

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

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—テラヘルツ電磁波科学と光電子融合材料・デ バイス工学の新たな展開—

尾辻 泰一(東北大学電気通信研究所・教授)

学術研究動向に関しては、テラヘルツ電磁波科学および光電子融合材料・デバイス工学に関する分野の中で新たな研究領域、新たに生まれつつある分野横断的・融合的な研究分野、今後重要性を増すと思われる研究領域を対象として、当該分野に関連する国際研究集会での成果発表・聴講・海外研究者との討議を通して、調査研究を行った。テラヘルツ電磁波の光子エネルギーは、ランダムな熱擾乱に伴う格子振動(フォノン)エネルギーよりも小さいために、室温でのコヒーレントなテラヘルツ波の発生には本質的な困難が伴う。レーザーダイオードのような集積型固体素子として最も有望な量子カスケードレーザーにおいてもテラヘルツレーザー発振閾温度は250Kに留まっている。その中で、最近、中赤外で発光する量子カスケードレーザーに共振周波数がテラヘルツ程度に接近した2つの共振器を実装し、利得媒質である半導体多重量子井戸が有する非線形光学効果を用いて、2つの中赤外レーザー発光どうしの誘導ラマン散乱による差周波テラヘルツ発生の手法によって、はじめて1THz前後のレーザー発振に成功している。一方、グラフェン電子の荷電振動量子:プラズモンの不安定性に起因した誘導増幅作用によって室温下で巨大テラヘルツ利得が得られることが実験的に確認されている。これらは、室温テラヘルツレーザートランジスタ実現につながる画期的な成果として、今後のさらなる発展が期待される。

学術振興方策に関しては、テラヘルツ電磁波科学および光電子融合材料・デバイス・回路工学に関する専門分野、およびその周辺分野における国内外の研究助成、研究者養成、学術の国際交流、大学支援、大型プロジェクト支援に関する動向調査

を行った。特に、我が国の科学技術水準をより向上させるための長期的な人材育成の観点から、あるべき学術振興施策のあり方について考察を深めた。具体的には、テラヘルツデバイス・技術の基礎・応用問題に関するロシアー日本ーUSAーヨーロッパシンポジウムRJUSE Tera-Tech 2021を企画開催した。日本、ロシア、米国、ドイツ、フランス、イタリア、ポーランド、スペイン、英国から総勢100名に上る参加を得て、各地域からの最先端学術研究成果の発表に基づいて、発表者が関連する研究組織、研究開発体制、資金助成制度、若手研究者育成プログラム、国際共同研究体制についての討議を展開し、それら学術振興方策に関する情報共有ならびに比較討論を行った。今後の我が国の学術研究における国際化、人材育成に資する知見を得た。

地球資源工学およびエネルギー学関連分野に関する学術研究動向 - 太陽エネルギーによる水素製造とその利用の新たな潮流

児玉 竜也(新潟大学自然科学系(工学部)・教授)

太陽光・風力発電の発電単価は14.9~26.8円/kWhと見積もられ、水電解水素の製造コストは、76~136円/Nm³と試算されてきたが、2021年に「国内では2030年には事業用の太陽光発電コストが8~11円/kWhとなる」という試算が公表された。しかし、それでも水素製造コストは(比例計算すれば)、約50円/Nm³程度までしか下がらない。一方、チリ、メキシコなどの太陽日射量が豊富なサンペルト国では太陽光発電コストを5円/kWh以下とする報告があり、水電解水素として20円/Nm³が可能という試算もある。

水電解以外の方法としては、太陽集熱による水熱分解サイクルがある。ヘリオスタットと呼ばれる地上反射鏡によって太陽光を集光し、1300℃以上の熱を得て、水を熱化学サイクルによって分解する手法であり、金属酸化物触媒を反応媒体とする2段階サイクルの開発が主流である。2019年頃から、太陽集熱プラントの建設コストの60%あまりを占

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

めるヘリオスタットコストが大きくダウンしたため、例えば50～110MWthに大型化したケースとして20円/Nm³の水素製造が可能という試算が報告され始めた。課題は、MWth級への大型化により、熱損失を低減し、水熱分解システムの熱効率を20%近くに向上させることである。さらに、反応媒体となる金属酸化物触媒の反応活性が現在の酸化セリウム(セリア)の2倍になれば、上記の20円/Nm³は半分になり、10円/Nm³が達成できる。そのため、当該分野では、高活性の金属酸化物触媒の開発がトレンドであるが、最近では電子軌道計算によって金属酸化物の熱力学特性を予測し、触媒設計をする手法が大きく注目されている。また、これまでのセリア系、ペロブスカイト酸化物系に加えて、高エントロピー金属酸化物が高活性を有することが報告され、今後の触媒開発の新たな潮流になることが予測される。

無機材料および物性関連、ナノ材料科学関連分野に関する学術研究動向—無機ナノ材料学と異分野の融合および境界領域における新たな展開—

関野 徹(大阪大学産業科学研究所・教授)

無機材料および物性関連分野やナノ材料科学関連分野などの無機系材料分野を中心とした最近の研究動向調査や、他の研究分野との融合や境界領域における新たな展開について調査を行った。

ナノ材料学を基礎としたナノデバイス・ナノ計測領域では、ナノ材料物性や、ナノ加工技術を基礎としたMEMS・NEMSデバイスにより、DNAやタンパク質検出が行われているが、特に本年はインフルエンザウイルス(グラフェンセンサー)や新型コロナウイルス(ナノポアやナノプローブデバイス)の直接検出手法に関する研究が注目された。これらは材料機能・ナノ加工技術に加え、微小シグナルの機械学習による定性・定量分析手法が鍵となり、材料学・ナノ工学と情報AI学の融合により実現されたものである。

一方、抗ウイルス部材研究もコロナ禍により急激に活発化された。材料学的な観点からは薬剤等による効果を狙ったものが主流であるが、特に抗菌・抗ウイルス性については

材料の化学的特性を活用したもの(例えば酸化物の酸化還元反応を基礎とした機能発現)が報告され、一部は社会実装されている。また、材料システム研究では、交換膜等を利用したウイルス除去・分離システムについての研究開発や、太陽電池と環境浄化材料(フィルタリングシステム)融合による生活環境健全性維持に関する研究などが進められてしている。

先端材料やデバイス応用に関しては、微小センシングデバイス創出に向けた光応答CMOSデバイス構造形成研究で、On-tip型の光電変換素子の形成と回路構造の最適化でデバイスサイズをmmレベルまでダウンさせることが可能なことなど示されている(2020年11月30日～12月6日・imec国際シンポジウム・東工大徳田教授グループ)。同会議では先端材料デバイスによる環境・生体センシングの新展開についても報告されており(Chris Van Hoff博士(imec CEO))、こうした技術は、人間の健康や安全など豊かな社会やライフスタイルへ対応したシステム構築などの先端技術分野のみならず、持続的発展のための基本分野(たとえば農業)など、将来の社会的要請に応える上で必須となるものであること、これらの社会的要請に向けてますます重要な研究領域となるものと考えられた。

薄膜および表面界面物性関連分野に関する学術研究動向—原子・分子レベルの表面・界面物性の解析技術と応用— 富取 正彦(北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科・教授)

近年発展が著しい“原子・分子レベルの表面・界面物性の解析技術”に注目し、研究の現状を調査した。現在、電子デバイスの微細加工サイズがシングルナノ(10nm未満)に到達しつつある。シングルナノは原子1個の揺らぎがデバイス特性に大きな影響を与える材料スケールである。従って、原子・分子レベルの空間分解能を有する顕微鏡法・物性評価法が重要となっている。

原子・分子レベルの顕微鏡法・物性評価法の代表格は、透過型電子顕微鏡とその派生である走査透過型電子顕微鏡、および、走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡(AFM)

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

などの総称である走査型プローブ顕微鏡 (SPM) である。現在、電子デバイスの動作中の特性を観察・評価するオペラント計測が期待されている。表面にデバイス動作を顕在化させた試料への SPM を使ったオペラント計測が広がっている。現在のデバイス開発の課題の一つは動作時の発熱である。AFM 探針の先端に微小熱電対を形成して試料表面の温度分布を計測する手法はデバイスへの入力信号に対する熱応答を即計測できる。探針に微小熱電対を形成する微細加工技術の進歩が多機能 AFM 探針の作製に結びついた好例である。また、ダイヤモンド針に NV センターを導入して、発光特性変化から磁場を高感度検出する手法がスピントロニクスやバイオ分野で注目される。ダイヤモンド針先端に 1 つの NV センターを再現良く導入する技術が確立されればこの分野はさらに発展する。原子分解能 AFM を利用して、 Q 値が極高い微細加工したカンチレバーの力学的振動エネルギーが探針の試料への接近によって失われる量を高感度計測することでトポロジカル絶縁体の表面電子状態の転移やイメージポテンシャルの電子状態の遷移を捉えたとの報告もあった。微細加工技術を活用した高感度力学センサーの開発によって、超高感度 SPM が非接触な摩擦現象などの新奇な物理・力学現象へも活用されていくと期待できる。

「通信分野 (テラヘルツ波帯アンテナとその応用) に関する学術研究動向」

廣川 二郎 (東京工業大学工学院・教授)

周波数帯が 100GHz~300GHz 帯の高利得平面アンテナ 2 種類に関して学術研究動向を調査した。

薄板積層板の拡散接合を用いて、120GHz 帯と 350GHz 帯で利得と反射の広帯域特性を持つ並列給電型スロット導波管アレイアンテナが開発されている。120GHz 帯のアンテナでは、化学エッチングを施した銅板を用いることができる。スロット数が 32×32 以上と大きくなると、薄板の中に細長い金属部が存在することになり、ハンドリングで曲げやすくなる。給電回路に二層構造を導入し、32×32 素子アレイアンテナでは、アンテナ利得 38dBi 以上、アンテナ効

率 60%以上、帯域幅 15GHz (119.0-134.0GHz)、64×64 素子アレイでは、アンテナ利得 43dBi 以上、アンテナ効率 50%以上、帯域幅 14.5GHz (118.5-133.0GHz) を得ている。350GHz 帯のアンテナでは、シリコンウェーハを深反応イオンエッチングにより ±5μm 以下の精度でエッチングしている。また、金メッキを施した後、拡散接合で接合している。16×16 素子のアレイアンテナを設計・製作し、3dB 低下利得帯域幅はシミュレーションで 50.8GHz、実測で 44.6GHz となっている。このアンテナは、Silicon-On-Insulator マイクロマシニング技術のプロセス要件に合わせて設計を最適化し、低損失と広帯域を実現するために改良されている。2 つのアンテナの利得は 32.8dBi と 38.0dBi で、それぞれ 16×16 素子アレイと 32×32 素子アレイから構成されている。両アンテナの動作帯域は 80GHz (22%の比帯域幅) で、全帯域での総合効率は -2.5dB 以上、-3.5dB 以上であることが確認されている。

ギャップ導波路は、異なる金属層間の良好な電氣的接触を避けるために、非接触としている。D バンド (110 GHz-170 GHz) において、直列給電アレイアンテナと完全並列給電アレイアンテナを作製されている。24x16 スロットの直列給電アレイアンテナでは、利得は 141 GHz から 149GHz で約 30 dBi から 31.5dBi、アンテナ効率は 40%から 60%と測定されている。32x32 スロットの並列給電アレイアンテナでは、利得は約 37dBi で、アンテナ効率は 138GHz から 148 GHz で約 50%となっている。

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—持続可能な都市政策とデザイン手法の潮流— 鶴 心治 (山口大学大学院創成科学研究科・教授)

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

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

「コンパクトシティ」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。本調査研究では、このような背景から、日本における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。

2020年度日本建築学会大会梗概集(都市計画部門 578題 オンライン)では、人口減少下での集約型都市構造再編や市街地の再生手法、関連する計画技術に関するテーマが多く、コンパクトシティと併せて、頻発する都市防災に関する研究が増えている。また、都市のサステナビリティを考える上で個別要素として、空地の計画、駅やまちなか再生とリノベーション、公共交通と交通アクセスに関するテーマも増加傾向である。最近の傾向としては、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都市再生を実現していこうとする若手研究者の関心が大きい。

2020年度日本都市計画学会全国大会(168題)では、例年と大きく変わりなく、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、エリアマネジメント手法等の研究論文が発表されている。特に、防災技術に関する研究やコンパクトシティの計画技術に関する論文が多くなっている。また、シンポジウム「With/After コロナ時代のスマートシティを考える」をオンラインで実施し、スマートシティを念頭に置いたコロナ後の都市計画について今後を展望した。

2020年度から2021年度にかけて発表された海外ジャーナルに掲載された論文テーマでは、コンパクトシティ、ウォークアブル都市、ネーフード計画論、土地利用の持続可能性、COVID-19パンデミック時の各種空間機能の考察が多い。特に、世界的なコロナ禍の影響もあり、健康と都市空間の関係やその効果的計画手法に関するテーマが増加傾向にある点が特徴的である。

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。

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ナノバイオセンシング・生体分子機能工学分野の新たな潮流と展開ー分野に係る学術研究動向に関する調査研究

大河内 美奈(東京工業大学物質理工学院・教授)

新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、感染症拡大の収束に向けた研究開発への取組みが進み、バイオセンサ国際会議やmicro Total Analysis Systemなどの学会においても改めてウイルスや微生物の検出技術に関するセッションが設けられた他、新型コロナウイルスの診断法、治療法、治療薬の探索などに関する現状について情報共有がなされた。「バイオ戦略2020」においても、新型コロナウイルス感染症拡大の収束に向けた研究開発は、直ちに取り組むべき特別章と位置付けられた他、高機能バイオ素材、バイオプラスチック、持続性一次生産システム、有機廃棄物・有機排水処理、機能性食品、バイオ医薬・再生医療・細胞治療・遺伝子治療、バイオ関連分析・測定など9つの市場領域が設定され、新規産業創出へのロードマップの策定と施策の推進方針が示された。また、「バイオとデジタルの融合」および「バイオコミュニティの形成」が横断的な取組として挙げられ、バイオ分野におけるビックデータを活用したネットワーク拠点形成によるオープンサイエンス化の潮流を取り入れる研究環境の整備について重要性が指摘された。合成生物学やゲノム編集技術の進展に伴い、バイオデータとロボティクスを活用した遺伝子改変微生物等の作製による化成品や医薬品原料の開発研究は大きな潮流であり、バイオエコノミーの推進においても重要性が増す方向である。「統合イノベーション戦略2020」においては、人工知能、バイオ、量子技術、マテリアルなどの基盤技術に関する取組の強化が挙げられ、当該分野における解析システムの構築などに関する研究においても、これらの技術を複合した検出系の開発が一層推進された。工学的支援技術により、個々の細胞の変化を動的に捉えることを可能とするシングルセル(単一細胞)解析も普及してきている一方、細胞微小環境を模倣した*in vitro*細胞培養モデルである生体模倣システムの開発や利用に関する研究も一層広がりをみせており、これらの創薬・医療分野への

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

展開が精力的に進められている。

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 -ナノエレクトロニクスと異分野融合に 関する研究動向調査を中心に-

小野 行徳(静岡大学学術院工学領域・教授)

昨年度に引き続き、量子情報、量子電子物性に焦点を当てたが、コロナの影響を受けたため、令和3年度に跨った調査となった。

グラフェンをはじめとする2次元物質における量子物性が継続して大きな進展を見せている。2枚のグラフェンを微小角度ずらして重ねた構造においては、超伝導発現、およびその周辺の電子強相関係の物性発現メカニズムが明らかになりつつある。高温超伝導の発現機構は、2次元電子系のバンド構造、および電子スピンの関与するものであるが、ネマチック性と呼ばれる高温超伝導特有の性質に関する理解が深まっている。また、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。また、ねじれグラフェンに関しては、超伝導以外にも強誘電体効果の発現なども報告されており、より応用・実用化に近い領域への発展が示唆されている。量子コンピュータに関しては、IBMから超伝導(ゲート型)で100量子ビットを超えるゲート型が報告されるなど、超伝導を利用した量子ビットが優位を保っている。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)で報告されるなど、一定の進展を見せている。ただし、量子ドットの特性を如何に揃えるか等、微細加工に関連した本質的な困難さに関しては、依然として明らかな解は得られていない。また、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、今後の展開に期待したい。なお、従来型のBCS理論に基づく超伝導に関して、シリコンを用いたジョセフソン素子などの作製もフランスのグループを中心に着実な進展を見せており、今後その動向を注視する必要がある。

新規デバイスとしては、トンネルトランジスタに関して調査を継続したが、性能向上に着実な進展が見られるものの実用化レベルには至っていない。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。

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-

淡路 智(東北大学金属材料研究所・教授)

2020年度は新型コロナウイルス感染症の世界的な感染拡大により、国際会議はもちろんのこと国内会議の多くも延期や中止となった。2020年に開催予定だった国際会議を中心に、2020年の学術動向について以下に述べる。

応用超伝導関連では強磁場超伝導マグネットを用いた核磁気共鳴(NMR)層値の開発が日本とドイツで進行している。NMRの世界的な企業であるBurker社がREBCOを用いた1.2 GHz (28.2 T)-NMR装置の開発に成功し販売を開始した。すでに1号機はEidgenössische Technische Hochschule (ETH)に納入し、そのほかに数台受注をしている。日本ではJSTの未来社会創造事業において理研を中心に1.3 GHz-NMR (30.5 T)の開発プロジェクトが進行している。高温超伝導材料を用いたNMRマグネットの問題の一つは、永久電流運転を実現するための超伝導接続である。Bruker社の1.2 GHz-NMRは永久電流運転であり、未来社会創造事業のマグネット開発を担っている理研でも、小コイルながら永久電流運転に成功している。また、米国国立強磁場研究所(NHMFL)で2018年に開発された32 T超伝導マグネットは、その後2年の時を経て2021年1月より共同利用として一般に開放された。

金属系超伝導である Nb_3Sn 線材開発も、ここ数年活発に

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(工学系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

行われている。これは、欧州加速器研究機構(CERN)で現在稼働中の大型加速器(LHC)の次に計画されている、次世代円形加速器(FCC)用にこれまでの2倍の臨界電流特性の必要性が打ち出されたこと、フランスに建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)の次の計画である核融合原型炉(DEMO)の設計が各国で始まったことによる。いずれもNb₃Snの臨界電流と機械特性の向上が必要であり、臨界電流特性の向上のため人口ピンと呼ばれる微細析出物を導入する方法や、高強度材料との複合化などが行われている。