


2. 地球シミュレータの応用

大気・海洋のシミュレーション

目 的

計算性能の高いPCが安価で手に入る今日においては、地域的な環境影響評価等で行われる大気、海洋関連のシミュレーションを含めれば、世界中で行われているこの分野のシミュレーションの数は数え切れないほどであろう。そのようなシミュレーションモデル（あるいはコード）は目的に応じて比較的簡単な手法を採用しているものから、流体力学や熱力学の基本的法則をできるだけ忠実にモデル化しているものまでいろいろとあると思われるが、後者であればそれは、我々が以下に紹介する地球シミュレータ（ES）上で実行するモデル（コード）と本質的な意味での相違はないといえる。

それでは、あえて地球シミュレータで行う大気・海洋のシミュレーションと他のマシーンで行うものとの本質的な違いは何かということが問題になると思われるが、その答えは簡単で、平たい言葉でいえば「地球全体の運動をできるだけ高解像度で表現する」ということである。非常に大雑把な表現をすると、ES以前の全（地）球規模での気候のシミュレーションの水平解像度のオーダーは100kmで、その解像度で自分が目指す研究が十分であればESを使う必要性はもろもない。気候の研究の対象となる現象は幅広い時空間スペクトルの中にあるので、研究対象によってはESは非常に強力な研究道具となり得る。言うまでもなくここで紹介する研究はそのようなものであるが、我々がここで述べようとする趣旨は、気候変動のメカニズムもよく分かっていない現段階において、なんでもかんでもできる限りの高解像度で研究を行うことを奨励することではもちろんない。全球の気候シミュレーションにおいて、今までの計算機では解像することはできなかったが、ESではできるようになったものは通常中規模（メソスケール）と呼ばれる現象で、その意義は以下の2点において重要である。①中規模現象は、気候変動の主役たる全球規模の現象に少なからぬ影響を与えている。②我々人間が直接的に感じる通常“異常気象”と呼ばれるものは中規模現象に伴うもの

 海洋科学技術センター 地球シミュレータセンター
佐久間 弘文
sakuma@jamstec.go.jp

少なくない。地球シミュレータに対して時々使われる「地球丸ごとシミュレーション」という言葉には額面通りには受け取れぬプロパガンダ的響きを感じる方も少なくないと思われるが、全球の気候シミュレーションにおいてこの中規模スケールの現象の統計的影響を定量的に評価できることを可能にしたということこそ、大気・海洋分野における地球シミュレータの意義といえる。

大気モデル

大気モデルに関してまずいべきことは、細かなモデル内パラメータのチューニングを問題にしなければ、その力学部分は日々の天気予報で重要な役割を果たしている数値モデルと同じものである。これに関して簡単な説明をすれば、モデルは速度場の時間変化を決める運動方程式、温度、圧力等を決定する熱エネルギーの式、状態方程式および別名連続の式と呼ばれる質量保存の式そして放射伝達の式等を組み合わせることにより大気中の諸物理量の時間発展を次々に計算していくアルゴリズムからなる。そのような式を一々ここに書き下すことはしないが、そのアルゴリズムの側面の本質は、現代的なシンボリックダイナミクスの抽象的記法で表せば、 t を時間、 X_i を変数、 N を自由度、 f をジェネレータ（時間発展を記述する写像）として、 Δt 後の X_i の変化 ΔX_i は

$$\Delta X_i = X_i(t + \Delta t) - X_i(t) = f_i(X_1, X_2, \dots, X_N) \Delta t$$

となる。ここにおいて、具体的な f のかたちはモデル化する物理法則により決まることになる。以上のかたちでは「陽」に現れていないが、実際の物理量は4次元時空で定義されるものなので、具体的な f のかたちは4次元時空の1階偏微分方程式で表現される式を適当なかたちで離散化したものであり、モデルの分解能は離散化の基になる水平、鉛直方向の格子点間隔で決まることになる（現在主流の大気大循環モデルはスペクトルモデルであるが、格子点間隔に対応するものももちろん存在する）。

連続的な量を離散化するので、当然のことながら分解能よりも小さなスケールの現象は表現できない。このような分解能以下の小さなスケールの現象の影響が分解できるより大きなスケールの運動に対して無視できる影響しか及ぼさないなら話しは非常に簡単であるが、実際には地球シミュレータの大容量をもってしても、理論的に十分満足のいく分解能には遠く至らないのが現実である。したがって、格子点以下の現象のフィードバックを適切に評価する必要が生じることとなり、この問題は一般的にはパラメタリゼーションと呼ばれており、大気・海洋のシミュレーションが始まって以来現在に至るまで

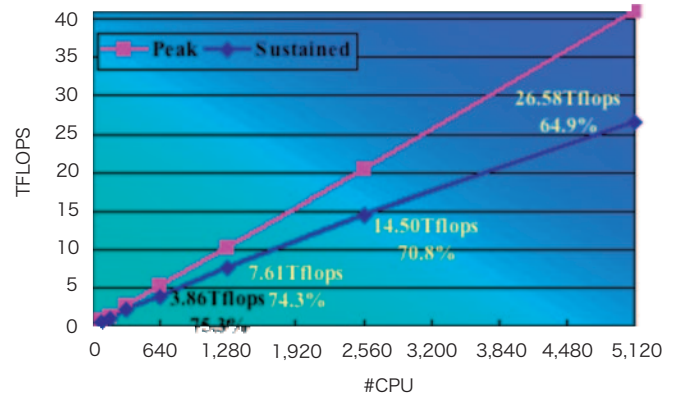


図-1 大気モデル AFES の計算性能

の重要課題となっている。天気予報モデルと気候モデルとの大まかな違いを1つ挙げるとすれば、それは2、3日先の予測は主に初期値と大気の力学的発展という2つの要素でほぼ決定されるのに対し、それよりはるかに時間スケールの長い気候のシミュレーションでは放射や、地表面過程あるいは、海洋との相互作用等がより重要になり、モデル化すべき要素の数も多く複雑であるということである。また当然のことながら長時間の時間積分を行う必要があるため、モデルの物理的性能に加えて高速性能も無視できない重要な因子となる。

図-1は地球シミュレータセンター（ESC）で最適並列化した大気大循環コード AFES の計算性能である。すでにいろいろな機会に出してきた図なのでご存知の方も多と思われるが、ES の高速性能を現実の大気モデルで実現したことで Super Computing 2002 で Gordon Bell 賞を受賞した。この高性能が具体的に何を示すかを示したのが次の図-2である。これは日本付近の降雨分布を従来の気候シミュレーションで用いられる典型的な水平解像度（約 300km）と AFES で可能な水平解像度約 40km とで表したものである。40km では太平洋側と日本海側の差がはっきりと表現でき、人間生活により身近な地域気候のシミュレーションが全（地）球規模で可能なことが見てとれる。また次の図-3は試験的に水平解像度 10km で行った、ある時刻における全球での降雨分布を示すもので、雲の分布ではないが、一見すると高分解能のため、衛星写真による雲の映像のような印象を与える。現在 ESC のグループ以外にも多くの研究グループが ES を使って研究活動を行っているが、最近のこの分野での研究は、似たような条件下で数多くのシミュレーションを行いその統計的性質を議論するいわゆるアンサンブル実験が不可避なので、整ったかたちで研究成果がまとまるにはもう少し時間がかかりそうである。

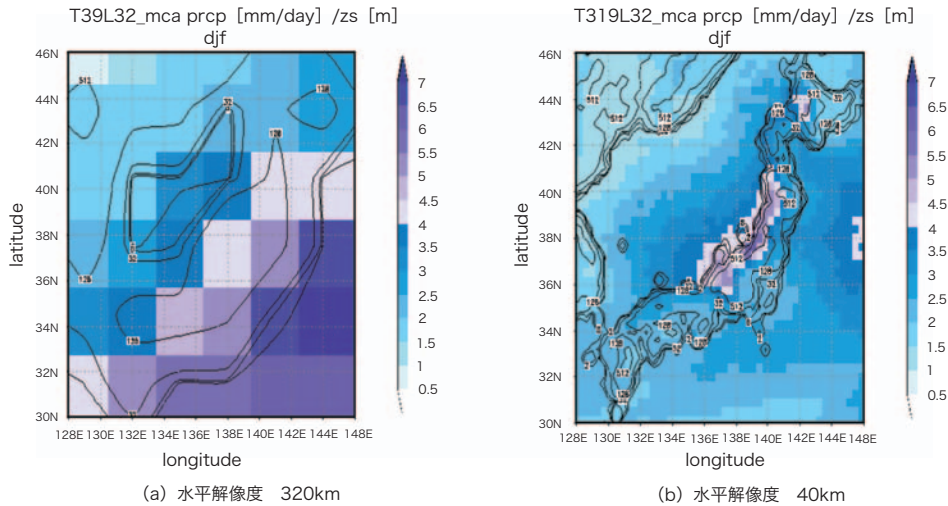


図-2 日本付近における降雨分布図の比較

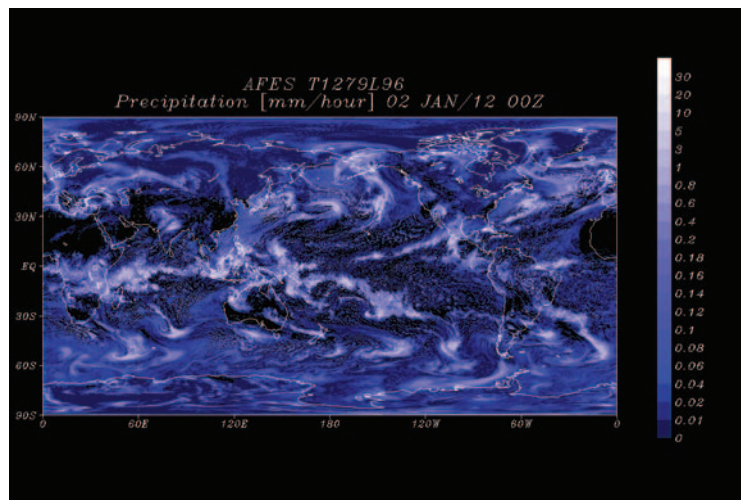


図-3 水平解像度10kmの大気モデルAFESによる降雨分布

海洋モデル

冒頭の「目的」でESの意義は中規模現象を全球規模のシミュレーションで解像すると述べたが、海洋においては、エネルギー的に非常に活発ないわゆる中規模渦と呼ばれるものがそれにあたる。一般的に海洋の現象は大気ほど知られていないと思われるので、この中規模渦について一言ここで説明を加える。60、70年代の観測を通して海洋は水平スケールが約100km前後の活発な渦で満ち満ちていることが確認されるようになった。この渦は天気図でお馴染みの大気中の移動性高低気圧に比べるとその水平スケールは1桁小さいが、大気・海洋の力学的見地から見るとこの渦は海において、大気の高気圧同様、気候において重要な南北の熱輸送に大切な働きを担っていることが知られている。またこの渦は、大

気上層のジェットストリームに対応するような海洋における強い流れ（黒潮、メキシコ湾流のような西岸境界流と呼ばれるものや南極の周りを流れる周極流）と強く相互作用し、その結果各大洋における大きな循環場に見えない影響を与えると同時に、より小さなスケールで重要となる混合や拡散過程にも大きな影響を及ぼす等、シミュレーションにおけるその存在は非常に重要である。しかし、これまでの気候のシミュレーションにおいては、計算機性能の制約により、中規模渦は全球での計算領域では解像できずパラメタリゼーションで対応してきた。それ故、全球での渦解像計算は20世紀末には地球計算科学におけるGrand Challenge Problemの1つに挙げられていた。さらに一言付け加えると、地球シミュレータで可能な全球計算の水平解像度は約10kmなので、大気モデルの雲解像シミュレーションには粗すぎる

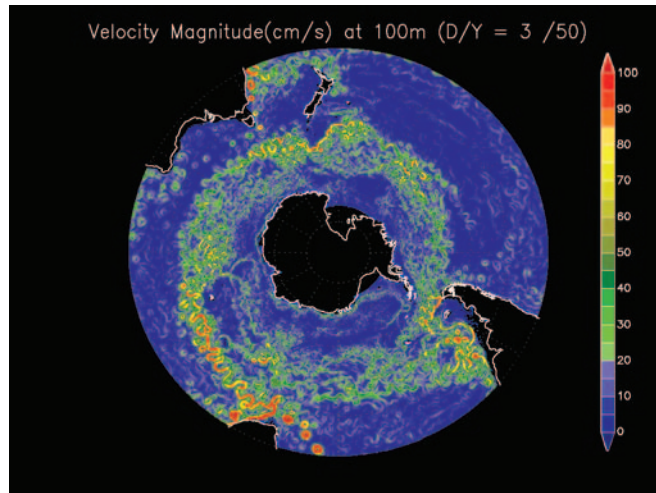


図-4 水平解像度 10km の海洋モデル OFES による南太平洋の流速およびアガラスリング（喜望峰沖の渦）

けれども、海洋の中規模渦の解像には満足のいけるものである。そのため、我々のグループでは ES が稼働して第一に取り組むべき課題として、この問題に挑戦した。

海洋のシミュレーションは大気に比べ長時間の積分が必須となるが（短いものでも数十年）、ES ができる直前の世界の状況は、この 10km 程度の解像度についていえば、最も進んでいる米国でも 10 年程度であった。ES 稼働直後は試験期間ということもあり、試験シミュレーションとして米国 GFDL で開発された海洋モデル MOM3 を ES に最適化したコード OFES を用いてこの数値実験に挑戦し、2、3 週間で 50 年積分を終えることができ、改めて ES の威力を実感した。このシミュレーションの結果は、現在すでにいろいろな角度から解析されて、第 1 回目のテスト計算にしては、かなり満足のいく良い結果が得られたと感じている。本稿は海洋学者を対象にして書いているのではないので、学術的な細かい議論はさておき、我々のシミュレーションで再現された、海洋の“ジェットストリーム”である南極周極流とそれと共存する無数の乱流的な中規模渦およびアフリカ南端の喜望峰から西へ送り出されるアガラスリングと呼ばれる孤立渦のスナップショットを図-4 に示す。現在はこの試験的第 1 弾のシミュレーションに引き続き、より現実的な設定で過去 50 年分の再現実験を行っている。

結合モデルおよび結び

以上で紹介した、大気と海洋の大循環モデル（コード）を基に、さらに地球フロンティアアラスカブランチ

(IARC) / アラスカ大学で開発された海水モデルその他を組み込んだ大気・海洋結合モデルの開発整備も同時に行っている。基本的コーディングは昨年度で目処が付き、今年度に入ってからではデバッグやパラメーターチューニングを主とする物理的検証実験を数多く行い、地道な動作確認の作業を行いつつあり、現在では先行する気候研究機関が有する結合モデルに物理的性能においても近づきつつあり、まもなくいろいろな研究に活用されると思われる。

本格的な気候のシミュレーションは結合モデルでなされることはだれの目にも明らかではあるが、一方において結合系のモデルの振舞いがモデル化された諸過程の微妙な違いに対して非常に敏感であったりするなどして、良い結合モデルの構築は気候のシミュレーション分野においてまさに先端的課題である。したがって、結合モデルを良くするための基礎的研究として、モデルの解像度依存性を調べるための大気や海洋モデル単独のシミュレーション研究等も今後いろいろな角度からなされていくと思われる。気候研究における“高解像度”シミュレーションはまさに ES の登場で始まったといつて過言でない。これからの道は決して平坦とはいえないが、多くの研究グループの努力により、中規模スケールの現象の統計的影響を取り込んだより現実的な気候の理解と予測可能性の研究が加速されると思われる。

参考文献

- 1) Sakuma, H., Sasaki, H., Takahashi, K., Tsuda, Y., Kanazawa, M., Kitawaki, S., Kagimoto, T. and Sato, T.: Fifty-Years-Long Global Eddy-Resolving Simulation Achieved by the Earth Simulator, NEC Research & Development, Vol.44, No.1, pp.104-108 (2003).
- 2) 佐久間弘文: 海洋における乱流 - 地球シミュレータによる世界初の全球高解像度 50 年積分, パリティ, Vol.18, No.2, pp.41-47 (2003). (平成 15 年 12 月 5 日受付)