551. 508. 9 : 551. 511. 32 : 551. 513

昭和54年秋季大会シンポジウム「流体を使う室内実験による大気現象の研究」の報告

まえがき

昭和54年秋季大会シンポジウム「流体を使う室内実験による大気現象の研究」は，1979年10月25日，福岡市電気ビルにおいて，坂上務氏を座長として開催された．その概要を講演者の投稿論文および討論の抄録によって報告する．

1. 気象力学における流体実験の意味*

木 村 竜 治**

1. はじめに

結論をさきにいってしまうと，気象学で意味を持つ流体実験は，大気現象の①相似模型，②メカニズム模型，③イメージ模型　の3種に分類できて，それぞれ，実用，研究，教育面で有効な道具となり得る．実際に実験を行なう際には，このような気象学における実験の位置づけなど気にしないで行なうことが多いので，この機会に，流体実験と気象学との関係を少し整理して，シンポジウムの導入的な話題としたい．

まず，流体を使った室内実験を「流体実験」と呼ぶことを提案する．「室内実験 (laboratory experiment)」の中には，流体を使わない実験も含まれるし，数値実験だって，laboratory experiment ではないが，「室内（で行なう）実験」である．ここでは，『数値の代わりに流体を使う実験』の意味で，「流体実験」という言葉を使う．

最近は，AMTEX, MONEX のように，大規模で組織的な観測に対して experiment という言葉が使われるが，流体実験とは異質なものである．大気を巨大な実験室と考えられないこともないが，大気現象は人為的に制御できない．これに対し，流体実験の特徴は，実験室内によく制御された流体系を作り，その性質を調べることである．そうであれば，大気と異なる流体系の性質を調べることがなぜ大気の研究に役立つのか，という疑問が生じる．これに対して，実験家は「流体実験は大気現象の模型である．模型の性質を調べることによって，実物の性質を知るのである．」と答えるであろう，それでは，模型とは何か．この問題に対する考察が，私の話の中心である．

2. 相似模型

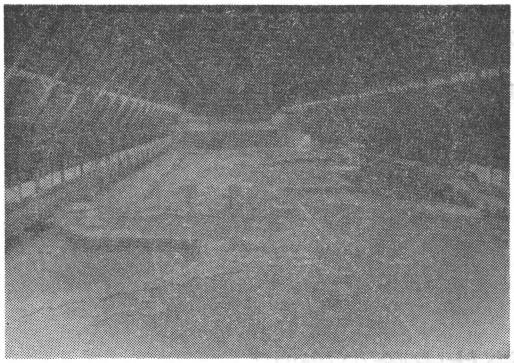
工場を建てる前に，その地域の風向風速の統計的な性質を知りたい，という実用的問題がある．卓越風向が与えられても，地形の効果で地上の風向は複雑に変化する．それを調べるには，特別観測を行なって，卓越風向別にその地域の風系を測定すればよいわけであるが，あらゆる卓越風向に対してデータを得るまでには，ひどく時間がかかる．まして，丘陵地域の一部を削って工場を建てようとする場合には，工事着工前に風系を知ることはできない．そのような場合，地形の縮小模型を利用して風系がわかれば便利である．このような目的には，地形模型の上に大気の流れとそっくりの流れを作りたい．そっくり，といってもサイズだけは極端に小さいので，この種の模型を相似模型と呼ぶ．大気現象と相似の関係にある模型という意味である．幸いにして，流体は相似性を示すので，うまい模型を作ると，自然現象を定量的に再現できる．その根拠が相似律である．相似律については，後に伊藤氏が話題提供されるので，ここでは述べない．実用的にひろく行なわれている実験には，風洞実験と水理模型実験がある．風洞実験は地表近くの大気現象を扱い，水理模型実験は河川や海水の流れを対象とする．

第1図は，呉市の中国工業技術試験所にある瀬戸内海の水理模型である．13.5億円をかけて，昭和48年に完成

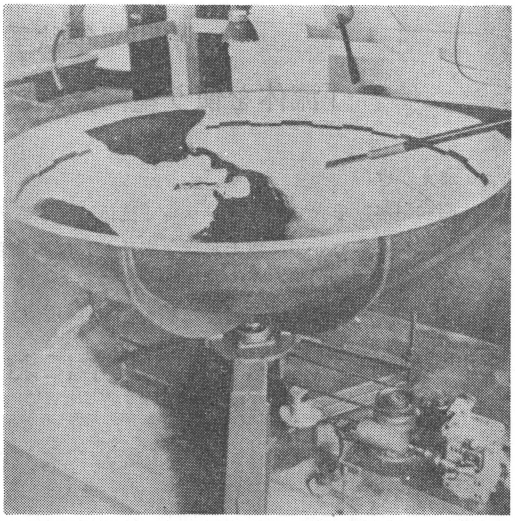
---

* Meaning of fluid experiments in meteorology.

** Ryuji Kimura, 東京大学海洋研究所



第1図　呉市の中国工業技術試験所にある瀬戸内海の水理模型．九州側から東を望む．



第2図　von-Arx（1952）が考案した北半球全体の海洋の水理模型．水面に北半球の風系に対応する風を吹かせて海水循環を再現しようとした．

した．瀬戸内海の海底地形を，水平方向 1/2,000，鉛直方向 1/160 に縮小して忠実に再現したものであるが，単なる地形模型としては高価すぎるであろう．実験の目的は，この模型の上に瀬戸内海の潮流を再現して，埋立計画や排水放流計画のアセスメントを行なうことにある．したがって，模型の上の流れが実際と異なっていれば全く意味がない．いわば，相似律に13億円をかけた，といってもよいであろう．

瀬戸内海全域（東西 400 km，南北 150 km）は，相似模型の対象としては大規模であるが，自然現象としては，中小規模の部類に入る．もっと大規模な自然現象に対しても相似模型は可能であろうか．第2図は，北半球全体の海洋の循環を相似模型で再現しようとした von-Arx（1952）の実験装置である．彼は，球面上にある海洋を回転放物面で近似しようと考えた．力学的には，海が球面上にあるために生じるコリオリ力の緯度変化（ベーター効果）が回転放物面でも表現できる，と思ったのである．しかし，水深（重力の方向に測定した水深）一定の海では，ベーター効果は生じなかった．これに対し，地球上の海では，重力の方向に測った水深が一定でも，ベーター効果が生じる．その理由は，（密度一様の海洋を考える場合）回転軸の方向に測定した水深が，模型では緯度方向に一定であるが，地球上では異なっている点にある．連続的に密度成層をなす海洋について，同様の議論が成り立つかどうかわからないが，現在のところ，密度成層を考慮した相似模型でベーター効果をうまく表現することに誰も成功していない．一般に，現象に関与する力学的効果の数が増えると，相似模型を作るのが非常にむずかしくなる．相似律と，実験技術的な制約との折合いがつかなくなるからである．また，大規模な大気現象には熱力学的な効果（放射や水の相変化による加熱冷却作用）が重要であるが，これを相似模型に組み入れることは非常にむずかしい．たとえば，気塊の上昇に伴う断熱冷却で積雲が発生する過程を小さな相似模型内に再現させることは不可能である．このようなことを考えると，大気の大規模現象に対する相似模型を作るのは絶望的のように思える．それでは，大規模現象に対して流体実験は無力か，というと，そうではなくて，非常に多種多様の定量的な実験が大規模現象に対して行なわれている．その指導原理は相似模型と異なる点にある．

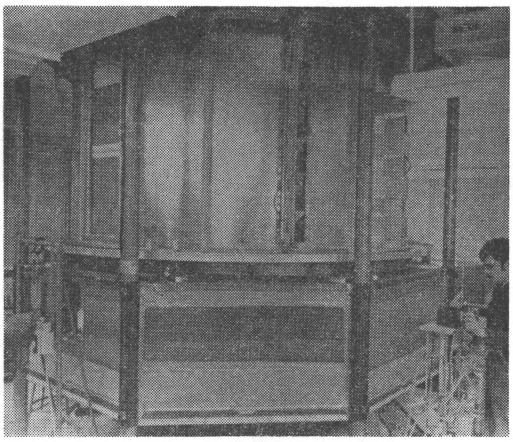
3. メカニズム模型

別の指導原理とは，スケールアナリシスのことである．スケールアナリシスとは，特定の現象のスケール（空間，時間，速度，圧力などさまざまなスケール）に着目して，その現象の本質を記述するもっとも単純な近似方程式系を導く作業である．Boussinesq（1903）は，熱対流の性質を記述するために，密度が温度のみによって変化する流体を考え，密度の変化を浮力のみで考慮する単純な方程式を提案した．今日，ブシネスク近似とか，ブシネスク流体と呼ばれている方程式である．その後，気象現象に対するスケールアナリシスの研究が，Batchelor（1953），Spiegel・Veronis（1960），Ogura・Phillips（1963）等によって行なわれた（小倉，1966；栗

原，1979参照）．スケールアナリシス的考え方の裏には，大気という複雑な流体系から特定の現象を切り離して扱えるという期待がある．そして，大気現象を総合されたシステムとして扱わずに，大気から切り離された個々の現象の性質を調べようとする態度がみられる．この種の研究の蓄積の結果，大循環規模から大気境界層内の小規模現象に至るまで，大気現象の多くのメカニズムがブシネスク流体で表現できることがわかってきた．それを体系化しようとするのが，地球流体力学である．密度成層と回転で特徴づけられるブシネスク流体の性質を体系的に調べれば，自然現象のメカニズムの理解に役立つという考え方である．ところが，ブシネスク流体のシステムは実験室内で容易に実現できる．そこで，地球流体力学の理論は自然現象で検証するよりも，流体実験で検証するのが普通である．また，流体実験に導かれて理論を構築する場合もある．どちらにしろ，流体実験は，地球流体力学の有力な研究手段となり得る．この種の実験は，自然現象のメカニズムのみに着目した模型であるから，相似模型に対してメカニズム模型と呼ぶことにしよう．

メカニズム模型の多くは，容器に入った回転（または／および）成層流体の性質を扱う．現象的には，特定の駆動力（機械的，熱的）を与えたときの流体の応答，安定性，波動，乱流現象が興味の対象となる．さらに詳しい分類は，木村（1976）の第1表にまとめてあるので参照されたい．次に守田氏が報告する傾圧不安定波の実験は，メカニズム模型の一例である．

相似模型は，相似律を媒介に，模型と自然現象が直接結びついているが，メカニズム模型は，地球流体力学という理論体系を通して自然現象と結びついている点に注意されたい．理論を飛びこえて模型と自然現象を直接対応させようとすると意味を失ってしまう．自然現象のメカニズムの理解が目的であるから，気象学の研究的側面で有効な研究手段といえよう．

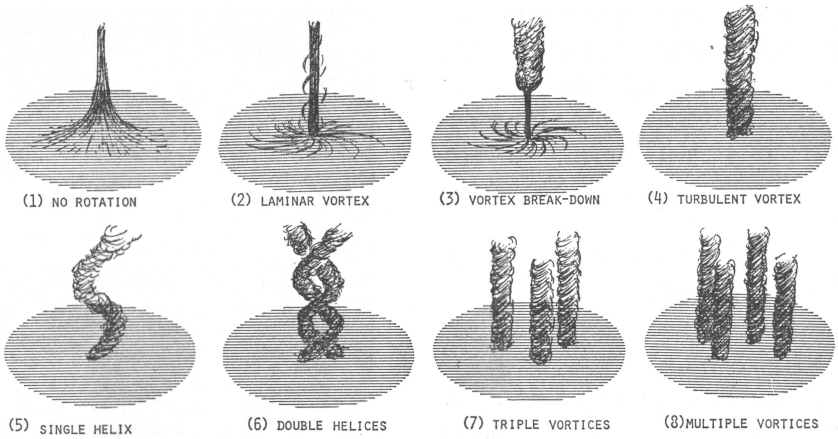


第3図　アメリカのパデュー大学にあるたつ巻の実験装置．外観と内部構造（Church *et al*, 1977）．

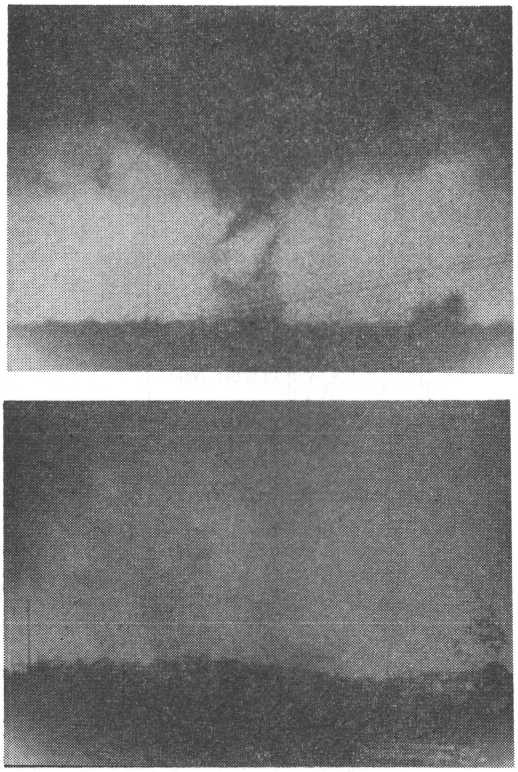
4. イメージ模型

気象学には，実用，研究の他に教育的な側面がある．相似律やスケールアナリシスの理論を知らない人に，大気がいかなるものであるか教えることはとても重要であろう．この場合，相似模型もメカニズム模型も意味を失なう．模型と自然現象を結びつけている論理を理解してもらえなければ，論理は説得力をもたない．それにもかかわらず，流体実験が自然現象の理解に役立つ場合があり得る．模型の流れが自然現象のイメージを連想させる場合である．

大規模な大気現象のイメージを頭に描くのはとてもむずかしい．それは，①われわれが現象にあまりに接近し過ぎて，全体像を一望のもとにとらえられない，②たえず変化していく大気の動的イメージを静的な大気図の中にとらえることがむずかしい，からである．大気の動的なイメージを与えるのに映画は有力な道具である．コマどり撮影を行なうことにより時間スケールの感覚を人間



第4図　第3図の実験装置で空気の流入量を一定に保ち，網の回転数を増加させていく場合に生じる渦巻の形の変化．

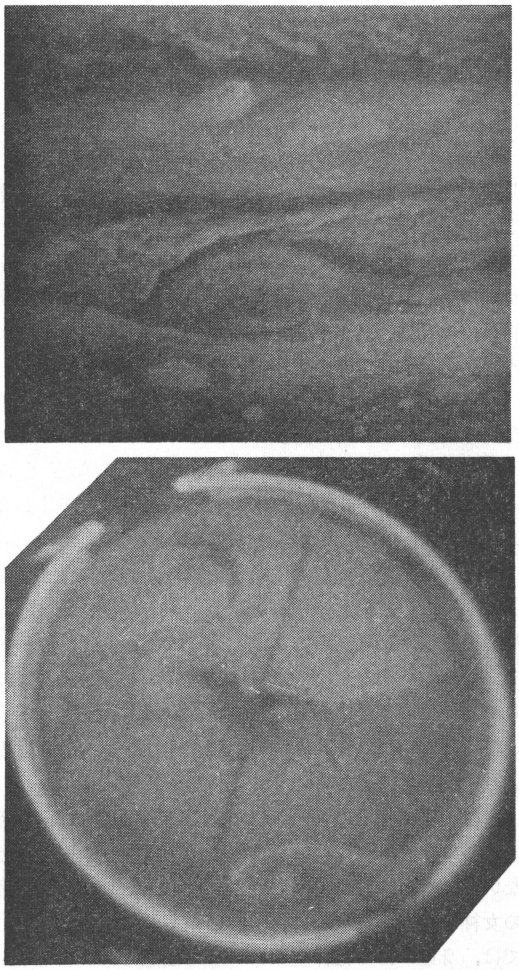


第5図　第4図の（6）（上図），（8）（下図）に対応すると思われる実際のたつ巻の例（写真は，新野宏氏提供）．

にあわせて適当に調節できるし，レーダーや人工衛星を利用して，人間の視野を拡大することも可能である．映画を通して，われわれは自然現象の動的な姿を視覚的イメージとして知るのであるが，そのイメージを連想させる流体実験を行なうと，現象が身近なものに感じられる．特に，まれにしか起こらない現象，はるか遠くの惑星に生じているような現象でも，流体実験で繰り返し観察していると，身近なものに感じられる．このような目的で行なわれる流体実験を，ここでは，イメージ模型と呼ぶことにする．

イメージ模型の例として，たつ巻のモデルと木星の大赤斑のモデルを紹介する（シンポジウムでは，16 mm 映画で，自然現象と流体実験のパターンの類似性を示した）．たつ巻の実験は，アメリカのパデュー大学の地球科学教室で行なわれているメカニズム模型であるが，ここでは，定性的に紹介するのでイメージ模型として扱う．第3図に実験装置の外観と内部構造を示す（Church, *et al.*, 1977）．円筒容器の上部にあるファンによって，容器下部から空気を吸い込み上部から排気する．空気の吸い込み部分に回転する網があり，空気が網をすり抜けるとき角運動量を与えられる．そして，中心で渦巻になる．排気量（流入量）を一定に保ち，網の回転数を次第に増加させた場合の渦巻のパターンの変化を第4図に示す．回転数が小さいときは層流の渦巻であるが，ある値を越えると乱流の渦巻になる．さらに回転数を増加させていくと1本の渦巻が，2本，3本と分裂して，自転しながら容器の中心軸のまわりを公転する．第5図は，複合たつ巻の実際例であるが，実験で得られた渦と形がよく似ている．

第6図は，ボイジャー1号が撮影した木星の大赤斑と



第6図　ボイジャー1号が撮影した木星の大赤斑（上図）と回転水槽内の水平シアー流の中に生じた渦巻（下図）.

実験室内に作った渦巻を比較したものである．大赤斑については，いくつかの力学的なモデルが提案されているが，まだ確定した説明は行なわれていない．ボイジャー1号の撮影したコマ撮り映画をみると，木星の南半球の東向きと西向きの帯状流の境界に渦巻きが維持されているようにみえる．そこで，回転流体（密度一様）内に水平シアー流を作ってみたところ，水平シアー流に不安定（順圧不安定）が生じて，第6図（b）に示すような渦巻の発生がみられた．しかし，この渦巻は次第に変形して数分後には消滅してしまう．この実験は，300年間同じ形を保ち続けている木星の大赤斑がシアー流の不安定性だけでは説明できないことを示唆している．

第1表　流体実験の種類

目　的	模型の名称	自然現象と結びつける根拠
実　用	相似模型	相似律
研　究	メカニズム模型	地球流体力学
教　育	イメージ模型	視覚を通じての感覚

5. まとめ——数値実験との関係

以上の話は，第1表のような図式にまとめられる．実験の種類によって結果の扱い方が違ってくるから，実験を行なう際には実験目的をはっきり意識することが大切である．

シンポジウムの席上では時間がなくて話さなかったが，流体実験と数値実験との関係について一言述べたい．両者の関係は，模型の種類によって異なる．数値シミュレーションの性格は，相似模型と似ている．自然現象に対して並列関係にあるから，流体実験を数値実験で検証することは意味がない．ともに多くの現象を総合して自然の状態に接近するのが理想である．これに対し，メカニズム模型では，数値実験は理論に近いもので，流体実験は理論で検証されるべきものである．理論は一般性を指向するから，流体実験もできるだけ一般的な結果が得られるものがよい．それには，できるだけ単純であることがのぞましい．したがって，相似模型は複雑化を，メカニズム模型は単純化を求める．現在，イメージ模型に対応する数値実験はないが，将来は，アニメーションを自動的に作製する方法として有力である．

謝　辞

パデュー大学の実験資料は新野宏氏（東大海洋研），ボイジャー1号の16mm映画はNHKの提供を受けました．記して感謝の意を表します．

文　献

Batchelor, G.K., 1953: The conditions for dynamical similarity of motions of a frictionless perfect-gas atmosphere, Quart. J.R. Met. Soc., 79, 224-235.

Boussinesq, J., 1903: Théorie analytique de la chaleur, 2.

Church, C.R., J.T. Snow and E.M. Agee, 1977: Tornado vortex simulation at Purdue University, Bull. Amer. Met. Soc., 58, 900-908.

木村竜治，1976：地球流体力学について，天気，23，591～612.

栗原宜夫，1979：大気力学入門，岩波全書，p. 138.

小倉義光，1966：最近の気象力学，気研研究ノート，17，1-61.
Ogura, Y. and N.A. Phillips, 1962: A scale analysis of deep and shallow convection in the atmsphere, J. Atmos. Sci., 19, 173-179.
Spiegel, E.A. and G. Veronis, 1960: On the Boussinesq approximation for a compressible fluid, Astrophys. J., 131, 442-447.

質疑応答

竹内：模型と自然現象との関係を相似律とスケールアナリシスに着目してクリアーカットに分類されたが，私の考えでは必ずしもそうではない．相似律にもスケールアナリシスを考えないと模型実験は完全に行なえないのではないか．

木村：わかり易くするために多少クリアーカットし過ぎた点は認める．相似模型の例として示した瀬戸内海の水理模型も密度成層は考慮されていない．瀬戸内海の潮汐に密度成層が重要でないというスケールアナリシスの結果を前提としているわけである．しかし，簡単に密度成層のモデルができるならば，この水理模型に組み入れられたと思う．できるだけ自然の状態に似せたいのだが，技術的にむずかしいのでやむを得ずスケールアナリシスを使っているのではないか．これに対し，メカニズム模型では，技術的に可能であっても，着目する現象に不要の要素は積極的にのぞく点が相似模型と異なっている．

北川：メカニズム模型とイメージ模型との間にはクリアーカットはないと考えられる．感覚的と思われるようなイメージ模型と自然現象との間にある物理現象としての本質的な対応を探り出すことは，自然現象の解明に役立つことが多い．たとえば，火花放電については相似律による模型実験は不可能であるが，人体への落雷についてはモデル人体への放電実験から従来全くわからなかった現象の本質を明らかにすることができた．模型実験という手法を整理する上で，模型と対応する自然現象に共通する物理現象の本質をさぐり出すことの重要性を指摘したい．

木村：最後に指摘された点は，室内実験のみならず理論的な研究に対してもいえるほど大きな一般性をもつ．これに対し，私の分類は，流体実験という枠内で考えたことである．実は，気象学では，流体を使わない室内実験のほうが重要である．流体現象は理論的枠組が割合しっかりしているが，流体以外の物理現象では，理論的予測がむずかしい場合が多く，こういう場合に室内実験が研究の指導的役割を果たす場合が多いように思う．人体への落雷実験もその一例ではないか．雲物理に関係した多くの実験もその例である．流体を使わない室内実験と自然現象との関連の方が，流体実験と自然現象との関連よりも，等身大の模型ができる点でより直接的であるように思われる．

孫野：実用・研究・教育に分類されたが，研究者といえども自然現象をすべて知っているわけではないので，研究者自らを教育する意味でも，感覚的実験から出発してスケールアナリシスの方向に進む行き方があると思う．

木村：確かにその通りであるが，注意すべき点は，感覚的な実験と論理的な実験の区別をはっきりしておくことだと思う．感覚は主観的で，科学の方法になじまない．教育は個人が納得すればよいので主観的でかまわないが，研究的実験では論理的根拠が不可欠である．

廣田：しかし，論理的根拠が実験に先立って存在するとは限らない．実験の中から新しい現象がみつかって，然る後に根拠が与えられる例もある．たとえば，ファーラーの境界層不安定，ハイドの vacillation を考えてほしい．このような“発見的”実験の価値も強調されてよいのではないか．つまり，自然現象→理論→実験と逆の認識過程もあり得るということである．

木村：廣田さんの言われる“逆の認識過程”は，実験家，特にメカニズム模型を作ろうとする実験家の夢ではないだろうか．しかし，これが成功するためには，幸運の女神に見初められることが必須の条件である．私としては，身近にある流体現象にいつも注意して，自然現象との関連を考えるように努めているのだが，女神は，ふりむいてもくれない．

廣田：作業流体としてさまざまな流体があるが，実験家は自分の好みで任意の流体を使っているように見受けられる．大気は空気，海洋は水であるが，大気現象の実験には空気，海洋現象の実験には水を使う，といった必然性はないのか．

木村：気体のモデルには気体を，液体のモデルには液体を使う，という必然性はない．地球流体現象の模型は，すべて，理論的には，ブシネスク流体を想定して行なわれる．音速より小さな実験室内の流れでは，気体といえども圧縮性の効果は無視できるから，液体と同様にふるまう．それでは，何を基準に作業流体の種類を選んだらよいかというと，これはむずかしい問題で，一言で答えられない．実験室内は既に空気で満たされているから，大規模な実験には空気が便利である．しかし，自由

表面が重要である潮流の模型は，どんなに大規模でも液体を使わざるを得ない．どちらでもよい場合は，流れの可視化が容易なものを選ぶ．実際の流体は，理論と異なり，物性定数が温度によって変化する．物性定数の温度依存性が現象に影響を与えるような場合は，自然現象や理論にもっとも適合した流体を選ぶ．しかし，これらの条件は，場合によって，競合することがあり，どの条件を優選させるか実験家の主観的判断に頼ることがある．そのために，実験家の好みで作業流体を選んでいるような印象を与えるのではないだろうか．

2. 回転流体中の傾圧不安定波*

守　田　　治**

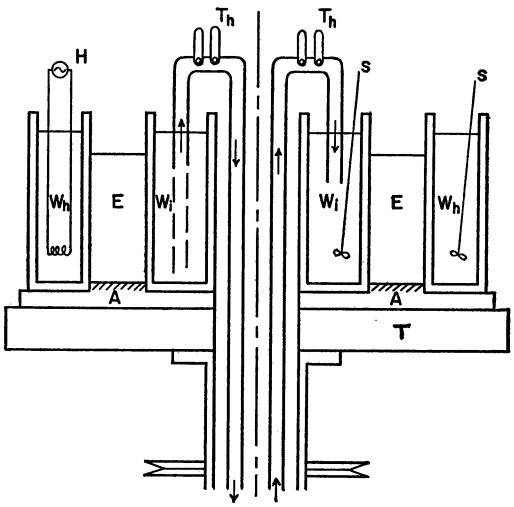
1. はじめに

一般に，純粋物理の実験が，自然その物を対称とするのに対し，気象における流体実験は，いわば様式化された自然を対象とする．水平温度傾度を持つ回転流体実験もその例に漏れない．

実験水槽は，平らな断熱壁を底に持つ2重の円筒容器で，annulus 型と呼ばれている（第1図）．上の境界は自由表面であったり，平らな断熱材の蓋であったりする．循環水により内・外壁を一定温度 T_a°C，T_b°C（通常 $T_a<T_b$）に保つ．この実験水槽を回転台に乗せ，一定の回転角速度 Ω rad/sec で回転させる．

回転流体実験をその対象物，すなわち，大気中や海洋中の大規模渦と比較してみると，いかに多くの簡略化がなされ，また，両者の間にはどうにも克服しようのない相違があるかが知られる．幾何学的形状に目を止めると，まず，球面が平らな円板に置き換わっており，曲率の効果が無視されていることに気付く．さらに大きな相違は側壁の存在である．また，現象の鉛直スケールと水平スケールの比（縦横比）をとってみると，地球大気では 10^{-3} 程度であるのに対し，回転流体実験では1～10程度となっている．次に，力学的効果については，球面を円板に置き換えた第2の効果として，コリオリ因子 f の緯度変化（β-効果）がなくなっている．また，地表面の海陸分布に伴う，下部境界の非一様加熱は，断熱境界で置き換えられ，大規模山系の影響も無視されている．こうして見ると，回転流体実験では，唯二つの要素—回転と水平温度傾度—のみが取り入れられていることがわかる．

このように，大気中や海洋中の諸現象に対する時，一切の夾雑物を排し，極めて簡略化したモデルにより，ある現象にアプローチを試みる分野を地球流体力学（G.F.D.）と呼んでいる．既に述べたように，実際の大気現象と G.F.D. 実験の間にはあるギャップが存在する．著者はこのギャップを埋めるべく努力すべきであろうが，以下に述べる事柄は，ややもすれば G.F.D. の枠内に留ってしまった．



第1図　実験装置 E；実験水槽，W_h；温水（T_b°C に保つ），W_i；冷水（T_a°C に保つ），T；回転台．

2. 流れ模様の転移

回転流体実験を規定する外部パラメータは，実験容器のサイズと作業流体が定まれば，水平温度差 $\Delta T(=T_b-T_a)C$ と回転角速度 Ω rad/sec の二つである．われわれの用いる容器のサイズでは，spin-up 時間に比べ熱拡散時間の方が1オーダ大きい為，一連の実験は T_a，

* Baroclinic Waves in a Rotating Fluid of Annulus.

** Osamu Morita，九州大学理学部物理学教室．