

地球温暖化現象の理解における諸問題

- IPCC TAR GROUP-1 における議論 -

中島映至

東京大学気候システム研究センター

teruyuki@ccsr.u-tokyo.ac.jp

<http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/docs/Nakajima/radiation&climate.html>

1. はじめに

地球温暖化現象が社会的に認められるようになってしばらくになる。そのおおざっぱな理解は、大気中に残留した人間活動起源の種々の温室効果ガスが、地表と地表近くから発生する暖かい赤外線の宇宙空間への散逸を妨げるために、地表付近の温度が上昇することで説明される。ちょうど、炬燵にブランケットを掛けたような状態を想像すれば良い。このブランケットは太陽放射に対しては透明で、太陽光が地球表面を暖めるのを妨げない。つまり、炬燵の中の熱源はとまり続けているわけで、ブランケットの中は暖かくなる。

しかし、現実の地球はあまりにも大きく、また、その表面の大気はきわめて薄いために、いったい、この地球が何度か暖められるかと言う定量的な問題を解くには、かなりデリケートな考察が必要になる。まず、大気に乗っている海への熱伝導をはっきりさせなければならない。熱伝導が大きければ、温暖化の割合は小さい。大気中の雲の影響はもっとわかりにくい。温暖化した大気の中で低層雲が増えれば、日傘のように太陽光を地表面から遮り地表付近を冷やす。逆に巻雲のような上層雲が増えれば、温室効果ガスのような温室効果を引き起こすために、温暖化は加速する。最近では、人間が排出する大気汚染ガスから生成される大気微粒子(エアロゾル)が、地球の反射率を増やしたり、雲を変調させたりするために、温暖化を抑制する効果の重要性が指摘され始めた。温室効果ガスに関して、残留時間の評価に問題が残っている。我々は、大気中に排出された炭酸ガスのうち、約2割がどこに吸収されたのかを理解していない、疑いがもたれている植物圏への吸収量の評価は現在でもおおきなばらつきを持っている。工業活動の発展とともに温室効果ガスの種類が増えているのも、頭の痛い問題である。強いオゾン減少と温暖化を引き起こすフロンガスの抑制のために、代替フロンが開発されているが、そのグローバル・ウォーミング・ポテンシャルの評価にもいくつかの議論がある。

このように詳細に立ち入ってくると、問題の複雑さに気が付く。それと同時に、これらの問題を解くためには、大気化学的な知識がますます必要になってきたことがわかる。IPCC TAR 報告の執筆委員会グループ1の作業においても、この辺にひとつの力点があり、大気化学的研究のサーベイとアセスメントに大きなエネルギーを割いている。

2. 温室効果ガス

図1に、さまざまな要因による、過去150年間の大気放射のエネルギー収支の変調の大きさを示す。図によると、温室効果ガスはこの150年間に約 $+2.4\text{W}/\text{m}^2$ の変動を引き起こして、それが全球平均として地球温暖化を引き起こす主要因になっている。図に示した2つの評価のばらつきは少なく、過去の気候変動において地球大気に加えられた温室効果ガスによる温室効果の大きさの評価は定まっていると思われる。しかし、将来予測においては、温室効果ガスの大気変動が、排出シナリオのみでなく、温度、光環境、地表面状態の変化による二次的なフィードバック機構に依存するために、大きな不確定を伴っている。この問題はグループ1のみに収まるものではなく、他グループとの共同作業によって明

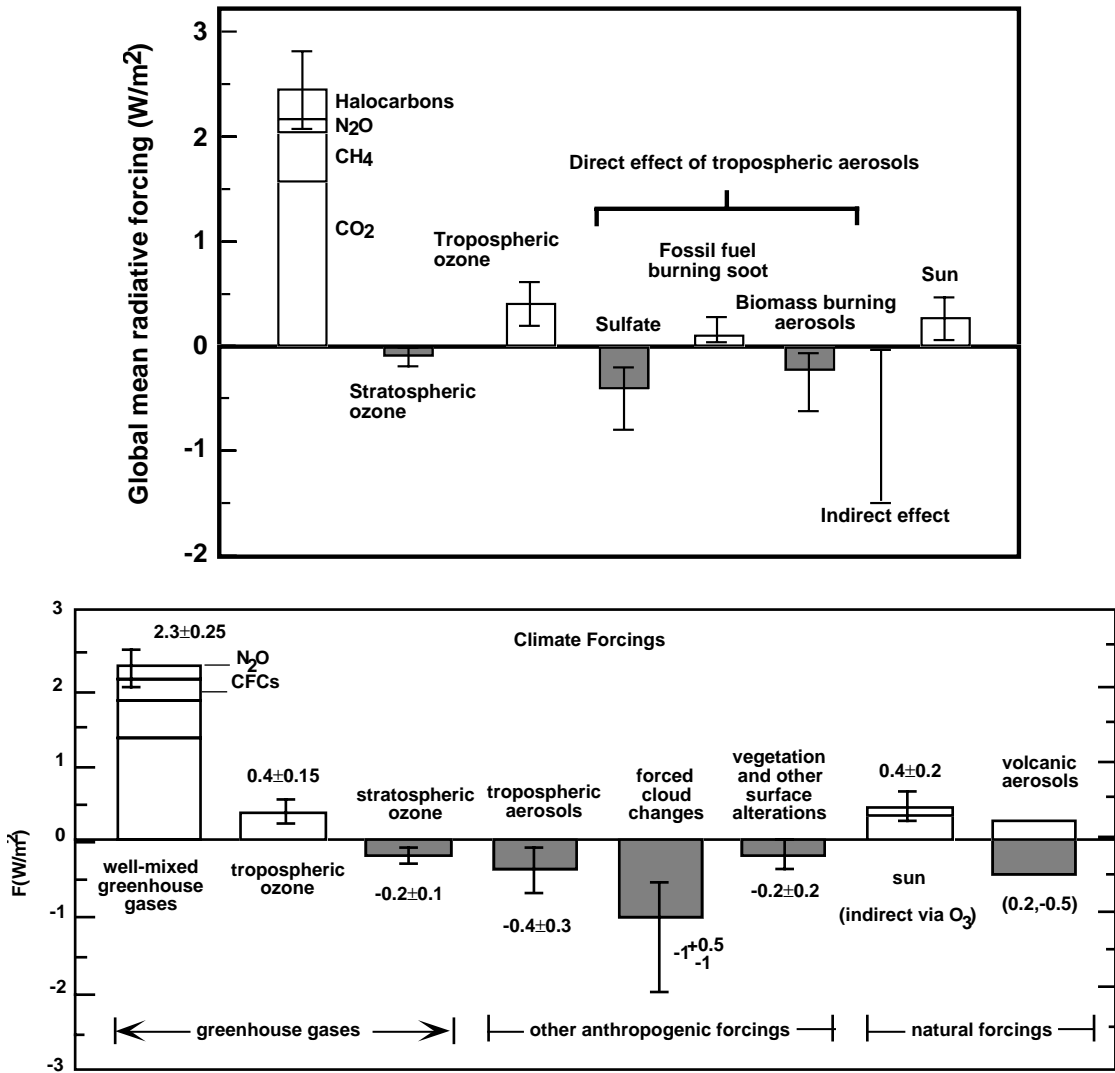


図1 過去150年間に地球大気系が受けた放射エネルギー収支の変調。IPCC95によるもの(上)と Hansen et al. (1998)によるもの(下)。

らかにされなければならない。

3. 海洋

海洋による熱の吸収は、地球温暖化の速度を遅らせる効果を持っている。すなわち、海洋表面で取り込まれた熱エネルギーは、海洋表層やNADW(北大西洋深層流)などによる深層への取り込みによって、しばらくは、大気エネルギー収支の評価からは消えてしまう。もっとも千年スケールではこの熱の効果は健在化する。

さて、最近の海洋による熱の吸収の評価は、ほとんど大気と海洋が結合された数値気候モデルによって評価されている。このような結合気候モデルは複雑で計算時間もかかるために、利用が一般化したのは最近のことである。1995年報告では、2050年段階での全球平均気温のモデル依存性は±0.5度程度であった。TAR報告ではこの部分の評価がある程度収束するものと思われる。

4. 雲

雲が温暖化過程で増えるか減るかに関する問題は、温暖化予測の中で大きな不確定性を持ち込む可能性がある。過去2つのIPCCレポートにおけるさまざまな数値気候モデルで得られた雲のフィードバックパラメーターを見てみると、1990年当時と1995年当時では、そのモデル依存性が大きく変わったことがわかる。1990年報告では、モデル間でそのばらつきが3倍もあった。ところが1995年報告では、それが収束して、20%程度の範囲に収まるようになってきた。この理由は、モデルの空間分解能が増加して雲が適切に生成されるようになってきたこと、雲生成アルゴリズムが発達したこと、またモデルの相互比較実験を通して、モデルの標準化が進んだことなどがあげられる。

雲のフィードバックパラメーターのモデル依存性に関してさらに重要なことは、1990年報告では、ほとんどすべてのモデルが大きな正值、すなわち雲は温暖化を著しく加速するという傾向を示していた。すなわち、当時のモデルでは、温暖化した大気では、深くなった対流のために低層雲が減少し、高層雲が増えるために、相対的に温室効果が日傘効果に勝って温暖化が加速していた。ところが、最近のモデルではばらつきが小さくなったと同時に、フィードバックの値自体も小さくなって、全体としては雲は何もしないという傾向になり始めた。さらに注目すべきことは、符号が正の場合も負の場合もあって、モデルによって雲が温暖化を加速する場合も、抑制する場合も起こり得るようになったことである。このどちらがより現実的かをTAR報告書で明らかにすることが重要である。

また、地表面放射収支に及ぼす雲の影響評価がモデルによって大きくばらついていることも課題として残っている。このことはまた、海洋による水平熱輸送を我々が正しくモデリングできていないことも示している。

5. エアロゾル

人間起源エアロゾルの効果については、1995年報告になってだいぶ定量化できるようになった。ここで言うエアロゾルは、化石燃料の燃焼によって発生する亜硫酸ガスや有機炭素系ガスと、農業活動などによる植物の燃焼から発生するガスから生成される半径が0.1ミクロン程度の微粒子のことである。その微少さに関わらず、近年の増大する大気汚染によってその影響は無視できない大きさになっている。

1995年報告では主に、Charlson et al. (1987)やMitchell et al. (1995)による研究を引用して、その影響は過去150年間の温室効果を1/3程度を相殺する効果を持っていると結論している。エアロゾルの効果には、微粒子が直接太陽放射を散乱する直接効果と、これが雲粒の元(雲核)として働いて雲場を大きく変化させるために、地球のエネルギー収支を変える間接効果がある。図1は、エアロゾル

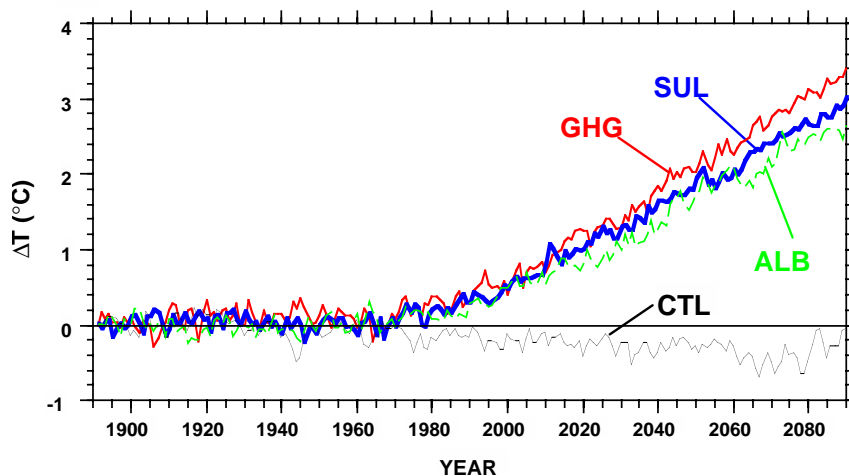


図2 エアロゾルの直接効果による全球年平均値表気温変化のシミュレーション(Emori et al., 1999)。GHG:温室効果ガスのみ、SUL:硫酸塩エアロゾルを含む、ALB: Mitchell et al. (1996)のパラメタリゼーションによる値。

の直接効果については -0.4 から -0.6 W/m^2 程度であると言う結論になりつつあることがわかる。図2にはエアロゾルの直接効果を取り込んだ場合とそうでない場合の将来の温室効果予測の一例を示す(Emori et al., 1999)。同じIPCC排出シナリオのもとでも、硫酸塩エアロゾルの直接効果をどのように取り入れるかによって、2050年での昇温予測は大きく異なることがわかる。

IPCCシナリオにおいては主に硫酸塩が着目されているが、最近のTARFOX実験(Russel et al., 1999)等では、工業活動域においても炭素性エアロゾルの寄与が50%にも及ぶことが報告され始めた。このことは、これまでのエアロゾルの全球分布に関する我々の知識が必ずしも正しいものではないことを示しており、アップデートが行われる見通しである。1995年報告以来の大きな発展として、人工衛星によるエアロゾルの全球リモートセンシング手法が大きく発展したことが上げられる(Nakajima and Higurashi, 1998)。例えば、NOAAによって提案されているエアロゾルの光学的厚さの統計は1.5倍程度大きくなるだろう。TAR報告書ではこれらの観点から評価のアップデートが行われるだろう。

間接効果の評価については、いまだに錯綜している状態であるが、TAR報告ではある程度の見積もりを提起できるものと思われる。この問題の解決を遅らせているのは、雲場の自然変動が非常に大きいために間接効果の中に埋もれていることと、エアロゾル場と雲場の関係には複雑なフィードバックが働いていて、その効果を評価をすることが難しいことが挙げられる。これらの諸問題に関しては、航空機と人工衛星を利用した詳細な観測やモデルの精緻化の努力が行われていて、ある程度の答えが見つかるだろう。

6. 異常吸収問題

炭酸ガスの倍増による温室効果は 4 W/m^2 程度である。従って、我々は少なくとも 1 W/m^2 程度の精度で現在の気候に関するエネルギー収支について理解していなければ、長期のエネルギー収支予測について不測の事態を招く可能性がある。しかしながら、現在の我々の知識では、大気中に収束する放射エネルギーのうち、 20 W/m^2 程度が説明不能になっている。すなわち、観測から算定される大気が吸収する放射エネルギーは、現在もっとも進んだ大気放射エネルギー収支モデルによって計算されるものよりも、 20 W/m^2 程度大きい。すなわち、モデルにおける大気加熱量が過小評価されている可能性があり、そのために、大気大循環のシミュレーションも若干、ゆがめられている可能性がある。なによりも、この 20 W/m^2 を吸収する物質がはっきりしない限り、将来の温暖化予測においてこの不確定要因が顕在化しないとも限らない。

このような異常吸収問題については、3つの可能性が指摘されている。ひとつは、雲が我々の知らない異常吸収を引き起こしていると言うものである(Cess et al., 1995)。これは古くは1960年代から提案されている。2つ目は、晴天大気に不明の吸収が起こっているとするものである(Arking, 1996)。その正体としてエアロゾルや水蒸気があげられている。3つ目は、このような異常吸収が、単純に不適切なデータ解析に起因するとするものである。正確な放射収支評価には、雲の形状や観測視野など非常に込み入った要因があり、このような系統的な誤差が起こっても不思議は無い。TAR報告では、この問題には明確な回答を出せる状況には無く、引き続き研究が必要である。

7. おわりに

ここでは、地球温暖化の評価にとって重要な、いくつかの重要なプロセスに関する研究の現状について簡単に触れてきた。もちろん、ここに述べたような要因に代表されるようなプロセスが、地球規模ではさまざまなフィードバックと、三次元的な構造を持って営まれている。そのようなプロセスの詳細な考察と評価も、IPCCグループ1の重要な課題である。特に、人間活動にとって大きな影響のある地域の気候変動予測が大きな課題となっている。その解説については別の記事に譲りたい。

TAR報告によって、必ずしもすべての温暖化メカニズムが評価されるわけではない。しかし、近年の、この分野における研究はめざましい発展を遂げており、衛星観測を始めとする地球観測システムの確立や、詳細な気候モデルの構築によってその全貌が徐々に明らかになるうとしている。このような現

状を背景として考えた時、今後、グループ2, 3との共同による、真にカップリングした人間活動の影響評価とその対策を考える基盤ができてきたのでは無いかと思われる。それが我々にとっての次の大きな課題であろう。

参考文献

- Albert Arking, 1996: Absorption of Solar Energy in the Atmosphere : Discrepancy Between Model and Observations. *Science*, 273, 779–782.
- Cess, R. D., M.H.Zhang, P.Minnis, L.Corsetti, E.G.Dutton, B.W.Forgan, D.P.Garber, W.L.Gates, J.J.Hack, E.F.Harrison, X.Jing, J.T.Kiehl, C.N.Long, J.J.Morcrette, G.L.Potter, V.Ramanathan, B.Subasilar, C.H.Whitlock, D.F.Young, Y.Zhou, 1995: Absorption of Solar Radiation by Clouds: Observations Versus Models. *Science*, 267, 496–503.
- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae, and S.G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326, 655–661.
- Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto, and T. Nakajima, 1999: Coupled Ocean–Atmosphere Model Experiments of Future Climate Change with an Explicit Representation of Sulfate Aerosol Scattering, *submitted to J. Meteor. Soc. Japan*.
- Hansen, J. E., M. Sato, A. Lacis, R. Ruedy, I. Tegen, and E. Matthews, 1998: Climate forcings in the industrial era. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 12753–12758.
- Herman, J.R., P.K. Bhartia, O. Torres. C. Hsu, C. Seftor, and E. Celarier, 1997: Global distributions of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data, *J. Geophys. Res.*, 102, 16911 – 16923.
- Mitchell, J.F.B., T.C.Johns, J.M.Gregory, and S.F.B.Tett, 1995: Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, 376, 501–504
- Nakajima, T., and A. Higurashi, 1998: A use of two-channel radiances for an aerosol characterization from space. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3815–3818.
- Russell, P. B., P. V. Hobbs and L. L. Stowe, 1999: Aerosol properties and radiative effects in the United States East Coast haze plume: An overview of the Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment(TARFOX). *J. Geophys. Res.*, 104, 2213–2222.