

研究・教育・社会活動の報告

「流体運動の可視化による気象実験」の紹介

¹木暮 嘉明 ²青木 大和 ¹小杉 俊男

¹ 帝京科学大学医療科学部理学療法学科 ² 東洋計器株式会社 総合開発研究所 ソフトウェアグループ
(平成 21 年 11 月 27 日受理)

Introduction of the study on weather model experiments by fluid flow visualization

Yoshiaki KOGURE Hirokazu AOKI Toshio KOSUGI

Experimental apparatuses to visualize a fluid movement have been developed. The apparatuses are applied on the experimental simulation of climate system. Rayleigh-Benard convection was realized by heating the silicon oil in the metal plate. The fluid flow in the convection was visualized by using aluminum powder and thermography. A linear relation between convection cell size and depth of silicon oil is determined. Experiments on the prevailing westerlies wave motion was performed by using rotary water vessel, which was consisted of cylindrical laminar structures of ice water, water and hot water. Wavy motion of rotating water flow was observed by using aluminum powder. A relation of wave number of water flow and rotary speed is determined.

1. 緒言

最近の地球温暖化、環境問題への関心は世界的にも極めて高いことは周知の通りである。気象現象や気候は地球全体の大気や海洋が太陽光のエネルギーを吸収して起こす大規模な熱流体運動であり、規模、複雑さにおいて実験室科学の対象とは大きく異なるものである。しかしながら大気も海洋も流体であり、ナビエ・ストークスの方程式によって記述されることに違いはない。原理的にはこの方程式を解くことにより全て解決される筈であるが、よく知られているように非線形のナビエ・ストークスは特別な場合を除いて解析的には解けない。最近ではコンピュータによる大規模なシミュレーションが広く行われるようになったが、それらの結果は計算モデルや初期条件に依存するので確定的な結論が得られているわけではない。我々は水槽等を用いた室内実験で流体（水やシリコン油）の流れをアルミ粉やサーモグラフィで可視化し、地球規模の現象の素過程の研究を行っている。ここで紹介する実験は環境や地学の教育実験としてしばしば取り上げられているが、気象現象の本質的な一面をとらえており、大規模なシミュレーションと相補的な関係にあると思われる。

2. ベーナール対流の実験

2-1 ベナール対流とすじ雲

容器に入れた液体を下から加熱すると、熱膨張に

より密度の小さくなった下層の液体が上昇し、いわゆる熱対流が起こる。1900年ベナールは金属製の皿にワックスを浅く入れ、下から加熱すると蜂の巣状の六角形の対流のセル構造が発生するのを発見した。その美しい規則的な形状は多くの理論家の興味を引きつけ、レイリーにより詳しく研究されたので、レイリー・ベナール対流と呼ばれることもある。^{1,2)}よく知られているようにベナール対流が起こる条件を判断するのにレイリー数、

$$R = \frac{ag\Delta Td^3}{\kappa\nu}$$

が用いられる。ここで、 a は熱膨張係数、 g は重力加速度、 ΔT は温度差、 d は液体の厚さ、 κ は熱拡散率、 ν は動粘性係数である。この式は熱膨張による浮力で液体が上昇しようとする力とそれを阻止する粘性力の関係で対流が発生が決まることを表している。境界条件にもよるが、 R が1000程度を越えたと対流が起こると言われている。

ベナール対流はもっと身近な例ではミルクを入れたコーヒーの表面³⁾や、味噌汁⁴⁾でも観察することができる。これらは下から加熱はしていないが、表面の液体が冷却され下にもぐっていくために同じような対流が起こっているのである。そしてミルクや味噌によって水の動きが可視化されている。ベナール対流は液体ばかりでなく空気でも起こってい

る。冬の日本海ではしばしば図1に示すような筋状の雲が発生する。これは空気のベナールセルがシベリアからの北風に吹き流されたものと考えられている。

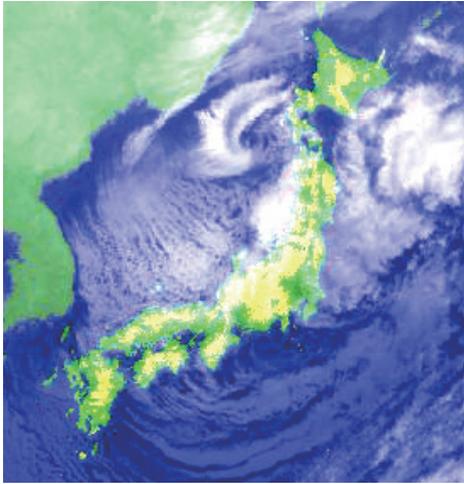


図1 冬の日本海のすじ雲。1997年1月21日の気象衛星ひまわりの画像データを加工したもの⁵⁾。

2-2 シリコン油による実験

ここで紹介するのは金属（アルミニウム）製の皿、またはガラス製のシャーレにシリコン油を数mmの深さに入れ、下からホットプレートで加熱したときに見られるベナールセルの例である。金属製の皿に2～3mm程度シリコン油を注ぎ、観察のためにあらかじめアルミ粉をまぜておく。加熱を始めてから数分で図2の写真のように周辺が直線の多角形で囲まれた多数の対流のセルが現れる。よくみると中央部から沸き上がり、周辺の直線部分で底に戻っていく流体の運動が観察される。最近普及しているサーモグラフィーを使うと表面の温度分布の様子を見ることができる。図3は図2とほぼ同じ条件でのベナール対流のサーモグラフィーの結果である。使



図2 シリコン油によるベナールセル

用したサーモグラフィー（アイ・アールシステム、MobIR-M4型）の画素数は120×160ピクセルで、デジタルカメラの写真のようにセルの形を詳細に記録することはできないが、温度についての情報を得ることができる点が大きな利点である。また、アルミ粉を用いずに対流の様子を可視化することも有力な点である。アルミ粉を混ぜることにより流体の熱伝導率が変化し、それにより対流の様子が変わってくる可能性もあるからである。図では温度の高い部分が白く、低い部分が黒く表示されている。

周辺部が白いのは皿の温度が緩やかに変動しているためである。右側のグラフは左図の中央部に水平に引かれた直線上の温度を数値で表したものである。温度が細かく波打っているのは対流セル中央部と周辺部での温度の変動をあらわしている。液体の平均的な温度が110～120℃であるのに対し、対流による温度の変動は3～4℃であることがわかる。図4はより大きなベナールセルについての結果である。セルの中央部で温度が高くなっていることが明瞭にわかる。サーモグラフィーで液体の温度を測定する場合、どの深さの液体から放射される赤外線を検出するかによって若干の誤差があることは認識しておくべきである。こうしてできたベナール対流はかなり安定しており、加熱を続ける限り同じ形を保っている。セルの大きさは油の厚さと共に大きくなる。アルミニウムおよび金属製の容器を用いて種々の厚さのシリコン油で測定した結果をまとめて図5に示す。セルの大きさ W は厚さ d と共に直線的に変化していることがわかる。最小自乗法でフィットする W と d との関係は

$$W = 4.0d - 1.8 [\text{mm}]$$

と表せる。 d の大きな領域でセルの大きさが厚さの4倍であるということは報告されている結果とほぼ

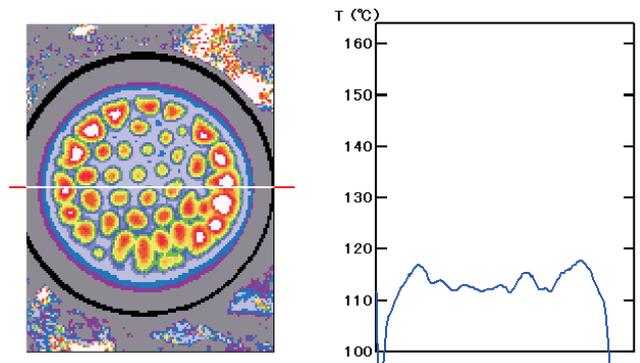


図3 サーモグラフィーで見た小さなベナールセル(左)と図中の直線に沿った温度分布

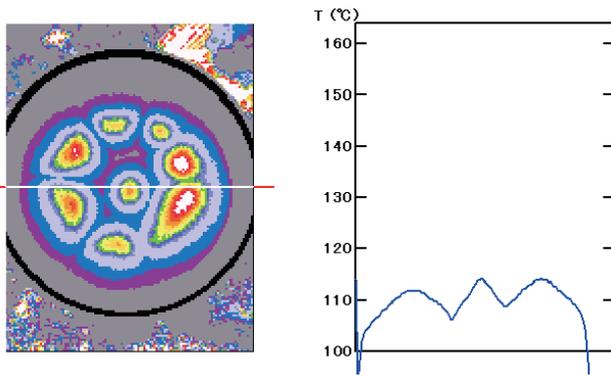


図4 サーモグラフィーで見た大きなベナールセル(左)と図中の直線に沿った温度分布

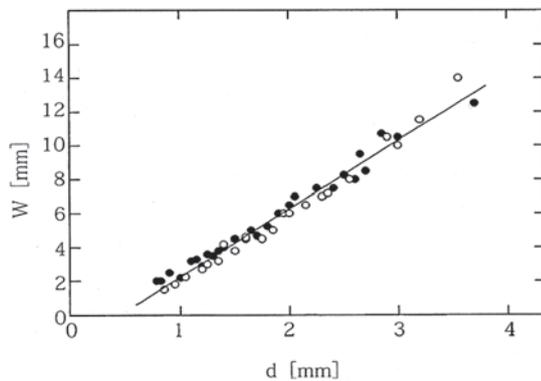


図5 セルの水平方向のサイズ W と油層の厚さ d

一致する⁴⁾。ただし W が単純に d に比例するのではなく、 -1.8 mm の定数項が存在するのは、 d の小さい領域で W と d の関係が非線形であることが予想される。 d が小さくなると対流の駆動力として重力の外に表面張力の不均一性も関わってくるのが知られている。また d が小さくなるとレーリー数が d^3 に比例して急速に小さくなり、対流が起こりにくくなる。これらの要素が比例関係のずれの原因になっていることが考えられる。小さなサイズの対流には興味深い現象が起こっている可能性がある。

3. 回転水槽と偏西風波動

3-1 大気大循環と偏西風

地球大気の運動は太陽の放射エネルギーと地球の自転運動が関係する。太陽エネルギーを強く受ける赤道付近で加熱された大気は上昇し（赤道低圧帯）、北緯 30 度付近の中緯度高圧帯で下降する熱対流を形成する。この南北方向の対流はハドレー循環と呼ばれている。中緯度で下降する大気は断熱圧縮により温度が上がり乾燥する。従ってこの付近には砂漠地帯が多く分布する。ハドレー循環の北には北緯 60 度付近の高緯度低圧帯で上昇し、30 度付近でハドレー循環と合流して下降するフェレル循環が存在する。（図 6 参照）更にその北側には高緯度低圧

帯で上昇し北極付近の極高圧帯で下降する極循環が存在する。これら南北方向の 3 つの大気循環は南半球にもほぼ対照的に存在し、赤道付近に集中して注がれる太陽エネルギーを南北に拡散させる役割をしている。しかしながら大気の循環には自転に由来する東西方向の流れが重なるのでより複雑である。中緯度帯で下降したハドレー循環が地表付近を赤道低圧帯に戻る際、東から西に向かう東風の成分をもち、貿易風と呼ばれている。これは大気に対し地表が東向きに自転しているためである。もしも大気が完全に静止していて地表が 24 時間で自転しているとすると、その間に赤道上では 40,000 km 移動するので風速は 463 m/s となるが中緯度帯ではさらに遅くなるものの貿易風はこれ程には速くない。摩擦により大気は自転の方向に引きずられているからである。ハドレー循環の北端の中緯度帯の上空では偏西風と呼ばれる 40 m/s 程度の強い西風が吹いている。東京から大阪に向かって高度 10,000m 付近を飛行するジェット機は偏西風に向かうので逆のコースに比べて 20% も多く時間がかかることはよく体験することである。なぜ地球の自転を追い越すような西風が吹くのか、一見不思議であるがその原動力はやはり地球の自転である。すなわち角運動量の保存則である。赤道付近で地表との摩擦によって大気が得た角運動量はハドレー循環によって中緯度帯に運ばれる。非常に単純な計算をすると、北緯 30 度での円運動の半径は赤道の $\sqrt{3}/2$ 倍であるので角運動量保存則により速度は $2/\sqrt{3}$ 倍になる。赤道で大気が地表と同じ速度で引っ張られているとすると北緯 30 度の大気は速度は 535 m/s になる。一方、そこでの地表の速度は $\sqrt{3}/2$ 倍の 401 m/s であるので理論的な偏西風の速度は 134 m/s ということになる。実際にはさまざまな過程で摩擦が働くので実際の風速はこれより小さな値になっている。ハドレー循環によって中緯度帯に運ばれた大気の角運動量は強力な偏西風を生み出す。これは亜熱帯ジェットと呼ばれている。南北方向の対流による大気循環と東西方向の偏西風の大気運動は独立なものではなく、偏西風は絶えず波動的な動きをしており、偏西風波動と呼ばれている。図 6 はこれらの大気循環を模式的に示したものである。北半球の大気の運動を示しているが、南半球も概ね対照的である。ただし、大陸の分布が北半球に偏っていることによる非対称性もある。実際の偏西風と気象現象はずっと複雑である。その詳細は本稿の目的ではないので関心のある読者はもう少し専門的な書物を見られることをお勧めする⁶⁾。

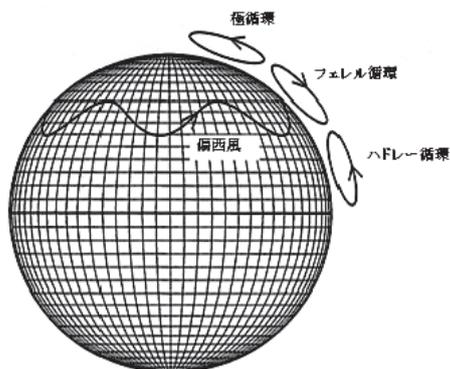


図6 地球上の主な大気循環と偏西風波動

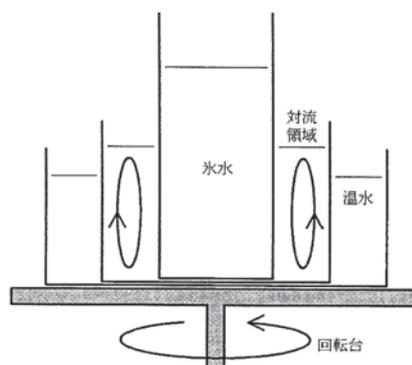


図7 回転水槽の実験装置

3-2 回転水槽を用いた実験

南北方向のハドレー循環と東西方向の地球の自転運動を組み合わせた大気の運動を水で簡単に再現する、回転水槽の実験行われている^{7,9)}。その装置の断面を図7に示す。外側の水槽には50～60℃に加熱した温水を入れ赤道地帯を模擬する。中央部には氷水を入れ、極地を模擬する。その中間の水槽には常温の水を入れ、中緯度帯を模擬する。外側で加熱され、内側から冷却される中緯度帯には鉛直方向の対流が発生する。この水槽を回転台に載せ、毎分10～20回転させると中間の水槽の表面に波動が発生する。その様子はアルミ粉を浮かべておくことにより観察できる。回転を始めて数分で波動は形成される。回転数を増やすと波動の数も多くなる。外側の水槽の温水の温度は特に制御していなくても波動は比較的長時間持続する。波動ができていない状態の中間層の温度は30～40℃である。図8はこうしてできた波動の一例であり、4つの波動が見られる。これらの波動をサーモグラフィーで撮影し、解析した例を図9に示す。前述のとおり、緑褐色の部分の温度の低い部分である。中央の氷水の部分から水塊

が外に向かって飛び出している様子がよく観察される。波動の外側の隙間には高温の独立した渦が見られる。実際の偏西風波動のうねりが激しくなるとその一部が主流から切断されるブロッキングと呼ばれる現象が起こり、切断された部分はブロッキング高気圧や切断低気圧と呼ばれ、比較的長く安定して停滞し異常気象の原因となることが知られている。ここで見られる渦も出来方は異なるが、形態的にはブロッキング高気圧や低気圧と似ている。

波動の立体的な構造を観察するため、透明なガラスの容器を用いて図7と同様の構造の装置を作製し、実験を行った。うまく写真では表せなかったが、図7から想像される様な上下方向の対流と円周方向の回転が重なったスパイラル状の流れを観察することができた。金属製およびガラス製の容器を用い、回転数を変えたときできた波動の数を図10に示す。どの回転数でもガラス容器の場合の方が波動の数が1つ程度多くなっている傾向が見られる。金属はガラスよりも熱伝導が良いので、壁面での熱的境界条件の違いが原因であると思われる。



図8 回転水槽で発生した4つの波動

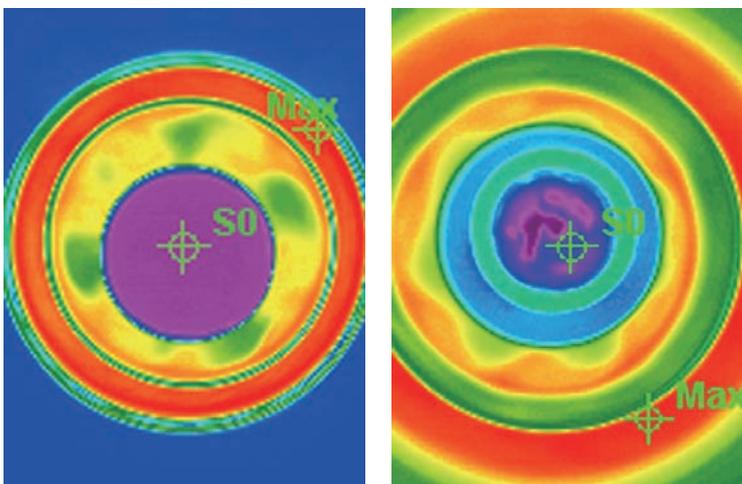


図9 サーモグラフィーで見た回転水槽の波動
左：4つの波動の場合、右：6つの波動の場合

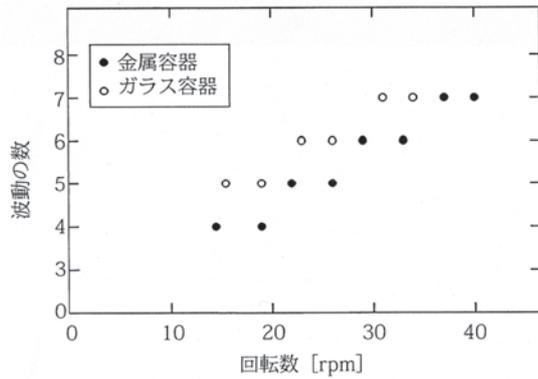


図 10 回転数を変えたときの波動の数の変化。金属性とガラス製の容器の回転水槽を用いたときの比較

4. 衛星画像の解析

最近ではデジタルカメラが普及し、撮影したデジタル画像をパソコンで容易に処理できるソフトも多い。デジタル画像は数万～数百万のピクセル(画素)の集まりであり、1つのピクセルはR(赤), G

(緑), B(青)の3原色の強さに対応する数値が含まれる。各色は0-255の10進数(8ビットの2進数)の階調で表せる。すなわちサーモグラフィと同様、1枚のデジタル写真には膨大な数値データが含まれ、それらをうまく解析することにより有効な情報を引き出すことができる。ここでは比較的単純な例を紹介する。図 11 はかつての気象衛星ひまわりによる日本周辺の赤外画像で、横 320 × 縦 240 = 76800 ピクセルの画素で構成される。画像の左上の一部の画素の数値(10進数)を右の図に示す。例えば右下の数値 13559766 は2進法で

11001110 11100111 11010110

と表せるが、これを8ビットずつに分け、それぞれを再び10進法で表すとそれぞれ 206, 231, 214 となる。これらは赤, 緑, 青の成分を 256 階調で表したものになる。3色の成分をこれらの平均値で置き換えて再描画するとモノクロの画像が得られる。

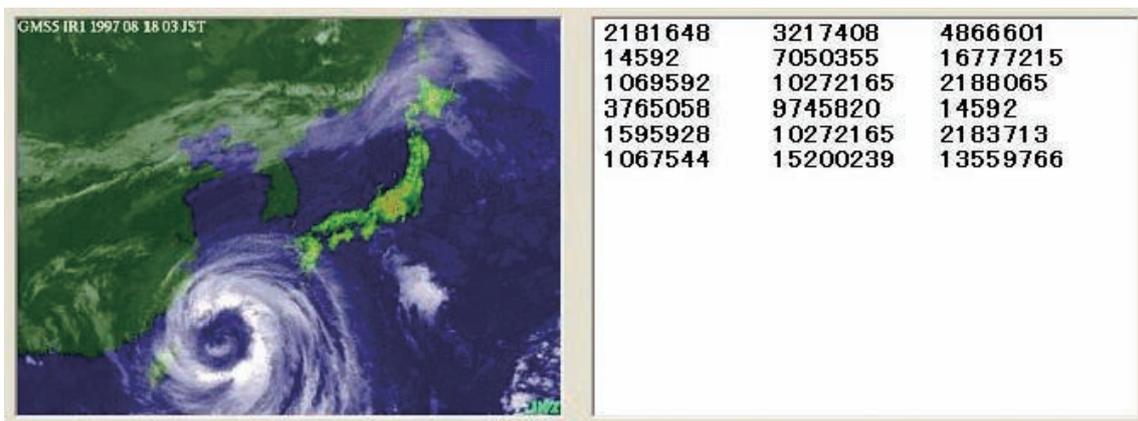


図 11 気象衛星ひまわりの画像とピクセルの色情報(10進法表示)

図 12 の画像は台風の部分をモノクロ化し、その断面の強度をグラフ化したものである。赤外線の色は温度に対応しており、白く見える部分は温度が低い。あまり定量的ではないが、台風の勢力の横断面と見ることができる。最近では気象庁やウエザー

ニュースなどのサイトで1時間毎の衛星画像を取得して雲の動きを解析することにより大気運動を研究することができる。風洞内の空気の流れが煙によって可視化されるように、地球規模の大気運動が雲によって可視化されているということもできる。

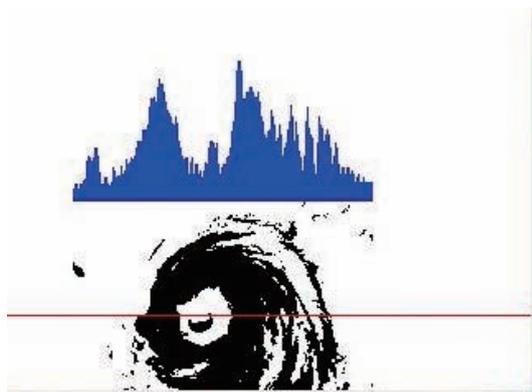


図 12 画像解析で求めた台風の断面

5. ナノ対流とマルチスケールモデル

物質の熱伝導は機械的強度と共に材料の最も基本的で重要な性質の一つである。例えばコンピュータのCPUの放熱のためには高熱伝導率の材料が要求される。近年、窒化アルミやカーボンナノチューブをはじめ多くのナノ構造の高熱伝導体が開発されつつあるが、そこではナノ構造の粒界や界面、高次構造などが本質的に深く関わっていると思われる。最近、水やその他の液体にシリカやダイヤモンドなどのナノ粒子を数%浮遊させたナノ流体(nanofluid)は高い熱伝導性を示すことが発見され注目を集めて

いる¹⁰⁾。高熱伝導性の流体はヒートパイプの作業物質など広い分野での活用が期待されるからである。これにはナノ粒子-液体界面でのマイクロな対流や粒子のブラウン運動が関わっているといわれているが確定的ではない。米国のマサチューセッツ工科大学やアルゴンヌ国立研究所では実用化に向けて本格的な研究を始めている。我々は対流現象研究の立場からこれらの現象を解明するプロジェクトを進めている。仮にナノ流体でマイクロな対流が起こっているとしてもそれは光学顕微鏡や電子顕微鏡で見えるものではない。本研究で可視化してきた対流の画像データや原子レベルでのコンピュータシミュレーションを利用した研究により、そのメカニズムが明らかになることが期待される。

ナノ流体での対流は原子のスケール、すなわち $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ の程度の世界の現象である。一方、偏西風波動は数千 $\text{km} = 10^6\text{m}$ のスケールでの現象である。従って、両者のサイズは 10^{15} 倍の差がある。流体力学はどんなサイズでも粘性係数や密度などのマクロなパラメータを含むナビエ・ストークスの方程式で表せるが、これだけスケールが違う世界の現象が同じパラメータで表せるとは限らない。原子から地球に至る尺度の間にはビーカーの中の水、室内の空気、谷の温度分布などの様々のスケールでの流体運動が存在する。異なるスケールでの流体のパラメータ（粘性係数や熱伝導率など）は必ずしも同じではない。スケールが大きくなるとその中には水滴や雲が含まれていたり、局所的に乱流が起こっていることによる高次構造をもつ。その場合の流体の有効パラメータはビーカーサイズの流体のそれとは異なっていることが考えられる。例えば、濟州島の風下側にはカルマン渦とよく似た形態の雲が発生することが知られているが、これと実験室で発生したカルマンを定量的に比較することは現在のところ困難であり、大きなスケールでの有効パラメータの評価が関係する問題と考えられる。

6. 結 語

気象現象のモデルとして、ベナール対流や偏西風波動の実験について紹介した。ナビエ・ストークスの方程式で表される流体力学の現象は無次元化されたパラメータを用いることにより、地球規模の 10^6

m オーダーから実験室内の 10^{-2} m オーダーの現象まで共通の基盤で表現できることからこうした実験の意味がでてくる。もちろんサイズが8桁も異なる室内実験で気象現象の細部まで定量的に比較することは困難であり、意味がないがその本質を考えるのに有効な方法である。我々は球形の地球を模した3次元装置での実験も試みたが可視化には至っていない。自由な発想によるモデル実験が数多くなされることは、大規模なコンピュータシミュレーションモデルの構築においても有用な情報を与えるものと思われる。

謝 辞

本実験の多くの部分は帝京科学大学環境科学科・木暮小杉研究室の卒業研究で行われたものである。実験を遂行してくれた藤井淳一、船木俊孝、辻和敏、室賀広行の諸氏に感謝する。

参考文献

- i) 神部勉, P. G. ドレイジン: 「流体力学 安定性と乱流」, 東京大学出版会, p. 59 (1998)
- ii) E. L. Koschmieder, "Benard Convection", Adv. Chem. Phys. Vol. XXVI, p.177 (1974)
- iii) V. J. Schaefer: "Observation of an Early Morning Cup of Coffee, American Scientist, Vol. 59, p. 534 (1971)
- iv) 三池秀敏: 「みそ汁の対流パターン」, パリテイ Vol.13, No.08, p.4 (1988)
- v) 日本気象協会編: 「気象データひまわり CD-ROM99」, 丸善 (1998)
- vi) 田中博: 「偏西風の気象学」, p. 1, 成山堂書店 (2007)
- vii) 小倉義光: 「一般気象学」[第2版], 東京大学出版会, p. 187 (2000)
- viii) 菊池勝弘, 瓜生道也, 北林興二: 「実験気象学」, 東京堂出版, p. 103 (1988)
- ix) 和田佳久 「惑星気象学」, 東京大学出版会, p.90 (2000)
- x) C-H. Lo and T-T. Tsung: "Low-temperature Effect on the Stability of CuO Nanofluid", Rev. Adv. Mater. Sci. Vol. 10, p. 64 (2005)