

地球惑星流体における「雲対流」

中島 健介 (九大 理)

1. はじめに

a) 地球惑星の対流における相変化の重要性

地球・惑星流体ではさまざまな局面で鉛直対流が生じており、それぞれ重要な地学的役割を担っているが、対流運動が大きな温度・圧力領域に渡るため流体中で相変化が起こる場合がある。例えば、大気中の雲対流では水の凝結や凍結、マントル対流では各種鉱物の相転位、地球中心核の対流鉄の固化が起る。すなわち、相変化は地球惑星対流の重要な共通要素と考えねばならない。

相変化は、成分の変化や潜熱の出入りにともなう浮力変化、相変化 (特に凝結・昇華) した成分の非可逆的な重力分離、などを通じて、対流に通常の熱対流と異なる特徴を付与する。すなわち、相変化は地球惑星対流の構造の多様性の源であり、したがって、多様な地球惑星対流の振舞いを理解するためには、相変化によって対流の構造はどの様に変化するかという問題を整理しておくことが重要であると思われる。

b) 相変化対流の研究の問題点

今まで諸々の地球惑星対流は、別個の分野で互いに無関係に研究されてきた。その現状の裏には各々の対流の物理的・地学的設定に差違 (例えば、熱的駆動力の構造・粘性の大小・電気伝導度の大小など) があり、各分野で重要なものをそれぞれ優先して考察してきたという事情が横たわっている。また、相変化の導入は理論においても数値計算においても種々の困難を持ち込むため、相変化の導入は各分野における研究の順序としては後になった。そのため、相変化の導入以前に既に設定も対流構造も複雑になっており、相変化を導入したことによる影響は抽出しにくい。以上二つの事情により、過去の研究を総合しても相変化が対流の構造に及ぼす影響を体系的に整理するための情報は得にくい。

c) 相変化対流への本来あるべきアプローチ

相変化が対流の構造に及ぼす影響を体系的付けて整理するためには、相変化以外の設定を優先して扱ってきたこれまでのアプローチとは逆に、出来るだけ共通した単純な熱対流に近い設定のもとで、相変化の仕方だけによって対流の構造はどの様に異なるかを調べるというアプローチが必須であると思われる。この発表では、地球大気の積雲対流用モデルを拡張して不完全ながら中島ら (1998) が試みた研究を中心に、対流に対する相変化の影響を整理してみる。

2. 相変化対流の基本プロセス

ここで議論する相変化対流は、いわば地球大気における雲対流を一般化したものといえる。以下で、その一般化のために、地球の雲対流に関する「常識」を再吟味しておく。

a) 「凝結」がおこるのは上昇流か下降流か

凝結には凝結成分の分圧が飽和蒸気圧に達する必要がある。そのため、圧力を高めることにより凝結成分の分圧を稼ぐか、温度を下げることで飽和蒸気圧を下げるか、のどちらかが必要である。鉛直対流問題においては、この二つは競合関係にある。たとえば流体が断熱的に上昇する場合には、圧力低下にともなう凝結成分分圧低下は凝結に不利であり、断熱膨張によるパーセル温度の低下は飽和蒸気圧が下がるので、凝結に有利である。これらのどちらが勝つかによって、凝結が上昇に伴って生じるか下降に伴って生じるかが定まる。

b) 温かいパーセルは必ず軽いのか

凝結の潜熱によってパーセルの温度が上がるとき、飽和蒸気圧の増加に伴い凝結成分の混合比が増す。この際、凝結成分が相対的に「重い」(凝結成分の分子量が主成分の分子量より大きい) 場合、浮力が負になり得る。

c) 雨が降ることの効果

単純なベナール対流との対比して際立って見える地球の雲対流の特徴 (条件付き不安定など特有の非線形性、エネルギー輸送における潜熱の重要性、対流要素の構造の特異性) が顕在化するにあたっては、雨の生成すなわち凝結物の重力分離が前提となっている。

3. 数値実験

上でまとめた素過程について、対流に及ぼす効果が特徴的に現れるいくつかの場合について数値実験を行ない、対流構造の比較を行なった。結果の概要は以下の通りである。

1. 上昇流において主成分より軽い成分が凝結する状況すなわち地球の雲対流に対応する実験を行なった。計算された対流は、狭く強い上昇流と広く弱い下降流という非対称に特徴付けられ、時間的には非定常であった。この非対称は凝結物の重力分離を抑制した場合には生じなかった。
2. 凝結成分が主成分より重い状況すなわち木星の雲対流に対応する実験を行なった。計算された対流の特徴は、凝結成分が少ない場合には凝結成分が軽い場合と基本的に共通であった。一方、凝結成分が十分に多い場合、凝結を伴う高度領域の下部に対流しない部分が生じた。これは重い凝結成分が対流を安定化する効果による。
3. 主成分より重い凝結成分が下降流で凝結する状況すなわち地球中心核の対流に対応する実験では、横長なセル構造をもつ定常な対流が生じた。これは凝結物の重力分離による浮力供給が最下層で幅広く生じ、熱フラックスを固定した熱対流に似た状況にあるためである。

4. おわりに

本研究における数値実験の設定は実は体系だったパラメータスタディーを構成するものではなく、むしろ具体的な地球惑星対流に対応しているものである。この選択の目的は、相変化パラメータを変えてみることによって種々の地球惑星対流が一つの枠組の中に位置付けられることを実際に示す事であった。この目的を意識しつつ得られた結果の全体を振り返ってみると、相変化を伴う様々な地球惑星対流が、相変化の仕方 — 凝結を伴う鉛直運動の符合・凝結成分の相対的な重さなど — が異なる対流という枠組の中に位置付け可能であることが検証できたと言える。また、地球大気だけに注目している一見形而上学的と感じられる設定 (分子量効果・相変化のための鉛直流の符号など) が、惑星大気や地球内部にまで視野を広げれば現実存在していることを強調したい。このことは、「地球流体力学」をその出発点であった地球の大気海洋に留まらず、惑星大気・内部の流体物理的諸問題まで含めて展開することの大きな価値を示唆している。

参考文献

中島健介, 竹広 真一, 石渡正樹, 林 祥介, 1998: 地球流体における「雲対流」. http://nagare.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/mm/98/nakajima/index_ja.htm