ウェブサイト公開用。

(様式10)

(海外特別研究員事業)

平成 31年 4月 29日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度	平成 29 年度
受付番号	255 6 6 11
氏 名	SHA HEN

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。 なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地(派遣先国名)用務地: チューリッヒ (国名: スイス連邦)

2. 研究課題名(和文)<u>※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。</u> <u>二次元材料積層系における励起子ポラリトン BEC を媒介とした光誘起超伝導の探索</u>

3. 派遣期間: 平成 29 年 4月 1日 ~ 平成 31 年 3月 31日

4. 受入機関名及び部局名

スイス連邦工科大学チューリッヒ校

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等) (注)「6.研究発表」以降については様式10-別紙1~4に記入の上、併せて提出すること。

電子や準粒子間の相互作用は固体中における多様な物性の創出に関わっている。最も顕著な例で ある超伝導現象は通常の場合、結晶格子の振動量子(フォノン)を媒介として電子がペアを形成す ることで発現している。電子間相互作用を媒介しているフォノンを他の準粒子に置き換えることが できれば新規な超伝導性の発現が期待できる。この候補として、励起子と呼ばれる電子-正孔のペア や、さらに励起子ポラリトンと呼ばれる共振器中における励起子と光の結合状態が提唱されてきて いる[1, 2]。特に後者の励起子ポラリトンは質量が軽いことから高密度に凝集したボーズ・アイン シュタイン凝縮状態(BEC)を形成しやすく、これを媒介とした強固な電子間相互作用による超伝導 の実現が最近になり予想されている[3]。本研究では励起子ポラリトンと電子との相互作用を研究し、 励起子ポラリトン BECを媒介とした光誘起の超伝導を探索する。

上述のような状況を実現するには励起子ポラリトン層と電子層の二種類の層が必要となり、両者 が強く相互作用している必要がある。二次元材料である遷移金属カルコゲナイド(TMDC)はその二 次元性から遮蔽効果が弱く、クーロン相互作用の影響が強く働くと同時に、中でも1層 MoSe₂や WSe₂ といった半導体は可視光から近赤外光に相当するエネルギーギャップを持ち、強いクーロン相互作 用によって安定な励起子を形成する。これらの二次元材料は自在に積層構造を作成することが可能 であるという利点がある。また TMDC のヘテロ構造においては間接励起子が観測されており[4]、永 久双極子モーメントを有する間接励起子と振動子強度の大きい直接励起子とのコヒーレントな結合 状態を実現できれば、共振器中に配置することで励起子ポラリトンに永久双極子モーメントを持た せることができる。このようなポラリトンは双極子ポラリトン[5]と呼ばれ、永久双極子モーメント の存在により、隣接する電子層との大きな相互作用が期待できる。

また 2018 年 3 月に MIT のグループにより 魔法角度 (Magic angle) のツイスト 2 層グラフェンにお いてモット転移と非従来型の超伝導が発現するという画期的な報告がなされた[6, 7]。この系は平 坦バンドになっていることから、電子間相互作用の影響が強く現れる。そこでツイスト 2 層グラフ ェンをポラリトンと相互作用させる電子層として用いることを考案した。

本年度は前年度に続き励起子ポラリトンと電子間の相互作用を研究するための準備として、双極 子ポラリトンの形成が可能かどうか実験的に検証を行った。ポラリトンの形成については共同研究 の(成果9)にもあるように、所属研究室で既に技術を確立しており、一方で課題となるのが間接 励起子と直接励起子の結合状態を実現することであった。これについて TMDC 合金を用いたヘテロ構 造、1層の BN をトンネル障壁として用いた TMDC ヘテロ構造、さらには MoSe₂/BN/MoSe₂構造といっ た複数の試料を試作し評価を行った。それぞれの実験において新しい成果を得ることができ、特に MoSe₂/BN/MoSe₂構造においては重要課題であった直接励起子-間接励起子のコヒーレントな結合状 態の観測、さらには電気的制御に成功した。

(成果1) TMDC 合金を用いたバンド構造及び間接励起子エネルギーの制御の実現

(成果2) TMDC ヘテロ構造における BN トンネル障壁を介した間接励起子の発光の観測、シュタル クシフトの増大、発光波長の青方偏移の観測

(成果3) BN トンネル障壁の挿入による2層 MoSe₂の間接ギャップから直接ギャップへの遷移の実現

(成果4) MoSe₂/BN/MoSe₂における間接励起子発光の観測

(成果5)MoSe₂/BN/MoSe₂における直接励起子-間接励起子間のコヒーレント結合の観測、電気的制 御の実現

また電子層として用いる予定のツイスト2層グラフェンについて試料作成技術の開発、評価を行った。輸送測定からモアレ超格子が形成されていることが確認でき、また超格子誘起のランダウ準 位の観測にも成功した。このことから非常に高品質な試料が作成できていることが確認できた。 (成果6)ツイスト2層グラフェンにおけるモアレ超格子の実現と超格子誘起ランダウ準位の観測

上述の成果で作成した TMDC ヘテロ構造試料は典型的に10 個程度の二次元薄膜試料をグローブボックス中で積層することで作成しており、成果を達成するためにはこのような複雑な試料の作成を 効率化することが必要不可欠であった。申請者が中心となり遠隔操作顕微鏡システムの開発、試料 作成の自動化を行った。

(成果7) 遠隔操作顕微鏡システム microFLAT の開発、試料探索、試料積層の自動化の実現

また共同研究において MoSe₂励起子のシュブニコフドハース振動を観測、さらに MoSe₂励起子ポー ラロン-ポラリトン系における光増幅効果を観測した。

(成果8[共同研究]) MoSe2 における光学伝導度のシュブニコフドハース振動の観測

(成果9[共同研究])励起子ポーラロン-ポラリトンの誘導冷却による光増幅効果の観測

現在(成果3)~(成果5)をまとめ、申請者が筆頭著者となり学術誌への論文投稿を準備している(6.研究発表(1-3))。また英国で開催された国際会議 The Rank prize funds symposium on 2 Dimensional Semiconductors for Optoelectronics において 2019 年 4 月に招待講演を行った(6.研究発表(2-1))。また奈良県で開催予定の国際会議 EDISON21 にて 2019 年 7 月に招待講演を行う予定である(6.研究発表(2-2))。

(成果8)、(成果9)については学術誌へ投稿し、査読中である(6.研究発表(1-1),(1-2))。

所属研究室が有するポラリトン形成の技術([8],(成果9))と(成果5)で実現した直接励起子間 間接励起子間のコヒーレント結合状態を組み合わせることにより双極子ポラリトンを形成できる可 能性が高く、また(成果6)のツイスト2層グラフェンにおけるモアレ超格子構造の実現により電 子層として平坦バンド系であるツイスト2層グラフェンを利用できる。さらに(成果7)において 試料作成の効率化、自動化を実現しており、(成果5)、(成果6)の試料を組み合わせた複雑な試料 も技術的に作成が可能である。必要となる要素技術を確立することに成功し、これらの成果を組み 合わせることにより、励起子ポラリトン BECを媒介とした光誘起超伝導を探索できると予想できる。

各成果の詳細については下記にまとめる。

(成果1) TMDC 合金を用いたバンド構造及び間接励起子エネルギーの制御の実現

前年度の試行錯誤の結果、直接励起子と間接励起子のエネルギーを近づけるために、Mo_{1-x}W_xSe₂合金(図1(a)下図)を用いることを考案し

た。以下にその実験結果についてまとめ る。

1. MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ヘテロ構造

MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ ヘテロ構造試料(図1(a) 上図)を作成し、液体ヘリウム温度 4.2K においてフォトルミネッセンス(PL)のゲ ート電圧依存性を評価した。MoSe2におい ては電荷中性点において励起子(X_Mo)、電 子ドープ領域において電子-励起子ポー ラロン(X-^M)、正孔ドープ領域において正 孔-励起子ポーラロン(X+™)のPLを観測し た[9]。また $Mo_{0.4}W_{0.6}Se_2$ においては $MoSe_2$ と同様に電荷中性点において励起子 (X₀^{Mow})、正孔ドープ領域において正孔-励 起子ポーラロン(X+^{MoW})のPLを観測した。 一方で電子ドープ領域においては2種類 の励起子ポーラロンの PL を観測した。そ れぞれバレー間電子-励起子ポーラロン (X-(K-K')^{MoW})、バレー内電子-励起子ポーラ ロン(X-(K-K)^{Mow})に対応づけることができる。 電子ドープ領域において2種類のポーラ ロンが観測されるこの振る舞いは、暗励 起子が第一励起状態となる WSe₂と同様の 振る舞いであり、明励起子が第一励起状 態となる MoSe₂と比較して伝導帯のスピ



図 1: (a) MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ ヘテロ構造試料の光学顕微鏡 写真(上)、及び Mo_{1-x}W_xSe₂合金の模式図(下)[8](b)-(d) 各 領域における PL のゲート電圧依存性((b) MoSe₂, (c) Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂, (d) MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ ヘテロ構造)

ン軌道分裂が反転していることとよく対応している。これまでに PL の強度から TMDC 合金系におけるスピン軌道分裂の反転を示唆している研究は存在したが[10]、高品質でゲート制御可能な試料を作成することで励起子ポーラロンのスペクトルからも W-rich な Mo_{1-x}W_xSe₂ 合金においてスピン 軌道分裂の反転の証拠が初めて確認できた。

さらにヘテロ構造領域においては間接励起子の PL を観測することに成功した。発光エネルギーは 1.425eV(ゲート電圧印加なし)で、MoSe₂の直接励起子(X₀^{Mo})とのエネルギー差は約 220meV であっ た。前年度に評価を行った MoSe₂/WSe₂ヘテロ構造では間接励起子と MoSe₂の直接励起子とのエネ ルギー差は約 280meV であり、TMDC 合金を用いることで間接励起子のエネルギーを制御することに 初めて成功した。一方で間接励起子-直接励起子のエネルギー差はまだ大きく、ゲート電圧印加に よる間接励起子のシュタルクシフト(最大約 30meV)によってはエネルギー差を埋めることができ なかった。

2. MoSe₂/Mo_{0.7}W_{0.3}Se₂ヘテロ構造 間接励起子のエネルギーを更に 直接励起子へと近づけるために、 Mo-rich な Mo_{1-x}W_xSe₂合金を用い て MoSe₂/Mo_{0.7}W_{0.3}Se₂ ヘテロ構造を 作成(図2(a))、評価を行った。 ヘテロ構造領域においては PL が 弱く、間接ギャップである二層 MoSe₂と同程度のPL、同様のゲー ト電圧依存性を示すことから(図 2(c, d)、MoSe₂/Mo_{0.7}W_{0.3}Se₂ヘテ ロ構造は間接ギャップになって **いると考えられる**。またこのこと は価電子帯 Γ 点の層間の混成に よるものと考えられる(図2(b))。 またヘテロ構造からの間接励起 子 PL は観測できず、間接励起子 が形成される、もしくは発光する 前に正孔が Γ 点へと移動してい ると考えられる。



図 2: (a) MoSe₂/Mo_{0.7}W_{0.3}Se₂ ヘテロ構造試料の光学顕微鏡写真 (b) バンドアライメントの模式図 (c), (d) MoSe₂/Mo_{0.7}W_{0.3}Se₂ ヘ テロ構造(c)及び二層 MoSe₂(d)の PL のゲート電圧依存性

(成果2)TMDC ヘテロ構造における BN トンネル障壁を介した間接励起子の発光の観測、シュタル クシフトの増大、発光波長の青方偏移の観測

(成果1)の TMDC 合金を用いた方法においては間接励起子と直接励起子のエネルギーを縮退させることができなかった。そこでヘテロ構造の間に1層の BN(1LBN)をトンネル障壁として配置することで、間接励起子の双極子モーメントの増大によるシュタルクシフトの増大、及び束縛エネルギーの減少による発光波長の青方偏移が期待できる。これらの寄与によって間接励起子のエネルギーを直接励起子へとより近づけることができると期待し、以下の試料の作成、評価を行った。

1. MoSe₂/1LBN/Mo_{0.4}Wo.6Se₂へテロ構造

MoSe₂/1LBN/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ヘテロ構 造試料(図3(a))を作成し、PL のゲート電圧依存性を評価した。 比較のため試料左側の緑色で示 された領域に BN を介さない MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ヘテロ構造を設 けた。MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ ヘテロ構 造においては(成果1)での結果 と同様に間接励起子の発光を確 認でき、発光エネルギーは 1.393eV であった(図3(c))。ま たゲート電圧印加によるシュタ ルクシフトは最大で約40meV程度 であり、(成果1)の結果と同程度 である。MoSe₂/1LBN/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ ヘテロ構造においても間接励起 子(IX)のPLを観測することに成 功した (図 3(d))。1 層 BN をトン ネル障壁として用いた TMDC ヘテロ 構造での間接励起子の観測は初と なる。



図 3:(a)ヘテロ構造試料の光学顕微鏡写真 (b) バンドアライメントの模式図 (c), (d) 各領域における PL のゲート電圧依存性 ((c) MoSe₂/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ (d) MoSe₂/1LBN/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂)

間接励起子の発光エネルギーは 1.467eV であり MoSe₂/Mo_{0.4}Wo.6Se₂ ヘテロ構造と比較して青方偏移している。この青方偏移は束縛エネルギーの減少に起因していると考えられ、これにより見積も

った束縛エネルギーの差は 74meV である。またゲート電圧印加によるシュタルクシフトは最大約 175meV (電子-励起子ポーラロンとの交差後は線形補完により見積もり)と増大していることが確 認できた。

さらにMoSe₂/1LBN/Mo_{0.4}W_{0.6}Se₂ヘテロ構造のPLのゲート依存性からは間接励起子のエネルギー準位がMoSe₂の電子-励起子ポーラロン(X_^{Mo})と交差する様子が観測できた。一方で反交差構造は確認できず、間接励起子と励起子ポーラロンのコヒーレントな結合は確認できなかった。

2. MoSe₂/1LBN/Mo_{0.6}W_{0.4}Se₂ ヘテロ構造

上述の試料では間接励起子と電子–励起子ポーラロンの 交差が確認できたが、直接励起子との交差は確認できな かった。電荷中性を保った状態で間接励起子と直接励起 子のエネルギーを近づけることができるように、合金の 比率を MoSe₂に近くした MoSe₂/1LBN/Mo_{0.6}W_{0.4}Se₂へテロ構 造試料を評価した。前述の試料と同様に、1 層 BN を介し て間接励起子(IX)の PL を確認できた(図 4)。さらに間 接励起子 PL のシュタルクシフトを線形補間すると、電荷 中性を保った状態で間接励起子のエネルギーを MoSe₂の 直接励起子(X_0^{Mo})、及び Mo_{0.6}W_{0.4}Se₂の直接励起子(X_0^{Mow}) へと変調することができている。しかしながら間接励起

子と直接励起子の反交差構造は観測できなかった。(MoSe₂

の電子-励起子ポーラロン(X-^{Mo})との交差後に間接励起子の



図 4: MoSe₂/1LBN/Mo_{0.6}W_{0.4}Se₂ ヘテロ 構造の PL のゲート電圧依存性

発光が観測できなくなる理由として、間接励起子の寿命が長いために、エネルギーの低い X[™]へと 緩和していることが考えられる。)

(成果2)におけるヘテロ構造において間接励起子と直接励起子の反交差が確認できなかった理由 として、層間の結晶方位の微小な不整合や不均一性による励起子の線幅が大きいなど複数の理由が 考えられる。そこで1層の BN をトンネル障壁として間に挟んだ2層の MoSe₂を用いることを考案 した。(成果6)で後述する tear-and-stack 技術[11]を利用することで結晶方位を高精度に合わせ ることが可能であり、また BN をトンネル障壁として配置することにより、間接ギャップの2層 MoSe₂を直接ギャップにできる可能性がある。さらに TMDC 合金を使用せず、MoSe₂のみを利用する ことで励起子の線幅を改善できる可能性がある。これらを踏まえ、MoSe₂/1LBN/MoSe₂へテロ構造を 作成し、光学測定による評価を行った。その成果を(成果3)~(成果5)に示す。

(成果3)BN トンネル障壁の挿入による2層 MoSe2の間接ギャップから直接ギャップへの遷移の 実現

上述の MoSe₂/1LBN/MoSe₂試 料において PL の空間マッ ピングを行った(図 5)。 MoSe₂/1LBN/MoSe₂の領域か らは強い PL シグナルが観 測され、一方で MoSe₂/MoSe₂ の領域からは PL シグナル が微弱であった。このこと は MoSe₂/1LBN/MoSe₂構造が 直接ギャップになっている ことを示唆しており、BN ト ンネル障壁の挿入によって



図 5: (a) PL の空間マッピング (b) 各領域の PL スペクトル

2 層 MoSe₂と比較して価電子帯 Γ 点の層間混成が低減されたためと考えられる。1 層の BN をトンネ ル障壁として利用して間接ギャップから直接ギャップへのバンド構造の変化を実証した例は初め てである。

(成果4) MoSe₂/BN/MoSe₂における間接励起子発光の観測

上述の MoSe₂/1LBN/MoSe₂ 試料において PL のトップ ゲート電圧依存性を評価 した(図 6(a))。4 種類の 特徴的なスペクトルが観 測され、トップゲート電圧 に対する依存性からそれ ぞれ上層、下層の励起子 (X₀^{top}, X₀^{bot})、また上層、 下層の電子-励起子ポーラ ロン(X₋^{top}, X₋^{bot})に対応 付けられる。**負のトップ**

ゲート電圧印加時に線形



図 6:(a) PL のトップゲート電圧依存性 (b) バンドアライメントの模式 図(負のトップゲート電圧印加時)

のシュタルクシフトを示すスペクトルが観測され、永久双極子モーメントを有した間接励起子で あることがわかる。バンドアライメントを考慮すると、上層に正孔、下層に電子を配置した間接励 起子に対応する。MoSe₂/1LBN/MoSe₂において間接励起子の発光を確認した初めての例となる。

(成果5)MoSe₂/BN/MoSe₂における直接励起子-間接励起子間のコヒーレント結合の観測、電気的

制御の実現

上述の MoSe₂/1LBN/MoSe₂ 試料において微分反射率 のトップゲート電圧依存 性を評価した(図7(a))。 負のトップゲート電圧印 加時に線形のシュタルク シフトを示す間接励起子 (IX)のスペクトルが下層 の直接励起子スペクトル

(X₀^{bot})近傍で観測された。また間接励起子と下層の直接励起子のスペクトル



図 7:(a) 微分反射率のトップゲート電圧依存性 (b) バンドアライメ ントの模式図(直接励起子-間接励起子共鳴時)

が交差する領域で反交差構造が観測された。これは間接励起子と直接励起子がコヒーレントに結 合し重ね合わせ状態を形成していることに対応し、また重ね合わせ状態を電気的に制御すること に成功した。図7(b)で示すように、トップゲートに負電圧印加時の間接励起子は、正孔のトンネ ル結合によって下層の直接励起子と結合する。一方で、上層の直接励起子と結合するには電子のト ンネル結合が必要となる。トンネル障壁として用いている BN は、価電子帯は MoSe₂とエネルギー が近いものの、伝導帯はエネルギー差が大きく、電子と比較して正孔の方がトンネル結合エネルギ ーが大きいと考えられる。このことは間接励起子と下層の直接励起子の間に反交差構造が観測され たこととよく対応している。

間接励起子と直接励起子のコヒーレント結合については2層 MoS₂[12]、及び MoSe₂/WS₂ ヘテロ構造 [13]において最近示唆に富む結果が報告されているが、いずれも間接励起子由来のシュタルクシフ ト、また反交差構造を観測しておらず、実証には至っていない。特に 2019 年 3 月に Nature 誌に発 表された MoSe₂/WS₂における直接励起子-間接励起子の混成[13]については中間報告で報告を行っ たように前年度に既に申請者が同様の試料でゲート電圧依存性の評価を行っており、発表文献と類 似の複数の新しいスペクトルを観測したものの、シュタルクシフトが観測されなかったことから観 測されたスペクトルは永久双極子モーメントを有さず、間接励起子はスペクトルに寄与していない と考えられ、実験結果の解釈には議論の余地がある。

一方で申請者らの成果は間接励起子由来のシュタルクシフト、及び直接励起子-間接励起子の反交 差構造を観測しており、TMDC における直接励起子-間接励起子のコヒーレント結合を初めて実証し たという点で重大な成果である。 (成果6)ツイスト2層グラフェンにおけるモアレ超格子の実現と超格子誘起ランダウ準位の観 測

相互作用をさせる電子層と しての利用を想定し、ツイス ト2層グラフェンの試料を 作成(図8(a))、液体へリウ ム温度4.2Kにおいて輸送測 定により評価を行った。試料 の作成については

tear-and-stack 技術[11]を 確立し、グラフェン間の角度 を高精度に制御することに 成功した。また BN に挟まれ たグラフェンへのコンタク トの形成方法としてエッジ コンタクト方式[14]を採用 し、エッチング等の条件出し を行い、良好なコンタクトを



形成, ることに成功した。 伝導度のキャリア密度依存 性に電荷中性点(ディラッ ク点)におけるディップに 加えて正孔ドープ側に新た

形成することに成功した。また輸送測定のためのセットアップの立ち上げを行った。

図 8:(a) ツイスト2層グラフェン試料の顕微鏡写真 (b) 伝導度のキャリア密度依存性 (c)横抵抗率、(d)縦抵抗率のキャリア密度、磁場依存性

なディップが確認できた(図8(b))。これは超格子効果によるディラック点のレプリカに相当して おり、この密度において超格子バンドを完全充填している。また横抵抗率のキャリア密度、磁場依 存性において、電荷中性点以外でも横抵抗率の符号が反転しており、ちょうど超格子バンドを半分 充填したところで電子的振る舞い、正孔的振る舞いが反転している(図8(c))。これらの観測結果 からモアレ超格子バンドが形成されていることが確認できた。また縦抵抗率のキャリア密度、磁 場依存性においてはディラック点レプリカからもランダウ準位の形成が確認でき、ディラック点 からのランダウ準位との交差構造が観測できた(図8(d))。これは Hofstadter's Butterfly の一 **部**であり、非常に高品質な試料を作成できていることが確認できた。ディラック点レプリカに対 応するキャリア密度、及びランダウ準位交差の周期から見積もったツイスト角度はよく一致し、約 1.5度であった。一方で平坦バンドの現れる魔法角度は約1.1度であり、超格子バンドの半充填に おけるモット絶縁体転移を確認することはできなかった。グラフェン間のツイスト角度については、 試料を積層する際に BN とグラフェンとの格子の整合具合なども影響している可能性があり、角度 の制御についてはある程度の不確実性が存在していると考えられる。試料の品質は十分に高いため、 複数の試料を作成すれば一部の試料についてはモット転移、超伝導転移の観測が期待できる。また 魔法角度から多少のずれがあっても、バンド構造は平坦に近くなっているため、双極子ポラリトン と相互作用させ、電子間相互作用を増大することができれば相転移が期待できる。

(成果7) 遠隔操作顕微鏡システム microFLAT の開発、試料探索、試料積層の自動化の実現

上述の成果で作成した TMDC ヘテロ構造試料は典型的に10 個程度の二次元薄膜試料を積層するこ とで作成している(例:TMDC x 2, BN x 3, グラフェン x 4)。それぞれの二次元薄膜試料を得る ために数日を擁し、また各積層のプロセスについても数時間かかる。また試料作成の歩留まりによ る困難もある。上述の成果を達成するにあたって、このような複雑な試料の作成を効率化すること が必要不可欠であった。また高品質な試料を作成するために前年度に立ち上げたグローブボックス システムを用いて試料の作成を行った。

そこで前年度に引き続き申請者が中心となって二次元材料ヘテロ構造作成のための遠隔操作顕微 鏡システム microFLAT (microscopic FLake Assembly Tool)の開発を行った。ソフトウェアの開発につ いては Python を用いることで比較的コンパクトに1万行程度のソースコードで実装ができた。ユ ーザーインターフェースについては Qt を使用、画像処理については OpenCV、及び ImageJ を利用 した。特に試料探索のための画像処理についてはバイオ系のコミュニティで標準的に用いられてお りプラグインの豊富な ImageJ を利用し、顕微鏡システムと連動させて専用サーバーで並列に処理 を行うようにした。試料の積層については、試料構造のデザインツールの作成、アライメントの半 自動化、積層の自動化を行った。また将来的に様々な環境で利用できるように、すべてオープンソ ースライブラリを用いて開発を行った。立ち上げにはソフトウェア、ハードウェア両面において膨 大なノウハウが必要となり、ゼロベースで立ち上げる経験ができたため、新しい環境においても比 較的容易に立ち上げができると考えられる。類似のシステムの実現の報告が他グループからも今年 度中にあり[15]、今後二次元材料の分野において重要になっていく技術と考えられる。

(成果8[共同研究]) MoSe2 における光学伝導度のシュブニコフドハース振動の観測

1層 MoSe₂において磁場下で励起子の吸収スペクトルにシュブニコフドハース振動を観測すること に成功した。励起子のエネルギー、線幅に振動が観察され、励起子とランダウ量子化した電子(正 孔)ガスとの間の散乱がランダウ準位の充填に依存していることと関連付けられる。申請者は試料 作成に貢献した[16]。

(成果9[共同研究])励起子ポーラロン-ポラリトンの誘導冷却による光増幅効果の観測 1層 MoSe₂を共振器中に配置した試料において、励起子ポーラロン-ポラリトンが観測できる。励起 子ポーラロン-ポラリトンの透過率をポンプ-プローブ測定を用いて測定したところ、2倍を超える プローブ光の透過率利得が確認できた。電子の存在によって、ポラリトンが誘導冷却され光学利得 が生じていると考えられる。ポラリトンの誘導冷却はポラリトン BEC の観測へ有用である。申請者

- は試料作成に貢献した[17]。
- [1] W. A. Little, *Phys. Rev.* **134**, A1416 (1964).
- [2] F. P. Laussy et al., Phys. Rev. Lett. 104, 106402 (2010).
- [3] O. Cotlet et al., Phys. Rev. B 93, 054510 (2016).
- [4] P. Rivera et al., Nature Commun. 6, 6242 (2015).
- [5] P. Cristofolini *et al.*, Science **336**, 704 (2013).
- [6] Y. Cao et al., Nature 556, 80 (2018).
- [7] Y. Cao et al., Nature 556, 43 (2018).
- [8] S. Tongay et al., Appl. Phys. Lett. 104, 012101 (2014).
- [9] M. Sidler et al., Nature Physics 13, 255 (2017).
- [10] G. Wang et al., Nature Commun. 6, 10110 (2015).
- [11] K. Kim et al., Nano Lett. 16, 1989 (2016).
- [12] I. C. Gerber et al., Phys. Rev. B 99, 035443 (2019).
- [13] E. M. Alexeev et al., Nature 567, 81 (2019).
- [14] L. Wang et al., Science 342, 614 (2013).
- [15] S. Masubuchi et al., Nature Commun. 9, 1413 (2018).
- [16] T. Smoleński *et al.*, arXiv:1812.08772
- [17] L. B. Tan *et al.*, arXiv:1903.05640