伝導冷却型超伝導磁石を使用した反磁性のデモンストレーション

廣田 憲之^{*1†}, 木吉 司^{*1}, 小泉 俊行^{*1}, 横山 和哉^{*2}

Demonstration of Diamagnetism by Using Conduction-cooled Superconducting Magnets

Noriyuki HIROTA^{*1}, Tsukasa KIYOSHI^{*1}, Toshiyuki KOIZUMI^{*1} and Kazuya YOKOYAMA^{*2}

1. はじめに

強磁性という性質は一般にも馴染み深い、反磁性はとなると、常磁性物質とともに、磁場には応答しない物質であるとの認識が主流である。伝導冷却型超伝導磁石が普及し強磁場環境の利用が容易になったことで、反磁性や常磁性物質の関わるプロセスの磁場制御に関する取り組みが盛んになる一方、教育や啓蒙のための手段としての利用も期待される。我々は、一般の人にも科学、磁場の魅力を伝えたいという観点から、反磁性という物性をデモンストレーションにより視覚的に体験する方法に関し検討している。

反磁性を視覚的に体験する方法として、最もインパクトのあるデモンストレーションは、反磁性磁気浮上だろう¹⁾。しかし、磁気浮上は魅力的だが、それを実現できる装置が少なく、機会も限られる。そこで我々は、既に 100 台以上が出荷され、大学等の研究室でもかなり普及した 10 T 級で直径 100 mm 程度の室温ボアを有する伝導冷却型超伝導磁石を用い、効果的に反磁性物質に作用する磁気力の効果を視覚化する方法や条件について検討した。

ひとつの有効な方法は、周囲の物質に作用する磁気力や重力を利用する磁気アルキメデス浮上である²⁾。原理や水の浮上への適用例は既に報告があるので、ここでは、物質の磁化率・密度と周囲媒体の選択に伴う浮上条件の検討手法に関し考察する。また、これまでに記述されてこなかったデモンストレーションの実施手法の詳細について述べる。

次に、超伝導磁石ボア中では、磁場と磁場勾配の積が、ボア軸上より壁面の方が大きいことに着目し、簡易的な方法として、非接触浮上ではないが、ボア壁面を利用して、物体を静止させる手法について検討した結果を報告する。

2. 磁気アルキメデス浮上

磁気アルキメデス浮上では、注目する物質の周囲に存在する媒体に対する磁場の影響を考慮する。周囲媒体にも磁気力が作用するので、注目物質との相対的な磁気力差を考慮することで浮上の条件を軽減できるケースがある。注目物質の体積磁化率を χ_1 、密度を ρ_1 とし、周囲媒体のそれらを χ_2, ρ_2 とすると、浮上の条件は次のように表わされる²⁾。

$$(\rho_1 - \rho_2)g = \frac{\chi_1 - \chi_2}{\mu_0} B_z \frac{dB_z}{dz} \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空透磁率、 B_z は磁束密度の z 成分、 dB_z/dz はその空間変化の割合である。水のような液体を気体中に浮上させるには、周囲媒体に酸素を用いるのが適当である。酸素は常磁性で、20℃、1 気圧における体積磁化率と密度はそれぞれ、 $+1.804 \times 10^{-6}$ 、 1.3316 kg/m^3 である。純水のそれらは -9.031×10^{-6} 、 $0.9982 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で、これを $B_z dB_z/dz$ の最大値が $400 \text{ T}^2/\text{m}$ 程度の 10 T-100 mm ϕ 級超伝導磁石で浮上させるには、酸素を 12 気圧程度にする必要がある。

ここで、磁気アルキメデス効果により浮上可能な物質を簡便に決定・判別する手法を考察する。(1)式を注目物質の体積磁化率と密度の関数として変形すると、

$$\chi_1 = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g\mu_0}{B_z dB_z/dz} + \chi_2 \quad (2)$$

となる。周囲媒体を選択し、使用する超伝導磁石を決めれば、得られる最大の $B_z dB_z/dz$ も決まるので、(2)は注目物質の体積磁化率と密度の 1 次関数となる。密度を横軸、体積磁化率を縦軸にこの式を描画した時、ある物質の体積磁化率と密度がこの関数よりも下、すなわち(左辺) $\leq$ (右辺)となる場合、その物質はこの式を描画に適用した周囲媒体と磁場の条件下で浮上できる。同一の周囲媒体を用いた場合、 $B_z dB_z/dz$ を変化させることは、関数の傾きを変えることに相当する。浮上可能な物質は、おおむね周囲媒体よりも磁化率の小さなものに限られるが、厳密には、周囲媒体の密

Received June 30, 2005

^{*1} 物質・材料研究機構 強磁場共用ステーション
〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

TML-NIMS, 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, Japan

^{*2} 足利工業大学 電気電子工学科

〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1

AIT, 268-1 Omae, Ashikaga, Tochigi 326-8558, Japan

[†] E-mail : HIROTA.Noriyuki@nims.go.jp

Fig. 1 Levitation of water in oxygen atmosphere

度による浮力の影響((2)式右辺の $\rho_2 g \mu_0$)があるので、 $B_z dB_z/dz$ に依存し若干変化する。 $B_z dB_z/dz$ を一定とすれば、この関数の傾きは一定で、周囲媒体を変えることは、関数を磁化率-密度平面で平行移動することに相当する。分離を目的とし、多数の物質を同時に浮上させる場合、その条件決定は煩雑だが、磁気アルキメデス浮上を体積磁化率-密度平面において捉え、周囲媒体の物性や超伝導磁石の $B_z dB_z/dz$ をパラメータとして浮上可能ラインを描画すれば、それらの物質を同時に浮上するための条件を簡便に決定できる。なお、 $B_z dB_z/dz$ の空間分布から、物質の安定浮上を実現するのは、超伝導磁石のボア軸上、磁場中心より上で $B_z dB_z/dz$ の絶対値が最大となる場所から上の領域となる。

次に、磁気アルキメデス浮上デモンストレーションの詳細方法を述べる。ここでは、高酸素圧下で液体を浮上させる例として、水の磁気アルキメデス浮上について記述する。高酸素圧環境を実現する容器として耐圧硝子(株)製ハイパーガラスシリンダーHPG-96-3を用いた。容器内への液体導入は、より加圧された別の容器から圧力差を利用して行なう。高圧側容器には同社製ポータブルリアクターTVS-1を用いた。両容器は、途中にバルブを入れたステンレスキャピラリーにより接続する。まず、ステンレス容器に純水を入れ、酸素を2 MPa程度導入する。あらかじめ酸素置換したガラス容器と接続し、ガラス容器側を所定圧力の酸素で満たす。装置全体を超伝導磁石室温ボアに導入し、キャピラリー先端がボア軸上で $B_z dB_z/dz$ が最大となる位置の少し上になるように設置する。磁場印加後、バルブを調整して水をガラス容器内に導入し、キャピラリー先端に液滴を形成する。この位置では水の浮上条件が満たされているため、液滴がある程度大きくなったら、ガラス容器全体を上方にゆっくり移動し液滴を切り離す。しばらく安定浮上位置を中心として振動し、浮上が実現する。JASTEC 製超伝導磁石 JMTD-10C13E-NC(13 T-100 mm ϕ)を用いて、ガラス容器内酸素圧を0.90 MPa、ステンレス容器内酸素圧を1.20 MPaとし、水を浮上させた様子をFig. 1に示す。なお、浮上させる物質が固体の場合、あらかじめガラス容器に物質を入れ、所定圧力の酸素で満たせば、簡単に浮上を観測できる。例えば、ミックスココアパウダーを磁気アルキメデス浮上させると、ココアとミルクのパウダーがそれぞれ異なる位

Fig. 2 Schematic illustration of an inclined magnet bore to sustain diamagnetic materials on the wall by magnetic force.

Fig. 3 Spatial distribution of $B_z dB_z/dz + B_r dB_r/dz$ along bore axis and bore wall for JMTD-10C13E-NC.

置に浮かぶ。このような身近な材料を使ったデモンストレーションは磁性の違いを実感してもらう上で効果的である。

3. 超伝導磁石ボア壁面の利用

磁気アルキメデス効果を利用すれば、普及タイプの伝導冷却型超伝導磁石でも反磁性物質の磁気浮上を観測できるが、高圧酸素環境を必要とするため、注意を要する。通常大気下で反磁性物質に作用する磁気力をより簡便に可視化する方法としてボア壁面を利用する方法がある。これは、ボア軸方向に作用する磁気力は、軸上より壁面の方が大きい性質を利用し、超伝導磁石を傾斜させ、磁気力で保持する力の成分を軽減するものである。この方法の概念図をFig. 2に示す。一例として、前出のJMTD-10C13E-NCのボア軸上及び壁面での磁場と磁場勾配の積の絶対値の分布をFig. 3に示す。磁場と磁場勾配の積は、軸上では最大585 T²/mなのに対し、壁面では762 T²/mに達する。この大きさは水を通常大気下で非接触浮上させるほどではない。しかし、傾斜ボア中では、Fig. 2のように、物質に作用する重力のボア軸平行成分のみ考慮すればよいから、保持条件が緩和され、この程度の磁場と磁場勾配の積でも反磁性物質に作用する磁気力を可視化できる。

実際に、13 T磁石を使用して氷を保持するデモンストレーションの条件を考察する。0℃の氷の磁化率は -8.090×10^{-6} 、密度は 0.9168×10^3 kg/m³であるから、非接触浮上に必要な磁場と磁場勾配の積は1293 T²/mである。大気中で氷を、前出の13 T磁石の壁面に静止保持するのに必要なボアの傾きは36.1°となる。実際には試料は有限な体積を有す

Fig. 4 Sustention of solid water on an inclined magnet bore. The inset is a photograph of inclined magnet.

るので、磁気力最大の点から 5 mm 以内における磁場と磁場勾配の積の最小値 $705 \text{ T}^2/\text{m}$ を適用すると、氷の静止に必要な角度は 33.0° となる。実際にこれを検証した。十分に脱気した水を用い気泡の無い氷を作製した。これを傾けた超伝導磁石のボア中に導入し、壁面での保持に必要な角度を観測した。実験の様子を **Fig. 4** に示す。挿入図は 33.0° 傾けられた超伝導磁石である。氷はボア壁面に保持され落下しない。5 mm 程度の大きさの試料の場合、 34.0° では壁面を滑り落ちたが、 33.0° の場合には静止した。試料が融解して小さくなると、 34.0° においても壁面での静止保持を観測できた。これらは、試料の大きさ、壁面近傍での磁場と磁場勾配の積の空間分布から予想される結果と一致する。

磁石の傾きは 15° 程度でも十分に急に感じられる。実際のデモンストレーションでは同じ角度の透明な円筒を側においておくと効果的である。透明な円筒では全く静止しないゆで卵やゴムボールが、ボア中では転がらず斜面で静止する様子を見せることは、身の回りのものの多くが反磁性であることを実感させる点で効果的である。

4. おわりに

ここで検討した他にも、水の表面形状が変形するモーゼ効果や、ボア端から反磁性物質を投入した際の反発などが反磁性の視覚的デモンストレーションとして有効である。

物質・材料研究機構 強磁場共用ステーションでは、一般公開や学生の見学などに際し、磁性と磁場に関するデモンストレーションを実施している。内容は、磁気アルキメデス浮上、傾斜ボア中での反磁性物質の保持のほか、モーゼ効果、水平ボア中での氷の反発、強磁性体の吸引力(スパナやスチール缶をボア端につける)、アルミ缶を利用した渦電流効果の体験などである。最後に、過去に実施したデモンストレーション 2 件でのアンケート結果を紹介しておく。

工業高専の 4 年生 40 名の見学の際には、1) 強磁性の実演、2) 傾斜ボア中でのゆで卵の保持による反磁性の実演、3) アルミ缶による渦電流の体験を実施した。印象に残った実演について回答を求めたところ、1) 8 人、2) 12 人、3) 23 人という結果だった。科学技術週間の一般公開では、小学生から

高齢の方まで幅広い年齢層が対象で、1) 強磁性の実演、2) 渦電流の体験、3) 水平ボアで氷の反発、4) モーゼ効果、5) 水の磁気アルキメデス浮上、を実施した。印象に残った実演は、有効回答数 46 人中、1) 15 人、2) 14 人、3) 14 人、4) 32 人、5) 24 人という結果だった。若い世代には、アルミ缶による渦電流体験が人気だが、普段は体感できない反磁性の実演は、どの世代にも共通して興味を持って受け止められた。

近年、10 T 級の超伝導磁石が普及し、その研究開発への利用が盛んになっているが、本検討によって、この他にも、反磁性という一般にはなじみの薄い物性の視覚的デモンストレーションへの利用も可能で、科学の普及・啓蒙の手段として価値が高いことがわかった。今後は、超伝導磁石が教育的な利用の面でも普及してゆくことが期待される。

参 考 文 献

- 1) E. Beaunon and R. Tournier: "Levitation of organic materials," *Nature* **349** (1991) 470.
- 2) Y. Ikezoe, N. Hirota, J. Nakagawa and K. Kitazawa: "Making water levitate," *Nature* **393** (1998) 749-750.

廣 田 憲 之

1969 年 11 月 13 日生。1992 年東京大学工学部合成化学科卒業。1997 年同大学大学院工学系研究科超伝導工学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員(PD)。1998 年東京大学大学院工学系研究科助手。1999 年同大学院新領域創成科学研究科助手。2003 年より物質・材料研究機構研究員。低温工学協会 他 会員。博士(工学)。

木 吉 司

1959 年 8 月 4 日生。1983 年東京大学工学部原子力工学科卒業。1988 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 4 月より科学技術庁金属材料技術研究所(現独立行政法人物質・材料研究機構)勤務。現在、同機構強磁場共用ステーション長。主として強磁場超伝導マグネットの開発に従事。低温工学、日本金属学会、日本 MRS、応用物理学会会員。工学博士。

小 泉 俊 行

1974 年 10 月 31 日生。1999 年長崎総合科学大学工学部機械工学科卒業。2001 年同大学大学院工学研究科流体工学専攻機械流体工学修士課程終了。2003 年より独立行政法人 物質・材料研究機構 重点研究支援協力員。工学修士。

横 山 和 哉

1971 年 1 月 17 日生。1999 年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年新潟大学大学院自然科学研究科助手。2001 年(財)いわて産業振興センター地域結集研究員。超電導バルク体の着磁および応用に関する研究に従事。2004 年(独)物質・材料研究機構、強磁場研究センター特別研究員。2005 年足利工業大学講師、低温工学協会会員。博士(工学)。