

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02947

研究課題名（和文）ソフトマターの秩序構造の光学的直接観察をサポートする理論的枠組みの構築

研究課題名（英文）Theoretical framework supporting direct optical observations of ordered structures of soft matter

研究代表者

福田 順一（FUKUDA, Jun-ichi）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：90392654

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトマターと呼ばれる一群の柔らかい物質群が示す、周期が数百nm程度の秩序構造に着目し、それらの光学的性質を明らかにするための理論的枠組み、計算手法の開発を行った。鏡映対称性の欠如したキラルな液晶が示す種々の秩序構造を具体的なターゲットとし、連続体理論による秩序構造の数値計算と組み合わせることで、光学顕微鏡像や光の反射特性（入射光の入射角、偏光に対する依存性など）について、実験結果をほぼ完全に説明できる計算結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周期的な構造を自発的に形成するソフトマターは、光学の観点からも興味を持たれている。そのような構造の光学的性質を明らかにするための理論的枠組み、計算手法の開発を行ない、種々の工学に関する問題に適用した。解像度の限界に近い数百nm程度の周期の構造がどのように光学顕微鏡で観測されるかは理論的に極めて難しい問題であり、光の電磁場に関する方程式を直接解くことでその問題に取り組み、光学顕微鏡の限界に近いところの動作の理解を与えたことに本研究の意義の1つがある。

研究成果の概要（英文）：We developed a theoretical and numerical scheme for the elucidation of the optical properties of periodic ordered structures of soft matter, whose periodicity is of the order of a few hundred nanometers. We particularly focused on various structures exhibited by a chiral liquid crystal without mirror symmetry. By combining the above-mentioned scheme with numerical calculation of ordered structures by continuum theory, we obtained results that account almost perfectly for experimental results on various optical properties including optical microscope images and the dependence of reflection intensity on the incident angle and the polarization of the incident light.

研究分野：ソフトマター物理学，物性物理学，統計物理学

キーワード：光学顕微鏡像 ソフトマター 液晶 自己組織的秩序構造 コッセル像 コレステリックブルー相 スカーミオン 位相欠陥

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

様々な材料が自己組織的に示す秩序構造は、ボトムアップテクノロジーの有望な構成要素として注目を集めている。そのような例として、ソフトマター（高分子、液晶、コロイド、界面活性剤などの柔らかい物質群の総称）などが示す光の波長程度以下の周期を有する周期的構造は、新規な光学材料としての可能性から注目が集まっている。また、種々の凝縮系は連続的な対称性の破れの結果として生じる位相欠陥を示すことが多いが、ソフトマター（特に液晶）は、位相欠陥を示す他の代表的な凝縮系とは異なり、光学的手法による位相欠陥の観察が可能であることから、位相欠陥研究の理想的なモデル系としても認知されている。

しかしながら、光の波長程度以下の空間スケールの秩序構造を光学的手法で実空間観察するのは実験的に困難な上、仮に実験的に実空間像を得たとしても、それを理論的に解釈する試みは、全くといっていいほどなされてこなかった。光学顕微鏡の動作原理を説明するのに通常用いられる幾何光学は、観察する構造の特徴的な空間スケールが光の波長よりもはるかに大きいことを仮定しているので、上記の問題には役に立たない。それゆえ波動光学の基礎となる、光の電磁場に関するマクスウェルの方程式を直接的に解く必要があるが、そもそもどのような設定でマクスウェルの方程式を解けば、実際の実験的手法で得られる実空間像を求めたことになるのかという考察すら、これまでなされていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のようなソフトマターが自己組織的に形成するサブミクロンスケールの秩序構造をターゲットとし、光学的手法（光学顕微鏡、共焦点顕微鏡など）によるその直接観察をサポートする理論的枠組みを構築することである。そのために、光の伝播に関するマクスウェルの方程式を効率的に計算するスキームを開発、改良し、その計算結果から実空間像を構築する理論的枠組みを開発した。この枠組みと、連続体シミュレーションによって得られる秩序構造のプロファイルを組み合わせることで、連携研究者、研究協力者の実験結果に対する理論的な解釈を与えた。

### 3. 研究の方法

まず、光の電磁場に関するマクスウェル方程式の計算手法について述べる。本研究でターゲットとなる系（試料）は、光が通過する2枚の平行平板に挟まれた非一様かつ非等方的な誘電体である（光学的に非等方的な媒体である液晶が、空間的な秩序構造を有しているケースを主に考えた）。平板に平行な方向には周期的境界条件を課し、量子系のバンド計算などで一般的に使われるブロッホの定理に基づいた平面波展開を電磁場に対して行う。平板に垂直な方向については、エネルギーの保存を適切に考慮に入れた差分法による離散化を行う。これらの離散化と、2枚の平板における適切な境界条件の考慮により、単一の波数ベクトルで記述できる単色平面波からなる光が系に入射した際の光の挙動を計算するための線形連立方程式を書き下すことができる。

実際の顕微鏡などの手段による光学観察においては、上記のような単一の波数ベクトルで記述できる光ではなく、レンズで集光された光が用いられる。レンズによる集光は、単色入射光の波数ベクトルをレンズの開口数で決まる立体角内に均等に配置して、それらに対応する計算を多数行うことで再現した。レンズの焦点で、それぞれの単色入射光の位相が揃うようにしている。

光学顕微鏡像の計算において、レンズによる結像の部分についてマクスウェル方程式を直接求めるのは空間スケールの観点から極めて困難であるので、上述の計算の結果から得られた反射光の、試料内の焦点面における強度を重ね合わせたものとして光学顕微鏡像を求めた。また連携研究者の実験において、コッセル像（単一波長の光をレンズで集光して試料に照射した際に強い反射を示す方向を可視化したもの）の取得が行われたが、コッセル像は上述の計算から得られた反射光の強度の方向依存性を単純にプロットすることで得られるとした。

またターゲットとなる液晶の空間的な秩序構造は、液晶の局所的な配向秩序を2階のテンソルの秩序変数で表現する連続体理論により、数値的に求めた。

### 4. 研究成果

以下に具体的な成果を項目ごとに述べる。

[キラル液晶の薄膜が示す秩序構造とその光学的性質]

鏡映対称性の欠如したキラルな液晶は様々な秩序構造をとることが知られている。本研究では、コレステリックブルー相と呼ばれる数百 nm 程度の周期の3次元秩序構造をバルクで示すキラル液晶が、2枚の平行平板間に拘束された薄膜となった際にどのような秩序構造を示し、それらの構造がどのような光学的性質を有するかを調べた。なお2枚の平板表面においては、液晶配向は平板に平行になろうとするが、面内では特定の方向を好むわけではないような設定を考えた（清浄なガラス平板ではこのような配向が実現されることが知られている）。

秩序構造の計算を行った結果、薄膜の厚さに応じて、スカーミオンと呼ばれる特異性を持たない渦状の秩序構造がヘキサゴナルな格子を組んだ構造（図 1(a)）や、バルクのコレステリック

ブルー相を2枚の平面でスライスした構造に極めて類似した構造(図1(b))が熱力学的に安定な構造として得られることがわかった。また準安定な構造として、スカーミオンが孤立した状態で存在しうることも確かめられた。これらの秩序構造の光学顕微鏡像の計算も行い、共同研究を行ったウクライナ/スロベニアの協力研究者(Igor Musevic 教授, Andriy Nych 博士, Uliana Ognysta 博士)のグループが実験的に得た顕微鏡像と非常に良い一致を示した。安定な構造が変化する薄膜の厚さの閾値などについても実験と数値計算で良い一致を示したことから、数値計算によって得られた秩序構造が実際に実験で観測されたと結論づけた。

またコッセル像の計算も行い、これも実験と非常に良い一致を示すことが明らかになった。通常コッセル像はバルクの結晶の3次元的な周期性に由来するブラッグ反射の結果として理解されるが、ブラッグ反射を起こすとは考えられない薄膜のコッセル像の起源についても理論的考察を行い、薄膜で起こる導波路共鳴と、薄膜の周期構造の存在を適切に考慮することにより、コッセル像における明線の位置を定量的に説明することに成功した。

スカーミオンはもともと素粒子物理学の分野で提唱された概念であるが、凝縮系分野で研究されている様々な系においてもその存在が提唱、あるいは実験的に確認されており、特にキラル磁性体におけるスカーミオンは応用の可能性も有していることから盛んに研究されている。液晶においてもスカーミオンが形成しうることは自身の過去の研究[Fukuda & Žumer, Nature. Commun. 2, 246 (2011)]によって提唱していたが、秩序構造とその光学的性質に関する数値計算によって実験に確固たる理論的解釈を与えることで、液晶においても実際にスカーミオンが形成されることを示したことが、本研究の大きな意義である。なお、本研究は理論の協力研究者としてSlobodan Žumer 教授(スロベニア)の協力も得た。

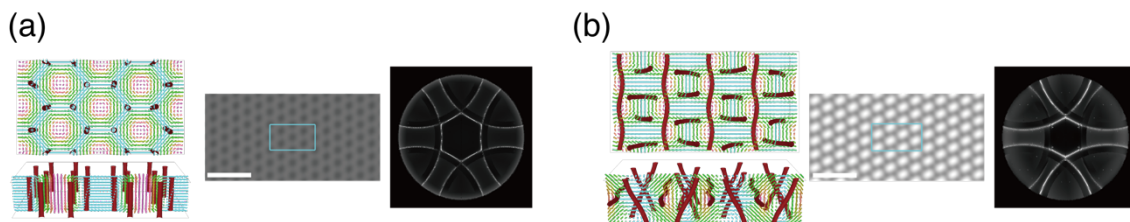


図1: (a) スカーミオンからなるヘキサゴナル格子, (b) コレステリックブルー相をスライスした構造の計算例. 左は秩序構造(色のついた短い棒は配向構造, 赤いシリンダー状のものは線欠陥), 真中は光学顕微鏡像(青の四角が左の秩序構造の大きさに対応), 右はコッセル像の計算結果.

#### [液晶の位相欠陥の顕微鏡像]

配向の秩序のみを有するネマチック液晶の位相欠陥についてはこれまでよく調べられており、「巻き数」と呼ばれるトポロジカル不変量などによって分類できることが知られている。有限の厚さの薄膜においては、巻き数だけでなく、薄膜に平行な平面から液晶配向が外れる外れ方や、自発的な鏡映対称性の破れ方などによっても特徴づけられ、それらの特徴は光学顕微鏡による観察で明らかにできることが、連携研究者の大園拓哉博士(産総研)らの実験により示された。その実験を踏まえ、欠陥の周りの液晶配向の空間変調が光の伝播にどのような影響を与えるかについてまず幾何光学による考察を行い(図2)、液晶が光線を曲げることによって生じるレンズ効果が実験の観測結果と矛盾しないことを示した。

また、[キラル液晶の薄膜が示す秩序構造とその光学的性質]のところで用いた光学顕微鏡像の計算スキームをこの欠陥の問題に適用し、欠陥の顕微鏡像が、顕微鏡で用いるレンズの開口数に強く依存することを明らかにした。開口数が1程度以下の場合に無偏光で観察した場合には、欠陥は暗いスポットとなり、これまでの実験で得られた顕微鏡像の性質と一致した(図3)。

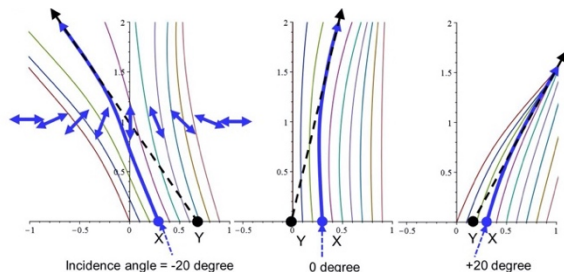


図2: 幾何光学による光の伝播の計算例. 両矢印が液晶配向を, 実線が実際の光線を, 点線が見かけ上の光線を表す.

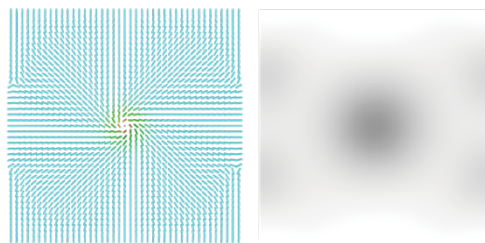


図3: 欠陥の配向構造(左)と、その光学顕微鏡像の計算例(右).

#### [コレステリックブルー相液晶の反射特性]

先にも述べたように、コレステリックブルー相は可視光の波長よりやや短い数百nm程度の周期の3次元秩序を自発的に示すのみならず、鏡映対称性も破れているという点で、光学的な応用の観点からも注目を集めている。本研究の過程で開発した光学計算に関するツールがコレステリックブルー相の光学特性の解明にも有用と考え、以下の研究を行った。

まずバルクに近い十分な厚さの系についてコッセル像の数値計算を行った。コッセル像はコレステリックブルー相の対称性の解明に大きな役割を果たしたが、コッセル像を直接計算する試みはこれまで行われていなかった。コッセル像を実際に計算した結果、バルクのブラッグ反射に由来すると考えられる明線と、前述の導波路共鳴に由来すると考えられる明線が得られた(図4)。明線の位置はブラッグ反射の式などのある程度解析的な議論からも得ることができるが、線の明暗や、明線が示す微細な構造は直接的な数値計算によってしか得ることはできず、本研究において行われた数値計算の意義を示すものである。

また、コレステリックブルー相は立方対称性を有することから巨視的には等方的な性質を示す。それゆえ一方向にねじれた配向を示すコレステリック相などと違い、光の入射角に対する光学特性の依存性がそれほど強くないことが期待される。また鏡映対称性の欠如により、左円偏光の入射光と右円偏光の入射光に対する応答が異なる。連携研究者の吉田浩之博士ら(大阪大)の実験研究により、実際にコレステリックブルー相が入射光の入射角に依存しない強い円偏光選択反射を示すことが明らかになった。その実験結果に想を得て、コレステリックブルー相の反射特性を、有限ではあるが十分に厚い系に単色光を入射した際の応答(図5)と、バルクにおける光の電磁波のバンド構造(フォトニックバンド構造)を計算することで調べた。それらの計算結果は実験結果を定量的によく再現するものであり、コレステリックブルー相が入射角に依存しない強い円偏光選択反射を示すことが、実験、理論の両面から確かめられた。

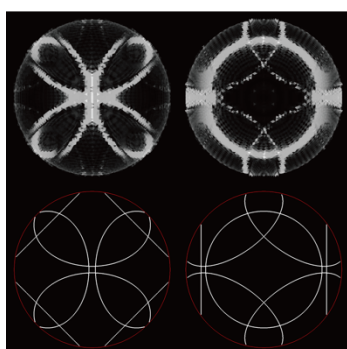


図4: 2種類の格子配向に対するコッセル像の数値計算結果(上)と、ブラッグ反射由来で生じると予想されるコッセル像(下)。

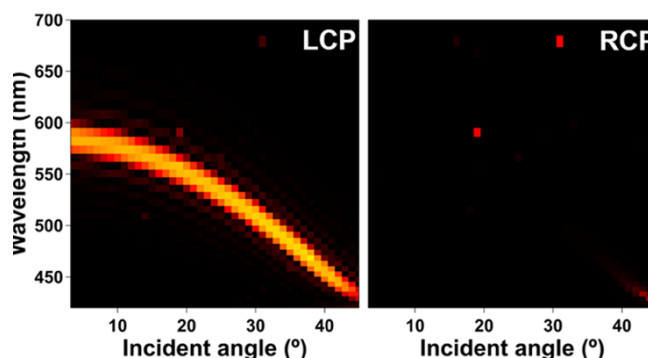


図5: コレステリックブルー相の反射特性の計算例。横軸は入射光の垂直入射からの角度、縦軸は入射光の波長。左円偏光入射時(左)には強い反射が起こるが、右円偏光入射時(右)ではほとんど反射は起こらない(2箇所スポットは技術的な問題による)。

#### [コレステリックブルー相液晶の構造]

光学的性質の解明とは直接結びつくものではないが、上述のようにコレステリックブルー相が種々の興味深い光学的性質を示すことを念頭に、その秩序構造そのものについての研究も行った。これらの研究は、いずれも連携研究者の吉田浩之博士らの実験研究に想を得たものである。

先に述べたようにコレステリックブルー相は立方対称性を有するが、その立方晶構造を一様に揃えることは応用の観点からも重要である。コレステリックブルー相に接触する平板基板において、基板に平行な特定の方向に液晶が配向するような表面処理をした際に、その表面における液晶配向の向きと立方格子の向きとの角度 $\theta$ が特定の値を示すことが実験で明らかになった。そこで、コレステリックブルー相の自由エネルギーの $\theta$ 依存性を数値計算により詳細に調べ、実験結果の一部は定量的に説明ができることが明らかになった。ただ、一部の実験結果は数値計算の結果により説明することができず、表面において液晶配向の履歴が記憶されているメモリ効果など、計算で取り入れられていない効果の影響であると推察される。

また、コレステリックブルー相の立方晶構造が完全に一様に揃えられない場合に、原子や分子からなる結晶で見られる、特定の結晶面を共有する双晶と呼ばれる構造が生じることが、吉田博士のグループ、及びアメリカの研究グループにより独立に発見された。しかしこれらのグループの実験研究は散乱実験に基づいており、双晶面(共有されている結晶面)における実空間の微細構造については明らかになっていない。またコレステリックブルー相では液晶分子が連続的に空間を埋め尽くしており、原子、分子からなる結晶の「格子点」に相当するものが存在するわけではない。そのような背景を踏まえ、双晶面を含むコレステリックブルー相の構造を明らかにするべく数値計算を行った。双晶面における格子のつながり方について系統的な計算を行い、どのような繋がり方をすれば自由エネルギーが最小になるか、またその際にコレステリックブルー相に内在する液晶配向の線欠陥がどのように双晶面において接続されるかを明らかにした。コレステリックブルー相の実空間構造については、連携研究者である菊池裕嗣教授(九州大)のグループにおいて共焦点顕微鏡による観察が行われている[Higashiguchi *et al.*, J. Am. Chem. Soc. 110, 6326 (2008)]. (本研究期間には間に合わなかったが)計算で得られた双晶の秩序構造から予想される共焦点顕微鏡像を計算し実験結果と比較することで、双晶面におけるブルー相の繋がり方を直接的に検証できることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic	4. 巻 24
2. 論文標題 キラル液晶薄膜中のスカームオンとその光学的性質	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 液晶	6. 最初と最後の頁 32-39
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 該当する
1. 著者名 Fukuda Jun-ichi, Nych Andriy, Ognysta Uliana, Zumer Slobodan, Musevic Igor	4. 巻 8
2. 論文標題 Liquid-crystalline half-Skyrmion lattice spotted by Kossel diagrams	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17234 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-35514-0	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 該当する
1. 著者名 Fukuda Jun-ichi, Zumer Slobodan	4. 巻 10941
2. 論文標題 Theoretical study on optical properties of liquid crystalline Skyrmion lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1094108(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2507520	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 該当する
1. 著者名 Takahashi Misaki, Ohkawa Takuma, Ozaki Masanori, Yoshida Hiroyuki, Kikuchi Hirotsugu, Fukuda Jun-ichi	4. 巻 10735
2. 論文標題 Three-dimensional crystal orientation of blue phase liquid crystals on surfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1073501(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2323159	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 -

1. 著者名 A. Nych, J. Fukuda, U. Ognysta, S. Zumer and I. Musevic	4. 巻 13
2. 論文標題 Spontaneous formation and dynamics of half-skyrmions in a chiral liquid-crystal film	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1215-1220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nphys4245	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 該当する

1. 著者名 Ohzono Takuya, Katoh Kaoru, Wang Chenguang, Fukazawa Aiko, Yamaguchi Shigehiro, Fukuda Jun-ichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Uncovering different states of topological defects in schlieren textures of a nematic liquid crystal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-16967-1	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 J. Fukuda and S. Zumer	4. 巻 26
2. 論文標題 Reflection spectra and near-field images of a liquid crystalline half-Skyrmion lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1174-1184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.001174	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 該当する

1. 著者名 Takahashi Misaki, Ohkawa Takuma, Yoshida Hiroyuki, Fukuda Jun-ichi, Kikuchi Hirotsugu, Ozaki Masanori	4. 巻 51
2. 論文標題 Orientation of liquid crystalline blue phases on unidirectionally orienting surfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 104003 ~ 104003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aaaa4b	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Fukuda Jun-ichi、Okumura Yasushi、Kikuchi Hirotsugu	4. 巻 10555
2. 論文標題 Numerical calculation of Kossel diagrams of cholesteric blue phases	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 105550A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2286290	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 -

1. 著者名 Cho SeongYong、Takahashi Misaki、Fukuda Jun-ichi、Yoshida Hiroyuki、Ozaki Masanori	4. 巻 2
2. 論文標題 Directed self-assembly of soft 3D photonic crystals for holograms with omnidirectional circular-polarization selectivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00146-x	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 -

1. 著者名 Fukuda Jun-ichi、Zumer Slobodan	4. 巻 2
2. 論文標題 Lattice orientation of cholesteric blue phases in contact with surfaces enforcing unidirectional planar anchoring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033407	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24件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 山下晃弘, 福田順一
2. 発表標題 BPI液晶の双晶の連続体シミュレーション
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下晃弘, 福田順一
2. 発表標題 BPI液晶の双晶の連続体シミュレーション
3. 学会等名 第126回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun-ichi FUKUDA
2. 発表標題 Exotic defect structures of a chiral liquid crystal sandwiched by two parallel substrates and their optical properties
3. 学会等名 SIAM Conference on Mathematical Aspects of Materials Science: MS64 Interface morphologies in liquid crystalline materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 キラル液晶薄膜が形成するスカーミオンとその光学的な性質
3. 学会等名 東京都立大学におけるセミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 Exotic ordered structures of a thin film of a chiral liquid crystal and their optical properties
3. 学会等名 International Conference on Liquid Crystals, Liquid Crystalline Polymers and Nanosystem (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 キラル液晶薄膜の秩序構造とその光学的性質
3. 学会等名 第9回ソフトな物理・工学の未来を考える会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 キラル液晶薄膜が形成する秩序構造のKossel diagramによる解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 キラル液晶薄膜の秩序構造が示すKossel diagram
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 キラル液晶薄膜の特異な秩序構造とその光学
3. 学会等名 ERATO横山液晶微界面プロジェクト 発足20周年記念研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 Simulation Study on the Self-organized Structures of a Liquid Crysta
3. 学会等名 National Taiwan Normal University—Kyushu University Joint Forum on Facilitating Interdisciplinary Research and Education (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Fukuda and S. Zumer
2. 発表標題 Theoretical study on optical properties of liquid crystalline Skyrmion lattice
3. 学会等名 SPIE Photonics West "Emerging Liquid Crystal Technologies XIV" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Fukuda
2. 発表標題 Exotic mesoscale structures in a thin film of a chiral liquid crystal
3. 学会等名 Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 キラル液晶薄膜におけるスカーミオン格子の生成とその直接観察
3. 学会等名 2018年日本液晶討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Fukuda, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 Half-Skyrmions in a chiral liquid crystal film
3. 学会等名 The 27th International Liquid Crystal Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 キラル液晶が示す特異な自己組織的秩序構造
3. 学会等名 第126回福工大土曜談話会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田順一, 奥村泰志, 菊池裕嗣
2. 発表標題 コレステリックブルー相のKossel diagramの数値計算
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 キラル液晶セルの特異な秩序構造とその光学顕微鏡像
3. 学会等名 第7回ソフトマター研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 液晶中に生じるスカーミオンとその直接観察
3. 学会等名 量子と古典の物理と幾何
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Fukuda
2. 発表標題 Liquid crystalline Skyrmions and their direct optical observation
3. 学会等名 2017 International Workshop of A3 Foresight Program on Soft Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Fukuda, Y. Okumura and H. Kikuchi
2. 発表標題 Numerical calculation of Kossel diagrams of cholesteric blue phases
3. 学会等名 SPIE Photonics West "Emerging Liquid Crystal Technologies XIII" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田順一, A. Nych, U. Ognysta, S. Zumer, I. Musevic
2. 発表標題 液晶スカーミオンの配向構造とその直接観察
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ohzono, K. Katoh and J. Fukuda
2. 発表標題 Localization of low-molecular-weight molecules at the defect of a liquid crystal
3. 学会等名 The 10th Liquid Matter Conference (Liquids2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田順一
2. 発表標題 液晶スカーミオンの光学顕微鏡像の数値計算
3. 学会等名 第7回計算統計物理学研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Fukuda
2. 発表標題 Skyrmions in a chiral liquid crystal film and their optical observation
3. 学会等名 The 7th Toyota Riken International Workshop on Chirality in Soft Matter (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>液晶は渦を巻く～液晶の新たな秩序構造形成を理論、実験により初めて実証～  <a href="https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/159">https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/159</a>  Liquid crystals swirl  <a href="https://www.kyushu-u.ac.jp/en/researches/view/71">https://www.kyushu-u.ac.jp/en/researches/view/71</a></p>
---

## 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
研究協力者	ジュマー スロボダン (ZUMER Slobodan)	ヨーゼフシュテファン研究所 (スロベニア)	
研究協力者	ニッチ アンドリー (NYCH Andriy)	ウクライナ国立科学アカデミー	
研究協力者	オグニスタ ウリアナ (OGNYSTA Uliana)	ウクライナ国立科学アカデミー	
研究協力者	ムシェビッチ イゴール (MUSEVIC Igor)	ヨーゼフシュテファン研究所 (スロベニア)	
連携研究者	菊池 裕嗣 (KIKUCHI Hirotsugu) (50186201)	九州大学・先導物質化学研究所・教授  (17102)	
連携研究者	奥村 泰志 (OKUMURA Yasushi) (50448073)	九州大学・先導物質化学研究所・准教授  (17102)	
連携研究者	尾崎 雅則 (OZAKI Masanori) (50204186)	大阪大学・工学研究科・教授  (14401)	
連携研究者	吉田 浩之 (YOSHIDA Hiroyuki) (80550045)	大阪大学・工学研究科・講師  (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
連携研究者	大園 拓哉  (OHZONO Takuya)  (40344030)	産業技術総合研究所・電子光基礎技術研究部門・主任研究員    (82626)	

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1件

国際研究集会 Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity	開催年 2018年～2018年
--	--------------------

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			
スロベニア	Univ. of Ljubljana	Jozef Stefan Institute		
ウクライナ	Institute of Physics			