



Topic

地球温暖化にともなって成層圏の大気循環は強まっているのか

青木 周司 (東北大学大学院理学研究科)

地球温暖化が顕在化しつつある現在、それに関連すると思われるさまざまな現象の変化が身近に起きている。我々は、地球温暖化の主要因となっている大気中の二酸化炭素 (CO_2) 濃度の観測を30年あまり続けてきたが、今回は CO_2 を大気のトレーサーとして見た場合、最近の大気循環の変化について何が言えるかという視点で話題を提供する。ご承知のように、大気中における CO_2 濃度は産業革命以来増加し続けているが、これは人間活動に伴う化石燃料消費や森林破壊によって引き起こされたものである。したがって、 CO_2 の放出源は地表にあり、そこから放出された CO_2 が大気循環によって対流圏のみならず成層圏やそれ以上にまで運ばれ、大気全体の濃度が上昇している。一方、 CO_2 は大気と海洋間および大気と陸上生物圏間で大量にやりとりされているが、地球規模で現在の収支を見積もれば、海洋、陸上生物圏とも吸収源になっていると評価されている。このように CO_2 は放出源や吸収源が地表にあり、大気中では化学変化せず、濃度が一方的に増加し続けているため、大気循環のトレーサーとしてたいへん優れた気体であると言える。ただし、大気中における CO_2 の放出源や吸収源は皆無かと言えば、そうではなく、例えば中間圏では光分解により一酸化炭素 (CO) に分解される。しかし、そのようにして生成された CO は酸素原子と結合して再び CO_2 に戻るため、この過程は実質的な吸収源とはなっていない。また、大気中ではメタン (CH_4) が光化学反応で分解されて最終

的に CO_2 を生成するが、大気中の CH_4 濃度は CO_2 濃度と比べて0.5%以下なので、厳密な議論を必要とする場合以外は無視できる。

さて、我々は航空機や船舶および地上基地を利用した対流圏における CO_2 濃度の観測を1978年以来継続している。図1に航空機観測によって得られた日本上空の高度別 CO_2 濃度の変化を示す。この図によれば、 CO_2 濃度は対流圏のどの高度でも季節変化を伴いながら経年変化していることが分かる。季節変化に注目すれば、振幅は対流圏の最下層が最も大きく、4月に極大値、8月に極小値を示しており、高度が上がるとともに振幅は減少し、位相も少しずつ遅れている。これだけを見ても CO_2 濃度の季節変化を引き起こしている原因が地表にあり (CO_2 の炭素同位体を用いた解析から、季節変化の原因は陸上生物圏の呼吸と光合成にあることが分かっている)、その影響が大気上層に伝播していることがよく分かる。また、 CO_2 濃度の経年変化はどの高度でもほぼ同じになっており、1979年から2004年までの平均増加率は1.58ppm/yrであった。一方、大気球を用いた成層圏の CO_2 濃度観測は1985年からほぼ毎年実施している。図2に大気球観測によって得られた成層圏における CO_2 の鉛直濃度プロファイルとその経年変化を示す (Aoki et al., 2003)。この図によれば、成層圏の CO_2 濃度は圏界面から25kmまでは高度とともに低下し、それ以上の高度でほぼ一定になること、さらにそのプロファイルが全体的に年々高

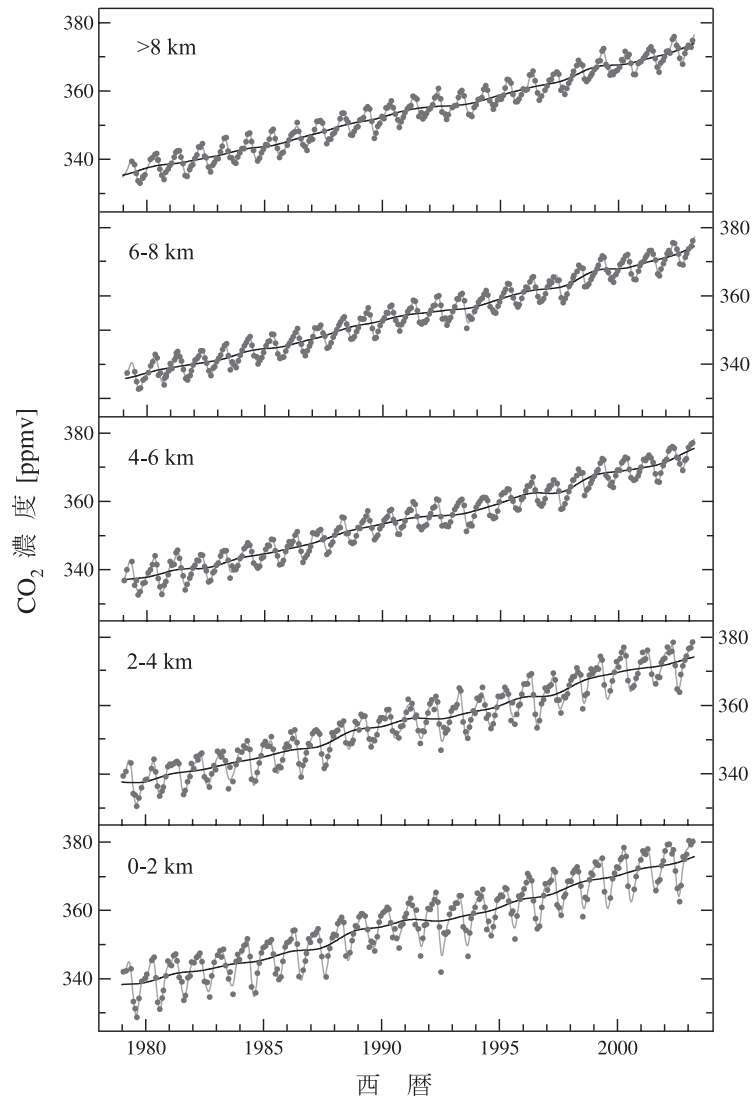


図1 航空機観測によって得られた日本上空の高度別CO₂濃度の変化

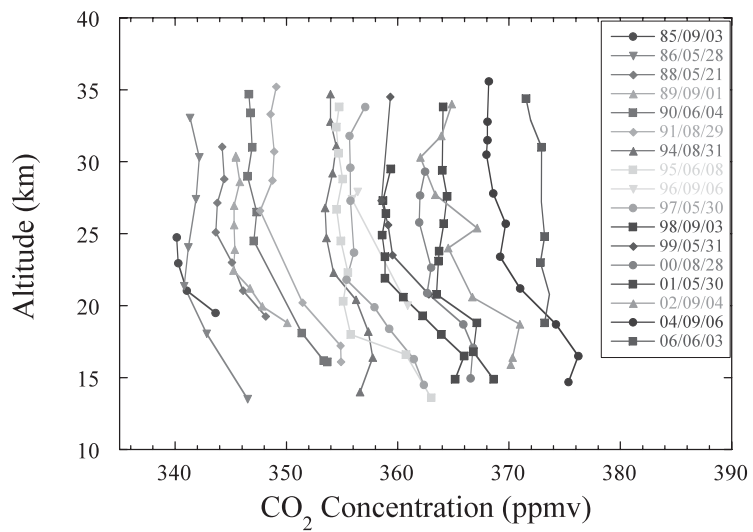


図2 大気球観測によって得られた日本上空の成層圏におけるCO₂濃度の分布とその経年変化

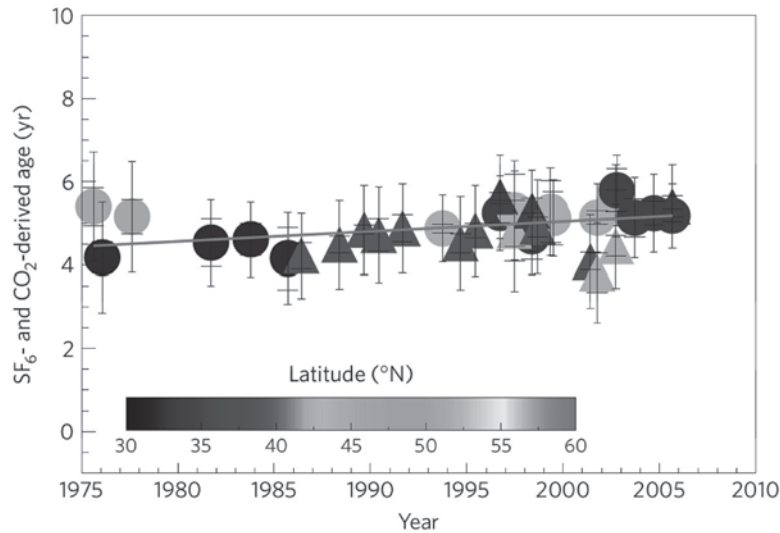


図3 北半球中緯度の成層圏における高度24-35 kmの間で平均した空気年代の推移

濃度方向にシフトしていることが分かる。上述したように、成層圏におけるこのような濃度増加は対流圏の濃度増加が大気の流れ拡散によって伝搬したものである。したがって、対流圏最上部の平均的なCO₂濃度と成層圏の25km以上の高度のCO₂濃度の差を対流圏の濃度増加率で割った値は、空気塊が対流圏から成層圏に注入されてから成層圏中層に達するまでの平均経過時間、すなわち平均年代を示すことになる。数値モデルを用いた研究では、地球温暖化に伴って対流圏から成層圏に移流する空気量が増大し、成層圏のBrewer-Dobson循環が活性化することにより、この年代が短くなるという予測がいくつか発表され話題となった（例えばAustin and Li, 2006）。我々はドイツや米国の研究者と国際共同研究を進め、観測面からこの予測の正否を検討した。図3はこの研究によって初めて明らかにされた北半球中緯度から高緯度にかけての成層圏大気の平均年代の1975年から2005年までの30年間の変化を示す（Engel et al., 2008）。なお、この研究では年代を求めるために、大気中で安定であり、かつ人為的な放出のために濃度が単調に増加し続けているCO₂とSF₆が用いられている。図によれば、北半球成層圏中層の過去30年間における空気の平均年代は4.9 (±0.5) 年であり、平均変化率は10年当たり+0.24 (±0.22) 年であった。変化率が正であることは平均年代が増加していることを意味しているが、慎重な誤差評価をもとに統計的に検定した結果、その有意性は確実とまでは断定できず、むしろこの30年間に平均年代は変化していないという結論に至った。このため、地球温

暖化に伴って成層圏の平均年代は短くなるという数値モデルを用いた研究による予測は、我々の観測に基づいた研究によって95%の確からしきで否定できることが判明した。したがって、現在研究に用いられている大気大循環モデルは少なくとも成層圏の循環に関しては見直す必要があると言える。

参考文献

- Aoki, S., Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Morimoto, S., Hashida, G., Yamanouchi, T., Kawamura, K. and Honda, H., Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctic, *Tellus*, 55B, 178-186, 2003.
- Austin, J. and Feng Li, On the relationship between the strength of the Brewer-Dobson circulation and the age of stratospheric air, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17807, doi: 10.1029/2006GRL026867, 2006.
- Engel, A., Mobius, T., Bonisch, H., Schmidt, U., Heinz, R., Levin, I., Atlas, E., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Moore, F., Hurst, D., Elkins, J., Schauffler, S., Andrews, A. and Boering, K., Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years, *Nature Geoscience*, 2, 28-31, doi:10.1038/ngeo388, 2009.



温暖化予測モデルで、なぜ、 100年後の気候予測ができるのか

池田友紀子（仙台管区気象台）

3月まで予報課で週間天気予報を担当していました。3日先から7日先までの天気予報です。予報作業に入り、7日先の資料が、日本付近を発達した低気圧が通過する予想であるときには、「明日、数値予報モデルの計算の初期値が新しくなれば、低気圧はこれほど発達しないかもしれない。通過が次の日にずれるかもしれない。もしかすると影も形もなくなるかもしれない……」と悩みます。翌日の資料で日替わりしていると悩みは深まります。今日や明日の天気予報なら、今日は西日本に低気圧があって雨が降っているから、明日は低気圧が関東に進んで雨が降って、半日遅れて東北地方が雨で……とスムーズに考えられます。しかし、週間天気予報となると、今日、カスピ海あたりにある気圧の谷が、7日後には東経130度に達して、今日は影も形もない低気圧が日本の西のどこかで発生して、日本に進んでくるのを予測しようというのですから、かなり難しい感じがします。参考に外国の数値予報モデルをインターネットでみると、予想が日本のものとかかなり違っていることもよくあります。毎日見ていると国別のモデルのクセが見えて面白いものです。

ですから、「これから1週間先の天気だって結構外れるし、2週間先は予報できないといわれているのに、100年後が予測できるわけがない」と言われると、つい、そうですね、と言ってしまいそうになります。本当のところどうなのでしょう。

天気の変化は物理法則に支配された物理現象であり、方程式を時間積分することで、将来の天気を予測できるとしたのは物理学者のリチャードソンです。20世紀の初めのことでした。現代の気候モデルは、この考え方を大きく発展させたものです。コンピュータに運動量保存の法則やエネルギー保存の法則、質量保存の法則、静力学平衡の式などを教えてやります。これらを時間変化の式にして、連立方程式とします。そして地球を小さな格子に区切り、格子毎に式を解いていきます。微小時間 Δt だけ先の時間の状態を計算し、これをもとにさらに Δt だけ先の時間の状態を計算し、また Δt だけ先……と計算していくことで、どんどん未来を計算できるというわけです。明日や明後日の天気予報、週間天気予報も、基本的に同じ仕組みです。現在の大気と海洋の状態を初期値として与え、例えば、10分先、10分先と次々と時間積分していくと、コンピュータの性能にもよりますが、2、3ヶ月かかって100年後の状態まで計算が進みます。ところが、1週間先の天気ですえ必ずしもこの計算のとおりにはなりません。なぜでしょうか。

毎日の天気は雨が降ったり晴れたり、暑い日があるかと思うと急に寒くなったり、不規則に変動しています。エルニーニョ現象のように数ヶ月単位から数年、あるいは数十年単位の変動も知られていて、これらが不規則に起こっています。このような不規則な変動は気象のもつカオス性に関連しており、ある程度より先の天気は予測できないと言われていました。カオスの例として1960年代に気象学者のエドワード・ローレンツが発見した、「バタフライ効果」がよく言われます。「どこかで蝶が羽ばたくと、別の場所の気象パターンを変化させる」と表現して、時間変化する量を表す方程式を解いていくと、初期条件におけるほんのわずかな違いが、どんどん増幅して全く異なる答えが出てくることを示しました。もっとも、小さな変動は大気の摩擦でつぶれてしまい、蝶が羽ばたいたからといって、無秩序が引き起こされるわけではないことは明らかです。

カオス的に変動する気象は、原理的にどこまで予報が可能なのかという問題は、現在でも解明されていません。現在の数値モデルは完全ではないため、改良すれば予報の限界はもっと伸びる可能性もないとはいえません。

ところで、100年後の温室効果ガスの増加による気候の変化を予測することは、数日先の気象を予測することとは全く違っています。数日先の予測では、いつ、どこで雨が降るのか、それとも晴れるのかということが問題となりますが、これは先に述べたように初期条件のわずかな違いで大きく変わってしまいます。そのため、できるだけ正確な初期条件から計算を始める必要があります。一方で100年後の予測では、毎日の天気ではなく、気象の平均的な状態である気候を予測します。気候は、例えば30年間の平均気温、平均降水量、大雨の頻度や地域ごとのばらつき、暑い日や寒い日の出現しやすさといったものです。

このような気候は、地球が太陽からのエネルギーを受け取り、大気や海洋の様々な過程や相互作用などを通じてバランスした結果（平衡状態）であると考えられます。100年後の予測は、このような平衡状態を予測することになりますが、それには、地球が受け取るエネルギーがどうなるかが重要です。地球が受け取るエネルギーに影響を与えるもの（「強制力」という言い方をすることがあります）としては、太陽活動などの自然起源のものや温室効果ガスなどの人為起源のものがあります。100年後の地球温暖化の予測では、これらの要因の変化に対して地球がどう反応するか、その結果どんな平衡状態になるかということ予測することになります。こ

の点が、日々の天気予報と温暖化予測の大きな違いです。

気候モデルで時間積分を100年先まで行えば、モデルの中では日々、天気が変わり、四季がめぐり、エルニーニョやラニーニャが起こり、大気や海洋はカオス的に不規則に変動しています。好きな日時で計算結果を書き出してみると、例えば2096年8月某日は、台風が太平洋高気圧の縁辺を回って日本沿岸まで北上してくる様子が見えます。ところが、別の初期値から出発して計算すると、同じ8月某日でも台風が発生しないこともあります。初期値が違えば台風や低気圧がある地域を通過する日やその進路はまったく異なったものになりますが、ある地域の数十年平均の降水量や気温といった気候（長期間平均した気象）でみれば、地球が受け取るエネルギーに反応した結果として、初期値に関わらずある平衡状態（ただし厳密に“平衡”に達するにはずっと長い時間がかかります）になり、それに応じた気候が計算されることになります。

人から聞いた例えです。やかんをガスコンロにかけて火をつけます。沸いてくると泡がぽこぽこ出始めます。この泡が低気圧や高気圧といった気象に相当します。いっどこに泡が出るかは予測できません。でも、この火力で10分たったらお湯が沸騰するだろうというのは予測できます。この火力が「強制力」で、お湯の温度が気候だというものです。なるほどと思いました。

温暖化の予測の場合は、天気予報とは違ってずっと先の状態を計算できるということはなんとなくわかりました。それでは、気候モデルはどのくらい信頼できるものなのでしょうか。

モデルが信頼できる根拠の第一は、モデルは現在の平均的な気候を再現できるということです。モデルに現在の気候を計算させ、地上の気温や降水量の分布、赤外放射、風、海水温、海流、水蒸気量といった平均的な気候について、現在の観測結果と比較すると、かなり実際の状況を再現できています。またモデルは昼夜の変化や季節変化だけでなく低気圧の経路や発達の様子、モンスーンの進行、エルニーニョ、半球の環状モードといった、さまざまな気候変動のパターンも再現できています。これらのことから、モデルの方程式やパラメータ化は現実的な計算をしており、将来の気候変化のシミュレーションでも信用できるのではないかと期待できます。

第二に、過去に実際に起こった気候変化をモデルが再現できることも、モデルが信頼できる根拠です。過去に気候を変える何かの原因があって、気候がそれに応答した様子をモデルが再現できれば、将来、温室効果ガスが増加したとき気候がどう応答するか予測できそうです。モデルは6000年前の縄文時代の高温期や、21000年前の最終氷期を大体再現できています。また20世紀における世界平均気温の変動に関しては、温室効果ガスの濃度の変化、火山活動、太陽活動などの要因を与えることで、かなり高い精度で観測結果と一致しています（図1）。

でも、モデルが過去や現在の気候が再現できるからと

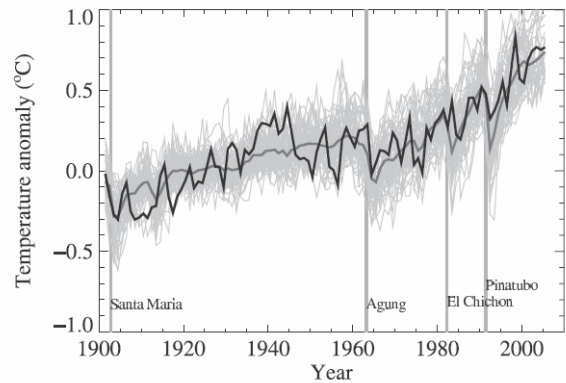


図1 観測（黒線）及び、14 の気候モデルを用いて、自然起源と人為起源の放射強制力とともに考慮した58のシミュレーションから得られた、20世紀の地表面付近の平均気温（赤細線）。すべての実験の平均を太い赤線で表す。気温は、1901～1950年の平均からの偏差で表している。縦の灰色の線は、火山の大きな噴火時期を示す。（図は IPCC 第四次レポート第一作業部会報告 FAO8.1 図1を転載）

いって、同じように将来も予測できるのでしょうか。

世界各国では複数のグループが気候モデルを開発しているので、複数のモデルで共通した結果が見出されているかどうかは、将来予測の信頼性についての重要な目安になります。すべてのモデルが間違っている可能性もないとはいえませんが、モデルは物理の基本的な方程式で組み立てられているので、パラメータ化という仮定が入っているにせよ、意見が一致していれば、将来の気候予測の信頼性が上がります。世界には温暖化予測を行う気候モデルを開発している研究グループが20くらいあるようですが、IPCCの第4次評価報告書で扱われた世界中のモデル結果は、温室効果ガスの増加によって、地球の平均気温が上昇している（幅はあるにせよ）という結果で一致しています（アメリカのPCMDI（The Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison）という研究プログラムのデータベースには気候モデルの計算結果が公開され、だれでも見られるようになっています）。また第4次評価報告書では複数のモデルの予測の不確かさも統計的に計算され、気温が何°C上昇するか予測の幅も求められています。

コンピュータの計算能力の向上や炭素循環や生態系や大気化学を組み込んだ地球システムモデルの開発など、温暖化予測研究は進歩を続けています。2013年から14年に発行が予定されているIPCC第5次評価報告書で、どのような新しい知見がまとめられるのか、とても楽しみにしています。

参考資料

- IPCC, 2007: 第四次レポート第一作業部会報告
- 江守, 2008: 地球温暖化の予測は「正しい」か?
- 住, 2008: 気候変動がわかる気象学

東北支部気象講演会報告

安田宏明（仙台管区気象台）

安田 今年度の東北支部気象講演会を、宮城県の後援を得て10月31日(土)に宮城県大崎市で開催した。「温暖化時代のヤマセはどうなる？」をテーマに、東北大学大学院環境科学研究科 境田清隆教授と、宮城県古川農業試験場作物保護部 大場淳司研究員による講演が行われた。

最初に、境田教授が「ヤマセ型冷夏の出現傾向」と題して講演し、高緯度の寒気が北西から南下してくるような冷夏は減ってきているが、オホーツク海高気圧から吹き出す北東風（ヤマセ）による冷夏は最近も減っていないこと、気象庁気象研究所が地域気候モデルを用いて仙



台管区気象台と共同で行った研究では、2081～2100年は7月下旬から8月上旬にかけてのヤマセによる低温が現在に比べて増加する傾向が示されていることなどを説明し、地球温暖化が顕在化してもヤマセは決して過去のものにはならず、多少姿を変えて、私たちの暮らしに影響を及ぼし続けるのではないかと結んだ。

次に、大場研究員が「ヤマセの出現傾向と水稲への影響 ～冷害と病害～」と題して講演を行い、まず、水稲の収量を大きく減少させる冷害について、遅延型冷害や障害型冷害など、いくつかの分類別に説明した。次に、ヤマセの出現はイネいもち病の多発も招いてきたとして、いもち病について、その種類や発生形態、防除について説明し、今後は、気象情報や気象予報を根拠の一つとしたいもち病の発生予察が重要になるなどと説明した。さらに平成15年の稲作期間の気象といもち病の解析結果を紹介した。

講演会は、約40名の方が聴講された。聴講者数は、それほど多くなかったものの、各講演に対して活発な質問が出され、農業と気象の関係や温暖化に対する関心の高さが伺われた。

平成21年度日本気象学会東北支部気象研究会

平成21年度の日本気象学会東北支部気象研究会を12月11日に仙台管区気象台会議室で開催した。東北大学、弘前大学、農研機構 東北農業研究センター、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所、気象台から11件の発表があった。当日は曇天で、夕方には雨が降り出すあいにくの空模様となったが約50名が参加し盛況であった。なお、今回初めて日本気象予報士会東北支部にも開催をご案内し参加していただいた。

参加者の所属や専門が多様なこともあって、様々なテーマの発表があり、また、いろいろな視点からの質問が出され、活発な研究会となった。

【日本気象学会東北支部事務局】

