

4.3.2 固体地球科学

(1) 現在行われている課題

(i) プレートテクトニクスとマントル対流

固体地球科学においては、1960年代後半に提案されたプレートテクトニクスを中心としたパラダイムで研究が進んできた。プレートテクトニクス理論によれば、地球の表面は十数枚の岩盤（プレート）に分かれており、個々のプレートが地球の表面をほぼ剛体的に動いている。また、プレートとプレートの境界では、それぞれの動きの食い違いが生じ、結果的に地殻変動や地震、あるいは火山といった地殻活動が引き起こされるとされている。プレートテクトニクス理論も当初は陸上の古地磁気データや海洋底の地磁気異常の縞模様など主に地球物理学的な観測データを根拠とした仮説であったが、これにより地殻活動の空間分布の偏りをうまく説明することが可能になった。更に現在では VLBI（Very Long Baseline Interferometry）や GNSS（Global Navigation Satellite System）といった宇宙測地技術によって、地表の動きが高精度で実測され、グローバルスケール（地球規模）では剛体的なプレートの動きが実証されるに至っている。

ひとたびプレートテクトニクスを「公理」として認めてしまえば、グローバルスケールでの地震・津波現象はほぼ理解が可能な段階にあるといえる。しかしながら、プレートテクトニクスがどのような仕組みで駆動・維持されているのかという肝心な点が、現在でも理解できているとは言い難い。むしろ「プレートの運動はマントル対流の地表付近への現れである」という描像は（第0近似的とはいえ）十分妥当であり、それゆえマントル対流を通してプレートテクトニクスを理解しようという試みはプレートテクトニクス理論の黎明期から行われてきた。近年の計算機の進歩によって、全球規模でのマントル対流シミュレーションも盛んに行われるようになってきたが、マントル対流の枠内でプレートテクトニクスを再現することにはまだ成功していない。

現在のマントル対流の研究で対象とする科学的なテーマは、大きく分けて二つある。まず一つは地球惑星全体のスケールを対象として、マントルの流れによって駆動される地球内部の熱輸送や物質循環の過程を明らかにすることである。この例として、地球史約45億年にわたるマントル内部の熱化学進化を調べる研究、水や揮発性元素といった物質がマントル内部へ還流・循環する過程を調べる研究、あるいは近年発見された「スーパー地球」（太陽系外の惑星系に見つかった、地球より大きな地球型惑星）のマントルダイナミクスを調べる研究、などが挙げられる。もう一つは時空間スケールを限定したうえで、マントルの流れ場を高精細に求めることである。例えば、プレートの沈み込みに関連したものとして、沈み込み帯周辺での小規模な対流と火山の時空間分布との関係に注目する研究、地表面でのプレートの運動を既知としたときにマントル内に生じる流れとさまざまな観測量との関係に注目する研究、更にはマントル対流からプレートの運動が自発的に発生・維持される条件それ自身を検討する研究、などが挙げられる。（図 4.3.2-1）

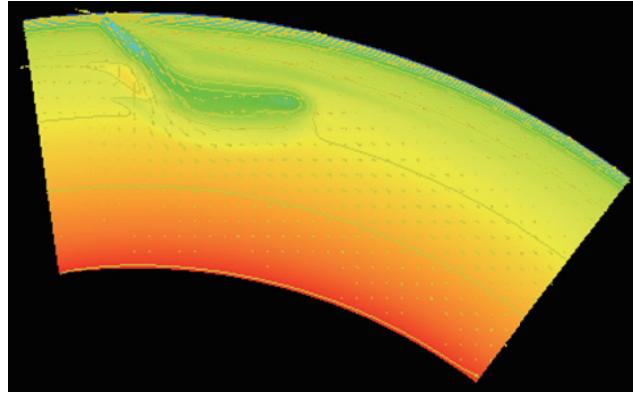


図 4.3.2-1 プレート沈み込みの地域的モデリング (図は亀山氏提供)

(ii) 地球コアダイナミクス

マントル対流を駆動するエネルギー源の 1 つとして、地球中心核（地球コア）からの熱の供給が期待される一方、核のダイナミクスについても十分な理解ができていない。地球コアのダイナミクスについての研究においては、3 次元球殻内で電磁流体力学方程式を解く地球ダイナモシミュレーションが 1995 年に初めて登場して以来、自発的な磁場生成（ダイナモ）が可能であることの再現、双極子磁場の卓越の再現、地磁気極性逆転の再現、などの成果が得られてきた。その過程で高速回転系における球殻内対流、磁場との相互作用やダイナモ過程についての基礎的な物理の理解も進んできた。地球コア内部は直接覗いて調べることができないため、数値シミュレーションから得られる知見は非常に有益なものである（図 4.3.2-2）。しかしながら、現在のスーパーコンピュータの能力の限界により、シミュレーションで使用されている物性値あるいは無次元パラメータの大部分は、実際の地球コアのものとは何桁もかけ離れたものになっている。パラメータが全く違うのになぜ双極子磁場が地球と似るのかといったことについても理由がわかっていない。現在の知見がどの程度まで地球コアダイナミクスとダイナモ過程の本質を捉えているかを確かめるためには、これらの物性値や無次元パラメータを現実の値に限りなく近づけたモデリングでその対流パターンや乱流構造、磁場生成メカニズムなどを調べることが必要である。物性値の中でも特に重要かつ再現が難しいのが粘性率である。地球外核はサイズ（厚さ約 2200km）に対して粘性が非常に低く（水と同程度）、非常に小さなエクマン数($O(10^{-15})$)となっている。小さなエクマン数は（相対的に）小さな粘性を意味するため、流れのスケールが（外核半径サイズに比べると）ずっと小さくなり計算に必要な解像度は増大する。このエクマン数を実現する粘性率では流れのレイノルズ数（慣性力と粘性力の比）は $O(10^8)$ 程度と非常に巨大な値になると見積もられる。このことからわかるように外核内はきわめて激しい乱流状態になっている。現在の HPC で可能な解像度ではこのような巨大なレイノルズ数とそれによる強い乱流状態を実現することができない。現在のモデルではレイノルズ数はおおむね $O(10^2) \sim O(10^3)$ 程度である。そのため現在のモデルでは実際の外核対流より極端に大きなサイズの渦までしか解像できていない。なお、分子粘性ではなく渦粘性を考慮したとしても $O(10^9)$ 程度の大きさだろうと考えられており、依然として数値シミュレーションはきわ

めて困難な状況である。大規模数値計算による低エクマン数の計算では日本が最もリードしているが、それでも最も低いものでも $O(10^{-7})$ である。

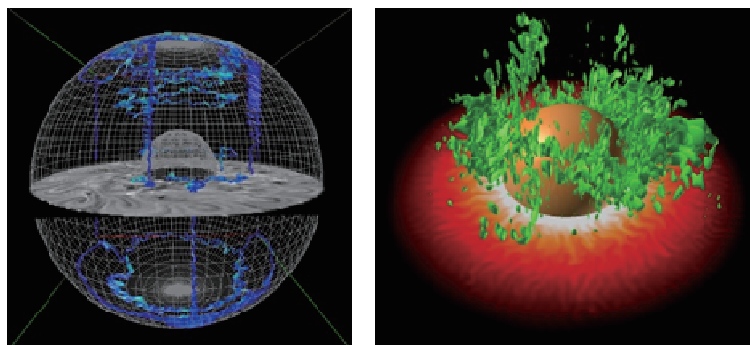


図 4.3.2-2 コア対流と地球ダイナモ過程の 3 次元球殻シミュレーション(宮腰・陰山提供)

(iii) プレート境界相互作用

プレートはグローバルスケールでは剛体的に振る舞うが、複数のプレートの境界付近では、プレート間の相互作用により変形や破壊が生じる。このうち短時間に生じる破壊が地震である。その中で特に、プレート同士の境界面に沿って発生する地震は、数百～千 km に渡って破壊が進展し、マグニチュード 9 (M9) クラスに達する場合もある。東日本大震災をもたらした東北地方太平洋沖地震もそのような地震であった。このような地震は、プレート境界での固着・すべりの時空間変化としてモデル化され、近年の地震発生の物理の進展と地球シミュレータによる大規模計算の実現により、M9 クラスを含む巨大地震の発生に至る応力蓄積過程や地震時の破壊伝播をシミュレーションすることが可能となっている。更に、プレート境界での固着・すべりの時空間変化は地表面の変形をもたらし、それが GNSS 等で観測されるため、そのデータを逆解析することで固着・すべりを推定することができる。このため、観測データに基づいた応力蓄積過程の推定もある程度可能となってきた。しかし、個別の地震やゆっくりしたすべりによる応力解放過程を予測するためには、強度の分布や低下の仕方、破壊開始位置の情報が必要であり、それを事前に推定するのは困難である。

更に、プレート内部の破壊現象もプレート境界での相互作用が原因である。ただし、地球内部がプレートの下も含めて弾性体として振る舞うのであれば、プレート境界近傍のみで破壊が生じるはずである。しかし、プレートの下は数年や数十年程度の時間スケールで粘弾性的に流動する性質を持つことがわかっている（アセノスフェアと呼ばれる）。そこでの流動によって弾性的なリソスフェア（プレート）に応力集中が生じることで、プレート内部でも広域に応力が蓄積していくことになる。リソスフェアとアセノスフェアが成層構造の場合については、日本列島スケールでの数値シミュレーションが実現しており、プレート内の絶対応力場を推定できる。更にその結果を、地震のモーメントテンソルをデータとした絶対応力場のパターンの逆解析結果と比較することも可能となっている。しかし、プレート内部でさまざまな規模の地震が発生するメカニズムや局所的な応力蓄積・解放過程はまだ明らかになっていないのが現状である。このプレート内部におけるさまざまな規模の地震の起こり方（いわゆる地震活動）は、大地震前にさまざまな時空間変化、例えば、発生頻度の低下（静穏化）や地球潮汐との相関を

示す。そのため、地震活動の時空間変化は、大地震の発生予測の手がかりを与える可能性を秘めている。しかし、地震活動は地震学の黎明期から研究が行われ、地震の規模別頻度分布や余震の発生頻度の時間変化のような統計則が知られているものの、これらの統計則を説明する物理的なメカニズムは未だ解明されていない。この課題は、現在まさに研究のフロンティアであり、室内実験や地震活動のデータ解析に加えて、最近では数値実験による研究も進められつつある。

(iv) 被害予測

より社会に密接した課題として、地震やそれにとまう津波によって生じる被害予測の課題がある。これは「京」の戦略分野3の地震・津波課題における中心であり、2章の総合防災で述べたように、地震発生から地震波や津波の伝播、都市の揺れや津波の遡上に至るまでを連携してシミュレーションすることによる災害予測と、避難シミュレーションの活用による減災対策に資するための手法開発が行われている。国内では東日本大震災を受けてこうした研究が注目されているが、戦略分野を含め、それ以前から進められてきた研究である。また、海外においても、スマトラ・アンダマンの地震津波をはじめ、多くの地震・津波災害が起きていることから、地震・津波の災害予測を対象としたシミュレーションが盛んに行われている。

地震発生のシミュレーションでは、沈み込みプレート境界地震を対象とした多数の地震発生シナリオ計算を行うとともに、多数のシナリオを観測データと照らし合わせて尤もらしさ（尤度）を評価し、尤度で重みづけしたシナリオのアンサンブルを用いてその後の推移を予測するシステムの構築に向けた研究が行われている。一方、海外ではカリフォルニアを対象とした複数モデルによるシナリオの検討や地震活動データを用いた予測実験などが行われている。

地震波や津波の伝播シミュレーションにおいては、従来別々に計算されていた地震波の伝播と津波の発生・伝播を、1つの方程式系で同時に解くことにより地震発生中の海底での音波の発生も含めたシミュレーションが「京」で行われている。これはリアルタイムで海底ケーブルなどで観測される地震波ならびに水圧変動観測のデータとの比較を可能とするものである。一方、日本だけでなく海外（米国やヨーロッパ）でも、東日本大震災以降、考え得るあらゆる地震シナリオに対する地震動評価のために、大規模シミュレーションの必要性が議論されている。更に、高密度地震観測による地震波形の逆解析で、大地震の震源過程と地殻・マントルの不均質構造を推定する目的にも大規模シミュレーションを活用する動きがある。

また、地震災害のシミュレーションとして重点的に行われている課題は、1) 地盤の揺れと連動した構造物のシミュレーションと、2) 都市全体の地震被害と被害対応を計算する都市のシミュレーションの二つである。都市を襲う地震動を引き起こす地震そのもののシミュレーションとの連成や複合災害として対策が必要とされている津波との連成の検討も進められている。構造物のシミュレーションは、1億自由度を超える超詳細な構造モデルを自動構築し、揺れがもたらす構造物の局所的な損傷や全体的な破壊・倒壊という非線形過程を数値解析するもので、世界最先端の技術である。係数が時間・空間的に不連続に変化する4次元偏微分方程式を解く他、有限要素法による非構造格子の解析モデルを使い、並列計算の性能を上げることは決して容易ではない。性能の向上と時間・空間分解能の向上が当面の課題である。都市のシミュレーションは、多様な地理情報システムを利用して都市モデルを構築し、地震災害の三つの

過程、すなわち、地盤の揺れ・建物の揺れ・群衆避難を解析するものである。このような大規模数値計算を使う地震被害のシミュレーションもまた、世界最先端の技術である。

地盤と建物の揺れは物理過程のシミュレーションであるが、群衆避難のシミュレーションは粒子系のマルチエージェントシミュレーションである。より大規模な都市モデルでも実効性能が出る並列計算性能の向上が課題であり、同時に、津波も組み込んだ複合災害のシミュレーションも着手されつつある。そして、津波シミュレーションにおいては、沖合のリアルタイム観測データを活用した津波波源モデルのリアルタイム推定や津波ハザード予測の高度化として、リアルタイム浸水予測の津波予警報への活用、津波の高さだけでなく流速・波力の見積りやそれによる被害予測、津波による土砂移動・地形変化、更には津波による複合災害の予測のための基礎研究が行われつつある。

(2) 長期的目標

固体地球科学の分野では、グローバルな空間スケール・地質学的時間スケールで生じるマントルやコアの対流から都市規模での地震・津波による災害予測に至るまで、さまざまな時空間スケールの現象が対象となる。以下では対象となるスケールや現象ごとに、大規模計算に関わる研究についての長期的目標を述べる。

なお、これまで固体地球科学においては、HPC は数値シミュレーションを行うために使うことがほとんどであった。しかし、リアルタイムに連続的に広域多点で観測される地震波形や地表変位のようなデータはいわゆるビッグデータであり、波形そのものが含む膨大な情報を活用するための大規模データ解析、例えば逐次データ同化による推移予測などには、大規模データの読み書きに耐えられる I/O を備え、個々の計算でも大規模な計算を多数アンサンブルに対して行える高性能・高並列の HPCI が必須である。長期的にはそのような方向性も重要であるが、課題や期待される科学的なブレークスルーを検討すること自体が今後の課題であるため、以下ではシミュレーションを中心とした長期的目標についてのみ扱う。

(i) ダイナモシミュレーション

グローバルスケールでは、マントル対流とコアを模擬したダイナモの数値シミュレーションが中心となる。マントル対流研究が今後 20 年程度のスパンで目指すものの 1 つは、現在も取り組んでいる大目標を、自己無撞着かつ物理的に厳密な取り扱いにより解明することであろう（図 4.3.2-3）。例えば、プレート運動とマントル対流との関係についていえば、本来は「プレート運動はマントル対流の帰結」であるにもかかわらず、現在の研究の多くはプレート運動をマントル対流の境界条件として与えることでその影響をモデル化するという、いわば「逆方向」の議論に留まっている。これに「順方向」の議論も加えることにより、マントル対流とプレート運動の相互作用や沈み込み帯の局所的な流れ場の見積りを自己無撞着に取り扱うことを目指していく。同様の自己無撞着な取扱いは、マントルより内側にある核の熱化学進化との相互作用、水や揮発性物質の還流・循環によって生じるマントル物質の物性変化が再び流れパターンを変化させる効果、更には地表面の環境変化（地形や気候の変化）からのフィードバック、およびスーパー地球などとの比較の際に求められる惑星サイズの効果、についても必要となるであろう。これに加えて、プレート運動再構築モデルを境界条件とした「逆方向」のマントル

ダイナミクスモデリングについても並行して進めていくことも想定される。ここでは、マントルダイナミクスと地質学的・地球物理学的・古地磁気学的な観測データとのリンクを現在よりも深化させていくことで、更に次の世代への準備としていくことが求められよう。

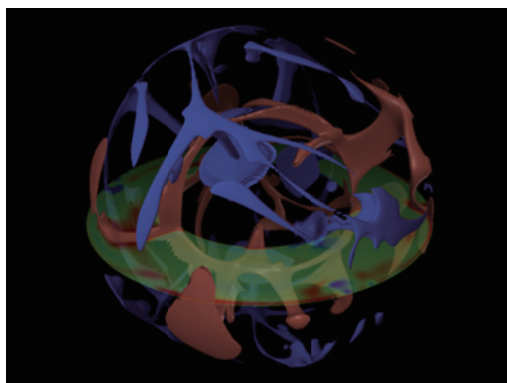


図 4.3.2-3 全地球惑星スケールでの自己無撞着なモデリング (図は亀山氏提供)

(ii) 地磁気変動シミュレーション

ダイナモシミュレーションが対象としている地球磁場は、高エネルギー宇宙線が地表に到達することを防ぎ、また太陽風による地球大気の散逸を抑えて、地表環境を生命が居住可能なものにする役割の一つを担ってきた。普段の生活では地磁気をあまり意識することはないが、このように人類を含む生物にとって重要な役割を果たしている。このバリア効果は地磁気の強さに依存する。太陽や宇宙からの影響の変動が地球に与える影響を予測するための宇宙天気予報において、地磁気強度は最重要物理量の一つであり、地磁気変動の未来予測は宇宙天気予報の研究においても重要なものである。過去の地磁気変動を再現できる信頼性の高いモデルが確立すれば、地磁気変動の将来予測を行うことが可能となり、社会的および科学的に意義の大きな成果となるであろう。数十万年、数万年から数十年、数年までさまざまな時間スケールの地磁気変動が存在するが、それらの変動の原因は明らかになっておらず、今後の重要な研究課題である。数万年～数十万年スケールの変動については、気候変動との相関が指摘されている。気候変動が地球の自転速度変動を通じて深部コアの対流と地磁気の変動を引き起こしている可能性がある。古地磁気学からもその可能性が示唆されており、重要な研究課題の一つである。またコア対流の駆動は、基本的にコアを包むマントルによる冷却によっている。そのためコア - マントル境界を通じたマントル対流活動との関係を調べることが不可欠である (図 4.3.2-4)。マントルの対流とその冷却過程は、コアばかりでなく表層活動の源でもあり、表層 - マントル - コアの活動は何らかの因果関係で結ばれていると考えられる。そのようなものの顕著な例の一つとして、白亜紀中期前後に見られる地磁気の振る舞いが挙げられる。地磁気は平均して 20 万年で極性反転が見られるが、この時期は約 4000 万年にわたって極性反転がないという特異な時期であった。更にこの期間は氷床がなく温暖な気候であり、またマントル対流活動は海嶺での海洋底の生成速度や巨大海台の存在から非常に活発であったと考えられている。これらの顕著な特徴は何らかの因果関係で結ばれていると考えられるが、それがどのようなものであるかは明らかになっていない。このような謎を解明するためには、マントル対流をはじめとする他分野の固体地球物理学研究者とも協力しながら研究を進めていくことが求められる。

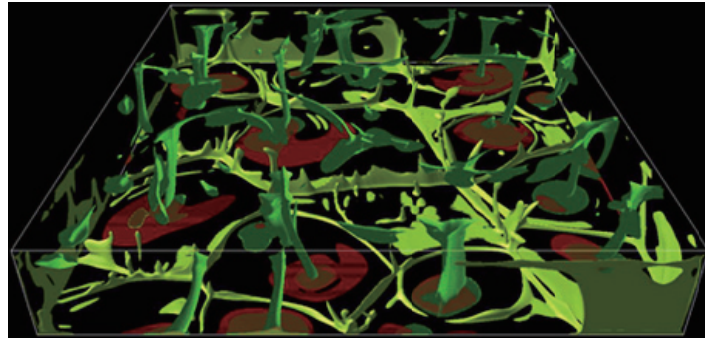


図 4.3.2-4 核・マントル境界の局所的モデリング（図は亀山氏提供）

(iii) プレート境界現象シミュレーション

日本列島スケールでは、プレート境界地震の発生を含む、プレート境界での応力蓄積・解放過程のシミュレーションと予測に向けた研究が中心となる。応力解放過程の予測は困難ではあるが、観測データから推定された固着・すべりの時空間変化に基づく応力蓄積状態の下で、地震時の強度変化の仕方や破壊開始位置をさまざまに仮定することで、起こり得るさまざまな地震のシナリオを定量的に予測することは可能になると期待される。ここで、応力蓄積状態を規定する固着・すべりの観測データは過去に遡るほど誤差が大きくなり、その曖昧さを多数の初期条件・モデルパラメタの組み合わせのアンサンブルで表現するなど、適切に定量化することが課題となる。したがって、「京」やその後の大規模計算においては、一つの大規模な計算を行うことよりも、個々の計算を観測データの分解能を表現できる範囲でできるだけコンパクト化し、多数（数百～数千）のアンサンブル計算を行うことで、定量的な予測を目指すことになる。こうして得られるさまざまな地震のシナリオを都市スケールの被害予測に順次取り入れる。更に、プレート境界の固着・すべりについては、その時空間変化をリアルタイムで陸上だけでなく海底を含めた地殻変動の観測データを基に推定しつつ、直後の推移を予測するための逐次データ同化システムを構築し、予測の試行を行うとともに、モデルの妥当性の評価や改善のための研究を進める。

(iv) プレート内破壊現象シミュレーション

プレート内の破壊現象については、日本列島スケールでのリソスフェアへの応力集中過程を、沈み込む弾性的なプレートの構造などを考慮した3次元粘弾性不均質構造の下で数値シミュレーションを行い、その結果をモーメントテンソル逆解析による応力場推定結果と整合させていくことが一つの課題となる。そのため、日本列島スケールを対象とした数百億自由度以上の3次元有限要素法（FEM）モデルを構築し、粘弾性変形の大規模FEM計算をすることになる。大規模FEM計算については、メッシュ作成段階での工夫や構造解析分野など他分野との協力により効率化を図る。更に、さまざまな規模の地震活動については、さまざまな規模の破壊を自発的に生じる離散要素と連続体を組み合わせた数値モデルによって、地震活動の統計則や潮汐との関連のメカニズムを研究することになる。桁違いの規模のバリエーションを計算するためには、3次元で億～兆オーダーの粒子・要素数の計算が必要となり、次世代や次々世代

の大規模計算機が必要となる。なお、離散要素法の計算を一般的に大規模に行うためには分散メモリにおける計算効率の向上が必須であるが、プレート内破壊現象のような相互作用する粒子の入れ替わりの少ない計算では、現状でも地球シミュレータのフルノードで並列化効率 90% 以上を達成しており、今後も並列性能を高める研究を進めていくことが期待される。また、地殻をモデル化するには、堆積物が岩石化して地殻を形成する過程を取り入れることが必須と考えられる。そのため、岩石化の室内アナログ実験と並行したモデル構築ならびに数値実験的な研究を進展させる必要がある。こうした地殻モデルを巨大地震の発生する境界条件下に置くことで、巨大地震発生前に必然的に生じる地震活動度や他の物理量の変化の有無、ひいては破壊前の切迫度や規模評価の可能性を物理的に明らかにすることを目指す。

(v) 被害予測シミュレーション

被害予測については、まずは地震発生ならびにそれによる強震動や津波伝播の予測を高解像度・高速で行えるようにして、海底観測データに基づいたリアルタイム強震動・津波予測ならびに事前のハザード評価に資する研究を進める。また、建物の揺れや損傷、都市全体の揺れの連続体モデルによるシミュレーション、複合災害である強震動による液状化、津波による構造物の破壊や漂流といった現象の粒子系シミュレーション、AI（人工知能）を取り入れた大規模避難シミュレーション等を実現する。こうした研究によって、非常に多数の地震発生シナリオに対する被害予測を行うことで、科学的根拠に基づいて予測の曖昧さを含めて評価できるシステムを構築し、政府の行っている長期評価の改善や中央防災会議や地方自治体による被害想定に用いられることを目指す。更に、将来的には、グローバルスケールのマントルダイナミクスや地殻モデルの研究成果に基づいて、各地域における超低頻度の最大規模の地震やメガ噴火の可能性、大規模地震の切迫度や規模評価など、可能なものから被害予測に取り入れていくことが長期的な目標となる。

(3) 次世代に解決すべき課題

(i) 地震発生から都市振動・津波遡上までのシームレスな連携のための高解像度計算

前述のように、科学的根拠に基づいて予測の曖昧さを考慮して地震津波の災害予測を行うためには、起こり得るさまざまな地震のシナリオについて、地震発生から地震波・津波伝播、都市振動、津波遡上の計算を連成して行う必要がある。地震発生のシナリオを考えるにあたっては、地震の発生過程を左右する震源域の上限・下限・水平方向の広がり・破壊開始点・仮定する摩擦則をそれぞれ 4〜5 通り考慮するだけでも、その組み合わせは 1,000 を超える。ここで、扱う問題のスケールが地震発生から都市振動・津波遡上では大きく異なっていることに注意する必要がある。巨大地震は数百 km×数百 km 以上の広がりを持った震源域で発生し、津波の波源域もこれに相当する。一方で、都市の振動では木造家屋や中低層建築物では周期 1〜2 秒の揺れが問題となり、空間スケールとしては数百 m オーダの構造不均質まで扱わなければならない。そのためには、地震波が励起される段階からそのオーダでの高解像度計算が求められることになる。地震波伝播の計算において、例えば南海トラフを対象とした 1200km×1000km×200km の領域で、周期 1〜2 秒の計算を行うには水平方向に 100m のメッシュでの計算が必要である。これは、「京」の全系を数時間使ってようやく 1 回の計算が可能な問題であり、1000

を超えるシナリオの計算は、「京」の数百倍の実効性能が出せる段階になって、初めて日常的に扱うことが可能なレベルになると言える。同様な高解像度計算は、地震発生のシミュレーションにおいても必要である。次世代の時点では、こうした計算が実際に実行可能であり、地震発生から被害予測までをシームレスに計算できることを示すことが課題となる。一方、こうした計算を意味のあるものにするためには、数百 m オーダーで地下の構造不均質や震源断層面上の不均質が明らかになっている必要があり、そのための地下構造モデルの構築や震源域内で普段から発生する小規模な地震の分布を明らかにすることも重要な課題である。なお「京」の戦略分野においても地震発生から被害予測までの計算を連携して行うことを課題としているが、それは粗い解像度でのシナリオ計算結果を入力として建物振動を計算するといった制約の中での計算となる。

(ii) 時空間スケールの異なる対流計算の高効率・高精度化（マントルの場合）

マントル対流計算において次世代で解決すべき最大の技術的課題は、時間的かつ空間的スケールが大きく異なる現象が共存している問題を、高効率かつ高精度で解く数値的手法の確立であろう。マントル対流問題では、この「スケールが大きく異なる現象が共存」していることが数値シミュレーションを著しく困難にする元凶である。例えば時間方向については、熱の輸送（熱伝導の時間スケールが数百億年）と運動量の輸送（ほぼ瞬間的に起こる）の両方の取り扱いが求められる他、固相マントルとマントル物質の熔融によって生じる液相マグマの運動を同時に扱う場合には、両者の時間スケールの違いが時間・空間解像度の比である CFL 条件を厳しく制限してしまう。空間方向についても、マントル全体のスケール（数千 km〜数万 km）とプレート運動の食い違いが局所的に起こるプレート境界のスケール（1km 以下）の両方を適切に解像しなければならない。このうち前者は、流れ場を（熱輸送に比べれば瞬間的に定常状態に至るという意味で）楕円型偏微分方程式で記述・求解せねばならないことを要求する。これに加えて後者は、流れ場を記述する楕円型偏微分方程式の性質をきわめて悪くする。すなわち、マントル対流問題に内在する「時空間スケールの大きく乖離した現象を同時に扱う」うえでは、悪条件の楕円形偏微分方程式を高効率かつ高精度で解くことがきわめて重要であり、この克服はマントル対流の枠組でプレート運動を再現するという目標への大きな一歩になる。前述の技術的問題への取り組みとしては、Jacobian-free Newton-Krylov 法等の大規模 3 次元問題に適応可能な非線形ソルバーの開発とその実装、レオロジーの大きく異なる物質（マントル、マグマ、プレート境界等）の矛盾ない運動場を解として得るために複数の偏微分方程式を効率的にカップルさせて解く手法の開発、更には局所的には（km を下回る）超高解像度でグローバルスケールのシミュレーションを可能にするための技術として、AMR（Adaptive Mesh Refinement）や homogenization（あるいは upscaling）の実装などが挙げられる。こうした技術的な課題がある程度克服されたとすれば、階層的な空間解像度を持つモデリングが可能となり、その結果プレート運動とマントルダイナミクスの双方をグローバルスケールで取り扱うことが、次世代機で解決が期待できる科学的課題の一つと見込めるであろう。ただし、この場合にはマントルダイナミクス計算で一般的な流体解法の使用を想定しているので、このモデリングを実行する次世代機には 100PFLOPS 程度の理論性能はもとより、B/F 値の優れたハードウェアが期待されていることは言うまでもない。その一方で、巨視的現象に内在する微視的な現象の

取り扱いには、流体的な手法のみではなく粒子的な手法との併用が有効な手段の一つとされているものの、マントルダイナミクス分野で行われた例は現在までほとんどない。こうした新たな手法の開発も、更に次の世代を見越した取組みの一つとして有用であろう。

(iii) 時空間スケールの異なる対流計算の高効率・高精度化（コアの場合）

ダイナモシミュレーションにおいては、次世代のスパコンではエクマン数 $O(10^{-9})$ の直接計算が可能になる見込みはない。しかしながら、限られた計算機資源で地磁気変動の予測を行うため、天気予報等の計算で行われているように、計算で分解できない微小領域の渦や乱流を物理的に根拠のあるやり方で適切にパラメータ化してモデルへの導入を行う。そのようなモデルが過去の地磁気変動をよく再現することができれば、モデルの信頼性が高まり、地磁気変動の予測に利用することも可能になる。また、次世代のスパコンでは、マントルとコアのカップリングに着目したシミュレーションが現実的なものになる可能性がある。モデル開発を進め、コア・マントル境界（CMB）の熱流量とその変動や、相互作用の下でのマントルとコアの時間発展などについての理解を得る。これらを基にすれば、先述の白亜紀中期における温暖な気候・激しい火成活動・長期間の磁場極性反転のない時代（白亜紀スーパークロン）のような、表層・マントル・コアのカップリングが顕著な現象についてシミュレーションを行い各圏の相互作用について理解を進めることが可能となるであろう。

先に述べたように、現在計算可能なエクマン数は $O(10^{-7})$ である。実際の地球コアでは $O(10^{-15})$ 、渦粘性を考慮しても $O(10^{-9})$ 程度と考えられている。100PFLOPS 程度スケールにおいては、現在の値から1桁近づけることが現実的な目標となる。この場合、空間解像度は3次元各方向に現在の4倍（約 $2000 \times 2000 \times 6000 \times 2$ ）以上が必要ということがこれまでのテスト計算から見積もられている。この解像度で対流やダイナモの基礎過程がわかる磁場散逸時間（地球で約2万年）までを計算するには、地球シミュレータ2換算で96ノード（約80TFLOPS）で 48×10^4 時間（約60年）必要となる見込みである。しかし、この1000倍（80PFLOPS）の性能があれば、480時間（20日）という現実的な時間での計算が可能となる。総演算量は、地球シミュレータ2で実効効率は大体二十数%程度なので、仮に25%とすると $80\text{TFLOPS} \times (1/4) = 20\text{TFLOPS}$ 、これに 48×10^4 時間 $\sim 1.7 \times 10^9$ [s] を掛けるとおおよそ（2万年積分の場合） 3×10^{22} FLOPS 程度と見積られる。なお、各方向に4倍というのは最低限の見積もりであり、必要な解像度はもっと大きくなる可能性がある。極性反転は平均して約20万年に1度生じ、このような地磁気変動を調べるためには更にあと数十倍の計算能力が必要となる。これはエクサスケールでの目標となる。地球コアと実効的にほぼ同等と見做せる可能性のあるエクマン数 $O(10^{-9})$ の計算はさらに次の世代のスーパーコンピュータにおける課題となる。マントルとコアのカップリングシミュレーションについては、両者の対流の時間スケールはそれぞれ約 $O(10^8)$ 年、約 $O(10^3)$ 年と違いが大きい事が困難さを産んでいる。仮に100PFLOPSで総計算ノード数が10000の場合、例えば10ノードをマントル、9990ノードをコアに割振って計算を行えば、時間スケール差が約 $O(10^3)$ ある系を調べることが可能になる。この場合コア側も1億年スケールの積分が欲しいため低エクマン数の計算は難しく（現実的に $O(10^{-4 \sim -5})$ 程度と見込まれる）、マントル側も100TFLOPSと（実効性能を考慮するとおそらく）現行の地球シミュレータ2以下となるため高レイリー数・大きな粘性コントラストや高解像度が必要なプレート境界を考慮したモデルの計算

は制限されるが、現在は着手するのが難しいカップリング現象に関する重要な知見が得られる可能性が高いため推進すべきモデリングである。エクサスケールにおいては、ノード数が先のものより 10 倍増加したとすると、マントル側に 10 ノード、コア側に 99990 ノードを割り振り時間スケール差が 10^4 程度の系が計算できる可能性がある。マントル側は 1 エксаの 1/10000 である 100TFLOPS で先のものと同程度であるものの、現実の時間スケール差 10^4 にかかなり近づく。

(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）

(i) 総合防災連携アプリケーション

1000 オーダーのシナリオを普段計算できるとともに、地震発生直後に被害予測を行うために、少なくとも 1 シナリオを数時間程度以内に計算できることが必要である。つまり、ここでは地震発生や波動伝播などの個々の計算は、次世代で普段計算できる規模を想定している。必要な演算量やメモリ、ファイル容量についてはすでに 2.2(4)節に、表とともに詳述しているのでここでは省略し、ここではその他の性能要求について述べる。

地震動シミュレーションに用いられる運動方程式の差分法計算では、2.0~2.5B/F が必要であり、現状の「京」のメモリバンド幅 (0.5B/F) では最大限性能チューニングを行っても実効性能は最大 20%程度止まりである。未チューニングコードでは実効性能が数%以下しか得られず、新しい物理モデルに基づく新規コード開発の効率が悪く、またチューニングに多大な時間を必要とする。

将来、メモリバンド幅が現行の 1/5 (0.1B/F 程度) に低下した場合には、必然的に 5 倍量の並列化が必須となるが、すでに現状の数万 CPU において strong scaling の頭打ちが起きており、並列化効率の低下は避けられない。

また、並列分割数が増えると、領域ごとの計算量に対するデータ通信の負荷が相対的に大きくなる他、MPI 通信サイズが小さくなるために通信性能が下がるなど、分割数の増大には限度がある。特定の分割領域においては、境界条件等の処理のための余分な計算が必要になるため、分割数が増えて計算負荷が小さくなると計算負荷のアンバランスが顕在化し、並列性能の低下も起きる。「京」ではソフトウェアパイプライン機能を働かせるために、ループ長を長くする必要がある。しかし、領域分割数が増えるとループ長が短くなりパイプラインが機能しなくなる。これは、長いベクトル長を必要とするベクトル計算機にも共通する。

I/O については、数万~数十万 CPU に対して必要な入力データを渡し、各 CPU より出力される膨大な数の出力データを適切にマージするなど分散ファイル処理の Fortran 言語サポートが必要（現在では MPI-I/O で一部をサポート）である。

(ii) マントル対流アプリケーション

マントルダイナミクス分野からは、現時点で「性能評価」に供されているアプリケーションは存在しないため、以下では既存の HPC（地球シミュレータなど）で使用されているものの性能に基づいて述べる。また、マントル対流シミュレーションでは、一般的に流れ場の求解が計算時間の 9 割以上を占めることから、計算量の見積りは流れ場の反復求解ルーチンの本体部分に要するものに限定する。地球のマントル全体（深さ 2900km、外周 40000km）を、地表面で

10km の解像度となるように分割するとすれば、必要なメッシュ数は (深さ方向 2900/10) × (経度方向 40000/10) × (緯度方向 20000/10) = 2.32×10^9 となる。ただし、この解像度では不十分な領域が局所的に存在するが、AMR 等の技法を駆使することで、必要な解像度の向上に要するメッシュ数の爆発的な増加が抑えられているものと仮定する。これに加えて、メッシュ 1 つ当たりに流れ場の 4 変数 (速度 3 成分と圧力) が付随しているため、全自由度はおよそ 10^{10} と見積られよう。これらを倍精度実数として確保するには 8×10^{10} バイトの記憶域が必要となる。ただし、実際にはこれに加えて作業変数や他の物理量 (温度・化学組成など) も含め、 10^{13} バイト程度の記憶域が必要と想定される。

以下、流れ場の反復求解に要する計算コストの見積りは、(初代) 地球シミュレータ向けに開発された、3 次元箱型領域内でのシミュレーションプログラム (Kameyama, 2005) の性能に基づいて行っている。なお、この手法には最大で $1024 \times 1024 \times 256$ のメッシュ分割での計算を行った実績があるが、楕円型偏微分方程式ソルバの性能に強く依存するマントル対流シミュレーションでは、この解像度が現在でも世界最高レベルである。流れ場の反復求解に当たっては、速度ベクトル各成分の残差の計算 (歪速度テンソルの計算、応力テンソルの計算、および応力テンソルの微分) に 1 点当たり 34 演算、圧力の残差の計算 (流束場の発散の計算) に 1 点当たり 12 演算、合計 $34 \times 3 + 12 = 114$ 演算が必要であり、解の更新に要する演算数も合わせて、1 反復当たり $114 + 2 \times 4 = 122$ 演算が必要になる。一方、多重格子法計算が理想的に動作した場合には、収束までに要する計算量は自由度に比例する。この計算量が最密格子で 1000 回分の反復計算に相当するとすれば、流れ場の計算に要する計算量は 1 時間ステップ当たり $2.32 \times 10^9 \times 122 \times 1000 = 3 \times 10^{14}$ となる。加えて、空間解像度 1km に対し、マントルの流れの速度がプレート運動とほぼ同等の 10cm/年とすると、時間刻みの大きさは 10^4 年である。これを用いて、地球史の 2 倍に相当する 100 億年の時間幅を計算するとすれば、 10^6 回の時間ステップが必要になる。これより、1 ケースに要する計算量はおよそ 3×10^{20} FLOP であり、この計算を 1 EFLOPS (10^{18} FLOPS) の速度で実行すると 300 秒の時間を要する。もちろんこれは理想的な場合の見積りであり、実際にはこれより格段に多くの時間を必要とする。とりわけマントル対流シミュレーションで重要な多重格子法計算では、粗い格子での反復計算に頻出するループ長の小さい計算のコストが不可欠であるため、計算の実行効率が一般の流体シミュレーションよりも、更に低下する傾向があることにも注意が必要であろう。なお、このことは、単体実行時での性能だけでなく、並列実行時の性能にも深刻な問題を及ぼしてしまう。例えば、計算に使用する解像度がどれほど細かくとも、それより格段に粗い格子系 (例えば使用する PE 数よりも少ないメッシュ分割数) での計算が必ず発生してしまうが故に、「strong scaling」は容易に頭打ちになってしまう。

マントル対流シミュレーションは主に連続体力学に基づく計算であり、変形を記述するテンソル成分を計算する際などに多くの変数を参照する必要がある。そのため、キャッシュが効果的に利用できるごく例外的な場合を除けば、高い B/F 値でメモリアクセスのできることが望ましい。実際、前述した $1024 \times 1024 \times 256$ のメッシュ分割でのシミュレーションが可能となった背景には、(初代) 地球シミュレータの持つ高い B/F 値 (=4) の恩恵があった。また、並列化およびこれにともなう領域分割の副作用として MPI プロセス間での通信が発生するが、楕円型偏微分方程式の反復求解の手順で大量のシフト型通信が発生する。更に多重格子法では、粗い、

すなわち自由度や計算量の少ない格子レベルでの計算の際にデータ量の少ない通信が頻繁に発生してしまう。こうした少量ながら多数の通信をとまなう計算の効率化にあたっては、レイテンシの十分低いノード間通信が望まれる。

(iii) ダイナモアプリケーション

外核(内核とマントルに挟まれた球殻部分)内における液体金属の対流および磁場を、電磁流体力学方程式を用いて解く。境界条件の記述や精度などで有利なため、ブシネスク近似を仮定して流れ場と磁場をポロイダル・トロイダル展開し、それらを球面調和関数展開するスペクトル法が広く用いられている。スペクトル法の場合、通信量の関係から、数万～数十万コア以上の大規模並列計算ではパフォーマンスが出しにくい可能性がある。一方、ブシネスク近似を仮定しない電磁流体力学方程式の下で、有限差分法およびインヤン格子（球座標問題を効率良く計算するために開発された手法）を用いて解く手法もある。開発者の陰山聡教授（現神戸大学）は 2004 年ゴードン・ベル賞を受賞し、大規模並列計算で実績を挙げている。以下はこの手法を基に記述する。

計算速度については、エクサスケールでエクマン数 $O(10^{-8})$ の計算が視野に入る。現実の地球コアを反映すると予想されている $O(10^{-9})$ の計算には、さらに次世代のスーパーコンピュータが必要である。エクマン数 $O(10^{-8})$ の場合、先述したとおり最低必要な解像度は $2000 \times 2000 \times 6000 \times 2$ 以上となる。基本変数は磁場ベクトル 3 成分、運動量ベクトル 3 成分、密度、圧力または温度の計 8 成分となり、その他電場や電流など多数の補助成分、作業配列が必要となる。そのため、全体のメモリ使用量の見積もりは 53TB 以上である。エクマン数 $O(10^{-8})$ で極性反転（平均的に 20 万年に 1 回）を見るため例えば 50 万年分を計算しようとした場合、(3)(iii)で述べたように 80PFLOPS で 2 万年積分に 480 時間（20 日間）だとすると、50 万年積分はその 25 倍で約 500 日間となるが、エクサスケールであればその 1/10 の 50 日程度となる。

インヤン格子では、3 次元球殻を緯度経度方向の 2 次元に分割している。見積もりのため使用ノード数を 20000 と仮定する。この場合、 $2000 \times 2000 \times 6000 \times 2$ のインヤン格子では、1 ノード当たり約 $2000 \times 33 \times 33$ の格子点数となる。通信は基本場 8 変数を倍精度で、4 方向に通信する。以上から、1 タイムステップ当たりの通信量は約 17MB となる。1 磁場散逸時間（2 万年）まで計算するのに要するステップ数は、約 4×10^8 と見積もられる。この計算を 480 時間～ 1.7×10^6 s で終わるとすると、1 ステップ当たりの許容時間は約 4×10^{-3} s となる。以上から、ネットワーク速度の要求性能は約 4GB/s となる。

ここまでの計算時間の見積もりは、現行の地球シミュレータと同程度の B/F（～2）があり、実効効率が現行の地球シミュレータより大きく下がらないと仮定して、現行の地球シミュレータの計算データを基に行っている。配列も先述のとおり現行計算よりかなり巨大化するため、大きなメモリバンド幅の需要が高い。次世代以降のスーパーコンピュータにおいても、2 程度以上の B/F があることが望ましい。

I/O としては、1 タイムスナップショット当たりのデータ出力は $2000 \times 2000 \times 6000 \times 2$ の解像度の場合約 4TB となる。解析のため磁場散逸時間（2 万年）の 1/20 の時間間隔でデータを出力した場合、50 万年のシミュレーションであれば総出力は 2PB 程度となる。ダイナモや磁気乱

流の素過程を調べる場合には、上述の時間間隔では粗すぎる可能性が高く、その場合は更に細かい時間間隔のデータが必要となる。

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
防災連携シミュレーション(地震直後の被害状況予測) 内訳は以下(1)~(6)			0.1	9	3					地震発生は1領域1000シナリオを5領域行う。各領域について1000シナリオ中、観測に基づき20シナリオを選び、波動伝播計算を行う。一方、地震動増幅や建物震動・津波遡上については、地盤構造や建物劣化、海底地形の不確実さを考慮するために数十ケース計算するとともに、複数の都道府県の都市(例えば南海トラフ地震の場合に、東海・近畿・四国・九州の4都市)を一度に計算する必要を考慮すると、結果的に各領域で1000ケース程度は計算が必要。 アプリの最大BF値=8.0
(1) 地震発生			0.000860	0.00086		5000	48	境界積分法による地震サイクル計算	面素数10 ⁷	アプリの最大BF値=4
(2) 波動伝播			0.1	0.5		100	1400	差分法による弾性波動伝播計算	1200x1000x200Km ³ (125mx125mx62.5m格子) ステップ数24万回	アプリの最大BF値=2.14、京での実測1.4。1ケースあたり演算量14EFLOP(東北大調べ)。東大前田先生による新バージョンを京でも主に利用。そちらは20EFLOP。
(3) 地震動増幅			0.01	4		5000	1300	有限要素法による地震波動計算	30億節点 (300x250x10km ³)	アプリの最大BF値=8.00
(4) 地震動増幅			0.01	4		5000	1300	有限要素法による地震波動計算	30億節点(30x25x1km ³)	アプリの最大BF値=8.00
(5) 建物震動			0.05	0.05		5000	500		構造物100万棟	BF値=0.26(実測値)。メモリ転送量はBF値と演算量から逆算。BF値はキャッシュに載るので小さい。 演算量はプロファイルからの外挿と一致、メモリ転送量はプロファイルからの外挿
(6) 津波遡上			0.002	0.5		5000		Navier-Stokes方程式複数500モデル(静水圧近似、非静水圧、VOF法)計算	3x3x0.08Km(1都市領域を1m格子幅から1400x1100x10Km(5.4Km格子幅)の複合格子、7都市同時計算、72万ステップ	演算量、メモリ転送量、メモリ量は実測値からの外挿。BF値=10(実測値)
避難誘導シミュレーション	3.30		0.3	0.006		1	5000	マルチエージェントモデルによる行動シミュレーション	300,000 agents, 18,000 steps (1 hour simulation), 1,000 Monte-Carlo members	演算量は命令数である。浮動小数演算は命令数のおよそ1/40。 演算量、メモリアクセス量、メモリ使用量は京でのプロファイルから外挿
マントル対流	1000		0.01		0.083	1	300	流れ場の反復求解、格子法差分計算	格子数: 290x4000x2000, 4変数	
ダイナモ			0.053	4		1		陰陽格子	格子点: 2000x2000x6000x2, 8変数	

※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

総合防災は、すでにその内部が異なる分野間の連携で成り立っている。地震発生から波動・津波伝播は地震学など理学系の分野であり、都市の振動や津波遡上は工学系、避難は社会科学系である。そのような異なる分野を横断した連携を行うフロンティア的な研究が、「京」の戦略分野の研究であり、今後もその連携を深めて行く必要がある。また、振動計算に注目した場合、構造物のシミュレーションの最大の課題は、非構造格子を使う数値計算の並列計算性能の向上である。この課題は難問であり、解決には、地震工学・構造工学・計算力学の研究者だけでは不十分であり、数学の研究者との連携が必要である。また、都市のシミュレーションは、数理経済学のような社会科学との連携が期待できる。またマルチエージェントシミュレーションはモデル化が容易な粒子系のシミュレーションの一つであり、さまざまな連携が可能であろう。人工知能に関わる研究分野の連携も期待ができる。

マントル対流シミュレーションで登場する問題はきわめて特異である。このような理由もあって、現時点では異なる分野のシミュレーション技術との連携は多くない。ただし、悪条件の

大規模楕円形方程式の元凶たる「時空間スケールの大きな乖離」という難点は、他のいくつかの分野でも共通して登場するものであり、この問題を高効率かつ高精度で解く手法を連携して開発することはきわめて有意義なものとなるであろう。また、マントル対流シミュレーションの高度化においては、格子分割や空間離散化の方法の改善も有効な手段の一つであろう。世界的にみても、既存のマントル対流シミュレーションプログラムは多くが構造格子を用いた有限体積法（有限差分法も含む）に基づいており、いびつな形状を表現するのに必ずしも適してはいない。球殻形状に対してはインヤン格子という構造的な格子分割が提案され、これに基づくマントル対流シミュレーションプログラムも開発されているが、楕円型問題との親和性が十分高いとは言えない。この対策の一つとして有限要素法で用いられているような、非構造的ながらも効率的な格子分割を採用することが考えられるだろう。その際には、メッシュ生成やオーダーリングといった有限要素法に共通的な技術の開発も連携して行う必要があるであろう。これに加え、シミュレーション結果の可視化技法についてのニーズも大きくなるであろう。例えば、流れの3次元構造やその時間発展が容易に把握できるような可視化手法、あるいは乖離した時空間スケールで起こる複数の現象を効果的に表示する方法の開発についても連携が望まれよう。

コア対流はマントルによる冷却によって駆動されているため、その対流の様子はマントルがコアをどれだけ効率的に冷やすか、またコア-マントル境界の状態（例えば熱流束の不均質性など）に支配されている。したがって、コア対流研究とマントル対流研究との連携は今後の必須の課題である。コア対流およびダイナモとマントル対流の相互作用を近似的にでも扱うことができるモデルを開発できれば、先に述べた白亜紀スーパークロンの謎や、コアの冷却に伴い地球史のいつごろ地球磁場が発生したか、またその時の磁場の様子は、といった問題について解明の手がかりが得られる可能性がある。これらは時間スケールがそれぞれ約1億年と約1000年という際立って異なる現象のカップリングであるため、今後20年以上を見据えた挑戦的課題となる。

(6) 公的な意見交換とそのサマリー

災害対策の実務的立場からの意見は2章の総合防災の項に述べた通りである。

地震発生予測や強震動・津波予測については、コミュニティの次期研究計画WG案（11/26コミュニティ内で検討会を開催）において、HPCを活用した予測システムが中核的役割を果たす方向で議論が進んでいる。ただし、シミュレーションに偏り過ぎることには警戒する声もある（予測には観測データが不可欠であることが必ずしも正しく伝わっていない面もある）。その後、次期研究計画策定のための委員会が立ち上がっており、今後パブリックコメントや分野内への意見聴取などが行われる予定である。

また、固体地球科学一般については、日本地球惑星科学連合大会での特別セッション「ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来」が採択され、平成25年5月20日に19件（口頭13件、ポスター6件）で開かれ、口頭の2件は議論用の枠となっており、社会的課題ならびに科学的課題について議論を行った。社会的課題については2章ですでに触れたとおりであるが、科学的課題については、地球科学は、真理を探究する認識科学から、観

測データとシミュレーションを両輪として問題解決のための予測能力を高める設計科学への質的転換が必要であるとの指摘がなされた。

社会的課題・科学的課題いずれについても、コミュニティ内外からの意見は、基本的に白書における計画の方向性を支持しつつ、よりよいものにするための意見であったと言える。

(7) ロードマップ

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
被害予測	地震発生・波動伝播・都市震動・津波遡上・破壊・漂流等のモデル化					被害予測・避難最適化
			地震発生から都市災害までの連携計算・復旧過程			
地殻モデル	様々な規模の破壊現象のモデル化				地殻モデル構築と大破壊前状態解明	
			変形・破壊モデルと地震波散乱・減衰モデルの統合			
プレート境界 モニタリング & 推移予測	プレート境界固着・すべりモニタ&予測システム構築				推移予測の実用化と予測情報発信	
			モニタ実用化・予測システム妥当性検証・改良			
全球マントル・ コアダイナミクス	熱輸送・物質循環過程・磁場形成メカニズムの解明				大陸形成等の物質分化過程・コア実粘性計算の実現	
			プレート運動とマントル対流・マントルとコアのカップリング			

図 4.3.2-5 固体地球科学ロードマップ