モノづくり領域における研究開発の動向と展望

Trends and Outlook for Research and Development in Manufacturing Technology

小野﨑　徹　T. ONOZAKI

The production volume of automobiles is expected to increase in the future, but Japan's working-age population is projected to decrease further. Under these conditions, efficiency, automation, and labor-saving in the production of automobiles, automotive parts, and machinery components are becoming increasingly important. This paper explains trends in manufacturing technology. It also describes research and development efforts by JTEKT into digital twins, focusing on gear skiving and grinding processes. Finally, the applications of AI technology in JTEKT, including the automation of resin injection molding, knowledge modeling for machining, and the automation of visual paint inspection for CVJ are described in detail.

Key Words: manufacturing, digital twin, AI, automation

1．はじめに

近年，自動車産業はCASEとよばれる世界的な大変革期を迎えている．その中で自動車生産台数は増加傾向にあり[1)]，今後も増えることが予想されているが，一方で日本の生産年齢人口は減少傾向にある[2)]．このような状況で自動車や自動車部品，機械部品の生産現場では，モノづくりの効率化，自動化や省人が不可欠となっている．また，これらの技術開発に対する期待は今後ますます大きくなると推測される．

当社は第二期中期経営計画の核としてJTEKT Group 2030 Vision「モノづくりとモノづくり設備でモビリティ社会の未来を創るソリューションプロバイダー」をあげた．これを達成するには，当社の強みであるコアコンピタンス技術を集約したテクノロジープラットフォームの充実および各コアコンピタンス技術の探索と深化が重要であり，これらを組み合わせてソリューションを創出していく必要がある．テクノロジープラットフォームに集約する各技術の探索と深化において，特に研究開発は重要な役割を担う．

本報では，モノづくりにおける最新の技術動向を概観したうえで当社の研究開発事例を紹介し，今後の展望について述べる．

2．モノづくりの技術動向[3)]

2.1　デジタル化

デジタル化はモノづくりにおける重要な動向の一つである．まず，デジタルツイン技術が注目されている．物理的な製品や生産プロセスのデジタルモデルを作成することによって数値シミュレーションや最適化が可能となる．これにより，製品や生産プロセスの開発期間が短縮され，品質向上にも寄与する．また，IoT（Internet of Things）技術の発展によって製造設備や機器からリアルタイムでデータを収集し，分析できる環境が整いつつあり，効率的な生産管理や予知保全が可能になっている．

2.2　AI技術の活用

モノづくりにおいて，AI技術の活用はきわめて重要な動向である．深層学習の発展により，大量のデータがあれば，判別や分類，パターン認識，最適化が可能となってきている．例えば，熟練技能者が行っている良否判定をAIで代替することにより，省人や自動化が図られている．また，品質予測に基づく生産プロセスの最適化にも活用されている．

2.3　自動化

自動化技術の進展も重要な動向である．特に人に替わって作業するロボットや，人とともに作業できる協働ロボットの導入は，柔軟な生産ラインを構築するための重要な要素となっている．これにより，省人や作業環境の安全性向上が期待されている．また，自動化技術は単純作業や危険な作業において人を補完することを目的として進歩しており，モノづくり全体の最適化が図られている．

2.4　その他

環境問題への関心が高まる中，持続可能な生産プロセスが重要視されている．企業はリサイクル可能な材料を使用したり，エネルギー効率の高い生産方法を採用することで環境負荷の低減を図っている．サステナビリティは企業の競争力を左右する要素となりつつある．

3. 当社におけるデジタルツインの研究開発と展望

モノづくりにおけるデジタルツインの主要な取り組みを**図1**に示す．当社製品における生産プロセスごとのシミュレーション技術や，高精度なデジタルツイン構築に必要な計測技術の開発に取り組んでいる．

本章では，特に加工点に着目してデジタルツインを構築してきたギヤスカイビング加工と研削加工について述べる．なお，加工点に着目するのは，加工現象を考慮することで，より精度のよいデジタルツインを構築するためである．

3.1　ギヤスカイビング加工

電気自動車やハイブリッド車は，静粛性の向上が求められており，減速機内の歯車のかみあい部で発生するギヤノイズを低減させることが重要な課題となっている．このギヤノイズの低減には歯面修整が有効であるが，許容される歯面形状誤差は数マイクロメートル程度で高精度な加工が求められるため，設計と試作が繰り返される．

当社ではギヤスカイビング加工を用いた歯面形状の創成技術を提案し，歯面修整加工の効率化を目指したスカイビング加工のデジタルツイン，具体的には加工点に着目した切削シミュレーション技術の開発を行っている[4), 5)]．本節では，その取り組みについて紹介する．

まず，工具と工作物の相対運動が歯面形状に与える影響を定量化し，任意の修整歯面を創成するための算出手法を構築した．具体的には切削シミュレーションを用いて，さまざまな追加運動（中心間距離，交差角，工作物回転角）を考慮して歯面形状を算出した．ここでは，クラウニング修整，歯すじ傾斜修整，バイアス修整の3種類の修整要素に着目し，追加運動が各修整要素に与える影響を明らかにするとともに，当社のギヤスカイビングセンタ ®GS200H5 を用いた加工試験も実施した．例と

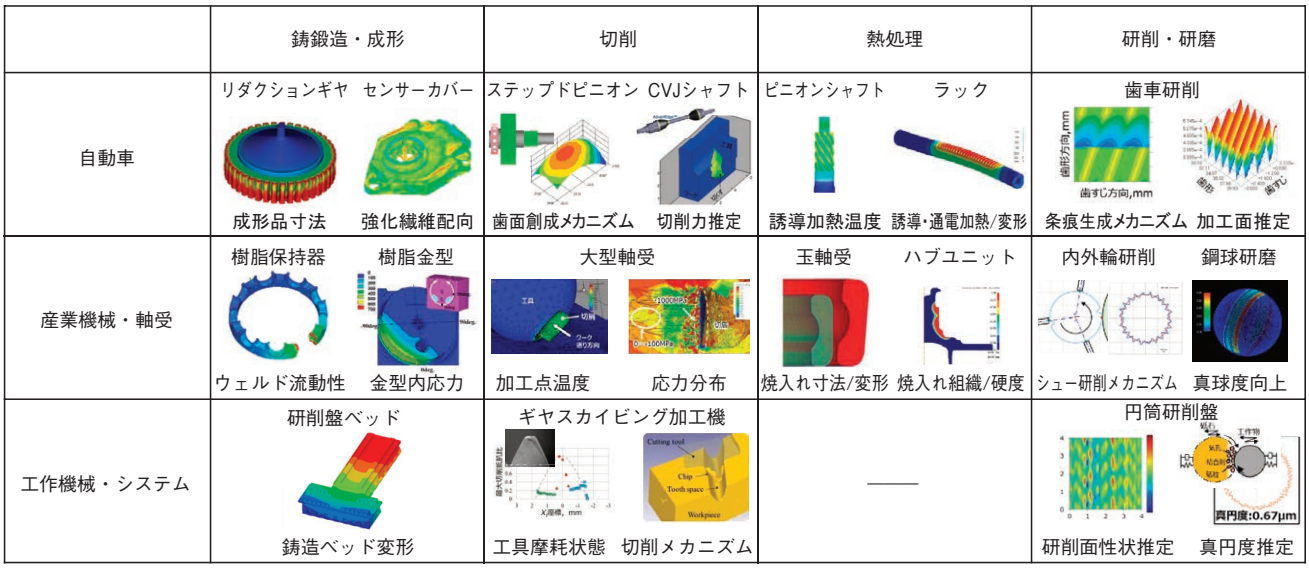

図1　モノづくりにおけるデジタルツイン技術
Major initiatives for digital twins in manufacturing

して，交差角の追加運動を与えた場合の歯面形状について，数値シミュレーションと実験の結果を**図2**に示す．**図2**からバイアスの相違は 3 μm 以下であり，クラウニングや歯すじ傾斜は 1 μm 以下に収まることが確認できた．また，加工後の歯面形状の例を**図3**に示す．歯幅両端で歯形勾配が異なっており，数値シミュレーションと同等のバイアスが得られた．

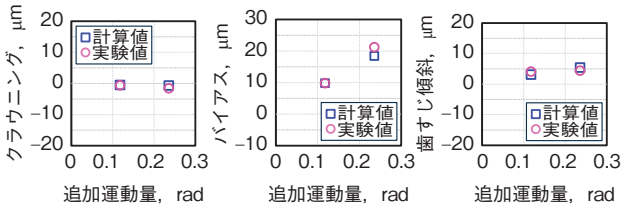

図2　交差角追加運動付与時の歯面形状比較
Companison of tooth flank shape when additional crossing angle motion is applied

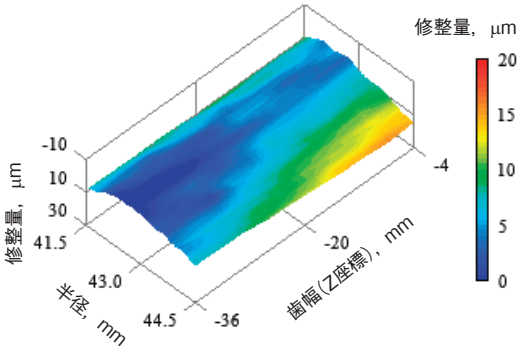

図3　交差角追加運動付与時の歯面形状
Tooth flank shape when additional crossing angle motion is applied

本研究では歯面修整加工の効率化を目指して，スカイビング加工のデジタルツインを構築した．これにより，仮想的な設計と試作を繰り返すことが可能となり，実際の試作を大幅に削減できるようになった．また，**図4**に示すように歯車加工デジタルツインにくわえて歯車性能デジタルツインの研究開発も進み，これらの連携が可能となってきている．これにより，軸受や軸を含む歯車モジュールの性能と加工を考慮しながら歯面修整を最適化できるようになっており，歯車モジュール試作の大幅な削減が期待される．

3.2　研削加工

当社では研削盤を製品として提供しながら，社内の生産現場でも研削盤を用いており，研削加工は重要な技術となっている．研削盤の開発や生産現場では，適切な研削条件を得るための工程を効率化することが期待されている．そのため，研削条件探索の効率化を目指した円筒研削加工のデジタルツイン，具体的には加工点に着目した円筒研削シミュレーション技術の研究開発[6),7)]を行っており，以下ではその取り組みについて紹介する．

円筒研削盤の概略を**図5**に示す．当社では CNC，サーボ，機械および加工モデルをそれぞれ構築し，連携させることにより，各要素の影響を考慮できる円筒研削シミュレーション技術を継続的に研究開発してきた．近年では研削条件の探索を効率化するため，より高精度なシミュレーションが求められることが多い．そこで，結果に大きく影響する加工プロセスに着目し，その高精度化に取り組んでいる．具体的には**図6**に示すように加工

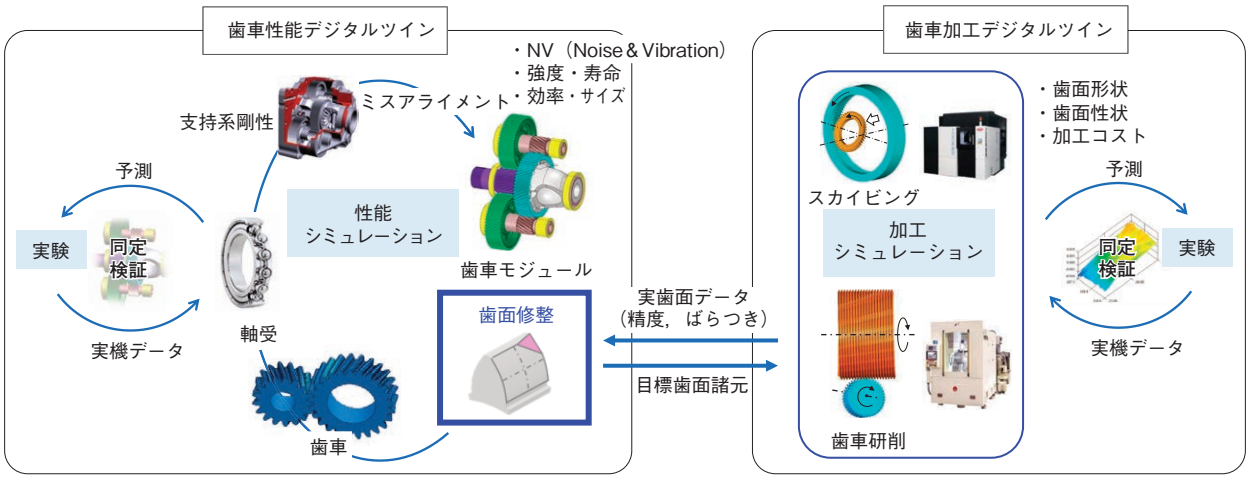

図4　歯車の性能評価と加工におけるデジタルツイン
Digital twin of gear performance and machining

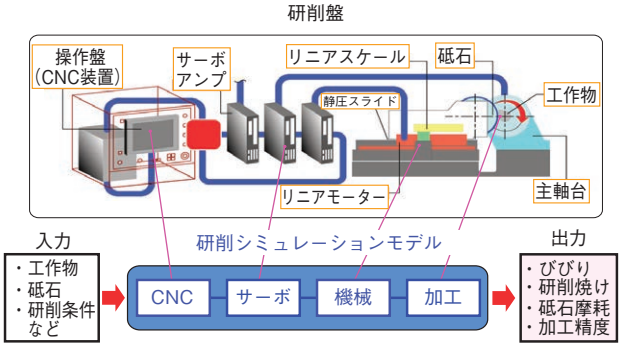

図５　円筒研削盤の概略
Overview of cylindrical grinding machine

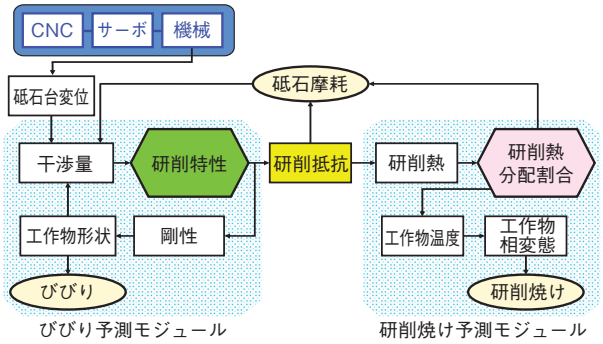

図６　加工プロセスのモデル
Machining process model

プロセスを詳細にモデル化したうえで剛性などの各要素を正確に計測し，シミュレーションに反映させた．その結果，**図７**に示す動剛性計測システムを開発し，砥石との接触によって変化する工作物の剛性を正確に計測できるようになった．**図８**にシミュレーション結果の一例を示す．工作物の形状がシミュレーション結果と実測値で一致していることがわかる．本シミュレーション技術を用いることにより，工作物や砥石の特性が加工結果に及ぼす影響を推測でき，研削現象の理解にもつながる．

また，研削現象の理解により，加工点に基づく研削盤の設計開発への貢献も期待される．

3.3　展望

生産プロセスの開発期間を短縮し，加工条件の探索を効率化するため，モノづくりにおけるデジタルツインの活用は今後も継続すると考えられる．技術的にはシミュレーション精度の向上や計算時間の短縮を目的として，加工現象の詳細なモデル化や AI 技術の活用が進むと予想される．具体的には分子動力学を用いた原子レベルでの加工現象シミュレーションや，シミュレーション結果をきわめて短時間で得るための AI サロゲートモデルなどの研究開発が行われ，生産プロセス全体での最適化が進むと予想される．

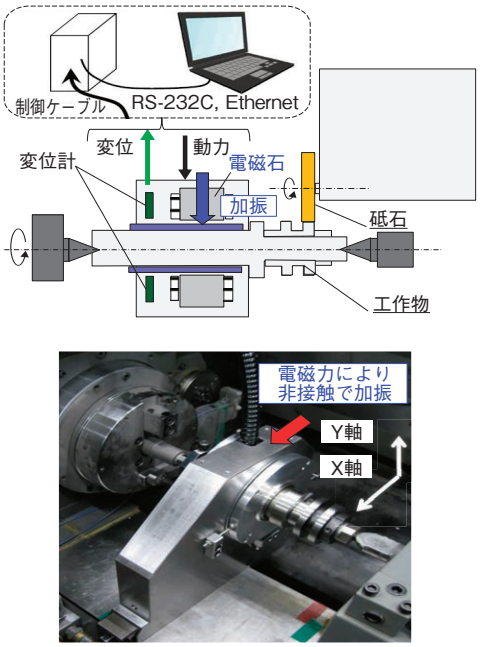

図７　動剛性計測システム
Dynamic stiffness measurement system

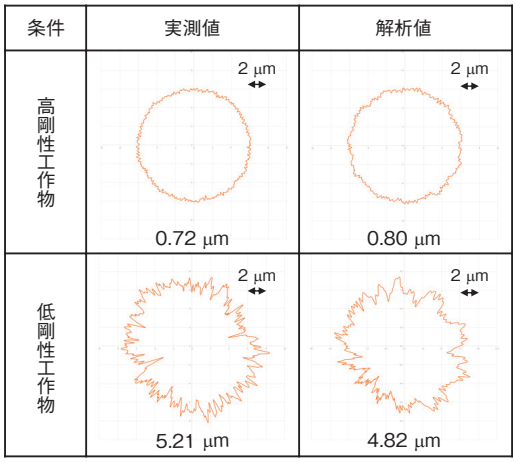

図８　円筒研削シミュレーションの結果
Cylindrical grinding simulation results

4. 当社における AI 技術の研究開発と展望

モノづくりにおける AI 技術活用の主な取り組みを**図9**に示す．ここで，生産ラインの工程は，①加工や熱処理，組立ておよび②検査がある．①においては，各工程の熟練技能者が加工や熱処理の条件を設定することによって良品が継続的に生産される．②においては，熟練技能者が視覚・聴覚・触覚で良否判定をする場合もある．これらには多くの人が携わっており，生産年齢人口の減少や熟練技能者の高齢化を考慮すると，AI を活用した条件設定や判定の自動化が必要である．

本章では，熟練技能者が設定する成形条件の自動化や，加工ノウハウの形式知化および検査における良否判定の自動化などの取り組みについて詳述する．

4.1 樹脂射出成形の自動化

一般的な樹脂部品の射出成形工程では，外的要因によって成形結果が変わるため，**図10** に示すように熟練技能者が必要に応じて成形条件を調整しながら品質を維持している．本節では，玉軸受の樹脂保持器を射出成形する工程について，成形データから樹脂保持器の品質を予測する手法について述べる．また，技能者の熟練度に関わらず品質を安定化させることを目的として，品質予測結果を用いた成形条件の自動調整[8)] についても述べる．

1）品質予測手法

樹脂保持器の品質予測は，成形データの収集，特徴量とデータセットの作成，重要特徴量の選択という三つのプロセスで行われる．成形データには成形条件，金型内の圧力と温度の履歴，品質情報として成形した樹脂保持器の質量と内径が含まれる．また，特徴量として金型内の圧力と温度の最大値など 120 種類を設定し，これらを品質データと関連付けて学習用データセットとする．重要な特徴量の選択方法を**図11** に示す．4 種類のアルゴリズムで品質に対する各特徴量の寄与度を算出した

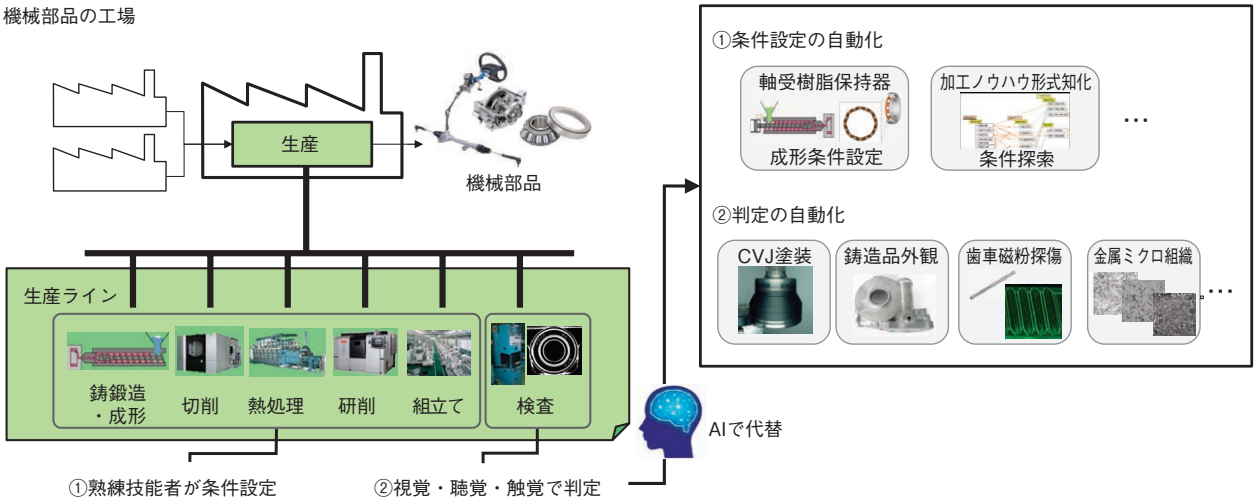

図9 モノづくりにおける AI 技術の主な活用
Major initiatives to utilize AI technology in manufacturing

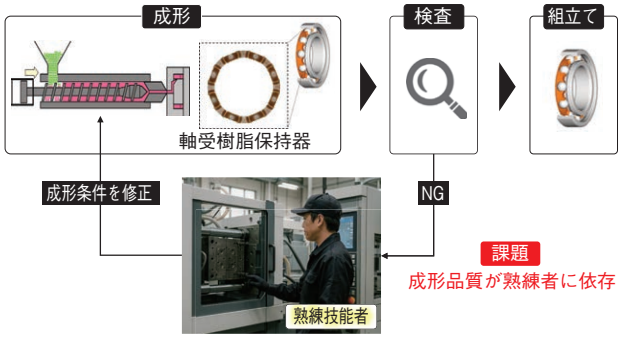

図10 樹脂射出成形における成形条件の調整
Adjustment of molding conditions in resin injection molding

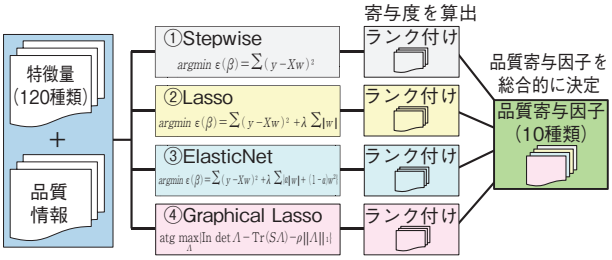

図11 特徴量の選択方法
Overview of process used for feature selection

後，算出結果を統合して機械学習 Support Vector Regression に入力する特徴量を自動で選択する．これらのプロセスに基づいて，AI を用いた品質予測モデルを構築した結果，成形条件および金型内の圧力と温度の履歴から樹脂保持器の質量と内径を予測できるようになった．

2）成形条件の自動調整

熟練度に関わらず品質を安定化させることを目的として，前述の品質予測手法を用いて成形条件の自動調整を行った．システムの概要を**図12** に示す．成形機における成形条件および金型内の圧力と温度の履歴データを入力値として，AI モデルで樹脂保持器の質量と内径を予測し，それらが目標値に近づくよう成形条件を自動調整する．成形条件を自動調整したときの質量と内径を**図13** に示す．質量，内径ともに成形条件の自動調整中に目標値へ収束しており，本方法の有効性が確認された．

4.2　加工ノウハウの形式知化

熟練者の知識を誰もが効率的に利用できることを目指し，加工ノウハウを形式知化した知識モデルの構築と探索アルゴリズムを開発[9]した．知識モデルは切削速度などの技術用語を「因子」とし，これらをネットワークで接続することで表現される．各因子は定量値や定性値を持ち，因子間の関係性を接続条件として示すことに

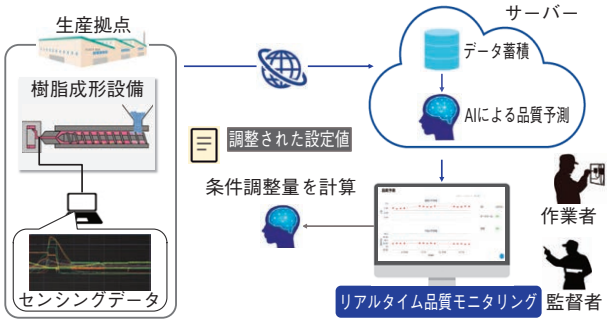

図12　成形条件の自動調整システム
Automatic molding condition adjustment system

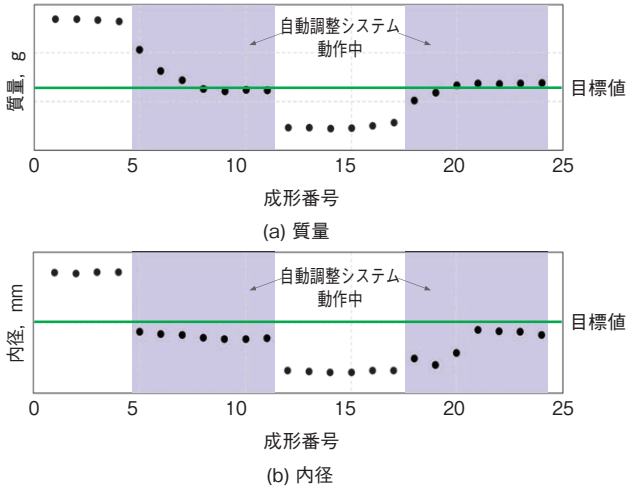

図13　成形条件を自動調整したときの質量と内径の履歴
Histories of mass and inner diameter during automatic molding condition adjustment

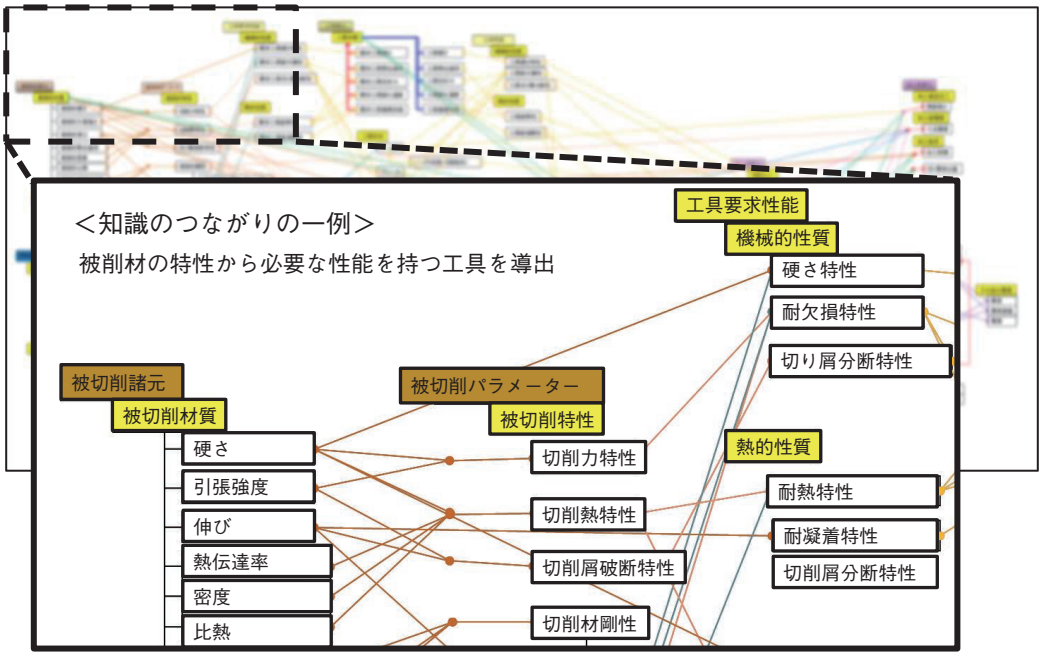

図14　旋削知識モデル
Tuming knowledge model

よって熟練者の思考過程を数値化し，見える化する．この具体例として，旋削加工に関する知識モデルを**図14**のように構築し，旋削加工支援ツールを試作した．このツールには未熟練者が直面する課題を想定して，推奨される加工条件の提示や加工結果の予測機能が搭載されている．ツールが出力した推奨加工条件と工具カタログの推奨値を比較し，推奨条件の出力精度を評価した結果，高い精度で推奨加工条件を予測できることを確認した．また，旋削加工支援ツールを新人教育実習で活用したところ，新人作業者が独自に条件選定や対策立案を行えるようになり，知識伝承の効率化や思考力の向上が確認できた．

この成果は加工ノウハウの形式知化と，その有用性を示しており，今後の技術開発においてさらなる精度向上と効率化を目指す．

4.3　CVJ 塗装検査の自動化

CVJ（Constant Velocity Joint）塗装検査工程に関する深層学習を用いた塗装の良否判定の自動化について述べる．CVJ 生産工程の概略を**図15**に示す．粗材投入後に自動加工と防錆(せい)用塗装が行われ，最後に人が外観検査を行う．この塗装の良否判定を AI で代替できれば判定の省人が可能となる．

深層学習を用いた判定モデル構築のプロセスを**図16**に示す．このプロセスは，撮像とデータ蓄積，画像の前処理とアノテーション，そして判定モデルの構築で構成される．まず，塗装後の CVJ を撮像し，対象となる検査領域を画像として保存する．つぎに，複数の CVJ について撮像を繰り返し，多数の画像データを蓄積する．また，前処理として蓄積した各画像を九分割し，それぞれの画像に良・不良のアノテーションを行う．その後，画像を教師データとして学習を行い，判定モデルを構築する．深層学習を経た判定モデルを用いて，CVJ の塗装画像を判定した結果を**図17**に示す．**図17**の場合，判定スコアのしきい値を仮に 0.4 に設定すれば，塗装の良否を明確に判定できることがわかる．このモデルを用いれば，CVJ 塗装検査における良否判定を自動化することができる．

しかしながら，この判定モデルの学習には数千枚以上の画像が必要であり，その作業を人が行う場合，撮影や画像の保存，移動などに大きな労力を伴う．そのため，これらを自動化できるソフトウェアを活用したシステムの構築も重要と言える．

図15　CVJ 生産工程の概略
Overview of CVJ production process

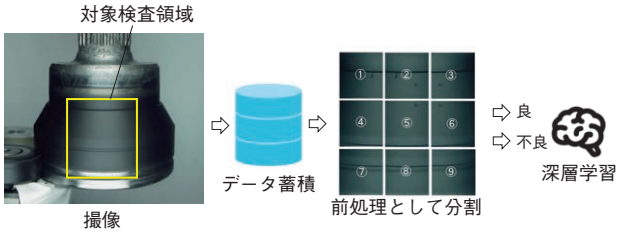

図16　判定モデル構築のプロセス
Process of building decision models

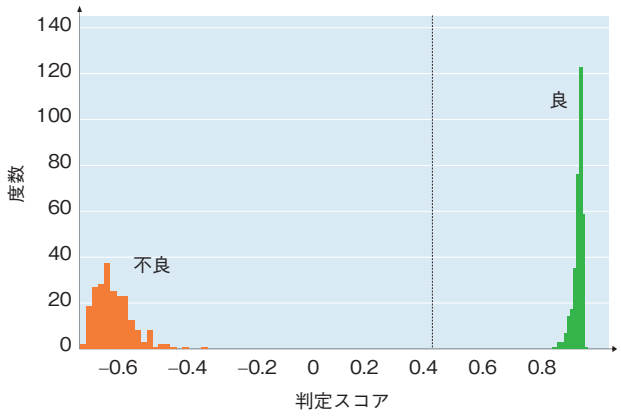

図17　CVJ 塗装画像の判定結果
CVJ paint image judgment results

マイクロサービスの考え方に基づいて構築した CVJ 塗装検査の自動化システム[10]を**図18**に示す．図中に示す各機能は独立したアプリケーションとして分割され，これらが互いに協働することでシステムとして動作する．このため，ある機能に変更をくわえてもほかの機能には影響せず，システム全体の品質を容易に保つことができる．また，各機能を構築するプログラム言語が異なっていても問題はなく，それぞれに応じた最適なプログラム言語やライブラリを採用できる．さらに，ほかのシステムへの転用も容易であり，類似の自動化システムの開発効率が向上する．

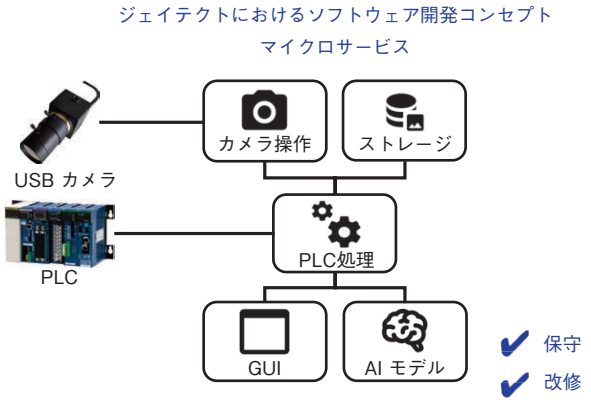

図18　CVJ 塗装検査の自動化システム
CVJ paint inspection automation system

4.4　展望

モノづくりにおける AI 技術の活用として，省人や自動化，熟練技能者に替わる良否判定，付加価値向上などの取り組みが加速すると予想される．一方，取り組みごとに適切な AI モデルの選択やパラメーターの調整が必要であり，AI についての高度な知識やプログラミングが求められるという課題がある．つまり，AI 活用を加速するためには，プログラミングなしで AI モデルを活用できる仕組みや，誰もが容易に AI を活用できる仕組みが必要になると考える．**図19** に示すように当社では，ノーコードで AI が活用できるプラットフォームの構築と，AI エージェントの構築を進めている．これらの仕組みによって誰もが AI を容易に利用できるようにし，モノづくりプロセス全体の付加価値向上につなげていきたいと考えている．

5．おわりに

本報では，モノづくりの技術動向として，デジタル化や AI 技術の活用，自動化などの重要性について概観した．そして，当社のデジタルツインの取り組み事例として，ギヤスカイビング加工や研削加工について紹介した．また，樹脂射出成形の自動化，加工ノウハウの形式知化，CVJ 塗装検査の自動化を例としてあげ，当社における AI 技術の活用と自動化の研究開発について紹介した．今後もデジタル化や AI 技術の活用はさらに進むとともに，これらの技術が複合的に作用して，モノづくりの変革が継続すると予想される．これらの技術は，当社の競争力維持と向上の重要な要素であるため，引き続き研究開発を進め，モノづくりの課題解決に貢献していく．

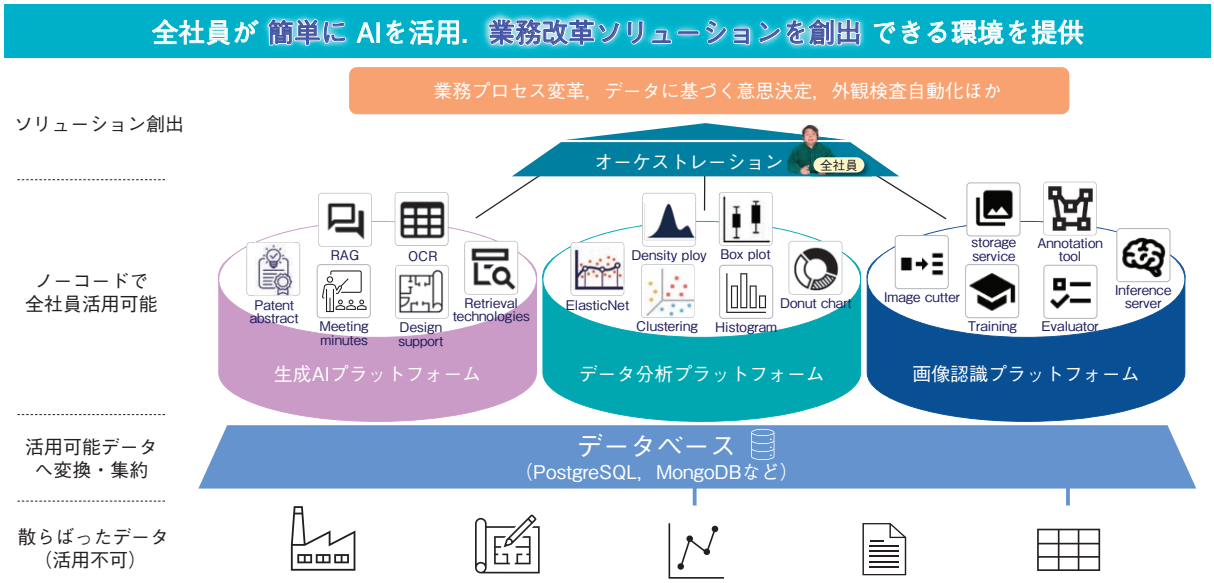

図19　当社における AI 活用戦略
AI utilization tactics

参考文献

1）日本貿易振興機構（ジェトロ）調査部：調査レポート，主要国の自動車生産・販売動向（2023 年 11 月），日本貿易振興機構，2023-11，https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/a19dc4f66e89813e/20230020.pdf（参照 2025.05.25）.

2）内閣府：第 1 章　高齢化の状況，令和 6 年版高齢社会白書（全　体　版）（PDF 版），https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/zenbun/pdf/1s1s_01.pdf（参照 2025.05.25）.

3）経済産業省：2024 年版 ものづくり白書，https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2024/pdf/gaiyo.pdf（参照 2025.05.25）.

4）吉永克仁，柴田英紀，平野　稔：ギヤスカイビング加工における歯面形状創成技術の研究，2024 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集（2024）49-50.

5）吉永克仁，柴田英紀：ギヤスカイビング加工における歯面形状創成技術の研究（第 2 報 シミュレーション結果の加工検証），2025 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集（2025）652-653.

6）T. ONOZAKI，A. SAITO，M. YORITSUNE：Simulation of Cylindrical Plunge Grinding Processes Considered Successive Change of Workpiece Shape，International Journal of Automation Technology，5，3（2011）433-438.

7）森　知也，小林久修，久原淳司：円筒研削加工中の砥石と工作物の接触による動剛性を考慮した加工シミュレーションに関する研究 - 第 1 報：研削加工中の工作物動剛性計測手法の構築 -，2025 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集（2025）56-57.

8）大久保勇佐，萩原幸子，溝口翔太，馬場紀行，足立智也：金型内センシング情報を用いた機械学習による成形品の品質予測，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1020（2023）68-73.

9）小島　大，酒井隼樹，佐々木雄二，東　孝幸，桑野義正，原田博正：加工ノウハウモデリングの研究，2023 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集（2023）611-612.

10）モレヨン・マキシム，山田大貴：MicroService，AI によるエッジデバイス判定システムの品質向上，ソフトウェア品質シンポジウム 2022（2022）.

筆　者

小野﨑　徹*
T. ONOZAKI

*　イノベーション本部　研究開発センター長　博士（工学）