

底面が回転する円筒容器内の軸対称流: 実験データによる理論の検証 An axisymmetric flow in a cylindrical tank with a rotating bottom: a confirmation of theory by experimental data

伊賀 啓太^{1*}
IGA, Keita^{1*}

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

地球や惑星の大気で見られる軸対称な状況にも関わらず、非軸対称になる流れのモデルとして、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によってさまざまな形で対称性の破れた流れが実現される。このような対称性の破れの過程を議論するために基本場として必要となる軸対称な流れを、境界層理論を用いて軸対称解を解析的に表現する試みについて報告を行ってきた。この理論によって、基本場の円形の流れに関連するパラメータの理論的な予測ができる。

この理論的な取り扱いについては、これまでも Tophøj et al. (2013) などによるものがある。そこでは、定常的な軸対称流では、底から与えられる角運動量と側壁に失われる角運動量流体とが釣り合わなければいけないという指導原理のもと、軸対称流を特徴づけるパラメータを決定するが、その角運動量のやりとりを評価する際には、各境界で内部流の流速と境界の相対速度の二乗に比例する角運動量が交換されるというバルク法に基づいて評価を行っている。

そこで、実際に室内実験で得られた結果を用いて、レジームの遷移パラメータ・回転を増やすとともに変化する水深などのデータについて、ここで本研究で行った評価方法から予測される値と、Tophøj et al. (2013) による見積りとの比較を行った。

その結果、本研究から予想されるパラメータは実験結果を非常によく再現していることが示された。運動量交換が相対速度の二乗に比例するという仮定では、側壁における角運動量交換を過小評価し、その結果中の水の回転速度を過大評価してしまうものと考えられる。

キーワード: 回転流, 境界層, 軸対称流, 室内実験

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

金属上で融解する氷塊の自発的回転 Spontaneous rotation of a block ice melting on metal surface

田中 雅士¹; 波々伯部 広隆¹; 吉田 茂生²; 中島 健介^{2*}

TANAKA, Masashi¹; HOHOKABE, Hirofumi¹; YOSHIDA, Shigeo²; NAKAJIMA, Kensuke^{2*}

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

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

1. はじめに

氷の塊を室温または暖めた真鍮(他の金属でも良い)の水平な円柱の上に乗せると、氷塊は融解と共に自発的に回転をはじめ、それが持続することを発見した。現象に必要な条件を探索すると、気泡を含まない氷は回転しないことがわかった。ゆえに、氷と真鍮の間の流体層における気泡の存在が回転に必要である。また、真鍮内部の温度が低下するにつれて回転角速度も低下し、真鍮が0℃付近まで冷えきると氷の回転は止まる。したがって、熱伝導により供給される熱流がこの現象の発現に本質的に重要であることが示唆される。本発表では、気泡の供給量と真鍮の熱流量を一定にした実験設定でこの現象の安定性と再現性を確認する。さらに、回転角速度のパラメーター依存性を調べ、メカニズムの提案を行う。

2. 再現性と安定性の確保

氷に伝わる熱流量と流体層の気泡の流入量を制御した実験設定を用意する。真鍮下部を水に浸し恒温装置を用いて水温を一定にすることで、真鍮内部の熱流量を制御する。実験に用いる氷塊は業者から購入した気泡を含まない氷である。ドリルで底面に貫通しない穴をあけ、融解と共に液体層に空気が流入するようにした。この設定で複数回の実験を行った結果、氷に穴が開いている間は回転角速度がほぼ一定になり、試行ごとのばらつきも小さいことがわかった。本実験設定において現象の安定性・再現性が±10%程度で確認された。

3. 回転角速度のパラメーター依存性

上記の設定で回転角速度のパラメーター依存性を調べた。その結果、回転角速度は熱流量の約0.5乗に比例し、氷のサイズの0.56乗に反比例するが、気泡の体積流入量や荷重にはほとんど依存しないことがわかった。

4. 表面張力による駆動の可能性

回転中の様子を観察すると、氷が回転しているとき、気泡は真鍮に対してほぼ静止していた。一方で、氷の回転を強制的に止めると、気泡はランダムに動いた。このことから、静止している気泡が氷を押しているのではないかと考えた。具体的には、氷と真鍮の間の流体層における空気と水の熱伝導率の差から、気泡の直上にある氷表面が融解せずに溶け残って下向きに氷の「峰」が成長し、これに表面張力による気泡内外の圧力差が作用して、氷が回転する。

5. スケーリング

上の駆動力と氷表面に作用する粘性力がバランスすると仮定すると回転角速度が $\omega = (\alpha \gamma F / ((1-\alpha) \mu \rho L))^{0.5} / R$ と見積もれる。氷の半径R、氷の融解潜熱L、気泡の表面張力 γ 、水の密度 ρ 、水の粘性係数 μ 、熱フラックスFである。見積もりから得られた回転角速度は、気泡の存在する面積比 $\alpha=0.04$ とすると測定結果と同程度の値となる。また、この式は実験で得られたパラメーター依存性の多くを説明する。このことは上で述べたメカニズムの妥当性を示唆する。

6. 今後の課題

未解明な要素として、気泡の存在する面積比 α の決まり方、気泡の形、気泡が静止できる条件などが挙げられる。また、氷の峰の存在を確認する実験を行いたい。

キーワード: 相変化, 表面張力, 熱伝導, 自己推進運動, 気泡

Keywords: phase change, surface tension, heat conduction, self-propelled motion, bubble

磁場の影響下での水平循環による流れ場の反転 Flow reversals under a magnetic field induced by horizontal circulation

柳澤 孝寿^{1*}; 浜野 洋三¹; 櫻庭 中²
YANAGISAWA, Takatoshi^{1*}; HAMANO, Yozo¹; SAKURABA, Ataru²

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学大学院
¹JAMSTEC, ²University of Tokyo

Coherent flow structures in the outer core are controlled by the magnetic field and rotation of the Earth. It is important to know the basic behavior of flow in relation to the magnetic field, for understanding the flow patterns observed in the real Earth and core dynamo simulations. On the other hand, spontaneous flow reversals generally observed in high Rayleigh number thermal convections may provide clue to the mechanism of random geomagnetic field reversals. As the most basic setting to observe the nature of flow structures with their time variations, we performed numerical simulations of Rayleigh-Benard convection in a three-dimensional square vessel by an electrically conductive low Prandtl number fluid, under a uniform horizontal magnetic field. Computed behaviors are consistent with the result of laboratory experiment (Yanagisawa et al., 2013) that shows flow reversals, and detailed process of reversals is clarified. The key mechanism is the emergence of a global circulation in the horizontal plane and following reconnection between rolls. An increase of global circulation induces bend and reconnection of convection rolls. It establishes a reversed flow state through roll number transitions. The horizontal circulation is related to the skewed-varicose instability of two-dimensional roll structure aligned in the direction of the magnetic field. This is a newly identified mechanism of flow reversal that works in large-scale three-dimensional geometry.

キーワード: 流れ場反転, 水平循環, 低プラントル数, 磁場

Keywords: flow reversal, horizontal circulation, low Prandtl number, magnetic field

水平磁場下の液体金属層内に形成されるロール状対流のホップ分岐について Hopf bifurcations on convection rolls toward flow reversals in a liquid metal layer with a horizontal magnetic field

田坂 裕司^{1*}; 山口 勝大¹; 藤田 広大¹; 柳澤 孝寿²; 大石 義彦¹; 村井 祐一¹
TASAKA, Yuji^{1*}; YAMAGUCHI, Yudai¹; FUJITA, Kodai¹; YANAGISAWA, Takatoshi²; OISHI, Yoshihiko¹; MURAI, Yuichi¹

¹ 北海道大学大学院工学研究院, ² 海洋研究開発機構
¹ Faculty of Engineering, Hokkaido University, ² JAMSTEC

Spontaneous flow reversals of convection rolls that were recently observed in experiments using a liquid metal layer in a box under a horizontal magnetic field (Yanagisawa, *et al.*, 2011) have collected attentions related to geomagnetic polarity reversals. If applying magnetic field is strong enough, convection disappears because of energy dissipation in Hartmann boundary layer on the side wall of box. On the other hand, the convection in liquid metal layers that have extremely small Prandtl number easily achieves thermal turbulence condition without applying magnetic field. In the intermediate cases of magnetic field, quasi-two dimensional rolls aligned parallel to the magnetic field are formed and instabilities occur toward losing two-dimensionality with decreasing the intensity of magnetic field. The flow reversals appear in this way to the thermal turbulence. Decreasing the intensity of magnetic field also produces decrease of the dominant number of convection rolls in the fluid layer. Yanagisawa, *et al.* (2013) explained that the flow reversals consist of competition between two modes having different number of rolls and relatively fast switching of flow direction is caused by Skewed-Varicose instability that was reported as one of instabilities on two-dimensional rolls in general Rayleigh-Benard convection in shallow fluid layers. Including the instability having $O(1\text{ s})$ time scale, there are three different time scales, oscillation of convection rolls with $O(10\text{ s})$ and the flow reversals with $O(100\text{ s})$. And we can assume that the flow reversals consist of three different mechanisms.

We performed detailed experimental investigations of process of transitions on convection rolls with decreasing the intensity of magnetic field from quasi-two dimensional rolls toward flow reversals. For rectangular box filled by liquid gallium with 200 mm * 200 mm * 40 mm in dimensions, ultrasonic velocity profiling (UVP) and thermistor probes were adopted to capture spatio-temporal velocity profiles and time fluctuation of temperature. These information provide the number of rolls, magnitude of velocity in the directions perpendicular or parallel to the magnetic field, dominant frequency of roll oscillation and intensity of temperature fluctuations. Summarizing the results elucidated that in the process of decreasing of magnetic field primary and secondary Hopf bifurcations occur. The first bifurcation keeps two-dimensionality on the rolls and the second one provides three-dimensional motion on the rolls. Fluid motions parallel to the magnetic field become considerable and corresponding flow velocity takes from 4 to 5 mm/s. Traveling time of fluid particles in the fluid layer with this velocity scale is in $O(100\text{ s})$. We can deduce that the development of three-dimensional motion provides large scale, long time scale motion in the fluid layer triggering SV instability for the flow reversals.

Keywords: Geomagnetic polarity reversals, Liquid metal flow, Thermal convection

内部発熱対流におけるセルサイズのRa数依存性に関する現象論モデルについて A phenomenological model for convective cell size in a fluid layer with internal heat generation at low Rayleigh numbers

熊谷 一郎^{1*}; 阿部 竜太²; 田坂 裕司²; Davaille Anne³; 村井 祐一²; 柳澤 孝寿⁴
KUMAGAI, Ichiro^{1*}; ABE, Ryuta²; TASAKA, Yuji²; DAVAILLE, Anne³; MURAI, Yuichi²;
YANAGISAWA, Takatoshi⁴

¹ 明星大学 理工学部, ² 北海道大学 工学研究院, ³ FAST, CNRS, パリ南大学, ⁴ 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 Science and Engineering, Meisei University, ² Faculty of Engineering, Hokkaido University, ³ Laboratoire FAST, CNRS, Universite Pairs-Sud, ⁴ Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, JAMSTEC

The convective behavior of a fluid layer with internal heat generation at low Rayleigh number ($6 \leq RaI/RaIc \leq 12$) was experimentally investigated. The horizontal fluid layer of 0.5 wt% KCl water solution was internally heated by Joule heating using the electric current. We quantitatively measured 2-D temperature and velocity fields by seeding the micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystals in the fluid layer. We experimentally obtained the fluid dynamic scaling on non-dimensional temperature and the maximum downwelling velocity as a function of the Rayleigh number, and also refined the experimental data obtained by the previous studies. The scaling relations were combined with a phenomenological model based on the stability of the top thermal boundary layer. This phenomenological model consistently explained the increase in convective wavelength with increasing the Rayleigh number.

Keywords: internal heat generation, natural convection, cell size, visualization, experiment, fluid mechanics

ジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れについて On solid state flow induced by Joule heating in the inner core of the Earth

竹広 真一^{1*}
TAKEHIRO, Shin-ichi^{1*}

¹ 京都大学数理解析研究所

¹ Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

地震波観測により示された地球内核の弾性的性質の異方性は、内核の固化における固体組織の整列や内核中の流体運動による塑性変形による組織の整列によるものと考えられてきている。内核の固化では異方性の深さ分布が説明できない一方で、これまでに考察されたさまざまな要因による内核中の流れでは異方性を生み出すに十分なほど決定的ではない。Takehiro (2011) では、内核中の流れを引き起こす要因として、内核外核境界で与えられた磁場が内核中へ貫入し発生するジュール熱を提案した。具体的に、球面調和函数の全波数 2, 方位角波数 0 のトロイダル磁場成分を内核外核境界において与えて計算したところ、赤道域で下降流、極域で上昇流の流れのパターンが得られた。この流れ場は外核との質量交換を伴っており、内核外核境界 (ICB) にて 0 でない速度の動径成分が存在している。このような流れ場が得られた要因は、ICB での境界条件として応力の法線成分が一定であることを用いていることにあり、暗に ICB を通過する物質の相変化が瞬間的であることを仮定している。しかしながら、実際には物質の相変化の速度は有限であり、もしも十分に相変化の速度が遅ければ、流れの動径成分の存在により ICB が変形し凹凸が発達することになるだろう。このような表面変位が存在すると、内外核間の密度差による浮力が働き、内核中の流れを妨げる可能性がある。

そこで本研究では、水平不均一なジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れに対する表面変位の影響を考察し、どの程度の振幅の表面変位が発達し内核中の流れ場がどう変形されるのかを吟味した。

内核外核境界における磁場分布と表面変位分布を与えたときのジュール熱により引き起こされる定常な速度場を数値的に求めた。用いた方程式は磁場の拡散の式、ブシネスク流体の運動方程式および熱の式である。境界条件は内核外核境界において応力の接線成分が 0 に加えて、温度擾乱が融点温度に等しいことと応力法線成分が表面変位による浮力とバランスする式を用いた。球面調和函数の全波数 2, 方位角波数 0, トロイダル磁場成分および表面変位を与え、地球内核中で予想されているパラメータを用いて計算したところ、ICB でのトロイダル磁場振幅が 10^{-2} – 10^{-1} T に応じて表面変位振幅が 0.018 – 1.8 m 程度で内核表面での速度動径成分が 0 となる結果が得られた。

これに対して、相変化の速度を見積もるために、ICB を通って出てくる固相の鉄を融かすに必要な熱 (あるいは ICB を通って入っていく液相の鉄を凝結させるに必要な熱) が外核中の速度場によって ICB 表面に輸送される熱とのバランスを考えた。ICB における表面変位は断熱温度と融解温度の温度差を生じ、これに伴う熱が外核中の小スケールの速度場によって ICB 表面に輸送されると考えた。

この熱バランスによる式を上の数値計算結果に適用することにより、平衡状態での表面変位振幅と速度動径成分振幅が定められる。外核中の小スケールの速度場の振幅が 10^{-1} – 10^{-2} m/s 程度に速いときには変位の発達速度に対して相変化の速度が十分に大きく、ICB において 10^{-10} m/s 程度の速度動径成分が存在し、表面変位振幅が 0.006 – 0.06 m 程度となる。これに対して、外核中の小スケールの速度場の振幅が 10^{-4} – 10^{-5} m/s 程度に遅いときには、相変化の速度に対して表面変位の発達速度が十分に速く、ICB における速度動径成分が 0 となり、表面変位が 1 m にまで発達する。

表面変位振幅が大きくなるにつれて、ICB における速度動径成分が小さくなり、ICB 直下に内部領域とは逆向きの流れが現れるようになる。しかし以前として内部領域の流れは表面変位によって妨げられることなく赤道から極へ向けての流れが存在している。このことは、内部領域の流れを定めるバランスが水平不均一のジュール加熱と移流による熱輸送との熱バランスによるものであり、力学的要因でないからである。一方、流れ場の応力の振幅は表面変位振幅が大きくなるにつれて内部領域よりも ICB 付近で大きくなってしまふ。このことは、地球内核の地震波速度異方性を説明するのに表面変位が大きい場合には整合的でないという結論に達する。しかしながらこのメカニズムは核マントル境界での熱フラックスが大きくより強い地球磁場が外核において生成されていたと考えられる過去の地球内核において重要な役割を果たしていた可能性が残されている。

参考文献: Takehiro, S., 2011: Phys. Earth Planet. Inter., 184, 134–142.

キーワード: 地球内核異方性, 地球外核磁場, 地球外核流れ, 内核外核境界, 地球外核ダイナモ作用

Keywords: anisotropy of the Earth's inner core, magnetic fields in the Earth's outer core, flows in the Earth's outer core, inner core boundary of the Earth, dynamo action in the Earth's outer core

マルチインパクト仮説による、月と地球深海洋底とプレート境界割れの全てを統一する形成メカニズムとプレート駆動力の起源 Formation mechanism of the Moon and Earth's Deep Ocean-floor and plate edge cracks, with multi-impact hypo

種子 彰^{1*}
TANEKO, Akira^{1*}

¹SEED SCIENCE Labo.
¹SEED SCIENCE Labo.

マルチインパクト仮説では、太陽系の同一公転面上の軌道に形成された原始惑星 CERRA(約火星サイズ)が、木星摂動により木星近点側に軌道が偏平化する。小惑星セレス位置の CERRA は約 275 年毎の会合周期で、数億年後に木星軌道と交差するまで偏平化する。太陽と木星の引力により、CERRA は衝突直前にその破壊強度を超えて、複数の破片に断裂する。潮汐破壊時の CERRA の軌道は地球軌道と交差しているため、マントル破片(月サイズ程度)は複数回の時間差の衝突となる。最初の衝突(約 1.5 月サイズ)で、太平洋の衝突クレーターと月の形成が起きた。

アイソスタシーにより、約 4700m 深さの太平洋の半分以上の広さの深海底が形成された。ダーウィン隆起を伴うマントル破片の巨大衝突は、地殻やマントルの飛散溶融や欠損とともに、コアの偏芯を含むマントルの変形と、地球半径 $R_E \approx 6400\text{km}$ に対して、深さ $\approx 5\text{km}$ の深海底の表面積の割合が約 70 %の現状は、海水の起源の議論は有るが、それが偶然での形成はあり得ないし、ウエゲナー氏が問題提起していた深海洋底の起源問題は忘れ去られていた。

結果としてプレート境界亀裂と形成や、プレートの凹状の陥没と弧状列島の形成、凸上プレートとの境界応力によるプレートの潜り込みの開始と、自転と慣性二次モーメントのアンバランス(最小値となる)の是正の力が駆動力として指摘できる。地球軌道と楕円軌道の交差から、衝突時の相対速度は 12.4km/s と衝突角度は約 34.6° と計算された。地球の第二次宇宙速度は 11.2km/s であり、第一次宇宙速度は 7.9km/s である。月はほぼ現在位置約 $60R_M$ に形成される。

ジャイアントインパクト仮説では、地球の半径を R_M とすると、 $3R_M$ の位置にしかできず、火星サイズのインパクトターのフィーディングゾーンの検討や、衝突確の問題と恣意的としか言えない速度と方向は、偶然にしては出来すぎている。

太平洋上のホットスポットによる海山列の軌跡や、海洋底拡大説として中央海嶺からの距離と残留磁化による地時期パターンによる移動方向が同時刻に急激な 60° もの方向転換は、マントル対流説の駆動力の根拠を揺るがしています。プレュームテクトニクスにしても、何故その位置に対流やプレュームが発生するのか、プレートの境界はどの様にして形成されたのか、今の駆動力はどの様にして発生しているのか、十分な説明ができていない問題がある。

テーチス海を形成した Drake Passage 位置(高緯度)への衝突は、地軸を 23.5° 程度傾けるモーメントとミルーヌイ位置へのキンバーライトパイプの形成と、インド洋の形成と Gondwana 大陸の分割と、分割された大陸が四方への大移動の原因となった。北極海位置のマントル欠落は、南極大陸がそこに収まってそれ以降は移動は起きていない。デカン高原やオーストラリアは活発に移動した。太平洋のハワイ位置への衝突では、大陸移動する前のアフリカのキンバリー位置であり 17.5 億年前のプレミア鉱山は、大陸移動により鉱山ごと移動している。地球の反対側への衝撃波は、マントルや地殻を突き破る衝撃ジェットの出射と共に、ダイヤモンド鉱山が形成された。

約 46 億年前の惑星集積中のマグマオーシャンの時で無く、約 40 億年前までの冷却で地球の地殻は、楕円軌道の偏平化によりマントルとコアが十分に分化してから潮汐破壊したので、CERRA のコア部分はマントルの一部がエネルギーと角運動量を失い、太陽方向に軌道を変えて水星となった。

木星に向かったマントル破片は、木星に突き刺さって大赤斑の起源と成った。木星のコアと成分が一致せず、熱伝導率が低いので大赤斑の中央部は周囲より数度低く、自転と偏正風によるゾーニングにより、巨大な渦が数百年も継続している。ちなみに、シューメーカーレビ第 9 彗星の木星衝突痕跡は、小赤斑として複数個が約半年間も持続した。偶然としても本仮説の証明として十分な説得力がある。冥王星は、木星とのスイングバイしたマントル破片とすると、比重や岩石惑星として理解が容易である。

<結論>太陽系から地球物理学と月の、統一した形成メカニズムが提案できた

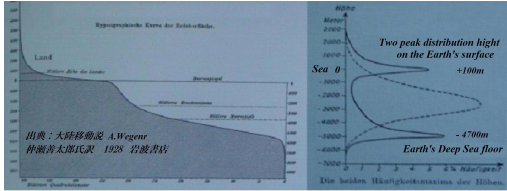
キーワード: 月と地球深海底とプレート境界亀裂の形成メカニズム, プレート境界亀裂形成, マルチインパクト仮説, プレート移動の駆動力, 何度も生物種の大絶滅, 2 ピークを示す頻度曲線

Keywords: Formation mechanism of moon and Earth's Deep Seafloor, The plate edge crack formation, Multi-impact hypothesis, Driving force of plate move, Large extinction of over and over again of organism species, Frequency curve showing a two-peak

MIS22-07

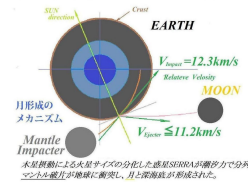
会場:106

時間:5月27日 10:30-10:45



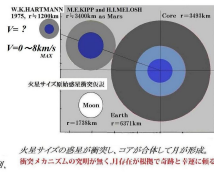
The Multi-Impact Hypothesis

[The Origin of The Moon and The Earth in Multi-Impact Hypothesis]
 Akino Nambu, 2014, Aug. [www.pisaonline.com/astro/astro/origins/multi-impacts](#)



The Giant Impact Hypothesis

[Satellite-sized planetesimals and lunar origin: J et al.
 Hartmann, W. K. and D. R. Davis 1975 Science, 94, 584-515.



全ての緯度帯の波を対象とした Eliassen-Palm 理論と渦度力学
 A divergence-form wave-induced pressure for extending the Eliassen-Palm theory to all waves at all latitudes

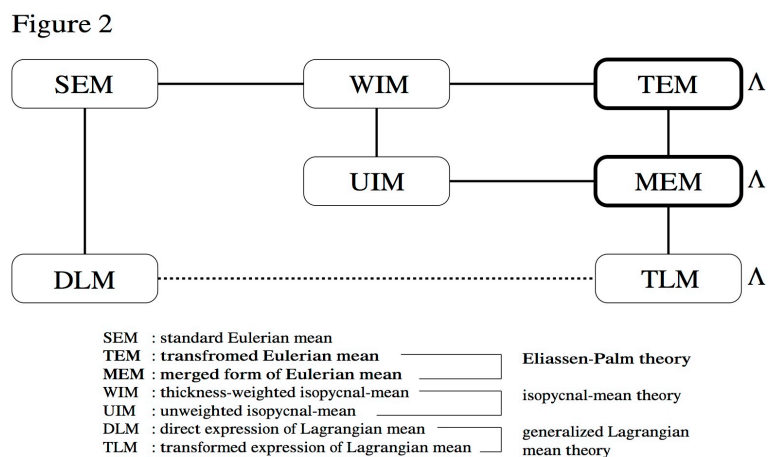
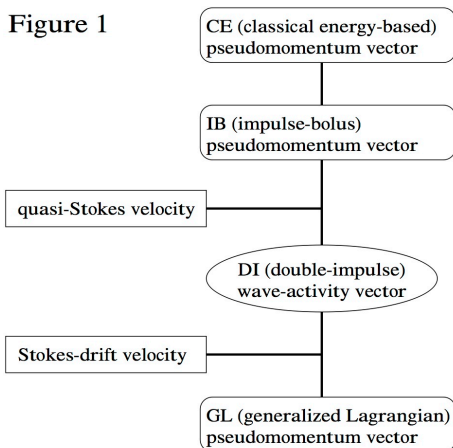
相木 秀則^{1*}; 高谷 康太郎²; Greatbatch Richard³
 AIKI, Hidenori^{1*}; TAKAYA, Koutarou²; GREATBATCH, Richard³

¹ 海洋研究開発機構, ² 京都産業大学, ³ GEOMAR / University of Kiel
¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² Kyoto Sangyou University, ³ GEOMAR / University of Kiel

Classical theory concerning the Eliassen-Palm relation is extended in this study to allow for a unified treatment of mid-latitude inertia-gravity waves (MIGWs), mid-latitude Rossby waves (MRWs), and equatorial waves (EQWs). A conservation equation for (what the authors call) the impulse-bolus (IB) pseudomomentum is useful because it is applicable to ageostrophic waves and the associated three-dimensional flux is parallel to the direction of the group velocity of MRWs. The equation has previously been derived in an isentropic coordinate system or a shallow water model. The authors make an explicit comparison of prognostic equations for the IB pseudomomentum vector and the classical energy-based (CE) pseudomomentum vector, assuming inviscid linear waves in a sufficiently- weak mean flow, to provide a basis for the former quantity to be used in an Eulerian time-mean (EM) framework. The authors investigate what makes the three-dimensional fluxes in the IB and CE pseudomomentum equations look in different directions. It is found that the two fluxes are linked by a gauge transformation, previously unmentioned, associated with a divergence-form wave-induced pressure (symbolized as Λ in the present study). The quantity Λ vanishes for MIGWs and becomes nonzero for MRWs and EQWs, and may be estimated using the virial theorem. Concerning the effect of waves on the mean flow, the quantity Λ represents an additional effect in the pressure gradient term of both (the three-dimensional versions of) the transformed EM momentum equations and the merged form of the EM momentum equations (the latter of which is associated with the nonacceleration theorem).

<http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-14-0172.1>

キーワード: 慣性重力波, 中緯度ロスビー波, 各種赤道波
 Keywords: inertia-gravity waves, mid-latitude Rossby waves, equatorial waves



Atlantic meridional overturning circulation in a variable-density, two-layer model: interaction with the Southern Ocean

Julian P. McCreary¹; Furue Ryo^{2*}; Schloesser Fabian³; Burkhardt Theodore⁴; 野中 正見²
Julian P. McCreary¹; FURUE, Ryo^{2*}; SCHLOESSER, Fabian³; BURKHARDT, Theodore⁴; NONAKA, Masami²

¹ ハワイ大学 IPRC, ²JAMSTEC, ³ ロードアイランド大学, ⁴ テンプル大学
¹IPRC, Univ. Hawaii, ²JAMSTEC, ³Univ. Rhode Island, ⁴Temple Univ.

The flow of the North Atlantic Deep Water (NADW) forms a global overturning circulation, in which the water sinks in the northern North Atlantic to deep ocean, upwells in the Southern Ocean and elsewhere to the upper ocean, and returns to the North Atlantic within the upper layer. This circulation can be described by a 1.5-layer model with the branch of the circulation after the upwelling and before the sinking contained in the upper layer of the model. Because the connection between the Southern Ocean and each ocean basin is not well understood, however, the description of the circulation by a 1.5-layer model is not complete.

In this study, we examine the boundary layer between the Southern Ocean (where the domain is zonally cyclic) and an ocean basin representing the Atlantic (where the Sverdrup dynamics determines the flow) in detail to derive the matching condition between the two regions, thereby completing the 1.5-layer description of the NADW circulation. This enables us, for example, to theoretically predict the dependence of the strength of the NADW circulation on winds in the Southern Ocean and on the mesoscale-eddy-mixing coefficient.

The governing equations are

$$\begin{aligned} -fV &= -P_x - \nu U + \tau^x, \\ fU &= -P_y - \nu V, \\ U_x + V_y &= w_e + w_m. \end{aligned}$$

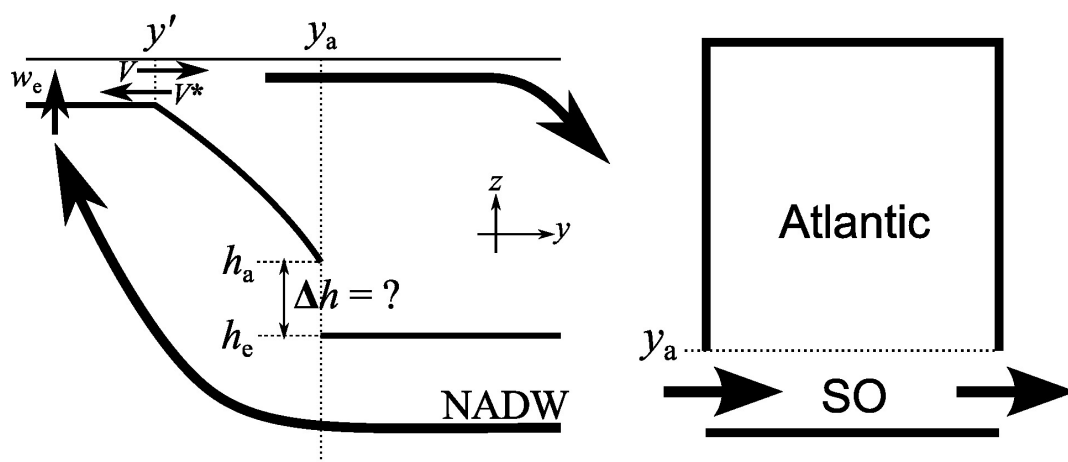
where $(U, V) = (hu, hv)$ is the "residual" transport vector in the upper layer, $P = g' h^2/2$ is the integrated pressure, h is the upper-layer thickness, $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ is the reduced gravity, τ^x is a zonal wind stress, and interior upwelling due to vertical diffusion w_m is prescribed. "Vertical viscosity" ν is actually an expression of horizontal mass transport due to parameterized mesoscale eddies and can be written as $\nu = \kappa_{GM} f^2/(g'/h)$, using the GM thickness diffusivity. Traditionally, κ_{GM} is often assumed constant, but we assume ν to be constant for simplicity.

It is easy to obtain the interior solution within each of the Atlantic basin and the Southern Ocean (not shown), but these solutions do not match, requiring a zonal boundary layer. It can be shown that the boundary layer solution (total solution minus interior solution) approximately obeys (ignoring the western boundary layer)

$$-P''_x = r P''_{yy},$$

where $r = \nu/\beta$. This is a "diffusion equation" where $-x$ is analogous to time. In physical terms, this equation describes how pressure anomaly associated with Rossby waves is spread meridionally by viscosity. This equation can be solved under the cyclicity condition $P''(x=0, y) = P''(x=L, y)$ for $y > y_a$ and the eastern boundary condition $P''(x=0, y) = P_e = \text{const.}$ for $y < y_a$, and the matching condition that the total pressure and its y derivative must be continuous across $y = y_a$, where y_a is the latitude of the southern tip of South America. The solution (not shown) determines one of the unknown constants of integration of the interior solutions, thereby closing the problem.

Keywords: analytic model, viscosity, eddy induced transport, wind stress, Ekman transport



関東南部における冬型降雪・南岸低気圧降雪 Snowfall on the South Kanto region under winter pressure pattern, and by south-coast cyclones

荒巻 健智^{1*}; 伊賀 啓太¹
ARAMAKI, Kento^{1*}; IGA, Keita¹

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo

関東南部における降雪としては、本州南岸を通過する総観スケールの低気圧(南岸低気圧)によるものが知られるが、2012年1月23日の関東南部は、そのような低気圧が存在しない冬型の気圧配置で大雪となった(原,2012)。このような冬型気圧配置における関東南部の降雪に関しては、山本(1984)が1事例を報告しており、本州中部の山岳を迂回した季節風によって下層に生じる収束との関連を指摘している。

本研究では、まず2012年1月23日の大雪事例について、気象庁メソ解析データを用いて解析を行った。総観スケールでは、JPCZ(日本海寒帯気団収束帯)および、関東南岸に収束域が生じていた。メソスケールで見ると、関東の南西側に位置する駿河湾付近から南東に伸びる収束線が顕著であった。また、中上層に寒気、下層に暖湿気が流入し、収束線付近では深い対流が発生しやすい不安定な環境場となっていた。関東付近では水平風の鉛直シアが顕著で、下層では収束線に向かう北東風が、中上層ではトラフの前面にあたることから南西風が卓越しており、収束線に沿って生じた対流性降水が中上層の南西風に流され、風下にあたる関東南部に降雪をもたらしていた。

また、関東付近における相当温位の鉛直構造を解析したところ、2012年1月23日の大雪事例では鉛直方向の相当温位差が小さく、成層が弱かった。一方で、南岸低気圧による大雪の典型事例と考えられる2014年2月8日についても解析を行ったところ、相当温位差が大きく、成層が強かった。この結果を踏まえ、過去30年間に於いて東京または横浜で大雪となった46の事例について、再解析データ JRA-55 を用いて関東付近の相当温位の鉛直構造を調べ、成層が2012年1月23日の事例と同程度かそれ以下であった事例(成層弱)と、成層がより強かった事例(成層強)に分類を行った。その結果、46事例のうち「成層弱」は4例(8.7%)、「成層強」は42例(91.3%)であった。また、東京における過去10年間の降雪日に対し同様の分類を試みたところ、全日数(86日)に対する「成層弱」の割合は29日(33.7%)となった。大雪における寄与と比較すると、降雪日の中で「成層弱」による降雪の寄与は大きかった。分類操作においては降水と相当温位に関する情報を用いているが、コンポジットの結果は、気圧配置や水平風等の他の要素を含め、「成層弱」が冬型的、「成層強」が南岸低気圧的な様相を示した。このことから、降水と相当温位に基づいて行った分類は妥当性を有するものと考えられる。関東南部における過去30年間の大雪に対して、南岸低気圧が主たる要因であったことが確認された一方で、冬型による大雪事例は2012年1月23日以外にも存在していたことが明らかとなった。

キーワード: 関東の降雪, 冬型, 南岸低気圧, 下層収束, 成層度

Keywords: snowfall on the South Kanto region, winter pressure pattern, south-coast cyclones, low level convergence, stratification

長時間維持する多重壁雲を伴った熱帯低気圧のエネルギー変換効率 Dynamic energy efficiency of tropical cyclones with long-lived concentric eyewall in numerical simulation

辻野 智紀^{1*}; 坪木 和久¹; 郭 鴻基²

TSUJINO, Satoki^{1*}; TSUBOKI, Kazuhisa¹; KUO, Hung-chi²

¹名古屋大学地球水循環研究センター, ²国立台湾大学大気科学科

¹HyARC, Nagoya University, ²Department of Atmospheric Sciences, NTU

“Eyewall” is a ring of convective clouds that encircles the eye of a tropical cyclone (TC) such as typhoon and hurricane. Multiple eyewalls, named “concentric eyewall”, are observed in some TCs, and “eyewall replacement cycle” is also observed after the formation of concentric eyewall. In the process of an eyewall replacement, the inner eyewall gradually disappears while then the outer eyewall moves towards the TC center in closing to the previous inner eyewall. During the period of a replacement cycle, the TC intensity changes drastically. 24 percentages of TCs with concentric eyewalls maintained in a long time (over 20 hours) in satellite observations (Yang et al., 2013). The result suggests that a TC with concentric eyewall does not always undergo the replacement cycle. There are very few studies of long-lived concentric eyewall. Moreover the maintenance mechanism of long-lived concentric eyewall is also not clear.

To understand the maintaining mechanism of concentric eyewall, we employ dynamic energy efficiency in considering the change of kinetic energy (KE) and available potential energy (APE) due to the internal dynamics of a TC. We focus on a parameter of dynamic energy efficiency, which is proposed as an index of conversion efficiency of potential energy to KE. In this study, dynamic energy efficiency of idealized TCs with replaced and long-lived concentric eyewall, and then, real typhoon Bolaven (2012) with long-lived concentric eyewall was investigated, using numerical simulation results which were performed by Tsujino and Tsuboki (2013, 2014). TC simulation data in this study were supported by an atmospheric numerical model of a three-dimensional, non-hydrostatic and full-physics, which is called by CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator; Tsuboki and Sakakibara, 2007).

The formula for the dynamic energy efficiency of heat and of momentum in balanced vortex, whose the primary circulation is gradient wind balance, and the secondary circulation is induced due to convective heating and surface friction, was derived by Kuo et al. (2013). The dynamic energy efficiency of heat and of momentum is determined by the solution of the Eliassen transverse circulation equation with the radial temperature gradient instead of the radial heating gradient. They showed that dynamic energy efficiency enables to explain intensity change of TC through diabatic heating and friction with analytical profile of idealized TCs. The dynamic energy efficiency of an idealized TC with replaced concentric eyewall was increasing drastically during the replacement cycle, and the value of dynamic energy efficiency had maximum when inner eyewall dissipated. Low (high) dynamic energy efficiency indicates that conversion of APE to KE is inefficient (efficient) for TC’s intensification. The tendency of dynamic energy efficiency of TC with replaced concentric eyewall was consistent with the TC’s intensity change during the replacement cycle. On the other hand, the dynamic energy efficiency of the idealized TC with long-lived concentric eyewall did not increase apparently after the outer eyewall formed. The result suggests that the conversion of APE to KE in the outer eyewall does not control much the TC intensity change. The tendency of dynamic energy efficiency resembled that of a typical TC with single eyewall which was shown by Kuo et al. (2013). Moreover, in typhoon Bolaven (2012), the tendency of dynamic energy efficiency also resembled that of the idealized TC with long-lived concentric eyewall. These results imply that the dynamic energy efficiency of TCs with long-lived concentric eyewall may describe one of the universal characters of a TC development process.

Keywords: Eliassen transverse circulation, concentric eyewall, tropical cyclone

階段状渦度域で構成される順圧軸対称渦上の非軸対称擾乱の最適励起 Optimal excitation of asymmetric perturbations on an axisymmetric barotropic vortex with piecewise constant vorticity

板野 稔久^{1*}
ITANO, Toshihisa^{1*}

¹ 防衛大学地球海洋学科

¹Dept. Earth & Ocean Sciences, National Defense Academy

自然界や人工的に作られる渦にみられる階層構造（複数の2次渦が親渦の中心核の周囲を公転する構造）を念頭に、3つの階段状渦度域で構成される軸対称順圧渦に関する線形特異値問題を定式化し、解析的に解を導出した。そのため、まず非発散順圧渦度方程式を上述した基本接線流の周りで線形化し、これを整理して2階の連立常微分方程式を導出した。この方程式は、基本場の渦度不連続に起因するロスビー波の振幅を成分とするベクトル X で記述され、これを初期値問題として解くと、任意の時間におけるベクトル X を初期値と関係付ける解核行列が得られる。この解核行列をもとに、L2 ノルム（ロスビー波の振幅の二乗）の下での前方および後方特異ベクトルと特異値を導出した。

結果は、基本場の渦度分布の形から大きく2種類に大別される。まず、リング状の高渦度域で特徴づけられる Michalke と Timme の渦では、前方・後方特異ベクトルおよび成長する固有ベクトルは、お互いに比較的似た形態をとる。これとは対照的に、正の渦度を持つ中心核を負の渦度域が取り囲む Syono の渦においては、前方特異ベクトルが、後方特異ベクトルあるいは成長する固有ベクトルと全く異なった形をしていることが明らかとなった。エネルギーをノルムとした場合に得られるいくつかの結果についても紹介する。

キーワード: 最適励起, 特異値, 特異ベクトル, 順圧渦, 複合渦

Keywords: optimal excitation, singular value, singular vector, barotropic vortex, multiple vortex

惑星大気大循環モデルの構築 - 鉛直一次元設定での数値実験 Development of a general circulation model for planetary atmospheres: Single column model experiments

高橋 芳幸^{1*}; 荻原 弘亮²; 西澤 誠也³; 原 旅人⁴; 石渡 正樹²; 林 祥介¹
TAKAHASHI, Yoshiyuki O.^{1*}; OGIHARA, Hirota²; NISHIZAWA, Seiya³; HARA, Tabito⁴;
ISHIWATARI, Masaki²; HAYASHI, Yoshi-yuki¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 北海道大学大学院理学研究院, ³ 独立行政法人理学研究所計算科学研究機構, ⁴ 気象庁
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ³RIKEN
Advanced Institute for Computational Science, ⁴Japan Meteorological Agency

太陽系内外の惑星の多様な循環構造および表層環境の維持機構を理解することを目指して、地球を含めて様々な惑星大気の数値実験を行うことができる惑星大気大循環モデル, DCPAM (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>), の構築に取り組んでいる。本発表では、惑星大気の計算の一部として実施してきた、鉛直一次元実験 (SCM (Single Column Model) 実験) について報告する。このような実験は、構築したモデルの各種パラメタリゼーションが適切に実装されていることの確認や、その実装されたパラメタリゼーションの性質の確認に有用である。また、主に地球の条件を想定して定式化されたパラメタリゼーションが地球と異なる惑星条件下でどのように振る舞うのかを調べるためにも有用である。なお、本研究は、理研 AICS のグループや気象庁のグループと協力して進めている共通物理過程ライブラリの構築の試みの一環として進めている。

DCPAM は、地球流体電脳倶楽部有志で構築を進めている惑星大気大循環モデルである。このモデルは、プリミティブ方程式をスペクトル変換法で解く力学過程と、放射過程、乱流過程、凝結過程、簡単な雲モデル、そして土壌熱伝導モデルとバケツモデルによる陸面モデルといった物理過程を組み合わせたものである。また、本モデルの構築では、コードをほとんど変更することなく、軸対称二次元計算および鉛直一次元計算が可能となるように設計している。

本研究では、DCPAM に実装したパラメタリゼーションの確認を目的として、次の 4 つの鉛直一次元実験を行った: (1) ICRCCM 実験 (InterComparison of Radiation Codes in Climate Models; Ellingson et al., 1991), (2) GABLS2 (GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study 2; Svensson et al., 2011) 実験, (3) TWP-ICE (Tropical Warm Pool International Cloud Experiment) 実験 (Davies et al., 2013), (4) 火星境界層実験。ここでは、3, 4 の実験結果について簡単に述べる。

TWP-ICE 実験では、観測に基づく強制の下での放射過程、乱流過程、凝結過程の応答によって形成される大気構造を調べる。今回の実験では、積雲過程、非対流性凝結過程、乱流過程にそれぞれ Relaxed Arakawa-Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992), Le Treut and Li (1991) のスキーム, Mellor and Yamada (1982) level 2.5 を用いた。実験の初期結果は、降水量の時間変化が大まかには他の SCM の結果 (Davies et al., 2013) と整合的であることを示していた。しかしながら、DCPAM で得られた相対湿度は、対流圏下層において他のモデルよりも小さい傾向も見られた。今後この原因について調べていく予定である。

火星実験は、大規模圧力傾度力の強制の下でモデルの放射過程、乱流過程によって形成される火星の大気境界層の構造を調べる。今回の実験では、乱流過程には、Mellor and Yamada (1982) level 2.5 を用いた。実験の結果得られた境界層の高さや温度の日変化は、二次元、三次元の対流解像モデル (e.g., Odaka, 2001) によって表現されてきたものとおおよそ整合的である。例えば、境界層の高さは、例えば火星において典型的なダストの量の場合に、地球よりも高く 5 km 程度となる。今後、他の惑星の計算に向けた基礎実験などにもこのような鉛直一次元実験を利用していく予定である。

キーワード: 惑星大気, 大気大循環モデル, 地球, 火星, 鉛直一次元モデル

Keywords: planetary atmosphere, general circulation model, Earth, Mars, Single column model