

基礎から論考する地球温暖化

— 科学・歴史・懐疑論 —

小西 一也

[IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 \(PDF 5.4MB\)](#)

気候システムの温暖化には疑う余地がなく、また1950年代以降、観測された変化の多くは数十年から数千年間にわたり前例のないものである。大気と海洋は温暖化し、雪氷の量は減少し、海面水位は上昇し、温室効果ガス濃度は増加している（図SPM.1、図SPM.2、図SPM.3、図SPM.4を参照）。
{2.2、2.4、3.2、3.7、4.2~4.7、5.2、5.3、5.5~5.6、6.2、13.2}

この小論を本格的に書き始めたのは、台風15号（2019年9月9日上陸、Faxai）、台風19号（同10月12日、Hagibis）、さらに10日後の21号（2019年10月23日、上陸せず）の被害が過ぎたところだったと思う。

特に、台風19号による被害は大きく、死者106人、行方不明3人、被害総額は1兆8600億円¹とされている。

ここにきて、こうした「スーパー台風」が発生する原因が「地球温暖化」にあることが、半ば当然のように言われるようになり、これまで地球温暖化について関心のなかった人も、その脅威に恐れを感じるようになったようで、実際に、私の周りにも、そのような声が聞かれる。

後でくわしく述べるが、このことは基本的にはあっているものの、現状を正しく理解するためにはもう少し説明が必要である。

不謹慎を覚悟で言うが、私は、ここにきて、気温上昇が観測されるようになったことに、少し安堵してしまった。

温暖化の科学は、間違っていることに越したことはない。温暖化しなければ、何も対策をする必要はないのだから。

温暖化を止めるためには、温暖化の科学が正しいと理解される必要があり、そのために温暖化の現象が表れなければならない、というのは、温暖化の科学がもつ特有の皮肉としか言い様がない。

私は、過去に、評論家の「個人誌」（商業誌）に地球温暖化をテーマにした以下のも含め、評論文をいくつか書いたことがある²。（もちろん温暖化「肯定論」寄りの立場で。）

『飢餓陣営』（09・3）／（新連載）混迷する「地球温暖化論争」を解体する（1）（2）

— 養老孟司・池田清彦『ほんとうの環境問題』、橋爪大三郎『「炭素会計」入門』を読みながら

個人誌を主宰する評論家との関係は、正直、良好とは言えなかったが、ほぼ1年間、「温暖化懐疑論」（温暖化について通説とされている見解が科学的に間違っているとする論説）に向き合ったことは、私にとって、とても貴重な経験となった。当時は、書店の本棚に「温暖化懐疑論」の本が何冊も並ぶ状況で、気温の上昇も停

滞しており、大規模な気象災害があまり問題になっていなかった。

「温暖化の原因は、太陽活動の変化によるものだ」

「最近は、温暖化が止まっている」「もうすぐ氷河期がやってくる！」

4 「二酸化炭素は増えても、大気はもう太陽光を吸収しない」

「温暖化しても、それによる雲の増加が温暖化を抑制させる」

公的な場で文章を書くと、一定の責任感もあって、その後も、その分野について考え続ける。

あれから 10 年以上が過ぎた。

当時は見えていなかったことも少なからずあったが、私の当時の見解は、いまのところ、およそ間違っていないかった、と感じている。

意外に知られていないようだが、学術的に正当だと考えられていたことが、メディアを通じて批判されて、大きく話題になったことがこれまでに何度もある。

私は、こうした、科学における専門家と、そうでない多くの人々のギャップが原因となる、特に「疑似科学」(科学のように見えて科学ではない) 問題に、これまで関心を持ってきた。私にしてみれば、「温暖化懐疑論」問題は、「薬害エイズ事件」、「ダイオキシン問題」、「ガン論争」、「学力低下論争」(特に、学力調査の統計の問題、「社会科学」に属する)、「アポロ疑惑」、「福島第一原子力発電所事故」に続いて発生した「疑似科学」問題の一つである。

「アポロ疑惑」については、たまたまだが、これらの疑惑が解けていない段階で、文章を発表する機会にも恵まれた³。私はこの小論を書きながら、「地球温暖化懐疑論」が、「アポロ疑惑」などと重なる部分が少なからずあると感じてきた。

「アポロ疑惑」を知らない人も多いと思うので、ごく簡単に説明しておこう。

「アポロ疑惑」とは、メディア、特に、2001~2002年にテレビ朝日で放送された『不思議どっとテレビ。これマジ!?』において、1969年に行われたアポロ11号による人類初の月面着陸を「ねつ造」として、月面上の映像に、科学的に不自然と感ぜられるところを何点も取り上げたことで、多くの視聴者が、アポロの月面着陸をインチキだと思うようになってしまったことである。(→[Wikipedia「アポロ計画陰謀論」](#))

しかし、このような疑惑が事実であり得ないことは、考えてみれば当たり前のことで、そもそも、アポロ計画は30~40万人が関わっていたとされる膨大なプロジェクトであり、アポロからの電波の受信は、世界各国で行われていた。すべてをだましてそんなことができるか?と考えると、アポロ疑惑などあり得ないことは明らかで、実際、『不思議どっとテレビ。これマジ!?』は、「放送倫理・番組向上機構(BPO)」でも問題にされた。

その後、テレビ朝日は、別番組で「アポロ疑惑」を否定する(すなわち、月面着陸の事実を認める)内容を放送している。さらに、アポロ疑惑を払しょくするためか、2011年にアメリカの無人月探査機「ルナー・リコネサンス・オービター」によって、月表面に残された着陸の痕跡が、高解像度画像によって撮影されている。

世界的に認められている科学組織に対し、専門外の学者がメディア(温暖化問題の場合は主に書籍)の力で

猛然と科学的知見を全否定し、一時的に一般大衆に認められるものの、科学者の反論と新事実によって、時間の経過とともにその間違いが明らかになっていった、ということは、温暖化問題の以前に事例が存在していたのだが、「アポロ疑惑」などのような事例が、地球温暖化問題で生かされることはなかった。「温暖化懐疑論」に関連する書籍を読んだ子どもたちはそれほど多くないと思うが、大人の方々の中には、懐疑論の論点（多くが、本人たちのオリジナルではなく、かなり以前に解決している問題）を未解決のものとして認識していると思われる。

このように、科学の問題であっても科学の中だけで解決するには限界がある、という事実が存在する。このようなことから、「温暖化」だけでなく、広く「環境問題」、またさらに広く「科学問題」、また、科学をめぐる「社会問題」（政治、経済、教育、歴史、・・・）として見ていくことが、科学をより深く理解するためには必要なのではないか。

こうしたことを扱った学問分野を、一般に「科学論」という。

科学論（読み）かがくろん（英語表記）philosophy of science
ブリタニカ国際大百科事典 小項目事典の解説
<https://kotobank.jp/dictionary/britannica/283/>

科学が個別の対象についての認識の発展を企てるのに対し、科学論は科学の原理や前提に立脚し、科学を人間活動とみて、その社会的、歴史的基盤を問題にする。

この小論は、できるだけ中学教科書レベルの科学知識で書くことを目指して書いたが、温暖化の科学は、内容によっては大変レベルが高く、そもそも、地球全体をイメージすることの難しさもある。

温暖化の科学は、多くの人が思うほど難解なものではないが、科学の基礎がなくても理解できるほどに簡単でもない。

中学生でまだ勉強してない、また、難しいと感じられる可能性があるものについても、必要と思ったものについては、あえて削減していない。むつかしいところでは高校レベル、またはそれ以上の知識は出てくると考えて欲しい。（その際は、できるだけ、簡単に理解できるように心がけている。）

あくまで理解を助けるためと思って、少々長めの脱線もあるため、本来の目的を忘れないように読んでほしい。

何も、全体を読まなければ何もわからないということはない。とりあえず、最初の「基本的なスタンス」（p.11）を読んでいただければ、私の目的は、半分程度は達成される。

論理的な流れを意識して、この小論の構成を決めているが、「第2章 気温上昇がもたらす現象」（p.77）や「第3章 歴史」（p.121）から読み始めることもありである。

中高生で読む人は、疑問点は疑問として読み、今後の勉強で解決してほしい。多くの科学論文は、（場合によってはその道の専門家でさえ）一度読んで簡単に理解できるものではない。

少しわからないとあきらめてしまう人がいるかと思う。教科書などを調べる、最初、書いてあることがわからなくても、良く考えると、知っていることもある。

温暖化の科学の中には、中学レベルの理科の基礎的な内容が多く含まれていて、学校の授業の中でも、この小論に載っている内容が出てくることになるから、関連付けて勉強をすれば、学習効果も上がると思う。すべてを理解するのに、何も、慌てる必要はない。

難しいと私が判断したものについては、見出しに「難」「やや難」などの記号をつけてあるので、読むにあたって参考にされたい。また、意味のわからない用語があったとしても、PDF版であれば、「検索」の機能で同じ用語を探することができると思うので、利用するとよい。

難しいと思ったところは読み飛ばして、あとで見直すと、理解できることもあったりする。(教育用語で「レミニッセンス」という。) その節でできるだけ後半に廻すようにしているので、少し考えて、難しければ読み飛ばしてあとでもう一度読んでみるのも、こうした科学読み物では読書技術のひとつであると思う。ただ、わからなかったところの多くは、中高で知っておくべき内容であることも理解しておいてほしい。

この小論を大人の方が読まれることもあると思うが、中学・高校の理科を思い出しつつ読み進めていただくとよいかもしれない。

また、この小論は、過去に温暖化問題に影響をおよぼした「温暖化懐疑論」によって生じたと思われる温暖化についての科学的な誤解を解くことを出発点としているが、温暖化の科学について、その全体像を見渡すことを目的として書いている。具体的な目標として、「IPCC (気候変動に関する政府間パネル)」が2013年に発表した「第5次評価報告書」、特に「政策決定者向け要約」を読むときの基礎知識を提供することをめざして文章を構成している。温暖化の科学を理解するために、私の小論を参考に、以下に紹介する評価報告書を読んでほしい。

(気象庁 HP IPCC 第5次評価報告書)

<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>

●IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 (PDF 5.4MB)

気象庁訳正誤表(H27.12.1) (PDF 211KB) (上掲のPDFファイルは修正済みです)

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf

今回扱うのは、第4次と第5次の評価報告書を中心に、基本的に第一作業部会 (WG I) および、統合報告書の「自然科学的根拠」に関わる内容である。そのほか、評価報告書とは別のタイミングで発表される「特別報告書」(special report) などがあるので、できれば、この小論の後ろにつけた「資料編」の、以下の項を参考に、他の報告書も読み進めて欲しい。

「基礎から論考する地球温暖化 - 科学・歴史・懐疑論 - 資料編」

●参考1 IPCC (国連・気候変動に関する政府間パネル) について (p.164~)

ちなみに、2021年6月には「第6次評価報告書」が発表される見通しである (第1次:FAR、第2次:

SAR、第3次：TAR、第4次：AR4、第5次：AR5、第6次：AR6)。世界の標準的な温暖化に関する知見が変更される部分も出てくると思われる。報道があまり伝えていないようだが、2018年に発表されて日本でも大きく報道された「1.5°C特別報告書」は、厳しい削減目標の必要性を説くものであった（このこともあまり伝わっていない）が、これは、第6次評価報告書の第一弾として発表されたものであり、すでに新たな枠組みが出始めていることになる。

目次

はじめに	3
8 基本的なスタンス	11
第1章 温暖化の原理	22
第1節 「温室効果」と温暖化	22
第1項 「地球放射」と「太陽放射」	22
第2項 温室効果ガス (GHGs : Greenhouse gases)	24
第3項 エアロゾル (またはエーロゾル)	27
第4項 雲のできる原理	28
第5項 単位	29
第6項 なぜ、気体分子が温室効果を持つか (やや難)	30
第7項 気温	33
第8項 「第5次評価報告書 RCP シナリオ」と「1.5°C特別報告書」	35
第9項 エネルギーとその単位 (後半やや難)	38
第10項 大気構造	40
第2節 自然要因	43
第1項 火山活動	43
第2項 太陽活動	44
第3項 ミランコヴィッチ・サイクル	45
第4項 「スベンスマルク効果」	47
第5項 ヒートアイランド	49
第6項 古気候	50
第7項 過去 2000 年の気温変化	53
第3節 地球のエネルギー収支	61
第1項 エネルギー収支図 (やや難)	61
第2項 気層モデル (難)	63
第3項 「飽和論」 (やや難)	68
第4節 コンピューター・シミュレーション	70
第1項 なぜコンピューターを使うか	70
第2項 打率	73

第2章	気温上昇をもたらす現象	77
第1節	気候の変化	77
第1項	大気循環の変化	77
第2項	気候の極端化（やや難）	78
第2節	温暖化と台風	84
第1項	台風とは	84
第2項	「気候の極端化」と台風	88
第3項	2019年台風19号	89
第4項	世界と日本の平均気温	95
第5項	雨量増加	96
第6項	速度減少	97
第7項	台風被害	98
第8項	西日本豪雨	99
第3節	フィードバック	101
第1項	水蒸気フィードバック	101
第2項	雲フィードバック	102
第3項	気候-炭素循環フィードバック	103
第4項	森林火災	108
第5項	ミッシング・シンク	109
第4節	水資源への影響	110
第1項	雪氷アルベドフィードバックと土地利用	110
第2項	海の吸収	111
第3項	海面上昇	113
第4項	「水資源」としての淡水・氷	115
第5項	海洋酸性化、サンゴの白化	118
第6項	メタン（ハイドレート）	119
第3章	歴史	121
第1節	時代	121
第2節	スヴァンテ・アレニウス	127
第1項	人物	127
第2項	論文の概要（やや難）	127
第3項	アレニウスの気候感度は4°C? 5-6°C?	132

第4項	論文発表後	135
第3節	アレニウス論文後	136
第1項	「あまり知られていないパイオニア」	136
第2項	反論	137
第3項	飽和論	138
第4項	海の吸収	139
第5項	フィードバックとエアロゾル	140
第6項	宇宙開発	141
第7項	キーリング以降	144
第4節	考察	146
	あとがき	150
●参考1	IPCC（国連・気候変動に関する政府間パネル）について	164
●参考2	（仮訳）スヴァンテ・アレニウス「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」（1896年）	166
●参考3	（仮訳）G.S.カレンダー「人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」	189
●脚注		207

基本的なスタンス

なぜ、温暖化について議論するか。それは、まず第一に、温暖化問題がきわめて重要だから、である。温暖化をもたらす影響は、数億人の死者、数十億人の生活の破壊をもたらすとする予測もある。

その対策には、現代文明の根幹に関わる、エネルギー資源活用の改革を必要とする。

こうしたことから、温暖化問題が、これまで知られてきた環境問題の中で、人類への影響が最も大きい問題であることは、ほぼ間違いない。

一方で、この温暖化問題の理解をむつかしくしているのが、2080～2100年というかなり先の予測をしていること。気候の予測は多くの人々が求める科学技術だが、その中で最も難しい分野の一つでもある。

特に、温暖化問題が大きく注目を集めるようになった1990年代ごろは、温暖化の科学には不十分どころが多くあり、現状では訂正されていることも少なくない。第2次評価報告書（SAR：Second Assessment Report、1995年）発表当時は、「科学的な事実がわかってからでは遅すぎる」と警告を発していたが、それから数十年にわたる研究の蓄積によって科学的な精度は高まり、最近では、あらゆる自然現象が温暖化の兆候を示していると考えられていて、科学的な事実について大きな争いはほぼなくなっているとされる。

この小論は、10年ほど前に流行した「温暖化懐疑論」（IPCCの評価報告書などが示す温暖化の科学は誤りで、人間による二酸化炭素の排出などが温暖化をもたらすことはない、または疑わしいと考える議論）を意識して書いている。

温暖化の科学は、現状でも未知の部分が少なからず存在するし、それは研究自体のむつかしさからきており、それゆえ、研究の進展には非常に長い時間がかかる、または今後、ずっと判明しないものもあると思われる。科学には反論が付き物であり、それによって科学はその精度を高めることができる。しかし、「温暖化懐疑論」には、自分の求める結論のために、科学を都合よく解釈したり、不都合な情報を無視したりしているケースが少なからずみられる。中にはきわめて基本的な誤りが前提になっているものも少なくない。

一方で、積極的な温暖化対策を主張する科学者がとっている科学的立場は、多くの場合、その正当性が共有されていることが多いが、メディアが取り上げると、過大な表現で脚色したり、不都合な情報を説明から避けたりするなどしているケースが見られ、そのことが、逆に、「温暖化懐疑論」に攻撃の材料を与えてきた。

そうした状況の中で、各国の政府が、正しい温暖化の科学を前提に政治判断することを目的に、国連の組織であるIPCCが「評価報告書」（現在は第5次）を作成している。

しかし、その評価報告書を見てもわかるとおり、科学的な認識については、現状分析も、未来の予測もそれぞれ難しく、「不確実」とされることが少なくない。

一方で、21世紀（2001年～2100年）末におこるとされる熱波の増加、海面水位上昇など基本的なところについては、「可能性が非常に高い」とされており、温暖化が起こること、それが人間活動（産業活動による二酸化炭素などの排出）によること、重大な影響があることについては、国際的な合意はほぼできていると言える。

そもそも、IPCCという国連の組織が警告を発し、1997年の段階で「地球温暖化防止京都会議」などいくつ

もの温暖化関連会議が開かれて、二酸化炭素など温室効果ガスの削減について、科学者や世界中の政府関係者が、温暖化が起こることを前提にギリギリの交渉を行っているのだから、IPCC の見解が世界的に広く受け入れられていることは明らかである。

12 | 問題なのは、そのことが一般の人に広く理解されているかということ、必ずしもそうとは言えず、多くの人が「温暖化が問題」とは思っているようだが、科学的、政治的な状況をあまりわかっていない。そもそも、二酸化炭素などの増加が、なぜ温暖化を引き起こすか、という基本的なところを理解している人は、相当に少ないのではないか。

そこに、「温暖化懐疑論」または「温暖化否定論」が一時期、一定の支持を得ていたことの原因がある。十分には言わないまでも、多くの人に、一定レベルの科学的な理解がなければ、温暖化に対する対応策を考えるのもむつかしいのではないか、というのが私の考えである。

そのため、温暖化の科学について見ていく前に、まず、私がイメージしている温暖化問題の概略をここで述べ、あとの章で、必要な内容について各論を述べることにする。

1. 歴史

現在、温暖化の予測がコンピューター・シミュレーションによって示されている状況にあり、世間には、温暖化の科学が、20 世紀（1901 年～2000 年）の後半にできた新しい学問だとする誤解がある。

たとえば、2006 年に放送された『NHKスペシャル 気候大異変 第1回 異常気象 地球シミュレーターの警告』（<https://www6.nhk.or.jp/special/detail/index.html?aid=20060218>）などは、各地の異常気象の予測がコンピューター・シミュレーションの結果として示されている。しかし、「温暖化懐疑論」（または「否定論」）の人達には、温暖化が、コンピューター・シミュレーションが作り出したものだとして批判する人が少なくない。

しかし、実際のところ、スウェーデンのノーベル賞科学者であるスヴァンテ・アレニウス（1859–1927）が、19 世紀（1801 年～1900 年）の終わり、コンピューターなどまだなく、気象に関する測定技術が現在とは比較にもならなかったような時代に、現代の温暖化研究の基礎となる理論によって、二酸化炭素が2倍になると、地球が約 4°C 温度上昇することを、すでに予測している。（→p.127「第3章第2節 スヴァンテ・アレニウス」および p.166「●参考2（仮訳）スヴァンテ・アレニウス「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」（1896 年）」）（アレニウスの予測を 5～6°C としている文献があるが、これは間違い。後述。）

その 30 年後にイギリスの蒸気機関技師、G.S.カレンダー（註：日にちを確認するカレンダーのことではなく、人の名前）が二酸化炭素が2倍だと、気温が約 2°C 上昇するとする予測を行っている。（→p.189「●参考3（仮訳）G.S.カレンダー「人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」」）

二酸化炭素を2倍にした場合の予測値は「気候感度」と呼ばれ、温室効果ガスの評価方法として現在でも使われていて、現在ではおよそ 3°C（1.5～4.5°C）と評価されているので、2人の予測はおよそあっていることになる。つまり、温暖化の科学は、125 年もの長期の検証の末に、現在の結論に到達しているのである。

アレニウスとカレンダーの時代には、当然、コンピューターは存在しておらず、彼らが手で計算をおこなったことによる成果である。このことは、温暖化は秀逸な着想と地道な観測があれば、基礎的な計算によってある程度検出可能であることを示している。

2. 現状

温暖化で語られる「平均気温」は、1年を通じた世界中の観測点で測定した平均である。統計というものは、データが多くなればなるほど、その精度が高くなる。そうして得た年ごとの自然変動は、大きくても±0.3°C程度である。

この問題では2080～2100年といった遠い先の予測を行っているが、こうした統計的手法によって分析を行っていることで、気温、海面水位、雪氷（せっぽう）の面積の変化などは、20～30年の時間がたてば一定の結果が出ると考えられている。

現状では、気温の上昇も含め、温暖化によって予想される現象の多くが現実には起こっていて、逆に、予想に反する現象はほとんど起こっていない。

大気中の二酸化炭素は確実に増加している

二酸化炭素は、水蒸気に次ぐ2番目に高い温室効果を持つ気体であることがわかっている。

20世紀（1901–2000）中盤の温暖化（懐疑）論議には、海が二酸化炭素を吸収するので、大気中の二酸化炭素は増加しないとする見解があったが、それが間違いであることは、1950年代終わりから1960年代前半にハワイ・マウナロア山の観測所で行われたチャールズ・デービッド・キーリング（1928～2005）による二酸化炭素濃度の観測によって明白になっている。（→p.139「第3章第3節第4項 海の吸収」）

1970年代前半の「オイルショック」を知る人は、「石油はあと30年程度でなくなる」とも言われていたことを知っている人もいるかと思う。「温暖化懐疑論」には、二酸化炭素によって温暖化すると言っても、それまでに、二酸化炭素を排出する元になる石油などが枯渇してしまったら、そもそも二酸化炭素の排出が止まるのではないかとする主張がある。

ここで出てくる「30年」は「石油可採年数」と呼ばれるもので、新しい油田の発見などによって数字が変わり、現在では50年程度、長期見通しでは150年ほどであるという⁴。数十年先に石油がなくなる心配はないが、その結果、二酸化炭素の排出も止まることはない。

発電所、エアコン（クーラー）の排熱などは、温暖化にほとんど影響ない

温暖化は、二酸化炭素などの気体を持つ「温室効果」によって起こる。一方で、発電所（火力だけでなく原子力も）などからの排熱の影響はないのか？といった疑問もあると思われる。

理学博士 東北大学名誉教授・近藤純正氏のホームページ（→[M43. 原子力エネルギーと熱汚染（対談）](#)）によれば、その影響は非常に小さいという。

発電所は、石炭・石油（化学エネルギー）、ウランなど（核エネルギー）を電気エネルギーに変えることを目的としているが、そのエネルギー効率は30%程度であり、70%のエネルギーが熱として大気と海に放出される。電気エネルギーも、別のエネルギーの形を経て、最終的には熱エネルギーになると考えられている。

しかし、この熱がもたらす温度上昇は、二酸化炭素などの「温室効果」のおよそ50分の1程度と見積もられている。

あくまで人為的な気温上昇であり、自然変動によるものではない

自然な気温変化は、氷河時代において、1万年程度の時間スケールで、場合によっては4～7°C程度の変動があったようだが、大きく見ても100年あたり0.04～0.07°C程度、現在、温暖化によって起こったとされる1750年～2000年で0.85°Cの上昇は、100年で0.32°C程度の上昇になる。1年あたり0.003°C上昇という、一

見ると小さく見えるこの数字も、地球全体の平均としてみれば、「統計上」、火山や太陽などの自然現象による変動では説明が困難であると考えられている。(→p.73「第1章第4節第2項 打率」)

自然変動でないとすると、他の多くの要素を考えたとしても、それほどの影響を及ぼすものが、人間が排出した二酸化炭素などの温室効果ガスの増加しか思い当たらない。

| 14

科学者の予測が的中している

2000～2010年あたりに、世界平均気温が上昇せず、やや低下していた時期があり(「ハイエイタス」と呼ばれる)、こうした時期に「温暖化懐疑論」が流行したが、このような「当面は寒冷化」とされた時期にも、温暖化に関わる科学者の人達は一貫して「しばらくしたら気温は上昇する」と言い続けていた。実際、その後、再び温暖化傾向が見られるようになった。

予測と実際の関係で、温暖化の科学は正しさを示しており、科学に対する信用につながっている。

(参考)

日経エコロミー 連載コラム 温暖化科学の虚実 研究の現場から「斬る」!

国立環境研究所 地球環境研究センター 江守正多

第3回「地球は当面寒冷化」ってホント? 2009年4月23日

http://www.cger.nies.go.jp/ja/people/emori/nikkei/ecolomycolumn_03.html

気象庁 HP 「世界の年平均気温」

先ほど紹介した『気候大異変 第1回 異常気象 地球シミュレータの警告』で示した予測は、2019年の台風19号を予見していたとする評価もある。(→「[2006年に見えていた巨大台風「日本上陸」の恐怖](#)」
[2019/10/17 東洋経済 ONLINE](#))

また、温暖化問題のだいぶ前に、「フロンによるオゾン層の破壊」(→気象庁 HP 「フロンによるオゾン層の破壊」)が問題になったが、国際的な研究の集積と国際交渉によって、1987年にカナダで採択された「モントリオール議定書」によってフロン規制が行われた結果、オゾンホールは回復傾向を示しており、対策は成功しつつあると考えられている。

つまり、すでに、大気科学の分野で、国際協力によって環境がほぼ予測通り改善した実績がある。

2020(令和2)年の暖冬は、多くの人に地球に大きな変化が起こっていると感じさせたと思われる。実際、北極の異常高温、例年にない規模の森林火災の頻発による生態系への影響は多大と見られ、現在も続くコロナウイルスのパンデミックの原因が、温暖化にある可能性も指摘されている。

一時期、「人工ウイルス説」などが広がったが、現在は、科学者により否定され、石弘之氏など、環境学者の多くは温暖化の関係を指摘している。

それはまだ、印象の段階であり、科学的に実証されているわけではないが、研究の進展により、今後、明らかにされると思われる。

(参考)

KADOKAWA 文芸 WEB マガジン カドブン

新型コロナウイルスはなぜ発生したのか、いつ収まるのか『感染症の世界史』著者、石弘之さんインタビュー
<https://kadobun.jp/feature/interview/9yhcdzonav40.html>

このように、温暖化によって起こると予測された現象については、いずれも、「だから温暖化している」と断定できるものではないが、およそ予想通り、またはそれより深刻な現象が起こっていて、多数の被害者が出ている。特に、以下のような現象が温暖化の影響として注目を集めている。

気候にそれほどの影響を及ぼすと考えられるものは、現在では二酸化炭素などの温室効果ガスしか考えられない。

- ・世界的な豪雨（2018年西日本豪雨（→p.99「第2章第2節第8項 西日本豪雨」）、2019年台風19号（→p.89「第2章第2節第3項 2019年台風19号」）、2020年九州北部豪雨で3年連続、三峡ダム決壊憶測）
- ・海面上昇（すでに、これによる難民問題が多く発生している）（→p.113「第2章第4節第3項 海面上昇」）
- ・オーストラリア、カリフォルニアを含めた多くの地域での大規模な森林火災、バッタの大量発生
- ・伝染病の世界的流行（新型コロナウイルスも、影響が指摘されている）
- ・世界的な気温の記録更新（特に北極は地球のほかの場所の2倍以上の速さで温暖化が進んでいるとされる）（→「[北極を襲う熱波が記録破りであることを示す6つの事実 NATURE 2020.07.07 TUE 08:00](#)」）

3. 総合科学

温暖化の研究には、さまざまな分野が関わっているが、そのことが理解されているとは言えない。

そもそも、気象学は地球全体を対象とし、大気だけでなく、天文学（少なくとも太陽、月の影響がある）、海洋、地理学など多様な分野が含まれ、それぞれが互いに相互作用する、極めて複雑な体系である。

温室効果の議論には、特に「飽和論」など、赤外線吸収についての議論に、高度な原子物理学が要求される。人間による二酸化炭素排出量の推定およびその抑制のための研究は、自然科学よりも工学（電力工学、エネルギー・資源工学、化学工学、・・・）や社会科学（政治学、経済学、経営学、産業社会学、・・・）に属する。

ここ数十年の中で、温暖化の科学は劇的に向上している。温暖化に対する問題意識の高まりから、研究費が増大した分野も少なくないらしい。（それでも研究者たちは「少ない！」というかもしれないが。）

こうしたことをすべて踏まえた上で、予測のためにシミュレーションを行う主体は「スーパーコンピューター」であり、極限まで要求される高速計算能力の開発（日本では「地球シミュレータ」、「京」、「富岳」など）および、そのプログラミングを扱う学問分野は「コンピューター科学」と呼ばれ、世界中の研究者がしのぎを削っている。

地球の現状を把握するために、地上のあらゆる地点だけでなく海を含めた気温、湿度、気圧の測定、動植物の個体数や水質などの環境調査といった生態系に関わる研究（「フィールドワーク」と呼ばれる）などが、現在進行中の温暖化の影響を検証するために、ありとあらゆる分野で大規模かつ継続的かつ地道に行われている。

意外に知られていないと思われるのが、温暖化の科学を下支えしている「地球史」（地層学、古生物学、古

気候学)に関わる研究である。そのために、地層(化石を含む)、樹木の年輪や堆積物の年縞(年に一枚ずつ縞状に堆積したもの)、氷床コア(掘削機によって南極やグリーンランドなど様々な氷床・氷河の深層を掘って得られた氷の柱)の大規模な研究が進んでいる。

このように、温暖化の科学は、その内容が多岐にわたり、その全部に精通している研究者はいないと思われる。

| 16

温暖化の科学について私が調べてきた中で、こうした全体像が見えていなければ、多くの人に温暖化の科学に対する信頼感が出てこないのではないか?という感想を持ったので、全体像が見えるものを作りたいと考えた。

太陽、地球表面、大気のエネギーの出入りに関する研究(→p.61「第1章第3節 地球のエネギー収支」)では、太陽、地球、大気放射(電磁波)の観測が重要になるが、気象衛星が登場するまでは、地球表面や上空での放射の測定を行うことはできても、大気の上端から宇宙へ放射される電磁波を測定することができなかった。1960年代から気象衛星(アメリカのニンバスシリーズなど)が登場したことで、地球の外から放射や海氷面積などを直接観測できるようになった。

温室効果の研究のひとつに、「惑星研究」がある。人類が探査船を送り込んでデータを収集している火星や月、金星などにより、地球とは異なる温室効果の研究ができています。

水蒸気や二酸化炭素による温室効果には上限があるとする説(「飽和論」と呼ばれる)については、特に、金星に送られた探査船(ベネラ、マリナー、パイオニア、など)による調査で、温室効果によって地表面が480°Cになっていることが確認されており、これが、大気圧が地球の90倍、大気の大半が二酸化炭素であり、地球の二酸化炭素濃度と比較にならない状態であるためとされている(二酸化炭素だけではこれだけの上昇を説明できないので、水蒸気の影響も考えられている)ことから、地球上でも二酸化炭素や水蒸気による飽和はない(それらの気体が追加されても温室効果の上限はない)ことがわかっている(→p.68「第1章第3節第3項「飽和論」」)。

一方で、アレニウスやカレンダー当時の、地上におけるデータの収集と紙による手計算による研究(しかも、現代から見れば重要ないくつかの視点が欠落していた)に比べて、これだけの新技術を駆使した研究が進んでいるにもかかわらず、アレニウスやカレンダーのような初期の温暖化研究の結論を大きく覆すことにはなっていない。

4. 懐疑論者

多数の気象学者、または少なくとも地学分野の専門家の一定数が科学的知見を批判するのならまだわかるが、ほとんどの「懐疑論者」が、専門外の研究者(中には教育社会学者までいる)であり、その人たちが専門分野の大前提に対して疑問を呈する構図になっていて、その多くが基本的な間違いを含んでいるにも関わらず、その訂正すら行わないことで、温暖化の科学の正しさに疑問を抱く人が多くいる。また、そのことを、多くの温暖化に関わる研究者が怒りを感じている。



図1-1 衛星ニンバス

出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』
ニンバス (人工衛星)

「飽和論」のように、現代の懐疑論者が主張している内容の主要なものが、実は 50 年以上も前に解決している内容であった、などということもある。

そうしたものも含め、温暖化懐疑論者が主張する内容は、いずれも仮説の域を出ず、それを支持する現象の裏付けがない（または、裏付けをしようとしな）いので、そうしたものは、はっきり言えば、科学的議論とは言えない。

学術社会というのは、ある説に対して、一定レベルで多数の賛同があって、初めて「定説」となるのが普通であり、多くの懐疑論ではその構図が成り立っていない。

こうした懐疑論の目的は、科学的に温暖化を否定することよりも、「温暖化の科学には、不明な点が多い」というぬぐいがたい印象を与えることを目的にしていると考えられている。

「アポロ疑惑」などを考えればわかる通り、主要メディアだから、その科学的主張が信用できるものではない。そして、実は、そのことは地球温暖化問題についても言うことができ、メディアが誤った、または誇大な説明をしてしまっていることも少なからずある。

逆に、地球温暖化の知見は、不確実性の高いもの、この数十年の中で変化しているものも多く、以前は危険性が指摘されながら、その危険性が低下したものもあるのは事実である。

「台風の強度化」については、不確実性が高いにもかかわらず、大型台風発生の原因を「温暖化による」と断定的に表現してしまうなどもその一つである。

研究者やメディアは、ただ、温暖化の危険性を強調するだけでなく、こうしたことについても正しく説明することが求められる。そうした面からも温暖化の科学の全体像——現代の科学技術のルーツをたどる、いわゆる「科学史」だけでなく、ここ数十年ほどの科学問題およびその経緯も含む——は、科学を多くの人が理解する上でとても重要になる。

これは、温暖化に限らないが、科学的理解を、自分の感覚だけに頼るのも妥当ではないし、学者の見解に従うだけなのも妥当ではない。科学的理解のためには、基礎知識だけでなく、温暖化以外の別の科学問題の例、科学研究の実際を知るなど、科学社会に対する理解（良い面も悪い面も含めて）を深める必要がある。

こうした科学問題に対して、この小論は、ひとつの提案を目指す。

5. IPCC

IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）という国際連合の機関が、なぜ、温暖化などの環境問題を扱うのか、正直、私自身が理解していなかった。そもそも、日本では、国連に対する問題点ばかりが語られていた（実際、あるにはあるが）ところがある。

悲惨を極め、1600 万人もの死者が出た第一次世界大戦（1914–1918）の反省から、国際平和機構としてできた「国際連盟」（League of Nations）は、紛争解決に一定の役割を果たしたものの、次なる第二次世界大戦（1939–1945）の開戦を止めることができず、6000 万人もの死者、戦争における原子爆弾など大量破壊兵器の使用、そしてナチスドイツによるホロコーストのような、女性や子どもにまで無差別に行われた異常ともいえる大量殺戮まで起こったことが、第二次大戦後に残された大きな課題となった。

当時、国際連盟では、人権はあくまで国内問題として、国内問題不干渉義務（国際連盟規約 15 条 8 項）の下、各国の専属的事項とされていた。（→Wikipedia「[国際人権法](#)」）

その後、人権の重要性が認識されるようになり、第二次世界大戦後に設立された「国際連合」(United Nations)では、「人種、性、言語または宗教による差別なくすべての者のために人権及び基本的自由を尊重するように助長奨励すること」(国際連合憲章 第1条)とされた。

18

第二次大戦前のように、人権を各国の専権事項としているようでは、国際紛争を防止できず、その結果、核戦争などによって人類全体が破滅する可能性すらあることから、国際社会が例外なく、人類の“すべての”人権を補償する必要があるとする結論に至った。その結果、国際連合では、戦争だけでなく、各国内の人権侵害に対する一定の介入が行われるようになったが、その延長線上に、環境問題によっておこる人権侵害に対しても、国際連合は役割を果たすことになった。

こうした国連の目的から、各国の協議によって、温暖化被害に対する救済はすでに決まっている。

マネー現代 2020.1.9

グretaさんばかりが注目される「COP25」の日本人が知らない現実
国連事務総長は何に「失望」したのか 夫馬 賢治

<https://gendai.ismedia.jp/articles/-/69403>

気候変動を話し合う国際会議で「合意に至らず」と報じられると、「CO₂の排出削減はやはり無理だよね」という空気を感じるかもしれない。今回、日本の政策が批判されるニュースが多く報道されたこともあり、「結局、日本だけじゃなくて、他の国も対応を渋ってるじゃないか」と言いたくなる人もいるだろう。

でも実際はそうではない。世界190カ国以上が二酸化炭素排出量を削減する目標を設定することも、発展途上国を先進国が資金・技術的に支援することも、支援の金額も、すでにパリ協定の中で決まっている。これについては採っていないし、COP25で議論にすらなっていない。パリ協定の加盟国は、皆これを受け入れているからだ。

(関連)

グretaさん演説のウラで、日本メディアが報じない「ヤバすぎる現実」 巨額マネーが動き出した
夫馬 賢治

<https://gendai.ismedia.jp/articles/-/67794?page=3>

『「環境難民」を政府は追い返せない——国連人権理事会』(ニューズウィーク日本版 2020/1/21)

<https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2020/01/post-92187.php>

人類にとって最良の判断を行うためには、正しい「事実」を知ることが前提になる。

特に、温暖化の科学には不確実な部分が少なくなく、科学的な認識の違いが対策のための国際的な議論に大きな支障をきたすことから、国際的に科学的な認識を統一することが求められる。そのため、IPCCの評価報告書、特に「政策決定者向け要約」では、各国の代表者が1行ごとの承認をする形となっていて、形式上、各国の政府は評価報告書の科学的な見解を認めていることになる。

ちなみに、IPCC は独自の研究をしているわけではなく、各国で行われている研究を集約する形で「評価報告書」を作成している。

Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)

From Wikipedia, the free encyclopedia (和訳)

https://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change

何千人もの科学者やその他の専門家が自主的に[10]レポートの作成とレビューに貢献し、レポートは政府によってレビューされます。IPCC レポートには、「政策立案者のための要約」が含まれています。これは、参加しているすべての政府からの代表者による 1 行ごとの承認が必要です。通常、これには 120 か国以上の政府が関与します。[11]

Thousands of scientists and other experts contribute on a voluntary basis^[10] to writing and reviewing reports, which are then reviewed by governments. IPCC reports contain a "[Summary for Policymakers](#)", which is subject to line-by-line approval by delegates from all participating governments. Typically, this involves the governments of more than 120 countries.^[11]

第 1 次評価報告書の発表からすでに 30 年が経過している。[図 1-2] を見ると、「人間活動が及ぼす温暖化への影響についての評価」は、評価報告書が改訂を重ねる中で可能性が高まり、現在では「可能性が極めて高い」(95%以上) に至っていることがわかる⁵。

以上、いくつかに分けて議論を行ってきた。

すでに、世界中で温暖化の影響が指摘される（実際、政府もそう言っている）気象災害がいくつも起こっていて、温暖化の科学は未来予測の問題である一方、これまでに起こった被害の原因究明の側面も持っている。

すでに日本においても、温暖化の影響と考えられる気象災害などの被害者が多数いる状況でもあり、特に今後、懐疑論を展開するにしても、それなりの配慮が必要になると思われる。

明日香壽川 日本の温暖化外交が死んだ日『世界』, 岩波書店, 2012 年 4 月号, p.265-280

http://www.cneas.tohoku.ac.jp/labs/china/asuka/_src/sc295/90A28AE8AF18De201294N48C8E8D86.pdf

いずれにしろ、日本での温暖化問題をめぐる状況においては、すでに発展を終え、かつ一人当たりで温室効果ガスをより多く排出している先進国に加害者責任があるという認識が圧倒的に乏しい。水俣病をはじめ、すべての環境問題を考える際の原則となっている「汚染者負担原則」は深く語られず、加害

者として自分たちが排出している温室効果ガスが脆弱な地域に住む世界の人々を苦しめているという自覚もない。

20 2019年に暗殺された中村哲医師（1946－2019）のアフガニスタンでの活動では、すでに温暖化で干ばつ（雨が降らないなどの原因で起こる長期間の水不足の状態）が進んでいるという認識で多くの人が活動に参加している。

温暖化問題は、2080～2100年という先の問題であり、私などは2100年の段階で生きている可能性はほとんどない。一方で、環境活動家・グレタ・トゥンベリさんなど現代の10代は生きている可能性がある。

上記に関連して、二酸化炭素の増加は、1700年代後半の産業革命から進んでいて、温暖化もそれによって進んできたと考えられるので、突き詰めて考えると、温暖化問題は、西洋を中心に化石燃料を使用した産業の拡大を極限まで進めてきた近現代における人類の営みが、人類すべてに寄与するものだったのかが問い返される本質的な問題でもある。（私自身は、単に否定するつもりはない。）

温暖化で起こっている現象は、何も科学分野だけではない。温暖化の過程で、想定を超えた気象災害の頻発によって、保険会社が大量に倒産しているという。（NHKスペシャル『世紀を越えて 地球 豊かさの限界 第5集 未知の恐怖 CO2との戦い』1999年3月21日放送）

iv. これまでの報告について (WGI)		
報告書	公表年	人間活動が及ぼす温暖化への影響についての評価
第1次報告書 First Assessment Report 1990(FAR)	1990年	「気温上昇を生じさせるだろう」 人為起源の温室効果ガスは気候変化を生じさせる恐れがある。
第2次報告書 Second Assessment Report: Climate Change 1995(SAR)	1995年	「影響が全地球の気候に表れている」 識別可能な人為的影響が全球の気候に表れている。
第3次報告書 Third Assessment Report: Climate Change 2001(TAR)	2001年	「可能性が高い」(66%以上) 過去50年に観測された温暖化の大部分は、温室効果ガスの濃度の増加によるものだった可能性が高い。
第4次報告書 Forth Assessment Report: Climate Change 2007(AR4)	2007年	「可能性が非常に高い」(90%以上) 温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化のほとんどは、人為起源の温室効果ガス濃度の増加による可能性が非常に高い。
第5次報告書 Fifth Assessment Report: Climate Change 2013(AR5)	2013～ 14年	「可能性が極めて高い」(95%以上) 温暖化には疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化の主な要因は、人間の影響の可能性が極めて高い。

図 1-2 「人間活動が及ぼす温暖化への影響についての評価」の変遷

出典：IPCC 第5次評価報告書の概要 -第1作業部会(自然科学的根拠)【2014年12月改訂】 - [PDF 4.5MB] p.6

(環境省が第1作業部会報告書の概要をプレゼンテーション形式にまとめたもの)

http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf

温暖化の影響を感じている人が世界的に多くなっているからか、海外では環境関係の政党が躍進するなども起きている。アメリカのように、逆の現象が起こったところもあるが、そうしてできた政権は4年で終了した。

こうした傾向を、日本の政府や専門家だけでなく、多くの人々も読み取っているとみられる。私が見聞きする範囲でも、これまで環境問題に関心の低かった人々も温暖化問題を意識するようになっている。

気温上昇や海水面の変化などは、春夏秋冬における変化や満潮干潮に比べてたいしたことないとする指摘があるが、地球規模で変われば、その影響は甚大となる。

評価報告書で示されている変化はあくまで平均であり、影響の大きく出るところ、小さく出るところがある。

また、重要なのは100年後の状態そのものというより、その間に起こる変化や現象に、多くの人に対応できず、高温、災害、干ばつなどで、人の生命が危険にさらされてしまうことの問題である。

生命・生態系は進化の過程でこうした短期間の変化にも追いつける形質を獲得しているかもしれないし、おそらく人間という種も対応すると思われるが、社会システムは急激な変化に対応することが困難だと推測されている。変化はできる限り小さくしなければならない。

すでに、これだけ国際社会の意識が高まっているところで、程度の問題はあるものの、多くの国の政府が何らかの対策をとることは間違いない。

科学的にデータは出そろいつつあり、温暖化対策を求める声がここに来て日本でも高まっている社会的状況（国際的にはかなり前から高まっていた）からして、すでに、温暖化対策（具体的には二酸化炭素削減）を躊躇する段階にはないと思われる。

懐疑論者は、温暖化の科学のもつ不確実性を武器にしているが、温暖化がどうなるかわからない、ということは、逆、つまり想定より悲惨になることもあり得るということである。温暖化対策を「保険」と理解すれば、その適応には十分な状況にあると言える。

一度、徹底的な対策を取ることになれば、それ自体が「実験」になり、それにより地球の環境は変わるので、現在予測している2100年の現象はそもそも実現しないことになる。実験結果を厳密に確かめるには、タイムマシンと「地球がもうひとつ」必要になると指摘する科学者もいる。

おそらく20年程度で見えてくるものもあるだろうし、実は、私は、それによって、全体とは言わないまでも、一部については現状の科学的知見が覆る可能性もあると思っていて、その場合、対策の方向性を変更すればよいと考えている。その意味では、私も「温暖化懐疑論者」である。

現状で「懐疑論者」と自認する人たちは、自説の正しさを証明するために、積極的に温暖化対策に協力するべきである。

第1章 温暖化の原理

第1節 「温室効果」と温暖化

温暖化問題で、「温室効果」という表現がよく使われるので、「温室効果」が悪い現象のように思われるかもしれないが、そうではない。

大気が存在しなければ、地球表面全体が氷点下になり、水が氷の状態でしか存在できない。地球・宇宙科学では、水が液体で存在できることが、生命が存在するための条件と考えられているので、大気の「温室効果」は、生命の存在に必要なもの、ということになる。

地球温暖化とは、この「温室効果」が、大気の組成の変化により増幅することであり、これが問題視されているのである。

第1項 「地球放射」と「太陽放射」

太陽がなぜ地球を温めるか、太陽光線がやってくるからなのは誰でも知っていると思う。宇宙空間は真空に近いので、液体や気体を介した熱の「伝導」や「対流」でエネルギーが伝わっているわけではない。

太陽からやってくるのは、いわゆる「光」（「光」には、一般に、人間にとって物が見える原因となる「可視光線」の他、目に見えない「紫外線」「赤外線」がある）だけでなく、X線やγ(ガンマ)線といった、いわゆる「放射線」に属するもの、電波（長波、中波、短波など）も含まれる。

これらは総称して「電磁波」と呼ばれる。（同じ種類であるので、伝わる速さも同じ（光速：30万km/秒）

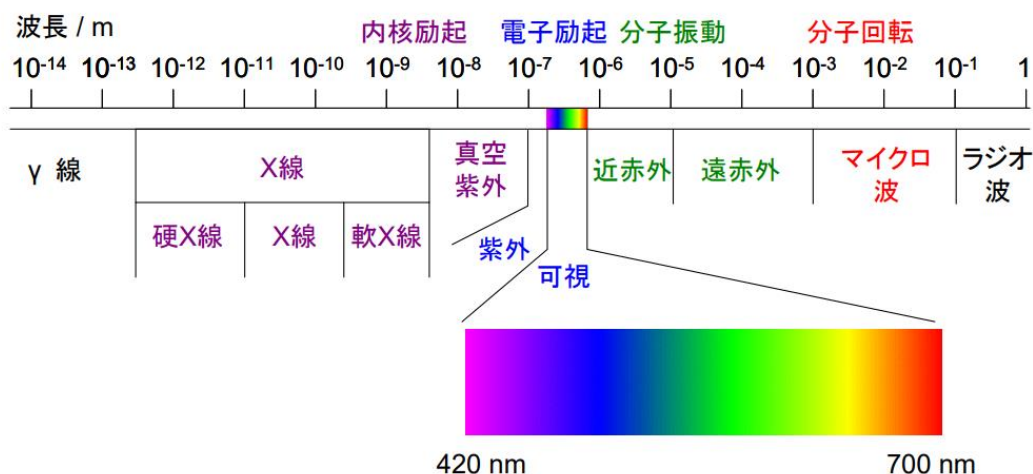


図 2-1. 光の分類

図 1-1 波長ごとの電磁波

出典：学習院大学理学部化学科 学習院大学大学院自然科学研究科化学専攻

河野研究室 分光化学 第二学期 月曜2限 河野淳也 2原子分子の回転準位とスペクトル

<https://www-cc.gakushuin.ac.jp/~20100088/bunko/2012/bunko2012.pdf>

である。) この電磁波が発せられることをすべて「放射」(または「輻射(ふくしゃ)」)(radiation)と呼んでいる。学習院大学理学部化学科・河野研究室の講義で使われている資料には、スペクトルだけでなく、その放射の原因となる原子内の現象も記載されている(図1-1)。

現状では、中学校の理科教科書に「電磁波」や「放射」という用語はなく、一般にもあまり使われることがないので、知らない人は結構多いと思われる。

太陽から来る電磁波のことを「太陽放射」と呼び、エネルギーとしては可視光線が約半分で、残りは紫外線と赤外線である。太陽は明るく輝くので、こうした「放射」が出ていることはイメージしやすいが、一方の地球表面も、自分の温度によって「放射」している。このように、温度に応じて放射を出すと仮定される

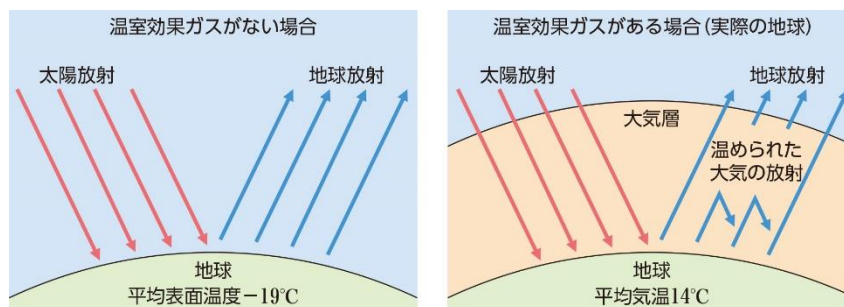


図1-2 大気がない場合とある場合の地球放射と太陽放射

出典：浜島書店 ニューステージ 新地学図表

物体を「黒体」と言い(実際には物体が黒いとは限らないし、温暖化の科学では、そもそも透明な大気も「黒体」として扱うので、今後、特に必要がなければ「黒体」という表現は使わない)、そこからの放射を「黒体放射」という。地球から出る「黒体放射」のはほとんどが目に見えない赤外線である。これを「地球放射」と呼ぶ。

温暖化というと、温度がどんどん上昇するイメージがあり、それが宇宙からの太陽エネルギーが地球に流入しているからであるわけだが、変化は100年程度で1~5°Cといったゆっくりとしたもの(海がかなり吸収している)なので、ある時期の状態を見ると、宇宙から入ってくる放射エネルギーと地球表面から出る放射エネルギーはつりあっていると考える。

太陽放射によって地球表面の温度は上がっていき、それによって「地球放射」も大きくなる。その放射によってエネルギーを失うことで、その分、地球の温度は下がる。ある温度になるとエネルギーの出入りのバランスが取れて(この状態を「平衡」という)、地球表面の温度は一定となる。大気がないと仮定した場合の地球の表面温度は-19°Cとなる。これを「有効放射温度」(effective radiative temperature)という。

現実の地球では、宇宙空間と地球表面の間に大気が存在するが、この大気も「黒体」として考える。太陽放射は可視光線が多いので、多くが大気を通過して地球表面に届き、一部は雲などで反射・吸収されたりする。大気中の「温室効果ガス」は、赤外線のほとんどを吸収し、それによって放射もすることで、地球表面の平均気温は、+14°Cとなる。(-19°C)「+14°C」などの値は、資料により少し違うことがある。)例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図1-2]のように説明されて

いる。

「温室効果」(greenhouse effect)というので、いわゆる「温室」「ビニールハウス」を思い浮かべる人が多いと思う。(そもそも、語源がそこから来ている。)

24

ビニールハウス内の地面が太陽放射を受けて温度上昇し、そのエネルギーで大気が温まることでは同じだが、地球放射を大気が吸収することで「温室効果」が起こるのに対し、「温室」や「ビニールハウス」では、地面の熱がビニールハウス中の空気を「伝導」(または「対流」)によって温め、その空気がビニールによって拡散が妨げられることで起こる。ビニールハウス内では、地球の放射が空気を通過する距離が短すぎて、放射によって空気はほとんどエネルギーを受け取らない。

第2項 温室効果ガス (GHGs : Greenhouse gases)

IPCC 第5次評価報告書では、第4次評価報告書と同様に、1951~2010年に観測された温暖化(世界平均地上気温上昇)の半分以上は、温室効果ガス濃度の人為的増加に起因する可能性が非常に高いと結論付けています。

温暖化は複雑な気象現象の過程で起こると考えている人も多いようだが、基本的な原理としては、自然界にもともと存在するもののほか化石燃料(石炭、石油、天然ガス)の燃焼によって発生する二酸化炭素(CO₂、「炭酸ガス」ともいう)と水蒸気(H₂O)を代表とした温室効果ガスが大気中で増加するという事実だけで起こる。

地球大気の組成は、窒素(N₂)78%、酸素(O₂)21%、アルゴン(Ar)1%程度である。例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図1-3]のように説明されている。

水蒸気は変動が大きく、最大で4%、平均が0.4%程度であり、二酸化炭素は0.039%(2019年で0.0415%)に過ぎない。

水蒸気が温室効果の48%、二酸化炭素が21%といわれている⁶ので、比率がとても小さい二つの成分が、気候に大きな影響を及ぼすことになる。

また、その他の温室効果ガスもそれなりの影響力があることが知られている。だから、温暖化の科学を国際的に共有するための組織であるIPCC(気候変動に関する政府間パネル)が作成する「評価報告書」も、問題を温室効果ガスとし、二酸化炭素はその一つ(影響としては大きい)として説明している。

温暖化対策の具体的な削減目標を合意した1997年の「地球温暖化防止京都会議」⁷において採択された「京都議定書」(Kyoto Protocol)⁸では、削減する「温室効果ガス」として、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)、六フッ化硫黄(SF₆)を規制対象と定めた。

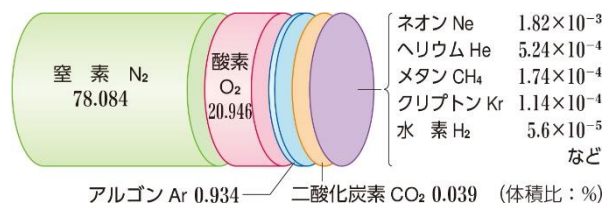


図1-3 大気組成

出典：ニューステージ 新地学図表

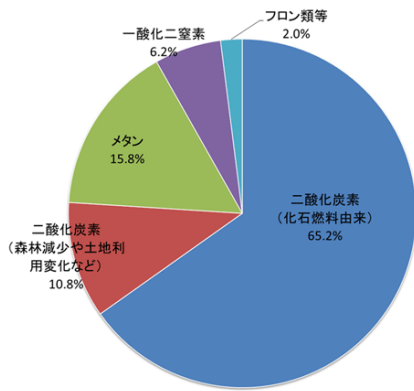


図1-4 温室効果ガスの影響力

出典：気象庁 HP 温室効果ガスの種類

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p04.html

あくまで京都議定書の規制対象が上記6つということであって、これらが温室効果ガスのすべて、ということではない。

温室効果ガスなどの影響を説明するグラフでは、「放射強制力」という表現が使われる。これについては後で説明するが、とりあえずは、それぞれの気体（またはそれ以外の要素）の影響力ぐらいに理解しておくといよい。p.26「図1-5 1750年を基準とした放射強制力 ($W m^{-2}$)」を見ると、温室効果ガスは、種類ごとに影響力に差があることがわかる。

二酸化炭素の放射強制力は温室効果ガスの60%程度を占めるが、他の温室効果ガスもそれなりに影響力があることがわかる。意外に重要なのがメタン (CH_4) で、排出量は二酸化炭素に比べて少ないが、同じ量で比較したときの温室効果の影響力（「地球温暖化係数」(GWP、Global Warming Potential) という) は、二酸化炭素の25倍⁹で、牛のゲップなどとして出る（大気中の20~30%といわれる）ことも問題になっている。「燃える氷」とも呼ばれ、主に海底に存在が多く確認されている「メタンハイドレート」の重要成分であり、これが溶け出して大気中に放出されることの影響が心配されている。

規制された物質は、大気中で酸素と化学変化するなどして、温室効果に影響をおよぼすこともあるので、「排出された物質」「最終的な大気中の駆動要因」として記載されている。

横向きの棒グラフの先に、幅を表す表現（「H」を横に広げたような図形と、横の線の真中あたりに「・」があることがわかるとするが、これは、放射強制力の値の「不確実性」を表す。こうした表現方法は、温暖化の科学に限らず科学研究のグラフにおいてよく使われるので、知っておくとよい。

「ハイドロフルオロカーボン類」、「パーフルオロカーボン類」といっても、知っている人はあまりいないと思うが、温暖化問題の少し前に問題となった環境問題「フロン類によるオゾン層破壊」のときに知られた、「代替フロン類」（オゾン層を破壊する性質が少なく、フロン全廃までの代替物質）に属する物質である。「フロン類」自体も重要な温室効果ガスであるが、京都議定書の規制対象に入っていない。これは、すでにフロン規制のために1987年にカナダで採択された「モントリオール議定書」の規制物質であり、すでに全廃することになっているので、「京都議定書」の規制対象には入っていない、ということのようだ。

また、温室効果として最も影響力が大きいはずの「水蒸気」も、規制することになっている上記6種類に入っていない。

化石燃料を燃やせば、二酸化炭素だけでなく水蒸気も出るが、先ほど見たように、水蒸気は海からの蒸発、また逆に海への吸収によって自然な交換が地球上で頻繁に起こっていることから、化石燃料の燃焼で出た水蒸気量自体は基本的に問題になるものではない。

先ほど見た、大気科学の分野で使われる大気組成のグラフ（図1-3）なども「乾燥大気」で描くことになっているので、一般に水蒸気は含めないことになっていて、他の温室効果ガスとは区別して扱うことが多いのだが、IPCCの第4次評価報告書において水蒸気が「温室効果ガス」として記載されていなかったことから、「評価報告書は水蒸気を考慮に入れていないから、温暖化の科学は間違っている」などと温暖化懐疑論者に批判されたこともあり、最近では表現に配慮がされるようになっている。

26

水蒸気については、「水蒸気フィードバック」（→p.101 第2章第3節第1項）と言って、二酸化炭素の増加→気温の上昇→海洋の水の蒸発→水蒸気（温室効果ガス）の増加→気温の上昇→・・・という、温暖化の増幅作用につながるということが知られており、125年前の、アレニウスによる温暖化論において、すでに考慮に入っていた。温室効果ガスの規制に入っていないからといって、重要性が低いということでは全くない。

（参考）

第4次評価報告書 概要およびよくある質問と回答「第2章 大気成分と放射強制力の変化」

https://www.data.jma.go.jp/.../ipcc_ar4_wg1_es_faq_chap2.pdf

ちなみに、「温室効果ガス」という表現には少し注意が必要である。日本では「ガス」という用語に、「人工的」「有害」のイメージがある（と私は思っている）が、英語の「gas」は日本語にすれば「気体」であ



図1-5 1750年を基準とした放射強制力 (W m⁻²)

出典: IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 (PDF 5.4MB)

り、自然に存在する気体も入ることから、特に「人工的」「有害」なガスを指しているわけではない。（「温室効果ガス」という表記には、そうした気体に対してマイナスイメージを持たせようとして、あえてそのように訳しているような気がする。）実、そのあたりの誤解がないようか、温暖化を解説する書籍や論文などでは「温室効果ガス」ではなく「温室効果気体」と表記していることが増えているようであるが、この小論では、一般に知られている表現である「温室効果ガス」で表記している。

第3項 エアロゾル（またはエーロゾル）

エアロゾルとは、空気中に漂う微粒子のことである。

天然ガスや石油などの不完全燃焼、熱分解により出てくる煤（すす）など（「黒色炭素」「ブラックカーボン」(BC) と呼ばれる）などや、産業活動の過程で発生する硫酸塩粒子、硝酸粒子、有機系のもの、鉱物ダストが知られている。「PM2.5」や花粉も、エアロゾルの一種である¹⁰。

温室効果ガスの増加にもかかわらず 20 世紀後半（1950～1980 年ごろ）にわずかな寒冷化が続いたのは、主に硫酸塩粒子によるものと考えられていて、その事からも、エアロゾルの効果はかなり大きいことがわかる。

6600 万年前の隕石衝突による恐竜の絶滅（衝突によって発生したエアロゾルのもたらした低温化によって、恐竜の食料である植物が不足した）、歴史に残されている火山の大噴火後に起こった数多くの大飢饉、また、核戦争が起こった場合に来るとされる「核の冬」は、それぞれ爆発によって岩石の破砕などによって生じた（生じる）あらゆるエアロゾルが大気中に長期間滞在した（する）ことが原因とされている。

このように、エアロゾルは一般に温室効果を弱める効果（負の放射強制力）があると考えられている。

エアロゾルの効果には、太陽光を反射・吸収する「直接効果」と、雲を作って影響を与える「雲アルベド効果」がある。

「直接効果」としては、以下の引用で示したようなものが知られている。ただ、比較的わかりやすい直接効果でも、以下のように種類によって温室効果への影響に違いがあるため評価がむづかしく、「第1章第1節第2項 温暖化の原理」(p.24) で示した「図 1-5 1750 年を基準とした放射強制力 ($W m^{-2}$)」においても、基本的には負の強制力（影響力）と考えられているものの、「黒色炭素」のように正の強制力（温室効果を強める）とみられるものもあり¹¹、不確実性（棒グラフの先から両方に伸びる H 形が示す幅）が大きく、正の強制力（影響力）の可能性もあるとされている。

●特集 大気汚染と気候変化● 【研究ノート】

国立環境研究所 HP エアロゾルの化学組成とその気候変動への影響

<https://www.nies.go.jp/kanko/news/31/31-5/31-5-03.html>

「硫酸塩や有機物のエアロゾルは透明であり光を散乱しますので大気も地表面も冷却します。一方で、BC は黒色であり光を吸収しますので地表面に到達する太陽光は減りますが、大気自体は加熱します。

また、多くのエアロゾルが降下、または凝結核（氷晶核）として雨粒の一部になるため、1週間程度で地表に落ちるので、個々の粒子で見れば、効果がそれほど長く続くわけではない¹²。

第4項 雲のできる原理

温暖化によって雲の状況が変化することが考えられており（→p.102「第2章第3節第2項 雲フィードバック」）、これが温暖化論議に大きな位置を占めるため、ここで、雲ができる一般的な説明をしておく。

飽和水蒸気量とは、気体である水蒸気が大気中に存在できる最大量のこと（それを超えると水蒸気は液体の水になる（凝結））で、一般に、1m³あたりの水蒸気の質量（g/m³）で表され、[図1-6]のような曲線になる。

これに対して、大気中の“実際の”水蒸気量は、蒸発や凝結（水蒸気が液体の水になることで、気体でな

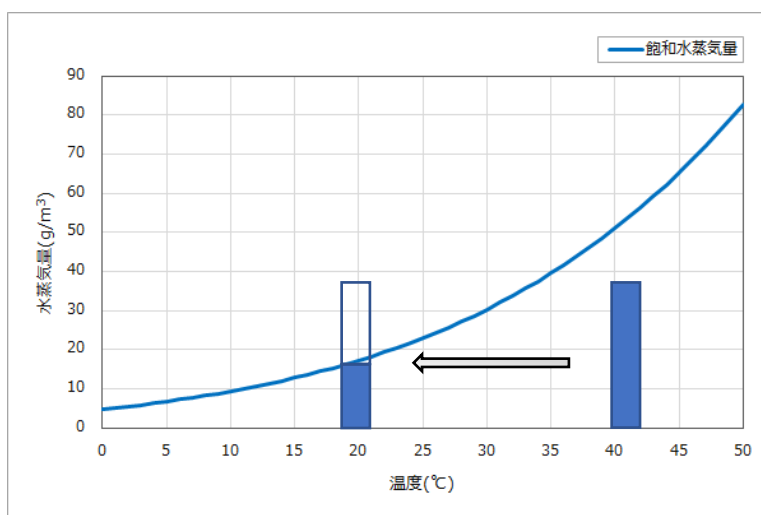


図1-6 飽和水蒸気量曲線と、水蒸気を含む気体の温度低下

温度が下がっても“実際の”水蒸気量は変化しないが、飽和水蒸気量は減少して、飽和水蒸気量を超える水蒸気の方は、凝結（液体化）する。

くなること）など、大気からの水分子の出入りなどによって増減するが、温度の変化だけでは増減しない。大気が温度低下すると、「飽和水蒸気量」が減少する。

私たちが「湿度」と呼んでいるものは、正確には「相対湿度」(%)と呼び、飽和水蒸気量に対する実際の水蒸気量の百分率である。（「実際の水蒸気量」は、「絶対湿度」(g/m³)と呼ばれることがある。）

式としては以下のようなになる。

$$(\text{相対})\text{湿度} = \frac{\text{空气中(実際)の水蒸気量}}{\text{飽和水蒸気量}} \times 100(\%)$$

水蒸気が含まれている空気が上昇すると、上空での大気圧の減少によって、空気が（断熱）膨張し、温度が低下する。温度の低下によって湿度が上がる（水蒸気量は変わらないが、空気が水蒸気を蓄えておく余地、すなわち「飽和水蒸気量」が低下する）ため、水蒸気の一部が気体でいられなくなり、エアロゾルは粒の核（「凝結核」または「氷晶核」という）の役割をして、それをよりどころとして凝結（液体化）する（または昇華（気体から直接固体に変る）によって「氷晶」ができる）。

エアロゾルが多いと、雲粒が小さくなる（水分が多いエアロゾルに配分されることで、一つ一つの粒が小さくなる）ことが知られ、これによって太陽光の反射率（「アルベド」という）を増加させるとされている。

ただ、エアロゾルは、雲の形成に影響を与えるものの、「雲量」に影響を及ぼすとは言えず、先ほど述べたとおり、太陽光を吸収したブラックカーボン（BC）などは大気を暖める効果もあり、飽和水蒸気量を引き上げて雲の生成を妨げる要因ともなるため、評価は簡単ではない。

（参考）

ココが知りたい地球温暖化 Q11 エアロゾルの温暖化抑止効果 エアロゾルが日射を変えるあの手この手
https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/14/14-1/qa_14-1-j.html

第5項 単位

ここで、少し単位の話をしておきたい。

地球温暖化問題においては、二酸化炭素の濃度を「ppm」で表記している。一般には「ピーピーエム」と読まれているが、「パーツ・パー・ミリオン」(parts per million) の読みの方が正式であるようだ。「per (率) million (100万)」は100万分の1の意になり、1ppm = 0.0001%である。ちなみに、2019年には、「ハワイのマウナロア観測所は5月11日、過去最高値の415ppmを記録したと報告した」¹³そうだが、%に直すと0.0415%ということになる。（[図1-3]のグラフでは、二酸化炭素濃度は0.0391%となっているので、391ppmになる。）

私と年齢が同じくらいか上の人であれば、1950～1960年代あたりに「公害」が大きな社会問題となっていて、大きい道路など大気中の公害物質の濃度の高いところで、このppmの単位で値が表示される掲示板があったのを覚えている方もいるかもしれない。

それより小さい濃度のものは「ppb」(parts per billion、パーツ・パー・ビリオン)、「ppt」(parts per trillion、パーツ・パー・トリリオン)が使われる。それぞれ「billion」(ビリオン、10億=10⁹)で1ppb = 0.0000001%、「trillion」(トリリオン、1兆=10¹²)で1ppt = 0.0000000001%になる。

メタン、フロン類は大気中の濃度が小さく、それぞれ「ppb」、「ppt」で表されるが、それぞれ地球温暖化係数(GWC)が大きいので過小評価できない。

一方、地球温暖化の問題は、地球全体を扱っているので、膨大な大きさの数値も扱う。IPCCの評価報告書にはそうした数値が大量に記載されているが、そこで知っておいた方がよいのが、「接頭辞」である。

たとえば、非常に多く使われているkm(キロメートル)は1000mを表すわけだが、距離の単位であるm(メートル)の前にあるk(キロ)は接頭辞が10³(すなわち10を3回かける→1のあとにゼロが3個つく、

すなわち 1000) の意味を持つ。

これと同様に、以下のように、 $10^3=1000$ 倍ごとに接頭辞が定められている。(最近の USB、ハードディスクなどの容量もこの表現が使われる。)

| 30 M (メガ) = 10^6 G (ギガ) = 10^9 T (テラ) = 10^{12} P (ペタ) = 10^{15} E (エクサ) = 10^{18}

E (エクサ) は非常に大きい値に見えるが、実際に IPCC の「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」では、「EJ (エクサジュール) (= 10^{18} J)」が出てきていた (p.21)。

t (トン) (=1000kg) はわりと有名かと思うが、これを用いた、「tC」(炭素トン)、「Gt 炭素換算」(キガトン炭素換算) (「C」は炭素の元素記号) は、炭素の元素成分で換算するもので、二酸化炭素 (CO_2) 「分子」に換算して、「Mt CO_2 」「Gt CO_2 」(それぞれ「メガトン CO_2 」「ギガトン CO_2 」) として表記することもありうる。

量が大きすぎ (または小さすぎ) るものは、イメージするのは困難かもしれないが、評価報告書を読む際には、頭に入れておかないと何を指しているのかまったくわからなくなることがあるので、知っておくとい。

一方、温暖化の科学においては、原子の大きさや波長などで 1m などよりもはるかに小さい値を使う場合があるので、この機会にそちらも紹介しておく。「 10^{-3} 」とは、「 10^3 分の 1」 (=1000 分の 1) の意味である。

c (センチ) = $10^{-2}m = 10 \text{ mm}$

μ (マイクロ) = $10^{-6}m = 10^{-3}mm$

n (ナノ) = $10^{-9}m = 10^{-3}\mu m$

p (ピコ) = $10^{-12}m = 10^{-3}nm$

次の節で光 (電磁波) の波長を考えるときは「 μm 」(マイクロメートル) を使う。(「 μ 」だけで表記されているものもある)

第6項 なぜ、気体分子が温室効果を持つか (やや難)

気体の「放射」について知っておくべきは、その気体の持つエネルギーが小さければ、特定の波長 (波数) の光を吸収するが、大きくなれば「再放射」(「放出」「射出」または単に「放射」などと表現されることもある) する性質があること。

例えばナトリウムランプで黄色の光が出る、花火などに見られる金属 (またはその溶液) の加熱によって起こる「炎色反応」など、原子・分子が特有の光を発することはよく知られているが、これが「再放射」に当たる。

あらゆる波長 (波数) の光を含んだ光は「白」になり、逆に、これをプリズムなどで分光すると虹色のスペクトルになる。「赤外線」「紫外線」は、スペクトルの端の赤と紫の外に届く光線で、目には見えない。赤

外線は熱を伝え、紫外線は光による化学反応（日焼けなど）をもたらす性質がある。

「山賀 進の Web site」(<https://www.s-yamaga.jp/nanimono/uchu/kousei-3.htm>) という、地学分野について幅広く説明しているサイトがあり、ここでスペクトルについて分かりやすく説明している。

白色の光を、特定の気体の中を通過させると、下図のように特定の部分だけが欠ける「吸収スペクトル」となり、その気体自体を加熱すると、その気体は特有の色を出す「輝線スペクトル」となる。

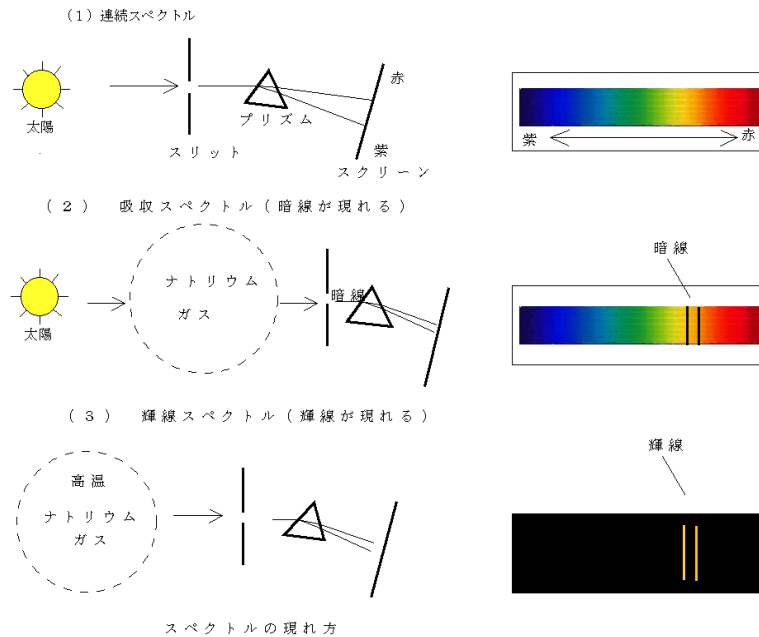


図 1-7 吸収線と輝線のスペクトル

山賀 進の Web site われわれは何者か-宇宙・地球・人類- 第一部-2- 宇宙の科学 第5章 恒星

4. 恒星のスペクトル 用語と補足説明 暗線と輝線：

<https://www.s-yamaga.jp/nanimono/uchu/kousei-3.htm>

水素などの「単体」（1種類の原子だけでできている物質のこと）では、いくつかの輝線が出ることが知られているが、実際の大気に存在する温室効果ガスとされるあらゆる分子も、それぞれの固有の波長で赤外線を吸収する一方で、基本的には同じ波長の電磁波を放射している（吸収・輝線スペクトルの関係とおなじ）ことになる。

大気中の二酸化炭素は二種類の原子でできた分子であり、輝線スペクトルはさらに複雑になり、「バンドスペクトル」と呼ばれる¹⁴。

気体が温室効果を持つか持たないかは、「極性」と呼ばれる分子内の電気的な偏りが、分子内の振動や回転によって周期的に変動するかどうかで決まる。

原子に限らず、電気的な振動があると、そこに磁場の振動が生じ、「電磁波」が発生することが知られている。スマホなどの通信に使われる「電波」も、電気の振動によってつくられている。

分子が持つこの性質によって、赤外線を吸収したり放射したりする。こうした分子をもつ大気が「温室効果」をもつことになる。

例えば水分子は、酸素原子1個と水素原子2個でできている。[図1-8]の水分子のモデルでは、球が「原子」を表す。

図では、3つの球が互いに重なっているように描かれているが、それぞれの球の中心に「原子核」（「陽子」と「中性子」と呼ばれる粒子が複数密集している）があり、球の描かれているところの範囲をいくつかの「電子」がバラバラに飛び回っていると考えると良い。（図1-10）



図1-8 水分子の分子モデル

出典：Wikipedia「水の性質」

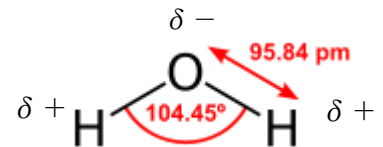


図1-9 水分子の構造式と極性

出典：Wikipedia「水の性質」

(参考)

Youtube『【科学万博協賛番組】サイエンススペシャル 宇宙200億年の旅』

https://www.youtube.com/watch?v=hEk-tQIF9zE&feature=emb_logo

原子どうしは、自然界のルールにしたがって、電子の飛び回る領域を重ねることで結合し、それぞれ決まった形の分子を形成している。原子どうしをつなげるはたらき（「共有結合」という）を、「価標」と呼ばれる線（-、=など）で表す（図1-9）と、「構造式」と呼ばれる。

また、分子の「極性」は、[図1-9]のように分子の構造式などに「 $\delta +$ 」「 $\delta -$ 」（「 δ 」はギリシャ語で「デルタ」と読む）と書かれることで表される。分子内にこうした電気的な偏りがある一方で、分子を全体で見ると、電気的には0になる。

赤外線が吸収・放射されるのは、「双極子モーメント」が変化することによる。「双極子モーメント」とは、簡単に言えば、電気の重心のことである。

水分子や二酸化炭素は、[図1-11]のように価標（-、=など）の伸縮や角度の変化によって電気的な重心が変化することで赤外線を吸収・放射する。このような性質を「赤外活性」という。そのため、「温室効果ガス」（greenhouse gases）を「放射活性ガス」（Radiatively active gases）と呼ぶこともある。

しかも、1種類の分子でも、重心が変動するパターンはいくつかあり、それぞれの変動に応じて、それぞれ特定の波長の赤外線を吸収・放射するため、1種類の分子からいくつもの波長帯の赤外線が吸収・放射される。名古屋大学太陽地球環境研究所・松見豊教授の資料では、このことを、分かりやすく、図で説明している。（図1-11）

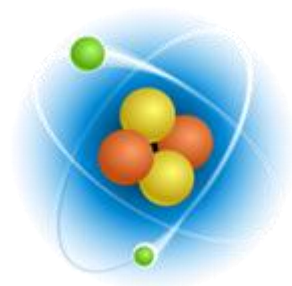


図1-10 原子核 (He) の構造

それぞれ、緑は電子、黄色は陽子、オレンジ：中性子になる。

出典：Wikipedia「原子核」

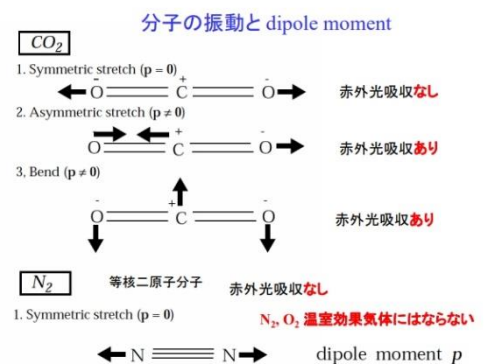


図1-11 分子振動による赤外活性

出典：第3章地球温暖化 - 名古屋大学[PDF]

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/stelab/www1/div1/matsumi/lecture3a.pdf>

水分子は、酸素と水素の結合が一直線ではなく、上記のような分子内部の振動だけでなく、分子が回転するだけで電気的な重心が変化するので、赤外線を吸収・放射する。p.22 [図 1-1] には、スペクトルの上に「分子振動」「分子回転」など、それぞれの波長によって放射の原因となる分子内の現象が記載されている。

一方、酸素分子 O_2 や窒素分子 N_2 にはそもそも極性（電気的な偏り）がないので、地球大気の大半を占めるこれら2種類の気体は温室効果にほとんど関与しないことになる。

第7項 気温

温暖化問題では、「気温上昇」が問題になっているので、大気の温度が測定されているわけだが、これに関しては少し注意が必要である。

私たちが普段使っている「気温」という言葉は、正式には「地上気温」と呼ばれ、地上から1.25～2.0mの高さで、温度計を直接外気に当てないようにして測定することと定められている。なお日本では、気象庁が測定する高さを1.5mと定めていて、学校に置いてある「百葉箱」は、1.2～1.5mの高さで温度計が設置されるように作られている。

後で扱う「地球のエネルギー収支」など、温暖化の科学で一般に議論するのは、厳密には「気温」ではなく、「地球表面温度」である。実際の研究では、地球表面温度は陸上における地表付近の気温及び海面水温の平均とされ、北極・南極、赤道などの地域差、季節の変化、1日の変動、気象の不規則性をすべて考慮した平均になる。

気温は地域によって差があり、季節のほか、一日の中でも変動があるので、それらをすべて考慮して、「年平均気温偏差」によって表される。

日本の場合、長期間にわたって観測を続けている観測所の中から、都市化の影響が比較的少ない15地点が選ばれている。日平均気温は1～24時までの毎正時24回の観測地の平均であり、月(年)平均気温は毎日(月)の平均気温の月(年)間の平均を取っている。

地球温暖化や気候変動について考える場合、平均気温の基準値（平年値）からのずれ（「偏差」という）で示されている¹⁵。気象庁が定めている平年値は1981～2010年の30年である。観測地点の選び方によって平均気温は違ってくるので、「日本全体の気温は15°C」などとは表現しない。

そのため、温暖化問題では、世界中の気温を考えることになるが、「気温が何度から何度に上がった」という考え方はなく、あくまで上昇の幅で語られる。

温暖化の科学において、歴史的に、二酸化炭素（実際は、温室効果ガスは二酸化炭素だけではない）が2倍になった時に、気温が何度変化するかが、それぞれの研究を比較する尺度として多く使われてきた。温暖化の科学では、こうした尺度を「気候感度」と呼んでいる。第5次評価報告書では、この値が1.5～4.5°C程度、一般には間をとって3°C程度と考えられている。予測の幅を「不確実性」と呼んでいる。

Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment

TS.5.3 Quantification of Climate System Response

http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_TechnicalSummary.pdf

TS.5.3 気候システム応答の定量化観測された気候変動、気候モデル、フィードバック分析に基づく平衡気候感度（ECS）の推定値、および古気候の証拠は、ECS が正であり、おそらく 1.5°C ~ 4.5°C の範囲であるの信頼性が高く、 1°C 未満の可能性は非常に低く（高い信頼性）、 6°C を超える可能性は非常に低い（信頼性は中程度）ことを示しています。モデルに通常含まれない長期フィードバックを含む数千年のタイムスケールでの地球システムの感度は、ECS よりも大幅に高くなる可能性があります（詳細については、TFE.6 を参照）。{5.3.1、10.8; ボックス 12.2}高い信頼性で、観測された気候変動と気候モデルに基づいて、一過性気候応答（TCR）が正であり、おそらく 1°C ~ 2.5°C の範囲であり、 3°C を超える可能性は非常に低いです（詳細については TFE.6 を参照）。{10.8; ボックス 12.2}

TS.5.3 Quantification of Climate System Response Estimates of the Equilibrium Climate Sensitivity (ECS) based on observed climate change, climate models and feedback analysis, as well as paleoclimate evidence indicate that ECS is positive, likely in the range 1.5°C to 4.5°C with high confidence, extremely unlikely less than 1°C (high confidence) and very unlikely greater than 6°C (medium confidence). Earth system sensitivity over millennia timescales including longterm feedbacks not typically included in models could be significantly higher than ECS (see TFE.6 for further details). {5.3.1, 10.8; Box 12.2} With high confidence the transient climate response (TCR) is positive, likely in the range 1°C to 2.5°C and extremely unlikely greater than 3°C , based on observed climate change and climate models (see TFE.6 for further details). {10.8; Box 12.2}

(参考)

「気候変動に関する政府間パネル 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約」にも、「平衡気候感度」(ECS: Equilibrium Climate Sensitivity) の記述あり

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf

東北大学 アジアにおける大気環境管理スキームの構築研究ユニット Working paper 2017-1

気候変動における不確実性問題：気候感度に関する最新の科学的知見を中心に

2017年2月9日 東北大学 明日香壽川

http://www.cneas.tohoku.ac.jp/labs/china/asuka/_src/sc437/8bc8cf38ab493x96e291e8838f815b83l839383n81j83w81k815b83n81k815b.pdf

気温を表す際には、水が氷になる温度（凝固点）を 0°C 、沸騰する温度（沸点）を 100°C とする「摂氏（せつし）」（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）で表記することが多いが、特に、温暖化の科学では「絶対温度」（単位： K （ケルビ

ン)) と呼ばれる単位を使うことがある。 -273.15°C (または単純化して -273°C) を「絶対零度」=0K (ケルビン) として、これより下の温度は、地球はおろか宇宙のどこにも存在しないとされている。1K の変化は 1°C の温度上昇に相当するので、摂氏 0°C (つまり氷が解ける温度) は絶対温度273Kということになる。

仮に 3°C の変化を絶対温度(K)の変化に換算すると1%程度($3.0 \div 273 \times 100$)となり、大きい変化とは感じられないかもしれない。逆に、この100分の1の変化が、地球上に住む人間および自然界にとって非常に大きな影響を及ぼすことになると言える。

温暖化の科学では、エネルギーと温度の関係を考える際に、後に出てくる「ステファン・ボルツマンの法則」などで、絶対温度で考えるケースが出てくる。

後で出てくる英訳論文には「華氏(かし)」(記号:F)が使われていることがある。水の凝固点を 32°F (華氏度)、沸騰点を 212°F (華氏度)とし、その間を180等分して 1°F (華氏度)とする。華氏($^{\circ}\text{F}$)の温度幅は摂氏($^{\circ}\text{C}$)の1.8分の1となる。

一般には、21世紀(2001~2100年)の中盤(2050~2060年ごろ)には、二酸化炭素の濃度は18世紀(1701~1800年)の工業化前より2倍になると考えられている¹⁶が、次の節で述べるとおり、それは人類がどれだけ温室効果ガスの濃度を抑制できるかで変わってくる。人間活動が影響するとなると、自然科学では議論が難しくなるので、政治・経済などを扱う「社会科学」と呼ばれる分野が関連してくることになる。

第8項 「第5次評価報告書 RCPシナリオ」と「1.5°C特別報告書」

温暖化問題では、2081~2100年での気温変化が $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ と予測されていて、予測の幅に、かなり開きがあると感じられるかもしれない。理由は2つある。一つは、そもそも温暖化の科学には不確実性があるから、もう一つが、人間社会の取り組みの度合いが決まっていないからである。

温暖化問題は、人類の出す二酸化炭素などが問題になるので、現在からその時期までにどれだけの二酸化炭素を排出するかは、人類の産業活動や温暖化対策のありかたによって大きく変わってくることになる。

コロナ禍において温室効果ガスの排出が減少したといわれているが、コロナウイルス自体が温室効果ガスを減らしたのではなく、人類の側が、人と人との接触を減らすために、経済活動が停滞する結果をまねく対策を取ったのである。

IPCCの第5次評価報告書では1986~2005年を基準とした、2081~2100年における気温上昇を考える際に、人間の取り組み度合いを考慮した、以下の4つの「RCPシナリオ」(RCP:代表的濃度経路 Representative Concentration Pathways))で表現している。

低位安定化シナリオ: RCP2.6 + 1.0°C (+ $0.3\sim 1.7^{\circ}\text{C}$)

中位安定化シナリオ: RCP4.5 + 1.8°C (+ $1.1\sim 2.6^{\circ}\text{C}$)

高位安定化シナリオ: RCP6.0 + 2.2°C (+ $1.4\sim 3.1^{\circ}\text{C}$)

非常に高い温室効果ガス排出量となるシナリオ: RCP8.5 + 3.7°C (+ $2.6\sim 4.8^{\circ}\text{C}$)

「RCP」の後についている数字は、先ほどから出てきている「放射強制力」(W/m²、1750年の工業化以前を基準としたもの)のことである(詳しくはp.38「第1章第1節第9項エネルギーとその単位(後半やや難)」)。

| 36

2007年の第4次評価報告書を知っている人の中には『A1「高成長社会シナリオ」、A1T非化石エネルギー重視2.4°C(1.4°C~3.8°C)』などという表現でシナリオが分けられていたことを知っている人もいるかもしれない。当時は、人間活動による温室効果ガス排出の度合いを、社会システムの違いによって分けていた¹⁷。おそらく、その後の温暖化をめぐる状況の変化も踏まえ、シナリオの表現だけでなく、考え方についても方針転換したと考えられる。

第5次評価報告書では、予測は「2081年~2100年」として表されているので、予測は実質、2090年あたりを指すことになるので、いまから70年後である。となれば、2100年はその10年後となり、温暖化もさらに少し進むことになる。

第5次評価報告書では、1880年から2012年で0.85°C。つまり、温度変化は、1880年からまだ1度いっておらず、この段階でも大きな気候変動が起きていると考えられているのに、ここからさらに4°C以上、上昇する可能性があるということになる。

[IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 \(PDF 5.4MB\)](#)

陸域と海上を合わせた世界平均地上気温は、線形の変化傾向から計算すると、独立して作成された複数のデータセットが存在する1880年から2012年の期間に0.85 [0.65~1.06]°C上昇している。1850~1900年の期間平均に対する2003~2012年の期間平均の上昇量は、現時点で最も長期間にわたっている単一のデータセットに基づく、0.78 [0.72~0.85]°Cである(図SPM.1を参照)。
{2.4}

一方で、2018年に発表された「1.5°C特別報告書」(SPR1.5)¹⁸は、かなり厳しい削減を求めていることで、日本でも大きく報道された。

「1.5°C特別報告書」では、これまでの度合いでいけば、2030年から2052年の間に、「工業化前」と比べて1.5°C上昇する可能性が高いとしている。

しかも、「工業化前」から、すでに2017年の段階で1°C上昇しているともされているので、現在から十~二十数年後には0.5°C上昇する計算になる(もっとも遅いペースで見積もっても、10年で0.2°C上昇する計算)。

「1.5°C特別報告書」は、1.5°Cと2.0°Cとで、影響に差があることを強調しているのだが、現在までにはすでに1°C上がっているわけだから、2100年までの余裕は現在から0.5°Cということになる。

第5次評価報告書の「RCPシナリオ」と「1.5°C特別報告書」では、気温変化の基準年が異なるが¹⁹、最も厳しい排出削減をした場合のシナリオ「RCP2.6」は、現在(1986~2005年平均)を基準にして2081~2100年で1.0°C(0.3~1.7°C)上昇を予測していて、グラフを見るとわかる通り、2050年ごろまでで、すでに予測の曲線が1.0°C上昇することは避けられない(海が熱を吸収することで、時間的な遅れが生じるか

ら)とされていて、これは、「1.5°C特別報告書」の2°C上昇にあたり、第5次評価報告書の「RCP2.6」シナリオの下での予測でいかないと「1.5°C特別報告書」の「1.5°C」にならない。

第5次評価報告書(2013年)の「RCPシナリオ」と「1.5°C特別報告書」(2018年)の縦軸を比較すれば、気温上昇の重要度が上がっていることがわかる。

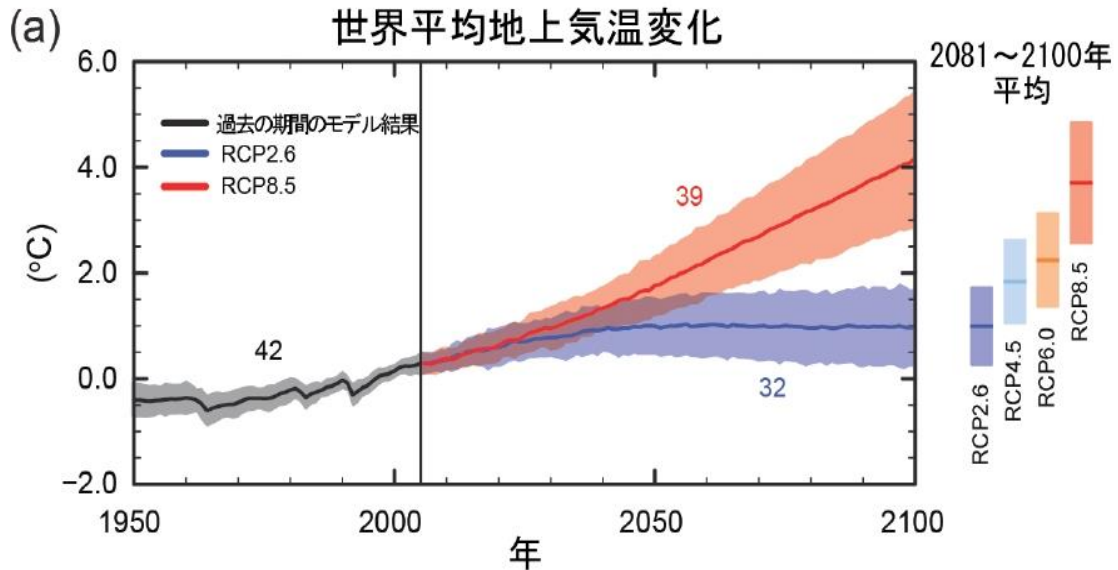


図 1-13 世界平均地上気温変化

出典：[IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 \(PDF 5.4MB\)](#)

a) 観測された地球全体の気温変化及び定型化された人為起源の排出及び強制力の経路に対するモデル応答

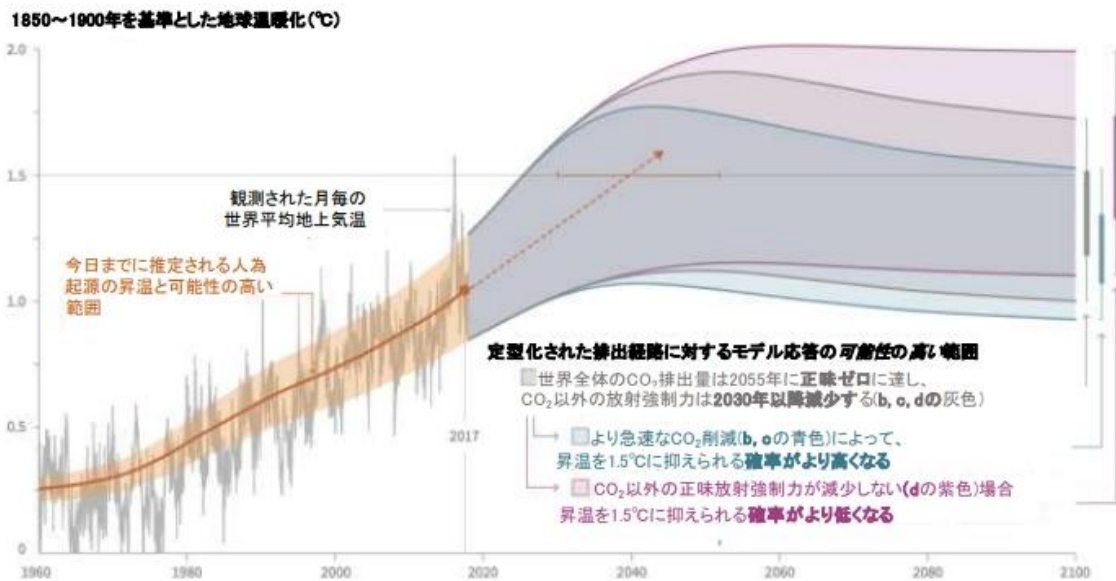


図 1-12 1.5°C特別報告書 SPM 環境省による仮訳【2019年8月】

http://www.env.go.jp/earth/ipcc/special_reports/sr1-5c_spm.pdf

ちなみに、放射強制力については2013年に発表された第5次評価報告書では、「工業化」すなわち1750年を基準にしている。この「工業化後」は英語で“pre-industrial”であり、環境省や気象庁による和訳では、こちらで訳しているが、日本の多くのメディアでは、これを「産業革命後」と表現するのが一般的になっている。(基本的にどちらで訳しても問題はないようだ。)

第9項 エネルギーとその単位 (後半やや難)

力・熱・光(電磁波)・音・燃料(石油、石炭、天然ガス、バイオマス、原子力)・電気・磁気などは、それぞれ別の状態に変換される。例えば、太陽の光で発電をし、それで荷物を動かしたり、電気ストーブなどで熱に変えたりする。これらはすべて、「エネルギー」と呼ばれる量(単位: J(ジュール))で換算可能であると考えられる。

温暖化の科学では、先ほど述べた「放射強制力」を表す単位として「 W/m^2 (または $W m^{-2}$)」(ワット毎平方メートル)が使われている。「放射強制力」は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では1994年の第1次評価報告書で、「対流圏の上端(圏界面)における平均的な正味の放射の変化」を放射強制力と定義し、現在もこの定義が使われているが、それ以外にも、「地球のエネルギー収支」(→p.61 [図1-24])などで「 W/m^2 (または $W m^{-2}$)」を使うので、ここで、この単位の意味について触れておく。

この単位にあるW(ワット)は、家電製品で記載されている「電力」の単位として知られているものと同じであるが、そもそも、W(ワット)はあくまでエネルギー(または熱)の単位であって、電気に限った単位ではない。W(ワット)は、1秒あたりのエネルギー(J)の量である($W=J/秒$)。「 $/m^2$ (または m^{-2})」($m^{-2}=1/m^2$)となっているのは、 $1m^2$ あたりであることを表す。

温暖化の科学において、エネルギーは太陽から「(原子)核エネルギー」→「光(電磁波)エネルギー」→「地球表面の温度(熱エネルギー)」へと、その姿を変化させていく。例えば、中学理科の教科書である東京書籍の「新編 新しい科学 3年」では、[図1-15]のように説明されている。

温暖化の科学では、すべて「 W/m^2 (または $W m^{-2}$)」で換算する。温暖化問題では、地球の全ての地球表面を問題にする。地球表面上の位置によって、エネルギーの受け渡しの事情はさまざま、あらゆるスケールの時間変化を考える必要もある。これらをすべて統一的にあらわすために、一般にはそれぞれのエネルギー量を「 $1m^2$ あたり」かつ「1秒あたり」の平均に還元して表すのである。

水1gを $1^{\circ}C$ 温度上昇させる「熱量」を1cal(カロリー)とすることを、学校で勉強した人も多いかもしれないが、今では、学校などでは基本的に「cal」は自然科学の単位として使わないことになっている。実は「cal」もエネルギー全般の単位であり、先ほどのJ(ジュール)とは、 $1cal \doteq 4.18J$ の関係がある。太陽放射エネルギーは約 $340 W/m^2$ であるが、これは1Lの水を $1m^2$ に広げて(厚さ1mmになる)1秒間で $340 J \doteq 80 cal$ すなわち、1秒間で $0.08^{\circ}C$ 温度上昇、1分間で $4.8^{\circ}C$ 上昇。(蒸発なしと仮定。 $340 \div 4.2 = 80.95$)

大気による電磁波の吸収について考えるためには、波長によって吸収の程度が異なることを考慮する必要がある。

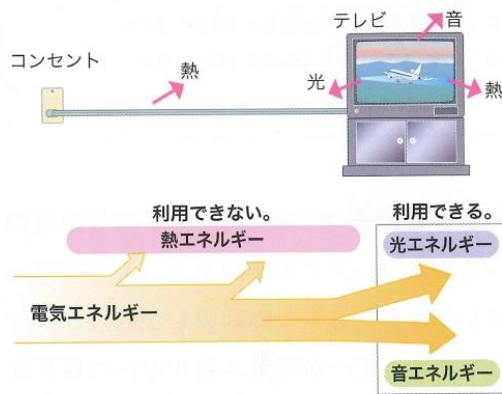


図2 テレビに見られるエネルギーの移り変わり

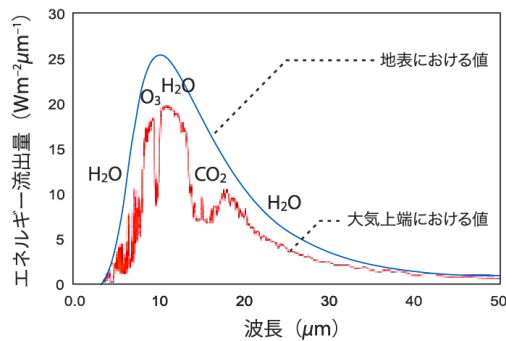
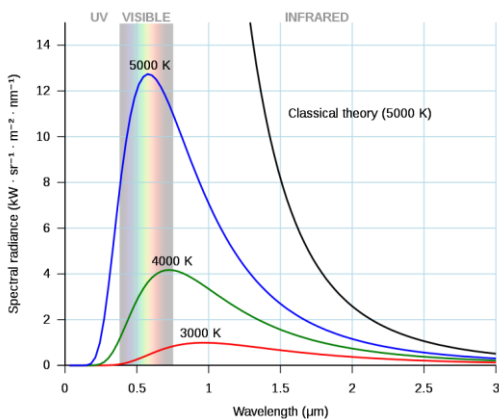


図3 火起こしに見られる運動エネルギーから熱エネルギーへの移り変わり

図1-15 異なる種類へのエネルギーの変換

出典：東京書籍 新しい科学 3年

物体が放射する電磁波のエネルギーは、p.39 [図1-14]にあるように、全体的には物体の温度が高いほど多く、波長ごとに出すエネルギー量を表すグラフは、山なりの曲線になる。この曲線を表す式は、マックス・プランク（1858-1947）によって作られ、「プランクの式」として知られている。



各温室効果物質の寄与	
水蒸気	48% (75 Wm ⁻²)
二酸化炭素	21% (33 Wm ⁻²)
雲	19% (30 Wm ⁻²)
オゾン	6% (10 Wm ⁻²)
その他	5% (8 Wm ⁻²)

図1-14 Planckの式

出典：左：[Wikipedia レイリー・ジーンズの法則](#) 右：[ココが知りたい地球温暖化 Q9 水蒸気の温室効果](#)

グラフの山の位置は、物体が高温であるほど波長の低い部分になる。例えば太陽の表面温度は約 6000K (絶対温度) であり、左の図 (図では 5000K) の山の位置が可視光線の領域となっている。実際、先ほど述べたとおり、太陽放射の約半分は可視光線である。

一方、地球表面温度は 300K 弱であり、左の図において 3000K の曲線のはるか右に山の位置が来ることになるので、地球放射のほとんどは赤外線ということになる。

また、気象学においては、大気も物体として放射エネルギーを吸収、放出していると考えて温室効果のメカニズムを解明している。

普通、物体は、他から熱を受け取り、その物体がもらう「熱量」 Q を「熱容量」 C (=比熱 c ×質量 m)で割ることで温度変化を得る (高校では次のような式が使われる。 $T = Q/C \Leftrightarrow Q = mcT$) が、こうした式で、後で考える「地球のエネルギー収支」を考えようとすると、それぞれの物体の熱容量を決めるために地球本体や大気の質量、比熱、熱の配分などを考える必要があり、それは決して簡単ではない。

そこで「ステファン・ボルツマンの法則」と呼ばれる法則をもとにして計算を行う。この法則は、物体はその温度のみによって放射するエネルギーが決まるというもので、放射によって平衡が保たれている地球の大気を議論するのに適している。放射エネルギーを E (W/m^2)、物体の絶対温度を T (K)、比例定数 σ (ボルツマン定数： $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$) として、以下の式で表される。

$$E = \sigma T^4$$

「ステファン・ボルツマンの法則」を使うと、エネルギーが1%上がると、1750年時点のエネルギーと絶対温度を E_1 、 T_1 (当時の温度を 15°Cとする)、現在のそれを E_2 、 T_2 とすると、 $E_1 = \sigma T_1^4$ 、 $E_2 = \sigma T_2^4$ より、

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{101}{100} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \left(\frac{T_2}{273 + 15}\right)^4$$

$$\therefore T_2 = 288 + 0.71(^{\circ}C)^{20}$$

となり、0.7°C上昇する計算になる。これは IPCC 第5次評価報告書において、1750年から現在までの温度変化とされる +0.85°C (IPCC 第5次評価報告書の推定値) に近い値となる。(これはあくまで地球表面での議論であり、対流圏上端における指数である「放射強制力」とは異なるので注意されたい。)

第10項 大気の構造

大気の濃度は上空に行くにしたがって薄くなっていき、温度も低温になっていくことは知っている人も多いと思う。例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図1-16]のように説明されている。大気圧の変化は滑らかな曲線でできているが、温度変化はそうではない。大気の鉛直 (上下方向) 構造は、4層構造になっていることが知られていて、それぞれの性質により、独自の温度変化を示す。

IPCC の評価報告書などでは、主に対流圏と成層圏を問題にしている。

対流圏

大気は地球表面から 10km 程度までの、この範囲で対流していることから、気象現象は、この層で起こっている。

赤道付近では太陽光線が地球表面に垂直に近い角度で当たるので、地球表面が暖まりやすく、北極・南極あたりでは太陽光線が地球表面に薄い角度から入射するので暖まりにくい。これが、赤道付近の地表の気圧（低い）と、極付近の気圧（高い）の差を生み、地表付近では極から赤道へ大気の移動が生じ、上空ではその逆の流れが生じる。ただし、地球は自転しており、移動する大気には「転向力」と呼ばれる力がはたらくため、実際には大気の流れは途中で曲げられ、「貿易風」や「偏西風」など、東西方向に吹く風の原因となる。

地上気温は、地球表面が全球の平均で 15°C ぐらい、対流圏の高度 11km ぐらいまでは地球表面から上空に行くにしたがって低下し、その割合は 100m あたり 0.65°C 程度である。この変化率のことを「気温減率」と呼び、高度 11km あたりでは -56°C にもなる²¹。

地上からの放射によって地球放射（主に赤外線）下層から少しずつ温室効果ガスによる吸収が行われて、上空に行くにしたがって放射量が弱くなっていく。（p.30「第1章第1節第6項 なぜ、気体分子が温室効果を持つか」で述べたとおり、温室効果ガスは赤外線を吸収したあと再放射（放出）する性質があり、単純に透過したということとはできない。）このため、上空に行くにしたがって温室効果ガスが吸収する赤外線量が減る。（→p.63「第1章第3節第2項 気層モデル」）

地球放射の大気による吸収以外にも、南北方向の大気循環、「顕熱」（地球表面が温められたときに温められた空気が膨張によって密度が下がり、上昇することで熱が移動する（対流）など）、および「潜熱」（状態変化、特に大気中では水蒸気が液体になること（凝結）によって雲ができる際に熱が出る）などによって一定レベルの「熱」の移動がある。

また、これはあくまで「対流圏」での話で、成層圏より上では事情が異なる。

成層圏

成層圏は高度 11~50km あたりで、このあたりになると、空気はかなり薄くなる。

ここには「オゾン層」が存在する。オゾンは化学式「O₃」で、紫外線と酸素「O₂」の化学反応によって作られ、紫外線による化学反応によって「O₂」に戻ったりする。この過程で紫外線が吸収されることで、地上に届く紫外線が減少している²²。

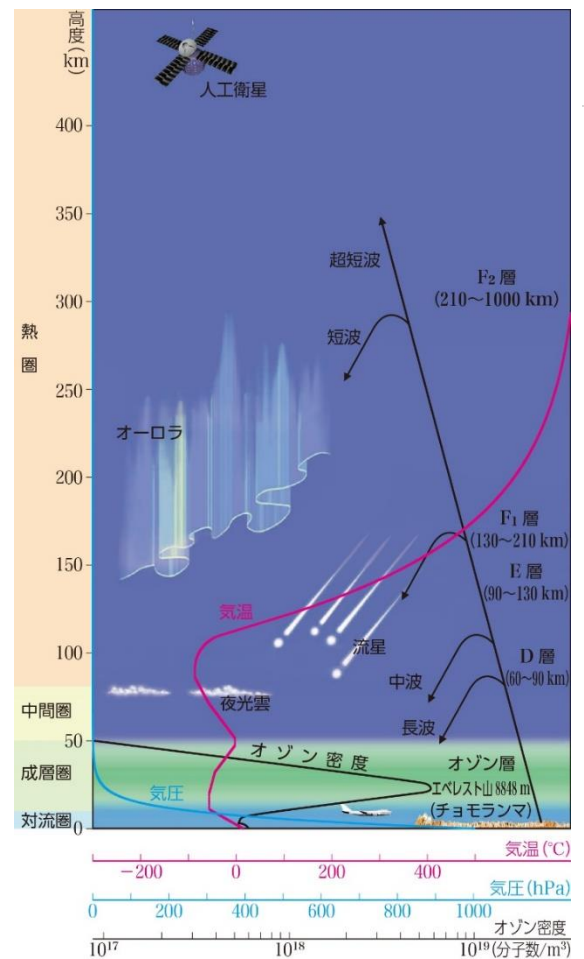


図 1-16 地球の大気圏

出典：浜島書店 ニューステージ 新地学図表

評価報告書などでは、地表近くで作られる「対流圏オゾン」と区別して「成層圏オゾン」と呼んでいる。このときの化学反応によって生じる熱で、成層圏下層から上層へは温度が -56°C から -3°C 程度まで上がる。

42 「フロンによるオゾン層の破壊」は、有名な環境問題のひとつであるが、これは、フロン類がオゾン層を次々と破壊していくことで、オゾン層が紫外線を防ぐ効果が低下することが恐れられているのである。

フロン類も温室効果ガスであるが、成層圏のオゾンも温室効果ガスであったりする。最近、フロンの削減によりオゾン層が回復したら、それで温暖化が進んだ、という話もある。

対流圏の水蒸気は、産業活動によって生じたものであっても、海水との交換で調整がされるので、排出が蓄積につながるわけではなく、基本的には問題にならないが、成層圏で生じた水蒸気（メタンの酸化など）は多くが成層圏に留まることから、温室効果ガスとして発生量を検討する必要がある。

温暖化の科学によれば、対流圏は温暖化、成層圏は寒冷化することが予測され、すでにそれを支持する観測結果もある。

中間圏・熱圏

参考に「中間圏」「熱圏」についても触れておく。この2つの大気圏は p.41 [図 1-16] の気圧（青線）を見ればわかる通り、大気圧が地球表面と比較にならないほど小さい。

「中間圏」(50~80km) は、あまり特徴のない層であり、温度も -3°C 程度から -93°C 程度まで徐々に下がっていく。

ところが、「熱圏」(80km 以上) になると温度が上がりはじめ、高度 200km あたりで 600°C を超える高温になる。(ただし、気圧が極めて低いので、仮に人間がそこにいても、熱いと感じることはないという。) オーロラができるのもこの領域である。

熱圏には、「電離層」と呼ばれる層が4層(D、E、F₁、F₂)あり、太陽光線により窒素や酸素の分子が電子を放出することでできている。この層は電波を反射する性質があり、電波の種類や条件によって電波が地球の反対側まで届く効果をもたらしている。太陽フレアによって電離層が乱されることで、地球上の電波の伝わりが悪くなる「デリンジャー現象」も知られる。

第2節 自然要因

温暖化したとしても、それが、「自然要因」によるものならば、温暖化の原因は人間による温室効果ガスの排出ではなく、削減などしても影響はないということになるから、温暖化は「仕方がない」ということになる。

例えば、太陽活動、火山活動などは、温暖化や寒冷化をもたらす原因となりえるが、人間が操作できるものではないため、気候変動の「自然要因」にあたる。

気候変動に相当な影響を及ぼすレベルの「自然要因」も存在する。巨大隕石の衝突やスーパーボルケーノ（超巨大火山、アメリカ・イエローストーンなど7か所が知られる）の大噴火は、エアロゾルの大量放出によって10°C近い気温の低下が考えられていて、もし現在、このようなことが起これば、世界にとって危機的な状況になると考えられているが、こうした現象は起こる頻度が非常に少なく予測も不可能で、温暖化の科学においては基本的に考慮に入れていない。

また、約10,000年前、更新世の終わり（ヤンガードリアス期）には、北アメリカにあった氷床が解けることで大陸規模の大洪水が起こっていて、その淡水が大西洋にふたをする形で広がることで気候に絶大な影響を与え、数十年で16°C程度の寒冷化をもたらしたとされているが、こうした現象も、当面、起こるとは考えられていないので、考慮に入れていない。

風化や地殻変動は、その影響が小さいことが明らかなので、あまり問題にならないが、特に、次の項で説明する太陽活動については、温暖化への影響について、「温暖化懐疑論」の主張によく出てくる。しかし、以下で説明する通り、現状の温暖化の“主な原因”を「自然要因」で説明することはほぼ不可能である。

二酸化炭素を吸収することが考えられる海の対流も重要だが、これについては歴史的な経緯も含めて、後で述べる。

第1項 火山活動

スーパーボルケーノのような極端ではない火山活動については、温暖化を説明する立場の人達からは、以下のように、その影響が小さいことを強調する説明が並ぶ。

[IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 \(PDF 5.4MB\)](#)

火山の噴火の排出する二酸化炭素は非常に少ない。

太陽放射照度の変化や成層圏の火山性エアロゾルによる自然起源放射強制力の合計は、大規模な火山の噴火のあとの短い期間を除き、過去1世紀にわたる正味の放射強制力に対してほんのわずかな寄与しかしていない。{8.5}

(参考)

人類による二酸化炭素排出量は「火山の100倍」とであると判明

Forbes JAPAN 2019/10/14

<https://forbesjapan.com/articles/detail/30171>

| 44

ただ、気をつけて欲しいのは、「自然要因」である火山活動や太陽活動は、地質時代のレベル（数千～数十億年）で過去にさかのぼれば、本来的に、温暖化の原因になり得るということ。太陽活動や火山活動によって、現代よりも高温だった時代も寒冷だった時代もあるし、後で述べるとおり、1000年前にさかのぼると、西暦1200年ごろの「中世温暖期」（または「中世気候異常」）や「マウンダー極小期」（1645～1715）による寒冷期は、太陽活動の影響が指摘されている。

火山活動によって排出される火山ガス（大半は水蒸気）には二酸化炭素が含まれており、温室効果ガスとして温暖化を進める要素がある（といっても、人為的なものの100分の1程度）一方で、火山噴火によって溶岩、火砕岩や火山ガスとともに微粒子（エアロゾル）が散乱し、短期間に限定して気温を急激に低下させると考えられている。（p.57 [図1-23]）

ここ数十年の温暖化の原因が二酸化炭素などの温室効果ガスによると考えられているのは、次の項にあるように、この間に太陽活動が大きな影響を及ぼしていない、また、火山活動によって排出される二酸化炭素の量は、人間が排出する二酸化炭素の100分の1程度と考えられており、大きな噴火活動によってエアロゾルが大量に放出されて温度が下がることさえあることから、少なくともここ数十年レベルの上昇への影響としては考えられない。それにもかかわらず、気温が上昇をしているから、二酸化炭素を中心とした温室効果ガスが原因と考えられる、ということである。

第2項 太陽活動

「ココが知りたい地球温暖化」

Q12 太陽黒点数の変化が温暖化の原因？

http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/17/17-1/qa_17-1-j.html

20世紀半ば以降には、太陽黒点数の長期的な変化はほぼ横ばいかむしろ減少傾向を示しており、そもそも太陽活動が活発化しているとは思われません。つまり、太陽活動の活発化が最近の温暖化の主要な原因であるとは考えられません。

日射量の変動は、太陽活動そのものによるものと、太陽と地球の位置関係の変化による（「ミランコヴィッチ・サイクル」として知られる）ものがある。

太陽活動そのものの変化については、IPCCの評価報告書などでは、「全太陽放射照度」（TSI：Total solar irradiance）（→[Wikipedia「太陽変動」](#)）と表現されていて、11年周期で変動があることは高校の地学教科書にも載っているが、これ以外にも、22年、87年（70–100年）、210年、2300年、2500年の周期などが知られている。

太陽の光球面は6000K程度、その光球面上にある黒点は4000K程度と温度が低いですが、黒点が多いほど太陽活動が活発だと考えられている。（黒点は、その位置での磁場が強く、熱がそこに上がってこないために黒く、黒点の周りに「白斑」ができて、そちらにエネルギーが逃げている。）

その変動は、0.1%から多くて0.2%程度と考えられているが、黒点の数が少なかった「マウンダー極小期」(1645～1715)と呼ばれる時期では、「中世における小氷期中頃の寒冷期の遠因と目され、この時期のヨーロッパ、北米大陸、その他の温帯地域において冬は著しい酷寒に震え、暦の上では夏至であっても夏らしさが訪れない年が続いた。北半球平均気温は極小期の前後と比べて0.1～0.2度低下したのではないかとされている[2]」([Wikipedia「マウンダー極小期」](#))

太陽活動は、第5次評価報告書において、正の放射強制力(+0.05[0.00-0.10]W/m²)として記載されているが、太陽活動は20世紀(1901～2000)終盤はやや低下に転じていて、一方、気温上昇は、それと関係ないと思えるほど大幅に進んでいる(→p.57 [図1-23])。11年の太陽活動周期の「第24太陽活動周期」(2008～2019)は数百年の観測でかなり太陽活動の弱い時期であったとされ、2019年はその終わりに来る極小期であったが、この時期の世界平均気温はこれまでの最高を記録している。

第25太陽活動周期の開始を確認。極小期は2019年12月だった

<https://sorae.info/astrometry/20200916-the-solar-cycle25-prediction-panel.html>

NOAAによると、終了が確認された第24太陽活動周期はこの100年で最も活動が弱く、太陽活動周期の記録が始まった1755年以降でも4番目に弱かったといます。2025年7月に極大期を迎えると予測されている第25太陽活動周期も第24太陽活動周期と同程度の強さになるとみられていますが、第21太陽活動周期以降の低調な活動は終わりつつあるとされています。

そもそも、太陽活動の増加が温暖化に寄与するかは、以下の記述にあるように、そもそも自明ではない。

[Wikipedia「マウンダー極小期」](#)

なお太陽黒点の活動低下と、地球の気温の変化についてはまだよく分からない部分も残っている。例えば2010年頃の極小期では太陽放射が減る一方で、スペクトルの変化によって大気による吸収がむしろ増える可能性も指摘されている[5][6]。

第3項 ミランコヴィッチ・サイクル

太陽自体の活動が変動する一方で、太陽-地球間の位置関係(基本的には距離)の変化が、地球の歴史において、気候に大きな影響を与えてきた。セルビアの地球物理学者、ミルティン・ミランコビッチ(1879年-1958年)は、太陽-地球間の位置関係は主に以下の3つの要素によって周期的に変わるとした。

- ① 公転軌道の変化：地球は、楕円形の軌道で太陽を回っており、太陽と近づく距離が、定期的に変動する。10万年。

- ② 地軸の傾きの変化：約4万1000年の周期で、地軸が22.1度から24.5度の間を変化するもの。傾きが大きくなると、緯度が高い地域ほど、太陽からの距離が遠くなり、寒くなる。
- ③ 地軸の歳差運動：約2万5800年の周期で、地軸がコマのように首振り運動を行うもの。

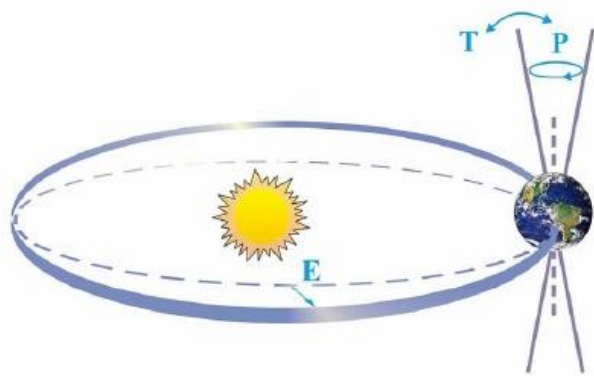
第二部－1－ 地球の歴史 第5章 固体地球の歴史 3. 氷河時代

b. ミランコビッチ・サイクル

<https://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyuu/kotaichikyunorekishi.htm#ミランコビッチ・サイクル>

1970年代から始まった深海底の堆積物の研究からミランコビッチ説が見直されることになった。それは放射性同位元素を用いた年代測定の精度の向上、酸素同位体比を用いた古海水温の推定などによって、たしかにミランコビッチの予想通りの周期での気候の変動が見られるようになったのである。

だが、計算では歳差と地軸の傾きの変化の方が、地球の公転軌道の離心率の変化よりも、日射量に対する影響が強いはずなのに、上に書いた地質学的な証拠からは公転軌道の離心率の変化の10万年周期と同じ周期の気候変動が一番強いように思えることである。



FA06.1 図1 氷期サイクルを駆動する地球の軌道変化(ミランコビッチサイクル)の模式図。“T”は地軸の傾き(または傾斜角)、“E”は軌道離心率の変化(楕円の短軸の変化による)、“P”は歳差運動、すなわち軌道上のある時点での地軸の方向の変化。出典: Rahmstorf and Scheffhuber (2006)

図1-17 ミランコヴィッチ・サイクル

E→① T→② P→③にあたる

出典: [IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 よくある質問と回答 気象庁訳 \(PDF 20.7MB\)](#)

また、ミランコビッチ・サイクルは氷河時代の中の氷期－間氷期という数万年～数十万年というスケールでの変動を考える上では重要だが、大規模な氷河時代が訪れたり、また無氷河時代(極地方にも氷床がない時代)に戻ったりする変化については説明できない。

逆に地球の自転・公転にそれほどの極端な変化がなかった(＝極端な気候変動がなかった)ことについて

は、月の存在が大きな役割を果たしてきたという説がある。それによると、地軸の傾きに大きな変化がなかったのは、月が地軸の安定に役立っているという。

「ミランコヴィッチ・サイクル」は、完全とはいえなくても、日射量の変化によって地球の気候が大きく変化することを説明できることから、人間の影響ではなく、自然変動によって気温が上昇することがあり得る例として「温暖化懐疑論者」がよく持ち出すのだが、実際には、逆に「地球温暖化二酸化炭素原因説」を補強している、というのが現在の科学的な知見である。

そもそも、こうした変動はどれも数万年～十万年レベルの変化であるが、地球温暖化問題は100年程度の問題なので、少なくとも数百倍のスピードである。また、以下にあるように、日射量の変化が直接に気温を変化させている要素はあるが、一方で、それが気候や生態系にも影響を与えることで二酸化炭素などの変化をもたらし、気温が変化してきたと考えられるのである。

ちなみに、ミランコヴィッチ・サイクルなどの研究により、現代の知見では、次の氷期は30,000年後だと考えられている。

地球環境研究センター「ココが知りたい地球温暖化」Q4 氷床コアからわかること

http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/8/8-1/qa_8-1-j.html

「太陽活動の変化」

図1の最終氷期の終わりを例にとると、この日射量変化をきっかけとして、北アメリカやヨーロッパを覆っていた氷床面積の減少、海水面の上昇とそれに伴う大気中の塵の減少、さらには陸上植物の分布が変化したことなどが現在の間氷期への移行に寄与したとされていますが、最近の研究によれば、これらの変動に加えてCO₂などの温室効果ガスの影響を考慮に入れないと、氷期-間氷期の気温差を半分程度しか説明できません。すなわち、過去にも、大気中の温室効果ガスの変動が地球の気候を実際に変えていたことがわかってきたのです。

(註：傍線引用者)

第4項 「スベンスマルク効果」

この「効果」は、もし存在していれば、温暖化の「自然要因」として、「温暖化懐疑論」の根拠となるはずだが、現在では基本的に、この効果が温暖化を起こすとは考えられていないので、「」(カッコ)付きにしている。

「銀河宇宙線」(「宇宙線」とは、宇宙から降り注ぐ放射線のことで、陽子が主成分。太陽からの宇宙線もあるが、ここでは関係ない)が地球の大気でエアロゾルを形成するとする仮説から、「自然要因」によって温暖化が起こったと説明しようとする研究が一時、注目を集めたことがある。日本ではあまり知られていない(主張している懐疑論者も多くない)が、海外では意外に大きな問題となったようだ。

このあたりについては、IPCCの評価報告書にも貢献したスーパーコンピューター「地球シミュレータ」

による温暖化シミュレーションに主要な役割を果たした、元海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター長、東京大学名誉教授・松野太郎氏の『温暖化問題，討論のすすめ 地球温暖化は物理法則に基づく理論である』（パリティ Vol.34 No.05 2019-05）に詳しく書いてある。

48 | 太陽黒点の増加によって太陽磁場が強くなると「銀河宇宙線」の進行を妨げ、地球に降り注ぐ線量が減少する。このこと自体は、実際に観測がされていて科学的に正しい。ただ、スベンスマルクは、その事によって、地球上のエアロゾルが減少すると考えたのである。それにより雲の凝結核（または氷晶核）が減少することになり、雲の量が減ることで、雲アルベド（反射率）効果が減少し、温暖化を招いたというのだ。

先ほど述べたとおり、太陽黒点の増加は、太陽活動の活発化のサインと考えられており、太陽黒点の増加 → 太陽活動の活発化 → 宇宙線の減少 → エアロゾル形成量の減少 → 雲量の減少 → 雲の反射率（アルベド）の減少 → 温暖化という流れになる。

しかし、この仮説およびその前提には多くの問題がある。

「エアロゾルの減少が雲の減少につながる」

→エアロゾルと雲の生成の関係については不確実性が高い。そもそも、少ないエアロゾルに水滴が配分されると考えられるので、雲量そのものが変化するとは言えない。あくまで大気中の水蒸気量が雲量に大きな影響をおよぼすと考えられる（→p.27「第1章第1節第3項 エアロゾル（またはエーロゾル）」）。

そもそも、雲は、上層・中層・下層で温室効果に与える影響に違いがあることが知られている。

それでも、他の指摘によれば、エアロゾルが少ないと、1粒が大きい、少ない数の雲粒を作ることによって「雲アルベド効果」が低下すると考えられており²³、そもそもエアロゾルは負の強制力があるので、それが減少したから温暖化したなどと論理を展開すれば多少は説得力が増したのかもしれないが、スベンスマルクはあくまで雲量で議論している。

おそらく、太陽変動に応じたエアロゾルそのものの減少が観測されていないため、雲量で議論するしかなかったと思われる。

「雲の減少による放射強制力は11年周期の雲量の変化で $1.5\text{W}/\text{m}^2$ 」

→スベンスマルクは気象学で知られている雲アルベドの放射強制力の推定幅の最大値を取っている（つまり可能性は低い）。仮にこれが正しかったとしても、太陽の11年変動に合わせて、雲量が増減して、その結果、気温もそれなりに変動するはずであるが、そのような変化は確認されていない。

「銀河宇宙線が、地球大気でエアロゾルを生成する」

→「スベンスマルク効果」の大前提であるが、実験した結果、こうしたことは否定されている。

最後については、セルン（CERN：Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire、正式名称：「ヨーロッパ合同原子核研究機構」（European Organization for Nuclear Research）と呼ばれる、現代物理学の素粒子研究における最先端（というかおそらく総合的には世界最高）の研究施設（周囲が27kmの世界最大の加速器）を有する研究所が、この仮説の検証のために実験を行って、否定的な結論を出している。

松野氏の指摘するところでは、スベンスマルク氏の仮説は、論文の出来とは別に、「 1.5Wm^{-2} とか CO_2 の

効果に匹敵といった確かなデータの裏づけのない表面的な言葉に、読者が過大に反応した」ことが、注目を集めた要因だったようである。この一件のその後については、松野氏の以下の説明で十分だと思われる。

松野太郎「温暖化問題、討論のすすめ 地球温暖化は物理法則に基づく理論である」
(パリティ Vol.34 No.05 2019-05)

| 49

さらに、宇宙線気候決定論により近年の温暖化はCO₂が原因ではない、というためには宇宙線が弱くなっていなければならない。ところがスベンスマルクが扱った1970～90年の後、宇宙線は再び強くなり、とくに2009年は太陽活動の異常な弱まりと相まって史上最強となった。このようにしてスベンスマルクの論に立つCO₂温暖化懐疑論はあらゆる面で根拠を失った。

スベンスマルクの宇宙線気候決定論は終息に向かいつつあるが、前節に記したように、出発点の論文¹²⁾は、きちんと検討されていれば誤りが多く、彼の主張の基礎が正しくないことがわかったはずである。それがなぜCERNを動かすほどになったのか。筆者が日本国内の経験としてみるところでは、たくさんある「地球温暖化懐疑論」のほとんどは科学論文のかたちで主張されるのではなく、新聞記事や一般向けの雑誌へのコメントであったり各専門分野での解説・レビューとして述べられたりしている。とりわけ力を入れて議論を展開しようとする場合は1冊の書籍として出版されることもあるが(意図から当然かもしれないが)、一般向けの解説のかたちをとり、専門的な議論にはならない。

これに対してスベンスマルクの場合はまったく異なり、観測されている地球全体の温暖化がGHG(引用者註:温室効果ガスのこと)の増加によるものである、という多くの研究者が受け入れている考えに対して異なる可能性があることを指摘し、科学論文として専門的な雑誌に発表したのである。結果的にこの考えは誤りであったが、ふつうの「懐疑論」ではなく本格的な論文であり、もしも彼のいうとおりならとてつもない大きな社会的な影響をもたらす。そう考えると、CERNが動いたのも納得できる。

上記のように松野氏の“日本型”「懐疑論者」に対する指摘は、的を得ている部分もあるが、以下のようにアメリカなどで活躍する、専門的「懐疑論者」にも気を付けなければならない。

(参考)

『組織的な温暖化懐疑論・否定論にご用心』江守正多 国立環境研究所 地球環境研究センター 副センター長

<http://ieei.or.jp/2020/03/opinion200310/>

第5項 ヒートアイランド

自分の住んでいるところが昔に比べて気温が上がっていると感じたら、それは必ずしも温暖化のせい、ということとはできないかもしれない。(非常に長い期間になるが。)

「ヒートアイランド」とは、都市化した地域は、以下の理由などにより、そうでない地域よりも高温になる

ことが知られていて、温暖化とは直接関係がない独立の現象と考えられており、実際の気温上昇は「ヒートアイランド+温暖化」によって生じることになる。

- 1 工場や家庭からの熱の排出
- 2 緑地・水面の減少（蒸発量の減少）
- 3 コンクリート・アスファルト化（熱をためやすい）
- 4 中高層の建物の密集化（風の遮断、熱をためやすい）

都市部の気温上昇の7割がヒートアイランド、温暖化の影響は3割程度と見積もられている。こうした効果は、温暖化とは区別することになっている。

温暖化懐疑論には、温暖化の科学はヒートアイランドを考慮に入れていない、または不適切な考慮をしているとしているものもあるが、そんなことはない。その都市の周りの森林や田畑などのある郊外と比較することで、解消が可能である。1930年代に、現代につながる温暖化の予測を行った“知られざるパイオニア” G.S・カレンダー（1898-1964）は、町の中心部が周辺の田舎地区よりも、気温、特に夜の最低気温が少しだけ高いと指摘しており、こうした現象がかなり以前より考慮に入っていたことがわかる。

ちなみに、カレンダーは、「ヒートアイランド」という用語は使っておらず、「都市影響」(city influence)と表現している。

第6項 古気候

「古気候」とは、文字通り、古い時代の気候のことを言う。温暖化の科学は、氷河時代の「古気候」研究の疑問から発展したところがある。

当時の気候について調べることができるのは、「氷床コア」(ice core、氷河や氷床から取り出された氷の試料)や樹木の年輪、地層、化石などが、当時の環境の跡を残しているからである。

こうした古気候研究は、時代が古くなればなるほど研究が難しくなる。

温暖化懐疑論を主張する人には、研究の進んでいない時期の太陽活動や火山活動についての問題を提示する人も多い。こうしたことも踏まえて、古気候には、多くの研究者のエネルギーが投入されるようになっている。

こうした研究の結果、最近になって、新生代・第四紀の始まりが従来の181万年前から258万年前に変更されるなど、地質年代表の大幅な改定が行われた。

最近、地質時代の名前として認められた「チバニアン」は、新生代第四紀にある更新世を4つに分けた3番目にあたる。

第四紀の定義が変わりました！

<https://isabou.net/Convenience/Tool/geology/index2.asp>

「第四紀」は「人類の時代」ともいわれ、地質学上の時代区分のうち最も新しい時代です。この時

代の始まりが77万年さかのぼり、258万年前に変更されることになったのです。
 (中略)
 近年、酸素の同位体を使った気候変動の研究が進展し、寒冷化はより前から始まっていることが分
 かり論争になったのです。10年以上、議論が続いていましたが、結論を出したのが国際地質科学
 連合。2009年6月に定義変更を決めたのです。

温暖化問題は、あくまで18世紀(1701-1800)中盤の産業革命以降の問題であるが、その科学的根拠は、その時期のデータだけにあるのではなく、極めて幅広い古気候に関する高度な研究が下支えしているの
 である。

今は、二酸化炭素などの増加が問題になっているが、地球の歴史46億年を通して見れば、二酸化炭素濃度は変動しつつ減少しており、現在の二酸化炭素の増加は、「小さいが急激な変化」といえる。しかし、その増加は、急激であるがゆえに多くの生物種の絶滅をもたらすと考えられている。

スノーボールアース (全球凍結)

地球は、微惑星(隕石)の取り込みにより現在の大きさになった。

以前は、地球誕生の46億年前から40億年前まで、地球表面が灼熱の状態が続き、大気圧も大半が二酸化炭素、60気圧(現代の地球の60倍)と考えられていて、そのような状態の地球は「マグマオーシャン」と呼ばれていた。

しかし、最近では、この時期には、地球誕生から間もない地球に火星クラスの大きさの小天体が衝突し、月ができる原因となった「ジャイアントインパクト」をはじめとして巨大隕石の衝突が複数回あったと推定されていて、衝突によって表面が「マグマオーシャン」のように高温になることはあっても、その度ごとに固体の地面と液体の海が回復したと考えられるようになってきている。(→NHKスペシャル『地球大進化 46億年・人類への旅 第1回 生命の星 大衝突からの始まり』初回放送日:2004年)

隕石衝突のほとんどなくなった地球上の海(または海底)のどこかで、自己増殖する「泡」ができた。そ



図1-18 地質年代表

出典: File:Earth Calendar.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_Calendar.jpg

の後、その泡は進化し、現在「細胞」と呼ばれるものになった。

その後、二酸化炭素は海へ溶けたり、風化によって岩石の一部になっ

| 52

たりして大気中から失われていった。
先カンブリア時代（46～5億年前）に「全球凍結」（スノーボールアース）が、「ヒューロニアン氷期」（24～21億年前）とその後何回か起こっている。光合成を行う生物が現れてから、海洋の二酸化炭素を吸収して酸素を放出することで、大気中の酸素濃度が上昇し、温室効果ガスであるメタン（当時はそれなりの濃度があったと考えられている）が酸素と反応して大気中から失われることで、寒冷化の引き金になったと多くの学者は推定している。

地球は、細胞レベルの生命ですら生き延びるのが厳しい状況になったが、火山活動のあったところではそれなりの温度があったため、生命は生き延びることができた。火山は二酸化炭素を排出し、海は凍っていたので、二酸化炭素は海へは溶け込まず、大気中の二酸化炭素の濃度が急激に上がり、全球凍結から脱したと考えられている。

古生代末の大量絶滅

「P-T境界」（古生代の最後に当たるペルム紀と中生代の最初に当たるトリアス紀の境界）と呼ばれる年代で、生物種の95%が「大量絶滅」したと言われる。

原因は、火山活動の活発化と考えられていて、二酸化炭素の増加やエアロゾルによる寒冷化が複雑に影響して、海洋が無酸素状態になるなど、環境が大きく変動したと考えられている。

中生代末の恐竜絶滅

恐竜の栄えた中生代は、現代よりも温暖であったが、これも二酸化炭素が現在よりも多かったことで説明されている。

白亜紀の終わり（約6600万年前）、ティラノサウルスやトリケラトプスなどの恐竜は、その時期まで繁栄の絶頂だったとする説と、ある程度は衰退していたとする説があるが、ともかく、ある日、突然落ちてきた直径10kmに上る巨大隕石が絶滅を招いたとされる。隕石衝突による爆風よりも、その後で大気に広がったエアロゾルが寒冷化を招き、そのことでまず植物が減り、植物を食べていた植物食の恐竜が減少し、それを食べていた肉食恐竜が減少したと考えられている。

新生代氷河時代

現在の氷河時代である第四紀氷河時代は更新世（約258万年前から）に始まり、北半球の氷床が拡大し始めた。それ以来、地球では4万年と10万年の時間スケールで周期的に氷床の発達と後退を繰り返していた。中緯度地域まで氷河や氷床に覆われるような、特に氷河の発達した寒冷な時期を「氷期」という。氷期と氷期間の温暖期で、相対的に氷河が縮小した時期を「間氷期」という。

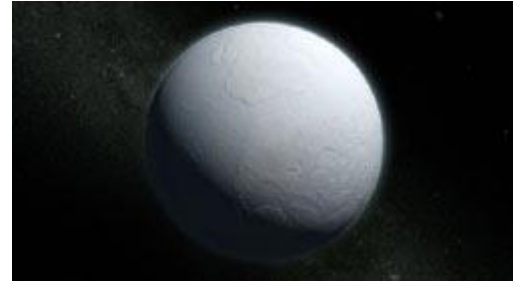


図1-19 スノーボールアース

出典：地球大進化 46億年・人類への旅 第2集 全球凍結 大型生物誕生の謎

<https://www6.nhk.or.jp/special/detail/index.html?aid=20040515>

最後の氷期（最終氷期）は約1万年前に終わり、その大陸氷床で現在まで残存しているのは、グリーンランド氷床と南極氷床、およびバフィン島にあるような比較的小規模な氷床である。温暖化の大きな要因が二酸化炭素濃度の変化にあると考えられている。

この時期（ヤングドリラス）には、北アメリカにあった氷床が解けることで大陸規模の大洪水が起こっていて、その淡水が大西洋にふたをする形で広がることで気候に絶大な影響を与え、数十年で16°C程度の寒冷化をもたらしたとされる。

現代も北極や南極に氷床などが見られるので、氷河時代であるが、比較的温暖であり、間氷期に属し、特に「後氷期」と呼ばれる。

700万年前から進化して現代に至る人類が自然に与えた影響は、多くの種の絶滅であり、新生代最後の「完新世」のあとに、現代を新しい地質年代「人新世」とすることが、多くの地質学者によって提案されている。

そして、「温暖化懐疑論者」が大きな問題とするのが、特に「中世」にあたる紀元後1000～1200年頃の気候である。

第7項 過去2000年の気温変化

古気候において、現代からもっとも短いスケールで、かつ、もっともはげしい論争を行っているのが、過去2000年の気温変化だと思われる。

18世紀（1701～1800）後半の産業革命から二酸化炭素の増加が始まり、それによって温暖化が起こっているのだから、産業革命前であれば、緩やかな変化しかないはずである。実際、よく知られているのがIPCC第三次評価報告書で提示された「ホッケースティック曲線」と呼ばれるグラフで、これは1000年ごろから2000年ごろまでの気温変化をグラフに示していて、変化がホッケースティックのように20世紀（1901～2000）で急に折れ曲がり、温暖化が人為的であることを非常に明確



図1-20 ティラノサウルス

出典：NHKスペシャル 完全解剖 ティラノサウルス
～最強恐竜 進化の謎～

https://www2.nhk.or.jp/archives/tv60bin/detail/index.cgi?das_id=D0009050550_00000

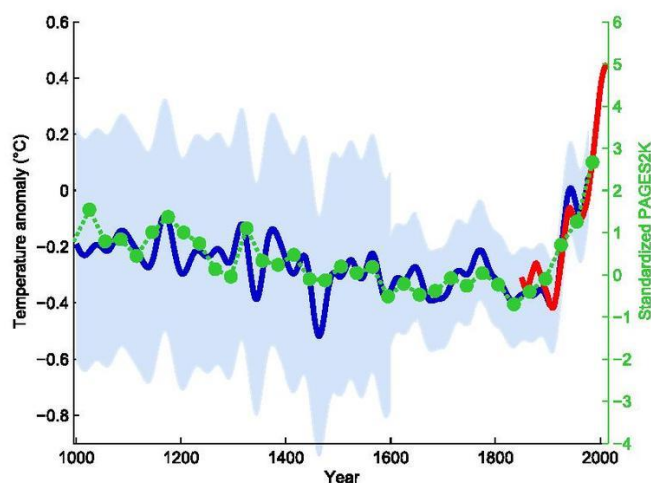


図1-21 ホッケースティック曲線

出典：File:T comp 61-90.pdf

From Wikipedia, the free encyclopedia

https://en.wikipedia.org/wiki/File:T_comp_61-90.pdf

に表すものとして大変有名になったが、一方で「懐疑論者」からは現在に至るまで攻撃の対象となっている。

[Wikipedia「ホッケースティック論争」](#)

古気候学者のマイケル・マンは木の年輪から過去 1000 年以上の気温変化を見積もった結果を発表した[1][2]。その過去の気温変化が 19 世紀以降の急激なカーブを示していたため、その気温変化の曲線が「ホッケースティック曲線」と呼ばれるようになった。その結果、マンは IPCC の第三次報告書の主要な書き手の一人に選ばれた。彼の再現結果は、今世紀の気温上昇が人為的であることを示す有力な証拠の一つともなり、IPCC をはじめ様々な分野で何度も引用されることになった。

(参考)

[Wikipedia「IPCC 報告書における中世温暖期と小氷期の記述」](#)

このグラフによって、これを作ったマイケル・マン氏自身も有名になったが、データの取り扱いに疑いがかけられ、その後、マン氏のホッケースティック曲線は「政策決定者向け要約」からはなくなり、同分野の研究をしていた他の 12 人の結果と共に第 4 次評価報告書・全文で示されることになった。その後も「懐疑論者」と対立して裁判になっている（マン氏が原告）など、懐疑論問題の中心人物の一人になっている。

現在の知見は次のようになっている。

[IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 \(PDF 5.4MB\)](#)

大陸規模の地上気温の復元によると、高い確信度で、中世気候異常期（950 年から 1250 年）の期間にはいくつかの地域で 20 世紀後半と同程度に温暖な数十年間があった。これらの地域的な高温期は、20 世紀後半における温暖化のようにいくつかの地域にわたって一貫して発生したものではなかった（高い確信度）。{5.5}

900~1250 年ごろに「中世気候異常」（MCA : Medieval Climate Anomaly）と呼ばれる時期があり、（以前は「中世温暖期」（Medieval Warm Period : MWP）と呼ばれていた）があり、1950 年代ごろの気温（すでに温暖化が進んでいた時期）と同程度の温度であったように見える西暦 1000 年あたりが「中世温暖期」にあたる。

これについて勉強していたとき、以下の記事を見つけた。これは「懐疑論」のひとつと言え、温暖化の科学について誤解をもたらす恐れがあるので、紹介する。

『中世は今ぐらい熱かった：IPCC の最新の知見』杉山 大志 キヤノングローバル戦略研究所／
IPCC 第6次評価報告統括代表執筆者（イノベーションとテクノロジー）

（引用者註：杉山大志氏の肩書について、環境省 HP に記載されている第6次評価報告書 国内連絡会メンバーには「元 WGIII 第16章 CLA」と記載されており、報告書発表前の現在の段階で役職を退いていると思われる。）

国際環境経済研究所

<http://ieei.or.jp/2018/04/sugiyama180409/>

第4次と第5次の評価報告書とで、以下のような図を提示している。十数本の曲線は、それぞれ別の研究者が過去2000年程度の気温再現したものである。見てわかるのが、それぞれの気温変動の結果がバラバラであることだ。現状では、産業革命より前の再現には、かなりばらつきがあることがわかるだろう。

確かに、[図1-22]のグラフを見ると、復元結果にばらつきがある。

しかし、複数の研究による復元結果にばらつきがあるから、中世の気候についてはあまりわかっていない、また、すでに一定の温暖化が進んでいるはずの現状の気温が、自然変動の範囲でも起こりうるのか

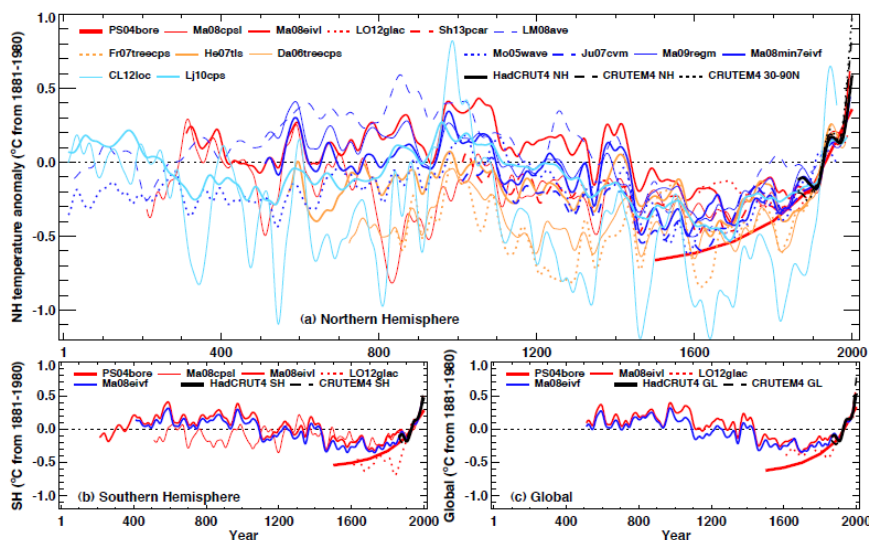


Figure 5.7 | Reconstructed (a) Northern Hemisphere and (b) Southern Hemisphere, and (c) global annual temperatures during the last 2000 years. Individual reconstructions (see Appendix 5.A.1 for further information about each one) are shown as indicated in the legends, grouped by colour according to their spatial representation (red: land-only all latitudes; orange: land-only extratropical latitudes; light blue: land and sea extra-tropical latitudes; dark blue: land and sea all latitudes) and instrumental temperatures shown in black (Hadley Centre/ Climatic Research Unit (CRU) gridded surface temperature-4 data set (HadCRUT4) land and sea, and CRU Gridded Dataset of Global Historical Near-Surface Air Temperature Anomalies Over Land version 4 (CRUTEM4) land-only; Morice et al., 2012). All series represent anomalies (°C) from the 1881–1980 mean (horizontal dashed line) and have been smoothed with a filter that reduces variations on time scales less than about 50 years.

図1-22 IPCC 第5次評価報告書 英語版・全文

出典：Climate Change 2013: The Physical Science Basis

5. Information from Paleoclimate Archives

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter05_FINAL.pdf

ら、第三次評価報告書（2001年）以来提示されてきた、1000年前までの気温変化の科学的な知見が揺らいでいる、とは言えない。

56 | まず、このグラフについて説明しておく、それぞれの研究結果は、[図1-22]の下の説明文に書かれている通り、「赤：陸のみのすべての緯度；オレンジ：陸のみの熱帯以外の緯度；水色：陸と海の熱帯以外の緯度；濃い青色：陸と海のすべての緯度」と、観測対象によって色分けされており²⁴、同じ色の地域を対象としている複数の研究も、研究手法が違ったり、対象とする緯度の範囲などが少しずつ異なったりしている。このグラフは「中世温暖期」などの傾向を示すことを目的としてひとつの図にまとめていると思われるので、変動のパターンまで同じ結果になることが必ずしも想定されていない。

ちなみに、一番大きい図が北半球、左下が南半球、右下が地球全体ということで、研究が陸地の多い北半球に集中していることがわかる。

また、IPCCの評価報告書に載っていて、杉山氏のサイトには記載されていない下のような図がある（→[図1-23]、第4次のもの。）

このグラフには、北半球における1000年～2000年の温度変化（復元）とともに、それぞれ「(a) Volcanic forcing」（火山強制）、「(b) Solar irradiance forcing」（太陽放射強制）「(c) All other forcing」（他のすべての強制）の変化が描かれている。「強制」（forcing）は、前に出てきた「放射強制力」と同じ意味である。ちなみに、これらの語は、日本ではあまり使われていないようだ。

特に、1000～1200年前後あたりの中世温暖期で「太陽放射強制」がやや強かったことがp.57 [図1-23]から読み取れる。

先ほど書いたように、太陽や火山は温暖化に影響しないと誤解している人もいるかもしれない（というか私がそうだった）が、特に「太陽放射強制」の変化は、地球の歴史において温度変化にそれなりの影響を与えている。グラフを見てもわかる通り、「太陽放射強制」や「火山強制」の変化と、色のついた線で描かれたシミュレーション結果、または灰色から黒でぬられた復元結果が比較的よく一致していることがわかる。

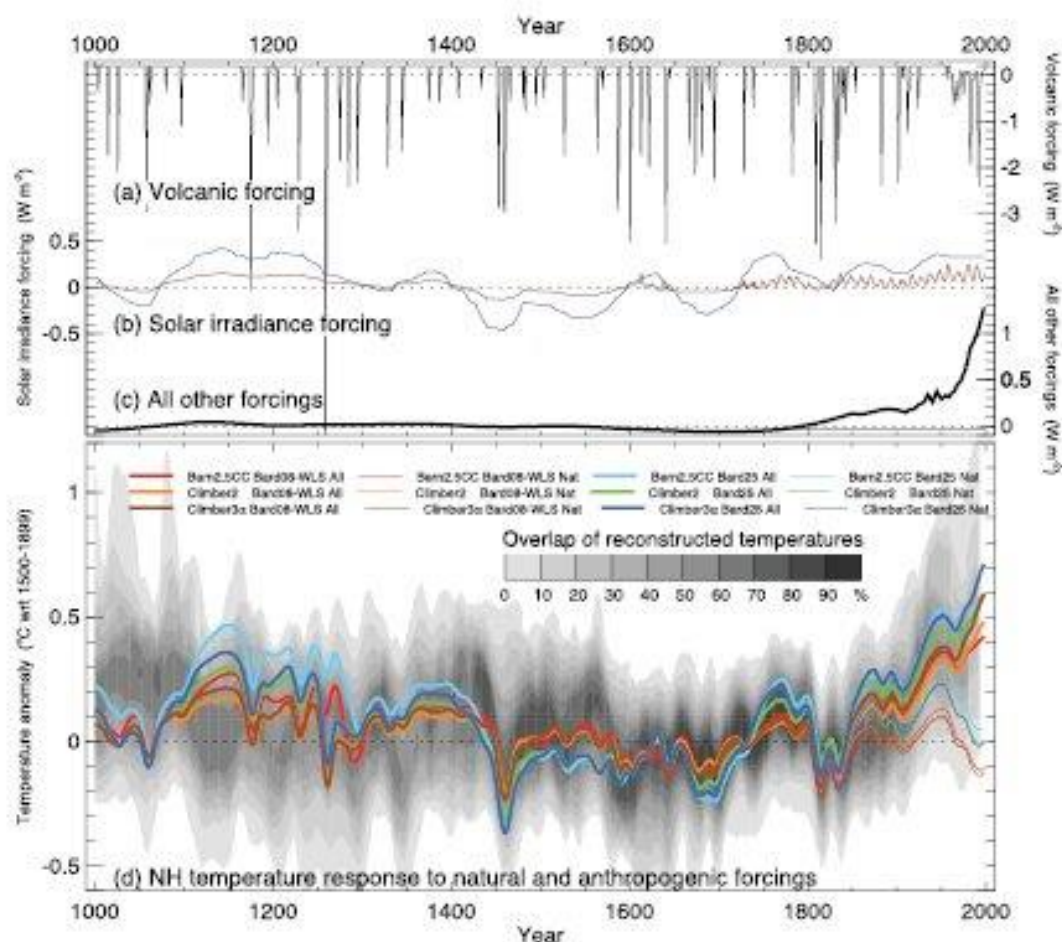


図 1-23 IPCC 第 4 次評価報告書 第 1 作業部会：自然科学的根拠（英語版・全文）

「(a) Volcanic forcing」(火山強制) や「(b) Solar irradiance forcing」(太陽放射強制) と気温変化の一致が比較的良好であることがわかる。

出典：Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis Chapter 6: Palaeoclimate

確かに「中世温暖期」は、20 世紀はじめ程度には温暖であったが、それは太陽活動が活発であったことによるところが大きく、一方、太陽活動が不活発になった 1645 年～1715 年ごろ（マウンダー極小期）は「小氷期」と呼ばれる寒冷な時期になっているので、温度変化の理由も一定レベルでわかっているのである。

ただ、「中世温暖期」（または「中世気候異常」）と、「小氷期」の温度差については、（あくまで私のグラフの読み取りだが）第 5 次評価報告書におけるグラフでは、「自然要因」によって 700 年程度で 0.3°C から大きくなって 0.4°C ほど（100 年で 0.057°C ）、の変化があることは言えるが、一方、第 5 次評価報告書に示されている「工業化前」の 1750 年から現在までの変化（250 年程度で 0.85°C 、100 年で 0.34°C ）に比べて大きくても 6 分の 1 程度といえる。

一方で、1900 年以降、「(b) 太陽放射強制」はやや高いものの、基本的に変化しておらず、それにもかかわらず気温は急激に上昇しており、「(c) 他のすべての強制」の増加（そのほとんどが、人間が排出した温室効果ガスによる）が主な原因と考えられる。このことは、1900 年代後半に、自然変動では想定されない気温の変化が起こっていることを示している。

しかも、グラフで描かれているのはあくまで2000年ごろまでであり、グラフには書かれていない2000年からは、1900年後半以降の上昇傾向がそのまま継続して2020年に至っている。(→p.96「図2-10 世界の年平均気温」) しかも、先ほど書いたとおり、もっとも最近の2008~2019年の第24太陽活動周期は歴史的にも太陽活動が弱かったとされ、2019年に極小期を迎えているにもかかわらず、このあたりの数年間は世界平均気温が最高を記録している。

ただ、西暦1000年あたりを見ると、確かに、太陽放射強制の変化と気温の変化があまり一致していないようである。杉山氏は、「なお、古気候の研究によっては、地球規模においても、中世の温暖期はもっと暖かかったとするものがある、という指摘もある(図4)。これが次回のIPCC第6次報告書(2020年)にどのように反映されるかは予断できない。」と言っていて、今後の中世気候異常の研究によっては、現在の温暖化の科学の基礎が揺らぐと考えているようだが、私の認識では、重要なのは温度変化そのものよりも、その変化率であり、先ほど述べたとおり、20世紀後半には、それ以前に比べて少なくとも6倍以上の温度変化が起きているのだから、「中世気候異常」が、これまでより2~3°C高い研究でも出ない限りは、基本的な知見は揺るがないのではないかと。

また、あまり知られていないようだが、2018年にIPCCが発表した「1.5°C特別報告書」(→p.35「第1章第1節第8項「第5次評価報告書 RCP シナリオ」と「1.5°C特別報告書」)は、以下の引用にある通り、「第6次評価サイクル」の枠組みとしてつくられたもので、2021年4月に発表される予定の「第6次評価報告書」(full report)が、最初の報告書の結論から大きく変わることは考えにくいと思われる。

国際連合広報センターHP

IPCC 特別報告書『1.5°Cの地球温暖化』の政策決定者向け要約を 締約国が承認 (2018年10月8日付 IPCC プレスリリース・日本語訳)

プレスリリース 18-072-J 2018年10月16日

https://www.unic.or.jp/news_press/info/30738/

『1.5°Cの地球温暖化』は、IPCCの第6次評価サイクルで作成が見込まれる一連の特別報告書のうち、第1弾となるものです。来年、IPCCは『変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書』および『気候変動と土地』を発表し、気候変動が土地利用に及ぼす影響を取り上げる予定です。

このサイト、他にも記述がおかしいところがある。記事には、「最新の第5次評価報告書では北半球において中世の温暖期(今のIPCCの言葉では中世気候異常と呼ばれているけれども)が存在したことが明記されている。」と書いてある。

実際、第5次評価報告書の「政策決定者向け要約」に中世気候異常が記載されているので、文章を素直に読むと、最近(2013年ごろ)になって「中世温暖期」(または「中世気候異常」)が認識されたような印象を受けるが、「中世温暖期」については第4次評価報告書(2007年)の本文(full report)にも書いてあるので、説明として妥当でない。

以下の引用の通り、「第6章 古気候 6.1 はじめに」中で「Medieval Warm Period」と記載されている。しかも、章の最初に紹介していて、評価報告書が「中世温暖期」をかなり重視していることがわかる。

基本的には、その前の第3次評価報告書（2001年）の「ホッケースティック曲線」も、グラフをつくったマイケル・マン氏が「中世温暖期」の存在を示しているとしている。

IPCC 第4次評価報告書 第1作業部会：自然科学的根拠（英語版・全文）

出典：Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis

Chapter 6: Palaeoclimate

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf

6.1 はじめに

この章では、古気候データと、気候システムが年間から千年の時間スケールでどのように変化し、これらの変動を気候モデルでどの程度うまくシミュレートできるかに関する知識を評価します。その他の章には、古気候の視点が含まれています。

古気候科学は、氷河期の起源、差し迫った将来の氷河期の可能性、いわゆる小氷期と中世温暖期の最初の探査に主な焦点を当てた1970年代以来、大きな進歩を遂げてきた。最初のIPCC評価（IPCC、1990）でさえ、器械記録に先立つ多くの気候変動は、それほどよく知られたり理解していなかった。15年後、理解ははるかに改善され、より定量的で、観察とモデリングに関してより良い統合されています。

6.1 Introduction

This chapter assesses palaeoclimatic data and knowledge of how the climate system changes over interannual to millennial time scales, and how well these variations can be simulated with climate models. Additional palaeoclimatic perspectives are included in other chapters.

Palaeoclimate science has made significant advances since the 1970s, when a primary focus was on the origin of the ice ages, the possibility of an imminent future ice age, and the first explorations of the so-called Little Ice Age and Medieval Warm Period. Even in the first IPCC assessment (IPCC, 1990), many climatic variations prior to the instrumental record were not that well known or understood. Fifteen years later, understanding is much improved, more quantitative and better integrated with respect to observations and modelling.

（註：傍線引用者）

もう少し説明しておく、温度測定の歴史は、（私の感覚では）意外に遅く、ガリレイの時代（16世紀（1501～1600）の終わり）が出発点になるようである²⁵。つまり、ガリレイの時代より以前は、「温度」という概念がそもそもなかった。

評価報告書などで「機器温度」が記載されているのは19世紀（1801～1900）中盤以降（おそらく機器の精度や測定場所の分布などが、世界平均気温の測定値として妥当だと認定されて以降）である。つまり、「ホッケースティック論争」が問題としている「中世温暖期」に当たる1000～1200年当時に、文書などで寒暖

の記録は残っているかもしれないが、温度計がない以上、定量的な比較はできないため、自然に存在する年輪や氷床コアと呼ばれる、氷床や永久凍土の標本を用いて用い、しかも地球全球または半球の温度を推定するしかない。

つまり、そもそも推定が難しい時代を扱っているといえ、全地球（半球）規模で、気温の平均を取るのはかなり困難な作業であることが想像される。

マイケル・E・マン『地球温暖化論争 標的にされたホッケースティック曲線』
(化学同人、2014年) pp.42-43

最も広く用いられている代替データは樹木の年輪だ。地域や環境にもよるが、樹木の成長は生育時期の状況による。例えば、生育期間（通常は夏）の暖かさや、雨季の降水量だ。したがって、年ごとに成長する年輪（年齢の幅や場合によっては形成された樹木の密度）を解析すれば、過去についての見通しが得られる。

しかし、樹木の年輪には、木が育つ陸地部でしか得られないという明らかな限界がある。南半球はほとんど水に覆われているのでそれが重大な欠陥になるし、北半球にも問題はある。ツンドラや氷に覆われている両極域にも年輪データはない。一般的な熱帯樹種にも年輪はないので（信じられない人はヤシの木の切り株を見てほしい）、熱帯地域の代替データにはなりえない。したがって、年輪代替データで気候を調べられるのは中緯度の陸地部に限られ、その他の地域はカバーできないが、幸いにも他の代替データがその役割を担うことができる。

サンゴは主に熱帯地域の海にあるため、カバーする地域という意味では樹木の年輪と相補的だ。サンゴは炭酸カルシウム (CaCO_3) でできた骨格の層（年輪）を作る過程で炭酸イオン (CO_3^{2-}) として酸素原子を吸収する。酸素には安定した同位体がふたつあるが（ほとんど全部を占める軽い ^{16}O とごく少量しかなくて重い ^{18}O ）、年輪の同位体比率は海水面近くの水温と塩分濃度（主に降雨に影響される）に関係していることがわかっている。その他に、年輪のストロンチウムとカルシウムの比などの化学的測定からも、補完的な気候情報が得られる（温度が上がると比率が下がる傾向がある）。

樹木の年輪もサンゴの記録もない極地域では、氷床というまた違う代替データが役に立つ。氷床中の ^{16}O と ^{18}O との酸素同位体比によって、雪や氷ができた当時の大気温を知ることができる。他にも、氷床から取り出せる塵埃の層や微量化学成分などの情報から、過去の気候の推移やその原因（火山の爆発や太陽放射の変化等）など、多くのヒントを得ることができる。高緯度に位置し、お盆の形をした湖の堆積物コアからは、気温の季節変化がわかる。雪解けの季節にどれだけの堆積物が湖に流れ込むかが気温の季節変動に関係するからだ。

第3節 地球のエネルギー収支

第1項 エネルギー収支図 (やや難)

温室効果を理解するためには、「地球表面」「大気」「宇宙空間」の間を電磁波の「放射」によってエネルギーが行き来してそれぞれが一定の温度で安定している状態を考える。(この状態のことを「放射平衡」という。)

また、エネルギーは放射だけでなく、「伝導」「対流」など(顕熱)または「凝結(水蒸気が水になる)・凝固・昇華」(潜熱)などによっても行き来し、それによってそれぞれの温度が決まってくる。

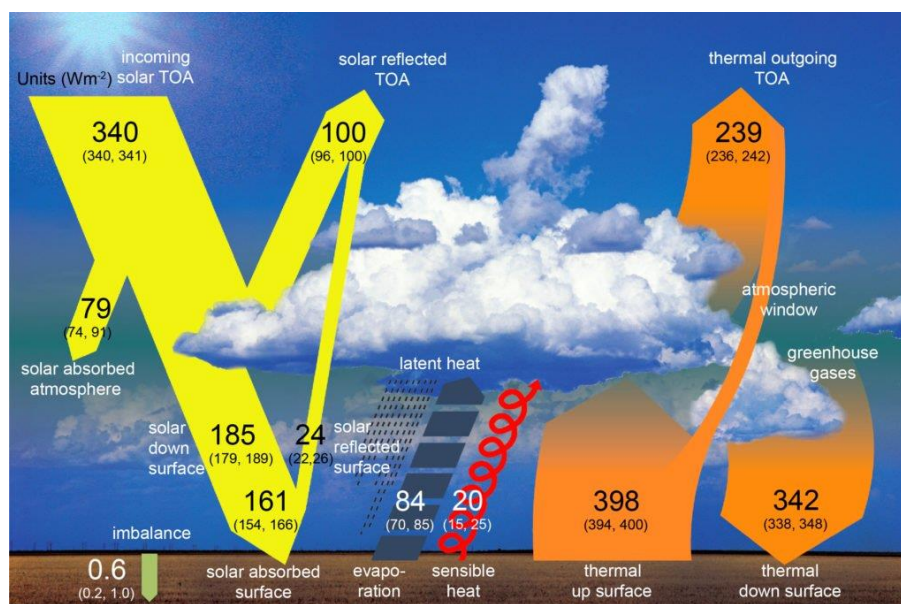


図1-24 IPCC第5次評価報告書 英語版・全文

出典：Climate Change 2013: The Physical Science Basis

2. Observations: Atmosphere and Surface

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf

この収支は、比較的単純な足し算になっているので、高校地学の問題演習の題材にもなっている。実際には、研究組織によって収支の数値には違いがあるし、研究の進展によって変わってもきている。

仮に、この図の地面に人が立っていたら、太陽光だけでなく、大気からと地面からの放射(主に赤外線)、空気を介した熱移動によってエネルギーを受けていることになる。

この「地球のエネルギー収支」について、帝塚山学院大学教授の薬師院仁志氏は、専門が教育社会学でありながら、著書である『地球温暖化論への挑戦』(八千代出版、2002年)で、温暖化の科学の基礎的なところにまで踏み込んで「温暖化懐疑論」を展開した。この著書は、ハードカバーで分量も大変多く、当時はかなり話題になったようで、その後、薬師院氏は、温暖化懐疑論者の代表格として、よく知られるようになる。

薬師院氏は、気候学者のステイブン・シュナイダー氏が『地球温暖化の時代』（ダイヤモンド社、1990年）の中で紹介した「地球のエネルギー収支」（図1-25）に関して、次のような疑問を呈している。

薬師院仁志『地球温暖化論への挑戦』（八千代出版、2002年） p.260

また、温室効果全体に目を向けて考えてみると、また、別の疑問が湧いてくる。なぜなら、温室効果はすでに充分働いており、これ以上どのような温室効果ガスが増加しようとも、あまり大した影響はないように思われるからである。このことを考えるに当たって、シュナイダー氏が作成した図（図2-16）を見てみよう。この図によると、地表からの放射されるエネルギーが一〇〇単位、トラップされるエネルギーが一〇四単位、そのうち、雲や温室効果ガスによって大気中にトラップされるエネルギーが一〇〇単位、トラップされずにそのまま宇宙空間に逃げていくエネルギーが四単位、トラップされたものの結果的に宇宙方向に再放射されるエネルギーが（一〇〇単位のうち）一二単位、最終的に地表方向に再放射されるエネルギーが八八単位となっている。

（中略）

つまり、「地表からの放射のほとんど」がすでにトラップされているのであり、大気を素通りして宇宙へ逃げているエネルギーは、一〇四単位のうちの四単位（約三・八％）に過ぎない。ということは、これ以上いくら温室効果ガスが増えようとも、この四単位分を超えるエネルギーを吸収することはないということになる。また、たとえ四単位分のエネルギーがすべてトラップされたところで、それがすべて地表方向に再放射されるわけでもない。いずれにせよ、温室効果自体は、あと約三％強程度しか高まる余地はなく、少なくとも無際限に働くようなものではないのである。このよ
うなことは、専門知識に属するようなものではない。（註：傍線引用者）

確かに、地球から放射されたエネルギーの「透過」が（4）となっている。薬師院氏の主張によれば、吸収が増えたとしてもこの4％以内に留まるというわけである。実は4％でも、温室効果としては結構重要なのだが、それ以前に、「透過が減少して、その分が温暖化する」という前提自体が間違っている。仮に透過が最初から0で、温室効果ガスの増加によって透過が減少しないと仮定しても、温暖化は説明できる。（註：ここでは、あくまで、透過が重要な要素かを考えるのであって、実際に透過が減るかどうかを議論するのではない。）

薬師院氏自身も書いているが、衛星は、地球表面から出る放射だけでなく、大気の放射、大気の反射などを観測するのであり、何も、透過した地球放射だけを観測しているのではない。

[図1-25]の図を見るとわかるが、地球および大気から宇宙空間に出ていく放射は次の通りとなり、全体で100％となって、太陽からの放射（100％）と同じとなる。

- ・地球表面と大気・雲などで反射された太陽放射（主に可視光線だが一定量の赤外線がある）（30％）
- ・大気の窓を通り地球表面から“透過”した地球放射（4％）
- ・大気による放射（ほとんどが赤外線）（66％）

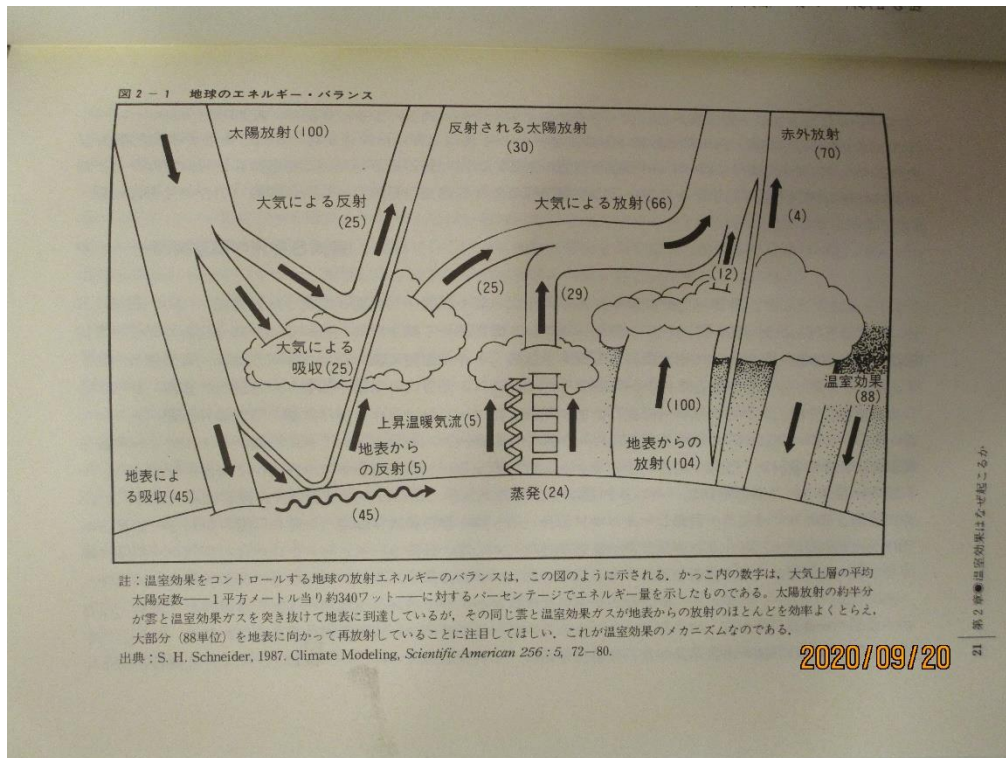


図 1-25 地球のエネルギーバランス

出典：スティーブン・シュナイダー『地球温暖化の時代』（ダイヤモンド社、1990年）p.21

[図 1-25] では地球放射が大気を透過するのが 4%であるのに対し、宇宙空間へ向けての「大気による放射」は、66%となっているので、こちらの方が割合としては圧倒していることになる。透過した地球放射は、気象衛星が観測する放射のうちわずかであることは、薬師院氏が指摘している通りである。（この図だと、雲から放射しているように描いてあるが、実際には図の雲は、雲とエアロゾルなどを含んだ大気全体を指す。）

一方、「地表からの放射」（104%）に目を向けると、透過 4%を除いた大気への吸収分は、宇宙空間へ放射するのは 12%に対し、地表に放射するのが 88%で、地表から受け取ったエネルギーの大半を（反射ではなく）地球に戻すことになる。

第2項 気層モデル（難）

ここでは、温室効果を説明する標準的なモデルを紹介する中で、透過量をゼロとして、薬師院氏が主張するのは違って、透過とは関係なく、温室効果が増大しうことを示す。

大学の教科書などに使われる学術書では、次のようなモデルを考える。（ここでは、元・東京学芸大学名誉教授・松田佳久氏の『気象学入門』（東京大学出版会、2014年）を参考にする。）

p.38「第1章第1節第9項 エネルギーとその単位（後半やや難）」のところでも説明したが、これらの

物体どうしのエネルギーの受け渡しを考えるため、高校理科では扱わない次の数式を利用する。この公式は、「ステファン・ボルツマンの法則」(→p.38「第1章第1節第9項 エネルギーとその単位 (後半やや難)」)と呼ばれる法則から導かれ、地球や大気の質量などを考えることなく、その物体の温度だけで放射エネルギー量の計算ができるので都合がよい。「黒体」と仮定した気層は、絶対温度 T (K) を持っている、気層の質量や物質の種類に関係なく、上下方向に同じ強さで、 T の4乗に比例するエネルギーを「放射」する (放射エネルギー： E (W/m²)、物体の絶対温度： T (K)、比例定数 (ボルツマン定数)： $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)。

$$E = \sigma T^4$$

「地球のエネルギー収支」の図を見ればわかるとおり、実際には、地球表面は大気に向けて上昇気流 (顕熱)、凝結 (潜熱) などの熱の移動が存在するが、今回の気層モデルでは考慮しない。太陽光には赤外線も含まれているので、大気での吸収が存在するが、それも考慮しない。この項の目的のため、地球放射の大気の透過も考慮しない。

一層モデル

[図 1-27] の一層モデルを見るとわかるように、大気は1枚の板で描かれている。当然、実際の大気はそうではない。大気は地球表面あたりから高い濃度で存在していて、上空にいくにつれて、だんだん濃度が低くなっていく。高校レベルの数式で計算するための、あくまで単純化したモデルである。

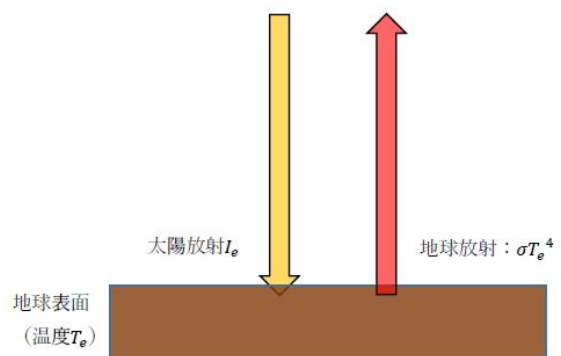


図 1-26 大気がないと仮定した場合の太陽放射と地球放射

(大気がないと仮定した場合) (→「図 1-26」)

太陽放射エネルギー (I_e とする) は、地球表面に吸収され、地球表面も I_e と同じ量のエネルギーの放射を行うことで T_e の温度で安定する。ステファン=ボルツマンの法則より、以下の式が成り立つ。

$$I_e = \sigma T_e^4 \dots (0)$$

(大気ありと仮定した場合)

地球表面：

太陽放射エネルギー (I_e) は大気を完全に透過し、すべて地球表面に入射すると仮定する (実際の大気では反射も吸収もある)。温度 T の「気層」からの入射があり、地球表面は T_g の温度によって、「気層」へ σT_g^4 のエネルギーを放射する。

気層：

「気層」は、太陽放射をすべて透過し、「気層」の温度 T に応じた上向きと下向きに同じエネルギー量の放

射を行い、地球放射のエネルギーを完全に吸収する。

地球表面： T_g 、気層： T のそれぞれが、エネルギーの受け渡しの中で、ある温度でバランスが取れて安定し、「放射平衡」の状態になる。 I_e と σ を定数とし、 T_g 、 T を未知数とした2元の連立1次方程式となるので、高校物理レベルで数式計算できる。

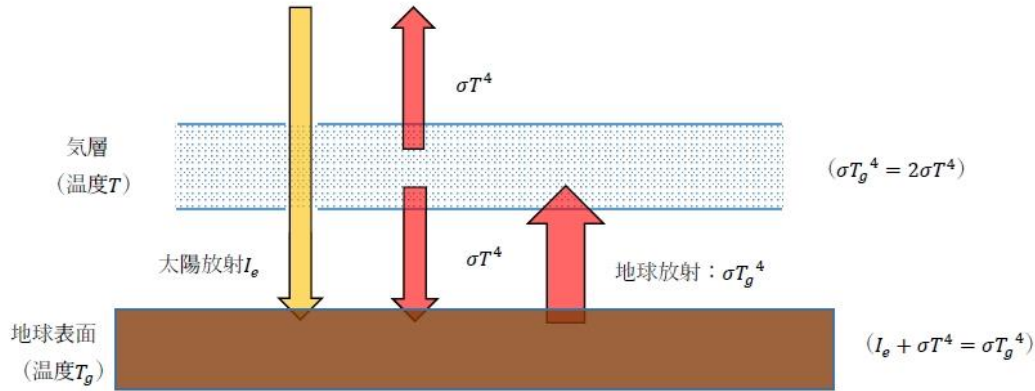


図 1-27 一層モデルによるエネルギー収支 (放射平衡)

$$\text{(気層)} \quad \sigma T_g^4 = 2\sigma T^4 \quad \dots (1)$$

$$\text{(地球表面)} \quad I_e + \sigma T^4 = \sigma T_g^4 \quad \dots (2)$$

$$(2)\text{式に}(1)\text{式を代入して} \quad I_e + \sigma T^4 = 2\sigma T^4 \Leftrightarrow \sigma T^4 = I_e \quad \dots (3)$$

$$(1)\text{式に}(3)\text{式を代入して} \quad \sigma T_g^4 = 2I_e \quad \dots (4)$$

$$\therefore (3) \Leftrightarrow T = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} I_e} \quad (4) \Leftrightarrow T_g = \sqrt[4]{\frac{2}{\sigma} I_e}$$

それぞれ、大気なし、大気（気層）ありの場合における地球表面の温度を表す(0)式と(4)式を比較すると、 $T_g^4 : T_e^4 = 2 : 1$ 、すなわち、 $T_g : T_e = \sqrt[4]{2} : \sqrt[4]{1}$ （4乗根の比）だから、 $T_g > T_e$ になることがわかる。大気がないと仮定したときの地球表面温度（平衡放射温度）が $T_e = 255(\text{K})$ （ -18°C ）としたとき、 $T_g = \sqrt[4]{2} T = 1.19 T_e = 255 \times 1.19 = 303(\text{K})$ 、すなわち 30°C になる。現実の地球表面温度は 15°C 程度と考えられているので、やや高い値になるが、これは大気を単純化していることを考えれば、おおむね現実の大気に近い値が出ていると言える。

実際には、大気は上層に上がるにつれて温度が低下するが、これは大気の大気対流などによる影響が大きいと考えられている。

実際の「地球のエネルギー収支」のモデルを見ると、大気上層と下層の温度差から、「大気」（全体）の上向き（宇宙空間向き）に対して下向き（地球表面向き）の方が、放射量が大きくなっていることがわかる（「宇宙への大気放射」 $<$ 「地球表面への大気放射」）。

二層モデル

大気中の二酸化炭素が増加することは、気層の数が増加することに当たると考える。

66 気層を2枚として、それぞれの温度を上層から T_2 、 T_1 、地球表面温度を T_g' とする。一層の時と同様に、気層を二層にしたモデルについて計算すると、次のようになる。

(地球表面)

太陽放射エネルギー (I_e とする) は大気を完全に透過し、すべて地球表面に入射すると仮定する (実際の大气では反射も吸収もある)。温度 T_1 の「気層1」からの入射があり、地球表面は T_g' の温度によって、「気層1」へ $\sigma T_g'^4$ のエネルギーを放射する。

(気層)

上と下それぞれの「気層」は、その温度 T_1 (下層)、 T_2 (上層) に応じた上向きと下向きに同じエネルギーの放射を行い、それぞれの上下から来る放射エネルギーを完全に吸収する。

地球表面： T_g' 、気層 (下層)： T_1 、気層 (上層)： T_2 のそれぞれが、エネルギーの受け渡しの中で、ある温度でバランスが取れて安定し、「放射平衡」の状態になる。 I_e と σ を定数とし、 T_g' 、 T_1 、 T_2 を未知数とした3元の連立1次方程式となるので、先ほどと同様に高校物理レベルで数式計算できる。

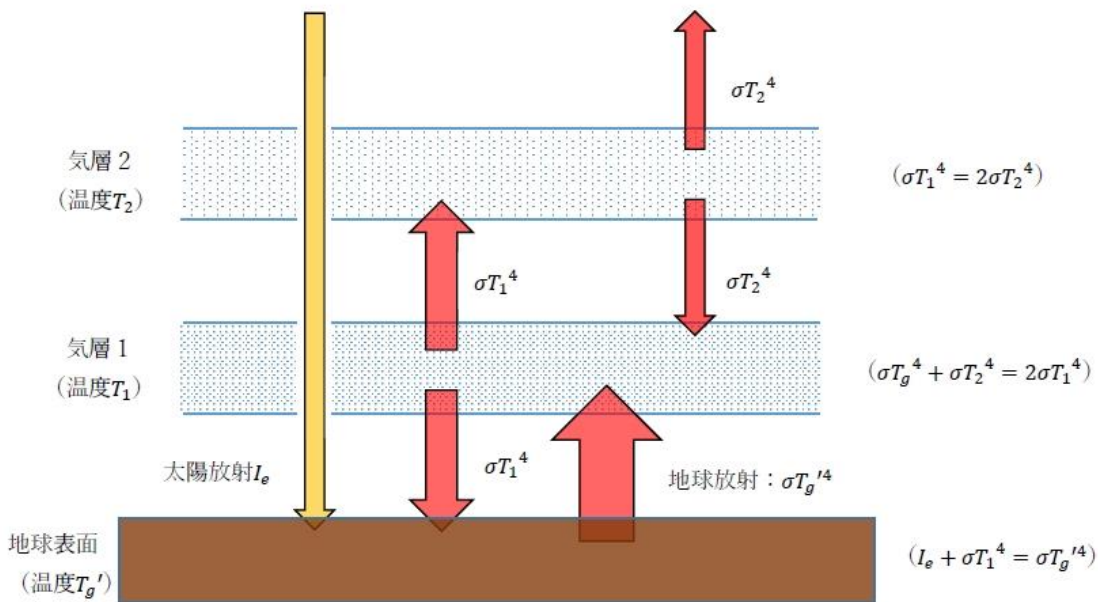


図1-28 二層モデルによるエネルギー収支 (放射平衡)

一見、複雑に見えるが、 $\sigma T_g'^4 : \sigma T_1^4 : \sigma T_2^4 : I_e = 3 : 2 : 1 : 1$ となる。

- (気層2) $\sigma T_1^4 = 2\sigma T_2^4 \quad \dots (1)$
- (気層1) $\sigma T_g'^4 + \sigma T_2^4 = 2\sigma T_1^4 \quad \dots (2)$
- (地表) $I_e + \sigma T_1^4 = \sigma T_g'^4 \quad \dots (3)$

$$(2) \text{式に}(1) \text{式を代入して} \quad \sigma T_g'^4 + \sigma T_2^4 = 2 \times 2\sigma T_2^4 \Leftrightarrow \sigma T_g'^4 = 3\sigma T_2^4 \dots (4)$$

$$(3) \text{式に}(1)、(4) \text{式を代入して} \quad I_e + 2\sigma T_2^4 = 3\sigma T_2^4 \Leftrightarrow \sigma T_2^4 = I_e \dots (5)$$

$$(1) \text{式に}(5) \text{式を代入して} \quad \sigma T_1^4 = 2I_e \dots (6)$$

$$(4) \text{式に}(5) \text{式を代入して} \quad \sigma T_g'^4 = 3I_e \dots (7)$$

$$\therefore (5) \Leftrightarrow T_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} I_e} \quad (6) \Leftrightarrow T_1 = \sqrt[4]{\frac{2}{\sigma} I_e} \quad (7) \Leftrightarrow T_g' = \sqrt[4]{\frac{3}{\sigma} I_e}$$

一層モデルと二層モデルにおける地球表面温度を比較すると、 $T_g' > T_g$ となり、二層モデルの方が、地球表面温度が高くなるのが理論的にわかる。これが、大気中の二酸化炭素が増加した場合、地球表面温度が上昇することの説明である。

上記の一層モデルも二層モデルも、地球放射が気層を透過するとは仮定していないが、一層モデルにしたときよりも二層モデルにしたときの方が、地球表面温度が高くなるので、葉師院氏が主張するような、透過が減るといような前提なしに温暖化を説明することができる。

先ほど述べたとおり、ここで提示したモデルは、学術的に確立したモデルではあるものの、大気をかなり単純化しており、実際の気層は、このように不連続な層の集合体ではなく、下層から上層に向けて連続的に濃度も温度も下がるし、各気層は、実際には地球放射を一定量は透過する。このほか、対流（顕熱）や蒸発・凝結（潜熱）による熱（エネルギー）の移動があるなど、実際の気層はこれよりはるかに複雑である。

ちなみに、これを応用して、気層が二層よりも多い n 層（ $n = 3, 4, 5, \dots$ ）としたモデルを考えると、地球表面温度は以下のようになる。

$$T_g'' = \sqrt[4]{\frac{n+1}{\sigma} I_e}$$

この式の n を大きくしていけば、理論上、地球表面温度は無限に上昇することになる。実際の地球ではこのようなことはあり得ず、今回の計算で透過を0とした前提などを変えなければならないが、金星のような、大気圧が地球の90倍、二酸化炭素濃度が90%という桁外れの気層は、地球（ $n = 1$ 程度）よりはるかに多くの気層（ $n = 100$ 程度）が存在することに当たり、 n が大きくなれば、 T_g'' はいくらでも大きくなるから、金星の地表面が 480°C 程度になっていることを、ごく大雑把な議論ではあるが、説明することができる。

最初の話に戻る。

葉師院氏は温室効果の増大が、大気の「透過率」の減少によるものだと考えて、一定以上の温暖化は起きないと考えた。しかし、上記モデルで説明した通り、透過を全く仮定しなくても温暖化を説明することがで

きる。

薬師院氏は、何を間違ったのだろうか？

おそらく、薬師院氏は、温暖化によって地球放射が大気を通過する過程で、「大気」がより多くの赤外線を吸収することで、「大気」が温度上昇する（これはあっている）と考えたのだと思われる。確かに大気は温度上昇するが、大気が温まることによって、大気から地球表面に向けての放射が増え、地球表面の温度が上がることで、地球表面から大気への放射量が全体に増加することが考慮に入っていない。

大気の温度変化にしか意識が向けられていないから、温室効果に限界があるという発想になる。p.33「第1章第1節第7項 気温」のところで書いたように、気温は、正確には「地上気温」といい、温暖化の本質は、大気の温度だけでなく、「地球表面温度の変化」にある。実際、海面上昇や熱波、温暖化の問題の多くは地球表面上で起こる温度上昇によって生じる問題である。

第3項 「飽和論」 (やや難)

「温暖化懐疑論」には、温室効果ガスはすでに一定量以上に達していて、ほとんど赤外線を吸収しており、仮にそのあとに温室効果ガスが増加しても、それ以上は赤外線を吸収しないという主張がある。

これを主張する人は、このことを「飽和」と言っている。これによって温暖化は、これ以上は起きないとする主張を「飽和論」と呼んでいる。

簡単なイメージとして、地球放射による赤外線 100 に対して現状で水蒸気や二酸化炭素が 100 を吸収する能力があるとする。その後、二酸化炭素が 2 倍に増大しても、赤外線は 100 だけ吸収がされているから、残りの 100 の分の赤外線は吸収されないで透過するので温室効果は増加しない、というイメージである。

薬師院氏は、そもそも赤外線の増加が 4 % であり、その 4 % も透過の領域によって吸収されないはずだ、ということであるから、「飽和論」の一種と言えるだろう。

あとの p.135「第3章第2節第4項 論文発表後」で紹介する通り、「飽和論」は、1896年に地球温暖化を予測したスヴァンテ・アレニウスに対する反論として、かなり早くから登場している。

二酸化炭素の「飽和」現象自体は、クヌート・オングストローム（単位 Å (オングストローム、 $=10^{-10}\text{m}$) の由来となったアンデルス・オングストロームの子) によって、実験室においては確認されていて、しばらくは温暖化を否定する根拠の一つとなっていた。

オングストロームの助手のコッホ (Herr J. Koch) は、 CO_2 の濃度を最初の量から 3 分の 1 減少させることによって、赤外線の吸収に目に見える変化が観察できなかつたとした。測定の方法が十分ではない上に精度が低く、赤外線の吸収量の変化を 0.4% に満たないとみていたが、実際には 1% 程度は減少していた。1% の検出を見出したとしても、オングストロームの当時の理論では、それを重視しなかつたであろうと考えられている。現在ではこの 1% が、「飽和」を否定する、当時の実験方法で検出可能な証拠だつたと考えられている。

そもそも、きわめて広い領域を持ち、非常に低い濃度の水蒸気と二酸化炭素しか含まない現実の大気を実験室で再現することは不可能であり、実験から得られた結論を現実の大気に簡単に当てはめることはできないため、「飽和論」は仮説の域を超えるものではなかつたはずだが、当時はそうした認識は広がらなかつたよ

うだ。

「飽和論」を否定する最も簡単な説明は、二酸化炭素が増えれば、放射・吸収過程の回数が増えることで、赤外線エネルギーが大気中に維持されることになるので、二酸化炭素が増えれば増えるほど、大気中のエネルギーが増幅するということ。これは、仮に二酸化炭素の分子レベルの「飽和」があったとしても、大気全体として飽和しない²⁶ことを表している。

また、原子物理学に基づいて波長ごとの吸収を精密に分析すると、オングストロームなどの初期の分析とは異なり、水蒸気と二酸化炭素では吸収に違いが存在し、二酸化炭素が増加することで温室効果は強まることになる。

さらに、対流圏に比べて成層圏では水蒸気の量が非常に少ないが、二酸化炭素は成層圏まで幅広く分布することが知られていて、対流圏上層や成層圏のような低圧の状況は、オングストロームやコッホが実施した実験とは異なり、上記の状況が強く現れ、温室効果は強まる。

このあたりを理解するためには、原子および分子軌道を解析するための専門的な数値計算が必要で、1950年代に、原子物理学の発展によって、吸収する波長帯を詳細に分析することによって「飽和」は起こらないことが理解された。こうした「飽和論」の検討に、温暖化の科学は50年近く要しており、そのほか、温室効果にフロンやメタンなどもそれなりの影響力があり、それらの気体は、吸収帯が異なることから、その要素も検討しなければならないなど、水蒸気や二酸化炭素以外の要素を考慮に入れなければならないため大変複雑であり、このことから、「飽和論」を否定する理論を専門外の人が理解するのが困難であることがわかる。

このように「飽和論」の厳密な反論は明らかに私の知識を超えるので、トップの温暖化の科学者の方々の代表的な反論にゆずる。

(参考)

地球温暖化への懐疑論に関する考察 増田 耕一増田 耕一, 明日香 壽川, 吉村 純, 河宮 未知生, 2006
日本の科学者, 41, 492 - 497.

<http://macroscope.world.coocan.jp/ja/essay/kaigiron.html#note12>

東北大学 環境科学研究科 環境科学政策論 教授 (兼任) 明日香 壽川 (あすか じゅせん)

「地球温暖化懐疑論批判」 議論 27

http://www.cneas.tohoku.ac.jp/labs/china/asuka/_src/sc362/all.pdf

第4節 コンピューター・シミュレーション

第1項 なぜコンピューターを使うか

| 70

温暖化の科学が提起した科学論的な問題として、これまで見てきたような自然現象の科学に加え、現代社会に大きな影響を与えている科学的「手段」である、コンピューターの問題について考えていきたい。

先ほども紹介した、『地球温暖化論への挑戦』（→p.61「第1章第3節第1項 エネルギー収支図（やや難）」）において、薬師院氏は次のようなことを書いている。

薬師院仁志『地球温暖化論への挑戦』（八千代出版、2002年）（p.23）

しかも、ハンセン氏が示したのは、充分とか不十分とか言う以前に、そもそも———少なくとも伝統的な意味での———科学的証拠などではない。彼は、「われわれのコンピューターによる気象シミュレーションによれば、温室効果は、夏の熱波のような異常気象を起し始めるのに十分なほど大きくなっている」と述べたのである。言い換えれば、「九九%発言」の根拠は、「コンピューターによる気象シミュレーション」、つまるところ予言機械の予言なのだ。通常自然科学観に立つならば、このような予言は、単なる仮説として取り扱われるべきであろう。実際、どのような学説であれ、厳密な経験的実験や実地検証を経てからでなければ、信頼に足る科学的根拠を認められてはこなかった。この点に関しては、科学者の頭脳で考えた学説であれ、電子頭脳で考えた学説であれ、区別はできないはずなのである。

薬師院氏が持ち出した「ハンセン氏」の「九九%発言」とは、1988年に起こったアメリカの干ばつなどの原因について検討するアメリカの上院公聴会（議会などが専門家などから意見を聞く場）において、上院議員、ティモシー・ワース氏の質問に対して、米国航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙研究所ディレクター、ジェームズ・エドワード・ハンセン氏が、1980年の温度上昇が偶然でないこと（すなわち二酸化炭素濃度の増加に原因があること）を「九九%」確信していると発言したことを指す²⁷。

この発言は、アメリカのみならず、世界中に大きな衝撃を与えたという。

この公聴会によって、初めて温暖化が政治的に重要な問題であるという認識が明確に示され、国際社会が温暖化対策に動き出すきっかけともなったが、一方で、温暖化の科学に対して批判的な見解を持つ人々が強い反論を行う動機付けにもなったようだ。その一つが、温暖化の科学が、100年以上も先の予測を、コンピューターが行っているという事実である。（ちなみに、ハンセン氏は、1987年までの10年間の高温の原因の可能性が99%と言ったのであって、将来の温度変化について言ったわけではない。）

当時としては「コンピューター・シミュレーション」は、まだ、新しい科学的手法であったこともあり、そうした科学に対して、多くの人が相当な抵抗感を抱いたことを薬師院氏の発言は示している。こうした認識は、実は現在でも少なくない。

しかし、実際のところ、地球温暖化の科学は、薬師院氏が主張するような、コンピューター・シミュレーションが作り出した科学ではない。

そもそも、自然現象の分析にコンピューターを使うといっても、当然ながら、その前提まで、すべてコンピューターによって研究しているわけではない。

温暖化の科学の基礎は、コンピューターなどはなかった125年前には、ある程度できていたことが知られている。その後の温暖化研究は、科学的な問題点の追及や、検討されなかったより細かい部分を検討する（当然それはアレニウス、カレンダーの見解を覆す目的を含む）作業であり、コンピューターがその一つであったわけだが、結局、人工衛星を含む最新技術による検証によって、一定レベルの修正はあったものの、温室効果を黒体放射の原理で説明することなど、大きく結論は変わることはなく、現在に至っている。

大気などの対流についての論理において、「ナビエーストークスの式」と呼ばれる式があり、これは、気象の数値予報（シミュレーション）におけるもっとも基本的な数式とされているが、アンリ・ナビエ（Claude Louis Marie Henri Navier、1785年－1836年）がこの式を作ったのは、アレニウスの時代よりもさらに前、1822年である。コンピューターは、こうした法則自体を作り出すことはできない。

$$\begin{aligned} \frac{D\vec{v}}{Dt} = & -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \text{grad } \Theta + \frac{\Theta}{\rho} \text{grad}(\lambda + \mu) \\ & + \frac{1}{\rho} \text{grad}(\vec{v} \cdot \text{grad } \mu) + \frac{1}{\rho} \text{rot}(\vec{v} \times \text{grad } \mu) - \frac{1}{\rho} \vec{v} \Delta \mu + \vec{g} \end{aligned}$$

地球上の地形や海洋、大気の大気対流については、世界各国でおこなわれる地道な測定と共有によってデータを手に入れなければ、気象予測は成り立たない。

もう一つ重要なのは、コンピューター・シミュレーションは「実証可能」であるということ。具体的には、現実起こった気象条件を入力して、シミュレーション結果が現実と一致するか試せばよい。

必ずしも、現在のデータから10年先の結果などを待つ必要はない。20年前など過去の、ある日時の気象データ（あらゆる地点の天気、気温、気圧、湿度、・・・）を入れて、10～20年程度の経過を見て検証すればよい。これまで蓄積された気象データすべてが、検証の対象になり得る。

明文化されているわけではないが、コンピューター・シミュレーションの研究には、一般に次のようなガイドラインがあり、これに反するものは、科学を知る者の一般的な感覚として、科学的な正当性が認められない。

- (1) 物理法則に反してはいけない
- (2) 観測事実に反してはいけない
- (3) 地球全体（または宇宙全体）で同じ式を使わなければいけない²⁸

コンピューター・シミュレーションについて、「係数を適当にいじれば、いくらでも自分たちに都合のよい結果を出すことができる」などとして、その本質を信用していない議論があるが、好き勝手に定数や数式を変えてプログラムをつくり、実際の気象現象では起こり得ないシミュレーションを行えば、多くの検証でそ

れが判明することになる。

もし、それを他の研究者にバレないようにやれば、それは「研究不正」に当たる。

ちなみに、温暖化の科学において、「クライメートゲート事件」や「ホッケースティック論争」など、使われたデータの正当性が問題になることはあったが、「不正」にあたるものは見つかっていない。一方、温暖化と異なる分野では、「STAP 細胞論文不正事件」「ディオバン事件」（高血圧の治療薬の研究論文に改ざんなどの研究不正行為があったとされ、関係の論文がすべて撤回された）など、研究不正が知られているが、毎日新聞がスクープした「旧石器ねつ造事件」（図1-29）など人文・社会科学系にも見られる。研究不正に目を光らせる必要があるのは、何も温暖化の科学に限らない。

72



図1-29 「旧石器ねつ造事件」新聞記事

出典：毎日新聞 2000年11月5日付

温暖化の科学は、地球全体を研究対象にしている、太陽放射、大気、陸地、海洋は、それぞれが相互に作用しており、状況は地域によって様々であることを考慮に入れる必要がある。そのほか、二酸化炭素増加量の推定、温度と複雑に相互作用するいくつかのフィードバック、その他、数えきれないほどのあらゆる科学的要素がプログラムの言語に書き換えられている。

しかし、誤解してはいけないのが、シミュレーションによるコンピューターの役割は、現在でも様々な方法の計算と出力である。（実際、computerの日本語は「電子計算機」である。）

この出力が、CG（コンピューター・グラフィックス）のような形で表示されているので、多くの人にとっては、その結論が膨大な計算によるものだという実感が得にくい可能性がある。

なぜ、コンピューターを使うのか。答えは、温暖化の科学があまりにも複雑で、人間が頭で考えることは不可能だからである。

シミュレーションは信用できなくなれば、ナビエ・ストークスの式などが実質的に利用不可能となり、その分野の研究の発展を断念するということになる。

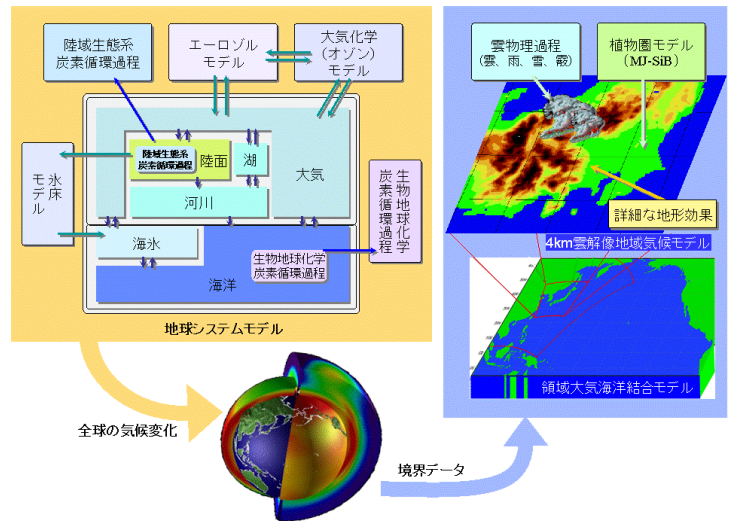


図1-30 気象シミュレーションの概念図

出典：気象庁気象研究所 HP 温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究（H17年～H21年）

<https://www.mri-jma.go.jp/Project/1-21/1-21-sjis.htm>

これは、「AI（人工知能）」で扱う他のあらゆる分野でも、基本的には同じである。

第2項 打率

温暖化シミュレーションに関して、天気予報のような短期的な予測でも外れることがあるのに、長期的な予報などできるはずがないという批判がある。

これに対する回答は、「平均であれば手に入る」というものだ。

温暖化の科学では、確率の発生は必然である。そもそも気象分野では、天気予報において「降水確率」が使われているし、温暖化の予想は、地域または地球全体の「平均」である。大気の動きが、将来にわたって細部にわたって正確に理解できるようになると考える人は少ないだろう。

IPCCの第5次評価報告書では、可能性を表す語句を、以下のような確率で定義している。

「ほぼ確実」：発生確率が99～100%

「可能性が非常に高い」：発生確率が90～100%

「可能性が高い」：発生確率が66～100% など。

しかし、確率で考えることは多くの人にとって簡単ではない。

台風の予測について、発生時期や軌道も年によって違うのは当たり前だが、台風が年間にいくつ発生するかは、多少の変動はあるものの、30個弱であるなどが知られていて、高校の教科書でもそのことが記載されていたりする。

短期間の予報は、薬師院氏などが指摘するように、難しいのは事実だが、1年間の中で起こる気象現象については、たとえば、毎月の平均気温などは、基本的には統計上のある範囲の中で収まるものが多く、春一番、梅雨、西高東低の気圧配置なども、毎年それほど変わらず起こるので、天気予報でも、「平年は・・・」などとして、過去のデータを活用している。

逆に、その平年を外れた年が続けば、地球に、天気予報の前提となる気象状況に大きな変化が生じているのではないかと気象学者は考える。

例えば、台風19号は、確かに大型ではあったが、これまでにないほどの巨大な台風だったわけではない。ただ、台風19号の特徴（雨量の多さなど）や、同程度の台風が表れる頻度などを分析することで、台風19号と温暖化の関連について考察できるようになる。

気象現象における短期的な予測の限界と長期的な予測の可能性について理解するためには、確率・統計の理解が不可欠である。

この事について、1990年代の温暖化研究やその広報の中枢を担った、スタンフォード大学教授、気象学者のステーブン・シュナイダー氏は、1990年に出版された『地球温暖化の時代』（ダイヤモンド社、1990年）の中で、野球選手の「打率」を例に出して、その説明を行っている。正直、シュナイダー氏の説明は、けっして上手いものとは言えず、薬師院氏にツッコミの余地を許してしまっている。

薬師院氏が引用した、シュナイダー氏の説明は以下の通りである。

スティーブン・シュナイダー『地球温暖化の時代』（ダイヤモンド社、1990年）p.108

74

天気と気候 気象学者は、長時間の平均的な状況がある程度予想できる。たとえば、天候（weather）と気候（climate）の予測に似ているものとして、野球選手の打率を取り上げてみよう。打者は自分の打席においてシングルヒット、三振、フォアボール、ホームランなどの結果をある固有の順序で実現していく。つまり打率とはある期間にわたって何度も打順に立った長期の平均である。ある特定の打者が今度の七月二十三日に本塁を四回踏むかどうかを確実に予測するのは不可能ではあるが、その打者のシーズン終了時の打率を予測することはできるし、彼の野球歴、健康状態、打順、その他の要素を知っていれば、それはシーズン前でさえも予測できる。

天候と気候についても同じように予測することができる。これまで見てきたように、ある日が雨で、翌日は晴れで、翌日は暑いなどと、短期の天候を予測するのは困難である。けれども、たとえば冬のシアトルは湿気が多くて寒いというような、ある特定の気候は、このような長期間の個々の天候現象の結果である。打者の打率を予測するように、海洋温度の偏差パターン、日光照射量、海や氷原に近いかどうかなどをもとにして、平均的な気候状況を予測できる場合は多い。

（打率について）

最近では野球を知らない子どもたちも多くなってきているようなので、「打率」の説明をしておこう。打率とは、「打席数」（打席に立った数、フォアボールなどを除く）のうちの「安打」（シングルヒット、ホームランなど）の数の割合である。

「.273」と表示され、「2割7分3厘」と読み、「27.3%」「1000分の273」の意味である。

一般に「3割バッター」といえば、打撃能力が高いか調子のよい選手に属し、2割を切るとレギュラーはかなり危ういので、1割程度の差で、バッターとしての技量が明確に示される。

薬師院氏は、シュナイダー氏の記述を引用した上で、次のように述べている。

薬師院仁志『地球温暖化論への挑戦』（八千代出版、2002年）p.35

この点だけは確認しておこう。シュナイダー氏は、打率の事前予測が可能だという例示のもとで、気候もまた予測可能だと主張している。逆に言えば、コンピューター・シミュレーションによる予測が可能だと信じることは、野球選手の打率予測が事前に可能だと信じることと同じなのである。

これらを信じるか否かは、世界観の問題である。シュナイダー氏は、個別具体的な出来事は不可能であっても、長期的に平均化した事象は予測可能だと見なしている。簡単に言えば、未来は大筋で予言可能だという世界観であり、多種多様な諸要素の複雑な相互関係の連鎖でさえ、基本的には偶然的巡り合わせの余地はほとんどないというわけである。シュナイダー氏だけでなく、コンピューターシミュレーションによる地球温暖化予測を信じる者は皆、同じ世界観に立っていることにな

ろう。一方、私も含めて、伝統的な世界観に立つ人間は、にわかにはこの世界観に納得することはできない。おびただしく、多数多様な要因が刻々と変化しながら複雑にからみ合ってもたらされるような現象には、偶然や成り行きやアクシデントといった部分がかかり含まれると考えるのが普通ではないだろうか。

(註：傍線引用者)

薬師院氏が自分の信じる世界観に立つのは自由であるが、傍線の部分を見ると、統計に関する基本的な誤解があるような気がする。

温暖化に限らず、コンピューター・シミュレーションは、偶然やアクシデントが起こらないような、厳密な予測ではない。自然現象の中に生じる「偶然」「アクシデント」と呼ばれるものを分析し、それが本当の偶然やアクシデントであるかどうかを判定することが、統計の役割のひとつである。

ある選手のシーズン終了時点の打率が、シーズン前に予測可能か、というと、シュナイダー氏には悪いが、そんなことは言えない。例年3割近くの安定した打率を残している選手が、シーズン終了時点で2割5分を切った、などということはよくある。試合中のアクシデントにより、その選手が出場できなくなってしまうことすらある。

偶然があったとしても、標本数が多くなればなるほど、平均したときの、偶然によるばらつきが小さくなる傾向があるというのが統計の大きな意義であり、個人の選手に統計を当てはめようとする、偶然の要素が大きく左右することがあり、特にプロ野球をそれなりに知る人にとっては、納得しづらいのではないかと思う。

私なら、個々のプロ野球選手ではなく、プロ野球全体の年間シーズンで説明をする。

出場する選手は毎年、一定数は入れ替わっていくし、個々の選手についても、その年によって調子が大きく異なる。乱打戦あり、投手戦ありの予測不能なあらゆる展開の試合が日々行われているにも関わらず、面白いもので、シーズンを通したすべての試合の全打席の打率の年ごとの変動は、.250～.270あたりを平均として、たいがい±1分(.01、要するに100分の1)程度に収まる。ここに、統計の本質がある。データが増えていけば増えていくほど、平均値は変動しにくくなる。

ただし、これは、条件が同じであることが前提である。

プロ野球では、年間の試合を通じて打率が高い、いわゆる「打高投低」といわれる時代と、逆に「投高打低」といわれる時代があることが知られている。

例えば、「日本プロ野球 RCAA&PitchingRun まとめ blog」<https://ranzankeikoku.blog.fc2.com/blog-entry-2290.html> というブログが、セ・パそれぞれの全球団の野手の年間打率を表にして、ルール改正やボールの規格の変更などによる影響を分析している。

「戦後の急激な打高化」「1951年－1975年の打低トレンド」「2011年－の打低トレンド」などとして、戦前の粗悪なボールから、戦後の改善によってできた高反発球による打率の上昇、その後のボールの規格化などのほか、守備力の高い選手を起用する傾向の増加が年間の打率に作用した、など興味深い指摘がある。

それによって時代ごとに打率の差が大きく出るか、というと、大きくても±.02(2分、2%)ぐらいだったりするのだが、この小さな差は、意外にプロ野球ファンの方々には、試合の面白さに影響を与えていたり

するのである。

これこそが確率・統計の本質である。われわれの実感は、統計の変化としては意外に小さいものだったりする。逆に、だからこそ、統計で生じたわずかな差が、重要な意味を持つことがあり得るのである。

76 | ただ、注意しなければならないのは、ルール上の変更がなくても、ここ数十年の中でも、ドーム球場の増加や球場の大型化など、打率の変わり得る変更があったと記憶していて、たとえば、温暖化によって選手の体調やグラウンドコンディション、雨天中止などの日程変更の頻発が選手の成績に影響を及ぼすことがある（またはあった）かもしれない。その他、プロ野球をめぐる状況が変わっていくことを考えれば、プロ野球全体の年間打率に影響がおよぶ要因は他にいくらかも考えられるわけだから、あらゆる視点から分析しないと大きな間違いを犯すことになる。統計は慎重に活用することが求められる。

気温のような地域や時期によって変動の大きい現象についても同様で、多数のデータを集めて、初めて、背景にある地球の構造的な変化を読み取ることができるのであり、その上に立って、その先の予測をすることができるのである。

温暖化の予測は、社会的に影響が極めて大きく、その精度向上のためには、膨大なコンピューターによる計算は不可欠ということになる。

先ほどの、「天気予報のような短期的な予測でも外れることがあるのに、・・・」への回答として、外れの多い天気予報は個人選手の各打席の結果、温暖化による温度上昇の予測は、プロ野球全体の年間打率と考えるのはどうだろうか。

第2章 気温上昇がもたらす現象

第1節 気候の変化

第1項 大気循環の変化

温暖化が起これば熱波（高温の状態になること）が増える、というのは、当然といえば当然で、温暖化そのものの確信度が高いので、熱波の増加の確信度は高い。ただ、気温の上昇は世界中で一斉に起こるわけではない。地域レベルでは、気温が低下すると予想されているところもある。

北極圏（北緯 66 度 33 分以上の地域であり、実はけっこう広い）では、ここ数十年で 2~3°C 上昇しているとされており、気温上昇は極地方で強く表れるとする予測と一致している。

2019 年の 1 月にアメリカ中西部と北西部を襲った寒波について、トランプ前大統領が「一体どうなってるんだ？」と皮肉ったそう。そもそも、次の節にあるように、「温暖化」によって「気候の極端化」が起こって極端な寒波が発生することがあることは、かなり以前より指摘されていた。だから、温暖化の科学を議論する場である IPCC の名称が「“気候変動”（Climate Change）に関する政府間パネル」という名前になっているのも、そうしたところにあるそう。

「一体どうなってるんだ？」トランプ大統領、記録的な寒波を受け、地球温暖化を皮肉る

Sarah Gray Jan. 30, 2019, 11:10 AM POLITICS9,720

<https://www.businessinsider.jp/post-184243>

トランプ大統領は気候変動に疑問を呈する手法として、こうしたコメントを以前から繰り返している。しかし、「寒いから温暖化は存在しない」という前提がそもそも間違っている。

こうしたことになるのは、世界の平均気温は上昇するが、それにともなって、大気の流れなどが変化するからである。

陸地の地形や状態は気候に大きな影響を与え、海洋も海底の地形・水温・海流・平均 1000 年（最長 2000 年）で周回する大循環があり、大気・陸上・海洋の相互作用によって、基本的には 1 年周期で変動する気象状態（大気の流れ、気圧配置など）を形成している²⁹。

温暖化は、大気・陸上・海洋の関係を変化させ、気温だけでなく、風の向きや風速、降水（雨や雪など）の状況などを変化させる。たとえば下記のような影響があると予測されている。

- ・大気中の水蒸気量の増加により、平均降水量は増加
- ・平均降水量の変動幅の増大、豪雨や干ばつの増加
- ・熱帯雨林の乾燥化や崩壊

- ・ 偏西風の蛇行、異常気象の増加、日本周辺の気候にも大きな影響を与える可能性
- ・ アメリカ南東部・東部の海水温上昇により、竜巻の発生域が南東部や東部に広がる
- ・ 暑い日/夜の数の増加、寒い日/夜の数の減少（世界的規模、可能性が高い）
- ・ 平均海面水位上昇による沿岸域の極端な高潮の増加（可能性が高い）

20～30年前に環境問題のひとつとして言われていた「砂漠化」は、当時は酸性雨の影響などといわれていたような気がするが、現在では、温暖化が一定レベルで影響していると指摘されている。

第2項 気候の極端化（やや難）

[Wikipedia「地球温暖化」](#)

気象現象への影響[編集]

気象現象への影響は一括して「異常気象の増加」、気候への影響は「気候の極端化」と表現されることがある。温暖化に伴って気圧配置が変わり、これまでとは異なる気象現象が発生したり、気象現象の現れ方が変わったりすると予想されている。

温暖化によって、世界的に干ばつや豪雨、暴風などが起こり、それによる被害が、これまでに比べ増加することが懸念されている。（最近の状況から、現実化しているとみられる。）温暖化の科学では、こうしたことを「気候の極端化」と表現することが多い。

ただ、こうした気候の変化に関する予測は、むつかしい研究分野だと考えられている。

IPCC はすでに 2012 年に発表した「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」(Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation : SREX) (http://www.env.go.jp/earth/ipcc/special_reports/srexja.pdf) で、温暖化のもたらす気象災害を警告していた。

この中で、「いくつかの極端現象は、大気中の温室効果ガス濃度の増加を含む人為的影響の結果として変化してきたという証拠がある。」と指摘しているが、一方で、「熱帯低気圧の活動（風速、発生数、持続期間）の変化（低い確信度）。確信度が低いとされるのは、過去の観測記録に不確実性があり、人為的影響と熱帯低気圧の関係の物理的な理解が不完全であるため。」「一つ一つの極端現象を人為的影響と結びつけるのは困難。」ともしている。現在では、当時よりも、確信度がかなり高まっていると思われるが、現在でも、不確実性は残されている。

例えば昨年、日本に多大な被害をもたらした台風 19 号が、温暖化の影響であると当然のように語られていて、実際にその確率は高いようだが、断言できるわけではない。これは、温暖化の科学が不確実というより、気象現象の分析がそもそもむつかしいのである。

ただ、20 世紀に入ってからの世界の気温変化が 1°C にも満たないにもかかわらず、世界中で「気候の極端化」が目に見える形で表れているとされていることを考えると、これから 3～4°C 上昇するとどうなるか、と

想像することはできなくはない。

干ばつと豪雨については国立環境研究所 地球環境研究センター 副センター長の江守正多氏が図入りの説明をしている。(図2-1)

気温が上昇すると、主に海水の蒸発量が増加する一方で、飽和水蒸気量がそれ以上に増加するケースがあり、この場合、雲のできにくい大気になるので、普段の雨の量は少なくなるが、強風などによる急激な上昇気流で断熱膨張→温度低下→凝結が起こったときに、水蒸気を多く含んだ空気が強雨をもたらすことになる。

地球全体でこのようなことが起こるといっているのではないが、「気候の極端化」の一例として、重要だと思われる。

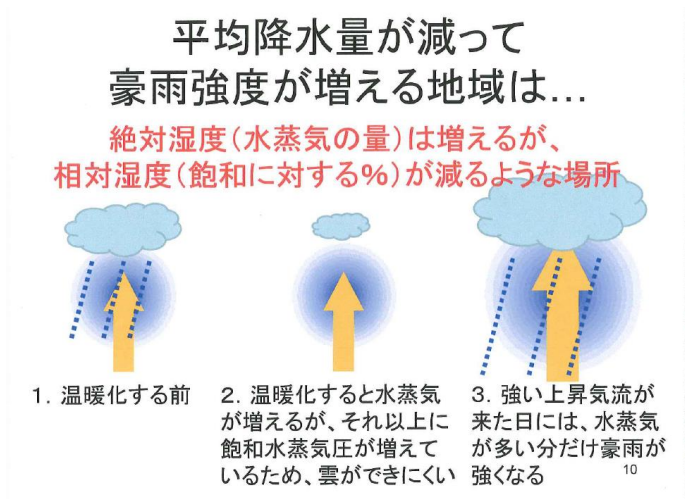
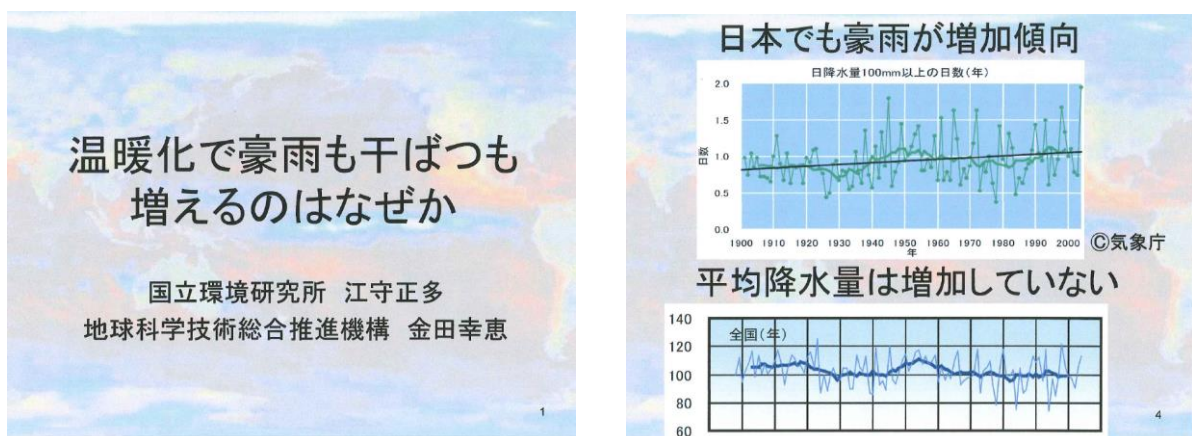


図2-1 温暖化による豪雨、干ばつの説明

出典：21世紀気候変動予測革新プログラム 平成21年度 公開シンポジウム

気候大変動の時代に生きる

<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/sympo2009/PDF/03->

析が過大だったとして訂正している。地球全体での調査方法の不統一があり、確信度を下げたようだ³⁰。第6次の評価報告書ではどうなっているかはわからない。

IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約 気象庁訳 (PDF 27.8MB) p.112

20世紀半ば以降に干ばつ及び／又は乾燥の影響を受けた陸地面積が大幅に増大したことについては、賛否両方の議論に説得力があり、結果として、観測された関係づけられそうな大規模での変化傾向の評価の確信度は低い。この主な原因は、直接観測とその品質の不足、変化傾向の推測が指数の選び方に左右されること、変化傾向の地理的な不一致、十年規模の変動と長期変化傾向との区別の難しさにある。千年規模の時間スケールでは、代替情報が、多くの地域で20世紀中に観測されたものよりも規模が大きく継続期間の長い干ばつがあったことの証拠を示していることの高確信度は高い。小氷期（1450～1850年）は中世気候異常期（950～1250年）に比べて、アジアのモンスーン域においてより多くの大規模干ばつが発生し、乾燥した中央アジアと南アメリカのモンスーン地域ではより湿潤な状態が卓越していたことの高確信度は中程度である。{2.6.2、5.5.4、5.5.5、10.6.1}代表的濃度経路RCP8.5に基づく、世紀末までの予測は、地域規模から地球規模で予測されている土壌水分の減少に関連して、現在乾燥している地域において干ばつのリスクが高まる可能性が高い（中程度の確信度）ことを示している。土壌水分の減少は地中海、アメリカ南西部、アフリカ南部で最も顕著であり、予測されているハドレー循環の変化及び地上気温の上昇と整合して、RCP8.5においては、21世紀末までにこれらの地域における地表面の乾燥化が生じる可能性が高い（高い確信度）。{12.4.5}

エルニーニョ現象

温暖化によって、気象災害の前提となる、これまで知られてきた地球規模の現象にも変化が起これると考えられている。

気候に大きな影響を与えている現象の一つが「エルニーニョ現象」である。例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図2-2]のよう

に説明されている。近年、エルニーニョ現象はインドネシア付近の変動と連動していることから、「エルニーニョ・南方振動」(El Niño-Southern Oscillation: ENSO) と呼ばれるようになっている。

南太平洋東部では、図のように表層水が貿易風で西側に流されることによって、冷たい深層水が上昇することが知られているが、貿易風の弱まりが表層水の移動を減らし、その結果、冷たい深層水が上がってこなくなる。これのもたらす影響が、日本のみならず、世界中に異常気象をもた

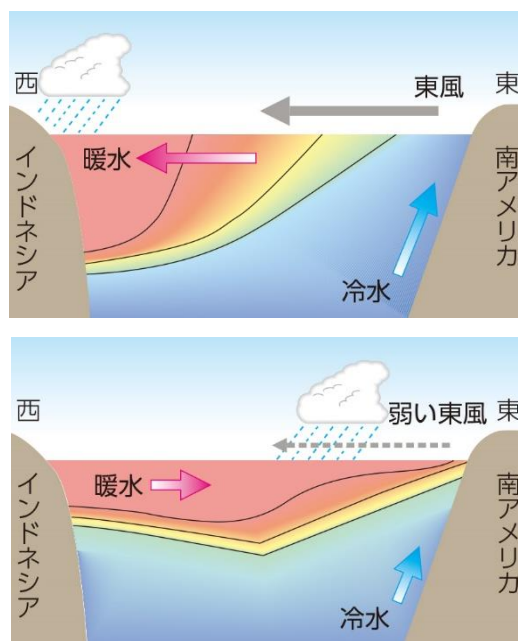


図2-2 エルニーニョ現象

出典：浜島書店 ニューステージ 新地学図表

らしているとされる。

日本では、一般に梅雨明けの遅れ、冷夏、暖冬をもたらすとされているが、2010年の猛暑がエルニーニョによって説明がされたりもする。「参考資料（気象庁作成） ○2010年（平成22年）夏の猛暑について」³¹は、エルニーニョに地球温暖化が関連している可能性についても指摘している。

エルニーニョ・南方振動は、自然変動の代表的なものであると考えられてきたが、温暖化によって、現象の起こる回数が増加するとする議論がある。ただし、いまのところははっきりしないという。

偏西風の蛇行

大気は、北極・南極と赤道付近の太陽光の吸収の差による温度差によって南北方向に循環するが、自転による「転向力」（または「コリオリ力」）によって東西方向に曲げられ、南・北半球それぞれ主に高緯度・中緯度・低緯度における東西方向の風（高緯度は「極偏東風」、中緯度は「偏西風」、低緯度は「貿易風」）になる。例えば、中学理科の教科書である東京書籍の「新編 新しい科学 2年」では、[図2-3]のように説明されている。

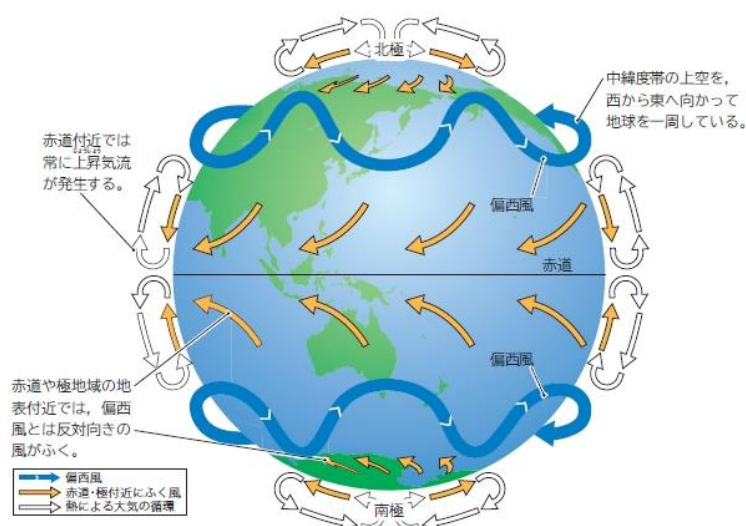


図2-3 大気の大循環

出典：東京書籍『新編 新しい科学 2年』

図4 地球規模での大気の動き

地球の大気は、太陽のエネルギーなどの影響を受けて、地球規模で常に循環し活発に動いている。

日本の上空を含め、中緯度を一回りして吹いている「偏西風」は、[図2-3]のように「蛇行」していることが知られており、西寄り（西側から吹いてくる）ではあるが風向きが南北に振れることが知られている。この「蛇行」が現在極端化、固定化されており、それが温暖化の影響と考えられている。

偏西風の蛇行は、北からの寒気と南からの暖気を流入させ、寒気、暖気を隔てる効果をもたらしているが、中緯度にある日本には寒暖差をもたらしているが、「ブロッキング効果」と呼ばれる効果によって、これが極端化し、北からの寒気と南からの暖気がそれぞれ長期的に流入し続けるようになり、日本だけでなく、世界のいたるところに激しい熱波や寒波をもたらすようになっていとされる。

（参考）

今冬の記録的暖冬 偏西風の蛇行で冬型続かず <https://weathernews.jp/s/topics/202004/160125/>

モンスーン（季節風）

| 82

日本は西に世界一大きい大陸と、南東に世界一大きい海があることで、海や陸の比熱の違い（比熱の小さい岩石によって陸の方が温度変化しやすく、海は比熱の大きい水によって温度変化が小さい）から、冬は北西の冷たい季節風（冬は「西高東低」の気圧配置となるが、風は等圧線に対して斜めに流れる）、夏は南からの暖かく湿った空気が入り込み、明確な四季の原因となっている。例えば、中学理科の教科書である東京書籍の「新編 新しい科学 2年」では、[図2-4]のように説明されている。

温暖化で海陸の温度差は拡大するので、モンスーンは強まる理屈になるが、実際の温暖化による影響は単純ではない。

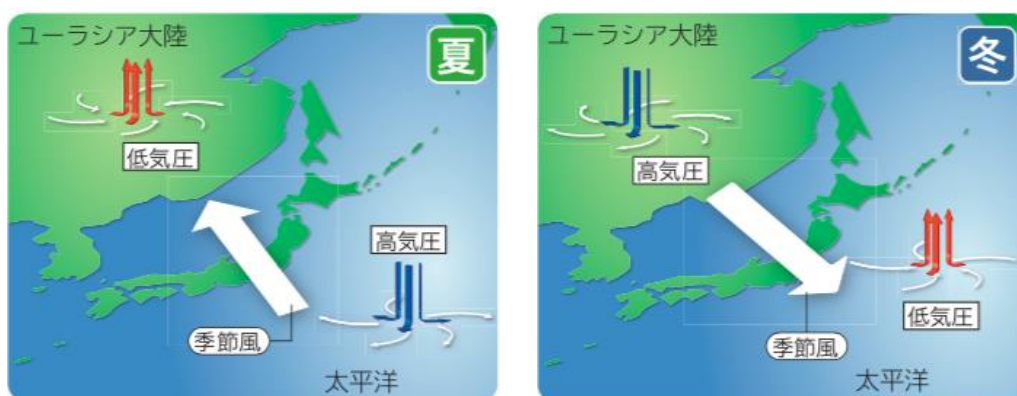


図2-4 冬と夏のモンスーン（季節風）

出典：東京書籍 『新編新しい科学 2年』

IPCC 第5次評価報告書 よくある質問と回答

FAQ 14.1 | 気候変動はモンスーンにどう影響するのか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq14.1_jpn.pdf

地表面は海面よりも急速に暖まるため、ほとんどの地域で表面の温度差が拡大している。しかし、熱帯大気におけるエネルギーバランスの制約によって、気候の温暖化に伴い、熱帯大気の子午面循環は平均的には弱まっている。こうした大気循環の変化は、モンスーンの強度、範囲、時期に関して地域的な変化をもたらす。

（中略）

熱帯のモンスーンに伴う降水の総量は増加するが、いくつかの地域では、熱帯の風循環が弱まることによってモンスーン降水量が減るだろう。

（中略）

モンスーンの強度と時期に関する将来の地域的な変化傾向は、世界の多くの地域において不確実な

ままである。多くの熱帯域におけるモンスーンの年々変動は ENSO による影響を受ける。ENSO が将来どう変化するのか、そして、それがモンスーンに与える影響がどう変化するのかについても不確実なままである。しかし、予測されているモンスーン降水量の全般的な増加は、ほとんどの地域において、極端な降水現象のリスクが降水量の増加に対応して増加することを示している。

第2節 温暖化と台風

第1項 台風とは

| 84

「台風」とは、海水温の高い赤道付近の低緯度で発生する熱帯低気圧で、最大風速が17.2m/秒のものをいう。例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図2-5]のように、1985年～2005年の熱帯低気圧の移動経路を紹介している。

「サイクロン」「ハリケーン」は「台風」と同じ性質のもので、発生地域によって異なる名前となっている。

海水の蒸発により多くの水蒸気を含んだ空気が上昇する中で、水蒸気が凝結（液体化）し、大きなエネルギーを持つ。だから、海水温が高いと、大気中の水蒸気量が増え、勢力の強い台風になると言われている（が、実際にはそうなるかどうかには、後で述べるように議論がある）。

2020年の日本近海は、海水温が30°Cにもなり、非常に高かったとされる。

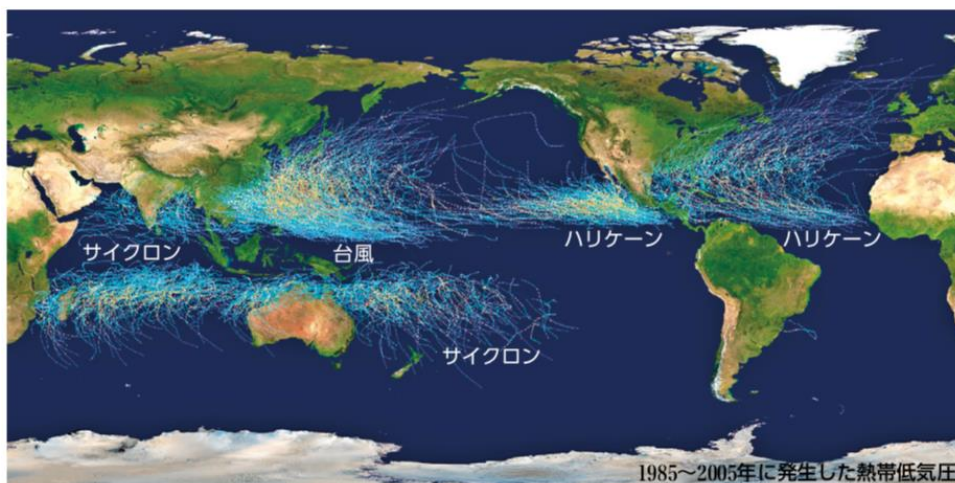


図2-5 熱帯低気圧の進路

1985年～2005年の軌跡を示している。

出典：ニューステージ 新地学図表

地球表面の大気圧の平均は1013hPaであるが、気圧の低い台風の目に、反時計回りで回転しながら空気が流れ込む。中心気圧が低いほど、周りからの空気が速く流れ込むことになるが、単純に風速が大きくなるとは言えない。

それは、2019年に日本に多大な被害をもたらした台風15号と台風19号を比較するとわかる。この2つの台風は、それぞれ9月9日午前3時と10月12日午後9時に、ほとんど同じ地点で上陸し、その時点の中心気圧もおおよそ同じだった。しかし、両者は似た台風とはいえない。

台風の規模を表すのに、「大きさ」と「強さ」という、やや似かよった2つの表現が併用される。

「大きさ」：風速が15m/s以上の強風域が半径500km以上で「大型」、800km以上で「超大型」と呼ぶ。

「強さ」：最大風速が、33～44m/sを「強い」、44～54m/sを「非常に強い」、54m/s以上を「猛烈」と呼ぶ。

つまり、「大型」であれば、広範囲に強風が吹き、「強い」であれば、風速の最大値が大きくなる。

2019年の上陸のときには、台風は次のように表現されていた。

台風15号：960hPa、最大風速40、およそ強風域200km（「大きさ」の記述なし）、「強い」³²

台風19号：960hPa、最大風速40、強風域600km、「大型」、「強い」³³

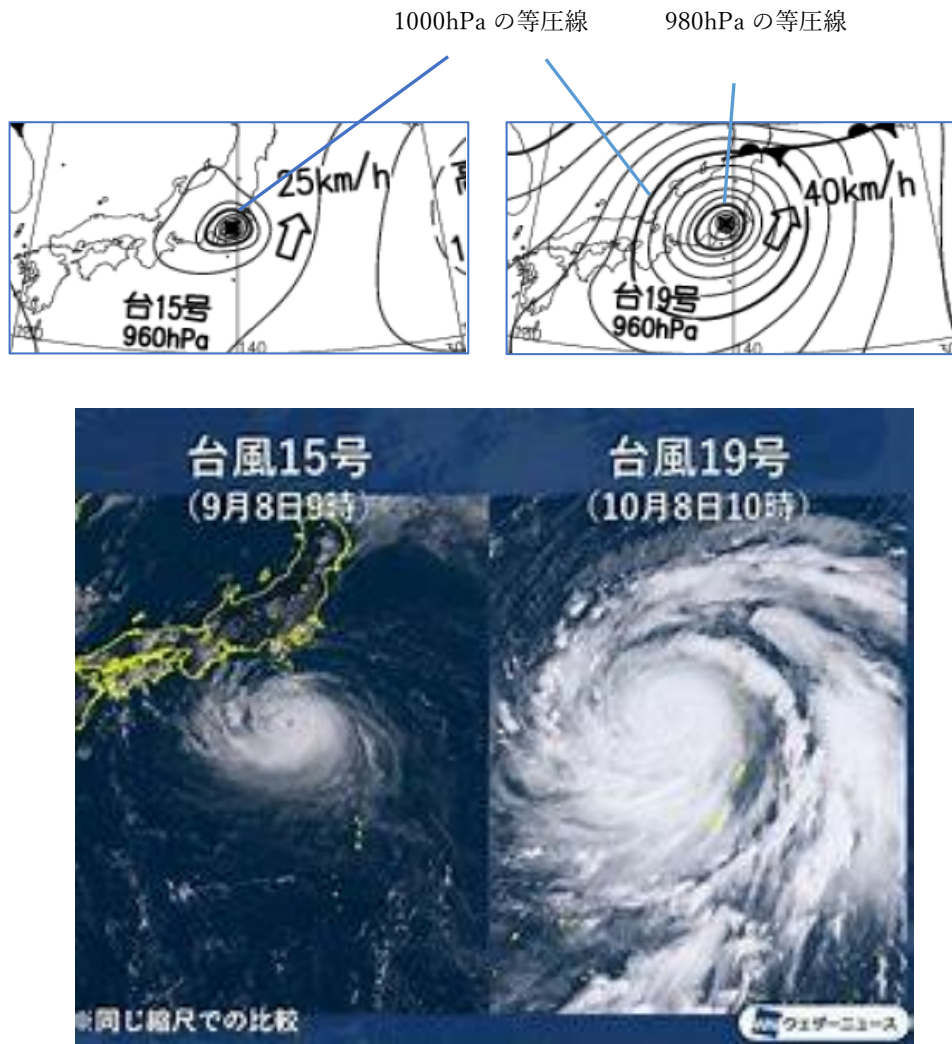


図2-6 台風15号と台風19号の比較

2つの台風を同じ縮尺で等圧線と台風画像を表示しており、「ウェザーニュース」が作成した下の図は、雲量の違いが非常によくわかるように紹介されている。ただ、写真の台風15号は960hPa程度、台風19号は915hPa程度なので、比較には注意が必要である。

出典：上の図は気象庁の2つの台風の気象速報、下の図は「ウェザーニュース」2019年10月08日15時43分JST | 更新 2019年10月08日15時46分JSTで、台風19号「非常に強い勢力」の予想 関東に接近・上陸の可能性も

https://www.huffingtonpost.jp/entry/taifuu19gou-hijyounituyoi-2019oct_jp_5d9c245ae4b03b475f9ef071

p.85 [図2-6] の天気図に描かれている曲線は、同じ気圧の位置を線で結んだもので、「等圧線」と呼ばれ

る。地図の等高線と同じで、等圧線の間隔がせまいほど気圧の変化が急になり、風が強くなる。図にそれぞれ「25km/時」「40km/時」とされているのは風速ではなく、台風の移動速度である。

86 太い等圧線は 20hPa ごと、細い等圧線は 4hPa ごとに描かれることになっており、台風 19 号では 1000hPa の太線の内側に 9 本前後の等圧線が描かれていることになるが、台風 15 号では、サイズが 3 分の 1 程度しかない 1000hPa の等圧線の輪の中に、19 号と同じ本数の等圧線が描かれることになる。画像の解像度の関係もあるが、台風 15 号は等圧線が密集しすぎて、中心がほとんど黒塗りのようになっている。

実際、この 2 つの台風の最大風速はそれほど変わらず、むしろ台風 15 号の方が瞬間最大風速は大きかった。一方で、台風 19 号の方が極めて広い範囲に濃い積乱雲があり、この台風が豪雨をもたらすことは、見ただけでわかる。

台風の風速については、発達経緯、周囲の気温・気圧、地形などによっても様子が異なり、台風の中でも一様ではないため、単純な比較は難しい。

台風 15 号は瞬間最大風速が千葉県神津島で観測所の記録を更新したとされる。台風は、進行方向の右側がより強風となることが知られており、台風 15 号の目は千葉の西を通過したことから、きわめて強い風になったと考えられる。この台風でゴルフ場のネット用の巨大な鉄柱が暴風により倒れて民家が押し潰されたのは、その典型である。

一方で、台風 19 号は、「大型」ゆえに、暴風域は台風 15 号に比べてはるかに広がったが、風は当初から警戒されていたより強くならず、むしろ長時間の豪雨によって 100 人を超える犠牲者が出てしまった。

箱根では 24 時間雨量が歴代最高となるなど、台風 19 号は雨量の記録を塗り替えた。

つまり、台風 15 号は、大きさが小型であるがゆえに風速が大きくなって、いわゆる「風台風」になったのに対し、台風 19 号は、大型ゆえに風はそれなりに強かったが、大量の積乱雲により長期の豪雨をもたらし、いわゆる「雨台風」として振る舞ったと考えられる。

東洋経済 ONLINE

台風が「大型化・凶暴化」しているのは本当か

<https://toyokeizai.net/articles/>

[/376259?utm_source=auweb&utm_medium=http&utm_campaign=link_back&utm_content=article](https://toyokeizai.net/articles/-/376259?utm_source=auweb&utm_medium=http&utm_campaign=link_back&utm_content=article)

「台風 19 号は台風 15 号の約 1 カ月後に日本を訪れましたが、風が強かった台風 15 号と同じような台風が再びやってくるということで、台風 19 号が接近する前には窓の補強をする養生テープが品切れになりました。しかし、私は『この台風で注意すべきポイントは風ではなくて雨のほうであり雨対策のほうが大事だ』と思っていました」(筆保教授)

なぜ、同じような進路や発達のしかたで、ここまで性質が違うのでしょうか。理由の 1 つは、台風が襲来したときの周囲の状況であり、季節がカギになります。おおざっぱにいうと、夏に来る台風は風台風になりやすく、秋に来る台風は雨台風になる傾向があるということです。

秋は前線が発生しやすく、雨が降りやすい状況です。そこに台風がやってくると、広い範囲で大雨をもたらします。2019年の台風15号が上陸したのは9月上旬でまだ夏の後半、台風19号は10月中旬だったので秋まっさかり、まさにこの季節からみられる傾向が台風の特徴を決めたようです。

台風の接近により、「高潮（たかしお）」被害が起こることが心配される。海水がもたらすその他の水被害についても、この機会に紹介しておく。

波浪（風浪、うねり）

そもそも海流は、上空の風によって生じている。その海流が陸にぶつかると、私たちが海岸で見る波となる。「高波」という表現は、こうした波が危険度を持つときに使われる。

津波

地震による海底の変形など（隕石の落下も含む）により、海水が大きく上下し、それを回復させるために大量の海水が動くことによって生じるため、「気象災害」には入らない。海岸付近に近づくにつれて、波の速さを落としながら波の高さを増していき、およそ時速50kmあたりで上陸する。

海水の波の一山が膨大な量であるため、それが陸に達すると、通常の「高波」と異なり、波の高さはそれほどでなくとも、極めて強い破壊力を持って人や物を押し流し、海水が内陸にまで入り込む。（高さ50cm程度で自動車を動かすとされる。）

東日本大震災では、18mの津波（遡上高40m）が内陸6kmに達して、18,000人という膨大な犠牲者を出した。

潮汐

「潮の満ち干き」とも呼ばれる。月・地球・太陽の引力の関係で、海水が影響を受けて海面水位が変動することをいう。

潮位が高い状態を「満潮」、「満ち潮」、「高潮」（こうちょう）と呼ぶ。地域によっては、満潮と干潮の差が6m（佐賀県住ノ江）にも達する。（カナダ・ファンディ湾では13m）

高潮（たかしお）

潮汐のところを見ると、同じ漢字で表現される用語があるが、読み方で意味が異なる。

台風によって気圧が低くなると「吸い上げ効果」によって、平均大気圧1013hPaに対して1hPaあたり1cm上昇するといわれる。吸盤を机に着けて引っ張ると、吸盤内の気圧が下がり、机を引っ張り上げようとするのと同じである。

先ほどの台風15号、19号における中心気圧960hPaではおよそ50cm程度ということになる。これに「吹き寄せ効果」（風によって海水が海岸に集中する）が加わるので、水位はさらに上がる。

例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図2-7]のように説明されている。

強い台風の下海面は、台風の目の位置を頂点とした高さ50cm以上、半径数百km以上の山のような形状になり、これが時速40km程度の台風の移動とともにやってくることになる。場合によっては他の効果も

あわせ、陸に高い波となってやってくる。これは、中レベルの津波と同じようなものであり、そのため高潮は「気象津波」とも呼ばれる。

第2項 「気候の極端化」と台風

昨年 2019 年の台風 15 号、19 号、21 号は、人的・物的被害があまりにもひどく、日本社会に強い衝撃を与え、温暖化が影響していることをほとんど自明とする論評が多く出ている。

本当にこれらが温暖化の影響か？ということとは、科学的には、少し慎重に語る必要があるが、台風 15 号と 19 号をきっかけに、特にニュースが、台風被害の根本原因を温暖化によるとはっきり言うようになったことで、私の身の回りの反応からも、温暖化への意識はかなり高まったように感じられる。

ただ、そのことで、温暖化すると台風が強くなる、と思っている人が多いようだが、現状で、それはあまり正しいとは言えない。

IPCC の第 5 次評価報告書が予測していたのはあくまで「豪雨の増加」であり、以下の「電力中央研究所」HP にあるように、台風（または熱帯低気圧）の増加や強度の変化については、予測がかなり難しいものに属している。

実際、史上最大の被害総額となった 2018 年の「西日本豪雨」は、台風の被害ではなく、豪雨災害によって 260 人以上の死者が出ており、2019 年台風 19 号を上回っている。2020 年（昨年）の九州豪雨（令和 2 年 7 月豪雨）では、死者 84 人、行方不明 2 人（11 月 13 日時点）となった。



図 2-7 高潮

出典：浜島書店 ニューステージ
新地学図表

[IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 技術要約 気象庁記 \(PDF 27.8MB\)](#) p.72

AR4（註：第 4 次評価報告書のこと）以降、極端な降水現象に対する人為的影響について、系統的な検出と原因特定研究を含めたいくつか新しい限定的な直接証拠があり、地球規模の水循環の様々な側面に対する人為的影響の証拠を前提として極端な降水現象が増えると予測されることの間接的証拠がある。また、温暖化とともに極端な降水現象の強度が平均降水量を十分に上回る率で増加することに高い確信度がある。評価に十分な観測がある陸域においては、20 世紀後半の地球規模での大雨の強まりに人為起源の放射強制力が寄与したことの確信度は中程度である。{7.6、10.6}

[IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 技術要約 気象庁記 \(PDF 27.8MB\)](#) p.72

地球全体では、熱帯低気圧の活動度の変化の原因が人為的影響にあるとすることの確信度は低い。その原因は、観測に基づく証拠が不十分なこと、人為起源の気候駆動要因と熱帯低気圧の活動度との関連に対する物理的理解の不足、内部変動と人為起源及び自然起源の強制力の相対的重要性に関する研究間の一致度の低さにある。北大西洋域において、北大西洋上のエーロゾル強制力の減少が、1970年代以降に同海域で観測されている熱帯低気圧活動の増加に少なくとも部分的に寄与していることの確信度は中程度である。この観測された変化傾向における内部変動、WMGHGの強制力及びエーロゾルの相対的重要性については、まだかなりの見解の不一致が残っている。{2.6、10.6、14.6}

(註：傍線引用者)

(参考)

気象庁気象研究所

「地球温暖化で変わりつつある日本の豪雨」 <https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H30/301110/02-3.pdf>

電力中央研究所HP

21) 2030年頃の近未来に予想される台風の潜在的な最大強度の変化

<https://criepi.denken.or.jp/result/pub/annual/2008/08bunya29.pdf>

また、台風については、温暖化によって発生する数が減少するが、個々の台風の強度については強まるとする予想がある。2000年代ごろからすでに、一般的な予想として知られていたが、かなり予測の難しい問題だと考えられているので、温暖化の影響として台風の強度に注目しても、実はあまりうまくいかない。先ほど述べたとおり、中心気圧の低さが、単純に風速につながるわけではない。むしろ、注目すべきは「気候の極端化」、特に降水量の変化である。

第3項 2019年台風19号

2019年10月12日に上陸した台風19号は、事前に大きな被害が出るのが予想されていた。

台風が12日の夜に最接近するとの予測から、9月に上陸した台風15号の記憶もあって関心も高く、テレビでは、5日前ほどから台風を警戒する呼び掛けが行われていたため、12日朝の段階から多くの電車が運休、デパートなども臨時休業となった。台風の予想進路上にはなかった名古屋でも、電車が運休、デパートなどが臨時休業になるという報道があった。

ニュースは、台風上陸の前から、「狩野川台風」(1958年)や「伊勢湾台風」(1959年)を持ち出して、台風の危険を伝えていた。(それぞれの被害については後述。)

台風19号は、中心気圧が一時915hPaとかなり低くなり、その後945hPaまでは衰えたが、その後あまり衰えずに日本列島に迫ったことで警戒が広がった。およそ960hPaで上陸との予想で、実際にも、予想に近い進路と中心気圧で、夜7時ごろに上陸した。

横浜にいた私の感想としては、風は想像していたほど強くはなかったが、台風は目の東側で強風になり、西側で弱くなる傾向があることが知られている。実際、我が家は台風進路のほとんど目か、目の西側にいた

とみられるので、それが原因でそれほど強風にならなかったのかもしれない。しかし、一度か二度、家の壁を叩きつけるような突風が来た記憶があり、我が家の道路を挟んだ隣の家では屋根の板が完全に外れて、その隣の家との間にその板が落ちるといようなことが起きた。だから、強風が実際にたいしたことなかったかどうかはよくわからない。

| 90

テレビでは、夜の段階で、アナウンサーが「命を守る行動をとってください」との言葉を繰り返し、堤防決壊の情報もいくつか出ていたと思う。台風19号の被害の重大さが伝わってきたのは、翌朝、13日になってからである。報道によれば、あらゆる地域で浸水や土砂災害が起これ、それによって多数の死者が出ているとのことであった。

死者の数は、報道の度に増加していった。浸水被害は、関東地方でも起きているが、特に東北地方の幅広い地域で起きているようで、その広範さから、全体像の把握は容易ではなかったようである。

報道による説明からは、台風19号による被害が「記録的」であるとの指摘がされ、その要因として「地球温暖化」についての言及があった。

私は、台風19号と温暖化を関連づける記事を探して「台風19号 温暖化」でYahoo!検索を行った。そうしたら、あらゆる科学分野について意見を述べることで知られ、温暖化については「懐疑論者」である中部大学総合工学研究所特任教授・武田邦彦氏のYouTube動画が検索に引っかかった。

Yahoo!で検索した結果がこれ↓

【武田邦彦】台風19号の直撃に備えてください！参考…

<https://www.youtube.com/watch?v=pCd67XKcJmE>

2019/10/10・こちらは武田先生ファンチャンネルです。勉強になる武田先生のトークを毎日配信しています。※公式チャンネルではございません。武田先生プロフィール 東京大学教養学部基礎科学科卒業。同年(1966)旭化成工業(株)に入社…

ビデオの時間: 10分

閲覧数: 89K

上記URLで出てきたyoutube動画がこれ↓

【武田邦彦】台風19号の直撃に備えてください！参考までに私の過去の大型台風経験と実際に行った準備を早急にお話ししておきます

武田邦彦 テレビじゃ言えないホントの話!

<https://www.youtube.com/watch?v=pCd67XKcJmE>

このYoutube動画は、題名を見ただけではあまりわからないが、武田氏が主張していることは、簡単に言えば、台風19号は、特別巨大というわけではなく、たまにやってくる程度の大きさの台風なので、「普通に」準備してください、とのことである。

話の中で、これまで日本に被害をおよぼした台風と、それらの海上と上陸してからの中心気圧を表にしたものが画面に表示された（図2-8）。武田氏は1941年生まれであり、これらの台風はすべて経験しており、歴代の中心気圧が低い台風は1950年～80年であり、狩野川台風は上陸時に少し衰えて960hPaぐらいだったので、今度（台風19号）についても同じくらいになるであろうと。

実際に表を見れば、そうであることはすぐにわかる。

Wikipedia で似たような表を見た覚えがあったので確認したところ、やはり Wikipedia からとった表らし

海上における中心気圧が低い台風

順位	名称	国際名	中心気圧 (hPa)	観測年月日	観測地点
1	昭和54年台風第20号	Tip	870	1979年10月12日	沖ノ鳥島南東
2	昭和48年台風第15号	Nora	875	1973年10月6日	フィリピン東方
	昭和50年台風第20号	June		1975年11月19日	マリアナ近海
4	狩野川台風 (昭和33年台風第22号)	Ida	877	1958年9月24日	沖ノ鳥島付近
5	昭和41年台風第4号	Kit	880	1966年6月26日	南大東島南方
	昭和53年台風第26号	Rita		1978年10月25日	フィリピン東方
	昭和59年台風第22号	Vanessa		1984年10月26日	
8	昭和28年台風第7号	Nina	885	1953年8月13日	フィリピン東方
	昭和34年台風第9号	Joan		1959年8月29日	宮古島南方
	昭和46年台風第35号	Irma		1971年11月12日	フィリピン東方
	昭和58年台風第10号	Forrest		1983年9月23日	沖ノ鳥島南方
	平成22年台風第13号	Megi		2010年10月17日	フィリピン東方

上陸時（直前）の中心気圧が低い台風

順位	台風番号	上陸時気圧 (hPa)	上陸日時	上陸場所 *1
1	6118 *2	925	1961年9月16日09時過ぎ	高知県室戸岬の西
2	5915 *3	929	1959年9月26日18時頃	和歌山県潮岬の西
3	9313	930	1993年9月3日16時前	鹿児島県薩摩半島南部
4	5115	935	1951年10月14日19時頃	鹿児島県串木野市付近
5	9119	940	1991年9月27日16時過ぎ	長崎県佐世保市の南
	7123	940	1971年8月29日23時半頃	鹿児島県大隅半島
	6523	940	1965年9月10日08時頃	高知県安芸市付近
	6420	940	1964年9月24日17時頃	鹿児島県佐多岬付近
	5522	940	1955年9月29日22時頃	鹿児島県薩摩半島
	5405	940	1954年8月18日02時頃	鹿児島県西部

図2-8 上陸時（直前）の中心気圧が低い台風と海上における中心気圧が低い台風

出典： 上：Wikipedia「狩野川台風」 下：気象庁 HP

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%A9%E9%87%8E%E5%B7%9D%E5%8F%B0%E9%A2%A8>

https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/ranking/air_pressure.html

い。ここには、主に 1950 年代以降に日本に被害をおよぼした台風の中心気圧・最大風量・被害状況などを、かなり細かく収録している。同じく気象庁 HP からも、画面をそのまま表示している。

(私も Wikipedia や気象庁 HP を参考にこの文章を書いている。)

| 92 その上で、武田氏は、参考までに、自分の狩野川台風の経験をお話しする、と。

当時は、雨戸を杉の木でバツの形に止めたり、当時は浸水が多かったので、川にはそれほど近くはないが、浸水に備えて1階の畳はすべて上げ、たんすなども移動して、いろんなところを整備して台風を待った、と。

今は、台風が来るからといって、庭に出してあるものを片付けずにそのままにしている家も結構あるがこれはいけない、と。

「一言で言えば、台風に備えるっていう必要がある。テレビとか新聞が異常に温暖化だとか、最近はずいとか言っているのは間違いです。この表を見ればわかるように、台風が大きかったのはですね、1950 年から 80 年くらいであって、最近、それより大きい台風ってないんですね。ですから伊勢湾台風とか室戸台風とか狩野川台風とか、よく知られた台風の時の備え、これは今よりか気持ちが謙虚でしたね・・・」

1 年に 1 回か、数年に 1 回ぐらいの台風が自分の身を襲ってくるので、それには十分備える。その時は無理して外に出ない、出ようとしなくていいことが大事である、と。

「命を守る行動を直ちにとってくださいとか、わけのわからないことを言っているもんですから。そこで私のような古老が昔の状態を、話をしました」

なるほど、台風に対する心構えとして大変参考になる。しかし、気になるのは、「温暖化懐疑論者」である武田氏が、この動画を公表することの「意図」である。話を聞いていると、題名の通り台風による注意を喚起することが目的なのか、それとも、台風がたいしたことないことを主張したいのか・・・。

その「意図」を示していると思われるのが、同じく Yahoo! によって検索して出てきたこの動画↓

【武田邦彦】昨日の台風 19 号で”強い怒り”が込み上げて ...

<https://www.youtube.com/watch?v=yiOuQ1Quw34>

2019/10/14・【武田邦彦】昨日の台風 19 号で”強い怒り”が込み上げてきました！ 今回 3 枚のレッドカードを出しましたが、この人達は拡散して罰する必要があります

ビデオの時間: 10 分

閲覧数: 187K

「温暖化が進む以前は、台風は大きかったんですよ。これは、学者レッドカードなんですけど、海水面の温度が高いとですね、蒸発する水が増えますから（蒸気圧が増えるっていうんですけど）台風が発達するように見えて、そういう予想があったんですが、現実には 20 世紀の台風を整理しますと、当然ですけど、1950 年～1980 年ぐらいに大きいのがあって、それ以降の台風ですね、本格的に 1970 年ぐらいまではわずかですけど寒冷化してましたから、温暖化して温度が上がり始めてから、むしろ台風は小さくなっているんですね。だいたい平均して 20hPa ぐらい小さくなっている。」

「レッドカードは報道が一番ひどくて、ひどいのは地球史上最大級だなんていったんですね。武士の情けで、どこの新聞かは言いませんけれど。」

「こんどの台風は、100年間の日本の台風の歴代10位にも入らない。」「(その新聞社は)犠牲者8000人もあり得る。」「拡散して罰しなければいけない。」

「第2番目のレッドカードは学者ですね。終わった後の学者とか気象予報士、海水面が高いから、台風の勢力が保たれたと、大きくなった。実績が出ないまではそう思っていたんです。東大の先生は間違った計算をして、温暖化したら台風は大きくなるって言っていた、ずいぶん前ですけれど。みながずーっと使っている。ところが温暖化するにつれて、台風が小さくなっている。これをまづ説明せんといかんです。」

こちらの動画では被害も死者50人程度、少なくて済んだと言っている。(その後、被害者は増加して、最終的に死者100人強)。

台風などの災害予測が(その記事の程度は別にしても)やや過大になることは、多少はやむを得ない気がする。また、東大の学者で、「温暖化すると台風が大きくなる」といった人はいるかどうかは知らないが、先ほど書いたように、IPCCなどは、単純に台風が強くなるとは言っていない。

他にも説はあるようだが、以下のように、温暖化によって台風の原動力となる大気の循環が弱くなるとする予測がある。

論文中にも、推論には多くの不確定要素があることが書いてあるのだが、少なくとも、温暖化によって水蒸気量が増加したから台風が増加・巨大化する、といった単純なものではないことは、2006年の段階では十分に認識されている。

2006年度秋季大会シンポジウム「台風—伊勢湾台風から50年を経て—」の報告385

2008年5月27(台風;地球温暖化;大気大循環モデル(GCM))

5. 地球温暖化で台風はどうなるか 杉正人

https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2008/2008_05_0027.pdf

温暖化により熱帯の大気の上層が下層より暖まって大気の成層が安定化し、熱帯の大規模な大気の循環が弱くなるのが台風の数の減少と密接に関係していることが示された。大気が安定になると、積乱雲の活動によって同じ量の凝結熱が放出された場合に、その加熱によって発生する上昇流や補償下降流は弱くなる。温暖化した場合には、大気中の水蒸気量が増えることにより降水量も増えるが、降水量(凝結熱)が増えることにより上昇流が強くなる効果と、大気が安定化することにより上昇流が弱くなる効果とを比べると、後者のほうが大きい。このため、温暖化すると熱帯の大規模な大気の循環が弱くなるのである。

(中略)

温暖化で、台風の総数が減るにもかかわらず、強い台風が増加することについては、一種の競争原理によって一部の台風が限られたエネルギーを独占して発達するという可能性が考えられる。

このことは、1950年代に台風の中心気圧が低かったことについても、当時はそれほど大きくなかった温暖化の影響が、複雑な要素がからみあうことで起きたことさえあり得ることを示している。

台風数の減少については、この論文に限らず、いくつもの論文が同様の予測をしている。

ココが知りたい地球温暖化 Q2「台風やハリケーンによる被害の増加は温暖化の影響？」

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/10/10-2/qa_10-2-j.html

IPCC 第5次評価報告書では、21世紀末の温暖化が進んだ世界では全球的には、熱帯低気圧全体の発生数は減少または変化しないものの、強い熱帯低気圧の発生数は増加し、その最大風速や降水強度が現在より増加する可能性が高いと報告されています(図1)。その一方で、海域ごとの将来変化では、どちらかと言えば強化されるとまとめられており、不確実な点もまだ多いようです。

武田氏だけでなく、日本の評論家・生物学者・早稲田大学名誉教授・山梨大学名誉教授で、養老孟司氏との共著『本当の環境問題』(新潮社、2008年)(p.3「はじめに」)で書いたが、10年前、この書籍について評論を書かせていただいた)などで「温暖化懐疑論」を展開していることで知られる池田清彦氏や、先ほども紹介したキャノングローバル戦略研究所の杉山大志氏も同じようなことを言っている。

MAG2NEWS

2019.11.11 319 by 池田清彦『池田清彦のやせ我慢日記』

池田教授の憂鬱。人為的地球温暖化という似非科学を信じる日本人

マスコミは、最近、台風の勢力が強くなり、数も多くなり、被害も甚大になったのは、温暖化のせいだと、何のエビデンスもなく、垂れ流しているが、そもそも、台風の数はこの半世紀を通じて微減傾向にあるし、勢力も1950年代や60年代の方が強かった。そういうことをTwitterに書くと、居丈高にエビデンスを見せろという人がいるが、気象庁のサイトで公開されているのだから自分で調べればいいのにね。そういう人に限って自説のエビデンスを示したことはない。

2020/03/27 温暖化の政策科学

杉山 大志 キャノングローバル戦略研究所 研究主幹

<http://ieei.or.jp/2020/03/sugiyama200327/>

「台風は強くなっていない、と IPCC は言っている」

(引用者註：アメリカの台風事情を示した上で)

これはじつは日本でも同じで、近年は強い台風が来なくなった。図6は日本上陸時の台風の中心気圧のランキングである。1970年ごろまでは強力台風が頻々と上陸した。特に昭和の三大台風(伊勢湾台風・室戸台風・枕崎台風)は、大きな被害を出した。対照的に、1993年以来、このランキングに入る強力台風が無い。

ちなみに杉山氏も、上記 URL のホームページで、武田氏が使用した気象庁 HP の表を使っている。

池田、杉山両氏とも、書いている事実は間違っているわけではない。台風の「中心気圧」は1950～70年代の方が低い(しかし、先ほど書いた通り、だから「勢力が強い」とは単純には言えない)。ただ、かれらの文脈では、台風には大きな変化は見られない、むしろ強いものは減っているから温暖化は起きていない、または、温暖化しても台風などによる自然災害はそれほど増えない、と暗に主張しているように見える。しかし、温暖化がもたらす台風への影響を、中心気圧だけで説明するのでは不十分である。

確認だが、最初に書いたように、評価報告書は、確信をもって台風が増加するとか、強度が増すとか言っていない。主張しているのは、「気候の極端化」による豪雨災害の増加である。

第4項 世界と日本の平均気温

武田氏は、1950年～1980年に「世界が」寒冷化(人為的エアロゾルによるとされる)しているときに台風の強度が強かった、と言っているが、実は、1950年代～60年ぐらいまでは、日本がそれまでよりも「温暖化」していた時期になる。70年代あたりまで安定した後、80年あたりで一度下がり、90年代に増加に転じて、その後、一貫して増加している。

武田氏や杉山氏が示した表を見ると、私が気温グラフと表を見比べた印象としては、台風の中心気圧が低かった時期と、日本が温暖だった時期とは割と重なっているように見える。

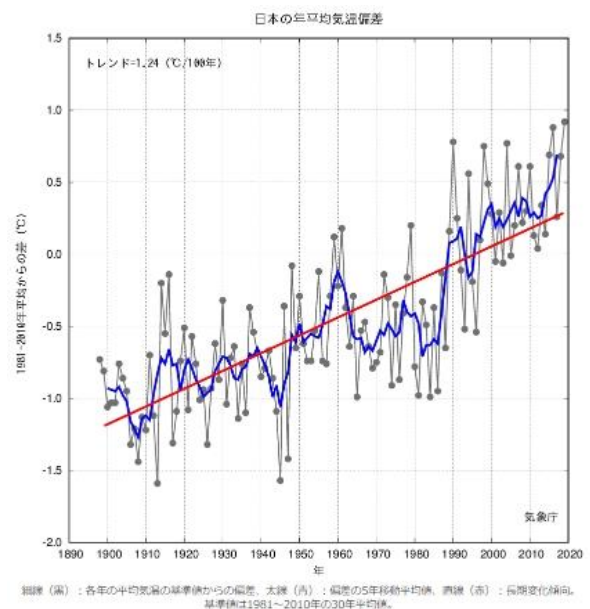


図2-9 日本の年平均気温

出典：気象庁ホームページ

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html

何も、1960年前後の気温が高かったから、その当時に巨大な台風が発生した、と言いたいのではない。

96 | 台風の発生する気象条件は、単に海水温だけとは限らない。温暖化の台風への影響も、単に強さの変化とは限らず“大きさ”、水蒸気量（絶対湿度）、速度なども考えられる。1960年代の気象条件が台風にどのように影響したのかの分析は、専門家の間でも意見が分かれるのではないかと思われる。

「温暖化」には地域差があり、「世界平均」だけを見ていては、日本における現象は理解できないのではないか、というのが、素人である私の印象である。

第5項 雨量増加

先ほど述べたとおり、台風19号については、雨量の多さが特徴的だったとする指摘がある。以下、台風19号到達前の段階での指摘である。

台風19号 長時間荒天 めったにない大雨や暴風警戒
日本気象協会 本社吉田 友海
2019年10月10日 12:58
https://tenki.jp/forecaster/t_yoshida/2019/10/10/6226.html#sub-title-a

今回の台風の特徴は台風を取り巻く活発な雨雲が大きいことです。このため、台風本体の活発な雨雲が長い時間かかり続け、半日以上、強い雨が降り続ける恐れがあります。台風の接近前から秋雨前線が本州付近に延びるため、台風の上陸前から雨が降り、さらに雨量が多くなる恐れがあります。また、暴風域が大きいのも特徴です。10日正午、現在の台風の暴風域は240キロと大きくなっています。このため、台風が接近、上陸すると、半日以上と長い間、暴風が吹き荒れる恐れもあります。

気象庁ホームページに、1日の降水量の最高記録をランキングにしているものがあるが、それを見ると、実際、今回の台風19号の降水量に、神奈川県箱根町が歴代の1位に入り、その他、20位の中に2地域入っていることがわかる。ちなみに、過去に、1日で3地域が入っている台風または豪雨が2回あるが、いずれも2000年以降（2005年と2011年）である。

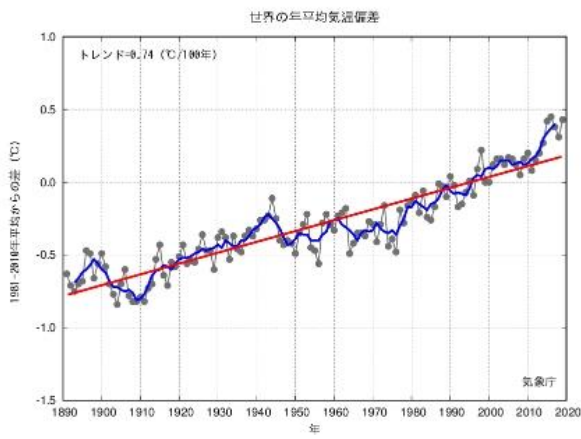


図2-10 世界の年平均気温

出典：気象庁ホームページ
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html

ホーム > 各種データ・資料 > 過去の気象データ検索 > 歴代全国ランキング

歴代全国ランキング

日降水量（各地点の観測史上1位の値を使ってランキングを作成）の抜粋

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php>

（2019年10月12日が台風19号の上陸日）

1 神奈川県 箱根 922.5 2019年10月12日

13 静岡県 湯ヶ島 689.5 2019年10月12日

18 埼玉県 浦山 635.0 2019年10月12日

武田氏は中心気圧と風力、死亡者で、台風19号が大したことないといっているが、台風19号では、河川の氾濫による被害が非常に多く、被害の程度＝台風の強さではないことは、このことからわかる。以下のような指摘もある。

agora.ex.nii.ac.jp: 北本 朝展 @ 国立情報学研究所 (NII)

デジタル台風：台風の強さと大きさ - 気圧と風速の単位 1. 気圧や風速の単位

<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/help/unit.html.ja>

そして1999年には弱い熱帯低気圧（Tropical Depression）による大雨が原因となり、玄倉川水難事故という大きな事故が発生。台風と熱帯低気圧との違いは風速のみであり、雨に関しては全く関係ないにもかかわらず、「弱い」という表現が防災上の重大な誤解を与えたかもしれない。そのような反省に立って、2000年以後はこれらの階級表現が廃止されました。

（参考）

デジタル台風：台風インパクト指数

<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/disaster/help/impact.html.ja>

これは、いまの気象学が台風を表現する際の問題なのかもしれない。雨量が問題になることが想定されるのであれば、中心気圧や最大（瞬間）風速など、台風を表す数値が、今後の災害予測に対応できないものになっている可能性がある。

第6項 速度減少

中心気圧や最大風速などに比べて台風被害が大きくなる要素は、雨量だけではない。その一つに、台風自体の移動速度が遅くなっているとする指摘がある。台風が遅くなれば、同一地域における降雨の時間が長くなり、河川氾濫の原因となり得る。

最大風力がそれほど大きくなるとも、吹いている時間が長くなれば、暴風による被害が大きくなる。

台風は赤道付近（緯度5°～25°あたり）で発生した熱帯低気圧が、その後、海水から供給された水蒸気によって発達してできる。その後、日本を通過するまでの様子を衛星画像などで見ると、台風が自ら回転してコマのように自力で移動しているように見えるが、実際には、台風自体は自分で動くわけではなく、貿易風や偏西風などの風によって運ばれ、日本近海や、東南アジアに移動してくるのであるが、温暖化が偏西風に影響を与え、そのことが台風の減速につながっているというのである。

温暖化で台風速度10%遅くなる？ 被害大きくなる恐れ 朝日新聞

<https://www.asahi.com/articles/ASN18563PN18ULBJ008.html>

気象研の山口宗彦主任研究官らは、今世紀末に地球の平均気温が産業革命前より4度（現在より約3度）上昇するとの想定で、気候の変化をコンピューターを使って推計。日本上空の偏西風が北に押し上げられるなどの影響で台風の進路や速度が変わり、日本列島周辺では平均時速が約10%遅くなるとの結果が出た。例えば東京周辺の平均時速は約31キロで、現在より4キロほど遅くなるという。

昨年10月に東日本に大きな被害をもたらした台風19号の平均速度も、平年値より約4割遅かった。温暖化が進むと、台風の数は減るものの勢力が強いものが発生しやすくなるとされ、最近の研究では雨が強くなると予測されている。

第7項 台風被害

(参考)

KYODO

土砂災害1.5倍に、国交白書 10～19年平均、気候変動影響 2020/6/26 12:18 (JST)

<https://www.47news.jp/news/4951242.html>

台風19号の死者数について、武田氏は上陸時の中心気圧が同程度である1958年の狩野川台風における死者数1138人に比べてはるかに少なかったとして、防災対策について評価をしつつも、台風19号の威力についてそれほど大きくなかったとの印象を持っているように見える。

しかし、以下の通り、台風に対する対策・認識はかなり変わっており、60年以上前の狩野川台風と、現代の台風の被害を比較するのはかなり困難ではないかと思われる。

1. 建築基準の厳格化、宅地造成の規制、堤防など水害対策の整備などが格段に進んでいる。
2. 予報技術の向上。危険の喚起について、いまはテレビ、インターネットによってされ、雨雲レーダーがスマホで確認できるが、当時はテレビが普及する途上であり、主なメディアがラジオであった。災害状況の把握も、以前に比べれば格段に進歩している。
3. 人命、安全の意識の変化は、台風19号におけるアナウンサーの「命を守る行動を・・・」という発言に

も表れている。そう表現することで、住民の方々に訴える力は違うと思う。

4. 被害総額は、物価などとも関連し、被害を受けた地域の特性、時代などあり単純には比較できない。

狩野川台風や伊勢湾台風など、歴史に名を残す台風だからといって、どれも同じような被害になるわけではなく、生じる被害は多様であることは知っておいた方がよい。

[「伊勢湾台風 Wikipedia」](#)

また当時、行政側の効果的な避難誘導や防災体制が不十分だったため、住民の台風災害に対する認識が希薄だった。行政による避難勧告も実施されなかった地域も珍しくなく、自分たちが近くに高台もなく海拔高度の低い危険地帯に住んでいることを知らないまま被災・死亡した住民も多かった。台風の接近により停電となったことも、当時重要な情報源だったラジオが使えなくなり（乾電池を電源とする携帯式のトランジスタラジオは開発されてまもなく、しかも高価だったため普及していなかった）、結果として避難の機会を失う一因となった。

[「狩野川台風 Wikipedia」](#)

狩野川台風は、あらゆる型の水害を起こした典型的な雨台風であり、特に首都圏では乱雑な宅地造成により土砂災害の被害が多発している。そのため、宅地造成の規制が求められ、1961年6月の梅雨前線豪雨で再び横浜など、傾斜地の多い大都市で大きながけ崩れ被害があったこともあり、62年に宅地造成等規制法が施行された。

しばらくして、再び上記 URL へアクセスした結果がこれ↓

非公開動画

動画へのアクセスが許可されている場合はログインすると視聴できます

ログイン

これは非公開動画です。ログインして、この動画が視聴可能かご確認ください。

(註：後日、公開を復活させていて、現在は視聴可)

第8項 西日本豪雨

「気候の極端化」について注目すべきは、2019年の台風よりも、2018年の西日本豪雨³⁴ではないか、と私は考えている。台風とは違い、強風による被害がほとんどないにも関わらず、200人を超える死者を含む膨大な被害を引き起こした。

西日本豪雨までは、温暖化による気候変動を感じさせるような現象があっても、「温暖化との関連は不明」とされてきた。西日本豪雨あたりから、気象庁が「温暖化の影響による」と言うようになった。西日本豪雨における温暖化の影響は約6%との試算も出ている。

100 西日本豪雨は「平成最悪」と評された。「平成」とついていたのは、「長崎大水害」（1982年7月23日）³⁵があったからである。長崎大水害では、比較的人口が密集している長崎市で土砂災害が多く発生したことが被害を大きくしたとされており、死者・行方不明者299人で、こちらの方が、被害が上回っている。

西日本豪雨では非常に広い範囲で被害が発生し、住宅の全半壊の数が長崎大水害より一桁違う多さとなった。同時多発的といえる洪水により、状況の把握がかなり遅れ、それが被害を増大させたと考えられている。（西日本豪雨：住家の全壊6783棟、半壊1万1346棟、一部破損4362棟、床上浸水6982棟、床下浸水2万1637棟。長崎大水害：全壊584棟、半壊954棟、床上浸水1万7909棟、床下浸水1万9197棟。被害総額約3153億1000万円）

西日本豪雨と台風19号は被害の広さなどで理解した方がよいと個人的に考えていたが、被害額を見れば、それが裏づけられる。

西日本豪雨は、被害総額1兆1580億円で、これまでの最高である1976年の台風17号による約8844億円を大きく上回った³⁶。西日本豪雨は台風7号が梅雨前線を刺激して、大量の雨を降らせたと考えられている。広域の同時決壊は西日本豪雨に引き続き、台風19号で、さらに九州豪雨（令和2年7月豪雨）でも起きた。

以上、台風19号も含めて、中心気圧だけで比較して温暖化の影響を語ることが必ずしも妥当でないことを示した。確認だが、風被害だけでなく「豪雨」にも視点を向けるべきであり、統計上、簡単には言えないが、台風19号が温暖化の影響の一つである可能性は否定できないと言える。

第3節 フィードバック

第1項 水蒸気フィードバック

温暖化が起きることによって、地球のいくつかのシステムが、温暖化を増幅、または抑制するはたらきをされると考えられている。これを「気候フィードバック」と呼ぶ。

温暖化が温暖化の原因を作る・・・ということが繰り返されれば、気温がいくらでも上がり続けることになる（「暴走温室効果」と呼ばれる）と主張する人もいる。（今のところは、これが起こるとは考えられていない。）

逆に温暖化を抑制すると考えられる気候フィードバックもあり、「負のフィードバック」と呼ぶ。温暖化の科学では、このような相互作用がいくつか考えられている。

「正のフィードバック」の中で最も代表的なものが、「水蒸気フィードバック」である。

温室効果ガスによって温暖化が起こると、それによ

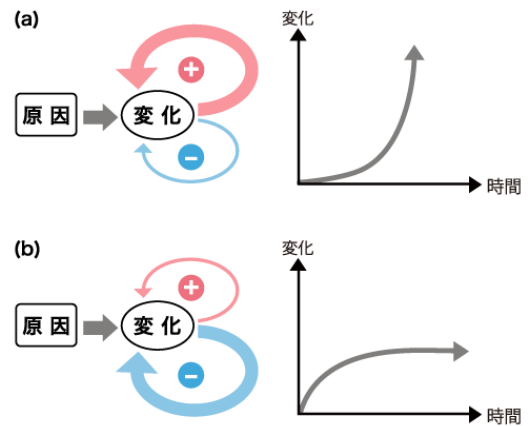


図 2-11 フィードバックの概念図

出典：ココが知りたい地球温暖化

Q15 温暖化は暴走する？

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/20/20-2/qa_20-2-j.html

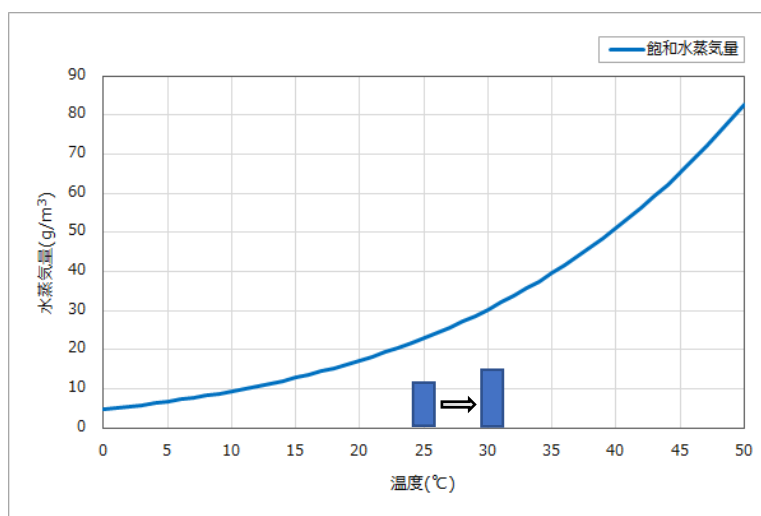


図 2-12 水蒸気フィードバックによる水蒸気量の増加

気温が上がって、湿度が50%のままだと、地球全体の水蒸気量は増加する。

(上図は、わかりやすくするため5°C上昇を仮定している)

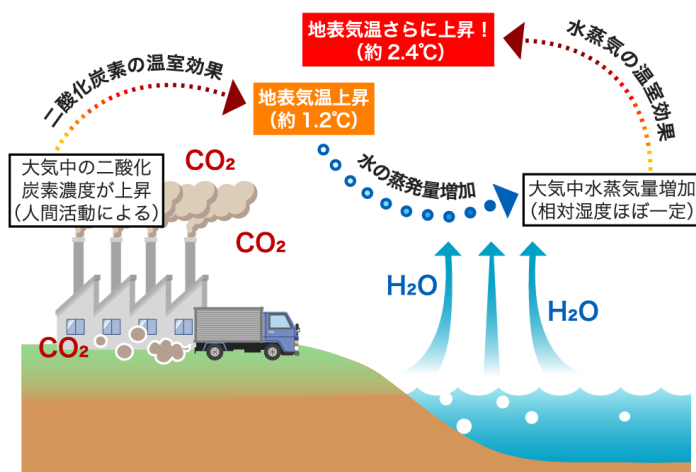


図 2-13 CO₂の増加による温暖化と、それに伴う大気中の水蒸気量増加がもたらす効果

出典：国立環境研究所 地球環境研究センターHP「ココが知りたい地球温暖化 Q9 水蒸気の温室効果」

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa_11-2-j.html

り海からの蒸発量が増加することが考えられている。水蒸気は二酸化炭素より強い温室効果を持つ気体であるため、温室効果をさらに強めることになる。

二酸化炭素が2倍になると、二酸化炭素そのものの影響は1.2°Cの上昇と考えられているが、水蒸気のフィードバックによって1.9°Cの上昇になると考えられている。(第4次評価報告書による。[図2-13]では2.4°Cとされている。)

ちなみに、これによって「湿度」が上がるとはあまり考えられていない。先ほども書いたが、気温の上昇によって、「飽和水蒸気量」も増加するからである。(→p.28「第1章第1節第4項 雲のできる原理」)

以下のように、国立環境研究所 地球環境研究センターHP「ココが知りたい地球温暖化 Q9 水蒸気の温室効果」の説明では、大気と海には水分子の交換によって湿度が50%で維持される「平衡効果」があると考えられている。

気温の上昇によって飽和水蒸気量が増加して、湿度(=実際の水蒸気量÷飽和水蒸気量×100%)が変わらない、とすると、温度上昇で飽和水蒸気量が増加するのにあわせて実際の水蒸気量が増加する(図2-13)。

すなわち、「二酸化炭素の増加」→「温度上昇」→「水蒸気という温室効果ガスの増大」→「温度上昇」となり、「正のフィードバック」となるのである。

湿度の高さは地域ごとに異なり、温暖化によって雨量の増加する地域と減少する地域があると考えられていて、IPCCなどでは、そうしたことの予測の評価も行われている。

第2項 雲フィードバック

雲フィードバックは、もともとは、温暖化によって雲が増えることで、雲アルベド(反射率)が増加する、また、水蒸気が凝結(液体化)することで大気中の水蒸気量が減るので、「負のフィードバック」が起これると考えられていた。(現在でもそのように思っている人も多い。スペンスマルク氏もその一人。(→p.47 第1章第2節第4項「スペンスマルク効果」)

さらに、雲の増減はシミュレーションすることが難しく、「温暖化懐疑論」者は、このフィードバックを持ち出して温暖化の科学を疑う武器のようにしていたところがある。

しかし、実際のところ、事は単純ではなく、上層雲、中層雲、下層雲などによって温室効果に対する影響（雲量の増減だけでなく、高度、雲の種類などによる効果の違い）が異なる。地球全体として、温暖化によって雲にどのような変化が起こるか、まだわかっていないことが多いのは事実だが、「雲フィードバック」は正の効果（すなわち温暖化を強める）である可能性が高いとされている。

まず、雲の発生は、気体が液体に状態変化する「凝結」にあたり、これは発熱反応になる（「乾燥すると吸熱する→冷える」の逆の作用）から、雲の増加は温暖化をもたらす要素を持っている。また、上層雲（巻雲（すじ雲）、巻積雲（うろこ雲）、巻層雲（うす雲））は温暖化によって、さらに高いところに移動することによって、温室効果に影響をおよぼす。

低・中層雲（積雲、乱層雲、層雲など）は、太陽放射を反射し、温暖化を妨げる効果を持つが、多くの気候のモデルが、温暖化により低・中層雲が減少することを予想していて、正味では正のフィードバックまたは全般的な影響がないと予想するものが多い。

IPCC 第5次評価報告書 よくある質問と回答

FAQ 7.1 | 雲は気候と気候変動にどう影響するのか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq7.1_jpn.pdf

雲は現在の気候に強く影響を与えているが、将来温暖化した気候にどう影響するかについては、観測結果だけではまだわからない。雲量の変化を包括的に予測するには、全球気候モデルが必要になる。こうしたモデルは観測されているものにおおよそ似ている雲の場を再現するが、重要な誤差や不確実性は残る。温暖化する気候において雲がどう変化するかについては、気候モデルによって予測は異なる。利用可能なあらゆる証拠に基づくと、正味の雲—気候フィードバックが地球温暖化を増幅する可能性は高そうである。そうであるとしても、この増幅の強さは不確実なままである。

（註：傍線引用者）

第3項 気候—炭素循環フィードバック

二酸化炭素は大気中で安定して存在しているわけではなく、一部は自然界で起こる化学変化によってつくられ、化学変化によって別の物質に変わっていく。雨・河川・海などで溶けたり、海からは逆に出てくることもある。森林と海による吸収・排出、火山活動は、二酸化炭素などの温室効果ガスを大気中に放出する。そのため、温暖化の科学では、大気中の二酸化炭素の増減を考えるために、「分子」として追跡すると同時に、「炭素C」という「元素」に注目して追跡することが行われている。

最も簡単な循環として考えられるのは、生物を介する循環である。人間活動がこれに影響を与えると考えられている。

二酸化炭素の発生には、炭素C（水素H、酸素O）を含んだ「有機物」と呼ばれる物質の存在が重要であ

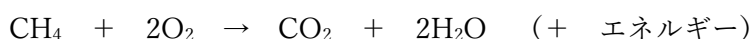
る。化石燃料や人間を含めた生命の体が、この「有機物」できている。

自然界では、この有機物が空気中の酸素O₂と結合して“燃える（または燃焼する）”ことで、エネルギーが発生し、二酸化炭素、水蒸気を出している。食べ物も大半が有機物であり、呼吸によって酸素O₂を取り込んで、体内で「燃やす」ことでエネルギーを得ている。産業活動による二酸化炭素排出も、多くが資源の燃焼によるものであるから、これに当たる。

104

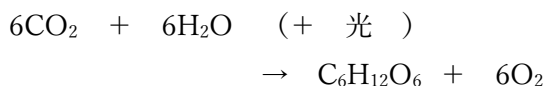
化学の分野では、そうしたものを以下のような「化学反応式」と呼ばれる式で表す。以下は、天然ガスに主に含まれるメタンCH₄による例。実際の世界では、左辺のメタンの部分には、当然、化石燃料（石炭、石油、天然ガス）にあたる複数の種類の「有機物」の混合物などが入るので、単純ではない。

こうした過程でエネルギーが発生する。（「化学反応式」には、一般にエネルギーの出入りについては書かないことになっているので、以下ではカッコつきで式に入れてある。）



上記の化学反応によって発生する水蒸気（H₂O）も温室効果ガスであるので、温暖化に関係すると思われるかもしれないが、先ほども書いたように、水蒸気は海など地球上の水分と大気との交換によって量が調整されることから、温暖化への影響を考える場合には、あまり気にする必要はない。一方、成層圏の水蒸気は対流圏の大気とあまり交換しないことから、話は別で、考慮に入れる必要がある³⁷。

有機物が「燃える」ばかりであれば、二酸化炭素は増える一方になるわけだが、逆の過程もある。植物は「光合成」によって二酸化炭素と水と光から、デンプン（ブドウ糖C₆H₁₂O₆の重合体）などの有機物を作り、酸素O₂を吐き出す。



上記の光合成の式は、実際には途中の過程があるので、あくまで簡略化したものとして理解していただきたい。（でないと生物の専門家に怒られるらしい。）

光合成は、地球の歴史46億年の中ごろ辺りから始まったと考えられていて、当時は現在よりも二酸化炭素の量のはるかに多かった。

地球の歴史で見れば、光合成によって酸素と植物の体としての有機物の量が地球上に増えていった一方で、二酸化炭素濃度は変動を経ながらも、基本的には一貫して減少してきていて、ここ200年程度の人類による二酸化炭素の増加は、「小さいが急激な上昇」に

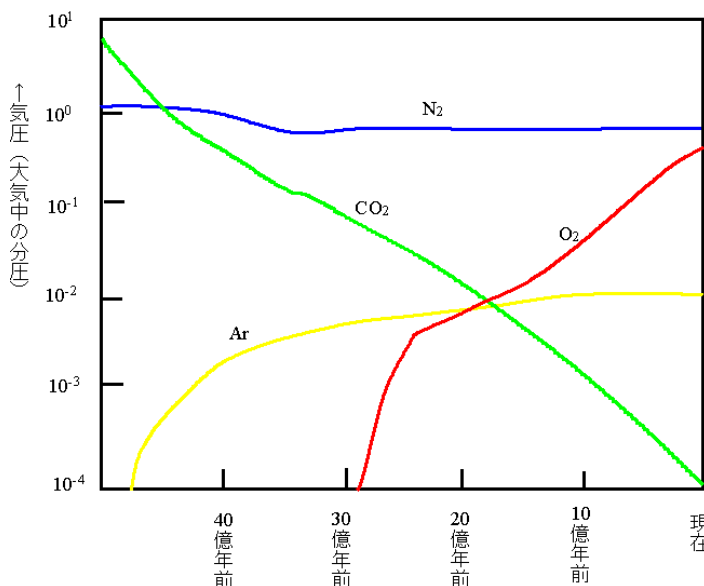


図2-14 二酸化炭素の減少

出典：山賀 HP 第二部-1-地球の歴史第4章 大気と海の歴史1. 大気の変遷 b. 二酸化炭素 <https://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyu/taikitokaiyonorekishi.htm>

当たる。(図2-14)

大気中の二酸化炭素の減少には、これ以外にも「風化」と呼ばれる現象や「海への溶解」が影響していることが知られている。

風化とは、地表にある岩石や鉱物の変質または分解する作用のことで、物理的、化学的、生物的作用が知られている。地球上の化学変化によって、大気中の二酸化炭素が炭素原子を含む別の固体物質になって大気から除かれる。

具体的には、雨が二酸化炭素を吸収して地表で炭酸塩 (CaCO_3) やケイ酸塩鉱物 (CaSiO_3) を溶かし、海では微生物によって炭酸塩 (CaCO_3) などとなって、海底に蓄積される³⁸。

光合成や風化によって炭素が気体 (CO_2) から化学変化して、一般には固体の状態になって地面の一部になることを「炭素が固定される」と表現する。

火山活動によって出る「火山ガス」の成分として最も多いのは水蒸気であるが、2番目が二酸化炭素であり、噴火は、炭素を逆に、地面から大気へ運ぶ作用となる。

ココが知りたい地球温暖化 Q15 温暖化は暴走する？

http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/20/20-2/qa_20-2-j.html

温暖化にともない陸上の生態系が二酸化炭素を吸収しにくくなる「気候-炭素循環フィードバック」は正のフィードバックと思われませんが、その大きさはまだよくわかっていません。しかし、これらのフィードバックはすでに働いているはずで、気候モデルによる研究もなされています。その結果を見る限り、温暖化を暴走させるほど大きな正であることはなさそうです。

(参考)

第5次評価報告書よくある質問と回答 FAQ 6.2 | 大気中に放出された二酸化炭素はどうなるのか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_fa6.2_jpn.pdf

「風化」は、地球の歴史全体における二酸化炭素の変化を考える上では重要であるが、現代に起こっているような短期間の温暖化においては、あまり考慮に入れる必要がない。

植物のまわりの大気中の二酸化炭素濃度を高めると、植物は普通の大気濃度の時と比較して二酸化炭素を多く吸収し、それによって植物の成長が促されて、植物への炭素固定が進むので、温暖化の抑制要因となると考えられることがある。

確かに、大気中の二酸化炭素濃度増加によって植物の成長が促進されるのは事実であるが、二酸化炭素濃度に比例するほど成長量があるわけではなく、二酸化炭素濃度が増加しても、成長の伸びは抑えられるので、二酸化炭素吸収はそれほど進まない。また、温暖化は、菌類の活動を活発化させるので、二酸化炭素増加の要因もつくる。

気温上昇、二酸化炭素増加は、植物の成長要因となりうるが、植物の種類や状況により成長量が減少することがあり得る。温暖化による乾燥もあり、地域によっても差があるものの、気温上昇が大きい場合は、総じて農作物の収穫量は減少することが予想されている。

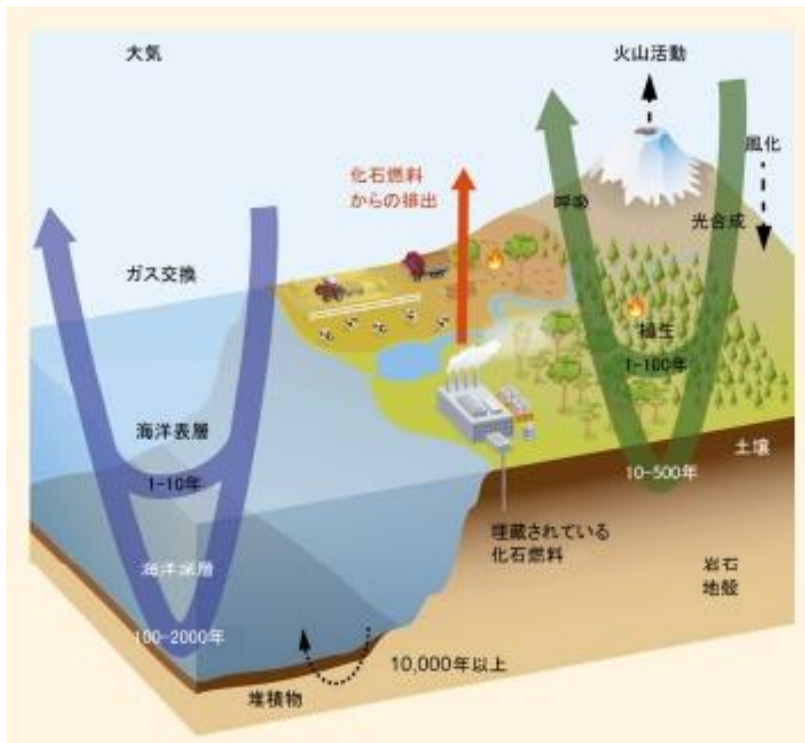


図 2-15 IPCC の示す地球規模の炭素循環の概略図

IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 よくある質問と回答 気象庁訳 (PDF 20.7MB)

FAQ 6.2 | 大気中に放出された二酸化炭素はどうなるのか?

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq6.2_jpn.pdf

第5次評価報告書 よくある質問と回答

FAQ 6.2 | 大気中に放出された二酸化炭素はどうなるのか?

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq6.2_jpn.pdf

工業化時代以前は、地球規模の炭素循環はだいたいバランスがとれていた。このことは、氷床コアの測定値から推測が可能で、工業化時代に先行する過去数千年にわたり、大気中の二酸化炭素濃度はほぼ一定であったことが示されている。ところが、大気中への二酸化炭素の人為起源による排出がその平衡を乱した。世界の二酸化炭素濃度が上昇すると、二酸化炭素と海洋表層及び植生との交換過程が変化し、同様にその後の陸域、海洋、最終的には地殻の炭素貯蔵庫間の交換過程も変化する。このように、追加された炭素は、最終的に様々な炭素貯蔵庫間での炭素交換が新たなおよその平衡に達するまで、地球規模の炭素循環によって再配分される。

ココが知りたい地球温暖化 Q5 温暖化で収穫量は減る？ 増える？

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/12/12-2/qa_12-2-j.html

環境変化に対する作物生産性への影響は、光合成を介した作物の応答に大きく依存します。光合成

は CO₂ を原料に光エネルギーと水を利用して炭化水素を生成する生化学反応です。光合成は原料である CO₂ の量が増加すれば促進されます。したがって大気中の CO₂ 濃度が増加すると作物生産性は増加します。この効果は CO₂ が肥料のような効果をもたらすので、CO₂ の施肥効果と呼ばれています。また光合成は反応のエネルギー源である光エネルギーが増加すると促進されるため、日射量の増加は作物生産性を増加させます。一方、降水量が減少して根から吸い上げる土中水分量が減少したり、気温上昇が蒸散量を増加させ、これに見合う土中水分量が十分でなかったりすると、葉中の水分量が低下することにより光合成が抑制され、作物の生産性は減少します。また光合成はその反応過程に酵素と呼ばれる蛋白質によって反応が触媒される酵素反応を含んでいます。蛋白質が酵素として機能を発現するには最適温度（至適温度）があるために、光合成は気温の影響を受け、気温変化は作物生産性を変化させます。なお光合成の速度は至適温度で極大となり、至適温度から離れるにつれ遅くなります。

このほか、葉における CO₂ と水分（水蒸気）の通り道である気孔は環境変化に対し敏感に反応し、気孔が開閉することにより間接的に光合成に影響を与えます。たとえば気孔は湿度の低下に対し、その開度を下げ、蒸散を抑えるために、CO₂ の取り込み量が少なくなり、光合成は抑制され、作物生産性は下がります。また低温が制約となって作物の生長可能な期間が短いような地域では、気温上昇は生長期間を延長させ、作物生産性を増加させます。しかしながら、すでに十分な生長期間のある地域では、気温上昇は受精から成熟までの登熟期間を短縮させるため、逆に作物生産性を減少させます[注 1]。また温暖化と関連深い作物生産性への影響として、作物の高温障害があります。作物の一生で花の芽（花芽）が形成される頃から開花、受精にいたるまでの期間は、温度変化に対し特に敏感な時期です。このためこの時期の高温による温度環境の不良は、花粉の発達阻害や受精阻害を通じて、作物生産性を減少させます。日本の水稻の場合、ほとんどの地域で8月に開花、受精の時期をむかえます。したがって温暖化による夏の異常高温は、水稻の生産性を大きく減少させると考えられています。（註：傍線引用者）

財務新聞

温暖化による穀物生産被害、世界全体では年間 424 億ドル 農研機構などの推計

<https://www.zaikai.co.jp/article/20181212/483275.html>

そこで3つの研究機関は、温暖化影響の検討のために作られた気候データベースを用いて、地球温暖化が主要作物のトウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズに過去30年に渡って与えた影響を、世界全体に関して推定した。

温暖化が起きている過去の気候条件下で推定される収量と、温暖化が起きなかった場合に推定される収量は、コメを除いた4種類の主要穀物において、前者の方が低くなった。

<https://www.afpbb.com/articles/-/3195844>

第4項 森林火災

最近はオーストラリアやアメリカ・カリフォルニアなどの森林火災によって、多数の死者、損害が出ており、その原因が温暖化にあると考えられている。

| 108

(参考)

【図解】なぜ気候変動が山火事を悪化させるのか

https://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20200826-00000004-jij_afp-sctch

森林が燃えることで二酸化炭素を放出するし、そもそも植物は二酸化炭素を吸収して酸素を放出する機能があり、それが失なわれることになるので、大気中の二酸化炭素濃度は増大し、温暖化を相当レベルで進めてしまうと考えられるかもしれないが、実際にはそれほど単純ではない。

森林火災と温暖化を関連づける多くのニュースなどには、明らかな誤解があると森林ジャーナリストの田中淳夫氏は主張している。

(参考)

<https://news.yahoo.co.jp/byline/tanakaatsuo/20190825-00139766/>

アマゾン「地球の肺」ではない。森林火災にどう向き合うべきか

田中淳夫 | 森林ジャーナリスト 2019/8/25(日) 11:09

ひとつは、植物は光合成だけでなく、呼吸もしており、森林は成長することで、炭素を固定することになるが、土の微生物は枯木を腐食させ、呼吸によって二酸化炭素を排出することで、固定された炭素をふたたび大気へ戻すことから、基本的には二酸化炭素の収支は±0になる。

森林火災によって、一定の二酸化炭素の吸収源が失われることにはなるが、すべての植物が失われるわけではなく、そこでふたたび樹木の形成が始まり、森林の復活によって炭素は再び森林に固定されるので、大気中の二酸化炭素は最終的にもとに戻ることになる。さらに、森林火災によって、土の中に住む細菌類も死ぬので、呼吸による二酸化炭素の排出も減少する。森林火災は、森林再生の一部との理解すらある。

だから、森林火災を扱った記事を読むと、森林火災を温暖化の結果として説明するが、森林火災が二酸化炭素の増加、それによる温暖化をまねくとは言っていない。

田中氏によれば、森林火災後、その土地を別の用途で利用せずに、森林再生に向けて、手を付けずに保全することが大事だという。

100年後には森林は回復して炭素固定がされるが、一時的な二酸化炭素の増加による温暖化が、他のフィードバックの引き金を引いて「暴走温暖化」を起こす可能性も考えられるので、最近の大規模森林火災において、上記の理解でよいのかは議論が必要とする話もある。

(参考)

「オーストラリアの森林火災は、「さらなる気候変動」という悪循環をもたらすのか？」

<https://wired.jp/2020/01/17/australia-wildfire-climate-change/>

気候モデルでは、一般に「炭素循環フィードバック」の効果は正である（すなわち温暖化を加速する）と考えられている。

後で述べるメタンのフィードバックと、この森林火災の要素は、第5次評価報告書には入っていないという。

第5項 ミッシング・シンク

「シンク」とは、「吸収源」のことである。

炭素循環に関しては、定量的な検討を行った結果、出入りの収支が一致しないことが温暖化研究の初期の課題として、よく知られていた。以前は「温暖化懐疑論」による攻撃の材料となっていたが、最近ではあまり言われなくなっている。

以下のように、大きな議論としては終了しているようだが、より高い精度で収支についての検討は続いており、最近でも、新たな進展があったようであるから、継続した研究が行われて、今後、精度は上がっていくものと思われる。

[地球温暖化に対する懐疑論](#)

[出典: フリー百科事典『ウィキペディア \(Wikipedia\)』 \(2020/04/03 01:47 UTC 版\)](#)

炭素循環に関する議論

ミッシング・シンク

• (主張) 初期の気候モデルにミッシングシンク(missing sink)とよばれる行方不明の二酸化炭素があることを根拠に、温暖化予測が不確実とする主張があった。[要出典]。

(反論) 森林やサンゴへの固定、地下への浸透、海への溶解などで、CO₂一部は大気から離脱し(二酸化炭素シンク)、二酸化炭素の排出量と大気中の残存量に差が生じる。初期の気候モデルでは、二酸化炭素の吸収・排出量を要素毎に合算した値が実測値と整合せず、ミッシングシンクと呼ばれた。その後、データが増えて解析が進展し、主に陸上生態系による吸収分として説明がつくようになり、1995年発行のIPCC第2次評価報告書(SAR)からはミッシングシンクという表現自体が消えた[73][74][75]。

(参考) HARBOR BUSSINESS Online 2020.06.13

毎年0.4%の炭素を耕作地の土壌に加えることが、地球温暖化の解決につながる!?

<https://hbol.jp/220721>

第4節 水資源への影響

第1項 雪氷アルベドフィードバックと土地利用

| 110

氷床、海氷は太陽光を反射する効果があるが、これらが増えると、地球表面の太陽光（放射）の反射率（これを「アルベド」という）を変化させることで、「地球のエネルギー収支」を変化させる。

$$\text{吸収率} = 1 - \text{アルベド (反射率)}$$

例えば、私たちが日常的に使用している鏡は光のかなりの割合を反射し、アルベドがおよそ1となるので、鏡にはほとんどエネルギーが吸収されない。雪や氷が覆われている地域は鏡ほどではないがアルベドが大きく、エネルギーを吸収しにくい。しかし、気温が上昇すると、地球表面上の氷が溶け、陸地の土や海水が露出することで地球表面の反射率が下がり、太陽光（放射）の吸収率が上がり、地球表面温度が上昇し、表面上の氷を溶かし、・・・という循環が続くことになる。

このようなフィードバックを「雪氷（せつびょう）アルベドフィードバック」と呼び、「正のフィードバック」であることが知られている。

温暖化の影響は、北極・南極圏に表れることが知られており、北極は今年、平年より4°C温度上昇していて、最高気温が摂氏20°Cに達したと報道されている。北極や南極の温暖化は他の地域に比べて大きくなることが知られている。また、氷の溶けかたは、予測が困難で、不確定要素が高いものとも考えられている。

実は、この「アルベドフィードバック」は、雲の影響とともに、すでにアレニウスの時代から考慮されていたものである。（計算には入れなかったと思われる。）

「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」

スヴァンテ・アレニウス

哲学雑誌および科学刊行物

シリーズ5、第41巻、1896年4月、237-276ページ（筆者訳）

温度変化の結果として、考慮される地球の表面の部分がそのアルベドを変えないのであれば、この理論は有効です。この場合、まったく異なる状況が発生します。たとえば、現在雪に覆われていない地面が、気温の低下により雪で覆われた場合、最後の式で β だけでなく ν も変更する必要があります。この場合、 α は β と比較して非常に小さいことを覚えておく必要があります。

（注： α は「太陽熱」の吸収係数、 β は大気による放射の吸収率、 ν はアルベド）

This reasoning holds good if the part of the earth's surface considered does not alter its albedo as a consequence of the altered temperature. In that case entirely different circumstances enter. If, for instance, an element of the surface which is not now snow-covered, in consequence of falling

temperature becomes clothed with snow, we must in the last formula not only alter β but also ν . In this case we must remember that α is very small compared to β .

「アルベド」という用語を日常で使う人はほとんどいないと思われるので、社会的に理解を深めることを重要と考えるとすれば、「雪氷反射率フィードバック」と呼んだ方がよいかもしれない。

一方、氷からは離れるが、「土地利用」はアルベドフィードバックと関係していて、実は、森林を伐採すると、負の強制力になる（すなわち温暖化を抑制する）可能性が指摘されている。

第4次評価報告書faq 第2章 大気成分と放射強制力の変化

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_es_faq_chap2.pdf

主に正味の森林破壊による土地被覆の変化は、地表アルベドの上昇により、 $-0.2[\pm 0.2]$ W/m²の放射強制力をもたらした。その科学的理解度はやや低い。雪に付着した黒色炭素エアロゾルは地表アルベドを減少させ、 $+0.1[\pm 0.1]$ W/m²の放射強制力をもたらしたが、その科学的理解度は低い。その他の地表特性の変化も、放射強制力による定量化ができないようなさまざまな過程を通して気候へ影響を与えるが、それらの科学的理解度は非常に低い。

第2項 海の吸収

炭素循環フィードバックと関連して「海の吸収」は、温暖化の科学を考える上で重要な要素である。海では二酸化炭素の溶解と放出によって大気と海の間でガス交換が行われる。水は、物質として基本的には最も比熱が大きく、「1」とされ、比熱の基準値となっている。膨大な海水が、9割の熱を吸収しているともいわれる。

一方、熱の吸収によって生じる「熱膨張」は、後で述べる「海面上昇」の一因となる。

さらに、海水は大気中の二酸化炭素を吸収する性質もあるので、海は、基本的には、地球温暖化を抑制する性質を持っていることになる。

海は想定以上の熱を吸収、気候変動影響か 研究

2018年11月24日 5:49 発信地：パリ/フランス [フランス ヨーロッパ] 訂正内容

このニュースをシェア

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deep/deep.html 太平洋ミッドウェー

島の砂浜（2016年9月1日撮影、資料写真）。(c)SAUL LOEB / AFP

【11月2日 AFP】海が過去25年間に吸収した熱の量はこれまでに考えられていたよりも多かったとの研究論文が、英科学誌ネイチャー（Nature）に掲載された。地球が気候変動の影響をより受けやすくなっていることをうかがわせる内容だ。

海は地球表面の3分の2を占めており、生命維持に極めて重要な役割を果たしているが、国連（UN）の「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の最新の評価によると、人間が排出した二酸化炭素によって上昇した気温の熱量の90%を海が吸収している。

深さ700mまでの表層水と、それより深い深層水（海の深さは平均3800m程度）が平均1000年（最長2000年）の周期で循環していて、「海洋の大循環」（または「熱塩循環」）と呼ばれる。例えば、高校地学の資料集である浜島書店の「ニューステージ新地学図表」では、[図2-16]のように説明されている。

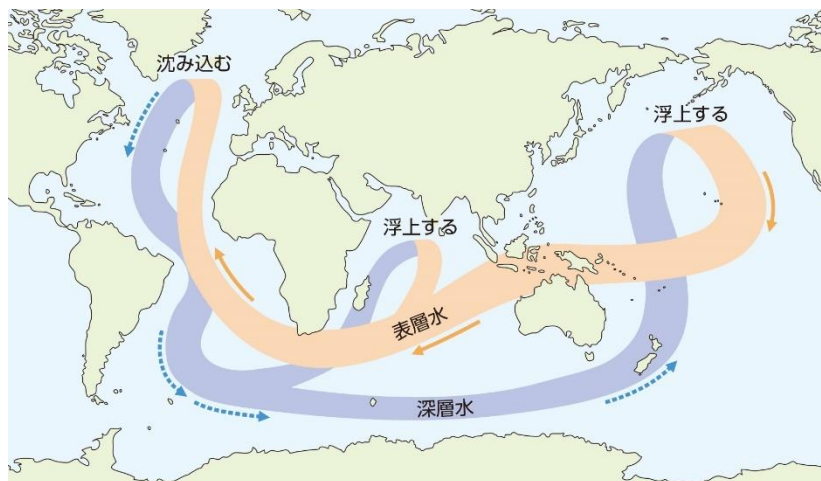


図2-16 海洋の大循環（熱塩循環）

出典：浜島書店 ニューステージ 新地学図表

この入れ替わりが早ければ、二酸化炭素を吸収した海水は深層に移動していくのだが、海には、二酸化炭素の吸収を緩和するメカニズムがあることが知られており、二酸化炭素の増加が早いため海は十分に二酸化炭素を吸収しない。一方、海は大気から熱を吸収することで、大気の温暖化を数十年遅らせると考えられているので、温暖化は二酸化炭素の増加に遅れて起こることがわかっている³⁹。

さらに複雑なのは、水は、一般に温度が高くなると固体の物質を溶かしやすく、気体の物質を溶かしにくくなる。温暖化すると、海洋中に溶けていた二酸化炭素が大気に戻ることになるので、二酸化炭素による温暖化を促進することが想定されているのである。

こうしたことがわかる前には、大気中に排出された二酸化炭素は海が吸収してくれるから、二酸化炭素は必要以上に増加しないと考えられていた。

CO₂濃度の変動は気温変動に遅れている（ラグがある）skepticalscience（作者訳）

<https://skepticalscience.com/translation.php?a=7&l=11>

例を挙げると、1.8万年前、南半球に当たる日射量が春季に上昇しました。それによって南極の海氷は後退し、南半球の氷河が融解しました(Shemesh 2002)。氷の減少によって正のフィードバック効果が生じ、氷からのアルベド効果をも減少しました。これは温暖化を加速しました。

南極海が温まると、CO₂の水への溶解度は低下します(Martin 2005)。海洋はそれによってCO₂を大気へと放出する。深海がどうCO₂を放出するか正確なメカニズムはまだ分かっていないが、海洋における鉛直混合と考えられます(Toggweiler 1999)。このプロセスは800～1000年かかり、CO₂濃度は1000年あたりの周期で上昇していると観測されています(Monnin 2001, Mudelsee 2001)。

気象庁 HP

海洋への熱の蓄積について

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/climate/knowledge/glb_warm/ohc.html

地球表面の7割を占める海洋は、大気に比べて熱容量が大きいため大量の熱を蓄積しており、大気との熱のやり取りを通して様々な時間・空間スケールで気候に大きな影響を与えます。このため、気候変動の監視、解析を行うためには、海面だけでなく海洋内部が蓄えた熱量（海洋貯熱量）の変化を詳細かつ正確に捉えることが重要です。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書（IPCC, 2013）は、1971年から2010年の40年間で気温の上昇や氷の融解などを含む地球上のエネルギー増加量の60%以上が海洋の表層（ここでは海面から深さ700mまでを指します）に、およそ30%は海洋の700mよりも深いところに蓄えられたと見積もっています（図1）。IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書（2019）では、海洋の温暖化は人間活動の直接的な結果であると指摘しています。

第3項 海面上昇

温暖化が進むことで起きるとされる海面上昇は、確実性の高い現象に属する。

海水の温度が上がることで海水が熱膨張することが最大の要因で、次が南極およびグリーンランドの「氷床」（陸地の上に乗っている氷）の融解であるが、最近は氷床の融解の影響が大きくなっていると考えられている。

温暖化によって北極の「海氷」（海に浮かぶ氷）も溶けるが、南極が大陸であるのと異なり、北極には陸地はなく、海に浮かぶ「海氷」があるのみである（温暖化で海氷に隠れていた島がいくつか発見されている）。

海水は溶けても海面上昇しない。

(参考)

RUSSIA BEYOND

114 | 北極圏に新たなロシア領が出現：5つの新しい島が温暖化で？

科学・技術 2019年9月02日エカテリーナ・シネリシチコワ

<https://jp.rbth.com/science/82497-hokkyokuken-ni-aratana-shima>

1990年代、温暖化問題が世に出るようになった最初のころ、温暖化で「北極の氷が解けることで海面上昇が起こる」とした説明がされていたことがあったらしく、いまだに、懐疑論者による攻撃の種になっている。

水は、凍ったときに密度が小さくなる珍しい物質であるが、それゆえ、氷が水に浮かぶとき、浮力の関係で約1割が海水面から顔を出している。海氷があることで、周りの海水よりも密度が小さいことになるが、海面上に出ている分が、密度の軽い分を埋め合わせしていることになっている。(→[Wikipedia「アルキメデスの原理」](#))

氷が溶けて水になることで体積は小さくなるので、海面上に出ていた氷の分が海面の上昇をもたらすことにはならない。

世界の海面水位変動の要因



全球平均海面水位の上昇率 (mm/年) と要因毎の寄与

要素	1901-1990年	1970-2015年	1993-2015年	2006-2015年
海水の熱膨張	--	0.89 [0.84~0.94]	1.36 [0.96~1.76]	1.40 [1.08~1.72]
氷河の変化 (グリーンランドと南極を除く)	0.49 [0.34~0.64]	0.46 [0.21~0.72]	0.56 [0.34~0.78]	0.61 [0.53~0.69]
グリーンランド氷床と周囲の氷河	0.40 [0.23~0.57]	--	0.46 [0.21~0.71]	0.77 [0.72~0.82]
南極氷床と周囲の氷河	--	--	0.29 [0.11~0.47]	0.43 [0.34~0.52]
陸域の貯水量の変化	-0.12	-0.07	0.09	-0.21 [-0.36~-0.06]
各要素の合計	--	--	2.76 [2.21~3.31]	3.00 [2.62~3.38]
海面水位の上昇 (観測)	1.38 [0.81~1.95]	2.06 [1.77~2.34]	3.16 [2.79~3.53]	3.58 [3.10~4.06]



- 海水の**熱膨張**が海面水位上昇の主な要因
- 近年は、氷河・氷床の融解の寄与が大きい

Table 4.1

図2-17 海面上昇の原因 (熱膨張と雪氷の融解) の原因分析

出典：国土交通省ホームページ

[資料2 気候変動に伴う海面上昇量に関する最近の議論【気象研究所 提供資料】](#)

https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/dai02kai/pdf/doc2.pdf

温暖化によって、南極大陸とグリーンランドの上にある「氷床」と北極の「海氷」（海に浮かぶ氷）面積は減少しているが、南極の「海氷」面積は増加しているとされている。南極の「海氷」の増加を根拠に温暖化を否定する懐疑論者がいるが、南極大陸やグリーンランドの「氷床」は減少しており、海面上昇に影響するが、南極の「海氷」は増加しても、先ほど説明したのと同じ理由で、海面上昇を抑えることにはならない。

第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 p.17

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf

・1979年以降の北極域の海氷の減少に人為的影響が寄与していた可能性が非常に高い。南極海の海氷面積にわずかな増加が観測されていることの科学的理解については確信度が低い。これは、変化の要因の科学的説明が不完全かつ互いに競合していることと、南極域の自然起源の内部変動性の大きさの見積もりの確信度が低いためである（図SPM.6を参照）。{10.5}

・1960年代以降の氷河の後退と、1993年以降のグリーンランド氷床の表面質量損失の増加に人為的影響が寄与していた可能性が高い。科学的理解の水準が低いため、過去20年間にわたって観測されている南極氷床の質量損失の原因特定については確信度が低い。{4.3、10.5}

海は基本的に地球上ですべて繋がっているから、海面上昇は世界中で均一に起こると思われるかもしれないが、海水面の上昇には地盤沈下、潮汐、暴風、エルニーニョが加わることで地域差があることが知られており、さらに温暖化が、海上風、海流、水温、塩分濃度に影響をおよぼすことになる。

（参考）

第5次評価報告書 よくある質問と回答

FAQ 13.1 | なぜ局所的な海面水位変化は世界平均と異なるのか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq13.1_jpn.pdf

過去の記録から、およそ1万8千年前の最終氷期最盛期から6千年前までの間にかけて、海面水位が120m以上上昇したことがわかっている。（→[Wikipedia「海水準変動」](#)）

第4項 「水資源」としての淡水・氷

気候変動 2013 自然科学的根拠 政策決定者向け要約

D.3 気候変動の検出と原因特定

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5-wg1-spmjapan.pdf>

1960年以降の世界の水循環に人為的影響があった可能性が高い。人為的影響は、大気中に含まれる水蒸気量の観測された増加（中程度の確信度）、陸上の降水分布の世界規模での変化（中程度の確信度）、十分なデータがある陸域における大雨の強まり（中程度の確信度）、海面や海洋表層の塩分の変化（可能性が非常に高い）に寄与している。{2.5、2.6、3.3、7.6、10.3、10.4}

地球上に存在する水は、海水のように塩分を含む「塩水」と、塩分を含まない「淡水」に分けることができる。人々の生活の中では淡水が「水資源」として圧倒的に重要である。

「塩水」である海水は、水分の蒸発によって塩分と分離し、上空で雲となり、雨となって陸または海に落ちる。

地球表面の7割を占める海に降った雨は、再び海水に混ざるので塩水に戻ることになる。地球表面の3割に当たる陸上に降って、川、湖、沼、池、氷河などとして陸上に残る淡水が「水資源」であり続ける。

雨水は、川や湖、沼、池に流れ込むものもあるが、多くは地中に入ってそのまま地中に留まったり、地下水として地下を流れたりして海にたどり着くものが少なくない。池、湖、沼の水も、川となって流れ下り、多くが海に戻っていく。

人々は、地球表面に存在する池、湖、沼または地下水を井戸から汲み上げて水を得る。ダムは川から流れ下る水をためる役割をする。

雪として降った後に氷で地表面に残った氷（大陸氷河＝山岳氷河、氷床（規模が小さいと氷帽（氷冠）などと呼ばれる））また、生成過程で塩分が取り除かれた、海に浮かんだ海水や氷山も、そこに住む人々にとっては貴重な水資源になる。

水として飲むわけだけでなく、生活や工業活動によって水が使われると、水が汚染され、汚染された土地に流れてきた水も汚染された水となる（福島第一原子力発電所付近の地下水など）。

淡水の総量は地球上の水の2.5%、人々が使う水は0.01%程度にしかない。

（参考）

国土交通省 HP

地球上の水

https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000020.html

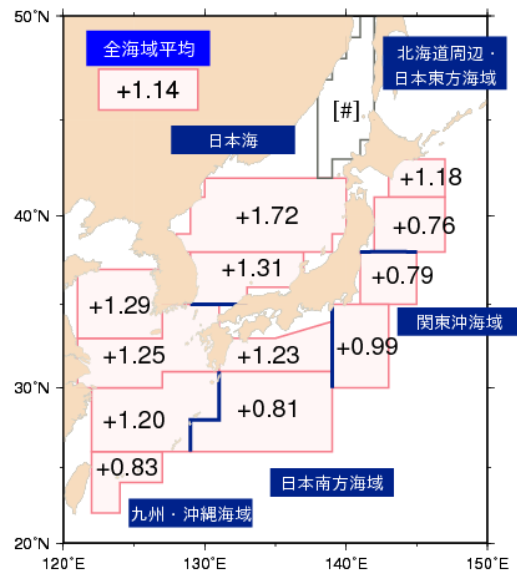


図 2-18 日本近海の海域平均海面水温（年平均）の上昇率（°C/100年）

出典：気象庁 HP

海面水温の長期変化傾向（日本近海）

温暖化で氷河が溶けると、その地域から水が流れ出てしまい、氷河付近に住む人々の資源としては失われてしまう。海面上昇は、海水の領域を広げることになり、淡水に混ざることによって、水資源の一部を塩水にしてしまう。

温暖化は水資源に影響し、多くの人々に水不足をもたらすと考えられている。

現在、海水から淡水を得る「海水淡水化」と呼ばれる技術が開発されていて、水不足の起きている地域ではすでに使用が広がっているという。ただ、「海水淡水化」のために海水の「蒸留」または「ろ過」を行う必要がある、どちらも、かなりの設備、経費がかかる。また、この行程は二酸化炭素の排出（つまりは温暖化）の原因になりうるし、稼働には高濃度塩分や化学物質の、海洋への流出が必要であり、環境への負荷が大きいと考えられているので注意が必要である。

一方で、氷床の融解や海水の温度上昇、降水の増加による塩分濃度の低下による密度の低下によって、淡水が海に流れ込むことで、特にグリーンランドあたりで海水の塩分濃度が減少し、海底の深層まで沈みにくくなることで「海洋の大循環」(→p.112 [図2-16])が止まるとの説もあったが、現在では起こる確率は低いと考えられている。



図2-19 水の循環

出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』「水循環」

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E5%BE%AA%E7%92%B0>

気象庁 HP

深層循環の変動について

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deep/deep.html

海洋の深層循環は、海水の水温と塩分による密度差によって駆動されており、熱塩循環（引用者註：「海洋の大循環」のこと）と呼ばれています。

熱塩循環は、現在の気候において、表層の海水が北大西洋のグリーンランド沖と南極大陸の大陸棚周辺で冷却され、重くなって底層まで沈みこんだ後、世界の海洋の底層に広がり、底層を移動する間にゆっくりと上昇して表層に戻るという約1000年スケールの循環をしています（図1）。

地球温暖化等の気候変動の影響により、底層まで沈みこむような重い海水が形成される海域の海水の昇温や、降水の増加や氷床の融解などによる低塩分化によって、表層の海水の密度が軽くなり、沈みこむ量が減少し、深層循環が一時的であれ弱まるのではないかと考えられています。

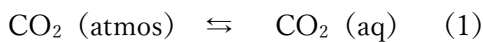
北大西洋での深層水形成が弱まった場合、南からの暖かい表層水の供給が減り、北大西洋およびその周辺の気温の上昇が比較的小さくなることが指摘されています。

第5項 海洋酸性化、サンゴの白化

118 二酸化炭素が海に多く吸収されると、海が酸性化すると考えられている。

以下の式（「イオン反応式」という）は、『[気候変動に関する政府間パネル 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 気候変動2013 自然科学的根拠 よくある質問と回答](#)』に記載されているものだが、高校の化学の教科書などにも記載されていたりする。

ちなみに、反応が「 \rightleftharpoons 」と書かれていて、双方向に向かう式になっているのは、「平衡」といって、その反応によって生じた物質から、逆にもとの物質に一部もどるという往復状態が生じるので、右と左の両方が混在していることをあらわす。



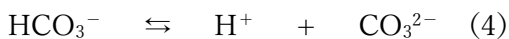
〔大気中の二酸化炭素（ $\text{CO}_2 (\text{atmos})$ ）が、一部、水に溶ける（ $\text{CO}_2 (\text{aq})$ ）〕



〔海水に溶けた二酸化炭素（ $\text{CO}_2 (\text{aq})$ ）から、一部「炭酸」（ H_2CO_3 ）が生じる〕



〔炭酸の一部が電離して水素イオン（ H^+ ）と炭酸水素イオン（ HCO_3^- ）が生じる〕



〔炭酸水素イオン（ HCO_3^- ）の一部が電離して、水素イオン（ H^+ ）と炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）が生じる〕

この反応によって生じた水素イオン「 H^+ 」が「酸性」の原因になる。

酸性の程度を表すのに「pH」（昔は「ペーハー」と呼んだが、現在の中学教科書などでは「ピーエイチ」と読むことになっている）と呼ばれる指数がある。この指数が7であると中性で、それより値が下がる（基本的には0まで）と酸性、それより値が上がる（14まで）とアルカリ性を示すことになる。値が1小さいと、水素イオン濃度が10倍となる。

海水のpHは一般的に弱アルカリ性を示し、表面海水中での約8.1から、深くなるにつれてpHは下がり、北西太平洋亜熱帯域では水深1000m付近で約7.4と最も低い。

二酸化炭素が増加することによって「海洋酸性化」が進み、pHの値が下がるが、IPCC第5次評価報告書(2013)によれば、「1750年から現代までに表面海水中のpHは全海洋平均で0.1低下しており、今世紀末までにさらに0.065から0.31低下する」と予測している。

（参考）

気象庁HP「海洋酸性化とは」

http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html

中学の理科教科書には、炭酸カルシウム(CaCO₃)に塩酸(酸性)をかけると炭酸カルシウムが溶けて二酸化炭素が発生する実験が載っているが、炭酸カルシウム(CaCO₃)の骨格を持つサンゴ(だけでなく、多くの海洋微生物)が、海の酸性化によって骨格が固まりにくい状況となるので、生態系への重大な悪影響が起ると懸念されている。



ちなみに、サンゴや有孔虫(海中の微生物の一種)については、海洋酸性化が石灰化を阻害、水温上昇が「サンゴの白化」に影響するとされている。

東京大学

サンゴに迫る海洋酸性化の脅威

骨格中のホウ素同位体の高精度分析によって解明

大気海洋研究所

掲載日：2017年12月7日

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/a_00603.html

近年の人為的気候変化の結果、サンゴ礁は高水温由来の白化現象の脅威にさらされていますが、海洋酸性化もまたサンゴの石灰化に対する脅威となっていることが示唆されました。

温暖化とは別の話になるが、雨は大気中の二酸化炭素によりpHが6.5~5.6の弱酸性を示すが、大気中に硫黄酸化物(SO_x、ソックス)、窒素酸化物(ノックス、NO_x)が多くなると、pHの値が下がる。これが5.6以下であるときに、一般に「酸性雨」と呼ばれる。

酸性雨の場合には、海洋生物にそれほど影響を与えないかもしれないが、土の中にある重金属を溶かすことで、植物に悪影響が起ることになる。

第6項 メタン(ハイドレート)

メタンは、私たちに関係するところでは、家庭で使われる液化天然ガス(LNG:Liquefied Natural Gas)に多く含まれている成分である。酸素と反応して熱が発生することから、日本でも産出される重要なエネルギー源のひとつである。また、最近では、「燃える氷」とも言われる「メタンハイドレート」が注目されていたことがあった。これは、メタン分子を水分子の結晶(十二面体、十四面体)が覆う構造をしており、日本の近海の海底に多く存在することから、日本の資源として期待されていた。

ただ、天然ガスや石油とは違い、メタンハイドレートは基本的に固体であることから、簡単に吸い上げることができず、海底に多く存在する資源であることから採掘の技術が開発されていない。

もうひとつ重要なのは、メタンハイドレートのメタンは、温室効果ガスのひとつだということである。採掘の際に、場合によっては大量にメタンが放出されることもあり得るので、採掘は現実的ではないとする意

見が多い。

逆に、海が温暖化すると、メタンハイドレート層が崩壊し、メタンが大量に大気中に放出される可能性があるとする多くの指摘がある。そのことから、メタンハイドレートは「温暖化の時限爆弾」などと表現されることがある。

IPCC 第5次評価報告書 よくある質問と回答

FAQ 6.1 | 永久凍土の融解や海洋の温暖化によるメタンと二酸化炭素の急速な放出は、温暖化をかなり加速するのだろうか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq6.1_jpn.pdf

モデリング研究と専門家の判断によれば、北極域が温暖化すればメタンと二酸化炭素の排出量は増加し、正の気候フィードバックをもたらすことが示されている。数世紀にわたり、このフィードバックは、他の気候-陸域生態系のフィードバックと同程度の大きさであるだろう。もっとも、数千年以上の期間については、炭素とメタンハイドレートの大きな蓄えが絡んでくるため、永久凍土と陸棚/陸棚斜面からの二酸化炭素とメタンの放出ははるかに重要となる。

隕石衝突による中生代・白亜紀末の恐竜絶滅を上回るとされる、古生代のペルム紀と中生代のトリアス紀の間（P-T境界）で起こった大量絶滅は、メタンハイドレートの大量溶解が影響したとの説がある。

ただ、現代ではこうしたことが短期間に起こるとはあまり考えられておらず、あったとしても数千年後の問題であるようだ。

（参考）

温暖化の時限爆弾になのか？ 海底下に潜む多数のガス貯留層

<https://forbesjapan.com/articles/detail/35061?n=1&e=30171>

FAQ 6.1 | 永久凍土の融解や海洋の温暖化によるメタンと二酸化炭素の急速な放出は、温暖化をかなり加速するのだろうか？

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_faq6.1_jpn.pdf

日本では、メタンハイドレートの調査を資源開発のためとしていたが、実は、温暖化研究のためではないか、とは私個人の勝手な推定である。

第3章 歴史

第1節 時代

「第1章 温暖化の原理」(p.22)および「第2章 気温上昇がもたらす現象」(p.77)で、温暖化問題の全体像と、問題を混乱させている基本的な誤りについていくつか述べてきた。

すでに何度か述べてきたが、二酸化炭素や水蒸気が及ぼす影響については、いまから125年以上も前に、スヴァンテ・アレニウス(1859–1927)が、その確認に成功しており、二酸化炭素2倍で4°C程度と結論づけている(現在の推定値は1.5~4.5°C程度)。その30年後に登場したG.S.カレンダー(1898–1964)(日付を知るためのカレンダーではなく、人の名前)は、1938年に二酸化炭素2倍で2°Cと推定しており、現代の科学的知見の範囲内にある。

彼らの活躍した時代は、コンピューターが発明されるはるか前であり、両者は、紙上の手計算で結果を導き出していた。

温暖化の科学において、アレニウスとカレンダーの重要性は多大であるというほかはないのだが、こうしたことが日本国内ではほとんど知られていない。

また、そうした情報の少なさから、誤情報も存在する。例えば、アレニウスの研究結果について、Wikipediaも含めたネット上で示されているものが、二酸化炭素2倍での温度変化を、「5-6°C」、逆に「2.1°C」(水蒸気フィードバックを含む)などとしているものがあるが、実際にはこれらの値は妥当ではない。

科学史で学ぶべきことは少なくない。当時の研究の様子を垣間見ることは、科学そのものへの理解を深めることになると思われる。そこで、ここでは、前章までで深めてきた温暖化に関する知識を活用しつつ、温暖化研究の歴史について、この2人の研究を中心に議論を進めることにする。

それに際して、2人の温暖化に関わる最も有名な論文を、私の方で、Google、Bing、Microsoftの提供する翻訳機能を用いて翻訳を行った。

Svante Arrhenius

”On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”

(→p.166「●参考2 (仮訳)スヴァンテ・アレニウス「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」(1896年))

G. S. CALLENDAR

「THE ARTIFICIAL PRODUCTION OF CARBON DIOXIDE AND ITS INFLUENCE ON TEMPERATURE」

(→p.189「●参考3 (仮訳)G.S.カレンダー「人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」)

2人は他にも論文をいくつも発表しているが、上記の2つの論文は、温暖化の分野ではそれぞれの代表作でもあり、題名が長いので、この小論では、それぞれ「アレニウス（の）論文」「カレンダー（の）論文」と呼ぶことにする。アレニウスは別に『世界の成立 宇宙の進化』（英文：Worlds in the making; the evolution of the universe）と題する書籍を出しているが、こちらについては、この題名をそのまま記載する。

また、日本で温暖化の歴史について調べようと思っても、都合のよい書籍やネット情報もあまりなかったので、英文のサイトである Spencer R. Weart 『The Discovery of Global Warming』（和訳：スペンサー・R・ワート『地球温暖化の発見』、<https://history.aip.org/climate/index.htm>）および、この書籍版の邦訳であるスペンサー・R・ワート著、増田耕一訳、熊井ひろ美訳『温暖化の〈発見〉とは何か THE DISCOVERY OF GLOBAL WARMING』（みすず書房、2005年）を多分に参考にしている。

上記のサイトは、アメリカ合衆国の物理学系学会の連合組織である「米国物理学協会」（American Institute of Physics、略称：AIP）（→[Wikipedia 日本版「米国物理学協会」](#)）の中に作られたページであり⁴⁰、学術的にも信頼度が高い。

東北大学 環境科学研究科 環境科学政策論 教授（兼任）明日香氏による『温暖化懐疑論批判』（http://www.cneas.tohoku.ac.jp/labs/china/asuka/_src/sc362/all.pdf）でも、参考資料として紹介しており、学術的に信頼のおける資料として活用していく。

2人の話に入っていく前に、2人が論文を出した時代について簡単に触れておきたいと思う。

（気象観測）

気象の研究は、古くは古代インドや古代ギリシャ時代までさかのぼれるようだが、科学的な観測としては17世紀ごろにガリレオ・ガリレイ（ユリウス暦1564–グレゴリオ暦1642）による（とされる）温度測定、エヴァンジェリスタ・トリチェリ（1608–1647）による気圧測定あたりから始まり、エドモンド・ハレー（1656–1742）（76年で周回する「ハレー彗星」を発見した人）による貿易風の発見があり、19世紀よりユルバン・ルヴェリエ（1811–1877）によって気圧配置による天気図がつけられるようになる。19世紀（1801–1900）中頃から電信技術の発達により、世界中の気象観測データを瞬時に集めることができるようになり、その後、20世紀（1901–2000）はじめにかけて、世界各国で多くの気象機関が設立されることとなる。

高層の研究は、観測用の気球に測定器を載せて飛ばす方法で、19世紀（1801–1900）の終わりからで、「成層圏」の発見⁴¹はアレニウスの論文発表のあとの1902年。ラジオゾンデ（気球から電波で気象情報を入力する）が普及するのはさらに後である。

アレニウスは論文で、成層圏の発見者、ティスラン・ド・ボール（1855–1913）の、地域ごと雲量データを利用している。

（数値予測）

p.70「第1章第4節第1項 なぜコンピューターを使うか」のところで述べたが、現在の数値予測（シミュレーション）の前提となる「ナビエ–ストークスの方程式」がアンリ・ナビエによって作られたのは18世紀（1801–1900）の前半から中ごろである。

大気を分析するためには、大気を「流体粒子」に分割して、それぞれの動きを計算しなければならない。

ナビエ・ストークスの方程式を含む多くの数式を実際の大気に適用するには膨大な計算が必要で、ルイス・フライ・リチャードソン (Lewis Fry Richardson、1881-1953) は、膨大な人員による手計算によって気象予報を実現させようとしたが、結局失敗した。



図3-1 「リチャードソンの夢」 123

出典：(数値予報の歴史；数値予報開始 50 周年；記念講演)1 数値予報の歴史—数値予報開始 50 周年を迎えて—新田尚

https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10608173_po_ART0009309843.pdf?contentNo=1&alternativeNo=

膨大な数値計算による気象予測を可能にしたのが、[図3-2]のENIAC (エニアック、Electronic Numerical Integrator and Computer) である。重量 28 トン、幅 24M×高さ 2.5M もあるという⁴²。

もともとは、アメリカ軍の弾道研究のために開発されたものであったが、最初に行われたのは水素爆弾に関する計算だったという。1950 年にはコンピューターによる世界初の気象数値予報に成功した。さらに、1952 年夏にはプリン米国東部を襲った大嵐の予報に成功した。



図3-2 ENIAC

出典：ENIAC history and technology
<http://the-eniac.com/machine/>

(温室効果)

「温室効果」を最初に見出したのは、「フーリエ解析」で知られるジョセフ・フーリエ (Jean Baptiste Joseph Fourier, Baron de, 1768-1830) で、Spencer R. Weart 『The Discovery of Global Warming』(スペンサー・R・ワート「地球温暖化の発見」)を含めた、複数の資料に記載されている。1827年に発表した論文『"Fourier 1827: MEMOIRE sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires" (フーリエ 1827：地球と惑星空間の温度に関する論文)』にて、「温室効果」の議論をしている。その論文の中で、フーリエ自身ではなく、M.de Saussure という研究者 (航海士?) の実験を紹介している。その実験は、(私の訳が正しければ) いくつかの仕切りで区切られ、下面を黒いコルクにした、花瓶に横から (透明容器) 片側から太陽光を入れ、それぞれの温度を調べる、といったことをしたようだが、この実験の妥当性についてはよくわからない。

フーリエは大気による太陽光の吸収を指摘しており、先駆者と呼ぶにはふさわしいと思われるが、それが水蒸気や二酸化炭素によるものだとまでは言っていない。

124

アレニウス以前で、温室効果の理解に大きな貢献をしたのが、高校化学の教科書などでも記載されている「チンダル現象」（光が水や空気の微粒子によって散乱される。雲の切れ目で光が柱状に見えるのが一例）を発見したイギリスの物理学者ジョン・ティンダル（1820–1893）である。

ティンダルは、実験室にて窒素、酸素、水蒸気、二酸化炭素、オゾン、メタン、などの気体ごとの温室効果について調べ、1872年の著書『1872 book Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat』（放射熱の領域における分子物理学への貢献）で、このことを発表している。

[Wikipedia「John Tyndall」](#)（英語版）には、ティンダルは先駆的な登山家であり、「氷山学」などにも精通していたと書かれている。温室効果研究を実施したこととの直接の関連については書いていないが、長年にわたる氷河の変化（おそらく減少）などの情報が、温室効果研究の動機付けになったと思われる。

「ステファン・ボルツマンの法則」⁴³は、アレニウスが活躍したのと同時代に確立していて、最新の理論の活用先の一つとして、地球の気候研究に適応されていったと思われる。

（参考：科学・芸術・政治）

温暖化の科学とは直接の関係はないが、アレニウスとカレンダーの活躍した時代の科学・芸術・政治を見ておこう。

19世紀（1801～1900）後半から20世紀（1901～2000）初頭は、もともとパリが中心であった万国博覧会があらゆる国で開催されるようになり、規模も徐々に大きくなっていくなど、科学に限らず、あらゆる分野で国際的な交流が進み、近代の知識が花開いていった。

理科関係で、私が物理、化学、生物、地学（天文）（実際には、科学の分野が明瞭に分かれているわけではない）で、私が近代における偉業と思っているものを紹介しておく——

- ・ 天文学では1838年にブラッドが年周視差（地球が公転することで、恒星の見える方向が微妙に変わる、その角度の差）を発見。（これにより、コペルニクス以来の地動説の問題点がすべて解決した。）
- ・ 太陽からもっとも遠い惑星である海王星が発見された（惑星だとわかった）のが1846年である。
- ・ 化学分野では1869年にメンデレーエフが元素の周期律表を考案。

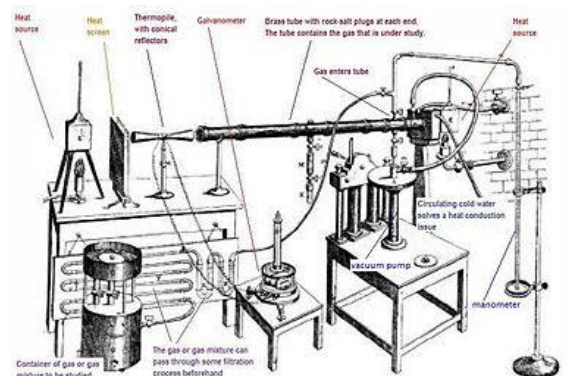
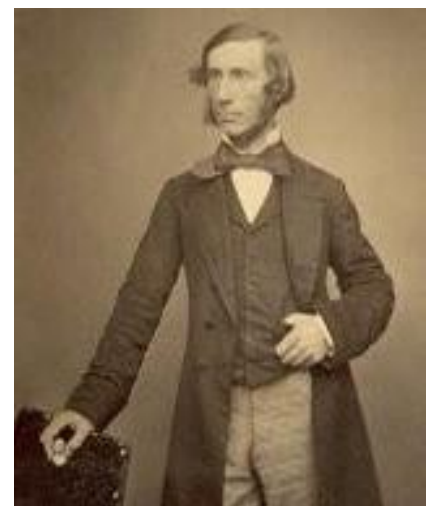


図 3-3 ジョン・ティンダル（1820–1893）

出典：John Tyndall

From Wikipedia, the free encyclopedia

https://en.wikipedia.org/wiki/John_Tyndall

- ・ 生物分野では 1856 年にメンデルが遺伝の法則を発見（評価されたのはメンデルの死後、1900 年）。1859 年にチャールズ・ダーウィンが『種の起源』を出版し、「進化論」を提唱。
- ・ ライト兄弟が 1903 年に飛行機の実験に成功。

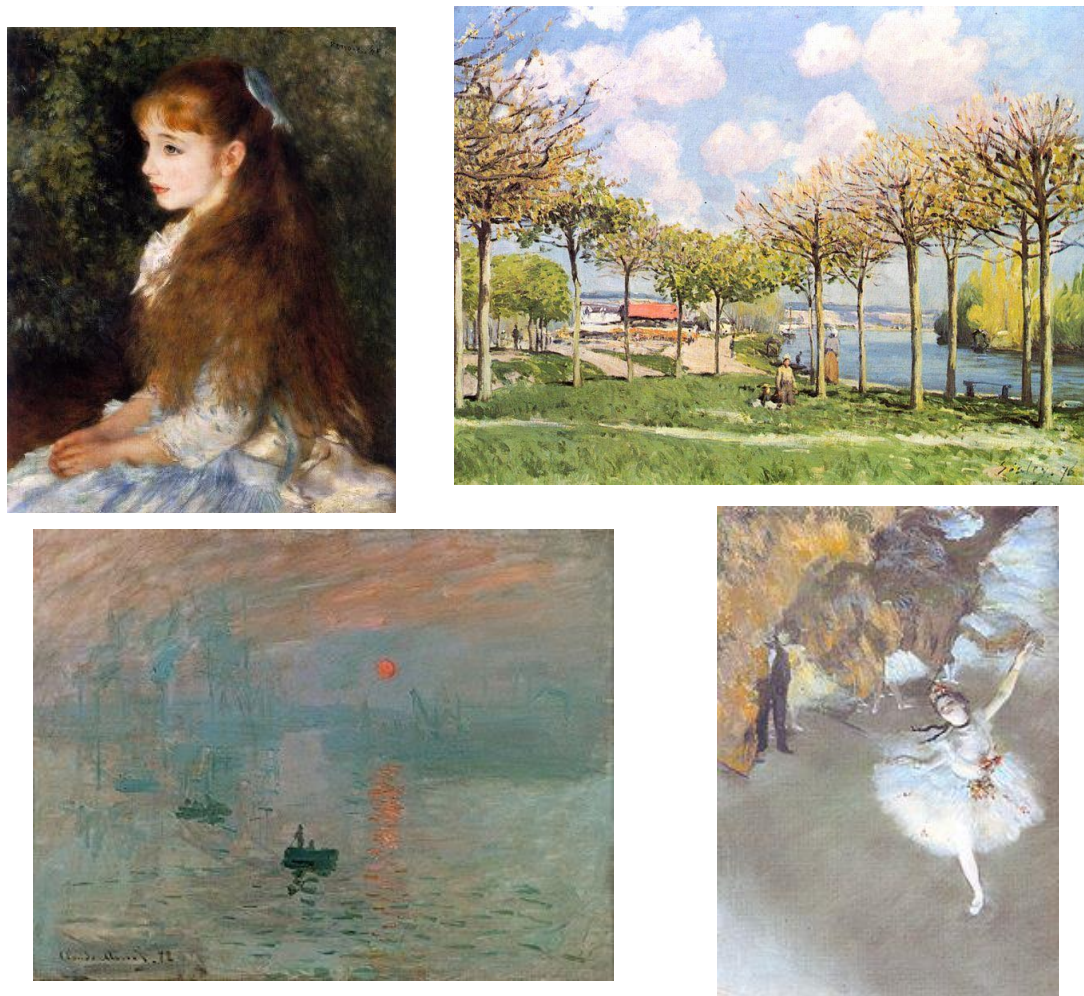


図 3-4 印象派の作品

左上：『イレヌ・カーン・ダンヴェール嬢』（1880 年） 右上：シスレー（1876 年）

左下：モネ『印象・日の出』（1872 年） 右下：ドガ『舞台の踊り子』（1878 年）

芸術では、「印象派」（カミーユ・ピサロ、エドガー・ドガ、アルフレッド・シスレー、ポール・セザンヌ、クロード・モネ、ピエール＝オーギュスト・ルノワールなど）が 1874 年から 1886 年まで、8 回にわたる展覧会を開催した時期でもある。

音楽では、ドビュッシー、マーラー、ラベル、ドボルザーク、チャイコフスキー、ワーグナーあたりが同時代になる。

ワーグナー 『ニーベルングの指環』（1869 年）

マーラー 交響曲第 1 番ニ長調 「巨人」（1889 年）

チャイコフスキー バレエ組曲「くるみ割り人形」（1892 年）

ドボルザーク 交響曲第9番 ホ短調 作品95、B.178「新世界より」(1893年)

ドビュッシー 交響詩『海』(La Mer) (1903年-1905年)

アレニウスの論文「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」を発表した1896年ごろから『世界の成立、宇宙の進化』(Worlds in the making; the evolution of the universe) (1906年)のあたりは、以下にあるように、「原子物理学」が爆発的な進歩を遂げた時期であった。この「原子物理学」が1950年代に温暖化論議(とくに「飽和論」)を解決する布石となる。

- 1895 X線の発見(レントゲン)
- 1896 ウラン放射能の発見(ベクレル)
- 1897 ブラウン管の発明(ブラウン)
- 1897 電子を発見(トムソン)
- 1898 ラジウム発見(キュリー夫妻)
- 1900 量子論(プランクの法則)(プランク)
- 1903 原子崩壊説を提唱(ラザフォードとソッディ)
- 1904 原子模型の理論を発表(長岡半太郎)
- 1904 二極真空管の発明(フレミング)
- 1905 特殊相対性理論、光量子仮説を唱える(アインシュタイン)

G.S カレンダーが「人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」(1938年)、を発表した時代も、引き続き「原子物理学」の時代である。

- 1932 中性子の発見(チャドウィック)
- 1935 中間子理論(湯川秀樹)
- 1937 中間子の発見(アンダーソン、ネッダーマイヤー)
- 1938 ウランの核分裂の発見(ハーン、シュトラスマン)
- 1938 最初の合成繊維"ナイロン"(カロザース)

(以上、科学史年表(暫定版)より <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~kazu/world/w-nenpyo.html#four>)

アレニウスが活躍した時代の少し後に、第一次世界大戦(1914年-1918年)が起こり、カレンダーが論文を発表した1938年(アレニウスの論文発表の40年後)は、日中戦争勃発(1937年)の1年後、第二次世界大戦が勃発した1939年の前年であり、世界の今後が見通せない時代であった。

第二次世界大戦では、原子物理学の成果が、1945年「原子爆弾」の広島、長崎への投下という形で表れてしまう。

さらに、ダーウィンの進化論の延長線上で、人間を「人工的」に進化させる目的で発展した「優生学」が、その内在する差別思想から「エセ科学」の様相を呈するようになり、その思想がナチスに利用され、最終的にガス室を含む1000万人もの大量殺戮(ホロコースト)につながってしまう。

第2節 スヴァンテ・アレニウス

第1項 人物

スウェーデンのノーベル賞化学者スヴァンテ・アレニウス (Svante August Arrhenius, 1859–1927 年) は、(気候ではなく) 化学分野で、中学理科1分野(物理・化学)と高校(化学)の教科書にも、その業績が紹介されている、科学史に残る有名な化学者であるが、温暖化の科学に大きな業績を残したことを知る人は少ないと思われる。

アレニウスはノーベル賞の創設に関わり、自身も1903年に「電解質の解離の理論」でノーベル化学賞を受賞した。

ファラデーはイオンが電気分解によって生み出されると信じていたが、アレニウスは電流を流していない状態でも水溶液中にはイオンが存在すると考えた。例えば、中学理科の教科書である東京書籍の「新編 新しい科学 3年」では、[図3-5]のように説明されている。

高校生は酸と塩基(アルカリ)で「アレニウスの定義」「ブレンステッドの定義」として知っている人も多いかもしれない。

さらにノーベル委員会の委員にもなったが、その立場を利用して敵対する科学者のノーベル賞受賞の妨害を画策した負の歴史もある⁴⁴。

第2項 論文の概要 (やや難)

アレニウスが温室効果を研究した動機は、ティンダルと同じく、氷河時代において、氷期と間氷期のような大きな気温の変化がなぜ起こるのか、という疑問を解決することだった。当時の氷河時代の研究は、多くの学者たちによって相当な関心の的であったようで、アレニウスが論文中で「特別な関心が彼ら(註:ストックホルム物理学会の科学者たちのこと)をつなぎとめていなければ、私は、間違いなく、これら退屈な計算を引き受ける(着手する)べき(はず)ではありませんでした。」(「On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground」p.267)などと述べていることから、アレニウスの研究の背景には、他の科学者の大きな期待(または具体的な要請)があったのではないかとと思われる。

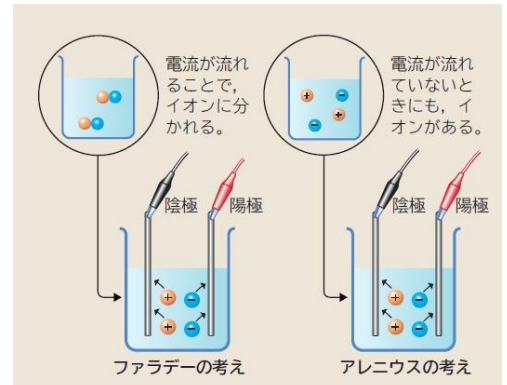


図3-5 電解質溶液中のイオン

アレニウスは、電気を流す前から、イオンは電離していると考えたことが、中学理科の教科書に載っている。

出典：東京書籍「新編新しい科学3年」

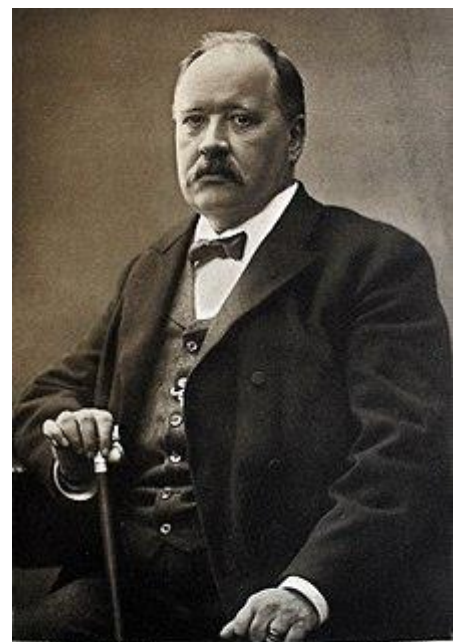


図3-6 スヴァンテ・アレニウス (1859–1927)

氷河時代の研究が盛んだったのは、間氷期である現代において、いつか訪れると思われていた氷期の到来が未来の脅威として見られていたからである。一方、当時は温暖化することが世界を揺るがす問題になるとは考えられていなかったようだ。

以下の引用にもあるように、スウェーデンの地質学者 アービッド・グスタフ・ヘグボム (Arvid Gustaf Högbom) は、「炭素循環」の研究をしており、アレニウスに研究の着想を与えたことを、アレニウス本人が論文中で言及した上で、かなりの量の引用を行っている。

Svante Arrhenius

”On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”

スヴァンテ・アレニウス

「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」(1896年)

これまでの一般的な見解は、地球は時間の経過とともに冷え込んでいるというものでした。そして、その逆が事実であることを知らなければ、この冷却が継続的に行われるはずだと断言するでしょう。私の友人であり同僚でもあるヘグボム教授との会話は、上記の議論とともに、大気中の二酸化炭素の変化が地球の温度に対して影響する可能性があるとする予備的な推定へと導いてくれました。この推定により、5~10°Cの気温変動の説明が見つかるかもしれないという信念につながったので、計算をより詳細に考え出し、今では一般大衆と批評家に提示しました。

水蒸気が最大の温室効果をもたらす事実については、ジョン・ティンダルの先行研究を、具体的な測定については、天文学者サミュエル・ラングレー (Langley) (1834-1906) の論文「月の温度」などの研究成果を活用している。アレニウスがそれまで研究の場としていた実験室ではなく、実際に大気を通過する月の光のスペクトルを分析することで、二酸化炭素や水蒸気の成分比との関係で大気の吸収係数を算定している。

波長ごとの吸収スペクトルの分析は、「飽和論」の検討に重要な意味を持つが、ラングレーのスペクトルの分析では、波長に相当するものを岩塩プリズムで屈折させた際の屈折角で表現しており、他からの引用との比較で波長を「 μ 」(ミクロン)で換算し直したりしている。そもそも、月の光では、光量が多いとはいえ、大気の変動もあり、難易度の高い測定であったと考えられるので、当時、実験室で実施されたもの比べても、ラングレーの測定は、それほど正確でなかった可能性がある。

アレニウスの論文には、「TABLE VII. Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.」(和訳:「表 VII 二酸化炭素の変化によって引き起こされる温度の変化」)という表が掲載されており(図3-7)、二酸化炭素が0.67倍、1.5倍、2.0倍、2.5倍、3.0倍になったときの温度変化の推定値が、北緯は10°ごとに0°から70°まで、南緯は60°まで、赤道から極に至る10°ごとの気温変化が記載されている。(経度については20°ごとに分割して計算している。)

この表の「2倍」(Carbonic Acid=2.0)のところを見ると、低緯度から高緯度に行くにつれて気温の数値が大きくなり、平均がおよそ5~6°Cになっていることがわかる。これをもってアレニウスが二酸化炭素2倍

における温度上昇（つまり「気候感度」）を「5~6°C」としていたとする誤解が生じているようだが、論文の最後にある「補遺」（論文の本文に対する補足）において、「雲量は異なる緯度で非常に異なり、また海上および大陸上でも異なるため、雲量は地球全体で同じであると想定したので、大気中の二酸化炭素の変化による影響は上記で計算したものと多少異なることは明白です。そこで、Teisserence de Bort が出版した図表を使用して、さまざまな緯度における雲量を推定し、現在に比べて二酸化炭素が 0.67 倍に減少した、または 1.5 倍に増加した場合、温度の変化の値について次の表を算出しました。」として、修正した計算値を示している。

雲量の地域差がそれほど大きくないと判断したので、もともとは雲量が一定と仮定していたと見られる。表を見るとわかるが、再計算を行ったのは、0.67 倍と 1.5 倍のみで、2.0 倍などについてはやっていない。これを 2.0 倍に換算すると、大雑把に見ると 4.5°C あたりになる。

TABLE VII.—Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.

Latitude.	Carbonic Acid=0.67.					Carbonic Acid=1.5.					Carbonic Acid=2.0.					Carbonic Acid=2.5.					Carbonic Acid=3.0.				
	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.4	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	9.5	9.3
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.17
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.8	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.9	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.5	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.6	6.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.65	7.4	7.5	8.0	7.6	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.3	8.22
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	7.9	7.9	7.85	9.1	9.2	9.4	9.3	9.25
-50	-3.2	-3.3	-	-	-	3.8	3.7	-	-	-	6.0	6.1	-	-	-	7.9	8.0	-	-	-	9.4	9.5	-	-	-
-60																									

266 Prof. S. Arrhenius on the Influence of Carbonic Acid

図 3-7 「表 VII 二酸化炭素の変化によって引き起こされる温度の変化」

出典： Svante Arrhenius On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground (1896 年)

現在の知見では、二酸化炭素を 2 倍としたときの気候感度は一般に $3 \pm 1.5^\circ\text{C}$ と考えられている。現在からさかのぼること 125 年、アレニウスの気候感度 4.5°C 程度をどう評価するかは、人によって（というより肯定派か懐疑派かによって）見解が割れるのではないかと思われる。現代における推定値の高い方の値になるので、当初の観測技術からすれば、かなりうまくいった結果ではないかと私は思っているが、失敗とみる人もいるかもしれない。

論文のそのほかの要素についてもコメントしておく、

・ アレニウスは、ステファン・ボルツマンの法則を活用して計算結果を算出して、具体的な計算方法についてもすべてではないが、論文に書いている。

・ 二酸化炭素による温度上昇によって、同じく温室効果ガスである水蒸気量が増加すること（→p.101「第2章第3節第1項 水蒸気フィードバック」）は考慮していて、「平均湿度一定」とする仮定は、（値そのものは違うものの）後に真鍋淑郎氏（日本の温暖化研究の第一人者）の検証でほぼ正しいことが確かめられている。

地表面の氷の減少（→p.110「第2章第4節第1項 雪氷アルベドフィードバックと土地利用」）や雲量の変化（→p.102「第2章第3節第2項 雲フィードバック」）による太陽放射（当時は「太陽熱」（solar heat）といった）の反射率の変化が結果に影響することを指摘しているが、どのように考慮に入っていたかは、論文では具体的に示されていない。（おそらく考慮に入れていない。）

ちなみに、雲量や雪氷の変化については、現代でも「不確実性が高い」内容に属する。

Latitude.	Nebulosity.		Continent per cent.	Reduction factor.			K=0.67.		K=1.5.	
	Continent.	Ocean.		Continent.	Ocean.	Mean.	Continent.	Ocean.	Continent.	Ocean.
70	58.1	66.7	72.1	0.899	0.775	0.864	-2.8	-2.4	3.1	2.7
60	56.3	67.6	55.8	0.924	0.763	0.853	-3.0	-2.4	3.3	2.7
50	45.7	63.3	52.9	1.057	0.813	0.942	-3.5	-2.7	3.8	2.9
40	36.5	52.5	42.9	1.177	0.939	1.041	-3.9	-3.1	4.1	3.3
30	28.5	47.2	38.8	1.296	1.009	1.120	-4.1	-3.2	4.5	3.5
20	28.5	47.0	24.2	1.308	1.017	1.087	-4.1	-3.2	4.3	3.4
10	50.1	56.7	23.3	1.031	0.903	0.933	-3.1	-2.7	3.3	2.9
0	54.8	59.7	24.2	0.97	0.867	0.892	-2.9	-2.6	3.1	2.8
-10	47.8	54.0	22.5	1.056	0.932	0.96	-3.3	-2.9	3.4	3.0
-20	29.6	49.6	23.3	1.279	0.979	0.972	-4.1	-3.1	4.2	3.2
-30	38.9	51.0	12.5	1.152	0.958	0.982	-3.8	-3.2	4.0	3.4
-40	62.0	61.1	2.5	0.86	0.837	0.838	-2.9	-2.8	3.2	3.1
-50	71.0	71.5	0.9	0.749	0.719	0.719				
-60										

* Cf. p. 265.

図3-8 アレニウス論文「補遺」に掲載された、気温変化を修正した表

出典："Svante Arrhenius On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" (1896年)

その他、潜熱（地球表面の水の蒸発による蒸発熱や雲の発生による凝結熱）、顕熱（対流による熱の移動）など、いくつかの重要な要素が考慮に入っていない。（→[Wikipedia「アレニウス」英語版](#)）

- ・ヘグボムの引用として、火山、風化、太陽活動、軌道変化（今のミランコヴィッチ・サイクル）なども検討に入れた上で、その影響の有無を議論している。

アレニウスの論文に具体的には書いていないが、化学的風化においてケイ酸塩鉱物のみが二酸化炭素の固定に関わるとする知見を前提として、ケイ酸塩質の土地にある河川における炭酸塩の蓄積が、石灰岩質の河川と比較して少ないことから、化学的風化による二酸化炭素の海洋への固定が大したことないと結論づけている。

これら、地球規模の炭素循環における量的な推定が、125年以上も前から行われていた（かなり大雑把であることをアレニウス自身が言及している）こと自体、意外に思われる人も多いかもしれない。しかも、量的・細部は別にしても、炭素循環の考え方は、基本的に妥当であると思われる。

- ・125年前の論文であり、地球全体に関する気温や湿度のデータはそれなりにはあったものの、現在よりは観測地点はかなり少なかったと思われる。論文にも記載があるとおり、北極、南極圏のデータは乏しかったようで、実際に高緯度の気温推定は行っていない。

アレニウスの当時は、上空における気象情報を調べる手段があまりなく、論文には気球で行った気温や水蒸気量の測定を参考にしておりと書いてある。高度によって大気の状態は複雑であることを指摘しているが、具体的にデータをどのように活用したかは論文ではわからない。

成層圏が発見されたのは1902年であり、アレニウスが論文を発表した後であったことから、成層圏も温室効果の考慮に入れていない。

おそらく、全地球レベルで上空の大気温を調べることも難しかったと思われるので、二酸化炭素増加による温度変化の推定などの地球レベルでの検証を行うのはかなり難しかったと思われる。海による二酸化炭素の吸収（当時は、海洋による二酸化炭素の吸収が、増加した二酸化炭素濃度を元に戻すと考えられていた）やエアロゾルも考慮に入っていない。

- ・アレニウスは、ヘグボムを引用して、近代以降の産業活動が地球の温度変化に影響を与えることを示唆しているが、二酸化炭素排出量の増加をそれほど多く見積もっていなかった。二酸化炭素は毎年同じくらいの割合で増加して、二酸化炭素が2倍になるのに3000年かかる（その後、数世紀と変更）と予想しており、200年弱で2倍になる（と予想される）とは考えられていなかった。

Wikipediaの英語版には、以下のような記述がある。

Svante Arrhenius From Wikipedia, the free encyclopedia

(Wikipedia「アレニウス」英語版) https://en.wikipedia.org/wiki/Svante_Arrhenius

同僚のアービッド・ヘグボムからの情報に基づいて、アレニウスは化石燃料の燃焼やその他の燃焼プロセスからの二酸化炭素の排出が地球温暖化を引き起こすのに十分な大きさであると予測した最初の人でした。彼の計算では、アレニウスは水蒸気の変化と緯度の効果からのフィードバックを含んでいたが、雲、大気中の熱の対流、および他の本質的な要因を省略した。彼の研究は現在、大気中のCO₂の増加が地球温暖化を引き起こす最初のデモンストレーションよりも、地球温暖化の正確

な定量化としてはあまり見られない。

132 | 先ほど述べたとおり、アレニウスがこの研究を行った動機は、氷河時代における古気候の理解であり、温度変化を計算する際に前提とするデータなどもかなり大雑把なものであったことは、アレニウス自身も自覚していたと思われる。

それ以前に、現在の地球温暖化における研究のように、厳密な温度変化の値を求める必要性が、アレニウス自身にはなかったと思われる。[図 3-7] の表を見るとわかるとおり、二酸化炭素が当時の 0.67 倍（3分の2）であった時の推定値も計算していて、季節の変化による違いも重視している。氷河時代における古気候や古生物の状況を再現することを目的としていたことが理由と考えられる。

これらのことから、現代から見れば重要と思われる二酸化炭素の気温への影響の表についても、アレニウスは、最後の「補遺」（論文最後の追加文章）の中で、限定した値の修正を行っているのみで、全体の再計算までは行わなかったのだと思われる。（再計算が面倒くさかった？）

しかし、現代の二酸化炭素 2 倍の推定値（気候感度）である 1.5~4.5°C に対して、5~6°C では、推定値の上のさらに 1°C 程度上の値であるのに対し、アレニウスが「補遺」でおよそ 4.5°C に修正し、さらに後の著書『世界の成立、宇宙の進化』で 4°C としたことで、現代の推定値の範囲に収まることになった。

この違いは、現代の「地球温暖化問題」では、後世のアレニウスの評価に一定レベルの重要性を持つことになると思われる。

第3項 アレニウスの気候感度は 4°C ? 5-6°C ?

ある時点から、仮に二酸化炭素を 2 倍にしたときに、何度温度変化するかを推定した値を「気候感度」と呼ぶ。この点に関して、そもそも日本でアレニウスの温暖化研究があまり知られていないことから、少なからず誤解がある。

アレニウスの推定した「気候感度」について、1908 年の『世界の成立、宇宙の進化』の段階で「気候感度 4°C」という、現在における標準的な見解とおよそ一致する「 $3 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 」の範囲に収まる研究結果が出ていた。

しかし、Wikipedia の日本版には、以下のように記載されている。

[地球温暖化に関する動きの歴史 Wikipedia](#)（日本版）

学術面での動きの経過[編集]

1827 年にジョゼフ・フーリエが温室効果を発表、1861 年にジョン・ティンダルが水蒸気・二酸化炭素・オゾン・メタンなどが主要な温室効果ガスであることを発見するとともに地球の気候を変える可能性を指摘した。これらの研究をベースに 1896 年、スヴァンテ・アレニウスは自身の著書『世界

『世界の成立、宇宙の進化』の中で、石炭などの大量消費によって今後大気中の二酸化炭素濃度が増加すること、二酸化炭素濃度が2倍になれば気温が5~6°C上昇する可能性があることなどを述べた[1][2][3][4]。このころは、二酸化炭素による冷害防止に触れた『グスコブドリの伝記』（宮沢賢治、1932年）などに見られるように、一部には浸透していたものの、こういった科学知識が一般に広く認知されるには至っていなかった。

（註：傍線引用者）

アレニウスの5~6°Cとする予測は、『世界の成立、宇宙の進化』ではなく、アレニウスが1896年に発表した「On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground」（和訳：「大気中の二酸化炭素が地面の温度に及ぼす影響について」）によるものであるが、先ほど書いたとおり、アレニウスはこの論文中の「補遺」で、雲量の緯度による違いを考慮した訂正を行っていて、二酸化炭素2倍のときの予測値はおおよそ4.5°Cである。

『世界の成立、宇宙の進化』には、以下のような記載がある。

「Worlds in the making; the evolution of the universe」（和訳：「世界の成立、宇宙の進化」）

（表紙の画像） <https://archive.org/details/worldsinmakingev00arrhrich/page/n7/mode/2up>

（p.53の画像） <https://archive.org/details/worldsinmakingev00arrhrich/page/52/mode/2up>

（註：アドレスに「page/52」となっていると、pp.52-53を表示する）

大気中の炭酸[$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{CaCO}_3$ (炭酸)]の量が現在の半分に沈むと、温度は約4°下がります。4分の1に減少すると、温度が8°減少します。一方、空気中の二酸化炭素の割合を2倍にしても、地球表面の温度は4°上昇します。二酸化炭素を4倍に増やせば、温度は8°上昇します。（p. 53）

海は炭酸を吸収することで、生産された炭酸の約6分の5を占める巨大な容量の調節因子として機能しますが、大気中の炭酸のわずかな割合は産業の進歩によって可能性があることをまだ認識しています。数世紀の間に顕著な程度に変更しました。（p. 54）

（註：傍線引用者）

「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」が、温室効果を計算した「研究論文」であるのに対し、『世界の成立、宇宙の進化』は、地球や宇宙に関する科学的知見を幅広く紹介した「啓蒙書」に当たると思われる。『世界の成立、宇宙の進化』にある4°Cは、前の論文の発表後、自分に対する研究結果（4.5°C）に対する批判や、その他、新しい知見により、アレニウスが（自ら再計算したかは不明だが）自分の数値を訂正したのではないか、というのが、私が限られた資料から導いた仮説である。

さらに、以下にあるように、Wikipedia（日本語版）では、気候感度を 2.1°C とかなり異なる値を提示している。Wikipedia なので、ただの偽情報と切り捨てるのは容易（たやす）いが、「英語版」まで調べてみると、少し興味深いことがわかった。

[Wikipedia「スヴァンテ・アレニウス」](#)（日本語版）

アレニウスは、CO₂ が半減すると気温が 4°C から 5°C 下がり、CO₂ が倍増すると気温が 5°C から 6°C 上がるとした[4]。1906 年の本ではこの値を 1.6°C（水蒸気によるフィードバックも含めると 2.1°C）と小さくしている。IPCC による 2007 年の試算では、その値（気候感度）を 2°C から 4.5°C としている。

（註：傍線引用者）

ちなみに、「1906 年の本」は「Worlds in the making; the evolution of the universe（世界の成立、宇宙の進化）」のスウェーデン語版を指すと思われる。アレニウス自身が厳密にこだわっているわけでもないようなのだが、アレニウスが、二酸化炭素のみの「気候感度」を 1.6°C としていたとすれば、現代における推定値にかなり近い。ただ、アレニウスがこのような修正を実際に行ったか？にこだわると、少し厄介な問題となる。

「アレニウス (Arrhenius)」Wikipedia 英語版やドイツ語版でこの記述はなく、記述があるのは日本語版だけである。ただ、以下の Wikipedia の海外版の「ノート」にも、アレニウスが「1.6°C」「2.1°C」に見解を変更したが、その後削除されたいことが記載されている。「英語版」には次のような記述があり、この記述を見る限り、過去には英語版でこのことが記述されていたが、その後削除されたと考えられる。

[「Talk:Svante Arrhenius/Archive 1 From Wikipedia, the free encyclopedia」](#)（和訳：「トーク:スヴァンテ・アレニウス/アーカイブ1 ウィキペディアから、自由百科事典」）（Bing 翻訳）

CO₂ の 1906 年の減少予測に必要な参照

「1906 年にアレニウスは値を 1.6°C (水蒸気フィードバックを含む: 2.1 °C) に下方に調整しました。私も参考文献でそれを見ません。それは起こったのですか? ブライアン・A・シュミット (講演) 17:38, 15 6 月 2009 (UTC)」

彼の 1908 年の著書「作りの世界」は 4C を使い続けているので、私はこの文を削除するつもりです。53 で [1] を参照してください。ブライアン・A・シュミット (講演) 03:41, 19 6 月 2009 (UTC) 1906 参照が復元され、それは参照リストにあり、とにかく 1.2 度の値は、水のない CO₂ 倍増のための温度上昇のための満場一致の許容値と一致する。製作中の世界の元のスウェーデン語版も 1906 年に書かれました。ハンス・アーレン (トーク) 00:24, 5 8 月 2009 (UTC)」

「1906 参照が復元され、それは参照リストにあり、」という記述の 1906 参照とは「Worlds in the making」のスウェーデン語版（すなわちアレニウスが母国語で著した原版）『Världarnas utveckling』（1906）のことになると思われる。これには、参照リストがある（文章は入手できず）ので、上記の記述をそのまま信用すれば、そこに「1.6°C」「2.1°C」の記述があったことになる。上記の記述にもある通り、この2つの数値は、それぞれ前者が純粋に二酸化炭素を2倍にした場合、後者が水蒸気フィードバックを考慮に入れた場合の気候感度の推定値であり、引用元が誰かはわからないが、その文献を書いた科学者の研究結果であるところの「1.6°C」「2.1°C」が『Världarnas utveckling』（1906）の参照リストに記載されていた可能性もある。

第4項 論文発表後

温室効果を地球レベルで考察したのはアレニウスがはじめてだったと思われるが、当時は、この論文に対する評価は、あまりよくなかったようだ。

まず、クヌート・オングストローム（単位Å（オングストローム、 $=10^{-10}\text{m}$ ）の由来となったアンデルス・オングストロームの子）は、赤外線について、水蒸気と二酸化炭素の吸収帯の重なりによって、二酸化炭素が増加しても温室効果に影響しないという、いわゆる「飽和論」からの反論があった。助手の Herr J. Koch は、CO₂の濃度を最初の量の3分の1まで減少させることによって、赤外線の吸収に目に見える変化が観察できなかつたとした⁴⁵。

当時のオングストロームによる研究は、測定の方法が十分ではない上に精度が低く、赤外線の吸収量の変化を0.4%に満たないとみていたが、実際には1%程度は減少していた。1%の検出を見出したとしても、オングストロームの当時の理論では、それを重視しなかつたであろうと考えられている。現在ではこの1%が、「飽和」を否定する、実験室で検出可能な証拠になると考えられている。

また、吸収帯のスペクトル分析は「飽和論」にとって極めて重要であるが、オングストロームの研究において、二酸化炭素と水蒸気の吸収スペクトルがかなり重なっていたことがわかり、「飽和論」に説得力を与えた。アレニウスもラングレーのデータでスペクトルの検討を行っているが、オングストロームの測定の方が精密だったからか、オングストロームの研究結果が評価されたようである。

これに対して、アレニウスは激しく反論したという。

当時は、「飽和論」によってアレニウスの理論は基本的に否定されたようだが、アレニウスの予測は、科学界に亡霊のように残ったという。

第3節 アレニウス論文後

第1項 「あまり知られていないパイオニア」

| 136

アメリカ物理学協会のサイトにある Spencer R. Weart 『The Discovery of Global Warming』（スペンサー・R・ワート「地球温暖化の発見」）には、イギリスの蒸気機関技師、G.S.カレンダー（Guy Stewart Callendar 1898–1964）（繰り返すが、人の名前）に対し、上記表題のような肩書が紹介されている。彼の研究は、アレニウスの研究からおよそ30年経っており、温暖化に関する関心を喚起するには、ちょうどよい時代だったと思われる。

- ・ アレニウスと同じくステファン・ボルツマンの法則を用いた「放射平衡」の説明を行っているが、アレニウスが、どのような資料をもとにどのような計算を行ったかをできるだけ丁寧に説明しているのに対し、カレンダーは事実上、ステファン・ボルツマンの式と計算結果しか書いておらず、具体的な計算についてはほとんど言及していない。論文の最後にある「議論」において、紙面の関係で計算過程をすべて説明することはそもそも不可能であることを本人が述べている。別の資料によれば、計算には12層の気層を想定したという。

「雲フィードバック」、「水蒸気フィードバック」についても言及がないため、考慮しているのかしていないのかも、論文だけではよくわからない。

二酸化炭素が2倍になった場合に2度上昇するとのカレンダーの予測は、水蒸気フィードバックのみを考慮したものであれば、現在の推定値（1.9°C程度）から見てかなり適切だったと言える。

- ・ アレニウスの論文では二酸化炭素の経年変化のデータなどはなかったが、当時は、世界各国の気象データの共有が進んでいたようで、カレンダーの論文では、50年かそれ以上前のデータを活用した経年分析が行われている。海の大循環による二酸化炭素の吸収やヒートアイランド（カレンダーは「city influence」と表現している。私は直訳で「都市影響」としている）、世界各地の気温など、実測データの「雑音」を除くなど、現状分析に重きを置いて論文を書いたように見える。

カレンダーも、ティンダルやアレニウス同様に、氷河時代に関心を持っていたようだが、アレニウスのそれとは違って古気候などの議論はしていない。カレンダーは、論文の最後で「致命的な氷期への回帰は無期限に遅らされるべきです。」としていて、アレニウスと同じく温暖化を肯定的にとらえている。

- ・ アレニウスの時代に比べ、高度差による温度、大気圧の情報はかなり進んでいたようで（おそらくラジオゾンデなどが普及していた）、高度別（3分割だが）における放射量の変化が「表V」で示されている。

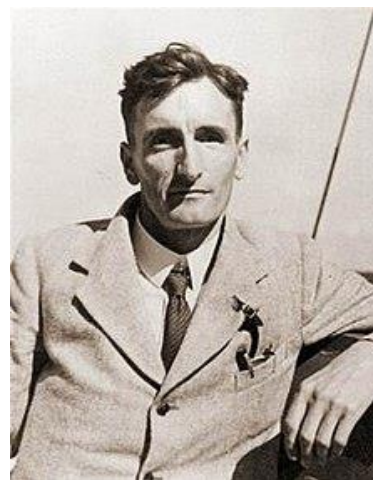


図3-9 G.S.カレンダー
(1898–1964)

- ・ 海の吸収について、カレンダーは「海洋の大循環」の周期を 2000~5000 年としている。現代では平均 1000 年（最長 2000 年）程度とされている。1924 年の論文では、海洋の吸収がなくとも、二酸化炭素が当時から 2 倍に増加するのに 500 年かかるとみていた。

海水の二酸化炭素の吸収に関する複雑なメカニズムなどについては何も書いていない（おそらく当時はほとんどわかっていなかった）ので、考慮していないと思われる。

第2項 反論

この論文で興味深いのは、カレンダーの論文のあとに「議論」が掲載されていることである（その多くが反論）。

ステファン・ボルツマンの法則を大気に当てはめた「放射平衡」によって温室効果を説明することの妥当性は、カレンダーの時代でもまだ確立していなかったらしく、そのことは、カレンダーの論文に対して、別の気象学者ジョルジュ・シンプソンが、「議論」において、大気の放射平衡による説明そのものを、以下の表現で公然と否定していることからわかる。

「G. S. CALLENDAR THE ARTIFICIAL PRODUCTION OF CARBON DIOXIDE AND ITS INFLUENCE ON TEMPERATURE」

「G.S.カレンダー 人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」(1938 年) 「議論」より

そもそも、彼（引用者註：カレンダーのこと）は、気象学者でない立場で、大気の温度分布を放射のはたらきによって説明しようとする研究によってでは、協会に貢献することはできないと思いました。大気は放射平衡ではなく、ある部分から熱をある場所から別の場所に移動して熱を受け取ることで説明することができます。第2に、大気中の温度分布は、空気の上下の動きによってほぼ完全に決定されていることを知っておく必要がありました。これにより、大気は、放射とは全く外れた温度分布のバランスに変化します。したがって、大気中の変化していく効果を1つの要因で計算することはできず、彼は、カレンダー氏が得た実際の数値結果は、効果の大きさの順序を明確に示すのに利用できないと感じました。

しかし、実際には、p.61「第1章第3節第1項 エネルギー収支図（やや難）」の図を見てもわかるとおり、対流の影響（潜熱、顕熱）はあるものの、放射平衡によって温室効果を説明しようとしたアレニウスとカレンダーの見解は大きく間違っていない。

二酸化炭素が2倍になる時期を、アレニウスは3000年（その後、二酸化炭素排出量の増加により数世紀先には変化が起こる可能性を示唆）、カレンダーは500年程度とみていた。

後の研究によれば、カレンダーが見出した1900年前後の温暖化は、当時は少なかった二酸化炭素排出が原因だったのではなく、何らかの他の自然変動だったと考えられている。

カレンダーはその後、有名になって、学会ではかなり活躍をしていたようだが、1964年に亡くなる時期は、工業活動によるエアロゾルによって寒冷化が起こっており（当時は原因不明）、晩年にカレンダーが雪かきをしている様子が見られたといわれる⁴⁶。当時からすれば200年以上先の現象を予測した科学者が、その結果を生きて見ることができない悲哀（それは現代の温暖化の研究者の方々でも同じことがいえる）を示すエピソードとして書かれたものとみられる。（生きて結果を見ることも幸福と言えるかはわからないが。）

第3項 飽和論

カレンダーが論文を発表した後も、温暖化が起こるか否かの議論はしばらく平行線をたどったようだが、1950年代（1950–1959）を中心に問題の解決が進むことになる。このころは、エアロゾルの増加によって気温がやや下降していた。エアロゾルが気温の低下に影響することが理解されたのは、後で述べるように1970年代に入ってからである。

カレンダーの論文発表の後に第二次世界大戦（1939～1945）がはじまり、大戦終了後、温暖化の科学は急激な発展を遂げる。戦時中は兵器開発のために膨大な科学研究費が使われる傾向があり、第二次大戦は結果的に科学を大いに発展させたところがある。原子爆弾（原爆）および、その平和利用としての原子力発電所（原発）などは完全に戦争の産物である。

アメリカとソビエト連邦による冷戦時代、両国は軍事的な理由から、地球上のあらゆる現象を理解する必要性に迫られた。

特に1950年代、赤外線が大気をどのように通過するかを理解することは、信号、爆撃、偵察、後には熱誘導ミサイルに必要とされ、軍事上の重要な研究テーマになっていた。恒星やブラックホールの研究に多大な貢献をしたインド系アメリカ人のノーベル賞物理学者、スブラマニアン・チャンドラセカール（1910–1995）も、このあたりの分野に興味を持っていたと言われる。

こうした科学的な発見には、実験装置などの測定技術の向上が非常に重要で、電磁気や放射性物質に関わる研究技術の向上が、当時の原子物理学の急激な進歩を後押ししたと思われる。さらに、電子軌道の分析にはコンピューターが使われるようになっていた。

こうした中で、温室効果を理解する上での懸案事項であった「飽和論」に関して、水蒸気の吸収帯と二酸化炭素の吸収帯は完全には重ならないことが分かった。実際、多数の分子の混合物である大気は、スペクトル分布がそれぞれの単体気体よりも複雑になることが知られており（分子どうしの衝突、分子運動によるドップラー効果などによる）、そもそも、水蒸気や二酸化炭素は赤外線を吸収するだけでなく再放射することから、それらの気体の増加はその回数の増加をもたらし、エネルギーを保持することができる。

さらに、大気組成も、水蒸気は低層に比べ上層で濃度が低いのに対し、二酸化炭素は大気（対流圏だけでなく成層圏まで）全体に広がりやすいことがわかり、仮に低層で飽和があったとしても上層では二酸化炭素の影響が出やすいことから飽和しないことなどが明らかになり、その結果、気層を多く仮定したモデルによって、大気の下層から上層にいたる各層でどのような変化が起こるのかなど、エネルギーバランスの変化を解明するための複雑な計算の必要性が理解された。

多くの研究者がこうした問題に取り組み、カナダ系アメリカ人で物理学者のギルバート・プラス（Gilbert

N. Plass) (1920–2004) は、「飽和論」を否定する明確な研究結果を示した。プラスは、そればかりでなく、気候変動は将来の世代にとって深刻な問題になるかもしれないと警告した。このことは、この時点で温暖化が、氷期を遅らせる好ましい現象ではなく、明らかに将来に悲劇をもたらす現象に反転したされたことを示している。

その後、こうした問題の把握のために、さらに高速な計算能力をもつコンピューターが必要とされることになる。

第4項 海の吸収

「炭素循環」は、地球全体の炭素の移動を追跡するという、きわめてむづかしい問題であったが、1950年代に国際社会で大きな問題となった核実験によって飛散した放射性炭素 ^{14}C (炭素 14) は、自然界にある ^{12}C (炭素 12)、 ^{13}C (炭素 13) から識別できるため、各地の調査によってこの放射性元素がどのように拡散したかを分析することによって、二酸化炭素の海洋や森林への吸収量が計算された。

意外にも、人類史上最悪の兵器が、温暖化の科学に貢献することとなった。

海洋の大循環（熱延循環）は、スースの研究によって、カレンダーの想定していた 2000～5000 年よりも早く、平均で 1000 年程度であることが分かった（つまり、表層水の入替わりだけを考えれば、海は、カレンダーが想定していたよりも吸収が早いことになる）が、一方で、海洋は単なる食塩水ではなく、「複雑な化学物質のシチュー」であり、二酸化炭素の過剰な吸収を抑制するメカニズムがあることが数十年ほど前からわかっていて、それを考慮に入れると、海洋が二酸化炭素をそれほど吸収しないことが分かった⁴⁷。

Spencer R. Weart 『The Discovery of Global Warming』(スペンサー・R・ワート「地球温暖化の発見」) <https://history.aip.org/climate/index.htm>

ロジャー・レベル (Roger Revelle) は、温室効果の温暖化は「産業用燃料燃焼が指数関数的に上昇し続けるならば、将来数十年の間に顕著になるかもしれない」と指摘した。また、「人間は今、過去には起こり得なかったし、将来再現することもできなかったような大規模な地球物理学実験を行っている」と書いている。(32)

Revelle did note that greenhouse effect warming "may become significant during future decades if industrial fuel combustion continues to rise exponentially."

こうしたことから、人類の産業活動によって二酸化炭素の濃度が上昇している可能性があることが分かったが、その測定は簡単ではなかった。大気の移動により、二酸化炭素の値は、場合によっては同じ観測地点で2倍になることもあり、そうした「雑音」問題を考慮した分析方法は確立されていなかった。そのため、こうした測定には、多くの地点で継続的に測定を行う必要があると考えられたが、カリフォルニア大学サン

ディエゴ校スクリップス海洋研究所教授、チャールズ・デイビッド(デイブ)キーリング (Charles David (Dave) Keeling) (1928–2005) が、南極とハワイ・マウナロア山において、新しい測定器を用いて短期間で二酸化炭素の増加を検出することができると考えた。レベルがチャールズ・キーリングに働きかけて、1958年に調査を始め、1960年代にはおよその結果が判明した。

二酸化炭素濃度は、季節の変化による増減（夏は植物の光合成によって二酸化炭素が多く吸収されるために減少し、冬は光合成が少ないことから呼吸が上回ることで増加する）を経ながら、ただ上昇しているのではなく、加速度的に上昇していったとキーリングは述べている。(『NHKスペシャル 世紀を越えて 地球・豊かさの限界 第5集 「未知の恐怖・CO₂との戦い」』)

そして、産業によって排出された二酸化炭素を海がそれほど吸収しないと仮定すれば、その増加量はおよそ予想通りだったという。キーリングの研究は、二酸化炭素の海への吸収に限界があることを示すものとなった。

この研究結果は「キーリング曲線」(図3-11)として、温暖化の科学におけるもっとも有名なグラフとして知られている。

第5項 フィードバックとエアロゾル

フリッツ・メラー (Flitz Möller) は、「水蒸気フィードバック」(二酸化炭素による気温上昇が大気中の水蒸気量を増加させ、それにより温暖化がさらに進む)を考慮したモデルを開発したところ、気温がいくらでも上昇するとする予測を得たので、それが非現実的であるように見えたことから、雲が1%増加する(それにより水蒸気量が3%減少する)ことで、「二酸化炭素が10%増加すると、温度上昇がキャンセルされる」と考えた。この予測は、数値モデルによる「温暖化懐疑論」として、温暖化を疑う人たちによって多く引用されたという。

p.102「第2章第3節第2項 雲フィードバック」でも述べたが、「雲フィードバック」は、現在では不確実性が大きいながらも「正のフィードバック」(温暖化を進める)であると考えられている。

愛媛県出身の真鍋淑郎(まなべ しゅくろう、1931-)氏は、主に海外で、多くの大気物理学者と共同して研究を行い、1967年にウェットヘラルド(Wetherald)とともに、放射だけでなく、水蒸気を含めたいくつかのフィードバックや対流による熱の移動などを考慮に入れた「1次元放射対流モデル」をつくり、このモ



図3-10 チャールズ・デービッド・キーリング (1928–2005)

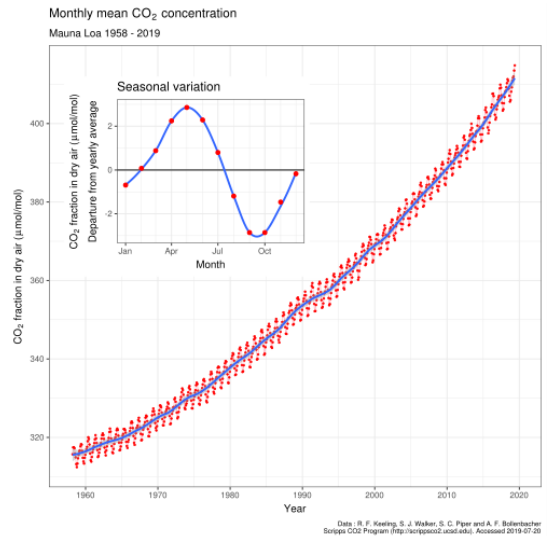


図3-11 1958年から2019年の大気中二酸化炭素(CO₂)濃度

出典：Wikipedia「キーリング曲線」

デルによって、二酸化炭素が2倍になると（気候感度）2°C上昇するという結論を得た⁴⁸。

この研究成果は、多くの専門家に「温暖化が実際に起こり得るという合理的な確固たる証拠を与えた」という。

ラスール（Rasool）とスティーブン・シュナイダー（Stephen Schneider、1945–2010）は、1971年に作ったモデルで、エアロゾルによって、不確実ながらも大気の放射バランスに大きな影響が引き起こされる可能性を示した。現在では、1940年～1980年ごろのわずかな寒冷化は、エアロゾルによるものであることがわかっている。

これは、「氷河期」（現代では「氷期」）の到来が差し迫っているとする予測として広く引用されたという。

日本では、この研究の数年後、「氷河期が来る」ことを主張する書籍が相当数、出版されることになった。当時は、「寒冷化説」「温暖化説」の両論が存在していた時期ではあったが、そうした書籍の中では、温暖化が起こるとする研究成果についてはあまり語られることがなく、私より上の世代の人には、今後は寒冷化が起こると学生時代に信じ、現在でも温暖化の科学に抵抗を感じる人が少なくないらしい。

しかし、これまで見てきたとおり、当時の段階ですでに、日本人の科学者も加わって、温暖化の科学はその基礎を確立していたのである。

第6項 宇宙開発

スプートニク1号による地球周回軌道投入の成功（1957年）に始まる宇宙開発は、現在に至るまで発展を続けている。1969年のアポロ11号による人類初の月面着陸（確認であるが、間違いなく人類は月に行っている）の背景には、東西冷戦下の核開発があったことはよく知られているが、こうした宇宙開発が、温暖化の科学に多大な貢献をしていることはあまり意識されていないように思える。

気象衛星

ひとつは、世界初の気象衛星タイロス1号（TIROS-1）（1960年、アメリカ）を出発点とした、人工衛星による太陽放射、地球放射などの観測である。人工衛星によって地球の外から気象観測ができるようになったことで、特にアレニウス以来、温室効果研究の柱のひとつである、ステファン・ボルツマンの法則を用いた「地球のエネルギー収支」のなどが実測で検証されたことがある。

これに大きく貢献したのは、1964年に発射された人工衛星ニンバス1号に始まる、アメリカの「ニンバスシリーズ」である。「ニンバスシリーズ」は、天気予報のみならず、オゾン層、地球のエネルギー収支、海水観測など、現在の温暖化研究に直結する気象観測データの取得を可能にした。オゾン層の破壊や海水の変化などの観測もしており、観測は精度を上げて現在も続けられている。

IPCCの評価報告書では、人工衛星によって大気研究が劇的に進歩した1979年からの時代を「Satellite age」（人工衛星時代）と表現している。

金星探査

もうひとつは、「惑星探査機」である。他の惑星に探査機を送り込んで、大気組成や大気温度、地表気温などを直接確認できれば、地球とは異なる条件での温室効果を研究することができる。

惑星探査については、最近火星探査が中心になっているが、温暖化の科学には、金星探査が特に大きな

役割を果たしたと言える。

金星探査について、温暖化との関係で理解するのに、NHK・BSプレミアム『コズミックフロント☆NEXT「世界初の惑星着陸 旧ソ連・執念のベネラ計画」』は、大変参考になる。

金星探査は、1962年、アメリカのマリナー2号による金星への接近成功から始まり、それに続く旧ソビエトの「ベネラ計画」によって金星の状態が詳しく調べられることとなった。

金星については、探査の計画段階では、濃い大気に覆われて地表面の状況はほとんどわかっておらず、地球と似た惑星であると考えられていて、液体の水がある可能性も考えられていた。そのため、着陸計画では、着水に対応する装備まで準備したという。

しかし、その後、マリナーの情報提供から、金星の表面温度が100℃以上である可能性があることがわかった。

多くの失敗を重ねながらも1967年にベネラ4号が大気圏へ突入し、大気データの送信に成功、主成分が二酸化炭素であることがわかった。

ベネラ4号では、金星の過酷な大気環境によって、金星に投入された機体が大気圏で破損したために交信が途絶えたが、以後、探査機が破壊されるのに対応するための改良を進め、複数の失敗を経て、1970年にベネラ7号で初めて金星表面に着陸、23分だけ地球にデータを送ることに成功し、金星表面が475℃、92気圧であり、その理由が、極めて濃度の高い二酸化炭素による温室効果によるものであることが分かった。その後、ベネラは金星表面の撮影にも成功した⁴⁹。



図3-12 パイオニア・ヴィーナス1号による金星の雲
(1979年2月26日、紫外線画像)

金星の温室効果は「飽和論」を否定する最良の「証拠」である。

「飽和論」の論理では、二酸化炭素は一定量あれば、それだけで地表面からの赤外線をすべて吸収してし



図3-13 金星の表面画像

出典：Astro Arts 金星探査の歴史ベネラ13号は金星の地表をカラー撮影して地球へ届けた
(提供：NASA/NSSDC)

<https://www.astroarts.co.jp/special/2009venus/exploration-j.shtml>

まうから、二酸化炭素がそれより多くても温室効果は変化しないことになるが、金星は、地球と大きさが近く、太陽放射もそれほど差はないが、二酸化炭素の量が地球に比べて桁違いに多ければ、温室効果は480°Cまで高くなりうる、つまり、温室効果には上限がないことを示している。

この番組の中で、p.63「第1章第3節第2項 気層モデル（難）」において参考にさせていただいた、（元）東京学芸大学名誉教授・松田佳久氏が、研究室のホワイトボードで金星温室効果を、多重層の大気モデルによってわかりやすく説明している。

火星探査

火星探査は、1971年に旧ソ連の「マルス（Mars）3号」が軟着陸に成功、また、1962年に始められたアメリカの「マリナー（Mariner）計画」では、火星周回軌道からの大気観測などを行った。

また、「バイキング計画」では、1976年にバイキング1号が、火星表面に着陸して大気や土壌の観測を行い、写真撮影にも成功している。火星における生命の存在も探査対象となっていたが、生命の痕跡も有機物も発見できなかったという。

最近では、1997年に火星着陸に成功した「マーズ・パスファインダー」や火星を周回しつつ火星の気候などを探査した「マーズ・グローバル・サーベイヤー」、「マーズ・クライメイト・オービター」など、現在にいたるまで、火星の気候や大気組成など、あらゆる情報を収集している。



図3-14 火星、火星探査船、火星表面の様子

出典：月探査ステーション 火星・赤い星へ

<https://moonstation.jp/ja/mars/exploration/past.html#mars>

火星は、金星と同じく大気の主成分は二酸化炭素であるが、大気圧は金星とは反対に非常に薄く、750Paほど（地球は1013hPa=101,300Pa）であり、地球の100分の1にも満たないので、二酸化炭素の量が少なく、そのため、火星の平均気温は -53°C と大変低い。

惑星探査は、その度ごとに膨大な費用がかかっており、それが何の役に立つのか、または科学者の自己満足や航空宇宙産業の利益が目的か、などとの意見もあるようだが、最近になって認識されるようになった地球温暖化対策の重要性や、温暖化懐疑論の問題を念頭に入れて、温室効果研究の流れの中で、惑星探査の位置づけを考えると、その社会的重要性が強く意識されるのではないだろうか。

（今後も、巨費を投じてこうした探査を今後も続けるべきか、はまた別の話である。）

第7項 キーリング以降

最後に、1960年あたり以降の流れについて追っていきこうと思う。有名なところを時系列で箇条書きにすると、以下のようなものになると思う。

1. 1958年 チャールズ・デービッド・キーリング (1928–2005) がハワイのマウナロア山頂と南極で二酸化炭素濃度の計測を開始 (→p.139「第3章第3節第4項 海の吸収」)
2. 1969年、国際科学会議 (ICSU) によって、環境問題を扱う初めての世界的学術団体となる環境問題科学委員会 (SCOPE) 設立
3. 1979年、アメリカ合衆国大統領行政府科学技術政策局から「気候に対する人為起源 CO_2 の影響」について諮問を受けた全米科学アカデミーがこれらの学術報告をまとめ、「21世紀半ばに二酸化炭素 (CO_2) 濃度は2倍になり、気温は $3 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ($1.5\text{--}4.5^{\circ}\text{C}$) 上昇する」とするチャーニー報告を発表
4. 1988年6月、アメリカ上院エネルギー委員会の地球温暖化に関する公聴会にて、ジェームズ・ハンセンによる「99%発言」(→p.70「第1章第4節第1項 なぜコンピューターを使うか」)
5. 1988年8月、世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) の共同で気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が設立。以降、評価報告書 (1990年：第1次 1995年：第2次 2001年：第3次 2007年：第4次 (AR4) 2014年：第5次 (AR5)) などを順次発表
6. 1997年12月、京都市の国立京都国際会館で開かれた第3回気候変動枠組条約締約国会議 (地球温暖化防止京都会議、COP3) において、「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」(きょうとぎていしょ、英: Kyoto Protocol) が同月11日に採択
7. 2001年 アメリカ合衆国 京都議定書を離脱

8. 2015年 第21回締約国会議（COP21） 192か国とEU連合が、パリ協定を採択。
9. 2018年 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第48回総会（仁川・韓国）において「1.5°C特別報告書」が承認（→p.35「第1章第1節第8項「第5次評価報告書 RCPシナリオ」と「1.5°C特別報告書」）
10. 2019年 アメリカ合衆国 パリ協定脱退 通告
11. 2020年 アメリカ大統領選挙 ジョー・バイデン勝利 2021年 パリ協定復帰
12. 2021～2022年 IPCC 第6次評価報告書の公表を予定

1970～1980年代は、温暖化の科学が大きく進展したのと同時に、一時わずかに低下していた温度が上昇に転じていた。さらに、干ばつの被害によって食糧難が世界的に増加し、気候変動を問題とした国際的な会議が開かれるようになっていた。

第4節 考察

146 | Wikipedia やアメリカ物理学協会のホームページにある Spencer R. Weart 『The Discovery of Global Warming』(スペンサー・R・ワート「地球温暖化の発見」)(<https://history.aip.org/climate/index.htm>)などは、アレニウス、カレンダーを先駆者として評価しているが、あらゆる要素を欠いていた故に間違っていると評価している。

そうだろうか？アレニウスとカレンダーはあっていたのではないか？というのが、短い期間で温暖化の歴史に触れた素人による素直な感想である。

特に、アレニウスは、論文にかなり研究手法を載せているが、現代の視点で見ても、当時の測定技術の限界、考慮不足はあったものの、基本的な仮定の多くはおよそ妥当だったと言える。

アレニウスの二酸化炭素2倍の予測がおよそ4°Cであるということが、現在では二酸化炭素以外の温室効果ガス(特に人工のもの)が影響するようになってきていることもあり、一定レベルで偶然だったとしても、組織的な研究でもなく、全く個人の着想、限られたデータによってであるにもかかわらず、結果的に現在のIPCC予測と大きく変わらない結論となった事実を、現代に生きる私たちはもっと重く受け止めるべきであると考えます。

たとえば、アレニウスは「(相対)湿度不変」を仮定して「水蒸気フィードバック」を計算に入れており、この仮定は、後年の真鍋氏などの研究で、間違っていないことが確認された⁵⁰。

温暖化懐疑論を展開したフリッツ・メラーは「雲フィードバック」を「負」として温暖化の進行を否定したが、現代では「正」(すなわち温暖化が促進される)と暫定的に見積もられていて、現代でも不確実性の高い問題であり、予測するにあたって、アレニウスが考慮しない(影響しないと仮定)と選択した(と思われる)ことは、その意味で正しかったと言える。

このことは、海による二酸化炭素の吸収についても言うことができる。海は単なる食塩水ではなく、「複雑な化学物質のシチュー」であり、二酸化炭素をそれほど吸収していなかったわけで、海による吸収を仮定しなかったアレニウスは大枠で正しかったことになる。

地球表面から大気への「伝導」「対流」の影響はそれほど大きくなく、炭素循環(かなり大雑把だが)など、多くの仮定は正しかった。アレニウスを含む近代の科学者は、現代のような観測技術がなく、それによるあらゆる知見不足は確かにあったが、おそらく、論文などには表れていない、気象や地質に関する経験則のようなものを気象学者、地質学者などから学び取り、独自に推定の前提となる仮定を選択していったのかもしれない。

アレニウスの業績について考えるとき、私は、高校の地学教科書に載っている、地球の周囲(約40,000km)を初めて測定したエラトステネス(紀元前275年-紀元前194年)を思い出す。

紀元前230年ごろ、アレキサンドリアの図書館長であったエラトステネスは、経度の同じ2地点の距離(同時であるために夏至に測定を行い、部下に歩かせて歩数から900kmほどと確かめたとされる)と太陽高度の違いから、現在わかっているよりも17%ほど大きい円周の値を見いだしたといわれる。

人工衛星によって地球を外から見ることができ、GPS(グローバル・ポジショニング・システム)が存在

する現代から見て、この結果をどのように評価するか、17%を大きいと見るか、小さいと見るかは、人によって変わってくると思われるが、私は少なくとも、地球表面が球ではなく円盤で、さらにその下で強大な像やカメが支えていた、また、天球がドームだと考えられていた時代・地域がある中で、突出した科学的知見だと考えている。

アレニウスの気候感度についても、同様の検討が求められる。私の考えでは、アレニウスは、観測まですべて自分でやったわけではないが、当時の科学的知見をうまく集約し、現在よりもはるかに劣る観測データによって、現代とそれほど離れていない結論を導き出している。

つまり、アレニウスは、大雑把な見積もりであっても、地球を俯瞰（ふかん）する優れた知見をもってすれば、案外正確な結果が出る、つまり、温暖化の科学は、実は意外にシンプルである可能性を現代に示唆しているのではないか。

考慮していない要素があったから不十分だった、と考えるのは、間違っていた、または考えに入れていないために、結果的に、現在の推定の範囲を外れていた場合で、アレニウスの結論（4°C）は、現在の推定値（1.5~4.5°C）の範囲におさまっており、その場合、現在の研究はアレニウスの「検証」であったという位置づけになるはずである。

そもそも、現代ですら、二酸化炭素2倍の推定（「気候感度」1.5~4.5°C）の範囲内である可能性は高いものの、範囲内のどこが妥当であるかはわかっていない。

検証であるからと言って、研究の価値が変わるものではない。現代の「温暖化懐疑論」の現状からすれば、温暖化の科学の正しさを証明するためには、徹底した検証は必要不可欠だったと言える。

別の視点から、温暖化研究の歴史を見てみたい。

アレニウス、カレンダーの論文および、その同時代から後の議論を見てみると、二人を支持する科学者がいた一方で、相当な攻撃も受けていたことがわかる。

当時にして、アレニウスやカレンダーの推定に対して、「飽和論」、「雲量の変化」、「海による二酸化炭素の吸収」といった、温暖化が進まない要素が提案されたが、どれも仮説であり、証明されたわけではなかった。にもかかわらず、温暖化が進むとする予測は、基本的には否定され続け、しばらくは積極的に研究された科学分野とは言えなかった。それには、当時の学術団体の先入観が影響していた可能性がある。

たとえば、オングストロームなどに見られた「実験科学」からの反論について、――

アレニウスは、月の光を用いて大気そのものの測定を行ったラングレーの研究を活用して、水蒸気や二酸化炭素の吸収係数を求めたのに対し、オングストロームは実験室で「飽和」を確認して、温暖化を否定した。このとき、アレニウスは強く反論したという⁵¹。そもそも、実験室での実験が、複雑な組成を持ち、広範囲に広がる現実の大気（または「大気柱」）に適応できるかは、簡単に結論が出せるものではなかった。

実験は大事だが、それを現実世界にどのように適応させるかという問題は、実は現代の悲劇、「福島第一原子力発電所事故」などにもつながる課題である。

また、物理学者・化学者であったアレニウスと、蒸気機関技師であったカレンダーは、温暖化という全く異なる気象の分野に取り組んだが、二人とも、気象学・地質学の専門家ではないことから、放射平衡による

説明などが、学会から敵視された可能性がある。

学問には検証が必要であり、その意味で、反論があることは健全であるとも言えるが、一方で、現代における「温暖化懐疑論」問題でも見られるような、感情的な議論が当時も少なからずあったのかもしれない。

異なる学問分野が総合されるステップで、気象学会がこの視点を取り入れて研究を行っていたら、物理学の更なる介入を待たず、基本構造がよりスムーズに共有されていた可能性がある。

学問の閉鎖性（タコ壺化）は、現代のあらゆる学問の中にも見られる。

アレニウスより前に、二酸化炭素や水蒸気の温室効果を発見したジョン・ティンダルは、実験科学者ではあったが、登山家として実際の地球を観察していたことが、実験の動機になっている。具体的には、氷期につくられ、温暖化して間氷期に移行することで表面化したU字谷、カール、モレーンなどの「氷河地形」によって確認されていた、温暖化という「事実」に対する科学的な関心であった。

“なぜ、時代によってこれほど気候は変化するのか”

「氷河時代」に対する疑問は、ティンダル、アレニウス、カレンダー、プラス（または取り上げていない他の科学者も）に共通していた。原因が二酸化炭素の増減であるとするならば、「飽和論」、「雲量の変化」、「海による二酸化炭素の吸収」といった、温暖化が進まない要素は機能しなかったことになる。逆に、原因が二酸化炭素でないとするならば「では何が原因か？」という問題意識が残ることになる。

アレニウスのように、自分の専門とする分野に留まらない、多分野にまたがる幅広い知見が作り出した科学的な世界観をもとに、あらゆる可能性を検討した上での考察は、あらゆる他からの批判に対する自信に満ちた反論として表れた。

事態をむつかしくしているのが、「温暖化」の価値観が、150年の研究の歴史の真ん中あたりで完全に反転したことである。

19世紀当時、温室効果研究の動機となったのが、いつか氷期が到来するのではないかという脅威だった。そして、人為的な二酸化炭素排出が、氷期への回帰を遅らせるものとして歓迎されていたところがある。（現代、氷期は、とりあえず30000年ぐらいは来ないと推定されている。）

ところが、その後の科学技術の発展により、二酸化炭素排出量を想定外に増加させていること、それが好ましからざる気象現象を生むことを見出し、温暖化を好ましいものから、危険な現象へと反転させてしまった。

温暖化の科学には、二酸化炭素と温室効果の関係→「飽和論」、二酸化炭素濃度上昇→「海の吸収」という対立軸が常に存在し、現在でも科学的に信ぴょう性の低い（科学的な実りの少ない）議論が続いていること背景には、そうした世界の劇的な変化に対する恐怖が影響して、希望的な推定が選ばれてしまうことが背景にあると思われる。

また、こうした社会・思想・心理的な要素を除いたとしても、特に、最新の技術であるコンピューター・シミュレーションは、科学研究を（温暖化に限らず）「ブラックボックス」化してしまっているところがある。

計算のもとになるプログラムを公開したとしても、コンピューターによる膨大な散逸数値データの自動計算は、研究対象に直接触れるわけでもなく、人間ができないことをやっているに違いなく、その過程を万人が納得するなどあり得ない。ホッケースティック曲線（→p.53「第1章第2節第7項過去2000年の気温変

化)をつくったマイケル・マン氏の裁判も、コンピューター・シミュレーションに用いた詳細なデータの開示を「懐疑論」の学者から要求されたことが発端となっている。

その点では、現代の懐疑論には原因がないわけではなかったと言える。スーパーコンピューターという新技術は、その点で、世の中をわかりやすく説明するという科学本来の目的の一つを完全に放棄するものであったとも考えられる。コンピューターは、薬師院氏が指摘したように、多くの人が考えている以上に、科学の本質に大きな影響を及ぼしているのかもしれない。

このことは、今後の温暖化論議において押さえておくべき重要な視点である。

しかし、コンピューター・シミュレーションの予想通り、気温は上がった。異常気象の頻発も、今のところ、ある程度は予想通りである。日本は、国際社会に応じて、こうした新しい科学について、何らかの判断をする必要がある。

JJJI.COM

日本、世界とも史上最高 年間平均気温速報値—気象庁

<https://search.yahoo.co.jp/amp/s/www.jiji.com/amp/article%3Fk%3D2020122200913%26g%3Dsoc%26usqp%3Dmq331AQRKAGYAfzgmNKPscexmQGwASA%253D>

気象庁は22日、2020年の日本と世界の年間平均気温が、1～11月の観測に基づく速報値で、いずれも統計開始以来の最高になったと発表した。地球温暖化の影響が考えられるという。

日本の年間平均気温は、都市化の影響が小さい全国15地点の観測値に基づき算出され、2010年までの30年間の平均値を1.07度上回った。これは1898年の統計開始以来の最高。1月初めに発表される確定値でも最高となった場合、2年連続で最高記録を更新することになる。

世界の年間平均気温は30年平均値を0.47度上回り、1891年の統計開始以来の最高。これまで最も高かったのは2016年で、30年平均値を0.45度上回った。確定値は2月初めに発表される。(2020/12/22-17:42)

あとがき

私にとって、温暖化との関わりは、小学生時代にまでさかのぼる。

小学生のときに読んでいた小学館の『小学1年生』シリーズ（当時は6年生までであった）で、確か、その中に、『氷河期がやってくる！』のような題名の記事があった。そこでは、地球はもうすぐ氷河期（今は「氷期」という）に向かうことで「寒冷化」して燃料が足りなくなり、人類が減びると予想し、それをイメージするような劇画のイラストが描かれていた。

（最近、「懐疑論者」の人たちの中に、おそらく太陽活動の低下を根拠に「氷河期（正確には氷期）到来」を主張している人がいるようだが、現在の科学では、氷期が来るのは30,000年後とされている。）

小学校時代に、もう一つ記憶に残っているのが、現在問題になっている川の氾濫を扱った読み物である。教科書の題材だと記憶していたので、当時の教科書を調べたが、結局、自分の記憶に当てはまるものは発見できなかった。

その読み物は、堤防を高くしても、川の増水がそれを上回る状態になっていることを問題にしていることを問題にしている、その原因を、森林破壊による森の取水能力の低下と説明していたと思う。当時は、そのまま理解していたが、今、考えれば、温暖化による豪雨の増加が洪水の原因になっていたことが考えられる。

そして、それと時期的に大きく離れていない、おそらく中学生のころに、「寒冷化」と真逆の説に出会うことになった。当時、私は渋谷にあった「天文博物館五島プラネタリウム」（2001年閉館、その後「コスモプラネタリウム渋谷」（東京・渋谷 <https://www.shibu-cul.jp/planetarium>）としてオープン）に毎月通い、「星の会」の会員にもなっていたりして、ちょっとした「天文少年」であった。（当時は、私と同世代で、私などよりもっとレベルの高い人がほかにもたくさんいた。）

東京・池袋にあった『サンシャイン・プラネタリウム』（現『満天 in サンシャインシティ』 <https://planetarium.konicaminolta.jp/>）で私が見た番組は、太陽系の他の惑星、特に金星と火星を紹介するものであった。特に、金星については、大気圧が地球の90倍、大気成分の90%が二酸化炭素という環境で、温室効果によって地表面が400°C以上になっている、また、地球も二酸化炭素が増えているから、そのまま二酸化炭素を排出していたら気温が上がっていくという説明であった。

地球と金星では大気濃度が桁違いなので、さすがに地球が金星と同じように暑く（熱く？）なるとは思わなかったし、番組では、温暖化したら具体的に何が起こるのか、というような未来予想図は描かれていなかったように記憶している。しかし、そこで示された二酸化炭素濃度と温度上昇のグラフは、現在の観測結果や予測と同じく、右肩上がりにただ上昇しているだけでなく、加速度的に変化していて、そのグラフから、温暖化によって地球にそれなりの何かが起こる、という印象が残った。

また、「寒冷化」と「温暖化」という真逆の未来がかなり近い時期に語られている（実際、当時は、両者で論争が行われていた）ことを知って、科学とは、わかっているところと、よく分かっていないところがある、という基本的な事実を実感することができたと思う。

私の小中学生時代は、当然スマホなどはなく、家庭向けのパソコン（当時は「マイコン」と呼んでいた）

が販売されるようになったころであった。販売店で、キーボードでプログラムを作る簡単な作業を経験したりして、当時としては、コンピューターの知識もそれなりに得ていたように思う。

私が大学で所属した研究室ではカオス、フラクタルなどの不規則現象を研究対象とし、私自身は「ウェーブレット解析」（簡単に言うとフーリエ解析の変型版）を研究対象としていた。

研究の合間に取り組んだ（？）シミュレーションは、当時はフリーソフトだった「シムシティ」（自分で都市を開発するゲーム）であった。現在では考えられないほど荒いグラフィックと、モンスター（ゴジラ？）が都市を破壊するなどのよくわからない設定は、当時はとても興味深く、私だけでなく仲間の研究をたびたび中断させた。

今になってみれば、私にとって数少ない「コンピューター・シミュレーション」の経験だったと思う。

大学（学部）生のとき、ある物理学の教授の「大学教授退官記念最終講義」が行われるということで、確か、私はその教授の講義は受けておらず、儀礼的に参加したように思う。

「最終講義」は、きれいともいえない、やや斜面になっている程度、学校の教室を少し拡張した程度の小さな一般講義室だった。

その講義は、物理学者の講義とは（当時は）思えないものだった。

説明の中心は、温暖化の証拠となる二酸化炭素の濃度変化を表した「キーリング・カーブ」であった。極めて基本的な内容の講義であり、私は、いちおう環境を専攻していたのでそれなりには知っていたので、目新しいものではなかったが、今になって考えれば、物理学を専攻している学生のほとんどが原子物理学を研究テーマとしていた中で、あの講義は、学生たちに、これからの物理学の方向性、具体的には、大気シミュレーションの重要性を伝えるものだったのではないかと、そう思えるほど、当時は温暖化について知られていなかった。

温暖化問題に対する目線が変わったのは、教職に就職したあたりのころの、ある経験からである。

当時、自分が好んで利用していた書店と同じ敷地に、環境関係の情報を集めて発信することを目的とした「地球環境パートナーシッププラザ」（東京都渋谷区、国連大学内）があり、私が書店に行ったときに、たまたま 1995 年に発表された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第二次評価報告書の報告会（一般公開）が行われていた。入ってみると、会場は、学校の教室の 2 倍くらいの会議室であった。

今考えれば、自分にとってかなり重要な場面であったが、当時はただ話を聞いていただけで、何も記録には残していない。当時の報告書では、気温上昇の予測、対策の違いによるシナリオなどは、現在知られているものとおおよそ同じだったと記憶している。

IPCC による第一次評価報告書の発表が 1990 年だったので、京都会議の 7 年前には、すでに地球温暖化の概要は、国際的にもおおよそ理解されていたことになる。そうした国際社会の取り組みに比べ、日本は・・・というのが、報告会における基本的な論調だったと思う。

日本では、地球温暖化問題は、今でこそ政治の場でも語られる重要なテーマとして認知をされるようになっているが、それも、本格的に話題に上るようになったのは、1997 年の第 3 回気候変動枠組条約締約国会議（地球温暖化防止京都会議）からである。

当時は、日本で国際的な環境会議が行われて、内容が連日メディアで流れたこと自体が、とても目新しい

ことだった。当時の私は、国連で大規模に温暖化の研究と対策に関する議論が行われていることがわかっておらず、この問題について世界各国がきわめて高い関心を寄せていることに、非常に驚いた。

現在、ヨーロッパ諸国が温暖化対策を引っ張っているが、それは、温暖化問題に対する理解が、政府レベルで十分にできていたからと思われる。今になって考えれば、この小論で見えてきたとおり、ヨーロッパにおける温暖化研究の歴史が100年を超えていることから、それは当然のことに感じられる。

ともかく、自分にとって、環境問題に意識が向いたことで、科学に対する目線が変わったことは間違いがない。

これらのことがあった1995年からの何年かは、科学知識を含む、既存の考え方を疑うようなことが断続的にメディアを賑わせる状態が続き、科学（または科学者）に対する不信が広がった時期でもあった。

阪神大震災（近畿地方は地震が起こらないとする認識が広がっていた）やオウム真理教による「地下鉄サリン事件」（優秀な科学者が、オカルトに惹きつけられて無差別テロの一端を担った）、近藤誠氏の『患者よ、がんと闘うな』（文芸春秋、1996年）（抗がん剤の多くは無意味、がん検診は百害あって一利なしとする主張）がベストセラーとなった。

薬害エイズ事件（1980年代に血友病患者に対し加熱処理をせずウイルスの不活性化を行わなかった血液凝固因子製剤（非加熱製剤）を治療に使用したことにより、多数のHIV感染者およびエイズ患者を生み出した事件）で、1996年に厚生省において重要なファイルが発見されたことで、被害者に有利な情報を厚生省が隠ぺいしていたことがわかり、菅直人・厚生大臣が謝罪、日本の医療が大きく信用を失った。

世紀の変わり目には、2001年「9.11同時多発テロ」があり、「アポロ疑惑」（→p.3「はじめに」）があったのは2002年である。

こうした衝撃的な事件が繰り返し起こっていたことが、少なからず私に影響を与えていると思う。具体的には、科学は、科学の枠の中だけで考えていただけでは不十分で、もっと科学と社会、教育と社会の関連について考えていく必要があるのではないかと？

こうした経験が、理科や科学について、授業で教える枠を超えて、いろいろ調べるきっかけになっている。

また、2000年前後は、自身の論文の受賞や、NHKスペシャル『映像の世紀』『世紀を越えて 地球 豊かさの限界』など、テレビ番組で現代を問い直す企画があり、最初に紹介した『樹が陣営』の作者と、その知り合いのグループと知り合うなど、あらゆる面で転機となる時期だったが、一方で、温暖化については、関心をもって調べても、自分の知りたいことにたどり着けず、そもそも何を知ればよいのかがよくわかっていない状態にあったように思う。

当時、流行っていた「温暖化懐疑論」に対してもともと抱いていた違和感があったところに、温暖化についての文章を書く申し出をいただいて、10年ほど前より温暖化に関する勉強をするようになった。

今回、少しだけ掘り下げることになった科学的な議論については、当時は、資料を読んでも意味がよくわからず、書く内容は、必然的に科学的なことよりも社会的なことが中心になった。

いわゆる「肯定派」として書いたものの、科学的な妥当性にはそれなりの不安もあった。最初に書いたとおり、当時は温暖化の兆候といわれるものはそれほどなく、「温暖化懐疑論」も世間的にはそれなりの人気があった。

書いたあとも、興味深い題材をいくつか見つけていて、紙面の関係で書けなかったことも含め、何らかの形で文章化したいと考えていたのだが、当時は、温暖化の科学について少しかじったところで、扱う領域があまりに幅広く、理解するのが難しいとも感じていた。温暖化の帰趨が見えていなかった頃でもあり、自分の納得するレベルで温暖化について語る力があるとも思えなかったので、さらなる文章化ができるような状態ではなかった。

しかし、書いたことによる責任感もあって、温暖化の動向についてはいつも意識していた。

2011年には「東日本大震災」が起きた。そもそも、南海トラフ、東海、東南海地震など、想定されていた巨大地震は西日本であり、東日本にM(マグニチュード)8を超えるような巨大地震(実際にきたのはM9)が起これとはほとんど想定されていなかった。このことで、東大などの地震研究機関は大いに反省を迫られることになっている。

その後、メディアは、地震対策に時間を割くようになり、温暖化(というより、環境問題全般)についてあまり取り上げなくなった。

この時期は、私自身も震災関連に興味があり、さらに自分の専門外の分野の文章に取り組んでいたことから、正直、温暖化への関心も後退していた。

ひとつのきっかけになったのが2018年の西日本豪雨である。台風でもないにも関わらず、これだけ広い範囲の地域で、それぞれの地域で数十人単位の死者が出たというのは、これまで記憶になく、気候が異常になっていることは、誰が見ても明らかであると思われた。

温暖化の影響により雨量が6%増との試算が気象庁より出ていた。日本において、一つの気象災害で温暖化の影響(と考えられる)についての分析が報道されたのは、この時がはじめてだったと思われる。

正直、10年前、温暖化を調べ始めた時には、年間の気温変化はわずかであるから、温暖化の影響が疑われる現象が、自分が教員をやっている間にこれほどはっきり表れるとは思っておらず、結論の出ない論争をしているつもりだった。そして、それは「懐疑論者」の方々も、実のところ同じだったかもしれない。ところが、結果(と思われる)現象が、ここ数年で現れるようになった。

今考えれば、世界レベルではかなり前から温暖化の影響が疑われる現象は多く表れていたもので、事情に詳しい人であれば、このようなことはわかっていたようだ。

文章作成の直接のきっかけは、授業のためにPowerPoint(投影用のスライド)作成していて、ネットを見ていく中で、120年前に温暖化を予測したスヴァンテ・アレニウスの業績を知ったことである。自分も温暖化の科学が、最新の科学だと思っていたところがあった。このことで、自分の温暖化に対するイメージが大きく変わり、このことを多くの人に知らせる必要があると感じた。

構想が膨らむ中、文章の作成に相当な時間がかかることを懸念するようになったところで、次は、コロナ禍という「科学問題」が発生してしまった。そのため、逆に膨大な時間が発生することとなり、相当な時間を今回の文章作成に使うこととなった。

コロナ禍の中でずいぶん言われているが、「万有引力の法則」を発見した、かのアイザック・ニュートン

(1642-1727) は、当時流行していたペストによってケンブリッジ大学が休校になり、地元への帰省中に「万有引力の法則」を発見したという。深い論考には、時間的余裕が必要だ。

小論の執筆中盤に九州豪雨（令和2年7月豪雨）（死者84人、行方不明者2人）が起こった。

10年前に『樹が陣営』で書いた文章で、「生態系」や「伝染病」について指摘をしたが、コロナは、その推定が一定レベルで正しかったことを裏づける。一方で、同じ文章で、私は「問題は日本から離れたところ」で起こると書いたが、それは間違いであった。現実には、温暖化による被害は日本にも大きく降りかかっている。

文章を進める中で、自分の身近な人を中心に、温暖化に対する意識についてリサーチもした。

人工光合成を研究している著名な研究者（今回、小論を読んでいただいた。それなりに評価いただいたと思う）は、「この無関心は異常だ」と話をされていた。これに限らず、日本を覆うニヒリズムについては別に考察する必要があるが、温暖化に対する科学的なベース（基礎）がないことが大きな要因ではないか、と私は考える。

今回の小論は、当初は、10年前の小論の延長と考えていて、懐疑論問題を、いくつかの視点から分析し、その問題点について議論するような内容を想定して、実際、その方針で文章を書き始めたのだが、ここにきて、気象災害の頻発によって温暖化に対する意識を持つ人が多くなり、科学的な知見に真っ向から反論する懐疑論自体があまり見られなくなってきていた（なくなったわけではない）。

一方、温暖化問題がこれだけ意識されるようになってきているのに、大型書店で温暖化関連の書籍を調べても、その数がきわめて少ない。中には、店員さんに問い合わせたら、1冊しか置いていない（しかも、読み物レベル）ところまであった。過去には、書店に行けば、温暖化関連の書籍はそれなりにあったような気がするが、出版が少なかったのか、売れ行きが悪かったのか・・・。

温暖化に関する解説書で最新かつ総合的なものといえば、IPCC第5次評価報告書（AR5）について解説した、日本気象学会 地球環境問題委員会編『地球温暖化 そのメカニズムと不確実性』（朝倉書店、2014年）くらいかと思うが、これは、専門用語のオンパレードであり、中高生などは、読んですぐにあきらめてしまいそうな内容である（私には参考になった）。

温暖化は、とにかく情報が多く、理解することがむづかしい。それにも関わらず、学校教育もメディアも科学もまったく対応していない、などということは、科学教育に関する私の先行研究ですでにわかっていたことではあったが、小論を作成することになって、それを実感することになった。

本論でも書いたが、温暖化は「放射」（電磁波）の関係によって生じるものであるが、「放射」なる考え方が中学の教科書で教えられていない。これでは、温暖化を基礎から考えることも不可能だろう。

このようなことから、途中から温暖化の科学の全体像が見えるような内容に、と構想を改めた。

温暖化について調べていく中で、理科のあらゆる分野が関係していることを実感できたのは、大きな収穫であった。本文中にも、自分が授業で活用した教科書や資料集の図を紹介しているので参考にされたい。

- ・物理：放射（電磁波）、エネルギー（熱、電気、原子力、・・・）
- ・化学：pH、溶解度、化学反応式、イオン
- ・生物：光合成、生態系
- ・地学：（気象）飽和水蒸気量、雲、潮汐（地質）火山活動、風化、地質時代（宇宙）太陽活動、宇宙線

自分にとって、気象分野は敷居の高い分野と感じていたが、「気象学」の入門書などを見るなどして、理解が深まってくると、メディアが伝える気象現象の説明に対する目も変わってきた。用語も正しく理解して、初めて現象の本質が見えてくることも少なくなかった。幅広い基礎知識の重要性を今更ながら実感した次第である。

また、温暖化の科学が、地球46億年の歴史を作ってきた気候の駆動力に関わる研究であることを考えると、温暖化の科学が、地球の本質を問う学問であるとも考えることもできる。

ちなみに、私はこの文章を「小論」と称しているが、こうした表現をあまり聞いたことのない人も多いと思う。「小論」には「短い論文」のほか「自分の論文・論説などをへりくだっていう」意味があり、小論は前者に当てはまらず、基本的には後者の意味で使っているわけだが、もう少し説明しておく、私の中では「論文」というと（必ずとは言えないが）学会などで査読を経た「学術論文」のイメージがあり、自分は現状で学術組織には所属しておらず、あくまでアカデミズムから自由な視点・立場で書いたつもりなので、「論文」とはせず、「小論」(=Essay)としている。(ちなみに、自分の中では自分の文章を「エッセイ」と呼ぶ分には問題ないが、エッセイを日本語にした「随筆」だと、日本語として、少し意味が違うようなので、これもあまり妥当だと思っていない。)

もともと、最低限の科学知識や文章表現の経験もあったから、「温暖化」というテーマは比較的書きやすかったところはあるが、基本的な内容についても調べながら書いたし、構成についてもずいぶん悩んだ。

今回は科学的側面で、何人かを取りあげているのみだが、最初に温暖化を文章化して以来、「懐疑論」を多面的に分析もしてきているので、現状では文章になっていないところも含めて、温暖化の科学に対するスタンスを決めるための論考には随分時間をかけている。

温暖化について、自分なりにいくつかの仮説を立てながら、それを補強する文献を調べたりしてきた。そうした仮説の一定数は、調べる中で否定され、その結果、当然、文章になっていない。

限られた時間の中で情報を収集するところから始め、記載したことの妥当性を、時間をかけて精査しなければならなかったことも多く、この程度の量で？と思われるかもしれないが、コロナ休校によってできた時間をフル活用しても、文章作成に、およそ1年半かかっている。

結果、このような文章構成になったが、小論の作成を事前に伝えていた方々には、構想とは異なる形になり、その事をお伝えすることができなかった人もいる。ここでおわびしたい。

書くときに私が意識していたのは、「近代科学の父」と言われたガリレオ・ガリレイである。

[NHK 番組『その時歴史が動いたそれでも地球は動いた ～ガリレオ・ガリレイの栄光と挫折～』\(初回放送：2006年4月19日\)](#)において、ガリレイが「地動説」を提示し、宗教裁判にかけられる原因ともなった『天文対話』の直筆原稿が紹介されていた。

その原稿は、紙を無駄にしないためか、細かく緻密な文字で、隅から隅までびっしり書かれており、多くの修正が書き込まれているのに加え、書き加えのためにメモを貼り付けたりしてあった。

私は今回、Microsoft Word（文書作成ソフト）で文章を作成したが、このようにパソコンで簡単に文章を編集できるようになった現代からすれば、当時の執筆活動はとてつもなく手間のかかる作業であったに違わず、ガリレイの原稿からは、言葉のひとつひとつに気を配り、真理の探求に人生をかけた、その熱意が伝わってくる。

あらゆるタイミングが一致して、このような形になった。

文章表現という形ではあるが、社会に対するひとつの働きかけができたのではないかと、思う。

コロナの中で、部屋にいた時間が、私の人生にとって、この上なく貴重な時間となった。

この文章に当たって、いくつか確認しておきたい。

私自身は、現在の職場も含め、団体、組織、宗教、思想、あらゆる利害から離れて、自分の信じる正しさのために、自由に表現を行ったことを確認しておく。

結構書いてきたつもりだが、私の中では、この小論は、温暖化論としては前半である。

最初に書いた通り、小論はIPCCの評価報告書を読む際の基本事項を押さえておくことを目的とすると書いたが、これは基本的に、第1作業部会（自然科学的根拠）の部分だけであり、第2、3作業部会のことはほとんど扱っていない。

次の機会になると思うが、第2、3作業部会の分析も交え、後半は温暖化に関する「社会的」側面を中心に扱うことを考えている。前半よりもはるかに生々しい内容になると思われる。

少し先になるかと思うが、「英文版」も作成する予定で、日本の温暖化の現状について、海外の人にもわかってもらいたいと考えている。

今回の論考にあたって、懐疑論者の方々も含め、この小論で参考にさせていただいたすべての方々へ、感謝申し上げます。

また、今回、台風について、被害者状況などを強調することは、正直、気持ちの良いものではありませんでした。

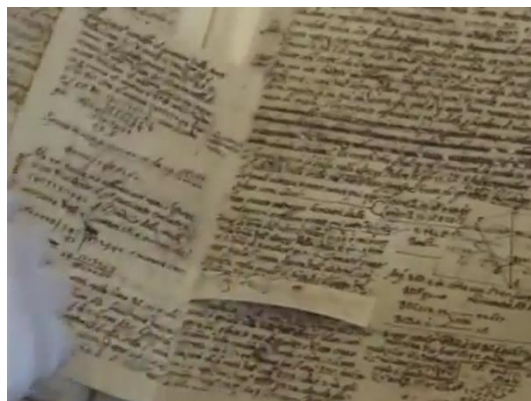
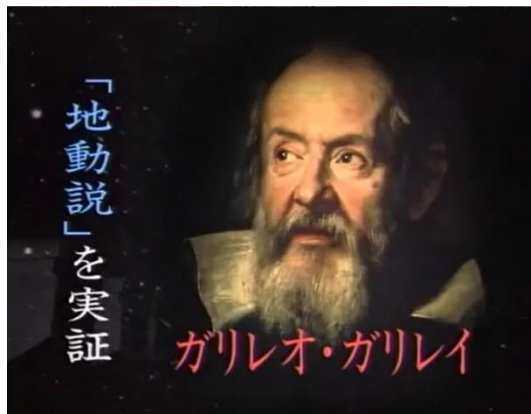


図 3-15 ガリレオ・ガリレイ直筆原稿

出典：NHK 番組「その時歴史が動いたそれでも地球は動いた ～ガリレオ・ガリレイの栄光と挫折～」初回放送：2006年4月19日

被害で亡くなられた方々に、哀悼の意を表します。

原稿が8割方できて、プリントアウトして文章の修正を行っていたときのこと。小学生中学年になった息子が、机を使うので、私の原稿を動かしてよいかと聞いてきた。

そのときに、原稿のページに出ていた「吸収率 = 1 - アルベド」という表記が気になったらしく、私に質問をしてきた。

「アルベドって何？」

「反射率っていうんだ。氷は反射率が高いから、氷が多いと太陽の光を反射して、地球に吸収される量が減るから温暖化が起きにくくなる。逆に温暖化すると氷が減って反射する能力が減るから、温暖化がもっと進むことになる。」

「そういうことか！」

と、そちらはわかってくれたが、

「アルベドが0.3ってことは？」と私が聞くと、息子は「吸収が0.3！」(-_-;)

「1から0.3を引いたら？」

「0.7!」

「鏡がアルベド1だと考えると、どうなる？」

「吸収率は0、そうか、だから、鏡はすべて跳ね返すってことだね！じゃあ、アルベドが2だったら？」と聞いてくる。割合のことはまだ、よくわからないらしい。

「アルベドは割合だから、1を超えることはあり得ないんだよ。1に対して0.7と0.3とかに分かれる」その後、息子は母親に「1アルベドってね！」と説明を始めた。1アルベドって表現はないんだが……。

温暖化について知ることは、地球の成り立ちや未来について知ることだ。そしてそのことは決して簡単ではない。私の小論はまだ読めないと思うけど、何も慌てる必要はない。

プロフィール

浅野中学・高等学校教諭 平成7年(1995年)～

教科担当 : 理科(物理)

部活動顧問 : 物理部 アーチェリー部

興味関心 :

ビリヤード(スヌーカー) 野球 サッカー テニス 読書、というより文献探査(教育、科学・環境、戦争、・・・)

令和3年2月～ 日本版AAAS(アメリカ科学振興協会)設立準備委員

資格等 :

修士(教育学)

中学校・高等学校教諭専修免許状(理科) 普通自動車第一種運転免許

アーチェリー・スターバッチ(RCシルバー)、3級審判員 第四級アマチュア無線技士

執筆経歴 :

1. 1992年(平成4年)(学部4年時)「第11回『教職課程』懸賞論文」優秀賞受賞(論文名:「私のめざす理科教育」、賞金2万円 52作中優秀賞2作)
2. 1999年(平成11年)「第5回読売論壇新人賞」佳作入選(論文名:「これからの科学教育について」、賞金20万円 321作中入選8作)
3. 2001年(平成13年)理工学振興会(東京工業大学内)教育研究助成授与(テーマ:「デューイ教育論における科学教育思想と戦後科学教育との関係」、助成金20万円)
4. 数研出版 サイエンスネット第11号平成13年5月発行「戦後学習指導要領の変遷と経験主義教育」
5. 1年まえ組 iTSCOM.net 1年まえ組中等部 せん(先生) でん(伝言板)
第11回 投稿(テーマ:アポロ疑惑)
<http://www.itscom.net/contents/maegumi/chutobu/index012.html> (閉鎖)
6. 『SSKレポート』連載(「地球温暖化論、雑感」(2007.4号)、「戦後科学教育論2ーアメリカとソビエト」(2009.4号)、「エネルギー」(2010.1号)、「古都」(2010.4号)「福島第一原発」(2011.2号)など)
7. 『飢餓陣営』(2009・3)(主宰:佐藤幹夫) / (新連載) 混迷する「地球温暖化論争」を解体する(1)
(2) 一養老孟司・池田清彦『ほんとうの環境問題』、橋爪大三郎『「炭素会計」入門』を読みながら 他

など

基礎から論考する地球温暖化

— 科学・歴史・懐疑論 —

資料編

●参考1 IPCC（国連・気候変動に関する政府間パネル）について

「(国連) 気候変動に関する政府間パネル」(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) とは、人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に国連環境計画 (UNEP) と世界気象機関 (WMO) により設立された組織である。組織の名称には国際連合 (UN: United Nations) の表現は入っていないが、国連の組織であることを強調するため、日本語訳に、「国連」を付けることが多くなっている。

(気象庁 HP IPCC 第5次評価報告書)

<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>

●IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳 (PDF 5.4MB)

気象庁訳正誤表(H27.12.1) (PDF 211KB) (上掲の PDF ファイルは修正済みです)

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf

(環境省 HP 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第6次評価報告書 (AR6) サイクル)

<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/>

●1.5°C特別報告書 SPM 環境省による仮訳【2019年8月】 - [PDF 2.63MB]

http://www.env.go.jp/earth/ipcc/special_reports/sr1-5c_spm.pdf

1.5°C特別報告書の概要【2019年7月】 - [PDF 6.35MB]

http://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/ar6_sr1.5_overview_presentation.pdf

2018年に、IPCCは「1.5°C特別報告書」を発表している（正式名称：「1.5°Cの地球温暖化：気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から1.5°Cの地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス(GHG)排出経路に関する IPCC 特別報告書 政策決定者向け (SPM) 要約 (2019年8月1日版 環境省仮訳*)」)。第5次評価報告書に比べて、こちらの方がきびしい温暖化対策を要求しているため、p.35「第1章第1節第8項「第5次評価報告書 RCP シナリオ」と「1.5°C特別報告書」で紹介したが、第5次評価報告書の方が、温暖化の科学全体を見渡すのに適しているため、こちらを意識した説明をすることにした。

ちなみに、2021年4月には「第6次評価報告書」が発表される見通しである。(第1次：FAR、第2次：SAR、第3次：TAR、第4次：AR4、第5次：AR5、第6次：AR6) 世界の標準的な温暖化に関する知見が変更される部分も出てくると思われる。日本語訳が出てくるのはその少し後になると思われるので、その辺りで、この小論も改訂版を出すことも想定している。

作業は下記3つの作業部会(Working Group, WG)に分かれている。

第一作業部会報告書 (WGI)：自然科学的根拠 (The Physical Science Basis)

第二作業部会報告書 (WGII)：影響・適応・脆弱性 (Impacts, Adaptation and Vulnerability)

第三作業部会報告書（WGIII）：気候変動の緩和策（Mitigation of Climate Change）

政策決定者向け→SPM（Summary for Policy-makers）

統合報告書→SYR（Synthesis Report）

特別報告書→SR（Special Report 例：SREX 極端現象特別報告書）

●参考2 (仮訳) スヴァンテ・アレニウス「大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について」(1896年)

| 166

本稿の作成にあたって、アレニウスおよび、カレンダーについて調べる中で、両者の最も重要な論文を読むのが最善と考え、コンピューターの助けを借りて読むことにした。アレニウス論文の翻訳は「Google 翻訳」、カレンダーの翻訳は「Microsoft 翻訳」を活用し、筆者の方で形を整えた。

今から125年前の論文であり、また、スウェーデン人であるアレニウスは基本的にスウェーデン語を使用していたはずだが、英文でこの論文を発表している。それを英語に堪能ではなく温暖化の専門家でもない筆者が翻訳したものである。論文中の説明には、正直、私自身の知識では理解できない部分があった。専門家からすれば正確な訳文であるとは言えないと思う。基本は自分の理解のために行ったものだが、参考になると思い、少し読みやすく推敲した上で掲載することにした。訳文を読まれる際はその点に注意されたい。

原稿原文 https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf

PDF:https://geosci.uchicago.edu/~archer/warming_papers/archer_galleys/9781405196178_4_003a.pdf

大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について

スヴァンテ・アレニウス

哲学雑誌および科学刊行物

シリーズ5、第41巻、1896年4月、237-276ページ

このコピーは、現在パブリックドメインにあるオリジナルの印刷物から、globalwarmingart (<http://www.globalwarmingart.com/>) のために Robert A.Rohde によって作成されました。

アレニウスの論文は、温室効果への二酸化炭素の寄与を定量化し（セクションI~IV）、大気中の二酸化炭素濃度の変動が気候の長期変動に寄与しているかどうかを推測した最初の論文です（セクションV）。この論文を通して、アレニウスは、彼が書いていたときの慣習に従って、二酸化炭素を「炭酸」と呼んでいます。

一部の誤解に反して、アレニウスは本論文では化石燃料の燃焼が地球温暖化を引き起こすことを明示的に示唆しているわけではないが、化石燃料は潜在的に重要な二酸化炭素の供給源であると認識していることは明らかであり（p.270）、その後の研究でこの結果を明示的に示唆しています。

I. はじめに：大気吸収に関する Langley の観測

ここには、大気吸収の気候への影響に関する素晴らしい契約が書かれています。特に Tyndall は、この問いが非常に重要なことを指摘しています。彼にとって、それは主に、この状況によって教えられた気温の1日ごとおよび1年ごとの変動でした。長い間物理学者の注目を集めてきた質問のもう1つの側面は、地面の平均温度は、大気中の熱吸収気体の存在によって何らかの影響を受けるか？ということです。Fourier は、大気が、太陽の光線は通過させるが、地面からの黒体放射はせき止めるため、温室のガラスのように機能するとの見解を持ちました。この考えは Pouillet によって詳述され、Langley は彼のいくつかの研究によって、「現在の大気が存在していても、その大気が選択的吸収の性質を持っていなかったら直射日光下の地球の温度はおそらく -200°C に下がるだろう」という見解に達しました。Newton の冷却の法則を広く適用して立てられたこの見解は、後の回顧録で Langley 自身が示したように、放棄しなければなりません。確かに検出可能な熱吸収大気を持たない満月は、約 45°C の「平均有効温度」を持っています。

大気は2つの異なる方法で熱（明るいまたは暗い）を保持します。一方で、熱は大気を通過する際に選択的拡散を受けます。一方、一部の大気中の気体はかなりの量の熱を吸収します。これら2つの振る舞いは非常に異なります。選択的拡散は紫外線に対して非常に大きく、光の波長が長くなるとしだいに減少するため、地球の平均温度を持つ物体からの放射の主要部分を形成する光線には影響されません。*

大気を選択的吸収は、Tyndall、Lecher および Pernter、Röntgen、Heine、Langley、Ångström、Paschen などによる研究によれば、まったく異なる種類のものです。それは、大気的主要成分によってではなく、大気中に存在するわずかな量の水蒸気と炭酸によって、高い割合で引き起こされます。さらに、この吸収はス

* Langley, 'Prof. 論文, No.15, p.151. 私は、Langley によって決定されるように、選択反射による吸収の値の公式を計算しようとしていました。検討したさまざまな式の中で、以下が実験結果と最もよく一致しています。 $\log a = b(1/\lambda) + c(1/\lambda)^3$ 最小二乗法を用いてこの式の係数を決定しました。

$$b = -0.0463, c = -0.008204$$

a は、強度1で入射し、大気質量1を通過した後の波長 λ (μ で表される) の光線の強度を表します。実験との密接な一致は、次の表からわかります。

λ .	$a^{1/7.6}$ (obs.)	$a^{1/7.6}$ (calc.)	Prob. error
0.358 μ	0.904	0.911	
0.383	0.920	0.923	0.0047
0.416	0.935	0.934	
0.440	0.942	0.941	
0.468	0.950	0.947	0.0028
0.550	0.960	0.960	
0.615	0.968	0.967	
0.781	0.978	0.977	
0.870	0.982	0.980	0.0017
1.01	0.985	0.984	
1.20	0.987	0.987	
1.50	0.989	0.990	0.0011
2.50	0.990	0.993	0.0018

紫外線の場合、事実に従って吸収は非常に大きくなります。最も一致度の低い値と1つの値 (1.50 m) について並べた誤差の可能性からわかるように、誤差の可能性は非常に小さいため、違いは予想される程度の大きさです。正確に適合する式と実験値の曲線は、4つのポイント (それぞれ、 $1/\lambda = 2.43, 1.88, 1.28, \text{および } 0.82$) で互いにカットします。式から、月と地球からの熱に支配されるスペクトルのそれらの部分の選択反射の値を推定することができます (偏差角 = $38-36^{\circ}$, $\lambda = 10.4-24.4 \text{ m}$)。この原因からの吸収は、大気質量1で0.5~1%の間で変化することがわかります。実験誤差で完全にカバーされるこの感知できない振る舞いは、以下の計算では無視しました。

ペクトル全体にわたって連続的ではなく、短波長ではほとんど感知されず、主に長波部分の明確に定められた吸収帯に限定されて顕著に現れ、その両側では急速に減衰します。この吸収の影響は、太陽からの熱については比較的小さいが、地球からの光線の透過には非常に重要であるはずで、Tyndall は、水蒸気が最大の影響力を持っているという意見を持ちましたが、他の著者、たとえば Lecher や Pernter は、炭酸がより重要な役割を果たすと考えています。Paschen の研究は、これらの気体は両方とも非常に効果的であることを示しているため、場合によっては、状況により 1 つ、時にはもう 1 つがより大きな効果を発揮する可能性があります。

地球（または温度+15°Cの物体）の放射が、私たちの地球に存在する水蒸気または炭酸の量の割合によって、どれだけ強く吸収されるかを知るために、厳密には、両方の適切な量の気体を使用して、15°Cの物体からどれだけ熱が吸収されるかに関する実験を準備する必要があります。しかし、そのような実験はまだ行われておらず、私が自由に使える以上の非常に高価な装置を必要とするため、私はそれらを実行する立場にありませんでした。幸いなことに、Langley の「月の温度」に関する研究には、私たちの大気で発生する条件で、水蒸気と炭酸による熱の吸収を正確に測定することが不可能ではないと思われる研究があります。

彼は、異なる月の高度と季節による満月の放射を測定しました（満月でない場合、この点に関連する必要な補正が適用されました）。この放射はさらにスペクトルに分散されていたため、彼の回顧録では、月からの、屈折角が 60°の岩塩プリズムとの偏差角によって定義される 21 の異なる光線グループの放射熱の図を見出しました。グループは角度 40°と 35°の間にあり、各グループは 15'間隔で隣接グループから分離されています。現在、月の温度は地球の温度とほぼ同じであり、月からの光線は測定機器に到達するまでに、月の高度と大気の湿度に応じた異なる厚さの炭酸と水蒸気の層を通過します。その場合、これらの観測結果が互いにほぼ同等であれば、水蒸気と炭酸に対する吸収係数を計算するには 21 の異なる光線グループのいずれか 3 つがあれば十分です。しかし、24 の異なる一連の観測結果を見るとすぐにわかりますが、そうはなりません。光線のグループの放射強度は、通過する水蒸気または炭酸の量が増加するにつれて常に減少するはずで、今、炭酸の量は大気を通る光線の経路、つまり、Langley の図で「大気質量」と呼ばれる量に比例します。したがって、炭酸の単位として、光線が大気質量=1 の大気中を垂直に横切る炭酸の量を取ります。それゆえ、通過する水蒸気の量は、1m³あたりの水の g 数で表され、部分的に「大気質量」、部分的に湿度に比例します。水蒸気の単位として、地球の表面にある大気が 1m³あたり 10 グラム含まれている場合の、垂直光線が通過する水蒸気の量を取りました。炭酸と水蒸気の量に関して引用した Langley の 24 種類の研究を一覧表にすれば、彼の数値が非常に不規則であることがすぐにわかります。そのため、これらの両方の量が増加すると、伝わる熱が連続的に減少するという規則に、非常に多くの例外が見つかります。

そして、まるで彼の一連の観測に、時期によって周期的な変化が起こったかのようです。どのような状況によってこれらの時間によって変化するのかについては、曖昧な推測しかできません。おそらく、目では検出できなくとも、空の透明度が、長い観測の間に変化しているかもしれません。この不規則な変動を排除するために、観測値を炭酸 (K) と水蒸気 (W) の平均量が 1.21 と 0.36、2.21 と 0.86、1.33 と 1.18、および 2.22 と 2.34 の 4 つのグループに分割しました。これらの 4 つのグループの光線のすべてのグループの放射熱の平均量の助けを借りて、私はおおよそその両方の気体の吸収係数 (x および y) を算出しており、これらによって、K と W がそれぞれ 1.5 と 0.88 だった場合に持っていたであろう観測値をそれぞれの値から差し引きました。その後、K = 1.5 および W = 0.88 を差し引いた一連の観測ごとに異なる光線における 21 個の値を合計し、合計の熱放射を得ました。観測試料が非常に均一である場合、この全放射の数値は互いに大きく異なるべきではありません。実際、ほぼ同時に行われた観測は、ほぼ等しい値を与えることがわかりますが、

観測が非常に異なる時期に行われた場合、一般に値は大きく異なります。次の期間、私は対応する全放射線の平均値を見出しました。

(時期)	(平均値)	(削減係数)
Period.	Mean value.	Reduction factor.
1885. Feb. 21-June 24	4850	1.3
1885. July 29-1886. Feb. 16.	6344	1.00
1886. Sept. 13-Sept. 18	2748	2.31
1886. Oct. 11-Nov. 8	5535	1.15
1887. Jan. 8-Feb. 9	3725	1.70

Langley の数値を互いに比較可能にするために、上記の表に示した削減係数を、それぞれの期間に行われた観測に適用しました。この作業方法によって、後に行う計算には体系的な誤差が入らないことを確信しています。

これを行った後、次の表の K と W の値に従って、Langley のグループの図を再配置しました。(詳細については、私のオリジナルの回顧録を参照してください。) この表では、偏差角が見出しとして採用されています。K と W の後に、上記で示した単位によって光線が通過した炭酸と水蒸気の量があります。この下に来るのは、ボロメータで Langley によって観測された放射強度 (i obs) (低減)、およびその後に来るのが、表 II に示された吸収係数を使用して計算された対応する放射量の計算値 (i calc)。

(表 II. 炭酸 (x) と水蒸気 (y) の吸収係数)

TABLE II.—Absorption-Coefficients of Carbonic Acid (x) and Aqueous Vapour (y).

Angle of Deviation.	log x.	log y.	A.
40°	{ +0.0286 0.0000 }	{ -0.1506 -0.1455 }	27.2
39.45	-0.0296	-0.1105	34.5
39.30	-0.0559	-0.0652	29.6
39.15	-0.1070	-0.0862	26.4
39.0	-0.3412	-0.0068	27.5
38.45	-0.2035	-0.3114	24.5
38.30	-0.2438	-0.2362	13.5
38.15	-0.3760	-0.1933	21.4
38.0	-0.1877	-0.3198	44.4
37.45	-0.0931	-0.1576	59.0
37.30	-0.0289	-0.1661	70.0
37.15	-0.0416	-0.2036	75.5
37.0	-0.2067	-0.0484	62.9
36.45	{ -0.2465 -0.2466 }	{ +0.0008 -0.0000 }	56.4
36.30	-0.2571	-0.0507	51.4
36.15	{ -0.1708 -0.1652 }	{ +0.0065 -0.0000 }	39.1
36.0	-0.0940	-0.1184	37.9
35.45	-0.1992	-0.0628	36.3
35.30	-0.1742	-0.1408	32.7
35.15	-0.0188	-0.1817	29.8
35.0	-0.0891	-0.1444	21.9

G は、対応する i obs に与えられる「重み」です。計算には、最小二乗法を使用します。この方法で計算された吸収係数について、私は次の表を提示します。（吸収係数の常用対数は表にまとめられています。）

これらの図の意味を、例によって示してみましよう。偏角 $39^{\circ}.45$ に対応する熱線が 1 単位の炭酸を通過すると、 $1:0.934$ ($\log = -0.0296$) の割合で強度が低下します。これに対応する 1 単位の水蒸気の単位は $1:0.775$ ($\log = -0.1105$) です。もちろん、これらの数値は、観測が行われた状況でのみ妥当です。つまり、次の量の炭酸と水蒸気の吸収が観測される前に、光線が炭酸の量 $K = 1.1$ と水蒸気の量 $W = 0.3$ を通過する必要があるということです。また、観測は、 $K = 1.1$ と $K = 2.2$ 、および $W = 0.3$ と $W = 2.1$ (K と W の数は、種類の異なる光線では少し異なります) の範囲を超えずに実験しているので、これらの 2 番目の量は $K = 1.1$ および $W = 1.8$ を超えないはずで、A の下には、 $K = 1$ および $W = 0.3$ の大気を通過した後の月の光における特定の種類の光線の放射強度の相対値が書き込まれています。場合によっては、計算により $\log x$ または $\log y$ に正の値が与えられます。これは物理的に不合理であるため（吸収気体を通過することで光線を強化する必要があることを意味します）、これらの観測誤差によるとすべきケースでは、対応する気体の吸収がゼロに等しいと仮定し、この値を使用して、他の気体の吸収係数を計算し、その後、A も計算します。

表 I の検査からうかがえるように、i obs の値は、ほとんどの場合、i calc の計算値とかなり一致します。

TABLE I.—Radiation (i) of the Full Moon for

different Values of K and W.

	40.	39.45.	39.30.	39.15.	39.	38.45.	38.30.	38.15.	38.	37.45.	37.30.
K	1.16	1.12	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16
W	0.32	0.269	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32
i obs.	28.7	26.6	27.0	26.4	24.8	24.8	12.6	20.1	43.8	65.9	74.4
i calc.	27.0	24.5	29.0	25.7	24.4	23.5	12.5	19.4	49.8	58.0	68.8
G	79	27	75	56	69	53	35	43	121	140	206
K	1.28	1.27	1.20	1.20	1.29	1.20	1.27	1.26	1.29	1.27	1.27
W	0.81	1.07	0.86	1.04	0.86	1.04	0.90	0.96	0.86	1.07	1.00
i obs.	22.9	31.2	26.7	21.3	18.2	11.0	5.8	3.7	14.0	32.0	52.3
i calc.	23.1	27.9	25.4	21.2	21.8	12.5	8.6	12.8	25.1	42.1	52.7
G	76	135	100	73	74	38	24	13	57	139	261
K	1.46	1.40	1.39	1.49	1.49	1.49	1.50	1.49	1.50	1.49	1.50
W	0.75	0.823	0.78	0.87	0.80	0.89	0.82	0.80	0.82	0.87	0.84
i obs.	11.9	28.2	23.0	18.9	18.0	9.2	9.0	14.4	24.6	34.8	46.6
i calc.	23.6	29.4	25.4	20.9	18.6	12.7	7.8	10.8	24.4	43.2	55.2
G	28	28	25	38	37	17	33	28	81	70	151
K	1.48	1.52	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.52	1.48
W	1.80	2.03	1.78	1.64	1.78	1.95	1.80	1.95	1.80	2.03	1.67
i obs.	25.2	27.6	24.6	18.3	27.6	4.8	3.7	3.6	17.6	45.5	43.9
i calc.	16.9	21.4	20.2	17.9	18.5	5.9	4.7	6.6	12.0	28.2	40.2
G	30	22	51	31	37	5	4	3	21	37	119
K	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.27	2.26	2.27
W	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.06	1.08	1.06
i obs.	21.3	23.4	20.8	16.4	11.1	8.2	4.5	3.5	17.3	36.1	47.1
i calc.	21.2	25.9	21.3	16.6	10.1	7.7	4.5	5.1	14.7	33.9	48.3
G	44	49	43	34	23	17	9	7	37	75	112
K	2.05	1.92	1.92	1.93	1.92	1.92	1.92	2.45	2.37	1.92	2.05
W	1.95	2.30	2.24	2.16	2.24	2.30	2.24	2.25	2.20	2.30	1.93
i obs.	13.4	12.8	14.8	15.1	10.3	6.6	3.4	3.4	7.9	20.8	31.5
i calc.	16.2	19.4	17.3	14.5	13.9	3.8	2.9	2.6	6.1	23.4	35.1
G	55	29	35	47	25	15	8	10	26	47	129

	37.15.	37.	36.45.	36.30.	36.15.	36.	35.45.	35.30.	35.15.	35.
K	1.16	1.16	1.18	1.18	1.27	1.16	1.27	1.27	1.27	1.16
W	0.32	0.32	0.34	0.34	0.48	0.32	0.48	0.48	0.48	0.32
i obs.	68.6	59	56.2	48.3	43.4	40.7	39.0	32.6	31.5	19.7
i calc.	73.7	57.1	50.9	46.0	34.9	30.4	31.3	27.7	27.3	19.3
G	190	163	118	102	28	112	25	21	20	54
K	1.27	1.27	1.31	1.32	1.32	1.28	1.33	1.33	1.33	1.25
W	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	0.81	0.51	0.51	1.07	0.60
i obs.	58.9	50.3	47.9	41.2	31.7	29.7	25.7	18.8	27.5	16.6
i calc.	53.0	51.2	47.1	39.2	34.2	31.1	30.3	26.8	21.3	17.2
G	294	251	205	140	108	98	16	12	39	22
K	1.49	1.48	1.48	1.48	1.41	1.45	1.41	1.41	1.41	1.41
W	0.87	0.85	0.85	0.85	0.97	0.89	0.97	0.98	0.98	0.98
i obs.	43.1	36.4	35.4	31.2	28.3	24.9	16.6	15.4	10.3	9.2
i calc.	55.2	47.1	42.5	36.3	33.0	29.3	27.3	22.3	22.0	14.7
G	87	149	146	127	54	78	32	29	19	17
K	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
W	1.66	1.58	1.66	1.66	1.83	1.66	1.83	1.58	1.83	1.66
i obs.	47.5	48.7	45.8	34.5	35.0	27.5	28.7	21.4	17.4	15.4
i calc.	38.2	43.4	42.5	33.0	32.0	23.6	23.4	17.8	15.4	11.6
G	136	176	131	90	82	79	67	81	41	43
K	2.26	2.12	1.91	1.90	1.91	2.00	1.91	1.90	1.90	2.12
W	1.08	1.15	1.10	1.11	1.10	1.18	1.10	1.11	1.11	1.15
i obs.	44.6	32.0	27.8	24.7	26.6	24.5	19.0	16.0	13.9	10.1
i calc.	47.1	33.5	32.8	27.4	26.8	23.6	21.3	17.5	20.4	12.2
G	93	98	66	58	63	72	45	37	32	31
K	1.92	2.05	2.45	2.37	2.45	2.37	1.97	1.97	1.97	1.97
W	2.30	1.93	2.25	2.20	2.25	2.20	2.33	2.33	2.33	2.33
i obs.	24.7	33.2	26.7	19.4	22.6	18.8	16.4	10.9	12.1	7.9
i calc.	27.1	31.8	29.7	18.4	21.4	16.8	17.4	11.5	12.2	8.4
G	56	137	77	63	65	61	32	22	24	16

しかし、場合によっては、望んでいるほど一致が良くないことがあります。これらのケースは、主に小さな「重み」G によって特徴付けられる、言い換えれば、これらのケースでは、観測の試料が相対的に不十分です。こうしたケースは、主にこれらの光線が水蒸気に強く吸収されることにより起こります。この効果は、おそらく、地表の湿度に比例して変化すると思われた大気中の水蒸気量が、常に理想的で均一な分布であるとは限らないという状況によるものです。気球の航行中に行われた観測から、水蒸気の分布は非常に不規則

であり、理想的な均一の分布とは異なる可能性があることもわかっています。また、いくつかのグループ、たとえば3番目のグループでは、観測された数値のほとんどすべてが計算された数値よりも少ないのに対し、他のグループ、たとえば4番目のグループではその反対です。この状況は、統計試料の区分が少し離れすぎていることを示しています。そして、これら2つのグループの組み合わせは、計算値と観測値の密接な一致を示していました。ただし、このような組み合わせは、計算された吸収係数の正確性に影響を与えないため、より大きなグループでは、結果の再計算において数値の再配置は省略しました。

表IIに示された吸収係数が、正の値を持つ対数が非常に少ないということで、大きな誤差が含まれていることはありえない、とする意見に賛成する議論が好まれている状況です。Langleyの観測がまったく不十分だった場合、負の対数とほぼ同数の正の数を見つけることが予想されていたでしょう。現在、角度が 40° の炭酸、および角度が $36^\circ.45$ および $36^\circ.15$ の水蒸気の3つのケースしかありません。 40° の観測は、月のスペクトルに属しておらず、月から散乱した太陽光のみに対応する光線であることをLangleyがほとんど関心を持たなかったため、あまり正確ではありません。これらの光線は、 15°C の物体から出る熱でも感知できるほどには発生しないため、この不一致は、私たちの問題を考える上では重要ではありません。水蒸気に属する対数の2つの正の値はまったく重要ではありません。これらは、 $W=1$ による吸収の場合に対して0.2および1.5%の誤差にしか相当しないので、実験誤差の範囲に完全に収まります。

これらの吸収係数をPaschenとÅngströmによる直接観測による結果と比較することは、確かに興味がなくはありません。ただ、この比較を行う際、上記の係数は、これら2人の著者の観測から計算された、または、されるであろう係数とは意味が異なりますから、正確な一致が期待できないことを留意する必要があります。上記の係数は、大量の炭酸($K=1.1$)と水蒸気($W=0.3$)を通過した光線の吸収率を示しています。一方、PaschenとÅngströmの係数は、これらの気体の最初の層を通過する際に光線が吸収される量を表します。場合によっては、これら2つの量の間には大きな違いが予想されるため、一般的な合意のみを探すことができます。

Paschenの図によると、 $0.9\mu\sim 1.2\mu$ の波長(偏差角 40° に相当)で、水蒸気による感知可能な放射または吸収は存在しないようです。一方、Langleyが表現した太陽のスペクトルが、この区間で非常に多くの強い吸収帯、その中で ρ 、 σ 、 τ 、そして ϕ とされたものが最も顕著であることを示し、その吸収帯が、非常に高い確率で水蒸気の吸収帯に属しており、Paschenがこの間隔で水蒸気による放出を観測しておらず、彼の得た熱スペクトルが、これらの短波長の光線に対して非常に小さい強度しか示していないという事実により明らかです。しかし、表IIにある、この角度での水蒸気の吸収係数は、Langleyが対応する観測値を重要視しなかったため、あまり正確ではない(おそらく大きすぎる)と認めてよいかもしれません。これがLangleyのスペクトルにおいて角度 $39^\circ 45'$ ($\lambda=1.4\mu$)で大きな吸収帯 ψ になった後、Paschenの曲線で最初に放射が顕著になります(表IIの $\log y = -0.1105$)。より大きな波長では、Paschenによると、 $\lambda=1.83\mu$ (Langleyのスペクトルの Ω)、つまり $39^\circ.30$ 付近および $\lambda=2.64\mu$ (LangleyのX)角度 $39^\circ.15$ の少し上に強い吸収帯が見出せます。これに従って、これらの角度で、かなり大きい水蒸気の吸収係数($\log y = -0.0952$ および -0.0862 応答)を見出しました。Paschenによると、 $\lambda=3.0\mu$ から $\lambda=4.7\mu$ までの吸収は非常に小さく、私の計算と一致しています($\log y = 39^\circ$ で -0.0068 、 $\lambda=4.3\mu$ に対応)。この位置から、 $\lambda=5.5\mu$ 、 $\lambda=6.6\mu$ 、および $\lambda=7.7\mu$ 、すなわち角度 $38^\circ.45'$ ($\lambda=5.6\mu$)および $38^\circ.30'$ ($\lambda=7.1\mu$)に吸収量は再び増加し、極大値を示します。この領域では、水蒸気の吸収は全区間にわたって連続的であり、その結果、この部分が大きな吸収係数($\log y = -0.3114$ および -0.2362)となることが理解できます。Paschen曲線において水蒸気の放出スペクトルの強度が低下した結果、その詳細を厳密に追跡することはできません

が、水蒸気の放出 $\lambda = 8.7 \mu$ ($39^\circ.15$) は、この場所での大きな吸収係数 ($\log y = -0.1933$) に一致します。Paschen の観測はさらには伸びず、 $39^\circ.08$ の角度に対応する $\lambda = 9.5 \mu$ で終了します。

炭酸については、Paschen および Ångström の数値と一致して、最初は 40° でゼロという値を見出します。炭酸の吸収は、最初に $\lambda = 1.5 \mu$ で検知可能な値があり、その後 $\lambda = 2.6 \mu$ の最大値まで急速に増加し、 $\lambda = 4.6$ (Langley の Y) で新しく非常に強い極大に達します。Ångström によれば、炭酸の吸収は $\lambda = 0.9 \mu$ でゼロであり、 $\lambda = 1.69 \mu$ で非常に弱く、その後連続的に $\lambda = 4.6 \mu$ に増加し、再び $\lambda = 6.0$ まで減少します。この振る舞いは、表 II の $\log x$ の値と完全に一致しています。 40° の値 0 ($\lambda = 1.0 \mu$) から、 $39^\circ.45$ ($\lambda = 1.4 \mu$) で検知可能な値 (-0.0296) に到達し、その後より大きな値 ($39^\circ.30$ で 0.0559 、 $39^\circ.15$ で -0.1070) が最大値に達するまで (39° 、 $\lambda = 4.3 \mu$ で -0.3412) どんどん値を大きくしていきます。この点の後、吸収は減少します ($38^\circ.45 = 5.6 \mu$ で、 $\log x = -0.2035$)。表 II によると、 $38^\circ.30$ および $38^\circ.15$ ($\lambda = 7.1 \mu$ および 8.7μ) での炭酸の吸収は非常に大きな値 ($\log x = -0.2438$ および -0.3730) を持ちますが、Ångström によれば、それは検知できないはずで、この振る舞いは、Ångström のスペクトルの波長が大きいほど強度が非常に小さいという事実と関連している可能性があります。Paschen の曲線には、 $\lambda = 5.2 \mu$ 、 $\lambda = 5.9 \mu$ 、 $\lambda = 6.6 \mu$ (水蒸気による吸収の可能性あり)、 $\lambda = 8.4 \mu$ 、および $\lambda = 8.9 \mu$ の、弱い最大値を持つこの領域全体に、炭酸によって連続的に吸収された痕跡があります。このスペクトル領域での水蒸気の強い吸収の結果、Langley の観測では放射の強度は非常に小さく、計算された吸収係数はあまり正確ではありません (上記 pp.242-243 を参照)。おそらく、この部分 ($38^\circ.30$ と $38^\circ.0$ の間) で計算された炭酸の吸収量が大きすぎ、水蒸気の吸収量が小さすぎた可能性があります。これは、表 I のように、より簡単に発生します。なぜなら、K と W は両方とも「大気質量」に比例するため、一般的には増加します。これは、以下で扱う問題でも発生することが指摘されます。この原因からの誤差は、最初の見方で考えるほど重要ではないということです。

38° ($\lambda > 9.5 \mu$) を超える角度の場合、2つの気体による放出または吸収を直接観測することはできません。Langley によると、太陽のスペクトルは、約 $37^\circ.50$ 、 $37^\circ.25$ 、 37° 、および $36^\circ.40$ で非常に大きな吸収帯を示します。私の計算によれば、水蒸気は $37^\circ.15$ から $37^\circ.45$ ($35^\circ.45$ 、 $35^\circ.30$ 、および $35^\circ.15$ の角度は非常にわずかな測定値に基づいているため非常に不確かです) の間にある 38° から 35° のスペクトルで最大の吸収力を持っており、炭酸は $36^\circ.30 \sim 37^\circ.0$ の間です。

これは、最初の2つの吸収帯は水蒸気的作用によるもので、最後の2つの吸収帯は炭酸的作用によるものであることを示すようです。

Langley が、最大の放射強度を有する 36° から 38° の角度で月の放射強度の測定に最大の注意を払ったことを強調する必要があります。したがって、スペクトルのこの部分の計算された吸収係数が最も正確であることを前提とすることができます。これは以下の計算にとって非常に重要です。地球からの放射はスペクトルのこの部分で、圧倒的な最大の強度 (約 3分の2、p.250 を参照) を持っているからです。

II. さまざまな組成の大気による総吸収量

ここで説明した方法で、すべての種類の光線の吸収係数の値を決定したので、Langley の数値の助けを借りて、 15°C の物体 (地球) から、指定された量の炭酸と水蒸気を含む大気に吸収されるの熱の割合を計算することができます。まず、値 $K = 1$ および $W = 0.3$ でこの計算を実行します。私達は、Langley によって最もうまく決められた種類の光線を使用します。そして、これは、放射の最も重要な部分 (37°) の中央にありま

す。この光束について、 $K = 1$ および $W = 0.3$ での放射の強度は 62.9 に等しくなります。そして、吸収係数の助けを借りて、 $K = 0$ および $W = 0$ の強度を計算し、105 に等しいことがわかります。次に、 15°C の物体からの放射のスペクトル分布に関する Langley の実験を使用します。他のすべての偏差角の強度を計算します。これらの強度は、見出し M の下にあります。その後、 $K = 1$ および $W = 0.3$ の値を計算する必要があります。角度 37° では 62.9 であることがわかっています。その他の角度については、表 II にある、月が 15°C の物体であった場合の値 A を使用することができます。Very の数値の計算では、満月の温度が、より高い約 100°C であることが示されています。現在、 15°C の物体と 100°C の体から出る熱スペクトル分布は、まったくではありませんが、ほぼ同じです。ただし、Langley の数値を使用して、 100° (月) の高温体の強度を、妥当な 15° の物体 (地球) に、簡単に低下させることができます。この方法で削減された A の値は、見出し N の下に表にまとめられています。

Angle...	40°	39-45.	39-30.	39-15.	39-0.	38-45.	38-30.	38-15.	38-0.	37-45.	37-30.	
M	3-4	11-6	24-8	45-9	84-0	121-7	161	189	210	210	188	
N	3-1	10-1	11-3	13-7	18-0	18-1	11-2	19-6	44-4	59	70	
Angle...	37° -15.	37-0.	36-45.	36-30.	36-15.	36-0.	35-45.	35-30.	35-15.	35-0.	Sum.	P.c.
M	147	105	103	90	60	51	65	62	43	30	2023	100
N	75-5	62-9	56-4	51-4	39-1	37-9	39-2	37-6	36-0	28-7	743-2	37-2

角度 37° 未満の場合、上記の方法で、表 II の吸収係数と N の値を使用して求められた、表に記載されたものよりも数が小さいことが見出されます。

この方法で得られた M の値は、上記の計算によるものより、少し大きくなります (6.8%)。この不一致は、おそらく観測のスペクトルがまったく純粹ではなかったという状況に起因します。

37.2 という値は、M の値の不確実性の結果として、比較的大きな誤差の影響を受けている可能性があります。以下の計算では、重要な役割を果たすのは 37.2 という値ではなく、K と W の値の増加によって引き起こされる値の減少です。比較のために、Langley が言及した研究では、大気 (平均組成) を通過した月からの熱は 38% です。Langley の観測における平均大気は、 $K = 1$ および $W = 0.3$ よりも高い K および W の値と一致していたため、彼は不透明な光線の透明度は私が行ったよりも大きいです。Langley の推定によれば、 $K = 1$ および $W = 0.3$ については、37.2 ではなく約 44 とする必要があります。この違いがどれほど大きな影響を与えるかについては、以下で調べます。

表 II に引用されている吸収係数は、K の値が約 1 と 2.25 の間、および W の値が 0.3 と 2.22 の間で有効です。この間隔で、上記の係数と N の値を使用して、異なる K と W の値に対する係数 N の値を計算し、そして、この方法で合計をすることによって、与えられた条件の大気を通過する熱の量を得ることができます。さらなる計算のために、さらに多くの炭酸と水蒸気を含む大気の N の値も計算しました。これらの値は外挿されていると見なす必要があります。次の表 (表 III) で、これらの N の値を示しました。

斜体で印字された数字は、記載されている方法で直接見つけられたもので、通常のタイプで印字された数字は、Pouillet の指数公式を使用して新たに加えたものです。表には 2 つの見出しがあります。横方向は水蒸気量 (W) を表します。縦方向は、大気中の炭酸の量 (K) を表します。

この黒体熱とまったく異なるのは、太陽の熱が地球の大気の新しい部分を通過する際の振る舞いです。大気最初の部分は疑いなく一部の赤外線を選択的に吸収しますが、これらが消滅しても、熱は、議論中の新しい量の気体を通過しても減少しないようです。これは、Langley による、コロラド州のマウンテンキャンプとローンパインにおける光量測定観測の助けを借りて、水蒸気については簡単に示すことができます。

(表III. 15°Cの物体からの熱に対する特定の大気の透明度)

TABLE III.—The Transparency of a given Atmosphere for Heat from a body of 15° C.

$\begin{matrix} \rightarrow \\ \text{H}_2\text{O} \\ \downarrow \\ \text{CO}_2 \end{matrix}$	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
1	37.2	35.0	30.7	29.9	23.9	19.3	16.0	10.7	8.9
1.2	34.7	32.7	28.6	25.1	22.2	17.8	14.7	9.7	8.0
1.5	31.5	29.6	25.9	22.6	19.9	15.9	13.0	8.4	6.9
2	27.0	25.3	21.9	19.1	16.7	13.1	10.5	6.6	5.3
2.5	23.5	22.0	19.0	16.6	14.4	11.0	8.7	5.3	4.2
3	20.1	18.8	16.3	14.2	12.3	9.3	7.4	4.2	3.3
4	15.8	14.7	12.7	10.8	9.3	7.1	5.6	3.1	2.0
6	10.9	10.2	8.7	7.3	6.3	4.8	3.7	1.9	0.93
10	6.6	6.1	5.2	4.3	3.5	2.4	1.8	1.0	0.26
20	2.9	2.5	2.2	1.8	1.5	1.0	0.75	0.39	0.07
40	0.88	0.81	0.67	0.56	0.46	0.32	0.24	0.12	0.02

ローンパインでの観測は、1882年の8月18日から9月6日の午前7:15、7:45、11:15、午後12:15、4:15、4:45。マウンテンキャンプでは、8月22日から25日まで同じ時間に観測が行われましたが、1回だけは朝(午前8時0分)に観測が行われました。私は、これらの観測値を、大気の湿度に応じて、地点ごとに2つのグループに分けました。次の小さな表では、最初に観測場所が、次のD観測の平均日(1882年8月)、Wは水蒸気量、Iは光量計によって観測された放射量、I₁は引用された同じ量の2回目の観測がかかれています。

	Morning.				Noon.				Evening.			
	D.	W.	I.	I ₁	D.	W.	I.	I ₁	D.	W.	I.	I ₁
Loose Pine.	{ 29.3	0.61	1.424	1.554	{ 23.6	0.46	1.692	1.715	{ 23.6	0.51	1.417	1.351
	{ 21.1	0.84	1.458	1.583	{ 25.9	0.59	1.699	1.721	{ 23.2	0.74	1.428	1.359
Mountain Camp.	{ 23.5	0.088	1.790		{ 22.5	0.182	1.904	1.873	{ 24.5	0.205	1.701	1.641
	{ 23.5	0.153	1.749		{ 24.5	0.245	1.890	1.917	{ 22.5	0.32	1.601	1.527

湿度が非常に低い場合(マウンテンキャンプ)、湿度が高い場合の数値は、湿度が低い場合よりも値が小さい(わずかな例外を除く)ことから、水蒸気の吸収力が影響を与えていることは明らかです。しかし、ローンパインからの観測については、その反対が真実のようです。放射が水蒸気を通過することで強化されたと仮定することは許されませんが、観測された効果は何らかの二次的な状況によって引き起こされたに違いありません。おそらく、水蒸気が多い場合、大気は一般的に純粋です。このより純度が高いことの結果として、選択的拡散は減少し、そして、この二次的な効果は、放射が水蒸気の増加により減少することによるわずかな吸収を相殺する以上のものです。

ElsterとGeitelが、非常に高い屈折でかつ目に見えない光化学作用の光線(註:紫外線)が、乾燥している場合よりも湿っている場合の方がはるかに容易に大気を通過することを証明したことは注目に値します。Langleyの数値は、太陽放射に対する水蒸気の影響が、約0.4の値を超えてもとすぐに影響を受けないことを示しています。おそらく、両方の気体の吸収スペクトルは一般に同じ特性であるため、同じ推論が炭酸にも当てはまります。さらに、炭酸による吸収はかなり長い波長で発生し、その結果、水蒸気による吸収よりもはるかに重要な太陽のスペクトルの部分で発生します。したがって、KとWがかなり重要でない値(K=1、W=0.4)からより高い値に増加する場合、太陽からの放射はそれほど減少しないと仮定することは妥当です。さらに先に進む前に、別の問いについて検討する必要があります。たとえば、大気中の炭酸を現在と

同じとし（垂直光線では $K = 1$ ）、水蒸気量は 1m^3 あたり 10 グラム（垂直光線では $W = 1$ ）とします。次に、地球からの垂直光線は、量 $K = 1$ および $W = 1$ を通過します。地平線に対して 30° の角度で逃げる光線（大気質量 = 2）は、数量 $K = 2$ 、 $W = 2$ を横切ります。地球の表面の 1 点から発するさまざまな光線は、したがって、異なる吸収を被ります—光線の経路は垂直から下方へ傾くとより大きくなります。それから、空間にあらゆる方向に発散された光線の総量が吸収されたのと同じ割合で吸収された、全ての放射がどのくらいの長さの経路を作らなければならないかが問われます。放射された光線については、表 III の助けを借りて、Lambert の余弦定理が有効であると仮定します。任意の光線の吸収係数を計算し、総吸収熱を合計して、総放射に対する割合を決定することができます。この方法で、この例では経路（大気質量）1.61 を見出します。つまり、放射全体の吸収された部分は、合計放射が水蒸気と炭酸の 1.61 の量を通じた場合と同じくらいの大きさです。この数は大気の組成に依存するため、大気中の水蒸気と炭酸の量が多くなるほど少なくなります。

次の表 IV に、両方の気体の異なる量に対するこの数値を示します。大気の吸収がゼロに近づくと、この値は 2 に近づきます。

（表 IV 地球の光線の平均経路）

TABLE IV.—Mean path of the Earth's rays.

$\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2}$	0.3.	0.5.	1.	2.	3.
0.67	1.69	1.68	1.64	1.57	1.53
1	1.66	1.65	1.61	1.55	1.51
1.5	1.62	1.61	1.57	1.51	1.47
2	1.58	1.57	1.52	1.46	1.43
2.5	1.56	1.54	1.50	1.45	1.41
3	1.52	1.51	1.47	1.44	1.40
3.5	1.48	1.48	1.45	1.42	

III. 地上および地球の大気圏における熱平衡

大気による熱の吸収についての十分な知識が得られましたが、地面の温度が大気の吸収力にどのように依存するかを調べる作業は残っています。このような調査はすでに Pouillet によって行われていますが、Pouillet は現在の私たちの知識と一致しない仮説を使用しているため、新たに（調査を）行わなければなりません。われわれの推論において、地球の内部からその表面に伝導される熱は完全に無視されるだろうと仮定します。地球の表面温度に変化が生じた場合、地球の地殻の上層も明らかに温度が変化します。しかし、この後のプロセスは、表面温度の変更に必要な時間と比較して非常に短い時間で終了するため、いつでも内部から表面に輸送される熱（冬にはプラス、夏にはマイナス）は、一年を通じた表面温度のわずかな変化とは独立したままでなければならず、1 年の間ではゼロにほぼ等しいはずだと仮定します。同様に、水平または垂直の大気または海洋の流動の結果として、地球の表面または大気中の所定の場所に伝導される熱は、考

慮される時間の過程で同じままであると仮定し、また、空の曇った部分は変わらないと仮定します。調べるのは、大気の透明度による温度だけです。

すべての著者は、地球とその大気の温度に平衡が存在するという見解に同意しています。したがって、大気は、一部は太陽の光線の吸収、一部は地球のより高温の表面からの放射、および地面との接触によって加熱された気流の上昇によって、得られた熱を宇宙に放射する必要があります。一方、地球は、宇宙や大気への放射によって、太陽光線の吸収によって得られた熱と同じ程度の熱を失います。大気中または地上の特定の場所を考慮する場合、海洋または大気の流れによってこの場所に運ばれる熱量も考慮する必要があります。放射については、現在、一般に受け入れられている Stephen の放射の法則が有効で、つまり、アルベド $(1-\nu)$ 、温度 T (絶対温度) の物体から、吸収係数 β 、絶対温度 θ の別の物体へ放射される熱量 (W) は次のようにあらわされます。

$$W = \nu\beta\gamma(T^4 - \theta^4),$$

ここで、 γ はいわゆる放射定数 ($1.21 \times 10^{-13}/\text{秒} \cdot \text{cm}^2$) です。真空は絶対温度 0 と見なすことができます。仮に、大気を温度 θ と太陽熱の吸収係数 α の均一な筒と見なします。太陽から 1cm^2 の断面積の柱に A (cal) が到着すると、 αA (cal) は大気に吸収され、 $(1-\alpha) A$ は地球の表面に到達します。したがって、 A (cal) には、大気中で選択的な反射によって宇宙に向かって放出される太陽の熱の一部は含まれません。さらに、地表から放射される熱に対する大気の吸収係数を β と指定します。 β は、低温 (厳密には 15°) の放射に対する大気の放出係数でもあります。しかし、熱のスペクトル分布は温度とともにかなりゆっくりと変化するため、 β は大気の温度でも放出係数として見ることができます。地球の地殻のアルベドを $(1-\nu)$ とし、考慮された点で大気と地表に運ばれる熱量をそれぞれ M と N とします。時間の単位として、任意の期間を取ることができますが、次の計算においておそらくこの目的のため、3 か月が最良の選択だと思われます。表面の単位を 1cm^2 とした、 1cm^2 の断面と大気の高さの柱に含まれる大気中の熱として選択します。地面から反射された熱は、それまでは大量の水蒸気と炭酸を通過していたため、その一部は拡散反射によって地面に戻される可能性があるので大気にあまり吸収されません (p.252 を参照)。この部分をアルベド $(1-\nu)$ には含めません。 γ 、 A 、 ν 、 M 、 N 、および α は定数、 β は独立変数、 θ および T は従属変数と見なされます。次に、大気の柱について、次の式を見出します。

$$\beta\gamma\theta^4 = \beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + \alpha A + M. \quad \dots (1)$$

この方程式の第 1 項は、大気 (放射係数 β 、温度 θ) から宇宙 (温度 0) に放射される熱を表します。第 2 項は、地球表面から放射される熱 (1cm^2 、温度 T 、アルベド $1-\nu$) を大気に与えます。第 3 項は太陽から大気に放射される放射熱、第 4 項は他の部分または地面からの伝導 (気流) によって得られる熱量になります。同じように、私たちは地球表面について、次の式を見出します。

$$\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + (1-\beta)\gamma\nu T^4 = (1-\alpha)\nu A + N. \quad \dots (2)$$

第 1 項と第 2 項は、それぞれ大気と宇宙に放射される放射熱量を表します。 $(1-\alpha)\nu A$ は太陽の放射の一部を吸収し、 N は他の部分から考慮される点に土壌または水流または気流による大気から伝導する熱です。これらの方程式の両方を組み合わせて、大きな関心がない θ を消去します。

$$T^4 = \frac{\alpha A + M + (1-\alpha)A(1+\nu) + N(1+1/\nu)}{\gamma(1+\nu-\beta\nu)} = \frac{K}{1+\nu(1-\beta)} \quad (3)$$

地球の固体地殻については、雪原 $\nu = 0.5$ と仮定する場合を除いて、 ν を 1 に設定できます。地球の水で覆われた部分については、Zenker の数値を使用して、 ν の平均値を 0.925 と計算しました。また、雲のアルベドを利用するために次のことも行います。これがこれまでに感知できる誤差なしで測定されたかどうかはわかりませんが、おそらく、Zöllner が 0.78 ($\nu = 0.22$) であると判断した新雪と大差はありません。古い雪の場合、アルベドははるかに少ない、または ν ははるかに大きい。したがって、平均値として 0.5 を想定しています。最後の式は、地球の温度が β で増加し、より急速に ν が大きくなることを示しています。 $\nu = 1$ の場合に 1° 増加すると、 $\nu = 0.925$ 、0.5、および 0.22 の値に対してそれぞれ次の増加量を見出します。

β	$\nu=0.925$	$\nu=0.5$	$\nu=0.22$
0.65	0.944	0.575	0.275
0.75	0.940	0.556	0.261
0.85	0.934	0.535	0.245
0.95	0.928	0.512	0.228
1.00	0.925	0.500	0.220

温度変化の結果として、考慮される地球の表面の部分がそのアルベドを変えないのであれば、この理論は有効です。この場合、まったく異なる状況が発生します。たとえば、現在雪に覆われていない地面が、気温の低下により雪で覆われた場合、最後の式で β だけでなく ν も変更させる必要があります。この場合、 α は β と比較して非常に小さいことを覚えておく必要があります。 α については、Langley の見積りに従って値 0.40 を選択しましょう。確かに、この値の大部分は、太陽熱の拡散反射の部分に依存します。これは地球の大気に吸収されるため、上記で定義したように、 α に含めるべきではありません。一方、太陽は一般に、比較的高い太陽で試験している Langley の測定よりもわずかに低くなる場合があります、その結果、 α は少し大きくなる可能性があるため、これらの状況は互いに相殺する可能性があります。 β については、値 0.70 を選択します。これは、 $K = 1$ および $W = 0.3$ (凝固点より少し下) の場合に係数 1.66 と一致します (p.253 参照)。この場合、 T (雪面に覆われていない) と T_1 (雪面に覆われている) の関係は次のようになります。

$$\begin{aligned} T^4 : T_1^4 &= \frac{A(1+1-0.40) + M}{\gamma(1+1-0.70)} : \frac{A(1+0.50-0.20) + M}{\gamma(1+0.50-0.35)} \\ &= \frac{1.60 + \phi}{1.30} : \frac{1.30 + \phi}{1.15} \end{aligned}$$

$M = \phi A$ の場合、地球全体の M の平均はゼロであり、赤道域では負、極域では正であることに留意する必要があります。平均緯度 $M=0$ の場合、この場合、 $T = 273$ の場合、 T_1 は 267.3 になります。つまり、積雪の結果として温度が 5.7°C 低下します。この原因からの温度の低下は $\phi = 1$ 、つまり、対流によって大気に伝達される熱が太陽の全放射を超えるまで有効です。これは冬と極地でのみ発生します。しかし、これは二次的な現象です。私たちが調べる主な効果は、地表の温度 T に対する β の変化の直接的な影響です。値 $T = 273$ および $\beta = 0.70$ から始めると、 β の変動によって生じる温度変化 (t) が次の値になることがわかります。

$\beta=0.60$	$t=-5^{\circ}\text{C.}$
0.80	+ 5.6
0.90	+11.7
1.00	+18.6.

これらの値は、 $\nu=1$ 、つまり雪原を除く地表の固体地殻に対して計算されます。たとえば海や雪原など、 ν の別の値を持つ表面の場合、この値 t に上記の分数を掛ける必要があります。

私たちは、ただちに雲の影響を考慮する必要があります。太陽の光線は雲に遮られるため、地球の表面の大部分は太陽から直接熱を受け取りません。地球の表面の大部分が雲で覆われているのは、Teisserenc de Bolt の雲量に関する研究からわかります。この出版物の表から、私は異なる緯度の雲量を決め、そして以下のように見出しました：-

(緯度)

Latitude. . 60.	45.	30.	15.	0.	-15.	-30.	-45.	-60.
Nebulosity.	0.603	0.48	0.402	0.511	0.581	0.463	0.53	0.701

(雲量)

地球の南緯 60 度から北緯 60 度までの部分では、平均値 0.525、つまり空の 52.5% が曇っています。これらの雲の熱的な効果は、次の方法で推定できます。雲が地球の表面の一部の上であり、この影の部分と隣接する部分の間に関連が存在しないと仮定すると、雲とその下の地面の温度の間に熱平衡が存在します。それらは互いに放射し、雲は上空、そして宇宙にも放射します。雲と地球の間の放射は、温度のわずかな違いのために、この差に比例するものとみなされます。気流による他の熱交換も、第一の近似として、この差に比例します。したがって、雲の温度が変化すると仮定すると（他の状況、その高さや組成などは変わらないまま）、その下の地面の温度も、両方に同じ熱が供給される場合、同じ方法で変化することに間違いありません。隣接する部分から地面への供給がないとすると、雲と地面は最終的に同じ平均温度になると仮定します。したがって、雲の温度が決められた方法で変化する場合（高さ、簡潔さなどの他の特性を変更することなく）、地面は同じ温度変化を受けます。今度は、同じ割合で大気中の炭酸を変化させると、絶対的な大小に関係なくほぼ同じ熱効果が生じることが次節で示されます (p.265 参照)。したがって、この場合の温度変化は、雲がアルベド 0.78 ($\nu=0.22$, p.256 参照) の薄膜で地面を覆っているように計算できます。現在は平均 $K=1$ および $W=1$ にほぼ等しく、この場合 β は約 0.79 です。曇った部分への影響は、 $\nu=1$ の部分への影響の 0.25 のみです。地球の雲のない部分が固体の地面と同じ量の水で構成されていると仮定して、海 ($\nu=0.925$) に補正が導入されます（雲は海洋上により多く留まるため、ほぼ真実です）、地球全体の表面が $\nu=1$ である場合に存在するものの、およそ 60% の平均効果を見つけます。一方で、雪で覆われた部分はこれらの部分の 65% が曇っているため、考慮されません。さらに、それらは地球の非常に小さな部分しか構成していないため（年平均で約 4% のみ）、この場合の補正は 60% で、0.5% を超えません。雪原とただの土壌の境界の二次的効果が作用し (p.257 を参照)、雪の緩和効果を補償し、おそらく打ち勝ちます。

前述では、大気は完全に均一な温度の筒と見なされるべきであると想定しました。もちろんこれは真実ではなく、この不正確さによって引き起こされる誤差を排除するために導入すべき、可能な修正の検討に進みます。宇宙に放射する大気の一部は主に外部のものであり、他方、地球の放射の大部分を吸収する大気層

はあまり高くないことが明らかです。これにより、大気から宇宙への放射（式(1)の $\beta \gamma \theta^4$ ）と、地表から大気への放射（式(2)の $\beta \gamma \theta (T^4 - \theta^4)$ ）の両方が大幅に減少し、大気にはこれらの方程式で想定されるよりも空間への熱の損失を防ぐ効果が大きく、結果として式(3)も同様になります。宇宙に放射して地球の放射を吸収する大気の2つの層の温度差を知っていれば、式(1)、(2)、および(3)で必要な補正を導入するのは簡単です。この目的のために、次の考慮事項を追加しました。

大気平均組成 ($K = 1$ 、 $W = 1$) では、約 80% の地球の放射が大気に吸収されるため、吸収層の平均温度として、熱の 40% が吸収される高度の層の平均温度を選択できます。放射と吸収は同じ定量的法則に従うため、放射層の平均温度は、実際の放射とは反対方向の空間から入射する放射が 40% の範囲まで吸収される高度の温度を選択できます。Langley は、 100°C の高温 Leslie cube からの放射に対する水蒸気の吸収力を 4 つ測定しました。これらは、Pouillet の式が計算に使用されていれば、ほぼ同じ吸収係数になります。これらの数値から、40% の放射を吸収するためには、放射源と検出器の間に大量の水蒸気が差し込まれる必要があり、これらが凝結すると、計算すると厚さ 3.05mm の水の層が形成されると思われます。地球全体の平均を $K = 1$ および $W = 1$ と仮定すると（表 VI を参照）、その地球鉛直放射が 100° の場合、40% を失うためには、305m の大気を通過する必要があります。地球は 15°C に過ぎませんが、これは大きな違いを生むことはあり得ません。放射はすべての方向に発散するため、305 を 1.61 で割る必要があります、209m 到達します。高度の高いところでは水蒸気の量が低下することから、わずかな補正を適用する必要があります、結果、233m になります。もちろん、この数値は平均値であり、値が大きいほど地球の寒い地域に適しており、暖かい地域では低くなります。それゆえ、地表からの距離が非常に近いところで、地球放射の 40% が止まってしまうはずで、必然的に低い値になってしまうので、現在、Pouillet の式で計算することはまったく正しくありません（Langley の数値がこれとよく一致することはかなり奇妙です）。しかし、一方で、この部分の炭酸による吸収についてはまったく考慮していないため、前述の誤差を補うことができます。大気の上層には水蒸気がほとんどないため、主な吸収源である炭酸を使用して計算する必要があります。Ångström による測定より、水蒸気と等量（分子数が同じ）の炭酸の吸収係数は、比率 81 : 62 です。この比率は、少なくとも Ångström の使用した熱くない放射源に対して有効です。地球の放射がはるかに屈折しにくいことは疑いありません。しかし、より適切な測定法がないため、これを目的のために使用しましょう。CO₂ の吸収帯は全体として H₂O のそれよりも屈折しにくいいため、熱の少ない放射源では、炭酸の吸収力は水蒸気の吸収力に比べて、少し大きくなる可能性があります（pp.246-248 を参照）。大気中の炭酸の量として 0.03% を使用して、大気の上層から発散した光線は、大気の 0.145 の部分を構成する層から 40% を得ることがわかります。これは、約 15,000m の高さに相当します。この値については、前述の値と同じことが言えます。この場合、高層大気中の少量の水蒸気による吸収を無視しています。一方、これら 2 つの層の温度差——1 つは吸収、もう 1 つは放射——は、Glaisher の測定（少し外挿）によると、約 42°C です。

雲については、自然にわずかに修正された数値が得られます。太陽に照らされた雲の平均的な高さを取る必要があります。そのような雲として、私は、最高 3611m、最低 900m、平均 1855m の高度にある積雲の頂上を選択しました。平均値 2000 および 4000m を計算しました。（温度差 30°C を計算し地表では 42°C ではなく 30°C 、 20°C に相当になります。）

(1) から (3) の公式を調整したい場合、(1) および (2) で、放射層の平均温度として θ を導入し、それぞれの吸収層の平均温度として $(\theta + 42)$ 、 $(\theta + 30)$ 、または $(\theta + 20)$ を導入します。最初のケースではそれぞれ $\nu = 1$ と $\nu = 0.925$ を使用し、2 番目と 3 番目のケースでは $\nu = 0.22$ を使用する必要があります。次に、式 (3)

$$T^4 = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)},$$

の代わりに、もう一つの別の非常によく似た公式を見出します。

$$T^4 = \frac{K}{1 + c\nu(1 - \beta)}, \dots \dots \dots (4)$$

ここで、3つのケースにおけるそれぞれの定数 c は 1.88、1.58、および 1.37 です¹。このようにして、固体地面が温度を 1°C 変化させた場合、式(3)によって計算された β の値が変化した結果として、温度の変化を表す以下の修正値を見出します。

地球全体の平均を $K = 1$ および $W = 1$ と仮定すると、 $\beta = 0.785$ になり、雲で覆われた部分を 52.5%、雲の高さを 2000m、さらに地表で雲に覆われていない残りの土地と水で均等に構成され、温度の平均変動を次のように見出します。

$$1.63 \times 0.2385 + 1.54 \times 0.2385 + 0.39 \times 0.525 = 0.979$$

これは、私たちとほぼ同じ式(3)から直接計算できます。この理由で、私はより単純な式を使用しました。

(表 V. 放射の補正係数)

TABLE V.—Correction Factors for the Radiation.

$\beta =$	Solid ground, $\nu = 1.$	Water, $\nu = 0.925.$	Snow, $\nu = 0.5.$	Clouds ($\nu = 0.22$) at a height of		
				0 m.	2000 m.	4000 m.
0.65	1.53	1.46	0.95	0.49	0.42	0.37
0.75	1.60	1.52	0.95	0.47	0.40	0.35
0.85	1.69	1.59	0.95	0.46	0.38	0.33
0.95	1.81	1.68	0.94	0.43	0.36	0.31
1.00	1.88	1.74	0.94	0.41	0.35	0.30

前述のように、私の見積もりによれば、大気は Langley の推定よりも黒体熱に対する透明度が低く、ほぼ 37.2 : 44 の割合であることに気づきました。この違いがどれほど大きな影響を与えるかは、式(3)または (4) によって簡単に計算できるはずですが、Langley の評価によると、その効果は私のものよりも 15% 近く

1

$$1.88 = \left(\frac{288}{246}\right)^4, 1.58 = \left(\frac{276}{246}\right)^4, \text{ and } 1.37 = \left(\frac{266}{246}\right)^4.$$

246° は大気上層の平均絶対温度。

大きくなるはずですが。私の推定値は、Langley が地上の放射体からの熱に対して見出した大きい吸収量と、より一致すると思います (p.260 を参照)。すべての状況で、私は問題の効果を過大評価するよりも少し過小評価することを好みました。

IV. 空気中に与えられた炭酸の変化の結果として起きるであろう気温変動の計算

大気中の炭酸の変動の結果であると考えられる地球の温度への影響を推定するために、私たちは必要なすべてのデータを所有しています。所定の場所の炭酸の量 ($K = 1$) と水蒸気 (W) がわかっている場合、表 III の助けを借りて、その場所の吸収係数を決定するだけです。表 IV の助けを借りて、最初に、地球から大気への放射の平均経路を与える係数 ρ を決定し、この係数で与えられた K 値と W 値をかけます。次に、 ρK と ρW に対応する β の値を決定します。ここで、炭酸の別の濃度が K_1 であると仮定します ($K_1 = 1.5$ など)。次に、最初に W が変更されていないと仮定し、この仮定で有効な ρ の新しい値を求め、 ρ_1 とします。次に、 $\rho_1 K_1$ ($1.5 \rho_1$) と $\rho_1 W$ に対応する β を求める必要があります。式 (3) から、簡単に計算できます。 β が β から β_1 へ変化するのに伴う所定の場所の温度変化 (t) (ここでは上昇) を簡単に計算できます。温度変化 (t) の結果として、 W も必ず変化します。土地と水の分布が変化しない限り、相対湿度はそれほど変化しないため (私の回顧録の表 8 を参照)、この量は一定のままであると想定して W の新しい値 W_1

(表 VI. 平均温度、相対湿度、絶対湿度*)

TABLE VI.—Mean Temperature, Relative and Absolute Humidity*.

Latitude.	Mean Temperature.					Mean Relative Humidity.					Mean Absolute Humidity.				
	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.
70	-21.1	- 8.3	+ 7.5	- 6.0	- 7.0	86	81	77	84	82	1.15	2.14	6.22	2.84	3.09
60	-11.2	+ 0.2	+13.5	+ 2.2	+ 1.2	83	74	76	80	78.2	2.22	3.82	8.82	4.7	4.9
50	- 1.4	+ 7.8	+18.7	+ 9.7	+ 8.7	78	73	69	76	74	3.86	5.98	10.8	7.16	6.95
40	+ 8.4	+14.5	+21.8	+16.6	+15.3	73	68	67	71	69.7	6.53	8.63	13.4	10.13	9.7
30	+17.0	+21.5	+26.0	+23.0	+21.9	71	68	70	73	70.5	10.36	12.63	17.1	15.0	13.8
20	+23.2	+25.5	+26.8	+25.9	+25.4	74	73	78	77	75.5	15.3	17.0	19.6	16.8	17.2
10	+25.5	+25.8	+25.4	+25.5	+25.5	77	78	82	81	79.5	17.7	18.9	19.9	19.3	18.9
0	+25.7	+25.5	+24.0	+25.0	+25.1	81	81	82	80	81	19.4	19.0	17.9	18.3	18.7
-10	+24.9	+24.0	+20.8	+23.1	+23.2	79	78	80	77	78.5	18.0	17.1	14.6	16.0	16.4
-20	+22.4	+20.5	+16.4	+19.3	+19.7	75	79	80	75	77.2	14.8	14.0	11.1	13.0	13.2
-30	+17.5	+15.2	+11.3	+14.2	+14.5	75	80	80	79	78.5	11.1	10.4	8.1	9.6	9.8
-40	+11.6	+ 9.5	+ 5.9	+ 8.2	+ 8.7	81	81	83	79	81	8.34	7.08	5.94	6.63	6.99
-50	+ 5.3	+ 2.0	- 0.4	+ 1.6	+ 2.1	83	79	—	—	—	5.74	4.46	—	—	—
-60															

* From the figures for temperature and relative humidity I have calculated the absolute humidity in grams per cubic metre.

(*温度と相対湿度の数値から、絶対湿度を 1m^3 あたりの g 数で計算しました。)

が定まります。ほとんどの近似は、定義的なものと見なされる W_1 と β_1 の値を与えます。したがって、この方法では、所定の場所の実際の温度と湿度から、直ちに温度の変化を取得します。

(表 VII 二酸化炭素の特定の変動によって引き起こされる温度の変動)

266 Prof. S. Arrhenius on the Influence of Carbonic Acid

TABLE VII.—Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.

Latitude.	Carbonic Acid=0.67.					Carbonic Acid=1.5.					Carbonic Acid=2.0.					Carbonic Acid=2.5.					Carbonic Acid=3.0.									
	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.	Dec- Feb.	March- May.	June- Aug.	Sept.- Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.3	9.4	9.1	9.3	9.4	9.3	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	9.5	9.3	9.5	9.5	9.5	9.3	
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.5	9.5	9.4	9.2	9.17	
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.8	8.82	9.3	9.0	8.2	8.8	
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.9	8.1	8.7	8.3	7.5	7.9	
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.5	7.62	7.9	7.5	7.2	7.5	
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15	5.0	4.9	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3	7.4	7.3	7.2	7.3	
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.5	6.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.35	7.3	7.3	7.4	7.35	
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.65	7.4	7.5	8.0	7.6	7.62	7.4	7.5	8.0	7.62	
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.3	8.22	7.9	8.1	8.6	8.3	
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	8.8	8.8	8.6	8.7	9.1	8.8	
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	7.9	7.9	7.85	9.1	9.2	9.4	9.3	9.25	9.1	9.2	9.4	9.3	
-50	-3.2	-3.3	-	-	-	3.8	3.7	-	-	-	6.0	6.1	-	-	-	7.9	8.0	-	-	-	9.4	9.5	-	-	-	9.4	9.5	-	-	
-60	-3.2	-3.3	-	-	-	3.8	3.7	-	-	-	6.0	6.1	-	-	-	7.9	8.0	-	-	-	9.4	9.5	-	-	-	9.4	9.5	-	-	

地球全体の気温を得るために、私は毎月の異なる場所での平均温度に関する Buchan 博士のチャートから、 10° ごとの2つの緯線、 20° ごとの2つの経線（たとえば、北緯 0° から 10° 、西経 160° から 180° のように）の間に含まれるすべての地区の平均温度を計算しました。湿度はまだ地球全体について十分に調査されていません。そのため、地球上のさまざまな場所（約 780 か所）で非常に多くの相対湿度の測定値を収集し、世界の地図に記録し、その後、すべての地区の平均値を推定しました。これらの数量は、12月～2月、3月～5月、6月～8月、9月～11月の4つの季節について表にまとめました。使用した詳細な表と観測結果は、元の回想録に記載してあります。ここでは、 10° ごとの平均値のみを再現しています。（表 VI）

これらの値を使用して、炭酸の量が現在の平均値（ $K=1$ ）から $K=0.67$ 、 1.5 、 2 、 2.5 、および 3 のそれぞれの値に変化した場合に生じる温度の平均変化を計算しました。この計算は、 10° ごとに行われ、1年を4つの季節に分けて行われました。変化量を表 VII に示します。

この表を見ると、その影響は地球全体でほぼ同じであることがわかります。その影響は赤道付近で最小になり、赤道から遠い平地ほど大気中の炭酸の量が多くなり、最大値にまで増加します。 $K=0.67$ の場合、最大の効果は約 40° 、 $K=1.5$ の場合は 50° 、 $K=2$ の場合は 60° 、より高い K の値では、 70° より極側で最大になります。最大の値と極の間にある部分の場合を除いて、影響は一般に夏よりも冬のほうが大きくなります。また、 ν の値が大きいほど大きくなり、一般に海洋よりも陸の方がいくぶん大きくなります。南半球の雲量のため、その影響は北半球よりも少なくなります。もちろん、炭酸の量を増やすと、昼と夜の温度差が小さくなります。非常に重要な二次的上昇の効果は、積雪の拡大または退行によってアルベドが変化する場所です（p.257 を参照）。この二次的効果は、おそらく、低緯度から極の近くに移動します。上記の計算は、値 $K=0.67$ および $K=1.5$ の Langley の数値からの補間によって求められ、他の数値は推定されたと見なされなければならないことを覚えておく必要があります。Pouillet の式を使用すると、 $K=0.67$ のときの値はおそらく少し小さすぎ、 $K=1.5$ のときの値は少し大きすぎます。これは、 K のより高い値に対応する推定値の場合にも疑いの余地がありません。

所定の温度変化を引き起こすために、大気中の炭酸の変化がどれだけ大きいはずなのかを今すぐ調査することができます。答えは、補間によって表 VII にあります。このような調査を容易にするために、簡単な観測を行うことがあります。炭酸の量が 1 から 0.67 に減少した場合、温度の低下は、この量が 1.5 に増加した場合の温度の上昇とほぼ同じです。そして、この大きさ（ $3^\circ.4$ ）の新たな増加を得るには、 2 から 2.5 の間の値に達するまで炭酸の量を変更する必要があります。したがって、炭酸の量が幾何学的に増加すると、温度の増加はほぼ算術的に増加します。このルールは、当然調査対象の部分でのみ有効であり、以下の推定の見積もりに役立ちます。

V. 地質学的帰結

特別な関心が彼らをつなぎとめていなければ、私は、間違いなく、これら退屈な計算に着手するべきではありませんでした。ストックホルム物理学会では、氷河時代の原因の推定に関する非常に活発な議論が時折行われています。そして、私の見解では、これらの議論によっては、短い時間経過の中でいくつもの氷期の時代が訪れる、氷河時代の気候条件がどのように実現できるかを説明できる満足できる仮説を、まだ導くことができないという結論に至りました。

これまでの一般的な見解は、地球は時間の経過とともに冷え込んでいるというものでした。そして、その逆が事実であることを知らなければ、この冷却が継続的に行われるはずだと断言するでしょう。私の友人であり同僚でもある Högbom 教授との会話は、上記の議論とともに、大気中の炭酸の変化が地球の温度に対して影響する可能性があるとする予備的な推定へと導いてくれました。この推定により、5~10°Cの気温変動の説明が見つかるかもしれないという信念につながったので、計算をより詳細に考え出し、今では一般大衆と批評家に提示しました。

地質学的研究から、第三紀には、温帯および北極圏に、現在の同じ地域よりもはるかに高温の気候条件の動植物が生息していたという事実が確認されています。北極圏は現在の温度を約 8~9°Cは上回っていたようです。氷期のあとに続いた間氷期は、現在とほぼ同じ特徴の、時にはさらに穏やかな気候さえあった間氷期によって1回またはそれ以上、中断されました。氷河時代が最も広まったとき、現在は最高の文明を享受している国々は、氷で覆われていました。これは、アイルランド、イギリス（南部の一部を除く）、オランダ、デンマーク、スウェーデン、ノルウェー、ロシア（キエフ、オレル、ナイニノヴゴロド）、ドイツ、オーストリア（ハルツ、エルツゲビルゲ、ドレスデン、およびクラクフ）のケースです。同時に、アルプスの氷冠は、スイス、フランスの一部、ドナウ川の南ババリア、チロル、ステイリア、および他のオーストリアの国々を覆い、イタリアの北部に下りました。同時に、北アメリカは西海岸で 47°線、東海岸で 40°線、中央部で 37°線が氷に覆われました（ミシシッピ川とオハイオ川の合流点）。世界のさまざまな地域でも、コーカサス、小アジア、シリア、ヒマラヤ、インド、ティアンシャン、アルタイ、アトラス、ケニア山とキリマンジャロ（ともに赤道に非常に近い）、南アフリカ、オーストラリア、ニュージーランド、ケルゲレン、フォークランド諸島、パタゴニアおよび南アメリカの他の地域のように、氷河時代の痕跡を発見しました。一般に地質学者は、これらの氷河作用は地球全体で同時に起こったと考えがちです。そして、この最も自然な見方は、北半球の氷期と同時に南半球の優雅な時代を要求する Croll の理論がその意見に影響を与えなければ一般に受け入れられていたでしょう。雪線の変位を測定することにより、そのときの温度は、——これは、さまざまな地点でよく一致して——現在よりも 4~5°C低くなければならない、という結果に到達しました。地質学的に言えば、最後の氷期はかなり最近に起こったに違いないので、人類は確実にその時期には現れていたでしょう。一定のアメリカの地質学者は、氷期の終わりから現在まで約 7000 年から 10,000 年しか経過していないという意見を持っていますが、これはかなり少なく見積もられています。今や、我々の数式に従って、温度が第三紀と氷河時代と同じ値に達するために、炭酸ガスはどれくらい変化したはずなのか、と問うことができます。簡単な計算は、炭酸が現在の 2.5 倍または 3 倍に増加すると、北極圏の温度が約 8°Cから 9°C上昇することを示しています。緯度 40°~50°における氷河時代の気温を得るには、大気中の炭酸が現在の値の 0.62~0.55 倍に下がる必要があります（温度が 4~5°C低い）。地質学者が求めているのは、間氷期には気候は今よりも均一でなければならないということであり、このことは、私たちの理論と非常によく一致しています。炭酸の量が増えれば、地理的な 1 年および 1 日の中で変化する気温の範囲は一定の割合で均一になります。炭酸の量が減少した場合は、（少なくとも赤道から緯度 50°までは）逆になります。しかし、どちらの場合も、積雪の退行または進行による二次的な振る舞い（p.257 を参照）が最も重要な役割を演じると考えがちです。理論では、大まかに言えば、地球全体がほぼ同じ温度変化を経験しているはずであるため、間氷期も氷期も地球全体で同時に発生しているはずということになります。南半球の雲量が大きいため、その変動は北半球よりもわずかに少なかった（約 15%）はずです。現在のように、海流もそこに存在していたはずで、緯度の異なる地域で気温の差が北半球のそれよりも大幅に抑制されています。この効果は、赤道付近よりも北極圏の方が、雲量が多いことからくる結果です。

今や、答えるべき重要な問いがあります。すなわち、私たちの理論が要求する、炭酸の量がそのような大きな変化は、地質時代の中の比較的短い時間で起こったのでしょうか？この問いに対する答えは、Högbom 教授によって与えられています。この問いに関して記載した彼の回顧録は、これらのページのほとんどの読者にはアクセスできないかもしれないので、私は、我々の課題における彼の最も重要な発言を要約し、翻訳しました：—

「炭酸が増加または消費されたことによる反応についての正確な定量的表現を得ることはできないとしても、その中からおよその正しい推定値を得ることができ、そこから問いに光を投げかける特定の結論を引き出すことができる、いくつかの要因があります。まず第一に、現在大気中に存在する炭酸の量と、変性した量とを比較することが重要であると思われます。前者が後者と比較して取るに足らない量である場合、変動する可能性は、その反対の場合とはまったく異なります。

「大気中の炭酸の平均量が 0.03 体積%（または 0.045 重量%、または 0.342mm 分圧、または地表の 1cm² ごとに 0.466g）と仮定すると、この量を石炭にすると地球の表面上に厚さ約 1 ミリの層ができます。生物界に固定されている炭素の量は、確かに同レベルの精度で推定することはできません。しかし、この量を表現する数字が同じ桁である必要があることは明らかです。そのため、大気中の炭素は、生物の中で発生する炭素の量と比較して、極端に大きいとも小さいとも思えません。生物界の変性が非常に速い速度で進行するのに対して、炭酸を処理する量はそれほど大きくないので、その変性の速度および値の気候学的または他の理由によって引き起こされる変性の速さや量によって均衡を損なうことはあり得ません。

「次の計算は、大気中の炭酸の量と変性する量との関係性を評価する上でも非常に有益です。世界の現在の石炭生産量は、年間 5 億 t、つまり地表 1 km² あたり 1t に達します。この量が炭酸に変性すると、大気中の炭酸の約 1000 分の 1 に相当します。これは、地球全体の厚さにして 0.003mm の石灰岩層、または立方体にして 1.5 km³ に当たります。主に現代産業によって大気に供給されるこの量の炭酸は、ケイ酸塩の風化または分解による石灰石（または他の炭酸塩鉱物）の形成によって消費される炭酸の量を完全に補うと見なすことができます。さまざまな土地や気候のもとで存在する河川の数、また、これらの河川の水流の量、地球表面と比較した排水面の測定値から決まる、特に炭酸塩の溶解物質の量から、1 年間で海洋に供給される溶解炭酸塩の量は、せいぜい 3 km³ だろうと推定されます。また、ケイ酸塩からなる排水地域の河川が、石灰岩地域を流れる河川と比較して炭酸塩を排出する量が取るに足らないことが証明されているので、炭酸塩の量は、これらの 3 km³ の炭酸塩のわずかな部分だけがケイ酸塩の分解によって直接形成されたとする結論を引き出すこともできます。言い換えれば、この石灰炭酸塩の重要でない部分だけが、1 年の風化の過程でできたものだと思います。与えられた数値は、誤ったまたは不確実な仮定のために 50% のまたはそれ以上の誤差であるにもかかわらず、以上のことは、炭酸ガスが常に大気から除去されているすべてのプロセス、すなわち珪質鉱物の化学的風化が、私たちの時代の産業発展によって引き起こされ、一時的な性質のものであると考えるべき逆方向のプロセスと同じ程度で、最も重要であることを証明しているため、始められた比較は非常に興味深いものです。

「石灰岩（およびその他の炭酸塩鉱物）に固定されている炭酸の量と比較すると、大気中の炭酸は無視できる量です。堆積層の厚さと石灰岩やその他の炭酸塩によって形成される堆積層の大部分に関して、炭酸塩の総量が地球の表面を数百 m の高さまで覆った可能性はないようです。仮に 100m と仮定する——かなり正確ではないかもしれませんが、おそらく過小評価されています——と、堆積層の石灰岩に固定されている炭酸の量は、大気中に自然に存在する量の約 25,000 倍です。石灰岩の中のすべての炭酸分子は、しかしながら大気中に存在し、時間の経過とともに大気から移動しました。私たちが、大気中の炭酸の量に影響を与えた可能

性がある他のすべての要因を無視したとしても、この数値は、地質時代に現在の量とあまり変わらない範囲で変化したはずである、という仮説に非常にわずかな可能性しか与えません。風化のプロセスは、現在大気中に排出されたと思われる量よりも何千倍も多い量の炭酸を消費しており、また、その他の地質学的、気候学のおよび他の原因から起こったこのプロセスは、おそらく起こった現象によって非常に異なる強度で進行し、平衡をかなりの程度で変化させる傾向がある炭酸の生成と消費によって、何らかの理由で直後に呼び出される補償生産プロセスを考慮しても、炭酸の量が顕著な変動をした可能性は非常に大きいようです。大気中の炭酸の量は以前の方が、今よりはるかに多かったはずであり、減少は、炭酸は大気から取り出されて、地球には石炭と炭酸塩の形で地殻に保存されたという状況から生じるべきであるという意見がしばしば聞かれます。多くの場合、この仮説上の減少は石炭の形成のみに起因するものであるとされ、はるかに重要な炭酸塩の形成は完全に見落とされています。炭酸がどのようにして常に大気に供給されてきたかについて掘り下げて考えれば、時間の経過とともに大量の炭酸が炭酸塩に固定されているにもかかわらず、大気中の炭酸が連続的に減少するとする推論のための方法論全体は、現実的にすべての基礎を失います。これらのことから、我々は非常に大きな変化が起こったと結論付けることができますが、変化が常に同じ方向に進んだというわけではありません。

「炭酸は、次のプロセスによって大気に供給されます。(1) 噴火とそれに伴う地質現象 (2) 大気高層での炭素質隕石の燃焼 (3) 有機体の燃焼と崩壊 (4) 炭酸塩の分解 (5) 鉱物の破壊または分解時により機械的に閉じこめられた炭酸の遊離。大気中の炭酸は主に次のプロセスによって消費されます：— (6) 風化によるケイ酸塩からの炭酸塩の形成 (7) 有機プロセスによる炭酸の消費。海は、温度が上昇すると炭酸を放出し、冷却すると吸収する水の吸収力によって、大気中の炭酸量の調節因子としてあまりにも重要な役割を果たしています。(4) および (5) のプロセスは、重要度が低いので省略できます。プロセス (3) と (7) の生物界での物質の循環は、非常に急速に進行するため、それらの変動は認識できるような影響を与えることはありません。このことから、大量の生物が堆積層に蓄積されて循環から差し引かれた期間、またはそのような蓄積された製品が循環に新たに導入された期間を除きます。(2) の炭酸の供給源は完全に計算不可能です。

「このように、プロセス (1)、(2)、および (6) は主に相互のバランスを保つものとして残ります。生物が地球の上に出現して以来、全時代を通じてほんのわずかな時代でさえも、地殻に現在、石灰岩として固定されている大量の炭酸（大きな大気圧として表れていた）は、大気中に存在していたとは考えられていないので、風化と炭酸塩の形成による炭酸の消費は継続的な供給手段によって補われていたに違いないので、火山の噴火を大気中の炭酸の主要な供給源と見なすほかありません。

「しかし、この供給は定期的かつ均一にされるわけではありません。ある一つの火山がそれぞれ相対的に休息と激しい活動を交互に繰り返す変動期間を持っているように、地球が全体として、特定の地質時代において、より破壊的であったり一般的な火山活動をしたりし、その間の時代には火山力が比較的静かな活動を示していたのではないかと思います。したがって、大気中の炭酸の量がほぼ同時に変動したか、少なくともこの要因が重要な影響を及ぼした可能性があります。

「上記の炭酸の消費と生成のプロセスが経過した場合、大気中の炭酸の均衡が永続的に維持されるような相関関係や依存関係が存在する可能性がないことが明白であることがわかります。地質時代の間に、供給の増加または減少が継続していたことは、それが重要でなかったにせよ、大気中の炭酸の量の顕著な変化をもたらしたに間違いなく、これが特定の地質時代に、現代の数倍、または十分に少なかったかもしれないことは想像に難くありません。」

大気中の炭酸が量的に変動した可能性があるとの問いの回答は、Högbom 教授によって回答された最も決定的な方法でされているとしても、少しの言葉で注意を喚起したい疑問点が1つだけ残っています。これまでに、間氷期と氷期の発生について受け入れることのできる説明を提案した人はいましたか？幸いなことに、前述の計算の進行中に、著名なイタリアの気象学者 L.De Marchi によって回顧録が発行され、これにより、最後の質問に答える手間が省けます。彼は、これまでに提案したさまざまな理論を詳細に精査しました——天文学、物理学、地質学、これらのうち、私は以下で短く要約しています。これらの理論は、間氷期、または氷期の発生は、以下の状況における1つまたは他の変化に依存するべきであると主張しています。

- (1) 宇宙における地球の位置による温度
- (2) 地球への太陽放射（太陽定数）
- (3) 黄道に対する地軸の傾斜
- (4) 地球表面上の極の位置
- (5) 地球の軌道の形、特にその離心率（Croll）
- (6) 大陸と海洋の形状と拡大
- (7) 地表の被覆（植生）
- (8) 海洋および気流の方向
- (9) 春・秋分点の位置

De Marchi は、これらすべての仮説を否定しなければならないという結論に達しました (p.207)。一方、大気の透明度の変化が望みの効果をもたらす可能性がある、というのが彼の意見です。彼の計算によると、「この透明度の低下は地球全体の温度の低下に影響し、赤道付近ではわずかであり、緯度が70度に近づくとつれて上昇し、極で少し小さくなります。さらに、この低下は、熱帯地域でなければ、海洋よりも大陸の方が少なく、年間の気温変動を小さくします。この大気の透明度の低下は、主に大気中の水蒸気の量が多いことに起因するはずであり、これは大陸を直接冷却するだけでなく、大量の降雨と降雪も引き起こすでしょう。水蒸気が増加した原因を説明するのは簡単ではありません。」

De Marchi は、水蒸気が持つ選択的吸収という重要な性質を十分に考慮していなかったため、私とはまったく異なる結論にたどり着きました。さらに、彼は、水蒸気が大気に供給されると、他の変化が起こらなければ、前の条件に達するまで凝縮が起こることを忘れていました。これまで見てきたように、北半球の40°から60°の間の平均相対湿度は76%です。その場合、平均温度が実際の値+5.3°Cから4~5°C下がる、つまり+1.3°Cまたは+0.3°Cになり、水蒸気がそのまま大気中に残った場合、相対湿度は101または105%に増加することになります。自然の空気で相対湿度が100%を超えることはあり得ないため、もちろんこれは不可能です。氷期の絶対湿度が現在よりも大きかったと仮定することは不可能です。

Croll の仮説は依然として英国の地質学者に一定の支持を得ているようであるため、本件の重要性に鑑みて他の研究者よりも詳細に検討したこの理論に関する De Marchi の発言を引用することには興味がないかもしれません。彼が言った次の点において、私は完全に同意します：—「気候学または気象学の観点から、これらの科学の現状では、その原理においても、その結果においても、Croll の仮説はまったく受け入れられないように思えます。」

Croll の仮説が地質学者に約束した大きな利点、すなわち、彼らに自然史年表を提示したことで、理論を受け入れやすくなる傾向が生じました。しかし、最初は有利に見えたこの状況は、調査の進歩が、その理論に反駁するようになってきているように思われます。なぜなら、Croll の仮説が要求する年表を、観測の事実と調和させることがますます不可能になってきているからです。私は、これまでのページで述べてきた理論が

今後、これまで解釈が最も困難であることが証明されてきた地質気候学のいくつかのポイントを説明するのに役立つと信じています。

補遺

雲量は異なる緯度で非常に異なり、また海上および大陸上でも異なるため、雲量は地球全体で同じであると想定したので、大気中の炭酸の変化による影響は上記で計算したものは多少異なることは明白です。そこで、Teisserence de Bort が出版した図表を使用して、さまざまな緯度における雲量を推定し、現在に比べて炭酸が 0.67 倍に減少した、または 1.5 倍に増加した場合、温度の変化の値について次の表を算出しました。1 列目は緯度です。2 列目と 3 列目の大陸と大陸上の雲量、4 番目に、全領域に対する大陸面積の 100 分率、この後に続く 5 列目と 6 列目に、大陸と海洋の温度の実際の変化量を得るために表の数値を掛けた削減係数、および 7 列目に、これら両方の平均補正係数。8 列目と 9 列目には $K = 0.67$ の温度変化、10 列目と 11 列目には $K = 1.5$ の温度変化が表に記されています。

Latitude.	Nebulosity.		Continent per cent.	Reduction factor.			K=0.67.		K=1.5.	
	Continent.	Ocean.		Continent.	Ocean.	Mean.	Continent.	Ocean.	Continent.	Ocean.
70	58.1	66.7	72.1	0.899	0.775	0.864	-2.8	-2.4	3.1	2.7
60	56.3	67.6	55.8	0.924	0.763	0.853	-3.0	-2.4	3.3	2.7
50	45.7	63.3	52.9	1.057	0.813	0.942	-3.5	-2.7	3.8	2.9
40	36.5	52.5	42.9	1.177	0.939	1.041	-3.9	-3.1	4.1	3.3
30	28.5	47.2	38.8	1.296	1.009	1.120	-4.1	-3.2	4.5	3.5
20	28.5	47.0	24.2	1.308	1.017	1.087	-4.1	-3.2	4.3	3.4
10	50.1	56.7	23.3	1.031	0.903	0.953	-3.1	-2.7	3.3	2.9
0	54.8	59.7	24.2	0.97	0.867	0.892	-2.9	-2.6	3.1	2.8
-10	47.8	54.0	22.5	1.056	0.932	0.96	-3.3	-2.9	3.4	3.0
-20	29.6	49.6	23.3	1.279	0.979	0.972	-4.1	-3.1	4.2	3.2
-30	38.9	51.0	12.5	1.152	0.958	0.982	-3.8	-3.2	4.0	3.4
-40	62.0	61.1	2.5	0.86	0.837	0.838	-2.9	-2.8	3.2	3.1
-50	71.0	71.5	0.9	0.749	0.719	0.719				
-60										

* Cf. p. 265.

赤道の削減係数 N の平均値は、大陸（北緯 70°まで）1.098 および海洋 0.927 で、平均 0.996 です。南半球（南緯 60°まで）では、大陸 1.095 および海洋 0.871 で、平均 0.907 であることがわかります。したがって、南半球への影響は、北半球よりも約 9% 少なくなります。両方の半球の緯度が 20°から 30°の間の雲量が最小になることの結果として、炭酸の変化によって最大の影響を受ける緯度は赤道に向かって移動し、 $K = 0.67$ および $K = 1.5$ の 2 つの場合で約 25°の緯度で落ち着きます。

●参考3 (仮訳)G.S.カレンダー「人類による二酸化炭素の発生と気温への影響」

(レディング大学 (University of Reading) → http://www.met.reading.ac.uk/~ed/calendar_1938.pdf)

551,510.4:551.521.3551.524.34

人類による二酸化炭素の発生と気温への影響

G.S.カレンダー

(英国電気および連合産業研究協会の蒸気技術者)

(G.M.博士による伝達 B.ドブソン F.R.S.)

[1937年5月19日原稿受理－1938年2月16日査読]

概要

燃料の燃焼によって、人間は過去半世紀の間に約1億5000万トンの二酸化炭素を空気中に加えました。筆者は、最良の利用可能なデータから、この約4分の3が大気中に残っていると推定しています。

二酸化炭素と水蒸気を持つ放射の吸収係数は、二酸化炭素が「空放射」に及ぼす影響を示すようになっています。このことから、二酸化炭素の人工的な発生による平均温度の上昇は、現時点では年間0.003°Cの割合であると推定されます。

20か所の気象観測所での温度観測は、世界の気温が実際に、過去半世紀の間に年間平均0.005°Cの割合で上昇したことを示すために使用されます。

私たちの気候や天候に従事して、大気 of 自然熱交換に精通している人のほとんどは、人間の活動が非常に広大な規模の現象に影響を与える可能性があることを認める準備ができていないでしょう。

以下の論文では、そのような影響がありえるというだけでなく、現時点で実際に起こっていることを示したいと思います。

二酸化炭素は、スペクトルの赤外線領域に特定の強力な吸収バンドを持つことはよく知られており、この事実が約70年前に発見されたとき、それはすぐに空気中の気体の量の変化が地球の表面の温度に及ぼす影響であるとする推測につながりました。大気中の水蒸気の方がはるかに量も吸収力も大きいことを考慮すると、二酸化炭素の影響はおそらく無視できると結論付けましたが、この分野の専門家、特にスヴァンテ・アレニウスとT.C.チェンバレンは、この見解に異議を唱えました。

近年、この問題に直接関係する新たな知識が蓄積され、二酸化炭素が温度に与える影響や、大気中に気体が蓄積する速度を合理的に推定することが可能になりました。このような計算の重要な要因の中で、C.J.フ

フォックス(1909)によって決定された海水温-水圧-アルカリ度-CO₂の関係、A.オングストローム(1918)他によって観測された蒸気圧-大気放射の関係、ファウル(1918)によって観察された大気水蒸気の吸収スペクトル、大気の構造に関する最大限の知識を挙げることができます。

この新しい知識は、この論文に記載されている結論に達する際に使用されていますが、明らかな理由から、気象的特徴を持つ部分だけをここで参照します。

1. 大気中の二酸化炭素の蓄積率

私は、1900年頃に実施された非常に正確な一連の観測(ブラウンとエスコム、1905)を調べ、その期間の気象図に関連して、自由大気中の二酸化炭素の量について調べました。その結果、北大西洋地域の自由大気中の二酸化炭素の量は、今世紀の初めに、乾燥空気の体積分率で10,000分の 2.74 ± 0.05 であったと結論付けました。

この気体の自然変動と化石燃料の燃焼によって生じる量との間の定量的関係を決定するために、天然の炭素循環に影響を与える多くの要因が検討されています。このような要因には、沼地などの炭素の有機堆積物、火成岩の炭酸塩化による気体の平均固定率などが含まれています。二酸化炭素量の自然変動に関するやや長い調査から得られた一般的な結論は、そうした気体の発生量が、燃料から生成される量のほんの一部を超えることを示す地質学的証拠は存在しなかったということです。(現在の人工生産量は年間約45億トンです)。

次に、海水による気体の溶解効果が考慮されました。海は二酸化炭素の巨大な調整因子として機能し、大気の約60倍を保持するためです。海水が大気中の二酸化炭素の超過を回復することができる速度は、大気中の気体との平衡が約200mの深さまでしかされないため、主に、年間で空気に接した新鮮な海水の量に依存します。

海洋の垂直循環についてはよく理解されていませんが、いくつかの要素が、海全体の海水の体積が大気にさらされている平衡時間が2,000~5,000年であることを示しています。よく知られている総アルカリ度および海水の平均表面温度によるフォックスの溶解度を用いて、所定期間における圧力、わかっている気体の追加速度、仮定された海水の平衡時間によって、大気中にあるCO₂の変化を算出することが可能になります。表Iにはいくつかの数値が示されており、数世紀の期間において、海の平衡時間があまり重要でないと考えられることがわかるでしょう。

表 I.—人工的な二酸化炭素の生産が大気中の分圧に与える影響

年間COの純生産量は43億トンです。

1900年におけるCO₂による大気圧=0.000274。

海水面15°C、総アルカリ度=1リットル当たり40mgの水酸化物イオンの溶解したCO₂がによって中和する量です。

P(CO₂)は、通常の気圧での大気中のCO₂の分圧を表します。

(海の平衡時間、年) (時期) (大気中の大気圧 P (CO₂)/10,000)

Sea equilibrium time, years	Date: 1936 2000 2100 2200			
	P (CO ₂) in atmos./10,000			
2000	2.89	3.14	3.46	3.73
5000	2.90	3.17	3.58	3.96
All CO ₂ to the air	2.96	3.35	3.96	4.58

(大気中の総 CO₂ 量)

1900 年から 1936 年にかけて、増加は約 6 パーセントだと思われます。

表 I の数値を計算して以来、米国東部で行われた大気中 CO₂ に関する多数の観測レポートを見てきました。1930 年から 1936 年の 1,156 の「自由大気」の測定値は、体積分率で 10,000 分の 3.10 でした。1898 年から 1901 年のキューでの測定では、92 の自由大気における平均値は 2.92 であり、地域的な燃焼などによって影響を受けた、幾分高い値の数を含み、そして、アメリカにおける測定値について、同様の割合で同じような影響を受けたと仮定すると、差は 6% の増加に等しくなります。計算による増加とこれほど近い値で一致したのは、もちろん、一部は偶然です。

2. 二酸化炭素と水蒸気による赤外線吸収

地球表面と大気からの熱の損失は、ほぼ全て 4 μm 以上の波長でなされ、最大強度になるのは約 10 μm です。

スペクトルにおけるこの部分について、様々な気体による吸収と放射の、非常に多くの慎重かつ正確な測定が行われましたが、これらの観測を相互比較するのが非常に困難であったために、初期の値のほとんどは、互いに非常に対立していました。

しかし、現在ではかなりの測定精度が達成されていて、詳しくは説明できないのですが、多くの検討を重ねた結果、より長い波長での二酸化炭素による吸収については、ドイツのルーベンスとアスキント (1898) が観測した値をここで使用することにしています。

水蒸気については、大気水蒸気による吸収を観測した F.E.ファウル (1918) と、測定のために 1 気圧 (atm) の蒸気を使用したルーベンスとヘットナーの測定 (1918) の間で多くの比較を行いました。これらの比較は、大気中で発生する水蒸気による吸収は、実験室の条件下で蒸気で検出されたものの半分以下であるというファウルが到達した結論を完全に支持します。おそらく、この結論を最も強く補強するのは、観測された大気放射と計算された大気放射の比較、具体的には、乾燥した大気と冷たい大気条件の場合、蒸気に見られる吸収指数が大気放射の値にしては高すぎることを示していることから来ています。

二酸化炭素による吸収に戻るために、この気体によって与えられた 3 つの一次バンドは 2.4~3.0 μm、4~4.6 μm、13~16 μm で、後者は小さなバンドで低温の放射が運ばれるので、大気条件にとって最も重要です。

吸収量と気体の量の関係式は、通常、次のように表されます。

$$A_{\lambda} = 1 - e^{-kl} \dots \dots \dots (1)$$

ここで A_λ は、波長 λ の放射の経路における気体の l 単位による吸収であり、 k はこの波長における気体の吸収指数です。

二酸化炭素に対するこの指数の値の一部は、表IIに示されています。

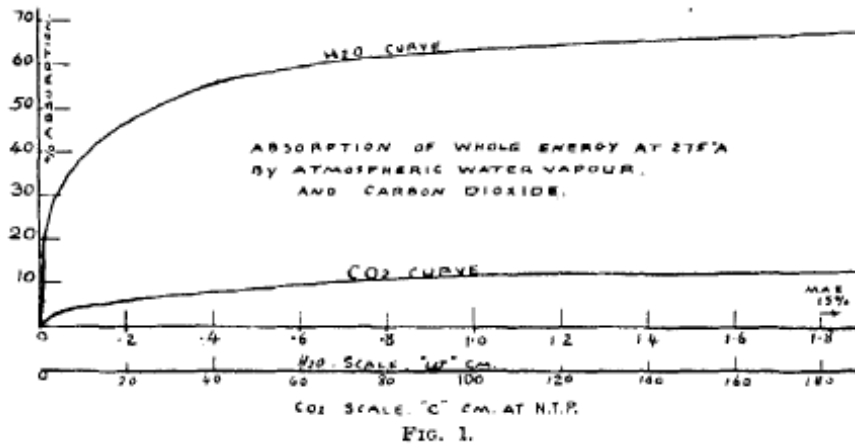
(表II) 二酸化炭素の吸収係数

H.シュミットによる 4-4.6 μ 帯 (1913)

ルーベンスとアスキンスによる 13-16 μ 帯 (1898)

TABLE II.—ABSORPTION EXPONENTS FOR CARBON DIOXIDE.
Band 4 to 4.6 μ by H. Schmidt (1913).
Band 13 to 16 μ by Rubens and Aschkinass (1898).

Wave length μ 10^3 \AA	4.0	4.1	4.2	4.25	4.3	4.4	4.45	4.5	4.6
	4.1	12.0	33.5	50.0	61.0	38.0	27.2	19.7	11.0
Wave length μ 10^3 \AA	13	13.5	14	14.25	14.5	15	15.25	15.5	16
	2.5	6.4	17.8	44.6	58.5	59.3	39.7	15.7	1.0



水の曲線 二酸化炭素の曲線 (縦軸) 吸収率 (横軸) 基準状態における CO_2

図 I⁵²

図Iの下の曲線は、表IIの指数によって与えられる 275°A から出される放射からの二酸化炭素による吸収量になります。

スペクトルの赤外線領域における水蒸気による吸収は、無数の微細バンドで構成され、非常に複雑です。既に述べたように、それは明らかに空気存在によって影響を受け、これは蒸気と大気中の水蒸気間の観測値の差を説明できる可能性があります。*

* 上記のことを書いて以来、私の注意は、ウェーバーとランドール (アメリカ物理学会紀要、40、1932、p.835) スペクトルのこの部分で最近の水蒸気吸収測定に向いています。これらの新しい値は、蒸気のために見つかったものよりもはるかに低く、大気水蒸気におけるファウルの値の精度全般に強いサポートを与えます。バンド 13~16 μ において、ウェーバーとランドールは、0.1cm の "w" で 30% の吸収になり、ここで使用した指数を使うと、この水蒸気量では約 30% の吸収になります。

ファウルの実験で示される大気水蒸気量と吸収量の関係式は、次のように書くことができます：—

空気中に二酸化炭素が存在するために測定が困難で、ファウルは水蒸気の約 13.5 μ 以上の吸収を検出できませんでした。(一方で、)彼は約 14.5~15 μ で強い CO₂ の吸収を検出しました。

長波長において、私は蒸気について見つけた値を使用し、比較に利用可能なそれぞれの波長ごとに、大気中の条件に修正しました。

表IIIは、表面条件をカバーする温度の範囲の様々な波長帯の放射エネルギーのおおよその割合を示します。水蒸気指数も同じ波長帯に対して示しています。(2)式とこれらの数値の助けを借りて、任意の温度における水蒸気の吸収量を、総エネルギー量として計算することができます。16 μ を超える波長における K の値は、水蒸気の異なる量に対する大気放射の観測値に合わせて調整されています。これについて、すでに多くの比較がなされており、ファウルの測定から推測される吸収と量の関係が、水蒸気圧による大気放射の変化についての観測と優れた一致を導くことを示しています。

表III. -水蒸気の吸収指数、およびそれぞれの波長帯におけるエネルギーの割合.

TABLE III.—ABSORPTION EXPONENTS FOR WATER VAPOUR, AND THE PERCENTAGE OF ENERGY ON THE WAVE BANDS.

Wave band μ	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-13	13-16	>16
K	1.1	2.1	1.9	6.2	2.2	0.20	1.0	2.0
Temp. abs.	Percentage of energy on band							
250	0	0.3	1.0	2.1	3.4	25.8	15.2	52.4
275	0.1	0.6	1.8	3.2	4.5	29.2	14.9	45.7
300	0.2	1.1	2.8	4.4	5.7	31.7	14.5	39.8

(エネルギーバンドパーセンテージ)

3. 空放射

太陽からの直接および散乱した短波放射を除いた空からの下向き放射は、通常「空放射」と呼ばれています。この分野に関する貴重な論文は、A.オングストローム(1918)、W.H.ディーンズ(1927)、シンプソン(1928)、ブランド(1932)などによって出版されていますが、ここでこれについて長々と言及することはしません。

地球の表面付近の通常条件では、澄んだ空で下向きの放射は、表面から5分の3から5分の4の間で変化し、大気が暖かく、水蒸気を多く含むときに割合が最も大きくなります。

$$A_{\lambda} = 1 - e^{-K_{\lambda} w^4} \dots \dots \dots (2)$$

A_λは、等面積の表面に凝縮されたときに w cm になる水(液体)に相当する水蒸気の量における、(波長) λ ごとの吸収量です。この式(2)から得られた値は、水蒸気の広い領域にわたってファウルの観測に非常によく一致します。

13~16 μ において、ルーベンスとアスキナスは、0.045 w cm に相当する蒸気がバンド全体の35%の吸収(ヘットナーは38%としている)であることを発見しました。この蒸気の量は、バンド13から16 μ において、(2)式の指数Kを1として11~13.5 μ と注意深く比較して、大気水蒸気の0.1w cm に相当します。

水蒸気と二酸化炭素の吸収係数からの空放射を計算するために使用される方法は、単純ですが骨が折れます。それは、それぞれ平均温度、水蒸気、および二酸化炭素含有量がわかっている水平層に分割し、表面温度のエネルギー分布スペクトルを組み合わせ、これらの層の異なる波長帯における吸収力を合計することによって構成されます。このようにして、空放射の垂直成分が得られます。

W.H.ディーンズによる長期の観測は、雲のない空の半球からの効果的な放射が、水平面まで、鉛直成分("天頂"放射)ときわめて恒常的な関係を持っていることを示していて、これはイングランドの低地の条件では7%大きくなっています。

表IVは、水蒸気と二酸化炭素の吸収係数から計算した天頂放射を、さまざまな大気条件に対して示しています。水平面への効果的な空放射は、温帯および熱帯条件の場合、表IVの天頂の値よりも7%大きくなります。北極・南極の条件の場合、それは約7%大きいと考えられます。

通常の条件では、天頂放射の約4分の3は、400mの低い大気から来ています。ただし、空気が冷たく乾燥すると、はるかに大きな深度がこの放射に加わります。

4. 空放射に対する二酸化炭素の影響

大気条件により、13~16 μ 波長帯の空放射は水蒸気と二酸化炭素の混合物から来ます。これはバンド4~4.7 μ にも当てはまりますが、エネルギーが非常に小さいため、大きなバンド吸収の際に起こり得る誤差に関連して無視される可能性があります。

混合気体の場合、混合物の吸収はそれぞれの吸収の合計と、それぞれの積の差に等しくなります：—

$$Acw = Ac + Aw + AcAw \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

この関係は、それぞれの吸収が、それらがカバーする波長帯上のエネルギー分布に対して対称である場合に当てはまります。

観測された空放射は、量に変化していく水蒸気と、通常、大気中に10,000分の3の割合で存在する二酸化炭素による赤外線吸収によって生じます。水蒸気圧7.5 mmHgの温帯条件では、私は、放射の95%が水蒸気から来ていて、北極の条件では二酸化炭素は全体の15%を供給していると計算します。

ここで必要とされる目的のためには、二酸化炭素の量の変化によって、第一に空放射に対する影響、第二に、続いて起こる温度への効果を考慮する必要があります。

放射は気体の厚い層から起こり、放射が来るその層内の平均深度は気体の密度に依存します。したがって、大気中の二酸化炭素の密度が変化すると、この気体の空放射が発生する高度が変化します。二酸化炭素の増加は、平均放射焦点を下げますし、表面近くでは温度が高くなるため、気体の厚み全体の増加によって吸収力が増加しなくても、放射が増加します。

大気中の現在の量(基準状態で2mの層に等しい)で、この気体が可能なほぼ最大の量を吸収することができるため、二酸化炭素による空放射の変化は、放射焦点高度の変化に大きく依存します。二番目の仮定は使用された指数に依存しますが、二酸化炭素がとても厚い場合、主たる波長帯以外の他の波長を吸収する可能性があります。

表IV：－異なった大気条件で計算された天頂放射

Sz% = 表面からの放射に対する天空放射の割合。

F = 鉛直方向の割合 °C/km。

P (H₂O) = 表面の蒸気圧。

St = 空から来たのと同じ放射量に相当する「黒体」温度。最小の表面温度はこれを下回ることはないため、-70°C (-93°F) は低地ではあり得ない。

(成層圏下では、Sz=30%、そして、空の温度は絶対温度 163°)

TABLE IV.—CALCULATED ZENITH SKY RADIATION FOR DIFFERENT AIR CONDITIONS.

Sz% = sky radiation as percentage of that from the surface.
 F = vertical lapse rates used °C./km.
 P (H₂O) = surface vapour pressure.
 St = the temperature of a "black body" which would give the same radiation as that from the sky. As the minimum surface temperature cannot fall below this, values below about -70°C. (-93°F.) are not to be expected at low levels.

Location	Antarctic plateau	Mountain top	Polar surface	Temperate	Tropical
Season	Summer	Any	Equinox	Equinox	Any
Altitude, km.	3	5	0	0	0
Surface, °abs.	250°	257°	257°	283°	296°
P (H ₂ O)	0.5	1.0	1.0	7.5	15.0
F	8°	7°	6°	5.6-6-7°	4-6-6-7°
Sz. %	40	48	52	68	73.5
Sr. cal/cm ² /day	186	246	267	514	664
Skytemp., °abs.	200°	214°	219°	257°	274°

Under the stratosphere only Sz=30%, and sky temp. 163° Abs.

(位置) (南極の高地) (山頂) (北極の表面) (温帯) (熱帯)
 (季節) (夏) (すべて) (春分) (春分) (すべて)
 (振る舞い)
 (表面絶対温度)

表Vは、大気中の二酸化炭素の量を現在の量の3分の1から2倍に変えていったときの、13~16μの波長帯に当たる空放射のその部分の効果を示します。これらの値のために、12の空気層が使用され、地表面蒸気圧は7.5mmHgとしました。

表Vの図から、二酸化炭素の増加によって、最も低い空気層に放射が集中し、冷たい上層からの量はさらに遮断されている一方で、正味の効果は空放射全体ではわずかな増加であることが分かるでしょう。これらの値の場合、最も低いキロメートル(層?)の二酸化炭素の厚さに換算すると10から55cm“c”に変更されることになり、これらの値は、ルーベンスとアスキシナスによる指数によります。

表 V. - 大気中二酸化炭素の量の変化が、13 から 16 μ の波長帯における、空放射の量と垂直分布に及ぼす効果

(温帯地域の大气 P (H₂O)=7.5mmHg T surface=絶対温度 283°)

TABLE V.—THE EFFECT OF CHANGES IN ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE UPON THE AMOUNT AND VERTICAL DISTRIBUTION OF SKY RADIATION ON BAND 13 TO 16 μ .

Temperate air section. P (H₂O)=7.5 mm. Hg. T surface=283° Abs.

Altitude of air layer, km.	0-1	1-2	> 2	Total on band 13 to 16 μ
	Radiation from air layer, % of surface radiation			
P (CO ₂) Atmos.				
0.0001	9.35	1.98	0.74	12.06
0.0003 (normal)	10.93	1.73	0.62	13.25
0.0006	11.93	1.43	0.47	13.83

(P (CO₂)大気) (表面からの放射に対する空気層からの放射の割合)
(普通) (13 から 16 μ の波長帯の合計)

5. 空放射と温度の関係

地球の表面全体が毎日一定量の熱が降り注ぐ構成単位と考えられる場合、他のタイプの熱交換があり得ないため、平均温度が、この熱が放射によって逃げる速度に依存することは明らかです。簡単のため、雲と氷雪面からの反射による損失は変化しない要素であると仮定します。

地表面と雲からの放射損失は絶対温度の 4 乗に依存し、地表面と空放射の差に比例します：-

$$H = \sigma \cdot T^4 \cdot (1 - S) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

H = 表面からの放射熱損失

σ = 放射定数 $10^{-7} \times 1.18 \text{ cal/cm}^2/\text{日}$

T = 表面の絶対温度

S = 地表面放射に対する空放射の割合

空放射はS₁からS₂に変化しますが、Hは一定であると仮定します。それにより：-

$$T_2 = T_1 \sqrt[4]{(1 - S_1)/(1 - S_2)} \dots \dots \dots (5)$$

この関係から、熱の収支が一定として、空放射の変化による温度の変化によって、続いて表面からの放射が急激に増加することが分かります。

地球上では、水蒸気の供給は表面の大部分において無制限であり、実際の平均気温は太陽"定数"と、水と空気間の特性がつくるバランスによって生じます。このように、水蒸気、空放射および温度の変化は、雲量および大気循環の変化によって修正され、前者は反射損失を増加させ、有効な太陽熱を減少させます。水分子による太陽エネルギーの散乱による、さらなる損失も存在します。

大気中の二酸化炭素の小さな変化は、CO₂の吸収帯は、ほぼすべての太陽エネルギーが運ばれる 0.25~1.5 μ の外側にあるため、表面に到達する太陽熱の量に影響を与えません。その結果、この気体による空放射の変化は、大気循環による温度差の増加がなければ、低層の温度に最大限の影響を及ぼす可能性があります。

空放射による温度の上昇は、太陽熱の増加によって引き起こされるものとは異なります。後者は温度差と大気循環を増加させる傾向があり、温度の最終的な上昇は太陽熱の変化に比例しないはずで

す。二酸化炭素による空放射の変化から、そして(5)式から、表面温度の結果的な変化が得られます。温帯地域における大気中の二酸化炭素と表面温度の関係を図に示します。

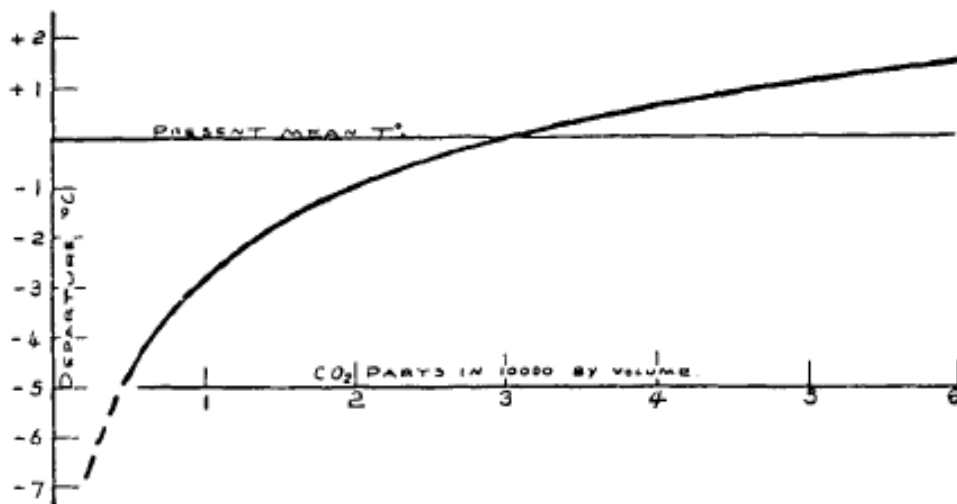


FIG. 2.—Change of surface temperature with atmospheric carbon dioxide (H₂O vapour pressure, 7.5 mm. Hg.)

(移動平均温度) (現在の平均 T°) (CO₂ の 1 万分率)

(図 2—大気中の二酸化炭素による温度の変化)

(H₂O 蒸気圧 7.5 mm.Hg.)

一目見て、二酸化炭素が、水蒸気量が非常に少ない北極地域の温度に、はるかに大きな影響を与えることを予測することができると思います。これは空放射に対する影響に関しては言えますが、空放射が表面から近づくにつれて比率 dT/dS が急速に増加するため、温度には当てはまりません。これら予測に反する結果は、地球のさまざまな気候帯の温度に対する二酸化炭素の定量的影響を著しく均一にするという結論をもたらします。

他にも、この気体が、温度に及ぼす影響に関連する、ここで言及できない非常に多くのポイントがありますが、使用方法と、最良の吸収係数によって与えられる実際の変化、および大気ファウルによる測定によって与えられた水蒸気の吸収と量の関係を示せば十分とされています。

表 I では、現在の生産速度に対する大気中の二酸化炭素の増加が示されていて、温度の変化から、数世紀の間に予想される平均温度の変化を合理的に推定することが可能です。

この期間に、人工的な生産が大幅に増加すると思われるかもしれませんが、この気体に対して、熱ユニットの大幅な増加が有用な目的に変わったにもかかわらず、燃料利用の効率の増大によって、過去 20 年間に於いて、約 40 億トンの二酸化炭素生産で安定する傾向がますます高まっています。

表 IV の最後の行は、気候の極偏差を示し、赤道と極の間の緯度の 2° ごとに 1°C の傾斜を表します。これは、温帯緯度の平均値です。

約 40 年前に S. アレニウス (1903) によってなされた気温に対する二酸化炭素の影響の推定値は、「表 IV」に示された約 2 倍の大きさの変化を示しました。しかし、アレニウスはエネルギー吸収を 30% としましたが、

ルーベンスとアスキニアス指数は最大でも 15%しかないとしました

(表VI.—人工的な平均温度の上昇)

(年間 CO₂ の超過分 a は、ir= 430,000 万トンに。)

(P(CO₂)は大気の 1 万分の 1 の単位で表されます。)

(ΔT= 19 世紀の平均温度の上昇)

(海水平衡時間 2,000 年)

(期間) (1910-1930 年) (20 世紀) (21 世紀) (22 世紀)

TABLE VI.—INCREASE OF MEAN TEMPERATURE FROM THE ARTIFICIAL PRODUCTION OF CARBON DIOXIDE.

Annual excess of CO₂ to the air = 4,300 million tons.
P (CO₂) is expressed in units of a ten-thousandth of an atmosphere.
ΔT = increase from mean temperature of 19th century.
Sea water equilibrium time 2,000 years.

Period	1910-1930	20th century	21st century	22nd century
Mean P (CO ₂)	2.82	2.92	3.30	3.60
Mean ΔT. °C.	+0.07°	+0.16°	+0.39°	+0.57°
Polar displacement of climate zones	15	36	87	127km.

(平均 P(CO₂))

(平均 ΔT°C)

(気候地域の北極の偏差)

6. 地球上で観測された温度変動

ここしばらくの間に、今や、地球表面の近辺で何百万もの正確で標準化された測定値を含む、ほぼ圧倒的な量の統計的詳細を提供する温度が観測されるようになりました。これらの測定は、これらの標準化された観測値を参照することができる期間は一般的に 65 年前までであり、多くの場合、これより少なくなります。このような期間が世界の気温の明確な傾向を示すために十分長いかどうかは、意見の分かれるところです。

私は主に、ここで温度測定値の概要を得るために、貴重なスミソニアン出版の『世界気象記録』に頼ってきました。私は約 200 あるすべての記録を調べましたが、移動平均温度を近隣の地点のものと比較してみると、一部ではありますが、不適切な測定値があることがわかりました。また、特定のケースでは、上記文献に詳細に記載されている通り、測定環境の変化により信用できないものもあります。

1 世紀以上前にさかのぼることのできる 18 の記録のうち、私は全体を通して 2 つだけ、連続データと評価することができるものを見つけました。それらは、オックスフォード、コペンハーゲンにあるラドクリフ天文台(1930)のデータです。他にも、比較が非常に信頼できるに違いない 2、3 のデータがあり、これらの中でおそらく最高のものはエジンバラ(モスマン、1902)、そしてニューヨーク市からのものです。

図3は、1901-30、エディンバラ、オックスフォード、コペンハーゲンでの20年間の混合偏差を「移動平均偏差」として示しています。

下にあるニューヨーク州の曲線は、主にニューヨーク市の記録に基づいていますが、アルバニーやニューヘイブンの、他の長期の記録がニューヨークの測定値をチェックするために使用されています。

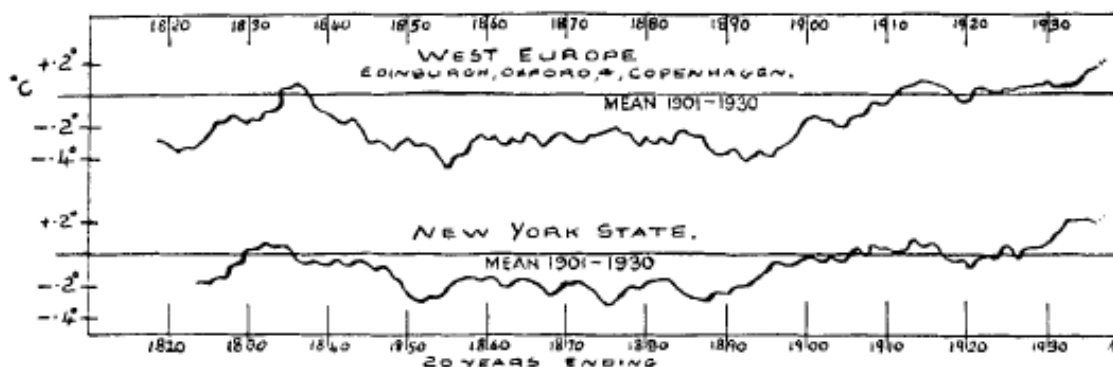


FIG. 3.—The most reliable long period temperature records. Twenty-year moving departures from the mean, 1901-1930.

(西ヨーロッパ エディンバラ、オックスフォード、コペンハーゲン)
(ニューヨーク州)

(図3 最も信頼性の長期間の温度記録平均から20年の移動平均偏差. 1901-1930)

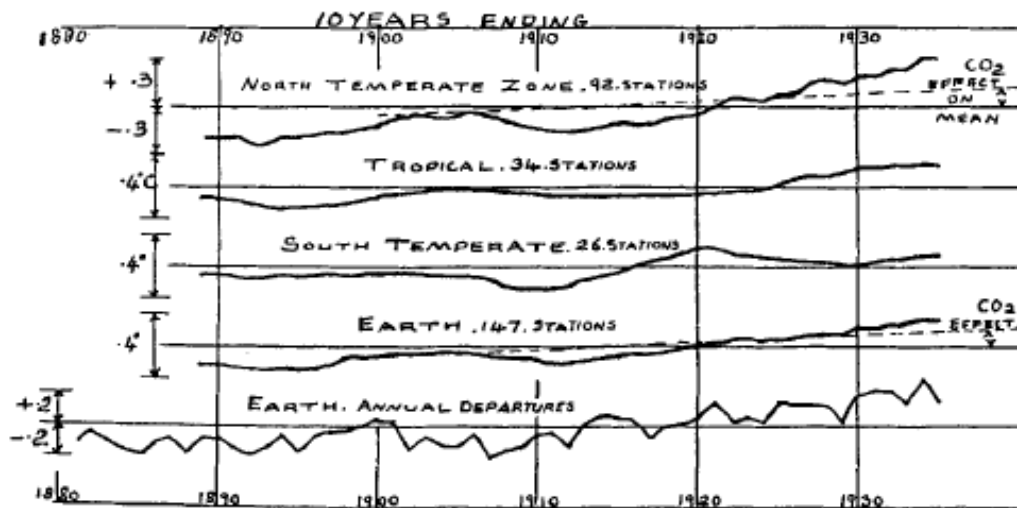


FIG. 4.—Temperature variations of the zones and of the earth. Ten-year moving departures from the mean, 1901-1930, °C.

(10年間)
(北半球温帯地域. 98地点) (CO₂の平均への影響)
(熱帯. 34地点)
(南半球温帯地域. 26地点)
(地球全体. 147地点) (CO₂の平均への影響)
(地球 年間偏差)

(図4. -地域と地球の温度変化. 平均から10年間の移動平均偏差. 1901-1930. °C)

西ヨーロッパの曲線とニューヨーク州の曲線との間には全期間を通じてとても顕著な一致が見られますが、主な気温異常は、東アメリカでは西ヨーロッパよりも数年早く発生しているようです。

地球表面の大きな領域の温度異常を表すために、私は多数の地点をグループ化し、その地点に代表される地域に応じて各グループで重み付けしました。このようにして、図4に示す地球の異なる地域の曲線が得られました。

私は北半球の温帯地域で複数の温度異常の推定を行いました。そして、表VIIの数字は、すべての疑わしい記録をより慎重に排除して最終的に得られたほぼ2倍の地点から得られた値と、以前の推定の結果を比較しています。示した2つのケースで、異なる地点のグループも使用しました。

(表VII—異なる数の地点で表された北半球温帯の温度異常)
(平均偏差 1901-1930 °C)

TABLE VII.—TEMPERATURE ANOMALIES OF THE NORTH TEMPERATE ZONE
REPRESENTED BY DIFFERENT NUMBERS OF STATIONS
Departures from mean, 1901-1930, °C.

Decade or period	1880-1889	1890-1899	1900-1909	1910-1919	1920-1929	1930-1934
No. of stations used 47 (original estimate)	-.23	-.12	-.12	-.07	+.20	+.50
92 selected stations	-.22	-.12	-.10	-.06	+.16	+.40

The first and final periods are represented by about 70 per cent of the total number of stations.

(10年間)
(使われた47地点の数(独自の推定))
(選んだ92地点)
(最初と最終の期間は、地点の約70%が表されます)

表VIIの値から、使われた十分に適切な数の信頼できる温度記録が、非常に大きな地域の期間異常を示している可能性があります。

私は、私は図4の曲線に、北極地域の地点であるウベルナビクとスピッツベルゲンを含んでいません。変化が非常に大きく、南極地域に検討の際に補う地点がないからです。

重要な事として、地球全体の年間偏差も図4にプロットされ、150地点で得られた実際の数字を表VIIIに示します。

図4の曲線から、近年の温暖傾向の大部分が北部地域で発生していることがわかつています。これらは、西太平洋の地点を除いて、すべて1920年頃から明確な上昇傾向を示しています。熱帯地域では、偏差はより地域によってさまざまです。しかし、使用される3つのグループ(インド洋、熱帯大西洋、熱帯西太平洋)のそれぞれは、過去25年間よりも1910-34年の25年間の平均気温が明らかに高いことを示しています。オーストラレーシアと南米(キンサー、1933)では、気温は非常に安定していますが、両方の地域は上記の期間にわたって明確な上昇を示しています。

(表VIII—147地点の記録から得られた、地球の年間気温偏差)
(平均からの偏差、1901-1930年 1/100°C)

TABLE VIII.—ANNUAL TEMPERATURE DEPARTURES FOR THE EARTH, FROM
147 RECORDS.
Departures from mean, 1901-1930, in 1/100°C.

Date	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Decade
1880	-5	-10	-4	-10	-15	-10	-11	-9	-18	-9	-11
1890	-9	-14	-18	-12	-5	-15	-6	-3	-2	0	-8
1900	+4	+2	-12	-7	-11	-11	-5	-18	-14	-12	-9
1910	-5	-3	-11	+1	+7	+6	+3	-7	0	-1	-1
1920	+6	+15	+2	+6	+2	+16	+14	+14	+13	+2	+9
1930	+20	+23	+22	+16	+30	+17					(+22)

ヨーロッパの高地では1920年代の温暖傾向は、次の数値が示すように、低地よりも大きくなっています：

—
ソンプルーウィック(高度3km)とサンティス(標高2 1/2km、km.) 1920-29年偏差 = +0.44°C
全ヨーロッパ、低地の30地点(リスボンからカザン)、1920-29 = +0.17

気温、特に夜の最低気温については、周辺の田園地域よりも大きな町の中心部付近の方が少し高いことが分かっていますが、したがって、検討中の期間の間に地点の近くに多数の建物が集中して建設された場合、その地点での偏差が影響を受け、高く出る傾向があることが推定できます。

この点を調べるため、私は次のような3つのクラスに観測地点を分けました：—

- (i) 最も自然と接している、海に囲まれた小さな島、または建物が集中していない、自然と接している陸地
- (ii) 面積のわりに物質的な増加がない小さな町
- (iii) 大きな町、そのほとんどが過去半世紀の間はかなり増加している

これは論争の対象になっていることであるため、各クラスで使用される地点の例を挙げる必要があります。

(表IX. — 期間温度の点で町のサイトの影響)

TABLE IX.—THE EFFECT OF TOWN SITES ON PERIOD TEMPERATURE DEPARTURES.

<p>(i) Best exposures. Upernivik, Greenland. Father Point, Q., Canada. Valencia, Irish Free State.* Ponta Delgada, Azores. St. Helena. Cape Pembroke, Falklands. Petropavlovsk (lighthouse), Kamchatka. Honolulu, Hawaii.* Apia, Samoa. Port Victoria, Seychelles.</p>	<p>(ii) Small towns. Victoria, B.C., Canada. St. John's, Newfoundland. Sibiu, Roumania. Yakutsk, U.S.S.R. Miyako, Japan. Leh, 3½ km. alt., Kashmir. Antananarivo, Madagascar. Bahia Blanca, Argentine. Magellenes (Punta Arenas), Chile. Darwin, N.T., Australia.</p>	<p>(iii) Large towns. St. Louis, Mo.* Alexandria. Moscow. Nagasaki. Bombay. Cape Town. Rio de Janeiro. Santiago. Auckland. Adelaide.</p>
--	---	--

* See Fig. 5.

Mean increase from period 1890-1909, to period 1910-1929.

- (i) 16 stations, 0.23°C.
 - (ii) 32 stations, 0.19°C.
 - (iii) 34 stations, 0.21°C.
- In each class one quarter of the stations were in the southern hemisphere.

(i) 最も自然に近い	(ii) 小さな町	(iii) 大きな町
ウエルニヴィク、グリーンランド	ビクトリア B.C.、カナダ	セントルイス、Mo.*
ファーザーポイント、Q.、カナダ	セントジョンズ、ニューファンドランド	アレクサンドリア
バレンシア、アイルランド自由州*	シビウ、ルマニア	モスクワ
ポント・デルガダ、アゾレス諸島	ヤクーツク、ソ連	長崎
セントヘレナ	宮古、日本	ボンベイ
ケープペンブローク、フォークランド	リー、3 1/2 キロ、カシミール	ケープタウン
ペトロパブロフスク(灯台)	アンタナナリボ、マダガスカル	リオデジャネイロ
カムチャツカ	バイアブランカ、	アルゼンチンサンティアゴ
ホノルル、ハワイ州*	マジェレネス(プンタアレナス)	オークランド
アピア、サモア	チリ	アデレード
ポートビクトリア、セーシェル	ダーウィン、N.T.、オーストラリア	

* 図 5 を参照してください。

(1890 年から 1909 年の期間から 1910-1929 年までの平均増加)

(i) 16 地点、0.23°C (ii) 32 地点、0.19°C (iii) 34 地点、0.21°C

各区分では、地点の 4 分の 1 が南半球です。

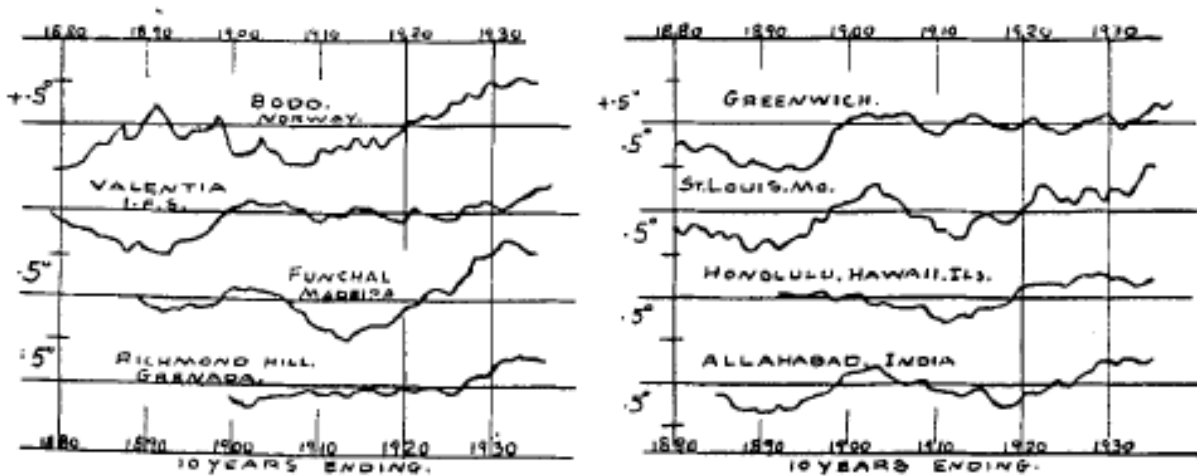


FIG. 5.--Temperature records from the great oceans and from great cities. Ten-year moving departures from mean, 1901-1930, °C.

(図 5. ー大海または大都市から得た気温。10 年の移動平均偏差。1901-1930 °C)

より具体的な見積もりをするために、私はイギリスにある多くの地方と都市の記録を調べました。前者は約半世紀に及びますが、過去 55 年間におけるストーニーハーストカレッジ、ワークソップ、ロタムステッドファームといった地方地点での 20 年移動平均は、グリニッジ天文台とオックスフォード天文台での正確な測定によって得られたものよりもわずか(0.1°F)に上昇しています。これは、検討中の期間中に人口が大幅に増加したにもかかわらず、「都市影響」による温度の現実的な上昇がこれらの都市で起こっていないことを示し

ています。

図5では、ロンドンとセントルイスの大都市の地点と一緒に、最高の「海」地点のいくつかの記録が示されています。

中国海やベンガル湾を除いて、過去半世紀にわたって気温の低下を示す信頼性の高い記録はほとんどありません。

図4の世界の温度曲線に戻り、点線は、大気中の二酸化炭素の増加による平均の変化量を示し、特に北半球の現在の温度が計算値を上回っていることを明らかにしています。今後20年間の世界の気温の経過は、計算された大気中の二酸化炭素の効果についての正確性に関する貴重な証拠を提示しているはずですが。

最近の氷河時代に代表される地質学的に最近の温度変化に関して、私は、二酸化炭素の自然変動が、大気において、量的に、約30,000年の期間で氷河期をもたらすのに必要なだけの大きな変化であることを説明するのに十分な速さであるかどうかを確認するために多くの計算を行いました。大気が平均気温で5~8°Cの低下を与えるほど二酸化炭素の分圧が低くなる(図2参照)と、海洋からの供給がほとんど無制限になるため、必要な程度の気体の変動すると説明することはほとんど不可能だと思います。もちろん、二酸化炭素が気温に及ぼす影響が想定よりもかなり大きければ、氷期はこの方法で説明されるかもしれません。

結論として、化石燃料の燃焼は、地球表面からの泥炭であろうと、地下10,000フィートからの石油であろうと、熱と電力の供給に加えて、いくつかの方法で人類にとって有益であると言えるかもしれません。例えば、これまで記した小さな平均気温の上昇は北の耕作空白地帯で重要であり、好都合な植物の成長状況は、二酸化炭素分圧に直接的に比例します(ブラウンとエスコム、1905)。いずれにせよ、致命的な氷期への回帰は無期限に遅らされるべきです。

燃料の埋蔵量に関しては、これらは現在の大気中に、少なくとも10倍の二酸化炭素を与えるのに十分だと思われる。

参考文献

- Angstrom, A. 1918 *Smithson. Misc. Coll.*, 65, No. 3.
- Arrhenius, Svante 1903 *Kosmischs Physik*, 2.
- Brown, H., and Escombe, F. 1906 *Proc. Roy. Soc.*, B, 76.
- Brunt, D. 1932 *Quart. J.R. Met. Soc.*, 58.
- Carpenter, T. M. 1937 *J. Amer. Chem. Soc.*, 59.
- Dines, W. H. 1927 *Mem. R. Met. Soc.*, 2, No. 11.
- Fox, C. J. B. 1909 *International Council for the Investigation of the Sea. Publications de Circonstance*, No. 44
- Fowle, F. E. 1918 *Smithson. Misc. Coll.*, 68, NO. 8.
- Hettner, A. 1918 *Ann. Phys., Leipzig*, 66.
- Kincer, J. B. 1933 *Mon. Weath. Rev.*, Wash., 61.
- Mossman, R. C. 1902 *Trans. Roy. SOC.*, Edin., 40.
- Radcliffe Observatory 1930 *Met. Obs.*, 55.
- Rubens, H., and Aschkinass, R. 1898 *Ann. Phys. Chem.*, 64.
- Schmidt, H. 1913 *Ann. Phys., Leipzig*, 42.
- 1927 and 1934 "World weather records." *Smithson. Misc. Coll.*, 19 and 90.
- Simpson, G. C. 1928 *Mem. R. Met. SOC.*, 3, No. 21.

議論

ジョルジュ・シンプソンは、カレンダー氏がこの論文に取り組んだ仕事の量に対して賞賛しました。それは素晴らしい仕事でした。それを批判するのは難しかったが、彼は Mr.カレンダーが再考されたらと思われるいくつかの点に言及したいと思いました。そもそも、彼は、気象学者でない立場で、大気の温度分布を放射のはたらきによって説明しようとする研究によってでは、学会に貢献することはできないと思いました。大気は放射平衡ではなく、ある部分の熱をある場所から別の場所に移動して熱を受け取ることで説明することができます。第2に、大気中の温度分布は、空気の上下の動きによってほぼ完全に決定されていることを知っておく必要がありました。これにより、大気は、放射とは全く外れた温度分布のバランスに変化します。したがって、大気中の変化していく効果を1つの要因で計算することはできず、彼は、カレンダー氏が得た実際の数値結果は、効果の大きさの順序を明確に示すのに利用できないと感じました。第3に、彼は、図2に示した結果をどのように計算したかについて、もう少し情報を開示すべきだと考えました。これらの内容は論文の重要な点を含んでいましたが、論文は彼がどのようにその結果を得たかを説明しませんでした。表5では、カレンダー氏はCO₂を2倍にした場合の効果を提示していましたが、13~16 μ の1つの放射帯で、CO₂に関わるエネルギーのほぼ全部を含んでいました。しかし、これらの結果から得られた温度の上昇は、同様に図2に示したCO₂の増加に対して同じではなかった。この種の不一致は解消する必要があります。最後に、彼はCO₂含有量の上昇と、過去50年間の温度上昇は、偶然であるにとらえるべきだと考えました。その大きさはカレンダー氏が計算したよりもさらに大きく、気温の上昇はおそらくすべての気象要素が経験した独特の変化の1つの段階に過ぎないと考えました。

F.J.W.ウィップル博士は、著者に対し、二酸化炭素の自然の動きに関する彼の調査の説明を学会にすることを望むと表明しました。CO₂の海への溶解に関する計算方法を明らかにしませんでした。表IVに具体的に示された計算は、どの場所でも高く温度が上昇するとする仮定に基づいていました。夜と極地域の冬の間の気温の反転は無視されました。反転は、臨界波帯における新しい放射流逆転を意味するので、様々な状況の変化に対応するためには追加の計算を行う必要があるように思えました。放射以外の他のプロセスの中には、地表面と大気間の通常のエネルギー交換も含まれますが、CO₂量の変動による影響を調査する際には、これら他の過程を無視することは正当であるかもしれません。

D.ブラントゥ教授は、過去30年間に気温が緩やかな上昇を示した図に言及し、この平均気温の変化は、18世紀後半に起こったと思われる変化と同じではなく、欠陥のある機器の問題によって起こったのでもない」と述べました。パリで長期に行われた一連の気圧観測は、大西洋から来たの低気圧の平均経路に大きな変化があったことを明確に示しました。ブラント教授は、大気の吸収力の増加がもたらす効果は、単に温度変化だけでなく、一般的な循環を変え、大気の状態に非常に複雑な一連の変化をもたらすとして、ジョージ・シンプソン卿の見解と一致しました。彼は、温度変化がどのように評価されたのかははっきりしていないとしました。しかし、彼は、カレンダー氏が彼の最も興味深い論文に費やした膨大な量の仕事を高く評価しました。

C.E.P.ブルックス博士は、過去30年または40年の間に実際に変化があったことに疑いの余地はないと述べました。これは、陸上地点の気温の上昇だけでなく、北極や、おそらく南極における氷の量の減少や、水温の上昇として表れました。この気温の上昇は、彼が説明した、定量的ではないにしても、定性的に、大気循環の変化によって説明できると考えました。大気循環変化が温度の低下を引き起こすと予想される地域

で、実際には低下が起こり、さらに北極地域では中緯度または低緯度の約 10 倍の温度上昇があり、二酸化炭素量の変化がそのような影響を引き起こすとは考えませんでした。しかし、その可能性については、確かに功績のある議論であり、彼は気候変化の問題に対する論文を書いたことは、貴重な貢献となった。

I.M.G.ダインズ氏は、彼が重要であると認識した空気の温度の変化が、単なる偶然の変化ではないとして、満足しているか、とカレンダー氏に問いました。

J.H.コステ氏は、カレンダー氏の勇気と忍耐を祝福しました。彼は私に実用的な問題を提起したいと思いました。まず、空気中の CO₂ は本当に増加していたのでしょうか？もともとは 0.04% でしたが、化学分析の方法が改善されるにつれて 0.03% に下がり、彼はカレンダー氏が活用した差異が本当かどうか非常に疑わしいと思いました。3、40 年前の CO₂ の決定方法は、このような比較を行うのに十分正確ではありませんでした。A. Krogh は、大気と海洋間の 1/10⁵ の大気圧の差を計算し、後者はもっと多く、CO₂ の年間溶解量は 3.7×10⁹mt (メートルトン) に等しく、これは燃料の燃焼による大気への CO₂ の年間寄与に関するものであり、海洋によるこの吸収には、光合成による植生の影響を加えなければなりません。30 年前の温度計はそれほど高精度の計器ではなく、そのような温度計の観測に基づいて温度分布の変動を考慮することはためらわれます。

G.S.カレンダー氏はこれらに答え、地球表面のどの特定の地域においても温度制御をするのは極めて複雑であると深く理解したと述べました。

放射平衡が実際には確立されていないことに気づいたが、熱の供給や分散を妨げることなく、低温放射の伝達を遅らせる物質が大気中に加えられた場合、宇宙空間から最も遠い部分では温度の上昇は避けられないように思えます。

本稿に記載されている CO₂ の温度変化 (図 2) は、この異なる気体の量に対して (5) 式の S₁、S₂ を代入して計算された空放射の値から得られました。S が表 V に示す (5) 式に使用される場合、空放射が地球放射の 10 分の 7 になると、図 2 の曲線のようになることがわかんと思います。空放射は表面放射に対する割合として計算されるため、一定の熱供給時には、「空の温度」の変化は、(5) 式のように地球表面温度平衡の変化を伴います。

空放射の計算に用いられる方法について、最小限の数値的な説明でさえ数ページを占めるということがわかり、多くの似たような方法が随時公表されるようになってきているので、より直接的な関心の問題のために利用可能な紙面を使用することを決めました。

ホイップル博士に対して、著者は、紙面の制約が CO₂ の自然変動についての説明を許さなかったことを残念に思いました。彼は、これらについての説明を実際書いていましたが、現状の紙面の 8 倍の長さでした。

海への CO₂ の溶解の計算をするために有効な深さは、どの時期でも 200 m であると考えられました。

温度に対する CO₂ の影響は、大きな反転を含む様々な経過の速度によって計算されています。後者の場合、表面温度への影響は小さいが、中間層の温度は維持され続けます。

ブラント教授に対して、著者は、およそ 1780、1797 年、1827 年に温暖期があり、非常に寒い年を挟んで、自然によって 10 年程度ごとの短い暖気が生じたのに対し、最近の状況では、徐々に持続的な気温上昇を示しました。これは、およそ 40 年移動平均によって示されています。

ブルックス博士に対して、著者は、最近の北極温度の上昇は CO₂ の変化に起因するにはあまりにも大きすぎることに同意しました。これらの大きな気温上昇によって、今後、近い時期に北極の氷の状況に継続的な変化をもたらすかもしれないとしています。こうした大きな上昇によって、彼は世界の温度曲線に北極地点

を含めていませんでした (図 4)。

ディーンズ氏に対して、著者は、大気温度の上昇があまりにも広範囲に及び、局所的な大気圧の変動による一時的な変化と思った、と述べた。

コステ氏に対して、著者は、彼が使用した CO₂ の初期の一連の観測は、おそらく非常に正確であると言いました。彼は、強く安定した西風の吹いた日に、キューで観測した値を使いました。

過去 40 年間に、実際に追加された CO₂ は 8% の増加に等しく、観察値と計算値は約 6% 増加の効果があることに合意しました。

著者は、あまりにも高く見える記載された数字を与えるために、A. コッホによって使用された海水によって導き出された係数を知りません。1 年で表面に置き換えられる海水の体積は 1/1000 未満であり、空気中の CO₂ 分圧の年間増加は大気全体の 1/10⁶ 未満であることを覚えておく必要があります。植生によって使用される CO₂ の約 98% は、腐敗酸化と呼吸によって戻されるように思えます。

著者は、非常に正確な温度は、前世紀に記録されたと考えました。この点に疑問がある場合は、ラドクリフ天文台 (Met. Obs., Vol.55, 1930) による長期の表についての序文を見れば、安心するはずです。

- ¹ 台風19号の被害額、約1兆8600億円…統計開始以来で最多
読売新聞オンライン 2020/08/21 21:02 <https://www.yomiuri.co.jp/national/20200821-OYT1T50248/>
- ² 他には、『SSKレポート』（2007. 4号）など
- ³ iTSCOM.net 1年まえ組中等部 せん（先生）でん（伝言板）第11回 小西一也
<http://www.itscom.net/contents/maegumi/chutobu/index012.html>（閉鎖）
- ⁴ 「一般財団法人日本エネルギー経済研究所 石油情報センター 可採年数 石油ってあとどれくらいあるの？」https://oil-info.ieej.or.jp/whats_sekiyu/1-5.html
- ⁵ 評価報告書では、可能性の表現が、すべて数値で表される確率に応じて決められている。
- 1 本政策決定者向け要約では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の5段階の表現を用い、「中程度の確信度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している（詳細は1章及びBox TS.1を参照）。
- 2 本政策決定者向け要約では、成果あるいは結果の可能性の評価を示すために、次の用語が用いられる。「ほぼ確実」：発生確率が99～100%、「可能性が非常に高い」：発生確率が90～100%、「可能性が高い」：発生確率が66～100%、「どちらも同程度」：発生確率が33～66%、「可能性が低い」：発生確率が0～33%、「可能性が非常に低い」：発生確率が0～10%、「ほぼあり得ない」：発生確率が0～1%。適切な場合には追加で以下の用語を用いることがある。「可能性が極めて高い」：発生確率が95～100%、「どちらかと言えば」：発生確率が>50～100%、「可能性が極めて低い」：発生確率が0～5%。可能性の評価結果は、「可能性が非常に高い」のように斜体字で記述する（詳細は1章及びBox TS.1を参照）。
- ⁶ ココが知りたい地球温暖化 Q9 水蒸気の温室効果
https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa_11-2-j.html
- ⁷ （正式には、「第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP3：3rd Session of the UNFCCC（United Nations Framework Convention on Climate Change） Conference of the Parties）」）
- ⁸ 正式名称は、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書（英：Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change）
- ⁹ <http://www-gio.nies.go.jp/faq/ans/outfaq2a-j.html>
- 国立環境研究所 GIO FAQ Q2-1:温室効果ガス排出量はどのように算定していますか？
- ¹⁰ <https://www.nies.go.jp/kanko/news/31/31-5/31-5-03.html>
「硫酸塩（SO₄²⁻）、硝酸塩（NO₃⁻）、有機エアロゾル、黒色炭素（Black Carbon; BC）など直径が1μm程度の微小粒子と、土壌粒子（黄砂）、海塩粒子など直径が数μm程度の粗大粒子があり、大気中を浮遊しています。」
- ¹¹ 日本地球惑星科学連合ニュースレターNovember, 2007 Vol. 3No. 4
「ブラックカーボンと地球温暖化 ～ミクロな粒子による気候変化～」東京大学 先端科学技術研究センター近藤 豊
<http://www.jpgo.org/wp-content/uploads/2018/03/JGL-Vol3-4.pdf>
- ¹² ココが知りたい地球温暖化
「エアロゾルが大気中を滞留できる時間は気象条件などにより異なりますが、対流圏では一週間程度、圏界面から成層圏にかけては数か月から数年程度です。」
- ¹³ 大気中のCO₂濃度、11日に観測史上最高の415.26ppmを記録。初の415ppm台突破。ハワイのマウナロア観測所で記録。一段と加速する温暖化（RIEF）2019-05-14 11:12:58
<https://rief-jp.org/ct8/89801>
- ¹⁴ 「原子は線スペクトルなのに、なぜ分子の場合はバンドスペクトルになるの？」

<https://katakago.sakura.ne.jp/chem/flame/spectre3.html>

¹⁵ 地球環境市民会議 (CASA) HP

<http://casaweb.html.xdomain.jp/casa/2/015/pdf/15chap01%203.pdf>

| 208

¹⁶ 「地球温暖化50のなぜ 31 化石燃料って何」

<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/ondanka/index.html>

¹⁷ 農林水産省 HP 農林水産省地球温暖化対策計画 1. IPCC 第4次評価報告書の概要

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/taisaku/attach/pdf/top-11.pdf>

¹⁸ 正式名称は、「1.5°Cの地球温暖化：気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から1.5°Cの地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス(GHG)排出経路に関するIPCC特別報告書」

¹⁹ 気温変化については、第5次評価報告書では、「測器による記録が存在」する1880年以降を基準にしている。「1.5°C特別報告書」では「工業化前」(または「産業革命前」)である1750年以前を基準に数値が表現されている。ただし、この間の気温変化は小さいと考えられているので、この小論での大雑把な議論では考慮に入れていない。

²⁰ 「地球のエネルギー収支」Wikipedia

IPCCの調査(リンク)によれば、2000年のエネルギー収支の総量は、1750年に比べて約 2.4 W m^{-2} (太陽放射により地球の大気を得るエネルギーの1%弱に当たる)増加したとされる。人為的な影響の中では特に二酸化炭素やメタンなどの影響が大きいとされている(地球温暖化の原因参照)。

²¹ 第二部-3- 大気と海の科学 第7章 空気の上昇と雲の発生

[https://www.s-](https://www.s-yamaga.jp/nanimono/taikitoumi/dannetsuassyukutokumonohassei.htm#%E9%AB%98%E3%81%95%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E6%B0%97%E6%B8%A9%E3%81%AE%E4%B8%8B%E3%81%8C%E3%82%8A%E6%96%B9)

<yamaga.jp/nanimono/taikitoumi/dannetsuassyukutokumonohassei.htm#%E9%AB%98%E3%81%95%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E6%B0%97%E6%B8%A9%E3%81%AE%E4%B8%8B%E3%81%8C%E3%82%8A%E6%96%B9>

²² コトバンク 知恵蔵の解説

<https://kotobank.jp/word/%E5%A4%A7%E6%B0%97-90946>

²³ 「エアロゾルの数が多い場合は少ない場合に比べて、同じ量の水蒸気がより多くのエアロゾルに配分されることになるため、雲粒ひとつひとつのサイズが小さくなります。このような小さい雲粒からなる雲は太陽光を反射する効率(この効率をアルベドと呼びます)が高くなります(雲アルベド効果)」

ココが知りたい地球温暖化 Q11 エアロゾルの温暖化抑止効果

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/14/14-1/qa_14-1-j.html

²⁴ 図 5.7 |(a)北半球と(b)南半球、および(c)過去2000年間の世界の年間気温を復元しました。個々の復元(各復元の詳細については、付録 5.A.1 を参照)は、凡例に示されているように、空間表現に従って色でグループ化されて示されています。(赤：陸のみのすべての緯度；オレンジ：陸のみの熱帯以外の緯度；水色：陸と海の熱帯以外の緯度；濃い青色：陸と海のすべての緯度)、機器測定温度は黒で示されています。(ハドリーセンター/気候研究ユニット(CRU)格子状の表面温度-4 データセット(HadCRUT4)の陸上および海、および CRU グリッドデータセット Air TEMperature Anomalies Over Land version 4 (CRUTEM4) land-only; モリスら、2012)。全ての系列は1881年から1980年の平均(水平破線)の異常を表し、約50年未満の時間スケールの変動を減らすフィルターで平準化されています。(註：傍線引用者)

²⁵ [Wikipedia「温度」](#)

温度の物理学史[編集]

物体の寒暖の度合いを定量的に表そうという試みを初めて行ったのは異説はあるがガリレオ・ガリレイであると考えられている。ガリレイは空気の熱膨張の性質を利用して物体の温度を計測できる装置、すなわち温度計を作成した。ガリレイの作った温度計は気圧などの影響を受けてしまうために実際に温度を定量的に表すには及ばなかったが、このように物質の温度による性質の変化を利用して、寒暖の度合いを定量的に表そうという試みは以後も続けられた。

²⁶ パリティ Vol.34 NO.05 2019-05 松野太郎「温暖化問題、討論のすすめ 地球温暖化は物理法則に基づく理論である」 p.55

「上空では大気全体も CO₂も密度が小さく（だからこそ宇宙に流出できる）、したがって CO₂の濃度が増えれば下層からの上向き放射の吸収の度合いは強まる。懐疑論の1つは、「CO₂は多量にあって吸収が強く、現状で飽和しているから多少増加しても吸収は増えない」というが、これは実験中の決まった温度・圧力の話もとの話で、いま問題としている高さとともに温度・圧力の変わる大気柱の議論に関してはあてはまらない。地球のエネルギー収支で問題なのは、宇宙へ流出する大気上端（光学的厚さが1に比べて十分小さいところ）での放射である。」

²⁷ (スティーブン・シュナイダー『地球温暖化の時代』(ダイヤモンド社、1990年) p.223

『世紀を超えて 地球温暖化』)

²⁸ ココが知りたい地球温暖化 Q17 気候のシミュレーションモデルはどんな結果でも出せる？

https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/25/25-1/qa_25-1-j.html

²⁹ https://tenbou.nies.go.jp/learning/note/theme1_3.html

一方、「海洋の大循環」は、数百 m 以深の深層の流れ（深層流）であり、秒速 1cm 程度で極めてゆっくり流れながら、平均 1,000 年（最長 2,000 年）程度の時間をかけて全海洋を循環すると考えられている。

³⁰ IPCC 第 5 次評価報告書 技術要約 p.112

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf

³¹ 「参考資料（気象庁作成） ○ 2 0 1 0 年（平成 2 2 年）夏の猛暑について」

https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/5_tekiou_gijyutu_report.pdf

³² (台風 15 号)

東京管区气象台 令和元年台風第 15 号に関する気象速報

https://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/ty1915/ty1915_kanku.pdf

³³ (台風 19 号)

東京管区气象台 令和元年台風第 19 号に関する東京都気象速報

https://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/ty1919/ty1919_tokyo.pdf

³⁴ [平成 30 年 7 月豪雨 - Wikipedia](#)

住家の全壊 6783 棟、半壊 1 万 1346 棟、一部破損 4362 棟、床上浸水 6982 棟、床下浸水 2 万 1637 棟

(→内閣府ホーム > 内閣府の政策 > 防災情報のページ>

http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/301009_1700_h30typhoon7_01.pdf)

³⁵ 長崎大水害 Wikipedia

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%95%B7%E5%B4%8E%E5%A4%A7%E6%B0%B4%E5%AE%B3>

死者・行方不明者 299 人 負傷者 805 人

全壊 584 棟 半壊 954 棟 床上浸水 1 万 7909 棟 床下浸水 1 万 9197 棟

被害総額約 3153 億 1000 万円

³⁶ 昨年の 7 月西日本豪雨の被害被害額 1 兆 1 5 8 0 億円で過去最大

<https://www.sankei.com/politics/news/190730/pl1907300022-n1.html>

³⁷ メタン起源の水蒸気は正の強制力→[Wikipedia「放射強制力」](#)

³⁸ 化学的風化作用による大気からの CO₂の除去フラックス推定上の問題点 珪酸塩と炭酸塩風化フラックス 鹿園直建*

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/111/3/111_3_360/_pdf

気候変動の要因：炭素（二酸化炭素）の循環

<http://www.gaia.h.kyoto->

[u.ac.jp/~ishikawa/Lecture/Grad/Grad_04.pdf#search=%27%E5%8C%96%E5%AD%A6%E7%9A%84%E9%A2%A8%E5%8C%96+%E3%82%B1%E3%82%A4%E9%85%B8%E5%A1%A9%27](http://www.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/~ishikawa/Lecture/Grad/Grad_04.pdf#search=%27%E5%8C%96%E5%AD%A6%E7%9A%84%E9%A2%A8%E5%8C%96+%E3%82%B1%E3%82%A4%E9%85%B8%E5%A1%A9%27)

| 210

炭酸塩鉱物・珪酸塩鉱物の風化と大気 CO₂ の固定

◆大気-海洋・雨水： $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$

◆炭酸塩鉱物

風化： $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

海洋： $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$ (炭酸塩鉱物の形成)

大気・海洋中 CO₂ 量に影響なし

◆珪酸塩鉱物

風化： $\text{CaSiO}_3 + 2 \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

海洋： $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$ (炭酸塩鉱物の形成)

$\text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

★ $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$

($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)

珪酸塩鉱物の風化 → 大気 CO₂ の固定 (大気からの除去)

0.03 Gton/年

³⁹ ナオミ・オレスケス+エリック・M・コンウェイ 福岡洋一訳『世界を騙しつづける科学者たち』(下)(楽工社、2011年) p.85

⁴⁰ 米国物理学協会 (American Institute of Physics、略称:AIP) はアメリカ合衆国の物理学系学会の連合組織 Center for History of Physics (Home > Programs and Resources > History Programs)

(<https://www.aip.org/history-programs>)

→History of Science Web Exhibits (科学の歴史 Web 展示) (<https://history.aip.org/web-exhibits/>)

→The Discovery of Global Warming (<https://history.aip.org/climate/index.htm>)

→The Carbon Dioxide Greenhouse Effect (<https://history.aip.org/climate/co2.htm>)

Basic Radiation Calculations (<https://history.aip.org/climate/Radmath.htm>)

作者: SPENCER R. WEART (スペンサー・R・ウィート) (<https://history.aip.org/climate/author.htm>)

Wikipedia 英語 (https://en.wikipedia.org/wiki/Spencer_R_Weart)

⁴¹ [Wikipedia「レオン・ティスラン・ド・ボール」](#)

Trappes に個人の気象観測所を作り、無人観測気球を使った高空の気象の実験を行った。高空の観測に無人氣球をつかった最初の科学者となった。

[Wikipedia「成層圏」](#): 成層圏の発見はおよそ 100 年以上前にもさかのぼる。1902 年にフランスの気象学者ティスラン・ド・ボール (1855 年~1913 年) が気球観測によって対流圏とは構造がやや異なった層があることを発見し、翌年に発表した。

⁴² CNET Japan ENIAC 誕生 60 周年--2 人の科学者が作った怪物コンピュータ <https://japan.cnet.com/article/20096729/>

⁴³ [Wikipedia「シュテファン=ボルツマンの法則」](#)

シュテファン=ボルツマンの法則 (シュテファンボルツマンのほうそく、英語: Stefan-Boltzmann law) は、熱輻射により黒体から放出される電磁波のエネルギーと温度の関係を表した物理法則である。ヨーゼフ・シュテファンが 1879 年に実験的に明らかにし、弟子のルートヴィヒ・ボルツマンが 1884 年に理論的な証明を与えた。

⁴⁴ 『現代化学史 - 原子・分子の科学の発展』(廣田 襄、2013 年) p.115

⁴⁵ [Knut Ångström From Wikipedia, the free encyclopedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Knut_%C3%85ngstr%C3%B6m)

https://en.wikipedia.org/wiki/Knut_%C3%85ngstr%C3%B6m

1900 年、クヌート・オングストロームの研究助手である Herr J. Koch は、CO₂ の濃度を最初の量の 3 分の 1 まで減少させることによって、赤外線吸収に目に見える変化を観察しませんでした。[7] この結果は、数年前に行われた観測に加えて、水蒸気吸収バンドの重ね合わせ[8]が、CO₂ のそれよりも大気中でより豊富であるため、一部の地質学者が CO₂ 温暖化に反対するようになった。Svante Arrhenius によると、その後の数十年のその後の仕事は最終的にアレニウスを立証した。[9] [10]

しかし、実験は現在の視点から不注意に見られ、誤った結果が得られましたが[11]、CO₂ によって増幅される温室効果の理論の発展において歴史的に重要でした。

⁴⁶ 地球温暖化曲線の系譜 (4) カレンダーの発見

<http://citywatch-net.sakura.ne.jp/WP/?p=1653>

カレンダーの晩年にあたる 1962 年と 1963 年には、ヨーロッパの気候は一転し冬は厳寒に襲われた。重い足取りで、道路に積もった雪をシャベルで除雪する彼の姿があったという。1970 年代になると再び地球温暖化曲線は上昇を始めるが、それを知ることなく 1964 年に彼は世を去った。変動する地球の気温と同じように、カレンダーの生涯も波乱に富んでいたことがうかがわれる。

⁴⁷ スースは、カリフォルニア州ラホヤのスクリプス海洋研究所でロジャー・レヴェルと共同で問題を取り上げました。(他のカーボン 14 の専門家の中には、この話題を独立して攻撃し、すべて同じ結論に達しました。空気中で見つかった同位体の量と海水中の量の測定から、CO₂ の動きを計算した。海面水は 10 年かそこらで大気から CO₂ の典型的な分子を取り込んだことがわかった。一方、爆弾実験による放射性炭素の移動の測定は、海洋が数百年で完全にひっくり返っていることを示した(他の研究からの証拠によってすぐに確認された推定)。(31)余分な CO₂ を深さに掃引するのに十分な速さと思われた一目で。

しかし、Revelle は彼のキャリア全体を通じて海の化学を研究していました、そして、彼は海が塩水だけでなく、化学物質の複雑なシチューであることを知っていました。これらの化学物質は、海水の酸性度を安定させる独特の緩衝機構を作り出します。このメカニズムは何十年も前から知られていましたが、Revelle は水が取り上げた余分な CO₂ をすべて保持するのを防ぐことに気がきました。注意深く見ると、表面層は本当に多くの追加ガスを吸収することができなかったことが示されました - わずか 10 分の 1 の素朴な計算が予測した量。

⁴⁸ [Wikipedia 英語版「Syukuro Manabe」](#)

Manabe は、NOAA の地球物理流体力学研究所で、最初はワシントン DC で、その後はニュージャージー州プリンストンで勤務し、Joseph Smagorinsky 監督と協力して大気の 3 次元モデルを開発しました。最初のステップとして、Manabe and Wetherald (1967) は、水蒸気の正のフィードバック効果を伴う放射-対流平衡における大気の 1 次元の単一列モデルを開発しました。彼らはこのモデルを使用して、二酸化炭素の大気中濃度の変化に応じて、地球の表面と対流圏では温度が上昇し、成層圏では温度が低下することを発見しました。放射対流モデルの開発は、大気の包括的な大循環モデルの開発に向けた非常に重要なステップでした (Manabe et al. 1965)。彼らは、このモデルを使用して、二酸化炭素の増加に対する温度と水循環の 3 次元応答を初めてシミュレートしました (Manabe and Wetherald, 1975)。1969 年、真鍋とブライアンは、大気の大循環モデルと海洋の循環モデルを組み合わせた海洋大気結合モデルによる最初の気候シミュレーションを発表しました。1990 年代から 2000 年代初頭にかけて、真鍋の研究グループは、結合大気海洋モデルを使用した影響力のある論文を発表し、大気の温室効果ガス濃度の変化に対する気候 (Stouffer et al., 1989; Manabe et al., 1991 & 1992)。彼らはまた、このモデルを過去の気候変動の研究に適用しました。これには、古気候記録で明らかな、いわゆる急激な気候変動の潜在的な原因としての北大西洋への淡水の流入の役割が含まれます (Manabe and Stouffer, 1995 & 2000)。詳細については、本 (Manabe and Broccoli, 2020) を参照してください。

⁴⁹ <https://www.weblio.jp/content/%E9%87%91%E6%98%9F%E6%8E%A2%E6%9F%BB>

1967年には旧ソ連のベネラ4号が放出したカプセルが金星大気に突入し、金星大気がほとんど二酸化炭素でできていることを観測しました。高度100kmより下には濃硫酸と思われる厚い雲の層があり、温度は500°C近くに達することもわかりました。

1970年、金星への軟着陸に成功したベネラ7号は、表面温度475°C、気圧90度というデータを地球に送ってきました。

⁵⁰ 大気中の二酸化炭素が地球表面温度に及ぼす影響について スヴァンテ・アレニウス

On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground Svante Arrhenius

Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276.

温度変化 (t) の結果として、W (引用者註: 「W」は水蒸気量をあらわす) も必ず変化します。土地と水の分布が変化しない限り、相対湿度はそれほど変化しないため (私の回顧録の表8を参照)、この量は一定のままであると想定して W の新しい値 W_1 が定まります。

⁵¹ [Wikipedia「アレニウス」\(英語版\)](#)

ARRhenius の CO₂ の吸収値と彼の結論は、1900年に2つの吸収バンドを持つ CO₂ の最初の近代的な赤外線吸収スペクトルを発表したクヌート・オンストロームの批判に会い、大気中のガスによる赤外線の吸収がすでに「飽和」していることを示す実験結果を発表しました。アレニウスは1901年(アナレン・デア・フィシク)に強く答え、批評を完全に却下した。

⁵² N.T.P.: 基準状態

温度 0°C、絶対圧 101.3kPa [abs]、相対湿度 0%における乾燥した空気の状態をいいます。

一般にノルマルと呼ばれ、N または N.T.P. と表示します。

実空気量 (m³) を基準状態空気量 (Nm³) に換算すると、温度と湿度の差だけ目減りするので注意が必要です。

1Nm³の質量=1.29kg

<https://www.ihl.co.jp/compressor/technical-info/grossary.html>

I H I 技術講座