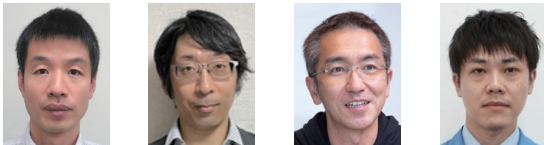


(1) Finite element modeling for single-twisted Fi(29) strand that reproduces strand stiffness and wire stress



緒方 公俊\*<sup>1</sup> 山口 篤志\*<sup>1</sup> 山際 謙太\*<sup>1</sup> 倉橋 直也\*<sup>2</sup>



泉 聡志\*<sup>3</sup>

複数の素線（細い鋼線）の捻り合わせからなるワイヤロープは、高い引張強度と柔軟性を合わせ持ち、クレーンやエレベータなどの産業機械で広く使用されている。ワイヤロープがシープ（滑車）の上を繰り返し通過するとき、つり荷による引張荷重に加えてシープによる曲げ荷重も作用することで、素線が徐々に断線（疲労破壊）していく。そのため、ワイヤロープ全体の疲労寿命を評価するためには、各素線の応力状態や接触状態を把握する必要がある。しかしながら、ワイヤロープは素線が複雑に捻り合わさった構造を持つため、実験的にこれらを詳細に測定することには限界があった。

そこで本研究では、ワイヤロープを構成するフィラー（Fi）型のストランドを対象として、動的陽解法による接触摩擦を考慮した有限要素解析手法を開発した。ストランド内の29本の素線すべてをソリッド要素でモデル化し、素線間のすべての接触をペナルティ法で表現した。モデルの妥当性を確認するために、引張試験・3点曲げ試験・シープ上での曲げ試験を実施し、実験結果と解析結果を比較した。その結果、引張及び曲げ剛性に加えて、素線に生じるひずみも20%以内の誤差で再現できることを確認した。これにより、素線の応力を定量的に求められる有限要素モデルを構築できた。

さらに本モデルを用いてシープ上での曲げ疲労試験における素線の疲労を評価した。各素線に生じる応力を算出したところ、中心素線、内層素線、外層素線の順に応力が高いことが明らかになった。得られた応力をもとに疲労寿命を推定した結果、疲労破壊による断線は中心→内層→外層の素線の順で発生するという実験結果を再現でき、実測寿命とも良く一致した。

以上より、本研究で構築した有限要素モデルは、シープによる繰り返し曲げで生じる素線の疲労寿命を定量的に推定できることが示された。また、本手法はストランドをさらに捻り合わせたワイヤロープにも応用できると考えられ、今後、より複雑なワイヤロープ構造の疲労寿命評価への展開が期待される。

\* 掲載：Mechanical Engineering Journal, 11-6, (2024-12), 24-00299

\*<sup>1</sup> 正員, (独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所

\*<sup>2</sup> 正員, (株)神戸工業試験場

\*<sup>3</sup> フェロー, 東京大学大学院 工学系研究科

(2) 鉄道車輪鋼を対象とした破壊力学的手法による 転動疲労条件下のモードIIき裂進展速度評価法



黒坂 隆太\*<sup>1</sup> 加藤 孝憲\*<sup>2</sup> 牧野 泰三\*<sup>3</sup>

鉄道車輪はレールとの転がり接触の繰返しによって、転動面に転動疲労損傷が発生することがある。転動疲労き裂は、材料内部を進展する際に、せん断型（モードII）または開口型（モードI）とモードIIの混合モードで進展することが知られており、過去には鉄道車輪鋼の転動疲労寿命の大部分は、き裂進展による寿命が占めることが報告されている。鉄道車輪の安全性の観点から、転動疲労寿命を予測することは有用と考えられるが、そのためには材料のモードIIき裂進展特性、特にき裂進展速度とその駆動力である応力拡大係数範囲の関係を正確に把握することが重要といえる。従来、高強度鋼を対象としたモードIIき裂進展に関する研究は多くなされているが、少なくとも鉄道車輪鋼を対象とした転動疲労条件下におけるモードIIき裂進展評価曲線の取得方法は提案されていない。

そこで本論文では、鉄道車輪鋼を対象に、転動疲労条件下のモードIIき裂進展速度とモードII応力拡大係数範囲の評価法を構築し、両者の関係を定量化することを目的とした。まず、人工欠陥を有する車輪鋼を対象とした転動疲労試験でき裂進展速度を測定した。加えて、同試験を対象としたFEM解析で計算したモードIIの応力拡大係数範囲を用いて、き裂進展評価曲線を取得し、転動疲労条件下のモードIIき裂進展速度評価法を確立した。転動疲労試験で観察されたき裂進展挙動は、試験で得られたき裂形状をパラメータ化したモデルを用いたFEM解析結果から説明することができ、本手法の妥当性を確認した。従来、実使用条件下のき裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係を定量的に評価している事例はなかったが、本論文では鉄道車輪が使用される代表的な二水準のヘルツ応力で試験を行い、確立した手法によりき裂進展速度と応力拡大係数の関係をそれぞれ評価することで、いずれの結果も一つのき裂進展評価曲線で整理できることを見出した。

この評価手法自体は鉄道車輪のみならず、転動を受けて損傷する様々な部品（レール、ローラー、歯車、軸受け等）にも適用可能であるとともに、破壊力学に基づいて転動疲労寿命を評価、予測するためのツールとして、これら技術の高度化に大いに役立つといえる。

\* 掲載：日本機械学会論文集, 90-932, (2024-4), 24-00010

\*<sup>1</sup> 正員, 日本製鉄(株) 技術開発本部 (〒293-8511 富津市新富20-1)

\*<sup>2</sup> 正員, 日本製鉄(株) 交通産機品技術部 (〒554-0024 大阪市此花区島屋5-1-109)

\*<sup>3</sup> フェロー, 日本製鉄(株) 技術開発本部 (故人) (〒660-0891 尼崎市扶桑町1-8)

(3) Elastic-viscoplastic behavior of filament winding CFRP: experimental investigation and multiscale analysis



松田 哲也\*<sup>1</sup> 田村 晃斗\*<sup>2</sup> 高橋 知也\*<sup>3</sup> 森田 直樹\*<sup>4</sup>



上田 政人\*<sup>5</sup> 岩瀬 航\*<sup>6</sup> 横関 智弘\*<sup>7</sup>

燃料電池自動車 (Fuel cell vehicle: FCV) は、水素と酸素の化学反応によって得られる電力でモーターを駆動して走る電気自動車の一種であり、水素社会実現のためのコア技術の一つとして注目されている。FCVの燃料である水素は、常温常圧下での体積エネルギー密度が非常に低いため、長距離航続を実現するためには高圧水素タンクの搭載が不可欠となる。高圧水素タンクは、安全性の観点から優れた耐圧性が求められるとともに、エネルギー効率向上の観点から軽量であることが求められるため、その主要構造材料として軽量・高強度な炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber-reinforced plastic: CFRP) が採用されている。CFRP製水素タンクは、一般に、水素ガスを封入するための容器 (ライナー) にトップレグ (炭素繊維と樹脂からなるブリブレグテープ) を様々な配向角で巻き付けるフィラメントワインディング (Filament winding: FW) 法により製造される。したがって、CFRP製水素タンクの機械的挙動を把握するためには、FW法で成形されたCFRP (以下、FW-CFRP) の力学特性に対する十分な理解が必須となる。

そこで本論文では、まず、5種類の積層構成 ( $[0]_4, [90]_8, [0/90]_{2s}, [45/-45]_{2s}, [63/-63]_{2s}$ ) を有するFW-CFRPを作製した上で引張試験を行い、弾性剛性、材料非線形性、強度等の力学特性を精査するとともに、それらが積層構成に依存して大きく変化することを明らかにした。つづいて、FW-CFRPのメゾおよびミクروسケールにおけるユニットセルモデルを作成するとともに、著者らの構築した3スケール弾-粘塑性均質化法に基づくマルチスケール解析を実施することで、実験的に観測されたFW-CFRPの力学特性およびその積層構成依存性を定量的に再現することに成功した。さらに、繊維束のクリンプ (湾曲部) を考慮した場合のユニットセルモデルも作成し、上記と同様に解析することで、クリンプの存在が特に  $[0/90]$  のFW-CFRPの粘塑性変形を促進させることを見出した。以上のように本論文は、FW-CFRPの力学特性ならびに積層構成依存性を実験・解析の両面から詳細に調査・検証したものであり、CFRP製水素タンク的设计開発に資する有用な成果を得ていると言える。

\* 掲載: Mechanical Engineering Journal, 11-6, (2024-12), 24-00262.

\*<sup>1</sup> フェロー, 筑波大学システム情報系

\*<sup>2</sup> 筑波大学 (現) 本田技研工業(株)

\*<sup>3</sup> 筑波大学 (現) 川崎車両(株)

\*<sup>4</sup> 正員, 筑波大学システム情報系

\*<sup>5</sup> 正員, 日本大学理工学部

\*<sup>6</sup> マザーサンヤチヨ・オートモーティブシステムズ(株)

\*<sup>7</sup> 東京大学大学院工学系研究科

(4) Multidimensional measurement of air-water two-phase flow in particulate bed using refractive-index-matching method and wire-mesh sensor



植田 翔多\*<sup>1</sup> 新井 崇洋\*<sup>1</sup> 古谷 正裕\*<sup>1</sup> 大川 理一郎\*<sup>2</sup>

軽水炉の過酷事故時に生じる炉心溶融物が凝固したものを燃料デブリ (以後、デブリ) と呼ぶ。炉心溶融物は燃料を含み、デブリになっても放射性物質の崩壊によって発生する熱エネルギーを出し続けるため、継続的に冷却する必要がある。デブリ堆積層の冷却特性は、現行の軽水炉に限らず、安全機能をより高めた次世代の原子炉である革新軽水炉の設計においても重要である。なかでも、炉心溶融物の一部は、水中で燃料冷却材相互作用を伴って破碎し、粒子状のデブリを形成する。粒子状デブリ堆積層は、周囲の水が堆積層空隙へ流入し、主として沸騰を伴う二相流の対流熱伝達により冷却される。粒子状デブリ堆積層内部と堆積層内部や周囲に存在する未溶融落下構造物等の壁近傍における気液二相流は冷却特性に影響するが、既往の実験データが表面観察や点計測に限定されており、モデル開発のボトルネックとなっていた。そのため、充填層内二相流を計測する革新的な実験が必要だった。

本論文では、沸騰流を空気-水二相流で模擬し、粒子状デブリ堆積層を粒子充填層で模擬することで充填層内の複雑な多次元二相流動を検討した。充填層内を流れる気泡のダイナミクスを理解するため、水とほぼ同じ屈折率とガラス以上の高い透過率を有する非晶性フッ素樹脂を用いた屈折率マッチング法 (RIM) を新たに開発し、水に添加物を加えることなく光の屈折を回避し、充填層内を流れる気泡の明瞭な光学的可視化を世界で初めて実現した。さらに、気液の導電率差から気相の体積割合であるボイド率を高速多点計測するワイヤメッシュセンサ (WMS) を、基準電位が不安定となる絶縁体で構成された充填層内の二相流計測に適用可能とし、充填層内ボイド率分布の時間変化を定量的に捉えることに成功した。壁面の存在に起因する局所充填率の低下により、壁近傍でボイド率が充填層内部より高くなる現象が卓越する流動条件を、異なる粒子径条件に対するWMS計測により定量的に示した。さらに、RIM法による気泡挙動の直接可視化を通じて、そのメカニズムが気泡の横流れであることを突き止めた。

本研究の知見は、軽水炉過酷事故解析コードの妥当性確認や機構論的モデルの高度化に活用できる。さらに、粒子充填層内二相流が重要となる環境・化学工学分野の流動制御など、異分野への展開も期待される。

\* 掲載: Mechanical Engineering Journal, 11-2, (2024-4), 23-00496

\*<sup>1</sup> 正員, (一財)電力中央研究所

\*<sup>2</sup> (一財)電力中央研究所

(5) Application of machine learning to optimized design of layer structured particles



江目 宏樹\*1 佐藤 弘武\*2 平井 達朗\*2

太陽エネルギーを熱として利用する技術は、化石燃料に依存しない持続可能な社会を実現するうえで重要である。特に日本では、家庭で消費されるエネルギーの多くが暖房や給湯に用いられており、太陽熱を直接利用する技術への期待が高まっている。その中でも本研究は、太陽光を直接吸収して熱に変える「直接吸収型太陽熱集熱器」に用いられる微小粒子（ナノ粒子）の設計に着目したものである。この集熱器では、粒子が太陽光をどれだけ効率よく吸収できるかが性能を左右するため、粒子設計は極めて重要である。本研究で扱う粒子は、金属・絶縁体・磁性体を層状に組み合わせた構造を持ち、比較的簡単かつ低コストで作製できるという特徴を有する。しかし、使用する材料の種類、粒子の大きさ、薄膜の厚さなど、設計に関わる要素が多く、その組み合わせは膨大となるため、従来の数値計算のみで最適条件を探索することは現実的ではなかった。

そこで本研究では、この複雑な設計問題を効率的に解決する手段として機械学習を導入した。まず、電磁場解析を用いて多数の粒子設計条件に対する光吸収特性を計算し、その結果を学習用データとして用いた。これにより、「どのような粒子構造が、どの程度太陽光を吸収するか」という関係を機械学習に学習させることを試みた。具体的には、ニューラルネットワーク、サポートベクターマシン、決定木を基にした三種類の学習手法を用い、それぞれの予測精度を比較した。その結果、粒子の材料や寸法を入力するだけで、太陽光吸収性能を高い精度で予測できることが確認され、特にニューラルネットワークが有効であることが示された。さらに、学習済みモデルを用いて、太陽光を最も効率よく吸収すると予測される粒子設計を探索した。その結果として得られた最適設計は、詳細な電磁場解析による結果ともよく一致しており、機械学習による設計予測が実用的であることが示された。

本研究は、計算に時間と労力を要する複雑な材料設計問題に対し、機械学習を活用することで設計探索を大幅に効率化できる可能性を示したものである。太陽熱利用に限らず、多数の設計パラメータを有する工学材料の開発においても、同様の手法が有効であることを示唆する結果である。

\* 掲載：Journal of Thermal Science and Technology, 19-2, (2024-10), 24-00236

\*1 正員、山形大学大学院機械システム工学専攻

\*2 山形大学大学院機械システム工学専攻

(6) Phase diagram for the spreading behavior of water drops impacting hot walls observed via high-speed IR imaging



岡部 孝裕\*1 白井 啓大朗\*2 大川 拓巳\*3 岡島 淳之介\*4



城田 農\*1

本論文は、加熱固体表面に衝突する単一水滴の動的濡れ広がり挙動を、高速度赤外線カメラおよび高速度可視カメラを用いて時空間的に観測し、加熱面温度とウェーバー数（慣性力と表面張力の比）からなるパラメータ空間において流体力学的不安定性のフェーズダイアグラムを構築した研究である。

単一水滴の加熱面衝突現象は、鋼材急冷のための噴霧冷却技術など、多くの熱流体工学の応用の基礎的現象として広く研究されてきた。とりわけ、衝突後の沸騰挙動と加熱面温度の関係については活発な議論が行われている。一方で、沸騰を伴わない単相冷却領域における蒸発の寄与や、流体力学的不安定性との相互作用については、体系的整理が十分とは言えなかった。

本研究では、加熱面温度を60-150℃、ウェーバー数を30-443の広範な条件下で液滴衝突実験を実施し、衝突後数ミリ秒における固液界面温度分布と濡れ広がり形状を同時計測した。その結果、広がり挙動は、①液滴が衝突後も円形を維持するGentle spreading領域、②広がる液滴の外縁にフィンガー状擾乱が生じるRim instability領域、③固液液三相接触線に沿ってフィンガー状擾乱が生じるContact-line instability領域の三領域に分類できることを明らかにした。特に、低ウェーバー数かつ高加熱面温度（水の飽和温度以上）条件において出現するContact-line instabilityを世界で初めて観測し、接触線近傍の激しい蒸発に起因する新たな不安定性現象として位置づけた点に本研究の獨創性がある。さらに、最大広がり径、無次元周長およびフィンガー数の温度依存性を定量評価することにより、接触線近傍の蒸発が不安定性の早期発達および成長挙動に本質的役割を果たすことを示した。また、高ウェーバー数条件で観測されたRim instability領域においても、液膜外縁に生じる擾乱の発達に蒸発が影響を及ぼす可能性を実験的に示した。

以上より、本研究は、加熱面温度とウェーバー数に基づく広がり挙動の体系化を達成するとともに、蒸発を介した界面熱流動と流体力学的不安定性の結合機構に新たな知見を与えるものであり、加熱面上液滴衝突の基礎理解を一段深化させる成果である。

\* 掲載：Journal of Fluid Science and Technology, 17-3, (2022-10), JFST0009

\*1 正員、弘前大学大学院理工学研究科

\*2 弘前大学大学院理工学研究科（現）ファナック株式会社

\*3 正員、弘前大学大学院理工学研究科（現）㈱荏原製作所

\*4 正員、東北大学流体科学研究所

## (7) Bingham fluid simulations using a physically consistent particle method



根岸 秀世\*1



近藤 雅裕\*2



雨川 洋章\*3



小原 新吾\*3



黒瀬 良一\*4

ビンガム流体は降伏応力を有し、せん断応力が降伏応力以下だと固体のように流動せず、降伏応力を超えると粘性流動を示すという固体と流体の性質を合わせ持つ非ニュートン流体である。ビンガム流体は、潤滑グリース、コンクリート、塗料、泥流、雪崩など産業や環境の広範な場面で現れるため、その特性を把握し制御することは工学上重要である。ビンガム流体の挙動把握には数値解析が有効と期待されているが、固体的挙動と流体的挙動が同一体系で現れるため、格子法での取り扱いが難しく、また固体と流体で統一的な計算原理が適用できる粒子法でも角運動量非保存や高粘性に起因する数値不安定が問題となっていた。

本論文では、粒子法の一つであるMoving Particle Hydrodynamics (MPH) 法に、ビンガム流体のひずみ速度依存粘性モデルを導入することでビンガム流体の解析手法を新たに構築した。具体的には、低ひずみ速度において固体を高粘性流体としてモデル化し、粘性項に陰的時間積分を導入することで、拡散数制約に起因する時間刻みの過度な微小化を回避し、実用的な計算効率を実現した。MPH法は、物理的健全性、即ち質量保存、並進・角運動量保存および熱力学的第二法則等を本質的に満足する粒子法であり、特に従来の粒子法では苦手であった角運動量保存の性質は、固体の性質を有するビンガム流体の計算に有効である。また、物理法則を本質的に満たすため、従来の粒子法で必要であった経験的もしくは複雑な計算処理を伴う計算安定化処理も不要となるのが特長である。

提案手法は、ビンガム塑性流体の2次元ポアズイユ流れ問題とビンガム擬塑性流体(潤滑グリース)の3次元ダム崩壊問題に適用し、理論解および実験結果との比較を通じてその妥当性を検証した。2次元ポアズイユ流れ問題では、提案手法による計算で理論解の速度分布を良好に再現できることを明らかにした。また、3次元ダム崩壊問題では、グリースが自重により崩壊し、その後徐々に減速して数秒後にはブーツ形状となり停止するという実験で観察された挙動を良好に再現した。また、定量的にも崩壊するグリースの先端位置履歴を良好に再現し、グリースの停止挙動を再現できることを明らかにした。

\* 掲載: Journal of Fluid Science and Technology, 18-4, (2023-11) JFST0035

\*1 正員, 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, 京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻

\*2 正員, 産業技術総合研究所 機能材料コンピュータシミュレーションデザイン研究センター

\*3 正員, 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門

\*4 正員, 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

## (8) 超音波治療のための音響ホログラフィによる水中での力場制御に関する実験的検討



青木 優介\*1



階戸 智也\*2



白石 俊彦\*3

本研究は、骨折治療などに用いられる超音波治療技術の高度化・再生医療への発展を目指し、音響ホログラフィという音波制御技術を用い、生体への適用を考慮して水中にて、超音波による音響強度を空間的に操作する力場制御の装置と手法の実現性を実験的に検証したものである。

従来の低出力超音波パルス (Low-intensity pulsed ultrasound, LIPUS) 治療は、患部だけでなく周囲の正常組織にも超音波が照射され、刺激領域を選択的に制御することが困難であった。本研究では、複数の超音波振動子を配列した超音波振動子アレイを用い、超音波の重ね合わせによって空間内に所望の力場を形成する音響ホログラフィに着目した。

まず、水中で使用可能な力場制御装置を設計・試作し、骨折治療に必要とされる十分な音響強度を持つ集束力場を形成できることを実験的に確認した。これにより、本装置が治療应用到に必要な基本性能を有することを示した。

次に、音響ホログラフィを物理レンズ1個で実現する際の設計で用いられるIterative angular spectrum approach (IASA) を超音波振動子アレイに拡張して位相分布の初期値を計算し、さらに最適化手法の一つであるAdaptive moment (Adam) を用いて各超音波振動子の位相分布と強度分布を得るといふ著者が開発した制御手法を適用した。深部骨の骨折線を想定し、1MHzの超音波を発する振動子面から深さ35mmの水中に、10mm×3mmの長方形の所望の音響強度分布を形成し、対象領域外の音響強度は十分に小さいことを実験的に示した。

従来、超音波振動子アレイの制御による音響ホログラフィでは、空中以外での応用例が少なく、また生体に適用できるような多点での制御は困難であった。超音波治療を目指して、超音波振動子アレイを用いた音響ホログラフィにより、生体への適用を考慮して水中で、きめ細かく制御できるように多点の接近した制御点で、所望の形状の音響強度分布を実証した研究については、著者が調査した限りでは、本研究が世界で初めての報告である。本研究は、治療应用を目指した水中環境で音響ホログラフィによる選択的力場制御を実証した先駆的研究であり、将来的には骨折治療のみならず、再生医療や神経疾患治療などへの応用展開が期待される基盤技術を提示するものである。

\* 掲載: 日本機械学会論文集, 89-924, (2023-8), 23-00052

\*1 横浜国立大学 大学院環境情報学府 (現) ㈱日立ハイテク

\*2 横浜国立大学 大学院環境情報学府 (現) ㈱デンソー

\*3 フェロー, 横浜国立大学 大学院環境情報研究院

論文

(9) 通勤車両内の横流ファン送風が乗客の温熱快適性に及ぼす影響の定量的評価



遠藤 広晴\*1



榎並 祥太\*1



菊地 史倫\*1



吉江 幸子\*2



伊積 康彦\*3



野口 純\*4

現在、都市部の鉄道における多くの通勤車両には、天井部に横流ファンが設置されており、車両内の空気循環に加えて乗客へ清涼感を与える重要な役割を担っている。特に、梅雨期から夏季の蒸し暑い季節では、横流ファンは冷房の補助として乗客の暑熱感の低減に貢献していると考えられる。一方で、車内気温によっては横流ファンからの風は寒冷感を引き起こす場合もあり、より快適な車内温熱環境を実現するためには、横流ファン送風が乗客の快適性に及ぼす影響を定量的かつ的確に評価し、送風制御に活かすことが重要である。しかしながら、通勤車両内の温熱環境、特に横流ファン送風環境下での温熱快適性に関する研究報告例は極めて少なく、当該環境下での乗客の快適性を定量的に評価する手法は未だ確立されていない。

本論文では、梅雨期～夏季の通勤車両内を対象に、横流ファン送風環境に適用可能な温熱快適性評価手法を提案した。本手法は、温湿度や風速が変動する非定常温熱環境下での生理状態（皮膚温、発汗など）を予測する数値人体熱モデルと、過去に通勤車両内で実施した被験者実験に基づく統計モデル（多項ロジスティック回帰モデル）から構成される。横流ファンからの風のような変動風に対し、従来の多くは平均風速で快適性が評価されてきたのに対し、本研究では数値人体熱モデルを用いて、体熱放散量が等価な一定風速へ変換する手法を導入することで、人の生理特性をより反映した快適性評価を実現した。また、温熱環境や服装が同一でも、季節により温熱的な快/不快の程度が異なることが既往の実験研究で報告されている点を踏まえ、夏季の被験者実験データを用いることで季節特性も考慮した。梅雨期と夏季に通勤車両内で実施した被験者実験（混雑率100%未満～180%相当の環境）に本手法を適用した結果、人同士が接触しない程度の混雑環境までに関して、横流ファン停止時・稼働時共に、平均絶対誤差10pt程度で熱的不満足率（暑くて/寒くて不満と感じる人の割合）を予測可能であることを確認した。

本論文で提案した温熱快適性評価手法により、梅雨期～夏季における通勤車両内の温熱環境を対象に、横流ファン送風による暑さ感の緩和効果や快適性の改善/悪化効果を定量的に予測・評価することが可能となり、快適性の観点からの送風調節の検討等に活用できると期待される。

\* 掲載：日本機械学会論文集、88-916、(2022-12)、22-00171

\*1 正員、(公財)鉄道総合技術研究所

\*2 (公財)鉄道総合技術研究所

\*3 (公財)鉄道総合技術研究所 (現) ㈱ジェイアール総研サービス

\*4 東日本旅客鉄道㈱

論文

(10) Evaluation of a Robotic Palpation Sensor System for Prostate Cancer Screening on Silicone Elastomers and Prostate Phantoms



Francis CHIKWETO\*1



奥山 武志\*2



田中 真美\*3

前立腺がんは男性にとって大きな健康リスクであり、高齢化に伴い患者数が増加している。このがんは、罹患した部位が周囲の正常な組織よりも硬くなる特性を持っているため、診断では医師が肛門から指を挿入して直腸を介して前立腺を触り、しこりを探す直腸診が行われている。この手法は医師の指の感覚に頼る主観的なものであり、結果が経験やスキルに左右され、再現性が低い課題がある。そこで、本論文では、医師による直腸診を模倣し、組織の硬さを客観的かつ定量的に評価できるロボット触診センサシステムを開発した。このシステムは、直径15mm、長さ135mmのプローブを体内に挿入し、プローブ先端に取り付けられた直径9.5mmの金属球を組織に押し込む構造である。プローブはワイヤ駆動の2関節を有し、上下左右にプローブ先端を動かすことで、標準的な前立腺のサイズを触診可能である。先端の鋼球をプローブに磁力で保持する構造とすることで、触診時の組織との摩擦を軽減し滑らかな触診を可能としている。この鋼球を片持ち梁構造で支持し、この梁のひずみを計測し、プローブ先端にかかる力を算出する仕組みである。

このシステムの有効性を検証するため、前立腺の硬さを模したシリコーンゴムと前立腺がんの進行度を模したポリウレタン樹脂製ファントムを使用して触診実験を行った。シリコーンゴムにはしこりとして金属球が中央に埋め込まれ、ポリウレタンファントムには硬質シリコーン球が複数埋め込まれている。実験では臨床における生検プロトコルに基づいた7箇所に対して計測した。計測した押し込み力と押し込み量を基にヤング率を算出した結果、しこり部において周囲の柔らかい部位と比較して顕著に高いヤング率が算出され、市販の押し込み試験装置による測定値ともよく一致する結果が得られた。以上のように、開発したロボット触診センサシステムは、組織の硬さを指標として正常組織の中のしこり部位を検出できることが示された。この研究成果は、主観的な医師の触診を補完するツールとして客観的な診断に貢献することで、がんの早期発見を促進することが期待される。

\* 掲載：Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 17-2, (2023-1) JAMDSM0021

\*1 正員、東北大学加齢医学研究所

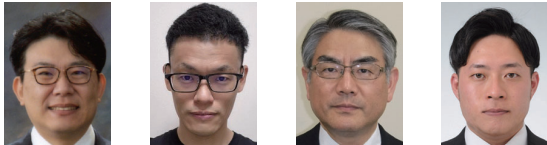
\*2 フェロー、東北大学大学院工学研究科 (現) 豊田工業大学

\*3 フェロー、東北大学大学院医工学研究科

(11) Experimental validation of elliptical contact tire model with friction coefficient deduced from viscoelasticity of tread rubber



中西 亮太\*<sup>1</sup> 松原 真己\*<sup>2</sup> 川崎 智史\*<sup>1</sup> 石橋 隆志\*<sup>3</sup>



鈴木 晴之\*<sup>3</sup> 川端 宏志\*<sup>3</sup> 河村 庄造\*<sup>4</sup> 田尻 大樹\*<sup>5</sup>

本研究は、タイヤ接地面内で発生する前後応力の再現性と理論的整合性を高めるため、粘弾性に基づいて摩擦係数を導出する摩擦理論を、楕円接地形状を有するタイヤ力学モデル (elliptical contact tire model) に組み込んだ新たなモデルを提案し、その妥当性を実験的に検証したものである。矩形の接地形状を持つ従来の力学モデルは、実測接地形状との不一致や摩擦係数の経験的調整が必要であり、タイヤ設計への適用精度に課題があった。本研究では、接地形状を楕円として実測再現性を向上させつつ、ゴム粘弾性・路面粗さ・滑り速度を統合的に扱う摩擦理論を適用することで、力学的に整合した前後応力計算を可能とした。

摩擦係数の計算理論として、Xuらが提案したマルチスケールな摩擦理論を採用した。これにより、ヒステリシス摩擦だけでなく粘着摩擦を考慮し、接地圧および滑り速度を入力として摩擦係数を解析的に算出可能とした。摩擦係数の理論値の妥当性を確認するため、タイヤと同一配合のゴム片を用い、乾燥路・湿潤条件下で摩擦試験を実施した。その結果、摩擦理論パラメータの適切な設定により、両条件における速度依存性が実験値と良好に一致することを確認した。

提案モデルの接地面内の前後応力分布の再現性は、インナードラム型のタイヤ試験機による実測値との比較により検証した。ドラム路面に組み込まれた三分力センサにより、接地面内の前後応力分布を取得し、スリップ率0%、-2%、-4%の条件で比較を行った。提案モデルは、スリップ率に応じて接地面内で前後応力が正負に転じる特徴や、幅方向に対する非線形的な応力分布を含め、実測で確認される傾向を従来モデルよりも高精度に再現した。

さらに、本研究では摩擦係数自体の絶対値調整を行わず、ゴム片摩擦試験で得られた摩擦理論パラメータのみを用いてタイヤ実験結果を再現できることを示した。これは、従来必要であったタイヤ実験による摩擦係数の同定を不要とし、材料物性とタイヤの制駆動特性を直接的に結びつける設計アプローチを可能とする点で意義深い。

以上より、提案モデルは、粘弾性に基づく摩擦係数導出とタイヤ実現象に即した接地形状表現を組み合わせることで、従来モデルの課題を克服し、接地面前後応力の高精度な再現を実現した。本手法は、タイヤ設計におけるゴム粘弾性検討や性能予測において有効であり、目標とする制駆動特性の設計を支援するものである。

\* 掲載：Mechanical Engineering Journal, 11-6, (2024-12), 24-00069

\*<sup>1</sup> 正員, 住友ゴム工業㈱

\*<sup>2</sup> 正員, 早稲田大学

\*<sup>3</sup> 住友ゴム工業㈱

\*<sup>4</sup> フェロー, 豊橋技術科学大学

\*<sup>5</sup> 正員, 豊橋技術科学大学

(12) Voxel-based end milling simulation of machining error induced by elastic deformation of tool and workpiece



金子 和暉\*<sup>1</sup> 清水 淳\*<sup>2</sup> 白瀬 敬一\*<sup>3</sup>

切削加工では、加工中の切削力の発生は避けられない。ゆえに切削力に誘発される工具・被削材の弾性変形により、加工誤差の発生が懸念される。そこで本論文では、切削加工の中でもエンドミル加工を対象として、工具および被削材の両方の弾性変形に起因する加工誤差を高精度・高効率に解析する新たな手法を提案した。一般的に被削材の変形解析は有限要素法で行われるが、形状変化のたびにリメッシュが要求されるため、計算コストが膨大であることが問題である。一方で本論文では、ボクセルモデルに基づく独自の解析手法を提案し、リメッシュ不要で高効率な解析を実現した。工具の弾性変形は、従来方法に倣ってカンチレバーとばねを組み合わせたモデルによって解析している。提案手法では切削力解析から工具・被削材の弾性変形解析まで、一貫してボクセルベースで連携的に行う。ゆえに、切削力と弾性変形の相互作用までも考慮した厳密な解析が可能であり、これも本手法の利点である。検証実験では、工具・被削材の弾性変形による切削力波形の変動を正確に再現できていることが確認された。加工誤差の解析結果も実測値とよく一致しており、切削中の工具・被削材の複雑な変形挙動を高精度にモデル化できていることが検証された。

\* 掲載：Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 18-4, (2024-6), JAMDSM0042

\*<sup>1</sup> 正員, 茨城大学 (現) 岡山大学

\*<sup>2</sup> 正員, 茨城大学

\*<sup>3</sup> フェロー, 神戸大学

論文

(13) 帯電液滴飛翔解析とベイズ最適化を用いた連続型インクジェットプリンタ向け帯電制御最適化技術の開発



佐藤 孝磨\*1 石井 英二\*2 木佐貫 祥一郎\*3 高岸 毎明\*4



加藤 学\*4

連続型インクジェットプリンタは、毎秒数万個～十数万個のインク液滴を生成・帯電させ、電場制御によって軌道进行操作することで、非接触かつ高速な印字を実現する装置である。この特徴を生かし、食品パッケージや電子基板、段ボール等に、賞味期限やロット番号、2次元コード等を高速描画する用途で広く用いられている。しかし、飛翔中のインク液滴は、空気抗力や液滴間のクーロン力、偏向電場といった複数の物理的影響を同時に受ける。さらに、先行液滴が形成する後流の影響も加わるため、狙い通りの着滴位置を得るための帯電制御（帯電波形）の調整は、多大な試行錯誤を要するという課題があった。本研究では、帯電液滴の飛翔軌道を数値解析で予測し、印字品質の定量評価に基づき最適な帯電制御を自動決定する技術を開発した。

具体的には、OpenFOAMを基盤として、液滴を粒子として追跡し、空気抗力（後流補正を含む）、液滴間クーロン力、静電場による偏向力を組み込んだ液滴飛翔解析技術を開発した。設計変数として、帯電液滴の投入順序と、帯電液滴の間に挿入する無帯電液滴（ガード液滴）の個数を設定し、軌道乱れを緩和しつつ文字形状を整える探索空間を定義した。印字品質の評価指標として、(1) 縦ラインの直線性誤差、(2) 縦ライン間の間隔均一性誤差を用い、これらを最小化する多目的最適化問題として定式化した。対象は5×5ドットマトリクスの数字「9」（文字高さ：約1.5mm）とした。

最適化手法には、Kriging（ガウス過程回帰）で目的関数の応答曲面を逐次更新するベイズ最適化を採用した。獲得関数（期待改善量：Expected Improvement）の最大化には多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。本研究では、初期36点に加え、更新10回（各6点）の計96ケースの解析で探索を進め、一般的な多目的遺伝的アルゴリズムを用いた場合（720ケース）と比較して、解析回数を約1/7に抑えつつ、従来と同等以上の高い印字品質を有する解の探索に成功した。さらに、導出した解を実機にて検証し、十分な印字品質が得られることを確認した。以上の結果から、液滴飛翔解析とベイズ最適化を組み合わせた本手法の有効性を実証した。

\* 掲載：日本機械学会論文集，88-912，(2022-8)，22-00140

\*1 正員，(株)日立製作所 研究開発グループ（〒319-1292 日立市大みか町7-1-1）

\*2 フェロー，(株)日立製作所 研究開発グループ

\*3 正員，(株)日立製作所 研究開発グループ（現）(株)アイシン

\*4 (株)日立産機システム 省力システム事業部（〒316-8502 日立市東多賀町1-1-1）

論文

(14) Thermal modeling techniques designed for high-speed directed energy deposition coatings



竹村 志帆\*1 宮田 雄一朗\*2 廣野 陽子\*3 柿沼 康弘\*4

3Dプリンタとも呼ばれるAdditive Manufacturingの中で、指向性エネルギー堆積法（Directed Energy Deposition: DED）は金属を造形可能な方式の一つである。DEDでは粉末やワイヤ等の金属材料を母材に対して供給すると同時に、レーザー等の熱源を照射することで材料を溶融付加するため、既存部品の補修やコーティングに適している。さらに、DEDを用いた高速コーティングは、高い生産性、薄いコーティング、および熱影響部の低減等の利点を有している。一方でDEDプロセスにはレーザー出力、走査速度や粉末供給量等の多様な造形パラメータが含まれ、それらによって熱履歴が変わり、さらに熱履歴は金属組織を変化させ、最終的には造形物の機械的特性・品質に大きく影響する。そのため造形の分析・安定化には温度の把握が重要だが、多くのパラメータに対する実験は時間やコストがかかるだけでなく、造形物内温度のように実験的測定が困難な場合も多いため、造形時の熱シミュレーションの需要が高まっている。一方で、DEDでの材料の逐次供給を再現する必要があり、さらに高速コーティングでは1回のトラックの厚さが薄く重なりが大きいいため、それらを高精細に再現しようとすると計算コストが増大する。

本研究では、高速DEDによる回転コーティングを対象に、「現実に向合う温度」を保ちながら計算を簡略化できる熱解析手法を検討した。まず、二色温度計により溶融池温度を計測し、シミュレーション検証用の基準データを取得した。次に、シミュレーション用有限要素モデル形状を簡略化したうえで、材料を追加する（要素を有効化する）範囲・高さ、および入熱方法（熱流束、体積発熱等）を変えた5種類の方法を提案し、コーティング表面と母材境界の温度を実験と比較した。その結果、熱流束付加範囲をレーザースポット相当、要素付加範囲はレーザースポット未満にした場合に、表面および境界温度の再現性が最も高く、高精細なメッシュでなくても実験値に近づくことを示した。これらの入熱・要素付加は、高速コーティングでは入熱が一瞬であるため、レーザースポット範囲に対してトラックの幅が小さいことに基づいて設計されている。本成果は、高速DEDコーティングの熱解析を簡略化する具体的な指針を与え、プロセス条件の事前検討やパラメータ検証を効率化する基盤になると期待される。

\* 掲載：Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 19-1, (2025-3), JAMDSM0012.

\*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

\*2 正員，DMG森精機(株)（現）DMG森精機Additive

\*3 正員，DMG森精機(株)

\*4 正員，慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科

(15) Mechano-neurophysiological model of fingertip to simulate tactile response during Braille reading under multiple frictional conditions



濱崎 透\*<sup>1</sup> 中平 祐子\*<sup>1</sup> 山田 大介\*<sup>1</sup>

本論文は、点字触読における触覚の神経伝達過程に着目し、摩擦が点字識別に及ぼす影響を力学-神経生理学統合モデルにより解明した研究である。

触感や操作感といった人の感覚特性を評価することは、製品のユーザビリティ向上において重要である。その際、触知覚に至るまでの神経伝達過程を考慮することで、従来は十分に解明されていなかった触知覚メカニズムをより詳細に理解することが可能となる。しかし、摩擦を含む触知覚過程を神経応答レベルで定量的に扱うことは実験的な制約が大きく、未だ明らかにされていない点が多い。

本研究では、三次元有限要素法による指先皮膚の力学モデルと、点字識別に重要な役割を果たすSlowly adapting type 1 (SA1) 触覚求心性神経の発火応答を再現する神経生理学モデルを統合したモデルを用いて、複数の摩擦条件下での点字触読を再現した。過去の心理物理実験で報告されている「高摩擦条件下で点字の誤読率が有意に増加する」という現象を対象とし、その発生メカニズムを神経応答レベルで検証した。

解析の結果、低摩擦条件では点字配置が指内のひずみエネルギー分布およびSA1神経応答に明確に反映される一方、高摩擦条件では摩擦に起因する大きな皮膚変形により、ノイズとなる神経発火が生じ、点字情報の神経符号化が阻害されることが確認された。さらに、神経発火分布と点字配置との相関解析により、神経発火ノイズによる識別能力の低下傾向が、心理物理実験データにおける誤読率の増加傾向と一致することが示された。すなわち、高摩擦条件下では点字そのものに由来する神経情報よりも摩擦に起因する神経ノイズが優勢となり、点字識別に必要な神経情報のコントラストが低下することで誤読率が増加する可能性が示唆された。

本論文は、重要でありながらこれまで十分に検討されてこなかった摩擦という要因が、触知覚情報の神経符号化に及ぼす影響を計算モデルにより初めて示した点に意義がある。本手法は点字素材の選定にとどまらず、操作ボタンや表面テクスチャなどの工業製品がもたらす触覚体験を、デジタル空間上で評価するための基盤技術として展開することも期待される。さらに、皮膚の力学応答、神経発火パターン、および心理物理学の知見を結び付ける枠組みを提供することで、機械工学、神経科学、心理物理学を横断する学際的な橋渡しに寄与すると考えられる。

\* 掲載: Journal of Biomechanical Science and Engineering, 19-1, (2024-1), 23-00102

\*<sup>1</sup> 正員, (株)豊田中央研究所 (〒480-1192 長久手市横道41-1)

(16) Block Newton法による  
接線係数を代数的に導出した弾塑性損傷解析



山本 剛大\*<sup>1</sup> 山田 貴博\*<sup>2</sup> 松井 和己\*<sup>3</sup>

金属材料など塑性変形や損傷を伴う挙動がフリーエネルギーから求まる変位と降伏条件式や損傷発展式に基づいた塑性変形や損傷の進展を表す内部変数で記述されることから、損傷が進展する弾塑性問題はフリーエネルギー・降伏条件式・損傷発展式の連成問題と捉えられる。本論文では損傷が進展する弾塑性問題に対して、有限要素解析を見据えた仮想仕事式・降伏条件式・損傷発展式の連成問題を定義し、それらを同時に線形化することで、Block Newton法に基づく数値計算手法を開発した。

定式化において、内部変数を陽に含む形で連成問題を線形化し、線形化された連成問題から内部変数を代数的に消去することにより、各変数に関する微分を用いて変位に関する接線係数が代数的に構築できる。本手法では接線係数の導出過程で内部変数を代数的に消去するため、積分点での内部反復を用いずに内部変数も代数的に更新される。さらに、降伏条件式と損傷発展式を物質点で満たされるべき制約条件式と定義することにより、制約条件に対する残差が偽応力(応力の次元を持つ2階テンソル)として表現できる。線形化された仮想仕事式に偽応力を組み込むことによって、変位を自由度とする非線形有限要素解析の残差項に制約条件式の残差が組み込まれ、全体反復によって連成問題の残差が同時に減少する。また、本研究では連成問題に仮想仕事式を採用することによって、通常の有限要素解析に本論文で提案する数値計算アルゴリズムを実装することが容易となる。具体的には、代数的に得られる材料接線係数を非線形有限要素解析の材料接線係数で使用するため、従来手法と同様に構成則サブルーチンで処理でき、連成問題としてプログラムを実装する必要がない。

繰り返し载荷や損傷が局所化する数値計算モデルに対して、本論文で提案する数値計算アルゴリズムは増分解析で設定する時間増分の大きさに関係なく、終局状態付近までの損傷進展を安定して予測でき、そのロバスト性が確認された。また、Armstrong-Frederick移動硬化則を採用する場合も解くべき連成問題は変わらず、未知数の数も増加しないことから、採用する硬化則の種類が計算時間に影響せず、本手法の有用性が示された。

\* 掲載: 日本機械学会論文集, 90-936, (2024-8), 24-00081

\*<sup>1</sup> 正員, 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 (現)茨城大学 学術研究院 応用理工学野

\*<sup>2</sup> フェロー, 横浜国立大学 大学院環境情報研究院

\*<sup>3</sup> 正員, 横浜国立大学 大学院環境情報研究院

研究奨励

(1)  $\beta$ 相含有鍛造TiAl合金の高温弾性特性と非弾性特性の研究



足立 寛太\*

本研究では、40~760℃の温度範囲に対応した超音波共鳴法計測装置を独自に構築し、 $\beta$ 相含有鍛造TiAl合金の各弾性定数および内部摩擦の温度依存性を詳細に評価した。その結果、熱間加工や熱処理の過程で $\beta$ 相中に形成される $\omega$ 相が、弾性・非弾性特性に顕著な影響を与えることを明らかにした。特に、 $\omega$ 相の形成により剛性が向上し、鍛造材が鍛造材と同等の弾性定数を示すこと、さらに $\omega$ 相に起因する内部摩擦が異方性を示し、せん断振動モードで顕著なエネルギー損失を引き起こすことを示した。また、200℃付近に新たな内部摩擦ピークを発見し、これも $\omega$ 相に起因する可能性が高いことを示した。

\* 正員、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

研究奨励

(2) 計算材料科学による半導体材料の強度信頼性に関する研究



榎間 大輝\*

本研究では、SiCを中心とするパワー半導体材料の強度信頼性を対象に、計算材料科学に基づき、原子スケール解析と材料強度指標・デバイス内応力場を接続するマルチスケール解析を進めた。第一原理計算により、多形安定性、積層欠陥エネルギー、理想強度を定量化し、温度依存性や分散力補正の影響も整理した。また、有限要素法とラマン分光を併用して残留応力分布を推定し、応力がパイポーラ劣化における積層欠陥拡張に及ぼす影響をモデル化した。さらに、過剰キャリアが欠陥エネルギーや強度指標に及ぼす影響を理論的に検討した。これらの成果は、プロセス条件や動作条件を考慮した信頼性評価に向けた基礎的知見として位置付けられる。

\* 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

(3) 材料の微視スケールでの塑性変形素過程に関する原子論的研究



佐藤 悠治\*

本業績は、転位や双晶の活動といった材料の微視スケールでの塑性変形素過程に対し、原子論的解析を基軸としてその本質解明のため取り組んだものである。まずナノインデンテーション試験中の転位核生成に対し、その発生荷重の温度・荷重速度依存性の非経験的予測手法を構築した。また鉄や銅に対し同試験中の圧子変位バースト現象の発生規模の統計解析を実施し、分布におけるべき乗則のメカニズムを分子動力学解析により明らかにした。さらにマグネシウムの変形双晶の境界移動過程に対し、非調和熱振動を考慮した自由エネルギー計算手法により活性化自由エネルギーの温度依存性を計算し、同過程にて顕著な非調和熱振動の影響が表れることを示した。

\* 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

(4) 熱交換器の高性能化に資する実験および数値解析的研究



齋藤 慎平\*

本研究は、金属3Dプリンタを用いて微細な流路を持つコンパクトな熱交換器を製作し、その性能を実験的に評価するとともに、気液が共存する複雑な流れを解析できる数値計算手法を開発したものである。アルミ合金を用いて最小約300 $\mu$ mの流路を有する手のひらサイズの熱交換器を造形し、流路寸法や表面の粗さが伝熱や圧力損失に与える影響を定量的に明らかにした。さらに、固体表面での濡れ挙動を含む混相流を熱力学的法則と整合的に再現できる解析基盤を構築し、小型で高効率な冷却・熱回収機器の設計に資する知見を示した。

\* 正員、産業技術総合研究所

研究奨励

(5) 高速液体噴流の微粒化モデリングに関する研究



松田 大\*

エンジン燃焼において、燃料を微細な液滴へ分裂させる微粒化過程の理解とその予測は重要である。本研究は、ディーゼル機関に代表される高速液体噴流を対象に、ノズル内部流れと噴流内部の乱流特性を数理的に記述し、気液界面の不安定性解析と統合した新たな微粒化モデルを構築した。本モデルは、実測噴射率と連成した解析に基づき、可視化データに依存せず微粒化特性を予測でき、多様な燃料・噴射条件に適用可能な汎用性を有する。さらに、合成燃料や液体アンモニアなど次世代燃料への展開により、カーボンニュートラル社会に向けた燃焼技術の高度化に資することが期待される。

\* 正員、九州大学大学院工学研究院

研究奨励

(6) 複雑流体のレオロジー計測手法開発と流動予測に関する研究



大家 広平\*

流体力学分野では、水や油など粘度が一定のニュートン流体の流れを知る段階から、その先に広がる複雑流体へと研究の重点が移行している。しかし、高齢者向けの流動食品や流体機械の動力削減で注目される機能性流体、バイオマス材料として期待されるセルロース溶液など、流動物性が未知ゆえに流体力学の枠組みが適用できない事例が多発する。本研究では、流動逆解析に基づくレオメトリの開発によって、これまで対象外となっていた多くの複雑流体の流動物性情報の獲得を可能にした。さらに、摂食嚥下プロセスにおける流動食品の振る舞い、化学工業における高分子溶液の管内輸送、土木工学や地球惑星科学における混相流の斜面流予測を実現した。

\* 正員、名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町)

研究奨励

(7) 圧縮性流れ中の粒子周り流れに関する研究



永田 貴之\*

ロケットエンジンの排気ジェットなど微粒子を含む高速流れにおいて、微粒子周りの流れは圧縮性低レイノルズ数条件となる。流体の圧縮性と粘性の両者の効果が顕著であり特有の流体现象を生じるが、実験計測が困難であり一部の条件で計測された抵抗係数以外の特性はほぼ未知であった。故に、圧縮性固気混相流解析では強い仮定や経験的修正を含むモデルが用いられてきた。本研究では、数値解析と実験を駆使して球周りの圧縮性低レイノルズ数流れを丹念に調べ、その流れ場や抵抗係数などの流体力学的特性および圧縮性低レイノルズ数流れの基礎特性を明らかにした。また、得られた知見を統合することで圧縮性流れにおける粒子抵抗モデルの構築に貢献した。

\* 正員、名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

研究奨励

(8) 高速度偏光計測技術による  
液体と固体の応力場可視化の研究



武藤 真和\*

本業績は、高速度偏光カメラを援用した光学計測技術（高速度偏光計測技術）を開発し、液体および固体内部に生じる応力の空間強度分布を、非接触かつ非定常に可視化したものである。従来は固体に限定されていた光弾性法を流体へ拡張し、模擬血液と模擬血管からなる実験モデル系において、脈動流下で生じる流体応力および固体応力の空間強度分布を、複屈折情報として同期計測する固-液複屈折場計測法を世界で初めて実現した。さらに、固体および流体の応力光学係数の計測手法を整備することで応力の定量評価を可能とし、脳動脈瘤破裂など医療課題の理解に不可欠な応力集中評価や、流体-構造連成問題に対する実験的検証手法を提供した。

\* 正員、名古屋工業大学大学院工学研究科（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）

研究奨励

(9) 点群自己位置推定および  
環境地図生成の研究



小出 健司\*

本研究ではLiDARやデブスカメラから得られる三次元点群を用いた自己位置推定および環境地図生成に取り組んだ。グラフ最適化、変分推論アルゴリズム、GPU並列処理を組み合わせることで、頑健・高精度な大規模地図生成手法や、従来対処が困難だった大域位置推定・誘拐問題（センサ目隠し）に対処できる自己位置推定を実現している。研究成果は国際会議・論文誌で発表すると同時に、一部はオープンソースソフトウェアとして一般公開しており、国内外の様々な産学機関において移動ロボットや自動運転システムの開発に使用されている。

\* 正員、産業技術総合研究所 情報・人間工学領域 インテリジェントシステム研究部門

研究奨励

(10) 平行リンク機構を用いた  
チルトフレーム型ドローンの研究



坂口 聡範\*

従来のドローンは固定フレームゆえ、飛行環境や対応タスクが限定的である。本研究では、フレームに平行リンク機構を導入したチルトフレーム型ドローンを提案した。全ロータの平行性を機構的に保証し、飛行効率を維持しながら多様なフレーム変形が可能である。ピッチ方向にチルトできる1軸チルトフレームを出発点として、これをモジュール化して平行六面体を構成することで、ロール・ピッチ方向の2軸チルトフレームへと発展させた。さらに、アクチュエータを追加することで、ヨー軸周りに収縮・拡大できる3軸変形フレームを実現した。これらの変形能力により、従来比50%の狭小空間での飛行や把持機能による物資運搬などの高い汎用性を獲得した。

\* 正員、九州大学 大学院システム情報科学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

研究奨励

(11) 人体動作特徴量解析による  
身体内部情報推定技術の研究



土谷 圭央\*

バイオメカニクス、生体計測、ロボティクスを専門とし、身体負荷の定量評価と人間支援技術の開発を進めてきた。腰部負担や筋疲労の非侵襲推定モデルの構築に取り組み、動作時の腰部姿勢、筋活動、生理指標など多角的な生体情報をセンサフュージョンによるウェアラブルデバイスで計測・解析する手法を確立した。これにより、主観的な「負担」や「疲労」を客観的データから高精度に推定し、建設作業員や介護従事者を対象とした研究で、作業中の腰部負荷と体力テスト結果の関連を明らかにし、労働安全衛生の向上に貢献している。

\* 正員、香川大学創造工学部機械システム工学領域

研究奨励

(12) 瓦礫内探査とドローン輸送が可能な  
小型循環式移動体の研究



渡辺 将広\*

地震などの大規模災害では、発生後72時間以内に瓦礫内に閉じ込められた人の位置を特定し、救助することが重要である。本研究では、レスキュー活動の安全性向上と効率化、搜索範囲の拡大を目的として、遠隔操作が可能な小型移動ロボットSMURFを開発した。従来の比較的大きなロボットでは探査が困難であった瓦礫内部に対し、ドローンで複数台を瓦礫上部へ分散投下することで、災害現場を網羅的に搜索できる。小型軽量な車輪型・クローラ型移動体により、狭い穴や隙間への進入や段差の乗り越えが可能である。さらに、サーマルカメラ、赤外カメラ、マイク・スピーカー、ガスセンサなどを搭載し、要救助者の手がかりとなる情報を収集する。

\* 正員、大阪大学大学院基礎工学研究科

研究奨励

(13) 材料非線形を積極的に参照する  
構造最適化手法の研究



韓 霽珂\*

本研究は、応力とひずみの関係が比例せず、かつ履歴依存性や不可逆変形を伴う「材料非線形性」を、構造設計の段階から積極的に考慮する新しい構造最適化手法の確立を目的とする。従来の構造最適化では、材料を単純な線形弾性体として扱うことが多く、塑性変形や損傷、さらには生体軟組織の成長や萎縮といった現象を十分に反映できないという課題があった。本研究では、材料内部の状態変化を表す内部変数を用いて、工学材料から生体組織までを統一的に記述し、それらを直接反映した構造最適化の枠組みを構築した。本手法により、安全性と軽量性を両立した構造設計に加え、医療・バイオ分野への応用も期待される。

\* 正員、京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻

研究奨励

(16) 複雑な物理モデルに対する感度解析の  
一般化に関する研究



小川 竣\*

本研究は、構造最適化手法の1つであるトポロジー最適化の最適解探索に必要な感度解析を一般化したものである。従来、非定常や材料非線形等の複雑な物理現象を扱うには、感度解析の定式化が極めて困難であり、トポロジー最適化の社会実装を阻む根本的課題であった。これに対し、随伴変数法を用いて非定常熱構造連成等の時間依存現象の設計感度式を体系化し、革新的な構造創生を実現した。さらに、自動微分の適用により、目的関数、制約条件、物理モデルに依存せず煩雑な定式化を排した汎用的手法を確立した。本業績は、高度な設計最適化の範囲を飛躍的に拡大させるものであり、機械工業をはじめとする産業基盤の発展に大きく貢献できる。

\* 正員、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

研究奨励

(14) トライボフィルムの形成機構と  
摩擦摩耗特性に関する研究



佐藤 魁星\*

摩擦場で生成される反応被膜(トライボフィルム)は、その摩擦・摩耗特性を通じて、機械部品の省エネルギー化に大きく貢献している。しかし、トライボフィルムはナノスケールの薄膜であるため、その成長過程に着目し、摩擦・摩耗特性との関係を詳細に検討した研究は限られている。本研究では、原子間力顕微鏡を用いて、高温潤滑油中の摩擦面をその場観察し、トライボフィルムが表面の応力が集中する真実接触部で成長すること、潤滑油添加剤の種類や組み合わせによって、膜の成長速度や摩擦特性が変化することを直接観察し、従来経験則に頼っていたトライボフィルム摩擦・摩耗特性を直接観察し、その評価手法を確立したものである。

\* 正員、東京理科大学 工学部 機械工学科

研究奨励

(17) 細胞活動の力学的な作用から生じる  
組織形態形成の研究



竹田 宏典\*

生体が形づくられる形態形成の過程では、細胞の活動から生じる力が駆動力となり、立体的な組織が形成される。本研究は、細胞活動の力学的な作用により生じる形態形成が、時空間的なゆらぎに対して安定的に再現性良く進行する仕組みの理解を目的とした。そこで、細胞の増殖と移動、収縮の連続体力学モデルを構築し、有限要素法による組織変形のシミュレーションを行った。脳組織のシワ形成では、力学場に応じた細胞移動がシワの伸長と維持に寄与して形態形成を安定化させることを示した。さらに、シート状組織のエネルギー地形を可視化し、細胞の増殖と収縮を通じて安定形状へ至るまでの力学状態の遷移過程を理解するためのアプローチを提案した。

\* 正員、京都大学医生物学研究所

研究奨励

(15) 高温真空環境下での炭素硬質薄膜の  
低摩擦指針の提案の研究



張 銳璽\*

グラファイト由来のsp<sup>2</sup>構造とダイヤモンド由来のsp<sup>3</sup>構造を併せ持つ炭素硬質薄膜は、低摩擦・耐摩耗性・化学安定性に優れ、自動車や半導体分野で広く注目されている。しかし、高温・真空などの過酷環境下では酸化や剥離が生じやすく、産業利用拡大には課題が残されている。本研究では、耐熱性および耐酸化性の向上を目的に添加元素を導入した炭素硬質薄膜を設計・改質し、大気中および真空中の高温環境下において超低摩擦( $\mu < 0.06$ )を安定的に実現した。さらに、電子顕微鏡観察およびラマン分光分析により、超低摩擦をもたらす移着膜の形成量と構造特性を明らかにし、その発現メカニズムの理解に基づく最適な成膜指針を確立した。

\* 正員、東京科学大学総合研究院未来産業技術研究所(〒226-8501 横浜市緑区長津田町4259)

研究奨励

(18) 生理病理状態における  
仙腸関節の力学的機能に関する研究



豊原 涼太\*

仙腸関節は約3割の腰痛患者の疼痛要因であり、骨盤内の重要な荷重関節であるものの、1mm未満のわずかな可動性しか許されておらず、動かない関節であるとみなされていた。そのため、仙腸関節の生理・病理における機能や疾患発症メカニズムの解明、治療法の客観的な効果検証は十分に組み込まれていないのが現状であった。そこで、本研究ではコンピュータシミュレーションと物理実験により仙腸関節の力学的機能を説明してきた。歩行時における仙腸関節の運動を可視化し、本関節の重要な衝撃緩衝機構を示すなど、仙腸関節のバイオメカニクスの基礎的な知見を提供するとともに、治療法の評価やメカニズムの裏付けを行い実臨床への還元も行ってきた。

\* 正員、北海道大学大学院工学研究院 機械・宇宙航空工学部門

研究奨励

(19) 微細周期構造の造形法の開発とその微小流体応用に関する研究



増井 周造\*

微細な周期構造は、最も基本的な形状の1つとして光学・流体分野での応用が研究されている。そのため、本研究では干渉リソグラフィと呼ばれる手法を用いた微細周期構造の造形・計測・応用を展開してきた。造形に関しては、光の全反射時に生じるエバネッセント光の干渉を利用した新規造形法を開発し、ナノマイクロ微細周期構造の一括造形を実証した。計測の観点では、造形されたナノマイクロ周期構造は、従来の格子周期計測の適用が困難であるため、光共振を用いた計測手法を実証した。さらに、微小流体分野への応用として、微細周期構造を用いたマイクロ液滴生成法の原理的な解明を行っている。

\* 正員、東京大学大学院工学系研究科（〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1）

技術奨励

(3) 離散粒子解析手法を工学応用したNa-水反応評価手法の開発



小坂 亘\*

ナトリウム冷却高速炉蒸気発生器の安全性評価の一環として、万が一伝熱管から水が漏れ、ナトリウムと激しい化学反応を起こしても、安全に事象終息に至ることを確認する必要がある。本事象は、多相流と化学反応の複合現象であり、まずはそれぞれを忠実に表現するモデルを組み合わせた解析手法が開発された。本研究では、この既往手法の運用で得た知見を活用して、工学応用という観点からモデルを合理化し、低計算負荷の解析手法を開発した。試解析を通して、本手法と既往手法との誤差は目標範囲内に収まることを確認した。低計算負荷の本手法を、工業分野で生じる様々な複合現象へ応用していくことで、産業界の技術開発に広く貢献できる。

\* 正員、(国研)日本原子力研究開発機構（〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地）

技術奨励

(1) スマート物流を実現するマルチ搬送AMR制御技術開発



伊藤 悠介\*

物流現場では、多様な台車を扱う搬送作業の自動化が求められている。しかし従来の自律移動ロボット（AMR）は、搬送可能な台車の形態に限られることや、複数台が同じ通路ですれ違う際に円滑に動作できないなど、人間と同等の搬送作業を実現する上で制約があった。これらの課題に対し、台車の種類に応じてAMRの動作特性を切り替える技術と、AMR同士が互いの進行範囲を共有することで無理なくすれ違える制御技術を開発し、多様な台車搬送と複数AMRが同一空間で安全に共存することを可能とした。また、既存の台車や設備をそのまま活用しながら搬送作業の自動化を進められる点も特徴となり、現場の省人化を継続的に後押しする技術的な仕組みを整えた。

\* 正員、(株)東芝 総合研究所 生産技術センター（〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町33）

技術奨励

(4) 蓄熱用岩石の粒度分布評価技術開発



神内 拓真\*

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、余剰電力を熱として蓄える技術が注目されている。特に岩石を蓄熱材とする方式は環境性や経済性に優れる点から実用化が進められている。このような設備では、充填層内の流動・伝熱特性評価のために岩石の粒度分布を把握することが重要である。従来の充填層の圧損や空隙体積から平均径を間接推定する手法は計測コストが課題であった。本技術は、市販のRGB-Dカメラでバラ積みされた岩石を撮影し、AIを含む画像処理により個々の岩石を検出する。さらに個々の岩石の全体形状を推定し、表面積や体積を算出することで粒度分布を求める。本技術により、簡易な構成で非接触かつ効率的な粒度分布評価が可能となった。

\* 正員、(株)東芝 総合研究所 生産技術センター（〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町33）

技術奨励

(2) プラズマアクチュエータを利用した脱臭技術の開発



岡 将太郎\*

近年、家庭やオフィスに蓄積される臭いや、工場における揮発性有機化合物が社会課題となっている。本開発では、プラズマ中のOHラジカルが持つ強力な酸化分解作用に着目し、プラズマ中に空気を引き込む電極構造（プラズマアクチュエータ）を用いた脱臭技術を開発した。本技術により、従来手法では脱臭が難しいエチレンを始めとして、多様な臭い成分に対して汎用的に機能する高速脱臭が実現できた。また、本技術で利用するストリーマ放電は湿度等の変化で不安定になりやすいが、電圧・電流を最適化することでストリーマの安定制御にも成功した。これらの技術は脱臭だけでなく集塵や除菌技術にも応用可能であり、関連する製品開発にも貢献した。

\* 正員、(株)東芝 総合研究所（〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1）

技術奨励

(5) 水素ステーション向け超高压液体水素昇圧ポンプの開発



原田 基至\*

カーボンニュートラル実現に向けた動きの中で、燃料電池商用車（トラック、バスなど）を対象とする大規模水素ステーションの需要増加が予想されており、今後、大量の水素を短時間で車両に充填する技術が不可欠となる。従来の水素ガス圧縮機を使用する方式は、圧縮機の吐出流量に制約があり、充填時間短縮のために大量の蓄圧器を併用する必要があるという課題があった。これに対して、コンパクトな機器でありながら、大流量の吐出能力を持つ液体水素昇圧ポンプを開発した。液体水素昇圧ポンプは超高压かつ極低温という過酷な環境で動作するが、安定した吐出能力や高い信頼性・耐久性を実証し、高速水素充填の実現に向けた基本技術を確認した。

\* 正員、三菱重工業(株) 総合研究所（〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1）

技術奨励

(6) AE法による床版内部の健全度評価に向けた解析技術の開発



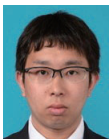
文倉 智也\*

橋梁床版内部の健全性を非破壊で評価するため、車両走行時に路面で発生する弾性波を床版下面に設置したAEセンサで検出する手法が用いられてきた。しかしながら、車両の走行位置による弾性波の波源位置の変動や温度に伴う弾性波の伝搬特性の変化により、常に同一の基準で健全性評価を行うことは困難であった。本技術では、車両走行に伴う弾性波源の分布を予測する技術を開発することで、妥当な計測領域の理論的な設定を可能とした。加えて、床版内の弾性波の伝搬挙動を解析することで、温度による影響を評価する技術を確立した。本技術は実際の橋梁床版内部の非破壊評価の高精度化に深く貢献するものである。

\* 正員、(株)東芝 総合研究所 先端デバイスR&Dセンター (〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1)

技術奨励

(7) 高強度中炭素鋼の強度推定法の開発



水野 湧太\*

転がり機構を用いた直動案内装置は工作機械や半導体製造装置などに広く使用されており、動作中は転動体と軌道面間に圧縮応力が作用する。簡便に圧縮応力下での機械的特性を求めめる方法として硬さ試験が挙げられる。しかし、高硬度鋼では表面切り欠き係数の影響により硬さと機械的特性が比例関係にならず、正確に算出することが困難である。一般的な引張試験では塑性不安定から早期破断するため圧縮試験から機械的特性を求めた。硬さと圧縮強さは比例関係とならなかったが加工硬化指数を考慮することで硬さから圧縮強さを推定する方法を考案した。本手法によって、硬さを測定するだけで圧縮強さが算出でき、より正確な安全設計や解析が可能となる。

\* 正員、THK(株) (〒108-8506 東京都港区芝浦2-12-10)

技術奨励

(8) 配管破損に伴う高温高压水漏洩時の噴流拡散予測技術の開発



湯浅 朋久\*

原子力発電所における高压配管破損により発生する熱水噴流は、衝突や被水等により作業員に重大な影響を及ぼし得るため、高压配管から流出する噴流挙動の高精度な予測技術が重要となる。本研究では、高速度ビデオカメラを用いた噴流挙動の詳細な可視化実験により、減圧沸騰に伴って熱水の噴流幅が急激に拡大する現象を明らかにした。さらに、実験結果を検証データとするCFD解析を行い、原子炉実圧条件までを含む高压配管からの噴流挙動の予測手法を構築した。加えて、実験と解析結果から得られた噴流の拡がり角と到達距離に関する相関式を用いることで、現行の簡易式と比べ噴流挙動の予測精度が向上し、作業員の熱傷リスク評価が可能となった。

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

教育

(1) 「楽しい流れの実験教室」を通じた流体力学の啓蒙活動



石綿 良三\*

受賞者は、永年にわたって流体力学に関連する実験動画の制作を行い、本会流体力学部門ホームページにおいて「楽しい流れの実験教室」として公開を続けている。これは、広く小中学生から一般社会人までを対象に楽しみながら流体力学に触れ、科学への興味と理解を深めることをねらいとしているものである。動画サイトでは累計70万再生を超えている。

「楽しい流れの実験教室」の公開は2009年から始まり、題材提供は現在も継続され、350件を超えている。身近にあるものを利用した、比較的簡単な実験も多く、個人での利用のほか、中学高校の授業・部活動、高専、大学の授業、オープンキャンパスなどで利用されている。自然現象を理解するためには話を聞くだけではなく、実際に体験することが重要であり、効果的である。

さらに、学校や市民行事での理科教室、流れのふしぎ展(流体力学部門主催)等の科学イベントで体験実験を行い、子供たちや一般市民から楽しかった、翼の原理がわかったなどの声を多く受けている。参加者の反応を見ることによって、どのように関心を持ち、どのように理解しているのかがわかり、その後の実験開発に役立っている。

(楽しい流れの実験教室 <https://www.jsme-fed.org/experiment/index.html>)

\* フェロー、神奈川工科大学 (〒243-0292 厚木市下荻野1030)

教育

(2) 日本の火力原子力発電技術の世界への発信と国内での技術伝承



動力エネルギーシステム部門30周年出版事業と技術継承活動ワーキンググループ

[代表者] 小泉 安郎\*

全地球的課題であるCO<sub>2</sub>排出削減において、我が国での努力は当然であるが、開発途上国で今後増えてくる排出量は莫大な量でありこれへの対応がまさに求められる。日本の優れた火力原子力発電技術を用いての開発途上国への協力は是非為されなければならない。しかしながら、我が国でこの領域の技術者研究者の退職が続き、国内での技術継承と後継者育成がそれ以前に喫緊の課題となっている。本件はこれらの問題に対応すべく動力エネルギーシステム部門が行っている活動に関わるものである。

本部門では、技術継承と後継者育成に関し、定期的に研究発表講演会やシンポジウム、また、原子力工学国際会議で学生プログラムを継続的に行っている。これに加え本件では、全8巻からなる火力原子力発電の技術書「JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation」をエルセビア社から出版し、それを生かし、若手技術者、学生を対象として講演会及び技術セミナーを行ってきている。技術書は我が国のみならず発展途上国をも意識し英文で書かれている。この出版物は、新たな研究開発を行う際には大切な基礎参考情報になる。

\* フェロー、電気通信大学情報理工学研究所機械知能システム学専攻