

## 地球温暖化における雲の役割

小倉知夫（国立環境研究所 地球環境研究センター）

### 1. はじめに

本講義では、雲の科学にまつわる話題として、数値シミュレーションによる気候予測についてご紹介したい。今後 100 年間の地球温暖化を予測する際、避けて通れない課題が、温暖化に伴う雲の変化を予測することである。雲の変化を予測するにはどのような困難が伴うのか、また、その困難を世界各国の研究者がどのように克服しようとしているのか、一端をお伝えできれば幸いである。

### 2. 気候予測の役割

まず、気候予測が必要とされる背景を手短かに述べる。大気中の温室効果ガスの濃度は増加を続けており、2018 年の CO<sub>2</sub> 濃度は工業化以前と比べて 47% の増加であった (WMO, 2019)。世界平均の表面温度も上昇を続けており、2018 年には工業化以前と比べておよそ 1°C の上昇であった。これらは主に人間活動によってもたらされたと推定されている (IPCC, 2018)。温暖化が人間社会や自然環境へ及ぼす影響を小さくするため、2015 年にはパリ協定が合意された。協定では温暖化を抑制するための目標として、世界の平均気温上昇を工業化前と比べて +2°C より十分に低く抑えること、そして、+1.5°C に抑える努力を追求することを掲げた。パリ協定の温度目標を達成するには温室効果ガスの排出をどのように削減する必要があるのか、また、温暖化のうち避けることが難しい部分に対してはどのように備える必要があるのか。こうした問題に答えるために気候予測が必要とされている。

### 3. 気候予測の不確実性

気候予測は全球気候モデル (Global Climate Model, GCM) を用いた数値シミュレーションにより実施される。具体的には、大気、海洋、陸面を空間的に分割し、小さな箱 (格子) の集合体と考える。そして、一つひとつの格子の状態を物理法則に基づいて予測計算する。大気においては各格子の気温、気圧、大気密度、風速、水蒸気量などをエネルギー保存則、質量保存則、運動量保存則および状態方程式に基づいて計算する。格子の大きさは任意に設定可能であ

り、小さめに設定する方が空間的に細かい現象を計算できるため望ましい。しかし、必要な計算の量が増大し、計算に時間がかかる。そこで、計算の目的および利用できる計算機資源の量に応じて、格子の大きさは適切な値に設定される。今後 100 年間の地球温暖化を予測する場合は、格子の大きさを水平方向で 100km、鉛直方向で 10m-1km 程度に設定することが一般的である。

この場合、大気のシミュレーションで計算されるのは水平幅 100km、鉛直幅 10m-1km の格子の平均的な状態 (気温、気圧など) となる。そして、シミュレーション結果から読み取れるのは、上記の格子の集合体として表現できるような、空間スケールの大きな現象となる。しかし、現実の大気では、上記の格子で表現できないような空間スケールの小さい現象 (乱流、積雲対流、雲、放射など) が存在しており、それらが格子スケールの状態に影響することが知られている。従って、このような小さな現象の影響も、シミュレーションにおいては勘定に入れなければならない。そこで、各格子の平均的な状態を元に、「空間スケールの小さな現象が格子の平均的な状態に及ぼす影響」が推定されている。このような推定をパラメータ化と呼ぶ。

パラメータ化において用いられる推定の方法は物理法則と違い、不確実性が含まれる。言い換えるならば、これまでに複数の推定方法が提案されており、その中からどれを採用するか任意性がある。従って、GCM において従来と異なるパラメータ化を採用すれば、シミュレーションの結果も従来と異なるものとなる。複数の GCM で将来予測シミュレーションを実施すれば、それぞれの GCM で採用されているパラメータ化は同じでないため、結果は GCM 間でばらつくこととなる。

このようにして生じるモデル間のばらつきはどの程度の大きさか。複数の国で開発された GCM を用いて、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が倍増したときの世界平均地上気温の最終的な上昇幅 (平衡気候感度) を見積もった結果は、「1.5-4.5°C の可能性が高い」とされている (IPCC, 2013)。この見積もりに現れた 3°C の幅は、温暖化の影響を評価する際に無視できないほど

大きい。このため、気候予測の不確実性（複数のモデル間のばらつき）がどのように生じているかを理解し、可能であれば低減させることを目指して、研究が実施されている。

#### 4. 放射強制力と気候フィードバック

気候予測の不確実性を理解する際に重要となるのは、不確実性がどのようなプロセスを通じて生じるのか、原因を絞り込むことである。そのためには、気候変化に影響を及ぼす要因を「放射強制力」と「気候フィードバック」という形に切り分けて、それぞれを定量化することが有効となる。

例として、大気中  $\text{CO}_2$  濃度の増加により地表気温が上昇する場合を考える。 $\text{CO}_2$  濃度の増加は大気・海洋・陸面に対して放射加熱を生じさせる（放射強制力）。放射加熱の一部分は海洋の深層に吸収され、残りの部分は海洋の表層や陸面、大気を温める。そして、地表が温まるにつれて地球表層の状態は変化する。具体的には、大気の温度が上昇すると共に、気温の鉛直勾配が変化する。また、大気中に含まれる水蒸気量が増加し、地表面を覆う雪氷が減少する。さらに、雲の面積や高さ、雲水量、相（固体または液体）、雲粒の粒径や数密度が変化する。以上に挙げたような変化は、地球に吸収される太陽からの短波放射の量や、地球から宇宙へ出ていく長波放射の量に影響を及ぼす。このため、地球表層は短波放射と長波放射の変化により加熱または冷却される。言い換えるならば、地表の温暖化は促進または抑制される（気候フィードバック）。結果として、地表気温の最終的な上昇幅は放射強制力と気候フィードバックの大きさによって決まる。

以上の考え方を気候シミュレーションの結果に当てはめれば、気候予測の不確実性がどのようなプロセスを通じて生じるのか、原因を絞り込むことが可能となる。これまでに実施された調査から分かることは、気候フィードバック、とりわけ雲の変化に伴う雲フィードバックが不確実性に大きく寄与している実態である。本稿の冒頭で「地球温暖化を予測する際に雲の変化を予測することが重要な課題」と述べたのは、このような事情を反映している。

#### 5. 雲フィードバックの不確実性

なお、雲フィードバックの不確実性について議論する際に問題となるのは、どのような種類の雲でフ

ィードバックが不確かか、ということである。雲の種類は多様であり、熱帯域の深い対流に伴う雲、亜熱帯海洋上の浅い積雲や層積雲、中緯度の温帯低気圧に伴う雲など、それぞれが異なるプロセスで生成、消滅している。従って、温暖化に伴う変化も雲の種類によって異なる考えるべきである。

雲の種類の中で、不確実性が小さくて比較的良く理解できると考えられているのが、深い対流に伴う「かなとこ雲」の高さに関するフィードバックである。対流圏では、高さが増すと共に気温は低くなる。このため、高い雲ほど雲頂の温度は低く、雲頂から宇宙へ向けた長波放射は少なくなる。従って、温暖化とともに雲頂の高さが増すことは、気候システムに対して、長波放射による冷却を抑えて温暖化を促進する正のフィードバックとして働く (Yoshimori et al. 2020)。

実際、温暖化とともに「かなとこ雲」の雲頂が高くなることは、全ての GCM のシミュレーションで共通して見られる特徴である。このことは、雲解像モデルを用いたシミュレーションの結果からも支持されており (e. g., Satoh et al. 2012)、雲の年々変動や数十年規模の変化傾向を観測した結果とも整合的である (e. g., Xu et al. 2005, Marvel et al. 2015)。さらに、雲頂が高くなる仕組みも理論的に説明可能である (Hartmann and Larson 2002, Zelinka and Hartmann 2010)。以上のことから、「かなとこ雲」の雲頂が高くなる正のフィードバックは「信頼性が高い」と評価されている。なお、温暖化に伴い雲頂が高くなる正のフィードバックは、熱帯域の「かなとこ雲」に限らず中高緯度の雲にも働くことが近年の研究で指摘されている (Thompson et al. 2017)。

対照的に、不確実性が大きく理解が不十分であると考えられてきたのが、下層雲のフィードバックである。ここで述べる下層雲とは、雲頂の高さがおよそ 3km より低い雲を指しており、層雲、層積雲、浅い積雲などが該当する。下層雲は、雲フィードバックが GCM 間でばらつく最も重要な要因である (Zelinka et al. 2020)。ここでは、下層雲フィードバックの符号が正負のどちらであるかが重要な論点となる。

下層雲フィードバックの符号が正であることは、GCM の多くに共通して見られる特徴である。この特徴は、温暖化に伴い下層雲が減少して地表面における短波放射の吸収が強まること、つまり温暖化が促

進されることを反映している。しかし、2013 年に出版された IPCC 第 5 次報告書では、下層雲フィードバックの正符号について「信頼性が低い」と評価している。その理由は、下層雲が減少する仕組みが良く理解できていないこと、また、観測データによる裏付けが乏しいことであった。

その後、ラージ・エディー・シミュレーションなどの空間解像度の高いモデルを用いた研究成果が蓄積された結果、下層雲が温暖化に伴い減少する仕組みが徐々に明らかとなってきた (Bretherton, 2015)。鍵となるプロセスは以下の 4 つとされている。1) 大気中の水蒸気量の鉛直勾配が増加し、乱流混合による境界層の乾燥化が効率良く働くようになること、2) CO<sub>2</sub> と水蒸気の温室効果が強まる結果、下層雲の雲頂における放射冷却が弱まること、3) 境界層上端の逆転層が強化され、自由大気と境界層の間の混合が抑えられること、4) 自由大気の下降流が弱まることにより境界層の厚みが増すこと。1) と 2) は下層雲を減らす方向に働き、3) と 4) は増やす方向に働く。正味では 1) と 2) が卓越して下層雲が減少する。

このほか、GCM でシミュレートされた下層雲フィードバックに観測データを用いて制約をかける研究も盛んに実施された。制約をかける方法は、二つに大別できる。第一の方法は、複数の GCM によるシミュレーション結果を利用して、観測可能な変数  $A$  と下層雲フィードバック  $\lambda$  の間に統計的な関係を見付ける方法である (例えば「 $A$  が大きいほど  $\lambda$  も大きい」など)。  $A$  と  $\lambda$  の関係が偶然の産物ではなく物理的に妥当な理由から生じている場合は、この関係を利用して  $\lambda$  の値に制約を加えることができる。具体的には、複数の GCM の中から  $A$  の値が観測に近いものを「信頼性が高い」と考えて選び、その GCM から出力された  $\lambda$  を信頼性の高い値と見なすことができる。変数  $A$  の例としては、現在気候における対流圏下層の鉛直混合の強度を上げることができる。混合が強いほど  $\lambda$  も大きくなる関係が発見されており、その理由を物理的に説明可能である。そして、この関係を利用して  $\lambda$  の値を制約できることが指摘されている (Sherwood et al. 2014, Kamae et al. 2016)。変数  $A$  の例としては他にも、現在気候の地表面における雲放射効果が  $\lambda$  と関係することが示唆されている (Watanabe et al. 2018)。

下層雲フィードバックに制約をかける第二の方法

は、観測データに基づき下層雲フィードバックを予測計算する、というものである。その実施手順は下記の 1) ~ 3) に従う。1) 下層雲とそれを制御する環境要因 (海面水温や大気の静力学的安定度など) の関係を観測データから読み取る。さらに、読み取った関係が、100 年後の温暖化を予測する際にもそのままの形で利用できると仮定する。2) 雲を制御する環境要因が温暖化によりどう変化するかを GCM でシミュレートする。3) 最後に、1) で読み取った関係と 2) で予測した値を元に下層雲フィードバックを計算する。

以上に述べた二つの方法による研究結果は、いずれも下層雲フィードバックの正符号を支持するものであった (Klein and Hall 2015, Klein et al. 2017)。このような進展を受けて、下層雲フィードバックおよび気候感度の値について、不確実性を従来よりも狭める方向で見直しが進められている (Sherwood et al. 2020)。

なお、本稿では「かなとこ雲」の高さと下層雲のフィードバックについて重点的に紹介したが、これら以外にも、様々な種類の雲フィードバックについて研究が行われている。近年、注目を集めている論点としては、熱帯域における雲の組織化が温暖化によりどう変化するか、という問題が挙げられる。この問題に答えるために全球雲解像モデルを用いた温暖化シミュレーションが実施されており、その結果からは、雲の組織化が温暖化により弱まることが報告されている。また、組織化が弱まるにつれて雲が広い領域に分散して地球を覆うため、宇宙への長波放射が弱められ、温暖化が促進されることも指摘されている (Noda et al. 2019)。

## 6. おわりに

雲フィードバックは気候予測に不確実性をもたらす重要な要因として 1970 年代から注目を集めてきた (Charney et al. 1979)。長年にわたる研究の結果、地球温暖化における雲の役割について理解が徐々に進んでいる。特に低緯度の下層雲フィードバックに関しては集中的に研究が実施されており、近年の進捗が著しい。このような進捗を可能にした要因としては、多数の GCM を相互比較するマルチモデルアンサンブル解析が一般的になったこと、ラージ・エディー・シミュレーションや雲解像モデルが活用されたこと、そして、衛星などによる観測データが充実

したことが挙げられる。今後は、低緯度の下層雲の研究で培われた手法を他の種類の雲、あるいは雲以外の気象要素にも応用することで、気候予測の不確実性の理解と低減を多角的に進めることが重要と思われる。また、既に良く理解できたと思われる雲フィードバックについても、現状の理解が本当に妥当であるのか検討を繰り返すことで、予測の信頼性をさらに高めていく努力が必要である。

## 参考文献

- Bretherton, C. S., 2015: Insights into low-latitude cloud feedbacks from high-resolution models, *Phil. Trans. R. Soc. A* 373:2014415, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0415>.
- Charney, J. G., A. Arakawa, D. J. Baker, B. Bolin, R. E. Dickinson, R. M. Goody, C. E. Leith, H. M. Stommel and C. I. Wunsch, 1979: Carbon dioxide and climate: a scientific assessment. Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate.
- Hartmann, D. L. and K. Larson, 2002: An important constraint on tropical cloud - climate feedback, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 20, doi:10.1029/2002GL015835.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Poertner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pean, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)].
- Kamae, Y., H. Shiogama, M. Watanabe, T. Ogura, T. Yokohata and M. Kimoto, 2016: Lower-tropospheric mixing as a constraint on cloud feedback in a multiparameter multiphysics ensemble, *J. Climate*, 29, 6259-6275.
- Klein, S. A. and A. Hall, 2015: Emergent constraints for cloud feedbacks, *Curr. Clim. Change Rep.*, 1, 276-287, <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0027-1>.
- Klein, S. A., A. Hall, J. R. Norris and R. Pincus, 2017: Low-cloud feedbacks from cloud-controlling factors: A review, *Surv. Geophys.*, 38, 1307-1329.
- Marvel, K., M. Zelinka, S. A. Klein, C. Bonfils, P. Caldwell, C. Doutriaux, B. D. Santer and K. E. Taylor, 2015: External influences on modeled and observed cloud trends, *J. Climate*, 28, 4820-4840.
- Noda, A. T., C. Kodama, Y. Yamada, M. Satoh, T. Ogura and T. Ohno, 2019: Responses of clouds and large-scale circulation to global warming evaluated from multidecadal simulations using a global nonhydrostatic model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, <https://doi.org/10.1029/2019MS001658>.
- Satoh, M., S-I. Iga, H. Tomita, Y. Tsushima and A. T. Noda, 2012: Response of upper clouds in global warming experiments obtained using a global nonhydrostatic model with explicit cloud processes, *J. Climate*, 25, 2178-2191.
- Sherwood, S. C., S. Bony and J. -L. Dufresne, 2014: Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing, *Nature*, 505, 37-42.
- Sherwood, S. C., M. J. Webb, J. D. Annan, K. C. Armour, P. M. Forster, J. C. Hargreaves, G. Hegerl, S. A. Klein, K. D. Marvel, E. J. Rohling, M. Watanabe, T. Andrews, P. Braconnot, C. S.

- Bretherton, G. L. Foster, Z. Hausfather, A. S. von der Heydt, R. Knutti, T. Mauritsen, J. R. Norris, C. Proistosescu, M. Rugenstein, G. A. Schmidt, K. B. Tokarska and M. D. Zelinka, 2020: An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence, *Reviews of Geophysics*,  
<https://doi.org/10.1029/2019RG000678>.
- Thompson, D. W. J., S. Bony and Y. Li, 2017: Thermodynamic constraint on the depth of the global tropospheric circulation, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 114, 8181–8186.
- Watanabe, M., Y. Kamae, H. Shiogama, A. M. DeAngelis and K. Suzuki, 2018: Low clouds link equilibrium climate sensitivity to hydrological sensitivity, *Nature Climate Change*, 8, 901–906.
- WMO, 2019: WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018, No.15, [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10100](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10100).
- Xu K.-M., T. Wong, B. Wielicki, L. Parker and Z. Eitzen, 2005: Statistical analyses of satellite cloud object data from CERES. Part 1: methodology and preliminary results of the 1998 El Nino/2000 La Nina, *J. Climate*, 18, 2497–2514.
- Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. J. Webb and T. Andrews, 2020: Fixed anvil temperature feedback: positive, zero, or negative? *J. Climate*, 33, 2719–2739.
- Zelinka, M. D. and D. L. Hartmann, 2010: Why is longwave cloud feedback positive? *J. Geophys. Res.* 115, D16117, doi:10.1029/2010JD013817.
- Zelinka, M. D., T. A. Myers, D. T. McCoy, S. Po-Chedley, P. M. Caldwell, P. Ceppi, S. A. Klein and K. E. Taylor, 2020: Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2019GL085782.  
<https://doi.org/10.1029/2019GL085782>.