



令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)

2.5次元物質科学: 社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト

2.5次元物質の化学的応用 —光デバイスへ向けて—

A05班

機能創出班 研究代表者
(2.5次元材料による化学センサ・光
エネルギー変換デバイス)

上野 貢生

北海道大学
大学院理学研究院

先生のご専門は化学ですが、今のご研究をされているきっかけは何でしょうか？

上野 化学の中でもメジャーな合成ではなく、反応機構の解明や反応制御に、ずっと興味を持っていたんです。分子レベルでは確かに反応は制御できますが、ちょっとそこからマクロスケールになると、途端に難しい。例えばナノ粒子。ナノ粒子1個は単結晶ですけど、そこに界面活性剤がくっついたりすると、表面や界面の状態が変化してしまいます。そこを人間の力で制御して化学反応場を人工的に作るような、新しい化学をやりたかったんです。

同じ条件で実験していたはずなのに実際に反応させたとき、人によって全然収率が違うなんてことが普通に起きます。そういうのが気になっちゃうんです(笑)。だから綺麗な系で、しっかり物理化学を明らかにしたいなと思ったんです。

確かに。その手の実体験は沢山あります(笑)

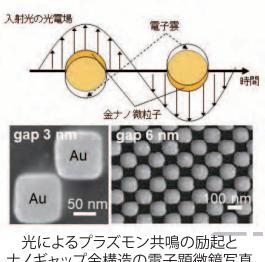
上野 例えば、マイクロ流路中においてAという液体とBという液体を反応させると、反応収率は流路の形が変わると比表面積や比界面積が変わることによって、見かけ上は変わります。でも本質的な量子収率は、変わらないんです。そこで、様々な物性が変化する表面・界面に 관심を抱くようになりました。また、学生時代に金を使って、リソグラフィーという微細な電極を作る技術を身に着けていました。ドクターを取得後異動した先が北大の電子科学研究所で、クリーンルームや微細加工技術用の電子ビーム露光装置などがあったので、これを使って自分の得意なナノ加工と表面・界面の物理化学を組み合わせたら、新しい展開が生まれるなど。それで始めたのが、プラズモンの化学なんですね。



2022年度前期総まとめゼミ後のバーベキューにて

プラズモンとはどういったものなのでしょう？

上野 プラズモンは下図のように、金属表面で自由電子を集団的に振動させることにより生じるナノスケールの光です。光を分子サイズまで小さくすることができるのと、光と物質の相互作用をかなり増幅することができます。また、プラズモンナノ構造には下図(左)の電子顕微鏡写真に示すように数nmのギャップという、非常に光が増強する場があります。ただその場にびったりと分子を持ってきたり、分子配向を揃えたりといった、分子を自在に扱うのって結構難しくて。そこで行き詰まつたんですね。なんとか制御できないかと考えていた時に、2019年の秋に突然吾郷さんから電話があり、この学術変革領域にお説いていただいたんです。TMDCは単層で発光を示し、プラズモンとの相互作用を探索する励起子として有用で、プラズモン構造よりも大きいので、必ずナノギャップに励起子が存在し、その配向制御もAu/WSe₂ナノ構造の電子顕微鏡写真に示しますように容易に行えるということで、光化学を研究している我々にとって、何とも魅力的な材料だと思ったのが第一印象です。



光によるプラズモン共鳴の励起と
ナノギャップ金構造の電子顕微鏡写真

5DM

そこから「2.5次元」へと、研究対象を移行されたのはどうしてですか？

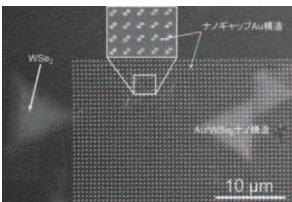
上野 プラズモンから2.5次元へではなくて、ちょうどやりたかったことが、この領域の先生方と一緒に研究することで初めて出来そうと感じたんです。例えば松尾さんの研究では、グラファイト構造の間にピラー構造があつて、そこにガス分子が取り込まれるんです。もし、中赤外に共鳴を有するプラズモン構造を組み合わせると、分子振動モードとプラズモンが、ダイボーラー/ダイボーラー相互作用によってカップリングして、スペクトルの変調が期待されます。それによって少数のガス分子を高感度に検出できる可能性が生じます。太陽光発電の展開を見据えているWSe₂とMoS₂のヘテロナノ構造も、プラズモンによってその電荷分離の効率を向上させたり、プラズモン増強を使って光吸収を増幅することが期待できます。金の電子をMoS₂のコンダクションバンドに注入してあげて、エネルギーの高い電子を使って水を還元して水素を発生させたりとか。

同時に、赤外のプラズモンとしてグラフェンのナノ構造も作っています。可視・近赤外波長域における励起子とプラズモンとの強結合だけではなく、TMDCの振動モードと赤外のプラズモンとのカップリングに関する研究を行っています。赤外のプラズモンによる光電場増強効果に基づいて、光学フォトンが増強され励起子や分子の無輻射失活速度を増大させることができ、化学センサーや化学反応制御に応用することができると期待されます。そのためにはグラフェンが必要ですし、TMDCと金ナノ構造を積層する技術やグラフェンを積層する技術も必要です。またグラフェンにインターラーションして分子を取り込む技術とTMDCを大面積で合成する技術も必要になってきて、それらはこの領域の先生方が研究されていらっしゃる内容です。

直接の研究ターゲットとして「2.5次元物質」があるのではない、けれど絶対に必要と。

上野 そうなんですよ。少し話がずれますが、この領域の名前の「2.5次元」で吾郷さんが考えた単語なんですけど、実はこの名前に最終的に決まる前に、物理の人の中には「2.5って意味のない次元だよね」と戸惑いがあつたみたいなんです(笑)。整数じゃない次元なんてありえないじゃないですか。でも私は強く同意しました。理由は、まさにこの「.5」っていうところなんです。私はプラズモンを研究してますが、これは二次元材料ではありません。でも二次元材料とプラズモンとのカップリングで新しい機能を出したいとか、新しい物理化学を理解したい。この「.5」の中に、二次元材料ってこの領域の人たちがみんなやってる研究と、私のような全く異なる研究内容を混ぜる。いや「積層する」、そういう意味合いを持たせたかったです。

つまり「.5」っていうのは、何でも置き換えることができるんです。機能だったり物質だったりインターラーションだったり。そこから私のような二次元材料の研究をパックグラウンドに持たない研究者にとって、非常に参画しやすい名前になったなあ、と。



Au/WSe₂ナノ構造の電子顕微鏡写真

先生が班長のA05班の領域でのポジションを教えていただけますか？

上野 私は光を使った化学センサーに関する研究、領域内の共同研究でエネルギー・デバイス、光デバイスを中心にしてさせていただいます。もう一つはエネルギー変換でも、発光とかあるいは太陽電池とか。MoS₂とWSe₂のヘテロの構造に、プラズモンを組み合わせて光電変換とか発光ですね。後はMoS₂っていう長沢さんや宮田さんとかがやられている遷移金属ダイカルコゲナideは、電子伝導体のエネルギーが割とネガティブなんですね。なので水素発生にすごい適しています。またガスのセンター、ガスは非常に高感度に濃縮したりしなければいけないんですけど、濃縮するのは松尾さんがやってるような、グラファイト構造の間にピラー構造があつて、そこにガス分子を取り込むことで濃縮が可能になります。そのような化学センサーを、大野さんのようなウェアラブルなフレキシブルデバイスに展開したいですね。

この領域のサブタイトルが「社会変革へのパラダイムシフト」ってある以上、社会に還元できるものを作るのが、領域の使命としてあると思うんですよ。そこを強く意識した班がA05班ですね。

最後に、今後の領域および先生のご研究の展望についてコメントをお願いします。

上野 改めて考えていくと今のテーマは、やはり2.5次元物質科学研究者全員の力を組み合わせることで、初めてできる研究だと思ってます。その中でも化学センサー、エネルギー変換、この二つに絞って高効率なデバイスを作る。そしてこの領域のサブタイトルにもある「社会変革に向けたパラダイムシフト」に向かっていけるように、頑張っていきたいなと思っております。

Interviewee



上野 貢生

北海道大学
大学院理学研究院
教授