

液体金属の熱対流における水平磁場強度とパターンのレジームダイヤグラム Regime diagram of thermal convection pattern under horizontal magnetic field in liquid metal

柳澤 孝寿^{1*}, 宮腰 剛広¹, 山岸 保子¹, 浜野 洋三¹, 櫻庭 中², 田坂 裕司³, 武田 靖³

Takatoshi Yanagisawa^{1*}, Takehiro Miyagoshi¹, Yasuko Yamagishi¹, Yozo Hamano¹, Ataru Sakuraba², Yuji Tasaka³, Yasushi Takeda³

¹ 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, ² 東京大学大学院 理学系研究科, ³ 北海道大学大学院 工学研究院
¹IFREE, JAMSTEC, ²School of Science, Univ. Tokyo, ³School of Eng., Hokkaido Univ.

The study on the nature of thermal convection in liquid metals under a magnetic field is important for the dynamics of planetary metallic cores. Electric current is induced when a flow of liquid metal crosses a magnetic field, and it generates Lorentz force. The Lorentz force changes the force balance, making the flow behavior different from no-magnetic field situations. In general, viscosity of liquid metals is very low and their flow easily becomes turbulent, but when a magnetic field is applied on liquid metals, it makes anisotropic flow structure with suppression of turbulence depending on its direction and intensity. To quantify the effect of magnetic field on flow patterns, we performed laboratory experiments of Rayleigh-Benard convection by using liquid gallium, with various intensities of a uniform horizontal magnetic field B . The vessel we used has a square geometry with aspect ratio five. Flow patterns with their time variation were visualized by ultrasonic velocity profiling method. The range of Rayleigh number (Ra) is from critical value to 100 times above it. The range of Chandrasekhar number (Q), which is proportional to the square of the intensity of B , is from 0 to 1000.

We recognized five flow regimes depending on Ra and Q , that is, (1) isotropic large-scale cell pattern, (2) anisotropic cell with larger flow velocity perpendicular to B , (3) short-period oscillatory behavior of rolls aligned in the direction of B , (4) continuous transitions between roll numbers in the vessel, and (5) steady 2-D rolls. In (4), reversals of the flow direction in rolls were observed several times. These behaviors are summarized as a regime diagram of convection patterns in relation to Ra and Q . The key mechanisms for the variation are the enhancement of two-dimensionality and increase of roll number for larger Q situations. These flow regimes can be classified by Ra/Q , that is the ratio of buoyancy force to the Lorentz force. If buoyancy force is much larger than Lorentz force, the flow is turbulent and isotropic structure is dominant. Short-period of oscillation (3) is observed where the ratio Ra/Q is lower than 100. Continuous transitions of roll numbers (4) are observed at Ra/Q between 10 and 30, and convection pattern keeps steady roll (5) at Ra/Q smaller than 10. We also performed numerical simulations of thermal convection with imposed horizontal magnetic field. Both the Prandtl number and magnetic Prandtl number of the working fluid are set small to simulate liquid metals. Our numerical result successfully reproduced all regimes that observed in the experiments.

Keywords: thermal convection, liquid metal, magnetic field, pattern

MHD Rayleigh-Benard 対流における流れ場の周期的な逆転 Periodic flow reversals in a MHD Rayleigh-Benard convection

井垣 一人^{1*}, 田坂裕司¹, 柳澤 孝寿², Sven ECKERT³, 村井祐一¹
Kazuto Igaki^{1*}, Yuji TASAKA¹, Takatoshi Yanagisawa², Sven ECKERT³, Yuichi MURAI¹

¹ 北海道大学大学院工学院, ² 海洋研究開発機構, ³ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

¹ Graduate school of engineering, Hokkaido University, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

A spontaneous reversal of flow direction in Rayleigh-Benard convection is an active topic to help our understanding of natural flow motions in the Earth. In a previous study, our group has investigated Rayleigh-Benard convection in a shallow liquid metal layer with relatively large aspect ratio under horizontal magnetic field. The dimension of the fluid layer is 200*200*40 mm giving an aspect ratio of 5. Applying the horizontal magnetic field suppresses isotropic turbulent fluctuation of the flow and thus quasi-two dimensional convection rolls appear. These rolls aligned with the direction of applied magnetic field. In the experiments with modifying both Rayleigh number, Ra and Chandrasekhar number, Q , various convection states were observed on the diagram with Ra and Q . Spatio-temporal velocity profile measurements by Ultrasonic Velocity Profiling indicate 3, 4, or 5 steady rolls regimes and also transitional states between each steady state. We reported that flow reversals occur spontaneously in these transitional states and it is a random event regarding time (Yanagisawa, et al., PRE, 2011).

In this paper, we have reported a new regime and also mentioned that a certain inertial factor of the system can regularize the flow reversals into a very periodic event. We have conducted the Rayleigh-Benard experiments in the same vessel as previous one but using other magnetic generator at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). This system can generate much larger magnetic field than the previous employed system. Thus, we could extend a regime diagram (in Ra - Q parameter space) to higher region regarding Chandrasekhar number, Q . In large Q -space, a new flow regime, six rolls, could be observed. The higher magnetic field also strongly suppressed the onset of convection and fluctuation of the convection rolls. These results are well supportable for our previous results and understanding. On the other hand, there is also remarkable difference from our prediction. The flow reversals occurred as very periodic events in this new system. Additionally, we found that the rolls are not always parallel to the magnetic field, but they are with an angle to the magnetic field direction. The most different point between the old and new system is magnitude of non-uniformity of the magnetic field. The new one has a little larger difference of intensity of the magnetic field in the test section. Therefore, one of the possible reasons of the inclination and periodic flow reversals is the non-uniformity of the applied magnetic field. Also, other factors are possible reasons such as small tilting of the fluid vessel to the magnetic field lines and higher values of the Chandrasekhar number Q . From detailed analysis of the velocity information, it will be discussed how the inertial factor of the system like non-uniformity of the magnetic field works on the regularization of the originally random event.

キーワード: 液体金属, 流れ場の逆転, 水平磁場, 規則化

Keywords: liquid metal, flow reversal, horizontal magnetic field, regularization

内部発熱対流のセルパターン形成に与える回転場の影響

Influence of rotating field on the cell pattern formation of internal heating convection

山口 勝大^{1*}, 田坂裕司¹, 大石義彦¹, 村井祐一¹, 柳澤 孝寿²

Yudai Yamaguchi^{1*}, TASAKA, Yuji¹, OHISHI, Yoshihiko¹, MURAI, Yuichi¹, Takatoshi Yanagisawa²

¹ 北海道大学, ² 海洋研究開発機構

¹Hokkaido University, ²JAMSTEC

Influence of a background rotation on the transition of flows is one of the interesting topics in fluid mechanics. The influence in thermal convections also has great importance not only for fluid mechanics but also for geophysics to understand large scale phenomena in the planets. Many studies about influence of rotation on Rayleigh-Benard convection have been carried out. For example, formation of the spiral flow in convection cells is theoretically predicted by Chandrasekhar(1961). On the other hand, only a few research of the effect of rotation on the internally heating convection has investigated. In generally, convection cells occurring in the internally heating convection expand as increasing Rayleigh number. Conversely, convection cells shrunk as the effect of background rotation. As described above, the increasing rotation speed and increasing Rayleigh number provide the opposite effect on the size of convection cells. The aim of this study is to clarify how the convection pattern changes with changing balance of these opposite effect.

This experimental study deals in the response of thin horizontal fluid layer with background rotation. The bottom boundary of the layer is composed by an insulating glass plate. And the top boundary is contact with copper plate where the temperature is kept constant by circulating water from a thermo-static bath. Internally heat generation is induced by Joule heating due to passing electric current in the ionic fluid. After electrifying to fluid layer, rotation immediately is begun.

Four characteristic flow patterns were observed with modifying the rotation speed and power of the heat generation. First one is that there are stable, polygonal convection cells. Second, flow pattern is irregular without forming any cell structure. Third is the unsteady cell pattern formation: roll or polygonal cells form but immediately change into different form with combining and dividing. The fourth one is conduction state without convection.

We have organized the results by Rossby number showing the relationship between the Rayleigh number and Taylor number. The convection cell is stable when Rossby number is greater than 3 or less than 0.7. But the cell pattern formation becomes unstable and repeats split and join when the Rossby number is around zero. In addition, when Taylor number is greater than 1000, convection does not form cell structure even if Rossby number is greater than 3.

When we focus on the parameter region of stable convectional cell, flow structure and cell size differ between Rossby number is less than 0.7 and greater than 3. The shape of convectional cell is regular hexagon and the flow inside the cell takes large distortion due to Coriolis force when Rossby number is less than 0.7, in other word the effect of rotation is relatively stronger than the effect of convection. On the other hand, when Rossby number is greater than 3, the shape of cell is irregular polygon and the flow inside the cell has little distortion as the effect of rotation.

キーワード: 自然対流, 内部加熱, 回転場, 対流パターン

Keywords: natural convection, internally heating, rotating field, flow pattern

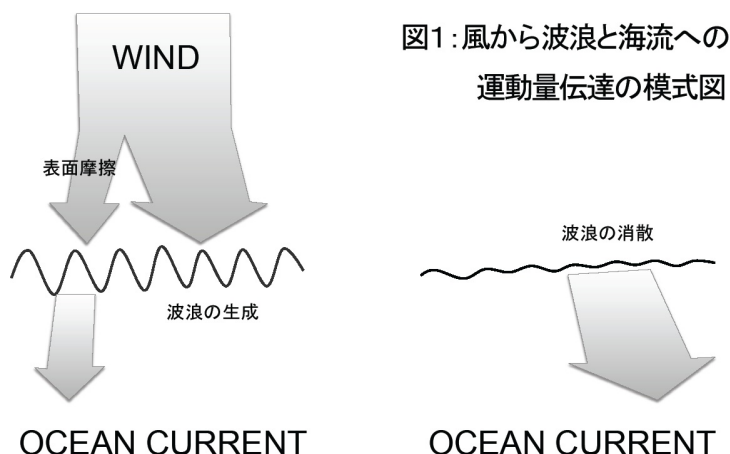
風波の生成と消散を経由した風から海流への運動量の伝達 The effect of wind waves on the upper ocean circulation

相木 秀則^{1*}, Richard J. Greatbatch²
Hidenori Aiki^{1*}, Richard J. Greatbatch²

¹ (独) 海洋研究開発機構・地球環境変動領域, ²GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany
¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany

海洋の表層流（以下海流）に対する風応力は、従来の海洋モデルでは風速に基づくバルク式によって求められている (Large and Pond, 1981)。しかし近年の研究では、台風のような強風下を考慮して、波浪による海面の粗度、波齢、波向に依存するバルク式の使用が提案されている。いくつかの方法があるが、本研究では風の運動量の大部分がまず波浪に渡され、波浪のエネルギーが（砕波などによって）消散する時に波浪の運動量が海流に渡されるという理論（図1）を採用して発展させる。この方法の副産物として波のエネルギー消散率が得られるので、これを海洋混合層の乱流運動エネルギーのソース項として与えることを視野にいれている。

Keywords: Wind waves, Wind stress, Wave dissipation, Momentum transfer, Lagrangian coordinates



くりこみ摂動法を用いた重力波の自発的放射メカニズムの理論的解明

A theoretical study on the mechanism for spontaneous gravity wave generation using the renormalized perturbation method

安田 勇輝^{1*}, 佐藤 薫¹, 杉本 憲彦²Yuki Yasuda^{1*}, Kaoru Sato¹, Norihiko Sugimoto²¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ² 慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Hiyoshi Department of Physics, Keio University

重力波 (GW) は地形性と非地形性に分けられるが、非地形性 GW は、地形性 GW に比べ力学的記述が難しく、放射メカニズムがよく分かっていない。近年、系の時間発展の中で、ほぼバランスした流れから自発的に GW が放射されることが分かってきた (O'Sullivan & Dunkerton 1995 など)。現在、自発的放射メカニズムを記述する最有力理論はバランス調節理論 (Plougonven & Zhang 2007) だが、以下の不完全な点を持つ。[1] GW の波源に対する物理的意味の説明を放棄している。[2] 摂動論等を用いていない。[3] GW 放射による反作用を無視している。そこで本研究は、これらを全て解決した新たな理論を導出し、その妥当性をモデルのシミュレーションの結果を用いて確認した。

先行研究 (Snyder et al., 2007; Viudez 2007 など) の調査から、渦の流れにより GW の対地周波数がドップラーシフトし、ほぼバランスした流れに付随するスレイブ成分と時空間スケールが一致した時に、準共鳴により GW が自発的に放射されるという新しいメカニズムを着想した。

本研究では、GW を簡潔に記述するため、線形渦位 (q)、水平発散 (d)、非地衡流渦度 (g) を用いて理論を構築した。ここで、渦の流れは q が作る流れであり、スレイブ成分は、 d と g のうち q の分布によって診断的に決定される成分と定義した。 d と g は、線形論において高い対地周波数成分を含む。この成分の非線形項は、 q と同等の時間スケールでゆっくり変動する成分を含むので、これも導出する方程式に組み込む必要がある。そこで、GW とこのゆっくり変動する成分の効果の両方を考えるため、ドップラーシフトが働く変数 (d^{GW}, g^{GW}) と働かない変数 (d^{diag}, g^{diag}) を別に考えて、 q と合わせて五種類の変数で、準共鳴による GW 放射を記述する理論を構築した (問題 [1] 解決)。

この理論の定式化において、特異摂動法の一つであるくりこみ摂動法を用いた (問題 [2] 解決)。さらに、 d^{GW}, g^{GW} に対しては、渦の流れ場に対する固有モード展開を用いて、ドップラーシフトの効果を組み込んだ。これにより自発的に放射される GW が記述できる。一方、高い対地周波数成分を記述する d^{diag}, g^{diag} に対しては、そのままくりこみ摂動を適用した。その結果、 d^{diag}, g^{diag} は、スレイブ成分と GW 放射の反作用からなる診断的な変数となった。導出した理論式は、GW 放射の反作用により q が変化する様子も記述しており、問題 [3] を解決したことになる。

理論の妥当性の評価に用いるため、気象庁非静力学モデル (以下 NHM) を用いて、流体内部の孤立渦対 (ダイポール) 中における準定常的な GW の自発的放射を再現した。初期条件としてベータ面上の三次元 QG 系の厳密解であるモドン解を与え、完全圧縮の非静力学方程式系の数値積分を行った。先行研究と同様に、ダイポールの中心にある局所ジェットの出出口において、上下に GW が放射されることが確認できた。GW は鉛直方向に対しほぼ対称で、ダイポールの縁に向かい波長が短くなり渦に巻き込まれる構造を持っている。

導出した理論式が、NHM で再現した自発的放射を正しく表現するかを調べるために、GW を含まない初期値のモドン解の q を用いて、ソースを計算し、くりこみ群方程式を積分した。その結果、ジェットの出出口の GW が再現され、NHM の結果と理論計算による結果が整合的であることが確認できた。

キーワード: 自発的放射, 重力波, くりこみ摂動法

Keywords: spontaneous radiation, gravity wave, renormalized perturbation method

Penman-Monteith 式における潜熱輸送プロセスについての考察 Consideration of latent heat transport processes in the Penman-Monteith equation

古屋 姫美愛^{1*}, 酒井 敏¹, 中村 美紀²
Kimie Furuya^{1*}, Satoshi Sakai¹, Miki Nakamura²

¹ 京都大学大学院 人間・環境学研究科, ² 愛知教育大学保健環境センター

¹Graduate School of Human and Environmental Study, Kyoto University, ²Center for Campus Health and Environment, Aichi University of Education

潜熱輸送プロセスには乱流拡散と分子拡散の2つのプロセスが考えられるが、植物群落のように空間スケールが大きい(数十から数千メートル規模)ところからの潜熱輸送についてはふつう乱流拡散プロセスのみを考慮した式で潜熱輸送量を見積もり、分子拡散を考慮した式で見積もることはほとんどない。

しかし古屋他(2011年連合大会)は現実の地表面付近の顕熱輸送過程は乱流拡散よりも分子拡散が寄与しており、顕熱輸送量推定式には分子拡散プロセスを考慮した推定式のほうがより現実のメカニズムに近いことが示唆された。このことは潜熱輸送についても言える可能性がある。

そこで潜熱輸送量を見積もるために広く利用されている Penman-Monteith 式(Monteith, 1968)において乱流拡散、分子拡散のそれぞれを仮定した場合にどのような推定値になるかを計算した。なお比較の基準となる値には古屋他(2012年連合大会)で報告した遮断蒸発量を用いた。

結果、遮断蒸発量との一致は日によってかなりばらつきがあったが、乱流拡散および分子拡散を仮定した推定値は大体似た値を示した。

計算過程で乱流拡散について値は Rutter et al.(1971)を参考したが、その値は必ずしも物理則にのった値を使っているわけではなく、任意定数により観測値に合うように値を決めるのに対し、分子拡散では任意定数はなく、その点を考慮すると、顕熱輸送だけでなく潜熱輸送についても分子拡散を仮定した推定方法のほうが現実在即していると示唆された。

キーワード: 潜熱, 熱輸送, 陸面過程, 大気境界層, 植生

Keywords: latent heat, heat transport, land surface process, atmospheric boundary layer, vegetation