

## 相対湿度0.1%の差を測る！ ArduinoとSHT75による高精度観測 Measuring the relative humidity within an error of 0.1% by Arduino

松尾 諒<sup>1\*</sup>; 酒井 敏<sup>1</sup>

MATSUO, Ryo<sup>1\*</sup>; SAKAI, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 人間・環境学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

一般に森の中は街と比べて涼しいと言われている。その気温差を生じている要因は何であるかということ調べるために、京都大学とその隣の吉田山にて気温と相対湿度の観測を行ない、気温差と大気中の水蒸気量の差を比較した。

今回この観測の中で Sensirion 社の SHT75 という温湿度センサーを用いた。このセンサーはカタログ値で相対湿度について分解能 0.03%、精度 ± 1.8%、再現性 0.1% という非常に高い精度をもっている。実際に使用しキャリブレーションを行った所、測定機器同士の差が気温について ± 0.05 °C、相対湿度について ± 0.1% の間に収めることができる可能性があるということが分かった。今回の観測における大気中の水蒸気量の差を考える際には、大気中の水蒸気 0.1g 程度の差を見る必要があることから、相対湿度の誤差は最低 ± 1% 程度に収められることが望ましい。この街と森の気温差と水蒸気量差の関係の議論についても、この精度で観測を行うことが出来なかったため今まで有効な観測結果を出せていなかった。このセンサーを Arduino を用いて作ったデータロガーに接続し、1分毎に記録するという形で観測を行った。

結果として吉田山と京都大学では常に吉田山の気温が低く、大気中の水蒸気量も多いということが分かった。この差は一日を平均してみると、夏の観測においては水の蒸発潜熱により大気が冷やされているというように見ることができた。しかし、冬においても夏の半分ほどの差ではあるが、常に吉田山の気温が低く水蒸気量が多いということが観測された。また、時間変化を加えてみると夏・冬ともに日の出とともに気温差がつき、次に昼までに水蒸気量の差が開き、その後日が傾くに連れて気温差が縮まり、夜の間水蒸気量の差も縮まるというサイクルを見ることが出来た。すなわち、これは水の蒸発潜熱によって気温差がつく以外の要素が働いていることを示している。

キーワード: 相対湿度, 気温差, 計測, Arduino, 森と街, 潜熱

Keywords: relative humidity, tempature, measure, Arduino, Forest and City

## 暖かい金属円柱上での氷の自発的回転 Spontaneous rotation of a block of ice on a flat surface of a warm metal column

田中 雅士<sup>1\*</sup>; 波々伯部 広隆<sup>1</sup>; 吉田 茂生<sup>2</sup>; 中島 健介<sup>2</sup>  
TANAKA, Masashi<sup>1\*</sup>; HOHOKABE, Hirotaka<sup>1</sup>; YOSHIDA, Shigeo<sup>2</sup>; NAKAJIMA, Kensuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府, <sup>2</sup>九州大学 大学院理学研究院  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyushu University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Kyushu University

### 概要

氷の塊を真鍮の円柱の上に載せると、融解とともに自発的にゆっくりとした回転をはじめ、それが持続することを発見した。

### 発見された現象

室温または暖めた直径 8cm, 高さ 16cm の真鍮製の円柱を上面が水平になるように置き、その上に直径 10cm, 厚さ 4cm 程度の底面が平らな氷の塊 (家庭用冷蔵庫で作成) を置くと、氷の融解とともに自発的に回転を始める。回転方向は、途中に外力を加えない限り変わらないが、回転と逆方向に力を瞬間的に加えただけで即座に反転する。典型的な回転周期は 20 秒程度である。真鍮が冷めるか、あるいは、氷が融けて円柱の上面が露出すると、回転は停止する。

### 氷と真鍮表面の間の気泡の重要性

製氷業者が作成した気泡を含まない氷を用いたところ、回転は生じなかった。しかし、この氷の下面に貫通しない穴をあけ、融解とともに氷と真鍮表面の間に気泡が供給されるようにすると、回転が生じた。また、氷と真鍮表面の間の気泡の振る舞いを観察すると、氷が自発的回転を行なっている時と回転を強制的に停止させた場合とで異なることがわかった。すなわち、氷が回転しているときは、気泡は円柱の半径方向に伸びた細長い形状になる傾向があり、真鍮表面に対して殆ど静止している。氷の回転を停止させたときは、気泡は不規則に変形・運動しつつ外側に流出する。これらのことから、この現象の物理には、気泡が本質的に重要な役割を果たしていることが示唆される。

### 熱供給の重要性

円柱内部の温度の測定より、円柱内の上下の温度差と氷の回転角速度の間に強い正の相関があることがわかった。また、真鍮の代わりに熱伝導率の小さいステンレスの円柱を用いると、氷の回転周期は長くなる。これらの事から、熱伝導により供給される熱フラックスが、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。

### 今後の方向

この現象の力学についてはまだ理解できていない。熱の供給と回転速度の強い関係から、この現象が一種の熱機関として解釈できる可能性もある。今後、より制御された実験を行い、その結果も踏まえて、多面的に考察を進める予定である。

キーワード: 気泡, 氷, 回転, 熱機関, 相変化, 自発運動  
Keywords: bubble, ice, rotation, heat engine, phase change, spontaneous motion

## 底面が回転する円筒容器内の軸対称解のレジーム Regimes of solutions of an axisymmetric flow in a cylindrical tank with a rotating bottom

伊賀 啓太<sup>1\*</sup>  
IGA, Keita<sup>1\*</sup>

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

地球や惑星の気には軸対称な状況にも関わらず、軸対称を保っていない流れが実現していることがある。このような対称性の破れは、円筒容器内に水を入れ、底の円盤を回転させるという極めて単純な室内実験でも実現することができる。我々はこれらの現象について報告を行ってきた。この、メカニズムを調べる際に基本場となる軸対称な流れが必要となるが、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も昨年度報告を行った。

この解析解の性質を詳しく調べ、その安定性に関連する性質を整理した。自由表面がある場合にこの解を適用すると、軸対称流の様子は3つのレジームに分けられる。つまり、(i) 中心まで水で覆われ、中心の剛体回転領域と外側の角運動量一定領域に分けられる場合 (ii) 底の回転板の中心部が空気に露出し、その外に剛体回転領域、さらに外側の角運動量一定領域がある場合 (iii) 底の回転板の中心部が空気に露出し、その外にすぐ角運動量一定領域がある場合。解析解を適用することによって、これらのレジーム間の遷移のパラメータ依存性を明らかにした。それぞれのレジームに対応して、そこに特徴的に存在する波の種類に差が出てくる。これは、不安定性に対して大きな影響を与える。

また、形成される境界層のうち、横壁付近にできる境界層は、その周回方向の速度にジェット状の分布を持ち、渦度勾配が負になる領域を作る。これも臨界層不安定の可能性を生じる要因となる。

キーワード: 回転流体, 対称性の破れ, 境界層, 軸対称流, 安定性

Keywords: rotating flow, symmetry breaking, boundary layer, axisymmetric flow, stability

## 金星大気 GCM のベンチマーク実験：モデルおよび天文パラメーターに対する感度について

### Benchmark experiments for Venus AGCM: sensitivities to model and astronomical parameters

山本 勝<sup>1\*</sup>; 高橋 正明<sup>2</sup>  
YAMAMOTO, Masaru<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Masaaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>東京大学  
<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>University of Tokyo

Benchmark experiments and inter-comparisons of atmospheric general circulation models (AGCMs) have been conducted in the climate and Geophysical Fluid Dynamics (GFD) communities. Recently, the AGCM inter-comparisons are extended to Venus and hot extrasolar planets. The ISSI inter-comparison project of Venus AGCM (Lebonnois et al. 2013) shows that there are large differences among the models under the same Venus-like condition, and some model parameters influence the general circulation structures. At the present stage, in the inter-comparisons project, the wave analyses have yet to be fully conducted. For Venus' atmospheric modeling, we need to investigate sensitivity to model parameter (such as resolution), in order to understand the numerical properties of the AGCM and to confirm the model results. In terms of GFD, sensitivity to astronomical parameter (such as planetary rotation) is interesting in profoundly understanding the dynamics of superrotation in a mimic slowly rotating planet, which is represented by the base simulation in the inter-comparison. By using the widely-used benchmark, we can easily compare with previous models. In the present study, the base simulation of the ISSI project is applied to a MIROC AGCM for checking the validity of the Venus model, and is extend to the sensitivity experiments for model resolution (T21, T42, T63, and T106) and planetary rotation (Venus, Titan, and Earth), in which the general circulations and waves are analyzed. In the Venus case, as the model resolution is increased, the total angular momentum of the whole atmosphere becomes larger, although the cloud-top superrotation weakens. This indicates that the high-resolution contributes to the accumulation of the angular momentum in the lower atmosphere. The eddy momentum and heat fluxes in the lower atmosphere are also sensitive to the horizontal resolution. Associated with the eddy heat flux, the indirect circulation is also influenced by the resolution. In T42 and higher resolution experiments, the high-latitude jet and polar indirect circulation are extended to the lower atmosphere. The lower-atmospheric high-latitude jet induces large equatorward eddy angular momentum fluxes. In this presentation, we discuss the sensitivities to model resolution and planetary rotation, based on the transformed Euler mean and Eliassen-Palm flux analyses, which are useful even for slowly rotating planet with very small Coriolis force (although they are not widely used in atmospheric researches of Venus).

## 理想化した熱帯低気圧における多重壁雲の構造と壁雲の置き換わりの関係 Relationship between structure and replacement of concentric eyewalls in idealized tropical cyclones

辻野 智紀<sup>1\*</sup>; 坪木 和久<sup>1</sup>  
TSUJINO, Satoki<sup>1\*</sup>; TSUBOKI, Kazuhisa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学地球水循環研究センター  
<sup>1</sup> HyARC, Nagoya University

台風をはじめとする熱帯低気圧には、中心からおよそ数百 km 以内に壁雲とよばれる対流活動の盛んな円形の雲域が存在する。熱帯低気圧はまれに、この壁雲を同心円状に複数有することがあり、多重壁雲 (Concentric Eyewall) と呼ばれる。多重壁雲は一度形成されると、内側の壁雲がゆっくりと減衰し、外側の壁雲が徐々に内側に収縮するという壁雲の置き換わり (Replacement) が起こる (Houze et al., 2006)。2012 年の台風 15 号 (Bolaven) は多重壁雲が形成されてから少なくとも 1 日以上維持しており、明瞭な壁雲の置き換わりは見られなかった (辻野・坪木, 2013 年大会)。辻野・坪木 (2013; 気象学会秋季大会) では、Bolaven の外側壁雲が長時間維持と、多重壁雲の鉛直構造が関係していると考察した。彼らは、外側壁雲が内側壁雲に比べて外向きに傾いていたため、鉛直風について内側壁雲より外側壁雲の強さが相対的に弱く、境界層を通過する内向きの流れが外側壁雲で捕捉されず、絶えず内側壁雲に水蒸気を供給していたことに起因することを示唆した。このように、多重壁雲が形成されたとしても、必ず壁雲の置き換わりが起こるとは限らず、多重壁雲と壁雲の置き換わりの間にどのような関係があるかという点については完全には解明されていない。本研究では、辻野・坪木 (2013, 日本気象学会秋季大会) における台風 Bolaven (2012) の再現実験といくつかの解析で示された、多重壁雲の構造と壁雲の置き換わりに注目する。まず、3 次元非静力学モデルを用いて理想化した熱帯低気圧における多重壁雲の構造に関するパラメータスイープ実験を行う。そして、各実験における多重壁雲の構造の違いと壁雲の置き換わりの関係について調べる。

本研究では、名古屋大学地球水循環研究センターで開発された 3 次元非静力学モデル (CReSS; Cloud Resolving Storm Simulator, Tsuboki and Sakakibara, 2007) を用いた。Terwey and Montgomery (2008; 以降 TM08) における多重壁雲の理想化実験を参考に初期値を作成した。具体的には、傾度風バランス、静力学バランスした低気圧性回転の軸対称な風場を初期渦とした (TM08 の (2,3) 式)。熱力学場については Jordan (1958; 以降 J58) で得られた熱力学場の鉛直 1 次元データを用いた。水平解像度は 2 km、鉛直方向には 45 層をとり、最下層の鉛直解像度は 100 m をとった。計算領域は 2000 km x 2000 km x 22.5 km をとった。積分時間は 500 時間まで行った。海面水温は各実験全て固定値を用いた。本研究では、多重壁雲の構造についてパラメータスイープ実験を行う際、TM08 で提唱されている考え方を元に、多重壁雲の構造が接線風の動径方向の分布で変化すると仮定した。この接線風の動径分布は熱帯低気圧の最大接線風速 (最大強度) で変化すると考えられる。そこで、最大強度を変化させるパラメータ (海面水温と大気的不安定性) に関して 4 つの数値実験を行った。それぞれ、SST を 301 K、初期の鉛直温度分布に J58 を用いた実験をコントロール実験 (CTL)、SST のみを 302 K にした実験 (S302)、SST を 302 K、J58 で観測された温度を鉛直方向に一律に 3 K 増加させた実験 (ST302)、SST を 300 K、J58 で観測された温度を一律に 1 K 増加させた実験 (ST300) として計算を行った。

本研究では壁雲の定義としてモデルの高度約 5 km における接線平均された鉛直風の水平分布を用いた。CTL, S302 実験は積分開始 400 時間程度で複数回の多重壁雲形成と壁雲の置き換わりを経験している。一方、ST302 では積分開始 250 時間付近で多重壁雲が形成されたが明瞭な置き換わりが見られなかった。ST300 では多重壁雲を形成しなかった。それぞれの実験について、壁雲の鉛直方向の構造を調べた。壁雲の置き換わりが見られた CTL, S302 では外側壁雲の鉛直方向の傾きが内側壁雲と同程度であった。一方、壁雲の置き換わりが見られなかった ST302 では外側壁雲の傾きが内側壁雲よりも外側に傾いているということがわかった。鉛直風の強さに着目すると、CTL, S302 では置き換わりの際に鉛直風が非常に強くなり、内側壁雲と外側壁雲で同程度の強さとなった。ST302 では、外側壁雲の鉛直風は内側壁雲に比べて非常に弱い結果となった。ST302 における多重壁雲の構造は辻野・坪木 (2013; 気象学会秋季) で示された Bolaven の構造と類似しており、Bolaven と同様に明瞭な壁雲の置き換わりが発生しなかった。これらの理想化実験の結果と多重壁雲の構造から、壁雲の置き換わりには壁雲の鉛直方向の傾きが関係していると考えられる。

キーワード: 熱帯低気圧, 多重壁雲, 壁雲の置き換わり, 渦力学  
Keywords: tropical cyclone, concentric eyewall, eyewall replacement, vortex dynamics

## 背景渦度勾配中の渦の移動の機構とその見積もり Mechanism of vortex movement in environmental vorticity gradient and its estimation

山田 佳緒<sup>1\*</sup>; 伊賀 啓太<sup>1</sup>  
YAMADA, Kao<sup>1\*</sup>; IGA, Keita<sup>1</sup>

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

大気の準定常的なパターンとして知られているブロッキングの維持機構として、Yamazaki and Itoh(2013)はSAM(selective absorption mechanism)を提唱した。SAMとはブロッキングが同極性の渦を選択的に吸収することで長期間存在できるというメカニズムであり、その本質は渦間相互作用である。同様のメカニズムによって、熱帯低気圧や温帯低気圧の移動についての理解が試みられている(例えば Fiorino and Elsberry, 1989; Oruba et al., 2012等)。また、渦間相互作用による渦移動には、背景場の絶対渦度勾配、渦の半径、強さなどのパラメータが重要であると指摘されている(DeMaria, 1985; Chan and Williams, 1987)が、いずれも数値実験結果を用いた診断にとどまっている。本研究では2次元非発散順圧モデルを用いて上記のパラメータを様々に変えた数値実験を行った。さらに渦間相互作用による渦の移動メカニズムを調べ、移動量を定量的に評価した。

渦の移動の時間発展を調べた結果、2つの異なる特徴を持つ期間、初期に見られる加速期間とその後の準定常状態、渦対並進期間に分けられることがわかった。それぞれの期間で渦はその周りに特徴的な渦度場を作り、その運動は異なるパラメータ依存性を持っていた。加速期間では渦は背景場を少し回転させて変形するだけであるが、渦対並進期間ではもとの渦の東側に長く伸びた反対符号の渦が現れる。

加速期間ではSAMの考え方をそのまま定量的評価に適用することによってその速度を評価した。その結果、速度は絶対渦度勾配と渦の循環、経過時間の積に比例することが示された。渦対並進期間では渦対の伝播というメカニズムを考えることで反対符号の渦を特徴づける少数パラメータによって速度を評価した。その結果、渦の速度は渦の循環の2/3乗と惑星渦度勾配の1/3乗の積に比例することがわかった。これらの見積もりは数値実験結果の各期間の速度のパラメータ依存性をよく表す見積もりであり、各パラメータが持つ渦移動に対する物理的効果の明確化、渦移動量の推定に成功した。

また、先行研究ではそのメカニズムが明確ではなかった惑星渦度勾配と相対渦度勾配の渦の移動量への影響の違いについて、渦対並進期間のパラメータを評価することで考察を行い、その違いはシアの有無に帰着することを示した。

キーワード: 渦  
Keywords: vortex

## 慣性重力波によるエネルギーフラックスの位相独立表現 A phase-independent expression for the energy flux associated with inertia-gravity waves

相木 秀則<sup>1\*</sup>  
AIKI, Hidenori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

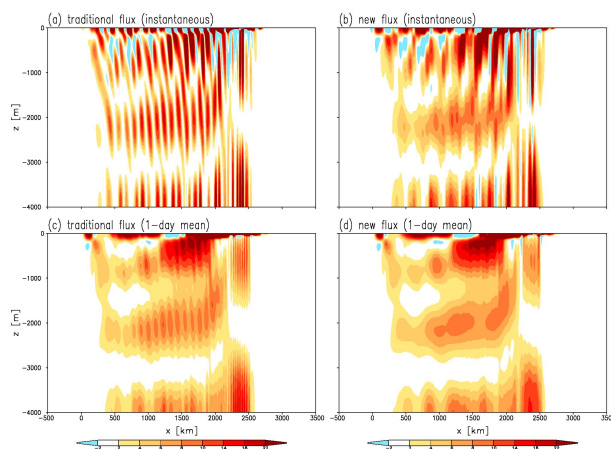
海洋中の波動の診断には時間平均がよく使われる。時間平均をとるには、波の位相変化にくらべて波の統計量がゆっくりと変化することを前提としている。実際の海洋の波動の診断では、この前提からはずれることがしばしばある。時間平均を積極的にとりにくい場合として、(i) 波の位相変化が非常に遅い(定在波)、(ii) 波の統計量の変化が突発的である(台風などによって励起された慣性重力波)、(iii) 観測や数値実験の制約上、細かい時間間隔でサンプリングできない等があげられる。このような状況に対処するために Takaya and Nakamura (1997, 2001) は「ロスビー波による 擬運動量フラックスの位相独立表現」を導いた。この表現は大気波動の診断の研究でよく使われ実用性に定評がある。ところが (a) ロスビー波によるエネルギーフラックスの位相独立表現、(b) 慣性重力波によるエネルギーフラックスの位相独立表現(本研究)、(c) 慣性重力波による擬運動量フラックスの位相独立表現(本研究)は過去の研究では導かれていない。

本研究では慣性重力波の支配方程式から出発して位相依存性のない新しいエネルギー方程式を導出した。この新しいエネルギー方程式の副産物として擬運動量の式の位相独立表現も得られた。

台風の通過ともなって海洋内部に慣性重力波が励起される様子を理想化した数値実験を行った。一様成層して初期に静止した海に、局所的な時計回りの風応力を与えて x 軸の方向に一定の速度で移動させる。10 日間の数値積分を行い、8.5 日目の(一回の)スナップショットを用いて、新旧のエネルギー方程式の比較を行った。図 a,c は従来の位相依存性のある表現  $u' p'$ 、図 b,d は新しい位相独立表現(詳細は省略)に基づく x 軸方向のエネルギーフラックスの鉛直断面である。両方とも x 軸の方向に波のエネルギーが伝達している。従来の表現だと位相変化が残るので、十分に細かい時間間隔(例えば 30 分毎)でモデルのスナップショットを出力した後にエネルギーフラックスを計算してその時間平均をとらなければならない。本研究の位相独立表現を使うとモデルの出力間隔が粗くても(例えば 3 時間毎でも)構わないので予報システムなどのオペレーションに向いている。

キーワード: 慣性重力波, エネルギーフラックス, 位相依存性

Keywords: inertia-gravity waves, energy flux, phase dependency



## 二重拡散対流による貫入の単純化モデル A mechanistic model of double-diffusive intrusions

野口 尚史<sup>1\*</sup>  
NOGUCHI, Takashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

### 1. はじめに

温度・塩分が異なる水塊が接する熱塩前線は、力学的に安定であっても二重拡散対流に対して不安定で運動が生じ、薄い層に分かれて相互に貫入が生じる。この貫入運動は前線面を通じた熱・塩分・運動量の輸送を担っているため、水塊の混合を考える上で重要な過程である。この貫入運動は、微細な規模の二重拡散対流(フィンガー対流・拡散型対流)の集合的な密度輸送により駆動されており、逆に二重拡散対流は貫入による水平流によって維持される塩分・温度の鉛直勾配によって駆動されている。

### 2. 設定

鉛直の仕切り板により2つの溶質 T, S を含む溶液が中央で2つに分けられている。

溶質 T, S は拡散係数が100倍異なっている。(海洋では T, S は温度(熱)と塩分に相当する。)仕切りの左右で、それぞれの溶質による密度の鉛直勾配は等しいが、左右でそれぞれ一定値  $\pm\Delta$  ずつ異なっているとすると、したがって全密度は左右で等しく、拡散が無ければ運動は生じない。また、初期の仕切り板の左右の流体の成層は、いずれも二重拡散対流について絶対安定であるため、拡散があっても(仕切りを取り除くまでは)運動は生じない。

### 3. 数値シミュレーション

無限に深い鉛直スロット内の2成分の Boussinesq 流体の2次元運動を分子拡散・分子粘性を陽に計算して解く数値モデルを用いて、貫入層を再現した。

初期に前線面で生じた擾乱は発達して層状の構造を形成した。生じた層状構造は傾いていた。 $\Delta$  を大きくすると層の傾きが反転し、内部の構造も変化した。

$\Delta$  が大きいときについて、層の内部構造を拡大したものを図 a に示す。

### 4. 単純化モデル

数値シミュレーションで見られた貫入層の力学的な仕組み、とくに輸送のバランスを理解するため、層内の微細スケールの対流運動のパラメータ化表現と、貫入層スケールの T, S 分布・運動とを結び付けた単純モデルを作成する。

同一の構造をもつ層が鉛直方向に周期的に重なっていると考える(図 b)。層の構造は準定常状態に保たれているとする。層の境界(拡散境界面)は層厚に比べ非常に薄いと、この境界面での T, S の跳び、層の勾配  $\alpha$ 、層内の水平シア  $u$ 、層の上端と下端(フィンガー層の上下)での T, S の差を用いて層構造の状態を表わす。

フィンガー対流による輸送は Stern による 4/3 乗則で表わす。

拡散型対流による輸送は大きくないが、T については同様に 4/3 乗則に基づいて表現し、S による輸送は小さいので無視する。

せん断が対流輸送の効率に与える影響は、せん断流の中でのフィンガー対流の安定性の理論(Kunze)より、せん断安定性の臨界状態に保たれていると仮定して求める。このときのフィンガーの幅・鉛直流速は、いずれも別の理論より層内の状態を用いて表現することができる。

これらの対流による輸送と層内での水平輸送との釣り合い式を解くことで準定常状態での層内の輸送が分かる。

その結果、輸送の表現、とくにソルトフィンガーのそれに大きく影響を受けるため定量的な比較は困難であるが、定性的には直接数値シミュレーションと整合的な結果を得た。

謝辞: この研究は科学研究費助成事業 若手研究 (B) 23740354 の助成を受けた。

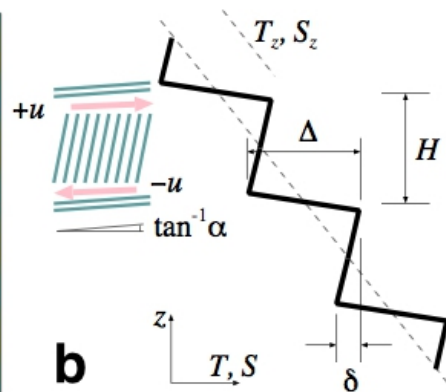
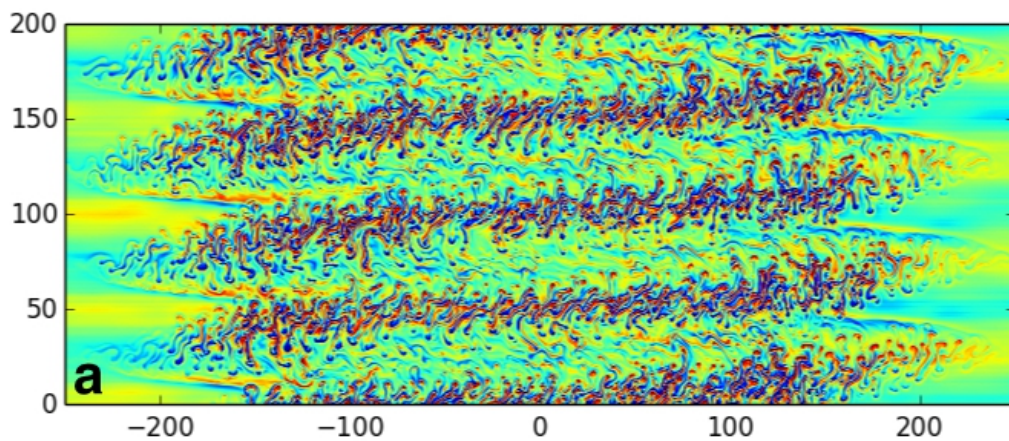
キーワード: 海洋, 二重拡散対流, 水平混合  
Keywords: double-diffusive convection, lateral mixing



MIS24-08

会場:313

時間:4月28日 15:15-15:30



## Low-frequency internal waves in Shiozu Bay, Lake Biwa: A numerical approach Low-frequency internal waves in Shiozu Bay, Lake Biwa: A numerical approach

AUGER, Guillaume<sup>1\*</sup>; NAGAI, Takeyoshi<sup>2</sup>; YAMAZAKI, Hidekatsu<sup>2</sup>  
AUGER, Guillaume<sup>1\*</sup>; NAGAI, Takeyoshi<sup>2</sup>; YAMAZAKI, Hidekatsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Ritsumeikan, <sup>2</sup>Department of Ocean Science, TUMSAT

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Ritsumeikan, <sup>2</sup>Department of Ocean Science, TUMSAT

In this study, we present results from the three-dimensional unstructured numerical simulator SUNTANS, used to understand the dynamics of the low-frequency internal wave field inside Shiozu Bay, a bay in the Northern part of Lake Biwa. Initial conditions for a fine-scale grid were generated in using a coarse grid with measured heat fluxes and wind stress. After being compared against observational data, the simulation reproduced consistently the low-frequency internal wave field, (similar frequencies and waves features). Based on the analysis of integrated potential energy and integrated dissipated energy time series, this study shows that the low-frequency internal wave field that enters Shiozu Bay does not either completely dissipate or break. Moreover isotherm elevation associated to the internal the first horizontal mode and first vertical mode Kelvin wave highlights the cyclonic rotation pattern, which is characteristic of the Kelvin wave, within the bay. This result shows that the part of the Kelvin wave entering the bay goes in and out. Moreover the dynamic of the internal wave field within the bay displays an peculiar process at the narrowing of the bay. At the contraction of the bay, the flow speeds up and deep isotherms deepen further. These two processes generated turbulence by shear and strain; according to the turbulence model (Mellor and Yamada, 1982) turbulent kinetic dissipation rate reached  $10^{-6} \text{ W kg}^{-1}$ , occurring during the trough phase of the internal wave field. Additionally the occurrence of these enhanced turbulent events appears to depend on the amount of energy detained by the low frequency internal wave. When the internal wave field was energized by the wind the turbulent events were enhanced. Such events could modify the long-term distribution of material in the lake.

キーワード: wind forcing, internal waves, contraction, strain  
Keywords: wind forcing, internal waves, contraction, strain

## 固体地球と海洋の重力・弾性結合系としての遠地津波の波形分散異常 Anomalous wave dispersion of distant tsunamis in a coupled system between the self-gravitating elastic Earth and ocean

綿田 辰吾<sup>1\*</sup>  
WATADA, Shingo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2010年チリ地震(M8.8)や2011年東北沖地震(M9.0)で発生した巨大津波は、約1日をかけて太平洋を渡り、対岸の来襲直前の深海域でその波形が観測された。その走時と波形はこれまで培われた遠地津波伝播予測から大きくずれていたため、多くの津波学者を悩ませた。

津波発生域近傍での津波観測により津波発生域を囲む観測点での津波波形は良く説明される。一方、太平洋を横断した津波は、これまでの津波伝播で使われた長波近似や、有限水平波長を考慮した線形重力表面波の分散関係から予測される伝播時間や波形とは大きく異なるものであり、伝播速度は1.2%低下(到達時間換算で最大15分程度の遅れ)していた。海底摩擦や有限振幅効果などの非線形効果は、深海域での数値計算によると遠地の伝播時間に観測可能な影響を与えない。

伝播遅延の要因として海底地形データの誤差(水深が系統的に浅い)や、海洋諸島・海嶺などの浅い水深での津波散乱の影響などが挙げられていた。また、遠地津波の波形には共通して、近地津波波形には見られない、主要到達波形とは逆転した振幅極性を持つ微弱な初期位相がみられた。初期反転位相の要因としては、主要津波発生前の初期破壊や、震源域周辺部での震源域とは逆転する地殻変動が挙げられていた。

今回、津波の水深変化による加重により弾性変形する固体地球の効果や、海水圧縮性の効果、津波や弾性変形する固体地球そのものが引き起す地球重力場の擾動が津波伝播に与える影響を考慮した津波波形を計算する手法を開発した。その結果、観測との走時差が5分以内に解消し、遠地津波のみにみられた初期反転位相を含む主要津波波形は、長周期帯域で固体地球と重力・弾性結合した津波の逆分散(波長が長いほど位相速度が低下)で良く説明できた。

太平洋を横断する津波の予想外の伝播遅延と逆分散は、固体地球と海洋が重力・弾性結合した力学系における波動の振舞いとしてよく理解される。

キーワード: 津波伝播遅延, 津波位相速度測定, 津波波形分散, 位相反転した初期津波位相, 津波先行波, 2010年チリ地震 2011年東北沖地震 DART 津波記録

Keywords: Tsunami propagation delay, Tsunami phase velocity measurements, Tsunami waveform dispersion, Tsunami initial phase with reversed polarity, Tsunami precursor, DART tsunami records from the 2010 Tohoku/Oki earthquake and

## スーパーアースにおけるマントル対流とスタグナントリッドの形成について On the vigor of mantle convection and stagnant lid formation in super-Earths

宮腰 剛広<sup>1\*</sup>; 亀山 真典<sup>2</sup>; 小河 正基<sup>3</sup>  
MIYAGOSHI, Takehiro<sup>1\*</sup>; KAMEYAMA, Masanori<sup>2</sup>; OGAWA, Masaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 愛媛大学, <sup>3</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Ehime University, <sup>3</sup>University of Tokyo

Super-Earths are extra-solar terrestrial planets which have large sizes and masses (up to about ten times the Earth's mass). Understanding mantle convection in super-Earths is a key to clarifying their evolution, surface environment, and habitability. In large super-Earths, the mantle depth far exceeds the thermal scale height, and adiabatic compression strongly influences super-Earths' mantle convection in contrast to the Earth's one. In this paper, we present numerical models of mantle convection in super-Earths with high compressibility, high Rayleigh number, temperature-dependent viscosity and depth-dependent thermal expansivity.

Thermal convection of compressible infinite Prandtl number fluid is solved in a rectangular box under anelastic approximation by the ACuTEMAN (Kameyama et al. 2005). The model of the super-Earths includes depth-dependent thermal expansivity and density, as well as a strong temperature-dependence of viscosity. We assume the mass of the planet is ten times the Earth's. The Rayleigh number defined with the viscosity at the core-mantle boundary (CMB)  $Ra$  is  $1E10$ . A viscosity contrast  $r$  up to  $1E7$  arises between the CMB and the surface owing to the temperature-dependence of viscosity. The employed grid number is 1024 (horizontal) and 256 (vertical).

We identified the stagnant lid regime in the model of super-Earths. When the viscosity contrast  $r$  is larger than about  $1E6$ , a stagnant lid of highly viscous fluid is formed along the surface. The lid hardly moves and is not involved in the convection, as has been observed earlier for the Boussinesq model of the Earth's mantle convection (Kameyama and Ogawa, 2000). The lithosphere is as thick as about thirty percent of the depth of the whole mantle, and the Nusselt number is about three at  $r=1E7$  and  $Ra = 1E10$ . This value is comparable to that of the Earth's model at the same  $r$  but at much lower  $Ra$  of  $6E6$  (Kameyama and Ogawa, 2000). The lithosphere is much thicker than has been expected earlier for super-Earths (e.g., Valencia et al. 2007), and the thick lithosphere is likely to affect the possibility of plate tectonics at the surface of super-Earths. The strong effect of adiabatic compression also affects the dynamics of hot plumes that ascend from the CMB when the temperature-dependence of the viscosity is strong: At  $r > \sim 1E3$ , hot plumes from the CMB are strongly suppressed. They do not ascend to the surface of the planet. The overall pattern of convective circulation in the mantle is, therefore, dominated by the cold plumes that descend from the lithosphere to the CMB. The low efficiency of heat transport by the mild convection would strongly affect the evolution history of super-Earths, and is likely to weaken the core convection, and thus, the magnetic field of super-Earths.

Keywords: super-Earths, mantle convection

## 熱プルーム形成時における熱源サイズの影響 Heater size effect on generation of thermal plumes

熊谷 一郎<sup>1\*</sup>; 山岸 保子<sup>2</sup>

KUMAGAI, Ichiro<sup>1\*</sup>; YAMAGISHI, Yasuko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 明星大学, <sup>2</sup>IFREE, JAMSTEC

<sup>1</sup>Meisei University, <sup>2</sup>IFREE, JAMSTEC

Mantle plumes from the CMB experience a filtering effect by the endothermic phase change at the 660-km phase transition. Fluid dynamics predicts that the hot mantle plumes stagnate at and locally heat the upper-lower mantle boundary, which causes generation of the secondary plumes in the upper mantle, and hence hotspots volcanic activities on the surface. To understand the effects of heater size on the plumes generation, we have experimentally investigated the behaviors of thermally buoyant plumes generated from a localized heat source (circular plate heater) using quantitative visualization techniques of temperature (TLC) and velocity (PIV) fields. Scaling laws for their ascent velocity and spacing of the plumes are experimentally determined. We also estimate the onset time of the secondary plumes in the upper mantle which depends on local characteristics of the thermal boundary layer developing at the upper-lower mantle boundary.

キーワード: プルーム, マントル, 流体力学, 実験

Keywords: plume, mantle, fluid dynamics, experiment

## 回転円筒内の磁気対流の線形安定性と波動 Waves and linear stability of magnetoconvection in a rotating cylindrical annulus

堀 久美子<sup>1\*</sup>; 竹広 真一<sup>2</sup>; 清水 久芳<sup>1</sup>  
HORI, Kumiko<sup>1\*</sup>; TAKEHIRO, Shin-ichi<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hisayoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 京都大学数理解析研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

天体内部の対流運動(例えば、地球コアの対流運動)やそれに伴う磁場の時間変動を考える上での基礎を得るために、境界面の傾いた回転円筒中で外部磁場を与えた場合に生じる熱対流の線形安定解析を行った。この円筒モデルは、非磁場下では、回転球または回転球殻内でおこる対流の特徴を定性的に表現できることがよく知られている。しかし、磁場が存在する場合についてはそれほど明確に知られていない。本研究では、重力、回転軸、および外部磁場の方向がそれぞれ直行する状況下で起こる二次元的な対流運動を考え、その臨界状態における振動解の分散関係と中立曲線を系統的に調べた。また、対流駆動型 MHD ダイナモ数値実験よりその影響が指摘された、熱的境界条件の影響も合わせて検討した。

その結果、熱拡散と磁気拡散の強さの比によって、対流運動が異なることがわかった。熱拡散に比べて磁気拡散が強い場合には、自転の順行方向に伝播する遅い波動モード(磁気ロスビー波)が現れるのに対し、熱拡散がより強い場合では様々な波動モードが現れ、逆行方向に伝播する遅い波動も複数起こりうる。これに伴い、中立曲線や対流を生ずる臨界モードも変化する。磁気拡散が強い場合には順行方向に伝播する磁気ロスビー波が、熱拡散が強い場合には逆行方向に伝播する遅い波動モードの一つ(遅い MC 波)が、最小の臨界レイリー数を与える。

また、温度固定型境界条件に代わり熱流固定型境界条件を課した場合、その影響は磁気拡散が強い場合でより顕著であることがわかった。ここでは、中立曲線が水平波数に対して単調増加するような関数となり、水平スケールの大きい対流セルほど発生しやすいことが示唆される。一方、熱拡散が強い場合では、複数の波動モードが存在することによって中立曲線が複雑に構成され、熱流固定型熱的境界条件の影響は明瞭に確認できなくなることがわかった。

## 超音波流速分布計測による回転熱対流のセルパターン調査 Investigation of cell patterns on a rotating convection by ultrasonic velocity profile measurements

藤田 広大<sup>1\*</sup>; 田坂 裕司<sup>1</sup>; 村井 祐一<sup>1</sup>; 大石 義彦<sup>1</sup>; 柳澤 孝寿<sup>2</sup>

FUJITA, Kodai<sup>1\*</sup>; TASAKA, Yuji<sup>1</sup>; MURAI, Yuichi<sup>1</sup>; OISHI, Yoshihiko<sup>1</sup>; YANAGISAWA, Takatoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

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

Rayleigh-Benard convection is the well-known topic as fundamental system in fluid dynamics. In particular, the effect of rotating field on the convection is one of essential piece for geophysics. The influence of centrifugal force and Coriolis force on convection pattern formation was experimentally showed by Rossby (1969). The flow structure of Rayleigh-Benard convection in a rotating field is described by Rayleigh number (Ra), Taylor number (Ta) and Prandtl number (Pr). Especially, it is important to study the behavior of low Pr fluid like liquid metals, because this knowledge helps to understand the dynamics of metallic cores in planets. In low Pr fluids, the flow regimes dramatically changes in comparison with ordinal fluid with  $Pr > 1$ . For example, Rayleigh-Benard convections in a liquid metal layer easily take transition to turbulent state. Generally, adding rotating field stabilizes the flow. On the other hand, flows of low Pr fluids with background rotation are expected to become oscillatory and irregular motion near the marginal stability conditions. These characteristics of low Pr fluids, however, have not been studied experimentally so much, because it is impossible to capture the convection patterns of liquid metal flows optically. To solve this problem, the authors adopt Ultrasonic Velocity Profile (UVP) method to visualize convective flow of liquid metal in a rotating field. As the data set of UVP measurement is one-dimensional velocity distribution, it is difficult to guess flow fields of convection from only a result of UVP without any criterion of translation. In this study, as preparations for liquid metal experiments, we performed two different visualizations using optics and ultrasound on ordinal transparent fluid, water ( $Pr = 7$ ), to understand flow field from spatio-temporal velocity distribution obtained by UVP. Optical visualization provides path line images for the comparison. In addition, we purpose to take the knowledge about spatio-temporal velocity distribution of high Pr contrasted with low Pr.

Experiments were performed on a rotating table. The vessel of fluid layer has a square geometry, which aspect ratio is seven. The bottom of fluid layer was heated by electrical heating and the upper surface was cooled by circulating water through flow channel made of glass plate. Optical visualization images were obtained from a horizontal section of the fluid layer. An ultrasonic transducer for UVP measurement was mounted horizontally on the side wall of fluid layer.

The path line showed many small round convective cells in the fluid layer, and it represented that the size of cells become smaller as Ta takes larger. In addition, the size of cell and cell motions were also detected by spatio-temporal velocity distributions acquired by UVP. For example, cells moved in certain direction and passed over measurement line of transducer. Staying time of cell on the line was observed and means speed of cells moving. As Ta gets larger, it was found that the speed of each cell motion became slower. The cell diameter was calculated from velocity data. When cells stay next to each other, there is 0 mm/s on cells boundaries in spatial velocity distribution at the time. We defined distances between neighboring cells on the spatial line respectively as scales of cell size. Then we extracted all distances from spatio-temporal distribution and calculated the expected value of these. The expected value represents dominant cell diameter. We confirmed that the cell size on the distribution roughly corresponds to that on the path line. Thereby we obtained information of convective cell from only UVP data.

キーワード: レイリー・ベナール対流, 回転場, 流れパターン

Keywords: Rayleigh Benard convection, Rotating field, Flow pattern

## 水平磁場下の液体金属対流におけるロール状対流について Roll convection in a liquid metal layer subject to a horizontal magnetic field

田坂 裕司<sup>1\*</sup>; 井垣 一人<sup>1</sup>; 柳澤 孝寿<sup>2</sup>; エッカート スヴェン<sup>3</sup>; 村井 祐一<sup>1</sup>  
TASAKA, Yuji<sup>1\*</sup>; IGAKI, Kazuto<sup>1</sup>; YANAGISAWA, Takatoshi<sup>2</sup>; ECKERT, Sven<sup>3</sup>; MURAI, Yuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院工学研究院, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> ヘルムホルツセンター

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Hokkaido University, <sup>2</sup> JAMSTEC, <sup>3</sup> Helmholtz center at Dresden-Rossendorf

Recent investigations using ultrasonic velocity profiling (UVP) on Rayleigh-Benard convection in a liquid metal layer under horizontal magnetic field gave good understanding for typical temperature fluctuations shown in previous studies (Yanagisawa, et al., 2013). For example, regime transition against variations of Rayleigh number (Ra) and Chandrasekhar number (Q), variation of the roll number and spontaneous, random flow reversal that consists of spontaneous transition between two modes having different number of rolls, mainly  $N = 4$  and 5. This flow reversal may be due to non-integer number of stable wave number in corresponding conditions of Ra and Q. The rolls can take only integer number even though the stable wave number determined by flow instability is, for example,  $N = 4.3$ . In this case the dominant condition is  $N = 4$ , and it is sometime modified into  $N = 5$  due to external noise. However,  $N = 5$  is not stable, and thus Skewed varicose instability occurs to restore  $N$  into 4. Time average of instantaneous  $N$  may correspond to stable wave number for the corresponding conditions.

This study aims to widen the flow regimes into larger Ra and larger Q by one order to clarify the influence of strong magnetic field: Past studies predict that the strong magnetic field greatly modifies the critical Rayleigh number at the onset of the convection. Experiments were done in Helmholtz center at Dresden-Rossendorf (HZDR) to utilize strong magnetic field generator that can provide quasi uniform magnetic field with 30 mT in the intensity. The test fluid layer is almost same with our previous study (Yanagisawa, et al., 2013) and its main aspects are, 5 in aspect ratio, 40 mm in height and sandwiched between copper plates for cooling at top and heating at bottom. The obtained regime diagram shows that the fraction rule on Ra/Q determining the regimes is still almost valid in the widen region of Ra and Q. But the number of rolls is slightly modified from expectations by the rule. Also we observed "regular" flow reversals instead of random one. This may be due to stable number of rolls larger than  $N = 4.5$  and aspect ratio of the vessel, 5. The dominant roll number also depends on the side boundary of the vessel. Velocity profiles parallel to the roll axes clarified three dimensional motion during the regular flow reversals.

キーワード: レイリーベナール対流, 液体金属, 磁場, 対流パターン

Keywords: Rayleigh-Benard convection, Liquid metal, Magnetic field, Convection pattern



## 液体金属の熱対流での skewed-varicose instability による流れ場の反転 Flow reversals in liquid metal convection by the skewed-varicose instability

柳澤 孝寿<sup>1\*</sup>; 櫻庭 中<sup>2</sup>; 浜野 洋三<sup>1</sup>

YANAGISAWA, Takatoshi<sup>1\*</sup>; SAKURABA, Ataru<sup>2</sup>; HAMANO, Yozo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup>School of Science, Univ. Tokyo

The natures of turbulence and large-scale flow pattern in the outer core are controlled by the magnetic field. It is important to know the basic behavior of flow in relation to the magnetic field, for understanding the flow patterns observed in real Earth and core dynamo simulations. By recent laboratory experiments of Rayleigh-Benard convection with liquid gallium, a regime diagram of convection patterns was established under various intensities of a uniform horizontal magnetic field for a wide square geometry (Yanagisawa et al. 2013, PRE). Five flow regimes are recognized; (I) fluctuating large-scale pattern without roll, (II) weakly constrained roll with fluctuations, (III) continuous oscillation of roll, (IV) repetition of roll number transitions with random reversals of the flow direction, and (V) steady 2-D rolls. In these, regime (IV) with flow reversals is the most interesting behavior. Flow reversals have been observed so far in narrow vessels with small aspect ratio, and the proposed processes for reversals are reorientation and cessation. Experiments with liquid metal under horizontal magnetic field suggest the existence of new type of reversal, via the skewed-varicose instability.

We performed numerical simulations of magnetoconvection in a same setting as the experiment with no-slip velocity boundary conditions. Both the Prandtl number and magnetic Prandtl number of the working fluid are set small to simulate liquid metals. Our numerical result successfully reproduced all regimes that observed in the experiments. The process of flow reversal is illuminated by the simulation. Axis of roll is skewed with a roll shrinking, and the number of rolls is reduced. In case the reduced roll number structure is not fit the vessel, new small circulation grows to a roll again, and then reversed flow state is established. The process repeats with irregular time interval. It works in 3-dimensional geometry, and should play important role in various flow systems.

キーワード: 熱対流, 液体金属, 流れ場反転

Keywords: thermal convection, liquid metal, flow reversal

## Spectrum of internal waves in bounded domains of the Atmosphere and the Ocean Spectrum of internal waves in bounded domains of the Atmosphere and the Ocean

GINIATOULLINE, Andrei<sup>1\*</sup>  
GINIATOULLINE, Andrei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Los Andes University, Bogota, Colombia, South America

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Los Andes University, Bogota, Colombia, South America

We consider the spectral properties of internal waves for three-dimensional compressible rotating exponentially stratified fluid. This model describes the flows in the Atmosphere and the Ocean which include simultaneously the rotation of the Earth over the vertical axis, and the non-homogeneous initial stratification of density caused by the gravitational force. We obtain theoretical results for the spectrum of the resulting internal waves in terms of its structure, localization, and its possible usage in computational algorithms. The applications of the spectral properties of such internal waves can be found, in particular, in the models of the resonance effect. We consider both the general case of bounded domains, and the explicit results of some particular domains, such as cubes and cylinders.

キーワード: computational fluid dynamics, compressible fluid, rotating stratified fluid, essential spectrum, internal waves, fluid dynamics of the Atmosphere and the Ocean

Keywords: computational fluid dynamics, compressible fluid, rotating stratified fluid, essential spectrum, internal waves, fluid dynamics of the Atmosphere and the Ocean