

大気海洋結合系のシミュレーション

小守 信正*

(独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター)

概要

本講義では、気候システムにおける海洋圏・雪氷圏の役割と、それらを含む大気海洋結合系の数値シミュレーションについて概要を述べた後、近年注目を集めている中緯度域での大気海洋相互作用について紹介する。

1 はじめに

気候システムは、大気圏や海洋圏、雪氷圏などのサブシステムから構成されており、それらは熱・水・運動量を相互に交換して変動しながら、全体としての気候システムを維持している。そこでは、エルニーニョ現象に代表される熱帯域の現象や、北極振動などの極域の現象が、日本付近（中緯度域）の天候にも影響を与えている。また、地球全体を巡る大気や海洋の大循環の中には、数千km程度の大気の高・低気圧や、数百km程度の海洋の中規模渦が溢れている。

このような多圈・多領域・多階層の相互作用からなる気候システムの変動メカニズムを理解し、将来予測へ繋げるためには、様々な観測データの蓄積に加えて、大気海洋結合モデルを用いた高解像度の全球シミュレーションを行い、この『仮想地球』の中で生じる現象を詳しく調べることが必要である。このような大規模シミュレーション研究は、地球シミュレータ（図1）に代表される近年の大型計算機の発展により、ようやく可能となりつつある。

本講義では、講師が実際の研究に使用している大気海洋結合モデル CFES を例として、大気海洋結合系の数値シミュレーションについて概要を紹介するとともに、今後の発展について展望する。

2 大気海洋結合モデル

大気と海洋の温度や速度およびそこに含まれる物質濃度（水蒸気や塩分など）の時間変化は、回



図 1: 地球シミュレータの外観。青い筐体は演算ノード、緑の筐体は通信ネットワーク。画像提供：独立行政法人海洋研究開発機構地球シミュレータセンター。

転（自転の影響）と成層（重力の影響）を考慮した流体力学の方程式系によって記述される。これを3次元的な格子状に離散化して数値的に取り扱えるようにした計算プログラムは、大気大循環モデル・海洋大循環モデルと呼ばれる。

実際には、元の方程式系を離散化する前に、着目する現象の時空間規模や特性に合わせた近似を行う。例えば、全球規模の大気や海洋の循環を扱う場合、鉛直方向の圧力傾度力と重力がバランスしているという静力学平衡の近似を導入することが多い。また、利用可能な計算資源も考慮した上で、現象を時空間的にどの程度まで細かく計算するか（解像度）を決定する。大気や海洋は非線形な系なので、解像できない小さな現象が、解像できる大きな現象の時間変化に与える影響を何らかの形で組み込むことにより、現実的な計算結果が得られるよう工夫をする。このような手続はパラメタリゼーションと呼ばれ、大循環モデルによるシミュレーション結果の不確実性の元凶となっている。

大気大循環モデル（陸面モデルを含む）と海洋大循環モデル（海水モデルを含む）を組み合わせて同時に計算するようにしたプログラムは、大気海洋結合モデルあるいは気候モデルと呼ばれる。以下では、これら要素モデル群とその結合方法を

*E-mail: komori@jamstec.go.jp

見ていく。なお、近年では、これらに大気化学モデルや陸域・海域の生態系モデルなどを組み合わせた地球システムモデルも開発され、地球温暖化予測に使用されている（行本氏の講義を参照のこと）。

2.1 大気大循環モデル

大気大循環モデルとは、気温・湿度・風速などの時間発展を計算するプログラムである。気温・水蒸気・渦度・発散の移流などを計算する部分は力学過程と呼ばれ、我々の使用している大気大循環モデル AFES では球面スペクトル変換法を用いている。また、放射や雲の計算を行う部分は物理過程と呼ばれる。大気組成やエアロゾルの空間分布は入力データとして与える。

2.2 陸面モデル

陸面モデルとは、土壤の温度・水分や積雪の時間発展、植生に関連する熱・水の遣り取り（蒸発散や根からの水の吸い上げ）などを計算するプログラムである。植生タイプ（例えば広葉樹林・針葉樹林や草地、沙漠など）や土壤タイプの分布自体は入力データとして与える。

2.3 海洋大循環モデル

海洋大循環モデルとは、水温・塩分・流速などの時間発展を計算するプログラムである。大気とは異なり、海洋は周囲を大陸に囲まれているため、格子法を用いて計算することが多い（我々の使用している海洋大循環モデル OFES もそうしている）。また、水深の空間的な変動が大きいため、鉛直方向の座標の決め方には注意が必要で、様々な流儀が存在する。

2.4 海氷モデル

海水モデルとは、海水の密接度（計算格子内に存在する割合）・厚さ・流速などの時間発展、海水の生成・融解などを計算するプログラムである。

2.5 要素モデルの結合

大気・陸面・海洋・海水の各要素モデルを結合させるためには、一定の間隔（一時間毎や一日毎など）で要素モデル間の熱・水・運動量フラックスを求め、これを境界条件としてそれぞれの時間発展を計算する。大気海洋結合モデル全体として

の境界条件は、太陽からの短波入射のみを考える。土壤深部や海底下との熱・水の遣り取りは（普通は）考えない。なお、以下では、陸面・海水面・海氷面をまとめて地表面と呼ぶことにする。

降水（降雨と降雪）は大気モデルによって計算され、水フラックスとして他の要素モデルの入力となる（図 2）。ちなみに、降雨と降雪ではその後の取扱いが異なる（例えば海水面では、降雨はそのまま流れしていくが降雪は積もる）。太陽からの短波入射が、雲などの影響を受けて地表面にどの程度到達するか（図 3）、長波放射はどの程度か、も大気モデルによって計算され、熱フラックスの主要な部分となる。

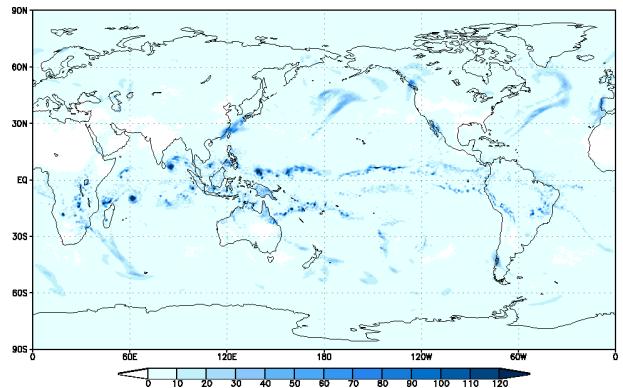


図 2: 大気海洋結合モデルで計算された降水率 (mm/day)。1月1日00時から06時（世界協定時）の平均値。

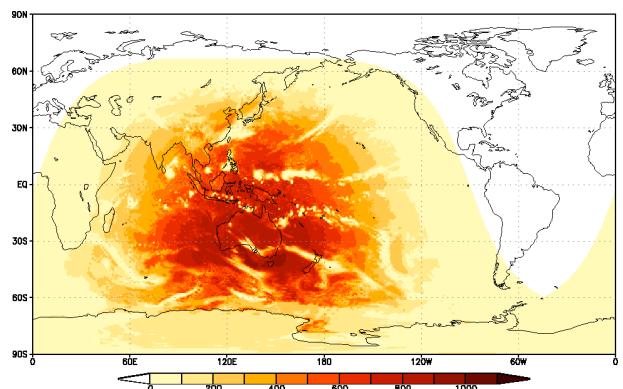


図 3: 大気海洋結合モデルで計算された、地表面上における正味の下向き短波放射 (W/m^2)。1月1日00時から06時（世界協定時）の平均値。1月なので南半球に偏っており、南極は一日中昼、北極は一日中夜である。また、雲に遮られている部分は白く抜けている（図 2 との対応にも注目）。

一方、地表面における顕熱フラックス・潜熱フラックスおよび運動量フラックス（風忯力）は、大

気下層での気温・湿度・風速および地表面の温度などから経験式に基づいて計算される。潜熱とは、相変化に伴う熱のことであり、例えば海面から水が蒸発する場合、海洋は蒸発の潜熱と液体の水を失い、大気は水蒸気（気体の水）を得る。なお、積雪面や海氷面では蒸発ではなく昇華が生じる点に注意が必要である。

これらに加えて、陸面モデルから海洋モデルへは、河川流出に伴う水フラックスが存在する。陸面では、降水や積雪・凍土の融解水をある程度は溜めておくことが可能であるが、限界を超えた分は河川水として放出する。陸上の点と河口との対応関係は、河川流路網データなどから計算する。

3 全球高解像度シミュレーション

講師らの研究グループでは、大気海洋結合モデルCFESを用いて、大気・陸面部分の水平解像度が約50km、海洋・海水部分の水平解像度が約25kmという全球シミュレーションを実施している（図4）。これは、数年から数十年程度の気候変動を対象としたシミュレーションとしては世界最高クラスの解像度であり、地球シミュレータを利用して初めて成し得るものである。

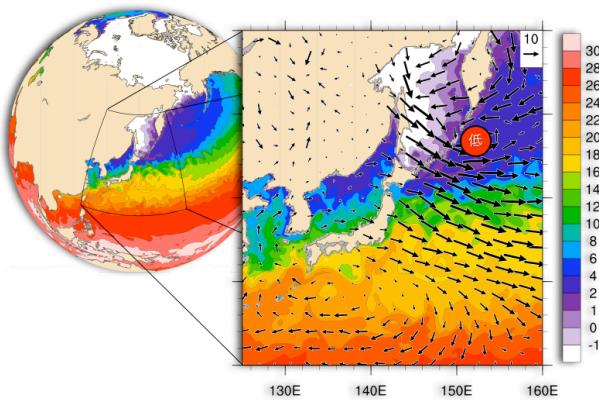


図4: CFESによる全球高解像度シミュレーションの例。色は海面水温、矢印は風速を表す。黒潮続流や親潮に伴う水温前線、オホーツク海の海氷の張り出し、低気圧に吹き込む風などが表現されている。

解像度を高めることにより、まずは地形の再現性が向上する。日本ならば、太平洋側と日本海側の違いが（それなりに）表現できるようになるし、地峡に伴う局所的な風の吹き出しや、島の影響なども考慮できるようになる。さらに、大気や海洋の諸現象の再現性も向上する。大気では、中緯度

の高・低気圧に加えて、弱いながらも熱帯低気圧（台風など）も表現できるようになる。また、海洋の場合、幅が100km程度しかない西岸境界流（黒潮やメキシコ湾流など）や、冒頭で述べた中規模渦が表現できるようになる。その結果、従来行われてきた大気海洋結合シミュレーションとは、質的に異なる結果が得られることが期待される。

4 中緯度大気海洋相互作用

中緯度域における大気海洋相互作用は、講師らの研究グループの主要なテーマの一つである。これまで、中緯度域の海洋変動は大気変動によって一方的に支配され、受動的な役割しかないと考えられてきた。しかし、近年の高解像度人工衛星観測データの発展などにより、黒潮やメキシコ湾流など西岸境界流の変動が、大気場にも影響を与えていることが示されつつある。例えばMinobe *et al.* [2008, *Nature*]は、高解像度の人工衛星観測データと大気解析データ（大気大循環モデルを使ったシミュレーション結果に観測データを同化して構築したデータ）およびAFESを使った数値実験を組み合わせて、降水や地表付近の風の場だけでなく、対流圏全層におよぶ大気の構造にメキシコ湾流が影響を与えていていることを発見した（図5）。メキシコ湾流のような海洋の局所的な変動が、全球規模の大気大循環に与える影響や、気候システムの形成・維持に果たす役割に関しては今後の研究が待たれるが、高解像度の大気海洋結合モデルが強力な研究ツールとなることは間違いないであろう。

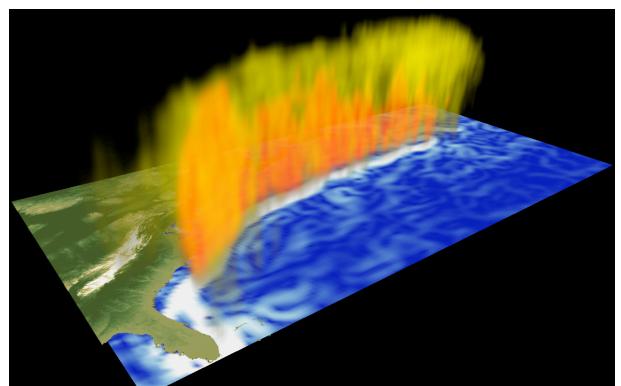


図5: メキシコ湾流上に局在する上昇風が上空約10kmにまで及んでいる (Minobe *et al.*, 2008, *Nature*)。手前左がフロリダ半島。欧州中期天気予報センターの年平均大気解析データより作成。なお、この図は *Nature* 2008年03月13日号の表紙を飾った。画像提供：荒木文明博士・川原慎太郎博士。

参考図書

書店や図書館などで入手可能な、大気海洋結合系の数値シミュレーションに関する和文の参考図書を何冊か挙げておく。

遠藤昌宏, 北村佳照, 石崎廣, 本井達夫 (1996): 大規模大気海洋相互作用の数値モデリング. 烏羽良明 編『大気・海洋の相互作用』第6章, 207–260, 東京大学出版会.

石岡圭一 (2004): 『スペクトル法による数値計算入門』, 東京大学出版会.

住明正, 寺沢敏夫, 岩崎俊樹, 遠藤昌宏, 小河正基, 戎崎俊一 (1997): 岩波講座 地球惑星科学 7『数値地球科学』, 岩波書店.

時岡達志, 山岬正紀, 佐藤信夫 (1993): 気象の教室 5『気象の数値シミュレーション』, 東京大学出版会.