

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03805

研究課題名（和文）高圧物性から探る惑星の流体コアの固化モードと磁場の起源

研究課題名（英文）Solidification of liquid core from thermal expansivity measurements on the Fe-Ni-S liquids

研究代表者

浦川 啓 (urakawa, Satoru)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：30201958

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：太陽系の天体には地球のような磁場を持っていたり、かつて持っていた天体がある。地球に似た岩石天体の磁場は、天体中心部の流体コアの熱・組成対流によって駆動されるダイナモが起源である。天体の磁場の寿命は、コア内部の金属鉄合金メルトの組成対流がどうなっているかに依存する。この研究では、Fe-FeS系コアで発生しうる組成対流のパターンが化学組成と圧力によってどのように異なるのかを明らかにした。その結果、月のような比較的小さな天体は、主に流体コアの上部から固化し、それにより組成対流が発生することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系の天体の熱的・化学的進化の詳細を理解することは、45億年前の太陽系の誕生から今日までの歴史の解明という地球惑星科学の壮大な目標の重要な部分を占める。天体の磁場はその熱的・化学的現象の結果であり、衛星によって観測される磁場は天体の熱的・化学的進化の記録を残している。天体の磁場の起源である流体コアの組成対流を理解することは、観測された天体の磁場からその熱的・化学的進化を読み解く鍵を与える。

研究成果の概要（英文）：Some bodies in the solar system have a magnetic field like the earth, and another bodies once had. The magnetic field of an Earth-like rock body originates from a dynamo driven by thermo-compositional convection of the liquid core. The lifetime of the magnetic field depends on how the compositional convection of the liquid Fe-alloy caused by the cooling of the core works. We have clarified how the compositional convection pattern of the Fe-FeS core changes depending on the chemical composition and pressure. It was found that relatively small bodies such as the Earth's moon solidify mainly from the top of the liquid core, resulting in compositional convection.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：惑星磁場 流体核 組成対流 断熱温度勾配 熱膨張率 Fe-Ni-S系

### 1. 研究開始当初の背景

地球と水星、ガニメデは、固有の磁場を持っている岩石天体である。一方、月と火星は、形成後しばらくの間、固有の磁場を持っていたことが残留磁気の観測から分かっている。なぜ、このような違いが生じるのであろうか？この違いは天体の熱進化や内部構造の進化という観点からみて地球惑星科学的に大変興味深い問題である。岩石天体の磁場は、その流体コア内で熱対流と組成対流が駆動するダイナモ作用によって維持される。比較的小さな天体では、コアの組成対流がダイナモを駆動する要因として重要であると考えられている。天体の冷却にともなったコアの固化が上部から進行するのか、または下部から進行するのかによって、異なるタイプの組成対流が発生する。このことは、惑星の磁場が長期にわたり存続できるのか否かということと関係している可能性がある。コアの固化過程はその断熱温度勾配と融点勾配の大小関係で決まり、断熱温度勾配が融点勾配より大きいとコアは上部から固化し、逆の場合は下部から固化する(図 1)。しかし、流体コアの断熱温度勾配と融点勾配については、まだ不明な点が多い。

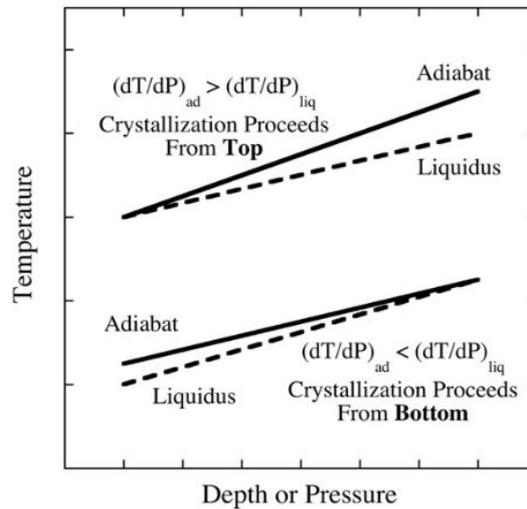


図 1. 断熱温度勾配（実線）と融点勾配（破線）による固化モードの違い。

### 2. 研究の目的

コアの固化が上部から進行するのか、下部から進行するのかの違いを、本研究ではコアの固化モードと呼ぶ。固化モードは断熱温度勾配と融点勾配に依存するが、このうち断熱温度勾配に対する制約が弱い。そこで、断熱温度勾配に主に焦点を当て、岩石小天体の核のモデル物質について断熱温度勾配に関する実験的研究を行うこととした。

断熱温度勾配は次式で表される。

$$(\partial T / \partial P)_S = \alpha T / \rho C_p$$

このうち熱膨張率 $\alpha$ が、天体の流体コアの断熱温度分布を評価する上で重要なパラメーターとなる。本研究では、惑星核に含まれる軽元素を硫黄(S)と仮定し、Fe-Ni-S系メルトの熱膨張係数を高圧下の密度測定実験から調べ、小天体の流体核の断熱温度勾配の解明を目指した。

一方、流体核の固化を考える際の鉄合金メルトの融点勾配については、そのリキダス温度の圧力勾配について考える必要がある。Fe-Ni-S系については固体Fe(-Ni)と共存するリキダス(Fe-リキダス)については多くの実験が報告されているが、FeS側のリキダスについては高圧下での報告がない。そこで、FeS-リキダスを含むFe-FeS系のリキダスの完全な理解を目標として研究した。

### 3. 研究の方法

本研究では、放射光を用いた高圧下のX線吸収密度測定から鉄合金メルトの熱膨張率を求めた。X線吸収密度測定はランベルト・ベールの法則に基づき試料によるX線吸収量からその密度を求める方法である。Spring-8のBL22XUに設置されたキュービック型高圧発生装置を用いて、約3 GPaの圧力でFe-Ni-S系メルトの密度を測定した。測定した53の密度データをモル体積に変換し、Margules級数を用いた非対称会合溶液モデルを用いて解析した。その際、メルトが単原子FeとNi、会合体FeSとNiSから構成されると仮定した。2成分間の相互作用だけ考慮し、3成分

以上の相互作用を無視した。Fe-FeS間是非対称溶液モデルを適用し、それ以外は対称溶液モデルで取り扱った。データ点の化学組成の分布に偏りがあるため、Fe-NiとFe-NiS、Ni-FeS間は理想混合を仮定した。

FeS-リキダスについては岡山大学理学部の川井型高压装置を用いて急冷回収実験を行った。回収試料の組織観察とEPMAによる化学分析から6GPaにおけるFeS-リキダスを制約した。

#### 4. 研究成果

熱力学モデルによる解析から、Fe-Ni-Sメルトの密度（モル体積）と、過剰体積，熱膨張率の組成依存性を明らかにした（図2）。Niが最も密度が大きく、FeSが最も密度が小さい。硫黄濃度一定では、Niが増加すると密度が大きくなる。負の過剰体積がFe-FeS間とFeS-NiS間に、正の過剰体積がNi-NiS間に認められる。Fe-FeS間の過剰体積は数GPa以下の圧力におけるFe-FeS系の2相分離傾向と関連している。過剰体積はFe-Ni-S系のリキダスの圧力変化を熱力学的に解析する上で重要なパラメーターである。特にFe-FeS系の非理想性の圧力依存性の今後の検証に有効である。熱膨張率はFe-FeS系では過剰体積が確認できる組成範囲でやや大きい値を取る。

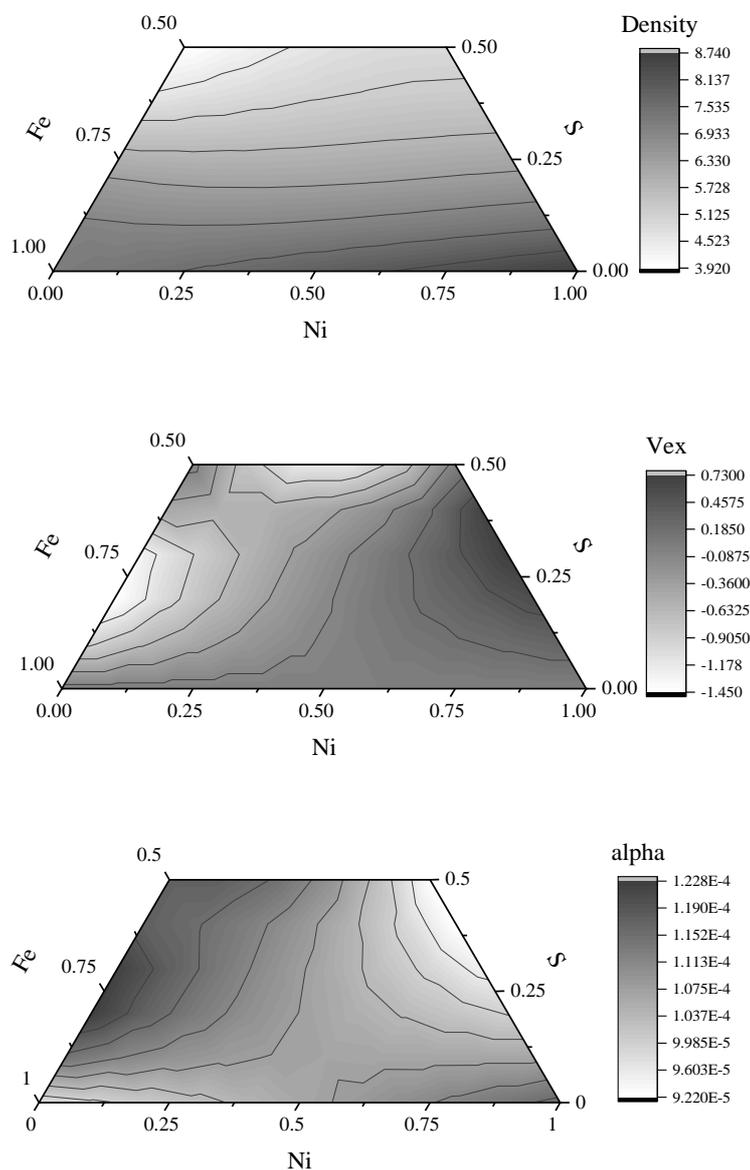


図2. Fe-Ni-S系メルトの3 GPa, 1873 Kにおける密度と過剰体積，熱膨張率。

今回求めたFe-Ni-S系メルトの熱膨張率を用いてFe-FeS 2成分系についてメルトの断熱温度勾配を3 GPaのリキダスに沿って計算した（図3）。断熱温度勾配は温度と組成によって大きく変化

せず、30から40 K/GPaであった。図3にはリキダス温度の圧力勾配の組成変化も示されている。このうちFeS側のリキダス温度の圧力勾配については、本研究で実施した急冷実験のデータから求めた。3GPaにおけるFe-FeS系の断熱温度勾配と融点勾配を比較すると、ほとんどの組成範囲で断熱温度勾配の方が大きくなっている。天体の流体コアの圧力が3 GPaのとき、その核は上部から固化が始まることが示唆される。

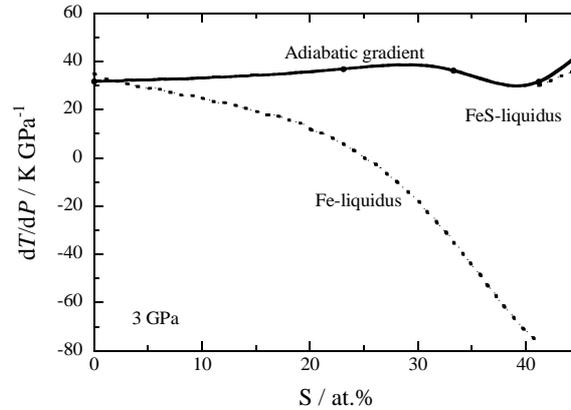


図3. Fe-FeS系の3 GPaリキダスに沿った断熱温度勾配と、リキダス温度の圧力勾配。

熱膨張率と体積に関する経験式から、測定した熱膨張率を広い圧力範囲に外挿した。そして、Fe-FeS系の断熱温度勾配をより高圧で見積もった。これと、Fe-FeS系のリキダス温度の圧力勾配を比較することにより、天体の流体コアの固化モードの圧力組成分布図を作成した（図4）。6GPaまでの圧力範囲では下から固化するBottom-upの領域がFe寄りの狭い範囲に限定されている。特に3-5GPaではS濃度が2~3at%以下でしか、Bottom-upの領域は存在しない。流体コアが冷却し底部での鉄の析出により固体内核が成長していくと、上部の流体核の化学組成はSに富むようになり、Bottom-up領域からTop-down領域に入ってしまう。Fe端成分の近くを除くと固化モードは上から固化するTop-downとなる。この場合、共融組成よりFeに富むとFe-Sメルトより密度が大きいFe結晶が析出しメルト中を沈降していくFe-snowingという現象が起こる。沈降したFe結晶は深部で再びFe-Sメルト中に溶解しメルトの密度を大きくする。その結果、流体コアの深部ではメルトの密度差による組成対流が駆動される。固化が進むと、コア深部ではFe濃度が増加してFeの析出が始まり固体の内核が形成される。流体コア上部は鉄とFe-Sメルトが共存しており、上部に行くほどS含有率が大きくなって密度が小さくなるためコアは密度成層する。一方、共融組成よりSに富む場合はFeS結晶が析出する。FeS結晶はFe-Sメルトより密度が小さいためコアの上部に浮上し（FeS-floating）、CMB直下に固体のFeS層を形成する。FeS層直下ではメルト中のFe濃度が上がって高密度となり下降流が生じて対流が駆動される。冷却に伴いFeS層が成長して対流域は小さくなっていく。

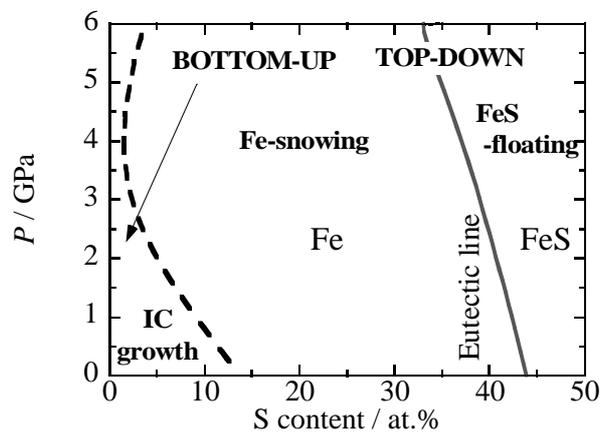


図4. Fe-FeS系コアにおける固化モードの圧力組成分布図。Eutectic line（実線）はFe-FeS系の共融組成の圧力変化を示す。破線はコアモードの境界で、Bottom-upは下から固化、Top-downは上から固化することを示す。Eutectic lineとコアモード境界によって、コアの固化の初期に起こる現象（IC growth, Fe-snowing, FeS-floating）が異なる。

このように、月やガニメデなどの比較的小さい惑星では、その冷却にともなう流体コアの固化過程と組成対流は、化学組成と、圧力、冷却速度などによって大きく異なった様式をとる。

本研究は、惑星の流体コアの冷却に伴う固化モードについて、その圧力・組成依存性について初めて詳細に解明したものである。本研究で得られた成果は、今後、水星とガニメデが今日も磁場を維持する理由や、火星や月の初期に存在した磁場がなぜ失われたのかといった地球惑星科学上の重要な問題を解決する糸口となるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Terasaki, A. Rivoldini, Y. Shimoyama, K. Nishida, S. Urakawa, M. Maki, F. Kurokawa, Y. Takubo, Y. Shibasaki, T. Sakamaki, A. Machida, Y. Higo, K. Uesugi, A. Takeuchi, T. Watanuki, T. Kondo	4. 巻 124
2. 論文標題 Pressure and composition effects on sound velocity and density of core-forming liquids: Implication to core compositions of terrestrial planets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 2272-2293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JE005936	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Terasaki, K. Nishida, S. Urakawa, Y. Takubo, S. Kuwabara, Y. Shimoyama, K. Uesugi, Y. Kono, A. Takeuchi, Y. Suzuki, Y. Higo, T. Kondo	4. 巻 351
2. 論文標題 Sound velocity and density of liquid Ni68S32 under pressure using ultrasonic and X-ray absorption with tomography methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Comptes Rendus Geoscience	6. 最初と最後の頁 163-170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.crte.2018.04.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Urakawa, R. Kamuro, A. Suzuki, T. Kikegawa	4. 巻 277
2. 論文標題 Phase relationships of the system Fe-Ni-S and structure of the high-pressure phase of (Fe1-xNix)3S2	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interior	6. 最初と最後の頁 30-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2018.01.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 浦川 啓, 寺崎 英紀
2. 発表標題 Bottom-up solidification versus top-down solidification of the liquid core of the relatively small planetary bodies
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦川 啓, 寺崎 英紀
2. 発表標題 Fe-Sコアの固化モードと組成対流
3. 学会等名 鉱物科学会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦川 啓
2. 発表標題 高圧下におけるFe-Ni-S液体のモル体積の熱力学解析
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Terasaki, M. Maki, Y. Shimoyama, K. Nishida, S. Urakawa, Y. Takubo, Y. Shibazaki, T. Sakamaki, Y. Higo, A. Machida, T. Kondo
2. 発表標題 Mercury's and Mars' core composition estimated from elastic properties of liquid iron alloys
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺崎英紀, Rivoldini Attilio, 下山裕太, 西田圭佑, 浦川 啓, 黒川冬華, 田窪勇作, 柴崎裕樹, 坂巻竜也, 町田晃彦, 肥後祐司, 近藤忠
2. 発表標題 Core composition of Mercury estimated from elastic properties of liquid Fe-Ni-alloy
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦川 啓, 鈴木昭夫
2. 発表標題 Density of the Fe70S30 liquid at high pressure: constraints from the Clapeyron-Clausius relation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中翔太, 浦川 啓
2. 発表標題 高压下におけるFe-FeS系のイオウに富む領域の融解関係
3. 学会等名 第59回高压討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦川 啓, 寺崎英紀, 田窪勇作, 長谷川巧, 町田晃彦
2. 発表標題 Ni-Sメルトの密度と熱膨張率
3. 学会等名 第59回高压討論会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------