

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01034

研究課題名(和文) シングルドメインソフトマターが拓く新構造と物性に関する研究

研究課題名(英文) Exploration of soft materials exhibiting a macroscopic single-domain structure and new properties

研究代表者

福島 孝典 (Fukushima, Takanori)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：70281970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,410,000円

研究成果の概要(和文)：分子凝縮相に関する既存概念では説明できない性質を示す構造、相挙動、および分子集団運動を示す、複数の新たなソフトマターを発見した。特に、加熱溶融して冷却するだけで、液滴のような形状でありながら単結晶様構造を形成し、見かけ上三次元構造規則性を保持したまま流動するキラル分子集合体を見だし、さらに分子のキラリティーと集団運動の相関に関する新知見も得た。分子自己集合場の開発においては、音波浮遊装置を開発し、これを用いた分子集合場の設計により、液晶や高分子をミリメートルサイズのシングルドメイン構造体へと集積化する方法論を確立した。この音波浮遊場は新たな化学反応場としても有効に活用できることも見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、低分子から高分子を構成要素とするソフトマターの構造化現象や物理化学に関する、これまでの常識をアップデートする新知見を提供するとともに、実応用上も高機能材料開発にとって重要な、「微子的なドメイン境界を含まず、巨視的スケールで一様な構造を有する材料をいかに構築するか？」という課題解決のための端緒を与える。明確な学術的な意義とともに、応用的観点からも今後、バルク状態の物性ばかりでなく、薄膜や表面・界面などで機能する新しいソフトマター設計の新概念や新合成法に通じる、インパクトある成果が得られたと考えている。

研究成果の概要(英文)：We discovered several unprecedented materials that exhibit new structures, phase behaviors, and collective molecular motions, which can update the existing knowledge for soft materials. A remarkable achievement is the finding of a triphenylene-based chiral liquid crystal (LC), which forms a 3D single-crystal-like structure with a droplet-like shape and can flow without losing the 3D structural regularity. The LC also has provided a new knowledge on the relationship between chirality and collective molecular motion. For the design of a new molecular-assembling field, an acoustic levitator, equipped with a heating device and an X-ray diffraction machine, has been developed, to enable the controlled self-assembly of LCs and polymers into millimeter-sized single-domain structures and observe structural events directly. The acoustic levitator was found to provide a unique field for chemical reactions, in which reactions, different from those occurs without levitation, can be induced.

研究分野：構造有機化学、分子集合体化学、有機機能物質化学

キーワード：分子自己集合 シングルドメイン ソフトマター 液晶 高分子材料 分子集団運動 音波浮遊 反応場

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

物質を構成する原子や分子の空間配置、すなわち「構造」は、物質が示す物性・機能の根源である。したがって、新構造の発見は新機能の創出に直結し、構造を知ることと物性・機能を理解することと同義と言える。図1に示すように、結晶性物質の場合、単結晶X線構造解析をはじめ、粉末X線回折や粉末中性子回折により得られる回折パターンのリートベルト解析により構造を可視化できる。しかし、柔らかい分子・高分子集合体、いわゆるソフトマターの構造については、試料から得られる粉末X線回折の回折パターンを合理的に説明できる電子密度分布や分子配列を推定して描いているのが実状である。仮に、これらの物質が高い構造秩序を有していたとしてもその状況は変わらない。なぜなら、ほぼ全ての分子集合体は、数十ナノ～数マイクロメートルサイズの微小なドメインが無秩序に集まったものであり、この状態では完全な分子配列・配向情報を粉末X線回折法からは得られないからである。しかし、もし単一のドメイン(=シングルドメイン)からなる試料を作製できれば、曖昧さなく構造を解明することが可能になる。さらに、シングルドメインの実現は、とりもなおさず構成分子の配向秩序の完全制御を意味するため、物質本来の機能を最大限引き出す可能性をもたらす。とはいえ、シングルドメインからなるソフトマターはほとんど存在しないため、これらのシナリオは「絵に描いた餅」の域を越えていない。

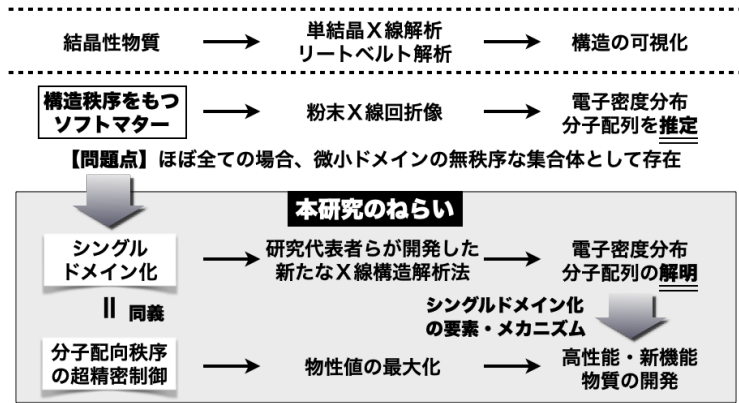


図1. 本研究の目的と概要：シングルドメインソフトマター科学の創成

研究代表者がシングルドメインの重要性を強く意識するきっかけになったのは、挑戦的萌芽研究「前例なき三次元構造形態を有するディスコティック液晶の相挙動の徹底解明」(H24-25年度)で取組んだキュービック液晶の構造解明に関する研究である。研究代表者らはこの研究により、高次秩序を有する液晶の構造形成と構造形態に対するこれまでの常識を覆す新事実を見出している。すなわち、図2に示す「高次液晶相における連続構造と不連続構造の同時発生」ならびに「新しい分子集合形態としてのリング構造」という、ソフトマターの物理にも一石を投じる発見である。この研究のポイントは、液晶試料のシングルドメイン化に成功したことであり、シングルドメイン化なくしてこの発見はなかった。

研究代表者がシングルドメインの重要性を強く意識するきっかけになったのは、挑戦的萌芽研究「前例なき三次元構造形態を有するディスコティック液晶の相挙動の徹底解明」(H24-25年度)で取組んだキュービック液晶の構造解明に関する研究である。研究代表者らはこの研究により、高次秩序を有する液晶の構造形成と構造形態に対するこれまでの常識を覆す新事実を見出している。すなわち、図2に示す「高次液晶相における連続構造と不連続構造の同時発生」ならびに「新しい分子集合形態としてのリング構造」という、ソフトマターの物理にも一石を投じる発見である。この研究のポイントは、液晶試料のシングルドメイン化に成功したことであり、シングルドメイン化なくしてこの発見はなかった。

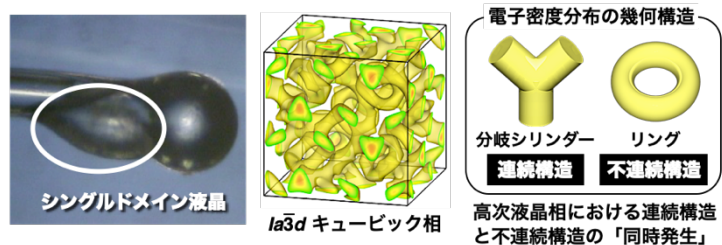


図2. シングルドメインキュービック液晶一粒のX線構造解析から見出された新構造

2. 研究の目的

本研究では、上記の挑戦的萌芽研究から培った、『シングルドメインを形成するソフトマターは、新構造、新現象、新機能を探求するための最適なモチーフである』という考えのもと、低分子・高分子液晶、自己集合性高分子、コロイドをソフトマターの対象として以下の具体的課題に取り組んだ。本研究の最終目標として、ソフトマターのシングルドメイン化のメカニズム、必要な構成分子の構造要素を明らかにし、シングルドメインを形成するソフトマターの合理的設計指針を提示するとともに、分子配向・配列秩序が「完璧」に制御された物質が生み出す機能を探ることを目指した。

課題(1)「分子設計による」自発的にシングルドメインを形成するソフトマターの創製

本課題の端緒として、挑戦的萌芽研究(H24-25年度)の後、その展開研究のなかで発見した「過去に例のない三次元構造を自発的にシングルドメインとして形成する」という驚くべき性質を示すソフトマターの構造を明らかにすることを目指した。さらに、光学特性、粘弾性、流動性、力学特性など、幅広い視点から性質を解明し、ソフトマターの新たな物理・化学の探求に取り組んだ。研究開始に先立ち、研究代表者らは、特異な粘弾性と集団運動性を示唆するデータを得ていた。本研究では、まず物質の全貌解明を出発点とし、構成分子の構造因子、分子配列様式、分子間相互作用などの観点から、シングルドメイン化のメカニズム、原理を追究し、そして得られた知見を分子設計へとフィードバックし、系の拡張を図ることを目指した。

課題(2)「自己集合場の設計による」ソフトマターのシングルドメイン化と機能開発

シングルドメイン化 (=完全かつ巨視的な分子配向制御) を実現するアプローチとして、上記 (1) の課題は「分子設計」を基盤とするものであるのに対し、(2) では、分子設計に頼らずより広い物質系への適用を可能にする「自己集会場」の設計を目指した。有機、無機物質にこだわらず、凝縮相における構造形成には核生成・成長過程が決定的な因子となるため、これらの過程を制御する技術が盛んに研究されてきた。理論的にみると、核生成には「均一核生成」と「不均一核生成」がある。しかし実際は、均一核生成を実現するのは極めて困難である。なぜなら、無重力場でない限り、必然的に物質を扱う容器を要するため、容器壁そのもの、あるいは容器壁から混入した不純物が不均一核生成の優先サイトとなるからである。結果として、核が複数のサイトで同時発生し、その状態で構造の成長が起こるため結果としてマルチドメインを与えてしまう。この状況を回避する唯一の有効な手法が無容器浮遊溶融法であると考えた。この手法は、ガラス、セラミックス、金属、合金、半導体などの作製に利用されている。しかし意外なことに、有機物に適用した例はほとんどない。特に、液晶や高分子などの凝縮系については皆無であった。研究代表者らはこの事実注目し、世界に先駆けて音波を用いた無容器浮遊溶融法によるソフトマターの構造化研究に着手した。ある液晶性物質を用いて予備検討を行ったところ、容器や基板を用いた場合には見られない特異な構造化挙動を見出した。本研究では、世界で初めて音波による物質浮遊技術を利用し、「均一核生成を促す自己集会場」の設計から、有機分子、高分子、コロイド集合体など、凝縮系物質のシングルドメイン化や超精密分子配向制御を試みた。こうして得られる物質の構造・物性解析を通じ、新構造や新機能の探求を目指した。

### 3. 研究の方法

学術的に大きなチャレンジであるとともに、新構造、新現象、新機能探索の有効な糸口となるシングルドメインソフトマターの創製を目的に、(1) 分子設計、ならびに (2) 分子自己集会場の設計という二つのアプローチにより研究を推進した。(1) では既に見出していた候補となる系の構造と性質を評価し、シングルドメイン化する系特有の構造要素を解明し、合理的な物質設計指針を導くことを行った。(2) では、音波浮遊法を用いて凝縮系分子集合化における均一核生成を促す場を設計することで、特別にデザインした分子を超えて、低分子および高分子から構成される、様々なソフトマターのシングルドメイン化の検討を進めた。得られた物質の電子・光学特性、粘弾性、流動性、力学特性などを多角的に評価し、構造物性相関を明らかにするとともに、新機能の探求にも取り組んだ。

本研究を立案するための予備検討を共に推進してきた各研究分野のスペシャリスト、および学生を含む研究協力者を擁する体制により研究を実施した。アプローチ (1) の低分子系シングルドメインソフトマターの電子密度解析手法は、そのデータ収集のノウハウも含めて、橋爪・梶谷とともに行った。アプローチ (2) は主に研究分担者の尾原および梶谷と協働して実施した。各種物性解析は、研究代表者のグループおよび柴山らとともに、それぞれの専門性を活かして連携し、推進した。

### 4. 研究成果

#### 課題 (1) 「分子設計による」自発的にシングルドメインを形成するソフトマターの創製

研究代表者らは、過去にディスコティック液晶のメソゲンとして古くから用いられてきたトリフェニレンに、エステル基を6つ導入した新しい誘導体 (図3) を開発した (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 7990)。「1. 研究開始当初の背景」の項目で述べた挑戦的萌芽研究の成果は、このトリフェニレンに対し、イミダゾリウム末端を有するアルキル側鎖を導入した誘導体の液晶相に関するものであり、「シングルドメインを形成するソフトマターは、新構造、新現象、新機能を探求するための最適なモチーフである」という考えを導ききっかけとなった。その後、キラル側鎖を導入した系 (図3) を合成し、相挙動を検討したところ、予期せぬことに、中間相において自発的にシングルドメインが形成される可能性を見いだした。しかも、特別なプロセスは一切必要なく、キャピラリー中や基板上で加熱冷却するだけで、再現性良くシングルドメインが得られる

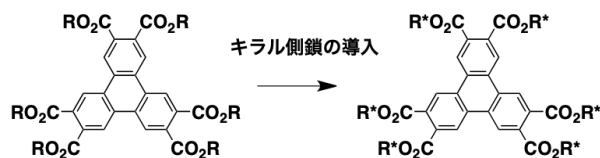


図3. トリフェニレンヘキサカルボン酸エステル誘導体の分子構造

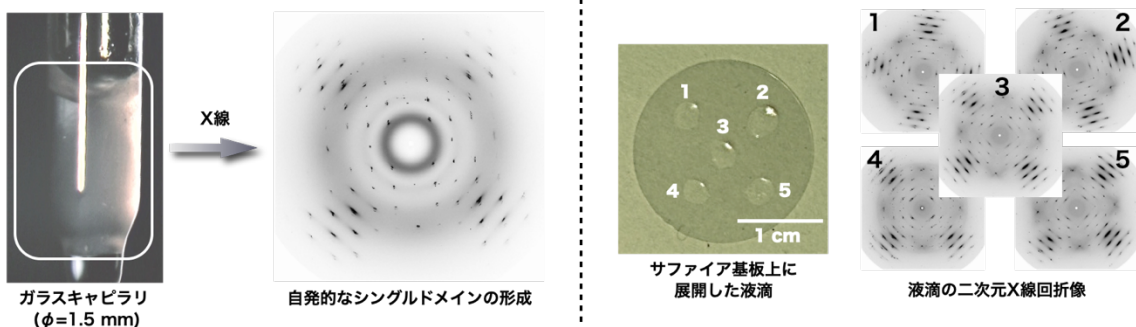


図4. キラルトリフェニレン分子集合体の二次元X線回折イメージ

ことを示す実験結果も得られた (図4)。このような挙動を示す分子集合体はこれまで全く例がなかった。X線回折像から、この分子は中間相において、三次元的な高次構造秩序を有していることが示された。さらに驚くべきことに、この物質の中間相は、三次元構造を保ちつつ流動性も示した。いわば「流れる単結晶」とも言える挙動である。加えて、動的粘弾性測定から、中間相における貯蔵弾性率と損失弾性率はほぼ同じ値をとることが示された (図5)。すなわち、液体と固体の性質を同程度有する。さらに際だった現象として、物質を流動させた際、見かけ上は三次元構造規則性を保持したまま側鎖のキラリティーに完全に対応してX線回折像が回転することも見出した (図6)。この振る舞いは、結晶とも液体とも液晶とも異なる。これらの成果を論文としてまとめ、Nature Materials 誌で報告した。加えて、複数の解説記事などにより広く国内外に発信した。

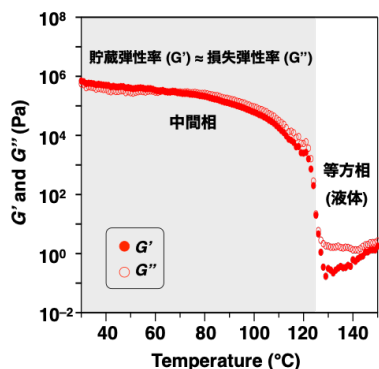


図5. キラルトリフェニレンの動的粘弾性

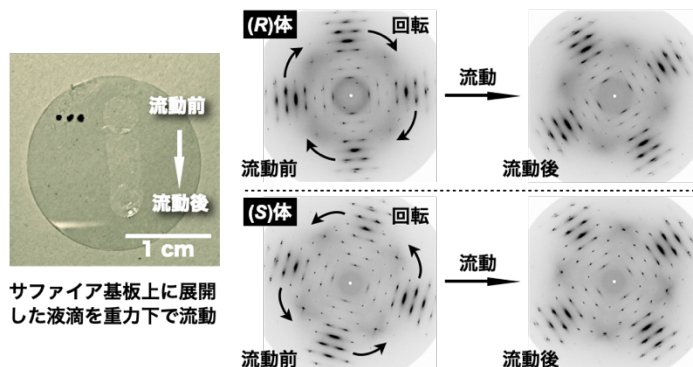


図6. キラルトリフェニレン液滴の回転流動

上記研究をさらに発展させるべく、アルキル鎖とは異なる性質を有するフルオロアルキルを含む側鎖を導入した系を設計した。具体的には、図7に示す分子を合成し、相挙動を検討したところ、自発的に大面積で基板表面に対して垂直配向することが明らかになった。驚くべきことに、この誘導体に剪断力を与えると、液晶カラムの配向が基板に対して一様な水平配向に変化し、その状態は液晶相温度で長時間保持された (図7)。一般にディスコティックカラムナール液晶は粘性が高く、電場や剪断力などの外場による配向制御ができないというのがこれまでの共通認識であったが、この分子のカラムナール液晶が示した挙動はその通念を覆すものである。本成果については、現在論文執筆中である。

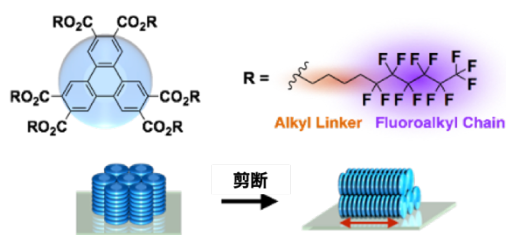


図7. フルオロアルキル鎖をもつトリフェニレン誘導体の剪断配向

本研究では、コアの形状を変えた分子の液晶性、構造、配向特性についても新たに検討した。研究代表者らが注目した分子は、お椀型分子「スマネン」である。スマネンは、その特異な構造により、平面π電子系分子とは異なるいくつかのユニークな電子的および動的性質を示す。一方スマネンは、ディスコティック液晶のメソゲンとして代表的なトリフェニレンを部分骨格として有していることから、適切な化学修飾により、珍しいタイプのお椀型メソゲンとして機能する可能性もある。そこで、長鎖エステル基を導入した誘導体 (図8) を合成し、相挙動を検討したところ、新たに合成した誘導体が、トリフェニレン類縁体と同様、ヘキサゴナルカラムナール相を発現することを見いだした。ところが興味深いことに、この誘導体が形成する液晶相は、既存の一般的なカラムナール液晶が示す力学的性質とは全く異なり、糸を引くほど柔らかく、剪断力に応じて、液晶カラムの配向が可逆かつ連続的に変化し、まさに積み重ねたお椀のような集団運動を示すことを発見した。詳細な検討から、このような特異な力学挙動を示すメカニズムもほぼ解明しており、今後レオロジー特性に関するより深い検討を加え、論文として成果する予定である。

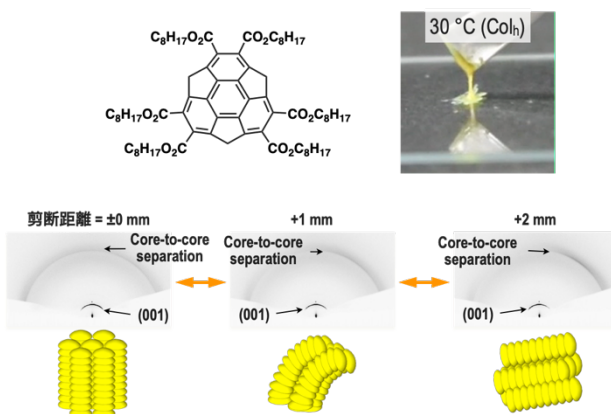


図8. スマネン誘導体の剪断配向

## 課題 (2) 「自己集合場の設計による」ソフトマターのシングルドメイン化と機能開発

完全に空気界面だけの状態で分子集合体を構造化させたら何が起こるだろうか？この素朴な疑問を背景に、さまざまな思考を重ねた結果、到達したのが音波浮遊技術の利用である。意外なことに、詳細な文献検索によっても、過去にソフトマターの構造化を浮遊状態で検討した例は見

つからなかった。そこで、音波浮遊を用いた無機材料作製を研究している高輝度光科学研究センター（JASRI）の尾原および東工大の梶谷（共に分担者）とともに検討した。JASRI が所有する装置を用い、有機物の凝縮相に適用するための装置セッティングを検討した。興味深いことに、自発的にはシングルドメインを形成しないトリフェニレン系液晶を、音波浮遊条件で加熱冷却して「球状試料」を作製し、X線回折により構造を調べたところ、物質全体がシングルドメインを形成していることを強く示唆する結果が得られた（図9）。音波浮遊溶融装置の開発については論文誌上や学会で発表し、広く国内外に成果発信した。

本研究を効率的に実施するため、音波浮遊装置を中心とした試料作製装置一式とそれを組み込んだX線回折装置を東工大に整備した（図10）。これにより、試料作製はもとより、放射光を用いる精密構造解析に先立つ予備的構造評価から物質系のスクリーニングを迅速に行える体制を整えた。その上で、東工大とSPring-8において、シアノビフェニルコアを有する棒状液晶を中心とする低分子系液晶を対象に、音波浮遊によって得られる集合構造と配向特性を検討した。構造秩序の低いネマチック相に音波を照射すると、照射方向に沿って分子長軸（配向ベクトル）が並ぶことが知られている（*Jpn. J. Appl. Phys.* 1999, 38, 3076）。本研究で設計した自己集合場は、「物質との界面は空気のみ」と「常に物質に音波が照射されている」という条件の両方を併せ持つ。すなわち、この「場」では「均一核生成」と「分子配向」を同時に引き起こせる可能性がある。そこで周期的な構造秩序を有する低分子系液晶を対象に、音波

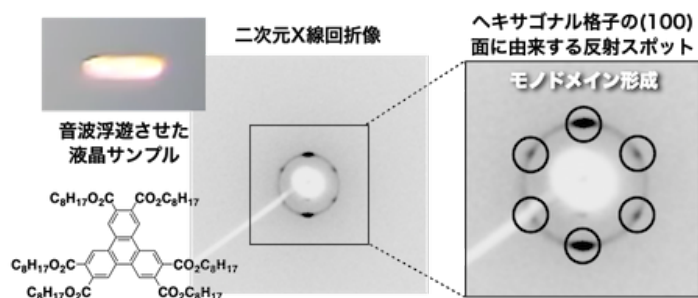


図9. 無容器浮遊溶融状態におけるトリフェニレン誘導体の集合構造

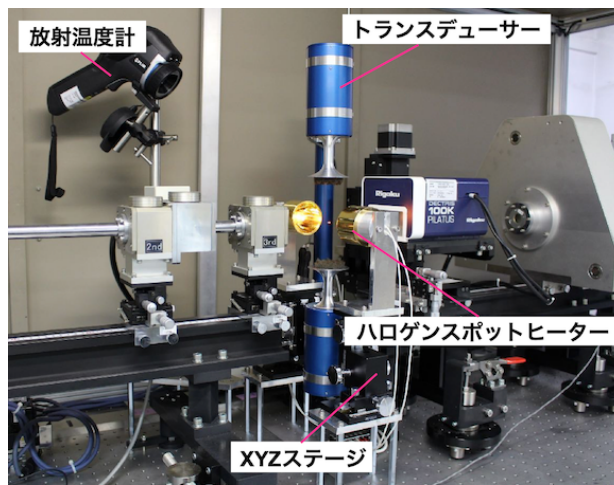


図10. 実験室のX線回折装置への音波浮遊溶融装置の組み込み

浮遊によるシングルドメイン化を検討した。液晶分子として、上述のディスコティック液晶系に加え、新たにスメクチック相を発現する棒状分子の構造化を検討した。その足がかりとして、層内で配列秩序のないスメクチックA相およびC相を発現する分子の配向特性を調べた。代表的なスメクチック液晶分子であるシアノビフェニル誘導体（8OCB）は、浮遊状態で熱処理することにより一様に配向したミリメートルオーダーのシングルドメイン構造を有する球体を得た（図11）。さらにSPring-8の放射光を用いて、球体の49箇所に対してそれぞれX線照射した結果、球体の中心部から放射状に液晶レイヤーが積層した玉ねぎ状のシングルドメイン構造を形成していることが明らかとなった。同様のシングルドメイン構造はディスコティックカラムナー液晶や液晶ポリマーの集合体でも観測された。さらに、音波浮遊溶融装置を高分子反応に用いた。光照射装置とガス吹付装置、さらには空気散乱を減らすための真空パスを組み込んだシステムを構築し、不活性ガス雰囲気下で浮遊した液晶モノマーのその場重合を検討した結果、液晶の配向秩序を保ったまま重合が進行し、ポリマー鎖同士が複雑に絡み合ったゲルを形成することを明らかにした。このような現象は浮遊しない条件では観測されなかった。

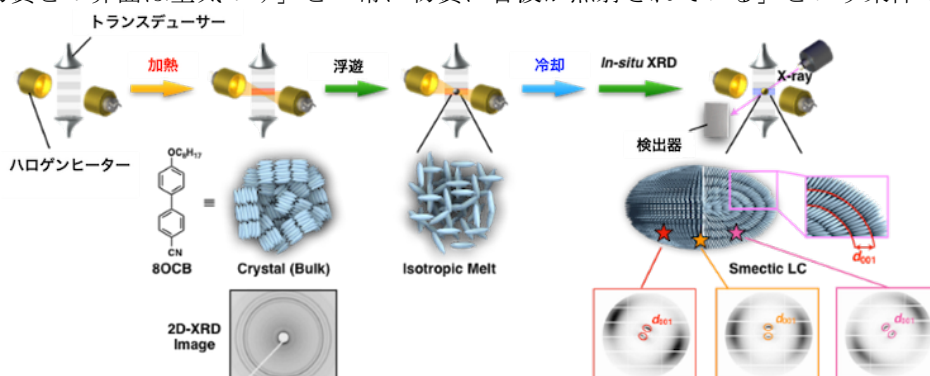


図11. 音波浮遊による棒状液晶（8OCB）のシングルドメイン液滴形成

以上、本研究では、(1)(2)のアプローチにより、低分子～高分子系物質の構造化を精密に検討した結果、これまで困難であったシングルドメインソフトマターの創製を、「分子設計」と「分子自己集合場設計」の両面から実現するとともに、構造化メカニズムや機能に関する多くの新知見を獲得した。今後、本研究をさらに発展させ、シングルドメインならではの新機能や新現象を発現する物質創製に向けた取り組みを、継続的に推進する計画である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Hibiki Ogiwara, Fumitaka Ishiwari, Tadahiro Kimura, Yukihiro Yamashita, Takashi Kajitani, Atsuki Sugimoto, Masatoshi Tokita, Masaki Takata, Takanori Fukushima   | 4. 巻<br>57              |
| 2. 論文標題<br>Changing the structural and physical properties of 3-arm star poly(ε-valerolactone)s by a branch-point design   | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Chem. Commun.  | 6. 最初と最後の頁<br>3901-3904 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1039/D1CC01092A   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Takuya Miyazaki, Yoshiaki Shoji, Fumitaka Ishiwari, Takashi Kajitani, Takanori Fukushima   | 4. 巻<br>11              |
| 2. 論文標題<br>Design of a molecular memory element with an alternating circular array of dipolar rotors and rotation suppressors  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Chem. Sci.   | 6. 最初と最後の頁<br>8388-8393 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1039/D0SC02836C   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Koji Ohara, Yohei Onodera, Shinji Kohara, Chihiro Koyama, Atsunobu Masuno, Akitoshi Mizuno, Jumpei T. Okada, Shuta Tahara, Yuki Watanabe, Hirohisa Oda, Yui Nakata, Haruka Tamaru, Takehiko Ishikawa, Osami Sakata | 4. 巻<br>37              |
| 2. 論文標題<br>Accurate Synchrotron Hard X-ray Diffraction Measurements on High-Temperature Liquid Oxides  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Microgravity Science and Application  | 6. 最初と最後の頁<br>370202    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.15011/jasma.37.2.370202   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |
| 1. 著者名<br>Takashi Kajitani   | 4. 巻<br>22              |
| 2. 論文標題<br>Single-crystal-like chiral organic droplets exhibiting unidirectional rotating sliding  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>SPRING-8 Research Frontiers 2019   | 6. 最初と最後の頁<br>54-55     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>尾原 幸治・水野 章敏・岡田 純平・小原 真司・石川 毅彦     | 4. 巻<br>33            |
| 2. 論文標題<br>放射光X線散乱と無容器浮遊法による液体の構造・物性研究～高温1～ | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>放射光                               | 6. 最初と最後の頁<br>112-119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし              | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takashi Kajitani, Kyuri Motokawa, Atsuko Kosaka, Yoshiaki Shoji, Rie Haruki, Daisuke Hashizume, Takaaki Hikima, Masaki Takata, Koji Yazawa, Ken Morishima, Mitsuhiro Shibayama, Takanori Fukushima | 4. 巻<br>18            |
| 2. 論文標題<br>Chiral crystal-like droplets displaying unidirectional rotational sliding   | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Nature Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>266-272 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41563-018-0270-7  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>梶谷 孝・福島 孝典                    | 4. 巻<br>74          |
| 2. 論文標題<br>結晶? 液晶? 液体? どれにも分類されない新物質を発見 | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>化学 2019年9月号                   | 6. 最初と最後の頁<br>35-40 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>福島 孝典                        | 4. 巻<br>68        |
| 2. 論文標題<br>シンプルさと美しさに機能が宿る             | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>高分子                          | 6. 最初と最後の頁<br>402 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>福島 孝典                        | 4. 巻<br>579         |
| 2. 論文標題<br>液体と固体の性質を併せ持つ物質             | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>現代化学 2019年6月号                | 6. 最初と最後の頁<br>20-26 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Fatin Hajjaj, Takashi Kajitani, Hiroyuki Ohsumi, Yoshikazu Tanaka, Kenichi Kato, Masaki Takata, Hideaki Kitazawa, Taka-hisa Arima, Takuzo Aida, Takanori Fukushima | 4. 巻<br>9          |
| 2. 論文標題<br>Rewriting the phase diagram of a diamagnetic liquid crystal by a magnetic field   | 5. 発行年<br>2018年    |
| 3. 雑誌名<br>Nature Commun.   | 6. 最初と最後の頁<br>4431 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-018-06976-7   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Shinji Kohara, Koji Ohara, Takehiko Ishikawa, Haruka Tamaru, Richard Weber   | 4. 巻<br>2       |
| 2. 論文標題<br>Investigation of Structure and Dynamics in Disordered Materials Using Containerless Techniques with In-Situ Quantum Beam and Thermophysical Property Measurements | 5. 発行年<br>2018年 |
| 3. 雑誌名<br>Quantum Beam Science   | 6. 最初と最後の頁<br>5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/qubs2010005  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 4件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典                                    |
| 2. 発表標題<br>ナノ～メゾ～マクロスケールの精密分子集積化による新機能物質創製          |
| 3. 学会等名<br>プリンテッド・エレクトロニクス研究会 2021年度第1回PE研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |



|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典                   |
| 2. 発表標題<br>精密分子集積化による機能ソフトマテリアルの創製 |
| 3. 学会等名<br>第70回高分子学会年次大会（招待講演）     |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>陳 玉根・石割 文崇・福井 智也・梶谷 孝・福島 孝典                                |
| 2. 発表標題<br>高い構造対称性を有するN,N'-ジアルキルおよびN,N'-ジアシルジアザシクロオクタン含有ラダーポリマーの合成と性質 |
| 3. 学会等名<br>第70回高分子学会年次大会  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典                          |
| 2. 発表標題<br>シンプルな分子系が織りなす新現象・機能            |
| 3. 学会等名<br>第13回 ChemBio ハイブリッドレクチャー（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>梶谷 孝・田中 大喜・尾原 幸治・福島 孝典            |
| 2. 発表標題<br>音波浮遊溶解により形成する高配向分子自己集合体のin situ重合 |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第101春季年会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>福光 真人・福井 智也・庄子 良晃・梶谷 孝・福島 孝典 |
| 2. 発表標題<br>二次元超分子足場による 電子系機能団の空間制御した集積化 |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第101春季年会                |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>神屋 智希・村木 亮介・石割 文崇・梶谷 孝・庄子 良晃・福島 孝典                    |
| 2. 発表標題<br>1,8,13-トリプチセンアミノトリプチセンを鍵中間体とする新規三脚型トリプチセン誘導体の合成と集合化挙動 |
| 3. 学会等名<br>第69回高分子討論会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>梶谷 孝   |
| 2. 発表標題<br>未来志向の化学分析～新たな分子集合場の創製と精密構造解析～                  |
| 3. 学会等名<br>人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス第9回技術支援シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takanori Fukushima   |
| 2. 発表標題<br>Unprecedented Structure and Phase Behavior of Discotic Liquid Crystals with a Classic Mesogenic Core |
| 3. 学会等名<br>2019 Annual Meeting of Taiwan Liquid Crystal Society (招待講演) (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takanori Fukushima   |
| 2. 発表標題<br>Synthesis, Properties, and Applications of Molecular Assemblies with Ultra-Long Range Structural Order                 |
| 3. 学会等名<br>CEMS International Symposium on Supramolecular on Supermolecular Chemistry and Functional Materials 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Takanori Fukushima  |
| 2. 発表標題<br>Spontaneous Formation of Single-Crystalline Organic Droplets          |
| 3. 学会等名<br>-EJ 2019, -System Figuration European-Japanese Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典                                    |
| 2. 発表標題<br>超長距離秩序構造を有するソフトマターの形成と動的挙動               |
| 3. 学会等名<br>第50回中部化学関係学協会支部連合秋季大会, 新時代を築く有機化学 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典             |
| 2. 発表標題<br>高次分子集合における集団的分子運動 |
| 3. 学会等名<br>第68回高分子討論会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Takanori Fukushima  |
| 2. 発表標題<br>A soft Material with Ultra-Long-Range Structural Order and Its Dynamic Behavior |
| 3. 学会等名<br>ICCMSE 2019 Computational Chemistry (CC) Symposium (招待講演) (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>福島 孝典  |
| 2. 発表標題<br>ありふれた分子への一工夫がもたらしたソフトマターにおける新現象                  |
| 3. 学会等名<br>ERATO 磯部縮退 集積プロジェクト最終成果報告会「ポストナノカーボン科学の黎明」(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>梶谷 孝・本川 究理・守島 健・柴山 充弘・福島 孝典 |
| 2. 発表標題<br>一方向に回転流動する単結晶状キラル分子液滴       |
| 3. 学会等名<br>第99回日本化学会春季年会               |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>梶谷 孝・Fatin Hajjaj・相田 卓三・福島 孝典 |
| 2. 発表標題<br>磁場誘起液晶相変化                     |
| 3. 学会等名<br>第99回日本化学会春季年会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田中 大喜・梶谷 孝・尾原 幸治・大隅 寛幸・高田 昌樹・福島 孝典 |
| 2. 発表標題<br>音波浮遊溶融法による高秩序な分子自己集合体の形成           |
| 3. 学会等名<br>第99回日本化学会春季年会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田中大喜・梶谷孝・尾原幸治・大隅寛幸・高田昌樹・福島孝典         |
| 2. 発表標題<br>音波浮遊溶融法による分子自己集合体の形成                 |
| 3. 学会等名<br>日本マイクログラフィティ学会 第29回学術講演会 (JASMAC 29) |
| 4. 発表年<br>2017年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田中大喜・梶谷孝・尾原幸治・大隅寛幸・高田昌樹・福島孝典 |
| 2. 発表標題<br>音波浮遊溶融法を用いた高秩序な分子自己集合体の形成    |
| 3. 学会等名<br>日本化学会第98春季年会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| <p>東京工業大学福島・庄子研究室ウェブサイト<br/> <a href="http://fuku.res.titech.ac.jp">http://fuku.res.titech.ac.jp</a><br/>         東工大ニュース<br/> <a href="https://www.titech.ac.jp/news/2019/043402.html">https://www.titech.ac.jp/news/2019/043402.html</a><br/>         Tokyo Tech News<br/> <a href="https://www.titech.ac.jp/english/news/2019/043648.html">https://www.titech.ac.jp/english/news/2019/043648.html</a><br/>         結晶にも液晶にも液体にも分類されない新物質を発見 一分子自己集合体の科学における新発見<br/> <a href="https://www.titech.ac.jp/news/2019/043402.html">https://www.titech.ac.jp/news/2019/043402.html</a><br/>         東京化成工業株式会社 1,8,13-トリヒドロキシトリブチセン製品ウェブサイト<br/> <a href="https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D5823">https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D5823</a><br/>         東京化成工業株式会社 1,8-ジドデシルオキシ-13-メトキシトリブチセン製品ウェブサイト<br/> <a href="https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D5881">https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D5881</a><br/>         高輝度光科学研究センター 放射光利用研究基盤センター 回折・散乱 グループウェブサイト<br/> <a href="http://rud.spring8.or.jp/member/0020758.html">http://rud.spring8.or.jp/member/0020758.html</a></p> |
|--|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 尾原 幸治<br><br>(Ohara Koji)<br><br>(00625486)      | 公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・主幹研究員<br><br><br>(84502) |    |
| 研究分担者 | 梶谷 孝<br><br>(Kajitani Takashi)<br><br>(20469927) | 東京工業大学・オープンファシリティセンター・技術職員<br><br><br>(12608)        |    |

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                       |              |  |  |
|---------|-------------------------------|--------------|--|--|
| オーストリア  | Graz University of Technology |              |  |  |
| ドイツ     | ハイデルベルク大学                     | ベルリン・フンボルト大学 |  |  |
| 英国      | University of St Andrews      |              |  |  |