

# ギヤスカイビング 3D 歯面創成加工技術の開発

## Development of a 3D Tooth Surface Creation Technology Using Gear Skiving

多田典広 N. TADA

With the promotion of electrification, the needs for mechatronic integrated units such as the E-Axle are increasing.

The gears used in E-Axle are required to have an optimum tooth profile, at the same time as being compact and light weight without generating vibration or noise.

This paper introduces technology for machining high-precision, compact gears with optimum tooth profiles required for E-Axle by developing the 3D surface creation technology and the phase detection function based on original logic.

**Key Words:** gear skiving, BEV, E-Axle

### 1. はじめに

100年に一度の変革期を迎え、近年、カーボンニュートラル、SDGsの実現を目指した電動化の推進が加速している。特に、自動車産業においては、内燃機関の自動車に代わり、BEVの普及が進んでいる。

BEVの電動パワートレインとしては、E-Axleと呼ばれる機電一体ユニットが注目を集めている。E-Axleは、小型化によるスペース効率の向上や省エネルギー化による航続距離の延長に貢献することが期待されている。

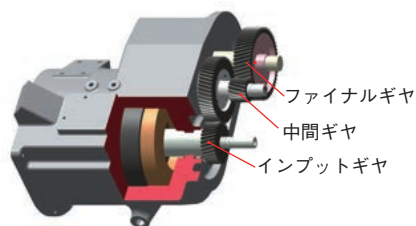


図1 E-Axle モデル  
E-Axle model

### 2. BEVにおける歯車への要求

#### 2.1 BEVとE-Axle

内燃機関の自動車とBEVの特徴を表1に示す。内燃機関の自動車の場合、エンジン音のため、歯車のかみあいの時の騒音や振動は目立たない。対してBEVは、エン

ジンが無く、少しの騒音や振動も顕著に表れるため、E-Axleは、より高い静粛性が要求とされる。また、インホイール化や4WD対応によって前後に二つ以上のE-Axleを配置するなど、レイアウトが課題となっている。そのため、E-Axleには、小型・軽量であり、静粛性が高く、効率が良いことが必要となる。

表1 内燃機関の自動車とBEVの比較

Comparison of an internal combustion engine car and BEV

	内燃機関の自動車	BEV
動力源	エンジン	モーター
-騒音・振動	大	小
-回転速度	低速	高速
-レイアウト	フロント固定	任意
航続距離	長い	短い

#### 2.2 歯車への要求

E-Axleには、インプットギヤ、中間ギヤ、ファイナルギヤなど数種類の歯車が用いられ、歯車の大きさがユニットサイズに直結する。また、モーターの回転を歯車同士がかみあうことで駆動力として伝達しているため、歯車のかみあいが振動や騒音の発生源となる。

さらに、歯車のかみあい時、歯面に負荷がかかると、歯車や歯車軸の変形が発生し、かみあい状態が悪化する。そのため、E-Axleに用いる歯車は、小型かつ高精度なだけでなく、負荷がかかった状態で理想的なかみあい

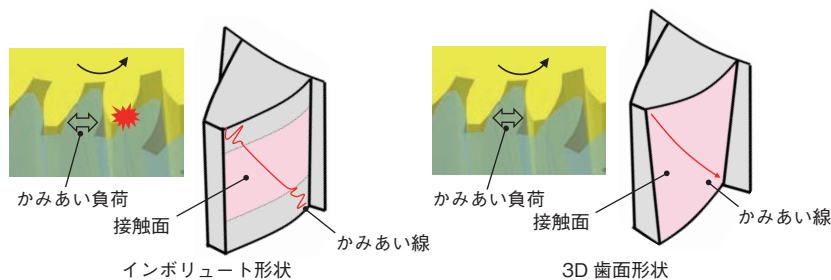


図2 最適歯形形状  
Optimal tooth profile

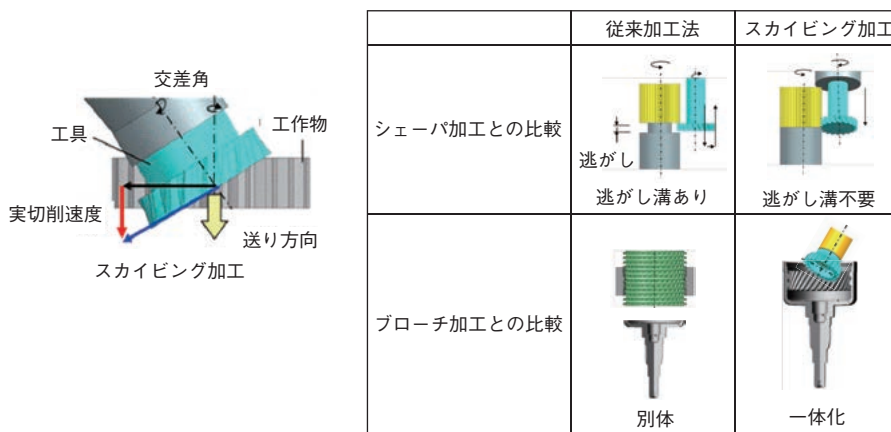


図3 スカイビング加工法と従来加工法との比較  
Comparison skiving method and other methods

になるような最適歯形形状であることが必要となる (図2)。

### 3. スカイビング加工法による 3D 歯面創成加工技術の開発

#### 3.1 スカイビング加工法

スカイビング加工は、歯車形状工具を用いて行う創成歯切り法の一つである。原理は、図3に示すように、工具と工作物を相対的に傾け、同期回転させることにより発生する相対速度を用い歯車加工を行う加工法である。

スカイビング加工法は、他の歯車加工法に対して多くの利点がある。シェーパ加工と比較すると、逃がし部が不要となることで、不完全歯形部を短くできるため、製品の小型化が可能となる<sup>1)</sup>。また、ブローチ加工と比較すると、内歯車の一体化加工が可能というメリットがあり、さらに、工具の歯形や加工軌跡を制御することにより、クラウニングなどの歯形修正についても、容易に調整が可能である<sup>1)</sup>。

#### 3.2 3D 歯面創成加工技術の開発

3D 歯面創成加工技術は、さまざまな自由曲面を創成する技術であり、歯形形状と歯すじ形状を組み合わせることにより実現する (図4)。

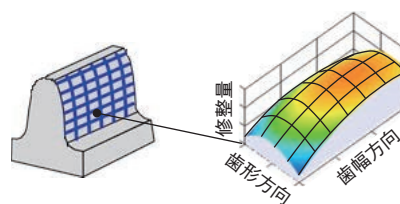


図4 3D歯面形状  
3D gear face

加工方法を図5に示す。従来歯面形状は、工作物軸に沿って直線的に工具を動かすのみで創成できるが、3D 歯面形状は、さらに、工作物の角度を変化させる必要がある。

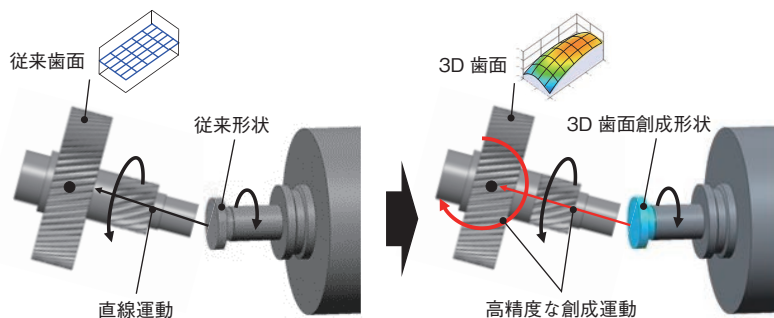


図5 3D 歯面創成加工法  
3D tooth surface creation method

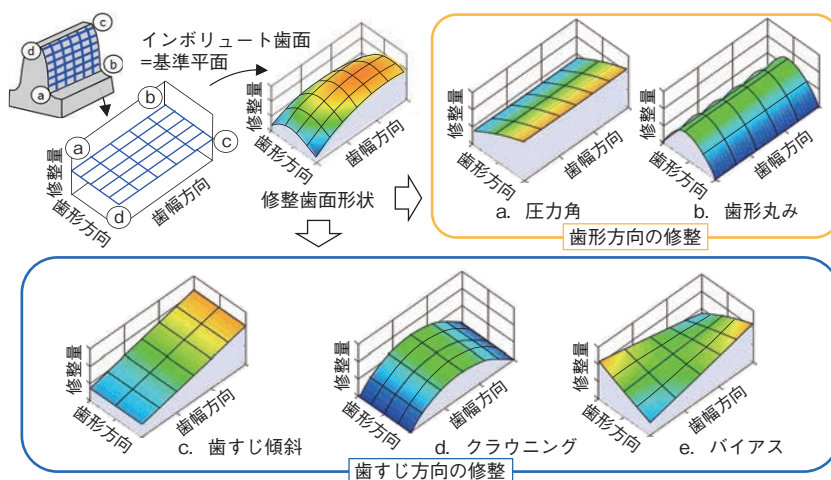


図6 自由曲面を構成する五つの要素  
Five elements comprising a free curved surface

ここで、3D 歯面形状を得るには、図6に示すように、圧力角、歯形丸みといった歯形形状を工具形状、歯すじ傾斜やクラウニング、バイアスなどの歯すじ形状を機械運動によって創成し、この歯形形状と歯すじ形状を組み合わせることにより 3D 曲面を実現する。

このような加工を実現するには、最適形状工具に加えて、滑らかに工作物の角度を変化させながら加工する必要があるため、機械要素技術と制御技術が必要となる(図7)。

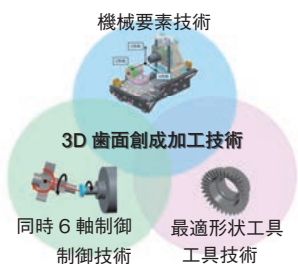


図7 3D 歯面創成加工技術  
3D tooth surface creation technology

## 4. 加工機開発

### 4.1 ギヤスカイビングセンタ GS200H5

当社は、高精度同期制御、高速高剛性ワーク軸、スカイビング加工用工具の技術と高速高剛性を実現するマシニングセンタの技術により、あらゆる切削加工に加え、旋削、歯切り加工を1台の機械で加工することができるギヤスカイビングセンタ GS200H5 を2016年に開発した。

GS200H5 は、従来、工程ごとに専用機で加工する必要があった歯車を1台に工程集約することにより、高生産性と高精度を実現した(図8)。

今回新たに、高度な3D 歯面創成加工を実現するため、高精度な動作と高い追従性を実現するダイレクトドライブテーブルと制御機能を開発。また、複合ギヤの位相合わせや焼入れ後の仕上げ加工も可能にするワーク・工具位相検知機能を搭載した高精度仕様機を開発したので紹介する(図9)。

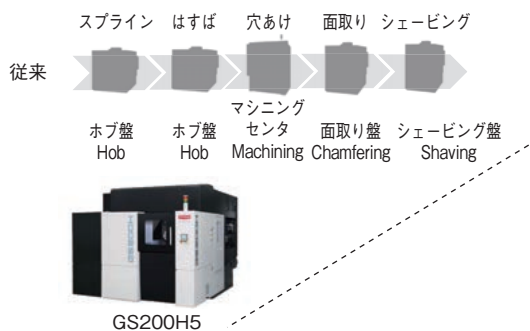


図8 工程集約事例

Example of process integration

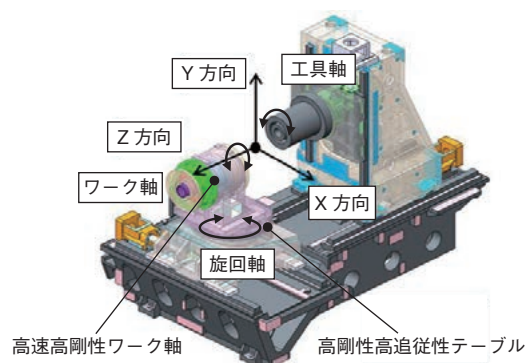


図9 高精度仕様機

High-precision machine

## 4.2 要素と機能の開発

### 1) 機械要素

#### ①高剛性高精度ダイレクトドライブモーター方式 (DD) テーブル

高能率なギヤスカイビング加工と高精度な 3D 歯面創成加工を行うため、ロータリーテーブルには、剛性ととも、高い追従性が必要である。

そこで、高い追従性を実現するため、ダイレクトドライブモーター方式とし、高剛性、高精度な内製の 3 列複合円筒ころ軸受を採用 (図10)。内部構造を見直すことにより、加工負荷による変位量を最小限に抑えたとともに、従来と比較して非常に高い剛性を実現した (図11)。

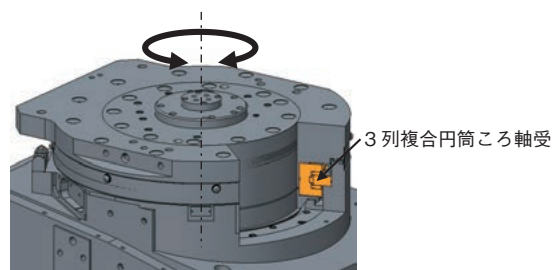


図10 DD テーブル

Direct drive table

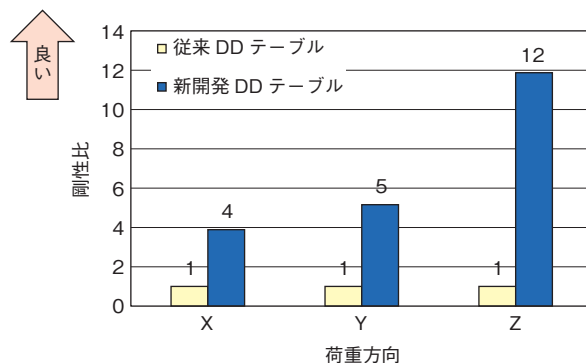


図11 剛性比較

Rigidity comparison

### ②ワーク・工具位相検知機能

E-Axle では、2 段ギヤが用いられ、二つのギヤに位相誤差があった場合、振動や騒音が発生する原因となり、伝達効率も悪化する。

そこで、高精度な位相合わせ加工を実現するため、スカイビングカッターの位相を検知する工具位相検知装置と、加工した歯車の位相を検知するワーク位相検知装置で構成される位相検知機能を考案した (図12)。独自のロジックを用いることにより、短時間で高精度の位相測定を行い、位相を狙い値に補正することで、高精度な歯車加工を実現する (特許出願中)。

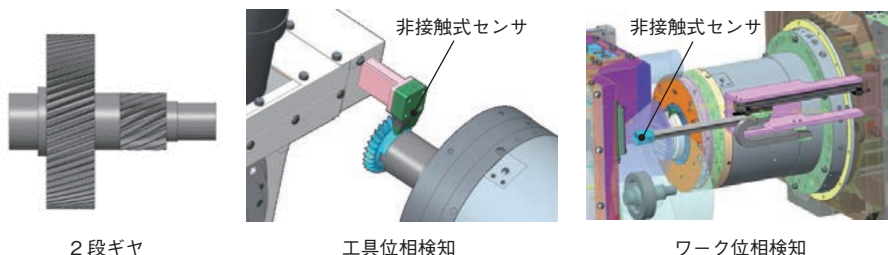


図12 位相検知装置

Phase detection unit



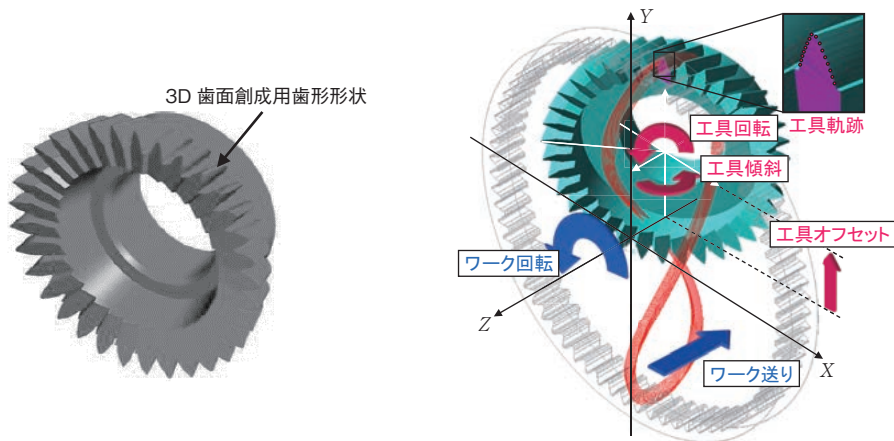


図13 工具設計  
Tool design

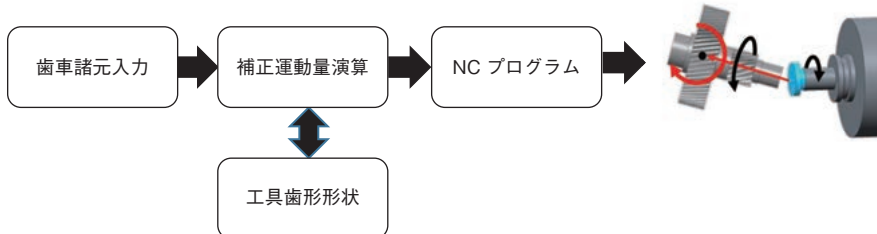


図14 3D 歯面創成加工用プログラム生成フロー  
Flow of 3D tooth surface creation process program

2) 工具

3D 歯面創成加工は、従来のスカイビング加工法と異なり、直線運動と回転運動を組み合わせる加工する。そのため、工具の刃形形状は、従来形状ではなく、機械運動を加味した最適形状が必要となる。

これを実現するために、独自のシミュレーションを開発し、刃形を設計した。それに合わせて、工具を成型することにより、3D 歯面創成用工具を開発した(図13)。

3) NC 加工プログラム生成機能

3D 歯面創成加工は、同時6軸加工となるため、求める最適歯面形状の加工プログラムを手動で作成することは困難である。そこで新たにプログラムの自動生成機能を開発した。

図14に自動生成フローを示す。簡単な歯車諸元を入力するだけで、自動的に演算を行い、3D 歯面創成加工用のNCプログラムを容易に作成することができる。

5. 加工事例

5.1 2段ピニオンギヤ仕上げ加工

平行軸歯車タイプのE-Axleに用いられる2段ギヤにはコンパクトであることが求められる。

2段ギヤの小径ギヤ部を仕上げ加工する際、従来は、ねじ状砥石を用いて歯研加工を行っていた。歯研の場合、図15に示すように砥石が大径であるため、干渉が発生しないようにギヤの間隔を広くする必要があり、結果として、製品が大きくなることが課題である。

一方、スカイビング加工は工具の接近性が良く、ギヤ同士の間隔を狭くすることが可能で、コンパクトな製品にすることができる。さらに、3D 歯面創成技術を用いることで、高精度な歯面形状の仕上げ加工が実現できる。

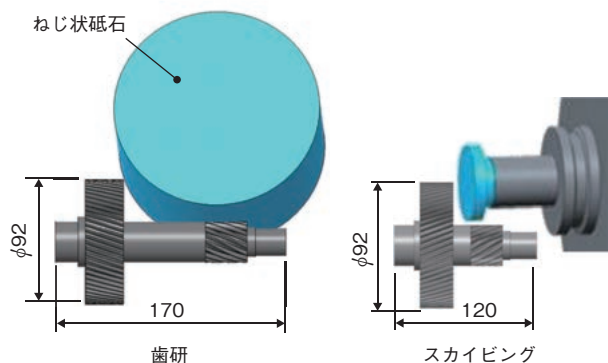


図15 スカイピング加工の利点  
Skiving process advantage

そこで、図16に示す工作物である2段ギヤに対して、加工評価を行った。この加工評価においては、超硬素材で製作したスカイピングカッターを用いて、熱処理後の仕上げ加工を実施した。

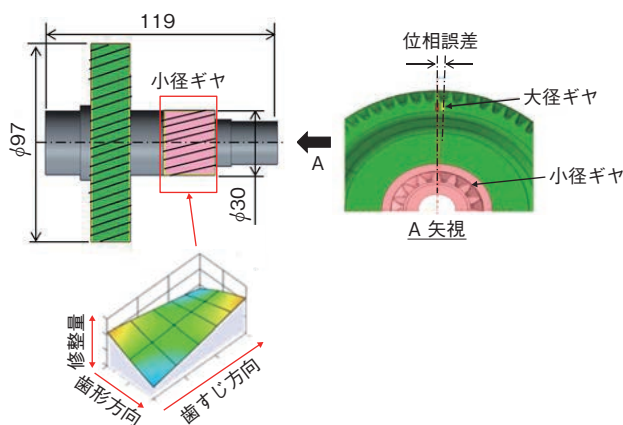


図16 2段ピニオンギヤ  
Two-stage pinion gear

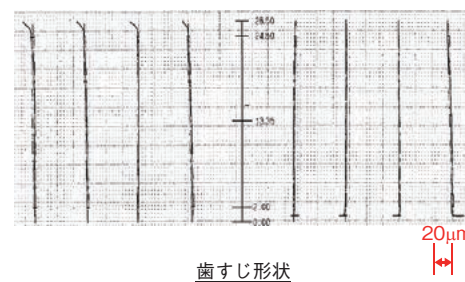
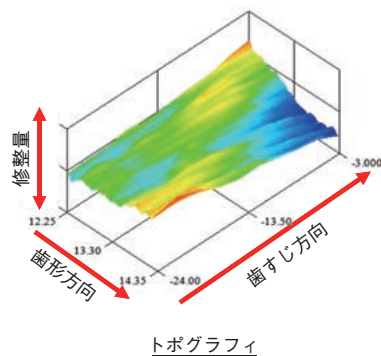
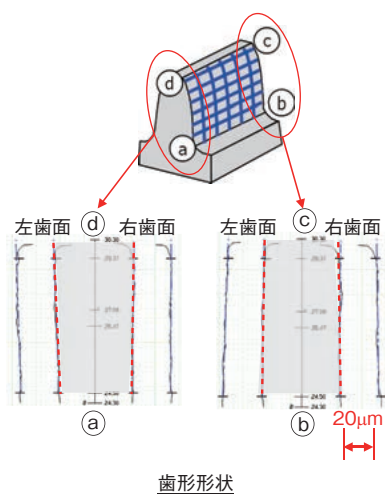


図17 加工結果  
Processing results

加工評価の結果を図17に示す。3D 歯面創成加工によって、歯車精度は JIS 5 級相当、バイアス修整量は狙い値  $\pm 1.5\mu\text{m}$  で加工することができた。また、位相検知機能を使うことで、位相誤差  $0.023^\circ$  という結果を得ることができた。

本技術を用いることで、当社の E-Axle の小型・軽量化、静粛性および効率向上に貢献できた (図18)。



図18 新開発 E-Axle  
Developed E-Axle

## 5.2 薄肉リングギヤの 3D 歯面創成加工

遊星歯車機構タイプの E-Axle では、薄肉リングギヤ (図19) が用いられるが、歯切り加工後に熱処理をした場合、ワークの熱ひずみが発生し、歯車精度が悪化するため、目標精度の達成が困難である。

そこで、3D 歯面創成加工技術を用いて、ワークの熱ひずみを考慮した傾向加工 (図20) を行うことにより、熱処理後の要求精度達成が可能と考え、加工評価を行った。

この加工評価においては、熱処理前に、熱処理時のひずみを考慮した傾向加工を行い、熱処理後に、最終製品精度の圧力角誤差  $6\mu\text{m}$  以内となることを目指した。

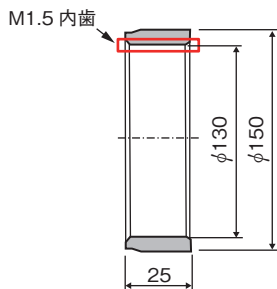


図19 薄肉リングギヤ  
Thin ring gear

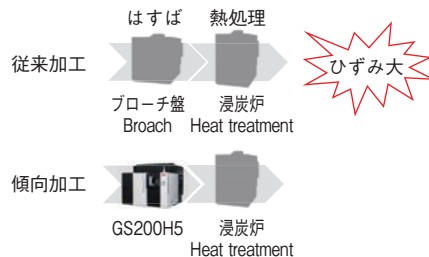


図20 加工工程  
Process

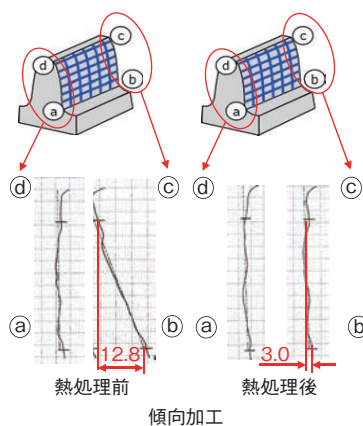
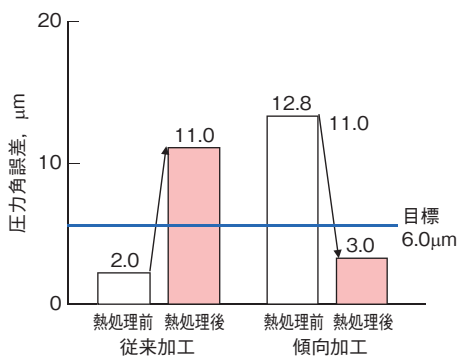


図21 加工結果  
Processing results

加工評価の結果を図21に示す。従来の工法では、熱処理前の圧力角誤差 2μm に対して、熱処理後に悪化して 11μm となり、最終精度未達であったが、3D 歯面創成技術による傾向加工を行うことで、熱処理後の圧力角誤差 3μm となり、要求精度を達成することができた。

\*ギヤスカイビングセンタは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

## 6. おわりに

新開発の 3D 歯面創成加工技術や位相検知機能を用いることで、E-Axle に求められる小型で、高精度かつ最適歯形の歯車を効率的に加工できることを実証した。

また、ギヤスカイビングセンタ GS200H5 とこれまでに当社開発した技術を組み合わせることにより、高生産性、低コストの生産ラインを構築するとともに、BEV に求められる小型で音・振動の少ない歯車を実現し、E-Axle を含むさまざまなユニットの付加価値を飛躍的に向上させることが可能と考える。今後も世の中の変化に追随し、さらなる技術開発を進めて、歯車の技術革新に貢献していく。

## 参考文献

- 張 琳, 大谷 尚, 中野浩之: 自動車技術会中部支部 研究発表会前刷集(2016).

## 筆者



多田典広\*  
N. TADA

\* 工作機械・システム事業本部 加工システム技術部