

論文・解説

25

# ハイポイドギヤ絶対原価の追究

## Process Development of Face Hobbing-Hypoid Gear

田中宏明<sup>\*1</sup> 山本真司<sup>\*2</sup> 樋口昭彦<sup>\*3</sup>  
 Hiroaki Tanaka Shinji Yamamoto Akihiko Higuchi  
 坂東武夫<sup>\*4</sup>  
 Takeo Bando

### 要約

マツダではハイポイドギヤの歯切り方法として、これまでフェイスミル歯切り法（勾配歯）を採用してきた。今回、新しい四輪駆動システム開発にあたり、より小型で静粛性を持ったPTO（Power Take Off）の開発・生産要望があった。ユニット小型化を可能とするため、内蔵するハイポイドギヤに高強度を狙った等高歯を採用した。これはフェイスホブ加工と呼ばれる歯切り法により得られる。高強度・静粛性を確保するとともに、ハイポイドギヤ加工工程を根本的に見直すこととし、コストに対して絶対原価を追究した。

本稿では、ハイポイドギヤ生産工程をタッチ数という視点から見直し、いかに少ない工程で生産出来るかを検討した事例を紹介する。

### Summary

Mazda has been doing the hypoid gear cutting by using the Face-Milling. In the new 4WD development, we were asked to develop smaller and more quiet PTO (Power Take Off). In order to reduce size, we adopted more rigid Face-Hobbed-gear for the built-in hypoid gear. Face-Hobbed-gear is produced through the so-called Face-Hobbing. In quest for high-rigidity and quietness, we thoroughly refined the hypoid gear cutting process, and made hunt for absolute cost.

This paper introduces our approaches to reduce as much process of hypoid gear cutting as possible.

## 1. はじめに

従来、ハイポイドギヤを内蔵するデファレンシャル（以下デフ）ユニットやPTO（Power Take Off：Fig.1）は、後輪駆動車・四輪駆動車にはなくてはならない動力伝達構造の一つとして、自動車業界においてはその開発・生産技術を重要な技術であると位置付けてきた。近年になってマツダでは世界最適調達を目指した外製ユニット購入の機会とともに、他の自動車メーカーへのユニット供給の機会も増えている。品質は“当たり前”の上に立脚した相互補完、激しいコスト競争が展開されている。デフユニットの生産は、絶対原価追究を目的に、組立工程でのフレキシブル化や部品点数削減、デフケース加工工程でのNCマシニングによるフレキシブル生産実現などにより、よりコスト競争力の

ある生産プロセスへと移行しつつある。しかし、内蔵するハイポイドギヤ加工工程においては、各社ともほぼ同じ生産方式を用いているため、品質、コストにおいて優位性を確保するのが難しい状態にある。これでは、競合力のあるユニットを生産することが出来ないだけでなく、今後のユニットビジネスの機会さえも失いかねない。そこで、従来から用いているハイポイドギヤ諸元と生産工程を絶対原価という考え方で見直し、最安のギヤ諸元と加工工程はどうであるべきかを検証し、量産に織り込んだ。以下に開発の経緯を述べる。

## 2. ハイポイドギヤ生産工程の概要

従来のハイポイドギヤ生産工程はFig.2に示す通りである。歯切り法はフェイスミル歯切り法と呼ばれるもので、

\*1~4 パワートレイン技術部  
 Powertrain Production Engineering Dept.

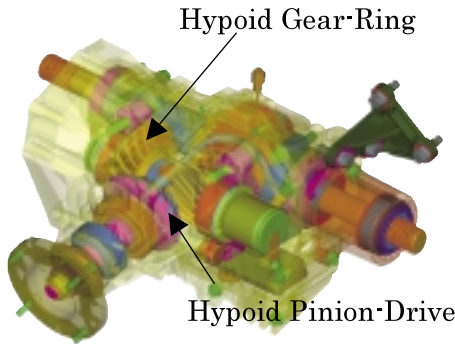


Fig.1 New PTO (Power Take-off)

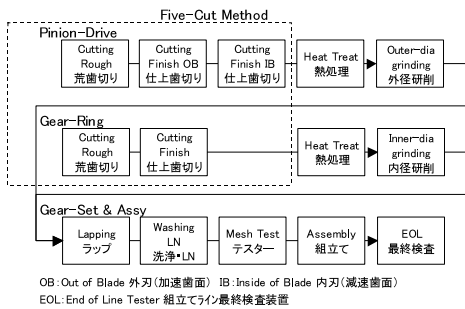


Fig.2 Process of Conventional Hypoid-Gear

ギヤとピニオン合わせて5回の歯切りを行うことから5カット方式と呼ばれる。歯切り後、それぞれ熱処理工程を経て、ピニオンは軸部外径が研削される。ギヤは同様に内径研削を行う。ラッピング工程ではそれらをセットとして、Si系の研磨剤を塗しながら歯面仕上げを行い、洗浄を経た後、表面処理を行う。対になったギヤセットをテスターで品質確認し、完成品となる。

### 3. 絶対原価を追究したハイポイド生産工程

#### 3.1 ハイポイドギヤ絶対原価の考え方

絶対原価とは、製品の構造・機能・特性により決まり、製品以外の条件（台数やライン形態）に左右されない最も効率的な製造プロセスの正味製造原価のことである。ハイポイドギヤに求められる機能は、ひとつはより小型軽量で高強度を有する動力伝達と、もうひとつはその動力伝達が静粛に行われることである。これらの機能を満足する製品を必要最小限のタッチ数（刃具、治具、検査具等がワークへ接触する手数）で生産出来る工程をハイポイドギヤの絶対原価工程であると定義し、歯車諸元・生産プロセスを再構築した。

#### 3.2 絶対原価ライン実現の課題

実現する上での検討課題は以下の通り。

- (1) 歯切り工程数削減（ワンチャック加工）
- (2) ラッピング工程廃止の可否
- (3) 当たり前としてきたファイナルギヤテスター工程の廃止
- (4) タッチ数削減と品質を成立させる良品条件（管理・点

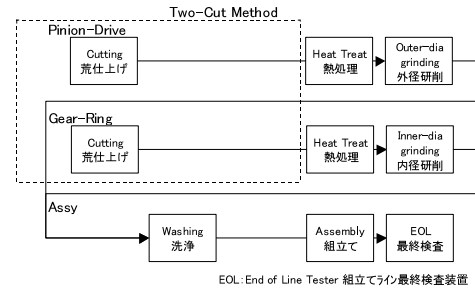


Fig.3 Process of Hypoid-Gear for Absolute Cost

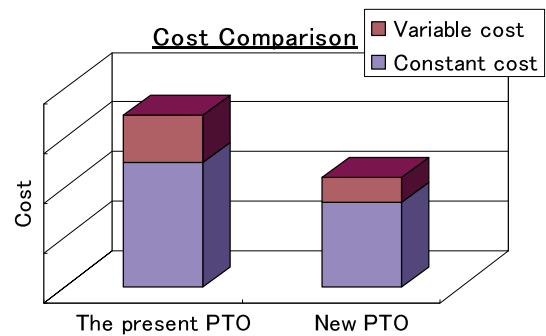


Fig.4 Merit of Hypoid-Gear for Absolute Production

#### 検)の設定

これら多岐にわたる課題を検討する上で対応策として提案したアイテムは、机上検討と同時に各開発試作段階へ織り込み、実機にて良否を確認しながら、より信頼性の高いものとしていった。Fig.3がハイポイドギヤの絶対原価工程である。新しい工程を実現することにより、ワークへのタッチ数を122回 31回へと削減出来、ギヤセットとしては変動費及び固定費の領域で約40%のコスト削減が可能となる (Fig.4)。

以下に各工程で検証した詳細について述べる。

### 4. フェイスホブ歯切り法の採用

#### 4.1 歯切り工程削減の課題

従来の創成歯切り法を代表とするフェイスミル歯切り法は、加速/減速歯面の仕上げ歯切りが別々の歯切り盤で行われ、歯当り調整の自由度が非常に高い。結果、実車ノイズに有利な歯形を得やすいという理由もあり採用している加工法だが、生産性が高いとはいえない。しかし、昨今のNC歯切り盤の導入や、3次元計測機による歯面形状測定により 加速側と減速側の同時歯面修正も容易になってきた。加えて、マツダではハイポイドギヤ噛合起振力の測定技術や、ユニットの起振力定量評価装置 (EOL; End of Line Tester) を開発し、導入してきた<sup>(1)</sup>。これらを活用し、加速/減速歯面の同時加工に起因する起振力ばらつきを評価した結果、歯切りワンチャック加工の採用は可能であると判断した。

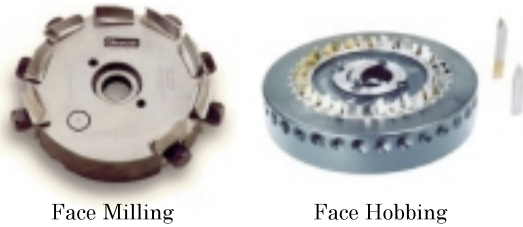


Fig.5 Cutter System of Face Hobbing and Milling



Fig.6 New Machine for Grinding of Stick Blade

今回、PTO用ハイポイドギヤの歯切りワンチャック加工法として、フェイスホブ歯切り法を採用した。この歯切り方法は前述のフェイスミル歯切り法に対し、ピニオンとギヤがそれぞれワンチャックで歯切りを完了するため、2カット方式とも呼ばれる。歯切り方法は、従来の勾配歯のような1歯割出しによる歯切りではなく、ヘリカルギヤでは一般的なホブ加工と同じ連続割出しによる歯切りとなる<sup>2)</sup>。割出しに要する時間が不要で、前述の工程数の違いと合わせ、勾配歯に比べ、圧倒的に単位時間・機械台数当たりの出来高に優れる。また、その連続割出しの幾何的利点から、小径のカッターが使用出来る。これにより、負荷荷重状態における歯当り荷重中心が歯面内に留まる特性から、従来の勾配歯に比べ歯筋全体で荷重を受けることが可能となり、強度面で有利となっている。

4.2 新しい刃研機の開発

フェイスホブ歯切りに必要な工具はフェイスミルに用いられるフライス状のカッターとは異なる。連続割出しを可能とするため、Fig.5右図に示すような切削方向に幅の短い棒状の刃物を使用し、そのプロファイル形状を刃研することが必要となってくる。

従来のプロファイル刃研機は高価であったため、Gleason Corporation (以下グリーソン社) に提案し、より安価な設備の共同開発を行うこととした。ベース機にはグリーソン社傘下のGleason-PFAUTER Maschinenfabrik GmbH製P60を使用することにしたものの、ベッド部が鉄板溶接構造を取るため 熱による変形や刃研精度への影響を考慮し、鋳物に変更した。また、刃物の母材が刃研精度ばらつきに影響しないチャック構造を提案し 精度を向上させながら、従来価格の約30%を低減可能とした (Fig.6)。

Table 1 The Function Required of Lapping

機能 Function	課題 Subject
初期なじみ (スコアリング防止) Initial familiarity	初期スコアリングの懸念 Concern of Initial familiarity
歯当り位置・歯形修正 (ノイズばらつき低減) Tooth Contact Position&Tooth form Correction	最適歯面形状の決定(ロバスト追求) Determination of the optimal tooth form ラップによる歯当り位置修正不可 Tooth contact position correction is impossible
カッターフラットの除去 (高周波ノイズの低減) Cutter flats removal	実車での高周波ノイズの懸念 High frequency noise in a real vehicle

5. ラッピング工程廃止の概要

5.1 ラッピングに求められる機能

ハイポイドギヤのラッピングとはピニオンとギヤを対として、Si系の研磨剤を塗しながら歯当りを歯面全体に移動させ表面仕上げを行い、歯面の面粗度を向上させる方法として一般的に知られている。

ラッピングに求められる機能とはTable 1のようなものであり、大きく3つある。(1)ギヤ信頼性の評価項目である初期なじみ(スコアリング防止)、(2)歯当り位置と歯形の修正、(3)カッターフラット除去による高周波ノイズ低減である。これらの機能に対してラッピングを実施しない場合の課題がそれぞれに挙げられるが、その課題を全てクリア出来れば、ラッピング廃止が可能といえる。

フェイスホブ歯切り法では、歯面に発生するカッターフラットと呼ばれる切削傷、うねりの方向がフェイスミル歯切り法とは異なり、それらに起因する高周波ノイズが発生しにくいとされる。このことから、通常ハイポイドギヤでは当たり前とされていたラッピング工程の廃止に着目した。

5.2 耐スコアリング性能の検証

ハイポイドギヤの場合、噛合い時の接触圧力が極めて高く、ほとんどの場合で歯面は境界潤滑下にある。そのため、金属接触部分では分担荷重が増え、そこで発熱する。スコアリングは、その発熱温度(フラッシュ温度)が高くなりすぎたときに、歯面の一部が溶融し、相手歯面に取り去られる歯面損傷のことである。このフラッシュ温度を低く抑えられれば、スコアリングは発生しにくいといえる。

耐スコアリング性能の評価は、下記のようなグリーソン社の提案している公式を用いた<sup>3)</sup>。

$$T_F = T_i + \Delta T_0 \dots(1)$$

$T_F$ ...スコアリング指数

$T_i$ ...ギヤブランク温度

$T_0$ ...接触歯面の温度 ( $T$ の最大値)

$$\Delta T = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot q_0 \cdot \mu \cdot v_s \left/ \left( C_1 \sqrt{\frac{v_1}{d_1}} + C_2 \sqrt{\frac{v_2}{d_2}} \right) \dots(2) \right.$$

$T$ ...接触面の温度上昇(フラッシュ温度)

$q_0$ ...接触圧力

$\mu$ ...摩擦係数

$v_s$ ...すべり速度

$C_1, C_2$ ...熱定数

$v_1, v_2$ ...速度

$d_1, d_2$ ...接触楕円の幅

添字の1, 2はピニオン, ギヤを指す

式(1)(2)はFig.7のような噛合いを仮定したときの式である。新設したPTO用ハイポイドギヤ(ニヤマイタ:ギヤ比が1.0に近い)と一般的な乗用車用サイズのハイポイドギヤをこの式を用いて比較した結果,同一のトルク・回転数の状況下では,圧倒的にフラッシュ温度  $T$ は低く,ギヤ諸元的にスコアリングが発生しにくいことが分かった(Fig.8)。この結果を受け,ラッピング未実施のギヤセットについて実機でのスコアリングテストを実施し,問題のないことを確認した。

5.3 最適歯形の検討

ラッピング廃止の場合,ラッピング加工の機能の2つ目である,歯当りと歯形の調整がネックとなる。通常,ラッピングすると歯当り位置と歯形は矯正され,完成品のばらつきは減少する。しかし,ラッピングを廃止することにより,最終完成歯形が熱処理後の歯形となり,これがユニット組立後の歯当り位置ばらつきに影響するためである。そこで,品質工学を用いて,その歯当り位置ばらつきに対し

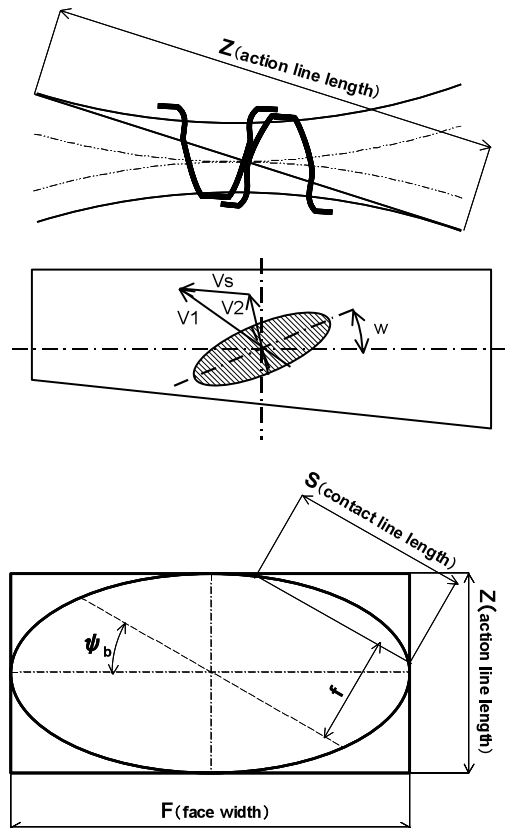


Fig.7 Hypoid-gear Meshing Model

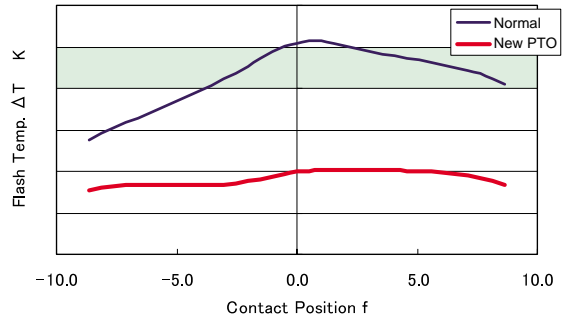


Fig.8 Verification of Scoring Index

て最もロバストな歯切り歯形を検討した<sup>(4)</sup>。この結果から,熱処理変形に依存する歯当りばらつきが最も少なく,ロバストな歯形を選定した。Table 2とTable 3に因子と水準を, Fig.9の赤印に,最終的に決定した各因子の条件を示す。

5.4 ロバスト性評価

マツダでは歯車諸元と歯形の狙いが有効なものであるかを最終的に評価するため,噛合伝達誤差テスターを用い,組付け時に発生する配置誤差を意図的に与えた場合の噛合伝達誤差と歯当りの評価を行う。これにより,ギヤ単体の配置誤差へのロバスト性を評価することが出来る。この方法によって,従来のフェイスミル歯切りと今回採用のフェイスホブ歯切りによるギヤセットの比較を実施した。Fig.10およびFig.11に従来のフェイスミルとフェイスホブのギヤセットの配置誤差に対する噛合伝達誤差特性を示す。フェイスホブ歯切りの方が今回設定した諸元・歯形においては平均的に伝達誤差が小さく,また平坦な特性を持っていることが分かる。これはケースの加工精度やユニット組付け誤差に対し,よりロバストな特性を持っているといえる。噛合伝達誤差テスターは軽負荷領域での計測であるため,加えてユニット全体の実車での実稼働状態で評価すべきであると考え,次のテストを実施した。

5.5 ノイズの検証

ロバストを追求した歯形に実機での量産ばらつきを与え,それをユニットに組み込むことで,ノイズの下限品テストを実施した。歯切り工程での刃具刃研寿命内加工を1

Table 2 Tooth Form Design Control Factors and Levels

	1	2	3
Heat Treatment Timing	head	middle	
Position in Heat Treatment Palette	front left	center	back right
Pattern Length Factor	0.35	0.5	0.6
Blade Curvature	50	200	0( $\infty$ )
Delta Gamma X	-1.5	0.5	2.5
Delta Psi	-0.75	-0.5	-0.25
Delta Ax	-0.015	-0.005	0.005
Cutter Radius Change	-0.005	0	0.005

Table 3 The Error Factors and Levels

	1	2
Heat Treatment Modification	small	large
Torque (Transmission Error Measurement)	low	high
Alignment (V/H)	0/0	80/120

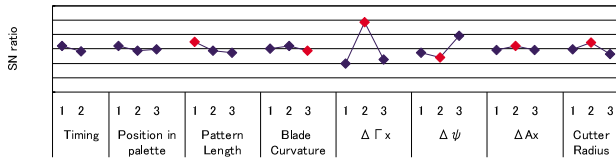


Fig.9 S/N Ratio

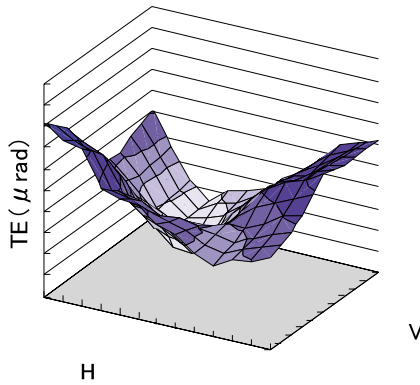


Fig.10 Transmission Error of Face-Milled Gear

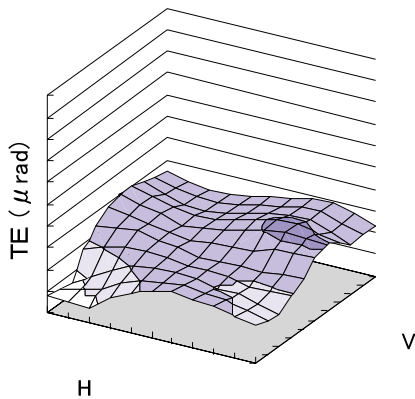


Fig.11 Transmission Error of Face-Hobbed Gear

ロットとして、連続加工の初回と最終品を取り出し、それに熱処理条件のばらつきを与えて下限品を製作した。Fig.12は個々のユニットの噛合伝達誤差を計測した結果である。車両からカスケードされたユニット目標ラインを十分に満足するレベルであることが分かった。

結果、ケース精度ばらつき、ユニット組立ばらつきを与えても、目標値を満足するノイズ性能（静粛性）を有するギヤセット性能であることを実機で確認することが出来た。

## 6. テスター工程廃止の概要

### 6.1 ギヤセットテスター工程の目的

ギヤセットテスターは、ギヤセット加工工程の最終工程であり、ギヤセットの歯当り品質と実車でのギヤノイズの原因のひとつである噛合伝達誤差の全数検査を目的としている工程である。マツダではユニット組立後にEOLテスターを導入し、ユニットとしての品質管理を実施しているが、

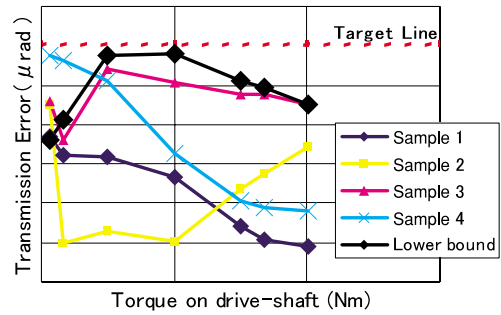


Fig.12 Transmission Error of PTO

ここで計測する特性はギヤテスターに類似している。結果として、デフユニット生産工場としては、品質の安定度とコストがバランスしていない可能性が高い。

### 6.2 オンライン品質工学の適用

オンライン品質工学を用いて不具合が発生した場合のロスコストと頻度を評価し、最適な管理方法を論理的に算出した。長期にわたる量産データと、新規に追加したトライアルデータなどを用い、計算を実施した<sup>(5)</sup>。

### 6.3 工場全体としての採算計算

式(3)を用いて、新規ユニット用ギヤセットと同様の工程で加工している現在量産中のギヤセットについて、ギヤセット加工とユニット組立での損失 $L_0$ を計算したところ、Fig.13に示す通り、総損失の内訳において、全数検査をしているギヤセットテスターと、組立ラインのEOLテスターでの計測コストの占める割合が圧倒的に高いことが分かる。

$$L_0 = \frac{B}{n_0} + \frac{C}{u_0} + \frac{A}{\Delta^2} \left[ \frac{D_0^2}{3} + \left( \frac{n_0 + 1}{2} + l \right) \frac{D_0^2}{u_0^2} \right] \dots (3)$$

- $L_0$ : 総損失
- $B$ : 計測コスト
- $n$ : 現行の計測間隔
- $C$ : 調整コスト
- $u_0$ : 現行の調整間隔
- $A$ : 生産者側の損失  
: 現状の許容差（規格幅）
- $D_0$ : 現行の調整限界
- $l$ : タイムラグ

### 6.4 量産工程への反映

そこで、この量産中のギヤセットについて、ギヤセットテスターを廃止した場合に予測される損失を試算した。なお、ギヤセットテスターで見つけていたNG品についてはそれぞれNGの内容を詳細に分類し、組立工程の歯当り検査やEOLテスターで流出防止するとして予測損失を試算した。この試算から、ギヤセットテスターを廃止すれば、後工程でNGを見つけるための調整コストなどが増大するが、結果として損失は1個当たり約15%抑えられるという結果が

得られた (Fig.14)。そこで、ギヤセットテスターを廃止するトライアルを約1ヶ月間実施し、実測結果を反映して損失を再計算した結果、試算と近い値となった。トライアル結果を踏まえ、実際にこのギヤについてはギヤセットテスター工程が廃止され、また今回新設されたPTOのギヤセットについても、組立工程にEOLが設置されるため、加工工程のギヤセットテスターを廃止した。

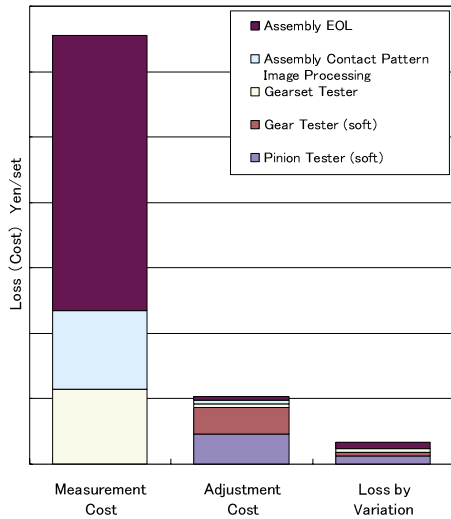


Fig.13 Items of the Quality Loss at the Current Process

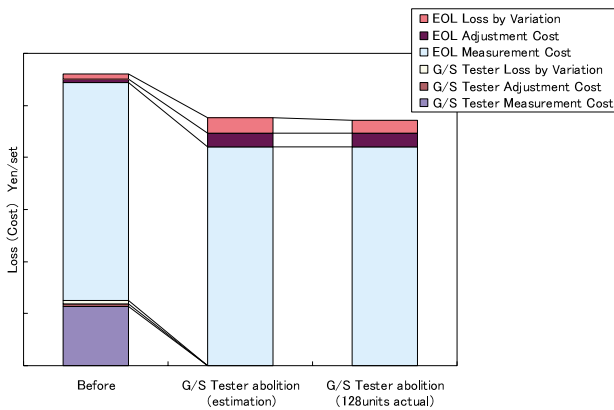


Fig.14 Comparison of the Quality Losses by the Difference in the Existence of a Tester Process

Table 4 Table of Excellent Article Conditions

INSTRUCTION SHEET FOR OPERATION						
CONTROL ITEM	SPECIFICATION	INTERVAL	CHECK ITEM	SPECIFICATION	INTERVAL	CHECK METHOD
Slot Accuracy						
#582 Actual	±0.00Amm	All	#582 Setup	Master measured	1/S	
#582 Actual	±0.00Amm	All	#582 Setup	Master measured	1/S	
Taper Drive						
Cutter Height	±0.00Amm	All	Base level of stand	±0.00Δ	1/Y	Dial Gage
-----						
Pressure angle	Nominal±0°	Cutter change	Master gear	Nominal±0°	1/M	3D Flank Measurement
Spiral angle	Nominal±0°	1	1	Nominal±0°	1	1
Tooth contact t/b: Drive	0±0mm	All	1	0±0mm	1/3M	1
Tooth contact u/d: Drive	<±2μ	1	1	<±2μ	1	1
Tooth contact t/b: Coast	0±0mm	1	1	0±0mm	1	1
Tooth contact u/d: Coast	Δμ	1	1	Δμ	1	1
V total: Drive	0±0mm	1/cutter change	1	0±0mm	1	1
H total: Drive	0±0mm	1	1	0±0mm	1	1
Blax: Drive	0±0	1	1	0±0	1	1
V total: Coast	0±0mm	1	1	0±0mm	1	1
H total: Coast	0±0mm	1	1	0±0mm	1	1

## 7. 良品条件表の設定

前述の活動をまとめ、現在あるいは新規の量産工程に展開するため、各工程での管理項目や点検項目、周期などの良品条件を見直し一覧にした。これまでは慣例的に用いられていた管理・点検項目も、機能面や加工原理などから必要な項目を明確にし、各工程間の関連性から検査工程の要否と周期を決定することとした (Table 4)。

## 8. おわりに

本活動で開発、導入してきた工程は2005年に量産開始される新しいPTOで具現化されることになる。このギヤにより我々は、最も安価なハイポイドギヤの生産プロセスが確立出来たと考えている。今後、他車種への適用を睨み、基盤技術の拡充を行いながら、世界で最も高品質・安価なハイポイドギヤ生産工程の実現に向け邁進する所存である。

## 参考文献

- (1) 坂東, 中田, 蒲原, 山本, 田中: デフユニット定量評価技術の開発, マツダ技報, No.18, p139-146 (2000)
- (2) 日下: ハイポイドギヤ乾式加工技術研究, SUBARU Technical Review Vol.30, p239-242 (2003)
- (3) W.Coleman: Bevel & Hypoid Gear Surface Durability: Pitting and Scuffing, Gleason Works, Rochester, N.Y., U.S.A. (1969)
- (4) L.S.Pitts, M.J.Boch: Design and Development of Bevel and Hypoid Gears using the Face Hobbing Method, The Gleason Works, Rochester, N.Y., U.S.A. (1997)
- (5) 井田, 安達: 製造現場における損失関数と計測周期のあるべき関係の明確化, 品質工学, Vol.9, No.6 p47-56 (2001)

## 著者



田中宏明



山本真司



樋口昭彦



坂東武夫