

## 学位論文要旨

A numerical study on the dynamics of the subducting lithosphere  
and the water circulation in the whole-mantle convection  
(数値シミュレーションによる全マントル領域における  
沈み込むリソスフェアのダイナミクスと水循環に関する研究)

氏名 金子 岳郎

プレートの沈み込みは地球のマントルが持つ重要な性質である。なぜなら、プレートの沈み込みは、マントルの大規模な流動構造を決定し、これによって、マントル内部の熱的・物質的な構造が作り出されると考えられるからである。本論文では、沈み込みによって引き起こされる2つの現象について注目し、数値シミュレーションを用いて研究を行なった。

(1)マントルの層構造と物性値が下部マントル深部まで沈み込むリソスフェアの運動に及ぼす影響について論じる。地震波トモグラフィから、下部マントルにおけるスラブの沈降速度が推測されてきた。この結果によると、沈み込むプレートの運動はスラブの引っ張りによって起こされているにもかかわらず、下部マントルスラブの沈降速度と表層にあるプレートの運動速度の間には大きな差が存在することになる。本研究では、表面と深部におけるスラブの運動速度が一致しない原因を明らかにし、同時にマントルの物性値の取り得る範囲の推定を行なった。本研究では、2次元長方形のマントル対流モデルを使用した。このモデルでは、プレートの沈み込みを表層の高粘性構造の自発的な運動として再現することができる。本研究では、マントルの粘性率の層構造、すなわち、660 km 相境界の粘性増加量と深さ依存性の強さ、降伏応力、さらには、熱膨張率の圧力依存性が、表面プレートとスラブ先端それぞれの速度に与える影響について系統的に調べた。その際、沈み込むリソスフェアの変形に注目し、これらの物理パラメータがどのようなメカニズムで運動速度に影響するのかを明らかにした。

沈み込む表面プレート速度と下部マントルにおけるスラブの沈降速度は、両者とも、スラブ先端のマントルの粘性率の層構造に強く依存することがわかった。特に、沈み込むリソスフェアが十分大きな降伏応力を持つ場合には、下部マントルの抵抗が表層まで伝わることにより、表面プレートの速度はスラブ先端の沈降速度の影響を強く受ける。したがって、スラブの沈降速度が小さくなる高粘性の場合は、プレートの沈み込む速度も小さくなる。このような浅部と深部の運動の連動性は、深部におけるスラブの変形の度合いに依存する。リソスフェアの強度が低い場合では、660 km 相境界付近でスラブが連続的に折り畳まれるような座屈変形 (slab buckling) が引き起こされる。この変形により、マントル浅部のスラブにおいては、下部マントルの強い抵抗の影響が弱まる。

そのため、下部マントルにおけるスラブの運動が低い場合においても、表面プレートは比較的速い運動速度を保つことができる。この傾向は、下部マントルの粘性率がほぼ一定あるいは増加する場合、かつ、平均で  $3 \times 10^{22}$  Pa s 以上になるときに、slab buckling が強く起こることで明瞭に見られた。さらに、熱膨張率の圧力依存性は、浅部におけるスラブの負の浮力を大きくする。一方、深部においては負の浮力が小さくなる。この深部と浅部の運動の不一致により、スラブにかかる応力が増加する。その結果、深さ 660 km 付近で起こる slab buckling は助長され、表面プレートと深部スラブ運動速度の差は大きくなった。このような結果から、観測された表面プレートと深部スラブの速度の両方が調和的な値を得るためには、660 km 相境界付近における slab buckling の影響が重要であることが明らかになった。

(2) 表層からマントルへ取り込まれた水の循環に対するマントル対流と含水鉱物の最大含水量の影響について論じる。高圧物性実験に基づいた数値シミュレーションによって、数十 ppm の水が無水鉱物 (nominally anhydrous minerals = NAMs) に取り込まれ、プレートの沈み込みに伴ってマントル深部まで運ばれることが示されてきた。しかしながら、マントル深部での水輸送過程やマントル内での水の分布については未だ理解が乏しい。本研究では、長期間にわたる深部への水輸送量を定量的に見積もるために、脱水・加水過程を取り入れたマントル対流の 2 次元円筒モデルによる数値シミュレーションを行った。本研究では、対流の活発さや時間依存性を決めるパラメータであるレイリー数、内部加熱量、さらに、下部マントルの最大含水率をパラメータとして変動させて水循環に与える影響について調べた。

水は地球表面の地殻の沈み込みによってマントルに取り込まれるため、水は対流セルの縁に沿って移動する。内部加熱がない場合では、マントル対流が定常的なセル状の対流モードとなるために、水がマントルに混合されることはほとんどなく、レイリー数と下部マントルの最大含水率に関わらず、流入と放出はすぐに平衡状態となった。一方、激しい時間依存性をもつ対流モードが支配的となる内部加熱を与えたモデルでは、表層から取り込まれた水はマントル全体に混合される。このとき、レイリー数が高い場合では、強い対流が発生するために、水の混合効率は高くなる。水がマントルに十分混合されると、マントルは水に飽和した状態となる。このときのほとんどの領域の最終的な含水率は、上部マントルの NAMs と下部マントルの最大含水率のうち、どちらか低い方の値とほぼ等しくなった。このため、大きな最大含水率をもつマントル遷移層においても、含水率は小さくなった。この結果から、マントルの大部分の含水率は、水の循環経路上の含水鉱物の最大含水率のなかで、最も低い値に依存することが明らかになった。さらに、下部マントルの最大含水率の方が小さいときには、多くの水が 660 km 相境界において放出される。この 660 km 層境界付近に取り残された水によって下降流付近で含水率が高い領域が形成される。この含水率の高い層はマントル遷移層全体に広がることはない。したがって、マントル鉱物の相転移による最大含水率の変化することで起こる脱水・加水反応により、含水率分布の局所的な不均一が形成されることがわかった。