サイエンティフィック・システム研究会　2011 年 8 月 25 日
SS 研 HPC フォーラム 2011

エクサスケール時代の気候モデル

富田　浩文
理化学研究所 計算科学研究機構
複合系気候科学研究チーム

[アブストラクト]

先日、理化学研究所の「京」コンピュータがLINPACK性能で世界一位を獲得した。93%という極めて高い実行効率である。これは「京」コンピュータの 潜在能力を示す一つの事例であるが、一般のアプリケーションでここまでの性能を出すのはきわめて難しい。特に気候計算での力学過程で用いられるような格子点法の場合、メモリロードストア量に比べて、実際の計算量が相対的に少ないため、今のスカラーコンピュータは決してバランスの良いものではない。キャッ シュの有効利用が一つのキーであるが、力学部分の高速化は根本的にメモリ性能できまるといってよい。一方、雲、放射などの物理過程は、メモリロードストア に対して力学部分よりははるかに計算量が多く、今後もこの傾向は続く。
エクサスケールの時代のコンピュータアーキテクチャは、いまだco-designの段階であるが、メニーコア時代が到来し、相対的なメモリ性能の悪化は避けられない。本講演では、「京」コンピュータ、ポストペタコンピュータ、エクサスケールと拡大するコンピュータ環境で、どのようなサイエンティフィックな課題に取り組めば最も効果的かを考察してみたい。

[キーワード]

気候モデル、高解像度化、不確実性低減、モデル要素の精緻化

1. はじめに

「京」コンピュータが整備されつつある。先日、米国では Blue Water 計画から IBM が撤退を表明し、波紋を呼んでいることはご存知の方も多いと思う。ナショナルフラグシップマシンとして「使える」大型汎用機は、事実上、現在、京コンピュータのみであると思われる。しかし、一方で、今後さらに、京コンピュータのような汎用機のストレートフォワードな拡張を行うことについては、消費電力、IC 技術、故障率問題が顕在化して、真に使えるマシンになるかどうか計算機科学側からも疑問が呈されている。アーキテクチャのドラスティックな変革を求められているように思う。しかしながら、どのような方向に進むとしても、１チップに多くのコアをおしこめるメニーコア全盛の時代が到来することは想像に難くない。

このとき、気象・気候問題で高速計算行う際に問題になるのは、相対的に少なくなっていく、１コアあたりのメモリバンド幅である。気象気候計算の土台となる力学過程では、ステンシル計算が用いられることがほとんどであるからである。１９９０年代半ば、それまで全球力学過程の解法の主流は球面調和関数を用いた、スペクトル変換法であった。しかし、高解像度化に伴うルジャンドル変換の計算コストが馬鹿にならなくなる懸念から、この業界では、少しずつ格子点法へ再帰してきた。地球シミュレータ時代においてもは、全球で積乱雲を直接解像する画期的なモデル NICAM においても、正

２０面体格子と言われる球面準一様格子が有効であることが実証された。しかしながら、エクサフロップス時代においては、再び格子点法は受難の時代を迎えようとしている。

2. 気候計算における3つの軸

気候計算において HPC の重要性は増すばかりであるが、どのように使うかにおいて、次の３つの軸がある。

a）高解像度化

最も、単純な高度化である。格子間隔が狭まり、より詳細な物理が見えてくることを期待する。様々な物理現象もより「現実的」に表現されてくる。また、解像度が粗いことに起因するあいまいなモデル化に頼る必要がなく、より原理的なシミュレーションを可能にする。ただし、これからは、単純に高解像度化を行うのは、コストパフォーマンスの面で少々効率が悪いように思う。もし行うと知れば、モデルにおける次のパラダイムシフトの可能性を十分に考えるべきであろう。例えば、現在、全球大気モデルは、積雲対流を直接解像するころまで来ており、従来型に比べて、劇的な改良がなされたが、次に目指すべきは、全球で LES(Large Eddy Simulation)であろう。しかしコンピュータリソースから見積もると、これが実現するにはまだまだ先の話である。

b）アンサンブル数の増加

気候気象の系は、力学過程におけるカオス性のみならず、雲物理、乱流、放射、エアロゾル、大気化学などの様々なコンポーネントの複合系であるため、予測に関しては、確率的な手法を使わざるを得ない。そのため、統計的な有意性を確たるためにはアンサンブルの数を増加して強化する。この場合、全系で通信が頻繁に入る計算ではなく、それぞれのアンサンブルメンバーは閉じている。したがって、ネットワークボトルネックとなることはあまり想定しなくてよいと考えられる。

c）各モデルの精緻化

気象気候モデルでの各物理過程の要素モデルでは、そのパラメータ化によってかなりのレベルがある。雲微物理を例にとると、もっとも簡単なものは、雲物質（例えば、水雲、雨、雲氷、雪、あられ、ひょう）の混合比だけを扱う１モーメントバルク法であるが、これを精緻化しようとすると、数密度も陽にあつかう２モーメンンバルク法となり、さらには、数密度の分布自体を陽に扱うスペクトルビンモデルになる。このぐらいの精緻化が行われると、エアロゾルや放射などとのカップリングもさらに強くなり、計算量もメモリロードストアに対して莫大に増えていく。すなわち、BF 比が小さいくても、コンピュータの能力を引き出せる可能性がある。現状、エクサスケール時代を考えると、このような物理過程の精緻化が最も成果に対するコストパフォーマンスが良いと考えられる。そのほか、放射過程も、平行平板モデルではなく、雲や山の遮蔽効果を考えた３次元放射スキームを適用するなど計算科学的にもチャレンジングな課題が多い。

本講演では、これまでの気象気候モデルとその成果を概観しつつ、エクサスケールで、何が一体成果に対するパフォーマンスが良いかを考察してみたい。