

おねがい：以下の討論で論拠となるデータは、オリジナルカラー表示をそのまま伝えると同時に本誌の省スペース化をはかる目的から<http://www.jser.gr.jp/index.html> にPDFファイルをアップロードしておりますので、ご参照の上お読み下さい。

第1部 20世紀後半の気温上昇の原因は？

1. 導入討論

1.1 温暖化が止まった

赤祖父俊一 Shun-Ichi Akasofu

2008年10月5日

皆様

地球平均気温は1800～1850年頃から連続的に上昇してきた。その上昇率は $0.5^{\circ}\text{C}/100$ 年であった。このことは上昇は炭酸ガスにほとんど関係がないということである（炭酸ガスが急激に増加し始めたのは1946年からである。すなわち、炭酸ガス急増の100年前からほとんど同じ上昇率であるということである）。ところが、この上昇が2001年頃より止まっている。炭酸ガス放出は依然として上昇しているにもかかわらずである。国際気候変動パネル（IPCC）によれば気温は上昇し続けているはずであるので、気温上昇は大部分炭酸ガスの温室効果によるとする彼らの仮定が誤っている可能性が高い。IPCCのどのシミュレーションも温暖化が止まるという例はない。上昇が止まって降下ぎみということは「温室効果より大きい何か」が作用しているということである。この「何か」は自然変動しかない。

筆者は過去1000年からの自然の（すなわち人類が放出している炭酸ガスに無関係の）気候変動の研究から、今までの気温上昇の大部分は地球が1400年から1800年頃まで経験した「小氷河期」からの回復（すなわち温暖化、変化率= $0.5^{\circ}\text{C}/100$ 年）によるということを主張してきた。この回復に乗って約30～50年周期の自然変動（準周期変動と呼ぶ）もあり、この変動は1975年からポジティブであり、2000年頃ピークになっていた。この準周期変動がピークを過ぎてネガティブになり始めている。（IPCCは、この1975年からのポジティブの変化は大部分炭酸ガスにおける温室効果であるとした。）この準周期変動の変化率は $0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年以上であるので、短期間（50年程度）では、この影響が気温変化を大きくコントロールする。これが原因で温暖化が止まった可能性が高い。この準周期変動の振幅は北極圏で非常に顕著であるのでわかりやすい。

過去ではこの準周期変動は1910年から1940年頃までポジティブであり1940年から1975年までネガティブであった（炭酸ガスの放出量が1946年から急速に上昇したにもかかわらず）。IPCCは1910年から1940年までの自然変動を十分研究せず、特に1975年からの上昇を炭酸ガスによるとした。

したがって、2000年後も上昇を続けるはずであるにもかかわらず、気温上昇が止まってしまったということは（炭酸ガスの放出量は現在も増加しているにもかかわらず）、1975年からの上昇は自然変動（主として準周期変動）による可能性が高い。しかも準周期変動であるためネガティブになり得る。そのため2000年後温暖化が止まり、その後、ネガティブになりつつある可能性が高い。これを一時的なもの（ラニーニャ）とする説があるが、JPLの観測は準周期変動としている。（編集者注：この一文は校正段階の12月19日に追加）

ここで注意すべきことは、IPCCが2000年までの気温上昇が炭酸ガスによるとしたのは仮説にすぎないということである。彼らとその仮説をスーパー・コンピュータにより証明しようとするのはわかるが、いつの間にかこの仮説が「事実」にすり替えられてしまってきた。事実であるという観測的確証はない。このすり替えが地球温暖化問題を世界の三重大問題にし、将来の大災害が本当に起きるとして報道されてきたのである。

それでは太陽活動は、地球温暖化、およびこの温暖化が止まったことに関係するのであろうか。現在太陽は「冬眠中」である。黒点周期23はすでに2年ほど前に終わり、2007年から周期24が始まっているにもかかわらず、2008年1月に一つの黒点が太陽の北半球の高緯度に現れたにもかかわらず、その後消えてしまったようである（新しい黒点周期は黒点が高緯度に現れることで始まる）。現在光球面でははっきり見える黒点はない。最近、太陽風も過去50年最低のレベルという報告もある。周期24が遅れているだけのことかもしれないが、気になることである。

それでは過去に長期間太陽黒点が現れないことがあったであろうか。実は過去1650年頃から1700年の初期まで黒点がほとんど現れなかった期間があった。この期間を1900年の始めの頃活躍した英国の天文学者モンダーの名をとって「モンダー・ミニマム」と呼んでいる。

太陽黒点と光球面から光線によって運ばれるエネルギーには関係がある。黒点が黒く見えるのは、温度が低いため

である。したがって黒点が多いときはこのエネルギーは少ないと考えられていた。それを研究する人工衛星が1980年代に打ち上げられた。予想に反して、逆であった。太陽黒点の数が多き時期の方が、太陽が発するエネルギーは高いことがわかった。黒点が多い時の方が太陽の活動が活発であるということである。黒点周期で変化する量は全量の0.1パーセントほどであり、モンダー・ミニマムから現在までの増加は0.5パーセントほどであるとされている。モンダー・ミニマムは1400年頃より1800年頃まで続いた小氷河期中に起きたため、小氷河期は太陽の不活発が原因ではないかという説がある。

そして、その後太陽が活発になり始めた1800年頃からの地球温暖化、すなわち小氷河期からの回復である、とする論もある。しかし、太陽黒点の変化と気候変化の相関はあまりよくない。むしろ、周期が正確に11年ではなく、変わることが気候変動に関係しているという研究結果もある。

さらに、IPCCの計算によると、このエネルギー増加は温暖化にあまり寄与していないようである。もっともIPCCは「現在の温暖化は炭酸ガスによる」と主張したいので、太陽の影響を少なく見積もりたかったのかもしれないので、この計算をもう一度やり直した方がよいのではないかと思う。0.1~0.5パーセントと言っても膨大なエネルギー量のことである。

太陽からのエネルギーは光球面からのエネルギーだけで

はない。太陽風も光のエネルギーに比較すると極めて少ないが粒子がエネルギーを運び出している。太陽風は地磁気嵐を起こすことから地磁気嵐と気候変動の研究が100年近くも行われてきた。しかしこの間には簡単な相関関係が見られないため、結論が出ていない。地球磁気嵐は高さ100キロメートル以上の超高層の温度を高くするが、これが成層圏や対流圏まで伝わる可能性は極めて少ない。黒点の11年周期で紫外線が大きく変動し、電離層やオゾン層に影響を及ぼす。その変化が対流圏に及ぶかどうかはわかっていない。これからの研究が必要である。

一方、宇宙から降り注ぐ宇宙線が比較的低い雲を作る可能性があるらしい。地磁気嵐を起こす太陽風嵐は「磁気嵐」と呼ばれ、太陽系外から侵入する宇宙線を遮蔽する傾向があるので、太陽活動と気候が複雑に関係しているとする理論もある。

このように気候変動と太陽活動との関係はまだ結論に至っていない。地球の気候の変動と太陽活動の関係は今後も研究を強力に続ける必要がある。

地球温暖化の問題についてもっと詳しく知りたい方は、参考文献^{1), 2)}を参照されたい。

参考文献

- 1) 赤祖父俊一；正しく知る地球温暖化, (2008), 誠文堂新光社.
- 2) http://people.iarc.uaf.edu/~sakasofu/little_ice_age.php

1.2 温度上昇 = 自然変動 + 人為影響 + 観測誤差

伊藤公紀 Kiminori Itoh

2008年10月24日

皆様

「地球平均気温」の意味 まず、地球平均気温を問題にする意味を確認したいと思います。出発となるのは、言うまでもなく、人間にとって地表気温が重要だという事実です。しかし、これは「平均気温」に注目する理由にはなりません。それは、局所的な気温や降水量などの方が人間にとって重要だからです。では、「地球平均の地表気温」の意味はなんでしょうか。それは「温室効果ガスの影響の検出」です。CO₂などの温室効果ガスは寿命が長いので、地球レベルで均一になりやすいという特徴を持っていますから、地球平均を見ると影響が検出しやすくなります。気温に対する温室効果ガスの影響を、平均的な放射強制力で置き換えた議論をIPCCが採用しているということも、それを表しています。

一方、局所的な気温・降水量の変化への影響が大きい因子もあります。寿命が比較的短いエアロゾルや局所的な土地の利用などが代表です。火山噴火や太陽活動の影響も、

かなり空間的に不均一です。各因子についての評価としては「地球平均気温」への影響だけを見るのは不十分です。しかし、温室効果ガスの影響を「検出」するためなら、このような要因の影響を地球平均するのは良い方法です。これは、日々の潮汐の影響などを除いて得られる海面変化データの場合同じです。

気温変化—20世紀前半 さて、IPCC報告書は、20世紀前半の地球気温上昇を自然変動（火山と太陽）に、後半については温室効果ガスに帰属しました [資料1.2.1]。これは気候モデルの結果と観測を照らしての結論です。

まず、「20世紀前半は自然変動」についてはどうでしょうか。これには大きな仮定があります。太陽光度変化がかなり大きめ（100年規模で0.5%程度）に見積もられているということです [資料1.2.2]。太陽の光度変化についての議論には困難もありますが、かつて考えられていたほど、太陽光度変化は大きくない（約0.1%）ようです [資料1.2.3]。従って、20世紀前半の平均気温上昇を自然変動で

説明できた、というIPCCの結論は間違っています。「説明はできないが自然変動に違いない」というのが正直な言い方でしょう。

気温変化—20世紀後半 次に後半についてです。CO₂濃度の増加の程度から考えて、その気温への影響を観測できると期待されます。そこで、CO₂の影響を検出する際の精度や妨害因子について考えます。

まず観測誤差についてです。地球全体の観測による衛星データは1979年以降しかありません。そこで、世界各地で行われてきた地上・海上での地表観測が主になりますが、最近、地表気温観測の問題点が指摘されています。①地上2mでの観測値の妥当性と、②観測環境の劣化です。

①では、地上2m測定は気温変化を過大評価するという理論的検討結果があり、地表気温の上昇は割り引いて考えるべきだと指摘されています〔資料1.2.4〕。

②では、特にアメリカでの現場報告例が目を引きまます〔資料1.2.5〕。誤差が1℃以下の環境良好な観測点は10%程度しかありません。特に問題なのは、基準となるべき田舎観測点の劣化です。住居のそばに自動観測器を置いた結果、廃熱の影響や駐車場の影響などを受け、ミクロな都市化が進んでしまっています〔資料1.2.6〕。このため、系統的な温暖化傾向が出ていると疑われます。日本の観測点でも誤差が大きいそうです〔資料1.2.7〕。また、海上の測定にも誤差が指摘されていますが、陸データとの関係が興味深いところです〔資料1.2.8〕。

1.3 反対意見には誤解多く、整合性と定量性が欠如

江守正多 Seita Emori

2008年11月10日

赤祖父様、伊藤様、皆様

赤祖父様の主張はIPCCの結論とは相容れない仮説の提示とお見受けしました。一方、伊藤様の主張はIPCCの結論は確信度合が強すぎるという批判であり、結論を大きく覆すものではないとお見受けしました。赤祖父様はIPCCが太陽活動変動を過小評価したと（主観的に）主張されるのに対して、伊藤様は過大評価したと主張されており、お二人の意見は互いに相容れない部分が大きそうです。

次に、以下の2点についてはお二人のご意見に同意します。

自然変動の重要性 実際に起こっている気候変動の一部が自然起源であることはいうまでもありませんし、IPCCでも当然そのように認識されています。

観測環境の劣化 世界の地上観測地点の中で、周囲の環境の人為的な変化などにより長期的な気温変化の時系列が正確に観測できていない地点が少なからずあることは、おそらくそのとおりです。

次に自然変動と他の人為的要因についてです。空間的に均したとしても、自然変動は大きいようです。例えば20世紀前半を含む過去の気温変動は、北極振動の影響を受けているという指摘があります〔資料1.2.9〕。なお、筆者の検討によれば、北極振動は太陽磁気活動の影響を受けます〔資料1.2.10〕。この機構を解明して、気候モデルに入れることができれば、20世紀前半の気温変化を説明できるのではないかと考えています。同様に20世紀後半の気温上昇への寄与も評価できると思います。

大西洋数十年振動（AMO: Atlantic Multidecadal Oscillation）や太平洋十年規模振動（PDO: Pacific Decadal Oscillation）、大気・海洋の大きな振動も平均気温変化に効いているようです〔資料1.2.11〕。実際、ここ30年の気温変化はエルニーニョ・ラニーニャのパターンで大きく支配されています〔資料1.2.12〕。

地球平均しても気温への影響が大きくなる人為的要因として、エアロゾル、特にススを含む着色エアロゾルが重要です。IPCC第四報告書が出た後、着色エアロゾルの影響が想像以上に大きいと報告されました〔資料1.2.13〕。

CO₂の気温への影響は検出できたか 以上のような要因を考え合わせると、「検出した」と明確に言うのははばかられます。しかし、CO₂の寄与が10年で0.1℃程度の気温上昇であると考えすることは不自然ではないでしょう。ちなみに、これはモデルの気候感度の下限に近く、観測に基づく気候感度〔資料1.2.14〕とは対応しています。

さて、以上を前提としたうえで、お二人の主張はIPCCの主要な結論に対して何ら本質的な批判になっていないことを以下に示します。

温暖化は止まっていない 資料1.3.1に、1977年から2007年までの観測された世界平均気温の変化を示します。火山噴火やエルニーニョ、ラニーニャに対応した気温変化率の変動があるのがわかりますが、15年の変化率で見ると、近年に至るまでほとんど同じ率で気温上昇が続いています。2007～2008年もラニーニャによる寒冷化が生じましたが、ラニーニャの終息により現在では気温上昇傾向が回復してきています。

平均気温変化データの妥当性 観測環境の劣化は確かに問題ですが、世界平均気温の変化を計算する際には、周囲と大きく異なったり大きな不連続があるなど明らかに不自然な時系列を示すデータは除去あるいは補正されています（たとえばPeterson et al.¹⁾）。また、地表面積の7割は海洋

が占めますので、世界平均気温の変化には海上のデータの寄与が大きいです（ただし、後述しますが海上データにも一部補正が必要です）。以上から、観測環境の劣化が世界平均気温変化の推定に与える影響は限定的と考えられます。

自然変動の原因 自然変動といっても、「自然起源の強制力への応答」（太陽活動変動や火山噴火への応答）と「気候システムの自励的な内部変動」（エルニーニョ南方振動、北極振動など）を区別する必要があります。お二人の少なくとも本文の記述ではこの区別が明瞭ではありません（ただし、伊藤様がお考えのように前者が後者に影響を与えることは、ありえないことではないでしょう）。赤祖父様のお考えになっている自然変動がどちらにあたるか、そして前者であれば強制力は何か、後者であれば内部変動のメカニズムは何かを明確にして頂かなければ、科学的議論の質としてIPCCに遠く及ばないといわざるをえません。なぜなら、IPCCでは過去1000年程度の気温変動の原因を定量的に議論しており、当然その結果はIPCCの結論と矛盾しないからです [資料1.3.2]。

20世紀温暖化の原因 IPCCが20世紀後半以降の温暖化の大部分が人為起源である可能性が非常に高いと結論した主な根拠は、伊藤様の資料1.2.1に示されているとおり、自然起源強制力のみを与えた気候モデル計算では観測された気温上昇が再現できず、人為起源強制力も与えると再現できるということです。この際、内部変動の不確実性、強制力（特にエアロゾルの効果）の不確実性、気候モデル（気候感度）の不確実性が当然ありますが、人為起源強制力を与えた場合は不確実性の範囲内で観測と整合的であり、自然起源のみの場合には不確実性を考慮しても観測と整合的でない、という点が重要です。赤祖父様の説を含め、他の説にこのような定量的な整合性を客観的に議論できるものがありますでしょうか。

太陽活動変動については、1985年以降の変動の影響は観測された気温変化と逆相関です（Lockwood and Frohlich²⁾）、その振幅がどうであっても、近年の温暖化を説明できません [資料1.3.3]。また、温室効果ガスの増加以外を主因と主張されるならば、観測されている成層圏の寒冷化 [資料1.3.4] の原因を整合的に説明して頂く必

要があります。

なお、20世紀前半の温暖化についてはまだ不明な点があり、IPCCでも解明できたとはいいません。しかし、過去にさかのぼるほど気温変化も強制力もデータの不確実性が大きくなるので、20世紀前半の温暖化が解明されなければ後半の説明もできないとはいえません。たとえば、1940年代の気温ピークは海面水温の観測方法の変化による人為的なものであることが最近指摘されました (Thompson et al.³⁾)。この問題が補正されると、1940年代のピークは今まで考えられていたより小さくなり、気候モデルの結果に近づくはずで

観測に基づく気候感度 伊藤様は「観測に基づく気候感度は1℃程度である」と理解しておられるようですが、これは誤りです。観測に基づいていても気候感度3℃前後を最尤推定あるいは推定の中央値とする論文は多くあります [資料1.3.5]。逆に、気候感度1℃程度という論文の中には手法の誤りを指摘する多くの反論論文が出版され著者が値を上方修正したものがあります [資料1.3.6]。

謝辞

本稿の作成にあたり、国立極地研究所の川村賢二様、気象研究所の石原幸司様、吉村純様、国立環境研究所の野沢徹様、塩竈秀夫様、山本哲様、NGOの小倉正様、東京大学の山本政一郎様、米国海洋大気局のSusan Solomon様の協力を得ました。

引用文献

- 1) T. C. Peterson, R. Vose, R. Schmoyer and V. Razuvaev; Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data, *Int. J. Climatol.*, 18, (1998), 1169-1179.
- 2) M. Lockwood and C. Frohlich; Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature, *Proc. R. Soc. A.* (2007), doi:10.1098/rspa.2007.1880.
- 3) D. W. J. Thompson, J. J. Kennedy, J. M. Wallace and P. D. Jones; A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature, *Nature*, 453, (2008), 646-649.

2. 温度測定の不確かさ

2.1 IPCCは結論を急ぎすぎ—拙速は危険

江守様、皆様

まず確認ですが、現段階の私の立場はIPCCの議論への

伊藤公紀 Kiminori Itoh

2008年11月11日

本質的な反論ではなく、量を問うものです。それは、前項で書きましたように、平均気温を基にしてCO₂の影響を検

出すということに議論を限ったからです。環境政策に直結する地域・局所の気候変動については、IPCCの議論とは本質的に異なってきます（詳細は後の項）。

ここでは温度測定について議論します。気温の機器測定と、過去気温の代替指標、共に「？」です。まず機器測定に基づくGISS (Goddard Institute for Space Studies: NASAゴダード宇宙研究所) のデータ [江守資料1.3.1参照] について、IPCCは次のように主張しています。①地表気温測定の誤差は考慮されているので問題ない。そして、②地表気温に問題があっても70%は海なので問題ない。

地表気温 ①については、誤差の性質の評価が誤っています。不自然な気温の跳びなら機械的に取り除くことも可能ですが、都市化（特に田舎サイトのマイクロな都市化傾向）が漸増する場合には、明確な跳びが見出せず、地表気温の測定に温暖化の偽傾向が生まれます。これを除くには、個々のステーションの現状をチェックして評価するしかありません [伊藤資料1.2.5～7参照]。さもないと、一部の誤差しか除けません。その点、機械的な補正に頼っているNASAの手法よりも、一つ一つのサイトを自分の足と目でチェックしているA. Watts氏の調査の方が信頼できると考えるのは当然でしょう。アメリカでの彼の調査結果をまとめた図2.1.1をご覧ください。

対流圏気温 従って、詳しい検討に耐える気温測定データは、衛星で測定した対流圏下部気温が一番と思われます（期間は短い）。資料2.1.2に、全球気温変化、緯度帯毎の平均気温、また気温変化傾向の空間分布を示します。GISSデータは気温上昇傾向が強いようです。全球平均気温の上昇傾向には北半球の気温上昇の寄与が大きいです。GISSデータで顕著なシベリアの高温が、衛星データでは弱くなっています。GISSデータを過剰に信頼するのは危険です [図2.1.2.5とその説明も参照]。

海洋温度 海での温度測定で最も信頼が置けるのは、ほぼ世界中の海に3000個散布されたArgoフロートでしょう [資料2.1.3]。他のシステムでは、温度計の誤差が大きく、

海水温上昇のバイアスが生じていると報告されました [文献2.1.3-1]。温度が高めに出るXBT温度計のデータが使われる割合が増したためとされています。

Argoでも誤差は生じますが、補正の結果、海水温は2003年以降あまり変化せず、むしろ下がり気味と見られています [文献2.1.3-2, 図2.1.3-2]。これは衛星による対流圏気温測定の結果と対応しています。

過去気温 過去気温の推定値 [江守資料1.3.2参照] についてです。機器測定よりも困難が多いのは当然ですが、①代替指標の質の問題と、②代替指標と機器測定データをつなぐ部分の問題が大きいです。

①には注意が必要です。図2.1.4-1はM. Mann（ホッケースティック曲線で有名）が最近の論文で使用したデータです [文献2.1.4-1]。20世紀後半に急激に上がっているデータがいくつかあります。Mannらの解析に異論を唱えるS. McIntyreの指摘 [文献2.1.4-2] によれば、これは例えば湖底堆積物の人為的な攪乱（農業の影響など）によるものです [文献2.1.4-3]。年輪データにも異常なものが見られ [文献2.1.4-2]、これらがホッケースティック度に寄与していた可能性は高いと思います。

過去気候の代替指標として使えそうな最も新しい報告データは、中国中央部の万象洞の鍾乳石です [図2.1.4-3文献2.1.4-4]。スイスアルプス氷河との対応も良いですが、ここ20年の上昇傾向はありません。この資料では、太陽活動との相関がよいと報告されています。

②については、樹木年輪を含めて「気温代替指標」の多くは実際には降水量の指標のようです。実際、万象洞のデータはそうですし、図2.1.4-1の中ほどにあるDongge（中国・董哥洞の鍾乳石）もそうです。この場合、降水量データとつなぐ方が適切かも知れません。なお、万象洞データとスイスアルプス氷河の対応がよいことは、後者の消長の原因が降水量変化であることを示唆していて興味深いところです。

2.2 不確実性はもちろんあるが、不確実性を示唆する知見にも吟味が必要

江守正多 Seita Emori
2008年11月30日

伊藤様、皆様

伊藤様は世界平均気温についてIPCCの議論への本質的な批判をお持ちでないとのことですので、これ以上の詳細な議論は不要と思います。2.1で伊藤様が主張されたことに対する私の立場の確認と、若干の感想のみ記させていただきます。

観測データにはもちろん不確実性がある 伊藤様は1.3

の私の主張に基づき、IPCCはGISSのデータが問題無いと主張している、と整理しておられます。しかし、1.3をよく読んで頂ければわかるように、私もIPCCも「問題無い」と言っておられません。観測データには当然ながら定量的な不確実性があると思います。1.3で説明させて頂いたのは、観測環境の劣化があるからといって、それが直ちにIPCCの議論の本質的な問題を意味するわけではない、と

いうだけです。

不確かそうな知見を並べるだけではだめ ところで、一般に、IPCCに対する反論の中には、不確か性を感じさせる知見をたくさん並べたてて、なんとなくIPCCが間違っているような印象を与える手法をとるものがあるように思います。しかし、提示された個々の知見がIPCCの結論にどのような定性的、定量的な影響を与えるのかを吟味しなければ、科学的な議論とはいえません。失礼ながら伊藤様

の資料を例にしますと、たとえば図2.1.2-5は観測データの処理のミス指摘していますが、同様のデータセットを作っている機関はGISSだけではありませんし、これだけ明らかなミスであればこのデータがたとえば次のIPCC報告書に反映されるまでには外部から指摘されるまでもなく修正が施されていたでしょうから、明らかにIPCCの議論の不確か性とは関係ありません。

用語解説

ARGO

http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html

地球全体の海洋変動をリアルタイムで捉えることを目指した国際プロジェクト(2000年～)。目標は、水深2,000mから海面までの間を自動的に浮き沈みして水温・塩分等を測定できるアルゴフロートを世界中の海洋で約3,000台稼働させる。

アルベド (albedo)

一般に物体が入射エネルギーを反射する割合のこと。(0と1の範囲の値をとる。)ラテン語で「白さ」のこと。

エアロゾル (aerosol)

気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子の総称。太陽光を散乱・吸収したり、雲の凝結核として働く。

エルニーニョ (El Niño)

東太平洋の赤道付近で海水の温度が上昇する現象。ペルーの漁師達がクリスマスごろに海水温度が上がることをスペイン語で「男の子」(イエス・キリスト)と呼んだことを語源とする。

エルニーニョ・南方振動

(ENSO: El Niño Southern Oscillation)

大気と海洋が密接に結びついて起こる気候の内部変動 (internal variability) の1種。赤道東太平洋の海水温度の上昇下降と連動して、インドネシア付近と南太平洋東部で海面の気圧がシーソーのように変動する。テレコネクション (teleconnection, 長波長の大気波動によって遠く離れた場所での大気が同期して変動すること) により世界中の天候に影響を及ぼす。

気候モデル (Climate model)

長い時間スケールでの地球の気候を予測

する数値シミュレーションのモデル。地球全体の気候・海洋・陸・氷およびそれらの界面でのエネルギー・水等の輸送現象を考慮している。大循環モデル (GCM: General Circulation Model) ともいう。日々の天気予報のモデルも原理的には同じだが、現実的初期値を必ず用いる点が異なる。

十年規模・数十年規模振動

(decadal/multidecadal oscillation)

大気と海洋が結びついて起こる気候の内部変動 (internal variability) で、十年から数十年の周期をもつものの総称。太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO), 大西洋数十年振動 (Atlantic Multidecadal Oscillation: AMO) などが知られている。長波長の気候変動によって遠く離れた場所での大気が同期して変動する、テレコネクション・パターン (teleconnection pattern) を伴う。

小氷 (河) 期 (little ice age)

14世紀半ばから19世紀半ばにかけて続いた寒冷な期間。

ステファン・ボルツマンの法則

(Stefan-Boltzmann law)

黒体から放射される電磁波のエネルギーが絶対温度の4乗に比例する法則。なお、本法則に関連して、放射エネルギーが最大になる波長は黒体の温度に逆比例する (Wienの変位則: Wien's displacement law) ことが、温室効果の出発点として重要。

大気大循環 (General Circulation)

地球表面上のエネルギーバランスは、基本的には太陽からのエネルギー入射と宇宙への放射で決まるが、空間的・時間的なアンバランスがあるため、大気と海洋

が運動してエネルギーを輸送している。とりわけ、地球規模で東西・南北方向に種々の気流が巡っていることを大気大循環と呼ぶ。

太陽全放射 (TSI: Total Solar Irradiance)

太陽から放射される電磁波の総量。地球表面投影面積を基準にした太陽からの入射エネルギーとして太陽定数を定義し、約1.37 [kW/m²] とされる。

太陽風 (solar wind)

太陽から吹き出す極めて高温のプラズマ。

太陽フレア (solar flare)

太陽の大気中に発生する爆発現象であり、太陽黒点の付近で発生することが多い。

パラメタリゼーション

(parameterization)

例えば、雲などの生成・消滅過程は本来はミクロな現象であるが、気候モデルの時空間分解能では、そのようなことを取り込むことが困難であるので、マクロな物理量 (パラメーター) で、ミクロな現象の効果をモデル化すること。

放射強制力 (radiative forcing)

地球の気候に対して影響を及ぼす放射の大きさ。

ラニーニャ (La Niña)

エルニーニョと逆に東太平洋の赤道付近で海水の温度が低下する現象。スペイン語で「女の子」の意味。

3. 気候感度の大小

3.1 観測による気候感度の見積もりは、やはり小さめ

伊藤公紀 Kiminori Itoh

2008年12月1日

江守様，皆様

ご指摘の気候感度「測定」についてです。主要点は2つでした。①CO₂二倍時の気温変化 (ΔT_{2xCO_2}) として、例えばForster & Gregory [文献3.1.1] のようにピーク値が1.6°Cであったとしても、誤差範囲が高い値のほうに裾を引いているので、中央値は大きくなる。②3°Cが得られている「観測」もある。

まず①です。形式的にはその通りですが、Forster & Gregoryは通常の気候感度の逆数（フィードバックパラメーター、 Y ）を使って解析したので、ピーク値と中央値は同じです。したがって、通常の気候感度に直したときの分布の中央値に物理的な意味を持たせるのは困難であり、ピーク値で議論するのが妥当だと思います。なお、 Y を用いる理由は、各寄与成分に分けた議論がし易いからです。

②については、観測ではやはり低い気候感度が出るということを強調したいと思います。ここでは、最近出された比較的分かり易い解析例を紹介させていただきます。これは、Anthony Wattsのブログ（Watts Up With That）で紹介されたBill Illisの方法です [文献3.1.2]。Illisは、毎月の地球平均気温を、海洋の大規模な自然変動に基づいて再現することを試みました。具体的には、資料図3.1.1に示したように、CO₂濃度（の対数）、AMO（Atlantic Multidecadal Oscillation 大西洋数十年振動）指数、ENSO（El Niño Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動）指数を足し合わせ、回帰分析により地表気温や衛星測定気温を再構成します。CO₂濃度の寄与分から T_{2xCO_2} が求まります。モデルでは再現できないエルニーニョとAMO、しかも月毎の詳しいデータを使った解析だというのが味噌でしょう。

資料図3.1.2に文献3.1.2のデータの一部を示します。衛星測定データから得た熱帯の対流圏下部気温（南北緯度±20°）と、地表気温データについて、回帰モデルと比較した例です。回帰モデルは気温データを良く再現しており、両者の相関係数は0.9近くあります。これは、Illisのアイデアがうまくいっているということを示しています。特に、通常は必須と思われる火山や化石燃料燃焼からのエアロゾルを考えずに済んでいるというのは不思議ですが、結果が全てを物語ります。例えば、エアロゾルの冷却効果と加熱効果が打ち消しあっていると解釈できるのかもしれませんが。

なお、対流圏の熱帯データを使う意味を資料図3.1.3に示します。まず、南半球気温に比べて北半球気温の上昇傾

向が大きくなっており、人工的廃熱 [文献3.1.3] や土地利用 [文献3.1.4] の影響ではないかと指摘されていますので、それが除ける可能性があります。また、エルニーニョの影響が熱帯に出やすいことを考えると、自然変動の寄与の評価に便利と思われれます。

資料図3.1.3のような解析結果に基づき、 ΔT_{2xCO_2} が見積もられます。地表気温では、英国ハドレーセンターとGISS（Goddard Institute for Space Studies: NASAゴダード宇宙研究所）のデータから1.85°C、NCDC（National Climatic Data Center: 米国気象データセンター）のデータから1.6°C、RSS（Remote Sensing Systems: 米国、リモートセンシングシステムズ）の熱帯対流圏データからは0.6°Cとなります。この結果についてIllisは、地表気温データには廃熱などの影響や気温測定誤差（2.1参照）が含まれているので、衛星気温データの方が信頼できるのでは、としています。

他の研究者による同様な試みもあります。例えばエルニーニョ指数と火山由来のエアロゾルを使い、1°C以下の値の ΔT_{2xCO_2} が報告されています [文献3.1.5]。AMOを使うIllisの解析と比べてどちらがよいかは、まだ分かりません。

当然ながら、Illisの解析への批判もありません。まず、AMOやエルニーニョにCO₂の影響が入っているだろうからIllisの解析はCO₂の影響を過小評価しているかもしれません。しかし実際には、AMOもエルニーニョも、CO₂の増加に伴う漸増傾向は観測されていません。エルニーニョについては最近、観測でもモデルでも増えたのか減ったのか不明である、と報告されました [文献3.1.6]。AMOに関しても、赤祖父先生ご指摘のように、20世紀前半と末期に観測された海流の変化は大変似ていることから、CO₂の影響は少なそうです。

もう一つの批判は、海洋の熱慣性を考慮していないというものでしょう。これは、海洋の応答は20~30年と長いので、今は気温上昇が見られなくても後で現れてくる、というものです（注の平衡気温感度参照）。しかし、このような長い応答は気候モデルで顕著ですが、観測によれば気候システムの応答はせいぜい10年であり、またこれよりも短い応答の成分もかなり大きいようです [文献3.1.7]。このような場合、後から来る気温上昇は、あったとしても小さいでしょう。

このように、「観測」による気候感度の見積もりは、や

はりかなり小さな値を与えるようです。なお、気候感度に関する詳細は、拙著¹⁾を参照していただけますと幸いです。
注 江守様との個人的なe-mailのやり取りの中で指摘され、改めて気付いたことがあります。IPCC 第四報告書の図10.25の一番上で、気候感度の平衡値（何百年も経ったとき）と實際上重要な過渡値（CO₂二倍時）を比べていま

す [図3.1.4]。代表的なプロットを見ると、前者は2～5℃ですが、後者は1～3℃と小さいです。これは一般に報道されていないでしょう。

参考文献

- 1) 伊藤公紀；観測による気候感度の推定，現代化学，456，(2009)。

3.2 気候感度が小さいという証拠は弱い

江守正多 Seita Emori

2008年12月 8日

伊藤様，皆様

伊藤様は3.1で観測から推定される気候感度は小さいという議論を再度展開しておられますが、説得力に乏しいと思います。以下にその理由を述べます。

確率分布のどこに注目するか 伊藤様は、Forster and Gregory (2006) の場合は気候感度推定の確率分布の中央値ではなくピーク値に「物理的に意味がある」とお考えのようです。しかし、確率分布のどこに注目するかは、その確率的情報を基に意思決定する際の考え方（確率は低い被害は大きいという場合をどれくらい心配するかというようなりスク判断）に依存する問題ですので、物理的意味により決まるものではありません。したがって「ピーク値で議論するのが妥当」とはいえませんが、私が1.3で書いたのも「中央値で議論するのが妥当」という主張ではなく、「ピーク値だけ見るのではなく、たとえば中央値で見れば…」といったほどの意味です。

単に研究を例示するだけではだめ 一般に、IPCCに対する反論の中には、IPCCの結論に反する研究を一つ二つ例示して詳しく解説するという手法をとるものがあるようです。しかし、例示された少数の研究が、IPCCの結論を導いた多数の研究を凌駕する説得力を持つかどうかを吟味しなければ、科学的な議論とはいえません。なぜなら、IPCCの結論は、相反するものも含めた多数の論文を総合的に評価することにより導かれているからです。

伊藤様はIllisの研究を例示して、観測から推定される気候感度は小さいと再度結論していますが、IPCCが引用し

ている2℃以上の気候感度を観測から推定した多数の論文 [資料1.3.5] のどれよりもこの一つの研究が信頼できることを示さないかぎり、そんなことはいえないはずで。このIllisの研究は、エアロゾルの冷却効果を無視している、海洋熱吸収が考慮されていない、といった理由から、必然的に現実よりも低い気候感度を導くと思われます。また、特に低い気候感度を示唆する衛星の気温データを地表気温データよりも重用視されていますが、複数の衛星のデータをつなぐために衛星データにも不確実性があることを忘れるべきではないでしょう。さらにこの研究はまだ査読を経た論文として出版されていないようです。

平衡気候感度と過渡気候応答 二酸化炭素濃度を倍増に固定して十分に時間が経ったときの気温上昇量である「平衡気候感度」と、年1%複利で二酸化炭素濃度を増加させていって倍増した時点（70年後）での気温上昇量である「過渡気候応答」の二つをよく区別して理解する必要があります。伊藤様は、実用上は後者が重要で、その値は前者より小さいのに、それがよく知られていない、とおっしゃっています。しかし正しくは、どちらも実用上重要です。長期的に気温上昇を止める目標（気候安定化目標）を議論するためには、過渡気候応答ではなく、平衡気候感度で議論する必要があるためです。

謝辞

本稿の作成にあたり、気象研究所の石原幸司様、海洋研究開発機構のJames D. Annan様、国立環境研究所の塩竈秀夫様の協力を得ました。

4. 太陽活動の評価

4.1 太陽黒点数グラフの真偽を問う

江守正多 Seita Emori

2008年12月 3日

丸山様，皆様

他のところで太陽活動度の話題が出てきましたので、そ

れに関連して丸山様に一点質問させていただきます。丸山様の著書^{1) 2) 3)}に現れる太陽相対黒点数のグラフで、出典が不

明で、かつ近年のグラフ形状が信頼できる他のデータソースと比べて相当程度異なるものがあります [資料4.1.1].

丸山¹⁾ p.89の図8 (図4.1.1-1)を同じ丸山¹⁾ p.103の図13 (図4.1.1-2)と比較すると、前者では1990年頃のピークが1980年頃のピークを大きく上回り、2000年頃のピークも1980年頃のピークより高いです (図4.1.1-3).ところが、後者では1990年頃のピークは1980年頃のピークと同じくらいで、2000年頃のピークはさらに低くなっています.

国際標準であるベルギー王立天文台のデータと整合的なのは後者です (図4.1.1-3).

丸山様は、前者のグラフに基づいて、太陽活動度は近年低下し始めたばかりであると主張されているようですが、実際には1990年代から低下していたのではありませんか。その場合、1.3の資料1.3.3で述べたのと同様に、このことは1990年代以降の世界平均気温の上昇を太陽活動度の変動では説明できないことを意味します。

つまり、丸山様の主要なグラフのひとつは何らかの理由で間違っており、正しいグラフに基づくと丸山様の主張は根拠が危うくなるのではありませんか。

図4.1.1-1と類似のグラフは、丸山²⁾ p.45, p.67, 丸山³⁾ p.47にも現れます。これらのグラフの出典は明記されていないか、「Pang K. D et al 2002, IPCC, 2007」あるいは「Karslow, Harrison and Kirkby, Science, 298」といった、そのときにより異なる文献名が出典として示されています

が、これらが指すと思われる文献 (Pang and Yau⁴⁾, Carlsaw, et al.⁵⁾)を見てもこのグラフを見つけることはできませんでした。

このグラフの出典と、1990年頃からのグラフの形状が他のデータソースと大きく異なっている理由を、丸山様からご教示頂きますと幸いです。

謝辞

本稿の作成にあたり、気象研究所の吉村純様、東京大学の山本政一郎様、国立環境研究所の野沢徹様、塩竈秀夫様、山本哲様の協力を得ました。

引用文献

- 1) 丸山茂徳; 「地球温暖化」論に騙されるな!, 講談社, (2008) 189.
- 2) 丸山茂徳; 科学者の9割は「地球温暖化」CO₂犯人説はウソだと知っている, 宝島社, (2008), 191.
- 3) 丸山茂徳; 地球温暖化対策が日本を減ぼす, PHP研究所, (2008), 196.
- 4) K. D. Pang and K. K. Yau; Ancient observations link changes in Sun's brightness and Earth's climate, Eos Trans. AGU, 83, (2002), 481.
- 5) K. S. Carlsaw, R. G. Harrison and J. Kirkby; Cosmic rays, clouds, and climate, Science, 298, (2002), 1732-1737.



第2部 今後の予測は？

5. 数値シミュレーションの現状と能力

5.1 未来予測における数値シミュレーションの信頼性

草野完也 Kanya Kusano

2008年11月24日

皆様

数値シミュレーションによる予測モデルには大別して、第一原理的モデルと経験論的モデルがある。前者では普遍的な法則のみに従って予測計算が行われるのに対し、後者では現象に関係すると思われる経験的なデータをモデル化することによりこれを実現することを目指す。両者を厳密に区別することはできないが、一般に経験的予測は徐々に第一原理的予測に移行し、最終的に普遍化される道を進む。日食や月食などの天体力学現象の予測は、占星術から始まり、暦による経験的予測を経て、力学による第一原理精密計算の時代に達した。その結果、天体力学現象の予測性は「極めて高い」ことが、実際の予測を通して実証されている。

これに対して、現在のグローバル循環気候モデル（GCM: Global Climate Model）は未だ経験的モデルに多くを依存する。第一原理に従って解くにはあまりに複雑な物理化学生物過程が現象を支配しているためだ。それゆえ、数多くの人為的な最適化作業（パラメタリゼーションによるチューニング）無しには現象を再現できない。このため、計算精度のみならず、モデル構築者によるプロセスの選択と最適化作業の指針が計算結果を大きく作用する。

1. 科学的理解度と不確定性

モデルを構築する際、我々の「科学的理解度」が低ければ、そのプロセスをモデルに取り込むことはできない。しかし、留意すべきは自然現象におけるプロセスの「重要性」は我々の「科学的理解度」とは無関係にすでに決まっているということだ。IPCC第4次評価報告書では、いくつかの潜在的には重要と思われるプロセスが、科学的理解度が非常に低いと判定されたうえで、評価から外されている¹⁾。未来予測の不確定性を正確に見積もるためには、こうしたプロセスの潜在的な重要さと「科学的理解度の低さに起因する不確定性」を掛け合わせた量を、最終的な予測の不確定性として加えるべきである。

例えば、太陽黒点活動に起因する銀河宇宙線変調の雲に対する効果や²⁾、太陽フレアに伴う高エネルギープロトンによる高層大気でのNO_x生成とオゾンの減少などの影響³⁾については、その理解が十分で無いためモデルに全く取り

込まれていない。また、過去の太陽全放射（TSI: Total Solar Irradiance）の再現についても不確定性が大きく、TSI変動やスペクトル変化に対する気候感度の見積もりも十分ではない。

2. エアロゾルと雲のモデル化の限界

エアロゾルの間接効果は最も大きな不確定性を生むプロセスとして広く認識されているが、そもそも自然起源（特に海洋性）エアロゾルについてはその起源すらよく理解できていない。生物活動によるジメチルサルファイド（DMS: CH₃SCH₃）の生成は海洋上の硫酸エアロゾルの主な供給源と考えられるが、DMSから雲核に至る過程の理解は不十分である。最近の微物理モデルが予想するように、宇宙線電離過程がそのプロセスの変動に数%の影響を与えることは十分考えられる⁴⁾。

さらにエアロゾルの種類や量の変化に対する気候システムの感度も良く理解されていない。エアロゾル数の増加は、ある場合には降水量を増加させるが、多すぎると水滴粒径が減少し降水量が減る結果、雲の寿命が延び、アルベドを大きく変える。こうした雲微物理過程に起因したフィードバックが古気候変動に極めて重大な影響を及ぼした可能性も最近指摘されている⁵⁾。しかし、エアロゾルに起因した雲の性質と寿命の変化に関する考察は、第4次評価報告書では十分に実施されていない。

3. 予測可能性の評価方法

第4次評価報告書においては異なるモデルの相互比較と過去のデータの再現によってモデルの信頼性を評価している。しかし、最も効果的で説得力のある予測可能性の評価がこれまでになされていない。それは、かつて古代ギリシャのタレスが日食を予測したように、未来予測そのものを実際にやってみることだ。また、短中期モデルや領域モデルでされているような、未来から過去への情報フィードバックを完全に遮断したhindcast実験（モデルによる過去の再現）による長期気候予測の評価も定量的になされていない。

4. 結論：人為起源温暖化説は未だ仮説段階

これまでの議論をまとめると、日食を極めて正確に予測することができる天体力学の第一原理モデルに比べ、気候

モデルはまだ経験的手法に頼る試行錯誤の段階にある。未だ予測に成功した事例もない。その意味で、人為起源温室効果ガスによって未来の気候変動が支配され、今後単調に気温が増加し続ける可能性が高いとするIPCC第4次評価報告書の結論は実証されていない一つの仮説と捉えるべきであり、自然変動に支配される可能性も併せて未来予測を考察する必要がある。

引用文献

1) IPCC Fourth Assessment Report, Working Group I

Report “The Physical Science Basis” Table 2.11.

2) H.Svensmark; Phys. Rev. Lett. 81, (1998) 5027.

3) B.C.Thomas, C.H.Jackman, and A.L.Melott; Geophys. Res. Lett. 34 (2007), 6810.

4) J. Kazil and E.R. Lovejoy; J. Geophys. Res. (2004), 109, D19206.

5) L. R. Kump and D. Pollard; Science 320 (2008), 5873, 195.

5.2 予測モデルの信頼性は過小評価、未知の要因は過大評価されている

江守正多 Seita Emori

2008年11月27日

草野様、皆様

草野様の主張は一般論としては予測モデルの限界を的確に指摘されているようにお見受けしました。しかし、草野様の個別の考察は残念ながら不十分な認識に基づいており、予測の信頼性を過小評価されています。以下に、草野様の3点の考察に対応させてその根拠を具体的に述べます。

理解水準が低い過程が主因とは考えにくい まず、IPCCの報告書を注意深く読んで頂ければ、理解水準が低い過程を排除しているわけではないことがおわかり頂けると思います [資料5.2.1]。それらの不確実性が評価されていないのは、理解水準の低さゆえに不確実性が定量化できないためです。IPCCは出版された論文を基にしますので、材料となる論文が出ていなければ、不確実性を見積もることはできません。

次に、理解水準が低い過程の潜在的な重要性についてですが、過去の気候変動の要因推定の結果から、それらが近年の気候変動の主因とは考えにくいです。1.3で述べたように、20世紀後半の観測された気温上昇は、人為および自然起源の既知の要因と、不確実性の範囲内で定量的に整合します。もしも観測された変化が既知の要因で説明不可能であれば、われわれは見落とされている要因を血眼になって探す必要がありますが、現在の状況はそうではないということです。加えて、温室効果ガスの増加による放射強制力の科学的な不確実性は小さいです。もしも近年の温暖化の主因が温室効果ガスの増加以外にあるとした場合、温室効果ガスの増加による放射強制力はいったいどこにいてしまうのでしょうか。

以上から、理解水準の低い過程についての研究を進めることはもちろん重要ですが、その結果として現在の理解が大きく覆されるとは考えにくいです。

エアロゾル・雲過程の理解は進んでいる 自然起源エアロゾルおよび雲過程の理解水準に関する草野様の記述は誤

解を招くものです。IPCC WG1 AR4第7章をご覧になればおわかりになるとおり、各種エアロゾルの地上観測、衛星観測、素過程研究、モデル研究は相当進んでいます。草野様は触れられていませんが、自然起源エアロゾルの大部分は海塩と土壌性ダストです。海上では大部分が海塩とDMS起源の硫酸エアロゾルで、どちらも雲の凝結核になります。エアロゾルが雲に与える影響の研究も素過程レベルではかなり進んでいます [資料5.2.2]。草野様は、「宇宙線がエアロゾルを通じて雲に与える影響が十分に検討されていない」ことのみをもって、「エアロゾル・雲過程の理解は不十分である」とおっしゃっているようですが、その言い方はこの分野全体の理解水準を的確に表していません。

一方、宇宙線がエアロゾルを通じて雲に与える影響を草野様は過大評価されているように思います。1.3で述べたように1985年以降の気温上昇を宇宙線の変化は説明できませんし、宇宙線が雲を通じて地球の太陽光反射率を変えることにより気温を変化させるのであれば、対流圏が温暖化する一方で成層圏が寒冷化することを十分に説明できません。さらに最近、宇宙線量が短期的に大きく低下する現象 (Forbush decrease) に対する雲の応答に整合的な関係がみられないことが示されました (Kristjansson et al.¹⁾)。このようにAR4以降の研究も含めて、宇宙線量の変動がもたらす雲の変動が近年の温暖化の主因になり得ないことの理解が進んできています。

気候モデルによる予測が真に検証された例 草野様は真の意味で気候モデルの予測を検証した例をご存じないようですので、お示ししたいと思います。有名な例は、NASAのJames Hansenが1988年に発表した予測 (Hansen et al.²⁾) の、その後の観測データによる検証です [資料5.2.3]。この例については、結果に合うようにモデルを作ったという批判が当てはまらないことは明らかです。この図の評価は見る人の立場によりさまざまですが、われわれの議論の文

脈上は「気候モデルは観測された気温上昇を20年前に予測できた」と評価すべきだと思います。Hansenの3つのシナリオのどれが現実に近いのか、それが現実の気温上昇量のデータとよく合っているかといった議論は、ここでは重要ではありません。なぜなら、当時のモデルには海洋の変化もエアロゾルの効果も極めて限定的にしか入っていませんので、定量的に現実と合うべき筋合いはないからです。ここで強調されるべきことは、温室効果ガスの増加に応答する気候変化が20年前から少なくとも定性的には適切にモデル化されており、それが近年の気候変化の主因であることがその後20年の実際の気候変化により支持されたということです。このことから考えれば、現実には近年の気候変化の主因が温室効果ガスの増加である限り、またその過程が適切にモデル化されている限り、それ以外のモデルの詳細（たとえば雲の表現）を観測データに合うようにチューニングしようがしなかりうが、現実と大きく異なる解は出てこないでしょう。

もっとも、定量的な気温上昇量の予測や地域的な予測はモデルの詳細に依存しますし、最新のモデルは近年の観測データを見ながら作っていることは事実です。これらを踏

まえた上で予測をどのように信頼すべきかについては、拙著³⁾で解説を試みましたので、ご一読頂ければ幸いです。

謝辞

本稿の作成にあたり、九州大学の竹村俊彦様、国立環境研究所の塩竈秀夫様、海洋研究開発機構のJames D. Annan様の協力を得ました。

引用文献

- 1) J. E. Kristjansson, C. W. Stjern, F. Stordal, A. M. Fjaraa, G. Myhre and K. Jonasson; Cosmic rays, CCN and clouds - a reassessment using MODIS data. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, (2008), 13265-13299.
- 2) J. Hansen, I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy, G. Russell and P. Stone; Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. J. Geophys. Res., 93, (1988), 9341-9364.

参考文献

- 3) 江守正多; 地球温暖化の予測は「正しい」か?, 化学同人, (2008).

5.3 人為起源温暖化説は未だ仮説：実証の為には様々な変動機構の解明こそ重要

草野完也 Kanya Kusano

2008年12月11日

江守様、皆様

ご返答ありがとうございます。近年における気候学の発展がめざましいものである点において、私の認識は江守様のご主張と重なります。しかし、様々な科学の歴史と比較し客観的かつ俯瞰的に判断するとき、気候変動の予測は未だ経験的手法に頼るものであり、人為起源温暖化説が実証された段階にあるとは考えられません。

理解水準が低い過程を過小評価してよいか 江守様のご意見を私なりに解釈するならば、理解水準の低い過程を取えてモデルに含めなくても20世紀の温暖化に似た振る舞いをするようにモデルをチューニングできるので、理解水準の低い過程が主因となることは考え難いということになります。しかし、このことは仮説を実証したことにはなりません。

広く知られているように気候モデルの解の収束性は高くありません。二酸化炭素濃度倍加における平衡温度感度実験という理想的条件においてすら、IPCC報告書の結果によれば上昇気温は2度から4.5度の幅をもっています。さらに、江守様のご著書¹⁾によれば、この不定性は過去30年間に膨大なデータが蓄積されているにも関わらず、ほとんど減少していません。これは経験的なパラメタリゼーショ

ンに基づくチューニングが本質的に大きな不確定性と（たとえ正しくないデータに対しても解をチューニングし得る柔軟さとしての）可塑性を持っていることを意味しています。

公表されている観測値によれば平均気温は1970年から30年間に0.4度ほど上昇し、二酸化炭素濃度は44ppmほど増加したようです。もし、この温度上昇のほとんどが二酸化炭素による温室効果の結果であり、温度上昇と二酸化炭素濃度が比例関係にあると仮定すると、370ppmの二酸化炭素濃度が倍加したときに3.4度気温上昇することになります。この値は複雑な気候モデルに基づいて得られた結果（2～4.5度）の平均値（3.3度）とほぼ一致します。この一致は気候モデルが過去のデータに基づいて構築されているので、ある意味当然の結果ですが、同時に現在の気候モデルの結論が1970年以降の温度上昇のほとんどが二酸化炭素温室効果の結果であるとする「仮説」に強く依存していることを意味しています。

例えば20世紀後半に活発化した太陽黒点活動による未知の気候変動要素が温暖化に寄与していたとしましょう。気候モデルの可塑性はこれを柔軟に取り込むことができるでしょうが、その結果求められる気候感度は今の予測より小さな値となります。すなわち、気候感度を経験的に求める

限り、温室効果による気候感度は温室効果以外の気候影響に関する我々の知見に強く依存せざるを得ません。このことが未知の過程を過小評価してはいけないことの最大の理由です。温室効果の影響を正確に見積もるためには、温室効果以外の理解が温室効果の理解と同じほど重要であり、これを過小評価することは真の科学的理解にとって危険です。

エアロゾル・雲過程の理解は進んでいる 私が「宇宙線がエアロゾルを通じて雲に与える影響が十分に検討されていない」ことのみをもって、「エアロゾル・雲過程の理解は不十分である」と主張しているとのこと批判は全般的外れで、心外でもあります。論点5.1を予断なく読み直されれば私が宇宙線のみならずプロトンイベントやTSI再現の不定性、自然起源エアロゾルの未理解、エアロゾル間接効果のモデル化の不十分さなど様々な問題を指摘していることをご理解いただけるはずです。

エアロゾル・雲の理解が進んでいることを私は否定しません。しかし、研究が進展していることと、信頼できる予測が可能であることを区別せずに語るべきではありません。現在の雲モデル（少なくともバルクパラメタリゼーション）は本質的に経験的なモデルであり、その予測能力は非常に制限されています。コロラド州立大学のRandall氏らが“Breaking the Cloud Parameterization Deadlock”と題する論文²⁾で解説したように、信頼性の高い雲モデルを構築するためにはより第1原理的な新しい手法の開発が必要であり、それらは未だ開発途上にあると考えるべきです。

気候モデルによる予測は真に検証されたか Hansen et al. (1988) の業績を否定するつもりは全くありませんが、その結果をもって予測が真に検証されたかと江守様が判断されることには多少の驚きを覚えます。前記したとおり気候モデルにはチューニングの可塑性があり、予測値はその不確定性と共に認識されるべきです。さらに、複数のシナリオを使って計算が行われたとき、いずれかの結果がその後の変動傾向と一致したとしても不思議ではありません。極端な例なので不適切かもしれませんが、多数の宝くじ購買者の中で当選した人が未来を予測する能力を持っていたわけではありません。また、Hansenらの結果は1960年代以降の温暖化傾向を用いてチューニングされたモデルですから、気温変動傾向が変わらない短期間の観測と比較してい

るだけでは、十分な検証はできないでしょう。

予測を如何に検証すべきか では、短期間に経験的モデルの成否を確かめるためには何をすべきでしょう。そのためには、チューニングに使った観測量とは独立の観測に基づいた検証が必要です。平衡温度 T_s は太陽放射 I_{Ts} と黒体放射のバランスより、ステファン・ボルツマンの法則に基づいて

$$4\sigma T_s^4 = I_{Ts}(1 - A)/(1 - g)$$

から決まります。ここで、 A は地球のアルベド、 g は規格された温室効果、 σ はステファン・ボルツマン定数です。この式は温度 T_s の決定において太陽放射 I_{Ts} とアルベド A の変動が温室効果 g と同じ次数で寄与することを意味しています。気候モデルにおいて観測値である T_s はチューニングのために、 I_{Ts} は入力データとして使われており、その結果として温室効果 g とアルベド A を見積もることができます。そこで、 A を観測できれば、チューニングされた気温とは独立にモデルの妥当性を検証できるはずです。ただし、アルベドの観測は容易ではなく、月の地球照³⁾と衛星データ⁴⁾から推定された値が一致しないなどの問題が残っているようです。検証は残された課題です。

以上の通り、人為起源温室効果は未だ実証されていない仮説と捉えるべきです。これを検証するためには二酸化炭素以外の気候変動効果を等しく解明する必要があります。気候学の枠組みを超えた学際的アプローチこそ重要であると私は考えています。

引用文献

- 1) 江守正多；地球温暖化の予測は「正しい」か？，化学同人，(2008)。
- 2) D. Randall, M. Khairoutdinov, A. Arakawa, W. Grabowski; Bulletin of the American Meteorological Society, 84 (2003), 11, 1547-1564.
- 3) E. Palle, P. R. Goode, P. Montanes-Rodriguez, S.E.Koonin; Changes in Earth's Reflectance over the Past Two Decades, Science, 304 (2004) 5675, 1299-1301.
- 4) B.A. Wielicki, T. Wong, N. Loeb, P. Minnis, K Priestley; Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite, Science, 308 (2005), 5723, 825.

5.4 宇宙線説等の理解により「実証」がもたらされるとは思えない

江守正多 Seita Emori
2008年12月14日

草野様、皆様

草野様のおっしゃるのが、将来予測の定量的な精度向上

のためには未解明の過程の理解が重要である、という意味であれば同意できます。学際的に様々な観点から研究する

ことにも賛成です。しかし、未解明の過程が理解されなければ定性的な予測（21世紀に地球が温暖化するか寒冷化するか）さえ信じられないとおっしゃるならば、草野様と私の間にはやはり根本的な考え方の違いがあるようです。まずその違いについて述べ、その後個別の点への応答を記します。

われわれの理解は「実証」に至るのか 草野様は、人為起源温暖化説は仮説であり、「実証」されるまではそれに基づく予測は信じないとおっしゃっているようです。では、もしも宇宙線説をはじめとするいくつかの過程が理解されたとしたら、複数のモデルの結果がびたりと一致したり、チューニングが必要なくなったり、hindcastがびたりと観測と一致して、われわれの理解は「実証」されるに至るとお考えなのでしょうか。私にはそんなことがそう簡単に起こるとはとても思えません。気候モデルの不確実性の原因はもっと複雑だからです。むしろ、草野様の論法に従えば、たとえ宇宙線説等が理解されたとしても、他にも未知の過程が働いている可能性が排除できない以上、やはり予測は信じられないという不可知論的な状況に陥るだけではないでしょうか。

地球のような複雑なシステムを対象とする場合、われわれの科学が100%満足な理解に到達することは原理的にありえません。このとき、現状の理解を疑い未解明の過程を調べることはもちろん科学として重要ですが、同時に、現状の理解がどれだけ本質に至っているかを評価することも重要な科学の営みです。20～21世紀における世界平均気温の変化傾向の議論に関する限り、温室効果ガスを主因とする現在の理解は本質に至っていると評価できます。根拠は1.3や5.2で述べたとおりです。

チューニングは万能ではない 草野様は、気候モデルのチューニングについてまだ誤解しておられるようです。前掲の拙著を予断なくお読み頂ければわかるはずですが、気候モデルが物理法則と観測データに拘束されている以上、チューニングによってあらゆる解を柔軟に作りだすことはできません。

草野様の二酸化炭素濃度変化と気温変化の比例関係による説明は意味が量りかねますが、もちろん気候モデル研究者はそんな理由で予測を妥当と考えているわけではありません。

5.5 相互理解のために

江守様、皆様

ご回答ありがとうございます。サンフランシスコに今到

エアロゾル・雲過程の理解度 草野様が引用されているRandall et al. (2002) が論じているのは、熱帯の季節内変動が再現できるかどうかなどの高い精度の話であって、たとえば「宇宙線の効果も含む第一原理に基づく雲モデルを開発しなければ、21世紀に地球が温暖化するか寒冷化するかさえ予測できない」といった極端な話に都合よく一般化されることを著者のRandallは望んでいません（本人に確認済み）。

また、5.1の草野様の主張の私による読解が不十分であったようで失礼しました。しかし、プロトンイベント云々はエアロゾル・雲とは別の節の記述であること、自然起源および間接効果については理解の不十分さに関する草野様の記述が不的確であると私が評価していることから、改めて読んでも私の読解が的外れであったとは思いませんでした。

Hansenの予測の意味 Hansenの予測を私が持ち出したのは、モデル開発・予測実施の際には決して知りえなかったデータ（つまり予測実施後の実際の気候変化）による予測結果の検証という意味において、草野様が5.1で要求されていたものに合致すると思ったからです。そして、くりかえしますが、この結果は定性的にはチューニングの詳細に依存しません。期間が短いので不十分であると評価さるるはご勝手ですが、もしも1988年の時点で太陽活動主因説に基づいて予測を行っていたら、その短い期間の温暖化傾向でさえ予測できていなかった可能性があるのではないのでしょうか。

地球規模エネルギー収支による検証 草野様のご提案の詳細はよく理解できていませんが、地球規模のエネルギー収支によりモデルを検証することは確かに重要と思います。しかし、ご提案の方法ではアルbedo変化と温室効果変化が正しければその理由が間違っていないにもかかわらず、検証の決め手にはならないように思います。

また、3.1、3.2で伊藤様と私が議論している観測データによる気候感度の推定方法の中には、まさに地球規模エネルギー収支に基づくものがあります。ただし、放射強制力の推定値を必要としますので、草野様のご提案とは異なりますが。

謝辞

本稿の作成にあたり、気象研究所の吉村純様、コロラド州立大学のDavid Randall様の協力を得ました。

草野完也 Kanya Kusano
2008年12月15日

着し、メールを拜見いたしました。江守様の返答に対して対応する時間はもう残されていないと思いますが、いくぶ

んまだ誤解があるようなので、簡単に回答いたします。相互の理解の改善に役立てば幸いです。

1. 仮説と実証について あらゆる過程を100%理解することは不可能であるというお話はその通りと思いますが、少なくとも提案されている仮説を検証することは科学的作業としてやらなければならないと考えます。もちろん宇宙線のみこだわらるわけではありませんが、例えば宇宙線仮説はIPCC報告書にも取り上げられたプロセスの一つなわけですから、その検証を二酸化炭素説と共に進めることは意味ある取組であると考えます。

2. チューニングはオールマイティではない もちろん、我々の知っている物理法則に従いチューニングをするわけ

ですから、いくらなんでもチューニングで何でもできると私が考えているわけではありません。しかし、多くの不確定性があることは確かなので、その範囲でチューニングの「可塑性」が生まれると考えています。

3. 宇宙線と雲 繰り返しますが、私は雲モデルに関して宇宙線のみこだわっているわけではありません。従来のバルクパラメタリゼーションのような経験的な雲モデルそのものの不確定性を指摘したかったのであり、Randall氏の論文に関して宇宙線問題とからめて議論しようとする意図はありません。その点を読み取っていただけなかったことは残念です。

5.6 人為起源温暖化説そのものの妥当性の議論と定量的な精度の議論を明確に区別すべき

江守正多 Seita Emori

2008年12月16日

草野様、皆様

草野様が5.3で宇宙線説を意味していないところまで、宇宙線説についての主張と私が決めつけて5.4で応答していたとのことで、その点は失礼いたしました。しかし、宇宙線説を含むか含まないかに関わらず、草野様の主張される未解明の過程、チューニングの可塑性、雲モデルの不確実性等が「人為起源温暖化説そのものの妥当性を過小評価するもの」であれば、その主張の根拠を注意深く評価し、問題点があれば指摘させて頂く必要があります。一方で、もしも草野様の主張が「定量的な予測精度や不確実性評価

を論じるもの」であれば、どの点についても全く同意します。

草野様の5.3の主張が少なくとも前者を含むことはタイトルから明らかでした。実際はおそらく両者を含んでいたのかもしれませんが、その区別は明確にはわかりませんでした。この場合、両者が一緒くたになることで読者の誤解を招く可能性に配慮すると、問題点の指摘を中心に対応せざるをえませんでしたので、その点をご理解ください。

両者を明確に区別することにより、相互理解に向けた議論をより効果的かつ建設的に進めることができると思います。そのような議論を惜しむつもりはありません。

5.7 定量的な予測精度や不確実性評価を論じることの重要性

草野完也 Kanya Kusano

2008年12月17日

江守様、皆様

ご回答ありがとうございます。江守様のご意見が、議論の結果としてどのような結論に至るかを恐れることなく、定量的な予測精度や不確実性を論じることの重要性をご指摘されたとすれば、私も全く同意いたします。人為起源温

暖化説の妥当性と不確定性の議論はその結果として与えられるべきものであり、過程と結果を明確に切り分けて議論すべきであると私も考えます。御主張をそうした意味に解釈させていただく限りにおいて、江守様のご意見に賛成です。

5.8 相互理解に至ったかもしれません

江守正多 Seita Emori

2008年12月17日

草野様、皆様

おっしゃるように解釈して下さって結構です。私はIPCCの結論に対して決して教条的になっているわけではありません。結論ありきではなく、虚心坦懐に未解明な過

程・不確実な過程の研究を進めていくのが科学的な姿勢だと思います。現時点で得られている知見の総体に誤解なく照らしてIPCCの結論の妥当性を評価して頂けるならば、草野様と私の考え方の間に本質的な違いはなさそうです。

6. 今後の地域・局所気候を支配する因子

6.1 地域的・局所的な気候変動の観点からはCO₂は小物 — しかし大物の理解は不十分

伊藤公紀 Kiminori Itoh

2008年12月3日

皆様

ここでは、我々の暮らしに直結する地域気候・局所気候の変動についてどう考えるかについて議論したいと思います。我々は地球平均温度よりも日々や季節の気温変動を敏感に感じますし、社会に直接影響する日照りや大雪といった現象は地域・局所気候の範疇だからです。

これまで議論しましたように、確かにIPCCは、地球平均気温を使ってCO₂の影響を「検出」することに、ある程度成功したと思います。地球平均気温を使う方法は、CO₂の影響検出という目的と一致していただけでなく、現在の気候モデルの能力からも妥当な方法でした。もちろん、それでも現在・将来の気温上昇について過大評価しているとは思いません。

では、CO₂の影響が検出できて話は終わったのでしょうか。IPCC第四報告書の後で語られた、「温暖化の科学は決着が着いた」という意見は、まさにそれを主張しています。しかし「検出」だけなら、前述したAMOやエルニーニョの影響を足し合わせるという簡単な方法でもできるでしょう（論点2.6）。では、何のために大規模なモデルを走らせ続け、また観測網を発達させて多量のデータを採り続けるのでしょうか。

それは、地球気候の詳しい理解が不十分だからに他なりません。もし十分なら研究は必要なくなります。資料図6.1.1にその事情を示します。CO₂を初めとする温室効果ガスは、気候変動の一因ではありますが、他にも多数の要因があります（論点1.2参照）。人為的な要因としては、着色エアロゾルや土地利用が重要とされます。また、自然要因としては太陽や火山、海洋・大気の大きな変動が重要です。図6.1.2に、文献6.1.1（論点3.1の参考論文3.1.6と同じ）の結果を示しておきます。最近125年間についての観測とモデルとの比較検討を行っていますが、結局、エルニーニョが増えたとも減ったとも言えないと結論されており、海洋の自然変動の複雑さが分かります。

これらの要因とCO₂との大きな違いの一つは、空間的・時間的な不均一性です。CO₂は寿命が長いために地球規模で均一になり易い結果、地球平均気温の議論にうまく乗った訳です。一方、例えば人為的に放出されるエアロゾルは、図6.1.3のように空間的な分布が大変不均一な上、季節変動なども大きくなっています（資料1.2.13も参照）。これでは、モデル計算も観測も難しいのは当然です。

火山からのエアロゾルの影響を調べた例が興味深いので、ここに挙げます。図6.1.4は、1991年フィリピンのパナツボ火山が噴火した後に観測された地表気温（冬）の変化です（文献6.1.2）。気温変化の不均一な空間分布が分かります。不均一さの幅は5～6℃もあるようです。日本付近は冬の気温が1℃程度上がっています。しかし東北大学名誉教授・近藤純正氏によれば、パナツボ山噴火の際、東北地方の夏の気温は2℃も下がり、平成の凶作をもたらしました（図6.1.5、文献6.1.3）。また、この気温低下は、大きな火山噴火の際に必ずといってよいほど観測されると結論されています。このように、不均一な影響を持つ因子では、平均値よりも変化幅の方が重要です。

論点1.2で示した太陽の影響に関連して、北極振動の影響も地域性が高い要因の一つです。図6.1.6には、冬の北極振動指数と冬の地表気温の相関地図を示しました。北極振動が強いときには、ヨーロッパやシベリアで帯状に気温が高くなるのに対して、その南北の領域では逆に気温が低くなっています。

土地利用も空間的な不均一性が大きい要因の一つです。図6.1.7、6.1.8には、Pielkeグループの地域気候モデルによる、米国フロリダでの植生変化に基づいた気温変化・降水量変化の見積もりを示します（文献6.1.4）。大規模な農地開発による植生変化が、地域・局所の気候に大きな影響を与えることが分かります。

植物と気候との相互作用は複雑です。CO₂についての議論では、対流圏の上部に置かれた熱源として単純化する方法（放射強制力）を考えれば十分でした。しかし例えば、植物の蒸散作用で気温が下がる作用は、非放射的なものです。しかも、植物の個性や土地の性状、局所的な気象等に依存します。これは、これからの気候の理解には必須な考え方だとされていますが（文献6.1.5）、IPCC第四報告書でも不十分な扱いしかされていません。

このように、地域・局所の気候に大きな影響を及ぼす変動原因の理解は足りません。図6.1.1に模式的に示しましたように、これらの要因は様々な形で気候に作用しますし、またその空間・時間スケールも様々です。この影響を、グローバルな気候モデルとローカルな気候モデルの組み合わせによって解析・予想できるようになるというのが理想でしょうが、少なくとも現状では不可能です（文献6.1.5）。

これまで見たように、CO₂は、特に地域・局所の気候変

動要因としては「小物」だと言わざるを得ません。平均気温による温暖化の議論はかなり落ち着いたかも知れませんが、これからは「大物」の追及を進める必要があります。

その意味では、むしろ議論が始まったところなのではないでしょうか。

6.2 近未来の地域・局所規模では確かに温室効果ガス以外にも重要

江守正多 Seita Emori

2008年12月8日

伊藤様、皆様

伊藤様は6.1で地域・局所規模の気候変動にはCO₂以外の要因も重要で、その説明は不十分と述べられましたが、これに基本的に同意します。個別の表現では同意しかねる個所が若干あるため、以下ではその指摘をまず行い、続いて温室効果ガス以外の要因も考慮した研究の展望を簡単に述べます。

「検出」は世界平均気温以外でも可能 伊藤様は、CO₂の影響を検出するためには世界平均気温に注目する必要がありますと述べておられるようですが、IPCC WG1 AR4の9章にありますように、各大陸規模の平均気温上昇や世界規模の高温日増加・低温日減少にも人為要因（CO₂はその主要な一部）が検出されています。AR4以降の研究では、陸上降水量の南北分布の変化（Zhang et al.¹⁾）や北極・南極域の平均気温上昇（Gillett et al.²⁾）にも人為要因が検出されています。

長期的には温室効果ガスは「大物」 地域・局所規模の気候変動に温室効果ガス以外の要因が同程度かそれ以上に重要かもしれないのは、特に今後20～30年程度の近未来についていえることです。それ以降の長期の気候変化を考える場合、温室効果ガスが「大物」であることはいうまでもないでしょう（近未来でも「小物」は言い過ぎと思います）。

諸要因を含めた予測研究が展開中 以上の点を除けば、伊藤様の指摘はおっしゃるとおりと思います。近未来の具体的な適応策策定などに有用な情報を提供するため、エアロゾル・土地利用変化等のより詳細な考慮や内部変動の予測を含めた、特に地域規模の予測の高度化が必要であるという認識は高まっています。

これに応えるため、IPCC AR5に向けた国際的な研究戦略（Moss et al.³⁾）の下では、炭素性を含めた各種エアロゾルおよび大気汚染前駆物質の地域的に詳細な排出量分布、ならびに地域的に詳細な土地利用変化のシナリオを与えて気候モデル実験を行う計画が推進されています。また、

近未来の温暖化と一緒に十年規模の内部変動を予測する研究（たとえばSmith et al.⁴⁾）もAR5に向けて本格的に展開する予定です。これらの結果を用いた地域気候モデル研究、影響・適応・脆弱性研究もできるかぎり速やかに行われるように計画が練られています。もちろんこれらによりすべてが解明されるわけではありませんが、伊藤様が指摘された点は今まさに世界中の温暖化予測研究者が取り組んでいる課題といえます。

引用文献

- 1) X. Zhang, F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. A. Stott and T. Nozawa; Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends, *Nature*, 448, (2007), 461-465.
- 2) N. P. Gillett, D. A. Stone, P. A. Stott, T. Nozawa, A. Y. Karpechko, G. C. Hegerl, M. F. Wehner and P. D. Jones; Attribution of polar warming to human influence, *Nature Geoscience* 1, (2008), 750-754.
- 3) R. Moss, M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O' Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele and M. Zurek; Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. (2008), 132, IPCC. (<http://www.ipcc.ch/meetings/session28/doc8.pdf>)
- 4) D. M. Smith, S. Cusack, A. W. Colman, C. K. Folland, G. R. Harris and J. M. Murphy; Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model, *Science*, 317, (2007), 796-799.