（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和５年度　海外派遣研究員研究報告書

令和６年４月２２日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　工学部（工学研究所）
資格・氏名　教授　加藤　隆二
■本報告書の内容を公表することは了承しております。
（公表可の場合，チェック■すること）

令和５年度海外派遣研究員（短期Ｂ）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　短期Ｂ

２　研 究 課 題

人工光合成材料のレーザー分光に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦２０２４年2月２１日　～　２０２４年3月２４日

４　派　遣　先　　オーストラリア（メルボルン大学、ロイヤルメルボルン工科大学、ウロンゴン大学）

５　研 究 目 的

太陽電池や光触媒など人工光合成の研究開発が非常に活発に行われている。これらの技術は人類のエネルギー問題を最終的に解決する究極の技術となりえる。現在、多方面から人工光合成の研究が進められており、具体的には基本的な材料開発、デバイスの作成、社会実装、それらに加えて、機能発現機構の解明がある。機能発現機構の解明のために、様々な研究技術が駆使されてきた。そのなかでパルスレーザーを用いた時間分解分光が欠かせない技術である。この手法はレーザーパルスで瞬間的に人工光合成反応を開始させ、時間とともに変化する状態変化、生成物の発生を計測する技術である。実際には 10 兆分の 1 秒のレーザーパルスを用いて、1 万分の 1 秒までに起こる化学反応の様子を調べる超高速現象計測である。時間分解レーザー分光にはさまざまな種類があるだけでなく、それぞれの分光法において材料の特殊性に最適化した計測ノウハウがある。それについて最先端研究機関での取り組みを現場で測定を行いながら学ぶ。また研究の現状に議論を行いながら研究を進める。

（ 様式D－２ ）

6　研 究 概 要

広い意味での人工光合成技術は太陽光の光エネルギーを利用してエネルギーを得る技術である。例えば、光触媒技術として太陽光をエネルギー源とし、水と二酸化炭素を原料として、燃料である天然ガスの主成分であるメタンを合成する夢のような技術が研究されている。また、種々の太陽電池の開発も盛んにおこなわれている。このような人工光合成研究の一つの分野として人工光合成反応のメカニズムを解明することを目的とする基礎研究がある。世界中で多くの研究者が取り組んでいる。メカニズムの解明は人工光合成実現のためには遠回りのように見えるが、メカニズムの基礎的な理解が新しいアイデアを生む機動力となる。つまり実際の反応装置やデバイスの開発と基礎的なメカニズム解明が車の両輪となって研究が進んでいくのである。

反応メカニズムの解明には新しい実験技術の開発が必須となる。化学反応の途中を追跡するという科学者の夢の実現のため、パルスレーザーを用いた時間分解レーザー分光が盛んに研究されており、この技術の開発や応用研究に複数のノーベル賞が与えられている。人工光合成反応の解明にも種々の時間分解レーザー分光が活用されてきた。例えば、レーザーパルスを利用した過渡吸収分光では、瞬間的に光反応を起こさせた後、反応中間体や生成物の光吸収スペクトル（つまり色変化）を計測して反応機構を明らかにする手法である。また、時間分解蛍光分光は材料の光励起で発光することを利用して、光エネルギーが反応に使われていく道筋を知る技術である。一方、太陽電池では光が電気に変換されるので、光によって生じる電子の動き、つまり電気伝導度を計測する手法として時間分解光電導度法が用いられている。これらの計測装置は最先端の技術であるため、装置はほとんど市販されておらず、研究者が自ら装置を制作し、さらに計測ノウハウを蓄積して研究を進めているのが現状である。そのため、実際の実験技術の詳細については、発表される文献からの情報だけではわからず、実際に研究室を訪問し、実験を行うことで実験技術が身に付けることができる。また、逆に相手先が持っていない技術をこちらが持っていることもあり、このような情報交換で科学が発展する。

ウロンゴン大学の Attila Mozer 教授の研究室では色素増感太陽電池を対象に非常に計測感度が高い過渡吸収分光法を駆使した研究が進められている。過渡吸収分光において高感度化は非常にノウハウの必要な技術である。計測技術にとどまらず、色素増感太陽電池の研究についても意見交換を行う。メルボルン大学の Trevor Smith 教授の研究室では高感度の時間分解蛍光分光に加え、非常に時間分解能が高い過渡吸収分光に関する実験技術を開発している。特に時間分解蛍光について計測手法や解析手法について学ぶ。あわせて光機能性有機材料の最新の研究結果や時間分解蛍光を用いた分析技術について意見交換を行う。ロイヤルメルボルン工科大学の Yasuhiro Tachibana 教授の研究室では、最近注目が集まっているペロブスカイト太陽電池の研究開発を進めている。太陽電池内に生じる電子の検出のため時間分解光電導法の開発を行っており、その詳細について議論を行う。

7　研究結果・成果

はじめにシドニー郊外にあるウロンゴン大学を訪問した。まず色素増感太陽電池の色素合成の研究者である Pawel Wagner 博士にウロンゴン大学のメインキャンパスにある化学科の研究室を案内いただき、複数の研究者に面会し、研究室の運営や制度について説明をしていただいた。その後、2 ㎞ほど離れたところにある研究や産学連携を行っているイノベーションキャンパスに移動し、色素増感太陽電池において重要な部材である色素の合成とその評価方法について、研究室の設備の紹介と併せて説明いただいた。その後、Attila Mozer 教授が現在進めている色素増感太陽電池の研究について議論を行った。翌日の午前中、色素増感太陽電池の反応機構に関するプレゼンテーションを行った。特に電子注入後のジェミネート再結合機構について、詳しく議論を行った。その後、Attila Mozer 教授のレーザー分光研究室において、先生が開発されたサブナノ秒時間分解高感度過渡吸収分光装置について説明いただいた。実際に装置を動かして色素増感太陽電池の計測を行い、装置の性能と高感度化のノウハウを多く学んだ。その中でもフラッシュランプの技術は秀逸であり、今後の研究に非常に有益な情報を得た。

2 月 28 日にシドニー経由でメルボルンに移動した。翌 29 日からメルボルン大学化学教室の Trevor Smith 教授の研究室に滞在した。メルボルン大学はオーストラリアで 2 番目に古い大学であり、市内の中心部に広いキャンパスを持つビクトリア州の中心的な大学である。現在、非常に多くの留学生が滞在しており、実際、化学科では約半分の学生が留学生であるとのことである。滞在した化学教室はおよそ 20 名の研究スタッフがおり、各分野で非常に活発に研究を進めているのが印象的であった。訪問した週から新学期が始まっており、新入生がキャンパスに溢れていて、非常ににぎやかであった。

化学教室のセミナーに呼ばれ、これまで行ってきた人工光合成材料のレーザー分光について研究の概略をおよそ 50 分程度、プレゼンテーションした。このセミナーで化学教室の物理化学分野の研究者と知遇を得て、その後、滞在中に研究室を訪問して意見交換を行う機会に恵まれた。まず、ナノ微粒子のサイエンスで世界をけん引する Paul Mulvaney 教授に呼んでいただき、研究室を訪問した。先生とはナノ粒子サイエンスの現状とこれから、そして日本との共同研究について意見交換を行った。また、ナノ微粒子を用いた太陽エネルギー変換研究の可能性について議論した。また、Paul Mulvaney 教授と一緒に研究されている James Hutchison 准教授には開発中の装置の詳細について、その現状と狙いについて紹介いただき、詳細について議論を行った。光共振器内における化学反応を計測する自作の分光装置を駆使した最先端の研究を進めており、非常に印象的であった。

Trevor Smith 教授の研究室は超高速分光とそれを顕微鏡の下で行う顕微分光の研究において世界的に有名な研究室である。この数年 Exciton Science という複数の大学が参画している大きなプロジェクトに参画しており、有機物質の中の励起子について、超高速過渡吸収分光と時間分解蛍光分光を駆使してアプローチしている。研究室は現在 5 名ほどの小さな所帯ではあるが、学内の他のスタッフとの共同研究が

〔７　研究結果・成果（つづき）〕

盛んであり、実質的には3名のスタッフで10名程度の研究者が強力なグループを組んで研究を進めていた。少し驚いたことに、ほとんどの博士研究員、学生が留学生であり、ニュージーランド、カナダ、ドイツ、中国、インド等の国から集まって国際的な環境で研究が進められていた。

研究室で中心的な課題は数年前に整備されたフェムト秒時間分解過渡吸収分光装置である。特に注目するべきは二つのフェムト秒レーザーを同期発振させることである。これによりフェムト秒の時間領域のみならず、ミリ秒の時間領域まで、励起光可変で観測光も可視から中赤外まで自由に選択できる世界最先端のスーパー過渡吸収装置が構築されていた。現状では観測光として中赤外線の発生とそれを用いた過渡吸収分光の装置が立ち上がっており、さらに近赤外線の発生について検討を重ねている段階であった。

時間分解蛍光分光については、広く用いられている時間相関単一光子計数法によって計測が行われていた。通常の装置を異なっているのは励起レーザー部分であり、420nmから250nm付近まで励起光の波長を選べるところにある。このような計測技術開発とそれを支える実験ノウハウの積み重ねが大切であることを改めて実感した。検出装置の改良も進められており、通常の装置は単一観測波長の計測であるため、波長依存性、つまりスペクトル計測には非常に時間がかかることが課題であった。これを克服するために計数光子を干渉分光計に通すことで時間挙動だけではなくスペクトル情報を同時に得る技術を導入していた。この最先端の装置を用いて、食品分野を含む様々な発光分析化学が展開されていた。これらの装置を実際に使わせていただき、人工光合成材料について自分の研究室ではできない計測を行った。発光挙動の励起波長依存性に注目し興味深い結果を得た。高度な解析方法も教えていただき、この結果を論文として発表することとなった。さらなる進展として超高速発光分光計測について計測可能性を議論し、これからの共同研究ですすめることとなった。

メルボルン郊外（トラムで40分程度）にあるロイヤルメルボルン工科大学のYasuhiro Tachibana教授の研究室を訪問し、時間分解マイクロ波光電導度法の実験技術について意見交換を行った。とくに検出器の直線性やキャビティの設計など、実地に装置を扱いながら議論しなければわからない多くのノウハウについて情報交換を行った。さらにペロブスカイト太陽電池や半導体ナノ微粒子の作成法について説明をしていただいた。

今回、約一か月という短い期間ではあったが、オーストラリアで最先端研究を進めている気鋭の研究者に会って様々な議論をすることができた。そして研究室に入り、その研究を支える実験装置で実験をさせていただき、文献情報では決して得られない実験のノウハウを体験することができたことは今後の研究に非常に役に立つと信じている。また今回の滞在で得た人間関係をもとに共同研究を進められることとなった。このような滞在の機会を与えていただいたことに感謝したい。

以　　上