

令和4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

「高速鉄道用高強度・高耐久性円弧歯すじ歯車の設計と革新的自動化製造技術の  
開発」

研究開発成果等報告書

令和5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 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 【1. 円弧歯すじ歯車の基本諸元決定法の確立への対応】
- 【2. マシニングセンタによる加工法の開発への対応】
- 【3. マシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の開発への対応】

### 最終章 全体総括

- 3-1 複数年の研究開発成果
- 3-2 アドバイザーによる講評
- 3-3 研究開発後の課題
- 3-4 事業化展開について

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### ○研究開発の概要・背景(これまでの取組など)

従来、鉄道駆動の歯車箱(図1)には、ヘリカルギヤ(図2)が用いられてきた。ヘリカルギヤを用いる理由としては、平歯車と比較して重なりかみ合いが多い、そのため運転時の噛み合う歯数が増加して低振動・低騒音に効果があるためである。しかし、ヘリカルギヤは運転時にスラスト力が発生(図3)するため小・大歯車ともに円錐ころ軸受を使用してスラスト力を両脇から挟み込んで抑える必要がある。運転時の熱の発生と外気温の急激な変化により鉄製の歯車とアルミ合金製歯車箱の膨張・収縮により軸受のスラスト力も大幅に増減を繰り返すことで軸受損傷を起こしてしまい運転が出来ない事故が起きてしまう。現状においては歯車の寿命は無量大であるが、軸受損傷を防ぐために定期的に軸受を交換する必要がある。

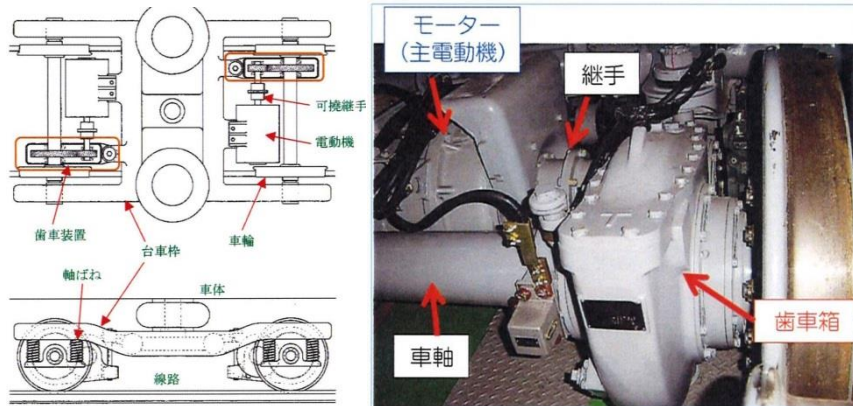


図1. 鉄道駆動用歯車箱

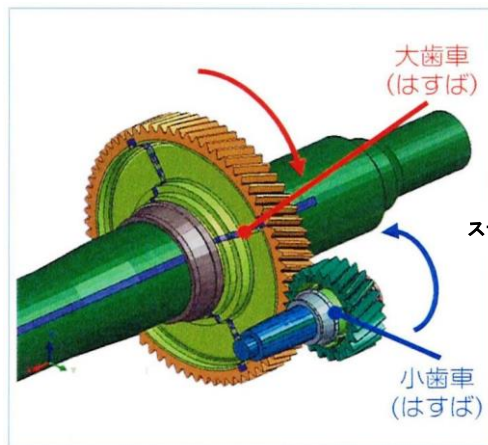


図2. 歯車箱に用いられるヘリカルギヤ

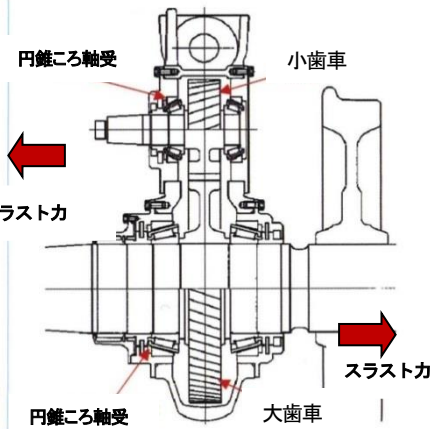


図3. スラスト力の発生

### 【従来技術の問題点】

近年、日本の新幹線の最高スピードは、300km/Hr から 360km/Hr と高速化を目指している。海外においても中国の「一帯一路」経済圏構想(図4)のように極寒の高山から灼熱の砂漠までを縦断するインフラ整備が進められている。その運転における耐久性の向上は益々強く求められる。このように鉄道用歯車箱の高強度・高耐久性は、今後世界の陸上輸送の主力となる鉄道輸送において最も重要な課題である。日本の新幹線に用いられる歯車箱の高強度・高耐久性は、新幹線事業の海外進出のためには達成しなければならない重要なキーテクノロジーである。



図4. 中国の一帯一路経済圏構想

130カ国が参加する巨大経済圏構想  
(現代版シルクロード)  
3年後中国・重慶からドイツ・デュクスブルグまで1日13便の列車を通す予定

**【研究開発動向】**

現在、鉄道用歯車箱にはヘリカルギヤ(ハスバ歯車)が使用されているが、世界では図5に示すように高速鉄道用歯車箱の高強度・高耐久性に対してスラスト力が発生しないダブルヘリカルギヤ(ヤマバ歯車)を採用して歯車箱の軸受を円錐ころ軸受から円筒ころ軸受に変更することにより軸受破損を無くして歯車箱の省メンテナンス化により高強度・高耐久性を目指している。しかし、その製造法が確立できていないため実用化は困難な状況である。(量産不可能)

株式会社イワサテックでは、低振動・低騒音でかつ高強度・高耐久性で量産可能な図6に示す円弧歯すじ歯車の基礎的な試作を独自に行い、川下会社である東洋電機製造(鉄道車両メーカー)に依頼して時速 305km の負荷運転試験を実施した結果、騒音が 110dB 以上から 100dB 以下に低減した。また、歯車箱の軸受を円錐ころ軸受から円筒ころ軸受に変更することが出来た。本サポインは、その革新的な円弧歯すじ歯車の製造技術を確認し、量産化・実用化を実現することを目指している。

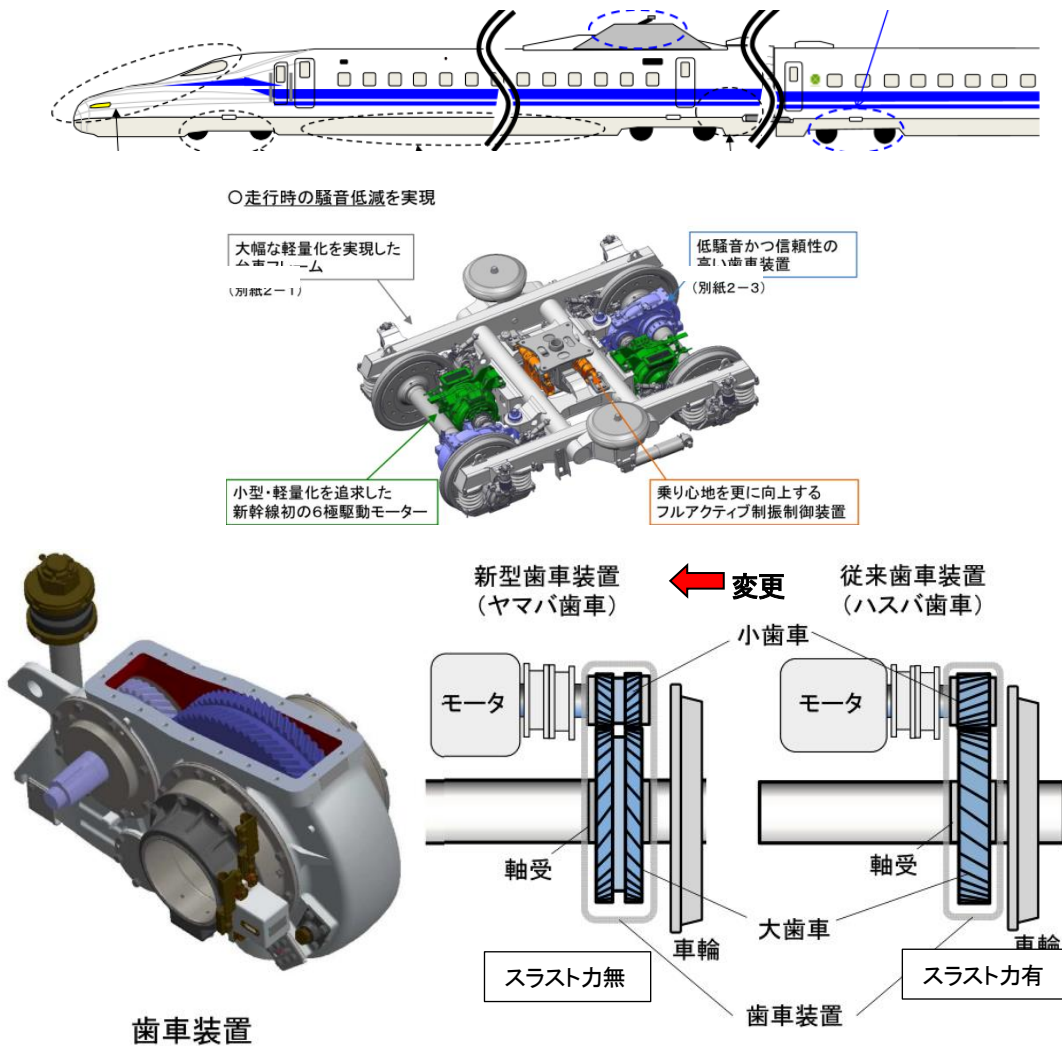


図5. 現在の高速鉄道用歯車箱の低騒音・低振動かつ省メンテナンス化対策



歯車箱に組み込まれた円弧歯すじ歯車

図6. イワサテック独自で試作・開発中の円弧歯すじ歯車

**【関連特許】**

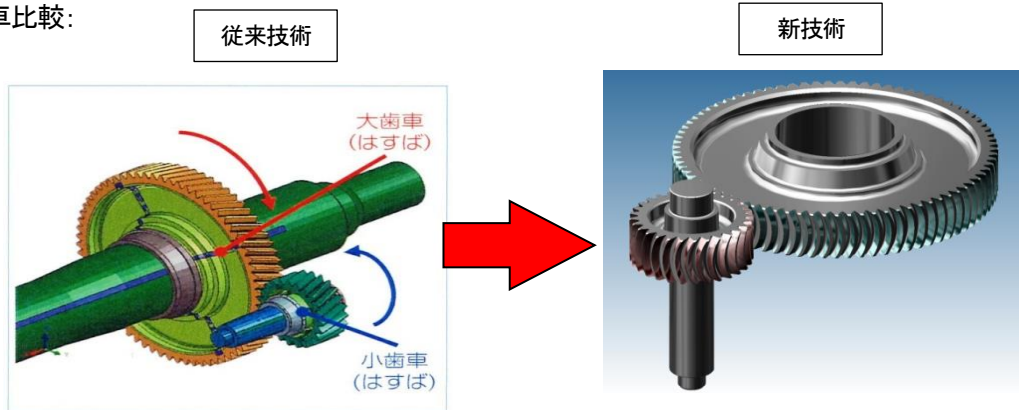
2019年3月8日に、川下会社である東洋電機製造と共同で「円弧歯すじ歯車を鉄道車両用歯車箱に使用する」件で国際特許を申請した。[国際出願番号:PCT/JP2019/009421]

**○従来技術での課題**

目的:

今まで実用化されていなかった円弧歯すじ歯車の実用化および自動化製造技術の確立を目指す。ヘリカルギヤから円弧歯すじ歯車に交換することより、軸受も円錐ころ軸受に変えることが出来、鉄道用歯車箱の省メンテナンス化を達成して歯車箱の高強度・高耐久性を実現する。製造面では中型の高強度・高耐久性歯車の自動製造法を開発すれば、日本の製造業の競争力アップに繋がる。(工作機械などにも展開が可能)

従来の歯車比較:

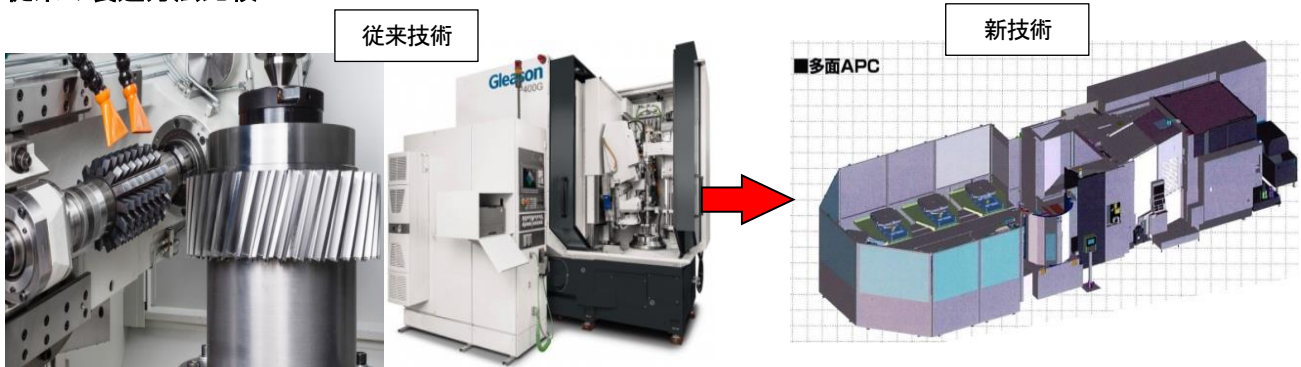


**【従来技術:ヘリカルギヤ】**軸方向にスラスト荷重が発生することにより円錐ころ軸受を使用しており、定期的に交換する必要がある。

**【新技術:円弧歯すじ歯車】**かみ合い率は2以上で振動・騒音が低い。加えて、スラスト力が発生しないことにより円筒ころ軸受が使用可能になり軸受寿命が格段に向上する。

	従来技術	新技術
軸受破損リスク	有り	無し
歯車箱メンテナンス	必要	省メンテナンス化
生産性・製造法	熟練者による専用機加工	マシニングセンタによる自動・無人加工

**従来の製造方法比較:**



**【NC ホブ盤】 【NC 歯車研削盤】**  
熟練作業者が歯切り・歯面研削を各専用加工機にて個別に加工

**【自動加工】**  
歯切り・歯面研削を10面 APC で24時間自動加工

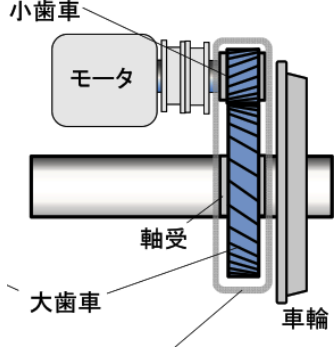
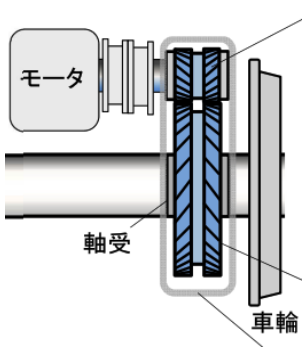

本研究は、鉄道用歯車箱の高強度・高耐久性(省メンテナンス化)とそれに用いられる歯車の生産工程の革新・自動化の二項目を高度化目標としている。

前項で述べたように現在の歯車箱にはヘリカルギヤが使用されているため、運転時にはスラスト力が発生し、それを支えるために円錐ころ軸受が用いられる。そのため軸受に負荷がかかり定期的に交換する必要がある。それに対して現在検討されているダブルヘリカルギヤと本研究で提案する円弧歯すじ歯車は、スラスト力が発生しないため

円筒ころ軸受を用いることが出来、軸受の交換が不要となり歯車箱の省メンテナンス化が図れる。

ダブルヘリカルギヤの生産性は左右ねじれのヘリカルギヤの距離が20mmもなく、歯切り工具と研削砥石の外径が極小(70mm以下)となり加工効率が非常に悪く、現行のヘリカルギヤの3から5倍の加工時間がかかるため量産対応が困難である。そこで本研究では、日本の得意分野であるマシニングセンタの自動化技術を活用して円弧歯すじ歯車の24時間自動加工技術の確立を高度化目標とする。

表1. 鉄道用歯車箱に使用される歯車の比較

	ヘリカルギヤ (ハスバ歯車)	ダブルヘリカルギヤ (ヤマバ歯車)	円弧歯すじ歯車 (Curvilinear Gear)
歯車形状			
特徴	歯すじがつるまき線である円筒歯車	左右ねじれのヘリカルギヤが組合さった円筒歯車	歯すじが円弧状である円筒歯車
振動・騒音	○:低い (110-115dBA)	◎:より低い (100dBA)	◎:より低い (95-100dBA)
スラスト力	×:発生する	◎:発生しない	◎:発生しない
歯車箱軸受	円錐ころ軸受	円筒ころ軸受	円筒ころ軸受
エ. 高耐久性	×:定期的軸受交換	◎:省メンテナンス化	◎:省メンテナンス化
加工精度	◎:JIS 0	△:JIS 1~2	◎:JIS 0
カ. 自動化	△:専用機単体加工のため自動化出来ない。	×:加工困難なため自動化出来ない。	◎:マシニング加工により自動・無人加工出来る。
総合判定	△	○	◎



本サポイン開発部分

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

(ハ)機械制御に係る技術に関する事項

1 機械制御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川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

エ. 高強度・高耐久性

カ. 生産工程の改善・自動化

【1. 円弧歯すじ歯車の基本諸元決定法の確立】

形状・寸法の精度向上するために創成理論に基づいた無負荷時の歯当たり解析と最適歯面修整方法の検討及び強度計算、円弧歯すじ歯車の歯車諸元と歯面修整量の決定が必要であるが、実用化出来ない。

【2. マシニングセンタによる加工法の開発】

形状・寸法の精度向上した円弧歯すじ歯車を高能率に製造を行うためにはマシニングセンタを用いて粗歯切り及び仕上げ歯面研削する加工技術が必要であるが実用化はまだ出来ない。

【3. マシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の開発】

現在のヘリカルギヤの製造法は小・大歯車は別々の機械で加工することにより最低でも専用機4台が必要となる。各々の機械は熟練した作業員により段取り、ワーク着脱と芯出し、砥石と歯溝の位相合せ等煩雑な作業が必要とされ自動化は不可能であったため量産化が実現出来ない。

【高度化目標】

(八)機械制御に係る技術に関する事項

(3)川下分野横断的な共通の事項

②高度化目標

エ. 高強度・高耐久性のための技術の向上

カ. 生産工程の改善・自動化のための技術の向上

従来、このような高強度・高耐久性歯車は、歯車専用加工機を用いて熱処理前の粗歯切り工程と熱処理後の歯面研削工程で生産している。各々の工程は単独の高価な専用機で加工され、小・大歯車は別々の機械で加工することにより最低でも4台必要となる。また、各々の機械は熟練した作業者により段取り、ワーク着脱と芯出し、砥石と歯溝の位相合せ等煩雑な作業が必要とされ自動化は不可能であった。

そこで今回汎用性の優れたマシニングセンタを用いて円弧歯すじ歯車の粗歯切り・歯面研削を2台の加工機で加工可能にすることにより、FMSのようなIoT技術を利用した多面パレット加工ラインにすることで世界で初めての中型の高強度・高耐久性の円弧歯すじ歯車製造の自動化技術を確立する。その結果、高品質(JIS 0)かつ耐久性(メンテナンスが少ない)の高く、生産性が高い(40set/月→100set/月以上)円弧歯すじ歯車の開発・製造を実現し、鉄道用歯車箱に円弧歯すじ歯車を実用化する。

円弧歯すじ歯車は、今まで製造法が開発されていないため実用化されていない。本サポインにて製造法が確立されれば、航空機・船舶、産業機械からEV車などの高強度・高耐久性でかつ低騒音・低振動の歯車装置が必要な多くの分野への展開が期待できる。

○実施結果

下記の技術目標を達成することで当初の目標を達成した。

【技術的目標値】

【1. 円弧歯すじ歯車の基本諸元決定法の確立への対応】

【1-1 創成理論に基づいた無負荷時の歯当たり解析プログラム(TCA)の開発】

現行のヘリカルギヤと交換可能な円弧歯すじ歯車の基本諸元を決定した。

【1-2 最新のCAEによる負荷時TCAによる最適歯面修整方法の検討及び強度計算】

歯車強度を従来のヘリカルギヤの10%以上の高強度化を実現した。

【2. マシニングセンタによる加工法の開発への対応】

【2-1 創成原理に基づいた粗歯切り及び歯面研削用マシニングセンタNCデータの生成】

マシニングセンタ用の粗歯切りと仕上研削加工のNCデータを生成した。

【2-2 仕上歯面研削用カップ型CBN電着砥石の設計・製作】

歯車諸元に基づきカップ型CBN電着砥石の設計・開発を行った。

表面粗さ目標値: Ra0.6 以下を達成した。

【2-3 粗歯切り用カップ型フェースミルカッターの設計・製作】

加工時間目標値: 720min から 240min に短縮した。

2-1, 2-2, 2-3の開発を行うことにより、以下の加工時間・加工精度を達成した。

	ダブルヘリカルギヤ			新規 円弧歯すじ歯車		
	粗歯切り時間	歯面研削時間	加工精度	粗歯切り時間	歯面研削時間	加工精度
小歯車	360 min.	240 min.	JIS 2	120 min.	100 min.	JIS 0
大歯車	720 min.	480 min.	JIS 2	240 min.	180 min.	JIS 0
判定	×	×	×	○	○	○

今回の比較対象は、ヘリカルギヤではなくスラスト力が発生しないダブルヘリカルギヤである。ダブルヘリカルギヤと比較して円弧歯すじ歯車は、生産性と加工精度共に優れていることを立証した。

【3. マシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の開発への対応】

【3-1 粗歯切りと仕上歯面研削の自動化加工システムの構築】

従来よりも生産性が高いことを立証するために10面APC2基を開発・構築した。

【3-2 パレットチェンジ時のワーク芯ずれを補正するプログラムの開発】

3-1, 3-2の開発を行うことにより、以下に示す量産能力を達成した。

(1日24時間機械稼働)

[生産能力の考え方]

	粗歯切り	仕上研削
小歯車	120x4=480 min.	100x5=500 min.
大歯車	240x4=960 min.	180x5=900 min.
1日出来高	4 set	5 set

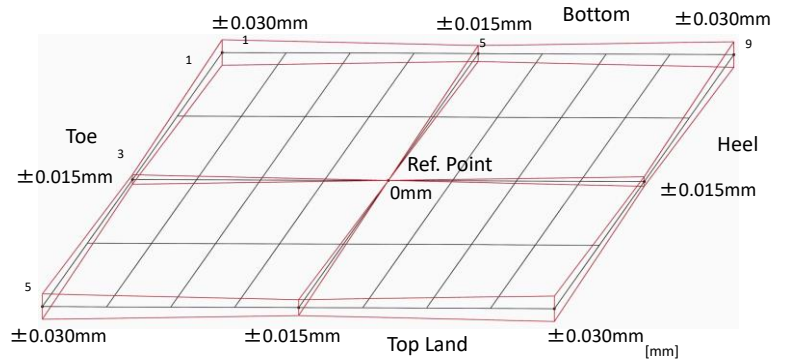
・マシニングセンタで10面APCを2基構築した場合、  
**4set\*25日/月=100set/月**の生産能力がある。

・従来の生産能力は、自動・無人加工が出来ないため、  
**2set\*20日/月=40set/月**の生産能力がある。

【3-3 本技術による高精度, 高強度の円弧歯すじ歯車の試作・品質評価】

今回開発するマシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術により、高精度, 高強度の円弧歯すじ歯車が下記の精度で加工できることを確認した。また、自動歯面研削焼けのチェックを行う技術を確認した。高強度化については既に試作で川下からの良好な評価を頂いているため、今回全ての技術目標値が達成することで実用化を立証した。

- ・研削焼けが無いこと
- ・ピッチ精度: JIS 0級
- ・三次元測定機による歯面形状精度  
(歯当たりに影響を及ぼさない形状公差)
- ・歯面四隅形状公差:  $\pm 0.030\text{mm}$



歯面形状公差

## 1-2 研究体制

### 【研究開発の実施体制】

図7に本研究の実施体制を示す。

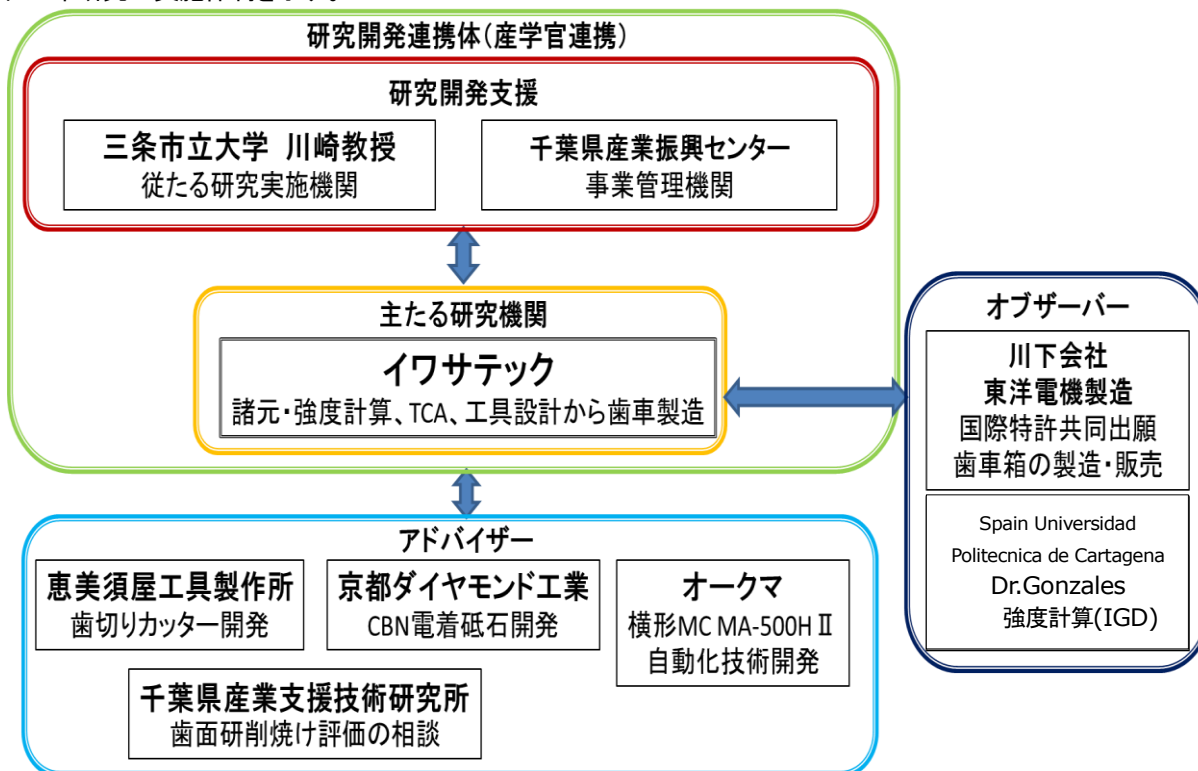


図7. 研究開発の実施体制

### 【体制及び役割分担】

	機関名・研究開発責任者	役割分担
研究開発連携体	株式会社イワサテック PL 代表取締役社長 辻 勇 技術顧問 北條 春夫 (東京工業大学 名誉教授)	本事業全般に関する設計・試作開発、製造技術開発、実証実験、検証評価、販路開拓を担当する。また、総括研究代表者として研究開発の計画、実施及び研究成果管理を総括する。担当サブテーマ:【1-1,2】【2-1,2,3】【3-1,2,3】
	公立大学法人三条市立大学 川崎 一正 教授	負荷時歯当たり解析、最適歯面修整法とFEMによる強度計算法の技術確立の指導と評価を担当する。また、SLとしてPLを補佐し、必要に応じて代理を務める。担当サブテーマ:【1-2】【3-3】
	千葉県産業振興センター 理事長 中村 耕太郎 産学連携推進室 副室長 渡部 由美子 研究開発コーディネーター 松井 敬之	事業管理機関として研究開発計画等の運営管理等や国との総合的な連絡窓口を行う。
アドバイザー	恵美須屋工具製作所 代表取締役 倭 隆英	歯切りカッター開発のアドバイスを頂く。支援サブテーマ:【2-3】
	京都ダイヤモンド工業 代表取締役 森田 英嗣	CBN 電着砥石開発のアドバイスを頂く。支援サブテーマ:【2-2】
	オークマ 部長 金本 克己 主任技師 安井 義輝	10面 APC 自動化技術開発のアドバイスを頂く。支援サブテーマ:【3-1,2】
	千葉県産業支援技術研究所 次長 石川宏美	・歯面研削焼け評価のアドバイスを頂く。【3-3】
オブザーバー	東洋電機製造	川下製造販売業者としてサンプル出荷・評価を行い、国内外の市場のニーズと販路開拓の支援を頂く。
	Universidad Politecnica de Cartagena in Spain Dr.Gonzales	FEMによる強度計算法のアドバイスを頂き、品質保証の支援を頂く。 支援サブテーマ:【1-2】

### 1-3 成果概要

#### 【1. 円弧歯すじ歯車の基本諸元決定法の確立への対応】

量産時のために幾何学的創成原理に則った円弧歯すじ歯車の基本諸元を決定した。その諸元を基に構造解析(CAE)と負荷時のかみ合い解析を行い、強度計算を実施することで詳細な歯面修整量を決定する手法を確立した。

#### 【2. マシニングセンタによる加工法の開発への対応】

本サポインでは、円弧歯すじ歯車の実用化に主眼を置いている。高強度・高耐久性が主目的であるが、量産性(QCD)が伴わなければ実用化出来ない。日本の得意分野である汎用性の高い工作機械を用いた自動化製造ライン(FMS, CELL等)は、既に30年以上前から構築されている。一方中型高精度歯車の製造は、未だに歯車専用加工機で熟練作業者は、各々の機械を単体で操作している。

そこで今回は、自動化加工ラインを目指して、汎用性が高いマシニングセンタにより小・大歯車の粗歯切り用と歯面研削用の各々の機械で加工できる技術を開発・構築した。

#### 【3. マシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の開発への対応】

前項では、マシニングセンタによる小・大歯車の粗歯切りと仕上歯面研削の加工法の開発を行った。早期事業化推進のためにサポイン1年目に試作準備を行い、2年目に大手鉄道会社にサンプル出荷を開始した。前述したように日本の得意分野である汎用性の高い工作機械を用いた自動化製造ライン(FMS, 多面APC等)は、既に30年以上前から構築されている。その技術を最大限に利用して下記に示すような無人加工を実現した。

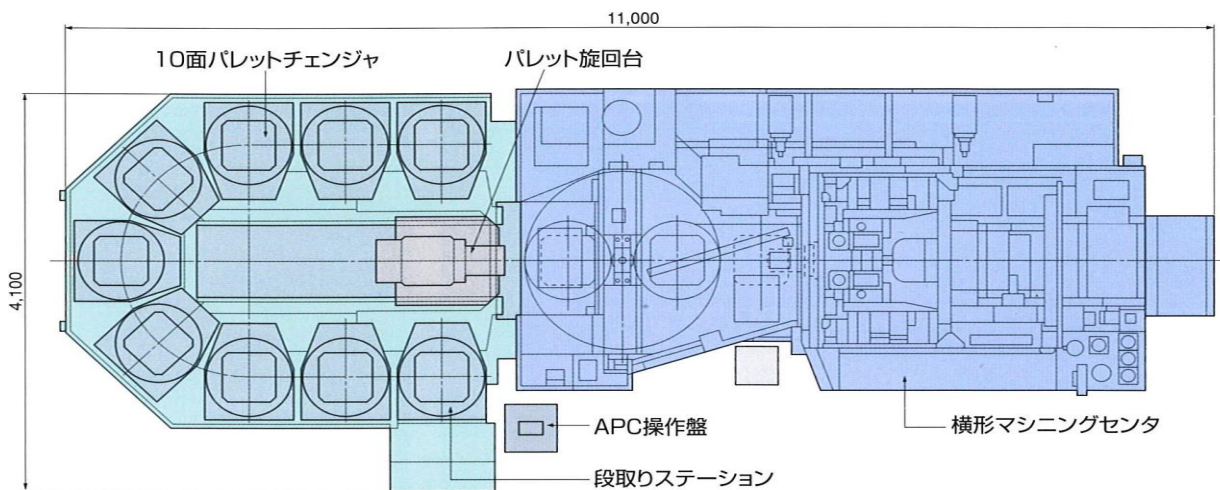


図8 小・大歯車の粗歯切りと仕上歯面研削の10面APC構想

### 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

### ○研究開発の取組内容

#### 【1. 円弧歯すじ歯車の基本諸元決定法の確立への対応】

量産時のために幾何学的創成原理に則った円弧歯すじ歯車の基本諸元を決定した。その諸元を基に構造解析(CAE)と負荷時のかみ合い解析を行い、強度計算を実施することで詳細な歯面修整量を決定する手法を確立した。

#### 【1-1 創成理論に基づいた無負荷時の歯当たり解析プログラム(TCA)の開発】

小歯車と大歯車のかみ合いにおいて仮装円弧ラックを媒介として創成理論に基づいた歯面形状を定義して無負荷運転時における歯当たりと回転伝達誤差を解析する歯当たり解析プログラム(TCA)の開発(図9)を行い。各々の歯車に適正な歯面修整を施すことにより良好な歯当たりとなるように歯面設計(図10)を行った。



図9 歯当たり解析プログラム(TCA)の開発

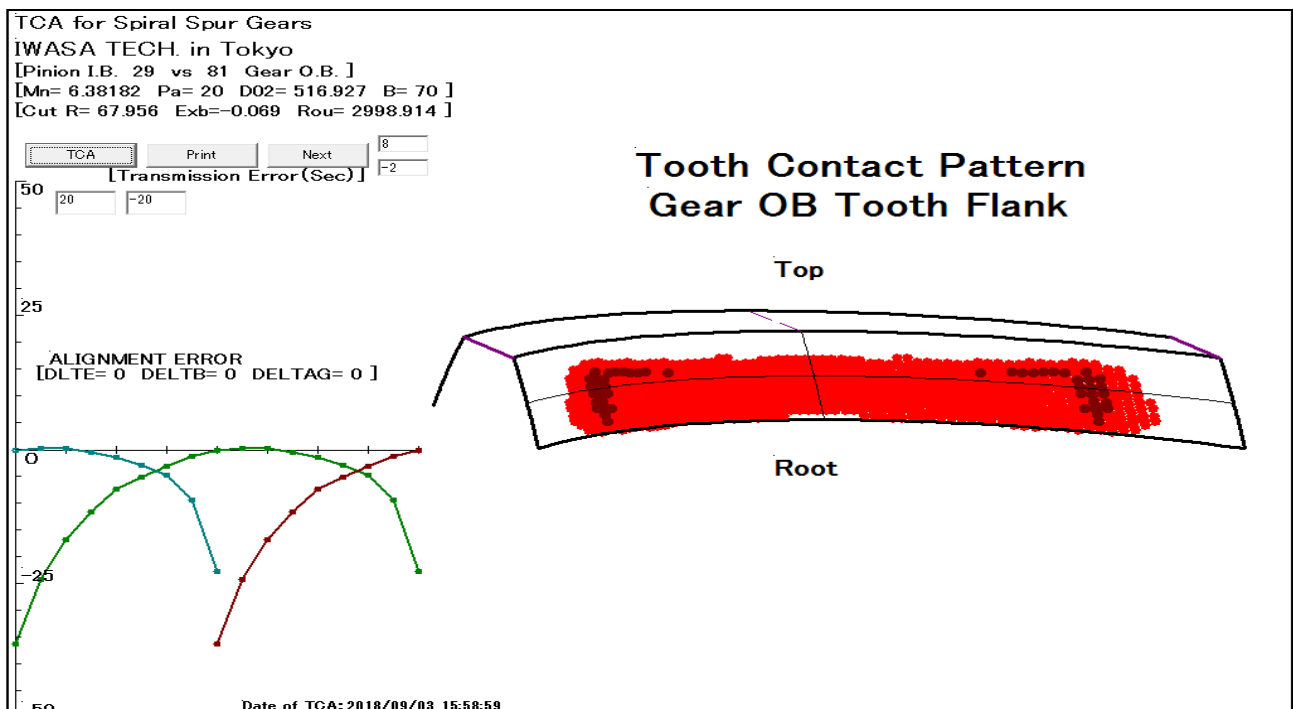


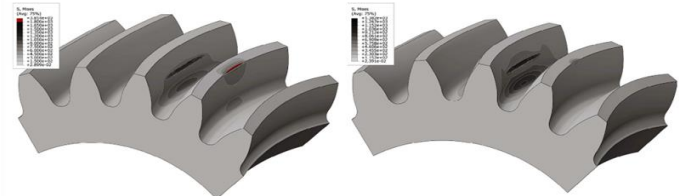
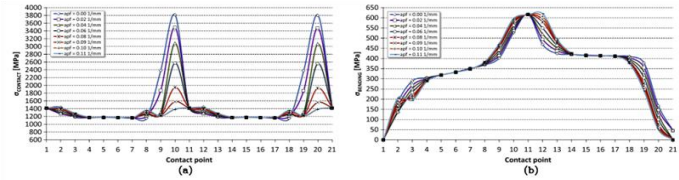
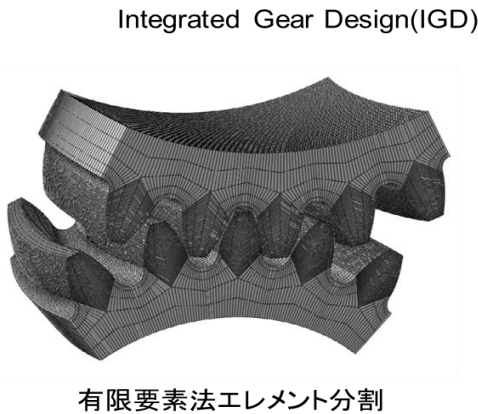
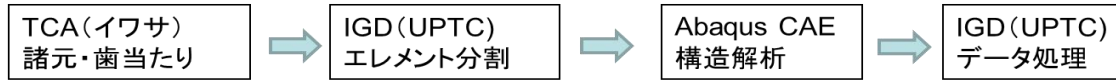
図10 歯車に適正な歯面修整を施すことにより良好な歯当たりとなるように歯面設計

【1-2 最新のCAEによる負荷時TCAによる最適歯面修整方法の検討及び強度計算】

下記にTCA(歯当たり解析プログラム)から強度計算までの流れを示す。Universidad Politecnica de Cartagena(Spain)のDr.Gonzalezの支援で本技術を開発した。FEMのエレメント分割を行い最新のCAE(Abaqus)を用いて構造解析し、その結果に基づき、今回試作を行う円弧歯すじ歯車の歯車諸元と詳細な歯面修整法を決定した。

下記に円弧歯すじ歯車の負荷時の歯当たり解析と強度計算結果(図11)を示す。

Dr.Alfonso (RIT), Dr.Gonzales(UPTC)と共同開発、モニターとしてIGD使用



面圧と歯山強度計算結果

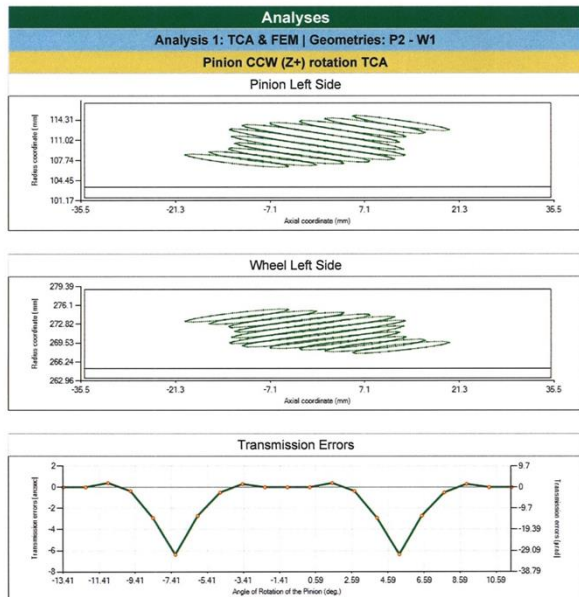
図11 円弧歯すじ歯車の負荷時の歯当たり解析と強度計算結果



Summary

Project title: HELICAL GEAR DRIVE  
Licensed to: GITAE

Company: UPCT



Summary

Project title: HELICAL GEAR DRIVE  
Licensed to: GITAE

Company: UPCT

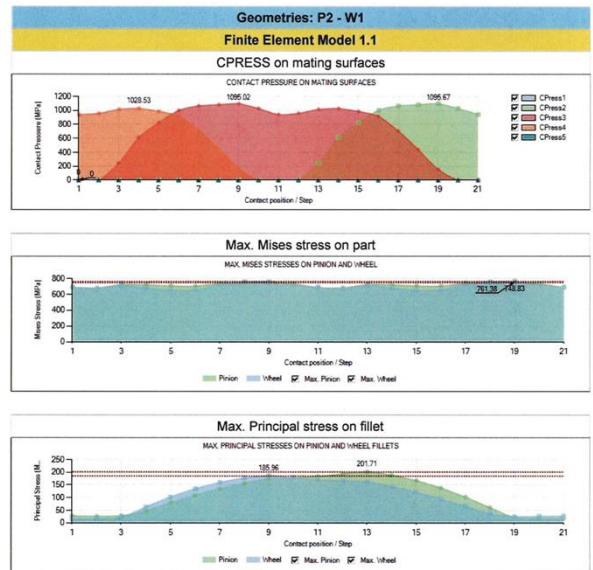


図12 現行ハスバ歯車の強度計算結果

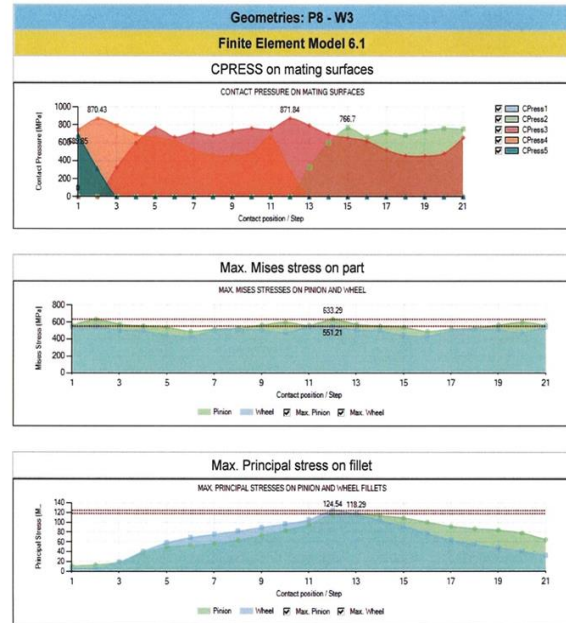
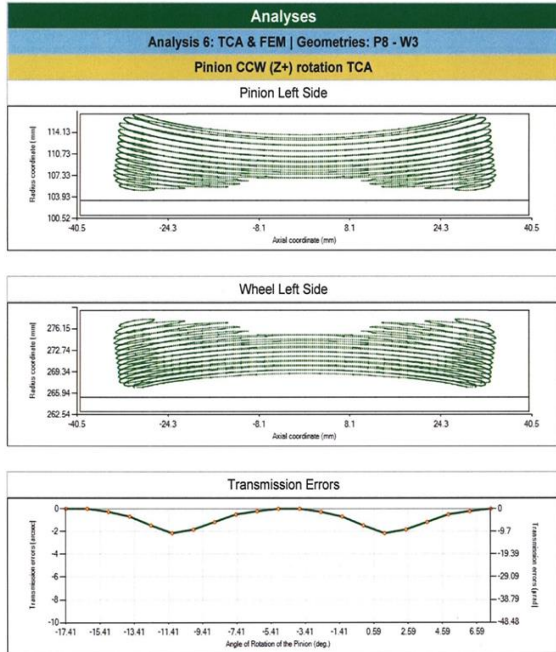


図13 円弧歯すじ歯車の強度計算結果

	許容値	現行ハスバ 歯車	円弧歯すじ歯車	
			CCW回転 P凹XG凸	CW回転 P凸XG凹
歯面面圧	3000Mpa	1095.02Mpa (SF=2.74)	871.84Mpa (SF=3.44)	798.45Mpa (SF=3.76)
Mises stress		P:761.38Mpa G:748.83Mpa	P:633.29Mpa G:551.21Mpa	P:583.67Mpa G:554.57Mpa
歯元曲げ応力	P:580Mpa G:340Mpa	P:201.71Mpa (SF=2.88) G:185.96Mpa (SF=1.83)	P:124.54Mpa (SF=4.66) G:118.29Mpa (SF=2.87)	P:124.41Mpa (SF=4.66) G:119.14Mpa (SF=2.85)

●強度比較結果：円弧歯すじ歯車 > 現行ハスバ歯車(技術目標達成)  
(歯面面圧<Mises stress の場合、ピッチング等の内部損傷の可能性はある。)

図14 円弧歯すじ歯車の強度計算結果

【2. マシニングセンタによる加工法の開発への対応】



図15. 横型マシニングセンタ(オークマ ma-500H II)

本サポインでは、円弧歯すじ歯車の実用化に主眼を置いている。高強度・高耐久性が主目的であるが、量産性(QCD)が伴わなければ実用化出来ない。日本の得意分野である汎用性の高い工作機械を用いた自動化製造ライン(FMS, CELL 等)は、既に30年以上前から構築されている。一方中型高精度歯車の製造は、未だに歯車専用加工機で熟練作業者は、各々の機械を単体で操作している。そこで今回は、自動化加工ラインを目指して、左記に示すマシニングセンタ(図15)により小・大歯車の粗歯切り用と歯面研削用の各々の機械で加工できる技術を開発・構築した。

【2-1 創成原理に基づいた粗歯切り及び歯面研削用マシニングセンタNCデータの生成】

マシニングセンタを用いて円弧歯すじ歯車の粗歯切り及び仕上げ歯面研削を行う場合、以後に述べるカップ型工具を図16に示すように工具と歯車との間で接線方向のラックアンドピニオンの創成運動を機械上に再現する必要が有る。図17に事前に株式会社イワサテックにて円弧歯すじ歯車の予備試作を行った時の写真を示す。このような創成運動を実際に機上で行うために、専用のNCデータ生成プログラムを開発した。

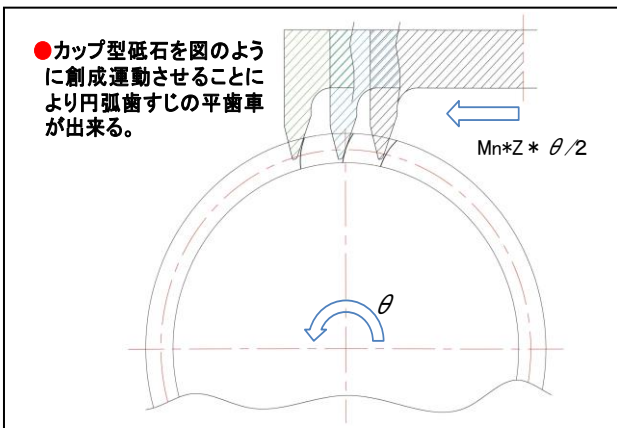


図16. 円弧歯すじ歯車の創成原理

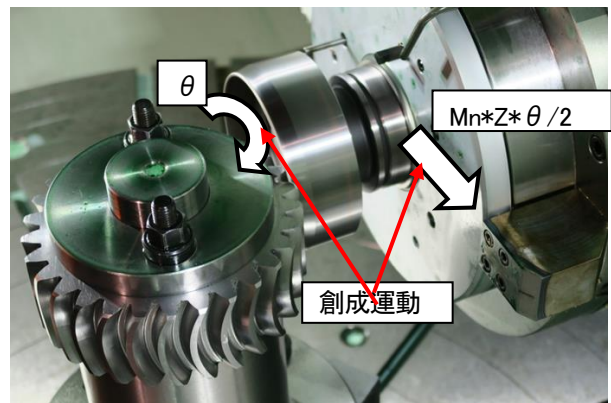


図17. 小歯車の歯面研削状況(予備試作)

下記に示す円弧歯すじ歯車の創成原理に基づいた粗歯切り及び歯面研削用マシニングセンタNCデータを生成するNCデータプロセッサを開発した。

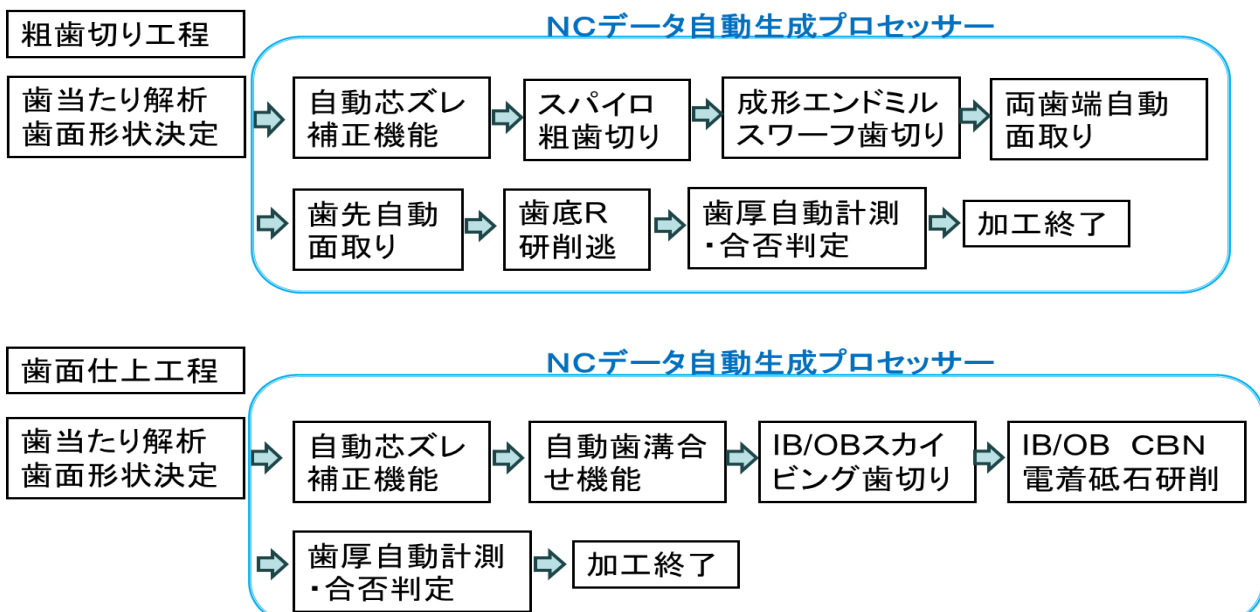


図18 IEA/ISO に基づいた粗歯切りと歯面研削のNCデータを自動生成するプロセッサの開発

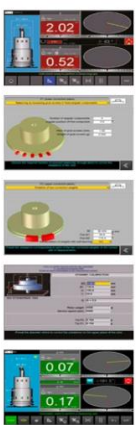
【2-2 仕上歯面研削用カップ型CBN電着砥石の設計・製作】



株式会社イワサテックの予備試作時に製作したCBN電着砥石を図19に示す。IB(Inside Blade), OB(Outside Blade)共に#100の砥粒を電着してそのまま何もせずに歯面研削試験を行った。歯面形状と表面あらさに改善点が見られた。本サポインでは、台金形状、粒度の選定、ダイヤモンド砥石を用いた形状ツルーイングと動的バランス取り等の開発を行い、歯面形状と表面あらさの大幅な改善を図った。

図19. 予備試作に用いられた仕上歯面研削CBN電着砥石

- ・高精度高能率かつ歯面に研削焼けを起こさないカップ型CBN電着砥石の設計・製作をアドバイザーである京都ダイヤモンド工業と共同開発を行い完成した。
- ・高速回転数 12,000rpm で研削するためダイナミックバルンサーにて G0.4 以下に動バランス取りを行った。

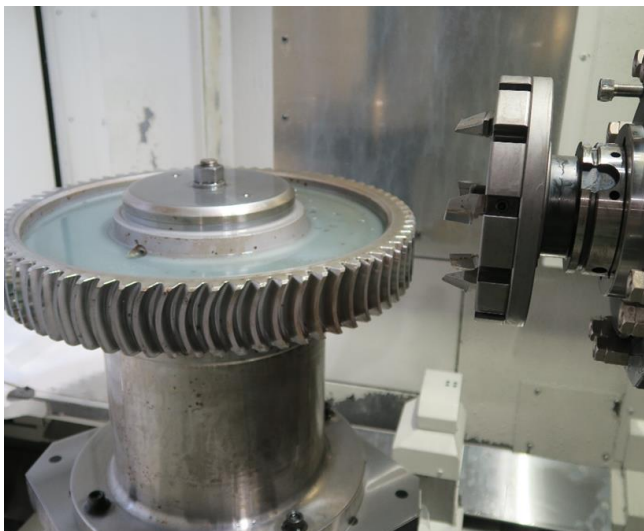


ダイナミックバルンサー CEMB社 TB7

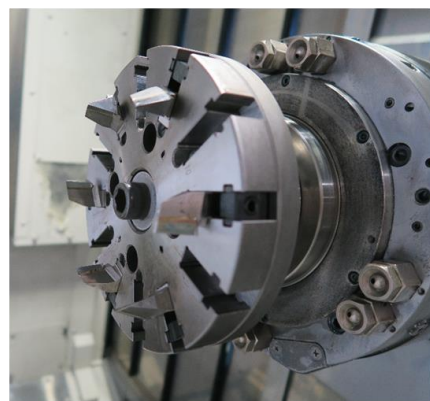
バランス取りしたCBN電着砥石

○円弧歯すじ歯車 仕上加工の効率化及び研削焼け防止対策

- ・カップ型超硬フェースミルカッターの設計・製作をアドバイザーである恵美須屋工具製作所と共同開発を完了し浸炭焼入れ後の熱処理歪を除去するスカイビング加工のテストを行い、有効性を確認した。



スカイビング加工による熱処理歪除去



カップ型超硬フェースミルカッター

本年度導入した光学式ツールプリセッターを使用してカッター半径を調整

**【2-3 粗歯切り用カップ型フェースミルカッターの設計・製作】**

株式会社イワサテックの予備試作時は、図20に示すように5軸制御複合加工機(オークマ B400)を用いてエンドミルにより浸炭焼入れ前の粗歯切り加工を行った。加工時間は、図のようにφ2mmの細いエンドミルで加工したため切削条件を落として1ヶあたり11時間以上かかった。量産時の目標加工時間は2時間以内である。そこで本サポインでは、加工効率と精度向上を目的として図21に示すスパイラルベベルギヤの歯切りに用いられるグリーンソン式フェースミルカッターの設計・製作を行った。

さらに下記を行うことで、量産時の目標加工時間を達成した。

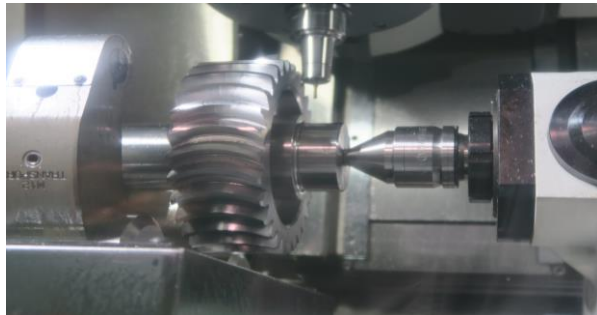


図20. エンドミルによる予備試作時粗歯切

○円弧歯すじ歯車 粗歯切り(粗溝加工)の効率化・高精度化

スローアウェイチップを用いた8条カップ型フェースミルカッター(スパイロカッター)の設計・製作の開発を行い、テスト加工を実施した。その結果、粗歯切り(粗溝加工)が非常に安定して効率化を図ることが出来た。



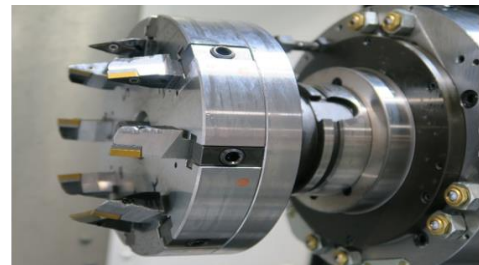
図21. 粗歯切り用グリーンソン式フェースミルカッター



スパイロ加工による粗歯切り

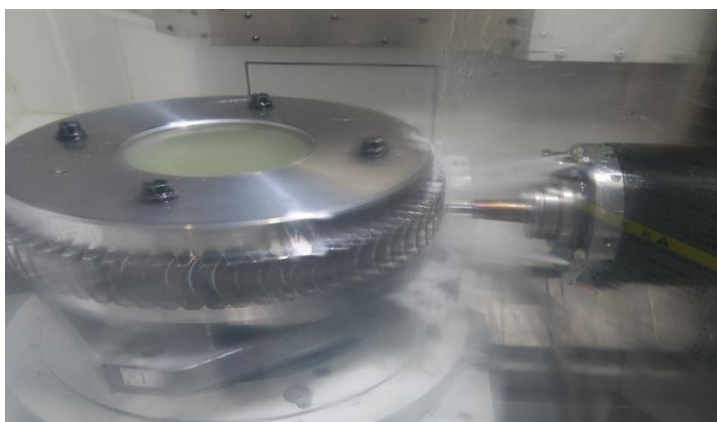
図22 スローアウェイチップを用いた8条カップ型フェースミルカッター(スパイロカッター)のテスト加工風景  
○円弧歯すじ歯車 歯切り加工の効率化・高精度化

スパイロ加工により粗歯切りを行った後に、歯幅中央部歯形に対応した成形エンドミルをIB/OB 歯面のピッチライン上において歯すじ方向にスワーフ加工を行うことにより歯切りの効率化・高精度化を図った。

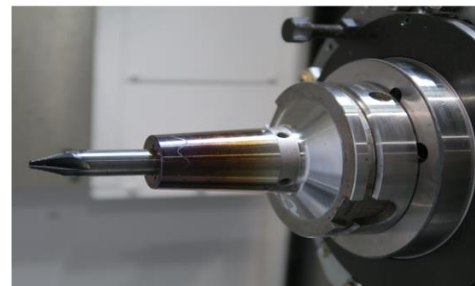


スローアウェイチップを用いた  
8条スパイロカッター

本年度導入した光学式ツールブリセッターを使用してカッター半径を調整



超硬成形エンドミルを用いた歯面スワーフ加工



超硬成形エンドミル

本年度導入した工具  
焼きばめ装置を使用

図23 成形エンドミルをIB/OB 歯面のピッチライン上において歯すじ方向にスワーフ加工

【3. マシニングセンタによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の開発への対応】

前項では、マシニングセンタによる小・大歯車の粗歯切りと仕上歯面研削の加工法を開発を行った。早期事業化推進のためにサポイン1年目に試作準備を行い、2年目に大手鉄道会社にサンプル出荷を開始した。前述したように日本の得意分野である汎用性の高い工作機械を用いた自動化製造ライン(FMS, 多面APC等)は、既に30年以上前から構築されている。その技術を最大限に利用して図24に示すような無人加工を実現した。

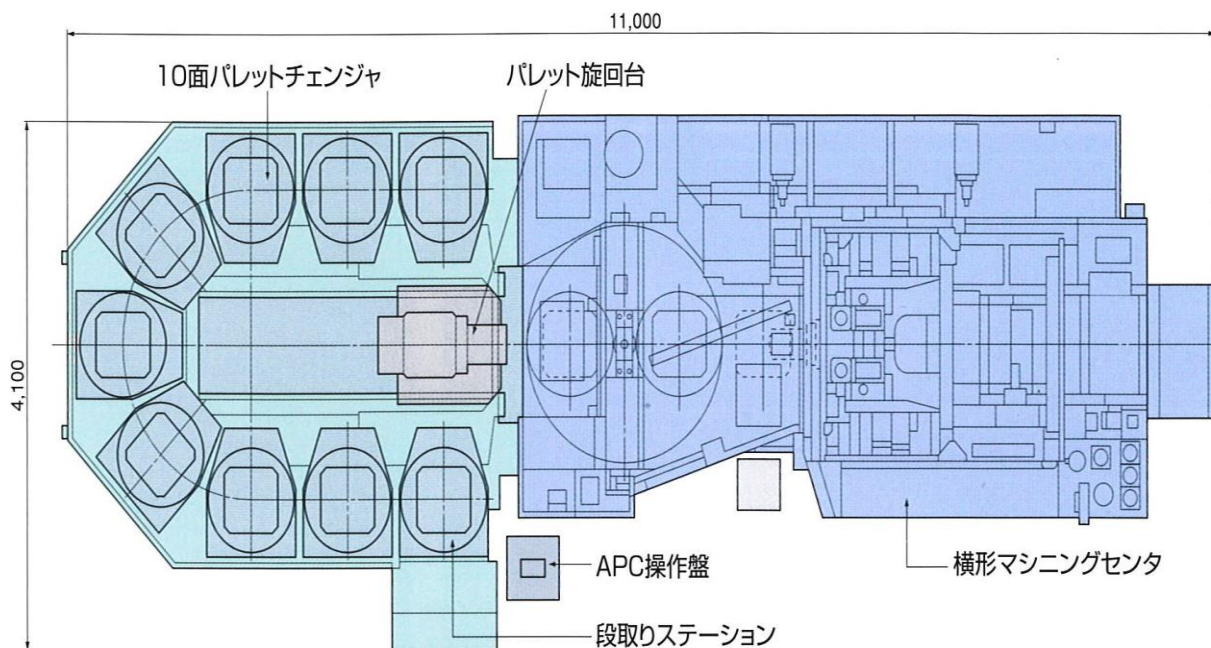


図24 小・大歯車(円弧歯すじ歯車)の粗歯切りと仕上歯面研削の10面APC構想

【3-1 粗歯切りと仕上歯面研削の自動化加工システムの構築】

歯切り及び歯面研削工具は、マシニングセンタの最大の特徴であるATCを用いて自動交換する。またワークは、10面APC(オートパレットチェンジャー)を活用してワーク交換を全自動で行い、無人加工を実現した。

初年度は、下記の仕上歯面研削の10面 APC 加工システムの構築を完了した。



図25 小・大歯車(円弧歯すじ歯車)の仕上歯面研削の10面APC加工システム

2年目に粗歯切りの自動加工システムを追加構築し、円弧歯すじ歯車の自動化製造技術を開発・構築した。

## 10面APC ma-500H II 2基設置

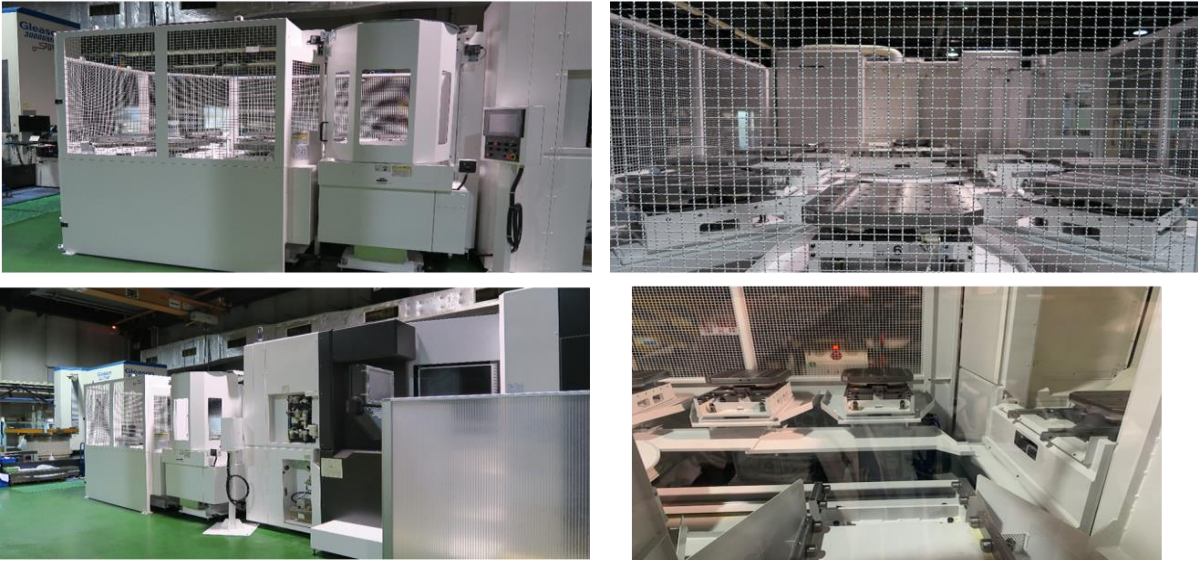


図26 小・大歯車(円弧歯すじ歯車)の粗歯切りと仕上歯面研削の10面APC加工システム

### 【3-2 パレットチェンジ時のワーク芯ずれを補正するプログラムの開発】

マシニングセンタの10面APCにおいて、段取りステーションで芯出しをしてもAPCを用いてワーク交換を行った場合、パレットの個体差などにより MAX0.1mm の芯ずれが発生する可能性が有る。芯ずれがある状態で加工を行うとピッチ精度と歯面形状に誤差が発生して図面要求を満足出来ない。このままであると自動加工が実現出来ない。そこで下記に示すようにワーク芯ずれを補正するプログラムの開発を行った。先ずタッチセンサーを用いてワーク基準径の芯ずれを把握する。次にワーク軸直角断面(ZX軸平面)において、各ワーク回転角における芯ずれ量に対して刃具基準点を図27のように共ブレするように補正を自動的に与える。それにより2次元的な芯ずれを加工中に補正することが出来る。これらの作業を完全に自動に行えるプログラムを開発した。

・マシニングセンタにおいてAPCを行うと、MAX0.1mm の芯ずれが発生する可能性が有る。これは自動加工実現において最大の阻害要因である。そこで、APC後タッチセンサーで芯ずれの計測を行い、加工中に自動的に芯ずれ補正を行うプログラムを開発して、自動化阻害要因を無くした。

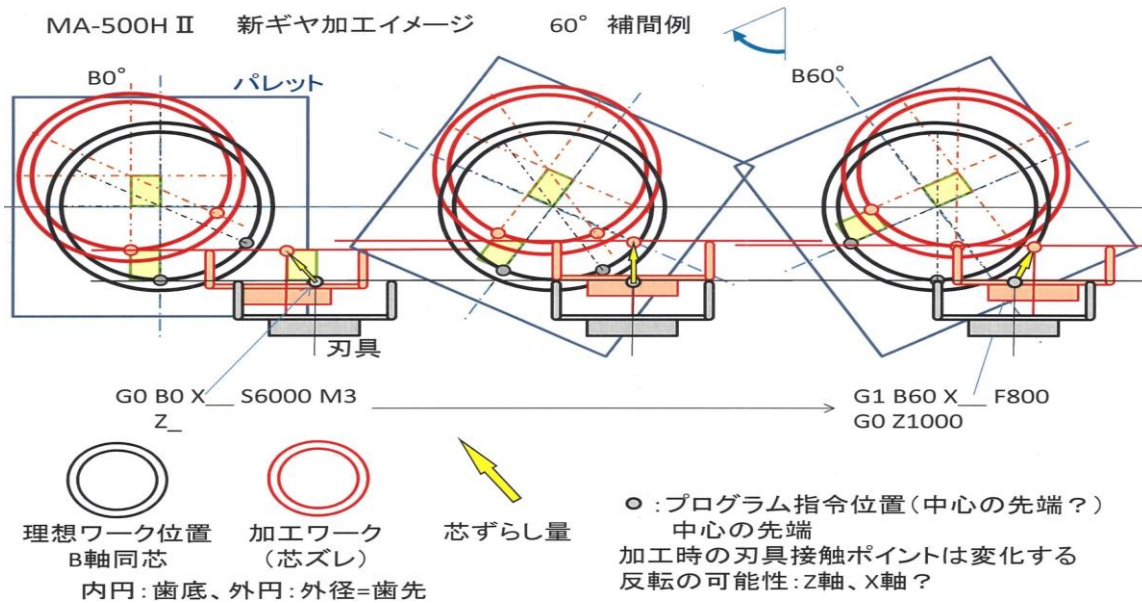


図27 ワーク芯ずれ補正プログラムの開発

1、2年目に培った各々の技術を連動させてさらにブラッシュアップして24時間自動加工技術を完成させた。

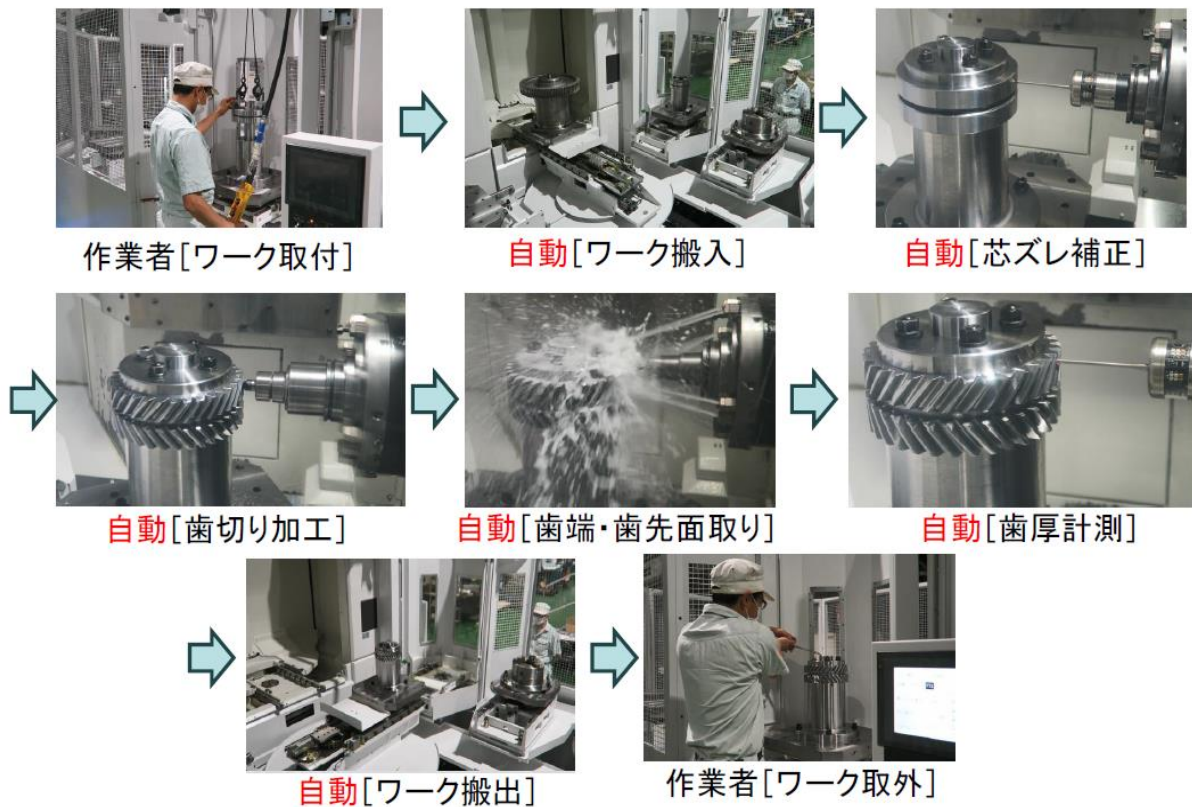


図28 24時間自動加工技術

**【3-3 本技術による高精度、高強度の円弧歯すじ歯車の試作・品質評価】**

本研究成果に基づいて、高精度・高強度かつ量産可能な鉄道歯車箱用円弧歯すじ歯車の試作を行い、品質を評価して本サポインで開発した技術の正当性を立証する。

図29に三次元歯車測定機によるピッチ及び歯面形状測定の様態を示す。技術目標であるピッチ精度JIS0 級、歯面形状精度(歯面四隅形状公差:  $\pm 0.030\text{mm}$ )を十分に満足していた。

加えて、CBN 電着砥石にて歯面研削を行うため、砥石の目詰まりにより研削焼けの恐れがある。図30, 31にバルクハウゼンノイズ法によりロボットを用いて曲り歯傘歯車の歯面を自動的に歯面研削焼けの有無をチェックしている写真を示す。本手法を用いて同じように歯すじが円弧状の円弧歯すじ歯車の歯面の研削焼け検査を自動的に行える技術も確立した。

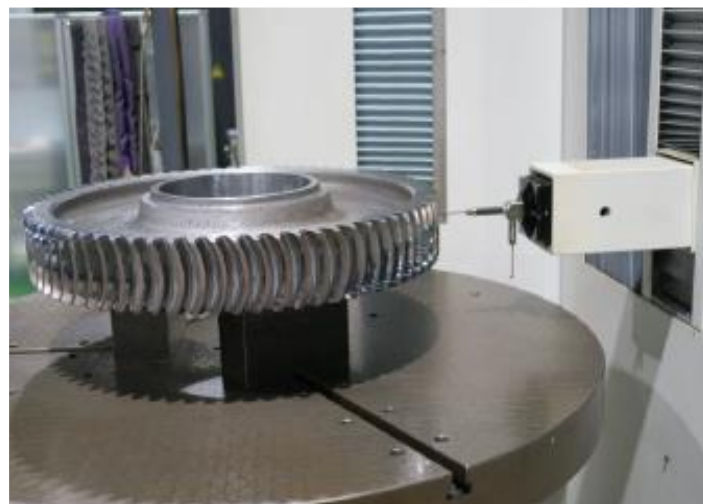


図29. 三次元歯車測定機による歯面形状及びピッチ測定

・歯面研削時の研削焼け検査のためのロボット式研削焼け自動検知装置を導入し、歯すじが円弧状の円弧歯すじ歯車の歯面の研削焼け検査を自動的に行える技術も確立した。



図30 バルクハウゼンノイズ法による研削焼け検査



図31 導入したロボット式研削焼け自動検知装置

## 最終章 全体総括

令和2年より、3年間にわたり公立大学法人三条市立大学との産学連携により学術的な技術支援を頂いた。また、アドバイザーなどのオークマ株式会社、京都ダイヤモンド工業株式会社、株式会社恵美須屋工具製作所、千葉県産業支援技術研究所など技術支援により高速鉄道用高強度・高耐久性円弧歯すじ歯車の設計と革新的自動化製造技術の開発をすることができた。また、最後に円弧歯すじ歯車を大手鉄道会社へサンプル出荷による実証試験を通じて本技術の有効性を立証しました。

### 3-1 複数年の研究開発成果

従来、このような高強度・高耐久性歯車は、歯車専用加工機を用いて熱処理前の粗歯切り工程と熱処理後の歯面研削工程で生産している。各々の工程は単独の高価な専用機で加工され、小・大歯車は別々の機械で加工することにより最低でも4台必要となる。また、各々の機械は熟練した作業者により段取り、ワーク着脱と芯出し、砥石と歯溝の位相合せ等煩雑な作業が必要とされ自動化は不可能であった。

今回汎用性の優れたマシニングセンタを用いて円弧歯すじ歯車の粗歯切り・歯面研削を2台の加工機で加工可能にすることにより、FMSのようなIoT技術を利用した多面パレット加工ラインにすることで、世界で初めての中型の高強度・高耐久性の円弧歯すじ歯車製造の自動化技術を確立しました。その結果、高品質(JIS 0)かつ耐久性(メンテナンスが少ない)が高く、生産性が高い(40set/月→100set/月以上)円弧歯すじ歯車の開発・製造を実現し、鉄道用歯車箱に円弧歯すじ歯車を搭載し、実用化を可能としました。

円弧歯すじ歯車は、今まで製造法が開発されていないため実用化されていませんでしたが、本サポインを通して、製造法を確立しました。その結果、鉄道以外の航空機・船舶、産業機械からEV車などの高強度・高耐久性でかつ低騒音・低振動の歯車装置が必要な多くの分野への展開が可能となりました。

### 3-2 アドバイザーによる講評

- ・素晴らしい成果が出ているので、工作メーカーとしても引き続き、協力して行きたい。
- ・スパイロ加工による粗歯切りは8つの刃物を使っており、凄く効率がいいことがわかった。
- ・量産効率率は80%が理想と言われているが、達成出来そうな結果が出ているので期待が大きい。
- ・24時の運用を考えると、くず処理、想定外のトラブルもあるので、来年1年間、細かいテストを続けて頂き、量産化技術を完成させてほしい。
- ・予定通りの成果が出て、かつ、サンプル出荷も行っているので早期事業化に期待している。
- ・今回の新しい加工方法は他への転用も可能と思うので、是非、展開してほしい。

### 3-3 研究開発後の課題

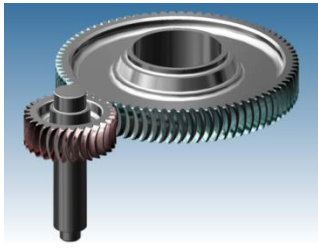

既に川下企業との間で、既にサンプル出荷を行っている。一方、社会・市場ニーズは、コロナなどの影響で世界的に激動しており、昨年同様販売窓口であるオブザーバーと密に連絡・連携をとり注意深く見守っていかなければならない。それらに応じて技術動向の修整もしていく必要があると考えている。

### 3-4 事業化展開について

補助事業の成果に係る事業化展開について、公立大学法人三条市立大学やアドバイザー（オークマ株式会社、京都ダイヤモンド工業株式会社、株式会社恵美須屋工具製作所、千葉県産業支援技術研究所など）とは、補助事業終了後においても、株式会社イワサテックへ引き続き技術支援を行う。

研究開発成果及び期待される効果：

#### 【研究開発成果に係る製品等】

主な対象製品の概要	
製品名称	製品等の概要(用途、特徴等)
(1) 鉄道駆動用歯車 	鉄道駆動用歯車箱には、従来ヘリカルギヤが用いられてきた。ヘリカルギヤは、スパークギヤと比較してかみ合い歯数が多いので低騒音・低振動であるが、負荷時にスラスト力が発生することにより、それを抑えるために円錐ころ軸受が使用される。それにより定期的に軸受を交換する必要がある。一方今回開発する円弧歯すじ歯車は、スラスト力は発生しないことにより、軸受交換の必要がなくなり省メンテナンス化が図れる。 

鉄道駆動用歯車箱

本研究の目的は、高速鉄道、通勤電車などの在来線や地下鉄などの駆動用歯車箱の省メンテナンス化とそれに使用される新型歯車の設計から量産生産の自動化・無人化である。本研究の成果は、従来と比較すると低振動・低騒音、省メンテナンス化そしてコストダウンが期待される。世界の鉄道車輛の市場規模は約 7.8 兆円であり、環境問題である世界的な温暖化対策及びこれからの人口増大により益々成長をしていく産業である。現在歯車箱にはヘリカルギヤが使用されているが、既存の歯車箱およびこれから新規に開発される歯車箱に、本研究で開発する円弧歯すじ歯車に置き換わっていけば無限の可能性がある。

#### 【期待される効果】

##### 川下産業の競争力に貢献

日本国内の川下産業は、車輛製造メーカーとして、日立製作所、川崎重工業、日本車輛製造、近畿車輛、総合車両製作所などがあり、それに用いられる歯車箱製造メーカーとして日本製鉄、東洋電機製造(株)がある。高速鉄道(新幹線)においては海外への輸出が期待されており、動力伝達部分の低振動・低騒音かつ高強度化・高耐久性はこれらの産業の更なる競争力を向上させる。日本の鉄道産業の基盤技術として、本研究開発テーマは非常に重要であると言える。

#### 【その他波及効果】

##### 工作機械のレベルアップ

本事業で開発する技術は多軸制御工作機械、複合加工機の性能向上、使用技術の向上などに繋がり、歯車加工用に新たな市場が創造されると思われる。

他の歯車においても加工法として本研究が採用されれば、工業用の工作機械の競争力が上がり、そうなることで日本の産業全体の底上げに繋がる。1台5千万円の複合加工機が100台以上使用されると予測されており、工作機械市場においても約50億円の波及効果があると予測される。

##### 産学連携で次世代人材の教育に貢献

本研究は、三条市立大学(川崎教授)との共同プロジェクトである。単なる企業だけの研究開発ではなく、今後更に進化が予想される汎用のマシニングセンタによる歯車製造の手法、設計に至るまで理論化される事が本研究の特徴でもある。このように理論化が進めば、歯車製造の業界においても他のアプリケーションに応用展開も可能となり、日本の歯車製造業界への技術的な進化に大きく寄与できる。本研究のPL辻は、社団法人歯車工業会の理事であり技術委員長を兼任しており主催するギヤ・カレッジにおいても講師として、業界横断的に技術指導の活動をしており、マシニングセンタによる歯車加工法も同カリキュラムに入れ、広く成果の共有を促進している。本研究の成果も同様にカリキュラムに取り入れ、日本歯車産業の技術の高度化に貢献したいと考えている。

##### 地元企業の協力促進

株式会社イワサテックは千葉県船橋市に本社を置き、機械導入も同所で検討している。本件設備が導入されれば、同じ千葉県に生産拠点を置き、株式会社イワサテックより大型ウォームホイールを採用している株式会社ハセックギヤとの連携強化が期待できる。具体的には、構想段階からの設計面での情報共有や品質管理の向上があるが、これらは同エリアに立地することで可能になっている。

## 雇用への貢献

本事業により、株式会社イワサテックでは営業担当1名、製造ライン管理者1名の新規雇用が必要となる。同エリアからの人材採用を行ない地域経済に貢献する。

## 国の施策等との整合性

- ・本取組は国の政策である第四次産業革命型の取組であり、これからの中小企業の成長モデルの模範になると考えている。その結果、働き方改革へも大きく貢献できる
- ・国は地球環境問題、特に温室効果ガスの社会問題の対応として省エネの取組を進めている。電車においても減速時の運動エネルギーを電気エネルギーに換える「回生ブレーキ」や、効率的なモーターの搭載を進めている。今回の取組はそれを実現する取組である。

## 【新たな事業展開の可能性】

本サポインで開発した円弧歯すじ歯車は、かみ合い率が高く低騒音・低振動であり、負荷時にスラスト力が発生しない等ダブルヘリカルギヤと同等もしくはそれ以上の特性を有するものである。製造法では、ダブルヘリカルギヤと比較して、本サポインで開発した革新的自動化製造技術は従来技術と比較にならないほど効率的であり、製造コストにおいて格段の差がある。

以上のことにより、すべての産業の歯車箱においてダブルヘリカルギヤ(ヘリカルギヤ含む)に置き換わる可能性がある。また EV 車などこれから開発が急務である歯車列においても本特性を活かせば採用される可能性もあると考える。

## 事業計画：

### 【想定する国内、海外市場(現状、今後の動向)】

図32に示す欧州鉄道産業連盟(UNIFE)の需要予測によると、世界の鉄道産業の市場規模は2011-13年の19.5兆円に対し、約20%成長し、2019-21年には24兆円以上の規模になると予測されている。その中で車両の市場規模は約7.8兆円を占めると予測されている。歯車箱の市場規模としては、保守サービス(メンテナンス)を含めて0.5兆円程度であると類推する。このように急激に成長し続ける将来性のある事業に参入することにより、安定した収益性が見込まれる。

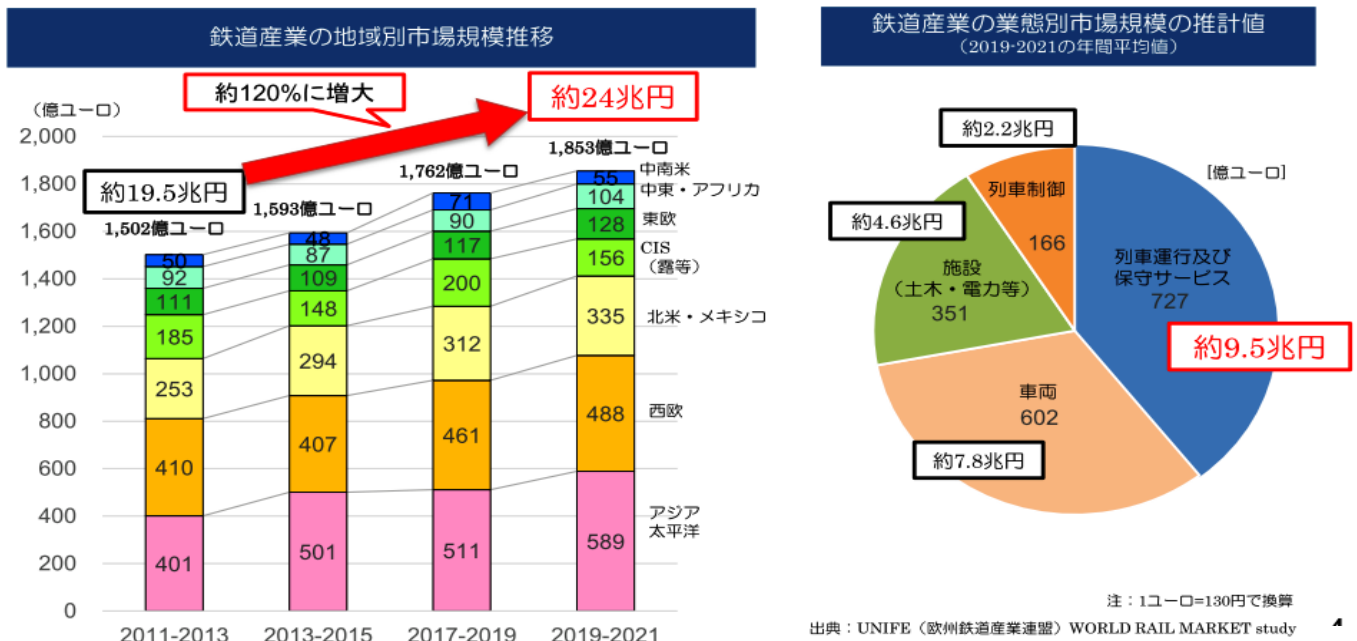


図32 鉄道産業の市場規模の推移

## 【川下企業(顧客)ニーズ】

株式会社イワサテックは川下企業から高度な技術を要するダブルヘリカルギヤについても他の企業で生産できず、生産依頼があり対応しているが、従来のコストでは生産できず、川下も困っている状況になっている。今回開発中の円弧歯すじ歯車と製造法は川下企業(鉄道車両会社)のニーズである低騒音・低振動(パフォーマンス)、高強度・高耐久性(信頼性・省メンテナンス化及び省エネルギー化)、現行コストに応えられるものである。また、これから益々鉄道輸送がメインになっていくこともあり、そのニーズも高まっていくと予想されている。

**【販売促進戦略】**

**・車輛メンテナンス時円弧歯すじ歯車に置き換え事業**

販売促進戦略としては、新規車両の開発にもチャレンジしていくが、既存の歯車箱のメンテナンス時に歯車だけを本サポインで開発した円弧歯すじ歯車に置き換えて行くことにより、低コストで短期間に顧客のメリットとなると考える。本手法が成功すれば、国内メンテナンス事業として円弧歯すじ歯車の需要は安定して拡大していく。そこでサポインと並行して、川下会社(歯車箱製造会社)東洋電機製造とともに通勤に用いられる在来線用の歯車箱を試作して負荷運転を行い、その結果を基に鉄道運行会社(2社)に試験走行を行ってもらい、円弧歯すじ歯車の有効性と優位性を実証する。

**・サポイン事業中にサンプル出荷により営業活動開始**

一方、本サポイン1年目(令和2年)で設計・強度計算および加工工具の設計手法およびマシニングセンタによる製造法を確立する。サポイン2年目(令和3年)には、10面APCによる円弧歯すじ歯車の自動化製造技術の基盤を確立して、生産能力と加工時間(コスト)を具体的に示す。サポイン3年目(令和4年)より具体的に営業活動を開始して、サポイン終了後生産を開始する。

**・海外事業展開**

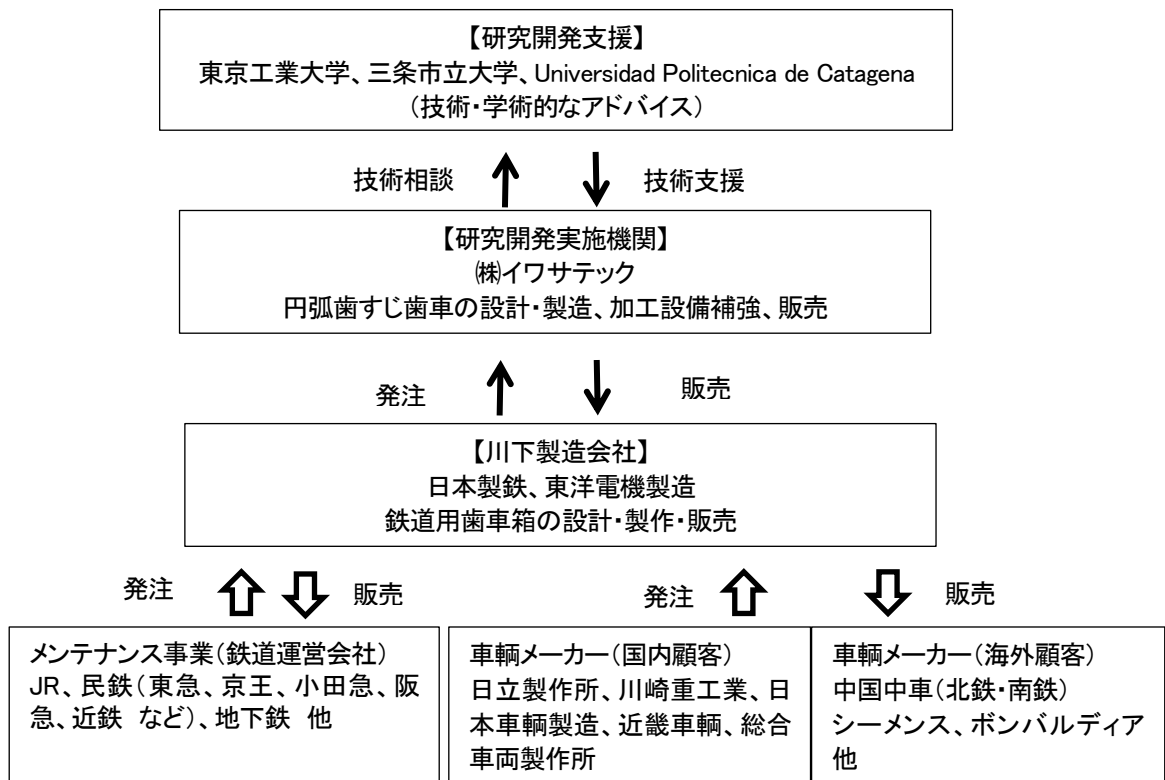
海外展開として、日本の川下会社を通じて世界トップメーカーである中国中車(南鉄・四方)に10セットの円弧歯すじ歯車のサンプルを出荷した。その実走・評価には2、3年かかると思われるが、採用されれば膨大な受注が期待できる。

サポイン終了前に上記の活動を行うことで早期事業化を実現させる。

**【知財戦略】**

2019年3月8日に、川下会社・東洋電機製造と共同で「円弧歯すじ歯車を鉄道車輛用歯車箱に使用する」件で国際特許を申請した。[国際出願番号:PCT/JP2019/009421]尚、本事業で開発した自動化・量産化製造技術は製造ノウハウに関する要素が高いため特許は申請しない。

**【販売先、川下製造業者等の事業化の体制】**



**【事業化に至るまでのスケジュール】**

製品等の名称		鉄道車輛用歯車箱に使用される円弧歯すじ歯車																																		
開発事業者		株式会社イワサテック																																		
想定するサンプル出荷先		国内:東急電鉄、阪急電鉄、他民鉄会社 海外:中国中車(南鉄)平成31年出荷済																																		
スケジュール	事業年度	令和5年	令和6年	令和7年	令和8年	令和9年																														
	サンプルの出荷・評価	他民鉄随時	→																																	
	追加研究	随時実施	→																																	
	設備投資	12,000 千円	12,000 千円	12,000 千円	(その都度)	(その都度)																														
	製品等の生産	→																																		
	製品等の販売	→																																		
	特許出願																																			
	出願公開																																			
	特許権設定																																			
	ライセンス付与																																			
売上見込	売上高(千円)	240,000	360,000	480,000	480,000	480,000																														
	販売数量	2,400 ケ/年	3,600 ケ/年	4,800 ケ/年	4,800 ケ/年	4,800 ケ/年																														
	売上高の根拠	<p>売上説明:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・現行ヘリカルギヤの歯切り、歯面研削コスト=約 100,000 円/ケ</li> <li>・10面APC(1セット)自動化設備の消化能力=100 ケ/月</li> <li>・令和5年:100,000x100 ケ x12 カ月 x2 セット(10 面 APC)=240,000 千円/年</li> <li>・令和6年:100,000x100 ケ x12 カ月 x3 セット(10 面 APC)=360,000 千円/年</li> <li>・令和7年:100,000x100 ケ x12 カ月 x4 セット(10 面 APC)=480,000 千円/年</li> </ul> <p>以後 12,000 千円投資(10面APC1セット)により 120,000 千円売上が増加する。</p> <p style="text-align: center;">事業展開別売上予想</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>令和5年</th> <th>令和6年</th> <th>令和7年</th> <th>令和8年</th> <th>令和9年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>メンテ事業</td> <td>80,000</td> <td>80,000</td> <td>100,000</td> <td>100,000</td> <td>100,000</td> </tr> <tr> <td>国内展開</td> <td>100,000</td> <td>180,000</td> <td>240,000</td> <td>240,000</td> <td>240,000</td> </tr> <tr> <td>海外展開</td> <td>60,000</td> <td>100,000</td> <td>140,000</td> <td>140,000</td> <td>140,000</td> </tr> <tr> <td>合計(千円)</td> <td>240,000</td> <td>360,000</td> <td>480,000</td> <td>480,000</td> <td>480,000</td> </tr> </tbody> </table> <p>要員計画: 令和5年より営業担当1名、製造ライン管理者1名の新規雇用を行う予定である。 その後必要に応じて増強していく。</p>						令和5年	令和6年	令和7年	令和8年	令和9年	メンテ事業	80,000	80,000	100,000	100,000	100,000	国内展開	100,000	180,000	240,000	240,000	240,000	海外展開	60,000	100,000	140,000	140,000	140,000	合計(千円)	240,000	360,000	480,000	480,000	480,000
		令和5年	令和6年	令和7年	令和8年	令和9年																														
メンテ事業	80,000	80,000	100,000	100,000	100,000																															
国内展開	100,000	180,000	240,000	240,000	240,000																															
海外展開	60,000	100,000	140,000	140,000	140,000																															
合計(千円)	240,000	360,000	480,000	480,000	480,000																															

**【経済効果】**

本サポインの成功により、鉄道用歯車箱の優位性を確立すれば日本の鉄道事業に多大なる経済効果をもたらす。また他のアプリケーションにも横展開していけば日本の歯車業界にも大きな功績をもたらす。