

事業活動を支える材料技術部の取組み

Materials Engineering Initiatives to Support Manufacturing

竹内 秀隆^{*1} 下 俊久^{*1} 鈴木 智博^{*1} 谷澤 元治^{*1} 斉藤 さつき^{*1} 工藤 英弘^{*1} 神谷 修平^{*1}
 Yoshitaka Takeuchi Toshihisa Shimo Tomohiro Suzuki Motoharu Tanizawa Satsuki Saito Hidehiro Kudo Shuheji Kamiya

野口 将人^{*1} 神山 真巳^{*1}
 Masato Noguchi Mami Kamiyama

*1 材料技術部

1 はじめに

モノづくりの会社である当社において材料技術は、創業当時から長い歴史の中で、扱う材料や技術の変遷はありながらも、社業を支える基盤技術としてその技術を引き継いできており、現在は材料技術部がその役割を担っている。

世の中の変化のスピードがこれまで以上に速くなる中、現在の材料技術部の取組みをご紹介しますとともに、今後も社会に貢献し続ける会社の一翼を担う部署としての役割を果たすべく、皆様と考える機会としたい。

2 材料技術部の役割

2.1 材料技術部門の変遷

当社はG型自動織機の製造販売を目的に1926年に創立され、その後、事業の多角化を進め、繊維機械、自動車(車両、エンジン、カーエアコン用コンプレッサほか)、産業車両、エレクトロニクスと事業領域を拡大してきた。その中で、当社における材料技術部門は、1947年「材料研究課」として設立し、1990年代の研究所時代等を経て現在の材料技術部に至る。研究所時代までは、各事業部から毎年数多くの分析を依頼されてきた。中でも当時の当社製品において「金属材料」は主要材料であり、SEM^{*1}による金属破面の観察や、EPMA^{*2}による金属成分の組成分析など金属材料の専門家が技術

ノウハウを蓄積してきた。

また、研究所時代には、事業部向けや新規事業向けの「材料開発」を進め、樹脂ウィンドウの基礎技術確立やコンプレッサ事業部向けめっき開発に取り組んだ。

2000年代になると材料技術部門も「新規事業」「差別化材料開発」に力を入れ、ロータリーバルブシャフトの樹脂コート開発など新規事業につながる技術開発で成果を挙げた。一方、選択と集中の経営判断から「依頼分析」を中断する時期もあったことから、2010年代以降、全事業部に役立つ材料技術部門へとかじを切り、後述する材料技術部の3つの役割を掲げ活動を推進している。

2.2 材料技術部の3つの役割

現在、材料技術部は本社機能として、図1に示すように

- I. 事業部の直面する材料起因の課題解決と品質確保
- II. 事業部将来製品の差別化につながる材料開発・適合
- III. 化学物質管理事務局・LCA算出情報提供

の3つの役割を担っており、これらの取組みにより材料技術の専門部署として事業部活動を支援している。

注: *1 SEM: Scanning Electron Microscope

*2 EPMA: Electron Probe Micro Analyzer

I. 事業部の直面する材料起因の課題解決と品質確保

材料技術部では、事業部製品に対し材料提案や材料不具合の原因調査など行っており、長年培った分析技術や外部連携を活用しながら材料課題を解決している。また、品質確保として、事業部のDRBFM^{*3}に参加し、材料の選び方や使い方に関し懸念点を抽出することで、材料起因不具合の未然防止につなげる活動を実施している。

II. 事業部将来製品の差別化につながる材料開発・適合

事業部の将来製品を差別化できる新規材料の開発や、既存市販材料の自社製品向け仕様への適合を行っている。材料開発についての事例は、後述するが、直近では環境対応のためのリサイクル材やCN^{*4}に向けた開発も行い、さらなる品質向上・性能向上・原価低減に対する材料提案を推進している。

III. 化学物質管理事務局・LCA算出情報提供

全社の製品含有化学物質管理事務局として、関連する法規情報提供や管理システム運用などを行っている。正確な対応を行うため、化学物質管理システムの再構築を進めている。また、CNに関連して温室効果ガス排出量削減に取り組むためのLCA^{*5}算出に関する情報収集や環境構築も進めている。

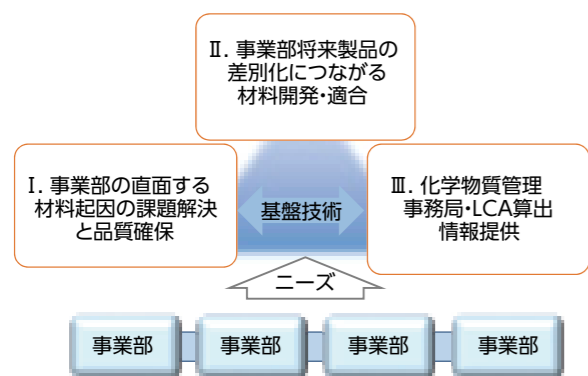


図1 材料技術部の3つの役割
Fig.1 Three Initiatives of the Materials Engineering Department

次章では、II. 事業部将来製品の差別化につながる材料開発・適合を詳細に説明する。

注: *3 DRBFM: Design Review Based on Failure Mode
*4 CN: Carbon Neutral
*5 LCA: Life Cycle Assessment
*6 FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

3 材料開発・適合の取組み

当社製品においては「金属材料」から「樹脂材料」まで幅広い領域が対象となる。また、材料開発において、材料固有の複雑な現象を把握するとともに物性向上を図るためには、「材料分析・評価技術」も重要となってくる。ここでは、これらの材料開発・適合とともに分析・評価技術に関する取組みも紹介する。

3.1 鋼の組織制御によるFCEV部品への貢献

機械部品や構造物を製作するためには、必要とされる材料特性を理解し、それに応じた材料を選定する必要がある。また、このためには材料工程の検討や材料特性の評価も重要である。ここでは、第2世代FCEV^{*6}に採用されたエアコンプレッサの小型・軽量化を実現する構成要素の一つである、トラクションドライブ式増速機に適用した鋼材の熱処理技術を例として紹介する。

一般的な増速機は歯車を用いるが、本製品では音や振動の問題から図2に示すトラクションドライブ方式を採用した^[1]。トラクションドライブでは、高い圧力で固化する特殊なトラクションオイルを介してローラ同士を押し付けて、トルク伝達を行う。このため、ローラが滑らないように強く押し付けるため、ローラ同士の接触点に数GPa級の応力が生じる。加えて、入力リングが1回転するとシャフトは10倍以上回転することから、シャフトやローラの接触点には、数GPa級の繰返し応力に耐えうる超長疲労寿命が求められる。

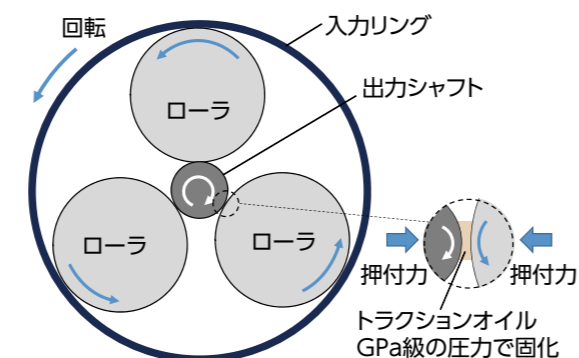


図2 トラクションドライブ式増速機のローラ接触点におけるオイルを介したトルク伝達
Fig.2 Torque transmission using solidified oil at roller-contacts of traction drive.

さらに、トラクションオイルには摩耗粉などのミクロな異物の混入が避けられない。試作開発段階において、図3に示すように転がり接触面にはさまざまな異物痕が観察され、これらを起点とした早期破壊が発生した。従って、接触面には耐異物性も求められ、疲労特性との両立が必要になる。

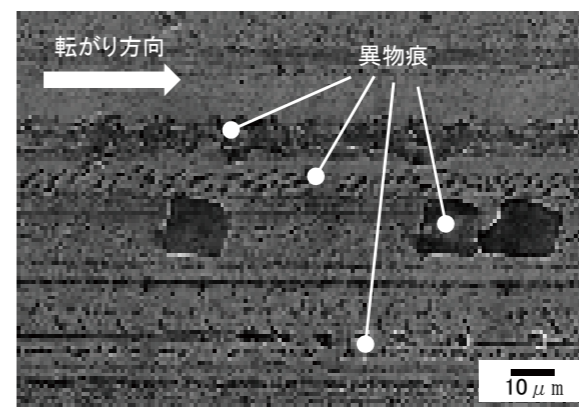


図3 転がり接触面の異物痕(試作開発品)
Fig.3 Impressions caused by contamination on rolling contact surface of trial product.

疲労特性の向上は、表面にマルテンサイト組織(M相)を形成させ、硬度を高めるとともに耐摩耗性を狙う。一方、耐異物性の向上には、硬いM相中に比較的柔らかいオーステナイト組織(γ相)を存在させ、異物圧痕の応力集中を緩和させることが有効である^[2]。従って疲労特性と耐異物性の向上を進める上では、硬さとしては狙う方向は相反する。

これに対して、両特性が両立する硬さの最適化、すなわち、M相とγ相の混在する金属組織の最適化を行った。一般的に鋼材は焼入焼戻し熱処理により硬度を高める。通常の熱処理では前述のように、硬すぎて異物痕による破壊が懸念されることから熱処理条件を見直した。さらに、使用中に高面圧によるγ相→M相の変化が生じるため、その変化を見込んだM相/γ相の比率を決定した。このようにして、新品から使用期間全域にわたってM相/γ相比率が許容範囲内に収まる熱処理条件を見出し、疲労特性と耐異物性を高い次元で両立させた。

本例に示すように、製品ニーズに応じて工程を最適化し、一般的な材料であっても使いこなしを工夫することで、信頼性確保や小型化・軽量化の両立を実現している。

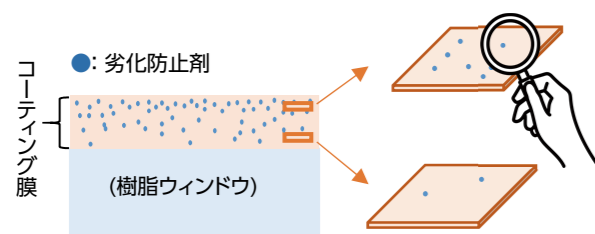
3.2 微量添加剤分析による樹脂ウィンドウへの貢献

樹脂材料は金属材料に比べて強度が低いが、軽く、複雑形状に成形しやすい。場合によっては安価に製造することができることから、比較的応力がかからない個所や機能材料を中心に年々その使用が増加している。一方で、樹脂は温度や紫外線などで劣化しやすく、変色・変形・割れなどのトラブルが起こり得るため、劣化防止剤が添加される場合が多い。

樹脂中の劣化防止剤が最大限に性能を発揮するには、その構造、添加量、分散状態などを制御した材料設計と、材料が狙いどおりに作成されているかを確認するための材料分析が欠かせない。しかし、樹脂は劣化防止剤などの混合物のため、微量に含まれる劣化防止剤を分析するには高度な技術が必要である。また詳細な検討には、材料やプロセスの情報、および製品としての使用条件が重要である。

材料技術部では2章で述べたように、分析手法や材料設計ノウハウを蓄積し、製品開発と品質確保を支援している。社内で情報共有できるメリットを活かして、関係者と密接に情報交換・議論をしながら材料分析、評価に取り組んでおり、これらの事例として、樹脂ウィンドウの基礎技術確立に寄与した分析技術を紹介する。

樹脂ウィンドウは無機ガラスと比べて大幅な軽量化効果があるが、日光の紫外線に直接さらされるため耐久性が大きな課題となる。すなわち、耐久性向上につながる添加剤を付与した材料の開発が鍵となる。一般的に、樹脂材料は樹脂主材と添加剤の混合物で、そのまま分析すると複雑なデータとなり状態を把握しにくい。そのため、目的成分を有機溶媒で抽出してから分析する。しかし、樹脂ウィンドウの場合、鍵となる劣化防止剤は樹脂表面のコーティング層に微量に含まれるため、抽出が困難である。また、薄膜の中の添加剤分布の把握も必要である。これらを模式的に図4に示す。



①採取個所のミクロン単位の制御 ②ppm単位の定量分析
 図4 添加剤分析に必要な2つの技術
 Fig.4 Two technical methods required to analyze additives in coating layer.

材料技術部では、コーティング層の薄片を採取する技術と薄片を熱分解GC/MS^{*7}に適用することによって、劣化防止剤を気化させてppm単位の高感度に検出する手法を開発した。一方、薄片であっても樹脂主材やその他有機成分も熱分解されると、図5に示すように100種類以上の熱分解物のスペクトルが得られる。これに対して、劣化防止剤の分子構造から熱分解挙動を推定し、基準となるピークを同定し、そのピークの面積から定量分析を可能とした。

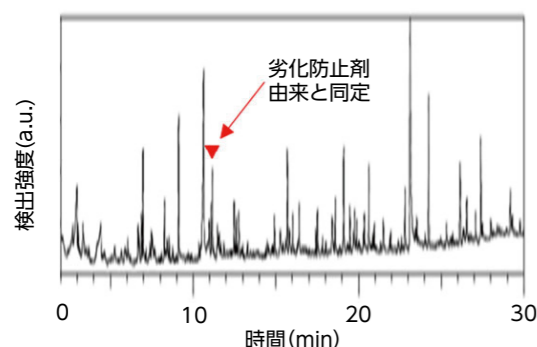


図5 熱分解GC/MSイオンクロマトグラム例
 Fig.5 An ion chromatogram example of pyrolysis GC/MS.

このように、分析手法や材料のノウハウ・知見を活かしながら、今後も困難な材料分析・解析に取り組んでいく。

3.3 アルミ合金の開発と鋳物疲労強度設計

アルミニウム合金(アルミ合金)は軽量でリサイクル性に優れ、CN、CE^{*8}に貢献し得る材料である。図6に示すように、比強度においてアルミ合金は鋼以上となる温度領域があり、さらなる高温域における特性の向上も期待される。また、アルミ合

金鋳物は複雑形状を低コストで作ることができるため、当社の生産では多く用いられているが、一方で、鋳物内部に強度を低下させる欠陥が存在するため、その対策として信頼性担保が重要である。

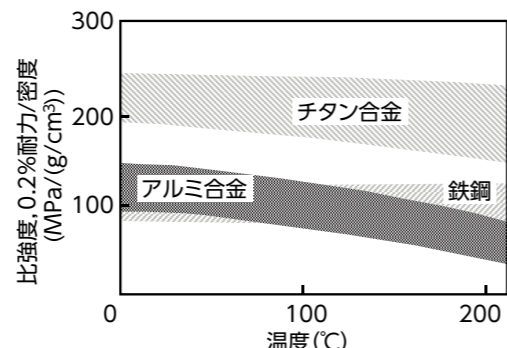


図6 代表的な構造用金属材料の比強度
 Fig.6 Specific proof strength of typical structural metallic materials

材料技術部では、これらのニーズや課題に対して種々の材料評価や合金設計・開発に取り組んでおり、ここでは高温強度向上と信頼性担保について紹介する。

高温強度向上: 従来にはない熱的安定性を有する金属間化合物T相を強化相とする耐熱アルミ合金(Tアルミ)に着目し、実用化開発を進めている^{[3][4]}。詳細については本技報の解説記事を参照いただきたいが、図7に示すように、Tアルミは鋳造および熱処理工程のみであるにもかかわらず、均質化や押出しといった複雑な工程を経たA2618と同等の高温強度が得られる。

信頼性担保: 鋳物の欠陥は特に疲労に影響するので、欠陥を考慮した疲労強度評価、そのデータ採取に取り組んでいる。すなわち、図8に示すように、欠陥を統計的に扱い、その疲労強度への影響を定量的に把握し、Stress-Strengthモデルを用いて許容欠陥寸法を評価する手法である。製品の疲労強度やCTデータを蓄積していくことで強度予測や工程へのフィードバックが可能になり、製品の高信頼化と過剰品質抑制の両立を実現し得る技術である。

注: *7 GC/MS: Gas Chromatography - Mass Spectrometry
 *8 CE: Circular Economy

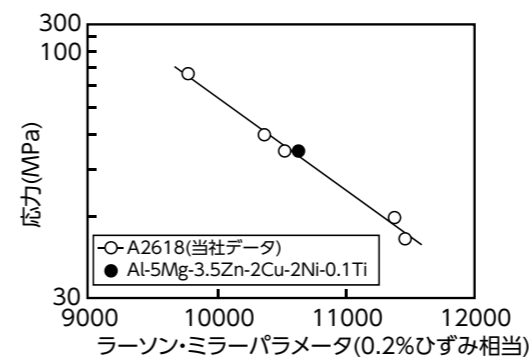


図7 Tアルミ(Al-5Mg-3.5Zn-2Cu-2Ni-0.1Ti)の高温強度(0.2%ひずみ相当ラーソン・ミラーパラメータ)
 Fig.7 High temperature strength of T-aluminum -Larson-Miller parameter equivalent to 0.2% strain-

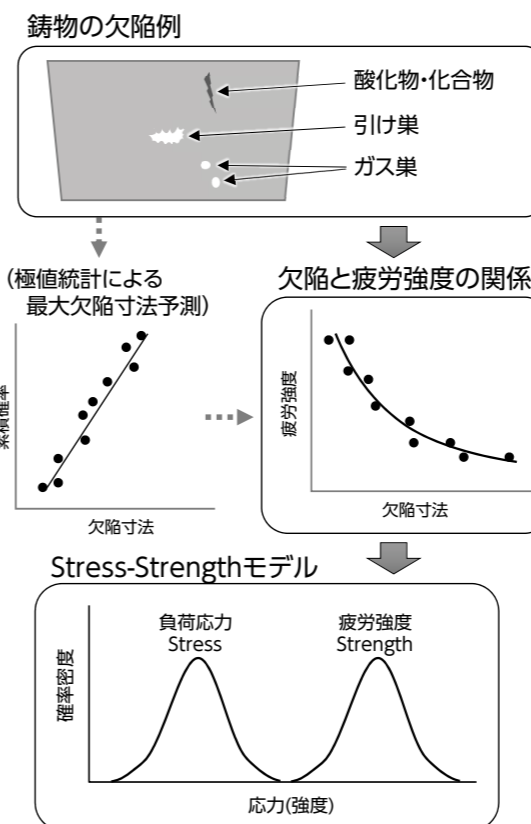


図8 鋳造欠陥を統計的に考慮する疲労設計
 Fig.8 Statistical model for fatigue design considering cast defects.

以上のようにアルミ合金を代表例として挙げたが、鋳鉄などの現用材から将来ニーズに備えるチタン合金まで、同様に高信頼化に対する材料評価や合金開発に取り組んでいる。

3.4 CNF分散による発泡吸音材開発

エンジン車におけるアイドリングストップやBEV^{*9}化により、これまで騒音の中で大きな割合

注: *9 BEV: Battery Electric Vehicle
 *10 CNF: Cellulose Nano Fiber

を占めていたエンジン音がなくなり、自動車にはより一層の静粛性が求められている。これに伴って、音を吸収する吸音材への要求も高まっている。

吸音材の吸音率を高めるには、吸音材を厚くするか、吸音材の背後に空気層を設ける方法があるが、車内空間を確保するため、吸音材に許される厚さや空間は十分ではない。また、一般的によく使われる多孔質吸音材は、高周波数帯で吸音率が高く、波長の長い低周波数帯の吸音ほど吸音材の厚みを要する。すなわち、より薄く、特に中低周波数帯の任意の騒音を取り除くことができる吸音材が望まれる。

音が発泡体を通る際、迷路のように入り組んだ経路により、発泡体の見かけの厚みを増やすことができる。図9に示すように、気泡が小さく、入り組むほど長い経路となり発泡体の厚みを増やすのと同等の効果がある。発泡体では気泡壁との粘性摩擦が主な吸音モードとなるため、より細かい経路を通過することで効率よく音を吸収できる。しかし、一般的な発泡体成形プロセスでは、気泡を小さくすると発泡率を上げることが難しく、さらに、発泡体骨格の比率が高まることで音が骨格で反射される確率が高くなる。この課題を克服するため、CNF^{*10}に着目した。

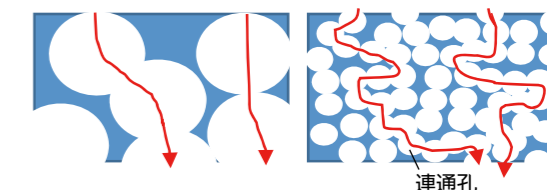


図9 発泡体気泡の大きさと音が通過する経路
 Fig.9 Sound wave pathway depend on the size of foam cells.

CNFは直径が3~50nm、アスペクト比が100以上の繊維状物質である。発泡吸音材は樹脂成形時気泡とするためCNFには、ナノサイズの無数の発泡起点として機能すること、気泡のサイズを抑制するために樹脂を増粘させること、連通路の生成起点となることを期待した。しかしCNFは、そのナノサイズがゆえに凝集しやすいという難点を持つ。

そこでCNFの種類・溶媒・極性と樹脂への混合方法を検討し、成形前の液状樹脂に極力凝集を抑えてCNFを混合する条件を見出した。すなわち、添加量を増やすことで、気泡数を増やしながらかそのサイズを小さくし、音の経路となる連通路を確保できることを確認した。その結果、図10に示すように、吸音する周波数帯は低周波数側へシフトした。これは、図11に示すように、均質化法を用いて実際の発泡体にフィッティングさせたケルビンセルモデル^[5]で計算した結果と同じ傾向となった。すなわち、CNFの添加量を増やすことで気泡数を増やして気泡サイズを抑制し、それに伴って吸音する波長のピークが低周波数側へシフトするというコンセプトが確認できた。また低周波数での吸音率は一般的な多孔質吸音材よりも高い値を示した。今後は適宜製品適用を検討していきたい。

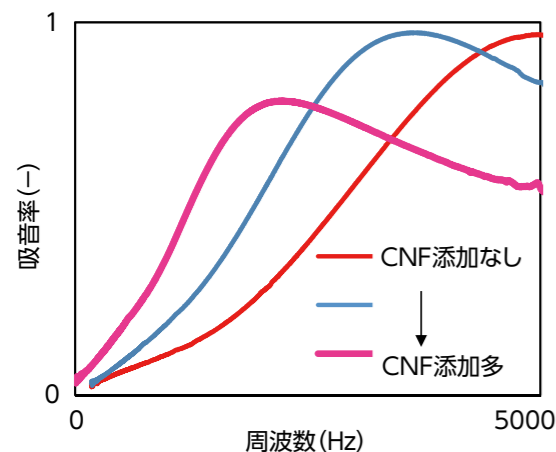


図10 CNFを添加した吸音材の垂直入射吸音率
Fig.10 Sound absorption coefficient of CNF added materials.

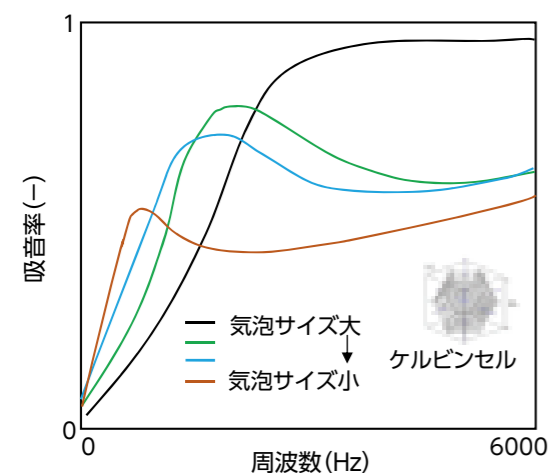


図11 気泡サイズをパラメータにした吸音率のシミュレーション結果
Fig.11 Simulation outcome of sound absorption coefficient with foam cell size.

4 まとめ

ここまで、材料技術の歴史から、現在の取組み内容である品質確保、化学物質管理、そして材料開発事例について紹介してきた。

それぞれの項目の成果や課題については、各章で述べられている通り、これまでの材料技術の活動は、いずれもモノづくりの会社として、基盤技術の一つである材料技術をいかに担保し、各事業部の事業活動のなかで、専門技術を持った本社部門の事業パートナーとして、役割を果たすかということを追いかけてきた。

幸い、材料に起因した重大な品質問題は発生していないが、それはひとえに、事業部とのパートナーシップと、これまでに培ってきた先人の知恵と努力を引き継いできたことに他ならない。

ここからは、これからの材料技術部門の在り方を考えてみたい。

2020年から始まったコロナ禍は、働き方を大きく変えることになり、常日頃、現場でものを触っていた材料技術部の仕事も人との接触を減らす工夫や、消毒の徹底など変化に対応していった。一方オンライン会議が浸透し、物理的な距離と移動にかかる時間の制約がなくなった。

同時に世の中では、地球温暖化対策からCO₂削減は、より喫緊の課題として取り組むことが要求されCNやCEといったキーワードが毎日のように聞かれるようになった。また2022年2月に始まったウクライナ侵攻は、カントリーリスクを認識させられただけでなく、今後の資源の確保やサプライチェーンの見直しを余儀なくされ、しかも不確実で誰しもが正解を持ち合わせていない状況に突入した。

そして、AIや機械学習が浸透する中で生成AIが登場し、今、まさにコンピュータと人との仕事の役割や線引きが見直されようとしている。

これらの環境変化は、企業活動全般に関わる変化であり、材料技術部門にだけ影響を及ぼすものではないが、材料技術部門の振る舞いが、企業活動に大きく影響を与え、会社にとってチャンスにも機会損失にもなりうる点でかじ取りは重要となる。

以下に具体的なポイントをいくつか挙げる。

- ・先人の知恵と現在進行中の材料技術部のデータは再構築中であるが、ここに生成AIなどの技術も取り込んで、知見はあったが活かされなかったということが無いようなレジジマネジメントシステムを構築する。
- ・技術ノウハウや職人技とも言える、破面観察や各種分析チャートの解析も機械学習を活用し、あるレベルまでは一般化、汎用化を進め、より専門的な解析に技術者の時間を充てる。
- ・CNの達成には、製造工程でのCO₂排出削減のための技術開発、例えば熱処理時間や温度の低温化など、材料技術の関わることも多く、事業部や取引先とコラボした対応がより必要とされる。また、内燃機関ではグリーンな燃料への対応や法規制対応に適合した技術開発が求められ、これら先回りして技術確立することで競争力確保といった攻めの経営にもつなげていく必要がある。
- ・CEに対しても、材料メーカーはもとより、製品の回収など、業界としての対応が必要である。また、資源確保やCEのしやすさの点で製品設計の見直しも必要であり、品質確保など材料技術の活躍の場はますます広がるため、リソース確保とシナリオが重要なポイントとなる。
- ・CNやCE、そして製品の付加価値向上のための材料開発は、望む特性から材料組成やプロセスを導き出す、MI^{*11}の活用がキーとなる。まだ、実用には時間がかかると思われるが、MIによる材料開発がゲームチェンジャーになりうる可能性は十分にあり、手を緩めるわけにはいかない。

以上、いくつかの今後の側面について方向性を記したが、当社のような製造メーカーにおいて、材料技術部門は、事業部からの日々の困りごと相談や品質確保のためのサポートが主たる業務であり、これらの業務の一つ一つ真摯に向き合い、材料の課題を解決し技術を残していくことがモノづくりの会社の技術力と言える。AIの世界がどんなに進んでも、人が設計し、人が作って、人が使う製品をより良くするのはコンピュータではなくて人であると思う。

材料技術の専門家集団として、今後も当社の事業活動を支えていくのが我々材料技術部の使命であり、モノづくりの基盤技術を担保する部門として進化を続けていく。

また世の中の変化に伴う新たな社会課題の解決に対応する、新たな価値創造となる新技術・新製品に貢献する材料の創出も目指していく。

■参考文献

- [1] 技報72号 第2世代MIRAI向けエアコンプレッサの開発
- [2] Y. Murakami, N. Mitamura and A. Maeda: Study on Improvement of Material Properties under Debris Contaminated Lubrication, Proc. Int. Tribol. Conf.(1995), 1393-1398.
- [3] 近藤雅晶, 鈴木智博, 黎若琪, 高田尚記: Al-Mg-Zn3元系耐熱合金の200℃におけるクリープ特性に及ぼす第4元素添加の影響, 軽金属, Vol.72, No.8(2022), 473-481.
- [4] 近藤雅晶, 鈴木智博, 黎若琪, 高田尚記: Al-Mg-Zn-Cu-Ni5元系耐熱合金へのTi微量添加による高温クリープ特性の向上, 軽金属, Vol.73, No.6(2023), 1-6.
- [5] 山本崇史, 桂大詞, 久保田寛: 均質化法による吸音材微視構造の寸法最適化, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.889(2020)

■著者紹介



注: *11 MI:Materials Informatics