

平成28年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「大型スパイラルベベルギヤの高強度設計・製造法の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人千葉県産業振興センター

—目 次—

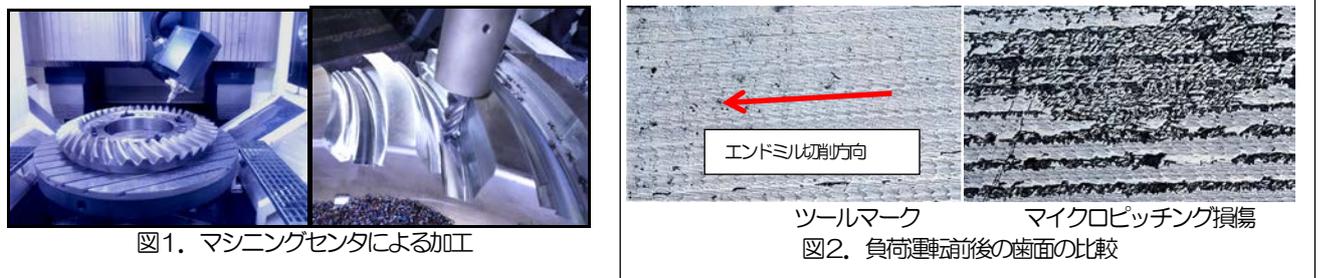
第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
【1】高強度歯面設計への対応	6
【2】歯車加工の高精度化への対応	9
【3】本設計・製造法の検証への対応	11
第3章 全体総括	15
3-1 結論（研究開発成果）	15
3-2 研究開発後の課題	16
3-3 事業化展開	17

## 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### ○従来技術での課題

マシニングセンタを用いた大型スパイラルベベルギヤの加工は、図1に示すように既にH19年度採択戦略的基盤技術高度化支援事業において、事業化に成功した。しかしながら、図2に示すように歯面のエンドミル加工によるツールマークと表面粗さは、従来の加工法である専用加工機と比較して劣っており、高負荷運転時において歯面損傷の原因となり大きな問題となっている。



	従来の加工法	本研究の新設計・製造法
歯面形状設計の比較 [歯面強度 (耐スカuffing) 向上]	<p>Tip, H, Tooth profile, Discontinuous point, Straight modification, Root</p>	<p>Tip, H, Tooth profile, Continuous path, Radius modification, Root</p>
歯面のツールマークの比較 [歯面強度 (耐マイクロピッチング) 向上]	<p>エンドミル加工法によるウロコ目状のツールマーク (表面粗さ)</p>	<p>弾性砥石を用いた磨き加工によりツールマークを改善する (表面滑らか)</p>
歯表面粗さの比較	エンドミル; Ra=0.4~0.6μm	弾性砥石; Ra=0.1~0.3μm 粗さ向上
ピッチ精度の比較	JIS2~3級 (専用加工機より劣る)	JIS0~1級 (目標) 精度向上

三次元歯面修整が、耐スカuffing強度に及ぼす影響について、理論的に解析を行い、歯面強度が向上する三次元歯面修整法を確立する。

#### ○新技術を実現するために解決すべき研究課題

歯面強度 (スカuffing・マイクロピッチング) 向上のために以下の研究開発を行う。

#### 【1】 高強度歯面設計への対応

負荷運転時の耐スカuffing強度を向上させるために、マシニングセンタの利点を活かし、自由度の高い三次元歯面修整法を確立する。

## 【2】 歯車加工の高精度化への対応

エンドミル加工によって発生する歯面上のウロコ目状のツールマークを解消するために、砥石などの連続加工の導入とともに、効率的な工具形状の開発を行う。

開発した仕上げ法を活用して、耐マイクロピッチング強度対策として表面粗さの向上を行う。

## 【3】 本設計・製造法の検証への対応

以上の研究成果を基に、大型スパイラルベベルギヤを試作して、実際に負荷運転試験をおこなうことにより、本研究の有効性を立証する。

### (二) 精密加工に係る技術に関する事項

#### 1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

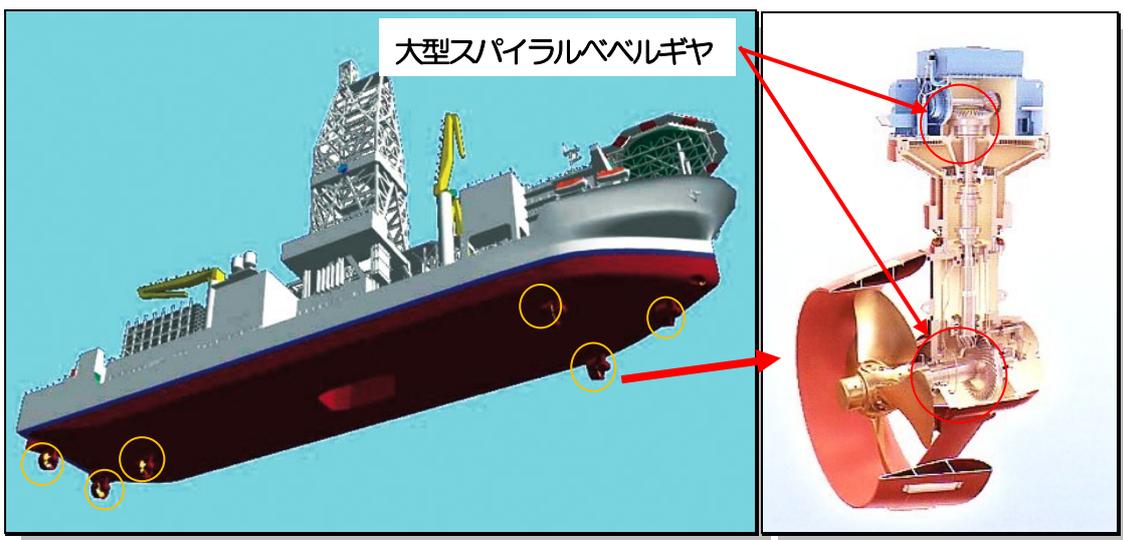
#### (3) 川下分野横断的な共通の事項

##### ①川下製造業者の共有の課題及びニーズ

##### ウ. 品質の安定性・安全性の向上

現在、エネルギー分野において世界的に需要が拡大している状況において、海洋資源開発や石炭の液化燃料化など新分野への参入が盛んに行われている。それらの分野において重要な装置である海洋探査船に用いられるアジマススラスタ（図3）、及び火力発電に用いられる石炭ミル等に使用されるスパイラルベベルギヤは、その旺盛な需要の拡大に伴い、近年益々大型化してきている。さらにISO規格、歯車強度計算ソフトウェアに代表される強度計算法の整備・発展により、スパイラルベベルギヤの負荷能力に対する要求もより高強度化・高効率化してきている。こうした状況の中、実機上で、スカuffing、マイクロピッチング（図4）等の重大な歯面損傷事故が急増してきており、装置全体の信頼性の低下が課題となっている。これが原因で、日本の重機メーカーの競争力低下を招いている。

スパイラルベベルギヤの設計法及び製造法は従前の通りのまま使用されているが、大型スパイラルベベルギヤの歯面損傷事故が急増したのは、装置設計の高強度化要求に対応していないことが大きな原因である。スパイラルベベルギヤは、大型になるにつれて運転時に高負荷による予想以上の歯のたわみ、軸の曲がり、ケーシングの変形等が大きくなり、これがこの歯車の良好な噛み合いの大きな阻害要因になっている。そのため、日本の重機メーカーの競争力向上のためにも、大型スパイラルベベルギヤの強度・耐久性の向上が強く求められている。



海洋探査船「地球」の船底には、6ヶのアジマススラスタが用いられている。

図3. 大型スパイラルベベルギヤの用途例

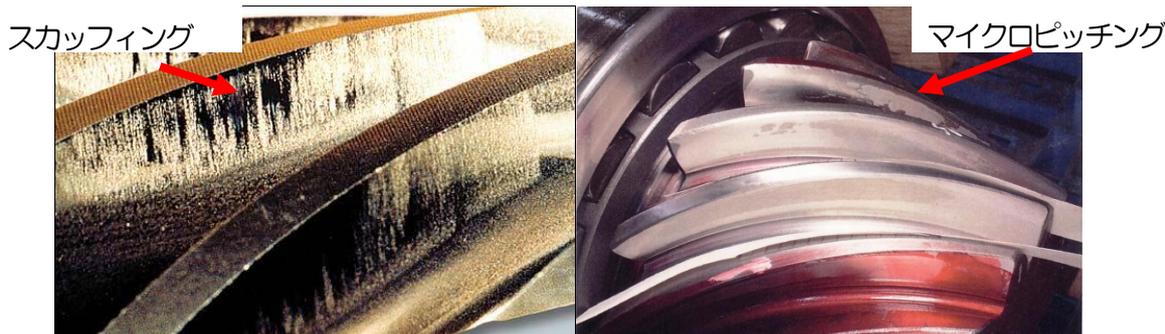


図4. ピニオン歯先部の歯面損傷（スカuffィングとマイクロピッチング）

## ②研究開発の背景（これまでの取組）

近年世界的に、スパイラルベベルギヤを専用の歯切り盤ではなく、マシニングセンタを用いて歯切り加工をする研究について盛んに行われきた。4から5年前より、ドイツのDMG社（現在のDMG-MORISEIKI）が、2年ほど前からアメリカ Gleason社などが、専用の解析ソフト、工具そして同時5軸制御マシニングセンタをセット販売しているが、未だに実用化が出来ていない状況である。

イワサテックでは、それらの研究に先駆けて、H19年度採択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」において、実際にマシニングセンタを用いて歯車の加工に成功して事業化している。現在、世界中でマシニングセンタを用いて品質の高いスパイラルベベルギヤを生産しているのは、フィンランドのATA社、スペインのビーデンス社などが挙げられるが、それぞれ前述した市販の技術ではなく、各社独自で開発した方法で生産しているが、品質面において未だに市場の高いニーズに応えられていないのが現状である。各社共通の問題点は、エンドミル加工でつくられる歯面の表面粗さである。この問題は、耐マイクロピッチング強度の低下を招く恐れがある。

イワサテックは、この問題を解決するために、①項で述べたようにエンドミルの代わりに円筒状の弾性砥石を用いて磨き加工を行い、加工のツールマークと表面粗さの改善に取り組んできた。その技術は、歯数の少ないピニオンに対しては、とても有効な手段である。しかし、歯数の多いギヤに対しては、加工時間が長くなることより砥石摩耗が生じ磨き能力の低下を引き起こした。そこで、今回本研究に取り組んでいくことを決定した。

## 研究開発の高度化目標

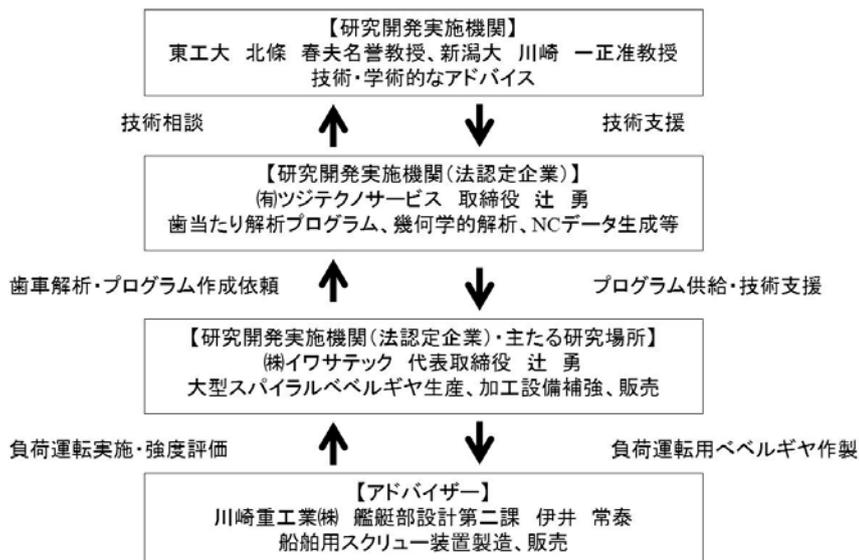
### 高度化目標

#### ア. 当該技術が持つ物理的な諸特性の向上

上述のように高強度・長寿命の大型スパイラルベベルギヤが求められているため、この要求に応えられる大型スパイラルベベルギヤの設計理論・製造方法を含めた革新的製造技術の開発が不可欠である。これを構築することにより、大型スパイラルベベルギヤの高強度化・長寿命化が実現できるとともに、負荷運転時における見通しのよい設計・製造が可能となる。

H19年度採択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」において、図1に示すように同時5軸制御マシニングセンタによる大型スパイラルベベルギヤ製造の事業化に成功した。現在イワサテックは、大型スパイラルベベルギヤの生産では、フィンランドのATA社、ドイツのクリンゲルベルグ社、アメリカのオーバトン社に次ぐ第4位の生産高を誇る。しかしながら本加工法は、市場要求に対して、ピッチ精度、歯面のツールマーク・表面粗さなどに問題が残っている。図2にマシニングセンタにより加工した歯面の損傷状況を示す。図のようにエンドミル加工によるツールマークが、マイクロピッチングを引き起こす原因になっている。そこで、さらなる設計・製造法の刷新により大型スパイラルベベルギヤの付加価値の向上と生産の効率化を目的とし、大型スパイラルベベルギヤの生産高世界No. 1の歯車製造メーカーを目指す。

## 1-2 研究体制



(株)イワサテックが主たる研究場所となり、最新鋭のオークマ製同時5軸制御マシニングセンタVTM-2000YBを設置して高強度スパイラルべベルギヤ2セットの試作を行った。(有)ツジテクノサービスは、本研究に必要とされる歯当たり解析を含む歯車解析プログラムを制作した。東工大と新潟大は、(有)ツジテクノサービスの要請により、幾何学的・学術的支援を行った。川下産業を代表して、最も技術力の高い川崎重工業にアドバイザーとして参加していただき、負荷運転装置により負荷運転を実施して、本研究の評価を行った。

## 1-3 成果概要

以下3項目の研究課題に対してスケジュール通りに研究を行い、目標とした研究成果を達成することができた。

### 【1】高強度歯面設計への対応

- 【1-1】新歯面修整法の幾何学的定義 (H26年度完了)
- 【1-2】耐スカuffing強度の高い歯面形状の設計 (H27年度完了)
- 【1-3】組立干渉の解析とその回避方法の提案 (H27年度完了)

### 技術的目標

歯当たり解析(TCA)を活用して歯面修整法及び量のスカuffingリスクに及ぼす影響を評価して耐スカuffing強度が向上する最適歯面形状の設計手法を確立した。また追加課題として組立干渉を起こさない高強度スパイラルべベルギヤの設計・製造法を提案した。

### 【2】歯車加工の高精度化への対応 (H27年度完了)

- 【2-1】歯面上のウロコ目状ツールマークの改善
- 【2-2】歯面の表面粗さの改善

### 技術的目標値

表1. ピニオン加工精度目標値

	現状	目標
形状誤差	±0.05 mm	±0.02 mm
ピッチ誤差	JIS2~3	JIS0
$R_{z1}+R_{z2}$ μm	6~8	4以下

本目標値は、川下会社の精度要求である。また、スパイラルべベルギヤのかみ合いは、歯形方向と歯すじ方向が合成されたすべり接触であることより表面粗さの目標は、以下の式となる。

$$R_{z1}(\text{歯形}) + R_{z2}(\text{歯すじ}) < 4\mu\text{m}$$

【結果】すべての目標を達成した。

$$R_{z1}(\text{歯形}) + R_{z2}(\text{歯すじ}) = 2.2\sim 2.5\mu\text{m}$$

【3】本設計・製造法の検証への対応（H28年度完了）

【3-1】同時5軸制御マシニングセンタにより高強度スパイラルベベルギヤを2セット試作

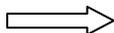
【3-2】動力循環方式の負荷運転装置にて耐久運転試験を実施

【3-3】耐久試験後の歯面の健全性の評価・判定

技術的目標値 **かみ合い繰り返し数  $1.0 \times 10^7$  回達成**

耐久テスト後、歯面にスカuffィング、マイクロピッチング等の欠陥が無いことを確認した。

従来；歯面損傷あり  
スカuffィング  
マイクロピッチング



目標；歯面強度の向上  
歯面損傷無きこと

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社イワサテック

〒273-0014 千葉県船橋市高瀬町62-4 Tel 047-420-0103 Fax 047-420-0028

代表取締役社長 辻 勇

E-mail：tsuji-tech136@dream.jp

## 第2章 本論

前章で述べた研究課題に対して3年間に渡り研究を推進した結果、具体的に以下の成果をえることが出来、当初の目標を達成した。

### 【1】 高強度歯面設計への対応

#### 【1-1】 新歯面修整法の幾何学的定義

運転時に良好な歯当たりが得られる新しい歯面修整法を提案した。基本的な歯面修整法の方角付けとしては、噛合いの進行方向（歯丈方向）に対してピニオン、ギヤともに歯先の円弧修整を行う。このとき、歯面修整量が問題となるが、負荷運転時の歯当たり解析に反映させることで、最適な歯面修整を実現した。

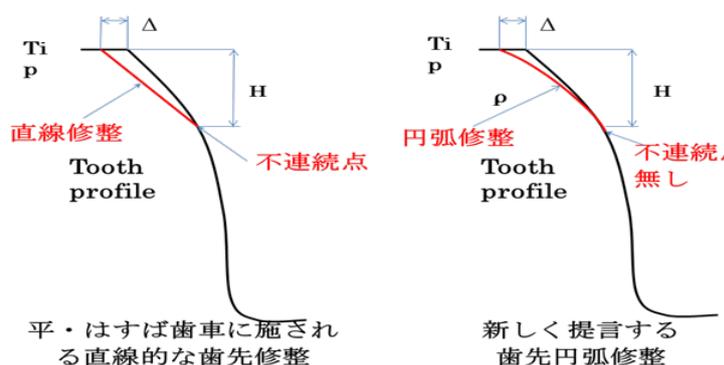
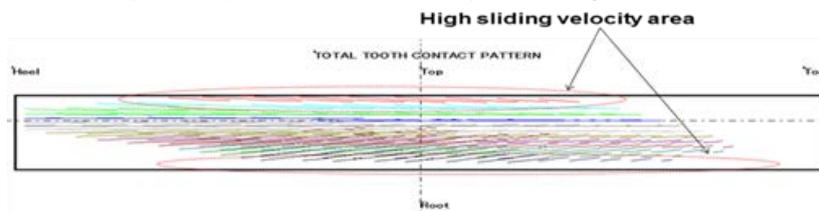
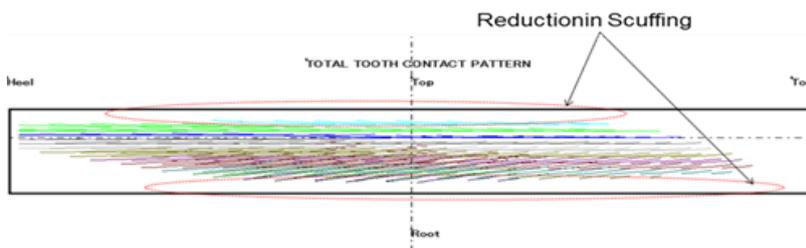


図5. 歯面修整法の提言

図5に示すように、平歯車やはすば歯車でされる一般的な歯先修整は、左側の直線的に逃す方法が採用されているが、これをそのままスパイラルベベルギヤのような三次元形状に適用した場合、図のように不連続点が歯面内部に存在し、負荷運転時には応力が集中して歯面のフラッシュ温度が上昇し油膜が切れやすくなり、これが原因で金属接触が生じてスカuffing損傷にいたる可能性が高い。そこで本研究開発では、右側の図のように歯先を円弧に修整し、高次元の関数とすることで、不連続点がなくなり連続的な修整が可能となる歯面修整法を提案した。これにより、急激な応力集中が無くなり、歯面の耐スカuffing強度が向上することが期待される。



(a) 歯面修整無しの場合のギヤ歯面上の滑り速度の分布



(b) 歯先円弧修整を施した場合のギヤ歯面上の滑り速度の分布

図6. 耐スカuffing強度に及ぼす歯面修整の効果

図6に示すように、(a) 歯面修整無しの場合はギヤのアデンダムとデデンダムにすべり速度が急激に早くなる領域が存在し、PV値（圧力×速さ）が高くなりスカuffィングが起きやすくなっている。これに対し、(b) 歯先円弧修整を施した場合はすべり速度の急激な変化が抑制されてスカuffィングのリスクが軽減される。

【1-2】耐スカuffィング強度の高い歯面形状の設計

先ずスカuffィングのリスクを軽減できる歯先R修整法を具体的に提案し、幾何学的な歯面形状として定義した。また、その効果を定量的に評価するシミュレーションプログラムを開発した。

次にアドバイザー（川崎重工業）のいままでの実機における運転事例を基に、来年度の負荷運転に対して最も有効な三次元歯面修整を決定し、目標とする耐スカuffィング強度が高い最適な歯面形状を設計した。

最後にスカuffィングリスク評価解析プログラムを開発し、歯先R修整量を決定した。決定した歯先円弧修整量を表2に示す。図7に表2の修整を加えた作用面の歯当たり解析結果を示す。

表2. 歯先円弧修整量の決定

従来の歯面修整		歯先円弧修整	
カッター半径差 $E_{xb}$	1.89mm	ピニオン歯先修正高さ H	5mm
カッター刃面曲率半径 $\rho$	1200mm	ピニオン歯先修正量 $\Delta$	0.2mm
ピニオンIB スパイラル角修整	0.02deg.	ギヤ歯先修正高さ H	4mm
ピニオンOB スパイラル角修整	-0.02deg.	ギヤ歯先修正量 $\Delta$	0.2mm

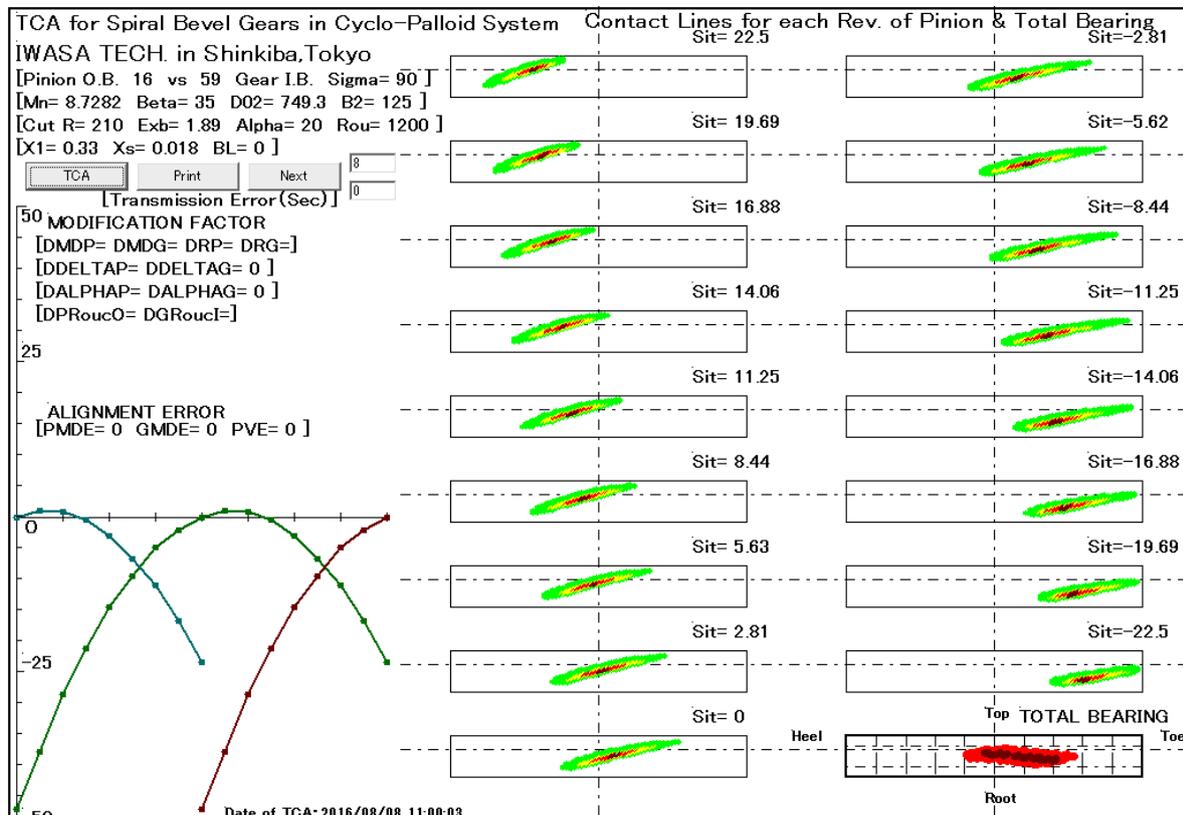


図7. 作用面の歯当たり解析結果

【1-3】組立干渉の解析とその回避方法の提案

スパイラルベベルギヤでは、ギヤボックスにギヤを組付けた後、ピニオンをその軸方向（図8. V方向）から組込むもしくは、引抜く構造のものがある。その時にギヤの歯とピニオンの歯が干渉して組込み・引抜きができないことがある。これが組立干渉である。現状では、有効な解析法もなく、それを回避するためにはテスター上でピニオンとギヤを実際にかみ合わせてピニオンが引き抜けるまでギヤの創成歯面（主に非駆動側）をサンダーで手動により削り取っていた。この作業は、浸炭焼入れを行った歯面を手修整することになり、せっかく硬化した浸炭層を取り除くばかりか、作業の不均一性や発熱により歯面に大きなダメージを与え、歯面・歯山強度の劣化をまねくことになる。

そこでH27年度は、組立干渉のメカニズムを解明して、解析ツールを開発しそれを回避できる歯面形状を計算することにより浸炭焼入れ前に歯面修整加工をマシニングセンタで行うことにより歯面・歯山強度の劣化を防ぐことができた。図9に本研究で開発した組立干渉シミュレーション結果の例を示す。横軸は、ピニオンの引き抜き距離（MD）を示し、縦軸は、バックラッシの最大最小値の変化を示している。

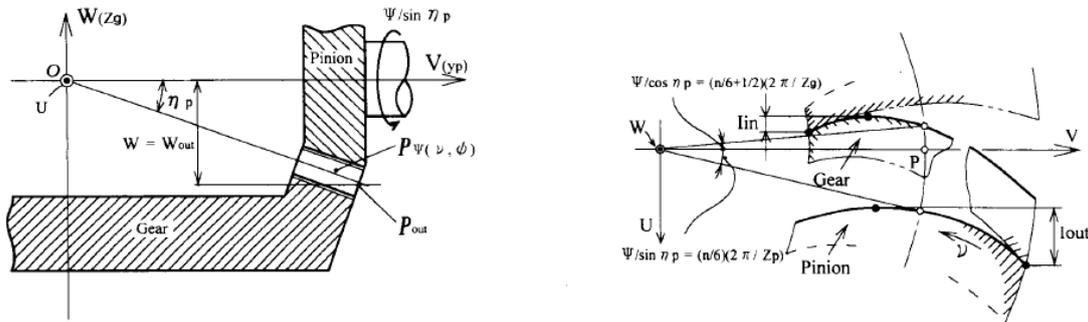


図8. スパイラルベベルギヤの組立干渉

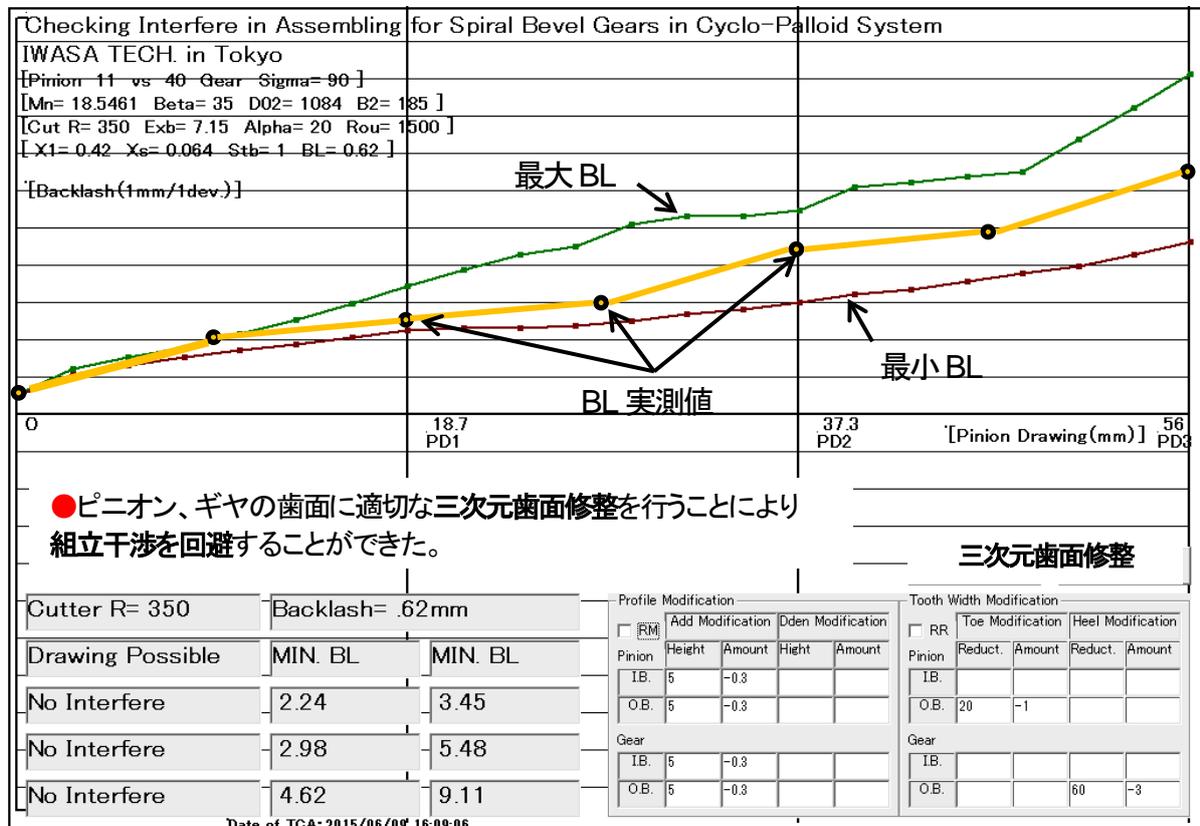


図9. 組立干渉シミュレーション結果の例

## 【2】歯車加工の高精度化への対応

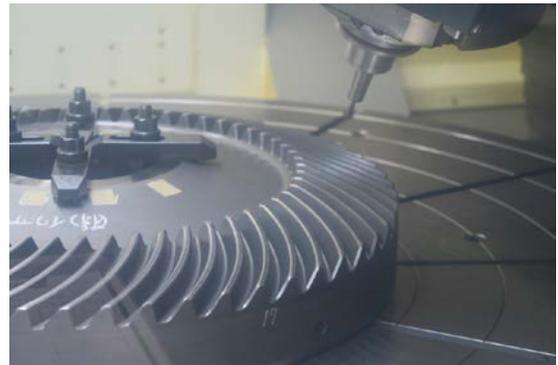
### 【2-1】歯面上のウロコ目状ツールマークの改善

ピニオンは、図10(a)のように浸炭焼入後オークマ製複合加工機 B750 を用いて同時5軸制御スワープ加工によりエンドミル仕上げ歯切り加工を行った。ギヤは、図10(b)のように、浸炭焼入後オークマ製同時5軸制御マシニングセンタ VTM-2000YB を用いて同時5軸制御スワープ加工によりエンドミル仕上げ歯切り加工を行った。

その後、ツールマークと表面あらさの改善を目的として 3M 社製 Radial Bristle Brushes, 型式 33215, 外径  $\phi 152$  mm, 粒度 grade 80 を用いて図11(a)(b)に示すようにピニオンとギヤの歯面のブラシ磨き加工を行った。加工条件は、ブラシ回転数 1000rpm, 送り F80mm/min, ブラシ押込み量 15~20mm とし、加工時間は、4分/1歯となった。



(a) ピニオン仕上げ歯切り加工



(b) ギヤ仕上げ歯切り加工

図10. 浸炭焼入後のスパイラルベベルギヤの仕上げ歯切り

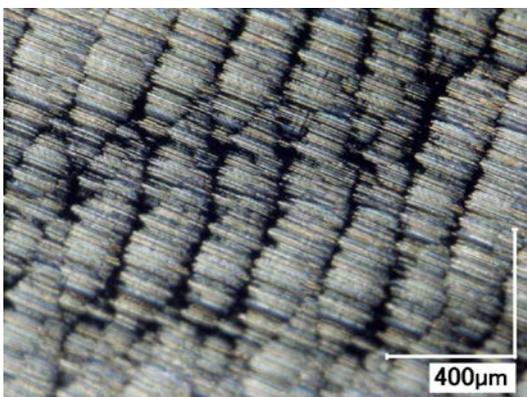


(a) ピニオン ブラシ磨き加工

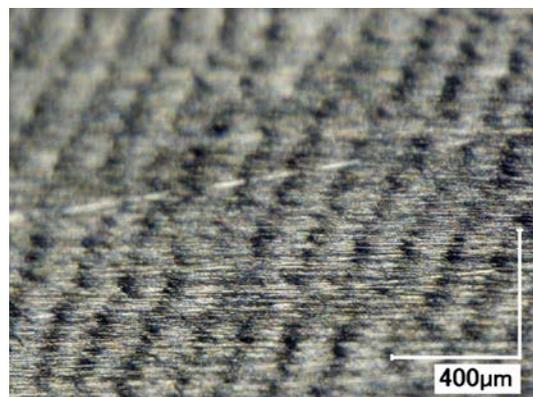


(b) ギヤ ブラシ磨き加工

図11. スパイラルベベルギヤの歯面ブラシ磨き加工

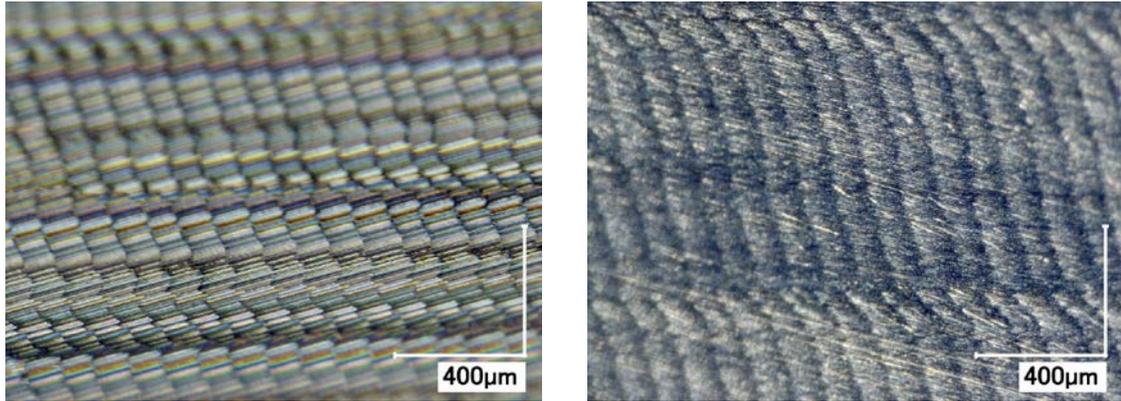


(a) ブラシ磨き加工前



(b) ブラシ磨き加工後

図12. ピニオン ブラシ磨き加工前後の比較



(a) ブラシ磨き加工前 (b) ブラシ磨き加工後  
図13. ギヤ ブラシ磨き加工前後の比較

ブラシ磨き加工前後の歯面のツールマークの状態を顕微鏡にて観察した。図12にピニオン、図13にギヤの結果を示す。両者ともにブラシ磨き加工前では、エンドミルのフレに起因した回転によるウロコ目状ツールマークがはっきりと観察される。一方ブラシ磨き加工後は、ウロコ目状ツールマークのササクレ立った頂点が除去されていることが確認できた。

前述したように、エンドミル加工によるツールマークが、マイクロピッチングを引き起こす原因になっていることを考慮するとブラシ磨き加工によりツールマーク頂点を除去することにより、マイクロピッチングに対するリスクが大幅に低減できたものと考えられる。

## 【2-2】歯面の表面粗さの改善

ブラシ磨き加工前後の歯面の表面あらさを測定した。表3にピニオン、表4にギヤの測定結果をまとめた。

表の第1回 KHI 負荷運転時は、本研究前に事前にマシニングセンタによるエンドミル加工で製作したスパイラルベベルギヤを川崎重工業で負荷運転を行った時の表面あらさであり、運転の結果、図2のように歯面にマイクロピッチングが発生したものである。AMK855CBN は、従前のクリンゲルンゲルンベルグ社製 AMK855 専用歯切り盤による CBN ブレード歯切りの時の表面あらさを示している。表面粗さは、歯すじ方向と歯形方向の Ra と Rz 表示で測定した。

技術的目標値として、歯すじ方向と歯形方向の Rz の和が  $Rz_1$  (歯形) +  $Rz_2$  (歯すじ) <  $4\mu\text{m}$  と設定した根拠は、従前の AMK855CBN ( $4\mu\text{m}$  以下) ではマイクロピッチングが発生しなかったのに対し、第1回 KHI 負荷運転時 ( $4\mu\text{m}$  以上) で発生したことにある。

表3 ピニオン表面あらさにおいて、第1回 KHI 負荷運転時の歯形方向の表面あらさが、 $3.535\mu\text{m}$  であり、歯形方向のツールマークと表面あらさが原因でマイクロピッチングが引き起こされたものと考えられる。今回の研究において、ブラシ磨き加工後の歯形方向の表面あらさは、 $1.496$ ,  $1.261\mu\text{m}$  となり、 $Rz_1$  (歯形) +  $Rz_2$  (歯すじ) も  $2.450$ ,  $2.255\mu\text{m}$  で、技術的目標値である  $4\mu\text{m}$  を十分に達成している。

表4 ギヤ表面あらさにおいても、第1回 KHI 負荷運転時の歯すじ方向の表面あらさが、 $2.424\mu\text{m}$  であり、歯すじ方向のツールマークと表面あらさが原因でマイクロピッチングが引き起こされたものと考えられる。ピニオンと同じく、ブラシ磨き加工後の歯すじ方向の表面あらさは、 $0.894$ ,  $0.730\mu\text{m}$  となり、 $Rz_1$  (歯形) +  $Rz_2$  (歯すじ) も  $2.601$ ,  $2.205\mu\text{m}$  で、技術的目標値である  $4\mu\text{m}$  を十分に達成している。

また、両者ともに従前の AMK855CBN と比較してもそれを上回る良好な結果となった。

表3. ピニオン 歯面表面あらさ測定結果 (μm)

		第1回 KHI負荷 運転時	負荷運転共試験体 B750			AMK855 CBN
			スワーフ (#1)	ブラシ (#1)	ブラシ (#2)	
歯すじ方 向	Ra	0.224	0.285	0.187	0.220	0.221
	Rz1	1.299	1.492	0.954	0.994	1.288
歯形方 向	Ra	0.651	0.275	0.225	0.256	0.308
	Rz2	3.535	1.571	1.496	1.261	1.997
$(Rz1^2 + Rz2^2)^{1/2}$		3.766	2.167	1.774	1.606	2.376
$(Rz1 + Rz2)$		4.834	3.063	2.450	2.255	3.285

表4. ギヤ 歯面表面あらさ測定結果 (μm)

		第1回 KHI負荷 運転時	負荷運転共試験体				AMK 855 CBN
			スワーフ (#1)	スワーフ (#2)	ブラシB (#1)	ブラシB (#2)	
歯すじ 方向	Ra	0.534	0.246	0.178	0.152	0.130	0.178
	Rz1	2.424	1.356	1.001	0.894	0.730	1.096
歯形 方向	Ra	0.377	0.327	0.248	0.323	0.263	0.228
	Rz2	2.115	2.028	1.528	1.707	1.475	1.659
$(Rz1^2 + Rz2^2)^{1/2}$		3.217	2.440	1.827	1.927	1.646	1.988
$(Rz1 + Rz2)$		4.539	3.384	2.529	2.601	2.205	2.755

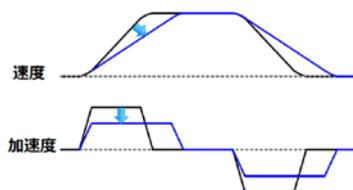
【3】本設計・製造法の検証への対応

【3-1】同時5軸制御マシニングセンタにより高強度スパイラルベベルギヤを2セット試作

本研究成果に基づいて、高強度の大形スパイラルベベルギヤの試作を行った。試作にあたり、より良好な歯面形状が得られるように同時5軸制御マシニングセンタの改造を行った。図14にその代表的な事例を示す。同時5軸制御によるスワーフ加工の各軸の同時制御をよりスムーズにするために、「スーパーブスC軸加速度指数」や「C軸反転突起保証」などのソフトウェアの追加と機械のファインチューニングを実施した。

スーパーブスC軸加速度指数

加速度を低くし、指令形状による急加減速を低減  
 ➡ 制御性がアップ。ただし、加工時間は若干延びる。



C軸反転突起補償

移動方向の反転部分で反転突起と呼ばれるスジ目が発生



図14. 同時5軸マシニングセンタのファインチューニング

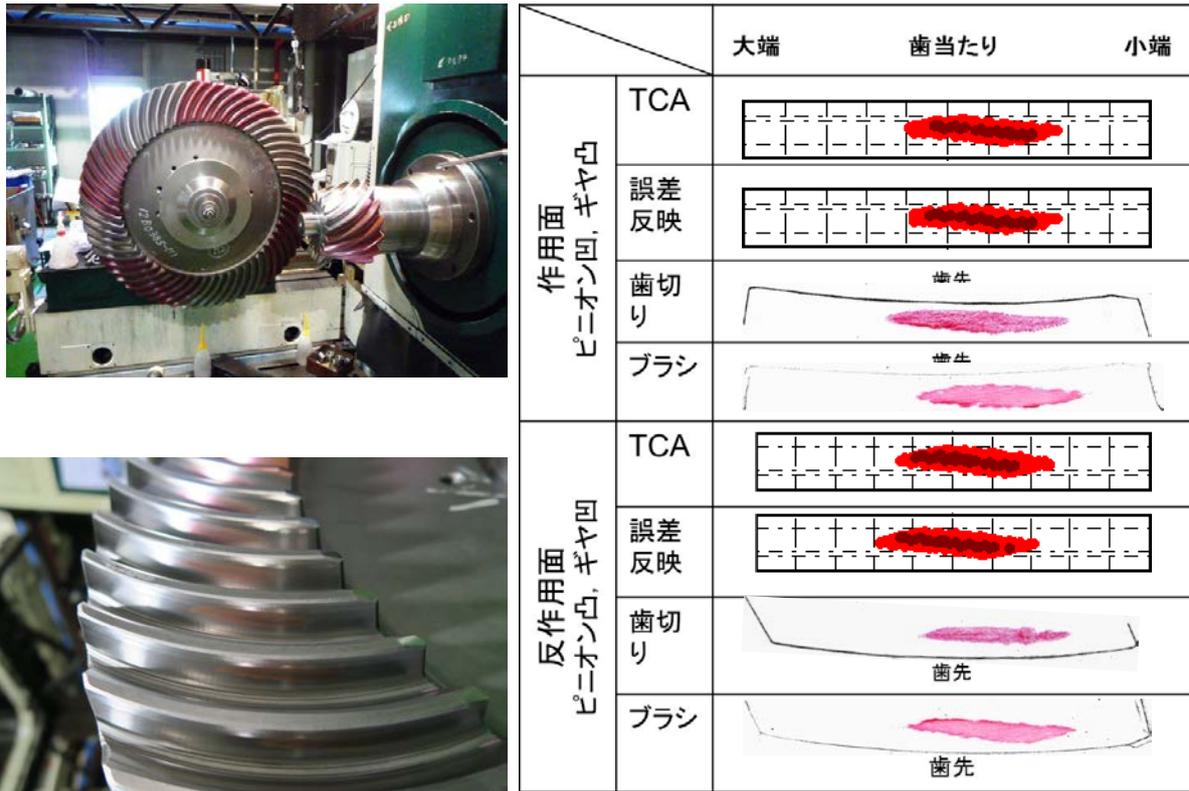


図15. 歯当たり解析と歯当たり検査結果の比較

表5. 歯車諸元 (サイクロパロイド方式スパイラルベベルギヤ)

歯直角モジュール	8.7272	スパイラルアングル	35 deg.
ピニオン歯数	16 L.H.	圧力角	20 deg.
ギヤ歯数	59 R.H.	ギヤPCD	749.3 mm
歯幅	125 mm	ピニオンPCD	203.2 mm

本研究で製作したスパイラルベベルギヤの歯車諸元の概略を表5に示す。製作に先立ち、本研究で開発した歯当たり解析プログラム(TCA)を用いて歯面の高強度設計を行った。解析結果に基づき、負荷運転試験用スパイラルベベルギヤを製作した。

図15は、その歯当たり解析結果と実際に製作したスパイラルベベルギヤのブラシ磨き加工前後の歯当たり検査結果を示している。この結果からわかるように、実際に製作した歯車の歯当たりは、歯当たり解析とほぼ一致している。また、ブラシ磨き加工前後の歯当たりの変化もないことより、狙い通りに高強度設計に基づいたスパイラルベベルギヤであることが確認できた。

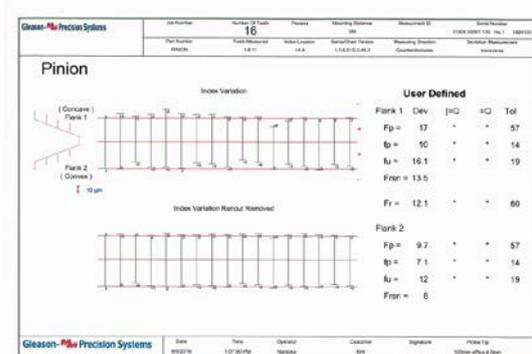


図16. 歯車精度検査 (ピニオン)

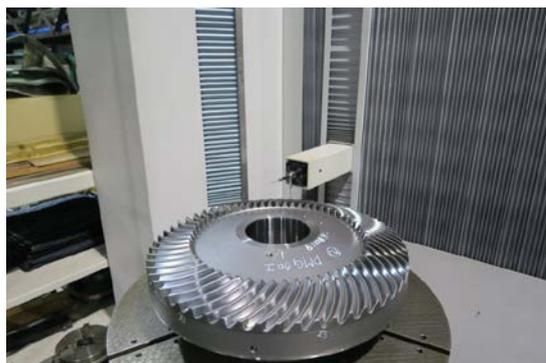


図 17. 歯車精度検査 (ギヤ)

図 16 にピニオン、図 17 にギヤの歯車精度検査の状況を示す。図のように三次元歯車測定機 (Gleason Sigma3000CMM) を用いてピニオンとギヤの歯面形状とピッチ精度を測定した。ピニオンとギヤともに歯面形状は、 $\pm 0.01\text{mm}$  以内であり、ピッチ精度も JIS0 であった。

以上の結果より、本研究で製作したスパイラルベベルギヤは、全ての研究課題に対して要求を満足しており、負荷運転試験に十分耐えられるものと判断した。

### 【3-2】動力循環方式の負荷運転装置にて耐久運転試験を実施

川崎重工業の動力循環方式の負荷運転装置により試作した歯車の耐久試験を行った。ピニオン歯面のかみ合いの繰り返し数が、耐久限度である  $1.0 \times 10^7$  回まで耐久試験を実施した。運転条件を表 6 に示す。

表 6. 負荷運転条件

Power	1800 kw	Lubrication oil	Gear oil VG68
Speed of pinion	1160 rpm	Total running time	286 Hr
Speed of gear	314.6 rpm	Pinion meshing	$1.0 \times 10^7$
Oil temperature	$63^\circ\text{C}$	Gear meshing	$2.7 \times 10^6$

### 【3-3】耐久試験後の歯面の健全性の評価・判定

100%負荷運転耐久テスト後、ピニオンとギヤの歯面の状態を確認した。図 18 に今回のサポイン以前に実施した第 1 回 KHI 負荷運転時の歯面と今回の高強度化を行った歯面の比較結果を示す。

前回の結果は、ピニオンは、歯形方向のツールマークがマイクロピッチングの引き金となっていることが観察される。またギヤにおいても歯すじ方向のツールマークの頂点がマイクロピッチングを引き起こしていることがわかる。この結果は、歯面の表面あらさとの相関関係が存在することを示している。

一方、高強度化を図った今回の結果は、歯面上にスカuffing 損傷およびマイクロピッチングは、認められない。

以上のことより、本研究で開発したスパイラルベベルギヤの高強度設計・製造法は、有効な手法であることが証明された。

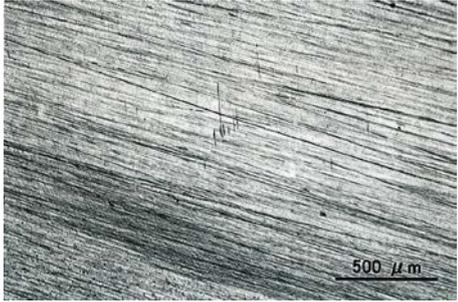
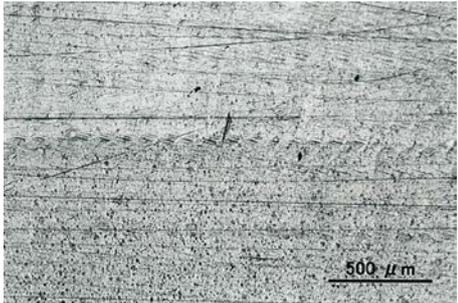
	前回の結果(サポイン前)	本研究結果
ピニオン歯面		
ギヤ歯面		
評価・判定	ピニオン、ギヤともにマイクロピッチングが観察された。判定:NG	両者ともに歯面に損傷が認められず健全である。判定:OK

図18. 負荷運転試験後の歯面の状況

## 最3章 全体総括

本プロジェクトの推進にあたっては、以下のようにプロジェクトメンバーの業務分担・協力体制により、研究を完了し目標通りの成果を達成することができた。

平成26年度より3年間に渡り、東京工業大学と新潟大学と産学連携により学術的な技術支援を頂きながらオリジナリティーを盛り込んだ解析ソフトウェアを開発した。それを基に(有)ツジテクノサービスの技術支援によりスパイラルベベルギヤの高強度設計を行うことができた。

加工においては、オークマ株式会社の開発部に外部アドバイザーとして本プロジェクトに参加してもらった。平成26年度にオークマ製同時5軸制御マシニングセンタ VTM-2000YB を導入した。本研究の成果を反映するために平成27年度にはハード、平成28年度はソフトの高精度対応の設備改造を行った。

平成28年度においては、主たる研究開発場所である(株)イワサテックにて、今までの研究成果に基づいて負荷運転に施す高強度スパイラルベベルギヤ2セットの製作を行った。

最後に、世界でもトップレベルの技術力を有するアドバイザーである川崎重工業の負荷運転装置にて100%負荷運転を実施した結果、歯面損傷もなく無事に試験が終了した。

### 3-1 結論（研究開発成果）

- 製作前に、本試験で提案したスカuffing強度向上対策としてピニオン、ギヤともに歯先R修整を施し、図面要求に従い歯当たり解析(TCA)を行って歯面形状を設計した。
- それに基づき、マシニングセンタによるミーリング仕上げ歯切り、ブラシ磨き加工を実施した。
- その結果、前回の負荷運転試験において発生した歯面のマイクロピッチングの起点となったツールマークと表面あらさは大幅に改善し、表面あらさの数値目標を1/2以下で達成した。
- 磨き加工後のピニオンとギヤの歯面形状誤差をTCAにフィードバックしてかみ合いの状況をチェックした結果、事前に行ったTCA通りに出来ていることを確認した。
- 最後に実際の歯当たりを確認した結果、本試験で製作した供試験体は、すべての目標を満足していることが立証された。
- 製作した供試験体をアドバイザーである川崎重工業の負荷運転装置にて100%負荷運転を実施した結果、歯面損傷もなく無事に試験が終了した。

以上の結果より、本研究にて開発した大型スパイラルベベルギヤの高強度設計・製造法の有効性が、証明された。

### 3-2 研究開発後の課題

- 今回の研究では、スパイラルベベルギヤの強度化の一つの手法としてブラシ磨き加工を導入してその有効性を明らかにした。今後、本手法をストレート・スキューギヤ、ダブルヘリカルギヤ、及び各種ウォームギヤに対しても展開して、高負荷能力向上をはかる。
- 今後は、粗歯切り加工の高効率化のために新たな加工法・工具の開発を進めていくつもりである。

マシニングセンタを用いた大型歯車の加工法は、未だ開発途上であり、更なる研究開発が必要である。再度サポインに挑戦して技術革新を推進したい。

### 3-3 事業化展開

#### 【想定する市場（現状、今後の動向）】

##### 事業化を想定する市場

想定される市場としては、高負荷能力が要求される大型スパイラルベベルギヤに特化したものである。特に圧延加圧ロール用の大型スパイラルベベルギヤは世界で唯一弊社しか製造できないオンリーワンの製品である。主なサプライチェーンとしては、製鉄プラントメーカーとして、三菱日立製鉄機械(株)、(株)ハセックギヤ、石炭微粉炭ミル装置メーカーとして(株)日立製作所、三菱重工業(株)、石橋製作所、B&W社(米国)、Lufkin社(米国)、船舶スクリー装置メーカーとして川崎重工業(株)、キャタピラー社、ロールスロイス社、Thrust Master社(米国)などが挙げられる。

##### 市場の規模と今後の見直し

日本歯車工業会の生産高の統計(平成27年度10月～28年9月)によると、日本国内のベベルギヤの平成27年度の市場規模は174億円であり、その内、1mを超える様な大型ベベルギヤの市場規模は、2.5%の4.4億円程度と予想している。米国の市場は日本市場の2倍、欧州市場は日本と同規模である事から世界市場の規模(日本市場含み)は18億円程度となる。この世界市場規模に対してイワサテック社売上は2.4億円であることから、シェアは13%である。さらに世界市場でのイワサテック社の生産高の順位は欧州のATA社、クリンゲルンベルグ社、米国のオーバトンに続き4位である。米国市場は世界の市場の半分の規模を占めて一方で、米国メーカーの売上もさほど大きくない。今後はイワサテック社として北米市場での販売拡大を押し進めて行く必要がある。

#### 【販売促進戦略】

##### 販売チャンネル

国内市場に対しては、世界でもトップレベルの技術力と実績のある川崎重工業(株)を中心に川下企業のニーズを反映し、(株)イワサテックで製造・販売を行う。新規顧客開拓については、川崎重工業(株)との実績を基に、(株)イワサテックの技術力をアピールして拡販に繋げる。

海外仕様に対しては、(株)イワサテックは2010年にアメリカのシカゴに現地事務所を開設し、北米市場での販売促進活動を更に加速できる。本研究開発が完了すれば、売上は倍以上になることが予想され世界トップ3の大型歯車メーカーになることができる。

##### 販売促進活動

従来の顧客に対しては、研究中においても得られた成果を技術資料としてまとめて常にコンタクトを取りながら営業活動をして行く。新規顧客に対しては、各川下企業の詳細な技術課題に丁寧に対応して行き、サンプル出荷を行い、販路を拡大して行く。また、学術的な正当性を立証するために、国内外の学会や技術雑誌に論文を定期的に投稿していく。

#### 【事業化担当者（所属・役職・氏名）】

株式会社イワサテック 常務取締役 古川 浩一

大型スパイラルベベルギヤの製造・販売

有限会社ツジテクノサービス 代表取締役社長 辻 勇

歯車のソフトウェア開発と加工用NCデータの生成

#### 〈事業化体制図〉

東京工業大学、新潟大学からはアドバイスを継続的に提供してもらい、(有)ツジテクノサービスは、(株)イワサテックの工作機械で使用するCAMや歯当たり解析ソフトウェア等を供給し、技術支援を行う。

国内営業は、基本的には(株)イワサテックが直接取引を行う。海外は、海外販社であるイワサテックUSAを通じて取引を行う。国内外ともに新規顧客に対しては、サンプル出荷を行い、実際に本研究の成果物を実機に組み込み、他社との優位差を確認してもらう。

