

2019 年 4 月 19 日

日本機械学会  
協調領域技術懇談会

## 1. 経緯

2017 年度の産業競争力懇談会 (COCN) のプロジェクト「学会をハブとするオープンイノベーション」において以下の提案を行った。

- ・非競争領域, 前競争領域, 協調領域などで複数の企業が出資し, 大学などの公的研究機関で研究開発を行うテーマを学会の企業会員が中心となって議論する.
- ・提案されたテーマについて, 学会のネットワークで企業会員に周知し, 参加企業を募るとともに, 研究開発を遂行する研究機関を選定する.
- ・学会がハブとなって, 企業, 大学の研究開発部署, 産学連携部署をチーミングし, 研究開発を推進する.

本プロジェクトには, COCN 会員企業 8 社と日本機械学会, 応用物理学会, 高分子学会, 土木学会が参加し, それぞれの学会に対応したワーキンググループ (WG) を構成して上記テーマの具体化を図った.

日本機械学会 WG では, 2017 年にイノベーションセンタ内に「協調領域技術懇談会」を設立し, 強度信頼性, トライボロジーの分野で具体的な研究テーマの発掘を行った<sup>2)</sup>. 参加企業は, コマツ, 東芝, 日立, 三菱重工の 4 社である. まず, 議論したい研究テーマを各社が提案し, 推進すべき研究テーマとなり得るテーマの調査を行った. その結果, 超低摩擦現象に関するテーマは 2018 年度の RC 分科会で, また, FRP の破壊メカニズムに関するテーマを 2019 年度の RC 分科会で推進することになった.

2018 年度は, IHI を加えた 5 社で活動を継続した.

本報告は, 2018 年度の「協調領域技術懇談会」の成果を纏めたものである.

### 参考文献

- 1) <http://www.cocn.jp/report.html>
- 2) <https://www.jsme.or.jp/innovationcenter/uploads/sites/6/2018/05/COCNchousa180531.pdf>

## 2. 提案テーマ

本年度は分野を限らないでテーマの提案を行った. その結果, 解析技術に関するテーマ 2 件, 界面現象に関するテーマ 3 件, 流体现象に関するテーマ 3 件, 計測・デバイスに関するテーマ 3 件, 合計 11 件の提案があった.

### 2.1 解析技術

#### (1) マルチフィジックス連成数値最適化技術

調査テーマに選定, 3. で述べる.

#### (2) 格子ボルツマン法をベースにしたオープンソースの熱流れ解析ソフト

商用の熱流れ解析ソフトは有限体積・有限要素法をベースにするものが多いが、近年格子ボルツマン法をベースにしたものが商品化されたり、解析精度は高い反面使用料が高価であるので、オープンソース版は多くの企業のニーズに応えるものと考えられる。

一方、東京大学生産技術研究所の革新的シミュレーション研究センターでは、有限体積・有限要素法をベースにしたオープンソースの熱流れ解析ソフトを開発している<sup>2)</sup>。同センターを中核にし、格子ボルツマン法をベースにしたオープンソースの熱流れ解析ソフトの開発が待たれる。

#### 参考文献

- 1) PowerFLOW : <http://exa.com/ja/product/powerflow>
- 2) オープンソースの熱流れ解析コード FrontFlow : 革新的シミュレーション研究センター, <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/software/>

## 2.2 界面現象

### (3) 接触熱抵抗の解明

調査テーマに選定, 3. で述べる。

### (4) メゾ領域での力学の記述

代表寸法が 1nm から 1 $\mu$ m のメゾ領域では、MD (分子動力学) などの原子レベルの解析が規模的に困難であり、かつ連続体力学の基礎式が成立しない場合もある。一方で固体の表面粗さがこの領域であるため、次のような現象の解明がなされていない。

#### i) ぬれ現象の解明

物理学辞典 (三訂版) には「ぬれは、固体表面に接触している気体が液体に置き換えられる現象」と定義されている。ぬれやすさはぬれ角で定義され、界面張力の釣り合いで説明される。しかし、ぬれ角を個々の材料の物性値で求めることはできず、実験によるしかない。これは、ぬれを支配するぬれ先端がメゾ領域となっており、液体の蒸発・凝縮の様子、薄膜化した液体の存在影響など解明できていない現象がこれを妨げているためであると考えられる。

#### ii) 沸騰現象

沸騰は工業的に極めて重要な現象であり、多大な研究がなされ、沸騰を促進する技術開発も行われている。しかし、この現象もそのメカニズムが十分に解析されていないといわれており、完全な数値解析もできていない。これも気泡の発生がメゾ領域であり、気泡成長後の気体・液体・固体の界面が必然的にメゾ領域として残るためであると考えられる。

#### iii) 界面現象一般

表面粗さがメゾ領域を含むことがさまざまな界面現象のメカニズム解明を困難にしていると考えられる。そもそも真実接触面積は真実なのか。

- ・接着：接着に関与しているのがメゾ領域の厚さであり、さらに表面粗さが絡んでくる。
- ・摩擦：摩擦に関与しているのがメゾ領域の厚さであり、さらに表面粗さが絡んでくる。
- ・摩耗：摩耗に関与しているのがメゾ領域の厚さであり、さらに表面粗さが絡んでくる。
- ・接触熱抵抗：接触面の状況は想像できるが、熱抵抗を推定するのは難しい。

### (5) デポジットの解明

材料表面に形成されるデポジットは、空調用伝熱間表面の付着汚れによる伝熱性能低下、自動車

エンジンの燃焼室表面での炭素系デポジットによる PM（粒子状物質）の生成，各種塗布工程における濡れ広がり不均一性など，工業製品において各種問題となっている．しかしながらデポジットの生成要因，およびそれが引き起こす各種物理現象が十分に解明されておらず，製品性能向上において現象解明に基づく製品開発が求められている．

## 2.3 流体现象

### (6) 微細凹凸表面による流体抵抗の低減

調査テーマに選定，3. で述べる．

### (7) 高圧下の二相流挙動

調査テーマに選定，3. で述べる．

### (8) シールメカニズムの解明

調査テーマに選定，3. で述べる．

## 2.4 計測・デバイス

### (9) 3次元温度計測

調査テーマに選定，3. で述べる．

### (10) メタマテリアルを用いた輻射・音の制御デバイス

調査テーマに選定，3. で述べる．

### (11) 自励振動式ヒートパイプ

自励振動式ヒートパイプは1本の蛇行した流路に作動流体を封入し，高温部と低温部の圧力差によって生じた自励振動によって熱を輸送することができるが，その作動原理は十分には解明されていない<sup>1)</sup>．重力の方向に逆らって熱を輸送できるので，メカニズムが解明できれば，信頼性が向上し，工業的な活用が広がると考えられる．

#### 参考文献

- 1) 杉本勝美，自励振動式ヒートパイプの可視化，伝熱，Vol. 51, No. 217, (2012) 表紙裏．

## 3. 調査テーマ

前章の提案テーマを本会内にて審議し，以下の7テーマについて，さらに調査を深めることとした．

### 3.1 マルチフィジックス連成数値最適化技術（担当：東芝，日立）

#### (1) 提案理由

各種製品やそれらを統合した製造プロセスのデジタルツイン化が進行しており，これに伴いデジタル空間での製品性能や製造プロセスの最適化が期待されている．この際に課題となるのは，①各種製品内で生じるマルチフィジックス（構造，流体，電磁場，伝熱，電気など）のモデル化とデータベース化，②支配時間スケールの異なるマルチフィジックスの連成解析，③マルチフィジックス連成解析への数理・統計的な最適化技術の活用，と考えられる．近年は市販ソフトの普及により，上記①②③がある程度克服され，設計や開発の現場へ適用が広く行われているが，実測と解析の合

わせ込み、解析の安定化/高速化、解析結果の検証など多くの課題が残されている。また、複数の物理現象を扱う最適化技術はアイデア段階にあり<sup>1)</sup>、構造、流体、電磁場、伝熱、電気などの全てを扱うことが可能な最適化を実現する新規手法の研究が望まれる。

## (2) 調査結果

複数の現象を組み合わせた連成解析は従来から広く研究されており、いくつかの現象を支配する方程式を1つの連立方程式に纏めた強連成解析と、それぞれの現象の方程式を繰返し解く弱連成解析に大きく分けることができる。強連成解析に関しては、市販ソフトを利用しても、概ね期待に沿う結果を得ることができる。一方、構造、流体、電磁場、伝熱、電気などの全てを連成させる解析に関しては、弱連成解析の適用が現実的と考えられる。このとき、構造、流体、電磁場、伝熱、電気などの全てを連成するためには、支配時間スケールの違いを考慮すると、各種3Dの現象を1Dに落とし込んだ、1Dモデルシミュレーションが有効と考えられる<sup>2)</sup>が、3Dから1Dへの落とし込み(モデルリダクション)にノウハウと多くの時間を有するという問題がある。また上記のマルチフィジックス連成解析技術とは別に、(1)の③で述べた最適化技術の進展が近年では見られる。例としては、多数の目的関数を有する最適化問題を扱うための新たな指標の開発<sup>3)</sup>や、Adjoint法による最適化が可能な汎用オープンソース流体解析ソルバーの開発<sup>4)</sup>等が進んでいる。

国内の研究としては、東京大学大学院 工学系研究科 システム創生学専攻 吉村忍教授のADVENTUREプロジェクトが知られる。各力学現象を扱うソフトを統合した連成解析システムが実現されている<sup>5)</sup>。このような連成解析に加え更に最適化計算が実施できることが理想である。名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 構造・材料工学 加藤準治教授は、土木構造物の設計に構造トポロジー最適化を導入し、近年ではマクロ構造とマイクロ構造を適切に最適化する手法などを研究している<sup>6)</sup>。また、京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 西脇眞二教授は、SIPでコンピューター支援解析・設計・製造技術と構造トポロジー最適化を有機的に統合した新しい構想設計法を開発している<sup>7)</sup>。

## (3) 実行テーマ化への課題

上記の(1)で示したように、マルチフィジックス連成数値最適化技術の構築には①②③の課題がある。この中で特に課題となるのは、①で示した3D解析結果をモデル化/データベース化するための技術となる。近年はAIの活用技術が進んできており、マルチフィジックス現象の支配因子を抽出して、モデル化/データベース化につなげることが期待されている。また、③の最適化技術で示したように、新たな最適化技術の開発にも強く期待されている。これらの課題を研究テーマとして複数の研究者に提示することで、研究活動の活発化と企業競争力強化につながると考えられる。

## 参考文献

- 1) <http://www.pref.kyoto.jp/sangyo-sien/specialist/nishiwakisinji.html>
- 2) Oh, U., Kusano, K., Nonaka, N. and Yamakawa, H., Multi-Fidelity Total Integrated Simulation Technology for High Pressure Pump with Squeeze Film Effect, SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2017-01-1325, (2017), 507-513.
- 3) Bader, J. and Zitzler, E., HypE: An algorithm for fast hypervolume-based many-objective optimization. Evolutionary computation, Vol. 19, No.1, (2011), 45-76.

- 4) Palacios, F., Alonso, J., Duraisamy, K., Colonno, M., Hicken, J., Aranake, A., and Lukaczyk, T. (2013, January). Stanford University Unstructured (SU 2): an open-source integrated computational environment for multi-physics simulation and design. In 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (p. 287).
- 5) <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/theme/multi/innovative/index.html>
- 6) Kato, J., Yachi, D., Terada, K. and Kyoya, T., Micro-macro concurrent topology optimization for nonlinear solids with a decoupling multi-scale analysis, International Journal of Numerical Methods for Engineering, (2017), 1-34.
- 7) <http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/SIP/>

## 3.2 接触熱抵抗の解明（担当：コマツ，日立）

### (1) 提案理由

接触熱抵抗は、電子機器等の冷却に関して全体の熱抵抗の中に無視できない割合を占めるため、古くから研究されてきた。これまでに、接触面の表面粗さ・接触圧力が接触熱抵抗に与える影響や、接触面にフィラーを挿入した場合の接触熱抵抗の低減効果に関する研究などが行われている<sup>4)</sup>。これらの研究によって、接触面が滑らかであるほど、また接触圧力が高いほど接触熱抵抗は低くなること、薄くて柔らかく熱伝導率の高い材料を接触面に挟むと接触熱抵抗が低減されることなど、定性的な性質は明らかになっている。そこで、表面粗さ、接触圧力、硬さなどから接触熱抵抗を推定するための実験式が数多く提案されており、また、部材間の真実接触部を介した熱伝導と接触面間の空隙に介在するガス等の物質を通した伝熱をそれぞれ考慮して合計するなどのモデルによって理論解析も行われてきた。しかし、接触熱抵抗の現象を支配する因子は非常に多く、定量化が比較的難しい、表面の酸化・汚染状態等の影響因子も含まれるため、実際の接触状態を正確に把握することは困難である。したがって、接触熱抵抗の推定式が実際の設計に使用できる場面は多くない。2物体が接する界面では、接触面のうねり、表面粗さ、押し付け圧力、物体の硬さなどの因子が複雑に絡み合うため、界面を観察し、モデル化を行う以外に、接触熱抵抗を予想することは困難である。接触面をメゾスケールで扱うことで、上記因子に加え、接触面の経時変化（酸化状態等）も考慮に入れた、接触熱抵抗の解明が求められる。そこで、接触熱抵抗を正確に把握するための測定技術を含め、接触熱抵抗の解明を目指す。

### (2) 調査結果

接触熱抵抗の測定方法は大きく分けると定常法と非定常法に分類できる。従来の定常法による測定では部材の温度分布が定常状態になるまでの待ち時間が長いことがデメリットである。近年、接触面の表面の微小領域の熱物性の定常的な測定法として、Micro-thermometry や Raman 法などの手法が発達してきた。Micro-thermometry ではカーボンナノチューブなどの微小な物体をプローブとして、接触面の微小領域の物性測定を行うことができる。また、Raman 散乱を用いた光学的な測定法によれば、接触面の熱物性を高解像度で測定することができる<sup>7)</sup>。

一方、非定常法としては、赤外温度計法、レーザーフラッシュ法、超音響法、サーモリフレクタンス法などが開発されている。赤外温度計法は、過渡的な温度分布を赤外線温度計で測定し、非定常熱伝導の理論解と比較することによって接触部の熱抵抗を推算する手法である。レーザーフラッ

シュでは測定試料の一方の端面をレーザーで瞬時加熱し、接触面を挟んだ逆側の端面の温度上昇を赤外線温度計で測定して、温度上昇の熱時定数から接触熱抵抗を求める。光音響法では、測定試料の表面に強度が変化する光を照射し、周期的な温度変化を生じさせることによって、試料表面の空気が周期的に膨張して発生する音を検出する。光の強度変調に対する音の位相遅れを解析することによって試料の熱物性を知ることができる。サーモリフレクタンス法は温度によって試料の光の反射率が変化することを利用した測定法である。試料を光で周期加熱することにより、やはり光の強度変調と反射率変動の位相差を検出する。

実用的な接触熱抵抗の研究は概略、改善策、測定方法関連、面圧や表面粗さ等のパラメータの影響に分類されている。

改善策の事例として、半導体パワーデバイス内部で使われているモリブデンと銅の接触熱抵抗改善のために、メッキ、箔挿入、表面スパッタを評価した研究<sup>8)</sup>が報告されている。

測定方法関連の事例としては、宇宙機への適応が期待されている炭素繊維強化プラスチックの熱伝導率測定における接触抵抗の影響<sup>9)</sup>が報告されている。また、名古屋大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 熱制御工学研究グループ 長野方星教授は、先端材料の熱物性解明のための先進熱物性計測技術の開発を実施している。

面圧や表面硬さなどのパラメータの影響の事例については、面圧・表面粗さ・硬度・熱伝導率を用いた実験式の提案<sup>10)</sup>、商用ソフトで接触熱抵抗モデル(パラメータで入力)に経験値が使われている例<sup>11)</sup>、最近の事例として、半導体パワーモジュールにおける金属表面状態がエポキシ樹脂—金属界面特性に与える影響<sup>12)</sup>などが報告されている。

上記以外の研究として有効と考えられるものは、ひたすらデータベースを充実させる方向である。地道な研究であるが、工業的には「使える」ものになるのではないかと思われる。

上記のように、近年、接触面近傍の微小領域の熱物性を計測する技術が発達してきており、接触熱抵抗のメカニズムに向けて、手法が整ってきたと言える。今後、接触面をメゾスケールで扱うことで、接触面の経時変化(酸化状態等)も考慮に入れた接触熱抵抗現象の解明が待たれる。

### (3) 実行テーマ化への課題

接触熱抵抗に及ぼす様々なパラメータの影響や接触熱抵抗を低減する手法は、本プロジェクトのテーマとしては相応しくないとと思われる。2.2(4)で述べたように、接触のメゾ領域における局所的な熱の移動のメカニズム解明などが課題となる。

#### 参考文献

- 1) 橘藤雄, 接触面の熱抵抗に関する研究, 日本機械学会誌, Vol.55, No.397, (1947), 102-107.
- 2) 佐野川好母, 接触熱抵抗, 日本機械学会誌, Vol.64, No.505, (1961), 240-250.
- 3) 築添正, 金属接触面の伝熱機構(第1報), 日本機械学会論文集(第2部), Vol. 37, No.299, (1971), 1361-1368.
- 4) 柳和久, 不規則微小突起をもつ機械加工面の接触伝熱機構(第1報), 精密機械, Vol.47, No.2, (1981), 39-44.
- 5) 真実接触面積を考慮した結合部接触熱抵抗の定量的測定法, 精密工学会誌, Vol.71, No.8, (2005), 1026-1030.
- 6) 芦分範行, 発熱素子冷却用のマルチフィン形熱伝導体に関する研究(第2報), 日本機械学会論

文集 B 編, Vol.58, No.547, (1992), 871-878.

- 7) Yaoqi Xian, Experimental characterization methods for thermal contact resistance: A review, Applied Thermal Engineering, Vol.130, (2018), 1530-1548.
- 8) 大曾根靖夫, 久保貴, 中里典生, 固体接触面における接触熱コンダクタンスの金属薄膜による改善, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.71, No.710, (2005-10), 2500-2506.
- 9) 辻輝, 長野方星, ロックインサーモグラフィ式周期加熱法による炭素系複合材料の面内方向熱拡散率測定(界面熱抵抗の影響と熱拡散モデルによる検証), 日本機械学会論文集 Vol.83, No.847, (2017), 16-00296.
- 10) 福岡他, 異材界面における接触熱抵抗の評価, 日本機械学会 A, Vol76 763 号 2010, No.09-0569
- 11) [http://help.solidworks.com/2012/japanese/solidworks/cworks/Thermal\\_Contact\\_Resistance.htm](http://help.solidworks.com/2012/japanese/solidworks/cworks/Thermal_Contact_Resistance.htm)
- 12) 金属表面状態がエポキシ樹脂—金属界面特性に与える影響, 日本金属学会誌 第 81 卷 第 3 号 (2017) 109-114

### 3.3 微細凹凸表面による流体抵抗の低減 (担当: IHI, コマツ, 三菱重工)

#### (1) 提案理由

各種回転機器や輸送機器, プラント配管や屋外に設置されている橋梁やクレーンなどの構造物は, 内部や外部が流れにさらされている. 流れのはく離は圧力損失の増大・振動などの問題を引き起こし, 固体・流体間の摩擦抵抗は回転機械などの動力の損失につながる.

このため, はく離抑制及び摩擦抵抗低減のための流れの制御技術の開発が各機関で実施されている. 摩擦抵抗低減技術としては自動車・船舶・航空機・スポーツ用品の各分野でリブレットの適用がなされており, 乱流構造・乱流現象の解明とともに技術が進歩している. 流れの制御については, はく離の抑制, 摩擦力の低減, 2 次流れの制御等が挙げられる.

また, 流体抵抗低減を実現するメカニズムが解明されると, 航空機, 自動車や船舶の燃費改善に大きなインパクトがあり, 建設機械などでも油圧機器の油の流路の抵抗を低減できるため, 同様に燃費改善が期待できる. このように, 流体抵抗低減メカニズムの解明は, 機械全般に渡る性能向上のシーズ技術になり, 非競争領域の研究テーマとしてふさわしいと考えられる.

#### (2) 調査結果

摩擦抵抗の低減のための技術としては, 受動・能動制御がありいずれも境界層内の縦渦の運動を抑制することを意図している<sup>1-3)</sup>. 受動制御の中には生物からヒントを得たリブレット(サメ肌)や低燃費型防汚塗料があり, 新たな摩擦抵抗低減のためのアイデアを得るために鳥, 魚, 昆虫の動きの解析(バイオミメティクス)が行われている<sup>4)</sup>. 以下に, 摩擦抵抗低減技術の内, 表面の凹凸を利用した受動制御の手法について述べる.

もっとも成功している境界層制御手法が, リブレット(流れ方向に設けられた微細な溝)を用いたものであり Speedo 社の LZR Racer をはじめとするスポーツウェア(2010 年より使用禁止)やテニスラケットなどに適用されている. また, エアバス社は 3M 社が開発したリブレット・フィルムを A320 に適用し, 飛行試験で燃費改善を確認した<sup>5)</sup>. 課題としては, レイノルズ数が大きくなるほどリブレットを小さくする必要があるが, 微小な溝を対象物にどう付加するか, また汚れや摩耗に対する対応などが挙げられる.

もう一つの例として、粗さを有する疎水表面による抵抗低減技術がある。この手法は、物体表面に粗さを設け、さらに疎水性素材をコーティングした物体を流体中に沈めると、表面の生地の中に空気がたまる部分ができ、この効果によって気液境界面ですべりが起き、表面摩擦を低減するものである。また、疎水材料が塗布された面と液体間のすべりの発生によっても表面摩擦を低減することができる<sup>6)</sup>。

微細凹凸表面による流体抵抗低減は、流体と表面界面で発生するすべり抵抗低減によると考えられている。界面すべりには、微細凹凸表面に気泡をかみこむことで発現する超撥水性による気液界面すべりモデル（層流領域において有効）と、超親水性による液液界面すべりモデル（乱流領域において有効）が提案されているが、今回は超撥水性による気液界面すべりモデルに基づいた流体抵抗に関して調査を行った。

撥水のメカニズムに関しては理論・評価方法ともにおおよそ確立されている。超撥水性（接触角 $150^\circ$ 以上）を発現するには界面の化学的性質よりも表面構造がより重要である。撥水性は界面物質の化学的性質（表面自由エネルギー）と表面構造の二点により決定される。表面自由エネルギーに関しては、理論・評価方法とも確立されている<sup>7)</sup>。また、表面構造と撥水性の関係もおおよそ明らかにされており、Young の式、Wenzel の式、Cassie の式などに理論化されている<sup>8)</sup>。化学的性質のみによる撥水性は接触角 $115^\circ$ が計算上限界であり、超撥水性（接触角 $150^\circ$ 以上）を発現するには界面の化学的性質よりも表面構造がより重要である<sup>8,9)</sup>。

微小な凹凸を持ち、強力に水をはじく超撥水性の表面上では、流動抵抗が低減すると言われている。撥水（撥油）性による流体抵抗の低減に着目した研究に関しては、船底や配管抵抗の低減に利用を試みた研究が多く、機械部品など耐久性が求められる箇所への適用を目指した研究は少ない。撥水性・耐久性の両立が今後の課題と考えられる。90年代後半～2000年代前半に船底に超撥水加工を施しマイクロバブルを供給することにより船の流体抵抗低減を目指す研究が行われており<sup>10,11)</sup>、2010年に特許取得が確認されている<sup>12)</sup>。船底以外には配管抵抗の低減に利用を試みた特許も存在していた<sup>13,14)</sup>が、機械部品など耐久性が求められる箇所への適用を目指した研究はあまり見当たらず、今後の課題と考えられる。

超撥水構造としての微細凹凸構造の付与方法として、様々な化学・物理的手法が開発されている。高耐久性実現へ向け、新陳代謝機能の付与や金属を陽極酸化することにより超撥水化する研究が行われている。前述のように、超撥水性を得るためにどのような化学的性質・表面構造を目指すべきかの指針はおおよそ解明されていると考えられ、現在は表面構造の付与方法が盛んに開発されている。表面構造改質の手法として、以下の方法が報告されている<sup>8)</sup>。

- ・ケテンダイマーのようなワックスの表面凝固
- ・シリカ粒子、PTFE粒子、ガラスビーズなどのフィラーや昇華性材料のコーティング剤への添加
- ・切削、研磨やエッチング処理、印刷やモールディングといった物理的処理
- ・フッ素系粒子共存下でのメッキ
- ・表面プラズマ重合、CVD
- ・自己組織化の利用

国内の研究者としては、同志社大学 理工学部 エネルギー機械工学科 平山朋子教授が「撥油コーティングによる界面すべりの実証とそのメカニズムの提案」というテーマで、数値計算・摺動試



験機を用いて狭小隙間における表面エネルギーと流体せん断挙動の関係を調査している<sup>15)</sup>。東京工業大学 物質理工学院 中島章教授は、新陳代謝機能を付与した超撥油表面の作製・応用に関する研究を行った<sup>16)</sup>。また、北海道大学 工学研究院 物質化学専攻 幅崎浩樹教授は、電気化学を用いて金属表面にナノ構造を付与し、超撥水性を持たせる研究を行った<sup>17)</sup>。

金沢大学 理工学部 機械工学類 川端教授、長谷川助教授は、実験的なアプローチで超撥水の課題に取り組んでおり、表面の微細凹凸構造の異なる試験面をいくつか作成し、実験により流動抵抗低減効果を確認すると共に、メカニズムに関する考察を行っている<sup>18)</sup>。

### (3) 実行テーマ化への課題

微細凹凸表面（撥水メカニズム）に基づく流体抵抗低減メカニズムに関しては解明されてきているが、機械要素に適用するに当たっての表面改質方法や、耐久性確保に関する研究が現在求められている。研究を推進頂けそうな研究者はアカデミアに存在しており、研究推進者の確保は可能と考えられる。ただし、実行テーマ化にあたっては、競争領域の研究に重なってくるため、具体的なテーマの設定が課題である。

### 参考文献

- 1) Zhou Yu, Bai HongLei, Recent Advance in Active Control of Turbulent Boundary Layers, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, Vol.57, No.7, 2011.7
- 2) 深淵康二, 流れの制御手法分類, 日本機械学会誌, Vol.115, No.1127, 2012
- 3) 池田一壽, 摩擦抵抗低減を目指した乱流制御の研究動向, 科学技術動向, 2006.9
- 4) 島田守, 船底防汚塗料による船舶のGHG削減技術-超低燃費型船底防汚塗料の研究開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第45巻, 第6号, 2010
- 5) Airbus to Fly Riblet-Coverd A320, Flight International, 5, August 1989, pp.18
- 6) 金子 和史, 長谷川 雅人, 松本 壮平, 尾崎 浩一, 成合 英樹, 牧 博司, 矢部 彰, 超微細凹凸面による流動抵抗低減に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.66, No.644, 2000, pp.1085-1090
- 7) [http://www.face-kyowa.co.jp/science/theory/what\\_surface\\_free\\_energy/](http://www.face-kyowa.co.jp/science/theory/what_surface_free_energy/)
- 8) 川瀬徳三, 超撥水表面, 繊維と工業, Vol.65 No.6(2009), p200-207
- 9) 辻井薫, 表面, 35, 629(1997)省エネ・環境に貢献するシール研究, トライボロジスト 第56巻 第2号 (2011)
- 10) 徳永ら, 造船学会 183, 1998
- 11) 児玉良明, マイクロバブルによる船舶の摩擦低減抵抗, ながれ 20(2001), p278-284
- 12) 三菱重工業(株), JP2010120612A
- 13) (株)日立製作所, JPH10318215A
- 14) (株)東芝, 特開 2009-247949
- 15) <https://www1.doshisha.ac.jp/~tribolab/japanese/research/tribology.html>
- 16) 中島章, 撥水性固体表面の科学と技術, 表面技術, Vol.60, No. 1, (2009), 2-8.
- 17) <https://labs.eng.hokudai.ac.jp/office/elo/jp/archives/labo/4719/>
- 18) <http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/fluid/> (金沢大学 理工学部 機械工学類 流体科学研究室)

### 3.4 高圧下の二相流挙動（担当：東芝，日立）

#### (1) 提案理由

キャビテーションは水車，ポンプ等の回転機械，自動車エンジンで使われる燃料ポンプ，また各種液体の高速流れを制御するバルブ装置に見られる流体现象である．問題となる現象の一つにキャビテーションエロージョンがある．これはキャビテーションによって発生した気泡が，高い圧力場の中にさらされることで縮小崩壊し，その際，非常に高い衝撃エネルギーが発生して，壁面が叩かれ壊食を起こす現象である．羽根の損壊や，壁面壊食によってシール性が保てなくなり，機械の様々な機能不具合を発生させる．キャビテーションは液体圧力が液体の飽和蒸気圧力以下になると発生するが，その発生量と圧力条件の関係には不明な点が多い．

#### (2) 調査結果

現在，商用の市販ソフトを用いた流体解析で，キャビテーションの発生量を予測することは可能であるが，定量的な予測精度には課題がある．液体中に残存している溶存空気や，その他の微粒子が核となってキャビテーションが発生するという仮説もあり，その生成メカニズムを流体解析で再現すること，更に，溶存空気や微粒子が液中に滞留する量や分布を評価することが困難なためである．またキャビテーション気泡が崩壊する際に発生する衝撃エネルギーを予測することも非常に困難である．現在の商用市販ソフトには，キャビテーションの発生量を予測する機能はあるが，衝撃力を予測する機能は無い．数値解析でキャビテーション衝撃力を予測するためには，液体流れの支配方程式である Navier-Stokes 方程式と気泡の支配方程式である Rayleigh-Plesset 式を同時に解く必要があるが，この両方程式は時間スケールがかけ離れているため，実用的な解析時間で安定に解くことが困難となっている．何らかの物理的なモデル化，または実験的な知見を反映させたモデル化を用いて，Navier-Stokes 方程式と Rayleigh-Plesset 式を連携させて解く数値解析手法の構築が必要であると考えられる．キャビテーションエロージョンは実験による定量評価，可視化評価が非常に困難な流体现象である．以上に説明した概要の観点で，数値解析のブレークスルーが図られ，設計者も容易に予測が可能な流体解析手法が構築されると，様々な製品の開発に大きな貢献が得られると考えられる．

気泡の計測に関しては，冷媒が融解した冷凍機油が隙間を通り，冷媒が解離してできた二相流に関する研究が報告されている<sup>1)</sup>．単相流としてモデル化した流れの理論計算とモデル流路での実験結果を比較し，冷凍機油からの冷媒蒸気が解離するにつれ生じる流路内の圧力や温度の低下や，粘度を考慮した流量についての考察を示した．また，圧縮機中の発泡状態を実験で示し，混合物から排出ブローを分離するカバーの消泡効果が大きいことが報告されている<sup>2)</sup>．

気泡の計測に関する国内の研究者としては，静岡大学 工学部 機械工学科 真田俊之 准教授は，気泡数個の挙動に関する研究を行っており，静止液体中を上昇する 2 個の気泡の挙動の研究では界面活性剤の濃度が気泡同士の合体や接近角度に影響することを実験的に示した<sup>3)</sup>．また，北海道大学 工学研究院 エネルギー環境システム部門 村井祐一 教授は，マイクロバブルを中心とした混相流の研究を行っており，管内のマイクロバルブの研究では希薄なマイクロバルブの混入により局所乱流塊（乱流パフ）の形成が促進されることを LDV での評価で示した<sup>4)</sup>．

#### (3) 実行テーマ化への課題

提案されている数値解析手法の精度評価，高圧の特殊性に着目した新しいメカニズムの解明など

が課題となると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 柳沢正, 清水孝, 冷媒の溶解した冷凍機油の流動特性の研究, 機論 B, 52, (1986), p2581-2587
- 2) 柳沢正, 清水孝, 福田充宏, 水野善仁, 冷媒圧縮機における冷凍機油の発泡対策, 日本冷凍協会論文集(1991)
- 3) 楠野 宏明, 真田 俊之, "静止液体中を上昇する 2 気泡の相互作用に及ぼす界面活性剤の影響", 混相流, 29(5), (2015), p.515-522.
- 4) 中村 幸太郎, 田坂 裕司, 村井 祐一, "管内流れの局所乱流塊形成におけるマイクロバブルの影響", 混相流, 31(1), (2017), p. 20-28.

### 3.5 シールメカニズムの解明 (担当: コマツ, 日立)

#### (1) 提案理由

シールは, エンジン, トランスミッション, 油圧機器などの機械コンポーネントの潤滑材の封止や外部からのダスト, 水の侵入を防止して機械コンポーネントの性能, 耐久性を確保するために必要な, 最も重要なキーパーツの一つである. 回転軸などに対する軸封装置として, オイルシール (接触式の運動シール) が広く用いられているが, その摺動メカニズムはまだ明確ではない. 摺動面の表面粗さと相対運動に起因して発生するポンピング作用により, シール面に液膜が形成されながら密封が達成されるという説が有力であるが, シール寿命を含めて定量予測するには到っていない. 密封装置は潤滑システムにおいて比較的脆弱であり, 潤滑剤の漏洩が製品の品質に影響を与えることが多い現状を考えると, 物理現象としての摺動メカニズムを解明し, 設計技術を高度化することは, 製品競争力の向上に資すると考えられる. シールの密封メカニズムが十分に解明されれば, 機械コンポーネントの小型化, 高速度化や長寿命化に対応するシールが実現できる. さらに, このようなシールが安価に入手できるようになれば, 自動車・重工・電気・建機等のメーカーが使うことができ, 機械性能向上への貢献は大きいと考える.

#### (2) 調査結果

オイルシールとフローティングシールについて調査した. オイルシールの封止メカニズムについては, 基本的には 20 世紀後半の研究によりほぼ解明されていることが調査の結果判明した<sup>2,3)</sup>. オイルシールの封止メカニズムにおいて, 軸回転中のシール摺動面の直接観察技術やポンプ量の測定を使用条件下で観察<sup>4)</sup> することで, シール摺動面の封止効果を評価することが可能である.

適正な運用状態にあるオイルシールの摺動面には油膜が形成されており, これが長寿命と軸封の両立を可能としていることは古くより知られている. この場合には流体潤滑が成立しているとみなすことができ, 摺動面における摩擦係数は, 流体粘度と摺動速度の積をシール緊迫力で除した値(軸受特性数)と, ゴム材料に依存する係数で表すことができる<sup>5)</sup>.

また上記の状態において, オイルシールには機内側へ微量の流体を吸入する特性があり, この流量がシールの封止性能を決めているとされる. この特性は, シール摺動面における軸方向の非対称な面圧分布, および表面粗さ形状の分布によるとされており, 実験検証もなされている<sup>6)</sup>.

一方、上記軸封機構はシールのゴム材料特性や摺動面の表面あらさ分布などが影響因子となっており、新規の軸封性能設計のためには実験が必要であること、軸封性能のロバスト化などは課題として残っている。また、シール材料の熱化学的劣化に関しては詳細なデータが採取されているが、摺動面に形成される油膜の状態と、これに基づく摩耗寿命の定量化などは、サブ $\mu\text{m}$ オーダのコンタミの影響を受ける<sup>7)</sup>ため、定量的な設計基準を得るには至っていないようである。

フローティングシールは、クローラ系の建設機械に主に使用され、内部の潤滑油漏洩防止、外部からの異物侵入防止という役割が求められる。フローティングシールについて調査を実施したが、その油封止メカニズムについて言及している文献は確認できなかった。面同士を摺動させて油を封止するという点で同一の思想であるメカニカルシールについては、メカニズム研究の最盛期は1970～1980年代であり、当時のメカニズムについての考え方は、流体膜の連続/不連続で大きく二分される。

流体膜の連続：流体膜は連続しているが、漏れに対して反対方向の流れが存在すると言う説。密封面メニスカス部の表面張力による油封止とする表面張力説<sup>8)</sup>と、密封面に存在する加工溝によって誘起される逆ねじ作用や、キャビテーション・エアレーションの発生に起因する半径方向圧力分布の非対称性によって生じる半径方向の流れによる油封止とするポンピング作用説<sup>9)</sup>がある。

流体膜の不連続<sup>10)</sup>：流体膜が何らかの障害物によって分断されると言う説。密封面の直接接触による油封止とする直接接触説と、密封面に形成される吸着膜による油封止とする境界潤滑説がある。

1990年代以降は、アプリケーション・シーズ検討が主であり、近年では、徳永雄一郎氏(イーグル工業)により、表面テクスチャを用いたアプローチがなされている。低摩擦係数・ゼロリークのシールの実現を目的とし、シール密封面に表面テクスチャを形成することで、シール密封面の外周側に流体潤滑機構を、内周側に密封機構を持つシール形状を提案した。本シールについて、検証(摺動面可視化・トルク測定)を行い、実用性を確認した。<sup>11)</sup>

関係技術における研究者を以下に示す。

九州大学 工学研究院 機械工学部門 設計・生体システム 杉村丈一教授は、潤滑摩耗におけるなじみ過程、表面トポグラフィのモデリング、表面粗さによる油膜の形成と破断の機構、非定常弾性流体潤滑、複数突起による表面の変形と破壊の機構などを観点に、マイクロテクスチャによる潤滑膜形成機構、オイルシールの気体移動機構に関する研究、弾性流体潤滑下での油膜厚さのその場観察、摩擦面の焼付き現象のその場観察など、オイルシールやメカニカルシールのシールメカニズム解明に繋がる基盤的なトライボロジー研究を実施している。

同志社大学 理工学部 エネルギー機械工学科 平山朋子教授は、近未来のロケット推進剤の一つエタノールを使用した、エタノール用ターボポンプのシールシステムの設計および評価を実施している。フローティングリングシールおよびリップシールのそれぞれの特性を評価することができる試験機を用意し、その流体力学特性、摺動特性、漏れ特性等の評価を行っており、特に、沸点が低く気化しやすいといったエタノール独自の特性に着目し、最適なシールシステムの研究を行っている。

### (3) 実行テーマ化への課題

上記のように、オイルシールの軸封メカニズムに関しては、既に詳細な検討が行なわれており、その物理現象は定量評価可能な段階に至っている。一方、摩耗に基づくシール寿命など、想定され

た範囲を逸脱する使用条件においては、未解明な領域が残っている。

COCN プロジェクトの協調領域技術テーマとしては、フローティングシールのメカニズム解明を取り上げるのが適切であると考えられる。実行テーマ化にあたっては、アカデミアで研究を実行していただける研究者もおり、大きな課題はないと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 兼田, シールの密封理論, トライボロジスト, 43 巻, 2 号(1998), p125-130.
- 2) 省エネ・環境に貢献するシール研究, トライボロジスト 第 56 巻 第 2 号 (2011)
- 3) オイルシールの密封機構, 日本ゴム協会誌 62 巻(1989)2 号 p.74-73
- 4) 蛍光法による圧力シールの密閉性能の考察, KOYO Engineering Journal No.157(2000)
- 5) Hirano and Isiwata : IME Proc., 180-3B(1965-1966)138.
- 6) Nakamura : Tribology International, 20, 2(1987)90.
- 7) NOK 技術資料 : 例えば <http://www.nok.co.jp/product/oilseal/pdf/ai.pdf>
- 8) A. Brkich: Prod. Eng., 21, 4 (1950) 85.
- 9) 兼田禎宏 : 潤滑 第 28 巻 第 3 号 (1983) 151.
- 10) E.Mayer: Mechanical Seals (1977) Newnes-Butterworths.
- 11) 徳永雄一郎ら : トライボロジスト 第 60 巻 第 5 号 (2015) 332~341.

### 3.6 3次元温度計測 (担当 : 東芝, 日立, 三菱重工)

#### (1) 提案理由

温度計測で工業的に最も用いられているのは熱電対である。これは 1821 年にトーマス・ゼーベックによって発見された原理に基づき、長年用いられている。これは原理的に 1 点の温度しか測れない。これに対し、物体から放射される赤外線を計測しこれを温度分布として表示するサーモグラフィは、2次元の温度分布がわかり、最近では工業的にも多用されている。

さらに進んで、空間や流体内部の 3次元の温度分布が瞬時に計測できれば、多方面で応用できると考えられる。

#### (2) 調査結果

筑波大水谷孝一助教授 (当時) が音速から空間平均温度を求める研究を実施している<sup>1)</sup>。多数の超音波プローブを用い測定した温度を熱電対温度と比較し、最大温度差 0.85°Cを得た。この技術は「音響的手法による空間温度分布計測システム」として、共同研究をした竹中工務店からも 2001 年に発表されている<sup>2)</sup>。

流体の温度分布を非接触で計測する技術として、山梨大学 工学部 機械工学科 船谷准教授が LIV (Laser Induced Fluorescence) の研究を実施している<sup>3)</sup>。LIF は、温度に依存して明るさが変わる蛍光染料を流体中に混入し、レーザー光の照射により輝度分布を画像として得ることで空間の温度場を計測する手法である。当該研究室の資料によれば、従来は液体の計測にしかできなかったが、グリコール系溶剤を用いて蛍光染料を溶解・噴霧することで、気体中での温度計測を可能にした。

多方面からの放射光量計測と ML-EM 法による画像再構成を用いることにより、三次元的に温度を計測する手法が構築され、アークプラズマの温度計測に利用されている<sup>4)</sup>。

感温液晶による温度場の可視化と画像処理によって、流体内の 3次元温度分布を計測する方法が

開発され、乱流熱対流研究に適用された<sup>5)</sup>。

### (3) 実行テーマ化への課題

多くの3次元温度計測の手法が報告されている。計測のメカニズムは明解であるが、熱電対やサーモグラフィのような汎用性はない。これらの計測技術に合致した技術課題の提示が必要である。

参考文献

- 1) K. Kudo, K. Mizutani, T. Akagami and R. Murayama, Temperature distribution in a rectangular space measured by a small number of transducers and reconstructed from reflected sound, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, No. 1, 5B, pp. 3189-3193, (2003) [http://www.iit.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/2004/01/Kudo\\_2003.pdf](http://www.iit.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/2004/01/Kudo_2003.pdf)
- 2) [http://www.takenaka.co.jp/news/pr0101/m0101\\_01.htm](http://www.takenaka.co.jp/news/pr0101/m0101_01.htm) (竹中工務店)
- 3) <https://www.eng.yamanashi.ac.jp/laboratory/sfunatani/>
- 4) 小西貴也, 平田好則, 野村和史, 白井健太郎, TIG アークプラズマの三次元温度計測, 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 4,(2011), 274-279.
- 5) 藤沢延行, Adrian, R. J., 感温液晶を用いた温度場の3次元計測と乱流対流研究への応用, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 63, No. 607, (1997), 818-823.

## 3.7 メタマテリアルを用いた輻射・音の制御デバイス (担当: コマツ, 三菱重工)

### (1) 提案理由

メタマテリアルとは、(光や音の) 波長より細かな構造を人工的に作って物質の光学・音響特性を変えるものである。光(輻射)を例にとると、ガラス越しの太陽光を夏は遮断し冬は透過させることで車内やキャビン内の温度を制御する。このような材料が安価に入手できるようになれば、自動車・住宅・建機等のメーカーが使うことができ、省エネへの貢献は大きいと考える。研究の現状について調査する。

### (2) 調査結果

メタマテリアルという概念は、初めに光学・電磁気分野において提唱され、分割リングと金属ワイヤからなる周期構造が特定の周波数で、負の屈折率を持つことが実証されて以来、高周波化や、電磁クロッキング装置、スーパーレンズ等、電磁メタマテリアルの応用に関する研究が報告されている<sup>1)</sup>。

一方、音響メタマテリアルは、シリコンゴムで被覆した鉛球をエポキシ樹脂内に周期的に配置した構造が負の体積弾性率を持つことを実験的に示されて以来、負の体積弾性率、負の質量密度、負の屈折率、すなわち、負の体積弾性率と負の質量密度を同時に示す構造がいくつか提案されている。これらの音響メタマテリアルの応用に関して、音響クロッキング装置やアコースティックスーパーレンズなどの従来の媒質では実現できなかった新しい機器の実現が期待されている<sup>1)</sup>。

また、輻射の制御も可能になって来ている。分割リング共振器とよばれるプラズモニク共振器を基板に並べて2次元メタマテリアル(メタ表面)を構成し、熱ふく射スペクトルを制御することに成功したとの報告がある。新しい原理の高効率赤外光源、完全吸収体、太陽熱発電、スカイラジエーター等、多くのエネルギー分野に応用が期待できる<sup>2)</sup>。

メタマテリアルは、自然界に存在する媒質が通常持たないような性質を持つように設計された人

工媒質なので、トポロジー最適化手法を用いた、明確な形状表現が可能な誘電体メタマテリアルや音響メタマテリアルの最適設計手法の研究が実施されている<sup>1,3)</sup>。

関係技術における研究者を以下に示す。

①北海道大学大学院 工学院応用物理学専攻 量子物性工学講座量子機能工学研究室<sup>4)</sup> Oliver B. Wright 教授

現在の研究活動は、ナノ構造におけるピコ秒超音波法とプラズモニクス、プラズフォニクス、音響メタマテリアル、超短光パルスによる表面音響波の可視化、超高速の電子・熱拡散の観測、原子間力顕微鏡を用いたナノスケールフォノン検出である。

音響メタマテリアルは、負の密度などの直観的でない特性を示し、例えば音を遮蔽するために使用できる。彼らは、小さなガラスビーズでコーティングされたガラス表面を伝わる、非常に高い周波数の波紋を可視化した<sup>5)</sup>。各ビーズは、小さなばねでガラスに取り付けられているかのように、約1ギガヘルツ(=10<sup>9</sup>サイクル/秒)までの周波数で振動でき、複合構造の音響メタマテリアルとなっている。超高速レーザー技術を使用して、周波数毎に領域外から波がメタマテリアルにどのように透過するのを見た。特定の周波数では、ビーズの振動によって妨害されるため、波がうまく伝わらないことがわかった。彼らは、メタマテリアル内部の波動を解析してその伝搬特性を見出し、その結果を説明するための理論モデルを作った<sup>6)</sup>。

②大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻 先導的融合工学講座 非線形離散動力学研究室<sup>7)</sup> 土井祐介准教授

メタマテリアルは機能性を有する要素を付加した周期構造から構成され、その周期構造のスケールによって電磁波や音波、また弾性波に対して新奇な応答を示すことが知られている。そのような特性の一つに負の有効材料定数があり、この性質を実現するために、波動伝播の役割を担う周期構造である主振動系の各単位構造に、局所振動子と呼ばれる副振動系を取り付けるモデルが提案されている。局所振動子を有するメタマテリアルを基に、主振動系と局所振動系との幾何学的拘束に由来する非線形性を組み込んだ準一次元非線形格子モデルを構築し、さらに非線形の効果によって動力学特性がどのように変化するかを数値計算で検討している<sup>8)</sup>。

③岡山大学大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 鶴田健二教授

音響メタマテリアルと光メタマテリアルについての研究を実施している。音響メタマテリアルでは、弾性率と密度が自在に設計可能な音響メタマテリアルの設計・試作を通して、自然界には存在しない負の屈折現象などの新奇な音波制御技術を実証している。光メタマテリアルでは、誘電率と透磁率が自在に設計可能な光メタマテリアルの設計・試作を通して、自然界には存在しない光機能の創発と新しい光科学の開拓に取り組んでいる<sup>9)</sup>。

④大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 高原 淳一教授

プラズモニクスに基づく新たな光物理現象の探求と、デバイス化へ向けての応用研究を行っている。メタマテリアルによる熱輻射スペクトルの制御についても研究を進めている。可視域から遠赤外域までの幅広い波長域にわたる光のメタマテリアルの研究を行っている<sup>10,11)</sup>。

⑤京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 生産システム工学研究室<sup>12)</sup> 西脇眞二教授

構造最適化、特に形状およびトポロジー最適化を中心に、機械製品の設計法、製造法に関する基礎的および実用的な研究を行っているが、レベルセット法に基づくトポロジー最適化手法を用いて、

明確な形状表現が可能な誘電体メタマテリアルや音響メタマテリアルの最適設計手法を構築した。誘電体メタマテリアルは、金属材料を用いず、誘電体材料のみで負の特性を実現することが提案されており、製造の容易性や等方性、広帯域などの特長をもつことにより、その実現が期待されている。メタマテリアルの性能は、ユニットセルの形状や大きさに大きく左右されるので、数学的および力学的な根拠に基づいた統一的な設計手法は確立をめざしている。

⑥名古屋大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 松本敏郎教授

計算力学における先進的な数値解析法を開発し、工学における様々な問題に適用している。フォノン結晶やフォトニック結晶などの周期構造やメタマテリアルのシンセシス、電磁場のトポロジー最適化などを行っている<sup>13)</sup>。

⑦北海道大学 工学研究院 島田 敏宏 教授

金属炭化物や酸化物などの様々な物性を持つ耐熱性材料に対するプロセス技術を研究するとともに、これら材料の赤外域での基礎物性を測定し、メタマテリアル設計につなげる研究を行っている。中～遠赤外線に対するメタマテリアルの作製により、分子検出用の狭線幅の中赤外発光素子や、輻射熱を制御する材料の作製を目指している<sup>14)</sup>。

⑧新潟大学 工学部 機械システム工学科 櫻井篤 准教授

TPV システム、波長制御ヒーター、宇宙機用熱制御デバイス、レーザー治療など様々な技術には熱ふく射を任意の波長で吸収・放射できるデバイスが期待されている。光を自由自在にコントロールできるメタマテリアルに着目し、電磁波シミュレーションや実験を通してその特性を明らかにする研究を行っている<sup>15)</sup>。

(3) 実行テーマ化への課題

メタマテリアルを用いた輻射・音の制御デバイスに関しては、研究を推進頂けそうな研究者はアカデミアに存在しており、研究推進者の確保は可能と考えられる。ただし、非競争領域の研究テーマとするには、まだ、基礎的な研究段階であるものや、競争領域の研究に重なってくるものなどを考慮した、具体的なテーマの設定が課題である。

参考文献

- 1) 乙守正樹, 陸麗蓉, 山田崇恭, 山本崇史, 泉井一浩, 西脇眞二, レベルセット法による形状表現を用いた音響メタマテリアルのトポロジー最適化, 日本機械学会論文集(C編), 79巻 802号(2013), pp. 2138-2151, No.2013-JCR-0097.
- 2) [http://nelph.parc.osaka-u.ac.jp/research\\_index.html](http://nelph.parc.osaka-u.ac.jp/research_index.html)
- 3) 乙守正樹, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, Jacob ANDKJÆR, Ole SIGMUND, レベルセット法に基づく誘電体メタマテリアルのトポロジー最適化, 日本計算工学会論文集, 2011 巻 p.20110012
- 4) <http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>
- 5) <http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-beads.html>
- 6) P. Otsuka et al., 'Time-domain imaging of gigahertz surface waves on an acoustic metamaterial,' New J. Phys. 20, 013026 (2018)
- 7) <http://www.nld.ams.eng.osaka-u.ac.jp/index.html>
- 8) 東山直樹, Xiao-Wen LEI, 土井祐介, 中谷彰宏, 局所振動子を有するメタマテリアルに基づいた準一次元非線形格子モデルの動力学特性, 日本機械学会講演論文集 No.164-1 ('16.3 関西支



部第 91 期定時総会講演会)

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmekansai/2016.91/0/2016.91\\_243/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmekansai/2016.91/0/2016.91_243/_article/-char/ja/)

- 9) <http://www.ec.okayama-u.ac.jp/~mdd/research.html>
- 10) <http://nelph.parc.osaka-u.ac.jp/people.html>
- 11) [http://nelph.parc.osaka-u.ac.jp/research\\_index.html](http://nelph.parc.osaka-u.ac.jp/research_index.html)
- 12) <http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- 13) <http://www.matsumoto.nuem.nagoya-u.ac.jp/matslab/2017/index-j.html>
- 14) <https://seeds.mcip.hokudai.ac.jp/jp/view/207/>
- 15) <http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~rad/research.htm>

## 4. 結論

### 4.1 調査結果概要

#### (1) マルチフィジックス連成数値最適化技術

複数の物理現象を扱うには、既存の解析ソフトを用いる弱練成解析が現実的と考えられるが、それぞれの現象を支配する時間のスケールが異なっていることが課題となっている。また、マルチフィジックス最適化は開発途上と思われる。アカデミアでは、多くの研究者がこの課題に取り組んでいる。

#### (2) 接触熱抵抗の解明

接触熱抵抗に及ぼす表面粗さ、圧力などのパラメータの影響に関する研究は、実験ベースで過去から数多くの研究が行われ、近似式として纏められている。しかし、メゾ、マイクロ領域に踏み込んだメカニズムの解明は十分でない。計測技術が進展しており、新たな手法によるメカニズムの解明が期待される。

#### (3) 微細凹凸表面による流体抵抗の低減

リブレットと超撥水による流体抵抗の低減の研究が行われている。また近年ではバイオミメティクスの研究も盛んになっている。本年度の RC 分科会で進めている超低摩擦のような画期的な表面構造の発見、開発が望まれる。

#### (4) 高圧下の二相流挙動

高圧下で問題となるキャビテーションに関しては、溶存空気や微粒子の影響など未解明な現象が残っているようである。キャビテーションに関しては市販ソフトである程度の現象解明が可能であるが、これに起因するエロージョンを予測する数値解析技術は不十分である。気泡の計測に関してはアカデミアで多くの研究者が存在する。

#### (5) シールメカニズムの解明

オイルシールの封止メカニズムに関しては既に解明されている。フローティングシール、メカニカルシールに関しては、流体膜の連続性・不連続性など未解明な現象が残っているようである。

#### (6) 3次元温度計測

メカニズムの異なるいくつかの3次元温度計測技術が研究されている。それぞれ特徴はあるが、2次元温度計測であるサーモグラフィのような汎用性はない。むしろ計測技術に合致した技術課題

の発掘が必要となる。

#### (7) メタマテリアルを用いた輻射・音の制御デバイス

メタマテリアルを用いた輻射・音の制御デバイスに関しては、多くの研究者はアカデミアに存在している。ただし、非競争領域の研究テーマとするには、基礎的な研究段階であるテーマを選ぶ必要がある。

#### 4.2 総括

解析技術に関しては、国内での研究開発が盛んであり、企業側から課題を提示していく必要がある。計測・デバイスに関しては、当然のことながらメカニズムは明快であるが特殊性という課題が存在する。協調領域からのテーマ設定が重要である。

物理現象に関して提案されたテーマ、すなわち接触熱抵抗、流体抵抗の低減、高圧下のキャビテーション、シールメカニズムは全て「界面」が未解決の原因となっている。前報の総括や本報 2.2(4)で述べたように、界面で避けられない表面粗さの寸法が、連続体力学が成り立たないメゾ領域であることが解決を難しくしていると考えられる。今後、原子レベル解析に遡ったメゾ領域におけるトライボロジー、熱現象、流体现象に共通した表面粗さのモデル化が望まれる。

協調領域技術懇談会では、調査された内容をさらに精査し、RC化を進める計画である。

追記：本調査は、冒頭に述べた COCN プロジェクトの趣旨に沿って、企業側の要望を基に行ったもので、網羅的でなくまた最新の研究成果の漏れもあると思われる。もしご興味があれば、調査結果に対するアカデミアの方々からのご指摘をいただきたい。

連絡先：日本機械学会 協調領域技術懇談会

E-mail: kyouchou@jsme.or.jp

#### 参加メンバー

日本機械学会	中山良一
IHI	豊田真
コマツ	花本忠幸
コマツ	山本浩
東芝	戸谷公紀
日立	北野誠
日立	大野耕作
三菱重工	加藤永護
事務局	川崎さおり（日本機械学会）