

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号： 11301

研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間： 2016～2019

課題番号： 15KK0222

研究課題名（和文） 内包粒子の規則配列構造を外場制御できる新規中空コロイド結晶の作製と機能創出（国際共同研究強化）

研究課題名（英文） Fabrication of hollow colloidal crystals with external field response to control the arrangement of internal particles and creation on their functionality (Fostering Joint International Research)

研究代表者

長尾 大輔 (Nagao, Daisuke)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号： 50374963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円

渡航期間： 2.5ヶ月

研究成果の概要（和文）：内部に可動性の粒子を閉じ込めた中空粒子（Yolk/Shell型粒子）を構成要素として、それを規則配列させたコロイド結晶の作製と、その新たな機能を創出することを目的に研究が実施された。東北大が有する単分散粒子合成技術と、オランダ国・ユトレヒト大学を中心とした海外研究機関におけるコロイド評価技術を共同研究により組み合わせることにより、Yolk/Shell型粒子を構成要素としたコロイド結晶が、完全な固体ではなく、また懸濁液中の分散した粒子でもない、新たなコロイドの機能を発現可能な粒子集積体となり得る可能性があることを実験的に示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のコロイド系材料の問題点は、その比表面積の大きさによる粒子凝集にあった。これを回避するため、本研究では、中空粒子の外殻を物理障壁として利用し、その外殻に閉じ込めた粒子が互いに凝集しないコロイド結晶を作製した。粒子をその表面が露出した状態で閉じ込めることで、粒子体積に依存する機能だけでなく、粒子表面に依存する機能も活用できる点に本研究の独創性がある。閉じ込めた粒子の大きさを数100 nmから数10 nmまで微小化しただけでなく、閉じ込めた粒子に可動性を与えたことから、外部刺激を利用した刺激応答性としての用途も期待される。

研究成果の概要（英文）：The present work synthesized colloidal crystals of particles comprising a movable inner sphere and outer shell with aiming on creation of novel functions from the colloidal crystals. A combination of the synthetic technique on monodisperse particles in Tohoku University with the characterization technique of colloids in Utrecht University is allowed to find a possibility of unprecedented functions that have not been reported in both solid-like previous colloidal crystals and liquid-like suspension of particles.

研究分野： 材料化学工学

キーワード： ナノ材料

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、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

コロイド結晶とは、大きさや形が揃った微粒子の周期構造体である。研究代表者は、本研究の基課題となる基盤研究(B)において、中空構造を有するコロイド結晶、具体的にはYolk/Shell構造(卵の黄身に相当するコア粒子と殻に相当するシェルを有する構造)の粒子で構成されるコロイド結晶を作製し、外部刺激に応じたコロイド結晶の構造変化について研究を進めてきた。基課題では主に、コロイド結晶内に周期的に配置された内包コア粒子の挙動を光学顕微鏡により解析していたが、その特異なコア粒子の挙動を機能として利用するための検討は十分に行われていなかった。

2. 研究の目的

粒径均一性に優れる(単分散性)微粒子の合成技術を基盤技術として、様々な材料と形を有するコア粒子を内包したYolk/Shell型構造のコロイド結晶を国内で作製し、その外部刺激応答性を評価するとともに、コア粒子に発現する特異な挙動を機能として活用するための評価法確立を、国際共同研究により進展させることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

<Yolk/Shell型コロイド結晶の作製法について>

コロイド結晶の構成要素となるYolk/Shell粒子に内包するコア粒子として、本研究では合わせて4種の粒子を合成した。具体的には(1)球状シリカ粒子、(2)球状シリカ粒子をチタニアシェルで被覆した(コアシェル型ST粒子)、(3)金ナノ粒子、(4)金ナノロッドの各粒子を合成し、それらをYolk/Shell粒子の内包粒子として使用した。前記(1)および(2)を内包するYolk/Shell粒子はハードテンプレート法により作製した。ハードテンプレート法とは、鋳型となる粒子を異種材料で被覆した後で、被覆した粒子の鋳型部分を後工程で除去する中空粒子合成法の一種である。残りの(3)および(4)を内包するYolk/Shell粒子については、セルフテンプレート法と呼ばれる手法で合成した。セルフテンプレート法による合成では、ナノ材料を被覆したシリカシェル表面にカチオン性高分子を吸着させ、その吸着高分子による選択的なシリカエッチング効果を利用した。

<外部電場によるコロイド結晶の内部構造変化と光学特性の関係について>

電場印加によるコロイド結晶の内部構造変化を、光学シグナルとして取り出すことができれば、新規スイッチングデバイスとしての用途が期待できる。デバイス化に向けては、そのスイッチ特性が瞬時に発現することも必要になってくる。このような観点から、本研究では球状シリカ粒子だけでなく、電場応答性に優れるコアシェル型ST粒子を内包したYolk/Shell型コロイド結晶も作製した。粒子配列体から得られる光学シグナルを電場でスイッチングするには、表1に示すような点に留意する必要がある。

表1 スイッチ機能を有する配列体作製に向けた検討事項

粒子の単分散性	<ul style="list-style-type: none"> <li>規則配列した配列体の作製</li> <li>簡便な粒子配列体作製手法</li> </ul>
周期構造(粒子サイズ等)の設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>可視光応答性を示す配列体の作製</li> <li>目的とする波長域での反射ピーク取得</li> </ul>
材料種の選定	<ul style="list-style-type: none"> <li>配列体由来の光学シグナル取得</li> <li>外場のOFF ONでのシグナル差増大</li> </ul>
適度な光透過性	<ul style="list-style-type: none"> <li>配列体内部での光の強め合いによる強い光学シグナルの取得</li> </ul>
内包コア粒子の 高い運動性/電場応答性	<ul style="list-style-type: none"> <li>内部構造制御</li> <li>外場のOFF ONでのシグナル差増大</li> </ul>

自己組織化による構成粒子(Yolk/Shell粒子)の規則配列構造形成を促すには、粒子の単分散性が必要になる。単分散性の高い粒子を構成粒子として用いることで、欠陥の少ない配列体の作製が可能となる。自己組織化による粒子配列体の形成には、粒子分散液を滴下するだけの簡便な手法で配列体を作製できるといった利点も挙げられる。に関しては、光シグナルとしてブラッグ反射による反射ピーク取得のためである。可視光と強く相互作用する周期構造に対してブラッグ則を適用して特性を評価する。また、構造周期性を狙い通りに設計できれば、目的とする波長域へ反射ピークを発現させることが可能となる。に関しては、粒子配列体由来の光学シグナル取得のためである。電場印加時には空隙部を液体(媒体)で満たすため、媒体と粒子の屈折率差が大きくなる材料を選定しなければ配列体由来のシグナル取得は困難となる。本研究では、高屈折材料としてチタニアを利用することにした。に関しては、粒子配列体から強い反射シグナルを得るには光の強め合いが重要となるためである。適度な光透過性を配列体に持たせることができれば、配列体の表面だけでなく配列体の内部においても波(光)の強め合いが起こり、強いシグナル取得が期待できる。に関しては、配列体の内部構造を制御することを目的としている。内包コア粒子の運動性や電場応答性が高ければ、内部構造の多

様化が期待でき、一つの配列体から複数のシグナル取得が見込める。これらが低ければシグナル差は小さくなると考える。

本研究では主に、スイッチ機能を有する配列体作製に向け、表に記載の材料種の選定、適度な光透過性に着目した。種々の粒子の分散液に対して交流電場による粒子集積構造制御と透過スペクトル測定による光学特性評価から、スイッチ機能を有する粒子配列体の構成粒子に適する材料種の選定を試みた。交流電場は、粒子配列面に対して垂直な方向に印加した。これにより、幅広い粒子集積面から光シグナルを取得できるようになる。得られた光学シグナルと、電場印加方向に対する平行あるいは垂直方向からの粒子挙動観察結果を比較しながら、光透過率や電場の有無によるシグナルの差異を評価した。

#### 4. 研究成果

<外部電場によるコロイド結晶の内部構造変化と光学特性の関係について>

シリカシェル内に閉じ込める球状シリカ粒子とST粒子は、ゾルーゲル法を利用することで単分散な状態で粒子を調製することができた。合成した粒子分散液に対し外部交流電場を印加し、電場印加前後での透過スペクトルを測定したところ、特定の印加条件では電場印加により分散液の透過率が低下した。同条件において液中での粒子を顕微鏡にて観察すると、電極から離れた場所で粒子が鎖状構造を形成している様子が認められた。一方で、電極付近では広範に無秩序集積した粒子が認められたため、これにより電場作用下で透過率が低下したことが推定された。電場応答挙動については、球状シリカ粒子、ST粒子を内包したYolk/Shell粒子の間で大きな相違は見られなかったが、電場印加前後での透過率の変化はS/T粒子内包Yolk/Shell粒子の方が強く発現した。これはコア粒子に高屈折材料であるチタニア成分を導入したことが影響したと考えられる。また、比較対象として、Yolk/Shell粒子と同程度の粒径を有する球状シリカ粒子（中空ではない中実粒子）の分散液に対して同種の実験を行ったところ、コア内包型中空粒子は光透過性に優れていることが明らかになった。

合成した2種のコア内包型中空粒子を用いて、3次元配列体を作製した。粒子水分散液を滴下するだけの簡便な手法で3次元的に密に集積した規則配列体の作製を達成した。また、作製した3次元粒子配列体に対し、反射スペクトルを測定したところ、角度依存性を有するピーク波長を確認した。得られた反射ピーク波長とブラッグの式から求めた理論的なピーク波長と比較したところ、実測値と計算値は良好に一致した。この結果から、適切な粒子設計により特定波長域に反射ピークを発現させられることを明らかにした。

ST粒子内包Yolk/Shell粒子の2次元配列体を作製し、液中でのコア粒子運動挙動を観察した。電場印加前では、シェル内に閉じ込められたコア粒子がブラウン運動する様子を確認した。同粒子配列体に対し電場を印加すると特定条件で内包コアの運動挙動が変化し、電場印加方向と平行方向の運動も認められた。これらの挙動は球状シリカ粒子内包Yolk/Shell粒子の場合と異なっており、内包粒子と中空部の界面近傍での分極状態が強く影響した可能性を指摘した。スイッチ機能の発現に向けた粒子配列体に関する検討結果を表2にまとめる。

表2 スイッチ材料への応用へ向けた粒子選定

検討項目	粒子	球状シリカ内包	ST粒子内包
		Yolk/Shell粒子	Yolk/Shell粒子
粒子の単分散性			
周期構造(粒子サイズ等)の設計			
材料種の選定		×	
適度な光透過性			
内包コアの高い運動性/電場応答性		1)	

表2に示すように、ST粒子内包Yolk/Shell粒子がスイッチ機能を有する粒子配列体の構成粒子として有用であることを実証した。ここで実証した内容は、S/Tコア内包型中空粒子が単分散状態で合成できたこと、それに準じて周期構造を有する粒子集積体を作製できたこと、さらには高屈折率材料を内包コアとして導入できたことに起因しており、作製した粒子集積体からは電場のOFF ONによる光学シグナルの変化が期待できる。

<Yolk/Shell構造へのナノ粒子内包と内包ナノ粒子の外部電場応答性について>

電子顕微鏡の特徴は、光学顕微鏡では観察できない微細な構造を観察できる点にある。従来の電子顕微鏡は減圧下（乾燥状態）で試料を観察することから、液中における微粒子挙動を観察することができない。一方、近年急速に開発が進んでいるLiquid Cell TEMでは液中での微

粒子挙動をリアルタイムで観察できる。本研究では、共同研究先であるユトレヒト大学 Debye Institute for Nanomaterials Science (DINS)に Yolk/Shell 粒子を送り、DINS 保有の Liquid Cell TEM において Yolk/Shell 粒子に閉じ込めた粒子の運動を評価した。その結果、液で満たされたナノ空間内においてサブミクロンサイズのシリカ粒子が、ブラウン運動することを明瞭に確認することができた。さらに、本研究ではナノサイズの金属粒子を内包した Yolk/Shell 粒子を合成して、その内包された金属ナノ粒子を同 Liquid Cell TEM で観察した。これにより、微小閉空間内の金属ナノ粒子の動的挙動を水中で解析できることが明らかになった。

この観察に用いた Yolk/Shell 粒子は、粒径 30 nm 程度の単一球状金ナノ粒子を内包したものと、複数の金ナノ粒子を内包したものの 2 種類があり、各金ナノ粒子の動的挙動を Liquid Cell TEM で観察した。その結果、Yolk/Shell 粒子内に金ナノ粒子を複数閉じ込めた場合には、閉じ込めたナノ粒子が互いに会合した状態を維持することを直接観察することができた。水中に分散する金ナノ粒子に 1 kHz 程度の交流電場を印加すると、金ナノ粒子が交流電場に応答することが知られる。その特性と Liquid Cell TEM による会合金ナノ粒子の観察結果を合わせて考えると、複数の金ナノ粒子を内包した Yolk/Shell 粒子に対して外部電場を印加すると、内包金ナノ粒子の会合体の動きや配置を外部から制御できる可能性があると言える。

局所ナノ空間に閉じ込めたナノ材料の動き(ブラウン運動)に及ぼすナノ粒子形状の影響を調べるため、金ナノロッドを内包した Yolk/Shell 粒子の合成も行った。ナノ空間に閉じ込めたナノロッドについても、球状金ナノ粒子を閉じ込めた Yolk/Shell 型粒子と同じように、金ナノロッドも周囲が液体で満たされていれば、局所ナノ空間内でブラウン運動できることを確認することができた。このような合成実験および観察結果から、高温熱処理を使わない中空化プロセスを利用することで、粒径 100 nm 以下の Yolk/Shell 型粒子を合成できることを実証するとともに、同中空化プロセスが粒径均一性の高い Yolk/Shell 型粒子合成プロセスとして、様々な形状を有するナノ粒子に対して汎用的に利用できることを示した。

以上で述べたように、東北大が有する単分散粒子合成技術と、オランダ国・ユトレヒト大学を中心とした海外研究機関におけるコロイド評価技術を共同研究により有機的に結び付けることにより、Yolk/Shell 型粒子を構成要素としたコロイド結晶が、完全な固体ではなく、また懸濁液中の分散した粒子でもない、新たなコロイドの機能を発現可能な粒子集積体となり得る可能性があることを実験的に示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ayumi Yahata, Haruyuki Ishii, Kosuke Nakamura, Kanako Watanabe, Daisuke Nagao	4. 巻 30(12)
2. 論文標題 Three-dimensional periodic structures of gold nanoclusters in the interstices of sub-100 nm polymer particles toward surface-enhanced Raman scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 2957-2963
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.appt.2019.09.003	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 Kanako Watanabe, Tom A. J. Welling, Sina Sadighikia, Haruyuki Ishii, Arnout Imhof, Marijn A. van Huis, Alfons van Blaaderen, Daisuke Nagao	4. 巻 566(15)
2. 論文標題 Compartmentalization of gold nanoparticle clusters in hollow silica spheres and their assembly induced by an external electric field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Colloid and Interface Science	6. 最初と最後の頁 202-210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcis.2020.01.094	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 Jun Kanazawa, Tsuyoshi Kanamori, Masaki Sato, Haruyuki Ishii, Mikio Konno, Daisuke Nagao	4. 巻 20
2. 論文標題 Permittivity enhancement of transparent poly(vinylidene fluoride) nanocomposite films by loading titania-coated barium titanate nanoparticles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Nanoparticle Research	6. 最初と最後の頁 186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11051-018-4289-0	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 Kanako Watanabe, Kotaro Kuroda, Daisuke Nagao	4. 巻 11(5)
2. 論文標題 External-stimuli-assisted control over assemblies of plasmonic metals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma11050794	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 Haruyuki Ishii, Mitsunobu Nara, Yuri Hashimoto, Arata Kanno, Shunho Ishikawa, Daisuke Nagao, Mikio Konno	4. 巻 85
2. 論文標題 Uniform formation of mesoporous silica shell on micron-sized cores in the presence of hydrocarbon used as a swelling agent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Sol-Gel Science and Technology	6. 最初と最後の頁 539-545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10971-018-4589-y	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 Kanakano Watanabe, Haruyuki Ishii, Mikio Konno, Arnout Imhof, Alfons van Blaaderen, Daisuke Nagao	4. 巻 33(1)
2. 論文標題 Yolk/shell colloidal crystals incorporating movable cores with their motion controlled by an external electric field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 296-302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.6b03116	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 該当する

1. 著者名 Haruyuki Ishii, Shunsuke Kawai, Daisuke Nagao, Mikio Konno	4. 巻 241
2. 論文標題 Phosphor-free silica-coating of monodisperse cores for dual functionalization with luminescent and mesoporous shell	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Microporous and Mesoporous Materials	6. 最初と最後の頁 366-371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.micromeso.2016.12.014	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 Kenta Yamada, Daisuke Nagao, Haruyuki Ishii, Mikio Konno	4. 巻 50(1)
2. 論文標題 Optimized Thermal Treatment for Preparation of Double Inverse Opals Incorporating Movable Cores	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 64-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.16we146	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 Chika Suwabe, Noriko Yamauchi, Daisuke Nagao, Haruyuki Ishii, Mikio Konno	4. 巻 294(12)
2. 論文標題 Low-temperature synthesis of water-dispersible magnetic composite particles with high monodispersity	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Colloid and Polymer Science	6. 最初と最後の頁 2079-2085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00396-016-3971-y	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 H. Namigata, K. Watanabe, E. Tanaka, D. Nagao
2. 発表標題 Fabrication of non-close-packed colloidal crystals composed of hollow particles incorporating movable cores
3. 学会等名 2019 International Symposium on Chemical-Environmental-Biomedical Technology(isCEBT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Watanabe, T. A. J. Welling, S. Sadighikia, H. Ishii, A. Imhof, M. A. Huis, A. van Blaaderen, D. Nagao
2. 発表標題 Colloidal stability of gold nanoparticle clusters encapsulated into hollow silica spheres
3. 学会等名 OKINAWA COLLOIDS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakamura, K. Watanabe, D. Nagao
2. 発表標題 Effect of silica encapsulation on plasmon characteristics of gold nanotriangle
3. 学会等名 OKINAWA COLLOIDS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸佑、黒田昂太郎、渡部花奈子、長尾大輔
2. 発表標題 金ナノトライアングルのシリカ被覆プロセスとプラズモン特性に関する研究
3. 学会等名 第21回先端研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌紀、金澤惇、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 誘電性ナノコンポジット膜に及ぼすTEMPO酸化セルロースナノファイバーの補強効果
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本洸太、石川椿峰、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 メソポーラスシリカ粒子の細孔径拡大に向けたゾル-ゲル反応溶媒組成の検討
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌紀、金澤惇、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 チタン酸バリウムおよびTEMPO酸化セルロースナノファイバーを充填した多機能ナノコンポジット薄膜の作製
3. 学会等名 マテリアル・ファブリケーション・デザインセミナー
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 J. Kanazawa, H. Ishii, D. Nagao
2. 発表標題 Fluorescence enhancement of nanocomposite films composed of phosphor-free luminescent silica nanoparticles by loading dielectric nanoparticles
3. 学会等名 13th Japan-Korea Symposium on Materials and Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金澤惇、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 蛍光シリカ透明ナノコンポジット膜の蛍光特性に及ぼす誘電性ナノ粒子添加の影響
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田昂太郎、渡部花奈子、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 微小空間での粒子配向制御に向けた金ナノロッド複合中空粒子の合成
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Watanabe, E. Tanaka, H. Ishii, D. Nagao
2. 発表標題 Rattle-type colloidal crystals incorporating a movable silica/titania core developed for switchable materials
3. 学会等名 32nd Conference of the European Colloid and Interface Society (ECIS)2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Ishikawa, H. Ishii, D. Nagao
2. 発表標題 Sub-micron core-shell mesoporous silica particles as a new generation for HPLC applications
3. 学会等名 32nd Conference of the European Colloid and Interface Society (ECIS)2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川椿峰、石井治之、長尾大輔
2. 発表標題 ゾル-ゲル反応におけるメソポーラスシェル形成過程の実験的検討
3. 学会等名 第20回先端研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Watanabe, E. Tanaka, H. Ishii, M. Konno, D. Nagao
2. 発表標題 Motions of cores incorporated into a rattle particle under an external electric field
3. 学会等名 16th Conference of the International Association of Colloid and Interface Scientists (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Watanabe, E. Tanaka, H. Ishii, M. Konno, D. Nagao
2. 発表標題 Characterization of 2D and 3D rattle-type colloidal crystals incorporating movable, electro-responsive cores for new optical devices
3. 学会等名 10th World Congress of Chemical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中恵理、石井治之、今野幹男、長尾大輔
2. 発表標題 3次元周期構造を有するコア-シェル粒子配列体の光学特性に及ぼす内包コア種の影響
3. 学会等名 化学工学会第49回秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Watanabe, D. Nagao, H. Ishii, M. Konno
2. 発表標題 Electric-field-assisted location control over inner cores incorporated into rattle-type colloidal crystals
3. 学会等名 6th International Colloids Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田中恵理、石井治之、今野幹男、長尾大輔
2. 発表標題 可動性コア内包型3次元中空粒子集積体の作製と特性評価
3. 学会等名 化学工学会第48回秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡部花奈子、石井治之、今野幹男、長尾大輔
2. 発表標題 ラトル型粒子配列体に内包した可動性コアの電場による運動制御
3. 学会等名 第65回高分子討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Watanabe, H. Ishii, M. Konno, D. Nagao
2. 発表標題 Controls over motion and location of movable cores incorporated into yolk/shell colloidal crystal by external electric field
3. 学会等名 12th Japan-Korea Symposium on Materials & Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 E. Tanaka, H. Ishii, M. Konno, D. Nagao
2. 発表標題 Fabrication of 3D assemblies of hollow particles incorporating movable cores for novel optical materials
3. 学会等名 12th Japan-Korea Symposium on Materials & Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 渡部花奈子、長尾大輔	4. 発行年 2017年
2. 出版社 株式会社シーエムシー出版	5. 総ページ数 10
3. 書名 高分子微粒子ハンドブック「Yolk/Shell 構造粒子」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻 長尾研究室HP  
<http://www.che.tohoku.ac.jp/~mpe/>

## 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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ファンブラーデレン アルフォンス  (van Blaaderen Alfons)	Utrecht University・Debye Institute・ Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ピッチ アンドレイ  (Pich Andrij)	RWTH Aachen University・Funct. and Interactive Polym.・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	リズマルツァン ルイス  (Liz-Marzan Luis)	CIC biomaGUNE・Bionanoplasmonic Laboratory・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	マルバニー ポール  (Mulvaney Paul)	University of Melbourne・School of Chemistry・Professor	