

「フロンティアセミナー・テキスト」 惑星のマントル・ダイナミクス

小河 正基¹

(要旨) 本稿は、2023年9月5,6日に北海道岩見沢市新篠津村で行われた「惑星科学フロンティアセミナー」の場で、地球型惑星のマントル・ダイナミクスについて筆者が行なった講演内容をまとめて[1]に掲載した総説の概要である。この総説では、マントル・ダイナミクスの立場から月からスーパー地球までさまざまなサイズの地球型惑星の内部進化を系統的に論じている。内容は、マントル・ダイナミクスの基礎を論じた第一部、この基礎を踏まえて月からスーパー地球までの内部進化を論じた第二部、この第二部の議論から見えてきた将来の課題を論じた第三部からなる。

1. マントル・ダイナミクスの基礎

現在の月と地球を見比べれば、これらの惑星内部は異なる歴史を辿ったことは一目瞭然である。また地球についても、現在の大陸の構造と4~2.5 Ga(Gaはgiga-year agoの意味)の太古代と呼ばれる時代に形成された大陸の構造の違いから、太古代やそれ以前の地球の姿は現在とは大きく異なっていたことが指摘されてきた。(以下、議論の根拠となる文献のリストなどの詳細については、原総説を参照されたい。)惑星内部進化の研究の中心課題は、このような「違い」の本質は何か、なぜ違いが生じたのか、という素朴な疑問に答えることにある。しかし、この問いかけは漠然としており、研究の拠り所となる物理法則となかなか馴染まない。これは、物理法則は多くの場合数式の形で書き下されており、そこから直接に導かれるのは、月と地球の違いといった素朴な疑問とはおよそかけ離れたマントルやコアの平均温度や地殻熱流量の時間変化などの定量的な予想であるためである。本稿では、物理法則に立脚するという立場を堅持しつつ、定量的な議論に代わり「素朴な

疑問」に応えるための理論的な枠組みとして、マントル・ダイナミクスのような非線形力学系でしばしば見られる「相転移」に着目する。非線形力学系では、その系に含まれるパラメーターが連続的に変化したとき、ある閾値を超えると突然この力学系の挙動が定性的に変化し別の「相」に移ることがある。そこで、月と地球が異なるのは、これらの惑星がそのマントルを特徴づけるパラメーターの違いのため異なる相(以下レジームと呼ぶ)に属するからであり、太古代と現在で地球の姿が異なるのは、時代と共に徐々にあるパラメーターが変化し、ある閾値を跨いだところでマントルが一つのレジームから別のレジームに相転移したからである、といった形で地球型惑星の進化を統一的に理解することを目指す。

このような試みの一例として、固体マントルの熱対流安定性とその惑星におけるホットスポット火山の有無の問題を取り上げる。よく知られているように多くの岩石は低温では固いが、およそ1000 Kを超えると粘性流体のように流動するため、マントルは対流運動をする可能性がある。この対流運動の表れの一つが、高温のブルームがマントル内を熱的な浮力により上昇することで起こるホットスポット火山である。そこで簡単のため放射性元素による内部加熱の効

1. 隠居(東京大学大学院総合文化研究科2023年退職)
cmaogawa@gmail.com

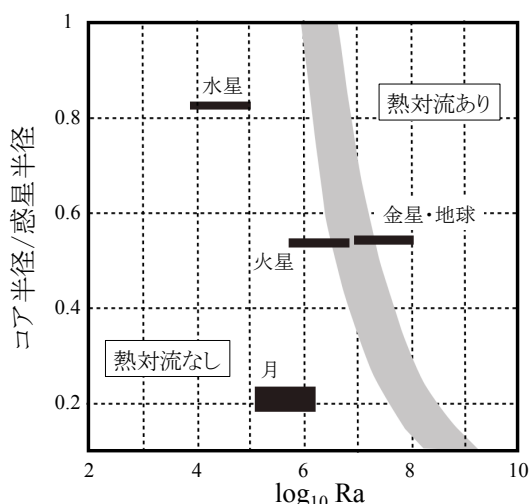


図1: グレーの帯は、地表面から冷却されコアから温められるマンテルにおいて熱対流が発生するレイリー数の臨界値をコア半径/惑星半径の関数として表したものである。この臨界値はマンテル物質の粘性率の温度依存性の強さに依り、グレーの帯はこの温度依存性が実際のマンテル物質に期待される範囲にあるときの臨界値の範囲を表す。現実の惑星のマンテルでは放射性元素の壊変による内部熱源が存在するため、図に示された臨界値より低いレイリー数でも熱対流は起こり得る。それでもグレーの帯は、各惑星におけるマンテル熱対流の起こりやすさの一つの目安を与える。

果を無視して、地表面からの冷却とコアからの加熱によりマンテルにおいて熱対流が起こる条件を求めると図1のようになる。マンテルの熱対流は、その深さ d と対流する岩石の物性値から決まる熱対流の特徴的な長さスケール $d_p \propto \eta_0^{1/3}$ の比を表すレイリー数 $Ra = \left(\frac{d}{d_p}\right)^3$ が図に示した臨界値を超えると起こる。(ここで η_0 は岩石の硬さの指標としての粘性率の代表的な値。一般にマンテルの粘性率は温度や圧力に依存し場所によって大きく変化するが、図ではコア・マンテル境界における値を η_0 として用いている。)図に示したように、この条件は火星でぎりぎり、それより大きな惑星ではほぼ確実に満足されるが、月や水星では満たされない。これに呼応して、ホットスポット火山は月や水星には存在しないが火星などのより大きな惑星には存在する。この例は、レジームという考え方が惑星に関する「素朴な疑問」に応える上で有効な道具となることを示唆している。

地球型惑星の内部進化に関わるレジームを同定するためには、まず力学系を特定する必要がある。マ

ントル・ダイナミクスの一つの主要な構成要素はもちろんマンテル対流であるが、もう一つ火成活動も重要な要素である。マンテル深部が十分に高温の時、対流の湧昇域では岩石の減圧融解のためマグマが生成される。生成されたマグマは母岩(マトリックス)から重力分離しその一部は地表面まで浮上して火山活動を起こす。この火成活動はマンテルの化学組成分布を不均質にする。地表面まで浮上したマグマは玄武岩という鉄分に富む岩石からなる地殻を形成するのに対して、その下では母岩から玄武岩成分が抜き取られた後の残渣物質(ハルツバージャイトと呼ばれる)が生成される。玄武岩はマンテルにリサイクルすると組成的に密度が高いためマンテル深部に沈降するのに対して、残渣物質は組成的に密度が低くマンテル最上部に留まろうとする。このため、火成活動によりマンテルは組成的に分化して、リサイクルした玄武岩物質に富む深部と残渣物質に富む浅部というように化学成層する。この重力的に安定な化学成層はマンテル対流を抑制する。他方、マグマは圧力がおよそ8 GPa(地球では深さ250 km程度、火星では600 km程度に相当)より低いマンテル最上部では大きな浮力を持つためマンテル対流の重要な駆動源となる。

この火成活動・マンテル対流結合系には、以下のような惑星内部進化を理解する上で重要な意味を持つレジームあるいはレジームを生み出すポジティブ・フィードバックが存在する。

- (a) 熱対流レジーム: 前述のとおり、火星サイズより大きな惑星では固体マンテルは熱対流を起こす。この閾値は厳密には内部熱源の強さやマンテルの粘性率の温度依存性の強さに依存する。
- (b) スタグナント・リッド・レジーム: 粘性率の温度依存性が強く、温度の低い地表面付近のマンテル物質がマンテル深部と比べて4桁以上高粘性になると、熱対流レジームに属する惑星では、地表面に沿って硬くて不動の蓋(リッド)のように振る舞うリソスフェアが発達し、マンテル対流はその下で起こるようになる。このレジームを「スタグナント・リッド・レジーム」と呼ぶ。スタグナント・リッド・レジームと粘性率の温度依存性が弱くリソス

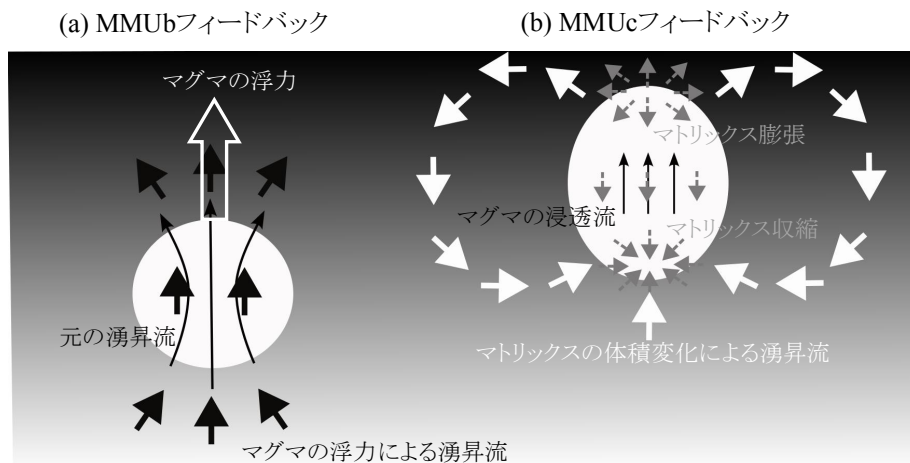


図2: 火成活動・マンテル湧昇流(MMU)フィードバックの概念図。(a)マグマの浮力を介して起こるMMUbフィードバックと、(b)浸透流によるマグマの上昇の結果起こるマトリックスの体積変化が引き起こすMMUcフィードバックの二種類がある。どちらの図においても、白の楕円はマンテル湧昇流による減圧融解の結果生じた部分溶融域を表す。背景のグレーの濃淡は平均的なマンテルの粘性率分布を表し、暗い色ほど高粘性に対応。地表面に沿った濃いグレーの領域がリソスフェア。

フェアが発達しない「リッドなし・レジーム」の境界に沿って、リソスフェアは発達するが熱収縮による自重のためある程度対流運動を起こす「スラギッシュ・リッド・レジーム」がある。

- (c) プレート・レジーム：リッドの岩石は温度が低い
ため普段は硬い物質として振る舞うが、なんらか
の理由で大きな応力がかかると破壊する。地球
のような表面を水で覆われた惑星では、しばし
ばこの割れ目に水が浸透し潤滑剤として働くた
め、破壊面に沿って定常的な断層運動が可能と
なる。この断層運動によるリソスフェアの変形も
巨視的なスケールでの流動の一種と見做すと、
リソスフェアの実効粘性率は破壊により低下する
ことになる。ここで大事な点は、一旦形成され
た断層は応力がリソスフェアの破壊強度以下に下
がっても消えてなくなるわけではないので、実効
粘性率は低い状態を維持することである。じっ
さい、地球のリソスフェアでは、プレート境界も
プレート内部もかかっている応力に大きな差は
ないにもかかわらず、プレート内部の粘性率は
 $10^{24} \sim 10^{27} \text{ Pa s}$ なのに対して、プレート境界域の
実効粘性率は $10^{17} \sim 10^{20} \text{ Pa s}$ 程度である。この

応力履歴依存性によりリソスフェアは過去に形成
されたプレート境界を長期にわたり記憶するた
め、現実の地球で見られるような安定したプレ
ート運動が可能になる。プレート・レジームは地表
面に水のような潤滑剤が存在し、かつ、プレート
内にその自重によって発生する応力が、プレートの
破壊強度(数百MPa)より低く、プレート境界
における断層の滑り強度(数MPa)より高いとき
に発現する。

- (d) 火成活動・マンテル湧昇流(MMU) フィードバック：マンテル湧昇流により生成されたマグマはマンテル上部では大きな浮力を持つため、レイリー数が十分高いとき有意に湧昇流そのものを加速する。このマグマの浮力を介して火成活動とマンテル湧昇流の間に働くポジティブ・フィードバック(MMUbフィードバック；図2a参照)は、地球上でデカン高原やオントン・ジャワの海台などの洪水玄武岩を生成したLarge Igneous Province (LIP) に見られるような大規模でパルス的な火山活動を引き起こす。しかし、同時にこのフィードバックにより強化された対流はマンテルを強く攪拌するため、全体としてこのフィードバックはそ

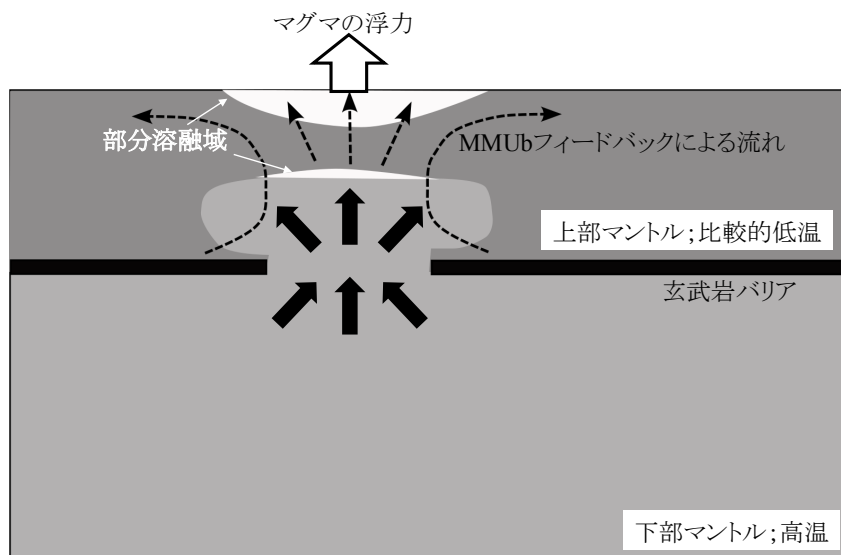


図3: パーストの概念図。上部マントルでMMUbフィードバックによって火成活動が始まると、それに伴う湧昇流のため、玄武岩バリアの下的高温物質が上部マントルに引き上げられ大規模に溶融し、元の火成活動をより大規模にするため起こる。

れによる活発な火成活動にもかかわらずマントルを均質化する。MMUbフィードバックは火星サイズより大きな惑星で、マントルが放射性元素によりある程度以上強く内部加熱されている時に顕著に働く。MMUフィードバックには、これ以外にマグマが浸透流としてマトリックス中を移動する際に起こるマトリックスの膨張・収縮を介して起こるMMUcフィードバックも存在する(図2b参照)。これは、マントル湧昇流により生じた部分熔融域でマグマがマトリックス中を浸透流として浮上すると、共存するマトリックスは部分熔融域の頭の部分で膨張、下部で収縮する。(図中の灰色の矢印参照。)この体積変化の双極子は、頭がリソスフェアに食い込んでいるときには、リソスフェアをわきに押し退けてマントルの広い領域にわたる循環流を引き起こす。(図中の白の矢印参照。)この循環流による湧き出しが元々の湧昇流を強化するのがMMUcフィードバックである。このフィードバックは上部マントルが大規模に部分溶融する惑星形成直後のマントル進化にとって特に重要であり、MMUbフィードバックとは対照的にマントルを化学成層させる。これは、MMUcフィードバックが引き起こすマントルの対流攪拌

はMMUbフィードバックが引き起こすものほど効率が良くないためである。

- (e) パースト：地球や金星のような下部マントルを有する惑星で内部加熱率がある閾値を超えると、下部マントル最上部で起こるいくつかの主要構成鉱物の高圧相転移の影響を受けたMMUbフィードバックにより、パルス的で大規模な火成活動が発生する(図3参照)。これは、マントルにリサイクルした玄武岩地殻の一部がこれらの相境界に沿ってトラップされ、相境界を通しての対流による熱・物質輸送を制限するバリアを形成するためである。普段は、この玄武岩バリアは下部マントルに熱を蓄積させる。しかし、マントル最上部でMMUbフィードバックによる火成活動が始まると、バリアは破られ下部マントルの高温物質が上部マントルに引き上げられる。その結果、もとの火成活動は規模を拡大しパルスの激しい火成活動へと発展する。このパルスをパーストと呼ぶ。

2. マントル・ダイナミクスの比較惑星学

1.節で述べたレジームという考えに基づき、月からスーパー地球までの様々なサイズの地球型惑星の内部進化は以下に述べるように理解される。

月はサイズが小さく、さらにその形成期におけるマグマ・オーシャンによる内部の化学成層のため、マントルにおいて熱対流は起きない。このため惑星形成後数億年にわたって、放射性元素の壊変による強い内部加熱によりマントル深部に熱が蓄積しマグマを生成する。このマグマの浮力はマントル対流を駆動し、それによる火山活動は4~3.5 Ga頃にピークを迎える。MMU**b**フィードバックが効かないため、この火山活動は億年スケールで継続する穏やかなものとなる。その後はマントルの冷却により徐々に火山活動は減衰する。この火山活動史は人工衛星による観測から明らかにされた海の特徴をよく捉えている。さらに、初期マントル深部におけるマグマの生成は、月で最初の数億年間に起きた半径膨張の原因であると考えられる。このマントル進化モデルは初期条件として、形成直後のマントルが大部分固体で化学的に成層しており、深部を組成的に密度が高く放射性元素を豊富に含む物質が占めていたことを要請する。

火星は月より大きいため、マントルにおいて熱対流もMMU**b**フィードバックも有効に働き、マントルは4つのステージで進化する。ステージIではマントルが高温であるためマグマ・オーシャンが発達し、分離したマグマが地表面に沿って一次地殻を形成するが、引き続きMMU**b,c**フィードバックが駆動する火成活動が二次地殻を形成し一次地殻を置き換える。このステージIの大規模な火成活動により、マントルは分化し重力的に安定な化学成層をする。その結果、続くステージIIでは数億年の間マントル対流も火成活動も停止し、深部では内部加熱のため温度が上昇しマグマが生ずる。このマグマの浮力が駆動するMMU**b**フィードバックのため、ステージIIIに入るとパルス的な火山活動が起こる。この火成活動によりマントル深部から放射性元素が奪われ地殻に濃集し、またMMU**b**フィードバックにより強化された対流によりマントルは強く攪拌されるため、マントル深部の温度は低下する。やがて内部加熱率が低下するにつれてMMU**b**フィードバックは停止し、マントル進化は

対流が熱対流として起こるステージIVへ移行する。火星で4~3 Gaの頃に起こった活発な火山活動はステージIIIのMMU**b**フィードバックにより、その後タルシスやエリジウムで長く活動したホットスポット火山はステージIVの熱対流におけるブルームにより理解される。

火星よりサイズの大きい金星でもマントルは4つのステージで進化する。特に、金星表面の20%ほどを占めその激しい変形によって特徴付けられるテセラ・テレンが形成された時代から、残りの80%を占め無数の小規模な火山から噴出した溶岩により覆われたより滑らかな火山平原が形成された時代への遷移は、ステージIIIからIVへの遷移として理解できる。ステージIIIではバーストによりパルスのようにマントル最上部に繰り返しマグマの池が形成され、それが冷却・固化する過程でテセラ・テレンが発達したと考えられる。しかし、内部熱源が減衰しマントルが冷却するにつれてバーストの原因となる玄武岩バリアは対流攪拌により消滅しバーストは停止する。ステージIVではマントル対流はより熱対流的になり、リソスフェア直下での小規模なマグマ生成による穏やかで継続的な火山活動を起こすようになる。この火山活動が火山平原を形作ったと考えられる。

金星のマントル進化に加えて、表層環境の違いによりリソスフェアがスタグナント・リッド・レジームからプレート・レジームに移ると、地球に見られるようなマントル進化が起こる。マントルがバーストに支配されるステージIIIでは、強い対流攪拌のためマントルは比較的均質に保たれ、プレートは間欠的に不規則な運動をする。しかし、内部熱源の減衰によりマントル深部の温度が低下しバーストが沈静化すると、マントルはプレート・テクトニクスに支配されるステージIVに入る。この時期のプレートは主に沈み込むスラブが持つ熱的な負の浮力により駆動されるため、定常的に運動する。このため、対流によるマントルの攪拌は弱く、海嶺火山活動により生成された海洋地殻はマントルにリサイクルしたのちコア・マントル境界上に堆積する。地震波トモグラフィーによりその存在が明らかになったLarge Low Seismic Velocity Provinces (LLSVP)は、この堆積物(玄武岩パイル)であると考えられる。玄武岩パイルは平均的なマントル物質と比べて放射性元素を多く含むため高温で

熱的な浮力を持つが、同時に組成的に高密度であるため全体としては大きな浮力を持たない。このことは、地球の重力異常、ジオイド異常、及び地形分布を注意深く比較することにより確認できる。ステージⅢからⅣへの遷移は、4 Ga以前の冥王代からプレート・テクトニクスが支配する原生代にかけての地球の変遷の原因であり、太古代はその遷移期と考えられる。

しかし、マントル・ダイナミクスの枠組みの中での水星の位置付けは未だ明らかではない。人工衛星による探査から示されたように、特に北極周辺に広がるsmooth plainと呼ばれる地域が存在は、水星でもMMU_Bフィードバックが働いたことを示唆している。水星のような小さな惑星でこのフィードバックが働く程度にレイリー数を高く保つためには、マントルの粘性率が地球よりはるかに低いことが要求される。しかし、粘性率を大きく下げるとマントルで熱対流が活発に起こるようになり、これによる水星内部の冷却のため惑星は顕著に熱収縮するはずであり、衛星観測から明らかにされた惑星半径収缩量や磁場から制約されるマントルの熱的な進化を理解することが困難になる。さらに、水星にホットスポットが存在しないことの説明も困難になる。マグマ・オーシャンによる最初期マントルの進化や水星に豊富に存在する硫黄など揮発性物質の効果を詳しく考察することが重要と思われる。

地球よりさらに大きなスーパー地球では断熱圧縮の効果が顕著になり、マントルにおける熱対流を弱め、厚いリソスフェアが発達しプレート・テクトニクスは困難となり、ホットスポット火山の原因となる熱的ブルームも発達できなくなる。さらに、内部は高圧となるためマントル湧昇流によるマグマ生成は困難となりMMU_Bフィードバックも働かなくなると予想される。地球からの類推によりスーパー地球のテクトニクスを予想することには注意が必要である。

3. 地球惑星内部科学の諸課題

2.節でまとめたように、惑星のマントルの進化については、ダイナミクスの枠組みの中で全体像を俯瞰できるようになりつつあるが、マントルとコアや表層環境とのカップリング、および惑星の形成過程とその後の進化の関わりに関しては、不明な点が多い。

惑星の内部進化において、その惑星が持つ内部起源の固有磁場の生成は一つの重要な要素である。一般に固有磁場は、溶けた鉄からなるコアが冷却されることで起こる対流によるダイナモ作用が原因であると考えられている。しかし、現在も固有磁場が存在する地球や水星、過去に地殻が獲得した残留磁化が検出されている月や火星のいずれについても、磁場が存在したと推定される期間にわたって、ダイナモを駆動できるほどの大きさでマントル・コア境界における熱流量を維持することは困難である。これは、長期にわたってコアの温度をマントルの温度より十分に高く保てるほどコアの熱容量は小さくなく、放射性元素はその化学的性質からダイナモ作用に必要なエネルギーを供給し得るほど大量にコアに入るとも思えず、さらに2.節で概観したマントルの進化に伴う冷却の速度もダイナモを駆動できるほど強くコアを冷やすには不十分なためである。コア・マントル境界における熱流量の水平不均質性や自転軸の揺らぎが引き起こす対流によるダイナモの可能性などを考慮した上で、惑星の自転による非常に強いコリオリ力や溶融鉄の低粘性からくる非常に高いレイリー数というコアが現実には置かれている状況のもとでのダイナモそのものの研究を進展させることが重要である。

マントルと表層環境のカップリングも惑星進化を考える上で重要な課題である。地球の表層環境の研究における中心的な課題の一つは「暗い太陽のパラドックス」である。このパラドックスは、現在地球に見られる表層大気と地球内部との間の炭素循環が地球史を通じて働いていたと仮定したモデルにより一応は説明されている。しかし、2.節で推定したように太古代以前の地球内部の活動は現在とは定性的に異なっていた可能性が高く、この時期の炭素循環が今日のものと同じであったとは考えにくい。さらに、太古代以前の地球の様子を記録する古い大陸は今日では断片的にしか残っていないため、そもそもこの時期を通じて表層が安定して温暖だったのかどうかも明らかではない。暗い太陽のパラドックスが未解明であるため、その裏返しとして原生代の初めと終わりに起こった海洋の全球凍結(スノーボール)の原因解明も困難である。これらの困難に対する一つの手がかりが、火星の内部進化と表層環境のカップリ

ングの研究から得られる。火星では、ホットスポット火山が活発であった4~3 Gaにかけて間欠的に温暖な表層環境が出現したことが示唆されている。数値シミュレーションからは、この火山活動はステージⅢのMMU_bフィードバックによるものであり、この活動による間欠的な温室効果ガスの供給により火星表層に温暖な環境を出現させた可能性のあることが示される。MMU_bフィードバックは冥王代から太古代のはじめにかけての地球でもバーストにより大規模な火山活動を起こし間欠的に温室効果ガスを供給したと考えられ、これにより火星と同様に暗い太陽の下で一時的に表層を温暖化したことが期待される。地球上で太古代初期に海が存在したことを示す堆積岩も、このような環境下で形成された可能性が考えられる。やがて原生代に入ると、マントル・ダイナミクスの主役がバーストからプレート・テクトニクスに移り変わるため、地球内部と表層大気との間の炭素循環はより定常的になり、表層は今日見られるように安定して温暖になったと期待される。炭素循環を考慮したマントル・ダイナミクスのより詳しいモデリングと、火星の探査による表層環境史の解明に基づくこのようなモデルの検証は、地球の表層環境史を理解する上で重要な意義を持つ。

最後に、惑星形成からその後のマントル進化へ至るまでの道筋の解明は、マントル進化の初期条件を知る上で必須である。月ではマグマ・オーシャンが冷却・固化する過程で、結晶が晶出した順にコア・マントル境界上に堆積し、マントルを化学成層させたと考えられている。しかし、この化学成層は後から上に堆積する結晶ほど組成的に密度が高くなるため重力的に不安定である。このためマントルは「ひっくり返し」(オーバーターン)、最終的に深部に組成的に密度が高く放射性元素を豊富に含む層が発達したと考えられている。このモデルからの類推により、地球のマントルもマグマ・オーシャンにより化学成層したことが期待されてきたが、少なくとも今日のマントルではそのような化学成層の存在は地震波トモグラフィの研究から否定されている。さらに、過去のマントルにおける化学成層を示す証拠も見つかっていない。最初期(マグマ・オーシャンが存在した時期)の惑星の内部進化を理解する上で一つの鍵となるのが、惑星形成にかかる時間 t_{PF} 、マグマ・オーシャンが

冷却・固化しオーバーターンが起きる時間 t_{MOT} 、マントル対流の立ち上がり時間 t_{conv} である。巨大衝突による月形成やマントル・ダイナミクスのモデルから、月では $t_{PF} \ll t_{MOT} < t_{conv}$ となり、惑星形成に続いてマグマ・オーシャンを経てその後の進化に繋がったという描像が成り立つことが期待される。他方、太陽周りで形成され、サイズが大きい場合MMUフィードバックが有効に働く火星では、 $t_{PF} \sim t_{conv}$ ~数百万年と見積もられ、惑星形成とマグマ・オーシャンの冷却・固化とマントル対流が同時進行で起こったことが期待される。単純に月の最初期進化から他の惑星の最初期進化を類推するのは危険である。さらに月でも、マントルがマグマ・オーシャンにより最終的に化学成層したとは限らない。化学成層するか否かは、マグマ・オーシャンの寿命 t_{MO} とオーバーターンの時間スケール t_{OT} (数百万年の程度)の大小関係に依存し、 $t_{MO} \ll t_{OT}$ の時にのみ化学成層する。月のモデリングからは $t_{MO} > t_{OT}$ となる可能性も否定できず、その場合はオーバーターンによりマントルは均質化する可能性がある。月試料の分析から t_{MO} や t_{OT} を制約することは重要だが、そのような制約は現時点で得られていない。2.節で述べた月のマントル進化のモデルでは初期状態としてオーバーターンのモデルから期待される化学成層構造を仮定したが、この仮定の正当性を検証するためにはさらに詳しい月探査が必要である。他方、火星のマントル進化モデルではマグマ・オーシャンによるマントルの結晶分化の可能性を考慮せず、初期条件でマントルは均質と仮定したが、この仮定から導かれた「標準モデル」が予言する二次地殻形成などステージIの進化は、リモートセンシングにより明らかになった火星の地殻の化学組成や火星隕石から推定される t_{MOT} の見積りと整合的である。もしマントルがマグマ・オーシャンにより顕著に分化したとすると、今日でも地殻は一次地殻でマントルには最初期の化学成層が残っているはずであることがモデリングから期待される。月と火星の地殻やマントルの構造発達史を惑星探査により実証的に解明し比較することは、最初期の地殻・マントルで働いた物理過程を理解し、地球も含めて地球型惑星内部全般がこの時期にどのような時系列を経て進化したかを解明する上で必須の研究である。

参考文献

- [1] 小河正基「惑星のマントル・ダイナミクス」, 惑星地球科学研究センター, ホームページ URL: https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/2023/2023-09-05/01_ogawa/pub-supplement/index.html

著者紹介

小河 正基

東京大学大学院総合文化研究科2023年退職. 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了. 理学博士. 専門は惑星科学特にマントル・ダイナミクス. 日本惑星科学会, 日本地震学会, American Geophysical Union所属.