

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23550111

研究課題名(和文) 強磁場による弱磁性物質の遠隔的マニピュレーションに関する研究

研究課題名(英文) manipulation of feeble magnetic materials using high magnetic fields

研究代表者

廣田 憲之 (HIROTA, Noriyuki)

独立行政法人物質・材料研究機構・先端材料プロセスユニット・主任研究員

研究者番号：10302770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物質に対し非接触で力学的影響を与えられる磁場の特徴を利用し、物質を遠隔的にマニピュレーションする技術に関し検討した。強磁場下における微視的その場観察とシミュレーションにより流体と弱磁性物質の関わる種々の現象について理解を深めた。流体中に分散した弱磁性微粒子の位置制御、相互作用による組織制御、運動方向制御、さらに、流体内部での流れの制御に関して理解できた。また、適切な空間磁場を与えることで、磁場による弱磁性物質の挙動制御が効果的に行えることも確認した。これらの成果は、高温プロセスなど物質の制御を非接触で行ないたい場合に必要となる技術として強磁場を利用するための基礎となる。

研究成果の概要(英文)：Utilizing the magnetic field, a dynamical effect can be given on materials including feeble magnetic materials without any direct contact with the matter. In this research, based on this advantage of magnetic fields, the technique to control materials in remote manner was investigated. In-situ microscopic observation under high magnetic fields and simulations were carried out to understand some phenomena consisted by feeble magnetic materials and fluids. As a result, control of position, structure and behavior of feeble magnetic particles dispersed in a fluid were understood. The way of convection control of feeble magnetic fluid was also understood. It was confirmed that the control of the behavior of feeble magnetic materials was optimized by applying a suitable spatial magnetic field distribution. Knowledge obtained here seems to be a base to utilize high magnetic fields as a way of remote control for feeble magnetic materials in practical processes.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・分析化学

キーワード：磁気力 弱磁性物質 可視化 シミュレーション 非接触制御

### 1. 研究開始当初の背景

磁性はすべての物質が有する性質である。したがって、物質により大小の差はあるものの、磁場を用いることで、全ての物質に対して力学的な作用を物質に接触することなく与えることができる。空間的に磁場が変化する場に置かれた物質に対し作用する「磁気力」はよく用いられる。物質が磁氣的性質に異方性を有する場合には、磁場中で「磁気トルク」により方向が揃う配向現象が起こる。また、よく知られるように、電場と磁場を直交して作用させることにより、「ローレンツ力」が働く。これら物質に対して非接触で作用する力学的効果の大きさはそれぞれの物質の物性に依存する。したがって、これを利用すれば、物質の遠隔的マニピュレーションを通して、物質の分離や、組織制御、個々の物体の持つ性質の分析が可能になる。

磁場を利用した分離技術については、磁気力を利用して流体中に分散している物質と流体とを分離する高勾配磁気分離がよく知られている。また、磁気アルキメデス分離では、物質が磁気浮上する際、その位置は物質固有の磁化率と密度に依存して決定されることを利用し、物質の種類ごとの分離が実現する。高勾配磁気分離、磁気アルキメデス分離ともに、空間的な磁場分布を制御することで、その効率や分離分解能が向上することがわかっている。さらに、近年、分離・分析に用いられるマイクロ流体セル中での物質挙動の制御に磁氣的遠隔力を適用すれば、新規の分離・分析・反応制御のパラメータとして利用できると期待される。

しかし、流体中に存在する磁性の小さな反磁性・常磁性物質の強い磁場下での挙動については、まだ十分に理解されているとは言えない。このため、材料プロセス制御に用いられる際には、過剰な条件が適用されているケースが多い。

### 2. 研究の目的

前述の背景を踏まえて、本研究では、物質に対して非接触で力学的影響を与えることができる磁場の特徴を利用し、物質を遠隔的にマニピュレーションする技術に関して知見を集積することで、流体中における物質挙動制御を最適化し、物質の分離・分析への応用展開への基盤を形成することを目指した。このため、強磁場下で使用できる共焦点レーザー顕微鏡やシュリーレン干渉計等の可視化機構を用い、マイクロメーター粒子や流体等挙動のその場観察を種々の条件下において行ない、その知見を集積したほか、空間磁場分布の影響についてシミュレーションにより考察した。

### 3. 研究の方法

流体中の弱磁性物質挙動の強磁場下における微視的その場観察と、シミュレーションによる解析との対比を行なうことで、磁氣的



図 1 本研究で用いた強磁場下微視的その場観察のツール

遠隔力による弱磁性物質挙動の体系的な理解を深めようとした。強磁場下での物質挙動のその場観察は、スペースが限定されること、強磁場が存在するために磁性材料を使用した通常の観測系が持ち込めないことにより困難が伴う。特にマイクロメーターオーダーの微視的その場観察には特殊な光学系が必要となる。本研究では、世界でも 1 台しかない強磁場中走査型レーザー顕微鏡(図 1 上)と、側方観測系(図 1 下)を利用してこれを実現した。また、別途開発した強磁場中で利用可能なシュリーレン光学系を用いて弱磁性流体自身の流れの可視化も実施した。シミュレーションは分子動力学法に基づくモデルにより印加磁場による運動と粒子間に働く相互作用を考慮した解析を行なったほか、ナビエ・ストークス式に基づく流体計算により、流体自身流れに対する磁場の影響や、流体中での弱磁性物質挙動を評価した。また、これらを通じて、磁場の空間分布による影響を評価した。

### 4. 研究成果

まず、流体中に希薄に分散した弱磁性微粒子の挙動について評価した。マイクロ流体セル中を流れる希薄分散液中のマイクロ粒子は、空間磁場の不均一による磁気力の影響を受け、その運動の軌跡を制御できた。軌跡の変位はその物質の磁化に依存するため、同一物質の場合には、粒径に依存した分離が、同

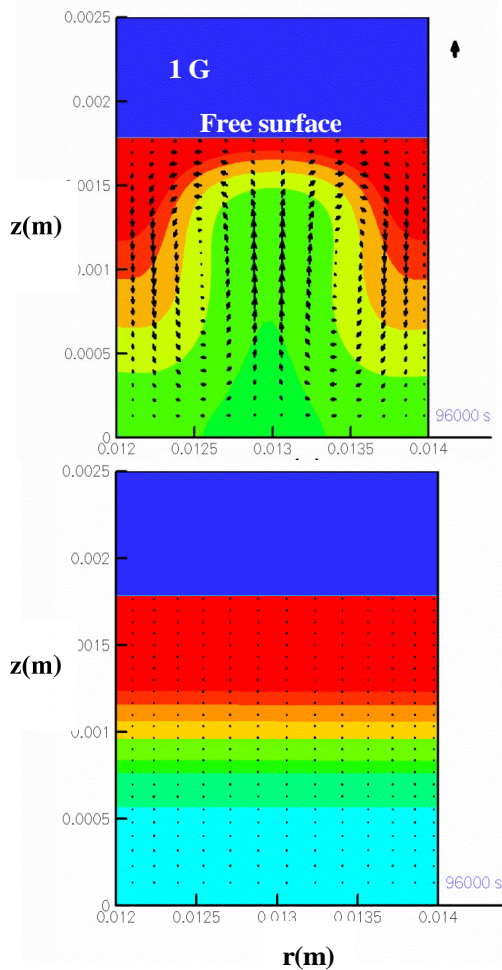


図 2 弱磁性流体の密度差対流に対する磁場影響のシミュレーション結果  
上: 無磁場、下: 高磁気力環境下、カラーは濃度差を表し、矢印の向きと大きさが各場所での流れのベクトルを表す。

一径の異なる物質の混合物の場合には、物質ごとの分離が可能になる。空間磁場の勾配をどの方向に印加するかによって、多様な制御が可能となることが明らかとなった。少なくとも  $5 \mu\text{m}$  まではこの制御が有効であることを確認した。また、重力と磁気力を重畳し、粒子を流体中で浮上させる場合(磁気アルキメデス浮上)、その安定浮上位置は物質の磁化率、密度、空間磁場分布で決定され、物質のサイズには依存しないことから、物質ごとの分離が実現し、分離の所要時間が粒径に依存すること、実効的な時間の範囲では  $20 \mu\text{m}$  程度までは適用可能であることを確認した。また、磁気アルキメデス分離の効率的な回収法についても考案できた。分子動力学法に基づくシミュレーションモデルに熱的擾乱を取り込み、流体中における弱磁性物質の挙動を解析した。特に物質のサイズは磁気遠隔力による物質挙動制御に対する熱擾乱の影響の度合いを決定し、磁氣的相互作用による構造形成のケースでは、時間平均を考慮すると、 $1 \mu\text{m}$  程度まで制御可能であることが分かった。

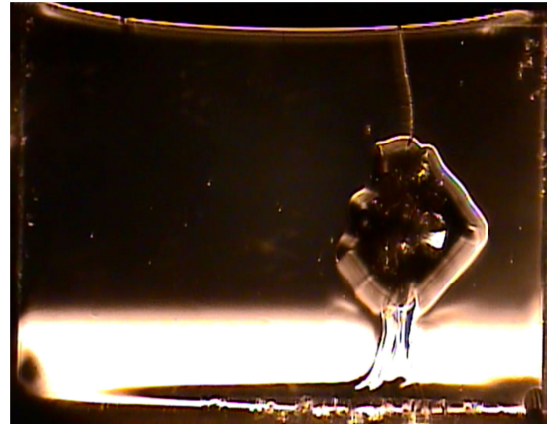


図 3 13 T までの強磁場下で利用可能なシュリーレン光学系を用いた密度差対流の可視化例

弱磁性流体自身の流れの磁場制御についても検討した。実験的には強磁場下で利用可能なシュリーレン干渉計を作製し、屈折率の違いを利用して流体中の流れを可視化した。濃度勾配による密度差に起因した対流に対して、空間的な磁場分布を考慮した配置をとることで、磁気力が影響し、流れの挙動が変化することを確認した。また、ナビエ-ストークス式に基づくシミュレーションにより、空間的な磁場分布により弱磁性流体中の流れの挙動がどのように変化するかについて評価した。その結果、空間磁場分布の制御により、流体に作用する磁気力の方向・大きさを適切に設定すると、流体挙動を効果的に制御することができ、ある条件では、対流をほぼ静止できることもわかった。シュリーレン干渉計を用いた流体中の屈折率分布の観測結果と合わせ、強磁場下での流体挙動の多様な制御性を理解できた。

この他、フランスのグループと共同で製作した装置を使用し、弱磁性流体挙動の高時間分解能観察に取り組み、磁気浮上状態等の環境にある流体挙動のその場観察に成功した。また、空間磁場設計に関して、磁性体等の空間的な配置により、均一度が高く磁気力の強い場を比較的広い領域に形成する方法、物質の直線配列構造を形成するために適した磁場の発生方法についても検討を行ない、その指針を得た。

これまでの研究成果から、流体中に分散した弱磁性微粒子の位置制御、相互作用による組織制御、運動方向の制御手法について実験及びシミュレーションにより体系的に理解できた。さらに、流体自体の挙動についても、濃度分布などによる流体内部での流れの制御に関して理解したほか、高時間分解能観測により興味深い現象が磁場により引き起こされることを確認した。各種シミュレーションの結果から、適切な空間磁場を与えることで、磁場による弱磁性物質の挙動制御が効果的に行えることも確認した。これらの成果は、高温プロセスや生体内現象など、物質の挙動



制御を非接触で行ないたい場合に有用と考えられる遠隔的のマニピュレーション技術として強磁場を広く利用するための基礎となるものである。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

廣田憲之、高磁場による無機材料の挙動制御, Journal of the society of inorganic materials, Japan, 査読あり, 20, No. 5 300-305 (2013)

Syou Maki, Noriyuki HIROTA, Magnetic separation technique on binary mixture of sorbitol and sucrose, Journal of Food Engineering, 査読あり, Vol. 120, No. 1, 31-36 (2013),

10.1016/j.jfoodeng.2013.07.006

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA, Shinji MATSUMOTO, Hitoshi WADA, Motosuke Kiyohara, Takahiro Ode, Masaru Tanokura, Akira Nakamura, Jun Ohtsuka, Development of a protein crystal formation system with a superconducting magnet, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 査読あり, 23, 3, 3700104-1 - 4 (2013), 10.1109/TASC.2012.2232693

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA, Shinji MATSUMOTO, Hitoshi WADA, A simulation study of protein solution under magnetic force, Journal of Applied Physics, 査読あり, Vol.113 No.7 (2013) 073913-1-8, 10.1063/1.4792650

廣田憲之、安藤努、高磁場による弱磁性物質の自己組織的構造形成、マテリアルインテグレーション, 査読なし, 25, No. 11 23-28 (2012)

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA, Shinji MATSUMOTO, Hitoshi WADA, A simulation study of magnetic force effects on solution flow during protein crystal growth, Journal of Applied Physics, 査読あり, 111, 093907-1-6 (2012) 10.1063/1.4709724

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA, Shinji MATSUMOTO, Hitoshi WADA, A simulation study of solution flow under magnetic force field, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 査読あり, Vol.22 No.3 (2012) 4904204-1-4

Martin Vojtíšek, Mark D. Tarn, Noriyuki Hirota, Nicole Pamme, Microfluidic devices in superconducting magnets: on-chip free-flow diamagnetophoresis of polymer particles and bubbles, Microfluid Nanofluid, 査読あり, 13, 625-635, 2012 10.1007/s10404-012-0979-6

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA, Shinji MATSUMOTO, Hitoshi WADA, Simulation of fluid flow during protein

crystal growth in magnetic fields, Journal of Applied Physics, 査読あり, Vol.110, No. 4, 2011, 043903-1-6

Tie Liu, Qiang Wang, Noriyuki HIROTA, Yin Liu, Shuanghui Chen, Jicheng He, In situ control of the distributions of alloying elements in alloys in liquid state using high magnetic field gradients, JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, 査読あり, Vol. 335 No. 1, 2011, pp. 121 - 126

〔学会発表〕(計 10 件)

Noriyuki Hirota, Development of high-throughput high quality protein crystal growth system utilizing high magnetic force, The 4th International Forum on Magnetic Force Control, 2013/11/21-22, Osaka, Japan (Invited)

Noriyuki Hirota, Hitoshi Wada, Motosuke Kiyohara, Masaru Tanokura, Akiko Kita, Ei-ichiro Suzuki, Hidehiko Okada, Takahiro Ode, Akira Nakamura, Jun Ohtsuka, Nobutaka Numoto, Tatsuki Kashiwagi, Development of high throughput and high quality protein crystal growth system using a superconducting magnet, International Conference on Magneto-Science 2013, 2013/10/13-17, Bordeaux, France

Noriyuki Hirota, Tsutomu Ando, Hidehiko Okada, Behavior of feeble magnetic materials under high magnetic fields, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cutting Edge of Computer Simulation of Solidification, Casting and Refinement, 2013/5/20-23, Aalt Univ. and KTH

Noriyuki Hirota, Magneto-Archimedes Separation as a way of Particle Removal from Suspension, International Conference on Ferrites, 2013/4/15-19, Okinawa, Japan

廣田 憲之、強磁場下における物質間相互作用による自己組織的構造形成、第 12 回日本磁気科学会研究会/応用物理学会磁気科学研究会第 1 回講演会、2012/11/19 - 20、京都大学、京都 (Invited)

Noriyuki Hirota, Tsutomu Ando, Control of the feeble magnetic materials behavior with high magnetic force, 7th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, 2012/10/22-26, Beijing International Convention Center, Beijing, China (Invited)

Noriyuki Hirota, Hitoshi Wada, Motosuke Kiyohara, Masaru Tanokura, Akiko Kita, Ei-ichiro Suzuki, Hidehiko Okada, Takahiro Ode, Akira Nakamura, Jun Ohtsuka, Nobutaka Numoto, Tatsuki Kashiwagi, Development of the device for high throughput high quality protein crystal growth using high magnetic forces with the

aid of optical microscope, International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields, 2012/5/13-2012/5/17, Autrans, France (Invited)

Noriyuki Hirota, Magneto-Science Research in NIMS, Japanese-French High Field Research Collaboration Workshop, 2012/3/29-30, CNRS, Grenoble France (Invited)

廣田憲之, 安藤努, 強磁場下における弱磁性微粒子挙動に関する研究, 第85回低温工学・超電導学会 2011/11/9 - 11 金沢歌劇座, 金沢, 日本(Japan)

Noriyuki HIROTA, Tsutomu ANDO, Contactless control of the behavior of feeble magnetic materials using high magnetic fields, International Conference on Magneto-Science 2011, 2011/10/9-15 Shanghai Univ. (Invited)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
現在のところ、なし。

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣田 憲之 (HIROTA, Noriyuki)

物質・材料研究機構・先端材料プロセスユニット・主任研究員

研究者番号：10202770