磁気アルキメデス浮上法による反・常磁性体の安定浮上 Stable Levitation of Dia- or Paramagnetic Substances by Magneto-Archimedes Levitation

池添泰弘*・茂木邦雄*・鈴木隆史*・廣田憲之***・植竹宏往*・渋谷正徳*・
中川 準***・北沢宏一**

*東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻,
東京都文京区本郷 7-3-1(〒113-8656)

**科学技術振興事業団,
埼玉県川口市本町 4-1-8(〒332-0012)

***TDK(株)基礎材料研究所,
成田市南羽鳥字松ヶ下 570-2(〒286-8588)

Y. Ikezoe*, K. Mogi*, T. Suzuki*, N. Hirota***, H. Uetake*, M. Shibuya*,
J. Nakagawa***, and K. Kitazawa***

*Dept. of Applied Chemistry, Univ. of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

**Japan Science and Technology Co.,
4-1-8 Hon-cho, Kawaguchi, Saitama 332-0012

***TDK Co., Ltd., Material Research Center,
570-2 Matsugashita, Minamihatori, Narita 286-8588
(1998年10月16日受理、1998年12月4日採録)

We succeeded in making water levitate in air, using not an extreme by strong magnet such as a Bitter-type hybrid magnet, but a compact superconducting magnet. The levitated water ball had a spherical shape and levitated stably for over a day. We named this phenomenon "magneto - Archimedes levitation," because, to achieve it, we used gravitational and magnetic buoyancy forces in the presence of pressurized oxygen gas. In addition, our method enables paramagnetic substances to levitate in air, which has been considered to be impossible owing to the Maxwell relation, $\text{div} B = 0$. We also succeeded in making paramagnetic aqueous copper sulfate levitate in air. To the best of our knowledge, this is the first demonstration of stable levitation of paramagnetic substances in the atmosphere.

Keywords: magneto - Archimedes levitation, paramagnetic/diamagnetic, water, oxygen, copper sulfate, magnetic force

1. はじめに

物体の非接触安定浮上は、例えば、容器との接触界面のない溶液・溶融体からの結晶成長を可能にするな

ど、工学的な観点から幅広い応用が期待されるほか、生物に対してはどのような影響があるのかなど学術的な観点からも興味深い魅力的な技術であるといえる。これを実現する一つの手法として、スペースシャトルなどにより宇宙の微小重力環境を利用する方法があるが、残念ながら、一般の企業や大学の研究者が手軽に利用できるものではない。地球上で非接触安定浮上を実現する一つの方法として、磁気浮上がある。これは、不均一な磁場のもとで物質にはたらく磁気力を鉛直上向きに作用させ、重力と釣り合わせることによって浮上状態を実現する。近年、水などの反磁性物質の浮上が報告されている¹⁾。また、カエルなどの生物を磁石によって浮上させた報告などもあり²⁻⁵⁾、雑誌等で話題を呼ぶようになってきている。しかし、反磁性体の磁化率の絶対値は非常に小さく、磁気浮上を実現するには世界でも有数の 20 T 超クラスの極めて強力な磁石が必要である。また、自由空間中に磁場最大の点を作り出すことはできないため、浮上は反磁性物質に限られる。

今回我々が提案する新しい磁気浮上法、“磁気アルキメデス浮上”は二つの breakthrough を含む。一つは市販されている小型の超伝導磁石でも物質を浮上させる事ができるということ、もう一つは、今まで不可能であると考えられてきた常磁性物質を浮上させる事ができるということである。我々は、理論的に予想した磁気アルキメデス効果について、実験によってこれを確認し⁶⁾、さらにその様子を撮影する事に成功したので報告する。

2. 非接触安定浮上のための条件

体積磁化率 χ をもつ物質が不均一な磁場中に置かれたとき、その位置での磁束密度 B と磁場勾配に比例した大きさを持つ磁気力 F_M が作用する。

$$F_M = \frac{\chi}{2\mu_0} \nabla B^2 \quad (1)$$

したがって、この物質を Fig. 1 のような空間分布をもつ磁場中で、物体に作用する力は、

$$F_z = V \left(\frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} - \rho g \right) \quad (2)$$

となる。ただし、鉛直上向きを z 軸正方向とし、 ρ , V はそれぞれ物体の密度、体積、 μ_0 は真空透磁率、 g は重力加速度をあらわす。

物体がある位置に静止するためには、物体に作用する力の和がゼロになるだけでなく、その位置でのエネルギーが最小でなければならない。したがって、次の関係が満たされなければならない⁷⁾。

$$F(r) = 0 \quad (3)$$

$$\oint F(r) \cdot dS < 0 \quad (4)$$

マクスウェルの方程式から、この関係を満たすのは、磁化率 χ が負の物質の場合だけであることがわかる。Beaugnon らによる水などの浮上は上記のような機構に基づいて理解される。この場合、水の浮上に必要な $B \cdot dB/dz$ の値はおよそ $1400 \text{ T}^2/\text{m}$ である。現在、これだけ大きな $B \cdot dB/dz$ を得るためには、Bitter タイプのハイブリッド磁石など世界でも数少ない極めて強力な磁石を使用する必要がある。浮上技術の発展・普及のためには、普及型の超伝導磁石での浮上を実現することが望ましい。しかし、最近普及してきている 10 T 程度の磁場を発生し得る超伝導磁石でも $B \cdot dB/dz$ は最大 $400 \text{ T}^2/\text{m}$ 程度でしかない。

Fig. 1 Force acting on a levitated object.

3. 磁気アルキメデス効果

今回我々は、汎用小型超伝導磁石による水等の反磁性物質の磁気浮上実現を目的とし、以下のような、磁気アルキメデス浮上法を考案した。

本研究では、これまであまり考慮されなかった周囲の気体の影響も含めて、浮上条件の考察を行った。Fig. 2 のように、安定浮上させる対象物の雰囲気を考慮すれば、物体に作用する力は次の様に表される。

$$F_z = -(\rho_1 - \rho_2)g + \frac{(\chi_1 - \chi_2)}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} \quad (5)$$

ここで ρ_1, ρ_2 及び χ_1, χ_2 は、それぞれ、浮上させる物質および周囲ガスの密度及び体積磁化率を表す。したがって、浮上のためには、 $B \cdot dB/dz$ は以下のような関係を満たさねばならない。

$$B \frac{dB}{dz} = \frac{\mu_0(\rho_1 - \rho_2)g}{(\chi_1 - \chi_2)} \quad (6)$$

(6)式の右辺において、分子の密度差を小さくするか、あるいは分母の磁化率差を大きくすれば、浮上に必要な $B \cdot dB/dz$ を小さくすることができる。例えば水の磁気浮上を考えると、水と周囲気体の密度差は、常圧下では 3 桁違うため、これを近づけるのは困難である。しかしながら、反磁性体である水の周囲に、常磁性の大きな気体を満たしてやれば、磁化率差を大きくすることができる。酸素の重量磁化率の絶対値は水のその 100 倍以上であるので、酸素を高压にすることにより、浮上に必要な $B \cdot dB/dz$ の値を効果的に低くできる。これによって、普及型の小型超伝導磁石による浮上の実現が期待される。これは、周囲のガスが磁場中心方向に引き込まれる方向に磁気力を受け、見かけ上、重くなることで、浮上体にはたらく磁場起因の浮力が大きくなったと考えることもできる。そこで、我々は、この浮上方法を“磁気アルキメデス浮上法”と命名した。

Fig. 2 Force acting on a levitated object when the contribution of environmental gases is taken into account.

また、式(6)からは、もう一つ重要な事柄がわかる。それは常磁性物質の磁気浮上の可能性である。前節で取り扱った磁気浮上条件では χ が負であることが必要で、常磁性の物質は浮上不可能であると思われた。しかし、式(6)を見ると、浮上条件は $\chi_1 - \chi_2$ が負であることであり、周囲を常磁性の大きな気体で満たした場合、それよりも常磁性が小さな物質であれば、浮上可能であることがわかる。

4. 実験の方法と結果

前節で紹介した磁気アルキメデス浮上を実験的に検証した。実験に用いた磁石は、市販の冷凍機伝導冷却超伝導磁石(住友重機 HF-10-100VHT-5, 室温ボア径 100 mm)で、最大中心磁場は 10 T, ボア軸上での $B \cdot dB/dz$ の最大値は 420 T²/m である。浮上には純水(体積磁化率 $\chi_{\text{water}} = -9.05 \times 10^{-6}$ [SI]), 及び常磁性の硫酸銅水溶液($\chi_{\text{CuSO}_4} = +4.78 \times 10^{-7}$ [SI])を用いた。

Fig. 3 は用いた純水と硫酸銅水溶液を浮上させるのに必要な $B \cdot dB/dz$ の値(絶対値)を、酸素ガス圧力 p (atm)に対してプロットしたものである。ただし、酸素の重量磁化率は $\chi_g(\text{O}_2) = 107.8 \times 10^{-6} (\text{cm}^3/\text{g})$, 温度は 15℃とした。磁石の $B \cdot dB/dz$ の最大値が 420 T²/m であることを考慮すると、水の場合は 10.7 atm 以上、硫酸銅水溶液の場合は 17.4 atm 以上であれば浮上可能である事がわかる。なお、このグラフでは、水中に溶けた酸素による水の磁化率の変化も考慮しているが、その絶対値は、周囲の酸素の磁化率に対して 4% 以下である。また硫酸銅水溶液は常磁性であるため、常圧下では浮上条件を与える曲線が発散してしまい、浮上不可能であることもわかる。

Fig. 4 は実験装置の概略図である。装置は、水の供給源となるステンレス製耐圧容器(耐圧硝子工業製 TVS-1, 容量 50 ml)と、水を浮上させる空間となるガラス製耐圧容器(同 HPG-96-1, 容量 96 ml)から構成される。

Fig. 3 Relationship between the oxygen gas pressure and the value of $B \cdot dB/dz$ required to levitate water and paramagnetic CuSO_4 aqueous solution.

これらはバルブによって区切られる。例えば、純水を浮上させる場合は以下のような手順で行う。はじめに、ステンレス容器内に純水 10 ml を入れ、18 atm 酸素ガスで満たす。また、ガラス容器は 12 atm 酸素ガスを満たす。キャピラリー先端が磁気力最大の位置に来るように、装置全体を磁場中に挿入する。バルブを開けると、二つの容器の圧力差により、キャピラリーを通してステンレス容器から純水が送られ、キャピラリー先端に水滴が形成される。その後、装置全体を上を持ち上げ、キャピラリーから水滴をはずして浮上させた。なお、硫酸銅水溶液の場合は、ステンレス容器内の酸素圧力を 23.8 atm, ガラス容器内は 18.4 atm とした。

純水、硫酸銅水溶液の場合ともに、浮上に成功した。液体球は、キャピラリーの先端から外れた後、1 分以上の間複雑に振動するが、次第に振幅が小さくなり球状を保って安定な浮上状態に移行する。安定浮上はどちらの場合にも 24 時間以上継続することを確認した。また、浮上している液体球の上から、さらに液滴を落とす事によって、球を徐々に大きくしていく事ができ、最大約 7 ml の液体球(直径約 24 mm)を作る事にも成功した。大きさの限界は容器の内径に支配されるものであり、大きな容器を使えば、その分大きい液体球を作る事が出来る。我々は、浮上した液体球が安定浮上している様子、および上から水を落として少しずつ球の体積を大きくしていく様子

Fig. 4 Set-up for "magneto-Archimedes levitation" of liquids in a pressurized atmosphere.

をビデオカメラによって撮影することに成功した。Fig. 5は、安定浮上した硫酸銅水溶液(約 1.4 ml)を撮影したものである。写真内の半円形枠はFig. 4中に示したMirror 1の枠であり、真ん中の球状の物体が浮上した硫酸銅水溶液である。

以上のように、前節で考察した磁気アルキメデス浮上法により、汎用小型超伝導磁石でも反磁性・常磁性液体の磁気浮上が可能であることが実証できた。

5. まとめ

これまで、物体の安定浮上は、宇宙での微小重力環境や、超強磁場による磁気浮上などによらなければ実現できないもので、一般の研究機関に普及するような技術ではなかった。しかし、その応用範囲は広く、研究対象として非常に興味深い。今回我々は、磁気アルキメデス浮上法を提案し、実験的にこれを検証した。この方法によれば、市販されている小型の超伝導磁石でも磁気浮上が可能となるほか、今まで不可能であると考えられてきた常磁性体の磁気浮上をも実現できる。

昨今、超伝導磁石は、高温超伝導体の研究と共に急速に普及し、現在では物理・化学ばかりではなく、医学・生物学の分野等でも利用されている。我々が提案する磁気アルキメデス浮上法が、このような超伝導磁石の普及とあいまって、多方面にわたる研究者に利用され、安定浮上状態の利用という新しい分野の普及・確立に貢献する事を期待している。

Fig. 5 Photograph of a levitating ball of CuSO_4 aqueous solution. The diameter of this droplet is 14 mm.

参考文献

- 1) E. Beaunon, and R. Tournier,; *Nature*, **349**, 470 (1991).
- 2) M. V. Berry, and A. K. Geim : *Eur. J. Phys.*, **18**, 307 (1997).
- 3) 田上将之, 淡路智, 茂木巖, 渡辺和雄, 本河光博: 日本物理学会 1997 年秋の分科会講演概要集 第52巻 第2号 第3分冊 460 (1997).
- 4) J. M. Valles, Jr., K. Lin, J. M. Denegre, and K. Mowry,; *Biophys. J.*, **33**, 1130 (1997).
- 5) 本河光博: パリティ, **12**, 28 (1997)
- 6) Y. Ikezoe, N. Hirota, J. Nakagawa, and K. Kitazawa,; *Nature*, **393**, 749 (1998).
- 7) T. B. Jones: *J. Appl. Phys.*, **50**(7), 5077 (1979).