

技術功績

(1) 認知発達ロボティクスとロボカップの
提唱推進とその拡張応用



浅田 稔*

受賞者は、認知発達ロボティクスとロボカップの提唱推進とその拡張応用に貢献した。前者では、人間の認知発達過程の新たな理解を計算機シミュレーションや実際のロボット実験などの構成的手法を用いて獲得することを目的とし、「身体性」や「社会的相互作用」をキーワードにして国内では1990年代後半に、国際的には、2000年初頭に提案し、様々な研究を推進した。

JST ERATO浅田プロジェクト(2005-2011)や科研特別推進研究(代表:2012-2016)において、乳幼児期における身体体表象獲得、多様な表現力を持った乳幼児アンドロイドの開発、身体母子間相互作用における共同注意や音声模倣等の研究を実施し、これまで現象として観察されてきた知見に対し、計算モデルによる再現により、その背後にあるメカニズムの解明に貢献した。また、神経科学との連携として、機能的核磁気共鳴画像法(fMRI)を用いた自己顔や自己身体の知覚実験において、小学生、中学生、大学生の被験者実験から、パフォーマンスはほぼ同等だったが、活動脳部位が異なることを明らかにした。また、世界発の親子脳磁図測定装置Hyperscan MEGを用いて、金沢大学、米国ワシントン大学と共同で、母子間音声模倣実験を実施し、親子間の脳の同期現象を明らかにした。

後者のロボカップについては、受賞者はその創設者として一人として著名である。1990年代初頭から、人工知能とロボティクスの統合研究成果発表のプラットフォームとして構想し、1997年に名古屋で開催された人工知能の国際会議において、第一回国際競技会を開催し、メディアの注目を浴びた。競技会を通じ、学生のモチベーションを上げ、さらには、ロボカップジュニアリーグを設けることで、小学生から高校生まで参加可能な競技会で全世界の子どもたちは競い合いながら交流する場も提供してきた。いまや全世界40余りの国と地域から毎年約400チーム3千人が参加する知能ロボットの国際競技会と認知されている。研究面では、世界に先駆けて強化学習の実ロボット応用を実現し、マルチエージェントへの拡張、さらに進化的手法による協調行動創発へと発展してきた。

以上のように、受賞者の認知発達ロボティクスとロボカップの提唱推進とその拡張応用の成果は、国の内外を問わず、学術研究のみならず学生教育にも大きな影響を与えている。

* フェロー、大阪国際工科専門職大学(〒530-0001 大阪市北区梅田3-3-1)、大阪大学先導的学際研究機構 共生知能システム研究センター(〒565-0871 吹田市山田丘1-1)

技術功績

(2) マイクロメカトロニクスの研究開発と
バイオメディカル応用



新井 史人*

受賞者は、機械システムが小型集積化技術との融合により、新たな機能を獲得するために必要な学術基盤の重要性に着目し、マイクロメカトロニクスの研究分野を早くから開拓した。課題解決のためのユニークなコンセプト、加工・計測・制御に関わる新たな技術、微小世界特有の物理化学現象の分析技術とそれに基づいた高度なシステム設計論を構築した。また受賞者は、学際的な技術融合が必要とされるバイオメディカル分野において、マイクロメカトロニクスを応用し、新たな機能を創出し、その有効性を示し、成果を実用化へと導いた。以下に代表的な3つの技術を紹介する。

- (1) マイクロ流体チップとロボット技術を統合した「オンチップロボティクス」を提唱し、細胞の操作・計測・解析・加工・分離に関する新しい方法論を構築した。微細で小さなマイクロツールを磁場や光放射圧などによって駆動することで、マイクロ流体チップ内での力学的相互作用を可能とし、チップの機能や応用範囲を拡大した。オンチップロボットにより、微小流体中の外乱の影響を抑えて精密な操作や計測が可能となった。この技術を細胞分離に応用し、希少な細胞を超高速に分離・回収する技術を実用化した。
- (2) 人体を人工物等で擬似的に再現し、生体忠実性を有する患者モデルとして「バイオニックヒューマノイド」を提案した。これに様々なセンサを組み込み、手術機器との相互作用をデータ化することで、新しい医療機器の評価や、医師の技術レベルの評価や訓練に利用できるシステムを開発した。眼科モデル、脳外科モデル、血管モデル、心臓モデルなどがある。この技術を用いて作製された患者モデルを実用化した。リアリティの高い手術シミュレーション環境が反響を呼び、国内外で活用されている。
- (3) 10の6乗オーダーの力計測レンジを有する高精度で安定性が高く、高剛性なワイドレンジ力センサを開発した。水晶振動子に加わる外力に応じてその共振周波数が変化することを原理とする。振動子の独自の保持機構、水晶の接合方法、信号処理回路を工夫することで、高い安定性、高応答性、小型化を実現した。応用例として、非拘束で体重、脈波、呼吸、姿勢などのライフログを計測するなど、この独自センサの有用性を示した。

以上のように、受賞者は、マイクロメカトロニクスの学術フロンティアを開拓し、多くのバイオメディカル応用を実践し、技術的功績は極めて大きい。

* フェロー、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)

技術功績

(3) 自動車の振動騒音の低減技術開発



駒田 匡史*

自動車の室内の振動騒音 (NV) に対する乗員の快適性を担保するため、低周波数から高周波数のNV現象を低減する技術や、市街地の騒音環境を守るため、自動車から発する車外騒音を低減するための技術を開発し、それらを車種開発へ適用してきた。加えて、振動抑制の基礎理論の提案も行ってきた。

ガソリン車の快適性に影響する主なNV現象は、エンジン音、ロードノイズ、風切り音である。走行中に不安感を与えるはギャウなり音である。これらは、車体、エンジン、タイヤなどのコンポーネントが影響するため、種々の技術開発が必要であった。エンジン音は良い音作りが重要なため、その数値化と具現化技術を開発した。排気音は、車体共振や室内共鳴の影響の解析技術を開発した。ロードノイズは、路面が加振源となる不規則な振動のデータ処理と対策部位の同定法の開発や、複雑に振動するタイヤの簡便な性能予測法の開発を行った。加えて、機械学習を用いた音の予測法開発にも挑戦した。風切り音は、強制源の簡易モデル化や伝播音の予測法開発、ガラスとガラスランのエネルギーのやり取りに着目した低減構造を開発した。ギャウなり音は、リーフサスペンションの振動ばらつきを抑制し、共振を制御する構造を提案した。車外騒音は、試験の効率化と要因解析の精度向上のための屋内試験での再現法や、エンジンやタイヤの音の寄与を抽出する技術開発を行い開発へ適用してきた。ハイブリッド車 (HEV) 開発では、世界初の前輪駆動HEVからシステムが進化するに伴いより一層の電磁気騒音の対策が必要となり、ガソリン車には無い高周波数音の発生メカニズム解析や予測法開発を行った。また、後輪駆動HEV特有の、パワープラント由来の低周波音やモータ音の低減技術や、高級車に要求されるエンジン起動停止時の厳しい振動目標を達成する技術を開発した。さらに、エンジンアイドル時の不規則な振動を、モータを活用して効率的に低減する技術も開発した。近年は機械学習を適用し、エンジン起動時の振動ばらつきの要因解析も実施した。振動抑制の研究を行い、ブッシュやマウントなどの結合ばねで連結された振動系を対象に、共振周波数を制御しつつ、任意の部位の振動を零にするための結合ばね値を求める基礎理論を提案した。

以上、この分野における幅広い技術開発に取り組み、自動車の静音化や技術の発展に貢献してきた。

* 正員、トヨタ自動車(株) (〒471-8571 豊田市トヨタ町1)

技術功績

(4) 建造物の健全性簡易計測技術とそのセンサ開発



下井 信浩*

受賞者は国立の研究機関に在職中であった1996年信州大学に提出した博士論文「地表及び地下埋設物の遠隔探査とその多元的画像処理技術」のなかで先駆的計測技術としてフィールド作業用ロボットを用いた新しい制御方法や活用方法について様々な問題を果敢的な手法を用いて成果を挙げる事に成功している。特に、2005年から1年間在籍したアルバータ州立大学のコンピュータサイエンス学科において、当時カナダの緊急的課題であったオイルサンドの露天掘りロボットの多数協調制御等に関する課題を与えて頂き大きな研究の励みになる事が出来たと思返すことができる。本研究の基盤は、これらの研究経験によって構築されたと考えられる。その結果、インフラ建造物の健全性を遠隔から長期間モニタリングするため、企業と共に研究・開発したロボット技術によって建造物の健全性簡易計測技術を進展させ、社会貢献に大きく寄与した。本計測技術は、遠隔からでも対象建造物の健全性を自律的に解析可能なAIモニタリングシステムであり、複数の建造物を同時にモニタリング可能である。機械学習法を用いた本システムは自律的に危険判定を実施し、異常時には自律的に関係機関へ通報する機能を持つ。また、本システムに使用する安価な消耗型のオリジナルセンサとして、加速度計と同様の性能を持つボルト形のビエゾ振動センサ (ビエゾケーブルをウレタンチューブに挿入した構造) や、変形角1/200、1/100時にも変位検出が可能なビエゾ変位センサ (ガラス管にビエゾフィルムを接着した構造) も開発した。これらのセンサは従来法よりも安価であり操作も容易なことから、幅広い建造物の健全性計測が可能となる。

我が国では高度経済成長期に建設されたインフラ建造物の老朽化が進み、トンネルや橋梁の崩落事故が社会的問題となっている。建造物の健全性簡易計測技術により、世界中の老朽化したインフラ建造物の異常をいち早く検知し、適切に修繕することで人々が安心して生活できる社会を作ることができる。受賞者は、独創的技術開発と社会課題に対する先駆的技術開発に挑戦し、インフラ建造物の予防保全や災害リスクの軽減に貢献している。

* 正員、秋田県立大学システム科学技術学部 (〒015-0055 由利本荘市土谷字海老ノ口84-4)

技術功績

(5) 地域エネルギー需給データベースの
脱炭素社会設計への実装



中田 俊彦*

受賞者は、熱工学を基盤とするエネルギーシステムの解析技術と火力技術開発の知見を組み合わせて、日本初の地域エネルギー需給データベース (Japan Energy Database) を開発した。このデータベースは、エネルギー統計解析に社会経済指標を加えて、全国1,741市区町村の地域エネルギー需給特性を情報提供する日本初のプラットフォームである。

きっかけは、2011年の東日本大震災後に大学教員として東北各地のスマートコミュニティ事業に参画して気づいた、地域社会のエネルギー需給データの不在である。2015年パリ協定を契機としたカーボンニュートラル研究の世界規模の新たな潮流を感じて、エネルギーシステムを論理的に設計するうえで必須の地域エネルギー需給データベースを、既存のエネルギー統計を参照して自ら解析し開発することを決意した。内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) に参画して、大容量のビッグデータ分析に必要な演算装置を揃えたことも支えとなった。

本技術の要は、6,200万個のビッグデータの統合解析、利用者の視点に立ったインタラクティブなデータ・ビジュアライゼーション機能とシミュレーション機能である。182変数の依存関係を緻密に定式化した動的シミュレーションモデルを内生し、サンキーチャート、時系列グラフ、ウェブマッピングなどデータ・ビジュアライゼーションを駆使して視覚化することに成功した。特徴として、データサイエンスとアートを融合して、地域エネルギー需給バランス表からドリルダウン操作でエネルギーフロー図を表示して、エネルギー資源量、需要量、エネルギー変換技術、エネルギー効率、CO₂排出量、コストなど解析結果を提供している。

公開後約二年間で14万件を超える表示回数と2.2万人のユーザー数の実績から、技術専門家、コンサルタント、政策立案者、環境団体まで幅広いユーザーに本データベース技術の優位性が認知されたといえる。カーボンニュートラル社会への異なるシナリオを仮想実験して、脱炭素技術の導入と市場展開に不可欠なCO₂削減効果を事前に理解し評価することが可能となった。環境省をはじめ約40の地方公共団体がカーボンニュートラル社会の実行計画立案に参照するなど、本技術の社会実装が始まっている。

* フェロー、東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-11-815)

(1) 材料特性と負荷形式を考慮した
最適疲労曲線の構築



高梨 正祐*¹ 朝田 誠治*² 小林 英男*³

本論文では、材料特性と負荷形式を考慮し、最適疲労曲線を構築した。機械と構造物の多くの損傷事例は、繰返しのひずみまたは応力による疲労破壊に起因している。疲労破壊の防止には疲労設計が必要となり、疲労設計の際に重要な役割を果たすのが設計疲労曲線である。圧力機器と原子力機器のように、設計規格で設計疲労曲線が設定されている場合もあるが、一般の産業機器の場合には、設計疲労曲線は設定されていない。設計疲労曲線は、最適疲労曲線に設計係数を適用して、設定される。しかし、最適疲労曲線がない場合、既存のデータベースに頼るか、自ら疲労試験データを取得することになる。ここで、二つの問題点に遭遇する。一つはどのように疲労試験データを取得するかであり、もう一つは取得した疲労試験データからどのように最適疲労曲線を設定するかである。

本論文ではまず、汎用されている三つの疲労試験方法（回転曲げ、軸荷重制御、ひずみ制御）を比較し、その使い分け方、すなわち適用範囲を明確に示した。

次いで、炭素鋼および低合金鋼の場合とオーステナイト系ステンレス鋼の場合を対象として、日本溶接協会の原子力研究委員会に設置されたDFC小委員会において、ひずみ制御試験データに基づいて構築された引張強さをパラメータとする最適疲労曲線が、軸荷重制御疲労試験のデータと長疲労寿命領域で乖離することを示した。

この乖離を埋めるために、回転曲げ疲労試験と軸荷重制御疲労試験のデータを考慮して、最適疲労曲線を再構築した。炭素鋼および低合金鋼の場合は、焼入れ焼戻し鋼と焼ならし鋼の2種類に分類して、最適疲労曲線を示した。オーステナイト系ステンレス鋼の場合は、負荷形式（荷重制御、ひずみ制御）により2種類に分類し、最適疲労曲線を示した。

さらに、統計解析により最適疲労曲線の平均と標準偏差を示した。これにより、目標とする信頼下限界に対応する設計係数を具体的に示した。本論文の最終的な目的は、日本と米国（ASME）における圧力機器と原子力機器の設計規格に共通の最適疲労曲線を設定し、現行の設計疲労曲線を改正するために、その技術的基盤を明確に示すことにある。その第一歩として、すでに圧力機器の設計規格（KHK-S-0220）において、最適疲労曲線を設定し、設計疲労曲線を改正した。また、一般の機械と構造物の設計疲労曲線に対しても、この設計疲労曲線が基本になると考える。

* 掲載：日本機械学会論文集，89-918，(2023-2)，22-00277.

*¹ フェロー，(株)IH

*² 正員，三菱重工業(株)

*³ 名誉員，東京工業大学名誉教授

(2) 部分安全係数法（JIS B9955-2017）を用いた
鉄道車両用台車枠溶接部の寿命と破壊確率の評価



牧野 泰三*¹ 加藤 孝憲*² 長谷川 翔一*³ 山崎 陽介*²



亀甲 智*³ 下川 嘉之*³

鉄道車両用台車枠には疲労限度設計が採用されており、設計荷重におけるFEM解析や静荷重試験のデータを合成した応力が、許容応力を超えないように長年設計されてきた。しかしながら、これまでに疲労による溶接部の不具合が少なからず報告されている。このような不具合の一要因として、実働応力の振幅や平均が絶えず変動するために、設計時に許容応力以下の応力であっても台車枠に疲労損傷を与える可能性、長期間の使用において経年による走行路線、軌道状態、積載質量など使用条件の変化、が考えられる。このため、台車枠の不具合を回避するには、これらの要因を考慮した寿命評価、すなわち強度側に加え外力側のばらつきをも考慮して寿命と破壊確率との関係を明らかにすることで、台車枠の疲労信頼性を確保する必要がある。

本論文では、台車枠溶接部を対象に、実働応力下における寿命と破壊確率の評価法を構築し、両者の関係を明らかにすることを目的とした。まず、溶接継手の疲労試験データを基に、強度側のばらつきを考慮すべく、応力比と止端曲率半径の影響を考慮した寿命評価用P-S-N曲線を決定した。そして、部分安全係数法（JIS B9955）を基に疲労による破壊確率を見積もる方法を提案した。部分安全係数法とは、外力と強度に対して部分安全係数を定め、それらの係数を有する基準式に基づいて信頼性評価、すなわち破壊確率を求める方法である。部分安全係数法の疲労への適用にあたり、外力側のばらつきを考慮すべく、以下の二つの概念を新たに導入した。一つは評価パラメータに累積損傷値とその限界値を用いたこと、もう一つは損傷値のばらつきを見積もるのにt分布に基づく区間推定を用いたことである。後者の概念は、短期間で測定した損傷値のばらつきが、全寿命に対応する長期間に累積する損傷値のばらつきとは異なることを論理的に考慮するために見出したものである。

そして提案方法を、上記したP-S-N曲線と累積損傷則を用いて実車両の台車枠に適用して寿命評価を行った。その結果、走行距離の増加とともに破壊確率が上昇する挙動や、実働応力のばらつきによって破壊確率と寿命との関係が変化することを明らかにした。これらの結果の意味を正しく理解することや提案方法を広く活用することは、台車枠、ひいては鉄道車両を安全に運用する上で非常に重要であり、その安全性・信頼性向上に大いに役立つといえる。

* 掲載：日本機械学会論文集，88-915，(2022-11)，22-00102.

*¹ フェロー，日本製鉄(株) 技術開発本部（〒660-0891 尼崎市扶桑町1-8）

*² 正員，日本製鉄(株) 技術開発本部

*³ 正員，日本製鉄(株) 関西製鉄所（〒554-0024 大阪市此花区島屋5-1-109）

論文

(3) Infrared high-speed thermography of combustion chamber wall impinged by diesel spray flame



相澤 哲哉*1 木下 智貴*2 秋山 忍*3 篠原 昂陽*4



宮川 雄成*5

ディーゼルエンジン燃焼室内の高圧高圧場において、2,000気圧レベルの高圧で噴射されるディーゼル噴霧火炎から燃焼室壁面への熱伝達は、時空間的に強い変動を伴う極めて複雑な現象である。著者らはこの現象解明に極めて有用な新たな計測手法として、128×128ピクセル毎秒10,000コマの世界最速の高速度赤外線カメラと、ディーゼル噴霧火炎衝突に耐える機械強度の向上及びピンホール生成抑制のため工夫を凝らしたクロム放射膜付き石英ガラス窓の裏面からの撮影という独創的な可視化手法を組み合わせて用いた。これにより従来の点計測センサでは全容把握が困難であったディーゼル噴霧火炎衝突壁面における高速・非定常で極めて複雑な熱伝達現象を、世界で初めて時系列可視化することに成功した。可視化用の放射膜付きガラス窓については、ディーゼルエンジン燃焼室壁面に用いられるアルミ合金や鋳鉄等と比べて熱拡散率及び熱浸透率の低い合成石英を敢えて壁面材質として選定し、ディーゼル火炎衝突時の壁面温度上昇を意図的に増大させることで、高速度赤外線サーモグラフィのS/N比を大幅に向上させ、現象理解に資する鮮明な赤外放射時系列画像の撮影を実現した。ディーゼル火炎の衝突で加熱されたクロム膜からの赤外放射は、壁面近傍のコヒーレントな乱流構造に対応すると推測される特徴的な放射筋状パターンを呈することが分かった。撮影された赤外放射画像を電気炉を用いた校正により温度分布に変換し、これを境界条件とする壁内部の3次元非定常熱伝導解析を行うことで、壁面熱流束分布の時系列画像を取得することができた。この筋状パターン熱流束分布の後縁部と谷底部の間では平均値の10～20%程度に相当する熱流束値の差が見られ、筋状パターン生成メカニズムを解明、活用することでディーゼル機関の壁面冷却損失を低減できる可能性が示唆された。本論文は、現在も継続している燃料噴射条件（噴射圧、噴射率パターン等）、雰囲気条件（酸素濃度、密度等）、壁面条件（衝突距離、壁面幾何形状、壁面性状、壁材伝熱特性、リブレットやディンプル等の壁面微細加工等）を対象とした広範なパラメトリックスタディへの本計測手法展開の突破口となった重要な論文である。今後の研究によって得られる詳細な現象理解により、ディーゼル機関の冷損低減手法の開発促進、熱効率向上を通じてのカーボンニュートラルへの貢献が期待される。

* 掲載：International Journal of Engine Research 23-7, (2022-7), 1116-1130ページ。

*1 フェロー, 明治大学工学部機械情報工学科

*2 正員, 明治大学大学院理工学研究科機械工学専攻 (現) ㈱デンソー

*3 明治大学大学院理工学研究科機械工学専攻 (現) トヨタ自動車㈱

*4 明治大学大学院理工学研究科機械工学専攻 (現) ソニーセミコンダクタソリューションズ㈱

*5 正員, 明治大学大学院理工学研究科機械工学専攻 (現) ㈱スバル

論文

(4) Effects of injection parameters on the amount of wall-wet fuel in a port-fuel-injected spark-ignition engine during cold start



荒木 幹也*1 坂入 克弥*2 栗原 崇至*3 ゴンザレスファン*1



志賀 聖一*4 石間 経章*1 羽原 輝晃*5 三谷 信一*5

本研究はエンジン内部を直接見ることなく、それについて直接観察に匹敵する情報を得ることを目指すものであり、エンジン開発における時間的・人的・金銭的コストの大幅削減に資するものである。自動車のEVシフトはとどまるところを知らず、国際競争に勝ち残るため、多くの企業は電動ユニット開発にリソースを向ける必要に迫られている。その一方で、日本の強みであるエンジン技術をさらに深化・発展し、その圧倒的優位を堅持することもまた重要であり、限られたリソースで短期間のエンジン開発が求められている。そこで本研究では、3次元数値計算も、可視化エンジンも、レーザ計測も使用せず、無改造のエンジンをを用い、ただ初回点火までのサイクル数を数えるだけの実験から、壁面付着の支配パラメータ特定に成功し、冷間始動時の燃料付着と蒸発という複雑な非定常現象を、わずか2つのパラメータと簡便な数式で記述しきることを可能にした。この数式は電子制御ユニット(ECU)に容易に実装でき、マップ制御に依らない「自ら考えるEUC」を実現することに貢献すると考えられる。

その具体的な方法は以下のとおりである。冷間状態のポート噴射ガソリンエンジンをスタータモータで駆動し、あるサイクルから燃料噴射を開始する。噴射燃料の一部はポート壁面に付着し液膜となるが、冷えたエンジンは壁面温度が低いため液膜の蒸発は遅く、一部の燃料は筒内へ入らない。そのため、実効燃料量が不足するため余剰噴射が必要となり、これが未燃燃料排出の原因となる。噴射燃料のうち壁面付着せず液滴あるいは蒸気として直接筒内に入る割合を α 、壁面付着した液膜のうち蒸発して筒内に入る割合を β とすると、両者の和で筒内実効燃料量は決まり、その量はサイクルを重ねることに増加していく。そしてその値が可燃範囲に入れば点火する。つまり初回点火が起こる。燃料噴射開始から初回点火までのサイクル数を数える実験で α と β は一意に決定される。 α は噴射弁の実効微粒化能力を表しており、同じ噴射弁であれば同じ数値を用いる。 β は液膜の蒸発速度を表しており、燃料蒸気圧のみに比例し噴射弁の種類には一切依らない。このように α と β は現象論的に決まるパラメータであり任意の値を取ることはできない。この厳しい制約下においても、実験的に観察される初回点火サイクルを満たす α と β の組合せを一貫して決定できることが証明される。このように本手法はサイクル毎の未燃燃料排出量までもが算出されるモデルであり、その活用が今後期待される。

* 掲載：International Journal of Engine Research, 22-1, (2021-1), 184-198ページ

*1 正員, 群馬大学大学院理工学部

*2 群馬大学大学院理工学部 (現) ㈱IHI原動機

*3 群馬大学大学院理工学部 (現) ㈱アイ・ピー・エー

*4 名誉員, 群馬大学大学院理工学部 (現) (一財) 地域産学官連携ものづくり研究機構

*5 正員, トヨタ自動車㈱

(5) 高温固体面に衝突する微小液滴の
固液接触状態の観察



田島 迅人*1 小林 優介*2 奥山 邦人*3

高温物体と液体の接触による蒸発の問題は、高温面の冷却や燃料の気化をはじめ様々な産業応用に関連して重要である。高温体との接触面温度が液体の熱力学的過熱限界温度に近い場合、たとえ固液接触が生じても、分子の密度ゆらぎによる自発核生成により空間密度の高い蒸気泡生成が極めて短時間の間に起こり、直ちに接触が妨げられることが推察される。しかし直径数ミリメートル程度の液滴を高温固体面に落下させる実験から、接触界面温度の熱伝導理論値が過熱限界温度を超える高温においても顕著に接触することが知られている。多くの研究では、その観察スケール（数ミリメートル、数ミリ秒程度）から、液滴が固体面に広がる過程の対流伝熱や相変化により、接触面の状態が大きく変化し、温度が低下するなどして液体がマクロに接触可能な状態になることも考えられる。

本論文では、高温固体と液体の接触限界と自発核生成現象の関係について考察するため、微小なインクジェット液滴（蒸留水滴）を高速衝突させ、衝突前の熱的影響や衝突後の固体面に沿う液流の影響をできる限り抑えつつ、自発核生成の時間・空間スケール（ナノ秒、ナノメートルのオーダー）により近づけた微小な体系で、光の全反射現象を利用することにより接触状況の直接観察を行い、接触限界に至る広い温度範囲にわたる動的過程を、熱慣性の大きく異なるサファイアプリズムと石英プリズムを用いて調べた。接触挙動は、両材料とも、熱伝導理論に基づく接触面温度の範囲によって大きく変化し、(I)液膜蒸発域、(II)核沸騰域、(III)自発核生成域、(IV)超臨界域に分類できること、接触面積は過熱限界温度に近い約300℃で極小値をとり、領域(III)で再び増加して臨界温度に近い約400℃で極大となった後、領域(IV)で再び減少に転じて漸減し接触限界に至ること、臨界温度を超える高い接触面温度であっても、数マイクロ秒の間、液体は固体面に接触すること、自発核生成気泡は過熱限界温度に近づく乾燥領域の形成により接触を妨げるが、さらに高温では自発核生成のダイナミックな作用により接触がむしろ促進されること、自発核生成による急速蒸発を開始するための過熱エネルギーの蓄積過程とそのためのわずかな待ち時間が存在することを実験により明らかにした。

* 掲載：日本機械学会論文集，87-904，(2021-12)，21-00278.

*1 正員，横浜国立大学大学院理工学府（〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）（現）本田技研工業㈱（〒351-0101 和光市白子2-25-3）

*2 横浜国立大学大学院理工学府（現）旭化成㈱（〒416-8501 富士市鯉島2-1）

*3 フェロー，横浜国立大学大学院 工学研究院

(6) Performance prediction model of contra-rotating axial flow pump with separate rotational speed of front and rear rotors and its application for energy saving operation



張 徳*1 片山 雄介*2 渡邊 聡*3 津田 伸一*3



古川 明徳*4

ターボ機械をはじめとする流体機械は、エネルギー生産はもちろんのこと電力等のエネルギー消費の大部を占める機械であることから、その性能向上、効率向上はたとえ僅かであってもカーボンニュートラルに大きく貢献する。互いに反転する前段動翼と後段動翼で構成され、案内羽根が不要な二重反転軸流ポンプは、従来形の軸流ポンプと比べて小形化が可能でかつ高吸込み性能であるという利点を有し、設計回転数運転では部分流量域での性能低下が懸念されるものの、前段・後段動翼の回転数を個別に制御することで性能向上が可能である。したがって、ポンプのように需要に応じて設計流量以外の幅広い流量で運転される機械においては、エネルギー消費の大幅な低減が期待される。しかしながら、その実現には運転流量ごとに最適な前後段回転数の組み合わせを見出す必要があり、高コストな実験や数値流体解析に頼らない高速な性能予測手法の構築が欠かせない。本論文では、通常のポンプ設計時に実施される動翼列の一翼間を対象とした低コストな定常RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 解析を設計回転数運転時のみに対して実施し、その結果に基づいて、各動翼出入口における半径方向平衡条件、ロータールビおよび質量保存則、偏差角の経験則、翼間相互作用、損失モデルを考慮して、高速かつ効果的な前後段動翼の運転回転数に依らない性能予測モデルを構築した。また、過去の実験および数値解析結果との比較から、提案モデルが広い流量範囲において回転数制御時の性能を十分な精度で予測できることを示すとともに、その応用として典型的な二種類の管路システムに二重反転軸流ポンプを適用した場合の試算を行い、回転数制御によって広い流量範囲においてシステム効率の大幅な向上が実現できることを示した。本研究の成果は、二重反転軸流ポンプという特定の機械を対象に得られたものであるが、他のターボ機械にも転用可能であり、高効率な運転制御のみならず、不安定流動を抑止する制御、さらには管路システムおよび運転制御を予め考慮した流体機械設計への応用も期待される。

* 掲載：Journal of Fluid Science and Technology, 15-3, (2020-7), JFST0015.

*1 正員，九州大学大学院工学府機械工学専攻（現）㈱西島製作所

*2 正員，九州大学大学院工学研究院（現）早稲田大学

*3 正員，九州大学大学院工学研究院

*4 名誉員，九州大学名誉教授

論文

(7) トンネル走行時の鉄道車両動揺に関わる
変動空気力の発生メカニズム
(単純形状の鉄道車両モデルにおける
大規模流れ構造のLES)



中出 孝次*1 佐久間 豊*1 梶島 岳夫*2

トンネル内を走行する鉄道車両にはトンネル以外では生じない変動空気力が作用する。この変動空気力は、左右方向の車両動揺の原因となり、列車速度の2乗に比例して増大するため、特に高速車両ではその低減法の開発が望まれる。従来研究において、現車試験、数値解析、風洞実験により変動空気力の特性が調べられてきたが、変動空気力に関わる車両周りの流れの構造についての理解は十分ではなく、例えば現車試験で測定された変動空気力の卓越周波数および波長などを説明するには至っていない。そこで、本研究では、変動空気力を引き起こす流れの構造の解明を目的とし、鉄道車両周りの流れの解析を行った。

単純形状車両モデルを対象としたLES解析 (Large-eddy simulation) により、トンネル走行時の鉄道車両に対しては、車両の床下からトンネル近接側の側面にわたる折れ曲がった狭隘部で大規模な蛇行流れが形成されることがわかった。この蛇行流れが車両後方に移流する過程で生じる圧力変動が進行方向横向きの変動空気力の原因となる。蛇行流れの発生メカニズムは、狭隘部における進行方向流速の低下とその周囲の高速流との境界における2つのせん断流れの相互干渉による平行渦列の形成にあると考えられた。蛇行流れによる速度変動の時空間スケールは、二次元の非粘性流れの理論で知られている渦列の安定配置による変動流れのアナロジーから推定できることも確かめられた。渦列の幅に相当する蛇行流れの幅 (進行方向に垂直方向) は車両幅と車両高さの和となり、これを円柱の直径としたときのカルマン渦列の波長および周波数を考えることで、車両に作用する変動空気力の波長および周波数が推定できた。

本論文で明らかにしたトンネル走行時の車両周りの蛇行流れは、トンネル以外では車両床下に形成される。この流れのLES解析の妥当性は、本論文の続報 (機論Vol. 87, No. 894, 2021, p. 20-00398) において、移動地板を用いた風洞実験により確認されている。本論文で初めて言及した「鉄道車両周りの蛇行流れ」は基本流れとなり得るものであり、鉄道分野の空気力学に関する多くの課題に関係する可能性がある。本論文の知見が鉄道車両の空力問題の現象解明および空力性能向上に貢献できることを期待している。

* 掲載: 日本機械学会論文集, 87-893, (2021-1), 20-00366.

*1 正員, (公財) 鉄道総合技術研究所

*2 フェロー, 大阪大学 (現) 四国職業能力開発大学校

論文

(8) 観察に基づく学習における
類似物体との自動的な動作共有による
未知の操作方法の想起



眞田 慎*1 松尾 直志*2 島田 伸敬*1 白井 良明*3

本稿では、日常空間における人の作業を自律的に代行するロボットを実現するため、ロボット自身が人の日常生活での動作を観察しながら物体操作を学習し、新規物体に対してありうる複数の動作を想起する手法を提案する。旧来の教師付き学習で一つの入力に対して複数の答えを学習する場合、全ての正解を同一入力に紐づけた訓練サンプルを用意する。しかし観察による学習では、物体に対して一度に一つの動作のみが観測でき、他の動作が同一物体に対して常に観測されるとは限らない。そのため、素朴な手法では些細な物体形状の差異に過度に着目して過学習し、直接観測された動作しか想起できなくなってしまう傾向が強い。物体に対してありえそうな複数の動作を想起するには、物体間で共通する形状特徴を認識し、観察された動作を類似物体間で自動的に共有したい。提案手法はまず、撮影された物体画像を入力とする変分オートエンコーダ (VAE) の学習によって自己符号化し、物体形状特徴とその確率分布を獲得する。次に、観測された動作の特徴空間と、物体・動作特徴間の共起性を条件付きVAE (CVAE) の学習によって獲得する。CVAEでは物体形状と動作の組み合わせを条件にして特徴化した確率分布を得るため、物体形状のみに条件づけられた動作の条件付き確率分布を陽に得ることが困難であり、物体形状から想起動作を直接サンプリングできない。そこで提案手法では、CVAEで得られた条件付き動作分布を訓練サンプルにある動作データに関して周辺化することで、物体形状のみから共有された動作の確率分布 (共有動作分布) を得る着想を得た。この周辺化計算は一般に解析的および数値的に求めることが難しいので、サンプリングに基づく最尤法を利用し、真の周辺分布を「模倣する」深層帰帰モデルを訓練する。この「模倣による周辺化」の過程において、類似形状の物体間で観測された動作の共有が行われ、得られた確率分布から繰り返しサンプリングすることにより、物体形状に対する複数のありうる動作を想起できる。

* 掲載: 日本機械学会論文集, 89-920, (2023-4), 22-00274.

*1 正員, 立命館大学

*2 正員, 立命館大学 (現) 一関工業高等専門学校

*3 フェロー, 立命館大学

論文

(9) タイヤ物理特性モデルのトレッド部のモデル化に関する研究
(TM Tire Modelの理論的妥当性の検証)



豊島 貴行*1 松澤 俊明*2 穂高 武*3 樋口 英生*1

自動車の操舵応答特性を考察するには「重量諸元」「寸法諸元」および「コーナリングステイフネス」の三者が欠かせない。特にコーナリングステイフネスは、サスペンション機構やステアリング機構を開発するシャシ設計者の視点から重要である。しかしタイヤ仕様の、コーナリングステイフネスへの影響が明確でないと、シャシとタイヤの性能設計(仕様検討)を同時に進めることは難しい。

タイヤの仕様変更がコーナリングステイフネスの変化に与える影響を考察するには、実験同定タイヤモデル(例えばMF Model)よりも物理特性タイヤモデルが有効である。なぜなら物理特性タイヤモデルはタイヤ各部位の剛性とコーナリングステイフネスの因果関係が明確であり、タイヤの仕様変更の影響を見積もること可能だからである。しかし既存の物理特性タイヤモデルは、さまざまなタイヤに対して普遍的に適用できるかという点で不十分であった。

そこで既存の物理特性タイヤモデルを基に多様な剛性要素について考察し、さまざまなタイヤに対してコーナリングステイフネスの同定分析を進めた。その結果、接地長に比例して剛性が増減する要素を付け加えることで、シンプルなモデルの構造でもさまざまなタイヤに対してコーナリングステイフネスを高精度で同定できることを見出した。こうして見出した新たな物理特性タイヤモデルをTread Mechanics Tire Model(TM Tire Model)となづけた。

TM Tire Modelは実際の車両開発に適用され有効であることは確認済だが、その概念が理論的にも妥当であることを証明する必要があった。そこで553に及ぶタイヤサンプルを使い、TM Tire Modelの概念が普遍的に適用できることを統計的に検証した。また他方で詳細なFEM Modelの計算結果とTM Tire Modelの計算結果を比較分析し、接地長に比例して剛性が増減するタイヤ要素の存在を明らかにし、TM Tire Modelはシャシとタイヤの性能設計を同時に進める上で有効な物理特性タイヤモデルであることを示した。

* 掲載：日本機械学会論文集、87-898、(2021-6)、21-00003。

*1 正員、(株)本田技術研究所 先進技術研究所

*2 正員、本田技研工業(株) 四輪事業本部

*3 正員、本田技研工業(株) 電動事業開発本部

論文

(10) Coupling analysis of unsteady aerodynamics and vehicle behavior with road input: Modeling and verification in road tests



前田 和宏*1 椿野 大輔*2 原 進*2 佐宗 章弘*2

走行中の自動車には空気が働き、燃費への影響と共に走行安定性に対して大きな影響を与えており、車両のボデー形状や付加物の最適化により走行安定性を向上させる取り組みがなされている。しかしながら、その効果を発生させる空気力の解析は定常空気力(定常走行状態での平均値)によるものがほとんどであり、ドライバーの感じ方(官能評価)に対しては十分な説明ができておらず、空気力を動的な現象(非定常空気力)として考える必要があると考えられる。

本論文では、その動的な現象への取り組みとして、走行時の路面入力による車両運動で発生する非定常空気力に着目し、車両挙動との連成解析を行った。具体的には、車両ボデー運動で発生する非定常空気力を上下・ピッチ運動それぞれに対し空気ばね・空気ダンピング・空気イナーシャ、および1次遅れで発生すると捉え、上下・ピッチ運動との連成解析を行なった。その結果、小さな形状による空気力の違い(ルーフ流れの乱れによる差)であっても、路面入力に対する車両挙動が変化することを定量的に示すことができ、さらに実際の走行実験結果とも整合することが確認できた。これにより、ドライバーが感じる車両挙動変化を定量的に説明することが可能となった。この定量化によって、車両運動に対する非定常空気力の影響は小さくなく車両のサスペンション特性に対して十分に大きな力になることが、空気力の特性値として示すことができている。また、路面入力によってその影響度が変わることを、空気力を周波数応答特性(ばね・ダンピング・イナーシャ・1次遅れ)として捉えることで表現しており、その必要性も示している。今回の検討形状では、空気慣性力が車両特性に対し大きな影響を与える結果となっており、車両サスペンション設計においても考慮が必要になること、空気流れの制御方法として流れパターン変化が関係することが示唆されており、車両運動性能向上につながる新たな取り組み観点を示すことができたと考えられる。

今後この観点での取り組みを継続し、さらなる自動車の走行安定性向上へ貢献していきたい。また、本論文で示した流体の応答特性(非定常、周波数応答、連成)という考え方は、自動車の空気抵抗、空力騒音、さらには他の輸送機器や流体機器に対しても応用ができると考えられ、この観点での性能向上への取り組みが広がっていくことが期待される。

* 掲載：Mechanical Engineering Journal 8-4、(2021-8)、21-00095。

*1 正員、トヨタ自動車(株)

*2 正員、名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

論文

(11) Unstable inner cylinder whirl of concentric double rotating cylinder system



吉住 文太*¹ 入谷 昌徳*²

環境負荷低減に向けた機械の効率化は、普遍の重要技術課題である。回転機器においては、効率向上策の一つとして、回転体の外側に同心の回転管を配置する二(多)重回転管構造が、フライホイール蓄電器への採用などいくつか提案されている。回転体では一般に、すべり軸受やシール等のすき間の流体に起因する自励振動(不安定振れ回り)が発生し得ることがよく知られている。これらの軸受やシールでは、回転体を取り巻く外側の円環構造は回転していないが、上述の二重回転管構造では、内側の回転体とともにその外側の管も回転する。このような両方の管が回転する場合の不安定振れ回りとして、これまで浮動プッシュ軸受の検討例がみられるものの、大きなすき間比(すき間/軸半径 $\sim 10\%$)を有し弾性支持された両回転二重管の不安定振れ回りについては、実験も含めて未検討であった。

本研究では、内側の管(内管)の軸を半径方向に弾性支持して外側の管(外管)の軸を固定した支持条件の下で、両回転二重管における内管の不安定振れ回りの発生状況を理論と実験の両面から明らかにした。すき間流体として気体を想定し、理論では、流体の慣性力、圧縮性および乱流をすべて考慮したすき間流れのバルクフローモデルにより非定常圧力の方程式を導出した。そして、管運動との連成系の複素固有値により振れ回りの安定解析を行った。さらに、回転数と不安定性の関係を容易に考察できるように非圧縮下の一自由度式を導出した。実験では、内管を平行モードで弾性支持した装置を製作し、逆回転を含む二重管の回転数の広範な組み合わせに対する振れ回り挙動を計測した。理論と実験は、回転数の組み合わせに対する振れ回り周波数と減衰比の変化および不安定振れ回りの発生境界について良く整合する結果を得た。とくに、逆回転の場合も含めて、両管の回転方向も考慮した回転数の和が増加するほど不安定となり、発生境界が回転数の和で特徴づけられることを明らかにした。加えて、実験で観察された振動数の低下傾向から、静的不安定の可能性を論じ、その発生条件式を流体の圧縮性を考慮した形で示した。

* 掲載: Mechanical Engineering Journal, 10-1, (2023-2), 22-00103.

*¹ 正員, ㈱豊田中央研究所

*² ㈱豊田中央研究所

論文

(12) A time-saving FEM-based approach for structural topology optimization with exact boundary representation



CUI Yi*¹ 高橋 徹*¹ 松本 敏郎*²

産業社会にとって、近年に一番重要なものづくり技術進歩の一つは「3Dプリンティング」であり、それを活かせる鍵として、トポロジー最適化手法の普及が急速に進んでいる。その中で、「3Dプリンティング」に最も親和性がある実際の境界に基づくトポロジー最適化を行えば、既存のものと同じ性能を持つ製品を製造しながら、材料の需要とCO₂排出量の削減に大いに役に立つと考えられる。さらに、実際の境界に基づくトポロジー最適化は、より正確な境界形状が得られるため、軽量化、断熱効果、生体適合性などの機能のより効果的な設計が可能となることから、自動車、航空宇宙分野、産業機器分野、医療分野(人工骨や再生医療に用いるScaffoldなど)など広く産業社会へ貢献できる。

しかし、これまでの長い間に、実際の境界に基づく有効なトポロジー最適化は十分とは言えなかった。最大の問題は従来の体積制約法の取り扱いにあった。従来の体積制約法は本質的に陽解法的であり、非材料領域のメッシュが無い場合は、最適形状の収束性に問題が発生していた。この問題に対して、本論文はレベルセット関数を目的汎関数の部分と体積制約に関する部分に分割し、それぞれ反応拡散方程式を満足するようにし、また体積制約をそれぞれの最適化のステップで厳密に満足させる画期的な体積制約法を新たに提案し、「非材料領域にメッシュが無い」実境界下でのトポロジー最適化を初めて実現した。この新たに提案した方法は、機械工業や産業社会全体への重要な貢献が期待されるとともに、今後の最適設計の学問的基盤として更なる発展が期待できる。

さらに、本論文では、最適形状の不安定性を解消するとともに計算コストを削減する新しい方法を提案した。最適化プロセスは2つのループで構成され、第1ループでは固定設計領域の粗いメッシュで最適化を行い、得られた材料領域を詳細なメッシュに分割して第2ループで実際の境界に基づくトポロジー最適化を行った。本論文と従来法の最大の違いは、数値計算を安定させる材料領域外メッシュは不要であり、実際の材料の境界に基づいて解析できる点である。しかしながら、最適形状への収束性の悪化や、形状が滑らかでないなどの難点が存在した。本論文ではその原因が体積制約の取り扱いにあることを見出し、体積制約に関するレベルセット関数を分離して定義し、厳密な体積制約法を課すことによって極めて滑らかな形状が得られることを示した。

* 掲載: Mechanical Engineering Journal, 9-6, (2022-12), 22-00281.

*¹ 正員, 名古屋大学大学院機械システム工学専攻

*² フェロー, 名古屋大学大学院機械システム工学専攻

論文

(13) Mobile parallel manipulator consisting of two nonholonomic carts and their path planning



姚 強*¹ 寺川 達郎*² 森田 悠也*³ 小森 雅晴*⁴

工場や倉庫における物品のピッキング、搬送、ハンドリング、投入といった一連の作業を自動化するため、モバイルマニピュレータの導入が進められている。従来のモバイルマニピュレータは移動ロボットの上にロボットアームを搭載した構造を有し、1台で移動と作業を共に行うことができる。しかし、移動ロボットとロボットアームのそれぞれにモータが搭載されるため、多くのモータが必要となる。

この問題を解決するために、本論文は新しいロボット機構 VEMOPAM (versatile mobile parallel manipulator) を提案した。VEMOPAMは2台の二輪独立駆動車、3組のねじ対偶、3組の回転対偶、出力部、およびそれらを接続するリンクから構成される。各駆動車を適当な軌道で駆動すると、その運動はリンク機構を介して出力部の運動へ変換され、出力部の位置と姿勢を任意の状態にすることができる。よって、出力部にロボットハンド等を搭載することで本機構はモバイルマニピュレータとして機能する。従来のモバイルマニピュレータでは空間6自由度の運動を実現するために6個以上のモータが使用されているのに対し、VEMOPAMに搭載されるモータの数は4個(各駆動車に2個)のみである。従って、本機構は従来機構よりも少ない数のモータで構成可能であり、モバイルマニピュレータの製造コストの低減や機体の軽量化に寄与する。またVEMOPAMの構造は2台の駆動車をリンク機構でつないだ単ループ形状であり、床占有面積が小さいという特徴も有する。

一方、VEMOPAMの動作においては「駆動車が一定の制約(非ホロノミック拘束)に従いながら運動する」「機構の拘束関係が破綻する特異点を回避する」「ねじ対偶が可動範囲を超えない」といった複雑な条件を考慮する必要がある。そこで本論文では、これらの条件を満足する運動経路を生成する手法として4ステップから成る独自の経路計画法を提案した。シミュレーションを行い、本手法を用いることでVEMOPAMは任意の初期状態から任意の目標状態に到達できることを示した。また外乱が作用する環境下でも計画した経路に沿った運動を可能にするため、フィードバック制御器を構築した。解析により得られた知見に基づきVEMOPAM試作機を製作して実験を行い、提案した機構および制御システムが有効に機能することを実証した。

* 掲載: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 17-2, (2023-1), JAMDSM0020.

*¹ 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (現) Huawei Technologies Co., Ltd.

*² 正員, 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

*³ 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 (現) トヨタ自動車㈱

*⁴ フェロー, 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

論文

(14) Optimization of fast tool servo diamond turning for enhancing geometrical accuracy and surface quality of freeform optics



Lin Zhang*¹ 佐藤 裕亮*² 閻 紀旺*³

光学系の複雑化と小型化が進むに伴い、非軸対称の形状を有する自由曲面光学素子を採用する事例が増えている。自由曲面光学素子の最も有望な加工法の1つとして、ファストツールサーボ (FTS) を用いた超精密旋削加工が挙げられる。加工機に搭載するFTSユニットは工具刃先を精密かつ高速に駆動することが可能であり、スピンドルの回転軸に対して、工具刃先の前後運動を同期させることで非軸対称な形状を創成することができる。また、単結晶ダイヤモンド工具を用いて加工を行うため、サブミクロンレベルの形状精度とナノスケールの表面粗さを達成することが可能である。

FTS旋削加工では既存の加工機との互換性や動作安定性の観点から、FTSユニットの工具の前後運動は加工機とは独立したコントローラーで制御される。そのコントローラーでは加工機で取得されるスピンドル回転角度と加工機座標情報を元にFTSユニットへの指令座標を決定し、PID制御で工具前後運動を実現させる。その際、指令座標はあらかじめ生成された制御点サンプリングから補間処理することで決定される。しかし現在採用されている制御点サンプリング方式は、創成する表面形状の変化に関係なく一定の間隔で制御点が配置されるため、形状変化が急峻な領域では補間処理により微細な特徴を失い、加工後の形状精度が低下してしまう可能性がある。

この問題を解決するために、本論文では新しい適応型の制御点サンプリング手法を提案した。本手法では表面形状の変化に対応し、隣接する2つの制御点間のサンプリング間隔を能動的に調整することができる。この方法を採用することで、制御点のサンプリングに起因する補間誤差を許容範囲内に抑制し、加工領域における制御点の不足や過定義をなくすことが可能となる。提案手法の有効性は、2次元正弦波自由曲面の誤差シミュレーションと加工実験の両方によって実証され、同じ制御点数を用いた従来法と比較し、形状誤差が約35%減少した。本研究の成果はFTS旋削加工における加工精度向上を可能にし、自由曲面光学素子の製造技術の発展に大きく寄与すると考えられる。

* 掲載: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 17-1 (2023-1), JAMDSM0012.

*¹ 慶應義塾大学理工学部機械工学科 (現) 長春工業大学

*² 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) ソニー㈱

*³ 正員, 慶應義塾大学理工学部機械工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

論文

(15) A concept of velocity estimation from magnetic resonance velocity images based on variational optimal boundary control



大谷 智仁*¹ 山下 博士*² 岩田 拓真*¹ Selin Yavuz Ilik*³



山田 茂樹*⁴ 渡邊 嘉之*⁵ 和田 成生*⁶

血流や脳脊髄液流れなど生体流れの非侵襲計測手法に、磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging : MRI) による流体計測があり、生理機能や病態の理解、臨床診断への応用に向けて以前から高い注目を集めてきた。ただし、MRIのハードウェア・計測原理・アルゴリズムの制約に起因する系統的・統計的ノイズや、時空間解像度の制約により、計測された流れ場は流体の保存則を満たさず、計測データの定量評価に課題を持つ。本研究では、低解像度かつノイズを含むMRI画像から、流体の保存則を満足する高解像度な流れ場を推定する逆問題を考え、MRI画像の性質を考慮した定式化および計算フレームワークを構築した。方針として、MRI計測の対象となる流路内の流れの数値流体計算を考え、境界条件を適切に制御することで、計測データと同様の速度場の取得を考えた。ここで、MRI流体計測により得られるデータについて、低解像度だが計測領域中で密な速度場と捉え、数値流体計算から得られる速度場との間で誤差関数を定義した。境界条件の最適化にあたり、流体の保存則を制約条件として、誤差関数に対する制御変数の勾配を随伴変数法により取得し、境界条件を逐次的に更新した。計算例として、ノイズを含む簡易的な流れ場のデータや、実際の脳脊髄液流れのMRI画像データを用いて速度場の推定を実施し、数値解の良好な収束を通じて、提案手法の有用性を示した。

* 掲載 : Journal of Biomechanical Science and Engineering, 17-3, (2022-8), 22-00050.

¹ 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科

² 正員, 大阪大学 (現) 広島大学大学院総合生命科学研究科

³ 大阪大学 (現) Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Faculty of Natural Sciences

⁴ 滋賀医科大学 (現) 名古屋市立大学大学院医学研究科

⁵ 正員, 滋賀医科大学放射線科

⁶ フェロー, 大阪大学大学院基礎工学研究科

論文

(16) Assessment of cardiac function using the modified ejection fraction as an indicator of myocardial circumferential strain



森下 孝臣*¹ 武石 直樹*² 伊井 仁志*³ 和田 成生*⁴

心不全の説明には、伝統的に拡張期と収縮期の左室容積の比である左心室駆出率 (Left ventricular ejection fraction : LVEF) が用いられてきた。しかし、LVEFが正常者と同等に関わらず、拡張機能の低下によって心不全を起こす、駆出率が保たれた心不全 (Heart failure with preserved ejection fraction : HFpEF) 患者 (以降、HFpEF患者) が世界的に年々増加している。現状、特に非侵襲的に拡張機能を安定に評価および病態生理の把握には、左心室心筋の円周方向ストレインが参考にされているが、心筋ストレインの測定には、特別な機器と計測者の熟練度を要する上、その測定値は各メーカーの機器によってばらつくことが知られており、その定量はまだまだ困難である。

そこで本論文では、HFpEF患者の発見に有効な力学的指標の提案を目的に、ナノスケールの膜電位動態をボトムアップ的に連続体力学に組み込んだ心筋収縮肉厚円筒モデルを構築した。このモデルを用いて、LVEFを一定にした条件下で様々な心筋壁厚や心筋スティフネスの条件に対する心筋ストレイン分布と消費心筋エネルギーへの影響を有限要素解析した。これにより、1) 心肥大 (円筒厚さの増加) に伴い半径方向及び円周方向ストレインは減少する一方、消費心筋エネルギーは増大すること、2) 消費心筋エネルギーは円周方向ストレインと相関があること、を明らかにした。

この知見に基づき、円周方向ストレインを推定する新たな工学的指標として、修正駆出率 (Modified Ejection Fraction : mEF) を提案した。mEFはLVEFと心外膜内の内部容積の収縮率の積であり、いずれも、一般の心エコーのようにベットのサイドで簡易に測定でき、画像モダリティやベンダーに依存せず、ばらつきが少ないという意味で実務上有効な指標である。我々が新たに提案したmEFは、心エコーや心臓MRIなどの異なる計測機器を用いた過去の7つの臨床実験で得られた円周方向ストレインの結果を良好に推定できることを示した。したがって、mEFは、局所心筋の収縮ポテンシャルエネルギーの低下、すなわち心不全の指標として有効であり、今後のHFpEF患者の診断で広く用いられることが期待されると結論した。

* 掲載 : Journal of Biomechanical Science and Engineering 17-2 (2022-5), 22-00014.

¹ 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科 (現) 葛城病院 循環器内科

² 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科 (現) 京都工芸繊維大学機械工学系

³ 正員, 東京都立大学システムデザイン学部機械システム工学科

⁴ フェロー, 大阪大学大学院基礎工学研究科

(1) 高性能に緩まないねじとその量産用転造金型の開発



天野 秀一*1 新仏 利伸*1 竹増 光家*2 桑原 利彦*3

1. 概要

ボルトの緩みによる重大事故を防ぐことは安全・安心な社会形成において極めて重要だが、従来商品の課題として、緩まないと宣伝しているが緩んでしまう、作業性が悪い、コストが高いなどが挙げられ、このユーザー目線で大切である3点全てを満たすねじ締結体がないという課題がある。国内の競合品のほとんどは、ねじに摩擦を与え、緩みを防止しているため、ばらつきが大きい。また、面倒な締結手順が指定されており、標準工具が使用できない。製造法に関しては、精度の高い除去加工が必要なため、コスト高になってしまう課題がある。

本開発では、最高の緩み止め性能と、外ナット締結だけで、電動工具も使用できる作業性の良さ、既存の量産設備に本開発金型を装着するだけで製造できることを目指し、各種転造盤用の金型を開発したことで、量産が可能となり、安価に製造することができる。

2. 技術の内容

2.1 緩まないねじの構造

本緩まないねじ構成体(図1)は、進み量の多い並目多条ねじ山と、進み量の少ない並目一条ねじ山をボルトに付与し、ボルト内側に多条ナットを装着し、外側に並目一条ナットを装着した構造となる。締結体が激しい振動を受けると、内側のナットが緩もうとするが、進み量の少ない外側のナットが受け止めると言う、機械的干渉により緩みを防止する。締結時は、外ナットを締めることで、内ナットが従動し、締め付け完了となる。ダブルナット特有の、内ナットの逆戻し処理も不要となった。緩める時は、外ナットを緩めることで、内ナットも簡単に取り外すことが可能となった。

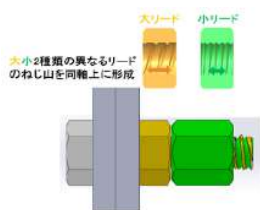


図1 ねじ構造

2.2 転造性の改善

この使用性を実現する為、多条ねじを組み合わせる構造を採用したが、そこで転造性の悪さが最大の課題となった。二種類のリードが混在する為、初期ねじ形状では、金型が300本で破損した。そこで転造性を改善する為、多条ねじ形状を(図2)の通り工夫し、三条ねじからねじ山を一条分間引き、更に多条ねじの谷を有効径以上に底上げすることで、大幅に転造性が改善し、SCM435材の強度区分8.8素材を、平転造金型を装着し転造加工した際、40,000本転造することができた。転造で量産加工できることで、安価に製造できるようになった。

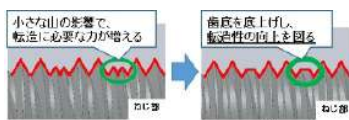


図2 多条ねじ山改善

2.3 緩み振動試験結果

このグラフ(図3)は、世界で最も厳しいと言われている、ISO16130規格のボルト・ナットのユニカー振動試験の結果となる。横軸に振動回数を示し、縦軸は残存軸力を示す。この試験では、試験後の残存軸力が、85%以上を緩み止め性能良好とし、85%未満40%以上を緩み止め性能許容可能と位置づけ、40%未満を緩み性能なしとしている。緩まないねじは、試験後の残存軸力93%と唯一最高の緩み止め性を示していることから、本緩まないねじは、高性能な緩み止め製品と言える。

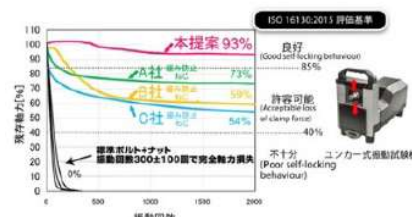


図3 緩み止め性能比較

2.4 機械的性質

引張り試験では、強度区分10.9に対応したボルト・ナットを各2set使用し、試験機として、島津製作所製オートグラフAG-25TBを使用して試験した結果を(図4)に示す。標準ボルトに対し緩まないねじは、全試験片とも、材料の塑性の開始する降伏点より上回っている箇所が破断していることが分かり、標準ボルトの引張り強度87.7kN以上の引張強度を実証した。

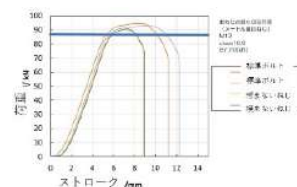


図4 引張り試験結果

2.5 実証試験結果

本緩まないねじの適用分野として、鉚山での激しい振動を受ける設備が挙げられる。石灰鉚山で使用されている予備燃焼炉ロータリーキルンに本緩まないねじを使用した実証例である。従来はナットを溶接している為、ねじは緩まないが、溶接時の隙間から燃焼ガスが入り込みボルトがやせ細そってしまい、ガタが生じてしまう。本緩まないねじは、締結時間を大幅に短縮できただけでなく、溶接仕様より長い時間緩みなく格子を固定出来た。その為、有効な締結手段と高く評価されている。

3. まとめ

緩み止めねじの市場は世界で3000億円以上と言われている。国内でも200億円以上と概算されている。本緩み止め製品の市場は各種インフラの締結、鉚山、道路や鉄道、建設現場で使用される重機のアタッチメント締結、農機のアタッチメント締結に使用が想定されており、高い緩み止め性能と使用性の良さで高評価を得ている。

*1 正員、(株)ニッセー (〒409-0502 大月市富濱町鳥沢2022)

*2 正員、PFR研究所 (〒297-0065 茂原市緑ヶ丘2丁目8-3)

*3 正員、東京農工大学 (〒184-8588 小金井市中町2-14-16)

(2) 液体アンモニア専焼技術を実現したガスタービンの開発



内田 正宏*1 伊藤 慎太郎*1 小松 湧介*2 水谷 琢*2

1. 概要

再生可能エネルギーからの電力供給が拡大しているが、再生可能エネルギーは不安定な電源であり、電力需給のバランスを調整する調整電源として、負荷変動への追従性に優れているガスタービンが重要となる。従来の天然ガスを燃焼させるガスタービンでは二酸化炭素が排出されるためカーボンフリー／カーボンニュートラル燃料への転換が強く期待されている。アンモニアは、二酸化炭素を排出しないカーボンフリー燃料であることに加え、安価かつ製造・輸送・貯蔵技術が確立されているため、早期の社会実装が期待される燃料である。一方で、その燃料利用では、天然ガスや水素に比べて燃焼性が低いこと、窒素酸化物（NO_x）の排出量が多いこと、未燃アンモニアおよび亜酸化窒素が排出されること等の課題がある。このような課題を克服し、アンモニアをガスタービンの燃料として使用するため、ガスタービンにおける液体アンモニア専焼技術を開発した。

2. 技術の内容

アンモニアの燃焼方法として、設備の簡素化や供給システムの負荷変動追従性を考慮して、液体アンモニア供給による直接噴霧燃焼方式を採用した。この液体アンモニア直接噴霧燃焼による専焼の実現には大きく三つの課題があった。一つ目は、アンモニアの燃焼性が低い点であり、安定燃焼を実現する燃焼器が要求される。特に、液体アンモニア噴霧燃焼では、燃焼器内でアンモニア液滴が蒸発するため、局所の火炎温度が低温となり、安定性の確保はより難しい。二つ目は、エミッションであり、アンモニアに含まれる窒素に由来するFuel-NO_xが発生する課題がある。同時に、ガスタービンでは燃焼時間が短いため、未燃アンモニアおよび亜酸化窒素の排出抑制が必要となる。三つ目は、液体アンモニアの噴霧の制御である。液体アンモニアの微粒化及び噴霧挙動については、既往研究が少なく学術的にも知見が乏しい。このような課題に対し、液体アンモニアの噴霧形成の観察を実施し、液体アンモニア噴霧に適した噴射弁選定を行った。保炎性の確保、未燃アンモニアおよび亜酸化窒素の抑制では、スワラ構造や液体アンモニア噴射点の調整により燃焼性能の向上を図った。同時に、低NO_x燃焼の実現のため、二段燃焼方式を採用した。この燃焼方式では、バーナ付近を低流速領域として保炎性を改善し、同時に、リッチ条件を利用することでアンモニア燃焼領域における余剰酸素を削減、還元雰囲気を形成してFuel-NO_xの生成を抑制することが可能である。

2 MW級ガスタービン（図1）を使用して、開発燃焼器の改良と発電試験による性能検証を繰り返し実施した。その結果、出力2 MWの条件で液体アンモニア専焼による安定運転が可能であること、NO_xが脱硝装置の使用により排出規制値に適合可能であることが確認された。加えて、このとき未燃アンモニアおよび亜酸化窒素の排出量は計測器の測定下限界以下であり、温室効果ガス（GHG）削減率99%以上と

なることを確認した（図2）。ガスタービンにおけるアンモニア利用では、GHG排出係数の大きい亜酸化窒素の排出により十分なGHG削減効果が得られないことが懸念されていたが、今回開発した技術により亜酸化窒素の排出抑制が可能であることが示され、ガスタービンでのアンモニア利用の実現に向け、大きく前進した。



図1 2MW級ガスタービン

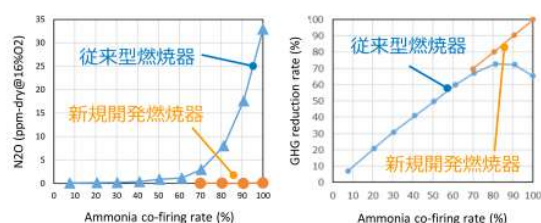


図2 エンジン運転におけるエミッション
（左：亜酸化窒素、右：GHG削減率）

3. まとめ

液体アンモニアのみを燃料として、2 MW級ガスタービンの発電運転を可能とする専焼技術を開発した。アンモニアの燃焼ではGHG排出係数の大きい亜酸化窒素が排出されることが課題となるが、本技術により温室効果ガス削減率99%以上の達成に成功した。

地球温暖化による深刻な環境問題によりGHG排出量の削減が急務である。今後も技術開発を進め、アンモニア燃焼ガスタービンの早期の社会実装に向けて開発を進めていく所存である。

*1 正員、(株)IHI
*2 (株)IHI

(3) 引火性ガス環境のプラントを自動で巡回点検する防爆ロボット



大西 献*1 大西 典子*2 村角 謙一*2 宿谷 光司*2 小堀 周平*2

1. 概要

石油ガス化学プラントなど引火性ガス環境でも活動できる日米欧で法規認証された防爆性能（自らが引火源とならない性能）を有し、福島第一原子力発電所事故後の探査ロボットにも用いられたクローラシステムで、プラント内の通路だけでなく階段や段差も自動昇降することで、複数階プラントを自動で巡回点検する移動ロボットである。引火性ガス環境で自動充電し、昼夜無人で連続運転しつつ、センサ（可視カメラ、熱カメラ、ガス検知器、マイク）で取得した点検情報をLTEを使ってクラウドへ連携し、AI情報処理によりプラントの異常を検知してユーザへ通知する機能を提供する、いわば「動くIoTセンサ」システムである。

2. 技術の内容

本技術を商品名“EX ROVR（エクローバーと発音）”として2022年4月に上市した。石油ガス化学業界に迫る人手不足・設備老朽化による操業率と安全性の低下対策として期待の声をいただいている。特に、海上プラットフォーム型石油掘削施設の省人化をめざす海外オイルメジャーからの購入や試運用の引き合いが多い。製品の概要は下図、詳細な仕様や動作状況の動画などは製品HP（次のURLまたは“EX ROVR”で検索）を参照いただきたい。

製品HP：https://www.mhi.com/jp/products/energy/ex_rovr.html

本技術の開発は、2012年の中央自動車道笹子トンネル事故にさかのぼる。天井板が崩落し、引火性ガスが充満するトンネル内の状況確認に、引火源となる電気機器である探査装置を投入することができず、人が危険と隣り合わせでガス検知器を頼りに入るしかなかった。この教訓をきっかけに、引火性ガス環境でも行動できる防爆移動ロボットの開発がはじまった。当時、ハンディ機器を除き、バッテリー駆動の無線電気機器で防爆認証を取得したものはなく、法律の解釈から始めて、無線移動ロボットの防爆認証を取得するのに4年を要した。その後、今の製品コンセプトにたどり着くまでに2年、プラント巡回点検固有の技術開発と試験・認証に4年と、製品化までほぼ10年を要した。その間、国内外の石油事業者さんとのいい出会いに恵まれ、多くの方々から共同研究・委託研究・助成などの形で支援をいただいた。本稿をお借りして謝意を表したい。

2024年1月現在、世界で正式に防爆認証を受けた無線ロボットは、弊社の知りうる範囲では4種しかなく、そのうち国内で使用可能なものは本技術のみである。プラントDXの一助となるべく研さんを積み、ライバル社とも切磋琢磨して市場を開拓していきたい。

*1 正員、三菱重工業㈱（〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号 戸造船所 原子力セグメント）
*2 三菱重工業㈱（同上）

クラウド上のユーザーページに登録した点検シナリオ（巡回経路+点検内容をユーザが教示したもの）がスケジューラから起動されると、自動でプラントを巡回点検し、取得した点検データを同じユーザーページにLTEを介して格納する。計器指示値や、さび・白煙・液漏れ・異常音などの異常発生をクラウド上のAI画像処理で検出し、ユーザにメールなどで通報する“**ロボットIoTシステム**”である。

「EX ROVR」のハードウェア（450mmW×600mmL 70kg）

マニピュレータ（山形大学と共同開発）
6自由度+ハンド+可視カメラ

画像（可視画像、熱画像、360度画像）

- さび、白煙、液漏れの検知
- 可視画像で計器指示値を読み取り

音（マイクで録音した音声）

- 回転機械の異常音、漏れ音の検知

数値データ（ガス濃度、気温、計器読み取り値）

- 異常値や異常変動の検知

IoTクラウドシステム構成

工場・プラント（Zone 1 危険場所）

インターネット

管理アプリケーション

- 巡回スケジュール管理
- 点検データの閲覧

ダッシュボード

- 点検データの閲覧

遠隔操作端末

非危険場所

通常は接続しない（シナリオを教示する時、インシデント対応として緊急遠隔操作する時にのみ接続し介入する）

駆動系（千葉工業大学ライセンス）
2本のメインクローラと4本のサブクローラで不整地を走行

高い機動性

狭幅かつ複数フロアにまたがる複雑なプラント内を稼働

- 46°（基準最大）の階段昇降
- 狭い階段踊り場での旋回
- 防油壁の障害物乗り越え

自動運転

複雑なプラント内を夜間でも安全に自動巡回

- LiDARによる3次元自己位置推定
- 障害物検知
- 階段昇降アルゴリズム

自動充電ステーション

- ASCENTの遠隔操作
- 巡回エリアの地図作成
- 巡回動作（シナリオ）の作成

(4) 高精度振動センサと精密リサージュ図形描画法の開発



佐藤 健太*¹ 轟原 正義*² 大戸 正之*² 瀧谷 俊夫*³ 北村 暁晴*⁴

1. 概要

機械可動部を持つ装置の異常は、温度や電流よりも振動をモニタすることにより比較的早い段階で検出されることが知られており、振動計測による装置診断技術は、非破壊で稼働状態を監視できるためその適用範囲は広い。振動データの信号処理は、時間領域、周波数領域、空間領域の3つに大別され、時間領域と周波数領域の信号処理は比較的簡便で多く用いられる。一方で、空間領域の信号処理であるリサージュ図形（またはオービット図形）解析は装置異常や故障検出に特に有効だが、計測データ間の同期方法、背景雑音による精度の低下、多軸振動センサ設置時の煩雑な調整作業という課題を抱えている。

これらの課題に対応するため、3次元空間での振動データを簡単かつ精密に処理するための新しい装置診断技術を開発した。この技術は、ハードウェア（振動センサ）とソフトウェア（解析手法）の両面で構築されている。開発されたセンサは設置が容易であり、前処理アルゴリズムによる精密リサージュ図形描画との組み合わせにより対象機器の振動状態を正確に把握することが可能となる。

2. 開発概要と適用例

ハードウェアの開発では、低ノイズで高解像度、そして優れた同期精度を備えることで、リサージュ図形描画に適した3軸デジタル振動センサを開発した（図1）。このセンサには加速度に応じて周波数が変化する「水晶双音叉振動子（図2）」が用いられ、後段のデジタル処理との組み合わせにより高感度で同期可能な計測を実現する。また、水晶の物理的特性を活用することで、耐ノイズ性と振動の感度や位相の再現性を向上させた。



図1 振動センサ外観

図2 水晶双音叉振動子

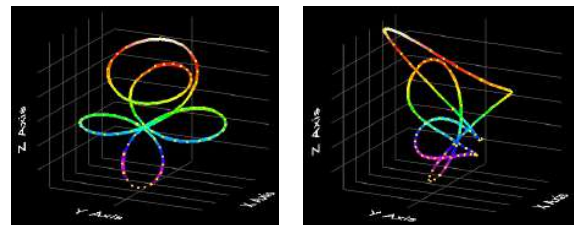
ソフトウェア面では、背景ノイズを低減し、対象とする機械振動に同期した信号を抽出するための前処理アルゴリズムを開発した。装置振動の周期に着目してデータを分割し同位相で平均化することで、背景ノイズを減少させつつ必要な信号を効果的に抽出することが可能となった。3軸間の位相情報を保持しつつ、従来手法に比べ格段に精密な振動データ解析を行うことができる。

開発成果の具体的な適用例として、同じ年に稼働を開始した同一機種である電動機Aと電動機Bに対し、マグネットベア



図3 電動機に取り付けられた振動センサ

スを介してセンサを取り付け、振動測定を行った（図3）。電動機Bの連続稼働時間が10年であるのに対し、電動機Aはオーバーホールを経験しており連続稼働は2年である。時間、周波数領域での振動データ解析では明確な差異は見られなかったが、振動リサージュ図形では差異が示された（図4）。電動機Aでは対称的な楕円形であるのに対し電動機Bでは楕円が変形していることから、連続稼働時間の差が振動状態に影響を与えていることが示唆された。このような図形の特徴を数値化し、定量的に分析することも可能である。



(a) 電動機 A 連続稼働 2年 (b) 電動機 B 連続稼働 10年

図4 連続稼働年数によるリサージュ図形の差

3. まとめと今後の展望

低雑音で高精度な3軸デジタル振動センサを開発し、背景雑音を低減し対象振動に同期した信号を抽出する前処理アルゴリズムと組み合わせることで、空間領域の信号処理を簡便に行える装置診断技術を実現した。開発されたセンサは設置が容易で、機械の稼働状態の変化を時間経過とともに効果的に追跡でき、工場やインフラのメンテナンス効率の向上が期待される。

本振動センサを搭載したシステムは、河川やダムなどの水門状態監視システムとして実用化されている。様々な機械振動を可視化しデータを蓄積することで、経年劣化や装置異常の状態と対応する相関を明らかにし、最適な指標化や機械学習の導入などにより精密リサージュ図形描画を実用的な装置診断手法として発展させたい。

*1 正員、セイコーエプソン(株) (〒530-6122 大阪市北区中之島3-3-23)

*2 セイコーエプソン(株) (〒399-0293 諏訪郡富士見町富士見281)

*3 正員、日立造船(株) (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

*4 日立造船(株) (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

(5) Mg合金を用いた競技用ハイパフォーマンス車いすの開発



塩野谷 明*1 宮下 幸雄*2 鎌土 重晴*3 中田 大貴*4 飯星 龍一*5

1. 概要

本技術は、競技用車いす（テニス用車いす、バドミントン用車いす）に、先端超軽量金属材料であるMg（マグネシウム）合金（AZ61（Mgに6%のAl、1%の亜鉛を添加）およびAZ91）を採用、従来のAl（アルミニウム）合金製車いすに比較し、30%以上の軽量化を実現した。当該分野では社会実装が難しいと言われてきたMg合金の車いす適用を、①詳細な材料・部材、構造物の構造解析、②AI技術等様々な計測技術を駆使した成果物の走行性、操作性評価、③大型重機を用いた破壊試験による強度・剛性評価から、垂直荷重で1トン以上の強度（フレームに亀裂が発生した強度）を獲得するとともに、高い走行性、操作性、ヒト親和性を有した競技用車いすを完成させた（図1）。



図1 Mg合金製テニス用車いす（東京大会モデル）

2. 技術の内容

本技術で採用したMg合金は実用金属の中で最も軽い金属材料で、その密度は一般的なAl合金が 2.70g/cm^3 、Ti（チタン）合金が 4.51g/cm^3 なのに対して、Mg合金は 1.74g/cm^3 と圧倒的に小さいが、剛性の点ではやや劣ることから、部材の厚さ等の選定が、後の車いすの強度・剛性さらには操作性に大きく影響する。そこで本技術では、材料、部材、車いすフレームの各段階で十分な構造解析を行うとともに、破壊試験、実走行試験でのAI計測技術の開発・導入等で解決に至った。

図2は、車いす下向き鉛直方向に3Gの垂直荷重をかけたときの構造解析結果を示している。構造解析はMg合金、Al合金（Al-Sc（スカンジウム）合金含む）、CFRPで実施した。この結果、フレーム上の応力集中部位の特定、車いすに使用するMg合金の選定（車いすはAZ61、AZ91に、一部CFRPのハイブリッド構造採用）、Mg合金のフレーム材の厚さ等が決定されるとともに、Mg合金による軽量化の優位性を保証した。次に、大型材料試験機による鉛直方向荷重時破壊試験を実施し（図3）、最初にクラップ音と共にフレーム上の亀裂・破断が発生した荷重を剛性・耐久性の指標とした。開発

した車いすは、1トン以上の荷重耐久性が保証された。破断部は電子顕微鏡解析を施し、車いすの耐久性獲得には材料の選定・調整とともに溶接技術の重要性を確認し、車いす設計・製作者に情報共有した。

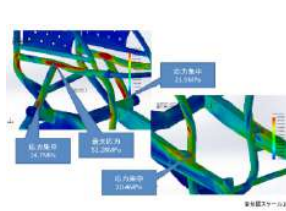


図2 構造解析（鉛直3G）



図3 大型材料試験機による破壊試験

表1 フレーム材料をAl合金ならびにMg合金に置換した場合の構造解析結果の比較

解析条件	最大変位 (mm)			最大応力 (MPa)			固有振動数 (Hz)		
	Mg合金	Al合金	Sc合金	Mg合金	Al合金	Sc合金	Mg合金	Al合金	Sc合金
鉛直下向き3G荷重	0.458	0.295	0.181	52.28	51.89	51.3	-----	-----	-----
前後衝突3G荷重	0.527	0.339	0.207	80.05	79.87	80.0	-----	-----	-----
ねじれ荷重1G	16.88	10.82	6.594	181.9	181.9	178.3	-----	-----	-----
1次固有振動数	-----	-----	-----	-----	-----	-----	89.0	90.5	87.3
2次固有振動数	-----	-----	-----	-----	-----	-----	104.5	106.3	102.5
3次固有振動数	-----	-----	-----	-----	-----	-----	125.5	127.6	123.0
4次固有振動数	-----	-----	-----	-----	-----	-----	132.0	134.3	129.5

表1に車いすフレーム材料をAl合金およびMg合金に置換した場合の構造解析の比較を示す。両者とも変形モード、振動モードは同様となっている。Al合金の方がヤング率が大きいため、変形量は小さくなっている。しかし、最大応力の有意な差は認められなかった。材料強度がほぼ同等であるため、前述のとおりMg合金の軽量化の効果が大きいことが確認されている（なお、表中のSc合金とはAl-Sc合金であり、従来のAl合金と区別して記載した）。

3. まとめ

本技術の成果物は2021年東京パラリンピック大会車いすバドミントン女子シングル・ダブルスで金メダル3つ、銅メダル1つ、車いすテニス女子ダブルス、クアードダブルスで銅メダル獲得に貢献している。

*1 フェロー、長岡技術科学大学工学研究院情報・経営システム工学系（〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1）

*2 フェロー、長岡技術科学大学工学研究院機械系（〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1）

*3 正員、長岡技術科学大学（〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1）

*4 長岡技術科学大学産学融合トップランナー養成センター（〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1）

*5 (株)オーエックスエンジニアリング（〒265-0043 千葉市若葉区中田町2186-1）



廣野 陽子*1

1. 概要

Additive Manufacturing (以下、AM) 技術の1種である Directed Energy Deposition (以下、DED) は、航空宇宙産業やエネルギー産業など様々な分野での利用が広がっている。なかでもDEDによる耐摩耗コーティングやクラディングが急速に広まりつつあり、合金工具鋼といった高硬度な金属材料を使用する要望が多い。これは、DEDを用いることで、安価な母材の表面へ必要箇所に絞り機能性を付加できるためである。またDEDは、最終部品に近い形状まで生成的に造形できることから、これまで製造されてきた部品の「かたち」を変えることなく適用できる場合が多い。こうした特徴から、DEDの採用により、製造コストが抑えられ、廃棄物を少なくでき、エネルギー消費量すなわちCO₂排出量を削減できるといった考えが一般的になっている。このように、環境負荷低減という社会的な大目標に繋がる製造手法として、DEDが注目されている。以上の背景を受け、DED技術を5軸複合加工機に搭載した、付加工と除去加工とのハイブリッド金属積層造形機(図1)を開発した。



図1 ハイブリッド金属積層造形機の外観

2. 技術の内容

図2に示すように、本技術では工具主軸にAMヘッドを把持することで、旋削/ミーリング加工に加え、DEDによる積層造形が可能となる。DEDではレーザー照射によりワーク上にメルトプール(溶融池)を形成させ、そこに金属粉末を供給し溶融・凝固させることで造形を行う。DEDは部品を作り上げるだけでなく、既製品に対して必要な機能を付加す

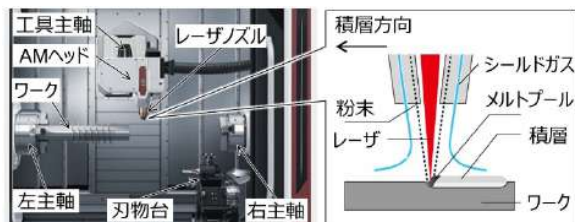


図2 機内(左図)およびDEDの原理(右図)

るコーティングにも使用でき、焼入れ処理と同等の硬さを得ることができる。本技術により、従来は複数の専用機を必要としていた切削加工、焼入れ処理および仕上げ加工の工程を1台で工程集約することができ、焼入れ処理により多量に発生するCO₂の排出量と、工程ごとの段取り替え時間を大幅に減らすことができる。工程集約の例を図3に示す。歯車部品の製造において、従来の旋削、ホッピング、仕上げ、熱処理、研削加工および段取り替えの工程を1台で完結できる。試算するとエネルギー消費量が5割削減される効果がある。

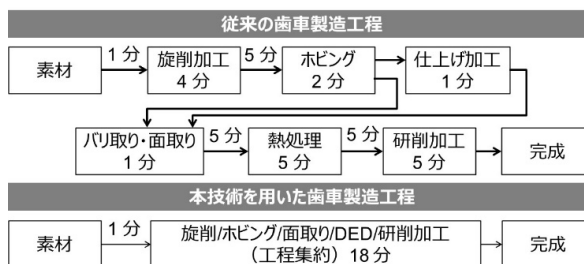


図3 本技術による工程集約の例(歯車製造)

さらに図4に示すプロセスモニタリングシステムを開発し、本技術に搭載することで、安定かつ高品質な積層造形を実現している。本システムでは、メルトプール温度やレーザーノズルとワークの距離、ワーク温度、粉末流量といった、プロセスの安定性や造形物の品質に強く影響することで知られる指標をリアルタイムで監視する。またメルトプールの大きさが指定値になるように、積層条件の自動制御を行う。

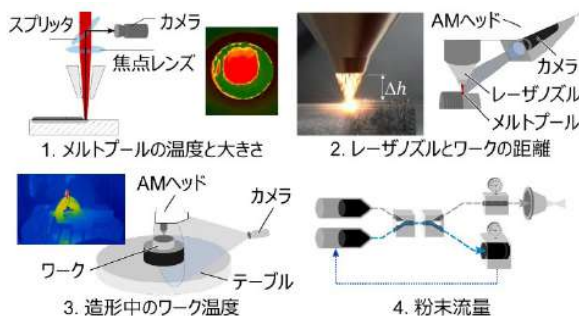


図4 プロセスモニタリングシステム

今後も、量産に必要な機能を有した金属積層造形機の開発を続けると共に、加工技術開発やお客様の協力を得ての工程設計など、AMに関したあらゆる技術開発に取り組み、社会への貢献を続けていきたい。

*1 正員、DMG森精機㈱(〒630-8122 奈良市三条本町2-1)

(7) 中小型トラック用電動パーキングブレーキのモータギヤユニット開発



増子 真二郎*1 鈴木 理夫*2 山口 裕太*2 石川 拓保*2 加藤 裕之*1

1. 概要

近年トラック運送業界ではカーボンニュートラルの実現に向けた電動化が進んでいる。また物流量の増加と人手不足により労働環境の悪化が懸念され、ドライバーの負担を減らすヒルアシスト機能や全車速追従ACCに対応した電動パーキングブレーキのニーズが高まりが見受けられる。このことから、受賞者らは中・小型トラック用2ピストンディスクブレーキをベースとした高出力且つ耐久性に優れた世界初の電動パーキングブレーキ用モータギヤユニットを開発し、昨年より新型EVトラックへの供給を開始した。

2. 技術の内容

従来の電動パーキングブレーキは1ピストンのディスクブレーキを用いており、GVW3.5トンまでの車両に実用化されていた。我々が今回開発した電動パーキングブレーキ用モータギヤユニットは2ピストンのディスクブレーキに装着され(図1)、高出力化を実現することでGVW8.5トン超のトラックまでの適用を可能にした。



図1 2ピストン電動パーキングブレーキ

特徴としては1個のモータにより2個のピストンを動かす構造を開発し、軽量且つ小型化を達成。ギヤユニット内にLSD付デファレンシャルギヤを配置しモータからの出力を分配することで、ブレーキキャリパ内の2個のピストンに推進力を伝達させる。既定の駐車ブレーキ力に到達した際には、ギヤユニットに内蔵した電磁ブレーキにより駐車ブレーキ力を機械的に保持させる(図2)。

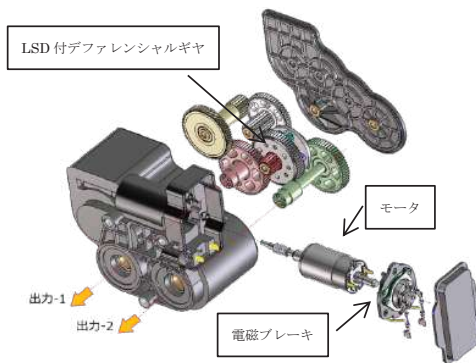


図2 モータギヤユニット構造

デファレンシャルギヤは非常にコンパクトな遊星歯車で構成され(図3)、ブレーキパッドの偏摩耗により2個のピストン間に押し付け力の差が生じると図4の赤線に示すように片側のピストンストロークが一旦停止し、トルク差が解消されるとストロークが再開し均等な押し付け力を発生させることができる。またスプリングを用いたLSD構造を採用することで両方のピストン押し付け力を確実に解除することを可能にした。

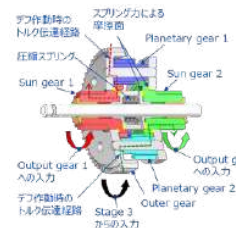


図3 デファレンシャルギヤ構造

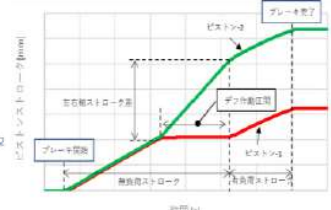


図4 ピストンストローク線図(偏摩耗時)

またトラックに用いる電動パーキングブレーキは駐車ブレーキ力を高める必要があることから、効率の高いボールねじ部品をキャリパ内に採用している。背反として駐車ブレーキ力発生時に大きなバックトルクが生じる為、この反力を押さえる多板の電磁ブレーキ(図5)をモータ同軸に配置している。

機能としては、駐車ブレーキ非作動時は内蔵スプリングによってモータ回転抑止を行い、駐車ブレーキ作動中のみコイル通電させることで電磁力によりプレートを吸引しモータ回転を可能とするネガティブブレーキ構造を採用した。

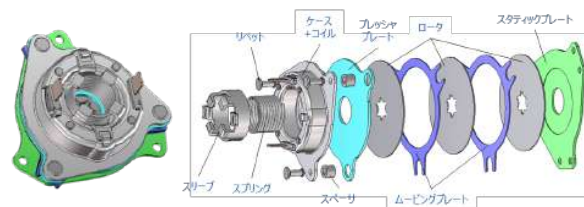


図5 電磁ブレーキ構造

3. まとめ

以上の技術により、中・小型トラック用として2ピストンディスクブレーキをベースとした電動パーキングブレーキ用モータギヤユニットの実用化に初めて成功した。この技術は国内外の様々な車種への展開を進めており、持続可能な社会の実現を目指す自動車業界全体に広く普及させることで、環境に配慮した安全・安心の社会づくりに貢献していく。

*1 正員、曙ブレーキ工業㈱ (〒348-8508 羽生市東5-4-71)

*2 曙ブレーキ工業㈱ (〒348-8508 羽生市東5-4-71)

(8) 世界初の液化水素運搬船の開発



村岸 治*1 浦口 良介*2 山城 一藤*3 奥村 健太郎*2 上田 雄一郎*3

1. 概要

脱炭素社会の実現に向け、燃焼時に二酸化炭素を排出しない次世代エネルギーとして期待される水素について、大量かつ安全な海上輸送を可能とする世界初の液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」を開発、建造し、その性能を実証した。

CO₂フリー水素サプライチェーンは、豪州に豊富に賦存する安価な褐炭から製造した水素を冷却液化し、利用国である我が国に輸送し産業利用することで安価に水素エネルギーを利活用できるものであり、本船は豪州から我が国への水素の大量輸送を担う。

2. 背景

2015年の国連気候変動枠組条約COP21（パリ協定）にて、低炭素から脱炭素へのシフトが目標とされ、我が国でも2050年カーボンニュートラル実現が目標と定められた。化石燃料、バイオマスなどの改質や工業プロセスからの副産物、再生可能エネルギーによる水の電気分解など様々なエネルギー源から製造可能な水素への期待が高まっている。

水素は液化すると大気圧で体積が気体の800分の1となり大量輸送に有利となる。一方、液化水素の沸点はマイナス253℃であり、貯蔵や取扱いには特殊な装置や対策が課題となる。

こういった課題に対し、弊社が保有するLNG運搬船および陸上用液化水素貯蔵タンクの設計製造技術を基盤とし、本船の開発・設計・製造を実施した。

3. 技術の内容

(1) 船体

本船はLNG内航船をベースに、容量1,250m³の円筒型の貨物タンクを1基搭載し、外洋を航行できるように船長を116mとした。(図1)。

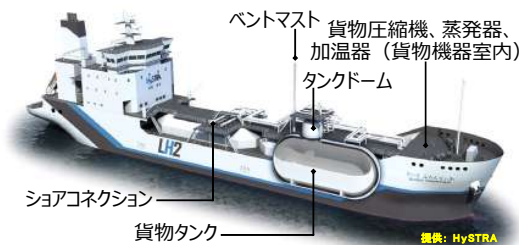


図1 すいそ ふろんていあ

(2) 貨物タンク

液化水素への外部からの侵入熱を低減するため、伝熱の基本3形態の対流、ふく射、伝導のそれぞれに対し、真空断熱二重殻、積層断熱材、GFRP製支持構造を採用し、航行中の

蓄圧が可能な断熱性能を実現した(図2)。



図2 蓄圧式液化水素輸送タンク

(3) 安全性への取り組み

液化水素を貨物として取り扱う上で、各機器と貨物操作に対しHAZID、HAZOP、FMEA、Bow-tie分析などのリスクアセスメントを、海上技術安全研究所をはじめ、造船所、船主、船級協会、メーカーと共同で実施し、本船の安全性を確認した。

日豪間の輸送に先立ち、国交省の取組みにより国際海事機関から「液化水素の海上輸送に関する暫定勧告」が発行され、日本海事協会からは液化水素運搬船に関するガイドラインが発行され、本船はこれらのガイドラインに適合させた。

(4) 建造

2019年末に約4,000名の来場者の下、弊社神戸工場で命名・進水式が行われた。貨物タンクを搭載後、艤装を終え2021年に本船は完成した。神戸空港島に建設した液化水素荷役実証ターミナル「Hy touch神戸」にて約4カ月の荷役実証試験を行った。液化水素を満載した試験航海を近海で行い、貨物タンクの蓄圧性能を確認、2021年12月に船級承認を取得した。

(5) 輸送実証

2021年12月、本船は神戸を出発し豪州に到着。液化水素を積載し翌年2月に神戸に帰港、無事に世界初の液化水素の長距離大量輸送を完遂した。

4. 商用化に向け

本船による液化水素の長距離大量輸送の実現により、今後の大型船開発、荷役基地・水素流通インフラ整備への推進力になると期待する。次世代エネルギーの需要供給システムの構築の上で海事クラスターでの産業振興にも貢献するであろう。

最後に、当実証事業は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」の一環として実施しており、ここに感謝の意を表す。

*1 正員、川崎重工業㈱ 船舶海洋ディビジョン (〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3丁目1-1)

*2 川崎重工業㈱ 技術研究所 (〒673-8666 明石市川崎町1-1)

*3 川崎重工業㈱ 船舶海洋ディビジョン (〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3丁目1-1)

研究奨励

(1) 局所微細組織制御による
アモルファス合金の加工性向上の研究



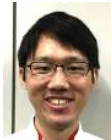
久慈 千栄子*

結晶構造を有さないアモルファス合金は様々な優れた材料物性を示し、特に高い軟磁性から省エネルギー磁性材料として着目されている。一方、高い強度と靱性を併せ持つため加工は困難であり、本材料の普及は進んでいない。本業績は、アモルファス合金のあらゆる材料物性が特殊な構造に依存して発現する点、その構造が熱により容易に変化する点に着目し、材料学と加工学を組み合わせた加工性向上に取り組んだものである。アモルファス合金の熱的微小組織変化過程を明らかにし、加工に適した強度特性を示す最適構造を発見した。さらに局所領域の瞬間加熱手法を確立し、製品性能を低下させず加工性のみを向上させる新たな加工手法を提案した。

* 正員、東北大学大学院工学研究科ファインメカニクス専攻

研究奨励

(2) 固体酸化物セルの機械的信頼性の
確立に向けた解析手法の研究



田中 順也*

固体酸化物燃料電池／電解セルは電気／水素を生成する発電／電解装置でありカーボンニュートラル社会における重要技術として期待されているが、心臓部であるセルは製造から運転までの各工程で生じる応力により破壊する懸念がある。セルの破壊は性能およびシステム安全性の低下を引き起こすため実用化における重要課題の一つであるが、これまで応力発生要因に不明な部分が多数あった。本研究では高温還元環境下でセルの発生応力や変位を高精度に測定可能なin-situ計測手法、また三次元構造構築技術に応用した微構造の評価指標など新しい解析手法を考案することで数値解析と実測の両面から各工程における応力発生要因を解明した。

* 正員、(株)デンソー

研究奨励

(3) 接着継手中の弾性波伝搬挙動の解明と
非破壊特性評価の研究



森 直樹*

種々の構造に対するマルチマテリアル化が進展する中、軽量化の促進や面接合など多くの利点を有する接着は重要な接合法の1つである。被着体／接着層間のはく離や接着層内の空孔を検出する検査法として超音波法が挙げられるが、接着のさらなる普及には接着構造に対する健全性評価の高度化が不可欠である。本研究では、接着継手を伝搬する種々の弾性波モードの挙動を解析するための理論モデルに基づき、弾性波が継手で示す共振・干渉現象が理論的および実験的に明らかにされた。得られた知見を応用した接着継手の凝集特性や界面特性に関する非破壊評価法が構築され、接着状態の異なる試験体に対してその有効性の検証が行われた。

* 正員、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

研究奨励

(4) 高温固体面の急速冷却現象の
メカニズム解明に関する研究



梅原 裕太郎*

沸騰現象は、非常に高い熱輸送性能を有することから高温物体の冷却(鋼材の焼入れや原子炉の緊急冷却等)に広く用いられている。しかし、時空間的な非定常性を有するため、そのメカニズムを十分に解明できていなかった。本研究は、流下液膜による高温面冷却を対象に、冷却を支配する三相界面の非定常挙動に注目し、そのメカニズムの解明を試みた。高温面に赤外線透過するシリコンウエハを用いることで、赤外線サーモグラフィによる時空間的な温度変動を測定し、液膜先端で生じる沸騰の気泡径が冷却速度に影響を与えることを明らかにした。これらの知見をもとに、非定常熱流動現象を予測および利用を可能とする新たな物理モデルの提案を行った。

* 正員、九州大学大学院工学研究院機械工学部門

研究奨励

(5) 高精度熱計測技術を用いた
皮膚がんの定量的早期診断の研究



岡部 孝裕*

メラノーマはその進行の速さから皮膚疾患の中で最も死亡率が高いことで知られ、早期発見と正確な病期の決定が治療成績向上に重要である。しかしながら、初期段階のメラノーマはホクロと極めて類似しており、診断精度は皮膚科医の熟練度に依存している。これに対して、本業績では、表面計測時に生じるセンサのリード線への熱損失を最小化する機構を考案し、従来技術では困難な皮膚表面温度と有効熱伝導率の非侵襲・短時間・高精度計測を可能とした。さらに、東北大学病院皮膚科との共同研究によってメラノーマ患者において臨床実験を実施し、世界で初めて初期段階の病変部と健康部の有効熱伝導率の差異の定量的検出に成功した。

* 正員、弘前大学大学院理工学研究科

研究奨励

(6) 粘弾性流体の抵抗低減流れにおける
乱流熱伝達の研究



原 峻平*

乱流状態の液体の流れに微小の粘弾性物質を加えると、壁面での摩擦と熱・物質伝達が劇的に下がります。この現象はトムズ効果と呼ばれ、粘弾性物質と乱流の相互干渉形態がわからなかったために、そのメカニズムは未解明でした。本研究は、粘弾性流体が持つ応力に対する変形速度の遅れ時間に対応して乱れ成分間で位相変調が発生していることを突き止めて、抵抗低減機構の一端を明らかにしました。そして、抵抗低減流れ特有の乱流構造を同定し、それらの乱流輸送機構を詳らかにしました。この知見を基に、熱搬送系への応用した際の省エネルギー効果が最大となる条件をエクセルギ解析も交えて特定することで粘弾性流体を使った乱流制御法を提示しました。

* 正員、同志社大学理工学部機械理工学科

研究奨励

(7) 水中気泡崩壊挙動の制御と
高温油エアロゾル解析への応用研究



木山 景仁*

液中では圧力低下に伴いキャビテーション気泡が生じる。この気泡の崩壊に伴う液体噴流や衝撃波は、流体機械の損傷を引き起こすため、その制御は重要な工学的課題である。本研究では、複数境界と相互作用する単一気泡中に生じる噴流、および、連続して入水する二球による円柱状気泡・噴流・球の相互作用、を詳細に調べ、損傷低減につながる知見を得た。さらに、水中単一気泡に関する議論を加熱油中における水滴の急発泡現象の解析へと拡張し、特徴的な気泡・油表面運動と音響特性とを併せて明らかにした。今後は、この知見を活用し、油面から放出される高温エアロゾルを音によって検知・予測する安全・衛生に資する技術への展開を目指している。

* 正員、埼玉大学大学院理工学研究科

研究奨励

(8) 乱流熱輸送の促進手法の提案
及びそのメカニズムに関する研究



本木 慎吾*

本研究では、平行平板間の剪断流および熱対流における熱輸送を最適化する速度場を変分原理に基づき理論的に求めることに成功するとともに、壁面に透過性を導入することで強制対流および自然対流のいずれにおいても極めて顕著に乱流熱輸送を促進し得ることを乱流の直接数値シミュレーションにより見出した。本業績において、乱流熱輸送を効率的に促進する流れの構造および壁面の性状を具体的に提案し、さらにその伝熱促進のメカニズムを理論的に解明した。本研究は、持続可能な社会に向けたエネルギーの有効利用の観点から近年その重要性を増す、伝熱促進を目的とした新たな乱流制御技術の研究開発に大きく貢献するものと期待される。

* 正員、大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻非線形力学領域

研究奨励

(9) リハビリテーション用ウェアラブル機器や
ロボット機器の研究



岡島 正太郎*

本研究はリハビリテーション機器の開発や制御、高密度sEMG計測機器の開発・研究を通じリハビリテーションへの貢献を目的としている。機器の制御においては、人が現在可能な動作をより良い動作へと導くように機器の動作を徐々に変化させながら運動支援を行う制御プロセスを提案し、一方で機器の設計開発では、人の把持動作において母指や手首を含めた動作支援による把持の機能的な回復を目指した機器の提案を行った。また、sEMGにおいては、ウェアラブル高密度sEMG計測機器の開発に留まらず、sEMG計測に基づいた深部の筋活動推定手法の提案を行い、今後は筋活動推定によるリハビリテーションによる回復の可視化が期待される。

* 正員、名古屋大学大学院医学系研究科(〒466-8550 名古屋市昭和区鶴舞町65)

研究奨励

(10) 柔軟伸展屈曲ロボットアームに関する研究



金田 礼人*

医療・生活介護・災害対応などにおいて、伸びたり曲がりたりしながら目標物まで到達できる伸縮ロボットアームの開発が期待されている。しかし、従来の伸縮ロボットアームは伸展と屈曲動作を両立することが難しかった。例えば、剛体を用いた伸縮機構は屈曲することが難しく、弾性材(パネなど)を用いた伸縮機構は伸長距離が制限される。この問題を解決するために、弾性材を並行移動によって伸展させる特殊な機構を開発した。提案する伸縮機構を用いたアームは、①大きな伸展・屈曲による広い動作範囲、②柔軟かつ安全で小さく収納することも可能な体幹、③アームが大きく伸展しても重力によって垂れない構造を実現した。

* 正員、九州大学大学院工学研究院機械工学部門

研究奨励

(11) 振動低減や衝突エネルギー吸収に関する
メタマテリアルの研究



富田 直*

構造の動的性能として重要な振動騒音と衝突エネルギー吸収それぞれを向上させるメタマテリアルを提案した。まず、振動騒音に関しては、周期的なくぼみ形状をもつ薄板構造によって弾性波の伝播を阻止するメタマテリアルを提案した。このくぼみ形状を緩衝材などに用いられる再生紙でモールド成型した構造と汎用的な鉄板の複合化によって、軽量構造かつ幅広い周波数域で振動低減できるメタマテリアルを実現した。次に、衝突エネルギー吸収に関しては、折紙構造の折り角によって変形モードが切り替わるメカニズムを利用して、効率的なエネルギー吸収形態を維持しながら、折り畳みによってエネルギー吸収量を制御できることを実証した。

* 正員、(株)豊田中央研究所 数理工学研究領域

研究奨励

(12) 色相解析を用いた
潤滑油劣化診断法に関する研究



今 智彦*

潤滑油は機械の血液とも称され機械の故障と密接に関係している。潤滑油の劣化を診断する一般的な手法はコストや時間がかかることから、日々の潤滑油劣化診断には簡便かつ低コスト、また精度良く劣化診断できる手法が求められている。そこで、著者は潤滑油をフィルタでろ過した際にフィルタに補足される汚染物の色と潤滑油の劣化診断に使用される化学分析の結果との関連性を調べ、色を用いた潤滑油の診断パラメータの確立を行ってきた。また、パーティクルカウンタによる粒子計数法と色相解析による劣化診断法を組み合わせた、潤滑油汚染度診断法を提案し、それらを用いた油潤滑面の摩耗監視・予測技術の可能性とその有用性を示した。

* 正員、福井大学学術研究院工学系部門工学領域機械工学講座

研究奨励

(13) 摩擦面その場分析による
境界潤滑下の摩擦低減手法の研究



橋詰 直弥*

自動車エンジンの摩擦損失低減を実現するため、潤滑油中摩擦調整剤であるMoDTCの重要性が増している。MoDTCはしゅう動面に低せん断な生成物層（トライボフィルム）を形成して摩擦を低減するが、低摩擦に最適なトライボフィルムの厚さ及び組成は現在まで未解明である。そこで本研究では「反射分光摩擦面その場観察装置」を用いることで、摩擦に伴うトライボフィルムの厚さ及び組成の推移をその場分析した。本手法を用いることで、軸受鋼及び炭素系硬質膜の表面に形成されるトライボフィルムの膜厚及び組成と摩擦係数の関係を明らかにした。また得られた摩擦メカニズムより、低摩擦発現に効果的なしゅう動部の材料及び機械的特性を提案した。

* 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

研究奨励

(14) レーザスライシング技術による
硬脆材料の精密切断の研究



山田 洋平*

半導体材料や光学ガラス等の硬脆材料を薄く精密にスライシングする新たな加工技術として、レーザスライシング技術を開発した。本加工法は、材料内部にレーザを集光し、数 μm の微小な改質部を形成することにより、残留応力を負荷する。この応力によって伸展したき裂やへき開をレーザ走査により連結・誘導していくことにより、精密切断を行うものである。高速加工が可能、工具摩耗が存在せず材料損失が微小といったメリットの他に、切りくずがでず、切削油剤不要といった環境負荷の低い加工技術でもある。これまで、材料内部での加工メカニズム解明を行い、SiC、ダイヤモンドといった半導体材料や、光学ガラスなどの精密スライシングに成功した。

* 正員、埼玉大学大学院機械科学系専攻

研究奨励

(15) 生細胞の分子交換メカニズム解明に
関する研究



齋藤 匠*

生細胞内の分子は入れ替わる(分子交換)。これは細胞(延いては組織・生体)がその恒常性を発揮するための機能であり、生き物らしさである。数ある恒常性の中に細胞の力学恒常性(力学ストレスを一定に保とうとする機能)がある。この機能発現には、力学情報を受け取り、生化学情報へと分子交換を介して情報変換する必要がある。本業績では、この力学が関わる分子交換メカニズムを多角的に解明した。特に光褪色後蛍光回復法(顕微鏡による分子交換計測手法)における数理解析や理論解析を推し進め、生化学情報(反応速度)と力学情報(拡散係数、細胞内流動およびひずみ)の同時・多点計測を可能にした。

* 正員、東北大学大学院工学研究科ファインメカニクス専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)

研究奨励

(16) マイクロ流体デバイスを用いた
真核細胞の走気性に関する研究



廣瀬 理美*

生体内では時空間的な酸素濃度変化に応じて様々な細胞の挙動が変化し、生体恒常性の維持や疾患の発症に関与する。しかし、微小環境の酸素条件制御の難しさと生物の複雑性が課題となり、酸素環境に応じた細胞挙動の理解は未だ十分でない。本研究では、細胞周囲の微小酸素環境を厳密かつ高速に制御可能なマイクロ流体デバイスを開発した。また、ヒト細胞を含む真核生物のモデル生物である細胞性粘菌の挙動の酸素環境依存性の解明に取り組み、細胞性粘菌が特定の環境下において、既知の酸素応答機構とは無関係に顕著な走気性を示すことを発見した。この機構の解明は、多くの細胞種が共有する未知の酸素応答機構の発見に寄与することが期待される。

* 正員、マサチューセッツ工科大学

研究奨励

(17) 粒子法による
流体シミュレーションの高精度化の研究



松永 拓也*

粒子法は複雑な自由表面流れなどを解析できることを特徴とし、機械工業においても多くの適用例が見られる。しかし、従来の粒子法は解析精度が低く、結果の信頼性や現象の再現性の面で課題が指摘されてきた。本研究は、この問題を解決するために実施された研究であり、粒子法の空間離散化スキームや境界の取り扱い、時間進行法などの要素技術の改良と、それらを基盤に構築された新しい高精度な粒子法の開発を行ったものである。開発手法は従来手法に不足していた収束性を有することを特徴とし、複雑な自由表面流れを精度良く安定に計算できるだけでなく、これまで困難であった複数の流体現象を再現できることが示された。

* 正員、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻

研究奨励

(18) イオン液体とMXeneによる
生分解性蓄電素子の研究



山田 駿介*

無線センサ端末とAIによる豊かな社会Society 5.0の実現には、フィジカル空間から膨大なデータを抽出するために年間10兆個ものセンサが消費されると試算されている。このため設置後のセンサの経年劣化による有害物質の漏洩により深刻な環境汚染を引き起こす恐れがある。本研究ではアルカリイオンをドーピングすることで、生分解性と電気化学特性を示すイオン液体を合成し、複合原子層物質MXeneを用いた生分解性電極を作製して回収不要な蓄電素子を実現した。本研究はSociety 5.0と持続可能な開発目標SDGsへの貢献が期待でき、将来的には生分解性という新たな指標をもつ触媒、電池、太陽電池の実現が期待できる。

* 正員、東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻

技術奨励

(1) 超小型試験片を用いた
原子炉圧力容器破壊靱性評価手法の開発



石 寄 貴 大 *

原子炉の長期運転においては、その信頼性評価が重要な課題となる。原子炉圧力容器 (RPV) では、中性子照射による脆化を運転開始時から炉内に装着しているシャルピー衝撃試験片を用いて定期的に評価する。一方、長期運転時には、試験片数を十分に確保することが求められる。本研究では、長期運転における信頼性評価を可能とするため、1個のシャルピー衝撃試験片から2個採取可能な新たなMini-C(T)試験片の形状を考案した。新形状の試験片は、シャルピー衝撃試験片のVノッチ部が含まれる。Vノッチが破壊靱性に及ぼす影響を検証し、ノッチ部の影響は軽微と考えられることを示し、RPVの破壊靱性評価が可能であることを示した。

* 正員、㈱日立製作所 (〒319-1292 日立市大みか町七丁目1番1号)

技術奨励

(2) 高温配管溶接部の
クリープ疲労寿命評価法の開発



片 測 紘 希 *

再生可能エネルギーをベースロードとした負荷変動が要求されている火力発電プラントでは、高温配管溶接部のクリープ疲労寿命予測法の確立が急務となっている。受賞者は、Ni基合金 (HR6W) の溶接部 (母材、溶金、熱影響HAZ) の硬さ分布 (材料不連続) に着目し、硬さの低い「母材とHAZの境界部」でひずみ集中が生じることを、非弾性解析で予測可能であることを示し、このひずみ集中を考慮したクリープ疲労寿命評価を行うことで、溶接部の寿命を「Factor of 2 (1/2から2倍)」程度の精度で予測可能なことを示した。単軸および曲げ負荷条件への展開も含めて、実機プラント溶接部のクリープ疲労寿命予測へのアプローチ法を明確にした。

* 正員、㈱三菱重工業 (〒851-0392 長崎市深堀町5丁目717-1)

技術奨励

(3) 複数同時把持可能な
バラ積みピッキング動作生成技術の開発



姜 平 *

物流分野での人手不足を解消するため、物流倉庫に頻出のピッキング作業をロボットにより自動化するニーズが高まっている。ピッキングロボットがバラ積み状態の対象物を大量でかつ高速的に把持するためには、適切なロボットの動作を計算するのに膨大な時間が必要であった。そこで、ロボットが対象物を把持するときの安定性と、ロボットが周囲物体と衝突するリスクを同時に考慮可能な深層学習モデルを構築した。把持候補数を絞り込むことによりロボットの把持動作計算を高速化した。また、動作計算の結果を利用し、複数対象物の同時把持を可能にする物理的な条件を満たす把持動作を生成し、単位時間の把持個数の増加を実機試験で検証した。

* 正員、㈱東芝 生産技術センター 業務プロセス変革推進領域 ロボット・自動化技術研究部 (〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町33)

技術奨励

(4) 高効率で広作動域を有する
発電用ガスタービン圧縮機の開発



関 亮 介 *

カーボンニュートラル社会の実現に向け、火力発電用ガスタービン圧縮機では、更なる効率と空力安定性の向上が課題である。これらの課題解決のため、インハウス流体解析コードの乱流モデルを改良して予測精度を向上するとともに、金属製3Dプリンタを用いた最先端の計測技術の適用により、翼面負荷分布の正確な把握を可能とした。これら技術を適用し、動翼翼端隙間が拡大した条件下で発生する翼端流れ渦の非定常流動現象の発生メカニズムを解明した。本現象を考慮した圧縮機安定性の判別クライテリアを新たに考案することで、空力安定性が高く、高効率なフローパターンコンセプトを創出し、世界最高クラスのガスタービン開発に貢献した。

* 正員、三菱重工業㈱ (〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1)

技術奨励

(5) 食肉処理ロボットシステムにおける
認識技術の開発



野 明 智 也 *

食肉処理工程の自動化では、加工対象の個体差が大きいため、対象の状況を正確に認識することが他の産業分野以上に求められる。豚枝肉を三分割する豚部分肉大分割装置では、対象の個体差や工場の照明条件に対応できず、分割位置の自動検出が実現できなかった。そこで、キーポイント検出という領域抽出を経由せずにポイントを導出する深層学習手法を実装し、ロボストで精度の高い検出手法を確立した。

本手法は、教師データが座標のみのため教示コストが小さく、導出したポイントをそのまま分割位置として使用できる。撮像系と教示点を最適化することで、高い精度で分割位置を検出することを可能にし、豚部分肉大分割装置の自動化に大きく貢献した。

* 正員、㈱前川製作所 (〒135-8482 東京都江東区牡丹3-14-15)

技術奨励

(6) 結晶組織情報に基づく
疲労寿命評価手法の開発



安 田 茂 *

金属材料の部品製造において、周囲の主結晶と異なる粗大な異結晶や集合組織など、材料内部に不均質な組織が発生することがあった。このような不均質な結晶組織が材料強度に及ぼす影響について研究事例は少なく、定量的に材料強度や疲労寿命の低下度を評価することは困難であった。

本開発技術では、不均質な結晶組織を有する材料を製作し、実験によって結晶粒における破壊メカニズムの解明やクライテリアの取得を行った。また結晶粒の挙動を再現した結晶塑性FEM解析によって、結晶組織情報に基づく疲労寿命評価手法を構築した。この技術の開発により、合理的な材料品質指針や設計指針策定への貢献が期待できる。

* 正員、㈱IHI (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地)

技術奨励

(7) 自動車システムにおける
データ駆動型制御系設計法の開発



矢作 修一*

自動車業界では開発効率および制御性能の向上がより一層求められている。これまでモデルベース制御の研究が盛んに行われてきたが、自動車システムのモデル化は容易ではなくその効果は限定的であった。これに対し、制御対象のモデル化が不要なone-shotデータ駆動制御のアプローチに着目し、自動車分野への適用を進めた。先行研究の多くは線形システムを対象としていたが、本研究では機械学習の知見を取り込むことで、非線形特性を有する自動車システムへの適用を可能にする制御手法を提案した。さらに、本制御手法をエンジン、自動変速機、車両運動といった幅広い制御対象に対して実機検証を行い、提案手法の有効性を明らかにした。

* 正員、(株)いすゞ中央研究所 (〒252-0881 藤沢市土棚8番地)

技術奨励

(8) 風車異常検知およびイナーター機構による
制振発電技術の開発



吉水 謙司*

風車は山間部や沿岸部などに設置されることが多く、洋上では荒天時には近づくこともできないため、長期停止による発電機会の損失が生じる。また、浮体式風車では、外部電源喪失時の非常電源確保と動揺を抑制する技術開発が重要である。これに対して、運転データに振動や音響等のデータを組み合わせ、機械学習手法によりドライブトレインの早期異常検知技術を開発した。さらに浮体式風車の制振発電技術として、建築の制振分野で利用されるイナーター機構を波力発電に応用し風車浮体に併設、浮体間の相対変位をボールねじで回転運動に変換、発電機を直結することで、小型で大きな出力が得られ、制振と発電が同時に実現できることを見出した。

* 正員、東芝エネルギーシステムズ(株) (〒230-0045 横浜市鶴見区2-4)

教育

(1) 運動と振動に関する
各種学習用教材の開発と書籍の出版



瀧口 三千弘*1 藤野 俊和*2 藤原 滋泰*3

受賞者は、「解く・観る・わかる」をコンセプトに、運動シミュレーションソフトウェア (DSSと呼ぶ) と多くの実験教材を開発した。さらに、これらの教材を用いた教育活動として、①DSSの無料配布、②実験教材の市販化、③教材紹介チラシの作成と大学・高専・工業系高校等への配布、④各種教材のYouTube等による紹介、⑤高専機械系学科への出前授業の実施 (13高専約600人の学生が受講)、⑥「ひらめき☆ときめきサイエンス」プログラムに参加 (3年間で約50人の中学生が受講) 等の取り組みを行った。そして、これらの成果を踏まえて、2022年に海文堂出版より書籍「機械系の運動と振動の基礎・基本」を出版した。本書は8章からなり、大きくは①運動と振動問題を学ぶ上での基礎・基本に関する部分、②DSSを用いたシミュレーションと実験教材に関する部分、③運動方程式の立て方と固有値問題の解き方に関する部分で構成されている。本書は、機械力学や振動工学をこれから学ぶ人・現在学んでいる人・既に学んだ人、さらには運動方程式の立て方や使い方 (役立て方) がわからなくて困っている人にとって、とてもわかりやすい内容となっている。

*1 正員、広島商船高等専門学校名誉教授

*2 正員、東京海洋大学学術研究院海洋電子機械工学部門

*3 広島商船高等専門学校一般教科

教育

(2) 「基礎から学ぶ流体力学」の教科書の出版



武居 昌宏*1 飯田 明由*2 小川 隆申*3

受賞者が執筆した流体力学の教科書「基礎から学ぶ流体力学」は、理解が追いつかない学生が増えてきているという教育現場で直面している困難を解決すべく、図やイラストによって数式展開や理論体系を視覚的に説明することでわかりやすさと理論の本質の理解を両立させることを狙って出版された。その意図は同じ課題を抱える教育者に支持され、学生が馴染みのある高校物理から出発して大学の力学に繋げるという説明は「教えやすい」という評価を得て、多くの大学として教科書として採用されている。当然、読者の評価もよく、専門の教科書としては異例の1万部を超えるという部数のみならず、その内容についてもAmazonで評価の8割弱が最高評価である星5つになるなど一般購読者からも支持されている。こうした理論の図解による説明というコンセプトの専門書は出版当時 (2006年) ではまだ珍しかったが、その後は同様の書籍が他分野でも見られるようになるなど書籍の在り方や教授法に影響を与えただけでなく、高大接続教育という観点でも意義があり、教育上の成果は顕著であると言える。

*1 フェロー、千葉大学大学院工学研究院

*2 フェロー、豊橋技術科学大学機械工学系

*3 正員、成蹊大学理工学部理工学科

(3) 産業用ロボットに関する
初学者向けの教科書の出版



西田 麻美*

「産業用ロボット The ビギニング」というタイトルの書籍を日刊工業新聞社より2022年9月出版した。本書は、メカトロニクス技術を軸とした「The ビギニング」シリーズの1冊である。現在の奉職先、東京国際工科専門職大学は、55年ぶりの新しい大学制度によって2020年4月に新設された。本学のロボット開発コースでは、産業用ロボット実習やメカトロニクス設計等を通して、専門家になるための知識と理論、特に実践的なスキルを身につける教育に注力している。授業においては、産業界で導入されている大小の多関節ロボットや協働ロボットを用いて講義を行っている。通常、産業用ロボットを操作する場合、労働安全衛生規則に従って、学生に教示および検査等の特別教育を受講させなければならない。また関係法令・安全についても学習することが定められている。そこで、初学者（学生）が産業用ロボットに関するノウハウを効率よく獲得し、独学でも学習できることを目的に、ロボットの定義、歴史、要素技術、周辺機器、学科・実技、関連法令等、最低限必要となる基礎知識を厳選し、わかりやすく一冊にまとめた。本書は、授業内で欠かすことのできない教科書として活用されている。

* 正員、東京国際工科専門職大学工科学部情報工学科