



2026 年 8 月 28 日

報道関係者各位

慶應義塾大学
理化学研究所

音響波で揺れ動く原子層二次元半導体の励起子発光を多次的に可視化

—発光の色・明るさ・寿命の超高速変化をリアルタイムに追跡、

量子デバイス応用へ—

慶應義塾大学大学院理工学研究科の高橋悠太（博士課程 1 年）、山本拓海（研究当時修士課程 2 年）、神澤英寿（修士課程 2 年）、慶應義塾大学理工学部物理学科の藤井瞬専任講師（理化学研究所光量子工学研究センター客員研究員）、および理化学研究所光量子工学研究センターの加藤雄一郎チームディレクター（開拓研究所加藤ナノ量子フォトンクス研究室主任研究員）らの共同研究グループは、原子 3 個分ほどの厚さしかない原子層二次元半導体に音響波の一種である表面弾性波を伝えることで、光励起によって生じる発光が音響波の動きに合わせて変化する様子を詳細に可視化することに成功しました。

研究グループは、光パルス列と表面弾性波のタイミングを精密に同期させることで、約 2.65 ナノ秒という非常に短い一周を細かく切り分けて観察することに成功しました。その結果、物質内で電子と、電子が抜けた穴である正孔が結び付いてできる「励起子」からの発光において、発光の色、明るさ、スペクトルの広がり、音響波がもたらすわずかなひずみに応じて周期的に変化することを明らかにしました。さらに、発光測定と基板表面の微小な振動の測定を組み合わせることで、最大約 0.045% という極めて小さなひずみが、励起子のエネルギー状態と発光過程をリアルタイムに制御していることを確認しました。

本成果は、音響波を活用して極薄の原子層二次元材料中の励起子を動的に操作するための基盤技術となるものであり、高機能な量子光デバイスの実現に近づく画期的な成果です。

本研究結果は、アメリカ科学振興協会が出版する科学雑誌『*Science Advances*』に、2026 年 8 月 22 日（日本時間）に掲載されました。

1. 本研究のポイント

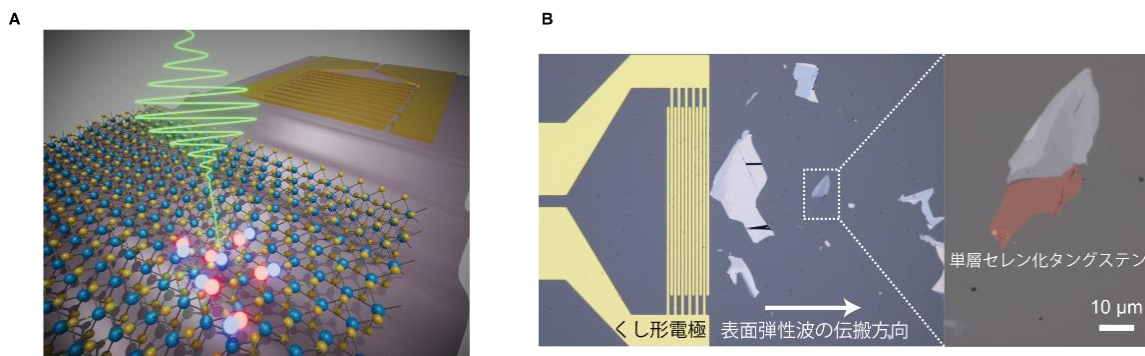
- ・周波数 377 MHz の音響波とパルスレーザーを精密に同期させ、音響波の一周中に変化する励起子発光を、発光の色、明るさ、スペクトルの広がり、時間変化の各側面から可視化することに成功。
- ・光干渉計による表面振動測定と発光測定を組み合わせ、最大約 0.045% の動的ひずみと励起子発光の変化を直接対応付けることに成功。
- ・動的ひずみが発光エネルギーだけでなく、励起子のバンド間散乱や発光の減衰過程にも影響することを解明。

2. 研究背景

近年、厚さが原子 3 個分ほどしかない原子層二次元材料は、次世代半導体や量子技術を支える

新たな材料として注目されています。なかでも、単層セレン化タングステンをはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイドは、厚さが約 0.7 ナノメートルという極めて薄い半導体材料です。このような材料では、光によって生じた電子と正孔が結び付き、「励起子」と呼ばれる粒子のような状態が形成されます。この励起子は、材料が光を吸収したり発したりする性質に影響を与えるため、発光デバイスや光センサー、量子光源などへの応用が期待されています。

励起子を制御する方法の一つとして、材料にわずかなひずみを与える「ひずみ工学」が研究されています。ひずみによって材料の電子状態を変化させることで、励起子のエネルギーや移動、発光のしやすさを調整できます。近年、固体表面を伝わる音響波の一種である表面弾性波を用いて動的なひずみを生み出す方法が注目されています。表面弾性波は、くし形電極に高周波電圧を加えることで発生し、材料表面に周期的な伸び縮みを与えます。しかし、表面弾性波によるひずみは通常 0.1%以下と非常に小さく、さらに電場や熱の影響も同時に生じるため、励起子が音響波の一周期の中でどのように応答するかを詳しく捉えることは困難でした。



(A) 表面弾性波による原子層二次元半導体の励起子発光変調の模式図。

(B) 作製した表面弾性波デバイスと単層セレン化タングステンの顕微鏡写真。

3. 研究内容・成果

研究グループは、圧電基板上に単層セレン化タングステンを配置した表面弾性波デバイスを作製し、周波数 377 MHz の高速な音響波を伝えることで周期的なひずみを与えました。さらに、パルスレーザーの繰り返し周波数と表面弾性波の周波数・位相を精密に同期させることで、わずか約 2.65 ナノ秒という音響波の一周期を細かく切り分け、それぞれの瞬間における励起子発光を観測することに成功しました。同時に、光干渉計を用いて基板表面の微小な振動も直接測定し、音響波の動きと発光特性の変化を対応付けました。この手法は高速変化するダイナミクスをストロボ撮影のように捉えることのできる画期的な方法です。

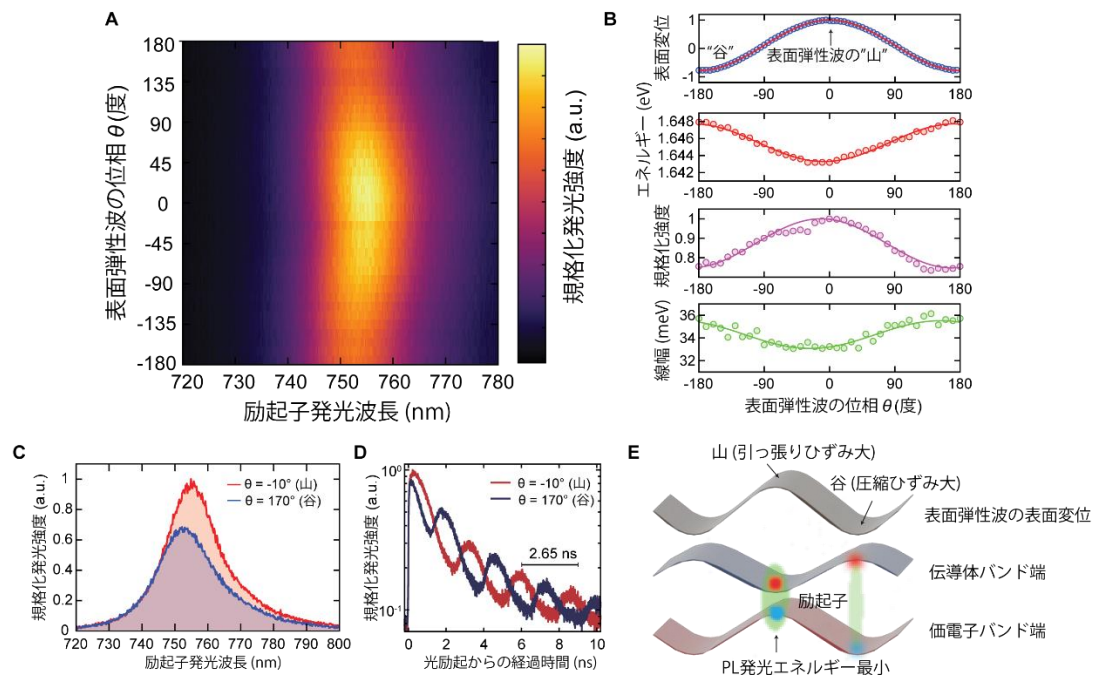


図 (A) 表面弾性波の位相に対する励起子発光スペクトルの変化の様子. (B) 表面変位と発光エネルギー, 強度, 線幅の関係. (C) 表面弾性波の山と谷における発光スペクトル. (D) 各位相における発光強度の時間変化. (E) ひずみによるバンド構造変調の模式図. 表面弾性波の山に対応する位相で引っ張りひずみが大きくなり, 発光エネルギーが最小となる.

実験の結果, 音響波の周期に合わせて, 励起子発光のエネルギー (発光の色), 強度 (明るさ), スペクトルの広がり が連動して変化することを明らかにしました. 発光エネルギーは約 ± 2.2 meV の範囲で周期的に変動し, この変化量から, 表面弾性波によって最大約 0.045% のひずみが生じていることが分かりました. また, 引っ張りひずみが加わると発光は低エネルギー側へ移動して明るくなり, 圧縮ひずみが加わると高エネルギー側へ移動して暗くなる様子も観測されました.

さらに, 励起子が生成されてから発光が弱くなるまでの時間変化を測定したところ, 発光強度が音響波の一周期と同じ 2.65 ナノ秒周期で振動することを確認しました. 解析により, この動的ひずみは二次元半導体のエネルギー構造を変化させるだけでなく, 励起子が異なる電子状態の間を散乱する過程にも影響を与えていることが分かりました. また, 発光の時間変化とエネルギーを同時に測定することで, 励起子が減衰する間も複数周期にわたって音響波に応答し続ける様子を可視化しました.

これらの結果により, 微小な動的ひずみの中で二次元半導体中の励起子の発光特性をリアルタイムに制御するプロセスの全体像を明らかにしました.

4. 今後の期待

本研究により, 音響波による微小な動的ひずみを用いて, 原子層二次元半導体中の励起子発光をナノ秒スケールの超高速かつ動的に操作できる可能性が示されました. 今後, 音響波の周波数や振幅, 伝搬方向を精密に制御することで, 励起子の発光の色や明るさだけでなく, 輸送特性や寿命を自在に操る技術への発展が期待されます. さらに, より長寿命の励起子や量子発光体と組み合わせることで, 励起子輸送デバイス, 高感度ひずみセンサー, 単一光子発生源など, 次世代

の光・量子デバイスへの応用につながることが期待されます。

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP24H01202, JP23H00262, JP25K21704, JP23K26165, JP24K21743, JP25H02153）、JSPS 特別研究員奨励費（JP25KJ2060）、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」（JPMXS0118067246）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR19J4, JPMJCR25A1）、JST 先端国際共同研究推進事業 ASPIRE（JPMJAP2310）、精密測定技術振興財団、池谷科学技術振興財団、服部報公会、慶應義塾大学次世代研究プロジェクトの支援を受けて実施されました。また、本研究の一部は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業の支援を受けた産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設（JPMXP09-F-21-AT-0085）において実施されました。

<原論文情報>

Yuta Takahashi, Takumi Yamamoto, Hidetoshi Kanzawa, Kazuki Maezawa, Hajime Kumazaki, Yuichiro K. Kato, Shinichi Watanabe, and Shun Fujii, "Multidimensional spectro-temporal imaging of exciton dynamics under propagating acoustic strain in two-dimensional semiconductors," *Science Advances*, **12** eaef5458 (2026). doi: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aef5458>

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 専任講師 藤井 瞬（ふじい しゅん）

TEL : 045-566-1629 E-mail : shun.fujii@phys.keio.ac.jp

理化学研究所 光量子工学研究センター 量子オプトエレクトロニクス研究チーム

チームディレクター 加藤 雄一郎（かとう ゆういちろう）

（開拓研究所 加藤ナノ量子フォトンクス研究室 主任研究員）

TEL : 048-462-1111 E-mail : yuichiro.kato@riken.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

理化学研究所 広報部 報道担当

TEL : 050-3495-0247

Email : ex-press@ml.riken.jp