

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03658

研究課題名（和文）室内実験と深層学習による流体予測モデルの開発と台風多角形壁雲ライフサイクルの解明

研究課題名（英文）Development of a Fluid Prediction Model using Rotating Annulus Experiments and Deep Learning and Elucidation of the Typhoon Polygonal Eye Wall Lifecycle

研究代表者

筆保 弘徳 (Fudeyasu, Hironori)

横浜国立大学・教育学部・教授

研究者番号：00435843

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は台風の非軸対称構造の形成に焦点を当て、回転水槽実験と深層学習を組み合わせた予測モデルの開発に取り組んだ。傾圧不安定を模擬する実験では、異なる回転速度や水深条件下で144回の実験を実施し、非軸対称運動エネルギーの分布を詳細に調査した。粒子画像流速測定法による速度分析とフーリエ解析を用いて波数を算出し、さらにその結果を教師データとした畳み込みニューラルネットワークを用いた波数推定モデルを開発した。このモデルは6クラス分類で高精度を示し、非軸対称構造の予測に寄与する可能性が高い。これらの研究成果は、学会発表5件と学術論文2篇を通じて広く共有された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は台風の非軸対称構造の形成メカニズムを解明し、より正確な台風予測モデルの開発に寄与する可能性がある。特に、回転水槽実験と深層学習を活用した新しいアプローチは、従来の予測手法に比べて精度を大幅に向上させることが期待される。この進展により、台風予測の改善が可能となり、災害対策の効率化や被害の軽減に直接的な影響を及ぼす。社会的な安全と経済的損失の低減に貢献する。また、学術界においては、新たな研究領域を開拓し、気象学の理解を深める契機となる。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the formation of non-axisymmetric structures in typhoons and developed a predictive model combining rotating tank experiments with deep learning. In experiments simulating baroclinic instability, 144 experiments were conducted under varying rotation speeds and water depths to thoroughly investigate the distribution of non-axisymmetric kinetic energy. Velocity analysis using Particle Image Velocimetry and wave number calculation through Fourier analysis were employed. Furthermore, a wave number estimation model using a convolutional neural network, trained with these results, was developed. This model demonstrated high accuracy in 6-class classification and has significant potential to contribute to the prediction of non-axisymmetric structures. These research findings have been widely shared through 5 conference presentations and two journal papers.

研究分野：台風

キーワード：台風非軸対称構造 傾圧不安定 回転水槽実験 深層学習

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

巨視的に台風を見れば軸対称構造を持つが、必ずしも同心円ではなく、多くの台風事例の発達過程において非軸対称構造に変形する。台風は中心に温暖核を持つ渦構造であり、さらに対流圏下層(上層)で接線風速が大きい(小さい)という風速分布を持つため、中緯度傾圧帯と同じ温度風関係を満たしている。時間・空間スケールは小さく、動径方向の温度構造は逆転しているが、台風の壁雲はまさに地球の中緯度傾圧帯であり、そこで発生する非軸対称構造の形成も傾圧不安定の力学で説明できる。

近年の数値シミュレーションによる研究で多角形壁雲などの非軸対称構造の理解は進んでおり、さらに観測研究により急速発達と深く関係が指摘されている(例えば Tsujino and Kuo 2020)。しかし、台風内部は非線形性効果が強く複雑な場であり、数値シミュレーション結果と観測の乖離は大きく、台風強度予測にとっても重要な現象でありながら、現実起きる非軸対称構造形成を予測するまでには至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、台風条件下で行った回転水槽実験の結果を学習データとした深層学習により、力学に依存しない流体予測モデルを開発して、台風多角形壁雲などの非軸対称構造形成をもたらすトリガーを解明することである。前述のように台風の非軸対称構造が傾圧不安定の力学で説明できるのであれば、傾圧不安定の地球大気を模擬する目的の室内実験の一つであった回転水槽実験を用いれば、台風構造を模擬した傾圧不安定波が発生すると仮説を立てた。また、回転水槽実験を行うメリットとして、深層学習の威力を十分に発揮する相当量の学習データを作成できる。本研究では2つのアプローチを分けて研究を進める。第一アプローチとして、台風構造に基づいた条件での回転水槽実験を実施して、仮説を立証する。特に、台風構造に基づいた条件での回転水槽実験は、従来の地球大気とは異なるので、実験結果がどのようになるかは分かっていない。台風構造を模擬するとしても、どういった実験設定(パラメータ)を設定することで軸対称流から定常的な傾圧不安定波が起きるのか、本当に仮説が正しく傾圧不安定波が発生するのか、実験を繰り返して調べる。第二アプローチとしては、その回転水槽実験の結果を学習データに用いた深層学習を行い、統計学的アプローチによる流体予測モデルを開発する。特に回転水槽実験から得られる速度場から、最も運動エネルギーが卓越する波数を推定するモデルを構築することにより、傾圧不安定波発生の予測可能性を調べる(というのは言い過ぎ、というかあまりよく分かっていないので適当に修正お願いします)。

3. 研究の方法

本研究は、研究分担者とともに、それぞれのアプローチを段階的に進めた。

(1) 学習データの作成 台風条件下での回転水槽実験の実施

通常の回転水槽実験で行われてきた水槽の底面を平らにした実験(本研究では「フラット実験」と呼ぶ)に加えて、水槽底面に傾斜を設置することによって、台風内部コア領域の渦度勾配の変化を再現した実験を追加した。回転水槽内側に向かって高くなる傾斜は台風外側 - 壁雲領域(本研究では「地形性 実験」と呼ぶ)を模擬し、水槽外側に向かって高くなる傾斜は壁雲 - 台風中心流域(「逆地形性 実験」と呼ぶ)を模擬する(図1)。傾斜はそれぞれ高さ2 cmと4 cm用意し、フラットの5条件を、さらに、中央と外側の温度差を10、20、水深は4 cm, 6 cm, 回転速度は1 rpm, 3 rpm, 5 rpm, 7 rpm, 9 rpm, 11 rpmと実験パラメータを変えて、全部で144条件を行った。

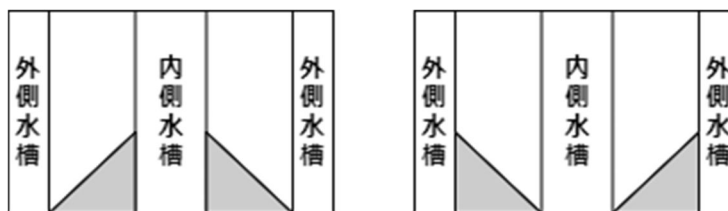


図1: 本研究で行った回転水槽を横から見たときの模式図。(左)地形性効果,(右)逆地形性効果をつけた場合の底面の様子。

回転水槽実験を実施し、実験水槽表面の様子を5~10分(0.33秒間隔)で観測し、その結果を解析した。解析手法としては、実験動画を画像化し、その画像を使用し粒子画像流速測定法(PIV)によって動画を定量化した。定量化した速度分布から運動エネルギー(Kinetic Energy; KE)を見積もり、軸対称運動エネルギー(MKE) + 非軸対称運動エネルギー(EKE)、さらにフーリエ解析による波数分解から、それぞれ波数ごとの運動エネルギーの算出をした。

(2) 方程式系非依存型の流体予測モデルの開発

回転水槽実験によって得られた画像から波数を予測する機械学習モデルを構築した。機械学習アーキテクチャとして、畳み込み深層ニューラルネットワークの一種であるResNetを選択した。ResNetは、学習時の誤差逆伝播における勾配消失問題を解決するために、残差接続(スキ

ップ接続)を導入したアーキテクチャである。入力データとして速度2成分(接線風,動径風)を与え,卓越する波数を推定するクラス分類問題としてモデルの学習を行った。卓越波数の出力クラスとして,0,1,2,3,4,5の6つを定義した。全873個の学習データのうち,6割を訓練用,2割を検証用,2割をテスト用に分割し,検証用データに対する予測誤差が最小化するように,訓練データを用いたモデルの学習を行った。バッチサイズは30,エポック数は200,学習率は0.001とした。また,過学習を回避するため,10エポック連続で誤差が減少しなかった場合に,学習終了とするEarly Stoppingを導入した。

4. 研究成果

(1) 本研究で得られた主要な研究成果は以下の2点にまとめられる

台風構造を模擬した回転水槽実験結果の波動分類
速度分布からの卓越波数推定モデルの構築

台風構造を模擬した回転水槽実験結果の波動分類

144条件の回転水槽実験で,さまざまな運動が観測された。その運動を定量的に調べるために,定量化された運動分布から非軸対称運動と軸対称運動に分解する。さらに,非軸対称運動の中に不規則運動と規則運動があり,規則運動は定常波動やヴァシレーションを指す。様々な実験結果からそれぞれの定義は図2とした。軸対称流運動は,KEに対するMKEの割合が60%以上,定常的な傾圧不安定波はKEに対する1つの波数EKEの割合が20%以上且つMKEの割合が60%以下,不規則運動はKEに対するすべての波数EKEの割合が20%以下且つMKEの割合が60%以下とした。その結果,表1のようにある条件によって31事例で傾圧不安定波が発生していたため,仮説は正しいと認められた。

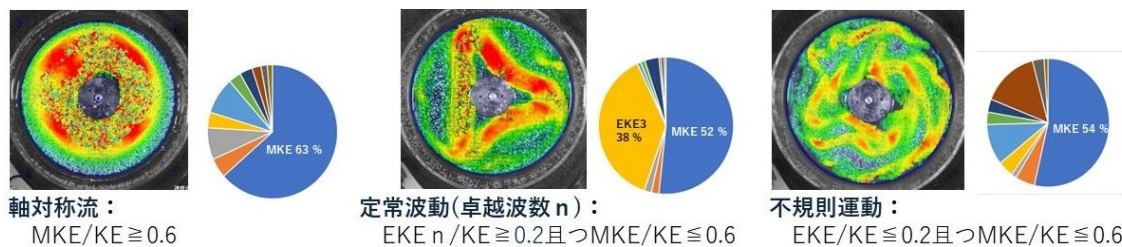


図2: 本研究で定義した回転水槽実験の水面運動の例と運動エネルギーの分布。(左)軸対称流の例,(中央)定常波動の例,(右)不規則運動の例。

表1では,各条件の実験で卓越した波数も示している。卓越波数を分類した定義は上記のとおりである。結果より,回転速度の増加とともに卓越波数も増加傾向にあり,主に1rpmでは軸対称流,9,11rpmでは波動が崩壊し不規則運動が発生していた。この結果は,底面に地形性効果及び逆地形性効果を受けた場合でも同様の傾向が見られ,先行研究との整合性がとれた。また,底面の条件別で比較してみると,逆地形性効果実験においては,地形性効果実験と比べ定常波動が発生しづらいことが分かった。これは,外側が高くなる傾斜が流体の対流を阻害する形になっており,冷やされた流体が水槽の底に滞留し,うまく波動が生じないためであると考えられる。

表1: 本研究で行った回転水槽実験の分類

回転速度	水深	20		10		20		10		20		10		20		10		
		6 cm	6 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	
1	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	2	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
	3	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
	4	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
	5	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
	6	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流
軸対称流		軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
7	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
8	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
9	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
10	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
11	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	
	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	軸対称流	

水槽の回転速度と運動エネルギーの平均値との関係を調べた。回転速度の増加とともに運動エネルギーの平均値が減少する傾向にある。回転速度1rpmなど,定常波動のない軸対称流が卓越する条件では運動エネルギーが大きい。これは,どの底面条件においても同様の傾向がある。これは,与える運動エネルギーは回転速度が大きいほど大きくなるはずであるが,そのエネルギーがより小さな渦として粒子に影響を与えてしまい,波数は多くなるものの運動エネルギーは小さく算出されてしまうためと考える。

以上の結果より,全96条件で実験を行い,それぞれの波数,回転速度,運動エネルギーを確認した。回転速度と卓越波数の関係では,回転速度の増加とともに卓越波数も増加傾向にあり,主に1rpmでは軸対称流,9,11rpmでは波動が崩壊し不規則運動が発生していた。これはどの

底面条件でも同様の傾向が見られた。底面の形状に着目してみると、逆地形性 効果実験では地形性 効果実験と比べ定常波動が生じにくいことが分かった。また回転速度と運動エネルギーの関係では、回転速度の増加とともに運動エネルギーの平均値が減少する傾向にあった。回転速度 1 rpm など、定常波動のない軸対称流が卓越する条件では、蛇行することのない分、運動エネルギーが大きくなった。

速度分布からの卓越波数推定モデルの構築

873 個の学習データのうち 2 割をテストデータとして用い、機械学習による波数推定モデルの精度評価を行った。6 クラス分類の結果を混同行列として図 3 に示す。波数 0 および波数 4 については、それぞれ 25 個および 41 個のデータのうち全てを正しく波数 0 または波数 4 であると推定できている。また、波数 1 および波数 2 については、共にテストデータのうち 1 つのみを誤推定している。特に波数 1 の場合は波数 2 であると、波数 2 の場合は波数 1 であるとの誤推定した結果である。波数 3 および波数 5 については、それぞれ 4 つおよび 5 つのデータとともに波数 1 であると誤推定するという結果となった。まとめると、波数 0 および波数 4 については正解率 100%、波数 1 および波数 2 はそれぞれ 96.1% および 96.0%、波数 3 および波数 5 についてはそれぞれ 85.7% および 83.9% となった。

上記のように、回転水槽実験の結果を学習データに用いた深層学習によって、予測精度のばらつきは見られるものの、流体場の速度分布構造から卓越する波数を予測するモデルが構築された。において示された結果と合わせることで、流体場から渦の規則性や傾圧不安定波を予測可能であることが示されたと言える。

< 引用文献 >

Tsujino, S. and H.-C. Kuo, 2020: Potential vorticity mixing and rapid intensification in the numerically simulated Supertyphoon Haiyan (2013). J. Atmos. Sci., 77, 2067-2090. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0219.1>

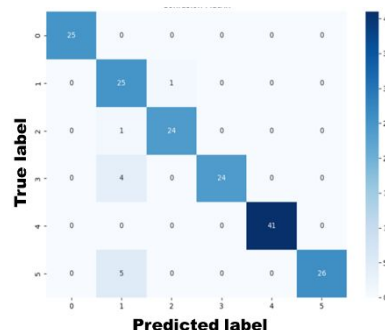


図 3: テストデータに対する正解ラベルおよび推定ラベル。

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 2件）

1. 著者名 Fudeyasu, H., U. Shimada, Y. Oikawa, H. Eito, A. Wada, R. Yoshida, and T. Horinouchi	4. 巻 100
2. 論文標題 Contributions of the large-scale environment to the typhoon genesis of Faxai (2019)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugiyama Daisuke, Onishi Ryo, Fudeyasu Hironori	4. 巻 19
2. 論文標題 SolaCam: A Deep Learning Model for Solar Radiation Estimation Using Consumer Cameras	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 246 ~ 252
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2023-032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菱沼美咲, 筆保弘徳, 辻野智紀, 伊藤耕介, 乙部直人, 松岡大祐
2. 発表標題 回転水槽を用いた台風内部構造の再現実験
3. 学会等名 日本気象学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菱沼美咲, 筆保弘徳, 辻野智紀, 伊藤耕介, 乙部直人, 松岡大祐
2. 発表標題 回転水槽を用いた台風内部構造の模擬実験
3. 学会等名 大槌シンポジウム2022集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菱沼美咲, 筆保弘徳, 辻野智紀, 伊藤耕介, 乙部直人, 松岡大祐
2. 発表標題 台風内部コアを模擬した回転水槽実験における波動の定量化
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菱沼美咲, 筆保弘徳, 伊藤耕介, 乙部直人, 辻野智紀, 松岡大祐
2. 発表標題 回転水槽実験装置を用いた台風内部構造の模擬実験
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大橋明日香, 菱沼美咲, 筆保弘徳, 乙部直人, 松岡大祐
2. 発表標題 地形性 効果と温度逆転条件での回転水槽実験
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本自然災害学会 編 筆保弘徳他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 806
3. 書名 自然災害科学・防災の百科事典	

〔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
研究 分 担 者	松岡 大祐 (Matsuoka Daisuke) (80543230)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (情報エンジニアリングプログラム)・グループリーダー (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関