

対流の美しき世界

北海道大学 大学院工学研究院

田坂裕司*

Beautiful world of thermal convections

*Yuji Tasaka, Faculty of Engineering, Hokkaido University

*E-mail for correspondence: tasaka@eng.hokudai.ac.jp

1 対流セルとは何ですか？

論より証拠、作ってみましょう。「実験」と言われると理科嫌いの方は及び腰になってしまうかもしれませんが、料理気分でやってみましょう。用意するのはサラダ油にコーヒーの粉、片手鍋にフライパンだけで結構です。①まず、鍋に油を数ミリの深さまで入れます。②その上からコーヒーの粉を軽く均等に振りかける、小さじ一杯程度でしょうか。③コンロでさっと加熱したフライパンの上に鍋を置く。これで準備完了です。加熱が強すぎたり直火だったりすると、うまくいかないかもしれません。鍋の底の油は加熱され密度が小さくなるので浮かび上がり、表面の油は相対的に重たくなり沈みます。どうでしょう、綺麗な模様が見えてきませんか？図1は実験で得られた可視化写真ですが、この模様は細胞状に見えることから対流セル、またこの現象はベナール対流あるいはベナール・マランゴニ対流とそれぞれ呼ばれています。対流についての詳しい話を始める前に、ここでは家庭でできる簡単綺麗な対流実験を紹介して、不思議な対流の世界へご案内します。

芸術の秋、ご家庭で対流の芸術作品を作るのも良いでしょう。用意するのは針金で作った輪っか、懐中電灯、

石けん水に半透明なトレーズ紙です。トレーズ紙に好きな絵を描いて、懐中電灯の上に乗せて照らし、輪っかで作ったシャボン膜に映し出します(図2(a))。シャボン膜にはその厚さにより複雑な虹色模様が形成され、映し出された絵と相まって不思議な作品ができあがります。よく見ると、この虹色模様は一定ではなく、時々刻々と変化し同じ模様を再現するのはほぼ不可能です。部屋の空気の僅かな流れ、重力、水の蒸発および表面張力の差に由来する対流がその動きを与えています。ポスト印象派、あるいは後期印象派に分類されるムンクは、代表作である「叫び」の意味するところについて、「自然を貫く果てしない叫びを聴いた」と語っています。常人には得難い感覚ですが、この手法でできあがった作品「対流の叫び」(図2(b))からは、その一端を共有することが可能かもしれません。

物理学者であり随筆家でもある寺田寅彦は、物理学の本質に迫る、多くのユニークなモデル実験を提案しています。対流に関するその実験の一つを再現してみましょう。用意するものは、エタノールにガラス板、画材店などで購入できるマイカ(雲母)の微細片だけです。アルコールにマイカを入れてかき混ぜると、流れの様子がつぶさに観察できます。これは、マイカの板状微粒子が流れの各点でその主歪み方向に配向し、光の反射に差が生

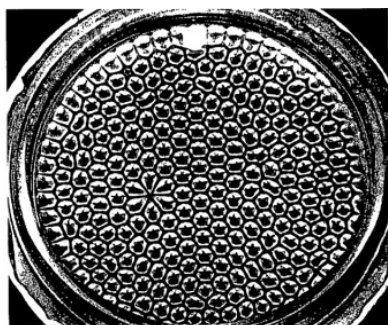


図1 セル状対流パターン¹⁾

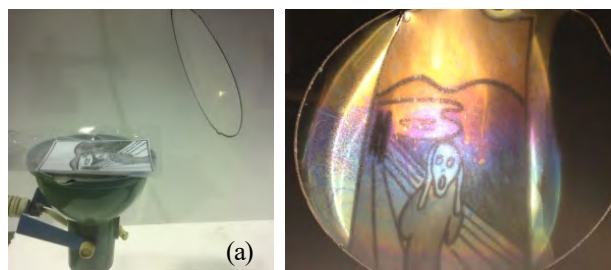


図2 (a)シャボン膜投影装置, (b)「対流の叫び」(北海道大学・HZDR, 明石恵実さん提供)



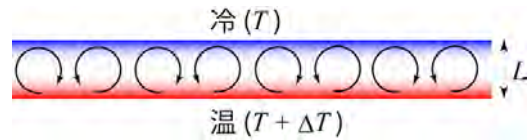
図3 流下するアルコールで観察される、筋状の対流パターン（筋は流れの方向と一致）

じることによって流れの様子が浮かび上がる、フレーク法と呼ばれる流れの可視化法の一つです。ガラス板を手で少し暖めてから、消しゴム程度の大きさのものを挟んで少しだけ斜めに置きます。マイカの入ったアルコールをその斜面にゆっくり流すと、流れの方向に沿って筋状の様子が観察されます（図3）。アルコールの表面ではその蒸発潜熱により表面の温度が下がります。一方、下面ではガラス板により少し暖められているので、その密度差により対流が生じ、斜面に沿った流れと合わさって筋状の様子が形成されます（実験を何度も続けると、ガラス板が冷えて対流が生じなくなります）。これは、冬の空でよく見られる筋状の雲の物理モデルとされています。なお、雲は上昇流の部分で形成されるため、空で実際に観察される筋の本数はこの半分になります。当時、自然科学の先端研究が行われていたヨーロッパにおいて本格的に気象の流体力学研究が始まる前に、極東の日本でこのような簡単な実験から現象の本質を見抜いていたことに驚きます。

2 対流って何だか弱々しくありませんか？

まさに「吹けば飛ぶような」イメージの対流ですが、自然現象や工業分野ではとても重要な意味を持っています。ここで改めて、対流の定義をしておきましょう。対流とは、流体において温度の不均一により密度や表面張力に差が生じ、重力差（浮力差）や表面張力差により流動が生じる種々の現象を表します。工学の世界では、ポンプなど外因的要素により引き起こされた流れによる熱の輸送を「強制対流」と呼び、先に定義したものを「自然対流」あるいは「自由対流」として区別します。また、表面張力による対流をマランゴニ対流、それ以外の、熱に起因する対流を熱対流として区別する場合もあります。

地表で暖められた空気は対流により上昇し、その際抱え込んだ水分が上空で雲を形成します。先に示した「筋状の雲」実験のように、対流は大気循環の諸現象を理解する上で必要不可欠です。熔融材料を固化させ部材



グラスホフ数:

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\nu^2}$$

プラントル数:

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$$

レイリー数:

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\kappa\nu}$$

g : 重力加速度、 α : 体積膨張率、
 ΔT : 流体層上下の温度差、 L : 流体層の高さ、
 κ : 熱拡散係数、 ν : 動粘性係数

図4 レイリー・ベナール対流の模式図と対流に関する無次元数

を形成する過程において、対流をいかに制御するかがその品質を左右します。国際宇宙ステーションの実験施設「きぼう」では、無重力下での部材形成に関連して、液中に生じるマランゴニ対流の研究が進められています。原子力発電所に取り付けられている非常用復水器（IC）は、電力喪失時においても自然対流の効果で原子炉を冷却できる強力な安全装置ですが、先の震災ではこれを使用するためのバルブ操作に電力が必要だとの矛盾したシステム構成が徒になりました。ラードが表面に張られた味噌ラーメンは、スープ表面での蒸発による冷却を抑制し、対流が阻害されるためいつまでも熱々です。

薄い流体の層を下面から加熱することで生じる現象は、最も基礎的な対流現象の一つです（図4上）。この現象は、1900年に発表された、フランスの科学者であるベナールの実験を発端として体系的な研究が始められました。その後、イギリスの物理学者であるレイリー卿により対流の開始条件や形成される対流セルの理論的な取り扱いが付加され、現在ではレイリー・ベナール対流と呼ばれています（ここでは表面張力の効果は考えていません）。余談ですが、フランスでは名前の順番を変えてベナール・レイリー対流と呼ばれており、自国の重厚な科学史に対する誇りが伺えます。対流の「程度」は、流体に働く浮力と粘性力（流体が持つ粘りこさにより運動を押しとどめようとする働き）の比であるグラスホフ数（英語ではグラシヨフ（Grashof）数と発音される）で表されます（図4下）。また、運動量拡散と熱拡散の早さの比であるプラントル数とグラスホフ数の積をレイリー数と呼び、流体の種類に関係無く、これがある一定値に達すると対流が開始することが分かっています。つ

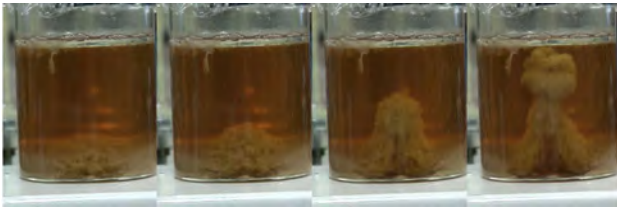


図5 味噌汁のバースティング (東京大学地震科学研究所・明星大学、熊谷一郎教授提供)

まり、流体の動きを押しとどめる粘性力や温度の不均一を解消する熱拡散の程度に対し、浮力の効果が十分に大きい場合に対流が生じるのです。ちなみに、コーンクリームスープは粘度が高く対流が抑制されるため、なかなか冷めません。

長さや時間の次元を持たないこれらの無次元数のおかげで、私たちは室内実験により多くの現象を再現することができます。温度差や容器サイズ、使用する流体により無次元数を研究対象にそろえれば、観察される現象は本質的に同じなのです。深部地球科学の分野では、地下のマントルを構成する岩石群を超高粘度の流体と見なし、その運動を対流として捉えることでプレートテクトニクスや火山活動を理解しようとしています。この場合、対流の駆動熱源は岩石群に含まれる放射性元素の崩壊熱、および地球最深部、コアを構成する溶融鉄の凝固潜熱です。ちなみに、マントルを流体と見なした場合のプラントル数は、おおよそ 2.5×10^{23} という途方もない数となります (ちなみに水は7程度、空気は0.7程度)。このような高プラントル数の対流における流れの特性を調べるために、水飴を流体として用いた室内実験などが行われています。また、東京大学地震科学研究所・栗田博士・熊谷博士のグループは、味噌汁を用いたマントル対流の模擬実験を行っています。複数の組成を持つ岩石群に対し、お湯を流動しやすい軽い物質、味噌を流動しにくい重い物質に見立てて、マントル対流の非定常な挙動を定性的に再現しようとする試みです。実験では、静置してお湯と味噌の2層に分離した味噌汁を加熱し、重たい味噌の層が周期的に持ち上がる、バースト現象が観察されています (図5)。お鍋の中で冷めた味噌汁を温めると

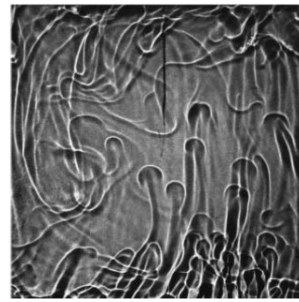


図6 キノコ状のブルーム²⁾

き、同じような現象を観察された方もいるのではないかと思います。キッチンで一瞬だけ、地球科学者になったつもりで味噌汁を眺めてみるのも良いのではないのでしょうか。ただし、暖めすぎで全体を「バースト」させないように気をつけて。

3 小さな流れが大きな流れをひっくり返す

レイリー数、あるいはグラスホフ数が小さい場合、レイリー・ベナール対流では綺麗な対流セルが形成されます (流体の上面がふたをされている場合には、ロール状のパターンが形成されます)。例えば加える温度差を大きくするなどしてレイリー数が増加すると、対流のパターンは段階的に複雑になり、やがて熱乱流と呼ばれる状態に移行します。対流運動が十分に強い場合、流体層の中央では時間平均的に見ると大きな温度差はなく、逆に上面と下面の壁付近に急に温度が変化する領域が形成されます。これを温度境界層と呼びます。図6は、熱乱流状態の対流をシュリーレン法と呼ばれる方法で可視化した写真です²⁾。図を見ると、上下の温度境界層が壁からはがれ、キノコ状の流体の塊 (熱ブルーム) となって上昇、下降しています。これが乱雑に生じる状態が熱乱流であり、通常思い描く「乱流」とはイメージが大きく異なります。

壁からはがれた熱ブルームの群れは容器内に対流運動をもたらす、その運動が熱ブルームの生成を方向付けることで、乱雑に見える熱乱流にある程度まとまった大規模な流れ (熱ブルームの大きさに比べて) が形成され

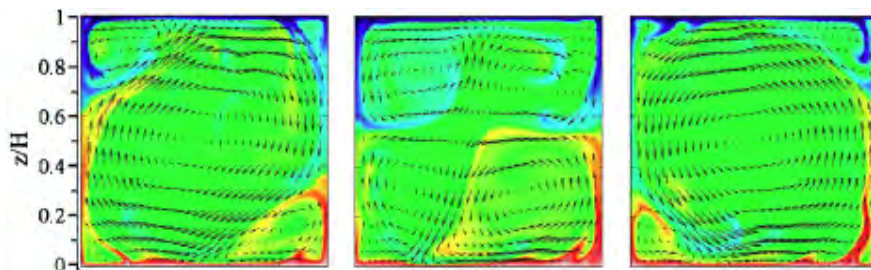


図7 大規模循環流の自発的反転³⁾

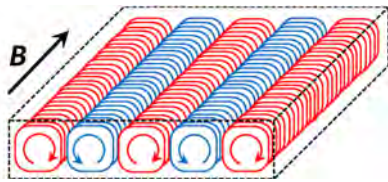


図8 磁場により拘束された液体金属層内の熱対流

ます。高さと同程度の容器で熱対流を作った場合、この大規模な流れ（大規模循環）は容器と同程度の大きさとなります（図7左）³⁾。さてその流れ、時計回り・反時計回りのどちらになるでしょうか？ 結果は五分五分。どちらの状態も取り得ます。これを双安定状態と言います。現在注目されているのは、このような大規模循環が、自発的かつ不規則にその方向を変える反転現象です。大規模循環が強くなると、容器角に形成される二次的な小さな循環流（図7中）、および流体が持つ粘性効果がそれを阻害し、結果として大規模循環は強弱を繰り返します。大規模循環が弱まったとき、そこに熱対流由来の偶発的な要因が加わることで、二次的な循環流が成長して反転現象をもたらす。このようなシナリオが、これまでの研究により示されています。

同じような現象が、液体金属を用いた対流実験でも確認されています。高さに対して4～8倍程度の幅を持つ矩形容器に液体金属を満たし、容器の上下に温度差を与えてレイリー・ベナール対流を形成させます。液体金属は他の流体と異なり非常に熱を伝えやすいため、先に示したキノコ状の熱ブルームは形成されず、より小さなレイリー数が複雑な熱対流状態となります。しかし、そこに水平な磁場を加えると、ローレンツ力により磁場と平行な方向の流れが阻害され、水などの流体でレイリー数が小さい場合に観察されるような、ロール状の対流が形成されます（図8）。このロール状の熱対流は、磁場を強くするほど細くなり、またレイリー数が大きくなると太くなりますが、おおそ容器の高さ程度の幅を持ちます。例えば、幅が高さの5倍の容器では、磁場の強さにもよりますが、レイリー数が小さいときには5個のロール、レイリー数が大きくなるとそれが4個になります。それでは、それらの中間的なレイリー数の条件ではどう

でしょうか。図9は、超音波を使って容器内の流れの向きを磁場と垂直な方向に測った結果で、横軸は時間経過を示しています。流れの向きを表す色が、時間とともに不規則に入れ替わっており、容器内のある点では流れが不規則に反転しています⁴⁾。この反転現象に関しては、容器が比較的狭いこと、磁場による拘束を受けて準二次元的なロール状の対流が形成されることが重要だと考えられています。

地球には、地磁気と呼ばれる北極と南極付近を両極とする磁場が存在し、これは地球内部コアの対流運動がもたらすダイナモ効果により生み出されていると考えられています。その地磁気ですが、数十万年から数百万年に一度、S極とN極が反転していることが古い地層の調査などにより明らかになっています。コアの対流は、地球の自転により生じるコリオリ力と呼ばれる力の拘束を受け、極方向にロール状の大規模な流れを形成します。さらに、固化した鉄である内部コアとマントルに挟まれた球殻状の領域は比較的狭い。なんだか話が先ほど示した自発的反転と似ていませんか？ もちろん、大規模な対流運動の反転現象が、地磁気の逆転現象そのものであるとは考えられていません。しかしながら、何らかの相似性がこれらの間にあり、対流の自発的反転現象を究明することで、地磁気の逆転現象解明に何らかの重要なヒントを与えてくれるかもしれません。

4 ビールも対流？

話が大きくなりすぎたので、ここでリラックスしながらリビングで対流の問題を一つ。暑い夏、よく冷えたビールが飲みたくなります。グラスにビールを注ぐと溶解していた炭酸ガスが気泡となり、複雑な流れを作った後に表面に泡の層を形成します。このとき、浮上する気泡は周囲の液体を連行するためグラス内には循環流が生じます。この流れも対流の一種で、浮力対流と呼ばれます。熱対流と同じく密度差から生まれる浮力（重力）の不均衡による流れですが、熱対流のように熱が拡散することがないため（ガスが再度液体内に溶解することはありますが）、強い流れが維持されます。周囲液体に対す

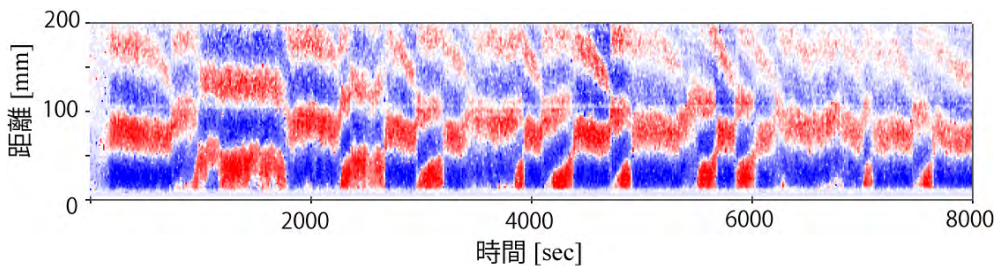


図9 ロール状対流の反転現象⁴⁾

る高い輸送力から、湖などの水質改善に使われています。水の流入出が少ない湖では、太陽光により表面が暖められ密度が軽くなる安定成層（軽い物が上にあり、重たい物が下にある。不安定成層はその逆。）が形成されるため、熱対流の発生が阻害されてアオコなどが生じる原因となっています。そこで、コンプレッサーなどを用いて湖底に空気を送り込むことで浮力対流による湖水の攪拌を行い（この場合、湖底の冷たい水を持ち上げ不安定成層を形成することで、熱対流による攪拌を引き出します。）、さらに湖底に酸素を供給することで生物を死滅させる貧酸素状態を改善するのです。また、水面まで液体を連行し水面に強い表面流を生み出すことから、タンカー事故などによる重油の拡散を防ぐ、オイルフェンスとしても期待されています。

さて、アイルランドのギネスビールをご存じでしょうか。グラスに注ぐと他のビールと同様に発泡しますが、泡がきめ細かい！これは炭酸ガスよりも多い割合で窒素ガスが封入されていることによります。飲んだときに、少し気の抜けたようなまろやかな口当たりになるのもこれが理由です。数十マイクロの微細な気泡を含んだ液体は、浮力により、グラスの底から徐々に泡の雲が晴れて黒い液体が姿を現し、グラス上部では側面に沿って泡が瀧のように流れ落ちる様子が観察されます。標準的な1パイントグラスでこのような流れが静まるまでの時間から「119.5秒のカスケード（小滝）ショー」と呼ばれるこの現象（図10）は、微細な気泡は周囲液体との速度差が小さく一緒に流れること、周囲液体の流れを伴って構造化しやすいことがその発生要因となっています。通常のビールに見られるような大きな泡は、それぞれがばらばらに浮上しますが、微細な気泡は群となってより大きな流れを形成します。飲み口が広がっているようなグラスは、中心で上昇流、側面で下降流といった大きな循環流を構成しやすく、綺麗なカスケードが現れます。このショーの間、気泡が徐々に表面の泡の層に取り込まれるた

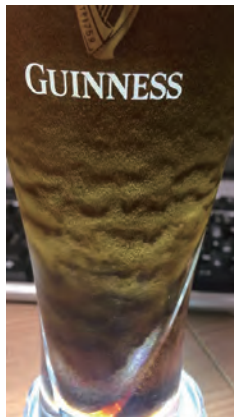


図10 ギネスビール「119.5秒のカスケードショー」

め循環流が段階的に小さくなり、その影響がカスケードとなって現れていると考えています。

微細気泡群もたらす流れの構造化は、簡単な理科実験で観察することができます。十分に大きな容器の底に白金線を貼り、水の電気分解により水素気泡を発生させます。発生した個々の気泡は表面張力によりすぐには白金線から離脱せず、線状の気泡群を形成します。ある程度気泡が増えると気泡群を含んだ軽い液体は直上の相対的に重たい流体に対して不安定となり、ブルーム状の流れを形成して同じような間隔で上昇します（図11(a)）⁵⁾。これは、密度の不安定層で見られるレイリー・テイラー不安定と呼ばれる流体现象の一つだと考えられます。微細気泡のブルームは、上昇しながら周囲の液体を取り込み、またそれぞれが生み出した周囲の流れとの干渉により集合・合体し、大きな流れを形成します（図11(b,c)）。これは、レイリー・ベナル対流において、温度境界層の壁面からの離脱により形成される熱ブルームが、大規模な循環流を形成する過程によく似ています。実際に、レイリー・ベナル対流で用いるような容器の底に白金線を貼り、水の電気分解により水素気泡を発生させることで、同様のロール状対流が形成されることが実験により観察されています。

このように、普段何気なく過ごしているキッチンやリビングには、地球規模の現象や環境改善技術に深く関わる、美しい対流の世界が潜んでいます。「またビール飲んでるの？」と責められたらこう言いましょう。「いや、

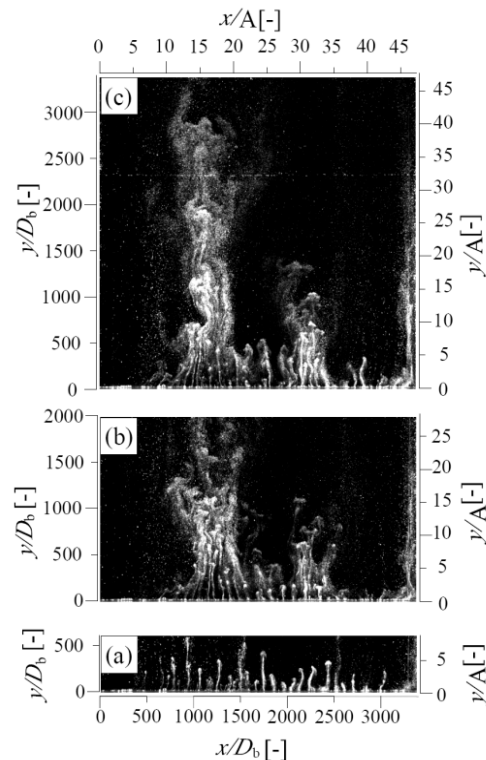


図11 微細水素基法による浮力対流の時間発展⁵⁾

地球と環境について考えているんだ。」と。

謝辞：本原稿を執筆するにあたり，東京大学地震科学研究所および明星大学・熊谷教授謝ならびに北海道大学およびHelmholz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR)・明石恵実さんに図の提供をいただきました。

引用文献

- 1) Van Dyke, M.: *An album of fluid motion* (The Parabolic Press, 1982) 83.
- 2) Zhang, J., Childress, S., Libchaber, A.: Non-Boussinesq effect: Thermal convection with broken symmetry, *Phys. Fluids*, 9 (1997) 1034.
- 3) Sugiyama, K. *et al.*: Flow Reversals in Thermally Driven Turbulence, *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 034503.
- 4) Yanagisawa, T. *et al.*: Spontaneous flow reversals in Rayleigh-Bénard convection of a liquid metal, *Phys. Rev. E*, 83 (2011) 036307.
- 5) 宮城島圭人, 他4名: マイクロバブルプルーム群の浮上成長に関する定量的可視化実験, 日本機械学会論文集B編, 784 (2011) 88-97.