

探査機搭載に向けた単一粒子の非破壊同定システムの開発

植田千秋、久好圭治（阪大理）

Nondestructive Method to Identify the Material of Single Dust Particle Based on Its Magnetic Ejection and Magnetic Oscillation

Chiaki Uyeda and Keiji Hisayoshi

Institute of Earth and Space Science, Graduate school of Science,

Osaka University Toyonaka Osaka 560-0043

E-Mail: uyeda@ess.sci.osaka-u.ac.jp

Abstract:

A new principle to identify material of a single particle is proposed which is based on diamagnetic susceptibility χ_{DIA} obtained from magnetically induced translation of the grain. When a grain is floated in an area of monotonously decreasing field by $\mu\text{ G}$, it will be ejected toward the area of zero field¹⁾; this type of translation has not been recognized before for ordinary diamagnetic solid. Provided that field-intensity at initial sample position is identical, terminal velocity v_T of the sample at $B=0$ is independent to mass of particle; v_T is uniquely determined by intrinsic χ_{DIA} of the material. Unlike the conventional methods to measure χ_{DIA} , the present method using $\mu\text{ G}$ condition is free from a back ground signal of sample holder, and from mass measurement of sample. Provided that the sample is observable, χ_{DIA} is detected for limitlessly small sample; material identification is also realized by comparing the obtained χ_{DIA} value with the published values. Solid samples collected in various space missions are expected to contain different types of grains with different origins. Therefore, material identification of individual grain is desired prior to a refined isotopic, chemical or optical analysis. A compact $\mu\text{ G}$ system is newly developed in the present work for the purpose of introducing the proposed system in an ordinary laboratory. It is noted that the compact-sized system will be the basis to construct an apparatus that can be loaded on a space probe to investigate dust particles.

Key words; magnetic ejection, magnetic oscillation, magnetic orientation, chamber type $\mu\text{ G}$ drop shaft, diamagnetic susceptibility, diamagnetic anisotropy

磁気放出、磁気回転振動、室内型 $\mu\text{ G}$ 装置、反磁性異方性、磁気配向、磁場配向

1. はじめに

近年、様々な分野において単一粒子ごとの精密分析が研究を進める上で重要な課題となりつつある。その際、分析の前段階として各粒子の物質同定を非破壊で効率よく実施しておくことが望まれる。このような同定を必要とする一例として、外惑星領域における揮発性ダストの探査が挙げられる。広大な領域にわたる正確な物質分布を知るには、粒子ごとの物質同定をミッションの現場

で効率的に進め、物質種ごとのダストの存在頻度を、その場でデータ化することが求められる。現在、小規模な装置で、そのような同定を全物質に渡って効率的に実施する手法は、必ずしも確立していない。ここでは一般の反磁性体に作用する力学的運動によって、そのような同定を実現する試みについて報告する。

静磁場の作用で反磁性体に顕著な力学的効果を誘導するには、これまで数テスラー以上の強磁

場が必要であると考えられてきた。当グループでは、 μ G条件下の希薄ガス空間に粒子を浮遊させ、これに実用的な低い磁場 ($B < 0.8$ T) を印加することで、粒子の並進&回転振動が誘導されることを初めて報告した¹⁾。さらにそれらの運動から得た反磁性磁化率 χ_{DIA} (およびその異方性 $\Delta \chi_{DIA}$) を文献値と比較することで、物質を同定する新たな手法を提案した⁵⁾。磁場勾配力は、物質を構成する個々の原子に起因する体積力である。このため、共通の磁場分布の中で、並進運動の加速度は物質固有の χ_{DIA} のみに依存し質量に依存しない。

既存の磁化測定法で微小試料を測定する場合、試料サイズの減少と共に計測が困難となる。これに対し μ Gを用いた今回の方法では、上記の困難の影響を原理的に受けないため、運動が観測可能な限り、無制限に小さな粒子が測定できる。さらにそれに基づく同定も可能である⁵⁾。

今回、サブミリサイズの反磁性試料で上記の磁気並進運動を始めて実現し、前述の質量非依存性を実験的に確認した。これらの結果に基づき、外惑星探査機への搭載に向けた装置の小型化の可能性や、性能チェックのための宇宙実験の必要性について検討する。

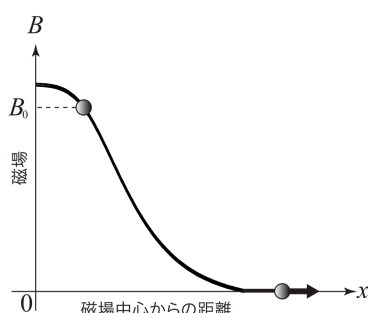


Fig.1 Schematic illustration showing energy conservation expected for a diamagnetic particle released in monotonously decreasing magnetic field.¹⁾²⁾⁵⁾ Field-induced energy at initial position ($B=B_0$) is completely converted to kinetic energy outside field ($B=0$). According to eq.(1), terminal velocity v_T is determined by B_0 and intrinsic χ_{DIA} of material; it is independent to mass m of

2. 同定の原理

一般に χ_{DIA} および $\Delta \chi_{DIA}$ は、物質を構成する個々の原子、分子の半径および電子数に依存する事が知られている。そのため反磁性体は、それぞれ固有の χ_{DIA} および $\Delta \chi_{DIA}$ (いずれも単位質量当り) を有している (別表参照)⁷⁾。物質の

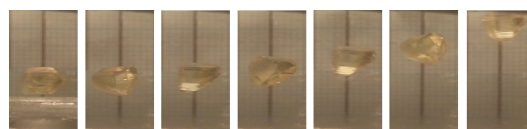


Fig.2 Time variation of sample position observed for a mm-sized apatite crystal released in a microgravity area^{1,2)} Pictures are arranged in sequence of time from left to right (time interval 0.03s). Sample is set on a sample holder in the first frame; then it was released in an area of static field monotonously decreasing in the vertical direction. Magnetic field (0.8T) is directed along horizontal direction.

大半は反磁性体であるため、単一粒子に関してこれらの値を検出できれば、非破壊かつ簡便に物質同定が実現する⁵⁾。 χ_{DIA} および $\Delta \chi_{DIA}$ の検出には、上述のように、静磁場の中で粒子に誘導される運動を利用する。すなわち (+x 軸方向に) 単調減少する磁場勾配の作用のみが有効な μ G 条件下に、初速度ゼロ開放された質量 m の反磁性体はエネルギー保存則

$$-\frac{1}{2}m\chi_{DIA}B_0^2 = \frac{1}{2}mv_T^2 \quad (1)$$

に従って Fig.1 のように磁場の外へ放出される。ただし試料が初期位置で有する磁気的エネルギーは、磁場強度を B_0 として $-\frac{1}{2}m\chi_{DIA}B_0^2$ で表される。一方 v_T は磁場の外で終端速度を表す。上式によると、磁場分布が共通の場合、 v_T は χ_{DIA} のみに依存し m では左右されない。この特性を検証する目的で、先に MGLAB および AIST において、様々な結晶の並進運動を μ G 条件で観察した¹⁾²⁾⁵⁾。そのうちアパタイト結晶の結果を Fig.2 に示す。

一方、均一磁場中で B に対する結晶の磁気的安定軸の角度 θ は回転の運動方程式

$$I(d^2\theta/dt^2) = -m\Delta\chi_{DIA}B^2\sin 2\theta \quad (2)$$

に従って回転振動した^{1,7)}。その周期から m を測定することなく $\Delta\chi_{DIA}$ が得られた。⁷⁾ 例えば水晶と石英ガラスのように、同一組成で構造が異なる物質の場合、 χ_{DIA} の差のみで物質を区別するには、後述のように χ_{DIA} の精度向上が必要である⁷⁾。従って現状の χ_{DIA} 精度で実用的な同定の性能を確保するには χ_{DIA} および $\Delta\chi_{DIA}$ 両方の検出が重要となる。回転振動の測定についての詳細は文献 7) を参照されたい。

既存の磁化測定では、1) 試料ホルダーからの妨害信号、2) 試料の m 測定、という問題点のため、単一の微小試料の測定が困難であった。今回の方法は上記 2 つの制限を受けず、無制限に小さい試料の磁化測定、およびそれに基づく物質の同定が可能となる。

3. 室内型落下シャフトに基づく磁化測定装置の構築

上記の磁気並進運動に基づく磁化測定法を、ルーチンの分析法として実用化する場合、現行の大規模 μG 施設の利用は、作業負担の観点から必ずしも適さない。仮に並進に要する μG 時間を従来の実験より短縮できたなら、通常の実感室の落下シャフトを用いても磁化測定が実施できる。シャフト長が 200 cm 以下の場合、大気中の落下であっても比較的良質の μG が得られることが知られている。この場合 μG 時間は 0.6 秒以下となる。そこでこの時間内の並進運動から χ_{DIA} が検出できるよう、磁場分布や試料撮影の条件を予備実験で見出した。それらの結果に基づいて Fig.3 に示す室内型の μG 発生装置、および磁化測定システムを開発した。

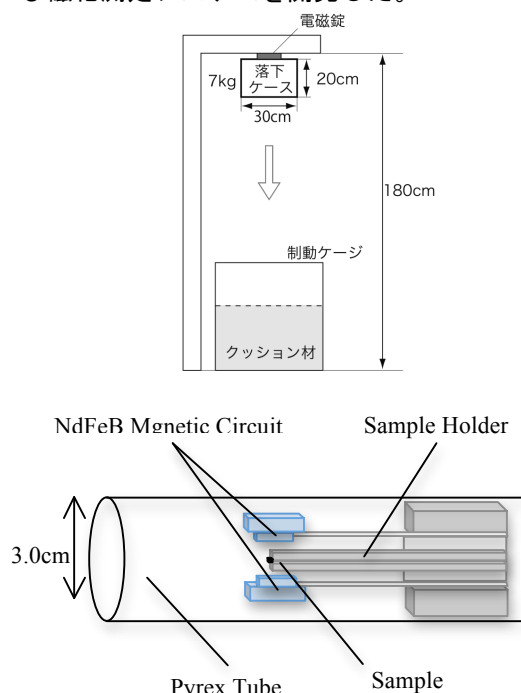


Fig.3 Chamber-type drop shaft to observe magnetic ejection; duration of μG is below 0.6s.⁵⁾ Volume of drop box was as small as 100 cm³, weight was below 1kg. The compact size of apparatus was realized by introducing a small NdFeB magnetic circuit (see lower portion of figure, $B < 0.5T$). A particle reaches terminal velocity when $> 2 \times 10^{-7} \text{emu/g}$. Identification of a single grain is realized for most of the materials. The compact system will serve as a basis to construct a analyzer to be loaded on a space probe to investigate primitive dust particles. Because of its simplicity, the compact μG drop shaft was recently adopted in an educational program performed at a senior high school, adding a 2 fold capsule system.⁸⁾

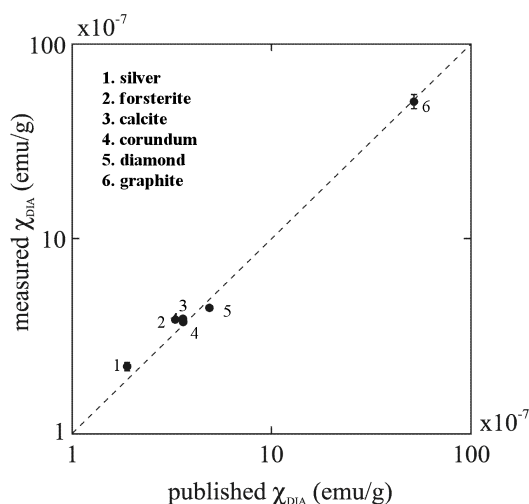


Fig.4 Comparison between published χ_{DIA} values and the values obtained by field-induced translation, for mm-sized samples¹⁾

従来の磁化測定では、最低でも直径 30 cm 以上の大型の磁場発生装置が用いられてきたが、Fig.3 に示すように、今回は磁場発生部として、 $\phi 3 \text{cm}$ 程度の小型 NdFeB 磁石を導入した。これにより落下ボックスの小型化が実現したが、これは後述のように探査機搭載用の同定装置を開発する上でも重要な要素となる。

これまでの磁気並進運動の結果から試算すると、最も小さい χ_{DIA} を有する Au や In の場合でも、0.6 秒間で 0.3 cm 程度の並進が見込まれ HV カメラでの観測が可能となる（但し磁場中心の強度 $\sim 0.7 \text{T}$ ）。従って（室内対応の）小型の落下カプセルに収納できる小型の磁気回路を導入できれば、既存の MGLAB での規格を大きく変更することなく、ほぼ全ての反磁性物質について χ_{DIA} 測定が可能と期待される。

4. 測定による並進運動特性の検証

先に MGLAB および AIST で様々な反磁性結晶の磁気並進運動を観測し、その加速度から χ_{DIA} 値を得た。その結果を Fig.4 に示す。測定値は $2.0 \sim 50 \times 10^{-7} \text{emu/g}$ の広範囲で文献値と一致した。この範囲は現実に存在する物質の χ_{DIA} 値の値をほぼカバーしており、(1) 式から予測された運動特性が、現存するほぼ全ての物質について成り立つことが示された。

Fig.4 以外に検証が必要な事象として、(1) 式から導かれる v_t の質量非依存性が、重要なポイントとなる。今回の測定では、黒鉛および酸化マグネシウムについて、 $m = 10^{-1} \sim 10^{-4} \text{g}$ の範囲で、文献値どおりのほぼ一定の χ_{DIA} 値が検出され、上記の質量非依存が確認された。

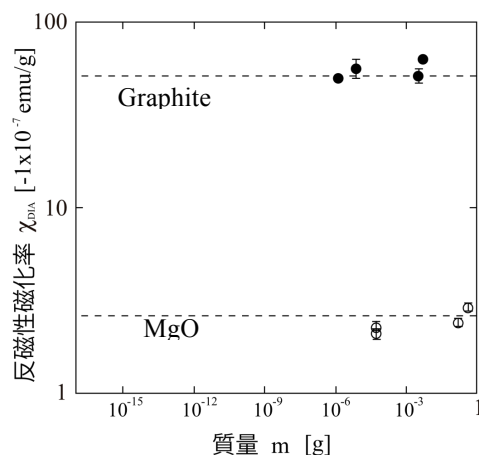


Fig.5 Relationship between χ_{DIA} values obtained by field-induced translation and mass m of sample⁵⁾.

今後 μm および nm レベルの試料でも、Fig. 4 および Fig. 5 と同様の測定を実施することで、これらの領域での磁化測定および物質同定が可能であるか否かが検証される。

5. 宇宙実験の必要性

既存の χ_{DIA} 値 (文献7, Table2) は3桁の精度で値が報告されているのに対し、磁場放出による測定では、精度が2桁に留まっている。その最大の原因は、(1)式における B_0 のおよび v_T の精度が低いことによる。即ち地上実験では、1秒前後の限られた μG 時間内に、試料を磁場ゼロの領域まで並進させる必要がある。このため、磁場勾配が大きい空間に試料をセットすることで、試料に大きな初速度を与える必要がある (Fig.1 参照)。その結果セットされた試料の進行方向・前面および後面の間で、有意の磁場強度の差異が発生してしまう。さらに μG 時間が短いため、磁場強度 B が十分ゼロ近傍に減衰した領域で終端速度 v_T が計測できていない。

宇宙実験により200秒以上にわたって単一の並進運動が観測できれば、現在よりも1桁以上小さい磁場勾配を持つ初期位置から試料を開放できる。さらに B が 10^{-5}T のレベルに達した領域で v_T を計測することが可能になる。これらの改善によって、 χ_{DIA} の精度を3桁に向上することが、これまでの測定結果から試算される。前述の磁化率データ表⁷⁾によると、既存の物質の χ_{DIA} は3桁まで計測することで、ほぼ完全に識別できる。従って磁気並進運動による同定の機能を最大限に引き出すには、 μG 時間の長い宇宙環境での実験が望まれる。これはミッションの現場における探査機搭載装置の機能や性能を検証する上でも重要な意味を持つ。

6. 探査機搭載に向けた課題

最初に述べたように、外惑星におけるダスト探査では、広範囲にわたる空間のサーベイを効率的に実現する必要があり、そのためには現地における効率的なダスト同定システムを開発する必要がある。搭載するダスト同定装置に必要な条件としては、1) 装置が小型であること、2) 測定原理が単純で科学的根拠が明確であること、3) サンプル非破壊であること、などが挙げられる。

Fig. 3に見られるように、小型のNdFeB磁石の導入により小型装置による粒子同定が実現しつつある。今回の小型化は、室内型の落下ボックスのサイズに対応したもので、磁場空間および磁気回路の大きさ、映像記録システムおよび排気システム等に関してさらなる小型化が可能である。今後これを進めて、探査機に搭載可能なサイズを達成する必要がある。

今回提案した同定法は、探査機以外にも材料科学の諸分野で、単一粒子の同定を効率よく実行する手段となり得る。物質の同定には、これまで密度、赤外スペクトル、化学組成あるいはX線回折など様々な物性計測が用いられてきた。研究対象の試料のサイズが小さくなり分析が難しくなる中で、 χ_{DIA} 、 $\Delta\chi_{DIA}$ による識別は、微小試料にも有効な原理の一つとして、検討する価値があると考えられる。Fig.4に示したように、この方法では現存する物質の範囲で有効性が確認された。即ち合成された試料あるいは自然界の試料の両方に関して、粒子同定に活用することができる。地球科学の分野では、地球表層の堆積物や始原的隕石を構成する粒子を非破壊で同定する手法として期待される。例えば前世代の恒星を起源にもつとされる隕石中のプレソーラー粒子の同定や、堆積岩中の生物起源の鉱物粒子の探索もその例に挙げられる。

参考文献

- 1) Uyeda, C., Hisayoshi, K. and Kanou, S.: *Jpn. Phys. Soc. Jpn.* 79, 064709 (2010).
- 2) Uyeda, C., Hisayoshi, K. and Kanou, S.: *J. phys.* 48, 2893 (2010).
- 3) Gupta, R.: "Landolt Bornstein" II 445 (1983).
- 4) M. Suwa et al: *Anal. Chem.* 74 (2002) 5027.
- 5) Hisayoshi, K., Kanou, S. and Uyeda, C.: *Phys.: Conf. Ser.*, 156 (2009) 012021.
- 6) Iwakami, T. & Nokura, M.: *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 23 (2006) 186.
- 7) 本シンポジウム予稿集: 「体積力を用いた単一粒子の物性測定システム」植田千秋 他
- 8) 日本地球惑星科学連合 2011 年大会」public session 高校生ポスター発表, 『実験室内で使用可能な簡易型微小重力実験装置の製作』大阪府立春日丘高等学校 (定)