技術功績

(1) 難削材切削の研究並びに技術指導

狩野 勝吉*

難削材切削は，ステンレス鋼/耐熱鋼ばかりでなく，チタン合金や超耐熱合金も一般部品用に多用され，量的拡大と質的多様化が進んでいる．

受賞者が，三菱マテリアル㈱の切削工具部門で切削加工技術の研究に従事していたとき，航空・宇宙分野に使用される超耐熱合金，その他の難削材の製造・販売をしている社内の他の事業部の加工現場で，それらの材料の切削トラブルがあり，その対応を受賞者の研究室が担当することになった．難削材切削のトラブル対策に必要な技術情報がほとんどない状態での対応だった．幸い，理解ある上司と良き同僚に恵まれて，次第にトラブル対策にやり甲斐を感じるようになった．

難削材切削には，切削データや知見を誰にも見せない，教えないという閉鎖的な雰囲気があった．閉鎖性の打破を図るため，多くの超耐熱合金について，旋削，エンドミル切削，ドリル切削，正面フライス切削といった加工形態別に，再現性が得られる最適な工具材種，切れ刃形状，切削条件が明らかになるまで，被削性研究の切削実験を繰り返し，加工現場と共有してトラブル対策に活かした．

1989年３月，「難削材の切削加工技術」を工業調査会から刊行した時，ある企業の生産技術担当者の訪問を受けた．難削材切削の厳しさを一日語り合った．自分より難削材切削で多くの苦労を重ねている人がいることを知った．研究を著書に纏めたことで難削材から離脱しようと考えていたが，これからが本番であることを思い知らされた．

切削研究の軸足を「臨床工学」に移した．主な切削データを森北出版「難削材・新素材の切削加工ハンドブック」に収録した．ステンレス鋼，金型用鋼，チタン合金の切削は，日刊工業新聞社刊で普及版に纏めた．超耐熱合金は養賢堂「データで学ぶ超耐熱合金切削の基礎技術とトラブル対策」に整理した．

電話やメールでの技術相談にも，加工現場を訪問して生産性向上やトラブルシュートに当たるように心がけた．切削データの入ったUSBを持参するだけで有益な技術情報の交換が可能だった．難削材切削は総合工学的な研究が必要で加工現場は宝の山だった．研究室では得られない多くを学ぶことができた．受賞に当たって，研究に没頭する環境を整えてくれた現役時代の上司や同僚，客員先や非常勤先の諸先生方，そして，苦楽を共にした加工現場の技術者たちに心から御礼を申し上げたい．

* 正員，難削材切削技術研究所（元 三菱マテリアル㈱）（〒302-0104 守谷市久保ヶ丘3-8-2）

技術功績

(2) 人とインタラクションするロボット（知的遠隔作業ロボット，ロボティックルーム）の研究開発

佐藤 知正*

受賞者は，人とインタラクションするロボットの研究分野において，知的遠隔作業ロボット，ロボティックルームといった新しい機能や形態をもったロボットシステムを実現した．ここで開発された遠隔作業技術や環境型人間支援技術は，コロナ禍を経て，リモートシステムやロボット要素が分散配置されたサイバーフィジカルシステムとして注目されている．

具体的に説明すると以下が成果の要点である．1）知的遠隔作業ロボットの研究（1976-1991）では，人の動作とロボットプログラム動作を重畳して利用する制御法の開発，作業知識ベースとそのデータ管理を操縦動作であっても実施できる行動理解システムの機能を実現した．これらの要素を搭載したロボットに関する論文「人間との共同作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム」は，論文賞を受けている．また，２）ロボティックルームの研究（1991-2013）では，部屋そのものをロボットとするというユニークな発想のもと，ロボティックルームがその中にいる人間を支援する機能を世界に先駆けて実現した．ロボティックルームの第一世代は，常時患者の呼吸をモニタし必要な物品をもってきてくれる“ロボティッ病室”として，第二世代は500個強のセンサを備えた“センシングルーム”として，第三世代は，物品搬送・収納を支援する部屋として実現された．その過程で，環境からの人間行動計測や支援機能が提示された．その成果は例えば「ロボットによる人間の意図の能動的理解機能」や「日常生活支援のための机上作業のモデル化およびその認識と支援軌道の生成」として論文化され，これらも論文賞を受けている．

以上の“人とロボットのインタラクション（遠隔作業ロボットやロボティックルーム）の研究”は，コロナ禍を経て，ロボットのリモート価値の見直しとともに，新たなロボットの地平を拓こうとしている．具体的には，コロナ感染に頑健なリモートロボットを活用する産業やサービスロボットシステムや，世界に分散されたサプライチェーンの遠隔メンテナンスなどの展開である．2002年の解説（日本ロボット学会誌Vol. 20 No. 5 pp482-486）にも書いたように，これからの遠隔作業システムが，「知的なロボット要素，あるいは知的なヒューマンインタフェース要素が人の周囲に分散配置され，ネットワークによって結合されている分散ロボット，ないし環境ロボットや空間ロボットシステムとして，今後実用化される」時代を迎えている．

* 永年会員，東京大学 名誉教授（〒277-0871 柏市若柴227-6 柏の葉キャンパス147街区 C-1808号）

技術功績

(3) 粒子積層膜創製“溶射技術”の学理解明と社会実装

福本 昌宏*

受賞者は粒子積層膜創製“溶射技術”の学理解明と社会実装化に貢献した．原子を基本構成単位とし数μm以下の薄膜を創成するメッキやPVD法等とは対象的に，膜創製単位をμmサイズの粉末粒子とし，高い製膜速度や厚膜形成能を特長とする表面技術分野が存在する．この技術は数μm以上の厚膜創製を守備範囲とし，独自の膜創製技術領域を担う．代表的な製品としてタービンブレード用熱遮蔽皮膜，いわゆるThermal Barrier Coatingがあり，薄膜では困難な構造特性や機能性を厚膜として創出可能なことから，産業技術上不可欠の存在である．このような膜創製における既存技術の代表が“溶射法”であり，各種産業分野での膜創製における基幹技術として重要な役割を果たしている．ただし，同法の高度化に向け飛行粒子のインフライト情報を活用するプロセス制御化が検討され始めているが，取り組みは未だ緒についたばかりであり，プロセス制御指針の確立が喫緊の課題となっている．

現行，既存の製膜現場では，多くのプロセス因子の組合せの下に作製した夥しい数の試験体の特性評価による絨毯爆撃的手法により適正製膜条件を探索しており，時間，コスト，労力の浪費を余儀なくされている．受賞者は単一溶射粒子の基材上での偏平現象に同法制御の本質が潜むと看過し，国内外に先駆けてその学理解明に着手した．その結果，粒子偏平が遷移的急峻に変化する基材温度および雰囲気圧力の臨界値を見出し，同時に，粒子偏平への影響において基材温度，雰囲気圧力の両因子に等価性のあることを国内外に先駆けて明らかにした．加えて，基材温度，雰囲気圧力の変化に伴い皮膜密着強度が，単一粒子偏平挙動の変化に呼応して遷移的に変化する事実から，両因子の組み合わせからなり，高特性皮膜を高効率の下に製造可能とするプロセス制御指針を3次元遷移曲面として提唱した．本指針に基づけば，高制御性の下に，より効率よく高品位な膜創製が可能となり，実生産ラインにおける溶射皮膜部材の品質保証性を飛躍的に改善可能である．確立した制御指針はすでに国内外の大手自動車およびエネルギー関連企業の製膜現場に導入され，年間数十万点を超える製膜ラインにおいて，皮膜部材の品質保証性を飛躍的に改善するとともに，コスト削減の経済的効果をもたらすなどの社会実装化の実績を通じ，我が国ものづくり技術の発揚に寄与している．

* フェロー，豊橋技術科学大学（〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1）

技術功績

(4) 空間知能化による人間ロボット協調システムの研究開発

水川 真*

受賞者は，ロボット工学の分野において，空間知能化と遠隔操作ロボットをエージェントとした人間協調支援システム，およびそのプラットフォームとしてのRT（Robot Technology）ミドルウエアの研究開発を行い，これらにもとづくサービスロボット統合技術の社会展開において，当該分野に多大な研究業績をあげている．

ロボット用ミドルウエアに関しては，各社各様であった産業用ロボットにおける通信インタフェースに着目し，分散オブジェクト技術を適用して共通化をはかった，これにより独立したアプリケーションソフトウエア，周辺機器，他社ロボットの組み合わせで，多様なユーザニーズに応えて，系列に縛られない自由なシステム構成を実現するミドルウエアORiNの開発を推進した．

これらと並行して，ISO，OMG（Object Management Group）およびCiA（CAN in Automation）において，ロボット用ミドルウエアやサービスロボットモジュールの国際標準化に取り組み，ロボットの産業界での活用，社会実装を強く意識した活動を推進した．これにより，組込み系からアプリケーションまで，ネットワーク上にモジュールを組み合わせてサービスシステムを実現する枠組を具体的に示し，複数の国際標準規格を策定した．

この，アプリケーションとデバイスの自由な組み合わせを担保するミドルウエアと分散オブジェクトソフトウエア構成により，空間分散センサと分散ロボットを協調させ，空間知能化システムを構成した（空間知）．さらに，サービスロボット用の状況理解システム（RTオントロジー）を提唱し，人の行動観察から状況を判断し，適切なサービスを提供する，物理エージェントシステムにインテグレーションし，人の生活を環境からサポートするコンセプトを具体的に示した．

上記コンセプトとミドルウエアを，複数の組織で開発したサービスロボットの連携に適用し，2005年愛知万博においてNEDOブースにてデモを実施した．これは，高齢化社会への適用や身体性拡張により，社会活動に対する機会均等の実現など，技術の可能性を示している．

ロボットシステム開発は，ともすれば個別開発に陥りがちであるが，専門技術者の確保が困難になる時代に，技術の恩恵を社会展開する上で，このような抽象化した枠組に基づく俯瞰的システムプラットフォームの寄与はきわめて大きい．

* フェロー，芝浦工業大学 名誉教授（〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5）

技術功績

(5) 自動車用内燃機関の潤滑解析と低摩擦要素の技術開発

村上 元一*

受賞者は，長年にわたり自動車用内燃機関の潤滑解析，摺動部品などの要素技術開発を行い，内燃機関の燃費向上，信頼性確保に貢献してきた．特に以下3点について顕著な業績をあげている．

①レーザ誘起蛍光法による油膜厚さ計測法の開発およびピストン潤滑解析

ピストン周辺1次元，2次元油膜厚さを可能とする計測法を開発した．受賞者は，高回転まで可視化可能とするライナの製作，１次元計測のための光学系の検討で主体的役割を果たした．また，本計測手法および実働時ピストン摩擦計測を用いた潤滑解析により，低摩擦となるピストンリング構成，ピストンスカートプロフィール諸元を示した．さらにピストンリング油膜厚さ，摩擦予測計算技術も確立させ，ピストン周辺の潤滑解析力を著しく向上させた．これらの解析手法は多くの研究者に参考にされている．

②低粘度オイルの検討

研究当時の2000年代前半，市場油の粘度グレードと比較し大幅に低粘度化したオイルを試作し，摩擦影響をエンジン部位毎に分析，適用条件を明確化させた．ディーゼルで発生するススや，オイル添加剤，表面処理の影響も解析した．本件はその後，ディーゼルエンジン用0W-30オイル，ガソリンエンジン用0W-8オイルの実現につながっている．

③漏れ油量低減軸受など低摩擦要素技術の開発

クランク軸受の一部に溝を設けることでオイル引き戻しが起こり漏れ油量が低減，低温時の摩擦低減効果が得られることを見出し，共同開発会社と実用化した．またピストン樹脂コート処理，動弁系DLC - Si処理の実用化にも貢献した．

さらに受賞者は，2014年から５年間実施された産官学プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム・革新的燃焼技術（損失低減チーム）に，東京都市大学の客員教授として参画，内燃機関の画期的摩擦低減の研究に貢献した．

* 正員，トヨタ自動車㈱（〒471-8571 豊田市トヨタ町1番地）

論　文

(1) Loss in discharging atoms through artificial hole for fabricating metallic micro/nanowire by electromigration

木村 康裕*1

金属マイクロ・ナノワイヤは，その極小なスケールに由来した特異な物理的諸特性を活かすことから，デバイス性能を飛躍的に向上させる次世代材料として注目されている．金属マイクロ・ナノワイヤを物理的に創製するために用いられる手法の一つにエレクトロマイグレーション（EM）ワイヤ創製技術がある．EMは高密度電子流を駆動力とした金属原子の拡散現象である．元来EMは電流印加に由来して微細な電子回路に断線や短絡などの配線損傷を与える害悪因子として知られてきたが，これを有効活用することでワイヤ創製が可能となる．EMワイヤ創製技術において鍵となる構成要素は，多くの原子集積を許容する保護膜と原子排出を促す微細孔である．EMの原子集積に伴う局所的な高応力場に集積原子の逃げ道となる微細孔を設けることで，応力解放を伴って原子が排出し，心太を作るようにワイヤ状に創製される．まさしく原子拡散に基づく原子集積が生む静水圧応力の変化が微細孔から原子を押し出す，電流を用いたミクロスケールでの押出加工といえる．このようにEMワイヤ創製技術においては，その創製原理はある程度確立しておりこれまでいくつかの実験的試みが行われているが，ワイヤ創製能力の定量評価に関する知見は少なかった．特にこれまで原子押出に要する微細孔の大きさによりワイヤ創製速度が大きく変化する創製損失の存在が実験的に示唆されていたが，その原因について十分に検討されていなかった．

本論文では，微細孔径がワイヤ創製能力に及ぼす影響を，ワイヤの創製速度やワイヤ創製に用いるしきい電流値の観点から定量的に評価した．本論文の成果は大きく２つあり，原子の流れである原子流束と連続体の流れである流速について数学的アナロジーを見出し前述の創製損失を説明したこと，ワイヤ創製の駆動力たる静水圧応力変化と実験印加電流の関係式を導くことで実験的に創製損失を制御可能にしたこと，である．この創製損失の解明と制御が最適なワイヤ創製条件の提案に繋がり，実用化が滞っているマイクロ・ナノマテリアル分野を開拓するきっかけを与えると期待できる．

＊ 掲載：Mechanical Engineering Journal，6-1，(2019-2)，18-00269.
*1 正員，東北大学大学院ファインメカニクス専攻（現 名古屋大学大学院マイクロ・ナノ機械理工学専攻）

論　文

(2) Weitzenböck多様体による らせん転位のモデル化と数値解析

小林 舜典*1　垂水 竜一*1

結晶性の金属およびセラミックス材料の強度や塑性変形特性は，多くの場合，転位の運動に支配されている．そのため，転位がその周囲に形成する応力場と，そこから導かれる転位間の力学的な相互作用を正確に理解することは，材料力学分野における中心的な研究課題の一つである．これまで，転位の応力場解析には古典転位論が用いられてきたが，この理論が導く応力値は転位芯の直上で無限大に発散するという大きな問題を抱えていた．この問題に対して，著者等は微分幾何学に基づく転位の応力場解析を実施し，これによって転位芯における応力の発散問題を完全に解決することに成功した．この理論では，これまでディラックのデルタ関数を用いて表されてきた不連続な転位密度場を，連続な転位密度場へ置き換えることを解析の出発点としている．材料内に転位密度が連続分布した状態は通常のユークリッド空間には収まらず，これを一般化したWeitzenböck多様体として取り扱う必要がある．著者等はその数学的記述に必要な枠組みを構築するとともに，構築した理論をアイソジオメトリック解析へ実装することによって，転位の応力場の数値解析法を確立している．論文中で行われた直線状らせん転位に対する解析では，転位芯では応力の発散が抑えられるとともに，転位芯の遠方では従来の古典転位論と一致した応力場が得られており，理論の妥当性を定量的に検証している．また，得られた応力場には非線形効果による静水圧成分が含まれており，これまでせん断成分のみと考えられてきたらせん転位の応力場を見直す必要があることを指摘している．このように，本研究成果は従来の古典転位論に基づく転位の力学的描像を本質的に発展させており，今後も当該研究分野に大きな影響を与えることが期待される．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，87-894，(2021-2)，20-00409.
*1 正員，大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻

論　文

(3) A new framework for design and validation of complex heat transfer surfaces based on adjoint optimization and rapid prototyping technologies

亀谷 幸憲*1　福田　豊*2　大澤 崇行*3　長谷川 洋介*4

持続型社会の実現に向けて熱の有効利用は極めて重要な課題であり，エクセルギー損失削減のため熱交換器は更なる小型化，高性能化が要求されている．圧力損失と伝熱性能の間には強い相似性が存在するため，圧力損失を抑えつつ伝熱性能を向上させる伝熱面設計は容易ではない．また，乱流伝熱面設計に，支配方程式に基づく数理最適化を適用する場合，現象の非線形性の取り扱いが課題となる．一方で，多自由度の数理最適化で得られた形状は一般に複雑であり，加工の制約から実証実験が困難な傾向にある．本研究では，高性能熱交換器開発を加速するため形状最適化・試作・実証実験を統合する新たな設計フレームワークを提案した．

伝熱面形状最適化のため，複雑乱流伝熱面における流れと熱伝達の直接数値シミュレーション（DNS）により，熱流動場の全時空間スケールを解像しつつ，その情報に基づき伝熱面を最適化する随伴最適化アルゴリズムを開発した．本アルゴリズムではコスト関数並びに時間平均化された支配方程式（RANS方程式）から随伴方程式を導く．この際，方程式を閉じるために渦粘性・渦拡散係数を導入し，それらをDNSから得た乱流統計場を用いて局所の乱流運動エネルギー及び温度変動の生成を再現するように決定する．更に，本形状最適化アルゴリズムを用いて，数値的に得られた複雑な最適形状を３Dプリンタで成形することにより，短時間でその伝熱及び圧力損失特性を計測する実験システムを構築し，最適形状の性能向上を実証する．

本フレームワークを異なる配置・寸法のピンフィンに適用し，伝熱の流体のポンプ動力に対する比であるアナロジファクタの最大化を試みた．計算機を用いた最適化の結果，どのケースにおいてもフィンは流れ方向に伸張し，上流側に特徴的な凹凸を形成した．数値解析結果の考察より，最適形状では，フィンの後流のカルマン渦放出が抑制されて圧力損失が著しく減少する一方で，伝熱は表面積増加によって維持されていることが確認された．また，最適形状の供試体を樹脂３Dプリンタで製作し，非定常法とピトー管により熱伝達係数及び圧力損失をそれぞれ評価した．その結果，数値解析結果と同様の熱水力性能向上が確認された．これにより本設計フレームワークの有効性が示され，高性能熱交換器開発の飛躍的な加速が期待される．

＊ 掲載：Journal of Thermal Science and Technology，15-2，(2020-8)，JTST0016.
*1 正員，明治大学
*2 AGC㈱
*3 東京大学
*4 正員，東京大学

論　文

(4) Thermal efficiency improvement of super-lean burn spark ignition engine by stratified water insulation on piston top surface

長澤　剛*1　大倉 優一*2　山田 涼太*3　佐藤　進*1

小酒 英範*4　横森　剛*5　飯田 訓正*6

2050年カーボンニュートラル達成のために，乗用車用ガソリンエンジンは，液体燃料の利便性，経済性，従来インフラの有効利用，将来のカーボンニュートラル液体燃料利用の観点から，車両動力の部分電動化と組み合わせて継続利用する必要がある．ガソリンエンジンを継続利用するうえで機関熱効率の向上は最重要課題であり，これを実現する技術として超希薄燃焼が近年注目を集める．通常の理論空燃比と比較し，空気過剰率を２倍程度とする超希薄燃焼においては比熱比向上および低温燃焼による冷却損失の低下に伴って熱効率の大幅な向上が期待されるが，持続可能社会に適合する高熱効率の達成には，高負荷領域におけるノッキング抑制と冷却損失低減が欠かせない．ガソリンエンジンの効果的なノッキング抑制・冷却損失低減手法として，水噴射により筒内ガス温度を低下させる手法が以前より研究されている．従来のガソリンエンジン水噴射の多くは水を吸気ポートに噴射しており，この場合，空気・燃料の混合気は比較的均一に冷却される．しかし，これにより燃焼速度は大きく低下するため，超希薄燃焼においては燃焼を不安定化させてしまう．

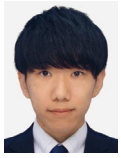
そこで本論文では，燃焼室内のピストン表面近くに水を噴射して低温水蒸気層を形成することにより，超希薄燃焼においても燃焼を悪化させることなくノッキング抑制と冷却損失低減を実現する新しい燃焼法（層状水蒸気遮熱燃焼）を提案している．単気筒エンジンを用いて水噴射時期と噴射量の影響を詳細に調べ，提案技術の開発指針を明らかにするとともに，石英ガラス製エンジンを用いた水噴霧の可視化と筒内瞬時壁面熱流束計測により，ピストン表面付近における水噴霧層の形成とそれに伴う壁面熱流束低減の様子をとらえ，水蒸気成層化による遮熱機構を明らかにしている．これらの結果を基に，圧縮比17の単気筒エンジンにおける超希薄燃焼に水噴射を適用することにより，グロス図示熱効率（機械損失やポンプ損失を含まない効率）52.6%を達成した．これは論文公表された乗用車用ガソリンエンジンとしては世界最高水準の値であり，本論文は持続可能社会における超高熱効率ガソリンエンジンの１つの可能性を示している．

以上のように，本論文は新たな乗用車用ガソリンエンジンの熱効率向上技術を提案し，その効果を実機試験により実証しており，持続可能社会に適合する高効率エンジン開発に大きく貢献すると期待される．

＊ 掲載：International Journal of Engine Research，22-5，(2021-5)，1421ページ．
*1 正員，東京工業大学工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）
*2 東京工業大学工学院（現）三菱電機㈱
*3 東京工業大学工学院（現）トヨタ自動車㈱
*4 フェロー，東京工業大学工学院
*5 正員，慶應義塾大学理工学部（〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1）
*6 永年会員，慶應義塾大学名誉教授

論　文

(5) 遠心圧縮機の羽根なしディフューザで発生する旋回失速の非定常挙動と構造



藤澤 信道*1　三井田 弘*2　田島 健太*3　太田　有*4

本研究の目的は，輸送用あるいは空気圧送用など社会全般で広く実用化されている遠心圧縮機を対象として，その羽根なしディフューザ部分にサージ点近傍で発生する旋回失速の流動構造・旋回機構を解明することである．ターボ機械のひとつである遠心圧縮機は，化学プラントでの気体の圧送や内燃機関への過給など，工業用途において重要な役割を担っており，高い安定性や効率性が求められる．しかし，圧縮機において高い圧力比が得られる高負荷運転時には，サージや旋回失速といった非定常現象が発生することで効率の低下だけでなく，機器や配管系の破損を招く危険性がある．このため，各種圧縮機では失速余裕と呼ばれる安全運転範囲を設定して非定常現象の発生を抑制しており，これらの運転余裕を設ける必要性から本来要求される高い圧力比や広範な運転流量範囲を犠牲にしている．

そこで本研究では，実験・解析両面から，サージ点近傍における遠心圧縮機のディフューザ内部で発生する旋回失速内部の微細な渦構造や渦の非定常挙動を調査し，失速セルの発生機構や旋回機構を解明した．ディフューザ失速セルは渦型室の非軸対称な圧力分布に影響を受けHub壁面の境界層剥離が集積することで初生し，Hub，Shroud壁面交互の境界層剥離と渦型室からの逆流に起因するディフューザ出口部の低速領域で構成されることを明らかにした．また，失速セルの前縁側で羽根車吐出流と渦型室からの逆流が合流することにより，流れ角が小さくなることで，境界層剥離と渦型室からの逆流が周方向に初生・成長し，低速領域を形成しながら失速セルは旋回していることを示した．解析により明らかになった失速セル内部の流動構造により，遠心圧縮機特有の非軸対称条件下での汎用的な失速形成モデルを提案した．

今回の基礎研究によって，旋回失速に代表される圧縮機内部で発生する非定常現象の発生機構が解明され，失速回避策が提案されることでより高い圧力比条件下での運転が可能となり，圧縮機性能，効率を飛躍的に向上させると共に，将来的には温室効果ガスなどの発生を抑制することで地球環境に優しい産業機械の設計手法が提案されることが期待される．

＊ 掲載：日本機械学会論文集, 87-894, (2021-2), 20-00364.
*1 正員，早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科
*2 正員，早稲田大学大学院，基幹理工学研究科
*3 早稲田大学大学院，基幹理工学研究科
*4 フェロー，早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科

論　文

(6) Risk map generation system for intelligent vehicles on community roads via data-driven approach

伊藤 太久磨*1　曽家 将嗣*2　通山 恭一*3　鎌田　実*4

自動車の様々な安全運転支援システムの実用化に伴って，交通事故の被害件数は年々減少傾向にある．しかし，現在実用化されているシステムの大部分は高速道路や市街地の幹線道路を対象としたものとなっており，住宅街の生活道路を対象とした技術開発は未だ十分とは言えない．生活道路では歩行者や自転車等と自動車との出会い頭事故が大きな問題となっているが，路地の見通しの悪さによって車載センサによるセンシングには限界があり，既存の緊急自動ブレーキシステムでは十分な効果が発揮できない可能性が懸念される．この様な状況に対し，著者らは自動車自体を知能化し，潜在リスクの先読みによって予見的な減速制御介入を行う先読みブレーキの開発に取り組んでいた．このシステムは，見通しの悪い路地での出会い頭事故防止には大きな効果が期待できるものの，比較的安全な路地であっても十分な減速制御介入が発動するため，ドライバの直感的な受容性を損ねる事が課題となっていた．そのため，安全性とドライバ受容性を両立させるために，交通環境のリスクに応じたアダプティブな減速制御介入が求められており，そのリスク情報を制御システムに提供するための仕組みが求められていた．

そこで本論文では，生活道路の見通しの悪い路地のリスク情報を提供する事を目指し，データ駆動型の手法でリスク地図を構築する手法を開発した．まず，生活道路での一般ドライバの走行データを収集し，運転の慎重さの観点から各ドライバのタイプをクラスタリングし，慎重群・インタラクティブ群・非慎重群の三群に分類する手法を提案した．また，慎重群の減速準備行動から疑似交差点等の潜在リスク地点を抽出する手法を開発した．さらに，インタラクティブ群の減速準備行動の特徴量から見通しの悪い路地のリスクレベルを推定する手法を開発した．そして，自動車教習所の運転指導員による評価結果をリファレンスとし，提案手法による推定リスクレベルとの一致度をコーエンのκ係数によって評価したところ，基本的な路地については両者の評価は“かなりの一致”となり，提案手法の有効性が確認された．

＊ 掲載：Mechanical Engineering Journal, 7-1, (2020-2), 19-00119.
*1 正員，東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
*2 東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻（〒277-8563 柏市柏の葉5-1-5）（現 日鉄ソリューションズ㈱）
*3 元 トヨタ自動車㈱（〒410-1193 裾野市御宿1200）
*4 フェロー，東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻（〒277-8563 柏市柏の葉5-1-5）（現（一財）日本自動車研究所）

論　文

(7) 鏡面に生じた微小凹凸の画像化技術に関する理論解析

廣瀬 知弘*1　渡辺 恵一*1　佐藤 康元*1　北山 綱次*1

須原 克洋*2　猪口志 祐人*2　鈴木 哲也*2　加藤 武彦*2

製品に生じたきずや凹凸など異常部の有無を確認する目視検査の省人化のために，外観検査システムによる自動化が強く望まれている．外観検査システムの技術開発では，照明とカメラを用いて検査対象に生じた異常部をパソコンのディスプレイで人が視認できる画像（以降，「検査用画像」）を生成するため，異常部もしくは正常部の特徴を強調する画像処理が重要になる．

検査対象が鏡面製品の場合，表面に生じる異常部は，くすみや汚れなど，表面の反射率が局所的に低下している状態（以降，「反射率低下」と称す）と，表面の反射率を保持したまま微小な凹凸（1 ㎛程度）が生じている状態（以降，「微小凹凸」と称す）とに分けられる．局所的な反射率低下は，蛍光灯などの照明パターンの直下で行われる鏡面製品の目視検査の場合，周囲との明暗差により容易に認識することできる．一方，微小凹凸は，わずかな光の反射方向の差を認識する必要があるため，検査員が製品もしくは照明の向きを何度も変えながら表面を凝視してようやく認識することが可能となる．

ここで，外観検査の自動化を狙った従来のシステムでは，異常部のサイズが小さくなると，「反射率低下」を画像化することは難しかった．加えて，反射率を保持したままの「微小凹凸」を画像化することはさらに難しいため，熟練検査員の目視検査レベル（深さ 1 ㎛以下）の検出精度を達成した研究事例はこれまでなかった．この課題解決に向けて，本論文では，外観検査システムにおいて，異常部を人が認識できる画像として生成することを研究対象とした．そして，微小凹凸を法線ベクトルの微小変化として考える独自の着眼点のもと，これまで経験則に依存していた照明パターンを含む撮像光学系と対象物の間における光線群のふるまいを定式化した．具体的には，照明パターンの走査時には微小凹凸に相当する部分で画像に位相ずれが生じること，その位相ずれを照明パターンの走査中に得られる複数枚の画像を微分処理後に積算して1枚の検査用画像に生成することでその部分を強調し，1 ㎛以下の凹みを画像化できることを理論と数値計算により証明した．

本成果は，これまで製品の特徴（形状や検出対象）に応じて試行錯誤していた外観検査システムの開発を大きく進展させるものであり，製品設計時の出荷基準の策定，生産現場の省人化および出荷品質の安定化など，産業界への広範な貢献が期待できるものである．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，87-893，(2021-1)，19-00328.
*1 正員，㈱豊田中央研究所
*2 豊田合成㈱

論　文

(8) 培養骨格筋をアクチュエータとした泳動ロボットの作製

松下 和磨*1　森本 雄矢*1, *2　竹内 昌治*1, *2, *3

近年，生体材料と人工物を組み合わせたバイオハイブリッドロボットが注目されている．特に生体材料として筋組織をアクチュエータとすることで，多様な運動を実現できるバイオハイブリッドロボットが作製されている．中でも泳動ロボットは，生体から摘出した筋組織や培養した心筋細胞をアクチュエータとしたバイオハイブリッドロボットが作製されているが，これらのロボットは生体の個体差や周期的な自発収縮のために再現性や制御性に課題があった．これらの課題の解決には，個体差が少なく作製でき，電気刺激によってオンオフ制御が可能な培養骨格筋組織をアクチュエータとする泳動ロボットの実現が必要である．これまでも培養骨格筋組織はゲル内で立体的に細胞培養することで形成されてきたが，収縮特性を失わずに培養するためには，組織長を一定に保った状態での培養が適していることが知られている．そのため，培養骨格筋組織をアクチュエータとする際には，培養時の組織長の維持とロボットの駆動性を両立させるために，ロボットの寸法や構造に制限があった．

そこで本研究では，別々に準備した培養骨格筋組織とロボット骨格を統合することで駆動する泳動ロボットを作製した．まず，取り外し可能なアンカにて培養骨格筋組織の両端部を固定し，硬い培養台にアンカを設置した状態で筋芽細胞を培養することで，電気刺激によってオンオフ制御が可能な骨格筋組織が作製可能なことが確認された．その後，この骨格筋組織をアンカごと培養台から取り外してロボット骨格に移動させることで，収縮能を失うことなく骨格筋組織をロボット骨格上に設置することに成功した．本方法では同一培養条件で準備した骨格筋組織を複数のロボット骨格に搭載できるため，同じ収縮能を有した骨格筋組織をもつロボットの駆動特性が評価可能となる．本研究では尾ひれの形状が培養骨格筋組織をアクチュエータとする泳動ロボットの駆動特性に影響を与えることを明らかにし，尾ひれを薄くすることで泳動ロボットが前進可能となることを見出した．

本研究で提案した方法は泳動ロボットに限らず，様々な形状をしたロボット骨格やデバイスに培養骨格筋組織を搭載する方法として広く応用されていくことが期待される．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，86-890，(2020-10)，20-00180.
*1 学生員，東京大学 工学部（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
*2 正員，東京大学大学院 情報理工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
*3 正員，東京大学 ニューロンインテリジェンス国際研究機構（〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1）

論　文

(9) 車両の過渡姿勢が制動感に及ぼす影響に関する研究

門崎 司朗*1　加納 民夫*2　森本 知昭*3　渡部 大治*4

乗用車のブレーキフィーリングを評価する上で，ペダル踏力やストロークと減速度の関係に加え，ピッチングやヒーブ（上下運動）等の車両姿勢が影響することが知られている．前者，すなわちペダル操作と前後運動の関係は，そもそものドライバの意図が前後運動の制御であることから重要視され，研究例も多く見られる．また，後者の車両姿勢はドライバの操作目的とは異なることから，姿勢変化が少ないのがよいと考えるのが一般的である．

一方，操舵操作に目を向けると，ドライバの意図であるヨー運動や横運動に加えてロール姿勢も重要視されており，好ましい姿勢変化が存在するという研究例が見られる．そこで著者らは「制動時においても操舵同様に好ましい姿勢変化があるのではないか」との疑問を抱き，研究に着手した．

著者らはアクティブサスペンションにより任意の車両姿勢を実現可能な実験車を用いて，ピッチングおよびヒーブの減衰比に対する制動感の関係を調査した．10名のパネラ評価の結果，ベース車両に対してピッチング減衰が大きくヒーブ減衰が小さい車両の評価が最も高いことが示された．これは「姿勢変化が少ない（＝ピッチもヒーブも減衰大）のがよい」とは異なる結果であり，制動時にも好ましい姿勢変化があるという仮説が正しいことが証明された．

次に，この制動時の好ましい姿勢変化を一般的な車両で実現する手法に着手し，前後の制動力配分を動的に変化させる手法を考案した．一般的な車両はアンチダイブやアンチリフトといったサスペンションジオメトリによって制動力を上下力に変換する機能を有しており，これを応用することで車両姿勢を制御するものである．側面視の運動自由度は前後・上下・ピッチの３自由度あるのに対し，前輪・後輪の制動力という２自由度の制御であるが，制御自由度の不足分はサスペンションのハード諸元を制御定数と同等に扱うという工夫で補っている．この制御の効果をシミュレーションおよび実車評価で確認し，狙い通りの車両姿勢を実現できることを確認した．最後に，14名のパネラによる官能評価を行い，「制動初期に地面を掴みにいくイメージ」「ペダルタッチした瞬間から効きを感じられ安心感がある」「コーナへのターンインでブレーキを抜きながら姿勢を決めやすい」といったコメントに代表される高い評価が得られた．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，86-890，(2020-10)，20-00053.
*1 フェロー，トヨタ自動車㈱
*2 トヨタ自動車㈱（故人）
*3 トヨタ自動車㈱
*4 ㈱デンソー

論　文

(10) 放電加工による内部空間形状の創成に関する基礎的研究

因幡 勇汰*1　LI SHUOXUN*2　山口　篤*3　岡田　晃*4

現在の機械加工技術では，小径の入口穴を通して金属材料内部に大きな内部空間形状を形成することは難しい．これを実現するためには，比較的細い切削工具を入口穴から挿入した後に，工具軸方向とは異なる方向へ工具を送る動作が必要であり，このため工具形状を屈曲や湾曲させる工具の変形機構が必要となる．しかしながら，機械加工では加工中に工具先端に大きな加工反力が作用するため，細い工具の変形姿勢維持は難しく，工具は変形したり破損したりする．一方，放電加工は過渡アーク放電によって材料を溶融除去する加工法であり，工具電極に作用する加工反力が極めて小さい．したがって，適切に穴内部で変形する工具電極機構が実現できれば，内部空間形状加工実現の可能性が高い．

本論文では，市販の形彫放電加工機に備わった標準的な電極サーボ送り制御と電極回転機能を利用し，入口穴径の数倍以上の直径を有する軸対称空間形状を工作物内部に形成することを目的とし，新たに開発した公転球電極を用いた内部空間形状加工について実験的検討を行った．この電極は，加工機ヘッドに取り付けられた回転丸棒部と先端に電極球が接続された傾斜丸棒とが連結された構造となっており，連結部では傾斜丸棒が鉛直方向に自由に傾斜できる．はじめに，加工機主軸の回転に伴って電極球に作用する遠心力を変化させることで傾斜角度を精度よく制御できることを高速度観察によって検証した．次に，公転球電極を用いた場合の電極消耗率や加工面粗さ等の放電加工特性について評価した．そして，主軸回転数と電極Z座標制御によって電極球を任意の位置に正確に位置決めできることから，いくつかの軸対称の内部空間形状の加工を試みた．その結果，下穴直径に対し３倍以上の円筒形，および球形の内部空間形状の加工に成功した．また，傾斜角とＺ座標の同時二軸制御による水平面形状も精度よく加工可能であった．

本手法は電極の位置決めが正確にできればその形状と軌跡に対応した加工形状が精度よく得られるという放電加工の特長を最大限に生かした加工法であり，放電加工技術の可能性を拡大する意義ある研究である．また，従来は数点に分割して加工した後に組み合わせていた部品構造に比べ，加工効率や部品強度の向上も見込める．さらに，本研究の進展によって様々な内部空間形状加工の可能性を有し，金型，冷媒流路や分析機器部品等の高性能化が期待できる．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，86-892，(2020-12)，20-00205.
*1 正員，岡山大学大学院自然科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1）
*2 正員，岡山大学大学院自然科学研究科（現）日野自動車㈱
*3 正員，兵庫県立工業技術センター 技術企画部（〒654-0037 神戸市須磨区行平町3-1-12）
*4 正員，岡山大学学術研究院（〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1）

論　文

(11) Intelligent process planning and control of DED (directed energy deposition) for rapid manufacturing

上田 真広*1　David Carter*2　山崎 和雄*3　柿沼 康弘*4

本研究では，指向性エネルギー堆積法（Directed Energy Deposition, DED）の工程計画と積層装置の制御を行う手法を提案し，それらをアドインモジュールとして従来の切削加工用CAMソフトウェアへ実装することで，簡易で正確な造形を可能とするDED専用CAMシステムを開発した．また単純形状から３次元形状までの部品の造形に適用し，その実現可能性を実験的に示した．

DEDは金属用アディティブマニュファクチャリング技術における積層方式の１つであり，ノズルから照射されるレーザにより母材上に生成したメルトプールへ粉末材料を供給することで造形を行う．複雑な部品を，最終形状に近い形状で，粉末から直接短時間で製造することが可能であり，さらに損傷した部品の修理や異種材の被膜処理にも適していることから，幅広い分野において，実用化が進められている．

DEDのプロセス原理の観点から，積層中においてメルトプールを母材上に安定して形成することは，高品質な造形のために重要である．また複雑形状を持つ部品の場合，ノズルの動きを３次元で指定するパスの計画が求められる．加えて，操作変数であるノズルの送り速度，粉末の供給量，レーザ出力は，部品の形状に応じて制御する必要がある．このように複雑な操作を必要とするDEDの積層装置では，NCプログラムによる自動化された高度な制御と工程計画が不可欠であり，そのための専用CAMシステムが強く求められている．

一方で，DEDのCAMに関する研究は未だ限られており，市販のCAMソフトウェアであっても，積層の安定性に影響を与える要因をプロセス原理の観点からユーザに説いてはおらず，DED特有の操作を実行させるための機能を十分に備えているとは言えない．

本研究で試作開発したCAMシステムは三つの特徴を持つ．第一に，重力方向に固定されたノズルに対して，被積層面が常に垂直になるように母材の姿勢を制御し，安定したメルトプール形成を実現する．第二に，既存の切削加工用CAMソフトウェアを利用して積層対象をすべて除去する仮想切削加工パスを作成し，それを逆再生することにより，効率的にパスを計画する．第三に，仮想切削加工シミュレーション及び操作変数と積層量の実験的分析モデルに基づき，操作変数を造形前に決定することで，積層量を適応制御する．本研究で提案する工程計画と制御の手法は，従来のCAMソフトウェアの課題を解決し，積層部品の形状精度の向上に貢献できると考えられる．

＊ 掲載：Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 14-1,（2020-2）, JAMDSM0015.
*1 正員，慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻（現）DMG森精機㈱（〒450-0002 名古屋市中村区名駅2-35-16）
*2 University of California Davis （現）Precision Metal Tooling Inc（5101 San Leandro Street Oakland, CA 94601, USA）
*3 正員，University of California Davis（One Shields Avenue Davis, CA 95616, USA），University of California Berkeley（5135 Etcheverry Hall, Berkeley, CA 94720, USA）
*4 正員，慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科（〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1）

論　文

(12) ベース油中ta-CNx膜の摩擦時反射分光分析その場観察による低摩擦メカニズムの解明

岡本 竜也*1　梅原 徳次*2　野老山 貴行*3　村島 基之*3

炭素系硬質膜であるダイヤモンドライクカーボン（DLC）膜は炭素原子を骨格とした薄膜でsp^2結合とsp^3結合をあわせ持つアモルファスな構造をしており，構造により軟質にも硬質にもなり表面粗さが小さくできることから耐摩耗で低摩擦な硬質膜として使用が拡大している．近年，DLCの中でもsp^3結合の割合が多いta-C（tetrahedral amorphous carbon）膜に窒素の含有したta-CNx（tetrahedral amorphous Carbon Nitride）膜の成膜が行われ，ベース油であるPAO（Poly Alpha Olefin）油中で窒素を含有することで摩擦係数が半減し，初期境界潤滑状態にありながら0.036の低摩擦係数が得られることが明らかになった．このようなta-CNx膜のベース油中低摩擦メカニズムとしては，摩擦初期に境界潤滑状態であったが，摩擦に伴い油膜厚さの増加と表面あらさの減少に伴い流体潤滑に遷移した事や，境界潤滑状態においてta-CNx膜表面の摩擦に伴うグラファイト化などの構造変化による油性の増加が考えられる．そのため，ta-CNx膜のベース油中低摩擦メカニズムの解明のためには，摩擦界面の油膜厚さ，表面粗さ，構造変化層の種類と厚さをモニタリングし，摩擦係数との関係を明らかにすることが必要である．そこで，本研究では，ta-CNx膜の摩擦相手面をサファイア半球とし，反射分光膜厚計によりサファイア半球を透過した反射スペクトルと光学モデルから，摩擦界面の油膜，表面粗さ及び構造変化層を定量的に評価した．

窒素が非含有なta-C膜，２水準の窒素含有量のta-CNx膜をイオンビーム支援FCVA法で成膜し，PAOベース油中での繰り返し摩擦に伴う摩擦係数の減少過程における油膜厚さ及び構造変化層の屈折率と消衰係数を計測し，それらの関係を明らかにした．その結果，ベース油中繰り返し摩擦で油膜厚さが増加し，それに伴う摩擦係数の減少が見られた．そのため，油膜厚さの増加に伴う境界潤滑から流体潤滑への遷移が低摩擦の一つのメカニズムであることが明らかになった．次に，何故繰り返し摩擦により油膜厚さが厚くなったかを明らかにするために，ta-CNx膜における屈折率と消衰係数から推定される構造変化層の分極率と油膜厚さの関係を明らかにした．その結果，油膜厚さとta-CNx膜の構造変化層の分極率は正の相関があり，分極率の増加によりPAO油とのファンデルワールス力による分子間力が高まり，油性の増加に伴い，油膜厚さが増加することを明らかにした．さらにこのta-CNx膜の構造変化層の分極率の増加は，構造変化層のC-Csp^2結合割合の減少を伴うことも明らかになった．

＊ 掲載：日本機械学会論文集，85-875,（2019-7），19-00071.
*1 正員，名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノ機械理工学専攻（現）トヨタ自動車㈱モノづくりエンジニアリング部
*2 フェロー，名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノ機械理工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町B3-3（641））
*3 正員，名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノ機械理工学専攻

論　文

(13) 工作機械用転がり軸受主軸における工具回転非同期振れによる加工面への影響の低減（加振システムによる加工面品位の改善）

正和 裕太*1　吉岡 勇人*2

近年，主に光学機器や医療機器といった分野の金型において，製品の高機能化や高デザイン化に伴う面品位の向上が求められている．また，磨きの難しい複雑形状を有する金型の需要も増大しており，切削加工による高品位な仕上げ面の創成への期待が高まっている．切削加工による高品位な仕上げ面を実現するためには，工具回転非同期振れ（NRRO）に代表される微小振動が加工面へ与える影響を低減する必要がある．工作機械用主軸の軸受として広く採用されている転がり軸受には，転動体公転運動に起因するNRROが存在するが，このNRROによる加工面への影響を低減する方法についてはまだ実現されていない．本研究では，NRROによる加工面への影響の低減を目的として，NRROに対して相対振動を励起する加振システムを提案している．

本論文では，まずテーブル上に固定した変位センサにより測定した工具回転振れをフーリエスペクトルへ変換し，該当する周波数ピークに着目することでテーブル基準のNRRO（$NRRO_T$）の評価を行った．その結果，主軸に組み込んでいる三つのアンギュラ玉軸受に起因すると考えられる三つのピークの存在を確認した．フーリエスペクトルにおけるピークの大きさは，時間領域のデータにおける片振幅に相当するため，各ピークの大きさを合計することにより，NRROの大きさを評価できる．よって，加振システムによるNRROの低減効果は，三つのピークの合計値で評価することとした．

加振実験の結果，加振システムにより$NRRO_T$を低減可能であることを確認した．また，実際の切削加工実験の結果，加振システムによりNRROが加工面へ与える影響（$NRRO_M$）を低減可能であることを確認した．さらに，両者の間には相関関係があることを確認した．しかしながら，低減効果としては不十分であった．その理由は，NRROは主軸（回転部）および主軸頭（非回転部）の両方へ影響を与えるが，加振システムにより低減可能なのはいずれか一方のみだからである．そこで，主軸および主軸頭を同時に考慮した加振システムを新たに提案し，再度加振実験を行った．その結果，いずれか一方のみを低減する加振システムよりも高い$NRRO_T$の低減効果が得られることを確認した．$NRRO_T$と$NRRO_M$との間には相関関係があることから，実際に加工を行わずとも$NRRO_M$の低減効果は予測可能である．よって，本加振システムにより高い$NRRO_M$の低減効果，すなわち加工面品位の改善が期待できる．

* 掲載：日本機械学会論文集，87-894，(2021-2)，20-00343.
*1 正員，㈱牧野フライス製作所（〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4023）
*2 正員，東京工業大学未来産業技術研究所（〒226-8503 横浜市長津田町4259-G2-19）

論　文

(14) Optimizing simulation of deficient limb's strokes in freestyle for swimmers with unilateral transradial deficiency

中島　求*1　髙橋 良輔*2　岸本 太一*3

近年，パラ競泳（障がい者による競泳）がスポーツとしてポピュラーになりつつある．しかしパラ競泳におけるトレーニングやコーチングでは，障がいに特化した知識は十分ではない．そのため，パラスイマーやコーチは一般に，各々の障がいに適した泳ぎの動作を試行錯誤により考えねばならない．本研究では障がいの種類として，片前腕欠損（あるいは切断）を有するスイマーの自由形泳を対象とした．片前腕欠損選手の自由形では，欠損肢を健常肢のテンポに合わせて動かした方が良いのか，欠損肢自体で推進力を発揮するように可能な限り速く動かした方が良いのかが明らかになっていなかった．そこで本研究では，著者らが開発した，筋力特性を考慮したアームストローク（腕のかき動作）の最適化手法を用いて，欠損肢のストロークについての最適化シミュレーションを行った．まずシミュレーションの妥当性検証のため，実際の研究対象者の泳動作を実験により取得した．研究対象者は片前腕欠損を有するスイマーであり，泳動作を3台の水中カメラおよび1台の陸上カメラにより撮影した．そして撮影画像より関節角を取得してシミュレーションに入力し，実験の再現シミュレーションを行った．その結果，シミュレーション結果の泳速度は実験値の測定誤差範囲内に収まることがわかり，シミュレーションの妥当性が確認された．次に，妥当性が確認されたシミュレーションモデルを用いて，欠損側の肩関節トルクの上限値を1倍，0.85倍，0.72倍と変化させ，それぞれの場合について最適ストロークを求めた．最適化のアルゴリズムとしては，ランダムサーチと粒子群最適化手法を組み合わせて使用した．最適化シミュレーションの結果，得られたストロークは，より遅いタイミングで可能な限り速く動作させたものとなった．そして肩関節トルクの上限値が1倍，0.85倍，0.72倍のそれぞれの場合に対して，泳速度は元の1.70 m/sからそれぞれ，1.78 m/s，1.76 m/s，1.75 m/sとなり，顕著に増加することが確認された．また欠損肢の推進力への貢献の割合は，元の健常肢側の4.7%から，15%程度まで増加可能なことが示唆された．そして最適ストロークの動作は，肩関節に関して，関節角速度が大きい場合に屈曲動作よりも内転動作の方がより大きな関節トルクを発揮できる原理によって実現されていることがわかった．

* 掲載：Journal of Biomechanical Science and Engineering，15-1，(2020-3)，19-00467.
*1 フェロー，東京工業大学
*2 オリンパス㈱
*3 東京都立足立特別支援学校，(現)日本パラ水泳連盟

論　文

(15) Biomechanical analysis of the mechanical environment of the cell nucleus in serum starvation-induced vascular smooth muscle cell differentiation

長山 和亮 *1

生体に対して「力」が如何なる作用を及ぼすのか明らかにすることは，バイオエンジニアリング分野の喫緊の重要課題である．特に血管や骨など，生体内で常に荷重に曝されている組織内において，個々の細胞が力や変形を感知し生化学的信号へと変換するメカニズムを明らかにすることは，疾患の発生や治癒などの様々な生命現象の理解に不可欠である．

血管における動脈硬化や動脈瘤などの重篤な疾患は，血管構成細胞の機能低下に伴う過度な増殖に起因すると考えられている．本論文では，バイオメカニクスの観点から，血管の収縮・弛緩を担う血管平滑筋細胞に着目し，収縮能が低下して過度に増殖する性質になった細胞（合成型細胞）と，血清飢餓培養法を用いて人工的に収縮能を回復させた細胞（収縮型細胞）を準備した．著者は，細胞内の遺伝子を保存している「核」の硬さや，「核」に加わる力が，細胞の機能変化に密接に関わるという仮説を立て，それぞれの細胞群の力学特性や細胞内の張力を詳しく調べた．まず，原子間力顕微鏡を駆使した高速連続押込み試験法を確立し，生きた細胞の表面全域について詳細な弾性率マップを得ることに成功した．次に，細胞内部に張り巡らされている細胞骨格の張力や，核の硬さを精密計測し，核に加わる力を推察する手法を考案した．さらに，共焦点蛍光顕微鏡による３次元形態解析を使って，細胞骨格の分布・核膜の構造・核内DNAの局在の変化を詳細に分析した．これらの手法を組み合わせ，上記の細胞群を詳しく調べた結果，「核の軟化」と「細胞骨格から核への過剰な力」が，血管平滑筋細胞の収縮機能を著しく低下させて合成型細胞へと導く重要因子であり，血管疾患発生に深く関わることを見出した．すなわち，血管平滑筋細胞が収縮機能を失い始めると，核が軟化して，核内の遺伝子に力が伝わりやすくなることを発見し，核への過剰な力が疾患発生に深く関わることを世界に先駆けて提唱した．

---

* 掲載：Journal of Biomechanical Science and Engineering，14-4，(2019-12)，19-00364.

*1 正員，茨城大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻（〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1）

(1) インターカレーション法によって合成した有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤

大下 賢一郎*1　小見山 忍*2　佐々木 信也*3

1．概　要

図１に示す冷間鍛造の分野では，1934年に発明されたりん酸亜鉛皮膜が，潤滑皮膜として現在でも広く用いられている．この皮膜は極めて良好な潤滑性を有する一方で，成膜に化学反応を利用するため成膜効率が悪く，成膜工程から大量の廃棄物が排出される等，環境負荷が高いことが問題視されている．それ故，2000年以降，成膜に化学反応を利用しない塗布型潤滑皮膜への移行が徐々に進んでいる．

本技術は，層状粘土鉱物の一種であるマイカの潤滑性向上を目的に，インターカレーション法によってマイカの層間，すなわちへき開面に，有機系潤滑成分であるアルキルアンモニウムを担持させた有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤である．本技術を塗布型潤滑皮膜に適用することで，潤滑性はりん酸亜鉛皮膜と同等レベルを維持しつつ，成膜効率を向上させ，環境負荷を大幅に低減することが可能となった．

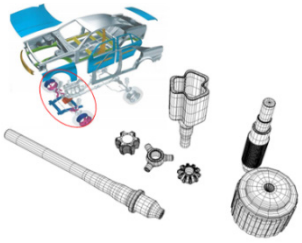


図１　冷間鍛造で成形された部品の一例

2．技術の内容

2．1　インターカレーション法

マイカは厚さ約１nmのシリケート層が層状に積層した粘土鉱物の一種である．その層間にはナトリウムなどの陽イオンが介在し，静電引力によって負に帯電したシリケート層をゆるく結合している．層間のナトリウムイオンは，イオン交換反応によって他のカチオン性化合物に置換することが可能で，この手法はインターカレーション法と呼ばれる（図２）．本技術では，潤滑成分としてアルキル鎖長がC=18の２本鎖型アルキルアンモニウムをマイカの層間に担持させることで，へき開性を向上させている．

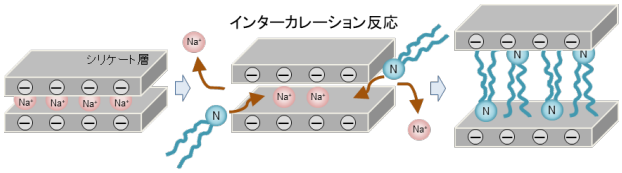


図２　有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤の合成

2．2　有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤の諸性能

図３に，据込みボールしごき試験による各潤滑皮膜の潤滑性評価結果を示す．この評価では，予め成膜処理した円柱状のビレットを据込み加工し，樽状に張り出した側面をSUJ２ボールでしごき加工する．潤滑性の評価は，しごき加工における最大加工荷重としごき面の外観によって行う．有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤を主成分とする潤滑皮膜では，従来技術であるりん酸亜鉛皮膜と同等レベルまで潤滑性が向上していることがわかる．また，参考までに二硫化モリブデンを主成分とする潤滑皮膜とも比較したが，耐かじり性に関しては，有機無機ハイブリッド型潤固体潤滑剤の方が良好であった．

表１に，生産性および環境負荷に関する諸性能を示す．有機無機ハイブリッド型固体潤滑剤を主成分とする潤滑皮膜の場合は成膜に化学反応を利用しないため，りん酸亜鉛皮膜と比較して，成膜時間の大幅な短縮が可能となった．さらに，排水や反応副生成物等の産廃物およびCO_2排出量も，10%未満に削減することができた．

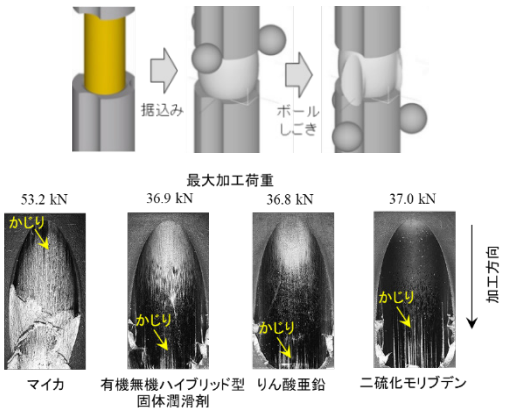


図３　据込みボールしごき試験による加工性評価結果

表１　生産性および環境負荷に関する諸性能

	りん酸亜鉛	有機無機ハイブリッド
成膜時間，min	20 ～ 40	2 ～ 3
産廃物量，%	100	0 ～ 10（相対比）
CO_2排出量，%	100	0 ～ 10（相対比）

3．まとめ

本技術によって，従来技術であるりん酸亜鉛皮膜と同等レベルの潤滑性を維持しつつ，同時に生産性の向上と，環境負荷の大幅な低減が可能となった．インターカレーション法では，担持可能なカチオン成分の候補は無数にあるが，適切な成分を選択することによって，目的に応じた機能を自在に層状物質に付与できる可能性がある．本技術が近い将来，固体潤滑剤の高機能化と地球環境保全に大きく貢献することを期待している．

*1 正員，日本パーカライジング㈱（〒254-0012 平塚市大神2784）
*2 日本パーカライジング㈱（〒103-0027 東京都中央区日本橋1-15-1）
*3 フェロー，東京理科大学工学部（〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1）

(2) 第2世代燃料電池駆動システム

奥村 暢夫*1　井田 敦巳*1　高橋　剛*2　中村 謙五*2　山下　顕*2

1．概　要

トヨタ自動車は，地球環境問題を最重要課題の一つと捉え，様々な技術に取り組んでいる．その中でも水素を燃料として使う燃料電池車は走行時にCO_2を排出せず，カーボンニュートラル(CN)社会実現の柱として重要度が益々高まっている．2014年に第１世代燃料電池駆動システム：トヨタフューエルセルシステム（TFCS）を搭載した初代MIRAIの市販に続き，更なる普及と乗用車以外への展開性向上を目的として，TFCSを全面的に刷新して高性能・小型化と低コスト・量産性を両立した「本格量産型の第２世代TFCS」を開発し，新型MIRAIに搭載して2020年12月に発売した．

2．技術の内容

2−1．第２世代TFCS概要

第２世代TFCSのシステム（図１）は，FCスタック，昇圧コンバータ，システム部品類，高圧水素タンクから構成され，第１世代と同様に，外部加湿器を不要とした簡素なFCシステムを踏襲している．但し，居住性向上と車両の組付け性を考慮し，従来のエンジンと同様，フード下に搭載するため，FCスタックと高電圧部品の昇圧コンバータや補機類をコンパクトに一体化し，高圧水素タンクも２本から３本に増やして航続距離を拡大している．

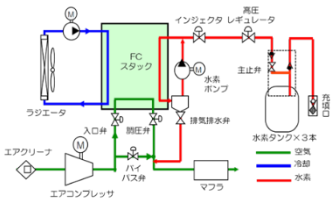


図１　システム図およびシステム搭載図

2−2．FCスタックの技術革新

スタックを構成するセルの構造と電極の革新により，最大出力を第1世代の114kWから128kWに向上（セル当たり＋26%）しつつ，体格を33L・41kgから24L・24kgへと27%の小型化・41%の軽量化を図り，世界トップレベルの出力密度5.4kW/Lを達成した．

セルの小型/軽量化のため，第１世代で４辺に配置していたマニホールドを左右２辺配置の対向流としつつ，第１世代でセパレータを３枚用いた３Dファインメッシュ流路構造から，ストレート溝流路に断面積を局所的に絞った抵抗部（絞り部）を設けたシンプルな構造に変更した．強制的に空気を電極内部に潜り込ませて触媒層への酸素供給と拡散層内の排水性を促進し，セルの小型化と構造簡素化による低コスト化を実現した（図２）．

電極には新規のカーボン担体とアイオノマ（プロトン伝導性ポリマ）を採用した．約80%の白金（Pt）を微細なメソ孔を有する新規多孔質カーボン担体内部に配置させて，アイオノマがPtに直接接触することによるスルホン酸被毒を抑制するなどで触媒の活性を約50%向上した．更に，酸素透過性３倍，プロトン伝導度1.2倍の新規アイオノマにより物質移動を促進するなどで，電極面積当たりの出力15%向上と出力当たりの触媒Pt量58%低減を実現した．

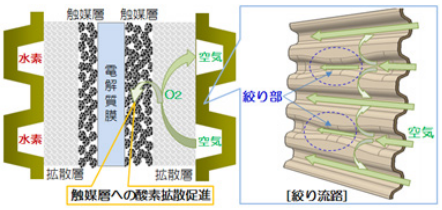


図２　絞り流路構造

2−3．高圧水素タンク

高圧水素タンクはガスを気密する樹脂ライナー，高圧ガスに対する強度を担う炭素繊維強化プラスチック（CFRP）層，口金等からなる．高強度高弾性カーボンファイバーの開発によりCFRP層数を７%削減すると同時に，70MPaの長尺タンク（図３）を開発し，貯蔵性能は従来の5.7から6.0wt%に向上した．

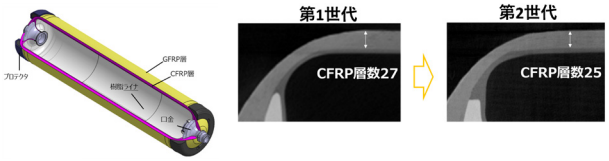


図３　高圧水素タンク

2−4．高電圧およびシステム部品

FC昇圧コンバータのスイッチング素子にSiCパワー半導体搭載のパワーモジュールを採用し従来比80%の電力損失低減を実現した．

また従来のヘリカルルーツ式から世界初のトルク感応型可動ローラー式増速機を用いたターボ式エアコンプレッサを開発し，圧縮効率24%向上，35%軽量化，45%小型化を実現した．水素循環ポンプは新シール構造で耐食性を向上させ，素材をステンレスからアルミ化することで，41%の軽量化を実現している．

3．あとがき

第２世代TFCSのLCAでのCO_2排出は，2.5L HEVと比較し副生水素で28%，再エネ由来水素で39%削減とCN社会実現に大きく貢献できる．本技術を搭載したFCシステムモジュールにより，乗用車以外の多様なアプリケーションへの幅広い拡大が期待されている．

*1 正員，トヨタ自動車㈱（〒471-8571 豊田市トヨタ町1）
*2 トヨタ自動車㈱（〒471-8571 豊田市トヨタ町1）

(3) 3次元自動巻線で複雑な磁場分布を実現した超電導磁石の生産技術

折笠 朝文*1　渡邊 郁雄*1　藤井 寿朗*1　林　家佑*2　高山 茂貴*3

1．概　要

超電導磁石は超電導コイルにより発生する強力な磁場を利用する装置として各種業界に使用されている．超電導線を巻線したコイルは約４K（-269℃）の極低温に冷却する必要があり，真空断熱容器に収納して使用される（図１）．従来コイルはソレノイド型と呼ばれる円型のコイルが基本で，発生磁場分布の自由度が低く，効率も悪いという問題があった．当社は３次元自由形状の超電導コイルを生産する技術を開発し，重粒子線がん治療装置や単結晶引上げ装置用超電導磁石に適用することで，大幅な軽量化や高効率化を実現した（図２）．

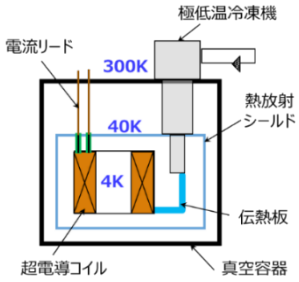


図1　超電導磁石構造

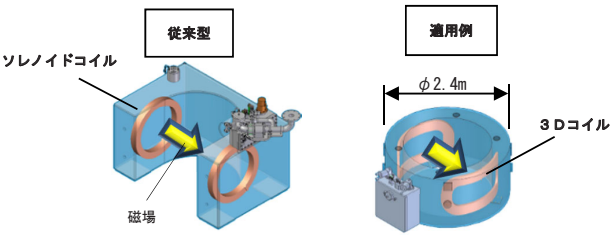


図2　単結晶引上げ装置用超電導磁石への適用例

2．技術の内容

コイルは直径１㎜程度の超電導線を数千ターン巻線し磁場を発生するが，開発した生産技術では巻枠表面に線を連続的に貼り付けながら巻線することにより自由形状のコイル形成を可能とした．

2．1　コイル設計技術

複雑な磁場分布を高効率で発生するために，超電導線１本毎の最適解を求める専用の計算コードを開発，同時に計算結果を巻線機のNCデータに変換するシステムを構築した（図３）．

2．2　自動巻線機

計算通りの線配置を実現させるため，線の貼り付けに超音波溶着を採用，同時６軸制御メカ機構により溶着ヘッド位置・姿勢を最適化出来る自動巻線機を開発した．ヘッドの軽量化，制御ソフトウェアの開発により位置決め精度±0.1mmの高精度な動作を実現した．

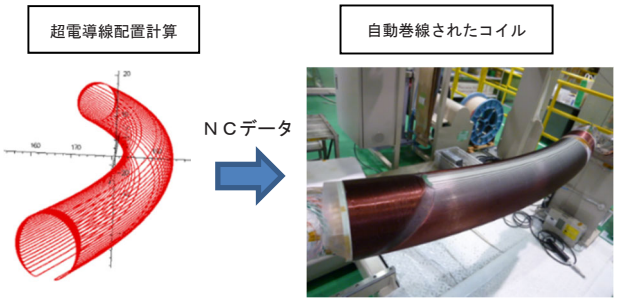


図３　重粒子線がん治療装置用コイル計算例と巻線されたコイル

2．3　接着材

コイルは極低温下で強い電磁力が加わるため，接着剤は極低温下で実績のあるエポキシ樹脂をベースとしてナノフィラー等の充填物を工夫することにより極低温下で必要な機械特性を得た．

2．4　適用例

重粒子線がん治療装置の回転ガントリーに適用した例を示す（図４）．本技術を適用することにより搭載する電磁石の超電導化に成功し，従来の半分の約300トンに小型・軽量化することが出来た．また前出の単結晶引上げ装置への適用では磁場発生効率が２倍以上向上し低コスト化に貢献している．

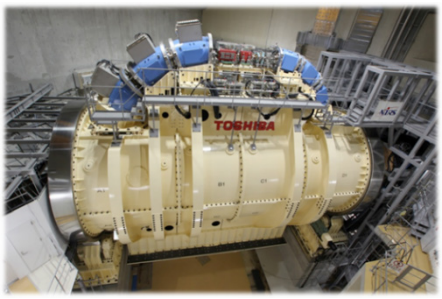


図４　重粒子線がん治療装置回転ガントリー（QST病院）

3．まとめ

３次元超電導コイル生産技術は，磁場分布形成の自由度が高く，効率の良いコイルを作成することが出来る．磁場を強く出来る超電導の特性も併せ，磁場を高度に利用する各分野への応用範囲が広い．今後科学技術各分野向への発展に貢献するものと期待される．

*1 正員，東芝エネルギーシステムズ㈱京浜事業所（〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4）
*2 正員，㈱東芝生産技術センター（〒235-0017 横浜市磯子区磯子町33）
*3 正員，東芝エネルギーシステムズ㈱ エネルギーシステム技術開発センター（〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4）

（4）ジョー再成形を不要にする高精度パワーチャックの開発

北川 祐治*1　北川 和紀*2　西宮 民和*3

1．概　要

旋盤用パワーチャックでワークを把握し，精度良く加工するためには，ジョーの把握面を旋盤で成形（機上成形）することが必要である．従来技術における把握精度は径振れ10～20μmT. I. R. 程度であり，成形済みジョーを脱着すると把握精度が悪化するため再成形が必要となる．本技術は，BRチャック（図１）とTnut-Plus（図２）で構成される．BRチャックの把握精度は0～5μmT. I. R. と圧倒的に良く，Tnut-Plusを使用すると，ジョーを脱着しても把握精度を維持する．

図1．BRチャック

図2．Tnut-Plus

2．技術の内容

2･1　BRチャック　【特許　第6345321号，第6411619号】

ワークを把握するとチャックの内部部品には数～十数tonもの荷重がかかる．BRチャックは，内部部品の形状を工夫することで弾性変形を小さく抑えて，内部部品の位置を安定させることで，把握精度向上，ワーク浮上り抑制，回転による把握力損失抑制を実現した．

図３は従来型，図４はBR型のマスタージョーである．BR型はウエッジ部の幅が広いので荷重による弾性変形が小さくなる．

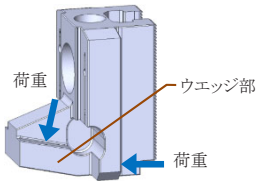


図3．従来型マスタージョー

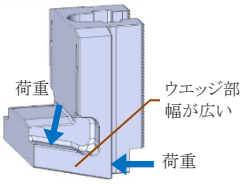


図4．BR型マスタージョー

図５は従来型，図６はBR型のチャック断面である．プランジャより外周に向かって発生する荷重により従来型はチャック本体がおむすび状に弾性変形する．BR型の荷重は分散しているので弾性変形は相対的に小さくなる．

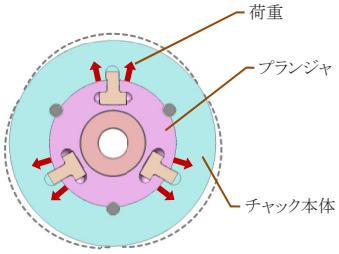


図5．従来型チャック断面

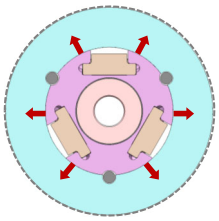


図6．BR型チャック断面

2.2　Tnut-Plus（特殊Tナット）【特許　第6345375号】

ジョーをチャック（マスタージョー）に取付けるには，セレーションを噛合わせた後，Tナットにボルトを締付けて固定する．ジョー脱着で把握精度が悪化するのは「マスタージョー溝とTナットの隙間①」と「ジョー溝とTナットの隙間②」によるガタにより，成形時とジョーの取付け位置が変わることが原因である（図７）．

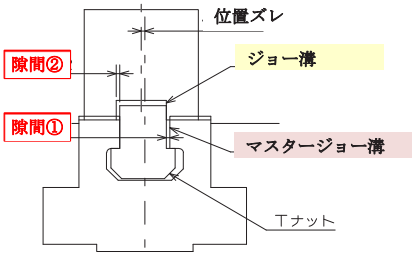
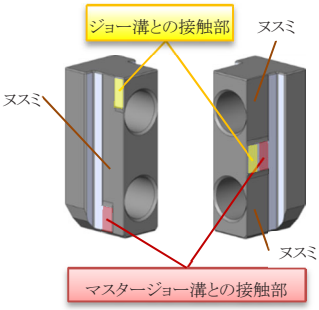
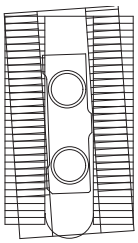


図７．ジョー取付け断面

Tnut-Plusは隙間①と隙間②が両方０になる．ガタなく同じ位置に取付くので把握精度が悪化しない．隙間が０になるのは，Tnut-Plusの幅が２つの溝幅よりわずかに大きいためである．

具体的な構成としてはTnut-Plusの側面には変則的なヌスミが入っており，ヌスミ部の幅は溝幅より小さくなっている．一方で，溝との接触部はズレた位置関係になっている（図８）．この形状であればジョーを傾けることでTnut-Plusを両方の溝に挿入できる（図９）．この状態からボルトを締付けると，セレーションが噛み合うことでジョーは強制的に真っすぐになる．この状態になると２つの溝とTnut-Plusはわずかに干渉することから，両者間の隙間は０になる（図10）．





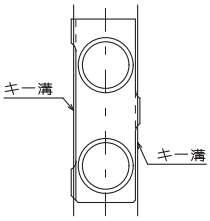


図８．変則的ヌスミ　図９．傾けて挿入　図 10．ボルト締付け後

3．最後に

本技術は，パワーチャックにおける半世紀の常識を打ち破る革新的イノベーションである．旋盤加工の品質や生産性を大きく向上させ，ものづくりの根幹を支えていくものと確信している．

*1 特別員，㈱北川鉄工所（〒726-8610 府中市元町77-1）
*2 ㈱北川鉄工所 KGhカンパニー（〒726-8610 府中市元町77-1）
*3 正員，㈱北川鉄工所 KGhカンパニー 技術部 開発課（〒726-8610 府中市元町77-1）

(5) 産学連携によるファブリックメカニズムを活用した持ち上げ動作補助スーツの開発

田中 英一郎*1　児玉 賢士*2　廖　允廷*3　石岡 利文*4　神田 千秋*4

1．概　要

物流，工場ライン，建設業，農業，介護等，様々な場面で行う持ち上げ動作に対し，ファブリックメカニズム（ゴムベルトや伸縮布による機構）を用いたパッシブ式の補助スーツを産学連携によって開発した．大学の創成授業で提案された構造を基に，産学のメンバーで工場内合宿を度々行い，様々な機構や構造を提案したその場で試作と実験を繰り返し，開発期間を大幅に短縮して製品化した．

2．技術の内容

日本の職業疾病の6割は腰痛であり，医学専門家からは持ち上げ動作時は膝を曲げて腰を落とし，蹲踞の姿勢を取って持ち上げ腰の負担を軽減することが望ましいといわれている．しかしこの場合，伸ばした腕にモーメントがかかり，腕の負担が増大することから，特に腕力のない女性から腕の補助が求められていた．また，場所によっては柵等があり膝を曲げられない場合があるため，引き続き腰部補助も必要である．腰部を補助する器具がアクティブ式・パッシブ式共に多数製品化されているが，その多くは腰のみを補助するためこれに対し，大学の創成授業の中で，２本のベルトにより腕と腰の両方を補助する構造が提案された（図１左）．

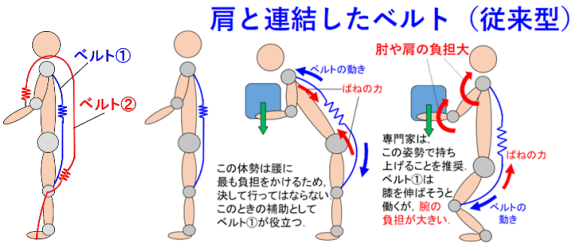


図１　補助スーツの基本構造とベルト①

ベルト①（図１右）は従来の腰部補助用スーツと同様だが，ベルト②（図２右，図３左）は，膝を曲げると肩越しにベルトが引っ張られて腕が上がる．しかし，腰をひねりながら動作すると，ひねった側の腕のベルトは緩み，反対のベルトが突っ張り，正しい補助力が得られなかった．そこで，上下左右には伸縮しないが対角線方向に引っ張ると伸び，他方の対角線方向が縮む繊維の特性を利用し，左右のベルト長を自動的に調整する機構を導入した（図３右）．その他背中を曲げると非線形に補助力が増加する機構など，各種ファブリックメカニズムは，教員や学生，企業担当者等産学のメンバーで工場内合宿を度々行った中で提案された．その場で試作と実験を繰り返すことにより開発期間を大幅に短縮でき，３年で製品化し2019年より販売開始した．

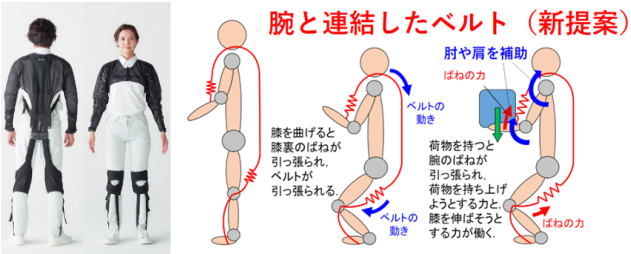


図２　補助スーツ装着時の様子とベルト②

図３　膝を曲げると腕が上がる構造と腰をひねったときの調整

本スーツを装着して予張力を与え，約10kgの箱を床から持ち上げたときの脊柱起立筋と上腕二頭筋の筋活動の変化を，健常男性20代7名と50代７名にて計測し，最大で３－５割軽減する結果を得た．特に50代は，腕力に頼れないせいか20代に比べて腰部の筋活動が高いことから，持ち上げ動作時は，本スーツに限らず何かしらの補助器具の使用を強く推奨するべきと考える．

販売開始後２年間は，試験販売期間としてあえてインターネットのみでの販売とし，また購入企業・個人まで出向いて使用方法を説明し，納得してもらった上で購入頂き，購入後も感想や問題点などをヒヤリングし，使用者の声を反映して特に着心地や使い勝手の改良を重ね，2021年に改良版の新型を卸売りに切り替えて本格的に販売を開始した．現在，様々な業種の多くの企業に導入して頂いており，本スーツ使用により，少しでも多くの方の負担軽減に役立てることができれば幸いである．

*1 正員，早稲田大学理工学術院大学院情報生産システム研究科（〒808-0135 北九州市若松区ひびきの2-7）
*2 特別員，㈱Asahicho（〒726-0004 府中市府川町110）
*3 元早稲田大学大学院情報生産システム研究科（〒808-0135 北九州市若松区ひびきの2-7）
*4 ㈱Asahicho（〒726-0004 府中市府川町110）

技　術

(6) 繊維強化プラスチック材料のプレス成形シミュレーション技術の開発

西　　正人*1 林　　信哉*2

1．概　要

様々な産業で軽量・高強度化のキーマテリアルとして開発が進められている繊維強化プラスチック（FRP）は，繊維強化形態と樹脂の種類の組み合わせで工法が変わり，多種多様な成形工法が存在する．また，ハイサイクル化と低コスト化の両立に向けた成形プロセスの自動化に対応すべく，成形条件の事前検討が強く求められてきた．しかし，FRPシートや不連続長繊維FRPに対しては，その成形中の材料挙動の複雑さから，これまで成形不良や成形荷重の事前予測が可能なシミュレーション技術は確立できていなかった．そこで，FRPシートの代表的な成形不良であるしわの発生および圧縮成形中の充填挙動や成形荷重を予測できる有限要素モデリング技術を構築し，FRPの複雑な成形プロセスおよびプロセスチェーンの解析を行うための解析システム「J-Composites®」を開発した．

2．技術の内容

2.1　連続繊維FRPのシート成形シミュレーション

連続繊維FRPシートのプレス成形時の代表的な成形不良としてしわの発生が良く知られているが，しわの正確な予測には面内の異方性特性に加えて，面外曲げ特性を正確に解析で考慮することが重要である．一方，連続繊維FRPシートは複雑な構造を持つため，その面外曲げ特性は圧縮・引張りの面内特性からは算定できない．受賞者らは，厚み中心位置に置いた面内特性を表現する膜要素に，面外曲げ剛性を考慮するため膜要素と節点を共有するシェル要素を２要素付加するシェル-膜モデルを提案した．面外の曲げ特性と面内の特性を相互依存がなく完全に独立に扱うことで，連続繊維FRPシートのしわ発生を含む成形中の材料挙動の正確な予測を可能とした．（図１参照）

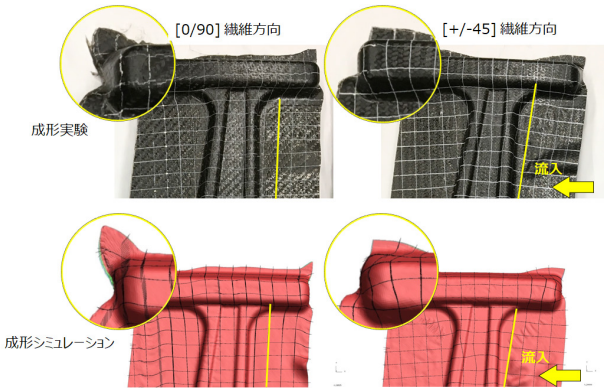


図１　自動車センターピラー部品のプレス解析事例

2.2　連続繊維FRPのシート成形シミュレーション

不連続繊維FRPはリブなどの複雑な形状に成形できる高い成形自由度を持つだけでなく，繊維長が25mmの長繊維になると連続繊維に匹敵する強度特性を発現することが知られている．不連続長繊維FRPの成形工法として圧縮成形が行われるが，成形により繊維が変形し，樹脂リッチ領域やウェルドラインが形成されるため，強度特性に大きな影響を与えることが課題となっている．受賞者らは，不連続長繊維の変形挙動をシミュレーションにより高精度に予測するために，繊維を有限要素法のビーム要素でモデル化する方法を採用した．マトリックス樹脂については自動的にリメッシングを行いながら大変形解析を行うテトラソリッド要素でモデル化し，ビーム要素とテトラソリッド要素の変形を連成させて圧縮成形解析を行う新たな手法を開発した．この連成計算において繊維が樹脂内部を流動する際の抵抗力を再現するために，ビーム要素とテトラソリッド要素の間で相互作用する摩擦モデルを開発した．図２は，不連続長繊維FRPの成形実験とシミュレーションの結果を比較したものである．ビーム要素により繊維配向や樹脂リッチ領域を評価することが可能になり，ウェルドラインの形成を正確に再現した．

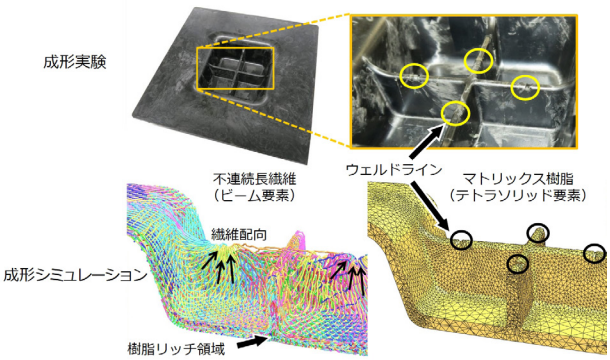


図２　十字リブ形状部品の圧縮成形解析事例

3．まとめ

開発した解析技術はシミュレーションソフト「J-Composites®」として商用化されており，自動車・重工・材料等の企業にて，開発・設計に活用されている．本技術により，今後の産業界においてFRPの量産化が加速されることを期待している．

*1 正員，㈱JSOL（〒104-6205 東京都中央区晴海1-8-12）
*2 正員，㈱JSOL（〒460-0002 名古屋市中区丸の内2-18-25）

(7) 大容量トリプルロータリコンプレッサの開発

平山 卓也*1　平野 浩二*1　志田 勝吾*2　妙摩 欣弘*2　四至本 知秀*2

1．概　要

エアコンの原理であるヒートポンプは，地球の熱を有効に利用できる省エネ技術として，カーボンニュートラル実現に向けより大容量の熱利用システムへの普及が期待され，心臓部となるコンプレッサにもその対応が強く求められている．これらの要求に応えるため，家庭用エアコン用途では最も普及しているロータリコンプレッサにおいて，圧縮部の気筒数を従来の２つから３つに増やし，１気筒あたりの流量と負荷を分散することで，大能力･高効率･低振動を実現する世界初のトリプルロータリコンプレッサを開発した．このコンプレッサの最大能力は容積型可変速機種では世界最大級で，従来の２気筒機種に対し，幅広い運転範囲で高効率であるとともに顕著な振動低減効果が得られた．

図１ トリプルロータリコンプレッサ

2．技術の内容

2．1　トリプルロータリ構造

図２に示すように，シリンダを軸方向に３つ並べ，３つある回転軸偏心部の偏心位相を120°等配とし，１回転あたり圧縮を３回行うことで，従来の２気筒２回圧縮に対し圧縮トルクが平準化し，回転トルク変動の大幅低減により，大容量にも関わらず低振動にできる．図３に同一吸込容積を仮定した従来２気筒のツインロータリと，トリプルロータリのトルク変動率の理論計算例を示すが，トリプルのトルク変動幅はツインの30%程度まで低減する．

トリプルロータリ構造の課題として，第２シリンダ部において回転軸のたわみが大きくなることと，第２シリンダ内径を回転軸心に対して高精度に位置決めすることが極めて困難であることが挙げられる．対策として，第１シリンダと第２シリンダの間に，図２に示す中間軸受を設け，第２シリンダはあらかじめ中間軸受内径を基準に中間軸受に調心固定する構造を開発した．この構造により軸たわみの最大量は半減し，軸受の信頼性も大幅に改善した．

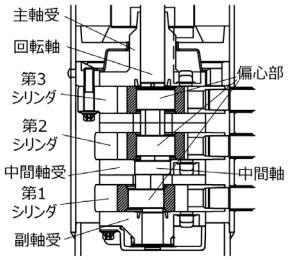


図２　トリプルロータリ構造

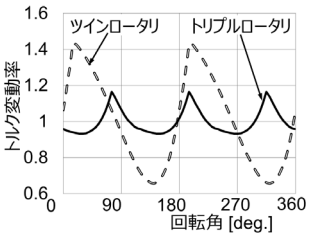


図３　トルク変動の比較

2．2　マルチ吐出ポート構造

ロータリ圧縮機では，大容量化により冷媒流量が増大するにつれ，吐出弁を有する吐出ポート通過部での流路損失が大きく増大し，効率低下の主要因となる．そこで図４に示すように，吐出ポートをシリンダの上下両面に設け，２つのポート断面積はあえて異ならせ，それに伴い吐出弁の応答性も異なるマルチ吐出ポート構造を開発した．図５に大流量時と小流量時の吐出弁の挙動を実測した結果を示すが，２つの吐出弁の開閉タイミングが異なることで，過圧縮損失や流路損失を効果的に抑制し，広い運転範囲において効率を高く保つことができる上，吐出冷媒流分散化により吐出脈動を抑制し，騒音低減効果も得られている．

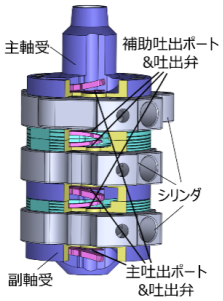


図４　マルチ吐出ポート構造

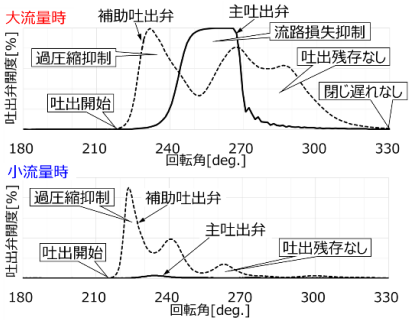


図５ 各吐出弁の挙動

2．3　高効率ワイドレンジモータ（オープン巻線モータシステム）

圧縮部大容量化によるモータ出力増大に対応するため，２つの標準容量のインバータで1つの大出力モータを駆動するオープン巻線モータシステムを業界で初めて開発した．このシステムは，モータを２つのインバータと結線することで印加電圧を約1.7倍にでき，効率の低下なく高負荷域まで運転できる一方，低負荷域では，モータの結線を切り替えて，１つのインバータで駆動することで損失を抑制し，全領域での高効率運転を可能にした．

3．まとめ

開発モデルはビル用マルチ空調システムに搭載され，室外ユニットのコンプレッサを複数台から１台に集約し，システムの小型・大容量化，省エネ・省資源化に貢献している．開発モデルは従来の２気筒機種に対し，信頼性余裕度も向上しているため，更なる大容量化や利用温度帯の拡大，冷媒の低GWP化対応などを通じて，ヒートポンプ機器の発展に貢献していきたい．

*1 正員，東芝キヤリア㈱（〒416-8521 富士市蓼原336）
*2 東芝キヤリア㈱（〒416-8521 富士市蓼原336）

研究奨励

(1) 流体を含む異種材料界面における波動伝播応答および破壊の評価の研究

小島 朋久*

爆発に伴う流体構造連成や異種材料接合界面への衝撃負荷の予測・回避は社会安全のため非常に重要である．本研究では固液連成界面および金属/樹脂接着接合界面における波動伝播応答と界面破壊を評価し，界面における波動伝播を制御して応力波・圧力波のエネルギを吸収する新しい技術を創出できる可能性を示した．波動伝播に伴う界面圧力を予測する力学モデルを提案すると共に，濡れ性の変化と幾何形状の付与により界面を起点とするキャビテーション（界面破壊）発生量が変化し，圧力波のエネルギが減少することを示した．また応力波により高速負荷を受ける金属/樹脂接着接合界面の破壊靭性についてデジタル画像相関法を用いた評価法を提案した．

* 正員，中央大学理工学部

研究奨励

(2) 大規模フェーズフィールド計算による高精度凝固組織予測の研究

坂根 慎治*

合金の凝固組織は，鋳造，溶接，積層造形製品の機械的特性を決定するため，その高精度な予測と制御が重要である．典型的な凝固組織形態であるデンドライト（樹枝状結晶）の成長を最も高精度に予測可能な数値モデルであるフェーズフィールド法は，取り扱える時空間スケールが小さいことが課題であった．そこで，GPUスパコンを用いた大規模フェーズフィールド計算による高精度凝固組織予測法を開発した．これにより，液相流動下におけるデンドライト成長の世界最大の３次元計算を実現し，強制対流と自然対流が組織形態に及ぼす影響の解明，デンドライト樹間流れの透過率の高精度評価，液相流動と固体運動を伴う多結晶凝固計算を達成した．

* 正員，京都工芸繊維大学機械工学系

研究奨励

(3) 高周波誘導加熱を用いた金属材料の表面改質とその効果発現メカニズム解明の研究

武末 翔吾*

元素拡散を伴う表面改質は，処理に長時間を要し，その短縮が課題として挙げられる．本研究では高周波誘導加熱に注目し，加熱雰囲気の制御と微粒子ピーニング（FPP）を組合わせた独自の手法を用いて，金属の特性が短時間で向上する表面改質法を開発し，その効果を検討した．その結果，加熱雰囲気やFPPで用いる投射粒子を工夫することにより，鉄鋼材料やチタン合金の耐摩耗性や耐高温酸化性が極短時間で向上することを明らかにした．またそのような短時間での改質は，被処理材内に流れる渦電流の電気的影響により生じる元素の高速拡散や，基材と投射粒子成分の間で生じた燃焼合成反応による被処理面の局所的な高温化に起因することを示した．

* 正員，京都工芸繊維大学機械工学系

研究奨励

(4) 壁面安定化冷炎を用いた低温酸化反応の研究

李　敏赫*

低温酸化反応により形成される冷炎は，燃料の自着火過程と密接に関連しており，内燃機関におけるノッキング現象や多段着火の原因とされている．本研究では，通常非定常現象で現れる冷炎を空間的に固定する壁面安定化冷炎を提案し，レーザ誘起蛍光法計測と数値解析により，冷炎の可燃特性の調査および低温酸化反応の評価を行った．さらに，MEMS技術を用いて壁表面に調査対象材料の薄膜を形成することで，同一の熱的境界条件のまま化学的境界条件のみを変化させ，冷炎に対する壁面の化学的効果を調べた．その結果，冷炎においても壁面の化学的効果が顕著に現れることを明らかにし，壁面材料によって冷炎が促進側にも抑制側にも傾くことを示した．

* 正員，東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻

研究奨励

(5) 有機液滴と周囲水蒸気間の相互作用および蒸発速度に及ぼす影響の研究

喜多 由拓*

エタノール液滴が湿度雰囲気下で蒸発する際に，周囲の水蒸気が液滴表面に吸収・吸着あるいは凝縮する現象を実験により初めて定量的に評価し，環境温度および相対湿度の影響を体系的に明らかにした．さらに，従来の単成分一方向物質拡散モデルを拡張させ，双方向の物質輸送を考慮した新しい液滴蒸発モデルを導出した．本研究は，２成分以上の物質が存在する系における液滴相変化現象の理解を深め，インクジェット技術やコーティング，および半導体の洗浄・乾燥の素過程である有機溶剤液滴の蒸発予測の高精度化に寄与するとともに，水蒸気の吸収・吸着・凝縮現象を利用した新たな応用技術への発展性を有する．

* 正員，九州大学大学院工学研究院機械工学部門

研究奨励

(6) ナノスケール直接観察による水の気液界面挙動の研究

塘　陽子*

沸騰熱伝達の理論的予測が，長い研究の歴史にも関わらず未だに不可能な原因の一つは，伝熱面からの気泡の生成など，気液界面や気固液三相界線の物理が明らかでないことにある．これに関して受賞者は，透過型電子顕微鏡を用い，自ら開発したナノスケール液中観察という新しい手法を用いて有用な知見を得てきた．具体的には，水中で壁面から発生した直径数十nmの気泡の成長過程を観察するとともに，二次元画像の解析手法を考案して，発泡直後の気泡成長過程を明らかにした．また，カーボンナノチューブ内部という特殊ナノスケール空間内の水の挙動を観察し，極薄液膜の存在と特異な界面現象を明らかにした．

* 正員，九州大学大学院工学研究院機械工学部門（現）九州大学大学院工学研究院機械工学部門/Stanford University，Department of Chemical Engineering

研究奨励

(7) 感温磁性粒子を含有したマイクロカプセルの生成と流動特性把握の研究

石井 慶子*

感温磁性流体や相変化エマルジョンは機能性冷媒として期待されているが，共に実用化できていない．そこで，これらをマイクロカプセル化することで，実用化と多機能化が期待できる．感温磁性により廃熱で自励駆動し，相変化の潜熱で大量の熱を輸送できる多機能冷媒が実用化できれば，新しい省エネルギー技術になりうる．実際に磁性材や蓄熱材を含んだマイクロカプセルの合成を行い，この各種物性値を明らかにした．これに加えて，熱流動場の実験的可視化計測を行い，報告例のない不透明液体の熱流動場を明らかにした．特に磁性クラスタが壁面に密集し，スリップする様子や，クラスタ長さの温度やせん断力依存特性を明らかにした．

* 正員，青山学院大学理工学部機械創造工学科（〒252-5258 相模原市中央区淵野辺5-10-1）

研究奨励

(8) 同心二重円筒内の環状ポアズイユ流における亜臨界乱流遷移の研究

石田 貴大*

私たちの身の回りの流れは粘性と慣性力の比によるレイノルズ数に依存して層流と乱流状態に大別されます．層流は規則的で，摩擦損失が少なく流体輸送に適し，乱流は不規則で，摩擦損失は増えますが，エネルギや熱運動量輸送に優れる利点があります．この層流と乱流両者の間を結ぶ遷移領域が当該研究対象となります．亜臨界過程と呼ばれる非線形な遷移過程では円管内で1次元，平行平板間では2次元の空間自由度に応じた特異な局在乱流構造の発生がこれまで報告されていました．本研究では二重円筒内の流れを対象としたことで，これまで流れ系毎の各論であった遷移現象を包括的に説明する，統一的理解の可能性を示し，乱流維持限界を特定しました．

* 正員，宇宙航空研究開発機構航空技術部門

研究奨励

(9) 複雑流体レオロジーの解明を目指した超音波スピニングレオメトリ開発と応用の研究

芳田 泰基*

混相・不均質物質を含む複雑流体レオロジーの経時的評価は，レオロジー学における難題とされる．本研究は，運動量拡散方程式に瞬時流速計測値を代入することで，応力と物性の瞬時値を出力する新方式，超音波スピニングレオメトリの開発と応用である．瞬時毎の空間歪み構造を計測可能で，流体挙動を記述する各種構成方程式を解くことにより，高次レオロジー物性値が定量化される．超音波流速計測技術の応用により，これまで多様な流体へ適用されてきた（分散気泡を含む流体，ゲル状流動食品，揺変性を示す粘土懸濁液，固体分散相を含む粘弾性流体等）．現在，工業生産制御系と融合することで，技術更新を目指しており，産業還元が期待される．

* 正員，（国研）産業技術総合研究所（〒300-4201 つくば市寺具1497-1）

研究奨励

(10) 球状歯車に基づく回転３自由度関節や全方向物体搬送テーブルなどの先進的な機構の研究

阿部 一樹*

１つの関節・作動面で多自由度駆動を実現できれば，ロボット，メカトロニクスシステムのより一層の小型化，高機能化，あるいは省エネルギ化が期待できる．本研究群では，球状歯車や２方向平面ラックなどの新しい機構要素を用いた，歯車の噛合いに基づく多自由度メカニズムを提案している．球状歯車は相補的な駆動ピニオンと噛合うことで，さながら能動的なボールジョイントの様に回転３自由度を得ることができる．全方向物体搬送テーブルは床側に敷き詰められた平歯車で平面ラックをバトンの様に受渡し，並進２自由度を得るシステムである．これらは原理上滑りが存在せず，従来得られなかった高トルクで信頼性の高い多自由度駆動を実現している．

* 正員，東北大学大学院 タフサイバーフィジカルAI研究センター（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01）

研究奨励

(11) ヒトの立ち上がり動作のモデル化とリハビリテーションシステムの研究

安　　琪*

加齢や脳損傷で運動が阻害された人の運動機能を支援するためには，人が運動を実現するメカニズムを理解し，個人に合わせた支援が重要である．受賞者は筋シナジーと呼ばれる協同発揮する筋群に着目し，人は多様な環境における起立動作において個別に筋を制御しているのでなく，４つの筋シナジーを組み合わせて起立動作を実現していることを解明した．特に片麻痺患者の運動機能を診断するシステムと理学療法士の筋活動から片麻痺患者に対する介入技能を評価する方法を確立し，リハビリテーションにおいて理学療法士は患者の不足した関節の力を補うのではなく，筋シナジーの活動タイミングを教示していることを明らかにした．

* 正員，九州大学大学院システム情報科学研究院

研究奨励

(12) 展開翼航空機のマルチフィデリティ解析法の構築と実験実証の研究

大塚 啓介*

飛行中に折り畳み展開できる展開翼の実用化が期待されている．展開翼の設計開発には，流体構造連成モデルを用いた挙動解析が必須となる．これまでは，低精度･高速計算の低フィデリティ剛体モデルと，高精度･低速計算の高フィデリティ柔軟モデルが，別々に開発され，展開翼の設計段階に応じて選択されてきた．しかし，現状では低・高フィデリティ構造モデルで使用される変数が共有されておらず，設計段階ごとにモデルを作成しなければならない．本研究では，この問題を解決する【内部変形拘束式】を提案し，柔軟モデルから変数を一切変更せずに剛体モデルを構築できるマルチフィデリティ解析法を構築した．解析結果を風洞実験によって実証した．

* 正員，東北大学大学院航空宇宙工学専攻

研究奨励

(13) 非線形波動変調に基づく接触型損傷検出の研究

田中　昂*

損傷界面における超音波の散乱特性を利用した損傷検出法は微小な損傷を精度よく検出できるが，損傷界面が接触した接触型損傷は検出が困難である．本研究では，環境外乱や稼働時振動による損傷界面の局所剛性変動に起因して，超音波に変調が生じる非線形波動変調に着目した．この手法は小振幅の超音波で損傷検出できる．まず，超音波の波動伝播解析による接触型損傷位置同定法を提案した．次に，局所剛性変動に起因する超音波帯域の固有振動数変動に着目し，粘性減衰に依存しない損傷評価指標を提案した．さらに，自励駆動型超音波の特徴である固有振動数変化に対する発振周波数の自動追尾性を利用して，検査手法の省略化，自動化を実現した．

* 正員，滋賀県立大学工学部機械システム工学科

研究奨励

(14) イオン液体の摩擦界面構造の分析および潤滑特性の能動的制御の研究

川田 将平*

潤滑油は摩擦表面に強く付着することで高い潤滑特性を発揮する．本業績では，固体表面に安定な界面構造を形成するイオン液体を潤滑油として応用することを試みた．摩擦試験の結果，イオン液体は良好な潤滑特性を示すことを明らかにした．また，周波数変調原子間力顕微鏡などを用いることで，低摩擦時の摩擦界面構造を可視化することに成功した．上記に加え，摩擦表面に電位を与える潤滑システムを構築することで，イオン液体の摩擦界面構造を変化させ，潤滑特性を能動的に制御することを可能とした．本業績の成果は，超低摩擦から高摩擦までの幅広い潤滑特性の制御を可能とするものであり，新たな潤滑システム構築への貢献が期待される．

* 正員，関西大学システム理工学部機械工学科

研究奨励

(15) 基板材料の高平坦研磨加工の研究

佐竹 うらら*

研磨加工では，その加工原理上，切削加工などと異なり加工量を直接設定することができず，形状精度を決定する工作物面内の加工量分布は工具をはじめとする加工条件により間接的に決定される．シリコンウェーハをはじめとする基板材料には高い平坦性が求められるが，研磨加工では軟質な工具が用いられるために工作物面内の応力が不均一になりやすく，それに応じて加工量も不均一となる．特に，工作物端部においては加工量の均一性が大きく悪化するが，そこでの応力分布の決定要因は未解明である．本研究では，工作物が工具に沈み込んだ際の工作物側面と工具の接触状態を理論的・実験的に検討することで，工作物端部の形状創成理論を構築した．

* 正員，大阪大学大学院工学研究科

研究奨励

(16) 自己最適化機械加工システムのためのモニタリングベースドプロセス制御による能動的びびり振動抑制の研究

大和 駿太郎*

熟練技術者の減少や省人化要求に対応し，かつ高い柔軟性を有した生産システムの実現には，機械が自ら感じ・考えて機械加工を行う自己最適化機械加工システム（SOMS）が必要である．特に，びびり振動と呼ばれる加工中の不安定振動は工作機械の永遠の課題とも言われ，SOMSが対応すべき重要課題の一つである．候補者は，SOMSの実現技術として工作機械の内部情報を利用したプロセス状態診断に基づき，工具回転数や工具姿勢などを実時間制御してびびり振動を能動抑制する技術の開発を行った．候補者が提案した自律的なびびり振動抑制を実現する加工制御則は，各種機械加工プロセスのモデル化に基づいて導かれており，学術的にも価値が高いといえる．

* 正員，京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻

研究奨励

(17) 圧縮性流体の離散保存性を満たす高精度解析手法とその応用の研究

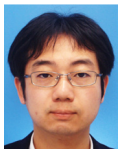
阿部 圭晃*

圧縮性流体の数値解析は機械工学における必須技術であり，工学設計のDXに向けて，さらに重要性が高まっている．これまでの数値流体力学では，「産業実用レベルの複雑形状の取り扱い」と「乱流の非定常解析に要する高次精度離散化」を両立した解析は困難だった．本候補者は「支配方程式が解析的に満たす保存性は離散的にも満足されるべき」という観点から上記２点を両立する研究に取り組み，一様流保存性と運動エネルギー保存性を満たす「離散的保存性」と呼べる新たな視点を切り開き，複雑形状周りの高精度圧縮性流体解析の進展に貢献した．

* 正員，東北大学流体科学研究所

研究奨励

(18) 力学的負荷によるリン脂質二重膜破断の分子機序の研究



重松 大輝*

哺乳類の細胞膜は，主にリン脂質分子とコレステロールから成る薄膜を基本構造としている．これまで，コレステロールの含有率が膜の強度に影響を与えることが知られていたが，その分子レベルでのメカニズムは不明であった．本業績では，分子動力学法を用いた数値計算により，ある割合でコレステロールを含有した膜では，引張負荷を受けたときに特異な相転移が起こり，膜の破断が起きにくくなることを明らかにした．さらに，その相転移の機序を熱力学的なエネルギのつり合いから説明した．近年，再生医療等製品のように生体組織や細胞を工業的に扱う場面が増えている．本業績は細胞損傷を工学的に制御する上で有用な知見となると期待される．

* 正員，大阪大学大学院基礎工学研究科

研究奨励

(19) 感光性複合材料を用いたマイクロデバイスの研究

中原　佐*

試薬量の削減や検査時間の短縮，携帯性の向上等を目的に，1つのチップ上に複数のマイクロデバイスを集積化させる，マイクロ総合分析システム（μ-TAS: Micro-Total Analysis Systems）の研究が進められている．μ-TASの発展に向けて，本研究では感光性材料と微粒子を混ぜ合わせた感光性複合材料を用いて，磁気および光熱駆動型のマイクロデバイスを開発した．磁気駆動型マイクロデバイスの研究では，流体制御を担うマイクロバルブおよびマイクロポンプを製作した．また，光熱駆動型マイクロデバイスとして，蛍光顕微鏡の励起光照射によって温度上昇が得られるマイクロヒータを製作した．上記の研究は簡易的な製作工程と新たな機能性を実証しており，今後の発展が期待できる．

* 正員，山口大学大学院創成科学研究科

研究奨励

(20) マルチフェーズフィールド法に立脚した多結晶組織形成の高精度予測の研究

三好 英輔*

多結晶材料の性能を最大に引き出す上では，加工・熱処理などを通じた微視組織の形成過程の高精度な制御が鍵となる．このためには数値計算による系統的な組織予測が有望であるが，「計算精度」「計算規模」「物性データ」の不備不足のため，その産業応用は限られてきた．本研究では，連続体ベースの組織予測モデルであるマルチフェーズフィールド法を軸に，①粒界多重点などの高次欠陥を考慮したモデル高精度化，②並列GPUによる計算超大規模化，③原子論的計算とデータ科学の援用による物性評価法の確立に成功し，上記3つの課題に解決方策を与えた．本成果は，実験レス組織制御による材料開発加速の技術的基礎として，広く貢献が期待される．

* 正員，東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門

技術奨励

(1) 車両運動性能の定量評価を目的としたドライバモデルを備えた自動操縦システムの開発

稲垣 貴弘*

車両の運動性能評価は，熟練ドライバの官能評価に頼る部分が多く，定量化が望まれている．そこで，官能評価で「操作感」「一体感」という感覚表現に対応すると言われているステアリングエントロピーや残留ヨー角加速度といった指標を実車で正確に測定するために，「ドライバモデルを備えた自動操縦システム」を開発した．このシステムは，異なる車種でも簡単に装着でき，車体スリップ角を考慮した曲率ベースのドライバモデルを適用することで，予め計画した走行経路を広い速度域でも正確に追従する自動操縦を実現した．これにより，高精度なクローズドループ評価を実現し，運転者の感覚の領域に踏み込んだ車両運動性能の定量評価を可能にした．

* 正員，トヨタテクニカルディベロップメント㈱（〒470-0334 豊田市花本町井前1番地9）

技術奨励

(2) 燃料機器用電磁弁を対象にした流体-磁場-機構連成解析技術の開発

王　宇*

近年，快適性の観点から，直噴ガソリンエンジン向け高圧燃料ポンプの低騒音化が求められている．この騒音は，ポンプ内の電磁弁の繰り返し衝突によって生じることが知られているが，弁周囲の燃料，磁場，及び電磁弁とその周辺機器の機構が相互に影響しあうため，弁挙動を精確に把握することは困難であった．そこで本開発では，流体，磁場，及び機構の三つの影響を同時かつ正確に予測可能な連成解析技術の開発を行った．また実験結果と比較も行い，弁衝突速度に関する予測誤差が約7%まで低減したことを確認した．本解析手法は低騒音電磁制御弁形状設計に貢献できるだけでなく，各種油圧機器等の解析にも活用できる．

* 正員，㈱日立製作所 研究開発グループ（〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2）

技術奨励

(3) 塗膜劣化を考慮した腐食寿命予測技術の開発

小野 裕司*

様々な機械部品を搭載する自動車において，その求められる防錆性能が高まる中，防錆評価の短期化と高精度化を両立させる新たな腐食寿命予測技術を開発した．従来の8ヶ月掛かる試験評価の代替として新たに計算科学を用いることで評価を6時間に短縮した．本技術は，塗膜中の酸素・水の物質拡散に注目し，それらをパラメータ化した実験式をシミュレーションに組み込むことで，多くの機械構造物に採用されている塗膜に守られた金属に関しての腐食寿命算出を可能とした．また，本技術はこれらをパラメータ化したことで，自動車の使用環境・走行状態（使われ方）に応じて，腐食のモードを切り替えることが可能である．

* 正員，トヨタ自動車㈱（〒471-8571 豊田市トヨタ町1番地）

技術奨励

(4) 産業用高温ヒートポンプの冷媒選定と性能評価手法の開発

甲斐田 武延*

産業用ヒートポンプは，排熱をくみ上げ，熱を再利用する技術であり，省エネとCO_2排出削減に貢献する．民生用ヒートポンプと異なり，熱源・熱供給の媒体（空気，水，蒸気）や温度が様々であり，ヒートポンプの高温化による適用用途の拡大と性能評価の標準化が必須である．また，地球温暖化係数（GWP）の低い冷媒に転換していくことが喫緊の課題である．そこで，ヒートポンプ供給温度が60℃から蒸気ボイラ代替が可能な200℃までの幅広い範囲で適切な冷媒を選択するための方法を考案した．また，蒸気供給ヒートポンプを対象に，多様な温度条件での性能や部分負荷特性，負荷追従特性等を評価する手法を構築し，標準化のための指針を得た．

* 正員，（一財）電力中央研究所（〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1）

技術奨励

(5) マルチフィジックスシミュレーションによる発電プラント機器の劣化診断技術の開発

柏瀬 翔一*

発電プラント内の重要機器は，故障に至る事例が少なく，定量的な状態評価を行う手法が確立していない．さらに，複数の機器で構成されるシステムにおいては，各機器の挙動変化が相互に影響を及ぼすため，劣化状態を正確に評価することが難しかった．そこで，機械，電気，流体などを扱うマルチフィジックスシミュレーションにより，複数の機器で構成されるシステム全体の劣化挙動を評価可能とする技術を開発した．

本技術をプラントの重要機器であるポンプおよび電動弁に適用し，ポンプの劣化の影響により電動弁の開閉動作に変化が生じることを明らかにした．監視技術と組み合わせて分解点検の削減など保守業務の最適化に活用していく．

* 正員，東芝エネルギーシステムズ㈱（〒183-8511 府中市東芝町1番地）

技術奨励

(6) 原子炉蒸気発生器の管群における相変化を伴う高精度気液二相流解析手法の開発

小室 吉輝*

原子力プラントの蒸気発生器等のシェル＆チューブ型熱交換器に適用可能な気液二相流解析手法の開発業務に携わり，二流体モデルに基づく３次元二相流解析に必要となる気液相間作用（気液界面抗力，気液界面積濃度，等）の構成式，及び，管群圧損，伝熱式等の構成式の選定・組込を行い，開発した解析手法の妥当性確認等を担当した．

解析手法の妥当性確認においては，実機模擬流体を用いた二相流試験の実験データを用い，U字管に沿った二相流パラメータ（ボイド率，気液界面速度）の分布を検証した．実験データには，蒸気発生器の部分負荷出力相当の条件も含んでおり，この条件に特有な管群外周部の低ボイド率領域の再現についても確認した．

* 正員，三菱重工株式会社 総合研究所 伝熱研究部 伝熱第二研究室（〒676-8686 高砂市荒井町新浜2丁目1番1号）

技術奨励

(7) ピッキングロボットシステムに適用可能な機構解析制御技術の開発

古茂田 和馬*

物流分野の労働力不足から，６軸多関節ロボットを用いたピッキングシステムの導入が進んでいる．しかし，従来のシステムでは，ロボットの特異姿勢により動作速度の低下や制御可能な可動領域が制限されるという課題があった．そこで，ピッキング動作に適したロボット構造をモデル化し，その位置姿勢と可操作度を最大化する最適化技術を開発した．これにより，環境条件に応じた高速なアクセス性を実現する最適なロボットシステムを一意に決定することができる．この技術は高速化と可動領域の拡大に効果があることから，狭い場所で高速な把持動作が必要とされる物流環境下でのピッキングロボットシステムの発展に貢献できる．

* 正員，㈱東芝（〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町33）

技術奨励

(8) 高過給・高EGR条件に適用可能な噴霧燃焼の着火遅れ予測式の開発

坂根 悠平*

ディーゼル・ガスタービンエンジンをはじめとする噴霧燃焼場における着火遅れを幅広くモデル化するため，実機での広範な運転条件において着火遅れを取得し，その影響因子を重回帰分析により数値化した．これに基づき，着火遅れを燃料液柱の分裂・蒸発混合に代表される物理的期間と実際に発熱が開始する化学的期間として明確な区別を試み，物理的期間は燃料噴霧先端挙動のモデル化により，化学的期間はアレニウス式の積分で得られるLivengood-Wu積分によりそれぞれ表現できることを明らかにした．さらに，これらの物理的・化学的着火遅れモデルを連成することで，簡便・高精度かつ広範な燃焼条件に適用可能な着火遅れ予測式を開発した．

* 正員，㈱本田技術研究所（〒351-0193 和光市中央1-4-1）

技術奨励

(9) 部材破断を考慮した耐震性能評価手法の開発

塩見 謙介*

巨大地震が発生した場合，発電所等の重要設備を構成する鉄骨部材には大きな繰返し荷重が生じ，疲労により破断に至る可能性がある．しかし数値解析に基づく現行の耐震性能評価ではこの破断は考慮されておらず，巨大地震に対する評価精度には課題があった．

この課題に対し，まず大型振動台を用いた鉄骨部材の破壊試験を実施し，部材の疲労寿命の予測式を構築した．これを現行の数値解析に組み込むことで，低サイクル疲労による部材破断を考慮した新たな評価手法を提案した．本手法により，巨大地震に対する精度良い耐震性能評価が可能となり，重要な社会インフラである鋼構造物の安全性と信頼性の向上に資すると期待できる．

* 正員，㈱IHI（〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地）

技術奨励

(10) ダンパを用いた地震発生時の脱線防止装置の開発

髙杉 誠*

当社では地震時の安全性向上に継続して取り組んでおり，脱線そのものの防止のため，車両の揺れを抑制するダンパをベースとした脱線防止装置の実用化を目指し，従来の特性に加え，地震時の大きな揺れに対して高い減衰力を発揮するようにして，車体・台車間の動きを抑制し，耐脱線性能を向上させた．本技術の実用化に向け，ダンパ取付部破損を防ぐリリーフ荷重特性の検討，現状の台車構造で装備可能とする小型化等に取り組み，新幹線試験車両ALFA-Xで世界初の実車搭載を実現し，今後の実用化に目途をつけた．

本成果は，高速鉄道車両に広く展開可能で，鉄道車両の安全性向上に大きく資するものであり，今後は幅広い車種への搭載が期待できる．

* 正員，東日本旅客鉄道㈱（〒331-8513 さいたま市北区日進町2-479）

技術奨励

(11) 二相流計測技術の確立と信頼性・性能を両立する蒸気タービン翼形状の開発

髙田　亮*

蒸気タービンでは，液滴が高速で動翼に衝突して生じるエロージョン損傷と，その抑制のために翼面に設けた水分除去構造からの主蒸気吸込みによるタービン性能低下が問題となっている．そこで，ミーの散乱理論を応用したレーザ液滴計測器を開発し，タービン内の二相流挙動を明らかにした．さらに水分除去構造から吸い込む二相蒸気を断熱環境下で気液分離し，液・蒸気量を高精度に同時計測する手法を開発し，水分除去構造の実機性能を定量評価する計測技術を確立した．この２つの計測技術を用いてエロージョン抑制と性能向上を両立する水分除去スリット翼形状を開発し，実機蒸気タービンにてその定量効果を実証した．

* 正員，三菱重工業㈱総合研究所ターボ機械研究部（〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1）

技術奨励

(12) 多種の作業環境に対応する双腕ロボットの動作生成技術の開発

中村 哲司*

施工や多品種少量製造等の分野での組立や分解等の作業は，部品を選択し，非固定環境で勘合やねじ締めといった作業を複数工程に渡って行う必要がある．本研究では，これらの作業のロボット適用に向け，動作の類型に応じてAIベースと信頼性の高い従来のプログラムベースの動作モデルの選択に関する設計指針を考案し，さらに２つの動作生成モデルを切り替えて一連作業を行うロボットシステムを開発した．そして，ランダム配置された部品をピックアップし，ねじ締めにて係合する一連の組立作業をロボットで実証した．これより，従来のロボットでは実現が難しかった不定形環境での一連作業に対するロボットの適用可用性を示した．

* 正員，㈱日立製作所（〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2）

技術奨励

(13) 連続陰極水素チャージ法による水素インフラ用鋼材の耐水素性の簡易評価手法の開発

西原 佳宏*

近年，水素インフラの普及推進に伴い，構造材料として低廉かつ高強度な鉄鋼製品の利用が望まれている．しかしながら，高圧水素ガス中では材料の劣化が生じるため，鋼材の適用には高圧水素ガス中における安全性の証明が必須となる．また，高圧水素ガス中材料試験は，法令に則った設備と保安管理体制を必要とし，実施には高いハードルがある．そこで，高圧水素ガスを使用せず，鋼材の水素インフラへの適合性を評価できる手法を開発した．本技術は，電気化学反応を利用することで，高圧水素ガス中を模擬した材料評価を実現した．高価な高圧ガス設備を必要としない手法であり，鋼材開発促進に加え，本分野の研究者増加等，研究分野発展への貢献も期待される．

* 正員，JFEスチール㈱（〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1京浜ビル）

技術奨励

(14) 沸騰水型原子炉の高温高圧・蒸気-水環境に適用可能な液膜厚さ計測技術の開発

古市　肇*

従来困難であった沸騰水型原子炉の運転条件（290℃・7MPa）に適用可能な液膜厚さ計測技術を開発した．福島第一原発事故を受け，蒸気中に露出した燃料の冷却特性を精度よく予測することで，安全性の向上が求められている．この冷却特性の限界は燃料棒表面の液膜消失現象により生じる．本技術では，従来の液膜計測技術である超音波反射法において，気液密度差が小さい点などから生じる液膜厚さ計測限界の課題を解決した．開発したケプストラム差分法は，液膜厚さ変動成分の時間平均化によりノイズを排除し，複雑な重畳波形から微弱な反射波を検出可能とした．従来の計測限界を拡大し，沸騰水型原子炉の運転条件に適用することに成功した．

* 正員，㈱日立製作所（〒319-1292 日立市大みか町7-1-1）

技術奨励

(15) 組立や医療分野などのロボット適用領域拡大に向けたエンドエフェクタおよびシステム化技術の開発

本間 敏行*

少子高齢化が進む中で，ロボットの活用が期待されている．その一方で，器用な作業はロボット化が難しく，製造業・非製造業問わず，現在ロボットが適用されている分野は限定的である．そこで，ロボットの器用さに直接かかわるアーム先端のエンドエフェクタに着目し，ねじ締めや部品挿入ができる高機能なロボットハンド，小型で大きな力が出せる液圧駆動機構を開発した．また組立分野において，そのロボットハンドを活用したシステムも開発し，生産ラインで使えるレベルであることを示した．これにより，器用な作業が必要とされる組立作業や医療分野へのロボット適用を拡大し，労働力不足解消への貢献が期待できる．

* 正員，川崎重工業㈱ 技術開発本部 システム技術開発センター（〒673-8666 明石市川崎町1-1）

技術奨励

(16) 無線多機能ホルダシステムを用いた回転工具のスマートモニタリング技術の開発

松田　亮*

各産業分野における部品の高精度化・高品質化は切削加工技術と，その技術を扱う熟練工らによって達成されている．熟練工らは加工点で発生している物理現象を五感でとらえ，正常・異常を判断しているため，若手技術者等は簡単に真似ができない．また，昨今の工作機械は安全性向上のためにフルカバーが施され，熟練工でも加工現象を捉えることが難しい状況にある．本技術は，回転工具内部に温度・加速度センサを内蔵させ，さらに無線通信機能を具備させ，マシニングセンタ等を用いる現場でも利用性を損なうことなく“加工現象の見える化”を確立した．これにより，刃先近傍での正常・異常の評価をリアルタイムかつ定量的に行うことが可能となった．

* 正員，㈱山本金属製作所（〒547-0034 大阪市平野区背戸口2-4-7）

技術奨励

(17) IoTに基づく無線ホルダシステムを用いたCNC工作機械とCAMを統合するシステムの開発

山本 隆将*

機械加工業のスマートファクトリーの実現に向けて，加工中のセンシング技術とそのデータからのフィードバック制御が求められている．本技術ではマシニングセンタでの加工において，無線回転ホルダによる加工点近傍の物理情報と工作機械CNCから加工座標値を含むサーボモーター情報をリアルタイムに取得した．これにより，工作機械毎の経時劣化状態や運動制御特性の診断が可能となり，実加工中の情報に基づきCAMにおける工具軌跡や主軸および送り軸のプログラム指令を変更しびびり振動を抑制することに成功した．このようにして，CAD/CAMと工作機械制御を統合する新しい生産システムによりスマートファクトリーの実現に向けた技術を構築した．

* 正員，㈱山本金属製作所（〒547-0034 大阪市平野区背戸口2-4-7）

技術奨励

(18) 自動車ガソリンエンジン向け副室式火炎ジェット点火システムの開発

米谷 直樹*

電動化時代に対応したハイブリッド車向けエンジン技術として，副室式火炎ジェット点火システムについて検討し，既存エンジンの点火プラグ穴へ後付け可能なアドオン型副室の開発を行った．アドオン型副室を実現するには，燃焼室の表面積増大による冷却損失の増加等，複数の技術課題を解決する必要があった．候補者は，実機試験とシミュレーション解析により，ジェット強度を適正範囲に制御するための副室体積とオリフィス径の最適化を行った．試作した副室サンプルの単気筒エンジン試験を行い，リーン限界と図示熱効率の改善を実証した．既存エンジンへの副室適用により，輸送・エネルギー部門のCO_2排出量削減への貢献が期待できる．

* 正員，㈱日立製作所（〒319-1221 日立市大みか町7-1-1）

技術奨励

(19) 低騒音化と冷却性能向上を両立させた鉄道用全閉外扇型モータの開発

王　　蕾*

本業績は，鉄道向けの全閉外扇型モータの開発に注力し，低騒音化と冷却性能の向上を両立させ，市場投入に大きく貢献したものである．冷却用ファンの最適化により風量を維持しつつ低騒音化を達成した．また，外気通風路を内気通風路と固定子鉄心との間に設ける独創的なアイデアにより，冷却性能の大幅な向上を実現した．冷却構造のモジュール化にも取り組み，国内外の主要な路線に対応可能とし，設計・製造工数の大幅低減にも寄与している．本業績は，全閉外扇型モータの鉄道への普及を加速するのみでなく，一般産業用モータへの発展性も期待されており，広く産業社会において省エネルギー化や環境負荷低減に大きく貢献するものである．

* 正員，東芝インフラシステムズ㈱（〒183-8511 府中市東芝町1）

教　育

(1)「やさしい材料力学」の会誌連載と「JSMEやさしいテキストシリーズ“基礎からの材料力学”」の出版

荒井 政大*1　後藤 圭太*2

受賞者らにより，令和元年度に12か月の連載記事として「やさしい材料力学」が日本機械学会誌に掲載された．材料力学の基礎を丁寧に解説するとともに，代表的な例題の解き方を詳しく説明し，初学者でも材料力学を基礎から学ぶことができるよう配慮した．日本機械学会出版センターでは，このやさしいシリーズの連載を契機として，新たな教科書シリーズの発刊を計画した．この「JSMEやさしいテキストシリーズ」の第一弾として，「基礎からの材料力学，荒井政大・後藤圭太共著」が令和3年8月に発刊されることとなった．機械工学の初学者でも学びやすく，さらにはこのコロナ禍のなかでも学生たちが自学自習しやすいよう，演習問題の解答を詳しく解説するよう心掛けた．なお，本教科書は紙の書籍と電子書籍の併売となっており，近年の電子書籍化の流れに配慮した．LaTeXを用いた組版を行うことで出版経費の大幅な削減を実現している．「やさしい材料力学」の連載と，それに続く「基礎からの材料力学」の出版は，令和の時代における「情報の事業化」を視野に入れた本学会の出版活動の新たな戦略と指針を与えるものであると考える．

*1 フェロー，名古屋大学大学院航空宇宙工学専攻
*2 正員，名古屋大学大学院航空宇宙工学専攻

教　育

(2) 三池炭鉱に残る「機械群の技術」に特化した「技術モデル製作」と市民に対する「技術教育」の実践

篠﨑　　烈*1　石橋 大作*2　吉冨 貴司*3　真島 吉將*3

この取り組みは，小学生や中学生，一般市民に福岡県大牟田市，熊本県荒尾市にある世界遺産「三池炭鉱」に残る機械群を調査し，技術を専門としない人達に「分かりやすく」「楽しく」伝えることを目的としたものである．目的を達成するために，［1］機械の技術モデル製作，［2］炭坑の機械技術に関する出前授業を約10年間で15回以上実施している．

技術モデル製作では，機械遺産である「三池港閘門」の水圧シリンダ等の動作原理を透過して観察できる尺度1/100の技術モデルや，子供達が乗って技術に親しむ尺度1/6の「電気機関車（炭鉱電車）」モデルを製作して産業科学館や小学校等での展示・教育に貢献している．機械技術に関する出前授業では，三池港閘門，竪坑櫓，石炭人形の加工技術，炭鉱電車について，実物の写真や図面，技術解説を加えたスライドを駆使して講義を実施している．小中学生は，授業で聞いた内容を付箋紙で書き出すブレインストーミングを行ない，「貼り出した枚数」＝「新しい発見」として，楽しく学ぶことができている．さらには，市民大学講座として子供から大人まで多くの市民に炭鉱技術に関する講義を実施しており，参加者が楽しみながら学べる場を提供している．

*1 正員，有明工業高等専門学校 創造工学科
*2 正員，有明工業高等専門学校 技術部
*3 有明工業高等専門学校 技術部