

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:幾原 雄一

所属・職:東京大学大学院工学系研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 主任研究員

調査研究題目:工学の分野に関する学術研究動向及び学術振興方策－工学と計測および  
界面科学の境界領域における新展開－

キーワード:電子顕微鏡、界面、粒界、転位、

令和4年度には以下の会議に対面にて参加し、調査活動を行った。以下、各会議についての調査報告を行う。

・2022年5月10-13日:日本顕微鏡学会第78回学術講演会(福島県郡山市)

調査報告:本会議は、顕微鏡に関する装置、解析手法、材料科学、生物材料に関する総合的な国内会議であり、福島県のビッグパレットふくしま(郡山市)で開催された。今回の学術講演会のテーマは、「観る喜び、極める喜び、分かち合う喜び」であり、観察による発見、最新テクノロジーとの融合および密な議論を目標として開催された。一般講演発表を中心として、最新の研究動向をシンポジウムとして取り上げるとともに国際若手シンポジウムも開催された。市民公開講座で2016年ノーベル賞受賞者の大隅良典博士による講演も行われた。

シンポジウムで取り上げられた最先端電子顕微鏡法に関するタイムリーな内容として、東京大学と日本電子(株)が中心に進めている分割型検出器の開発、微分位相コントラストによる高分解能での電場観察が注目されていた。この新手法は今後の半導体デバイスを含め、機能材料の多くの分野で応用されることが期待できる。また、東京大学からは、高速スキャンを用いた原子分解能STEM法を用いた原子移動のその場観察に関する成果についても報告され、注目されていた。九州大学のグループは、ナノメートルオーダーの超微粒子を原子分解能で観察し、原子分解能のEDSマッピング法により組成と構造を同時に観察する手法について報告した。この手法も粒子解析に今後広く普及するものと思われる。また、産業総合技術研究所(AIST)のグループは、モノクロメーターを用いたEELS測定を駆使し、ナノスケールで同位体の識別を行った結果について報告しており、新たな計測手法として注目されていた。JFCCのグループは、位相シフト電子線ホログラフィーにより、窒ガリウム結晶中のキャリア分布の可視化を高分解で達成した結果について報告していた。本手法も今後の半導体の解析手法として期待されている。格子欠陥の構造解析に関する研究では、島根大学のグループが、金属の格子欠陥挙動のその場観察の結果について、転位ループの挙動に注目した興味深い成果を発表していた。また東北大学のグループは、収束電子回折

法を用いて、界面の局所ひずみを高精度に計測した結果について報告した。この手法は界面ひずみを高分解能で定量的に解析することができる手法として注目された。

・2022年8月7-12日:ゴードン会議(アメリカ・マサチューセッツ州サウスハドリー)

調査報告:セラミックスの基礎科学に関するゴードン会議が、マサチューセッツ州の Mount Holyoke Colleague で開催された。セラミックスの特性の多くは、粒界や界面の微細構造に依存するので、その相関性を明らかにする必要がある。近年、さまざまな実験的および理論的ツールが登場して、セラミックスにおいてもマルチスケールのメカニズム解明が可能となりつつある。本ゴードン会議は、1954年から開催されている歴史ある会議であるが、今回は、アディティブマニュファクチャリング、材料設計の高速化、階層材料の挙動、過酷環境下での熱機械応答の理解、その場での実験(透過型電子顕微鏡を含む)などについての発表がなされた。ここでは、特に界面や粒界が関係した発表について報告する。

東京大学のグループは、最新のMEMSホルダーを駆使することによって、原子レベルでセラミックスの破壊や変形現象を観察した結果について報告した。その結果、き裂先端からの転位放出の挙動や破壊進展の挙動が引張方向によって変化することなどを報告した。また、電子線誘により粒界移動を促進させ、粒界移動の原子レベルの観察結果について発表したが、本結果はセラミックスの焼結現象を理解するための知見として重要である。また、フロリダ大学のグループは、4次元X線回折法を用いる粒成長挙動の解析を、ローレンスリバモア国立研究所のグループは、粒界原子構造の第一原理計算を行い、粒界から転位が発生する様子について報告した。この粒界計算は、構造のみならず転位放出の動的挙動に関する内容であり、その力学的特性にも直結するため、多くの参加者から注目を得ていた。さらに、カルフォルニア大学アーバイン校のグループは、セラミックス粒界に偏析にする格子欠陥の挙動を系統的に計算し、格子欠陥の種類と電気特性の相関性について議論していた。粒界偏析を考慮する上で、偏析元素のイオン半径と電気的中立条件が重要であるが、その条件は酸素分圧に大きく依存することなどについて議論されていた。また、カーネギーメロン大学のグループは、電子セラミックスにおける格子欠陥と格子ひずみの相関性について、系統的に計算した結果について示した。その際複数の格子欠陥が同時に存在する場合も想定し、界面における電気的中性条件が最も重要であることも報告された。セラミックスの粒界に関する構造解析についての研究は、上記以外にも、カルフォルニア大学デイビス校、カルフォルニア大学サンディエゴ校、ドイツのユーリッヒ研究センターなどからの発表もあり、当該分野の現状が把握できた。

・2022年9月13-16日:日本セラミックス協会第35回秋季シンポジウム(徳島県徳島市)

調査報告:日本セラミックス協会秋季シンポジウムが徳島大学常三島キャンパスで開催された。本シンポジウムではタイムリーなテーマをピックアップし、先進的な構造科学と分析技術、焼結技術の新たな展開、マテリアルデザイン、など24のセッションでの講演があった。今回は、界面工学とナノ計測に関するテーマを中心に調査を行った。

京都大学のグループは、第一原理計算と機械学習を用いた原子間相互作用のモデリングと結晶構造探索の内容で発表し、機械学習により材料設計がある程度のレベルに達成していることを示した。しかし、本手法はまだ限られた単純な結晶構造にしか適用できず、構造が複雑な複合セラミックスへの適用にはまだハードルが高いのが現状である。JFCC のグループは、やはり第一原理計算を用いてケイ化物結晶中の熱平衡点欠陥濃度の解析を系統的に行い、これまでの実測値ともかなり合致するという結果を示した。今後の熱力学と第一原理計算の結果との融合が期待される。高輝度光科学研究センターのグループは、機械学習ポテンシャルと逆モンテカルロ法を組み合わせた固体電解質の構造解析を行い、機械学習が電池材料の設計指針として有効なことを示した。さらに JFCC では、ゼオライトなどの電子線に非常に敏感な材料の観察に明視野走査透過電子顕微鏡法が有用なことを示した。セラミックスの中にはゼオライト以外にも電池材料や触媒など電子線に弱い材料が多数存在するため、本手法の今後の応用が大いに期待できる。日本原子力研究開発機構のグループは、放射光高エネルギーX線回折を利用した強誘電体のナノスケール構造解析を、神奈川県立産業技術総合研究所のグループは、放射光を用いたペロブスカイト型酸化物の負熱膨張メカニズムの解明に関する発表を行った。いずれも放射光をセラミックスの構造解析に利用した研究成果であるが、X線の場合平均情報しか得られず、界面や粒界のナノ計測には電子線による解析の方が有利であることが議論された。名古屋大学のグループは、マンガン窒化物の超高压合成と高压その場観察を、JFCC のグループは、エポキシ-無機ハイブリッド材料のSTEM-EELS 取得の最適条件に関する研究成果を発表し、EELSとSTEMの融合の有用性が示された。

・2022年9月21-22日：日本金属学会2022年秋期(第171回)講演大会(福岡県福岡市)

調査報告：日本金属学会秋期講演大会が福岡工業大学で開催された。ここでは、界面工学やナノ計測を中心とした公募シンポジウムについて調査した。従来の材料研究は、材料内部のバルク領域の平均的な構造と巨視的特性を主に対象としていたが、最近のナノ計測技術や計算科学の進歩により、結晶欠陥の電子・原子レベル構造に関する情報が定量的に得られるようになってきている。これにより、多くの先進材料において、点欠陥や粒界、界面、転位などの結晶欠陥が材料特性発現の起源であることが明らかになっている。そこで、結晶欠陥の電子・原子レベル構造と材料機能の関係について理解を深め、結晶欠陥の機能を積極的に利用した新材料開発を行うことが重要になってくる。本シンポジウムでは、熱、電場、磁場、光、力などの外部刺激下での機能コアの特性がどのように変化するのかについて多角的な面から議論された。

計算では、京大のグループが、圧力下における機械学習ポテンシャルを用いた結晶構造探索および虚数振動モード解析に関する発表を行い、新しい材料探索法として注目された。また、産総研からは、局所エネルギー・局所応力の第一原理計算によって、粒界の原子構造や偏析構造を定量的に理解する手法の紹介があった。局所応力というコンセプトで粒界原子構造を理解する新しい手法であり、今後の展開が期待できる。また、界面工学を応用したプロセス研究において、JFCCのグループが、耐熱酸化膜中の拡散現象について、高

温下酸素ポテンシャルを変化させることで、定量的に解析した結果を示した。酸素ならびに添加したドーパントが、酸素分圧によって相互的な対抗拡散を示す現象を利用して、粒界の拡散係数を定量的に導出した成果は非常に注目された。名古屋大学のグループは、種々のセラミックスの転位のコアが光によって再構成する現象を第一原理計算によって明らかにし、転位移動度に関する光の影響について議論した。東京大学のグループは、最近開発されたSTEMの高速スキャンを用いて、原子レベルの動的観察を論じるとともに、連続的にフォーカスを変えて像を再構成する 3 次元観察法について提案した。本手法は、原子レベルで界面の原子構造情報を測定できる唯一の方法であり注目された。

・2022 年 10 月 9-14 日:MS&T22 国際会議(アメリカ・ペンシルベニア州ピッツバーグ)

調査報告:界面は、多結晶材料や複雑な材料システムの微細構造進化において重要な役割を果たしている。多くの工学的特性は、例えば粒界構造に依存する機械特性など、界面特性に支配される。電子材料においては、粒界や界面はキャリア移動度に重大な影響を与え、多くのセラミックスでは、界面は電荷付きコアと隣接する空間電荷を含み、SOFC の電解質やリチウムバッテリー用の固体電解質など、イオン伝導体の分野での応用において重要な課題がある。本シンポジウムでは、界面の熱力学、運動学、および構造、それに伴う微細構造進化および材料特性に焦点を当てている。これらの問題には、実験的および理論的なさまざまな長さスケールでの問題に対処する貢献が必要だが、電池、燃料電池、強誘電体、光電変換材料、触媒、センサーなどの機能性設定における界面構造、化学、空間電荷、および各特性についての議論が目的である。また、本シンポジウムでは、セラミックス材料における界面に関する現在のパラダイムと研究の新しい方向性を特定することに重点を置いたパネルディスカッションが行われ、以下のトピックスが多角的に議論されていた。

- ・界面の熱力学的安定性と運動学的安定性
- ・微細構造進化の熱力学と運動学:焼結、粒子成長、異方性
- ・界面構造と構造-物性関係を予測するための理論、モデリング、データ分析、情報科学方法論
- ・界面に適用される高度 (in-situ) 解析技術
- ・スペースチャージの基礎:分離、吸着、電子構造
- ・界面が特性に及ぼす影響:イオン伝導体、触媒、複合材料、センサー
- ・界面の熱力学的対運動学的安定性

・2022 年 11 月 3-6 日:日本顕微鏡学会第 65 回シンポジウム(岡山県倉敷市)

調査報告:標記日本顕微鏡学会シンポジウムが、川崎学園・川崎祐宣記念講堂にて開催された。本シンポジウムでは、7つのタイムリーなセッションを設定し講演を行ったが、ここでは、界面工学や材料ナノ計測と関係の深い、Network Tele-Microscopy、FIB 技術が生み出す極微試料作製法の変化、電子顕微鏡像コントラストから読み解く三次元ナノ計測の3つのセッションについて調査した結果を記す。

Network Tele-Microscopy のセッションでは、大阪大学、川崎医科大学、日本電子が連携して、超高圧電子顕微鏡の遠隔操作が可能なシステムを構築している旨の発表があった。大阪大学の超高圧電子顕微鏡は 3000kV の高圧も達成できる我が国唯一の電子顕微鏡であり、外部機関からの使用のニーズも多い。これに対応するため、インターネットを駆使したシステムで外部からの操作がスムーズに行えるようにしたという発表があった。このような電子顕微鏡ネットワークが拡大すれば、先端電子顕微鏡を有しない研究機関であっても遠隔操作で使えることになり今後の当該分野の活性化が期待される。FIB 技術が生み出す極微試料作製法の変化のセッションでは、大阪大学と日立ハイテクのグループが、最新 FIB によってダメージの少ない良質な TEM 薄膜試料が作製できることを示した。これより得られる像質は通常のイオンシニング法によって得られる試料の像質と比較しても遜色ない上、複雑形状も作製できるので有利である。また、JFCC は FIB を用いた三次元構造の可視化についての発表を行った。この手法は FIB で試料を削りつつ像を再構成する手法であるが、簡便な三次元観察手法として普及しつつある。最後に、電子顕微鏡像コントラストから読み解く三次元ナノ計測のセッションでは、試料ホルダーの形状を加工して、三次元観察を可能とする方法、STEM におけるスキャン速度を高速にするとともにフォーカスを連続して変化させることにより、原子レベルの三次元像が構築可能なことが発表された、後者の手法は、高速スキャンが可能であるため、原子レベルでのその場観察も可能となるので大きなメリットがある。大阪大学からの発表は、超高圧電子顕微鏡法を用いて、厚い試料を観察できることを利用した方法であるが、高加速電圧による試料のダメージが問題である点について議論された。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:梅原 徳次

所属・職:名古屋大学大学院工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 主任研究員

調査研究題目:工学系科学分野に関する学術研究動向及び学術振興方策（機能性表面の創成と評価における新たな潮流と展開）

キーワード:機能性表面、超低摩擦、超耐摩耗、持続型エネルギー取得

カーボンニュートラルを目指した持続型社会の形成が求められ、その実現において新たな機能性表面の開発及びその効率的探索のための評価手法の開発は急務の課題である。機械工学の分野では、エネルギーの有効利用だけでなく、持続的獲得のために機能性表面の研究が進められている。

エネルギーの有効利用としては、機械の駆動部を支持する摩擦面において省エネ・長寿命のために超低摩擦・超耐摩耗表面が求められる。また、エネルギーの持続型取得のためには、地熱発電における熱水から析出するシリカの蒸気タービン翼や配管内への付着抑制機能性表面が研究されている。

機能性表面の創成と評価の 2022 年度における学術動向をまとめる。

超低摩擦・超耐摩耗表面の創成について、カーボン系硬質膜を中心として、FCVA とスパッタリングやイオンビーム等を用いた複合成膜において、窒素などのガスイオンの導入として、カーボンターゲットに吹きつけ供給する方法が提案され、窒素含有量と硬さなど、トレードオフの関係であった問題の解決方法が提案された。潤滑油中においては、酸化グラフェン粒子や Ti ナノ粒子等の固体ナノ粒子や添加剤の提案がなされ、摩擦時において機能性表面が必要に応じて生成し、かつ長寿命を実現するための方法が模索されている。

地熱発電に代表される持続型エネルギー取得のための機能性表面として、カーボン系硬質膜に窒素や水素を含有し、かつカーボンの骨格構造の結合形態を制御した硬質膜が提案され、模擬熱水中でのシリカ付着試験において、従来の金属材料と比較し著しく付着量を低減できることが報告されている。対照実験により、骨格構造の変化に伴う電子の挙動の重要性が明らかになり、基礎実験での科学的解明が待たれる。

新しい動きとして、従来の摩擦面は受動的な摩擦面であり、繰り返し摩擦により優れた低摩擦と耐摩耗の表面を得ていたが、それに対し積極的に摩擦面を能動的に変化させ摩擦の増加を抑制する能動型摩擦面のコンセプトが提案された。具体的には、空気圧を利用し形状変化する能動変形(Morphing)表面を試作し、遺伝的アルゴリズムによる AI 技術組み合わせることによる提案があり、モデル実験では従来にない摩擦条件対し最適な機能性を発現することが実証されている。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:永田 晴紀

所属・職:北海道大学大学院工学研究院・教授

区分:工学系科学専門調査班 主任研究員

調査研究題目:工学系科学分野に関する学術研究動向及び学術振興方策 –航空宇宙工学および関連分野における新たな潮流と展開–

キーワード:宇宙輸送工学、ロケット、超音速、SDGs

航空宇宙工学の中で特に宇宙輸送工学研究分野を重点的に調査した。宇宙輸送工学研究の全体的な動向としては、SDGs の意識の高まりと、商業宇宙利用を意識した低価格化および小型化が挙げられる。再使用化の動きも強まっており、液体ロケットでは再使用化に関連する研究(疲労寿命解析手法や軌道上推進剤充填技術等)が活発化している。コスト削減のため、上段ロケットでヒドラジン系燃料、四酸化二窒素、硝酸等の代表的推進剤をより毒性が低いものに代替する研究も目立つ。固体推進剤ロケット(固体ロケット)分野では小型宇宙機用マイクロスラスタ、ノズル浸食の機構、3D プリンタによる固体推進剤成形等の研究が見られた。過塩素酸アンモニウムを酸化剤に用いる固体ロケットは SDGs の観点から避けられる傾向にあり、再使用にも向かないため、固体ロケット分野の研究は減少傾向である。

電気推進は基礎物理機構の研究と実用化研究の両面で活発である。無電極電気推進や磁気ノズルに関する研究が多く見られる一方で、1 kW を超える大規模な電気推進の開発計画も多く出て来ている。空気吸い込み機関では亜音速域のラムジェットと超音速域のスクラムジェットを兼ね備えるデュアルモードエンジンの研究が進んでいる。

今後の実用化を目指す宇宙輸送技術としてはハイブリッドロケットとデトネーションエンジンが挙げられる。デトネーションエンジンは活発に研究されており、特に回転デトネーションエンジンが注目されている。実機開発が進む一方で燃焼場のダイナミクスの多くが未解明で、数値計算による燃焼流れ場の解明が多く見られる。我が国では S-520 サウンディングロケットを用いて宇宙環境で RDE の動作実証に成功したが、この成果は国際的にも高く評価されており、米国航空宇宙学会から 2022 AIAA Pressure Gain Combustion Best Paper Award が授与された。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:渡部 平司

所属・職:大阪大学大学院工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 主任研究員

調査研究題目:工学分野に関する学術研究動向及び学術振興方策ー表面界面科学を基軸とした先進デバイス工学の新たな潮流と展開ー

キーワード:半導体集積回路、パワーエレクトロニクス、光電子融合素子、量子デバイス

経済安全保障の観点から各種半導体デバイスの重要性が再認識され、半導体集積回路やパワーエレクトロニクス分野に注目が集まっている。前者はパソコン等の情報通信機器への利用に留まらず、様々な電化製品にも欠かせない。また、パワーエレクトロニクスは省エネ社会の発展に不可欠である。令和4年度は、半導体デバイスに関する国内国際会議に出席して各技術領域の研究開発動向を調査すると共に、当該分野を支える人材育成の状況についても調査した。

集積回路技術分野では、2次元材料の探索研究が進められているが、デバイスの性能実証や信頼性の確保を含め、本格的な実用化のためには材料科学に立ち返った中長期的な取り組みが必要だと思われる。一方、国内での先端半導体の生産体制の再構築を目指した大型プロジェクトの発足が相次ぎ、関連学会では盛り上がりを見せている。しかし、1990年代以降、産業界では半導体分野の研究者が減少し、大学でも半導体デバイスの研究を活動の中心に据えた研究室が減っており、当該分野の復興を担うべき若手人材が不足している。関連する学協会では、若手人材育成にも積極的に取り組んでいるが、研究者人口の増加には時間を要するであろう。

パワーエレクトロニクス分野では、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)等の新材料の導入が検討され、鉄道や電気自動車へのSiCパワーモジュールの導入が始まったが、材料物性から期待されるデバイス性能には未だ程遠い。特にMOS型電界効果トランジスタの移動度劣化は顕著であり、MOS界面の特性改善技術に関する研究が精力的に進められている。一方、GaNパワーデバイスについては、移動体通信基地局用途の高周波高出力デバイスに加えて、縦型デバイスの基礎検討が進められている。しかし、GaN半導体は不純物ドーピングや各種のプロセス技術が未成熟であり、さらなる研究開発が必須である。現在、パワーデバイス領域は日本が学術的・技術的な優位性を維持しているが、欧米や中国での重点化が進んでおり、継続的な支援と戦略的な人材育成が望まれる。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名: 鵜 心治

所属・職: 山口大学大学院創成科学研究科・教授

区分: 工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目: 建築計画および都市計画関連分野に関する学術研究動向ー持続可能な都市政策とデザイン手法の潮流ー

キーワード: 都市計画、コンパクトシティ、持続可能性、建築学

人口減少社会下における我が国の都市の持続可能性については、様々な議論がなされている。特に、2015年に国連サミットで採択されたSDGs(持続可能な開発目標)17の目標に向けた取り組みも活発化してきている。建築計画、都市計画分野においては、低密度で拡散的に広がった市街地を一定程度の密度で集約し、コンパクトな市街地構造を目指し、公共交通で拠点間を結ぶ「コンパクト・プラス・ネットワーク」の理念が志向されている。このような社会的、構造的課題を抱えてきたアメリカ、ヨーロッパの先進主要国では、既に、都市の持続可能性を追求しながら都市形態としてのコンパクト性や都市の成長管理に関する研究が進んでいる。都市を計画・デザインする手法の開発に留まらず、成熟都市社会においていかにマネジメントするかという課題に対応したものである。本調査研究では、このような背景から、都市の計画とデザイン、マネジメントの研究に関する動向調査を行った。

2022年度日本建築学会大会梗概集(都市計画部門 566題)では、コロナの影響を受けたテーマに関する研究集会や協議会が多かったが、近年の社会情勢を反映させた「新たな価値を実現させる都市・都市計画の枠組み」、「ウォークブル都市」、「縮小時代の都市計画」といった、テーマに回帰してきた。具体的な個別の研究発表のテーマは、「ポストコロナと観光政策」といったテーマが新しく登場したものの、その他のコロナ関連のテーマはひと段落した様相である。また、「災害リスクや安全安心」に関するテーマが増加傾向にあると同時に、例年同様に、立地適正化計画など都市縮小時代における都市計画のあり方が問われており、コンパクトシティや都市再生、まちなか再生とリノベーション等の研究に興味が大いようである。広場やストリート、低未利用地を暫定的に活用し、地域活性化やエリアマネジメント等へ発展させていながら都市再生を実現していこうとする動きは依然、若手研究者を中心に関心が高い。

2022年度日本都市計画学会全国大会(131題)では、ここ2年のコロナ禍の影響を受けた研究テーマが少なくなり、例年と同様に、海外事例によるエリアマネジメント手法、立地適正化計画の策定手法、都市の拠点形成論、公共交通計画と管理、住宅団地の再生等の研究論文が発表されている。しかし、「感染症にもレジリエントな未来の都市像とは」というテーマで研究集会が行われていることは興味深い。

今後の建築計画、都市計画分野におけるSDGs,17の目標に向けた研究に期待できそうである。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:大河内 美奈

所属・職:東京工業大学物質理工学院・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:バイオ機能応用およびバイオプロセス工学関連分野に関する学術研究動向  
ーバイオセンシング・生体分子機能工学分野の新たな潮流と展開ー

キーワード:バイオプロセス、バイオセンサ、ナノバイオテクノロジー

「バイオ機能応用およびバイオプロセス工学」関連分野は、化学と生物の融合領域、ナノとバイオの融合領域とも密接に関連し、分子レベルでの生命現象の理解と制御、バイオ機能を活用した機能性材料の創製、環境・医療分野への展開が精力的に進められている。本分野の研究動向は大きくは変化していないが、データ駆動・AI 駆動によるデジタルトランスフォーメーションを活用した研究・技術開発が広く注目され、当該分野においてもタンパク質構造や細胞のシミュレーション、バイオ生産プロセス、持続可能な食糧生産技術、グリーントランスフォーメーションなどへの展開やロボティクスを含めた支援技術の開発が一層進められている。また、気候変動問題を含む地球規模課題への対応についても、微生物群解析及び環境制御技術の開発による生産システムの開発や温暖化係数の高いガス排出削減などに関する大型研究開発プロジェクトが進められ、「デジタル化」と「グリーン成長」が潮流として推進されている。

コロナ禍を通して、リモート医療や在宅でのセルフメディケーションに必要な Point of care testing による疾患マーカー検査やウェアラブルデバイスによる常時健康モニタリングの重要性がさらに認識された。生体分子認識素子として改良された抗体、酵素、DNA、アプタマーなどを、センサ上にナノ界面制御により固定化することで、迅速、簡便、超高感度なシグナル計測が行われている。また、特有の電子的、光学的特性を有する2次元材料の利用も進み、超高性能マイクロ・ナノセンシングシステムが開発されている。ウェアラブルデバイスにおいても超小型化が求められ、体液中の糖などを利用するバイオ燃料電池による発電と体液中の生化学的パラメーター計測の両方を行う自己駆動型バイオセンシング技術の開発も目覚ましい発展を遂げており、安全性や製造コストを見据えた生体分子認識素子のナノ材料界面およびナノ反応場の設計が改めて進行している。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:小野 行徳

所属・職:静岡大学大学院工学領域・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:電子デバイスおよび電子機器関連分野に関する学術研究動向-強相関電子系の物理・量子情報処理技術を中心に-

キーワード:強相関電子系、量子ビット、2次元層状物質、MOSトランジスタ

2018年にM.I.T.のグループにより報告されたねじれグラフェンによる超伝導発現に端を発する2次元物質系の強相関電子系の研究は、様々な広がりを見せている。機構解明に関しては、スピン三重項の寄与が明らかとなりつつあり、また、応用を見据えた研究に関しては、 $WSe_2$ 上に形成されたbilayerグラフェンの超伝導が安定化しかつ転移温度の上昇などが報告され、着実な進展がなされている。遷移金属カルコゲナイド系における高温動作実証を受けた、励起子(電子・正孔対)のボース・アインシュタイン凝縮、および超流動に関する研究に関しては、 $MoSe_2-WSe_2$ 系から応用上重要であるSiGe系などを含む他の材料系を用いた研究へと広がりを見せている。これに関連した2重層系のクーロン・ドラッグに関しても、これまで報告されていた標準理論に加え、熱電効果に起因するモデルが提唱され、検証実験が進むなど、新たな展開を見せている。総じて、2次元層状物質を基盤とした強相関電子系に関する研究は、基礎物理的な検討に加え、応用を見据えた検討が増加傾向にある。

量子コンピュータに関しては、誤り訂正技術が格段の進展を見せた。当該分野においては、中国における技術の進展が無視できない。超伝導量子ビットに関しては、100量子ビットを超えるゲート型が報告された後も着実な進展を見せている。誤動作の原因となるチャージトラップの起源やノイズ発生機構についての理解も進んでいる。一方、スピン量子ビットに関しては、シリコンを用いた3ビット動作が世界の3機関(うち、一機関は日本)で報告された後の大きな進展はみられていない。超伝導量子ビットを制御するためにはMOSFET集積回路との配線が必須となるが、室温で動作させるMOSFET回路からの熱流入が問題となっている。このため、低温動作MOS回路の研究が活発化している。当該分野においては日本のプレゼンスも高く、研究成果が出始めている。特に低温でのサブスレッショルドスイングの飽和機構に関する理解の進展が見られた。

新規デバイスに関しては、2次元層状物質の集積回路応用に関する調査を行った。配線とのコンタクト抵抗が大きな問題の一つとなっており、一定の進展(ショットキ障壁生成機構の理解など)は見られるものの、実用化にはまだ時間がかかるものと考えられる。シリコンMOSに代わる、あるいはこれを補完するデバイスの開発は、依然として基礎検討、原理実証の段階と言える。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:佐々木 浩一

所属・職:北海道大学大学院工学研究院・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:プラズマ応用科学関連分野に関する学術研究動向ーガス転換プロセスにおける新たな潮流と展開ー

キーワード:プラズマ, ガス転換, 触媒反応, 再生可能エネルギー

低炭素社会の実現に関連し、再生可能エネルギーを用いてガス転換プロセスを電化する技術が活発な研究テーマになっている。これは「Power-to-X」という言葉に代表される考え方であり、Xとして化学ポテンシャルの高い物質(水素, アンモニア, メタノール, 炭化水素など)が想定され、原料物質として二酸化炭素や水などが想定されている。すなわち、電力を化学エネルギーに転換して貯蔵し、再利用しようとする考え方である。このような中において、電化技術の一つの形態として、ガスをプラズマ化する方法が活発に研究されるようになってきた。ある研究者の言葉を借りれば、このテーマに関する現状は「高度成長期」にあると評されている。

安定で化学反応性の低いガスであっても、それをプラズマ化すると、プラズマ中の電子と原料ガスが衝突し、解離が生じることにより、ラジカルが生成される。このようにして生成されたラジカルは、原料ガスと比較して格段に高い化学反応性を持ち、ガスのままでは進行しない反応を生じさせる。この効果は特に低温において顕著であり、熱平衡の場合には高温を必要とする反応を低温で生じさせる点に特徴がある。

触媒反応は、触媒表面への分子の吸着、触媒表面での反応、および、反応生成物の脱離の3ステップで進行するが、吸着過程が律速段階である反応プロセスが多い。例えば、窒素と水素を原料としてアンモニアを生成するプロセスでは、窒素分子の解離エネルギーが大きいことに起因して、窒素分子の解離吸着が律速段階となる。この時、気相をプラズマ化すると、窒素分子の一部が解離して窒素原子が生成される。窒素原子は高い吸着確率を持つので、触媒温度が低温の場合でも、アンモニアの生成が可能になる。また、最近では、ラジカルに加えて、振動状態が励起された分子が触媒表面において高い吸着確率を有することが報告され、高い注目を集めている。プラズマの場合には、分子の振動温度(振動励起状態の密度分布を温度であらわした量)がガス温度よりも顕著に高いことが従来から知られている。窒素プラズマを例にすると、窒素分子に対する窒素原子の密度比は多くの場合 0.1%より小さいが、基底状態窒素分子に対する振動励起状態窒素分子の割合は 10%を超える場合がある。振動励起状態を活用した反応プロセスは従来のプラズマプロセスには無い新しい視点であり、それに関する研究は今後しばらくの間 hot topic になると予想される。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:平山 朋子

所属・職:京都大学大学院工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:機械要素およびトライボロジー関連分野に関する学術研究動向ー機械要素およびトライボロジー関連分野を基軸とする学際領域における新展開ー

キーワード:機械工学、機械要素学、トライボロジー

機械工学分野において、機械要素の更なる高効率化、高機能化への期待は留まるところを知らず、特に近年の省エネルギー社会の構築に向けた機械要素の最適設計に対する要望は一層声高になってきている。機械要素の性能向上を図る上で、部材間の摩擦およびそれに伴う摩耗の発生に関する諸問題の解決は特に重要な課題であり、それらはトライボロジー分野において研究が盛んに行われている。一方で、旧来の摩擦試験機を用いたアプローチのみでは限界があり、近年、他分野との学際的な融合による新規的な試みがいくつか提案されつつある。令和4年度、機械要素およびトライボロジー関連分野を基軸とする学際領域の活動動向に焦点を当ててその国内外での展開について調査を行った結果、以下の動向を確認した。

・令和4年度は、国内および国際会議の多くがコロナ禍以前のように対面式で開催された。2022年7月には7th World Tribology Congressがフランス・リヨンにて開催され、世界各国の研究者が久しぶりに集うことができた。その後、例えばIndiaTrib(インド・ニューデリー)等、多くの国際会議が対面式で開催された。また日本国内においても、9月に日本機械学会年次大会が富山にて対面式で開催された他、トライボロジー会議2022秋(福井)等も対面式での開催となった。発表においては、近年のEV化の流れに伴う新規潤滑剤の開発に関する発表件数の増加が目立った。

・科研費審査区分は大区分「C」、中区分「18:材料力学、生産工学、設計工学およびその関連分野」、小区分「18040:機械要素およびトライボロジー関連」に該当する。科研費採択状況を見ると、若手～中堅の採択率が伸びており、産業界からのニーズと併せて、まだまだ伸び代がある領域であることを確認した。

・オンラインシステムの普及により、対面式／オンライン式／ハイブリッド式をうまく使い分けたイベントが多く見られた。例えば、基礎的な講習会などは、オンライン式で実施することにより逆に参加者が増える傾向にあった。対面式イベントが解禁されたが、このような使い分けは今後も長く継承されていくと思われる。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名: 淡路 智

所属・職: 東北大学金属材料研究所・教授

区分: 工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目: 応用物性関連、金属材料物性分野に関する学術研究動向 - 革新的超伝導材料及び超伝導マグネット開発の潮流と展開 -

キーワード: 高温超伝導、核融合、医療、強磁場

超伝導材料においては、すでに 10 社程度の線材メーカーが安定的に販売を実施すると共に、数社が製造能力を向上させて年間 1000km を超える超伝導線材供給体制を整えている。これは、高温超伝導を用いたコンパクト核融合開発が世界中で活発し、受注が増えたためである。実際、世界中で 20 社近いスタートアップ企業が大量の資金を集め、高温超伝導核融合炉開発に参入している。なかでも Commonwealth Fusion Systems(CFS)が世界に先駆けて 20T の実規模 Toroidal Field Model Coil (TFMC)を作製し、目標である 20T の磁場発生に成功したことは大きなニュースとなった。この技術を発展させて CFS は 2025 年に SPARC と呼ばれる小型核融合実験炉の建設を目指している。開発したコイルは約 3m x 2m の D 型コイルであり、使用した REBCO 線材は 270km にも及ぶ。主だった REBCO 線材メーカーが線材を供給することで、各社に設備投資を促すことで製造能力を向上させることとなった。さらに、米国、仏国の強磁場施設でそれぞれ 40T 超伝導マグネット開発計画が予算化され、次世代高温超伝導マグネット開発が活発になっている。日本でも東北大金研で 33T 無冷媒超伝導マグネット開発が予算化され開発が始まったが、その次のステップとして 40T を視野に入れている。また、Bruker は日本のフジクラ社製 REBCO 線材を用いた 1.2GHzNMR 装置の販売を始めたが、加えて 900MHz コンパクト NMR や 1.3GHz-NMR も受注を開始し、すでに 5 カ所以上に納入を行っている。さらに、オランダにおいて 1.4T-MRI の開発も開始され、これにも高温超伝導材料が利用される可能性が高い。ゼロカーボンの要請から、電動航空機の開発が NASA-Boeing 社や、Airbus 社を中心として行われており、その軽量化のために超伝導モーターや発電機の開発も進んでいる。このように世界各国で高温超伝導応用機器開発が進み、高温超伝導線材、特に REBCO 線材にニーズが高まっている一方で、工業製品としての品質保証や信頼性の確保が求められている。特に、多くの応用機器が利用される低温・強磁場領域の臨界電流特性を中心とした特性理解が重要となっている。また、特性の高い高温超伝導材料故に、高電流密度での利用が求められることから、クエンチなどの場合の保護方法や設計手法などの確立も最重要課題として認識されている。今後、高温超伝導材料が工業製品として成立するための壁をクリアする必要がある。超伝導エレクトロニクス分野では、量子コンピュータの性能向上と、TES と呼ばれる超伝導転移を用いたセンサー開発など活発化している。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:片田 直伸

所属・職:鳥取大学工学部・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:触媒プロセスおよび資源化学プロセス, 無機物質および無機材料化学関連分野に関する学術研究動向ー地球環境問題に対応する細孔性物質の応用ー

キーワード:カーボンニュートラル, 細孔性物質, MOF

カーボンニュートラル化がフォーカスされ, 自然エネルギー利用や炭素リサイクルの鍵となる  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  などの小分子を特殊な環境に保持できる細孔性物質を利用する  $CO_2$  排出抑制・リサイクルプロセスの研究が急速に展開されている. ゼオライト, メソポーラス酸化物, ナノ細孔性カーボン, MOF (metal-organic framework) / PCP (porous coordination polymer), ZIF (zeolitic imidazole framework, zeolitic imidazolate framework とも)など, 無機・有機・物理化学, ナノ材料や溶液と固体の界面の化学などの境界領域に位置する新規細孔性物質に関する基礎研究と,  $CO_2$  分離などへの応用に関する動向について, 細孔性物質分野の最大の学会である国際ゼオライト会議(20th International Zeolite Conference, IZA-2022)などに参加, 発表内容の推移を解析し, またセミナー(2回, 講師計5名)を開催し, 調査した. 細孔性物質の応用が, トラディショナルな石油精製における触媒から, バイオマス転換に対する触媒を経て, 吸着・膜分離など  $CO_2$  の実質生成量削減に直接貢献する分野にシフトし, その過程では扱う細孔性物質がゼオライトから MOF などに広がったことがわかった. 昨年度に比べ, MOF による  $CO_2$  吸着などが実用性評価に向かうなど急速な変化が見られた. 具体的には細孔性物質分野で最大の国際会議において, 6年前には, バイオマス関連課題(酸型ゼオライトを触媒としてバイオマス由来の有機化合物を高価値化学製品に転換させるものなど)の発表が多く, 従来の細孔性物質の研究者が, 自分の関わることのできるカーボンニュートラル関連課題に飛びついた, という状況であったのに対し, 2022年には MOF を吸着剤として  $CO_2$  を分離・濃縮・貯蔵する発表が急増し, 多くの企業が実用性を考慮した技術開発を始めたことが窺えた.

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:多々見 純一

所属・職:横浜国立大学大学院環境情報研究院・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:無機材料および物性関連と移動現象および単位操作関連分野に関する学術

研究動向ーセラミックスの製造プロセスにおける新たな潮流ー

キーワード:セラミックス、計測・可視化技術、粉体プロセス

無機材料物性関連分野および移動現象及び単位操作関連分野では、優れた材料機能を実現するための研究開発が進みつつある。その重要性は、Society5.0 や持続可能な社会の実現に向けて益々高まっており、そのための先端計測・可視化技術や粉体プロセスの高度化などの検討が盛んに行われている。例えば、セラミックス自身、および、その製造プロセス中の変化を計測、可視化する研究が活発に行われており、テラヘルツ分光、光コヒーレンストモグラフィー、機械的特性評価と同時の原子分解能 TEM 観察、放射光 3D トモグラフィーといった先端的な手法を駆使し、ナノスケール～マクロスケールまでを跨ぐトランススケール解析が研究のトレンドとしてあげられる。エンジニアリングセラミックスに関しては、その破壊に関する基礎的研究とともに、形態付与のための Xolography といった高速・高精細アディティブマニファクチャリング技術、気孔を含む微構造制御技術まで広く研究が進捗している。また、従来の構造要素としての材料研究から、その優れた熱的・機械的性質を活かしながら、水素製造技術といった環境・エネルギー分野等にもその研究の裾野が拡大している。材料に関わる粉体プロセスについては、微粒子表面の改質をはじめ、前述の計測化・可視化技術などの先端材料のための粉体の様々な不均質構造の理解と制御に関する研究が活発に行われている。他にも、界面の高度利用による先端材料のための粉体プロセス、カーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーを意識したエネルギーと環境分野への展開、粉体の多様性を活用した革新的な材料設計と評価、CFD-DEM をはじめとした顆粒やスラリーに関するモデリングとシミュレーションについての研究開発が当該分野の研究動向である。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名: 谷 和夫

所属・職: 東京海洋大学学術研究院・教授

区分: 工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目: 地盤工学関連分野に関する学術研究動向ー沖合域での地盤施工技術の研究開発ー

キーワード: 洋上風力発電, 浮体式, 海底ケーブル

海洋・海域を対象とした地盤工学では、港湾施設や埋立・浚渫などに係るものがほとんどであったために、水深が浅い沿岸域(主に 20メートル以浅)を対象とした技術開発が主であった。近年、欧州を中心に洋上風力発電施設(着底式)の建設が進んだ結果、水深がより深い沖合域(主に 40メートル以浅)における基礎の建設に係る地盤工学技術が開発されつつある。さらに、より深い海域(主に 40メートル以深)では、浮体式の洋上風力発電施設を設けることも検討されている。また、深海底に賦存する海底鉱物資源の開発を目指した研究も進められており、大水深(主に数百メートル以深)での採掘・集鉱や揚鉱に係る地盤施工技術の開発も喫緊の課題である。

そこで、地盤工学関連分野に関する学術研究動向の調査研究として、特に、水深が数十メートルを超える沖合の海域で適用される地盤工学技術に注目して学術研究動向を調べた。

調査方法は、学会合への参加と文献調査である。学会合には 5 件に参加した。ただし、多くの会合が対面とのハイブリッドだった。

その結果、主に以下の結論を得た。

- 1) 沖合の海域で適用される地盤工学技術として注目される新たな研究開発の分野は、浮体式の洋上風力発電に関するものである。大きなテーマは基礎の係留(把駐力が大きいアンカーの構造, 設置方法, 設計方法など)と海底送電ケーブル(立地の選定, 敷設, 維持管理など)である。
- 2) 深い水深に賦存する海底鉱物資源の開発に係る地盤工学分野の研究開発は意外と少ない。例外はわが国で行われているレアアース泥の採掘技術に関するチャレンジである。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:村上 俊之

所属・職:慶應義塾大学理工学部・教授

区分:工学系専門調査班 専門研究員

調査研究題目:遠隔操作システム構築のための要素技術に関する学術研究動向—情報通信に基づいた物理的相互作用をもたらすシステムの応用技術—

キーワード:サイバーフィジカルシステム, 分散アーキテクチャ, ハプティクス, モーションコントロール

情報通信技術の高度化や遠隔操作システムにおけるモーションコントロールの高精度化は人と協働システムや産業システムの多様化に関連して多くの研究開発が行われている。特に、サイバーフィジカルオートメーションシステム、分散アーキテクチャ、マルチエージェントシステムを含めた情報通信技術に基づいた応用開発事例、また遠隔操作システムにおいて要となるハプティクス技術については、IEEE Industrial Electronics が主催するメカトロニクスに関する国際会議(ICM: IEEE International Conference on Mechatronics)のキーノートセッションにおいて最新の研究発表が行われていた。また、情報通信技術においては、エッジコンピューティングプロトコルの最適な構成を踏まえた IoT の産業応用等がテクニカルセッションにおける一つの話題として取り上げられていた。VLC (Visible Light Communications)を含む光無線通信技術においても低消費電力のための制御技術等が多くみられた。遠隔操作システムにおけるハプティクス技術においては、移動ロボットの遠隔操作における衝突確率や運動学的な拘束条件を考慮した軌道計画、また仮想空間におけるアバターが存在における遠隔操作への影響等興味深い研究開発が多くみられていた。

情報通信技術や遠隔操作技術の展開においては、SDGs やカーボンニュートラルに関わる諸問題とも関連が深く、分散アーキテクチャやマルチエージェントシステムにおいてはエネルギー消費を抑えるための制御技術の開発に重きが置かれている。また、遠隔操作システムにおいてはエネルギー問題に加え、安全安心のための技術開発が重要な位置づけにある。近年では、電気自動車の開発推進が行われている中で、自動運転技術の先進的な開発も多く行われているが、こうした開発において情報通信技術は言うまでもなく、遠隔操作システムの制御技術も多方面での活用が期待できるものと考えられる。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:田中 真美

所属・職:東北大学大学院医工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:医療福祉工学関連分野に関する学術研究動向ー医療福祉工学と他分野との境界領域における新たな潮流と展開ー

キーワード:AI による研究の変革、モデリング、シミュレーション、ナノテクノロジー、セルメカニクス

医療福祉工学は医療や福祉に貢献する学際的な学問であり、超高齢化社会を迎える日本において、その発展は大きく期待されている。特に、健康寿命を延ばすためには、疾患の早期発見、早期治療、さらに精密医療や高精度な医療の実現が求められる。令和4年度、医療福祉工学と他分野との境界領域における学際領域の活動動向について、機械工学を基として焦点を当てて、国内外の展開について調査を行った結果、以下の動向を確認した。

医療福祉工学についても情報・AI(機械学習など)との融合も進んでおり、機械の知能化やロボティクスなどにおいては、AIを用いた手術システムと関連してガイドシステムやセンサシステムの開発が行われている。特に、手術のトレーニングや教示用のシステムとしてARやVRそしてセンサとの組み合わせについても取り組まれている。またAIのデータとしても有効であるIoTとの関連したウェアラブルなセンシング技術に関するものも多かった。また、ビッグデータの活用におけるタイムパフォーマンス向上とも直結するデータとして意味のあるものとするためにも、センサ出力における詳細なデータのモデル化や現象との関係性の調査、解析方法の検討についても多く取り組まれていた。

特に国内に着目すると、流体工学と関連してCOVID-19感染予防法のエアロゾル飛散シミュレーション、気道内のCFD、脳動脈網モデルなど、モデリングやシミュレーションも多く取り組まれている。また、バイオマテリアルの研究においても細胞組織の力学や強度、治療具の物性特性や腹部大動脈瘤形状などの計測などが行われている。ナノテクノロジーの応用も盛んで、細胞輸送やマイクロ操作やマイクロ流路やマイクロ流体デバイスの開発なども多く行われている。さらにセルメカニクスとして骨芽細胞、心筋細胞、平滑筋細胞など各種細胞の刺激へのシミュレーションや細胞内構造物の適応メカニズムなどの研究も多く行われている。以上のように、国内では、細胞・臓器・疾患などの細分化されたレベルにおいて、メカニズムについて完全に解明されていないが、一定程度のシミュレーションを行えるモデルの構築の報告が多くされている。今後、医療の高精度化の実現のために、デジタルツインなどデータのモダリティとマルチモーダルバイオメディカルAIの進展が期待される。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:秋山 充良

所属・職:早稲田大学理工学術院・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:構造工学および地震工学分野に関する学術研究動向―気候変動が社会基盤に及ぼす影響―

キーワード:気候変動, 海面上昇, インフラ, リスク, レジリエンス

我が国では、特に水環境系の研究部門において、活発に地球温暖化の影響が議論されており、例えば、温暖化による気温上昇が流域の生態系に及ぼす影響や、海面上昇が砂浜や干潟の消滅に及ぼす影響などが評価されてきた。温暖化による異常気象をもたらす洪水に関しては、堤防高さや浸水被害の軽減などの議論において、構造物(堤防)への言及が見られるが、橋梁などのインフラ構造物自体の破壊可能性や安全性に地球温暖化が及ぼす影響はほとんど検証されていない。この理由には、日本では、他国に対して圧倒的に大きな地震作用を想定し、耐震設計が行われているため、例えば、水の作用が温暖化により大きくなったとしても、水の直接の作用や洗掘により橋梁などの構造物が破壊することはないと考えられてきたためである。しかし、令和2年7月豪雨の際、球磨川水系では、地震時保有耐力法による耐震設計がなされていた橋梁が流出したり、洗掘の影響を受けたりしている。地球温暖化が経済・社会活動を支える基盤であるインフラ構造物の耐力や作用に対して、どれほどの脅威となり得るのかを検証する必要がある、令和4年度にその調査を実施した。

諸外国の構造系学会(International Association for Bridge Maintenance and Safety (IABMAS), International Association for Bridge and Structural Safety (IABSE)や International Association for Structural Safety and Reliability (IASSAR))では、地球温暖化が既に構造物の耐力や作用に及ぼす影響を評価する試みが始まっていた。また、アメリカ土木学会(American Society of Civil Engineers) (ASCE)では、Effect of Climate Change on Life-Cycle Performance, Safety, Reliability and Risk of Structures and Infrastructure Systemsに関するプロジェクトが稼働中であり、気象の専門家、荷重・作用の専門家、構造の専門家、そして、リスク・レジリエンス評価の専門家が参画し、レポートの作成が鋭意進められていた。特に、2022年9月29日・30日にASCE本部(ヴァージニア州・Reston市)にて開催されたワークショップに参加する機会があり、気候変動問題の構造工学分野での扱い、さらには、我が国においてこの種の問題を扱う領域を形成するための基礎資料を得た。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:新井 豊子

所属・職:金沢大学理工研究域数物科学系・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:ナノサイエンス・ナノテクノロジー分野に関する学術研究動向

キーワード:走査型プローブ顕微鏡(SPM)、振動分光法、顕微鏡法・分光法複合装置

ナノテクノロジーは、2001年に米国で国家ナノテクノロジー・イニシアティブ(National Nanotechnology Initiative)が創設されたことを皮切りに、この20年余りの間、日本を含め世界中で、科学技術の重点研究分野であり続けている。本研究では、ナノテクノロジーの基礎となる、ナノサイエンスも含め研究動向を調査した。

1981年に、世界で初めて、試料表面原子を1つ1つ分解して描き出すことに成功した走査型トンネル顕微鏡(STM)の発明が、ナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の大きなブレイクスルーであった。STMの発明以降、種々の走査型プローブ顕微鏡(SPM)が開発されたが、SPMの中でも超高真空(UHV)中で駆動するSTMと周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)は、原子・分子レベルの空間分解能で表面観察、電子状態解析ができ、さらに、原子操作ツールとしても応用できるので、ナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の中でも最も期待されている。しかし、SPMでは未知材料の組成同定が困難であることが、SPMの欠点でもある。一方、光に対する分子振動の共鳴を利用する振動分光法(赤外分光法やラマン分光法など)では、長年にわたり多くの振動スペクトルデータが蓄積され、試料同定・分子構造解析に多大な威力を発揮している。但し、光の回折限界のために空間分解能は10 nm程度に限られる。そこで、SPMと振動分光法を組み合わせたナノメートルレベルの空間分解能を持つ顕微鏡法・分光法が開拓されてきている。近年、AFMと近接場光学顕微鏡(SNOM)の利点を合わせた探針増強ラマン分光法(TERS)が開発された。TERSは探針先端の局所領域での近接場効果によるラマン散乱増強を利用するもので、赤外光の回折限界を超える10 nmオーダーの空間分解能を持つ。また、AFMと赤外分光(IR)を組み合わせたAFM-IRも10 nmオーダーの分解能を実現している。ここ数年、TERSやAFM-IRの開発競争は激しく、複数メーカーによる市販品も登場している。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:北川 尚美

所属・職:東北大学大学院工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:化学および生物反応工学、プロセス工学、バイオマス資源循環関連分野に関する学術研究動向

キーワード:反応工学、プロセス工学、バイオマス資源循環

当該分野における国内外の最新の研究例や注目すべき研究例、各種プロジェクト研究、各種学術集会の開催状況やテーマ等の動向調査では、「carbon neutral」「SDGs」「Green」「Sustainable」といったキーワードが多くみられた。「carbon neutral」に関しては、さらに、「Hydrogen」「Battery」「Energy carrier」「Carbon Capture Storage & Utilization」が含まれる。一方、「bioresources」「biobased products (bioplastic を含む)」「circular economy」といったキーワードも依然として注目されている。

当該分野における若手研究者の研究動向調査では、JSTの「さきがけ」「ACT-X」「創発的研究支援事業」、環境省の「環境研究総合推進費(若手枠)」などの採択者を中心に活性化が進んでいることを実感した。特に、「創発的研究支援事業」の採択者からは、PO やアドバイザーからポジティブなコメントを数多くもらい、自信をもって研究に取り組めるようになったという意見を多く聞いている。2023 年度も事業が継続すると聞き、周囲の若手研究者たちが次こそはと準備しているようで、非常に有効な事業であると考えます。

若手教育や若手女性研究者支援への対応については、若干停滞しているように見える。いずれもこれまでの支援が継続されているだけといった状況で、新たな支援事業は見られない。これに対し、2022 年度は、東北大学工学部の女性教授 5 名の公募をスタートに、東京工業大学の上位職の女性教員 8 名の公募、東京大学の女性教員 300 人採用計画など、各大学で独自の策を打ち出す状況となっている。こういった動きが、STEM 分野の女子学生比率の増加につながるかが今後の課題と考える。

自身が関与した当該分野における国際シンポジウム、セミナー、講演会等の企画・開催状況などについては、バイオマス資源循環に関わる公開シンポジウムを 2 件、カーボンニュートラルに関わる公開シンポジウムを 2 件、小・中・高校生向けのセミナーを 6 件、インドネシア、マレーシア、タイから来日した研究者向けのセミナーを 4 件、実施した。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:末益 崇

所属・職:筑波大学数理物質系・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:結晶工学関連分野に関する学術研究動向—創エネルギー材料および省エネルギー材料の新展開—

キーワード:結晶成長、太陽電池、界面

世界の脱炭素化のため、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーへの期待が、益々高まっている。2022年現在、太陽光発電で得られる電力は、火力等に比べても世界各地で最も安価な電源となっており、累積導入量が1テラワット(TW)に達した。国際エネルギー機関によると、2050年には14TWの導入が必要とされている。このため、今後も、太陽光発電の役割は拡大を続けると考えられる。令和4年度は、太陽電池に係わる参加者の多い国際会議および国内会議は、ほぼすべての会議でハイブリッド開催となった。電力用太陽電池の主力材料は、目下、単結晶シリコンであり、市販の太陽電池のエネルギー変換効率は、条件が良いときで20%程度である。シリコン太陽電池では、エネルギー変換効率の飛躍的な向上を目指し、禁制帯幅の大きな材料と組み合わせるタンデム化の検討がなされており、薄膜太陽電池の新材料として注目を集めているペロブスカイトと組み合わせようとする動きが盛んである。異種材料との組み合わせでは、界面の制御が不可欠であり、この分野の研究も始まっている。一方、無機系元素からなる新規太陽電池材料( $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{SnS}$ ,  $\text{CZTS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSnP}_2$ ,  $\text{BaSi}_2$ など)の研究も、活発に行われている。シリコン太陽電池は光吸収層の厚みが $180\mu\text{m}$ 程度であり、基板ベースであるため柔軟性に欠けるのに対し、これらの新材料では、光吸収層の厚さがシリコン太陽電池の30分の1以下になるため、建物の壁面、車載などへの応用を考えた、軽量で柔軟な太陽電池の研究が盛んである。

スピントロニクス分野では、新材料・新機能創成に係わる基礎研究から、萌芽的デバイス技術、単体デバイス、さらに、集積回路まで、非常にレンジの広い研究が行われている。スピントロニクス材料を記録媒体として用いる場合、磁化の方向を電流またはスピン流で制御する必要があり、この方面の研究が盛んに行われている。スピン移行トルクやスピン軌道トルクによる磁化の制御の他に、電圧制御磁気異方性効果を利用することで、電流ではなく電圧制御による磁化の制御を達成しようとする研究が進展しつつある。

# 令和4(2022)年度調査研究実績報告書

研究担当者名:平田 晃正

所属・職:名古屋工業大学大学院工学研究科・教授

区分:工学系科学専門調査班 専門研究員

調査研究題目:電力工学、生体医工学分野(生体電磁工学)に関する学術研究動向 ー生体電磁工学を基軸する学際領域における新展開ー

キーワード:熱中症、電波の安全性、国際標準化動向、国際ガイドライン

我々の身の回りにおいて、さまざまな電波が飛び交うようになった。無線通信の多様化のみならず、ワイヤレス給電など新たな利用が模索されてきている中、これらの実利用を把握した人体周辺の機器からの漏洩電磁界などの調査、国際動向を把握、有用なデータを取得する必要がある。また、非電離放射線の領域は広く、それらを統合的に分析する必要がある。

工学的見地から考察するために、生体物理、生理シミュレーション技術に加えて、信号処理分野などを調査し、最新の研究動向を把握することにより、研究の進展さらには標準化動向を見極める必要がある。国際ガイドラインに関する動向調査として、世界保健機関(WHO)が述べる電磁界の安全性に関わる国際ガイドラインを作成している組織である国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)および米国電気電子学会(IEEE)委員会に出席し、調査を行った。

新規熱中症リスク評価技術の確立に向けて、微気象の人体温熱生理応答への影響解明とそのモデル化について実地調査を行った。物理因子の生体影響を議論するにあたり、亜熱帯地域での気象および暑さ慣れによる生体応答の調査を実施、気温・湿度の場所・時間依存性データを取得し、非電離放射線の一つである太陽光の影響について分析した。

生体電磁の国際学会 BioEM2022 に有識者2名を招へいした。紫外線領域および電離放射線領域における国際標準化動向に関する情報を取得するとともに、今後の無線周波との国際整合、境界周波数領域における国際ガイドラインのあり方に関する新展開について意見交換した。また、生体電磁工学分野における安全性を中心に医療応用、製品安全性、環境物理因子の影響に関する情報を取得、周波数ごとの基準値の相違や、関連分野である電磁環境研究のあり方に関する新展開について意見交換した。さらに、電磁界や暑熱など環境因子の安全性に関する生体影響に関する意見交換、将来の標準化に向けた理論と実験の比較についての議論を行った。

生体電磁工学分野を中心にその周辺分野の調査研究を行うことにより、安全性を中心に、医療応用、製品安全性、環境物理因子影響などを包括的に調査包括的な知見を得た。