

光を自在に操るハイブリッドナノシートを開発 ～光の吸収・反射・発光の統合とフォトニック構造の三次元可視化に成功～

【発表概要】

信州大学学術研究院繊維学系の佐野航季准教授、信州大学総合理工学研究科繊維学専攻の油井聖也大学院生らによる共同研究グループは、光を自在に操るハイブリッドナノシート^[1]を合成するための普遍的なモジュール型戦略を確立し、ナノシートの自己組織化^[2]によって光の吸収・反射・発光という三つの発色原理を統合した多機能フォトニック結晶^[3]を実現しました。さらに、フォトニック構造^[3]の三次元可視化とフォトニック結晶の光学機能の動的制御にも成功しました。

ナノユニットが数百ナノメートル (nm) ^[4]程度の間隔で周期的に配列したフォトニック結晶は光の反射に由来する構造色^[5]を示し、魅力的な光学プラットフォームとして多様な分野での応用が期待されています。特に、無機ナノシートは固有の二次元性と刺激応答性を示すことから、有望なナノユニットとして近年国際的な注目を集めています。しかしながら、無機ナノシートが本質的に抱える構造的・コロイド的な課題のために、ナノシート固有の性質やフォトニック結晶の形成能力を維持したままナノシートに対して追加機能を付与することは困難でした。今回、共同研究グループはモジュール型戦略によって無機ナノシートの表面にさまざまなナノ粒子を修飾した機能性ハイブリッドナノシートの開発に成功しました。続いて、得られたナノシート間に働く相互作用を精密に制御して自己組織化させることで、光の吸収・反射・発光という三つの発色原理を統合した多機能フォトニック結晶を実現しました (図1)。さらに、フォトニック結晶を形成するナノシートの三次元可視化およびフォトニック結晶の光学機能の動的制御を実証しました。自己組織化構造を形成する個々のナノシートをウェット状態で三次元的に直接可視化できた点は、二次元物質分野における重要なブレークスルーです。本戦略のモジュール性によって複数機能の統合と光学機能の精密設計が可能となり、創発的な光機能を示す新規色材・インクや次世代スマートフォトニック材料の創出を加速する新しい光学プラットフォームの確立が期待されます。

本研究成果は、2026年5月26日(現地時間)に英国の国際学術誌「Nature Communications」に掲載されました。

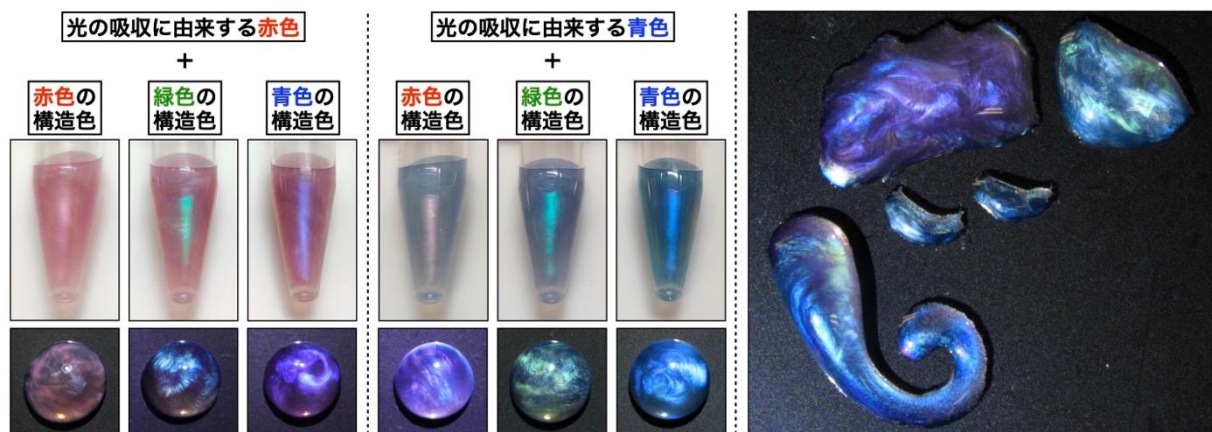


図1. ハイブリッドナノシートの自己組織化による多機能フォトニック結晶の実際の写真

【研究の背景】

数百 nm 程度の周期的なナノ構造によって構成されるフォトニック結晶は、特定の波長の光を選択的に反射することで構造色を発現します。このようなフォトニック結晶は、自然界に存在する多くの生物や植物の発色にも利用されており、例えば、カメレオンやネオンテトラの美しい色は構造色に起因します。その発色原理は光吸収に由来する色素や顔料とは異なり、構造色は色の調整可能性、耐褪色性、環境調和性などの特徴を示し得ることから、センサー、ディスプレイ、偽造防止技術、次世代インク・色材などへの応用が期待されています。これまでに、さまざまなナノユニットの自己組織化によってフォトニック結晶が作製されてきましたが、特に近年、層状結晶の剥離によって合成される無機ナノシートは固有の二次元性と刺激応答性を示すことから、有望なナノユニットとして国際的な注目を集めています。ここでもし、機能性ナノシートを用いてフォトニック結晶を構築できれば、さまざまな機能を統合した多機能フォトニック結晶の開発につながることを期待されます。しかしながら、無機ナノシートが本質的に抱える構造的・コロイド的な課題のために、フォトニック結晶を構築可能な無機ナノシートはいまだに数種類に限られており、ナノシート固有の性質やフォトニック結晶の形成能力を維持したまま無機ナノシートに対して追加の機能を付与することは大きな課題となっていました。

【研究の内容と成果】

本研究では、フォトニック結晶を構築可能な基盤ナノシートに対してさまざまな機能性ナノ粒子による表面修飾を行うことで、ナノシートの性質を維持したまま機能化する普遍的なモジュール型戦略を確立しました(図2)。本戦略によって、ナノ粒子を変えるだけで多様な機能をナノシートへ統合できるようになり、光を自在に操ることのできるハイブリッドナノシートを実現しました。具体的な基盤ナノシートとしては、安定なフォトニック結晶を形成可能な二次元物質である酸化チタンナノシート^[1]を選択しました。酸化チタンナノシートは高い表面電荷密度のために水中で良好に分散し、強磁場の印加によってその向きを制御できます。また、ナノシート間に働く相互作用(ファンデルワールス引力と静電斥力のバランス)を精密に制御することで、ナノシート間距離を数百 nm にまで拡大したフォトニック構造の構築が可能であり、鮮やかな構造色を示すフォトニック結晶を作製できます。本研究では最適化した条件下で、表面が負に帯電した酸化チタンナノシートに対して表面が正に帯電した機能性ナノ粒子を徐々に添加することで、静電引力を利用したハイブリッド化を行いました。金ナノ粒子、金ナノロッド、蛍光シリカナノ粒子を利用したところ、どの場合でも構造的・コロイド的に安定かつ修飾したナノ粒子の光学特性(プラズモン特性^[6]や蛍光特性^[7])を保持したハイブリッドナノシートの合成に成功しました(図3a)。

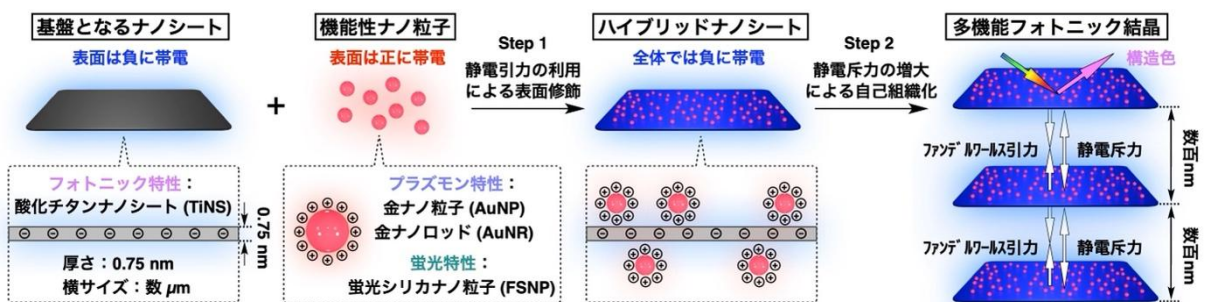


図2. ハイブリッドナノシートおよび多機能フォトニック結晶の作製方法の概念図

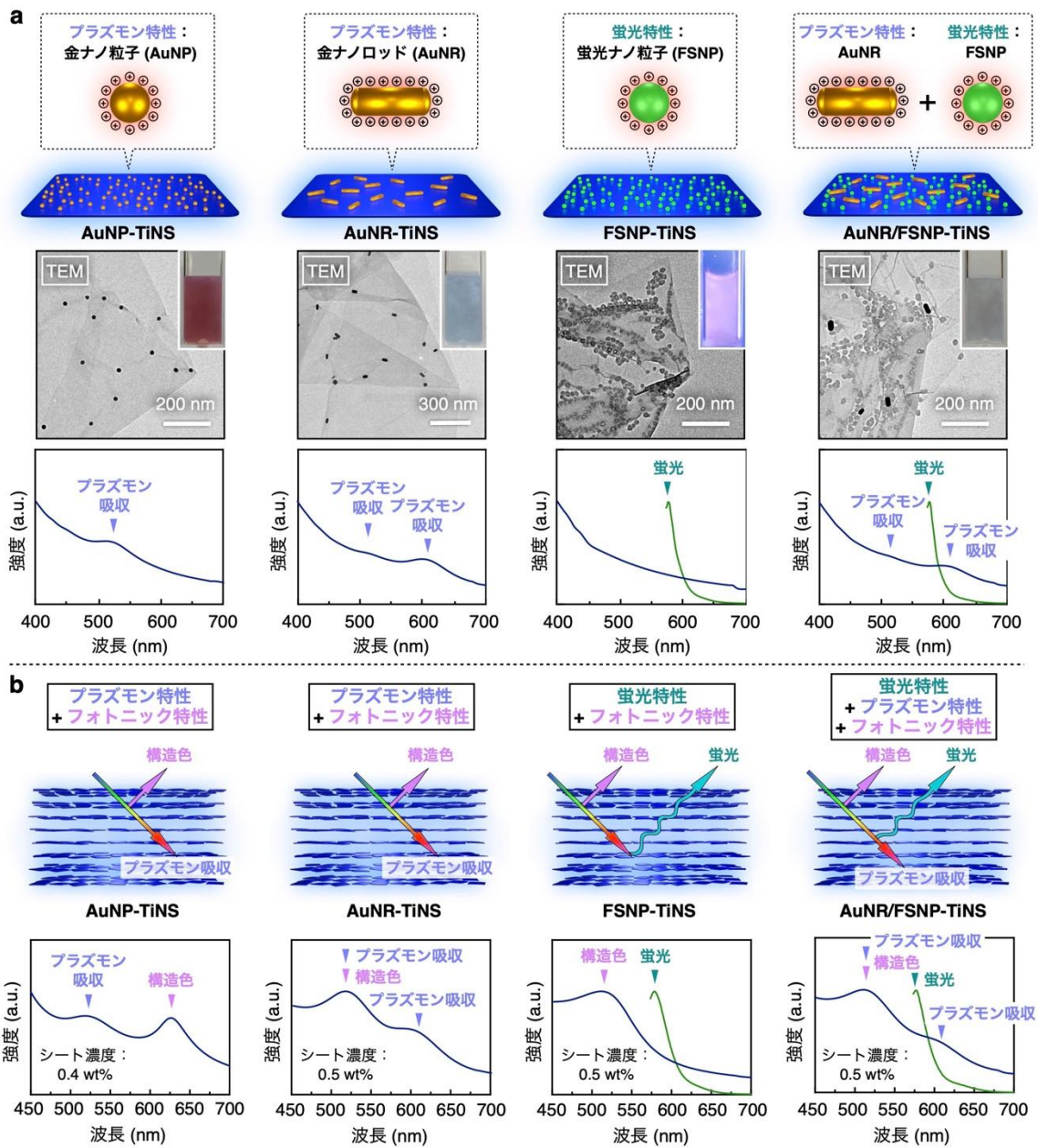


図 3. (a) ハイブリッドナノシートの構造と光学特性および (b) その自己組織化によって得られた多機能フォトニック結晶の光学特性

続いて、得られたハイブリッドナノシートの間働く静電斥力を強めたところ、自己組織的にナノシート間の距離は数百 nm にまで拡大し、プラズモン吸収⁶⁾・構造色・蛍光という三つの異なる発色原理を統合した多機能フォトニック結晶の作製に成功しました (図 3b)。また、ナノシートの濃度を調整するとナノシート間の距離が変化し、さまざまな構造色を示す多機能フォトニック結晶も作製できました。これにより、「金ナノ粒子のプラズモン吸収に由来する赤色」や「金ナノロッドのプラズモン吸収に由来する青色」および「ナノシートのフォトニック構造の選択反射に由来する構造色」が融合した独特な色合いを観察できます (図 1)。さらに、強磁場 (12 テスラ) を印加してナノシートの向きを制御したところ、磁場の印加方向の調整によってフォトニック特性 (構造色) のオン・オフを可逆的に切り替えることにも成功しました。その結果、「プラズモン吸収に由来する色と構造色の融合状態」と「プラズモン吸収のみに由来する色」の二つの状態を可逆的に変化させることができました。最後に、金ナノ粒子の光熱変換効果⁸⁾を利用した構造色の

光制御を目指しました。金ナノ粒子のプラズモン吸収に対応する緑色光を多機能フォトニック結晶に照射したところ、光熱変換効果によって光照射領域の温度が上昇してナノシート間に働く静電斥力が減少する結果、構造色が短波長にシフトすることが観測されました。また、光照射を停止すると空冷によって温度が低下し、構造色は元の状態へと回復しました。これらの結果は、ナノシート表面に修飾された金ナノ粒子の光熱変換効果によって構造色の光制御が可能であることを実証するものであり、多機能フォトニック結晶が幅広い応用に向けた新しい光学プラットフォームとなり得ることを示します。

本研究のさらに重要なポイントとしては、蛍光シリカナノ粒子を修飾した蛍光性ハイブリッドナノシートを用いることで、蛍光顕微鏡や共焦点レーザー顕微鏡⁹⁾によって水に分散するナノシートの直接可視化を実現した点です。例えば、蛍光顕微鏡を利用することで水に分散したナノシートの運動をリアルタイムで可視化することができました (図 4a)。また、共焦点レーザー顕微鏡を用いることにより、フォトニック結晶を形成する自己組織化した個々のナノシートを三次元的に可視化することにも成功しました (図 4b)。さらに、磁場でナノシートの向きを揃えた状態から磁場を取り除いた後に向きがランダムになる状態への構造緩和過程や、巨大ベシクル内部におけるナノシートの動的挙動の観察にも成功しています。通常、ナノシートは極めて薄いために一般的な光学顕微鏡での観察は困難であり、多くの場合は電子顕微鏡が利用されます。しかしながら、電子顕微鏡での観察は通常、複雑な構造固定や乾燥操作が必要であり、自己組織化したナノシートの動的挙動を解析することはできません。一方、蛍光顕微鏡や共焦点レーザー顕微鏡

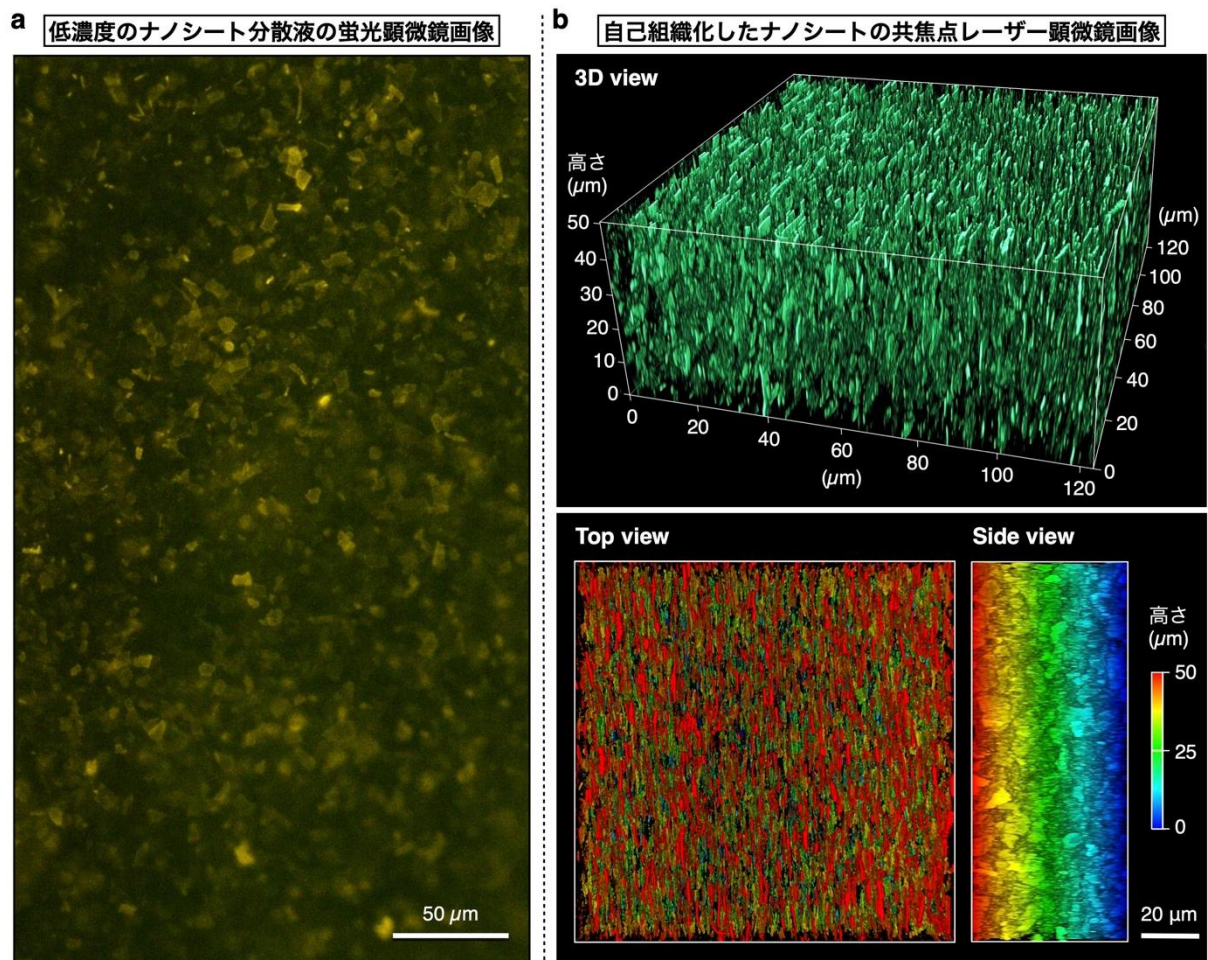


図 4. (a) 希薄条件において水に分散した蛍光性ハイブリッドナノシートの蛍光顕微鏡画像および (b) その自己組織化によって得られた多機能フォトニック結晶の共焦点レーザー顕微鏡画像

を用いると、希薄条件下では分散液中の孤立した蛍光性ナノシートを観察することはできますが、自己組織化状態や凝集状態においてはナノシート間の距離が近いために1枚1枚を識別することは困難です。そのため、自己組織化構造体を形成する個々のナノシートの三次元直接可視化は二次元物質分野における構造解析の重要な課題でした。本研究では、ナノシート間に働く強い静電斥力によってナノシート間の距離が十分に保たれているため、ナノシート1枚1枚を識別して観察することが可能となり、この課題の解決に至りました。

【今後の展開】

本研究では、光を自在に操るハイブリッドナノシートを合成するための普遍的なモジュール型戦略を確立し、ナノシートの自己組織化によって光の吸収・反射・発光という三つの発色原理を統合した多機能フォトニック結晶を実現しました。本戦略のモジュール性によって複数機能の統合と光学機能の精密設計が可能となり、磁場や光などの外部刺激によってその光学機能を可逆的に変調できることも実証しました。本成果は、創発的な光機能を示す新規色材・インクや次世代スマートフォトニックマテリアルの創出を加速する新しい光学プラットフォームの確立に貢献することが期待されます。

さらに特筆すべきは、本戦略によって合成した蛍光性ハイブリッドナノシートを用いることで、共焦点レーザー走査顕微鏡によりフォトニック構造を形成する個々のナノシートをウェット状態において三次元的に直接可視化できた点です。本手法は、従来の電子顕微鏡観察で一般的に必要なとされる複雑な構造固定や乾燥操作を伴わず、水に分散した状態のまま動的挙動を観察可能とするものであり、無機ナノシートの自己組織化構造とそのダイナミクスを精密に解析するための新たな基盤技術となることが期待されます。

【論文情報】

タイトル： Multi-functional photonic crystals of modular nanosheets

著者： Seiya Yui, Takumi Mihara, Tomoki Nishimura, Yasuo Ebina, Takayoshi Sasaki, and Koki Sano*

(油井 聖也, 三原 匠, 西村 智貴, 海老名 保男, 佐々木 高義, 佐野 航季*)

(*は責任著者)

掲載誌： *Nature Communications*

DOI： 10.1038/s41467-026-70456-6

【共同研究グループ】

信州大学	総合理工学研究科 繊維学専攻	大学院生	油井 聖也
	総合理工学研究科 繊維学専攻	大学院生	三原 匠
	学術研究院繊維学系	准教授	西村 智貴
	学術研究院繊維学系	准教授	佐野 航季
物質・材料研究機構	ナノアーキテクトニクス材料研究センター		
		主幹研究員	海老名 保男
		フェロー (研究当時)	佐々木 高義

【研究支援】

本研究は、科学技術振興機構（JST） 創発的研究支援事業（JPMJFR2230）および戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR2301）、日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業（JP23K23325）、クリタ水・環境科学振興財団の支援を受けて実施されました。

【用語説明】

[1] ナノシート、酸化チタンナノシート

ナノシートは厚さがナノメートル（nm、10 億分の 1 メートル）スケールである二次元状の物質であり、巨視的なサイズの物質とは異なるさまざまな性質を示す。酸化チタンナノシートは層状のチタン酸化物を剥離して得られる単層のナノシートであり、表面は負に帯電するため水中で安定に分散する。

[2] 自己組織化

外部から細かい操作を行うことなく、分子やナノ粒子が自発的に秩序ある構造を形成する現象のこと。

[3] フォトニック結晶、フォトニック構造

光の波長と同程度（数百 nm）の周期的なナノ構造（フォトニック構造）を有する材料のこと。光の伝播を制御したり、そのナノ構造に対応した特定の波長の光を選択的に反射したりすることができる。

[4] ナノメートル（nm）

ナノメートルは 10 億分の 1 メートルのこと。

[5] 構造色

発色原理が光吸収に由来する色素や顔料とは異なり、ナノ構造による光の干渉・回折・散乱などによって生じる色のこと。例えば、フォトニック結晶はそのナノ構造に対応した波長の光を選択的に反射し、構造色を示す。

[6] プラズモン特性、プラズモン吸収

金属ナノ粒子の自由電子が光と相互作用して集団的に振動し（局在表面プラズモン共鳴）、特定の波長の光を強く吸収・散乱する性質のこと。

[7] 蛍光特性

光を吸収した後、吸収した光よりも長い波長の光を放出する性質のこと。

[8] 光熱変換効果

光エネルギーを吸収して熱へと変換する現象のこと。例えば、金ナノ粒子に対してプラズモン吸収に対応する波長の光を照射することで、照射領域における温度上昇を引き起こす。

[9] 蛍光顕微鏡や共焦点レーザー顕微鏡

蛍光顕微鏡：蛍光を発する物質を選択的に観察できる顕微鏡のこと。

共焦点レーザー顕微鏡：レーザー光を照射して蛍光を励起し、焦点のあった層の情報だけを検出する顕微鏡のこと。異なる高さの画像を再構築することで、三次元構造を可視化できる。

【お問合せ先】

< 報道に関すること >

信州大学 総務部総務課広報室

TEL: 0263-37-3056

E-mail: shinhp[at]shinshu-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404 FAX: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

< JST 事業に関すること >

科学技術振興機構 創発的研究推進部

加藤 豪

TEL: 03-5214-7276

E-mail: souhatsu-inquiry[at]jst.go.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。