

技術論文

3次元データを基準とした ベベルギヤ歯面形状加工精度向上

Improving the Precision of Bevel Gear Surface Processing
Based on 3-D Data

山口 淳 Jun Yamaguchi
● MC 事業本部 生産技術開発室

As one means of reducing the running noise of motorcycles we have worked on improving the precision of the shapes of tooth surfaces of individual bevel gears. At Yamaha Motor until now our evaluations of gear tooth shapes has been based on differential tooth contact check results. However, this is a technique that requires training and experience and we have seen a considerable degree of discrepancy in observation results achieved by different technicians. To solve this problem, we developed a system for bevel gear measurement by which even technicians with limited experience can get quantified results.

Next we developed a system for correcting gear tooth shape processing. By controlling the processing machines by means of shape-discrepancy data, we were able to reproduce master shapes with a high degree of precision.

Here we introduce the resulting system that enables the processing of high-precision bevel gears in a short amount of time.

1 はじめに

モーターサイクルの低騒音化への顧客要求は年々増してきている。中でもメンテナンスフリーのベベルギヤユニットを採用している高級車に対しては、その要求度は一段と高い。そこで騒音低減の一環として、単体ギヤの歯面形状精度の向上に取り組んできた。

ヤマハ発動機(株)の歯面形状評価は、歯当り観察により行われてきたが、熟練を要し、作業者により評価のばらつきが発生している。そこでベベルギヤ計測システムを構築し、熟練者でなくとも歯面形状を数値評価できるようにした。

次に、歯面形状加工修正システムを開発した。形状誤差データを利用して加工機を制御することにより、高精度にマスター形状を再現することができた。

これにより短期間で高精度なベベルギヤを加工することが可能になったので、ここに紹介する(表1)。

2 ベベルギヤユニット概要

ベベルギヤユニットは、エンジン動力を車輪に伝えるために用いられる(図1)。

表1 ベベルギヤ歯面形状精度向上の取組み

歯面形状精度向上	
① 誰もが高精度に歯面形状を計測できる ↓ 歯面形状計測システムの構築	② 形状誤差が発生した場合に形状修正ができる ↓ 加工修正システムの構築



図1 モーターサイクルとベベルギヤユニット

駆動軸と被駆動軸が直交する点が特徴である (図2)。

また、ユニットを構成する単体ギヤの歯面形状は、平歯車と異なり、3次的に複雑な形状である (図3、4)。

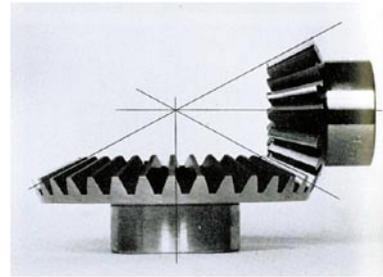


図2 駆動軸と被駆動軸の位置関係

2.1 ベベルギヤユニット製造工程

ベベルギヤユニットは、鍛造・熱処理前加工・熱処理・熱処理後加工を経て製造される (図5)。

各工程にて精度向上の取組みを行っているが、本論文では熱処理前加工の歯切り工程での取組みについて述べる。



図3 駆動側単体ギヤ

図4 被駆動側単体ギヤ

2.1.1 歯切り工程

歯切り工程を図6に示す。

単体ギヤの加工機 (以下、歯切盤と呼ぶ) では、カッタとワークを共に連続回転させ次々に各歯溝を削る (図7)。

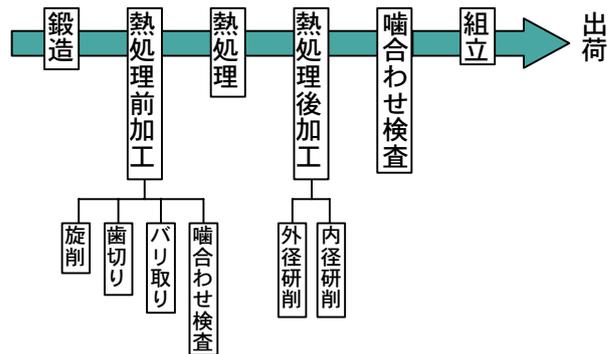


図5 ベベルギヤユニット製造プロセス

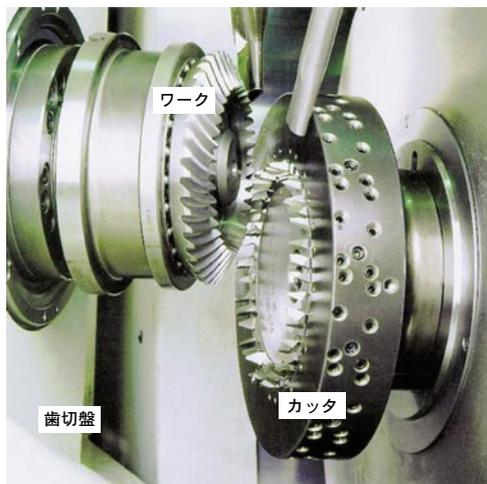


図6 歯切り工程

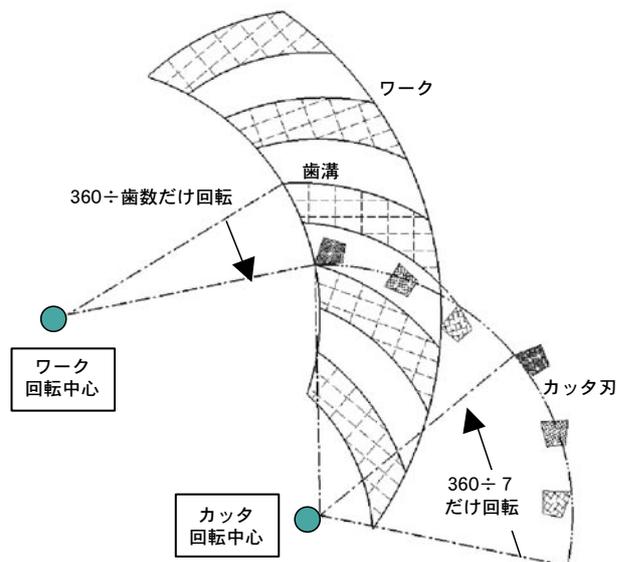


図7 カッタとワークの動作

歯切盤は複数の加工軸から構成されている。この複数の軸同士の角度・オフセット量を調整し、加工することで狙った歯面形状を生成する（図8）。

2.1.2 現状の歯面評価方法の問題

現状の歯面評価方法（以下、歯当り評価と呼ぶ）を以下に示す。光明丹と呼ばれる鉛化合物（四三酸化鉛）を歯面に塗布したギヤ同士を噛み合わせる（図9）。

その時光明丹が除かれた部分（以下歯当りと呼ぶ）の面積・形状・歯面中の位置が狙った当り方をしている時、加工された形状が正しいと判断する（図10）。

この方法で歯面形状をミクロンオーダーで評価するためには熟練を要し、熟練度により評価のばらつきが生じている。この問題を解決するため、評価方法を歯当り評価から歯面形状計測へ変更し、誰もが安定して高精度に歯面形状を評価できるようにした。

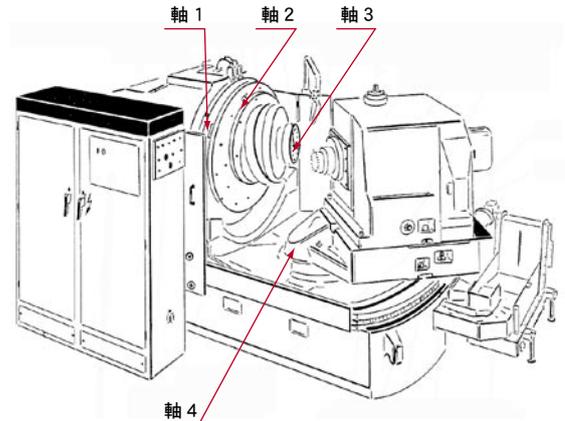


図8 歯切盤の軸構成



図9 噛み合わせ検査による歯当り評価

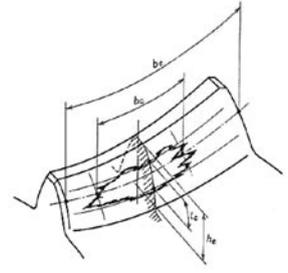


図10 JISによる“歯当り”定義

3 歯面形状計測技術の開発

これまで当社では、複雑なベベルギヤの歯面形状を計測する手段がなかった。一部のメーカーでは、ギヤ専用測定機を使用して、歯面形状計測を行っている。

しかしギヤ専用測定機は高コストで汎用性に欠けるため、エンジンブロック・シリンダヘッドなどの計測に使用している汎用3次元測定機を使用し、歯面形状計測技術のしくみを構築した。

3.1 計測システム概要

当社では、早くから計測の自動化に取り組み、CAD（Computer Aided Design）と3次元測定機を結んだ自動計測システムを開発・実用化してきている（図11）。今回、このシステムをベースに、ベベルギヤ歯面形状・工具・治具等を計測できる形状計測システムを構築した。

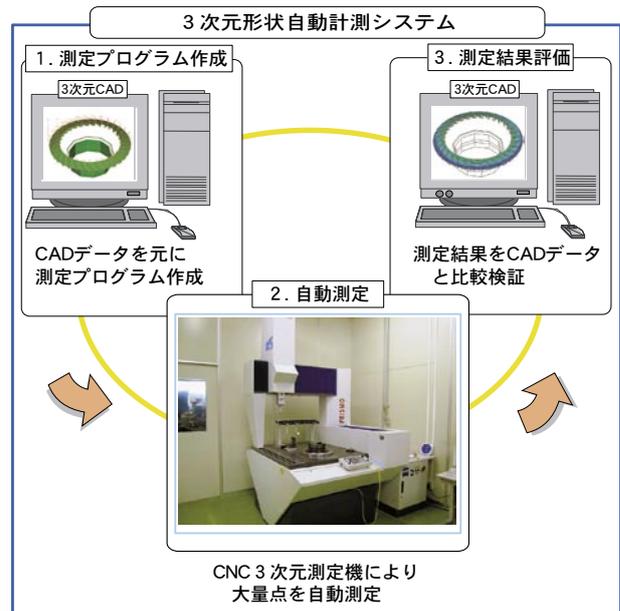


図11 自動計測システム

3.2 ベベルギヤ歯面形状計測

3.2.1 マスターデータの定義

計測にあたっては、マスターデータとの形状差を数値化する。本計測システムでは、設計した理論歯面データを取込みマスターデータとしている。また、実物ワークを測定してマスターデータとすることもできる。

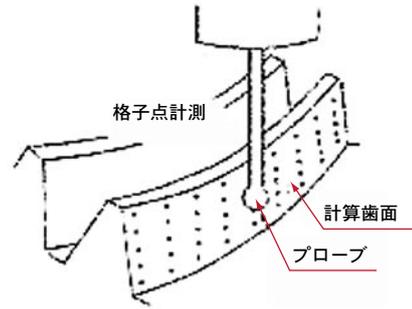


図12 プローブによる接触式計測

3.2.2 計測箇所と結果出力

各歯面5×9の45点を計測し、各計測点の誤差量を数値化している。

プローブによる接触式計測の様子を示す(図12)。計測結果は、各計測点での誤差量を図示により表現する(図13)。

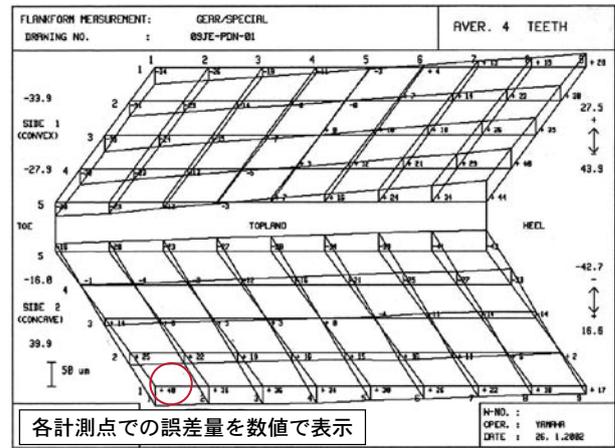


図13 計測結果の表示

4 歯面形状計測による評価レベルの向上

歯当り評価において同一と判断された2つの単体ギヤの歯面形状を数値化した(図14、15)。

また、この2つの間には、加速時の騒音値の差が約6dBあった。

歯面形状計測の結果、マスターギヤとの歯面形状差が最大±60 μmあった。また、2つのギヤの間には、最大40 μmの形状差があることがわかった。これらの誤差量が、歯当り評価での評価のばらつきと考えられる。

振動・騒音の差を低減するためには、この形状差を小さくすることが必要である。

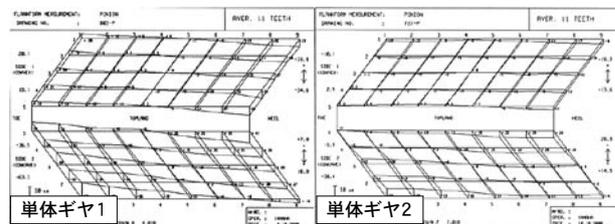


図14 単体ギヤ1 (騒音値大)

図15 単体ギヤ2 (騒音値小)

5 歯当り評価による歯面作り込みの問題

現状の歯面作り込みのプロセスを以下に示す。歯切盤の複数の軸のセット位置(以下、歯切盤セッティングと呼ぶ)は設計諸元より算出され、これに従い歯切り加工する。歯当り評価は、駆動側・被駆動側双方のギヤを加工した上で行う(図16)。

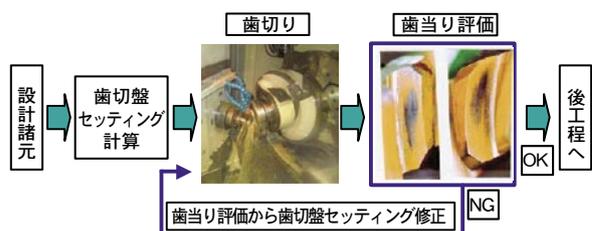


図16 現状の歯面作り込みプロセス

歯当り評価が良くない場合、歯切盤セッティングを変更して歯当りを修正する。この修正は試行錯誤にて行われるため、多大な時間が必要となる。また前章の通り、歯当り評価は熟練度によるばらつきがあり、その結果、歯面形状にもばらつきが生じている。よってマスター形状を高精度に再現すること、及び生産準備期間を短縮する技術開発が求められていた。

6 計測結果フィードバックによる歯面作り込み技術の開発

歯当り評価から歯面形状計測へと評価方法を変更したため、形状変動要因の分析から行なった。ここでの変動には、ばらつき及びばらつき中央値と設計値の差の両方を含む。

6.1 歯面形状変動要因の調査

歯面形状が変動する要因を示す（図17）。

設計値通りの歯切り加工を行うには、カッタ及びブランク材の両方が設計値通りに製作されており、加工時にその相対位置関係を正しく再現している必要がある。

図17中で歯切り加工工程に関係する、ワーク素材・治具・カッタ組立精度を計測した（表2）。

ワーク素材・治具の精度に比べて、カッタの組立誤差量が著しく大きいため、これを考慮した歯切盤セッティング補正が必要と考えた。

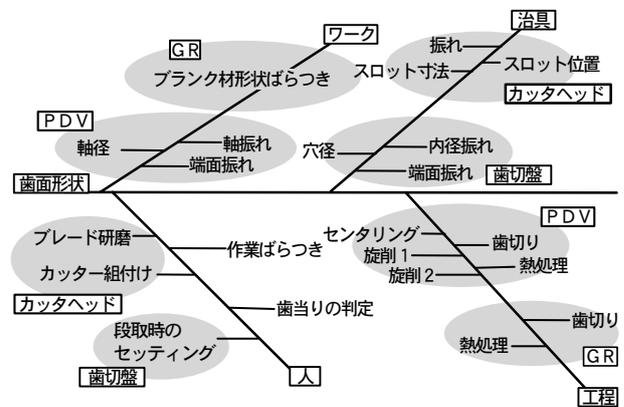
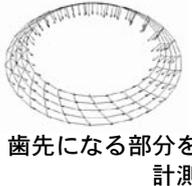
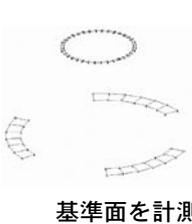


図17 歯面形状の変動要因

表2 ワーク素材・治具・カッタ組立精度計測結果

計測対象	計測部位	計測結果
ワーク素材 	 歯先になる部分を計測	誤差幅 14 μm
治具 	 基準面を計測	誤差幅 5 μm
カッタ組立 	切刃エッジのカッタ中心からの距離を計測（詳細は6.1.2による）	誤差幅 300 μm

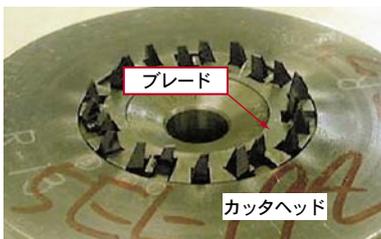


図18 カッタの構成部品

ブレードは、粗加工用・凸歯面加工用・凹歯面加工用の3種類存在し、この3本で1グループを成す。これが計7グループあり、次々に歯面を連続割り出しして加工する（図19）。

6.1.2 カッタ計測箇所

カッタヘッドへのブレードの組込みは、ブレードの高さ誤差 $\Delta 1$ を $\pm 5 \mu\text{m}$ に収まるよう調整しながら行われる（図20）。

今回、歯面形状を生成する、ブレード切刃エッジ回転中心からの位置 (RBA) をブレード 21 本それぞれ計測した（図21）。

6.1.3 計測結果

計測結果を以下に示す。横軸はカッタのグループ、縦軸は中心からの位置を示す。カッタ組立精度は物によって差があり、カッタの設計値に対し、最大で約 $300 \mu\text{m}$ の誤差を持つことがわかった（図22、23）。

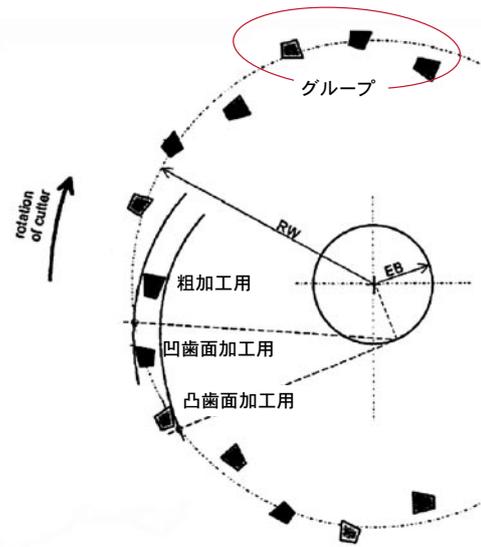


図19 歯切り用カッタの組立

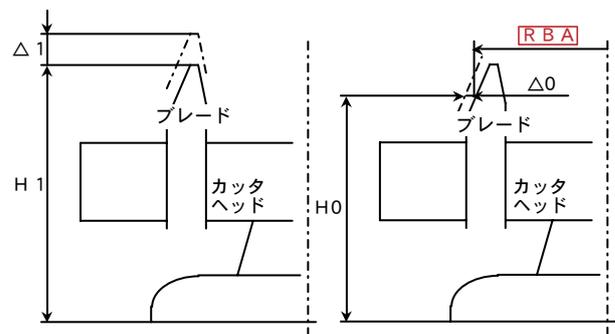


図20 ブレード組込み調整 図21 組立後のカッタ計測位置

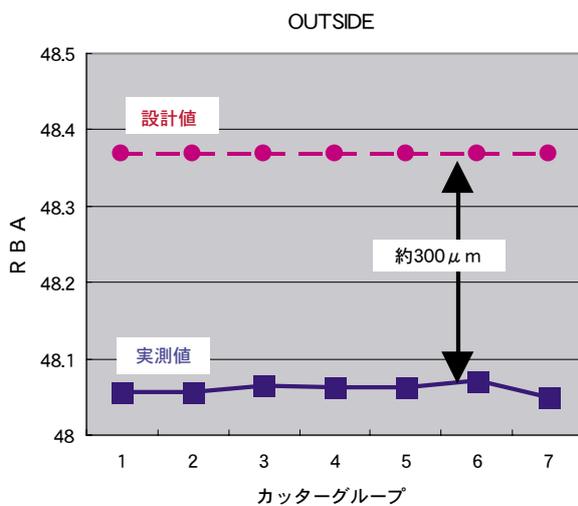


図22 計測結果（誤差が大きい場合）

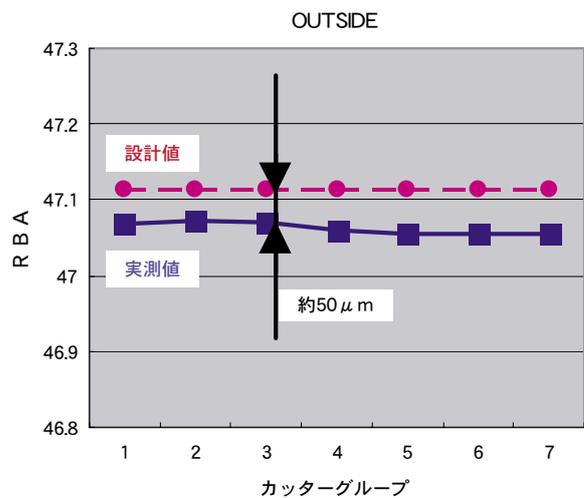


図23 計測結果（誤差が小さい場合）

6.2 加工修正システム開発

設計諸元を元に算出したセッティング条件で歯切りをしても、特性要因図（図16）に示した複数の要因により、精度良い歯面形状は得られない。ここで歯面計測結果データを元に、セッティング条件を再計算させるシステム（以下加工修正システムと呼ぶ）を構築した（図24）。

加工修正システムは、カッタ組立精度検証部と歯切盤セッティング修正部の2つの部分から成る。

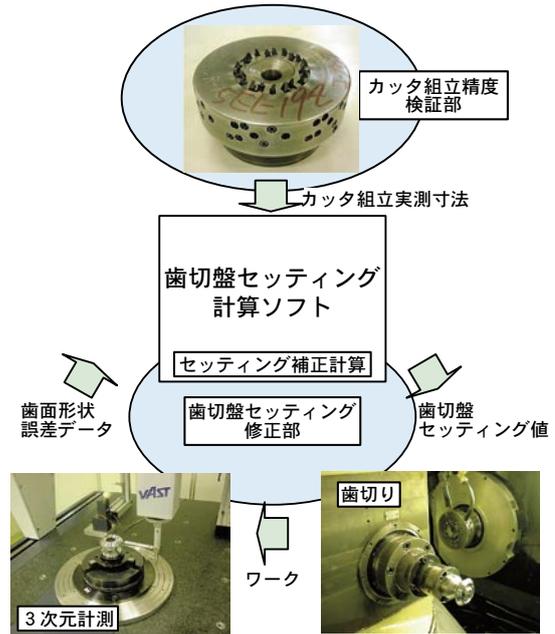


図24 加工修正システム概要

6.2.1 カッタ組立精度検証部

カッタを計測し、粗加工用・凸歯面加工用・凹歯面加工用の3種類の切刃エッジ RBA 実測値を歯切盤セッティング計算ソフトに取り込む部分である。

6.2.2 歯切盤セッティング修正部

試加工したワークとマスターデータとの形状差データ（歯面形状誤差値）を読み込み、歯切盤セッティング値を再計算する。そのセッティングで再加工したワークを計測する。この作業を繰り返し行い、形状差を許容値以下にする部分である。

7 加工修正システム適用の結果

加工修正システムを適用することで、歯面形状を設計値に対して $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内におさまられた。この歯面作り込みは、歯切盤の段取り作業時間も含め4時間にて行えた（図25）。

また、この適用トライの過程において、カッタ組立誤差が大きいと歯面形状を設計値に近づけられないことがわかった（図26）。

カッタ組立誤差が大きい場合は、4回修正しても形状が収束しなかった。

このことから、カッタ組立誤差の許容値を設定すること及び、カッタ組立誤差の低減が今後の課題となる。

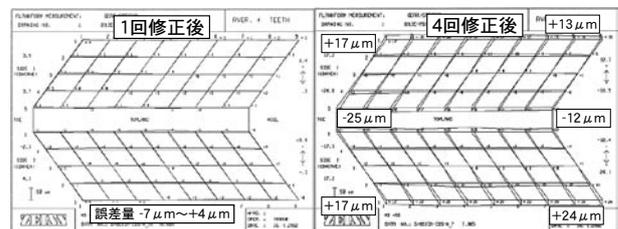


図25 加工修正システム適用結果（カッタ誤差 Δ RBA=0.05mm）

図26 加工修正システム適用結果（カッタ誤差 Δ RBA=0.3mm）

8 効果

歯面形状計測から加工修正システムを開発したことで、以下の結果が得られた（表3）。

- (1) 熟練作業でなくても、歯面形状を高精度に評価できるようになった。
- (2) 狙った設計形状を高精度にかつ安定して加工できるようになった。
- (3) 歯面形状の変動要因を定量的にとらえることができ、歯面形状変動発生原因が短時間につかめるようになった。また、量産時に管理していくポイントが明確になった。
- (4) 歯面作り込みの時間が短縮できた。

表3 加工修正システムによる歯面形状修正法の効果

	歯当り評価による歯面修正	加工修正システムによる歯面修正
歯面形状評価	熟練を要し、作業によるばらつきが生じやすい	作業によるばらつきが生じにくい
狙った形状を加工できるか	できない (実績±60 μm)	できる (実績±10 μm)
量産中での形状ばらつき	40 μm	40 μm (カッタ補正により低減可能性あり)
歯切盤セッティング値決定時間	24 時間	4 時間

9 おわりに

歯当り評価による定性的・試行錯誤的な歯面形状修正法から3次元データを中心にした定量的な歯面形状修正法へ移行することで、精度面・効率面ともに大きな効果を得ることができた。

今後は適用事例を増やし歯面形状精度を更に向上させると共に、生産中での管理手法確立・工程全体での形状ばらつきの低減に取り組んでいく所存である。

■参考文献

- 1) 津久井勝巳：ハイポイドギヤ歯面形状測定技術開発とデフノイズ低減への応用：日本設備管理学会誌第9巻第4号（1988）
柴田好克等：ハイポイドギヤ最適歯面設計：自動車技術会学術講演会前刷集962（1996）

■著者



山口 淳