

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

汎用の多軸制御工作機械による
大型スパイラルベベルギヤの製作方法の研究開発

成果報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局
委託先 テクノロジーシードインキュベーション株式会社

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	4
1-4 プロジェクト連絡窓口	5
第 2 章 本論	6
2-1 大型スパイラルベベルギヤの試作準備	6
(1) 供試体の選定	6
(2) 歯当り解析の実施	7
(3) CAD モデル作成及び歯面形状測定用三次元座標値	9
(4) スパイラルベベルギヤ歯部の CAD モデル	9
(5) スパイラルベベルギヤ歯切り加工用 NC プログラム作成	11
2-2 ギヤ浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高能率化	15
(1) ギヤ荒歯切り加工	15
2-3 ギヤ浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化	17
(1) ギヤ仕上げ歯切り加工	17
(2) 加工精度の評価	18
2-4 ピニオン浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高能率化	20
(1) ピニオン荒歯切り加工	20
2-5 ピニオン浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化	23
(1) ピニオン仕上げ歯切り加工	23
(2) 加工精度の評価	25
2-6 ピニオンとギヤの歯当り確認	26
2-7 ショットピーニングによるギヤ歯面模様の改善	27
(1) ショットピーニングの条件決定	27
(2) ショットピーニング試験	28
(3) ショットピーニングの評価	29
_Toc192071090	
最終章 全体総括	32
参考文献	33

第1章 研究開発の概要

平成19年度の戦略的基礎技術高度化事業である“汎用の多軸制御工作機械による大型スパイラルベベルギヤの製作方法の研究開発”は、本年度にて完了した。本研究の概要は、次の通りである。

1-1 研究開発の背景・経緯・研究目的及び目標

背景

近年、世界的なエネルギー需要の高まりにより、火力発電プラントに用いられる微粉炭ミル(バーチカルミル)に代表されるように、大型スパイラルベベルギヤの需要も増加しており、今後益々の需要の拡大が見込まれる。この様なギヤ PCD (Pitch Circle Diameter ピッチ円径) が1メートルを超える大型スパイラルベベルギヤのほとんどが、クリンゲルンベルグサイクロパロイド方式である。

このサイクロパロイド方式は、工具歯車である仮想冠歯車の歯筋が、トロコイド曲線で、この仮想冠歯車で、スパイラルベベルギヤが創成歯切りされる。^{(1)~(6)} スパイラルベベルギヤの仕上げは、ドイツ・クリンゲルンベルグ社が製造販売している専用の歯切り盤と5口のカッターヘッドが用いられる。

しかしながら、国内では、大型のスパイラルベベルギヤの専用加工機は、1台しか存在しない。しかも機械の精度劣化が激しく、顧客の要求に対応できていないのが現状である。また、ドイツ製の専用歯切り盤は、10億円以上と高価であり、投資しても回収できないという欠点がある。現在、クリンゲルンベルグ社は、自社で大型スパイラルベベルギヤを生産して外販しており、専用歯切り盤は製造販売をしていない。

すなわち、世界的にも大型スパイラルベベルの需要の高まりに対して、供給が対応できていないのが現状である。

経緯

本研究開発では、サイクロパロイド方式のスパイラルベベルギヤの歯形の設計・解析理論の構築、汎用工作機械による高精度かつ高速な加工方法の開発及び歯車精度確認方法の確立を行う。

平成 19、20 年度では、サイクロパロイド方式のスパイラルベベルギヤの噛合い理論を理解して、それを基に歯当り解析プログラム (Tooth Contact Analysis ; TCA) を開発した。TCA で、良好な歯当りが得られる事を確認した後に、CAD モデル作成用と三次元測定機による歯面形状測定用に、ピニオンとギヤ歯面形状の三次元座標と法線ベクトルを求めた。

次に、歯面形状の座標値を基にピニオンとギヤの CAD モデルを作成して、汎用エンドミルカッターと多軸制御工作機械を用いて、高速かつ高精度の加工を可能にする NC プログラムの開発を行った。

そして、浸炭焼入れ前の荒歯切り加工、浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工、三次元歯車測定機による歯車精度検査、そして、ピニオンとギヤを歯当りテスター上で噛合わせて、その接触痕を観察する、いわゆる歯当り試験を行った。

平成 19、20 年度の成果としては、今後の研究のキーテクノロジーとなるサイクロパロイド方式のスパイラルベベルギヤの噛合い理論の構築と、それに基づいた歯当り解析プログラム (TCA) の開発ができ上がったことが大きな収穫と言えよう。TCA の開発によって、CAM データに必要なピニオンとギヤの歯面

形状の数字モデルが容易に得られるようになった。ピニオンとギヤの歯切り加工においても、十分に実用可能なレベルで行えた。また、三次元歯車測定機で、ピニオン、ギヤの歯面形状を測定し、定量的に評価した。実際の歯当りテスター上での歯当り検査においても十分に実用可能なレベルの良好な歯当りが得られた。しかしながら、事業化に際して、効率、加工精度、そして歯面模様等に課題が残った。

そこで平成 21 年度は、事業化をさらに確かなものにするべく、上記課題を解決するため、荒歯切り加工の高能率化、仕上歯切り加工の高精度化、そして、歯面模様の改善を図った。

目的

本研究の目的は、専用加工機で製造される大型のスパイラルベベルギヤを汎用の多軸制御加工機を用いて高精度かつ高速に製作する方法を確立することである。この製作方法の確立により、風力発電機や石炭の微粉炭ミルなどの製造で需要がある大型のスパイラルベベルギヤの安定供給を可能にする。

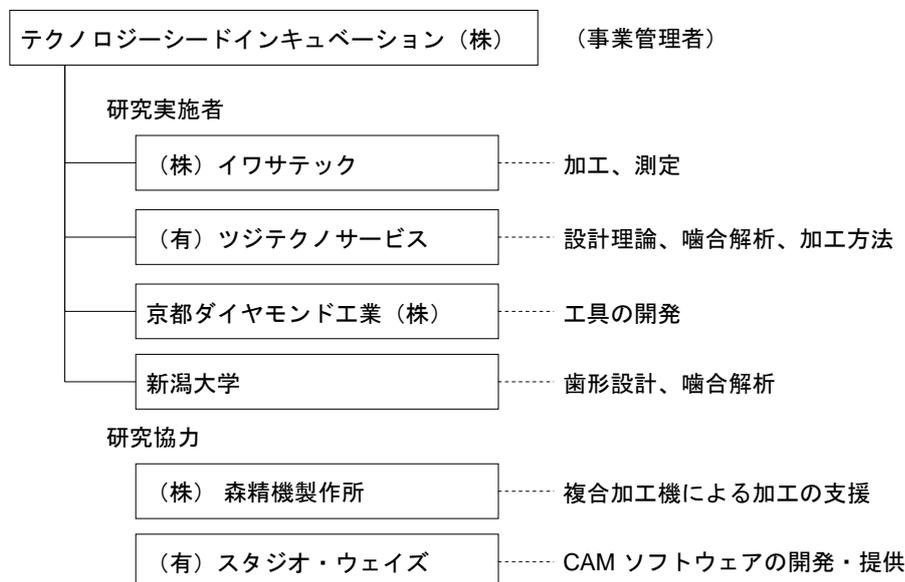
目標

クリンゲルンベルグ社製専用歯切り盤での加工実績と同等もしくは、上回る加工能率、加工精度そして、噛合い性能を代表する歯当りが得られること。

- 「5軸制御＋ラジラスエンドミル」(エンドミル側面によるスワーフ加工)により、
 - ・加工能率の向上 ;ギヤソフト荒歯切り 50%以上の低減
 - ・ピッチ精度の向上 ;ギヤピッチ誤差 JIS1級 以上
- 仕上げ歯面にショットピーニング加工を施すことにより、
 - ・歯面模様の改善
 - ・歯面強度の向上(圧縮応力を歯面に残す)

1-2 研究体制

(株)イワサテックを中心に、(有)ツジテクノサービス、京都ダイヤモンド工業(株)、新潟大学を研究実施者として研究開発を進める。また、複合加工機による加工については(株)森精機製作所の、CAMによるNCプログラムの開発では(有)スタジオ・ウェイズの協力を得る。



1-3 成果概要

前年度までに得られた成果に基づいて、本年度は(1)～(5)の研究を行った。その結果、次のことが明らかになった。

(1) ギヤ浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高効率化

本研究では、円筒エンドミルを用いて、5軸マシニングセンター(ドイツDMG社製DMU210P)の同時5軸制御により、荒歯切り加工を行った。

使用した5軸マシニングセンター(ドイツDMG社製DMU210P)は、来季の事業化に備えて、イワサテックが、H21. 9月に投資を行った。

その結果、加工時間は、6時間と大幅に低減できた。また加工精度もピッチ誤差JIS1級、歯面形状誤差 $\pm 0.010\text{mm}$ 以内を満足し、大幅に改善した。

(2) ギヤ浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化

本研究では、円筒エンドミルを用いて、5軸マシニングセンター(ドイツDMG社製DMU210P)の同時5軸制御により、仕上げ歯切り加工を行った。

その結果、目標であるJIS2級を大きく上回り、JIS0級の半分程度まで向上した。

(3) ピニオン浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高効率化

本研究では、円筒エンドミルを用いて、複合加工機(森精機 NT6600+SMW製自動振れ止め)の同時4軸制御により、荒歯切り加工を行った。

その結果、加工時間が、16時間と大幅に改善した。

(4)ピニオン浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化

複合加工機(森精機 NT5400)により、R15ボールエンドミルを用いて同時4軸制御加工により浸炭焼入れ後の仕上げ歯切りを行った。

その結果、目標であるJIS2級を上回り、JIS1級の精度で加工できた。

(5)ショットピーニング加工による歯面模様の改善

ギヤ歯面にショットピーニングを施工することにより、専用歯切り盤で創成歯切りで加工した歯面とは異なるエンドミル加工による送り目(シマ模様)が無くなり、改善できた。一方、歯面の面アラサに関しては、ショットピーニング前は、 $Ra=0.3\sim 0.5\mu m$ であったが、ショットピーニング後は、 $Ra=0.7\sim 1.0\mu m$ と2倍になった。実際の噛合いにおいては、規則性のない微細な凹凸(ディンプル)が、歯面の油膜形成及び保持の効果が見込まれる。また、歯面表面に $-1400MPa$ の圧縮応力を残留させることにより、歯面及び歯底の疲労強度が向上し、歯車の信頼性が向上した。これらのことより、ショットピーニングを歯面に施工することにより、歯車に新たな付加価値を創出することができる。

以上、「大型スパイラルベベルギヤの製作方法の研究開発」においては、大きな進展があり、技術的にも、経済的にも事業化が可能なレベルにまで研究開発を進めることができた。第2章では、本年度に行った研究内容について詳細に述べる。

1-4 プロジェクト連絡窓口

■ 事業管理者:テクノロジーシードインキュベーション(株)

担当者:

奥村 幸司(koji-okumura@tsi-japan.com)

(京都本社)

〒600-8427 京都市下京区松原通烏丸西入玉津嶋町 316-2 川南ビル 6F

電話:075-352-2091 FAX:75-352-2092

(東京事務所)

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 2-10 徳住ビル 3F

電話:03-3556-6932 FAX:03-3556-6933

■ プロジェクトリーダー

辻 勇

(有)ツジテクノサービス

〒136-0082 東京都江東区新木場 4-12-40

電話:03-3521-0103(イワサテック内)

第 2 章 本論

2-1 大型スパイラルベベルギヤの試作準備

(1) 供試体の選定

本年度は、実際にセメントを生成するセメントミルに使用されているサイクロパロイド方式の大型スパイラルベベルギヤを供試体として選定した。歯車諸元は、表-1に示すように、ピニオン歯数16枚、ギヤ歯数40枚、ギヤPCD=φ1350mm、モジュールMn=24.9799、スパイラルアングルβ=32°の大型のスパイラルベベルギヤである。ピニオンとギヤの図面を図-1、2に示す。ピニオン全長=1650mm、ギヤ最大外径=1361mmであり、今までイワサテック所有のクリンゲルベルグ社製歯切り盤(AMK855)では製造できなかった大きさである。

表-1 供試体の歯車諸元

Pinion Num. of teeth	16 (Righ)	Pressure angle	20deg.
Gear Num. of teeth	40 (Left)	Pinion PCD	540mm
Shaft angle	90deg.	Gear PCD	1350mm
Normal Module	24.9799mm	Face width	185mm
Spiral angle	32deg.	Whole depth	56.21mm

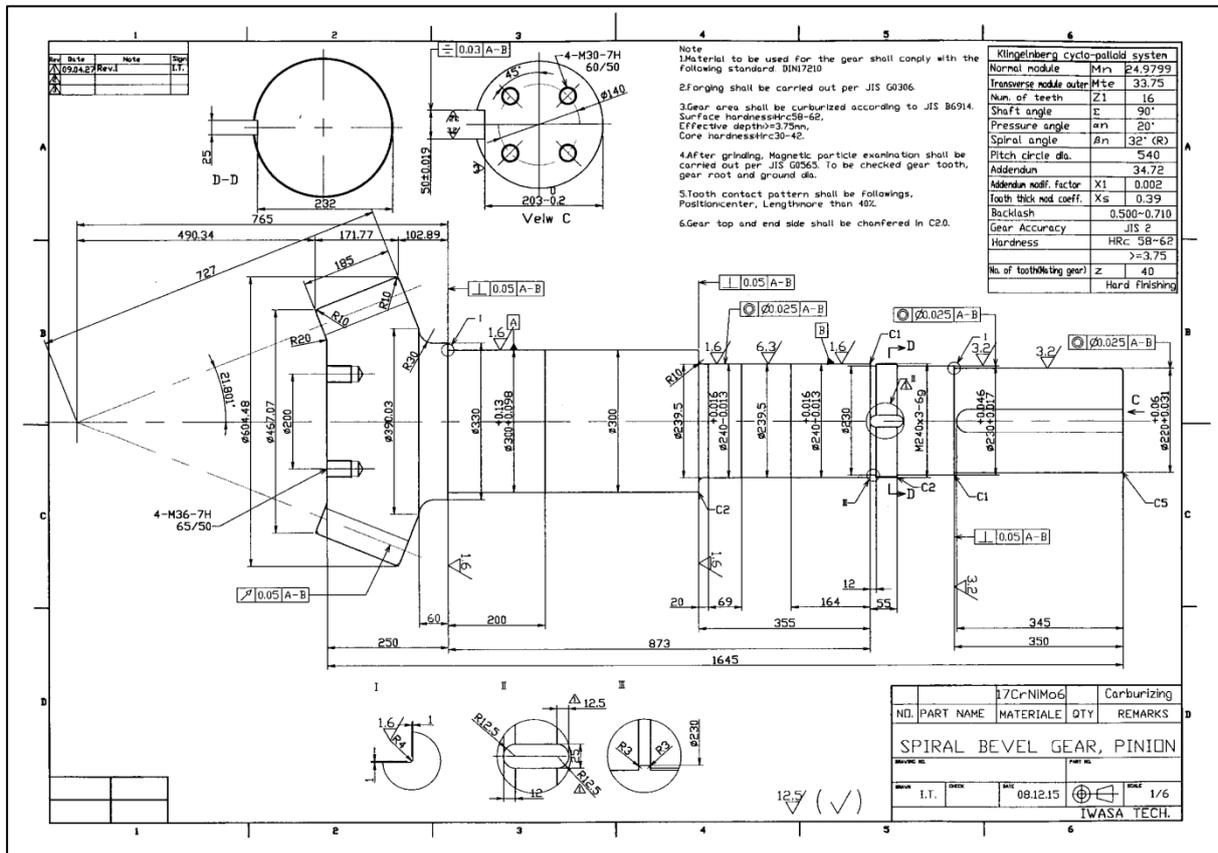


図-1 供試体(ピニオン)の製作図面

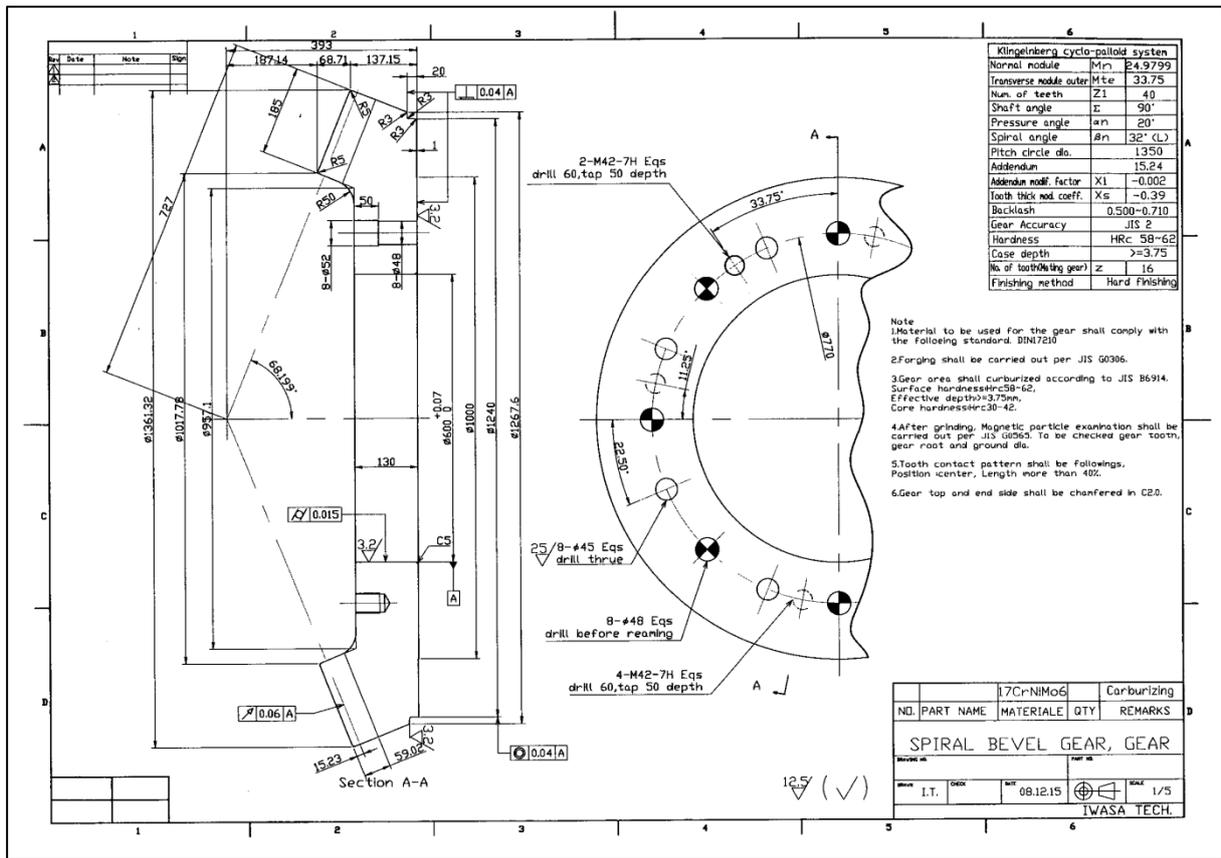


図-2 供試体(ギヤ)の製作図面

(2) 歯当

の実施

り解析

表-1の歯車諸元を昨年度までに開発した歯当り解析プログラム(TCA ; Tooth Contact Analysis)に入力して、ドライブ(作用歯面)・コースト(非作用歯面)両歯面ともに良好な歯当りが得られるまで、歯当り解析を行った。このとき、歯幅方向の歯当りの長さを決定するために、カッター諸元であるインサイドブレードのカッター径をアウトサイドブレードよりも小さくする必要がある。図-3に示すカッター径の差異(Exb)が歯幅方向の歯当りに対してクラウニング効果を発揮する。又、歯丈方向の歯当りの幅をコントロールするためにカッター形状に曲率半径 ρ により少量の円弧形状(凹)を与える必要がある。歯車諸元に応じたExbと ρ と適度に与えることにより、クラウニングと歯形修正を同時に施した歯面形状が得られ、良好な歯当りが得られる。

図-4, 5に、ドライブ(作用歯面)・コースト(非作用歯面)のTCA結果を示す。TCA上では、両歯面ともに良好な歯当りが得られている。

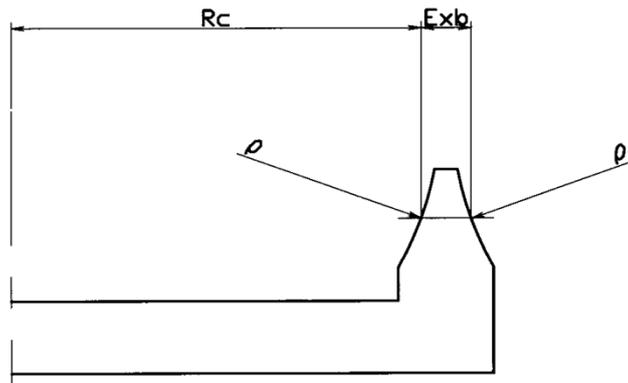


図-3 カッター寸法

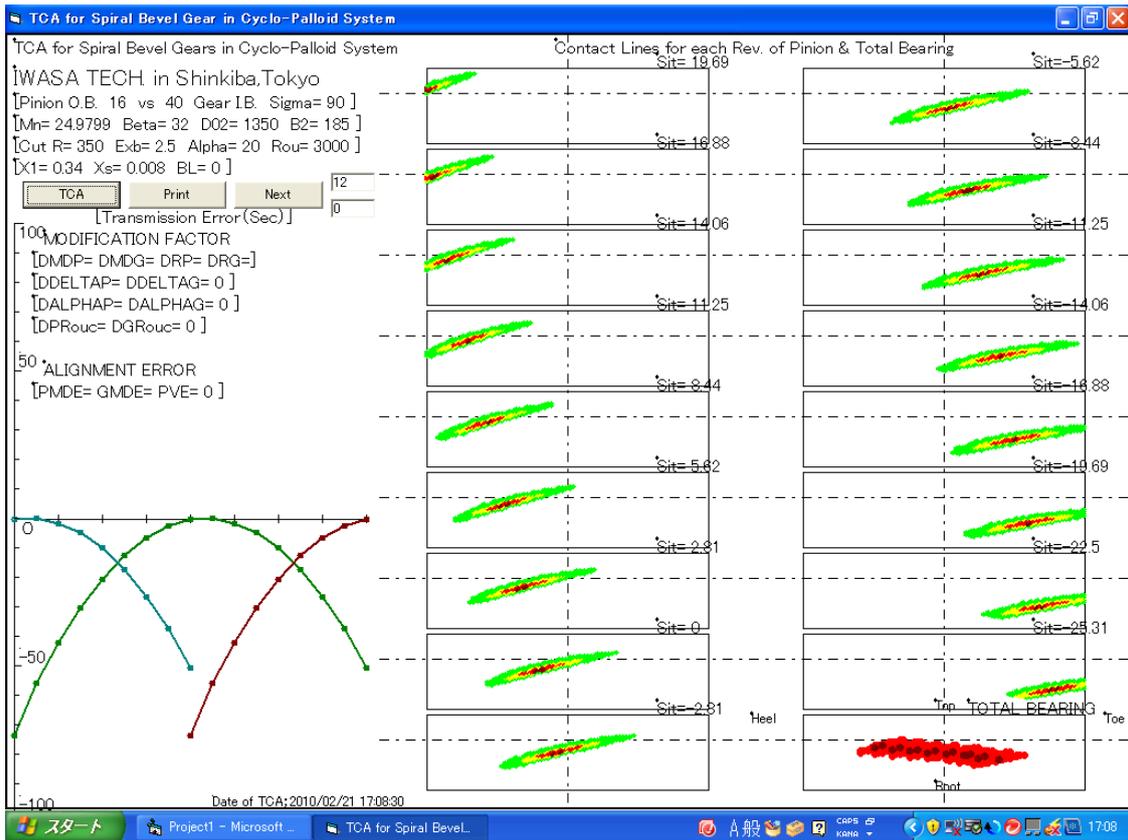


図-4 ドライブサイド歯当り解析結果(カッター径 350mm, Exb=2.5mm, ρ =3000mm)

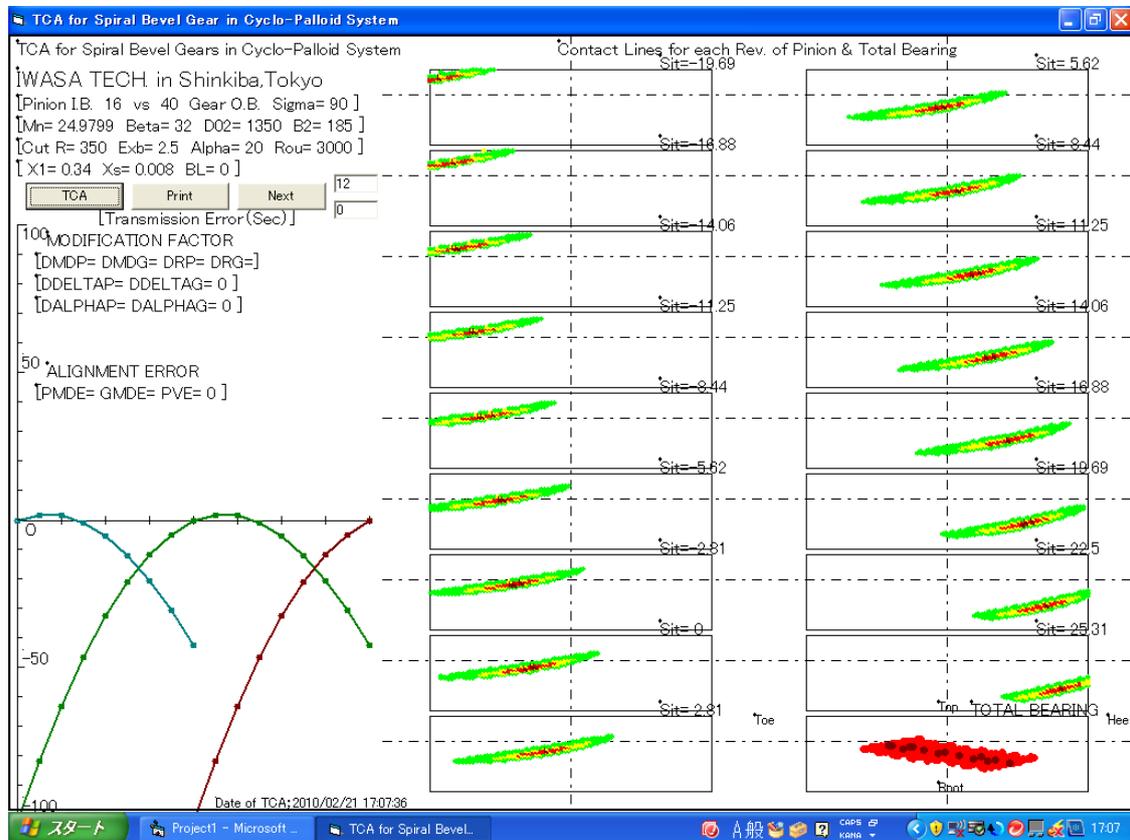


図-5 コーストサイド歯当り解析結果(カッター径 350mm, Exb=2.5mm, ρ =3000mm)

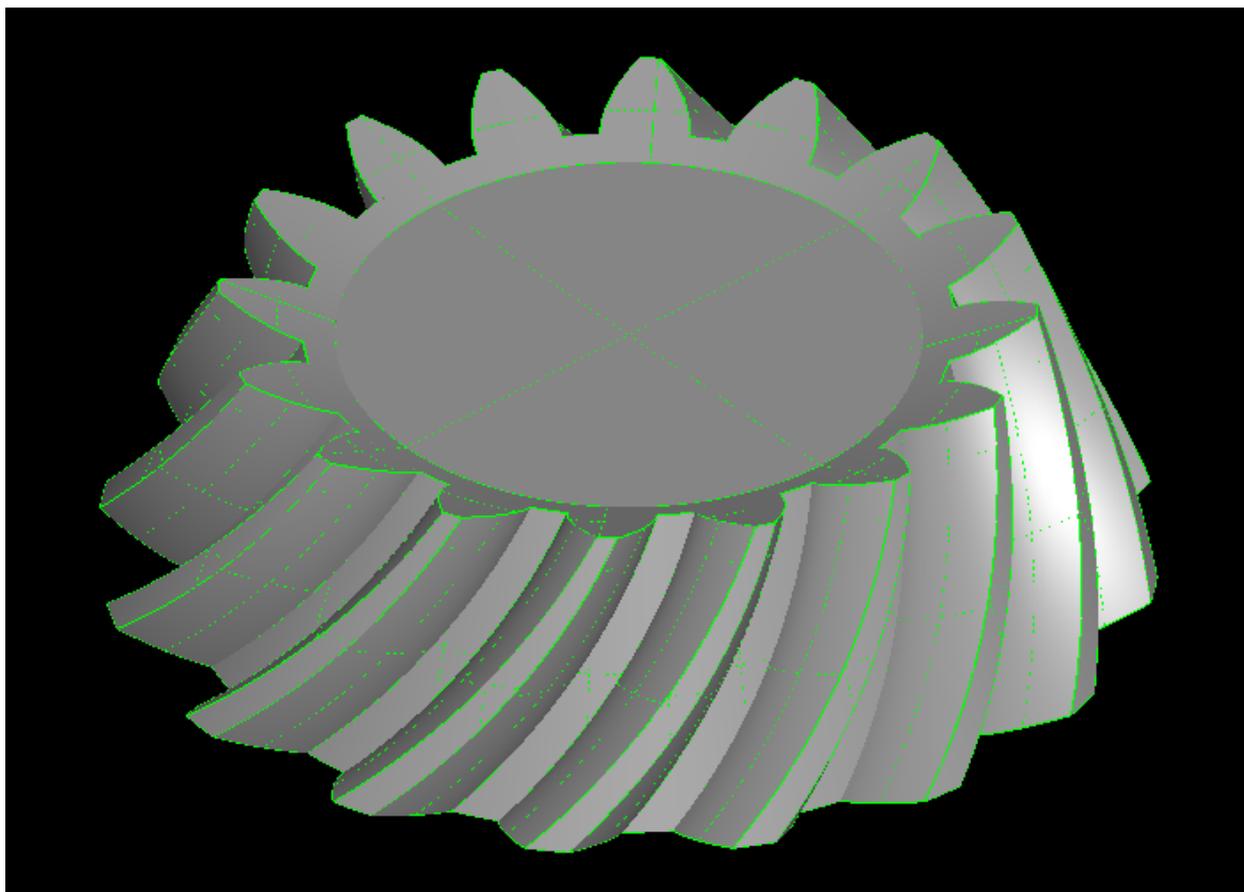
(3) CADモデル作成用及び歯面形状測定用の歯面三次元座標

TCAにより良好な歯当りが得られ、その後、TCAプログラムにより、加工と測定用の歯面の三次元座標を算出する。添付－Ⅰに「CADモデル作成用の歯面三次元座標」を、添付－Ⅱに「歯面形状測定用の歯面三次元座標」を添付する。

添付－Ⅰ、Ⅱでは、座標値(x、y、z)に加えて法線ベクトル(nx、ny、nz)も算出している。これらのデータに基づいて、汎用加工機による加工と三次元測定機による測定が実現できる。

(4) スパイラルベベルギヤ歯部のCADモデル

図－6、7、8に歯面三次元座標より作成したピニオン、ギヤ、そして、ピニオンとギヤの噛合いのCADモデルを示す。これらのCADモデルより、同時5軸制御加工の工具パスを作り、加工用のNCプログラムを作成する。



図－6 ピニオン歯部CADモデル

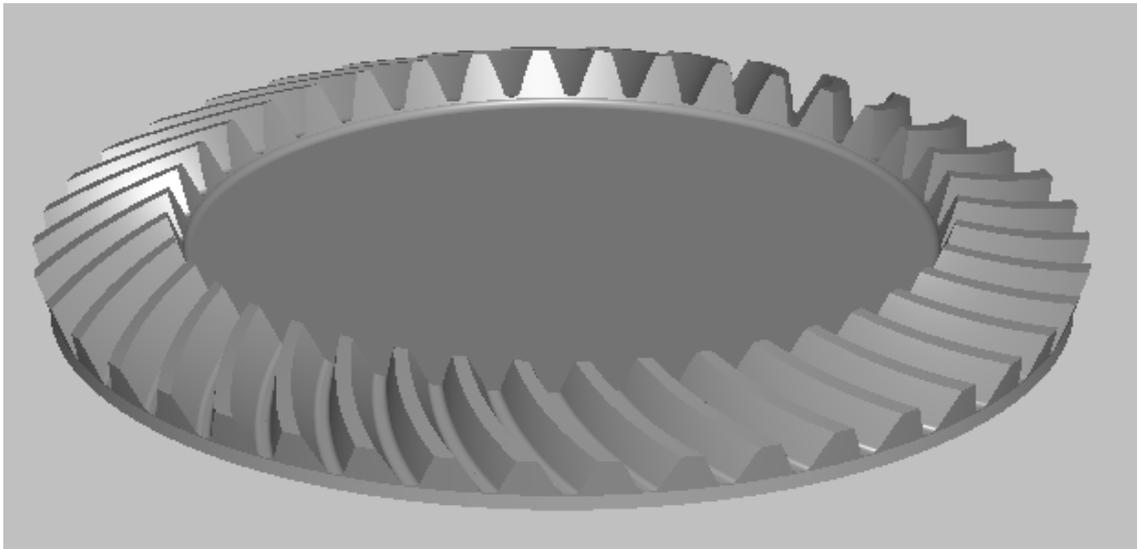


図-7 ギヤ歯部CADモデル

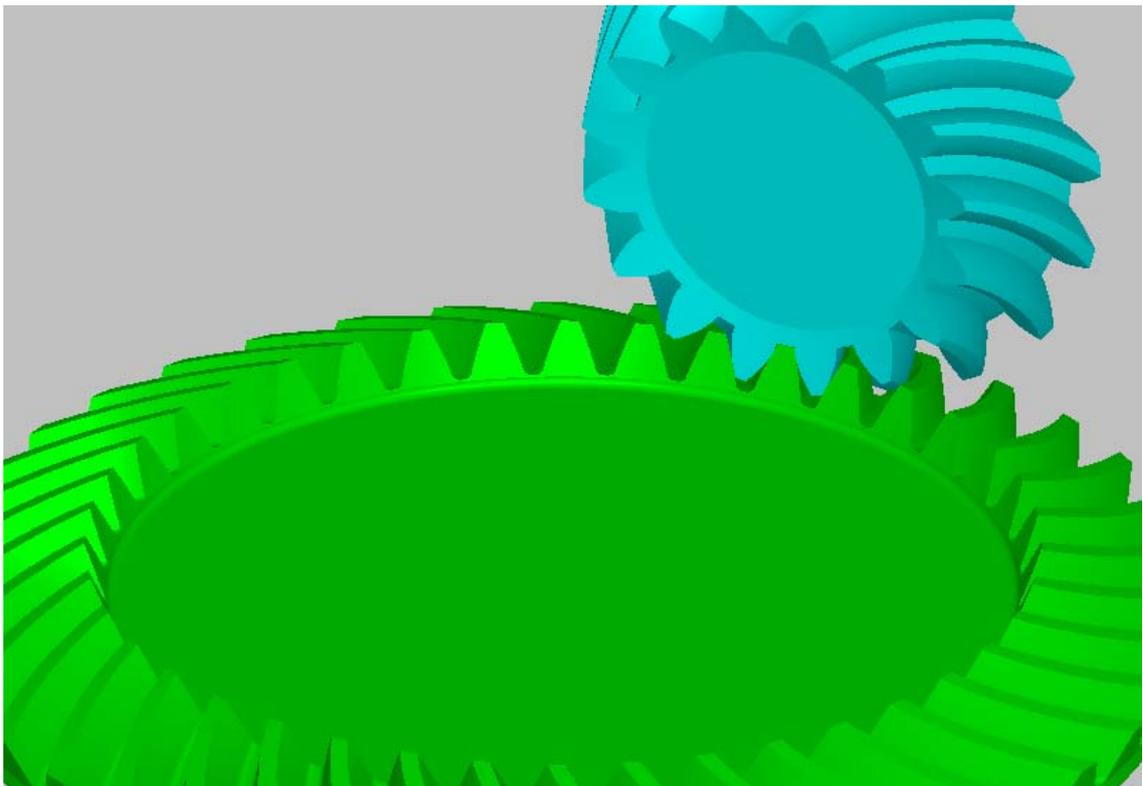


図-8 ピニオンとギヤの噛合い状態のCADモデル

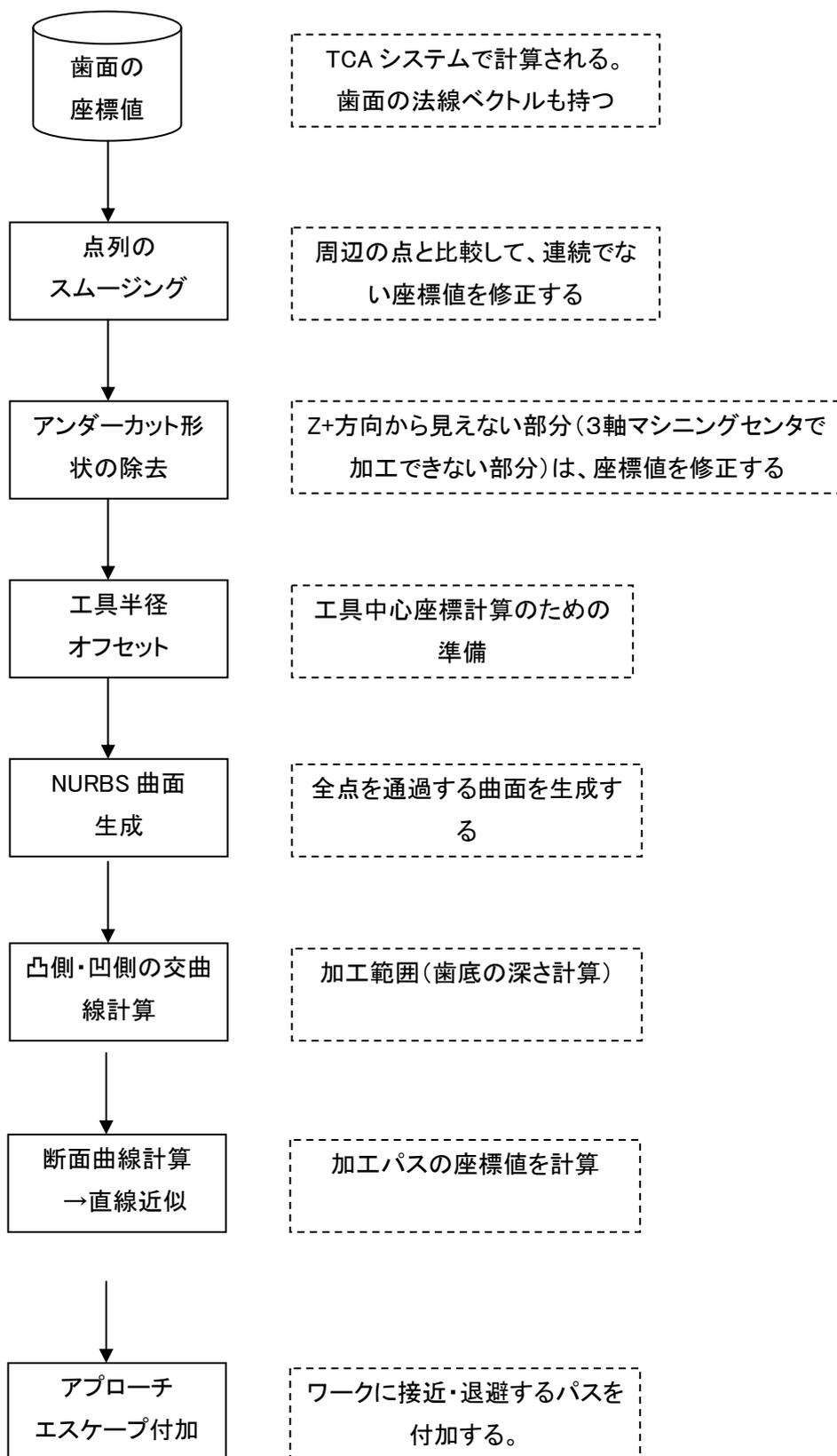
(5)スパイラルベベルギヤ歯切り加工用 NC プログラム作成

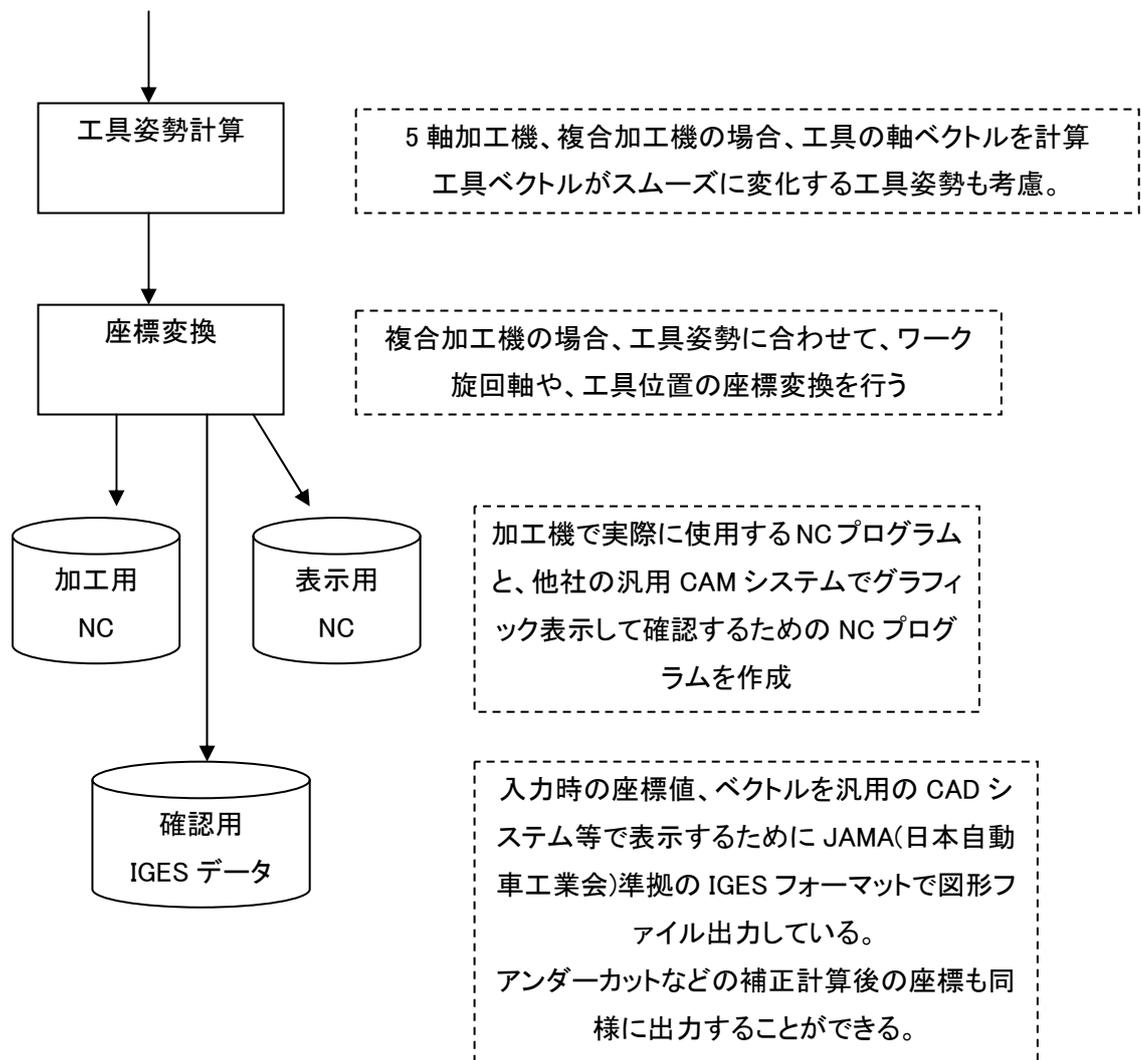
1. CAM システムの概要

TCA システムで計算されたスパイラルベベルギアの歯面座標値から、歯面を加工するための NC プログラムを作成する。ギア側は、門型3軸マシニングセンタ、立型3軸マシニングセンタ、立型5軸マシニングセンタ向けの NC プログラムを、ピニオン側は、旋盤型複合加工機の NC プログラムを作成することができる。

1) 計算手順

使用する工具や切削条件などを指定したあとは、下図の順に加工パスを自動計算する。





2) 加工パス

加工順序は歯幅や最小 R、使用する工作機械によって異なるが、基本的順序は、次の通りである。

(1) 3軸加工機(ボールエンドミルを使用)

i) ソフトカット

- ・使用できる最大径(φ20~30mm)の工具で粗く加工
- ・歯底の幅より少し大きい直径の工具(φ12~20mm)で歯面を中仕上げ
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(φ8~16mm)で歯底を仕上げる

ii) ハードカット

- ・工具の位置合わせのためのパス(加工はせずに、歯の位相計算用)

- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具で全面の黒皮を取る
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具で全面を均一に仕上げる

(2) 5軸加工機、複合加工機(ストレートエンドミルを多用)

i) ソフトカット

- ・ラフィングエンドミル(φ20mm 前後)で粗く加工
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(φ8~16mm)で前工程の段差を取る
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(φ8~16mm・ボール)で歯底を仕上げる
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(φ8~16mm)で歯面をスワーフ加工中仕上げ

ii) ハードカット

- ・工具の位置合わせのためのパス(加工はせずに、歯の位相計算用)
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(ストレート)で全面の黒皮を取る
- ・歯底の幅より少し小さい直径の工具(ストレート)で全面を均一に仕上げる

3) 機能概要

(1) 共通条件

歯面ファイル名、歯数、歯のねじれ方向など、主として幾何形状に関するパラメータと

使用する加工機のタイプを指定する

(2) 切削共通条件

各工程に共通するパラメータを指定する。

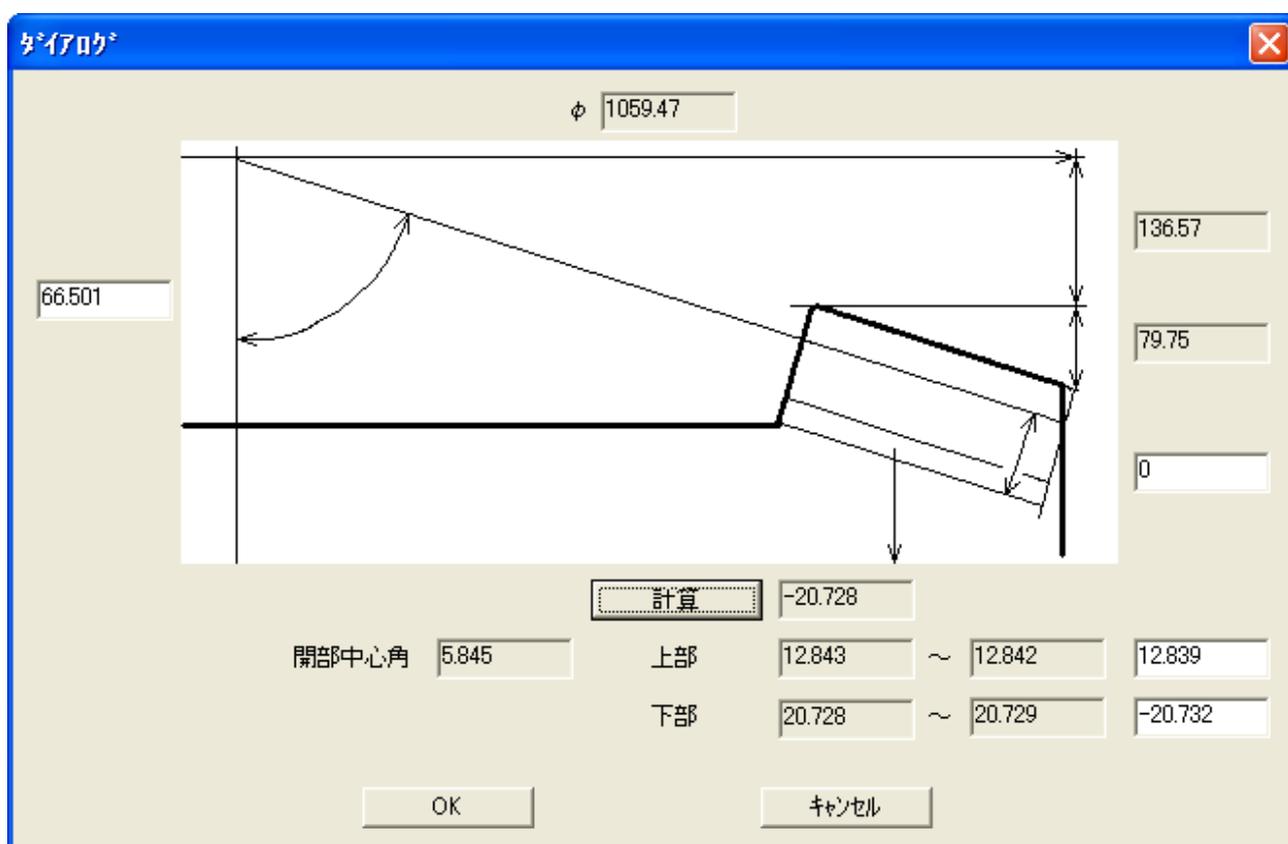
残し代、歯底の延長量、クリアランス(上方向の工具退避量)、などを指定する。

(3) ~ (6) 工程ごとの指定パラメータ

使用工具、回転数、送り速度、Ad(軸方向切り込み量)、Rd(径方向切り込み量)のほか、
工具パスを往復させるか、など。

4) その他の機能

(1) 歯の外形計算機能



入力された点列から、歯面の外形を計算し、歯面の外形から上面の傾きなどを計算する。
上面の傾きは複合加工機で工具を傾斜して加工する場合に使用する。

2-2 ギヤ浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高効率化

同時5軸制御マシニングセンター(ドイツDMG社; DMU210P)図-10を用いて、浸炭焼入れ前のギヤの歯面の荒歯切り加工を行った。

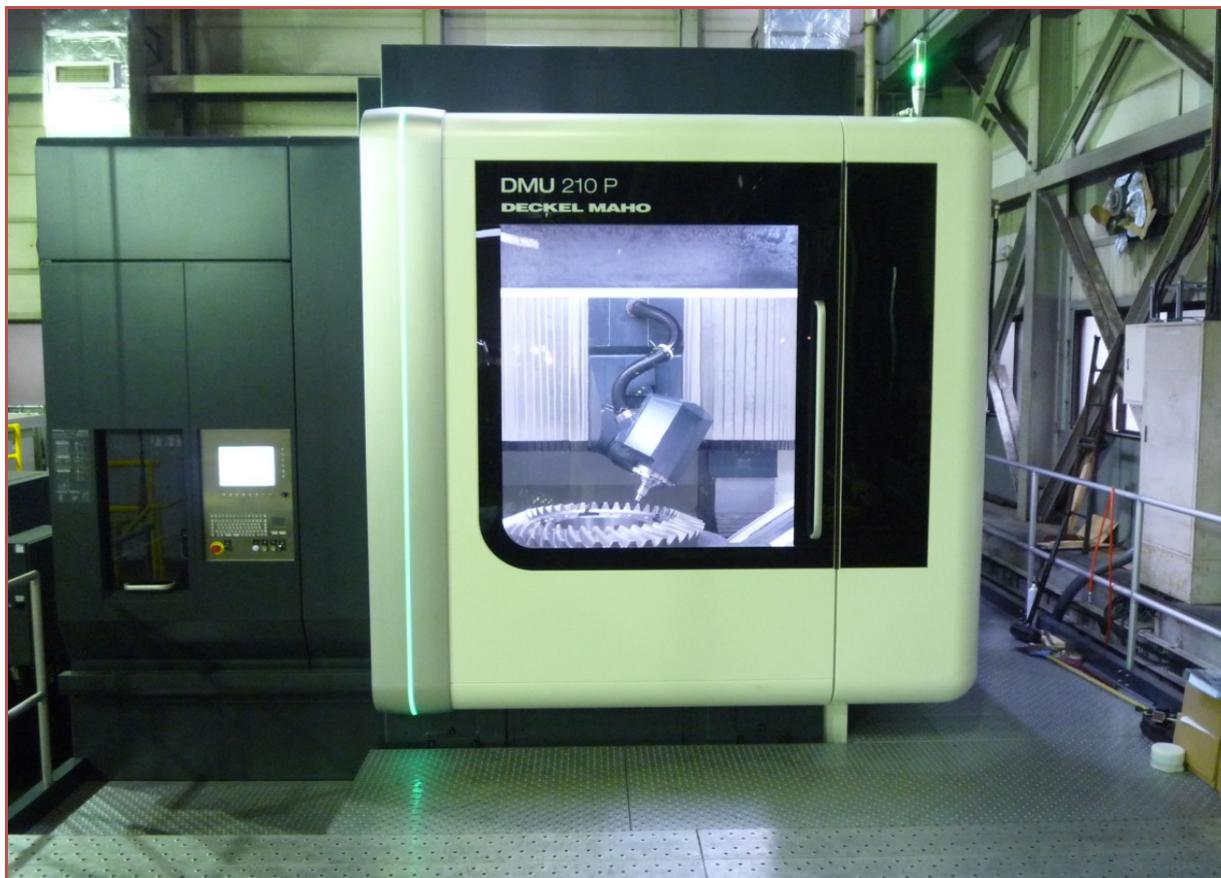


図-9 同時5軸制御マシニングセンター(ドイツDMG社; DMU210P)

(1)ギヤ荒歯切り加工

以下の加工工程で浸炭焼入れ前の荒歯切り加工を行った。

- | | | | |
|---|---------------|-------------|------------|
| ① | φ20ラフィングエンドミル | 25mm × 3回 | 歯丈 25mm |
| ② | φ20ラフィングエンドミル | 25mm × 2回 | 歯丈 50mm |
| ③ | φ20ラフィングエンドミル | 5mm × 2回 | 歯丈 55mm |
| ④ | φ10エンドミル | 1.21mm × 1回 | 歯丈 56.21mm |
| ⑤ | R5ボールエンドミル | 2回 | 歯底R部 |
| ⑥ | φ20エンドミル | 左右歯面スワーフ加工 | |

図-10、11にφ20ラフィングエンドミルの加工の写真を示す。

加工時間は、約6時間で完了した。各工具の欠損もなく、順調に加工が完了した。



図-10 $\phi 20$ ラフィングエンドミルによるギヤ荒歯切り加工

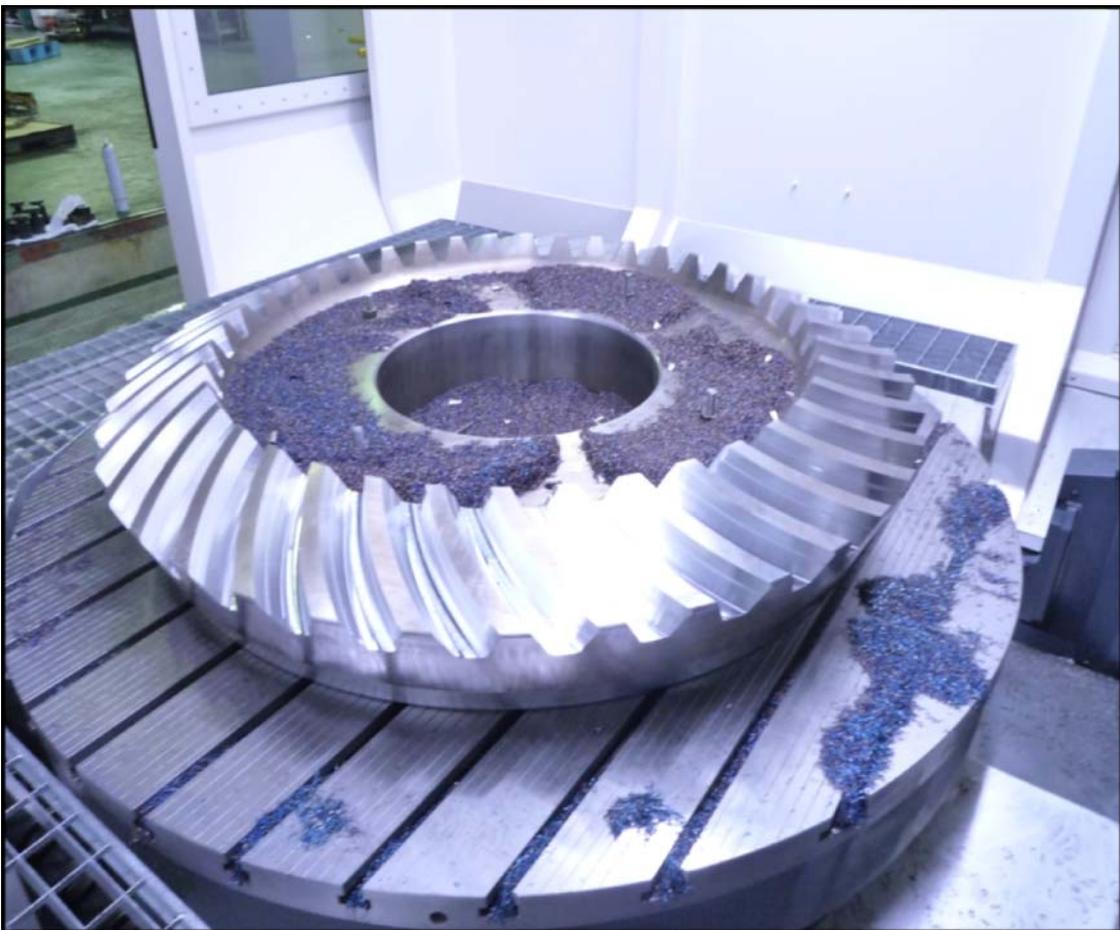


図-11 ギヤ荒歯切り加工完了

2-3 ギヤ浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化

同時5軸制御マシニングセンター(ドイツDMG社; DMU210P)図-9を用いて、浸炭焼入れ後のギヤの歯面の仕上げ歯切り加工を行った。

(1) ギヤ仕上げ歯切り加工

以下の加工工程で浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工を行った。

- ① $\phi 20$ 、12枚刃エンドミル 左右歯面スワーフ加工 取り代0.2mm
[中仕上げ加工工程]
- ② $\phi 20$ 、12枚刃エンドミル 左右歯面スワーフ加工 取り代0.05mm
[仕上げ加工工程]

図-12、13に $\phi 20$ 、12枚刃エンドミルの加工の写真を示す。

加工時間は、約12時間で完了した。各工具の欠損もなく、順調に加工が完了した。

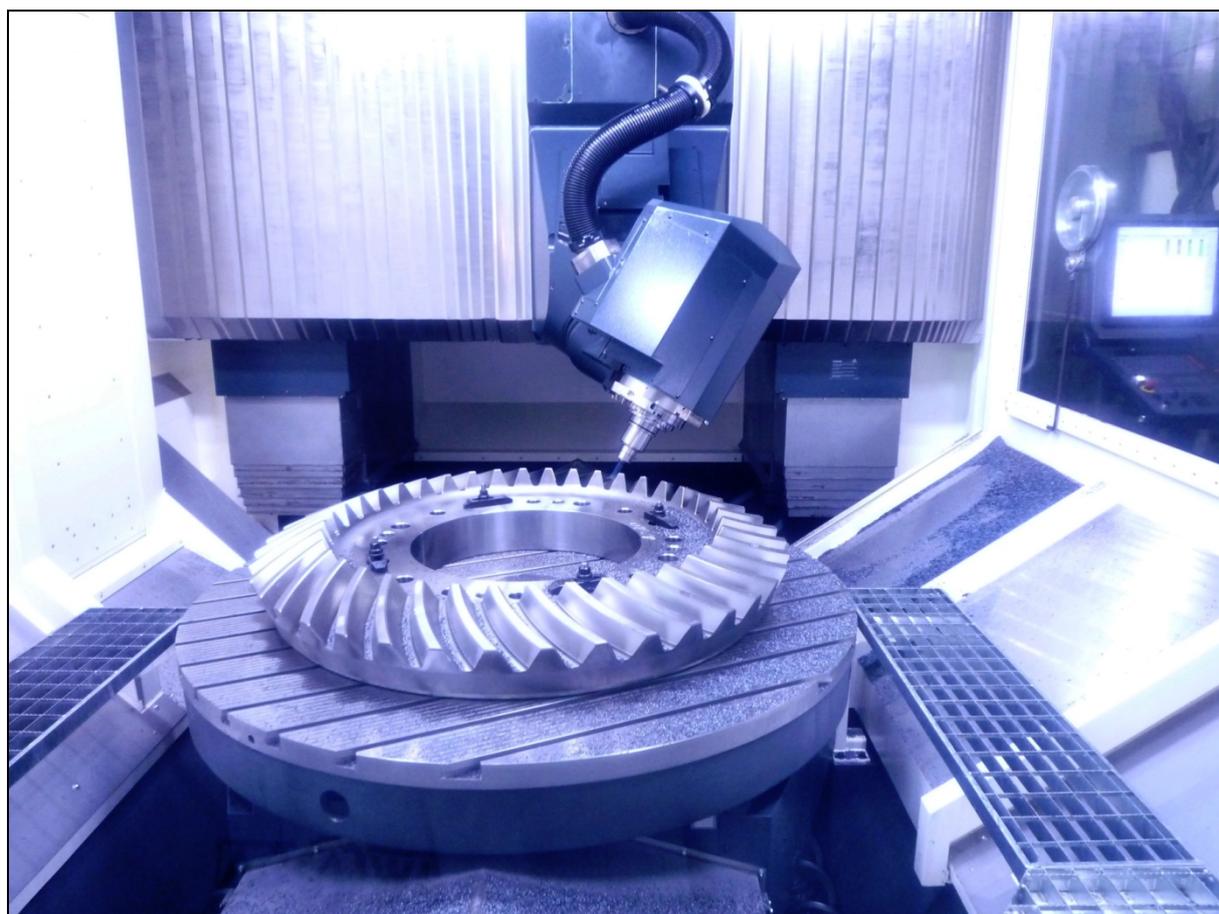


図-12 同時5軸制御+円筒エンドミルによるギヤ仕上げ歯切り加工



図-13 φ20、12枚刃エンドミルによるギヤ仕上げ歯切り加工(スワーフ加工)

(2)加工精度の評価

図-14に示すように三次元歯車測定機(GLEASON M&M社製 Sigma 3000)により歯面形状及び歯車ピッチ精度を測定した⁽⁷⁾。

図-15に示す測定結果のように、**・歯面形状;±0.015mm以内** **・ピッチ精度;JIS1級以下**と仕上げ歯切り加工の高精度化を図ることができたといえる。



図-14 三次元歯車測定機を用いたギヤの歯車精度検査状況

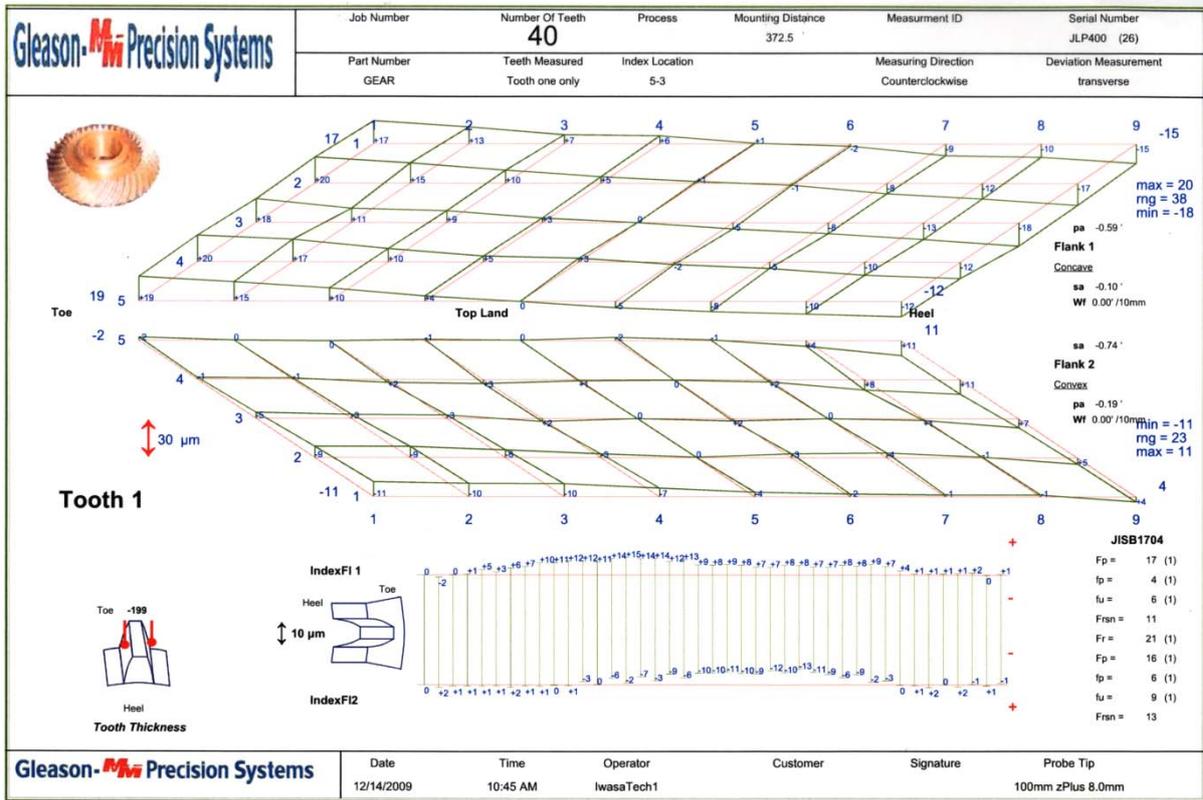


図-15 三次元歯車測定機を用いたギヤの仕上げ歯切り加工後の歯車精度検査結果

2-4 ピニオン浸炭焼入れ前の荒歯切り加工の高能率化

同時5軸制御複合加工機(森精機; NT6600)図-16を用いて、浸炭焼入れ前のピニオンの歯面の荒歯切り加工を行った。



図-16 同時5軸制御複合加工機(森精機; NT6600)

(1)ピニオン荒歯切り加工

以下の加工工程で浸炭焼入れ前の荒歯切り加工を行った。

- 工程1: 粗加工 $\phi 20$ ラフィング用ストレートエンドミル(S=1500,F=600)
- 工程2: 歯面粗加工 $\phi 20$ ラフィング用ストレートエンドミル(S=3000,F=1800)
- 工程3: 歯面粗加工 $\phi 20$ ラフィング用ストレートエンドミル(S=3000,F=1800)
- 工程4: 歯底加工 $\phi 16$ ボールエンドミル(S=3200,F=800)
- 工程5: 歯面加工 $\phi 16R1.5$ ストレートエンドミル(S=3000,F=1800)
- 工程6: 歯面加工 $\phi 16R1.5$ ストレートエンドミル(S=3000,F=1800)

図-17、18に加工の状況、図-19に加工された歯面の写真を示す。

加工時間は、約16時間で完了した。各工具の欠損もなく、順調に加工が完了した。



図-17 同時5軸制御複合加工機(森精機; NT6600)による荒歯切り加工

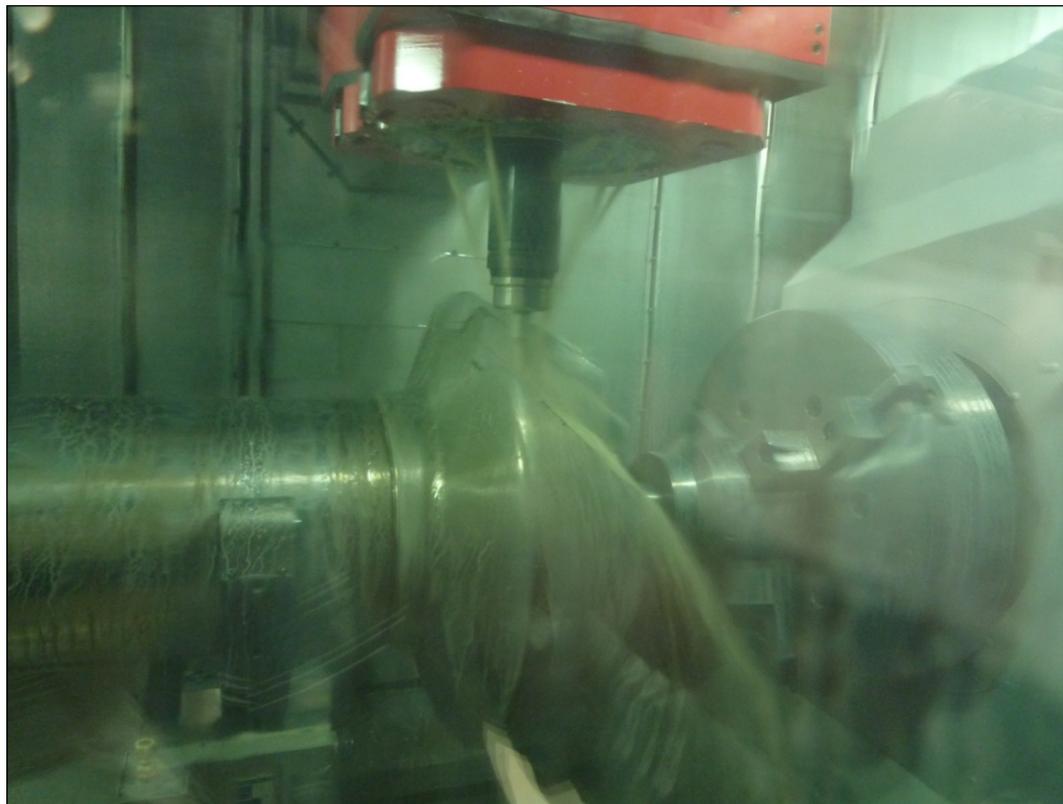


図-18 同時5軸制御複合加工機(森精機; NT6600)による荒歯切り加工

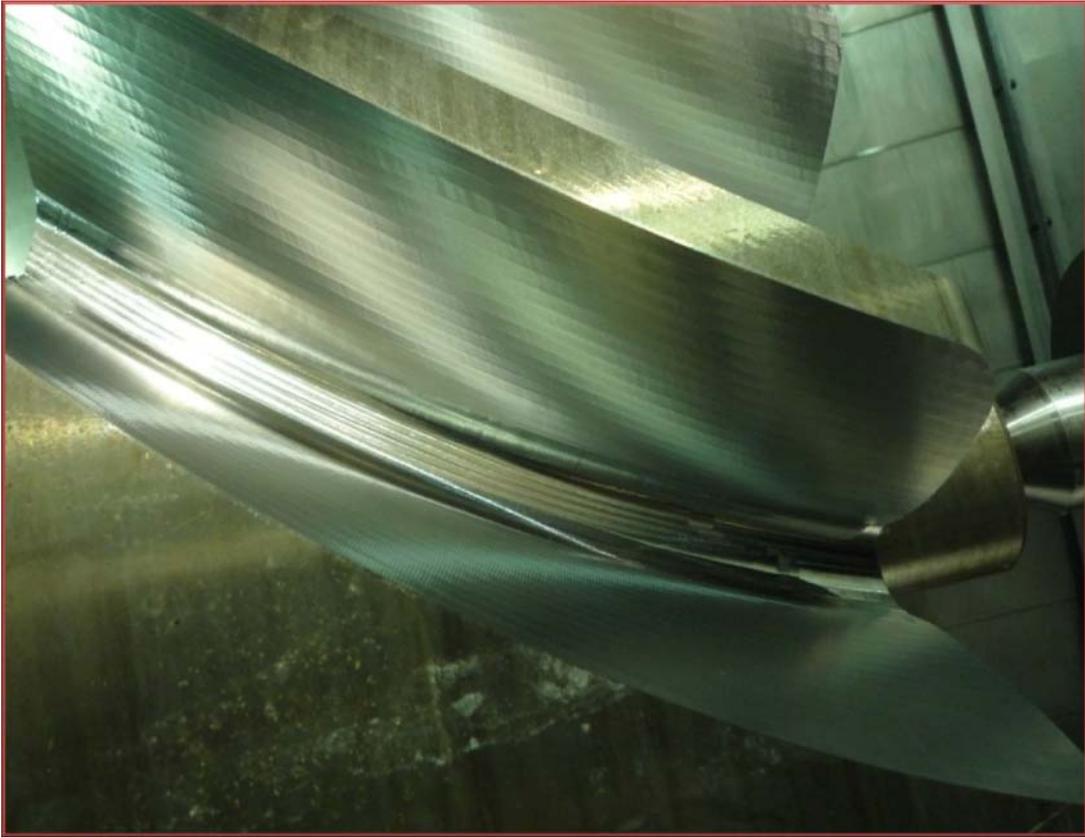


図-19 ピニオン荒歯切り加工された歯面

2-5 ピニオン浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工の高精度化

同時5軸制御複合加工機(森精機; NT5400)図-20を用いて、ボールエンドミルを使用して同時4軸制御加工により、浸炭焼入れ後のピニオンの歯面の仕上げ歯切りを行った。

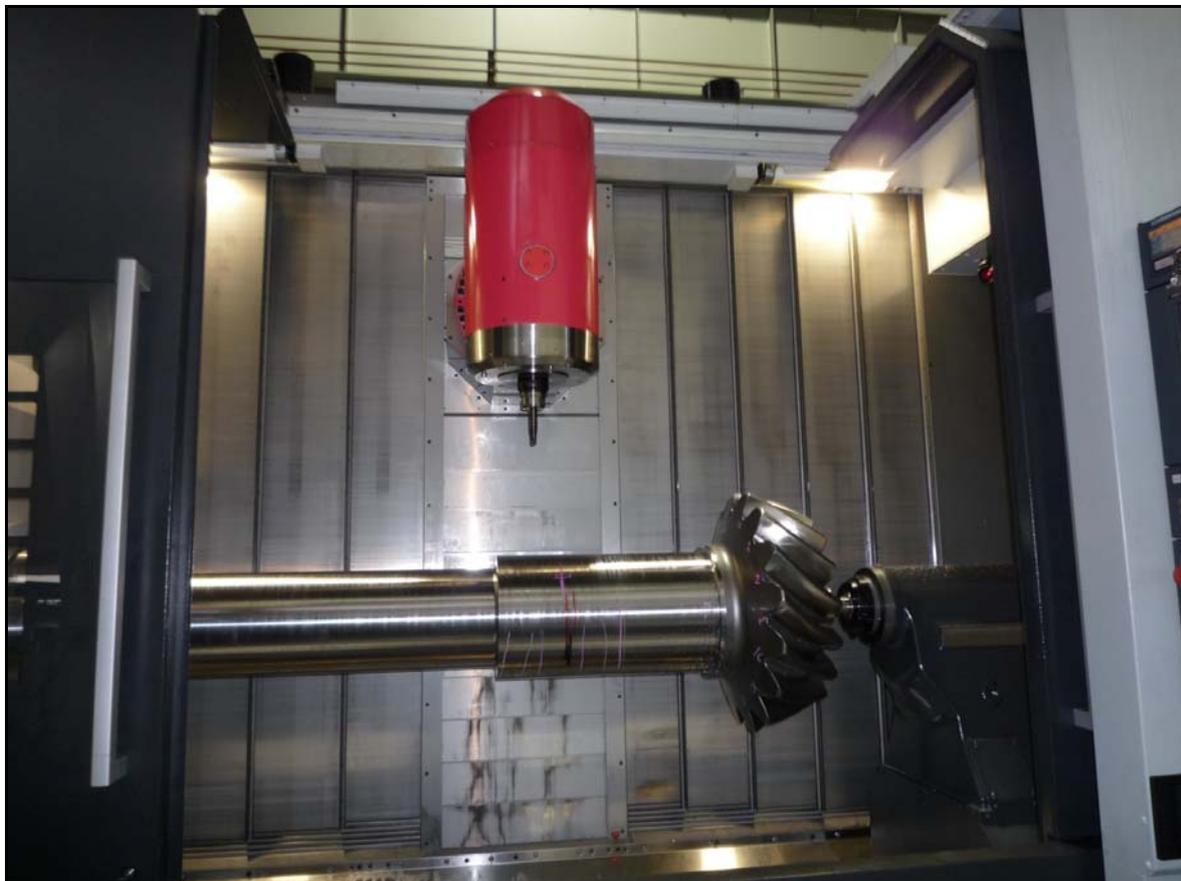


図-20 ピニオン仕上げ歯切り加工[森精機NT5400]

(1)ピニオン仕上げ歯切り加工

以下の加工工程で浸炭焼入れ後の仕上げ歯切り加工を行った。

- ① R16、ボールエンドミル 同時4軸制御加工 取り代0.2mm
[中仕上げ加工工程]
- ② R16、ボールエンドミル 同時4軸制御加工 取り代0.05mm
[仕上げ加工工程]

図-21、22にR16、ボールエンドミルで加工したピニオンの歯面の写真を示す。
加工時間は、約12時間で完了した。各工具の欠損もなく、順調に加工が完了した。

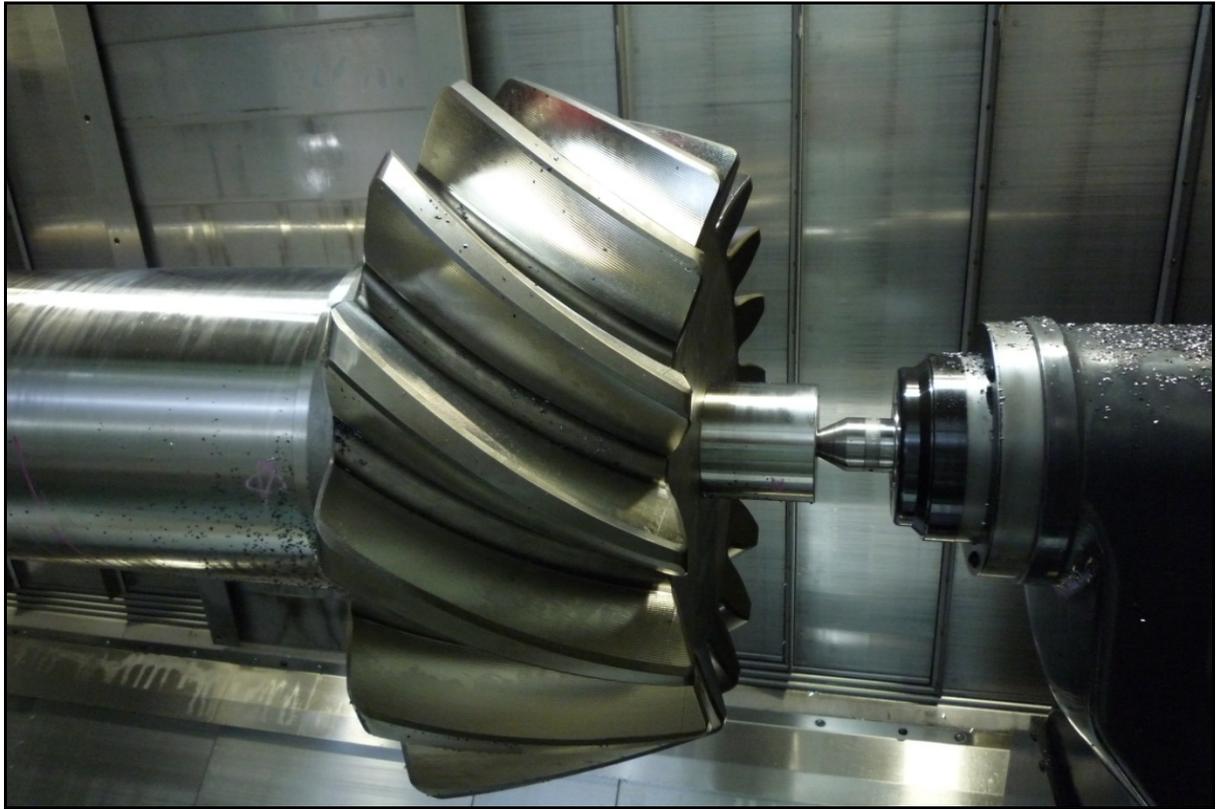


図-21 ピニオン仕上げ歯切り加工[森精機NT5400]

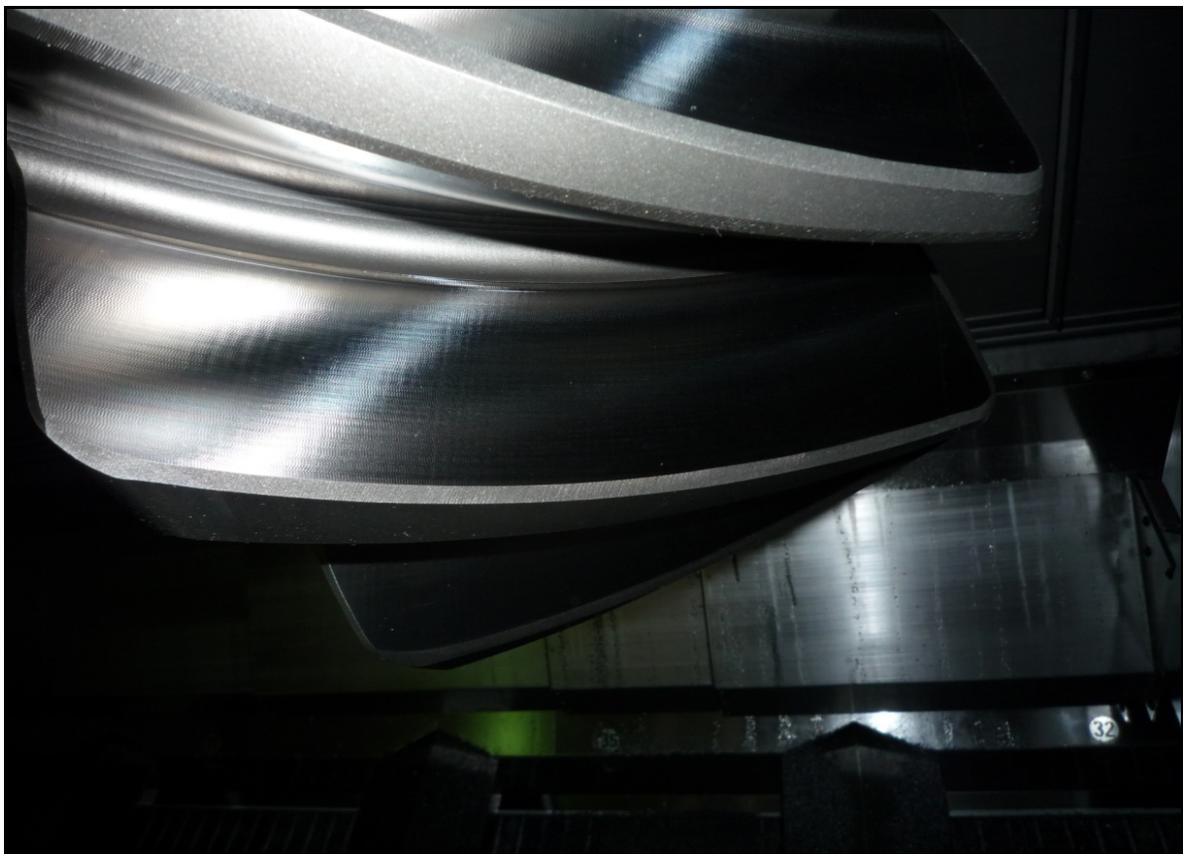


図-22 ピニオン仕上げ歯切り加工[森精機NT5400]

(2)加工精度の評価

図-23に示すように三次元歯車測定機(GLEASON M&M社製 Sigma 3000)により歯面形状及び歯車ピッチ精度を行った。

図-24に示す測定結果のように、

・歯面形状; $\pm 0.015\text{mm}$ 以内 ・ピッチ精度; JIS1級以下 と目的通り、高精度に加工ができていることがわかる。

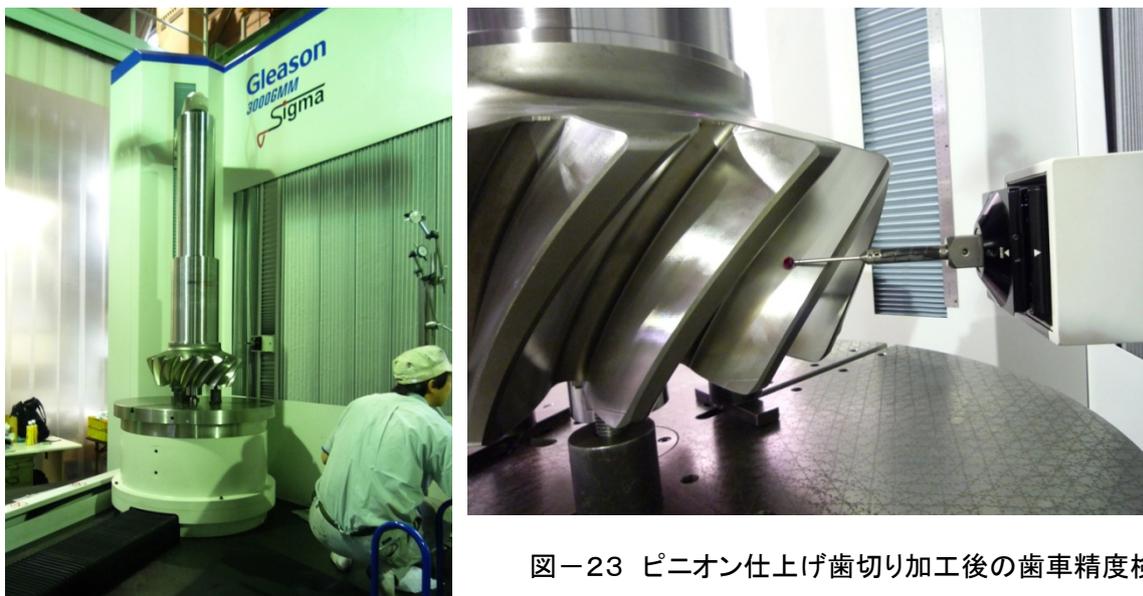


図-23 ピニオン仕上げ歯切り加工後の歯車精度検査

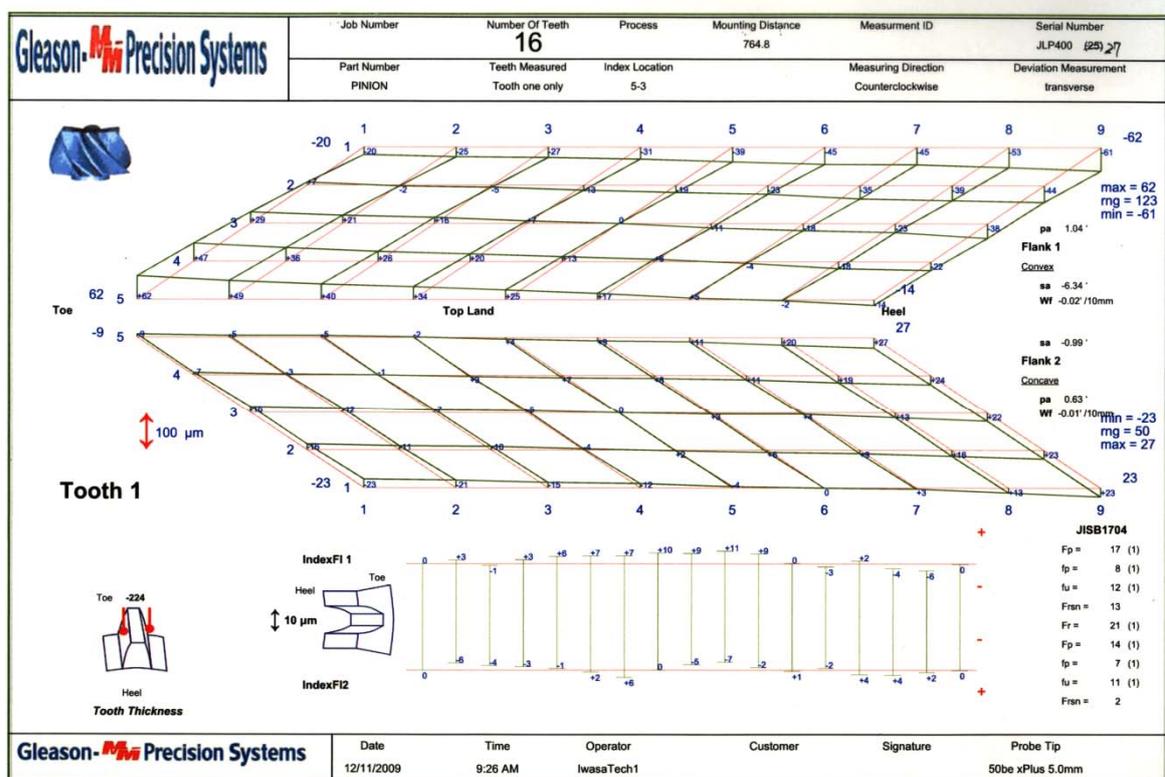


図-24 三次元歯車測定機を用いたピニオンの仕上げ歯切り加工後の歯車精度検査結果

2-6 ピニオンとギヤの歯当り確認

上述のように、仕上げ歯切り加工を行ったピニオンとギヤを図-25に示すように歯当りテスター上で噛ませて歯当りを採取した。図-26に示す通り、両歯面ともに、TCAの結果とよく一致しており、良好な歯当りが得られたといえる。



図-25 歯当りテスター上での歯当り検査

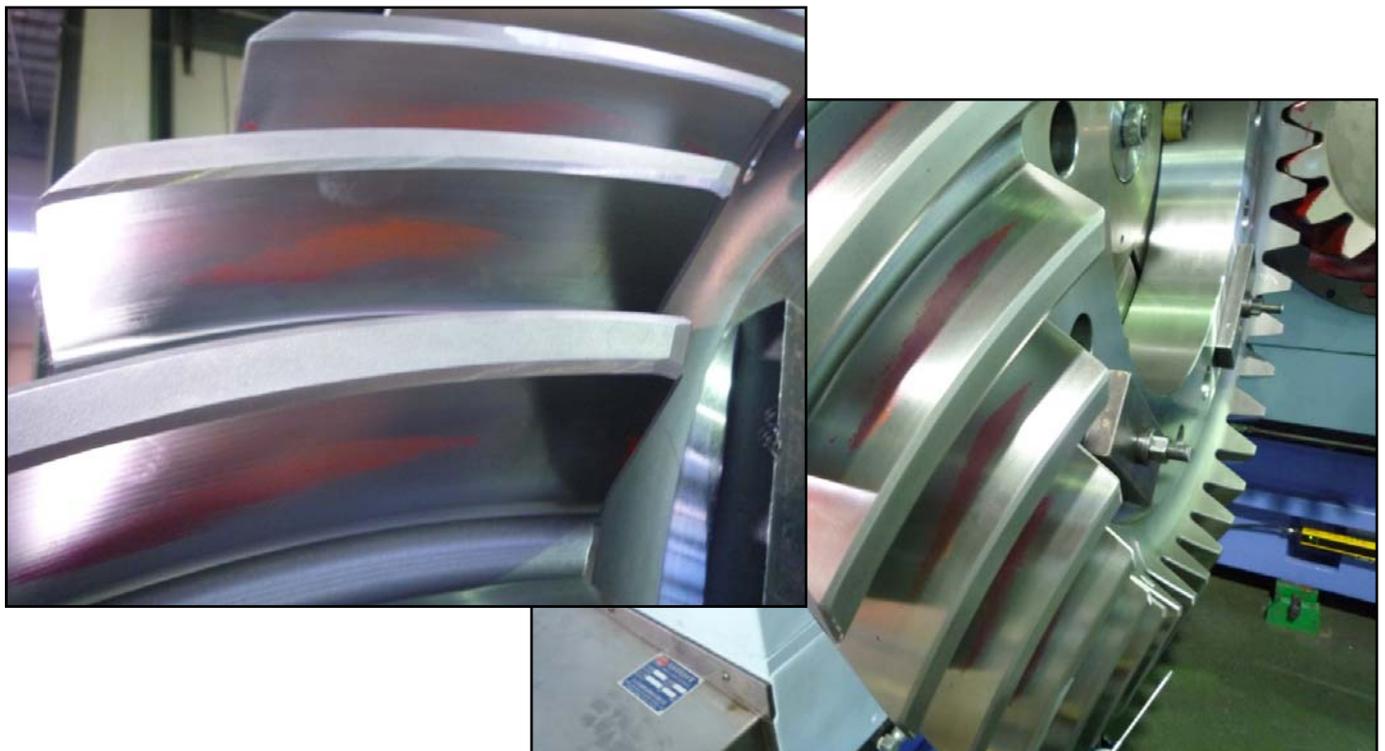


図-26 ギヤ両歯面の実際の歯当り状況

2-7 ショットピーニングによるギヤ歯面模様の改善

クリンゲルベルグ社製歯切り盤で仕上げ歯切りを行ったギヤの歯面と5軸制御マシニングセンターで仕上げ歯切りを行った歯面とを比較すると、加工法(工具パス)、使用工具、切削条件等が異なるため、面アラサは同等であるが、歯面模様が異なるという問題が生じた。川下産業、特に海外の顧客としては、歯車精度、歯当りが十分に図面要求を満たしているにもかかわらず、歯面模様に関しては、実績が無いだけに良否の判断がつかないことが予想される。

近年の傾向として、航空機や自動車に使用される高負荷、信頼性が要求される歯車に対し、歯面にショットピーニング⁽⁸⁾を施工して、表面に圧縮応力を残留させることにより歯面の疲労強度を向上させるとともに、歯面表面に微細な凹凸(ディンプル)を生成させることにより油膜形成、保持を向上させる等の処理がなされている。

そこで、本研究では、今後、事業化に際して顧客要求に対するオプションとして、歯車強度向上と歯面模様の改善を目的として、ショットピーニング試験を行った。

(1) ショットピーニングの条件決定

まず、ショットピーニングの条件を決定するために、図-27に示すように実際のスパイラルベベルギヤの一歯を切り出して、4種類の条件で、ショットピーニングを打って、面アラサ、圧縮応力の大きさと深さを調査した。ショットピーニング後にX線により、歯面表面の圧縮応力を測定した。測定後、表面をエッチングにより除去し、圧縮応力を測定する。その作業を繰り返し行い、除去量と圧縮応力の結果をプロットしたものが図-28である。その結果、T4:[RCW06PU+100C]の2種類の投射材を用いたダブルショットピーニングを採用した。これにより、表面圧縮応力を-1400MPa 残留させることができる。

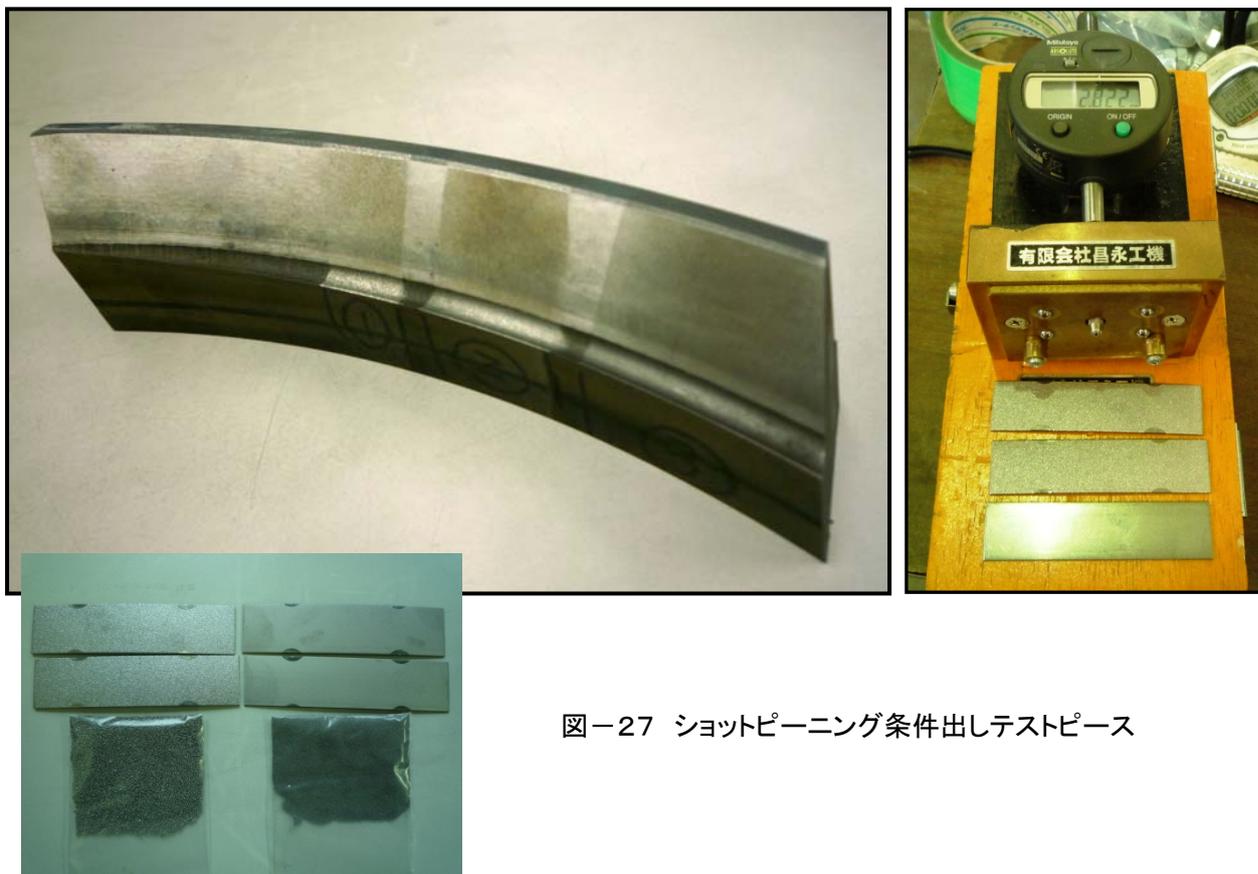


図-27 ショットピーニング条件出しテストピース

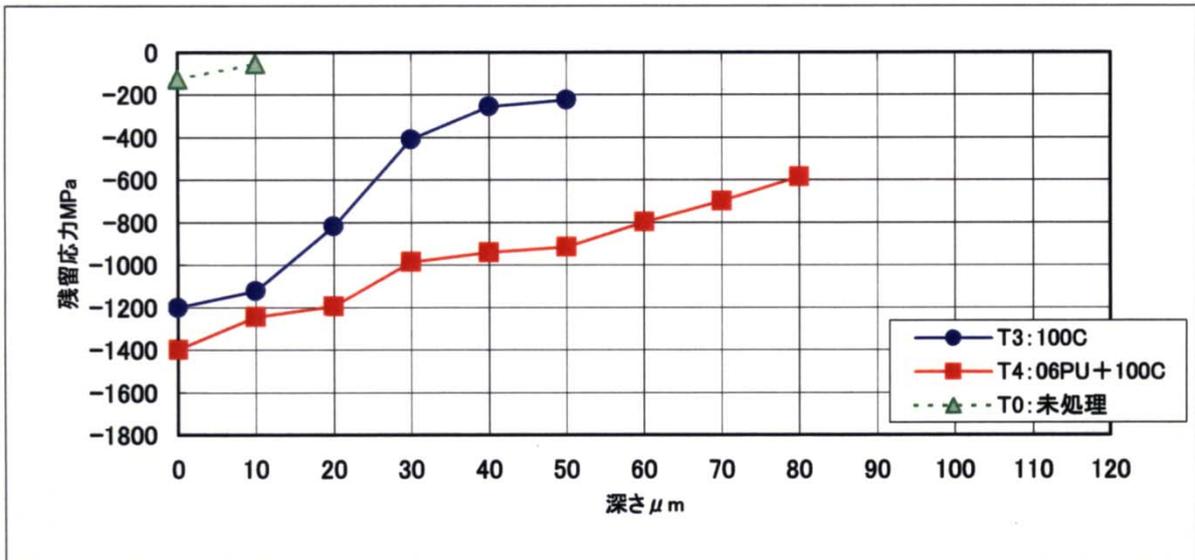


図-28 ショットピーニング表面硬化層深さ

硬化層深さも、深さ0.08mmで残留応力-600MPaと歯面表面だけでなく、深く圧縮応力を残留させることができる。

(2)ショットピーニング試験

図-29に示すような装置にて、ギヤの歯面にショットピーニングを施工した。図-30にショットピーニング後のギヤ歯面の状態を示す。ショットピーニング前では、エンドミルの送り目(シマ模様)が、観察されるが、ショットピーニング後は、均一な歯面となり、送り目のような特定の模様は見当たらないことがわかる。



図-29 ショットピーニング装置

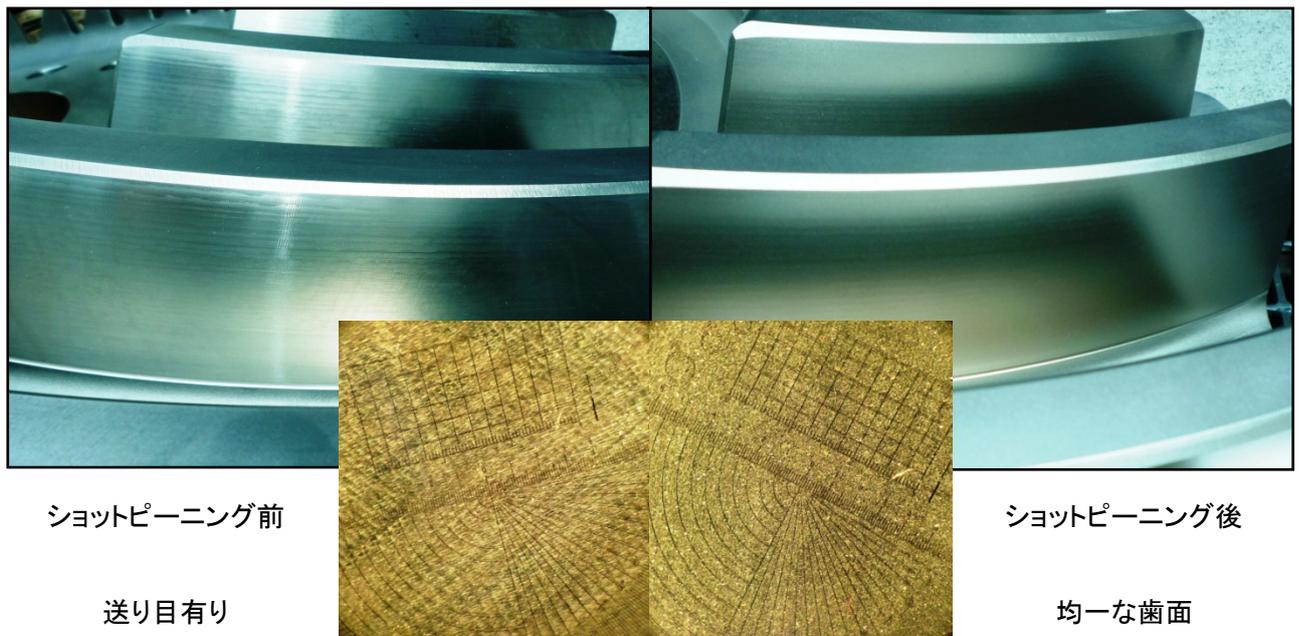


図-30 ショットピーニング施工前後のギヤ歯面の比較

(3) ショットピーニングの評価

(3-1) 面アラサ

レプリカ(樹脂)で歯面表面のアラサを転写して、間接的に面アラサを測定した。表-2にショットピーニング前後の面アラサの結果をまとめた。ショットピーニング前は、 $Ra=0.3\sim 0.5\mu m$ であったが、ショットピーニング後は、 $Ra=0.7\sim 1.0\mu m$ と約2倍になった。

表-2 ショットピーニング施工前後のギヤ歯面の面アラサの比較 $Ra[\mu m]$

		ショットピーニング前	ショットピーニング後
ドライブサイド	歯形方向	0.46	0.70
	歯筋方向	0.36	0.84
コーストサイド	歯形方向	0.38	1.00
	歯筋方向	0.28	0.74

(3-2) 歯車精度

図-31にショットピーニング前、図-32にショットピーニング後の歯面形状誤差とピッチ誤差を示す。両者は、同じ歯面を測定しており、比較してみると歯面形状誤差とピッチ誤差は、ほとんど差異が無く、誤差傾向も一致している。ゆえに、ショットピーニングは、浸炭焼入れ後の歯車の精度にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。

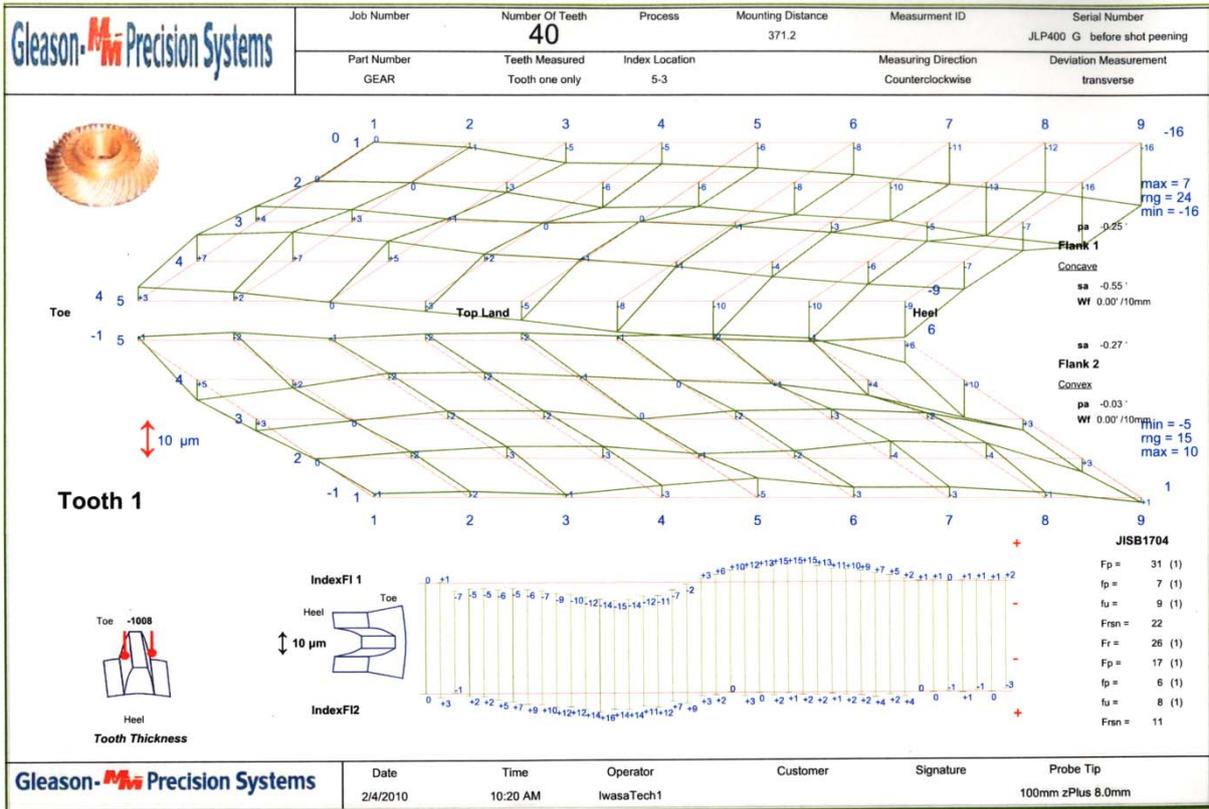


図-31 ショットピーニング施工前のギヤ歯車精度測定結果

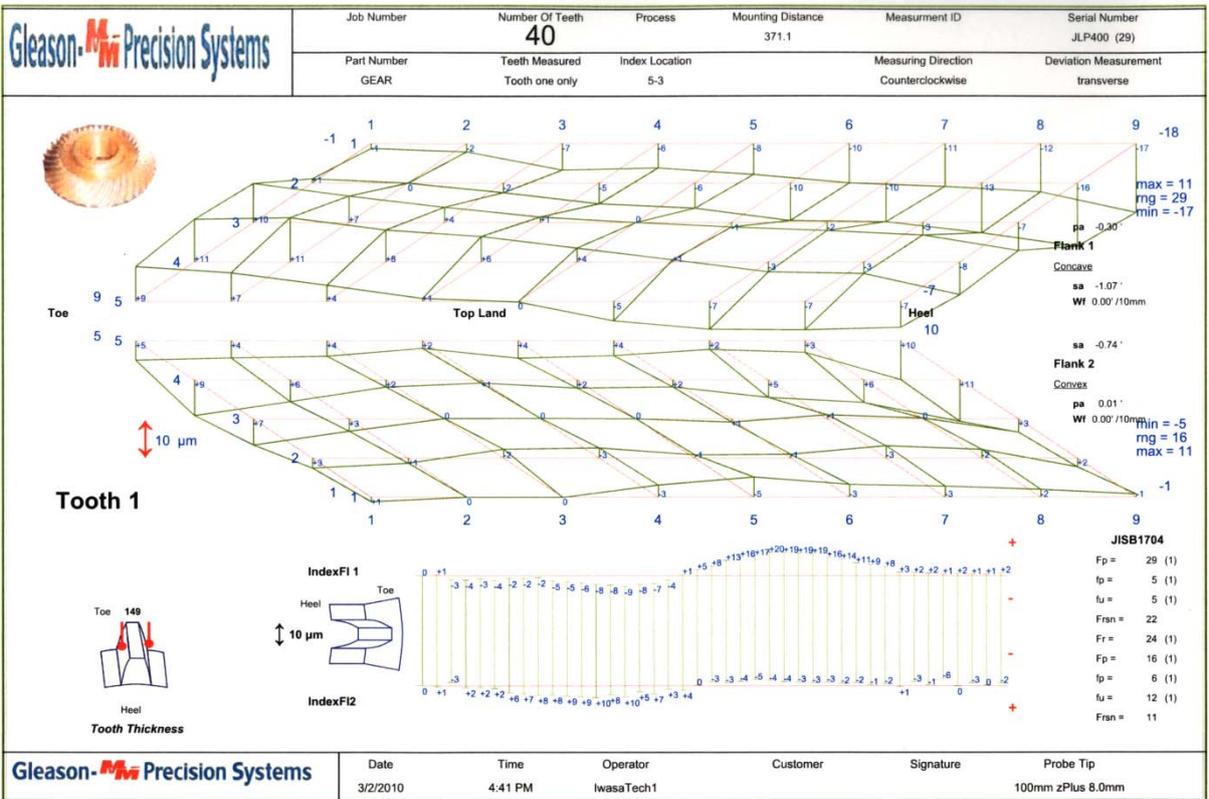


図-32 ショットピーニング施工後のギヤ歯面精度測定結果

以上の試験結果により、ギヤ歯面にショットピーニングを施工することにより、専用歯切り盤で創成歯切りした歯面とは異なるエンドミル加工による送り目(シマ模様)が無くなり、改善できた。一方、歯面の面アラサに関しては、ショットピーニング前は、 $Ra=0.3\sim 0.5\mu m$ であったが、ショットピーニング後は、 $Ra=0.7\sim 1.0\mu m$ と約2倍になったが、実際の噛合いにおいては、規則性のない微細な凹凸(ディンプル)が、歯面の油膜形成及び保持の効果が見込まれる。また、歯面表面に $-1400MPa$ の圧縮応力を残留させることにより、歯面及び歯底の疲労強度が向上し、それに伴い歯車の信頼性が向上した。ショットピーニングが、歯車精度に影響を及ぼさないことも分かった。

これらのことより、ショットピーニングを歯面に施工することにより、歯車に新たな付加価値を創出することができると考えられる。今後の事業化においては、顧客要求に応えられるオプションとして非常に有益である。

最終章 全体総括

(1) 成果の評価

3年間と通して、スパイラルベベルギヤの理論解析、歯当り解析、NCプログラム作成、加工試験、精度性能評価を行った。それにより得られた結果は次の通りである。

i. サイクロパロイド方式のスパイラルベベルギヤの噛合い理論を理解することにより、歯当り解析プログラムを開発した。本プログラムにより良好な歯当りが得られるピニオンとギヤの両歯面の三次元座標と法線ベクトルを算出できるようになった。それに基づいて、加工用のNCプログラムと歯面形状測定用の理論値を算出することができるようになった。

ii. iに基づいて、ピニオン、ギヤともに浸炭焼入れ前の荒歯切り加工と焼入れ後の硬化(Hrc60以上)した歯面の仕上げ歯切り加工を行った。同時5軸制御機により円筒エンドミル(スワーフ加工)を用いることにより、専用の歯切り盤より高能率かつ高精度に加工することができるようになった。

iii. 加工精度については、目標であったJIS2級に対して、ギヤは、JIS0級、ピニオンは、JIS1級のピッチ精度が得られた。また、歯面形状も当初目標値 $\pm 0.050\text{mm}$ に対し、 $\pm 0.015\text{mm}$ と目標を大幅に下回った。結果として、歯車の高精度化を図ることができた。

iv. 歯当りテスター上で採取したピニオンとギヤの歯当りも、形状(長さ幅)、位置ともに歯当り解析結果と一致しており、本加工法の妥当性を確認した。

v. 浸炭焼入れしたギヤの歯面にショットピーニングを施工することにより、①歯面強度向上と②歯面の模様の改善を図ることができた。使用条件の厳しいアプリケーションに対しては、有効な手法であり、新たな付加価値の創出となる。

(2) 結論

以上の試験結果より、本プロジェクトは、事業化が可能であると判断する。早急に以下のアクションを起こし事業化を加速して行く。

参考文献

- [1] Design of a Bevel Gear Drive According to Klingelnberg Cyclo-Paloid System, KN 3028 Issue No.2.
- [2] Stadtfeld, H. J. Handbook of Bevel and Hypoid Gears, Calculation, Manufacturing and Optimization, 1993, Rochester Institute of Technology, R.I.T.,pp. 9-12
- [3] K. Kawasaki, H. Tamura, and Y. Iwamoto, Klingelnberg Spiral Bevel Gears with Small Spiral Angle, Proc. 4th World Congress on Gearing and Power Transmissions, Paris, 1999, pp. 697-703.
- [4] Gear Geometry and Applied Theory 2nd ed.
- [5] Stadtfeld, H. J. Advanced Bevel Gear Technology for The New Millennium, Edition 2000
- [6] Stadtfeld, H. J. Gear Encyclopedia Gleason 2008 Edition
- [7] Q.Fan, Ronald S. DaFoe, and John W. Swanger, Higher-Order Tooth Flank Form Error Correction for Face-Milled Spiral Bevel and Hypoid Gears, Journal of Mechanical Design, July 2008, Vol.130/072601-1
- [8] 井上、前原、山中、加藤 浸炭歯車の曲げ強度に対するショットピーニングの効果、日本機械学会論文集 (C 編) 54(502) , PP/1331-1337 (1988)