

2020 年 6 月 24 日

日本機械学会 事業委員会

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」では以下の提案を行った<sup>1)</sup>。

- ・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。また，2018 年度以降は IHI を加えた 5 社で活動を継続した。

2017 年度<sup>2)</sup>，2018 年度<sup>3)</sup>の成果報告書は，日本機械学会のホームページに掲載されている。本報告は，2019 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/theme99-L.pdf>
- 2) <https://www.jsme.or.jp/innovationcenter/uploads/sites/6/2018/05/COCNchousa180531.pdf>
- 3) <https://www.jsme.or.jp/activity-com/uploads/sites/6/2019/04/2018COCNhoukoku.pdf>

## 2. 提案テーマ

本年度も分野を限らないでテーマの提案を行った。その結果、機械材料に関するテーマ 3 件、材料強度に関するテーマ 3 件、解析・設計・製造技術に関するテーマ 4 件の提案があった。その内 6 テーマを調査テーマとし、深掘りした。

### 2.1 機械材料

#### (1) 自己修復材料

自己修復材料の研究は、破損時に応急処置ができない人工衛星などを対象に始められた。広く使われている低中温域での機械部品を対象にした自己修復材料は、省エネルギー、安全性向上などに対するインパクトが大きい。セラミック系材料の一部では研究が進んでいるが、金属材料など他の材料系への展開が望まれている。

##### a) 自己修復材料の現状<sup>1)</sup>

ステンレス鋼や耐候性鋼は、表面に形成される酸化膜を利用して耐錆性を発現している。この酸化膜が損傷しても空気中の酸素によりキズ部が酸化され修復されるため、最初の自己修復材料と認識されている。その後、高分子系材料を自己修復材料に応用する例が実用化されていて、自動車の車体への塗装や液晶画面などにも広く利用されている。ただし、高分子系材料であるので強度や靱性が低いため、構造用材料には適用できていない。

##### b) 構造用自己修復材料の研究状況

次世代構造材料として自己修復材料は、自己修復性を利用して寿命向上を可能にすることに加え信頼性を大幅に改善できる期待が高い。現在研究されている分野として、ジェットエンジンに代表される熱機関に向けてセラミック系の自己修復材料<sup>2)</sup>とコンクリート構造物に対する自己修復材料<sup>3)</sup>などがある。

##### c) 機械向け自己修復材料

高温環境下で使用されるジェットエンジン向けとしてセラミック系の自己修復材料研究が開始されたが、低中温域で使われる機械部品（ギヤ、軸など）に対しての研究は残念ながら今回の簡単な調査では顕在化していなかった。

## 参考文献

- 1) 新谷紀雄, 自己修復材料の研究開発の現状と期待される展開, 日本画像学会誌, Vol.54, No.3, (2015), 206-212.
- 2) 中尾航, 新規ロードマップ3:「自己治癒材料」, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, P002007.

- 3) 三橋博三, 金子佳生, 西脇智哉, 大塚浩司, 強度の自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.2, (2000), 21-28.

## (2) 異材接合

異材を接合する方法では, 接着剤が主として用いられ, メカニズムを含め多くのことがわかってきている. しかし, これに限らず異種金属の融合技術や樹脂・複合材と金属の接合が可能となる手法も今後出てくると考えられ, 工学的に有用な手法が求められる.

自動車や航空機では, 複合材料と金属を接合しなければならないケースが多く, 主に接着剤を用いた接合法が用いられている. しかし, 接着剤は材料の組み合わせや施工によっても破壊モード, 強度が変わってくるため, 評価が容易ではない. また, 母材に比べて強度が大幅に小さくなることが多い. これらから, 数値シミュレーションを用いた高精度な接着継手の強度評価法の開発が求められる.

また, 接着剤に限らず, 異種金属の融合技術や樹脂・複合材と金属の接合が可能となる手法も今後開発されると考えられ, 工学的に有用な手法が求められる. 接着以外の高信頼性異材接合 (金属/複合材) の開発状況 (例えばレーザー, 摩擦重ね接合など) について適用性などの調査が必要である.

## (3) 断熱材料

調査テーマに選定した. 3章にて述べる.

## 2.2 材料強度

### (4) 内部欠陥を有する材料の強度に対する寸法効果

調査テーマに選定した. 3章にて述べる.

### (5) 表面硬化材料の疲労強度推定技術

調査テーマに選定した. 3章にて述べる.

### (6) マイナー則に関する考察

調査テーマに選定した. 3章にて述べる.

## 2.3 解析・設計・製造技術

### (7) メゾスコピック領域における物理モデルの提案

代表寸法が 1nm から 1 $\mu$ m のいわゆるメゾスコピック領域は, 材料組織の不均質性を苦手とする材料力学と, 原子レベルの問題を取り扱う分子動力学などの手法の間にあつて, これらが与える物理

モデルがかならずしも適合しないことがある。たとえば、ぬれ現象におけるぬれ角の定義や、沸騰現象における気泡生成、界面における熱伝達や接着強度などである。このような問題に対して適切な物理モデルを与えることは現象解明につながるとともに、既往の物理計算モデルを拡張できる可能性があり、有用と考えられる。本テーマは2018年度に調査提案されたが詳細調査には至らなかった。しかし、同年の報告書総括に述べられているように、重要性が増していると感じられる。

#### (8) 画像からのモデル化

現状の数値シミュレーションでは、図面情報をもとにモデルを構築するのが主であるが、計測結果をもとにモデル化する技術も発達してきている。今後、写真やCT画像などからモデルを構築する技術が発展することが期待される。現在のCAEでは、3次元CADや2次元の図面情報をもとにジオメトリを作成して、メッシュ分割等を行い、解析モデルを作成することが一般的となっている。

しかし、図面が無い製品や、あったとしても改造等により初期の構造から変更があるものについてはCADデータをもとにしてモデル作成をすることができない。現在の技術では3Dスキャナーによる形状測定を行い、STLデータ（ポリゴン）に変換し、さらにCADデータに変換して解析モデルを作製することになる。

このような3Dスキャナーによる形状測定は大がかりで費用もかかる。また、ポリゴンデータからCADデータを作製するのは人の目を介して実施しなければならない。これらより、簡易なカメラなど使って精度よく形状を構築し、ポリゴンデータから手間をかけずにメッシュデータを作成する方法が望まれる。

#### (9) 機械工学への現代数学理論の応用

調査テーマに選定した。3章にて述べる。

#### (10) バイオミメティクスと3DPによる製造技術

調査テーマに選定した。3章にて述べる。

### 3. 調査テーマ

前章の提案テーマを本懇談会にて審議し、6テーマについて、さらに調査を深めることとした。

#### 3.1 断熱材料

##### (1) 提案理由

現在電動化の大きな流れがあり、二酸化炭素排出削減に向けて内燃機関からEV化の流れがあるが、当面、動力は内燃機関に依存していくと考えられる。その場合、内燃機関の熱効率向上は二酸化

炭素削減のためには必要不可欠なものとなる。熱効率向上には、吸気温度を上げずに冷却水への熱の散逸をいかに減らすかが課題となっている。そのために、熱容量が小さく断熱性能に優れる材料が必要となる。

一方、航空ジェットエンジンや発電用ガスタービンでは、熱効率を向上するために、タービン入り口温度(Turbine Inlet Temperature : TIT)の高温化が進められている。高いTITを実現するためには、高温タービン翼や燃焼器に熱遮蔽コーティング(Thermal Barrier Coating : TBC)システムを適用することが有効であり、開発が進められている。

このように熱伝導率が小さく、ヒートマスの小さい耐熱性のあるコーティング技術ができると、エンジンの高効率化にインパクトがある。

## (2) 調査結果

まず、断熱材料全般について、これまでの取り組みを調査した。

### a) 断熱材料の分類<sup>1)</sup>

断熱材料は以下の様に大きく分類される。

- ・断熱構造起因：①中空形状，②多孔質形状，③繊維形状
- ・低熱伝導率材料：①原子量大，②不定形構造

### b) 中空形状

中空構造を持つ中空バルーン型断熱材料<sup>2)</sup>の中でも高い断熱性能を有するのがシリカエアロゲルである。シリカエアロゲルは、ゲル化プロセス⇒液相置換⇒疎水化プロセス⇒超臨界乾燥プロセスで製造される。高い断熱性能を有するが、構造の脆弱性、超臨界乾燥による高い製造コストが実用化への大きな壁であり、内燃機関への適用を考えると、シリカゲルの耐熱性の高いバインダーの開発も壁と考えられる。

### c) 多孔質形状<sup>3)</sup>

多孔質構造を有する金属またはセラミック系の断熱材料である。多孔質を形成する製造方法は熔融金属に直接ガスを吹き込み気孔を形成するガスインジェクション法を始め各種存在する。特に燃焼合成法ではセラミック系の多孔質材料の製造が可能である。

### d) 低熱伝導率型断熱材料<sup>4)</sup>

本材料はこれまで内燃機関への適用を最も多く試行されてきた材料系である。熱伝導率の低いジルコニアなどのセラミック系材料をピストン、ピストンリング、シリンダライナの表面に溶射技術を用いて皮膜を形成し、断熱性能を引き出している。断熱性能や耐摩耗性能に優れる反面、熱容量が大きいのが欠点である。

### e) 表面改質型断熱材料<sup>5)</sup>

アルミニウム合金のピストン表面を陽極酸化を用いて多孔質アルミナ膜化した表面改質型断熱材

をトヨタ自動車が開発した。本表面改質型断熱材は、高い断熱性能と低い熱容量を両立している。ただし、作成方法がアルミニウムの陽極酸化技術を使うためにアルミニウム合金以外への適用が難しい。

#### f) 中・低温域断熱材料<sup>6)</sup>

住宅や冷蔵庫などの中・低温域に使用される断熱材についても調査した。中・低温域断熱材は、①中空形状、②多孔質形状、③繊維形状の断熱構造を利用して、有機系材料で強度を発現している物が殆どである。有機系材料を使うため高温になる内燃機関への適用は困難である。

以上、様々な断熱材料の調査結果について述べた。内燃機関向けの断熱材料としては表面改質型断熱材料が断熱性能と低熱容量の両立を実現しているが、内燃機関に広く使われている鉄系材料に適用できないため、新しい断熱材料が求められている。中でも中空バルーン型断熱材料や多孔質金属（セラミック）型断熱材料を鉄系材料へ適用することがキーと考えられる。

次に開発事例の多い耐熱性のあるコーティング技術として、ジェットエンジンのタービン翼などに適用されている材料について調査を行った<sup>7),8)</sup>。

高圧タービン翼では、ガスの入り口温度が仮に 1500°C程度だとすれば、空気冷却などで 200°C程度、さらに熱遮蔽コーティング (TBC)により 200°C程度の遮熱を行い、基材の耐用温度になるよう設計される。TBC システムは最外層（燃焼ガス側）に位置するトップコートとその内層（基材側）に位置するボンドコートで構成される。トップコートは熱遮蔽効果を目的としたセラミックコーティングで、大気プラズマ溶射法や、電子ビーム蒸着法<sup>9)</sup>が用いられている。トップコートの主な材料としては YSZ が挙げられる。一方、ボンドコートは耐酸化を目的とした金属コーティングで、アルミ拡散コーティングが代表的なものである。TBC はこのようにトップコートとボンドコートから成る複雑なシステムであり、劣化原因も多岐にわたり、信頼性向上や劣化メカニズムの解明が望まれている。TBC の損傷評価としては、例えばトーカロなどで破壊力学的な評価がなされている<sup>10)</sup>。また、近年では類似のコーティング技術として熱遮蔽に加えて耐環境性の向上のためのコーティング (Environmental Barrier Coating ; EBC) の開発が盛んであり、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の中でも開発が行われている<sup>11)</sup>。

#### (3) 今後の課題

熱エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー、位置エネルギー、核エネルギー（核エネルギー以外は太陽光起因）など、我々は多くの種類のエネルギー源を活用しているが、熱エネルギーは今後も主力エネルギーとして活用されていくと考えられる。その上で、貴重な熱エネルギーを有効に活用するためには、断熱材量の開発が欠かせない。(2)a)で述べたように断熱のメカニズムはわかっており、それぞれの断熱材の発展、複合利用技術の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 曾我部浩一, 三宅雅也, 講座セラミック基高機能材料 5.放熱材, 遮熱材, 材料, Vol.44, No.499, (1995), 498-504.
- 2) 片桐成人, 安達信恭, 太田敏孝, 究極の多孔質材料 -シリカエアロゲル-, 名古屋工業大学先進セラミックス研究センター年報, Vol.2, (2014), 13-17.
- 3) 小橋真, ポーラスメタルの現状と展望, 軽金属, Vol.55, No.7, (2005), 327-332.
- 4) 田中正紀, 北嶋義久, 遠藤裕久, 渡辺正興, 名木田浩, セラミック系複合材料をコーティングした船用低速ディーゼル機関のピストンリングおよびシリンダライナ, 日本船用機関学会誌, Vol.27, No.3, (1992), 238-247.
- 5) 脇坂佳史, 稲吉三七二, 福井健二, 小坂秀雅, 堀田義博, 川口暁生, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第2報),自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, (2016), 39-45.
- 6) 依田智, 中・低温領域の断熱材の概要と発泡ポリマー・シリカナノコンポジット断熱材の開発について, ニチアス技術時報, 2014年1号, No.364, (2014), 1-9.
- 7) 佐藤彰洋, 松永康夫, 吉澤廣喜, 高橋耕雲, 森信儀, 航空ジェットエンジン用熱遮蔽コーティングシステムの現状, 石川島播磨技報, Vol.47, No.1(2007), 1-6.
- 8) 川岸京子, 松本一秀, 原田広史, Ni基超合金のための遮熱コーティングシステムの開発, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 14, (2007), 390-396.
- 9) 松本峰明, 山口哲央, 松原秀彰, EB-PVD法で合成した  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $La_2O_3$  皮膜の相安定性と熱サイクル特性, 日本金属学会誌, Vol.69, No.1, (2005), 43-47.
- 10) 小野 智裕, 荒井正行, 水津竜夫, 高温下におけるセラミック遮熱コーティングの界面疲労き裂進展挙動, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.835,(2016), p.15-00614.
- 11) [https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/pamph\\_c\\_j.pdf](https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/pamph_c_j.pdf)

## 3.2 内部欠陥を有する材料の強度に対する寸法効果

### (1) 提案理由

鋳物, セラミックス, および FRP (Fiber reinforced plastics ; 繊維強化樹脂複合材料), などの内部に欠陥を有する材料は, 強度ばらつきが大きいため, 構造メンバとして使用するにはリスクが伴う。体積が大きくなると欠陥を含む確率が高まるため強度が低下する「寸法効果」が提唱されているが, 現象論的であり, 損傷リスクを定量化するには至っていないように思われる。破壊力学的観点からは, 鋼や球状黒鉛鋳鉄, 不均質相を含むアルミ合金などに対して, 欠陥寸法を考慮した疲労強度の評価手法が提案されている<sup>り</sup>が, 広く普及しているとは言いがたい。材料の欠陥寸法および分布状況と, 対象物の容積とを結びつけて一般化した強度評価指標の確立は, 前述した材料の適用拡大に向けて不可欠と考えられる。

## (2) 調査結果

内部欠陥の計測・モデル化技術および鋳物、セラミック、複合材料の内部欠陥に対する強度評価技術の調査結果について報告する。

### a) 計測・モデル化技術

一般的に、寸法効果については 2 つの要因が示されている。一つは材料内部の応力勾配に起因するもので、高応力領域の大小が関係するとされている。もう一つは、材料内に微小な欠陥の分布を仮定し、表面積や体積が大きくなると、欠陥の個数や最大寸法が大きくなるためと考えられている<sup>2)</sup>。今回は、後者について調査した。

計測技術では、理化学研究所が鉄鋼材料内部の微細な介在物の形態を 3 次元解析する技術を開発しており<sup>3)</sup>、介在物の元素分析や結晶粒の配向調査を断面観察と併用することで、材料内部の不均質性分布を正確に取得し、コンピュータ上に再現することができる。このような 3 次元デジタルモデルから、体積や表面積、縦横比といった形状パラメータの計算や、CAD システムなどを利用した力学シミュレーションへの道が開かれ、コンピュータシミュレーションによる材料内部の応力解析が可能となると考えられる。今後、介在物の形態だけでなく、亀裂の伝播形態調査とこれら内部物性分布を詳細に調査することで、これまでよく分かっていなかった材料の破壊現象を解明する新しい技術になると期待される。

アルミダイカストについて、X 線 CT で取得した三次元欠陥形状分布データから直接 FEM 解析モデルを作成し、応力解析および疲労寿命評価を行う方法が紹介されている<sup>4)</sup>。またセラミックスを対象に開発された数値シミュレーション技術（バーチャルテスト）では、内在する微小欠陥や組織の情報から、セラミックス強度のばらつきやサイズ依存性を予測できるだけでなく、得られたワイブル統計の結果と微子組織条件を関連付けることができるとしている<sup>5)</sup>。これらの手法を用いて寸法効果の検討を行うことができれば、内部欠陥を有する材料の寸法効果の定量化につながるものが期待される。

### b) 鋳物の内部欠陥評価

鋳物は、自由度の高い構造設計が許容される加工法であり、要求される機能を得るための合理的な形状や肉厚の配分を選択し、実現することが容易である。よって、複雑形状の構造物を一体加工することが可能なため軽量化と製造コストの低減に寄与し得る。その一方、鋳造材料は形状や鋳造法が強度信頼性に大きく影響することが知られている<sup>4)</sup>。鋳造品の強度ばらつきは、(1)冷却速度の変動に起因する各部の組織、材質の変化、(2)各種の欠陥、(3)基質組織、黒鉛片などの微視的要因によるばらつきである<sup>3)</sup>。これらの強度ばらつきについて、実験的に多くの検討がなされている。例えば、複数のねずみ鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄について寸法を変えた試験片を製作して引張試験を行っている<sup>7)</sup>。その結果、ねずみ鋳鉄の強度における変動係数は、球状黒鉛鋳鉄に比べて試験片寸法に対する



感受性が高いことを示唆している。別の報告では、3種類の球状黒鉛鋳鉄を対象として、負荷比が異なる応力およびひずみ制御の繰返し荷重試験を行っている。ここで対象とした鋳鉄は、いずれも高応力が生じている体積の大きさによって疲労強度が変動する寸法効果を示している。また、寸法効果は応力だけではなくひずみ制御型の試験結果にも表れ、平均荷重に対する感受性の高さにも言及している<sup>8)</sup>。また別の報告では、球状黒鉛鋳鉄の応力比と試験片寸法を変量して疲労試験を行い、取得した疲労寿命データがワイブル分布に適合することを示している。このとき、ワイブルが提唱した最弱リンク説を適用することにより、寸法効果を考慮した疲労強度予測についても検討している<sup>9)</sup>。ワイブル分布を実製品の構造設計へ適用した例としては、風力発電用ローターハブを題材として、球状黒鉛鋳鉄の鑄造欠陥の有無や構造物寸法の影響が疲労特性に及ぼす影響を評価している例がある<sup>10)</sup>。荷重比を変量した疲労試験を行って P-S-N 線図を作成し、試験片の幾何学的形状や切欠き形状に対する寸法効果、および平均荷重に対する影響について考察している。さらに、X線 CT 撮像技術を活用し、疲労強度に及ぼす欠陥の種類、形状、寸法、および位置の影響を評価しており、欠陥情報を詳細に把握することによって、疲労寿命のばらつきを評価できる可能性を示唆している。このように、鑄物材の微視構造を考慮して強度ばらつきを検討し、実構造物に適用した報告例もあるが、その適用限界についてはセラミックスほど議論されていないと思われる。

#### c) セラミックスの内部欠陥評価

セラミックスは、焼結および加工プロセスによってその内部や表面に欠陥を内包するため、同一ロット製品であっても欠陥分布は異なる<sup>11)-15)</sup>。また、評価対象とする部材のサイズによっても欠陥分布が変わることから、破壊の起因となる欠陥の存在確率を反映し、強度の寸法効果が発現する。このようなセラミックスの強度評価は、ワイブル分布に基づく統計的な手法<sup>7)</sup>がしばしば適用されており、実製品への適用を目指した構造設計手法としても整理されている<sup>12),13)</sup>。しかし、ワイブル分布を取得するためには多くの試験を要するため、試験コストと時間を削減することから、シミュレーションを活用することにより強度のばらつきを検討する事例がある。谷口ら<sup>14)</sup>は、強度をワイブル分布で表したときのワイブル係数が、試験片寸法（有効体積）によって変化する理由を明らかにするため、モンテカルロ法を用いてセラミックスの強度分布のシミュレーションを行っている。有効体積が小さな試験片で大型試験片の強度を推定する場合、推定強度は危険側の評価を与えることを示唆している。その一方、有効体積が小さくなると強度は上限値に漸近する傾向も示している。最近では、画像観察で得られた微視組織情報を確率分布関数で表現したモデルの有限要素法解析結果から直接ワイブル分布を作成し、同一サイズの部材における強度ばらつきやサイズ効果について検討している例がある<sup>15)</sup>。

#### d) 複合材料の内部欠陥評価

複合材料の強度におよぼす寸法効果は、1970年代後半から実験を主体として離散的に取り組み

てきた。連続繊維強化樹脂複合材に関しては、1990年代に Zweben<sup>16)</sup>によって、強度の寸法効果に関する幾つかの研究論文がレビューされ、複合材料は、セラミックスと同様な寸法効果が表れることを示している。強度の寸法効果を整理する手法として、ワイブル統計<sup>7)</sup>によって導かれた有効体積理論が良く知られているが、この理論におけるワイブル係数のばらつきが、強度と寸法の関係に及ぼす影響についても議論がなされている。さらに、大型構造物については、セラミックスの場合と同様のアプローチを迫る必要性を示唆している。Wisnom<sup>17-20)</sup>は、一方向炭素繊維強化複合材料を対象として強度ばらつきと寸法効果をワイブル分布によって整理している。さらに、複数のサイズの試験片を対象として数多くの引張り強度と曲げ強度を取得し、試験方法の違いによる、強度と寸法の関係を有効体積理論によって整理している。Ishihara<sup>21)</sup>らは、黒鉛系材料による試験片強度のワイブル係数を取得し、FEM解析によって求めた有効体積に適用することでばらつきを考慮した強度予測法を提案している。また、破壊起点が内部と表面とに分類されることに着目することにより、競合リスクモデルを適用することで予測精度を改善している。さらに、Wangら<sup>22)</sup>は SMC材の強度ばらつきを取得するため、標定部の幅と長さを3水準に設定した合計9通りの試験片を作製し、静引張試験と疲労試験に供している。試験片寸法が大きくなるにつれて静強度、疲労強度が低下することを示しており、試験片毎のばらつきはワイブル分布で表すことを試みている。Hashemiら<sup>23)</sup>は、ガラス繊維強化 PBT/PC樹脂複合材料の引張り強度と曲げ強度のワイブル係数を取得し、有効体積理論が適用できることを示している。

### (3) 今後の課題

現象の特徴から確率論的な取り扱いが必要になる可能性が高いが、確率論的な検討結果は工学的に利用することが難しい場合も多いため、大学研究者と企業研究者が協力し、実用的な成果を得られるよう、適切なテーマ設定を行う必要がある。また、最新の材料観察技術も併用することで、欠陥分布等についてより現実的な設定による解析が行えるようになると期待される。

また、内部に欠陥を含む材料は、不安定な破壊挙動を呈し、かつばらつきも大きい。そのため、試験片で求めた強度分布データにワイブル統計を適用し、寸法効果を考慮して強度を評価する報告が多く見られた。しかし、その適用限界については未知な点も多いため、統一的な指針を打ち出す必要があるといえる。また、近年では計算機処理能力の向上や計測技術の発展により、実際の微視構造をモデル化して破壊メカニズムの解明や強度予測法が研究されている。しかし、材料特性に関する専門知識だけではなく、高性能な計算機や計測装置、高価なソフトウェアが必要になるため、汎用的な技術として整備されるまでには時間を要すると予想される。従って、欠陥や介在物を含む材料を製品に適用するためには、その強度特性に及ぼす寸法効果の影響を、材料試験、および数値解析手法によって明確化し、製品設計において安全性を合理的に保障し得る実用的な強度評価法を検討することが直近の課題といえる。

## 参考文献

- 1) 村上敬宜, 微小欠陥と介在物の影響 (2014), 養賢堂.
- 2) 理化学研究所, 鉄鋼材料内部の微細な介在物の形態を3次元解析する技術を確立 –工業材料の欠陥, 亀裂, 介在物の観察や応力解析シミュレーションに寄与–, 理化学研究所プレスリリース, 2009年8月17日.
- 3) 酒井達雄, よくわかる最新金属疲労の基本と仕組み, 秀和システム, (2011), 84-85.
- 4) 吉川, X線CTによる欠陥の三次元計測に基づくアルミダイカスト部材の寿命評価, 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-12-002, (2012).
- 5) 尾崎伸吾, まるで実験?! セラミックス強度のばらつきの数値解析手法の開発 –バーチャルテストを活用した高信頼性材料の開発へ向けての第一歩, 横浜国立大学 Press Release 2018年2月27日.
- 6) 野口徹, 清水一道, 鋳造品の強度評価と軽量化, 鋳物, Vol.64, No.12, (1992), 840-846.
- 7) 野口徹, 鋳鉄の引張強さのばらつきと試験片寸法, 鋳物, Vol.60, No.3, (1988), 161-166.
- 8) Bleicher, C., Wagener, R., Kaufmann, H. & Melz, T. Fatigue strength of nodular cast iron with regard to heavy-wall applications. Mater. Test. 57, (2015), 723-731.
- 9) Shirani, M. & Härkegård, G. Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components. Eng. Fail. Anal. 18, (2011), 12-24.
- 10) Shirani, M. & Härkegård, G. Casting defects and fatigue behaviour of ductile cast iron for wind turbine components: A comprehensive study. Materwiss. Werksttech. 42, (2011), 1059–1074.
- 11) Weibull, W., A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Applied Mechanics, 18 (1951), 293-305.
- 12) 岡部永年, 平田英之, 村松正光, セラミックス強度の統一的評価の信頼性設計への適用の検討, 材料, Vol.39, No.439, (1990), 393-399.
- 13) 鈴木章彦, 林誠二郎, 馬場秀成, ワイブル統計に基づいたセラミックス部品強度評価理論の信頼性, 日本機械学会論文集 A編, Vol.61, No.589, (1995), 1902-1908.
- 14) 谷口佳文, 北住順一, 山田敏郎, 計算機実験によるセラミックスの強度分布と寸法効果, 材料, Vol.38, No.435, (1989), 1428-1433.
- 15) 竹尾, 青木, 長田, 中尾, 尾崎, 有限要素解析によるセラミックス強度のばらつき予測とサイズ効果, 日本機械学会 2018年度年次大会講演論文集, (2018).
- 16) Zwben, C., “Is there a size effect in composites?”, Composites, 6 (1994), 451-454.
- 17) Wisnom, M.R., “Relationship between strength variability and size effect in unidirectional carbon fibre/epoxy”, Composites. 22 (1991), 47-52.
- 18) Wisnom M.R., “The relationship between tensile and flexural strength of unidirectional composites”, Journal of Composite Materials, 26 (1992), 1173-1180.

- 19) Wisnom, M.R., Atkinson J.W.. Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size” Composite Structures, 45 (1997).
- 20) Wisnom, M.R., “Size effects in the testing of fibre-composite materials” Composite Science and Technology, 59 (1999), 1937-1957.
- 21) Ishihara, M., Hanawa, S., Sogabe, T., Tachibana, Y., and Iyoku, T, “Proposal of the Prediction Method Using a Competing Risk Model on the Bending Strength of 2D-C/C Composites”, Materials Science Research International, 10 (2004), 65-70.
- 22) Wang, A.S.D., Tung, R.W., and Sanders, B.A., “Size effect on strength and fatigue of a short fiber composite material”, Emerging Technologies in Aerospace Structures, Design, Structural Dynamics and Materials, (1980), 37-52.
- 23) Hashemi, S., and Khamsehnezhad, A., “Analysis of tensile and flexural strength of single and double gated injection moulded short glass fibre reinforced PBT/PC composites”, Plastics, Rubber and Composites, 39 (2010), 343-349.

### 3.3 表面硬化材料の疲労強度推定技術

#### (1) 提案理由

浸炭焼入れに代表される表面硬化材料は、摺動材や構造材の表面強化に広く用いられている。また、ショットピーニングなどにより表面層の圧縮残留応力を増大させ、高強度を得ることもよく行われている<sup>1)</sup>。一方、疲労強度の絶対値に関しては、材料が深さ方向に硬度分布を有するとともに、硬度増加に伴うき裂感度の上昇や介在物の分布、熱処理による残留応力分布などが影響因子となり、精度良く推定することは容易ではない。工学的観点から影響因子を整理して強度評価指標をまとめると共に、材料検査法と組み合わせる機能保証を行う必要があると考えられる。

#### (2) 調査結果

鋼材の表面処理は、機械的性質の向上を図ることを主な目的として行われ、表面層のみを硬化させることで、内部は強靱のまま保ち、耐摩耗性と高い靱性を兼ね備えた特性を満足させることができる。さらに表面硬化処理により表面層に生じる圧縮残留応力によって、耐疲労性を向上させる効果が期待できる。この目的のために、鋼材の表面全体あるいは一部分のみを硬化させる処理法が行われている。表面を加工硬化させかつ圧縮残留応力を生じさせるショットピーニング、低炭素鋼の表面に炭素を拡散新党させた後に焼入れして表面硬化させる浸炭焼入れ、形成される窒化物による格子ひずみによって表面に圧縮残留応力を生じさせ硬化させる窒化、うず電流によるジュール熱により表面層だけを焼入れ硬化される高周波表面焼入れなど、手法により硬化メカニズムは異なる<sup>2)</sup>。

日本鉄鋼協会では、2016年と2019年に機械構造用鋼を対象に表面硬化部材の疲労損傷シンポジウムが開催されており、ショットピーニングによるき裂の無害化、窒化化合物層の影響、き裂面の摺動を伴う転がり疲労やピッチング損傷、転動疲労、などが取り上げられている<sup>3,4)</sup>。また2018年には

横国大共催で「表面硬化部材の組織と力学特性」フォーラムが開催される<sup>5)</sup>など、この分野への関心は高い。

ショットピーニングについては、表面欠陥のある材料にショットピーニングを施すことによって疲労強度が向上する理由は、圧縮残留応力によるき裂進展抑制に加え、表面欠陥が潰され穴縁の応力集中が緩和されたことも一因としている<sup>6)</sup>。

窒化については、表面化合物層の結晶構造を制御した SCM435 鋼の疲労強度特性に及ぼす表面化合物層の結晶構造の影響が検討され、化合物層がε相主体であってもγ'相主体であっても、それぞれの破壊応力において表面からき裂が生成し、このき裂先端における応力拡大係数範囲は窒素拡散層の下限応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  を上回っていることが示されている<sup>7)</sup>。

材料の疲労限度  $\sigma_w$  はその硬さから推定できることが多く、鉄鋼材料の場合には、概ね  $\sigma_w \cong 1.6 H_v$  (ビッカース硬さ) の関係がある<sup>7)</sup>。一方、硬さが Hv400 を超える高強度鋼では、この関係は維持されず、疲労限度は前述の推定値よりも低下する<sup>9)</sup>。これは、材料に内在する介在物などの微小欠陥が主要因と説明されている。

また材料に存在する残留応力は、き裂の進展過程に影響を及ぼすといわれており、圧縮の残留応力は疲労限度を向上させる<sup>10)</sup>。表面硬化材料の一つである浸炭焼入れ材の表面には、マルテンサイト変態の過程で圧縮の残留応力が生じており、表面起点き裂の進展を抑止する効果がある。一方、内部にはこれに釣り合う引張の残留応力が存在し、内部起点き裂に対する耐性を下げている。従ってこのような材料では、材料内部に存在する介在物を起点としたき裂に対する強度評価も必要と考えられる。

以上に述べたように、表面硬化材料の強度評価にあたっては、材料に内在する介在物の分布状況に加え、深さ方向を含めた硬度の分布、および残留応力の分布などを考慮する必要がある。精度の良い評価は容易ではない。このような課題に対し、村上らの提案<sup>5)</sup>が適用できる可能性がある。まず、介在物および残留応力を考慮した疲労限度  $s_w$  (MPa) の推定式として、下記が与えられている<sup>11)</sup>。

$$\sigma_w = \frac{1.56(H_v + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \cdot \left[ \frac{(1 - R)}{2} \right]^\alpha, \quad R = \frac{\sigma_m - \sigma_w}{\sigma_m + \sigma_w}, \quad \alpha = 0.226 + H_v \times 10^{-4}$$

ここで、 $H_v$  : ビッカース硬さ(kgf/mm<sup>2</sup>)、 $\sqrt{area}$  : 欠陥断面積の平方根(mm)、 $\sigma_m$  : 平均応力(MPa)である。式中の係数 1.56 は介在物が材料内部にある場合であり、介在物が材料表面に存在したり、表面に接する位置にある場合には、別の値となる。また、式の右辺に  $\sigma_w$  があるため、収束計算により  $\sigma_w$  を求めることになる。

介在物の影響評価に関しては、同文献において、極値統計学の適用を推奨している。材料検査により観察領域における介在物寸法( $\sqrt{area}$ )の分布を調べ、分布直線を外挿して評価領域に存在し得る最大介在物の寸法を推定する。この結果を上式に適用し、介在物が存在する場合の疲労限度の下限値を推定している<sup>12)</sup>。以上のような提案を元に、浸炭焼入れ歯車の歯の曲げ強度評価を実施した例<sup>13)</sup>なども認め

られる。

### (3) 今後の課題

表面硬化材料の強度評価については、初期欠陥を仮定した破壊力学的な手法と、これに残留応力や組織の影響を考慮する方法が主流で、基礎理論が整えられ、アプリケーション例を積み上げるフェーズに入っていると言える。個別の研究成果はいくつか報告されているので、これらをレビューし硬化方法毎に評価手法を検討・整理する必要がある。また、最近のコンピュータシミュレーション技術や観察技術を用いることで、各種硬化手法のメカニズムに立脚した評価法が開発される可能性もあると考えられる。一方、強度評価に必要な材料検査技術として、介在物および残留応力の分布評価が挙げられるが、まだ製造現場において手軽に精度よく実施できる段階にはないと思われる。これら要素技術の高度化と統合された簡便安価な評価手法の構築が待たれる。

### 参考文献

- 1) 橋本宗到, 白鳥正樹, 長嶋晋一, 浸炭歯車材の残留応力分布と疲労強度: 第1報, 粒界酸化とショットピーニングの効果, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.55, No.520(1989), 3034-3038.
- 2) 西本明生, 特殊鋼を支える表面改質技術と今後の動向について, 特殊鋼, Vol.67, No. 4, (2018), 2 - 5
- 3) 日本鉄鋼協会, 材料の組織と特性部会, 機械構造用鋼表面硬化部材の疲労損傷シンポジウム, 2016年3月23日.
- 4) 日本鉄鋼協会, 材料の組織と特性部会: 機械構造用鋼表面硬化部材の疲労損傷IIシンポジウム, 2019年9月11日.
- 5) 神奈川県産業技術総合研究所, 横国大 GMI 研究拠点共催, 表面硬化部材の組織と力学特性フォーラムー社会基盤材料の長寿命化を目指してー, 2018年10月26日.
- 6) 高橋宏治, 天野利彦, 宮本貴正, 安藤柱, 高橋文雄, 丹下彰, 岡田秀樹, 小野芳樹, 人工表面欠陥を有するばね鋼のショットピーニングによる疲労強度向上, ばね論文集 No.50, (2007), 9-13.
- 7) 高木眞一, 殿塚易行, 中村紀夫, 伊藤経, 教室化処理した SCM435 鋼の疲労強度特性に及ぼす表面化合物層の結晶構造の影響, 鉄と鋼, Advance Publication by J-STAGE DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-011, (2018).
- 8) 西島敏, 疲労試験データの統計的整理, 材料, Vol.29, No.316(1980), 24-29.
- 9) Garwood M.F. : Correlation of Laboratory Tests and Service Performance, Interpretation of Tests and Correlation with Service, ASM, (1951), 1-77.
- 10) 例えば, JWES : 接合・溶接技術Q&A1000, Q01-04-20,  
[http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg\\_no=0010040200](http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0010040200)
- 11) 村上敬宜, 微小欠陥と介在物の影響 (2014), 養賢堂.
- 12) 文献5), 233-252.

13) Masuyama, T, Evaluation of Bending Strength of Carburized Gears Based on Inferential Identification of Principal Surface Layer Defects, JSME Int. J., Series C, Vol.45, No.3, (2002), 794-801.

### 3.4 マイナー則に関する考察

#### (1) 提案理由

材料、特に金属材料の疲労強度に関しては、膨大な研究がなされ、信頼性設計が設計現場で遂行されている。これはSN線図をベースに、機械が稼働時に受ける荷重を推定（仮定）して行われているが、一般の機械は変動する繰返し荷重を受ける。これに対してはマイナー則（線形累積損傷則）が広く用いられている。これは、材料が受ける応力レベルを $\sigma_i$ 、繰返し数を $n_i$ 、応力レベル $\sigma_i$ に対応する疲労寿命を $N_i$ としたとき、累積疲労損傷値 $D$ を

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}$$

で定義し、これが1に達したときに破壊が生じるとする方法である。

近年、IoT分野における状態監視技術に関係し、稼働機器の構造健全性評価や余寿命評価が盛り上がりを見せている<sup>1)</sup>が、その多くは疲労寿命に関するマイナー則をベースにしている。一方この経験則は、応力振幅の負荷順序などによって累積疲労損傷値が大きく変動するため、様々な補正方法が考えられているが、必ずしも十分ではないようである。いま一度、累積損傷という物理量にどのような意味があるのかを確認し、疲労損傷モデルに反映する必要があると考える。

#### (2) 調査結果

変動荷重下の疲労寿命推定は、マイナー則あるいは修正マイナー則に基づいて検討されることが多い。しかしよく知られているように、破壊するときの累積損傷値は必ずしも1ではない。大路は自らの実験と文献調査からそのばらつきは0.6~1.5であり、概ね1であるとしている<sup>2)</sup>。別の調査ではばらつきが0.1~10とされている<sup>3)</sup>。高瀬は試験条件によっては累積損傷値が5以上になる場合や、0.2まで小さくなる場合があることを報告している<sup>4)</sup>。また、FRPではマイナー則をそのままの形で適用するのは適当ではないとする多くの報告がある<sup>5)</sup>。実際の設計においては $D$ の値を修正して用いている場合が多い<sup>6)</sup>。この一因として荷重の頻度のみならず作用順序（荷重履歴）が影響を及ぼすことが指摘されている。村上らは、累積損傷則成立の条件として、①き裂進展が疲労寿命を支配していること、②き裂進展速度がき裂長さに比例すること、③ひずみ履歴がき裂進展速度に影響を及ぼさないこと、の3点を挙げている<sup>7),8)</sup>。逆に言えば、これらの条件を満たさない場合はマイナー則が成り立たないことになる。このため、個別の荷重条件・材料に関して種々の検討、提案が行われてきたが、個別検討の域を出ていない。

マイナー則は非常にシンプルな考え方であるが、経験則である。累積疲労損傷値は物理量としてどのような意味があるのだろうか。西谷らは表面き裂発生時でも材料内部に損傷が生じていること

を示した<sup>9)</sup>。また先に述べたように、村上らはマイナー則が成立する根拠としてき裂進展速度の条件を挙げている。しかしながら、マイナー則の累積疲労損傷値の物理的意味に直接アクセスした論文は見つからなかった。

機械工学の世界では、疲労については応力（ひずみ）振幅、平均応力（ひずみ）、応力（ひずみ）頻度分布、荷重履歴、破壊力学のき裂開閉口挙動、などを用いて検討されているが、累積被害については十分に説明できているとは言い難い。疲労は、現象的には局所的な塑性変形の繰返しによる微小クラックの発生および拡大のマクロ的な側面と、転位とすべり面に起因するミクロ的な側面があることが、金属学の世界では広く知られている<sup>10)</sup>。このため、累積被害についてその物理量の意味合いまで遡って考えるためには、これまでの力学の世界だけでなく、原子スケールやミクロスケールの性質を組み合わせるマクロな機能を作り出すマルチスケールのものも視野に入れ、「一線を越えた発想」による検討も必要ではないかと考える<sup>11)</sup>。

### (3) 今後の課題

ミクロな破壊現象とマクロな疲労寿命をどのように関連付けるのか、良いアイデアが無いと検討が纏まらない恐れがある。また、総合的に取り扱おうとすると評価のために決める必要があるパラメータの数が多くなり実用的では無くなるが、分類が多くなると個別評価の集合体のようなになる。この当りの切り分けについてもエンジニアリング的な判断が重要になる。

今後 IoT によるリアルタイムモニタリングで稼働中の信頼性評価が広まるとすれば、マイナー則による損傷評価の精度向上が信頼性と経済性の両立を図るうえで重要な課題となると考えられる。深層学習による従来データの分析など、マイナー則の高精度化を目的とした研究開発が望まれる。

### 参考文献

- 1) 竹田憲生, 北泰樹, 中川弘充, 鈴木英明, 実稼働情報を信頼性設計・保守に活用す IoT 時代のアナリティクス, 日立評論, Vol.98 No.07-08 506-507.
- 2) 大路清嗣, 低繰返し疲れにおける累積損傷の仮設の検討, 日本機械学会誌, 70, 576 (1972) 36.
- 3) 日本材料学会編, 金属材料疲労設計便覧 (1978), 206, 養賢堂.
- 4) 高瀬徹, S45C 調質材の二段二重変動荷重下の回転曲げ疲労寿命評価, 日本機械学会論文集(A編), Vol.75, No.751, (2009), 322-326.
- 5) 日本機械学会編, 機械工学便覧基礎編材料力学, 丸善, (2005), 170.
- 6) 日本機械学会編, 機械工学便覧基礎編材料力学, 丸善, (2005), 127.
- 7) Murakami, Y., Harada, S., Endo, T., Tani-ishi, H. and Fukushima, Y. : Correlations among growth law of small cracks, low cycle fatigue law and applicability of Miner's rule, Engineering Fracture Mechanics, Vol.18, No.5(1983), 909-924.



- 8) 村上敬宜, 原田昭治, 谷石彦文, 福島良博, 遠藤達雄, 微小き裂の伝ば則, 低サイクル疲労則およびマ  
イナー則成立の相互関係について, 日本機械学会論文集, Vol.49, No.447 (1983), 1411-1419.
- 9) 西谷弘信, 森田尚文, 炭素鋼の低サイクル疲れにおける疲れ被害, 日本機械学会論文集, 39, 322  
(1973) 1711.
- 10) 正橋直哉, 破壊の基礎, ものづくり基礎講座 (第 53 回技術セミナー)「金属の魅力をみなおそう  
第三弾 観察・分析編 第四回」, 2 Feb. 2018.
- 11) 北村隆行, 破壊の研究の深化と高度化, 学問の動向, (2017-3), 10-16.

### 3.5 機械工学への現代数学理論の応用

#### (1) 提案理由

新たな発想のもと高機能機械システムを実現するために, 近年発達した数学理論 (微分幾何, 多  
様体理論をはじめとした幾何学的解析手法) を積極的に取り入れた解析制御技術を確立できると意  
義がある<sup>1)</sup>.

#### (2) 調査結果

力学系 (Dynamical Systems) は時間とともに変化するシステムを意味し, 力学系理論とはシステム  
のふるまいを定量的のみならず定性的に明らかにする数学理論であり, 数学の分野で急速に研究が  
進んでいる. 力学系理論はとくに, 非線形ダイナミクスの解析や制御に威力を発揮し, 工学分野で  
使われてきたいわゆる非線形振動解析法の発展的な側面を持ち, より数理的かつ汎用的な理論と考  
えることができる.

非線形ダイナミクスの研究は, 線形解析結果の単なる定量的な精度向上のみを目的とはせず, 線  
形解析では全く予想不可能な現象の解析とその定性的なメカニズムの究明, さらには制御を目的と  
する<sup>2)</sup>.

#### a) 力学系理論・応用

一般に機械システムは非線形特性を持ち (複数の平衡点が存在し, それらの安定性も様々で), 予  
測不可能な非線形挙動を示す可能性がある. 安全性や信頼性を確保するために, 非線形挙動が生じ  
ないように, 高剛性な (その結果重量化してしまう) 機械システムが, 狭い動作範囲 (振り子でいえば  
近似  $\sin\theta \doteq \theta$  が成り立つ狭い動作範囲) で利用されてきた.

しかしながら近年の, 機械システムに対する高性能・高機能化への期待は, 柔軟化・軽量化さら  
には動作範囲の拡張 (振り子でいえば近似  $\sin\theta \doteq \theta$  が成り立たない範囲) を要請し, もはや無視できな  
くなったシステムの非線形性といかに向きあい, 安全性や信頼性を確保しさらに向上していくかが  
重要な課題になっている.

そこで、これまでの発想とは逆に、元々システムに内在する非線形性によって生じる非線形現象の複雑性や多様性を積極的に利用して従来手法の限界を打破する、様々な革新的な制御手法が構築されている<sup>3)</sup>。

広島大学佐藤、名古屋大学藤本は、非線形確率システムの一クラスである確率力学系に対して、力学系特有の性質を積極的に利用することで、効果的な制御手法を提案した<sup>4)</sup>。

慶応大学井上正樹専任講師の研究室では、大規模複雑系のための制御・力学系理論の研究に取り組み、「次々世代電力系統の設計方策」「自動運転車群の隊列制御系設計」などのテーマに取り組んでいる<sup>5)</sup>。

#### b) 位相データ解析とパーシステントホモロジー

位相的データ解析とは、トポロジー（位相幾何学）という「柔らかい」幾何学の手法により、データに隠された構造を抽出しようという解析手法である。近年の計算機の高高速化やアルゴリズムの発達により、その適用範囲は飛躍的に広がっている。機械工学分野の応用事例では、「流体力学計算データの構造解析」などがある<sup>6)</sup>。

理化学研究所革新知能統合研究センター トポロジカルデータ解析チームの平岡らは、トポロジカルデータ解析の中でもパーシステントホモロジー理論の表現論、確率論、統計・機械学習、および逆問題について研究を進めている。また、実データ解析の応用例では、材料科学の構造解析で成果を上げ、他の分野へも進出している<sup>7)</sup>。なお、「位相データ解析とパーシステントホモロジー」の数学的説明については、8)が詳しい。

#### c) 材料科学と離散幾何解析学の連携による挑戦<sup>9)</sup>

東北大学原子分子材料科学高等研究機構では、数学者・計算科学者・実験科学者が組んで、材料科学と離散幾何解析学の連携による挑戦が進んでいる。研究目標は、具体的には下記のようなものである。

- ・異なる材料に共通な機能発現の背後にある基本原理の解明。
- ・見いだされた原理に基づき機能や材料を予見する基盤の構築。
- ・創エネルギー、省エネルギー、環境浄化に貢献するグリーン・マテリアルの創製による社会貢献。

次に、機械工学へ数学理論を取り入れる活動として、2つの研究機関の例を調査した。

#### d) 大阪大学数理・データ科学教育研究センター(MMDS)の取組<sup>10)</sup>

現状、工学における理論研究はモデリングとシミュレーションを用いた数理的方法が主体となっている。しかし、普遍的な法則や構造を抽出し、理論を精密化し、実用性を高めて現実により近づかせるためには、数学的な整理と、数理構造の明確化が必要である。大阪大学数理・データ科学教育研究センター(MMDS) モデリング部門では、工学で展開されている数理的方法と、高度に抽象化された現代数学との接点に関して、ワークショップの形式で探索している。この中では最適形状設計に数学論が用いられる例として以下に示すような例が紹介されている。

- ・最適形状設計問題における評価関数の2階形状微分とNewton法(畔上秀幸):線形弾性体とStokes流れ場の密度型位相最適化問題における評価関数の2階 $\theta$ 微分,線形弾性体とStokes流れ場の領域変動型形状最適化問題で定義された評価関数の2階形状微分をもとめ,これらを使って $H^1$ Newton法がどう動くかについて.
- ・多階層量子シミュレーションによるナノマテリアルデザインと実証(吉田博):原子レベルやナノスケールレベルにおける物質の基本法則である量子力学(第一原理)に基づいて,原子番号だけを入力パラメータとして,物理機構解明や物性予測を行う第一原理計算について.
- ・材料の強さと階層性(尾方成信):材料の強さの数理的理解と予測には時空間階層性へのアプローチが不可欠である.原子・電子論から見れば,材料の強さという概念は,外部からの刺激に対して発生する「反応,拡散,変形」という3つの材料応答形態の結果として評価される材料の力学的安定性という定義で一般化するのが自然である.本報告では,材料の力学的安定性について空間階層性(サイズ依存性),時間階層性(通常のMDを超えた領域の計算)を考慮した評価法が述べられていた.
- ・開殻性を持つ光機能性分子系の理論設計(中野雅由):未開拓の中間および強電子相関系の非線形光学(NLO)効果について,世界に先駆けて「開殻分子に基づく新規非線形光学物質の理論」を量子化学に基づいて提案されている. ※開殻性:結合の弱さ/電子と電子の相関の程度を表す.

#### e)九州大学マス・フォア・インダストリ研究所の活動<sup>1)</sup>

多くの科学技術分野において,数学・数理科学の研究人材はかつてないほど必要とされており,国際的にこうした需要が今後さらに増加することが確実である.九州大学マス・フォア・インダストリ研究所(略称:MI研究所またはIMI)は,このような国際社会からの要請に応えるため,多様な数学研究を基礎におくアジア初の産業数学の研究所として,平成23年4月1日に創設された.多くの研究実績があるが,産学連携の共同研究の事例の一例としては下記のようなものが挙げられる.

- ・多目的最適化と特異点論:多目的最適化に特異点論を応用することにより,従来の最適化理論のように線形関数や凸関数に留まらず,ジェネリックな写像を扱うことができる汎用性の高い最適化理論およびアルゴリズムを創出することを目指す.
- ・数理モデルを活用した道路性状分析に関する研究:車両に設置したセンサーにより取得した走行データ(位置,速度,加速度等)に基づき,路面状態を把握し,路面劣化を予測する.
- ・材料科学への純粋数学適用に関する研究:材料組織の種々のデータの特徴量を幾何学的に抽出し定式化することを目的に,マルチスケールモデリングの数学基盤の創出を図った.
- ・データ分析と統計モデル構築による予測,最適化:ものづくりから社会システムまで,製造の微細化や情報の洪水が急速に進んでおり,最適な解を効率よく求める手法の確立が重要になっている.このような背景の下,この研究では,これまで試行錯誤を繰り返したり,順番に候補を適用して解

いていた問題に対して、効率よく系統的に高品質な解を提供することを目的とした研究を行った。

### (3) 今後の課題

近年発達した数学理論により工学分野の応用の発展が期待され、科学技術振興機構の「さきがけ」、 「CREST」など大型プロジェクトが動いている。機械工学への応用はまだ端緒であり、今後の動向に注目する必要がある。

### 参考文献

- 1) 技術ロードマップ，機械工学における力学系理論の応用に関する研究会，日本機械学会 機械力学・計測制御部門，2016
- 2) 藪野浩司 筑波大学，13.4 力学系理論・応用，機械工学年鑑 2019 —機械工学の最新動向—
- 3) 筑波大学機械システム研究室藪野研究室 HP  
<http://yabuno.iit.tsukuba.ac.jp/>
- 4) 佐藤訓志，藤本健治，力学系の性質を利用した非線形確率システムの制御，計測と制御，Vol.50, No.11,(2011),1-6.
- 5) 慶応大学井上正樹研究室 HP パンフレット  
<https://sites.google.com/keio.jp/minoue/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0/%E3%83%91%E3%83%B3%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%83%E3%83%88>
- 6) 荒井迅，計算トポロジーによる位相的データ解析，中部大学創発学術院 HP  
<https://www.chubu.ac.jp/about/faculty/profile/1791e67338c061f97cd10090ce76d49938775190.pdf>
- 7) 理化学研究所 革新知能統合研究センター トポロジカルデータ解析チーム HP  
HP[https://www.riken.jp/research/labs/aip/generic\\_tech/topology\\_data\\_anl/index.html](https://www.riken.jp/research/labs/aip/generic_tech/topology_data_anl/index.html)
- 8) 平岡裕章，位相データ解析とパーシステントホモロジー，数学，Vol.68,No.4，(2016) ,361-380.
- 9) 小谷元子，材料科学と離散幾何解析学の連携による挑戦，表面科学，Vol.34, No.1, (2013), 3-8.
- 10) 大阪大学数理・データ科学教育研究センターHP  
<http://www-mmds.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/structure/activity/workshop.php?id=26>
- 11) 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 HP  
<https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/pages/about.html>

## 3.6 バイオミメティクスと 3DP による製造技術

### (1) 提案理由

従来の構造物は製造上の制約から形状が決まっていたため自由な形状が作れなかった。しかし、近年の各種 3次元プリンタ (3DP) の発達からバイオミメティクスなどを利用した自由な形状が作れるようになっている。材質・形状を場所によって変える合理的な構造の製造技術・設計技術の先端動向を調査する。

自然界における生物の形は何百万年もの進化を遂げてきたものであり、人間が設計する形状と比較しても合理的で美しいバイオミメティクス研究が盛んにものとなっている。これら生物の持つ構造・機能を工学的に応用するためにバイオミメティクス研究が盛んに行われてきたが、その複雑な構造のために製造が困難なものが多かった。

しかし、近年では樹脂や金属の3Dプリンタの開発が盛んに行われることにより、従来不可能であった造形が可能になってきている。また、形状だけでなく材料特性そのものも異材を組み合わせた3次元造形で調整する事が可能になると考えられる。

このように、バイオミメティクスを活用し、3Dプリンタで製造を実現するための技術動向について調査を行う。

## (2) 調査結果

### a) 活用事例の現状

既にバイオミメティクスを活用している事例<sup>1)</sup>として、以下の3つのカテゴリーに別けて製品/システム例を記載する。いずれもが3Dプリンタは活用していない。

#### ・消費者向け製品

ヨーグルトのフタ (森永乳業) : ハスの葉。ヨーグルトが付きにくい。

洗濯機のセパレータ (シャープ) : イルカの背びれ。電力、水量、洗剤量削減。

#### ・企業向け製品

ロボットアーム (関西大学) : タコの足。あらゆる形状の物体を把持。

石油化学分野の遠心圧縮機ディフューザー (日立製作所) : 鮫肌。圧縮効率向上。鮫体表面構造をX線マイクロCT法を用いて解析し、遠心圧縮機の動作流速からサメ体表での流れと相似な流れを再現するために、精密切削加工を用いて数十mm程度の微細表面構造を再現した<sup>2)</sup>。

#### ・システム

自動群走行技術 (日産自動車) : 魚群の動き。隣接個体との衝突防止など。

パッシブ型空調システム (Mick Pearce) : アリ塚。冷房コスト低減。

### b) 3Dプリンティング技術の適用

ナノスクライブ社では光造形技術による3Dプリンティング技術 (Photonic Professional GT) を用いたナノ、マイクロ及びミリメートルスケールの生物的な構造をまねた、自由な幾何学的デザインを提供している<sup>3)</sup>。

早稲田大学の梅津教授らは、静電力によってインクを吐出するマイクロバイオ3Dプリンタを開発した<sup>4)</sup>。プリントの対象となる面はXYZステージに取り付けられ、シリンジは着弾面に対して垂直に設置されている。シリンジの先端にノズルが装着され、プリントするインクはシリンジ内に充填される。高電圧電源装置からシリンジ内のインクに電圧が印加され、電荷を持ったインクがノズル

ル先端から、アース接続されている着弾面に向かって引っ張られるように吐出される。XYZ ステージが PC 制御によって動く事で、任意の形状にプリントする事が可能。静電力によってインクを吐出するため、高粘性の液体を高精度で吐出することができる。

### c) X線 CT システムによる生物及び素材の構造観察<sup>5)</sup>

X線 CT システムは非破壊で対象内部の情報を得ることができるため、対象の構造を崩すことが無い。そのため、軟組織の観察や光学顕微鏡による観察が難しいものには特に有効であり、対象の三次元形状を活用すれば構造解析などのシミュレーションや、3D プリンタによる造形も可能となることから、その後の材料開発につながる有益な手法として注目されている。例えば流体抵抗低減のため鮫肌を X線 CT で撮影して STL (Standard Triangulated Language) 形式で出力し、3D プリンタでのモデリングやシミュレーションに活用する方法が紹介されている。慶応大学では、電子顕微鏡データの利用ではあるが、実際に人工鮫肌の 3D プリンタによる製造に成功している<sup>6)</sup>。

### (3) 今後の課題

現状小型の部品等へのバイオミメティクス適用がなされており、3D プリンタを使った研究例も盛んに報告されている。高分子学会ではバイオミメティクス研究会<sup>7)</sup>を設置して盛んに活動している状況である。しかし、大型部品、構造物へのバイオミメティクス適用には、それに対応できる 3D プリンタが必要であるが現在その技術は未確立であり、発展が望まれる。

### 参考文献

- 1) 船橋龍之介, バイオミメティクスの活用が製造業にもたらす新たな変革, 三菱総合研究所 技術レポート, 2019年6月, 1-7.
- 2) NEDO 材料・ナノテクノロジー部, 革新的新構造材料等研究開発 電子・材料・ナノテクノロジー部実施事業の周辺技術・関連課題における小規模研究開発の実施 バイオミメティクスによる流体制御に関する研究開発 (プロジェクト番号 P14014), NEDO 平成 27 年度成果報告書, (2015).
- 3) [https://www.nanoscribe-japan.com/a\\_top/a\\_biomimetics/](https://www.nanoscribe-japan.com/a_top/a_biomimetics/)
- 4) 田中龍一郎, 坂口勝久, 清水達也, 梅津信二郎, マイクロバイオ 3D プリンタを用いたバイオマテリアルゲルパターンニング技術の開発, 生体医工学, 55Annual, 3PM-Abstract, (2017), 203-203.
- 5) 西埜誠, バイオミメティクスと最新の分析評価技術, 表面技術, Vol.68, No.4, (2017), 2187-190.
- 6) Yasuda Y, Zhang K, Sasaki O, Tomita M, Rival D, Galipon J. Manufacturing of biomimetic silicone rubber films for experimental fluid mechanics: 3DPrinted shark skin molds, Journal of The Electrochemical Society, 166(9), (2019), B3302-B3308.
- 7) <https://main.spsj.or.jp/c12/gyoji/biomimetics.php>

## 4. 結論

### 4.1 調査結果概要

#### (1) 断熱材料

現在エネルギー源として電動化の大きな流れがあるが、当面動力は熱機関に依存していくと考えられる。断熱材料のメカニズムは十分に検討されており、様々な材料、断熱メカニズムが開発されている。特に高温で稼働するタービン用の断熱材料の進歩は著しい。今後は熱機関で多く用いられている鉄系材料に容易に適用できる断熱材料の開発が望まれる。

#### (2) 内部欠陥を有する材料の強度に対する寸法効果

内部欠陥が避けられない鋳物などの信頼性、経済性向上のためには、材料の強度に対する寸法効果の解明と評価法の開発が必要である。計測・モデル化技術では、X線CTで取得したデータと数値解析を組み合わせた手法の開発が進んでいる。統計的手法による欠陥評価が鋳物、セラミック、複合材料のそれぞれで進められている。しかしこれらの手法を実際の製品に適用するにはギャップがあり、企業と大学が協力して安全性を合理的に保障しうる簡便な手法の開発が望まれる。

#### (3) 表面硬化材料の疲労強度推定技術

ショットピーニングなどにより表面層の圧縮残留応力を増大させ、高強度を得ることもよく行われている。疲労強度の絶対値に関しては、深さ方向に分布する硬度の影響、硬度増加に伴うき裂感度の上昇、介在物の影響、熱処理による残留応力分布の影響などの研究が行われており、精度良く疲労強度を推定する技術開発が進められている。一方、強度評価に必要な材料検査技術として、介在物および残留応力の分布評価が挙げられるが、まだ製造現場において手軽に精度よく実施できる段階にはないと思われる。要素技術の高度化と統合された簡便安価な評価手法の構築が待たれる。

#### (4) マイナー則に関する考察

累積疲労損傷値  $D$  を応力レベル、その繰返し数と疲労強度データで定義し、 $D$  が 1 に達したときに破壊が生じることを推定するマイナー則は広く用いられているが、実際は破壊が生じるときの  $D$  の値は材料や条件で広くばらつくことが知られており、個別検討を要するのが実情である。今後 IoT を活用したリアルタイムモニタリングが進展すると考えられるので、マイナー則の高精度化を目的とした研究開発が望まれる。

#### (5) 機械工学への現代数学理論の応用

近年発達した数学理論を機械工学に積極的に取り入れた解析制御技術を確立できると飛躍的な発展が期待できる。この分野の研究は大学が中心となって進められている。科学技術振興機構の「さきがけ」、 「CREST」など大型プロジェクトも動いているが、機械工学への応用はまだ端緒であり、今後の動向に注目する必要がある。

#### (6) バイオミメティクスと 3DP による製造技術

生体のメカニズムを模倣するバイオミメティクスは、製造技術がネックとなっていたが、3DP がプレー

クスルーとなり、さらに X 線 CT の技術により開発が加速している。現状小型の部品等へのバイオメテックス適用がなされているが、3D プリンタの開発による大型構造物への適用は望まれる。

## 4.2 総括

冒頭で述べたように本懇談会は COCN 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」の提言に基づき、日本機械学会のイノベーションセンタ（当時）に 2017 年に設置した。目的は COCN プロジェクトで提案されているように、複数企業の出資による協調領域の研究推進である。現在 2 テーマの研究が RC 分科会で遂行されている（[RC285]産業競争力を強化する基盤技術開発のための FRP 破壊メカニズム解明に関する研究分科会，[RC290] 産業競争力を強化する基盤技術開発のための革新的超低摩擦化手法に関する研究分科会）。これらのテーマを提案するため、参加メンバが学会の会議室に集まり、協調領域の技術に関してざっくばらんに議論し、調査した。2017 年度、2018 年度の検討結果を報告書にまとめ、学会に提出した。本報告書は第 3 報に相当する。

これまでの議論で分かったことを簡単にまとめると以下のようなになる。

- ・各企業の技術的な悩み事は似通っており、特に秘匿することはない。
- ・最先端の競争前領域の研究に関しては、国プロなどで複数の研究機関が共同で研究開発を行う機会は多いが、各企業の悩みのテーマの深堀研究の機会は少ない。
- ・企業が抱えている技術的課題をそれぞれの企業が共同研究などで解決しようとするのは非常に非効率である。

2019 年度末に開催された会議にて、本懇談会は 3 年の活動を経てひとまず終了することにした。JSME の E は「Engineers」である。今後も産官学の機械系エンジニアが学会内でざっくばらんな意見交換ができる場を設けていただくことを希望する。

### 参加メンバ

日本機械学会	中山良一
I H I	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）



## 付 録

### 2017 年度の調査内容

#### (1) 接着メカニズムの解明

接着力の発現メカニズムは、機械的結合、物理的相互作用、化学的相互作用によっていることが判っており、現時点での技術課題に対し、接着メカニズム自体は解明されていると考えられるが、定量的な予測手段はない。

#### (2) 摩擦力の解明

摩擦力の発生メカニズムは、摺動表面状態の同定の困難さもあって、全貌解明への道のりは遠い。シンプル化した表面状態に対するシミュレーション技術をマクロ領域へと援用することがブレークスルーとなる可能性がある。

#### (3) フラクトグラフィの高度化

破面解析は技術の属人化傾向が強いため、AIなどを活用した評価の自動化に対する期待が大きい。

#### (4) 摺動シミュレーション技術

第一原理分子動力学解析、フェーズフィールド法などマイクロな解析で摺動現象を解明する研究が進められているが、工学的には、更なるマクロ領域の現象解明に対する期待が大きい。

#### (5) FRP の疲労メカニズムの解明

個別材料、構造に対する寿命評価研究は膨大であるが、統一的な理論の構築には未だ到っていない。また、環境の影響が強いことも問題を複雑にしている。

#### (6) 材料の残存強度、残存疲労寿命の推定法

切り出し試験片を用いたミニチュア材料試験や様々な非破壊検査が提案されているが、実働機械へ適用可能な簡便な評価手法への道のりは遠いと思われる。イノベーションが必要。

### 2018 年度の調査内容

#### (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。