

令和元年6月4日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06805

研究課題名(和文) 同じ回転運動を遠心力印加と高周波加熱に用いた高温遠心システムの開発

研究課題名(英文) Development of a high-frequency induction heating using mechanical rotation for centrifugation at high temperature

研究代表者

小野 正雄 (Ono, Masao)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：50370375

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、強い遠心力を利用して合金等の組成や結晶構造の制御が可能であることを示したが、遠心機ロータは昇温とともに遠心強度が低下するため、対象物質を物性発現に乏しい低融点合金に絞らざるを得ない状況である。

本研究では、遠心力印加時の遠心機ロータの高速回転運動に着目し、静磁場中で非磁性の遠心機ロータを高速回転させることで内包試料のみ誘導加熱して、遠心力印加と高温加熱を両立させる前例のない高温遠心システムの実現を目指した。特に、機械的周波数で前例のない高周波加熱を扱ったものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の組成制御や構造制御は新奇物性発現への定石アプローチであり、超高圧、超強磁場といった極限環境場を用いた新奇物質合成研究が積極的に行われている。新たな極限環境場として強い遠心加速度場の適用を目指すのが我々の取り組みであるが、物性材料を研究対象とするには、1,000^gで地上重力の20万倍以上の遠心加速度場の発生を可能にする必要があった。本研究で開発した同じ回転運動を遠心力印加と高周波加熱に用いた高温遠心システムでそれが原理的に可能であるため、今後、物性発現が大いに期待できる遷移金属からなるような高融点合金の組成や結晶構造の遠心制御による新規物性開拓が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have been investigating the sedimentation of atoms in solid-state alloys using a centrifugal apparatus at heating condition. However, the experimental condition in temperature is limited at low temperature up to 400 degrees C because of the tensile strength degradation of the centrifugal rotor with heating.

In this study, we have developed a high-frequency induction heating using mechanical rotation for centrifugation in a strong centrifugal field at high temperature over 1,000 degrees C in principle comprising a high-speed rotational system and an electromagnet to break through the restriction of temperature condition.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：高周波加熱 機械的周波数 遠心加熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 強い遠心力を利用した固相での組成・結晶構造制御

数十万 G ($G=9.80665\text{m/s}^2$)レベルの強い遠心加速度場では、固相中で原子量の大きな原子が遠心加速度方向に、より原子量の小さな原子が反対方向に移動する(原子の沈降)[理論:①、②、示唆:③]。研究代表者は、理論提唱者らと共に最大 100 万 G を印可できる超遠心機を開発して沈降現象を証明し[装置:④、証明:⑤]、合金組成や結晶構造の遠心制御研究を進めてきた[⑥、⑦]。

(2) 研究の最大の障壁、昇温による遠心機ロータの遠心強度低下

固相で原子の沈降を引き起こすには、試料を再結晶温度まで加熱する必要がある。試料は遠心機ロータに内包されているため、遠心機ロータごと試料を加熱する必要がある。この遠心機ロータは合金製であるため、昇温とともに遠心強度が低下する。例えば、60 万 g の遠心加速度を印可するには、チタン合金製のロータであれば 400℃までしか加熱できない。したがって、対象物質は物性発現に乏しい低融点金属に絞らざるを得ない状況である。物性発現が期待できる遷移金属からなるような高融点合金の組成や結晶構造の遠心制御を可能にし、新規物性開拓を行うには、遠心システム高温化の突破口となる加熱技術の開拓が不可欠である(図 1 参照)。

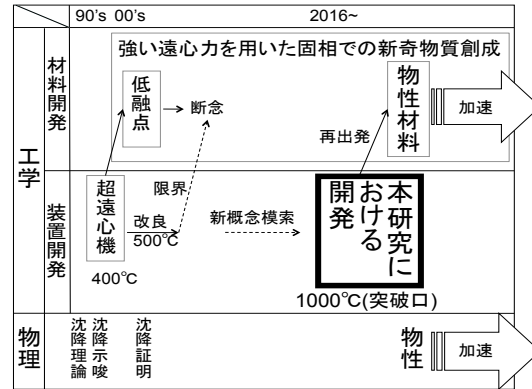


図 1 強い遠心力を用いた固相での新奇物質創成における本研究の位置づけ

(3) NMR 測定手法、マジックアングルスピンニング(MAS)のデメリットから着想した遠心処理中の試料加熱法

試料を内包したカプセルの回転軸を磁場に対して 54.7° 傾けて高速回転させることで NMR の信号を先鋭化する MAS という測定手法がある。金属試料に対して MAS は適用できない。その理由は、導体を磁場に対して角度を持たせて回転させると機械的周波数による誘導加熱が生じてしまうからである。このとき MAS の遠心機ロータは非磁性であるため、内部の試料のみが加熱されている状態であり、加熱によるロータ強度低下は無視できる。ここで、例えば我々が所有している直径 2.2mm の試料を回転できる MAS では最高 24kHz の高速回転が可能で、このとき試料には最大 180 万 G の遠心加速度がかかる。したがって、この静磁場中の回転による昇温を利用すれば、強い遠心力を印可しながらロータ強度を下げずに試料のみを加熱することが可能となり、(2)に示した研究の最大の障壁となっている昇温による遠心機ロータの遠心強度低下の問題が克服できる。

2. 研究の目的

本研究では、遠心力印加時の遠心機ロータの高速回転運動に着目し、静磁場中で非磁性の遠心機ロータを高速回転させることで内包試料のみ誘導加熱して、遠心力印加と加熱を両立させる前例のない昇温遠心システムの実現を目指した。特に、機械的周波数で前例のない高周波加熱を扱ったものである。

通常の誘導加熱はコイルに流す電流の向きを変えてコイル周囲に発生する磁場 $H(t)$ を反転させることで、磁場中に静置された被加熱体にうず電流 $I(t)$ を発生させ、試料をジュール加熱する(図 2a)。静磁場 H 中で被加熱体を回転させることでも同様に加熱効果が得られる(図 2b)ため、低速回転させる方法が実現されているが、今回取り組む高周波加熱に相当する回転速度域については前例がない。電磁波工学では 3kHz から 300MHz が高周波と定義されていることから、我々は 3kHz 以上の回転速度を扱った加熱の実現を目指した。

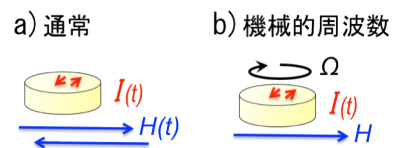


図 2 誘導加熱概念図

a)通常、b)機械的周波数を用いる方法

3. 研究の方法

まず、磁場中で導体を高速回転させることで遠心力印可と高周波加熱を両立させることが可能な高温遠心システムの構築を目指した。具体的には、高速回転システムと電磁石を組み合わせた高周波遠心加熱装置を製作し、遠心機ロータに対する耐熱対策、温度計測環境の整備を行った。最後に、磁場、回転速度をパラメータとして振った系統的な実験を行い昇温特性を調べた。なお、当初計画では、強磁場発生装置を利用して 1,000℃への加熱を目指す予定であったが、計画外の実験室移転に伴い、自由に利用できる予定であった強磁場発生装置が使用停止状態となり、研究期間内のマシンタイムの確保が困難となったため、磁場発生装置には常伝導磁石を用いることとし、その実験から本研究開発の最終目標である 1,000℃到達の必要条件を見積もった。

4. 研究成果

図3に示すような、高速回転システム、電磁石、非接触型温度計を組み合わせた磁場中で高周波の機械回転の発生が可能な装置を作製し、任意の磁場における試料温度の回転速度依存性を調べた。電磁石には、株式会社テスラ製の光学用電磁石(TM123-6520T15B、最大磁場 1.2T)、高速回転システムには、JEOL 製ベンチスピナー(NM-02570SB8、最高回転速度 8kHz)を用いた。電磁石の磁極間隔は 20mm であり、この磁極間に外径 19.5mm の高速回転システムを配置して回転軸に対して垂直に磁場を印可する仕様とした。外径 8mm の円筒状の試料カプセルは回転ロータを兼ねており、内部に断熱を施した外径 6mm の円柱状の試料を封入し、空気軸受でカプセルを浮かした状態でカプセル片端にある羽根車を圧縮空気で回転させて高速回転を発生させる仕様である。羽根車部には、回転軸延長線上から目視可能な観察孔を設け、内部の試料を観察できる状態としており、今回はこの観察孔から非接触温度計測を行った。温度は、試料端に貼付けた温度指示薬の変色を観察することで校正した。高い放射率が得られる黒色酸化皮膜を容易に作りやすく、かつ、8mm ベンチスピナーで 8kHz までの安定な高速回転の実績のある試料としてガドリニウムを用いた高周波回転加熱実験を行った。

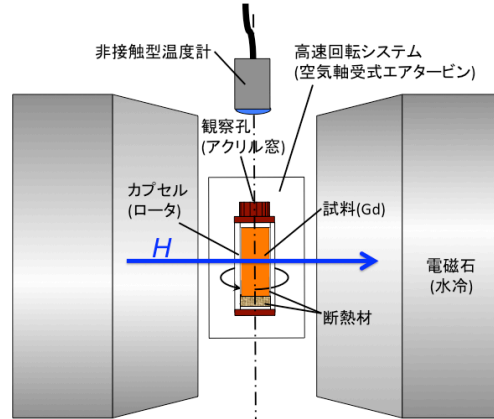


図3 高周波回転加熱式遠心機模式図

図 4-a)は任意の磁場強度における温度の回転速度相依存性をプロットしたもの、図 4-b)は、任意の回転速度における試料温度の磁場依存性をプロットしたものである。回転速度および磁場の 2 乗に比例する試料の温度上昇が確認できた。図 4-c)は試料温度 1,000°C 到達に必要な任意の回転速度における磁場強度であり、電磁波工学での高周波加熱の定義を満たす最低条件となる 3kHz の場合で 0.75T、回転速度 6kHz の場合で 0.4T と見積もられた。現在は実験室の電源容量の都合で 0.17T までの磁場条件制限があるが、現在の仕様の電磁石のままで十分に発生可能な磁場強度である。回転速度 6kHz における試料最大半径 3mm の遠心加速度は 43 万 g である。また、試料半径 1.5mm 以上の部位でこれまでに原子の沈降現象が確認されている 20 万 g より大きな遠心力が得られている。したがって、原理的に、今回構築した装置を用いた 1,000°C での合金等の組成や結晶構造の遠心制御研究は可能である。

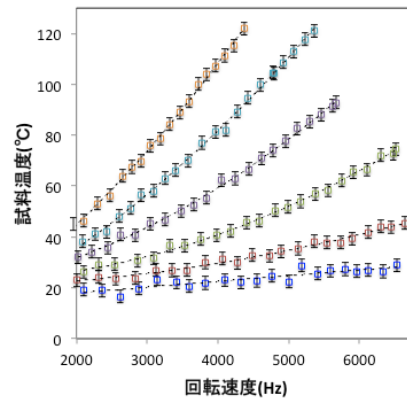


図 4-a) 任意の磁場強度における温度の回転速度依存性

本研究成果により、物性発現が大いに期待できる遷移金属からなるような高融点合金の組成や結晶構造の遠心制御が可能となり、新規物性開拓の道が開かれるものと期待している。

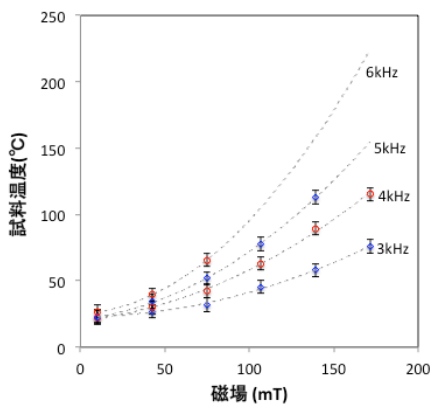


図 4-b) 任意の回転速度における試料温度の磁場依存性

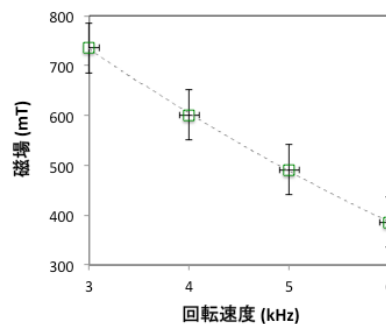


図 4-c) 試料温度 1,000°C 到達に必要な任意の回転速度における磁場強度

<引用文献>

- ① T. Mashimo; Phys. Rev. A38, 4149-4154 (1988).
- ② T. Mashimo; Philos. Mag. A70, 739-760 (1994).
- ③ T. Mashimo et al.; Jpn. J. Appl. Phys. 36, 498-500 (1997).

- ④ T. Mashimo, M. Ono et al.; Rev. Sci. Instr. 74 (1), 160-163 (2003).
- ⑤ T. Mashimo, M. Ono et al.; Philos. Mag. Lett., 83, P687-690 (2003).
- ⑥ M. Ono et al.; Mat. Trans., 46 (2), 219-224 (2005).
- ⑦ X. S. Huang, M. Ono et al.; J. Appl. Phys., 101, 113502-113506 (2007).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① M. Imai, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Angular momentum compensation manipulation to room temperature of the ferrimagnet $\text{Ho}_{3-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ detected by the Barnett effect”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 114, 162402, 2019. DOI: 10.1063/1.5095166
- ② M. Imai, Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Observation of gyromagnetic reversal”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 113, 052402, 2018. DOI: 10.1063/1.5041464
- ③ Y. Ogata, H. Chudo, B. Gu, N. Kobayashi, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Enhanced orbital magnetic moment in FeCo nanogranules observed by Barnett effect”, J. Magn. Magn. Mater., 査読有, 442, 329-331, 2017. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.101
- ④ Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Gyroscopic g factor of rare earth metals”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 110, 072409, 2017. DOI: 10.1063/1.4976998

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
無し
- 取得状況 (計 0 件)
無し

[その他]

ホームページ等

<https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spinenergy/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

無し

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：緒方 裕大

ローマ字氏名： Ogata Yudai

(高速回転機構開発に関する相互協力)

研究協力者氏名：今井 正樹

ローマ字氏名： Imai masaki

(高速回転機構開発に関する相互協力)

研究協力者氏名：針井 一哉

ローマ字氏名： Harii Kazuya

(試料選定、磁場発生装置選定に関する意見交換)

研究協力者氏名：中堂 博之

ローマ字氏名： Chudo Hiroyuki

(温度計測手法構築に関する相互協力)

研究協力者氏名：岡安 悟

ローマ字氏名： Okayasu Satoru

(断熱方法に関する意見交換)