

## 気候モデルの発展の歴史

佐藤正樹(東京大学大気海洋研究所)

### 1. はじめに

気候モデルは、ノーベル物理学賞を受賞された真鍋淑郎博士による 1960 年代からの半世紀以上にわたる開発の歴史がある。近年は、気候モデルの精緻化、複雑化が進み、海洋・陸面・生態系モデル等と結合した地球システムモデルとして発展するとともに、数値モデルが高解像度化し、数日先の気象と数十年以上先の気候を同一のモデルで予測することが可能になりつつある。この講義では、これら数値モデルの開発の歴史を俯瞰し、気候モデルの発展について解説したい。

地球全体をメッシュに区切り、各メッシュ上の点において、力学的な方程式に基づいて気温、圧力、風、水蒸気等を計算するモデルを大気大循環モデル(GCM)とよぶ。GCMは、大別すると、数値的な天気予報のための数値天気予報モデルと気候状態をシミュレートする気候モデルとに分類され、それぞれ関連しつつも異なる開発の歴史をたどってきた。数値天気予報で対象とするのは日々の「天気」であり、シミュレーション期間が1週間程度であるのに対し、気候モデルでは、何年にも渡るより長期な「気候状態」を再現するため、大気的基本的なエネルギーバランスをもとに、大気の平均的な気候状態を数値的に求める。数値天気予報の歴史については、新田他(2009)により、「リチャードソンの夢」から現代の数値予報にいたる流れを辿ることができる。気候モデルについては、真鍋氏らによる開発の歴史を Manabe and Broccoli (2020) によって知ることができる。1960 年代の真鍋氏の最初の気候モデルの開発から約半世紀が経過した現在、気候モデルは地球温暖化予測や季節予報に利用され、気候変動や将来気候の変化等の研究に欠かせないツールとなっている。一方、スーパーコンピュータの発展により、天気と気候の予測の垣根が低くなり、地球を高解像度で覆うことで天気と気候を表現可能な次世代の気候モデルが開発され、広く利用されつつある。

本講義では、真鍋氏による気候モデルの開発、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)報告書で引用された気候モデルの変化、次世代型の気候モデルとして全球雲解像モデルの開発について紹介する。

### 2. 真鍋氏による気候モデルの開発

地球大気は、年程度の期間を地球全体で平均して考えると、太陽から地球に流入する日射と地球から宇宙に向け放出される赤外放射とがバランスした状態として気候状態が決まる。このバランスによって求められる等価な黒体温度は約  $-18.7^{\circ}\text{C}$  となり、現実の地球の地表面温度  $14.5^{\circ}\text{C}$  と  $33^{\circ}\text{C}$  もの差がある。この差を説明するためには大気の鉛直構造を理解する必要がある。真鍋氏は、気候モデルの開発の最初に、大気の高さ構造の温度分布を説明するための「放射対流平衡モデル」を構築し、大地表面温度が放射と対流のバランスによって決まることを説明した(Manabe and Strickler 1963)。放射対流平衡モデルにおいては、物理的な考察から放射過程と対流過程を数値的に表現することで、対流圏や成層圏といった大気の鉛直構造を数値的に求めることが可能である。

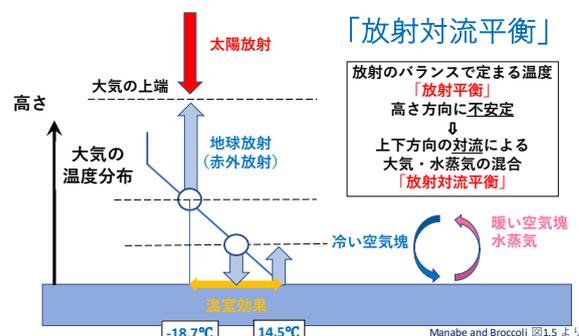


図 1. 放射対流平衡の概念図。

地球の気候状態を求めるためには、GCM における地球全体の各メッシュ上の点において、気温、圧力、風、水蒸気の力学的な時間変化に加えて、放射や対流の物理過程に基づく計算を行う必要がある。真鍋氏は、図 2 に示すような地球の海陸配置を理想的な分布に仮定して、地球の気候状態を数値的に求めることに成功した(Manabe et al. 1965)。さらに真鍋氏らは、図 2 と同様な海陸配置で海洋部分を海洋循環モデルによって計算する大気海洋結合モデルによる気候計算を行った(Manabe and Bryan 1969)。真鍋氏の気候モデルでは、実際に大気で起こっている現

象を物理的洞察に基づいて簡略して導入している。大気中で成層不安定が生じた際には「対流調節」が生じるとし、鉛直方向に空気を混合する。十分水蒸気がある場合には、水蒸気が凝結し降水が生じる。

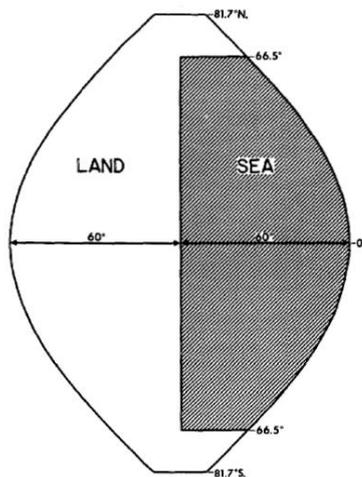


図 2 真鍋氏の初期の気候モデルにおける海陸配置 (Manabe 1969 より)。

真鍋氏らによる気候モデルの開発は、現実的な海陸配置、海陸をまたがる水循環プロセスの導入、陸面モデルとの結合を経て、大気海洋陸面結合モデルとして発展してきた(図 3)。この研究の過程で、大気の大気二酸化炭素濃度が増加した際の地表面温度の応答、地球温暖化に伴う極域の昇温の増幅、海陸や南北半球の昇温コントラスト等を見出してきた。真鍋氏らの息の長い研究の成果として、Stouffer et al. (1989) 予測された二酸化炭素増加に伴う 30 年前の予測結果とほぼ同じ空間パターンの昇温が現実に観測されていることが示されている(図 4: Stouffer and Manabe 2017)。現実に起きた地球温暖化とともに真鍋氏らの研究が進行し、自身の予測結果が実証されたことになる。

### 3. 気候モデルの発展

現在に至るまで、気候モデルは、世界中のさまざまな機関で開発され、気候研究や地球温暖化予測等に利用されている。1990 年代の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 1 次報告書(FAR)が出版された頃の気候モデルは解像度が 500km 程度、大気・海洋・陸面・海氷から構成されており、真鍋氏らの気候モデルによる結果も引用されている。IPCC 第 4 次評価報告書(AR4)には年代ごとのモデルの解像度と気候モデルのコンポーネントの変遷が示されている

(図 5)。2021 年に出版された IPCC 第 6 次評価報告書(AR6)には、FAR と AR6 の気候モデルの比較が示されており(図 6)、AR6 では、代表的な解像度が 100km 程度、モデル要素も大気化学、土地利用、海陸の生物化学過程、雲とエアロゾルの相互作用等が加わっている。今日利用されている多様なコンポーネントを含むモデルは地球システムモデルと呼ばれている。また、高解像度モデル比較プロジェクト HighResMIP に参加したモデルは、全球 25-50km 程度の高解像度モデルである(Haarsma et al. 2016)。

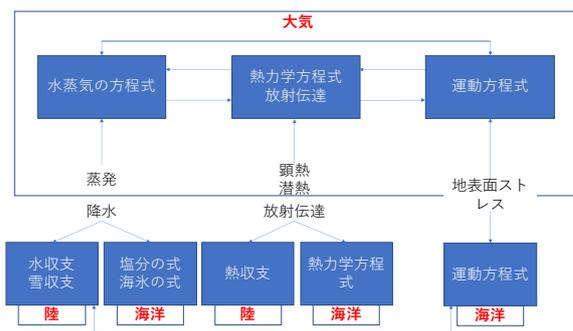


図 3. 真鍋氏が開発した大気海洋陸面結合モデルのダイアグラム (Manabe and Broccoli 2020 より)。

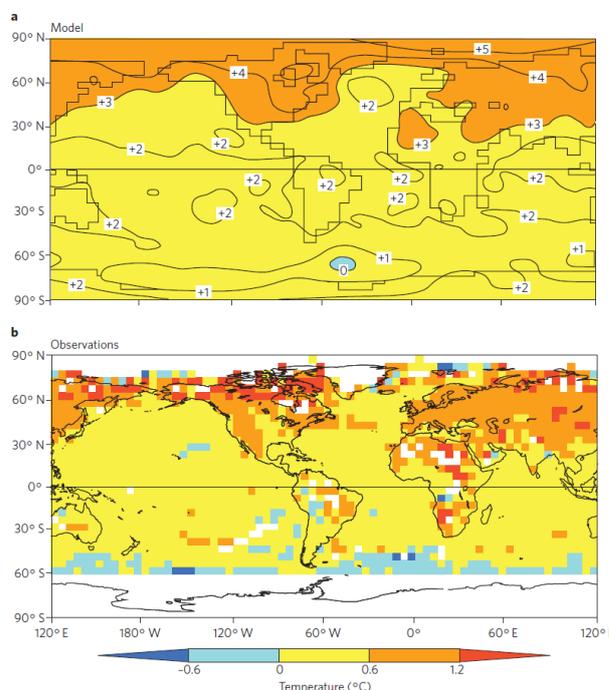


図 4. 上: Stouffer et al. (1989) で予測された二酸化炭素倍増に伴う地表面温度の昇温分布。下: 30 年間の観測された地表面温度の変化分布 (Stouffer and Manabe 2017)。

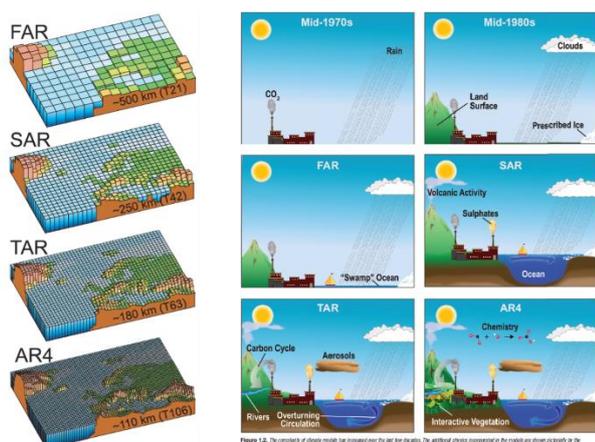


図 5. 気候モデルの発展。IPCC AR4 より。Le Treut et al. (2007)。

	1990年代 IPCC FAR	2021年 IPCC AR6
	 Global General circulation models	 Global Earth system models
	 Regional High-resolution models	
モデル解像度	500 km	100 km, 25-50 km
主要なモデル要素	Circulating atmosphere and ocean Radiative transfer Land physics Sea ice	Circulating atmosphere and ocean Radiative transfer Land physics Sea ice Atmospheric chemistry Land use/cover Land and ocean biogeochemistry Aerosol and cloud interactions

図 6. IPCC FAR(1990 年代)と AR6(2021 年)の気候モデルの代表的な解像度および構成要素(Chen et al. 2021)。

#### 4. 次世代気候モデル

真鍋氏の気候モデルの開発開始から 50 年以上が経過した現在、コンピュータの能力の進展により、気候モデルの解像度を劇的に高めることが可能になってきた。近年では km スケールの間隔の水平メッシュで地球全体を覆う新しいタイプの気候モデルが出現している。これにより、格子内のサブグリッドプロセスとしての対流パラメタリゼーションを用いずに気候が計算できる。このような新しいタイプの気候モデルをここでは、便宜上、「次世代気候モデル」と呼ぶ。東京大学等で 2000 年頃より開発を始めた非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM は、世界で

初めて km スケールの格子間隔で全球数値実験を実施したもので、次世代気候モデルの嚆矢といえる(Tomita and Satoh 2004; Satoh et al. 2008, 2014)。

km スケールの格子間隔をもつ次世代気候モデルは、現実的に対流をモデル内で表現できる。一方、近年の気候モデルでは、対流雲を解像できないため、格子内で対流に関するプロセスをできるだけ現実に近くモデル化されており、多くの不確定なパラメータが導入されている。これらのパラメータの値の微妙な調整により、計算される気候状態が大きく影響を受けることが知られている。次世代気候モデルでは、対流に関するサブグリッドの仮定を用いずに計算することから、物理的な不確実性の少ないモデルということができる。

次世代気候モデルの開発は世界各国で進められており、国際比較実験が最近実施された(Stevens et al., 2019)。図 7 に国際比較実験に参加したモデルの一つである格子間隔 3.5km の NICAM と静止気象衛星ひまわり 8 号との雲分布の比較を示す。Stevens et al. (2019) には、10 種類のモデルの比較が示されており、どのモデルも現実の雲分布と見間違えるような高解像度シミュレーションが実現されている。

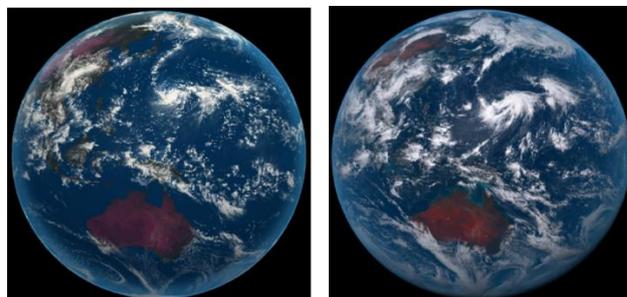


図 7. 次世代気候モデル NICAM による雲分布(左)と静止気象衛星ひまわり 8 号による雲分布(右)の比較(Stevens et al. 2019)。

次世代気候モデルでは、格子間隔を km スケールにとることで、地球上のメソ対流システム(MCS; 図 8)をあらわに計算することができる。MCS のシミュレーションのためには、浮力による上昇流の加速効果が計算される必要があり、非静力学効果した全球モデルとして構築されている。これに対して、従来の気候モデルは、静水圧平衡を仮定した全球モデルであり、いくら解像度を高めても MCS を表現することはできない。また、従来の気候モデルは基本的に緯

度・経度方向の格子をもつメッシュ構造を採用しているが、高解像度化すると格子間隔の非一様性が顕著になる。高解像度で計算効率を上げるためには、格子間隔を地球上でほぼ一様にした方が優れている。このように、次世代気候モデルは、ほぼ一様な格子構造をもつ全球非静力学モデルとして、従来の気候モデルと異なるアプローチで設計する必要がある。世界の研究機関では、それぞれ格子構造やモデルの数値計算手法に工夫を凝らした次世代気候モデルの開発が進められている (Sato et al. 2019)。NICAM では、正二十面体の三角形を順次半分に分割した格子系を採用している。格子を 11 回分割することで格子間隔 3.5km の格子系が得られる。格子を 1 回分割すると、格子数は 4 倍になり、時間ステップは 1/2 となることから、計算量は 8 倍になる。

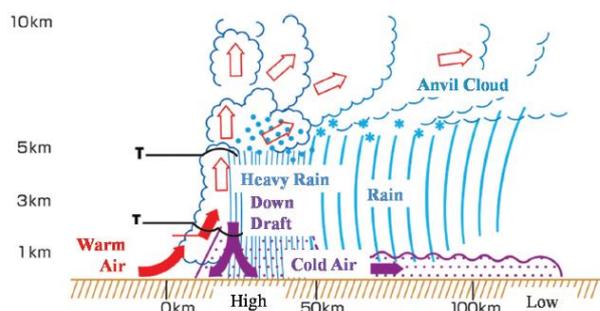


図 8. メソ対流システムの鉛直断面の模式図。Matsuno et al. (2011) により Zipser (1977) を改変。

次世代気候モデルは高解像度のため、気候計算に必要な数十年以上の長期積分を行うことは難しい。高性能なスーパーコンピュータを利用した次世代気候モデルの計算効率化が図られている。気候計算に実用的になるためには、1 日の実時間において、1 年分のシミュレーションが実行可能になることが一つの目安とされている (Schulthess et al. 2019)。実時間 1 日あたりのシミュレーション年数を SYPD (simulated years per wall-clock day) の単位で表す。格子間隔 km の次世代気候モデルを 1SYPD で実現することを世界で目標としている。スーパーコンピュータ「富岳」上での見積もりでは、全計算機の 1/4 程度が利用できれば、3.5km 格子間隔の NICAM による計算が 1 SYPD が実現できると予想される。

## 5. おわりに

気候モデルの発展の歴史として、真鍋氏の気候モ

デルの開発、IPCC における気候モデルの変遷、次世代気候モデルの開発をみてきた。気候モデルは、大気・海・陸等の多くのコンポーネントからなり、力学過程のモデリング (力学コア)、放射・雲・乱流等の物理過程モデルが組み込まれている。これらの開発には、多くの専門家の協力が必要であり、また長年の開発の蓄積として現在の気候モデルが存在している。気候モデルの違いを理解するには、力学コア・物理過程モデルに分け入らなければならない。世界には数多くの気候モデルが存在するが、モデルごとの独自の開発を経て、計算される気候状態は異なるものになる。そのため、地球温暖化予測や気候感度は気候モデルごとに異なっており、予測に幅をもつことになる。

気候モデルの予測の幅、不確定性をもたらす最大の要素は、雲や対流に関わるプロセスのモデルである。従来の気候モデルでは、格子以下のスケールの対流を扱うのに、対流パラメタリゼーションを用いており、これが予測の不確定性の大きな要因となっている。次世代気候モデルでは、対流パラメタリゼーションを用いずにあらわに MCS をシミュレートすることで、モデルの不確定性を低減することが期待されている。今後のスーパーコンピュータの発展とともに、次世代気候モデルの利用がより容易になることが期待できる。

## 参考文献

- Chen, D. et al., 2021: Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147-286, doi:10.1017/9781009157896.003.
- Haarsma, R. J., Roberts, M., Vidale, P. L., Senior, C., Bellucci, A., Corti, S., Fuckar, N., Guemas, V., von Hardenberg, J., Hazeleger, W., Kodama, C., Koenigk, T., Leung, R., Lu, J., Luo, J.-J., Mao, J., Mizielinsky, M., Mizuta, R., Nobre, P., Satoh, M., Scoccimarro, E., Semmler, T., Small, J., and von Storch, J.-S., 2016: High Resolution Model

- Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 4185–4208
- Le Treut, H. et al., 2007: Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 新田尚, 二宮洗三, 山岸米二郎, 2007: 数値予報と現代気象学, 東京堂出版, pp. 224.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation: I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 739–774.
- Manabe, S., and Broccoli, A. J., 2020: *Beyond Global Warming. How Numerical Models Revealed the Secrets of Climate Change*. Princeton University Press, pp. 193.
- Manabe, S., and Bryan, K., 1969: Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 26, 786–789.
- Manabe, S., and Strickler, R. F., 1964: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J. Atmos. Sci.*, 21, 361–385.
- Manabe, S., Smagorinsky, J., and Strickler, R. F., 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 93, 769–798.
- Matsuno, T., Satoh, M., Tomita, H., Nasuno, T., Iga, S., Miura, H., Noda, A. T., Oouchi, K., Sato, T., Fudeyasu, H., and Yanase W., 2011: Cloud-cluster-resolving global atmosphere modeling - A challenge for the new age of tropical meteorology. In "The Global Monsoon System, Research and Forecast", 2nd Edition. C.-P. Chang, Y. Ding, N.-C. Lau, R. H. Johnson, B. Wang, and T. Yasunari (eds.), World Scientific Pub Co Inc., 455–473.
- Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., Iga, S., 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comp. Phys.*, 227, 3486–3514.
- Satoh, M., Stevens, B., Judt, F., Khairoutdinov, M., Lin, S., Putman, W. M., and Düben, P., 2019: Global cloud-resolving models. *Current Climate Change Reports*, 5, 172–184.
- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18.
- Schulthess, T. C., Bauer, P., Wedi, N., Fuhrer, O., Hoefler, T., and Schär, C., 2019: Reflecting on the goal and baseline for exascale computing: A roadmap based on weather and climate simulations. *Comput. Sci. Eng.* 21, 30–41.
- Stouffer, R. J., and Manabe, S., 2017: Assessing temperature pattern projections made in 1989. *Nature Climate Change*, 7, 163–165.
- Stouffer, R. J., Manabe, S., and Bryan, K., 1989: Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 342, 660–662.
- Tomita, H. and Satoh, M., 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357–400.
- Zipser, E. J., 1977: Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line structure. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1568–1589.