

宇宙空間では全ての物体が磁場の作用で運動する

大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻 植田 千秋

人類は有史以前から、砂鉄や鉄針などが磁場で運動することを認識し、それらをヒントにして、羅針盤から発電機まで様々な道具を生み出してきました。この効果は長い間、鉄を多く含む一部の物質に限るとされてきました。しかし近年、宇宙を模擬した微小重力実験の結果、大多数の物質が、ハンドマグネット程度の磁場で、顕著な反発や整列を引き起こすことが分かりました。私達は実験科学の立場から、この新たな性質が、宇宙空間で引き起こす可能性がある作用を検討してきました。

1. 大多数の固体は磁場に反発して並進する

自然界に存在する固体のうち、磁場の作用を強く受ける物質は、強磁性体、フェリ磁性体に分類され、そのほとんどが鉄を主成分として含みます。それ以外の一般の固体は、反磁性体あるいは弱い常磁性体に分類され、19世紀以前には、磁場の作用が観測されることがありませんでした。一般の固体にも顕著な磁場の作用が起こることは、M.ファラデーの報告によって、初めて知られるようになりました。この報告で彼は、ガラスなどの身近な物質が、自作の電磁石で発生させた“強磁場”に反発することを示しています。しかしそれ以降は、磁場の作用が大きい一部の物質に興味が集申し、一般の固体への作用は、ほとんど顧みられませんでした。



マグネットにスチール缶が引付けられる



地球磁場の方向に方位磁針が整列する

図1. 磁場が引き起こす運動(科学館で展示中)

1980年代以降、大型の超電導磁石が開発された結果、一般の固体を10万ガウス以上の超強磁場で浮遊させるなど、様々な強磁場効果が報告されるようになりました。私たちは、一般の物質が磁場の中で得る位置エネルギーの大きさを再検討

しました。その結果、微小重力空間では大多数の固体粒子が、ネオジウム磁石の磁場に反発し、並進することを初めて観測しました。そして粒子の加速度は(重力と同様に)粒子の質量に依存しないこと、さらに物質ごとに固有の加速度をもつことを見出しました。その後、これらの性質を利用して、粒子の集団を物質の種類ごとに磁気分離できることを提案し、図3に示す自作の微小重力発生装置で実証しました。図中(a)の装置で、磁場は向かい合わせに設置した2個の小型ネオジウム磁石のN極S極の間に、発生させます。この磁場の強さは+x軸方向に、単調に減少します。このため磁場に反発する粒子の混合体は、微小重力空間に開放直後から、物質ごとの集団に分れて+x軸方向に

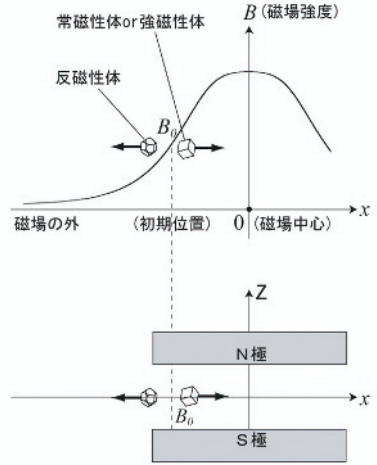
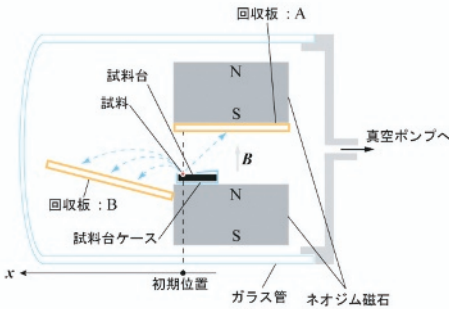
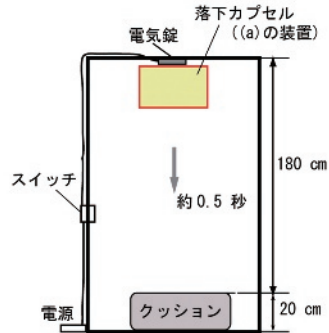


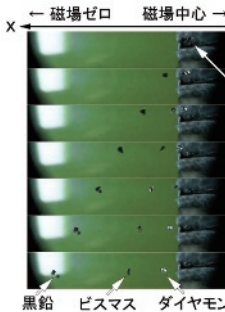
図2. 磁気分離の原理



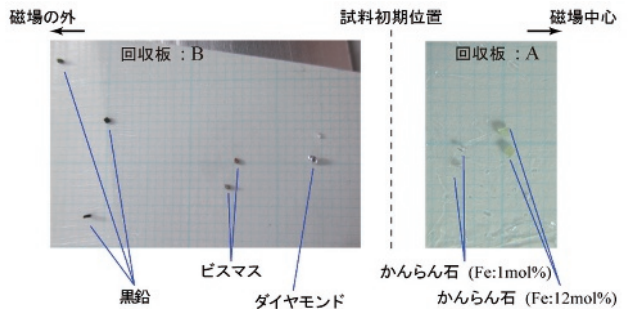
(a)装置図



(b)微小重力発生装置



(c)微小重力下で分離する試料



(d)回収板に到達した試料

図3. 微小重力空間で行った磁気分離実験

並進し、図中(d)に示すように、回収板に到達します[YouTube「現存する全物質を永久磁石で分離する」(https://youtu.be/_OaEjvFJi0Q)参照]。回収板の左端には、反発力が一番強い事で知られる黒鉛が収容されています。これにより小型の磁石で全物質を、あたかもプリズムで光の7色を分けるように、分離できる事が示されました[Sci. Rep. 6, 38431, 2016]。微小重力の空間は、装置の箱を高さ1.8mの鉛直シャフト内で自由落下させることで、約0.5秒間発生させました[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2016/20161208_1 参照]。

磁場に引付けられない固体を、磁石で誘導する技術としては、粒子に磁気ビーズを付着させ、磁場勾配を加える方法が実用化されています。これは特定のターゲット粒子を抽出あるいは排除するのに効果的です。しかしこの方法では、ビーズを付着させねばならない上、さらに粒子の誘導のための強磁場の発生装置を必要とします。

一般に研究・開発の現場では粒子の混合物を分析することが多く、その前処理として、物質の種類ごとに混合物を分離し、それらを識別する技術が望まれます。しかし固体粒子の場合、これを効率的に実現する方法はまだ確立されていません。その実例として惑星科学の分野では、貴重な地球外物質の前処理に、重液による比重分離や、溶解／蒸発などの化学処理が用いられてきました。しかし処理の過程で残った汚染物質の除去が難しかったり、試料の大半が消失するなどの問題がありました。月の表土や、はやぶさ1 & 2で得られた小惑星表土は岩石の細粒であり、図3の装置を改良することで、汚染フリーな試料抽出が実現します。この分離方法は、地上の汚染物質除去や希少物質の抽出にも応用でき、「固体版クロマトグラフィ」として発展する可能性があります[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190313_1 参照]。

2. 宇宙で起こる固体粒子の磁気並進

近年、はやぶさ1 & 2やオシリス・レックスに代表されるように、固体試料をサンプルリターンするミッションが、目覚ましい成果をあげています。ところで広大な太陽系空間について精密な物質の分布を知るには、これまでのサンプルリターンと並行して、多数の観測地点でサンプル採取や分析を行ない、その結果を地球へデータ送信する探査手法が望まれます。このような装置を探査機に搭載する場合、最低限の条件として 1)小型で堅牢である 2)動作原理が単純で十分実証されている 3)消費電力が少ない 4)微小重力空間で作動する 5)貴重な試料を非破壊で保持で



図4. ミッション継続中のはやぶさ2(想像図)
(イラスト:池下章裕)

きるなどの性能が求められます。図3に示すシステムはこれらの条件をほぼ満たしており、将来のミッションにおいて、質量分析計や赤外分光計など、既存の装置の機能を補完できるようになるかもしれません。

物理法則の特徴の一つは、対象とする空間のスケールを大きく変化させても、成立し得るということです。そこで私たちは、銀河内の中の物質循環の各段階で、宇宙磁場が固体物質の分化に寄与する可能性について考察を進めています。図5に示すように、銀河空間には様々な強度の磁場と、多種の固体微粒子が遍在している領域がいくつもあります。

しかしこれまでは、主に磁場とイオン化したガス間の作用ばかりが注目され、固体粒子に磁場が直接作用する可能性は、あまり論じられていません。図3の実験で得られた結果は、星間の磁場によっても、固体粒子が物質の種類ごとに分離する可能性を示唆しています。これは、宇宙において物質がどのように分化していったかを研究する上で、新しい視点を提供しうるものです。

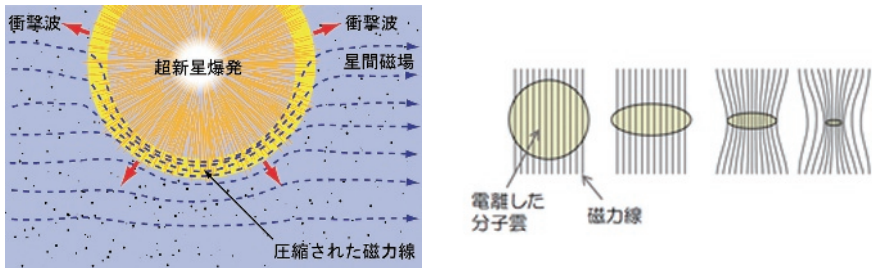


図5. 銀河の星間で磁場とダストが共存する領域

3. 大多数の固体は磁場の方向に整列する

磁鉄鉱で作った匙が、地球磁場によって北（磁北）を指す現象は、約千年前に羅針盤として実用化され、世界規模で人々の交流を促進してきました。一方で鉄を含まない一般の固体粒子が磁場方向に部分整列する性質は、20世紀初めに、P.キュリーらによって研究が始まりました。しかし磁場整列に関しても、その後は磁場の作用が強い一部の物質の研究が、しばらくの間続きました。

1980年代に入って、単一のベンゼン分子、生体物質、粘土粒子などを整列させる実験が、日本の超強磁場施設を中心として始まりました。これと並行して固体粒子の方向を磁場で



図6. 磁性物理学の祖、P.Curie
(左側の人物)

https://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Curie

整列させて、新材料を創生する試みも始められました。これらの研究は、強度の高い人工骨、高性能の超電導材料など、これまでにない機能材料の開発を目指すものです。しかし粒子の整列には、当初10万ガウス以上の強い磁場が必須とされ、その実用化は、簡単には進みませんでした。

私たちは、先に述べたキュリー達の古典的モデルを用いて、整列に必要な最低限の磁場の強さを試算しました。その結果、液体に分散させたマイクロサイズの粒子は、概ね1万ガウス以下の磁場で整列することがわかりました。この磁場強度は小型のネオジム磁石で発生させることが十分可能です。そして微小重力の環境下で行なった実験により、大多数の物質の粒子が、ネオジム磁石の磁場で整列することを確認しました [Appl. Phys. Lett. 86, 094103, 2005]。キュリーらに始まる整列モデルによると、磁場整列は原子や分子が粒子内の特定の方向に配列することで、粒子内の物理的性質に異方性が存在する場合に実現します。従って液滴、ガラス質および立方体の構造をもつ結晶では整列が起りません。先に述べたように、磁場整列での研究は新材料の創成を目的として進められてきました。私たちの研究室では自然界で整列現象にも眼を向け、星間の「ダスト整列問題」に取り組んでいます。

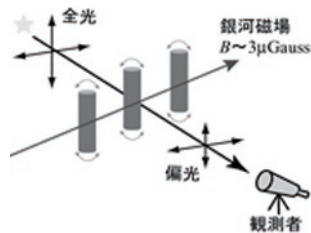


図7. 星間のダスト整列

ガラス試料 1コマ 1/600秒

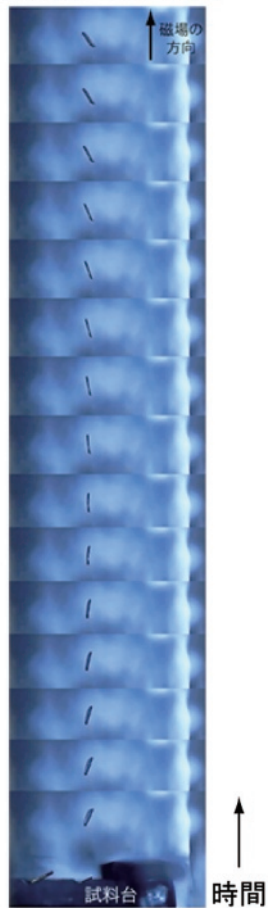


図8. 微小重力空間で行なった急冷ガラスの磁場による回転振動の実験

4. 宇宙空間における「ダスト整列」問題

銀河空間での可視・赤外の偏光観測の結果、星間に漂う固体微粒子は、図7に示すように宇宙の磁場に対し垂直に部分整列していると結論づけられています。すなわちダストの整列により天体から放射される可視・赤外の全光のうち、整列方向の偏光成分が選択的に吸収(または散乱)され、観測者は宇宙磁場と同方向の偏光が観測される、と説明されます。今日の宇宙物理では、この結果を用いて、宇宙磁場の方向が推定され、星や惑星の進化もこの結果に基づいて研究されています。この偏光がダスト整列によるものであるなら、それは現実の世界で起こっている最も普遍的な磁

場整列現象ということになります。しかし宇宙科学でも、磁性物理でも、今日までその原因が解明されていません。その理由の一つは、観測から推定されるダストの的成分が、鉄を殆ど含まないシリカガラスであり、粒子内に原子配列がないため、P.キュリーの古典モデルによる磁場整列が困難なためです。

この状況で、実験科学の立場から取り組むべきことは、ガラス質の粒子には、本当に磁場整列の特性がないのか、調べる事です。私たちは、熔融状態から急冷して合成されたガラスの表面に大きな歪みが局部的に蓄積される事実に着目しました。そして熔融状態から秒速約10°Cで冷却してガラス試料を作成し、その表面を厚さ0.02ミリメートルの板状に切り出しました。これを微小重力空間に浮遊させ、小型のネオジウム磁石によって均一な磁場を加えました。その結果、図8に示すように、ガラス粒子の板面は磁場方向を中心とした回転振動を起こしました。すなわち急冷ガラスの表面は、従来の認識と異なり、数千ガウス程度の磁場で、磁場方向に整列することが明らかとなりました。今後は図8で観測した回転振動の周期から、磁場整列の能率を決定し、これをキュリーのモデルに適用することで、「ダスト整列」が定量的に説明できるか検証する必要があります。その一方で、急冷ガラス表面で、磁場整列の特性がなぜ局部的に発生するのか、磁性物理の分野での解明が待たれます。

5. おわりに

これまで自然科学では、顕著な現象の研究が集中的に進められ、それに続いて、作用の弱い現象を捉えるために、高性能で高価な装置が導入されるのが常でした。しかし固体の磁気的作用に関しては、小型ネオジウム磁石と微小重力発生装置を組み合わせたことで、大型の超電導磁石に引けを取らない効果が観測されました。ところで自然界には、今回紹介したような基本的な現象が、未発見のまま数多く眠っているように思われます。最近では、高電圧発生装置、高速度カメラ、小型の重力センサーなど、以前は一般で入手できなかった機器が手に入りやすくなり、高機能な装置を安価に製作できるようになりました。かつての自然科学がそうだったように、アマチュア実験家が自由な発想を武器にして、専門の研究者と肩を並べる日が近いことを祈りつつ、筆を置きます。

著者紹介 植田 千秋(うへだ ちあき)



1982年、大阪大学理学部物理学科卒業、理学博士。現在、同理学研究科 准教授。さきがけ研究21「場と反応」研究者を兼任(1992-96年)。趣味：天牛で掘り出し物のCDや図録を見つけること。少し昔の住宅地を散歩すること。