

論文内容の要旨

論文題目 Early Thermal History , Core Formation , and Tectonics of Mars

(火星の初期熱史, コア形成, テクトニクス)

氏名 千秋博紀

火星は月に続き惑星科学者の興味を惹いてきた天体である。火星表面の画像が1964年にマリナー4号によって得られて以来、現在までに14機の探査機が火星に到着、もしくはその近くを通過し、火星を研究する上で有益なデータをもたらしている。特に、火星の表面地形に関しては非常に詳細なデータが得られており、その精度は我々が地球について持っているデータを凌ぐ程である。

火星の地図をみるとすぐに気がつくのが、南北の非対称性である。南半球は多くのクレータに覆われ、起伏が激しいのに対し、北半球は非常に滑らかである。これは地形が形成されてからの年齢を反映しているものと考えられる。正確な年齢はわからないが、南半球には隕石重爆撃期の地質情報がまだ残されていると考えられる。北半球の平均高度は南半球に比べて数km低く、かつてはここに海が存在したのではないかと考えられている。南北の半球の境には沈み込み帯は見付からないため、この二極性はプレートテクトニクスの結果形成されたとは考えにくい。

大きな火山が幾つも存在していることも火星の特徴のひとつである。火星ではプレートテクトニクスが働かなかったために大きな火山を形成しやすかったのかも知れない。火山地帯にはあまり多くのクレータが見られないことから、火星では、最近まで火成活動が続いていたと考えられる。質量が地球の1/10しかない火星で、太古の地質情報を残しつつタルシスのような大規模な火山地形を形成していたということは、何らかの特殊な熱源を考えなければ説明がつかない。

一方、火星の内部構造については実はまだあまり良くわかっていない。地球の場合には複数の経路についての地震波の解析から内部構造が推定されているが、火星ではまだ複数地点での地震波の観測は行われていない。火星が起源であると言われているSNC隕石は唯一我々が現在直接手にすることのできるサンプルだが、SNCに分類されている隕石もたかだか18個に過ぎない。火星の内部構造に関して

唯一得られているデータは、慣性能率である。Folkner et al. (1998) によれば現在の火星の慣性能率は $0.366 \times MR^2$ (M と R はそれぞれ現在の火星の質量と半径) である。この値は火星の中心に密度の大きな金属コアが存在していることを示唆している。

コアがいつ、どのようにして形成されたのかは初期熱進化に依存する。金属とシリケイトが重力的に分離するためには一度、シリケイトが融ける程の高温を経験しなければならないからである。この熱源の候補としては、集積エネルギーと放射性核種の崩壊熱が考えられる。コアの形成は同時に重力エネルギーを解放する。その影響は火星表面にも及び、長期に渡る火成活動のエネルギー源になったのかも知れない。しかし現在までに、火星の初期熱進化からコア形成に至るまで統一的な研究を行なった例はない。

そこで我々は第1部として火星の初期熱進化を、第2部として火星のコア形成過程を、それぞれ数値計算の手法を用いて研究した。第1部に於いては、コアの形成を視野に入れ、Tonks and Melosh (1996) 的な重力分離を考慮に入れたモデルを構築した。第2部ではその結果を受け、集積中に原始火星内部に形成された金属層が重力不安定によって火星中深部に沈み込み、金属核を形成する様子をシミュレートした。先に述べたように金属核の形成は大きなエネルギーを解放する。解放されたエネルギーの分布には偏りがあるため、これを考慮に入れると火星の南北非対称性や赤道付近に大きく、活動期間の長い火山が形成されることもうまく説明される。このことは、初期熱史からコア形成に至るまでの、統一的な研究の結果始めて明らかにされたことである。以下に、第1部、第2部それぞれの手法と結果について簡単にまとめておく。

第1部: 集積期の熱進化モデル

原始火星は周囲の微惑星を集積して大きくなり、現在の大きさに至ったと考えられている。集積の際解放された重力エネルギーは衝撃波として原始火星内部を伝わり、熱として埋め込まれる。同時に、微惑星の衝突に伴うクレータ形成は周囲の物質の変形、再配置を生じる。これは熱の分配という観点からすると、物質を攪拌することに相当する。従来の地球型惑星の初期熱史モデルでは、衝突してくる微惑星が惑星内部に与える熱エネルギーの量は、微惑星のサイズ分布にしたがって平均化し、集積期の原始惑星は時間、空間的に連続して加熱されると仮定していた。しかしこのような取扱をしてしまうとクレータの変形によって原始惑星内部が攪拌される効果や、局所的に強く加熱される事によってマグマの池が形成され、そこで金属とシリケイトとが重力分離する効果について検討することができない。そこで我々は、一度毎の衝突における熱の分配を計算し、同時に金属とシリケイトとの分離も追える火星の初期熱史モデルを新たに構築した。

我々のモデルは2つのパラメータを含む。

ひとつは衝突してくる微惑星の最小質量である。微惑星のサイズ分布は、惑星形成論の結果から、冪乗分布で表されると仮定した。サイズ分布の全体を決定する最小質量は、惑星形成論から与えられるべき値だが、今だ不確定がある。また、もし微惑星のサイズが非常に小さかった場合には、毎回の衝突の影響を計算する事が困難になる。そこで我々はこの値をパラメータとして振ることによって、結果に与える影響を調べた。

もうひとつのパラメータは衝突地点直下に形成される等圧核のサイズを決めるパラメータである。これは衝突実験や衝突に関する詳細な数値計算によって決められるべき値であるが、不確定性が残されているため、パラメータとして振ることにした。

その結果、(1) 集積中の火星の内部温度構造はこれらふたつのパラメータに強く依存すること、(2) 集積中には金属コアが形成されないこと、(3) シリケイトから分化した金属は途中で金属層を形成すること、が明らかにされた (図1、2)。

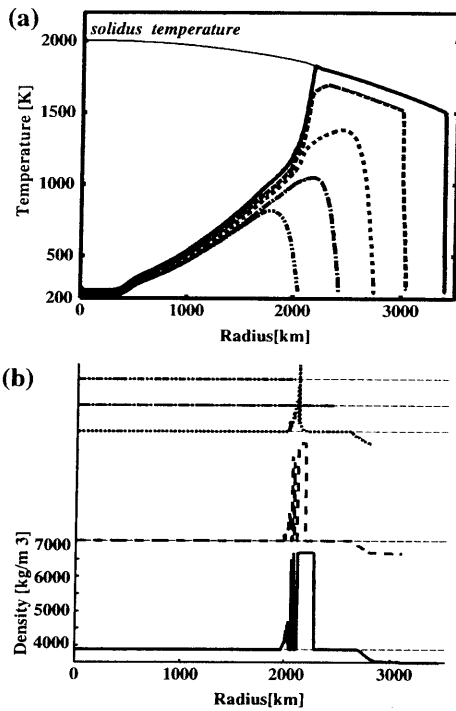


図1：微惑星の最小質量が 10^{18} kg の場合の (a) 温度構造と (b) 質量分布の進化。

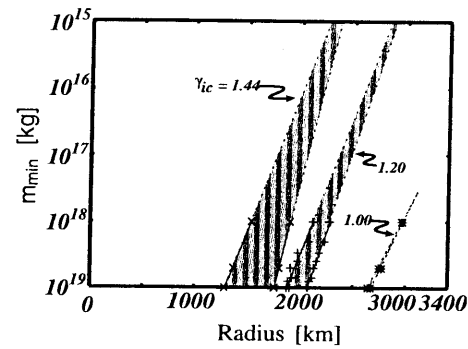


図2：形成された金属層の位置と厚さ。微惑星の最小質量と等圧核のサイズの間数として表される。

第2部：コア形成モデル

火星は集積中に大規模なマグマオーシャンを形成することはできない。しかし、局所的な金属の分離を繰り返した結果、内部に金属層が形成される。この構造は重力的に不安定なので、やがてレイリーテイラー型の不安定が生じ、中心の未分化部分との入れ替わりが生じると考えられる。

我々はこのモードによるコア形成の過程をシミュレートする数値モデルを構築した。このモデルの初期条件としては、Part I で得られた集積完了時の火星の内部構造に、放射性核種の崩壊による加熱の効果を加えたものを用いた。また、入れ替わりの際に解放される重力エネルギーによって内部が暖められる効果も考慮にいった。

その結果、重力不安定によって火星の金属コアが形成される場合には (1) コア形成時間はプロトコアの粘性率で決まること、(2) コア形成の最終期に至るまで波数1のモードが卓越し続けること、(3) 火星の金属コアは集積後 20 億年近く経ってからである可能性があること、(4) プロトコアは強く加熱されつつ、惑星表面近くまで上昇すること、が明らかにされた (図3)。

コア形成の数値モデルで、内部の温度分布も同時に解いたものを図4に示す。これを見ると図で上側と下側とで大きな温度差が生じている。これはコアの形成モードとして波数1のモードが卓越した結果であり、現在火星に見られている南北の非対称性に相当しているのかも知れない。

コア形成に伴って非常に大きなエネルギーが熱として解放されるが、コア形成は放射壊変によってプロトコアが暖められてから生じるため、集積の完了と分化による加熱との間に時差が生じる。このことが、タルシスのような長期に渡る大規模な火成活動を説明できる可能性がある。この場合には、一度に大量の揮発性成分が放出され、一時的な大気が形成されるだろう。