

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15350

研究課題名（和文）磁気斥力を内包したソフトマテリアルの開発

研究課題名（英文）Development of soft materials with magnetic repulsion

研究代表者

佐野 航季（Sano, Koki）

信州大学・学術研究院繊維学系・助教

研究者番号：20845763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁気斥力を生み出すためのビルディングブロックの探索と磁気斥力を内包したソフトマテリアルの作製を行なった。得られた磁性ナノシートは水中に安定に分散し、一定以上の濃度でリオトロピック液晶性を発現することを確認した。また、1テスラ以下のハンドマグネットによってこのナノシートを容易に磁場配向可能であることも明らかになった。さらに、磁気斥力を利用することによってハイドロゲルの力学物性を増大させることにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の身の回りで日常的に使われる有機材料・複合材料の設計戦略は概して「引力的相互作用」に基づく。これと対をなす概念は「斥力的相互作用」であるが、特に磁気斥力はその合理的設計と制御の難しさから、材料科学分野において戦略的に利用されてこなかった。本研究で得られた成果は、積極的に利用されてこなかった「磁気斥力」をソフトマテリアルの材料設計に活用するための有力な指針となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we fabricated building blocks to generate magnetic repulsion and created soft materials with magnetic repulsion. We confirmed that the obtained magnetic nanosheets are colloidally stable in water, forming lyotropic liquid crystals, and can be readily oriented in water by a hand magnet of less than 1 T. We successfully enhanced the mechanical property of a hydrogel by using magnetic repulsion.

研究分野：ソフトマテリアル

キーワード：磁気斥力 ソフトマテリアル 磁性ナノ材料 ハイドロゲル 無機ナノシート 力学物性

## 1. 研究開始当初の背景

我々の身の回りで日常的に使われる有機材料・複合材料の設計戦略は概して「引力的相互作用 (図 1)」に基づく。例えば、分子や高分子間の化学結合や構成要素間に働く引力的相互作用を適切にデザインすることで、様々な機能や優れた力学物性を有する材料を作製できる。一方、これと対をなす概念は「斥力的相互作用 (図 1)」であるが、特に静電斥力と磁気斥力はその合理的設計と制御の難しさから、長年、材料科学分野で戦略的に利用されてこなかった。これは、その合理的な設計と微視的スケールでの構造制御が極めて難しいためだと考えられる。しかしながら、「静電斥力」や「磁気斥力」は非接触かつ長距離に作用する力であり、「引力的相互作用」だけでは実現不可能な革新的材料の創出へと繋がる可能性を秘めている。

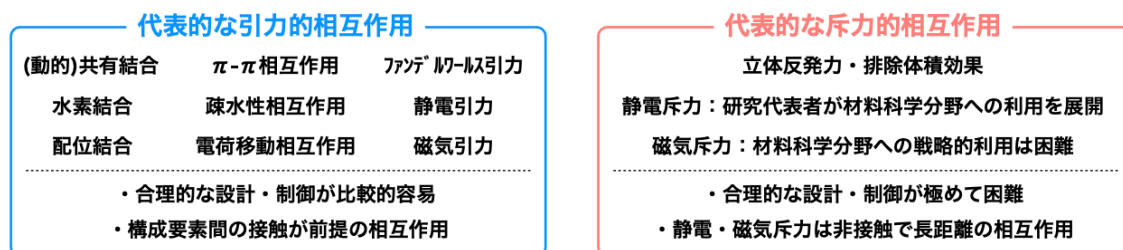


図 1. 材料科学分野で従来用いられてきた引力的相互作用 (左) と今回着目する斥力的相互作用 (右)。

## 2. 研究の目的

研究代表者はこれまで、無機ナノシート間に働く「静電斥力」を自在に制御することによって様々な機能性ソフトマテリアルを開発してきた。本研究では、今までの研究で得られた「斥力」に関する知見と技術を活かすことによって「磁気斥力」の概念をソフトマテリアルの材料設計に導入し、高強度化された機能性ソフトマテリアルを創成することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) まず、磁性元素を利用してナノシートを作製する方法、あるいは、磁性ナノ粒子を非磁性ナノシート表面に非共有結合的に修飾する方法によって、「磁気斥力」を生み出すためのビルディングブロックとなる磁性ナノシートの作製を目指した。次に、水分散液中における磁性ナノシートの磁場応答挙動を理解するために、ハンドマグネットによる磁場印加を行い、その配向挙動を偏光顕微鏡によって観察した。

(2) 「磁気斥力」を生み出すためのビルディングブロックの配列方法と「磁気斥力」の力学物性への影響について検討を行った。「磁気斥力」を生み出すためには、磁石の S 極同士、あるいは、N 極同士を向き合う形にしてソフトマテリアルに内包する必要があるが、一般的には S 極と N 極が自発的に引き合うためにこのようなジオメトリを実現するのは困難である。そこで、トップダウン的に扱いが容易なサイズスケールの磁石を利用することで、磁石の同極同士を向き合わせた状態でハイドロゲルとの複合化を目指した。物性としては力学物性に着目し、得られたハイドロゲルに対して圧縮試験を行うことで「磁気斥力」の影響を見積もった。

## 4. 研究成果

(1) 磁性ナノシートの作製に関しては、磁性元素を利用してナノシートを作製する方法と磁性ナノ粒子を非磁性ナノシート表面に非共有結合的に修飾する方法のどちらの場合においても、磁性を有する無機ナノシートを得ることに成功した。これらの方法で得られた磁性ナノシートは水中において安定に分散し、一定以上の濃度でリオトロピック液晶性を発現することを偏光顕微鏡観察によって確認した。次に、得られた磁性ナノシートの磁場応答挙動を理解するために、1 テスラ以下のハンドマグネットによる磁場印加 (磁場の向きと偏光子の向きが平行になるように磁場を印加) を行い、その配向挙動を偏光顕微鏡によって観察した。磁場印加前にはナノシートはランダム配向しているために複屈折に由来する明視野が観測されたが、磁場を印加すると

だんだんと輝度が減少し、10 秒程度で偏光顕微鏡画像は暗視野となり、ナノシートは配向したことが示唆された (図 2a)。ここで、得られた偏光顕微鏡画像の輝度解析を行ったところ、磁場印加直後に急激に輝度は減少し、磁場印加後 10 秒程度でほぼ一定になったことが確認された (図 2b)。このようにして得られたナノシートの配向状態をより詳細に解析するためにサンプルを回転させながら偏光顕微鏡観察を行ったところ 45°の回転ごとに明視野と暗視野が交互に観測された (図 3)。鋭敏色板を用いた観察結果と併せることで、ナノシートは磁場に対してシート面を平行にして配向していることが示唆された。非磁性 (反磁性) ナノシートの場合、ナノシートの配向制御には数テスラ程度の強磁場印加が必要であるが、今回得られた磁性ナノシートは 1 テスラ以下のハンドマグネットによって比較的簡便に配向制御可能になったことが明らかになった。非磁性 (反磁性) ナノシートの系においては、単純な一軸配向構造以外の複雑なナノシート配列構造の構築にも成功しており、これらの知見と技術を利用することによって、より精密なナノシート配列構造を実現できることが期待される。

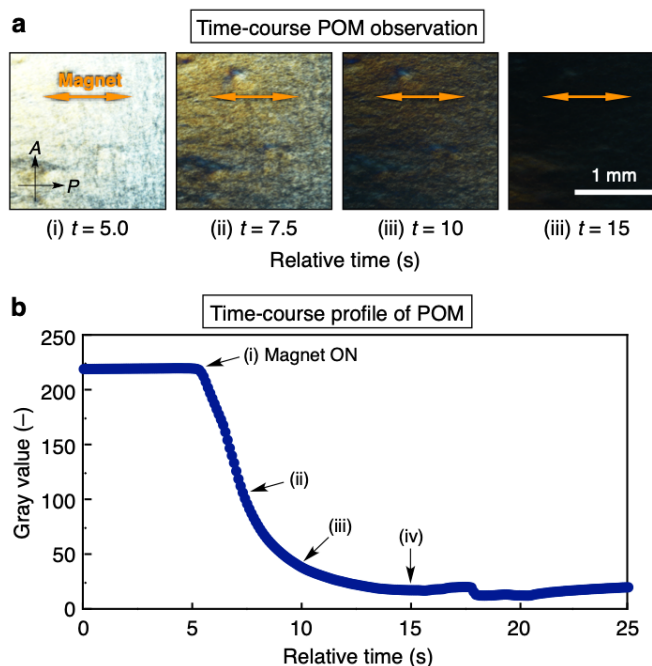


図2. a,b, ハンドマグネットを利用して無機ナノシート水分散液に磁場印加をした際の偏光顕微鏡画像の時間変化 (a) とその輝度の経時変化プロファイル (b)。

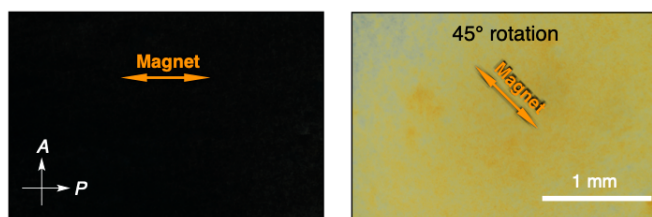


図3. ハンドマグネットを利用して磁場配向したナノシート水分散液の偏光顕微鏡画像。

(2) 「磁気斥力」を生み出すためのビルディングブロックの配列方法と「磁気斥力」の力学物性への影響について検討を行った。トップダウン的に扱いが容易なサイズスケールの磁石を利用し、まずは同極同士を向き合わせた 1 対の磁石と水ゲルとの複合化を行い、圧縮試験によって「磁気斥力」の力学物性への影響を見積もった。モノマーとして *N,N*-Dimethylacrylamide を、架橋剤として *N,N'*-Methylenebis(acrylamide)を用いてラジカル重合を行うことで水ゲルを作製した。「同極同士を向き合わせた 1 対の磁石との複合化水ゲル (サンプル 1)」、「キュリー温度程度で加熱して消磁した磁石を用いて作製した同様の複合化水ゲル (サンプル 2)」、「磁石と複合化されていない水ゲル (サンプル 3)」の 3 つのサンプルに対して圧縮試験を行い、それぞれの力学物性を比較した。その結果、サンプル 1 の応力-ひずみ曲線はひずみが 10%から 70% (上限値) の範囲においてサンプル 2 およびサンプル 3 の応力を常に上回っていることが明らかになった。一方で、サンプル 2 とサンプル 3 の応力-ひずみ曲線はほぼ一致することも確認しており、これは消磁された磁石の間には磁力が働いていないためだと考えられる。事実、水ゲルと複合化せずに同極同士を向き合わせた 1 対の磁石に対して圧縮試験を行ったところ、消磁操作を行っていない磁石は近づくにつれて急激に応力が増加したのに対して、消磁操作を行った磁石はほとんど応力が 0 のままであった。以上の結果により、磁石と複合化することによって水ゲルの力学物性が増加することが明らかになった。

研究期間全体を通して、磁気斥力を生み出すためのビルディングブロックの探索と磁気斥力を内包したソフトマテリアルの作製を行なった。本研究で得られた成果は、今まで材料科学分野で積極的に利用されてこなかった「磁気斥力」を活用するための指針となることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koki Sano, Xiang Wang, Zhifang Sun, Satoshi Aya, Fumito Araoka, Yasuo Ebina, Takayoshi Sasaki, Yasuhiro Ishida, Takuzo Aida	4. 巻 12
2. 論文標題 Propagating wave in a fluid by coherent motion of 2D colloids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6771
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-26917-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koki Sano, Naoki Igarashi, Yasuo Ebina, Takayoshi Sasaki, Takaaki Hikima, Takuzo Aida, Yasuhiro Ishida	4. 巻 11
2. 論文標題 A mechanically adaptive hydrogel with a reconfigurable network consisting entirely of inorganic nanosheets and water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6026
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-020-19905-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 佐野 航季	4. 巻 41
2. 論文標題 無機ナノシートを利用した生き物のようなソフトマテリアル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超分子研究会アニュアルレビュー	6. 最初と最後の頁 10-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Koki Sano
2. 発表標題 Dynamic Assembly of Colloidal Nanosheets
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online: Emergent Nonequilibrium Dynamics in Soft Materials（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野航季, 海老名保男, 佐々木高義, 石田康博
2. 発表標題 無機ナノシートと水のみからなる、生き物のように力学物性を变化させるハイドロゲル
3. 学会等名 第70回高分子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野航季, 石田康博
2. 発表標題 無機ナノシート間に働くファンデルワールス引力と静電斥力のバランス制御によって駆動される、生き物のように力学物性を变化させるハイドロゲル
3. 学会等名 第72回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野航季, 石田康博
2. 発表標題 無機ナノシートと水のみからなる液晶性ハイドロゲルの相転移
3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野航季, 石田康博
2. 発表標題 無機ナノシートの波運動による微粒子の輸送機能
3. 学会等名 第21回高分子ミクロスフェア討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野航季, 海老名保男, 佐々木高義, 石田康博
2. 発表標題 数十億枚のナノシートが協働する織毛運動のような波
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野 航季, 石田 康博
2. 発表標題 無機ナノシートと水のみからなる生き物のようなゲル：内部ネットワークの構造組み替えによる力学物性の可逆変化
3. 学会等名 第32回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野 航季, 海老名 保男, 佐々木 高義, 石田 康博
2. 発表標題 無機ナノシートからなる生き物のようなハイドロゲル
3. 学会等名 日本化学会 第101春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------