

大規模スパコン技術の進化に対応する次世代日本標準気候 モデルプラットフォームの研究

(財)高度情報科学技術研究機構 荒川 隆

● 調査研究の目的

人間活動に伴う温室効果ガスの排出に起因する地球温暖化は、食料生産や水循環の変化、疫病の汚染範囲拡大などを通じて人間社会に直接影響するのみならず、珊瑚の白化や砂漠の拡大など地球上の生命環境そのものに大きな影響を及ぼすことが懸念されている。地球温暖化に代表される気候変動の予測には気候シミュレーションモデルが用いられるが、気候モデルは大気や海洋、陸面など多様なプロセスを表現するサブモデル（要素モデル）で構成される。新たな要素モデルを気候モデルの中に組み込むには、気候モデルのプログラム構造や格子系の定義を理解した上で、適切な補間処理とデータ交換を（大規模並列計算機上で）施さねばならないが、これを要素モデルの開発者すなわち気候の研究者が行うのは、技術的・時間的負荷が高く困難である。この問題に対応するには、要素モデル標準化されたインターフェースで結合した上で格子系の変換を行うようにすればよい。このような知見から、要素モデルの結合を可能とするソフトウェアプラットフォームの必要性が認識され、日欧米間での開発競争となっている。しかし、これらのソフトウェアは従来の気候モデルが扱う現象の範囲内では一定の成果を収めているものの、人口動態や工業生産など地球温暖化の直接的な原因である社会的、経済的な現象については未だ適用の範囲外である。他方、シミュレーションモデルを実行するスーパーコンピュータのアーキテクチャは、その規模、複雑性を増大させている。現在最高性能の計算機は20万を超えるコアを搭載しており、近い将来、その数は100万を超えるものと予想される。またマシンアーキテクチャもベクトル・スカラ混在、さらにGPUを加えた極めて複雑な構成になると考えられる。従って、高精度の気候変動予測のためには、多様なモデルを、ここで述べたような多様なアーキテクチャのハードウェア上で高性能に実行しなければならない。

よって本研究では、スーパーコンピュータ技術の急速な進化に対応し、かつ地球温暖化による影響評価までも視野に入れた多分野のモデル群を含む気候シミュレーションモデルプラットフォームの開発を目的として、調査、課題発見を行い、研究開発計画を立案する。

● 国内外における気候変動予測研究に関する動向調査

気候変動の研究が特に活発に行われているのは、日本を含むアジア、米国及び欧州である。そこで、気候変動予測研究、特にシミュレーションによる気候変動予測研究について、最新の動向を公開文献等を通じて調査した。国外における気候変動予測研究に浮いては、国際的な気候変動予測研究に関する最も包括的かつ信頼性の高い文献として、IPCC第四次報告書を取り上げた。IPCC報告書における気候変動予測シミュレーションは、以下、気候モデルを100年単位で時間積分することにより実施される。この際、温室効果ガスを2000年の濃度で固定した場合、及び将来の温室効果ガス排出量を6通りのシナリオとして設定し、これらの設定に従って積分が実行された。各シナリオの結果は本文にとりまとめたが、いずれのシナリオでも地球規模で（地質年代と比べると）急速な気温上昇が起きるという結果となっている。ただし、推定値には幅があり、今後、これらの推定誤差を以下に小さくしてゆくかが技術的な課題となっている。影響評価についても複数の研究が採択されているが、これらは、いずれも気候変動予測研究の結果を何らかの形でダウンスケールし評価の基本データとして用いている。

国内の気候変動予測研究および影響評価研究として、21世紀気候変動予測革新プログラム（革新プログラム）、および環境省S-4、S-5プロジェクトの内容を調査した。気候変動予測については、革新プログラムの中でIPCC次期（第五次）報告書に向けた研究がなされているが、これは長期（300年）、短期（30年）、極端現象、の3つのサブテーマに分かれており、これらが、地球温暖化予測における重点課題であることがわかる。影響評価研究については、上記3プロジェクトの中

で複数の研究が実施されている。研究内容は高潮・洪水リスクなどの水門分野、穀物生産などの食料（農業）分野、感染症や熱中症など医療保健分野に大別される他、気候シミュレーションの結果を影響評価研究に適用するためのダウンスケーリング手法の研究も行われている。

● 気候シミュレーション技術開発の動向調査

気候シミュレーション技術について最新の動向を調査した。IPCC 第四次報告書に採択された気候モデルの数は 23 個、モデルの開発機関は 18 機関であった。アジア（含オセアニア）・米・欧の割合はほぼ同じであった。モデル開発国の数は 11 か国であり、気候モデルを開発・実行できる国は（少なくとも IPCC 報告書に採択されレベルでは）限られていることが明らかになった。また気候変動予測には、その時点で得られる最高性能の計算機、いわゆる National Flagship クラスの計算機が多く用いられること、しかしながら、大気モデルの解像度は（第四次報告書の時点では）数百 km にとどまっていること、が明らかとなった。

21 世紀気候変動予測革新プログラムにおける影響評価技術開発の動向を気候シミュレーションとの関係で見ると、

- 気候シミュレーションの結果がそのまま入力として用られる事はない
- 時空間スケールのダウンスケール、極値や平均値といった統計計算など、評価モデルに応じて何らかの翻訳が必要
- 用いるデータは、気温や降水量、風など評価モデルによって異なる
- 気候シミュレーションの結果だけでなく、土地利用や地下水分布など、評価モデルに応じて多様な情報が必要

といった特徴が抽出された。

● 気候モデルプラットフォームに関する調査研究

気候モデルプラットフォームに係るソフトウェア技術について、調査検討した結果、気候モデルプラットフォーム開発に際しては、Co-array Fortran などの先進的な技術の採用には慎重であるべきであり、デファクトスタンダードである MPI および OpenMP を用いるのが妥当との結論になった。その理由は、気候モデルは開発に期間を要し長期にわたって用いられるため、基盤となる気候モデルプラットフォームも長期にわたって安定的継続的に開発改良が行われねばならないからである。ハードウェア技術については、気候シミュレーションには時代時代の最高性能の計算資源が用いられることが多く、従って、気候モデルプラットフォームの開発に際しては、数的割合の高い 4 千から 8 千プロセッサのマシンのみならず、現在最高性能の十万個を超えるプロセッサを搭載したマシンをもターゲットとして含むべきであるという結論になった。

● 新しい気候シミュレーションモデルプラットフォームの実現に向けた開発計画の立案

以上の調査から考えられる、気候シミュレーションモデルプラットフォームのソフトウェア・ハードウェア構成は以下ようになる。

1. 一つもしくは数個の気候モデルが National Flagship レベルの大規模計算機で実行される
2. 気候モデル内のサブモデルはカップラーで結合される
3. I/O コンポーネントがカップラーで結合され、データ入出力は I/O コンポーネント経由で行われる

4. 計算結果はデータストレージシステムに保存される。保存されたデータは複数の影響評価モデルからアクセスされる
5. 影響評価モデルは、それぞれに適切な計算機上で実行される
6. その際、データのダウンスケールは影響評価モデル毎に行われる

気候モデルのライフスパンを考慮すると、気候シミュレーションプラットフォーム研究開発に当たって重要なのは、長期間にわたって継続的に開発・サポートが行われるような体制である。そのためには、欧米がそうであるように、計算科学に関する研究施設およびその一部門として気候気象研究（に関わるソフトウェア研究）部門の存在が望ましい。また、この部門のメンバとしては気象学のバックグラウンドを持つ人材が不可欠である。