

磁気浮上を利用して測定した反磁性磁化率の温度変化

Temperature dependence of diamagnetic susceptibility measured by a magnetic levitation technique

東北大・金研 高橋 弘紀, 茂木 巖, 淡路 智, 渡辺 和雄
K. Takahashi, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

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は、擬似的な微小重力環境と見ることができるとして新しい材料プロセスとして注目されている。また、この磁気浮上状態においては、磁化率の僅かな変化が浮上試料の挙動に影響を及ぼすことが知られている。一般に反磁性磁化率の温度変化は無視できるものとして扱われているが、磁気浮上状態で熔融凝固を行う場合には、非接触状態を維持する上で試料の僅かな磁化率変化も無視することはできない。実際、これまでの磁気浮上実験において加熱による浮上位置の変化等が観察されており、挙動の変化が大きい場合には試料の加熱の継続が困難となる。このことは逆に、磁気浮上状態を利用すれば反磁性磁化率の温度変化を高感度に測定できることを示唆している。このことに着目して行った昨年度に実験において[1], 磁気浮上が反磁性磁化率の温度変化を高感度に測定できることを示した。今回行った実験においては、試料周囲の雰囲気を実験室と窒素の場合で比較することにより、大気中の酸素の影響を実験的に検証することを主な目的とした。

反磁性物質の磁気浮上には通常、非常に大きな磁気力場、 $B(\partial B/\partial z)$ が必要になるが、試料の周囲をそれよりも磁化率の大きな媒質、特に常磁性の媒質で満たせば、より小さな磁気力場での浮上が可能となる。この現象は磁気アルキメデス効果と呼ばれている[2]。大気中には約 20%の酸素が含まれているが、酸素は常磁性であるため、大気中での磁気浮上は酸素による磁気アルキメデス効果が働くことになる。また、磁化率の温度依存性を測定しようとする場合には、常磁性である酸素の磁化率の温度変化が、反磁性である試料の温度変化よりも大きくなると考えられる。そのため、精密な測定を行う上で、大気中の酸素の影響を実際に見極めることは非常に重要である。

2. 実験方法

試料には反磁性有機結晶ベンゾフェノン(融点 48-50°C)の単結晶を用いた。磁気浮上にはハイブリッドマグネット(28T-HM)を用い、ボア内に循環水式恒温槽を設置し、水温をコントロールすることで温調を行った。装置の概略図を Fig. 1 に示す。試料セル内の雰囲気は大気または窒素ガスとし、試料を挿入後、セルの開口部をシーロンフィルム(富士フィルム)で密封した。試料の温度はセルの近傍に設置した熱電対で読み取った温度とした。試料の様子は CCD カメラを通してモニターで観察し、浮上位置が一定位置になるように水冷マグネッ

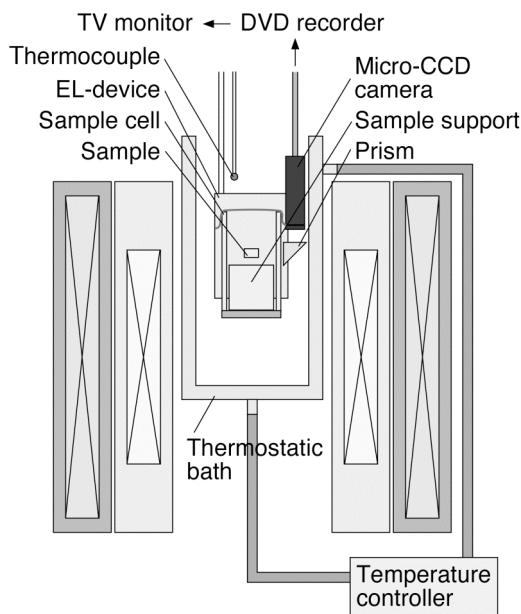


Fig. 1 Schematic illustration of an experimental setup.

トの電流値を増減させることによって磁場を制御した。この時、試料の挙動が安定するまで十分待つことで試料の温度が安定したとしている。磁化率の値は、磁気浮上状態における力の釣り合いの式

$$(\chi_g / \mu_0) B(\partial B/\partial z) = g \quad (1)$$

から質量磁化率 χ_g を求めた。ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 $B(\partial B/\partial z)$ は試料位置での磁気力場、 g は重力加速度である。

3. 実験結果

Fig. 2 に浮上に要した試料位置での磁気力場の温度依存性を示す。大気中で浮上に必要な磁気力場は、窒素中に比べて 20°C の場合で 3.6%大きい。即ち、より低い磁場で浮上したことになる。これは、大気中の酸素による磁気アルキメデス効果によるものであると考えられる。これらの値を元に式(1)から求めた質量磁化率の温度変化を Fig. 3 に示す。窒素中では昇温にともなって磁化率の値は単調に減少しているのに対し、大気中では僅かに増加した後に減少しているのが見て取れる。そこで温度変化における酸素の影響を見積もるため、磁気アルキメデス効果を取り入れた解析を行った。この時、質

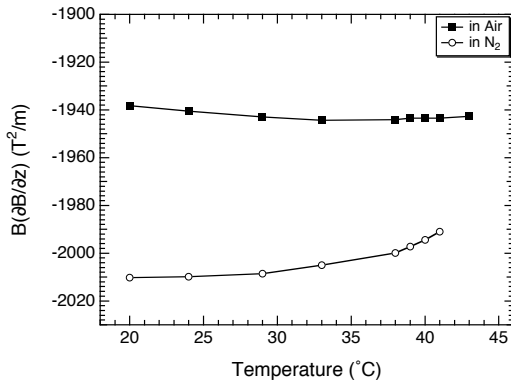


Fig. 2 Temperature dependence of $B(\partial B/\partial z)$ for sample levitations.

量磁化率は、まず磁気アルキメデス効果を考慮した力の釣り合いの式、

$$(\chi - \chi_{\text{atm}}/\mu_0) B(\partial B/\partial z) = (\rho - \rho_{\text{atm}}) g \quad (2)$$

から体積磁化率を求め、密度で除することによって求めた。

$$\chi_g = \chi / \rho \quad (3)$$

ここで、 χ は試料の体積磁化率、 χ_{atm} は雰囲気気体の体積磁化率、 ρ は試料の密度、 ρ_{atm} は雰囲気気体の密度である。式(2)、(3)より求めた質量磁化率の温度変化を Fig. 4 に示す。この結果、絶対値においては違いがあるものの、温度依存性についてはどちらも定性的に一致し、昇温にともなって単調に減少する結果となった。このことから、Fig. 3 における温度依存性の違いは酸素の磁化率の温度依存性に影響されていることが分かった。また、窒素雰囲気の場合には、式(1)から求めた値と式(2)、(3)から求めた値の間に、どの温度においても 0.012% 程度の違いしかない。即ち、窒素雰囲気中を行えば、真空中と同等の結果が得られることが分かった。

磁気アルキメデス効果を考慮して解析を行った場合でも、大気中と窒素中での値に違いが見られたため、文献値に対して両者のデータを規格化した。その結果を Fig. 5 に示す。文献値としては、各軸方向の磁化率で最も大きい、即ち浮上状態では磁場と平行となる a 軸方向の磁化率 $\chi_a = -6.07 \times 10^{-9}$ (28.5°C) [3]を用いた。また、Fig. 5 には前回の結果から式(2)、(3)によって求めた値も併せて載せてある。この結果から、ベンゾフェノンの磁化率は融点よりもかなり低い温度から急激に減少し始めることが分かった。これは、溶融前の状態においても、結晶内の分子の熱振動が激しくなったためと考えられる。ベンゾフェノンの磁化率の異方性は、分子に含まれるベンゼン環に寄るところが大きい。ベンゼン環は面内と面と垂直方向との磁化率差が非常に大きいため、分子の向きが僅かに変わっただけでも試料全体の磁化

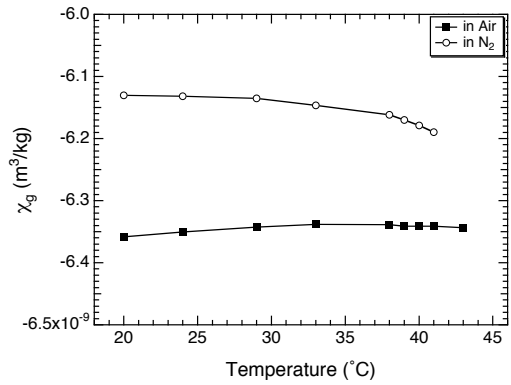


Fig. 3 Temperature dependence of χ_g evaluated from eq. (1), without concerning the magneto-Archimedes effect.

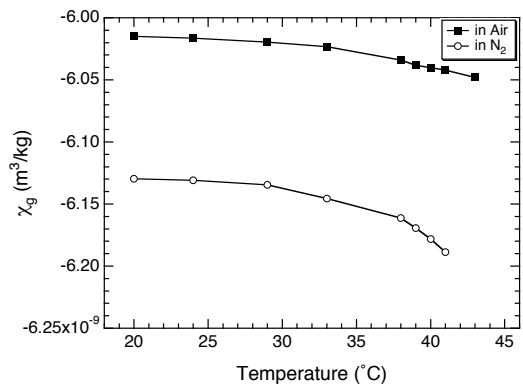


Fig. 4 Temperature dependence of χ_g evaluated from eq. (2) and (3), with concerning the magneto-Archimedes effect.

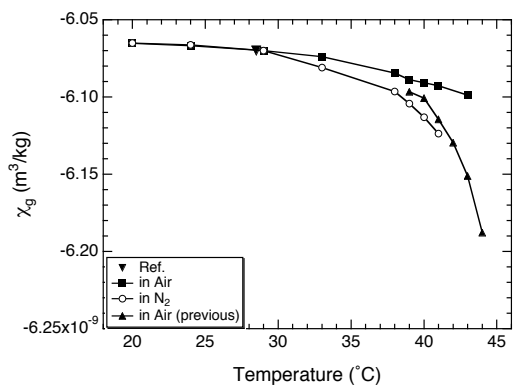


Fig. 5 Temperature dependence of normalized χ_g of benzophenone.

率に与える影響が大きいと考えられる。

4. まとめ

今回、磁気浮上を利用した磁化率測定において、測定に与える雰囲気の影響を検証した。その結果、大気中で行った場合には、大気に含まれる酸素の影響が顕著であり、特に温度変化を行う場合には、試料の磁化率の本質的な温度変化が酸素の温度変化によって見

かけ上埋もれてしまう。また、磁気アルキメデス効果を考慮した解析を行う場合にも温度に依存するパラメータが増え、解析は非常に複雑となる。特に、大気の場合は酸素と窒素を含めた成分比など不確定な部分が多いのもその一因となる。雰囲気として酸素のみを用いれば、磁気アルキメデス効果によって窒素中あるいは真空中よりも低い磁場での浮上が可能となるとともに、不確定なパラメータを減少させることができる。一方、窒素中の場合には、磁化率の温度変化を測定する上では真空中との差異はほとんど無いと考えられ、装置の作製上の理由等で真空中での測定が困難な場合には、窒素雰囲気とすることで磁化率の温度変化を高精度に測定できると考えられる。

参考文献

- [1] 高橋, 他: 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 18 年度年次報告 (2007) 171-172.
- [2] Y. Ikezoe, et al.: *Nature* **393** (1998) 749-750.
- [3] K. S. Krishnan, et al.: *Philos. Trans. R. Soc. London* **A231** (1933) 235-262.