

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560044

研究課題名（和文） 磁気浮上状態での反磁性物質の特異な挙動の解明

研究課題名（英文） Behavior of Diamagnetic Materials under Magnetic Levitation Condition

研究代表者

茂木 巖 (MOGI IWA0)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：50210084

研究成果の概要：反磁性物質が磁場から受ける斥力が重力とバランスするほど大きくなると物質は浮上する。これは反磁性物質の磁気浮上と呼ばれ、地上で実現できる擬似無重力状態である。本研究では磁気浮上状態における物質の挙動を調べ、(1)水の熱対流を磁気力により制御できること、(2)浮上物質の熱的挙動から高精度磁化率測定が可能なことを明らかにすることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000	0	2,300,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	360,000	3,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学工学基礎・応用物理学一般

キーワード：磁気浮上，マイクログラビティ，反磁性，強磁場，磁化率

## 1. 研究開始当初の背景

木や水でもわずかながら磁石から斥力を受けることは、19世紀にファラデーにより発見され、反磁性と名付けられた。反磁性物質が磁場から受ける斥力が重力とバランスするほど大きくなると、物質は浮上する。これが反磁性物質の磁気浮上である。東北大などの世界的な強磁場施設にある大電力水冷マグネットと超伝導磁石を組み合わせたハイブリッドマグネットを使うと、浮上実験が可

能となる。

静電浮揚や電磁浮揚などの他の浮上と異なり磁気浮上の大きな特徴は、磁気力と重力のバランスが物質を構成している分子レベルにまで成り立っていることである。したがって、他の浮上実験と比較してマイクログラビティの環境に最も近い状態が得られる。それに加えて、磁場が本来有している配向効果なども加わるから、宇宙環境とも異なるより高機能な実験環境となりうる。

そのような磁気浮上を物質合成に利用しようとする試みが、まだほんの数例ではあるが、我々のグループで始められた。浮上液滴の凝固、浮上液滴での水溶液からの結晶成長などの実験や、浮上物質を無容器溶融凝固できる磁気浮上炉の開発などを行ってきた。これらは初歩的な実験ではあるが、磁気浮上を物質合成に応用した世界で最初の例となった。しかしながらそれらの経験から、闇雲に「浮上させ、融かして固める」だけの実験を繰り返しても、新規な材料プロセスへと展開させることは難しいと感じられた。

## 2. 研究の目的

磁気浮上の特性を活かしたプロセスを提案するためには、浮上状態で反磁性物質はどのような挙動を示すのかを正確に知り、それらを理解する必要がある。これまでの研究で、次のような特異な挙動が観察されている。

(1) 水の熱対流は磁気浮上状態でも存在する。

(2) 磁気浮上した高分子試料が加熱により回転・振動運動を始める。

これらの現象は宇宙の無重力状態では見られない現象であり、磁気浮上に特有のものと考えられる。本研究ではこれらの現象を解明し、磁気浮上状態の特徴を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

磁気浮上の実験は 20 テスラ程度の強磁場が必要なので、東北大学金属材料研究所の強磁場センターにあるハイブリッドマグネットを用いて行った。ハイブリッドマグネットは大電力水冷マグネットと超伝導マグネットを組み合わせることで強磁場を発生する装置で、本研究では 26 テスラまでの磁場を利用した。

はじめに、水の熱対流が磁気浮上状態またはそれ以上の強い勾配磁場の下で、どのような挙動を示すかを調べた。水を入ったセルの中にヒーターと共に液晶シートを入れ、これをハイブリッドマグネットに設置して熱輸送の様子を強磁場中で可視化した。

次に、炭酸ガスレーザー加熱の磁気浮上炉を用いて、数種類の有機ポリマーや分子性結晶の加熱溶融を試みた。さらに、この結果を

もとに、磁気浮上を利用した精密磁化率測定法の開発をおこなった。

## 4. 研究成果

### (1) 水の熱対流の制御

磁気浮上状態における物質合成でもっとも重要と考えられる物質の挙動のひとつが、熱対流である。ゼロ磁場においてヒーター上方へと立ち上る熱対流は、磁気浮上相当の勾配磁場 ( $1360 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$ ) 下ではほとんどなくなってしまい、マイクロ重力状態での熱輸送に近い振る舞いが観察された。しかし、対流が完全には抑制されていないことも確認された。水の質量磁化率が温度変化するために、磁気力、重力、浮力のバランスが崩れ、暖まった水に働く力がゼロにならないからである。さらに磁場を強くして、 $2880 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$  になったとき、より完全に対流のない熱伝導の様子が観察された。また同じ勾配磁場下で温度を  $40\text{--}45^\circ\text{C}$  まで上昇させると、水の磁気対流が発生することが確認された。このように、磁気浮上状態およびさらに強い勾配磁場下での、水の熱対流の挙動を明らかにすることができた。

### (2) 有機ポリマーの加熱挙動

ほとんどの有機ポリマーでレーザー加熱により上下動や回転運動が観察された。これは加熱による反磁性磁化率の増加と、不均一加熱による試料内の温度分布に起因しており、磁化率変化によるポテンシャルエネルギーの増大が運動エネルギーに変換されたものと理解できた。従来、反磁性磁化率の温度依存性はほとんど無視されてきたが、わずかな磁化率の違いが磁気浮上状態では大きな浮上位置の変化をもたらすことが分かった。この結果から、磁気浮上を利用した反磁性物質の高感度磁化率測定が可能であることがわかった。

### (3) 磁気浮上を利用した精密反磁性磁化率測定法の開発

磁気浮上を利用した反磁性磁化率の精密測定法の開発を試みた。分子性有機単結晶のベンゾフェノンに磁気浮上させ、温度を上昇させながら浮上位置と印加磁場の計測を行った。この方法で磁化率の温度依存性を測定したところ、 $0.035\%$  の変化量まで検出することが可能であった。これは従来の磁気天秤な

どの測に比べ二桁程度も高精度な結果であり、様々な反磁性物質を測定することにより、新たな反磁性の物理と化学が展開するのではないかと期待される。

#### (4) 磁気浮上精密磁化率測定法の応用

磁気浮上状態での精密磁化率測定法の応用として、パラフィンの固液相転移での磁化率測定を試みた。昇温過程において融点（ $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ）近傍において、磁化率は0.2%ほど増加し、溶融後は1%以上減少した。固体状態から液体状態になったときの磁化率の減少は配向状態の差として考えることができ、融点近傍で見られた磁化率の増加は、固液共存状態で残った固体の磁場配向によるものと結論された。このように反磁性磁化率を精密に測定することにより、反磁性物質の相転移近傍での挙動を詳細に観察することに成功した。

#### 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9件）

- ① K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe, Application of magnetic levitation to materials processing, Proc. of 3rd Asian Workshop and Summer School on Electromagnetic Processing of Materials (Shanghai, 2008) pp183-186 (2009) 査読無
- ② K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe, Precise Measurements of Diamagnetic Susceptibility of Benzophenone and Paraffin by Using Magnetic Levitation Technique, J. Phys. Conf. Ser. (2009) (印刷中) 査読有
- ③ 高橋弘紀, 反磁性物質の磁気浮上とその応用, 化学と工業, vol. 60, 708-711 (2007) 査読有
- ④ K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe, Thermal behavior of diamagnetic materials in a magnetic levitation furnace, Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields (Grenoble, 2006) pp104-107 (2007) 査

読無

- ⑤ 茂木 巖, 磁気浮上-強磁場がつくる擬似無重力状態-, 化学と教育, vol. 54, 12-15 (2006) 査読有
- ⑥ K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, M. Motokawa, K. Watanabe, Containerless melting and crystallization of diamagnetic organic materials under magnetic levitation condition, J. Phys. Conf. Ser. vol. 51, 450-453 (2006) 査読有
- ⑦ I. Mogi, K. Takahashi, S. Awaji, K. Watanabe, M. Motokawa, Magnetic levitation experiments in Sendai, J. Phys. Conf. Ser. vol. 51, 431-438 (2006) 査読有
- ⑧ K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji and K. Watanabe, Magnetic levitation furnace combined with a hybrid magnet, Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials (Sendai, 2006), pp599-603 (2006) 査読有
- ⑨ K. Takahashi, I. Mogi, T. Onogi, S. Awaji, M. Motokawa and K. Watanabe, Materials Processing with Magnetic Levitation Furnaces, Sci. Tech. Adv. Mat. vol. 7, 346-349 (2006) 査読有

〔学会発表〕（計14件）

- ① 高橋弘紀, 磁気浮上を利用したn-alkaneの精密磁化率測定, 春季第56回応用物理学術講演会, 2009.3.30-4.1, つくば市
- ② 高橋弘紀, 磁気浮上を利用して測定した反磁性磁化率の温度変化, 日本マイクログラビティ応用学会第23回学術講演会, 2008.11.25, 京都市
- ③ K. Takahashi, Application of magnetic levitation to materials processing, 3rd Asian Workshop and Summer School on Electromagnetic Processing of Materials (Asian-EPM 2008) 2008.10.15, Shanghai, China
- ④ 高橋弘紀, 磁気浮上を利用したパラフィンの反磁性磁化率測定, 第3回日本磁気科学会年次大会, 2008.10.1, 弘前市

- ⑤ 高橋弘紀, Magnetic levitation of diamagnetic materials and its application, 第32回日本磁気学会学術講演会, 2008.9.12, 多賀城市
- ⑥ 高橋弘紀, 磁気浮上を利用したパラフィンの精密磁化率測定, 秋季第69回応用物理学術講演会, 2008.9.5, 春日井市
- ⑦ K. Takahashi, Precise Measurements of Diamagnetic Susceptibility of Benzophenone and Paraffin by Using a Magnetic Levitation Technique, 3rd International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields (MAP3) 2008.5.15, Tokyo, Japan
- ⑧ K. Takahashi, Sensitive measurements of diamagnetic susceptibility under magnetic levitation conditions, International Conference on Magneto-Science (ICMS2007) 2007.11.12, Hiroshima, Japan
- ⑨ 高橋弘紀, 磁気浮上を利用した反磁性磁化率の精密測定 II, 秋季第68回応用物理学術講演会, 2007.9.4, 札幌市
- ⑩ 高橋弘紀, 磁気浮上を利用した反磁性磁化率の高感度測定, 第1回日本磁気科学会年次大会, 2006.11.15, つくば市
- ⑪ K. Takahashi, Magnetic levitation furnace combined with a hybrid magnet, The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2006) 2006.10.24, Sendai, Japan
- ⑫ 高橋弘紀, 磁気浮上を利用した反磁性磁化率の精密測定, 秋季第67回応用物理学術講演会, 2006.8.30, 草津市
- ⑬ I. Mogi, Magnetic Levitation Experiments in Sendai, 60<sup>th</sup> Yamada Conference on Research in High Magnetic Fields, August 2006.8.18, Sendai, Japan (招待講演)
- ⑭ K. Takahashi, Containerless melting and crystallization of diamagnetic organic materials under magnetic levitation condition, Yamada Conference LX on Research in High Magnetic Fields (RHMF2006) 2006.8.17, Sendai, Japan

[図書] (計 1件)

- ① I. Mogi, K. Takahashi, Magnetic Levitation of Diamagnetic Materials, Magneto-Science, Eds. M. Yamaguchi and Y. Tanimoto, Kodansha-Springer, Japan, pp.41-55 (2006).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

茂木 巖 (MOGI IWAO)  
 東北大学・金属材料研究所・助教  
 研究者番号: 50210084

### (2) 研究分担者

高橋 弘紀 (TAKAHASHI KOHKI)  
 東北大学・金属材料研究所・助教  
 研究者番号: 60321981

### (3) 連携研究者