

マントルダイナミクスにおける「巻き込み」現象の重要性

On the importance of the entrainment process in mantle dynamics

栗田 敬[1], 熊谷 一郎[2], 並木 敦子[3], 柳澤 孝寿[4]

Kei Kurita[1], Ichiro Kumagai[2], Atsuko Namiki[3], Takatoshi Yanagisawa[4]

[1] 東大・地震研, [2] 東工大・院理工・地惑・ほんまもん厨房, [3] 金沢大・地球, [4] IFREE, JAMSTEC

[1] ERI, Univ. of Tokyo, [2] Honmamon Kitchen, EPS, TITECH, [3] Dept. Earth Sci., Kanawasa Univ., [4] IFREE, JAMSTEC

地球や惑星の内部では重力分離を起こした層状構造での対流現象が一般的に見られる。この対流運動を通して、各層間の熱と物質のやりとりが惑星の進化や内部のダイナミクスを支配している。対流運動は層状構造の形成にも、破壊にも重要な働きをし、内部構造を決める。特に重力的に安定な成層構造を対流運動が破壊するプロセスは様々なカストロフィックな現象を引き起こし、地球や惑星の進化では重要なイベントとなっている。地球惑星科学で見られるこのような例は様々な時間・空間スケールにわたっている。本講演では上部・下部マントル・D層と言うマントルの層状構造を念頭に置き、成層構造の対流による崩壊過程やブルームの形成・成長に流体力学的巻き込み現象 (Hydrodynamical Entrainment Process, HE) が果たしている役割をまとめる。

混和する多流体系ではその界面を通して熱のやり取りをするのみならず、物質のやり取りを行い、各層は化学組成を変えていく。特に対流場では境界面を通しての流体力学的な巻き込み現象により異なった層の物質を取り込む現象が知られている。従来この HE による混合はレイノルズ数の高い乱流状態での現象と考えられてきたが、近年室内実験により低 Re 数領域・層流状態においても生じることが明らかにされ、マントルの様な場においても有効に働くと考えられている。これは微小領域でのみ有効な拡散現象とは異なり、地球惑星の大きなスケールにおいても有効に働く混合機構のために、混和系の流体運動において化学組成を変動させるプロセスとして近年注目を集めている。化学組成の変化は各層の密度構造を変えるために、オーバーターン、層状構造の崩壊・混合、ブルームの成長、上昇速度の変化へと結びつく。また同時に化学組成は粘性率をも制御するために流体力学的な状態の変化をうみだす。講演ではスターティング・ブルームの実験で見る巻き込み現象と二層対流系にみられる巻き込み現象を室内実験の結果に基づき整理を行なう。

ブルームでの巻き込み現象：ブルーム、サーマルといった多相（複合）流体の運動においては流体の境界面を通しての物質の移動が流体力学的巻き込み現象により活発に起きる。これは流体運動によって引き起こされた界面の不安定による引き剥し運動で、低 Re 数領域においても有効な物質混合機構であることが明らかになっている。HE はマントルでの物質混合や地球化学的貯留層の形成・寿命を支配する基本過程であるにもかかわらず、今までその重要性が認識されてこなかった。Kumagai & Kurita (2000), Kumagai (2002) は Starting Plume の実験を通して巻き込みの定量化を図ってきた。特にブルームと密度境界との相互作用に特異な現象を引き起こし、ブルームの地球化学特性に反映されていることが明らかにされている。多層対流系においてもブルームを媒体としたこの流体力学的巻き込み現象は系の化学組成を変える重要な役割を担う。特に D 層に関して下部マントルによる活発な巻き込みにより短い寿命が予測され、その形成・維持機構に興味が集まってきている。また巻き込みによって密度差が減少し、一方ブルームの体積のインフレーションがおき、両者のバランスによってブルーム上昇速度は変化する。この系は自己調節系と見なすことができる、興味深い挙動を示す。

層状対流系の構造進化に果たす巻き込み現象：混和型の 2 層対流系の構造の進化の形態は 3 つのパターンに分けることができる、1) 一方の層が HE により一方的に侵食され、消滅させられる、「侵食型崩壊」、この場合 HE の強さは境界を挿んで大きく非対称的であるために層の体積が変化していく。2) 双方の層が HE により物質の交換を行い、密度差を解消し、界面の不安定により 1 層化する、「界面不安定型崩壊」、3) 相転移の進行によって界面が解消される、「相転移進行型崩壊」。侵食型崩壊は D 層の状況に、界面不安定型は上部・下部マントルに、相転移進行型は氷衛星の内部海の進化やマグマオーシャンの固化の状況にそれぞれ対応している。