

2. 地球シミュレータの応用

全球・非静力・大気海洋結合 シミュレーションコードの開発


全球・大気および海洋大循環モデルの現状

■ 全球・静力学平衡を仮定したモデル

地球シミュレータの登場により、従来から構築されてきた気候モデルは、大気、海洋ともに、全球 10km 程度の高解像度のシミュレーションが可能になった。大気では台風、梅雨前線など、海洋では海流や渦による熱輸送など、観測値に匹敵するほどに再現できるところまできている（詳しくは、本特集第 2.1 章「大気・海洋のシミュレーション」を参照していただきたい）。しかし、地球シミュレータセンターでこれまで開発してきた大気大循環コード（AFES）や海洋大循環コード（OFES）、大気海洋結合コード（CFES）を含む、従来構築されてきた全球・気候変動予測モデルのほとんどは、これまでの計算機資源の限界を反映して、比較的粗い解像度（100km から 500km）の現象に焦点をあてたモデルであったため、圧力傾度力と重力がつりあっているという静力学平衡状態を仮定している。従来のシミュレーションに用いられてきた 100km から 500km という解像度では、この近似がよく成り立つことから、この仮定は、大域的な現象の再現にはほとんど影響を与えなかった。しかし、この静力学平衡の仮定のもとでは、積雲（入道雲）の生成や維持、集中豪雨、積乱雲や局所的な雄大積雲の下で起こる強い吹き出し風ダウンバーストなどに代表される、静力学平衡近似が成り立たない鉛直方向の速度成分が激しい変化のある現象を、厳密に扱うことはできない。

■ 領域を限定した非静力学モデル

一方、現業の気象予報に活用されている大気領域モデルは、全球モデルに比べて、1 桁から 2 桁解像度が高い。現在、気象庁で予報業務に活用されている日本周辺域に限定された領域モデルは、水平 10km であるが、世界的には数 km のモデルも存在する。水平数 km 以下になると、静力学平衡の近似が成り立たない前述の現象を陽に扱う必要があるので、まさに 3 次元ナビエストークス

 海洋科学技術センター 地球シミュレータセンター
高橋 桂子
takahasi@jamstec.go.jp

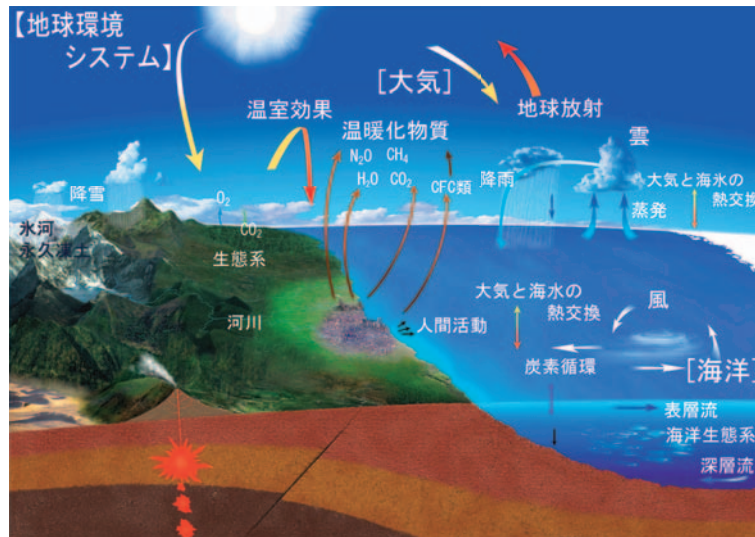


図-1 地球環境を構成する要素

方程式を何の仮定もせず解くことになる。しかし、計算機資源の制限から、領域を限定した範囲内の現象のみを対象としており、境界条件をどのように導入したらよいかについては、常に困難を伴う問題である。さらに、数週間単位の気象予測や、より長い時間スケールの気候変動予測を考える際には、それらの小さなスケールの現象、あるいはそれらの集団が、大気や海洋の中の波動の伝播により、全地球的に影響を与えることになる。この意味から、非静力学的な領域スケールと全球スケールの現象を、丸ごと、高解像度で扱うことのできるような気候モデル、さらにそれによるシミュレーションを許容できる計算機環境が、気候変動予測に必要である。まぎれもなく、地球シミュレータは、このようなシミュレーションに基づく予測を可能にする計算機資源を提供することになる。

気候変動予測の課題

■ 温暖化予測の不確定性

地球上の気候は、大気、海洋、陸面、海氷、生態などの自然環境に加え、人間活動から排出される多くの化学物質など、それらの相互作用が複雑に絡み合った複雑系である(図-1)。現在、気候変動予測のための大気海洋結合モデルは、世界で40を超えており、昨今、学問的な問題のみならず、社会的な問題に取り上げられることも多い温暖化予測においては、これらの予測モデルによるシミュレーション結果をもとに、議論が繰り広げられている。

2001年に発表されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)第3次レポート¹⁾では、2100年までに地球の平均気温は1.5度から5.8度の範囲で上昇すると予測されている。これは、全球平均気温の上昇予測であり、この予測温度幅内の最高と最低温度を比較すると、地球環境はまったくその形相を変えてしまうだろう、といわれている。この問題は、予測の不確定性問題としてたいへん重要視されており、この不確定性をできるだけ減少させるような努力が続けられている。では、なぜこのようなばらつきが生じるのであろうか。

■ 高解像度化とパラメタリゼーション

気候変動予測モデルを構成するパーツをよく見てみると、任意性が高いパラメータあるいは、経験則により近似された定式化が導入されている。これらはパラメタリゼーションと呼ばれており、非常に高解像度でのシミュレーションが可能となったとしても、その解像度以下のスケールの現象に関してはパラメタリゼーションを導入せざるを得ない。しかし、それらのパラメタリゼーションは、予測モデルに任意性を与えることになり、その結果として、気候予測結果にばらつきが生じる。このことが、主たる原因の1つと考えられる。

地球シミュレータが稼働している現在、従来の解像度に焦点をあてたパラメタリゼーションではなく、地球シミュレータ上において、はじめてターゲットとなり得る高解像度を対象としたパラメタリゼーションが必要であるといえる。さらに一步踏み込んで、第一原理により近い定式化、解法を、気候変動予測モデルに導入することにより、不確定性を軽減できるような新たな突破口を探

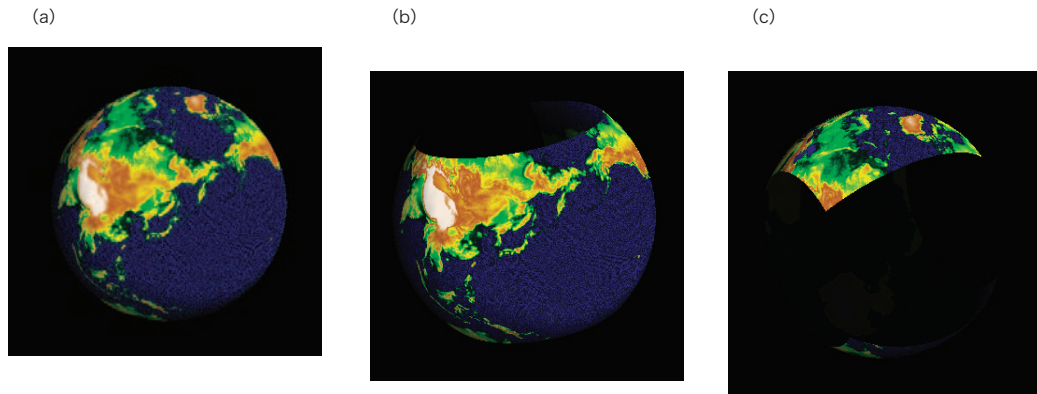


図-2 ホリスティック気候シミュレーションコードで用いる座標系. 全球 (a) は (b) と (c) からなる座標系で構成される.

索するという試みを、地球シミュレータセンターでは開始している。このような取組みは、地球シミュレータの存在があってこそその発想である。

ホリスティック気候シミュレーションコードの開発

■ 開発の概要

現在開発中のシミュレーションコードを、私たちはホリスティック気候シミュレーションコードと呼んでいる。“ホリスティック”の意味については、後述するが、本年度における開発のターゲットは、全球・非静力学大気海洋結合コードのプロトタイプを構築することである。コンポーネントとなる大気大循環コード、海洋大循環コードとともに、格子系として、地球シミュレータセンター固体地球研究グループが開発した新たな格子系を採用した。採用した格子系上で、地球上地形は、2つの3次元のプレートを重ね合わせて表現できる(図-2)。この格子系の導入により、通常用いられている緯度経度格子において、極域に近づくにつれて格子幅が非常に変化する(図-2)。この格子系の導入により、通常用いられている緯度経度格子において、極域に近づくにつれて格子幅が非常に変化する(図-2)。この格子系の導入により、通常用いられている緯度経度格子において、極域に近づくにつれて格子幅が非常に変化する(図-2)。

大気や海洋の流れを解く際に重要である非線形項の移流項の解法は、計算精度が高く、保存性も満足するCIP(Cubic-Interpolated Pseudoparticle/Propagation)法を導入している²⁾。さらに、高解像度に対応するために、セミラグランジュ法を用いて、時間ステップ幅をさらに大きく取れるような新たな工夫を導入している。また、計算精度や計算安定性、保存性についても、離散化や補間の手法によって結果のよしあしが左右されることから、

慎重に選択をする必要がある。水平方向においては、熱や物質の輸送にとって重要な役割を果たす渦を精度よく表現できるように、スカラー変数とベクトルをスタガードに配置したArakawa-Cグリッドを採用した。鉛直方向には、従来の実績とコーディングの簡易性から、水平速度、圧力、密度を同じ鉛直レベルに設定し、鉛直速度はそれら変数と鉛直スタガードに配置するローレンツグリッドを使用した。時間方向には、4次精度のルンゲクッタ法を採用している。詳しい仕様については、誌面の関係上述することができないが、現地球シミュレータにとどまらず、次の世代のシミュレータ上の気候変動予測シミュレーションとしてもふさわしい仕様となっている。

■ ホリスティック気候シミュレーションコードの特徴

ホリスティック(Holistic)とは、各部分の足し合わせではなく、全体的な立場にたった研究手法、と英辞書にはある。前述のように、地球シミュレータセンターでは、本年度より、地球シミュレータ上においてホリスティックシミュレーションを行うことを目的に、気候変動予測モデルとして、全球・非静力学の大気大循環コード、海洋大循環コード、および大気海洋結合コードの開発を、スクラッチから開始している。ターゲットとする解像度は、数百mから数kmの水平解像度、鉛直約100層の解像度である。この目標とする空間、時間スケールは、台風や竜巻、集中豪雨など地域限定の局所的な現象から、ストームトラックと呼ばれる高低気圧の活発な領域の位置の変化や、移動性高気圧の移動経路がブロックされる現象などの大域的、全球スケールの現象のシミュレーションを含む(図-3)。局所的な現象の生成、維持、消滅を通して大域的な現象に影響を与える、またはその逆に、大域的な現象が局所的なスケールの現象に環境を与える

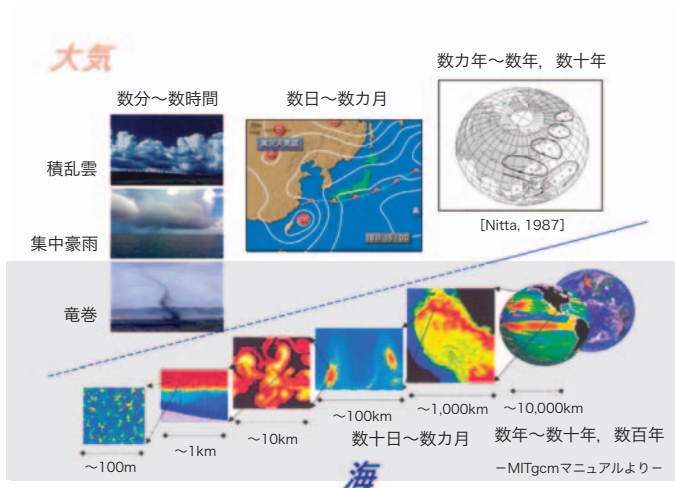


図-3 大気、海洋における現象の時間と空間のスケール

といった、相互作用を、世界で初めて、全球レベルでシミュレーションしようという試みである。

気候変動予測に大きな影響を与えるパラメタリゼーションの代表として、積雲・雲物理パラメタリゼーションと、大気海洋および大気陸面相互作用のパラメタリゼーション、の2つを挙げることができる。いずれのパラメタリゼーションも、すでに従来知見から、高解像度における新たなパラメタリゼーションの必要性が示唆されている。非常に小さいスケールの気液相互作用に用いられてきた相変化を直接扱う先進的な解法を、大気海洋相互作用のスケールに対してどのように拡張すべきかについての検討も開始している。

■ これまでに得られている成果

開発の各段階において、大気大循環コード、海洋大循環コードともすでに、流れを解く力学過程部の開発をほぼ終了し、現在、主に、大気大循環コードに、水蒸気等の相変化(これらは、降雨や降雪などに関係する部分)と、太陽からの放射に関連する過程、大気の接地境界層の扱いを導入中である。本稿では、すでに完成している、流れを解く部分についての、これまでの成果を紹介する。

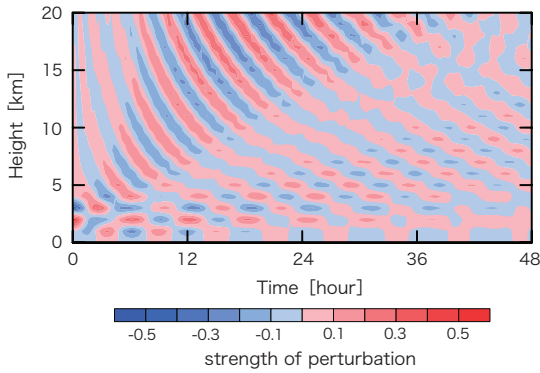
気候変動予測のためには、少なくとも10年から数十年の規模のシミュレーションが要求されるため、地球上の状態を表現するには、物理量の保存性が保証されることが望ましい。ホリステティック気候シミュレーションコードにおいて採用した格子系は、2つの独立した格子系が、全体の一部で重なり合うオーバーラップドグリッドである。各格子系が重なり合う境界部分において、補間を施しながら物理量をやりとりする必要があるが、そのときにおけるグリッドスケール、および系全体の物理量

の保存性が問題となる。本開発においては、すでに、この境界部分における各グリッドあたりにおける物理量を保存する手法を新たに開発し、すでに、計算機の丸め誤差範囲で、物理量が保存されることを検証済みである²⁾。

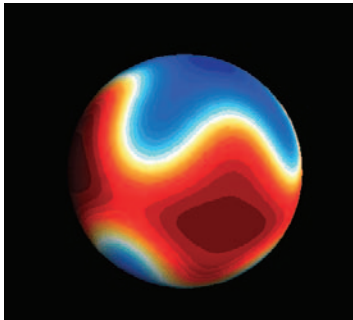
スクラッチから開発する利点を活かし、シミュレーションコードの仕様を決定する際には、基礎的な要求事項に関しては、どのような仕様が、気候変動シミュレーションに適しているかを、基礎的な事項から検証した。その中でも、非静力学現象を扱う際の鉛直方向の波の伝播は、気候変動現象に大きな影響を与える内部重力波の表現の精度にかかわることから、すべての鉛直方向の変数のとり方を探索して、前述のローレンツグリッド配置とは異なる Charney-Phillips 変数配置が、鉛直方向の波をより厳密に伝播することが分かった³⁾。Charney-Phillips 変数配置により、鉛直方向の波の伝播は、波のエネルギーの変動を伴うものの非常に精度よく表現できる(図-4(a))。このことから、今後近い将来、現設定のローレンツグリッド配置から Charney-Phillips 変数配置に変更することを考えてゆく予定である。

大気大循環コード、海洋大循環コードの開発においては、地球全体のスケールを考えると、鉛直方向の距離に比べて、水平方向のスケールが圧倒的に大きい。このことは、非常に薄い膜のような大気、海洋中の運動を扱うことを意味する。よって、水平方向のグリッド幅が、鉛直方向のグリッド幅に比べて非常に大きいときは、水平方向の運動が卓越する。本シミュレーションコードのターゲットは、非常に高解像度でのシミュレーションであり、水平方向と鉛直方向のスケールがほぼ同等と考えられるので、必ずしも水平方向の運動が卓越するとは限らない。しかし、水平方向の運動が卓越する場合の現象が、本コードにおいてもシミュレーション可能であることを示しておくことは、最低限の必須事項である。本開発においても、2次元空間において基礎的に表現できなければならない現象のベンチマークテストを行い⁴⁾、3次元へ拡張した。さらに、3次元空間上の特徴的なテストの実施と結果の評価を行い、その挙動を検証済みである^{4)・5)}。その中で代表的な課題である、地球上の波の伝播の中で重要な惑星波の伝播(図-4(b))や、山岳を配した場合の鉛直方向への波の伝播(図-4(c))は、いずれも精度よく計算できる。

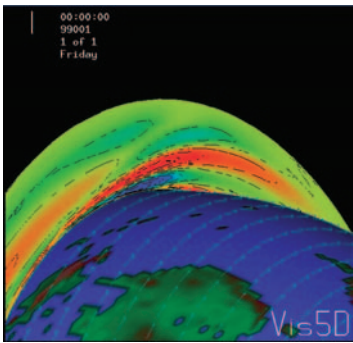
新しいパラメタリゼーションの構築にむけて、大気海洋相互作用パラメタリゼーションとして、C-CUP法および粒子法により、波のうねりの効果を取り入れた大気海洋相互作用のパラメタリゼーションの評価を行っている。C-CUP法による評価では(図-4(d-1), (d-2))、運動量交換の評価においては、鉛直方向の速度を精度よ



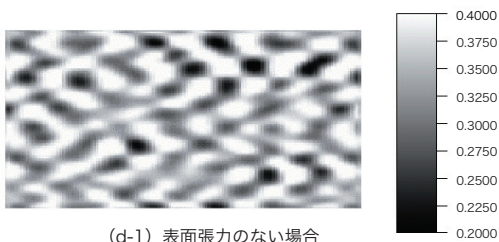
(a) 鉛直1次元の波の伝播シミュレーション結果



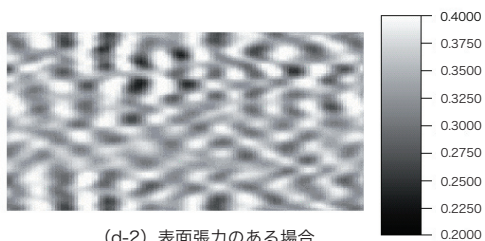
(b) 2次元・惑星波の伝播シミュレーション結果



(c) 3次元・山岳波の伝播シミュレーション結果



(d-1) 表面張力のない場合



(d-2) 表面張力のある場合

(d) 波の効果を入れたパラメタリゼーションの試み：波の効果の再現結果

図-4 基礎的検証結果

く計算する必要性が示唆された⁶⁾。粒子法による評価は、すでに実績のある計算体系に比べて、はるかに大きい体系に対する初めての適用事例である。現在、観測値との定量的な比較を行っており、その評価の妥当性の検証を進めている。

開発の各段階において、計算性能についても最適化を行いながら、計算性能を損なうことのないコーディングを進めている。計算性能の最適化チューニングは途中段階であるが、現時点において、すでに、前述の AFES (2002年 Gordon Bell 賞を受賞した大気大循環シミュレーションコード) に匹敵する性能値である地球シミュレータのピーク性能値の 62.5%、並列化率 99.99% を達成している。

今後の課題

先に述べたように、現時点において大気や海洋の流れをシミュレーションする過程の導入と検証を、ほぼ完了した。現在、大気において、水蒸気の相変化にともなう雲を表現する過程の導入をほぼ終了し、台風、ストーム、集中豪雨の再現実験準備を開始している。本稿では、誌面の制約上、海洋大循環コードについての詳しい言及ができなかったが、大気コードと同様の進捗をしており、現在、海盆スケールの現実の海流再現実験を行っている。また、計算性能の最適化においては、実際の研究対象となる空間、時間スケールに対して、シミュレーションに必要な計算時間を評価する段階にある。今後、非静力学モデルの特徴を活かす、上記の局所的な現象の再現実験を進めるとともに、従来の静力学モデルとの詳細な比較を行う予定である。

気候変動には、陸面や生態系の関与が非常に大きいことが、これまで報告されており、どのような環境構成要素を厳密に取り入れ、あるいは近似してゆくか、を検討することも、今後取り組むべき重要な課題である。これらについては、国内外の研究者との共同研究により開発を進めてゆく計画である。

参考文献

- 1) Climate Change 2001, The Third Assessment Report of IPCC, Cambridge Univ. Press (2001).
- 2) 彭 他：球面上の高精度高効率移流計算，第 17 回数値流体力学講演論文集，C6-2 (2003)。
- 3) 杉村，高橋 他：非静力学大気モデルにおける鉛直座標変数配置，日本気象学会 2003 年秋季大会講演予稿集，p.358 (2003)。
- 4) 大平，高橋 他：陰陽格子法における浅水波方程式による力学的検証，第 17 回数値流体力学講演論文集，C6-1 (2003)。
- 5) 小峯，高橋 他：陰陽格子法を用いた全球・非静力学大気モデルの開発，第 17 回数値流体力学講演論文集，C6-3 (2003)。
- 6) 阿部，高橋 他：C-CUP 法を用いた大気・海洋界面での交換物理量の評価に向けて，第 17 回数値流体力学講演論文集，C6-3 (2003)。
 (平成 15 年 12 月 5 日受付)

