

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05653

研究課題名(和文) 回転流体の境界層のフラックス評価に関する室内実験を用いた基礎的研究

研究課題名(英文) A fundamental study on the estimation of fluxes in boundary layers of rotating fluids by laboratory experiments

研究代表者

伊賀 啓太 (Iga, Keita)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：60292059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：水を入れた円筒容器の底面付近に設置した回転盤を高速に回転することにより大規模な渦を作り、境界層を通した角運動量交換の観点から、理論的な計算と実験結果の比較して、境界層の中の流れの形態を調べた。水面高の変化の詳細な測定結果は、渦を伴った水の運動と底面の円盤や側壁境界との間に起こる運動量交換が速度差に比例することを示しており、境界層が層流の形をとることがわかった。一方、水面付近では乱流的な性質もみられ、同じパラメータにおいても層流・乱流境界層領域の両方が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室内実験によって境界層の性質を解析し、そこを通して行われる運動量輸送の評価を行ったが、室内実験の測定結果を通じて、境界層の素過程の性質を示すことができた。これは、地球流体の数値計算を行う際に必要となるパラメタリゼーションが数値実験を通して行われることが多い中、スケール間相互作用を測定できる室内実験の手法を用いた輸送量評価となっており、数値計算で用いるパラメタリゼーションの根拠づけとしての役割も果たす。

研究成果の概要(英文)：In a cylindrical container filled with water driven by a rapidly rotating bottom disk, a vortex motion is formed in a laboratory experiment. Considering the angular momentum exchange through the boundary layers, and comparing the theoretical calculation and the experimental results, the flow features of the boundary layers are investigated. The detailed measurements of the change of the surface elevation indicate that the momentum exchange between the fluid and the bottom or side-wall boundaries is proportional to the velocity difference, which indicates that the flow in the boundary layer is laminar. On the other hand, the flow at the free surface has also turbulent features; both laminar and turbulent boundary layers are formed in the same system with the same surrounding flow parameter.

研究分野：地球流体力学

キーワード：渦の室内実験 渦運動に伴う境界層 境界層内の運動量輸送 層流境界層・乱流境界層

1. 研究開始当初の背景

大気や海洋の流れを調べる研究において、モデルを用いた数値実験は非常に重要で強力な手段であるが、周辺との相互作用がある境界層や小さなスケールの乱流運動は、注目する現象そのもののスケールの隔たりが大きいいため、同一の枠内で直接計算を遂行してスケール間相互作用を取り扱うことが難しい。そのため、境界層での振舞いやサブグリッドスケールの乱流の取り扱い、これらの効果を少数の自由度の数値で代表させるパラメタリゼーションとして取り入れることが必要となる。乱流や境界層の過程のパラメタリゼーションは、乱流や境界層そのものの性質を深く調べてその解析結果を根拠として行われることが多い。

流体力学の広い範囲で考えると、室内実験などの手法が用いられることも多いのに対して、地球流体の分野においては、もともと興味ある現象のスケールが非常に大きなものであるため室内実験で設定するスケールとは大きく違っていることや、湿潤過程が大きな役割を担っていることなどの理由から、実験での再現が比較的難しいという事情もあり、近年では室内実験の手段が取られることはほとんどない。この傾向は、乱流や境界層そのものの構造の研究にもあてはまり、このような素過程の研究においても数値実験の手法に重点がおかれていた。

しかし、数値実験の手法による素過程の研究においても、計算機能力が年々飛躍的に向上している現在でもそのような異なるスケール間の相互作用を全て同時に取り扱って計算することは困難であり、その計算自体にまだ LES などのパラメタリゼーションが必要とされている。一方、工学などの流体力学にかかわる他の分野では、このような基礎的な調査には室内実験が今でも積極的に利用され、大きな役割を果たしている。

2. 研究の目的

地球流体力学の分野では、素過程研究においても、数値計算による手法が主要な手段となっているが、現在の計算機資源のもとでは、その素過程の数値計算自体にもパラメタリゼーションを考慮する必要がある。乱流や境界層の効果のパラメタリゼーションによる不確実性を払拭するためには何らかの根拠が必要とされるが、それは大気や海洋の流体现象でも必要であると考えられる。室内実験はそれ単独で一般性のある結論を導くのに困難を伴うことが多く取り扱いも難しいなど欠点も多く、この欠点は常に認識しておく必要はあるものの、そこで再現される流れは、一般流から微細構造による流れまで、全てのスケールの現象を確実に包有しており、現在の数値計算による手法にはない長所も持っている、そのため、数値計算や理論の展開を併用して相互補間することにより、より確実・正確に流れの様子を記述できるようになることが期待される。

そこで、本研究では、地球流体力学で扱う典型的な流れである回転流体に注目し、その乱流や境界層のような小さなスケールの現象から、大スケールの現象や内部領域の流れに与える影響の評価を、室内実験を実施してその解析を通して検討する。その評価をもとにして、これまで主に数値シミュレーションを通して得られてきているパラメタリゼーションの知見を評価することを目的とする。

3. 研究の方法

回転流体の境界層の振舞いを記述するために、容器の底面・壁面の影響が重要となる回転流体の流れを実験室内で実際に作り、流れの大局的なパラメータとフラックスとの関係を用いることによって境界層内のフラックスの見積もりを行う。

まず全体的な流れの変化の把握を行い、この室内実験のデータを集積してその詳細を解析しデータの解析結果から、境界層のフラックス量を明らかにし、力学的な裏付けとなる理論を構築する。さらに、室内実験によって得られた結果に対して、対応する数値実験や大気現象に対する数値シミュレーション結果と比較して理論の妥当性を検討し、これらの結果を総合して、境界層の影響によるパラメタリゼーションを再評価する。

4. 研究成果

底面付近に回転盤を設置した円筒容器内に水を入れて回転盤を高速で回転することにより大規模な水の渦を励起する室内実験を行い、渦の振る舞いが実験の条件によってどのように変化するかを調べて、その実験パラメータ依存性を整理した。

回転盤の回転数が小さい時は、基本的には円形の渦ができるが、回転数が大きくなるとその軸対称性が崩れ、楕円や多角形など非軸対称な構造をもった渦へと移行する。回転数が大きくなるに連れて、実現する多角形の渦の頂点の数は増えていく。また、その移行が起こる円盤の回転数は、初期に入れておく水の水深に依存し、初期水深が浅いほど小さな回転数でこの遷移が起こる。これらの結果は、回転数と初期水深によるパラメータ面でダイアグラムとして整理することができる。

さらにこのダイアグラムのうち、回転数が小さく円形渦のできるレジームを詳細に見ると、

流れが完全に軸対称になっておらず小さな擾乱を伴うようにケースも観察された。特に、円形に近い渦の水面が次第に大きく振動していき、しばらくすると再び静かになるという特徴的な現象が観測される。この現象が生じる回転数の幅は非常に狭く特定の回転数に限られており、またその値は初期水深にあまり依らない。

これ以外にも、回転数によってはほぼ軸対称を保っているように見える渦に小さな振動が重なっている場合があり、大局的には円形渦のレジームとして分類できるパラメータ領域内であっても、詳細に見ると必ずしも完全な渦の軸対称性が保たれているとは限らないことが明らかになった。

次に、定常的な対称渦ができるレジームに注目し、その境界層における角運動量交換の解析を行った。定常的な対称渦の流れは、周回方向の速度場成分が圧倒的に大きな値を持ち、運動はその成分の循環で成り立っているが、この速度場の形成には、弱いながらも存在する鉛直循環による角運動量の輸送・分配が重要な役割を果たす。特に、内部領域と容器の側壁や底面との間に形成される狭い境界層の中での角運動量輸送は、流体が全体として形成する渦の速度分布に決定的な影響を与える。

この境界層内で行われる角運動量輸送の形態は、大きく分けて二つの可能性があった。すなわち、境界層の流れが整った層流の状態であり、内部領域の流体の速度と外部境界の固体領域の速度と間の速度差に比例するような運動量輸送が行われる場合と、境界層の流れが乱れてランダムな分布を持った乱流状態にあり、内部領域と固体領域の速度差の二乗に比例する運動量輸送が行われる場合である。今回、形成される境界層の中ではどちらの状態になっているのか、この二つの可能性を解析し、それぞれの妥当性を検討した。この目的のために、室内実験の結果のうち、渦の中心が接地する円盤の回転数、初期水深と回転数に対応した中心部での水面のへこみおよび側壁での水面高さなどの、円形渦が形成されるパラメータ領域での種々の実験結果を利用して、それらから予想される運動量輸送の大きさの妥当性を検証する基礎データとして活用した。

これまでの先行研究では、乱流境界層を仮定するものがいくつか見られて、それらの研究では境界層を超えての運動量輸送が速度差の二乗に比例することを前提に議論を進められていたが、今回、層流境界層での運動量が速度差に比例するという仮定に基づいた理論計算と比較して、実験データをどれくらい説明できるのかを検討した。その結果は、回転数を上げていったときに渦の中心が接地をはじめめる円盤の回転数、渦の中心付近の高さ、それに、容器の側面における水面の上昇量のいずれの測定結果も、運動量輸送が速度差に比例することを仮定した理論計算の結果が二乗に比例するとしたものより圧倒的によい結果を与えており、この検討結果は、実験の回転渦に伴って底面と側壁に沿って形成される境界層が層流状態であることを支持するものであった。

一方、室内実験で見られる流れの様子は、特に渦の表面付近の水面の変動が観察されるなど、完全な層流では説明できないような、流れの乱れが存在することも示しており、この解析結果との整合性を検討する必要があった。内部領域の流体と外の容器との間の運動量輸送から推測されるのは、水の流れの内部領域と底面や側壁との間にできる境界層の流れの性質の情報である。これらの境界層内の流れについては、流速場が比較的整った層流状態であることが示されたのであるが、それに対して、水の上の自由表面での境界層については、この層内における運動の様子が、外部の容器との運動量交換に直接かかっているわけではなく、どのような性質の流れになっているのか、まだわからないままであった。

まず、室内実験によって自由表面に生じる流れのようすを観察し、ここに形成される境界層が、完全な層流境界層とはなっていないことを確認した。実験によって作られた渦の自由表面には、流れに伴ってスパイラル状の水面変動など複雑な構造が見られ、この領域において渦に伴う流れが完全な軸対称なものではないことが示唆された。

一方、運動量交換を根拠にして行った理論計算においても、大規模な渦を形成するのに決定的な役割を果たす鉛直循環の流れが、底面の円盤の上に行ける境界層から側壁に沿った境界層を経て上端まで到達し、そこから自由表面付近の領域に出てきた時に、運動量の一様化を伴うような十分な混合が行われている必要があり、自由表面の境界層の中でも、側壁から出てきてすぐの領域では乱流的な構造を持っていることが推測された。

この渦の内部領域での流れの速さは、領域内の各場所によって大きな差異はなく、また、流体の内部領域の周囲の各方向で行ける境界層の厚さのスケールにも大きな違いはない。したがって、そこから計算されるレイノルズ数などの特徴的な無次元パラメータもほぼ同じような値をとるはずである。しかし、その外部の境界が、固体壁による境界であるのか、自由表面であるのかという性質の違いや、さらには、同じ境界条件の境界層の中でも、流体がそこに来るまでにどのような履歴をたどってきたのかという違いによって、境界層が層流になる場合、乱流になる場合がありうるということが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iga Keita	4. 巻 49
2. 論文標題 Axisymmetric flow in a cylindrical tank over a rotating bottom. Part I. Analysis of boundary layers and vertical circulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 065502 ~ 065502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/aa8bef	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iga Keita, Yokota Sho, Watanabe Shunichi, Ikeda Takashi, Niino Hiroshi, Misawa Nobuhiko	4. 巻 49
2. 論文標題 Axisymmetric flow in a cylindrical tank over a rotating bottom. Part II. Deformation of the water surface and experimental verification of the theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 065501 ~ 065501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/aa8bf0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Iga K.
2. 発表標題 Axisymmetric Flows and Non-Axisymmetric Phenomena in a Cylindrical Tank with a Rotating Bottom Filled with Water
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics XXVII General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒水槽底面の回転円盤上に生じる流れの上を伝播する波の共鳴
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒容器内の回転円盤上の流れの上を伝播する波の共鳴
3. 学会等名 日本気象学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 底面が回転する円筒容器内の軸対称流: 速い流れと遅い流れの場合の比較
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Iga K.
2. 発表標題 Sloshing phenomena on a water in a cylindrical tank over a rotating bottom
3. 学会等名 5th International Conference on Experimental Fluid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒水槽底面の回転円盤上に生じる軸対称流: 速い流れと遅い流れ
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒容器内で回転する円盤上の軸対称流: 速い流れと遅い流れの比較
3. 学会等名 日本気象学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒水槽内の回転する底面上の軸対称流の波の共鳴
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒水槽底面の回転円盤上に生じる軸対称流とその浅水系としての安定性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒容器内で回転する円盤上の軸対称流の不安定
3. 学会等名 日本気象学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊賀 啓太
2. 発表標題 円筒水槽内の回転する底面上の軸対称流: 速い流れと遅い流れ
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所研究集会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考