

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2005～2008
課題番号：17540419
研究課題名 (和文) 開放散逸系としての海洋・気候システムの熱力学的研究
研究課題名 (英文) Thermodynamic study on ocean-climate system as an open dissipative system
研究代表者
下川 信也 (SHIMOKAWA SHINYA)
独立行政法人・防災科学技術研究所・水土砂防災研究部・主任研究員
研究者番号：40360367

研究成果の概要：

海洋系のような非平衡開放系において、系のもつエントロピー生成率が平衡系における熱力学的ポテンシャルと同等の働きをすることを、海洋大循環モデルを用いた数値実験とその理論的考察から明らかにした。また、雪崩等の粉粒体流動の先端の波状パターンの形成メカニズムは、エントロピー生成率最大の仮説と整合的であることを、微粒子を用いた室内実験とその結果の理論的考察から明らかにした。

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 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 420,000 | 3,520,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：非平衡熱力学、開放散逸系、エントロピー生成率、非線形力学、気候変動、自然災害、海洋循環、雪崩、黒潮、台風

1. 研究開始当初の背景

大気や海洋の流れは乱流と考えることができる。その乱流の状態は、レイノルズ数で規定される。しかし、現在のところ、高レイノルズ数の乱流の状態を完全に予測することは

できていない。例えば、天気予報も一週間程度ならば予測可能であるが、高精度の数値モデルを使っても、また高速のスーパーコンピュータを使っても、季節予報となると予測は困難である。これは、従来の力学的方法、つまり Navier-Stokes 方程式を数値積分する方

法の限界を示している。この予測可能性限界の存在は、かつて Lorenz (1963) が指摘したように、非線形システムに共通して内在する本質的かつ根元的な問題である。この研究の目的は、大気や海洋のような乱流の長期的ふるまいを理解するための新しい方法論を提案することにある。

2. 研究の目的

本研究で注目するのは、従来の力学的な方法論とは異なる視点をもつ熱力学的な方法論である。熱力学的な手法の特徴は系の細部に依存しないマクロな性質に着目して対象を議論するという点にある。本研究では、そのマクロな性質として系の平衡へと向かう割合を示すエントロピー生成率に着目した仮説（エントロピー生成率最大の仮説：以下、MEP と記す）に焦点をあてる。この仮説は、大きな自由度をもつ非線形系がいくつかの可能な運動状態をもつ場合、現実には、その中でエントロピー生成率最大の状態が選ばれるという仮説である (Sawada, 1981)。いくつかの非線形系では、この MEP が成立することが経験的に知られている（例：地球の大気の平均的状态、地球のマントル対流など）。しかし、地球の気候状態を支配する海洋系について MEP を検証した研究は、申請者らの最近のいくつかの研究 (Shimokawa and Ozawa, 2001, 2002) を除いてない。それらの研究においても、MEP の詳細な適用条件や適用可能対象についてはまだよくわかっていない。また、その理論的背景を探る試みもいくつかはなされているが、未だ確定的なものはない。本研究の目的は、それらの解明にある。

3. 研究の方法

本研究では、海洋系において、数値実験によって MEP の詳細な適用条件を明らかにすると共に、MEP のメカニズムを解明することを目指す。より具体的には、長期的な気候に大きな影響を与える海洋の深層循環を対象とする。その深層循環には同一境界条件下の多重解が存在することが知られている。その深層循環の多重解間の遷移の数値実験において、MEP を検証し、遷移を引き起こす擾乱の大きさなどの定量的な条件など MEP の適用条件の詳細を明らかにすることを目指す。また、それらの数値実験の結果も踏まえ、理論的な側面から、MEP のメカニズムの解明を目指す。

さらに、そのほかの地球上の気候変動や自然災害に関わる非線形・非平衡現象、具体的には、雪崩・土石流などの粉粒体流動などへの MEP の適用可能性を検討する。

4. 研究成果

海洋系のような非平衡開放系において、系のもつエントロピー生成率が古典熱力学で知られた平衡系における熱力学的ポテンシャルと同等の働きをすることを海洋大循環モデルを用いた数値実験、及び、その結果の理論的考察から明らかにした。また、エントロピー生成率最大の仮説を応用することにより、海洋大循環の変動が大きな役割を果たしたと考えられている過去の長期的な気候変動（例えば、Dansgaard-Oeschger 振動や Younger Dryas 事件 など）のメカニズムを解明できる可能性を示した。

微粒子を用いた室内実験により、雪崩等の粉粒体流動の先端には粒径が小さいと波状パターンが形成されること、粒径の大小によるパターンの差異は速度境界層の厚さと渦の大きさのバランスから決まることがわかった。また、その実験結果に対する理論的考察により、波状パターンの形成メカニズムは2つの渦の形成→空気抵抗の減少→速度の増加→PE・KE 変換率の増加→渦運動の発達というポジティブフィードバックによること、このメカニズムはエントロピー生成率最大の仮説と整合的であることがわかった。

このほかに、地球上の気候変動や自然災害に関わる非線形・非平衡現象として、黒潮の蛇行・非蛇行の間の遷移や台風の最大可能強度などへの非線形力学的、及び、非平衡熱力学的視点からの考察を行った。

これらの研究成果の一部は、Nature のレビュー記事 (Whitfield, 2005) に紹介され、海洋大循環の不可逆的遷移についての GRL 誌掲載論文 (Shimokawa & Ozawa, 2007) は、米国地球物理学連合の AGU Journal Highlights (http://www.agu.org/sci_soc/jh/2007-06-29.html#ten) に選出されるなど、国内外で高い評価を得た。さらに、本研究計画に関連するテーマで、京都大学基礎物理学研究所・研究会開催資金を取得し、国際シンポジウム”Workshop on Maximum Entropy Production: Earth, Life and Physical Approaches ” (<http://mizu.bosai.go.jp/MEP/wiki.cgi>) を2008年9月10-12日に湯川記念館で開催した。

参考文献：

- Sawada, Y., 1981, Prog. Theor. Phys. 66, 68-76.
Shimokawa, S. and H. Ozawa, 2001, Tellus A53, 266-277.
Shimokawa, S. and H. Ozawa, 2002, Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 128, 2115-2128.
Shimokawa, S. and H. Ozawa, 2007, Geophys. Res. Lett., 34, L12606, doi:10.1029/2007GL030208.
Whitfield, J., 2005, Nature, 436, 905-907.

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 9 件)

Y. Nohguchi and H. Ozawa, On the vortex formation at the moving front of lightweight granular particles, Physica D, 238, 20-26, 2009. (査読有)

松浦知徳・下川信也, 季節変化風応力強制場における準地衡流ダブルジャイヤー海洋の非線形現象, 九州大学応用力学研究所講究録「地球流体における波動と対流現象の力学」, 19ME-S6, 88-97, 2008. (査読無)

S. Shimokawa and T. Matsuura, Chaotic behaviors of oceanic double-gyre under seasonal forcing, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, 38, 809-810, 2008. (査読無)

下川信也・松浦知徳, 季節変化する外力にตอบสนองする海洋のダブルジャイヤーのカオスの挙動について, 日本流体力学会年会講演論文集, 2007, CD-ROM, 2141, 2007. (査読無)

下川信也, 海洋大循環の熱力学とその応用, 物性研究, 88, 513-526, 2007. (査読有)

S. Shimokawa and H. Ozawa, Thermodynamics of irreversible transitions in the oceanic general circulation, Geophys. Res. Lett., 34, L12606, doi:10.1029/2007GL030208, 2007. (査読有)

下川信也・小澤久, 海洋大循環におけるエントロピー生成率のより高い方向への不可逆的遷移, 日本物理学会誌, 60, 867-871, 2005. (査読有)

S. Shimokawa and H. Ozawa, Irreversible transition to a state with higher entropy production in oceanic general circulation,

Mechanics of the 21st Century, CD-ROM, MS6_11732, 2005. (査読無)

S. Shimokawa and H. Ozawa, Entropy production of the oceanic general circulation, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, 35, 807-808, 2005. (査読無)

[学会発表] (計 31 件)

栢原孝浩・飯塚聡・鈴木真一・下川信也, 地球温暖化時の台風活動度と沿岸災害への影響, 防災科学技術研究所第 6 回成果発表会予稿集, P31, 090317, 東京.

栢原孝浩・下川信也・小澤久・松浦知徳, 複数の異なる海面水温偏差を用いた大気大循環モデルによる地球温暖化実験の熱帯低気圧活動度について, 日本気象学会 2008 年度秋季大会予稿集, P312, 081121, 仙台.

S. Shimokawa, Maximum Entropy Production in the Oceanic General Circulation, Workshop on Maximum Entropy Production: Earth, Life and Physical Approaches, 080912, Kyoto.

S. Shimokawa and H. Ozawa, Thermodynamics of irreversible transitions in the oceanic general circulation, Proceedings of ICTAM 2008, 154, 080828, Adelaide.

下川信也・納口恭明・野口伸一・鈴木真一・松浦知徳・小澤久, 2008, 自然災害に関わる非線形現象についての基礎的研究, 防災科学技術研究所・平成 19 年度所内研究発表会・講演要旨集, 3, 80731, つくば.

S. Shimokawa and T. Matsuura, Chaotic behaviors in the response of oceanic double-gyre to seasonal external forcing, Proceedings of 2008 Joint Meeting for Earth and Planetary Science, J160-P002, 080527, Makuhari.

下川信也, 海洋大循環の不可逆的遷移の熱力学, 九州大学大学院理学研究院「非平衡複雑系の科学」シンポジウム, 080313, 福岡.

松浦知徳・下川信也, 季節変化風応力強制場における準地衡流ダブルジャイヤー海洋の非線形現象, 第 9 回地球流体力学研究集会, 080304, 福岡.

栢原孝浩・下川信也・小澤久・松浦知徳, 大

気大循環モデルによる温暖化実験の台風の最大可能強度について、日本気象学会 2007 年度秋季大会予稿集, P357, 071016, 札幌.

松浦知徳・下川信也, ダブルジャイヤーの固有振動と季節変動風応力の非線形相互作用, 日本海洋学会 2007 年度秋季大会予稿集, 181, 070928, 那覇.

H. Ozawa and S. Shimokawa, Maximum extraction and dissipation of available energy: homogeneous turbulence, ocean circulation and tropical cyclones, Computational Modelling of the Earth/Life System: Homeostasis and the Selection of Steady States, A workshop on Daisyworld and the Principle of Maximum Entropy Production, 070908, Lisbon.

下川信也・松浦知徳, 季節変化する外力にตอบสนองする海洋のダブルジャイヤーのカオスの挙動について、日本流体力学会 2007 年度年会予稿集, 120, 070807, 東京.

S. Shimokawa, T. Kayahara, H. Ozawa and T. Matsuura, On analysis of typhoon activities from a thermodynamic viewpoint, Proceedings of AOGS 4th meeting, IWG11-A0008, 070804, Bangkok.

下川信也, 海洋大循環の熱力学と気候変動, 広島大学大学院総合科学研究科・「環境科学セミナー」, 070629, 東広島.

下川信也・納口恭明・松浦知徳・野口伸一・鈴木真一・小澤久, 自然災害に関わる非線形現象についての基礎的研究, 防災科学技術研究所・平成 19 年度所内研究発表会・講演要旨集, P001, 070621, つくば.

下川信也, 海洋大循環における不可逆的遷移の熱力学, 防災科学技術研究所・水土砂部研究会, 070618, つくば.

下川信也・栢原孝浩・小澤久・松浦知徳, 熱力学的視点からの台風の活動度の解析について, 日本気象学会 2007 年度春季大会予稿集, P334, 070515, 東京.

下川信也, 海洋大循環の熱力学とその気候変動への応用, 気象庁・気候影響利用研究会, 061127, 東京.

下川信也, 自然災害に関わる様々な現象への非平衡熱力学の応用, 防災科学技術研究所・台風 P セミナー, 061130, つくば.

S. Shimokawa and H. Ozawa, A thermodynamic explanation for irreversible transitions of the oceanic general circulation, Proceedings of WPGM 2006, OS11G-0113, 060724, Beijing.

H. Ozawa and S. Shimokawa, Maximum entropy production and regular pattern formation in nonlinear non-equilibrium phenomena, Proceedings of 4th MEP meeting on physics and biology, P7, 060706, Splits.

S. Shimokawa and H. Ozawa, A thermodynamic explanation for irreversible transitions of the oceanic general circulation, Proceedings of 4th MEP meeting on physics and biology, P13, 060707, Splits.

下川信也, 海洋大循環の熱力学とその応用, 京都大学基礎物理研究所・「環境物理学」シンポジウム, 060613, 京都.

S. Shimokawa and H. Ozawa, A thermodynamic investigation on analogy between ocean system and living system, Proceedings of 9th Tamura Symposium, PS42, 060523, Tokyo.

S. Shimokawa and H. Ozawa, On analogy between ocean system and living system - A thermodynamic investigation -, Proceedings of Japan Geoscience Meeting 2006, B219-002, 060517, Makuhari.

下川信也・小澤久, 海洋系と生命系の類似性についての熱力学的視点からの考察, 日本物理学会予稿集、第 61 巻、第 1 号, 29pPSB-67, 060329, 松山.

H. Ozawa and S. Shimokawa, Entropy Reduction and Regular Pattern Formation in a Nonlinear Non-equilibrium System: An Energetic Approach, Eos, Transactions AGU, 86 (52), NG23A-0092, 051206, San Francisco.

下川信也・小澤久, 海洋大循環の非可逆的遷移についての熱力学的理解, 日本物理学会予稿集、第 60 巻、第 2 号, 22aPS-43, 050922, 京田辺.

下川信也, 海洋大循環の熱力学とその応用, 防災科学技術研究所・気候変動 P セミナー, 050909, つくば.

下川信也, 海洋大循環の熱力学, 電力中央研究所・環境科学研究所・特別セミナー, 050707, 我孫子.

S. Shimokawa and H. Ozawa, Irreversible transition to a state with higher entropy production in the oceanic general circulation, Proceedings of 2005 Joint Meeting for Earth and Planetary Science, J028-002, 050525, Makuhari.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下川 信也 (SHIMOKAWA SHINYA)
防災科学技術研究所・水土砂防災研究部・主任研究員
研究者番号：40360367

(2) 研究分担者

納口 恭明 (NOHGUCHI YASUAKI)
防災科学技術研究所・防災システム研究センター・総括主任研究員
研究者番号：50360368

小澤 久 (OZAWA HISASHI)
広島大学大学院・総合科学科・准教授
研究者番号：30371743

松浦 知徳 (MATSUURA TOMONORI)
富山大学大学院・理工学研究部・教授
研究者番号：10414400

(3) 連携研究者

佐久間 弘文 (SAKUMA HIROFUMI)
海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・グループリーダー
研究者番号：70359214