

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800262

研究課題名(和文) 回転水槽実験を用いた台風コア領域構造の力学に関する研究

研究課題名(英文) Study on the genesis processes of tropical cyclones

## 研究代表者

筆保 弘徳 (Fudeyasu, Hironori)

横浜国立大学・教育人間科学部・准教授

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)：本研究では、まず、これまで難しかった回転水槽実験で発生する水面運動の定量化と、運動パターンを定量的に分類する解析手法と定義を提案した。粒子画像流速測定法により運動場の定量化を行い、運動エネルギーを算出した。この運動エネルギーを用いた定義により、すべての実験の運動パターンを客観的に分類した。今後は、まだ成功していない回転水槽実験を用いた台風コア領域の再現を目指し、本研究での手法を適応して台風の非軸対称構造の形成メカニズム解明を行う。

研究成果の概要(英文)：This study firstly developed a method and definitions which quantitatively detects the features of baroclinic waves observed in the experiments with a differentially heated rotating fluid annulus. The Particle Image Velocimetry (PIV) provided the high-resolution digital data of the surface flow in the experiments. Our quantitative definitions using the calculated kinetic energy captured the surface flow pattern in the experiments. Future work will involve the development of the experiments to form the tropical cyclones, and our method could be applied to provide new and useful insights into the inner core structure of tropical cyclones.

研究分野：気象学

キーワード：台風内部コア構造 回転水槽実験 傾圧不安定波

## 1. 研究開始当初の背景

平成 23 年台風 12 号により 90 人以上の死者・行方不明者と多くの被災者が出てしまったように、台風が脅威をもたらす自然現象であることは今も変わりはない。計算技術の進歩や地球規模観測網の拡充により、台風進路が精度良く予報できる現代でも、台風強度の予報精度は 1990 年代以降であまり向上していない。これは、台風内部の微細構造の理解が進んでいないという背景を表している。

申請者は、台風モデルを用いて、理想的な環境場で発達する台風の数値シミュレーションを行ってきた。台風コア領域は軸対称構造を持つが、壁雲は必ずしも同心円ではなく、多くの場合は多角形に変形する。これまでの理解では、大気境界層は地表摩擦による内向き流(インフロー)、壁雲で上昇流、対流圏上層で外向き流(アウトフロー)の二次循環が発生していると考えられてきた。しかし、申請者の研究(Fudeyasu and Wang 2011)により、従来の二次循環に加えて、対流圏中層でインフローが発生することが再現された。そして、Sawyer-Eliassen 理論方程式により、対流圏上層とは別の温暖域が中層インフローの発生要因になると指摘した。この中層インフローによる運動量輸送は、強度や壁雲変形にも関係があると示唆している。

## 2. 研究の目的

Sawyer-Eliassen 理論方程式は、中緯度におけるジェット軸のまわりで発生する二次循環を力学的に解釈する診断式である。また、台風は中心に温暖核を持つ渦であることを考えれば、下層(上層)で接線風速が最大(最小)という分布は、中緯度傾圧帯における温度風関係を満たしている。以上の根拠から、本研究では、時間・空間スケールは異なり温度構造は逆転(台風中心は高温域)しているが、台風コア領域の内部構造は地球の大循環と類似しており(台風中心が極に対応した循環)、多角形の壁雲形成や中層インフローは中緯度傾圧帯の力学で説明ができる、と作業仮説を立てた。

上記の作業仮説が正しければ、半世紀前より中緯度の傾圧不安定論の構築に用いられてきた回転水槽実験は、台風内部構造の再現や力学的理解に有用な手法となり得る。本研究では、回転水槽装置に現代の最先端技術を駆使して、室内実験により発生する傾圧不安定波の定量化と、回転水槽の中央部を高温域にするという、これまでの実験とは逆転した温度傾度の設定を行い、台風内部の軸対称・非軸対称構造の再現を行う。そして、回転水槽実験を繰り返し、仮説検証を蓄積し、中緯度傾圧帯の力学と相違点を示しながら、普遍的なメカニズムを提案する。最終的に、まだ成し遂げられていない台風内部構造力学の構築を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究の第一段階として、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開発する。本研究代表者は、すでに、回転水槽装置を保有している。実験の定量化には、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry; PIV)を用いる。

実験条件を変えた回転水槽実験を複数回繰り返し、すべての実験結果に開発した手法を適応させて、多くの実験で得られた水面運動を統計的に把握する。そして、客観的に回転流体の水面運動パターンを分類する定量的な定義を作成し、検証する。

最後に、台風コア領域を想定し、水槽の中央は高温域、外側は低温域に設定し、どのような条件の時に台風コアの非軸対称構造が発生するかを整理する。中緯度傾圧帯の力学と相違点を示しながら、台風内部構造の形成メカニズムを提案する。

## 4. 研究成果

### (1) 水槽実験の定量化技術の開発

図 1 は、典型的な 3 つの実験結果における、PIV より得られた水面運動の流線(左)である。実験 1 は、明瞭な傾圧不安定波が確認できる実験である。

得られた速度分布を円筒座標系に直し、全運動エネルギー(Kinetic Energy; KE)を算出する。図 2(上段)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。スピニング期間(約 7 分)以降で定常状態となり、KE は約  $9.0 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$  で変動が小さくなる。さらに、円筒座標系の速度分布を軸対称平均成分と非軸対称成分に分解する。そして、軸対称成分からもとまる運動エネルギー(Mean Kinetic Energy; MKE)、非軸対称成分からもとまる渦運動エネルギー(Eddy Kinetic Energy; EKE)を算出する。図 2(中段)では、実験 1 で得られたそれぞれの運動エネルギー量の時間変化を示す。図で 2 項と示した計算上算出されるエネルギーは、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、スピニング期間で変動が大きいものの、それ以降の MKE は約  $2.3 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ 、EKE は約  $6.8 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$  で変動が小さくなる。

さらに、非軸対称成分の運動場にフーリエ解析を施し、波数別の運動場を算出し、波数別 EKE に分解する。図 2(下段)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。波数 3 の EKE (EKE3 と記す) 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 1(右)は、約 10 分間で平均した各運動エネルギー量を KE の中で割合で示している。実験 1(上段)では、EKE は KE の 68% であり、

MKE 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 が卓越波数だと定量的に同定できる。卓越波数の高調波である EKE6 の比率も大きい。卓越波の隣の波数（サイドバンド）である EKE2 や EKE4 は小さい。

傾圧不安定波が発生していない円周運動が支配的な実験 2(中段)は、MKE が KE の 96% と占めている。実験 3(下段)は、いびつな水面運動が発生した実験であるが、比率で見ると、EKE は 60% と大きい。EKE のなかでは EKE2 が最も大きい。EKE3 もそれに匹敵するほど大きく、EKE1 や EKE4 のサイドバンドも無視できない。いびつな水面運動が発生した実験は、複数の波数の波動が重なって発生していると理解できる。

このように、本研究で開発した波数別渦運動エネルギー量の解析方法は、全ての回転水槽実験の結果を定量的に議論するうえで有効な手法となる。特に、目視での観察では難しいサイドバンドの定量化は、新たな知見をもたらすと考えられる。

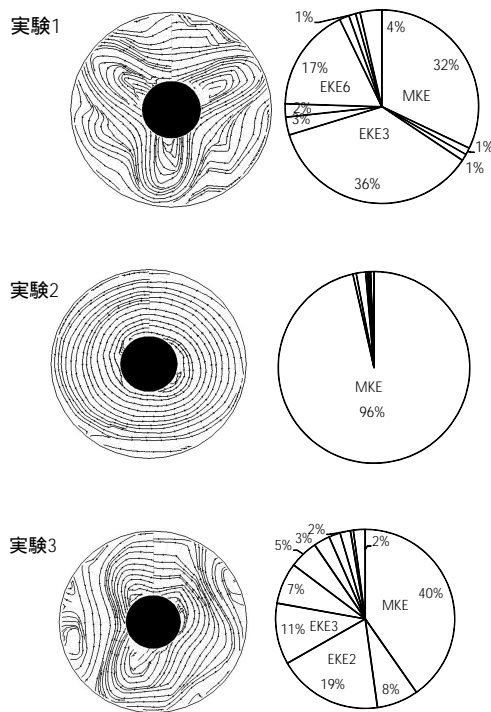


図 1 典型的な実験 1 (上段)、2 (中段)、3 (下段) の、(左)実験開始から 600 秒後の流線分布と (右)回転開始からの時間 (480 ~ 600 秒) で平均した KE 中での MKE と各波数 EKE の割合。右回りに、MKE、波数 1 から 9EKE、波数 10 以上の合計の EKE の割合。

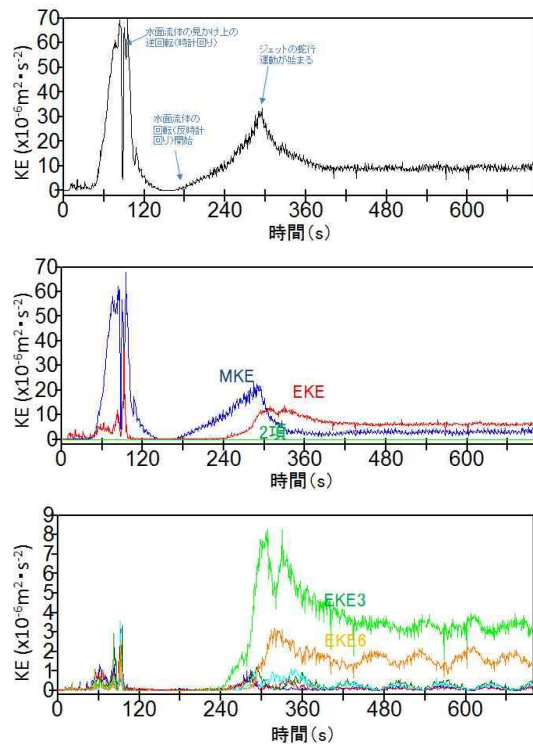


図 2 実験 1 の実験槽中央付近で平均した (a)KE の時間変化、(b)MKE(青)と EKE(赤)と 2 項(緑)、(c)EKE の波数 1~6 の EKE。単位は  $\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

## (2) 水槽実験の統計解析

本研究では、水平温度差・回転速度・水深の 3 つの実験条件を変えた回転水槽実験を 420 回行い、すべての実験結果に開発した定量化手法を適応させた。そして、多くの実験で得られた水面運動を統計的に把握し、定量的な定義を設けて、客観的に回転流体の水面運動パターンを分類する。

前述の結果で示したように、回転水槽実験では、主に 3 つの水面運動パターンが確認されている。実験 2 のように円周運動が支配的な運動は「軸対称運動」、実験 1 のように明瞭な傾圧不安定波が発生した運動は「非軸対称で規則運動」、実験 3 のようにいびつで時間変化する運動は「非軸対称で不規則運動」である。そこで本研究は、運動エネルギー比率の解析を用いた以下のような定量的定義を設けた。

軸対称運動：KE に占める MKE が 80% 以上。

非軸対称で規則運動：KE に占める EKE が 20% 以上で、最も大きい EKE を卓越波数とすると、そのサイドバンドの EKE が 5% 未満。

非軸対称で不規則運動：KE に占める EKE が 20% 以上で、卓越波数のサイドバンドの EKE が 5% 以上。

この定量的定義により、本研究で行った実

験結果を客観的に分類することができた。図3はFowlis and Hide (1965)のレジーム・ダイアグラム上に、本研究で定量的に解析した実験結果のプロットを重ねた図である。無次元パラメータの算出は、Fowlis and Hide (1965)の式を使用している。図3では、図の左上から右下に向かって、運動状態が軸対称流運動、規則運動、不規則運動へとおおまかに遷移している。これは先行研究で報告されたレジーム・ダイアグラムの傾向と一致している。レジーム・ダイアグラムの境界線が本研究のプロットと重ならないため比較が難しいが、軸対称運動と非軸対称運動の遷移領域がおおむね一致していることが分かる。比較すると、規則運動のプロットと不規則運動のプロットが重なり、非軸対称運動領域の中で、規則運動と不規則運動がほぼ同じ領域に分布している結果となった。これは、波動パターンの遷移領域(波数が2から3に移り変わるヒステリシス領域)で発生した複雑な運動を不規則運動に分類したことが原因の1つだと考えられる。また、先行研究と整合性が高い実験は、水深が2、4、6 cm、水平温度差5、10、15の実験であった。実験条件において水深が8 cm以上、水平温度差が20以上になると、先行研究のダイアグラムと不整合な結果が増加した。回転速度による不整合への影響は見られなかった。

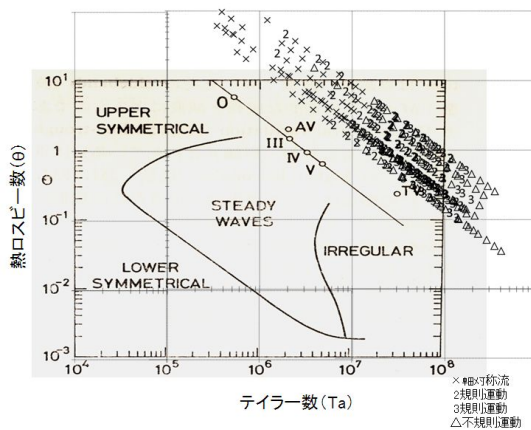


図3 Fowlis and Hide (1965)のレジーム・ダイアグラム上に本研究で定量的に分類した実験結果をプロットして比較した図。×は軸対称運動、2は規則運動で卓越波数2、3は規則運動で卓越波数3、Δは不規則運動。

### (3) 台風コア構造の実験

台風コア領域に想定し、従来とは異なる水槽の中央は高温域、外側は低温域に設定した。複数回の実験を繰り返したが、台風の非軸対象構造は発生しなかった。台風構造と比べると、水槽の半径方向と温度差に問題があると考察している。さらに、回転速度も現実の台風と比べて遅い。今後は、実験装置の改良を重ねて、ひきつづき、台風コア構造の再現を目指す。

### <引用文献>

Fudeyasu, H., and Y. Wang, Contribution by balanced dynamics to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer core spin-up process. J. Atmos. Sci., 68, 2011, 430-449.  
Fowlis, W.W. and R. Hide, Thermal Convection in a rotating annulus of liquid: Effect of viscosity on the transition between axisymmetric and non-axisymmetric flow regimes. J. Atmos. Sci., 22, 1965, 541-558.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計2件)

Fudeyasu, H., S. Hirose, H. Yoshioka, R. Kumazawa, and S. Yamasaki, 2015: A global view of the landfall characteristics of tropical cyclones, TC Research and Review, 3, 178-192 (<http://tcrr.typhoon.gov.cn/EN/abstract/abstract84.shtml>)  
筆保弘徳, 舛田あゆみ、乙部直人、熊澤里枝、西野耕一, 2014: 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, ながれマルチメディア (<http://www2.nagare.or.jp/mm/2014/Fudeyasu-Revise-20150515/index.html>)

#### [学会発表](計8件)

筆保弘徳, 山崎聖太, 台風ノモグラム、台風セミナー、東京、2014年12月15日  
筆保弘徳, 舛田あゆみ、乙部直人、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、気象学会2014年秋季大会、博多、2014年10月22日  
筆保弘徳, Yuqing WANG, 大内和良、山田洋平、那須野智江、佐藤正樹、HOW DO WET ENVIRONMENTS AFFECT THE SIZE OF TROPICAL CYCLONES?, 熱帯気象研究会、富山、2014年9月11日  
舛田あゆみ、筆保弘徳、乙部直人、回転水槽実験で観測される波動挙動の定量化、日本気象学会2014年度春季大会、横浜、2014年5月24日  
筆保弘徳、清原康友、大橋唯太、桑形恒男、森山文晶、局地風広戸風の発生に対する台風の影響、日本地球惑星科学連合2014年大会、横浜、2014年4月28日  
筆保弘徳、舛田あゆみ、乙部直人、回転水槽実験で観測される複雑な波動の定量化、気象学会2013年秋季大会、仙台、2013年11月21日  
筆保弘徳、茂木耕作、三好建正、榎本剛、

伊藤耕介、台風発生予報の実現に向けて、  
気象学会 2013 年春季大会、東京、2013  
年 5 月 18 日

舩田あゆみ、筆保弘徳、二重回転円筒水  
槽における波動現象の研究 ~PIVによる  
波動の可視化 と検出した流速の考察 ~、  
気象学会 2013 年春季大会、東京、2013  
年 5 月 16 日

〔図書〕(計 4 件)

筆保弘徳(監修・著)、岩槻秀明、今井明  
子(著)、技術評論社、気象の図鑑、2014  
筆保弘徳、伊藤耕助、山口宗彦、朝倉書  
店、台風の正体、2014

筆保弘徳(編)、川瀬宏明(編著)、著者  
梶川義幸、高谷康太郎、堀正岳、竹村  
俊彦、竹下秀(著)、ベレ出版、異常気象  
と気候変動についてわかっていることい  
ないこと、ようこそ、そらの研究室へ!、  
2014

筆保弘徳(著) 他、SAMA 企画、季刊理  
科の探検 RikaTan2014 冬号、2014

〔その他〕

ホームページ

<http://www.fudeyasu.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

筆保 弘徳 (FUDEYASU HIRONORI)

横浜国立大学・教育人間科学部・准教授

研究者番号：00435843