

## 微小重力環境および永久磁石レベルの弱磁場を利用した 高感度の反磁性異方性測定

阪大理 植田千秋

Method to accumulate magnetic anisotropy in microgravity condition  
and by the use of a horseshoe magnet

Chiaki Uyeda

Institute of Earth and Space Science, Graduate school of Science, Osaka University,  
Toyonaka Osaka Japan 560-0043, E-Mail: uyeda@ess.sci.osaka-u.ac.jp

Abstract: At present, existence of magnetic anisotropy  $\Delta\chi$  is ignored for immense number of solid materials;  $\Delta\chi$  can cause magnetic alignment even if the material contains no spontaneous moment.  $\Delta\chi$  is expected to range between  $10^{-7}$  and  $10^{-11}$  emu/g according to a recent study based on a model assuming that the individual bonding orbital in the crystal posses constant amount of  $\Delta\chi$ . Oscillation of a magnetically stable axis of a crystal with respect to a horizontal field is observed for the purpose of detecting small  $\Delta\chi$ . Effect of a fiber suspending the crystal is omitted in the measurement; restoration torque of the fiber was a standard in measuring  $\Delta\chi$  in conventional methods.  $\Delta\chi$  above  $4 \times 10^{-8}$  emu/g are obtained from period of oscillation  $\tau' = 2\pi(I/M\Delta\chi)^{-1/2}B^{-1}$ , which was induced at a low field of 0.11 T produced by a horseshoe magnet; here popular materials such as biotite, forsterite, graphite, muscovite, talc and urea were observed. Significant oscillation of bulk nonmagnetic crystals has not been observed at such low field intensity as yet. The system is effective to accumulate  $\Delta\chi$  values over a immense number of unmeasured materials in various facilities other than magnetic science that do not posses a strong magnetic-field generator. Sensitivity of  $\Delta\chi$  is improved considerably by realizing the above oscillation in microgravity where the fiber itself is deleted; oscillations are achieved for calcite, KDP, gypsum, graphite, Rochelle salt and urea at  $B=1.3$ T; sensitivity is expected to be improved to  $1 \times 10^{-10}$  emu/g in ground based facilities. High sensitivity is required to detect smaller  $\Delta\chi$  values to the level of  $10^{-11}$  emu/g; this can be done by increasing  $\tau'$  according to the above equation in an orbital laboratory. The nature of spontaneous moment was recognized long ago by a rotational oscillation of a compass due to terrestrial field, which led to the invention of important magnetic devices. Significant rotational motions of ordinary nonmagnetic crystals reported in the two experiments mentioned above may induce new devices in various research fields which are not related to magnetism at present.

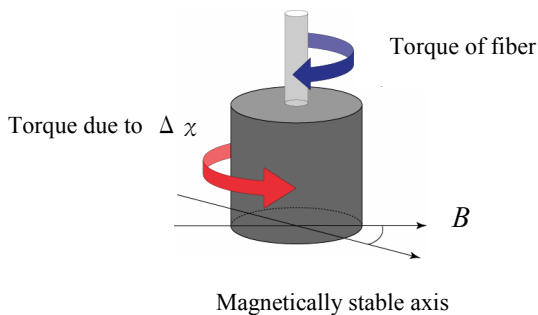
*Key words; Diamagnetic Anisotropy, Magnetic Oscillation, Microgravity, Magnetic alignment,*

今日の磁気科学は、17世紀に地磁気の原因が考察された結果、地球自身が一個の巨大な「磁石」であると結論づけられたことに始まる。ここから電磁気学や磁性物理学が発達し、さらに電動モーターからメモリーディスクにいたるデバイスが発明された。これらの磁氣的機能は全て電子スピンなどが生み出す自発磁化に由来する。これに対し一般の固体では自発磁化は発生しないが、それとは異なる物性のために微弱な磁化が磁場と逆方向に発生する。この磁化は反磁性磁化と呼ばれ、個々の原子に誘導電流が磁場を遮蔽する方向に発生するモデルで説明される。反磁性磁化は磁場を加える結晶方位によって異なり、そのために磁氣的に安定な結晶軸が磁場方向に回転する。この反磁性磁化率の差（反磁性異方性あるいは $\Delta\chi_D$ ）が磁場

配向のしやすさを決める基本的な係数となる。しかし無機物の $\Delta\chi_D$ は微弱なことが多く、既存の方法ではその検出が容易ではなかった。

反磁性異方性の発生機構は結晶中の電子の空間分布の異方性に由来し、物性物理もしくは量子化学の理論の研究課題である。有機物に関してはポーリングに始まる考察が有名だが、無機物の異方性に関する定量的な考察は前例がない。当グループでは「個々の結合軌道に起因する $\Delta\chi_D$ が原因である」とする仮説を提唱し測定値を矛盾なく説明した。<sup>1)</sup> 言うまでもなく固体は化学結合で構成されており、この仮説に従うなら未測定 of 非磁性物質の大多数が $10^{-8} \sim 10^{-11}$  emu/g の範囲の $\Delta\chi_D$ 値を有し、磁場配向する特性を有する事になる。

既存の $\Delta\chi_D$ 測定では Fig.1 のように試料を固い



**Fig.1** Principle to measure magnetic anisotropy in a conventional method.  $\Delta\chi$  is measured by a balance between a magnetic torque and a restoration torque; sensitivity of  $\Delta\chi$  is limited by the numerical values of the restoration torque. This torque is controlled in the present study to be negligible in 2 systems; one is composed with a horseshoe magnet, and the other is composed of a system using microgravity condition.

ファイバーで水平磁場中に吊す。試料には安定軸を磁場方向に回転させるトルクが働き、これとファイバーのネジレを復元しようとするトルクが釣り合う。のバランスを利用するため、 $\Delta\chi_D$ の感度の上限は復元トルクで制限されていた。当グループでは極細のファイバーを用いる事で、復元トルクが無視できる条件を実現した。この時、安定軸は磁場方向を中心に回転振動し、その周期から復元トルクを用いずに $\Delta\chi$ が検出された。この方法により $1.0 \times 10^{-9} \text{emu/g}$ 以上の $\Delta\chi_D$ を容易に測定することが可能となり、カンラン石、サファイア、正長石、魚眼石、生セッコウ、水酸化マグネシウム、KDP、など基本的な酸化物の $\Delta\chi_D$ 値を得た。

当グループでは最近、1100 Gaussの馬蹄形磁石を用いて $4 \times 10^{-8} \text{emu/g}$ の感度をもつ $\Delta\chi_D$ 測定装置を開発した (Table 1 参照)。<sup>2)</sup> 異方性の起源に関する上記の考察によると、未測定物質の大半が、 $1 \times 10^{-8} \text{emu/g}$ 以上の $\Delta\chi$ 値を持つと予想される。一方、このシステムは通常の永久磁石さえあれば容易に導入可能であり、磁気科学に携わっていない物質科学の専門機関でも、異方性の検出が容易となる。すなわち $\Delta\chi_D$ の効率的な集積さらにはこれを用いた実用化に大きく進むと期待される。

一方、前述の考察によると非磁性体質の中には $\Delta\chi_D$ が $10^{-10} \text{emu/g}$ レベルのものも多数存在する。従って $\Delta\chi_D$ 値を集積するには、さらに高い感度を必要とする。感度を向上させる最もシンプルな方法は、ファイバー自体を除去することである。こ

れを検証するために日本無重量総合研究所 (MGLAB)および産業技術総研究所・北海道センター(AIST)での実験を進めた。その結果、微小重力で浮遊し結晶の磁氣的安定軸が、磁場を基準にして振動することを確認した。方解石、生セッコウ、尿素の測定結果を Fig.2 に示す。実験パラメータを変えた時の周期は理論値と一致し、測定原理の有効性が確認された。<sup>3,4)</sup> 現行よりさらに長い周期の実験、例えば航空機での20秒あるいは軌道実験での100秒以上のレベルが実現すれば、感度は桁違いに向上する。 $\Delta\chi_D$ の起源に関するモデルの検証には、多数の測定値が不可欠であり、微小重力を用いた感度の向上が今後重要となる。

磁場配向による新機能材料の開発は一部の物質で、すでに始まっている。その例として高品位の単結晶の育成、人工骨材料の開発、カーボンナノチューブの配向による導電性材料の開発などがあげられる (例えば文部科学省・特定領域研究「強磁場新機能」、「新磁気科学シンポジウム」参照)。しかしその開発には10万ガウス以上の強磁場が必要とされ、効果を起こす物質も一部に限られている。ところでピエール・キュリーらの古典的な考察に従うと、液体に分散した粒子結晶の磁場整列は、粒子の磁気異方性エネルギー $\frac{1}{2}\Delta\chi B^2$ がブラウン熱運動 $\frac{1}{2}kT$ を1桁回った時にほぼ実現する。この考察、および大半の物質の $\Delta\chi_D$ が $1 \times 10^{-9} \text{emu/g}$ 以上であるという前述の予想に従うならば、非磁性粒子の多くは通常の電磁石程度の磁場 (約1T以下)で容易に整列することになる。<sup>5)</sup> このことは新規の実用方法を、超伝導磁石を有さない広範な開発機関で試行し得る、という点で重要である。

自発磁化が磁場から受ける作用は、地磁気の中に置かれた方位磁石が回転振動する現象のために、おそらく有史以前から広く認識されてきた。その認識が今日の様々の磁気デバイスを創出する一因となった。Fig.2に示すように、同様の回転振動が通常の結晶で観察されれば、反磁性物質も磁氣的に活性である事が、直感的に広く認識されるきっかけになると考えられる。その結果、長い磁気科学の歴史からは想像できない新しい利用法が、数多く提案されるようになるかもしれない。

#### References

- 1) Uyeda. C. ; Phys. Chem. Mineral 20, 77 (1993)
- 2) Uyeda. C. et al.; submitted
- 3) Uyeda. C. et al.; Jpn. J. Appl. Phys. 39, L1334 (2003)
- 4) Uyeda. C. et al.; Jpn. J. Appl. Phys. 45, L124 (2006)
- 5) Uyeda. C. et al.; Appl. Phys. Lett. 28, 094103 (2005)

Table 1. Numerical parameters of the experiment of magnetic oscillation using a horseshoe magnet.<sup>2)</sup> The direction of the magnetically stable axes of the crystal show rotational oscillation with respect to  $\mathbf{B}$  with different periods  $\tau'$ . The theoretical relationship between  $\tau'$  and  $B$  is deduced from the rotational equation,  $I (d^2\theta/dt^2) = -(1/2)B^2 M \Delta\chi \sin 2\theta$ , to be  $\tau' = 2\pi(I/M\Delta\chi)^{-1/2} B^{-1}$ ; the contribution of restoration torque suspending the sample was controlled to be negligible, which realized a high sensitive measurement by the simple setup. The measured  $\tau'$  values at  $B = 0.108$  T, 0.114 T and 0.123 T are denoted as  $\tau'_1$ ,  $\tau'_2$  and  $\tau'_3$ , respectively.  $\Delta\chi$  values are determined from the gradient of the measured  $\tau'-B^{-1}$  relationships according to the above equation. The measured anisotropy  $\Delta\chi_{\text{meas}}$  are consistent with the published value  $\Delta\chi_{\text{pub}}$ , which indicate that the measuring system is effective.

Sample	$I/M$ (m <sup>2</sup> )	$\tau'_1$ <sup>-1</sup> [B=0.106T]	$\tau'_2$ <sup>-1</sup> [B=0.114T]	$\tau'_3$ <sup>-1</sup> [B=0.123T] (s <sup>-1</sup> )	$\Delta\chi_{\text{meas}}$ (emu/g)	$\Delta\chi_{\text{pub}}$
1. Biotite	$1.10 \times 10^{-5}$	-	2.08	2.17	$1.4 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
2. Forsterite,	$1.28 \times 10^{-5}$	0.41	0.43	0.45	$7.6 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^{-7}$
3. Graphite,	$1.14 \times 10^{-5}$	-	2.63	2.76	$2.3 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$
4. Muscovite	$2.10 \times 10^{-5}$	0.11	0.12	0.13	$8.3 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-7}$
5. Talc	$0.94 \times 10^{-6}$	0.77	0.81	0.84	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$
6. Urea	$2.87 \times 10^{-5}$	0.075	0.081	0.083	$4.8 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-8}$

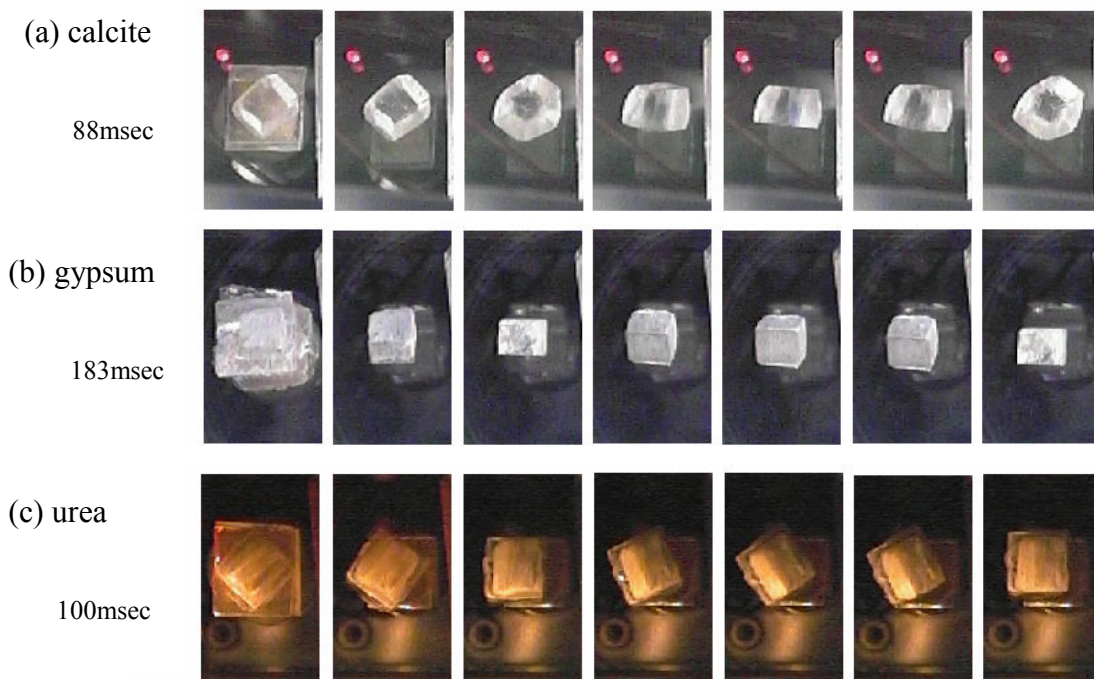


Fig.2 Visual images of magnetic oscillation in microgravity for (a) calcite, (b) gypsum, and (c) urea.<sup>4)</sup> Field is applied in a up-down direction in all the images. Images are arranged in time sequence from left to right; image at left end was taken just before of microgravity. Time intervals between the frames are noted in the left side of each figure. Detailed mechanism of oscillation is similar to that described in Table 1.  $\Delta\chi$  obtained from the period of oscillation is consistent with the published value, which indicate that the measuring system in microgravity is effective