

4.3. 地球科学

4.3.1 気象・気候科学

(1) 現在行われている課題

台風や集中豪雨といった大規模な気象災害は、社会・経済に大きな脅威を与える。こうした気象災害に対しては、その影響が広範に及ぶことから、迅速かつ効率的な対策を実施することが求められている。大規模気象災害は実験によって影響評価を検証することが不可能な事象であり、大規模シミュレーションによる防災・減災対策の検討が不可欠である。

台風の発生および構造については 100km 程度の解像度を持つ気候モデルでは再現が不十分である。このため、わが国の社会・経済に重大な影響を与える台風が地球温暖化によりどのように振舞いを変えるのか、その詳細はまだ十分にわかっていない。「京」コンピュータがもたらす膨大な計算資源を活用することにより、雲の塊までを再現できる数 km の解像度を持つ全球雲解像モデルを用いた数値実験で熱帯における降水等の季節内振動現象などを精度よく再現することが可能となり、この問題に対する知見を得ることが期待できる。この成果は、わが国のみならず台風の影響下にある世界の国々における温暖化時の影響評価の基礎資料としても活用できる。また、毎年わが国に多大な被害をもたらしている集中豪雨は、近年その頻度が増加傾向にある（図 4.3.1-1）。2~20km ほどの水平規模を持ち、1 時間に 50mm から 100mm 程度の雨をもたらす対流現象の発生や消長を一定時間前に予測するためには、積乱雲を解像できるモデルを用い、数 km~数十 km の空間スケールを対象としたデータ同化技術により初期値の精度を高めるとともに、初期値やモデルの誤差も考慮し、少しずつ条件を変えて多数実験を行うアンサンブル予測を用いる必要がある。「京」コンピュータの出現により、こうした高度な予測手法が現実のものとなる可能性が出てきた。こうした手法の開発を通じて高解像度の全球雲解像モデル、あるいは領域を限って解像度を高くした領域雲解像モデルに基づくアンサンブル解析予測システムを開発し、台風や集中豪雨といった顕著気象現象の予測実験を行う。この成果は、現業機関における将来の予報システムとして活用され、わが国におけるさまざまな気象災害の軽減に貢献する。

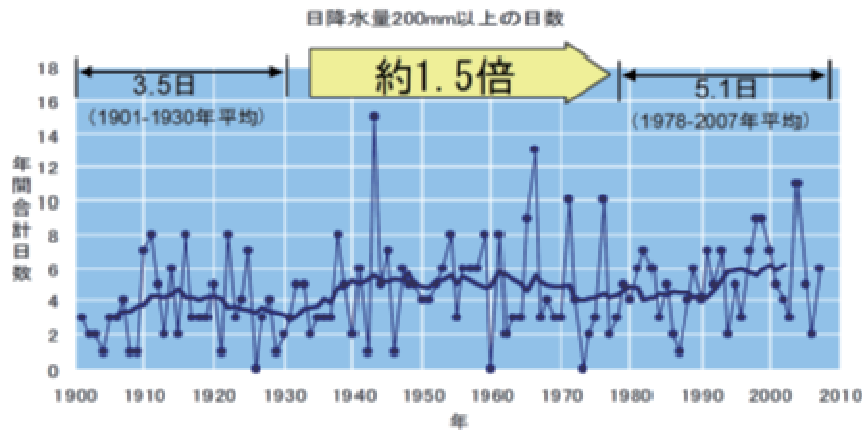


図 4.3.1-1 全国 51 地点の観測値から求めた日降水量 200 ミリ以上の年間日数。年々の変動（細線）と 11 年移動平均（太線）を示す。出典：気象庁「気候変動監視レポート 2007」

<http://www.mlit.go.jp/common/001024684.pdf>（2014 年 2 月 26 日閲覧）。

気象災害が多発する日本特有の条件と高い計算機開発能力とがあいまって、高解像度雲解像モデル開発の分野では日本は世界をリードしている。しかしながら、近年、各国の研究機関も同様のモデル開発に力を注いでおり、日本の優位性は揺らいできている。「京」コンピュータの活用により、この種のモデル開発を更に進めることで、世界的にも先導的な地位を維持することができよう。

更に、「京」コンピュータの登場により、それ以降を見据えて地球規模の防災予測研究をより効率的に行っていけるよう、コミュニティの英知を結集させた地球変動予測モデルのアプリケーションパッケージ（実際の問題に対する予測モデルの適用を容易にするソフトウェア群）の実現を図ることが重要となる。その際、モデル開発に関わる国内のグループ間に知見が分散することは避け、モデル開発環境を統一して知見の集積を図るべきである。「京」コンピュータは、大気中の雲や海洋の小規模渦、生物化学過程等の詳細な再現を可能とすることによって、日々の天気予報はもちろん、2 週間以上の長期予報、季節予測、10 年規模の気候変動予測、大気海洋環境予測、沿岸海況予測等、地球変動予測モデルの適用範囲を大幅に拡張させ、地球規模での気候・環境変動予測に革新的な変化をもたらすトリガーとなることが期待されている[1]。更には、予測には常に不確実性がともなうことを考慮に入れると、衛星観測データ等の地球環境観測データの同化によるモデルの初期値化、初期値およびモデルの構成要素を差し替えて行うアンサンブル解析の実現等の機能を含めた計算負荷調整機能が必要である。また、予測の時間スケールやターゲット現象に応じた各種コンポーネントの選択、解像度やモデルに組み込む素過程の表現の精密さ等の調整を容易にする仕組みも付加していく必要がある。更に、開発したソフトウェアを、今後効率的に継承、結合していくために、コミュニティの研究成果を全体システムに反映し、予測性能の向上につなげられるアプリケーションパッケージの実現に取り組む。

わが国における開発の着手より早くから、欧米においてもこうしたアプリケーションパッケージの開発は盛んに行われてきている。この種の開発は計算機アーキテクチャや既存のコンポーネントモデルの仕様を十分に考慮しながら行う必要があるため、国内に存在する大規模な計算

機の仕様を念頭に、わが国独自の開発を推進する必要がある。「京」コンピュータの登場が契機となり高度な予測システムの開発が進むことで、知見の集積と開発グループ間の協力を容易にするこうしたパッケージの開発が促進されることが期待できる。

(2) 長期的目標

(i) はじめに

気象・気候分野で大規模並列計算機を利用する研究は、気象予報、地球環境変化予測、スケール間相互作用の解明、の三つの研究領域に大別することができる。このうち一つ目の気象予測に関しては、アンサンブル数の増強による確率予報の精度向上や、予報モデルの高解像度化による局所的豪雨の予報などが含まれる。また、二つ目の地球環境変化予測に関しては、生態系までも含めた統合的な数値モデルによる予測や、温暖化にともなう台風の変化の高解像度モデルによる予測などが大きな課題である[1,2]。更に、三つ目のスケール間相互作用の解明に関しては、気象予報モデルや気候変動予測モデルで用いられるパラメタリゼーション（格子間隔より小さい空間スケールで起こる現象の影響を取り込むため導入される経験則）の精度向上のため、小規模現象が大規模現象に与える影響を直接表現できるような超高解像度モデルを利用して、スケール間の相互作用を解明することが重要な研究領域である。以下では、これらの領域における課題について更に詳しく述べる。

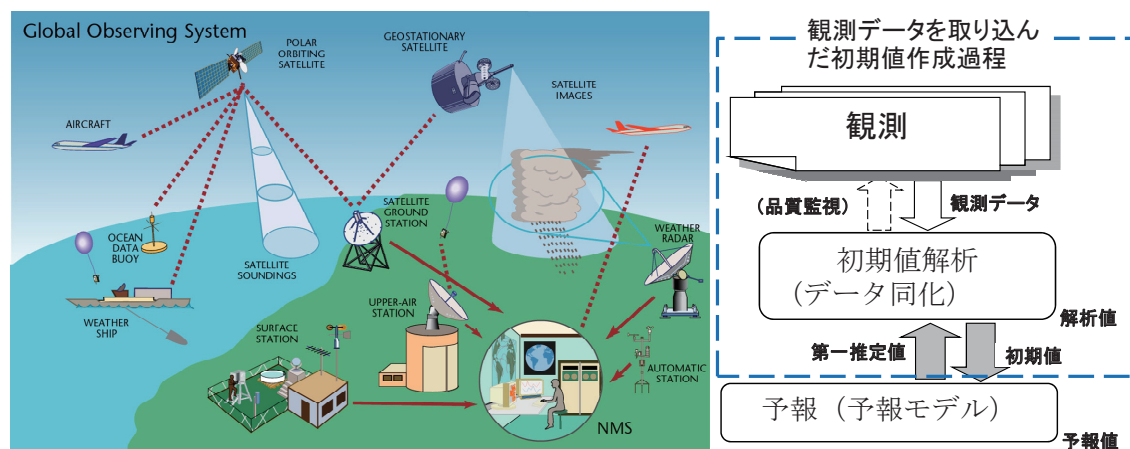
(ii) 気象予報

後述の100年程度の時間スケールを対象にした地球環境変化予測と、ここで述べる気象予報との大きな違いの一つとして、初期値の作成過程の重要性の違いを挙げることができる。気象予報においては、モデルを積分する期間が最大でも数ヶ月程度と気候変動予測に比べて短く、計算結果に初期値が大きく影響する。そのため、対象とする日付の気象場を、観測データに基づいて可能な限り現実的に表現したデータセットを作成することが、予測の成否の決定的要因となる。

衛星観測や船舶、飛行機などによる観測、そして定点観測など、観測データにはさまざまな種類があり（図4.3.1-2参照）、それらをバランスよく取り込みながら、数値計算上の発散も抑えられるような「性質のよい」データセットを作成するのは容易な作業ではない。これを可能にするために、観測データからの乖離を抑えるよう拘束条件をかけながら予報モデルを走らせ、その結果を初期値として利用できるような「データ同化」手法が複数開発されている[3,4]。これらの手法いずれについても、一定の期間に対してモデル計算を多数行うことが必要であり、気象予報では通常、初期値の作成に計算資源の半分以上が投入される。更に、予測計算においてもカオス的な誤差の発展は避けることができないため、軽微な修正を施した初期値を多数用意してアンサンブル実験を行うことが不可欠である。このアンサンブル数の増加は、予報の精度に直結する。計算機能力の向上により、初期値作成の効率やアンサンブル数が飛躍的に向上し、予報精度の向上につながることが期待できる。

また、近年増加している局所的・集中的な大雨（いわゆる「ゲリラ豪雨」）の予報を可能にすることも、今後の気象予報における大きな課題である[5]。こうした大雨をもたらす積乱雲の時空間スケールは非常に小さく、現在の気象予報モデルでは解像できていない。この点でも、

計算機能力の向上により高解像度化が可能になり、今後見込まれるレーダーなどの観測網の充実とあいまって、状況の大幅な改善が期待できる。



図の出典:世界気象機関

(<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>) および
気象予報士ハンドブック(日本気象予報士会, 2008年, オーム社)の図を改変

図 4.3.1-2 気象予報のためのデータ取得のイメージ図(左)と、データ同化手法の概念図(右)

(iii) 地球環境変化予測

二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの人間活動による排出にともない、全球的に気温が上昇する地球温暖化（以下、単に温暖化と呼ぶ）が懸念されている[6]。温暖化により、台風や集中豪雨、渇水などの極端事象の頻度や強度が変化し、新たな自然災害の脅威がもたらされる危険性が指摘されている。こうした極端事象が持つ空間スケールは往々にして小さいため、計算機資源が許す限りの高解像度モデルを用いた予測計算を行い、温暖化がもたらす脅威に備える必要がある。

更に温暖化は、森林や海洋プランクトンの成長、大気中の化学反応など、地球環境を形成するさまざまな過程にも影響を与える。こうした影響は、更に将来の温室効果ガスの濃度を左右することになる。例えば、温暖化が炭素循環過程に与える影響を考慮すると、昇温の予測を最大で 1.5 度程度上方修正する必要があることが最近の研究により示唆されている[7]。つまり、森林や海洋プランクトンの成長、大気中の化学反応と温暖化との間には、複雑な相互作用が存在する。そのため、温暖化を契機としてもたらされる地球環境の変化を包括的に予測するためには、海陸の生態系や大気中の化学物質の動態などの生物地球化学的過程を含んだ地球システムモデルの開発とそれによる予測とが不可欠である[4]。

地球システムモデルを用いて予測を行う際に注意すべきなのは、生物過程に関するパラメータが多く含まれ、それらの値を正確に決定することがほぼ不可能なことである。そのため、パラメータの値をさまざまに変えた実験を多数行って感度や不確実性の幅を調べることが重要となり、計算機資源も多く必要とされる。

また、データ同化の手法は、温暖化予測の領域でも重要性を増してきている。例えば、データ同化を施して作成した初期値から予測を開始し、数年～10年スケールで自然変動の影響も考慮した温暖化予測が可能になれば、政策を論じる際に考慮される時間スケールで予測を行うことになり、より政策にも反映しやすいであろう。また、地球システムモデル中の生物地球化学的過程にもデータ同化を応用して現実的な場を再現しながら、長期的な予測を行い（場合によっては）社会に地球環境の危機を警告する「地球環境監視予測システム」の構築も、将来的には可能となろう(図 4.3.1-3 参照)[8-10]。

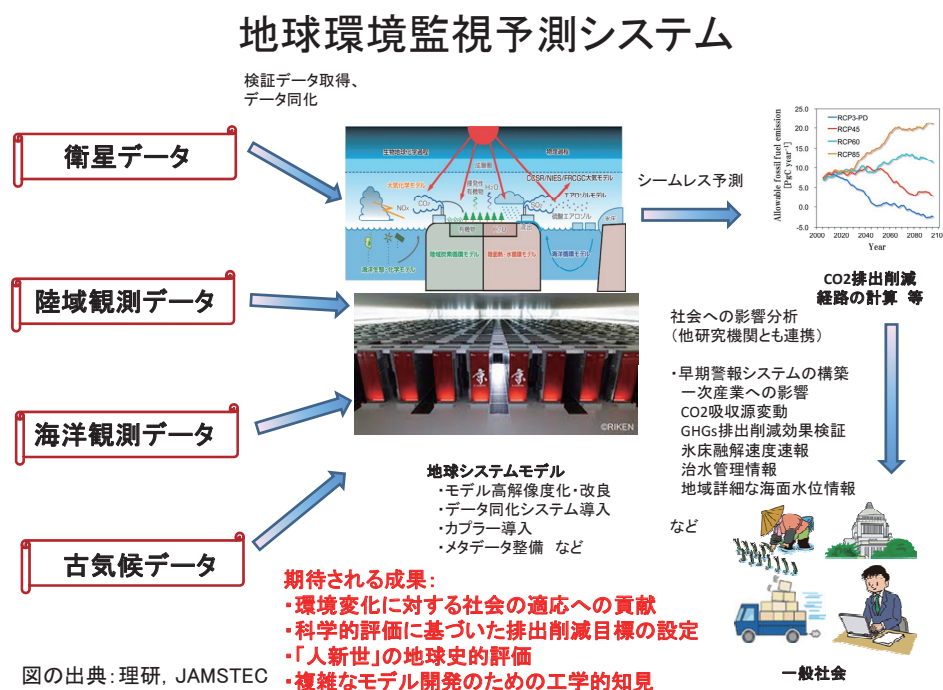


図 4.3.1-3 地球システムモデルを用いた地球環境監視予測システムの概念図

(iv) スケール間相互作用の解明

大気や海洋中には、小さな規模の現象が大規模な場に有意な影響を与える現象がしばしば見られる。モデルの格子間隔よりも小さな空間スケールで起こるこうした小規模現象を取り扱うための手法が開発されてきている。例えば、熱帯域では、高い海面水温のせいで大気の下から暖められる格好になって活発に対流（大気の上下混合）が起こっており、これが地球全体で見たときの熱や水蒸気の輸送にも重要な役割を果たしている。こうした対流を一般に積雲対流と呼ぶが、これにともなって上昇する空気塊の水平方向の広がりには1～10kmのオーダーである。したがって、例えば、温暖化予測で100年程度の積分期間を要する場合、雲の変化の把握が大変重要であるにも関わらず、その形成過程をすべて解像したモデルを使用するのは、今日得られる計算機資源では非現実的である。そこで、モデルで再現できる熱帯域の大まかな気温や水蒸気の分布から、対流がどの程度活発に起こっているか、を推測する経験則を導入する必要がある。こうした経験則をパラメタリゼーションと呼ぶ。

海洋モデルにもパラメタリゼーションは取り入れられている。海洋中には空間スケールにして 10~100km 程度の大きさの渦が存在しており、これらの渦は、海洋による熱の南北輸送に一定の役割を果たしている。このような渦も温暖化予測に用いられるモデルでは解像できない場合が多く、海水の密度分布などからパラメタリゼーションによってその役割を表現することになる。

こうしたパラメタリゼーションの検証や改良のため、対象とする現象（上の例では、積雲対流や海洋中の渦）を直接解像できるモデルを動かし、その結果を解析する手法は大変有効なものである。こうした手法は従来から用いられているが、解像度や積分期間が不足している場合が多く、計算機能力の向上にともなって得られる科学的知見の質も上がることが期待される。更に、50m 程度と言われる大気中の水平乱流の空間スケールを直接解像する Large Eddy Simulation により、大気汚染のシミュレーションに重要な大気中の水平混合のパラメタリゼーション精度の向上につながることが期待される。また、個体間の競争を直接表現したモデルによる森林動態の解明や、大気中のエアロゾルと大気化学過程の相互作用の解明など、生物・化学過程が関わる現象については過去の研究例も少なく、強力な計算機資源を生かし画期的な成果につながる可能性もある。

(3) 次世代に解決すべき課題

(i) 気象予報

気象予報の領域では、データ同化手法の開発が大きなテーマになる。高解像度化にともない、大気中の水分の相変化をデータ同化手法中でどのように取り扱うか、という問題に関しては工夫を要すると予想される。また、精度向上のため、近年注目されている新しいデータ同化手法の導入も検討していく。

(ii) 地球環境変化予測

地球環境監視予測システムの構築に向け、モデルの検証や高解像度化、データ同化の導入などに取り組む。生物過程が関わるモデル要素に関しては、検証に用いることのできるデータが他の分野に比べ乏しい。そのため、モデルの検証や、データ同化手法の開発などに関して気象予報の領域とは異なった問題を克服していく必要がある。

(iii) スケール間相互作用

大気モデル、海洋モデルなど、さまざまな高解像度モデルを利用して解析を行い、パラメタリゼーションの改良に結びつける。気象予報、地球環境変化予測の両領域で成果が活用されるよう、領域間のコミュニケーションは適切に保たねばならない。

当面、それぞれの領域におけるモデル開発は個別に行っていくことになるが、領域間で具体的課題の重複も存在する。こうした非効率性を解消するために、典型的なデータ通信をライブラリ化するなどして異なったモデル間での構成要素交換を容易にするカプラー技術の開発が進んでいる[11]。こうした技術を利用しながら、各領域で用いられるモデルを統合したモデル

開発環境の構築にも取り組む。こうした努力により、広範な時空間スケールにわたって断絶のない、広い意味でのシームレスな予測システムの確立につながることが期待される。

(4) 課題を解決するために必要なアプリケーション群（要求性能）

はじめに、要求見積もりの基礎データとしてどのようなモデルが選択されるべきであり、かつ選択可能かを考察する。気象気候分野のサイエンスロードマップでは、気象予報、地球環境変化予測、そしてスケール間相互作用の解明の3つが主要な研究領域として挙げられている。これらの領域で用いられるモデルは、

- 気象予報領域

- 高解像度アンサンブル予報モデル（5年後）

- 超高解像度アンサンブル予報モデル（10年後）

- 地球環境変化予測領域

- 中解像度シームレス予測モデル（5年後）

- 高解像度シームレス地球システムモデル（10年後）

- スケール間相互作用領域

- 地球環境変化予想と気象予報の2領域のモデルを用いる

のように想定されており、気象・気候分野では大別すると二つの系統のモデルが使われている。

気象予報領域に用いられるモデルは、数時間から数週間、長くても数ヶ月の気象の変化を再現・予報するモデルであり、一般に気象モデルと呼ばれている。対象とする空間スケールは、全球から数百 km（用途によっては数 km）までさまざまである。後述する地球環境変化予測に比して時間スケールが短いため、モデルに組み込まれる物理現象の種類は、地球環境変化予測に用いられる地球システムモデルより少なくなる。反面、雲や降水など、気象現象を支配する主要な物理現象は、時空間的に密に、かつ物理的にもできる限り詳細に表現されねばならない。そのため、地球システムモデルではパラメタリゼーションを通じて表現されることが一般的な積雲対流を、気象モデルでは直接計算する例が増えてきており、雲の微物理過程もより詳細なスキームが用いられる傾向がある。気象モデルも地球システムモデルと同様、国内に複数のモデルが存在するが、ここでは、NICAM と asuca を評価対象とする。

地球環境変化予測領域に用いられるモデル群にも複数の種類が存在するが、代表的なものは、文字どおり地球環境の変化を予測することを主目的とした、一般に地球システムモデルと呼ばれるモデルである。地球システムモデルは、空間的には全球を、時間的には数十年から数百年、目的によっては大陸移動をとまなうようなスケールの時間を対象とする。したがって、計算対象とする時間スケールに応じて、地球環境に影響を及ぼすと考えられる物理現象がモデル内で表現されていなければならない。近年問題となっている温室効果ガスの排出にとまなう地球環境変化予測では、数十から数百年の時間スケールが主要なターゲットとなっており、地球システムモデルには、このスケールで温室効果ガスの消長や環境に影響を及ぼすと考えられる、大気や海洋、河川、陸氷、海氷や陸域生態系、海洋生態系などの物理現象が組み込まれている。多様な物理現象を長期にわたり計算しなければならないため、気象モデルに比して解像度は粗く、また、個々の物理現象は精度の許す範囲で簡略化されて表現されている。国内には複数の

地球システムモデルが存在するが、代表的なモデルとして MIROC-ESM と JMA/MRI-ESM が挙げられる。今回の要求見積もりでは、比較的パフォーマンス測定がそろっている MIROC-ESM を評価の対象とする。

上に挙げたモデルはいわゆる気象・気候の数値シミュレーションモデルであるが、客観解析プログラムも当該分野における重要なアプリケーションである。客観解析とは不規則に分布した観測データから規則的な格子点での大気（や海洋）の状態を与える手法であり、初期値の精度が予報精度に直結するため、客観解析手法にも多くの改良が重ねられてきた。ここでは「4次元変分法」という手法を用いた客観解析プログラム JNoVA を評価の対象とする。

(i) NICAM

NICAM は正 20 面体準構造格子を用いた全球気象モデルである。力学過程では非静水圧のナビエーストックス方程式を有限体積法を用いて解いている。物理過程は雲微物理過程（ダブルモーメント・バルク法）、大気放射過程、スラブオーシャンなどを含む。

見積もりにあたって想定する問題規模は以下のとおりとする。

- 3次元格子数：1兆グリッド
(glevel15, 94layer：水平解像度 220m、鉛直解像度 100m~1km)
- 積分期間と実行時間：2ヶ月積分を2週間で実行
- 総ステップ数：520万 step (dt: 1秒)

水平格子間隔が 500m を切る計算においては、積雲対流の表現が格段によくなる（真の global-cloud-system resolving）。そこで北半球夏の熱帯計算について季節内振動の再現性評価（複数ケース）を行い、来るべき全球 LES への布石とすることがこの計算の位置づけである。

「京」コンピュータにおける glevel13, 94layer の計算結果から得られたデータは以下である。

- 3次元格子数：700億グリッド (glevel13, 94layer：水平 880m、鉛直 100m~1km)
- 使用ノード数：20480 ノード
- 実行効率：8%
- 演算性能：200TFLOPS
- 総メモリ使用量：220TByte
- 積分期間と実行時間：1日積分を延べ106時間（4.4日）で実行
- 総ステップ数：43200step (dt: 2秒)
- 1ステップ当たりの総演算量：88GFLOP
- 1ステップ当たりの所要時間：8.8秒
- 1格子あたりのメモリ使用量：3.5Kbyte（3次元変数 440個分に相当）
- 1格子1ステップ当たりの演算量：29230FLOP
- 要求 B/F 比：およそ 3
- 出力データ量：44変数 2.6TB を 900ステップ（実時間 2時間）おきに出力

これらの数値から、想定する問題規模で要求される値は以下のように見積もられる。

【総メモリ量】

- ・ 1 格子当たりのメモリ使用量×3 次元格子数 = およそ 3PByte

【演算性能】

- ・ 総演算量：1 格子 1 ステップ当たりの演算量×3 次元格子数×総ステップ数 = 152ZFLOP
これを実行時間 14 日で行う場合、
- ・ 総演算量 / 実行時間 = 125 PFLOPS

【メモリ帯域】

- ・ アプリケーションの要求する B/F 比と要求される実効演算性能より、要求されるメモリ帯域はおよそ 360PByte/sec である。
- ・ 理論演算性能が 1EFLOPS のマシンを想定した場合、実効 B/F 比でおよそ 0.36 が必要とされる。それぞれ B/F 比が 0.01、0.1、1、4 であるマシンを想定した場合、必要とされる理論演算性能は 36EFLOPS、3.6EFLOPS、360PFLOPS、90PFLOPS である。

【ネットワーク性能】

- ・ ほとんどの通信が隣接ノード間で行われるため、ノード当たり 1GB/s あればよい。出力データはシミュレーション 1 時間おきに延べ 40TB 程度出力すると見積もられ、ファイル I/O 性能は十分な I/O バッファが利用できるのであればトータルで 0.2TB/s で十分である。

(ii) asuca

asuca は領域気象モデルであり、力学過程では非静水圧のナビエーストークス方程式を差分法によって解いている。

見積もりにあたって想定する問題規模は以下のとおりとする。

- 格子数：7500×7500×500（水平 400m、鉛直 40m）
→総格子数 28G
- 積分時間と実行時間：36 時間予報を 30 分、dt=1s（129600 ステップ）
→1 ステップ当たりの実行時間は 1800/129600=13.88ms

計算領域の設定にあたっては、日本全体をおおむね覆う領域として東西 3000km、南北 3000km の領域を想定している。本資料を作成していた時点で、2013 年の気象庁のメソモデルは 36 時間予報を 30 分で終了することとしており、この予報時間および所要時間で計算を行うことを想定する。

既存の計算から得られた実測値(格子数 1571×1291×57)

- 演算量は 1 ステップ当たり 2TFLOP
- 377GByte のメモリを利用
- 所要時間の比率

通信時間を全体の 10%と仮定する。なお、入出力については入出力専用プロセスを設けることとして、オーバーラップさせることにより隠ぺいできると仮定する。

■ メモリバンド幅

力学過程（例えばセル境界でのフラックス評価）においては、四則演算が中心であることから比較的大きいメモリバンド幅を必要とするものの、物理過程においては複雑な関数を用いることもあり、力学過程よりもメモリバンド幅を必要としないものと考えられる。今後必要となるメモリバンド幅は、これから超高解像度の計算に対して、どのような力学過程・物理過程を開発していくかに依存しており、推定するのは難しいが、B/F 値が 1 であると仮定することにより見積もることとする。

■ ネットワーク性能

asuca は格子点法を用いており、全対全の計算を行うことはない。隣接プロセスとの通信回数として 1 ステップ当たり 75 変数に対していわゆる「のりしろ」領域（2 格子幅）を送信および受信する、とする。1 プロセスが担当する格子数を $50 \times 50 \times 500$ 層と仮定する（プロセス数としては $150 \times 150 = 22500$ プロセスを利用するとする）。のりしろ領域の 1 面当たりのバイト数は 50 （1 方向の格子数） $\times 500$ （鉛直層数） $\times 2$ （のりしろの幅） $\times 8$ （倍精度実数） $= 400\text{Kbyte}$ である。

■ データ出力

3 次元変数 25 個を予報時間 10 分おきに出力するとする（36 時間予報では 216 回）。データは圧縮して出力するものとし、1 変数当たり 2 バイトに圧縮できるとする。

これらの数値から

【総メモリ量】

$$377\text{Gbyte} \times (7500 \times 7500 \times 500) / (1571 \times 1291 \times 57) = 0.09\text{Pbyte}$$

【1 ステップ当たりの演算量】

$$2\text{TFLOP} \times (7500 \times 7500 \times 500) / (1571 \times 1291 \times 57) = 0.5\text{PFLOP}$$

【演算性能】

$$0.5\text{PFLOP} / 13.88\text{ms} = 30\text{PFLOPS}$$

【メモリバンド幅】

$$30\text{PFLOPS} \times 1 = 30\text{Pbyte/s}$$

【ネットワーク性能】

$$400\text{Kbyte} \times 75 \times 2 / (13.88\text{ms} \times 0.1) = 40\text{Gbyte/sec}$$

（隣接プロセスとの通信で必要な性能）

$$40\text{Gbyte/sec} \times 22500 = 0.9\text{Pbyte/sec} \text{（全体で必要な性能）}$$

【使用ストレージ量】

$$28\text{G} \times 25 \times 2 \times 216 = 0.3\text{Pbyte}$$

【ストレージ I/O 性能】

$$0.3\text{Pbyte}/1800\text{ (秒)} = 0.17\text{Tbyte/sec}$$

(iii) MIROC-ESM

MIROC-ESM は、地球環境の変化を予測することを主目的とした、一般に地球システムモデルと呼ばれるモデルである。地球システムモデルは地球環境の変化を再現・予測することを主目的としており、地球環境を形成している各種物理過程が、対象とする時間スケールや要求される精度に応じて組み込まれている。

見積もりにあたって想定する問題規模は以下のとおりとする。

- 格子数：大気モデル $2000 \times 1000 \times 200$ 、海洋モデル $3000 \times 1000 \times 50$
- 積分期間と実行時間：100 年積分を約 1 ヶ月で実行（=1 年積分を 6 時間で実行）
- 総ステップ数：5256000000（100 年、100 ケース並行実行、 $dt=60\text{sec}$ ）

地球システムモデルは複数のサブモデルから構成される。これらのサブモデルは流体の運動や光の放射伝達、大気化学反応など、異なる物理現象を表現しており、モデル全体にわたって全ての方程式系や解法を理解・把握することは多大な労力を要する。したがって、性能要求見積もりに際して、基礎方程式から出発し計算アルゴリズムから理論的に性能要求を導出する演繹的手法を採ることは困難であり、ここでは演算量やメモリ使用量などの測定値から帰納的に推測される値として要求を見積もることとした。なお測定は大気モデルのみで行った。

問題サイズ T85L40（格子数 $256 \times 128 \times 40$ ）の計算を、京コンピュータで実行し得られたプロファイル情報は次のとおりである。

- 1 ステップ当たりの総演算量：74.7 GFLOP
- 1 格子当たりのメモリ使用量：16.0 Kbyte
- 1 格子 1 ステップ当たりの演算量：57000 FLOP
- 1 格子 1 ステップ当たりのメモリアクセス量：129 Kbyte

これらの数値から、想定する問題規模（格子数： $2000 \times 1000 \times 200$ 、並行実行数：100）で要求される値は以下のように見積もられる。

【総メモリ量】

- ・ 1 格子当たりのメモリ使用量 \times 3 次元格子数 \times 並行実行数 = 600 TByte

【演算性能】

- ・ 総演算量：1 格子 1 ステップ当たりの演算量 \times 3 次元格子数 \times 総ステップ数 = 120 ZFLOP
これを実行時間 600 時間で行う場合、
- ・ $120\text{ZFLOP} / (600 \times 3600\text{ sec}) = 55\text{PFLOPS}$

【メモリ帯域】

- ・ 総メモリアクセス量：1 格子 1 ステップ当たりのアクセス量 \times 3 次元格子数 \times 総ステップ数 = 240000 EB
- ・ 要求メモリバンド幅： $240000\text{EB} / (600 \times 3600\text{ sec}) = 110\text{PB/sec}$

上記の1ケース当たりの要求演算性能は比較的小さい。しかし100ケースのアンサンブル実験全体を1ヶ月で終了させたいという要請がある。完全にケース間の同期をとって実行する必要はないが、同時に100ケースを実行するだけのキャパシティが不足しているシステムである場合、1ケース当たりの実行速度がより高速に行われることが要求される。出力データはシミュレーション100年当たり800TB程度出力すると見積もられ、100ケースで80PB必要である。ファイルI/O性能は十分なI/Oバッファが利用できるのであれば、トータルで40GB/s（積分時間の1%）あればよい。

(iv) JNoVA

JNoVAは「4次元変分法」というデータ同化手法を用いた客観解析プログラムである。客観解析とは不規則に分布した観測データから規則的な格子点での大気（や海洋）の状態を与える手法であり、初期値の精度が予報精度に直結する。

見積もりにあたって想定する計算規模は以下の通りとする。

- 格子数：4000km×3000km×鉛直150層を水平格子1kmで計算する（4000×3000×150格子）。
- 同化ウィンドウ3時間のデータ同化を実行時間30分で計算。dt=4秒（2700ステップ）。

既存の計算から得られた実測値は以下のとおりである。

- 1格子1ステップ当たりの演算量：12500FLOP
- 格子数241×193×40でのメモリ量：525Gbyte

これにより、必要なリソースは、以下のように見積もられる。

【総メモリ量】

4次元変分法の計算では、ステップごとにモデル内で計算される予報値を保存しておかなければならない。そのため、モデル時間（積分時間）が同じでもステップ数が異なると、要求されるメモリ量は異なる。上の実測値はDT=40秒、270ステップでの値である。一方、想定している計算規模ではDT=4秒、2700ステップとなるため、総メモリ量は、525Gbyte×（4000×3000×150）/（241×193×40）×（2700/270）=5.08Pbyteとなる。

【演算性能】

4次元変分法では、最適な値を求めるために複数回の探索計算を行う。この探索回数を50回とすると、総演算量は、12500FLOP×（4000×3000×150）×50×2700step=3.04EFLOPとなる。これを30分で計算する。実行時間の30%を通信が、70%を演算が占めるとすると、演算性能は3.04EFLOP/（1800s×0.7）=2.41PFLOPSとなる。

【メモリ帯域】

JNoVAの計算ではステップ毎にメモリ量が変わるため、メモリ帯域の正確な算出は困難である。きわめて大まかな見積もりとして、他のデルと同様、1ステップごとにロードストアが発生するとし、演算の10分の1でロードストア（ロードとストア）が行われると仮定する。4

次元変分法の探索計算内では、予報・随伴モデルにより予報値がステップごとに処理される。総メモリ量の大部分が予報値で占められていると仮定すると、予報値 1 タイムステップ当たりのメモリ量は $5.08\text{Pbyte}/2700\text{ step}=1.88\text{Tbyte}$ となる。また、1 タイムステップ当たりのロードストアの時間は $1800\text{s} \times 0.1 / (2700\text{step} \times 50 (\text{繰り返し回}) \times 2 (\text{予報・随伴モデル})) = 0.67\text{ms}$ である。この時間でロードとストアが行われると仮定すると

$$1.88\text{Tbyte} / 0.67\text{ms} \times 2 = 5.64\text{ Pbyte/s}$$

となる。

【ネットワーク性能】

JNoVA の時間発展演算子では、隣接プロセスとの通信回数として、1 ステップ当たり 68 変数についてのりしろ領域 (2 格子幅) を送信および受信する。1 プロセス当たりの格子数を $100 \times 100 \times 150$ 格子と仮定する (プロセス数としては $40 \times 30 = 1200$ プロセス)。のりしろ領域の 1 面当たりのバイト数は 100 (1 方向の格子数) $\times 150$ (鉛直層数) $\times 2$ (のりしろの幅) $\times 8$ (倍精度実数) $= 240\text{Kbyte}$ である。

$$240\text{Kbyte} \times 68 (\text{変数}) \times 2 \times 2700\text{step} \times 2 (\text{予報・随伴モデル}) \times 50 (\text{探索回数}) \times 1200 (\text{プロセス}) = 10.58\text{Pbyte}$$

実行時間 30 分のうち 30% が通信と仮定して、

$$10.58\text{Pbyte} / (1800\text{s} \times 0.3) = 0.0196\text{Pbyte/s}$$

【ストレージ量】

解析結果 3 次元変数 21 個を出力するとして、

$$4000 \times 3000 \times 150 \times 21 (\text{変数}) \times 8\text{byte} = 302.4\text{Gbyte}$$

【ストレージ I/O 性能】

計算時間の 1% 程度を想定すると、

$$302.4\text{Gbyte} / (1800\text{s} \times 0.01) = 0.017\text{TB/s}$$

と見積もられる。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ / バンド幅 (PB/s)	メモリ量 / ケース (PB)	ストレージ量 / ケース (PB)	計算時間 / ケース (hour)	ケース数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
高解像度気象予報 (全球)	130	360	3	58	340	1	150000	モデル名 NICAM, 有限体積法	格子点数: 1 兆 (水平解像度 220m, 鉛直 94 層)、ステップ数: 520 万 (dt=1 秒、2 ヶ月)	10 万ノードを仮定 (ノードあたり隣接通信 1GB/s)
高解像度気象予報 (領域)	33	33	0.09	0.3	0.5	2700	160000	モデル名 ASUCA, 有限体積法	格子点数: 7500x7500x500、ステップ数: 13 万 (dt=1 秒、36 時間)	演算量、メモリ量に関しては、SR1600 でのプロファイルを元に外挿。メモリアクセス量は、B/F 値が 1 と仮定して見積もった。出力は、25 変数は 10 分毎に出力する。通信に関しては、22500 ノードを仮定 (ノードあたり隣接通信 40GB/s)
地球環境変化予測	56	110	0.60	80	600	1	120000	モデル名 MIROC-ESM	格子点数: 2000x1000x200、ステップ数: 5300 万 (dt=60 秒、100 年)、100 アンサンブル同時実行	計算の大半を占める大気モデルのみで見積もり。100 ケース全体が 1 ヶ月で計算完了することが必要。ネットワークは 1000 ノードを仮定 (ノードあたり大域通信 1TB/s) 演算量、メモリ転送量、メモリ使用量は、京でのプロファイルを元に外挿
データ同化を用いた気象予測精度向上	2	5.6	5	0.0003	0.5	1	4.2	モデル名 JNoVA, 四次元変分法 (同化モデル)	格子点数: 4000x3000x150、ステップ数: 2700	探索回数 50、実行時間のうち 70% が演算として見積もり

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値は Web 版 (→「1.2. 本文書の構成」) を参照のこと。

(5) 他分野との連携

惑星科学の分野では、惑星大気の振る舞いを理解するため、地球大気を念頭に開発されてきた大気大循環モデル（AGCM）を適用する研究が盛んに行われている。AGCMでは、グリッドスケール以下の地球大気現象を表現するためのパラメタリゼーションが多数用いられる。惑星大気へのAGCM適用により、こうしたパラメタリゼーションの適用範囲が明確になり、また惑星大気特有の現象再現のための改良の努力が地球の気象現象の再現性向上をもたらすことも期待される。また、ものづくり分野などで研究開発が進む流体モデルと連携することにより、精度の高い移流スキームや乱流の取り扱いの開発、高度な可視化技術の開発などにつながる可能性がある。

また、「(2)長期的目標」で触れたデータ同化技術は、気象・気候の研究を行うにあたって数値モデリング分野と観測分野を結ぶのに不可欠な手法であるが、生命科学分野や数値流体力学など他分野でも利用が盛んになってきている。それぞれの分野で進むデータ同化技術の開発について情報交換を行うことで、単一分野内での技術開発では望めないような思わぬ発展がもたらされるかもしれない。

更に、地球温暖化の予測など長期的な環境変化予測は、将来の社会・経済発展の方向性を議論するために開発されてきたモデルと関連が深い。実際、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）の報告書作成へ向け使用される社会・経済シナリオ開発のために用いられるモデルでは、気候モデルによる温暖化予測実験結果が入力データとして直接、間接に用いられている。向上の著しい計算能力を活用して、社会・経済分野での詳細なモデルを、本節で述べた地球環境監視予測システムに組み入れることで、社会制度の未来設計に有用なツールを構築することは検討の価値があろう。

(6) 公的な意見交換とそのサマリー

2013年3月25日、日本海洋学会春季大会においてシンポジウム「ポスト『京』に向けた計算科学としての海洋学の展望」を開催し、海洋学会員以外の参加者も含め約50名の参加を得た。気候モデリングの研究を進める主な国内機関（東大大気海洋研、気象研究所、北海道大学、海洋研究開発機構）からの講演者7名に、モデル研究の将来構想を個人として自由に発表してもらったのち、1時間ほどの総合討論を行った。総合討論では、ロードマップの大枠については支持が得られ、ロードマップの実現へ向けた具体的な手法や体制などを中心に議論が進んだ。討論で出された話題として、以下のようなものがあった。

- 計算機の高速化とともに、モデルの大規模化も進んでいる。海洋コミュニティの中で可能な限りモデルを統一していくための連携が始まっている。
- ポスト「京」の他に、分野ごとに最適化されたアーキテクチャを持つ大型計算機が存在し、ポスト「京」と連携していく体制が理想的。
- データ同化を行うにあたっては、メモリとCPUに加え早いI/Oが必要。また診断量をモデル内で計算してディスクに書き出しておく必要性が増してきており、十分なディスクを確保することが重要。

- 波浪モデルや生態系モデルを海洋モデルに結合するケースが出てきている。波浪モデルは次元数が5次元と多いため、計算時間が20倍になることもある。また生態系モデルも、構造によってはトレーサの数が飛躍的に増大する。高性能の計算機の能力を活用するという意味では適切な課題。

また、日本気象学会においても、専門分科会「ポスト『京』に向けた気象・気候シミュレーションの展望」を2013年5月18日に開催し、学会員100名以上の参加を得た。気象・気候の数値モデリングを進める主な国内研究・行政機関（気象庁、理化学研究所、京大、東大、海洋研究開発機構など）に所属する講演者から、第1部では「京」を利用した計算結果について、第2部ではポスト「京」に向けた数値モデリング・データ同化研究の将来構想やアーキテクチャに関する要望などについて、計10の講演があった。特に、データ同化に取り組んでいる複数の講演者から、計算速度のみならずI/Oが成果を得るまでのスループットを決める重要な要因となってきたことが指摘されたほか、竜巻予測や気象LES実験といった先進的な取り組みも紹介されていた。講演終了後の総合討論では、データ同化のみならず、実験結果の可視化やデータマイニングといった後処理を効率的に進めるためにも、高い計算速度に見合ったI/Oの性能の必要性が改めて強調されていた。更に、大規模な資金を投じて開発される大型計算機の利用に際しては、社会に資するという意識が不可欠であるという指摘がある一方、高解像度モデルの活用により素過程の理解を深め、科学的知見を得ることで世界をリードすることも広い意味での社会貢献につながるという意見が出された。気象・気候分野での計算科学ロードマップは、この両面を含むものとして評価され、大枠での合意は得られた。

(7) ロードマップ

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
地球環境監視 予測システム	中解像度シームレス予測システムの開発 地域スケールの詳細温暖化予測 ・確率的予測手法開発 ・一様格子力学コアの導入 ・領域モデル、GCM改良			高解像度シームレス予測システムの開発 地球環境再解析・再予測システム構築 ・ESM要素モデル開発・結合 ・古気候や惑星大気モデリングによるESM検証 ・生物化学過程データ同化		
スケール間 相互作用解明	大気・海洋の乱流と大規模場の相互作用解明 GCMパラメタリゼーション改良 ・LES・雲物理モデル結合 ・海洋渦解像モデル改良			化学－エアロゾル過程相互作用解明 個体動態と群集動態の関係解明 ・エアロゾル・大気化学結合系モデル開発 ・個体ベース生態系モデル(陸域・海洋)開発		
高解像度 気象予報	高解像度アンサンブル予測モデルの開発 1-2km雲解像モデルによる局地的強雨の直前 予測と確率的予測の実証実験 ・ストームスケール、雲解像スケールのデータ 同化手法の開発と統合			超高解像度アンサンブル予測モデルの開発 0.5-1kmモデルによる確率予報の実証と再生 可能エネルギー供給・大気汚染の精密予測 ・氷相を入れたデータ同化技術開発 ・高精度の風系・物質輸送再現モデル開発		

図 4.3.1-4 気象・気候科学ロードマップ

参考文献

- [1] Oouchi, K. and H. Fudeyasu (2012) Cyclones: Formation, Triggers and Control, Nova Science Pub. Inc., ISBN 978-1619429765, 276pp.
- [2] J. L. Kinter III, B. Cash, D. Achuthavarier, J. Adams, E. Altshuler, P. Dirmeyer, B. Doty, B. Huang, L. Marx, J. Manganello, C. Stan, T. Wakefield, E. Jin, T. Palmer, M. Hamrud, T. Jung, M. Miller, P. Towers, N. Wedi, M. Satoh, H. Tomita, C. Kodama, T. Nasuno, K. Oouchi, Y. Yamada, H. Taniguchi, P. Andrews, T. Baer, M. Ezell, C. Halloy, D. John, B. Loftis, R. Mohr, and K. Wong (2013) Revolutionizing Climate Modeling - Project Athena: A Multi-Institutional, International Collaboration. Bull. Am. Meteorol. Soc., 94, 231-245.
- [3] 淡路敏之, 池田元美, 石川洋一, 蒲地政文 (2009) データ同化—観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, 284pp.
- [4] 住明正, 露木義, 河宮未知生, 木本昌秀 (2012) 計算と地球環境 (岩波講座計算科学第5巻), 岩波書店, 256pp.
- [5] 斉藤和雄 (2012) 局地的大雨の予測に挑む—超高精度気象メソスケール予測の実証—, 環境会議, 2012 春号, 58-63.
- [6] 河宮未知生, 石井正好, 鬼頭昭雄, 木本昌秀 (2013) 「21 世紀気候変動予測革新プログラム」における CMIP5 実験仕様に基づいた温暖化予測実験, 天気, 2013 年 4 月号, 印刷中.

- [7] Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. Weaver, C. Yoshikawa, and N. Zeng, et al. (2006) Climate-carbon cycle feedback analysis, results from the c4mip model intercomparison. *J. Climate*, 19, 3337–3353.
- [8] World Climate Conference-3 Geneva, 31 August – 4 September 2009, Conference Statement, http://www.wmo.int/wcc3/documents/WCC-3_Statement_07-09-09_mods.pdf (2013 年 4 月 5 日閲覧)
- [9] World Climate Research Programme (2005) The World Climate Research Programme Strategic Framework 2005-2015: Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPES), WMO/TD-No.2191, 59pp.
- [10] Griggs, D. (2013) Sustainable development goals for people and planet, *Nature*, 495, 305-307.
- [11] Arakawa, T., H. Yoshimura, F. Saito and K. Ogochi (2011) Data exchange algorithm and software design of KAKUSHIN coupler Jcup, *Procedia Computer Science*, 4, 1516-1525.