

# モノづくり企業の総合力で実現する歯車 DX

## Pursuing Gear DX Through Comprehensive Manufacturing Capabilities

吉永克仁 K. YOSHINAGA 鈴木義則 Y. SUZUKI 松下直矢 N. MATSUSHITA

With the growing demand for eAxle systems in electrified vehicles, challenges in gear reducers, such as noise and vibration (NV), efficiency, and cost, have become increasingly significant. At the same time, the skills required for gear design and manufacturing are becoming unsustainable due to the decline in the number of engineers. To address these issues, we have developed the Gear Double Digital Twin system that integrates performance and manufacturing simulations. This tool reduces the effort needed for prototyping while improving prediction accuracy and gear development efficiency to aid in preparation for mass production. This paper presents our company's core competencies by describing the advantages of Gear Double Digital Twin.

**Key Words:** gear double digital twin, gear skiving, GIC, surface modification, manufacturing simulation

### 1. はじめに

近年、電動車両の需要拡大に伴い、eAxle (electric axle) をはじめとする電動ユニットが注目されている。eAxle はインバーター、モーター、減速機で構成され、減速機はモーターの高速回転を車輪駆動に適した低速・高トルクへ変換する。減速機の設計においては歯車のかみあいに起因する Noise and Vibration (以下、NV) の低減とともに、伝達効率の向上やコスト低減などが課題とされている。

歯車は高い精度が要求される精密加工部品であり、歯車諸元設計や歯面設計から加工準備、実加工、測定評価に至る各工程で熟練の技術および技能を要するため、熟練者への依存度が高い。しかしながら、生産労働人口の減少、特に熟練技能者の減少に伴い、歯車品質の維持・向上は年々困難となっている。さらに、若手技術者が熟練の水準に到達するまでには、多大な教育コストと時間を要することから技術の伝承停滞や空洞化が顕在化している。

このような課題を解決する有効な手段として、歯車分野における Digital Transformation (以下、歯車 DX) が注目されている。歯車 DX では、まず熟練者の技能に頼っていた歯車設計・製造の品質要因をシミュレーションプログラムなどにより数値化する。品質要因を数値化することで最適化技術により品質向上および自動化

が可能となる。さらに、実機検証を繰り返すことでモデル精度を向上させ、歯車製造プロセスにおける設計時間および加工時間の短縮、試作回数の削減、工具寿命の延長などをもたらす。すなわち、歯車 DX への取り組みは、品質向上にくわえて、生産性向上およびコスト競争力の強化にも寄与する。

これらの社会的状況を背景に当社では、歯車の設計から加工に至るプロセス全体の最適化を目的として、「歯車ダブルデジタルツイン」と称するシミュレーションシステムを構築し、シミュレーション結果と実験検証を積み重ね、継続的な品質向上に取り組んでいる<sup>1)</sup>。本報では、歯車 DX の進化を支える当社のコアコンピタンスを紹介する。

### 2. 歯車ダブルデジタルツインの構成

本章では、当社が推進する歯車 DX の中核となる「歯車ダブルデジタルツイン」の全体構成について説明する。歯車 DX の実現には、歯車の性能設計と加工プロセスを個別に最適化するのではなく、両者を相互に連携させた統合的な設計・製造基盤が不可欠である。そのため、当社では図 1 に示すとおり、性能デジタルツインと加工デジタルツインを対をなして構成し、設計から製造、評価に至る各工程をつなぐ仕組みを構築している。

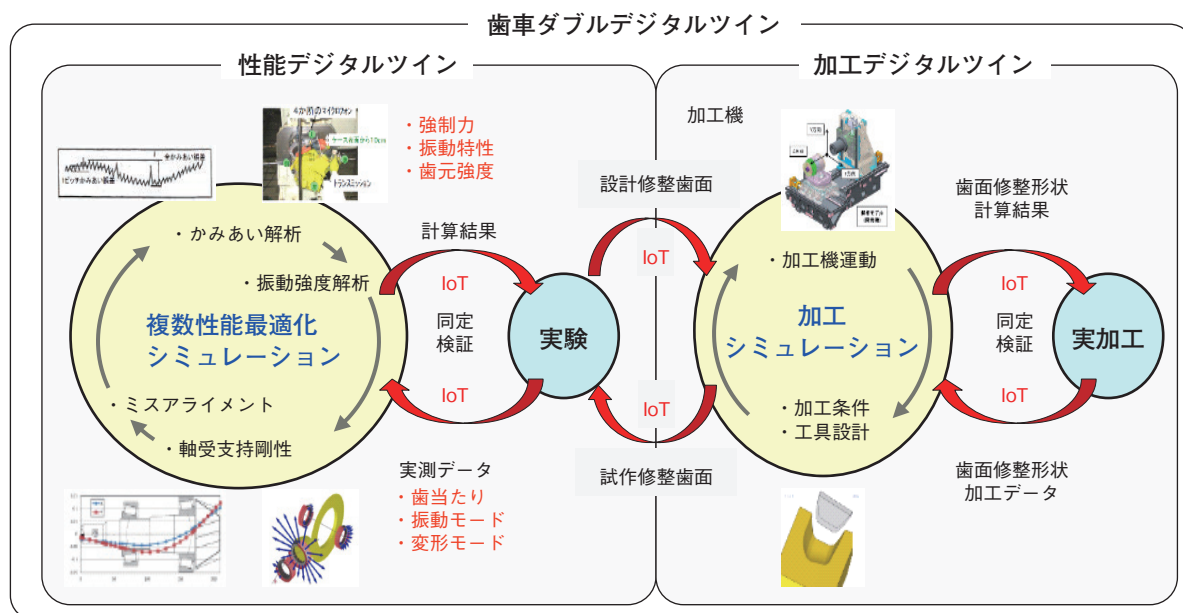


図1 歯車ダブルデジタルツインコンセプト  
Gear double digital twin concept

## 2.1 性能デジタルツインの構成

性能デジタルツインでは、歯車のかみあいに伴う強度・耐久性、伝達効率、NV特性など各種性能指標の向上に応じた最適な修整歯面形状を予測する。また、シミュレーション結果と実機データを比較・検証することが重要であり、これを繰り返すことで各種性能に即した修整歯面形状を高精度に予測できる。その結果、試作回数および開発コストの削減ならびに開発期間の短縮が期待できる。

当社の性能デジタルツインでは、歯車部だけでなく、それを支持する軸および軸受、さらには軸受を支持するハウジングの剛性の反映が可能である。すなわち、減速機の構成部品をすべてモデル化しているため、入力トルクに応じた歯車かみあい部の変位・変形を計算でき、実機挙動に即した歯面応力、かみあい伝達誤差(Transmission Error: T.E.)、さらにはトロコイド干渉などを高精度に算出できる。

前述のとおり、単にシミュレーション結果を利用する従来のデジタル化とは異なり、歯車DXの実現には実測データとの比較・検証が不可欠である。これにより、シミュレーションモデルの解析精度を継続的に向上させ、熟練者の経験や勘に依存していた複数の性能指標を最適化しながら修整歯面の設計および評価を効率的に実

施できる。すなわち、性能デジタルツインとは、歯車のかみあい特性、NV特性および強度特性を対象とし、シミュレーションモデルと実機データを双方向に連携することにより、実歯車の性能挙動を高精度に再現・予測するデジタル基盤である。

## 2.2 加工デジタルツインの構成

加工デジタルツインは、性能デジタルツインと対をなしており、性能デジタルツインで導出された修整歯面形状の創成を目的としている。

ギヤスカイピングを例にあげると、まず、性能デジタルツインで導出された修整歯面を加工するため、切れ刃の形状を設計する。この切れ刃形状および加工対象（円筒状の歯車素材）を3次元モデル化し、切込み量・送り速度・加工経路などの加工条件を付与することで創成される歯面形状を予測する。

さらに、実加工後の歯面測定結果と予測値との比較・検証によって加工機の動剛性などのモデルパラメータを調整する。これにより、加工シミュレーション精度の向上が可能である。つまり、加工デジタルツインとは、歯車加工機、工具および加工機の運動プロセスに関わる物理現象を数値モデル化することで歯面生成過程および加工結果を高精度に予測し、最適化するデジタル基盤である。

### 3. 性能デジタルツインを支える コアコンピタンス

性能デジタルツインを実際の設計に適用するには、モデルと実機挙動との関係が検証されていることに加え、設計目的に直結した性能指標を提供し、現状の設計プロセスと整合させる必要がある。本章では、性能デジタルツインを実現するための当社のコアコンピタンスについて述べる。

#### 3.1 量産可能な歯面設計

性能デジタルツインの実用化にあたっては、図面指示寸法に基づく性能評価だけでなく、量産工程における加工誤差や組付け誤差のばらつきを考慮した統計的な性能解析が重要である。

減速機を構成するシャフトなどの部品寸法は、図面で規定された公差内でばらつきを有しており、ハウジングにはめあう軸受の位置も同様である。したがって、特定条件で最適解のみを求める設計では不十分であり、量産を前提とした各部品の寸法ばらつきや組付け誤差を考慮する必要がある。また、歯車対の性能は、負荷トルクに起因するシャフトやハウジングなどの変形によって歯面のかみあい姿勢も変化するため、想定される運転条件下で解析する必要がある<sup>2)</sup>。

当社は、歯車設計にくわえて減速機全体の設計技術を有しており、設計の中核ツールとして軸系解析プログラム (Shaft System Analysis Program : S.S.A.P) を自社開発している<sup>3) 4)</sup>。S.S.A.Pでは、複数のシャフトおよび歯車・軸受を含むユニット単位でのモデル化や、シャフト剛性を考慮した軸受挙動の解析が可能である。これにより、設計・製造・組付け・運転条件といった各要因が複合的に影響して生じるミスアライメント（設計中央値のノミナル条件、ばらつき最悪条件）を考慮できることが当社の強みである（図2）。

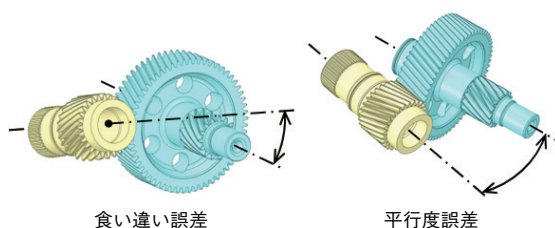


図2 2種類の見アライメント  
Two types of misalignment

#### 3.2 歯車かみあい解析

当社はステアリングメーカーとして、ラックアンドピニオンタイプ電動パワーステアリング装置などを開発してきた。その中でラックとピニオン間の歯面かみあいの解析手法<sup>5)</sup>を自社で開発・改良し、高精度な性能予測に基づく製品設計を実現してきた。本手法は当社のコアコンピタンスである。平歯車・はすば歯車のかみあい解析では、このラックアンドピニオンのかみあい状態の定式化を参考にしており、局所接触状態での接触位置の移動、接触線の長さ変化、面圧分布の変動などを算出できる（図3）。本手法によってNVの代用特性であるT.E.も迅速に算出できる。

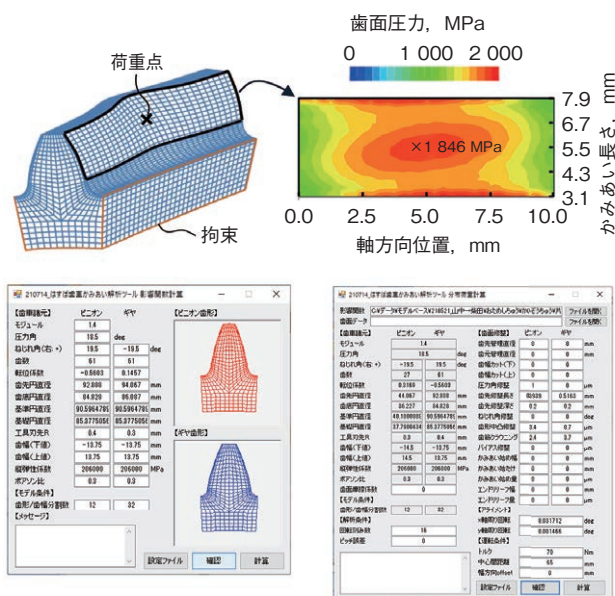


図3 歯面かみあい解析ツール  
Software for analyzing tooth contact

#### 3.3 歯車性能の評価技術

ばらつきを考慮した設計シミュレーション結果についても実際の歯車を用いて要求性能を満たすかを検証する必要がある。このため、当社では歯車を試験評価する装置を保有しており（図4）、修整歯面の違いによるNV特性および効率を実測し、シミュレーション結果と比較・検証している。この結果を基にモデルを補正することで計算精度を向上できる。

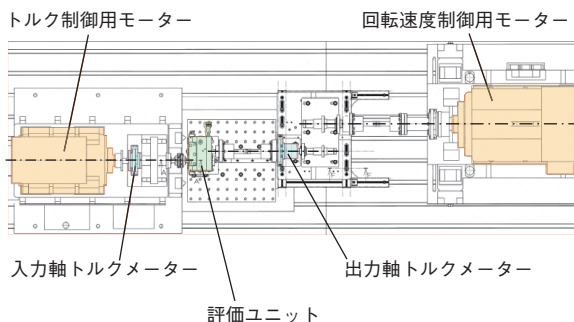


図4 歯車性能評価装置  
System for evaluating gear performance

## 4. 加工デジタルツインを支える コアコンピタンス

加工デジタルツインは、性能デジタルツインで導出された最適修整歯面が実際の加工プロセスにおいて実現可能かを再現・評価するためのシステムである。このシステムは、加工シミュレーションおよび実加工検証によるパラメーター補正を通じて日々進化している。これは当社が加工機的设计・製造技術、切削加工技術、研削加工技術、シミュレーション技術および歯車精度評価設備を保有していることによって実現されている。

本章では、この加工デジタルツインを支えるコアコンピタンスとして、加工機設計技術、加工シミュレーション技術および加工後の歯車精度を評価・検証する設備について述べる。

### 4.1 ギヤスカイビングセンタの設計技術

性能デジタルツインを用いて、T.E.の最適化を目的としてシミュレーションした場合、得られる歯面形状はクラウニングなどの単純な修整ではなく、複数の修整要素が重なった三次元的な歯面形状（以下、三次元修整歯面）となる。三次元修整歯面の創成が可能な加工機として、歯車研削盤やギヤスカイビングセンタ<sup>6)</sup>があげられ、各加工機には特有の設計技術が求められる。当社のギヤスカイビングセンタは、長年蓄積してきたマシニングセンタ（以下、MC）の設計技術が基になっている。また、加工機設計だけでなく、CNC（Computer Numerical Control）、ギヤスカイビングカッター、加工条件・加工アルゴリズムを自社で一括して開発している。

一般的なMCとは異なり、ギヤスカイビングセンタでは、加工点が常に移動することを前提とした設計が必要であり、静剛性よりも同期回転精度と動剛性が求めら

れる。工具回転軸、工作物回転軸、送り軸（軸方向送り）のすべてをリアルタイムで同期しながら加工するため、特に歯すじ修整や三次元歯面修整では、わずかな位相ずれも加工誤差の要因となるためである。そこで当社では、サーボ制御、多軸同期制御、位置決め制御などのモーター制御に優れた独自のCNC（TOYOPUC-GC70）をギヤスカイビングセンタに搭載している。このCNCも長年の設計ノウハウの蓄積によってギヤスカイビング加工の制御を実現しており、高い加工精度を得るために必須のシステムである<sup>7)</sup>。

### 4.2 加工シミュレーション技術

ギヤスカイビング加工は、工具（ギヤスカイビングカッター）と工作物（歯車）を同期回転させ、両者の回転軸を交差させた状態でカッターの刃と歯車の歯をかみあわせながら切削する方法である。カッターと歯車を同期回転させながら連続的に切削するため、歯面加工中にカッターのすくい角や切込み量に変化する。そのため、適切なカッター仕様や加工条件を設定するには、カッターの切削状態を定量的に評価できる加工シミュレーション技術が求められる。また、性能デジタルツインで算出された最適歯面を創成するには、カッターの切れ刃形状や加工機各軸の運動の設計や、NCデータを作成できる加工シミュレーションが必要である。

当社は、工作機械メーカーとして除去加工技術（研削・切削）および解析技術を長年にわたり蓄積してきた。これらの技術を基にカッターと歯車の幾何モデルを用いて、カッターの軌跡と歯車との干渉領域を数値計算により求め、除去領域を逐次更新するシミュレーションを開発した。本シミュレーションを活用することで加工機各軸の運動設計および検証が可能となった。また、本シミュレーションで算出された歯車形状をインポリュート歯面と比較して誤差を算出する手法や、切り取り厚さなどのデータを活用し、切削状態を算出する手法を構築した（図5）<sup>8), 9), 10)</sup>。

さらに近年では、加工機の動剛性などを考慮した歯面のうねりも算出できる（図6）<sup>11)</sup>。このようなシミュレーション技術の進化は、加工機の挙動予測から加工後の歯面評価までを一気通貫で実施可能な当社の体制に基づいている。

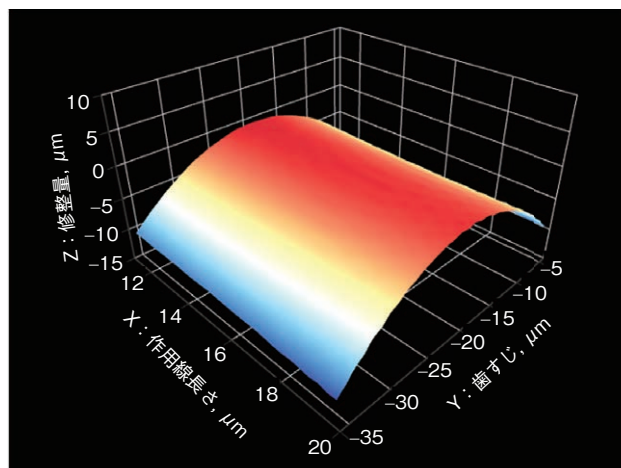


図5 歯面形状の算出  
Calculation of tooth surface geometry

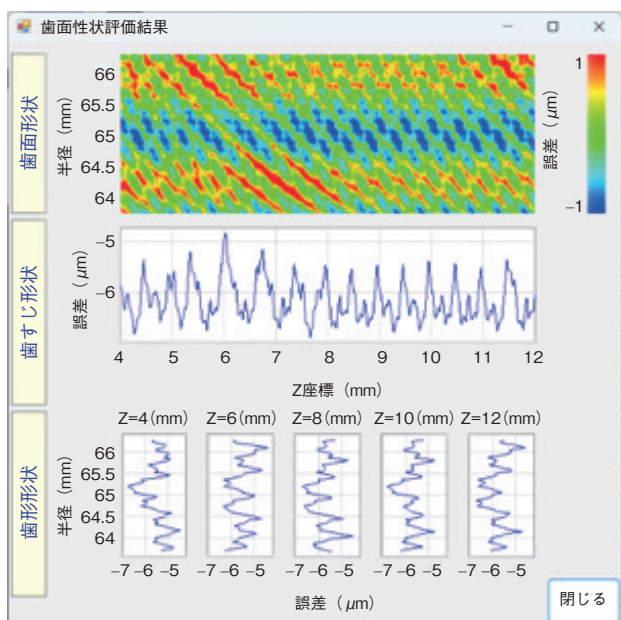


図6 加工機の動剛性を考慮したシミュレーション結果  
Simulation results considering the dynamic stiffness of the machine tool

### 4.3 加工後歯面の評価設備

加工シミュレーションは理想化モデルであるため、加工後には歯面の品質を検証することが重要である。特に歯車加工では、歯形誤差、歯すじ誤差、歯面の表面粗さなどの精度を確認する必要がある。

当社は、歯車技術開発の強化を目的として、ギヤイノベーションセンター（Gear Innovation Center：GIC）を2021年に開設した。当センターには、旋盤、ギヤスカイピングセンタ、円筒研削盤、歯車研削盤、高速浸炭炉、高精度歯車測定機や各種顕微鏡、接触式粗さ測定機

などが設置され、歯車の試作から評価まで一連の工程を実施できる。これらの開発環境により、シミュレーション結果に基づく歯面を迅速に試作し、評価検証できることが当社の強みである。

## 5. おわりに

本報では、歯車製造を取り巻く環境変化を背景に当社が推進する歯車 DX について解説した。DX 実現の本質は、個別のシミュレーションやデジタル化ではなく、歯車の設計・加工・評価の各工程で長年蓄積された知見を体系化し、実用可能なシステムとして統合することである。「歯車ダブルデジタルツイン」は、当社が保有する歯面設計理論、加工機・工具・加工条件に基づく加工メカニズムの理解および測定・評価技術を基盤としている。「性能デジタルツイン」と「加工デジタルツイン」を連携させ、各工程を理解したモデル化とパラメータ設計により、設計系と製造系の統合を実現している。

本システムは、単に理想状態の再現ではなく、量産過程における加工ばらつきや設備特性を前提とした実用志向の構成である。これにより、従来の試作と修正を繰り返すプロセスから脱却できる。当社にとって、このような歯車 DX の実現は一つの到達点であると同時に、現場で積み上げた技術を次世代へ継承する基盤づくりでもある。

今後は、モデル精度のさらなる向上に努め、量産データのフィードバックおよび自動化を推進し、構築したデジタル基盤の汎用性と持続性を高める。実際の製造現場で役立つ DX の深化を通じて、付加価値の高い歯車の提供を目指す。

\*ギヤスカイピングセンタ、TOYOPUC は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 牧 泰希：オンリーワン技術を活かした高性能歯車の取り組み，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019 (2022)89-93.
- 2) 高林巨樹，増田祐生，青山隆之，樽谷一郎：歯車性能最適化技術の開発－多目的最適化手法による歯面修整設計システムの構築－，2025 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，精密工学会(2025)513.
- 3) 中下智徳，鬼塚高晃，長谷川賢一：転がり軸受における

- 新しいCAE解析技術について, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1001(2006)92-96.
- 4) 長谷川賢一, 下村利明: 軸系における熱と剛性・振動の連成解析, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1006(2009)66-69.
- 5) 前田大輔, 山中亨介: ステアリング用ラック&ピニオンのかみあい解析, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019(2022)30-36.
- 6) 大塚義夫: GS200H5 ギヤスカイピングセンタの開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017)58-62.
- 7) 大崎嘉太郎: TOYOPUC-M70 切削機用 CNC 装置の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1012(2014)90-93.
- 8) 齋藤 明, 春山朋彦: 歯車加工シミュレーション装置, 特開 2014-237185 号(2014-12-18).
- 9) 吉永克仁, 柴田英紀: ギヤスカイピング加工中の切削状態解析技術開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1021(2024)98-104.
- 10) 吉永克仁, 柴田英紀: ギヤスカイピ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 学術講演会講演論文集, 精密工学会(2024)49.
- 11) 佐々木雄二, 酒井隼樹, 橋本高明: 加工機の動剛性を考慮したギヤスカイピング加工シミュレーションによる歯面性状予測技術の研究, 2025 年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集, 精密工学会(2025)444.

## 筆者



吉永克仁\*

K. YOSHINAGA



鈴木義則\*\*

Y. SUZUKI



松下直矢\*\*\*

N. MATSUSHITA

\* イノベーション本部 データアナリティクス研究部

\*\* イノベーション本部 機械要素技術研究部

\*\*\* 工作機械・システム事業本部 工作機械技術部