

【基盤研究（S）】

ロボット技術支援によるモアレ量子プラットフォームの創生と応用



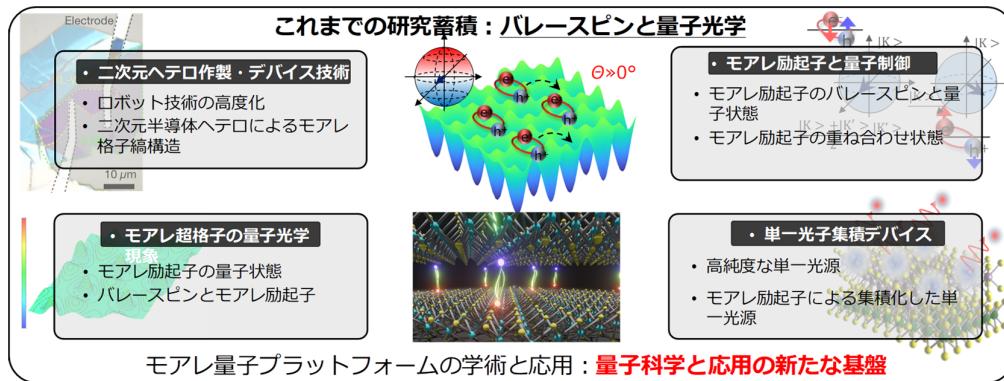
研究代表者	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授 松田 一成（まつだ かずなり） 研究者番号：40311435
研究課題情報	課題番号：25H00417 研究期間：2025年度～2029年度 キーワード：二次元半導体、量子科学、光科学、モアレ物理

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像：

本研究の目的是、物質の本質を明らかにする物質科学と、量子力学が主体となる光学である量子光学の知見を統合し発展させることで生み出される新しい学術を創出することにある。これまでの研究から、原子数層の極めて薄い二次元半導体を重ねたヘテロ構造で生じるモアレ格子縞での、水素原子のような電子・正孔対であるモアレ励起子が、量子的な性質を有する量子二準位系であることが明らかとなった。この系が、膨大な数の量子二準位系を集積した新たなモアレ量子プラットフォームと呼べる量子システムとなりうることを見出した。更に、ロボット技術とデーター科学の進展による技術支援で究極のモアレ格子を作製する道筋ができた事から、このモアレ量子プラットフォームの学術を構築し、それを量子科学・技術へと橋渡しする新しい研究潮流を生み出すことを目指している（図1）。

「モアレ量子プラットフォームの学術と応用」 -「量子光学」と「物質科学」の融合-



●研究背景と目的：

インターネットなど情報化社会を支える半導体レーザーなどの光技術は、これまで重要な役割を担ってきた。しかし、そのような光技術による古典コンピューティング、メモリ、さらには量子コンピューティング・シミュレーターや量子暗号通信などの量子デバイスでは、電子・磁気技術が重要な要素となっている。今後社会で必要とされる光量子技術は、物質中の量子コヒーレンス消失や集積という原理的な壁によって用途が大きく制限されている。そのため、既存物質であるダイヤモンドや金属超伝導体が、量子システムやデバイスの最有力候補と目されている。このような量子システム設計では、新しいデバイスやシステムが強く切望されている。そのため、既存の物質科学の量子科学の延長だけで本当に良いのであろうか？という命題が生じる。

近年、物質科学の進展から原子数層の二次元半導体に関する研究が立ち上がり、大きな学術変革期を迎えており、そのタイミングで我々は、二次元半導体での化学ドーピングの実証、キャリアダイナミクス、バレースピン緩和の解明とその制御など、新しい光科学・技術への道筋を切り拓いてきた。

さらに研究進展とともに、単層二次元半導体MX₂ (MX₂:M=Mo, W, X=S, Se) をツイストして重ねたヘテロ構造（図2(a)）では、格子のモアレ干渉縞（図2(b)）とそれによる周期配列したモアレポテンシャルが生じる。光で生成された水素原子のような電子とホール対（励起子）は、このポテンシャルに閉じ込められモアレ励起子となり、新たな物理自由度を有する（図2(c））。我々はこのモアレ励起子が量子二準位系（量子ビット）であり、長い量子コヒーレンスを有することを見出し（図2(c)）、新たな量子システムとしての研究潮流への視野が拓けた。

本研究の目的は、ロボット技術支援で初めて可能となる究極のモアレ構造を準備し、それを基軸とする「モアレ量子プラットフォーム」の学術を構築することにある。我々が独自に描くこのモアレ量子プラットフォームで、膨大な数の量子二準位系（量子ビット）が規則配列し、集積したシステムとの制御が可能となれば、量子コンピューティングや量子暗号通信などの量子技術への新たな道が拓かれると考えている。

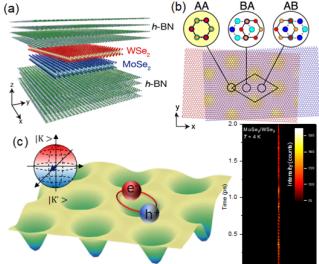


図2 (a)二次元半導体ヘテロ構造、(b)モアレ超格子、(c)モアレポテンシャルとモアレ励起子のコヒーレンス

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●ロボット支援でのモアレ格子作製技術：

モアレ格子は、二つの二次元半導体を重ねる作製時の僅かな歪などで、そのサイズやポテンシャルが乱されるため、人間が介在した作製時の曖昧さが、それを大きく左右する。このため、作製時に人間が行う作業を、すべてロボットアームで代替したロボット作製技術によるシステム構築を進めている。このロボット支援とデーター科学の融合によるアドバンテージを活かし、自律的作製に至るまで行うシステムへと発展させる。

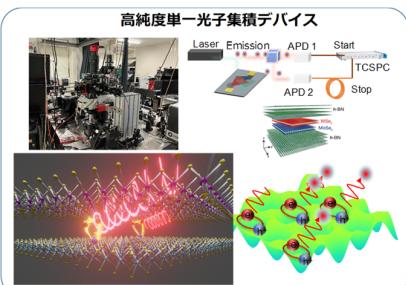


図3 高純度単一光子集積デバイスの模式図とモアレ励起子からの単一光子発生の模式図

●モアレ量子プラットフォームの量子光学現象の開拓と量子制御：

これまでの研究から、モアレ格子が莫大な数に及ぶ周期配列した量子二準位系からなる、バレー自由度を有する量子プラットフォームと見做せることが明らかとなっている。まず先端分光手法により、光励起状態に関する詳細な情報を得て、デコヒーレンスマカニズムを理解する。次に量子コンピューティングにおいて、量子ビット操作に対応する、量子二準位系の量子制御などの研究を進める。

●モアレ量子プラットフォームの量子情報処理デバイス応用：

量子情報通信では、必ず単一光子（フォトン）を発生する理想的な単一光子発生デバイス利用が前提となっている。しかし、現状の単一光子純度では長距離量子通信では大きな困難があり、将来の量子情報通信量の爆発的増大に備え並列化が避けられない。そのため、モアレ量子プラットフォームを適用し光子純度が高く、理想的な高純度かつ並列化した単一光子発生集積デバイスを検討する（図3）。

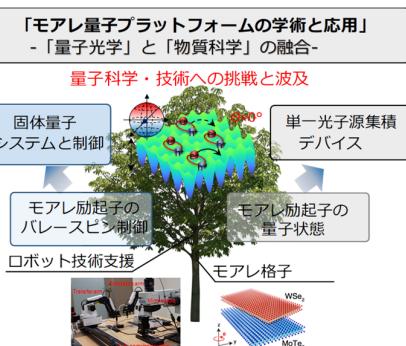


図4 学術と応用の側面からの本研究の将来展望