

Title	永久磁石で灰とダイヤモンドを選り分ける？
Author(s)	植田, 千秋; 寺田, 健太郎; 久好, 圭治
Citation	大阪大学低温センターだより. 168 p.16-p.22
Issue Date	2018-01
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/70640
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

永久磁石で灰とダイヤモンドを選び分ける？

理学研究科 植田 千秋、寺田 健太郎
 大阪府立大手前高等学校 久好 圭治
 E-mail: uyeda@ess.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

私たちの身の回りに存在する物質は、そのほとんどが反磁性体や常磁性体（すなわち弱磁性体）に属し、磁場によって生じる作用は微弱だと考えられてきた。そのため、強磁性体やフェリ磁性体のように、磁気利用の対象となることはほとんどなかった。1980年代以後、反磁性体の磁気浮上 [1]、あるいはベンゼン分子 [2]、赤血球 [3]、粘土粒子 [4] の磁場配向などに見られるように、超強磁場下での弱磁性体の磁場効果が、数多く報告されるようになった [5]。これらの効果は、弱磁性体が、数テスラ以上の磁場中で得る磁気的エネルギーによって、ようやく実現する。弱磁性体の広範な磁気利用を促すためには、永久磁石レベルの磁場強度で、新たな効果を見出す必要があるが、そのような試みは必ずしも盛んではない [6]- [8]。

磁場の利用方法として、古くから広く知られている技術の一つに磁気分離がある。従来これは、強い磁性をもつ物質だけに有効とされてきたが、近年は磁気ビーズを付加することで弱磁性粒子の分離・抽出にも成果をあげつつある [9]。これらの分離は、磁場勾配によって発生する磁気力が物質ごとに異なることを利用したもので、このこと自体は、磁性のカテゴリーを問わず、磁気天秤による測定などによって古くから知られてきた（“反磁性”の名付け親であるファラデーも、自作の電磁石をもちいた実験で、初めて反磁性体の反発を報告している）。

私たちは、反磁性の磁気エネルギーによって物体に誘導される力学運動を、単純なエネルギー保存則に基づいて再検討し [10]、その結果、微小重力 (μg) 空間では一般の固体物質が、（その磁性に関係なく）ネオジム磁石レベルの磁場勾配で並進することを報告した。さらにその速度が粒子の質量に依存しない性質を利用して、全ての弱磁性体を磁場で分離できる新たな方法を提案した [11]。ここでは、その予備的な検証実験の結果を報告する。

2. 実験原理

希薄なガスで満たされた μg 空間に、右図に示すような、一方向に単調減少する磁場分布を設定する。そして、その中の1点で質量 m の粒子を静かに開放する。すると粒子には、磁気的ポテンシャルの勾配による磁気力が、その磁性によらず発生し、粒子は並進する [10]。粒子が反磁性体あるいは常磁

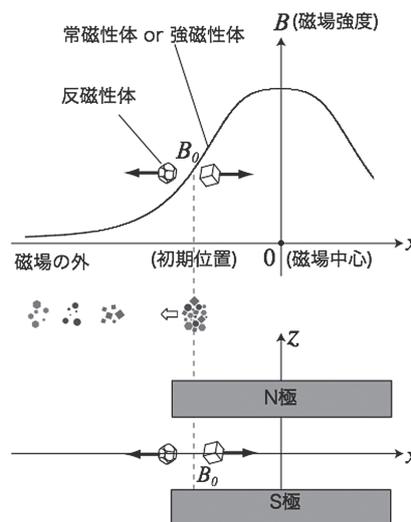


図1 磁場勾配によって物体に誘導される並進運動。

性体の場合には、以下のエネルギー保存則が成り立つ。

$$\frac{1}{2}m\chi_{DIA}B_1^2 + \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}m\chi_{DIA}B_2^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (1)$$

ただし x 軸上の任意の位置 x_1 および x_2 における磁場強度を B_1 および B_2 、粒子速度を v_1 および v_2 とする。反磁性粒子の場合には、磁場が単調減少する $-x$ 方向に並進し、磁場ゼロの空間では、

$$v_T = B_0\chi^{1/2} \quad (2)$$

の終端速度を得る。ただし初期位置での磁場強度を B_0 とし、初期速度は無視できる。すなわち同じ位置で開放した粒子の v_T は、物質に固有の χ のみに依存し、質量によらない。一方、常磁性粒子を上と同じ位置で静かに開放すると、磁場中心に向かって並進し、位置 x_2 における速度は

$$v_2 = \chi^{1/2}(B_0^2 - B_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

となり、並進速度はやはり質量に依存しない。私たちは、これらの関係に基づいて単一粒子の磁化率を、質量計測なしに測定できる原理を提案し、多数の物質でそれを実証した [10]。

上と同じ設定で、単一粒子の代わりに、物質の種類が異なる複数の粒子を、同一位置から開放すると、それらの粒子は、たとえ質量が大小様々であっても、物質の種類ごとの集団に分かれて並進するはずである。そしてそれらを回収することで、弱磁性体の磁気分離が実現する。

3. 実験方法

上記の分離が実現可能かどうかを調べるため、5種類の反磁性物質および常磁性物質の粒子を準備し、単調減少する磁場中の一点で開放する実験を行なった [11]。反磁性物質の試料としては、磁化率が大きく異なる

黒鉛 ($\chi = -52 \times 10^{-7} \text{ emu/g}$)、ビスマス ($\chi = -12.3 \times 10^{-7} \text{ emu/g}$) およびダイヤモンド ($\chi = -5.9 \times 10^{-7} \text{ emu/g}$) の3物質を選んだ。表1に示すように、黒鉛は主要な固体物質の中で反磁性磁化率の絶対値が最も大きい。さらにビスマス、ダイヤモンドの絶対値と合わせると、表1にある物質の χ 値の範囲をほぼカバーする。一方、常磁性粒子としては、鉄濃度が 1.1 mol% (Myanmar産) および 12 mol% (San Carlos USA産) のカンラン石 $[(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4]$ の粒子を用意した。自然界に存在する大多数の岩石の常磁性イオン濃度は、上記試料と同じ範囲にある。粒子のサイズは、並進運動の質量依存性の有無を検証する目的で、直径 0.08~0.2 mm の範囲で変化させた。

実験の前提となる μg 条件は、研究科の実験室内に設置した小型の落下シャフトで発生させる (μg 継続時間 < 0.55 秒) [6]。この装置は、1回の実験コストが非常に低価格で所要時間も15分程度と短いため、今回のように、実現するのに多数回の試行を必要とする研究には適している。これに伴い、観測装置を図2左側の落下ボックス内 (サイズ < 30 cm) に収納できるように、小型化する必要がある。

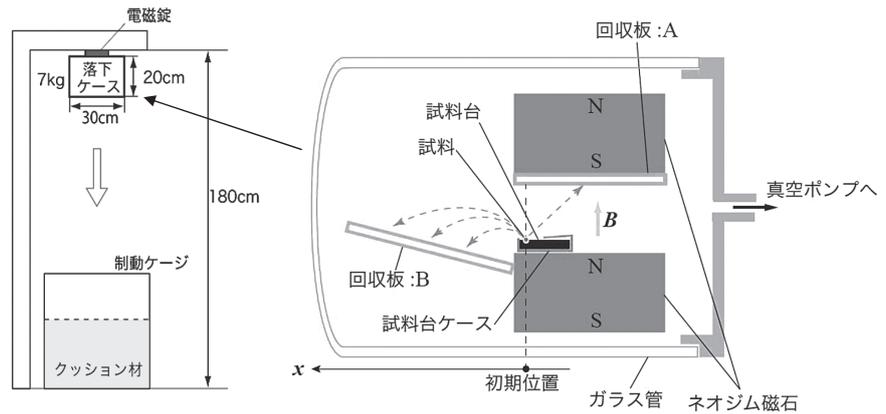


図2 小型の微小重力発生装置 (左) と弱磁性体の磁気分離を観察するための装置 (右) [10,11]。

そのため磁場空間の発生は図2に示すような、2枚のネオジウム磁気プレートからなる磁気回路を用いる。また、上記の反磁性粒子および常磁性粒子を回収する目的で、回収板AおよびBを図中の位置に設置する。そのうえで粒子試料の集団を、図中の初期位置におく。以上のセットアップを透明なガラス容器内に収納した後、媒体ガスの影響を抑える目的で、100 Pa程度に減圧する。微小重力条件下における粒子の並進運動は、ガラス容器の外側から高速度カメラで観察する。

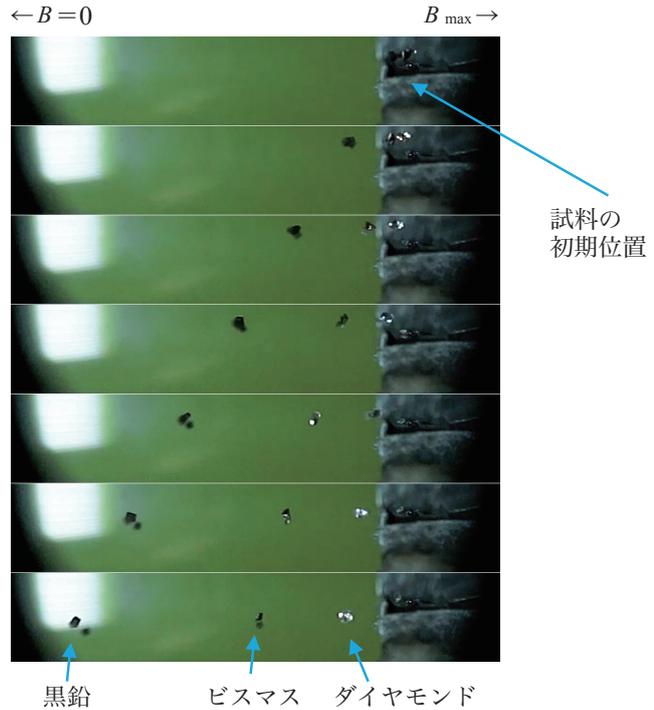


図3 μg 空間で観測した黒鉛、ビスマスおよびダイヤモンド粒子の磁気分離(連続写真の時間間隔0.03秒)。

4. 測定結果

反磁性粒子の並進運動を観測した結果を図3に示す。式(1)から予想されるように、異種粒子の混合体は、初期位置で μg 空間に開放された直後から、物質ごとに集団を作って磁場が減少する方向に並進して回収板Bに達した。常磁性粒子についても、濃度が異なる2つの粒子集団に分かれて並進する様子が観測さ

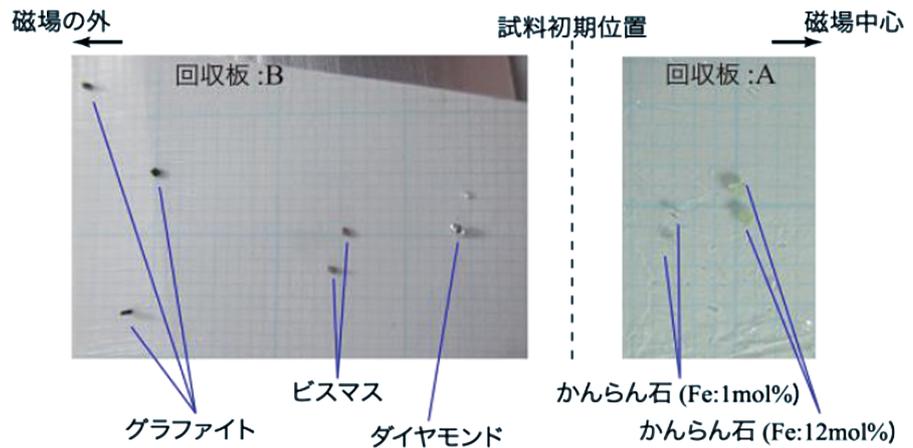


図4 μg 実験後に観察した回収板AおよびB (図2を参照)。

れた (You tube「現存する全物質を永久磁石で分離する」を参照)。実験終了後に2つの回収板を観察した結果を、図4に示す。反磁性粒子に関しては、主要物質の中で最大の $|\chi|$ 値をもつ黒鉛が回収板Bの左端に收容されている。一方、典型的な常磁性体の磁化率を有する2種のカンラン石粒子も、回収板Aの中に収まっている。すなわち自然界に存在するほぼ全ての物質を、(あたかも小さな光学プリズムで可視光を分散するように) 小型の永久磁石で分離する展望が得られた。この分離には、物質固有の磁化率という“新規の”スペクトルが導入される。ただし後に述べるように、この装置の分解能は、まだ実用化には程遠い段階にある。

これと並行して、高速度カメラの映像から粒子の並進速度を求め、これを式(2),(3)に代入することで、粒子ごとの χ 値を得た。図5に示すように、それらの値はいずれも文献値とよい一致を示しており、複数回にわたる繰り返し実験の再現性もよい。これらの結果から、今回観察した粒子の並進

運動は、いずれも式(1)に従っていることが確認された[11]。前述のように、今回、検証実験を行なった物質の χ 値の範囲は、表1に記した主要物質の χ 値の範囲とほぼ重なっており、上記のエネルギー保存則に基づく分離が、実験で観測しなかった他の弱磁性体でも観測できる。将来的には、物質の種類が同定されていない未知粒子の並進速度から、その磁化率を決定し、これを表1の文献値と比較することで、物質の種類を識別することが可能である。

ただし表1で見られる物質間の χ 値の差異($\delta\chi$)は、多くが 10^{-7} emu/g以下のレベルであるのに対し、現行の装置で分離可能な $\delta\chi$ の下限は、図4によるとせいぜい 5×10^{-7} emu/g程度である。従って提案する分離および識別の原理を、固体全体で確認できたとは言い難く、分離能率のさらなる向上が必要である。将来、観測した並進速度から $\delta\chi$ を 1×10^{-9} emu/gの精度で測定できるようになれば、表1の物質の種類が全て同定可能となる。

5. 応用の可能性

①混合試料の分析 自然科学や産業界の諸分野では、異なる物質の粒子集団を対象とすることが多い。そのような試料を分析・評価する場合、前処理として粒子の集団を物質の種類ごとに分離した後、その種類を非破壊で同定する技術が望まれる。しかしこれを効率よくかつ正確に実施する方法はまだ確立していない。有機分子の混合液体に関しては、クロマトグラフィ技術が前処理の方法として導入された結果、有機化学、生化学はもとより医療、環境、食品、衛生

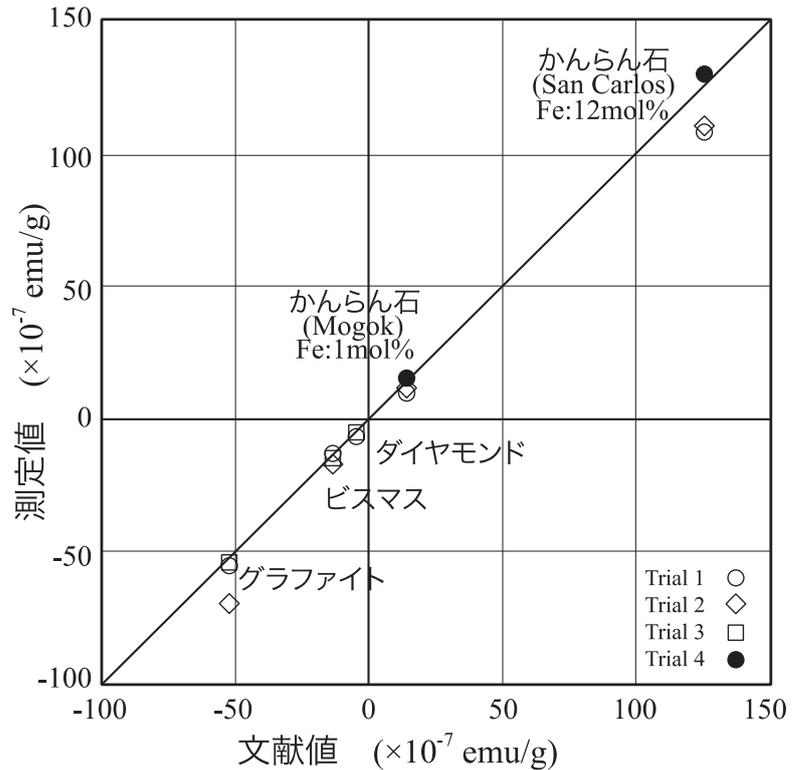


図5 磁気並進運動で得た反磁性体および常磁性体の磁化率 [11]とその文献値 [12]の比較。

表1 主要な反磁性体の磁化率[12]。

Material	χ_{DIA} $\times 10^{-7}(\text{emu/g})$
Graphite : C	-52.0
Bismuth : Bi	-13.4
Methane : CH ₄	-8.00
Anthracene : C ₁₄ H ₁₀	-7.35
Naphthalen : C ₁₀ H ₈	-7.08
Water : H ₂ O	-7.02
Diamond : C	-5.88
Carbon dioxide : CO ₂	-4.77
Cellulose : (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	-4.2
Enstatite : MgSiO ₃	-4
Qurrtz : SiO ₂	-3.7 ~ -4.7
Alumina : Al ₂ O ₃	-3.63
Calcite : CaCO ₃	-3.55
Forsterite : Mg ₂ SiO ₄	-3.3
Silicon carbide : SiC	-3.19
Gold : Au	-1.42

など広範な分野で、分析能力の変革がもたらされた。固体の粒子集団の試料でも同様の技術が確立すれば、分析能力の急速な向上が多くの分野で進むと期待される。その意味で今回の分離技術は、「固体版のクロマトグラフィ」として発展する潜在性を有している[11]。

例えば地球惑星科学の分野では、希少な地球外物質に対する前処理として、重液による比重分離や、溶解／蒸発などの化学処理が、これまで用いられてきた。しかしこれらの方法では、処理過程で残留した汚染物質の除去が難しかったり、希少な試料の大半が消失してしまうなどの問題があった[13]。具体的な例として、アポロ計画で回収した月表土や、はやぶさ1&2で得られる小惑星表土は、そのほとんどが隕石の衝突によって破碎した弱磁性シリケートの細粒であり、今回報告した原理による物質の種類ごとの分離ができる。今後の研究により、試料に適合した条件を見出すことで、汚染フリーで効率のよい試料の抽出が実現する。

図4の回収板で常磁性粒子の位置をみると、同一試料の粒子位置の分散は、濃度が異なる2試料間の距離に比べ十分小さく、粒子間の濃度差が1%程度であれば、現行の装置で分離は可能である。その応用の一例として、始原的隕石の分析が挙げられる。このタイプの隕石に含まれるシリケート粒子は、大体1%～20%の範囲で連続した鉄濃度の分布を持ち、その濃度の差異は、太陽系初期のダスト円盤の温度分布に起因すると考えられている。従って今回の分離技術を試料の前処理として導入することで、今後、上記粒子の生成過程解明につながるデータが得られるかもしれない。

②無人探査機への搭載 広大な太陽系空間に関して精密な物質分布を知るには、ボエジャーやカッシーニのミッションのように、広範囲の空間にわたって探査機を飛行させながら、多数の観測点で分析を行い、そのデータを地球に送信する必要がある。このような探査機に固体粒子の分析装置を搭載する場合、1) 小型で力学的強度が強いこと、2) 大電力を必要としないこと、3) 動作原理が単純で、その科学的根拠が十分検証されていること、4) 可能であれば試料を非破壊で分析できること、などの条件が求められる。今回開発した図3の装置は、上記の条件をほぼ満たしており、将来的には、質量分析計や赤外分光計などの既存の装置を補完できる可能性がある。一方で、この装置はドローンや移動型ロボットにも搭載可能であり、地球表層の危険地帯の無人探査などにも応用できる。

③資源探査・リサイクル 先に述べたように、これまで磁気分離は、強磁性やフェリ磁性を含むごく一部の資源を抽出するのに利用されてきたが、今回の装置により、今後はレアアースや貴金属など、様々な希少資源の抽出にも適応可能となる[11]。すなわち資源の原石を単物質の粒子に粉碎し、磁気分離にかける単純な工程で抽出が可能となる。この技術は都市鉱山を対象としたリサイクル技術としても応用できる[11]。また低いエネルギー消費で、磁場による効果を最大限引き出せる点で、省エネルギー化の推進という社会的要請にも合致する。

③星間空間における物質分化 宇宙空間には、様々な強度の磁場と、ナノ～数ミクロンの様々な固体微粒子（グラファイト、ダイヤモンド、ケイ酸塩、金属粒子）が遍在している[14]。しかしながら、これまでの宇宙／惑星科学では、主に磁場とガス（実際には、イオン化したガス）の相互作用が注目され、磁場と固体粒子との相互作用については十分に論じられて来なかった。また、一般に、宇宙空間や星形成現場における有機物/ケイ酸塩鉱物/金属球などの物質分布は、物質の揮発性/難揮発性に起因する「温度勾配」に伴う現象とされてきた。これに対し、本研究で得られた知見は、星

間の磁場勾配によっても、固体粒子の有意な分離が起こりうることを示唆するもので、宇宙空間における物質分布機構に、新たな視点を提供する可能性がある。地上の実験室での一連の測定は、そうした可能性を考察をするうえで、数値的な根拠を与える。これと並行して、今後の宇宙観測技術の進展により、空間分解能の高い磁場分布のデータが得られることが、期待される。

6. 終わりに

体積力による並進運動が物体の質量に依存しない性質は、これまで地球表面では、重力による運動だけで認識されてきた。しかし広大な宇宙空間では、磁気力についてもこの性質が広く観測され得ることを、(1)式は示唆している。弱磁性体や常磁性体は、磁場による作用が微弱であるにも関わらず、これらを磁場でコントロールしようとするニーズは強く、そのため磁性イオンの付加などによるドラッグデリバリー[15]や磁気分離の技術[9]が進展している。従って将来、同様の機能が、磁性イオンを付加することなく、しかも永久磁石によって実施可能になれば、弱磁性体全体の磁気応用がさらに進展するかもしれない。なお並進運動以外に、固体粒子が磁場中で起こしうる運動として、異方性エネルギーによる磁気容易軸の回転や整列が挙げられる。私たちは、文頭に述べた磁場配向実験を μg 条件下で進めた結果、大多数の弱磁性体が、磁化率の異方性 $\Delta\chi$ のために、低磁場で整列する可能性を示した[6][10]。この運動も、その原因である磁氣的トルクが体積力によって生じるために質量非依存の性質を示すが、その詳細は、弱磁性体全体の挙動が明らかになったのちに、改めて報告したい。

参考文献

- [1] for example, Kitamura, N. , Makihara, M., Sato, T., Hamai, M., Mogi, I., Awaji, S., Watanabe, K. & Motokawa, M. Glass spheres produced by magnetic levitation method. *J. Non-Crystalline Solids* **624**, 293–295 (2001).
- [2] Yamagishi, A. & Date, M. Diamagnetic “Curie-Weiss law” and molecular interactions in organic liquids. *Physica B* **155** 429–432 (1989).
- [3] Takeuchi, T., Yamagishi, A., Higashi, T., Yamagishi, A. & Date, M. High field magnetic orientation of red blood cells. *Physica B* **201** 601–605 (1994).
- [4] Uyeda, C., Takeuchi, T., Yamagishi, A. & Date, M. Diamagnetic Orientation of Clay Mineral Grains. *J. Phys. Soc. Jpn.* **60** 3234–3237 (1991).
- [5] for example, G. & Dransfield, K. Biomolecules and polymers in high steady magnetic fields. F. Herlach (Ed.), *Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and their Applications*, Springer-Verlag, New York 143–204 (1985) ; Brant, E. H. Levitation in physics. *Science* **243**, 349 (1989).
- [6] Uyeda, C., Takashima, R. & Tanaka, T. Magneto-rotation of nonmagnetic micro- crystals caused by diamagnetic anisotropy. *Appl. Phys. Lett.* **28** 094103 (2005).
- [7] Geim, A. K., Simon, M. D., Boamfa, M. I. & Heflinger, L. O. Magnet levitation at your fingertips. *Nature* **400**, 323–324 (1999).

- [8] C. Uyeda, Takashima R and Abe T, Magnetic oscillation of crystal without spontaneous moment caused by single-ion anisotropy achieved by ahorseshoe magnet above 1000 K, *J. Magn. Magn.*, **310** 536- (2007).
- [9] for example, K. Sekiya, H. Kuwahara, Y. Yoshida, S. Igarashi, N. Nomura, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, Study on Decontamination of Contaminated Soils by Magnetic Separation, *IEEE Trans Appl. Superconductivity* 24, 3700205 (2014).
- [10] Uyeda, C., Hisayoshi, K. & Kanou, S., Magnetic Ejection and Oscillation of Diamagnetic Crystals Observed in Microgravity. *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 064709 (2010).
- [11] K.Hisayoshi, C.Uyeda, K.Terada, Magnetic separation of general solid particles realized by a permanent magnet, *Sci, Rep.*, 6 38431 (2016).
- [12] R. Guputa, “Landort Bornstein” New Series II 445 (1983).
- [13] Matsuda, J.-I., Amari, S., & Nagao, K. *Purely physical separation of a small fraction of the Allende meteorite that is highly enriched in noble gases : Meteoritics & Planetary Science* **34** 129-136 (1999).
- [14] Whittet D. C. B., *Dust in the Galactic Environment” (Institute of Physics Publishing Bristol) 110, (1992).*
- [15] Rosen, H & Thierry Abribat, A. The rise and rise of drug delivery, *Nature Reviews Drug Discovery* 4, 381-385 (2005).