

平成21年 6月 30日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2005 ～ 2008

課題番号：17540404

研究課題名 (和文) インヤン格子の開発とその応用

研究課題名 (英文) Development of Yin-Yang grid and its applications

研究代表者

陰山 聡 (KAGEYAMA AKIRA)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・グループリーダー

研究者番号：20260052

研究成果の概要：地球科学では、球面上や球内部に分布した物理量を扱う場合が多い。球領域で定義された数値データを計算機で効率的に扱うためには適切な球面計算格子が不可欠である。本研究では、研究代表者が考案した新しい球面格子「インヤン格子」を発展させ、さまざまな分野で応用した。4年間の研究を通じ、インヤン格子を使った地球ダイナモシミュレーションコード、マンテル対流シミュレーションコード、データ可視化コードなどを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,000,000	0	1,000,000
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,800,000	330,000	3130,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：インヤン格子、計算機シミュレーション、地球ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

- (1) 地球ダイナモシミュレーションやマンテル対流シミュレーションでは、球ジオメトリでの数値計算が不可欠である。球ジオメトリ用の計算手法としては、古くから球面調和関数展開に基づくスペクトル法が用いられてきたが、この手法は大規模な並列計算に適さないという問

- 題があった。そこで、研究代表者は、有限差分法や有限体積法に基づく大規模な並列計算に適した新しい計算格子を2004年に提案し、これをインヤン格子と名付けた。
- (2) 本研究を開始した当初は、インヤン格子を地球ダイナモシミュレーションの計算に応用し始めた直後であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、インヤン格子手法を進展させ、固体地球科学を中心とし、球ジオメトリを扱う様々な研究分野において基本格子として広く使われるようにすることである。

3. 研究の方法

- (1) 計算格子としてのインヤン格子の基本的性質を研究する。
- (2) 地球ダイナモやマントル対流など、球ジオメトリを扱う様々な地球科学のシミュレーションにインヤン格子を応用し、コードを開発する。
- (3) 計算機シミュレーションの計算格子としてだけでなく、可視化など、球形状を扱うその他の数値計算問題にインヤン格子を応用する。

4. 研究成果

- (1) インヤン格子は、二つの合同な要素格子をキメラ手法で組み合わせて球面全体を覆う格子系である。球面を合同二分分割する方法は無限のパターンが存在するので、それに対応して、インヤン格子にも無限のバリエーションが存在するが、大規模並列計算機に最も適したインヤン格子はメルカトル図法の低緯度部分（緯度方向 90 度、経度方向 270 度）を長方形に切り取った形状であることがわかった。
- (2) インヤン格子を用いた地球ダイナモシミュレーションにより、世界最高解像度の地球ダイナモシミュレーション計算を地球シミュレータの 512 ノード 4096 プロセッサを使って実行することに成功した。その結果、低エクマン数領域における地球外核の流れとダイナモ作用

は、これまで考えられていたような円柱状の対流胞による流れ構造によるものとは質的に異なるものであることがわかった。対流は薄いシート状のブルーム構造をもち、その流れが磁力線を引き延ばすことで磁場のエネルギーが生成される様子を解明した。

- (3) インヤン格子を使ったマントル対流コードを 2 種類開発した。
- (4) インヤン格子の普及と共に、インヤン格子上で定義されたシミュレーションデータをインヤン座標で直接可視化するソフトウェアに対する需要が高くなった。そこで、レイキャストアルゴリズムに基づき、インヤン格子上でデータを直接可視化するソフトウェアを開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 33 件)

- (1) 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, 東京大学情報基盤センター スーパーコンピューティングニュース, 印刷中, 2009, 査読無し
- (2) 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報告「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」, 印刷中, 10 pages, 査読無し
- (3) Akira Kageyama, Mamoru Hyodo, Mikito Furuichi, and Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, and Kumiko Hori, Development of advanced simulation methods for solid earth simulations, Annual Report of the Earth Simulator Center

- April 2008 September 2008, 105-112, 2009, 査読無し
- (4) Akira Kageyama, Mamoru Hyodo, Mikito Furuichi, and 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 April 2007–March 2008, 111-119, 2009, 査読無し
- (5) 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, 84, 834-843, 2008, 査読有り
- (6) 陰山聡, 大野暢亮, 『固体地球シミュレーションの可視化』, 可視化情報, 28, 180-185, 2008, 査読無し
- (7) Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi and Nobuaki Ohno, High resolution geodynamo simulation by Yin-Yang grid and its visualizations, Proceedings of FCS 2008 (Frontiers of Computational Science 2008), ISBN: 978-4-9904336-0-4, 61-68, 2008, 査読有り
- (8) Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi, and Tetsuya Sato, Formation of current coils in geodynamo simulations, Nature, 454, 1106-1109, 2008, 査読有り
- (9) Masanori Kameyama, Akira Kageyama, and Tetsuya Sato, Multigrid-based Simulation Code for Mantle Convection in Spherical Shell Using Yin-Yang Grid, Phys. Earth Planet. Inter., 171, 19-32, 2008, 査読有り
- (10) Mikito Furuichi, Masanori Kameyama, and Akira Kageyama, Three-Dimensional Eulerian method for large deformation of viscoelastic fluid: Toward plate-mantle simulation, J. Comput Phys., 227, 4977-4997, 2008, 査読有り
- (11) N. Ohno and A. Kageyama, Scientific Visualization of Geophysical Simulation Data by the CAVE VR System with Volume Rendering, Phys. Earth Planet. Interiors, 163, 305-311, 2007, 査読有り
- (12) 陰山聡, コンパスはなぜ北を指すのか?, 岩波「科学」, 77, 532-538, 2007, 査読無し
- (13) Nobuaki Ohno and Akira Kageyama, Introduction to Virtual Reality Visualization by the CAVE System, Advanced Methods for Space Simulations, pp.167-207, TERRAPUB Tokyo ISBN978-4-88704-138-7, 2007, 査読無し
- (14) 陰山聡, 大規模シミュレーションデータの可視化, JAXA プロシーディングシリーズ JAXA-SP-07-024, 第3回学際領域における分子イメージングフォーラム, CD-ROM, ISSN:1349113X, 2007, 査読無し
- (15) 荒木文明, 大野暢亮, 川原慎太郎, 陰山聡, 研究所紹介海洋研究開発機構地球シミュレータセンター高度計算表現法研究グループ, 可視化情報, 27, 1f33-134, 2007, 査読無し
- (16) 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), 111-118, 2007, 査読無し
- (17) Akira Kageyama, Tooru Sugiyama, Kunihiko Watanabe, and Tetsuya Sato, A Note on the Dipole Coordinates, Computers & Geosciences, 32, 265-269, 2006, 査読有り
- (18) 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. 11, B03412, 1–10, 2006, 査読有り
- (19) N. Ohno, A. Kageyama, and K. Kusano, Virtual Reality Visualization by CAVE with VFIVE and VTK, J. Plasma Physics, 72, 1069-1072, 2006, 査読有り
- (20) 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 Physics, 72, 841-844, 2006, 査読有り
- (21) Y. Tamura, A. Kageyama, H. Nakamura, N. Mizuguchi and T. Sato, Collaborative virtual reality space for analyzing numerical simulation results, J. Plasma Physics, 72, 1065-1068, 2006, 査読有り
- (22) F. Araki, H. Uehara, N. Ohno, S. Kawahara, M. Furuichi, A. Kageyama, Visualization of Large-scale Data Generated by Earth Simulator, J. Earth Simulator, 6, 25-34, 2006, 査読有り
- (23) 陰山聡, コンパス, 学術月報, 59, 322-323, 2006, 査読無し
- (24) Akira Kageyama, Masanori Kameyama, Masaki Yoshida, Mamoru Hyodo, and Mikito Furuichi, Computer simulations of geodynamo, mantle convection, and earthquake, Annual Report of the Earth Simulator Center (April 2005–March 2006), 139–144, 2006, 査読無し
- (25) Akira Kageyama, and Mamoru Hyodo, Eulerian Derivation of the Coriolis Force, Geochem. Geophys. Geosyst., 7, Q02009, 1–5, 2006, 査読有り
- (26) 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, 162–181, 2005, 査読有り
- (27) Akira Kageyama, and Masaki Yoshida, Geodynamo and mantle convection simulations on the Earth Simulator using the Yin-Yang grid, Journal of Physics: Conference Series, 16, 325–338, 2005, 査読有り
- (28) 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, 58-65, 2005, 査読無し
- (29) Akira Kageyama, Nobuaki Ohno, Tutorial introduction to Virtual Reality: What possibilities are offered

to our field?, Proceedings of ISSS-7, 127-136, 2005, 査読無し

- (30) 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, 査読無し
- (31) Akira Kageyama, Yin-Yang Grid and Geodynamo Simulation, Computational Fluid and Solid Mechanics 2005, K.J. Bathe (Editor), Elsevier Ltd., ISBN 0080444768 (Hardcover), pp.688-692, 2005, 査読有り
- (32) 陰山聡, 大野暢亮, 地球シミュレーターデータの可視化, 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)」, pp.30-35, 2005, 査読無し
- (33) Akira Kageyama, Dissection of a Sphere and Yin-Yang Grids, Journal of the Earth Simulator, 3, 20-28, 2005, 査読有り

[学会発表] (計 18 件)

- (1) 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 年 12 月 2 日, 宇都宮
- (2) 陰山 聡 (招待講演), 『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 年 11 月 14 日、九州大学

- (3) Akira Kageyama (Invited Talk), Dynamo Models at Low Viscosity, ISSI (International Space Science Institute) Workshop on Planetary Magnetism, 2008 年 9 月 4 日, Bern, Switzerland
- (4) 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 年 8 月 6 日、海洋研究開発機構 (横浜)
- (5) Akira Kageyama (Invited Talk), Solid Earth Simulations at Earth Simulator Center, Western Pacific Geophysics Meeting, 2008 年 7 月 31 日, Cairns, Australia
- (6) 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 年 6 月 10 日、神戸ポートアイランド
- (7) 陰山 聡 (招待講演), 『地球流体シミュレーション』, 第一回シミュレーションスクール神戸, 2008 年 3 月 18 日、神戸ポートアイランド
- (8) Akira Kageyama (Invited lecture), Numerical Methods for Geodynamo Simulation, Les Houches Summer School “Dynamos”, 2007 年 8 月 15 日, Les Houches, France
- (9) Akira Kageyama (Invited talk), Geodynamo simulation using Yin-Yang grid on Earth Simulator, Symposium on Turbulence & Dynamism at PETASPEED, 2007 年 10 月 15 日、NCAR (Boulder, CO, USA)
- (10) Akira Kageyama (Invited talk),

- Visualization at Earth Simulator Center, Symposium on Turbulence & Dynamos at PETASPEED, 2007年10月15日、NCAR (Boulder, CO, USA)
- (11) Akira Kageyama (Invited talk), Numerical Methods and Visualizations for Solid Earth Simulation, Univ. Tokyo The 21st Century Center of Excellence (COE) International Symposium: “Predictability of the Evolution and Variation of the Multi-scale Earth System”, 2007年12月4日、東大
- (12) 陰山聡 (招待講演), 『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』, 日本地球惑星科学連合 2007年大会, 2007年5月20日、幕張メッセ
- (13) 陰山聡 (招待講演), 『大規模シミュレーションデータの可視化』, 第3回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2007年11月13日、早稲田大
- (14) 陰山聡 (招待講義), 『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—』, 朝日カルチャーセンター講義, 2007年9月8日、新宿
- (15) 陰山聡 (招待講演), 第6回地球シミュレータセンターシンポジウム, 『やわらかい球体: 地球の内部を計算機で探る』 2007年10月31日、東京都港区, 「女性と仕事の未来館ホール」
- (16) Akira Kageyama (Invited Lecture), Tutorial introduction to Virtual Reality: What possibility are offered to our field? ISSS7: 7th International School for Space Simulations, 2005年3月30日、京都
- (17) 陰山聡 (招待講義), 『地球シミュレータによる固体地球科学』, 名古屋大学

COE 計算科学夏の学校、2005年9月13日、愛知県渥美町

- (18) 陰山聡 (招待講義), 『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「ビジュアライゼーション (科学技術における応用)」, 2005年5月12日、上智大学

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称: 構造格子データの可視化方法及びプログラム
 発明者: 荒木文明, 陰山聡
 権利者: 海洋研究開発機構
 種類: 特許
 番号: 3972994
 取得年月日: 2007年6月22日
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陰山 聡 (KAGEYAMA AKIRA)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・グループリーダー
 研究者番号: 20260052

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし