

地球システムモデル

河 宮 未知生*

1. 地球システムモデルとは

地球温暖化がもたらす環境変化の包括的な予測を行う際、炭素循環と気候変化の相互作用など、従来の大気海洋結合大循環モデル (Atmosphere-Ocean General Circulation Model ; AOGCM) には含まれていない過程を考慮することの重要性が認識されてきている。実際、世界各国の研究機関で海陸の炭素循環や、大気微量組成間の化学反応など、生物、化学的過程を含んだ AOGCM が多数開発されてきており、それらを総称して地球システムモデル (Earth System Model ; ESM) と呼ぶことが多い。国内では、気象庁気象研究所や海洋研究開発機構などで開発が進んでいる (河宮 2007)。

地球温暖化予測に関する最新の知見を得るうえで重要な役割を果たす第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 ; CMIP5) の実験仕様においても、ESM の使用が必須となる実験がいくつか設定されており (Taylor *et al.* 2012), CMIP5 参加機関の多くから ESM を用いた実験結果が提出されている。ESM を用いた実験では、森林伐採などの土地利用変化が地球環境に与える影響の評価も可能となる設定になっており (Hurtt *et al.* 2011), 温室効果気体の放出に限らず人間活動の影響を総合的に解析できるようになってきている。このことは、従来の AOGCM と大きく異なる点と言えよう。

ESM がさかんに開発されるようになったきっかけの一つは、炭素循環フィードバックによる温暖化の加速の可能性が示されたことであろう (Cox *et al.* 2000)。多くの ESM が炭素循環フィードバックは正の符号をもつこと (すなわち温暖化の加速) を示して

いるが、最近では陸域植生の活動が窒素量により制限されることを考慮すると、この符号が負にもなりうるということが分かってきた (Thornton *et al.* 2009)。現在、多くの研究機関が ESM への窒素循環過程導入に取り組んでいる。また、海洋の酸性化 (Yamamoto *et al.* 2012) や貧酸素化 (Frölicher *et al.* 2009) の予測にも ESM が用いられるようになってきており、従来取り沙汰されてきた温暖化問題にとどまらず、人間活動による環境改変の影響を物質循環も含めて検討するために不可欠な道具になってきている。

さらに、気候と物質循環、生態系間の相互作用が鍵となる古気候問題に関しても、ESM は有用であり、上で触れた CMIP5 実験仕様でも、ESM を用いた古気候実験が採用されている。

2. 中程度の複雑さの地球システムモデル (EMICs)

ふつう ESM というとは AOGCM をベースに各種過程を導入したものを指すことが多い。しかし、この種のモデルの欠点は計算量が多く、計算資源の面で制約が大きいことである。そこで、AOGCM の欠点を補うよう、「中程度の複雑さの地球システムモデル」 (Earth System Models of Intermediate Complexity ; EMICs) と呼ばれるモデルが最近盛んに開発されている (Claussen *et al.* 2002)。これは、大気、海洋の運動方程式や放射過程の取り扱いを大幅に簡略化しつつ、気温や深層循環といった基本的な気候変数の地理分布は出力されるよう工夫したモデル群のことである。大型計算機を用いなくとも長期間の積分が可能である。

ポツダム気候影響研究所 (ドイツ) で開発された CLIMBER-2 (Petoukhov *et al.* 2000) などがよく知られており、国内では東京大学や海洋研究開発機構で開発が進んでいる。計算負荷が軽いことを活かし、パラメータを変えて多数の実験を行うことで、AOGCM

* Michio KAWAMIYA, 海洋研究開発機構。

kawamiya@jamstec.go.jp

© 2013 日本気象学会

ベースの ESM による結果の不確実性評価を行うなど、ESM と相補的に利用されている。2013 年発行予定の IPCC 第 5 次報告書に向け、各国で開発された EMICs による温暖化予測結果の相互比較プロジェクトも進行中である (Eby *et al.* 2012)。

3. 今後の発展

近年、地球温暖化の影響が顕わになり始めたという印象があるが、そうした状況に呼応して、ESM の適用対象も多様化してきている。生物圏と大気圏、海洋圏といった地球環境の構成要素間の相互作用の強度を評価するといった学術的な動機に基づく研究もさることながら、地球環境変化自体の変化も考慮にいたれた統合的な社会経済の将来シナリオの開発、温暖化に対抗して気候を人工的に制御する「ジオエンジニアリング」(杉山ほか 2011) の影響評価など、社会の意思決定に関わる問題にも適用され始めている。

さらに、地球環境に影響を与えるようになった人間社会を大気や海洋、生物圏と同様の意味で地球環境の構成要素としてとらえ、ゆくゆくは地球システムモデルに取り込むことが、温暖化適応策の包括的検討のためには必要であるとの認識も生まれてきている (Steffen *et al.* 2004)。しかし、将来そのようなモデルが開発されたとして、あまりに複雑なモデルの結果を人間が理解できるのか、という不安はつきまとう。意思決定のための道具として使いこなすためには、多岐にわたる関連分野の知見を俯瞰する、異分野間の研究者たちの連携が必要となろう。

参 考 文 献

- Claussen, M. *et al.*, 2002 : Earth system models of intermediate complexity : closing the gap in the spectrum of climate system models. *Clim. Dyn.*, **18**, 579-586.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall and I. J. Totterdell, 2000 : Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**, 184-187.
- Eby, M. *et al.*, 2012 : Historical and idealized climate model experiments : an EMIC intercomparison. *Clim. Past Discuss.*, **8**, 4121-4181.
- Frölicher, T. L., F. Joos, G.-K. Plattner, M. Steinacher and S. C. Doney, 2009 : Natural variability and anthropogenic trends in oceanic oxygen in a coupled carbon cycle-climate model ensemble. *Global Biogeochem. Cycles*, **23**, GB1003, doi:10.1029/2008GB003316.
- Hurt, G. C. *et al.*, 2011 : Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100 : 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Clim. Change*, **109**, 117-161.
- 河宮未知生, 2007 : 地球システムモデリング. *天気*, **54**, 275-278.
- Petoukhov, V., A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki and S. Rahmstorf, 2000 : CLIMBER-2 : a climate system model of intermediate complexity. Part I : model description and performance for present climate. *Clim. Dyn.*, **16**, 1-17.
- Steffen, W., A. Sanderson, P. D. Tyson, J. Jäger, P. A. Matson, B. Moore III, F. Oldfield, K. Richardson, H. J. Schellnhuber, B. L. Turner II and R. J. Wasson, 2004 : *Global Change and the Earth System*. Springer-Verlag, 336pp.
- 杉山昌広, 西岡 純, 藤原正智, 2011 : 気候工学 (ジオエンジニアリング). *天気*, **58**, 577-598.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl, 2012 : An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498.
- Thornton, P. E. *et al.*, 2009 : Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks : results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*, **6**, 2099-2120.
- Yamamoto, A., M. Kawamiya, A. Ishida, Y. Yamanaka and S. Watanabe, 2012 : Impact of rapid sea-ice reduction in the Arctic Ocean on the rate of ocean acidification. *Biogeosciences*, **9**, 2365-2375.