

# 令和3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)

## 工学の分野に関する学術研究動向及び学術振興方策 —工学とナノ計測および界面科学の境界領域における新展開—

幾原 雄一 (東京大学大学院工学系研究科・教授)

令和3年度に参加予定であった国内学会や国際会議は、コロナウイルス渦のため多くの会議がオンラインでの開催あるいは延期となったが、オンラインおよび一部対面で参加した以下の国内外の学術会合について調査研究を行った。また、延期された国内学会と国際会議については、組織委員会、関係者と可能な限りコンタクトし、以下に示す情報を得た。

・MRS Spring Meeting 2021 (2021年MRS春季会議) 4月18日～23日 (オンライン開催)

調査報告: 材料の破壊や変形その場観察を行い、転位、格子欠陥、粒界の動的挙動を把握し、変形や破壊の微視的メカニズムを議論するセッションを中心に情報収集した。幾原は、セラミックスの変形その場TEM観察の結果を発表した(招待講演)が、他のその場観察の多くが金属材料をベースとする内容であった。金属の場合は、転位が運動して塑性変形を示すが、転位と粒界の相互作用や転位と析出物の相互作用の直接観察が、今後の高強度金属材料の開発にあたって重要な研究になることが示唆された。TEMその場観察の研究は国際的にも増加しつつあることが認識された。

・ICC8 国際会議 (第8回セラミックス国際会議): 4月25日～29日 (プサン、韓国、ハイブリッド開催)

調査報告: 本会議は、セラミックスの微細構造、機能特性、力学的特性、プロセス、などセラミック科学全般について議論する国際会議であり、今回は現地開催に加えオンライン開催を併用したハイブリッド方式で行われた。幾原は、セラミックスの粒界構造と力学的特性の相関性についてオンラインで発表した(基調講演)。構造セラミックスの力学的特性の研究は徐々に縮小傾向にあり、変わって、電池材料などの機能材料の創製に関する研究が増加している。いずれの場合もプロセッシングにフォーカスした研究が多く、微細構造解析の詳細な研究は少ないが、第一原理計算をはじめとする計算科学的アプローチは多くの発表で

取り入れられていた。特に今回の傾向としては、機械学習やAIを取り入れたニューラルネットワークポテンシャルの開発、機能を決定づける記述子の抽出に関する研究が目立った。

・Thermec2021(先端材料プロセスに関する国際会議): 5月9日～14日 (オンライン開催)

調査報告: 本会議は、金属やセラミックスの微細構造とプロセスの相関性を議論する国際会議であり、今回はオンライン限定で開催された。幾原はセラミックスの微細構造のTEM解析について発表した(招待講演)。この会議は、熱処理を積極的に用いた組織制御に関する研究が多く、特に鉄や鋼の熱処理による微細構造制御、非鉄材料の圧延組織など金属の内部構造に関する研究が主であった。これらの研究アプローチは非常に有用であるので、セラミックスなど無機材料への応用も今後は可能と思われた。また、本会議の発表では、走査透過電子顕微鏡法を用いた解析が非常に多くなってきていることも特徴である。

・日本顕微鏡学会学術講演会: 6月14日～16日 (つくば市、ハイブリッド開催)

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、つくば市における対面開催とオンライン開催を併用したハイブリッド形式で運用された。最近の電子顕微鏡法の研究として、収差補正装置を用いた走査透過電子顕微鏡法による原子構造解析が主流になってきており、種々のデバイスや機能材料への応用例が多く発表されていた。また、生物材料についてはクライオ電子顕微鏡による単粒子解析が活発に行われていることも本分野の研究スピードの速さを示している。クライオTEMが日本全国に徐々に普及していることが伺えた。

・日本金属学会2021年秋期(第196回)講演大会: 9月14日～17日 (オンライン開催)

調査報告: 本会議は、金属・セラミックスのプロセス、微細構造、機能、力学特性などに関して議論する総合的な国内会議である。幾原は、現在文部科学省新学術領域で進行している“機能コア”のセッションを中心にオンラインで参加した。機能コア領域は、計算科学とナノ計測を高度に融合し、機能コアを明らかにすることによって、合理的に機

## 令和3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)

能材料の本質を明らかにする試みを展開している。すなわち、材料に光、熱、応力を与えると、転位や粒界の原子構造(コア構造)が変化し、その物性が変化する現象をターゲットにして、種々の材料を対象として各成果が発表されていた。その中でも特に、通常の可視光域では、脆性的に破壊するセラミックスが、光を遮断することで延性を示す現象は多くの研究者から興味を持たれていた。幾原は、同セッションにて、TEM その場観察による粒界-転位相互作用を中心に発表した(基調講演)。

・240th ECS Meeting: 10月10日~14日(オンライン開催)

調査報告: 米国電気化学学会が主催する国際会議であり、今回はオンラインで開催された。今回はリチウムイオン電池の研究で著名なフランスの Delmas 教授の退官記念行事として開催されたセッションを中心に発表および情報を収集した。幾原は、リチウムイオン電池の正極材料である鉄オリビンの結晶表面から脱着する Li イオンの拡散挙動を原子レベルで明らかにした成果について発表した。本セッションの多くは、リチウムイオン電池に関する内容であり、正極材料、負極材料、電解質材料の合成、評価、微細構造に関する研究を中心に議論された。本分野はフランスと米国がリードしているが、最近では中国も伸びてきている傾向がうかがえる。しかし、研究の中心は電気化学的アプローチが多く、まだ経験的な手法が主流である。一方、計算科学と原子構造解析を併用した研究アプローチも急速に増えている傾向があり、近いうちにそのアプローチが逆転することが予想される。

・日本顕微鏡学会シンポジウム: 11月25日~27日(福岡市: 対面開催)

調査報告: 電子顕微鏡学全般について、先端装置、材料、生物を議論する国内のシンポジウムであるが、今回は一部外国からの発表のみオンラインで国内は対面のみで開催された。外国からのオンラインは基調講演一件のみであり、ケンブリッジ大学のミズリー教授による“電子顕微鏡三次元観察”の発表があった。最近の顕微鏡法は三次元観察が取り入れられつつあり、本基調講演のほか、STEM による格子欠陥の三次元観察、深さ方向の原子分解能三次元観察、金属内析出物の三次元観察に関する報告がなされた。また、本

シンポジウムのテーマの一つとして AI を用いた定量解析法に関する発表もなされ、像の分解能向上、S/N 比の向上、EELS や EDS スペクトルの定量評価などに応用されていた。

・14th PACRIM (第14回環太平洋セラミックス国際会議): 12月12日~17日(オンライン)

調査報告: 環太平洋地区の各国が集まって、セラミックス科学に関する総合的な討論をする国際会議であり、今回はオンラインで開催された。時間的制限があったため部分的にしか参加できなかったが、電子顕微鏡法のセラミックスへの応用に関する情報を中心に調査した。電子顕微鏡分野では、その場観察、収差補正 STEM の普及、スペクトルの第一原理計算による解釈などが、セラミックスの解析においても普及してきている。特に機能セラミックスの評価において多く用いられてきていることが伺えた。

・PacifChem (環太平洋化学会議): 12月15日から19日(オンライン開催)

調査報告: 環太平洋地区の各国が集まって、化学に関する総合的な討論をする国際会議であり、今回はオンラインで開催された。電子顕微鏡法の化学への応用に関する情報を調査した。液体中における材料挙動を理解するための TEM 法が普及しつつある。電池反応や液体中の凝固過程、エンブリオの成長過程の観察などが行われつつある。しかし、ほとんどが欧米、中国からの報告が多く、日本はこの分野ではやや立ち遅れている感があった。

・MRM2021@横浜: 12月13日から16日(ハイブリッド)

調査報告: 本国際会議は日本が U-MRS と連携して主催する材料科学全般に関する国際会議である。幾原は、水素応用に関するセッションに参加し、材料中の水素解析に関する研究の動向を調査した。材料中の水素同定は、中性子回折などの手法が主流であり、多く場合回折的手法が用いられていた。一方電子顕微鏡による水素の直接観察も可能であることが報告された。収差補正技術を用いた環状明視野 STEM 法により結晶内の水素原子カラムが実空間で直接観察されることが示された。今後は本手法が広く用いられていくことが期待できる。

以下の学会・国際会議は、延期となったが、組織委員およびプログラム委員と以下の情報交換を行った。

## 令和3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)

・ Gordon 会議 (セラミックスの物性) : 8 月 2 日から 7 日 (South Hadley, MA, 米国) : 延期

趣意 : セラミックスの粒界・界面の構造解析、物性、機能特性について総合的に議論する伝統的な国際会議であるが、2022 年の 8 月への延期予定がアナウンスされている。

・ ELMINA2021 (2020 Electron Microscopy of Nanostructures ELMINA2018 Conference)

9 月 6 日～10 日 (ベオグラード、セルビア) 延期

趣意 : 最先端電子顕微鏡によるナノ構造解析に関する国際会議

・ Spinel Nitride Workshop (スピネル・窒化物国際会議)

9 月 6 日～10 日 (リュエデスハイム、ドイツ) : 延期

趣意 : スピネル構造材料、窒化物を対象に、その微細組織、特性、プロセスについて議論する国際ワークショップであるが、2022 年 9 月に延期予定であることがアナウンスされた。

・ Sintering 国際会議 : 2022 年 3 月 27 日から 3 月 31 日に延期 (岐阜)

趣意 : 焼結に関して総合的な討論を行う伝統的な国際会議

・ EAMC 会議 (東アジア電子顕微鏡会議) : 11 月 26 日から 29 日 (台北 : 台湾) : 延期

趣意 : 日本、中国、韓国、台湾の 4 か国の顕微鏡学会が共同で開催する、電子顕微鏡に関する会議であるが、延期して 2022 年 12 月に開催することを決定。

### 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

梅原 徳次(名古屋大学大学院工学研究科・教授)

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 2021 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等において基板へのバイアス電圧の付与だけでなく、Ta などの金属原子の含有により不對電子密度の抑制が可能となり、かつ金属原子によりカーボン系硬質膜の酸化抑制が報告されている。潤滑油中では、このような金属含有カーボン系硬質膜において添加剤由来の摩擦低減・耐摩耗向上のトライボフィルムの厚さや構造が摩擦面の材質や表面粗さに依存することが報告され、添加剤含有の摩擦面における低摩擦と耐摩耗の両立が模索されている。

持続型エネルギー獲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、3D プリンティングなどの Additive Manufacturing (AM) による新たなトライボロジー特性を有する機能性表面の創成の研究が米国機械学会の特集号として報告されている。AM 技術の進歩により、構造材としては強度的に不十分だが、製品の表面で機能を発現する部品への適用が進められている。具体的には、3 次元自由曲面のテクスチャリングによる高負荷容量すべり軸受面の提案や、空気圧を利用し形状変化する能動変形 (Morphing) 表面の摩擦面としての有効性の提案があり、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3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)

### 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—二酸化炭素削減・有効利用に関する熱利用技術の新たな潮流

児玉 竜也 (新潟大学自然科学系(工学部)・教授)

海外のサンベルトで実用化が進む太陽熱発電における研究開発のトレンドは、蓄熱技術の開発である。夜間電力としてはバッテリーよりも蓄熱が安価であることから、昼間は太陽光発電、夜間は蓄熱型の太陽熱発電を行うハイブリット型の発電プラントの建設が増えてきている。蓄熱技術の開発において、最も挑戦的な研究は、粒子を熱輸送・蓄熱媒体として利用する粒子顕熱蓄熱である。さらに粒子として酸化還元金属酸化物を使うことで化学蓄熱も付与できる。これらは従来の太陽熱蓄熱(硝酸塩系の熔融塩による顕熱蓄熱)よりも高温で高効率となる超臨界CO<sub>2</sub>タービンと組み合わせることが主目的であり、米国等で開発が進められている。一方、近年は、太陽光発電や風力発電の電力を一旦、熱に転換して蓄熱し、熱発電するカルノーバッテリーが注目を集めており、これまで太陽熱発電用として開発されてきた熔融塩による顕熱・潜熱蓄熱、合金による潜熱蓄熱、化学蓄熱が応用できることから、さらに蓄熱技術の開発がトレンドとなっている。しかし、熱電変換の部分のコストが高く、回転発電機の低コスト化が重要であるが、既に成熟した技術でもあり、この部分の低コスト化は容易ではないと予測される。これを補うためには蓄熱部の低コスト化が重要である。そのため海外のプロジェクトでは、空気を熱媒として砕石で顕熱蓄熱する手法が試験されている。太陽熱を利用し、金属酸化物を反応媒体とする2段階熱化学サイクルによって二酸化炭素と水を共熱分解し、合成ガスを製造する50kWhのソーラー反応器の実証試験がスペインで成功した。さらに熱効率を上げるには熱損失を低減する必要があり1000℃を超える太陽熱蓄熱システムを導入する研究開発が開始されている。

このように太陽熱発電、カルノーバッテリー、太陽熱による二酸化炭素分解の何れにおいても低コストあるいは高温での蓄熱技術の開発がトレンドとなっている。

### 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—無機ナノ材料科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)

本調査研究では、我が国におけるマテリアル戦略の観点からも国の重点的施策となっている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を主な対象とし、これら分野の先端学術研究領域における他の研究分野との融合による新規学術領域や境界領域における新たな展開を顕在化することを目的とした動向調査を行った。

材料学についても情報・AI(機械学習等)との融合材料創製、プロセス開拓、構造・物性評価について研究が増加している。例えばNEMSセンシングデバイスによるナノ領域で分子やDNA、特にここ数年間は新型コロナウイルスを含むナノサイズウイルスへの直接アクセス・情報認知手法が研究されている。一方、スピントロニクス関連研究では、従来の物理学的観点に立脚した機序解明や、ナノ構造・ナノ薄膜形成の高度化によるデバイス化・機能検証が活発であるが、スピントロニクスデバイスを建築物構造体などの巨視的健全性評価へ応用(例えば歪センシングや損傷探知など)する原理検証や社会実装研究などが始まっており、学術成果が社会的課題解決のための工学的応用へと展開されつつある。

材料の革新的プロセスとそれに派生した先端材料に関する研究(2021年10月26日~29日・韓国・Hybrid会議ほか)では、三次元造形、複合材料の局所反応や結晶学的・ナノ構造学および界面特性とマクロ特性との相関やインフォマティクス研究展開など、機能性ナノマテリアル創製・物性とバイオメディカル応用に関する研究(2021年10月13日~14日・Online会議)では、ドラッグデリバリー(DDS)用磁性ナノ粒子表面の分子修飾による機能発現や空間的分布を検知する手法(蛍光標識付与による生体内検出法)など、材料学的・化学的・生化学的知見を融合させた研究の新展開がされており、先端材料とデバイス応用に関しては(2021年11月15日・ITF日本および12月12日~16日・imec国際シンポジウムほか)、3D集積化・実装や、ナノ~サブナノスケール半導体創出における材料物性の

## 令和3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)

重要性や機能性複酸化物などが重要な次世代候補物質であることなどがトレンドとして研究が今後進みつつある。今後はデジタルトランスフォーメーション(DX)の加速と協調して、情報・AI駆動型材料物性研究やビッグデータ活用による新たな分析・解析手法の展開と活用など、材料学、デバイス・ナノ工学と情報学とを横断した学術領域として更に研究が活発化されるのは必然且つ必須であり、学術的見地のみならず、その工学的展開や社会実装への動きも注目すべき動向である。

### 構造工学および地震工学関連分野に関する学術研究動向 —構造物の強靱化・長寿命化に向けた新たな潮流と展開—

舘石 和雄(名古屋大学大学院工学研究科・教授)

前年度に引き続き、コロナ禍ではあったが、主要な学協会の行事はオンラインで開催されたことから、それらを基にして研究動向の分析を行った。ここ数年の構造工学分野の研究動向として、地震工学関連や維持管理関係の研究が活発であることが挙げられるが、本年度もその方向性に大きな変化はない。地震工学関連の研究としては、地盤振動に関する研究、構造物の耐震や免震に関する研究、被害推定やリスクマネジメントに関する研究がある。これに加え、レジリエンスをキーワードとする研究が盛んになってきている。維持管理関係の研究としては、構造物の劣化予測に関する研究、長寿命化に関する研究、センシングやモニタリングなどの研究が盛んである。新しい材料を劣化の抑制や補修・補強に活用しようとする研究も多く見られ、材料分野とのさらなる連携が期待される。

構造工学や土木工学に限らず、昨今の社会においてはデジタル技術が重要性を増しており、構造工学分野や地震工学分野においても、これらを活用するための研究が急速に増加している。地震工学関連ではビッグデータを活用した地震被害予測、維持管理関連ではインフラの状態や挙動を取得するためのデータ収集システムや、それによる健全度予測などが例としてあげられる。

2021年度は例年に比較して自然災害は少なかった

が、熊本地震から5年目の節目であり、各地でシンポジウムなどが開催された。構造工学分野に関連する出来事としては、10月に和歌山市の水管橋が落橋した。落橋原因として部材の腐食が疑われており、再発防止に向けた取り組みが必要である。また、2022年3月には東北地方を中心に震度6強の地震が発生し、東北新幹線の高架橋に損傷が生じた。構造物の耐震性について、今一度、確認しておく必要性を示唆する被害である。強靱化・長寿命化の実現にはまだ課題は多く、今後とも防災と維持管理は重要なキーワードであり続けると考えられる。誰が防災と維持管理を担っていくのかという点も大きな課題であり、人材不足の影響を緩和できるよう、デジタル技術の活用により省力化や効率化につながる技術の発展が期待される。

### 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(10 nm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(TEM)や原子間力顕微鏡(AFM)などの総称である走査型プローブ顕微鏡(SPM)である。探針を接近させるSPMは近視野法であり、電子線を利用する遠視野法である電子顕微鏡との複合化は原理的に容易で、開発も活発である。この複合化によってSPM探針の形状や試料との相対位置を確認できるようになった。

一方、探針を試料に接近させると、近視野法と遠視野法が独立に組み合わせただけでは無い現象が起きる。探針増強ラマン散乱(TERS)では、探針接近によって局所プラ

## 令和3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)

ズモンが共振励起されて強いラマン散乱が起きる。TERSはこの原理を使った高感度分析法として注目される。探針接触によって試料から採取された物質を、その探針先端から局所電界でイオン化放出させ、その種を質量分析する手法も開発された。このイオン放出は探針先端に誘起される高電界によって可能となった。また、AFM 検出系の感度を極高めることでカンチレバーの熱振動が捉えられている。探針が試料に接触すると共振周波数が変化する。熱振動スペクトルを解析すると、下層の局所構造が可視化できるという発見があった。以上の様に、SPM と他手法の単なる複合化ではない協奏的な一体化が注目される。SPM の動作原理に他の原理が絡むことで、未だ着目されていない科学原理が顕在化し、それが未踏領域へ展開されていくかも知れない。そこから“原子・分子レベルの表面・界面物性の解析技術”が飛躍し、イノベーションが生まれることも期待できる。

### 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～10THzであるテラヘルツ帯の高利得平面アンテナに関して学術研究動向を調査した。代表的な3つについて以下に内容を説明する。

A. Karimi らは、サイドローブレベルを低減するために、放射電力の振幅テーパを用いた不均一並列給電アンテナ設計を提案している。非対称電力分配器の位相非均一性は、開口効率を維持するため遅延線によって補償している。位相補償後の10dBビーム幅はE面で8.5%、H面で10.2%減少している。16×16と32×32素子のアレーアンテナを230-290GHz、すなわち23%の比帯域幅で設計し、利得はそれぞれ29.4-32.1dBiと34.6-37.6dBiであり、サイドローブレベルはそれぞれ21.2dBと20.5dBを実現している。

S. A. Razavi らは、140GHz帯の正面方向固定放射の高利得アンテナ開口部の新しい構成を提案している。金属製平行平板導波路の広壁に2組の対称的な漏れ波放射スロットを背中合わせに配置している。また、グレーティングロ

ープの問題に対処するために、給電導波管にコルゲート表面を適用している。設計された開口アレーは、142-148GHzの周波数帯で27.8-30.2dBiの指向性利得を持ち、正面方向固定放射を実現している。また、開口効率は60%～80%となっている。

D. Jung らは、広帯域2給電/2偏波アレーアンテナを設計している。4x1アレーは136～148GHzで動作し、垂直方向に構築された並列給電回路により給電され、プリント回路基板を用いて製作されている。広帯域インピーダンス整合のために、スタブ装荷近接結合スタックパッチアンテナを導入している。近接結合線路上の垂直ビア変換器に2個以上のオープン/ショートスタブを採用している。最大利得は9.1dBiを得ている。

2022年3月にスペイン、マドリッド市で開催された欧州アンテナ伝搬国際会議(EuCAP)にオンラインで出席し、調査研究活動を行った。特別セッションでは、第5世代・第6世代無線通信に向けたアンテナおよびビームフォーミング技術、IoTおよびスマート産業のための高度なRFIDシステム、リアルタイム医療応用に向けたマイクロ波/ミリ波イメージング、電波伝搬を制御するメタサーフェスと特性可変インテリジェント表面、実環境を模擬したコネクテッドドライブおよび自動運転のための自動車性能試験、無線電力伝送とRFエネルギーハーベスティングのためのアンテナシステム、複雑化・多様化するアンテナや無線チャネルの評価とモデリング、アンテナ・伝搬のための人工知能などが企画され、アンテナの昨今の研究動向を反映していると考えられる。

### 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）

新型コロナウイルス関係

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、

## 令和3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)

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。

2021年度日本建築学会大会梗概集(都市計画部門 520題)では、昨年からのコロナ禍により大会の総合テーマが「ウイズ/アフターコロナへの建築学の横断的検討研究成果の確認と対応指針づくり」としてオンライン開催された。都市計画部門でも「コロナ禍を発端とした生活様式変容と住環境計画への影響」や「コロナ禍における都市と観光」、「コロナ禍における大学キャンパスの空間変化や利用実態分析」に関するテーマ等、コロナ禍での空間利用に関する調査研究、アフターコロナに向けた計画技術の提案が新規に増加した。その他では、例年と同様に、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。また、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き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。

2021年度日本都市計画学会全国大会(141題)でも昨年からのコロナ禍の影響から、「業務活動」や「子育て環境や生活行動様式全般」、「住宅嗜好や居住地選択」、「緑道の社会的便益」、「人口流動」等とコロナ禍との関連や影響をテーマとする研究が登場している。その他では、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。

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)

「バイオ機能応用およびバイオプロセス工学」分野は、化学と生物工学の融合領域、ナノとバイオの融合領域とも密接に関連し、生体機能を活用した機能材料の創製、環境・医薬分野への展開が精力的に進められている。新型コロナウイルスの感染拡大の影響により、衛生的なディスプレイ製品を中心にプラスチックの果たす役割が再認識される一方、海洋や河川におけるマイクロプラスチックによる深刻な環境問題が表面化しつつあり、生分解性プラスチックやバイオマスプラスチックの利用拡大について重要性が増している。令和元年に策定された「バイオプラスチック導入ロードマップ」が更新され、プラスチック資源循環を総合的に進めていく方針が提示された。従来の化学プロセスの一端をバイオプロセスに置換する取り組みは世界的にも広がりを見せており、生分解性プラスチックの開発・生産およびプラスチック分解手法についても活発に研究が進められている。ポリエチレンテレフタレート(PET)は、世界的にも環境蓄積が問題となっているが、加水分解が難しい他、熱リサイクルによる強度低下が課題となっている。加水分解酵素や分解微生物の探索が進められ、*Ideonella sakaiensis* 201-F6株がPETバイオリサイクルを実現できる微生物として注目されてきた。さらに、PET分解酵素の基質結合部位の4ヶ所に変異を加えた改良型酵素が開発され、原料として市販されるアモルファスPETを10時間で90%程度分解できること、また、この分解物を利用した再生PETの特性が石油化学合成品と同等であり、PET循環システムの構築に貢献できる手法として提案された。このような取り組みは、環境微生物およびそのゲノム情報の利用、AI技術や合成生物学の活用により発展することが期待される。また、微生物等の非侵襲ラマン分光分析法、

## 令和3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)

ハイスループット微生物分離と解析を可能とするマイクロデバイス開発、各種半導体センサによる計測、超解像イメージングなどのバイオセンシング技術を組み合わせることで、さらに有用酵素や有用微生物の探索が加速され、これを利用したバイオプロダクションやバイオリサイクル技術の構築に向けた開発研究が進展するものと期待される。

### 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)

集積回路に関連して「Beyond CMOS」と呼ばれるポストCMOS技術(特にロジック)に焦点を当て調査を行った。急峻なサブスレッショルド特性が可能となるデバイスは低消費電力デバイスとして重要であり、バンド間のトンネル効果を利用する Tunnel FET (TFET) や強誘電体をゲートスタックに用いる負性ゲート容量FET (NCFET) が精力的に研究されている。TFETに関しては、主に Si, SiGe などの IV 属半導体、さらに III-V 半導体においても検討がなされ、Si/InAs ヘテロ構造においては 0.1pA/um で 20mV/decade を達成している。しかしながら実用的には 1-10uA/um が必要であり、また、この大電流化と急峻化はトレードオフの関係にあるため、これらの両立を可能にする有力な解は見つかっていない。また、依然として界面欠陥や界面均一性の制御にも問題があり、現状では、2次元材料を含めた材料研究に主眼を置くべき状況にある。NCFETに関しては、近年、様々なゲートスタック材料において検討がなされ、14nm finFET テクノロジーにより良好なサブスレッショルド特性と GHz 領域のリングオシレータ動作が確認されている。今後、本質的な動作周波数の限界見極めや、デバイスの信頼性評価が重要となってくると考えられる。

電子スピンの偏極を利用するスピndevice に関しては、チャネルと強磁性ソース・ドレイン間での抵抗比を利用する spin-MOSFET と、チャネル内でのラッシュバ効果を用

いたスピン偏極を利用する spin-FET が精力的に研究されている。どちらのデバイスに関しても、スピン偏極した電流注入が要求されるが、強磁性/MgO コンタクトを用いたスピン注入が室温で可能となっている。また、強磁性/MgO コンタクトを用いることにより、spin-MOSFET の室温動作も報告されている。一方、spin-FET に関しては、基本動作の検証に重点が置かれており、室温動作は報告されていない。いずれの場合においても、スピン偏極率は低く実用化には材料の革新、および回路構成法の検討が必須な状況にある。新奇特性を基礎に置くデバイスとしては、金属絶縁体転移を利用する Mott FET やトポロジカル絶縁体を利用するデバイスが挙げられる。前者においては、室温動作が可能であることから酸化バナジウム (VO<sub>2</sub>) が精力的に研究されている。しかしながら、良好なスイッチング特性(スイッチング速度やサブスレッショルド・スロープ)を得るための基礎検討の段階であり、MOSFET の代替よりむしろニューロコンピューティング等の Non-CMOS 回路への応用を念頭に置いた検討がなされている。当該物質では、対称性に起因するトポロジカルに保護(protected)された特性により無散逸な伝導を可能にするため低消費電力デバイスへの応用が期待されているものの、ON-OFF スwitchingの機構と手段が明確に示されておらず、基礎検討の段階を脱していない。

日本においては、TFET, NCFET, spin デバイスの研究は多くの世界を先導する研究がなされている。一方、Mott FET やトポロジカル絶縁体に関しては、基礎分野の研究は活発なものデバイス応用を指向した研究が手薄であり、この分野の活性化が望まれる。

### プラズマ応用科学関連分野に関する学術研究動向 -計測技術および実験技術の新たな潮流と展開-

佐々木 浩一 (北海道大学大学院工学研究院・教授)

低温プラズマ科学に関する研究分野では、プラズマと液体の相互作用、および、分子振動状態の基礎過程およびそのガス転換プロセスへの応用に関する研究分野への関心が高まっている。



## 令和3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)

プラズマと液体の相互作用に関する研究は、いくつかのジャーナルで特集号が組まれるなど、世界的に注目度が上がっている。その要因の一つは、実験技術が開拓され、以前より深部に迫る研究を実施できるようになったことにあると考えられる。水の蒸気圧は高いので、プラズマ・水相互作用は大気圧プラズマを用いて研究されることがもっぱらであったが、大気圧プラズマは制御性がよくなく、プラズマパラメータの測定も容易でないという困難があった。これに対して、低ガス圧で生成されるプラズマにジェット状の水を導入する方式で、化学反応をプラズマパラメータの関数として整理する研究が行われるようになってきている。また、大気圧プラズマの場合でも、高速水ジェットを用いた方式により時間を空間に置き換えて短寿命ラジカル反応性を直接調べようとする実験方式や、水を液滴化してプラズマ中を飛行させることによって反応性を可視化しようとする実験方式が出現している。また、実験研究の困難さから長らく研究進捗が停滞していた感のある水和電子についても、従来にはない検出方式を用いた研究が発表されている。

プラズマプロセッシングは、従来、プラズマがもつ高エネルギー電子を活用して分子をラジカルに変換し、ラジカルを凝縮相の表面に輸送して反応させる技術として発展してきた。プラズマ中の分子がガス温度と比較して高い振動温度をもつことは従来から知られていたが、振動励起状態を反応プロセスに活用しようとするアイデアはあまりなかった。このような中であって、振動励起状態をガス転換プロセスに活用しようとするアイデアが数年前に出現し、注目を集めている。特に、最近1-2年における環境技術に対する社会的関心の高さは、このテーマに対する追い風になっている。また、ナノ秒パルス放電と呼ばれる放電を生成するのに適した電源が入手しやすくなったことも背景にある。応用への期待を背景に様々な基礎研究が行われるようになったため、振動温度の測定法も発展してきており、従来の方法の感度および時間分解能を飛躍的に向上した方法や、従来にはない新しい方法が開発されている。

### 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

平山 朋子(京都大学大学院工学研究科・教授)

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3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。

- ・JST-CRESTにおいて「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明(代表:伊藤耕三)」と題した領域が3年目を迎え、トライボロジー分野に関連する課題が2件採択された。ナノからマクロへの力学現象の橋渡しはトライボロジー分野においても重要であり、関連分野においてもその認識が高いことを確認した。

- ・令和3年度は、トライボロジーに関わる国内外のほぼ全ての会議がオンライン開催となった。しかしながら、全世界的にそのような環境にも皆慣れてきたところもあり、令和2年度に比べると発表件数は増加傾向にあった。特に、ソフトマターの活用や最新の表面界面分析による新規取り組み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。

## 令和3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)

### 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)

高温超伝導線材の開発が進み、世界的に 10 社を超えるメーカーから、高性能な高温超伝導線材が市販されるようになってきている。現在市販されている高温超伝導線材は、希土類系高温超伝導 REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , RE は Y および希土類元素) と ビスマス系高温超伝導  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $\text{Bi}_2223$ ) および  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  ( $\text{Bi}_2212$ ) の 3 種類である。現在広く用いられている NbTi 合金と Nb<sub>3</sub>Sn 金属間化合物と合わせて、それぞれコストや性能に応じた使われ方をしている。これらに加えて、MgB<sub>2</sub> および鉄系超伝導である BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> も線材開発が勢力的に行われている。現在、これらすべての実用超伝導材料の性能向上と低コスト化が行われると同時に、これらを用いた様々な応用超伝導機器の開発も世界中で行われている。以下に 2021 年における学術研究動向を述べる。

高温超伝導材料のうち REBCO テープおよびこれを用いたケーブルの開発が活発に行われている。カーボンニュートラルに貢献できるとされる核融合炉開発において、特に、高温超伝導を用いることでコンパクト化された先進核融合炉開発が世界各国で行われている。これに加え、低炭素社会で重要な電動航空機において、高温超伝導モーターを用いるプロジェクトが日本、米国で行われている。これは、高温超伝導を用いることでモーターの大幅な軽量化が可能となる利点を活用する計画である。高温超伝導を活用した強磁場マグネット開発も、米国、日本、フランスで 30 T を超える研究用強磁場超伝導マグネット開発計画が予算化されている。このように、高温超伝導材料を用いた多くの超伝導応用機器開発が各国で予算化されつつある他、民間企業が主体となった研究開発も進んでいる。

### 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一

### 新規細孔性材料の応用展開一

片田 直伸 (鳥取大学工学部・教授)

ハイブリッドセミナーによってグリーン・サステナブル・ケミストリー (地球環境問題解決に貢献する化学) 分野における新規細孔性材料の研究の最新動向を調べた。また細孔性材料関連で 2020~2021 年度で最大の国際会議 FEZA2021 (Conference of the Federation of European Zeolite Associations, ヨーロッパゼオライト学会連合会議) 参加し、細孔性材料の研究動向について多くの情報が得られた。口頭発表 136 件に占める、扱っている物質、研究内容の占有率から研究動向を分析した。これらから、以下のことがわかった。

ゼオライトをはじめとする細孔性材料の分野ではユニークな特性を持つ新規物質が、従来ほど完全に経験論ではなく、ある程度の設計ができるようになってきている。1990~2010 まで盛んであったメソポーラスシリカなどメソポーラス物質の研究は下火となっている。代わって MOF (金属有機構造体) など有機細孔性材料 (ほとんどは MOF) の研究が盛んである。その中身は、新規構造の剛性や設計、吸着、分離への応用 (③-[C]) が顕著であるが、当初期待された CO<sub>2</sub> 分離への応用に関する研究例はトラディショナルな細孔性材料であるゼオライトより少ない。また触媒としての応用も少ない。以前から利用されているゼオライトに関して、新規物質の合成や機能解明は非常に盛んであり、また CO<sub>2</sub> 関連以外の触媒反応 (その多くは石油精製及び石油化学物質の製造であった) への応用研究が依然多い。前述のように CO<sub>2</sub> 分離への応用に関する研究例も多い。細孔性材料の世界をリードしてきたゼオライトの科学と技術はますます進化しており、地球環境問題を解決するための応用も盛んにチャレンジされている。MOF はこれに続いて新規合成、吸着分離への展開など、基礎レベルの研究が盛んに行われており、MOF ならではの用途も見出されつつあると言える。

### 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 一構造用セラミッ

## 令和3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)

### クスを中心とした機能と粉体材料プロセスにおける新たな潮流一

多々見 純一(横浜国立大学大学院環境情報研究院・教授)

無機材料物性関連分野では、優れた機械的、熱的、電気的、磁氣的、光学的、化学的性質を得るための研究開発が進みつつある。その重要性は Society 5.0 の実現や、ゼロエミッション、SDGs の達成に向けてますます高まっている。そのために微構造制御や粉体プロセスの検討が盛んに行われている。例えば、生体関連材料の HA セラミックスについては、バイオメテックの観点から結晶配向制御、特に、c 軸配向制御の研究が行われている。ナノインデンテーション等を用いたミクロスケールの力学特性評価も活発に行われており、マクロな力学特性の発現原理の解明に近づきつつある。透明セラミックスは粉体から作られるセラミックスの究極の姿の 1 つであるが、近年これをシンチレーターやレーザー発振に活用しようという動きが盛んである。酸化物セラミックスが主要なトレンドではあるものの、非酸化物セラミックスについても研究が進展しており、研究の裾野が広がっている。これらの高機能化を実現するためには、精緻な粉体プロセスが不可欠である。多孔体は材料の軽量化だけでなく得意な空間を利用した各種機能を活かした応用も検討されている。多孔体の空隙を制御するために様々な取組が行われているが、スラリー設計に基づくものが、多様な造形と併せて特に活発である。スラリーを用いた際には必ず乾燥工程が必要であるが、毛細管力に起因した乾燥応力により割れや変形が生じることも課題であった。これを勘と経験からの見かけの最適化から脱却するための各種実験的・計算科学的アプローチがなされており、粉体材料プロセスの高度化が進展しつつある。

### 地盤工学関連分野に関する学術研究動向一沿岸から沖合に展開する技術開発一

谷 和夫(東京海洋大学学術研究院海洋資源エネルギー学部門・教授)

地盤工学は主に建設などに係る産業からの技術的な要

請に応える形で発展してきたが、これまで産業活動のほとんどが陸域で行われてきたことから、また海域での産業活動も海上輸送と漁業が主であったことから、海洋(沿岸域を除いて)の地盤に技術的な関心を寄せる産業分野は海底油田・ガス田の開発に限定されていた。しかし、海洋探査に伴い海域の表層にも鉱物・エネルギー資源が賦存することが知られようになり、また海洋に流出する廃棄物による海浜・海底の汚染への対処も重要になってきた。そこで、沿岸から沖合に関心の範囲を広げつつある海洋地盤工学に関連する分野につい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、コロナ禍のためすべてオンライン参加だった。

その結果、主に以下の結論を得た。

- 1) 建設に係る地盤工学分野としては、洋上風力発電施設のための基礎地盤調査、基礎工あるいは係留工の設計・施工について活発に技術開発されている。
- 2) 建設以外に係る地盤工学分野としては、熱水鉱床、マンガン鉱床、メタンハイドレートに加えて、レアアース泥の探査・採掘に係る技術開発が活発化してきた。また、海底ケーブルの防災として海底表層の地すべり・乱泥流を対象とした研究が新たな研究領域として注目される。

### 知的ロボティクス関連分野の学術研究動向

#### 一情報化社会における人支援のためのロボット技術応用一

村上 俊之(慶應義塾大学理工学部・教授)

人の動作モデリングと人支援システムへのロボットの応用分野では、安全・安心のための新たな機構設計や各種センサ情報に基づいた高度モーションコントロールの研究開発が多くなされている。こうしたモーションコントロール、いわゆる制御理論の実応用についてはサイバーフィジカルシステムを意識した開発も行われており、現実空間における各種情報を仮想空間に集めるデジタルツインに加え、その解析結果を現実空間へフィードバックする試みは現実空間における物理的な人の支援システムの効果的

## 令和3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)

な実現において要となっている。また、人や環境を含めたシステムの相互作用に関係する制御においては、リアルハプティクスと呼ばれる考え方が継続して議論されており、IEEE Industrial Electronics が主催する高度運動制御に関する国際会議 (AMC: International Conference on Advanced Motion Control) において、2021 年 9 月の開催学会に引き続き 2022 年 3 月開催学会においても幾つかのセッションにて最新の研究発表が行われていた。ここでは、人や環境との安全なインタラクションを実現するため、ばね機構を含むアクチュエータシステムの研究開発事例もいくつか散見された。モーションコントロールの人支援システムへの応用展開にも関連し、人の状態を観測するセンサ技術、情報処理技術も不可欠となり、電気学会の産業応用部門が主催する国内会議では、サーバーフィジカルシステムによる制御理論の融合技術等、制御理論の新展開に関する発表が多くみられた。IEEE Industrial Electronics Society が主催する産業電気部門の年次シンポジウムでは人の動作解析における加速度センサの応用とエンパワーメントシステムへの展開が示されており、日常生活におけるリハビリテーションの実施が可能なシステムとして、心臓病患者の外来スクリーニングと治療後のモニタリング、高血圧の診断、および脳卒中後の患者のリハビリテーションへの応用開発事例等の発表が行われていた。上記に加え、各学会ではロボットに関わる産業機器のカーボンニュートラルを意識した最新技術も多く見られた。

### 医療福祉工学関連分野に関する学術研究動向 — 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 —

田中 真美 (東北大学大学院医工学研究科・教授)

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、医療費や医療従事者に対する負担を軽減できるよう、疾患の早期発見、早期治療が極めて重要である。医療や福祉において対象となる人間の体の部分や、またそれに対する計

測・診断や治療の方法も多く、さらに術前(治療前)診断・検査、治療における治療支援および治療デバイス、またその後のリハビリまでと医療福祉のあらゆるフェーズが対象となる。そのため医療福祉工学分野のカバーすべき領域は極めて広い。

医療福祉工学を支える工学系の学問は、機械工学、電気工学、材料科学、化学工学、情報科学など多岐にわたる。また医療系においても、内視鏡、超音波医学、ロボット外科、人工臓器学などの診断・治療の機器を対象とした学会や、消化器外科、脳神経外科、整形外科、内科、小児科、皮膚科学など臨床系の学会も多数ある。医療福祉工学の発展には、医療ニーズと工学の技術シーズの相互理解が重要であるが、以上のような状況より、互いが必要とする情報にたどり着くことが困難であることが大きな課題である。近年、日本内視鏡学会と日本機械学会の交流や、日本コンピュータ外科学会で工学系のシンポジウム枠が確保されるなど、医学系と工学系の交流が行われ、この課題を解決する対策が講じられつつあるが、さらに広がりをもって深めていくことが求められる。

超高齢化社会やこれからの With/post コロナ社会を考えると、オンライン診療や遠隔手術や日常的なヘルスケアのさらなる発展が求められる。そのためには AI を用いたデジタル技術やセンシング技術は重要である。今後さらに人々が健康に留意することが予想され、不調の予測や病気の予防も重要なテーマとなる。そのためには、リアルタイムでの生理計測、得られたデータも含む医療データによる健康管理・促進・最適治療の実現とビッグデータの活用と、そしてその取り扱いの議論が深まることが求められる。また AI を用いたデジタル技術、センシング技術に加えて、モデリング、シミュレーションやナノテクノロジーの医療応用の研究の深化も活発に進められている。