

〔創立 50 周年記念特別記事〕

地球流体力学の半世紀

木村 龍 治*

A half century of Geophysical Fluid Dynamics

*Ryuji Kimura

*E-mail for correspondence: mfrk@jcom.home.ne.jp

1 はじめに

自然科学の歴史のタイムスパンに比べれば半世紀は長い時間ではないが、それでも、科学の発展を実感することがある。私の研究分野に近い地球物理学でいえば、1960年代以降のプレートテクトニクス発展は、地球科学にパラダイムシフトをもたらした。米ソの冷戦を背景にした宇宙開発は、惑星観測や天文学に新しい視座をもたらした。20世紀後半、コンピュータと数値計算法の進歩によって、数値予報が実用化した。それと並行して、自然界にみられる不思議な流体現象の謎が、流体力学の概念によって解き明かされた時代でもあった。私自身は、そのような「謎解き」に興味を持っていたので、この半世紀の謎解きの進歩に感慨を覚えざるを得ない。本学会が、今後も、この分野で寄与することを願いながら、その幾つかを紹介したい。

2 スケール効果

スタニスワフ・レムのSF小説「ソラリスの陽のもとに」(ハヤカワ文庫)をタルコフスキー監督が映画化した「惑星ソラリス」の最後の場面。主人公の宇宙飛行士が地球に帰還し、緑豊かな自宅の庭でくつろいでいる。カメラがゆっくりズームアウトすると、自宅のまわりの景色が次第に見えてくる。自宅を取り囲んでいたのは、地球の自然ではなく、ソラリスの海であった。日頃親しんでいる日常生活は別世界に埋め込まれていたのである。

流体力学の教科書によれば、流れの構造を支配する力は慣性と粘性である。自由表面があれば、重力が支配的になるが、流体が固体壁で取り囲まれていれば、重力は圧力勾配とバランスし、流れに影響を与えない。ミクロな世界では粘性が支配的になる。スケールが大きくなるほど、慣性の効果が大きくなる。その程度は、レイノル

ズ数(= UL/ν : U は代表的な流速、 L は代表的なスケール、 ν は動粘性係数)で表現される。日常生活の中の流れはレイノルズ数が大きく、ほとんど慣性が支配的である。

流体力学の発展に寄与した分野(航空、土木、機械工学など)は、何れも人間スケールの現象を扱う。その枠組みの中で、流体力学が体系化された。「惑星ソラリス」の最後の場面にならない、人間スケールの流体現象をさらにズームアウトしてみよう。

私たちは地球の表面に存在して、地球と共に自転している。もしも、慣性と粘性だけが作用するのであれば、地球の表面に大気がおおっている理由がない。実際は、重力によって大気が地球表面に補足されているのである。その存在範囲は、地球の直径1万kmに対して表層の10km程度であるから、球形の境界条件が大きな影響を与えている。

人間スケールの流体系では、重力は下向きであるが、グローバルなスケールになると、重力は緯度によって方向を変える。しかも、大気はほとんど地球と同じ速度で剛体回転をしている。地球上からみると強風であっても、地球回転からのずれは1割程度である。地球自転の効果は、ロスビー数(= $U/\Omega L$: U は回転系に相対的な流れの代表的な流速、 Ω は系の回転角速度、 L は代表的なスケール)で表現される。ロスビー数が1より大きければ、慣性が支配的になる。ところが、地球規模の流れは、大気にしろ、海洋にしろ、ロスビー数が0.1程度である。このような流れを almost solid rotation という。そこで支配的になるのは慣性ではなく、コリオリの力である。上空に吹く風は、コリオリの力と圧力勾配がほぼ釣り合っている。ところが、地上から高度1kmまでの大気境界層の内部は、流れのスケールが小さく、慣性や粘性が卓越する。人間はその中に存在する。流体力学は、そこで生まれた。その世界をズームアウトすると、重力

と回転が支配する特異な流体世界が見えてくる。

3 流動体としての地球

大気や海洋は地球表層に存在するので目にみえるが、固体地球も長い目でみると、流動している。地球の形自身が、自転に伴う遠心力によって変形し、回転楕円体になっている。万有引力と遠心力の合力(=重力)は地表(海面)に対して垂直下向きである。そのため、大気も海洋も地球自転に伴う遠心力の効果は重力の一部として扱われ、水平の力として機能しない。その代わりにコリオリの力(の地表面に沿った成分)が支配的になる。

しかし、地表から深さ約 3000 km に及ぶマントル(岩石)の流動は、粘性が極端に大きいので、コリオリの力は重要でない。静止系の粘性流体として扱うことができる。その内部で、岩石が対流運動を行っている(マントル対流)。厚さと半径が同じ程度の大きさなので、球殻という形状と中心重力場が対流を支配している。その下側の外殻(溶融した金属)は流動性が大きく、コリオリの力が支配的である。

地球内部の流体に比べて、地球表層の流体は扱いやすい。大気にしろ海洋にしろ、厚さが地球の半径より圧倒的に小さいので、地球表面の曲率は流れに影響を与えない。地表面は平面で近似できる。重力はその平面に垂直下向きと考えてよい。

回転する平面と、回転する球面で、どこが違うのだろうか。剛体回転に伴う渦度(方向は地表面に垂直)が、平面の場合は、半径によらず一定であるが、球面では、緯度によって異なることである。

もしも、流れが東西方向であれば、平面と球面の違いは流れにあまり大きな影響を与えない。大気は地球全体を覆っており、東西方向の流れが卓越するので球面効果は2次的である。しかし、海洋は大陸の存在によって南北方向の流れが生じるために、球面効果が海水の循環に大きな影響を与える。

4 球面効果

人間スケールの流れでは、圧力勾配によって流れが励起され、粘性によって減衰する。定常状態の流れは、圧力勾配と粘性応力が釣り合っている場合が多い。

このような常識は、グローバルスケールの流れには当てはまらない。例えば、中緯度の海面には、北向きに風速の増加する西風(東向きの風)が常に吹いており、その応力によって、時計まわりのトルクが海面に与えられている。海水内部には、深さ 1 km 程度まで、時計まわりの渦度が励起され続けられているわけであるが、海水循環は定常性が保たれている。なぜなら、時計回りの渦

度を励起された海水がゆっくりと南下しているからである。静止した海水の渦度は、緯度が高いほど大きい。もしも、静止した海水が南下すれば、それだけで、正の渦度をもった(回転系に相対的な)流れが発生する。同様に、(回転系に相対的な)負の渦度をもった流れが発生したとしても、その流れが南下するだけで、流れは消えてしまう。南向きの流れが、粘性なしに流れを減衰させる作用をもっているのである。海面に、常に、負の渦度が与えられ続けても、海水全体が南下することによって、定常状態が維持できる。地球が球面だから成立するメカニズムである。

このような理由で、太平洋にしても、大西洋にしても、北半球の中緯度の海水は全体が南下している(図1参照)。ところが、東西方向に積分した質量輸送はゼロである。南下した質量輸送と同じ質量が北上しているはずである。その北上は、大洋の西側にできる境界層の中で行われる。北太平洋の黒潮、北大西洋の湾流、オーストラリア東海岸付近を流れる東オーストラリア海流など、大洋の西側には強い海流が流れているが、それは、大洋全体の吹く風のトルクによって励起される南下流(南半球では北上流)の反流である。

なぜ、大洋の西側に、幅 100 km、流速 1.5 m/s 程度の川のような流れが1年中流れているのか、長い間、ミステリーであった。上記のようなメカニズムが分かったのは、1940年代の末である。

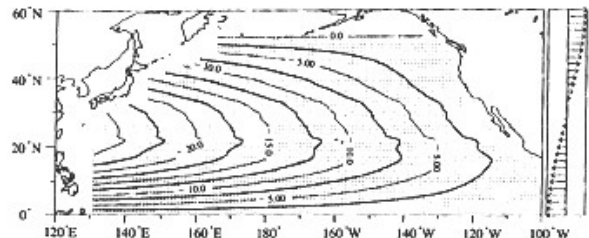


図1 北太平洋スケールの風による海水の循環。海面を吹く風の緯度分布を右側に示す。図の曲線は流線で、時計まわりの循環を表す。流線につけた数字は流量を表す。単位は、 $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (=1スベルドラップ(Sv))である。海水全体が南下していることを示している。その反流が(ここでは示していない)北太平洋の西側の境界層に流れている。それが黒潮である。黒潮の流量は40 Sv程度である²⁾。

5 熱機関としての台風

同じ流体力学でも、分野によって、その志向するところが異なる。工学では、実用目的を想定した研究が行わ

れることが多い。人間がコントロールできる流れが対象になる。物理学では、物理法則の数学的な構造が興味の対象になる。それに対して、人間スケールよりも大きな流れは、自然界の流れなので、人間が流れをコントロールすることはできない。もっぱら、観測された自然現象の説明に流体力学が利用されるのである。

定常的な台風が実現すれば、エネルギー資源、水資源として、画期的なものになるに違いない。風力発電、太陽光発電に代わる第3の自然エネルギーとして期待できる。

台風のエネルギーは、海面から蒸発を続ける水蒸気である。その点で、蒸気機関と似ている。しかし、蒸気機関が蒸発、凝結に伴う水蒸気圧の変化を力として利用するのに対し、台風のエネルギー源は、水蒸気が凝結するときに放出する凝結熱である。その意味で、水蒸気を燃料にしているといえるだろう。

凝結熱は積乱雲の内部で放出される。積乱雲は煙突のようなものである。高さが10kmもあるから、その内部の気圧は、上部で0.2気圧ほどである。水蒸気を含んだ空気が上昇すると、断熱膨張によって温度が下がり、内部の水蒸気が凝結する。そのときに解放される凝結熱が空気を加熱し、その浮力で上昇気流が持続する。熱帯海面には無尽蔵の水蒸気が存在するから、上昇気流は、一度発生すれば、未来永劫、持続的に維持される。但し、無限小の摂動では、上昇気流は発生しない。ある程度の高度まで強制的に空気塊を持ち上げる必要がある。一度、上昇気流が発生すれば、後は、自発的に上昇気流が持続する。

煙突といっても、壁はないので、上昇気流は連行によって周囲の空気を上昇気流に巻き込む。その吸いこみによって、台風周辺の空気が中心に吸いこまれ、巨大な吸いこみ渦が発生する。それが、台風の強風である。

蒸気機関に冷却装置があるように、台風にも冷却装置がある。台風上部に傘のように広がる雲である。雲の上面から赤外線が放射され、熱を宇宙に逃がしている。

台風は、無尽蔵の水蒸気を燃料にして駆動されるクリーンエネルギー源であるが、残念ながら、人間スケールに縮小することができない。対流圏全体に及ぶスケールがあって、はじめて駆動することができるエンジンなのである。

6. 波が作る流れ

グローバルスケールの流体力学は、人間スケールの流

体力学とかなり異なっている。従来の流体力学の枠組みには収まらない問題が多い。そのため、一見、手品を見せられているような現象もある³⁾。

図2は円筒形の実験水槽を示す。この中に塩水を入れる。塩の濃度を高さ方向に変化させて、内部に密度成層を作る。浮力振動数(=流体が上下に振動する振動数)は 1.5 s^{-1} 程度である。これだけでは何事も起こらない。底面を上下に振動させて、流体内部に内部重力波の定在波を作ってみよう。そのために、底面をゴム膜で作り、それを上下に振動させることにより、底面に波数8の定在波を発生させる。

これが励起源になって、流体も上下に振動するようになる。可視化のために、流体内部に小さなビーズを分散させると、波が上方に伝播することにより、あらゆる高さで、ビーズが振動するようになる。

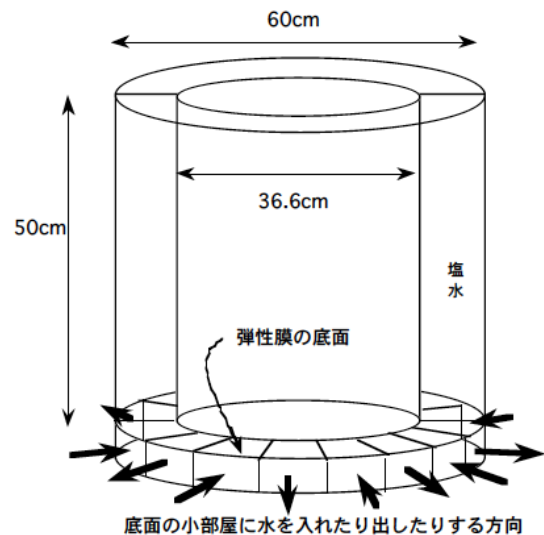


図2 内部重力波の定在波を作る装置。底面が16に分けた部屋になっている。部屋の上面がゴム膜で、部屋の中に水を入れたり出したりすることにより、ゴム膜を振動させることができる。交互に出入りさせることにより、波数8の定在波を底面に作ることができる。ゴム膜の振幅は0.5cm程度。容器には塩水を入れる。塩の濃度は、下ほど濃く、内部に密度成層が形成されるようにする。

しばらくすると、ビーズは水平方向に移動を始める。その内に、全体の水が回転を始める。条件の対象性から、回転方向は決められない。時計まわりのこともあれば、反時計まわりのこともある。

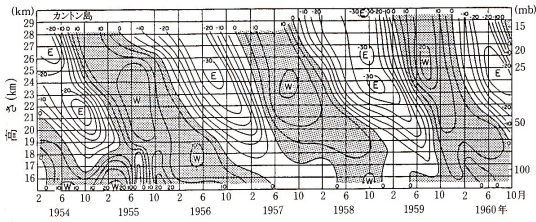


図3 赤道上空の成層圏の東西風の高度分布の時間変化⁴⁾。6年間の変化を示す。西風と東風が交代する。交代は上空から始まり、下層に下りてくる。交代の周期は約26ヶ月。Eは東風、Wは西風である。風速の単位はm/s。

驚くべきは、その流れが一定の周期で反転することである。この実験では周期40分程度で反転する。全く対称的な条件下で、その対称性を崩すような現象が発生するのである。水に水平方向の運動量を与えているものは何だろうか。

この実験は、自然現象に触発されて行われた。図3は、赤道上空の東西方向の風の高度分布の時間変化を示す。西風と東風が、約26ヶ月周期で交代している。この図はかなり以前のものであるが、現在でも、同じ振動が繰り返えされている。赤道の上にある空気は固体地球と共に回転する大気の中でも、（自転軸からの距離が最大なので）もっとも大きな角運動量をもっている。西風は、その角運動量よりもさらに大きな角運動量を持っていることを意味する。どこから、角運動量が供給されるのであろうか。さらに不思議なのは、一定の周期で東風と西風が交代することである。気象学のミステリーであった。

運動量の供給源が、対流圏から成層圏に伝播する波の運動量であることが発見されたのが、1960年代の末である。そのメカニズムを実験室で再現しようとしたのが、図2の実験なのである。

底面で励起される定在波は、時計回りに伝播する波と反時計回りに伝播する波が重なり合ったものである。重なり合ったまま、上方に伝播すれば、対称性は保たれる。ところが、円筒をまわる流れが存在すると、2つの波の上方への伝播特性が変化する。波の伝播方向と逆向きの流れの中では、上方伝播が可能であるが、同じ向きの流れの中では、波の位相が傾いて、伝播不可能になる。波は減衰して、波のもっている運動量は流れに受け渡される。常に、流れと反対向きの波だけが容器の上部まで伝播するので、流れは上部から反転する。

大気や海洋は安定な密度成層流体なので、流体内部を波（内部重力波）が自由に伝播する。それに伴って、エネルギーが散逸し、波が消滅するとき、波の運動量が流れに与えられる。風が山岳に当たって発生する波（山岳波）は位相が山に固定される。ということは波の伝播は風と逆方向である。従って、上空の風にブレーキをかける作用がある。安定な密度成層ならではのメカニズムである。

7 地衡風調節

前節で紹介した実験は、かなり凝った実験であった。しかし、もっと簡単な実験で、almost solid rotationの不思議さを感じることができる。回転する水槽を作って、水が剛体回転をする状態を作り、その中に、墨汁を一滴垂らして、スプーンでかき回してみよう。数秒後には、図4に示すようなパターンが現れる。墨汁は拡散しないで、カーテンのような形になる。流れが深さ方向に変化しない地衡流平衡（＝コリオリの力と圧力勾配との釣り合い）が成り立つからである。

初期に与えられたランダムな圧力場から地衡流が形成される過程を地衡流調節という。圧力場の一部は地衡流平衡になり、その他の圧力場は水面に波を作る圧力場に変化する。波は四方に伝播し、数秒後には、地衡流平衡の圧力場のみが、その場に残る。すなわち、任意の圧力場から、高低気圧が形成されることになる。結果として、almost solid rotationの流れは、ほとんど地衡流になる。

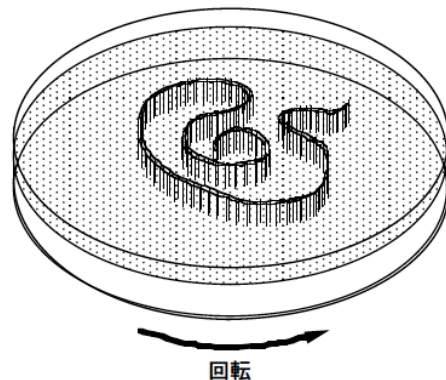


図4 回転する水槽に墨汁を垂らしてかき回した後の流れのパターン

8 地球流体力学の成立

従来、自然界の流動は、地球科学分野で扱われていた。1960年代から、主に、欧米の応用数学者によって、回転成層流体の力学が体系化された⁵⁾。そこでは、不安定現象⁶⁾、熱対流⁷⁾、波動⁸⁾、安定な密度成層流体に見られる様々な現象⁹⁾、回転流体¹⁾などの流体力学が研究対象になる。金星のスーパーローテーション¹⁰⁾、エル・ニーニョ²⁾など、まだ、メカニズムが解明されていない現象もある。今後の発展を期待したい。

引用文献

- 1) Greenspan, H. P., 1968: The theory of rotating fluids, Cambridge University Press, 1-327.
- 2) 宇野木早苗、久保田雅久：海洋の波と流れの科学（東海大学出版会、1996）1-356
- 3) Plumb, R. A., and A. D. McEwan, 1978: The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid: a laboratory analogue of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1827-1839.
- 4) 菊地勝弘、瓜生道也、北林興二：実験気象学入門（東京堂出版、1988）1-254.
- 5) Pedlosky, J., 1979: *Geophysical Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, 1-710.
- 6) Chandrasekhar, S., 1961: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. Oxford University Press, 1-652.
- 7) Saltzman, B., 1962: *Theory of Thermal Convection*. Dover Publications Inc., 1-461.
- 8) Lighthill, J., 1978: *Waves in Fluids*, Cambridge University Press, 1-504.
- 9) Turner, J. S., 1973: *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press.
- 10) 松田佳久：惑星気象学（東大出版会、2000）1-204.