

底面に冷熱源を持つ回転水槽実験における 回転初期の遷移過程と高さ依存性

Experimental study of the spin-up process and height dependency in a rotating cylinder with the bottom partially heated and cooled

北海道大学大学院工学院	○学生員	一瀬輪子	(Rinko Ichinise)
北海道大学大学院工学院	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	山田朋人	(Tomohito J. Yamada)
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

中緯度における総観規模の大気の振る舞いを左右する偏西風の蛇行は傾圧不安定波として解釈される。大気大循環に対する理解を深めるため、これまでに多くの回転水槽による傾圧不安定波の再現実験が行われてきた。円筒水槽内の流体に温度差と回転を与えることによって、地球の中緯度における大気の循環を再現した回転水槽実験は Fultz¹⁾や Hide²⁾によって提唱され、装置や解析の手法の改良が重ねられてきた。

Fultz¹⁾は金属の円筒容器の底面を冷却、縁を加熱することで容器内の流体に温度差を与える実験を行った。この手法は実験装置が洗い桶 (dish-pan) に似ているためにディッシュパンの実験と呼ばれている。一方、Hide²⁾は3重の円筒水槽の中心に冷水、外側に温水を入れ、間の水槽内の流体に温度差を与えることで傾圧不安定波の再現実験を行った。この実験手法は、環状 (annulus) の水槽を用いることからアニュラスの実験と呼ばれる。ディッシュパンの実験では、作業流体水槽に内壁がないため、流体の挙動に制限がない自由な流れの再現が可能である。しかし、アニュラスの実験で規則的な波動形態が再現できる傾向があるため、過去の回転水槽実験の多くの研究はアニュラス型の装置を用いて行われている。Fowles and Hide³⁾は、テーラー数と熱ロスビー数の2つの無次元量によって波動の決定されることをアニュラスの実験の結果から示唆した。

しかし、Spence and Fultz⁴⁾は補助的な熱源を用いることで、ディッシュパンの実験によっても同様の結果が得られることを報告した。また、Katsumi and Ukaji⁵⁾は補助的な熱源を用いないディッシュパン型の装置で、帯状流、規則的な定常流、流れ場が時間変化するヴァシレーション、不規則流れを得、波動形態を示す図を作成、表面流やヴァシレーションの周期、遷移変化についても述べている。

三沢、木村⁶⁾は極域の寒気の吹き出しをモデル化した実験にディッシュパン型の装置を用いた。底面中央部を冷却、外周部を断熱させた回転水槽内の中心部で冷却された流体の挙動を水槽底面の感温液晶によって可視化した実験であり、回転数の増加によって低温域の形状が軸対象から非軸対象の波形になることを報告した。木

村⁷⁾は同様の条件について数値実験を行い、エクマン層高さと寒気の吹き出し高さの比による流れ場の変化の解析や底面形状が平面、球面である場合の比較を行った。

また、三村⁸⁾は温度差を与えない回転円筒水槽による実験で極渦の反転現象を模式化する研究を行った。この実験では、水槽底面を球状にし、半径方向に傾斜を与えることで地形性ベータ効果を加味した。さらに、同様の水槽の中央部に冷却棒、外側に温水槽を配置し、実験に傾圧性を与えた実験も行った。

本実験では、水槽底面中央部を冷却、底面外周部を加熱させた円筒水槽による回転実験を行った。底面から作業流体に温度差を与えることで、鉛直方向に異なった特徴を持つ流れ場を生成できるため、既往の研究より一層、地球大気に近い再現が可能である。環状の水槽を用いないため流体が水槽内を自由に移動でき、また地球大気における極域に相当する水槽の中心部の挙動を観察できる。本実験での再現は特に極域における大気の挙動を想定している。解析は、側方から挿入するシート状のレーザー光が照射する水平面上でPIV (Particle Image Velocimetry) を行うため、任意の水平面での流れ場を調査することができる。本実験では津波発生時の遡上について解析した渡部ら¹⁰⁾に準じた方法でPIV解析さらに、SRPIV⁹⁾ (Super Resolution Particle Image Velocimetry) を行った。以上の点に着目し、回転開始直後から傾圧不安定波に遷移するまでの過程を含め、水平面の流れ場の定量的な解析、考察を行った。第2章に実験の概要、第3章に解析手法、第4章に実験結果と考察を記述する。

2. 実験装置

図-1に本実験で用いる実験装置の概要を示す¹³⁾。水槽の側壁は直径150mm、高さ150mmの大きさの円筒であり、後述するレーザーシート光が透過可能な厚さ10mmの亚克力製である。底面には熱伝導性の高い真鍮を用いた。底面内部は円状、環状の2重の空洞域を有し、内側の空洞には冷水、外側の空洞には温水が恒温水槽から供給し、常時循環させることで水槽内の水槽底面に同心円状の温度分布を与える。円状の冷源となる領域の半径は43.3mm、環状の温源となる領域の内径と幅はそれぞれ61.2mm、13.8mmであり、恒温水槽

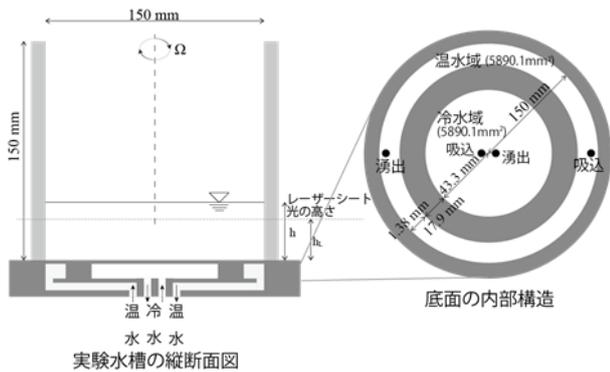


図-1 実験水槽の縦断面図(左)および水槽底面の内部構造(右).
水槽内の作業流体の中央の円形域には冷水, 外側の環形域には温水を恒温で常時循環させる.

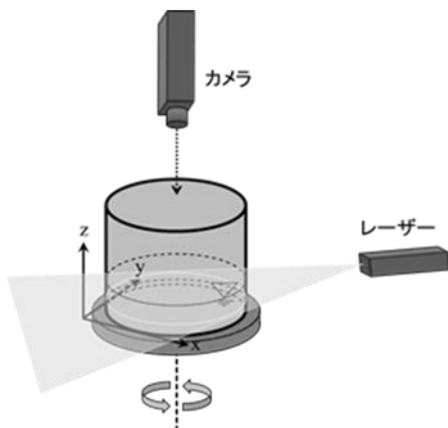


図-2 画像取得の概念図.
作業流体内に混入させた中立粒子を側方からレーザーシート光で照射し, 鉛直上方から CCD カメラで連続撮影する.

から供給される冷水, 温水の循環する領域の面積は等しく 5890mm²である.

PIV 解析に用いる画像は, 鉛直上方向から撮影した. 流体内に中立粒子を浮遊させ, 側方から水平にレーザーシート光を挿入し, 照射された中立粒子の輝度値を 1000×1000 画素の CCD カメラによって記録した. レーザーの挿入高さの設定によって, 流体内の任意の水平面上についてのみの解析が行える. 中立粒子の直径は 60~200μm であり, 輝度を高めるため蛍光塗料によって着色した. レーザーシート光は, 波長は 532nm レーザー光をレーザーラインジェネレータレンズによって均一なラインビームを得ることで照射している. 中立粒子の反射光のみを撮影するため, カメラには 560nm 以上の光のみを透過させるローパスフィルタを取り付けた.

3. 解析手法

(1) 相互相関法 PIV

相互相関法 PIV では, 微小時間 Δt 間隔で撮影した 2 枚の連続画像における領域ごとの輝度値の分布の相関係数から流速を求める. 1 枚目の画像に数十ピクセル四方の小領域 α を設定し, Δt 秒後の 2 枚目の画像内で輝度

値の分布の小領域 α との相互相関係数が最大となる小領域 α' を検出し, 微小時間での α の移動先と設定する. この領域の移動距離 $\alpha \alpha'$ を Δt で除すことで領域ごとの流速を求める.

本実験では 1000×1000 ピクセルの画像を利用するが, 上記方法では移動距離はピクセル値で規定されるため 1 ピクセル分の幅で離散値になる. より高解像度の流速を求めるために, 周囲の相互相関係数から逆数補完したサブピクセル精度にて移動距離及び流速を算出した.

(2) SRPIV

SRPIV とは, 相互相関法 PIV 解析で得られる領域ごとの流速をその領域内部の粒子の移動速度の第一近似として, 個々の粒子を追跡し, 最高解像度での流速を取得する手法である.

Δt 間隔ごとに画像 A, B, C を取得したとする. 画像 A において AB 間の流速が u である領域 a 内部の特定の粒子の速度を u と想定する. 画像 B において, 小領域 a から距離 $u \Delta t$ の位置の近傍に検索領域 b を設定し, 探索領域 b の内部のすべての粒子を小領域 a 内の特定の粒子と同一の粒子である候補粒子とする. 画像 BC 間でも同様に特定の粒子の候補粒子を設定することで, 特定の粒子について ABC 間での複数の軌道候補が挙げられる. この軌道候補のうち, 最小化速度の原理にしたがって, AB 間, CD 間の流速の差が最小となる軌道を最適な粒子の軌道として選択する. 最適な軌道における移動距離から個々の粒子の流速を求め, これらを竹原, 江藤¹²⁾による MLS 法を用いて, 座標系へのデータへと変換している.

4. 実験結果と考察

(1) 実験条件

本実験での実験条件は, 回転水槽実験における波動の形態を決定づける無次元量である熱ロスビー数が, 地球での値と近づくように設定し, 無回転時の水深を 40mm, 水槽の回転数を 30rpm (角速度 3.14rad/s), 底面に与える温度差を 30℃とした. 地球の熱ロスビー数はおよそ 0.01~1 程度であり, この実験条件での熱ロスビー数は 0.04 である. 温度差は実験室内の室温 T を中心に, 冷水を $T-15^\circ\text{C}$, 温水を $T+15^\circ\text{C}$ とした. 回転系における水槽に対して相対的な流速を得るために, 画像の取得は水槽の 1 回転に 1 回, すなわち 2 秒に 1 回の頻度で, 回転開始直後から 30 分間行った. 水槽の回転方向は半時計回りである. 円筒水槽の側壁が曲面であるためレーザーシート光が屈折し, 水槽の縁に近い領域では十分な輝度が得られず解析結果の欠損が生じている.

水槽底面からのレーザー光の挿入高さ H_I について $H_I=10\text{mm}$, 20mm , 30mm の 3 種類の実験を行った. それぞれを実験(1), 実験(2), 実験(3)と呼称する.

(2) 解析結果

円筒水槽は極域を中心に地球の北半球の一部を模しており, 半径方向の座標は緯度, 接線方向の座標は経度に相当する. 以降の記述では地球に倣い, 接線方向流速を

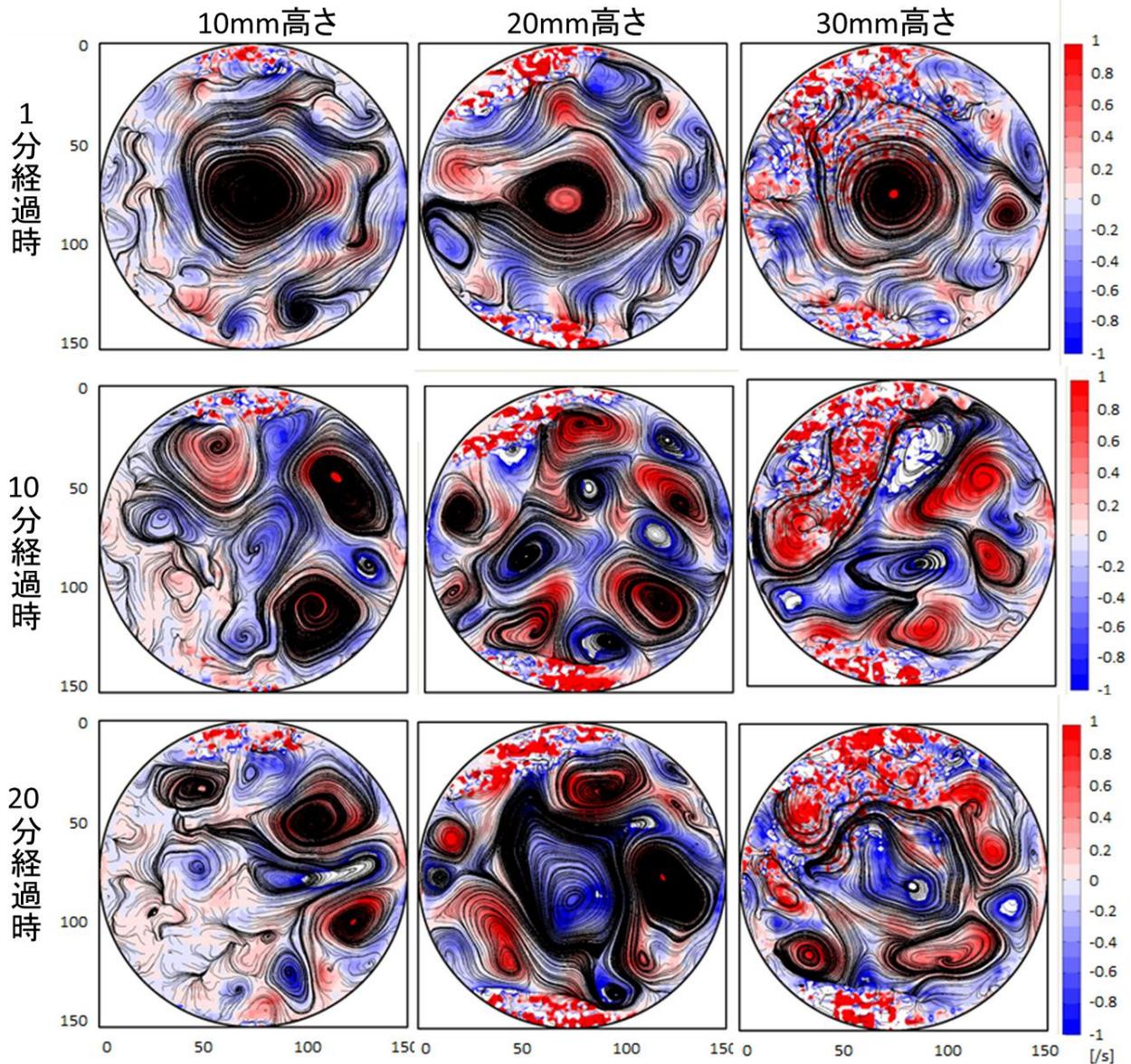


図-2 回転開始から1分経過時，10分経過時の流線と渦度(赤-青)

水槽底面からのレーザー光挿入高さ 10, 20, 30mm における流線と渦度. 赤い領域が正の渦度であり，水槽と反対方向の回転であることを示す. 青い領域は負の渦度，水槽と同方向の回転を示す.

東西流速と呼称，半径外向き方向を南向き，反時計回り方向（水槽の回転と同方向）を東向きと想定し，それぞれの正の方向とする．地球大気に関する帯状平均という用語についても同様に，同一半径の地点の接線方向1周の平均という意味で用いる．

解析から流速を求め，これより東西流速，南北流速の分解成分，渦度，流線を得た．渦度は相対渦度を意味し，時計回り（水槽の回転と反対方向）を正とする．惑星渦度は6.28であり水槽全体で一定である．

図-2 に回転開始から1分後，10分後，20分後の流線と渦度を示す．この値は1分間の平均値である．流線の図を時間ごとに観察することで水平面での流体の挙動を目視で確認した．

スピニアップ

回転開始から3分ほどの時間には，どの実験におい

ても水槽の回転と反対方向の回転を持つ渦が形成され，やがて消えるというスピニアップ現象が見られた．渦度は青い領域が水槽の回転と同じ方向の回転，赤い領域が水槽と反対の方向の回転の渦度を持つ．図-2 の1分時点にはスピニアップ現象で生じる水槽と反対方向の回転の渦度が見られる．この渦は水槽の外周から徐々に形状を崩し，水槽の中心付近に負の渦が移動した，図-3 に水槽の中心付近渦度（半径 $r=37.5\text{mm}$ 以内の空間平均）と $r=37.5\text{mm}$ 上の東西流速の時間変化を示す．水槽の中心付近の渦度が増大し減衰し終わるまでがスピニアップ時間に相当し，流体内の高さによらずおよそ200s前後である．正の渦度が大きいほど，スピニアップ状態において，流体内の高さによる渦度の大小やスピニアップ時間長さの変化は小さい．

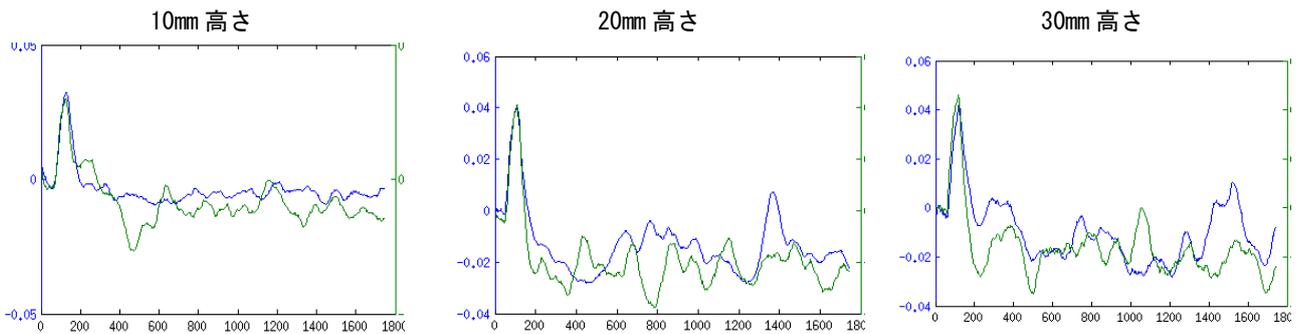


図-3 渦度(青)と東西流速(緑)の時間変化.

渦度は水槽の中心付近 ($r=37.5\text{mm}$ 以内) での空間平均値. 東西流速は $r=37.5\text{mm}$ 上での帯状平均値. いずれも 1 分間の時間平均値. 縦軸は東西流速 [cm/s]. 横軸は時間 [s].

非定常流れ

スピナップ終了以降は複数の渦によって流れ場が形成される. 実験(1)においては, 波数のはっきりとした流れがしばしば見られた. 図-2 の 10 分経過時に示した流れは 600-640 s の間で見られたもので, 波数は 4 である. 実験時間を通して波状の流れが維持されたが, 時間経過によって波数や振幅の変化があった.

図-3 よりスピナップ終了以降は中心付近の渦度は負の値である傾向があり, $r=37.5\text{mm}$ 上の流速は常に東向きであることがわかる. 実験(1)において, 中心付近には負の低い値の渦度が定在している. しかし, 実験(2)や(3)においては, 外周側に存在していた正の渦が中心側に, また反対に中心部に存在していた負の渦が外側に剥離する現象が生じ, 正の渦が水槽の中心を横切ることもあった. 実験(1)と比較すると, スケールの小さな渦が多く, 波数も 3-6 程度の大きい値で上下するようが見られた.

図-4 に東西流速の最大値の時間変化を示す. スピナップ以降での最大東西流速は 10mm, 20mm, 30mm 高さにおいてそれぞれ 0.35cm/s, 0.27cm/s, 0.21cm/s ほどであり, 底面ほど東西流速が小さい傾向が見られる. 底面摩擦, または温度風の影響だと考えられる.

本実験では, 流体の高さによって異なった流れ場が得られた. この結果の地球大気との比較, 異なった条件での解析は今後の課題とする.

謝辞

本研究は MEXT/SICAT, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C), JSPS 科研費 26.1522, JSPS 科研費 15K18118 の成果の一部である.

参考文献

- 1) Fultz, D.: Studies of thermal convection in a rotating cylinder with same implications for large-scale atmospheric motions. *Meteor. Monogr.*, 21, 96-97, 1959.
- 2) Hide, R.: Some experiments on thermal convection in a rotating liquid. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 79, 161, 1953.
- 3) Fowlis, W. W. and Hide, R.: Thermal convection in rotating annulus of liquid: effect of viscosity on the transition between axisymmetric and non-axisymmetric flow regimes. *J. Atmos. Sci.* 22(5), 541-558, 1965.
- 4) Spence T.W and D.fultz.: Radial heat transition spectra and vacillation in an open rotating cylinder. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1261-1285, 1977

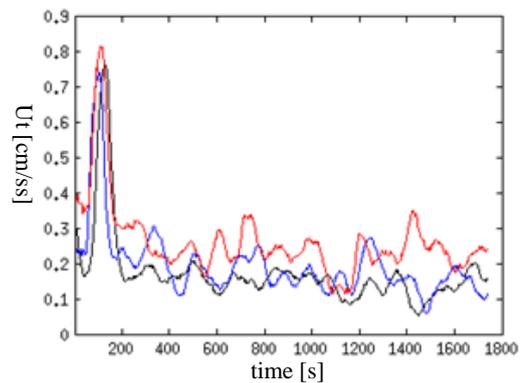


図-4 最大東西流速の時間変化.

レーザー挿入高さ $H=10\text{mm}$, 20mm , 30mm の実験について黒線, 青線, 赤線で示した. いずれも 1 分間の平均値.

- 5) Tamiki, K. and K. Ukaji.: An experimental study of baroclinic flows in an Open cylinder. *Journal of the Meteorological society of japan*, Vo. 73.no. 6, pp. 1079-1085, 1995
- 6) 三沢信彦, 木村竜治: 地表面冷却によって生じる大気循環の流体実験 (液晶による温度の可視化), *可視化情報学会誌*, 10 (39), 277f-277_1, 1990.
- 7) 木村龍治: 差分加熱による回転流体中の対流(回転流の数値), *数理解析研究所講究録*, 1075, 117-126, 1999.
- 8) 三村和男: 地形性ベータ効果を持つ回転水槽実験による極渦の反転: 速度場解析法の開発. *東海大学紀要. 教養学部* 21, 59-76, 1990.
- 9) 三村和男: 傾圧性と惑星規模ベータ効果を合わせ持つ回転水槽実験の展開 (2002 年度学部等研究教育補助金報告). *東海大学紀要. 教養学部* 34, 321-325, 2004.
- 10) 渡部靖憲, 堀井正輝, 新井田靖郎: 遡上波の力学的バランス流れの構造, *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, 69 (2), 2013.
- 11) Keane, R. D., Adrian, R. J., Zhang, Y.: Super-resolution particle imaging velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 6(6), 754, 1995.
- 12) 竹原幸生, 江藤剛治: MLSを導入したPTVによる渦度推定法の提案と風波流速場への適用, *土木学会論文集B*, 65(3), 151-165, 2009.
- 13) 乙部直人, 筆保弘徳, 菅田誠治, 伊賀啓太, 佐藤正樹, 田島俊彦, 佐藤元, 酒井敏, 三村和男, 山田朋人, 北野慈和, 日本気象学会機関紙「天気」の「解説」に投稿中
- 14) 一瀬輪子, 北野慈和, 山田朋人, 渡部靖憲, 泉典洋, 底面の加熱および冷却を伴う回転水槽実験による傾圧不安定波の再現, *土木学会論文集G(環境)*, Vol.71, No.5, I_289-I_294, 2015