

## 極度に発達した熱乱流系での熱輸送

### Heat transport at highly turbulent thermal convection

# 山岸 保子 [1], 柳澤 孝寿 [2]

# Yasuko Yamagishi [1], Takatoshi Yanagisawa [2]

[1] 東大・理・地惑, [2] 東大・理・地球惑星物理

[1] Earth and Planet. Phys., Univ. of Tokyo, [2] Earth and Planetary Phys., Univ. of Tokyo

惑星・衛星内の構造や進化を理解する為、非常に発達した熱対流の物理の解明を実験と理論とを対応させることにより試みた。まず実験により高レイリー数対流におけるパターンの解析を行い、系を支配していると考えられるブルームの挙動を詳述した。一方、「対流」を「流体パーセルの移動」と捉え熱輸送効率を見積もる「混合距離理論」に対し、「流体パーセル」を前述の「ブルーム」と捉えた場合の計算法を提案した。この計算法により得られた結果を、さらに実験による熱輸送効率の測定と照らし合わせることで、対流の本質を議論した。

対流による熱及び物質の輸送は、衛星・惑星内の構造やその進化を決定づける重要な物理過程の一つである。そもそも対流運動は、組成又は温度の違いにより重力的に不安定になった流体が、自身を移動させることによりその不安定を取り除こうとする現象である。特に熱的不安定による「熱対流」は衛星・惑星内の様々な物理現象を支配している。熱対流現象は、室内実験・数値実験の両分野において研究され、臨界レイリー数から数桁上までの対流による熱輸送効率は、「ヌッセルト数はレイリー数の $1/3$ 乗に比例する」という簡潔な形で記述できることが知られている。しかし非常に発達した、高レイリー数をもつような対流は室内実験・数値実験共にその再現が難しく、熱輸送効率も十分にはわかっていない。一方で衛星・惑星内に生じている熱対流は、系の大きさや大きな温度差によって非常に発達したものである場合が多い。故に、高レイリー数をもつ熱対流を理解することは地球惑星科学において本質的に重要であり、本研究では特に熱輸送効率に着目した理解を目指す。

室内実験によれば、レイリー数の上昇に従い熱輸送効率の増加率は減少し、ヌッセルト数対数のレイリー数対数に対する比例係数は $1/3$ から $2/7$ 程度に落ちることが確認されている。しかしこの変化の理由は解明されていない。一方理論的扱いにおいて、対流による熱輸送がパーセルの移動によるものということとを考慮し、その効率を見積もるという混合距離理論なる手法があり、高レイリー数の対流に適用されている。この手法は周囲に対し温度摂動を獲得したパーセルが高温部から低温部、又は低温部から高温部へと移動することにより熱を運び、ある特徴的長さ (= 混合距離) 進むと、その個性を失い外部流体と馴染む、という気体分子運動論的な考えを定式化したものである。重要となるのはパーセルの速度、温度摂動、そして混合距離の見積もりである。温度摂動に関しては、パーセルの断熱的な上下運動によって生じると考え、また速度については粘性流体の場合はストークス沈降、低粘性流体の場合は自由落下時の値が用いられる。しかし混合距離については実際の現象と対応させた物理的意味が与えられておらず、使用する値は対流層の境界からの距離、プレッシャーハイト等々である。但し、粘性流体を仮定し混合距離として境界からの距離を採用した場合、対流による熱輸送は前述の「ヌッセルト数はレイリー数の $1/3$ 乗に比例する」という比較的低レイリー数であてはまる関係を良く再現する。同時にこのことは、この混合距離の与え方では高レイリー数において実験で見られているような熱輸送効率の増加率の減少を再現できないことを示す。それでは、この混合距離にレイリー数に依存するような何か現実の物理現象と対応させた値が与えられれば、実験と調和的な対流の再現が可能になるのではないか？

室内実験に立ち戻り、高粘性流体を用いて対流を生じさせると次のような現象が観察される。レイリー数の増加とともに対流パターンはセルを持った層流から、ブルームの垂直運動で特徴づけられる乱流的状態に移る。さらに高いレイリー数では、平均水平流が定常的に存在するような大規模秩序構造が形成され、その構造中で個々のブルームは組織化された集団運動をするようになる。この構造の詳細を観察すると、個々のブルームは上昇・下降の途中で典型的な距離において熱拡散により、そのブルームという個性を失っている。つまり周りと同じような温度になることにより駆動力を失い、同時に鉛直運動も停止する。このような視点から見たブルームの挙動は、混合距離理論で想定される仮想パーセルに極めて近いものである。

そこでこの乱流ブルームを混合距離理論におけ仮想パーセルを対応させて考える。パーセルの実体として個々のブルームをとらえると、温度摂動として熱境界層と対流コア領域との温度差を、速度としてこのような高粘性の場合はストークス抵抗で決まる速度を、それぞれ考えればよい。ただし混合距離を与える際には、ブルームの運動は断熱的ではなく熱拡散で規定された現象と考える。これは、通常の混合距離理論では取り込みなどの運動により混合が起こるとするが、ここでは高粘性のため運動はすべて温度分布によって支配されるので温度の拡散がすなわち混合であるからである。

混合距離をこのようなブルームの移動距離ととらえると、その積極的な物理的意味付けが可能で現象に即した値を決めることができる。また、混合距離理論による対流を実効的な拡散係数という形で記述すれば、大規模秩序構造として観察される水平平均流の流速と結びつけることが可能で、これも測定結果と比較することができる。

以上に基づき、本研究では実験で得られたブルームの挙動を理論に適応させることにより、極度に発達した対流の熱輸送形態を明らかにする。