

平成30年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書

ふりがな 氏名	ふくやま ひろき 福山 紘基	学部 学科	理学部生物科学 科生命理学コー ス	学年	3年
ふりがな 共同 研究者氏名		学部 学科		学年	年
				学年	年
				学年	年
アドバイザー教員 氏名	植田 千秋	所属	理学研究科宇宙地球科学専攻		
研究課題名	磁場勾配による有機物の分別				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<研究動機と目的>					
<p>私は以前から天文学・特に宇宙の生命や太陽系の生命の起源に興味があり、大学の同じ学部の研究室が、太陽系の物質分布の起源に磁場が寄与する可能性や、現在の太陽系内探査において磁場を用いて物質のダストの組成を非破壊分析できる可能性を研究していること[1]を知り、この研究室で本研究を始めた。</p> <p>先行研究[1]はかんらん石や氷などの無機物質を扱っていたが、私は生命により深くかかわっている有機物質について、宇宙空間の磁場中で示す挙動を知りたいと考えた。そしてこの挙動と密接につながる事象として、宇宙空間のような微小重力中で、未知の有機物試料の識別・同定や混合物の分離を、磁場勾配を用いて非破壊分析する可能性について研究を行った。</p>					
<研究計画と方法>					
【原理】					
<p>磁石が生む磁場の強度は、磁石からの距離が増加すると共に単調減少するが、そのような磁場勾配下では物体に磁気力が作用する。磁場勾配下のある一点で初速度ゼロで解放された反磁性体は、この磁気力を受けて磁場の外に向かって並進運動する。(図1)</p> <p>粒子のエネルギー保存を考えると磁場ゼロの領域で物体が得る運動エネルギーは、初期位置での磁氣的ポテンシャルが保存されて変換されたものとなる。磁氣的ポテンシャルが完全に運動エネルギーに変換されると、物体の加速が終わり物体は終端速度に達する。このとき以下の式のようなエネルギー保存が成り立つ。</p>					
$-\frac{1}{2}m\chi B_0^2 = \frac{1}{2}mv_T^2 \quad (\text{式1})$					
<p>(m 物体の質量 χ 磁化率 v_T 終端速度 B_0 初期位置での磁場強度)</p>					

磁化率は物質の種類によって特有の値を有し、反磁性の場合 $\chi < 0$ である。式 1 を速度について変形すると、

$$v_T = B_0 \sqrt{|\chi|} \quad (\text{式 2})$$

という式が成り立つ。

この式 2 の通り、終端速度は同一の初期磁場強度のもとでは磁化率のみに依存する。したがって、質量が異なる粒子でも同一の物質でさえあれば、同じ初期磁場強度のもとで等しい終端速度で運動すると考えられる。このことを利用すれば、同一の初期位置（磁場強度が同一の位置）で反磁性粒子の混合物に磁場を作用させることで、磁化率の違いによって粒子を異なる速度で運動させ、混合物を物質ごとに分離することができる。さらに、それぞれの物質が未知の場合は、速度から物質の種類を識別・同定できる。

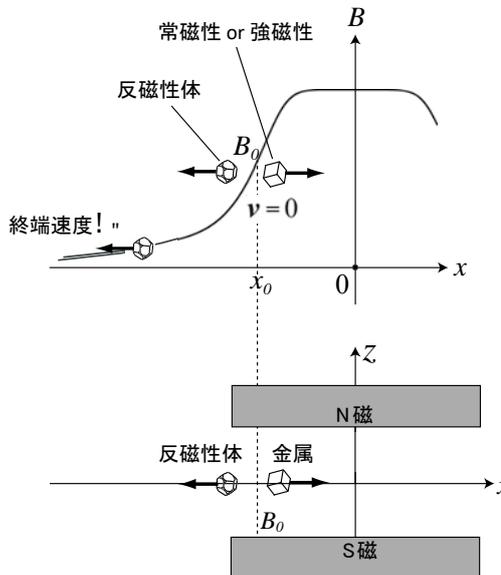


図 1 磁場勾配による反磁性体の磁気並進運動（模式図）

先行研究[1]では、無機物質について実際に複数種類の微粒子が混ざった混合物を物質ごとに分離することに成功している。しかし、無機物質の磁化率はおよそ $-2 \times 10^{-7} \sim -50 \times 10^{-7}$ (emu/g) の範囲で広く分布していることに対し、表 1 によると有機物の多くの磁化率は $-4 \times 10^{-7} \sim -10 \times 10^{-7}$ (emu/g) の狭い範囲に多くの物質が含まれている。

この表 1 により 10^{-8} emu/g の桁で磁化率の差異を識別できれば、物質の種類をある程度絞り込める可能性が見込める。

そこで本研究では、これらの有機物で磁化率の少しの差異による運動速度の違いを検出することを試みた。

物質名	磁化率文献値 (emu/g)
グラファイト	-52×10^{-7}
エタン	-9.03×10^{-7}
メタン	-8.72×10^{-7}
フタロシアニン	-8.21×10^{-7}
コロネン	-8.10×10^{-7}
ナフタセン	-7.40×10^{-7}
アントラセン	-7.20×10^{-7}
ベンゼン	-7.02×10^{-7}
ナフタレン	-7.00×10^{-7}
ダイヤモンド	-5.88×10^{-7}
アラニン	-5.70×10^{-7}
尿素	-5.56×10^{-7}
スクロース	-5.52×10^{-7}
二酸化炭素	-4.77×10^{-7}
一酸化炭素	-3.50×10^{-7}
磁化率を 0.1×10^{-7} emu/g の差で決定・識別することにより、物質名がある程度絞り込むことが可能?	

表 1 有機物の反磁性磁化率[2]

【実験方法】

落下箱の中で試料をネオジウム磁石の磁場勾配下におき、落下箱を自由落下させることで物体に重力が作用せず磁気力のみが作用する環境を作った。(図 2) 落下箱に直接かかる空気抵抗を軽減するため、落下箱を段ボール製のカプセルに入れて (図 2 中の二重カプセル)、二重カプセル落下と同時に二重カプセル内で落下箱が約 2m(0.5 秒間)落下するように装置を組んだ。この装置では、微小重力下で磁気力を受けた試料の運動を、同じく落下箱に取り付けてあるカメラで撮影することで記録する。この映像から運動する試料の位置を読み取り、試料の速度を測定した。

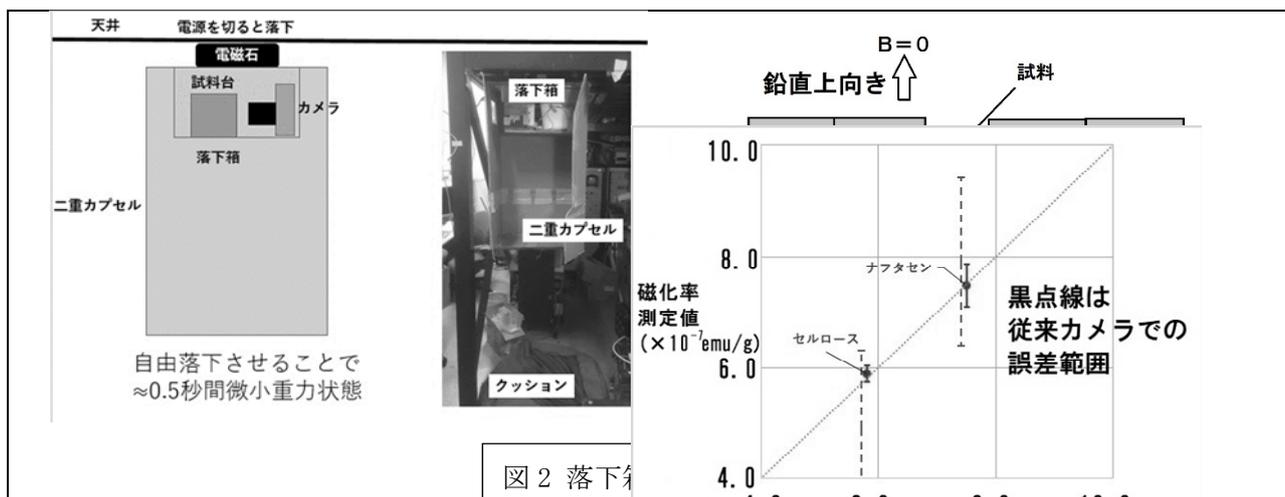


図 2 落下装置

また、試料にはたらく磁気力は

$$F = m\chi B \frac{dB}{dx} \dots (式 3)$$

と表せられる。力の大きさは、磁場勾配 $\frac{dB}{dx}$ と磁場強度 B との積に比例する。試料が十分に力を受けるよう、磁気力が最大になる位置に試料台を設置するため、磁石内の磁場強度の分布をガウスメーターで測定して求めた。そして、磁場中心から 18mm 離れた、磁気力が最大となる位置に試料台を置いた。

装置の準備の後に、本実験で用いる有機物試料の選定を行った。有機物が磁場中で運動したとして、その運動速度が磁化率の違いをどのくらい反映しているのかを比べられるように試料を選定したいと考え、有機物の不飽和度の違いに着目した。不飽和度が大きくなる程物質の磁化率が大きくなることは既知であり、不飽和度の違い（磁化率の違い）が並進運動速度の違いとして観察できるかという観点で、物質の種類による磁気分離が可能かどうか調べるためである。不飽和度が非常に大きいグラファイト、小さいセルロースに加え、ナフタレン・アントラセン・ナフタセンといった芳香族で磁化率の違いが小さい類似の物質を用いた。

こういった異なる有機物間の磁化率の小さな違いを精度よく識別するためには、研究室で元々使われてきたカメラでは性能（高速度撮影時の位置分解能）が足りないと考え、高画質な新しく高速度カメラの選定を要した。産業用・研究用として企業向けに販売されている機種ではなく、本来趣味向けの天体観測に使われるカメラを用いて安価に研究を行うことができた。

<研究結果>

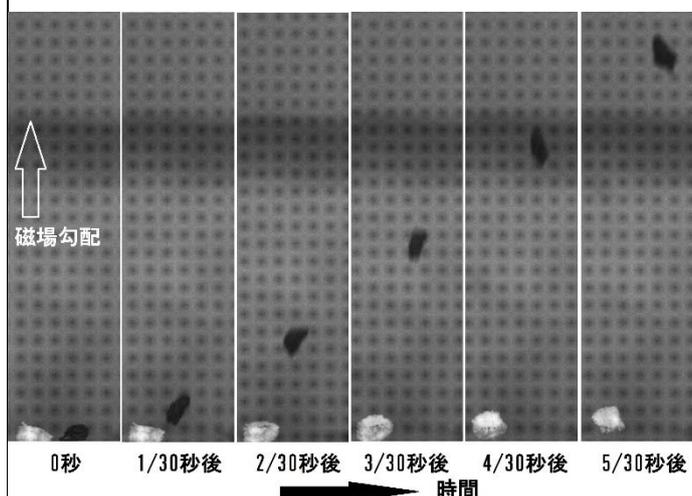


図 3 試料の運動（連続写真）
 間隔は 1/30 s
 右の黒い試料がグラファイト（磁化率文献値 $\chi = -52 \times 10^{-7} \text{emu/g}$ ）で、右の白い試料がセルロース（平均幅 1.0mm 文献値 $\chi = -5.7 \times 10^{-7} \text{emu/g}$ ）
 5/30 秒後までに、グラファイトは 12mm、セルロースは 1mm 鉛直上向きに運動した。

図 3 のように、複数種類の有機物試料で実

際に磁場勾配に沿って微弱重力下で運動することが確認できた。また、(1),(2)式の通り、その飛行速度も磁化率によって変化した。

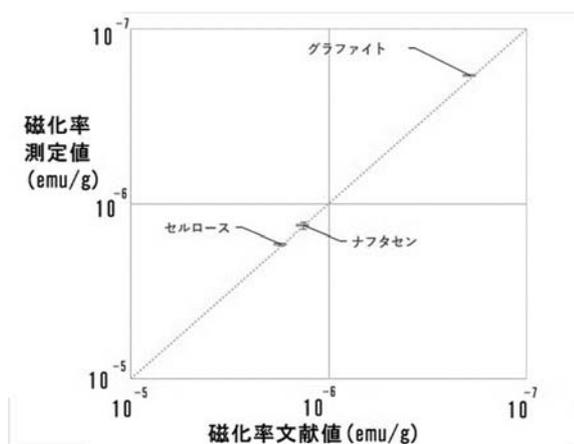


図 4 有機物試料の磁化率測定結果

図 4 に示すように、測定された磁化率は文献値と概ね一致している。表 1 で挙げた、有機物の磁化率として特に多い $-4.0 \times 10^{-7} \sim -1.0 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$ の範囲では、従来のカメラでは磁化率が 10^{-7} emu/g 異なる物質も、誤差範囲の中に入っており分離できなかった。一方、今回導入した新しいカメラを用いた装置ではよく分離できていることがわかる。さらにこの精度だと磁化率が 10^{-8} emu/g 異なる物質の識別も期待できることが分かる。

<本研究で得られた成果と今後の展望>

本研究において、有機物を固体粒子の状態と同定・識別したり、有機物の混合物を物質ごとで異なる速度で運動させて分離する手法の実用可能性が新たに示された。磁化率の違いが 10^{-7} emu/g の桁でしか識別できなかった先行研究（無機物）では提案にすぎなかった手法だが、本研究で 10^{-8} emu/g の違いが識別できる展望が得られたことで、前述表 1 の物質の多くを見分けることが現実味を帯びている。この手法は簡便な装置で非破壊で行えること、さらに有機物の固体の塊のまま混合物分離ができることにおいて、物質の分析手法として他のクロマトグラフィーとは異なる利点があると考えられる。実験室で小規模に生じさせられる微小重力環境には維持できる時間に制約が付くが、その制約内で精度よく、かつ低予算でデータを集めることのできる装置の一例を示すことができたことも大きい。これは、他の短時間の現象を高速で捉えることが要求される一部の学術研究・企業研究でも、分野を問わず応用できる可能性が十分あり、実験・分析手法の面から見た成果は小さくないと考える。

分析以外に、惑星科学の理論への応用としての方面では、原始惑星系円盤内で有機物が原始星からの磁場によって運動する可能性を示唆する影響を示したことは、惑星形成論の議論において現在太陽系の有機物分布、さらに生命の存在を議論するうえで新しい視点を示すことができたと考えられる。

なお、本研究の一部は IEEE Transactions on Magnetics に論文投稿し、その Early Access として掲載された (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8493521>)。改良した装置での測定結果などをさらに 2019 年 3 月開催予定のサイエンスインカレにおいて報告したいと考えている。

<参考文献>

- [1] K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Terada “Magnetic separation of general solid particles released by a permanent magnet” Scientific Reports ,6,38431(2016)
- [2] R. Gupta “Landort Bornstein New series II -16 2” p2-p239 (1983) (磁化率文献値)