

## 黒潮大蛇行を引き起こす傾圧不安定の発達に膠州海山が果たす役割

## Effects of Koshu Seamount on the Development of Baroclinic Instability Leading to the Kuroshio Large Meander

\*田中 祐希<sup>1</sup>、日比谷 紀之<sup>1</sup>\*Yuki Tanaka<sup>1</sup>, Toshiyuki Hibiya<sup>1</sup>

1. 東京大学大学院理学系研究科

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo

It is well known that the Kuroshio south of Japan shows bimodal path fluctuations between the large meander (LM) path and the nonlarge meander (NLM) path. The transition from the NLM path to the LM path is triggered by a small meander which is generated off the southeastern coast of Kyushu and then propagates eastward to Cape Shiono-misaki while being amplified slowly through baroclinic interaction with a lower layer cyclone-anticyclone pair. This small meander thereafter amplifies rapidly over Koshu Seamount located about 200 km to the south of Cape Shiono-misaki, leading to the formation of the LM path. Although it is shown that the existence of Koshu Seamount is essential for the rapid amplification of the small meander, the underlying physical mechanism has not been fully understood yet.

In this study, the effects of Koshu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the formation of the LM path of the Kuroshio are investigated using a two-layer quasi-geostrophic model taking into account the effect of bottom topography. Numerical experiments show that the transition processes from the NLM path to the LM path can be successfully reproduced only when the bottom topography mimicking Koshu Seamount is taken into account. In this case, the upper layer meander trough is amplified rapidly together with the lower layer cyclone-anticyclone pair during their passage over the seamount. This suggests that the transition from the NLM path to the LM path is caused by baroclinic instability enhanced over the seamount. A linear stability analysis with the bottom topography mimicking Koshu Seamount shows that baroclinic instability over the seamount is caused by a coupling between the upper layer Rossby wave propagating eastward in the background geostrophic flow and the lower layer topographically trapped wave propagating clockwise around the seamount. These two waves in the upper and lower layers propagate in the same direction with nearly the same speed so that they can resonantly interact with each other over the northern slope of the seamount. The spatial structure of the most unstable mode is shown to be close to that of the rapidly amplifying meander trough over the seamount reproduced in the numerical experiment.

キーワード：黒潮大蛇行、膠州海山、傾圧不安定、地形性捕捉波、二層準地衡流モデル、線形安定性解析

Keywords: Large Meander of Kuroshio, Koshu Seamount, Baroclinic Instability, Topographically Trapped Wave, Two-Layer Quasi-Geostrophic Model, Linear Stability Analysis

Dynamics of the Atlantic meridional overturning circulation and Southern Ocean in an ocean model of intermediate complexity

Dynamics of the Atlantic meridional overturning circulation and Southern Ocean in an ocean model of intermediate complexity

McCreary Julian P.<sup>2</sup>、\*Furue Ryo<sup>1</sup>、Schloesser Fabian<sup>2</sup>、Burkhardt Theodore W.<sup>3</sup>、野中 正見<sup>1</sup>  
Julian P McCreary<sup>2</sup>、\*Ryo Furue<sup>1</sup>、Fabian Schloesser<sup>2</sup>、Theodore W Burkhardt<sup>3</sup>、Masami Nonaka<sup>1</sup>

1.APL, JAMSTEC、2.ハワイ大学、3.テンブル大学

1.APL, JAMSTEC, 2.Univ. of Hawaii, 3.Temple Univ.

A steady-state, variable-density, 2-layer, ocean model (VLOM) is used to investigate basic dynamics of the Atlantic meridional overturning circulation and Southern Ocean. The domain consists of idealized (rectangular) representations of the Atlantic, Southern, and Pacific Oceans. The model equations represent the depth-averaged, layer-1 response.

A hierarchy of solutions is obtained in which forcings and processes are individually introduced. The complete solution set includes a wide variety of solution types: with sinking in the northern North Atlantic and with sinking near Antarctica; with and without wind forcing; with, without, and for two parameterizations of northern-boundary sinking that represent cooling external to and within the North Atlantic; for a wide range of mesoscale-eddy mixing strength and wind stress in the Antarctic Circumpolar region; and for different closures for mesoscale-eddy mixing. Novel aspects of the model and solutions include the following: use of VLOM, which allows buoyancy forcing to be introduced realistically; the aforementioned closure, which allows eddy-induced transport to be determined when layer 1 represents *\_both\_* the surface mixed layer ( $h=h_m$ ) and the depth of subsurface isopycnals ( $h>h_m$ ); latitude where layer 1 outcrops in the Southern Ocean being *\_internally\_* determined rather than externally specified; and a boundary layer, based on Gill's (1968) solution, that smoothly connects the Southern- and Atlantic-Ocean responses across the latitude of the southern tip of South America. Finally, some solutions in the set are comparable to solutions to idealized, ocean general circulation models (OGCMs); in these cases, our solutions provide insight into the underlying dynamics of the OGCM solutions, for example, pointing toward processes that may be involved in eddy saturation and compensation.

キーワード：海洋深層循環、層モデル、南大洋

Keywords: Oceanic deep circulation, Layer model, Southern Ocean

## 回転系における深水波の直接数値計算

## Direct numerical simulation of deep-water waves in rotating frame

\*藤原 泰<sup>1</sup>、吉川 裕<sup>1</sup>、松村 義正<sup>2</sup>\*Yasushi Fujiwara<sup>1</sup>, Yutaka Yoshikawa<sup>1</sup>, Yoshimasa Matsumura<sup>2</sup>

1.京都大学大学院理学研究科、2.北海道大学低温科学研究所

1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

The ratio of the periods of oceanic surface waves (wind waves and swells) and the inertial period is about  $10^{-4}$ , and the earth's rotation does not greatly affect the orbital motion of fluid particles. Waves, however, do modify mean flow under the influence of Coriolis force. This is because the slight tilt of the orbital plane of fluid particle generates Reynolds stress. Hasselmann (1970) and Huang (1979) demonstrated that this Reynolds stress induced by waves can be expressed as the Coriolis force acting on the Stokes drift. The latter expression is called Coriolis-Stokes forcing. In ocean surface layer studies, Coriolis-Stokes forcing has been used as a standard formulation to incorporate the wave-stress effect. However, Coriolis-Stokes forcing is derived under several assumptions, and there has been no research that directly examined the appropriateness of the forcing.

Here we investigated the Coriolis-Stokes forcing, by performing direct numerical simulations of deep-water waves using a recently developed free-surface nonhydrostatic numerical model. The new scheme that this model adopts allows for the accurate simulation of the orbital motion and the dispersion relation of deep water waves, which could not be achieved by the conventional mode-splitting scheme.

Simulations were carried out under idealized conditions of x-z two dimensional domain with periodic horizontal boundaries. Waves were maintained by surface pressure perturbation. Reynolds stress was obtained from the velocity field, and the Coriolis-Stokes forcing was calculated using the Stokes drift, which we obtained from the on-line particle tracking.

Comparison of the two forces tells us that the Coriolis-Stokes forcing is nearly identical to the wave stress under the idealized condition. These forces induce a Eulerian response to the Stokes drift. In the existence of viscosity, this Eulerian flow generates the spiral current throughout the Ekman depth, even there is no net momentum input from the surface. By imposing a uniform stress on the surface, we also find that the mean current profile is described by Ekman-Stokes solution (Polton et al., 2005), which is obtained by considering Coriolis-Stokes forcing, rather than the classical Ekman solution. We will be presenting the results of further simulations under various conditions.

キーワード：波・平均流相互作用、コリオリ・ストークス力、自由表面非静力学モデル

Keywords: wave-mean flow interaction, Coriolis-Stokes forcing, free-surface nonhydrostatic numerical model

## 流動化現象が定常状態に達するまでの過程

## A route to steady state of liquid fluidization

\*金 芳隆<sup>1</sup>、栗田 敬<sup>1</sup>\*Yoshitaka Kon<sup>1</sup>, Kei Kurita<sup>1</sup>

## 1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

When fluid is injected with low flux into the saturated packed bed of particles, fluid flows through interstitial spaces. This is known as a permeable flow. In this situation an empirical relationship, the Darcy law is known to exist in laminar flow, where the fluid flux is proportional to the applied pressure difference. When the applied pressure difference is increased and hence, the fluid flux is increased and both fluid and particles begin to flow together as a suspension. This gross flow called fluidization is important because it can drastically change efficiency of material transport. In the field of hydrology, for an example, this is related to an initiation of debris flow. In the field of volcanology, this process is related to the rejuvenation of a dormant magma chamber where the injection of new magma into the crystal mush causes the replenishment. In the field of chemical engineering, fluidization is well investigated for the engineering applications. The transition between a permeable flow and a gross flow is a kind of phase change; This critical superficial velocity is known as a minimum fluidization velocity ( $v_{mf}$ ). The dynamics of the change from a permeable flow state to a gross flow state is more important in the initiation of such as debris flow and rejuvenation of magma chamber. The process of the initiation of fluidization is as follows; Water start to flow with high velocity enough to fluidize, both upper and fluidized front are lifted from top and bottom of particles bed, respectively (Slis et al. (1959)). Gibilaro et al. (1984) derived that upper front velocity has constant value until it reaches steady state and depends on water flux, and Thelen and Ramirez (1997) confirmed it experimentally. Upper front velocity is discussed like above, however, fluidized front velocity is not observed experimentally. In this presentation, we focus on the dynamics of the initiation process of the fluidization and present experimental approaches.

To observe the initiation process of the fluidization, we employed a vertical fluidizing bed. Transparent acrylic pipe (inside diameter: 30 mm, length: 40~120 cm) is used, where particles are packed at the bottom of 12.5 cm. From water-saturated state, water is injected from the bottom at constant flux (the superficial velocity of 0.5~4.7 cm/s). The hydrostatic pressures are monitored at 3 different positions at 0, 5, 10 cm high from bottom. Glass beads (diameter: 0.8 mm, density: 2.5 g/cm<sup>3</sup>) and polystyrene beads (diameter: 0.8 mm, density: 1.03 g/cm<sup>3</sup>) are used as particles. The all move of beads are filmed, and inside area of this pipe is divided into fixed, fluidized and no particle area by differential of particles density.

We found that top of the particle bed and the fluidization area propagates from bottom to upward when the injected velocity is above the critical value  $v_{mf}$ . Because fluidization front velocity is larger than upper front velocity, the thickness of fixed bed becomes gradually small, and after that all beads become fluidized. On checking pressure and movie of the same time, it is revealed that hydrostatic pressure gradient of fixed bed are larger than fluidized bed during rise. Propagation of fluidized bed is divided into two types by flux; In case injected velocity is slightly larger than  $v_{mf}$ , the propagation ends when both upper and fluidization front reach same high. In case injected velocity is enough high compared with  $v_{mf}$ , rise lasts after a while that. Fluidized front velocity depends on injected flux when it is low, however, fluidized front velocity saturates when it is high. Porosity of propagating fluidized bed is kept nearly equal value to one

of terminal fluidized bed.

We also compare the cases for soft gels are used as elastic particles and discuss the effect of modification of packing and particle shape during flow.

キーワード：流動化、粒子層、物質輸送、サスペンション、室内実験

Keywords: Fluidization, Bed of particles, Substance transportation, Suspension, Laboratory experiment

## 吸収線輪郭から探る太陽表面对流速度の高さ構造

## Height structure of solar surface convective velocity from absorption line profile

\*大場 崇義<sup>1</sup>、飯田 佑輔<sup>2</sup>、清水 敏文<sup>2</sup>

\*Takayoshi Oba<sup>1</sup>, Yusuke Iida<sup>2</sup>, Toshifumi Shimizu<sup>2</sup>

1.総合研究大学院大学物理科学研究科、2.宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構

1.The Graduate University for Advanced Studies, 2.Institute of space and astronomical science / Japan aerospace exploration agency

恒星において流体の対流現象は、内部のエネルギー輸送やひいては恒星大気活動などその全域で重要な役割を果たす。恒星の内部構造は、コアにおける核融合反応によって発生したエネルギーを如何に宇宙空間に運びだすかで決定される。この恒星における対流の働きを理解する上で、我々に最も近くに位置する太陽は最もよい例となる。太陽では、コアで発生したエネルギーは光の放射で外層に運ばれる。ある程度外層(~0.7 太陽半径)まで達すると、流体による対流運動により運搬される。その対流運動は、私たちが可視光で観測できる太陽表面に達し、そのガス運動はさらに上空の大気(コロナ)の加熱や様々な大気ダイナミクスのエネルギー源となる。このように太陽表面对流は内部から運搬されたエネルギーを大気に伝える役割を果たすが、その運動は完全に理解されているわけではない。私達が見ることができる太陽表面は明るい「粒状斑」と暗い「間隙」で覆われている。粒状斑は内部からの対流が吹き出した上昇流領域であり、間隙はそれが下降流に転じた領域である。この上昇流が下降流に転じる過程は、主に数値シミュレーションによって研究されている。しかしながら、実際の太陽においてこの速度を失うプロセスが何の物理過程によって起こっているかは定かではない。このプロセスは高さ方向への運動中に起こるが、観測データから十分な時間・空間分解能を持って対流速度の高さ構造を取得できないという問題があった。本研究では、太陽観測衛星「ひので」の可視光望遠鏡/スペクトロポラリメータ(SOT/SP)の分光データに吸収線輪郭の解析を行うことで、対流速度の高さ変化を調べた。ある原子や分子における吸収線輪郭において異なった輝度はそれぞれ異なった高さを反映する。そのため、輝度毎のドップラー速度は高さ毎の速度に対応する。宇宙空間から安定した観測を実施できる「ひので」は、粒状斑と間隙を空間分解した上で高精度の吸収線を観測できる点から、本解析に最適である。得られた対流速度を粒状斑・間隙に分類して解析を行った。粒状斑においては上昇流が加速したのちに減速に転ずる傾向が見られた。一方で間隙においては沈みこむにつれて下降速度が大きくなる傾向を捉えることができた。間隙において下降速度場が大きくなることは、従来の1次元定常大気の描像では説明できない。講演では加速を引き起こすメカニズムの候補について議論する。

キーワード：対流、太陽

Keywords: convection, the sun

森は夏も冬も昼も夜も寒いのはなぜか？ —気温と水蒸気量の関係をシンプルに考える—  
Why always so cold the forests is?

\*松尾 諒<sup>1</sup>、堀之内 龍一<sup>1</sup>、酒井 敏<sup>1</sup>

\*Ryo MATSUO<sup>1</sup>, Ryoichi Horinouchi<sup>1</sup>, Satoshi Sakai<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院 人間環境学研究科

1. The Graduate School of Human and Environmental Sciences

森という場所は涼しい。都会の中にある木々に囲まれた公園でさえもそれは同じである。ではなぜ涼しいのかということについては突き詰められていない。漠然と、街と森とでは森のほうが気温が低く、相対湿度が高いということがわかっているだけだった。また植物が蒸散を行うということから、植物の蒸散量を計測することは植物の生態への興味や都市緑化のためなどの多角的な方向から盛んに行われてきた。そこで「蒸散量」という「観える」値は水蒸気という言葉と関連付けられ「観える」値として認識されていった。故に「植物が蒸散を行うから森や公園は涼しい」という意見は一般に広まっているように思える。しかし、もっと単純に気温と水蒸気量を眺めてみるとどうだろうか。

これまででも街と森の気温と相対湿度を観測し、その差を見るということについては試みられてきたはずである。しかし、少し前までの相対湿度のセンサーというのは、誤差が±5%と大きいものが多く、気象庁のJMA-10型地上気象観測装置の湿度計でやっと誤差±1%という観測精度であった。もし街と森とで湿度を比較しようとしても、この誤差の大きさでは森のほうが相対湿度が高いという大まかな差は分かるものの、大気中の水蒸気量を比べるといった細かな差を測ることはできなかった。しかし、昨今のIT化や産業の自動化、モバイル端末の普及などによりセンサー市場の需要が高まる中で、センサーの精度も飛躍的な向上が見られた。そして相対湿度センサーについても誤差±0.2%とするものが現れたのだ。これにより今まで「観えなかった」ものが観えるようになってきたのだ。すなわち、街と森での大気中の水蒸気量の差が有効なデータとして観測できるようになったのである。すると街と森での気温と水蒸気量について見えてきたものがある。まず、街と森の気温差と水蒸気量差の変化は連動しないということだ。もし、水の蒸発によって街と森で気温差がつくのであれば気温差と水蒸気量の差は比例するはずである。しかし実際には午前中のうちに気温差は最大

となり、水蒸気量の差は殆ど変化しない。水蒸気量の差が大きくなるのはその後である。

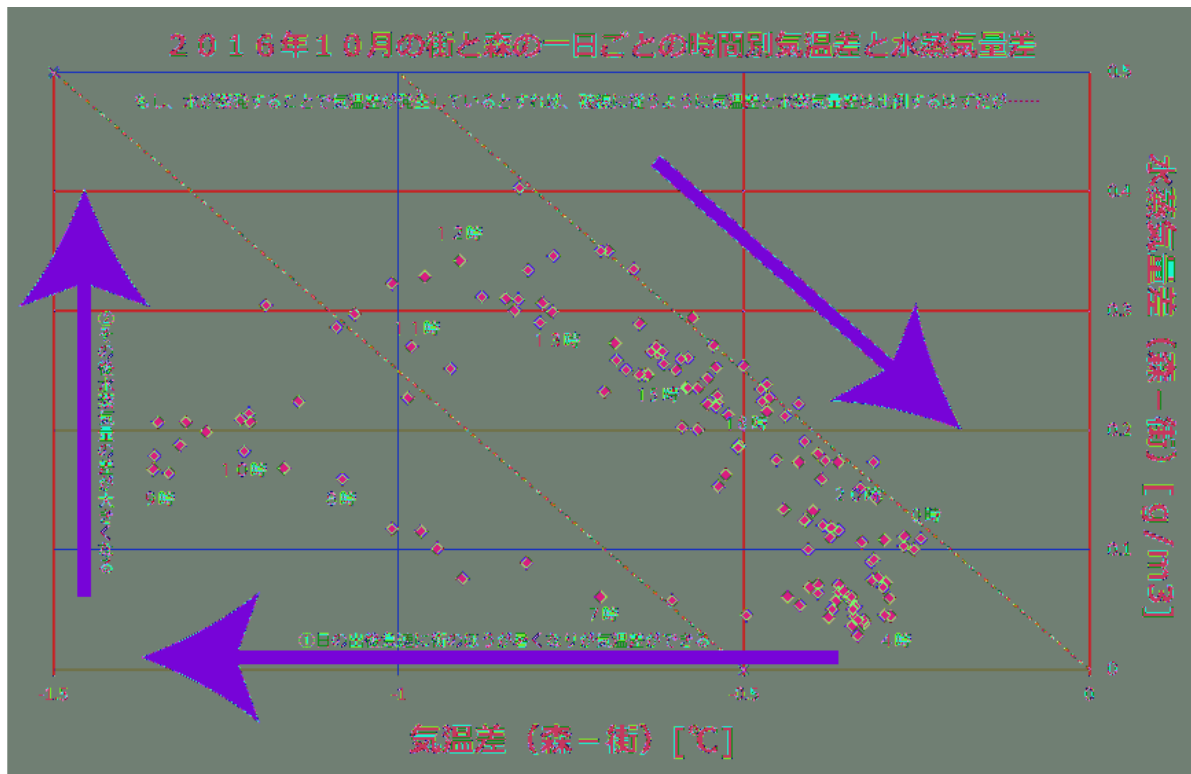
次に森は街よりも常に気温が低いということだ。常にというのは季節に関係なく、昼夜を問わず、まさに常にである。これは森に常に気温を冷やす要因があるということを示している。そうでなければ、放射冷却の影響を考えると、少なくとも夜は森のほうが気温が高くなるはずだからである。

更に飽差（ある温度と湿度の空気に、あとどれだけ水蒸気の入る余地があるか）と街と森の水蒸気量の差の間には非常に高い相関があることが分かった。これはすなわち街と森の水蒸気量の差について、植物の生物的作用による説明ではなく、大気の混合過程のみで説明できる可能性を示している。

現在はこのことを検証するために、街と森における気温と相対湿度を一年を通して観測しようとしており、今回はその経過を発表するものである。

キーワード：ヒートアイランド、湿度、気温、水蒸気、森

Keywords: HEAT ISLAND, HUMIDITY, TEMPERATURE, WATER VAPOR, FOREST





**Wind stress for ocean circulation as given by the dissipation rate of surface waves**  
**Wind stress for ocean circulation as given by the dissipation rate of surface waves**

\*相木 秀則<sup>1</sup>

\*Hidenori AIKI<sup>1</sup>

1.名古屋大学

1.Nagoya University

Recent studies have shown that mesoscale eddies and recirculation around western boundary currents are better simulated with a moderate magnitude in high-resolution OGCMs when relative wind speed (difference between the speeds of wind and surface circulation) is used in the bulk formula for wind stress. However the drag coefficient for wind stress might be better parameterized using quantities associated with surface gravity waves, such as significant wave height, wave age, and the direction of waves. Many studies in the surface wave community suggest that the net momentum flux from air (i.e. wind) to water (i.e. ocean circulation and surface waves) is given by the sum of skin stress and wave stress, the latter of which is associated with the generation of surface waves. Meanwhile, the net momentum flux to ocean circulation is given by the sum of the skin stress and dissipation-induced stress, the latter of which is associated with the breaking of surface waves. In order to investigate the utility of this mechanism, we have developed a coupled atmosphere ocean surface-wave model and performed sensitivity experiments associated with three types of wind stress. The first type of wind stress is given by the traditional formula with absolute wind speed. The second type of wind stress is given by the traditional formula with relative wind speed. The third type of wind stress is given by the surface wave model based on the dissipation rate of surface waves. The sensitivity experiments have been performed to examine the strength of mesoscale eddies in the Kuroshio Extension region, the small Kuroshio meander south of Japan, and the interaction between the Kuroshio Current and coastal upwelling associated with the landing of tropical cyclones.

キーワード：風応力、風波、海洋循環波浪結合モデル

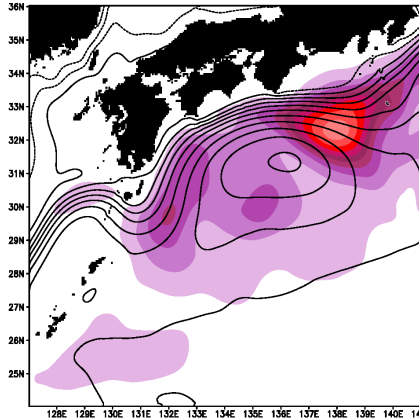
Keywords: Wind stress, Wind waves, Ocean circulation surface-wave coupled model

# sensitivity of Kuroshio Small Meander to wind forcing

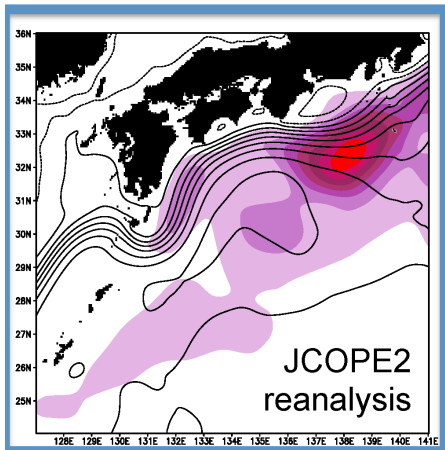
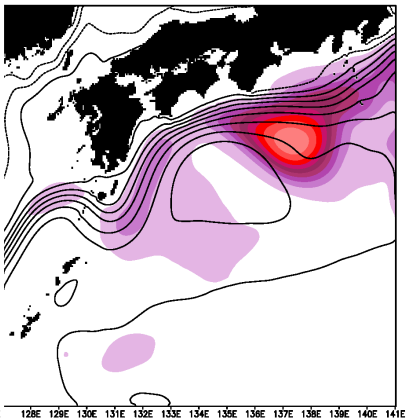
Color:  
7-yr variance of SSH

Contour:  
7-yr mean of SSH

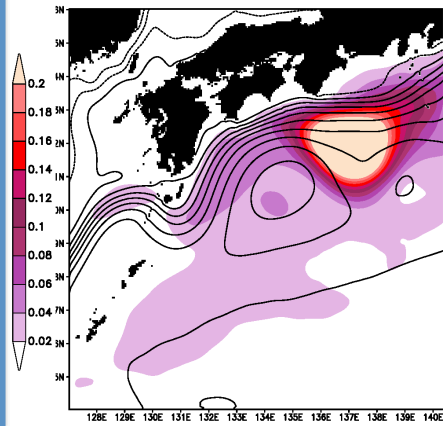
#1: Absolute Wind Velocity



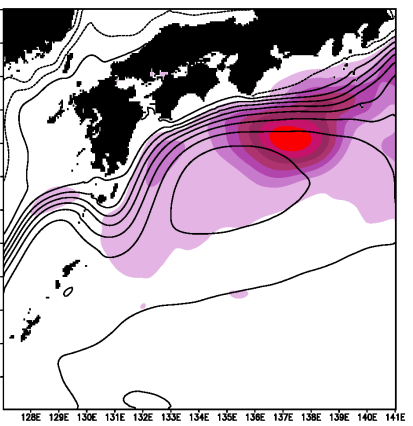
#2: Relative Wind Velocity



#3: Wind Stress in JRA55



#4: Surface Wave Model



A seamlessly diagnosable expression for the energy flux of all waves at all latitudes with equatorial and coastal waveguides

A seamlessly diagnosable expression for the energy flux of all waves at all latitudes with equatorial and coastal waveguides

\*相木 秀則<sup>1</sup>、Greatbatch Richard<sup>2</sup>

\*Hidenori AIKI<sup>1</sup>, Richard J Greatbatch<sup>2</sup>

1.名古屋大学、2.GEOMAR / Univ. of Kiel

1.Nagoya University, 2.GEOMAR / Univ. of Kiel

Some of Rossby waves in the mid-latitude regions of the ocean originate from waves propagating poleward along the eastern boundaries, that may be traced back to the arrival of equatorial Kelvin waves. This kind of interaction between the various types of free waves in the equatorial and mid-latitude regions is fundamental for understanding tropical climate systems, and has sometimes been explained using the concept of equatorial basin mode. In previous studies, the interaction of equatorial and mid-latitude waves has been little mentioned in terms of the transfer of wave energy. The present study provides a formula to calculate the energy flux, from model outputs without relying on a Fourier analysis. The expression of the energy flux of the present study has been determined from the analysis of the group velocity of equatorial Rossby, mixed Rossby-gravity, and inertia-gravity waves. The result is that the energy flux is written as the sum of the pressure flux and the additional rotational flux. The expression of the additional rotational flux reduces, under the approximation of mid-latitude Rossby waves, to that has been derived in previous studies and, under the approximation of mid-latitude inertia-gravity waves, to zero. Thus the expression of the energy flux, as given by the present study, may be used for a seamless diagnosis of waves in both equatorial and mid-latitude regions.

キーワード：群速度、赤道波

Keywords: group velocity, equatorial waves

対流が抑制される雲層における凝結物粒子の落下に伴う熱輸送

Heat transport associated with gravitational sedimentation of condensed particles in cloud layers where convection is suppressed

\*中島 健介<sup>1</sup>、杉山 耕一朗<sup>6</sup>、小高 正嗣<sup>2</sup>、はしもと じょーじ<sup>7</sup>、高橋 芳幸<sup>3,4</sup>、石渡 正樹<sup>2</sup>、竹広 真一<sup>5</sup>、林 祥介<sup>3,4</sup>

\*Kensuke Nakajima<sup>1</sup>, Ko-ichiro SUGIYAMA<sup>6</sup>, Masatsugu Odaka<sup>2</sup>, George HASHIMOTO<sup>7</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>3,4</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>2</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>5</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>3,4</sup>

1.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2.北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻、3.惑星科学研究センター、4.神戸大学 大学院理学研究科惑星学専攻、5.京都大学数理解析研究所、6.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、7.岡山大学 大学院自然科学研究科

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Department of CosmoScience, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Center for Planetary Sciences, 4.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 5.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 6.Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 7.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

地球大気ではH<sub>2</sub>Oの凝結は潜熱放出によって対流を強化する。しかし、惑星大気一般では、凝結層において対流が抑制される場合がある。たとえば、大気主成分が凝結する場合、凝結を伴うパーセルの密度が、飽和蒸気圧が温度と圧力に課す拘束のために、ほとんど許されない (Colaprete et al 2003; Yamashita et al, in revision)。ここで我々は、凝結にともない対流が抑制されるような場合においても、凝結相の重力沈降が鉛直熱輸送に寄与しうることを提案する。すなわち、エントロピーの小さい凝結相の重力落下とエントロピーの大きい気相の平均的上昇運動の組み合わせによって、気相中对流運動が無くても正味の上向きエントロピー輸送が可能である。当日は、上の機構の実現可能性について数値実験により検証する。なお、同様のメカニズムは、水素を主成分とする大気の中で H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, あるいは CH<sub>4</sub> する巨大ガス惑星の雲層で凝結成分の大きな分子量により対流が抑制される場合 (Guillot, 1995) にも有効かもしれない。

キーワード：対流、雲物理、惑星大気、湿潤対流、火星、木星型惑星

Keywords: convection, cloud microphysics, planetary atmospheres, moist convection, Mars, Jovian planets

回転球殻中の磁気対流により引き起こされる平均帯状流の外側安定成層への貫入  
Penetration of mean zonal flows into an outer stable layer excited by MHD thermal  
convection in rotating spherical shells

\*竹広 真一<sup>1</sup>、佐々木 洋平<sup>2</sup>

\*Shin-ichi Takehiro<sup>1</sup>, Youhei SASAKI<sup>2</sup>

1.京都大学数理解析研究所、2.京都大学大学院理学研究科数学教室

1.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 2.Department of Mathematics,  
Kyoto University

最近の地震波観測とその解析は地球の核マントル境界直下に厚さオーダー 100km の安定成層が存在することを示唆している。深部対流運動の外側安定成層への貫入の程度はダイナモ過程通じての磁場生成ならびに磁気永年変導の成因を考える上で重要な問題のひとつである。

Takehiro and Lister (2001) は磁場がない場合に柱状対流の安定成層への貫入厚さを理論的に導出し、貫入厚さが惑星の自転角速度に比例し、安定成層のブラントサイラ振動数ならびに擾乱の水平波数に反比例することを示した。Takehiro (2015) では安定成層が強い場合の磁場の影響下での貫入厚さのスケールリングを見積り、アルフベン速度と拡散係数及び擾乱の全波数の比で表されることを示した。しかしながら、これらのスケールリングは安定成層下の運動が振動あるいは伝播する場合にのみ適用可能であり、磁気対流により引き起こされる定常な平均帯状流の安定成層への貫入に関しては適用することができない。Takehiro and Lister (2002) では磁場がない場合の回転球殻内の柱状対流によって引き起こされる平均帯状流の安定成層の貫入を調べ、貫入の初期の段階では Takehiro and Lister (2001) によるスケールリングで貫入の程度が説明できるが、時間発展後は最終的に粘性による拡散の効果が卓越し、平均帯状流が水平スケールと同程度に安定成層に貫入することを示している。これに対して、磁場の影響下での定常な流体運動の安定成層の貫入に関してはまだ議論されていない。ここでは、安定成層下の定常対流運動に対する安定成層内の磁場擾乱の振舞いを理論的に調べる。

Takehiro (2015) の理論モデルを再吟味し、下面境界からの定常な流体運動が鉛直方向半無限空間に存在する密度成層した磁気流体中へと貫入する状況を考える。系の回転軸は鉛直軸から傾いている。粘性と拡散の効果を無視し、安定成層が十分に強く基本場磁場が弱いことを

仮定すると、磁気流体運動が 2 つの磁気流体波動に分類されることが線形解析からわかる。ひとつは速いモードであり、コリオリ力・浮力およびローレンツ力が足しあわさって波の復元力がもたらされている。もう一つは遅いアルフベン波であり、流体運動が水平方向に制限されている。下面から与えられる擾乱の振動数が十分小さければ、速いモードは安定成層を伝わることはできず、その貫入距離は磁場のない場合のものに帰着する。これに対して遅いモードは、与えられる擾乱の振動数がどんなに小さくても安定成層中を伝播することができる。下面の擾乱の振動数  $0$  の場合の貫入メカニズムはアルフベン速度の大きさに依存して変化する。アルフベン速度が小さい場合には粘性拡散が卓越し、貫入距離は下面の運動の水平スケールと同程度となる。このことは Takehiro and Lister (2002) の磁場のない場合の結果と整合的である。一方、アルフベン速度が大きくなると、より深く深くできるようになり、貫入距離はアルフベン速度と粘性および磁気拡散係数の相乗平均及び擾乱の全波数の比で表される。この結果は、振動数が  $0$  でない場合の擾乱の貫入距離の表現が粘性および磁気拡散係数の相加平均に依存していることと対照的である。

伝播距離の理論的なスケールリングの正当性を評価するために、一様磁場中に埋めこまれた上層に安定成層を伴う高速に回転する球殻中の磁気熱対流の非線形時間発展計算を行った。強い安定成層を与えると、基本場磁場を強めていくにつれて、安定成層下に閉じ込められていた中立モードの柱状流体運動と磁気擾乱が次第に安定成層へ貫入していく。得られた平均帯状流の貫入距離は理論的スケールリングと良くあっている。

\* 参考文献

Takehiro and Lister (2001) Earth Planet. Sci. Lett., 187, 357-366.

Takehiro and Lister (2002) Geophys. Res. Lett., 29, 50-1-4.

Takehiro (2015) Phys. Earth Planet. Inter., 241, 37-43.

キーワード：地球外核、水星外核、核マントル境界、ダイナモ、地磁気永年変動、アルフベン波

Keywords: Earth's outer core, Mercury's outer core, core mantle boundary, dynamo, secular variation of geomagnetic field, Alfvén waves

## 薄い対流層のMHDダイナモ

Spherical MHD dynamo in a thin convection layer above a thick resistive core

\*陰山 聡<sup>1</sup>、古藺 拓也<sup>1</sup>\*Akira Kageyama<sup>1</sup>, Takuya Furuzono<sup>1</sup>

1.神戸大学大学院システム情報学研究科

1.Graduate School of System Informatics, Kobe University

We performed magnetohydrodynamics (MHD) simulations in a sphere of radius  $r=1$  with a thin convection layer between  $r=0.9$  and  $r=1$ , with relatively slow rotation rates. The inner sphere of radius  $r=0.9$  is a stable (rigid) region with the same resistivity as the convection layer. The dynamo-generated magnetic field, therefore, diffuses into the inner resistive sphere. Since the convection layer is such thin, the convection pattern and its dynamo action are very different from those observed in the standard geo- or solar dynamo simulations. For these simulations, we applied a newly developed global grid, Yin-Yang-Zhong grid [Hayashi & Kageyama, JCP (2016)] by which we can solve equations on the coordinate singularity at  $r=0$ .

キーワード：MHDダイナモ、球対流、イン=ヤン=ゾン格子

Keywords: MHD dynamo, spherical convection, Yin-Yang-Zhong grid

## 磁場の影響下での液体金属の対流：乱流への遷移過程

Transition to turbulence in liquid metal convection under a horizontal magnetic field

\*柳澤 孝寿<sup>1</sup>、櫻庭 中<sup>2</sup>、田坂 裕司<sup>3</sup>、浜野 洋三<sup>1</sup>\*Takatoshi Yanagisawa<sup>1</sup>, Ataru Sakuraba<sup>2</sup>, Yuji Tasaka<sup>3</sup>, Yozo Hamano<sup>1</sup>

1.海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野、2.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、3.北海道大学大学院工学研究院

1.Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 3.Faculty of Engineering, Hokkaido University

Transition of flow pattern from laminar to turbulent is one of the most interesting problems in fluid dynamics. We performed both laboratory experiments and numerical simulations of Rayleigh-Benard convection of liquid metals under a uniform horizontal magnetic field. Fluids with low-Prandtl number like liquid metals are easy to be turbulent above the critical Rayleigh number. On the other hand, flow pattern can be laminar under a strong magnetic field when the fluid is electrically conductive, and the axes of convection rolls tend to be aligned in the direction of the magnetic field. Rayleigh-Benard convection of liquid metals under a uniform horizontal magnetic field is an appropriate system for a systematic study of flow transitions. Ultrasonic measurement of flow velocity profile is suitable for this setting of liquid metal convection, because it can grasp quasi-two-dimensional structure with its time variations. The process to turbulence is as follows; from steady laminar roll-structure to oscillatory rolls, to time dependent roll-numbers, and to vessel-scale circulation with turbulence. These are clearly observed with the decrease in the magnetic field. Repetition of the change of roll-numbers occurs when the magnetic field has moderate intensity for a given Rayleigh number. By analyzing the results of both laboratory experiments and numerical simulations, we clarified the decrease in mean roll-numbers as well as their mechanism. The process can be regarded as an interaction between aligned convection rolls and global-scale flow. The occurrence of global circulation bends the aligned rolls in a style of the skewed-varicose instability and induces roll number reduction. In the other point of view, the transitions can be regarded as a competition among several flow modes having different roll-numbers. To extract the fundamental flow structures and to quantify the mean roll-number existing in time varying flow patterns, we utilize the proper orthogonal decomposition (POD) analysis. We succeeded in identifying competitive modes with time variations of their amplitudes. Convective flow regimes seen in the present setting are clearly classified by a few fundamental flow modes and variations of their relative intensities.

キーワード：対流パターン、遷移、磁場

Keywords: flow pattern, transition, magnetic field



## 中間的なアスペクト比をもつ容器に拘束された熱乱流構造

## Structure of thermal turbulence confined by moderate aspect ratio box

\*明石 恵実<sup>1</sup>、田坂 裕司<sup>1</sup>、村井 祐一<sup>1</sup>、柳澤 孝寿<sup>2</sup>\*Megumi AKashi<sup>1</sup>, Yuji Tasaka<sup>1</sup>, Yuichi Murai<sup>1</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>2</sup>

1.北海道大学 工学研究科 エネルギー環境システム専攻 流れ制御研究室、2.海洋研究開発機構

1.Laboratory for Flow Control Faculty of Engineering Hokkaido University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

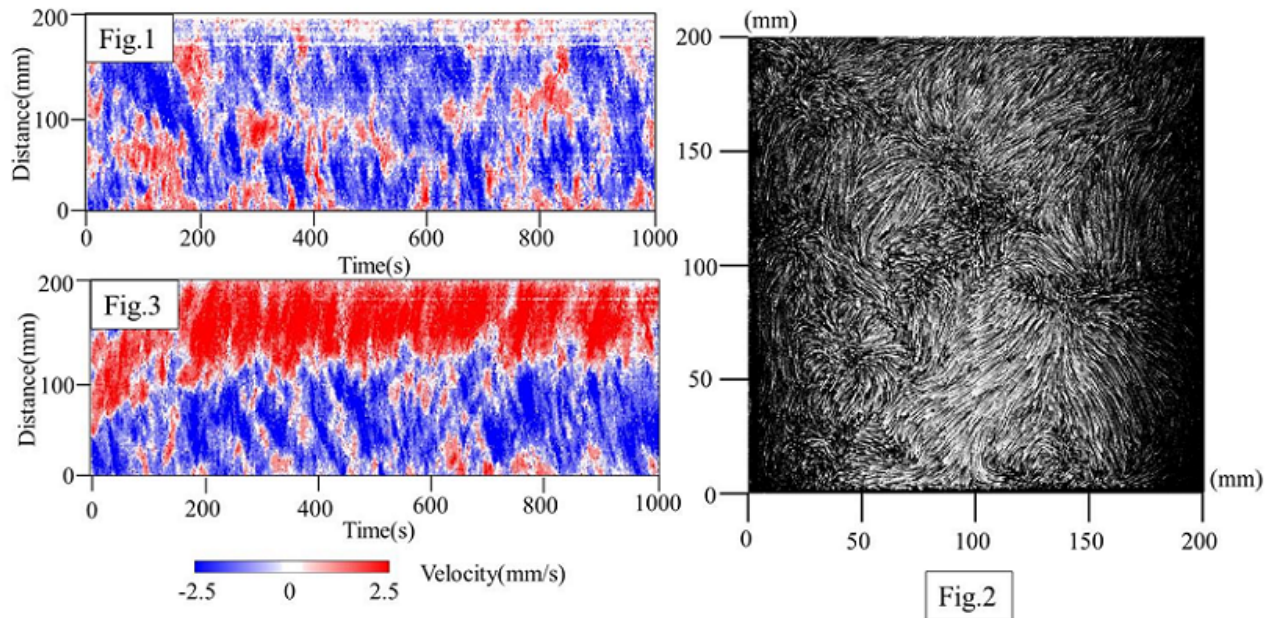
Spontaneous flow reversals occur in buoyancy-driven fluid dynamical systems, e.g. the ocean, the atmosphere and the inner core of planets. Behaviors of large scale flow structures in these systems have attracted many interests and a typical example is reversals of geo-magnetic polarity. The most fundamental flow configuration for these systems is the Rayleigh-Bénard convection, convections in a fluid-filled cell heated from below and cooled from above. In this system, flow reversals of large scale flow in thermal turbulence regime are detected and statistically analyzed in the particular case of the two-dimensional (2-D) rectangular geometry with aspect ratio of unity. The occurrence of reversals sensitively depends on the aspect ratio and thus there is great importance to investigate behaviors of the large scale flows in 3-D rectangular geometry with larger aspect ratios.

We performed laboratory experiments of Rayleigh-Bénard convection with a moderate aspect ratio box filled with water. The box has horizontal cross section of  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  and 40 mm in height giving the aspect ratio five. The wall of this box assumes thermal insulation and the boundary conditions are isotropic in the horizontal cross sections. Ultrasonic Velocity Profiling (UVP) was used to visualize the spatiotemporal structure of flows on a measurement line and predicted the 3-D structure of the flows all over the box. We fixed Rayleigh number  $Ra = 6.4 \times 10^6$  and Prandtl number  $Pr = 5.3$  at which thermal turbulence regime is expected. Fig.1 shows the spatiotemporal velocity map obtained in the measurement, where horizontal and vertical axes indicate time and distance, color represents velocity. We can observe flow keeping its direction over the measurement line and this is regarded as large scale flow in thermal turbulence. Besides there are several smaller scale flows accompanying the large scale flow with the size of about tens of millimeters which repeats appearance and disappearance everywhere on the line. We calculated spatial spectra from the velocity map and flow structures were objectively classified as large or small scale structures. Wavelength of the large one is the same with length of the box and that for the small ones corresponds to tens of millimeters we expected. This result agrees with past studies of numerical simulations. We also identified these 3-D structures by making instantaneous path line images at the same aspect ratio box with the grass cover. Fig.2 shows an example of path line images and some convective cells and rolls with the size of about tens of millimeters are identified. In addition, calculating power spectra of the velocity map indicates existence of a dominant frequency of the velocity oscillation in the order of  $10^{-3} \text{ Hz}$ . This oscillation is caused by periodic appearance of thermal plumes in a closed cell or roll that organize themselves both in space and time, and these generate coherent oscillations in thermal turbulence at any finite aspect ratio box. Finally we performed UVP measurement at the same aspect ratio box with the grass cover, where we can expect anisotropic large scale flows by non-uniform side wall thermal conditions. Fig.3 is the spatiotemporal velocity map of this measurement. There are two large scale structures of the flow having opposite flow directions, and corresponding instantaneous path line images tell us corresponding 3-D structures. These flow directions were kept for several thousand seconds and changed suddenly and spontaneously. This change resembles flow reversals in its time scale. There

is also dominant velocity oscillation frequency in the same order as the box having uniform horizontal thermal condition at the wall on the power spectra calculated from the velocity map.

キーワード：自然対流、熱乱流、大規模構造流れ、流れの反転現象

Keywords: Natural convection, Thermal turbulence, Large scale flow, Flow reversals



底面が回転する円筒容器内の軸対称流：過去の研究の実験データとの比較と側壁付近の補正  
An axisymmetric flow in a cylindrical tank with a rotating bottom: comparison with  
experimental data in preceding studies and corrections around sidewall

\*伊賀 啓太<sup>1</sup>

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

1. 東京大学大気海洋研究所

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

地球や惑星の大気では、環境が軸対称でも非軸対称な流れがしばしば実現する。そのような非軸対称な流れは、水を入れた円筒容器を用いた非常に単純な室内実験で、底の円盤を高速に回転させることによって観察される。このような対称性の破れのメカニズムを議論するためには基本場として軸対称な流れを調べておく必要がある。これまで境界層を解析的に解くことによって基本場の軸対称な流れのパラメータを求め、これにより理論的な予測ができることを示してきた。

この理論を検証するために、理論の予測とこれまでの同様の実験研究の結果と比較した。これまでの実験の研究は非軸対称な現象に注目したものが多く、いくつか軸対称なレジームについてデータを残しているものもある。これらの実験データとの比較を通じて理論の妥当性が確認された。ただし、側壁付近で水面高度が理論より高くなる傾向にあることも見出された。

側壁境界層の振舞いを再検討し、水面高度を高くする効果があることがわかり、その大きさの見積りを行った。補正を加えた理論は、側壁付近も含めて非常により予測を与えることが示された。

キーワード：回転流体、境界層、軸対称流、室内実験

Keywords: rotating flow, boundary layer, axisymmetric flow, laboratory experiment

チチウスボーデの法則，月の形成メカニズム，プレートテクトニクスの駆動力を統一的に説明する「マルチインパクト仮説」の，アブダクションで地球進化を解明，ダイヤモンド形成の謎に迫る  
Titius-Bode's law, the formation mechanism of the month, to explain the driving force of plate tectonics unified manner of "multi-impact hypothesis", elucidate the Earth evolution in Abduction, Approaching the mystery of the diamond formation

\*種子 彰<sup>1</sup>

\*Akira Taneko<sup>1</sup>

1.SEED SCIENCE Lab.

1.SEED SCIENCE Lab.

アブダクションの有効性は，「物理的に意味が有る仮説」の選択で全てが決定される。

「複数の結論が現状を相互に矛盾なく系統的に説明できること」がその証明となる。

「マルチインパクト仮説」は，(A)と(B)の仮説と以下の「月と地球のミッシングリンクを繋ぐ」統一的な推論を得た。

(A)太陽系の小惑星帯位置に形成された火星サイズの分化した原始惑星CERRAが，その直近の木星(巨大質量)の摂動により，

軌道が木星近点側に偏平化する。

(B)そのCERRAが木星衝突する直前に，木星と太陽の張力で断裂し，そのマントル片が地球軌道と交差しており地球と衝突する。

アブダクションによる<結論> \* :プレートテクトニクスの起源関係の流動 ◎ : キンバーライトパイプの起源と流動，ダイヤモンド形成

(1)月の起源 : マントル片が地球に衝突(12.4km/s, 36.5度:理論計算から)し，軌道半径60・Re位置に形成，月形成メカニズム

\* (2)環太平洋弧状列島縁海起源 : 月形成時の太平洋位置衝突では，全方向へ凹縁海形成。

\* (3)月形成衝突で大量のマントル欠損により，コア偏芯(約10%)のブラジルのバンアレン帯が低下。

\* (4)CERRAが木星摂動で軌道偏平し断裂するまで約5~6億年掛かり，既に分化冷却していた。

\* (5)地球へ複数のマントル片が衝突して，マントル剥離しアイソスタシーで-5kmの地球表面の70%海が形成した。

\* (6)プレートテクトニクスPTの起源，駆動力は衝突による偏芯と慣性モーメントの最小化である

\* (7)プレート境界の起源 : マントル片衝突による地殻剥離と亀裂形成

\* (8)弧状列島と縁海盆凹プレートの起源 : 衝突によるマントル欠損とアイソスタシーでプレート凹形成

\* (9)凸プレート沈み込み開始の起源 : その駆動力で凹プレートと凸プレートが押し合うと凹の下に凸が潜り込む原因となる。

◎ (10)何故キンバーライトパイプが南アのプレミアやロシアのミルーヌィ地区に形成されたのか?

⇒ハワイ位置の衝突，衝突エネルギーが地球反対側に集中して内圧となりパイプが噴出した，その後大陸移動した。

◎ (11)ミルーヌィ鉱山の反対側のDrake Passagelに衝突して，南極大陸が移動して安定化した。

◎ (12)何故地軸が公転面から23°傾いたか? ⇒そのDrake(高緯度)位置へのCERRA分裂片の衝突と推定した。

(13)CERRAの断裂時の破片は小惑星帯の起源である。長半径(運動エネルギー)の分布で理解

(14)隕石には，分化した石質・石鉄・鉄隕石が混在しているがそれはCERRAの破片と理解できる。

(15)CERRAの破片は複数あり，順次衝突して度重なる生物絶滅が起きた。

(16)セラのコアとマントルの一部は質量が大きい為に速度が低下し，エネルギー等分配の法則により軌道エネルギーの低い水星(多くの割合をコアが占める)となった。

(17)CERRAの破片が木星へ衝突した事が，大赤斑の起源となった。

cf. シューメーカーレヴィ9号彗星が1997年7月に木星に衝突し，衝突痕は小赤斑として約半年間残った。

彗星より大きいセラの破片なら，数億年前から消えることなく大赤斑を維持できる。これで実証実験が済んだ

のか?

小惑星帯の起源を推定することで、サンプルリターン計画で何を解明するかのが目的が明確となる。

キーワード：チチウスボーデの法則、月の形成メカニズム、プレートテクトニクスの駆動力、マルチインパクト仮説、アブダクション

Keywords: Titius-Bode's law, the formation mechanism of the moon, the driving force of plate tectonics, Multi-Impact Hypothesis, Abduction

The Origin of The Moon and The Earth in Multi-Impact Hypothesis 2016 5/23

# Abduction の成果

## ゴンドワナ大陸の亀裂形成と キンバリーパイプの成因と分布

**原因:**  
裏面Mantle隕石衝突  
衝撃波集中⇒圧力  
衝撃力=パイプ形成  
亀裂: ● 17.5億年前  
移動: ○ 約1億年前  
衝撃波=パイプ形成

出典: 諏訪兼位 著  
「アフリカ大陸から  
地球がわかる」  
岩波ジュニア新書2003  
p103,p108,  
プロット 種子彰  
data: パスタリス他

■: ダイヤモンド産出・キンバライト噴出有り  
□: ダイヤモンド産出・キンバライト噴出無し。  
●: ダイヤモンド産出無し・キンバライト噴出有り。  
○: ダイヤモンド産出無し・キンバライト噴出無し。  
(J. D. Pasteris, 1983 による)

約17.5億年前  
Pole

Ice-flow direction →

キンバリーパイプ(噴出)と、  
ダイヤモンド産出状況

図. 3 Ice-flow directions, palaeomagnetic pole position and extent of Late Carboniferous glaciations.