

底面の加熱および冷却を伴う回転流体水槽実験

Rotating fluid experiment having a bottom heated and cooled

北海道大学工学部環境社会工学科	○学生員	一瀬輪子	(Rinko Ichinise)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	山田朋人	(Tomohito J. Yamada)
北海道大学大学院工学研究院	学生員	北野慈和	(Yoshikazu Kitano)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	渡部靖憲	(Yasunori Watanabe)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	泉典洋	(Norihiko Izumi)

1. はじめに

中緯度地域にて南北に蛇行しながら恒常的に吹く偏西風は、等圧面と等温度面との傾きによって生じる傾圧不安定波として解釈される。傾圧不安定波の研究として、Fultz(1959)や Hide(1953)によって提唱された回転水槽を用いた室内実験が古くから行われている。

同実験は、3重の円筒容器の内側の水槽に冷水、外側の水槽に温水、間的水槽に作業流体を満たし、回転させることで南北及び鉛直方向に温度傾度を有する中緯度帯を模する。Fowles and Hide¹⁾(1965)は水面に撒いたアルミ粉の流れで流速を可視化する実験を行い、熱ロスビー数 R_{ot} とテラー数 T_a 、

$$R_{ot} = \frac{\alpha \Delta T H g}{\Omega^2 R^2}, \quad T_a = \frac{4\Omega^2 R^2}{\nu^2 H}$$

α : 膨張率、 ΔT : 温度差、 H : 深さ、 g : 重力加速度

Ω : 角速度、 R : 半径、 ν : 動粘性係数

の2つの無次元量の関係がその波動形態を特徴づけることを示唆した。過去の研究では、水面の波状の観測は目視で行われてきたため、定性的な研究に留まり定量的な研究に至っていなかったという問題点があった。近年はPIV解析を用いた流速分布の算出や、3次元の数値シミュレーションによる定量的な研究も行われている。三村・松島²⁾(2006)は、従来の装置ではコリオリ因子 f が一定で惑星 β 効果の影響がない点に着目し、底面に楕円形状の傾斜をつけ水深の変化による地形性 β 効果を加味した実験を行っている。

従来の装置では冷熱源となる内壁が存在しているため、蛇行の振幅が制限されていた。本研究では、制限のない自由な蛇行を観測するために、水槽中の側壁を取り除き底面から流体に温度差を与える。本研究は回転流体水槽実験の発達や偏西風波動の定量的な解明を目的とし、以上の装置を用いた実験での傾圧不安定波の発達、減衰の過程やその波状を、地球大気現象や既往の研究と比較、考察する。第2章に実験の概要、第3章に解析手法、第4章に解析結果、第5章に考察と今後の方針を記述する。

2. 回転水槽実験概要

(1) 実験装置

従来の回転水槽実験の装置と本研究で用いる装置との違いを図-1に示す。従来の研究では、三重の円筒水槽が用いられ、観察の対象である流体の領域が冷熱源である側壁に挟まれていた。本研究では、内壁を取り除き、

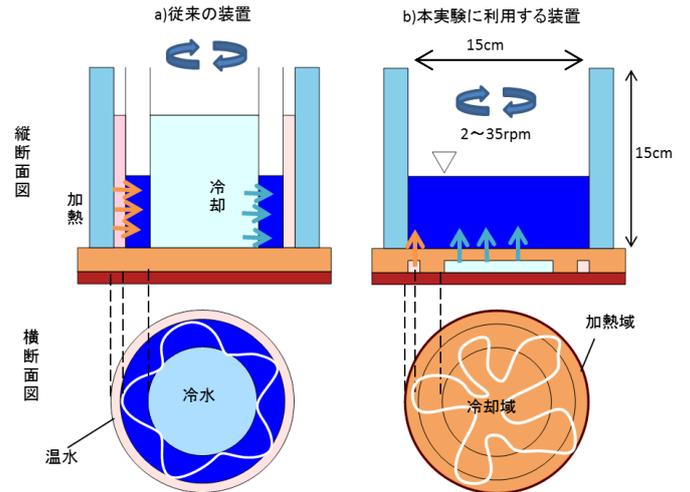


図-1 従来の実験装置と本実験に用いる装置の比較

- a) Fowles and Hide などが利用した従来の装置
- b) 本実験で用いる装置

底面から作業流体に温度差を与える。底面は、同心円状のしきりを設けた真鍮の円板を用い、中央部に冷水、外周部に温水を常に一定の温度で循環させることで、作業流体に温度差を与える。

内壁がなくなることで、壁面による波動の振幅の制限がなくなり、自由に振る舞う波動が再現できる。また、従来の装置では水槽の中心部に存在した冷源が底面にあるため、極に近い部分の流れの観察が可能になる。実際の地球大気は地表面から熱が与えられるが、従来の装置では側面から熱が与えられていた。底面から熱を与えるので、より地球大気に近い再現ができるといえる。

(2) スケール解析

実験のパラメータを設定するためにスケール解析を行った。回転系のナビエ・ストークス式は

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + f \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1.1)$$

\mathbf{v} : 流速、 t : 時間、 f : コリオリ因子、 \mathbf{k} : 鉛直方向の単位ベクトル、 ρ : 密度、 p : 圧力である。無次元の定数を

$$\mathbf{t} = \tau \hat{t}, \quad \mathbf{r} = L \hat{r}, \quad p = P \hat{p}, \quad \mathbf{v} = U \hat{v} \quad (1.2)$$

スケール τ : 時間、 L : 長さ、 P : 圧力、 U : 速度

と定義すると式(1.1)は

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \frac{\tau U}{L} (\hat{v} \cdot \nabla) \hat{v} + \tau f \cdot \mathbf{k} \times \hat{v} = -\frac{\tau P}{\rho UL} \nabla \hat{p} + \frac{\tau \nu}{L^2} \nabla^2 \hat{v} \quad (1.3)$$

とかける。ここで $\tau = 1/f = 1/2\Omega$ とする。地球大気の代表スケールの値を代入すると第 2 項の係数のオーダーが非常に大きい。この無次元量はロスビー数といい、慣性作用と回転作用の比を表す。傾圧不安定波においては、流速に温度風

$$U = \frac{Hg\Delta\rho}{\rho fL} \quad (1.4)$$

を代入し 4 倍することで、安定性の指標とされる熱ロスビー数

$$R_{0t} = 4 \cdot \frac{\Delta\rho Hg}{\rho f^2 L^2} = \frac{\alpha \Delta T H g}{\Omega^2 L^2} \quad (1.5)$$

が得られる。傾圧不安定波の実験の相似関係は熱ロスビー数から決定できる。地球大気熱ロスビー数を概算すると 0.1 程度である。これより実験をする際のパラメータは、熱ロスビー数が 0.1 とオーダーの大きく変わらない範囲で設定する。本実験で使用する装置は高さ 15cm、直径 15cm の円筒水槽であり、可変なパラメータと範囲は、水深 2~8cm、回転数 10~35rpm、温度差 2~30°C である。

3. 解析手法

PIV(Particle Image Velocimetry)解析とは、流れに乗って移動する粒子の運動を画像計測することによって、流体速度を測定する手法である。中立粒子を浮遊させた流体にシート状のレーザーを当て、その散乱光を一定時間ごとに連続してとりこむことで得られる画像をプログラムによって解析する。レーザーを当てる高さを変えることで流体内のあらゆる層の流れを対象とすることができる。

(1) 相互相関法 PIV

相互相関法 PIV では、微小時間だけ異なる 2 枚の画像における粒子の輝度値分布の相関の高いものを同一の領域とし、その領域の中心の移動距離から流速を求める。

まず、時間 $t=t_0$ における画像 A、 $t=t_0+\Delta t$ の画像 B に対して検査領域、検索領域をそれぞれ設定する。検索領域は検査領域を中心とし、検査領域より広範囲でなくてはならない。検索領域内で検査領域の輝度値の分布の相関が得られる領域を検索、検査領域と選択された領域の中心位置の差を代表移動距離 Δx とする。このときの流速 v は $v=\Delta x/\Delta t$ によって求まる。ただし、相互相関係数 C_{AB} の値が定めた値に達しないとき、あるいは異常な流速がある場合、その流速は距離を重みづけた周囲のデータによって補正される。

(2) SR-PIV

SR-PIV とは、相互相関法 PIV 解析の結果を粒子速度の第 1 近似として、個々の粒子を追跡し、最高解像度で流速を求める方法である。一般に、PIV は、その解像度が低く制限され、精度は混入した粒子数が多いほど高くなる一方、粒子追跡法(PTV)は最高解像度で速度を計測できるが粒子数が多くなると誤追跡による誤差が顕著に増加する。SR-PIV は PIV と PTV を組み合わせ、両者の短所を補完し、高粒子群に対する高解像度流速計測を可能とするものである。

相互相関法 PIV 解析で得られた時刻 $t=t_0-\Delta t$ における流速 u と同一の速度をもつ粒子が、 Δt 間に粒子が移動した距離 $u\Delta t$ 近傍に探索領域を設定する。時刻 $t=t_0$ の画像中の探索領域内に存在する全ての粒子を追跡候補粒子とし、それら候補粒子について同様に $t=t_0+\Delta t$ までの粒子追跡を行う。本研究では、得られた多数の候補粒子軌道の内、最小加速度の原理に基づき、最適粒子軌

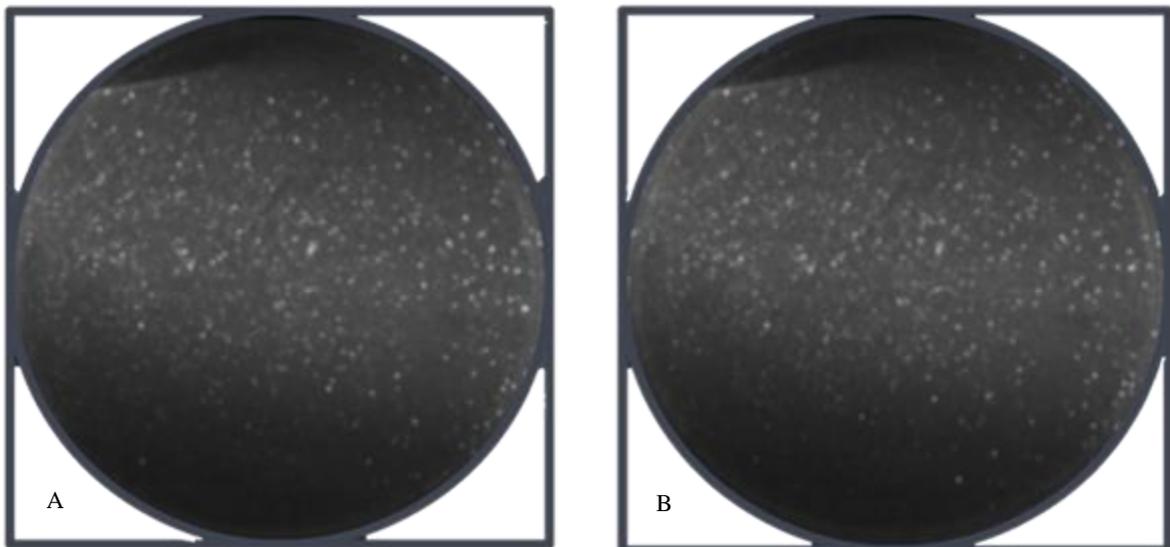


図-2 PIV 解析に利用する粒子画像 A($t=0s$)、B($t=2s$)

1000×1000pixel のひとつひとつに輝度値が数値として与えられている。この画像はガウシアンフィルタをかけたノイズ除去がなされている。実験条件は水深 4cm、レーザー高さ 3cm、回転数 30rpm、温度差 30°C。

表-1 本実験で設定したパラメータと無次元数

水深	4.0 cm
レーザー高さ	3.0 cm
温度差	30 °C
回転数	30 rpm
撮影時間	10 minutes (回転開始から 30~40 分)
熱ロスビー数	0.40
テーラー数	2.6×10^8
微小時間 (Δt)	2.0 seconds

道を決定する。すなわち、 $t=t_0 - \Delta t$ 、 $t=t_0$ 、 $t=t_0 + \Delta t$ の3枚の画像 A、B、C に対して、AB 間 CD 間の加速度が最小のものを対応粒子とし、求まる粒子の速度から領域ごとの流速を定める。

4. 実験結果

(1) 実験条件

表-1 に示すように、水深は 4.0cm、レーザーをさす高さは底面から 3cm、温度差は室温を中心に前後 15°C の熱を与えた 30°C、回転数は 1 分間に 30 回転での実験を行った。

(2) 解析結果

a) 波形について

30 分経過時における粒子の画像、PIV 解析、SR-PIV 解析の結果を図 2、図 3、図 4 に示す。また、次項の図 5、6 に PIV、SR-PIV それぞれで求めた速度の分布の図を示す。回転の方向は図の矢印の通りである。PIV 解析の結果を観察すると、円周の縁に沿って並ぶ渦が存在している。流速ベクトルの画像を連続して見ることで、渦の間をぬって蛇行する波数 5 程度の流れが確認できる。一方、地球大気の蛇行流れの波数は 3~6 程度である。蛇行流れの方向は回転の方向と同じである。渦は 1 分ほど同じ位置に留まり、蛇行した流れに一体化するように消える。渦自体はほとんど動くことはないが、わずかに水槽の回転方向に移動する。

また、横軸にテーラー数、縦軸に熱ロスビー数をとったグラフに本実験条件のおおよその点をプロットし、Fowles and Hide の研究と比較した。結果、本実験は波数を持つ流れである規則波動領域と、流速が統一されない不規則波動領域の中間となる点に位置した。粒子の連続画像の目視、また PIV 解析では一部規則的な流れがあるように見える。

解析した流れは底面からの高さ 3.0cm のものである。アルミ粉による可視化では水面の傾圧不安定波を観測していたが、本実験では水面より 1cm 低い層での水平方向の流れが見られた。

b) 流速について

PIV 解析によって求めた平均流速は 0.1cm/sec 前後で、その幅はおおよそ 0.1~0.2cm/sec であった。ジェット気流の流速は 30~100km/h であり、流速から求める熱ロ

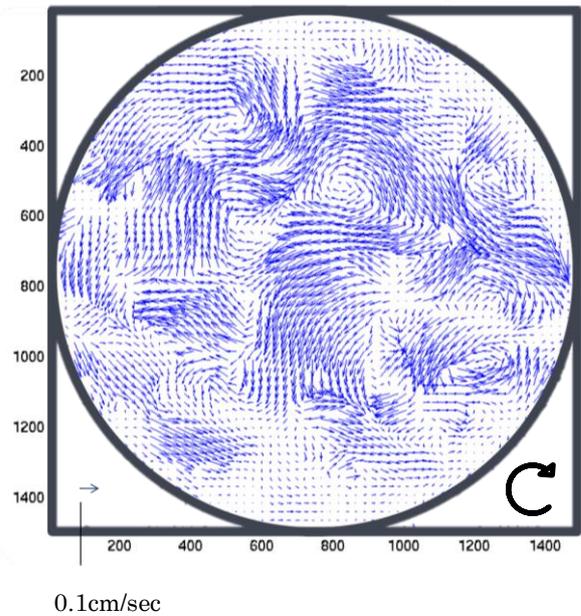


図-3 相互相関法 PIV 解析結果
実験条件は図-2 に従う。渦と蛇行した流れが見られる。

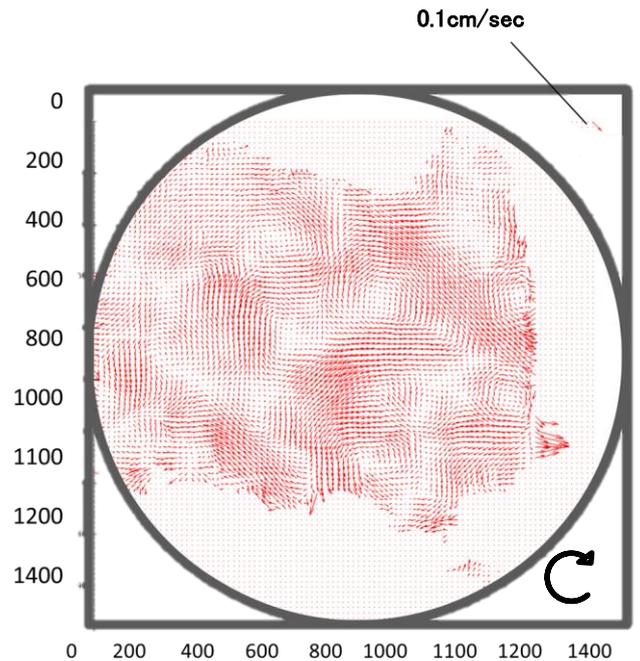


図-4 SR-PIV 解析結果
実験条件は図-2 に従う。相互相関法よりも細かい部分の流れが確認できるが、速度の求まらない領域も多い。

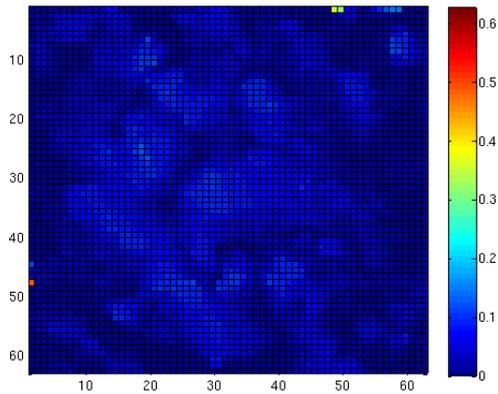


図-5 PIV 解析結果の流速分布
0.2cm/sec より小さい値に偏っている。

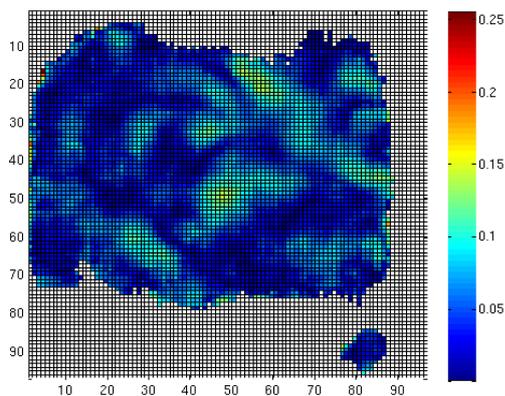


図-6 SR-PIV 解析結果の流速分布
渦や蛇行流れと重なる部分は流速が大きく
速度分布にも幅がある。

スピー数は0.1~0.4程度である。本実験装置が地球大気
のロスビー波を再現していると仮定すると、熱ロスビー
数より装置内の流速は0.1~0.4cm/secと推測される。相
似関係といえる範囲の流速が求まっている。

5. まとめ

本実験では、水槽の全体に点在する渦や水槽の中心を
横切る流れが観測された。これは、従来の内壁のある装
置では観察することができず、本実験で用いた装置で観
察できる特有の流形であると考えられる。高緯度地域の
地球大気の流れの再現や、ブロッキング現象の解明に役
立つ実験が行えるのではないかとと思われる。本実験装置
では複数実験を繰り返しているが、大きく蛇行する流れ、
蛇行の流れから離脱する渦が粒子の画像の目視から確認
できるが多かった。しかし、PIV解析の利用に十分な精
度の画像を得ることができなかった。今回の結果の
画像も位置によって欠損のベクトルが多い。撮影環境の
改善の必要があるだろう。

今後は、各パラメータの設定を変えた実験の解析を高精
度で行い、無次元数による波形の違いを既往の研究のも
のと比較していく。また、PIV解析の結果の流速ベクト
ル画像の観察は、時間ごとの流れが確認に利用しやすい。

流れを時系列に沿って追うことで、その形成、崩壊、遷
移の過程の解明を行う。以上の流速や波形の解析から、
地球大気との類似点や相違点を考察することも目標であ
る。

謝辞

本研究は MEXT/RECCA, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C),
JST/CREST(Core Research for Evolutional Science and
Technology)と JSPS 科研費 26242036 の成果の一部であ
る。

参考文献

- 1) W.W.Fowlis and R.Hide: Thermal Convection in a Rotating Annulus of Liquid: Effect of Viscosity on the Transition Between Axisymmetric and Non-Axisymmetric Flow Regimes, Journal of the atmospheric science, Vol. 22, pp.541-558, 1965.
- 2) 松島和宏・三村和男: 室内実験による半球規模地球対流圏の再現: 第7回地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」
- 3) 守田治: 回転流体中の傾圧不安定波: 第7回地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」