

【公開版】

令和元年度  
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

「5軸マシニングセンタによる航空機用高機能ストレートベベルギヤの  
特殊歯面調整加工の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 一般財団法人大阪科学技術センター

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

- 2-1 オリジナル歯面設計ソフトの開発（オージックオリジナル歯面設計ソフトの開発）
  - （1）歯車設計理論に基づく歯面3次元座標値と単位法線ベクトルの解析プログラムの開発
  - （2）相対する歯車の接触点（歯当たり・回転伝達誤差）の解析プログラムの開発
  - （3）歯当たり解析結果の視覚化出力方式の開発
  - （4）歯当たり面安定化のための最適特殊歯面（千鳥模様形状）の設計
- 2-2 マスターギヤの歯面形状・面粗さの高精度な再現性を実現する5軸マシニング特殊歯面調整加工の開発
  - （1）焼入れ後の高硬度歯面の仕上げ精密加工技術の開発
  - （2）5軸マシニングセンタによる微細凹凸形状で構成された千鳥模様面の加工技術の開発
- 2-3 IoT及び非接触3次元測定機を用いた評価技術の開発
  - （1）設計歯面に基づく実加工歯面の評価技術の開発
  - （2）IoTを活用した評価結果の加工工程へのフィードバックによる加工ロス低減技術の開発

最終章 全体総括

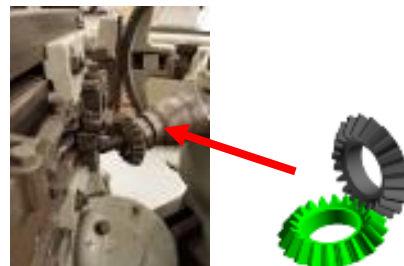
- 3-1 研究成果のまとめ
- 3-2 補助事業の成果に係わる事業化展開について
  - （1）想定している具体的ユーザー、マーケット及び市場規模等に関する効果
  - （2）事業化見込み

## 第1章 研究開発の概要

航空機エンジンにはストレートベベルギヤが使用されているが、多品種少量・複雑形状化に対応するには専用加工機では歯面の形状精度や面粗さが不十分となっている。そのため品質確認用ゲージであるマスターギヤの適合という絶対条件がある中、歯面形状や面粗さを高精度に再現加工できないため、ギヤ同士のかみ合い精度が高い組み合わせ発生率であるペアリング率が低下している。航空機産業では、歯車のコスト低減と信頼性や伝達能力を向上させる高機能化が要求されるため、汎用機である5軸マシニングセンタを使用したペアリング率の向上と特殊歯面調整加工による高機能化及び設計・評価技術の開発を目指す。



ストレートベベルギヤは、航空機エンジン動力を発電機などに伝達する機構に使用されている。



航空機エンジン用ストレートベベルギヤは主に TWO-TOOL やコニフレックスと呼ばれる専用加工機による製造が行われている。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### <研究開発の背景>

従来ギヤの品質はギヤ単体の加工精度よりも相手側のギヤとかみ合わせて回転させ、振動や騒音等の性能を確認するかみ合い試験が重要とされており、航空機用ストレートベベルギヤにおいても各航空機エンジンメーカーが所有するマスターギヤとかみ合い試験により評価されている。

従来のストレートベベル専用加工機は、ギヤの基本的な諸元を入力することで一般的な形状のギヤを容易に製造することが可能であるが、歯面の強度を向上させる熱処理工程後の加工はできないため、航空機部品など多品種少量・複雑な形状のギヤの製造には加工精度面において不向きであり、このことがマスターギヤとのペアリング率の低下を招いている。こうした現状を改善するためこれまで汎用性の高い5軸マシニングセンタによるストレートベベルギヤの製造技術開発が進められてきたが、未だ実用化の域には達していない。そこで要因分析を行った結果、下記の課題が判明した。

<5軸マシニングセンタの従来課題>

① ストレートベベルのCADによる歯面設計

原因

マスターギヤの歯面を5軸マシニングセンタで高精度再現加工するために必要なギヤの3次元形状を再現できる設計ソフトが存在しない。

内容

既存歯面設計ソフトは、ギヤ専用加工機での加工を前提としているため、ギヤの諸元を入れることで機械セッティング条件のみ算出する。そのためマスターギヤの歯面を高精度に再現するために必要な3次元形状を数値で算出する等の機能は有しておらず、CADモデルが作成できない。

② CAMによる5軸マシニングセンタ加工での工具パス

原因

焼入れ後の高硬度のギヤに対して5軸マシニングセンタを用いた高精度歯面仕上げ加工では、歯面表面にツールパスと呼ばれる切削工具痕が発生し面粗度が粗くなる。

内容

5軸マシニングセンタで加工した場合、工具干渉や機械剛性の観点から、焼入れ後の硬度が高くなったギヤの高精度加工が難しい。また切削工具を歯すじ方向に動かすためツールパスと呼ばれる加工痕が縞模様状に発生することで、マスターギヤの歯面を正確に再現することが出来ない。この加工痕は歯面に微細な凹凸が発生しており、ギヤ同士をかみ合わせた場合にこの微細な溝が干渉し、歯当たりの悪化、振動や騒音の発生源になりギヤの性能低下に繋がる。

③ 加工歯面の良否判定基準

原因

作業員の官能試験による曖昧な合否判定

内容

マスターギヤ歯面に近づけるために修整加工を行う際、加工誤差量を数値管理ができないため、機械セッティングの変更量が適切に把握できず作業者のカンコツに頼った生産方式になっている。その加工精度を確認するかみ合い試験では、検査官の官能検査で行われており合否判定が曖昧である。

<研究開発目的及び目標>

<目的>

5軸マシニングセンタを用いマスターギヤの歯面の形状及び面粗さを高精度に再現したストレートベベルギヤの製造技術

(三) 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

(4) 川下分野特有の事項

3) 航空宇宙分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

ア. 高機能化（高剛性、高比強度、耐熱性、耐食性等）

<ストレートベベルギヤ加工工程について>

航空機用ストレートベベルギヤの品質は各航空機エンジンメーカーが所有するマスターギヤと呼ばれる品質確認用の専用ギヤとのかみ合い試験により実施される。そのためマスターギヤの歯面の形状や面粗さを高精度に再現できる技術を確立出来れば、自ずと航空機市場に出回るストレートベベルギヤ同士のペアリング率の向上に繋がり、延いては航空機用ギヤの振動や騒音の低減による高機能化やコスト低減に繋げることが可能になる。

本事業の研究開発目標であるストレートベベルギヤのペアリング率改善のための因子としては、主に次の事項が挙げられる。

<ペアリング率向上因子>

- ・ マスターギヤの歯面形状の高精度再現
- ・ マスターギヤ歯面の面粗さの再現
- ・ 加工機の繰り返し加工精度の安定化

<目標>

<新技術個別開発課題>

① ストレートベベルのCADによる歯面設計

開発

## オーシックオリジナル歯面設計ソフトの開発

### 内容

従来の幾何学的な歯面計算だけでなく、マスターギヤの設計歯面と加工誤差を加味した歯面の3次元モデリング化が可能な設計ソフトを開発する。これにより汎用性の高い5軸マシニングセンタで精密ギヤ加工を可能にする。

## ② CAMによる5軸マシニングセンタ加工の工具パス削減

### 開発

マスターギヤの歯面形状・面粗さの高精度な再現加工と高機能化を実現する5軸マシニング特殊歯面調整加工の開発

### 内容

熱処理後の高硬度な歯面をマスターギヤとの形状誤差 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内に再現する精密加工、面粗さ $\text{Ra}0.4\mu\text{m}$ 以内を実現させ飛躍的に性能を高める特殊歯面調整加工（千鳥模様磨き加工）に関する加工技術の開発を行う。これによりギヤかみ合わせ時に発生する騒音・振動を軽減させる。

## ③ 加工歯面の良否判定基準の明確化

### 開発

IoT及び非接触3次元測定機を用いた評価技術の開発

### 内容

精密画像測定技術を用いた歯面全体の評価手法の開発を行い、従来の官能検査から定量検査へ評価手法の改善を実現する。さらに設計から加工、検査までの工程をネットワークで接続し、評価結果を設計、加工工程に効率的にフィードバックさせることで開発期間の短縮とギヤ品質の安定化を図る。

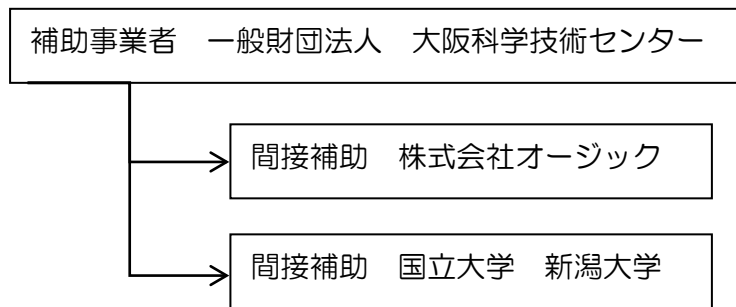
以上の新技術開発テーマを達成することで、

1. マスターギヤとのかみ合いを高精度に再現
2. 高精度に再現しながら、加工の安定化でペアリングの向上
3. 更に、特殊歯面調整加工で性能を向上

を実現し【ペアリング率 97~100%達成】及び【ギヤ駆動時の騒音・振動の15%低減（高機能化）】を実現する。

## 1-2 研究体制

<履行体制図>



<研究者>

事業管理機関

一般財団法人 大阪科学技術センター

総括研究代表者プロジェクトリーダー

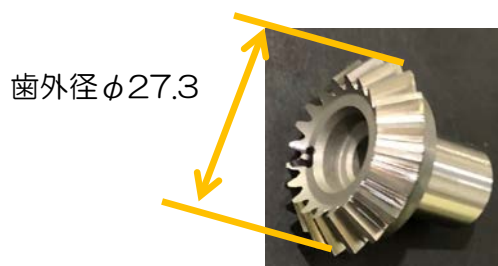
株式会社オージック 竹山 章宏

副総括研究代表者サブリーダー

国立大学法人新潟大学自然科学科 川崎 一正

## 1-3 成果概要

ストレートベベルギヤのペアリング率改善のため、ストレートベベル歯面の理論解析から設計ソフトを開発した。そのソフトで算出した歯面座標値から CAD/CAM で設計を行い、5 軸マシニングセンタを使用し実証実験を実施した。加工したストレートベベルの検証を行うため歯車測定機で歯面形状の再現性や加工精度の評価、及び非接触測定機で歯面の微細な特殊凹凸加工の検証などを行い、加工精度の向上及び安定品質を維持する研究を実施した結果、ペアリング率を向上させることが実証できた。



研究対象

歯 車：ストレートベベル  
材 質：AMS6260  
熱処理：浸炭焼入れ

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒578-0984 大阪府東大阪市菱江 1 丁目 15 番 33 号

株式会社オージック

Tel : 072-965-1011 Fax : 072-965-4196

濱田 成則 Email : shigenori-hamada@ogic.co.jp

第2章 本論

2-1 オリジナル歯面設計ソフトの開発

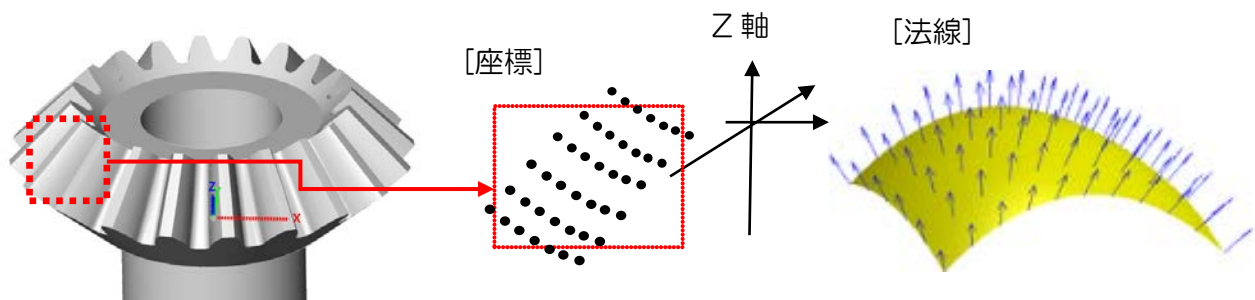
(1) 歯車設計理論に基づく歯面 3次元座標値と単位法線ベクトルの解析プログラムの開発

① 目標

歯面の設計理論に基づく 3次元座標と法線ベクトルの解析を行う。同時に幾何学的な計算だけではなく、幾何学的な歯面形状の偏差量も加味した汎用性の高いソフトを開発する。

② 具体的技術開発内容

設計ソフトは計算式の思案から始め、約 20,000 ステップに及ぶプログラミングとデバッグを行い、改良を重ねて 2 年で完成させた。そのソフトの確からしさは 2 つの方法で検証した。1 つ目にソフトの信用性を高めるため、仮データ（単純データ）を多数作成し、INPUT と OUTPUT を一つ一つ確かめていった。2 つ目に最終加工物に対して評価を行った。CAD/CAM・加工・測定の各項目において、発生する偏差を調査し、予め設計ソフトにフィードバックさせておくことにより、設計に近い歯面形状を作ることができた。



歯面設計手順



## 【公開版】

(2) 相対する歯車の接触点（歯当たり・回転伝達誤差）の解析プログラムの開発

### ① 目標

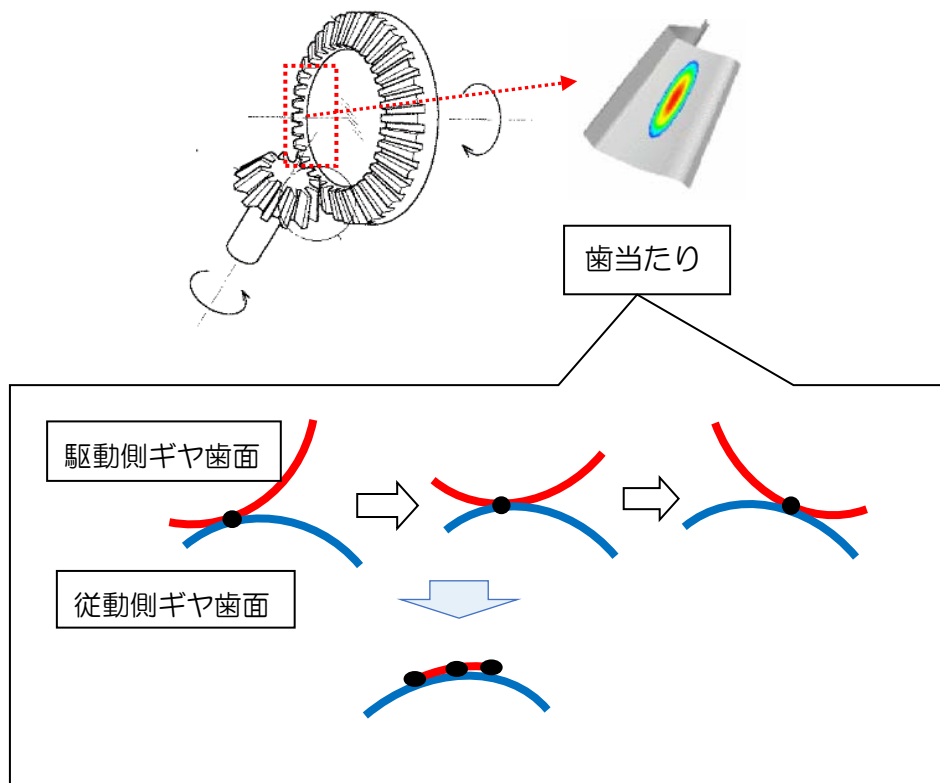
15%低騒音の歯車を実現させるには、ギヤ駆動時における振動・騒音をシミュレーションする必要がある。歯車のかみ合い状態の良否を示す歯当たりと伝達誤差を可視化させるソフトを作成する。

### ② 具体的技術開発内容

一般的に設計ソフトの歯当たり及び伝達誤差は、加工精度のバラツキを考慮しないことが多い。そのため、加工後に想定していなかった、高次数の騒音が発生することもある。そこで、開発ソフトでは設計から CAM まで歯面座標データの関連付けをさせることにより、設計時間の削減と品質向上の両立を図ることができた。

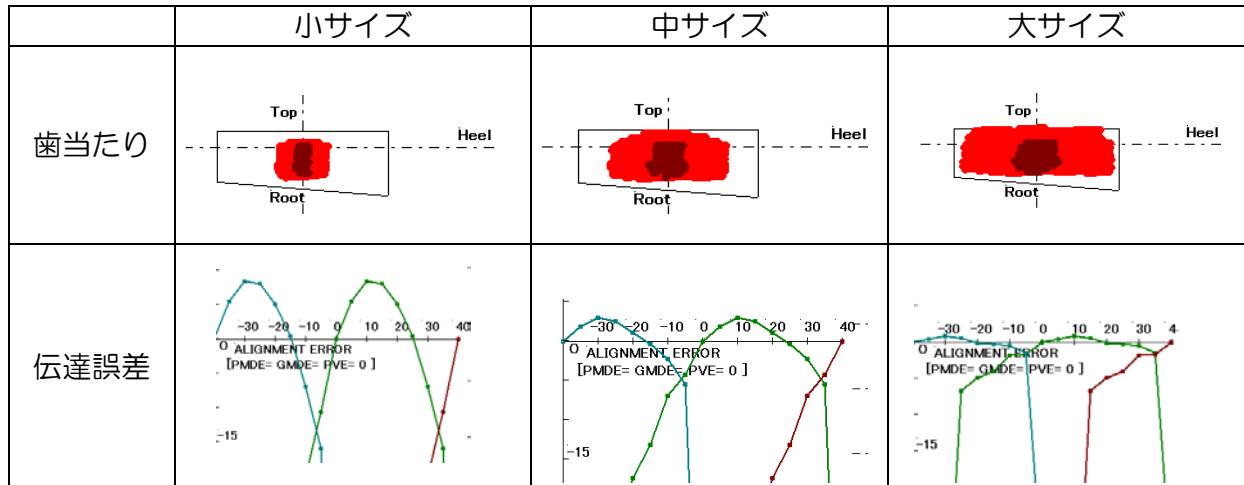
### 【歯当たり】

歯当たりは一对の歯車をかみ合わせ、歯面に光明丹(朱色の塗料)を塗り、回転させると歯面の接触部分は除かれる接触跡をいう。



【伝達誤差】

任意の回転角を入力軸に与えた時、理論出力軸の回転角度と実出力回転角度の差を意味する。歯当たりと密接にかかわっており対で考えることが多い。歯当たりの大きさにより伝達誤差の変化量を可視化することに成功した。



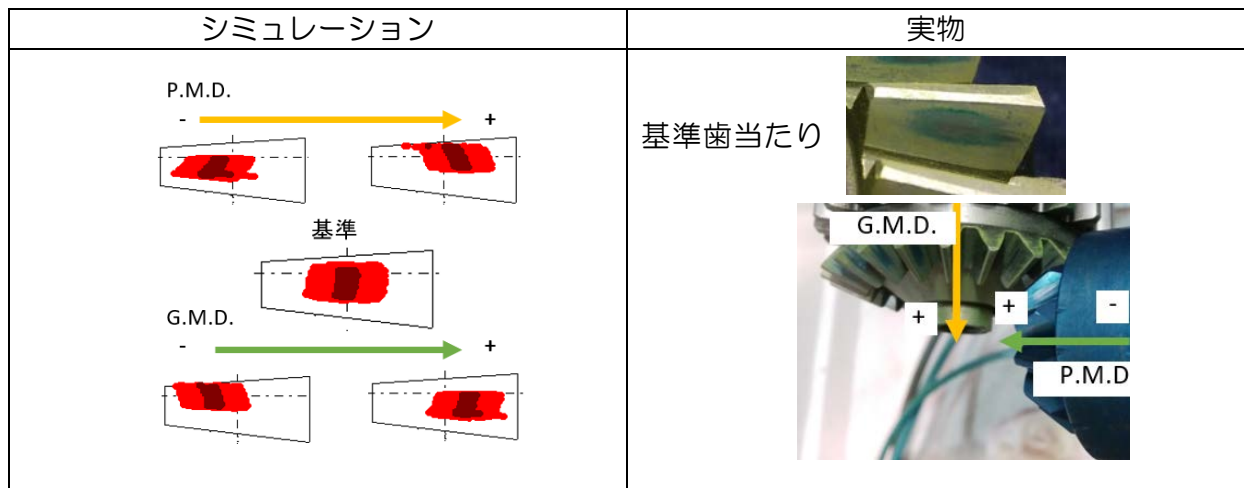
(3) 歯当たり解析結果の視覚化出力方式の開発

① 目標

歯当たりは大きさだけでなく、歯面内の位置や形が重要になるため可視化させる。

② 具体的技術開発内容

本研究対象はピニオンとギヤ共に歯数が同じであるが、ソフトで視覚化した歯当たりを検証するには、歯数の異なるものでも実験を行うことで正確性を増す。そこで他の航空機で使用される歯数比がある諸元の製作を行い、かみ合い試験機の各軸の距離を変更する試験を行った。結果はシミュレーション通りであり、有効性を検証した。



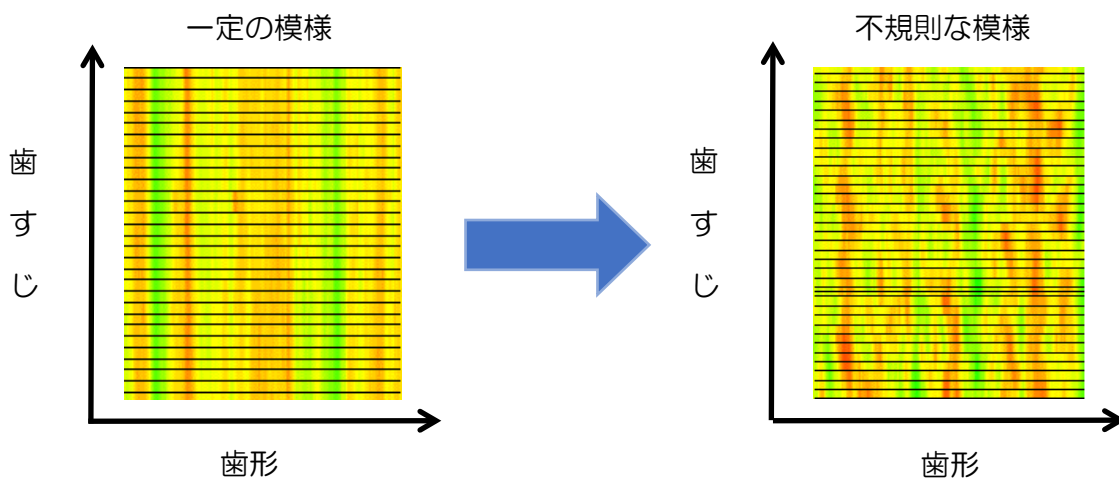
(4) 歯当たり面安定化のための最適特殊歯面（千鳥模様形状）の設計

① 目標

ボールエンドミルの加工パスで発生する微細な凹凸を意図的に付与して騒音・振動を低減させる。

② 具体的技術開発内容

歯車同時接触線に基づき、ランダムピッチで特殊歯面（千鳥歯面）を設計することができた。しかし、現時点での特殊加工では、歯面加工や CAD 設計など総製作時間が増える結果となった。今後は、実験と加工データを集計して最適量を決めていく。



2-2 マスターギヤの歯面形状・面粗さの高精度な再現性を実現する5軸マシニング特殊歯面調整加工の開発

(1) 焼入れ後の高硬度歯面の仕上げ精密加工技術の開発

① 目標

マスターとの形状誤差量 $\pm 0.005\text{mm}$ 以下にする

② 具体的技術開発内容

航空機で使用される材質AMS6260（表面硬度HRC60）をボールエンドミル $\phi 1$ の小径工具で歯面加工を実施したが、工具摩耗、損傷により理想的な歯面形状、面性状を維持することが困難であった。要因分析の結果、歯元Rを加工する際に、歯底と歯元Rの同時接触による著しい工具負荷によりチッピングが発生していた。そこで、歯面と歯底を分割した工具パス設定と工具傾斜を切削面に対して付与させた。また、増速スピンドルを使用することで工具周速向上などによる切削性の安定化に寄与した。その条件を基に加工数を重ねて、加工誤差を維持できる結果となった。

(2) 5軸マシニングセンタによる微細凹凸形状で構成された千鳥模様面の加工技術の開発

① 目標

千鳥模様の実現 修正量 $\pm 0.003\text{mm}$ 以下にする

② 具体的技術開発内容

加工実験から評価していく中で、当初目標設定の千鳥模様(深さ) $\pm 0.003\text{mm}$ は大きい値との認識ができ、千鳥模様の深さを変更した。千鳥模様を更に微細に設定したが、これまでに無い加工技術が必要となった。通常のCAD/CAMでは歯面間の座標点から面張りを作成するときには千鳥模様の凹凸は描画誤差として自動的に補正されてしまう。そこで点群を面として認識させるマクロ技術を確立した。しかし、実際に加工すると5軸マシニングセンタの座標計算の処理速度が間に合わず再現できなかった。そこで、工具の先端制御を安定させる工具加速度を調整することで微細加工の千鳥模様を実現することが可能となった。

2-3 IoT及び非接触3次元測定機を用いた評価技術の開発

(1) 設計歯面に基づく実加工歯面の評価技術の開発

① 目標

ネットワークを用いてソフトを100%安定稼働させる

② 具体的技術開発内容

千鳥模様を評価するため、非接触測定機のメーカーで開発した面性状解析ソフトを活用したが、近似曲線による面形状補正を実施していたため歯面の千鳥模様を正しく評価できなかった。そこで、歯面形状に合わせた独自の近似手法を開発することで、評価することができた。その結果、歯面形状と千鳥模様を高精度に測定することが可能となった。しかし、歯面測定を行うネットワークを構築し、官能検査から定量検査へ実現することができたが、完全自動照合や自動評価が人による作業となってしまった。

(2) IoTを活用した評価結果の加工工程へのフィードバックによる加工ロス低減技術の開発

① 目標

加工ロスを 20%削減する

### ② 具体的技術開発内容

歯面の測定結果から、加工誤差量を CAD/CAM へ展開しモデルの再作成を実施することができた。これにより設計誤差と加工誤差の両方を把握することで、より加工精度を向上させることが可能となった。特に、加工立ち上げ時には、各工程の作業誤差を当社のマクロ技術と、今まで構築した技術を一体にすることに注力し、各作業精度を把握した。それにより、実際に加工を行うと、当初から誤差量も低減が可能となり有効な手法となった。

## 最終章 全体総括

### 3-1 研究成果のまとめ

従来の歯車専用機で加工した航空機用ストレートベベルは、専用加工機の精度不足や熱処理後の仕上げ加工が出来なかったことにより、歯車性能低下やペアリング率低下を招いていた。この理由から、ストレートベベル歯面の理論解析からソフト設計を行い、汎用機である5軸マシニングセンタで高硬度の歯面加工を行うことを重点的に実施する計画であったが、ストレートベベルの設計理論は一般的に公開された情報ではないため、数少ない資料より設計理論を導く必要があった。特に、ブラックボックス化された情報であり、計算結果の良否判定には、アドバイザーの意見、および、作成した設計ソフトを基に CAD/CAM、5軸マシニングセンタで加工を行い、歯車測定機、非接触測定機の歯面測定から加工精度の問題点抽出し完成することができた。特殊歯面調整加工（千鳥模様）では、歯面に微細な加工を施すことができたが、エンドミルのチッピングが発生し切削加工が安定せず、加工形状誤差やピッチ精度が低下する傾向があった。5軸マシニングセンタは万能な加工機ではなく、加工面の断続切削による面粗さ、工具摩耗、加工条件、工具姿勢などを安定させる必要があった。そこで、切削の基礎実験を行い、加工面に対して最適な工具傾斜角を突き詰めた。

今回の研究課程では、市販されているソフトなどを一部利用したが、歯面の曲面加工プログラムを作り出す CAD/CAM では、歯面間の座標点から面張りを作成するときに、近似曲線で誤差が発生するなど、マスターギヤの歯面形状を正確に作成することが不可能であることが判った。また、加工した面性状を測定する非接触測定機でも、測定メーカーの解析ソフトでは、歯面の曲線に合わせた面性状を高精度

## 【公開版】

に評価することができなかった。その課題を解決するため、CAD/CAMで歯面形状を作成する際には点群のマクロ計算を独自で自動化しCAD/CAMへ反映させる手法を導くことができた。また、測定結果の評価では、歯面形状に合わせた最小二乗法を導くなど当社独自ソフトの開発を行いテストすることで、市販された機能よりも独自性の強い製造手法を導きだすことが可能となった。この状態を基に加工を継続的に実施した結果、安定した品質を維持することが可能となりペアリング率の向上に寄与した。これにより、従来のストレートベベルと、今回の補助事業で開発したストレートベベルを比較した結果、かみ合い伝達誤差、騒音などの機能性も向上することが可能となった。

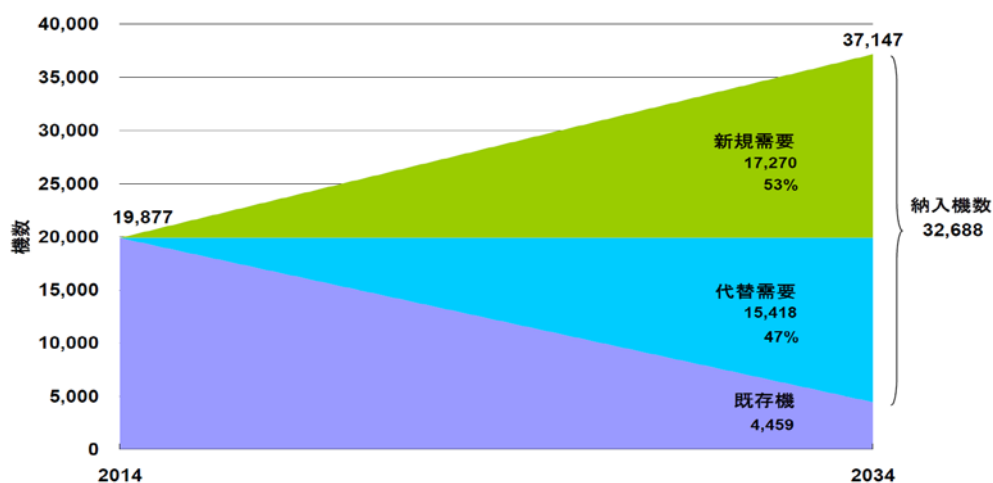
航空機で使用されるマスターギヤは、エンジンの動力を伝達する最重要部品であるため研究課程の補助期間中には航空機エンジンメーカーからマスターギヤを借用することができなかったが、歯面の歯車諸元から理論的に設計した歯面形状の実現や航空機以外のマスターギヤの再現加工などを行うことができた。航空機部品では、工程変更に対する認証手続きなど多数の作業工程を経て準備されるため、航空機メーカーから加工依頼があれば直ぐに作業に掛かれることを立証できた研究となった。

### 3-2 補助事業の成果に係わる事業化展開について

#### (1) 想定している具体的ユーザー、マーケット及び市場規模等に関する効果

現在、民間航空機の機体、エンジン、装備品の各部門を中心に生産が増加しており、航空機産業は我が国の経済成長を牽引する産業として注目されている。(一社)日本航空機開発協会の需要予測によると、世界の航空機産業の市場規模は2008年の60兆円に対し、年平均5%程度成長し、2028年には150兆円以上の規模になると予測されており、中でもアジアが最大のシェア32%を占めると予測されている。機体製造産業においても、現在、世界には19,877機のジェット機が運行されているが、今後20年間の間に新規需要分として17,270機、代替え需要分として15,418機、合計32,688機の需要を見込むことができる。

本事業は航空機に多用されるストレートベベルギヤのペアリング率向上による高機能化及びコスト削減を目的とした事業である。今後、増え続ける航空機需要と相俟って、本研究開発の事業化効果は非常に高いと考えられる。



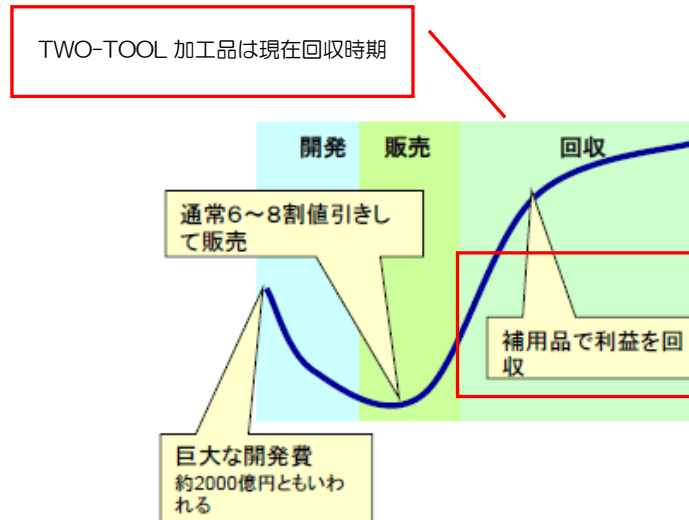
(出所：民間航空機に関する需要予測 2015-2034 一般社団法人日本航空機開発協会)

### ジェット旅客機の需要予測

#### 【川下企業（顧客）ニーズ】

##### ＜航空機産業の現状＞

航空機エンジン産業のビジネスモデルには特徴があり、平成25年経済産業省製造産業局の資料によると、エンジンの開発費は通常約2,000億円の投資を行う必要がある。しかし、航空機エンジンの販売にあたっては通常6～8割値引きして販売されており、エンジンの販売のみでは投資コストの回収が出来ない。そのため30～40年余りかけて、補用品の販売でエンジンの開発費と利益を回収することになる。しかし、従来の専用加工機で製造する航空機向けストレートベベルギヤは、相対するギヤのペアリング率が悪く、製造コストの増加や安定供給において課題を有しており、航空機エンジンの投資コストの速やかな回収の障害となっている。加えて昨今の航空機業界は、短距離向け小型機（シングルアイル）がビジネスの中心となり、多品種少量生産型から少品種大量生産型へとシフトしている。そのため高機能、高価格重視から価格重視、量産性重視の方向へシフトしている。こうした市場動向に適合した高品質・高信頼性を有するストレートベベルギヤを「より安く作る」技術を求めており、生産コストの低減と歯車の機能向上に関する技術開発を早期に行う必要がある。



航空機開発コスト回収構造

< 研究開発の効果 >

航空機市場におけるストレートベベルギヤの生産コスト削減と機能性向上のニーズに対応するためには、汎用性の高い加工機による新たな加工手法及び加工技術の開発が必要となる。加工機の選定条件としては、次のすべての項目を満たす必要がある。

航空機部品製造現場における加工機選定条件

- 加工設備の汎用性が高く入手しやすい
- 品質が安定している
- メンテナンス性が良く、設備停止時間が短い。
- 設備更新が可能であり、長期で安定した加工ができる。
- 海外調達の特種専用工具が不要であり、国内で入手性のよい市販工具で加工ができる。
- 加工面に対して、適切な工具を接触させることができ面粗さを出す事ができる。

こうした条件に該当する最適な加工機は、5 軸マシニングセンタであると結論付けた。本研究開発は、航空機用ストレートベベルギヤの高い品質と信頼性の向上を確保することと同時に相対するギヤ同士のペアリング率を向上させるための加工技術の開発を通じて、航空機エンジンの信頼性を更に向上させる事業であり、我が国の航空機産業の競争力維持・強化において果たす役割は極めて高い。



### (2) 事業化見込み

今回の実験加工から得た切削理論は、曲面加工の品質向上へ向けた工具傾斜角など、以前の当社では発想も浮かばなかった手法を学ぶことができた。これは、当社の独自性の技術力を強化するものである。そして、近年販売されるソフトや加工機の基礎能力は向上しているが、歯車の微細加工では満足できることはなく、独自技術と融合する必要があり開発を強力に進めることができた。

今回の研究内容について、航空機産業以外からの問い合わせもあり、市場ニーズとマッチングしていることから、航空機、電車、自動車などのインフラ、工作機械、産業機械など、今後の産業を支える駆動部品の歯車の特性を強化し販売することができるようになる。特に航空機産業の部品は、人命に大きく関わる部品のため、高精度に安定供給できる製造工程が重要となる。

今回の補助活動を通じて産学共同開発の進め方や情報交換方法など、新たな繋がりができ今後の事業でも友好関係を結ぶ結果となった。そのなか、歯面の独自解析ソフトや、CAD/CAMの操作など、当社だけではなく、アドバイザーや、加工機、ソフトの販売先などと連携することで、補助事業を無事進めることができた。ただ、今回実験加工を通じて特殊歯面調整加工（千鳥模様）を全歯面に施すと、加工工数が通常の10倍近く発生するため事業化では販売加工コストが上昇することが判る。今後は、事業化に向けた販売戦略を研究テーマとし更に開発を進めていく方針である。