

頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム  
—世界の成長と共存を目指す革新的生存基盤研究のための日本・アセアン協働強化—  
報告書

## 新奇二次元原子層物質の合成

派遣者：林 宏恩

派遣期間：2016年4月1日～2016年11月1日

派遣先：シンガポール国立大学（シンガポール）

キーワード：二次元，原子層物質，半導体，硫化錫，CVD 合成

### 1. 研究課題について

将来の光エネルギーの高効率的な利用を可能にする、新しい材料の研究が進められている。例えば、原子層のカーボンシートであるグラフェンの研究を契機として、層状物質はそのような素材として非常に注目されている。量子閉じ込め効果とこれらの構造の影響で、結晶厚みが1ナノメートル以下薄くなっていくと、バルクとは異なる新奇な物理的性質を持つ。例えば、通常三次元の二硫化モリブデンや二セレン化タングステンのような遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDCs)は間接遷移型半導体である。一方で、厚み1ナノメートル以下の単層になると直接遷移型に変化する。また、反転対称性を持たないTMDCsにおいて、ある特定のバレー（谷）に上向きもしくは下向きスピンのロックされるように、バレーとスピンが結合した新しい自由度（バレースピン）を与えると同時に、円偏光によってバレー自由度を選択することができる。このような、バレースピン物性を用いたデバイス応用に特に有利である。更に、様々な二次元原子層物質の組み合わせることで、全く新しい光学・電子の性質を持つ新規なファンデルワースヘテロ構造の探索に極めて有用である。

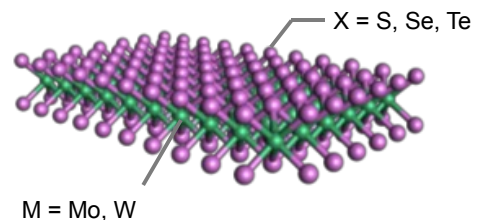


図1. TMDCsの構造。

### 2. 派遣の内容

様々な層状物質の中で、14族カルコゲナイド(MX<sub>2</sub>; M=Sn および Ge, X=Se および S)に、近年大きな注目が集まっている。特に、単層硫化錫(SnS)はスピントロニクスとバレートロニクスに優れた二次元半導体材料であることが、理論的に予測されている。従来のTMDCsとは異なり、複数の谷（バレー）は光学的に直線偏光を利用してポンピングすることが可能である。同時に、これらの谷は、横方向非線形伝導を介して分離することができる。これら、非常に興味深い理論的予測を動機とし、本研究では単層SnSやSnSeの合成手法の開拓とその光学特性の調査を目指している。他の二次元物質の合成手法を参照し、化学気相成長法(CVD)を用いてSnS、SnSeの作製を進めた。

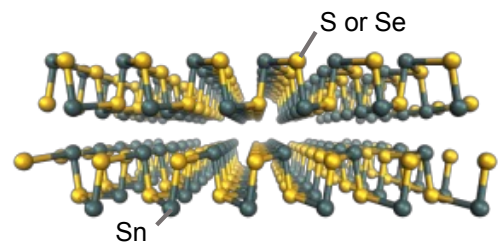


図2. 硫化錫の構造。

### 3. 派遣中の印象に残った経験や体験

シンガポールでは、多くの人が健康に気を使い積極的にスポーツに取り組んでいる。運動ジムが数多くあり、ほとんどの人がフィットネスセンターのメンバーシップを持っている。年齢や性別にかかわらず、ヨガやボディーコンバットなどのクラスを楽しんで参加しているようである。早朝に、室内だけではなく近所の広場に多くの人が集まってラジオ体操をやったり、夜遅い時間にジョギングしたり、サイクリングしたりする姿を多く見ました。このような高い意識を持つことは、おそらく政府の方針（エフォート）と関係しているようである。小さい頃から、体の健康に気を配り、学校では体重が標準を超えると、もっと運動させることもあるそうです。また、国民のフィットネスレベルを上げるため、スポーツ施設に使うお金を、一人ずつ100SGD（シンガポールドル）を配っているそうです。さらに、たくさん競技場やテニスコートやプールや様々なトレーニング施設があるスポーツセンターを、コミュニティ近辺に設置し、簡単にアクセスできるようにしている。このような環境にすることで、皆が良い生活を送り、それが国を強くする事に繋がっているようである。

シンガポールに出発する前に、インドネシアの森林火災によるかすみの被害の影響を受けていることを心配していた。しかし、今回一番深刻な問題はそれではなく、蚊によるジカ熱感染のことだった。症例が報告された直後、一時近所の店で虫よけが売り切れになった時期があった。ある人は、外出する人は、「歩く蚊よけ」になるまで真剣に薬を塗っていた。一方、他の人は無関心のまま普通通り過ごす人もいた。滞在期間中に、焦げくさい匂いを感じる日が多少あったが、それほど心配なく、またジカ熱にも感染せず、無事に帰国することができた。

#### 4. 目的の達成度や反省点

前年度までに、酸化スズと硫黄との反応またはセレン化スズの粉末の再結晶することにより、SnS と SnSe 薄膜結晶の作成に成功した。しかし、できた結晶はまだかなり厚いため、特徴的な光学特性が期待される厚みまで、薄くする必要がある。そのため、本年度は薄い層成長を達成するための反応条件の微調整と同時に、成長した結晶を薄くする方法について探索した。成長した結晶をアルゴン雰囲気の中で高温アニリングすると、厚さが大幅に減少し図3に示すようなサブナノメートルの薄膜になることを見出した。しかしながら、原子間力顕微鏡による測定から、表面に大きな凹凸が存在しており、高品質なさらに薄い薄膜の実現には、更なる条件の最適化が必要である。

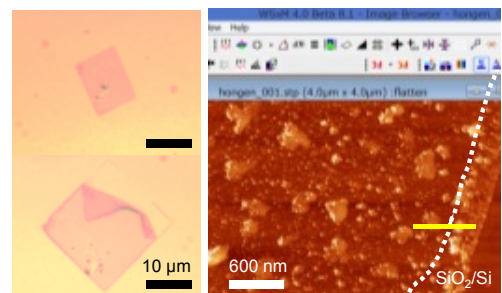


図3. 加熱処理で得られた薄膜の光学顕微鏡の像と原子顕微鏡の像。

#### 5. 今後の派遣における課題と目標

これまでほとんど報告がされていない、硫化錫 (SnS)とセレン化スズ (SnSe)の薄膜成長に成功した点は大きな進展である。その一方で、それら本質的な光学特性を測るためには、更に高品質な薄膜を作る必要がある。現在の反応条件はかなり激しく、形成された薄膜の品質を維持するにはアニール温度、時間および圧力の最適化が必要であり、よりマイルドな処理アプローチを探究すべきである。例えば、酸を用いた湿式化学反応では、低い温度で高い制御性でエッチングすることができ、高品質な薄膜が得られ可能性がある。このように、本研究を通して新しい原子層材料の薄膜成長に成功した点、高品質薄膜を得るための指針を得ることができた。