

コリオリの力の台風への影響を正しく理解するための試行

島畑 あゆみ¹⁾・三野 弘文²⁾

¹⁾ 千葉大学大学院総合国際学位プログラム ²⁾ 千葉大学大学院国際学術研究院

Attempts to properly understand the effects of Coriolis forces on typhoons

SHIMAHATA Ayumi and MINO Hirofumi

要旨

コリオリの力は地球の自転によって地球上空を移動する物体に対して働く慣性力であり、進行方向に対し北半球では右方向、南半球では左方向に働く。この力の働きについて、直進する複数の物体がコリオリの力を受け、台風の渦状になっている様子を実際に記録した事例はあまり見られない。そこで本研究では、コリオリの力がどのように渦を形成していくのかを実験で視覚的に理解できることを目標に、複数の物体が直進する映像を使用し、それを回転するカメラで撮影する実験を行った。得られた結果より、台風の渦と同様な動きをする物体の進路形成について考察した。

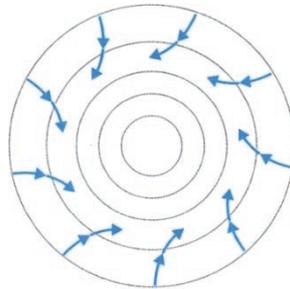
キーワード

コリオリの力、台風、科学理解、再現実験

1. 序論

コリオリの力（コリオリ効果）は回転する座標上を移動する物体に対して働く見かけ上の力（慣性力）であり、地球上を移動する物体の場合、進行方向に対して北半球では右方向（時計回り）、南半球では左方向（反時計回り）に働く。コリオリの力による現象として挙げられるものとして、大砲の弾道が標的からわずかにずれるというものがある。北半球で赤道に向けて大砲を撃った場合、地球上から見ている観測者は地球の自転により常に移動しているため、弾が少しずつ進行方向に向かって右向きに流されていくように見える。一方、宇宙から見た場合観測者は移動していないため、弾は直進していることが確認できる。また、南半球で赤道に向けて大砲を撃った場合は自転による回転方向が反対になるため、地球上の観測者からは弾が進行方向に向かって左向きに流されていくように見えることになる。

また、コリオリの力が確認できる例として、台風の渦の方向が北半球では左回り、南半球では右回りになる現象がある。この力の働きについて、一般的には図1のような模式図で示されることが多いが、直進する複数の物体がコリオリの力を受け、台風の渦状になっている様子を実際に記録した事例はあまり見られない。そこで本研究では、コリオリの力がどのように渦を形成していくのかを実験で視覚的に理解できることを目標とし、複数の物体が直進する映像を回転するカメラで撮影する手法を使い、コリオリの力と台風の渦形成の関係について考察することとした。



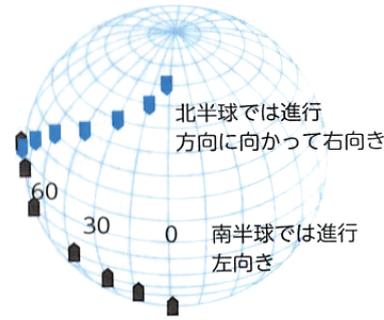
(図1) 上空から見た台風の渦についての一般的な説明（涌井、2015）

2. 理論

コリオリの力は慣性力的一种であり、自転する地球上など、回転する座標系の上で働く見かけ上の力である。この力は物体の進行方向に対して直角に働き、北半球では右向きに、南半球では左向きに働く（図2）。式では物体の質量を m 、速度を v 、自転の角速度を ω とした場合、

$$F = 2mv\omega$$

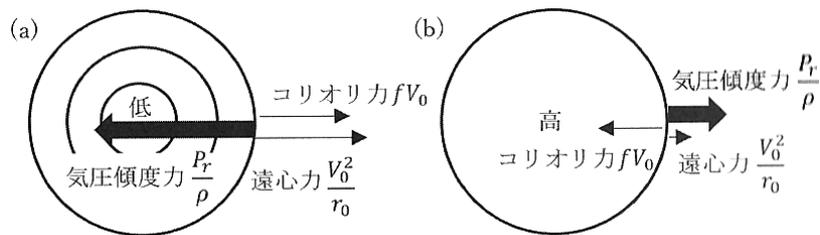
と表せる。



(図2) コリオリの力の向き (涌井、2015)

台風の渦の回転方向もコリオリの力の影響が存在する。一般的には図1のような模式図と併せ、地球の自転の影響で北半球の上空では空気の進行方向に向かって右方向、南半球の上空では左方向に逸れる力を受け、北半球では反時計回り、南半球では時計回りに渦を巻く。しかし、実際の台風の渦はコリオリの力だけでなく、気圧傾度力と遠心力も合わせることにより正確な説明がなされる (稲津、2022)。

図3は北半球における低気圧及び高気圧の周囲に働く力を模式図で示している。低気圧では反時計回り、高気圧では時計回りの風の流れがあるとして、図3 (a) (b) それぞれのコリオリの力の方向も理解することができる。模式図では、等圧線上に沿った風の存在を想定しているが、これは地衡風と呼ばれ、コリオリの力と気圧傾度力の釣り合いである地衡風平衡において吹く風と定義されている。台風などの低気圧の場合では遠心力と外向き (右向き) に働くコリオリの力の和に比べて内向きの気圧傾度力が大きいため、地表付近では内側に吸い込まれるような風の流れとなる。また、高気圧の場合、地表付近では内向き (右向き) に働くコリオリの力に比べ、外向きの気圧傾度力と遠心力の和が大きくなるため外向きに吹き出すような風の流れとなる。



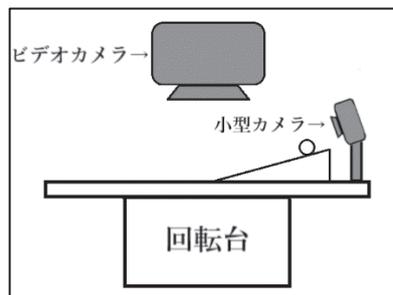
(図3) 気圧傾度力、コリオリの力、遠心力の釣り合いの様子 (稲津、2022)

(a) 低気圧、(b) 高気圧

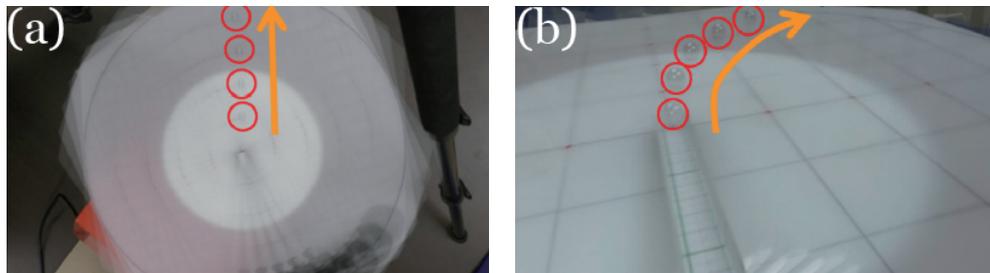
3. 実験結果と考察

図4に示すように直径50 cmの回転台と回転台上を中心から等速直線運動する鉄球を使用した、Glessmerほか (2018) などでも用いられている一般的な手法でコリオリの力を

観測する実験（以降、実験1とする）を行った。鉄球を転がす際、ガイド付きスロープを使用することで、スロープ下端である回転台中心からの等速直線運動の試行を安定して行えるようにした（ただし、スロープが緩やかであったり、回転速度が速い場合は遠心力で鉄球がスロープと逆向きに転がるため注意が必要）。鉄球の速度 v の値が十分に大きい場合には、上空からの視点では直進する鉄球が、回転台の視点では右に曲がっていくというコリオリの力の理論に沿った結果が得られた（図5）。この実験は、安価で視点が分かりやすく、鉄球の速度 v が十分に大きい場合にはコリオリの力が働く様子を実際に観察することが可能であるが、その一方で、速度 v の値が小さい場合には、鉄球が回転台との摩擦を受けて上空からの視点でも等速直線運動とならなかったことが課題となった。



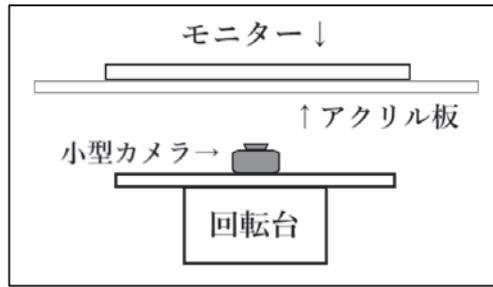
(図4) 実験1の模式図



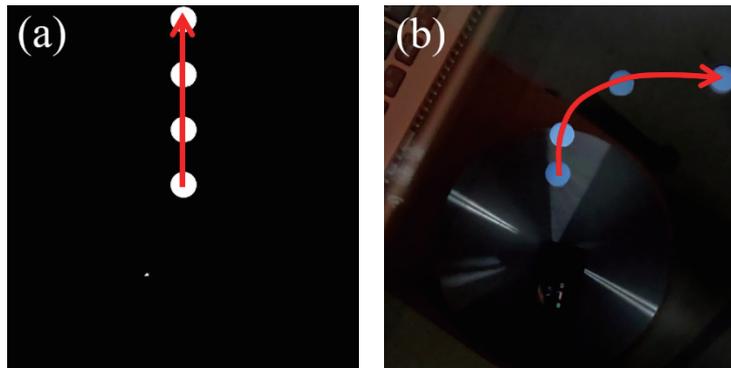
(図5) 実験1の結果 ($\omega=1.35 \text{ rad/s}$, $v=0.50 \text{ m/s}$)

(a) ビデオカメラ、(b) 小型カメラ (GoPro) で撮影

実験1での問題点を踏まえ、鉄球を転がす手法ではなく円形の図形が等速直線運動する映像を使用して実験（以降、実験2とする）を行ったところ、実験1で発生した実物の鉄球を使用することによる回転台と鉄球との摩擦や視認性の悪さといった問題を解決し、より様々な条件下での実験が可能となった（図6）。これにより、図形の移動する速度 v が比較的大きい場合（図7）は基より、小さい場合（図8）であってもコリオリの力による図形の進路を記録することができた。図7、図8は (a) を慣性系、(b) を回転座標系に立ったそれぞれの視点として記録した映像を分割し、画像編集ソフトを使用して一枚の画像にまとめたものであり、図8 (b) の軌跡は特に速度 v が角速度 ω に対して小さい場合（図形が端から端に移動するまでに複数回回転運動する場合）の特徴が明確に示されている。

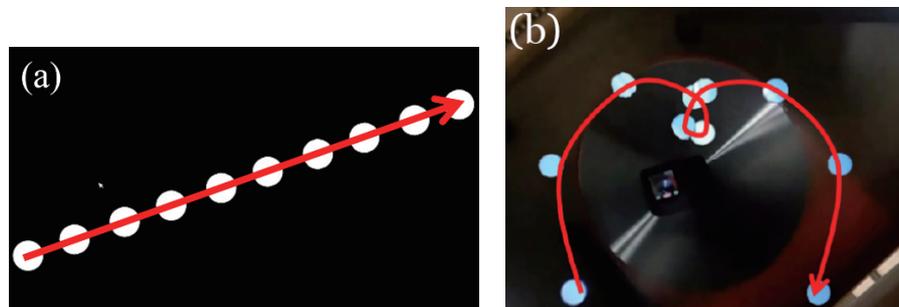


(図6) 実験2の模式図



(図7) 実験2の結果 ($\omega=1.39 \text{ rad/s}$, $v=0.10 \text{ m/s}$)

(a) 等速直線運動の映像、(b) aを回転座標系から撮影し合成した図

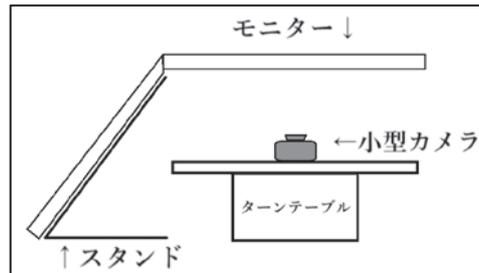


(図8) 実験2の結果 ($\omega=1.59 \text{ rad/s}$, $v=0.05 \text{ m/s}$)

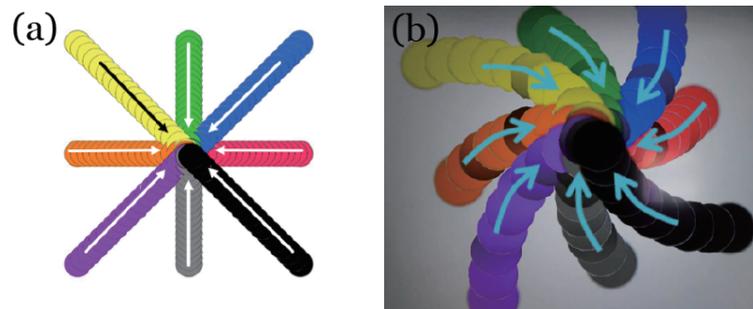
(a) 等速直線運動の映像、(b) aを回転座標系から撮影し合成した図

実験2の手法の利点を活かし、映像内の図形の数をも8個に増やし、それぞれ別の場所から画面中心に向けて等速直線運動させ、台風の渦の再現をする実験(以降、実験3とする)を試みた(図9)。ただし、ここでは実験2において使用したアクリル板ではなく、PCを支えるスタンドを用意した。アクリル板を外し、またPCの画面はノンフレア液晶のものを使用したため、実験2よりもカメラの像の映り込みが軽減できた。この実験でも等速直線運動する図形が回転座標系からでは右に力を受け、曲がっていく様子が確認できたものの、実際の台風に伴う地表付近での風や図1のような一般的な台風の模式図とは異なり、一見時計回りの渦が発生しているかのような結果となった(図10)。この結果について、

図11で示すように、図10 (b) の矢印で示した力を等速直線運動（黒矢印）とコリオリの力（赤矢印）に分解したところ、コリオリの力は理論通り右向きに働き、それらが集まって左向きの回転の力を作っていることを確認できた。しかし図11のような作図を要する説明では直観的な理解は難しい。

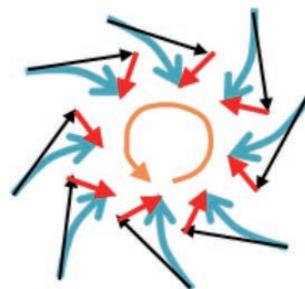


(図9) 実験3の模式図



(図10) 実験3の結果

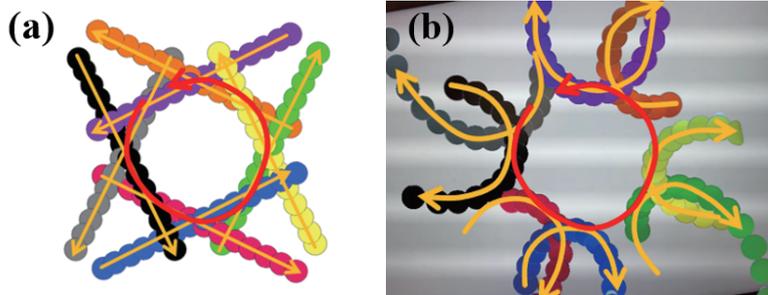
(a) 等速直線運動の映像、(b) aを回転座標系から撮影し合成した図



(図11) 図9 (b) の力の分解

以上の実験の内容を踏まえ、中心に向かう等速直線運動ではなく進行方向を中心からずらした等速直線運動の映像を使用することを考えた。気圧やコリオリの力を考えた場合、台風が発生する前から地表付近の大気を流れている地衡風により、中心方向から逸れた反時計回りの空気の流れ（映像における物体の動き）が予めできている想定等速直線運動の動画モデルを作成し、これを回転台に設置したカメラで撮影する試行（以降、実験4と

する)を行った。モニターで再生した映像を地球上空からの視点を模したもの、モニターの映像を回転座標系から撮影したものを地球上での視点を模したものとし、記録したそれぞれの映像を一定時間ごとに分割し1枚の画像として合成した。作成した画像は次の通りである。

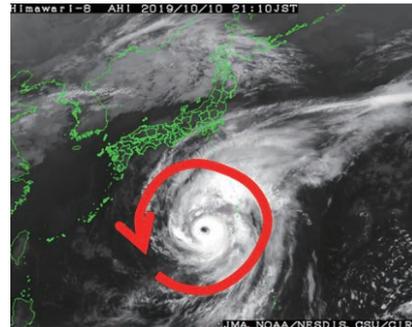


(図12) 実験4の結果

(a) 等速直線運動の映像、(b) aを回転座標系から撮影し合成した図



(図13) 図12 (b) の中心部分



(図14) 実際の台風

実験1～3と同様に、それぞれの等速直線運動する図形が力を受け、右に曲がっていく様子が確認できた(図12)。図12 (b)のうち、中心に近い部分に注目し、コリオリの力を受けたそれぞれの図形の進路をつなげると、左向きの大きな渦になっていることがわかる(図13)。この結果は図1で示されている空気の流れを再現するものであり、北半球においてコリオリの力は右に働くにも関わらず、台風の渦が反時計回りである事を説明可能とする。このことから、台風の渦を再現するためには予め左回りの地衡風が存在している(北半球の場合)ことが重要であり、等速直線運動が中心に向かう条件で試行を行った場合には図10 (b)のように時計回りに回転しているように見えてしまうといえる。

しかし、本研究では等速直線運動する図形の映像を使用したため、実際の台風に伴う地表付近の風のように気圧傾度力によって中心に向かって吸い込まれていくような進路を再現することができなかった点が課題として残った。気圧傾度力も考慮に入れることで、図12のように外から中心に少し逸れた方向で動いてきた図形が図12 (a)の赤矢印のような

円運動になり、更に気圧傾度力が大きくなっていくと吸い込まれていく実際の台風の渦を再現できる可能性がある。

4. まとめと今後の展望

本研究では複数の図形が二次元平面内で等速直線運動する映像を、回転台上で回転するカメラで撮影する手法で、コリオリの力により渦ができる現象について実験を行った。二次元運動の映像を使用することで、摩擦や物体同士の衝突などの影響をなくし、図形の速度を自由に設定した運動について回転座標系での動きの観察が可能となることを示した。これらの点に加え、身近で簡易的な道具のみを使用していることから、従来の一般的な手法よりも容易に実験が行え、かつ正確な結果を得ることに繋がると考えられる。

台風の渦の理解に向けた実験においては、回転中心に向けて様々な方向から等速直線運動する図形を反時計回りで回転座標系で見ると、全体として右回りの渦の形成に見え、北半球における台風の渦の理解が難しくなったが、中心から逸れた等速直線運動を回転座標系で見ること、教科書で示されるようなコリオリの力の軌道を再現できた。この考えはもともと左回りの回転があることが前提で、それは低気圧の周りにできる地衡風であるとするので、図1で示すような台風におけるコリオリの力の説明とすることができる。

ただし、上記の試行では、図の中心にある部分に左回りの回転渦を形成するとしても、外からの風が中に吸い込まれることはない。この場合は、もともと中心にある部分を円筒形の空気の塊（台風）として、それが回転させられるとして台風の渦を考えることになるだろう。

実験4では、等速直線運動のみを考慮して回転座標系で見た風の動きを考察したが、そこに、例えば台風中心に向けた気圧傾度力の効果を取り入れるとすると、気圧傾度力とコリオリ力が釣り合う場合には風の動きは等速円運動となり、さらに気圧傾度力が強くなると中心に吸い込まれていく風の動きになる（稲津、2022）。この気圧傾度力による影響を取り入れたモデルによる試行が次なる課題である。

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP21K02945の助成を受けたものです。

参考文献

- 涌井貞美 (2015) : 「物理・化学」の法則・原理・公式がまとめてわかる事典, ベレ出版.
為近和彦 (2003) : 大学生なら知っておきたい物理の基本 [力学編], 中経出版.
稲津将 (2022) : 気象ブックス047 気象学の教科書, 成山堂書店.
Mirjam S. Glessmer & Pierré D. de Wet(2018) : "Experiment : Demystifying the Coriolis force",

- <https://mirjamglessmer.com/2018/08/03/experiment-demystifying-the-coriolis-force/> (2023/01/04)
- 気象庁 (2019) : 「観測画像紹介 令和元年台風第19号」, https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_typh.html#typh (2022/11/07)
- 金沢子ども科学財団 (2015) : 科学の散歩道⑧ 北半球の台風は左回りか? ~本当に『わかる』とは~, <https://kodomokagaku.or.jp/news/walkingscience2015-08.pdf> (2022/06/10).
- 中島俊夫 (2022) : イラスト&図解 知識ゼロでも楽しく読める! 天気のおもしろさ, 西東社.
- 若杉誠 (2018) : コリオリ力シミュレータ, 神戸大学附属中等教育学校, <http://www2.kobe-u.ac.jp/~wakasugi/mats/coriolis/> (2022/06/13).