

ジェット気流を可視化して地球の異常気象について調べよう!!

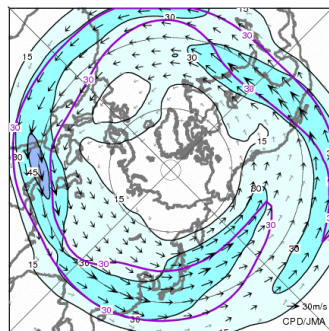
茨城大学工学部機械工学科 松村研究室

代表 関 真之(大学院理工学研究科機械工学専攻1年)

植田亮 玉根正貴

1.概要

地表は高気圧や低気圧の通過によって天候が左右され、我々は日々変動する"気流"にさらされている。地球規模の大きなスケールで考えると、高緯度よりも日射量の多い赤道付近で大気が温められて、その結果地上では圧力の低い地帯(赤道低圧帯)が出来ている。赤道低圧帯では水蒸気が活発に上空に運ばれて雲を形成し、その熱がより高緯度に運ばれている。このような地球規模の大気の循環によって、地球上にはジェット気流(亜熱帯ジェット気流、寒帯前線ジェット気流)と呼ばれる強い西風が形成される(図1参照)。ユーラシア大陸の東岸に位置する日本から北アメリカ上空はこうした二つのジェット気流が接近して流れやすく、世界でも有数のジェット気流の強い地域である。第二次世界大戦以降、こうしたジェット気流について色々な調査がなされていて、日本とアメリカを結ぶ航空路線では時間と燃料を節約するためにジェット気流を用いていることは良く知られている。一方で、地球上では人間の営む活動を発端とするエルニーニョ現象などにより、ジェット気流が影響を受け、異常気象の原因ともなっている。



Monthly mean 200 hPa wind speed and vectors in the Northern Hemisphere (Apr.2015)
The black lines show wind speed at intervals of 15 m/s and the purple lines show its normal (i.e., the 1981-2010 average) at intervals of 30 m/s.

図1 ジェット気流を含む2015年3月の北半球の月平均風速(気象庁ホームページより)

我々は、伝熱工学・流体力学の視点からジェット気流の形成過程とその流れのパターンを可視化する装置を製作し、地球規模のジェット気流を解明することを目指す。これまで当研究室で蓄積された知見を生かしつつ、まず物理現象を実際に直接目で見て確認し、それを直感的に理解し体感することの出来る、理科学教材としても役立つ実験装置の製作を目的とする。また、作成した装置を利用して実験条件を変えながらジェット気流の蛇行や地球の異常気象の関連性について調べることを予定している。

2.実験の内容

上に述べたように、我々はジェット気流の循環過程を"目"で直接観察し、なおかつ小学生から高校生までの幅広い世代の理科教材としても楽しむことが出来る実験装置の製作を目指す。実験は、以下に述べるように二つのステージで段階的に行う予定である。

(1)ジェット気流を再現するための実験装置の製作と観察実験

(2)実際の気と同様に、ジェット気流を蛇行させる実験

(1)図 2 の概要図に示す実験装置を製作して、円筒容器内の流体がどのような挙動を示すのかを実験的に調べる。装置は北極側から見た地球をイメージしていて、円筒容器内に作動液体(水あるいは空気)を入れておき、円筒容器の側面をヒータにより加熱、中心部分を一定温度に冷却した状態で、円筒容器を地球の自転を模擬して一定角速度(ω)で回転させる。容器内に生じる熱対流と容器の回転運動が複合する結果、容器内の内部でどのような流れが発生するのかを可視化観察する装置である。可視化には、作動液体に染料や蛍光塗料などを混ぜて行う。ジェット気流を実験で再現する試みは様々な方法がこれまで提案されているが、本試験装置では円筒容器の外周と内面の境界条件(熱量や温度)をそれぞれ必要な条件に適切に設定することで、容器内に発生する"擬似ジェット気流"を定量的(加熱量、内外面の温度差、容器の回転数)に評価することが出来る点が特徴である。

(2)の実験は、完成した試験装置を利用して自然界に見られる"ジェット気流の蛇行"を容器内に人工的に発生させることを目的としている。自然界ではエルニーニョやラニーニャ現象と呼ばれる海水温度の局所的な上昇がジェット気流の蛇行を引き起こす要因として知られている。そこで、円筒容器外部の加熱条件を非均一(あるいは内面の冷却面温度を非均一化)にすることで、円筒容器内の対流と回転運動に伴う流れ場がどのように変化するかを明らかにすることを目的とする。

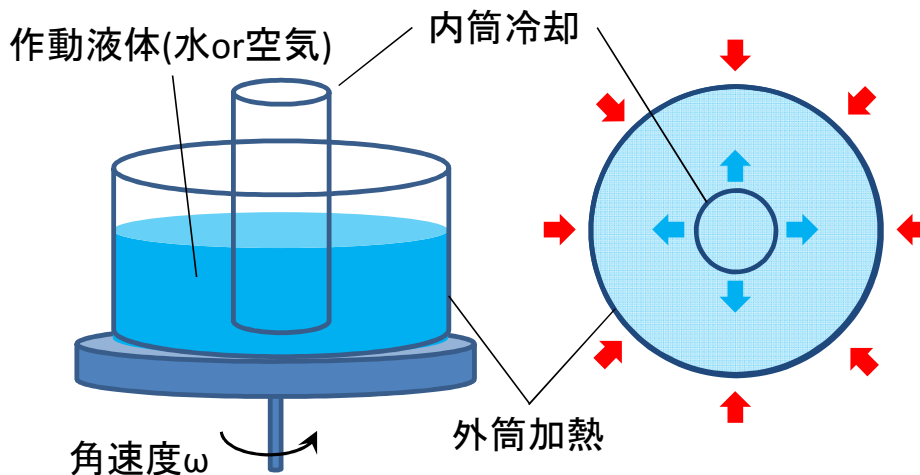


図2 実験の概要

(回転台に載せた円筒容器を回転させる。円筒容器は二重構造になっていて、外面を加熱、内面を冷却して対流を生じさせる。対流+回転運動で北極からみた地球の大気流動を模擬する)

3.実験装置

3.1 模擬実験装置作成

図 3~5 に初期に考案した実験装置の回転部分、水槽部分、断面図を示す。水槽は加熱・冷却を行うために3重構造になっていて、円筒容器は外槽が直径46cmのプラスチック、中槽が直径16cmのプラスチック、内槽が直径9cmの金属缶を用いた。各容器の底面の中心に穴をあけ自転車のタイヤの回転軸に固定しスプロケットとチェーンを経由させ自転車のペダルを手動で回すことにより水槽を回転させた。容器は内槽が金属缶、中槽と外槽がプラスチックの容器になっている。また中槽の対流の様子を可視化するために、流体実験で用いられる蛍光性の発光トレーサー粒子を用いた。本実験では実際の自然現象と照らし合わせるため、外槽を赤道付近、内槽を極地付近と見立て、外槽に温水、内槽に氷水を入れて加熱・冷却を行った。この装置では、水槽を手動で回して波動ができるかどうかを試験すること、その大略を理解することを目的とする。

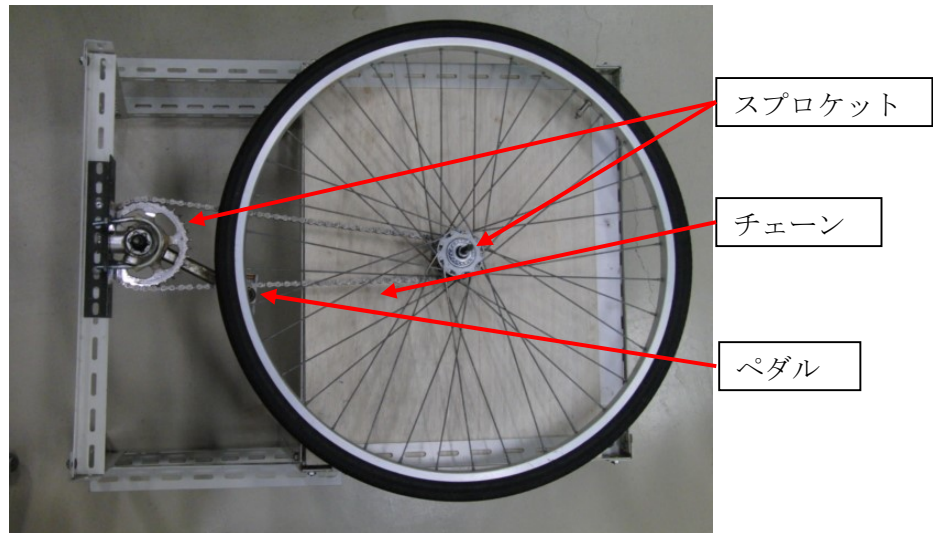


図 3. 模擬実験装置 (回転部)

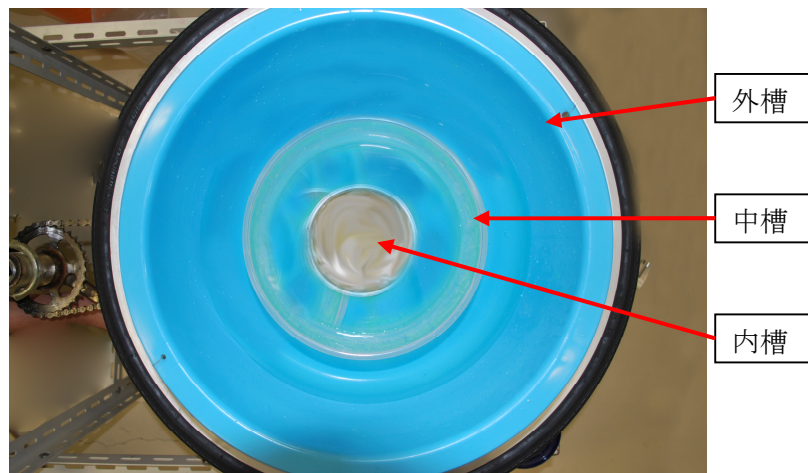


図 4. 模擬実験装置 (水槽部)

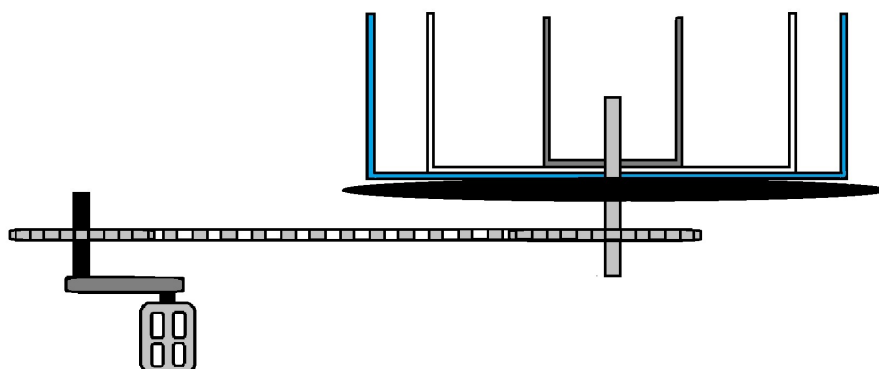


図 5. 模擬実験装置 (断面図)

3.2 実験方法

以下に実験方法の手順を示す。

1. 外槽に温水(30~40℃)、中槽に常温の水(18~23℃)、内槽に氷水を入れる。
2. 手動でペダルを回しながら、中槽での対流を可視化するため、中槽にトレーサー粒子を入れる。
3. 水槽真上にあるカメラで水槽の流れの撮影をする。

3.3 模擬実験装置実験結果

外槽と内槽の作る温度差の中で、系全体を回転させると中槽に図 6 のような波紋ができた。回転数は手動で約 10~15rpm を目安に回し、回し始めてから 8~9 分くらいで図のような波紋が確認できた。この段階では波数が 13 個の波動が確認されており、回転速度や水位、温度差によって波数は変化すると思われる。この模擬実験装置では外槽の水温を変化させたり回転速度を変えた条件でも実験してみたが、回転方法が手動であることや、回転体が大きく、重いので軸がブレてしまうことから波動が非常に発生しにくかった。

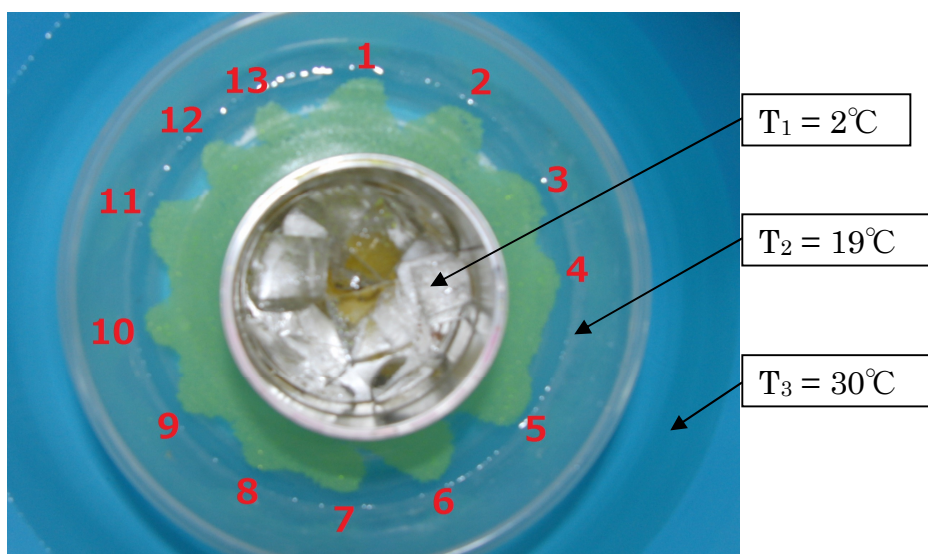


図 6. 模擬実験装置-実験結果

3.4 実験装置作成

3.3 までの予備実験結果を踏まえて、図 7、図 8 のように実験装置を改良した。予備試験装置では、水槽を手動で回していたため回転数にムラができていたので、回転数を制御できるよう水槽下部にはモータを取り付けた。モータの回転軸と水槽の接着に関しては真鍮を加工して自作の継ぎ手を作り、水槽の中心に開けた穴とモータの回転軸を図のようにボルトで締め付けられるようにしている。モータと加工した真鍮の継ぎ手を図 9、図 10 に示す。モータの負荷を抑えるため、回転体を小型・軽量にして、さらに外槽と内槽から中槽への温度伝導を良くするため、中槽と内槽を金属にした。模擬実験装置と実験装置を比較したものを表 1 にまとめる。この装置では**回転数やそれぞれの槽での水位と水温を変化させると、どのように波紋に影響を及ぼすのかを調べることを目的とする。**

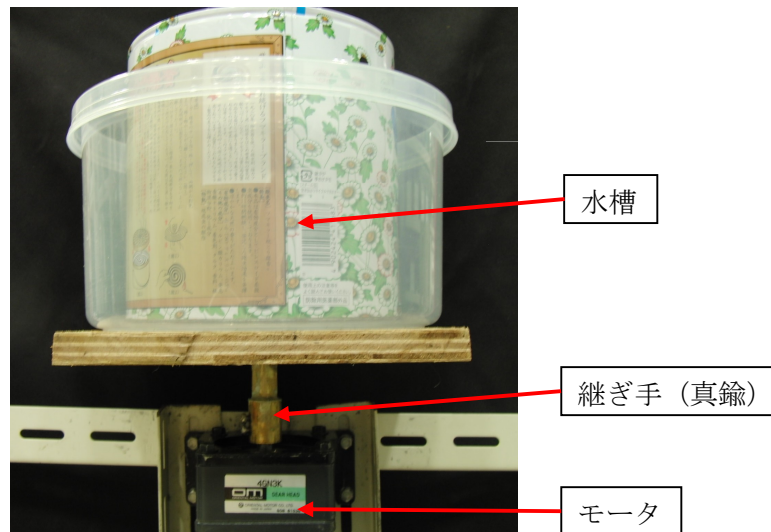


図 7. 実験装置 (正面図)

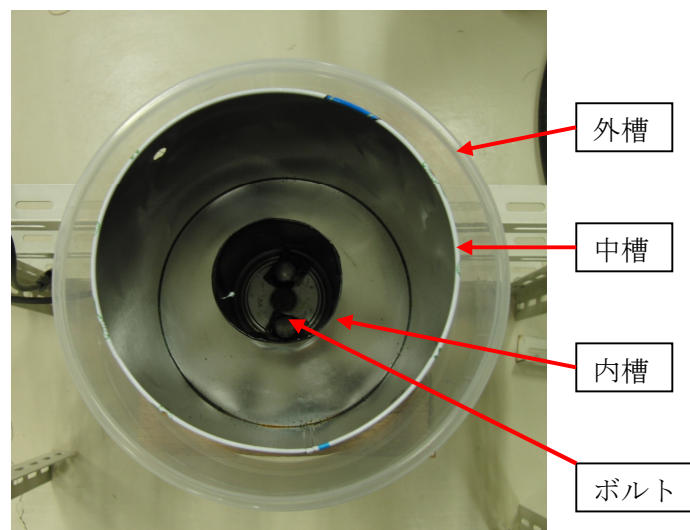


図 8. 実験装置 (平面図)



図 9.モータ



図 10.自作した継ぎ手 (真鍮)

表 1.模擬実験装置と実験装置の比較

	模擬実験装置	実験装置
内槽	直径 9cm の金属缶	直径 6cm の金属缶
中槽	直径 22cm のプラスチック	直径 16cm の金属缶
外槽	直径 46cm のプラスチック	直径 22cm のプラスチック
回転方法	手動	モータ

4.実験条件

実験条件を表 2 に示す。水温については中槽を常温の水(18~20℃)、内槽を氷水(3~5℃)で固定して外槽の温度のみを変化させた。水位は内槽を 7cm で固定して中槽と外槽の水位を変化させた。

表 2.実験条件

外槽の水温(℃)	35 , 40 , 45
外槽の水位(cm)	3.5 , 7
中槽の水位(cm)	3.5 , 7
回転速度(rpm)	7 , 12 , 20

5.実験結果

それぞれの実験条件によって、確認できた波動の波数を表3に、波動の様子を図8~図25に示す。表3の赤線で囲まれている部分が実験結果となっており、表3の結果と図8~25の配置は対応している。

表3.それぞれの条件での波数

外槽の水温 (°C)	内槽：外槽の水位 (cm)	回転速度(rpm)		
		7	12	20
30	3.5 : 7.0	4	7	10
	7.0 : 3.5	4	5	7
	7.0 : 7.0	4	4	4
40	3.5 : 7.0	4	6	9
	7.0 : 3.5	3	3	5
	7.0 : 7.0	3	3	3

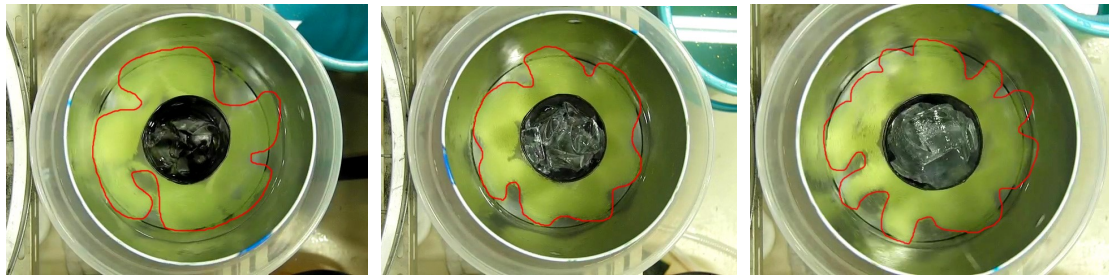


図11~13. 外槽温度30°C、3.5cm : 7cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

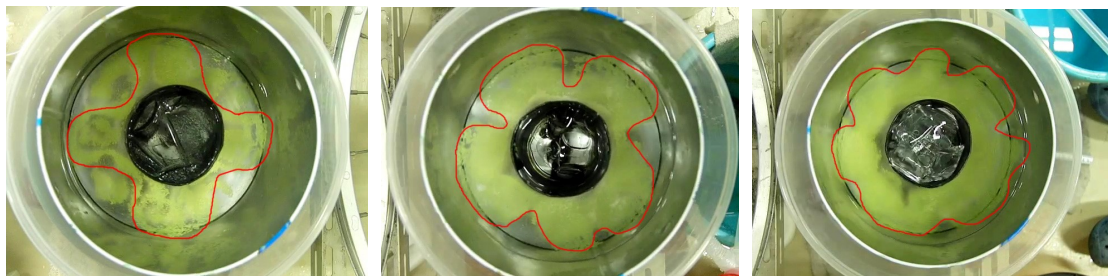


図14~16. 外槽温度30°C、7.0cm : 3.5cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

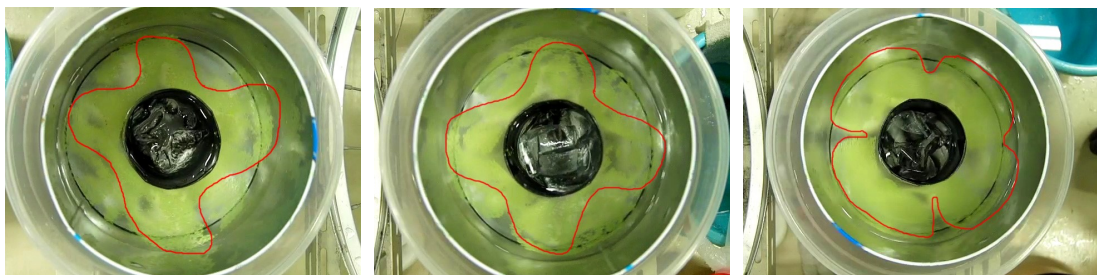


図17~19. 外槽温度30°C、7.0cm : 7.0cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

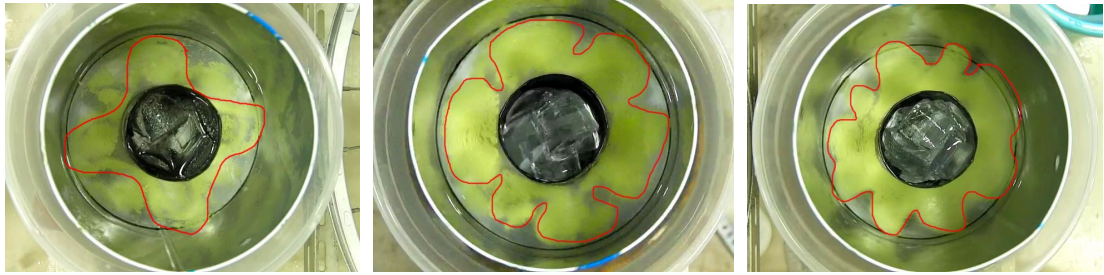


図 20~22. 外槽温度 40°C、3.5cm : 7cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

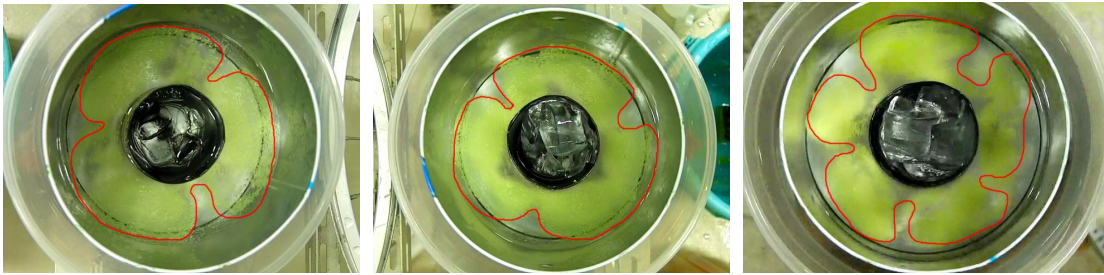


図 23~25. 外槽温度 40°C、7.0cm : 3.5cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

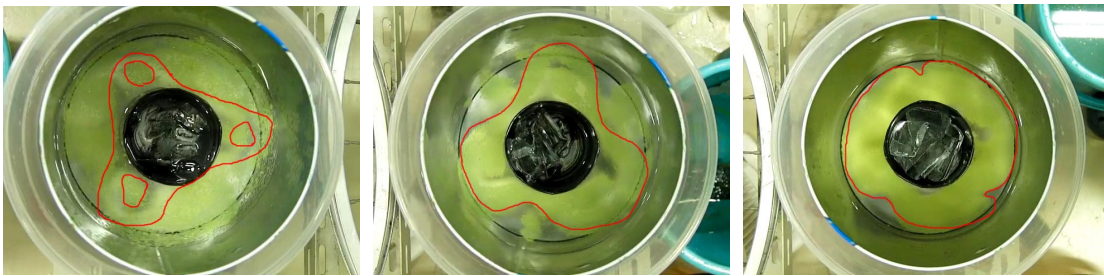


図 26~28. 外槽温度 40°C、7.0cm : 7.0cm、回転速度 左:7rpm、中央:12rpm、右:20rpm

図において、トレーサー粒子の領域は流れや対流がなく、流れがあるところには粒子は留まらず水の領域になっていると考えられる。また、実際にはこれらの波動は、模様が崩れることなく容器と同じ速度で回転をする。

6. 考察・まとめ

6.1 考察

粒子の模様はいずれも回転を開始してから次第に変化していき開始より 2~3 分で図のような波動で定常状態となる。実験結果からもわかるように、波動の波数は、槽の間の温度差、水位、回転速度に依存し変化することが確認できた。特に温度の依存性が高く、表 3 から 40°C に比べ 30°C の方が全体的に波動の波数が増える傾向がみられた。また水位に差がある際には、回転速度が高くなるにつれ、波動の波数が増えるという結果が得られた。中には同じ波数の波動でも図 23 のように粒子と水の領域が真逆になっているものもあった。模擬実験装置の時と比較してみると、波動は明らかに発生しやすくなっていて、回転速度が不安定の場合、波動が発生しにくいことがわかった。回転してから波動が発生する時間

も内槽を金属に変え、温度伝導がよくなったことにより、はるかに早くなっていた。また波動の波数に関しては模擬実験装置の結果である 13 枚を超えるものはないことから回転体の大きさにも大きく依存すると思われる。

6.2 流れと模様のカメカメ

中槽内部の水は、温度の高い外槽側の壁面で温められて上昇し、内槽側の低い温度の壁に冷やされて下降する(図 29)。よって、温かい水は上部に、冷たい水は下部にたまり安定な層をなしている。ここに、回転力を加えるため、外壁に沿って上昇した水は上層で中心に向かって流れようとするが、図 30 に示すように中心に向かって左方向へ流される。また、下層で外壁に向かう流れは外から見て右方向へ流されるため、水面では蛇行した流れが確認できると考えられる。

実際に波動の波数が 4 つ現れた実験の内部流れは図 31 のようになっていると考えられる。この図において、赤色で示した矢印は温水による上部の対流、青色が冷水による下部対流である。また、実験では波と波の間に、黒色で示した矢印のような循環する対流も確認できた。

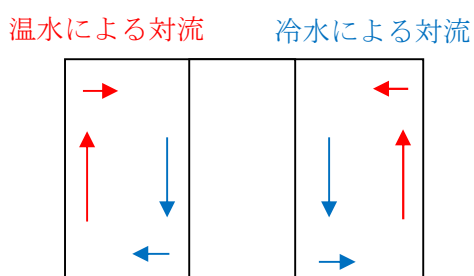


図 29. 内部流れモデル(断面図)

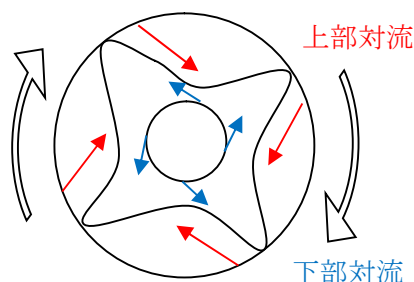


図 30. 内部流れモデル(平面図)

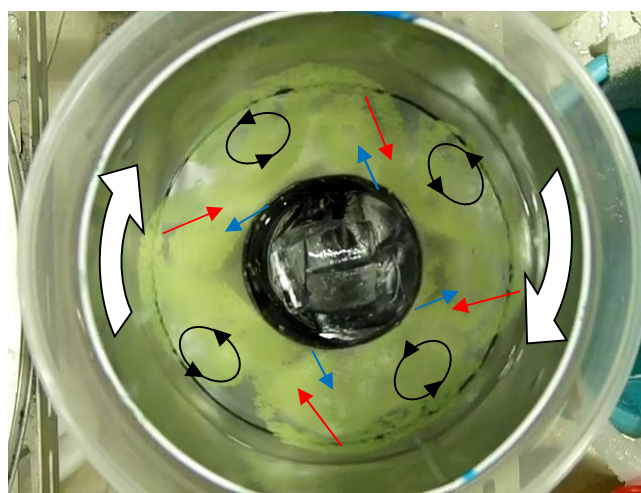


図 31. 内部流れ(波数 4)

6.2 実際のジェット気流との比較

先に述べたようにジェット気流とは、対流圏上部または圏界面付近の狭い領域に集中して吹いている帯状の非常に強い風のことであり、主要なものとして北半球では緯度 40 度付近の寒帯ジェット気流と 30 度付近の亜熱帯ジェット気流がある。



図 32. 北半球におけるジェット気流

このジェット気流は季節によりその強さが変化し、地上における南北の気温差が小さい夏では弱く、気温差が大きくなる冬に強くなる。ジェット気流が弱いと南北への蛇行は小さくなり、波動の波数は多くなる傾向にあり、反対に気流が強い場合は大きく蛇行するため、波数は少なくなることが分かっている。すなわち、温度差と波数は、反比例の関係にある。

本実験においては表 3 より、内槽との温度差がより小さい外槽 30°Cの実験が 40°Cに比べ全体的に現れる波動の波数が多かった。これは実際の地球におけるジェット気流の現象と一致していることが分かる。このことから、小型容器による実験装置でもジェット気流の蛇行を人工的に発生させることに成功したと言える。

動画

実験の動画をのせてありますのでご覧になってください。

謝辞

本実験では、偏西風波動に関する知識を高める貴重な場を提供していただき、ここに感謝の意を表します。また実験を進める際にアドバイスを下さった先生方、研究室の皆さんに心より感謝を申し上げます。