

研究種目：基盤研究(G)

研究期間：2007年度 ～ 2009年度

課題番号：19540433

研究課題名(和文) 水星の熱史と固有磁場の起源の再検討

研究課題名(英文) Re-examination of the thermal history of Mercury and the origin of its intrinsic magnetic field

研究代表者

倉本 圭 (KURAMOTO KIYOSHI)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50311519

研究成果の概要(和文):水星を構成する物質の組成を原始太陽系星雲の進化モデルから推定し、その結果に基づいた物性値を用いて、水星の内部熱構造の進化ならびに固有磁場の起源について数値的・理論的解析を行った。水星のマントル物質は従来の推定よりも流動性が低く、そのために惑星中心部の冷却が妨げられ、固体内核の成長が鈍る。また液体核は内核からの軽元素放出によって対流し、それを駆動力とする穏やかな発電作用が生じて現在の弱い固有磁場が形成される可能性があることが分かった。これらは現在進みつつある水星探査の獲得データを解釈する基盤となる。

研究成果の概要(英文): The bulk composition of Mercury estimated from a model for the solar nebula evolution is adopted for the numerical and theoretical analysis of the thermal history and dynamo action of this innermost planet. The mantle components are probably more viscous than the previous estimates, which slows down the growth of solid inner core. The release of light element from the slowly growing inner core possibly induces the convection of outer liquid core with generating a moderate dynamo action and the present weak intrinsic magnetic field. These results provide a basis for the interpretation of data acquired by the current and future Mercury exploration missions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：固体地球惑星物理学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：ダスト、原始惑星系星雲、固有磁場、水星、混合距離理論、熱史、熱源、起源

1. 研究開始当初の背景

近く複数の探査機が送りこまれようとして

いる水星は、地球型惑星の固有磁場の起源を実証的に解明するための極めて重要な研究対象として位置づけられる。水星固有磁場の

起源の標準的な理解は 1980 年代に熱史の数値計算を基に Stevenson らが提唱した「薄い外核の組成対流ダイナモ説」である。水星は小型の惑星であるため、Mariner10 による強い固有磁場の発見(1974、75) までは、核は完全に凍結しており液体核のダイナモ作用は存在しないと考えられてきた。しかし金属核に微量の硫黄が溶解していれば、その凝固点降下によって液体の外核は薄くなりながらも現在まで存在しつづけることができる。その一方、核マントル境界の熱流量は極めて低くなってしまい、外核に熱対流は生じない。むしろゆっくり成長し続ける固体内核の表面から放出される硫黄分の浮力によって駆動される組成対流によってダイナモ作用が起こる可能性をStevenson らは示した。Mariner10 以後、水星探査が行われなかったこともありこの説が現在も広く受け入れられている。

従来の水星熱史の計算ではマントルと核は地球と同様の物性を持つことが暗に仮定されているが、水星の構成物質についての最新の理解を当てはめると、この想定は根本から見直す必要がある。水星の組成については未知な点が多いものの、これまでに得られている表面反射スペクトルや撮像データから、水星は地球よりも著しく酸化鉄と水分に乏しいマントルを持っている可能性が高い。これに関して申請者は原始太陽系星雲の化学進化の研究から、星雲の内側領域は、ガス抵抗によって外側から落ち込んでくるダスト中の有機物が蒸発したガスに汚染され、炭素に富む還元的な状態となった可能性があることを最近見出した。そのような還元的環境下では酸化鉄が金属鉄へ還元されるだけでなく、硫黄が不揮発性となり、水星へ多量に取り込まれた可能性がある。その場合、水星核の硫黄濃度は 15wt% 近くにも達しうる。

これらを考慮すると水星内部は従来の予想よりもよりはるかに冷えにくく、金属核の構造もこれまでの「薄い外核モデル」から著しく異なっている可能性がある。岩石の粘性率が組成に強く依存すること、特に水分量と酸化還元状態に敏感であることは良く知られている。現実的な水星のマントル組成を考慮すると、マントル粘性率は地球のそれよりも 2 桁ないしそれ以上高い可能性がある。一方、硫黄の大量混入は金属核の凝固点を著しく降下させる。実際にこれらの効果を取り入れた予察的な熱史計算を行ったところ、現在までに内核が成長しないケースすらありうることが分かってきた。

2. 研究の目的

そこで本研究では水星の熱史、金属核の進化、固有磁場の起源に惑星組成の違いがどのような影響を持つのか数値的ならびに理論的に明らかにする。そして今後取得される水星の磁場、表面組成、重力等の新しい探査データを統合的に解釈するための基本的知見の一つを提供することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 水星組成のモデリング: 独自に申請者が開発しつつある惑星原物質の酸化還元状態をコントロールする有機物と H_2O の分別輸送過程を考慮した原始惑星系円盤モデルを用いて、水星が取りうる組成範囲を定量的に予想する。この推定結果は水星の熱史、ひいては水星内部構造と固有磁場の発生の定量的な解析のための境界条件を与える。

(2) マントルおよび核の物理状態の理解: 推定組成から予想されるマントル粘性率と核の融解特性を与えた水星の熱史および核の冷却史の数値計算を行い、現在のマントルと核の物理状態をその組成依存性を把握しつつ明らかにする。

(3) 磁場の起源の多角的検討: 熱史計算から得られる核の構造と熱・浮力フラックスを与えた水星核ダイナモの評価を行う。熱・浮力フラックスと液体核の厚さが磁場の強度と形にどのように影響するかを明らかにすることによって、新しい磁場、表面組成、重力等の種々探査データを有機的に結合させ、水星内部の物理状態と 45 億年の熱史を制約することに寄与する。

4. 研究成果

(1) 本計画で開発を進めた原始惑星系円盤中のガス成分と固体成分(ダスト)の輸送を解く数値計算コードを用いて円盤内の固体成分分布の進化をシミュレートした。原始惑星系円盤の天文観測、始原的隕石の酸素同位体組成の進化、現在の太陽系惑星の質量配置と整合的な固体成分の面密度分布は、円盤形成の開始からおおよそ百万年~2 百万年後に得られることが分かった(図 1)。これは今後進展の期待される、より空間分解能の高い原始惑星系円盤の天文観測に理論予測を与えるものである。またこの結果を踏まえて水星に直接適用される円盤最内縁部への固体成分の輸送と組成について調べた。水星材料物質の酸化還元度については初期ダスト中の有機物量とガス降着率の時間変動が重要な役割を演じる。太陽系内縁部では固体成分は、

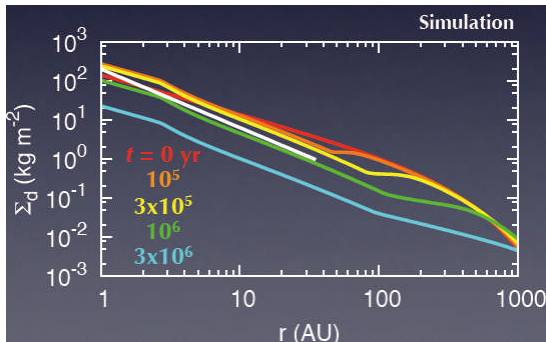


図 1. 原始太陽系星雲の固体成分の面密度分布進化のモデル計算の一例。円盤形からおよそ 100 万年後に現在の惑星の太陽系惑星の質量配置を整合的な面密度分布（白線）が再現されている。

一時的に実際に FeO と水分に乏しい組成を持つ可能性が確認された。この場合、金属鉄相中の硫黄濃度も同時に上昇する。さらに水星物質の酸素同位体組成は地球の値に類似していると予想されることが分かった。

(2) 混合距離理論を用いた水星熱史計算コードの開発をすすめ、水星熱史のパラメータスタディを行った。混合距離理論を用いることによって、惑星内部の粘性や組成などを中心からの距離の関数として任意に与えて熱進化を解くことが可能になる。水星マントルが FeO と揮発性元素に乏しい組成を持つと推定されることを考慮すると、マントル粘性率が上昇し、水星中心部の冷却が妨げられる。その一方で、水星の非調和元素である長寿命放射性核種が地殻に濃集する効果について調べたところ、熱源が表層付近に集まることによって、内核とリソスフェアの成長が促進される（図 2）。今後の探査によって入手の期待される地形、重力、表面の放射性核種濃度

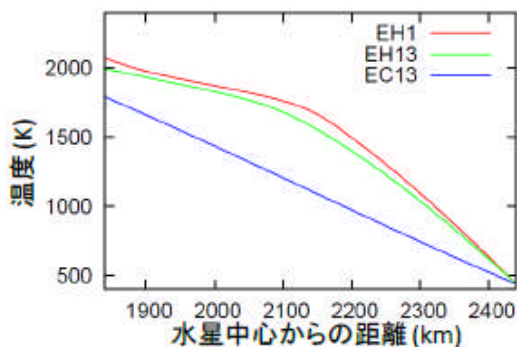


図 2. 現在（水星誕生から 45 億年後）の水星マントルの温度分布のモデル計算例。マントル組成は還元的組成とし、EH1, EH13 の両モデルではマントル中の放射性熱源は一樣、EC13 モデルでは地殻に濃集していると仮定した。

のデータから、水星の熱史と核の対流の強さを制約できることを示した。現在の水星地形から見積もられる全球の冷却収縮量を同時に説明するには、内核のサイズは従来の推定よりもかなり小さい可能性がある。一方で核マントル境界の熱流量の全球平均値は、外核で熱対流が発生するための下限値よりも小さい。固有磁場の生成に必要な核の対流機構としては、内核表面から放出される軽元素の浮力によって生じる、組成対流が重要と考えられる。

また流体力学計算による熱史計算に向けて、水星表面の境界条件の検討を進め、日射の時間・緯度変化に加えて熱伝導率の温度依存性を考慮した表面の熱収支モデルを構築し、これを数値的に解くことによって水星表面の長時間平均温度分布を求めた。またこの境界条件を与える流体数値計算コードの開発を進め、予察的な計算結果を得た。

(3) 中心核ダイナモの数値コードの開発を進め、水星ダイナモの駆動源として考えられる組成対流と熱対流のうち、扱いの容易な熱対流によるダイナモの発生を想定した数値シミュレーションを進めた。ただしこの結果から、組成対流の場合についても考察を進めることが可能である。

核表面の力学的な境界条件の違いが核の対流運動についてはダイナモ作用のパターンに及ぼす影響について調べ、核マントル境界において滑り条件を設定した場合、核内において運動エネルギーに比して磁場エネルギーの小さな「弱磁場ダイナモ解」が存在することを新たに発見した（図 3）。これは水星のような比較的弱い固有磁場を説明する可能性がある。

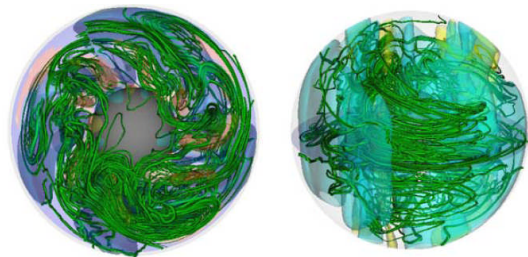


図 3. 数値シミュレーションにより見出された弱磁場ダイナモ解の一例。磁力線が緑線で示されている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- ① Fukui, T. and Kuramoto, K., Oxygen isotopic evolution in the early solar nebula: Validation of the H₂O transport model, *Proc. 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, 査読有, 409--411, 2008.
- ② Edward D. Young, Kiyoshi Kuramoto, Rudolph A. Marcus, Hisayoshi Yurimoto, and Stein B. Jacobsen, Mass-independent Oxygen Isotope Variation in the Solar Nebula, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 査読有, **68**, 187--218, 2008.
- ③ Naoya Sakamoto, Yusuke Seto, Shoichi Itoh, Kiyoshi Kuramoto, Kiyoshi Fujino, Kazuhide Nagashima, Alexander N. Krot, and Hisayoshi Yurimoto, Remnants of the Early Solar System Water Enriched in Heavy Oxygen Isotopes, *Science*, 査読有, **317**, 231--233, 2007.
- ④ 福井 隆, 倉本圭, 氷が担う原始太陽系星雲のグローバル物質輸送, 低温科学, 査読有, **66**, 83--88, 2008.
- ⑤ Iwahori, T. and Kuramoto, K., Thermal evolution of Mercury: Effects of bulk composition on core dynamo and global geomorphology, *Proc. 41th ISAS Lunar and Planet. Symp.*, 査読なし, 39--42, 2008.
- ⑥ 倉本 圭, 玄田英典, 荒井朋子, 岡田達明, 杉田精司, 月の熱進化の謎 (Enigmas of the lunar thermal evolution), 遊星人(日本惑星科学会誌), 査読有, **16**, 197--207, 2007.
- ⑦ Fukui, T. and Kuramoto, K., Radial redistribution of solids in an accreting protoplanetary disk: On the effect of variation in adhesive properties between H₂O ice and silicate, *Proc. 40th ISAS Lunar and Planet. Symp.*, 査読なし, 2007.

〔学会発表〕(計 19 件)

- ① Iwahori, T. and Kuramoto, K., Thermal Evolution of Mercury: Implication from Temperature Profile, AOGS 6th Annual General Meeting, Aug 11-15, 2009, Suntec, Singapore.
- ② Fukui, T., Tanaka, H., and Kuramoto, K., Dust Mass Distribution in Protoplanetary Disks: Effect of Dust Growth, Fragmentation, and Inward Drift, AOGS 6th Annual General Meeting, Aug 11-15, 2009, Suntec, Singapore.
- ③ Fukui, T. and Kuramoto, K., Growth, Fragmentation and Inward Drift of Dust in Protoplanetary Disks: Implications for Chondritic Components, 72nd Annual Meeting of the Meteoritical Society, July

13-18, 2009.

- ④ 佐々木洋平, 竹広真一, 林 祥介, 倉本圭, 下端に粘着条件・上端に応力無し条件を課した回転球殻 MHD ダイナモ計算, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張, 千葉市, 2008 年 5 月 25 日~30 日

〔図書〕(計 2 件)

- ① 倉本 圭, 第 4 章 月および惑星, 「地球化学講座 第 2 巻 宇宙・惑星化学」, 松田准一・塚本尚義編, 培風館, 総 291 頁, 2008.
- ② Hisayoshi Yurimoto, Kiyoshi Kuramoto, Alexander N. Krot, Edward R. D. Scott, Jeffrey N. Cuzzi, Mark H. Thieme and James, R. Lyons, Origin and Evolution of Oxygen Isotopic Compositions of the Solar System in *Protostars and Planets V*, University of Arizona Press, Tucson, 849--862, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉本 圭 (KURAMOTO KIYOSHI)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 50311519

(2) 研究協力者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

佐々木洋平 (SASAKI YOUHEI)
北海道大学・大学院理学院・博士後期課程
(2010 年 3 月学位取得. 現京都大学・大学院理学研究科・職員,)

福井 隆 (FUKUI TAKASHI)
北海道大学・大学院理学院・博士後期課程

岩堀智子 (IWAHORI TOMOKO)
北海道大学・大学院理学院・博士後期課程