

## 薄い球殻内の熱対流とMHDダイナモ

### MHD convection and dynamo in a spherical thin shell

\*陰山 聡<sup>1</sup>、古菌 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

薄い球殻内部のMHD対流とMHDダイナモを計算機シミュレーションで調べた。対流層は半径 $r=0.9$ から $1.0$ までとし、球の原点 $r=0$ から $r=0.9$ までは（対流層と同じ磁気拡散率を持つ）固体層とした。今回は回転の遅い状態について特に注目した。このとき、対流は(1)多数のリング状のロールの集まりとなるか、または(2)一本の（長い）螺旋型のロールになるかの二つの特徴的な構造が見られた。このロール状対流はダイナモ作用をもち、磁場が生成・維持されることも確認した。なお、シミュレーションには最近開発した全球格子イン=ヤン=ゾン格子を利用した。

キーワード：MHDダイナモ、球殻、イン=ヤン=ゾン格子

Keywords: MHD dynamo, Spherical shell, Yin-Yang-Zhong grid

# 正多面体対流ダイナモ

## MHD Dynamo by Polyhedral Convections

\*上田 佳輝<sup>1</sup>、陰山 聡<sup>1</sup>

\*Yoshiki Ueda<sup>1</sup>, Akira Kageyama<sup>1</sup>

1. 神戸大学

1. Kobe University

本研究ではこれまであまり追求されていなかった低レイリー数と遅い自転速度  $\Omega$  をもつ回転球殻MHD対流系でのMHDダイナモについて計算シミュレーションで詳しく調べた。なお、過去の研究から、このような系での対流は正多面体構造をもつことが知られている。シミュレーション計算には、最近開発した全球用計算格子 Yin-Yang-Zhong格子 [Hayashi & Kageyama, JCP, 2016] を用いた。球殻半径比は $r_i/r_o=0.7$ とした。その結果、以下の5点を明らかにした：(1)  $\Omega$ が小さいときの対流の基本構造は(予想通り)正四面体と正六面体である。(2) これらの対流構造は  $\Omega$ を上げてても比較的安定である。(3) どちらの多面体対流も  $\Omega > 0$  で磁場が成長する。(4)  $\Omega > 0$  では多面体の頂点における下降流が螺旋型の流れを持ち、それがダイナモの起源である。(5)  $\Omega$ をさらに上げるとダイナモが消失する。

キーワード：MHDダイナモ、球殻、Yin-Yang-Zhong格子

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

# Investigation of Sub-Grid Scale (SGS) terms for dynamo simulations in a rotating spherical shell

\*松井 宏晃<sup>1</sup>、Buffett Bruce<sup>2</sup>

\*Hiroaki Matsui<sup>1</sup>, Bruce A. Buffett<sup>2</sup>

1. Dept. of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, 2. Dept. of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley

1. Dept. of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, 2. Dept. of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley

The flow in the Earth's outer core is expected to have vast length scale from the geometry of the outer core to the thickness of the boundary layer. Because of the limitation of the spatial resolution in the numerical simulations, sub-grid scale (SGS) modeling is required to model the effects of the unresolved field on the large scale fields. We model the effects of sub-grid scale flow and magnetic field using a dynamic scale similarity model. Four terms are introduced for the momentum flux, heat flux, Lorentz force and magnetic induction.

In the present study, we adapt the dynamic scale similarity methods to Calypso, which is a numerical dynamo model using spherical harmonics expansion. Spatial filtering operations is required for the scale similarity model. The spatial filtering in the horizontal directions is done by taking the convolution of the Gaussian and spherical harmonics expansion by following Jekeli (1981). The Gaussian filter is applied explicitly in the radial direction. We evaluate the SGS terms in the fluid shell using a snapshot of a fully resolved dynamo simulation using 0.4 and 1/4 coarser resolution in each direction. The evaluated SGS term evaluated has a good correlation with the SGS term directly evaluated on the fine grid to 0.4 times coarser resolution of the reference resolution. The dynamic scale similarity model does not well represent SGS terms near the outer boundary around the equator. The reason is that smaller scale flow motion is excited near the outer boundary than that for the main convective region. Consequently, simulation domain does not have enough spatial resolution to satisfy the scale similarity model near the outer boundary around equator. The scale of the convection around equator near the outer boundary controls the required resolution to work the present SGS model properly.

キーワード : ダイナモシミュレーション、sub-grid scale モデル

Keywords: dynamo simulation, sub-grid scale model

## 磁場をかけた液体金属の対流において秩序構造が変化する過程 Gradual changes of an ordered flow structure in a liquid metal convection with reducing magnetic field

\*柳澤 孝寿<sup>1</sup>、石見 亘<sup>2</sup>、田坂 裕司<sup>2</sup>、櫻庭 中<sup>3</sup>、Vogt Tobias<sup>4</sup>、Eckert Sven<sup>4</sup>

\*Takatoshi Yanagisawa<sup>1</sup>, Wataru Ishimi<sup>2</sup>, Yuji Tasaka<sup>2</sup>, Ataru Sakuraba<sup>3</sup>, Tobias Vogt<sup>4</sup>, Sven Eckert<sup>4</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. 北海道大学大学院 工学研究院、3. 東京大学大学院 理学系研究科、4. Helmholtz Zentrum at Dresden-Rossendorf

1. Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Faculty of Engineering, Hokkaido University, 3. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 4. Helmholtz Zentrum at Dresden-Rossendorf

Studies of magnetoconvection and rotating convection by liquid metals are both important for understanding the dynamics of flow in planetary cores. On magnetoconvection, we studied the Rayleigh-Benard convection under a horizontal uniform magnetic field by laboratory experiments (Yanagisawa et al. 2013, Tasaka et al. 2016). We have established a regime diagram of convection style on the plane of the Rayleigh number ( $Ra$ ) and the Chandrasekhar number ( $Q$ ). Convection regimes are classified well by the value of  $Ra/Q$ ; when  $Ra/Q < 1$  (strong magnetic field), the flow pattern shows steady roll structure whose axes are aligned to the magnetic field. On the other hand, it shows a vessel scale turbulent flow structure with many fluctuations when  $Ra/Q > 100$  (weak magnetic field). Among these two extremes, we can identify several flow regimes, such as, oscillation of rolls, repetition of roll number transitions, reversal of the flow direction in rolls. Here we focus on the transitions process from steady laminar flow to turbulent flow by gradual decreases in the  $Q$ , at fixed values of the  $Ra$ . We performed both laboratory experiments and numerical simulations, and made up a comprehensive view of the process that the convection structure loses the initial ordered roll state. In laboratory experiments, we used an ultrasonic measurement of flow velocity profiles with newly developed transducers to achieve measurements under a strong magnetic field. In numerical simulations, we used sufficient grid points to resolve well the Hartmann layers generated at side walls of the vessel. At very high  $Q$ , the pattern shows almost 2-dimensional roll structure, but we observed the existence of small velocities of flow parallel to the imposed magnetic field. Detailed study on the distribution of this flow elucidated that it is a kind of suction generated by the circulation of 2-D rolls. With reducing the  $Q$ , this component of flow velocity is getting larger, and secondary vortices emerge at the boundaries of main rolls. Time variations of the roll structure are closely related to the migration of these secondary vortices. At smaller value of the  $Q$ , the rolls begin large amplitude of oscillation and 3-D behavior becomes dominant.

キーワード：液体金属の対流、磁場、流れのパターン

Keywords: liquid metal convection, magnetic field, flow pattern

## Advection and shape transition of vortices in a rotating Rayleigh-Bénard convection

\*能登 大輔<sup>1</sup>、田坂 裕司<sup>2</sup>、村井 祐一<sup>2</sup>、朴 炫珍<sup>2</sup>、柳澤 孝寿<sup>3</sup>

\*Daisuke NOTO<sup>1</sup>, Yuji TASAKA<sup>2</sup>, Yuichi MURAI<sup>2</sup>, Hyun Jin PARK<sup>2</sup>, Takatoshi YANAGISAWA<sup>3</sup>

1. 北海道大学大学院工学院、2. 北海道大学大学院工学研究院、3. 海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野

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

Thermal convection confined between two parallel plates is called Rayleigh-Bénard convection. In considering various fluid dynamics appearing in natural phenomena, this system is the most fundamental one to investigate from perspectives of theoretical, numerical, and experimental approaches. Taking geophysical fluid dynamics, such as atmosphere, ocean, and convection in the outer core, into consideration, the effect of background rotation should be conceived and inevitable. Certainly, the Rayleigh-Bénard convection in a rotating field induces roughly divided two fascinating events. The first one is the appearance of vortical structures because of the influence of the Coriolis force. In non-rotating fields, convection cells or rolls appear, however such structures are transformed by the Coriolis force in a rotating field. Another event is the enhancement of heat transfer because of the Ekman pumping. The phenomena appearing in rotating Rayleigh-Bénard convection are organized by three dimensionless numbers, Rayleigh number  $Ra$ , Prandtl number  $Pr$ , and Taylor number  $Ta$ . Especially, the vortex behavior under the enhancement of heat transfer is paid attention in this study. The objective is to elucidate the vortex dynamics experimentally and quantitatively.

Water suspended with temperature-sensitive liquid crystals is used as a working fluid in order to visualize vortical structures. The fluid layer is composed of an acrylic cylindrical wall with the inner diameter 190 mm and the height 40 mm, which giving aspect ratio 4.75. The fluid layer is heated from the bottom with heater and cooled from above through a glass plate with circulating water from a thermostatic bath. All the parameters are fixed at  $Ra = 1 \times 10^7$ ,  $Ta = 1 \times 10^8$ ,  $Pr = 7.01$ . Photographing is performed by 3-seconds interval from above the fluid layer by a digital camera.

From visualized images, the horizontal temperature fields are obtained by means of a kind of temperature calibration method. The unevenness in the temperature fields are regarded as the vortices. To detect vortices, the template matching, which is well known as one of the pattern recognition techniques, is performed. Additionally, detected vortices are categorized into several patterns depending on its temperature distribution shapes using the equation of ellipsoid. In this process, radius representing the size of a vortex, height expressing the temperature gap between the center and edge in a single vortex, and curvature showing the temperature gradient, can be modified and categorized. From these procedures, the coordinates and temperature distribution shapes of vortices are determined.

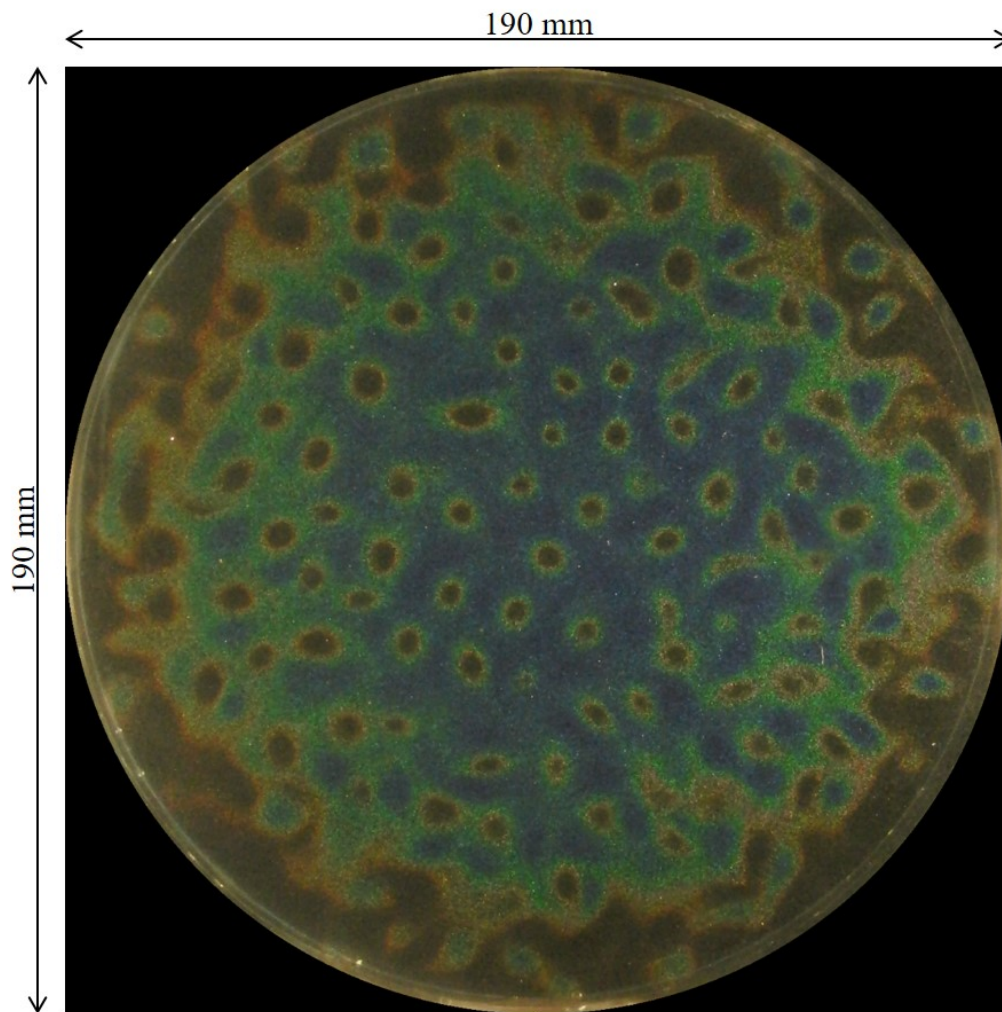
By tracking vortex advections for time course, the vortex dynamics is revealed. In a short time scale, the direction of vortex advection is disorderly. In a longer time scale, the path-lines of up-welling vortices draw hexagonal patterns around a down-welling vortex. In a much longer time scale, the advection is dominated in the radial direction because of the centrifugal force. Such extremely complicated vortex dynamics are observed in entire the fluid layer and thought to be caused by mutual interaction among vortices and the centrifugal force. Accordingly, further experimental studies should be performed.

Moreover, the temperature distribution shapes categorized by the vortex detection method are also tracked for time course. In accordance with the transition of the shapes, as for up-welling vortices, generation occurs near the sidewall and moves toward the center of the fluid layer. The height is getting shorter and the curvature is getting larger along the advection. On the other hand, as for down-welling

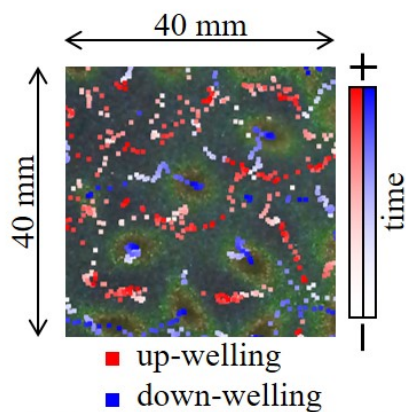
vortices, generation occurs in the center and moves to the sidewall of the fluid layer. The height becomes shorter and shorter, and the curvature is getting smaller along the advection. Such transition of temperature distribution shapes along the vortex advection seem to relate the enhancement of heat transfer.

キーワード：自然対流、回転場、流れ模様、画像処理

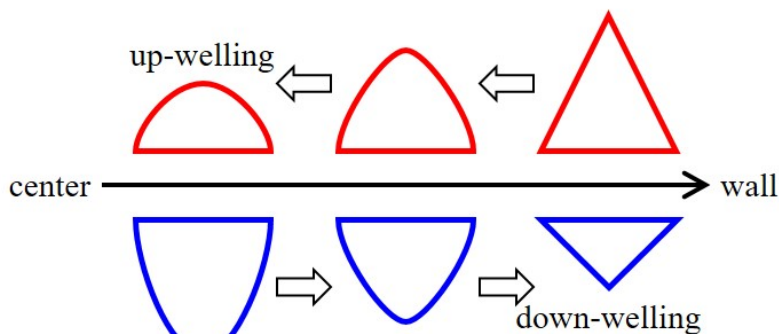
Keywords: Natural convection, Rotating field, Flow pattern, Image processing



Visualized image using temperature-sensitive liquid crystals



Path-lines of vortices for 90 s



Transition of horizontal temperature distribution shape of vortices

# Guinnessで特徴的な気泡粗密波に関する実験的研究

## Experimental study for bubble waves characteristically seen in Guinness

\*木下 茜<sup>1</sup>、寅丸 敦志<sup>1</sup>

\*Akane Kinoshita<sup>1</sup>, Atsushi Toramaru<sup>1</sup>

1. 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

An analog experiment was performed to investigate the hydrodynamic behavior of a two-dimensional bubbly flow. Bubble waves, spatially periodic distribution of bubbles in bubbly flows, are sometimes observed in various natural situations. In particular, a pint of Guinness beer is a familiar and impressive example of bubble waves. The bubbles are distributed nearly uniformly at the moment when Guinness is poured in a pint glass, and a few seconds later, layers or waves of bubbles develop and propagate downward. Previous works studied the formation and development processes of these waves only theoretically. The present study provides experimental data for characteristics of bubble waves and examines the validity of mathematical models by previous works.

We conducted a series of analog experiments using water and the hollow glass particles (glass bubbles) as analog materials of a beer liquid and bubbles, respectively, presuming that the bubble waves in Guinness are caused by the relative motion between rigid spheres and liquid by buoyancy due to the density difference, but not by the formation and dissolution process of bubbles. We mixed the liquid and the glass bubbles in a rectangular container by gently shaking it. The bubble segregation or relative upward migration of bubbles starts from the homogeneous mixture as an initial state just after stopping shaking. We found that the bubble waves form during the upward segregation of bubbles under some conditions. In order to constrain factors governing the formation of bubble waves, we conducted the series of experiments with varying the volume fractions of the glass bubbles, sizes of them and the inclination of the container. We found that the bubble waves formed only when we incline the container, that is, with non-vertical side wall. If we set the container vertically, the bubble waves didn't form. On the other hand, if we incline the container, we observed a bubble-free layer along the lower inclined wall where liquid flows downward. The wave like structure of the glass bubbles with the wave length about 7mm developed near the lower wall of the inclined container under certain conditions. We represent the condition for wave formation as a phase diagram which is a function of controlling parameters. It is important that the wave formation requires non-zero positive value of inclination, in such conditions a thin bubble-free layer near the lower wall develops. It is found that the wavy structures reached steady state after a certain period of time of transient state, and eventually the formation of waves stopped. The ratio of duration time of wave formation at steady state to total duration time is nearly constant regardless of controlling parameters. We analyzed the time development of waves and obtained wave velocity and frequency by image analysis for the movies. Waves propagated at constant velocity during a certain period of time after their formation, and slowed down before their disappearance near the bottom. They sometimes coalesced each other, unlike a solitary wave. The wave velocity at early 20s of steady state was constant at any conditions, and the wave frequency was proportional to the volume fraction of the glass bubbles. Our experimental results suggest that the bubble-free layer plays an important role in wave formation rather than the bubble nucleation and growth or diffusion, and that the wave formation can be described by the two-dimensional shallow water theory leading to the roll waves. We propose the formation mechanism of bubble waves by applying the linear stability analysis on the roll waves at the thin fluid film in an inclined

channel to the bubble-free layer along the lower side wall.

キーワード : バブルウエーブ、気泡流、気泡の周期的分布、2次元流、アナログ実験

Keywords: bubble wave, bubbly flow, periodic distribution of bubbles, two-dimensional flow, analog experiment



# 底面が回転する円筒容器内の軸対称流の側壁境界領域と不安定

## Sidewall boundary region and instability of an axisymmetric flow in a cylindrical tank with a rotating bottom

\*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、軸対称な環境下でもしばしば非軸対称な流れが形成される。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実現できる。

このような現象を理論的に取り扱うために、これまで、基本場となる軸対称流の解析を行ってきた。理論と室内実験結果を比較すると、側壁境界付近で水面高に若干の違いがあることがわかった。この領域での角運動量収支を考えることによって、水面高を正確に予測する理論を示すことができた。

得られた流れ場に基づいて軸対称流の不安定を調べた。問題を浅水系として考え、不安定モードを計算したが、その結果は実験結果と異なっているところも見られる。浅水系として取り扱うことが、不安定モードの存在範囲をずらすだけでなく、本来共鳴すべき波の分散曲線と重なりあわなくなって不安定モードの存在自体にも大きな影響を与えている可能性がある。

キーワード：回転流体、不安定、浅水波、室内実験

Keywords: rotating flow, instability, shallow water waves, laboratory experiment

## コンクリート + フラクタル日除け = クールアイランド Concrete Buildings + Fractal Sunshade = Cool Island

\*酒井 敏<sup>1</sup>、菅原 広史<sup>2</sup>、三坂 育正<sup>3</sup>、成田 健一<sup>3</sup>、本條 毅<sup>4</sup>、清田 誠良<sup>5</sup>、仲吉 信人<sup>6</sup>  
\*Satoshi Sakai<sup>1</sup>, Hirofumi Sugawara<sup>2</sup>, Ikusei Misaka<sup>3</sup>, Kenichi Narita<sup>3</sup>, Tsuyoshi Honjo<sup>4</sup>,  
Nobuyoshi Kiyota<sup>5</sup>, Makoto Nakayoshi<sup>6</sup>

1. 京都大学人間・環境学研究科、2. 防衛大学校、3. 日本工業大学、4. 千葉大学大学院、5. 広島工業大学、6. 東京理科大学  
1. Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, 2. Defense Academy of Japan, 3. Nippon  
Institute of Technology, 4. Chiba University, 5. Hiroshima Institute of Technology, 6. Tokyo University of Science

都会のコンクリートは、都市のヒートアイランドの元凶のように言われる。実際、夏の直射日光にさらされたコンクリートは周囲の気温より30°C程度高くなる。しかし、昼間に関しては、熱慣性の大きなコンクリートはむしろ都市の温度上昇を抑える役割をしているはずである。それにも関わらず、非常に高温になってしまう原因は、素材としての特性ではなく形状にある。ビルや道路のような人工物はメートル単位の大きさの表面を持つ。それに対して、自然の樹木の葉は数cm程度の大きさである。大きな表面積を持つ物体からの熱伝達率は小さいので、コンクリートに太陽からの熱をため込んでしまうと、それを放出するために非常に高温にならざるを得ない。これに対して、人工物でありながら、樹木の葉に近い形状にして、空気に対する熱伝達率を低く抑えたものがフラクタル日除けである。この日除けで太陽光を遮蔽し、コンクリート本来の高い熱慣性を利用すれば、日中の都会はクールアイランドになるはずである。

これを実証するために、日本工業大学の都市模型COSMOにフラクタル日除けを設置した。COSMOは100m×50mのコンクリート基盤の上に、ビルに見立てた1.5m角のサイコロ状のコンクリートブロック512個を3m間隔で並べたものである。壁面を含めたコンクリート表面の面積は、地表面積の2倍あるので、全体のバルクの熱慣性はコンクリート平面の2倍となる。ここに20m×20mのフラクタル日除けを設置し、日除けのない区画との比較を行った。フラクタル日除けは、南中時に遮光率最大になる層に加えて、午前と午後の日射を遮る層を設け、3層構造となっており、1日中ほぼ遮光率90%程度を維持している。また、比較のためCOSMOに隣接した草地での観測も行った。

フラクタル日除け下の区画、直射日光下のコンクリート区画、COSMOに隣接した草地で気温観測を行ったところ、日中の気温はフラクタル日除け下が最も低くなった。昼間の気温の鉛直分布を見ると、草地とコンクリート区画では、地表面に近いほど気温が高く不安定成層をしているのに対し、フラクタル日除け下では安定成層をしており、コンクリートが吸熱源として働いていることが確認できた。

キーワード：フラクタル日除け、ヒートアイランド、熱慣性  
Keywords: Fractal Sunshade, Heat Island, Thermal Inertia

## 円筒形渦シート上の摂動の特異値解析

# Singular-Value Analyses of Perturbations on a Cylindrical Vortex Sheet

\*板野 稔久<sup>1</sup>

\*Toshihisa Itano<sup>1</sup>

1. 防衛大学校

1. National Defense Academy

円筒形渦シートは、無限小の厚さをもつ渦度無限大の円筒形部で構成される理想的な渦であり、しばしば竜巻状の渦にみられる多重渦構造を説明するモデルとして用いられてきた。例えば、この円筒形渦シートを親渦とし、その上で発生・発達する非軸対称な摂動を親渦の中に形成される二次渦とみなして、その線形安定性を調べるというような具合である。円筒形渦シートを基本場とする場合、無限小厚の円筒部以外は渦なしの流れであるため、ベルヌーイの式が支配方程式となる。

ここで注意すべきことは、有限の評価時間の間に最も早く成長する摂動の形と成長率を知るためには、固有値解析ではなく、特異値解析を実施することが必要である、という点である。これは、系に存在する非正規性のため、たとえ線形の範囲に議論を限定したとしても、最大発達率を持つ固有モードが有限の評価時間の間に最も早く成長する摂動とは一般にならないためである。そこで本研究では、円筒形渦シートを基本場として、その上で発生・発達する擾乱の特異値解析を実施した。特異値解析を実施するにあたり、摂動の成長を計測するための指標となるノルムを指定する必要があるが、ここでは3種類のノルム（すなわち、L2ノルム、エネルギーノルム、およびソボレフノルム）を採用して、そのそれぞれについて特異値を解析的に導出した。その結果、固有モードを超える摂動の成長がすべてのパラメータ空間でみられ、その多くにおいて、基本的にエネルギーノルム、ソボレフノルム、L2ノルムの順に振幅が大きくなることが明らかとなった。

キーワード：特異値解析、円筒形渦シート、多重渦

Keywords: singular-value analysis, cylindrical vortex sheet, multiple vortex

# 高温多湿大気における積雲対流の数値実験

## Numerical Experiments on Cumulus Convection in Hot and Humid Environment

\*中島 健介<sup>1</sup>、谷川 琢也<sup>2</sup>、杉山 耕一朗<sup>3</sup>、小高 正嗣<sup>4</sup>、石渡 正樹<sup>4</sup>、竹広 真一<sup>5</sup>、林 祥介<sup>6</sup>

\*Kensuke Nakajima<sup>1</sup>, Takuya Tanigawa<sup>2</sup>, Ko-ichiro SUGIYAMA<sup>3</sup>, Masatsugu Odaka<sup>4</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>4</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>5</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>6</sup>

1. 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、3. 松江工業高等専門学校 情報工学科、4. 北海道大学大学院宇宙理学専攻、5. 京都大学数理解析研究所、6. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻/惑星科学研究センター(CPS)

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 3. Matsue College, National Institute of Technology, 4. Department of CosmoScience, Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 6. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University / Center for Planetary Science (CPS)

### 1 はじめに

海を持つ地球型惑星における生存可能条件の決定に重要な概念として「暴走温室状態」がある。これは海からの水蒸気供給と温室効果の正のフィードバックの暴走であり、Komabayashi (1967), Ingersoll (1969)、Nakajima et al (1992)によって定量的に議論された。彼らは大気上端から射出される放射量の上限(放射限界)の存在の重要性を示した。その値は、温度構造や相対湿度に依存し(たとえば Ishiwatari et al 2002)、これらは大気の運動構造、特に積雲対流の影響を受ける。しかし、暴走温室状態の発生に近い、高温多湿大気における積雲対流の構造はわかっていない。そこで本研究では雲解像モデルを用いて実験を行う事で、その特徴を明らかにし、暴走温室状態のより詳しいプロセスの解明につなげたい。

### 2 モデルと数値実験の設定

本研究では地球流体電脳倶楽部で開発されている雲解像モデルdeepconv (Sugiyama et al 2015)を用いる。計算領域は水平128km、鉛直20km、また格子点間隔は水平250m、鉛直200mとする。温度と湿度はYamasaki(1983)の値を基準とし、これからさらに10、20、40K高温とした計算を行った。積分は10日間行う。

### 3 結果

現在の地球大気では一般的に積雲対流の上昇域は周囲より高温高湿であるが、今回の計算では、周囲より低温高湿であることが発見された。これは、高温多湿で水蒸気量が多い環境では、積雲対流が、空気と水蒸気分子量差により駆動される「組成対流」の性質を強く持つことを示す。詳細は口頭発表で説明する。

### References

Ingersoll, Andrew P. "The runaway greenhouse: A history of water on Venus." *Journal of the atmospheric sciences* 26.6 (1969): 1191-1198.

Ishiwatari, Masaki, et al. "A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional gray atmosphere." *Journal of the atmospheric sciences* 59.22 (2002): 3223-3238.

Komabayashi, M. Discrete equilibrium temperatures of a hypothetical planet with the atmosphere and the hydrosphere of a one component-two phase system under constant solar radiation. *J. Meteorol. Soc. Jpn* 45, 137-139 (1967).

Nakajima, Shinichi, Yoshi-Yuki Hayashi, and Yutaka Abe. "A study on the "runaway greenhouse effect" with a one-dimensional radiative-convective equilibrium model." *Journal of the atmospheric sciences*

49.23 (1992): 2256-2266.

Sugiyama, K., Odaka, M., Yamashita, T., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., deepconv Development Group, 2015: Non-hydrostatic model deepconv, <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>, GFD Dennou Club.

Yamasaki, M., 1983: A further study of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection. *Pap. Meteor. Geophys.*, **34**, 221-260.

キーワード：惑星大気、積雲対流、暴走温室状態、数値モデリング、組成対流

Keywords: planetary atmospheres, cumulus convection, runaway greenhouse state, numerical modeling, compositional convection

# 風波実験水槽設計にみる工学系と理学系の視点の違いとその応用例

## Different viewpoint of researchers in science and engineering for making a wind-wave tank

\*高垣 直尚<sup>1</sup>

\*Naohisa TAKAGAKI<sup>1</sup>

1. 兵庫県立大学

1. University of Hyogo

これまでに、風波水槽を用いた室内実験研究は数多く行われている。例えば、過去には、室内実験の成果も寄与して、風波の発達に関する吹送距離則や局所平衡則（鳥羽の2分の3乗則）が発見されており、また、海塩粒子やホワイトキャップの生成機構、海水面を通しての熱物質輸送機構などが検討されてきた。近年では、台風が発達が海水面を通しての運動量および熱輸送量に強く依存することから、また実海洋での台風下でのフィールド観測では多くの危険が伴うことから、過去に利用されたよりもより大型でより高風速まで実現可能な風波水槽が各国で稼動しつつある。そこで、本発表では、これらの風波水槽の設計上での理学系研究者と工学系研究者の視点の違いを紹介し、また風波水槽を使用した最新の研究成果を紹介する。

キーワード：室内実験、風波水槽

Keywords: laboratory experiment, wind-wave tank

# 格子ボルツマン法による2次元流体コードの開発とcoarray並列化

## Development of Two-Dimensional Lattice Boltzmann Code and Its Coarray parallelization

\*三好 淳太<sup>1</sup>、陰山 聡<sup>1</sup>

\*Junta Miyoshi<sup>1</sup>, Akira Kageyama<sup>1</sup>

1. 神戸大学

1. Kobe University

数値流体力学の比較的新しい計算手法として格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) が近年注目を集めている。格子ボルツマン法は多孔質材料中の流れなど、複雑な流体を比較的簡単に解くことができることと、大規模な並列計算に適しているという特徴がある。

格子ボルツマン法はすでに成熟した計算手法であるため、すでにオープンソースのシミュレーションコードがいくつか存在し、典型的な応用問題に対してはそのコードを利用できる環境は整っている。しかし、本研究ではあえてそのようなコードは利用せず、新しい格子ボルツマン法コードをゼロから開発した。それは格子ボルツマン法の基本をしっかりと理解するために不可欠であるだけでなく、将来、格子ボルツマン法を新しい問題に適用するには自分で作ったコードを発展させるのが結局は効率的であると考えたためである。

本研究は、格子ボルツマン法を応用した新しい計算手法を将来開発するための基礎研究・開発である。2次元流体を解く基本的な格子ボルツマン法のシミュレーションコードを開発し、定量的なテストを行い、さらに並列化も行った。

並列化は Fortran 2008 のcoarray 並列化を採用した。coarrayは格子ボルツマン法のように単純な計算格子を持つ計算手法の並列化に有効である。実際に格子ボルツマン法コードのcoarray 並列化を行ったところ、現在標準的な並列化手法として広く採用されているMPIによる並列化に比べて格段に並列化が容易であるだけでなく、並列化後のシミュレーションコードの可読性も高いことを確認することができた。

2次元格子ボルツマン法コードのテストとして、クエット流、ポアズイユ流、粘性の評価計算の3種類の定量的テストを行った。そしてそれぞれの解析解(理論値)と今回開発した格子ボルツマン法コードの計算結果が一致することを確認した。

キーワード：格子ボルツマン法、Coarray並列化、Fortran 2008

Keywords: Lattice Boltzmann Method, Coarray parallelization, Fortran 2008

# Preliminary results of linear stability analysis on the onset of convection in a thick rotating spherical shell with implications for a dynamo in an icy moon

\*谷口 陽菜実<sup>1</sup>、高橋 太<sup>1</sup>

\*Taniguchi Hinami<sup>1</sup>, Futoshi Takahashi<sup>1</sup>

1. 九州大学

1. Kyushu University

Convection in the fluid core of a terrestrial planet, which maintains its intrinsic magnetic field by dynamo action, is driven by thermal and/or chemical buoyancy. In case of the Earth, the former is fed by secular cooling of the core, latent heat release upon inner core solidification, and possibly decay of radioactive elements in the core, while the latter arises from light element ejection into the outer core at the front of inner core growth. On the other hand, let us consider a celestial body smaller than the Earth. In that case, compositional convection could occur in various ways due to different pressure-temperature conditions, strongly depending on bulk sulfur content in the core. Among them, we here focus on the iron snow process, which might drive the present Ganymede's dynamo.

In order to understand a basic flow structure of convection driven by the iron snow process, onset of thermal/compositional convection in rotating spherical shells is studied with linear analysis. First, we consider thermal convection of a Boussinesq fluid contained in a rotating spherical shell. We solve the linearized equations as an eigen-value problem, and then, check validity of our linear code by comparing the results with those in a literature (Ardes et al., 1997). Thus, the Ekman number adopted here is not very low. Afterwards, linear stability problem of compositional convection driven by iron snow is examined. In this case, relative inner core size smaller than the Earth is given to mimic possible Ganymede's core geometry. Using the results, we then solve kinematic dynamo problem to gain some insights into dynamos driven by iron snow. We will report our preliminary results about these issues.

キーワード：熱対流、組成対流、キネマティックダイナモ、線型安定性解析、鉄雪

Keywords: thermal convection, compositional convection, kinematic dynamo, linear stability analysis, iron snow



## 地球外核最上部の安定成層におけるトロイダル背景磁場の影響を受けた赤道波

### Equatorial waves modified by the presence of a toroidal magnetic field within the stably stratified layer at the top of the Earth's outer core

\*中島 涼輔<sup>1</sup>、吉田 茂生<sup>2</sup>

\*Ryosuke Nakashima<sup>1</sup>, Shigeo Yoshida<sup>2</sup>

1. 九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

地球の外核最上部には安定成層が存在する可能性は以前から指摘されており（例えば、Buffett, 2014）、地震学による観測的証拠も見つかってきている（例えば、Helfrich and Kaneshima, 2010）。安定成層があると水平流が卓越するようになるので、大気や海洋で用いられている静水圧近似を用いた力学に磁場の影響を加えれば、外核最上部の流体運動に応用できることが予想される。

本研究では、そのような外核最上部での赤道域の波動について考えた。この研究を始めるきっかけとなったのは、赤道付近の地球磁場には特徴的な変動があることが知られているからである。たとえば、Chulliat et al.(2015)は、永年加速（secular acceleration）から約6年周期の赤道付近に局在する定在波的な変動を見つけた。また、Finlay and Jackson(2003)などの多くの研究では、地磁気の西方移動は赤道付近で顕著であることが示されており、外核の赤道域の流れの様子は、非常に興味深い。

今回用いる基礎方程式は、線形化した非散逸のブシネスクMHD方程式である。さらに、静水圧近似と赤道ベータ面近似を用い、東西方向成分のみの背景磁場を仮定する。これらの近似により、水平方向と鉛直方向に変数分離ができる。特に、水平方向の式は、MHD (magnetohydrodynamics) 浅水波方程式（例えば、Gilman, 2000; Zaqarashvili et al., 2008など）に一致する。

解析的、および数値的に分散関係と固有関数を求め、東西磁場の赤道波に対する影響を調べた。

まず、一様な東西磁場が存在する場合を考える。このとき、慣性重力波やロスビー波などは、磁場なしの場合に比べ、周波数が大きくなり、より赤道に局在するようになる。また、中緯度ベータ面近似の場合に現れるMCロスビー波は赤道にはトラップされないことが分かった。

次に、東西磁場に緯度依存性を持たせると、アルフベン波が連続的な固有値を持つようになる。また、固有モードの東西位相速度とアルフベン速度が一致する緯度で共鳴が発生する。

キーワード：外核最上部、安定成層、赤道波、MHD浅水波方程式

Keywords: the uppermost outer core, stable stratification, equatorial waves, MHD shallow water equations

## シースプレー測器による海上観測計画：海面砕波と海洋性エアロゾル生成の時空間構造を捉える

### A Marine-field Optical Particle Counter for Sea-Spray Measurements: Understanding the Relationship Between Surface Wave Breaking and Aerosol Generation

\*相木 秀則<sup>1</sup>、根田 昌典<sup>2</sup>、田中 潔<sup>3</sup>、久島 萌人<sup>1</sup>、油布 圭<sup>4</sup>

\*Hidenori AIKI<sup>1</sup>, Masanori Konda<sup>2</sup>, Kiyoshi Tanaka<sup>3</sup>, Moeto Kyushima<sup>1</sup>, Kei Yufu<sup>4</sup>

1. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所、2. 京都大学 大学院理学研究科、3. 東京大学 大気海洋研究所、4. 九州大学 応用力学研究所

1. Nagoya Univ., 2. Kyoto Univ., 3. The Univ. of Tokyo, 4. Kyushu Univ.

台風シミュレーション研究などで最近では大気・海洋・波浪結合領域モデルがよく使われているが、将来的には大気側にはエアロゾルプロセスを海洋側には低次生態系プロセスを組み込み、大気海洋間フラックスによる包括的な影響の整合性検証をすることが期待されている。従来の大気化学研究では衛星や地上ライダー観測によって上空数百mから数kmにかけてのエアロゾル分布と雲物理の関係解明を推進してきた。ところが海洋性エアロゾルの生成源である海面近傍（海面から海上数mまでの範囲）のシースプレー観測は国内ではあまり行われていない。そこで本研究プロジェクトでは、海上観測プラットフォーム（係留ブイ・海上観測塔）のような強風・塩水飛沫にさらされる環境下において、シースプレーの粒径別個数の時系列を計測できるような測器の実用化を目指している。2016年度には防水・軽量・省電力型の光学粒子計とロガーの一体型測器の試作機を独自に調達した。この試作機の特徴は(i)将来的には超音波乱流風速計と同期させてフラックス測定（渦相関法）ができるようにシースプレーの測定間隔が0.1秒になっている、(ii)風波の一つ一つの砕波による空気中の粒子数変化や水面波との位相関係を調べる事ができるように3軸加速度計を内蔵していることである。2017年度には、試作機および観測システムの安定度および測定精度の検証・将来的なフラックスに向けた技術的な問題点の抽出と解決方法の検討する。具体的には、京都大学防災研究所白浜海象観測所（和歌山県田辺中島高潮観測塔）や東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター（岩手県大槌湾内係留ブイ）との共同利用・研究協力制度を使って初期試験を行う。

キーワード：シースプレー観測、波浪境界層、海洋性エアロゾル

Keywords: Sea spray measurement, Air-sea surface wave boundary layer, Marine aerosol

On the mathematical properties of non-linear atmospheric flows counting with heat conductivity, vertically stratified density, rotation of the Earth, humidity and moisture content in the clouds.

On the mathematical properties of non-linear atmospheric flows counting with heat conductivity, vertically stratified density, rotation of the Earth, humidity and moisture content in the clouds.

\*giniatouline andrei<sup>1</sup>

\*andrei giniatouline<sup>1</sup>

1. Department of Mathematics, Los Andes University, Bogota, Colombia, South America

1. Department of Mathematics, Los Andes University, Bogota, Colombia, South America

We construct an explicit solution of a non-linear Navier-Stokes type system of partial differential equations which describes the behavior of the Atmosphere of the Earth taking into account various simultaneous parameters; such as rotation, initial exponentially decreasing vertical stratification of density, heat conductivity, humidity and moisture content in the clouds. To construct the explicit algorithm of the solution, we use the Galerkin method.

We prove the existence and uniqueness of the solution for a limited interval of time.

For the linearized model, we find the structure and localization of the spectrum of internal vibrations of the Atmosphere.

The results may find theoretical application in Atmosphere fluid dynamics, as well as more practical application in weather forecasting.

キーワード : atmosphere flows、 explicit numerical solution、 humidity and moisture content in the clouds、 vertical stratification of density、 existence and uniqueness of solutions of PDE systems、 spectrum of internal waves

Keywords: atmosphere flows, explicit numerical solution, humidity and moisture content in the clouds, vertical stratification of density, existence and uniqueness of solutions of PDE systems, spectrum of internal waves

プレートテクトニクスと深海洋底と環太平洋弧状列島の起源,地球自転軸の傾斜とバンアレン偏芯の起源とプレートテクトニクスの新駆動力  
 --全てはマルチインパクト仮説でアブダクションを用いて統一的に検証--  
 Origin of plate tectonics, Ocean floor, Pacific arcuate rchipelago, nclination of the Earth's axis, Van Allen eccentricity and Drivie force  
 Plate tectonics  
 --Everything is unified with a multi impact hypothesis using abduction--

\*種子 彰<sup>1</sup>

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

1. SEED SCIENCE Lab.

1. SEED SCIENCE Lab.

起源の解明は太陽系物理では再現実験は費用的にも時間的にも不可能である。更に初期条件も不明なので、それは帰納法や演繹法でも解明は困難である。しかし、アブダクションを用いれば太陽系の起源から一回だけの進化の結果を利用してその仮説を検証できる。

物理的に意義ある仮説を仮定し、アブダクションを用いて太陽系の起源から完全に初期条件も一致した進化で、複数の現状を説明できればできるとほどその検証の真実性が増す。アブダクションでは、仮説が現状を多く説明できればできるほど信頼性が増すが、説明できないと無駄である。

マルチインパクト仮説では、プレートテクトニクスと深海洋底と環太平洋弧状列島の起源,地軸傾斜と移動方向の急変の起源,バンアレン帯偏芯とプレートテクトニクスの新駆動力等,全てを統一的に説明出来た。マルチインパクト仮説で一度だけの地球の進化による現状を用いて、アブダクションにより全てを統一的に検証できた。更に、マルチインパクト仮説では月の起源,冥王星の起源,小惑星帯の起源,分化した隕石の起源,木星大赤斑,海王星の地軸の傾き,水星コア・マントル比が大きい等も全て説明できます。

この様に地球だけでなく太陽系の起源と進化も統一的に説明できます。逆に根拠のない仮説のシミュレーション結果は成果が少なく、且つ矛盾も多くなる。

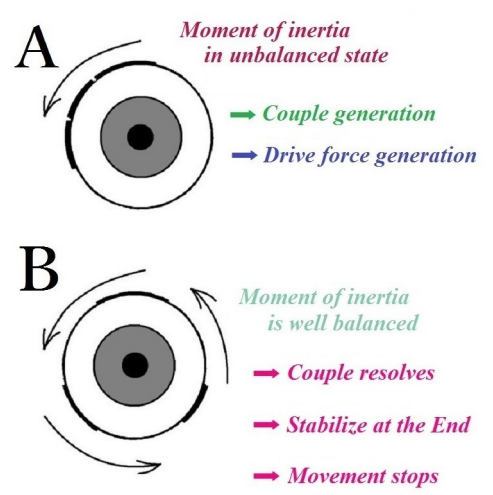
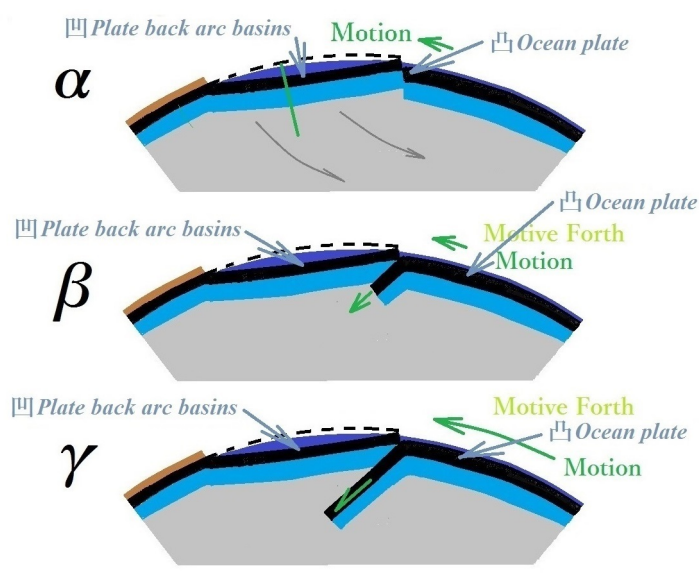
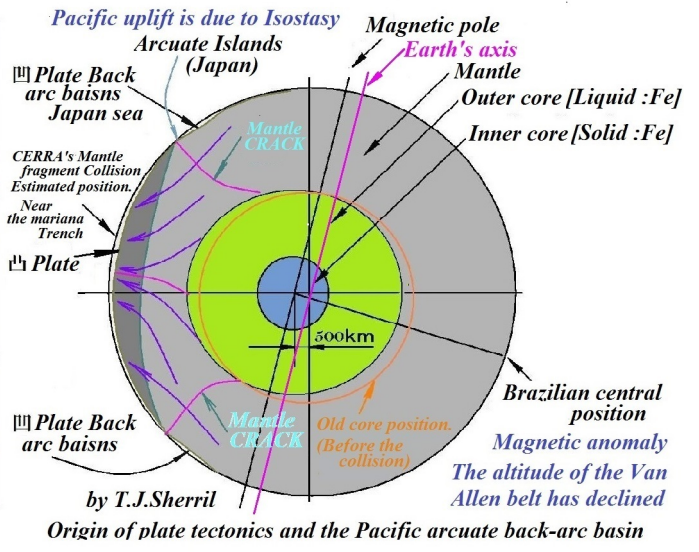
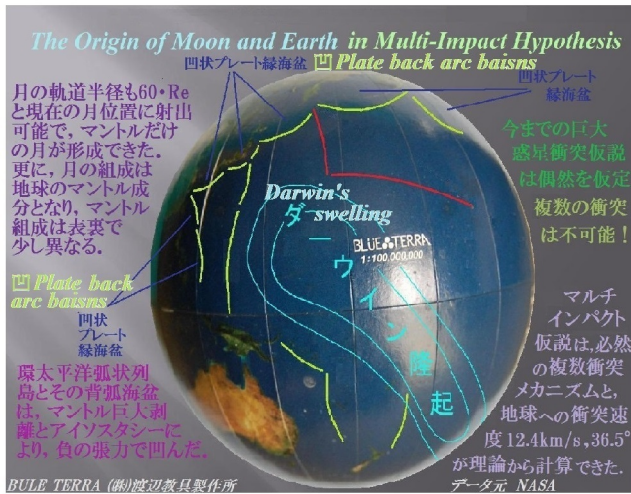
ジャイアントインパクト仮説のシミュレーションでは、マントルだけの月形成は計算できるが、月軌道エネルギーは現実の1/20しか得られなかった。更にジャイアントインパクト仮説では、月の表側・裏側の密度の違いや、隕石重爆撃期やフィーディングゾーンの起源も説明できない。

この様に、全ての起源はアブダクションで容易に解明できる。しかし他の証明は困難で有る。

キーワード：プレートテクトニクスの起源、深海洋底と環太平洋弧状列島の起源、プレートテクトニクスの新駆動力、移動方向急変の起源、地球自転軸の傾きの理由、マルチインパクト仮説をアブダクションで検証

Keywords: Origin of plate tectonics, Origin of Ocean floor and Pacific arcuate rchipelago, Driving force of plate tectonics, Origin of sudden change of movement direction, Reason for inclination of the Earth rotation axis, Examination of multi impact hypothesis by abduction

# Origin of the Earth, Plate-tectonics, Ocean-floor, by Abduction in Multi-Impact Hypothesis CERRA



## The Great Kanto(1923) Earthquake and YOKOHAMA (2)

\*西澤 勝<sup>1</sup>

\*Masaru Nishizawa<sup>1</sup>

1. なし

1. none

1. まえがき：関東大震災（1923. 9. 1日午前11時58分. 相模トラフの海溝沿いプレート境界. M=7.9）の相模トラフ（信玄）について、大崎 順彦著「地震と建築」を参考に述べる。又長沼 毅著「深海生物学への招待」を参考にトラフと深海生物の関係を、坪井 忠二著「新・地震の話」を参考に地震と重力の関係を和達 清夫著「地震」を参考にしつつ少しふれる。

2. 要旨：（イ）Fig-1は小松 左京著「日本沈没」より想定した東大構内の「東京大地震」の架空の波形である。このような“模擬地震動”が使われることもあるが、大崎先生もp197で述べられておられるが、実際の地震動と“何かがちがう”。葉のジェネリックのような。現在は著者は“模擬地震動”を必要としないと考える。

何よりも、日本列島は「世界一の地震の巣の上に在る」ことを念頭に諸・諸の構造物の建設及び都市計画などを実施しなくてはならぬ。

（ロ）相模トラフ及びその海域について：Fig-2に深海生物の代表としてチューブワームと諸トラフ・海溝等を示す。「太陽を食べる（太陽光）生態系の他に深海には「地球を食べる生態系」がある。これらは熱水噴出孔等からのイオウ（S）成分で生きる。相模トラフ・駿河トラフの在る海域は海流・地形・気候条件などがそろった海洋研究にはもってこいの地域である。潜水船等の出現もあり、深海生物・地形等の知見は積み重ねられている。三浦半島には逗子層の上に葉山層が積もっている“不整合”の案内がある。地震によって沈下した海底の逗子層上に葉山層が積もり又地震によって地上に浮き上り、現在に至っていることが判る。図-3に深発地震面の等深線図（「地震」）、Fig-4に重力異常の急変帯（「新・地震の話」）を示した。この二つの図からもこれらの海域が地震学上も大変“微妙”な地域・海域であると判る。

なお、関東大震災の調査で皇居内の公文書館の「震災録」を拝見。詳しい救護状況等が薬品名までも示されている。別の機会に。

ただ、昭和天皇は昭和初期から約60年間の長い間、相模湾での海産物のご研究をされた。これらの膨大な資料が現在、国立科学博物館に移館され、多くの研究者の研究論文の試料としてお役に立っているようである。市販の書物としては、東海大学出版「相模湾動物誌」等多数市販されている。さらにこれらの有用資料が一般の研究者のために利用され易くなることを期待する。

3. 結び：日本列島は世界一の地震の巣の上にあることを銘記すべし。

キーワード：SAGAMI trough、the deep-sea creatures、Gravitation、The sink of Japan

Keywords: SAGAMI trough, the deep-sea creatures, Gravitation, The sink of Japan

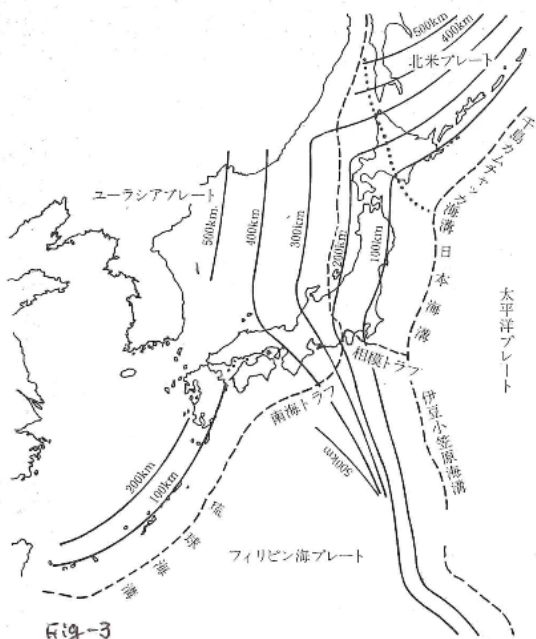


Fig-3  
 深発地殻面の等深線 (宇津徳治:「地震の事典」, P. 147, 朝倉書店, 1987)  
 和達清夫著「地震」中公文庫 1933, 1993, P.229

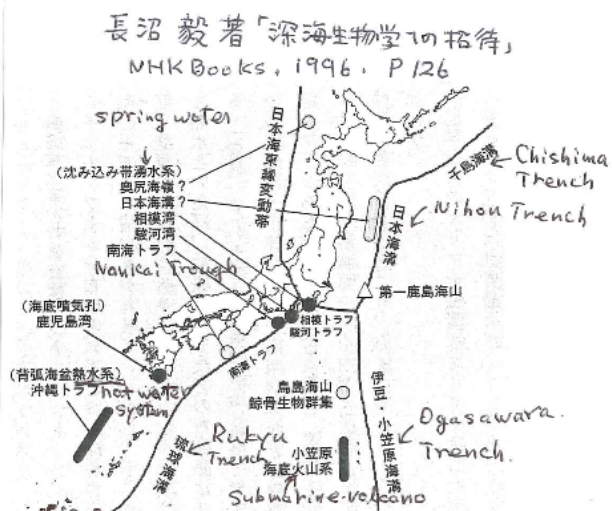


Fig-2  
 図2 日本周辺の海底におけるチューブワームの分布。●は既発見地。○は候補地。

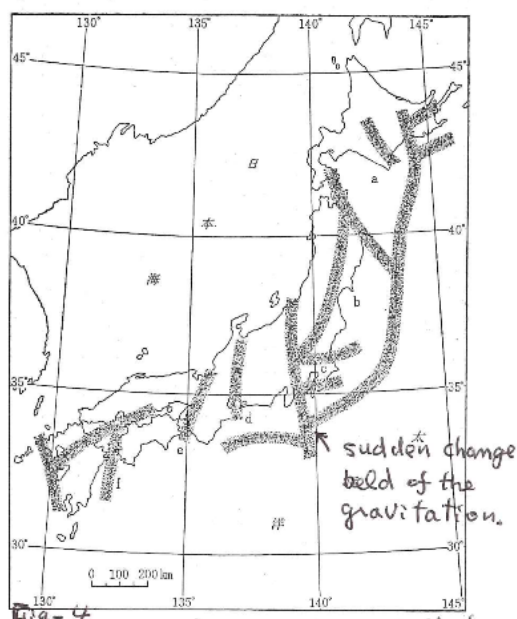


Fig-4  
 重力異常の急変帯 (Sudden change belt of the Gravitation)  
 坪井忠二著「新・地震の話」岩波新書, 1957, P.42

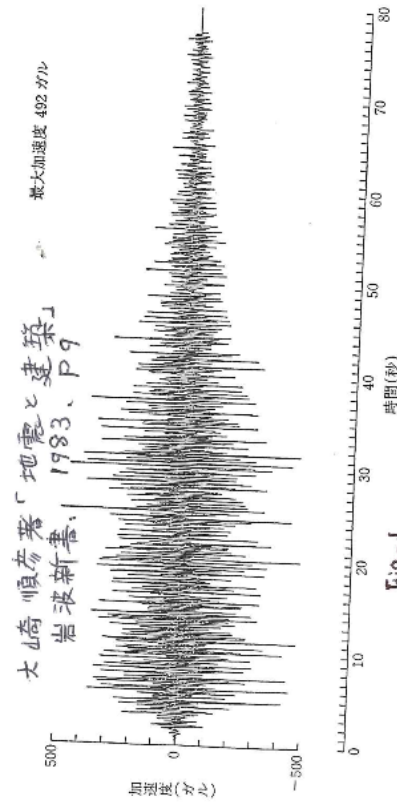


Fig-1  
 図1-1 東京大学管内における加速度記録(東京大地震)