

プレスリリース



報道解禁日時：指定なし

資料配布先：
岡崎市政記者会、大阪科学・大学記者クラブ、横須賀市政記者クラブ
文部科学記者会、科学記者会

自然科学研究機構 分子科学研究所
大阪公立大学
物質・材料研究機構
総合研究大学院大学

2026 年 8 月 31 日資料配布

「ナノの光」が変わる一瞬をフェムト秒で捉える ——フォノンポラリトンの超高速制御をナノスケールで可視化——

【発表のポイント】

- ハイパボリックフォノンポラリトン (注 1) (HPhP) は赤外光の電磁場をその波長よりもはるかに小さな空間に閉じ込めて伝搬させることができる光と物質が結びついてできた特殊な状態であり、その超高速制御はナノフォトニクス (注 2) の先端技術として期待されています。
- しかし、照射した光の周波数によって HPhP の波長が大きく変化するため、広い周波数成分を含むフェムト秒パルスレーザー (注 3) を用いると、異なる波長の HPhP が重なり、その超高速な変化を実空間で観測することは困難でした。
- 本研究では、超高速赤外近接場光顕微鏡 (注 4) によってフェムト秒・ナノメートルの時空間分解能と、高い周波数選択性を同時に実現する技術を開発しました。
- これにより、ファンデルワールス物質 (注 5) である二硫化タングステン (WS_2) と六方晶窒化ホウ素 (hBN) を積層したヘテロ構造に可視光パルス照射し、 WS_2 内に光キャリア (注 6) を生成したところ、それに伴って隣接する hBN 中を伝搬する HPhP が超高速で変化する様子を直接観測することに成功しました。
- 本成果は、ナノスケールの光伝搬をフェムト秒の時間スケールで観測・制御する新たな基盤技術として、将来の超高速ナノフォトニクスへの展開が期待されます。

【概要】

分子科学研究所の鎌田一輝特別共同利用研究員 (大阪公立大学大学院工学研究科 博士後期課程)、西田純助教 (兼 総合研究大学院大学助教)、熊谷崇准教授 (兼 総合研究大学院大学准教授) を中心とする研究チームは、hBN と WS_2 からなるファンデルワールスヘテロ構造を用い、 WS_2 を可視光パルスで励起することで、隣接する hBN 中を伝搬する HPhP をフェムト秒の時間スケールで変調し、その超高速な変化を直接可視化することに成功しました。

HPhP は、赤外光と物質中の光学フォノン (注 7) が強く結びついて形成される状態で、赤外光を通常の光の波長よりもはるかに小さな空間に閉じ込めることができるため、ナノスケールの光制御技術や高感度分光などへの応用に加え、その超高速制御は、将来の超高速ナノ光デバイスの実現に向けた基盤技術として期待されています。

一方、HPhP は光の周波数によって波長が大きく変化する強い分散を示します。そのため、

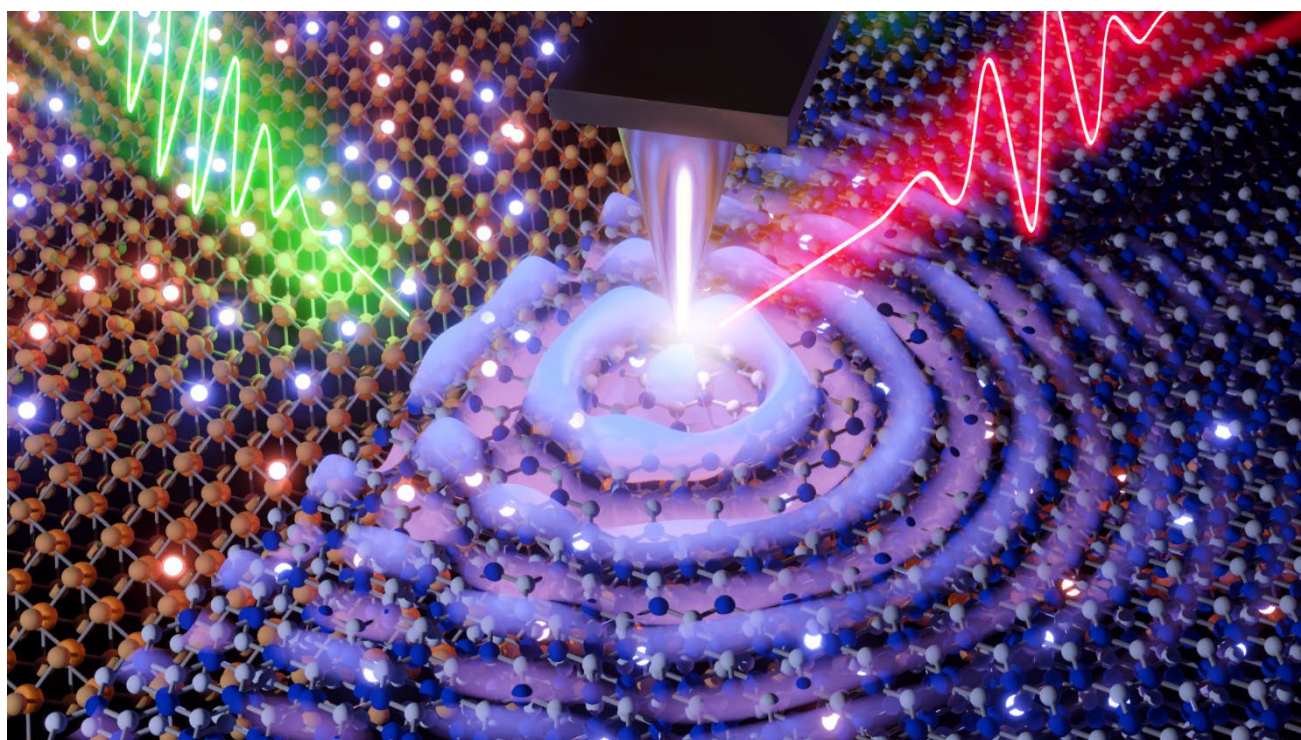
広い周波数成分を含むフェムト秒赤外パルスを用いると、異なる波長の HPhP が同時に励起され、それらの信号が重なって平均化されるため、伝搬の様子を鮮明に観察できないという問題がありました。

そこで本研究では、超高速赤外近接場光顕微鏡において、散乱光を回折格子 (注 8) で分光してから検出する方法を導入しました。その結果、約 150 フェムト秒という高い時間分解能を維持したまま、HPhP の超高速制御を直接観測することが可能となりました。

この新しい超高速ナノイメージング技術により、可視光パルスを WS_2 に照射して光キャリアを生成すると、それに伴って隣接する hBN 中を伝搬する HPhP の電場振幅が、一時的に変化することを実空間で観測しました。さらに、比較的厚い WS_2 と hBN からなる構造では、HPhP の波長が変化する様子も可視化しました。

数値シミュレーションにより、観測された HPhP の超高速変調が、光キャリアの生成に伴う WS_2 の過渡的な誘電率 (注 9) の変化によって説明できることを示しました。本成果は、ナノスケールの光伝搬をフェムト秒の時間スケールで観測・制御する新たな基盤技術として、将来の超高速ナノフォトンクスへの展開が期待されます。

本研究成果は、国際学術誌『Nano Letters』に、2026 年 7 月 27 日付でオンライン掲載されました。



超高速赤外近接場光顕微鏡による、HPhP の超高速ナノイメージングのイメージ図

1. 研究の背景

光をナノスケールの微小な空間に閉じ込めて制御することは、ナノフォトンクスにおける重要な研究課題です。光は通常、回折限界 (注 10) により、そのエネルギーを閉じ込められる空間スケールが光の波長程度に制限されます。しかし、光と物質中の素励起 (注 11) が結合して形成されるポラリトンを利用すると、通常の光よりもはるかに小さいスケールに閉じ込めて伝搬させることができま



す。

hBN では、赤外領域において光と光学フォノンが結合した HPhP が形成されます。HPhP は光をナノスケールに強く閉じ込められることや、hBN 内部で指向性を持った伝搬を示すことから、ナノスケールの光制御技術や高感度分光などへの応用が期待されています。

HPhP の性質は赤外近接場光顕微鏡を用いて調べられてきました。一方、HPhP は光の周波数によって波長が大きく変化する強い分散をもちます。そのため、広帯域な周波数成分を含むフェムト秒赤外パルスを用いると、異なる波長成分が重なることで波束が急速に位相を失い、干渉縞が不鮮明になります。逆に、入射光そのものを狭帯域化すると、今度は測定システムの時間分解能が低下してしまいます。したがって、超高速に HPhP を制御する様子を実空間で観測することは困難でした。そこで本研究では、フェムト秒の時間分解能を維持しながら、特定の周波数を選択して観測できる新しい超高速ナノイメージング手法の開発を目指しました。

2. 研究の成果

本研究では、フェムト秒パルスレーザーと原子間力顕微鏡 (AFM) を組み合わせた超高速赤外近接場光顕微鏡に、回折格子を用いた分光機構を導入することで、強い分散をもつ HPhP を高い時間・空間分解能と周波数選択性を両立して観測する手法を開発しました。この手法を WS_2/hBN ヘテロ構造に適用し、光励起によって HPhP の電場振幅や波長が超高速に変化する様子を実空間で観測しました。

回折格子を用いた HPhP イメージングの実証

図 1(a)に本研究で用いた超高速赤外近接場光顕微鏡の模式図を示します。AFM の金属探針先端にフェムト秒赤外パルスを照射し、探針先端に局在した近接場光 (注 12) を利用して HPhP を励起・検出します。本研究では、検出器の手前に回折格子を配置し、探針先端から散乱された広帯域のフェムト秒赤外光 (帯域幅：約 150 cm^{-1}) の中から、特定の周波数成分のみを選択して検出しました。この方法により、約 150 フェムト秒の時間分解能を維持しながら、約 10 cm^{-1} の周波数分解能を実現しました。

まず、この方法を用いて hBN 単体における HPhP を観測しました。図 1(b)に示すように、 1477 cm^{-1} および 1517 cm^{-1} のそれぞれの周波数において、hBN 端から周期的に並ぶ明瞭な干渉縞が観測されました。この縞は、AFM 探針から発生した HPhP と、hBN 端で反射された HPhP との干渉によって生じます。各周波数で観測された縞模様から HPhP の波長を求め、縦軸を入射光の波数 (注 13)、横軸を入射光の波数で規格化した HPhP の波数としてプロットしたところ、理論計算から得られる分散関係とよく一致しました (図 1(c))。以上から、広帯域のフェムト秒赤外パルスを用いた場合でも、散乱光を回折格子によって分光してから検出することで、特定の周波数の HPhP を選択的にイメージングできることを実証しました。

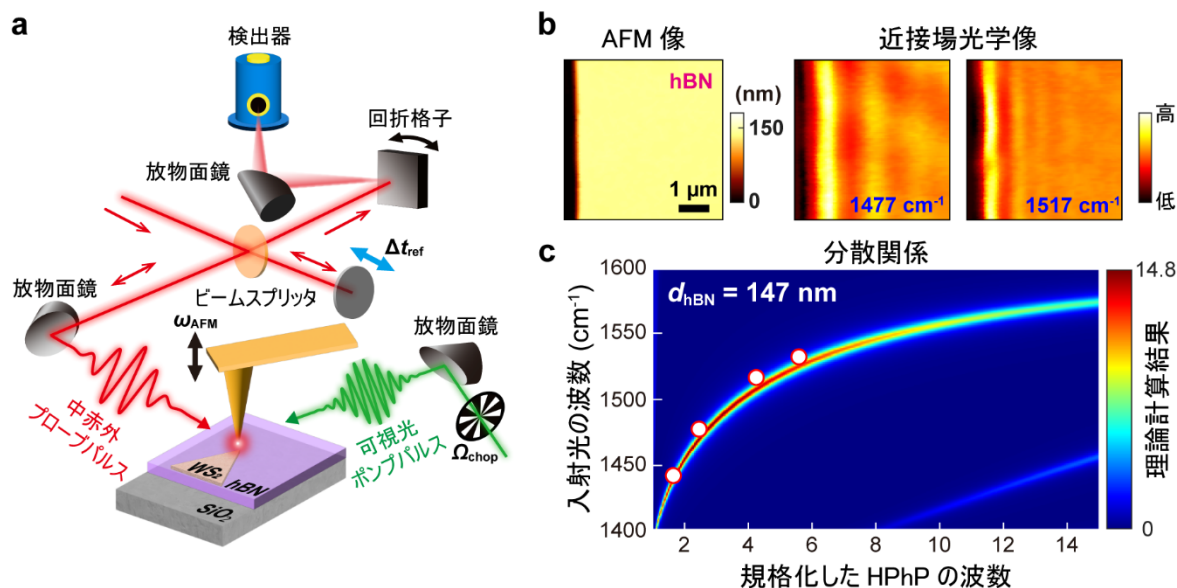


図 1 (a) 超高速赤外近接場光顕微鏡の模式図。探針から散乱された赤外光を回折格子で分光して検出する。(b) hBN の AFM 像と、1477 cm⁻¹ および 1517 cm⁻¹ で取得した近接場光学像。hBN 付近に HPhP に由来する干渉縞が観測され、周波数によって縞の周期が変化している。(c) 干渉縞から求めた HPhP の分散関係。白丸が実験値、背景のカラーマップが計算結果を示す。

HPHP の超高速イメージング

次に、本手法を WS₂ と hBN からなるヘテロ構造に適用し、光励起による HPhP の超高速変化を観測しました。図 2(a)に示す試料では、hBN 上に 2 層の WS₂ が形成されています。可視光パルスを照射せずに取得した近接場光学像では、hBN 端付近に HPhP の干渉縞が観測されました (図 2(b))。

一方、このヘテロ構造に可視光パルスを照射すると、ポンプ・プローブ (注 14) 近接場光学像において、WS₂ が存在する領域に特徴的な縞模様が観測されました (図 2(c))。この縞は光励起直後の 0 ps で明瞭に観測され、2 ps、7 ps と時間が経過するにつれて減衰しました。この時間変化のスケールは WS₂ に生成された光キャリアの緩和時間と対応しており、WS₂ に生成された光キャリアによって、隣接する hBN 中の HPhP が超高速に変調されていることを示しています。さらに、図 2(d)に示すように、縞模様の強度分布を解析すると、光励起前の HPhP の縞に対して、ポンプ・プローブ信号はほぼ逆位相の振動を示しました。この結果から、薄い WS₂ を用いた試料では、光励起によって主に HPhP の電場振幅が一時的に変化していることが明らかになりました。

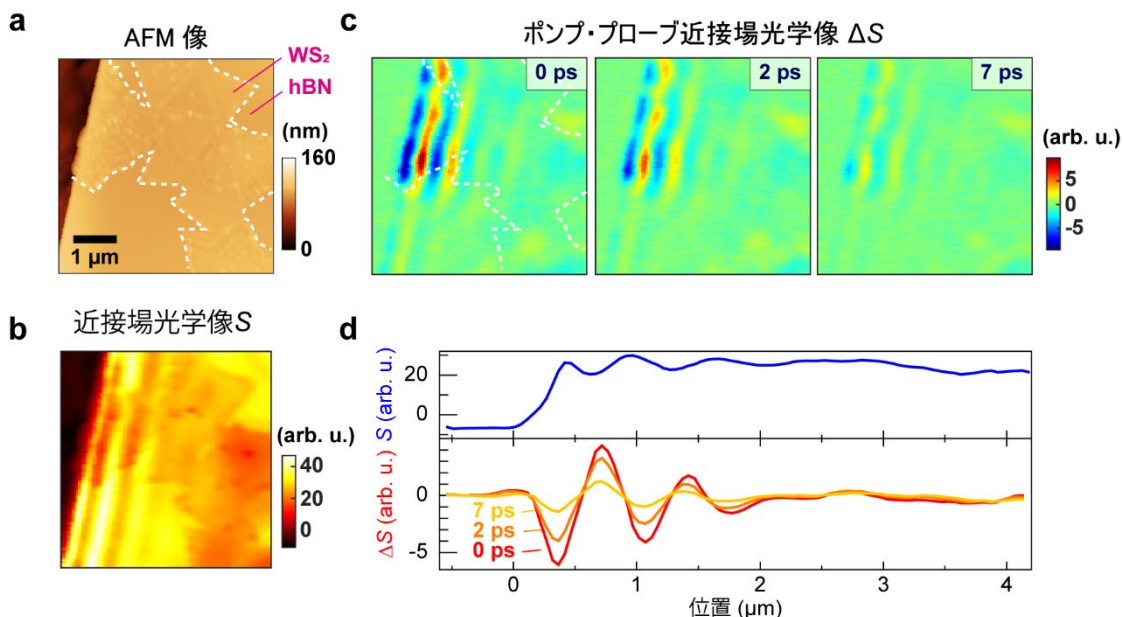


図 2 (a) WS₂/hBN 試料の AFM 像。白点線は WS₂ が存在する領域を示す。(b) 光励起前に 1498 cm⁻¹ で取得した近接場光学像。(c) 可視光パルス照射後 0、2、7 ps に取得したポンプ・プローブ近接場光学像。光励起直後に現れた HPhP の干渉縞が時間とともに減衰している。(d) 光励起前および光励起後の縞模様の強度分布。

さらに、HPhP をより大きく変調するために、比較的厚い WS₂ の上に hBN を積層したヘテロ構造について測定を行いました (図 3(a))。図 3(b) は光励起前の近接場光学像、(c) は光励起直後のポンプ・プローブ近接場光学像です。どちらも先ほどと同様に HPhP の干渉縞が観測されています。

干渉縞の強度分布を解析した結果、光励起前の HPhP の波長は 570 nm であったのに対し、光励起後のポンプ・プローブ差分信号からは 660 nm の波長が観測されました (図 3(d))。このような長波長側への変化は複数の周波数で観測されました (図 3(e))。この結果は、WS₂ に生成された光キャリアによって、HPhP の電場振幅だけでなく、HPhP の波長、すなわち分散関係そのものが超高速に変化することを示しています。

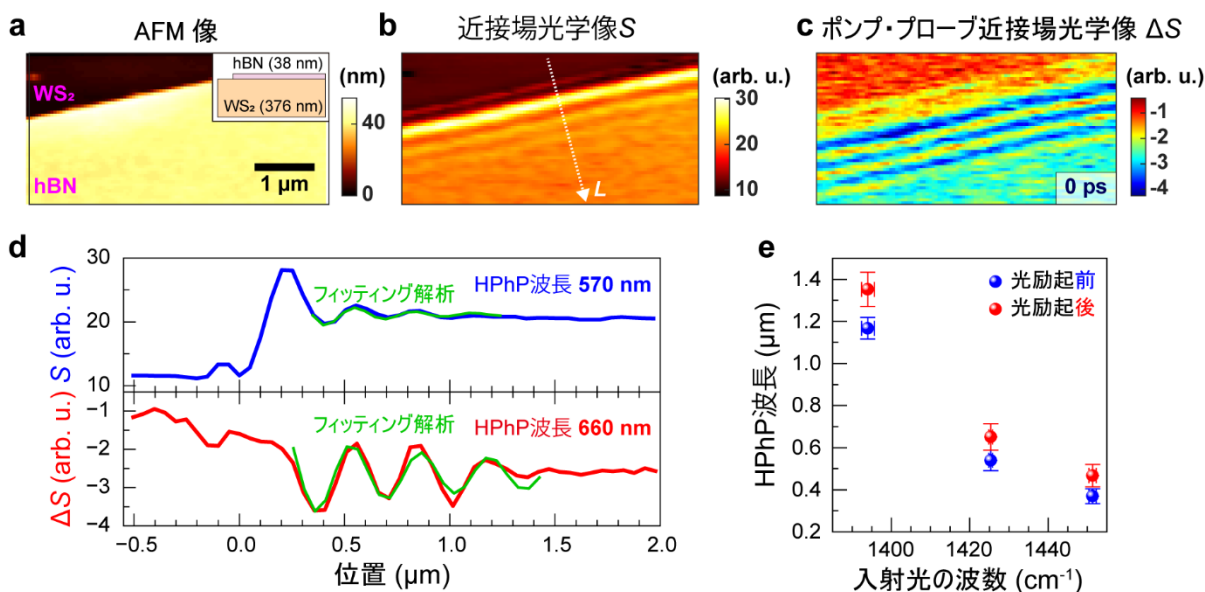




図 3 (a) hBN/WS₂ 試料の AFM 像。 (b, c) 1425 cm⁻¹ で取得した光励起前の近接場光学像 (b) および、光励起直後のポンプ・プローブ近接場光学像 (c)。 (d) 縞模様の強度分布。フィッティング解析から、光励起前では 570 nm、光励起直後のポンプ・プローブ信号では 660 nm に相当する波長が得られた。 (e) 異なる赤外周波数において評価した光励起前後の HPhP 波長。

数値シミュレーション

最後に、観測された HPhP の超高速変調の起源を明らかにするため、電磁場シミュレーションを行いました。図 4(a)に、実験で用いた 2 種類のヘテロ構造を模した計算モデルを示します。AFM 探針を HPhP の励起源となる双極子としてモデル化し、光励起前と光励起後の電場分布を計算しました。

図 4(b)に示すように、どちらの構造においても hBN 中に HPhP に特徴的な周期的な電場分布が再現されました。さらに、光励起によって WS₂ の誘電率が変化すると仮定して計算したところ、薄い WS₂ を用いた構造では主として HPhP の電場振幅が変化し (図 4(c))、厚い WS₂ を用いた構造ではより大きな波長変化が現れました (図 4(d)および(e))。これらの結果は、それぞれ図 2 および図 3 で観測された実験結果とよく対応しています。

以上の結果から、可視光パルス照射によって WS₂ に光キャリアが生成され、WS₂ の誘電率が一時的に変化することで、隣接する hBN 中を伝搬する HPhP の電場振幅や波長が超高速に変調されることが明らかになりました。

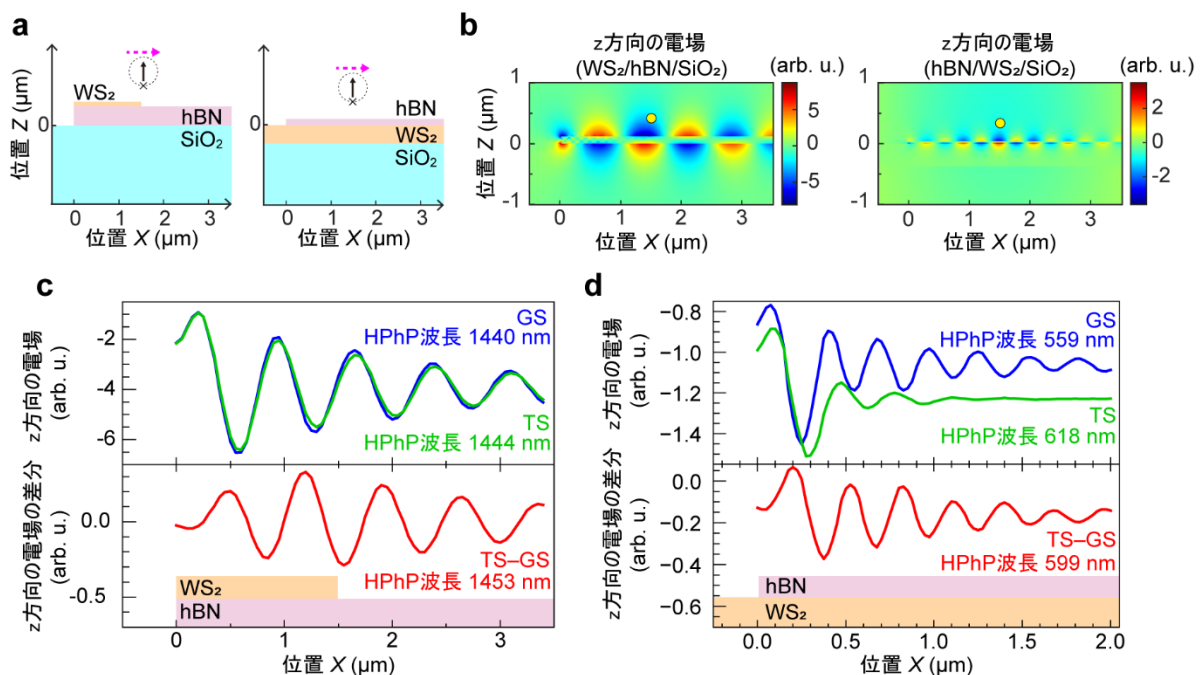


図 4 (a) WS₂/hBN および hBN/WS₂ ヘテロ構造の計算モデル。 (b) 計算によって得られた HPhP の電場分布。 (c, d) 光励起前 (GS)、光励起後 (TS) およびその差分 (TS-GS; ポンプ・プローブ信号に対応) の電場分布。光励起による WS₂ の誘電率変化を考慮することで、実験で観測された HPhP の電場振幅および波長の変化が再現された。

3. 本研究成果の意義

本研究では、HPhP の超高速現象を、ナノスケールの空間分解能、フェムト秒の時間分解能、高い周波数選択性を同時に備えた新しい計測手法によって捉えることに成功しました。これにより、次世代ナノフォトニクス材料として期待されるファンデルワールスヘテロ構造において、ナノスケールの光伝搬を外部から超高速に制御できることを実証しました。

本成果は、強い分散をもつフォノンポラリトンの超高速ダイナミクスを研究するために新たな基盤を提供するとともに、将来的に、機能を動的に制御できる超高速・超小型ナノ光デバイスの実現につながることを期待されます。

4. 用語解説

- (注1) ハイパボリックフォノンポラリトン (HPhP)：赤外光の電磁場と、物質中の原子の集団振動である光学フォノンが強く結びついて形成されるポラリトン (注 11) の一種で、光と物質の両方の性質を併せ持ちます。hBN のように、結晶の方向によって誘電的な性質が大きく異なる物質では、「ハイパボリック分散」と呼ばれる特殊な分散をもつ HPhP が形成されます。HPhP は、赤外光を通常の光の波長よりもはるかに小さな空間に閉じ込めて伝搬させることができるため、ナノスケールの光制御への応用が期待されています。
- (注2) ナノフォトニクス：ナノメートル (10 億分の 1 メートル) スケールの構造や物質を利用して、光と物質の相互作用を制御する研究分野です。光をナノスケールの微小な空間に閉じ込めて制御することで、超小型の光デバイス、高感度センサー、光情報通信などへの応用が期待されています。
- (注3) フェムト秒パルスレーザー：フェムト秒 (fs) は 1 秒の 1000 兆分の 1 (10^{-15} 秒) という極めて短い時間の単位です。フェムト秒パルスレーザーは、このような非常に短い時間幅の光パルスを発生させるレーザーで、物質中の電子や原子などが起こす超高速現象を観測するために用いられます。本研究では、約 150 フェムト秒の時間幅をもつ光パルスを用いています。
- (注4) 超高速赤外近接場光顕微鏡：原子間力顕微鏡 (AFM) の金属探針先端に赤外光を照射し、探針先端に生じる近接場光を利用して物質の光学的性質を観察する顕微鏡です。通常の光学顕微鏡の回折限界を超えたナノスケールの空間分解能をもちます。さらにフェムト秒パルスレーザーと組み合わせることで、ナノスケールの超高速光学現象をフェムト秒の時間分解能で追跡できます。
- (注5) ファンデルワールス物質：層内では原子同士が強い化学結合で結ばれている一方、層と層の間は、電子分布の揺らぎや分極に由来する比較的弱いファンデルワールス力によって結びついた層状物質です。層間の結合が弱いため、粘着テープなどを用いて単層または数層まで薄く剥がすことができます。また、異なる種類のファンデルワールス物質を積み重ね、ヘテロ構造（異なる物質を組み合わせた積層構造）を作ることができます。
- (注6) 光キャリア：半導体が光を吸収することで生成される、電気を運ぶことのできる電子や正孔（電子が励起されることにより生じる「電子の空き」）の総称です。光キャリアが生成されると、物質の電氣的・光学的性質が一時的に変化します。本研究では、可視光パルスによって WS_2 内に光キャリアを生成し、それに伴う WS_2 の誘電率変化を利用して、隣接する hBN 中の HPhP を超高速に変調しました。
- (注7) 光学フォノン：結晶中の原子の集団振動を量子として表したものをフォノンと呼びます。光学フォノンは、結晶の基本単位に含まれる複数の原子が互いに逆向き、すなわち逆位相で振動するモードです。この振動によって電気分極が生じる場合には、赤外光の電磁場と強く相



相互作用します。hBN では、このような光学フォノンと赤外光の電磁場が結合してフォノンポラリトンが形成され、そのうちハイパボリック分散を示すものが HPhP です。

- (注8) 回折格子：表面に細かな溝などの周期構造をもつ光学素子です。光を当てると、波長（周波数）の異なる光がそれぞれ異なる方向へ回折されるため、複数の波長成分を空間的に分けることができます。本研究では、この性質を利用して、探針先端から散乱された広帯域の赤外光の中から、特定の周波数成分だけを選択して検出しました。
- (注9) 誘電率：物質に電場が加わったとき、物質内部の電子やイオンが応答して生じる電荷の偏り（分極）を表す物理量です。誘電率は、光が物質中をどのように伝わるか、また、どの程度吸収・反射されるかを大きく左右します。その値は、光の周波数や結晶の方向、物質の電子状態などによって変化します。
- (注10) 回折限界：通常の光学顕微鏡で二つの近接した物体を見分けられる細かさには、光の波としての性質によって決まる限界があり、回折限界と呼ばれます。そのため一般に、レンズを用いた光学顕微鏡では、光の波長の半分程度よりも細かな構造を見分けることは困難です。一方、HPhP は、同じ周波数の自由空間光よりもはるかに短い波長をもち、電磁場を回折限界より小さなナノスケールの領域に閉じ込めながら伝搬できます。
- (注11) 素励起：固体中では、電子や原子の運動が相互作用することによって、さまざまな励起状態が生じます。これらの励起状態を一つの粒子のように取り扱ったものを素励起と呼びます。フォノン、プラズモン、励起子などが代表例です。これらの素励起と光が強く結合すると、「ポラリトン」と呼ばれる光と物質の性質を併せ持つ状態が形成されます。本研究で扱う HPhP は、hBN の光学フォノンと赤外光の電磁場が結合して形成されるポラリトンです。
- (注12) 近接場光：金属探針の先端など、ナノスケールの微小構造のごく近傍に生じる局所的な電磁場です。構造から離れると急速に弱くなり、通常の光のように遠方まで伝搬しない一方、光の電磁場を非常に小さな領域に集中させることができます。この近接場光を利用することで、通常の光学顕微鏡の回折限界を超えて、物質の局所的な光学応答をナノスケールで調べることができます。
- (注13) 波数：赤外分光で用いられる波数（分光学的波数）は、光の真空中における波長の逆数で表される物理量で、通常、 cm^{-1} （センチメートルの逆数）を単位とします。波数が大きいほど、光の波長は短く、周波数および光子のエネルギーは高くなります。このため、赤外光の周波数やエネルギーを表す指標として広く用いられます。本研究では、入射赤外光の波数と HPhP の波数との関係から、HPhP の分散関係を評価しました。
- (注14) ポンプ・プローブ法：物質中で起こる非常に速い変化を観測するための時間分解測定手法です。まず、「ポンプ光」と呼ばれる光パルス照射して物質を励起し、その状態を変化させます。続いて、時間差をつけて「プローブ光」を照射して、その状態を観測します。ポンプ光とプローブ光が試料に到着する時間差を変えながら測定することで、物質の状態が時間とともにどのように変化するかを追跡できます。本研究では、可視光のポンプによって WS_2 に光キャリアを生成し、赤外近接場光のプローブによって HPhP の超高速変化を観測しました。



5. 論文情報

掲載誌：Nano Letters

論文タイトル：Ultrafast Nano-Imaging and Optical Control of Hyperbolic Phonon Polaritons at hBN/WS₂ Heterojunctions

著者：Kazuki Kamada, Keisuke Shinokita, Fanyu Zeng, Ryo Kitaura, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Alexander Paarmann, Masahiro Shibuta, Takashi Kumagai*, and Jun Nishida*
(*責任著者)

掲載日：2026/07/27

DOI：[10.1021/acs.nanolett.6c02448](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6c02448)

6. 研究チーム

本研究は、自然科学研究機構分子科学研究所の鎌田一輝特別共同利用研究員（大阪公立大学大学院工学研究科 博士後期課程）、西田純助教、熊谷崇准教授を中心とする研究チームにより行われました。

共著者

- 篠北啓介 准教授（分子科学研究所）
- Fanyu Zeng 研究員（物質・材料研究機構）
- 北浦良 グループリーダー（物質・材料研究機構）
- 渡邊賢司 特命研究員（物質・材料研究機構）
- 谷口尚 理事（物質・材料研究機構）
- Alexander Paarmann グループリーダー（マックス・プランク協会フリッツハーバー研究所）
- 洪田昌弘 准教授（大阪公立大学、分子科学研究所 客員准教授）

7. 研究サポート

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP25H01395、JP24K01443、JP22K14653、JP26H00400、JP26K00641、JP24H01209、JP25K00936、JP23H05469、JP23H02052、JP21H05233、JP24K01277、JP23H01939）、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR236L、JPMJFR201J、JPMJFR213K）、JST CREST（JPMJCR24A5）、文部科学省 世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）、文部科学省 卓越研究員事業（JPMXS0320220123）、光科学技術研究振興財団、自然科学研究機構先端光科学研究分野（01213008）、大幸財団の支援を受けて実施されました。

8. 研究に関するお問い合わせ先

西田 純（にしだ じゅん）

自然科学研究機構 分子科学研究所 メゾスコピック計測研究センター / 総合研究大学院大学 助教

TEL：0564-55-7412

E-mail：nishida@ims.ac.jp

熊谷 崇（くまがい たかし）

自然科学研究機構 分子科学研究所 メゾスコピック計測研究センター / 総合研究大学院大学 准教授

TEL：0564-55-7410

E-mail：kuma@ims.ac.jp

9. 報道担当

自然科学研究機構 分子科学研究所 研究力強化戦略室 広報担当

TEL：0564-55-7209

E-mail：press@ims.ac.jp



分子科学研究所
プレスリリース

「ナノの光」が変わる一瞬をフェムト秒で捉える
— フォノンポラリトンの超高速制御をナノスケールで可視化—

総合研究大学院大学 総合企画課 広報社会連携係

TEL : 046-858-1629

E-mail : kouhou1@ml.soken.ac.jp

大阪公立大学 広報課

TEL : 06-6967-1834

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp