# 地球温暖化研究と歩んだ気象研究所 地球システムモデル開発40年

### 行本誠史 (気候・環境研究部)

令和3年度気象研究所研究成果発表会



#### 地球温暖化研究と歩んだ気象研究所地球システムモデル開発40年

- ・はじめに
- ・ 気象研究所における気候モデルの発展
  - MRI-AGCM1 (~1990年)
  - MRI-CGCM1 (~1995年)
  - MRI-CGCM2.0 (~2001年)
  - MRI-CGCM2.3 (~2007年)
- •気候モデルから地球システムモデルへ
  - MRI-CGCM3  $\rightarrow$  MRI-ESM1 (~2013年)
  - MRI-ESM2.0(最新版)
- 最新モデルMRI-ESM2.0の性能
- 今後に向けて
- ・まとめ



### 地球の気温の変化と地球温暖化研究の歴史





### 真鍋博士の初期の研究

Manabe and Wetherald 1967

#### 1次元放射対流平衡モデルを用いたCO2変化 に対する大気の応答



CO<sub>2</sub>倍増(300→600ppm)により
対流圏で温度が上昇、成層圏で低下
相対湿度一定、雲量一定などのシンプルな仮定⇒ 現在においても妥当な近似
地上気温は+2.36℃

#### 81.7°N 66.5°

海

60

陸

60°

#### 3次元気候モデルを用いた最初の CO<sub>2</sub>倍増実験

- 格子間隔は約500km
- 鉛直9層
- ・領域は1/6球、仮想的な海陸分布
- 積雪、海氷を表現
- 海洋は熱容量のない水面



- 対流圏で昇温、成層圏は冷却
   高緯度で昇温が大きい

   雪氷アルベドフィードバック
   大気下層が安定

   熱帯では地表よりも対流圏上 部で昇温が大きい
  - 湿潤対流調節による
  - 気温が高いと湿潤断熱気温減率がより安 定となる
- 全球地上気温は+2.92℃

現在知られている地球温暖化の基本的特徴を明らかにし、 物理的解釈を与えた

#### Manabe and Wetherald 1975



気象研究所気候モデル・地球システムモデルの系統図



### 大気大循環モデルMRI-GCM-Iから気候モデルMRI-AGCM1へ



#### 気象研究所気候モデルMRI-CGCM1の開発



#### MRI-CGCM1による温暖化予測実験の結果

年率1%でCO2濃度を徐々にCO2増加させる実験(CO2漸増実験)による温暖化予測



### MRI-CGCM1による温暖化予測実験の結果

#### CO2漸増(年率1%)実験における地上気温変化の緯度分布



#### 気象研究所気候モデルMRI-CGCM2.0の開発



#### MRI-CGCM2.0において北極の海氷分布の表現が改善 3月 9月















海洋の循環が改善したことに関連 北大西洋子午面循環(AMOC) Ocean Meridional Overturnin 1500 Depth [m] 3500 4500 EQ Latitude Global Ocean Meridional Overturning Ξ む黙 1500 4000 北極 赤道 海洋の熱塩循環の再現性が重要

 海洋の熱塩循環の再現性が重要
 海氷の再現性に強く影響
 温暖化によってAMOCが弱化 Øえば、Stouffer et al. 1989

MRI-CGCM2.0

MRI-CGCM1

Yukimoto et al. 2001

#### 気象研究所気候モデルMRI-CGCM2.3の開発



### MRI-CGCM2.3における雲の表現の改善

#### 気候モデルにとって雲の表現は極めて重要

- ・雲は地球の平均気温を大きく左右
  - 雲には日傘効果と温室効果の放射効果
    - 日傘効果:日射(=短波放射)を遮って地表を冷やす効果
      - 下層雲には主に日傘効果
    - 温室効果:赤外線(=長波放射)を閉じ込めて地表を温める効果
      - 上層雲には主に温室効果
  - ・ MRI-CGCM2.3で雲の表現が改善
    - 特に熱帯の下層雲が減少
    - 雲の放射効果が衛星観測に近づいた
- ・ 雲は<u>気候感度\*</u>を大きく左右
  - \* CO, 倍増によって地球の地上気温が何度上がるかの指標
  - 気温が上昇する時、もし**下層雲が減る**と
    - 日傘効果が弱まり昇温を強めようとする
    - → 気候感度大
  - 逆に、もし**下層雲が増える**と
    - 日傘効果が強まり昇温を弱めようとする
    - → 気候感度小









雲の放射効果 (緯度分布)



### MRI-CGCM2.3による全球地上気温変化の再現性

全球平均気温変化の過去再現と将来予測



Yukimoto et al. 2001 当時の実験データで新たに作図

Yukimoto et al. 2006b

## 気候モデルから地球システムモデルへ

#### 気象研究所気候モデルMRI-CGCM3/地球システムモデル MRI-ESM1の開発



#### 気象研究所地球システムモデル MRI-ESM1





### 最新モデルMRI-ESM2.0の性能

#### MRI-ESM2.0による地球のエネルギー収支の再現性



現在の地球は、

- 平均で340W/m<sup>2</sup>の太陽放射を受けるが、雲や地表面での反射・吸収され、そのうちの約100W/m<sup>2</sup>が宇宙へ戻る。
- 地球は長波放射で冷やされ、約 239W/m<sup>2</sup>が宇宙へ出て行く。
- 差し引き約1W/m<sup>2</sup>で地球温暖化 が進んでいる。

 MRI-ESM2.0はこれら大気上端 での収支を<u>1W/m<sup>2</sup>以内の誤差</u>で 精度よく再現

・地表面(観測の不確実性も大きい)でも数W/m<sup>2</sup>以内

- 上段(黒)は観測(Wild et al. 2015)
- 下段(赤)は MRI-ESM2.0
- 単位は W/m<sup>2</sup>

historical 実験の 1986-2005平均 5 アンサンブル平均

#### 年平均大気上端放射の誤差

衛星観測 (CERES-EBAF) との差



#### Yukimoto et al. 2019

年平均地上気温の誤差

再解析 (JRA-55) との差

#### 放射収支の精度が良くなることによって、地上気温の再現性も向上



historical 1986-2005年の平均,5メンバー平均

#### 大気上端短波放射の誤差(RMSE)のモデル間比較



#### 地上気温の誤差(RMSE)のモデル間比較



\*ただし、参照値をJRA-55から 別のデータ(例:ERA-Int.)に すると微妙に順位が変わる。

### 全球平均地上気温の過去の変化の再現性



<sup>\*</sup>観測は年々の値、モデルはhistorical実験の5メンバー平均を5年移動平均



気候感度は直接観測できない量であり、長年、その 確からしい値を求める研究が続けられてきた。









#### ■気候再現性の更なる向上

- ・ 熱帯降水分布の改善
  - 多くの気候モデルに共通する降水量の誤差
    - ・ ダブルITCZ(赤道の南側で降水過剰)
    - 浅い積雲領域での降水過剰
    - インドモンスーン降水過少
    - 西部インド洋の降水過剰
- ・過去の気候変化の再現性向上
  - エーロゾルと雲の相互作用の効果の評価

#### ■季節予報、短期・中期予報の評価

- ・ 予測精度の向上
  - 気象庁の季節予報、短期・中期予報への貢献



#### **CMIP6モデル平均**







#### 年平均降水量の観測との相関





- ・気象研究所の筑波研究学園都市への移転(1980年)に伴うスーパーコン
   ピュータの導入を契機に、大気大循環モデル、気候モデルの開発が始まった。
- 気候科学の発展とともにモデルは高度化され、解像度が高くなるとともに、 プロセスも精緻化・複雑化してきた。
- 2010年ごろから、炭素やオゾンなどの物質循環過程が組み込まれ、気候モデルは地球システムモデルへと発展してきた。
- IPCC第1次評価報告書(1990: MRI-AGCM1)以降、第2次(1995: MRI-CGCM1)、第3次(2001: MRI-CGCM2.0)、第4次(2007: MRI-CGCM2.3)、第5次(2013: MRI-CGCM3/MRI-ESM1)、第6次(2021:MRI-ESM2.0)に対し、常に最新のモデルによる結果を提出してIPCCに貢献してきた。
- より高いレベルでの科学的考察を可能にするため、また地球温暖化予測の信頼性を高めるため、現在気候の再現性や過去の気候変化の再現性を重視して開発を行ってきた。
- •現在最新の地球システムモデルMRI-ESM2.0は、これら再現性において高い 性能を示す。

### ご清聴ありがとうございました。