

[26]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/6796417>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 26, 2023-03. Research Institute for Applied Mechanics,
Kyushu University

バージョン：

権利関係：



特定研究1【国際】

回転成層流体における波動現象の多角的理解

Multidisciplinary study of wave dynamics in rotating stratified fluids

統括責任者：大貫 陽平（地球環境力学分野）

地球海洋や惑星大気には、天体の自転に起因したコリオリ力や重力成層した流体に働く浮力を復元力した多様な波動現象が存在します。これらの波動は、流れ場との相互作用や境界における反射・散乱を繰り返しながらエネルギーや運動量を運ぶことで、環境システムにおいて重要な役割を果たしています。

本特定研究では、海洋・大気における波動現象への理解を飛躍的に高め、全球数値モデルの精度向上や次世代観測衛星のデータ分析に資することを目指し、基礎流体物理的な研究を推進します。特に大型回転水槽実験やトポロジー理論を強みとした欧州グループとの連携を強化し、実験・理論・シミュレーションを柱とした多角的な研究アプローチを展開します。

Quasi-resonance phenomena in geophysical waves

Antoine VENAILLE (ENS de Lyon, France)

目的: 地球システムや他惑星に見られる流体现象は、物理学における他分野の知見を応用して説明できることがある。例として我々は数年前、凝縮系物理学分野で生まれたトポロジカル波動論の概念を利用し、赤道波動に特徴的なスペクトル構造の説明に成功した。この理論は、複雑な微分方程式を詳細に解くことなく、北半球と南半球において波動成分が局所的に異なるトポロジー的性質をもつことに基づき、赤道に捕捉された波動成分のスペクトル構造の概形を説明することを可能にする。トポロジー解析に関連した数学手法として、表象として定義された関数を擬微分作用素に結びつける Wigner-Weyl 変換がある。表象は波線追跡法に用いられる概念であるが、一方で作用素は波動のスペクトルを定めるものである。Wigner-Weyl 変換の地球流体力学への応用は、トポロジー解析とは独立して Onuki (2020)によっても提唱された。我々の共通の興味は、地球流体现象に対するこれら理論的手法のさらなる応用可能性を探ることにある。

■ 研究 1: 連続媒質における波線追跡法とトポロジカル波動論の関係

(Venaille et al., 2023)

不均質な媒質は共通して、空間依存したパラメータの界面付近に捕捉された離散的な波動モードを保持することがある。もしパラメータを連続的に変化させても捕捉モードが存在し続ける場合、これらの波動は「トポロジカルな起源」をもつと呼べる。過去数十年余りの研究によって、そのようなトポロジカルな起源をもつ波動は、2つのバルクを跨いで Chern 数と呼ばれる単一のトポロジー不変量を計算することにより、微分方程式を直接的に解くことなく計算できることが示されている。単純なバルク問題の計算と、より複雑な界面の問題の対応性は、抽象的な指数定理によって正当化される。本研究では、赤道域における浅水方程式系を例とし、波線追跡法を応用することで、この対応性に対して物理的な解釈を与える。最初に Wigner-Weyl 変換を用いて位置と波数についての相空間における波線を計算し、その後、量子化の条件から元の波動作用素がもつスペクトルの性質を明らかにする。その過程で、Chern 数が量子化の条件に関係することを示す。

■ 研究 2: 鉛直シア流の存在下における潮汐による内部波の発生

(Onuki and Venaille, Internal wave generation in shear flow: a spectral theoretic perspective, in preparation)

鉛直方向に流速勾配をもつ背景定常流の存在下において、微小な海底地形上を行き来する潮汐振動流によって励起される内部重力波の性質を理論的に考察した。我々はこの問題を、周期的な外力強制に対する線形システムの応答として定式化した。その一般解は、自由波

の時間発展を定める作用素のレゾルベントを用いることで、ラプラス変換の方法によって得ることができる。このレゾルベントがエネルギーノルムについて非有界となる条件により、作用素のスペクトルが定義される。このスペクトルは、それぞれの水平波数に対し、鉛直固有モードに対応する離散的な固有値と、臨界層の存在条件に対応する連続的な部分によって構成される。強制振動に連動した定常応答解の空間構造は、フーリエ積分の漸近評価により、地形から十分に離れた地点において、正弦波形を保ちながら伝わる離散モード成分と、臨界層にエネルギーを吸収されながら流速シアを増していく成分によって構成されることが示される。順圧潮汐成分から傾圧成分へのエネルギー変換率は、スペクトルの離散成分と連続成分それぞれからの寄与の和によって表現される。この結果は、離散モード成分のみを考慮した従来の結果を拡張するものである。

■ 研究3: 東西シア流の中での Rossby 波の伝搬

順圧の準地衡方程式形において、南北方向に勾配をもつ東西シア流において励起される Rossby 波の性質を理論的、数値的に考察した。固有の南北構造をもつ離散モードと、臨界緯度を伴う連続モードの性質を調べ、波線追跡法によって Rossby 波の伝搬特性を検証した。外部からの周期強制によって励起される Rossby 波のエネルギーの長期的な振る舞いを調べた結果、連続モード成分の中でも、流速の南北勾配が 0 となる定常流線と呼ばれる地点に臨界緯度をもつ強制周波数に対しては、エネルギー成長の冪指数が特異的になるという興味深い結果を得た。

■ 出版論文

- Venaille, Onuki, Perez, and Leclerc, 2023, From ray tracing to waves of topological origin in continuous media, SciPost Physics, in press.

■ 学会発表等

- Venaille, A., Topological waves, Boulder School 2022: Hydrodynamics Across Scales, 2022.07.
- 大貫 陽平, Antoine Venaille, シア流中に励起される内部重力波のスペクトル論的考察, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022.09.
- Onuki, Y. and Venaille, A., Internal tide generation in shear flow, Singularities and Attractors in rotating and stratified fluids, 2022.12.

■ 研究組織

代表 : Antoine VENAILLE (ENS de Lyon)

所内世話人 : 大貫陽平

協力者 : Emile DELEAGE (ENS de Lyon, Student)

金星大気波動の解析

慶應義塾大学法学部 杉本憲彦

目的

金星は、その固体部分が半径や重力加速度などの点で地球とよく似ているため、地球の兄弟星と呼ばれる。しかし、その自転周期は非常に遅く、約 243 日にもなる。またその大気部分は、二酸化炭素を主成分とし、約 92 気圧にも達しており、地球と大きく異なっている。高度 45-70km 付近には、厚い雲層が存在するため、その大気循環の全貌は未だ解明されていない。雲の模様などの動きから、大気全体が自転を追い越す方向に約 4 日周期(～100m/s)で回転していることが知られており、スーパーローテーションと呼ばれているが、その成因解明は、地球流体力学的にも興味深い研究テーマとなっている。

2015 年には、我が国の金星探査機「あかつき」が金星軌道への再投入に成功し、現在も観測が続けられている。あかつきによって、様々な時空間スケールの波動が観測され、その運動量輸送を通して、スーパーローテーションの生成や維持に重要な役割を果たすと考えられている。しかしながら、これらの波動の 3 次元構造や働き、理論的解釈は未だ十分になされていない。そこで本研究では、観測、モデル、データ同化、理論を駆使して、金星の大気波動の実態を明らかにする。あかつきの観測データを金星大気大循環モデルに同化し、より現実的な客観解析データを作成、この中に再現された大気波動を調べることで、これらの波動の理論的解釈を試みる。そして、今後の海外金星探査計画へ、その知見の提供を目指す。

研究方法

我々は、これまでに地球シミュレータ上の金星大気大循環モデル (AFES-Venus) および世界初のデータ同化システム (ALEDAS-V) を開発してきた。本研究では、これらを用いて次の研究を行う。

1. あかつき観測データを AFES-Venus に同化 (杉本・藤澤・小守) することで、あかつきで観測される様々な時空間スケールの金星大気波動を再現する。
2. AFES-Venus 単体での高解像度計算 (杉本) によって、より細かいスケールの波動現象の再現を試みる。
3. これら数値モデルで得られた波動について、3 次元構造や働きについての解析 (藤澤・小守) を行い、理論的な解釈 (杉本・大貫・山本) を行う。
4. また、国内外の金星大気大循環モデルで得られる波動についても、その発生条件や構造の違い等を本モデルの結果と比較する (杉本・山本)。
5. 同化データやモデル内での波動の再現が当初の予定通りにうまくいかない場合など、必要に応じて波動を疑似観測データとして作成、同化する実験 (OSSEs) を行う (杉本・藤澤)。

研究結果

2022年度は、1. あかつき風速の同化を行い、金星大気で世界初となる客観解析データの作成を行った。その結果、熱潮汐波の位相および平均東西風が改善された。また、2. AFES-Venus 単体での高解像度計算を実施し、傾圧不安定からの自発的な重力波放射を再現した。さらに、5. あかつき中間赤外を想定した観測システムシミュレーション実験を実施し、実観測の同化と波動の再現に向けた観測条件を探索した。1. については研究成果報告の(i)として、論文発表を行い、プレスリリースを行った。また5. についても研究成果報告の(ii)のレター論文として出版済みである。さらに大気大循環モデルの改良として、加熱や安定度分布を修正し、熱潮汐波や短周期波動の再現性の向上に努めている。

考察

2022年度に得られた結果は、金星大気中の波動の重要性を強く示唆するものである。このため、2023年度には研究方法の3. および4. の解析を進め、理論的解釈を目指す。特に最近のGCM研究では、ロスビー波とケルビン波のカップリングによる結合不安定によって、3次元的な短周期波動の励起が示唆されており、スーパーローテーションの時空間変動とも強く関連する可能性が指摘されている。このロスビー波とケルビン波の結合不安定については、これまで2次元の浅水系を用いた基礎的な理論研究がほとんどであり、3次元的な励起のメカニズムの解明が期待される。また、あかつきの温度観測データの同化にも着手し、金星大気の現象の理解をさらに深めていく。

研究成果報告

- (i) Fujisawa, Y., N. Sugimoto(3番目), 他10名 **The first assimilation of Akatsuki single-layer winds and its validation with Venusian atmospheric waves excited by solar heating**, *Scientific Reports*, Vol.12, (2022), 14577, 11pp, 10.1038/s41598-022-18634-6. プレスリリース.
- (ii) Sugimoto, N., Y. Fujisawa, N. Komori, 他3名, **Akatsuki LIR observing system simulation experiments evaluated by thermal tides in the Venus atmosphere**, *Geoscience Letters*, Vol.9, (2022), 44, <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00253-8>.

研究組織

杉本憲彦 (慶應義塾大学法学部・教授) : 研究代表者
大貫陽平 (九州大学応用力学研究所・助教) : 所内世話人
藤澤由貴子 (慶應義塾大学自然科学研究教育センター・研究員)
小守信正 (慶應義塾大学自然科学研究教育センター・研究員)
山本勝 (九州大学応用力学研究所・准教授)

Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave field

Wei YANG (Tianjin University, China)

概要: 海洋の内部において微細な乱流運動によって引き起こされる鉛直密度混合は、運動量、熱、淡水、炭素、あるいはその他の生物科学的な物質の輸送に多大な影響を与え、地球規模の環境システムにおいて重要な役割を果たしている。特に深層においては、順圧潮流が海底地形上を通過する際に発生する内部重力波(内部潮汐)が、乱流混合の主要なエネルギー源である。しかしながら、比較的大きな空間スケールをもち、長距離を伝搬する内部潮汐が、どこでどのようにしてエネルギーを失い乱流散逸に至るのかは、未だ十分に理解されていない。過去の研究では、内部波間の三波共鳴相互作用の一種である parametric subharmonic instability (PSI)が、内部潮汐から短波長の近慣性波成分へエネルギーを受け渡すことで、エネルギー散逸を促進するメカニズムが指摘されている。しかし、PSI によって励起された近慣性波成分のエネルギーが、その後スペクトル空間内をどのように伝わっていくのかは明らかにされていない。本研究は、高解像度三次元数値シミュレーションによって、内部波スペクトルにおける非線形的なエネルギー輸送機構を明らかにすることを目指す。

■ 手法

大きな空間スケールをもつ背景内部波の一部を切り出し、周期変動する局所線形的な流速シアと密度勾配の影響を受けて時間発展する擾乱成分を数値シミュレーションで検証した。この数値モデルは、Onuki et al. (2021)のモデルを拡張し、地球自転の効果とそれに伴う背景内部波の偏光性の変化を組み入れたものである。計算領域を時間とともに変動させることで、領域サイズを抑えつつも背景波のもつ流速シアの効果を適切に表現し、フーリエスペクトル法で離散化することで、小スケールの擾乱成分を精度良く解像できる点がこのモデルの持ち味である。

■ 結果

東シナ海を想定したパラメータ設定で、微小なガウシアンノイズを初期条件に計算を開始した結果、擾乱エネルギーが指数関数的に増大したのち飽和に至る様子が観察された (図 1)。時間当たりのエネルギーの増大率は、線形安定性解析から見積もられる PSI の不安定成長率と整合する。エネルギー飽和の前後で、擾乱流速場の構造は層流から乱流へ遷移しており(図 2)、内部重力波の碎波が起こったものと解釈できる。擾乱成分を周波数分解し、エネルギースペクトルの時系列を確認したところ、初期段階では近慣性成分に集中していたエネルギーが飽和と同時に他の周波数成分へと流れ出し、特に慣性周波数の高調波成分にピークを作り出すことが確認できた。スペクトル空間内でのエネルギー輸送のメカニズム

をより詳細に明らかにするため、バイスペクトル解析を実施し、近慣性成分のもつ流速シアに伴うシア生成率を計算した。その結果、実地観測(Yang et al. 2022)で報告されたような高周波数成分へのエネルギー輸送が見られた。これら高周波数成分は近慣性波と同程度の鉛直スケールを有していた。

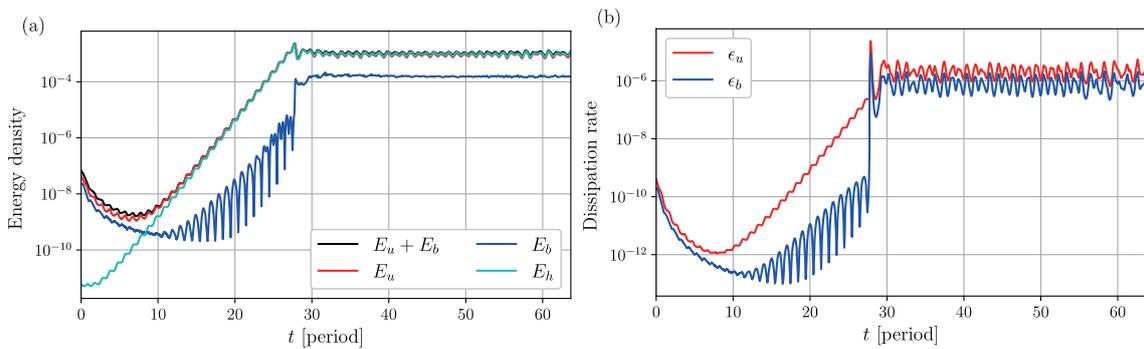


図 1. (a) 擾乱エネルギー密度と (b) エネルギー散逸率の時系列. 黒が全エネルギー, 赤が運動エネルギー, 青が有効位置エネルギー, シアンが水平平均(慣性振動)成分を表す.

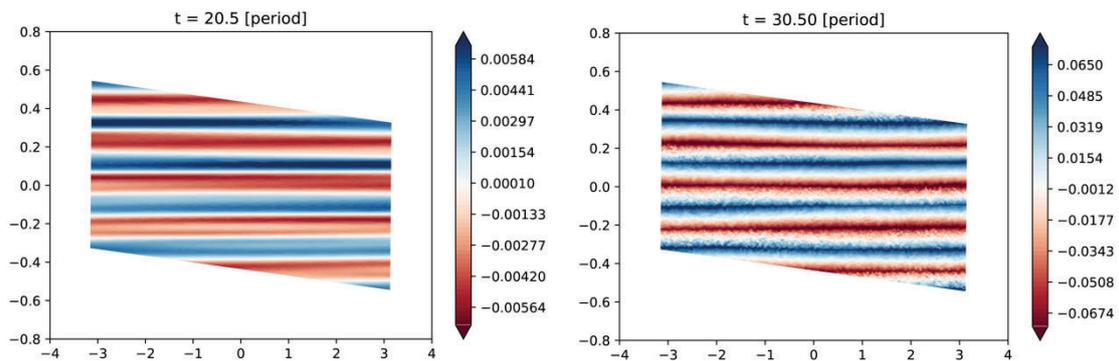


図 2. x 方向流速成分の鉛直断面図. 左がエネルギー飽和前で右が飽和後の様子.

■ 今後の展望

実験パラメータや解像度を調整しながら引き続き数値実験を実施するとともに、シミュレーションで得られた近慣性成分から高周波数成分へのエネルギー輸送メカニズムを詳細に明らかにする。具体的には、いわゆる三波共鳴相互作用によるものなのか、あるいは波動平均流相互作用に似たメカニズムによるものなのかを、慣性重力波の分散関係式や wave action の保存則の観点から議論していく予定である。

■ 共同研究者

代表者: Wei YANG (Tianjin University)

所内世話人: 大貫 陽平

Energy cascade and mixing due to internal wave in stratified fluid

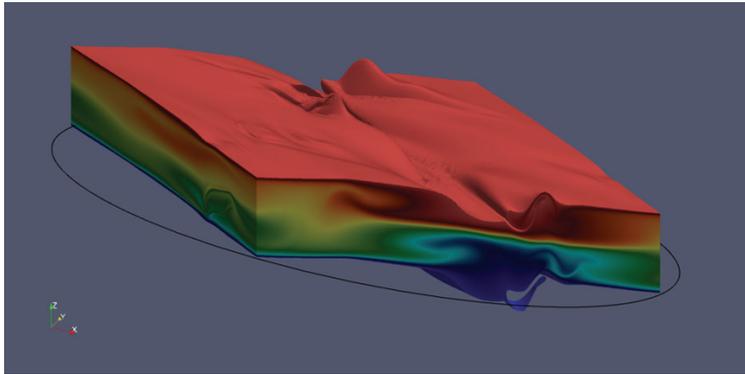
Sylvain JOUBAUD (ENS de Lyon, France)

Objective: Vertical mixing plays a major role in modeling the global circulation in the ocean (or climate). One of the key mechanisms for such ocean mixing is overturning internal waves. However, these mechanisms are still poorly understood and modeled on a very crude level (diffusion with an adjustable coefficient). To get more insights into this phenomenon, we will investigate the complex dynamics of rotating and stratified systems subject to high energy forcing using laboratory experiments and numerical simulations. In such cases of strongly-forced regimes, advection and mixing play essential roles by affecting the dispersion relation and the background stratification. The project aims to quantify the energy cascade due to nonlinear wave interaction and the local mixing events to relate the wave-induced mixing intensity to the intensity of the turbulent motions. In the present project, we aim to combine French and Japanese teams' efforts and benefit from the two-year visit of Y. Onuki at ENS de Lyon. S. Joubaud will take care of the experimental part while Y. Onuki will implement the numerical simulations.

- Study 1: Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability (Onuki et al., 2023, under review)

A gradient-wind balanced flow with an elliptic streamline parametrically excites internal inertia-gravity waves through ageostrophic anticyclonic instability (AAI). This study numerically investigates the breaking of internal waves and the following turbulence generation resulting from the AAI. In our simulation, we periodically distort the calculation domain following the streamlines of an elliptic vortex and integrate the equations of motion using a Fourier spectral method. This technique enables us to exclude the overall structure of the large-scale vortex from the computation and concentrate on resolving the small-scale waves and turbulence. From a series of experiments, we identify two different scenarios of wave breaking conditioned on the magnitude of the instability growth rate scaled by the buoyancy frequency, λ/N . First, when $\lambda/N \geq 0.008$, the primary wave amplitude excited by AAI quickly goes far beyond the overturning threshold and directly breaks. The resulting state is thus strongly nonlinear turbulence. Second, if $\lambda/N \leq 0.008$, weak wave-wave interactions begin to redistribute energy across frequency space before the primary wave reaches a breaking limit. Then, after a sufficiently long time, the system approaches a Garrett-Munk-like stationary spectrum, in which wave breaking occurs at finer vertical scales. Throughout the experimental conditions, the growth and decay time scales of the primary wave energy are well correlated. However, since the primary wave amplitude reaches a prescribed limit in one scenario but not in the other, the energy dissipation rates exhibit two types of scaling properties. This scaling classification has similarities and differences with

D'Asaro and Lien's (2000) wave-turbulence transition model. (extracted from the original paper)



A snapshot of the density field in the numerical simulation. The breaking process of internal gravity waves excited through elliptic instability is visualized.

■ Study 2: Three-dimensional visualization of stratified fluid flow using suspended inertial particles

This year, we have started a new series of experiments to understand the dynamics of internal gravity waves and stratified turbulence. Innumerable minute particles are suspended in density-stratified fluid in a laboratory tank. We make a wavy fluid motion by moving the tank wall while measuring the locations of the particles using particle tracking velocimetry with four cameras at any instance. Tracking the trajectory of the particles, we have created a 3D movie of streamlines, which exhibits oscillatory motion associated with the internal gravity waves and induced mixing. Using this method, we will investigate the formation of an internal wave attractor, triadic resonant instability, and turbulence statistics from Lagrangian viewpoints.

■ Submitted paper

- Onuki, Y., Joubaud, S., and Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, *Journal of Physical Oceanography*, under review.

■ Presentations

- Onuki, Y., Joubaud, S., Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 2022.05.
- Onuki, Y., Joubaud, S., Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, 14th European Fluid Mechanics Conference, 2022.09.

■ Project members

Representative: Sylvain JOUBAUD (ENS de Lyon)

RIAM advisor: Yohei ONUKI

Collaborators: Corentin PACARY, Dheeraj VARMA, Julie DELEUZE (ENS de Lyon)