

## 物理学に基づき地球の気候を再現する

# 「気候モデル」について

### 1. はじめに

2021年のノーベル物理学賞に日本出身で米国籍の真鍋叔郎・米ブリジストン大学上席研究者ら3名が選ばれました。授賞理由は「地球温暖化を確実に予測する気候モデルの開発」ということで、物理法則を基に大気CO<sub>2</sub>濃度が気候に与える影響を明らかにしたことが評価されました(日本経済新聞 2021)。真鍋博士の研究は温暖化を科学的に示し、現在の脱炭素をめぐる議論の発端となったとされます。真鍋博士の受賞で一躍注目を集めるようになった「気候モデル」、今回はその概要と、気象庁の気候モデルについて紹介したいと思います。

### 2. 気候モデルとは？

「気候」は長い期間で平均した時の大気の状態のことを言います。「モデル」は物理法則のシミュレーションを行うためのコンピュータプログラムを意味します。つまり、気候モデルを一言でいえば、物理学の法則を基にコンピュータで地球の「気候」を再現するプログラムのことです。太陽からの光エネルギーが地球に入り、空気や地表面を温める。一方温まった空気や地表面は宇宙に熱を逃がして冷めていく。暖かいところと冷たいところの差が大気を循環させ風が吹き、高気圧、低気圧ができ雨や雪を降らせる…、この現実の地球で起こっている様々な現象を物理学の方程式で計算することができるのです。

ここで真鍋博士の気候モデルを一つ紹介します(Manabe and Stricker 1964)。地球上にもし大気がなかったとするならば、地球の平均気温は-19℃になるといわれています(図1左)。実際の地球がこれほどまでに寒くないのは、水蒸気や二酸化炭素、オゾンなどの温室効果ガスのおかげです。温室効果ガスは赤外線を吸収する性質を持っています。これによって地球から熱が逃げるのを防ぐ効果があります。この温室効果ガスがあると地球の気温はどうなるかモデルで計算した結果、地表付近の気温は上がりますが、現実より気温が高く、逆に対流圏界面付近で現実より気温が低くなりました(図1中央にイメージ図)。これは天気予報用語でいうところの、「大気の状態が不安定」に当たります。このような大気では積乱雲の発生のような対流によってかき混ぜられてしまいます。真鍋博士はこの対流の効果も気候モデルに加えました。結果、博士のモデルによる気温の鉛直分布は、現実の大気の気温分布を見事に再現しました(図1右にイメージ図)。

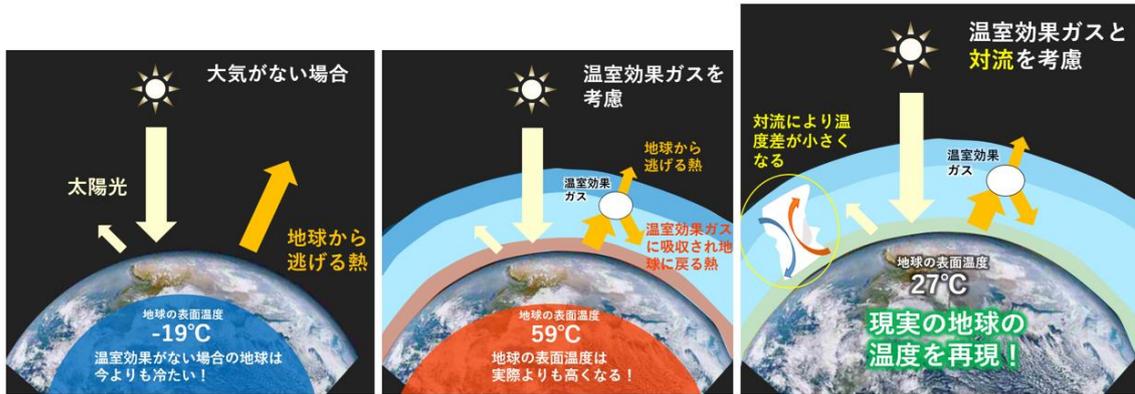
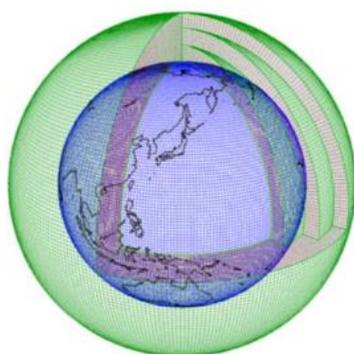


図1. 大気がない場合(左)、温室効果ガスを考慮した場合(中央)、温室効果ガスと対流を考慮した場合(右)の地球の気温の決まり方の模式図。Manabe and Strickler (1964)の Fig. 4 をもとにしたイメージ。

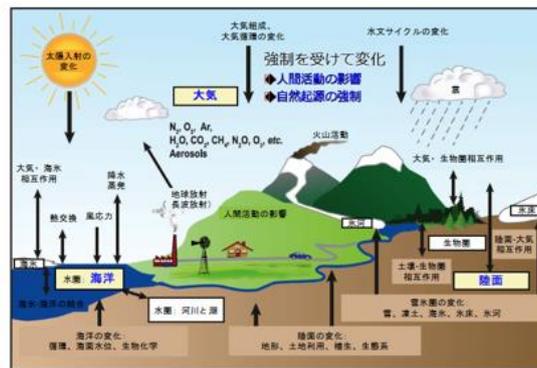
地表の気温は Manabe and Strickler (1964)の計算結果(整数になるよう四捨五入)。地球の写真はひまわり9号の気象衛星画像(JMA, NOAA/NESDIS, CSU/CIRA による)。

### 3. 地球温暖化と気候モデル

真鍋博士は大気中の CO<sub>2</sub> の量が2倍になると、地上の気温が約 2°C上がると試算し、1967年に発表しています(Manabe and Wetherald 1967)。博士らの大気の鉛直(上下)方向のみの一次元からスタートしたモデルは、現在はより複雑な三次元の、大気・海洋に加えて雪や氷河、二酸化炭素やほかの温室効果ガスの循環と化学反応など地球の気候を決めるいろいろなメカニズムが詰め込まれた、複雑な気候モデルによる温暖化予測にまで発展しています(図2)。



3次元の気候モデルのイメージ



気候システムの模式図

図2. (左)3次元の気候モデルのイメージ、および(右)気候システムの模式図

日本の気候変動 2020 より引用。

[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020\\_shousai.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_shousai.pdf)

今年8月には、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が「向こう数十年の間に二酸化炭素及びその他の温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、21世紀中に、地球温暖化は1.5°C及び2°Cを超える」と報告しました(IPCC 2021)。この将来どれほど気温が上昇す

るのかを予測する根拠の中心となっているのが気候モデルです。現在に至るまで、世界各国が様々な気候モデルの開発を行っています。日本には気象研究所が開発した MRI-CGCM モデルや東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が開発した MIROC モデルがあります。気候モデルと一口に言っても、地球の物理学を再現する方法は、モデルによって異なります。そのため、地球温暖化の予測結果もモデルによって異なります。そのため地球温暖化予測を行う際にはいろいろな気候モデルを比較することで予測がどれほど確実なのかがわかるようにしています。図3に示しているのは IPCC 第5次評価報告書 (AR5) による RCP-4.5(中程度の温暖化対策を行った場合)を条件に各国の気候モデルが予測した 21 世紀末年平均気温です。同じ温室効果ガスの増え方でも、モデルによって気温予測の結果は異なります。ただモデルの見解は、気温の上昇を予測することで満場一致しています。

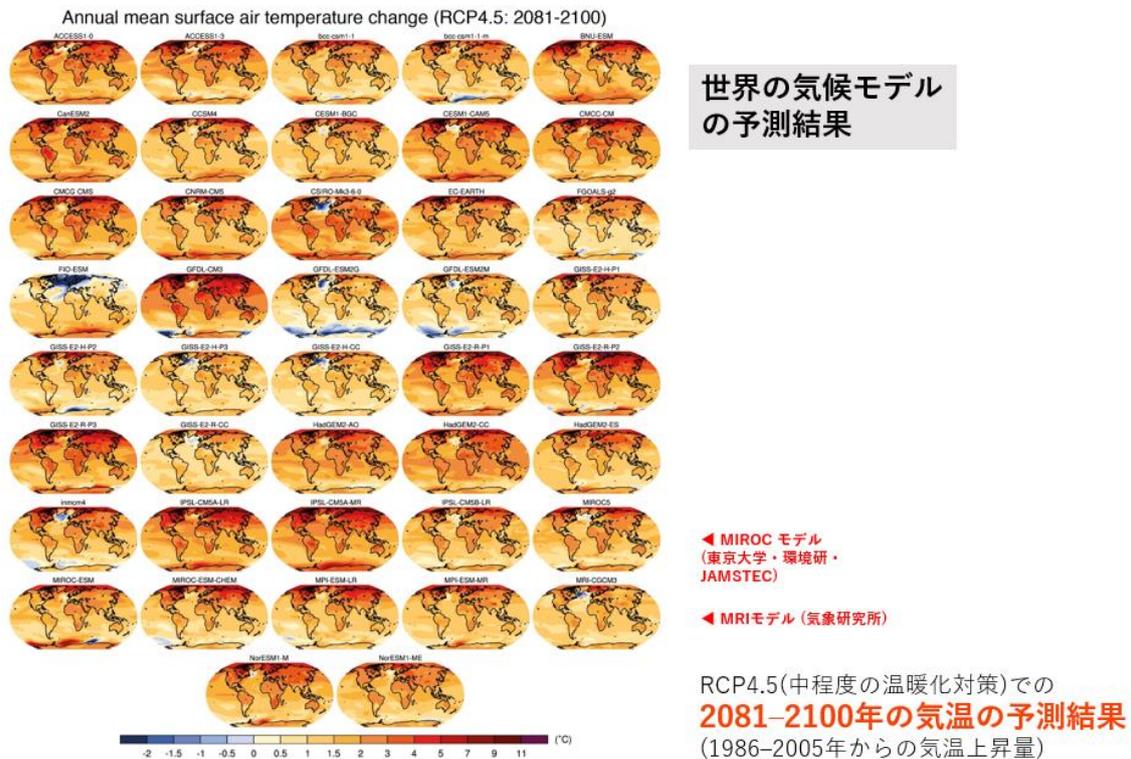


図3. RCP4.5の21世紀末(2081~2100年平均)の世界の地上の年平均気温を気候モデルによって予測した結果(1986~2100年平均からの差)。

世界各国の気候モデルの結果を並べて表示している。地図が赤色になっている部分は温暖化を表し、青色になっている部分が寒冷化を表す。

IPCC AR5 WG1 の Fig. 12.9 より(IPCC 2013)

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/long-term-climate-change-projections-commitments-and-irreversibility/>

#### 4. 気象庁の気候モデル

ここまでは地球全体の気候を再現する気候モデルの紹介をしてきました。一方気象庁の気象研究所は、もっと細かい地域の気候を再現できる気候モデルである、非静力学気候モデルNHRCMを開発し、日本の将来の気候予測を行っています。その結果を一部紹介します(仙台管区气象台 2019)。地球温暖化への対策を全くとらなかった場合の温室効果ガス排出量に基づいて気候モデルの計算を行うことで、21世紀末(2076年~2095年)には、20世紀末(1980~1999年)と比較して、青森県では4.7℃気温が上昇すると予測しました(図4左)。また降水に関しても、青森県では、現在は数年に一度の大雨が100年後はほぼ毎年発生するようになると予測されています。そして年間の降雪量や年最深積雪は東北地方全体では現在より73%程度減少すると予測されています。特に本州の日本海側では大きく減少し、東北地方太平洋側ではなんと約80%減少するという結果が出ています(図4右)。

東北地方の将来の気候の予測結果

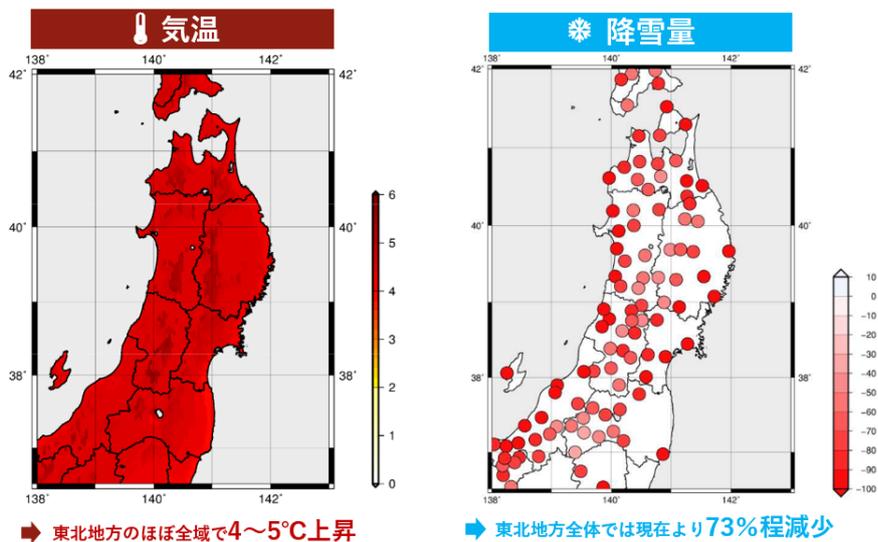


図4. 東北地方の年平均気温(左)、年降雪量(右)の将来変化

左図は IPCC の RCP8.5 シナリオに基づき地域気候モデル(NHRCM05)で予測した、東北地方の現在気候(1980~1999年)に対する将来気候(2076~2095年)の年平均気温の変化量。右図は左図と同様の予測を行った、年降雪量の将来気候と現在気候の差の比。

仙台管区气象台 編 「東北地方の地球温暖化予測情報」より

<https://www.data.jma.go.jp/sendai/knowledge/climate/future/future.html>

#### 5. 終わりに

真鍋博士が先駆けた「気候モデル」は、私たちに将来の気候がどうなる可能性があるのかを教えてくれるものとなっています。本稿が、気象庁も開発を行っている「気候モデル」について少しでも知っていただける機会となれば幸いです。

## 参考文献

- 日本経済新聞, 2021: 「ノーベル物理学賞に真鍋氏 温暖化予測、気候モデル開発」  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC055BFOV01C21A0000000/>
- Manabe and Stricker, 1964: *J. Atmos. Sci.*, **21**, 361-385.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2)
- Manabe and Wetherald, 1967: *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241-259.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2)
- 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.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. P é an, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelek ç i, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- 仙台管区气象台, 2019: 「東北地方の地球温暖化予測情報」  
<https://www.data.jma.go.jp/sendai/knowledge/climate/future/future.html>

(この原稿の作成 山口)



国土交通省 気象庁 青森地方气象台  
〒030-0966 青森市花園一丁目17番19号  
電話017-741-7411



気象庁ホームページ: <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>  
青森地方气象台ホームページ: <https://www.data.jma.go.jp/aomori/>