

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247014

研究課題名(和文)大規模数値解析による乱流中の流れ構造の動力学と異方性の解明

研究課題名(英文) Study of the dynamics and anisotropy of flow structures in turbulence by large scale numerical analysis

研究代表者

木村 芳文 (Kimura, Yoshifumi)

名古屋大学・多元数理科学研究科・教授

研究者番号：70169944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,730,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は渦や波といった乱流中の流れ構造の非等方性が重要な役割を果たす宇宙・地球流体乱流に焦点をあて、大規模数値解析を用いて、流れ構造の動力学と特異性の解明を通じ乱流統計理論の構築を目指すことを目的としていた。論文公表に至った主な成果としては(1)安定密度成層乱流におけるエネルギースペクトルの時間発展のメカニズムと(2)渦リコネクションにおける特異性と特徴的な幾何学的性質の抽出、が挙げられる。特に2番目の結果はClay研究所のミレニアム問題の一つであるNavier-Stokes方程式の適切性に大きく関係するものであることが分かってきた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project was to study the dynamics and singularity of flow structures such as vortices and waves in turbulence using a large scale computer simulations. We placed astrophysical- and geophysical turbulence as the main research target because the anisotropy of flow structures plays the essential role in them. As the major achievements of the project, we can raise (1) clarification of the mechanism of development of the energy spectrum for stably stratified turbulence, and (2) understanding of singularity and characteristic geometrical features in the vortex reconnection process. In particular, it is realized that the second result is largely related to the problem of regularity of the Navier-Stokes equations, one of the seven millennium problems by the Clay Mathematical Institute.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 大規模数値計算 渦運動 非等方乱流 流体方程式の特異性

1. 研究開始当初の背景

乱流の理論的研究は Kolmogorov が提唱した一様等方性理論から始まり、常に多様性、精密性、現実性を求め進化を続けてきている。本研究課題は一様等方性乱流を超えた非等方性乱流の解析が極めて重要である宇宙・地球流体乱流および MHD 乱流に焦点をあて、超大規模数値解析を通して、渦や波といった流れ構造の動力学と特異性の解明と乱流統計理論の構築をヘリシティのような幾何学的保存量と結びつけて行うことを最終的な目的としていた。特に成層や回転の効果を含む流れは宇宙・地球流体乱流の要素として宇宙物理、気象、海洋などの研究者によって世界的に活発に研究が成されており、それらを非等方性の基として捉え、非等方性乱流研究の確立を目指す流れは激しい競争状態に入ったといえる。

このような状況において研究代表者の木村は研究協力者の J.R. Herring 博士との共著論文で成層乱流としては当時までに世界最大級のシミュレーション(格子点数 1024^3 、マイクロスケール Reynolds 数 ~ 400)を用いて運動エネルギースペクトルの非等方性について報告する一方、木村は 2012 年の後半に Cambridge 大学の Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences で開催されているプログラム「Topological Dynamics in the Physical and Biological Sciences」にオーガナイザーの一人として参加し、乱流研究の幾何学的視点について多大の刺激と知見を得ていた。

2. 研究の目的

以上の背景を基に申請書に挙げた研究の目的は以下のような内容であった。

[a] 宇宙・地球流体乱流及び MHD 乱流における非等方的な流れ構造の動力学:

(1) 地球流体における回転と成層の乱流統計への影響: 成層および回転の乱流の粘性スケールへの影響を計算し、エネルギースペクトルのベキ $k^{-\alpha}$ を水平方向、鉛直方向について決定する。成層のみの乱流で得られたエネルギースペクトルのベキ遷移に対する回転の影響を求める。さらに減衰乱流のシミュレーションを行い、Kimura & Herring (1996) が強い成層の場合に予想し、近年論争になっているエネルギー減衰率 τ^{-1} の問題に決着をつける。

(2) MHD 乱流における渦線、磁力線のトポロジーと統計則: MHD 乱流では磁場による運動拘束により、大規模構造が形成されやすい。磁場の全磁気ヘリシティ保存則が構造生成に果たす役割を決定する。特に、衛星による精密観測が近年初めて可能となった太陽表面乱流に注目し、大規模数値解析により超精密 MHD 乱流計算を行うと共に渦線と磁力線のトポロジー統計解析を通して、回転球殻 MHD 乱流が大規模な双極子磁場を生成するメカニズムを明らかにする。

[b] 非等方性乱流の統計理論とその数値解析:

(1) 速度場の幾何学的分解とその乱流解析への応用: 3次元のベクトル場を非圧縮場と渦無し場に分解する Helmholtz-Hodge 分解を非等方乱

流の統計的記述に応用し、等方乱流で考察された完結性問題を非等方乱流に拡張して乱流の自由度縮約手法を構築する。

(2) 壁乱流における速度場の対称性と群論的考察: 壁乱流の対数的平均速度分布の普遍性について非平衡場系の乱流場で開発された統計理論に基づき、速度ならびに圧力変動への非等方性の効果を数値および実験データの解析を通じて行い、対数則の傾き(カルマン定数)の理論的導出方法を確立し、その物理的描写を提示する。

[c] 流体方程式の流れ構造のもたらす特異性:

(1) 渦糸、点渦の動力学における特異性と統計性: 2次元の渦点および3次元の渦糸の運動を研究し、自己相似解、複素時間平面上での特異点、方程式のもつ解析性などと Navier-Stokes 乱流のスペクトルや非ガウス統計との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

研究を推進する方法として「大規模数値解析の組織的な実施および結果の理論、実験・観測との比較」をその中心に置き、それを促進するために「連携研究ワークショップ・国際研究集会」の開催を行うという方法をとった。以下にそれぞれの説明を行う。

「大規模数値解析の組織的な実施および結果の理論、実験・観測との比較」:

擬スペクトル法による「成層回転乱流の数値解析」を格子点数 1024^3 を基本にして行う。数値解析のパラメータとして格子点数(空間解像度に対応)の他、外力(定常乱流を得るために注入するエネルギー機構: 2次元(水平), 3次元(等方), 波数), レイノルズ数(流れの特徴的速度、長さスケール、体粘性率で決まる乱流の尺度: マイクロレイノルズ数 ~ 500 , 浮力レイノルズ数 ~ 10)、浮力振動(安定成層の強さを表すパラメーター: 10, 20, 40)、回転角速度(系の回転の強さを表すパラメーター: 10, 20, 40)がある。これらの組み合わせを網羅することによって乱流統計と流れ構造生成における成層、回転の役割を確定する。計算資源として名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ-FX1 ならびに初年度に購入したワークステーションを使用した。具体的な計算内容としては以下の計画を立てた。

(1) 成層回転乱流の数値解析の結果をうけ、理論的に「速度場の幾何学的分解とその分解とその乱流解析への応用」[b](1) を推し進める。研究協力者の Herring 博士を招聘し、速度場の Helmholtz-Hodge 分解と Craya-Herring 分解の関連を解明する。さらに Kelvin-Helmholtz 渦の安定性と特異性の問題を追究し、「流体方程式の流れ構造のもたらす特異性」[c](1) を推し進める。

(2) R. Pelz によって行われた木田の高対称性 Navier-Stokes 流の擬スペクトル法の数値計算を Hou & Li による高次 Fourier スムージングによる de-aliasing 法を用いて継続し、渦度の

特異性を木村によって得られたモデル方程式の自己相似解と比較する。([c](1))

(3) MHD 方程式を回転球殻内で数値積分し、大規模双曲線磁場の発生メカニズムを決定するとともに磁気ヘリシティのエネルギーの減衰における(速度、磁気およびクロス)ヘリシティの影響を決定する。ヘリシティの減衰率に大きな差が出た場合にはスケール分離によるモデル化の可能性を検討する。([a](2))

(4) 流体乱流(粘性および量子)とMHD乱流における渦線、磁力線のリコネクションのシミュレーションを通してそれぞれの特徴を比較精査する。渦線のリコネクションにおける境界付近の粘性の役割、磁力線における電離層での不安定性にメカニズムを考察する。また、磁力線のリコネクションに関して、ひので衛星による太陽表面観測、電波天文学による宇宙乱流の観測などをボックスに含める。([b](2))

(5) 成層乱流の数値解析で得られたデータのウェーブレットによる解析をパリのエコールノルマルの M. Farge 博士のグループと共同で研究する。特に渦構造の果たす役割を情報縮約手法の観点から研究する。([a](1))

「連携研究ワークショップ・国際研究集会の開催」:

大規模数値解析とその理論、実験・観測との比較を促進するために以下のような連携研究ワークショップ・国際研究集会を計画した。

[W1] 地球流体乱流の数値解析と統計理論

[W2] 流体乱流とMHD乱流におけるリコネクションと構造形成

[W3] 流体方程式の大規模数値解析と乱流の未解決問題

[W4] 流体および量子乱流における壁の効果とスケールリング

[W5] 渦運動と流体方程式の特異点

具体的なワークショップの情報については後の項目で述べる。

4. 研究成果

本研究課題の研究期間内に得られた研究成果の内、主なものは以下のようなものである。

[1] 安定成層乱流のエネルギースペクトルの時間発展^[1]:

安定成層乱流の時間発展をフーリエ変換した方程式系を周期境界条件のもとで擬スペクトル法によって数値解析することによって研究した。速度場の解析には速度場を Craya-Herring 分解によって水平モード(ϕ_1)と鉛直モード(ϕ_2)時刻 $t=0$ で静止状態から始め、低波数水平速度のフーリエモードにランダムな外力を加える。初期には成層パラメータ(浮力振動数) N を 0 とおき、各水平面内で同じ二次元乱流を生成し、十分に二次元乱流が発達したところで安定成層を点火する。水平エネルギーと鉛直エネルギーの時間発展に対応する水平エネルギースペクトルの発展には以下のような3つの特徴的な変化の過程(a),(b),(c)が存在することが分かった。

(a) $t=0$ から水平エネルギーが速やかに立ち上がり、その後もゆっくりと増加する。これはエネルギーが逆カスケードによって低波数側に移動していることに対応しておりエネルギー逆カスケードで特徴的な $k^{-5/3}$ スペクトルが低波数領域に、また順カスケードに特徴的な $k^{-3} \sim k^{-4}$ スペクトルが高波数側で形成される。

(b) 安定成層点火後、その影響で鉛直エネルギーが成長すると「渦と波の相互作用」が顕著になり、逆エネルギーカスケードで蓄えられた水平大規模スケールのエネルギーが解放されて平坦なスペクトルに近づき、さらに高波数側のスペクトルが持ち上がり、 k^{-1} に近いスペクトルが観測された。

(c) 渦と波の相互作用がほぼ定常になり、中波数領域にコルモゴロフスペクトルを想起させる $k^{-5/3}$ スペクトルが現れる。しかしながらその係数はコルモゴロフ普遍定数 $K_0 \sim 1.5$ から大きくずれおり、その性質については更なる考察が必要である。

[2] 渦リコネクションにおける特異性と特徴的な幾何的性質の抽出^{[2],[3]}

渦のリコネクションは乱流中の渦運動の素過程であり、流体の特異性と極めて密接な関係を持つ事が知られている。木村はケンブリッジ大学の H.K.Moffatt との共同研究で3次元で8の字型の閉曲線を描く渦の運動を Biot-Savart 積分を行って速度を求め、その速度で渦が移動するというモデル(Biot-Savart モデル)を用いて解析した。Biot-Savart モデルは流体のオイラー方程式の解に対応しており、非粘性の流体における渦運動を考察している事に相当している。この場合、初期条件が滑らかな速度場であっても有限時間で8の字の中心のクロスポイントが近づき、速度場が発散して特異点が発現する。Kimura & Moffatt[2]はその特異点を t_c とするとき t_c の近傍で最小距離 D_{\min} が $(t_c - t)^{1/2}$ 、最大速度 V_{\max} が $(t_c - t)^{-1/2}$ 、そして軸方向の渦伸張 σ_{\max} が $(t_c - t)^{-1}$ とスケールすることを示した。これらのスケールリングはフランスの数学者 J. Leray が Navier-Stokes 方程式の相似特異性を議論するとき仮定したいわゆる Leray スケールリングと一致している。Navier-Stokes 方程式の特異性は今世紀の始めに Clay 数学研究所が公表した7つのミレニアム問題の一つに挙げられている大問題であり、渦のリコネクションの解明がこの問題とも絡んでくる事が分かった。

8の字型渦の特異点近傍での渦線の形状を見ると漸近線の交点で折れ曲がった平面上の双曲線の形に非常に近いことが観測された。そこで傾いた双曲線のモデルとしてテントモデルを提唱してその解析を行ったのが[3]である。テントの面上に描いた双曲線のペアを渦糸の初期条件とし Biot-Savart モデルで数値計算をすると渦糸はテントの稜線を漸近線として近づいていき、頂点付近で最接近し速度場が発散する自己相似解に近い解が得られた。8の字渦と同様のスケールリングが得られる事も分かったが速度と軸方向の

渦伸張は Leray スケーリングよりも若干ではあるがより特異的であることが観測された(図 1)。

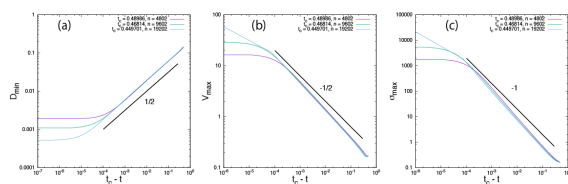


図1:テントモデルにおけるスケーリング

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

1. 木村芳文, 成層乱流の2次元性と3次元性, *パリティ* **33** No.1 44–46 (2018) (査読有).
2. Y. Kimura & H.K. Moffatt, “Scaling properties towards vortex reconnection under Biot–Savart law”, *Fluid Dyn. Res.*, **50** 011409 (2018) (査読有).
3. Y. Kimura & H.K. Moffatt, A tent model of vortex reconnection under Biot–Savart evolution. *J. Fluid Mech.* **834** R1. doi:10.1017/jfm.2017.769 (2018) (査読有).
4. Inoue Satoshi, Kusano Kanya, Büchner Jörg, & Skála Jan, “Formation and dynamics of a solar eruptive flux tube”, *Nature Communications*, **9**, id. 174, 01/2018 DOI:10.1038/s41467-017-02616-8 (査読有).
5. Ali Mehrez, Yoshinobu Yamamoto, & Yoshiyuki Tsuji, “Reynolds number dependence of turbulent structures associated with high-amplitude wall pressure peaks in channel flow”, accepted for publication in *Fluid Dynamic Research*, (2018) Article reference: FDR-100689.R1 (査読有).
6. Noriyuki Furuichi, Yoshiya Terao, Yuki Wada, & Yoshiyuki Tsuji, “Further experiments for mean velocity profile of pipe flow at high Reynolds number”, accepted for publication in *Physics of Fluids*, (2018) PF#POF17-AR-01883R1(査読有).
7. T. Tong, T. Tsuneyoshi, T. Ito, & Y. Tsuji, Instantaneous mass transfer measurement and its relation to large-scale structures in pipe flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **71**, June 2018, Pages 160-169(査読有).
8. Yoshinobu Yamamoto & Yoshiyuki Tsuji, “Numerical evidence of logarithmic regions in channel flow at $Re \tau = 8000$ ”, *Phys. Rev. Fluids* **3**, 012602(R) - Published 29 January 2018 (査読有).
9. Iijima, H.; Hotta, H.; Imada, S.; Kusano, K.; Shiota, D., “Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment”, *Astronomy & Astrophysics*, **607**, id.L2, 4 pp. (A&A Homepage) DOI:10.1051/0004-6361/201731813. (査読有).
10. Vekstein, G.; Kusano, K., “Taylor problem and onset of plasmoid instability in the Hall-magnetohydrodynamics”, *Phys. Plasmas*, **24**, Issue 10, id.102116 (PhPI Homepage), DOI:10.1063/1.4996982 (査読有).
11. Wang, Haimin; Liu, Chang; Ahn, Kwangsu; Xu, Yan; Jing, Ju; Deng, Na; Huang, Nengyi; Liu, Rui; Kusano, Kanya; Fleishman, Gregory D.; Gary, Dale E.; Cao, Wenda, “High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere”, *Nature Astronomy*, **1**, id. 0085 (2017). DOI:10.1038/s41550-017-0085 (査読有).
12. Shukuya, D. & Kusano, K., “Simulation Study of Hemispheric Phase-Asymmetry in the Solar Cycle”, *The Astrophysical Journal*, **835**, Issue 1, article id. 84, 11 pp. (2017) DOI:10.3847/1538-4357/835/1/84 (査読有).
13. Wataru Kubo, Yoshiyuki Tsuji, “Lagrangian Trajectory of Small Particles in Superfluid He II”, *J Low Temp Phys*, June 2017, **187**, Issue 5-6, pp 611-617.(査読有).
14. Marie Farge, Naoya Okamoto, Kai Schneider, Katsunori Yoshimatsu “Wavelet-based regularization of the Galerkin truncated three-dimensional incompressible Euler flows”, *Phys. Rev. E*, **96** (2017) 063119-1, 063119-11(査読有).
15. Naoya Okamoto, Margarete Oliveira Domingues, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, “Adaptive wavelet simulation of weakly compressible flow in a channel with a suddenly expanded section”, *ESAIM: Proceedings and Surveys* **53** (2016)38-48,(査読有).
16. Y. Kimura & H.K. Moffatt, Reconnection of skewed vortices, *J. Fluid Mech.*, **751**, 329–345 (2014) (査読有).
17. Y. Kimura, Magnetic field generated by current filaments, *J. Phys. : Conf. Ser.* **544** 012004 (2014) (査読有).
18. Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu, Kai Schneider, & Marie Farge “Small-scale anisotropic intermittency in magneto-hydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds numbers” *Phys. Rev. E*, **89** (2014) 033013-1, 033013-10, (査読有).

[学会発表](計 71 件)

1. Y. Kimura, “Study of Biot–Savart models for vortex reconnection”, 5th International Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, Mar. 12–13, 2018 Nagoya University Japan.
2. Kyo Yoshida, Yoshiyuki Tsuji, & Hideaki Miura, “Spectrum of Turbulence in nonlinear Schrödinger (Gross–Pitaevskii) equation”, 5th international Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, Mar. 12–13, 2018, Nagoya University, Japan.
3. Y. Kimura & J.R. Herring, “Scaling properties towards vortex reconnection under Biot–Savart evolution”, 70th Annual Meeting of the APS / DFD Denver, Colorado, Nov. 19–21, 2017.
4. M. Farge, N. Okamoto, K. Schneider, & K. Yoshimatsu “Wavelet-based regularization of the Galerkin truncated three-dimensional incompressible Euler equations”, 70th Annual Meeting of the APS / DFD Denver, Colorado, Nov. 19–21, 2017.
5. Y. Kimura & H.K.Moffatt, “Geometric exploration of vortex reconnection under Biot–Savart evolution”, IUTAM Symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and vortices Carry–le–Rouet, France June 13–16, 2017.
6. Y. Kimura, “Interaction of vortices and waves in stratified turbulence”, 7th APTWG International Conference, Nagoya University, 5–8 June 2017.
7. Jiawen Zhang, Takahito Ito, Yoshiyuki Tsuji, Takaya Sato, Takeshi Ooyama, and Kenji Koumura, “On the Droplet Deformation due to the Turbulence Interaction in Shear Flow”, The Ninth JSME–KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, October 27–30, 2017, Okinawa, Japan.
8. Yoshiyuki Tsuji & Yukio Kaneda, “Anisotropic Pressure Correlation Spectra in Turbulent Boundary Layer”, American Association for the Advancement of Science, June 19–23, 2017, Waimea, Hawai’i Island, USA.
9. Yoshiyuki Tsuji, “Small particle motions in super fluid He II: its size effect on particle velocity and acceleration”, Quantum Turbulence Workshop, Aprl 10–12, 2017, National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA.
10. 岡本直也, Marie Farge, Kai Schneider, 芳松克則 「三次元非圧縮オイラー方程式のウェーブレットレギュラリゼーション」 日本流体力学会年会 2017, 2017 年 9 月 1 日, 東京理科大学(葛飾キャンパス)
11. Kai Schneider, Marie Farge, Naoya Okamoto, Katsunori Yoshimatsu, “Wavelet Regularization of 3D Incompressible Euler Flows” the 16th European Turbulence Conference, 22 August 2017, KTH, Stockholm, Sweden.
12. Y. Kimura, “Search for a standard model of vortex reconnection”, Myanmar–Japan Workshop on Mathematics, Yangon University, Yangon Myanmar, 20 Dec. 2016.
13. Y. Kimura & J.R.Herring, “Formation of temperature front in stably stratified turbulence”, 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA, Nov. 20–22, 2016.
14. Y. Kimura, “Search for a standard model of vortex reconnection”, International Workshop on the Multi-Phase Flow; analysis, Modeling and Numerics, Waseda University, Tokyo, Japan, November 07 – 11, 2016.
15. Y. Kimura, “Towards a standard model of vortex reconnection” International workshop on mathematical science for nonlinear phenomena, In honor of Prof. Hisashi Okamoto on his 60th birthday, Hotel Grand Terrace Obihiro Sep. 28 – Oct. 1, 2016.
16. Y. Kimura & J.R.Herring, “Temperature front formation in stably stratified turbulence”, VIIIth International Symposium on Stratified Flows, San Diego, CA, USA, Aug. 29 – Sept. 1 2016.
17. Y. Kimura & J.R.Herring, “Temperature front genesis in stably stratified turbulence”, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 8/21–26, 2016, Montréal, Canada.
18. Y. Kimura, “Interaction of vortices and waves in rotating stratified turbulence”, GTP Workshop on TURBULENCE AND WAVES IN FLOWS DOMINATED BY ROTATION: LESSONS FROM GEOPHYSICS AND PERSPECTIVES IN SPACE PHYSICS AND ASTROPHYSICS, National Center for Atmospheric Research, Boulder CO, USA. 15–19 August 2016.
19. Y. Kimura, “Temperature front genesis in stably stratified turbulence”, Séminaires du LadHyX, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 21 April, 2016.
20. Y. Kimura & H.K.Moffatt, “Reconnection of skewed vortex and magnetic flux tubes”, IUTAM Symposium on “Helicity, Structures and Singularity in Fluids and Plasma Dynamics”, Venice, Italy, 11–15 April, 2016.

21. Y. Kimura, “Energy spectrum of a system of point vortices”, A3 Foresight Program Workshop on Vortex Dynamics and Turbulence Okinawa 2016年3月12日～14日
22. Y. Kimura, “2D Vortex Motion in Turbulence”, The 8th International Conference on Science and Mathematics Education in Developing Countries, Yangon University, Yangon, Myanmar, 4-6 December, 2015.
23. Y. Kimura & J.R. Herring, “Energy transfer in stably stratified turbulence”, 68th Annual Meeting of APS/DFD Boston, USA 23 November, 2015.
24. Y. Kimura, “Burgers vortex system and Hermite polynomials”, The 8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Beijing, China. 10-14 August, 2015.
25. Naoya Okamoto, “Applications of wavelet analysis to turbulence” 2015 International Workshop on Computational Science and Engineering, 23rd May 2015, Nagoya University, Japan.
26. Y. Kimura, “Reconnection of skewed vortex tubes”, Knots and Links in Fluid Flows – from helicity to knot energies, Independent University, Moscow, 27-30 April, 2015.
27. Y. Kimura, “Annihilation of strained vortices”, 67th Annual Meeting of APS/DFD (San Francisco, CA, USA) 25 Nov. 2014.

〔その他〕

連携研究ワークショップ・国際研究集会のタイトル並びに URL:

(1) Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III 2018年3月19～21日(名古屋大学)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2017/turbulence.html>

(2) 流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算 II 2017年1月30～31日(名古屋大学)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2016/fluids.html>

(3) Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence II 2015年8月5～7日(Boulder, Colorado)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2015/geophysics-turbu-2.html>

(4) 流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算
2014年12月8～9日(名古屋大学)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2014/fluids.html>

(5) 量子乱流の新展開: 量子渦の可視化シミュレーションに関するワークショップ
2014年12月11～12日(名古屋大学)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2014/quantum-turb.html>

(6) Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence
2014年3月10～12日(名古屋大学)

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2013/geophysics-turbu.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 芳文(KIMURA Yoshifumi)
名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・教授
研究者番号: 70169944

(2) 研究分担者

岡本 久(OKAMOTO Hisashi) 平成25～26年度
京都大学・数理解析研究所・教授
研究者番号: 40143359

草野 完也(KUSANO Kanya)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
研究者番号: 70183796

辻 義之(TSUJI Yoshiyuki)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00252255

岡本 直也(OKAMOTO Naoya)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 80547414

(3) 連携研究者

金田 行雄(KANEDA Yukio)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号: 10107691

芳松 克則(YOSHIMATSU Katsunoni)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70377802

坂上 貴之(SAKAJO Takashi)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号: 10303603

松尾 宇泰(MATSUO Takayasu)
東京大学・情報理工学研究所・教授
研究者番号: 90293670