

地球温暖化予測の最近20年の進展*

行 本 誠 史**

1. はじめに

「地球温暖化」が、今日ほど社会的に大きな注目を集め、また地球科学の非常に幅広い分野にわたるテーマとなってきたのはこの20年ほどの間である。特に1988年に気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が設立されて以来、1990年に最初に出された評価報告書 (FAR)、1995年の第2次評価報告書 (SAR)、さらに2001年の第3次評価報告書 (TAR) と、提出される毎にそれらに寄与する研究機関、研究者の数とその内容が飛躍的に増大してきている。2007年には第4次評価報告書 (AR4) が提出される予定で、そこではさらに多くの研究機関からの寄与が取り入れられる見込みである。ここでは、これら IPCC 報告書に沿って、気候モデルの変遷に焦点を絞って概略を紹介することとする。

最初の数値3次元気候モデルを用いた気候変化予測実験は Manabe and Stouffer (1980)¹⁾によって行われた。その後、この種の気候モデルはいくつもの機関によって開発がすすめられてきている。その発展の歴史をモデルの構成及び解像度、モデルに取り入れられた物理過程、現在の気候を再現するパフォーマンス、および温室効果気体増加に対する全球平均気温応答の大きさである気候感度などについて見ていく。またこれら気候モデルによる将来の気候変化予測の結果についても紹介したい。

なお、いわゆる「地球温暖化」を指して、IPCCの報告書ではより広い定義である「気候変化 (Climate

Change)」を用いているので、本稿でも気候変化という言葉を使う。

2. モデルの構成と高解像度化

FARにおいては、大気大循環モデル (AGCM) に、海流の効果を陽に含まない海洋混合層モデル (スラブ海洋混合層) を結合したモデルを用いた平衡応答実験が22のモデルが参加して行われた。AGCMの水平解像度は500 km程度で、鉛直層の数は10程度のもので主流であった。気候変化の時間発展を調べるため、AGCMに力学を含む海洋大循環モデル (OGCM) を結合したモデル (AOGCM) も4つが参加した。当時は計算機的能力が低かったため、大気・海洋ともに水平解像度500~700 kmと低解像度で、しかも積分できる期間も最長のもので100年と短かった。

FARから5年後のSARではAOGCMの数が16へと大幅に増えた。その水平解像度は、大気モデルでは高いもので250 km程度であったが、多くは400~500 km、海洋モデルでは高いもので1°であったが、多くは3°程度であった。海洋モデルの鉛直層数は9~29であり、16のモデルの中央値は17であった。

さらに、TARでは参加するAOGCMが31に増加したが、大気モデルの解像度はSARとあまり変わらなかった。これは新たに参加した機関のモデルが比較的解像度であることによる。海洋モデルの解像度はいくらか高くなり、2°~2.5°が中心で、最も高いものでは0.67°となった。しかしこの解像度では、後述する海洋の中規模渦はまだ解像できない。

次のAR4 (報告書はまだ出版されていないが、参加モデル等についての情報は http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php で得られる；2006/12/1時点) では23のAOGCMが参加している。最も高解像度のモデルはCCSR/NIES/FRCGCによる大気110

* Progress of global warming projection in the last 20 years.

** Seiji YUKIMOTO, 気象研究所気候研究部。
yukimoto@mri-jma.go.jp

© 2007 日本気象学会

km, 56層, 海洋 $0.2^{\circ} \times 0.3^{\circ}$, 47層である。その他のモデルも全般に高解像度になってきており, 23モデルの中央値でそれぞれ示すと, 大気250 km, 24層, 海洋 1.5° , 31層となっている。

3. 気候変化とモデルの物理過程

気候変化の予測のためのモデルは, 気候システムにおける基本的な各種の物理過程, すなわち放射, 拡散, 対流, 凝結・降水, 地表面(顕熱・潜熱)フラックス, 摩擦, 地表面過程(地面温度, 土壤水分, 積雪)などを適切に表現する必要がある。それらの多くはモデルの格子点値で直接表現することができないサブグリッドスケールの過程なので, 格子点値でパラメータ化する必要がある。気候モデルは, 前節に述べた高解像度化に加え, これら物理過程のパラメータ化についてもこの20年間で大きな発展を遂げてきた。

FARで用いられたAGCMでは, 上に挙げた物理過程はほぼ取り入れられていたが, それぞれはかなり簡単なスキームが多かった。たとえば積雲対流過程では湿潤対流調節が多く用いられ, 最近主流のマスフラックス方式のスキームは少なかった。当時, 現在も多く用いられている荒川シューバート・スキームも存在していたが, 計算コストの面で長期積分に向かなかったようである。地表面過程については簡単なバケツ・スキームが一般的であり, 現在ほとんどのモデルが取り入れている多層土壌や植生キャノピーは考慮されていなかった。放射過程では時間間隔を伸ばして計算コストを節約する目的で, 日変化を考慮しないモデルが約半数であった。

海水は気候変化予測においてそのモデル化が非常に重要な部分である。なぜなら, 気温上昇により海水が減少するとアルベドが小さくなり, 地表面での日射の吸収量に影響してさらに温度を上昇させるという正のフィードバック効果(氷・アルベド・フィードバック)があるためである。FARで用いられた海水モデルは海水を一枚板として扱い, 融解・凍結の熱力学過程のみ表現するものが一般的であった。その後, 海水モデルは精緻化が進み, 海水の割れ目(リード)の効果や海流による移動と応力による変形(レオロジー)が取り入れられていった。AR4モデルの多くは熱力学過程に加え, リードとレオロジーの効果を入れたものが大勢を占めるようになってきている。

気候変化予測において, モデルにおける雲の表現は最も重要であり, かつ現在でも多くのモデル間の最大

の不確実性要因である。一般に雲は太陽からの短波を反射し地表を冷却する効果と, 長波を吸収し地表へ射出することにより地表を暖める温室効果の両方を持っている。下層の雲は短波の反射に強く効くので, 増加すると負のフィードバック効果を持つ一方, 熱帯上層の絹雲の増加は温室効果を強める正のフィードバック(あるいは短波とキャンセルしほぼゼロの)効果を持つと考えられている。雲の正味のフィードバックは, これら正負のフィードバックの微妙なバランスで決まると考えられ, モデルによってかなり異なり符号さえ一致しない。さらにそれぞれの効果は, 雲の微物理やサブグリッドの分布や形状などにも大きく依存するためモデル化が難しい。

モデルにおける雲の取り扱い, FARの頃は雲量固定あるいは相対湿度による雲量診断で, 雲の光学的特性は一定値とするものが多かった。SARでは液相と固相の雲水を明示的に予測するモデルが現れた(Senior and Mitchell 1993²⁾) が, 水と氷の割合については経験的な取り扱いであった。TARではより多くのモデルが雲水(+雲氷)予報スキームを導入してきた。初期のスキームでは雲水と雲氷の合計の収支方程式で, 温度依存で水と氷に分割していたが, 液相と固相を陽に区別したスキームも現れた。多くのモデルは雲を作るのにサブグリッドの水蒸気分布を適当な確率密度分布を用いて表現していたが, それに代わり雲の気塊の保存式に基づく雲量予報スキームが使われた。現在では, 雲の微物理(雲粒/氷晶の形成・成長及び降水)を陽に表現するスキームがあるが, 温暖化予測モデルにはまだ一部にしか使われていない。

大気中のエアロゾルが気候に与える影響はSAR以降次第に重要視されるようになってきている。一般にエアロゾルは, 一部の種類を除き, 日射を反射することで地表に対し冷却の効果(直接効果)を持ち, 温室効果気体の増加による温暖化を緩和する働きを持つ。また, エアロゾルは雲の凝結核として働くものがあり, 雲粒の数密度に影響して雲の光学的特性を変化させる効果(第1種間接効果)や, 雲水・氷晶から降水への変換効率に影響して雲の寿命を変化させる効果(第2種間接効果)を持つ。これら直接・間接効果を通して, 人間活動により排出されるエアロゾルが気候変化に関わってくるため, モデルでこれらの効果を適切に表現しなくてはならない。

SARでは地表面アルベドを増加させることで硫酸エアロゾルの直接効果を簡易に表現した実験(Mit-

chell *et al.* 1995³⁾) が用いられた。TAR では多くの機関でエアロゾルの効果を入れた実験が行われたが、直接効果のみがほとんどで、ごく一部 (MPI, HadCM2 と CCSR/NIES2) で間接効果が導入された。TAR までは硫酸エアロゾルのみ外部条件として与える扱いで、その他の種類 (海塩、鉍物ダストや黒色炭素など) は含まないものが大多数であったが、AR4 では多種類のエアロゾルをインタラクティブに扱うモデルが現れはじめています。

海洋には中規模渦とよばれる 100 km オーダーの渦が満ちていて、海洋の南北熱輸送などに大きな役割を果たしていることが、この 20 年の間に知られるようになった。しかしこのスケールの渦は、現在温暖化予測に用いられるほとんどの気候モデルの解像度ではまだ表現できない。したがって一般に海洋中規模渦による輸送などサブグリッドスケールの混合の効果はパラメタ化されている。FAR のモデルでは定数の水平・鉛直拡散係数を用いていたが、SAR 以降中規模渦の輸送効果をパラメタ化 (たとえば Gent and McWilliams, 1990⁴⁾) するスキームが用いられるようになり、全球の温度躍層の深さや勾配、海洋の南北熱輸送が大きく改善してきた。

4. モデルのパフォーマンスと気候感度

気候システムは様々な現象が相互作用しあっているため、気候変化予測に用いるモデルは、予測対象とする現象を現実的に表現できることはもちろん、あらゆる面において欠点の少ない総合的な表現能力が求められる。そのなかでも季節ごとの気圧場、気温、風、降水などの大規模な分布が適切に表現されるかどうかは、気候モデルに対する最も基本的な評価であり、FAR から現在に至るまで常にこれらの評価は行われてきている。FAR では AGCM が中心であったが、SAR 以降の AOGCM でも大規模な季節ごとの分布はそれなりによく表現されている。全般に TAR, AR4 へとモデルの改良とともに精度は向上してきている。

気候モデルの気候感度は、二酸化炭素を現在レベルの 2 倍にする放射強制力を与えたときの平衡応答における全球平均地上気温の上昇量で見積もられる。モデルが予測する将来の気温上昇の大きさは、海洋による熱の吸収にも若干左右されるが、ほぼ気候感度に比例するため、気候感度のモデル間のばらつきは気候変化予測における不確実性に直結する。気候感度は FAR モデル間で 1.9~5.2°C (平均 3.7°C, 標準偏差 0.9°C)

と大きくばらついていましたが、SAR モデル間で 2.1~4.6°C (平均 3.8°C, 標準偏差 0.8°C), TAR モデル間でも 2.0~5.1°C (平均 3.4°C, 標準偏差 0.9°C) と不確実性は依然として小さくなっていない。

気候感度の不確実性の要因は、雲フィードバックの寄与が最も大きく、晴天放射フィードバック (水蒸気フィードバックと気温減率フィードバック) の寄与は相対的に小さいことが早くから示唆されている (FAR)。 (ただし対流圏上部の水蒸気量変化の影響についての不確実性にかなり議論がある。) 多くのモデルは、雲放射強制力 (CRF) を観測の信頼性の範囲内で再現しているが、二酸化炭素増加に対する CRF の応答はモデル間で大きく違ってくる。最近では正味放射の雲フィードバックについてはモデル間のばらつきが収束してきているが、短波放射と長波放射の配分はモデル毎に大きく異なっており (TAR)、フィードバックの不確実性はあまり減少していない。ただ最近では、雲フィードバックについての理解が深まり、不確実性の主要な原因が下層雲の表現にあることがわかってきた。海洋層積雲などをモデルで適切に表現することが重要な課題であることが認識されている。

初期の気候モデルでは大気モデル及び海洋モデル双方の欠点により、結合させたときに気候がドリフトしていき、現実的な現在気候をうまく再現できない問題があったため、大気海洋間のフラックスに補正を与えていた。その後、大気モデル・海洋モデル双方の改良が重ねられていくなかで、フラックス補正を使わなくても、様々な視点から見て満足すべき程度まで、現在気候の再現性が次第に改善されてきている。これには特に、モデルの高解像度化に加え、海洋中規模渦のパラメタ化による南北熱輸送の改善や雲スキーム改良に伴う CRF の分布の改善が寄与していると考えられる。AR4 モデルの大部分ではフラックス補正は使われていないが、まだバイアスやドリフトがいくらか残っている。

気候変化においては、気候の平均状態の変化だけでなくその変動性の変化も重要な要素である。その中でもエルニーニョ南方振動 (ENSO) は最も大きな気候の変動性であることから、その将来の変化について関心が高い。FAR の頃の AGCM でも、エルニーニョ時の海面水温偏差に対する応答が調べられ、現実的な応答をすることが示されていた。初期の粗い解像度の AOGCM を用いた現在気候の再現においても、ENSO に似た熱帯太平洋の変動性が再現されたが、

一般に振幅が小さく表現が不十分であった。その後モデルの解像度も高くなり、次第により現実的な ENSO が表現できるようになってきた。TAR モデルでは ENSO の表現がかなり良くなってきたが、SST 偏差の極大が西にずれ、振幅が小さいなどの欠点がある。

5. 予測結果

温室効果気体増加により将来予想される気候変化については、FAR における平衡応答実験の結果から以下のような主要な特徴が得られている。

- 大気下層及び地表付近で昇温し、成層圏は冷却する。
- 地上気温の上昇は、相対的に高緯度で大きく夏より冬に大きい。また海洋より大陸で昇温が大きい。
- 全球降水量は増加し、昇温が大きいほど増加も大きい。高緯度では年間を通じて増加する。
- 海水と積雪の面積は減少する。
- 土壌水分量は高緯度の冬に増加、北半球大陸の夏に減少する。

これらは SAR, TAR と経て現在までほぼそのまま追認され、さらに定量的な見通しや解釈が追加・拡張されてきた。たとえば SAR の二酸化炭素漸増実験の結果から、地域的な分布は平衡応答に似るが、南極周辺と北部北大西洋で昇温が相対的に小さくなることが示唆された。また亜熱帯で降水が減少することが示唆された (SAR までは変化が小さいとしていた)。

定量的な全球平均地上気温の将来見通しは、上述のモデル気候感度のばらつきの他に、与える強制についても様々なシナリオが用いられた結果、FAR での $+1.5^{\circ}\text{C}\sim+4.5^{\circ}\text{C}$ から TAR では $+1.4^{\circ}\text{C}\sim+5.8^{\circ}\text{C}$ と、ばらつきの幅は小さくなっていない。しかし、自然起源と人為起源の歴史的な強制を与えることにより、20世紀の地上気温の変化傾向が定量的に再現でき、自然起源のみでは再現できないこと (TAR) が示されたことなどにより、予測の信頼性は向上してきている。

いくつかの注目される対象について、これまでの IPCC 評価報告書でまとめられた気候変化の見通しを以下に示す。

- 硫酸エアロゾルの効果を入れると、北半球中緯度の昇温はいくぶん減少し、北半球高緯度冬季の大きな昇温も弱まる (SAR)。また、地表温度の上昇が小さくなることから降水量の増加も小さくなる

(SAR)。

- 大西洋の海洋熱塩循環が弱まり、さらに北大西洋北部の昇温も弱まる。高緯度の降水増加による塩分濃度低下と加熱による昇温によって海洋表面の密度が低下し、子午面循環を駆動している高緯度の海水の沈み込みが妨げられるためと考えられる。
- 多くのモデルがエルニーニョ的な平均応答を示す、つまり中東部赤道太平洋で西部赤道太平洋より大きく昇温し、降水域が東にシフトする。
- 極端現象についての予測が加えられた。極端に高い最高気温の頻度が増加し、極端に低い最低気温の頻度が減少すること、また降雨強度が増加する。
- 熱帯低気圧の変化について、最近の高解像度 AGCM 実験から、全体の発生数は減少するが非常に強い熱帯低気圧は増加する可能性が示唆されている。
- 中高緯度の大気場の平均応答が南北両半球の環状モード (NAM, SAM) に似た構造を示すモデルが多い。

これらの見通しについては、たとえばエルニーニョ的な平均応答、中高緯度の環状モードに似た構造、熱帯低気圧の変化など、その原因について一致した見解の得られていないものも多い。また ENSO の変動度の変化など、将来の変化についてモデルごとに異なっていて見通しがつかめていない現象もある。

6. おわりに

この20年で気候モデルによる温暖化予測は大きく進展してきた。それとともに気候モデルに対する要請は、予測の信頼性向上、物質循環や植生との相互作用の評価などに加え、産業や生活、生態系への影響評価など、高度化・多面化してきている。今後は気候モデルの高精度化だけでなく、気候以外の分野の研究との連携が特に重要となってくると考えられる。

参考文献

- 1) Manabe, S. and R. J. Stouffer, 1980 : J. Geophys. Res., **85**, 5529-5554.
- 2) Senior, C. A. and J. F. B. Mitchell, 1993 : J. Climate, **6**, 393-418.
- 3) Mitchell *et al.*, 1995 : Nature, **376**, 501-504.
- 4) Gent, P. R. and J. C. McWilliams, 1990 : J. Phys. Oceanogr., **20**, 150-155.