

4.3 地球科学

4.1.3 気象・気候科学

(i) 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、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り、このため我が国の社会・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分かっていない。重大な影響を持つ台風の温暖化時の動向の詳細はまだ分かっていない。「京」コンピュータがもたらした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により熱帯における降水等の季節内マッデン・ジュリアン振動現象などを精度よく再現し、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、我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。また集中豪雨は毎年我が国に多大な被害をもたらしており、近年その頻度が増加傾向にある（図4.3.1.1）いる。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メソ対流系の発生や消長を一定時間前に予測するためには、積乱雲を解像改造できるモデルを用い、数km-数10kmの空間スケールメソ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た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を利用すること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挑戦が可能になった。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、我が国における様々な気象災害の軽減に貢献する。

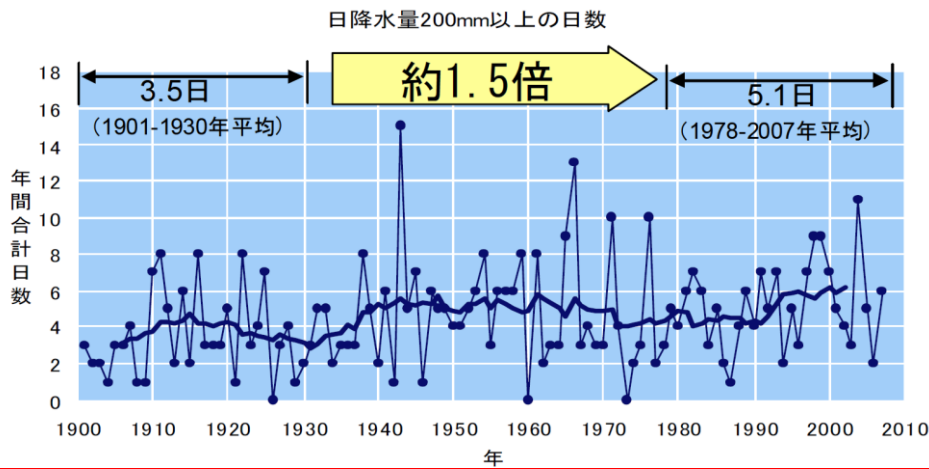


図 4.3.11 全国 51 地点の観測値から求めた日降水量 200 ミリ以上の年間日数。年々の変動（細線）と 11 年移動平均（太線）を示す。出展：http://www.mlit.go.jp/river/sabo/keiryu/081112_09_siryu.pdf（2013 年 6 月 9 日閲覧）。

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さらに進めることで、世界的にも先導的な地位を維持することができよう。

さらに、「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くよう、コミュニティーの英知を結集させた地球変動予測モデルアプリケーションパッケージ（統一日本モデル）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小機坊主、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、十年規模気候変動予測、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。さらには、予測には常に不確実性が伴うことを考慮に入れるとに鑑み、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コンポーネントモデルアンサンブル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、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分解能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計算負荷調整機能が必要である。開発されてきたソフトを、今後効率的に継承、結合していくために、コミュニティー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。

我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我が国独自の開発を推進する必要がある。が、「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3つの研究領域に大別することができる。このうち1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予報モデルによる予測や、温暖化に伴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。さらに、気象予報モデル、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、スケール間の相互作用を解明することも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さらに詳しく述べる。

ii) 気象予報

後の節で述べる100年程度の時間スケールを対象にした気候変動予測と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を挙げることができる。すなわち、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カ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、観測データに基づき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のである。

衛星観測や船舶、飛行機などによる観測、定点観測など、観測データにはさまざまな種類があり（図4.3.1.27参照）、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「性質の良い」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。そ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。さらに、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り、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を期待できる。

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。しかしながら、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。

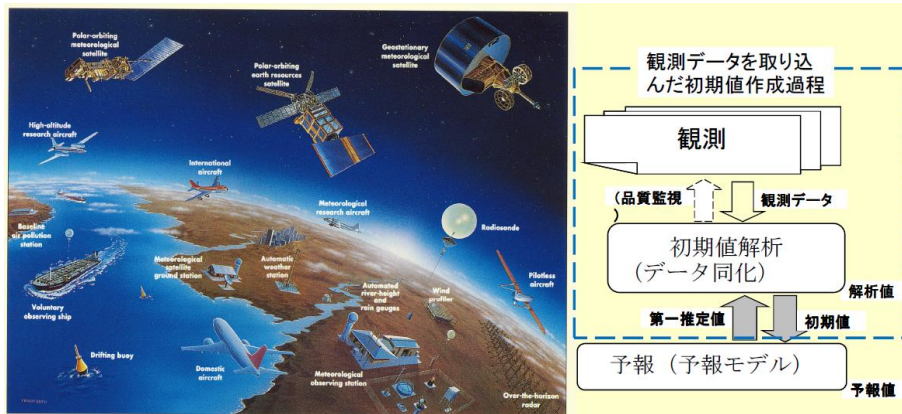


図 4.3.1.2 気象予報のためのデータ取得のイメージ図(左)と、データ同化手法の概念図(右)。

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気体の人間活動による排出に伴い、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。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。

さらに温暖化は、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様々な過程にも影響を与える。こうした影響は、さらに将来の温室効果気体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(Friedlingstein et al., 2006)。→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**相互作用フィードバックループ**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**←(Earth System Model←以下**ESM**)の開発とそれによる予測とが不可欠である(図4.3.1.2参照)。

地球システムモデル ESM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、それらの正確な値を決定することがほぼ不可能なことである。そのため、パラメータの値を様々に変えた**実験を多数行って**感度や不確実性の幅を調べる**ことパラメータサンプリング**が重要となり、計算機資源も多く必要とされる。

また、前節で述べ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〜十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、予測の時間スケールが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のみに近くなり、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 ESM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）。

地球環境監視予測システム

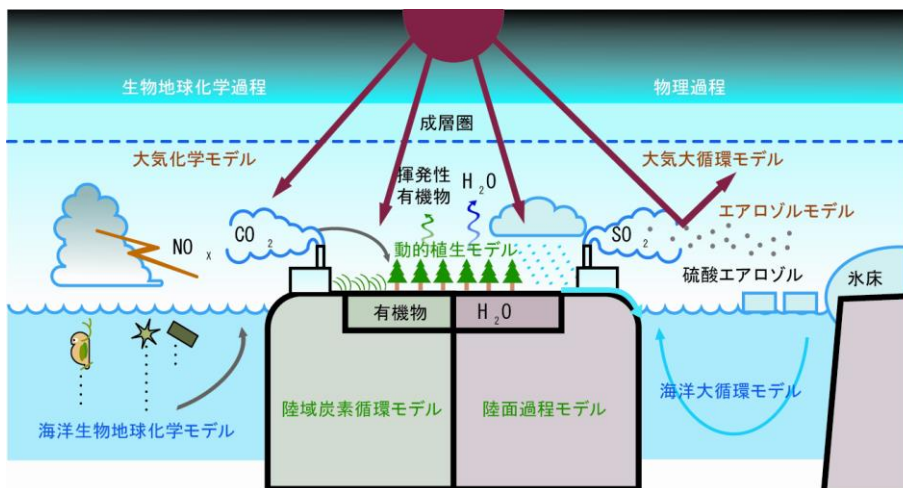
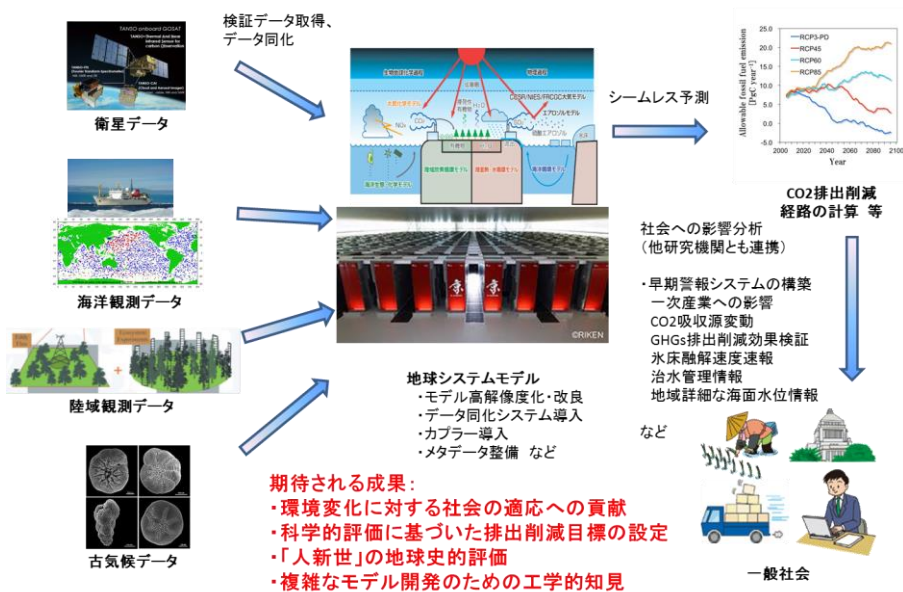


図 4.3.1.3z 地球システムモデルを用いた地球環境監視予測システムの構成を示す概念図。

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場合がままある。モデルの格子間隔よりも小さな空間スケールで起こるそうしたそのような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パラメタリゼーションである。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、これに伴って上昇する空気塊の水平方向の広がりは10kmの桁である。従って、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わけである。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伴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。さらに、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・化学過程に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。高解像度化に伴い、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、「粒子フィルタ」など、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、様々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別途行っていくことになるが、領域間で具体的な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。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。前節の気象気候分野のサイエンスロードマップでは、地球環境変化予測、スケール間相互作用の解明、気象予報の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 ESM（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2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、全球から数百キロメートル（用途によっては数キロメートル）まで様々である。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 を解析対象とする。NICAM は京コンピュータの初期ターゲットアプリケーションの一つであり、そのため、パフォーマンスに関わる分析が豊富に存在する。asuca は気象庁で開発されている次世代メソモデルで、今後数値予報に用いられる予定になっている。

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、文字通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伴うようなスケールの時間を対象とする。従って、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伴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、次に述べる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データのそろっている MIROC-ESM を **評価**の解析対象とする。

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**の解析対象とする。

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-ストークス方程式を、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（**雲粒の数濃度と体積濃度を予報変数とする手法ダブルモーメントのバルク法**）、放射過程、**大気海洋間の熱交換を簡略化して表現するための「スラブオーシャン**」などを含む。後述するように、NICAM では、~~（もちろん解像度など計算条件に依存するものの、が）~~物理過程に比して力学過程 **が** の計算に占める割合が高いため、性能要求見積もりは力学過程のみについて行った。

見積もりにあたって想定する問題規模は以下の通りとする。

- 格子数：gh4L100（水平 400m、鉛直 250m 相当）、総格子数 286G
- 積分期間と実行時間：6 ヶ月積分を 10 日で実行
- ケース数：10 ケースをシリーズで実行

水平格子間隔 500m を切る計算においては、**鉛直対流 convection** 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。NICAM の性能見積もりは、力学過程を対象とした。物理過程を無視した理由は、現在得られている様々な性能

測定結果によって、力学過程に比して物理過程は実行時間が短く要求メモリ量も小さいという結果が得られており、力学過程で得られる要件が満たされれば、物理過程も十分効率的に計算可能であると推測されるためである。

gh0L40 の計算結果から得られたデータは以下である。

- dt=1.875 秒
- 1 格子 1step あたりの演算量：25780FLOP
- 力学過程と物理過程の演算量比：0.7 対 0.3
- 変数の数：50 変数

これらの数値から、

- 総メモリ量
総格子数 $286\text{G} \times 50$ 変数 = 0.14Pbyte
- メモリ帯域
6ヶ月積分 $\times 10$ ケース、dt=1.875 だから、全ステップ数は 83M ステップ。これを実計算時間 10 日で終わるとすると 1 ステップあたりの力学過程の実行時間は 7.3msec。1step 毎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と $(0.1\text{Pbyte}/(7.3\text{msec} \times 0.1)) \times 2 = 313.8\text{Pbyte/sec}$ となる
- 演算性能
総演算量は 286G （格子数） $\times 83\text{M}$ （ステップ数） $\times 25780$
これを 10 日で積分するから演算性能は
総演算量/ $(60 \times 60 \times 24 \times 10) = 708\text{PFLOPS}$

と見積もられる。

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ストークス方程式を差分法によって解いている。物理過程は雲微物理や放射等 NICAM と類似である。性能見積りは力学と物理の両過程を合わせて行った。

見積りにあたって想定する問題規模は以下の通りとする。

- 格子数：7500 \times 7500 \times 500（水平 400m、鉛直 40m 相当）、総格子数 28G
- 積分期間と実行時間：32 時間積分を 30 分で実行。dt = 1.0 秒
- ケース数：1 ケース

通信時間を全体の 30%、残りを演算時間と仮定する。また既存の計算から得られた実測値は以下の通りである。

- 20 \times 20 \times 57 の格子数で測定した演算量は 1step あたり約 1350MFLOP
- 51 \times 51 \times 57 の格子数で 600MB のメモリを使用

これらの数値から、

- 総メモリ量
 $600\text{MB} \times (7500 \times 7500 \times 500) / (51 \times 51 \times 57) = 0.114\text{Pbyte}$
- メモリ帯域

32 時間積分、 $dt=1.0$ だから、全ステップ数は 12966 ステップ。これを実計算時間 30 分で終わるとすると 1 ステップあたりの演算時間は 9.7msec。1step 毎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と $(0.114\text{Pbyte}/(9.7\text{msec} \times 0.1)) \times 2 = 234.1\text{Pbyte/sec}$ となる。

- 演算性能

1 ステップあたりの演算量は $1350\text{MFLOP} \times (7500 \times 7500 \times 500) / (20 \times 20 \times 57) = 1.665\text{PFLOP}$

これを 9.7msec で実行するから演算性能は $1.665\text{PFLOP}/9.7\text{msec} = \text{総演算量}/(60 \times \cancel{3060} \times \cancel{24} \times \cancel{60}) = 171\text{PFLOPS}$

と見積もられる。

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通りとする。

- 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 1 ヶ月で実行（=1 年積分を 6 時間で実行）
- ケース数：100 ケースを平行して実行

前述のように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求する。従って、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と海洋モデル別々に行われたが、海洋モデルの演算量は大気モデルの 1% 未満だったため、ここでは大気モデルのみについて考える。測定から得られたデータは次の通りである。

- T639L200（格子数およそ $2000 \times 1000 \times 200$ に相当）を ES2 で測定した結果
- 160 プロセス使用時にメモリ使用量 20GB/プロセス=総メモリ量 3.2Tbyte
- 演算量 11.5EFLOP/一年積分
- $dt = 60$ 秒

これらの数値から、

- 総メモリ量
 $3.2\text{Tbyte} \times 100 \text{ アンサンブル} = 0.32\text{Pbyte}$ となる。なお 3.2Tbyte を格子数 ($2000 \times 1000 \times 200$) で割るとおよそ 1000 個の 3 次元変数が存在することになる。
- メモリ帯域

dt=60 秒だから1年積分を6時間で実行するには1stepの時間は41msec。1step毎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と $0.1 \times 32\text{Pbyte} / (41\text{msec} \times 0.1) \times 2 = 155.7\text{Pbyte/sec}$ となる。

- 演算性能
1年間の演算量 11.5EFLOP を6時間で計算するから $11.5\text{EFLOP} / (6 \times 60 \times 60) \times 100$
アンサンブル = 53PFLOPS

と見積もられる。

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。
モデル時間3時間を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通りである。

- (ア) 1格子1stepあたりの演算量：12500FLOP
- (イ) 格子数 $241 \times 193 \times 40$ でのメモリ量：525Gbyte

これにより、必要なリソースは、

- 総メモリ量
4次元変分法の計算では、ステップ毎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、
 $525\text{Gbyte} \times (4000 \times 3000 \times 150) / (241 \times 193 \times 40) \times (2700/270) = 5.08\text{Pbyte}$ 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、 $12500 \times (4000 \times 3000 \times 150) \times 50 \times 2700 = 3.08\text{EFLOP}$
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 $3.08 / (1800 \times 0.7) = 2.41\text{PFLOPS}$ 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、他のモデルと同様、1step毎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と
 $5.08\text{Pbyte} / (1800/2700 \times 0.1) \times 2 = 153\text{Pbyte/sec}$

となる。この見積もりは、記憶されている全ての変数をステップ毎にロードストアする、という前提に基づいているが、実際の計算ではステップ数が少ないうちは記憶されている変数も少なく、また、必ずしも全変数のロードストアがステップ毎に要求される訳でもないため、上記の見積もりは過大な数値になっていると想定される。

と見積もられる。

(5) 他分野との連携

惑星科学の分野では、惑星大気の振舞を理解するため、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)長期目標」の節で触れたデータ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。

さらに、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、3.6節で紹介されるような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るだろう。

(6) 公的な意見交換とそのサマリー

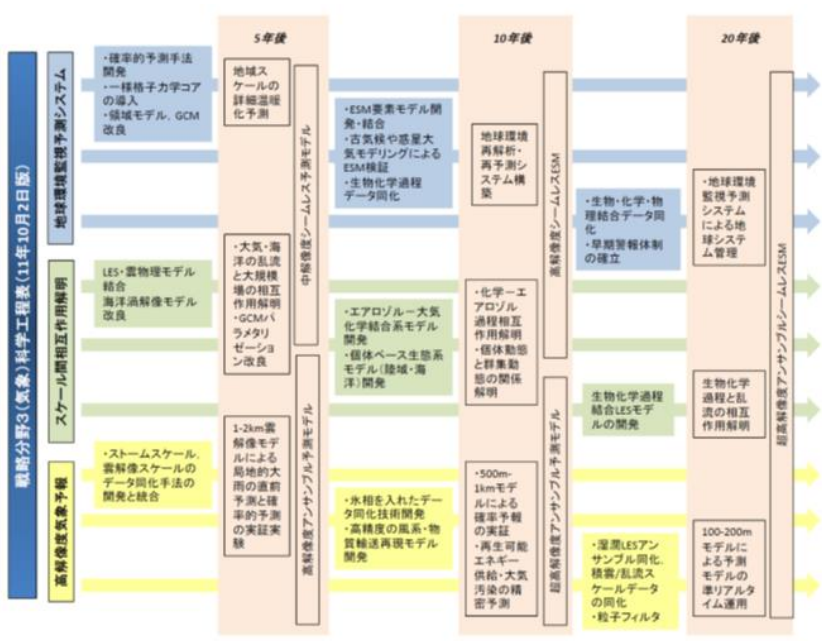
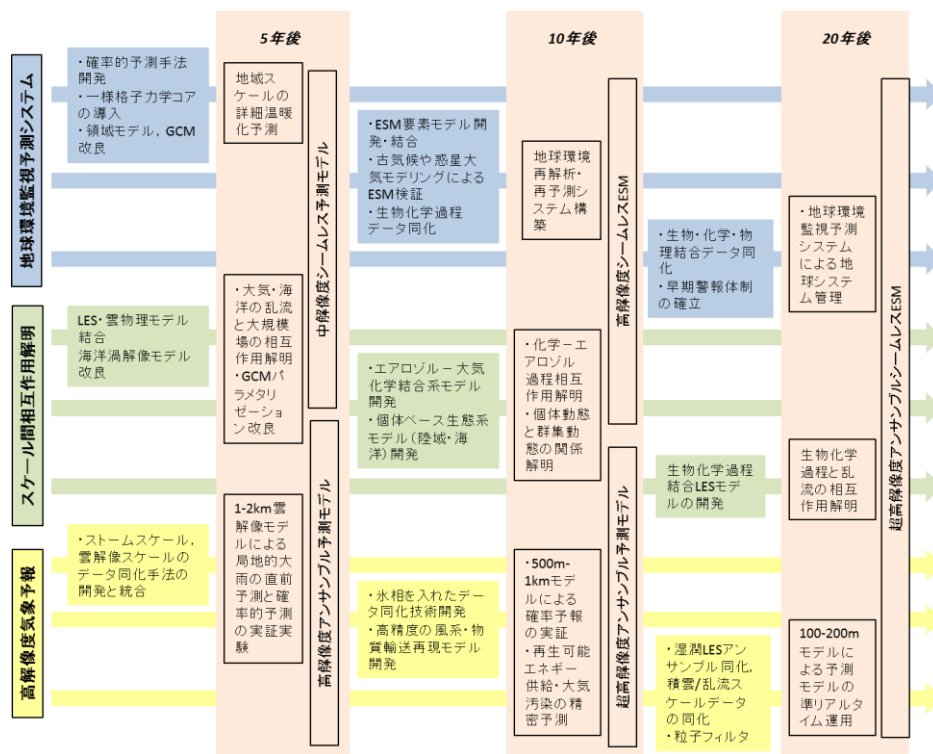
2013年3月25日、日本海洋学会春季大会においてシンポジウム「ポスト『京』に向けた計算科学としての海洋学の展望」を開催し、海洋学会員以外の参加者も含め約50名の参加を得た。気候モデリングの研究を進めるおもな国内機関（東大大気海洋研、気象研究所、北海道大学、海洋研究開発機構）からの講演者7名に、モデル研究の将来構想を個人として自由に発表してもらったのち、1時間ほどの総合討論を行った。総合討論では、ロードマップの大枠については支持が得られ、ロードマップの実現へ向けた具体的な手法や体制などを中心に議論が進んだ。討論で出された話題として、以下のようなものがあつた。

➤ データ同化については、今後は結合モデルを用いた同化が盛んになってくると思われる。とくにシームレスな予測システム開発のためには重要。

- ▶ ~~計算資源の効率的な利用のためには、全球で高解像度にしていくよりは、日本近海や深層水形成域など、研究対象とする領域のみ高解像度化するネスティング技術が有効。~~
- ▶ 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」のほかに、分野ごとに最適化されたアーキテクチャをも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。
- ▶ ~~大規模化、高解像度化する観測データを十分に活用するためにも、高解像度モデルを用いたデータ同化の重要性は今後増大する。~~
- ▶ 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。高性能の計算機的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。する予定である。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。さらに、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



参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] [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.](#)
- [4][5] Oouchi, K. and H. Fudeyasu (2012) *Cyclones: Formation, Triggers and Control*, Nova Science Pub. Inc., ISBN 978-1619429765, 276pp.
- [5][6] 齊藤和雄 (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][7] 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.
- [7][8] 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.
- [8][9] 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][10] 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][11] Griggs, D. (2013) Sustainable development goals for people and planet, *Nature*, 495, 305-307.