

地球シミュレータセンター 固体地球シミュレーション研究グループ 研究成果報告書

2009年2月12日

(2010年1月14日 一部修正)

グループリーダー：陰山 聡

研究員：兵藤 守、古市 幹人、宮腰 剛広

1. はじめに

本中期計画が開始した当初、我々の分野「固体地球科学」では、大規模な計算機シミュレーションという研究スタイルはまだ一般的ではなかった。この点が大気・海洋分野とは大きく異なる点である。そこで我々は、この分野における基本的な並列計算アルゴリズムの考案と、それに基づいたコード開発から始める必要があった。研究開発のターゲットは、地球シミュレータを使うことによるのみ解決が期待される固体地球科学分野の重要問題に絞った。その開発にあたり、我々が常に心掛けてきたことは：(i) 人真似を排し、独自開発に徹底的にこだわること、そして(ii) 開発した手法を自分達の手で固体地球のシミュレーション研究に応用すること、の2点である。

この方針の下、大規模固体地球シミュレーションのために本中期計画中に我々が開発に成功した重要な基本アルゴリズムとして次の3つの成果を特筆することができる。一つ目は球ジオメトリ用の新しい計算格子「インヤン格子」、二つめは、マントル対流の新しい数値解法「ACuTE法」、そして三つ目は粘弾性流体の高精度解法「CIP-CSLR-CS法」である。これらの手法を応用し、組み合わせることで我々は、(1) コア(ダイナモ)、(2) 球殻マントル対流、(3) プレート・マントル統合計算、(4) 地震発生、の4種類のシミュレーションプログラムを開発した。いずれも、地球シミュレータの多数ノードを駆使した大規模のシミュレーションを想定して開発したものである。

特に(1)のダイナモシミュレーションコードは、地球シミュレータの512ノード(実際上利用できる最大ノード)を使った世界最大規模(最高解像度)での計算でプロダクトランを行い、新しいダイナモ現象を発見するという大きな成果を得た。このダイナモコードは、インヤン格子を開発する直接の動機となったコードであり、その演算性能の高さから2004年のゴードン・ベル賞を受賞したものである。

次に、上記(2)の球殻マントル対流コードに関しては、この中期計画期間内に 2 種類を開発した。一つは、マントル対流業界で広く使われていた流体ソルバアルゴリズム **SIMPLER** 法をインヤン格子上で実装したものであり、もう一つは、**SIMPLER** 法の代わりに我々が開発した独自のソルバアルゴリズムである **ACuTE** 法をインヤン格子上で実装したものである。**SIMPLER** 法に基づく最初のマントル対流コードは地球シミュレータの多数ノードでは十分な並列化率を維持できないという欠点があったが、**ACuTE** 法とインヤン格子を組み合わせることでこの問題を解決した。

プレート・マントル系を解くための上記(3)のコードについても、粘性率の異なる二つの流体がシャープな境界面を維持しながら高精度にその時間発展を追跡することを可能にする粘弾性流体の新しい解法「**CIP-CSLR-CS** 法」を考案することで開発に成功した。この手法は、保存型セミラグランジュスキームとして定評のある **CIP-CSL** 法に、我々が独自に開発した共回転セミラグランジュ法を組み合わせたものである。

最後に(4)の地震発生シミュレーションに関しては、境界積分方程式法・有限要素法に基づく新しい地震サイクルシミュレーションコードを完成させた。これは、我々が目指す、より現実的な地震発生シミュレーションの実現に必要な 2 条件 1)地震断層近傍の応力場を精度良く評価可能であること、2)最新の地震学的知見を反映する不均質な弾性/粘弾性媒質の取り扱いが可能であること、の両者を満たすため、境界積分方程式法と有限要素法の長所のみを抽出・カップルさせることにより、不均質場の影響を考慮しつつ精度の良い断層応力の評価を可能にしたものである。

以上述べたことより、中期計画に記された本グループの目標（以下に引用）は十分に達成できたと考えている：

コア・マントルの地磁気変動、地殻変動、さらには地球規模の地球内部研究を推進するため、全体規模のコア・マントル変動、プレート運動、日本列島域の地震破壊過程の再現に必要なシミュレーションプログラムを開発する。

2. 中期計画における達成状況

まず、中期計画に沿って我々が進めた昨年度までの研究成果を年度別にまとめ、その後、社会還元等を項目毎にまとめる。平成 20 年度の成果は第 3 章で述べる。

平成 16 年度の成果概要

新しい球面格子『インヤン格子』を考案 [1, 2]し、それに基づいた球殻ダイナモシミュレーションコードを開発した [3]。このコードは SuperComputing 2004 にてゴードン・ベル賞を受賞した。さらにインヤン格子をマントル対流シミュレーションに応用し、球殻マントル対流コードを開発した [4]。そしてこのコードを用いてマントルのレイリー数や内部発熱の強さがマントル対流パターンに及ぼす影響を解明した [4, 5]。これと独立して、マントル対流の新しい解法 ACuTE 法を開発した [6, 7]。この ACuTE 法を用いて熱伝導の温度依存性がマントル対流に与える影響を解明した。地震サイクルシミュレーション [8, 9]に関してすべり応答関数計算のための粘弾性ループの最適化を行い [10]、すべり応答関数計算のための局所細分化有限要素格子の構築を行った。また、磁気回転不安定性の液体金属検証実験に関する計算機シミュレーション [11, 12]を行った。その他に解説・論文 [13, 14, 15]を出版した。

平成 17 年度の成果概要

ダイナモプログラムの改良の一環としてインヤン格子上でのマルチグリッド法を実現した [16, 5]。またインヤン格子法に関連して、球面の合同分割とインヤン格子との関係を明らかにした [17]。箱型ジオメトリにおけるマントル対流計算において ACuTE 法を応用しポストペロブスカイト相転移がマントル対流に及ぼす影響を明らかにした [18]。インヤン格子を用いた球殻マントル対流コードで粘性率の温度・圧力依存性を明らかにした [19]。また、同じコードを用いてマントル物質の混合問題について研究した。陸羽地震を想定した余効変動シミュレーションにより、日本列島下の上部マントルの粘性率を評価した。新しい双極子座標を開発した [20]。また、回転系における見かけの力のオイラー的導出法についてまとめた [21]。その他解説記事・報告 [22, 23, 24, 25]を出版した。

平成 18 年度の成果概要

512 ノードを使った高解像度ダイナモシミュレーションを実行し、世界最高記録となる低い粘性領域 (低エクマン数)でのダイナモシミュレーションに成功した。マントル対流に関しては、我々が開発した二つの独自手法であるインヤン格子と ACuTE 法を融合させ、3次元球殻マントル対流の新しいコードを開発した。プレートとマントルの統一的理解を目指した統合シミュレーション手法の開発に着手し、18年度は粘弾性流体を

高精度・高効率に解く新しい計算手法の開発に成功した。また、地震サイクルシミュレーションの新しい計算手法の開発に着手した。以上が 18 年度の主な成果である。その他、プレート境界でのすべり速度を逆問題として推定する手法を開発した；マントル粘性率に関する分子動力学シミュレーションとマントル対流シミュレーションの連携に関する共同研究を開始した；ミネソタ大学との MOU 共同研究として、マントル最深部でのポストペロブスカイト相転移の存在を考慮したマントル対流シミュレーションとその解析を行った [40, 41]。その他の論文・記事 [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] を出版した。

平成 19 年度の成果概要

コア（地球ダイナモ）シミュレーションにおいては、512 ノードを使った高解像度ダイナモシミュレーションのプロダクトランを実施し、新しい対流構造と磁場の生成（ダイナモ）機構を見いだした。この結果をまとめ、Nature 誌に投稿した [45]。また、インヤン格子と ACuTE 法を組み合わせた新しい球殻マントル対流を完成させ、論文を投稿した [44]。そして、昨年度から開発を始めた粘弾性流体の大変形問題の高精度新解法を完成させ、論文を出版した [47]。これによりプレートとマントルの統合シミュレーションの実現に向けて大きく前進した。また、この手法の精度を定量的に確認することを目的とし、我々は Fluid rope coiling と呼ばれる興味深い現象に注目し、この現象の擬 1 次元数値解モデルを作成する事に成功した。そしてこの数値解と比較することで我々の 3 次元粘弾性流体シミュレーション手法が高い精度を持っていることを証明した [48]。この Fluid rope coiling 問題は今後、粘弾性流体の大変形問題のベンチマークテストとして使われるであろう。また、地震サイクルシミュレーションの有限要素法に基づく新しいコードの基本部分を完成させた。そして、有限要素法による数値解と無限弾性媒質の解析的解を組合せて断層近傍の応力精度を向上させる手法を考案し、コードに実装した。その他、以下の論文を出版した： [33,34,35,36,37,38,39,40,41]。

中期計画中の社会還元など

講演等

- ・ 海洋研究開発機構地球情報館公開セミナー, 2004, 地球の南北が逆転する, 陰山聡
- ・ 地球シミュレータシンポジウム, 2004, ザ・コア地球の南北が逆転するとき, 陰山聡
- ・ 神奈川県柏陽高等学校、サイエンスワークショップ, 2004, スーパーコンピュータ

「地球シミュレータ」, 陰山聡

- ・ 亀山真典, 「地球の中身は冷却中 — マントル対流シミュレーションで探る地球内部の 45 億年—」, 地球情報館第 53 回公開セミナー (2006 年 9 月 9 日@海洋研究開発機構横浜研究所)
- ・ 亀山真典, 「岩をも動かす巨大熱エンジン — 数値シミュレーションで探るマントル対流—」, 第 5 回地球シミュレータセンターシンポジウム (2006 年 9 月 22 日@女性と仕事の未来館)
- ・ 朝日カルチャーセンター講義 (2007/09/08) 『コンパスはなぜ北を指すのか? — 地球シミュレータで探る地球磁場の世界—』 陰山聡
- ・ 地球シミュレータセンターシンポジウム (2007/10/31) 『やわらかい球体: 地球の内部を計算機で探る』, 陰山聡
- ・ 宇宙地球科学研修講義 (広島大学附属高校) (2007/8/9) 『地球史の再現』, 古市幹人
- ・ 航空自衛隊幹部学校研究部研修 (2008/02/06) 『大規模計算機シミュレーション』, 陰山聡
- ・ 慶応義塾大学理工学部数理科学科講義 (2008/2/13) 『地球史の再現』, 古市幹人

教育活動

- ・ 陰山: H17 年度: 東京大学大学院地球惑星科学専攻 非常勤講師
- ・ 陰山: H18 年度より: 九州大学大学院総合理工学専攻連携講座客員准教授。
- ・ 亀山: H18 年度: 愛媛大学客員研究員
- ・ 陰山: H19 年度: 東京大学大学院地球惑星科学専攻 非常勤講師

新聞掲載

- ・ 『しんぶん赤旗』14 面、2008 年 9 月 28 日、記事見出し「地球の真ん中にあつた “鉄のカーテン”」
- ・ 『科学新聞』、2008 年 9 月 5 日、記事見出し「地球磁場生成の新たなメカニズム発見」
- ・ 『日経新聞』、2008 年 8 月 28 日、夕刊、記事見出し「『北が N 極』詳細に分析」
- ・ 『日経産業新聞』、2008 年 8 月 28 日、記事見出し「地球磁場、スパコンで再現」

- ・ 『日刊工業新聞』、2008年8月28日、記事見出し「地球磁場生成を可視化」
- ・ 『読売新聞（神奈川版）』、2007年10月21日、ひと紀行：「地球の謎」と向き合う
- ・ 『AFP 通信』、2007年05月14日配信：「地球のデータを3D化する技術を開発」
- ・ 『朝日新聞』一面、2007年5月8日、「見えた地球の中身」
- ・ 『東京新聞』科学面、2005年5月10日、記事見出し：「地磁気の逆転 解明の夢」
- ・ 『東京新聞』科学面、2005年4月4日、記事見出し：「世界初オーロラ再現 スパコン上に」
- ・ 『日刊工業新聞』、2004年11月18日、記事見出し「海洋機構の地球シミュレータ 3年連続最高性能賞」

雑誌掲載

- ・ 『La Recherche』, “Images de science: L'ALBUM DE L'ANNEE”, p.64, Janvier (2009)
- ・ 『La Recherche』 11月号 (2008)
- ・ 『Nature』 (News & Views), “A sheet-metal geodynamo”, vol.454, pp.1058–1059 (2008)
- ・ 『企業実務』, 「文系アタマにもわかる科学と技術のはなし: 地球内部などに入り込める仮想空間」, 2007年7月号
- ・ 『Nature』 (News in Brief), “Virtual journey to the center of the Earth”, vol.447, p.365 (2007)
- ・ 『Science Window』, 特集「磁石の星に生きる」, 2007年12月号
- ・ 『サブラ』, 「篠山紀信: Tokyo Addict」, 2007年7月号
- ・ 『BlueEarth』 2007年3・4月号、記事タイトル「シミュレーション研究を支えるビジュアライゼーション」
- ・ 『Blue Earth』 2006年11・12月号背表紙
- ・ 『日経サイエンス』 9月号、2005年7月、記事タイトル「立体画像の中で見えるもの、失うもの」
- ・ 『NES ソフトウォーカー』、2005年9月号、記事タイトル「カットオーバーの日」

- ・ 『日経サイエンス』 7月号、2005年5月、記事タイトル「磁気流体方程式で解けたダイナモ」
- ・ 『BlueEarth』 2005年1・2月号、記事タイトル「地磁気から読み解く地球システム」
- ・ 『Japan Inc.』、2003年11月号、記事タイトル「Heavy Weather」

テレビ番組

- ・ サイエンスチャンネル、2007年07月24日放送、番組名『時効なし！未解決問題を追いつめる：地磁気はなぜ反転するのか』（内容：地球磁場と地球ダイナモシミュレーションについて説明した。）
- ・ 青森放送：2007年10月14日、番組名：『ニュートンのリンゴ』、No.157「地球の未来が見える？」～地球シミュレータ～
- ・ NHK 教育：2005年4月16日、「サイエンス・ZERO」
- ・ NHK 教育、2005年04月23日、番組名：「科学大好き土曜塾」

論文

本中期計画中に我々が発表した論文は計58本である（投稿中も含む）。全リストを付録2に載せた。

招待講演・講義

- ・ International Workshop on Geodynamics, Univ. Tokyo, 2004, Geodynamo Simulation by “Yin-Yang Grid” and its Virtual Reality Visualization, Akira Kageyama (Invited talk)
- ・ SciDAC 2005, invited plenary talk, 2005.6.30, New Geodynamo and Mantle Convection Simulation Results from the Earth Simulator Using the Yin-Yang Grid, Akira Kageyama (Invited Plenary Talk)
- ・ Akira Kageyama: ISSS-7 Invited Lecture Talk, 2005, Tutorial introduction to Virtual Reality: What possibility are offered to our field?, 2005.3.30
- ・ 陰山聡：名古屋大学 COE 計算科学夏の学校、「地球シミュレータによる固体地球科学」, 2005.9.13
- ・ 陰山聡, 大野暢亮：上智大学理工学部講義「ビジュアライゼーション（科学技術における応用）」 2005.05.12, 「地球シミュレータデータの可視化」

- ・ 亀山真典：東北大学流体研究所 21 世紀 COE 「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」講義：『「流体」力学で解く「固体」地球科学』2006
- ・ Computer Simulation and Geodynamo (Invited seminar talk), Akira Kageyama, IFREE-All seminar, 2007.02.23
- ・ Geodynamo simulation using Yin-Yang grid on Earth Simulator, (Invited talk) Akira Kageyama, Symposium on Turbulence & Dynamos at PETASPEED, Boulder, CO, USA (2007/10/15)
- ・ Visualization at Earth Simulator Center, (Invited talk) Akira Kageyama, Symposium on Turbulence & Dynamos at PETASPEED, Boulder, CO, USA (2007/10/15)
- ・ Numerical Methods and Visualizations for Solid Earth Simulation, (Invited talk) Akira Kageyama, Univ. Tokyo The 21st Century Center of Excellence (COE) International Symposium: “Predictability of the Evolution and Variation of the Multi-scale Earth System”, Tokyo (2007/12/04)
- ・ インヤン格子を用いた高解像度ダイナモシミュレーション(招待講演), 陰山聡, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会
- ・ 地震発生サイクルシミュレーション—プレート境界地震から内陸地震まで含む系へ—(招待講演), 平原和朗, 兵藤守, 光井能麻, 堀高峰, 加藤尚之, 日本地震学会 2007 年度秋季大会
- ・ 大規模シミュレーションデータの可視化(招待講演), 陰山聡, 第3回学際領域における分子イメージングフォーラム, 早稲田大 (2007/11/13)
- ・ 陰山 聡：Les Houches Summer School (フランス) 夏の学校 “Dynamos” 招待講義：「Numerical Simulation of Geodynamo」(2007/08)
- ・ 陰山聡：第一回シミュレーションスクール, 神戸 (2008/03/18) 招待講演：「地球流体シミュレーション」(2008/03/18)
- ・ 陰山聡(招待講演), 『流体シミュレーション：基本計算手法から並列化と可視化まで』第二回シミュレーションスクール神戸 (2008/06/10)
- ・ Akira Kageyama (Invited Talk), Solid Earth Simulations at Earth Simulator Center, Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns (2008/07/31)
- ・ 陰山 聡(招待講演), 『地球ダイナモの 10 テラスケールコンピューティングと今後の課題』, 平成 20 年度 STEL 研究集会ペタスケールコンピューティング検討会 (2008/08/06)
- ・ Akira Kageyama (Invited Talk), Dynamo Models at Low Viscosity, ISSI

(International Space Science Institute) Workshop on Planetary Magnetism, Bern (2008/09/04)

- ・ 陰山 聡 (特別講演), 『低エクマン領域における MHD ダイナモシミュレーション』研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」(2008/11/14)
- ・ 陰山 聡 (招待講演), 『バーチャルリアリティを用いた対話的 3 次元可視化ソフトウェアの開発とその応用』プラズマ核融合学会年会 (2008/12/02)

受賞

- ・ 2004 年: Gordon Bell Award (Peak Performance), SC2004 Conference, Pittsburgh, “A 15.2 TFLOPS Simulation of Geodynamo on the Earth Simulator”, Kageyama et al.
- ・ 2006 年: 第 2 回日本学術振興会賞。受賞理由: 「計算機シミュレーションによる地磁気の先駆的研究」, 陰山聡
- ・ 2006 年: JAMSTEC 業績表彰, 「インヤン格子の開発」, 陰山聡
- ・ 2007 年: Computer Visualization Contest Award at APCOM'07, Mikito Furuichi and Fumiaki Araki
- ・ 2007 年: 第 48 回科学技術週間, 科学技術団体連合主催パネル展表彰, 「マントル対流のシミュレーション」, 亀山真典

特許

- ・ インヤン格子による特許インヤン格子を可視化プログラムに応用する内容で国内の特許を既已取得した【第 3972994 号】。

その他

- ・ 日本科学未来館企画展協力 2007 年 9 月 22 日から 2008 年 1 月 28 日まで日本科学未来館にて開催された企画展『地下展』に協力し、地球ダイナモシミュレーションの動画とマントル対流シミュレーションの動画を提供した。
- ・ 日経サイエンス記事監修「地磁気はなぜ逆転するのか?」2005 年 7 月号 (陰山)

3. H20 年度成果の概要

3.1 中期計画上の成果

コア（地球ダイナモ）シミュレーション

昨年度に引き続き、主に 512 ノードを使った高解像度ダイナモシミュレーションのプロダクトランを継続し、低エクマン数領域における流れ構造とダイナモ機構を解析した [43,45,50,55,56]。

昨年度見いだしたシート状対流の外側に帯状流が形成されることを今年度新たに発見し、詳細な解析を行った [54]。

また、今年度は、東大情報基盤センターが公募した T2K（東大）HPC 特別プロジェクトに我々のプロジェクトが採択され、地球シミュレータに最適化したこのダイナモコードを、T2K（東大）でどの程度の性能が出るか、また、最低限の最適化でどのような高価が出るかを調べた。その成果は論文 [57] で報告した。

プレート・マントルシミュレーション

本年度は、プレートの表面や破壊を念頭に、移動境界を伴ったストークス流の数値解法に取り組み、また既存の同様の研究との差別化を意識し、大規模計算が可能なマルチグリッド法の改良にも多くの時間を割いた。これらの研究は拡張性が高く、新たに取り組んでいる数値惑星の実現に繋がる研究である。また表層環境の取り扱いに対して surface erosion モデルの数値手法について新規に研究を始めた。

地震シミュレーション

昨年度、基本的部分を作成した地震発生サイクルのシミュレーションコードの 2 次元版を完成させた。また、このコードを利用して、東北地方のような平面歪み近似が成り立つ領域を対象とした不均質場での地震サイクルのシミュレーションを開始した。

マントル対流シミュレーション

インヤン格子に ACuTE 法を組み合わせた我々の新しい球殻マントル対流コードについての論文が PEPI 誌に掲載された [43]。

3.2 国際共同研究

我々はミネソタ大と MOU 共同研究を行ってきた。我々が開発した 3 次元箱型マントル対流プログラム [6, 7] をミネソタ大学計算機に移植し、そのデータ解析と可視化[18,40,42]を行った。以下にその成果を簡単に紹介する。より詳しくは、付録 1 に記した。

まず我々は、マントル最深部での鉍物相転移（ポストペロブスカイト相転移）を考慮したマントル対流シミュレーションのデータ解析に関して共同研究を行った。この相転移がマントル深部の熱構造に与える影響を明らかにし[18]、この相転移とマントル深部からの巨大上昇流（「スーパープレーム」）の起源との関連を調べた[29]。

また、ESC で開発した 3 次元箱型マントル対流プログラム ACuTEMan [6,7] のソースコードをミネソタ大に提供した。ミネソタ大学側では、IBM BlueGene/L、SGI Altix などの並列計算機で ACuTEMan を実行し、この結果 ACuTEMan は地球シミュレータだけでなくこれらスカラー型並列計算機でも高い計算性能を示すことが確認された。

次に我々は、3 次元マントル対流シミュレーションデータの対話的可視化を実現するための研究開発を実施した [42]。ACuTEMan による 3 次元マントル対流シミュレーションを実行させながら、時々刻々出力される計算データにリアルタイムでボリュームレンダリング処理を施し、生成される画像をミネソタ大学設置の PowerWall 型大型スクリーンに表示した。単なる「リアルタイム」な可視化処理に留まらず、可視化パラメータをその都度“interactive”に変更することも可能になっている。この機能は、ESC が提供した 3 次元マントル対流プログラム ACuTEMan を基に、対話的可視化機能及び PowerWall への表示機能をミネソタ大学が追加することで実現した。

3.3 国内共同研究

特になし。

4. 社会への還元状況

新聞掲載（平成 20 年度）

- ・ 『しんぶん赤旗』14 面、2008 年 9 月 28 日、記事見出し「地球の真ん中にあった “鉄のカーテン”」
- ・ 『科学新聞』、2008 年 9 月 5 日、記事見出し「地球磁場生成の新たなメカニズム発見」
- ・ 『日経新聞』、2008 年 8 月 28 日、夕刊、記事見出し「『北が N 極』詳細に分析」

- ・ 『日経産業新聞』、2008 年 8 月 28 日、記事見出し「地球磁場、スパコンで再現」
- ・ 『日刊工業新聞』、2008 年 8 月 28 日、記事見出し「地球磁場生成を可視化」

雑誌掲載（平成 20 年度）

- ・ 『La Recherche』, “Images de science: L'ALBUM DE L'ANNEE”, p.64, Janvier (2009)
- ・ 『La Recherche』 11 月号 (2008)
- ・ 『Nature』 (News & Views), “A sheet-metal geodynamo”, vol.454, pp.1058–1059 (2008)

5. プレス発表などアピールしたい点

プレス発表（平成 20 年度）

「地球シミュレータを使って地球磁場生成の新しいメカニズムを発見」、2008 年 8 月 26 日、海洋研究開発機構東京事務所

論文（平成 20 年度）

2008 年以降、本グループが投稿・発表した論文は計 17 本である（付録 2、論文リストの[42-58]）。

招待講演・講義（平成 20 年度）

- ・ 陰山聡（招待講演），『流体シミュレーション：基本計算手法から並列化と可視化まで』 第二回シミュレーションスクール神戸（2008/06/10）
- ・ Akira Kageyama (Invited Talk), Solid Earth Simulations at Earth Simulator Center, Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns (2008/07/31)
- ・ 陰山 聡（招待講演），『地球ダイナモの 10 テラスケールコンピューティングと今後の課題』，平成 20 年度 STEL 研究集会ペタスケールコンピューティング検討会（2008/08/06）
- ・ Akira Kageyama (Invited Talk), Dynamo Models at Low Viscosity, ISSI (International Space Science Institute) Workshop on Planetary Magnetism, Bern (2008/09/04)
- ・ 陰山 聡（特別講演），『低エクマン領域における MHD ダイナモシミュレーション』

- ョン』研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」(2008/11/14)
- ・ 陰山 聡 (招待講演), 『バーチャルリアリティを用いた対話的 3 次元可視化ソフトウェアの開発とその応用』プラズマ核融合学会年会 (2008/12/02)

インヤン格子法の普及

地球ダイナモとマントル対流用の計算格子として本グループにおいて考案されたインヤン格子は、地球シミュレータセンター内部では、複雑性シミュレーション研究グループ (大気・海洋結合 GCM コード) と表現法研究グループ (球ジオメトリ用可視化ソフトウェア) でも利用されている。また、ETH の P. Tackley 教授も球殻マントル対流コードの計算格子としてインヤン格子を採用している。

我々のインヤン格子ダイナモシミュレーションのソースコードはこれまでに、次の研究者に提供した：

- ・ 【省略】

最近出版された論文・書籍で、(i) インヤン格子法そのものについて、あるいは(ii)インヤン格子法を応用して書かれた論文で、かつ(iii) 我々のグループ以外の著者によって書かれたものは、我々が見つけた限り以下のものがある：

1. Jorn Behrens, Adaptive Atmospheric Modeling—Key Techniques in Grid Generation, Data Structures, and Numerical Operations with Applications. Springer, 2006
2. Peng et al., Conservative constraint for a quasi-uniform overset grid on the sphere, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 2006
3. Xingliang et al., Implementation of the semi-Lagrangian advection scheme on a quasi-uniform over-set grid on a sphere, Advances in Atmospheric Sciences, 2006
4. Hara et al., Segmentation of Images on Polar Coordinate Meshes, Image Processing, 2007
5. Wiegelmann et al., Optimization approach for the computation of magnetohydrostatic coronal equilibria in spherical geometry, Astron. & Astrophys., 2007
6. Wiegelmann, Computing Nonlinear Force-Free Coronal Magnetic Fields in Spherical Geometry, Solar Physics, 2007

7. Jishan Xue, Yan Liu, Numerical weather prediction in China in the new century—Progress, problems and prospects, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 24 (6) pp. 1099-1108, 2007
8. K Hara, R Kurazume, K Inoue, K Urahama, Segmentation of Images on Polar Coordinate Meshes, *ICIP2007 (IEEE International Conference on Image Processing)*, vol. 2 pp. 245-248, 2007
9. Williamson, The Evolution of Dynamical Cores for Global Atmospheric Models, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2007
10. Qaddouri, Optimized Schwarz Methods with the Yin-Yang Grid for Shallow Water Equations, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XVII*, 2008
11. Cote et al., Optimized Schwarz methods in spherical geometry with an overset grid system, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XVII*, 2008
12. Shi Chen, Huai Zhang, David A. Yuen, Shuxia Zhang, Jian Zhang, Yaolin Shi, *Volume, rendering visualization of 3D spherical mantle convection with an unstructured mesh*, *Vis Geosci*, vol.13, pp.97–104, 2008
13. Warren M Washington, Lawrence Buja, Anthony Craig, The computational future for climate and Earth system models: on the path to petaflop and beyond, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367, pp. 833-846, 2008
14. B Kaus, T Gerya, D Schmid, Recent advances in computational geodynamics: Theory, numerics and applications, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 171 (1-4) pp. 2-6, 2008
15. P Tackley, Modelling compressible mantle convection with large viscosity contrasts in a three-dimensional spherical shell using the yin-yang grid, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 171, pp. 7-18, 2008
16. T Nakagawa, P Tackley, Lateral variations in CMB heat flux and deep mantle seismic velocity caused by a thermal–chemical-phase boundary layer in 3D spherical convection, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 271 (1-4) pp. 348-358, 2008

付録 1. 研究内容の解説

インヤン格子

我々は球ジオメトリ用の新しい計算格子「インヤン格子」を考案した（図1）。インヤン格子は、大規模並列計算機に適した格子である。二つの合同な要素格子（イン格子とヤン格子）が境界近くで部分的な重なり合って球面全体を覆う。各要素格子の境界上の値を相互補間することで、一種の境界条件として扱う。つまり、インヤン格子はキメラ格子手法の一種である。

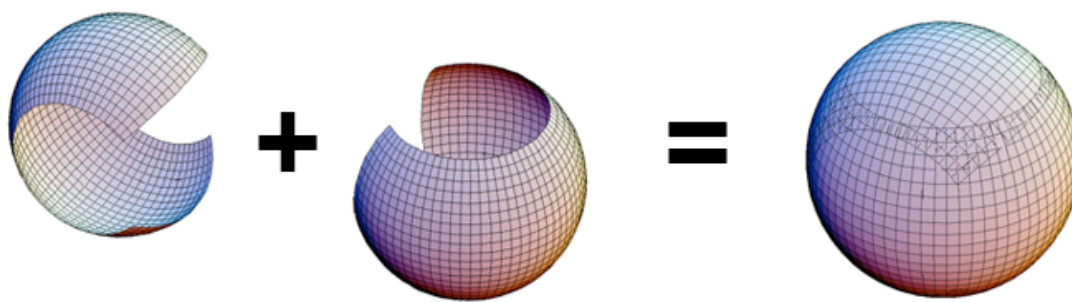


図1：インヤン格子。二つの要素格子を合わせた球面上のキメラ格子。

我々は球面を合同な2つの領域に分割する幾何学的問題（インヤン分割）と、一般化されたインヤン格子との関係も明らかにした。

また、マルチグリッド法をインヤン格子上で実装し、地球ダイナモの磁場の境界条件の改良に関する問題（数学的には単位球の外側領域のポテンシャル問題をノイマン境界条件で解く問題）に適用して、その精度と高速さを確認した。

さらに、インヤン格子とカーテシアン格子をやはりキメラ手法で融合させるコードも開発した。これは地球ダイナモシミュレーションモデルへの内核の組み込みを想定したものである。

インヤン格子に基づいた地球ダイナモシミュレーション

インヤン格子を地球ダイナモシミュレーションコードに適用し、その並列化とチューニングを行った。その結果、ESの512ノードを使った計算で、ピーク性能の46%の演算性能を記録し、2004年のゴードン・バル賞（Peak Performance）を受賞した。これは、イ

ンヤン格子が大規模な並列計算にも適した優れた計算格子であることを証明するものである。

インヤン格子を用いたダイナモコードによる 512 ノード(4096 プロセッサ)を中心とした大規模計算により、高いレイリー数 Ra 、低いエクマン数 E での地球ダイナモシミュレーションを行った。低いエクマン数 (=低い粘性率) のシミュレーションには高解像度が要求されるために実行が困難であった。インヤン格子を用いた我々のダイナモコードは、その高い並列計算性能により、これまでだれも到達できなかったほど低いエクマン数領域におけるダイナモを計算することに成功した。

その結果世界で最も低いエクマン数領域の地球ダイナモシミュレーションの結果、 10 のマイナス 7 乗のエクマン数領域ではジェット流を伴うシート・ブルーム対流構造が形成されること (図 2 上)、およびそれに伴いヘリカルコイル電流構造と磁束管構造が形成されることが分かった (図 2 下)。これらはどれもこれまでの高いエクマン数領域のダイナモシミュレーションでは見られなかった現象である。

この領域における対流構造やダイナモ機構は、高いエクマン数領域のものとは大きく異なる。対流は、 50 本以上の上昇および下降するシート状ブルームから成り、さらにそれは半径方向に枝分かれする。ブルームの幅はどこでもほぼ一定になる。磁場は局所的に束ねられ、磁束管が形成されることが分かった。その結果、電流構造は磁束管を取り巻くヘリカルコイル構造となる。このような磁束管は上昇ブルームに沿って形成されやすく、上昇ブルームが磁場を引き伸ばしダイナモ作用が起こり、磁束管が形成される事が分かった。エクマン数を約 10 倍大きく変化させると、ブルームの幅が太くなることが分かった。また流れに蛇行する部分が見られるようになり、それに伴って蛇行する磁場も見られるようになった。ヘリカルコイル電流構造はおおむね維持されるが、やや崩れた構造になる。

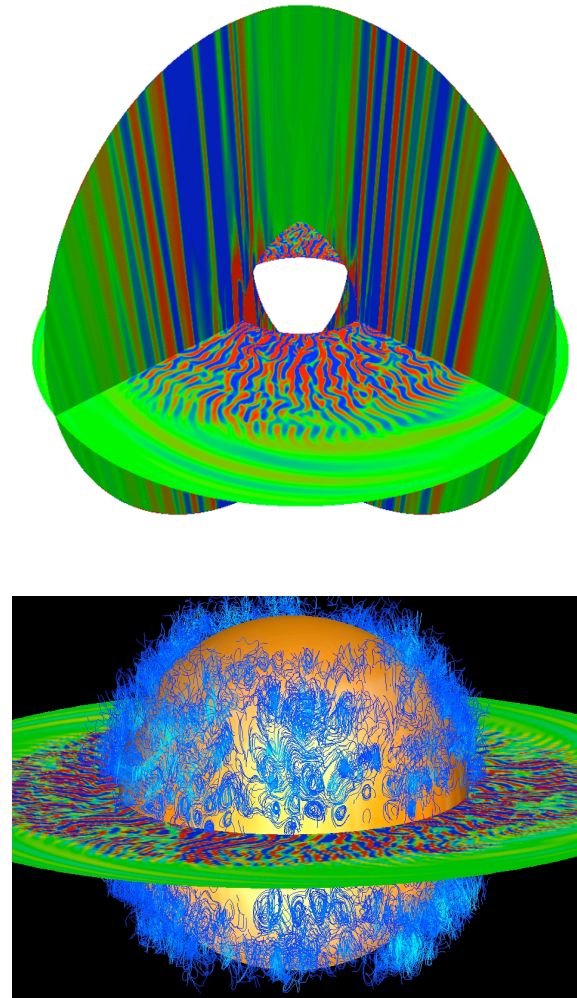


図 2 : (上)低エクマン数領域における外核の対流構造
(下)外核内における電流構造(青い流線)

粘性率が温度と圧力に強く依存する球殻マントル対流

インヤン格子で SIMPLER 法を実装した球殻マントル対流コードを応用して、マントル物質の粘性率の温度依存性の影響について調べた。レイリー数と温度依存性の程度に対してパラメータ探索を行い、得られた対流パターンを分類した結果を図 3a に示す。マントル下面で定義されるレイリー数は現実的な地球マントルのレイリー数の範囲内で調べた。その結果、マントル対流層上下面の粘性率比が $10e4 \cdot 10e5$ 以上の場合では、マントル表面を覆う低温かつ高粘性の境界層 (スタグナント・リッド) が発達する「スタグナント・リッド」型の対流パターンが得られた (図 3d)。スタグナント・リッドの下のマントル対流

はアスペクト比がほぼ 1 の非常に短波長な構造（次数 6 以上が卓越）で特徴づけられる（図 3e）。しかしながら、この短波長構造は地球及び他の地球型惑星のジオイド分布から推測される長波長構造の対流パターンとは異なる。そこでさらに粘性率の圧力依存性の効果を加えた。マントル内での圧力依存性による粘性率の深さ分布は観測からはよく分かっていない。そのため、上記の温度依存性の効果に加え、(i) マントルの粘性率がある深さ（本研究では地球の上部・下部マントル境界に相当する深さとした）で急激に増加する場合と (ii) 下部マントルの粘性率が深さに従って徐々に増加する場合の二種類の計算を行った。また、温度依存性の効果に加え、粘性率の圧力依存性も考慮に入れると、広範囲な粘性率比の領域において次数 1 の対流パターンが得られることを確認した。

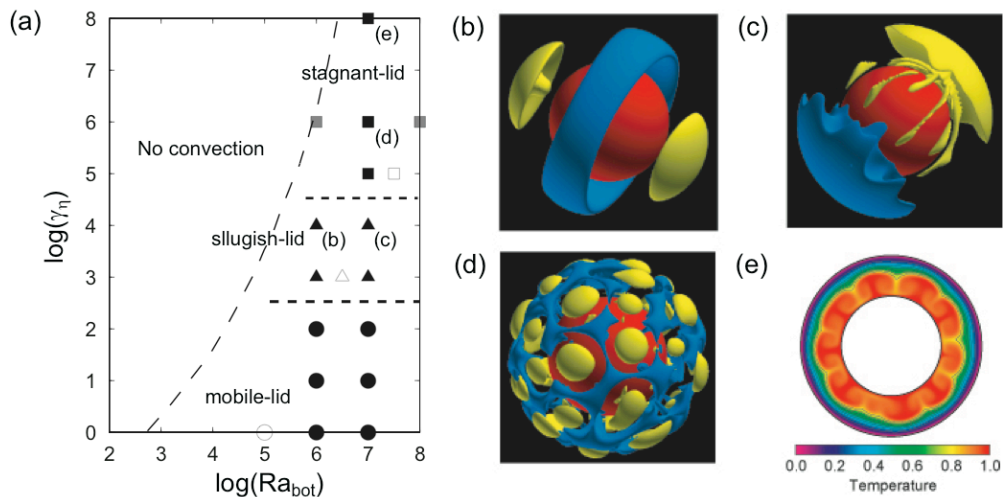


図 3: 粘性率の温度依存性のみの効果を考慮した場合の結果。(a): 様々なレイリー数 Ra と対流層上下面の粘性率比 γ における対流パターンを分類したダイアグラム。(b-d): (a)の中で示した Ra と γ での温度場の三次元分布。青色（黄色）は周囲のマントルより低温（高温）の部分を表す。中心の赤い球はコアの表面を表す。(b) $\gamma < 10e3$ の場合には、マントル表面を覆う低温の境界層が比較的低粘性のため自由に動く“mobile-lid”型の対流パターン、(c) $\gamma = 10e3 \sim 10e4$ では、低温かつ高粘性の「リッド」の動きが遅く、マントル対流が長波長構造で特徴づけられる“sluggish-lid”型の対流パターン、(d - e) $\gamma > 10e4$ では、非常に高粘性のリッドがほとんど動かず、その下のマントル対流の運動とデカップルする“stagnant-lid”型の対流パターンが観察される。

ACuTE 法

マンテル対流理論では、マンテル物質は粘性率の非常に高い ($\sim 10e22 \text{ Pa}\cdot\text{s}$); 水の約 $10e25$ 倍) 非圧縮性流体として近似される。これにより、マンテル内では粘性抵抗と浮力が常に釣り合った状態で流れが起こる。言い換えれば、マンテル内の流れ場を求めるために、速度・圧力に対する楕円形偏微分方程式を各時刻で解く必要がある。これに加え、マンテル物質の粘性率は温度、圧力、変形速度などによって何桁も変化することから、解くべき楕円形偏微分方程式は非常に悪条件なものになってしまう。これらのことから、マンテル対流の流れ場を精度よく高速に解くことが非常に困難であり、マンテル対流シミュレーションでは一般に計算時間の 9 割以上が流れ場の求解に占められている。

そこで我々は、マンテル対流の流れ場を高速かつ効率よく解くための新たな手法 (ACuTE 法) を開発・提案した。ACuTE 法とは、擬似圧縮性法と局所時間刻み法を組み合わせた反復解法であり、運動量と質量の保存則を同時に満たす速度場と圧力場を逐次的に求めていく。この方法は多重格子法と併用することで収束の加速が容易にできるだけでなく、(i) マトリックスを構成する必要がないため使用メモリ量が少ない、(ii) ベクトル化・並列化が容易である、という優れた特徴を持っている。我々の手法の有用性を検証するために、有限体積法に基づく 3 次元矩形領域内でのマンテル対流シミュレーションプログラムを構築した。多重格子法の計算部分に重点的に最適化を施すことで、マンテル対流問題に特有の困難を克服することが可能になった。また、地球シミュレータ 64 ノードを用いた計算でベクトル演算率 98.079%、並列化率 99.8517% を得ることができ、 $1024 \times 1024 \times 256$ メッシュという世界最高レベルの高分解能なマンテル対流シミュレーションが可能となった。

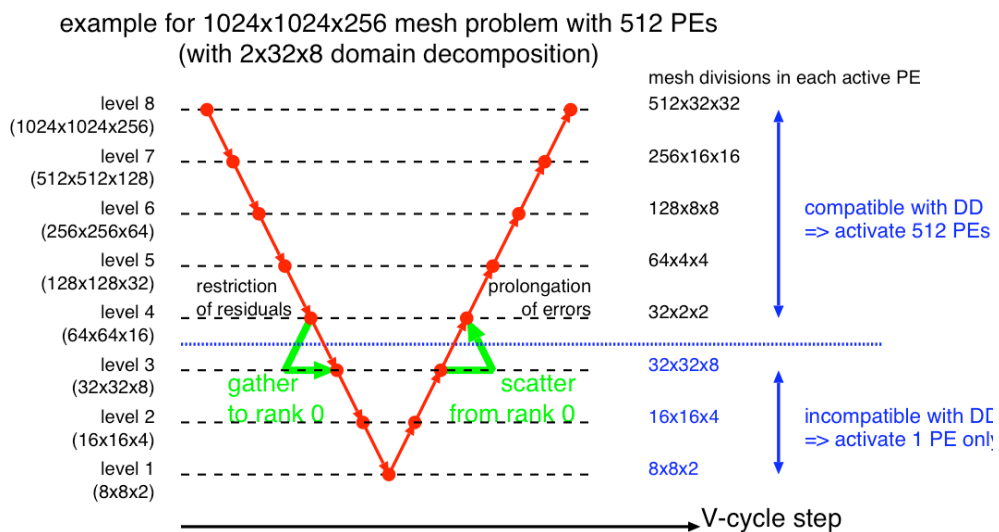


図 4: 大規模並列計算のために最適化された多重格子法計算の模式図。青の破線で示した位置によって、多重格子法計算に用いる格子レベルを 2 つに区別する。破線よりも細かい格子レベルでは、並列計算に用いる PE 数と比べて十分多くの計算格子が存在する。その場合は全 PE を用いて並列に計算を行なう。一方、破線よりも粗い格子レベルでは、計算格子の数がさほど多くない。その場合は 1 つの PE のみ(ここではランクが 0 のもの)を用いて計算を行なう。

ACuTE 法とインヤン格子の融合

我々が最初に開発した球殻マントル対流コードは、インヤン格子を使った新しいコードであったが、このコードは大規模なモデルに適用すると計算速度が極端に遅くなるという課題があった。これはマントル対流の流れ場の求解に用いているアルゴリズムに起因する。この点を解決するために我々は 3 次元球殻マントル対流シミュレーションコードを新たに作り直した。このコードでは流れ場の求解に上述の ACuTE 法を採用した。そのため計算の大規模並列化が可能となった(図 5)。このコードは、インヤン格子と ACuTE 法という我々が独自に開発した二つの計算手法の融合であるという点を強調しておきたい。

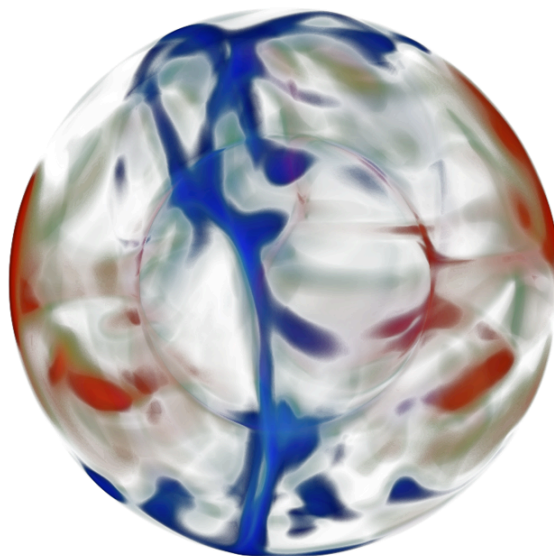


図 4: インヤン格子上での ACuTE 法によるマントル対流シミュレーション

そして、このコードの演算効率を左右する、流れ場解法ルーチンのベクトル化作業を集中的に実施した。この結果、有限体積法ベースのプログラムでは世界最高レベルの空間分解能をもつ 3 次元球殻マントル対流シミュレーションを実現することができた。またこれに

より、本コードの系統的なベンチマークテストを高い空間分解能に至るまで実施し、その高い計算精度を改めて実証した。これと並行して、粘性率の空間変化に対する流れ場ソルバの頑健さの向上を図った結果、粘性率コントラスト 1 万倍程度で予想されている流れ場の長波長化を再現することができた。

粘弾性流体解法 CIP-CSLR-CS 法

大陸移動の原因として知られるプレートテクトニクスは、マンツルの熱対流により駆動される硬い表層の振舞いである。我々は地球史的な時間スケールで見た時のプレートテクトニクスを数値的に再現するためにマンツルとプレートの統合的な連続体シミュレーションを研究開発している。マンツルとプレートは共に岩石を主とした構成であるが、変形機構（レオロジー）が大きく異なるために数値的な取扱いが非常に難しい。そのような困難を克服するために、プレートがもつ複雑なレオロジーを数値的に取り扱う事が出来る新しいタイプの粘弾性流体のコード [47]を開発した。我々は、プレートに弾性的に蓄えられた応力を移流させるために、CIP-CSLR-CS と名付けたセミラグランジュ手法を提案し、また蓄えられた応力の粘性的な緩和を離散化せずに非移流項として解析的に解いた。これらのシミュレーション手法を用いることにより、高精度な移流を行えるだけでなく、粘弾性構成式からくる時間幅の制約を緩和させる事ができる。この新しいシミュレーション手法の有効性は、3次元レイリーテイラー不安定性を用いた数値実験（図 5）を行うことにより示すことが出来た。本年度は、本手法のベースとなる CIP-CLSR を改良に取り組み、急激な勾配や引き裂かれるプロファイルに対し有効な工夫を取り入れることに成功した。我々の提案するシミュレーション手法は、世界中で行われている類似した研究と比較して、大規模計算に適応が可能であるという独自性を持つため注目を集めている。

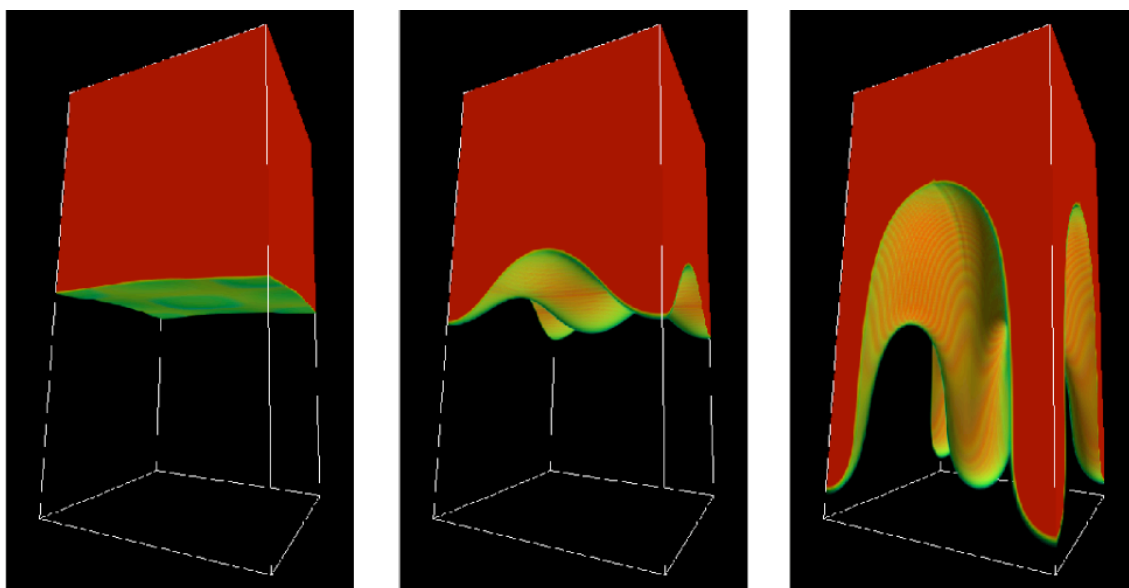


図 5: 新しく開発した粘弾性流体コードにより計算した 3 次元レイリーテイラー不安定性の結果を示す。直方体の箱の上部には粘性が大きくて硬い物質が詰まっており、下部には軽くて粘性がすごく小さい物質が詰まっている。色と透明度を用いて粘性の大きさが表わされている。ある波数の小さな擾乱をもった、上部の硬い物質が時間とともに下に落ちてゆく様子が、少ない移流拡散で再現されていることがわかる。

Fluid rope coiling を用いた大変形粘弾性シミュレーションの精度評価手法の開発

近年、CIP 法をはじめとして、様々なセミラグランジアン法を用いた高精度な移流の取扱いが提案され、それらを用いた連続体計算を行うことにより、プレートとマンツルのように大きく物性の異なる混相系を解くシミュレーション研究が盛んになっている。しかしながら、それらが実際にどの程度信頼できるのかは、単純な擾乱の線形成長解析などが適応できないため、これまであまりまじめに評価されてこなかった。そこで、我々は複雑な 3 次元的大変形を伴う fluid rope coiling 現象に着目し、その擬 1 次元数値解モデルを作成する事に成功した。そして、その 1 次元モデルの結果との比較 (図 6) によって、3 次元シミュレーションモデルの精度の検証を行った [48]。本研究により、これから我々がシミュレーションで再現するプレートテクトニクスなどの複雑な現象に対して、離散化や移流拡散誤差などを含む数値的な取扱いの信頼性を担保する事が可能になった。このような複雑な現象を用いたシミュレーション手法の精度評価の研究は世界に類がなく、プレート・マンツル結合シミュレーションを、信頼のおける科学として追及する点から有効な研究である。

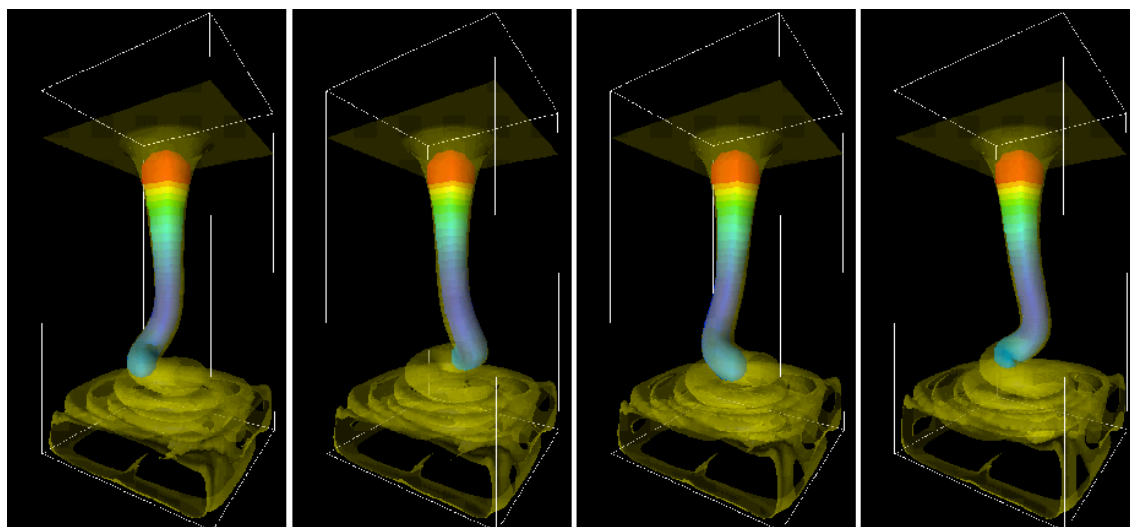


図 6: fluid rope coiling 現象を用いたシミュレーションの精度評価の結果を示す。黄色い半透明の等値面が我々の開発した手法により計算された 3 次元シミュレーションの結果で、色のついた球体がつながったチューブは擬次元モデルの数値解である。3 次元シミュレーションにおいてはロープの外側には、無視してよいほど質量が軽く粘性が小さい物質が詰まっている。黄色い膜とチューブが重なっていることは、両者の結果が一致していることを示している。このことにより、我々の開発した 3 次元シミュレーション手法が精度よくシャープな境界を持つ物質の振る舞いを再現することがわかる。

地震サイクルシミュレーションコードの開発

プレートの沈み込みに伴う巨大地震の断層面への応力蓄積、そこでの地震発生による応力解放といったプレート境界で発生する一連のプロセスを計算機上で再現する試みは、地震サイクルシミュレーションと呼ばれている。地震サイクルシミュレーションでは、断層運動の時間発展を、連続体近似によって断層のずれ量から決定される断層表面力とすべり速度・状態依存摩擦則に従う断層摩擦力との差分により規定する。このため断層の挙動を正確に見積もるためには断層応力を高精度に求めることが不可欠となる。既存の多くの地震サイクルのシミュレーション手法では、ずれに対する応力応答の解析表現が得られている半無限均質弾性媒質などを仮定しているため、各時間ステップでの断層のずれ分布とずれに対する応力応答関数の積を断層面に渡って積分することにより断層表面力を精度良く求めることが可能となっている。しかしながら、日本列島のような沈み込み帯において地

震の発生予測を目的とする現実的なシミュレーションを行うためには、断層近傍の応力場を高精度に評価しつつ、トモグラフィーにより得られてきた弾性不均質、余効変動解析などから見積もられている粘弾性不均質構造などに起因する断層面上での応力変化を取り込めるようにシミュレーションコードを発展させる必要がある。

このため、本グループでは、有限要素法ベースの準静的地震サイクルシミュレーションコードの開発に着手し、19年度前半にそのプロトタイプを完成させた（このシミュレーションコードによる計算事例を図7に示す）。我々のシミュレーションコードでは、準静的な釣り合い状態を各時間ステップにおいて平衡方程式を解くことにより直接評価している。このため、予め弾性・粘弾性不均質媒質中でのすべり応答関数を用意する必要がないことが最大の長所である。有限要素メッシュ上で計算された応力場は、すべり速度・状態依存摩擦則に従う断層上のすべり速度・その他パラメタの時間発展に使用し、更新された断層上のすべりは次ステップの釣り合い式を評価するための断層での境界条件となる。

しかし、先行研究との結果の比較を進めるうちに、有限要素法ベースで開発した我々のシミュレーションコードを粗い空間離散化メッシュで走らせた場合、前述の断層近傍応力の見積もり精度に問題があることが明らかとなってきた。そこで我々は、有限要素解と均質半無限弾性媒質でのすべり応答を使用した解析的応力変化とを重ね合わせることで不均質媒質による応力変化を精度よく計算できる手法を新たに考案し、それをコードに組み込んだ。

具体的には、図8cに示すように均質な断層帯（つまり断層極近傍には不均質が存在しないこと）を仮定すれば、不均質構造を含んだ媒質モデル中での断層応力は、1)均質弾性モデルでの応力変化と2)その余剰分との和として表現できるであろう。ここで2)の余剰分が断層帯を取り巻く不均質構造に起因する応力変化分である。1)の均質弾性モデルでの応力変化は、図8aのような半無限均質媒質であれば解析的に既知であるすべり応答の境界積分によって精度よく評価できる。これに対して、2)の余剰項に関しては離散化した均質弾性媒質（図8b）、不均質媒質（図8c）の2種類の有限要素解析を並列に行い、その計算値の差によって評価する。このとき2種類の有限要素解析に対し同一の空間離散化メッシュを用いて計算を行えば、離散化に起因する誤差を除去し求めるべき不均質起源の応力変化（余剰分）のみを抽出することが可能と考えられる。この手法は、均質弾性媒質でのFEM解と同じ構造の半無限均質弾性媒質で見積もった解析的応力変化との差分によりFEM解析の離散化誤差を評価し、不均質FEM解からその離散化誤差を除去しているとも解釈することができる。

この手法を我々が開発したコードの断層すべりを境界条件としてFEM解析に与える部分に適用した場合を図9に示す。図9dに示されているように、比較的粗い空間離散化を採

用した場合でも細かい離散化のケースと殆ど変わらないオーダーの不均質起源応力変化を抽出できた。このことからこの手法は非常に有効であると判断できる。

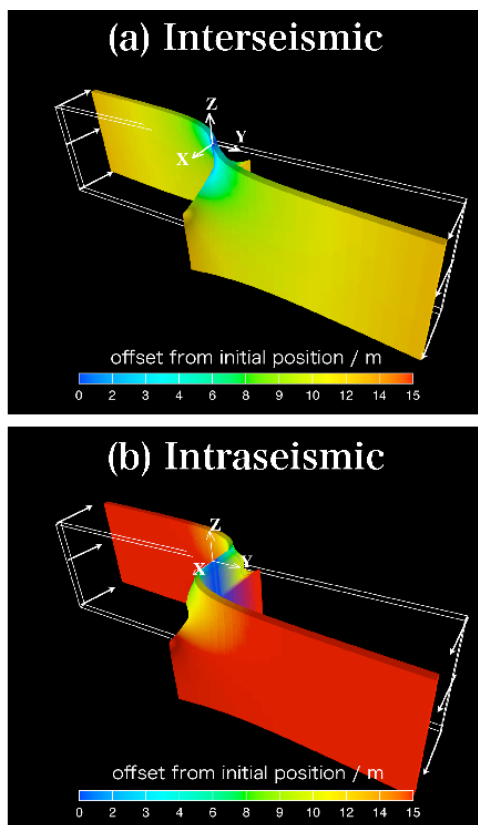


図 7: 三次元の有限要素法による地震サイクルシミュレーション結果の可視化事例。アメリカのサンアンドレアス断層タイプの鉛直な横ずれのプレート境界をモデル化し、プレートの相対運動方向である x 軸 (水平) 方向は周期境界条件を与えている。

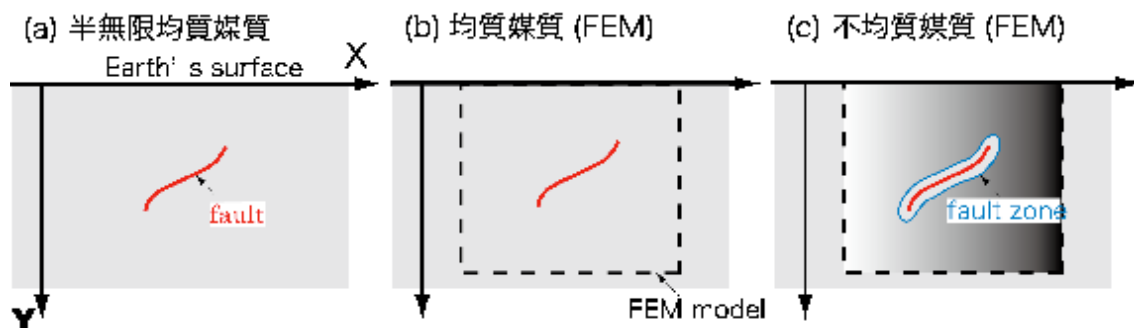


図 8: 不均質構造の影響を抽出するための手法の概念図。(a)断層が均質半無限弾性媒質中に存在するとしたモデル。(b)均質弾性 FEM モデル。半無限媒質から断層を含む領域を切り出し、モデル a と同一な均質弾性媒質の離散モデルに対応させる。(c)不均質 FEM モ

デル。モデル b と同一な空間離散化メッシュに対し不均質な弾性・粘弾性媒質分布を与える。なお青線で囲まれた断層帯はモデル a、b と同じ均質弾性媒質を仮定する。

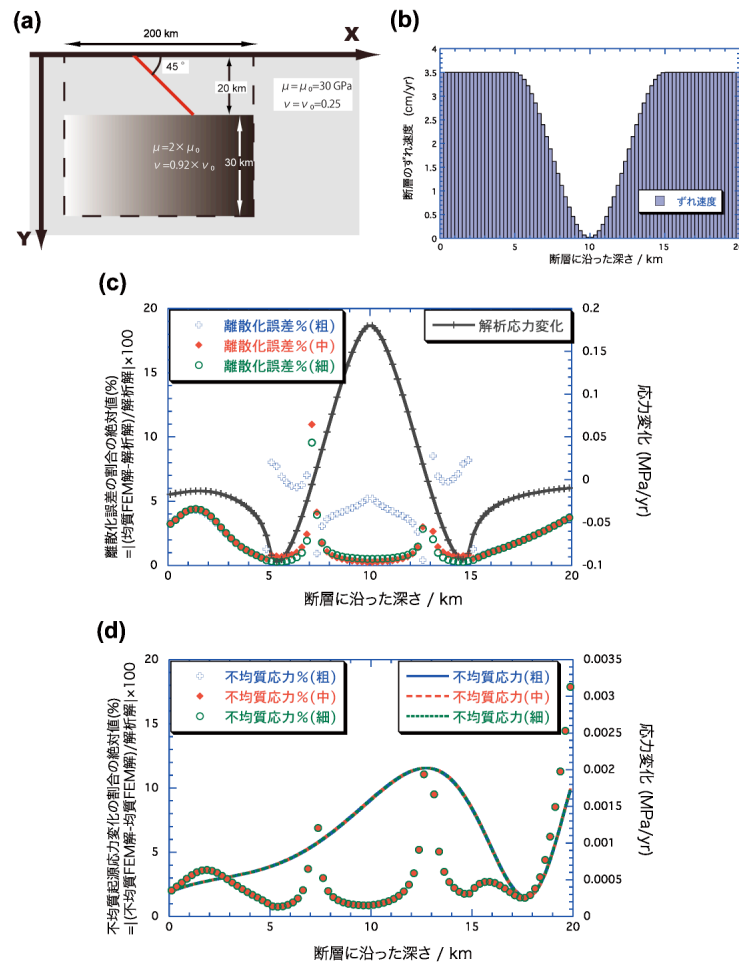


図 9: 提案した不均質媒質起源応力の抽出手法の 2 次元 FEM 解析による検証例。(a) 不均質構造の一例。断層 (赤線) が存在する浅部 (0-20km) とは異なる弾性媒質を深部 (20-50km) に仮定している。(b) 断層に与えたずれ速度分布。断層に沿って釣り鐘型 (浅、深部では一様すべり、中間深さでは固着を表現) のずれ速度分布を、深さ方向に 250m 間隔のボックスカー型基底関数で展開して与えている。トータルの基底関数は深さ方向に 80 である。(なおボックスカー関数を採用した理由は、これまでの多くの地震サイクルのシミュレーションで、この形の基底関数展開を採用しているためである) (c) b のずれ速度分布による断層の剪断応力変化の解析解 (黒十字線) と、その解析解と FEM 解析の誤差。FEM 解析では、断層近傍の FEM メッシュの離散化を基底関数の 1/2 (粗), 1/4 (中), 1/8 (細) に変化させている。もっとも細かいメッシュの場合でも、解析解からは、平均で数%程度の誤差をもち、粗いメッシュでは、固着領域近傍での誤差が 5%程度とかなり大きい。(d) 不均質, 均質の 2 種類の FEM 解の差分により見積もった不均質媒質起源の応力変化およびその解

析解との比率。断層周辺の離散化のレベルに依存せず一定の値が得られている。

ミネソタ大学との MOU 共同研究

【マントル対流に対するポストペロブスカイト相転移の影響】

マントル最深部での鉱物相転移（ポストペロブスカイト相転移）を考慮したマントル対流シミュレーションのデータ解析に関して共同研究を行った。これまでに、この相転移がマントル深部の熱構造に与える影響を明らかにし[18]、この相転移とマントル深部からの巨大上昇流（「スーパープレーム」）の起源との関連を調べた[29]。

また、ESC で開発した 3 次元箱型マントル対流プログラム ACuTEMan [6,7] のソースコードをミネソタ大に提供した。ミネソタ大学側では、IBM BlueGene/L、SGI Altix などの並列計算機で ACuTEMan を実行し、この結果 ACuTEMan は地球シミュレータだけでなくこれらスカラー型並列計算機でも高い計算性能を示すことが確認された。

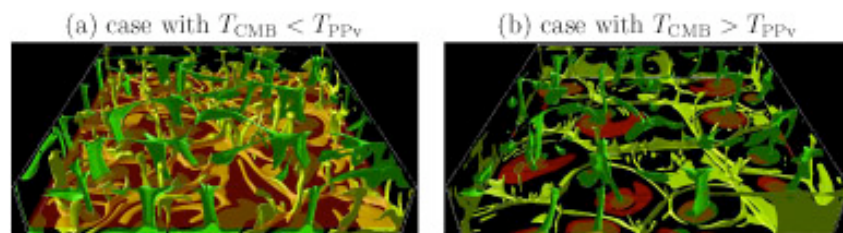


図 10: ポストスピネル相転移とポストペロブスカイト相転移の効果を取り入れた 3 次元箱型マントル対流シミュレーションの例。モデル領域は高さ 3000km、幅 18000km の 3 次元直方体で、上面から深さ約 660km の位置にポストスピネル相転移、下面付近にポストペロブスカイト相転移を導入している。図には温度の水平平均からのずれの等値面とポストペロブスカイト相転移の phase function G (高压相の分率に相当) の等値面を示しており、黄色は水平平均より 75K 高いところ (上昇流に相当)、緑は水平平均より 125K 低いところ (下降流に相当)、赤は $G=0.5$ (ポストペロブスカイト相とペロブスカイト相が平衡にある条件) の等値面を示す。(a) 左は底面の温度 T_{CMB} がそこでのポストペロブスカイト相転移温度 T_{PPv} よりも低い場合、(b) は $T_{\text{CMB}} > T_{\text{PPv}}$ の場合の計算結果を示す。

【マントル対流の対話的可視化】

3 次元マントル対流シミュレーションデータの対話的可視化を実現するための研究開発を実施した [42]。実際の可視化の様子を図 11 に示す。この図は、ACuTE 法による 3 次元マントル対流シミュレーションを実行させながら、時々刻々出力される計算データにリ

アルタイムでボリュームレンダリング処理を施し、生成される画像をミネソタ大学設置の PowerWall 型大型スクリーンに表示したものである。また単なる「リアルタイム」な可視化処理に留まらず、可視化パラメータをその都度 “interactive” に変更することも可能になっている。この機能は、ESC が提供した 3 次元マントル対流プログラム ACuTE マントル対流コードを基に、対話的可視化機能及び PowerWall への表示機能をミネソタ大学が追加することで実現した。

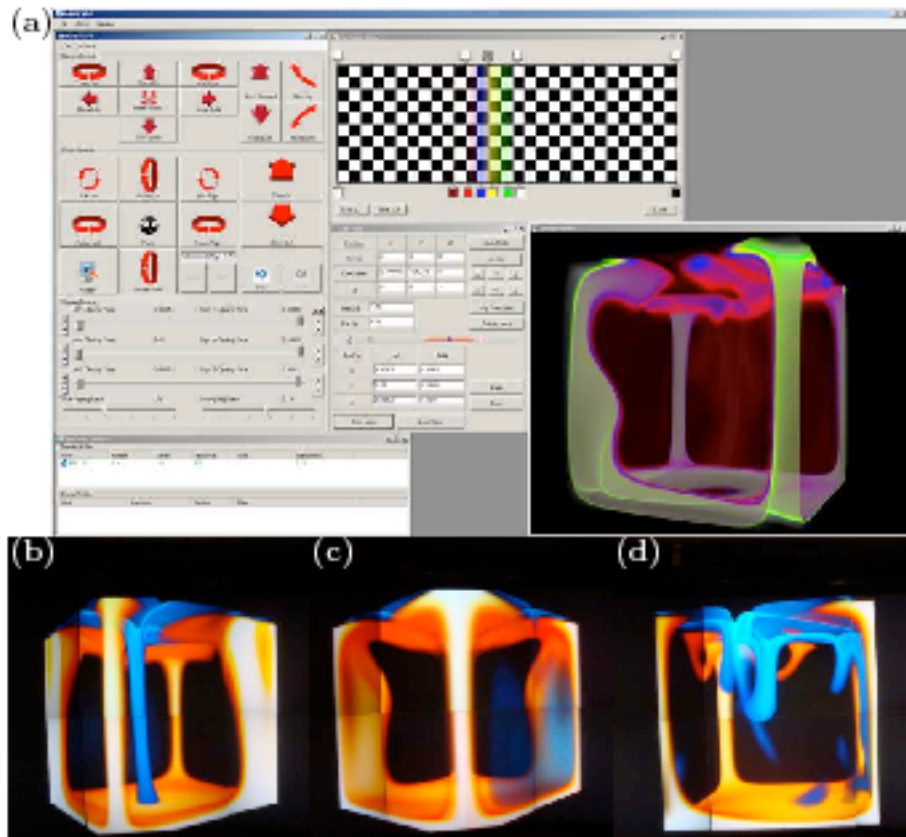


図 11: 3 次元箱型マントル対流シミュレーションデータの “interactive visualization” の実例。(a)は可視化処理 PC 上でのコントロールパネル。シミュレーション及びボリュームレンダリング処理と同時並行で、可視化パラメータの変更も可能である。(b)-(d)はシミュレーションで得られた温度構造をミネソタ大学の PowerWall で表示したものである。

付録 2. 固体地球シミュレーション研究グループ論文リスト

2004 年

- [1] Akira Kageyama and Tetsuya Sato. “Yin-Yang grid”: An overset grid in spherical geometry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(9):1–15, 2004.
- [2] 陰山聡, 固体地球シミュレーション.情報処理, 45(2):139–143, 2004.
- [3] Akira Kageyama, Masanori Kameyama, Satoru Fujihara, Masaki Yoshida, Mamoru Hyodo, and Yoshinori Tsuda. A 15.2 TFLOPS simulation of geodynamo on the Earth Simulator. *Proceedings of the ACM/IEEE SC2004 Conference*, ISBN:0-7695-2153-3, pp. 35 – 43, Nov 2004.
- [4] Masaki Yoshida and Akira Kageyama. Application of the Yin-Yang grid to a thermal convection of a boussinesq fluid with infinite prandtl number in a three-dimensional spherical shell. *Geophys. Res. Lett.*, 31(12), 2004.
- [5] Akira Kageyama and Masaki Yoshida. Geodynamo and mantle convection simulations on the Earth Simulator using the Yin-Yang grid. *J. Physics: Conference Series*, 16:325–338, 2005.
- [6] Masanori Kameyama, Akira Kageyama, and Tetsuya Sato. Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity. *J. Comput. Phys.*, 206(1):162–181, 2005.
- [7] Masanori Kameyama. Acuteman: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator. *J. Earth Simulator*, 4:2–10, 2005.
- [8] 堀高峰, 兵藤守, 平原和朗. 3次元不均質粘弾性媒質中の断層系における大規模地震サイクルシミュレーション実現に向けて. *物理探査*, 161:2069–2090, 2004.
- [9] 兵藤守, 平原和朗. 中部日本内陸への歪み蓄積過程の運動学的モデル化. *月刊地球*, 46:190–196, 2004.
- [10] Mamoru Hyodo and Kazuro Hirahara. Geofem kinematic earthquake cycle simulation in southwest japan. *Pure Appl. Geophys.*, 161:2069–2090, 2004.
- [11] H. Ji, J. Goodman, A. Kageyama, M. Burin, E. Schartman, and W. Liu. Magnetorotational instability in a short couette flow of liquid gallium. *AIP Conference Proceeding*, volume 733, pp. 21–34, 2004.

- [12] Akira Kageyama, Hantao Ji, Jeremy Goodman, Fei Chen, and Ethan Shoshan. Numerical and experimental investigation of circulation in short cylinders. *J. Phys. Soc. Japan*, 73(9):2424–2437, 2004.
- [13] 陰山聡. 自己組織化・複雑性の典型例としての地磁気ダイナモ. 総合研究大学院大学 新分野開拓記, 湯川哲之編, pp. 35–37. 2004.
- [14] A. Kageyama, M. Kameyama, S. Fujihara, M. Yoshida, and M. Hyodo. Development of numerical methods for geodynamo and mantle convection simulations. *Annual Report of the Earth Simulator of Fiscal Year 2003*, pp. 105–108, 2004.

2005 年

- [15] Satoru Fujihara. Spherical mesh generator for elastic deformation simulation of solid earth. *J. Geodetic Soc. Japan*, 51(3):147–158, 2005.
- [16] Akira Kageyama. Yin-Yang grid and geodynamo simulation. *Computational Fluid and Solid Me-chanics 2005*, K.J. Bathe (Editor), pp. 688–692. 2005.
- [17] Akira Kageyama. Dissection of a sphere and Yin-Yang grids. *J. Earth Simulator*, 3:20–28, 2005.
- [18] M. Kameyama and D. A Yuen. 3-d convection studies on the thermal state in the lower mantle with post-perovskite phase transition. *Geophys. Res. Lett.*, 33, 2006.
- [19] Masaki Yoshida and Akira Kageyama. Low-degree mantle convection with strongly temperature-and depth-dependent viscosity in a three-dimensional spherical shell. *J. Geophys. Res.*, 111, 2006.
- [20] Akira Kageyama, Toru Sugiyama, Kunihiko Watanabe, and Tetsuya Sato. *Computers and Geo-sciences*, 32:265–269, 2006.
- [21] Akira Kageyama and Mamoru Hyodo. Eulerian derivation of the coriolis force. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 7(2), 2006.
- [22] 陰山聡, 大淵濟, 草野完也, 高橋桂子, 渡邊國彦, 佐藤哲也. 地球シミュレータの応用成果. *NEC 技報*, 58(4):58–65, 2005.
- [23] Akira Kageyama, Masanori Kameyama, Masaki Yoshida, and Mamoru Hyodo. Computer simulations of geodynamo and mantle convection. *Annual Report of*

the Earth Simulator Center, April 2004— March 2005:133—138, 2005.

- [24] Akira Kageyama and Nobuaki Ohno. Tutorail introduction to virtual reality: What possibilities are offered to our field? Proceedings of ISSS-7, pp. 133—136, Mar 2005.
- [25] 陰山聡, 大野暢亮.地球シミュレータデータの可視化.上智大学理工学部講義テキスト「ビジュアライゼーション (科学技術における応用)」, pp. 30—35, 2005.

2006 年

- [26] Akira Kageyama, Masanori Kameyama, Masaki Yoshida, Mamoru Hyodo, and Mikito Furuichi. Computer simulations of geodynamo, mantle convection, and earthquake computer simulations of geodynamo, mantle convection, and earthquake. Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2005—March 2006, pp. 139—144, 2006.
- [27] 陰山聡.コンパス.学術月報, 59(5):322—323, 2006.
- [28] Nobuaki Ohno, Akira Kageyama, and Kanya Kusano. Virtual reality visualization by CAVE with VFIVE and VTK. J. Plasma Physics, 72:1069—1072, 2006.
- [29] Yuichi Tamura, A Kageyama, H Nakamura, N Mizuguchi, and T Sato. Collaborative virtual reality space for analyzing numerical simulation results. J. Plasma Phys., 72:1065—1068, 2006.
- [30] T. Sugiyama, K. Kusano, S. Hirose, and A. Kageyama. MHD—PIC connection model in a magneosphere-ionosphere coupling system. J. Plasma Phys., 72:945—948, 2006.
- [31] Mikito Furuichi, Fumiaki Araki, and Hideharu Sasaki. Analysis of large-scale three-dimensional scalar data of ocean simulation. Journal of Visualization, 9(4):356, 2006.
- [32] H. Uehara, S. Kawahara, N. Ohno, M. Furuichi, F. Araki, and A. Kageyama. Moviemaker: A parallel movie-making software for large scale simulations. J. Plasma Phys., 72:841—844, 2006.

2007 年

- [33] 陰山聡. コンパスはなぜ北を指すのか? 岩波「科学」, 2007.
- [34] Akira Kageyama, Masanori Kameyama, Mamoru Hyodo, Mikito Furuichi, and Takehiro Miyagoshi. Development of advanced simulation methods for solid earth simulations. Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2006–March 2007, pp. 111–118, Sep 2007.
- [35] M. Tagawa, T. Nakakuki, M. Kameyama, and F. Tajima. The role of history-dependent rheology in plate boundary lubrication for generating one-sided subduction. *Pure Appl. Geophys*, 2007.
- [36] A. Sakaguchi, A. Yanagihara, K. Ujiie, H. Tanaka, and M. Kameyama. Thermal maturity of fold-thrust belt based on the vitrinite reflectance analysis in western foothills complex, western taiwan. *Tectonophysics*, 2007.
- [37] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama. Introduction to virtual reality visualization by the CAVE system. *Advanced Methods for Space Simulations*, edited by H. Usui and Y. Omura, TERRAPUB, Tokyo, pp. 167–207. 2007.
- [38] Kachishige Sato, Naoya Minagawa, Mamoru Hyodo, Toshitaka Baba, Takane Hori, and Yoshiyuki Kaneda. Effect of elastic inhomogeneity on the surface displacements in the northeastern japan: Based on three-dimensional numerical modeling. *Earth Planets Space*, 59(10):183–1093, 2007.
- [39] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama. Scientific visualization of geophysical simulation data by the CAVE VR system with volume rendering. *Phys. Earth Planet. Inter.*, pp. 305–311, 2007.
- [40] David A Yuen, Marc Monnereau, Ulrich Hansen, Masanori Kameyama, and Ctirad Matyska. Dynamics of superplumes in the lower mantle. In D. A. Yuen, S. Maruyama, S. Karato, and B. F. Windley, editors, *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*. Springer, pp. 239–268, 2007.
- [41] David A Yuen, Ctirad Matyska, Ondrej Cadek, and Masanori Kameyama. The dynamical influences from physical properties in the lower mantle and post-perovskite phase transition. In K. Hirose and D. A. Yuen, editors, *The last phase transition*, *Geophysical Monograph*, vol.174, pp. 249-270, American Geophysical Union, 2007.

2008 年

- [42] M. Damon, M. Kameyama, M. Knox, D. H. Porter, D. A Yuen, and E O D Sevre. Interactive visualization of 3D mantle convection. *Visual Geosciences*, doi:10.1007/s10069-007-0008-1, 2008.
- [43] Masanori Kameyama. Simulation studies of solid earth dynamics on the earth simulator – theoretical backgrounds, tools and outcrops. *International COE of Flow Dynamics Lecture Series, Earth Simulator*, Tohoku Univ. Press, Sendai, Japan, 2008.
- [44] Masanori Kameyama, Akira Kageyama, and Tetsuya Sato. Multigrid-based simulation code for mantle convection in spherical shell using Yin-Yang grid. submitted to PEPI, 2008.
- [45] Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi, and Tetsuya Sato. Formation of current coils in geodynamo simulation. *Nature*, vol.454, pp.1106–1109 (2008)
- [46] 陰山聡, 大野暢亮. バーチャルリアリティを用いた対話的3次元可視化ソフトウェアの開発とその応用. *プラズマ・核融合学会誌*, vol.84, 834–843, 2008
- [47] Mikito Furuichi, Masanori Kameyama, and Akira Kageyama. Three-dimensional eulerian method for large deformation of viscoelastic fluid: Toward plate-mantle simulation. *J. Comput. Phys.*, vol.227, pp.4977–4997, 2008
- [48] Mikito Furuichi, Masanori Kameyama, and Akira Kageyama. Validity test of a Stokes flow solver by fluid rope coiling: toward plate-mantle simulation. submitted to PEPI
- [49] 陰山聡, 大野暢亮, 固体地球シミュレーションデータの可視化. *可視化情報学会誌*, vol.28, pp.180–185, 2008
- [50] Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi and Nobuaki Ohno, High resolution geodynamo simulation by Yin-Yang grid and its visualizations. *Proc. International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008 (FCS 2008)*, Nagoya, Kaneda, Sasai and Tachibana Eds. pp.61-68, 2008.
- [51] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama, Region-of-Interest Visualization by CAVE VR System with Automatic Control of Level-of-Detail. submitted to *Comput. Sci. Discovery*
- [52] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama, Visualization of Spherical Data by Yin-Yang Grid. submitted to *Comput. Phys. Comm.*

- [53] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama, Synthesized Visualization of Vector and Scalar Fields in CAVE. submitted to Computers & Geosciences
- [54] Takehiro Miyagoshi and Akira Kageyama, Zonal flow formation in Earth's core, submitted
- [55] Akira Kageyama, Mamoru Hyodo, Mikito Furuichi, Takehiro Miyagoshi, Nobuaki Ohno, Masanori Kameyama, and Yosuke Ito, Development of Advanced Simulation Methods for Solid Earth Simulations, Annual Report of the Earth Simulator Center FY2007, pp.111-120, 2008

2009 年

- [56] 陰山聡, 宮腰剛広, 低エクマン数領域における地球ダイナモシミュレーション, 九州大学応用力学研究所研究集会論文集, 10 pages, 印刷中
- [57] 陰山聡, 大野暢亮, HA8000 システムでの地球ダイナモシミュレーション, 東大情報基盤センタースーパーコンピューティングニュース, 印刷中
- [58] 大谷寛明, 田村祐一, 陰山聡, 大野暢亮, 水口直紀, 伊藤篤史, CAVE 型 3 次元バーチャルリアリティ装置 **CompleXcope** を用いたサイエンティフィック・ビジュアライゼーション, 分子シミュレーション研究会会誌 アンサンブル, 投稿中