

IIII 特集：惑星科学×微小重力（惑星科学における微小重力の役割）IIII  
（解説）

## 宇宙環境で静磁場によって反磁性粒子に誘導される力学運動

久好 圭治<sup>1,2</sup>・植田 千秋<sup>1</sup>

### Dynamical Motions of Diamagnetic Solid Particles Induced by Static Magnetic Field in Cosmic Condition

Keiji HISAYOSHI<sup>1,2</sup>, Chiaki UYEDA<sup>1</sup>

#### Abstract

Field-induced rotation and translation caused by static field below 1T was studied for sub-mm sized diamagnetic particles using a short term  $\mu\text{g}$  condition. Magnetic motions of ordinary solid, free of spontaneous moment, has not been reported at such low field before. In a given field distribution, the motions were mainly determined by intrinsic magnetization of the material; they were independent to mass of particle. This was because the motions were induced by magnetic volume force. The above translation is applicable in identifying the  $\mu\text{m}$ -sized grains or regolith collected in various regions of the solar system. The magnetic rotation provides quantitative information to solve the mechanism of dust alignment observed in various interstellar regions. The above motions were observable in a short  $\mu\text{g}$  duration produced by a compact drop-shaft; here the observation was realized by adopting a small NdFeB magnetic-circuit. The established technique to observe the motions of sub-mm sized sample is a step to detect the magnetic motions of  $\mu\text{m}$  & nm grains.

**Keyword(s):** magnetic orientation, magnetic alignment, dust alignment, magnetic ejection, diamagnetic anisotropy

#### 1. はじめに

一般に物質の磁氣的性質は、反磁性、常磁性および自発磁化による磁性に大別して説明される。自発磁化および常磁性の磁化は、最も安定な方向である磁場方向に整列し得るが、反磁性の磁化は磁場に対し常に逆方向に発生する。反磁性は全ての物質に発現するが、その磁化は自発磁化と比べ数桁以上も小さい。自発磁化を有する物体には、磁場中心に向かって引き寄せられる勾配力の作用と、磁氣的トルクによる回転の作用が働くことが古くから知られ、それぞれ実用に深く寄与してきた。しかし物質の大多数を占める反磁性体で、同様の力学運動が検討されることはなかった。

近年、反磁性体を静磁場で磁気浮上させる実験が報告されるようになったが<sup>1)</sup>、この実験では重力と勾配力を拮抗させる必要があるため、大規模な強磁場発生装置を必要とする。これと並行して磁気異方性エネルギーで微結晶を配向させて凝集することで、人工骨の硬度や、TiO<sub>2</sub>塗装剤の光触媒効率など、工業材料の機能を増大さ

せる試みが始まった<sup>1)</sup>。しかし配向には数テスラ以上の強磁場が必要とされ、実用化に向けた研究・開発は、必ずしも進んでいない。

絶縁体に誘導される反磁性磁化は、固体内部に配列した原子や分子に局在する電子に由来し、その磁化の大きさは、局在電子の軌道断面積で決定される（ランジュバン反磁性）。すなわち、固体は物質ごとに固有の反磁性磁化率  $\chi_{\text{DIA}}$  をもつ（Table 1 参照）。当グループでは、固体粒子がその  $\chi_{\text{DIA}}$  のために磁場勾配力を受け、磁場が単調減少する方向へ並進することを  $\mu\text{g}$  実験で初めて確認した（Fig.1 参照）<sup>2)</sup>。また、一般に上記の局在電子の分布は等方的でないため、磁場を印加する方向によって軌道断面積の大きさに差異が生じる。このため、反磁性磁化率には異方性  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  が発生し、これに由来する磁気異方性エネルギーで前述の磁場配向が進行する。一般に無機物質の  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  は微弱であるため、既存の測定法ではその検出が困難であり、基礎・応用を通じてこれまで研究が進展しなかった。当グループでは、 $\mu\text{g}$  条件下の希薄な空間に浮遊させた反磁性結晶が、反磁性異方性エネルギー

1 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1  
Institute of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

2 大阪府立春日丘高等学校 定時制の課程 〒567-0031 大阪府茨木市春日 2-1-2  
Kasugaoka High-school of Osaka prefecture, 2-1-2 Kasugaoka, Ibaraki, Osaka 563-0031, Japan  
(E-mail: hisayoshi@ess.sci.osaka-u.ac.jp)

**Table 1** (a) Published  $\chi_{DIA}$  values of solid materials <sup>7)</sup>, (b) The  $\Delta\chi_{DIA}$  values of oxide crystals detected by the method of field-induced oscillation <sup>8)</sup>.

(a)			(b)		
Sample		$\chi_{dia} \times 10^{-7}(\text{emu/g})$	sample		$\Delta\chi_{dia} \times 10^{-9}(\text{emu/g})$
naphthalen	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	7.08	orthoclase	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.1±2
anthracene	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	7.35	gypsum	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	9.6±0.2
silicon carbide	SiC	3.19	quartz	SiO <sub>2</sub>	2.0±0.2
alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.63	alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7±0.1
calcite	CaCO <sub>3</sub>	3.55	calcite	CaCO <sub>3</sub>	8.3±0.3
forsterite	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3.3	forsterite	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	9.6±0.2
graphite	C	52	graphite	C	20000
diamond	C	5.88	ADP	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	11±0.5
magnesia	MgO	2.56	KDP	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	8.3±0.3
gold	Au	1.42	magnesium hydroxide	Mg(OH) <sub>2</sub>	1.4±0.2
bismuth	Bi	13.4	aluminium hydroxide	Al(OH) <sub>3</sub>	2.6±0.2

のために、1 テスラ程度の低磁場で回転振動することを見出した (Fig.1 参照) <sup>3),4)</sup>. その振動周期から、従来は困難だった、微弱な  $\Delta\chi_{DIA}$  の検出が可能になった。

自然界で観測される磁場配向は、地球や宇宙の進化を理解するための重要な情報をもたらして来た。地球表層では岩石に残された地磁気逆転の記録が、大陸移動を証明する直接の根拠となった。一方で銀河諸領域の磁場方向を推定する方法として、ダストの磁場整列で発生する可視・赤外偏光を用いる方法が、広く受け入れられている <sup>5)</sup>. 星や惑星の進化には、磁場が強く関与するとされているが、それらの考察は上記の偏光観測を基盤としている。しかし自発磁化を有さないダストが、微弱な宇宙磁場で整列する機構は、まだ完全には解明されていない。

上述のように重力や粘性抵抗が無視できる、いわゆる宇宙条件下では、一般の反磁性体も自発磁化と同じように、弱い磁場で顕著な力学運動を引き起こすことが明らか

かになりつつある。惑星の進化は、ガスおよびダストをキャリアとする銀河内の物質循環の一段階として捉えられている。しかしダストの運動には未解明な部分が多く、銀河の諸領域でダストが受ける可能性のある力学作用を、素過程として理解しておく必要がある。本稿ではその一環として、実験に基づく磁気運動の特性について紹介する。

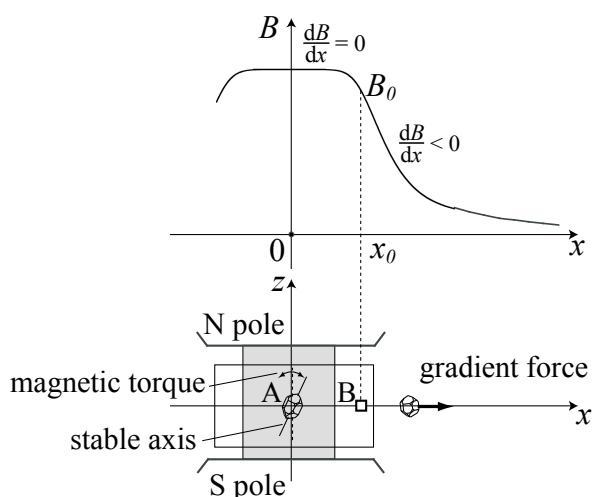
この研究は初期段階にあり、実験法の確立のために試行錯誤を重ねる必要がある。このため当グループでは、研究室内に設置した小型落下シャフトで動作する装置を製作し、それを用いて観測を進めている。ここではそのシステムについても紹介したい <sup>6)</sup>.

## 2. 磁場で誘導される力学運動の原理

前項で述べたように、 $\mu\text{g}$  環境下の希薄な空間に開放した反磁性粒子に静磁場を印加すると、その磁気的ポテンシャルが増加し、粒子を磁場空間の外に移動させる方向に勾配力が働く。質量  $m$  の反磁性試料を、 $+x$  方向に単調減少する磁場空間に、初速度ゼロで開放する場合を考える (Fig.1 を参照)。単位質量あたりの試料の磁化率を  $\chi_{DIA}$ 、初期位置における磁場強度を  $B_0$  とすると、初期位置で試料が得る磁気的ポテンシャルは、磁場空間の外では全て運動エネルギーに変換される。そこで試料の終端速度を  $v_T$  とすると、下記の単純なエネルギー保存の式が成立する <sup>9)</sup>.

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

即ち  $B_0$  の値が固定されている場合、磁化率  $\chi_{DIA}$  は  $m$  の計測をすることなしに  $v_T$  だけから求められる。 $v_T$  は  $\chi_{DIA}$  と  $B_0$  のみに依存し  $m$  に依存しない。



**Fig.1** Two types of magnetically induced motions expected for a diamagnetic crystal released in microgravity <sup>9)</sup>.

$$\chi_{DIA} = \frac{v_T^2}{B_0^2} \quad (2)$$

磁気異方性エネルギーに起因する回転の運動方程式は、結晶の磁氣的安定軸と  $B$  のなす角度を  $\theta$  として下式で表される<sup>9)</sup>。

$$I \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = -m\Delta\chi_{DIA}B^2 \sin 2\theta \quad (3)$$

ここで、反磁性異方性  $\Delta\chi_{DIA}$  は、直交する 2 つの磁氣的主軸の磁化率を  $\chi_{//}$  および  $\chi_{\perp}$  として、 $\Delta\chi_{DIA} = \chi_{//} - \chi_{\perp}$  で表される。 $I$  は結晶の慣性モーメントを表す。 $\theta$  が十分小さい場合、その変化は調和振動に従い、その周期  $\tau$  は下式で表される。

$$\tau = 2\pi \left( \frac{I}{m} \Delta\chi_{DIA} \right)^{1/2} B^{-1} \quad (4)$$

$B$  が既知ならば、 $\tau$  は物質固有の  $\Delta\chi_{DIA}$  と  $I/m$  のみで一意に決定される。ここで結晶粒子が均一な球体の場合、試料半径を  $r$  として  $I/m = 1/2 r^2$  と計算される。観察で  $\tau$  と  $r$  が得られれば、それらと  $B$  値を式 (4) に代入するだけで  $\Delta\chi_{DIA}$  が得られる。即ち (並進運動からの  $\chi_{DIA}$  の検出と同様に)  $m$  の計測を必要としない。(なお粒子を球体で近似できない場合は、映像で捉えた粒子の形状から最適の  $I$  値を代入する。)

### 3. 観測装置の開発

前述のように本研究では、sub-mm サイズの粒子に関して、磁気運動の観測を目指した。ここでは、試行錯誤するために繰り返す作業手順が容易になるように、室内用の落下シャフト (長さ 180cm,  $\mu\text{g}$  時間 0.5 秒) でも有効に動作する小型の観測装置を設計・製作した (Fig.2 参照)<sup>6)</sup>。達成すべき装置の条件として、(a) 上記シャフトで動作できる小型の drop box に装置が収納可能であること、(b) 0.5 秒の短い  $\mu\text{g}$  時間内に目的とする力学運動が完了すること、の 2 点が挙げられる。そこでまず (a) を解決するために、磁場発生部として小型のネオジウム磁石プレート 2 枚からなる磁気回路を新たに導入した。磁気回路の小型化により、磁場強度が  $B_0$  から  $B \sim 0$  まで減衰する空間の距離が約 2cm に縮小し、並進運動の空間を drop box 内に収めることが可能になった。さらにこの距離の縮小により、粒子が終端速度に到達するまでの所要時間が、0.5 秒以下に縮小できた。

回転振動の実験の場合は、試料サイズが 1mm 以下になったことで式(4)の  $I$  が減少し、 $\tau$  を 0.5 秒以下に抑えられた (ただし  $\Delta\chi_{DIA} > 1 \times 10^{-8} \text{emu/g}$  で  $B \sim 0.6 \text{T}$  とす

る) これにより、最低でも 1 周期分の回転振動を観察することができ、運動が式(3)の調和振動に従うかどうか検証できる。

並進運動の観察では、最初に試料を sample stage 上の磁場勾配力が最大になる位置 (Fig.1 の位置 B) に、セットする。そのうえで全体をガラス製の真空チャンバーの中に収納し、内部を 100Pa 程度まで減圧する。実験準備の完了した drop box を、Fig.2 のように実験室の天井から電磁石でつるして保持する。その後、電磁石の印可電流を遮断することで、drop box を自由落下させる。落下開始から約 0.05 秒後に赤外線信号を、drop box 上面の受光装置に向けて送信する。この信号により装置内の sample stage が下降し、試料は初速度ゼロで開放される。以後、真空チャンバー内の試料の挙動を、記録用カメラで撮影する。回転振動を観察する場合、試料は均一磁場領域の中心 (Fig.1 の位置 A) にセットした。それ以外の実験手順は、並進運動の場合とほぼ同じである。

粒子運動の記録には、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、それぞれの実験で必要な空間および時間分解能を考慮して使い分けた。撮影された映像を連続の静止画面に変換し、試料の運動を解析した (Fig.3 参照)。なお、Fig.2 の装置では、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、drop box を 2 重構造にすることにより、現在  $10^{-2} \text{G}$  の残留 G を、 $10^{-3} \text{G}$  のレベルにまで改良できると期待される。

### 4. 実験結果

Figure 2 の装置を用いて行なった並進運動の観測例を Fig.3 に示す。試料は直径 100 $\mu\text{m}$  のグラファイトで、 $dB/dx < 0$  の領域では、磁場が単調減少する方向へ正の

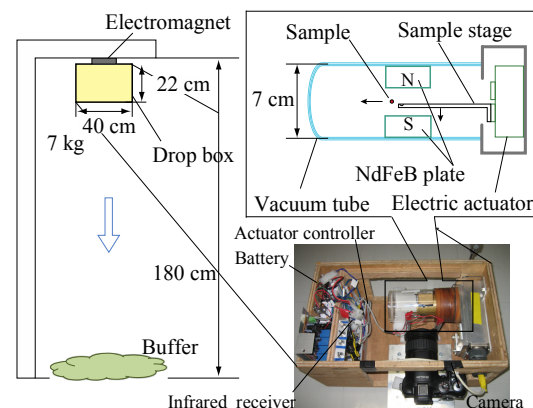
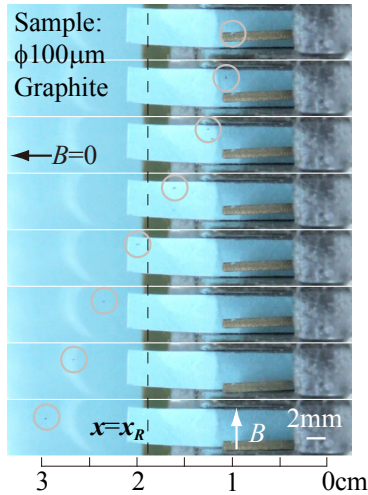
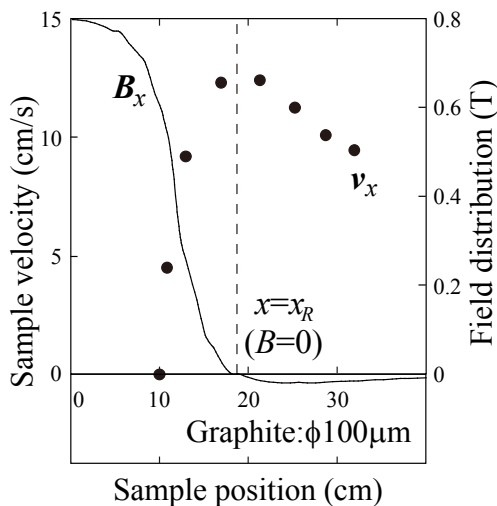


Fig.2 Schematic view of a short drop-shaft (left side) and an apparatus to observe magnetic motions of sub-mm particle (upper portion in the right)<sup>6),10)</sup>. Image inside the drop box is shown in the bottom of right side.

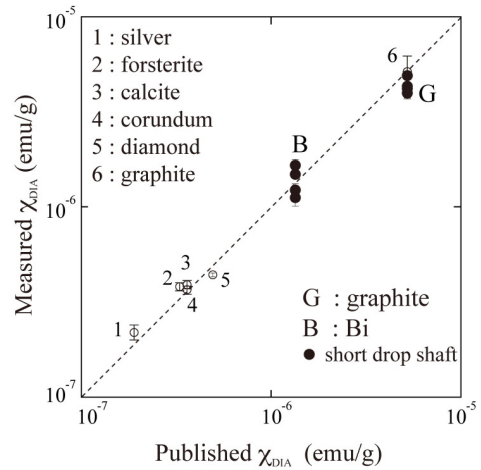


**Fig.3** Visual images of translational motion of graphite particle. Field decreases monotonously from right to left. The images are arranged in the sequence of time from top to bottom; time intervals between the images are 0.034sec. Translating particle is observed inside the circles.

加速度で運動しているのが確認される。Fig.3 から得られた試料位置と速度の関係を Fig.4(●印) に示す。試料の速度  $v$  が、式(1)のエネルギー保存則に従って、 $B=0$  の点( $x=x_R$ )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  $\chi_{DIA}$  は、試料の初期位置の磁場 ( $B_0 = 0.63$  T) と、 $B=0$  の位置での速度 ( $v_R = 12.3$  cm/s) を式(2)に代入することで簡単に求められ、この場合、 $\chi_{DIA} = -39 \times 10^{-7}$  emu/g となる。

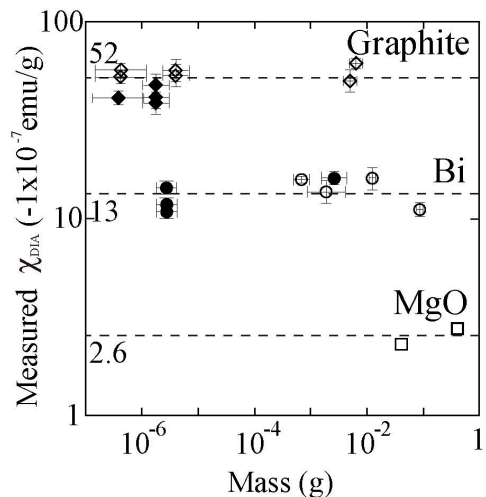


**Fig.4** Relationship between sample velocity  $v$  (Left axis) and position  $x$ . Relationship is obtained from measured variation of sample position shown in Fig.3. Field distribution is shown by a solid curve.

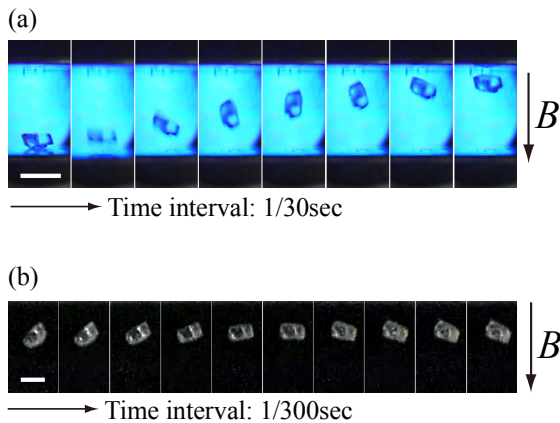


**Fig.5** Relationship between measured and published diamagnetic susceptibilities of various materials. Closed circles in figure are values of graphite and bismuth measured by short  $\mu$ g drop-shaft<sup>10)</sup>. The measured results of mm-sized sample are shown in open circles<sup>9)</sup>.

同じ方法で、これまで様々な反磁性物質の粒子について、その並進運動を観測し、 $\chi_{DIA}$  値を得た<sup>9),10)</sup>。Fig.5 に示すようにそれらの測定値は、2桁にわたる広い範囲で文献値とよく一致した。図に示した  $\chi_{DIA}$  の範囲は、現実に存在する物質の  $\chi_{DIA}$  の範囲をほぼカバーしている。グラファイト、ビスマスおよび酸化マグネシウムについて計測した  $\chi_{DIA}$  と質量  $m$  の相関を Fig.6 に示す。式(2)から予想されるように、実験誤差を超える  $\chi_{DIA}$  の質量依



**Fig.6** Relationship between  $\chi_{DIA}$  values obtained by field-induced translation and mass  $m$  of samples. Closed circles in figure are values of graphite and bismuth measured by short  $\mu$ G drop-shaft<sup>10)</sup>. Open squares are results of measurements on mm-sized samples<sup>9)</sup>.



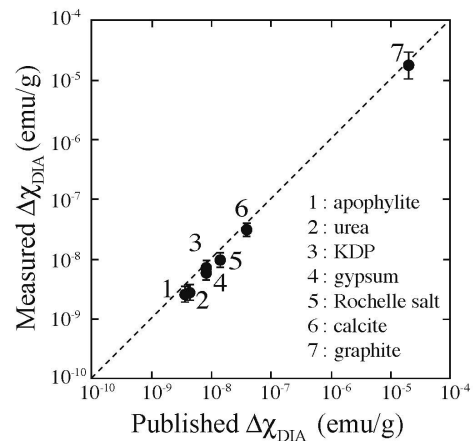
**Fig.7** Visual images of field-induced oscillation of calcite (a) and apatite (b). The images are arranged in the order of time from left to right. Length of scale bar is 1mm.

存性は見られない。このように **Fig.5, 6** の結果から、式 (1) のエネルギー保存則の有効性が、物質全体でほぼ検証できた。さらに、今回開発した小型シャフト対応の装置で、単一粒子の  $\chi_{DIA}$  測定が、 $m=10^{-1}\sim 10^{-6}\text{g}$  の範囲で十分可能であることが示された。

方解石およびアパタイトに関して得られた回転振動の観測例を **Fig.7** に示す。方解石の  $\tau$  は結果より 0.47 秒と求められ、さらに試料の  $I/m$  値も写真から直接得ることができる。これらの値を式(4)に代入することで  $\Delta\chi_{DIA}$  が得られる。これまでに  $\mu\text{g}$  実験で得られた様々な  $\Delta\chi_{DIA}$  値を **Fig.8** に示す<sup>9)</sup>。それらは 5 桁にわたって文献値と一致した。また、 $\chi_{DIA}$  の場合と同様に、 $\Delta\chi_{DIA}$  と  $m$  の相関を方解石について計測し、実験誤差を超える質量依存性がないことを確認した。以上の結果により、式(3)に示した回転の運動方程式の有効性が、物質全体にわたって検証された。後に述べるように、単一の微小結晶に関して信頼性の高い  $\Delta\chi_{DIA}$  を得ることは、反磁性粒子が磁場配向する能率を定量的に解析する上で重要である。

## 5. 単一粒子の磁化測定と構造解析

既存の磁化測定法では、以下の 2 つの問題点のため、微小試料の反磁性磁化を計測することが困難になる。第一の問題点は、試料を磁場中に保持するホルダーに起因する。反磁性磁化は微弱であるため、試料の大きさが  $\phi 0.1\text{mm}$  以下になると、試料ホルダーからの信号が無視できなくなる。これに対し、今回提案した方法は、ホルダーが存在せず、上記の制約を受けない。既存の方法の二番目の問題は、試料の質量計測である。 $\chi_{DIA}$  および  $\Delta\chi_{DIA}$  は単位質量当り（あるいはモル数当り）の値で定義されるため、試料の質量を計測する必要がある。しかし質量が  $100\mu\text{g}$  以下になると、通常の装置では計測が困難となる。式(2)、(4)で示したように、今回の方法では質量を計



**Fig.8** Comparison between published and measured  $\Delta\chi_{DIA}$  values detected by the method of field-induced oscillation<sup>9)</sup>.

測する必要がない。

以上のように、今回の方法は、前述の問題点を両方とも回避することができ、運動が観測可能な限り、原理的には無制限に小さい試料の磁化率を測定できる<sup>9)</sup>。試料サイズの下限は、観測装置の空間分解能で決定され、現在の装置では  $50\mu\text{m}$  程度である。

一般にナノ領域において固体粒子の物性は、bulk 結晶からの構造変化に起因して大きく変化することが知られている。前述のように、 $\chi_{DIA}$  および  $\Delta\chi_{DIA}$  は結晶構造に直結した物性値であるため、サイズの減少と共に、大きな変化を示すと予想される。将来的には、ナノサイズの単一粒子の磁気運動から、 $\chi_{DIA}$  および  $\Delta\chi_{DIA}$  を決定し、そこからサイズ減少に伴う構造変化を直接観察することも可能になる。ナノ領域における粒子の運動は、**Fig.2** のシステムに蛍光紫外線顕微鏡を導入することで実現する。その前段階として、 $\phi 100\sim 1\mu\text{m}$  の領域で  $\chi_{DIA}$  および  $\Delta\chi_{DIA}$  の質量依存性が発生しないかどうかを検証する必要がある。そのため上記のシステムに可視の光学顕微鏡を導入する準備を現在進めている。

無機物の  $\Delta\chi_{DIA}$  は、結晶を構成する個々の結合軌道に一定の異方性を割り当てることで、定量的に説明される。当グループでは回転振動に基づく測定法を利用して、無機酸化物の  $\Delta\chi_{DIA}$  値の集積を進めてきた (**Table 1** 参照<sup>11)</sup>)。そしてこれらの値と、結晶構造の規則性の関係を考察することで、異方性の発生機構の解明を進めた。その結果、結晶を構成する個々の結合軌道が、一定の異方性を有すると仮定することで、大部分の測定値が矛盾なく説明されることが分かった<sup>8),11)</sup>。固体は全て化学結合で構成されているため、立方晶と非晶質以外の物質は有意の  $\Delta\chi_{DIA}$  を有し、有限の磁場強度で磁場整列することになる。しかし現行の感度では、未測定  $\Delta\chi_{DIA}$  値をすべて検出することはできず、後述のように宇宙環境での計測が必要となる。

## 6. 物質同定

前項で述べた磁化測定法を利用して、単一の微小試料に関する物質同定が、原理的には可能である。前述のように、物質は各々固有の  $\chi_{DIA}$  および  $\Delta\chi_{DIA}$  を有している。従ってこれらの値を **Table 1** のように 3 桁の精度で得ることが出来れば、文献値と対照させることで、全ての固体物質を単一原理で、しかも非破壊で識別することができる。5 章で述べたように、今後、 $\mu\text{m}$  レベルの粒子で磁化測定が可能になれば、惑星科学を含めた分析科学への適用範囲が、大きく広がると期待される。

一例として、太陽系初期に形成された始原的隕石の分析が挙げられる。このタイプの隕石は、成因の異なる  $\text{mm}\sim\text{sub-}\mu\text{m}$  サイズの粒子が無秩序に混じり合った集合体である。それを分析することで、太陽系形成期の様々なイベントを直接解明することができる。隕石中には、コンドルールと呼ばれる急冷で形成されたケイ酸塩粒子や、不定形の高温鋳物集合体 (CAI) などが、有機物を主とする揮発性物質と共存している。さらに近年、太陽系形成以前の恒星で形成されたプレソーラー粒子が発見され、元素合成や進化についての情報が直接入手できるようになった。

上記のように始原的隕石は、起源の異なる多様な粒子の不均一な集合体であるため、SIMS や顕微ラマンなど、最先端のプロブ技術を駆使して、研究が進められている。その一方で隕石中に含まれている粒子の全てを、上記のプロブ分析だけで、もれなく把握できるかどうかについては疑問が残る。例えば予見されていないタイプのプレソーラー粒子が、発見されずに埋もれている可能性も十分にある。これを解決する手段の一つとして、式 (1) の特性を利用して、粒子の集合体を機械的に物質ごとに分離・同定する可能性が考えられる。

仮に隕石を構成粒子サイズに分解し、**Fig.1** の磁場勾配中の一点で静かに開放したとすると、式 (1) より粒子の終端速度は  $\chi_{DIA}$  の差のみで決定し、質量に関わりなく物質の種類ごとに異なる速度で並進運動をすると予想される。この速度から  $\chi_{DIA}$  が簡単に決定でき、それを文献値 (**Table.1**) と対応することで、物質が同定される。さらに測定後の粒子は非破壊で残っているので、そのまま同位体分析や X 線分析などにかけることができる。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分離・同定する技術が確立している。無機試料でも、有機物と同様の分析過程が望まれるが、上記の磁気運動を取り入れることで、ほぼ全ての固体物質で、それが実現すると期待される。

別の応用例として惑星・衛星探査機に搭載するためのダスト分析装置への応用が考えられる。今後の探査では、従来のサンプルリターンと並行して、広大な空間における物質の存在頻度を効率的にサーベイすることが重要

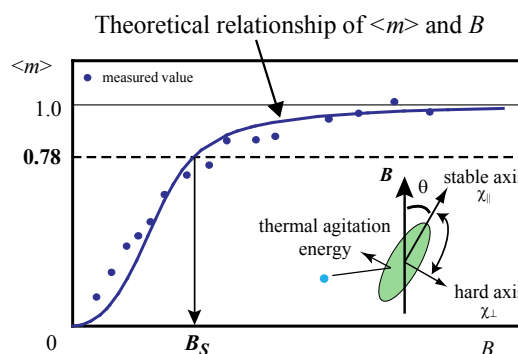
になる。この場合、探査現場では、粒子を物質毎の存在頻度とサイズ分布を効率的にデータ化することが求められる。従来の研究によると、岩石惑星や衛星および分化の進んだ小惑星などの表面に存在する数十  $\mu\text{m}$  径の粒子は、大部分が単一物質で構成されていると予想される。

探査機に搭載する分析装置は、小型で、測定原理が単純でしかも科学的根拠が明確であり、可能であれば非破壊分析であることが求められるが、2 章で記した計測原理は、現時点上記の条件を全て満たす、最も有力な手法の一つと考えられる。

## 7. 宇宙におけるダスト整列

初めに述べたように、宇宙磁場の方向はダスト整列で発生する偏光で推定されている。近年の観測技術の向上で得られた高空間分解能の偏光 mapping は、惑星進化への磁場の作用を強く示唆するものである。ところで、銀河空間の平均元素組成を考慮すると、星間ダストは反磁性あるいは磁性イオンの濃度の低い常磁性の状態にある。一方で、宇宙磁場の強度は地磁気比べて 3-6 桁小さい。従って既存の磁気科学で考えられてきた機構では、整列が説明できない。ダスト整列を説明する最も単純なモデルとして、磁化率 (常磁性・反磁性) の異方性  $\Delta\chi$  による異方性エネルギーで整列する機構が考えられる。

一般に温度  $T$  の分散媒に浮遊する粒子の配向は、粒子に誘導される異方性エネルギー  $1/2 m\Delta\chi B^2$  が、回転のブラウン運動  $1/2 k_B T$  を 1 桁上回った時に実現する (Langevin 過



**Fig.9** Degree of alignment  $\langle m \rangle$  vs field intensity  $B$  measured for an ensemble of diamagnetic micron-sized crystal dispersed in fluid. Parameter  $\langle m \rangle$  is defined as  $\langle m \rangle = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle$ . Parameter  $B_s$  is the field intensity to achieve partial alignment of the crystals.<sup>8, 11)</sup> It is deduced from a process proposed by Langevin<sup>12)</sup> that  $B_s$  is uniquely determined by temperature  $T$ , mass of particle  $m$  and intrinsic  $\Delta\chi$  of material.

程)<sup>12)</sup>; ただし  $k_B$  は Boltzmann 定数を表す<sup>10)</sup>. 当グループは液体およびガス中に分散した粒子の磁場整列を上記過程で解析し, 整列に要する磁場強度  $B_s$  (**Fig.9** 参照) が分散媒に依らず  $T$ ,  $m$  および  $\Delta\chi$  だけで決まることを, 3 パラメータを変化させた実験で確認した<sup>8),13)</sup>.

近年, 赤外 emission の観測から, 原始惑星系円盤の近傍では結晶質のフォルステライト, エンスタタイトおよび非晶質のシリカなどが共存することが明らかになった. そこで, この領域での整列の可能性を検証するため, 上記のシリケートの正確な  $\Delta\chi$  値の検出を進めた<sup>15)</sup>. 一般に自然界のシリケートには, 鉄などの常磁性イオンが少量固溶しているため, これに起因する常磁性異方性  $\Delta\chi_{\text{para}}$  はキュリー・ワイス則に従う. そのため温度が 100K 以下のダスト円盤外周では,  $B_s$  が大きく減少する. 一方この領域の磁場強度  $B_0$  は, 隕石の残留磁化から推定される. 上で求めた  $B_s$  は  $B_0$  と同程度の大きさに達することから, この領域では, 結晶質のシリケートダストが, 部分的に配向しうると考えられる.

最近の研究では, 微小結晶の実効的な磁気異方性  $\Delta\chi_{\text{eff}}$  が, 粒子サイズの減少と共に, バルク結晶の値から逸脱する例がいくつか報告されている. このため **Fig.9** の解析では, 実際に整列する粒子サイズでの  $\Delta\chi_{\text{eff}}$  を用いる必要がある. さらに現実の無機結晶は,  $\mu\text{m}$  サイズの微小結晶でしか存在しないものが多い. しかし前述のように既存の  $\Delta\chi$  計測法では,  $\text{mm}$  サイズより小さい試料の  $\Delta\chi$  を検出することができない. これに対し,  $\mu\text{g}$  空間での磁気回転振動 (**Fig.7** 参照) からは, 原理的には, 無制限に小さな粒子の  $\Delta\chi$  が検出可能となり, 今後はその値を用いて Langevin 過程による正確な配向の解析が実現する.

隕石中の微小粒子や惑星間塵の中には, 太陽系以前の銀河空間で形成されたものが発見される. この種の粒子は星間環境を反映した特異な構造を有することが多い. 即ち, それらの  $\chi_{\text{DIA}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  値から推定した構造から, 粒子の形成環境に関する知見が得られる可能性がある.

## 8. 理科教育への活用と成果

今回製作した装置の利点のひとつは, 通常の実験室内で手軽に  $\mu\text{g}$  環境を発生できることである. さらに, この装置は低費用で製作でき, 実験時間も大幅に短縮できるため, 試行錯誤を必要とする実験に適している.

筆者の担当する高校の科学部では, 生徒たちが宇宙ステーションでの報道に触発されて, 自分たちも  $\mu\text{g}$  実験をしたいと考え, 装置作りに取り組んだ. 阪大の落下装置を参考にして, 高校生でも入手可能な部材を使用して, 2重構造の drop box を用いた装置を製作した. その成果を日本地球惑星科学連合大会の高校生セッションで発表し, これが契機となって, この装置は「はやぶさ 2」のサンプラーホーン設計の予備実験に採用されることにな

った (日本惑星科学会 2011 秋季講演会 S22-03P). 自信を得た生徒たちは, 自発的に考え討論しながら意欲的に実験に取り組み始め,  $\mu\text{g}$  の精度向上を目指して, drop box の材質, 強度や大きさなどを変化させて, 自分たちで装置の最適な条件を選定し始めた. さらに, box 内の間隙空気の開放を試みたり, 支持装置と box の質量の関係を調べたりと,  $\mu\text{g}$  環境の向上に自らの創意で取り組むようになった. その成果は日本物理学会などの高校生部門で発表され, 高い評価を受けた<sup>16),17)</sup>.

上記のように, **Fig.2** の装置を起点とした科学部の活動は, 高校生たちの科学への意欲を引き出すことに予想外の効果を発揮した. その要因として, 生徒たち自身がこのシステムを使って試行錯誤を繰り返すことで, 体験学習的なプログラムを越えた“本物”の極限条件に近づける点が挙げられる. 科学部による今回のプロジェクトは, 期せずして, 中・高校生の理科離れを解決する糸口の一つにつながるのかもしれない.

## 9. 宇宙実験の必要性

既存の  $\chi_{\text{DIA}}$  測定値は, **Table 1** に示すように, 3 桁の精度で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, 式 (2) における  $B_0$  および  $v_R$  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  $\mu\text{g}$  時間で, 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, 磁場勾配が最大の位置に試料をセットすることで, 大きな初速度を与える必要がある. その結果, 単調減少する磁場分布の中で, 試料の進行方向の前面と後面の間で, 磁場強度に数%の差異を生じる. これが  $B_0$  の精度を 2 桁以下に抑えている. さらに  $\mu\text{g}$  時間が短いため, 磁場強度が十分ゼロ近くに減衰した領域で終端速度  $v_R$  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  $10^{-5}\text{T}$  のレベルに達した領域で  $v_R$  を計測することが可能になる. これらの改善によって,  $\chi_{\text{DIA}}$  の精度を 3 桁に向上することが, これまでの実験結果から試算される. 前述の磁化率データ表によると, 既存の物質の  $\chi_{\text{DIA}}$  は 3 桁まで計測することで, ほぼ完全に識別できる. 一方,  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  測定においても, 式 (4) の  $\tau$  を現在の数秒から 200 秒に増加させることで, 検出感度を 3 桁以上向上できる. 5 章でのべた  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  の発生機構に基づく試算では, この感度ではほぼすべての酸化結晶の  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  が検出可能となる.

このように宇宙環境で観測時間を増加させることで, 反磁性磁化の感度・精度は桁違いに向上し, 式 (1), (3) から期待される運動の特性全体が, 初めて検証される.

## 10. まとめと展望

1.  $\mu\text{g}$  条件下で、希薄な空間に開放した固体は、その磁気的エネルギーのため、低磁場で並進や回転を引き起こす。2つの運動は慣性項と磁気体積力の項だけの単純な方程式で記述される。磁気分布の条件が共通の場合、これらの運動は粒子質量に依存しない。
2. 銀河の各領域には磁場とダストの両方が偏在しており、惑星進化に関与しうる力学運動の一つとして、1. の特性を検証しておく必要がある。今回、反磁性粒子で見出された運動保存則は、常磁性あるいは自発磁化をもつ粒子でも期待される。即ち磁気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。
3. 上記 1. の運動を用いて単一粒子の  $\chi_{\text{DIA}}$  および  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  が検出できる。これら測定では運動が観測できる限り無制限に小さな試料が測定できる。さらに検出した値を文献値と比較する事で、微小な粒子の物質同定を効率的に非破壊で実行できる。この分析原理は、始原的隕石の分析、あるいは探査機に搭載する粒子分析器に有効である。
4. 式(1), (3)から期待される特性を完全に捉えるには、運動を宇宙環境で長時間観測することで、 $\chi_{\text{DIA}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  を現行より数段高い感度・精度で検出する必要がある。
5. 今回 sub-mm 粒子で確立した磁化計測の技術は、今後、 $\mu\text{m}$ ~ $\text{nm}$  粒子の計測を実現する足がかりとなる。微小領域で単一粒子の  $\chi_{\text{DIA}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  が検出されれば、サイズ減少に伴う粒子の構造変化を直接観察する手段となる。
6. 隕石や惑星間塵の中に見出される星間ダストは、それらが存在した特異な環境を反映した構造を有する。即ち検出した  $\chi_{\text{DIA}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{DIA}}$  からその構造を推定することで、形成環境やその後滞在した領域に関する情報が得られる。
7. ブラウン運動する粒子の磁場配向の解析には、粒子そのものの実効的な  $\Delta\chi_{\text{eff}}$  を用いる必要がある。また微結晶でしか存在しない物質の  $\Delta\chi$  は既存の測定法では検出できない。これらの問題を解決する上で、提案した  $\mu\text{g}$  条件下の測定法は大きく寄与する。その適応分野は、星間ダストの整列機構の解明や、粒子配向材料の生成プロ

セスの設計など、多方面にわたる。

8. 小型の NdFeB 磁気回路の導入により、 $\mu\text{g}$  条件下での磁気実験が、通常の実験室内で実現した。計測時に試料を測定系から完全に孤立させる必要がある場合、 $\mu\text{g}$  環境は有用であるが、物性計測の多くは 0.5 秒以内に完了するため、室内型の小型シャフトでも、十分  $\mu\text{g}$  条件が供給できる。室内型の落下シャフトを用いた実習は、高校生の理科への意識を高めるうえで、有効であることが分かった。

## 参考文献

- 1) Various papers that appear in "Magneto-science"(eds. M. Yamaguchi, M. Tanimoto, and K.Ozeki, Kodansha-Springer, Tokyo, 2006).
- 2) K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., **156** (2009) 012021.
- 3) C. Uyeda, K. Tanaka, and R. Takashima : Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1226.
- 4) C. Uyeda, M. Mamiya, R.Takashima, T. Abe, H. Nagai, and T. Okutani : Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) L124.
- 5) Spizer L Jr., "Physical Properties in the Interstellar Medium" (Wiley & Sons Inc.,New York) 1978.
- 6) K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Kuwada, M. Mamiya and H. Nagai, : Phys.:Conf. Ser., **327** (2011) 012058.
- 7) R. Gupta, "Landort Bornstein" II 445(1983)
- 8) C. Uyeda, R.Takashima and T. Tanaka : Appl. Phys. Lett. **28** (2005) 094103.
- 9) C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 064709.
- 10) K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Kuwada, M. Mamiya and H. Nagai, : Earth, Planets and Space, in press.
- 11) C. Uyeda : Phys. Chem. Miner. **20** (1993) 77.
- 12) P. Langevin and P. Curie : CP Acad Sci Paris **151** (1910) 331.
- 13) G. Maret and K. Dransfield, : Topics Appl Phys **57** (1985) 144.
- 14) C. Uyeda, K. Hisayoshi and S. Kanou : Earth Planets Space, **62** (2010)99.
- 15) [http://www.jpgu.org/meeting/news\\_0523.html](http://www.jpgu.org/meeting/news_0523.html).
- 16) <http://www.gakkaiweb.net/butsurijrsession/2012/shinsa.html>.

(2012年8月31日受理)