

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)

「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—」

幾原 雄一 (東京大学大学院工学系研究科・教授)

令和2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ほぼ全て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、関係者との可能な限りコンタクトし、以下に示す情報を得た。さらに、界面工学およびナノ計測分野と密接に関係している新規国家プロジェクトである“マテリアル先端リサーチインフラ事業”の展開についての調査も行ったので合わせて報告する。

・日本セラミックス協会第33回秋季シンポジウム：9月2日から4日(オンライン開催)

調査報告：本学会では、機能コア構造解析に基づく材料科学への新展開という関連シンポジウムが開催された。本シンポジウムにおける最先端電子顕微鏡法を用いた研究発表では、三次元電子顕微鏡法の開発、微分位相コントラスト法を用いた界面電場の計測において新しい進展があった。三次元電子顕微鏡法では白金金属粒子触媒への応用が、また、微分位相コントラスト法は窒化ガリウムのPN接合界面への応用が紹介された。また、走査型トンネル顕微鏡の分野においても、装置の高速化や触媒への高度応用など最近の進展について示された。

・日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会：9月14日～17日(オンライン開催)

調査報告：機能コアの材料科学のセッションがあり、強電界下でのセラミックスの物質輸送現象、TZPの応力下での微細組織に対する直流電場印加の効果、STEMによるNd-Fe-B系熱間加工磁石の磁区構造・微細組織の直接観察、Ba₂Ti₆O₁₃焼結体の一次元トンネル構造と電気伝導特性、Si添加アルミナΣ13粒界における粒界フェレット形成など界面計測関連についての最新の発表があった。いずれも最先端STEM法、第一原理計算などを駆使した定量的な解析が行われていた。

・日本顕微鏡学会秋季シンポジウム：11月19日から21日(北海道大学)(オンライン開催)

調査報告：顕微鏡学に関する総合的な討論をする国内シンポジウムであり、最先端電子顕微鏡に関する発表の他、プローブ顕微鏡、レーザー顕微鏡、光学顕微鏡などの新しい展開についての発表があった。特に磁石など磁性材料を観察する場合、従来の電子顕微鏡では、試料周りに磁場が発生し、その観察を困難にしていたが、最近無磁場の状態でも観察できる無地場電子顕微鏡が開発され、幾つかの磁石や鉄などへの応用例が示された。また、高分解その場観察法についても新たな展開があり、STEMも用いた高速スキャンにより、原子レベルでの動的観察が可能なことが示された。

その他、以下の学会・国際会議は、紙上開催あるいは延期となったが、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。①日本顕微鏡学会：5月24日から27日(大阪)：紙上開催、②Thermec2020(先端材料プロセスに関する国際会議)：5月31日から6月5日(ウイーン、オーストリア)：延期、③NANO2020(ナノ構造に関する国際会議)：7月7日から10日(メルボルン、オーストラリア)：中止、④Gordon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、⑤ICC8国際会議(第8回セラミックス国際会議)：8月23日から28日(プサン、韓国)：延期、⑥Spinel 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、⑦ELMINA2020(2020 Electron Microscopy of Nanostructures ELMINA2018 Conference)9月14日から18日(ベオグラード、セルビア)：延期予定、⑧IMNano(International Workshop on Advanced and In-situ Microscopies of Functional Nanomaterials and Devices)：10月11日から14日(ヨーテボリ市、スウェーデン)：延期、⑨EAMC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、⑩PacifChem(環太平洋化学会議)：12月15日から19日(ハワイ)：延期、⑪Sintering国際会議：2021年3月27日から3月31日(岐阜)：延期。

以下、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

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)

開一について、最新の関連プロジェクトに関しての調査を行った。この境界領域においてもデジタルトランスフォーメーション (DX) の流れが大きくなっており、文部科学省を中心に関連のプロジェクトや事業が立案されている。ここでは、界面科学・ナノ計測の展開に重要な役割を担うと考えられるマテリアル DX プラットフォームの基盤となるマテリアル先端リサーチインフラ事業の内容について調査したので報告する。

本事業では、ナノテクノロジープラットフォーム事業においてこれまで各機関で独立に展開中の微細構造解析、微細加工および分子・物質合成プラットフォームを有機的に統合し、新たにデータ利活用ファンクションを組み込みことを意図して立案された。これより、高品質かつ大量のマテリアルデータの創出、収集、蓄積、構造化、利活用およびデータ人材育成を可能にするマテリアルデータハブ拠点を構築し、マテリアル DX プラットフォーム構想に貢献することを計画している。これにより、日本の産学官におけるマテリアル研究力強化および高度人材育成に資することを最終的な目標としている。本事業のハブ機関として、東北大、東大、NIMS、名大、京大、九大の5機関が採択されたが、特に、界面科学に関連する内容は、革新的なエネルギー変換材料の研究（蓄電池、太陽電池、光触媒、熱電材料、エネルギー輸送・貯蔵材料、磁性材料等）や高度なデバイス機能発現のためのマテリアル研究（パワーデバイス、MEMS デバイス、セラミックデバイス、IoT センサー、アクチュエータ等）であり、これらの研究を加速するためのインフラハブ拠点の形成を目指している。これらのマテリアル分野はSDGsやSociety5.0の実現においてその根幹を担う研究分野でもあり、今後益々重要になるものと思われる。

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）

機械工学における機能性表面としては、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・超耐摩耗が求められ、確実な駆動や安全のためにあらゆる環境における高摩擦が求められる。また、摩擦帯電による摩擦発電など、摩擦によるエネルギー獲得が可能な機能表面の開発が行われている。

オンラインによる国際・国内会議で取得した機能性表面の創成と評価の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より硬質でドロップレットがなく10 μ m厚さの厚膜成膜の開発が進められている。また、剥離などの不安定破壊を防ぐために窒素を含有させる ta-CNx の実用性の拡大が追求されている。潤滑油中では、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提案され、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。

機能表面の効率的設計手法のために、摩擦に伴うコーティング内や界面の応力のシミュレーションが広い領域で進み、実験値との比較によりその有用性が明らかになっている。さらに、摩擦に伴う摩擦界面のその場観察が無潤滑中、潤滑中などでカーボン系硬質膜により進められ、超低摩擦発現のための必要条件が徐々に明らかになっている。

新しい動きとして、摩擦面の機能として、荷重の支持や動きの案内としての機能だけでなく、同時に発電するなどの新たな機能を生み出す研究が、物理学に基づく提案から、実用化を目指した次のステージへと進められている。これらの研究においては電子の挙動が重要であり、電子の挙動は凝着力も支配し、摩擦の本質にも大きく影響を及ぼす。そのため、摩擦と電子の挙動の関係が今後明らかになり、上記の超低摩擦・超耐摩耗表面の創成や機能表面の効率的設計方法においてもそれらの知識がフィードバックされることが期待できる。

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)

「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)

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連の研究が活発であることが挙げられ、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、震源モデルに関する研究、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などが挙げられる。維持管理関連の研究としては、構造物の劣化予測に関する研究、構造物の長寿命化に関する研究、補修・補強法、センシングやモニタリングなどの研究が盛んである。

2020年7月には熊本県を中心に九州や中部地方など集中豪雨が発生し、インフラも被害を受けた。球磨川では14の道路橋と3つの鉄道橋が流出するという大規模な被害となった。流されたのは1980年代以前に完成した比較的軽い鋼橋であり、90年代以降に造られた橋は流失を免れている。古い橋に大きな外力が作用する場合の崩壊制御についてはまだ研究が十分ではないが、地震工学と維持管理工学の双方に密接に関わる重要なテーマであり、今後の研究の推進と、その成果に基づく構造物の強化が求められる。また、2021年2月13日には東日本大震災の余震とみられる最大震度6強の地震が発生したが、構造物本体の被害は比較的軽微であった。震度がやや小さかったとはいえ、現在の耐震補強の方向性の正しさを示唆する事例である。全国的にはまだ残されている構造物の耐震補強を着実に推進する施策を後押しするためのハード、ソフト技術の開発が必要である。

2014年に義務化された5年に1度のインフラ点検が2巡目に入っている。2019年に、近接目視に代わってロボットを用いることが認められるようになって以降、ドローンを含むロボットなどの活用技術に関する研究や、それに付随する大量のデータ処理、健全度診断などに関する研究が行

われている。また、既設構造物の補修・補強技術に対するニーズはますます高く、研究開発も非常に活発である。

インフラがますます高齢化する中で、自然力に対する強靱さも担保しなければならないという使命から、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。課題は複雑化するばかりであるが、当該分野以外からの新しい技術流入の動きや、従来型の枠組みを明示的に超えて複数分野の連携や融合を模索しようとする動きが出始めており、今後の発展が期待される。

ナノ材料科学関連、ナノバイオサイエンス関連分野に関する学術研究動向—生体分子ナノ界面の高感度センシング及びイメージングにおける新たな潮流と展開—

玉田 薫 (九州大学先端物質化学研究所・教授)

今年度の世界的学術研究動向は、COVID-19の影響下であり、生化学・医学の分野に限らず、全ての学問分野において、COVID-19パンデミックの終息に貢献しようという大きな動きがあり、ナノの研究領域も例外ではなかった。生化学、薬学、分析化学関係に限らず、ナノサイエンスの分野でも、最先端ナノ材料を駆使したマスクやフィルターの開発、センサー応用などの報告例が多数見られた。年度後半になると、コロナ禍により中断していたSDGs関連研究、特に環境・エネルギー、カーボンニュートラル等に関する研究が加速化してきたように見受けられる。国内でもグローバル・アジェンダや情報社会の台頭を見据えた将来構想が提示された。

調査対象である超解像度バイオイメージング分野では、分子レベルの現象の高解像度・高速イメージング手法として、共焦点回転ディスク顕微鏡の台頭が目立った。高出力レーザーを使用した場合、光退色が問題にならないければ、スキャン型でも十分に高速の画像取得が期待される。ディスクの回転速度は十分に速く、フレーム速度には影響しない。共焦点回転ディスク顕微鏡に限らず、ハイパワー光源を用いた最先端光学技術の生体観察への応用は、最終的には低侵襲性の問題(光毒性の回避)になると予想される。

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)

今年度はこれに加えてペロブスカイト半導体粒子についても調査を進めた。有機無機ハイブリッド材料であるこの粒子は、化学的安定性が確保できれば、発光素子あるいは太陽電池等の分野に大きな変革をもたらすと期待される。日本が発見した次世代ナノ材料として注目が集まっている。

今年度はコロナ禍のために、渡航あるいは国内移動での学会参加による情報収集に代わり、海外研究機関とのオンラインを通じた情報交換を進めた。移動を伴わない新たな国際共同研究・国際連携のあり方について、学ぶことができた1年であった。

プラズマ応用科学関連分野に関する学術研究動向ーレーザーを利用したプラズマ・ガス・流れ計測における新たな潮流と展開ー

佐々木 浩一 (北海道大学大学院工学研究院・教授)

レーザーを応用したプラズマおよび流体の計測に関する研究分野にはいくつかの新しい動きが見られた。一つは Femtosecond Laser Electronic Excitation Tagging と名付けられた方法で、強力なフェムト秒レーザーにより流体中のある位置において窒素分子を窒素原子に解離し、ある寿命を経て窒素原子が窒素分子に戻る時に生じる発光を画像計測することで、窒素原子の寿命の間の流体の動きを1ショットのレーザー照射により可視化している。また、従来からあるレーザー誘起蛍光法によるラジカル等の密度分布の可視化においては、多数回のレーザーショットの結果を積算するのが通常であったが、このようにすると実際の流体の動きが把握できないことを問題視し、1ショットのレーザー照射で十分なS/N比をもつ画像計測を実現しようとする動きもある。

自由電子によるレーザー光の散乱現象であるトムソン散乱を利用したプラズマの計測は、核融合研究において広く用いられているが、プラズマの電子密度および電子温度の測定法としては低温プラズマにも適用されてきた。核融合研究では、炉心プラズマの閉じ込め改善の研究において協同トムソン散乱によるプラズマの不安定性計測が大きい

な役割を果たしたが、最近、低温プラズマにおいても協同トムソン散乱法が用いられ、高電圧パルスマグネトロンスパッタリングプラズマにおけるExBドリフト不安定性が調べられた。

レーザー光の吸収を利用したプラズマ中のラジカル密度計測では、キャビティリングダウン分光法を酸素原子の禁制遷移に適用することで、従来はパルス色素レーザーを用いた2光子励起レーザー誘起蛍光法を必要とした酸素原子密度計測を、安価な半導体レーザーを光源に用いて実現できるようになった。レーザー光の波長を少し変えることで、酸素負イオンおよびオゾンの密度を測定することにも成功している。

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擦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。トライボロジーに関わる研究動向および展開として、令和2年度の動向事例を以下に記す。

・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)」、JST さきがけにおいて「力学機能のナノエンジニアリング(代表:北村隆行)」と題した領域が2年目を迎え、トライボロジー分野からも積極的な応募がなされ、そのうち数件が採択された。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な課題であ

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)

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2年度前半は、国内のトライボロジー会議 2020 春をはじめとする多くの国内会議、国際会議がコロナ禍により中止となった。後半はトライボロジー会議 2020 秋別府や STLE Tribology Frontiers 等の国内・国際会議がオンラインで開催された。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。

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—実力ある固体触媒材料の進歩—

片田 直伸 (鳥取大学・工学部・教授)

オンラインセミナーによってグリーン・サステナブル・ケミストリーにおける固体酸塩基触媒研究、および CO₂ 利用研究の最新動向を調べた。バイオ資源を利用するための固体酸塩基触媒の分野では、研究対象が燃料製造から化学原料を製造する高度な方法に移っており、最先端では含窒素化合物の特性を活用した試みも始まっている。固体酸触媒として活躍するゼオライトでは、細孔と骨格それぞれの役割が解明されている。現実に行進しやすい CO₂ の還元(水素化)反応が熱力学を考慮して選ばれて触媒開発が行われ、CO₂ を基幹高分子原料に転換可能となっている。また、高輝度放射施設の本分野における有用性も明らかにされた。

直近8年の論文出版動向を調べ、文献数、引用件数、これらの2013年と2020年を比較した伸び率などから、現在と近未来の研究トレンドを推測した。カーボンニュートラル、人工光合成など CO₂ 抑制に関する一般的な研究例は増加傾向にある。中でも CO₂ 光還元・電気化学的還元の研究例が顕著に増加する一方で、二酸化炭素捕集・貯蔵はあまり増加していない。水の電気分解、水素と CO₂ から有用物質を得る各種技術、関連するメタン脱水素の発展も著しい。ヨーロッパを中心にカーボンニュートラルの早期実現を求める世論が高まり、CO₂ を太陽光のエネルギーで直接還元する CO₂ 光還元、光のエネルギー吸収は太陽電池に任

せるが CO₂ から CO や有機化合物への転換を電気化学・電極触媒化学的に行う CO₂ 電気化学的還元、水の電気分解による水素製造、CO あるいは有機化合物を得る CO₂ 水素化など、カーボンニュートラル実現のための現実的な技術開発が急である。またこれらを支えるペロブスカイト型化合物など新規無機材料の光触媒、電気化学的触媒分野での研究例も急増している。

以上のように、カーボンニュートラルに向けた研究が盛んであるが、現実性に鑑みて淘汰されはじめている。

無機材料および物性関連分野に関する学術研究動向—エンジニアリングセラミックスおよび粉体材料プロセスにおける新たな潮流と展開—

多々見 純一 (横浜国立大学大学院環境情報研究院・教授)

無機材料および物性関連分野では、機械的、電氣的、磁氣的、光学的特性などの向上のための物質探索や機能発現原理の解明、新しいプロセスの開発などを通じて、環境エネルギー分野や安心・安全な社会を支える重要な各種セラミックスの研究開発が進んでいる。その重要性は、Society5.0 やゼロエミッションの実現のためにますます高まっている。ただし、このような無機材料は、優れた特性を有しているながらも、プロセスコストが高いことや機械的信頼性が低いことに起因して、普及が十分に進んでいない。近年、我が国でも JST A-STEP にて『セラミックスの高機能化と製造プロセス革新』をテーマとして、製造時のエネルギー多消費や内部構造の不均一性を解決するための集約的な研究開発が進んでいる。このように、原料粉体の製造から成形、焼結までのセラミックス粉体プロセス全体を科学的な観点から再認識して高度化を図っていく研究が世界的にも進展している。特に、セラミックスのプロセスの最前段である原料粉体の表面改質やこれを利用した成形プロセスおよび微構造制御は多岐にわたって研究が拡大しており、関連分野の学術誌である Advanced Powder Technology のインパクトファクターがここ5年で大きく増加(2.478→4.217)としていることから、注目度の高さが確認される。また、究極の無機材料の一つは、焼結体

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)

であるにもかかわらず気孔を極限まで低減させた透明／透光性セラミックスである。この分野も近年の焼結科学の発展に伴って報告例が増加しており、単結晶が実現できない多結晶体での透明無機材料の報告もなされている。光学デバイスの高機能化や高出力化に伴い、樹脂材料やガラスでは対応できない領域での無機材料の利用への期待は高まっており、ますます研究が増加していくことが考えられる。

地盤工学関連分野に関する学術研究動向—海洋の地盤への展開—

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地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、海洋の地盤を対象とした地盤工学関連分野に関する学術研究動向を調べた。

調査方法は、学術会合への参加、文献調査、海浜ごみの現地調査である。学術会合には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。また、海浜ごみの現地調査は東京湾から房総半島の沿岸6か所の海浜公園ないし海水浴場において行った。

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、熱水鉱床やメタンハイドレートなどの探査・採掘に係る技術開発と、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始めている。

- 3) 環境地盤工学の分野では、海浜のごみ問題が社会的な関心を集めているが、清掃技術の開発は未着手のようである。

制御およびシステム工学関連分野に係る学術研究動向に関する調査研究—情報化社会におけるモーションコントロールの新たな展開—

村上 俊之 (慶應義塾大学理工学部・教授)

制御およびシステム工学関連分野では、機械システムやロボットの実応用を中心にモーションコントロールを軸とした展開が多くなされている。また、Industry4.0やSociety5.0のようにサイバーフィジカルシステムを意識した産業応用にも関心が寄せられ、現実空間における各種情報を仮想空間に集め、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モーションコントロールに深く関係している。例えば、モーションコントロール分野では、人や環境を含めたシステムの情報収集のため、リアルハプティクスと呼ばれる考え方が出されており、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)においても幾つかのセッションにてハプティクスの発表が行われていた。同時に、人や環境との安全なインタラクションを実現するため、先進の力制御に基づいたソフトモーションに関する事例がいくつか見受けられた。モーションコントロールにも関連し、システムの状態を観測するセンサ技術、システムの状態を物理的に変化させるアクチュエータ技術は重要であり、電気学会が主催する電気機器システムに関する国際会議(ICEMS: International Conference on Electrical Machines and Systems)では、最新のアクチュエータシステムやセンサレス制御システムの発表が多くみられた。サイバーフィジカルシステムにおいては、デジタルツインに関連した研究も散見されるようになってきており、IEEE Industrial Electronics Societyが主催する産業電気部

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)

門の年次国際会議ではサイバーフィジカルシステムの特別セッションにてデジタルツインの実開発に関する話題が多く扱われていた。

日本国内においては、2018年の北海道地震によるブラックアウトや2019年の首都圏における台風被害に端を発して社会システムのレジリエンスに関する意識が高まっている。これは制御およびシステム工学関連分野でも重要であり、データに基づいた設備の運用と保全の改善を目指したメンテナンスのスマート化等をシステム論的に取り扱う事例も見られた。