

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760043

研究課題名（和文） 磁気浮上を利用した反磁性磁化率の精密測定

研究課題名（英文） Precise measurement of diamagnetic susceptibility by using a magnetic levitation technique

研究代表者

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

研究成果の概要：反磁性物質に働く磁気力と重力が釣り合った磁気浮上状態を利用し、反磁性磁化率の微小な温度変化の測定に成功した。ベンゾフェノンやパラフィンなどの有機物質を試料とした測定を行い、固体から熔融状態までの磁化率の温度変化を非接触で連続的に測定できることを示した。この技術は磁気浮上を利用した無容器での材料作製にとって非常に有用であると考えられる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	390,000	2,790,000

研究分野：磁気科学

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，反磁性磁化率，非接触測定，精密測定，無容器熔融凝固

1. 研究開始当初の背景

(1) 1991年フランスのグループが反磁性物質の磁気浮上を成功させて以降、磁気浮上は世界の強磁場施設で実施されたが、浮上試料の熔融凝固、結晶成長などを行ってきたのは東北大金研の強磁場センターのみである。

(2) 反磁性物質の磁気浮上を利用した無容器熔融凝固は、擬似的な微小重力環境に配向効果などの磁場効果も重畳されることから、強磁場を利用した新しい材料プロセスとして注目されている。

(3) 反磁性物質の磁気浮上状態は磁化率の変化に非常に敏感であり、これまでの熔融凝固プロセスにおいて、加熱による試料位置の変化が観測されている。場合によっては浮上の維持が困難となり、試料の落下をもたらす。

(4) 磁気浮上を利用した無容器熔融凝固を行うためには、浮上物質の磁化率の温度変化を知ることが重要であるが、反磁性物質の固体から熔融状態までの磁化率の温度依存性のデータは殆ど見られない。

2. 研究の目的

反磁性物質の磁化率の温度変化を精密に測定する方法として、磁気浮上を利用した測定法を確立し、特に、固体から熔融状態への相変化における磁化率変化の精密な測定を行う。

3. 研究の方法

(1) 試料の磁気浮上には東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターに設置してあるハイブリッドマグネットを使用する。

(2) 試料の加熱には循環水式恒温槽を用い、融点の比較的低い (50~60°C程度) の物質を中心に測定を行う。恒温槽内に試料と CCD カメラなどの観察系を挿入し、試料の浮上の様子を横方向から観察する。

(3) 試料としては有機物を中心に低融点の物質の測定を行う、その際、ベンゾフェノンなどの結晶、パラフィンなどの鎖状炭化水素など融点は近いが性状の異なる物質の測定を行い、それが質量磁化率の温度変化に及ぼす影響を見出す。

(4) 磁化率変化の測定方法として、試料の浮上位置を一定に保つ方法を試みる。具体的には、室温で浮上させた試料位置をマーキングし、昇温によって試料が上下に移動した場合、磁場の値を微調整することによって最初の位置に戻す操作を行う。この時の磁場値の変化量から磁化率の変化量を見積もる。

(5) 測定試料周囲の雰囲気を実験室とした場合と窒素ガスにした場合の測定結果を比較することで、大気中の酸素の影響を検証する。酸素は常磁性気体であるため、反磁性物質の磁気浮上においては浮力を与える。昇温などの温度変化がともなう場合の酸素の有無が浮上磁場に与える影響を測定値と計算値とを比較することで検討する。

4. 研究成果

(1) 雰囲気の影響を見極める実験としてベンゾフェノンを試料として用い、試料周囲の雰囲気を大気と窒素の2つの場合において測定したところ、大気中においては常磁性気体である酸素の影響が顕著であり、定量的な値だけでなく定性的な振る舞いさえも酸素の磁化率の温度変化に影響されることが分かった。特に、試料の磁化率の温度変化が酸素の磁化率の温度変化よりも小さい領域では、観測される見かけ上の磁化率が酸素の磁化率の温度変化に埋もれてしまうことが分かった。一方、窒素雰囲気の場合、窒素の磁

化率の温度変化を考慮した解析値と真空と仮定して求めた値において 0.01%程度の違いしかないことが分かった。

常磁性気体である酸素が反磁性物質の磁気浮上において浮力として働くことは磁気アルキメデス効果として知られているが、実際に酸素の有無の条件で同じ試料を浮上させた報告はこれまでに無く、温度変化まで含めてその影響を明確に観察したのは初めてである。

(2) ベンゾフェノンの質量磁化率の温度依存性を Fig. 1 に示す。用いた試料は単結晶であるため、20°Cにおいては反磁性磁化率が最も小さい a 軸が磁場と平行になるように浮上していることが文献値との比較より分かった。昇温につれて反磁性磁化率は大きくなり、融点である 48°C よりもかなり低い 38°C 付近から急激に変化し始めることが観測された。これは結晶内での分子振動がこの温度付近から激しくなり始めたことが原因と推察される。ベンゾフェノンにおいては、熔融状態まで磁化率を測定することができなかったが、熔融した場合の反磁性磁化率はさらに増加し、各軸方向の平均値に近づくと考えられる。

またこの測定において、温度変化に伴う磁化率の変化量として、最小で 0.02%程度の微小な変化を本測定法により観測できること

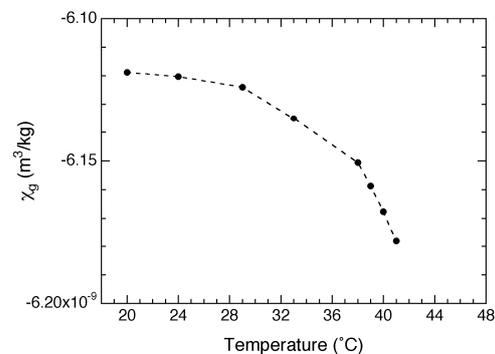


Fig. 1 ベンゾフェノンの質量磁化率の温度依存性。

を示した。

(3) パラフィンの質量磁化率の温度依存性を Fig. 2 に示す。試料としたパラフィンは融点 48-50°C と 56-58°C の2種類を用いた。その結果、どちらの試料も融点の 20°C 程度下から反磁性磁化率が僅かに減少し、融点直下から増加するという定性的には同様な振る舞いを示すのが観測された。パラフィンを構成する直鎖型飽和炭化水素 (n -alkane) は融点近傍の固相で多段の固相-固相相転移を起こし、その転移温度は炭素数に依存することが知られている。そのため、磁化率の温度

変化で見られた融点直下での挙動は固相-固相転移に伴う磁場配向が起こっているとも考えられ、その因果関係に興味を持たれる

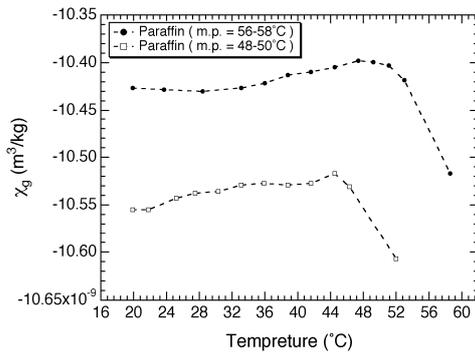


Fig. 2 パラフィンの質量磁化率の温度依存性を依存性. こととなった.

(4) パラフィンで見られた質量磁化率の温度依存性をより詳しく調べるために、炭素数の揃った *n*-alkane を試料として磁化率の温度依存性を測定した. 試料として *n*-tricosane (炭素数 23, 融点 47°C) と *n*-docosane (同 22, 46°C) を用いて測定を行った

① Fig. 3 に *n*-tricosane, Fig. 4 に *n*-docosane の測定結果を示す. 図から分かるように室温から融点付近まで質量磁化率はほとんど変化せず、パラフィンで観測されたような反磁性磁化率の減少は観測されなかった. このことからパラフィンで観測された溶融前の反磁性磁化率の減少は、パラフィンは異なる炭素数 (=異なる融点) を持つ *n*-alkane の混合物であることから、融点の低い *n*-alkane が溶融し始めたところで融点の

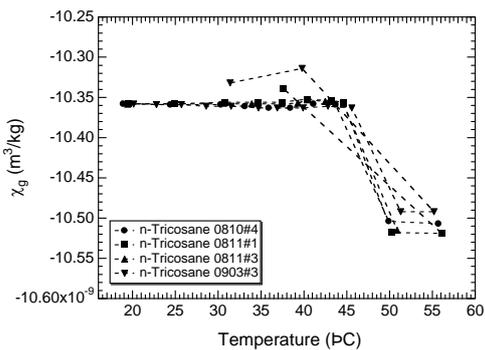


Fig. 3 *n*-tricosane の質量磁化率の温度依存性を依存性. 各データは 20°C の値の平均値で規格化 (平行移動) してある.

高い *n*-alkane のドメインが磁場により配向した可能性が高いことが分かった.

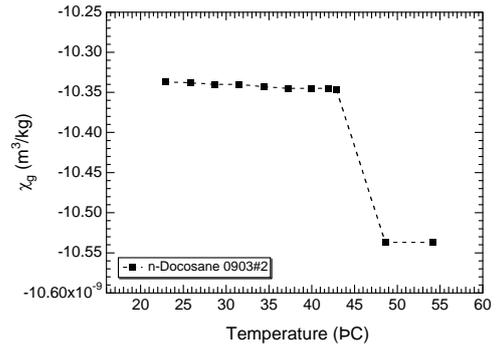


Fig. 4 *n*-docosane の質量磁化率の温度依存性を依存性.

② *n*-tricosane の測定においては、昇温によって固相から溶融状態までの測定に加え、降温させることによって再凝固過程の磁化率の測定に成功した. 各温度での試料の様子を Fig. 5 に示す. その結果、再凝固した試料の反磁性磁化率は初期の反磁性磁化率より小さくなることが分かった. これは磁気浮上状態で凝固させたことにより、*n*-tricosane 分子が磁場によって配向した結果であると考えられる. 実際、パラフィンを磁場中で凝固させることによって僅かに磁化率の異方性を持つ *n*-alkane 分子が磁場と垂直方向に配向することはこれまでに報告されている.

本測定法においては磁化率測定と凝固過程のその場観察を同時に行えることから、実

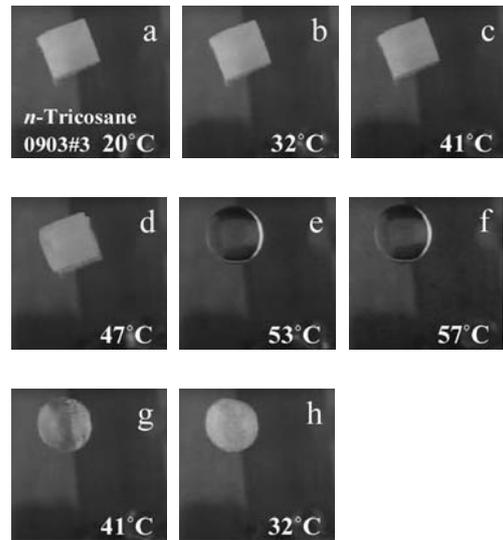


Fig. 5 磁気浮上している *n*-Tricosane の溶融過程 (a-f) と凝固過程 (g-h).

際の試料の状態と磁化率との関係を明確に対応させることが可能である.

③ *n*-tricosane と *n*-docosane の測定において、試料の大きさを 2 mm 角にそろえることを試みた。その結果、4~5 mm 角程度で行ったパラフィンの測定では試料間の測定値のバラつきが 1.3%程度あったのに対し、大きさを小さくして形状を揃えることで 0.45%にまで抑えることができた。このことは、試料が小さければ小さい程より正確に測定できるという磁気浮上を利用した磁化率測定法のメリットを示したことになる。同時に、多量の試料を準備できない磁化率測定に対して本測定法が非常に有用であることを示している。

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 2 件)

- ① K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe, "Precise measurements of diamagnetic susceptibility of benzophenone and paraffin by using a magnetic levitation technique", Journal of Physics: Conference Series **156** (2009) 012020-1-5, 査読有
- ② K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, M. Motokawa, K. Watanabe, "Application of magnetic levitation to materials processing", Proceedings of the 3rd Asian Workshop and Summer School on Electromagnetic Processing of Materials (2009) 187-190, 査読無

[学会発表] (計 9 件)

- ① 高橋弘紀, 他, 「磁気浮上を利用した *n*-alkane の精密磁化率測定」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 30 日, 茨城県つくば市
- ② 高橋弘紀, 他, 「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 年 11 月 26 日, 京都府京都市
- ③ K. Takahashi, 他, 「Application of magnetic levitation to materials processing」, The 3rd Asian Workshop and Summer School on Electromagnetic Processing of Materials (Asian-EPM 2008), 2008 年 10 月 15 日, 中国, 上海市
- ④ 高橋弘紀, 他, 「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 年 10 月 1 日, 青森県弘前市
- ⑤ 高橋弘紀, 他, 「Magnetic levitation of diamagnetic materials and its application」, 第 32 回日本磁気学会学術講演会, 2008 年 9 月 13 日, 宮城県多賀城

市

- ⑥ 高橋弘紀, 他, 「磁気浮上を利用したパラフィンの精密磁化率測定」, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 5 日, 愛知県春日井市
- ⑦ K. Takahashi, 他, 「Precise Measurement 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 年 5 月 15 日, 東京都文京区
- ⑧ K. Takahashi, 他, 「Sensitive measurements of diamagnetic susceptibility under magnetic levitation conditions」, International Conference on Magneto-Science (ICMS2007), 2007 年 11 月 14 日, 広島県広島市
- ⑨ 高橋弘紀, 他, 「磁気浮上を利用した反磁性磁化率の精密測定 II」, 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 北海道札幌市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: