

回転水槽を用いた台風壁雲構造の再現実験 Reproduction of Typhoon Wall Cloud Structure in a Rotating Tank

菱沼美咲*1, 筆保弘徳*1, 伊藤耕介*2, 乙部直人*3, 辻野智紀*4, 松岡大祐*5,
Misaki HISHINUMA, Hironori FUDEYASU, Kosuke ITO, Naohito OTOBE,
Satoki TSUJINO, Daisuke Matsuoka

This study observed the vortex Rossby waves (VRW) in a rotating fluid annulus with thermal gradient similar to typhoon inner core. The actual VRW in the typhoon eye appears to rotate counterclockwise in the observations by Himawari-8, but theoretically, the direction of rotation differs between the inside and outside of the wall cloud. By using a rotating fluid annulus and rotating camera over the fluid, simulated VRW rotated clockwise, consistent with the theoretical study.

1. はじめに

台風の内部コア構造は、軸対称構造と非軸対称構造から成り立っている。台風の眼はいくつかのケースにおいて、常に完全な軸対称ではなく、図1のように楕円で非軸対称構造が反時計に回って見える時がある。台風の数値シミュレーション結果を見ると、接線風は下層ほど風が強く、上層ほど風が弱いという鉛直シアが非常に大きい構造をとっていることがわかる(図2)。また、温位の数値シミュレーションの台風内部コア領域を見ると、中心が暖気核であるため、中心ほど暖かいという水平方向にも温度傾度が強いという傾圧性が高い構造になっていることがわかる(図3)。

本来、地球大循環を模擬する目的で行われていた回転水槽実験は傾圧不安定な状況下での惑星ロスビー波の再現が可能である。地球を模擬する場合は、中央水槽に冷水、外側水槽に温水を入れ実験を行うが、その温度を逆転させ、渦度勾配をつけることで、回転水槽で台風の内部コアの構造を再現できる。ホフメラー図(図4)を見ると、時

間がつにつれて左側に動いていることから時計回りに波動が伝播していることがわかる。渦度勾配をつけて実験を行っていることから、この波動は渦ロスビー波を再現した現象であると考えられる。

回転水槽で再現した渦ロスビー波は、台風の中心ほど渦度が大きいという背景場で発生している。しかし、台風の渦度の数値シミュレーション結果を見ると、壁雲付近に渦度のピークがあり、中心と壁雲外側が低くなっていることがわかる。渦度の高い方を右に見るよう基本場の流れに相対的な位相速度をもつ渦ロスビー波は、この渦度勾配によって壁雲内側では反時計回り、壁雲外側では時計回りに動くといえる。しかし、ひまわり8号などの観測では台風は反時計回りに回転しているように見え、時計回りの回転は確認することができない。これは、台風の基本場が反時計回りであり、それを固定されたカメラで観測しているため、時計回りの渦ロスビー波が観測できていないと考えられる。台風構造を再現でき、カメラと水槽を一

*1 横浜国立大学教育学部 hishinuma-msiaki-np@ynu.jp

Faculty of Education, Yokohama National University

*2 琉球大学理学部

Faculty of Science, Ryukyu University

*3 福岡大学理学部

Faculty of Science, Fukuoka University

*4 気象庁気象研究所

Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute

*5 海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

緒に回転することができる二重回転水槽ならば、固定されたカメラで観測できていない渦ロスビー波の動向を観測できるのではないかと、という仮説をたて本研究に着手した。

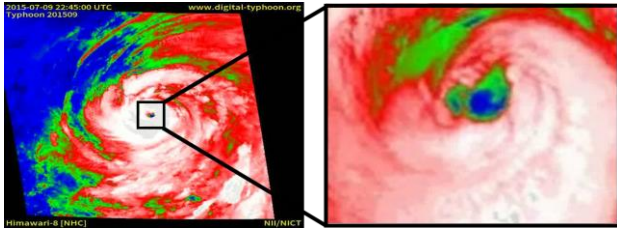


図1：ひまわり8号による時間的・空間的に高解像度な台風の眼の観測。

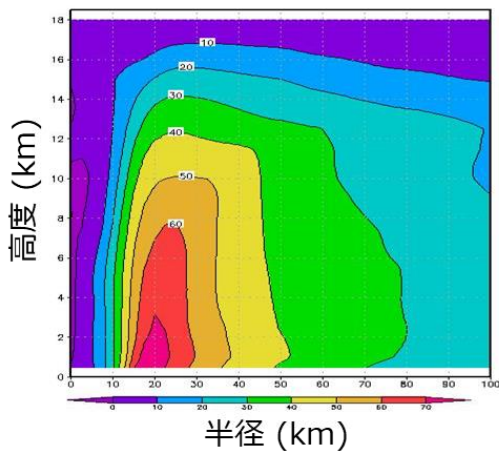


図2：台風の軸対称平均した接線風の半径-鉛直断面図。

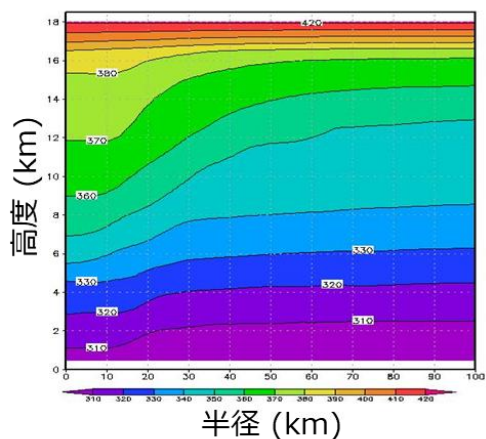


図3：台風の軸対称平均した温位の半径-鉛直断面図。

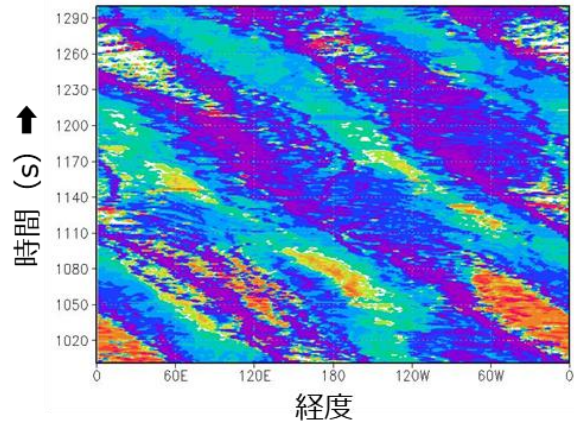


図4：台風模擬の条件で行った回転水槽実験のホフメラー図。横軸に30°，60°，90°を時計の11時，10時，9時方向にとった角度，縦軸に上にいくほど経過を表すように時間をとった。

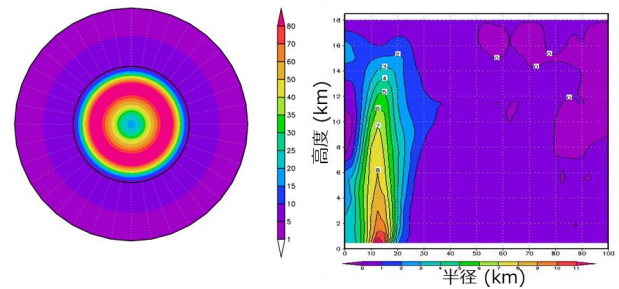


図5：台風の渦度偏差のシミュレーション結果（左：TCM4による5 km高度の半径方向の渦度平均，右：台風の鉛直断面図）

2. 解析手法

横浜国立大学にある二重回転水槽（図6）を用いて回転水槽実験を行い、画像処理、Particle Image Velocimetry (PIV) 解析、GrADS化を行った。

本研究では台風条件下で実験を行うため、従来の回転水槽実験と温度差を逆転させた台風実験（f 実験）、温度を逆転させ地形性β効果をつけた壁雲外側の再現であるβ実験、地形性β効果のつけ方を逆転させ壁雲内側を再現した逆β実験を行った（図7，8）。実験条件は、実験槽の水深を4 cm、内側水槽と外側水槽の温度差を20℃、回転速度を1～12 rpm とし、10分間水槽を回転させた。水槽を回し始めて約3分半で波動が起き始めるため、そこから5分間分のデータを切り取り、Adobe Premiere Pro を用いて画像化し、PIV 解析ソフトを用いて数値化した（図9）。数値化したデータをFortran プログラムで解析し、GrADS で描画した。

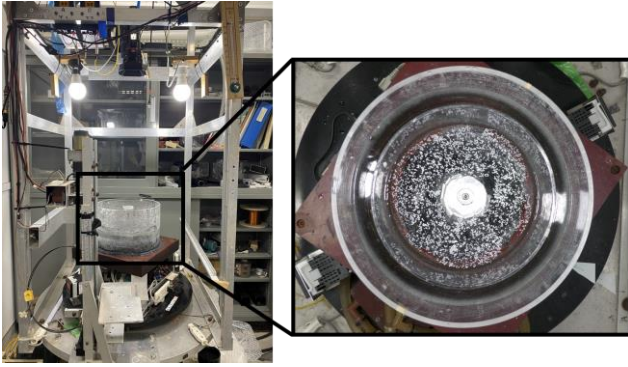


図 6：使用した二重回転水槽（横浜国立大学）

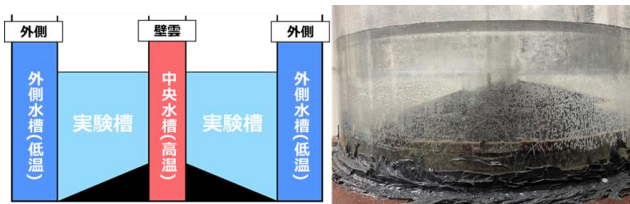


図 7：壁雲外側実験の地形性 β 効果のつけ方（左：模式図，右：実際の様子）

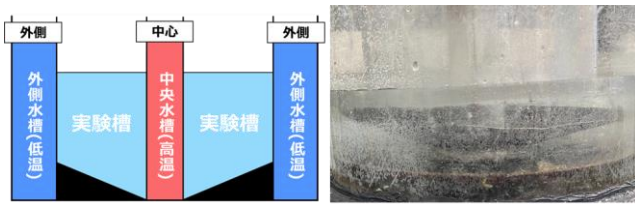


図 8：壁雲内側実験の地形性 β 効果のつけ方（左：模式図，右：実際の様子）

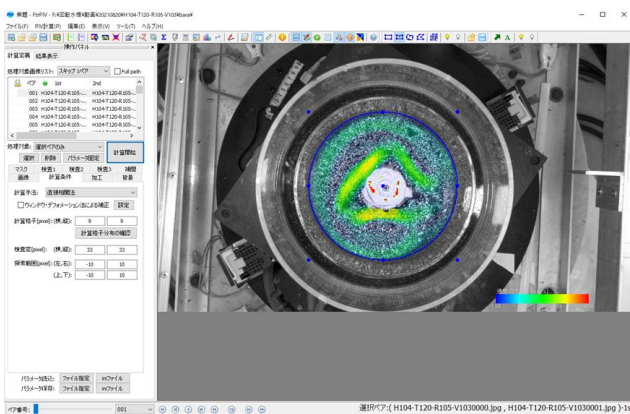


図 9：PIV 解析の解析画面

3. 結果・考察

二重回転水槽で前半をカメラと一緒に回転させ、その後カメラを固定させた β 実験のホフメラー図を示す(図 10). カメラと水槽と一緒に回転させていた前半部分では、時計回りに波動が伝播していることが確認できる. しかし、後半カメラを固定し水槽だけ回転させると、速い速度で波動が反

時計回りに伝播しており、カメラを固定する前に観測できていた時計回りの波動が観測できなくなったという結果を示している.

次に、 f 実験、 β 実験、逆 β 実験を行った結果の流線図(図 11)とホフメラー図(図 12)を示す. 時間がたつにつれて左側に移動しているホフメラー図は波動が時計回りに伝播していることを示し、右側に移動しているホフメラー図は波動が反時計回りに伝播していることを示している.

f 実験は波動が動いていないことがわかる. β 実験の結果からは、波動が 0.07 cm/s の周期で時計回りに伝播していることがわかる. 逆 β 実験の結果からは、波動が 0.01 cm/s の周期で反時計回りに伝播していることがわかる. 複数の実験を行った結果、壁雲外側を模擬した β 実験では波動が時計回りに伝播し、壁雲内側を模擬した逆 β 実験では波動が反時計回りに伝播する傾向が見られた.

これらの結果から、渦ロスビー波が壁雲内側では反時計回りに、壁雲外側では時計回りに伝播するという理論に近い結果を回転水槽実験で得られたといえる. これは、仮説で立てた通り、カメラを回転水槽とともに回転させたことで、反時計回りと時計回りの両方の伝播を確認することができたと考えられる. カメラが固定されている状態での観測では、渦ロスビー波が壁雲外側で時計回りに伝播していても基本場の反時計回りに押し流されているため、観測では全体が反時計回りに伝播しているように見えていると考えられる. 本研究で二重回転水槽を用いてカメラと水槽と一緒に回転させたことで、その問題を解決でき、理論通りの渦ロスビー波の伝播を確認できたと考えられる. しかし、本来の回転水槽は、内側水槽に冷水、外側水槽に温水を入れて実験するものであるため、外側水槽に冷却機能が備わっていない. 本実験では 10 分間水槽を回転させている間に、外側水槽の水温が上がってしまい、温度差 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ という実験設定を保つことができず、それが実験結果に影響を与えていることも考えられる.

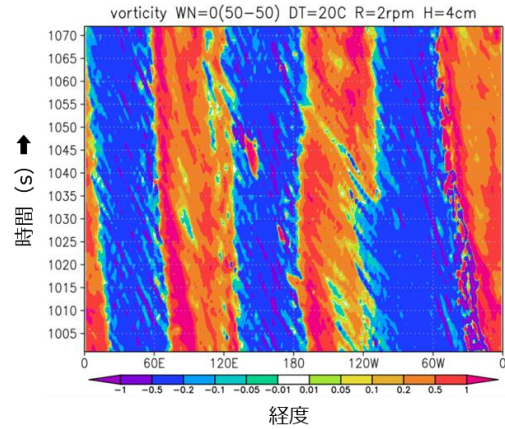
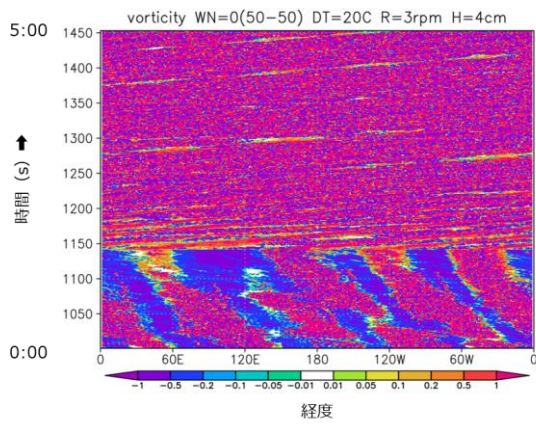


図 10：前半カメラと水槽を一緒に回転させ、後半カメラを固定し水槽だけ回転させた実験のホフメラー図。

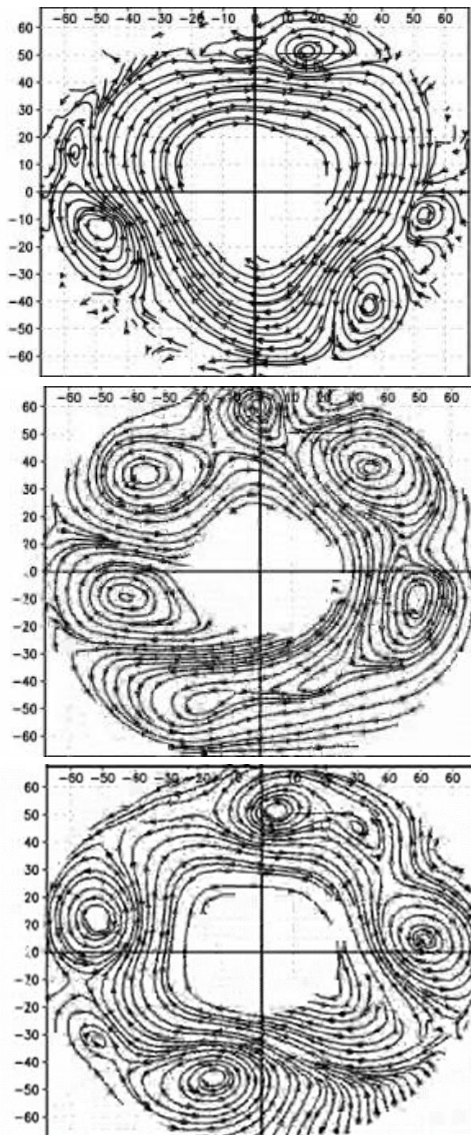


図 11：回転水槽実験の流線図
(上：回転速度 2 rpm の f 実験，中：回転速度 6 rpm の β 実験，下：回転速度 1 rpm の逆 β 実験)

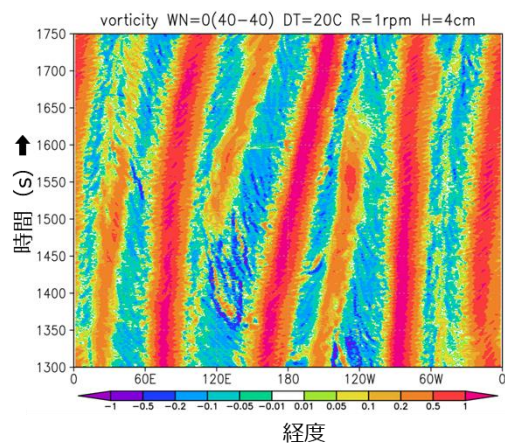
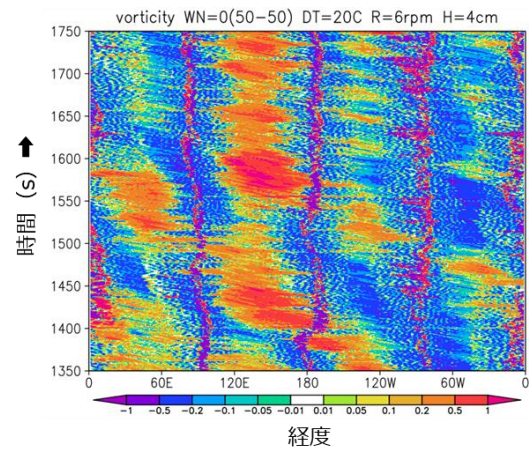


図 12：回転水槽実験のホフメラー図
(上： f 実験，中： β 実験，下：逆 β 実験)

4. まとめ

本研究では、台風構造の条件下で回転水槽実験を行うことにより、渦ロスビー波と類似した現象を再現することができた。また、回転水槽実験で地形性 β 効果を両方向でつけることにより、波動の伝播の方向が壁雲外側を模擬した β 実験では時計回り、壁雲内側を模擬した逆 β 実験では反時計回りであるという傾向を確認することができた。さらに、理論的な研究と一致する渦ロスビー波の伝播を観測するためには、カメラを台風とともに

回し，回転に乗った状態の視点での観測が必要であることがわかった。

今後の展望として，まず回転水槽の温度制御を行えるよう実験装置を改善し，より正確な実験をより多く行っていきたい。また，回転水槽で得られた定性的な結果と，理論に基づいた位相速度を見積もり定量化したものをつきあわせていきたいと考えている。

謝 辞

本研究は，堀之内武先生に有益なご助言を頂きました。日本学術振興会科学研究費補助 19H00705, 21K03658 の支援も受けました。

参 考 文 献

- 板野稔久，2010：渦ロスビー波．*天気*，57，513–516.
- 筆保弘徳，伊藤耕介，乙部直人，佐藤元，2015：回転水槽実験と台風モデルで再現された台風内部コアの非軸対称構造．日本気象学会秋季大会.
- 坪木和久，伊藤耕介，2013：メソ構造．*気象研究ノート*，台風研究の最前線（上），93–126
- Toshihisa Itano, Hirohiko Ishikawa, 2002：Effect of Negative Vorticity on the Formation of Multiple Structure of Natural Vortices . *Journal of the Atmospheric Sciences*, 3254–3262