テーマ解説

磁気アルキメデス効果とその応用

廣田 憲之^{*1,†}

Magneto-Archimedes Effect and Its Applications

Noriyuki HIROTA^{*1,†}

Synopsis: The magneto-Archimedes effect is a technique to enhance the effect of the magnetic force acting on materials by considering the influence of the surrounding medium. Application of this technique as a way of materials separation is known as the magneto-Archimedes separation. The magneto-Archimedes separation enables the separation of many different materials into each component based on the differences in their magnetic susceptibilities and densities irrespective of the particle size. In this topical review, the principle of the magneto-Archimedes effect and its application as a way to separate materials are described and some other examples applying the magneto-Archimedes effect are introduced.

Keywords: magnetic force, magnetic susceptibility, magneto-Archimedes levitation, magneto-Archimedes separation

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

よく知られているように、水中で物体が受ける浮力の大きさは物体が押しのけた体積の水に作用する重力と同じである、と説明されるのが「アルキメデスの原理」である。若干、視点を変えてみると、物体に作用する力は、周囲媒体の影響を受ける、と捉えることもできる。ところで、物質を空間的に変化する磁場下に置くと、物質の磁気的性質に応じて磁気力が作用する。磁性はすべての物質が有する性質であり、真に均一な磁場など存在しないので、物質を永久磁石や超伝導磁石といった磁場発生源に近づけると、大小はあるものの、あらゆる物質に対して磁場由来した力学的な作用がある。この時、物質に作用する力を、その周囲媒体に作用する磁気的な力まで含めて考えるのが「磁気アルキメデス」効果の考え方である。「磁気アルキメデス」という言葉が初めて使われたのは、筆者の知る限り、池添らによる水や水溶液の磁気アルキメデス浮上についての報告である¹⁾。この論文の中では、水の周囲媒体を常磁性物質である酸素ガスにし、水との磁化率差を大きくすることで磁気的な浮力を増幅し、普及型の超伝導磁石で水の磁気浮上を実現している。その後、この磁気アルキメデス

効果は磁場を用いた物質挙動制御や材料プロセス、分離・分析等でごく普通に利用されるようになっている。既によく知られた概念ではあるが、「超電導技術を応用した磁気分離の現状と産業化に向けた取り組み」の特集に際し、本稿では、従来の高勾配磁気分離との組み合わせで分離の多様性を生み出す目的でも利用されるようになった磁気アルキメデス効果の基礎について、いくつかの応用例も挙げつつ、解説したい。

2. 磁気アルキメデス効果の原理と磁気アルキメデス浮上

物質を空間的に変化する勾配磁場の下に導入した際に作用する単位体積当たりの磁気力 F_m は次式のように表される。

$$F_m = \frac{\chi}{\mu_0} B \nabla B \quad (1)$$

ここで、 χ は物質の体積磁化率、 μ_0 は真空透磁率、 B は磁束密度を表す。

高磁場を用いて反磁性物質に強い磁気力を作用させれば、その磁気浮上が可能になる（反磁性磁気浮上）。水などの反磁性磁気浮上は、1991年にフランスの Beaugnon と Tournier によって報告された²⁾。反磁性磁気浮上は、浮上させる反磁性物質に作用する磁気力と重力の釣り合いによって説明される。体積磁化率 χ と密度 ρ を持つ物質の浮上条件は次式で表される。

Received March 25, 2020

^{*1} 物質・材料研究機構

〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

National Institute for Materials Science (NIMS), 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, Japan

[†] E-mail: hirota.noriyuki@nims.go.jp

DOI: 10.2221/jcsj.55.185

Fig. 1 Forces concerning the magneto-Archimedes levitation

$$-\rho g + \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 z は鉛直方向の座標を表す。

反磁性物質の磁化率は、 10^{-5} 程度以下と非常に小さいために、磁気浮上を実現させるためには、(2)式左辺第 2 項からもわかるように高磁場で高磁場勾配が必要となる。例えば、水は比較的密度が小さく体積磁化率が高い (-9.031×10^{-6} , SI, 無次元) ため、磁気浮上させやすい物質の一つであるが、それでも磁気浮上の条件となる $B \cdot \partial B / \partial z$ の大きさはおよそ $1400 \text{ T}^2/\text{m}$ 必要となる。一方で、最大印加磁場 10 T で室温ボア径 100 mm の普及型冷凍機冷却タイプの超伝導磁石の場合、得られる $B \cdot \partial B / \partial z$ の大きさは $400 \text{ T}^2/\text{m}$ 程度である。ソレノイドタイプの磁石の場合、ボア径を一定とすると、 $B(\partial B / \partial z)$ の最大値は、およそ最大発生磁場の二乗に依存して決まることから、反磁性磁気浮上にはさらに高磁場を発生できる磁石が必要となる。実際、Beaugnon らが種々の反磁性物質の磁気浮上を行なった際には、磁場発生手段としてハイブリッド磁石を用い、最大 27 T の磁場を印加している。(ちなみに、室温ボアが 40 mm くらいであれば 15 T 程度の超伝導磁石でも反磁性磁気浮上は可能である。) 当時、著者らのグループでは、超伝導磁石の水平ボア内に導入した水槽内の水の表面が変形し、高磁場領域で押し下げられて割れたようになるモーゼ効果^{3,4)}を報告し、さらに、密度の近い 2 液間で界面を形成することで永久磁石でも同様の現象を実現できることを観測していた⁵⁾。これは、密度の近い 2 液体で界面を構成することで、界面変形に伴う位置エネルギーの変化を気液界面のケースに比べて小さくしていることに相当する。高磁場利用によって見出されたモーゼ効果を、そのメカニズムに基づき、低磁場でも実現するために界面を構成する周囲媒体の性質を利用した先例となった。池添らは、この考え方を反磁性磁気浮上にも適用し、磁気アルキメデス浮上を実現した。

Fig. 2 Levitation of water using the magneto-Archimedes levitation technique

Fig. 1 に関連する力を示すように、浮上させたい物質の周囲媒体の影響も考慮すると、(2)式は次のように変更できる。

$$-\rho_1 g + \frac{\chi_1}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial z} + \rho_2 g - \frac{\chi_2}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで ρ_1 と χ_1 はそれぞれ、浮上対象物質の密度と体積磁化率を表し、 ρ_2 と χ_2 はそれぞれ、周囲媒体 (気体や液体) の密度と体積磁化率を表す。前述の反磁性磁気浮上では、左辺の後半二項が考慮されていなかった。空気の磁化率は、強い常磁性を示す酸素が約 20% 存在するため全体として常磁性を示す。したがって、磁場中に入れられた空気は、磁場強度の高い方へ引きつけられる。一方、反磁性の水は、磁場強度の低い方へ力を受ける。よって、超伝導磁石の中で、磁場最大の位置から上方に少し離れた位置では、空気には下向きに磁気力と重力が作用し、水には、下向きの重力と上向きの磁気力が働き、空気及び水の見かけ上の重さが増加する。空気の密度は水の密度に比べて 3 桁も小さいが、勾配磁場下、例えば $B \cdot \partial B / \partial z$ の大きさが $400 \text{ T}^2/\text{m}$ のところでは、空気の見かけ上の重さは、水のそれと比較して約 2% に達する。空気の代わりに 1 気圧の酸素を入れると、酸素の見かけ上の重さは、水の約 10% になり、さらに 10 気圧の加圧された酸素を入れれば、その見かけ上の重さはもはや水の見かけ上の重さと同程度になり、水は“重い”酸素ガスの上に浮くことになる。

Fig. 2 は 12 T の小型冷凍機冷却タイプの超伝導磁石で浮上した純水の液滴である。周囲の酸素ガス圧は 12 気圧としている。上部に写っているキャピラリーから液体を供給し、その先端に液滴を形成させた後、キャピラリーを切り離すと、液滴はしばらく振動した後に、酸素ガス中で完全に非接触な状態で安定浮上した。

ここまでの「反磁性磁気浮上」という用語を使ってきた。これは、反磁性物質の場合、空間中に非接触で安定浮上し、たとえそこから変位したとしても、元の位置に戻る復元力

が作用するのに対して、常磁性物質の場合には、Earnshawの定理から、非接触で浮上できないためである。言い換えると、空間的にどの方向に変位しても磁場が小さくなるような特異点は存在しないためである。しかしながら、磁気アルキメデス浮上の考え方を適用すれば、常磁性物質も非接触安定浮上が可能となる。これは、浮上させる物質よりも周囲媒体の磁化率を大きくすれば、浮上物質は相対的に“反磁性”的なふるまいを示すことによるので、Earnshawの定理にも反しない。実際、常磁性溶液の液滴についても磁気アルキメデス浮上できることを確認している¹⁾。

非接触状態で物体を長時間保持する技術は、宇宙における微小重力実験の類似実験としての利用価値が期待され、材料科学・生物学などの観点から興味深いものである。周囲の環境を制御することで磁気力の効果を増強する磁気アルキメデス浮上により、小型の超伝導磁石でも物体の磁気浮上が可能になったこと、また、浮上物質が常磁性でも、媒体よりも相対的に反磁性的であれば、磁気浮上が可能となったことは、磁気浮上の応用範囲を格段に広げてくれる。

3. 磁気アルキメデス効果の応用

前項で紹介した磁気浮上・磁気アルキメデス浮上の大きな特徴の一つは、物質の安定位置が1つに定まることである。磁気アルキメデス浮上において浮上に必要な $B \cdot \partial B / \partial z$ の値は、(3)式からもわかるように、物質とその周囲媒体の体積磁化率差と密度差の比に依存して決定される。磁場を印加する手段としての超伝導磁石や永久磁石を考えた時、その磁場強度 B や磁場と磁場勾配の積 $B \cdot \partial B / \partial z$ には空間的分布がある。したがって、(3)式の浮上条件を満たす $B \cdot \partial B / \partial z$ が異なる物質は、異なる安定浮上位置を持ち、磁気浮上させることで分離できる。もし仮に、あるいくつかの物質が、ある条件下で同じ位置に浮上したとしても、周囲媒体の性質を変えることで、分離浮上が可能になる。この性質は、物質分離を行なう上で、非常に有効なものであると考えられる。このような物質分離手法は磁気アルキメデス分離と呼ばれるようになった。磁気アルキメデス分離の一例として、Fig. 3 にミックスココアパウダーの分離例を示す。ココアパウダーとミルクパウダーが浮上位置の違いにより分離されているのがわかる。既に、磁気アルキメデス浮上技術を利用することで、反磁性・常磁性物質を対象として、それらの磁気的性質の違いに基づく新しい物質分離の試みが多くなされている。代表的な例として、木村らによる各種ポリマーの塩化マンガン水溶液中における磁気アルキメデス分離⁶⁾や、液体酸素中で金属片を浮上分離した例⁷⁾、安藤らによる磁気アルキメデス分離した物質の回収機構に関する検討⁸⁾、西嶋らによる高勾配磁気分離と組み合わせた高度物質分離⁹⁾などが知られている。

これまでの磁気的な分離方法としては、例えば、様々な金属廃棄物から鉄を分離するものや、磁気フィルターにより粒子を懸濁液から分離する、いわゆる高勾配磁気分離な

Fig. 3 “Mixed cocoa” separated using the magneto-Archimedes separation.

Upper: cocoa powder, Lower: milk powder.

どが知られていた。しかしながら、前者の場合には、被分離物は大きな磁性を有しなければならず、また、両者ともに、磁気力により牽引できるか、否か、すなわち、磁性が大きいのか、小さいのか、の2つのグループに分離する技術で、多種の被分離物質間での物質の違いによる分離は一般にできない。被分離物質相互の種類の違いによる分離が可能な方法として、磁性流体を利用した分離法も古くから知られるが、これは、物質の密度の違いのみを利用しており、同密度の物質同士は分離できない。これに対して、磁気アルキメデス分離法は、密度と磁化率の両方の寄与を利用することが出来、同じ磁化率、あるいは同じ密度を持つ物質同士でも、わずかな密度差($\sim 0.01 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、磁化率差($\sim 10^{-5}$)があれば分離可能である。また、媒体を変えることで、磁化率差、密度差のどちらを利用するのか、を選択することができる。しかも、複雑な手順を必要とせず、通常の超伝導磁石によって反磁性・常磁性物質の種類による分離を実現することから、今後、物質分離の新しい手法として、リサイクルなどに適用できるのではないかと期待されている。

本特集は「超伝導技術を応用した磁気分離の現状と産業化に向けた取り組み」ということであったので、ここまで物質分離に絞って、磁気アルキメデス効果の利用を述べてきたが、終わりに、磁気アルキメデス効果が既にいろいろな分野で利用されていることについて触れておきたい。

液体が磁気浮上する際には無容器であるため、Fig. 2 のように球形になる。これを利用して、真球に近い材料作製に用いる試みが知られる。山登らは磁気アルキメデス浮上を利用して球形ポリマーの作製を行なった¹⁰⁾。このほか、分析手法としての利用も行なわれており、Miricaらは物質の磁気アルキメデス浮上位置から密度計測を行なうデバイスを開発した¹¹⁾。渡會・諏訪らのグループは永久磁石を用いて微粒子の磁気的性質を利用して磁気アルキメデス効果を利用することで検出感度を向上させた多様な分析を可能にしている¹²⁾。マイクロ流体デバイス利用では、

Pamme らがやはり磁気アルキメデス効果を利用してフローセル内における粒子マニピュレーションを行なっている¹³⁾。

磁気アルキメデス浮上が報告されてから既に 20 年以上が経過し、日本から提案された「磁気アルキメデス効果」、「magneto-Archimedes effect」という名称はこの分野では世界的にも定着した。いろいろな形での応用が検討され、一部、実用化も進んできているが、その本質は、周囲媒体への磁気的な影響も含めて現象を設計することで、より簡便に磁場利用を実現する、ということになる。磁場は物質に非接触でその挙動を制御する手段として利用できるので、磁気アルキメデス効果は、様々な現象・プロセスの制御において、貢献することが期待される。本稿がその一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Y. Ikezoe, N. Hirota, J. Nakagawa and K. Kitazawa: “Making water levitate”, *Nature* **393** (1998) 749-750
- 2) E. Beaugnon and R. Tournier: “Levitation of organic materials”, *Nature* **349** (1991) 470
- 3) M. Iwasaka and S. Ueno: “Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields”, *J. Appl. Phys.* **75** (1994) 7177
- 4) N. Hirota, T. Homma, H. Sugawara, K. Kitazawa, M. Iwasaka, S. Ueno, H. Yokoi, Y. Kakudate, S. Fujiwara and M. Kawamura: “Rise and fall of surface level of water solutions under high magnetic field”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) L991-L993
- 5) 廣田憲之, 本間琢朗, 崎浜竜也, 酒井正格, 菅原宏治, 北沢宏一, 岩坂正和, 上野照剛, 横井裕之, 角館洋三, 藤原修三: 「磁場による非磁性液体の表面・界面形状制御—増強モーゼ効果の観測とその機構—」, *日本応用磁気学会誌* **20** (1996) 513-516
- 6) T. Kimura, S. Mamada and M. Yamato: “Separation of solid polymers by magneto-Archimedes levitation”, *Chem. Lett.* **29** (2000) 1294-1295
- 7) A. T. Catherall, L. Eaves, P. J. King and S. R. Booth: “Floating gold in cryogenic oxygen”, *Nature* **422** (2003) 579
- 8) T. Ando, N. Hirota and M. Maie: “Development of recovery device for particles in fluid by magneto-Archimedes separation”, *Sep. Pur. Tech.* **149** (2015) 197-207
- 9) S. Nishijima: “Magnetic force control technology and its industrial applications”, *J. Magn. Soc. Jpn.* **37** (2013) 333-337 (in Japanese)
西嶋茂宏: 「磁気力制御技術とその産業応用」, *J. Magn. Soc. Jpn.* **37** (2013) 333-337
- 10) M. Yamato, H. Nakazawa and T. Kimura: “Levitation polymerization to fabricate a large polymer sphere”, *Langmuir* **18** (2002) 9609-9610
- 11) K. A. Mirica, S. S. Shevkoplyas, S. T. Phillips, M. Gupta and G. M. Whitesides: “Measuring densities of solids and liquids using magnetic levitation: fundamentals”, *J. Am. Chem. Soc.* **131** (2019) 10049-10058
- 12) M. Suwa and H. Watarai: “Magnetoanalysis of micro/nanoparticles: A review”, *Analysica Chimica Acta* **690** (2011) 137-147
- 13) M. D Tarn, N. Hirota, A. Iles and N. Pamme: “On-chip diamagnetic repulsion in continuous flow”, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **10** (2009) 014611

廣 田 憲 之

1969 年 11 月生。1992 年東京大学工学部合成化学科卒業。1997 年同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、東京大学大学院工学系/新領域助手を経て、2003 年より物質・材料研究機構勤務。磁気科学研究に従事。低温工学・超電導学会、応用物理学会、日本磁気学会、日本磁気科学会 他会員。博士(工学)。