

## 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<sup>1\*</sup>, 宮腰 剛広<sup>1</sup>, 山岸 保子<sup>1</sup>, 浜野 洋三<sup>1</sup>, 櫻庭 中<sup>2</sup>, 田坂 裕司<sup>3</sup>, 武田 靖<sup>3</sup>

Takatoshi Yanagisawa<sup>1\*</sup>, Takehiro Miyagoshi<sup>1</sup>, Yasuko Yamagishi<sup>1</sup>, Yozo Hamano<sup>1</sup>, Ataru Sakuraba<sup>2</sup>, Yuji Tasaka<sup>3</sup>, Yasushi Takeda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, <sup>2</sup> 東京大学大学院 理学系研究科, <sup>3</sup> 北海道大学大学院 工学研究院  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup>School of Science, Univ. Tokyo, <sup>3</sup>School 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<sup>1\*</sup>, 田坂裕司<sup>1</sup>, 柳澤 孝寿<sup>2</sup>, Sven ECKERT<sup>3</sup>, 村井祐一<sup>1</sup>  
Kazuto Igaki<sup>1\*</sup>, Yuji TASAKA<sup>1</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>2</sup>, Sven ECKERT<sup>3</sup>, Yuichi MURAI<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup> Graduate school of engineering, Hokkaido University, <sup>2</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup> 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<sup>1\*</sup>, 田坂裕司<sup>1</sup>, 大石義彦<sup>1</sup>, 村井祐一<sup>1</sup>, 柳澤 孝寿<sup>2</sup>

Yudai Yamaguchi<sup>1\*</sup>, TASAKA, Yuji<sup>1</sup>, OHISHI, Yoshihiko<sup>1</sup>, MURAI, Yuichi<sup>1</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>JAMSTEC

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

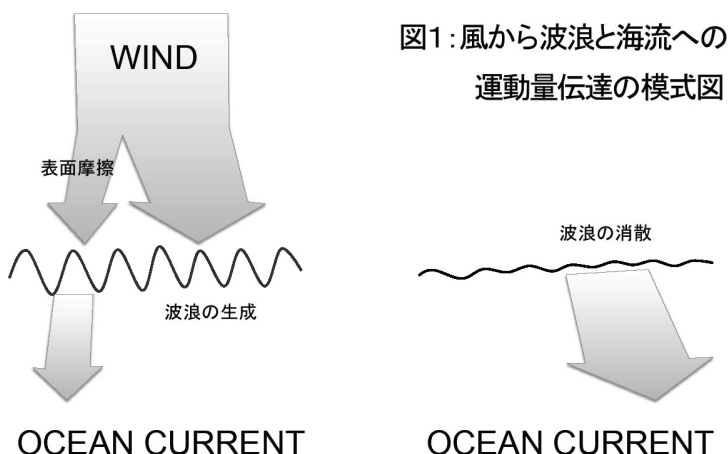
## 風波の生成と消散を経由した風から海流への運動量の伝達 The effect of wind waves on the upper ocean circulation

相木 秀則<sup>1\*</sup>, Richard J. Greatbatch<sup>2</sup>  
Hidenori Aiki<sup>1\*</sup>, Richard J. Greatbatch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (独) 海洋研究開発機構・地球環境変動領域, <sup>2</sup>GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany  
<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>GEOMAR 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<sup>1\*</sup>, 佐藤 薫<sup>1</sup>, 杉本 憲彦<sup>2</sup>Yuki Yasuda<sup>1\*</sup>, Kaoru Sato<sup>1</sup>, Norihiko Sugimoto<sup>2</sup><sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Hiyoshi 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<sup>1\*</sup>, 酒井 敏<sup>1</sup>, 中村 美紀<sup>2</sup>  
Kimie Furuya<sup>1\*</sup>, Satoshi Sakai<sup>1</sup>, Miki Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 人間・環境学研究科, <sup>2</sup> 愛知教育大学保健環境センター

<sup>1</sup>Graduate School of Human and Environmental Study, Kyoto University, <sup>2</sup>Center 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

## ビデオカメラを用いたモアレ法による内部重力波の可視化 Movie Moire Method, applied to Internal Gravity Wave.

乙部 直人<sup>1\*</sup>  
Naohito Otohe<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 福岡大学 理学部  
<sup>1</sup>Fukuoka Univ. Faculty of Science

内部重力波は密度の揺らぎが伝わる波であり、室内実験では通常透明な媒質中を伝播するため、見る事が出来ない。大がかりな光学系の干渉を利用する方法もあるが、単純な直方体水槽には適応するが、円筒形の水槽などには仮に適応できても、水槽ごとに光学系を開発する必要がある。

モアレ縞を利用する方法も知られており、上記のような欠点は克服されている物の、リアルタイムに可視化する場合は厳密な位置合わせや、モアレの元となる格子模様サイズなどを正確にそろえる必要がある。以前 QBO 実験中の内部重力波を可視化した際には、1枚の格子縞を2重露光しデジタル処理によってモアレを生じさせたが、解像度や処理能力の制限からムービーを作成することは出来ず、また実験と同時に見ることは出来なかった。

今回ビデオカメラを使用することで安価に内部重力波を見ることが出来るようになった。

キーワード: モアレ法, 水槽実験  
Keywords: Moire, Experiment

## 鉛直加振による液状化と流体輸送の実験的研究 Experimental study of liquefaction and fluid transport

安田 奈央<sup>1\*</sup>, 隅田 育郎<sup>1</sup>  
Nao Yasuda<sup>1\*</sup>, Ikuro Sumita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科  
<sup>1</sup> Kanazawa University

液状化とは、何らかの衝撃により粉粒体における粒子同士の噛み合いが崩され、一時的に流体のような振る舞いをすることを言う。地震によって土壌の液状化が起こることは広く知られており、土壌の液状化は噴砂現象や泥火山形成の原因となっている。液状化は、土壌に限らず粒子 - 流体系ではどこでも起こり得ると考えられ、高粘性流体の場合の例としてはマグマ溜りにおける液状化がある (Sumita and Manga, 2008, EPSL)。マグマの液状化もまた地震によって引き起こされ、これは火山の地震による誘発噴火の原因になっている可能性がある。また、地球のみならず、火星表面においても液状化に伴い、流体が噴出したことにより形成されたと考えられる地形が見られる。これまで土質力学や土木工学の分野において、水で飽和した砂を用いた液状化実験が数多くなされてきた。しかし、液状化を引き起こす臨界条件や実験パラメータによって現象がどのように変わるかについては十分に明らかにされていない。我々は、様々な液状化と流体輸送の素過程を理解するために、液状化を粒子 - 流体系の物理学の問題として捉え、鉛直加振による液状化の室内モデル実験を行った。

本実験では、粒径の異なる2種類の球形のガラスビーズと流体(水あるいはグリセリン水溶液)を封入したケースに、鉛直方向の正弦振動を与えて液状化させる。ケース下部の約33.7mmはガラスビーズ層となっており、その下層が粒径0.2mm、上層が粒径0.05mm(低浸透率層)の2層構造となっている。実験セルは加振機の上に設置し、加速度2.0 - 41.1m/s<sup>2</sup>、周波数10 - 40 Hzの範囲で振動を与える。

水を用いた実験では、振動による間隙水の排出パターンが4通りあることが分かった(No-change, Percolation, Transition, Flame)。小さな加速度では、粒子層の層厚や2層境界の形態において明らかな変化はない(No-change)。加速度を大きくしていくと、粒子層は間隙水の排出によって収縮する。初めのうちは2層境界に変化は見られないが(Percolation)、加速度をさらに大きくしていくと2層境界が不安定になり始め(Transition)、さらにその振幅が成長すると火炎構造を形成する(Flame)。

水で飽和した粒子2層系に振動を与えると、下層から排出された間隙水が一時的に2層の界面にたまった後、上層中をチャンネル状に上昇し排出される様子が観察された。火炎構造が形成されるための臨界加速度は、( )gのオーダーであった( : 粒子 - 水の密度差、 : 粒子の密度、g : 重力加速度)。

キーワード: 低浸透率層, レイリーテイラー型不安定, 火炎構造

Keywords: low-permeability layer, Rayleigh-Taylor type instability, Flame structure



## 粉体層の鉛直振動における対流構造の粒子形状依存性

## Grain shape dependence of the convective structure in a vertically vibrate granular bed

山田 智哉<sup>1\*</sup>, 桂木 洋光<sup>1</sup>

Tomoya Yamada<sup>1\*</sup>, Hiroaki Katsuragi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院 環境学研究科

<sup>1</sup> Graduate Schools of Environmental Studies, Nagoya University

小惑星イトカワの表面には、天体衝突起因の振動により表面のレゴリスが移動したと思われる地形があると報告されている [1]。そのような地形の発生機構を明らかにするためには、レゴリスのような砂礫の集合体が振動を受けたときのような挙動を示すか解明する必要がある。一般に、粉体に振動を加えると、分級、対流等の様々な現象が観察される。それらの現象の物理的な素過程を室内実験により明らかにすることで、小天体表面での地形形成の基礎的な情報を得ることが本研究の目的となる。粉体対流については、これまで多くの室内実験や数値計算が行われてきた [2 - 5]。しかし、これらのほとんどは球形粒子を用いており、自然界に存在する砂礫のような不規則な形状を持つ粒子群の性質はあまり反映されてない。そこで、本実験では、球形のガラスビーズに加えランダムな形状を持つ砂 (JIS 標準砂) を用い、これに鉛直加振を加え粉体対流の実験を行った。

実験では粉体媒質として直径 0.8 mm のガラスビーズと直径 0.71 mm から 1.4 mm の標準砂を用いた。粉体を入れる容器は内径 75 mm の円筒形アクリルセルを使用し、上記の粉体を 50 mm 積層させ、電磁式の振動装置 (EMIC 513-B/A) で容器全体を振動させた。円筒容器壁面での粉体の流れ場を高速カメラ (Photoron SA-5) により、1000 fps で撮影し、対流速度場を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて算出した。振動パラメータとしては、重力加速度で無次元化した最大振動加速度 ( $\Gamma = A(2\pi f)^2 / g$ ; A, 振幅; g, 重力加速度) を 2 から 6 の間で、振動数 f を 10 Hz から 300 Hz の間で変化させた。得られた動画と対流速度場のデータより、グローバルな対流構造と対流速度の および、f 依存性を調べた。

結果、f の増加によりグローバルな対流構造が、円筒容器壁全体で回転するロール状態から、円筒容器中央で上昇し、容器壁面で下降するトラス状ロールに変化することが分かった。対流速度については、容器の底面に近づくほど減少するという先行研究 [2,3] と同様の結果が得られたが、減少の様式が標準砂とガラスビーズでは顕著に異なることがわかった。また、標準砂では対流速度場が時空間的に不均一であることもわかった。

[1] H. Miyamoto et al, Science 316, 1011 (2007)

[2] Y. Taguchi, Physical Review Letters 69, 1367-1370 (1992)

[3] J. B. Knight et al, Physical Review E 54, 5726-5738 (1996)

[4] A. Garcimartin et al, Physical Review E 65, 031303 (2002)

[5] J.M.Pastor et.al, Physica D 232, 128-135 (2007)

キーワード: 粒子形状依存性, 対流, 鉛直振動, イトカワ

Keywords: Grain shape dependence, Convection, Vertical vibration, Itokawa

## 2012年台風15号における多重壁雲の数値実験 Numerical Experiments for Concentric Eyewalls of Typhoon Bolaven (2012)

辻野 智紀<sup>1\*</sup>, 坪木 和久<sup>1</sup>

Satoki Tsujino<sup>1\*</sup>, Kazuhisa Tsuboki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学地球水循環研究センター

<sup>1</sup>Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

台風をはじめとする熱帯低気圧には、中心からおおよそ数百 km 以内に壁雲とよばれる対流活動の盛んな円形の雲域が存在する。熱帯低気圧はまれに、この壁雲を同心円状に複数有することがあり、多重壁雲 (Concentric Eyewall) と呼ばれる。顕著な多重壁雲構造を伴ったハリケーンについては、いくつかの航空機観測および数値モデルによる再現実験が行われている。それらの先行研究から、多重壁雲は一度形成されると、内側の壁雲がゆっくりと減衰し、外側の壁雲が徐々に内側に収縮するという壁雲の置き換え (Replacement) が起こることがわかっている。また、この置き換わりの前後では、熱帯低気圧の強度が急速に変化することも示されている。したがって、壁雲の置き換えを理解することは熱帯低気圧の正確な強度予測という観点で重要である。しかし、2012年に日本の沖縄海域を通過した台風15号 (Bolaven) は、ドップラーレーダなどの観測から、多重壁雲が形成されてから少なくとも1日以上維持しており、明瞭な壁雲の置き換えが見られなかった。このように、多重壁雲が形成されても、壁雲の置き換えが起きない場合があり、台風の壁雲の置き換えについては未だに完全に解明されていない。

そこで、本研究では、Bolavenの多重壁雲構造と、多重壁雲がどのように維持し続けられたかということをも3次元非静力学モデルを用いて詳細に調べた。本研究では、名古屋大学地球水循環研究センターで開発された3次元非静力学モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) を用いた。ハリケーン上の多重壁雲についての先行研究によると、多重壁雲は水平スケールがオーダー10 km程度であり、数値モデルで再現するためには、水平解像度1 km程度の高解像度計算を必要とすることが示唆されている。まず、気象庁全球数値モデル (GSM; 水平解像度0.5度) の初期値を初期値・境界値として水平解像度5 km x 5 kmの計算を行った。次に、この5 km x 5 kmの計算結果を初期値・境界値として2.5 km x 2.5 kmの計算を行った。最後に、この結果を元に水平解像度1 km x 1 kmの計算を行った。

その結果、水平解像度1 kmの再現実験において、Bolavenの中心から半径およそ100 km以内に顕著な多重壁雲構造が再現された。さらに、この多重壁雲のうち最も内側の壁雲は、形成からおおよそ24時間以上、その状態を維持し続けた。これらの結果は実際の観測結果と整合的であった。また、先行研究で示唆されている壁雲の置き換えに要する時間をはるかに越えて、多重壁雲が維持されていた。多重壁雲が形成された時間において、多重壁雲の構造を調べたところ、ハリケーンにおける先行研究と同様に、隣接する壁雲の間には moat と呼ばれる非常に乾燥した弱い下降気流の領域が存在することがわかった。

moat領域が存在すると、内側の壁雲への水蒸気供給が制限され、内側の壁雲が次第に減衰する。この構造はハリケーンにおける壁雲の置き換え前後に見られる顕著な特徴である。このような特徴をもっていたにも関わらず、Bolavenでは多重壁雲が長時間維持されていた。このことから、Bolavenでは moat領域によって中心に向かう流れによる水蒸気の供給が制限されていてもなお、内側の壁雲を維持するだけの水蒸気が壁雲の周辺から供給されていたと考えられる。

キーワード: 熱帯低気圧, 多重壁雲, 渦力学, 数値計算, 非静力学雲モデル

Keywords: tropical cyclone, concentric eyewall, vortex dynamics, numerical modeling, nonhydrostatic cloud resolving model

## 上層渦により発達する地表面低気圧の力学的および熱的過程 Dynamic and thermal processes of a surface low developed by a vortex aloft

瀬戸 息吹<sup>1\*</sup>, 伊賀 啓太<sup>1</sup>  
Ibuki Seto<sup>1\*</sup>, Keita Iga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup> AORI, The University of Tokyo

冬季に高緯度地域の海上ではスケールが約数百 km と比較的小さいポーラーローと呼ばれる低気圧が発達することがある。ポーラーローの主要な発達メカニズムにはいくつかの要因が考えられているが、その一つとして、上層の短波トラフがトリガーとなるものがある。本研究では、このタイプの発達過程に焦点をあて、上層の渦擾乱が下層の低気圧を発達させる際の力学的・熱的過程を、非静力学モデルによる理想化実験により調べる。

上層の渦擾乱によるポーラーローの理想化実験はこれまでも行われている。多くの場合では上層の擾乱に加えて下層にも擾乱が配置され、両者のカップリングにより低気圧が発達するというものであった。しかし、近年では上層の渦擾乱のみからでも下層に擾乱を励起し、ポーラーローが再現できることが確かめられ、環境場などの条件に対する感度実験も行われている。しかし、これまでの理想化実験では対流圏界面と上層渦の高さが 5000m ~ 6500m と現実よりも低く設定されることが多かった。また上層の渦が下層に擾乱を励起する過程としては、主に渦としての力学的な効果が調べられているが、上空に寒気が入ることにより成層が弱められ対流が起こる効果については理想化実験ではほとんど調べられていない。そこで本研究ではまず、東西一様で傾圧的な環境場において、これまでよりも高い位置に初期渦や対流圏界面をおく設定でも、ポーラーローが発達するか調べた。その結果、初期渦と対流圏界面の高度が 8000m でもコンマ型のポーラーローが再現された。ところがその発達の初期段階においては、先行研究で注目している渦の励起の機構はあまり働いておらず、成層が不安定化することによる対流的な擾乱の発達が起きていることがわかった。

発達初期のメカニズムを理解するために、上層渦や対流圏界面の高さに加えて、基本場の成層を変える実験を行った。その結果、発生するメカニズムは、上層渦や対流圏界面の高さと基本場の成層によりいくつかのパターンに分類できることがわかった。傾向としては、渦と圏界面の高さが低いほど、また基本場の成層が弱いほど、渦の励起によるメカニズムを通して擾乱が発生する。そうでない場合には対流による擾乱の発達が起きるが、圏界面が高く成層が強い場合には発達しないこともあった。渦の励起による擾乱の発生条件は Eady モデルでの不安定条件とよく似ており、関連が示唆された。Eady の不安定条件が満たされる時は渦の相互作用による励起が起こるが、その条件を満たさない時は対流的な発達によって地表面擾乱が発達することになる。

一方、対流型の発達が起きる際の対流の達する高度については、地表面における空気塊を持ち上げた時の温位の変化と基本場の温位とを比較することにより、成層が弱い場合には理想化実験とほぼ同様の高度まで対流が達することがわかった。ただし、成層が強い場合には実験から得られた結果とは食い違いが見られたが、その原因には、上層に渦があることによる温位偏差があることと、発達に時間がかかるため、海面からの熱フラックスで下層の空気の変質が起きていることが考えられる。

キーワード: ポーラーロー, 上層渦, 成層, 対流

Keywords: polar low, vortex aloft, stratification, convection

## 底面が回転する円筒容器内の軸対称流の境界層 Boundary layers of an axisymmetric flow in a cylindrical tank with a rotating bottom

伊賀 啓太<sup>1\*</sup>  
Keita Iga<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大気海洋研究所  
<sup>1</sup> AORI, The University of Tokyo

惑星探査機の写真には、六角形の形状をしている土星の極の回りの流れが写っている。また気象衛星の写真には、しばしば円状ではなく多角形になっている台風の眼が見られる。このように、地球や惑星の大気には軸対称な状況にも関わらず、軸対称を保っていない流れが実現していることがある。

このような対称性の破れは、円筒容器内に水を入れ、底の円盤を回転させるという極めて単純な室内実験でも実現することができる。その際に観測される対称性が破られた現象は、単純な多角形の流れだけでなく、軸対称な円状の流れと対称性が破れた楕円状の流れの間の遷移の際の履歴現象や、容器の側壁に沿って伝わる大きな振幅の波が励起される現象などさまざまなものがあり、我々はこれらの現象について報告を行ってきた。

しかし、メカニズムを理解するには基本場となる軸対称な流れをもとにして考察を進めることになるため、これらの現象自体はいずれも軸対称性が破れた現象ではあっても、軸対称な流れを求めておくことが必要である。そこで、底面だけが一定の角速度で回転する円筒容器内の水の軸対称な流れを、解析的に求めることを試みた。

流れを厳密に求めることは不可能であるが、エクマン数が小さいという条件のもとで境界層理論を用いながら流れの近似解を求めることができた。円筒容器内の流れを6つの異なるバランスをする領域に分割することによって、流れを求めるができた。その6つとは、(i) 容器内側の、剛体回転する内部領域 (ii) 容器外側の、角運動量一定の内部領域 (iii) 両内部領域に挟まれたスチュワートソン 1/4 層 (iv) 回転する底面付近のエクマン境界層 (v) 外側の側壁付近の境界層 (vi) 外側底面の角領域 である。

特に、各境界層の流れを求めてつなぎあわせることにより、鉛直循環する流れの流量を求めることができ、全体としての軸対称流の様子を記述することができた。

キーワード: 軸対称流, 回転流, 境界層  
Keywords: axisymmetric flow, rotating flow, boundary layer