

8 大気の大循環に関するモデル実験

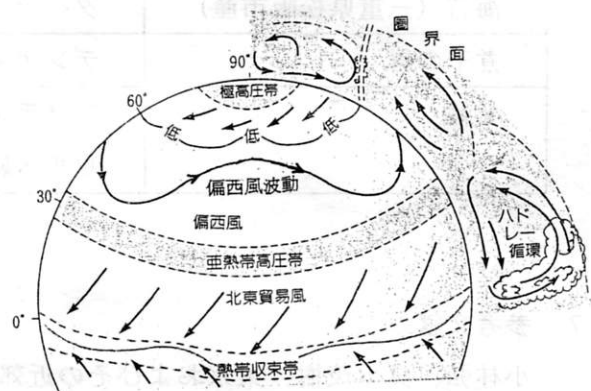
1. 目的

大気の大循環は中緯度～高緯度地方における偏西風波動（水平循環）と低緯度地方におけるハドレー循環（鉛直循環）がある。地球規模の熱輸送に大きな影響を与えている偏西風波動等のモデル実験をとおして大気の大循環について考察する。

2. 原理

(1) 低緯度地方はハドレー循環

高温域と低温域の温度差を解消する大気の運動には鉛直方向の対流運動（鉛直循環）がある。地球の対流圏では低緯度地域において鉛直循環による熱輸送があり、この循環をハドレー循環という（図1）。



(2) 中～高緯度地方はロスビー循環

回転台上において高温域と低温域の温度差を解消する熱輸送は、熱の上鉛直向の対流運動ではなく回転の影響を受けた水平方向の移動（水平循環）によって行われる。対流圏では中緯度～高緯度地方において地球の自転の影響を受けた水平循環（偏西風波動）による熱輸送があり、この循環をロスビー循環という（図1）。

図1 大気の大循環のモデル

(3) 鉛直対流で発生する粒状斑

下部が高温で上部が低温の時、高温物質が上昇することにより鉛直方向の対流運動が発生する。定められた範囲内ではこの鉛直方向の対流運動によって斑点状の模様が形成されることがあり、これを粒状斑（セル）という（図2）。



図2 粒状斑の実験

3. 準備

(1) 鉛直循環（ハドレー循環）の実験

アルミ粉末、シリコンオイル、アクリル製容器（仕切りは銅板）、水性インク、ビデオカメラ、三脚、湯、氷水

(2) 水平循環（ロスビー循環）の実験

回転台、ビデオカメラ、アルミ粉末、水平循環の実験装置（容器3個、図3）、湯、氷水、ガラス棒、温度計（2本）、三脚

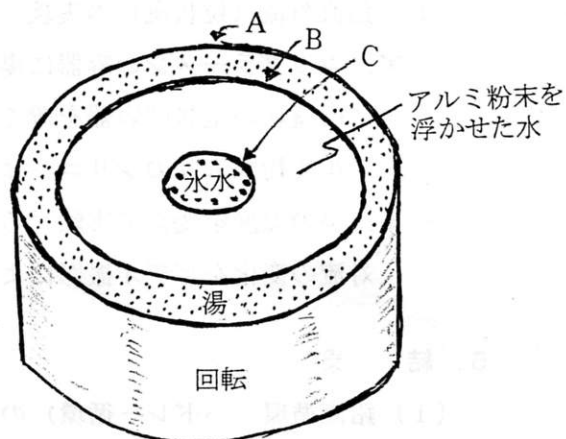


図3 水平循環の実験装置

(3) 鉛直対流（粒状斑）の実験

カップラーメンの容器、円盤状の金属製容器、アルミ粉末、シリコンオイル、湯、デジタルカメラ、三脚、温度計

4. 方法

(1) 鉛直循環（ハドレー循環）の実験

- ア. 鉛直循環の実験装置（図4）をアクリル板で製作する。仕切は銅板とする。
- イ. 両側の水槽に湯と氷水、中央に水を入れる。
- ウ. 中央の水に、シリコンオイルにアルミ粉末と水性インクを混ぜて加える。
- エ. 時間経過と共に鉛直対流が生じて循環が発生するようすを撮影・観察する。

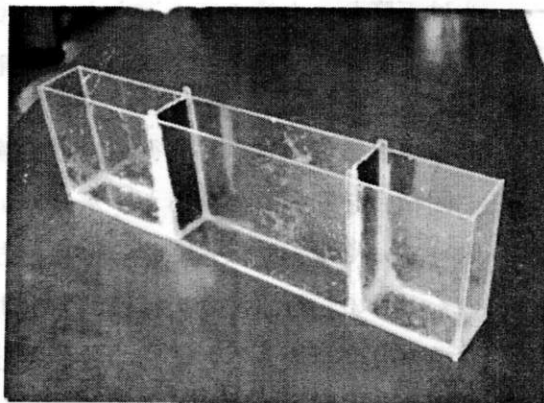


図4 鉛直循環の実験装置

(2) 水平循環（ロスビー循環）の実験

- ア. 回転台上に大きさの異なる3つの容器を設置する（図3）。外側の容器Aに湯、内側の容器Cに氷水、中央の容器Bに水を入れ、容器Bの水に少量のアルミ粉末を浮かべる。
- イ. 回転台を回転させてロスビー循環のモデル実験ウとエを行う。
- ウ. 回転速度を一定に保ち、湯の温度を変えて温度差による波動の変化を実験する。
- エ. 温度差を一定に保ち、回転速度を変えてコリオリの力を変化させ、波動の変化を実験する。回転台上にカメラを固定（図5）して北極上空から見たと仮定してビデオ撮影により観察する。

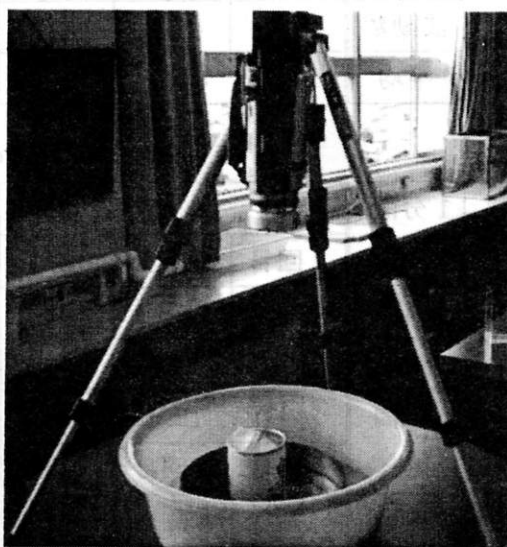


図5 水平循環の実験のようす

(3) 鉛直対流（粒状斑）の実験

- ア. カップラーメンの容器に湯を入れその上に円盤状の金属製容器を置く。その容器にアルミ粉末入りのシリコンオイルを入れる。
- イ. 湯の温度を変えて実験する。温度による対流の変化をビデオ撮影により観察する。



図6 粒状斑の実験装置

5. 結果

(1) 鉛直循環（ハドレー循環）の実験

シリコンオイルは湯側の銅板付近で上昇し水面まで上がると、水面付近を氷側へと流れていく。また、氷水側の銅板付近ではシリコンオイルは下降し、水槽の底を這うように湯側へ流れていく。こうして鉛直循環の対流が発生する。

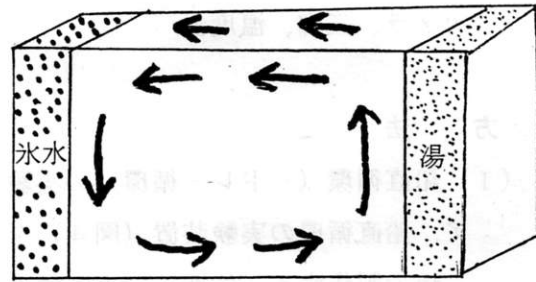


図7 鉛直循環の概念図

(2) 水平循環（ロスビー循環）の実験

回転台を回転し始めると、水に浮かべたアルミ粉末は慣性に従って水の回転方向と逆向きに動いていくが、しばらくすると回転方向に回り始める。数分後には氷水を入れた容器の周りにいくつかの蛇行（波動）模様が発生する。

湯の温度を変えると波動の数が増える（表1）。また、回転数を変えた場合も波動の数が増える（表2、図8）。

表1 湯の温度変化と波動の数（1分間の回転数9.54）

湯の温度 ℃	60℃			75℃			90℃		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
波動数	不能	3	3 or 4	3	3	4	3 or 4	4	3 or 4
平均	3			3			4		

表2 回転数の変化と波動の数（温度60℃）

1分間 回転数	3.47			7.21			9.34		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
波動数	小2	1 or 2	0	3	3	4	不能	3	3
平均	1			3			3		
1分間 回転数	13.4			16.2			18.3		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
波動数	3	4 or 5	5	4 or 5	4 or 5	3	4	不能	不能
平均	4			5			測定不能		

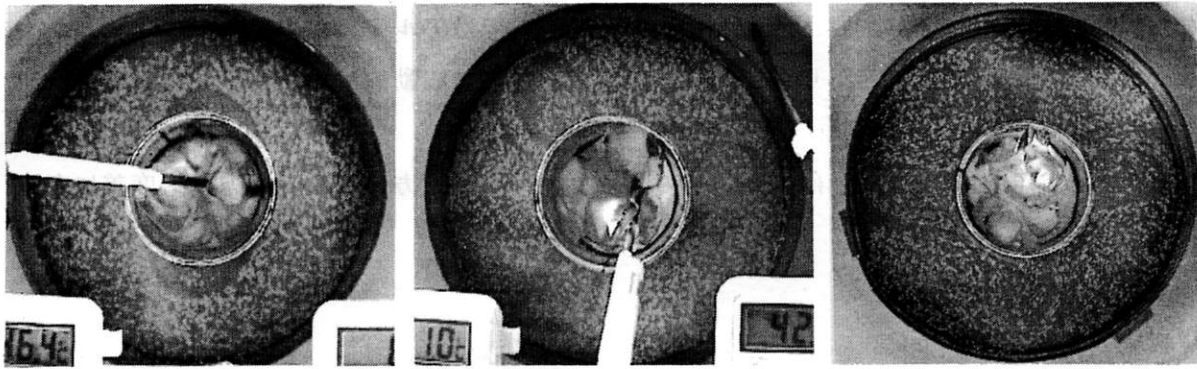


図8 回転数変化と水平循環(左: 3.47回転/分、中: 7.21回転/分、右: 13.4回転/分)

(3) 鉛直対流(粒状斑、セル)の実験

湯の温度が高いほど下から上へ盛り上がるようなたくさんの対流が発生する。なお、シリコンオイルの層が薄いと粒状斑は発生しない。



図9 湯が95°Cの時の粒状斑

表3 温度変化と粒状斑の数

湯の温度	55°C	65°C	85°C	90°C
粒状斑の個数	大1個	大1個	13個	31個

6. 考 察

(1) 鉛直循環(ハドレー循環)

暖められた空気塊は、上昇した後上空では気温の冷たい側へ熱を運ぶために水平方向へ移動する。空気塊が上昇した地域の気圧が低下して周辺地域から空気が流れ込む。また、上空から空気塊が下降すると、上空のその付近の気圧が低下して周辺地域から空気が流れ込む。このようにして鉛直方向の対流(鉛直循環)が発生する。

地球の自転による偏向力(コリオリの力)の影響が少ない地域では、温度が高い低緯度地方と温度が低い中緯度地方の間でハドレー循環が発生する。

(2) 偏西風波動(ロスビー循環)

回転数によって波動のでき方に違いが生じる(表2)。回転数が少ない時はほとんど波動を生じない。逆に、回転数が非常に速い時は波動の数が多くなり過ぎて計測できなくなる。また、発生した波動が分離して独立した渦が形成された、これは低気圧に相当すると考えられる。このことから、偏西風波動は回転数の影響を受けていると考えられ、地球上では自転の影響(コリオリの力)によって左右される。従って、高緯度地域では波動の数が低緯度地域より多くなると推測される。

温度差によっても波動のでき方に違いが生じる。温度が低い時は波動の数が少なく、温度が高いと波動の数が多くなる傾向がみられる。また、湯の温度が高いほど実験槽の温度差が大き

くなり、波動の発生状況が左右される。湯の温度が90℃ではアルミ粉末の動きが著しく速くなる。つまり温度差が大きいとより多くの熱を輸送するために波動の流れが速くなると予想される。

以上のことから、偏西風波動はコリオリの力および中緯度地方と高緯度地方の温度差に左右されると考えられる。

(3) 粒状斑 (セル)

暖められたシリコンオイルが上昇して、表面で外気によって冷やされて下降する。このとき、暖められたシリコンオイルが外気に触れると表面全体が冷やされるため、鉛直対流（ハドレー循環）の実験のように1つの対流ではなく、複数の対流が生じ（図9）、湯の温度が低いとシリコンオイルの上昇が弱まって全体が1つになって対流すると考えられる。逆に温度が高いとシリコンオイルが上昇する勢いが強くなって多くの対流が生じると推定される。

以上のことから、定められた範囲内において回転の影響がない時はハドレー循環だけで熱を輸送するのではなく、粒状斑のような対流も発生することがあると予想される。

7. 終わりに

地球の大気の大循環は規模が大きすぎて観察することができないため、実感しにくい現象である。このような現象の学習には、モデル実験による視覚的な観察が効果的である。この実験は結果だけでなく、準備段階から実験の経過を観察することによって、より理解を深めることができる。

対流圏での気象現象の根本原因である熱エネルギーの輸送方法を知ることによって、日本の天気を広い視野に立って理解することができる。とくに、日本の天気には大きな影響を与えている偏西風波動は本研究で示したモデル実験を通して、その原理を深く理解することができる。

8. 参考文献

- 小倉義光『一般気象学（第2版）』、2002年、東京大学出版会
- 菊池勝弘・瓜生道也・北林興二『実験気象学入門』、1988年、東京堂出版
- 小嶋丈兒『新訂地学図解』、2003年、第一学習社
- 名越利幸・木村龍治『気象の教え方学び方』、1994年、東京大学出版会
- 松田時彦・山崎貞治『高等学校地学I』、2002年、啓林館