

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400465

研究課題名(和文)地球科学現象におけるエントロピー生成率の変動特性の研究

研究課題名(英文)Variation characteristics of entropy production in geophysical phenomena

研究代表者

小澤 久(Ozawa, Hisashi)

広島大学・総合科学研究科・准教授

研究者番号：30371743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：流体系での熱と運動量の輸送に伴うエントロピーの生成率を、運動方程式とエネルギー方程式に基づいて研究した。その結果、流体系の安定性を支配する無次元数が臨界値より小さい場合は、エントロピー生成率が最小の状態が定常状態として実現されるが、臨界値より大きくなると非線形移流項が拡散項より大きくなり、エントロピー生成率が最大の定常状態が実現されることが分かった。また、地球科学現象の例として、熱帯低気圧と地球大気の熱対流の強度と熱輸送特性を熱力学的に研究した。その結果、熱帯低気圧や熱対流の強度とその変動特性が、対流運動に伴うエントロピー生成率が最大になる条件から説明できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Entropy production due to irreversible transports of heat and momentum is investigated based on balance equations of energy and momentum in a fluid system. It is shown that entropy production always decreases with time and becomes a minimum when the dimensionless parameter that determines the stability of a fluid system is less than a certain critical value. In contrast, entropy production tends to be a maximum when the parameter becomes larger than the critical value and nonlinear advection becomes dominant over linear diffusion. As typical examples of geophysical phenomena, we investigate strength and heat transport properties of tropical cyclones and atmospheric convection. It is found that the strength and variation characteristics of these systems can be understood from a state in which the rate of entropy production due to convective movement is at a maximum.

研究分野：数物系科学，地球惑星科学，非平衡熱力学

キーワード：地球科学現象 エントロピー生成 流体系 熱帯低気圧 熱対流

1. 研究開始当初の背景

外からのエネルギーや物質の供給を受けて平衡から離れた状態を維持する非平衡系の統計的な定常状態が、どのような状態に対応するかは、古くから研究されてきた。ノーベル化学賞を受賞したイリヤ・プリゴジンは、非平衡系の定常状態が、エントロピー生成率が最小の状態に対応すると考えた(Prigogine, 1945)。この考えは、エントロピー生成最小説と呼ばれ、平衡に近い線形過程でなり立つことが知られている。しかし、その後の研究から、平衡から離れた非平衡系では、エントロピー生成率が最大の状態が実現される可能性が指摘され議論の的になっていた(Ziegler, 1961; Sawada, 1981; Ozawa et al., 2001, 2003; Dewar, 2003)。しかしながら、どのような条件の下でエントロピー生成率が最小や最大の状態が実現されるのかは、これまでよく分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、外からのエネルギーや物質の供給により駆動される非平衡系におけるエントロピー生成率の変化の仕組みを、理論的及び実験的に詳しく研究し、得られた結果を一般化することで、地球科学現象を含む非平衡系の状態とその変化を支配する性質を明らかにすることである。

3. 研究の方法

流体系での運動量や熱の輸送に伴うエントロピー生成率がどのように変化するかを、運動方程式とエネルギー方程式を基にして理論的に研究する。特に、流体の力学的安定性を支配する無次元数(レイノルズ数やレイリー数)が臨界値より小さい場合と大きい場合について、エントロピー生成率の時間変化の仕方を詳しく研究する。理論的な解析から得られた結果を、地球科学分野の非平衡現象についての観測結果や数値シミュレーションの結果と比較検討する中で、理論的な推定の整合性と適用限界を研究する。

4. 研究成果

(1) 理論研究

流体の運動方程式とエネルギー方程式を用いて、熱や運動量の輸送に伴うエントロピー生成率の時間変化の様子を研究した。流体系の安定性を支配する無次元数(レイノルズ数やレイリー数)が臨界値以下の時は、エントロピー生成率が時間と共に減少し、最終的

な定常状態でエントロピー生成率が最小の状態が実現される。しかし、無次元数が臨界値より大きい場合、熱や運動量の非線形移流項が線形的拡散項より大きくなり、エントロピー生成率が最大の状態が最終的な定常状態として実現されることが分かった。理論的に推定された結果は、ベナール型の熱対流やシアー乱流についての室内実験の結果や数値シミュレーションの結果と良く合うことが示された。これらの結果から、非平衡系の定常状態には2つの異なる定常状態があり、線形的な拡散が支配する領域ではエントロピー生成率が最小の状態が実現されるが、非線形的な移流が支配的な領域ではエントロピー生成率が最大の状態が実現される可能性があることが分かった。

(2) 地球科学現象

典型的な非平衡現象の例として、高温の海水面と低温の大気上層の温度差の下で発達する熱帯低気圧(台風)の形成機構とその経路の特徴を熱力学的に研究した。その結果、熱帯低気圧は、海面水温が27°Cの臨界温度以上の場合、2-3日で急速に発達すること、定常状態での熱から運動エネルギーへの変換効率はカルノー効率の約60%である事、そして定常状態の風速と中心気圧は、循環運動に伴うエントロピー生成率が最大になる条件から説明できることが分かった。また、過去20年間に北太平洋上で観測された熱帯低気圧の強度と経路を統計的に解析した結果、熱帯低気圧は、平均的に見て3-4hPa中心気圧が低くエントロピー生成率の大きい経路を通る傾向があることが分かった。更に、海面水温の変化に伴う熱帯低気圧の強度の変化をエントロピー生成率が最大になる条件から推定した所、1990年代に観測された熱帯低気圧の強度の増加の傾向と良く合うことが示された。これらの結果から、熱帯低気圧は、高温の海水面と上空の温度差によって駆動される循環運動であること、そして熱帯低気圧の強度と経路の特徴が、熱力学的な条件である程度まで説明できることが分かった。

また、太陽の短波放射による地表の加熱と長波放射による大気上層からの冷却の下で発達する大気中の熱対流とその熱輸送過程を熱力学的に研究した。大気の放射場の中で、対流熱輸送に伴うエントロピー生成率が最大になる条件から熱輸送率と温度分布を推定した所、地球上での観測結果と良く合うことが分かった。また、放射による地表の加熱率が変化した時の地表温度の応答を、同じ条件から推定した結果、推定された応答が、観

測結果や数値モデルシミュレーションの結果と良く合うことが分かった。これらの結果から、大気中の熱対流の平均的な状態とその変動特性が、エントロピー生成率が最大になる条件から理解できる可能性が示された。

以上の成果は、6件の英文論文として国際学術誌上に発表され、また Springer 社及び McGraw Hill 社から出版された書籍にその内容が出版された他、3件の招待講演を含む国内外の国際学会や国際ワークショップでその概要が発表された。本研究の成果は、海外の研究者からも注目され、オーストラリアの New South Wales 大学とドイツの Max Planck 研究所の研究者から依頼を受け、国際的な共同研究を行った。今後も学際的な国際共同研究を推進していく予定である。

<引用文献>

Prigogine, I., *Bulletin de la Classe des Sciences, Academie Royale de Belgique* **31**, 600, 1945.

Ziegler, H., *Ing. Arch.* **30**, 410, 1961.

Sawada, Y., *Prog. Theor. Phys.* **66**, 68, 1981.

Ozawa, H., Shimokawa, S., and Sakuma, H., *Phys. Rev. E* **64**, 026303, 2001.

Ozawa, H., Ohmura, A., Lorenz, R.D., and Pujol, T., *Rev. Geophys.* **41**, 1018, 2003.

Dewar, R., *J. Phys. A* **36**, 631, 2003.

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 6 件)

1. Ozawa, H., and S. Shimokawa, Thermodynamics of a tropical cyclone: generation and dissipation of mechanical energy in a self-driven convection system, *Tellus, A* **67**, 24216, 1–14, 2015. [査読有] (doi:10.3402/tellusa.v67.24216)

2. Sakuma, H., and Y. Fukumoto, On formal stability of stratified shear flows, *Proc. Res. Inst. Math. Sci.*, **51**, 605–633, 2015. [査読有] (doi: 10.4171/PRIMS/166)

3. Shimokawa, S., T. Kayahara and H. Ozawa, Maximum potential intensity of typhoon as information for possible natural disaster, *Asian J. Environ. Disas. Manag.*, **6**, 69–81, 2014. [査読有]

4. Shimokawa, S., T. Murakami, S. Iizuka, J. Yoshino and T. Yasuda, A new typhoon bogussing scheme to obtain the possible maximum typhoon and its application for assessment of impacts of the possible maximum storm surges in Ise and Tokyo Bays in Japan, *Nat. Hazards*, **74**, 2037–2052, 2014. [査読有] (doi:10.1007/s11069-014-1277-2)

5. Shimokawa, S., and T. Kayahara, Difference among data of damage reports of typhoon disaster, *J. Disas. Res.*, **8**, 473–483, 2013. [査読有]

6. Ozawa, H., and S. Shimokawa, General Characteristics of entropy production in nonlinear dynamic system, *Proc. 12th Joint European Thermodynamics Conference*, 121–126, 2013. [査読有]

[学会発表] (計 4 件)

1. Ozawa, H., Thermodynamics of non-equilibrium phenomena: fluid turbulence, thermal convection and the general circulation, *Workshop on Thermodynamic Optimality Principles*, Vrije University, Amsterdam, the Netherlands, 8–10 November, 2016. [招待講演]

2. Ozawa, H., Thermodynamic properties of non-equilibrium phenomena: turbulence, thermal convection and the general circulation, *Max Planck Institute International Colloquium*, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany, 22 September, 2016. [招待講演]

3. Shimokawa, S., T. Murakami, S. Iizuka, J. Yoshino and T. Yasuda, A new typhoon bogussing scheme and its application for assessment of impacts of the possible maximum storm surges in Ise, *Japan Geoscience Union Meeting*, HSC24-P07, Makuhari, 22–26 May, 2015.

4. Ozawa, H., and S. Shimokawa, General characteristics of entropy production in nonlinear dynamic systems, *12th Joint European Thermodynamics Conference*, Brescia, Italy, 1–5 July, 2013. [招待講演]

[図書] (計 4 件)

1. Niven, R. K., and H. Ozawa, Entropy production extremum principles, *Handbook of Applied Hydrology* (V. P. Singh, Ed.), McGraw-Hill, New York, 321–327, 2017. [査読有]
(ISBN: 978-0-07-183509-1)
2. Shimokawa, S., and T. Matsuura, Oceanic oscillation phenomena: Relationships with synchronization and stochastic resonance, *Geophysics: Principles, Applications and Emerging Technologies* (G. Aiello, Ed.), Nova Science Publishers Inc., New York, 123–136, 2016. [査読有]
(ISBN: 978-1-63484-831-2)
3. Ozawa, H., and S. Shimokawa, The time evolution of entropy production in nonlinear dynamic systems, *Beyond the Second Law: Entropy Production and Non-Equilibrium Systems* (R. C. Dewar, C. H. Lineweaver, R. K. Niven and K. Regenauer-Leib, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 113–128, 2014. [査読有]
(ISBN: 978-3-642-40153-4)
4. Fukumura, Y., and H. Ozawa, Entropy production in planetary atmospheres and its applications, *Beyond the Second Law: Entropy Production and Non-Equilibrium Systems* (R. C. Dewar, C. H. Lineweaver, R. K. Niven and K. Regenauer-Leib, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 225–239, 2014. [査読有]
(ISBN: 978-3-642-40153-4)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 久 (OZAWA Hisashi)
広島大学・大学院総合科学研究科・准教授
研究者番号：30371743

(2) 研究分担者

下川 信也 (SHIMOKAWA Shinya)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員
研究者番号：40360367

(3) 連携研究者

佐久間 弘文 (SAKUMA Hirofumi)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー
研究者番号：70359214

(4) 研究協力者

Robert K. Niven (NIVEN Robert)

Associate Professor, The University of New South Wales, Canberra, Australia

Axel Kleidon (KLEIDON Axel)
Group Leader, Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany