

[English]

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化

筆保弘徳 (横浜国立大学教育人間科学部)
舛田あゆみ (横浜国立大学大学院教育学研究科)
乙部直人 (福岡大学理学部)
熊澤里枝 (横浜国立大学大学院教育学研究科)
西野耕一 (横浜国立大学大学院工学研究院)

(Received 3 July, 2014; in revised form X October, 2014)

要旨

本研究では、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) と各波数で分解した運動エネルギーを用いた、回転水槽実験により水面で発生する流体の運動を定量的に同定する解析手法を提案する。まず、回転水槽実験結果を撮影した動画から、PIVを用いて、高時間・空間解像度で水面の運動場を算出する。そして、その運動場から運動エネルギーを見積もり、軸対称成分による平均場の運動エネルギーと、非軸対称成分による渦運動エネルギーに分解する。さらに、非軸対称成分の流れに対してフーリエ解析を行い、各波数毎の運動場から得られた波数別渦運動エネルギーを算出し、全体の運動エネルギーの中での比率を示す。

本研究では、実験条件を変えた400回以上の実験を行っているが、その中でも特徴的な3つの回転水槽実験結果を用いて、この解析方法の検証を行った。傾圧不安定波が発生せず軸対称運動が卓越した実験結果では、平均場の運動エネルギーが支配的な結果となる。逆に傾圧不安定波が発生する実験結果では、渦運動エネルギーが平均場の運動エネルギーに匹敵するほど大きくなる。特に、一つの波数の渦運動エネルギーとその高調波成分の渦運動エネルギーが全体の渦運動エネルギーの中でほとんどを占めている場合は、規則正しい傾圧不安定波が発生する実験結果に対応している。複雑な波形を持つ非軸対象の運動が発生した実験結果を解析すると、卓越波数や高調波だけでなく、その隣の波数の渦運動エネルギーも無視できないくらい大きい比率を持っている。つまり、いびつな波形の運動は、いくつかの波数を持つ波動が重なっていると理解できる。本研究で提案した解析手法により、回転水槽実験で発生した全ての傾圧不安定波に対して、定量的な同定や理解が行える。

本文

1. [はじめに](#)
2. [実験方法](#)
 1. [装置の概要](#)
 2. [計測方法](#)

3. [実験手順と実験設定](#)
3. [結果](#)
 1. [空間・時間分布](#)
 2. [渦運動エネルギー](#)
4. [まとめと今後の課題](#)
5. [謝辞](#)
6. [参考文献](#)
7. [著者・連絡先](#)

付録

1. [スピニング期間の運動](#)
2. [サーモグラフィによる温度場の測定](#)
3. [実験全期間の動画](#)

[Next>>](#)

[日本流体力学会ウェブサイト「ながれマルチメディア」へ](#)
c1998-2008 998-2008 The Japan Society of Fluid Mechanics, ALL RIGHTS
RESERVED.

1. はじめに

傾圧不安定波を模擬する方法として、1940年代から回転水槽実験（または回転円筒水槽実験）が考案され([Fluts and Kaylor, 1959](#))、これまで気象学や流体力学の研究に用いられてきた。この回転水槽実験により様々な知見が得られてきたが(例えば、[Douglas and Mason, 1973](#); [Uryu et al., 1974](#); [Niino, 1978](#); [Ukaji, 1979](#); [Niino and Misawa, 1984](#); [Niino 1988](#); [Ukaji and Tamaki, 1989](#); [Tajima et al., 1995, 1999](#); [Tamaki and Ukaji, 1995, 2003](#); [Yukimoto et al. 2010](#); [Iga et al. 2014](#))、回転する水槽中の流体運動を正確に測定することは難しく、発生する波動の傾圧不安定波は目視や画像からの観測によっていた。そのため、古くから水槽実験内の流体の運動場や温度場を測定する手法の開発が取り組まれている。例えば、サーミスタ等の温度プローブを流体内に配置して直接計る方法がある(例えば、[Matsuwo et al., 1976, 1977](#); [Tamaki and Ukaji 1985](#))。また、カイラルネマチック液晶などを用いて、流速と温度分布を3次的に観測した研究もある(例えば、[Tajima and Kawahira, 1991](#))。水中に浮遊する蛍光染料マイクロカプセルの1粒子追跡を行うことで、ラグランジュ的な運動を検出する手法もある([Tajima et al., 1998](#))。

[Hide\(1969\)](#)によると、回転水槽実験で観測される水面の運動は、軸対称運動と非軸対称運動に大別される。水面で発生した非軸対象の運動は、主に傾圧不安定波の発生によるものである。しかし、回転水槽実験の水面の運動を詳しく観察すると、規則的な傾圧不安定波ばかりではなく、目視では卓越波数を同定できないようないびつな波形の運動も発生する。このような複雑な実験結果も含めて、発生している全ての運動を定量的に理解・分類するためには、水面全体の運動場を正確に測定し、各波数の波動成分を比較できる解析が必要となる。つまり、これまでの手法よりもさらに時間・空間的高解像度に運動場を測定することと、それを用いた解析手法の開発が求められる。

そこで本研究では、回転水槽実験で発生する全ての水面流体の運動を定量的に理解できる解析手法を提案することを目的とする。近年の科学技術の飛躍的な発展により、非接触で正確かつ高解像度に速度場や温度場の計測が行えるようになった。なかでも、流れに乗って移動する微粒子の運動を画像計測する粒子画像流速測定法

(Particle Image Velocimetry; PIV) は、技術の向上が目覚ましい手法の一つである。PIVはおよそ30年の歴史のある技術であり、近年のPIVでは短時間で高精度の速度分布を大容量で得ることが可能となった。つまり、このPIVを回転水槽実験に用いれば、これまで開発されてきた測定手法に比べて、より時間・空間的に高解像度で水面全体の運動を定量化することができる。また、発生した傾圧不安定波の卓越波数の定量的な同定手法には、渦運動エネルギーの算出が有効な解析手法になると考えられる。[Fudeyasu et al. \(2010\)](#)は、数値実験で再現された台風の渦構造を、軸対称運動と非軸対称運動に分解し、さらに波数別に分解した非軸対称成分の風から渦運動

エネルギーを算出している。本研究では、この台風の理解に用いた解析方法を、水槽実験結果に応用することを試みる。

まず[第2節](#)では、PIVを用いた解析手法や実験設定について説明する。次の[第3節](#)では、その手法によって得られた結果を示す。[第3.1節](#)では、PIVを用いると回転水槽実験結果がどのように定量的に表せられるかを紹介する。[第3.2節](#)では、運動エネルギーの算出方法を紹介し、その結果を示す。最後に[第4節](#)で本研究をまとめて、今後の研究の発展性について考える。付録として、[付録1](#)では、PIVを用いることで得られたスピナップ期間の運動を記す。[付録2](#)では最新のサーモグラフィーの結果、[付録3](#)では本文で紹介した解析結果の動画を示す。

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化

<< [Prev](#) | [Index](#) | [Next](#) >>

2. 実験方法

第2.1節で実験装置、第2.2節で実験結果を記録する装置やPIVについて紹介する。そして第2.3節では、本研究で行っている実験手順と、本稿で検証する実験設定を示す。

2.1. 装置の概要

本研究の回転水槽実験は、横浜国立大学に設置された二重回転水槽装置を用いる（図2.1）（図2.2）（図2.3）。特別な機能としては、スリップリングを用いた装置内部と外部の間の計測信号のやりとりと、2つの回転円盤である。2つの回転円盤のうち、内側の円盤では実験水槽を回転させて、外側の円盤では実験記録用カメラや測定器を設置して回転させる。この回転円盤はそれぞれ独立して回転させることができるため、実験水槽と同じ回転速度だけでなく、異なる回転速度からも撮影・計測が行える。その機能を用いれば、内側円盤は回転を止めずに実験を続けて、外側円盤だけを停止させて計測器の調整や交換をすることも可能である。

水槽は三層となっていて、一番内側の水槽（内側槽）は半径20mmの円柱、中央（実験槽）と一番外側（外側槽）はリング型の水槽になっている（図2.3）。実験槽のリングの半径方向の幅は66mm、外側槽は27mmであり、その間は4mmの厚さを持つアクリル製の壁で仕切っている（さらに詳しい実験槽の情報は、[Tajima and Nakamura, 2005](#)）。外側槽には熱線とサーミスタ温度計とポンプが設置されていて、水を循環させながら実験条件の設定値に自動制御で温める。一方、内側槽には恒温水循環装置（タイテック社製CH-402BF）により実験条件にまで冷却した水が、円盤の回転軸中央を通して内側槽に流れ込むようになっている。

(a)  (b) 

図2.1: 二重回転水槽実験装置の写真。(a)装置全体の写真、(b)実験水槽とその上部の設置したカメラ。

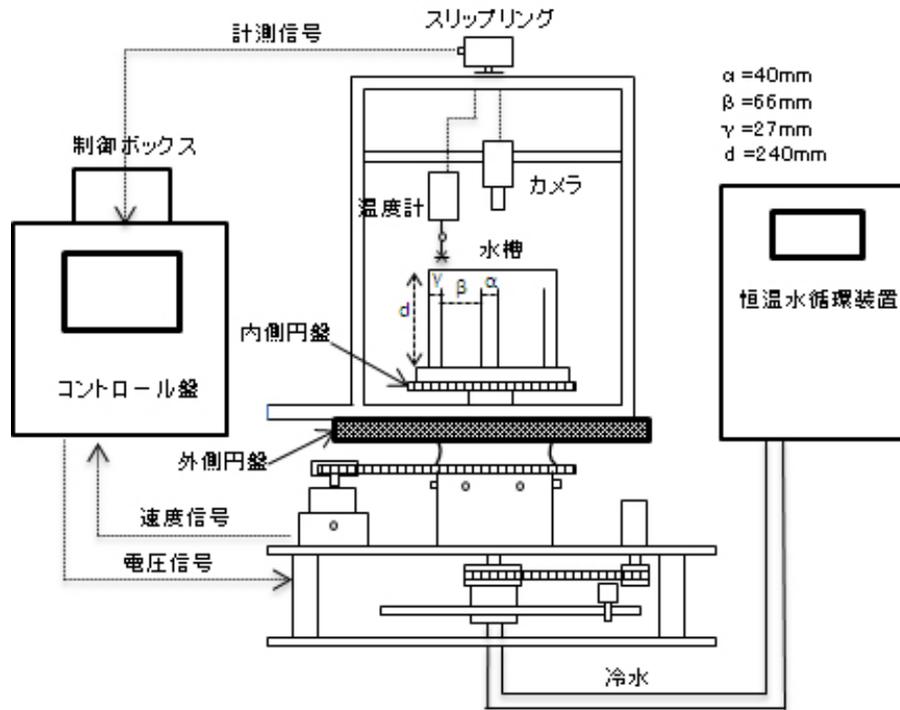


図2.2:二重回転水槽実験装置の概略図。

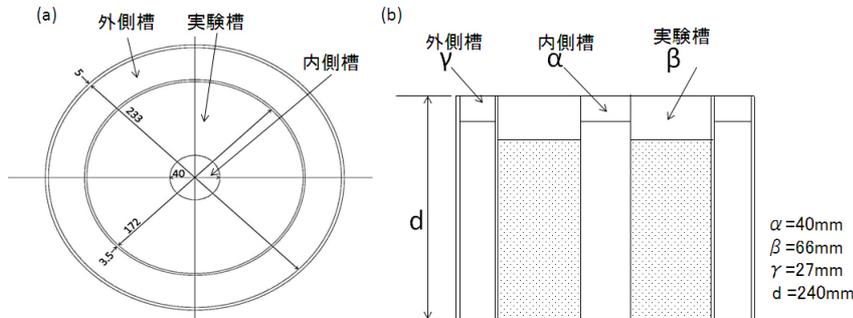


図2.3:(a)水槽を上から見た概略図。数字はmm。(b)水槽を横から見た概略図。

2.2. 計測方法

実験槽の水には、トレーサーとしてアルミ粉末を浮かべて、水面で起きている運動を可視化する。トレーサーとなる粉末や粒子には、他の素材（例えば蛍光カプセル）でも試しているが、アルミ粉末で行った場合とPIVの解析結果に差はなかった。本研究では、400回を超える実験を実施することを考えて、入手しやすく安価なアルミ粉末に統一した。用いたアルミ粉末（大和金属粉工業製No.1112）は、平均サイズは30ミクロン、形状はフレーク状、水面拡散面積は7500cm²/gと非常に細かく、流れの追従性も高い。

実験槽の上部には、高感度カメラ（日立電子社製KP-C571）を設置し、下向きに水面を撮影する（図2.1）。水面は、装置の上部にある実験室の蛍光灯でライティングしている。画像データは、スリップリングを通り、随時装置外部に送り記録する。水槽が回転することで、撮影した水面が回転による遠心力の水面上昇で変形することも心配される。角速度を Ω 、半径を r とすると、遠心力は $r\Omega^2$ である。水面の傾き d は、重力 g を用いて、 $d=r\Omega^2/g$ となる。そのため、半径 R での水面高度の上昇は、

$$d = \int_0^R \frac{r\Omega^2}{g} dr = \frac{\Omega^2}{2g} R^2$$

。今回の実験で最も速い設定の回転速度12rpm（1分間に12回転）を

考えると、遠心力による水面の高さは半径10cmでは0.1mm程度上昇すると見積もられる。今回の実験スケールを考えれば、その値は無視できるほど小さいため、水面高度の補正は行っていない。

記録された画像を基に、フローテック・リサーチ社製FtrPIV3を用いて、水面の運動量を算出する。PIVとは、短時間間隔で撮影した2枚の画像の差異から、粒子群の瞬時の流体速度として検出する手法である。本研究で用いたPIV解析のソフトは、解析精度に優れる直接相互相関法を用いており、インテル系CPUの相関計算機能を直接駆動する並列計算による高速化が図られている。解析パラメータは、検査窓サイズ=33×33画素、探索窓サイズ=53×53画素、過誤ベクトル排除とウィンドウデフォメーション機能は用いていない。ウィンドウデフォメーション機能の有無により、得られる瞬時速度には局所的に生じる。しかし、その領域（具体的には後述するジェット領域のごく一部）でも、±10%程度の差異（=±0.8mms⁻¹程度の差異）を生じるだけであり、解析時間の短縮と解析結果の信頼性の観点から、この機能を用いなかった。

本研究では、高感度カメラで撮影された動画を0.33秒間隔で画像に分解し、それらの画像からPIVで0.67秒間隔で運動場を算出している。PIVにより算出される運動場は、水平解像度は1.9mm、速度は0.1mms⁻¹の精度である。但し、上述したウィンドウデフォメーションの機能の有無を考慮すると、ジェット領域の一部ではプラスマイナス0.8mms⁻¹の精度となる。

2.3. 実験手順と実験設定

実験手順を説明する。まず初めに、実験条件の設定値に合わせて、内側槽と外側槽の温度差をつける。実験槽と接する側壁温度が実験設定の温度になったことを確認した後、実験槽に水道水を設定した水深まで入水する。この実験開始までの準備でおよそ2時間を要する。

水槽を回転させた時点を、実験開始の時間とする。内側円盤の回転速度を、実験条件の設定値まで数秒で到達させる。スピニングアップ期間(付録1)は、およそ5~10分程度を要した。その後、約15~30分間観察する。それ以上の時間で実験を観測しても、結果に大きな変化がなかったことを確認している。これまで様々な実験手順を試しているが、本研究では、時間の区切りが明確な以上のやり方に統一した。

本研究では、実験条件を変えた400回以上の実験を行っているが、その中でも、特徴的な3つの回転水槽実験結果(表2.1)を用いて、解析方法の有効性を検証する。実験1は実験槽の水深は20mm、回転速度は6.0rpm、外側槽35.0℃と内側槽5.0℃にした温度差30.0℃である。実験2は水深40mm、回転速度4.0rpm、温度差15.0℃。実験3は水深80mm、回転速度8.0rpm、温度差20.0℃である。実験1は、明瞭な傾圧不安定波が発生した実験である。実験2は、目視では傾圧不安定波が発生していないと確認できる実験であり、実験3は卓越波数が明確でない、いびつな波形の運動が観測された実験である。

過去の研究（例えばFowlis and Hide, 1965）により、実験設定の無次元数パラメータから、どういった水面運動が発生しているか、目視観測でまとめたレジームダイアグラムが提案されている。本研究で紹介する3つの実験の無次元数は表2.1であり、実験気象学入門（1988）で掲載されているレジームダイアグラムと対応つけると、3つの実験とも定常波動領域に位置する。これは、実験1のみ整合的で、実験2と3は一致しない。しかし、400回以上の実験結果を整理した舩田（2012）は、実験層の水深が深くなるにつれてレジームダイアグラムと一致しなくなることが指摘している。この400回の実験と過去の研究との比較は、統計的に整理した続報で詳しく紹介する。

表2.1: 実験設定の概要

	回転速度 (rpm)	水温差 (°C)	水深 (mm)	テイラー数	ロスビー数
実験1	6.0	30.0	20	79083229	0.76
実験2	4.0	15.0	40	27871868	0.77
実験3	8.0	20.0	80	17039926	1.43

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化

<< [Prev](#) | [Index](#) | [Next](#) >>

3. 結果

第3.1節では、回転水槽実験の水面の運動場を粒子画像流速測定法を用いて算出する。その算出した運動場から、流速や相対渦度の分布を示す。第3.2節では渦運動エネルギーによる解析方法を紹介し、その検証を行う。

3.1 空間・時間分布

図3.1は、水槽と同じ速度で回転させて撮影した高感度カメラの各実験結果の画像である。アルミ粉末が白く映っていて、それぞれの実験で発生する水面運動の様子をとらえている。PIV解析を行うことにより、この画像から水面全域の運動を把握することができる。

図3.2と図3.3と図3.4は、図3.1の画像から得られた水面の運動ベクトル、速度分布、相対渦度分布である。相対渦度の算出は、PIV解析で得られた格子状の流体運動分布から算出した。実験1の結果では、実験開始からスピナップ期間を経た420秒後、明瞭な傾圧不安定波が発生している(図3.2aと図3.3a)。本研究では、この1周につながった高速度領域をジェットと呼ぶ。ジェットの速度の大きさは、最大のところでおよそ 6.0mms^{-1} であった。ジェットは1周のうち3度の蛇行をしており、この波形や波数は実験期間中でほぼ変わらなかった。相対渦度場で見ると、蛇行するジェットの軸の内側で正、外側で負の相対渦度分布となる(図3.4a)。これらの実験期間中の動画を[付録3](#)に掲載している。

ここで、温度風関係が成り立っていると考えて、理論値と比較して解析されたジェットの速度を評価する。温度風関係より、流速=(圧力傾度力-遠心力)/(2x角速度)である。水の密度は理科年表に記載されているもの、求める位置は水槽幅の内側から30mm、水温 20°C とした。すると、求まる速度は 0.0046ms^{-1} となる。観測値(6.0mms^{-1})と比べてやや小さいが、妥当な結果が得られていることがわかった。

図3.5は、実験槽中央付近(水槽幅の内側から22-44mm)で平均した相対渦度分布の時間変化を示したホフメラー図である。実験開始から約300秒までのスピナップ期間中はノイズが大きいが、その後、正と負の相対渦度域が規則正しく並んで発生していることが確認できる。ジェットの蛇行に対応した正と負の相対渦度は、水槽の回転方向と同じ反時計回りにまわっている。1周に約200秒を要し、その位相の移動速度は実験期間中ほぼ一定だった。この半径での円周を考えると、位相の移動速度は 1.7mms^{-1} となる。これは、水面流速(平均的に $0.5\sim 4.0\text{mms}^{-1}$)のおよそ半分であるため、線形論で予測される傾圧不安定波の位相速度と整合的といえる。

実験2は、円周運動が卓越し(図3.2b)、速度分布は実験槽の中央付近から内側で大きく、ほぼ同心円の分布をしている(図3.3b)。速度の最大は約 5.0mms^{-1} である。相対渦度場は、実験1と比べて全域で小さい(図3.4b)。

実験3は、波数2とも波数3とも確認できるような、いびつな形に蛇行したジェットが発生している(図3.2cと3.3c)。ジェット軸の速度は約 3.0mms^{-1} 、相対渦度場はジェット軸の内側で正、外側で負の相対渦度分布となっている(図3.4c)。実験期間中、明瞭な卓越波数を持つようなジェットの蛇行は確認されなかった。

(a)

(b)

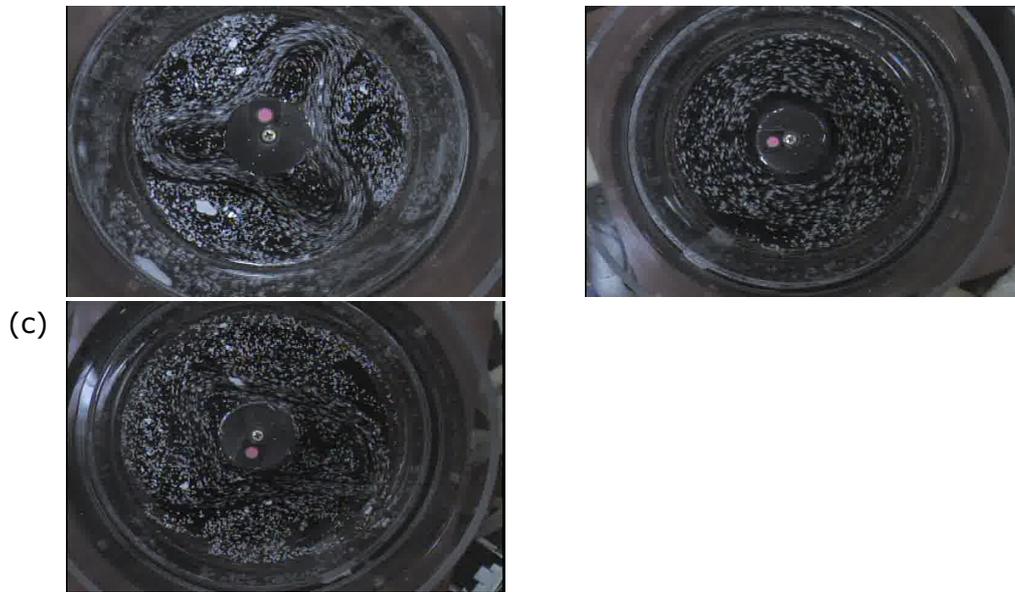
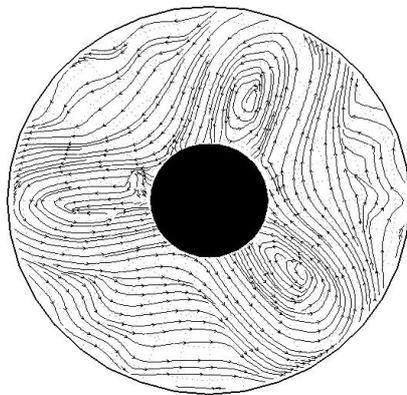
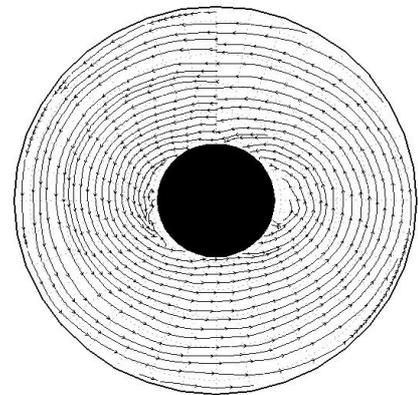


図3.1: 高感度カメラで撮影された画像。(a)実験1の結果で実験開始から420秒後、(b)実験2の600秒後、(c)実験3の900秒後。

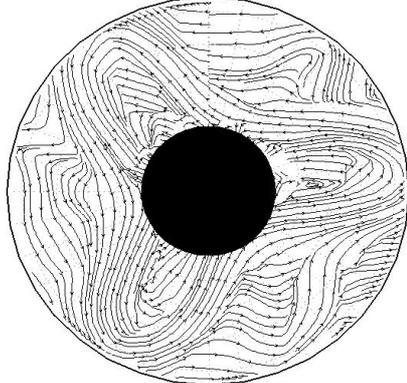
(a)



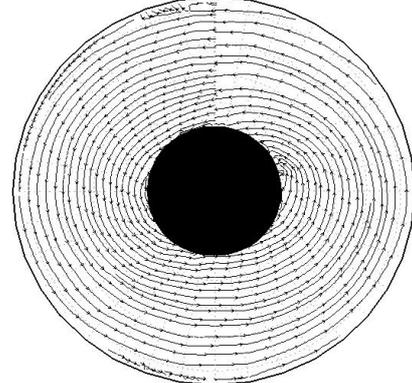
(b)



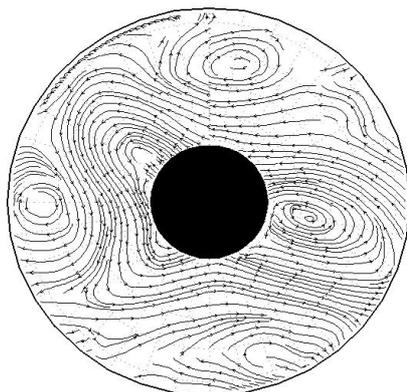
TIME:01266s



TIME:01266s



(c)



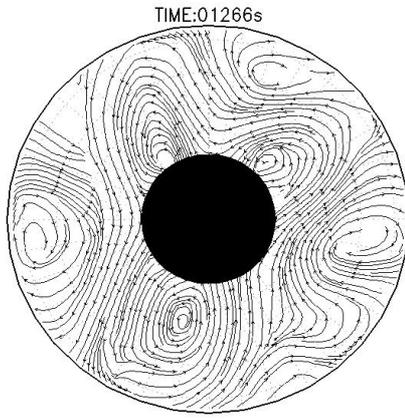
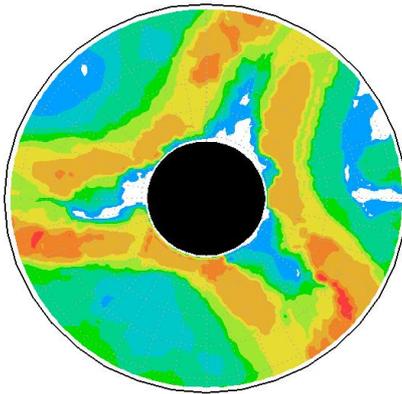
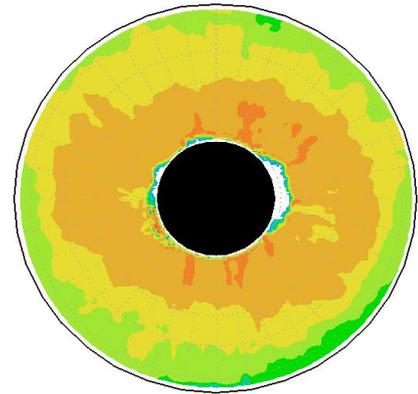


図3.2: 図3.1の時間と1260-1332秒の流線分布。

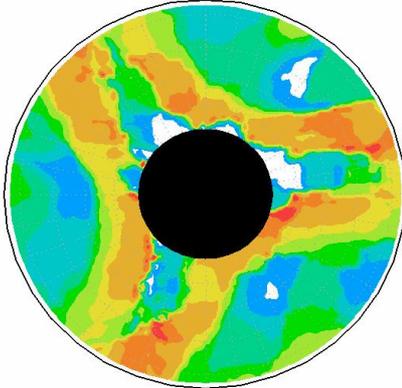
(a)



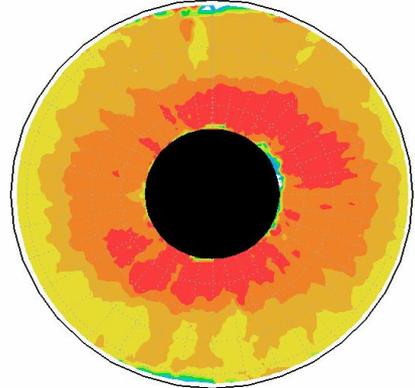
(b)



TIME:01266s



TIME:01266s



(c)



図3.3: 図3.1の時間と1260-1332秒の速度分布。単位は mms^{-1} 。

(a)

(b)

(c)

図3.4: 図3.1の時間と1260-1332秒の相対渦度分布。単位は s^{-1} 。

図3.5: 実験槽中央付近（水槽幅の内側から22-44mm）で平均した実験1の相対渦度の時間変化。単位は s^{-1} 。

3.2. 渦運動エネルギー

本研究では、PIVで検出された運動場を用いて運動エネルギーを算出する。

まず第一段階として、格子座標で得られた運動場を円筒座標系に変換し、接線方向（接線流）と半径方向（動径流）の速度成分に分解する。動径流は格子座標と同じ1.9mm間隔、接線流は1.0度間隔である。そして、運動エネルギー量(KE)は以下の式(1)で算出する。

式(1)の u は接線流（反時計回りをプラス）、 v は動径流（外向きをプラス）である。本研究では、KEを円周（接線）方向で平均した量を用いて議論するため、式(1)右辺に上付きバーをつける。図3.6(a)は、実験1における、実験槽中央付近（水槽幅の内側から22-44mm）で平均したKEの時間変化を表す。スピニングアップ期間(約7分; [付録1](#))以降で定常状態となり、KEは約 $4.0 \times 10^{-6} m^2 s^{-2}$ で変動が小さくなる。

次の第二段階は、接線流や動径流を円周方向で平均した軸対称成分と、それからの差となる非軸対称成分に分解する。例えば接線流 u の運動を分解すると、

となり、式(2)右辺の上付きバーが軸対称成分、プライムが非軸対称成分である。接線流と動径流の軸対称成分と非軸対称成分に分解した場合の運動エネルギー量KEは、

となる。第1項を平均場の運動エネルギー量(MKE)、第3項を渦運動エネルギー(EKE)と定義する。図3.6(b)のそれぞれの運動エネルギー量の時間変化を示す。式(3)右辺第2項は、他の項に比べて無視できるほど小さいため、KEはMKEとEKEのほぼ和と考えられる。MKEとEKEは、スピニングアップ期間で変動が大きいものの([付録1](#))、それ以降のMKEは約 $1.0 \times 10^{-6} m^2 s^{-2}$ 、EKEは約 $3.0 \times 10^{-6} m^2 s^{-2}$ で変動が小さくなる。

第三段階として、非軸対称成分の運動をフーリエ解析により接線方向で波数分解を行った。例えば非軸対称成分の接線流を波数分解すると、

のように表される。式(4)右辺の λ は波数を指す。この波数別の非軸対称成分から、渦運動エネルギーが算出できる。例えば、波数3の非軸対称成分から求まる渦運動エネルギー量(EKE3)は、

となる。波数1から9までの非軸対称成分の渦運動エネルギーの和はほぼEKEと一致したため、この波数毎の運動エネルギーの分解は妥当であることを確認した。図3.6(c)は、波数1から6までの非軸対称成分から求まる渦運動エネルギー量の時間変化である。EKE3が最も大きく、次いで波数3の高調波に当たるEKE6が大きい。それ以外の波数の渦運動エネルギー量は1桁小さい値であった。図3.6cによると、EKE3やEKE6が、定常状態の期間でも約 $0.2 \times 10^{-6} m^2 s^{-2}$ の大きさを約70秒の周期的な変動をしている。これは、網目上の格子データから円筒座標に変換した際に発生した、運動量の解析誤差である。一定の間隔（3つの波形が200秒で1周することを考えれば、周期70秒の変動は整合的である）で変わるジェットと格子の位置関係により見かけ上発生していて、実際にこのようなエネルギーの時間変動は起きていない。

時間平均をした各運動エネルギー量を、全運動エネルギー量KEの中での割合で示したのが図3.7(a)である。EKEはKEの68%であり、MKEの32%に対して約2倍である。EKEの中でもEKE3が

約半分を占めており、この傾圧不安定波は波数3が卓越波数だと同定できる。卓越波数の高調波であるEKE6もEKEの4分の一と大きい。一方、卓越波の隣の波数（サイドバンド）であるEKE2やEKE4は小さい。このサイドバンドが非常に小さいという結果は、[Tamaki and Ukaji\(1985\)](#)と一致している。

図3.7(b)と(c)は、実験2と実験3の結果である。実験2では、MKEがKEの95%と占めている。傾圧不安定波が発生していないと目視でも確認できるが、定量的にも軸対称運動が支配的であることを示している。実験3は、MKEがKEの70%に対して、EKEは30%である。EKEのなかではEKE3が最も大きい、EKE2もそれに匹敵するほど大きい。この渦運動エネルギー量の解析で見られるように、サイドバンドの支配率が高いという結果は、実験1や[Tamaki and Ukaji\(1985\)](#)の結果とは異なっている。

(a)

(b)

(c)

図3.6: 実験1の実験槽中央付近（水槽幅の内側から22-44mm）で平均した(a)KEの時間変化、(b)MKE(青)とEKE(赤)と式(3)右辺第2項(緑)、(c)EKEの波数1~6のEKE。単位は $\times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ 。

(a)

(b)

(c)

図3.7: 時間平均したKEの中での各波数のEKEの割合。真上から右回りに、MKE(軸対称)、波数1から9EKEまで続き、波数10以上の合計のEKEの割合。(a)実験1（480~600秒の時間平均）、(b)実験2（480~600秒）、(c)実験3（660~780秒）。実験3は外側円盤と内側円盤の回転速度がわずかにずれていたため、KEとMKEの算出時に補正を加えている。

4. まとめと今後の課題

回転水槽実験に粒子画像流速測定法(PIV)を用いることで、発生する傾圧不安定波動やジェットの手動を定量的に検出することができた。そして、その算出した運動場から運動エネルギーを見積もり、軸対称成分から得た平均場の運動エネルギーと、非軸対称成分から得た渦運動エネルギーに分解した。さらに、非軸対称成分の流れに対してフーリエ解析を行い、各波数毎の運動場から得られた波数別渦運動エネルギーを算出した。以上の解析を、特徴的な3つの回転水槽実験の結果に適応させて検証すると、卓越波数の同定やその比率が算出でき、どういった傾圧不安定波や運動が発生しているのかを定量的に理解できることを確認した。

PIVと波数別渦運動エネルギー比率の解析方法は、様々な回転水槽実験の結果に対する定量的な理解に有効になると考えられる。実験1のように、規則正しい傾圧不安定波が発生する実験結果では、卓越波と高調波成分の渦運動エネルギーの支配率が大きく、サイドバンドが小さい解析結果となった。実験3のようにいびつな非軸対象運動が発生した実験は、卓越波数成分に比べてサイドバンドの渦運動エネルギーも無視できないくらい大きく、複数の波数を持つ波動が重なっていると理解できる。また、実験2で示したように、平均場の運動エネルギーが支配的な解析結果は、[Hide\(1969\)](#)の分類では軸対称運動に区分される実験結果に対応すると考えられる。

本研究では、最新の技術を用いることで、回転水槽実験で発生する水面の運動場が、時間・空間的に高解像で算出できることを紹介した。現代の技術による計測は、運動場だけでなく、最新のサーモグラフィーを用いると高解像度の温度場が測定できることも確認されている([付録2](#))。現状では、本研究の実験装置で設置するカメラは1台のみであり、運動場を算出する高感度カメラと同時に測定できていない。しかし、将来2台のカメラが設置・撮影できるように実験装置を改良することを計画している。高感度カメラとサーモグラフィーの撮影を一度に行い、温度場と運動場の同時計測が可能になることで、運動場と温度移流の関係も議論することができる。

本稿で示したPIVや運動エネルギーを用いた定量化は、全ての回転水槽実験の結果に適応できると考えられる。現在まで、回転速度・温度差・水深の条件を変えた実験を400回以上行っている。今後は、その実験結果全てに本研究で示した手法を適応させて、その解析方法の妥当性と、定量的な分類結果を報告する予定である。

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化

<< [Prev](#) | [Index](#) | [Next](#) >>

謝辞

本研究で使用した二重回転円筒水槽は、福井県立大学田島俊彦教授より譲り受けました。そして、(株)富士機設工業に設置・設計していただきました。PIV解析ソフトやその作業において、(株)フローテック・リサーチ社の土井加代子様にご教授を賜りました。また、佐藤正樹教授、三村和男教授、酒井敏教授には、回転水槽実験について大変有益なご助言を頂きました。この研究は、科学研究費補助金若手B(25800262)と気候変動リスク情報創生プログラムの支援を受けています。

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化

<< [Prev](#) | [Index](#) | [Next](#) >>

参考文献

1. Fluts, D., and R.Kaylor, 1959: The propagation of frequency in experimental baroclinic waves in a rotating annular ring. 359-371.
2. Douglas, H.A. and P.J.Mason, 1973: Thermal Convection in a Large Rotating Fluid Annulus: Some Effects of Varying the Aspect Ratio. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1124-1134.
3. Uryu, M., O. Morita, N. Noguchi and R. Sawada, 1974: Heat transport in a rotating fluid annulus. *J. Meteor. Soc. Japan*, 52, 93-105.
4. Niino, H., 1978: Turbulent Jet in a Rotating Fluid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 527-547.
5. Ukaji, K., 1979: Thermal and Dynamical Structures of Convective Motions in a Rotating Fluid Annulus Subject to Internal Heating. *J. Meteor. Soc. Japan*, 57, 532-547.
6. Niino, H. and N. Misawa, 1984: An Experimental and Theoretical Study of Barotropic Instability. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1992-2011.
7. Niino, H., 1988: Inertial instability of the Stewartson E1/4-layer. *Fluid Dyn. Res.*, 3, 407-414.
8. Ukaji, K. and K. Tamaki, 1989: A comparison of laboratory experiments and numerical simulations of steady baroclinic waves produced in a differentially heated rotating fluid annulus. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 359-374.
9. Tajima, T., T. Nakamura, and T. Kuroda, 1995: Laboratory experiments of lagrangian motions in a steady baroclinic wave-internal structures of vortices. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 37-45.
10. Tajima, T., T. Nakamura, and K. Kurosawa, 1999: Experimental observations of 3D lagrangian motions in steady baroclinic waves- II. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77, 17-29
11. Tamaki, K. and K. Ukaji, 1995: An experimental study of baroclinic flows in an open cylinder. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 1079-1085
12. Tamaki, K. and K. Ukaji, 2003: An experimental study of wave dispersion in a differentially heated rotating fluid annulus with a radially sloping bottom. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 951-962.
13. Yukimoto, S., H. Niino, T. Noguchi, R. Kimura, and F. Moulin, 2010: Structure of a bathtub vortex : Importance of the bottom boundary layer, *Theoretical Comp. Fluid Dyn.*, 24, 323-327.
14. Iga, K., S. Yokota, S. Watanabe, T. Ikeda, H. Niino and N. Misawa, 2014: Various phenomena on a water vortex in a cylindrical tank over a rotating bottom, *Fluid Dyn. Res.*, 46, 031409.

付録1. スピニアップ期間の運動

本付録1では、実験1におけるスピニアップ期間の運動を記述し、傾圧不安定波や蛇行したジェットが発生するまでの時間変化を示す。

図A1.1は、水槽と同じ速度で回転させた高感度カメラで撮影した画像である。傾圧不安定波が発生するまでの期間の、水面の運動に対応したアルミ粉末分布の変化が確認できる。

PIV解析を行うことにより、この画像から水面の運動を把握する。図A1.2、図A1.3、図A1.4は、図A1.1と同じ時間から得られた水面の運動ベクトル、速度分布、相対渦度分布である。(a)の円盤が回転していない時間では、水面上ではほとんど運動が起きていない。しかし回転を開始すると、外槽と内槽の摩擦により、側壁に接地した端の水だけが円周運動を始める。はじめのうちは側壁から離れた実験槽の中央付近では円周運動は起きていない(図省略)が、(b)の実験開始から約3分を過ぎると、実験槽中央もふくめて、実験槽全体の水面が回転方向と同じ向き(反時計回り)の円周運動をする。速度は、外側側壁で一番大きく約 5.0mms^{-1} 、内側側壁で約 3.0mms^{-1} 、中央で約 2.0mms^{-1} である。相対渦度場で見ると、半径方向の速度差が大きいところで相対渦度は大きく、外側から内側へ低速になる領域では正渦度、その逆の領域で負の渦度が分布している。

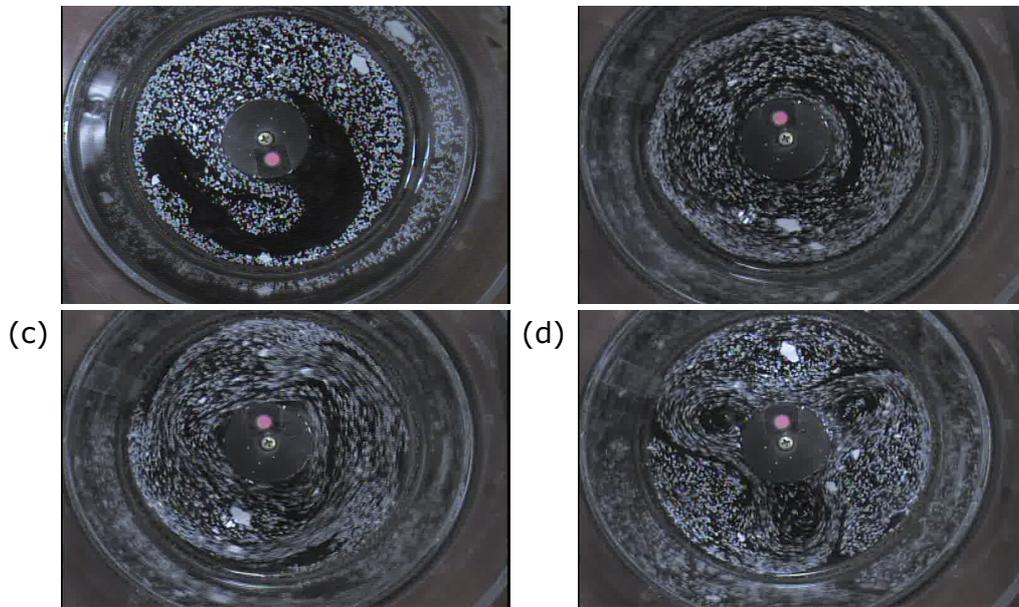
(c)の実験開始から約4分後、円周運動はくずれ始める。3方向の約 6.0mms^{-1} の速度の大きい領域が外側から内側へ拡大する。その後面では、速度の小さい領域が外向きにのびている。(d)の実験開始から5分30秒後、高速度の領域は蛇行しながら1つにつながり、ジェットや傾圧不安定波は発生する。実験開始から約7分後、波数3の蛇行したジェットの構造は、その後約20分間変わらず、定常状態になったといえる。

この定常状態に至るまでの期間、つまりスピニアップの時間が、理論的に一致するかどうか調べる。回転数からエクマンパンピングの量を見積り、その水が一回転する時間を算出した。すると、スピニアップ時間 T は、 $T=2H / (f \times He)$ 、 H は層の厚さで実験1の場合 0.02m 、 f のコリオリパラメータは回転速度 6rpm の場合は約 0.6s^{-1} である。 He はエクマン層の厚さは、水ということで 1mm 程度を考える。計算すると T は約 60s 。つまり、理論上1分以上はスピニアップに要することになる。実際の実験では約7分かかっているが、オーダーとしては妥当といえる。

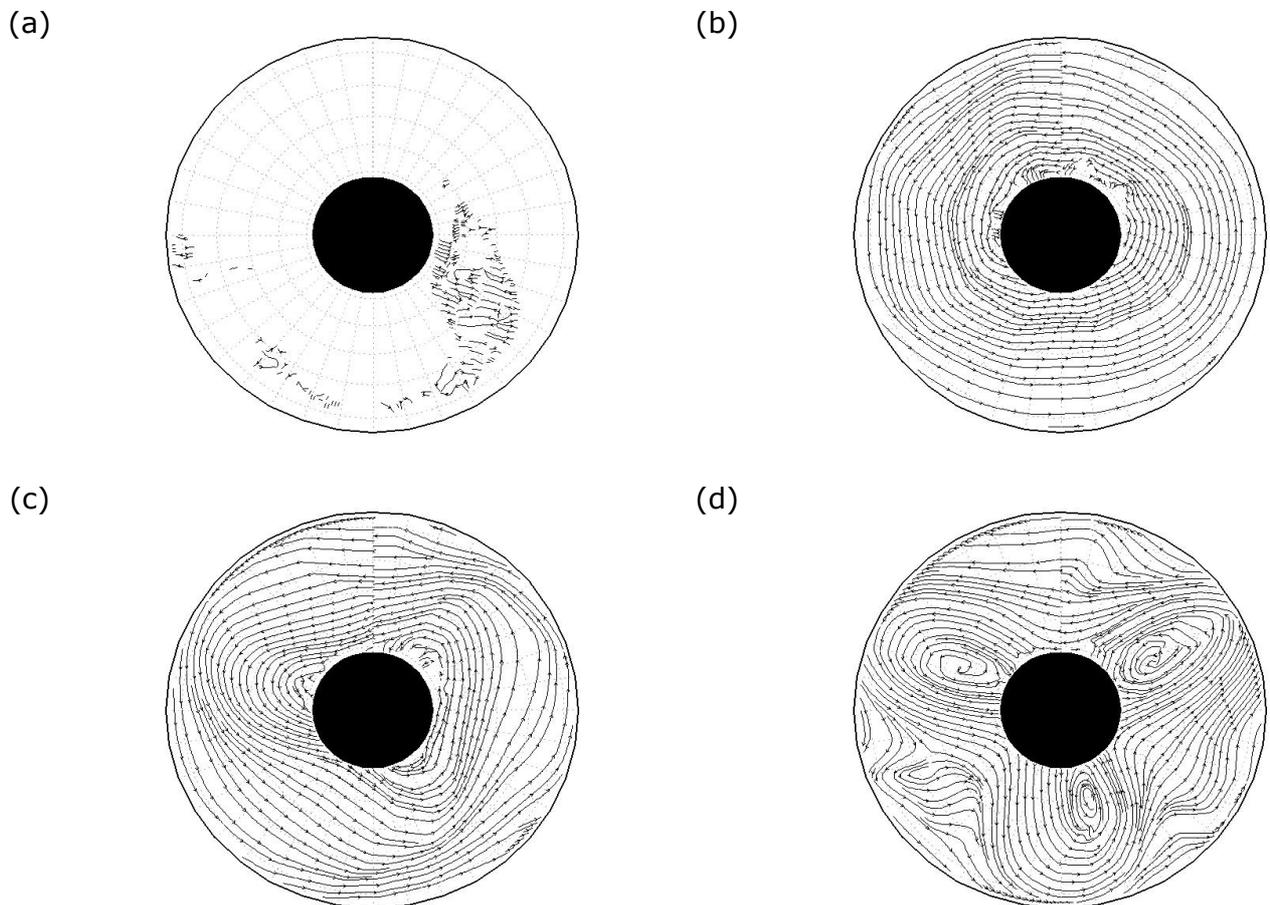
第3.2節の図3.6で紹介した運動エネルギーの時間変化は、スピニアップ期間での変化も示している。回転を初めて120秒まで KE と MKE が急増化している。実験開始後からしばらくは慣性が顕著に働き、実験槽内の流体は運動をしない。そのため、撮影された動画では回転方向の逆向きに運動しているように見える。この見かけ上逆向きの運動が起きることで、 KE や MKE が大きくなる。実験開始から約3分が過ぎると、実験槽全体の水面が回転方向と同じ向き(反時計回り)の円周運動を始めるため、いったん見かけ上の反対向きの運動がほぼ止まり、 KE と MKE はゼロとなる。その後、軸対象運動が卓越するため KE と MKE が増加する。そして、数十秒後に傾圧不安定波が発生することに伴い EKE が増加する。

(a)

(b)

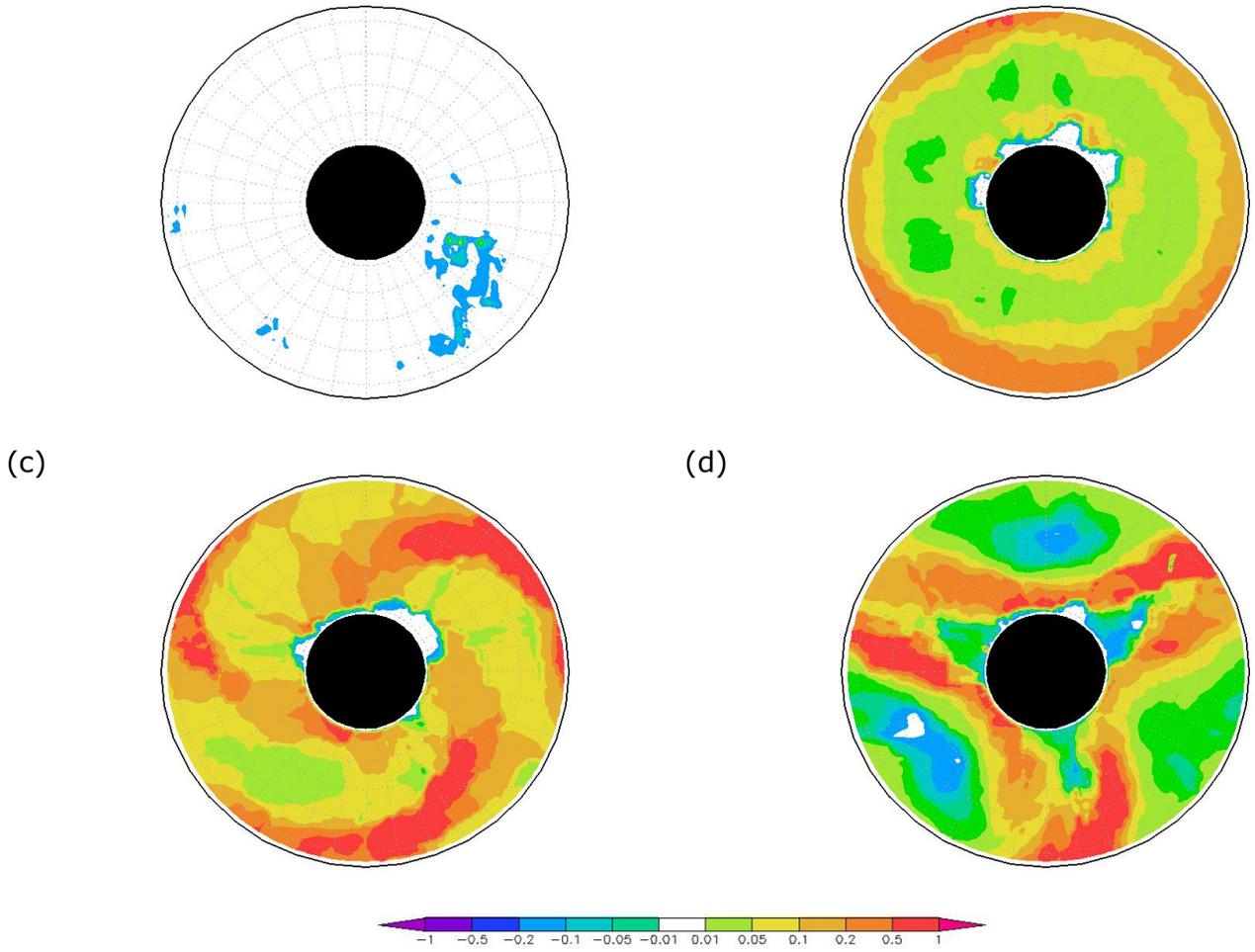


図A1.1: 高感度カメラで撮影された画像。(a)回転開始30秒前、(b)回転開始200秒後、(c)266秒後、(d)330秒後。

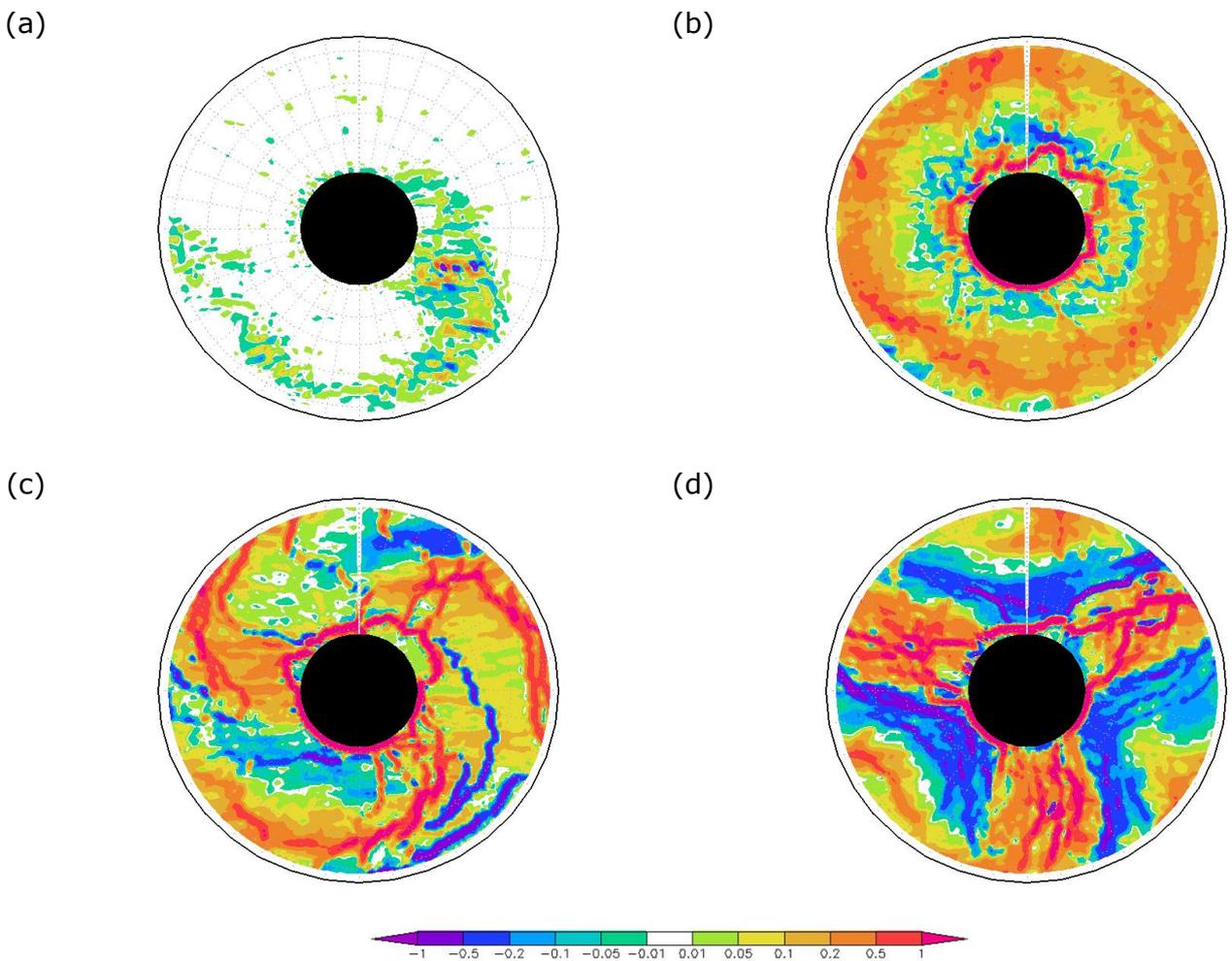


図A1.2: 図A1.1の時間の流線分布。

(a) (b)



図A1.3: 図A1.1の時間の速度分布。単位は mms^{-1} 。



図A1.4: 図A1.1の時間の相対渦度分布。単位は s^{-1} 。

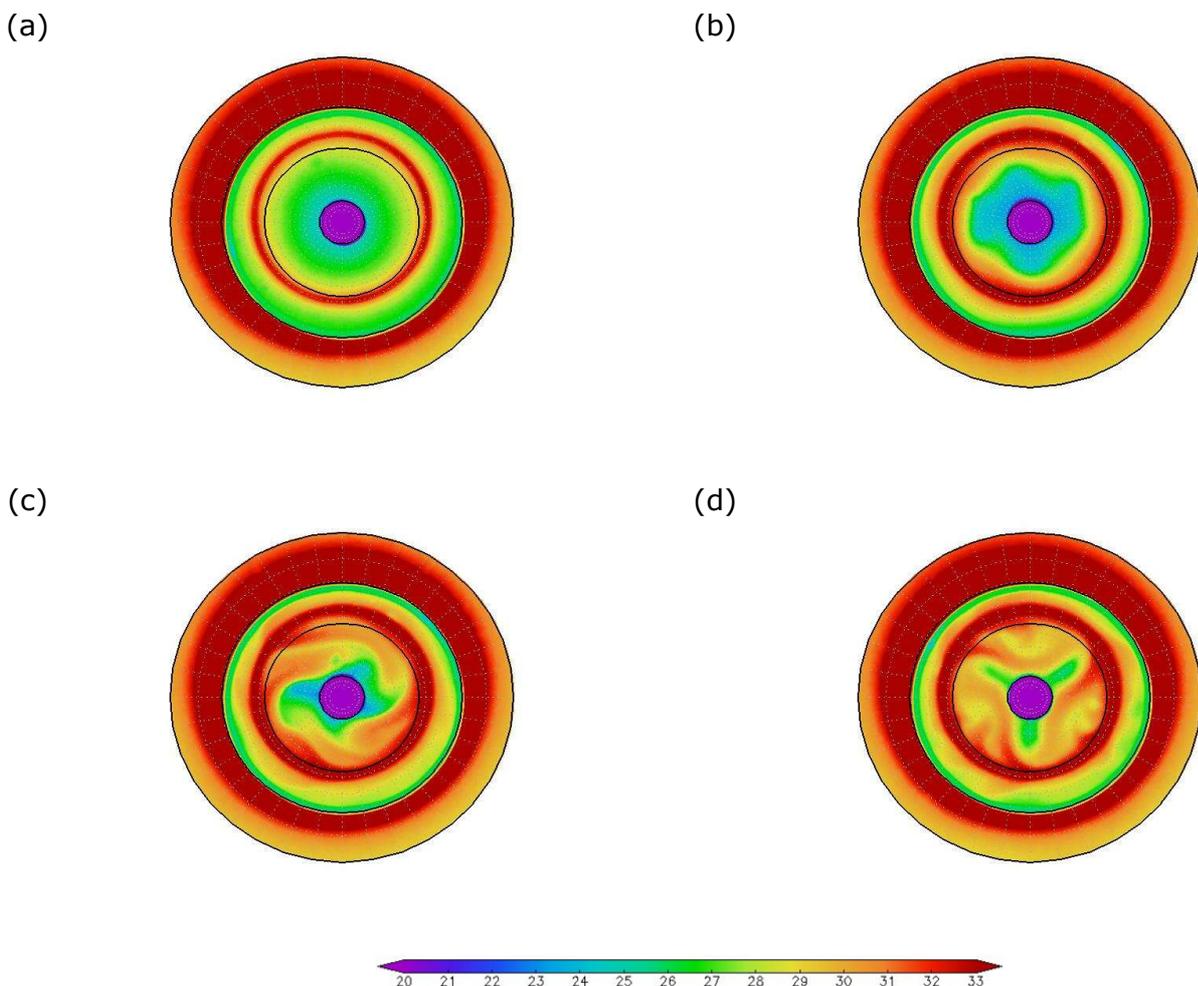
粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の
定量化 << [Prev](#) | [Index](#) | [Next](#) >>

付録2. サーモグラフィーによる温度場の測定

本研究では、高感度カメラの代わりに、サーモグラフィーを上部に設置して、水面の温度を測定した。本研究で用いたサーモグラフィーはtesto890（テスト社製）であり、1280×960画素という超高精細で測定することができる。

図A2.1は、実験1の設定で得られた、図A1とおよそ同じ実験時間でのサーモグラフィーの画像である。サーモグラフィーにより測定された水面温度分布は、おおまかにいえば、ジェットの軸の内側でおよそ25℃の低温、外側でおよそ32℃の高温となっている。また、ジェット軸に沿ってみると、外側から内側に暖水を運んでいる様子が確認できる。

現状では実験装置の上部に設置するカメラは1台のみであり、図A2.1は図A1と同じ瞬間の画像ではない。将来、2台のカメラが設置・撮影できるように計画中している。高感度カメラとサーモグラフィーにより同時に撮影することで、温度場と運動場の計測が可能になり、温度移流の議論も可能となる。



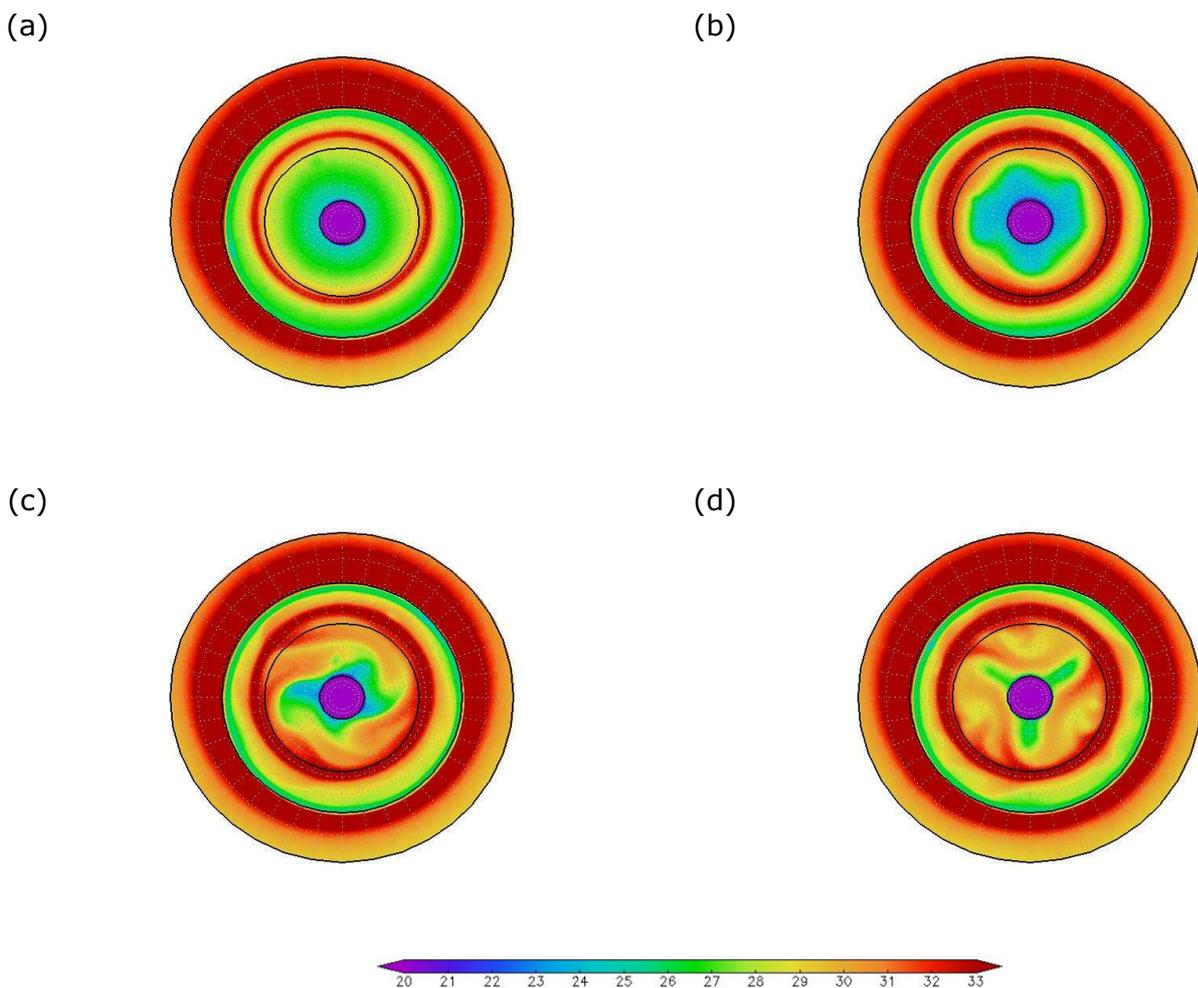
図A2.1: 図A1に相当する時間で撮影したサーモグラフィーの結果。単位は℃。

付録2. サーモグラフィーによる温度場の測定

本研究では、高感度カメラの代わりに、サーモグラフィーを上部に設置して、水面の温度を測定した。本研究で用いたサーモグラフィーはtesto890（テスト社製）であり、1280×960画素という超高精細で測定することができる。

図A2.1は、実験1の設定で得られた、図A1とおよそ同じ実験時間でのサーモグラフィーの画像である。サーモグラフィーにより測定された水面温度分布は、おおまかにいえば、ジェットの軸の内側でおよそ25℃の低温、外側でおよそ32℃の高温となっている。また、ジェット軸に沿ってみると、外側から内側に暖水を運んでいる様子が確認できる。

現状では実験装置の上部に設置するカメラは1台のみであり、図A2.1は図A1と同じ瞬間の画像ではない。将来、2台のカメラが設置・撮影できるように計画中している。高感度カメラとサーモグラフィーにより同時に撮影することで、温度場と運動場の計測が可能になり、温度移流の議論も可能となる。

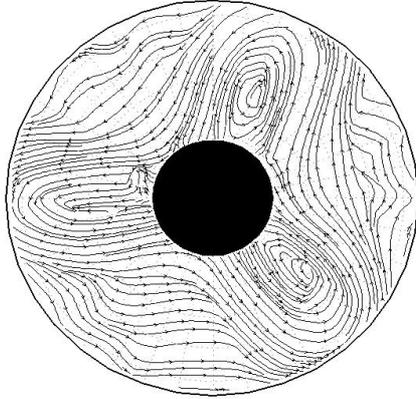


図A2.1: 図A1に相当する時間で撮影したサーモグラフィーの結果。単位は℃。

付録3. 実験全期間の動画

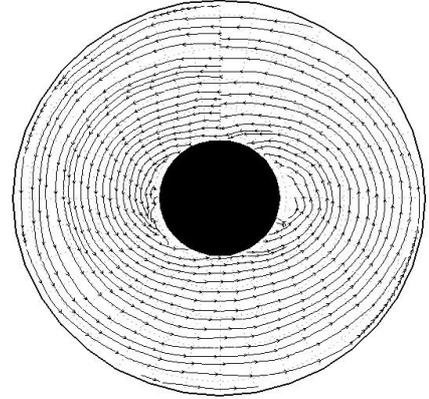
本稿で紹介した実験の実験全期間の動画を掲載する。

(a)



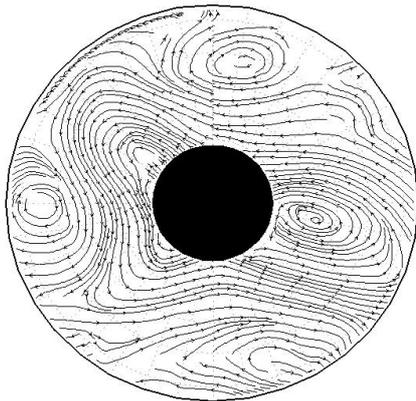
[実験1のアニメーション](#)

(b)



[実験2のアニメーション](#)

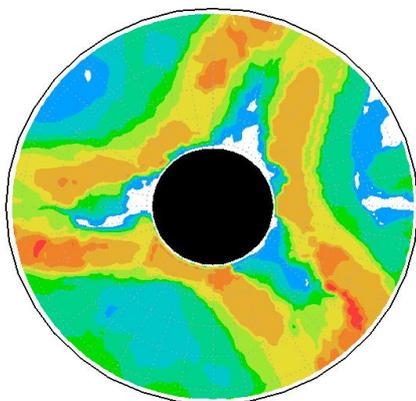
(c)



[実験3のアニメーション](#)

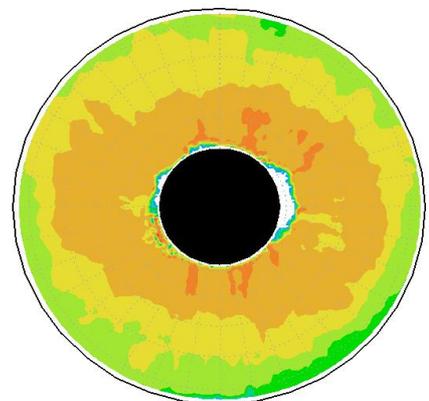
図A3.1 流線分布の動画。

(a)



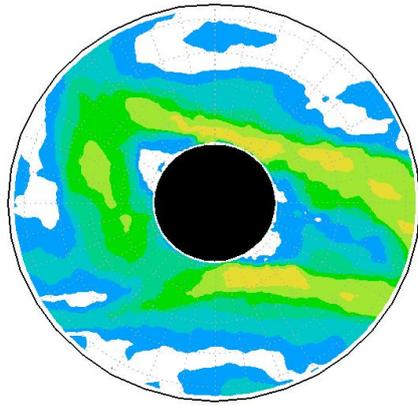
[実験1のアニメーション](#)

(b)



[実験2のアニメーション](#)

(c)

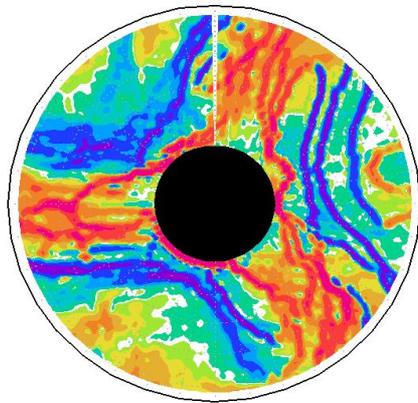


実験3のアニメーション



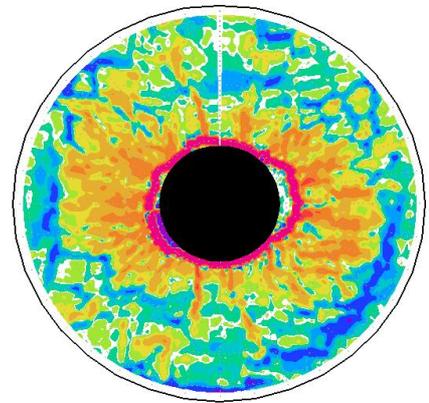
図A3.2 速度分布の動画。単位は mms^{-1} 。

(a)



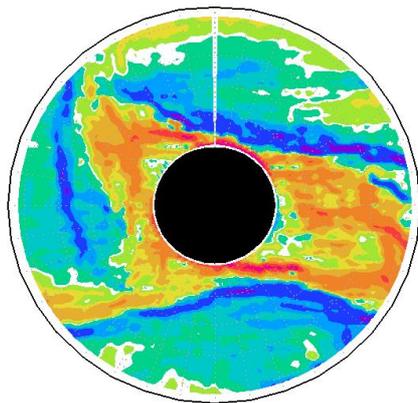
実験1のアニメーション

(b)

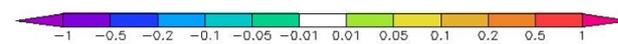


実験2のアニメーション

(c)



実験3のアニメーション



図A3.3 相対渦度分布の動画。単位は s^{-1} 。

粒子画像流速測定法と渦運動エネルギーを用いた回転水槽実験で発生する傾圧不安定波の定量化 << [Prev](#) | [Index](#)>>

[Japanese]

Method to quantitatively detect the features of baroclinic waves observed in the experiments with a differentially heated rotating fluid annulus

Hironori Fudeyasu (Faculty of Education and Human Science, Yokohama National University)
Ayumi Masuda (Graduate School of Education, Yokohama National University)
Naohito Otake (Faculty of Science, Fukuoka University)
Rie Kumazawa (Graduate School of Education, Yokohama National University)
Koichi Nishino (Graduate School of Engineering, Yokohama National University)

(Received 3 July, 2014; in revised form X October, 2014)

Abstract

The purpose of this study is to construct a method which quantitatively detects the features of baroclinic waves observed in the experiments with a differentially heated rotating fluid annulus. Using the high-interval video frames recorded by a highly sensitive camera located over the annular tank, the Particle Image Velocimetry (PIV) provides the high-resolution digital data to capture the surface flow pattern in the experiments. The numeric data provided by the PIV is used to calculate the kinetic energy, and then divide into the annual mean of kinetic energy (MKE) from axisymmetric flow and eddy kinetic energy (EKE) from asymmetric flow. Furthermore, the each wave-number component of EKE is estimated from the each wave-number component in the asymmetric flow.

In order to validate the method, we apply the method to the results from three experiments. From the result of experiment in which the symmetric-flow pattern is distinct, the analysis showed that MKE is dominant. On the other hand, in the case of a steady-baroclinic-waves flow, the particular wave-number EKE is dominant and the side-band-component EKE is neglected. In the case of the non-steady flow pattern, the side-band-component EKE is comparable to the particular wave-number EKE. Namely the multiple wave-number flow patterns are overlapped. It is expected that the method developed in this study could provide new and useful insights into the experiments with a differentially heated rotating fluid annulus.

Contents

1. [Introduction](#)
2. [Methodology](#)
 1. [Experimental equipment](#)
 2. [Measurement method](#)
 3. [Experimental procedure and setting](#)
3. [Results](#)
 1. [Surface flow patter](#)
 2. [Eddy kinetic energy](#)
4. [Summary and conclusions](#)
5. [Acknowledgements](#)
6. [References](#)
7. [Authors and addresses](#)

Appendix

1. [Results of spin up period](#)
2. [Results of thermography](#)
3. [Movies](#)

[Next](#)>>

[Jump to "Nagare Multimedia" top page](#)

c1998-2008 998-2008 The Japan Society of Fluid Mechanics, ALL RIGHTS RESERVED.