

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654123

研究課題名(和文) 微小重力下の磁気誘導運動に基づく単一粒子の磁化およびその異方性の検出

研究課題名(英文) Identification of Single Particle by Observing Dynamic Motions Caused by Magnetic Volume Force.

研究代表者

植田 千秋 (Uyeda, Chiaki)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50176591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 300,000円、(間接経費) 90,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では磁場勾配力による並進運動を利用して、自発磁化を有さない一般の物質の磁化を測定する方法を確立した。具体的には微小重力条件下で、磁場強度が単調減少する空間に反磁性粒子を解放し、それらが磁場ゼロの方向へ並進する速度を解析することで、磁化率を検出した。上記の運動は磁気体積力に由来するため、磁場の外での終端速度は粒子質量に依存せず、磁化率のみに依存する。この速度から磁化率を検出し文献値と比較することにより、物質の種類を非破壊で識別することができる。磁場による物質同定の適応範囲はこれまでの自発磁化を有する一部の物質に限られていたが、今回の計測により一般の固体物質に拡張される展望が得られた。

研究成果の概要(英文)：A new method to identify the material of a small grain is proposed which is driven by magnetic volume force. By comparing the measured susceptibility of a particle by their published values, material of the particle is identified. Solid materials are generally obtained as an ensemble of grains with different elemental composition with heterogeneous origins. At an initial stage of investigating this type of material, it is important to extract and identify the material of individual particles included in the ensemble. Such method should be non-destructive and easily performed. The present results achieved on sub-millimetre-sized diamagnetic grain have a large significance as a step to realize the extraction and identification of micron-sized grains that compose the primitive materials. The technique described is useful in the search for new types of pre-solar grains that are not identified as yet.

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：反磁性異方性 微小重力 磁気体積力 磁場勾配力 ダスト整列 磁化測定

1. 研究開始当初の背景

磁化測定は今日 SQUID や VSM を用いて行うことが一般的である。しかしこれらの方法では、試料サイズの減少とともに、試料ホルダーからのバックグラウンド信号の寄与が顕著となる。また、試料の質量測定が不可欠であるが、これも $10 \mu\text{g}$ 以下では実施が難しい。そのため微小粒子の磁化測定では、多数の粒子の凝集体を作成して測定を実施するが、試料のサイズ依存性が顕著な場合、この方法は必ずしも有効でない。磁気異方性 についても、上記2つの問題のため、これまで単一粒子試料の測定は行われて来なかった。

一般に銀河空間の磁場ベクトルの方向は、星間ダストの磁場整列に起因する可視および赤外領域での偏光に基づいて推定される。その観測結果に基づいて恒星および惑星の形成過程への磁場の寄与が考察されてきた。ダスト整列は自然界で最も普遍的に発生している磁場整列現象である。しかし銀河空間における平均の元素組成を考慮すると、星間ダストは反磁性または弱い常磁性状態にあり、一方で磁場強度は微弱である。このため今日の磁性物理学で知られているメカニズムで、観測されるダスト整列を説明することは難しい。当研究室ではダストが磁化率異方性 によって整列する可能性を、室内実験の結果に基づいて研究してきたが、その遂行にはダストサイズに近い微小結晶で を検出できる手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、微小重力 (μG) 条件下の希薄媒体中に単一粒子浮遊させたのち、これに単調減少する磁場を印加することで、粒子に勾配力による並進運動を誘導する装置を開発する。そして任意の試料位置 x で観測した試料速度 $v(x)$ と磁場 $B(x)$ の関係から、単一粒子の磁化率を得る新規の原理を確立する。上記の運動において、粒子の磁気的エネルギーと運動エネルギーの保存則が成立するならば、磁場の外での粒子の終端速度は、(共通の磁場勾配の中では) 質量 m に依存せず物質固有の磁化率 あるいは飽和磁化 M (いずれも単位質量当り) に依存する。そこで様々な強磁性、常磁性および反磁性体に関して、その磁場勾配運動を $20 \mu\text{m} \sim 5 \text{mm}$ のサイズ範囲で観測し、並進運動が m に依存しないことを検証する。上記の結果に基づき、固体物質全体について物質同定を実行する手法を確立する。提案する方法は非破壊かつ簡便である点で、実用化されるポテンシャルを有する。本研究を遂行する場合、試行錯誤の μG 実験を繰り返す必要がある。このため簡易 μG 発生装置を基盤とした測定装置の構築をめざす。これと並行して μG 空間に sub-mm レベルの粒子結晶を μG 空間に浮遊させ、その磁

氣的安定軸を磁場により回転振動させることで、結晶の磁気異方性 を検出する方法を、新たに開発する。これにより星間ダストが地場整列する機構を、実験的に解明する基盤 w を確立する。

3. 研究の方法

実験装置は、これまでの簡易型 μG 実験で実績のあるシステムをベースにして設計・製作を進めた。即ち単調減少する磁場勾配の領域に、上記の可能式試料台を配置する。 μG 実験に先立ち、粒子 (サブミリサイズ) を、試料台上にセットしておき、 μG 開始直後に試料台を動作させて試料を磁場空間に開放する (図1)。本研究では μG 持続時間を一般の実験棟内で実施可能な0.6秒以内に設定する。落下式 μG 発生装置の場合、落下シャフトの高さ160cm以内では、空気抵抗の寄与が小さく比較的良質の μG が得られることが明らかとなっている (図2)

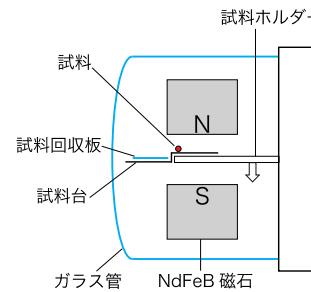


図1 磁場勾配力による並進運動を観察するための装置の概略図。この装置を図2に示す小型落下シャフト対応の落下ボックス(50x40x30cm)の中に設置する。

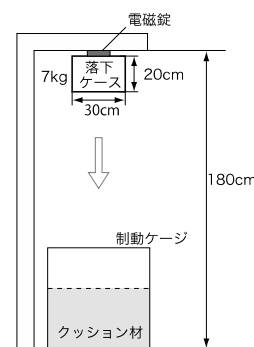


図2 通常の実験室内に設置可能な小型落下シャフト。このシャフトの導入で、 μG 条件の印加が従来より格段に容易となった

製作する観測装置の条件として、(a)短いシャフト長に対応した小型 drop box (図2参照) に収納できる、(b) ~ 0.5 秒の μg 時間内に目的とする力学運動を完了させる、の2点が挙げられる。まず(a)を解決する目的のため、磁場発生部としてネオジウム磁石プレ

ート2枚からなる小型の磁気回路を製作した。この磁気回路の小型化によって、 $B=B_0$ から $B \sim 0$ の運動空間の距離が(従来の50cmから)約2cmに縮小し並進運動の空間を drop box内に収めることができるようになった。さらに粒子が終端速度に到達するまでの所要時間が、上記の距離の縮小によって、0.5秒以下になった。

並進運動の実験で、図中のsample stage上で磁場勾配力が最大になる位置 (Fig.1の位置B)に、試料をセットする。その後、全体をガラス製の真空チャンパー内に収め、内部を ~ 100 Paまで減圧する。準備が完了したdrop boxを実験室の天井から電磁石で吊るして保持する(図2参照)。その後、電磁石の印可電流を遮断することで、boxを自由落下させる。落下開始直後にbox上面の受光装置に向け赤外線信号を送信することで、sample stageが下降させる。これにより、試料は初速度 ~ 0 で磁場勾配中の微小重力空間に開放される。これ以後の試料の運動を、記録用カメラで撮影する。

既存の磁気異方性 Δ の計測法では、mmサイズより小さい試料で弱磁性の異方性を検出することは困難である。磁気異方性を計測する標準的な手法であるトルク法では、水平磁場の中に試料をファイバーで吊し、発生した磁気異方性トルクとファイバーのネジレ復元トルクをつり合わせることで、異方性を検出する。この方法による測定感度は、ネジレ復元トルクで限定されてしまう。

そこで本研究では磁場による磁気安定軸の回転振動から検出する[3]。回転の運動方程式は、安定軸と磁場 B のなす角を θ とすると $I \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = -m\Delta\chi_{DIA}B^2 \sin 2\theta$ で表される。ここで、 I は粒子の慣性モーメント、 $\Delta\chi_{DIA}$ は、2つの主軸間の磁化率の差(単位質量あたりの値)である。安定軸の調和振動の周期は B が一定ならば m に依存せず $\Delta\chi_{DIA}$ と $I/m(r^2)$ のみで決定される。従って B と試料半径 r が与えられていれば、観測で得た値だけから、 $\Delta\chi_{DIA}$ を求めることができる。即ち並進運動から $\Delta\chi_{DIA}$ を求める場合と同様、 m 計測を必要としない。回転振動の実験では、 r の長さを μ G持続時間0.6秒以下に抑える必要がある。この条件は、試料サイズをsub-mmレベルにすることで試料の回転半径が減少し、 $r < 0.5$ 秒以下とすることができた。(磁場強度 ~ 0.5 T, 異方性 $> 10^{-8}$ [emu/g]の場合)。これにより最低でも1周期分の運動が観察

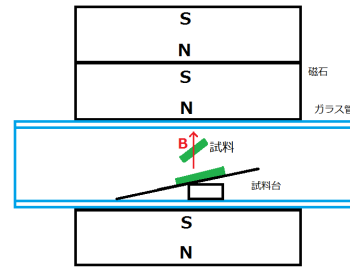


図3 磁気異方性を検出する目的で試料の回転振動を観測する装置の概略図

でき、振動が磁気異方性に起因していることを確認される。また図3の装置を図2のbox内に収納する必要があるが、これは(並進運動の実験同様)小型のネオジム磁石プレート2枚からなる磁気回路を導入することで、磁場空間を従来の10cmから1cm以下に減少することで実現した。実際の実験では、試料を均一磁場領域の中心にセットし(図3参照)、その後は並進運動の場合とほぼ同じ手順で進めた。

粒子運動の記録には並進運動、回転振動ともハイビジョンビデオカメラ(Panasonic HDC-SD3-S)あるいはハイスピードカメラ(CASIO EX-F1)のいずれかを、それぞれの空間分解能および時間分解能の特性を考慮して使用した。これらのカメラで撮影された映像を連続の静止画に変換し、試料の運

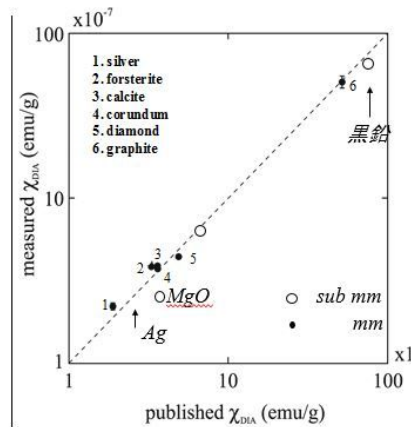


図4 磁気並進運動で得た磁化率と文献値との比較

動を解析した(図4参照)。従来の大型落下施設での実験と比較して、残留Gが増加しているが、今後落下boxを2重にすること等により、 10^{-2} Gの残留Gを 10^{-3} G程度に改良できると期待される。

4. 研究成果

1) 単一粒子の磁化測定 図2の装置で観測した並進運動の観測の例を図4に示す(試料: 直径100 μ mのグラファイト)磁場勾配のある領域では、磁場が単調減少する方向への加速度を有する。上図から得ら

れた試料位置と速度の関係を図5に示す。試料の速度 v がエネルギー保存則に従って、磁場ゼロの点で最大になっているのが確認される。粒子の反磁性磁化率 χ_{DIA} は、試料の初期位置の磁場 B_0 と、 $B=0$ の位置での速度 v_R から簡単に求められる。

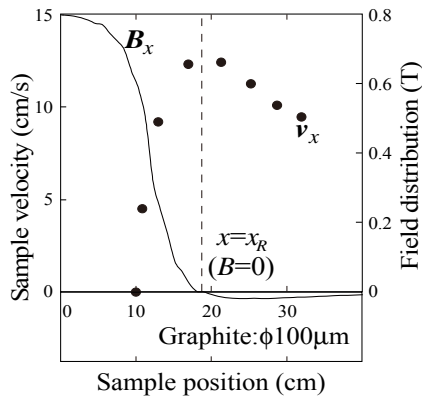


図5 磁気並進運動の観察から得た試料速度と磁場の関係

同様の計算法で種々の物質の粒子について、その並進運動から得た χ_{DIA} を図6を示す。測定値は、 $2.0 \sim 50 \times 10^{-7} \text{ emu/g}$ の広い範囲で文献値と矛盾しない。図の χ_{DIA} の範囲は、現存する物質の χ_{DIA} の範囲をほぼカバーしている。

さらに計測した χ_{DIA} と質量 m との関係を、図7に示す。黒鉛、Bi および MgO について、実験誤差を超える χ_{DIA} の m 依存性は確認されず、エネルギー保存則の有効性が物質全体で検証された。今回開発した図1-2の装置で、単一粒子の χ_{DIA} 測定が、 $10^{-1} \sim 10^{-6} \text{ g}$ の範囲で可能であることが確認された。についても同様の手法で測定法の有効性が確認された(文献[1][3][7]参照)。今回、sub-mmサイズの結晶粒子で確立した χ_{DIA} および $\Delta \chi_{DIA}$ の計測技術は、今後、 $\mu\text{m} \sim \text{nm}$ サイズの粒子での計測を実現する上で重要な足がかりとなる。

本研究では小型磁気回路を導入することで、通常の実験室内での微小重力実験を実現させた。一般に物性計測では試料を計測系から完全に孤立させる手段として μg 環境は有用であるが、物性測定の多くは測定が0.5秒以内に完了するため、この小型落下シャフトによる実施が可能である。磁石回路の小型化は、探査機用の分析システムを開発する上で有望な要素である。

本研究では反磁性体の特性を観測したが、常磁性や自発磁化をもつ粒子でも、同様の運動特性が期待される。すなわち力学運動における質量非依存の特性は、自然界の固体一般に適用される可能性が高い。

2) 単一粒子の物質同定 材料科学で対象とする固体試料は、起源の異なる多様な粒子の集合体である場合が多い。このような

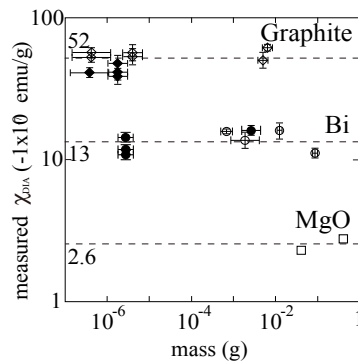


図6 磁気並進運動で得た値と試料質量との関係

試料に対しては、マイクロプローブ技術を駆使した切片表面の分析に先立ち、個々の構成粒子の物質識別を、非破壊で効率よく実施する手段が望まれる。すでに有機化学・生化学の分野では、精密測定に先立ってクロマトグラフィにより、有機分子の混合物を分子量ごとに同定する技術が確立しているが、無機試料でも、有機物と同様の分析過程が望まれる。

固体試料を構成する粒子の大多数は、sub-mmサイズ以下の常磁性体あるいは強磁性(フェリ磁性)体である。そこで今回、これらの条件の粒子に関しても上記の原理で物質識別が可能か検証するための実験を進めた(詳細は文献[4][6]を参照のこと)。常磁性、強磁性およびフェリ磁性体で、磁気並進運動を用いた測定原理の有効性が確認されれば、ほぼ全ての固体物質で物質識別が実現することになる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

- [1] Takeuchi T., Uyeda C. and Hisayoshi K. (2013) Attempt to detect diamagnetic anisotropy of dust-sized crystal orientated to investigate the origin of interstellar dust alignment *Earth Planets Space*, Vol. 65 (No. 3), pp. 193-197, 2013 A 査読有り
- [2] Hisayoshi K. and Uyeda C. (2013) Magnetic ejection of diamagnetic sub-millimeter grains observed by a chamber-type μG generator orientated to identify material of a single particle *Earth Planets Space*, Vol. 65 (No. 3), pp. 190-193, 査読有り
- [3] Hisatoshi K., Uyeda C. (2012) JASMA Elemental Dynamical Processes of Solid Particles Expected in Space and Planetary Science 29 170-183 査読有り
- [4] Kuwada K., Uyeda, C., Hisayoshi K., Nagai, H and Mamiya, M (2013). Field-Induced Translation of a Single Ferromagnetic and a Ferrimagnetic Grain Observed in a Chamber-type μG System. *J. Magnetism*.

18(3), 308-310 査読有り

[5] Uyeda C. and Hisayoshi K., Mamiya M Nnagai Y Method to detect the material of a single grain passed on its magnetization and anisotropy measured in a chamber type maikuc-g drop shaft (2012) Iron & Steel Res 19 2012 1081-1084 査読有り

[6] K. Kuwada, C. Uyeda and K. Hisayoshi (2014) Attempt to Detect Magnetization of a Single Magnetic Grain by Observing its Field-induced Translation in μG Condition Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 61 s78-s80 査読有り.

[7]. M. Yokoi M. Katsura, K. Hisayoshi, C. Uyeda (2014) Magnetic anisotropy observed at surface of amorphous silicate and its implications for the mechanism of dust alignment. Planetary and Space Science, in print 査読あり

[学会発表] (計 16 件)

1. 「微小重力下で反磁性鉱物粒子に誘導される磁気放出および回転振動」 植田千秋、久好圭治 日本地球惑星連合 2011 年大会幕張メッセ (H23 5/23-27).

2. 「微小重力下の磁気放出現象に基づく単一反磁性粒子の非破壊同定」 植田千秋、久好圭治 植田千秋、日本地球惑星連合 2011 年大会幕張メッセ (H23 5/23-27).

3. 「室内型 μG 発生装置を用いて観察した単一粒子の磁気並進運動とその飽和磁化の計測」 植田千秋、桑田建登、久好圭治 日本地球惑星連合 2012 年大会 千葉・幕張メッセ (H24 5/23-28).

4. 「室内型 μG 発生装置で観測した氷 Ih の磁気放出」 植田千秋、日本地球惑星連合 2012 年大会 幕張メッセ (H24 5/24).

5. Uyeda C., Kuwada.K & Hisayoshi K. (2012) Magnetization of Single Ferro-magnetic Grain Obtained from Observation of Field-Induced Translation in

a Chamber -type μG System, The 19th International Conference on Magnetism Busan, Korea (7-13 July 2012)

6. . Hisayoshi K. & Uyeda C. (2012) Translation & Rotation of Diamagnetic Materials Induced by a Low Field of a Permanent Magnet and Identification of a Micron-sized Particle; The 19th International Conference on Magnetism Busan, Korea (7-13 July 2012)

7. Uyeda C. (2012) Experimental System Using a Chamber-type μG Drop-shaft Orientated to Reproduce Elemental Dynamical Processes of Solid Particles Expected in Space and Planetary Science, The 5th Meeting on Cosmic Dust, Kobe. Univ., Kobe Japan (6-10 August 2012).

8. 「反磁性異方性解明に向けた新たな検出法の開発 植田千秋、日本磁気学会第 23 回強磁場応用専門研究会 (招待) 2013.2.21 大阪大学材料開発物性記念館

9. 「絶縁物における磁気異方性の発生機構」 植田千秋 (招待講演) 応用物理学会・磁気科学分科会 第 1 回講演会「磁気科学の新展開」2013.11.19 京大益川ホール

10. 「磁気並進運動に基づく単一粒子の飽和磁化測定」桑田建登、久好圭治、植田千秋、日本磁気科学会 第七回年会 2013.11.19 京都大学 益川ホール

11. 植田千秋 磁場勾配で誘導される並進運動を用いた始原的隕石構成粒子の非破壊同定、日本地球科学惑星連合、2013 年大会 2013 年 5 月 19-24 日・幕張メッセ。

12. 植田千秋 久好圭治 ダスト整列の起源解明に向けた単一微小結晶の磁場整列実験、日本地球科学惑星連合 2013 年大会 2013 年 5 月 19 - 24 日・幕張メッセ。

13. 久好圭治 植田千秋 磁気体積力を利用した単一粒子の同定、日本地球科学惑星連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19

- 24日 千葉・幕張メッセ。

14. U. Uyeda “Saturated Magnetization of Single Ferrite Particle Detected by Field-Induced Translation in μ -gravity Condition”, 11th International Conference on Ferrites (ICF 11) Okinawa Convention Center, Okinawa (April 15-19, 2013)

15. C. Uyeda, M. Ykoi, M. Katsura and K. Hisayoshi (2013) “A Study on Paramagnetic Anisotropy of Amorphous Silicate Orientated to Solve the Mechanism of Dust Alignment in the Dense Regions” The 5th Meeting Cosmic Dust, Kobe. Univ. Kobe Japan (6-10.8)

16. U. Uyeda (2013) “Paramagnetic Anisotropy of Amorphous Silicate and the Mechanism of Dust Alignment in the Dense Regions” 5th Subaru International Conf.: Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II Registration Form Sheraton Kona Resort and Spa at Keauhou Bay, Kailua-Kona, Hawai'i Island (December 9–12, 2013)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 chiakiu.jimdo.com/

6. 研究組織

(1) 研究代表者 植田 千秋

研究者番号: 50176591.

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし