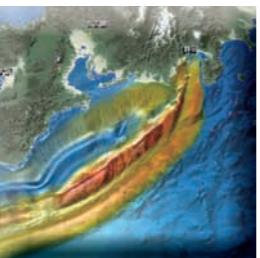
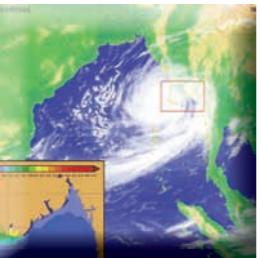


HPCI STRATEGIC PROGRAM FOR INNOVATION RESEARCH, FIELD 3

ADVANCED PREDICTION RESEARCHES
FOR NATURAL DISASTER PREVENTION AND REDUCTION



<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/>



Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)



HPCI STRATEGIC PROGRAM FOR INNOVATION RESEARCH, FIELD 3

HPCI 戰略プログラム 分野 3

防災・減災に資する 地 球 変 動 予 測

Advanced Prediction Researches
for Natural Disaster Prevention and Reduction



国立研究開発法人
海洋研究開発機構

■ HPCI 戰略プログラム

理化学研究所の計算科学研究機構（神戸）に設置され、2012年9月に共用が開始されたスーパーコンピュータ「京」（略称：「京」）を中心として、大学等の主要なスーパーコンピュータを高速ネットワークでつなぐHPCI（革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ）が構築されています。「HPCI 戰略プログラム」は、「京」の能力を最大限に活用して世界最高水準の研究成果を創出するとともに、戦略的に選ばれた研究分野における計算科学技術推進体制の構築を支援するために実施されているプロジェクトです。

文部科学省は、「京」の利用のあり方として、多様な研究者のニーズにこたえる利用形態（一般的な利用）と、社会的・国家的見地から特定分野の研究を戦略的・重点的に推進する戦略的利用を導入すべきとの提言を受け、次世代スーパーコンピュータ戦略委員会において、「京」の計算資源を必要とし、かつ、社会的・学術的に大きなブレークスルーが期待できる分野（戦略分野）の検討を行いました。その結果、「予測する生命科学・医療および創薬基盤」、「新物質・エネルギー創成」、「防災・減災に資する地球変動予測」、「次世代ものづくり」、「物質と宇宙の起源と構造」の五つの分野が選ばされました。

2009年度には、これらの戦略分野の研究を担う戦略機関が公募され、戦略機関として行う活動の実施可能性調査（FS）を行う機関が決まりました。その実施計画の評価を経て、戦略機関が決定され、各戦略機関は、2010年度に準備研究を行ったのち、2011年度から本格的な研究に取り組んできました。2015年度は、5年計画の最終年度に当たります。

■ 防災・減災に資する地球変動予測（分野3）

戦略分野の一つである「防災・減災に資する地球変動予測」（分野3）は、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）が代表機関として事業を進めています。

JAMSTECは全国の大学・研究機関と共に、戦略目標である「地球温暖化時の台風の動向の全球的予測と集中豪雨の予測実証、および次世代型地震ハザードマップの基盤構築と津波警報の高精度化」の実現に向け、世界最高水準の研究成果の創出と、本分野における計算科学技術推進体制を構築することを目的として事業を推進してきました。



©RIKEN



スーパーコンピュータを駆使して 大規模自然災害の軽減を

日本は毎年のように台風、集中豪雨、地震、津波などに見舞われ、大きな被害を受けています。特に2011年3月11日の東北地方太平洋沖を震源とする超巨大地震とそれに伴う超巨大津波は、東北地方を中心に2万人を超える犠牲者と壊滅的な被害をもたらし、さらに福島第一原子力発電所での大量の放射能漏れ事故をも引き起こしました。これはまさに未會有の大惨事であり、自然の猛威を思い知らされました。このような大規模な自然災害は社会・経済活動に深刻な打撃を与えることから、防災・減災に向けた迅速で効率的な対策が喫緊の課題となっています。

大規模な灾害をもたらす自然現象（ナチュラル・ハザード）に関しては、野外実験によって影響を評価し検証することは不可能であり、スーパーコンピュータを駆使した大規模シミュレーションによる検討が不可欠です。これまで「地球シミュレータ」を用いて大掛かりなシミュレーションを行ってきましたが、HPCI 戰略プログラムの分野3「防災・減災に資する地球変動予測」では、スーパーコンピュータ「京」を用いて、これらのナチュラル・ハザードに関する大規模で高精度のシミュレーションを全国の大学や研究機関と協同して実施し、

学術的な展開を図るとともに実際の防災・減災に資することを目指して研究を進めています。研究開発課題を二つ設定しています。一つは「防災・減災に資する気象・気候・環境予測」で、地球温暖化時の台風の動向の全球的予測と集中豪雨の予測実証を目指します。もう一つは「地震・津波の予測精度高度化に関する研究」で、次世代型地震ハザードマップの基盤構築と津波警報の高精度化を目指します。その際、「京」と「地球シミュレータ」の二つのスーパーコンピュータの相乗効果を最大限に追究し、同時に次代を担う若手研究者の育成にも努めています。

残念ながら「京」をもってしても、地震や津波がいつ、どこで、どれくらいの規模で発生するかを正確に予測することはできません。しかし、台風や集中豪雨を含めたナチュラル・ハザードに関するシミュレーションがより高速・高精度にできるようになれば、より効果的・効率的な防災・減災対策を立てることができ、人的・物的被害を最小限に留めることができます。

2015年9月



海洋研究開発機構 特任参事
今脇 資郎

地震・津波の予測精度高度化に関する研究

は、さまざまな地震の発生シナリオを想定し、条件の異なるシミュレーションを多数実行する必要があります。それぞれのケースにおいてどのような対応が必要になるかということを検討するためです。このようなケーススタディを幅広く行うためには、より速く計算結果を得る必要があり、「京」のような世界最高レベルの計算速度を誇るスーパーコンピュータが必要となります。

地震の揺れ・津波と都市への影響などを複合的にシミュレーションし、その計算結果を「見える化」して、社会に広く伝える活動にも取り組んでいます。シミュレーション結果を実際に発信していくことは、国や地方自治体が現実の地域における広域複合災害の対策を立てる際の、重要な情報になると 생각できます。また計算結果の「見える化」は、個々人の防災意識の向上に寄与するとともに、計算科学技術分野の将来を担う学生や若手研究者の育成にもつながっています。シミュレーションで何が可能になるのかを知ることによって、「京」をはじめとするスーパーコンピュータの利用が促進されることを期待しています。

シミュレーションと現場から得られた観測データとの整合性を取ることで、予測精度を従来よりもさらに上げることが研究的・技術的に可能であることも証明されました。今後は、シミュレーションと併せてより多くの情報を解析し適切な防災・減災対策を推進出来るような人材も必要になると 생각ています。

今後、この研究開発課題を通じて構築された「統合地震シミュレータ」を基礎として、その進化に留まらず、ポスト「京」も視野に、地震津波被害による交通状況や経済的影響なども取り入れたさらなる「統合地震シミュレータ」の発展を目指しています。

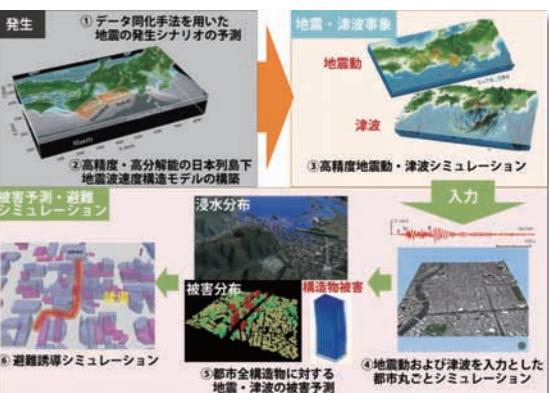


図 4. 統合地震シミュレータの概念図

東日本大震災から得た教訓を活かし、広範囲を襲う複合災害の予測に挑む

東日本大震災では地震や津波の直接的な被害以外にも、多くの複合的な災害が発生しました。ひとたび巨大地震が起れば地殻変動に伴って津波が発生し、その地震の揺れや津波が都市部に到達すれば大きな災害が引き起こされます。このような広域複合災害に備えることは、日本が直面している最重要課題といえます。この研究開発課題ではその対策として、地震発生の仕組みの解明や地震・津波の伝播過程の解明、構造物の倒壊や浸水分布・被害分布などの予測（図 3）に関する研究を進め、各分野の成果を連携させることにより、「統合地震シミュレータ」（図 4）の構築に取り組んできました。

災害シミュレーションを活用したレジリエントな社会づくり

この5年間で、地震・津波・都市災害の各分野で着実な成果が創出されており、予測の高精度化に成功しました。地震動・津波・都市被害予測に関するシミュレーションを複合的に連携させることで、「統合地震シミュレータ」の構築も着実に推進しています。これらの成果を実際の被害軽減に活かすために

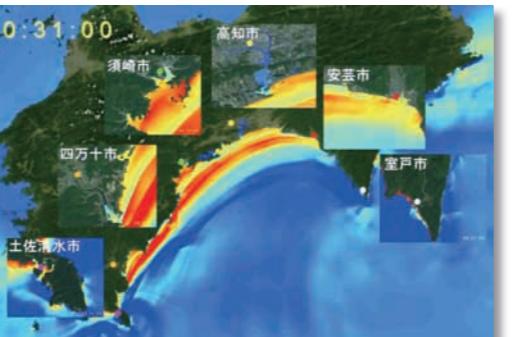


図 3. 南海トラフ巨大地震による四国全域の津波浸水シミュレーション

膨大な気象観測データをもとに高精度のシミュレーションを行い、気候予測や気象灾害予測の最先端を追究する

気象の数値予測に関する研究は、世界初のコンピュータ「エニアック」以来、常にその時々のトップクラスのコンピュータを駆使して行われ、60年以上の歴史があります。最初は対流圏大気の平均的な流れを、北アメリカのみを対象に 700 km 程度の水平解像度で計算していたものが、スーパーコンピュータ「京」の出現によって、全球大気にについて 1 km を切る超高解像度で実験が行えるまでになりました。

この研究開発課題では、「京」の能力を最大限に引き出し、気象・気候・環境予測の限界に挑戦する研究に取り組んできました。具体的には以下の二つの課題を設けて研究を進めてきました。一つは「地球規模の気候・環境変動予測に関する研究」です。地球全体を対象とする全球大気モデルにおいて、これまで不可能だった個々の雲の動きを扱うことによって、気候予測にどのような革新がもたらされるか、特に地球温暖化が進むと台風は

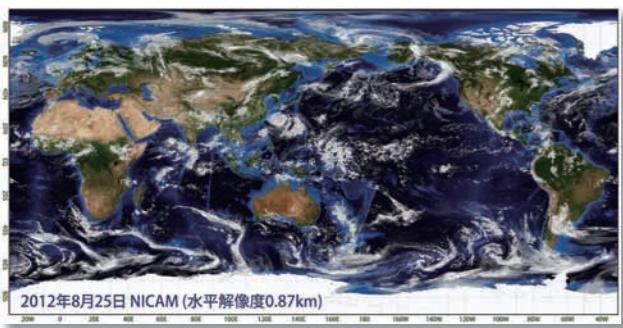


図 1. 1 km を切るまでに解像度を高めた全球雲システム解像モデル (NICAM)

防災・減災に資する気象・気候・環境予測

どのように変化するのかなどを研究してきました。もう一つは「超高精度メソスケール気象予測の実証」です。これまで予測が困難とされてきた集中豪雨や局地的大雨、竜巻など、局地的に深刻な災害をもたらす顕著な気象現象の予測の高度化を目指しています。

シミュレーションを高精度化し、防災・減災に役立てていく

この5年間で両課題ともに大きな進展がみられ、従来を上回る高精度でのシミュレーションが可能となりました。上記の全球大気に関する超高解像度の数値実験（図 1）を実施したほか、雲システム計算の精度向上により、これまで延長予測を困難にしていた熱帯巨大雲塊の動きを 4 週間程度先まで予測できることを示しました。また、地球温暖化時には、台風の強風範囲が広がることを示しました。メソスケールの気象予測に関しては、新しいデータ同化手法を用いた、集中豪雨や局地的大雨、台風・高潮の高精度予測、水平格子間隔 10 m 以下という超高解像度での竜巻や海陸風の詳細構造の再現に成功しています（図 2）。

この研究開発課題によって得られた知見をわかりやすく国や地方自治体などに発信することで、今後の気象・気候・環境分野での防災・減災対策の策定に確実に貢献していくことができます。人々の暮らしをより便利で安全・安心なものにし、多くの命を守っていくために、この分野での予測研究のさらなる進展には大きな期待が寄せられています。

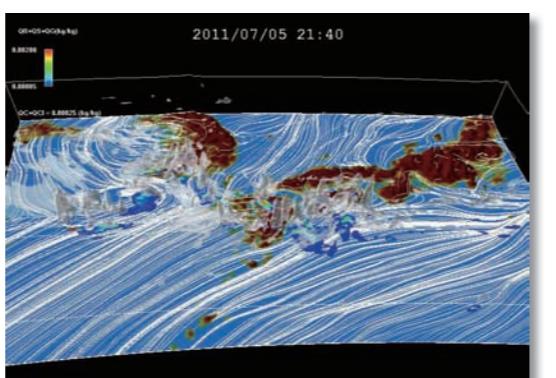


図 2. 2011 年 7 月梅雨期の大気事例の同化予測実験



今脇 資郎
海洋研究開発機構
特任参事



金田 義行
海洋研究開発機構
招聘上席技術研究員
名古屋大学 特任教授

スーパーコンピュータ「京」が拓く、 気候予測の新たなるフロンティア



NICAM × 「京」が天気予報の可能性を拓げる

毎日の天気予報や長期予報、また今世紀末の地球温暖化の影響など、全地球規模の気候計算をする際には、さまざまな時間スケールを扱います。計算する期間が長くなると計算量も膨大になるため、現在では、明日の天気予報を計算するときも全球大気モデルでは雷雲のような一つ一つの雲の動きは扱わず、多数の雲の集団的な効果を半経験的に推定して計算しています。細かな雲まで扱っていては明日の天気予報に間に合わなくなってしまうからです。

本研究では、近い将来に個々の雲の動きまでを扱うことができるようになり、計算上の制限が緩和されたとき、気象予測にどのような革新がもたらされるのかを、先んじて探っています。具体的には、地球全体の雲の生成・消滅を詳細に計算できる「全球雲システム解像モデル（NICAM）」を用いて多数のシミュレーションを実施し、延長予測可能性の研究、および温暖化時の台風の研究を進めてきました。

延長予測の可能性については、初めて2週間以上の延長予測可能性を検討することができとなりました（図1）。温暖化に伴う台風の変化については、水平解像度14kmのNICAMを用いて、世界に先がけて現在と将来の30年分の気候実験を行い結果を解析しました。あわせて、次世代の気候モデルのプラットフォーム構築も進めています。2013年には、格子間隔が1km未満（870m）の超高解像度での

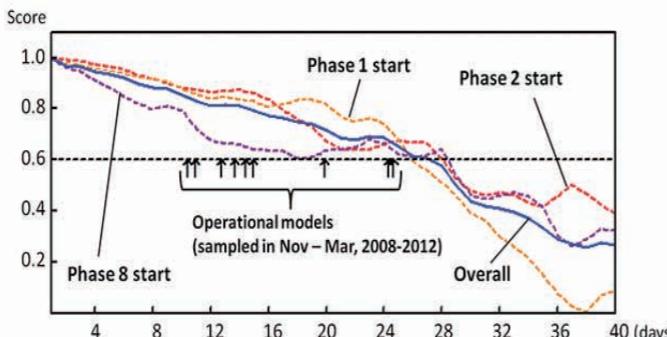


図1. 全球雲システム解像モデル（NICAM）による熱帯季節内振動（MJO）予測。約4週間の予測可能性を示す。

地球大気のシミュレーションに世界で初めて成功しており（図2）、地球大気にとって重要な雲擾乱ごとの対流の違いを初めて明らかにしました。

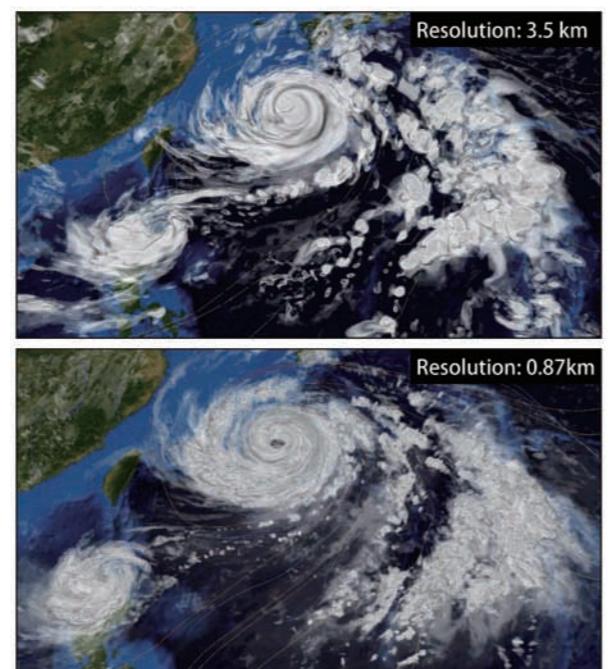


図2. 従来の最高解像度（水平格子3.5 km）での台風（上）と、1km未満の格子間隔でシミュレートされた台風（下）の比較



課題責任者：木本 昌秀
(東京大学大気海洋研究所 副所長／教授)



MJOの再現により、延長予測のさらなる可能性が検討可能に

大量の降水を伴って熱帯域を東進する巨大積乱雲群（MJO）をシミュレーションで再現することにより（図3）、熱帯の1カ月先までの延長予測が可能になる見込みがでてきました（図1）。MJOは熱帯の水蒸気が蓄えた潜熱を解放して大小さまざまな大気の波を励起し、地球全体に影響を及ぼしています。これまでMJOの再現の難しさが2週間以上先の予報を困難にしていましたが、「京」の能力を活かして雲を精緻に計算することで、延長予測の可能性を示すことに成功しました。熱帯では今日・明日の予報よりも雨期・乾期がいつ頃やってくるのか、田植えはいつ頃がよいかなど、2～3週間先の長期的な予報の需要の方が高く、本研究には高い関心が寄せられています。MJOは日本の天候変動にも大きな影響を及ぼしているので、日本の延長予測の精度向上にも有用であると期待されます。

また、MJOはその後方に台風の発生を促す場合が多いことが知られていますが、2004年8月にMJOに関連して発生した八つの台風をもとに解析を行った結果、2週間前からの台風発生予測についてその可能性を示すことができました（図4）。

温暖化時の台風については、発生数自体は23%減少するが強い台風は7%増加すること、平均的な強度は3%増加し、台風周辺の降水も22%増加することなど、既往の研究と整合的な結果が出ました（図5）。そして新たに、同じ強度の熱帯低気圧については、温暖化すると最大風速半径が大きくなり、被害範囲が大きくなる可能性が示されました。

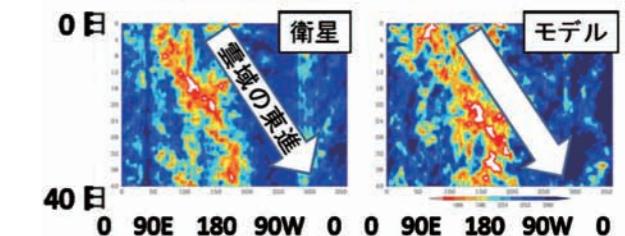
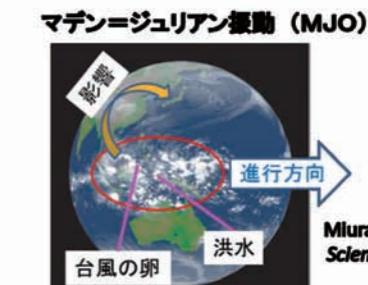


図3. 全球雲システム解像モデルにより再現された赤道域を東進する巨大積乱雲群

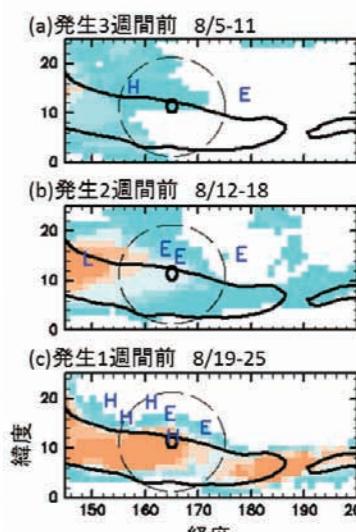


図4. 2004年台風18号発生の予測。○は観測された台風18号の発生位置。H,E,Lはシミュレーションで発生した台風18号の位置とタイミング（それぞれ誤差1日以内、1～5日早い、1～5日遅い）を示す。観測された西風領域（黒実線）の予測が発生予測の力を持たる。

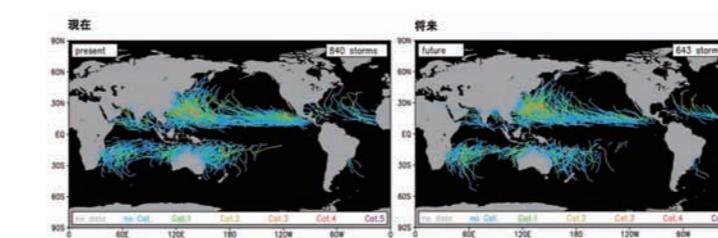


図5. NICAMでシミュレートされた現在（左）と温暖化時（右）の熱帯低気圧の経路



気象予測の可能性を探り、防災・減災や未来の天気予報に貢献する

コンピュータによる気象計算の歴史は60年以上にもなり、今日の気象予測においても、コンピュータによる精緻な計算は欠かすことのできないものです。また、気象庁による台風の進路予報が従来の3日から延長されて5日先まで可能になつたことなどからもわかるように、気象予測の精度は日々確実に向かっています。

本研究ではこの5年間、NICAMや「京」を駆使して気象予測の精度をさらに向上させ、防災や減災に役立てるための研究を進めてきました。気象庁では今はまだ手がつけられないようなMJOの予測や台風の発生などの研究を行い、気象予

測の可能性を探ってきたことが、「京」を用いた本研究の意義といえます。研究成果はすぐに社会に還元されるものではありませんが、5年後、10年後に天気予報が進んでいくべき道の方向づけを行うという点で、本研究は非常に価値のあるものといえます。

温暖化についても、本研究で予測したような、温暖化が進むことで災害をもたらす可能性が高くなる台風などの気象情報を国や社会に伝えていくことで、適応策や対応策の立案に寄することができます。

集中豪雨や台風、局地的大雨を 高精度に予測し、防災・減災に貢献する



正確な予測の鍵を握るのは「初期値」と「雲解像モデル」

気象予報の精度は近年めざましく向上していますが、その一方で集中豪雨や局地的大雨など、人命損失を含む災害につながる強雨の定量的な予測精度は十分ではありません。特に狭い範囲に短時間に強い雨が降る局地的な大雨は時間的・空間的なスケールが小さく、場所や時間、強度を特定した正確な予測は大変難しいのが実情です。また台風の強度予測にも多くの課題が残っています。

上記のような現象の予測が難しい原因としては、現在の数値予報モデルの解像度が積乱雲の構造を表現するためにはまだ十分ではないこと、数値モデルの初期値の精度が現象のスケールに対して十分でないこと、などが挙げられます。また局地的大雨のような不安定な大気で生じる現象では、僅かな初期値や計算方法の違いで、結果が大きく異なってしまうこともあります。これらの問題を解決するためには、雲を解像するモデル（雲解像モデル）と初期値の高精度化が非常に重要で、予測の誤差を定量的に評価する技術の開発も必要です。

本研究では、(1) 雲解像モデルの初期値を改善するために、詳細な観測データを予測に利用する技術（データ同化技術）の開発を行いました。また、(2) スーパーコンピュータ「京」の計算能力を活用することにより、複数の予測から予測の誤差を定量的に求める「アンサンブル予測」の手法とデータ同化技術を雲解像モデルに適用する領域解析予測システムを構築し、集中豪雨や台風、局地的大雨や竜巻などの災害につな



課題責任者：斎藤 和雄

(気象庁気象研究所 部長 / 海洋研究開発機構 招聘上席研究員)

がる顕著な気象現象の再現や予測に取り組みました。さらに、(3)「京」による超高解像度シミュレーションで上記のような現象のメカニズムを調べる基礎的研究を行うとともに、雲微物理や境界層乱流などの物理過程のモデル化に伴う誤差を調べました。

以下、図はモデルの解像度の粗いものから細かいものの順に示します。

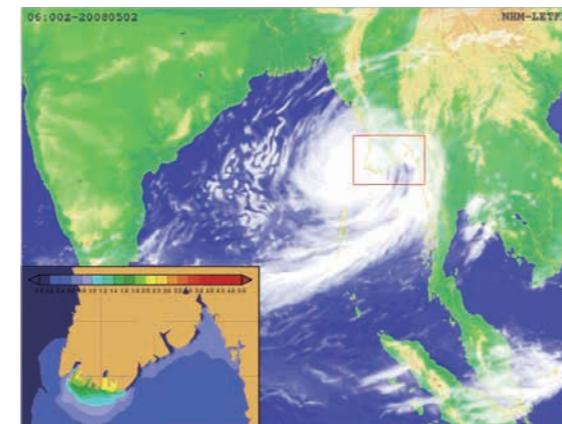


図 1. 2008 年 5 月ミャンマーに未曾有の災害をもたらしたサイクロン「ナルギス」と高潮のアンサンブルデータ同化予測実験

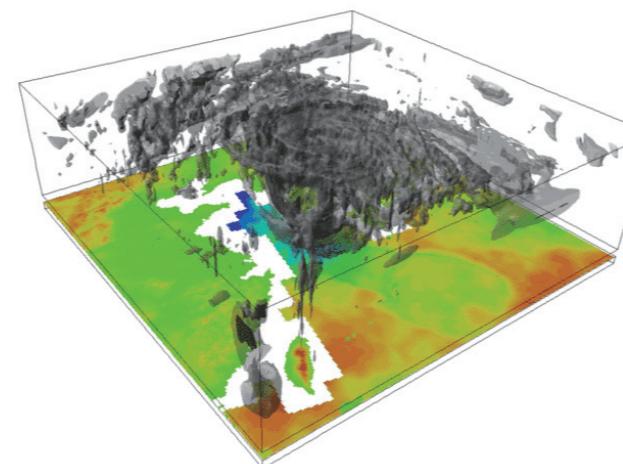


図 2. 大気海洋結合モデルによる 2012 年台風第 15 号の予測実験

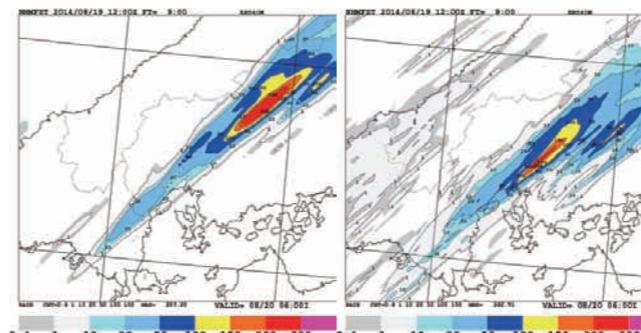


「京」による高精度シミュレーションがさまざまな成果をもたらす

アンサンブル予測とデータ同化の技術を用いて、平成 24 年 7 月九州北部豪雨の予測を改善する実験を行ったところ、半日～1 日前の初期値からの計算で、大雨の発生が高い確率で予測できました。また 2008 年 5 月にミャンマーに未曾有の災害をもたらしたサイクロン「ナルギス」についての実験では、サイクロンの進路と上陸時刻、強度の予測が既存の研究よりも改善され、実況に近い高潮を再現することができました（図 1）。

2012 年 5 月につくば市に大きな被害をもたらした竜巻の事例では、雲解像モデルで高頻度にデータを同化することにより、竜巻をもたらしたメソスケールの対流系が精度よく再現できることを示し、モデルの水平格子間隔を 50 m にまで上げた実験では、50 m/s を超える強風を伴う竜巻がモデルで再現されました。また水平格子間隔を 10 m にまで上げた超高解像度の数值実験では、多重渦構造の時間変化を含む竜巻の詳細構造がシミュレートされています（図 4）。

現在の気象庁の予報で用いられている数値モデルで最も解像度が高いのは局地モデルの 2 km です。本研究では、2013 年 10 月伊豆大島や 2014 年 8 月広島に大きな土石流災害を引き起こしたような豪雨が、水平解像度を変えた場合にどのように予測できるかを調べるために、気象予測モデル（気象庁非静力学モデル）を「京」に対して最適化し、ほぼ日本全域を覆う

図 3. 2014 年 8 月広島での土石流災害の豪雨事例に対する超高解像度実験による 20 日 0 時から 6 時の予測雨量。
左) 水平解像度 2 km, 右) 水平解像度 500 m

広い領域で解像度を変えた予測実験を行いました。水平解像度を 500 m にした場合、強い雨域の位置が 2 km の実験よりも改善されることがわかりました（図 3）。

台風の強度予測を改善するための実験として、海洋混合層モデルを結合した高解像度大気海洋結合モデルを開発し、「京」の資源を活かして、日本に接近した台風を対象に多数（281 回）の実験を行いました。その結果、結合モデルでは既存の大気モデルに比べて、強度予測を大きく改善できることを示しました（図 2）。台風については、水平格子間隔 100 m で台風全域をシミュレートして眼の壁雲とその周辺の詳細構造を調べる実験や、水平格子間隔 75 m で台風全体の構造を再現しつつ、台風に伴って竜巻が発生する可能性のある場所を予測する実験が行われています。

個々のビルを表現できる数値流体力学モデルを並列化し雲解像解析予測システムと結合させたダウンスケールシステムを開発しました。「京」を用いることにより、数メートルの格子間隔で個々のビルを解像しながら数十キロ四方の領域を対象にする実験が可能になりました（図 5）。

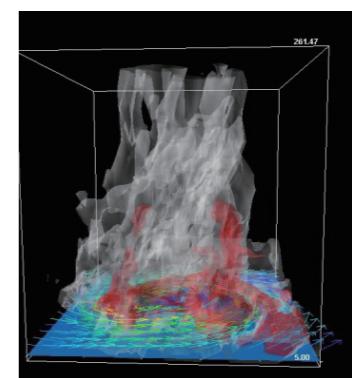


図 4. 2012 年 5 月つくばでの竜巻についての水平格子間隔 10 m の再現実験による竜巻の詳細構造



図 5. 水平格子間隔 3 m のビル解像モデル (DS3) による海風侵入時 (2007 年 6 月 19 日 13 時) の仙台駅周辺の気温の分布



リードタイムを持って災害を予測する未来の防災・減災システムへ

この 5 年間で前ページに述べた三つの科学目標に沿った研究を進めてきました。ここでは取り上げませんでしたが、初期値改善の技術に関しては、天気予報に使われる本格的な数値予報モデルを用いてアンサンブル予報のメンバーの数を 1,000 にした実験も行っています。また、雲の微物理の過程を従来の手法よりも桁違いに高い精度で扱うモデルの実験も行っています。ここに紹介したさまざまな成果は、「京」の計算能力があつて初めて可能になったものであり、「世界初」と言つていいものばかりです。また河川の水位や洪水・氾濫を予測するモデルや、流体と礫の運動を同時に計算する土石流

シミュレーションモデルの大規模計算に向けた開発も行っています。

後継プログラムでは、超高精度のメソスケール気象予測と上記のような水文モデルを連携させて、気象現象によって引き起こされる災害そのものを直接予測する試みへと発展させていきます。本研究と後継プログラムの進展は、集中豪雨、台風、局地的大雨などメソスケール現象による災害を、十分なリードタイムをもって予測する未来の防災・減災システムへの重要な科学的知見を提供することになります。

仮想地球で巨大地震を起こし、将来の大地震と、強い揺れ・地殻変動・津波を予測する



大地震の発生を予測する—リアルタイム観測データ解析技術とスーパー コンピュータ「京」の高精度シミュレーション技術を両輪に

プレートが衝突する日本の周辺では、大地震が繰り返し発生しています。本研究では、「京」の中に仮想地球を創り、高精度シミュレーションにもとづいて、プレート境界での大地震の発生予測に取り組んできました。地震発生サイクルシミュレーションでは、「京」の中に複雑な地殻・マントル構造、プレート構造を細かい分解能でモデル化し、プレート運動によって大地震が繰り返し発生する様子を再現します（図1）。「京」の多数のCPUを用いた並列計算を行うことで、多数の地震発生シナリオを評価します。過去に起きた南海トラフ地震の履歴を検証し、地震の発生パターンの特徴をつかむことで、将来の大地震を予測するのです。

現在、日本列島の陸域と周辺海域には高い密度で地震計や津波計などの設置が進んでいます。リアルタイムで集積される観測データは、シミュレーション結果の検証に用いられ、また地下構造モデルやシミュレーションパラメータの修正に活用されます（図2）。

刻々と集まる観測データの高度な解析手法と高精度シミュレーション技術がそろうことで、大地震の発生予測に向けた大きな進展が期待されます。



課題責任者：古村 孝志
(東京大学地震研究所 教授)

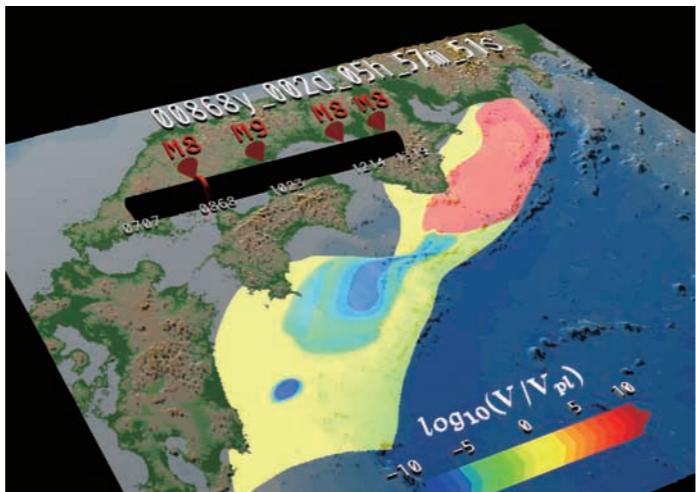


図1. 地震発生サイクルシミュレーションにより再現・予測された、南海トラフ巨大地震の発生パターンの一例。赤色と青色の領域は、それぞれ過去に起きた安政東海地震と安政南海地震・日向灘地震の震源域に相当する。

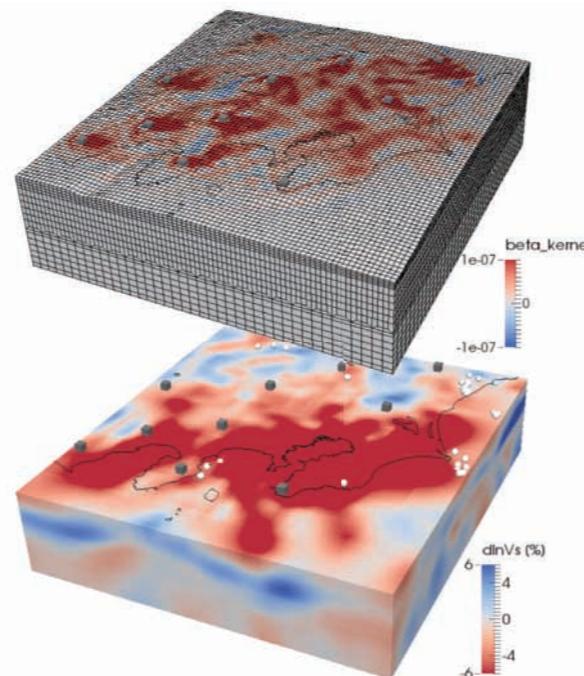


図2. 広帯域地震波形の逆解析に基づく関東平野の地下構造推定シミュレーション。
(上) 地下構造モデルとS波速度の修正。(下) 地下構造推定シミュレーションから推定された関東平野のS波速度構造(地下10～80 kmのS波速度の平均からのずれ)。



大地震発生予測の結果に基づいて、強い揺れ・地殻変動・津波を予測する「連成シミュレーション」を実現

震源から放射された地震波が複雑な地下構造の中を伝わり、地表付近の軟らかい地盤で增幅されることで、強い揺れが生まれます。このとき、震源域の直上の海底には地震地殻変動が発生し、これが海水を押し上げ・下げて津波を起こします。こうした、複雑な地震隨伴現象を詳細に評価するために、「京」は力を発揮します。

本研究では、地震発生シミュレーションから得られた南海トラフ地震シナリオを入力として、地震の強い揺れ・地殻変動・津波発生をシミュレーションする「連成シミュレーション」を

実現しました（図3）。これまでのシミュレーションでは、強い揺れ、地殻変動、津波を別々に計算してきましたが、「京」の高い性能を活かした新しい計算手法の開発により、ひとまとめに計算できるようになりました。

地震の断層運動には多様性があり、動きの速さの違いで、強い揺れと津波を起こすもの、津波だけを起こすもの（津波地震）など様々な特性をもちます。連成シミュレーションでは、こうした多様な地震による被害や災害予測の不確定性も評価します。



図3. 連成シミュレーションにより求められた、南海トラフ巨大地震の強い揺れ、地殻変動、津波。地震発生から3分20秒後の地面・海面の震動と、海底地殻変動により発生した津波が海面を広がる様子を示す。

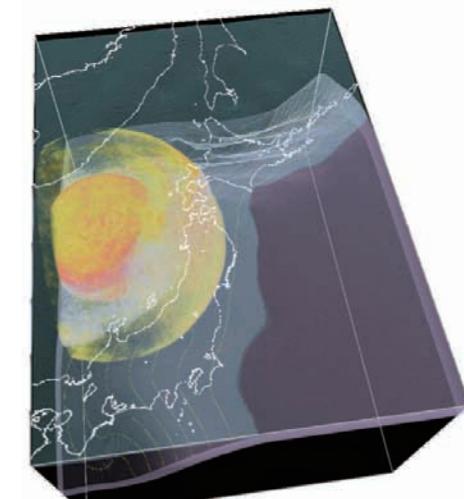


図4. 日本海下の深部に沈み込む太平洋プレート内で発生した、深さ500 kmの深発地震の日本列島全域の地震動シミュレーション。地震波がプレートの中を伝わり、太平洋岸へと到達し、強い揺れが起きる様子を再現。



「京」で50倍のシミュレーションが実現、さらに求められる1万倍の性能

本研究に「京」が導入されたことで、地震シミュレーションの精度が格段に高まりました。8万個のCPUを用いた大規模並列計算では、以前のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」の50倍規模の計算が可能になりました。2日間を要した計算がわずか1時間で完了するスピードです。これまで不可能であった規模のシミュレーションが初めて可能になり、これまで見えなかつた現象が初めて明らかになるなど、地震の研究環境は格段に前進しました（図4）。

地震予測と災害軽減に資するシミュレーションの実用化に向け、さらに高い性能が必要です。地震の揺れの計算は、空間（3次元）×時間（1次元）の4次元問題なので、50倍の性能でも、計算分解能が $\sqrt[4]{50}=2.7$ 倍に高まつたにすぎないのです。実用的計算には現行の10倍の分解能、すなわち1万倍の性能が求められるのです。まずは100倍の目標を掲げ、その次も100倍を目指した継続的な研究開発が必要

です。

コンピュータの高性能化で、シミュレーションの高度化が自動的に進むわけではありません。高い計算性能を引き出すためには、ユーザがスーパーコンピュータの仕組みを理解して、シミュレーションで用いる方程式や計算のしかたを工夫する努力も必須です。計算のアルゴリズムあるいは基本方程式そのものを見直す必要があります。この5年間で培った高速計算のノウハウは、後継の研究プログラムでも大きな力を発揮するものと期待されます。

日本は自然災害が起こりやすい国であるからこそ、地震の観測とシミュレーションの両方を高いレベルで行うことが不可欠です。今回の研究で得られた実現可能性を実用につなげていき、予測技術を高めることは将来的に国際貢献にもなり得ます。災害に対して諦めず、技術と観察をもとに戦い続けることが我々研究者に求められている責務だと考えます。

人々を津波から守るために—「波源」からのシグナル兆候をとらえ、早期予測に挑戦する



津波の来襲前に挙動を予測し、適切な避難・防災情報の発信に挑む

東日本大震災での例のように地震に加え津波の脅威にもさらされることの多い日本では、津波の発生や規模、そして即時に避難すべき地域を速やかに予測することが喫緊の課題となっています。しかし、地震動とそれに伴う津波の発生・伝播・遡上は非常に複雑であり、津波が到達するまでの短い時間で膨大なデータを処理して正確な予測を行うことには困難が伴います。

そこで本研究では、スーパーコンピュータ「京」を用いてリアルタイムで津波を高精度で予測するシステムの構築に挑みました。これは、沖合で観測される津波の波形から波源を即時に正確に推定して、それにもとづいて沿岸に迫りくる津波を予測し、警報などを素早く適切に伝達するというものです。

システム自体は、大規模な津波データベースにもとづく予測システムをベースとして、そこに地震発生直後に海底の水圧計や地震計に記録される地震・津波のリアルタイムデータを用いた津波の伝播解析システムや、地震がどのように起こるかという震源過程と津波発生過程の解析システムを統合しています。

具体的には、広域の海底・陸上地形を高い分解能でモデル化し、大規模津波の高精度なシミュレーションを行って研究を進めました（図1）。特に、第一波だけでなく後続波も正しく予測し、被害予測の精度を高めています。あわせて、津波が陸上をどのように遡上するのかという浸水解析や、津波に伴う土砂の移動などの複合的な被害予測にも取り組みました。

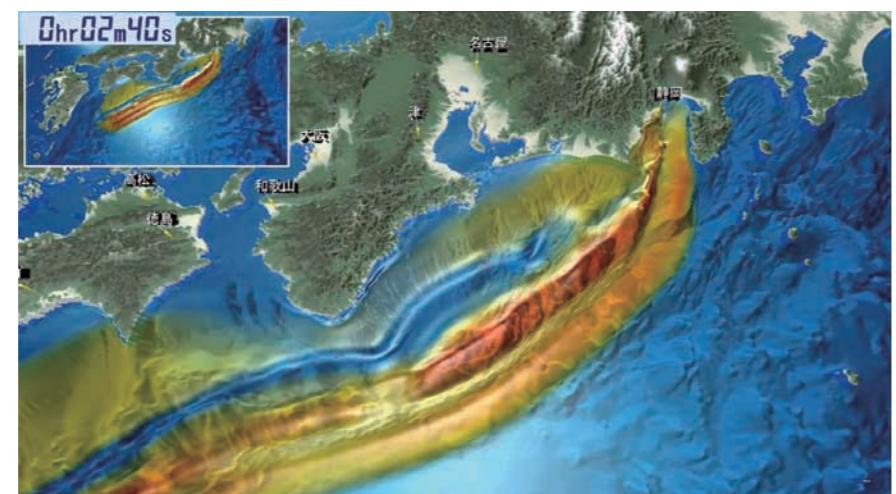


図1. 南海トラフでの最大クラスの地震・津波の予測シミュレーション。赤い部分が、3 m以上の津波が発生している箇所。沿岸部では数倍に達する。



課題責任者：今村 文彦
(東北大大学災害科学国際研究所 所長／教授)



津波予測の高速化・高精度化により、ハザードマップ早期提供の可能性が見えてきた

津波の波源推定にもとづく津波予測手法（tFISH）については、重要な構成要素である「グリーン関数」のデータベースの高度化を進めました。グリーン関数とは、ソースや伝播状況を逆解析して、発生状況そのものを推定するための関数です。tFISHの仕組みは、あらかじめ日本周辺域の3400にものぼる小さな波源をデータベースに登録しておき、地震発生直後にそれらとグリーン関数を組み合わせて津波の発生を予測するというものです（図2）。このグリーン関数を求めるために大量かつ高コストの計算を「京」で行うことにより、汎用計算機では10年以上を要する計算が、南海トラフ沿いの海域については、すべてのグリーン関数の計算を23時間、待ち時間を入れても約3日という短期間で完了することができました。

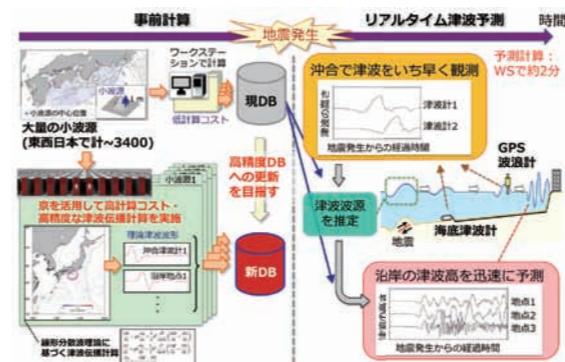


図2. グリーン関数を使った津波波源の高精度推定方法とデータベース

こうしてデータベースの高度化に成功したこと、津波をさらに早期に高精度で予測できる可能性を示しました。

浸水解析では、リアルタイムで推定される津波波源を入力データとして、「京」により津波の浸水計算がどれくらい高速で行えるようになるのかを研究しました。世界各地で広く用いられている津波浸水予測モデルである、東北大大学の「TUNAMI-N2」を「京」に移植して性能の最適化を行い、仙台湾沿岸域を5 m間隔の格子状にモデル化して、東北地方太平洋沖地震津波の2時間分の浸水シミュレーションを行ったところ、96秒で完了させることができました（図3）。これは実時間の72倍以上の処理速度に当たります。この成功により、津波が陸域に到達する前に浸水ハザードマップを提供することは技術的に可能であるとわかりました。

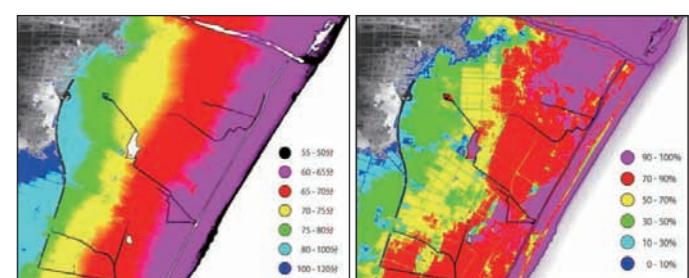


図3. 津波の到達時間の推定値（左）と家屋が倒壊する確率の推定値（右）



5年間の成果を、さらなる津波予測・減災へつなぐ

「京」の導入により、従来の計算やシミュレーションの限界を越えて、この5年間で津波の早期予測・被害予測のさらなる可能性を示すことができました。先に挙げた大きな成果のほかにも、津波浸水や漂流物・土砂移動の複合被害の予測精度の高度化なども進展しています。陸前高田市を襲った津波をシミュレーションで再現することで、津波による土砂移動で地形が大規模に変わってしまうこと（図4）、また、地形変化により第二波以降の浸水域が拡大することを初めて解明し、津波・土砂移動モデルの高度化も実施可能になりました。



図4. 陸前高田市を襲った津波第一波による大規模な土砂移動（左図：押し波、右図：引き波）

さらに、津波の中に漂流物が含まれていると被害がどのように変化するのかも研究中です。

今後は津波に伴う複合的な現象を一体として解析し、モデル地域での減災計画や避難計画も含めた人的被害の予測と軽減対策を行うことを目指します。また、「京」を有効活用するために行なった移植や最適化などの手法は、後継プログラムの発展にも寄与するものと予想されます。本研究を礎として、従来よりも格段に高精度化された津波警報のリアルタイム発信や、避難が必要とされる浸水域の即時予測や避難解

除の支援などが可能となれば、ハザードマップの作成や近隣住民への啓発、避難計画の立案や事前の防災対策なども含め、津波被害の大幅な低減に貢献できるものと期待されています。

地震で都市はどのように被害をうけるのか？ 詳細なシミュレーションに挑む



細部まで再現した建物や都市で、地震動への応答を解析する

地震被害の主体は地震動を受ける構造物であり、構造物や都市がどのように地震に応答するかの正確な解析が被害予測には重要となります。本研究では、地震によって建物がどのように揺れ、場合によっては損傷し崩壊に至るか、また都市全体を見たときに建物の一棟一棟がどのような被害を受け、人々がどのように行動するかを予測する解析手法の開発に取り組んできました。

地震動や地震応答を解析するには、コンピュータ上にcm単位の詳細な建物のモデルや、一棟一棟の建物や一本一本の道路までを再現した都市のモデルを構築し、大規模な数値計算を行う必要があります。従来のコンピュータの演算能力ではこれらの計算は不可能でしたが、スーパーコンピュータ「京」の高速大規模な演算能力で地震動と建物の被害を連成して計算することにより、短時間でより正確な結果を得られるようになりました。

具体的な研究として、建物については、超高層ビルや大型橋脚を対象として、建物を支える地盤もモデルに加え、建物全体の揺れや一部分の損傷の発生・発展、それが引き起こす建物の崩壊を計算しています（図1、図2）。都市については、南海トラフ地震によって被害を受ける可能性のある高知市などを対象として、100万棟におよぶ建物の被害や住民の避難の状況などまで計算しています（図3、図4）。



課題責任者：堀 宗朗
(東京大学地震研究所 教授)

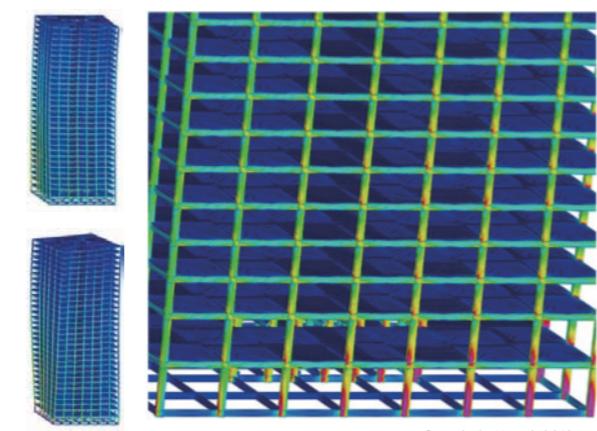


図1. 超高層ビルの地震応答シミュレーション。建物全体の変形（変形は30倍）。色はひずみの度合いを示している。

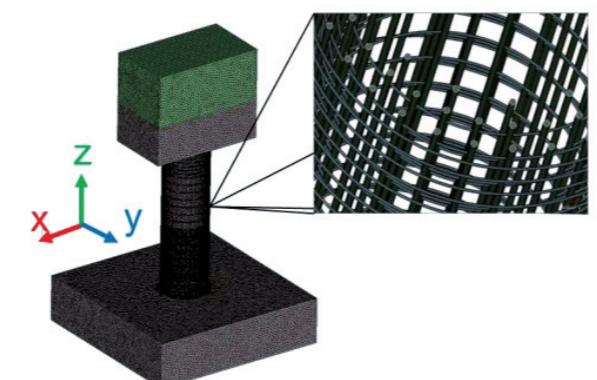


図2. 鉄筋を一本一本までモデル化した、鉄筋コンクリート橋脚のモデル



「京」によって複雑な地震応答シミュレーションを実現、世界初の成果も

都市の地震応答シミュレーションでは、地震動、建物群の地震応答、津波侵入、群衆避難を対象に研究を進めました。「京」によって世界で初めて、地震動や各建物への影響と津波など複数の被害要素を計算するコードを統合することができ、「京」の並列化計算性能を大幅に向上させて地震災害・被害の大規模シミュレーションを実現するに至りました。この成果は地球科学・地震工学の分野だけでなく、計算科学の分野など各方面から高い評価を受けています。

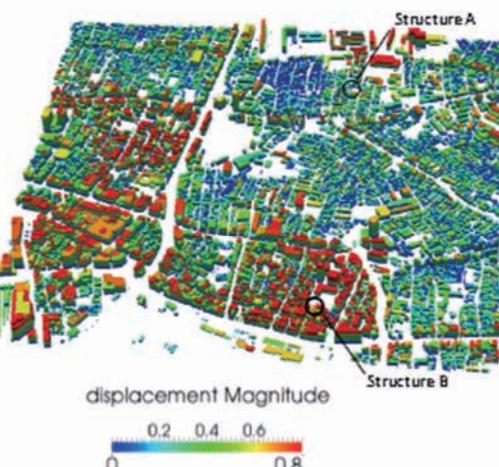


図3. 建物一棟のシミュレーションの結果。
色は揺れの大きさ・揺れ方を示している。

今後は統合シミュレーションの有効性を確認するために、高知市を対象に災害・被害の予測のための計算を行っていく予定です。これに避難シミュレーションを連成させ、災害対応も統合することを目指しています。

なお、避難シミュレーションは、住民や旅行者一人一人を想定して「エージェント」という高度な解析モデルを作ることで、10万人の人々が、地震によって損傷を受けた周囲の建物を見ながら避難するという複雑な動きをシミュレーションしています（図4）。

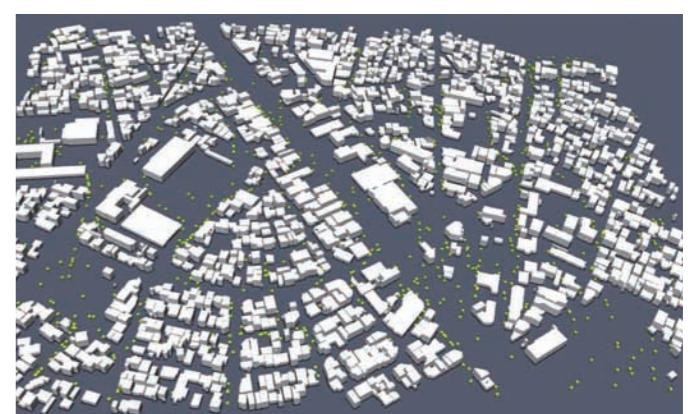


図4. マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション。黄色い点がエージェント1人を指す。家屋や道路などをモデル化した都市のモデルの中をエージェントが自律的に移動する。



研究成果を結実させ、次世代のハザードマップ作成へ

「京」の導入により、今まで不可能であった複雑で大規模な計算ができるようになりました。都市や建物におけるより詳細な自然災害のシミュレーションが可能になりました。建物の構造シミュレーションでは、原子力発電所建屋の耐震性評価に使われるようになります。成果をわかりやすい形で社会に還元する取組みも進んでおり、都市のシミュレーション結果をより正確かつ直感的に理解できるような、3D画像や動画の作成にも力を入れています（図5）。

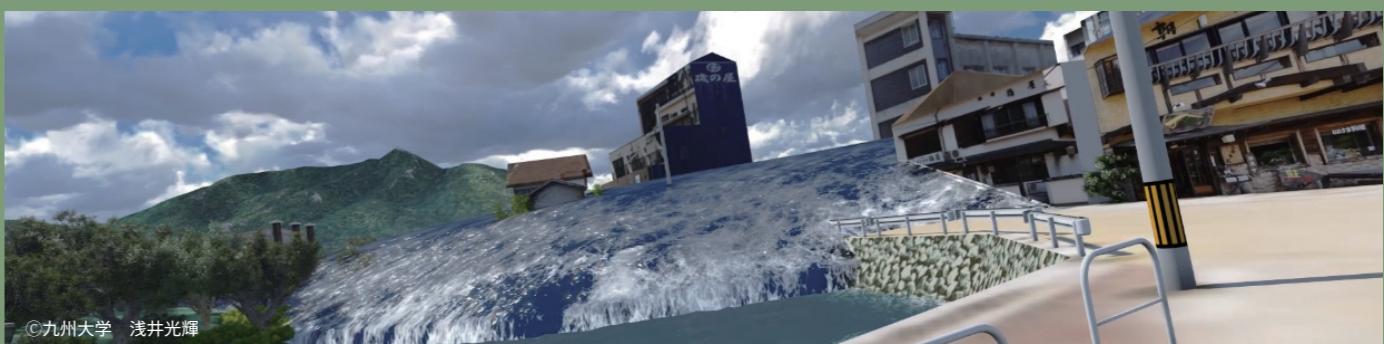
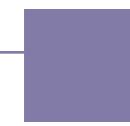


図5. 先端的三次元の津波シミュレーション

この5年間の成果をベースとして、都市シミュレーションの研究がさらに発展していくれば、効果的な防災・減災対策や避難行動をサポートできる次世代のハザードマップ作成につながると期待されています。また、本研究で試みた「京」の活用法や最適化のノウハウは、後継の研究プログラムにとても有用なものであり、多量のデータを高速で計算できるようになることで、大幅なコストダウンにつながる可能性も見出されました。



計算科学技術推進体制構築では、スーパーコンピュータ「京」をより速く、効率的に利用するための基盤構築に取り組んでいます。

計算科学技術推進体制構築の主な活動として、技術的なサポートを中心とした研究の推進を行っています。技術サポートでは、これまで地球シミュレータなどで利用してきたアプリケーションを「京」上で高度に動作させるために、アプリケーションの最適化・高速化の支援等を行ってきました。

「京」では、地球シミュレータ等のスーパーコンピュータとのアーキテクチャの違いから、より速く、より効率的な計算を行うためには、十分な知識を持った技術者によるアプリケーションの最適化が必要になります。

最適化を施すことにより、大幅なアプリケーションの高速化にも成功しており、このことからもアプリケーションの最適化・高度化は研究を推進する上で非常に大きな役割であると言えます。

その他、計算機資源を効率的に利用するために必要なマネジメント計画を立案したり、理化学研究所 計算科学研究機構 (AICS) の技術者たちと、データ同化技術やプログラム最適化技術、シミュレーション可視化技術などを共有することにより、戦略プログラム後にも利活用可能な知識・技術の蓄積



人材育成ワーキンググループの様子



高橋 桂子

海洋研究開発機構
地球情報基盤センター センター長

計算科学技術推進体制構築

を行うことができ、計算科学技術の発展に大きく貢献しています。

このような取組みに加えて、「京」を高度に利用できる人材の育成に努めるとともに、大学や大学院における計算科学技術教育に協力し、次世代の若手研究者の育成のあり方についても有識者による議論を重ね、今後の人材育成のあり方に関する報告書の作成に取り組んでいます。

人材育成活動や、技術の共有・蓄積には、戦略プログラムに参画している研究者の更なるキャリアアップを推進する側面もあり、数多くの研究者が分野3で創出した研究成果を基にキャリアアップを実現してきました。

さらに、研究成果の普及・広報活動では、一般市民も対象とした成果報告会を行うことに加え、研究者コミュニティが中心となった研究会や、セミナーなどの開催支援を行うことにより、人的ネットワークを広げています。今後も AICS や戦略プログラムの他の分野と連携した普及・広報活動を行い、このプロジェクトで得られた研究成果を広く発信することに努めています。

計算科学技術推進体制構築で取り組んできた研究者への技術サポート、人材育成、人的ネットワークの形成、研究成果の普及活動により、「京」などのスーパーコンピュータをより効率的に利用することができる基盤が着実に研究コミュニティへと浸透し、そこで創出される研究成果が広く発信される体制も整備されてきました。このプロジェクトを通じて構築された研究基盤・体制は、計算科学および計算機科学の分野の研究推進に大きく貢献するものです。今後の研究プロジェクトにおいても、このような体制を継続することは、この分野の更なる発展のために不可欠であると考えています。



成果報告会の様子

■ 研究課題と責任者

戦略プログラム分野3 防災・減災に資する地球変動予測

統括責任者 今脇 資郎 海洋研究開発機構 特任参事

2015年度 研究開発課題責任者 今脇 資郎 海洋研究開発機構 特任参事

2011年度～2014年度 研究開発課題責任者 時岡 達志 海洋研究開発機構 特任上席研究員 (2015年3月当時)

① 地球規模の気象・気候変動予測に関する研究

課題責任者 木本 昌秀 東京大学大気海洋研究所 副所長／教授

- 全球雲解像モデルによる温暖化時の台風の研究

サブ課題責任者 杉 正人 気象庁気象研究所 客員研究員

- 全球雲解像モデルによる延長予測の可能性の研究

サブ課題責任者 佐藤 正樹 東京大学大気海洋研究所 教授

- 地球変動予測アプリケーションパッケージの開発

サブ課題責任者 羽角 博康 東京大学大気海洋研究所 教授

② 超高精度メソスケール気象予測の実証

課題責任者 斎藤 和雄 気象庁気象研究所 予報研究部長／海洋研究開発機構 招聘上席研究員

- 領域雲解像4次元データ同化技術の開発

サブ課題責任者 露木 義 気象大学校 講師

- 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証

サブ課題責任者 濑古 弘 気象庁気象研究所 予報研究部第二研究室長／海洋研究開発機構 招聘上席研究員

- 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

2015年度 サブ課題責任者 中村 晃三 海洋開発研究機構 主任研究員

2011年度～2014年度 サブ課題責任者 木村富士男 海洋開発研究機構 特任上席研究員 (2015年3月当時)

研究開発課題 (2) 地震・津波の予測精度高度化に関する研究

研究開発課題責任者 金田 義行 海洋研究開発機構 招聘上席技術研究員／名古屋大学 特任教授

① 地震の予測精度高度化に関する研究

課題責任者 古村 孝志 東京大学地震研究所 教授

- 地震発生準備・破壊過程シミュレーションの高度化

サブ課題責任者 堀 高峰 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 地震津波予測研究グループ グループリーダー

- 地球内部構造の高度モデル化

サブ課題責任者 坪井 誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター 地球情報技術部 部長

② 津波の予測精度高度化に関する研究

課題責任者 今村 文彦 東北大学災害科学国際研究所 所長／教授

③ 都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

課題責任者 堀 宗朗 東京大学地震研究所 教授

計算科学技術推進体制構築

2014年度～2015年度 責任者 高橋 桂子 海洋開発研究機構 地球情報基盤センター センター長

2011年度～2013年度 責任者 渡邊 國彦 海洋開発研究機構 地球シミュレータセンター センター長 (2014年3月当時)

(所属・役職は 2015年9月現在)