

平成29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

「自動車用デフギアの高強度化を実現する
ための高精度歯面設計システムの構築」

研究開発成果等報告書

平成30年 5月

担当局：中国経済産業局

事業管理機関：公益財団法人ひろしま産業振興機構

研究等実施機関・法認定事業者：株式会社オンド

研究等実施機関：広島県立総合技術研究所

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	p. 1
1-2	研究体制	p. 4
1-3	成果概要	p. 5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	p. 6
第 2 章	本論	
2-1	解析結果と実機評価結果の強度データベース作成	p. 6
2-2	最適歯面形状の決定	p. 11
2-3	最適化歯面をおり込んだデフギア製作	p. 14
2-4	最適化歯面をおり込んだデフギアの実機試験	p. 16
2-5	試験終了品の特性調査	p. 20
第 3 章	全体総括	
3-1	補助事業の成果	p. 25
3-2	研究内容総括	p. 25
3-3	補助事業終了後の技術課題	p. 26
3-4	ディファレンシャルユニットの事業化見通し	p. 26
3-5	事業化展開	p. 27

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

近年の自動車開発においては、運転性能向上と低燃費化を図るため変速機の多段化が進んでいるが、現設計では変速機の全長及び外径が大きくなり、車体設計(他部品とのスペース設計)上うまく行かない。よって変速機の燃費向上及び車両への搭載性を向上させる小型軽量化を実現する為、主要部品の新たな設計、技術開発が求められている。

変速機は、主にエンジン連結部及び変速機構部、ディファレンシャルユニット部から構成されているが、従来から変速機構部の小型化については、新構造のスケルトンの開発及び構成部品の小型高強度化、及びディファレンシャルユニット部の小型化については、デフケース及びデフギアの高強度化に取り組んで来ている。

デフケース及びデフギアの小型軽量化の研究成果として、(株)オンドが独自開発した歯形が地場自動車メーカーに2011年から量産採用されているが、今後更なる環境規制等の強化や中国・インドなど新興国を中心とした競合メーカーとの競争激化への対応のため、変速機の重量の約10%を占めているディファレンシャルユニットの更なる軽量化が不可欠である。

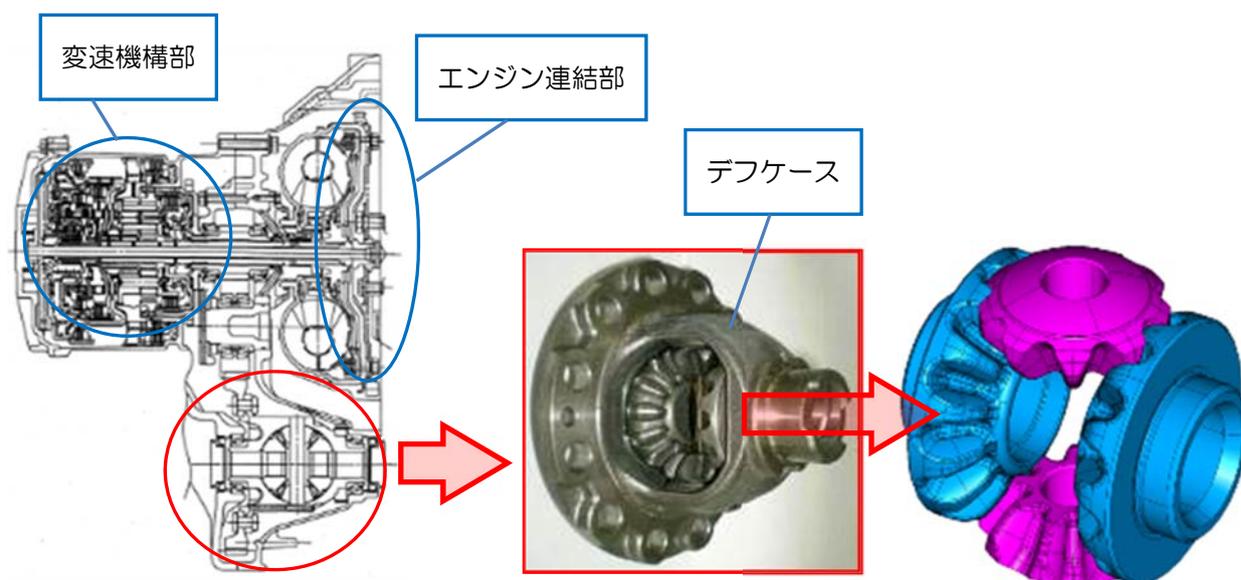


図1 変速機断面図

図2 ディファレンシャルユニット

図3 デフギア

自動車構成部材の小型・軽量化要請に対応するため、車両旋回時の左右輪の回転差を吸収する差動装置に使用されるデフギアについて、歯面形状の高精度測定技術と高感度解析技術からなる高精度歯面設計システムを構築し、デフギアの高強度化を達成することによる、ユニットとしてのダウンサイジングを実現する。

デフギアの強度はギアの歯当たりが大きき影響され、その歯当りは歯面形状によって決まる。従来のデフギアの開発は実機試験のトライ&エラーによる経験的な手法(表1)で歯面形状を決定していたため、費用と時間がかかる上に、必ずしも高強度化のための最適歯面形状を得られていなかった可能性が高い。そこで、新技術による高強度化を実現するための高精度歯面設計システムを構築する。

表1 従来の開発方式と今回開発する方式の比較

	従来技術	新技術
歯面設計フロー		
歯面測定	<p>9点×5点=45点測定</p>	<p>歯面全域測定</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・最適歯面の可能性が低い ・時間が掛かる ・検証レベルが低い ・歯面測定範囲に制限がある ・測定解像度が低い 	<ul style="list-style-type: none"> ・最適歯面が見つかる ・時間が早い ・検証レベルが高い ・歯面測定範囲に制限がなく、歯面全域を測定できる ・測定解像度が高い

ディファレンシャルユニットを軽量化するためには、構成部品の一番内側に配置されるデフギア（サイドギアとピニオン）を小型化しなければならない。デフギアは最終減速（増幅）されたエンジン駆動力をタイヤに伝達し、且つ車両旋回時には左右輪の回転差を吸収する機能が要求される部品である。

各自動車メーカー及び変速機専門メーカーは、従来のグリーソン社の機械加工をベースとしたレバサイクル歯形を採用していたが、エンジンのパワートレインの電子制御等の技術の進歩により、デフギアに対する強度要件が、急発進時等に発生する衝撃的過大負荷に対するギアの破損強度要件から、ギア歯面の面圧疲労強度要件（ピッチング強度）に移行しており、各社とも歯形を高歯設計とし噛合い率を上げ、ギア歯面の面圧を低減する独自の歯形を採用する傾向にある。

（株）オンドが独自歯形を開発・採用したことで、当時（2011年）の目標であった17%の軽量化に成功した。ディファレンシャルユニットのベンチマーク結果（トルク VS 重量）を下図に示す。現状においては競合他社最軽量化ラインを下回っており競争力を維持している。

ここで、独自歯形とは、歯車のかみ合い理論に基づき、デフギア用に(株)オンドが独自開発した歯形であり、歯丈、歯厚、歯元Rを自由に設計でき、歯面も必要に応じて自由に修整可能である。高歯化し、歯厚を大きくし、歯底をフルRにすることで高強度を実現している。

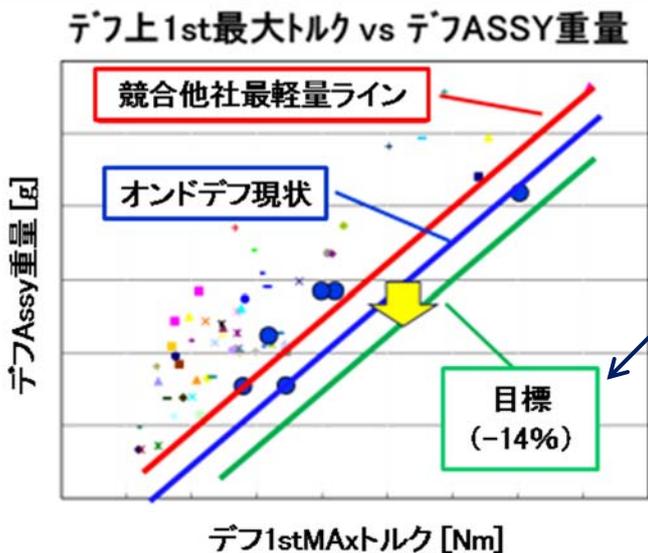


図4 ベンチマーク結果

ピニオン球面径が 2mm 縮小出来れば、デフユニットで 14%軽量化が出来る。ピニオン球面径を 2mm 縮小するには、歯面強度 11%UP(応力比)が必要。

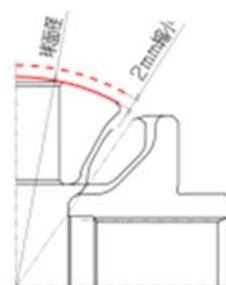


図5 デフギアセット図

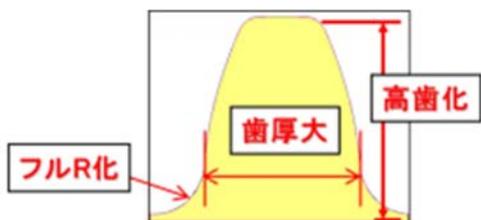


図6 独自歯形の断面

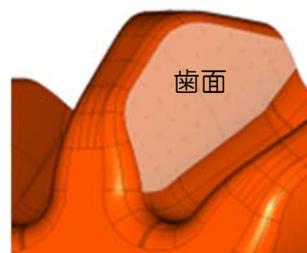


図7 独自歯形の歯面形状

具体的にはメーカーからは新規車両開発において 14%の軽量化を求められている。弊社のディファレンシャルギアシリーズにおいて、従来よりも 1 ランク小型のディファレンシャルギアで強度を満足できれば 17%の軽量化が見込め、14%軽量化の目標をクリア出来る。1 ランク小型化する場合歯面強度に置き換えると 11%の強度アップが必要であり、高強度化の目標として歯面強度 11%アップを目標としている。

デフギアの高強度化には図 8 のデフギア高強度化技術構想に示す通り二つのアプローチがあり、デフギア自体で歯面・歯元曲げ応力を低減する方法と、材料・加工によって強度アップさせる方法がある。

後者の材料、加工による強度アップのアイテムとしては、特殊材料、表面改質、特殊熱処理があり、特殊材料については、過去に鋼材メーカーと共同で高強度材の開発・評価を行っており、高強度化に繋がる材料はコストアップとなることが確認されている。ショットピーニング等の表面改質、浸炭二次焼入れ、高周波焼入れ等の特殊熱処理についても既

存製品で実施している製品があるが高強度化に繋がる処理はいずれもコストアップとなる。これらの処理は高強度化の最終手段であり、競争力確保の為にコストアップを伴わない前者のアイテムについて追及する必要がある。中でも歯形はデフギア強度の最も基本となる特性で有りながら、最適な歯面形状の追及ができておらず、先ずその基本となる所を追及することが高強度化において急務であると考え活動を行った。

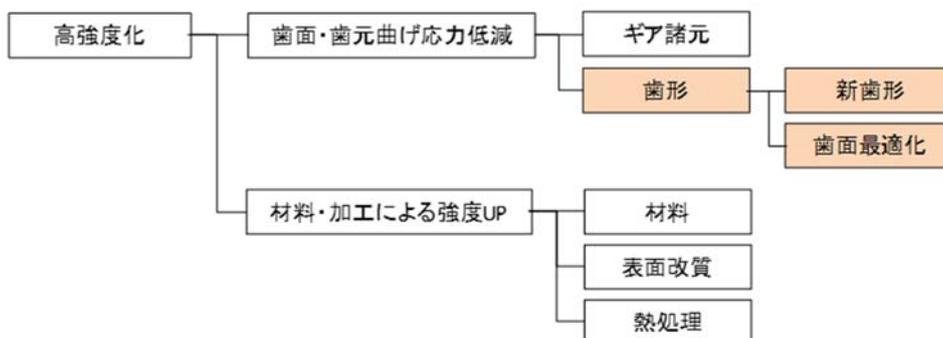
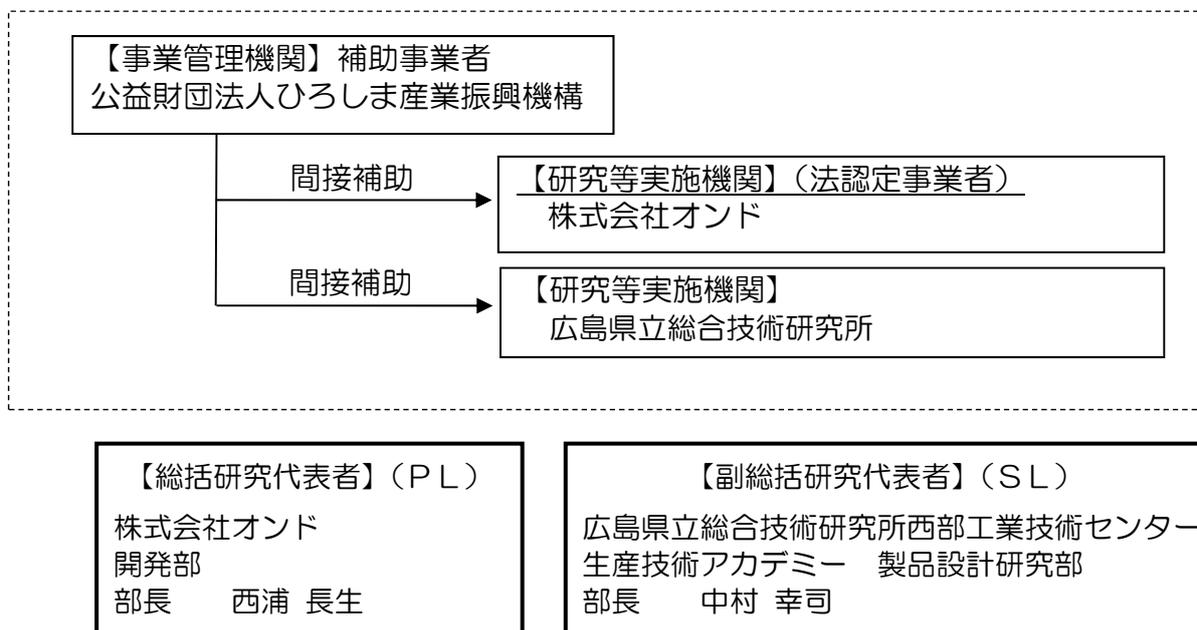


図8 デフギア高強度化技術構想

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制



1-3 成果概要

【1】デフギア高精度歯面設計システムの構築

【1-1】解析ソフトウェアの調査/ベンチマーク/選定/導入

連続的に変化するかみ合い状態での歯面接触応力を解析可能である「非線形構造解析ソフトウェアLS-DYNA」を導入した。

【1-2】歯面形状測定機の調査/ベンチマーク/選定/導入

デフギアの歯面を正確に測定し、解析へ反映可能である「高精度非接触センサー3D計測システムHN-C3030」を導入した。

【1-3】解析結果と実機評価試験の強度データベース作成

(1) 歯面接触応力解析

導入した歯面形状測定機にてデフギアの歯面形状を取り込み、LS-DYNAにて実機評価試験を再現した条件で歯面接触応力解析を実施した。

(2) 実機評価試験

(株)オンドが所有するダイナモ試験機により、歯面強度を評価するピッチング試験を実施した。

(3) 実機評価結果からのピッチング面積10%時のサイクル予測

歯面強度の評価基準とするピッチング面積10%時のサイクルを予測するため、ピッチング進展試験を実施した。進展試験結果より、サイクルとピッチング面積の相関式を求め、実機評価結果から、ピッチング面積10%時のサイクルを予測することが可能となった。

(4) 強度データベース作成

解析で求めた歯面接触応力と実機評価ピッチング面積10%時のサイクルの相関式を求め、解析で求めた歯面接触応力と実機評価試験のピッチング面積から、机上で歯面強度の評価が可能となった。これにより、実機評価でのトライ&エラー廃止でき、顧客の要求歯面強度を満足する歯面決定と、歯面設計開発期間の短縮が可能となった。

【1-4】最適歯面形状の決定

歯面接触応力解析を用いて、ピッチング起点部の歯面接触応力低減となる最適歯面形状を決定した。最適歯面形状の決定にタグチメソッドを適用したことで、SN比による制御因子（歯面形状）の各水準が歯面接触応力に与えるバラツキと、制御因子（歯面形状）が歯面接触応力に与える感度を把握することができた。決定した最適歯面形状は現行歯面に対し18.5%の応力低減となり、目標である応力比で歯面強度11%アップを達成した。

【2】本研究で開発したデフギアの評価

【2-1】最適化歯面をおり込んだデフギア製作

最適歯面をおり込んだデフギアを製作したが、デフギア製作工程間における各歯面変化量の見込み違いがあり、設計歯面通りの最適歯面ギアを製作することができなかった。ただし、歯面接触応力で現行歯面に対し12.4%の応力低減はできており、目標値の11%を満足した歯面形状となった。本研究で製作したデフギア自体の各工程の変形量は測定済で

あり、最適歯面形状のデフギア製作は可能と考える。

【2-2】最適化歯面をおり込んだデフギアの実機試験

製作したデフギアを(株)オンドが所有するダイナモ試験機にて実機試験を実施した。現行歯面に対し、歯面接触応力 12.4%低減による歯面強度アップの効果をピッチング面積比較により確認した。現行歯面のピッチング面積 40.1%に対し、製作ピニオンではピッチング面積 10.39%であり、歯面接触応力 12.4%低減は、ピッチング面積 74.1%低減となる結果が得られた。

【2-3】試験終了品の特性調査

本研究で求めた接触応力分布の妥当性を検証するため、歯面形状以外で歯車強度に影響する要因として考えられる、硬さ分布、残留オーステナイト量、応力変化を測定し、ピッチングが発生した当たり面の形状を観察した。今回調査したデフギアではピッチングの発生に対する、個別の歯の硬さ・残留応力・残留オーステナイト量の影響を確認することはできなかった。ただし、表面処理が行われていないサイドギアでは、残留オーステナイト量、すなわち、熱処理のバラツキがピッチングの発生に影響している可能性が示唆された。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人ひろしま産業振興機構

研究開発支援センター 神田敏和

〒730-0052 広島市中区千田町3-7-47

TEL：082-240-7712 FAX：082-242-7709

E-Mail：t-kanda@hiwave.or.jp

株式会社オンド

開発部 西浦長生

〒739-0146 広島県東広島市八本松飯田1丁目1番1号

TEL：082-428-2217 FAX：082-428-9338

E-Mail：osao_nishiura@ondo.co.jp

第2章 本論

2-1 解析結果と実機評価結果の強度データベース作成

(1) はじめに

解析で求めた歯面接触応力と、実機評価ピッチング面積 10%時のサイクルの相関が-0.8以上となる関係式を求める。

強度データベース作成の流れを図9に示す。歯面形状測定機によりデフギア全体を正確に測定し、取り込んだ歯面を使用して解析ソフトウェアで歯面接触応力を求めた。一方で測定した同一デフギアをダイナモ試験機にて実機評価を行い、ピッチング面積 10%時のサイクルを求めた。ピッチング面積は、歯当り面積をピッチング発生面積で割った値であり、ピッチングの進展や顧客との取り交わしを踏まえて、決定した歯面強度評価基準である。

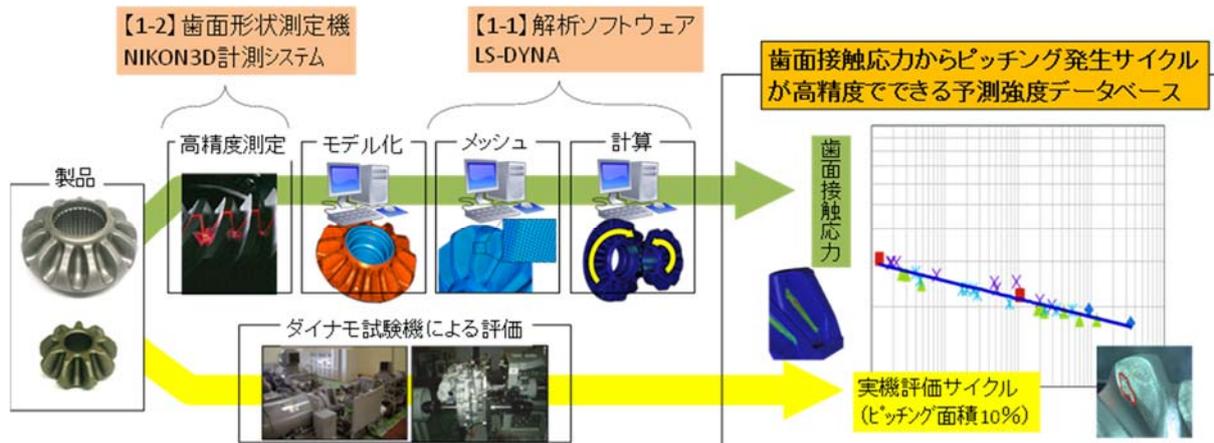


図9 強度データベース作成の流れ

本項では、解析で求めた歯面接触応力と、実機評価ピッチング面積 10%時のサイクルから、強度データベースを作成した結果について報告する。

(2) 方法、結果及び考察

(2) -1 歯面接触応力解析方法

歯面接触応力解析の手順を図 10に示す。導入した歯面形状測定機にて、デフギアの歯面を含む全体形状を測定した。測定データは 0.02mm 間隔の点群データとなっており、メッシュ作成ソフトへのデータ変換時の容量制限と、解析精度確保を考慮し、測定した点群データを 0.08mm 間隔に間引いて出力した。

出力した点群データから、デフギアのモデルを作成した。モデル作成には点群をサーフェイス化する必要がある。サーフェイス化は面として実態化する作業であるが、点群欠落や明らかに実体形状に沿わない点群が異常要素と認識されサーフェイス化が出来ない。そのため、異常要素の修正を行った。

次に、モデルに対しメッシュを作成した。実際の現象を再現するための解析条件（荷重・回転・拘束・接触条件）の設定を行い、歯面接触応力解析を行った。

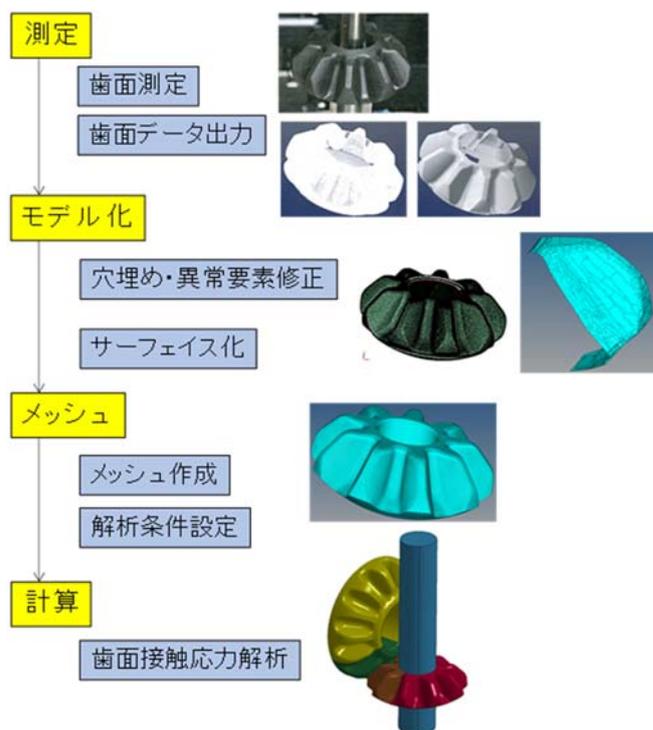


図 10 歯面接触応力解析の手順

(2) -2 ダイナモ試験機による実機評価方法

デフギアをディファレンシャルユニットに組み込み、(株)オンドが所有するダイナモ試験機とギアボックスを用いて実機評価を行った。歯面強度を評価するピッチング試験を行い、ピッチング面積とサイクルを求めた。



図 11 ダイナモ試験機

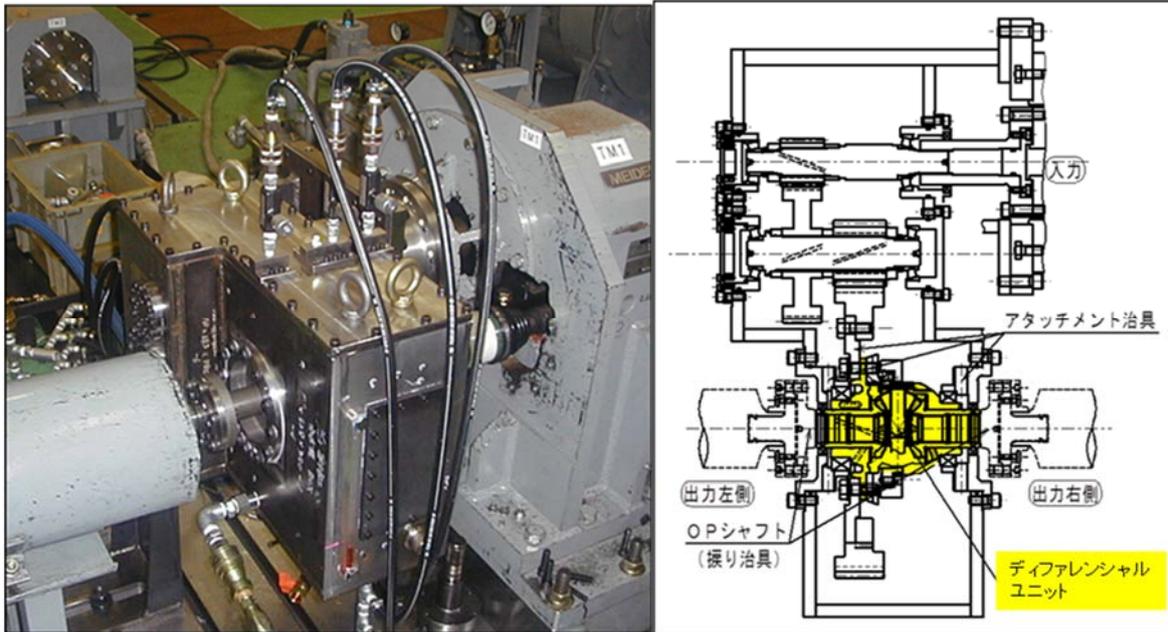


図 12 ディファレンシャルユニットを搭載したギアボックス

(2) -3 実機評価結果からのピッチング面積 10%時のサイクル予測

強度データベースを作成するには、実機評価結果からピッチング面積 10%時のサイクルを求める必要があるが、実機評価試験中はギア歯面のリアルタイムな確認が困難であるため、どのタイミングでピッチング面積が 10%になるのかわからない。そこで、ピッチング面積の進展を調べるための試験を実施した。ピッチングの進展試験は、同一ギアを使用し、規定の試験サイクル数で試験を一時停止し、ピッチング面積を計測後、試験を再開する方法を繰り返し実施した。図 13 にディファレンシャルユニットのギア構成、図 14 にピッチング進展試験結果を示す。

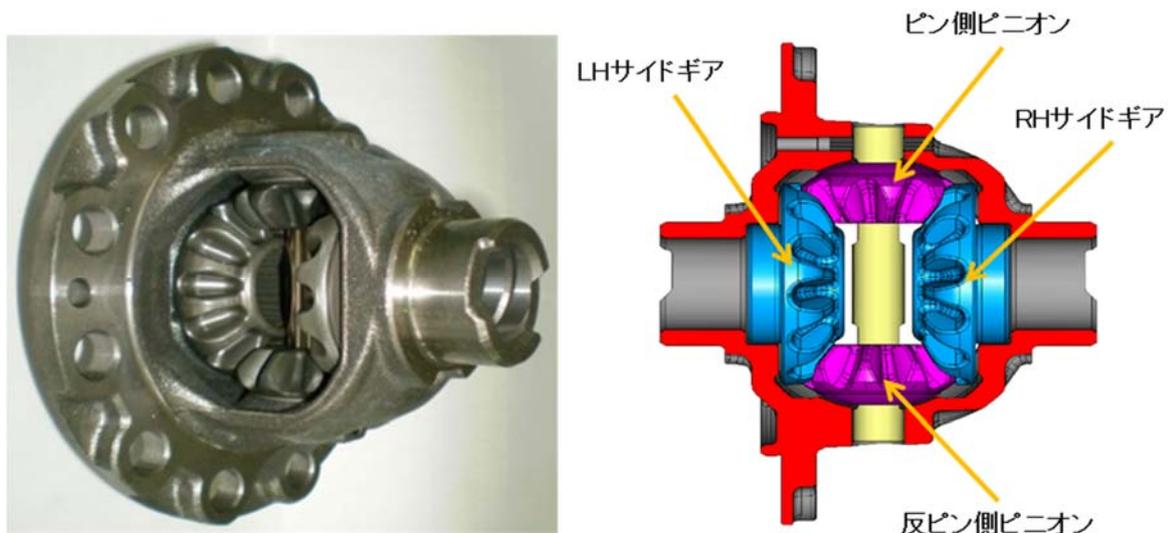


図 13 ディファレンシャルユニットのギア構成

デフ上トルク [N・m]		1,000				
試験時間 [hr]		20	22	24	26	30
試験サイクル		84,000	92,400	100,800	109,200	126,000
LHサイドギア						
RHサイドギア						
ピン側ピニオン	LH歯面					
	RH歯面					
反ピン側ピニオン	LH歯面					
	RH歯面					

図 14 ピッチング進展試験結果

ピッチング進展試験結果より、ピッチングの発生位置と進展状況が確認できた。ピッチングはサイドギア歯先、ピニオン歯元に発生している。サイドギアよりもピニオンの方がピッチング面積は大きい結果であった。ピッチングは、発生後緩やかに進展し、ピッチング面積が10%を越えた付近から急速に大きくなっている結果が得られた。

ピッチング進展試験結果から得られたピニオンのサイクルとピッチング面積の関係を図15に示す。関係より、サイクルとピッチング面積の相関式（式1）が得られた

$$A = a^{-b} \times N^c \dots \text{(式 1)}$$

A : ピッチング面積 [%]
 N : サイクル
 a, b, c : 係数

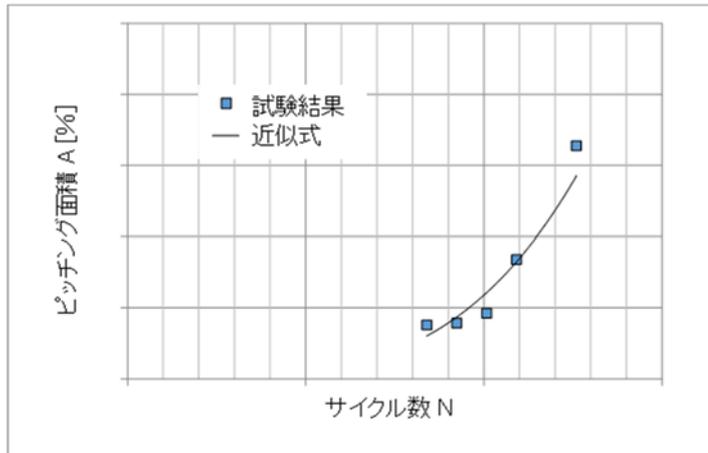


図15 サイクル数とピッチング面積の相関

上記の式1から、ピッチング面積増加分のサイクルが分かるようになり、実機評価結果のピッチング面積10%時のサイクルを予測することが可能となった。

(2) -4 強度データベースの作成

歯面形状が異なるデフギアの歯面接触応力解析と実機評価試験を実施した。同一負荷トルクでの歯面接触応力解析結果と実機評価結果を図16に示す。

		TYPE1	TYPE2	TYPE3	TYPE4
デフトルク [N・m]		1,000	1,000	1,378	1,378
試験時間 [hr]		100	100	20	22
試験サイクル		420,000	420,000	84,000	92,400
歯面接触応力 [MPa]	ピニオン	3780	3310	4680	4680
	サイドギア	3400	3110	4080	4080
実機評価結果	ピニオン				
	サイドギア				

図16 歯面接触応力解析結果と実機評価結果

解析における最大接触応力発生位置と実機評価のピッチング発生位置は同じであり、解析結果は妥当であると判断した。実機評価結果に対し、サイクル数とピッチング面積の相関式（式 1）からピニオンのピッチング面積 10%時のサイクル数を算出した。歯面接触応力とピッチング面積 10%時のサイクル数の関係を図 17 に示す。この関係から、歯面接触応力に対するピッチング面積 10%時のサイクル数の相関式（式 2）が得られた。

$$S = aN^{-b} \dots \text{ (式 2)}$$

S : 歯面接触応力 [MPa]
 N : ピッチング面積 10%
 時のサイクル
 a, b : 係数
 相関係数 : -0.859

式 1 と式 2 により、解析で求めた歯面接触応力と実機評価ピッチング面積 10%時のサイクルとの相関が-0.8 以上となる関係式を求めることができた。

サイクルとピッチング面積の相関式（式 1）と、ピッチング面積 10%時のサイクル数と歯面接触応力の相関式（式 2）より、強度データベースを作成した。また、目標である相関-0.8 以下も達成できた。これにより、解析で求めた歯面接触応力と実機評価試験のピッチング面積から、歯面強度の評価が可能となった。

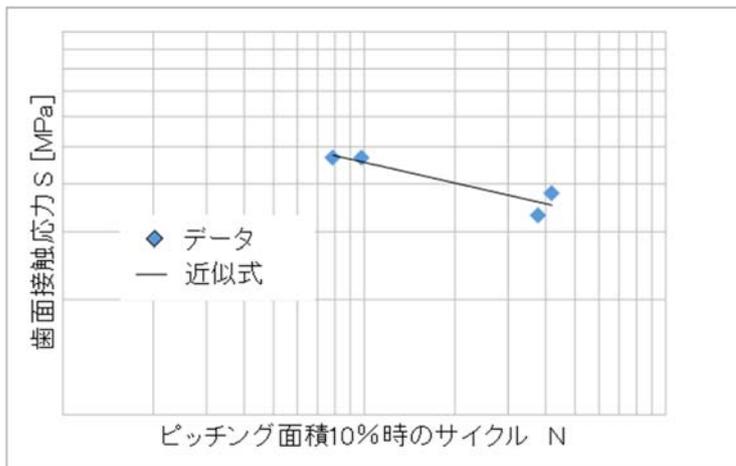


図 17 ピッチング面積 10%時の
 サイクル数と歯面接触応力の相関

2-2 最適歯面形状の決定

(1) はじめに

ピッチング強度はギアの歯当りが大きく影響することが分かっており、歯当りを決定するギア歯面形状の歯すじ方向と歯形方向の修整量を最適化することにより、ピッチング強度アップが可能となる。

本項では、歯面接触応力解析を用いて、ピッチング起点部の歯面接触応力を低減し、応力比で歯面強度 11%アップとなる最適歯面形状を決定した結果について報告する。

(2) 方法、結果及び考察

(2)-1 最適歯面形状決定方法

最適歯面形状の決定には、タグチメソッドを適用した。タグチメソッドは、多くの因子が関係している問題解析に対し、効率良く最適解を求めることが可能である。評価特性（歯面接触応力）に影響する、制御因子（歯面形状）の振らし水準を決定し、SN 比（バラツキ評価）と感度（評価特性に対する感度）を評価し、歯面接触応力が最小となる最適歯面形状を決定した。

(2)-2 制御因子（歯面形状）と振らし水準

歯面接触応力に影響する制御因子（歯面形状）と、制御因子の振らし水準を決定した。制御因子（歯面形状）は、歯すじ方向で 2 因子、歯形方向で 2 因子とした。形状を図 18 に示す。

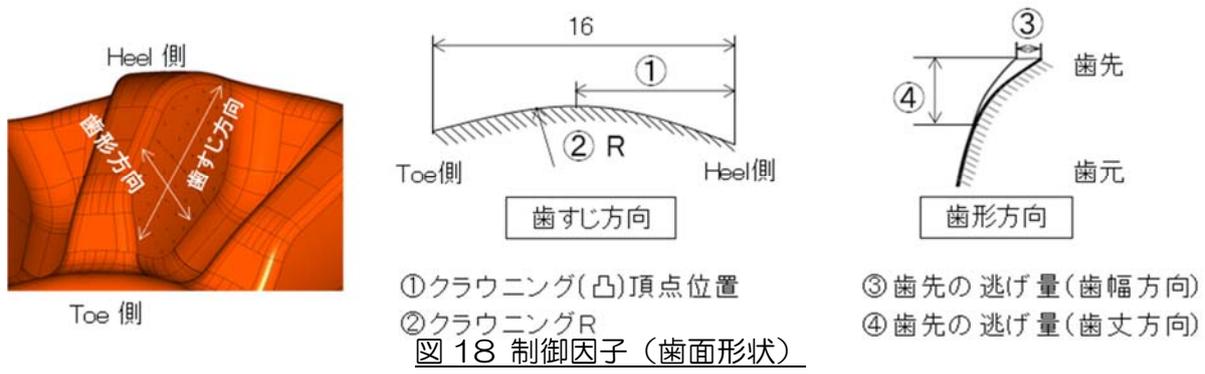


図 18 制御因子 (歯面形状)

次に、制御因子 (歯面形状) の振らし水準を図 19 に示す。

	①	②	③④
水準1	a	b	c, d
水準2	e	f	g, h

図 19 制御因子 (歯面形状) 振らし水準

(2) -3 直交表の作成

決定した制御因子と水準より直交表を作成した。直交表は、各因子について、どの水準も同じ回数出現するように割り付けた表であり、制御因子と水準の数によって、使用する直交表を選択する。本研究では、制御因子 4 つ・水準 2 つであるため、L4 直交表を選択した。直交表により決定した No1~No4 の歯面形状を図 20 に示す

No	①	②	③④
1	水準1	水準1	水準1
2	水準1	水準2	水準2
3	水準2	水準1	水準2
4	水準2	水準2	水準1

No	①	②	③④
1	a	b	c, d
2	a	f	g, h
3	e	b	g, h
4	e	f	c, d

図 20 直行表と各歯面形状

(2) -4 歯面接触応力解析

直交表により決定した歯面形状と現行歯面形状の歯面接触応力解析を実施した。現行歯面形状は、導入した歯面形状測定機にて測定した実体歯面形状である。図 20 の No.1~No.4 歯面形状は設計歯面形状となっている。歯面接触応力解析結果を図 21 に示す。No1 歯面形状の歯面接触応力が最も低い結果となった。

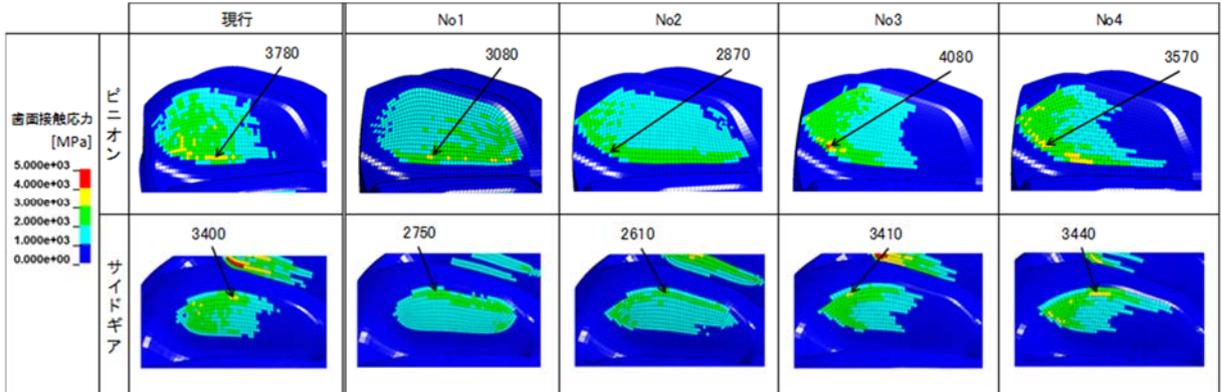


図 21 歯面接触応力解析結果

(2) -5 SN比評価

求めたピニオンの歯面接触応力結果を利用し、SN比の評価を実施した。SN比は各制御因子の各水準が歯面接触応力に与えるバラツキを評価する指標であり、SN比が大きい程、歯面接触応力のバラツキは小さいと評価する。

歯面接触応力結果と式3及び式4を利用し、制御因子の水準毎にSN比を算出した結果を図22に示す。

$$SN比 = -10 \log \sigma^2 \dots (式3)$$

$$\sigma^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n} \dots (式4)$$

x：歯面接触応力 [MPa]

n：データ数

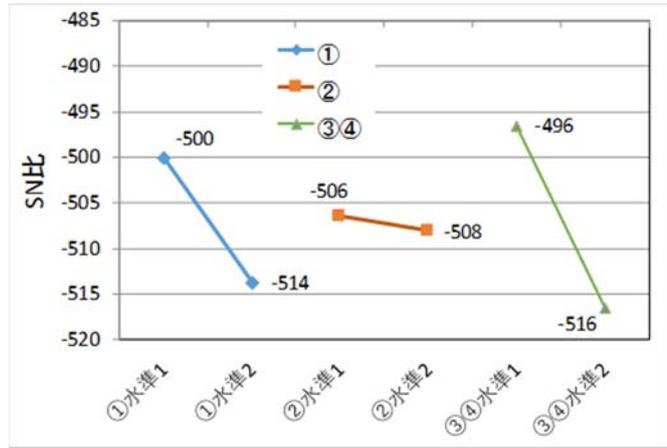


図22 SN比の算出結果

SN比を算出した結果、図18の①クラウニング（凸）頂点位置、②クラウニングR、③④歯先の逃げ量、いずれの制御因子も、水準1が歯面接触応力に与えるバラツキが小さい結果となった。

(2) -6 感度評価

感度評価を実施した。感度は各制御因子が歯面接触応力に与える感度を評価する指標である。感度の傾きが大きい程、歯面接触応力に与える感度が高いと評価する。

歯面接触応力結果、式5及び式6を利用し、制御因子の水準毎に感度を算出した結果を図23に示す。

$$感度 = \sigma \dots (式5)$$

$$\sigma = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \dots (式6)$$

x：歯面接触応 [MPa]

n：データ数



図23 感度の算出結果

感度を算出した結果、歯面接触応力に対し、傾きの大きい③④歯先の逃げ量の感度が高く、歯面接触応力への影響が大きくなることが分かった。

(2) -7 最適歯面形状の決定

SN比と感度の評価結果から、No1を最適歯面形状に決定した。現行歯面に対し、No.1歯面は応力値で18.5%低減であり、目標とする応力比で歯面強度11%アップを達成できた。

2-3 最適化歯面をおり込んだデフギア製作

(1) はじめに

解析により決定した最適歯面のピッチング強度アップを確認するため、最適歯面をおり込んだデフギアを製作し、ダイナモ試験機による実機評価を実施する。

本項では、最適化歯面をおり込んだデフギアの製作と、製作したデフギアの歯面形状測定結果について報告する。

(2) 方法、結果及び考察

(2) -1 最適歯面をおり込んだデフギアの製作

最適化歯面をおり込んだデフギアを量産と同一工程で製作した。デフギア製作工程を図24に示す。

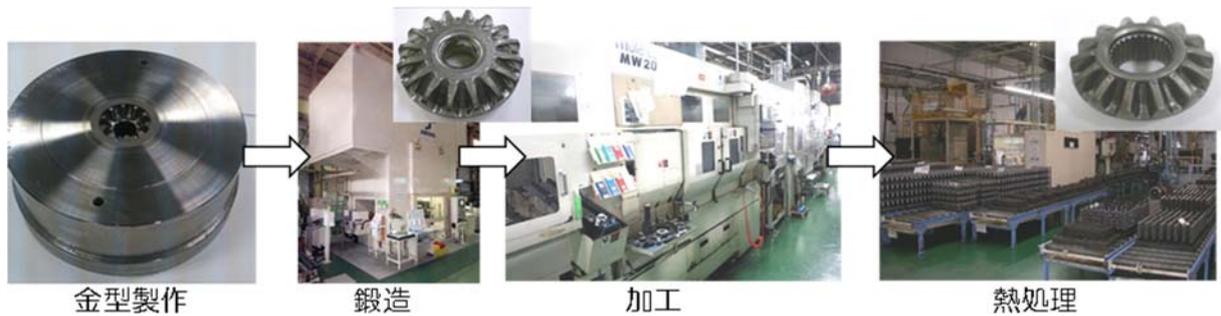


図 24 デフギア製作工程

鍛造時のスプリングバックや熱処理変形により、金型と完成品の歯面形状は一致しない。そのため、デフギア製作工程間における各歯面変化量を考慮する必要がある。本研究で製作したデフギア金型には、量産品の歯面変化量をおり込んだ。

製作したデフギアの歯面形状が設計どおりにできているか評価するため、本研究で導入した歯面形状測定機で測定した。歯面測定位置を図 25 に、歯面測定結果を図 26 に示す。

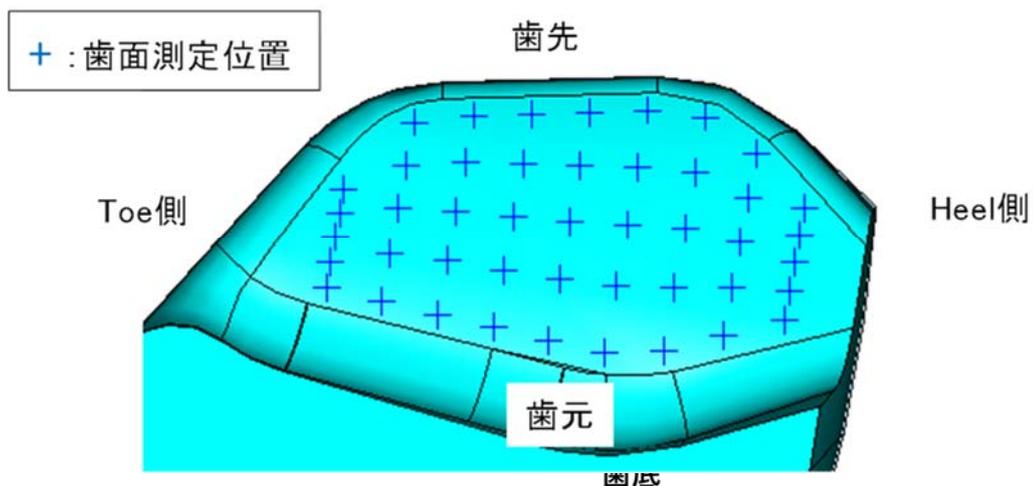
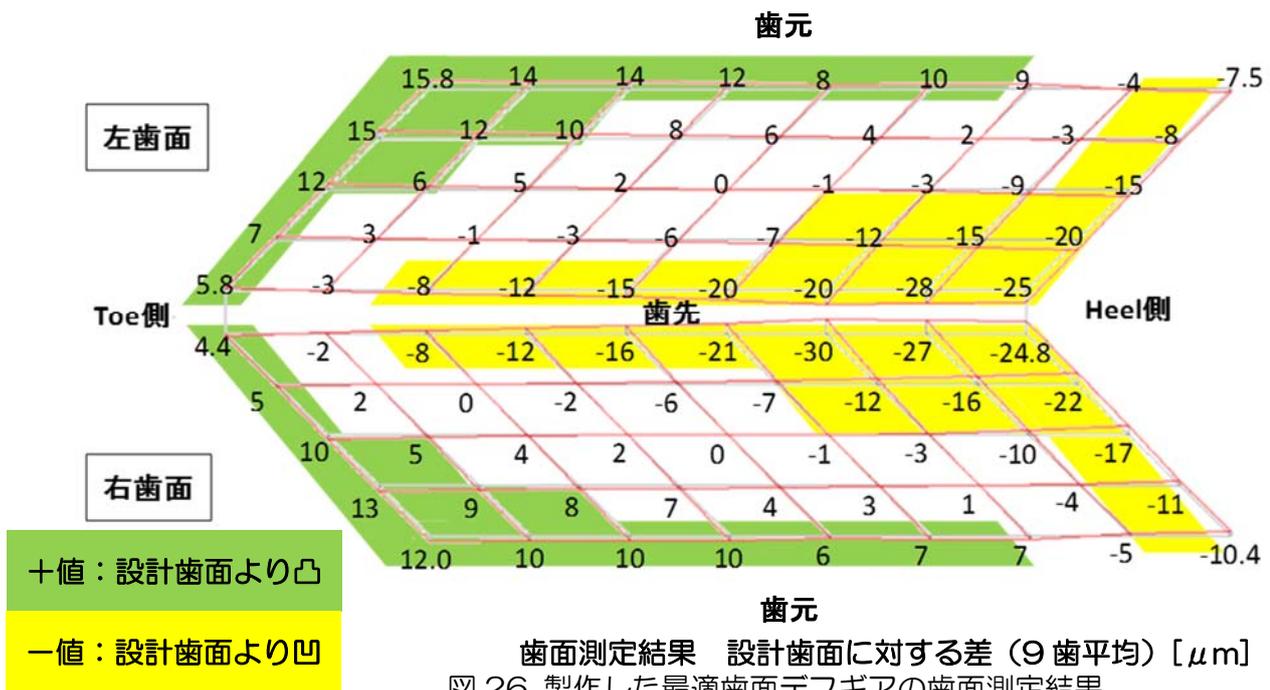


図 25 デフギア歯面測定位置



歯面を測定した結果、製作したデフギアは、設計歯面に対して差が生じていた。図の緑色で示した箇所は設計歯面よりも凸となっており、黄色で示した箇所は設計歯面よりも凹となっていた。

図 27 に示すとおり、製作したデフギアの歯面接触応力値は、設計歯面に対し 12.4% の応力低減であり、目標値の 11% を満足しており、このデフギアで評価を実施した。また、製作したデフギアの歯面全体測定を実施した。設計歯面に対する差を比較した結果を図 28 に示す。

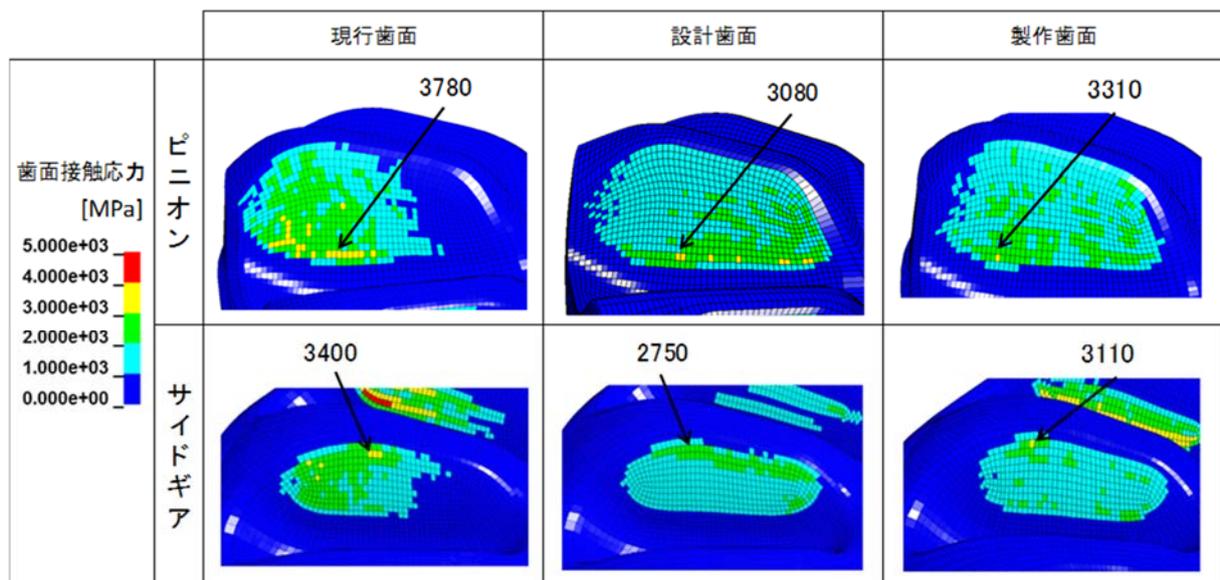


図 27 歯面接触応力結果の比較

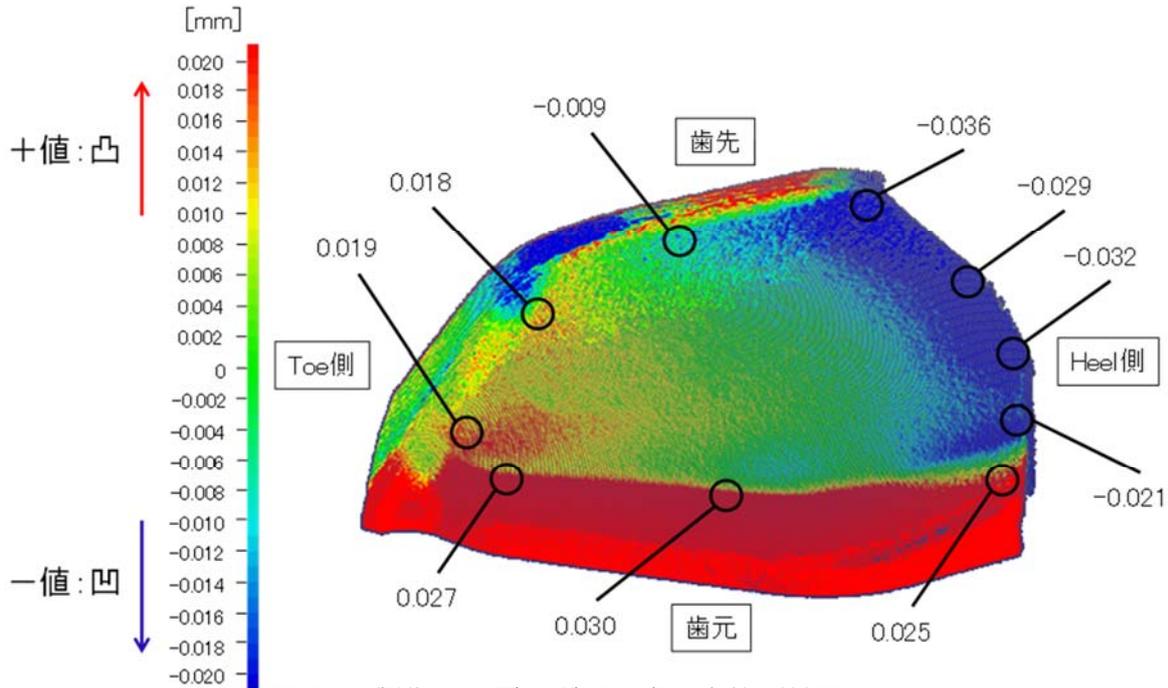


図 28 製作したデフギアの歯面全体測結果

通常の接触タイプの測定機では、指定したポイントしか測定できないが、導入した歯面形状測定機は非接触のレーザー測定機であるため、歯面全体の形状を計測することができた。図は設計歯面と製作歯面の差を表示している。設計歯面に対し、赤色は凸形状、青色は凹み形状を示す。測定結果より、設計歯面に対し、歯元の凸量とHeel側の凹量が大きいことが分かった。また、通常の歯面測定では測定できない相手ギアとのかみ合い範囲内では、最大30 μ m凸形状となっていることが分かった。

デフギア製作工程間における各歯面変化量の見込み違いがあり、設計歯面通りの最適歯面ギアを製作することができなかった。ただし、設計歯面に対し12.4%の応力低減はできており、目標値の11%を満足した歯面形状となった。本研究で製作したデフギア自体の各工程の変形量は測定済みであり、最適歯面形状のデフギア製作は可能と考える。

2-4 最適化歯面をおり込んだデフギアの実機試験

(1) はじめに

製作したデフギアを、(株)オンドが所有するダイナモ試験機により実機試験を実施した。現行歯面に対し、歯面接触応力12.4%低減による歯面強度アップ効果をピッチング面積比較により確認した。

本項では、歯面接触応力析と実機試験の比較検証結果について報告する。

(2) 方法、結果及び考察

(2)-1 歯当り測定結果

歯当り測定結果を図29に示す。歯当りはデフギアを組み込んだディファレンシャルユニットの状態にて、歯面に光明丹を塗布したデフギアを噛み合わせ、光明丹の剥離状態を観察した。現行歯面は、歯当りがHeel側に寄っているが、製作したデフギア歯面では、歯当りがToe側に寄っており、意図した歯当りとなっていることが確認できた。

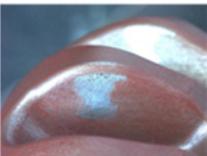
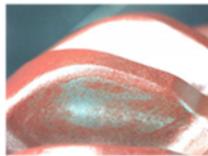
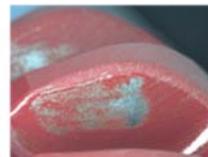
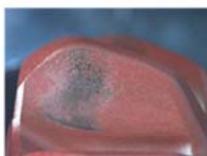
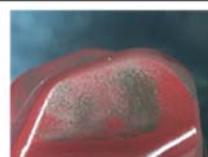
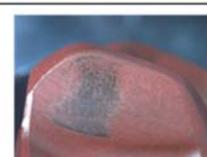
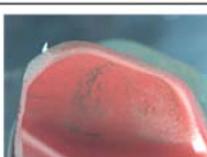
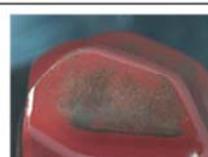
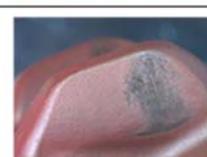
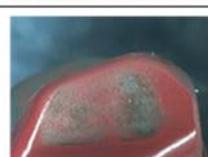
		現行歯面	製作歯面 N = 1	製作歯面 N = 2	製作歯面 N = 3	
サイドギア	LH側					
	RH側					
ピニオン	ピン側	L歯面				
		R歯面				
	反ピン側	L歯面				
		R歯面				

図 29 歯当り測定結果

(2) -2 実機試験による歯面強度アップ効果確認

現行歯面と製作デフギア歯面の実機試験を行い、ピッチング面積比較による歯面強度アップの効果を確認した。試験条件を図 30 に示す。

デフ上トルク [N・m]
試験時間 [hr]
試験サイクル

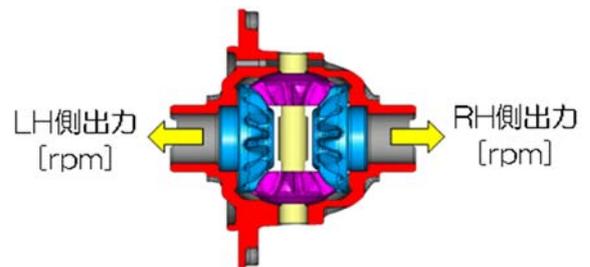


図 30 試験条件

(2) —3 実機試験結果

現行歯面と製作デフギア歯面の実機試験結果を図 31 に示す。

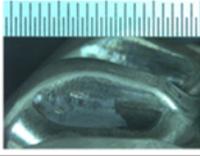
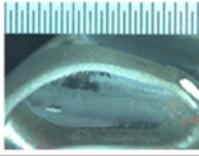
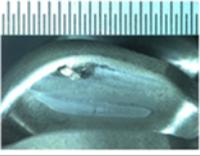
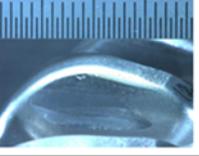
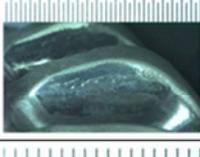
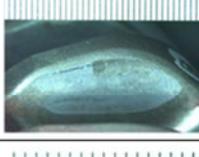
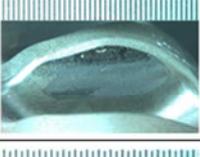
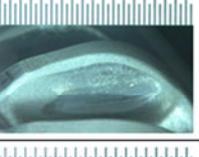
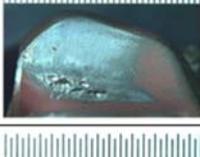
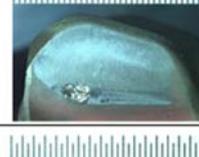
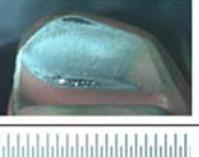
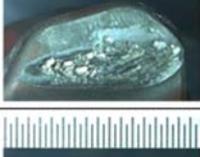
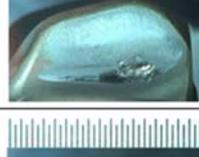
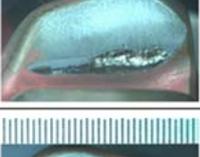
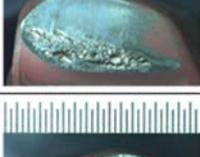
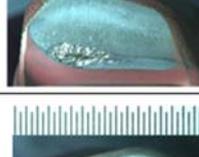
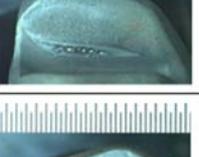
		現行歯面	製作歯面 N = 1	製作歯面 N = 2	製作歯面 N = 3	
サイドギア	LH					
	RH					
ピニオン	ピン側	L歯面				
		R歯面				
	反ピン側	L歯面				
		R歯面				

図 31 実機試験結果

製作ピニオンは現行ピニオンに対しピッチング面積が小さくなっていることより、ピッチング強度アップが確認できた。現行歯面のピッチング面積 40.1%に対し、製作ピニオンではピッチング面積 10.39%であり、歯面接触応力 12.4%低減は、ピッチング面積 74.1%低減となる結果が得られた。

(2) -4 歯面接触応力解析結果と実機試験結果の比較検証

現行歯面と製作歯面における、歯面接触応力解析結果と実機試験結果の比較検証を行った。比較検証結果を図 32 に示す。

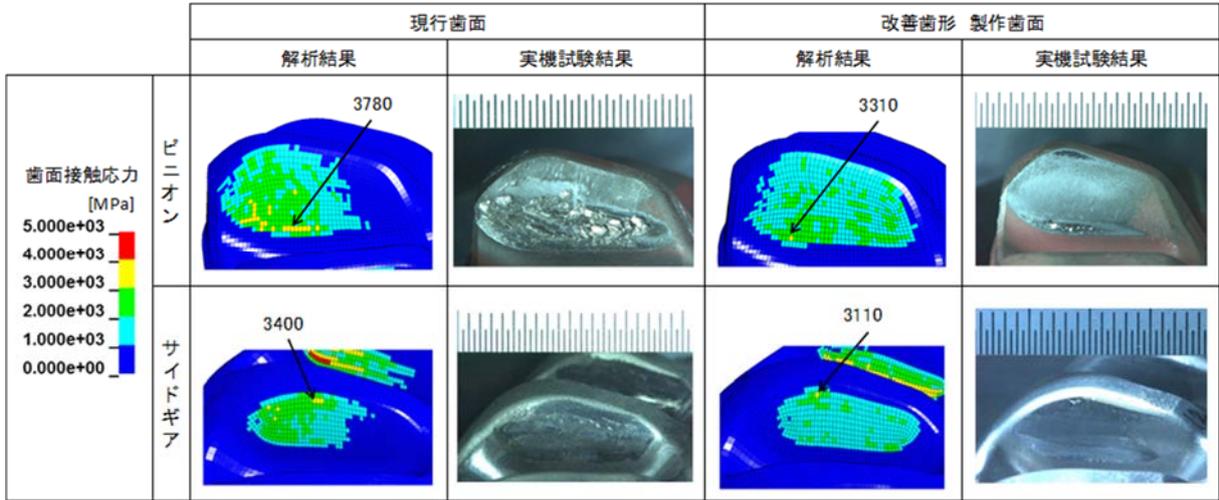


図 32 歯面接触応力解析結果と実機試験

比較した結果、歯面接触応力解析の最大応力発生箇所がピッチング起点部となっている。さらに、導入した歯面形状測定機により、歯面摩耗量の測定が可能となった。その結果を図 33 に示す。

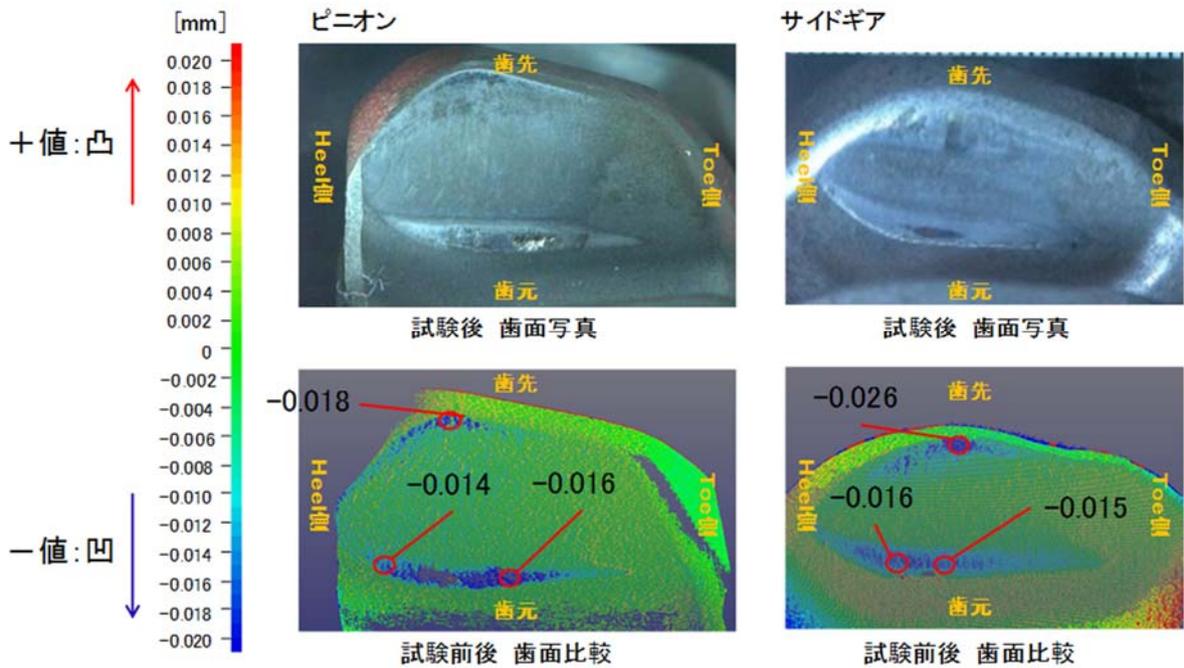


図 33 デフギア試験前後の歯面摩耗量調査結果

以上より、製作したデフギアの歯面強度アップを確認することができた。

2-5 試験終了品の特性調査

(1) はじめに

本項では、本システムで求めた接触応力分布の妥当性を検証するため、歯面形状以外で歯車強度に影響する要因として考えられる硬さ分布、残留オーステナイト量、応力変化を測定し、ピッチングが発生した当たり面の形状を観察した結果について報告する。

(2) 方法、結果及び考察

(2)-1 硬さ分布測定

試験後、ピッチングの発生した歯とピッチングの発生が無く摩耗のみが見られた歯の当たり面中央付近の硬さ分布を図 34 に示す。測定試料は、歯車を水冷切断し、アクリル系樹脂で包埋後、耐水研磨紙で研磨、1 μm 多結晶ダイヤモンドスプレーを使用したバフ研磨を行い、マイクロビッカース硬さ試験機（荷重 0.3Kg）で表面直下深さ 0.05mm から 3.2mm まで測定した。

サイドギア、ピニオンともにほぼ同一傾向で、ピッチングの発生した歯では表面から 0.1mm 付近、ピッチングの発生が無く摩耗のみが見られた歯では 0.2mm 付近が最高硬度となっていた。これはピッチングによって表面が剥離したことによる測定位置の差異が原因と考えられる。

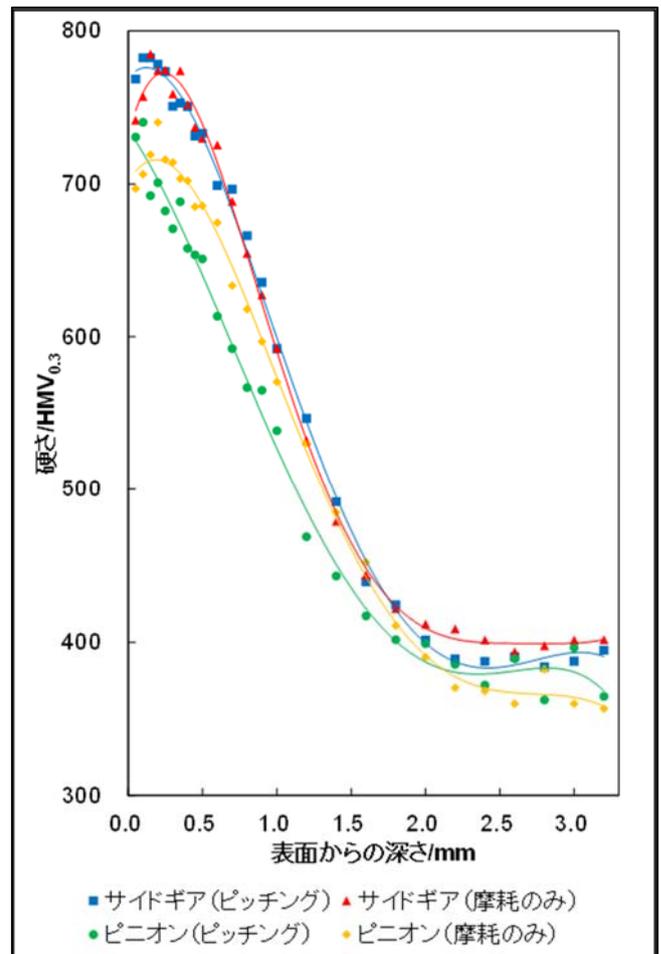


図 34 各歯当たり面中央付近の硬さ分布

(2)-2 残留オーステナイト定量・残留応力測定

歯車の加工・熱履歴のバラツキが、ピッチング発生に与える影響を調べるため、同一ロットで製造されたサイドギア L・R の 2 枚とピニオン P (ピン側) と H (反ピン側) の 2 枚から成るデフギア 1 セットの試験前後の残留オーステナイト及び残留応力を X 線応力測定装置によって測定した。測定位置を図 35 に、残留オーステナイトの定量結果を図 36 に、残留応力の測定結果を図 37 に示す。図 36 及び図 37 の「左」・「右」の赤文字はピッチングの発生が確認された当たり面で、残留応力測定方向はサイドギアの歯先だけは歯筋方向と周方向の 2 方向を測定できたものの、それ以外は歯筋方向しか測定できなかった。

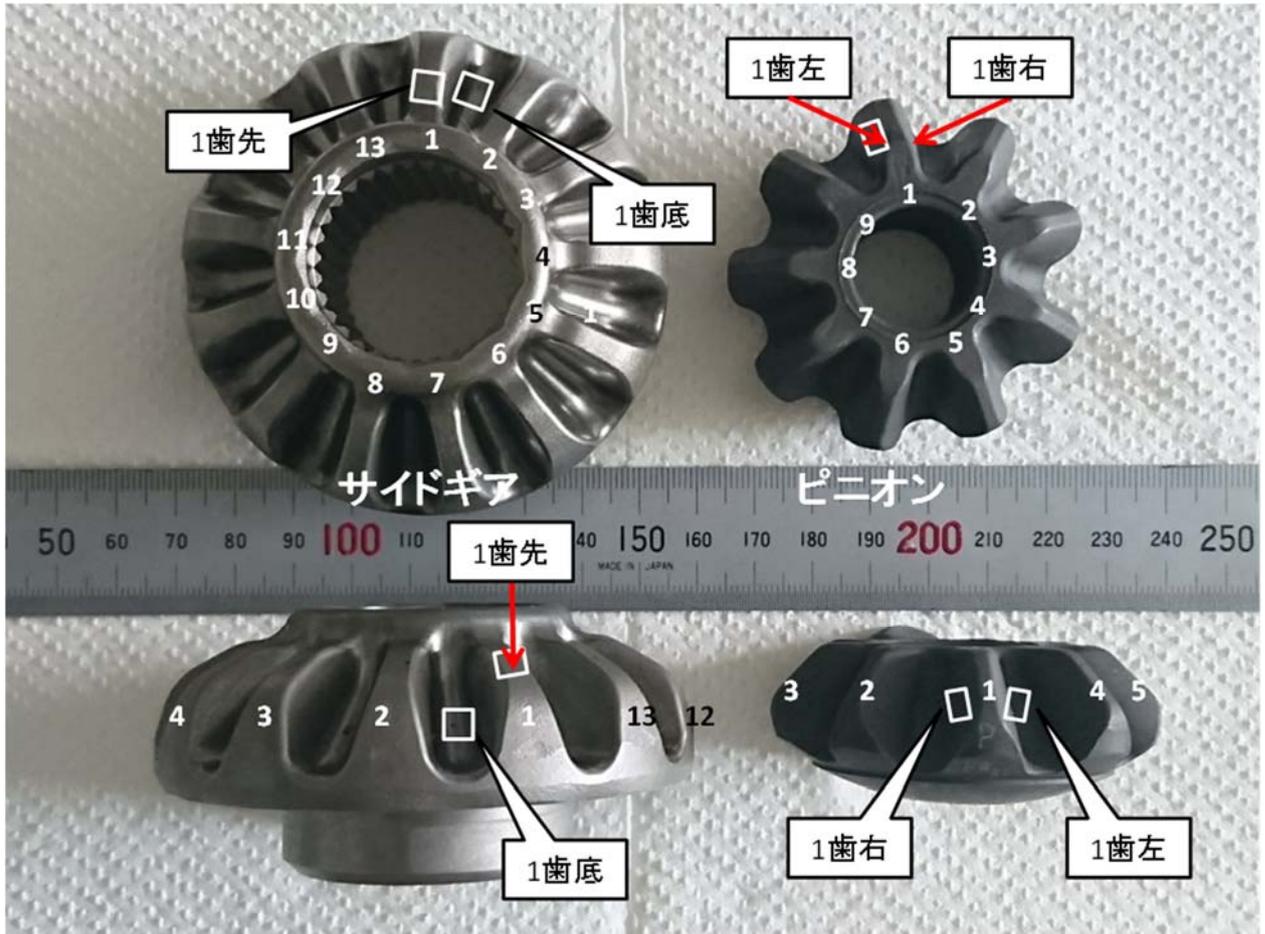


図 35 サイドギア及びピニオンの残留オーステナイト及び応力測定位置

測定条件は次の通り。

装置名：(株)リガク MSF-3M X線応力測定装置；

X線管球：Cr；使用線：Cr-K α 1,2；K β 線カットフィルター：V；

管電圧：30kV；管電流：10mA；X線照射範囲：約4mm角；

計数装置：0次元NaIシンチレーションカウンター；スリットDS：1°、RS1°；

残留オーステナイト測定条件

α 相 2θ ：149.0°～164.0°、ステップ：0.05°、FT時間：2.0秒/ステップ；

γ 相 2θ ：120.0°～137.0°、ステップ：0.05°、FT時間：8.0秒/ステップ；

平滑化：5ステップ；バックグラウンド導出：8ステップ；

応力測定条件

平傾法・ ψ 一定法； ψ 角度：0.0、16.8、24.1、30.0、35.3、40.2、45.0、49.9、54.8；

2θ ：147.0°～166.0°、ステップ：0.20°、FT時間：0.50秒/ステップ；

平滑化：3ステップ；バックグラウンド導出：5ステップ；

ピーク位置決定方法：2/3 価幅法；応力定数：-318MPa/°

Cr-K α 線のFeに対する吸収係数から導出したX線の95%有効侵入深さは α 相(211)ピークで約16 μ mであり、表面近傍の残留オーステナイト量及び残留応力を測定し

ていることになる。装置の構造と歯車の形状のため、X線の入射及び回折光路の遮蔽が生じ、サイドギアの当たり面の測定はできなかった。また、原理的に試料が平坦であることを前提に応力値が計算されるため、曲率半径の小さなピニオン当たり面の測定精度が低下した。

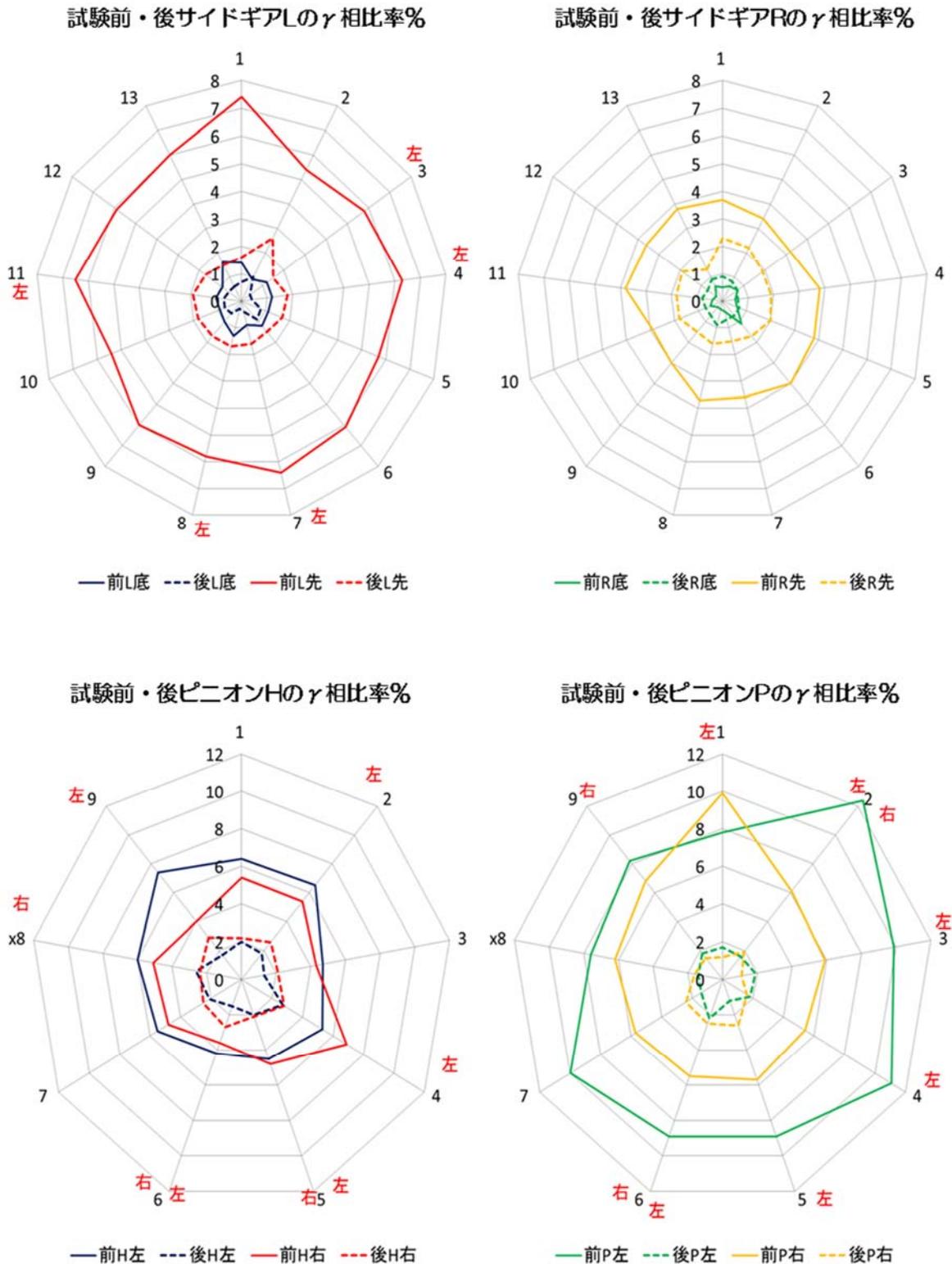
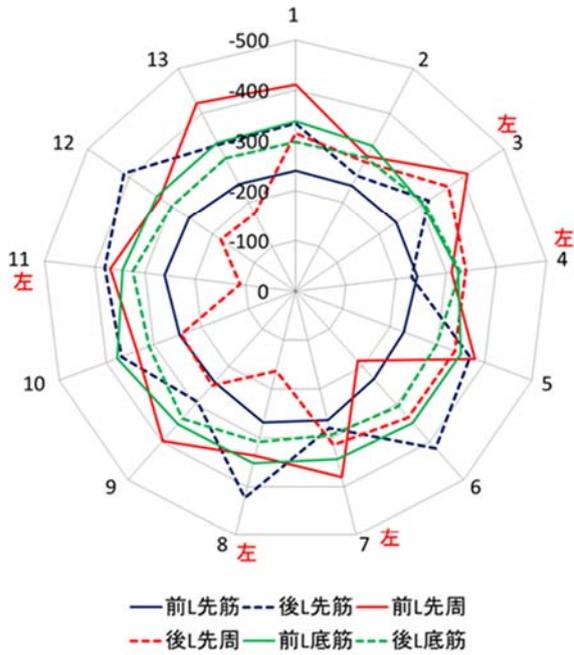
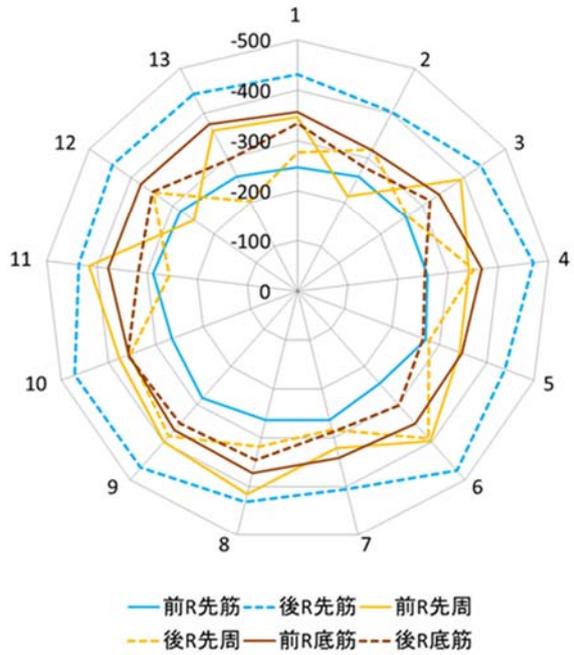


図 36 試験前後のサイドギア及びピニオン各歯・各位置での残留オーステナイト量

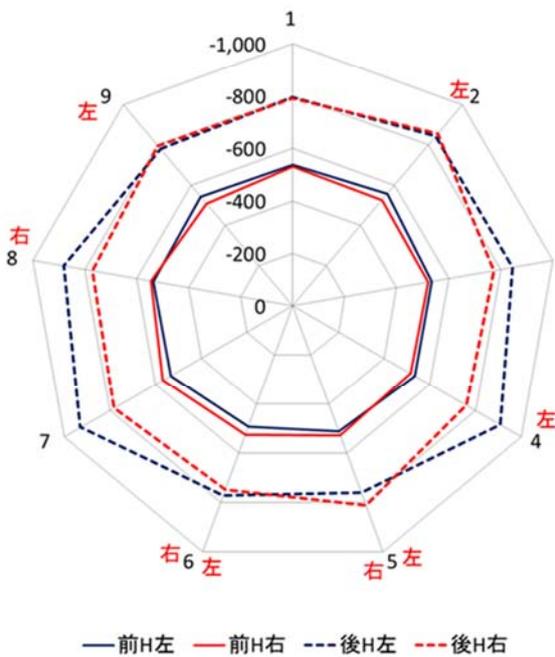
試験前・後のサイドギアLの残留応力 /MPa



試験前・後のサイドギアRの残留応力 /MPa



試験前ピニオンHの残留応力/MPa



試験前ピニオンPの残留応力/MPa

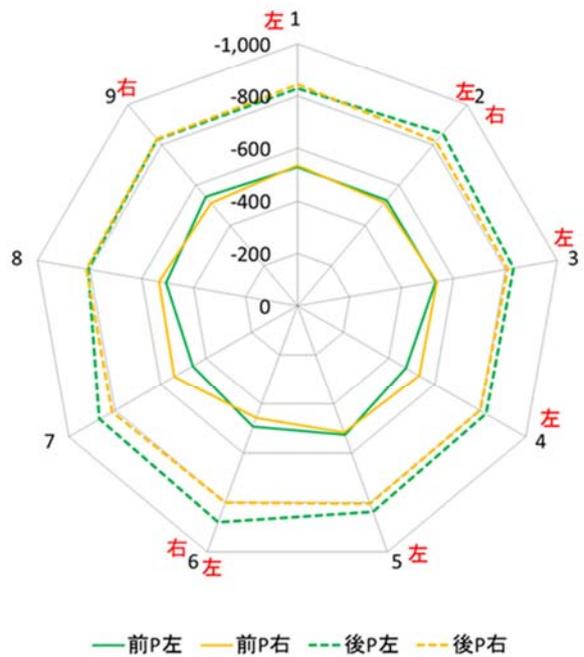


図 37 試験前後のサイドギア及びピニオンの各歯・各位置での残留応力

図 36 の残留オーステナイト及び図 37 の残留応力ともに、実線が試験前、実線と同色の点線が試験後の同一位置でのその値を示している。

もともと残留オーステナイト量が少なかったサイドギアRの歯底を除いて、すべての歯面でオーステナイト量は減少していた。サイドギアではRに比べて、試験前のオーステナイト

量の高かったLだけでピッチングが発生していた。これは、同一ロットではあったものの、LとRの製造工程での熱履歴が異なり、その結果がピッチングの発生に影響したものと考えられる。一方、ピニオンではHに比べてPの試験前のオーステナイト量は高かったが、ピッチングの頻度に明瞭な差異は無かった。なお、個別の歯について、残留オーステナイト量及びその変化とピッチングの発生箇所には相関が確認できなかった。

サイドギアRの歯底でのオーステナイト量増加は誤差の範囲内である可能性が高く、三次元測定の結果によると測定領域付近での摩耗量がX線侵入深さに比べて僅かであったことから、試験前後でほぼ同一箇所を測定していたと考えられる。このため、減少の主要原因は、試験中、歯車同士の接触によって加えられた繰り返し応力による応力誘起マルテンサイト変態の可能性が高いと推測できる。

試験中に歯車同士が直接接触していない箇所を測定したサイドギアの残留応力は増加・減少まちまちであったが、直接接触し繰り返し応力を加えられていたピニオンの当たり面では一様に残留応力が増加していた。また、サイドギアのLとR同士及びピニオンHとP同士の試験前の残留応力値が比較的類似していた。これは、両者の加工履歴に顕著な差異が無かったためだと考えられる。なお、個別の歯について、残留応力及びその変化とピッチングの発生箇所には相関が確認できなかった。

(2) -3 破断面調査

ピッチングの外見的な特徴を調査するため、試験後の歯車当たり面を表面から走査型電子顕微鏡（SEM）、断面を光学顕微鏡で観察した。サイドギア及びピニオンに発生した典型的なピッチングのSEMの2次電子像を図38に、そのピッチングの深さ方向への典型的な進展を見られた断面の光学顕微鏡像を図39に示す。

表面からのSEMの2次電子像は、切断した歯車を破面がほぼ水平になるように試料台に載せ、洗浄後、(株)日立製作所製走査型電子顕微鏡S-3000N（加速電圧20kV）を使用して2次電子像（SEM像）を撮影した。導電処理は行っていない。断面の光学顕微鏡像は、硬さ測定試験と同様に水冷切断し、アクリル系樹脂で包埋後、耐水研磨紙での研磨、ダイヤモンドスプレーでのバフ

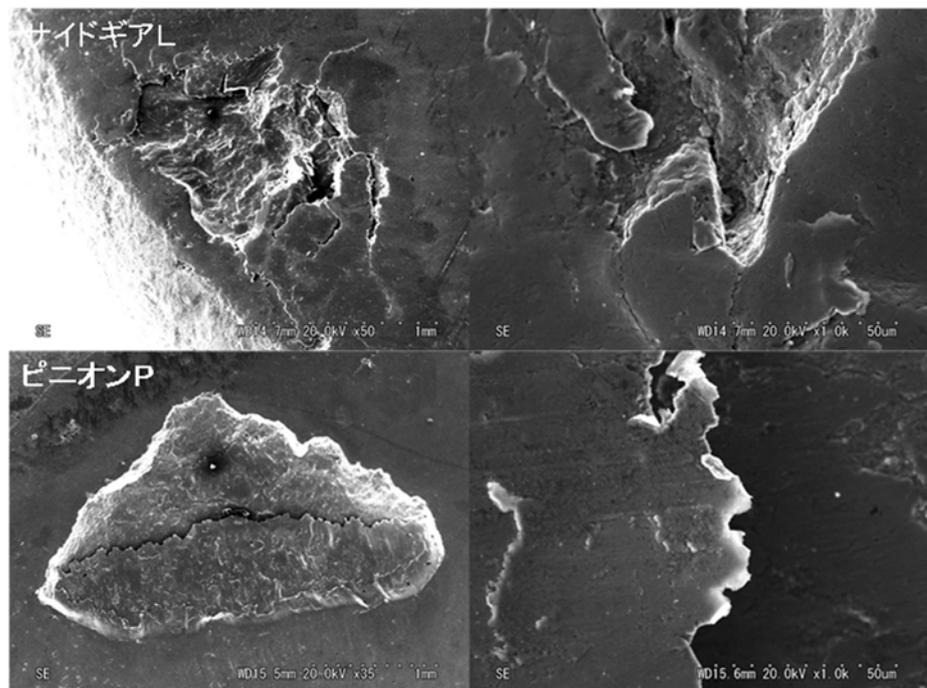


図38 サイドギアL及びピニオンPの典型的なピッチングのSEM2次電子像

研磨で作製した試料を倒立型金属顕微鏡で撮影した。

各ピッチングには1本以上の亀裂が見られ、断面観察した亀裂ではすべて表面から浅い角度で亀裂が進展していた。

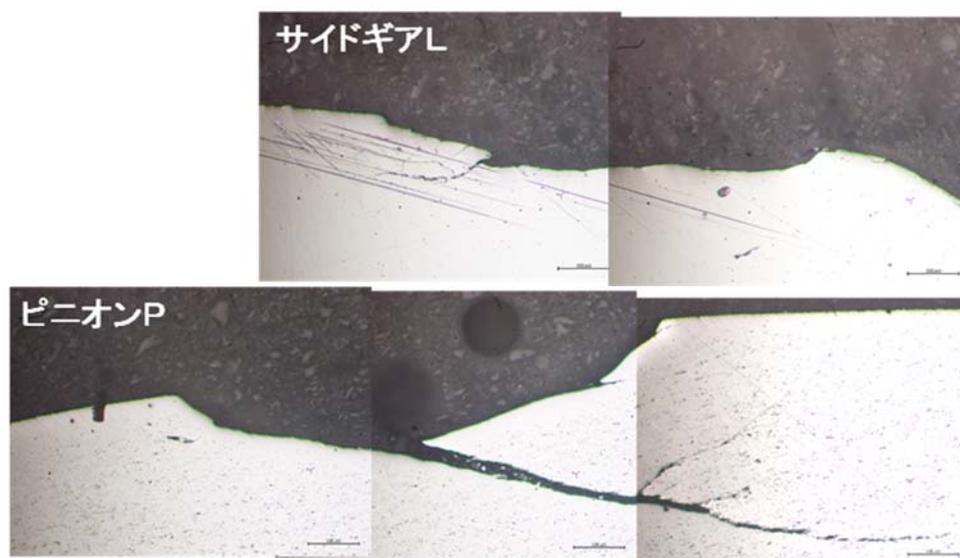


図 39 サイドギアL及びピニオンPの典型的なピッチングの断面の光学顕微鏡像

今回調査したデフギアではピッチングの発生に対する、個別の歯の硬さ・残留応力・残留オーステナイト量の影響を確認することはできなかった。ただし、表面処理が行われていないサイドギアでは、残留オーステナイト量、すなわち、熱処理のバラツキがピッチングの発生に影響している可能性が示唆された。

第3章 全体総括

3-1 補助事業の成果

第2章で記載した各サブテーマに対する成果については、1-3節の成果概要に掲載している。

3-2 研究内容総括

歯面接触応力解析技術の確立と、歯面接触応力からピッチング寿命を予測する強度データベースを作成し、デフギア高精度歯面設計システムを構築した。構築したシステムを用いて、最適歯面を決定した。決定した最適歯面をおり込んだデフギアを製作し、実機評価を行い、目標の歯面強度アップを達成した。また、残留応力及び残留オーステナイト量のバラツキがピッチング発生に与える影響を調査したが、ピッチングの発生箇所に相関は確認できなかった。また、歯面形状以外で歯面強度に影響する要因として考えられる硬さ分布、残留オーステナイト量、応力変化を測定したが、影響する要因は確認できなかった。

本研究において、弊社の目指すディファレンシャルユニットのモデルベース開発(MBD)の一部である、デフギア高精度歯面設計システムが構築できた。これまでの様な実機評価に頼ったトライ&エラーによる設計手法に対して、実機評価前にモデル上で高レベルの検証が可能となり、開発期間と開発費用の短縮が期待できる。さらに、最適歯面決定方法にタグチメソッドを適用し、効率良く歯面形状を求める手法も確立した。副産物として、

これまでは分からなかったデフギア強度に対する、各歯面特性値（歯先の逃げ等）の影響度も把握できた。また、残留応力及び残留オーステナイト量のバラツキがピッチング発生に与える影響として、熱処理のバラツキが影響している可能性も示唆された。

3-3 補助事業終了後の技術課題

本研究を通じて、明らかになった課題は下記の2点である。

- ・強度データベースのさらなる精度アップ
- ・デフギア的设计歯面と製作歯面の形状差最小化

3-4 ディファレンシャルユニットの事業化見通し

ディファレンシャルユニットの事業化見通しを図40に示す。ディファレンシャルユニットの出荷先として、自動車メーカーM社、変速機メーカーJ社及びA社がある。本研究成果によるM社のニーズである軽量化ディファレンシャルユニットを開発する事により、売上げ増加として9.6億円/年の受注を目指す。変速機メーカーであるJ社向けディファレンシャルユニットにおいては、本研究成果により、J社での新機種の立ち上がり上りのタイミングで、売上げ7.2億円/年の受注を目指す。変速機メーカーであるA社向けディファレンシャルユニットにおいては、本研究成果によるディファレンシャルギアの軽量化技術により、ディファレンシャルユニットの受注活動を推進し、顧客の内製品及び新規立ち上りユニット品等、売上げ9.6億円/年の受注を目指す。5年後の売り上げ見込みとして、26.4億円の売り上げアップを見込んでいる。



図40 ディファレンシャルユニットの事業化見通し

3-5 事業化展開

平成31年度を目処に技術課題を解決する。強度データベースについては、相関式導出のためのサンプル数が十分とはいえず、歯面形状が異なるデフギアのデータを増やし、相関式の精度向上を図る。それにより、限界設計が追求でき、更なる高強度化につながると考える。設計歯面と製作歯面の形状差については、本研究で製作したデフギア自体の各工程変形量を金型へおり込むことで、形状差の最小化を図る。課題を解決し、小型・軽量化したディファレンシャルユニットの受注活動を行い、平成34年度の商品化を目指す。

事業年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度	平成33年度	平成34年度
サンプルの出荷・評価		→			
課題解決	→				
商品化					→

図 41 ディファレンシャルユニット事業化計画