

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究 (A)

研究期間： 2006~2008

課題番号： 18204050

研究課題名 (和文) 惑星形成過程の実験的再現

研究課題名 (英文) Experimental study on the formation of terrestrial planets

研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI EIICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号： 40144779

研究成果の概要：

代表者らは、地球中心核の主成分である溶融鉄への水素溶解度および炭素溶解度と、FeH および Fe<sub>3</sub>C の融点を東工大および SPRING-8 放射光に設置されたマルチアンビル装置を用い世界で初めて超高压下で測定することに成功した。その結果、水素および炭素が地球の核に多量に存在した場合、外核の温度は従来の予想 4000K より最大 1500K 低下する可能性があることが分かった。本科研費に基づく研究成果は Hirano ほか(2006)、Sakamaki, Takahashi ほか(2009)、Nakajima, Takahashi ほか (2009) など合計 6 編の国際誌論文として発表した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2007 年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008 年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
年度			
年度			
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：地球科学

科研費の分科・細目：岩石鉱物学

キーワード：原始地球，惑星，マントル，コア

### 1. 研究開始当初の背景

地球型惑星の形成過程はこれまでコンドライト隕石と地球マントルの化学組成を比較して研究されてきた。東工大などで発展した現代の惑星形成理論とこれまでの隕石に基づく地球形成論には相互に矛盾する点が多く、新たな実験的研究が必要となった。

### 2. 研究の目的

地球が 46 億年前にいかなる過程を経て原

始太陽系星雲から誕生したかは人類の懐く究極の謎のひとつである。我々は十分に制御された高温高压実験と化学分析を武器に、惑星初期分化過程を実験的に再現し、46 億年から 40 億年にいたる地球初期進化を『フォワード問題』として検討した。本計画では代表者らが東工大で確立した静的な高压実験と、関根が物質・材料研究機構において開発してきた衝撃圧縮実験ラボを組み合わせることにより、原始地球が惑星集積時に

経験した動的な過程を解明した。本計画は、1) 原始地球内部に取り込まれた  $H_2O$ , S, C, など揮発分量の解明、2) 原始地球内部の核・マントル元素分別にこれら揮発成分が与えた効果の解明、3) それらを通じて地球・火星・金星の核に含まれる軽元素の正体を明らかにし、それぞれの惑星内部の現在に続くマントル対流の様式などへの影響を考察することを目指す。

地球の外核は融けた金属 Fe-Ni 合金であり、その中に 10wt% 程度の軽元素が含まれていると考えられている。軽元素の候補としては O, S, Si, Mg, C, H などがこれまで提案されてきた。惑星の中心核に含まれる軽元素の種類と量比は、惑星原料物質の化学組成および惑星の形成過程によって異なる。

Ringwood (1979) は地球マントルに含まれる元素の存在度を調べ、揮発性の高い元素ほどマントル存在度が系統的に減少することから、地球の原材料物質は C1 コンドライト隕石に比べて揮発成分に著しく不足していると結論した。地球原料物質が Si, Mg の一部に至るまで揮発によって失ったとする考え(LOSIMAG-C1 モデル Hart 1984)は今日も地球化学研究者の多くにより支持されている。このモデルに基づけば外核質量の 10wt% (地球全体の約 3wt%) を占める軽元素の候補は O, Si, Mg に絞られる。

しかしながら、内惑星領域で惑星集積以前に原料物質が Mg, Si まで蒸発する高温 (>1400K) にさらされたとする根拠は得られていない。反対に C1 コンドライト組成に近い原材料物質の集積によって地球が形成された場合、外核の軽元素の候補は O, Si, Mg に加えて、S, C, H が重要となる。惑星理論からは、地球型惑星の (円に近い) 公転軌道を説明するために、惑星形成過程後期 (ジャイアントインパクトが起きた時期) にまで原始太陽系星雲が存在したことが必要である。その場合、原始地球は H, He を主成分とする原始大気に包まれて成長したことになる。原始大気による保温効果で成長中の惑星表面温度は 4000K に達し、深いマグマオーシャンに覆われる。原始地球はマグマオーシャンの表面を通じて原始惑星から多量の軽元素 (H, C, S, N など) を原料物質以上に吸収した可能性がある。

LOSIMAG-C1 モデルに代表される、揮発成分に極めて乏しい地球モデルとは違って、C1 組成またはさらに原始大気からの揮発成分の補給を考慮に入れた地球形成モデルに関する実験的検討はこれまでほとんどなされていない。代表者らは本科学研究費(基盤 A)を用いて、地球形成過程を核の

軽元素から制約することを目指して、Fe-C 系の相平衡と物性測定、Fe-H 系の相平衡と物性測定、衝撃圧縮による溶融鉄とシリケイトの分別など一連の研究を行った。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. Fe-H 系の実験

高温高压 X 線その場観察実験はスプリング 8 放射光 BL04B1 の SPEED-MkII 装置を用いて行なった。圧力媒体として  $MgO(+5\%Cr_2O_3)$  八面体を用いた。加熱には  $TiB_2 + BN$  コンポジットヒーターを用いた。圧力スケールには  $MgO$  (Speziale et al., 2001) を温度測定には W5Re-W26Re 熱電対を使用した。水素発生源として用いた  $LiAlH_4$  は加熱中に分解し Fe と  $MgO$  の混合物からなる試料に水素を供給する。試料部は水素の気密性が高温高压下で最も良い NaCl を用いた。

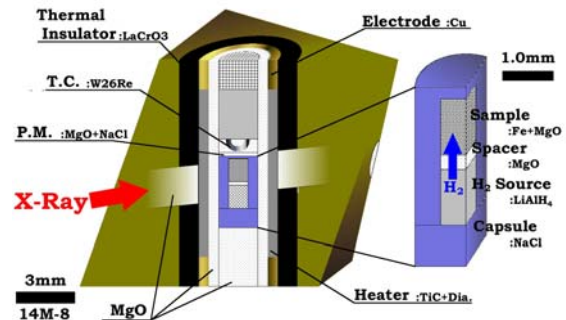


図-1 SPring-8 放射光実験に用いた高压試料構成の断面図 (Sakamaki et al. 2009)。

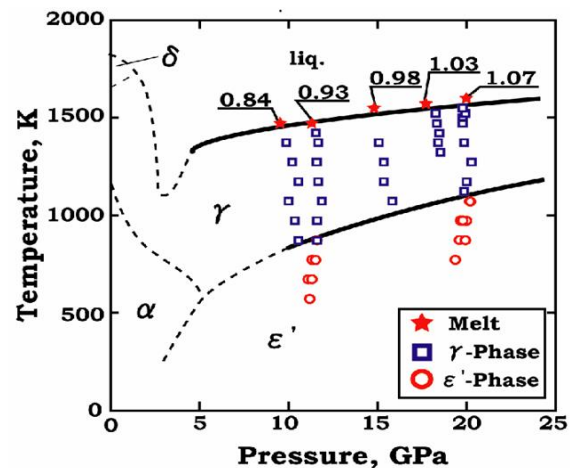


図-2 SPring-8 放射光実験を用いて決定した  $FeH_x$  の高压相平衡と融点 (Sakamaki et al. 2009)。

回折線が消滅し、ハローが生じることで  $FeH_x$  の融点を世界で初めて測定に推定した。FeH の融点測定を 20GPa の圧力下

でその場測定することに成功した(図-2)。格子定数測定から、dhcp 構造を持つε相とfcc 構造のγ相の相境界を 10GPa と 20GPa でそれぞれ 50℃以内の精度で可逆的に決定した。また、融点近傍での FeH 相の格子定数から、H の濃度がほぼストイキオメトリックであることがわかった。図-2 中に示す数字はそれぞれの圧力で融解する直前に存在した FeHx 中の水素のモル濃度 (X の値) を表わす。図-2 に示すように融点のクラペイロンスロープは 10~20GPa の間で <10℃/GPa と Fe、FeO、FeS より小さいことがわかった。

### 3-2. Fe-C 系の実験

Fe<sub>3</sub>C の高圧下における相平衡関係を明らかにするため、高温高圧下 X 線回折その場観察実験を行った。高温高圧実験には SPring-8、BL04B1 に設置されている川井型装置 SPEED-Mk. II を使用した。MgO(+5%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)圧媒体、LaCrO<sub>3</sub> ヒータをそれぞれ用いた。出発物質には Fe<sub>3</sub>C と MgO の混合粉末を用い、MgO カプセルに封入した。W5%Re/W26%Re 熱伝対を用いて温度を測定した。圧力マーカーには金を用い、Anderson ら(1989)による金の状態方程式より圧力を決定した。今回、加熱実験中 1200℃まで圧力を測定し、それ以上の温度では圧力を一定と仮定した。

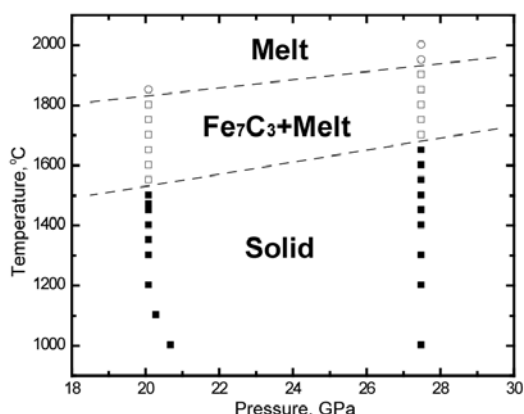


図-3 SPring-8 放射光を用いた X 線その場観察実験により決定した Fe<sub>3</sub>C の高圧融解関係 Nakajima et al(2009)。

20GPa で行われた実験では 1500℃まで Fe<sub>3</sub>C は安定であった。しかし、1550℃にて Fe<sub>3</sub>C の回折線が消滅し、新たな回折線とバックグラウンドの上昇が観察された。この新回折線は Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub>(擬似六方晶系)のものであると同定された。また、バックグラウンドの上昇は、液体が生じた事に起因す

ると考えられる。これらのことより Fe<sub>3</sub>C は 20.1GPa、1500-1550℃にて Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> と液体へと不一致融解すると考えた。このような融解関係は急冷回収実験にて得たものと整合的である。その後、加熱に伴いバックグラウンドはさらに上昇し、1850℃までに Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> の回折線は消滅し液体構造に特有な halo パターンのみとなった。28GPa で行われた実験でも同様の相平衡関係であった。27.5GPa に於いて、Fe<sub>3</sub>C は 1650-1700℃で Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> と液体へと不一致融解し、1900-1950℃で完全に融解した。本研究で得られた融解関係、融点温度は過去の熱力学計算の結果と異なる。

### 3-3. 天体衝突集積時の衝撃融解

原始地球のマグマオーシャン中では、Fe メルトとシリケートマグマが分離し、Fe メルトは地球深部に沈降したと考えられる。初期地球の分化過程を解明するためには、隕石が衝突融解した際にいかなる速度とメカニズムで Fe メルト粒子が成長するかを知ることが重要である。我々は本研究でコンドライト隕石天体衝突溶融時の Fe メルトの初期サイズ分布を解明するためカンラン岩と鉄粉末の混合物を用いて物質材料研究機構 (NIMS) の 1 段式火薬銃を用いて瞬間加熱実験を行った。その結果、衝撃に伴う 0.0001~0.1 秒の加熱時間でも出発物質に用いた微細な Fe スポンジとカンラン岩粉末が融解し、カンラン岩の部分融解度が 50% に達する試料中央部では最大 50 ミクロン (直径) に達する Fe メルトが生成することが分かった (図-4)。

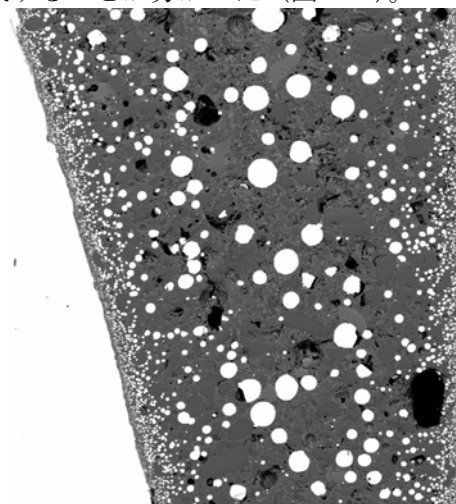


図-4 1 段式火薬銃を用いて衝撃融解したカンラン岩と Fe 微細粉末試料。最大の Fe メルトは直径 50 ミクロン。

瞬間加熱時のFe粒子成長機構をさらに詳しく検討する目的で、東工大地球惑星科学専攻のピストンシリンダー装置を使用し、さまざまな組成(加熱時間、Feとカンラン岩の量比、粒子サイズの組み合わせ、などを変化させた)の出発物質を用いて実験を行った。1300°C(カンラン岩のソリダス直上)まで温度上昇させ10分保持、その後1300°Cから1600°Cまで10秒程度の時間で温度を上げた。1600°Cで1~1000秒の間保持した後、急冷回収した試料を電子顕微鏡で観察した。

その結果、Feメルトの成長速度は出発物質の組成(カンラン岩とFeの割合)にもっとも大きく依存することが分かった。出発物質に占めるFeの割合が一定値を超すと3次元的なFe粒のネットワークが形成され、カンラン岩の融解とFeの融解が同時に進行する1550°C以上でFeメルトの急速な成長が起こる。その際、出発物質中で3次元的に連結していたFe粒子ネットワークが1か所に集まって最大のFeメルト球を形成する。

出発物質に含まれるFeの割合がある一定値(およそ60wt%)を超すとほとんどの粒が融解する以前に連結しているため、瞬間加熱でも一つの巨大なFeメルトプールを形成する(図-5)。すなわち、惑星形成過程で繰り返したと考えられる局所的な融解において、ローカルなFeメルトポケットまたはFeと溶け残りカンラン石が多数形成された可能性が高い。本研究で明らかになったFeメルトの集積成長機構は、粗粒カンラン石と金属Feからなるパラサイト隕石の起源に新たな解釈を与える。すなわち、パラサイトは衝突融解に伴ってできた無数の局所融解ポケットの痕跡かも知れない。

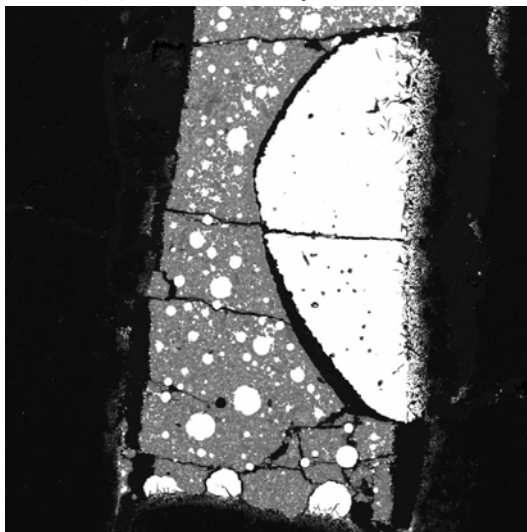


図-5 ピストンシリンダー装置を用いて1600°Cで1分保持した実験試料の電子顕微鏡写真。Feメルトの最大直径2mm。

#### 4. 研究成果：地球中心核の温度について

本基盤研究で初期地球の金属成長機構、金属中に従来考えられなかった水素、炭素が多量に取り込まれる可能性が多くの実験事から明らかになった。研究は引き続き基盤研究A(地球形成と内部進化に果たすマグマの役割：代表者 高橋栄一 平成21~24)において継続するが、ここでは本研究において解明されたもっとも重要な研究成果である、地球中心核の温度とそれが現在の地球内部ダイナミクスに及ぼす効果について述べる。

従来の地球形成論およびそれに基づく地球中心核に含まれる軽元素(O, Si, S)からは、外核の金属融点は4000K(核マントル境界に相当する135GPa)から低下することはあり得ない。したがって下部マントルの断熱温度勾配の核マントル境界への外挿値(約3000K)との間には最低でも1000Kのギャップが存在する。このため、核マントル境界のD''層は熱的に不安定であり、核の熱によって冷却されたマントル底部が高温のブルームを形成するという解釈が支持されてきた。しかしながら、本研究によって、核に多量の水素及び炭素が含まれる場合、外殻の融解温度はマントル底部の温度と同じかそれを下回る可能性すらある。その場合、D''層のダイナミクスに果たす役割やブルームの起源は再考を必要とすることになる可能性がある。

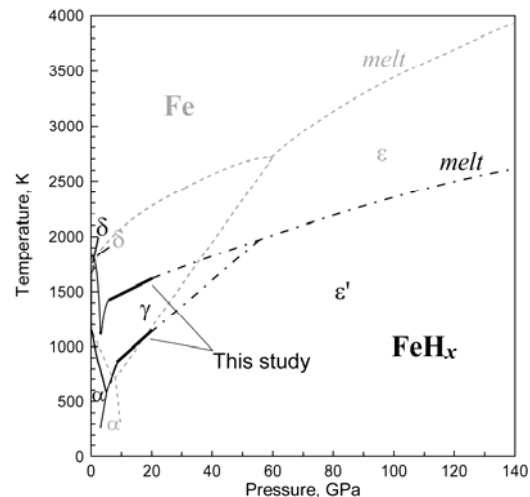


図-6 FeHとFeの融点の比較(Sakamaki et al., 2009)。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

① A.Akashi, Y.Nishihara, E.Takahashi, Y.Nakajima, Y.Tange and K.Funakoshi, The orthoenstatite/clinoenstatite phase

transformation in MgSiO<sub>3</sub> at high-pressure and high-temperature determined by in-situ X-ray diffraction: Implications for nature of the X-discontinuity, **J. of Geophysical Res.** 114, B04206, doi:10.1029/2008JB005894.2009.

② Y.Tange, E.Takahashi, Y.Nishihara, K.Funakoshi and N.Sata Phase relations in the system MgO-FeO-SiO<sub>2</sub> to 50 GPa and 2000C: an application of experimental techniques using multianvil apparatus with sintered diamond anvils, **J. of Geophysical Res.** VOL. 114, B02214, doi:10.1029/2008JB005891, 2009

③ Y. Nakajima, E.Takahashi, T. Suzuki, K.Funakoshi, "Carbon in the core" revisited, **Physics, Earth Planet. Inter.**, vol.174, 202-211, 2009

④ Sakamaki E. Takahashi, Y. Nakajima, Y. Nishihara, K. Funakoshi T.Suzuki and Y. Fukai Melting phase relation of FeH<sub>x</sub> up to 20 GPa: Implication for the temperature of the Earth's core **Physics, Earth Planet. Inter.**, vol.174, 192-201, 2009.

⑤ Shock equation of state of basalt Toshimori Sekine, Takamichi Kobayashi, Mineyuki Nishio, and Eiichi Takahashi **Earth Planets Space**, 60, 999-1003, 2008

⑥ N.Hirano, E.Takahashi, J.Yamamoto, N.Abe, S.P.Ingle, I.Kaneoka, T.Hirata, J.Kimura, T.Ishii, Y.Ogawa, S.Machida and K.Suyehiro, Volcnism in Response to plate flexure, **Science**, 313, 1426-1428,2006.

[学会発表] (計15件)

主要発表5件のみをリストする

① E.Takahashi, N.Takehara, P.Bhalla, and N.Hirano (招待講演)

題名: Origin of young alkali basalts found on 145 Ma old Pacific Plate:Evidence for partial melting in the Earth's asthenosphere

学会名: MISASA The 3rd COE-21 International Symposium

場所: Misasa (JPN), March 30, 2008

② E.Takahashi, P.Bhalla, N.Takehara  
題名: Role of partial melting in the Earth's asthenosphere 学会名: American Geophysical union Annual meeting 場所:

San Francisco (USA), Dec. 11th 2007

③ Y. Nakajima, K. Sakamaki, E. Takahashi, Y. Fukai, T. Suzuki, K. Funakoshi

題名: Effect of hydrogen and carbon on the melting temperature of the core 学会名: 2007 AGU Fall Meeting 場所: San Francisco (USA), Dec, 10th 2007

④ K. Sakamaki, E. Takahashi, Y. Nishihara, Y. Fukai and K. Funakoshi

題名: Melting temperature of FeH<sub>x</sub> up to 20 GPa, implications on the temperature of the Earth's core (招待講演) 学会名: 7th High Pressure Mineral Physics Seminar 場所: Matsushima (JPN), May.10th 2007

⑤ Y. Nakajima, E. Takahashi, K. Funakoshi

題名: Thermoelastic property of the paramagnetic Fe<sub>3</sub>C 学会名: 11th International Conference on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry 場所: Bristol (UK), Sept.5th 2006

[その他]

ホームページ:

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/takahashi/takahashilab.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI EIICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 40144779

(2) 研究分担者

西原 遊 (NISHIHARA YU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号: 10397036

佐藤 桂 (SATO KEI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・COE 研究員

研究者番号: 80422533

(3) 連携研究者

関根 利守 (SEKINE TOSHIMORI)

独立行政法人物質・材料研究機構・主席研究員

研究者番号: 70343829