

研究報告書

「3次元メゾスコピック・エンジニアリングによる有機アクティブレーザー光源の創出」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月 1 日～平成 26 年 3 月 31 日

研究者: 古海 誓一

1. 研究のねらい

周期構造を持つ媒質中に、その繰返し周期と同程度の波長を持つ光が入射すると、媒質と光の相互作用が極めて大きくなる。これは、「フォトニック結晶」における「フォトニックバンドギャップ」が起因している。近年、新しい光デバイスとして「フォトニック結晶」に対する期待が高まっている。従来、フォトニック結晶は、半導体デバイス作製で培われた微細加工技術を駆使して集積されている。しかしながら、その煩雑な作製プロセスのために、簡便に得ることは容易でない。

一方、フォトニック結晶の一種である「コロイド結晶」は、秀逸な材料である。コロイド結晶とは、サブマイクロからマイクロメートルの大きさの微粒子が階層的に 3 次元規則配列した集積体である。興味深いことに、この規則配列構造を集積するために特別な作製装置を必要としない。分散液中で働くコロイド微粒子の静電相互作用を巧みに利用することで、微粒子はコロイド結晶構造をボトムアップ的、すなわち自己組織的に形成することができる(図 1)。コロイド結晶はブラッグ条件を満たす波長の光を反射するが、粒径が数百ナノメートルのコロイド結晶では、可視波長域に発現した反射光を目視できる。このブラッグ反射光は、まさにコロイド結晶のフォトニックバンドギャップそのものである。

最近の研究動向を調べてみると、コロイド結晶中の微粒子の隙間に、高分子ハイドロゲルや液晶に代表される外部刺激に応答するソフトな有機・高分子材料を挿入し、温度、pH、電場、光によってブラッグ反射波長が応答する光センサーが数多く報告されている。その中でも、コロイド結晶の膜厚方向の応力によって反射波長が変化する指紋認識光センサーが報告され、実用の可能性が示された。しかしながら、多くのコロイド結晶の光デバイスは、ブラッグ反射の波長変化を受動的に目で観察する反射型の光センサーに限られているのが現状である。

それに対して、本研究者は、ブラッグ反射、すなわちフォトニックバンドギャップの積極的な利用として、コロイド結晶による高効率なレーザー発振に取り組んでいる。たとえば、粒径 200 nm 程度のコロイド微粒子の高品質なコロイド結晶膜に発光性高分子を組み合わせ、532 nm の波長の光で励起すると、コロイド結晶のフォトニックバンドギャップの波長バンド、すなわち反射バンド内の 610 nm でレーザー発振が発現し、0.17 nm と線幅が非常に狭い発光であることを見出した。さらに、全てが高分子材料で構成されたフレキシブルなレーザーデバイスの作製にも成功している(図 1・右)。

本研究では、数百ナノメートルのコロイド微粒子が 3 次元規則配列した階層構造、すなわちコロイド結晶をボトムアップ的に集積し、有機・高分子材料の特長を最大限に引き出すことによって、次世代フォトニックシステムに繋がる新しいアクティブなレーザー発振の創発を目的とした。研究を進めた結果、コロイド結晶の高分子ゲル膜を蛍光性有機色素のイオン液体溶液で永続的に安定化すると、機械的応力による波長可変レーザー発振を実証することができた。さ

らに、コロイド結晶の光共振器にフォトクロミック化合物を導入すれば、マイクロパターンレーザー発振の可逆的な光スイッチングにも成功することができた。

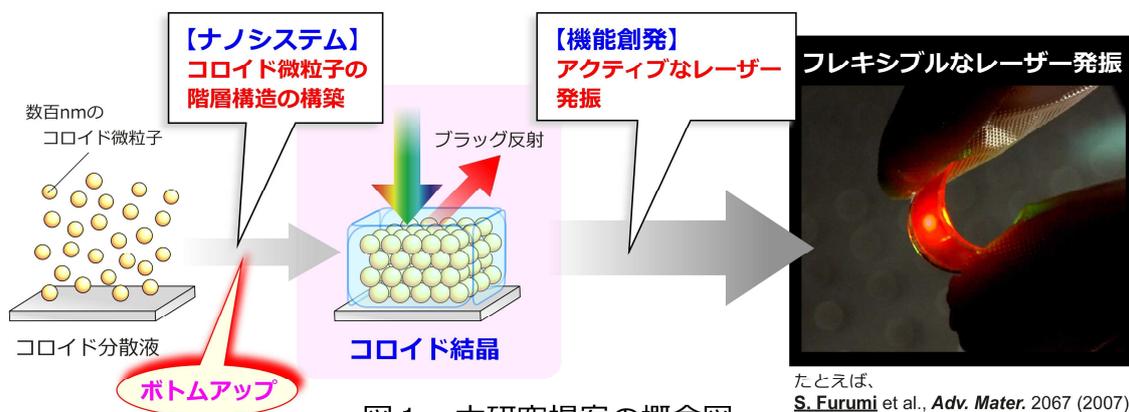


図1 本研究提案の概念図。

2. 研究成果

【コロイド微粒子の精密合成技術の確立】

コロイド結晶をフォトニック結晶の研究分野へ展開するには、意図しない欠陥構造を抑制することが必要不可欠である。当初、微粒子の単分散性などが問題視されていたが、コロイド合成化学の発展に伴って、ポリスチレンやポリメタクリル酸メチルに代表される高分子やシリカからなる単分散性の高いコロイド微粒子を精密に合成できるようになってきた。

本研究者は、界面活性剤であるドデシル硫酸ナトリウム (Sodium dodecyl sulfate; SDS) を用いて、スチレンモノマーをエマルジョン重合すると、微粒子の大きさが 200 nm 前後で真球状のポリスチレン (PS) コロイド微粒子 (PS-1~PS-6) を精密に合成できることに成功した〔図2(A)〕。合成条件を精密に制御すると、PS コロイド微粒子の大きさをコントロールできる。たとえば、エマルジョン重合における SDS の濃度を変えることで、PS 微粒子の粒子径を約 15 nm 刻みで精密にコントロールできる合成技術を確認した。しかも、エマルジョン重合における SDS の濃度が高くなると PS 微粒子の粒径は小さくなり、SDS の濃度と PS 微粒子の粒径の関係はほぼ比

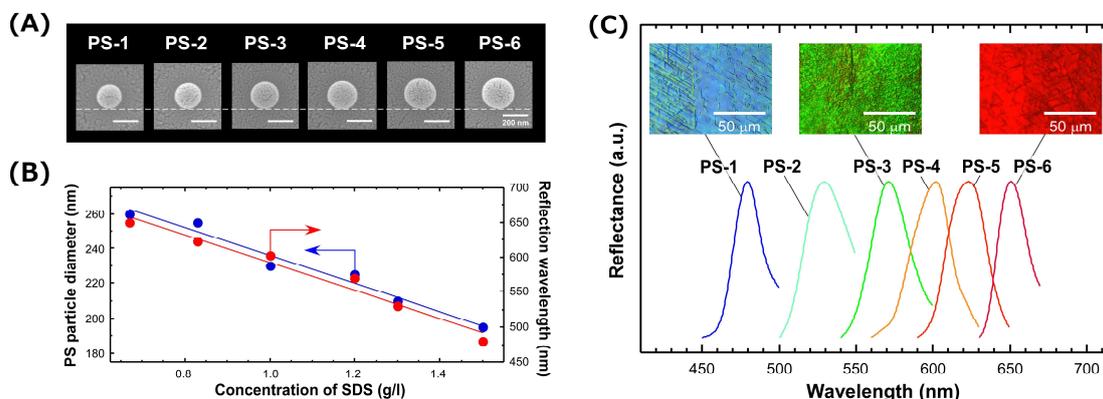


図2 (A)エマルジョン重合によって合成したポリスチレンコロイド微粒子の電子顕微鏡写真。エマルジョン重合における界面活性剤の濃度は0.67~1.5 g/lである。(B)エマルジョン重合によって合成したポリスチレン微粒子の粒径 (●) とそのコロイド結晶薄膜のブラッグ反射波長 (●) の界面活性剤濃度依存性。(C)合成したポリスチレン微粒子で作製したコロイド結晶薄膜の反射スペクトル。挿入図：顕微反射像。

例関係になることを見出した〔図2(B)・青丸〕。

さらに、この合成した PS 微粒子 (PS-1~PS-6) を用いて、ポリ(ジメチルシロキサン) (PDMS) で固定化したコロイド結晶薄膜を作製した。反射スペクトルを測定すると、PS 微粒子のサイズに応じて 475 nm から 650 nm の可視波長範囲にフォトニックバンドギャップ由来のブラッグ反射バンドを観察することができた〔図2(C)〕。実際に顕微反射像を観察すると、PS 微粒子の粒径に依存して、反射色が青、緑、赤に変化することが分かった。しかも、PS コロイド微粒子のエマルジョン重合で添加した SDS の濃度に対して、PS-1~PS-6 のコロイド結晶薄膜から実測されるブラッグ反射波長をプロットすると、SDS の濃度と PS 微粒子の粒径の関係と同様に、SDS の濃度とブラッグ反射波長は、ほぼ比例関係を示した〔図2(B)・赤丸〕。

以上のように、粒径が 200 nm のポリスチレン微粒子の精密合成技術を確立した。スチレンモノマーに溶解する化合物、たとえば、発光性有機色素や発光性ナノ粒子、磁性ナノ粒子を事前に溶解しておき、エマルジョン重合を行えば、機能性ポリスチレン微粒子を合成することができる。さらに、コロイド結晶を作製すれば、フォトニックバンドギャップを利用することで、光電子特性の増強などが期待できる。

【イオン液体で安定化したコロイド結晶ゲルによる波長可変レーザー】

不揮発性液体であるイオン液体に着目して、永続的に安定化したコロイド結晶の高分子ゲル膜を作製し、機械的応力による波長可変レーザー発振に成功した〔図 3(A)〕。

粒径が約 120 nm のポリスチレンコロイド微粒子、高分子ハイドロゲル前駆体の *N*-methylolacrylamide と *N,N*-methylenebisacrylamide、さらには、光重合開始剤として 2,2'-azobis[2-methyl-*N*-(2-hydroxyethyl)propionamide] を含む水分散液を 100 μm の隙間を持つキャピラリーセル中に流動させた。そうすると、良配向のコロイド結晶構造を得ることができ、その後、紫外光を照射すると光重合反応が進行し、高分子ハイドロゲル [poly(*N*-methylolacrylamide-*co*-*N,N*-methylenebisacrylamide)] で固定化した良配向のコロイド結晶ハイドロゲル膜を調整することができた。ここで重要となるポイントとして、非最密充填型のコロイド結晶ゲル膜を作製することである。

その後、このコロイド結晶ハイドロゲル膜を蛍光性有機色素であるローダミン 640 のイオン液体溶液に浸漬した。ここで用いたイオン液体は、HIMS で比較的人体に有害でなく、低環境負荷な化合物と認められている 1-allyl-3-butylimidazolium bromide (ABImBr) である。ローダミン 640 の ABImBr 溶液に浸漬したコロイド結晶ハイドロゲル膜を数日間、放置すると、ハイドロゲルの溶媒である水が自然に蒸発するとともに ABImBr とローダミン 640 がコロイド結晶膜中に浸透し、乾燥した大気中においても永続的に安定なコロイド結晶ゲル膜を得ることができた。

このコロイド結晶ゲル膜を 532 nm の光で励起すると、レーザー発振を示し、その発光のスペクトル線幅は 0.06 nm であり、非常に狭かった。光共振器の品質の指標である Q 値は 1.1×10^4 と算出でき、これまでのコロイド結晶のレーザー発振に関する報告と比較すると世界トップレベルの高い値であった。レーザー発振時のビームプロファイルを測定したところ、対称的な形状を示し、1次元ビームプロファイルについては、理論的フィッティングによって 90%以上で gaussian 形状であることが分かった。

さらに、高分子ゲルは柔軟性に富んでいることが特筆すべき点であるが、コロイド結晶ゲル膜に圧縮応力を加えれば、レーザー発振の波長をチューニングできると考えた。レーザー発振が起こる条件は、発光色素の蛍光バンド、すなわちゲインスペクトルとコロイド結晶のブラッグ反射波長が同じ波長範囲で重なり合っていることが必要である。ここでは、レーザー波長チューニング範囲をより広くするために、ローダミン 640 とスルフォローダミン B を適切な割合で混合し、エネルギー移動によるブロードな蛍光バンドを調整した〔図 3(B)・上・破線〕。

ローダミン 640 とスルフォローダミン B を混合した ABImBr 溶液を含むコロイド結晶ゲル膜に、機械的圧縮応力を加えた時のレーザースペクトルを測定した。コロイド結晶ゲル膜に 9%から 25%まで圧縮応力を加えると、レーザー波長は 655 nm から 588 nm に連続的に短波長側にシフトした。もちろん、圧縮応力を弱めれば、レーザー波長も長波長側に戻すことができた。すなわち、レーザー波長は 588 nm から 655 nm までの波長範囲で連続的、かつ可逆的にチューニングすることに成功した。過去、弾性高分子で作製した光共振器を用い、機械的応力による波長可変レーザー発振を報告した研究例があるが、ここで達成した 67 nm というレーザーチューニング範囲は世界トップレベル値である。しかも、独自の顕微鏡システムでレーザー発振の顕微鏡発光像を観察してみると、655 nm では赤色、610 nm ではオレンジ色、588 nm では黄色というように、レーザーの変色も確認することができた〔図 3(B)・下〕。

以上のように、コロイド結晶ゲル膜の膜厚方向に機械的応力を加えると、圧縮率に応じてレーザー波長は連続的に短波長シフトし、可逆的な波長可変レーザー発振を実証できた。イオン液体で安定化した高分子ゲルによるレーザーへの展開はこれまで皆無であり、高分子ゲルを用いたフォトニクスへの新展開を提示することができた。

【フォトクロミック化合物を利用したマイクロパターンレーザーの光スイッチング】

コロイド結晶の中にフォトクロミック反応を示す発光層を設けることで、マイクロパターンレーザーの光スイッチングに成功した。

コロイド結晶のビルディングブロックであるポリスチレン微粒子は、ドデシル硫酸ナトリウムを含むエマルジョン重合によって精密合成した。ドデシル硫酸ナトリウムの濃度を約 3.5 mM に

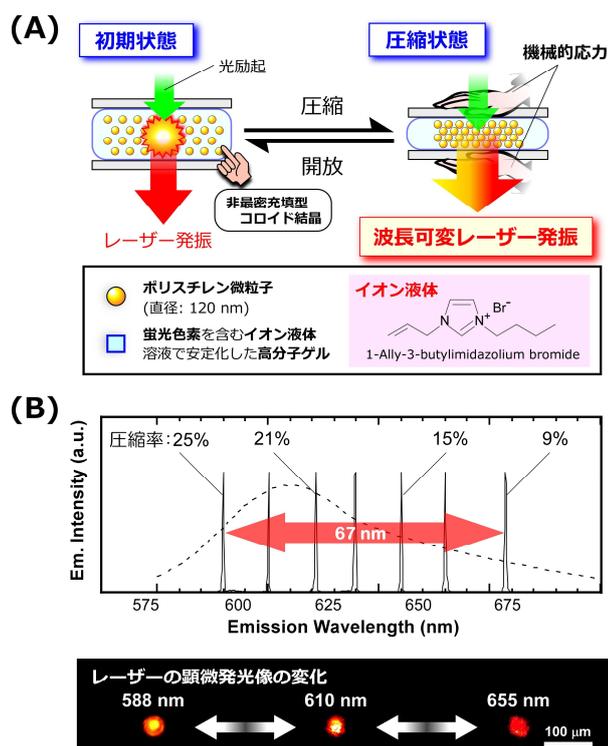


図3 (A)イオン液体で安定化したコロイド結晶ゲル膜による波長可変レーザー発振の模式図。(B)機械的応力によるレーザーのスペクトルと顕微鏡発光像の変化。

調整すると、ポリスチレン(PS)微粒子はほぼ真球状を示し、その粒子径は約 210 nm になることを見出した。

上述した手法で合成した粒径が約 210 nm の PS 粒子を使い、ポリ(ジメチルシロキサン)(PDMS)で固定化したコロイド結晶膜を作製した。作製方法は非常に簡便である。まず初めに、親水性ガラス基板上に、PS 微粒子の分散水溶液を展開した。ついで、PS 微粒子の分散液膜表面をシリコーンオイルで覆い、数日間放置すると、分散溶媒の水がシリコーンオイルを通して徐々に蒸発することで、コロイド結晶構造が自己組織的に形成した。その後、熱重合性シリコーンモノマーの溶液を添加し、室温で 12 時間、60°C で 3 時間の熱処理を行うことで、モノマーの重合反応を促進した。その結果、PDMS で固定化された PS 微粒子のコロイド結晶薄膜を得ることができた。

反射スペクトルを測定すると、フォトニックバンドギャップ、すなわち反射バンドの波長は、560 nm 付近に現れた。また、反射バンド付近にはファブリーペローフリンジが現れ、これは PS 微粒子のコロイド結晶が高配列していることを意味している。実際に、電子顕微鏡観察を行うと、PS 微粒子の最密充填構造、すなわち面心立方 (fcc) 構造を形成していることを確認できた。PS 微粒子の粒径、隣接粒子の間隔と PDMS・PS の屈折率の実測値を用いて、スカラー波展開法 (Scalar Wave Approximation; SWA) によって、コロイド結晶の反射スペクトルを計算したところ、実測した反射スペクトルは理論結果と良く一致していた。

フォトクロミック反応を示す発光層は、ピロメテン錯体[図 4(A)・挿入図]とジアリルエテン誘導体[図 4(B)]を用いて調製した。ジアリルエテン誘導体の開環体と閉環体は電子構造が異なっている。開環体では 400 nm 以上の可視波長域には吸収帯が現れないが、紫外光を照射すると、光環化反応が進行し閉環体に変化する。閉環体は π 電子共役系が長くなったために、580 nm 付近の可視波長域に新しい吸収帯が現れる特性がある。

コロイド結晶・光共振器は、2 枚のコロイド結晶膜の間に 2.7 μm 程度の厚みのフォトクロミック・発光層を設けた単純な構造である。このコロイド結晶・光共振器を 470 nm で光励起をして、発光スペクトルを測定した。38 nJ/pulse 以上の光励起エネルギーになると、発光強度が数千倍になるとともに、フォトニックバンドギャップの波長バンド内の 560 nm でレーザー発振を観察することができた[図 4(A)・赤線]。高分解能発光スペクトル測定を行うと、1 つのレーザーピー

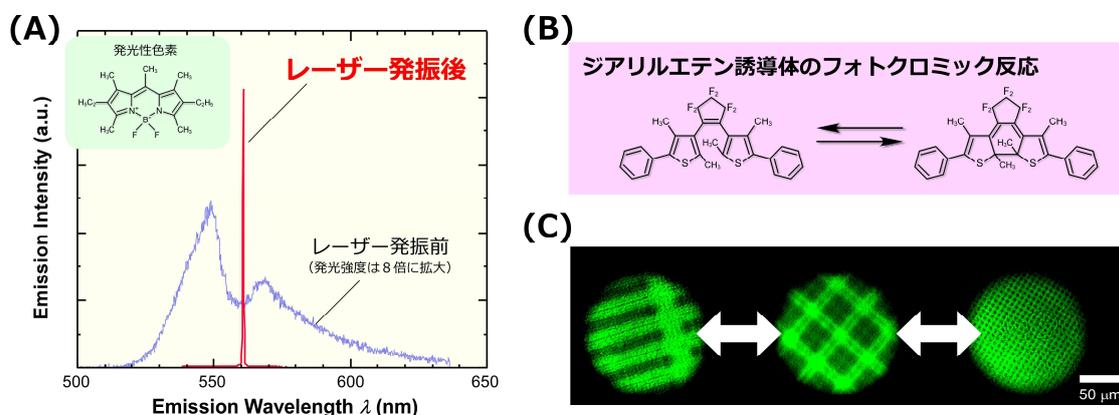


図4 (A)フォトクロミック反応を示す発光層を設けたコロイド結晶・光共振器のレーザー発振前後の発光スペクトル変化. (B)ジアリルエテン誘導体のフォトクロミック反応. (C)フォトクロミック反応によるマイクロパターンレーザー発振の可逆的な光スイッチング.

クであることがわかり、そのスペクトル線幅は 0.16 nm であった。スカラー波展開法による理論計算を行うと、コロイド結晶中の欠陥モードによってレーザーが発振したと解釈することができた。

さらに、コロイド結晶・光共振器に紫外光照射すると、ジアリルエテン誘導体の光閉環反応が進行した〔図 4(B)〕。紫外光を照射したフォトクロミック・発光層は、ピロメテン誘導体からジアリルエテン誘導体の光閉環体のエネルギー移動が起こり、ピロメテン誘導体の発光量子収率が紫外光照射前後で 25%から 1%に減少した。したがって、紫外光照射を行うことで、ピロメテン誘導体の発光量子収率の減少し、コロイド結晶・光共振器からレーザー発振も消失することが分かった。すなわち、レーザー発振の光スイッチングである。しかも、フォトマスクを用いて紫外光照射すると、マイクロパターンされたレーザー発振を観察でき、レーザービームの中に数 μm のパターンを書き込むことに成功した。さらに、レーザー発振のマイクロパターンは、紫外光・可視光照射によって可逆的に書き換え可能であることも見出した〔図 4(C)〕。

以上のように、マイクロパターンレーザーの可逆的な光スイッチングは、コロイド結晶に限らず、1次元、2次元、3次元フォトニック結晶にも導入することができ、超小型で高密度な光スイッチングデバイスへの応用が期待できる。

3. 今後の展開

本研究では、数百ナノメートルのコロイド微粒子がボトムアップ的に集積した階層構造、すなわちコロイド結晶構造を用い、有機・高分子材料の特長である柔軟性や制御性を最大限に活用することでアクティブなレーザー発振の創発に成功した。現在、広く普及している半導体レーザーは波長をオンデマンドにコントロールすることは難しいが、本研究で見出した高分子ゲルで安定化したコロイド結晶レーザーは機械的応力の外部刺激でレーザー波長を任意に制御することができる。また、フォトクロミック化合物を用いれば、マイクロパターンレーザーの光スイッチングを可能にすることができ、将来、光集積回路システムを構築する際、コロイド結晶デバイスを微小領域に導入することが容易である。

今後、ボトムアップ技術とトップダウン技術を高度に融合することで、コロイド結晶の中に数百ナノメートルのメソスコピック空間を創り出し、その微小空間における「光と物質の相互作用」に着目して新しい有機・無機ナノハイブリッド材料の学理的探究に発展させていく。たとえば、フェムト秒レーザーによる 3次元微細加工技術を導入すれば、コロイド結晶の内部にデザインされた 3次元微小空間を創り出すことができ、特異なフォトニックバンド効果、光特性の飛躍的な増強、高効率なレーザー発振などが期待できる。さらに、外部変調性や電界発光特性を備えている有機・高分子材料や機能性無機ナノ材料を用いることで、革新的なアクティブレーザーへの研究展開を行う。

4. 評価

(1) 自己評価

本さきがけ研究では、数百ナノメートルのコロイド微粒子がボトムアップ的に形成した 3次元規則配列構造、すなわちコロイド結晶を用い、そのフォトニックバンドギャップ(ブラッグ反射)を利用して、次世代オプトエレクトロニクスに繋がる新しいアクティブなレーザー発振の創発を目

指し、研究を進めてきた。

粒径が数百ナノメートルの単分散・高分子コロイド微粒子を設計・合成することから始まり、高配向コロイド結晶膜の作製と安定化、さらにはレーザー発振特性の評価と外部変調の一連の研究を行った。本研究者はこれまで市販のコロイド微粒子を用いてきたが、ソープフリー重合やエマルジョン重合による数百ナノメートルの単分散性の高いポリスチレン微粒子の合成技術確立することができた。今後、より合成技術の精度を上げて、粒径が 100 nm~1 μm、かつ変動係数が 10%以下になる条件を見出す。さらに、微粒子内部にフォトクロミック化合物、発光ナノ材料、磁性ナノ材料を含有した新しい機能性コロイド微粒子への発展性も期待できるので、今後、機能性コロイド微粒子の合成研究を進めるきっかけを得ることができた。

また、コロイド結晶を使った新しいレーザーへの研究展開を提示することができた。コロイド結晶の反射特性を測定し、理論解析と併せて考察することで、これまでにないアクティブなレーザー発振を見出すことができた。特に、イオン液体で永続的に安定化したコロイド結晶高分子ゲル膜を用いた波長可変レーザー発振に関する研究成果は、学術的だけでなく、実用的にも展開できる可能性を秘めていると考えており、今後、この研究をさらに発展させる予定である。さらに、非公開の研究成果で記述したように、無機ナノ材料と有機・高分子材料とのハイブリッドによる新しい研究成果を得ることができ、今後の研究における新しい展開の手がかりをつかむことができたと思っている。

当初の研究計画では、微粒子のコロイド結晶形成技術(ボトムアップ)とフェムト秒レーザーによる3次元微細加工技術(トップダウン)を高度に融合して、コロイド結晶内部に数百ナノメートルのメゾスコピック空間を導入して、光子を時空間的に閉じ込めることで、高効率なレーザー発振を実証することを目指していた。しかしながら、研究開始直後に東日本大震災、それに付随して、フェムト秒レーザーの設置の遅延などの予期せぬ多くのトラブルに見舞われ、本さきがけ研究の期間内に、フェムト秒レーザーによる3次元微細加工システムを設置するのみに留まってしまった。しかしながら、今後の研究を進める上で、フェムト秒レーザーによる3次元微細加工システムという強力な基盤技術を得ることができたので、本さきがけ研究に採択して頂いたことに対して、改めて感謝している。

以上のように、本さきがけ研究の3年半という期間で、本研究提案の基礎・基盤となる知見を取得することができ、研究開始前に本研究者自身が持っていなかった技術を新たに身に付けることができた。これは今後、研究を展開する上で重要な技術であり、さらに発展した研究成果が期待できる。今後は、無機化学、有機・高分子化学、光学の専門家と協力しつつ、引き続き当初からの目標に向かって研究を邁進していく予定である。

また、本研究領域の領域会議では、毎回、趣向を凝らしたテーマで、自分なりにプレゼンテーションの内容を熟慮し、参加した。しかしながら、必ずしも、毎回の領域会議で要望する内容を発表することができず、反省するとともに、大変に勉強になった。半年に1回の領域会議を通じて、自分の今後の研究ビジョンを見つめ直す良い機会を頂くことができた。このことを忘れずに、今後の研究に取り組みたいと思っている。

最後に、本さきがけ研究を推進する上で、長田 義仁 研究総括および領域アドバイザーの先生方、佐々木 隆 技術参事をはじめJSTの皆様にご指導とご支援を頂きました。心よりお礼申し上げます。

(2) 研究総括評価

コロイド微粒子をボトムアップ的に3次元的に規則配列し集積した階層構造をつくることによってゲルフォトニッククリスタルを形成し、次世代フォトニックシステムに繋がるアクティブなレーザー発振の実現を目指した。研究者はエマルジョン重合によって、200 nm 前後の真球状ポリスチレンコロイドゲル微粒子の精密合成に成功し、このコロイド結晶ゲル膜を光励起すると、0.06 nm という非常に狭いスペクトル線幅のレーザー発振することも見出し、しかもその Q 値は 1.1×10^4 という世界トップレベルの高い値を持つ優れた性能を示した。また、コロイド結晶ゲル膜を蛍光性色素含有のイオン液体溶液で安定化したものは、応力によって波長が変わるというアクティブなレーザー発振することも実証した。さらに、フォトクロミック化合物導入によって、マイクロパターンレーザー発振の可逆的な光スイッチングにも成功し 90%以上ガウシアンであるというこれまでにないアクティブなレーザー発振を見出した。精密に合成した高分子ゲルによるレーザー発振はこれまでに例がなく、特に、サイズ可変という高分子ゲルの基本特性を生かした波長可変レーザー発振に関する研究成果は高分子科学の可能性に新たな機軸を切り開いたばかりでなく、その産業応用も大きな可能性を秘めていると考えられ、その成果は極めて高く評価されるものである。現在活発な産学連携研究も推進しており、今後の発展が大いに注目される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- [1] S. Furumi, "Active lasing from organic colloidal photonic crystals", *J. Mater. Chem. C*, **1**, 6003-6012 (2013).
- [2] S. Furumi, "Self-assembled organic and polymer photonic crystals for laser applications", *Polymer J.*, **45**, 579-593 (2013).
- [3] S. Furumi, H. Fudouzi and T. Sawada, "Dynamic photoswitching of micropatterned lasing in colloidal crystals by the photochromic reaction", *J. Mater. Chem.*, **22**, 21519-21528 (2012).
- [4] S. Furumi, "Recent advances in polymer colloidal crystal lasers", *Nanoscale*, **4**, 5564-5571 (2012).
- [5] S. Furumi, T. Kanai and T. Sawada, "Widely tunable lasing in a colloidal crystal gel film permanently stabilized by an ionic liquid", *Adv. Mater.*, **23**, 3815-3820 (2011).
- [6] S. Furumi, "Recent progress in chiral photonic band-gap liquid crystals for laser applications", *Chem. Rec.*, **10**, 394-408 (2010).
- [7] S. Furumi and N. Tamaoki, "Glass-forming cholesteric liquid crystal oligomers for new tunable solid-state laser", *Adv. Mater.*, **22**, 886-891 (2010).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 3 件

1.

発 明 者: 古海 誓一・澤田 勉

発明の名称: スイッチング可能フォトニック結晶レーザーキャビティ及びそのスイッチング方法

出 願 人: 独立行政法人 物質・材料研究機構

出 願 日: 2012/6/15

出 願 番 号: 特願 2012-135273

2.

発 明 者: 古海 誓一・澤田 勉

発明の名称: コロイド結晶ゲルからなるレーザー発振素子、レーザー発振装置およびその製造方法

出 願 人: 独立行政法人 物質・材料研究機構

出 願 日: 2011/9/15

出 願 番 号: 特願 2011-201261

他 1 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【依頼講演・受賞講演】

- [1] Seiichi Furumi, “Self-organized organic photonic crystals for laser applications”, *3rd International Conference on Nanotek and Expo (Nanotek-2013)* (Las Vegas, U.S.A.), 2013 年 12 月.
- [2] Seiichi Furumi, “Soft and tunable photonic crystal lasers by self-assembled organic materials”, *International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN 2012)* (Brisbane, Australia), 2012 年 10 月.
- [3] 古海 誓一, 「高分子によるソフト・チューナブルレーザー」、内閣府 産学官連携推進会議 (東京)、2012 年 9 月.
- [4] 古海 誓一, 「自己組織化による有機・高分子フォトニック結晶レーザーの創製」、高分子学会 第 60 回高分子討論会 (岡山)、2011 年 9 月.(受賞講演)
- [5] Seiichi Furumi, “Self-assembled organic materials leading to organic solid-state lasers”, *Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR)* (Jeju, South Korea), 2011 年 6 月.
- [6] Seiichi Furumi, “Self-assembled photonic crystals for organic solid-state lasers”, *9th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME 2010)* (Kobe), 2010 年 12 月.

【受賞】

平成 25 年 9 月 ホソカワ粉体工学振興財団 ホソカワ粉体工学研究奨励賞.

平成 25 年 4 月 船井情報科学振興財団 船井学術賞.

平成 23 年 9 月 高分子学会 日立化成賞.

【著作物】

- [1] 古海 誓一, “高分子によるソフトチューナブルレーザー”, *プラスチック*, **64**, 68-72 (2013).
- [2] 古海 誓一, “コロイド結晶のフォトニックバンドギャップによるレーザー発振”, *バンドギャップエンジニアリング 一次世代高効率デバイスへの挑戦*, 大橋 直樹 監修(シーエムシー出版), 178-187 (2012).
- [3] 古海 誓一, “自己組織化による有機フォトニック結晶レーザー”, *化学工業*, **62**, 528-535 (2011).
- [4] 古海 誓一, “コレステリック液晶を用いた波長変換材料”, *機能材料*, **31**, 26-35 (2011).
- [5] 古海 誓一, “高分子材料によるコロイドフォトニック結晶レーザー”, *高分子*, **59**, 338-339 (2010).

【プレスリリース等】

- [1] *Polymer Journal* 誌、2013 年 7 月 1 日、*Polymer Journal* 誌 (2013 年、p.579-593) で発表した論文が、2013 年 6 月 1 日～6 月 30 日でダウンロード第 1 位だった。
- [2] *Polymer Journal* 誌、2013 年 6 月 1 日、*Polymer Journal* 誌 (2013 年、p.579-593) で発表した研究成果の図面が表紙に採用された。
- [3] *Angew. Chem. Int. Ed.* 誌、2012 年 10 月 15 日、*Angew. Chem. Int. Ed.* 誌 (2012 年、p.10505-10509) で発表した研究成果の図面が内表紙に採用された。
- [4] *日経産業新聞*、2012 年 9 月 13 日、イオン液体で安定化したコロイド結晶ゲルによる波長可変レーザー発振に関する研究成果が、*日経産業新聞*・11 面に紹介された。
- [5] *SYNFACTS* 誌、2012 年 5 月 16 日、*J. Am. Chem. Soc.* 誌 (2012 年、p.4080-4083) で発表した研究成果が *SYNFACTS* 誌に紹介され、“SYNAFACT of the month” に選ばれた。
- [6] *NPG Asia Materials* (Nature Publishing Group) 誌、2011 年 11 月 14 日、*Advanced Materials* 誌 (2011 年、p.3815-3820) に発表した研究成果が、*NPG Asia Materials* 誌の “Featured Highlight” に紹介された。