

平成27年度
革新的ものづくり産業創出連携促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「すぐばかさ歯車の低騒音化を実現するバレル形ねじ状砥石を
用いた低コスト・高能率連續創成研削技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成28年3月

委託者 中部経済産業局

委託先 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

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
1－2 研究体制	3
1－2－(1) 研究組織	3
1－2－(2) 管理体制	4
1－2－(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	7
1－2－(4) その他協力者	7
1－3 成果概要	7
1－4 当該研究開発の連絡窓口	8

第2章 本論

①－1 噫み合い伝達誤差を低減させる連續創成研削技術の確立	9
①－1－1 Dontyne GEAR DESIGN SOLUTION による歯車理論解析	9
①－1－2 クリングルンベルグ製すぐばかさ歯車測定ソフト実態計測	10
①－1－3 キーエンスマイクロスコープによる歯面形状解析	11
①－1－4 5軸同時制御歯車研削盤による実加工	12
①－1－5 三次元測定機 DuraMax による実加工と3D シミュレーションとの整合性の解析	14
①－2 振動及び騒音評価の実施	17
①－2－1 振動・騒音測定用駆動装置の設計製作	17
①－2－2 振動・騒音測定用駆動装置の構造解析	17
①－2－3 振動及び騒音評価の実施	19
②－1 すぐばかさ歯車の新研削技術の開発	23
②－2 連續創成研削を実現する砥石形状成形技術の開発	28
第3章 全体総括	31

第1章 研究開発の概要

本研究開発では、工作機械業界の「低騒音化」と「生産工程の改善」という両ニーズを満足する「すぐばかさ歯車」の安価で従来とは全く異なった「ねじ状砥石による連続創成研削方法」を開発するものである。本研究開発の実施内容を、「低騒音・低振動化への対応」「生産工程の改善への対応」の2分野に大別し、それに以下の「研究開発の目標」で記載したサブテーマを設定した。

本年度の取り組み内容は次の通りである。

①－1 噫み合い伝達誤差を低減させる連続創成研削技術の確立

実施内容：テストワーク設計・製作、治具の設計・製作、テストワーク測定、トライアル加工、歯面形状解析

①－2 振動及び騒音評価の実施

実施内容：振動・騒音測定用駆動装置の設計製作及び騒音・振動測定歯車の噛み合わせの測定

②－1 すぐばかさ歯車の新研削技術の開発

実施内容：干渉を避ける砥石形状の導出

②－2 連続創成研削を実現する砥石形状成形技術の開発

実施内容：ドレッシング制御プログラム開発、砥石の形状測定・評価

③ 事業化の検討

④ プロジェクトの管理・運営

本年度実施内容について本章1－3成果概要、および2章の本論で述べる。

1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標

[特定ものづくり基盤技術の種類]

主たる技術：動力伝達

[川下製造業者等の課題・ニーズ]

ア. 低騒音化

エ. 生産工程の改善

[高度化指針に定める高度化目標]

ア. 低振動・低騒音化のための技術の向上

エ. 生産工程の改善

【研究開発の背景】

近年の諸外国との厳しい価格競争や環境負荷低減、不安定な電力供給事情を踏まえ、あらゆる産業において競争力の維持と省エネルギーに留意した技術革新が求められている。工作機メーカーにおいても、相次いで『省エネ・エコマシン』というコンセプトを明確に打ち出し、競争力強化のための低コスト化と、構成部品の効率向上による機械の環境負荷軽減を実現する技術革新が同時に求められている。

【研究目的】

本研究開発では、工作機械及び産業機械等の動力伝達装置における騒音・振動低減のため、重要部品である「すぐばかさ歯車」を対象に世界初のバレル形ねじ状砥石を用いた高能率な連続創成研削技術及び、多品種少量生産に対応した砥石成形技術を開発することで、低コスト・高能率研削を可能とし、低コストと省エネを両立した「国際競争に勝てる次世代型マシン」の開発に大きく貢献することを目的とするものである。

【研究開発の目標】

本研究開発では、川下企業（工作機械業界）の①「低騒音化」と②「生産工程の改善」という両ニーズを満足する「すぐばかさ歯車」の安価な従来とは異なった「ねじ状砥石による連続創成研削方法」を確立するため、①②について以下のサブテーマを設定し技術開発を行うものとする。

- ① - 1 噫み合い伝達誤差を低減させる連続創成研削技術の確立
- ① - 2 振動及び騒音評価の実施
- ② - 1 すぐばかさ歯車の新研削技術の開発
- ② - 2 連続騒音研削を実現する砥石形状成形技術の開発

また、従来技術と比較した新技術の具体的な目標値を以下の表に示す。

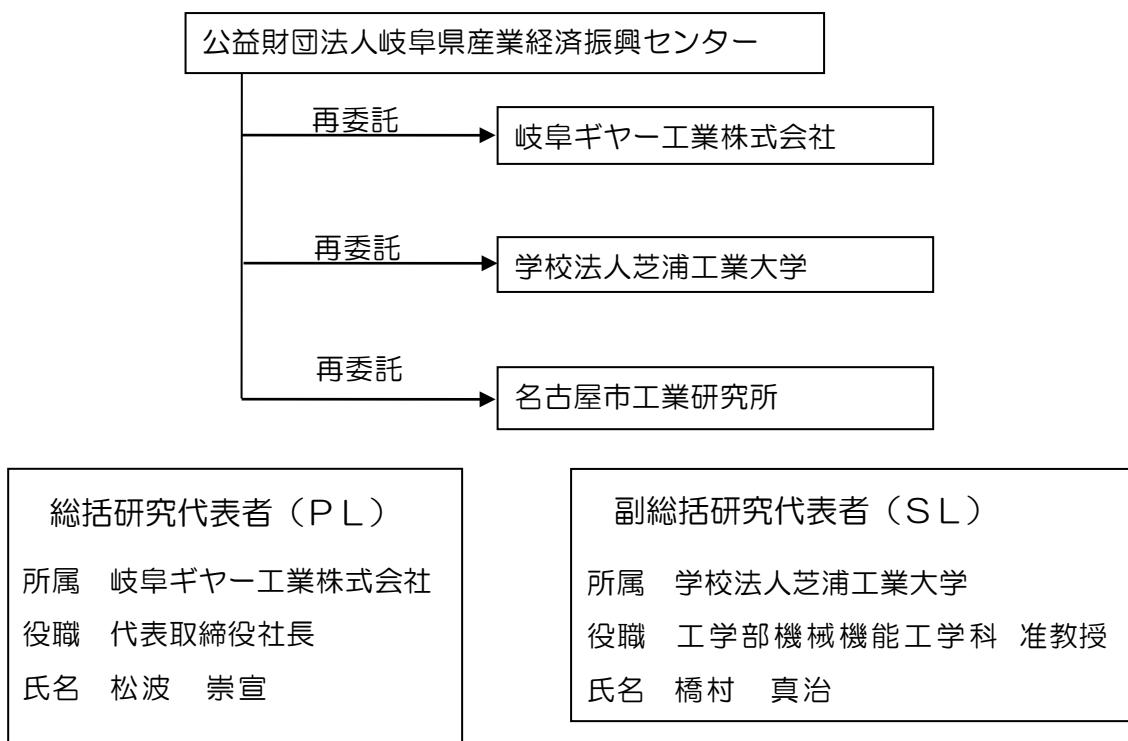
『従来技術の現状と本研究開発最終目標値の比較表』

項目	従来技術の現状	研究開発最終目標値
仕上げ精度	JIS B 1704で4~5級	JIS B 1704で2級以上
1歯あたりの歯当たり面積	—	10%程度向上
歯当たり面積のバラツキ	—	10%程度向上
面粗度	Ra 12.5	Ra 0.6以下

伝達効率	—	20%程度向上
定量騒音・振動評価	—	10%程度削減
感覚騒音・振動評価	—	川下企業の基準を満足
加工時間	100（指數）	約30（指數）
加工可能円錐角	5°	25°
設備導入費	100（指數）	55（指數）
加工コスト	100（指數）	15（指數）

1-2 研究体制

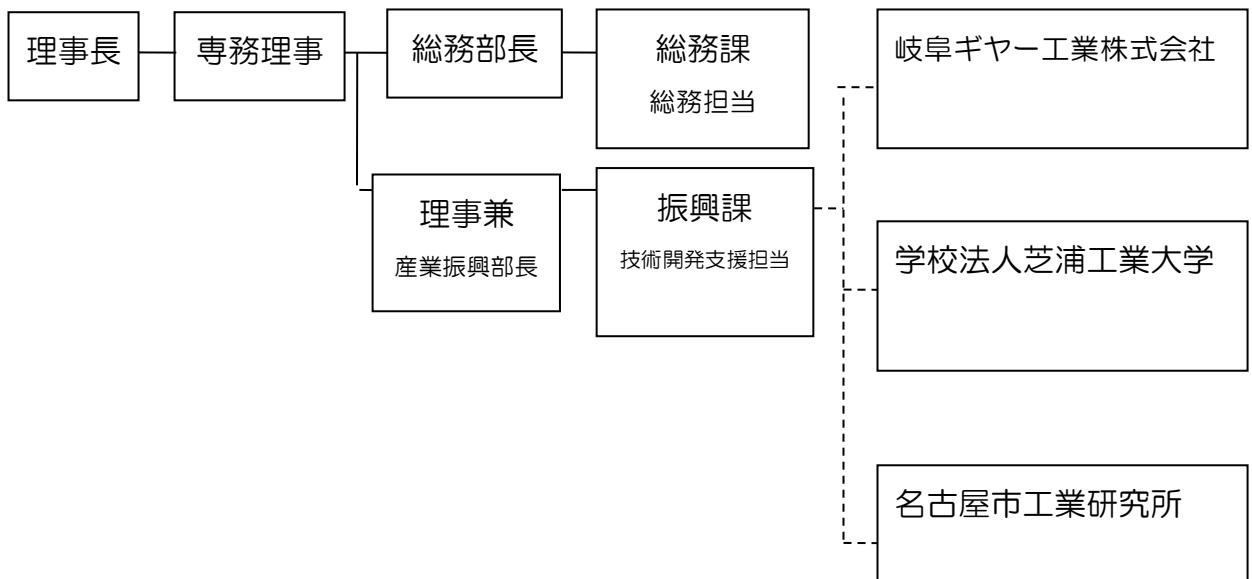
(1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

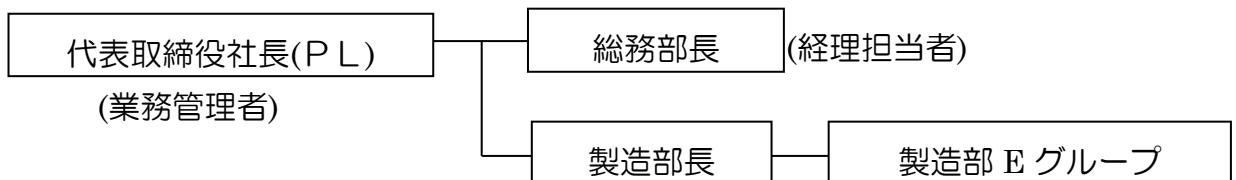
①事業管理機関

公益財団法人岐阜県産業経済振興センター



②(再委託先)

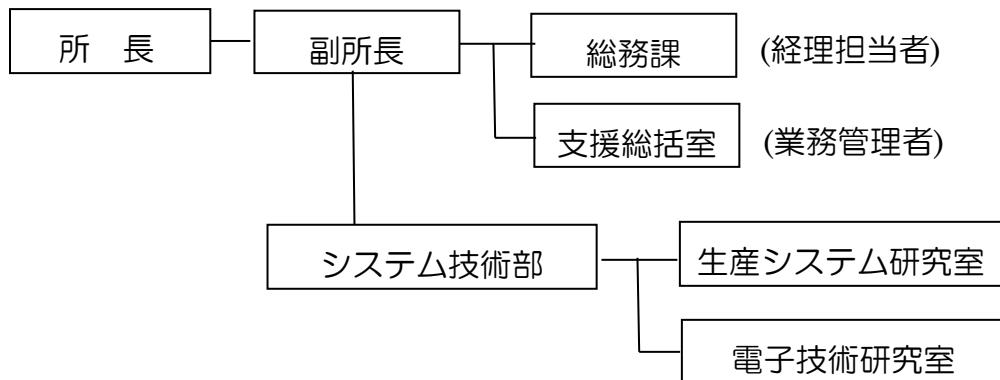
岐阜ギヤー工業株式会社



学校法人芝浦工业大学



名古屋市工業研究所



管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
石榑 芳直	理事兼産業振興部長兼 振興課長	④
山田 博義	産業振興部次長兼総合相談課長	④
小川 誠	産業振興部振興課統括主査	④
戸松 薫	産業振興部開発課主事	④
竹腰 久仁雄	産業振興部開発課管理員	④
宮嶋 崇成	総務部総務課主任	④

【再委託先】 研究員

岐阜ギヤー工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松波 崇宣	代表取締役社長	①-1 ③
松波 信之	製造部長	①-1、①-2

磯部 高伸	製造部Eグループ	②-1、②-2 ③ ①-1、①-2 ②-1、②-2 ③
安田 尚孝	製造部Eグループ	①-1、①-2 ②-1、②-2 ③
祖父江 信一	製造部Eグループ	①-1、①-2 ②-1、②-2 ③
山梶 正裕	製造部Eグループ	①-1、①-2 ①-1、②-2 ③
高橋 真也	製造部Eグループ	①-1、①-2 ②-2

学校法人芝浦工業大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
橋村 真治	工学部 機械機能工学科・准教授	①-2、②-1
山本 竜也	工学部 機械機能工学科 4年生	①-2、②-1

名古屋市工業研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松下 聖一	システム技術部 生産システム研究室主任研究員	①-2、②-2
真鍋 孝顯	システム技術部 生産システム研究室主任研究員	①-2、②-2
山岡 充昌	支援総括室主任研究員	①-2、②-2
岩間 由希	システム技術部電子技術研究室 研究員	①-2、②-2

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者)	総務部 総務課 主事	足立 良介
(業務管理者)	理事兼産業振興部長 兼 振興課長	石榑 芳直

(再委託先)

岐阜ギヤー工業株式会社

(経理担当者)	総務部長	吉村 頴武
(業務管理者)	代表取締役社長	松波 崇宣

学校法人芝浦工業大学

(経理担当者)	財務部次長	大田 勝正
(業務管理者)	研究推進室長	坂井 直道

名古屋市工業研究所

(経理担当者)	総務課 事務係長	飯田 満
(業務管理者)	支援総括室主幹	秋田 重人

(4) その他

アドバイザー：米倉将隆、廣尾靖彰、三和精機株式会社、
株式会社ニートレックス、DMG 森精機株式会社、
淀川機工株式会社

1－3 成果概要

すぐばかさ歯車をねじ状砥石で連続創成を行うには、平歯車とは異なった特殊形状の砥石が必要不可欠である。そこで、この特殊形状砥石成形を行うための「高機能ドレッシングユニット」を自社と三和精機株式会社及び淀川機工株式会社の3社共同で開発を行うとともに、砥石成形を行うためのドレスプログラムを開発するため「ソフトプログラム編集ソフト」及び「ソフトプログラムオプション（異常負荷検出）」を導入し、基準ラック及び②-1で策定した理論砥石形状成形プログラムの開発を行った。また、砥石形状成形精度に関しては、フォトグラメトリーシステムを導入し非接触による砥石形状測定を実施し CAD データとの比較検証を行った。

加工されたすぐばかさ歯車の精度評価及び理論解析を行うため、「クリンゲルンベルグ製すぐばかさ歯車測定ソフトウェア」及び「Dontyne GEAR Design Solution」を導入し歯面形状解析を行った。また、不十分であった部分に関しては、「キーエンスマイクロスコープ」の導入により「すぐばかさ歯車」の連続創成研削時に於ける研削歯面の進行状況についてより高度な観察を行うことで加工法の検証を行った。更に「東京精密カールツァイス製三次元測定機 DuraMax」を導入し、歯面研削の進行状況に関して絶対値計測を行うことで3D シミュレーションと実加工との整合性及び切削歯面との形状比較をおいてより高い検証を行いすぐばかさ歯車の連続創成研削法の完成度を高め、実用性の観点からの検証を実施した。

また、①-2 実施する目的で「振動・騒音測定用駆動装置」設計・製作した。これにより「すぐばかさ歯車」対の運転時における、振動及び騒音を客観的に測定し、連続創成研削技術の当初の目標値（騒音・振動）に関しての実証実験を行った。尚、本機の設計・製作にあたっては「2DCAD 頭脳 Rapid PRO17」及び「構造解析ソフト・ANSYS」を使用し試験機としての是非を検証した。

すぐばかさ歯車連続創成研削の加工モデルとして、円錐角 13° で諸元が異なる2種類のすぐばかさ歯車を設計し歯車としての理論解析を行った。27年度には、今後の事業化を考慮し TP-O2 を主として研究開発を進めた。3次元測定機で絶対値評価を実施するために TP-O2-1 を制作し連続創成研削での歯面形成状況解析及び研削精度評価を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

主たる研究実施機関

岐阜ギヤー工業株式会社 代表取締役社長 松波 崇宣
総括研究代表者 (PL)

(最寄り駅：岐阜乗合自動車 六条大溝町バス停)

住所：〒500-8367 岐阜県岐阜市宇佐南 2-2-2

電話番号：058-274-5381

E:MAIL staff@gifu-gear.co.jp

第2章 本論

① – 1 噛み合い伝達誤差を低減させる連続創成研削技術の開発

(すぐばかさ歯車の歯当たり解析及び歯面応力解析、歯面形状の実測定の実施)

ここでは、大きく分けて次の5つの内容を実施しました。

1. Dontyne GEAR DESIGN SOLUTIONによる歯車理論解析
2. クリングルンベルグ製すぐばかさ歯車測定ソフト実態計測
3. キーエンスマイクロスコープによる歯面形状解析
4. 3次元測定機 DuraMaxによる実加工と3Dシミュレーションとの整合性解析
5. 5軸同時制御歯車研削盤による実加工

これにより、現状評価及び今後の開発にあたっての検証を行うことができた。

①-1-1. Dontyne GEAR DESIGN SOLUTIONによる歯車理論解析

本研究開発では、先ず、連続創成研削の加工シミュレーションを行う為の初期ターゲットモデルを策定する必要がある。そこで、川下企業（DMG 森精機株式会社）製工作機械の ATC（オートツールチェンジャー）に使用されているすぐばかさ歯車を参考に暫定的な歯車諸元を策定した

図1のモデルに対して、許容トルク、許容動力解析を行った。実際の稼働条件を基にした動力2KW、各回転数 250、500rpm の条件におけるテストワーク形状の各運転条件での結果を表1に示す。この結果より回転数 250 rpm、および 500 rpmでのトルク 76.4Nm および 38.2Nm に対して余裕のあり、評価対象に資するテストワークであると確認できた。

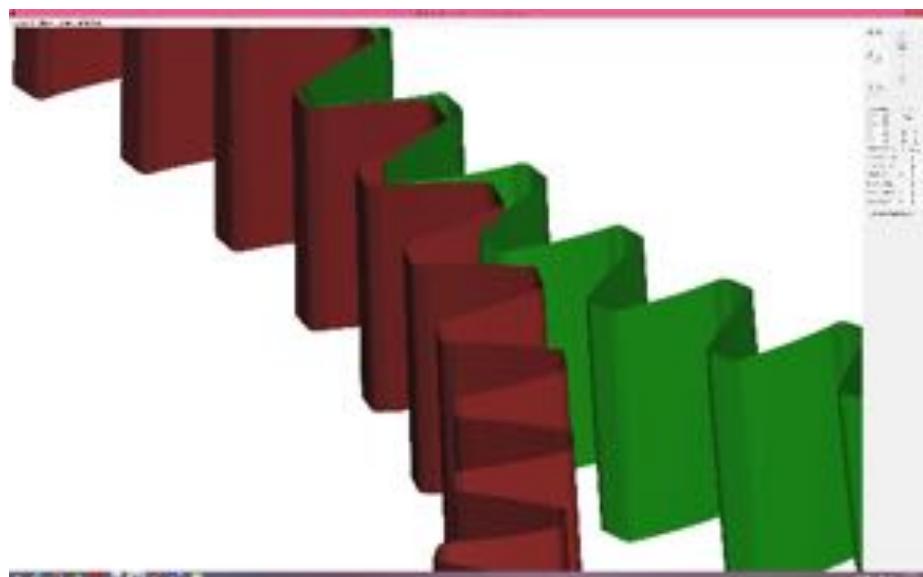


図1 歯車理論解析モデル

	歯面修正無し		歯面修正有り	
駆動条件	ヘルツ応力 (MPa)	曲げ応力 (MPa)	ヘルツ応力 (MPa)	曲げ応力 (MPa)
250rpm (76.4Nm)	638.2	121.5	755.1	159.7
500rpm (38.2Nm)	501.9	75.8	567.6	86.1
	許容ヘルツ応力 1608.29MPa		許容曲げ応力 300.737MPa	

表1 稼働条件でのヘルツ応力、曲げ応力解析結果

①-1-2 クリングルンベルグすぐばかさ歯車測定ソフト実態計測

研究開発成果である研削歯面を適切に評価する為には加工前ワークのピッチ誤差、歯面形状等の現状を正確に把握し、比較する必要がある。そこで、本年度製作したテストワーク TP-O2-1について「クリングルンベルグ製すぐばかさ歯車測定ソフト」を使用し歯車試験機、を用いて測定を行った。



図2 歯車試験機による測定

測定項目

測定項目は、「かさ歯車のJIS規格（JIS B 1704）」に準じ、すぐばかさ歯車の評価に求められる項目を追加して以下のように定めた。

- (1) ピッチ誤差精度・・・単一ピッチ誤差、隣接ピッチ誤差、累積ピッチ誤差、歯溝の振れ

- (2) 歯厚バラツキ量・・・円弧歯厚のバラツキ最大値
 - (3) 歯面形状誤差・・・4歯等配測定値の平均形状誤差
 - (4) 圧力角誤差・・・歯幅中央における圧力角誤差
 - (5) 円錐角誤差・・・歯先円錐角、歯底円錐角
- (1)(2)(3)(4)(5)・・・歯車試験機

測定結果および考察

加工前後の各測定値をまとめた結果を表2に示す。

項目	単位	No.3 (3段階修正砥石で加工)		No.9 (5段階習性砥石で加工)	
		研削前	研削後	研削前	研削後
単一ピッチ誤差	μm	25.3	1.4	25.3	1.1
隣接ピッチ誤差	μm	42.7	2.0	42.7	0.8
累積ピッチ誤差	μm	55.7	2.4	55.7	3.7
歯溝のフレ	μm	43.0	6.8	43.0	3.4
歯形形状誤差	μm ²	835.2	83394.6	835.2	287008
圧力角誤差	deg	-0.082	-0.796	-0.082	-0.658
歯当たり	%	10	5	15	13

表2 TP-O 2研削前後測定データ比較

ピッチ精度が大幅
向上 JISO級

①-1-3. キーエンスマイクロスコープによる歯面形状解析

キーエンス社製マイクロスコープ VHX-5000を導入し、20~2000倍まで広範囲の倍率で歯全体を測定することで加工中に起こった砥石とワークの干渉の状態を、高倍率を使用して歯面の面性状を確認した。先ず、歯面上の研削部と非研削部の状態を解析するため、歯面全体を150倍のレンズで観察を行った。次に、観察結果を画像処理し3D変換することで、歯面全体の任意断面での凹凸状態を計測した。測定結果を図3に示す。

これにより、すぐばかさ歯車の創成研削における創成の進行状況を概ね知ることができ、②-1での3Dシミュレーションと実加工との整合性をある程度調べる

ことが可能になった。3Dシミュレーションと実加工と整合性に関しては後に述べる。しかしながら、図3の結果からも判る通り、研削面と非研削面と凹凸から砥石がワークに対してどの程度削り込まれるかを相対的に判断できるが、創成研削加工前後の絶対的評価を行うにはデータとして不十分である。

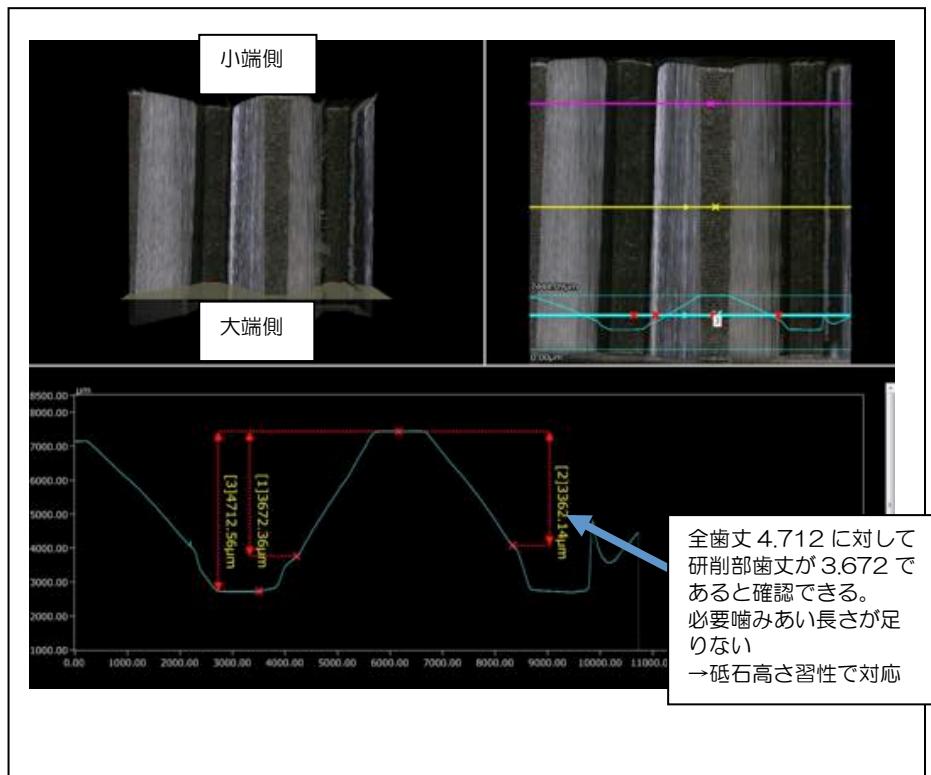


図3 TP-O2-1 研削後の歯形形状2（150倍）

①-1-4. 5軸同時制御歯車研削盤による実加工

連続創成研削加工のイメージ図を図4に示す。

3Dシミュレーションにより策定された圧力角を5段階に修正した特殊形状砥石による連続創成研削歯面の進行具合を図5～図7に示す。

図25に示すように0.75mm砥石を切込時において黒皮部分にそって研削面が両歯面とも形成されており、歯幅中央部においてある程度適正な歯面形状が創成されている結果となった。「すぐばかさ歯車」対として滑らかに回転運動を伝達するために最も重要なのは歯幅中央部において適正な歯面形状が形成されることであり、歯幅上部及び下部においては完全に干渉を取り除く必要がないことは様々な文献により既知であることから、実加工を行ったTP-O2-1の歯面形状は実用的な観点から十分に機能を満たすものであると想定される。

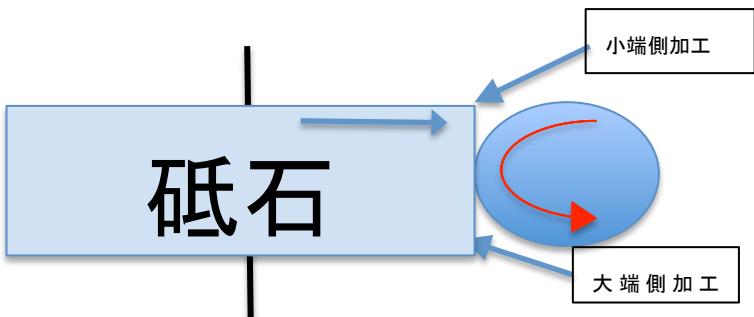


図4 上面から見た加工イメージ



図5 連続創成研削時の砥石動き

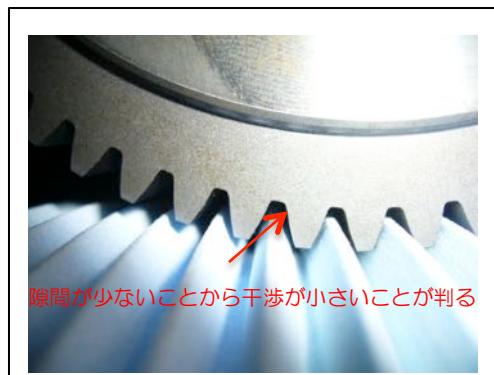
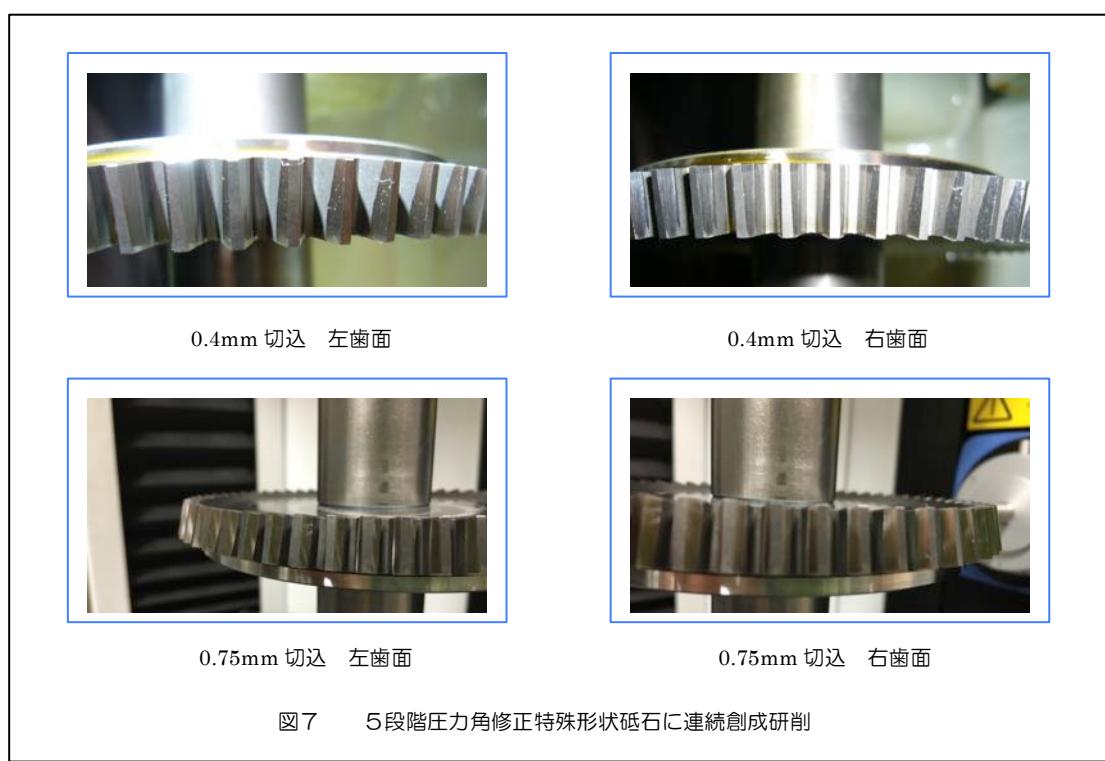
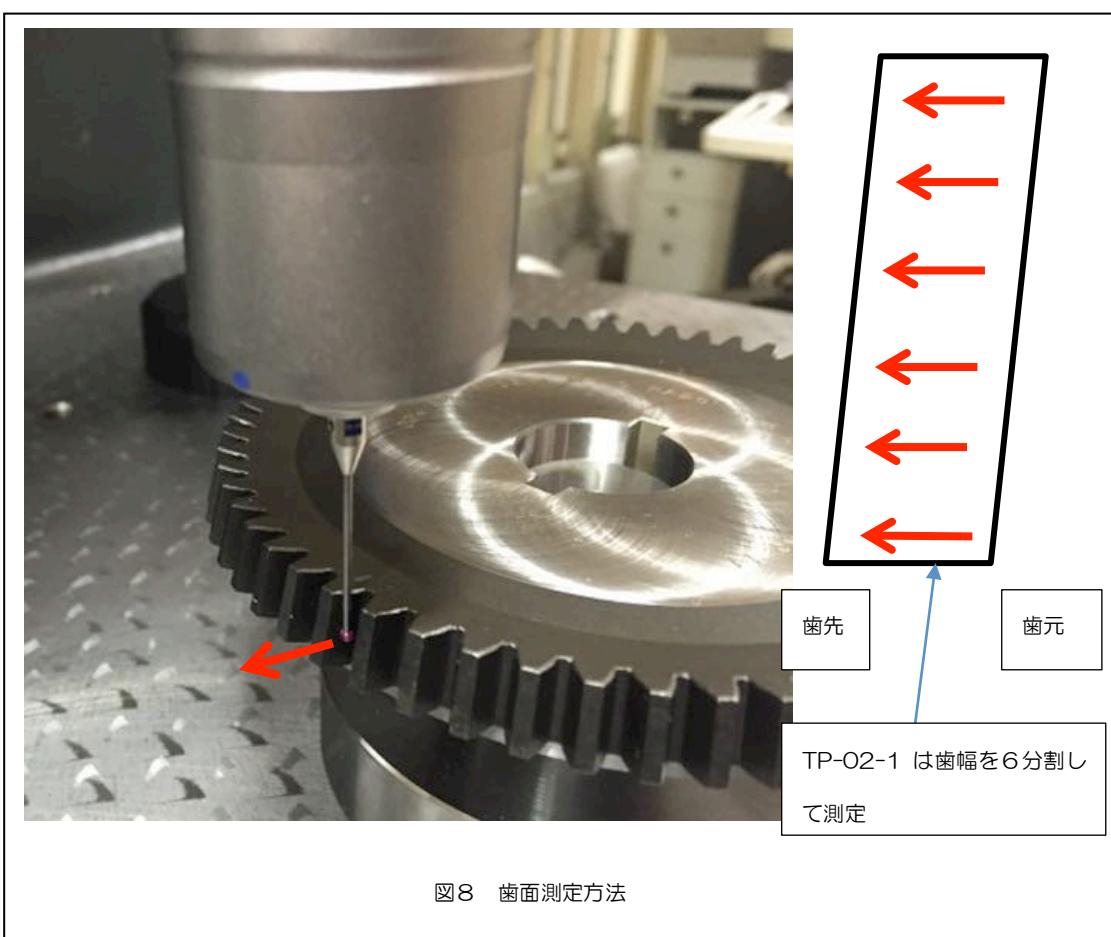


図6 ワークと砥石の噛合の様子 TP-02-1



①-1-5. 3次元測定機 DuraMax による実加工と3D シミュレーションとの整合性の解析

クリングルンベルグ製すぐばかさ歯車測定ソフトは、かさ歯車測定のスタンダードではあるが、マスター歯面を基準として被測定歯車歯面内でどれだけ相対誤差があるかを調べる比較測定であり、絶対的な数値を表すことが出来なかった。また、キーエンスマイクロスコープでは絶対的な基準を持っていないため、研削面と非研削面の凹凸から相対的評価は出来たが創成研削加工前後での絶対的評価を行うにはデータとして不十分であった。東京精密カールツァイス製3次元測定機 DuraMax を導入し、図8の様に研削前後の同一歯面の形状を6分割で測定を行った。これにより、測定の基準を明確にすることで研削量の絶対的評価と3D-CAD によるシミュレーションと実加工の整合性を解析した。



実加工の研削量測定結果と3Dシミュレーションとの比較を表3、4に示す。研削量としては、加工途中切込み量0.4mmでの正規片歯面研削量は0.137mmとなる。表のとおり、実加工での研削量は、小端側右歯面と大端側左歯面ではほぼ同一であるが、小端側左歯面で0.06mmと大端側右歯面で0.1mmの差が生じている。この差は本来除去される量以上に歯面が研削されており、干渉によって研削された部分と想定される。また、加工後の状況をみても小端側左歯面と大端側右歯面が先行して除去され、その量は、小端側右歯面で切込みの進行に応じて同様の干渉が拡大したと考えられる。

ここで、表10、11の芝浦工業大学が行った研削シミュレーションとの比較値をみると、右歯面では0.03mm以下となり概ねシミュレーション通りの結果となった。一方、左歯面では約0.09mmの差となっており、実加工との差異が確認できた。ここで現状の研削シミュレーションは切込みの進行に応じた結果までは求めておらず、バックラッシュ状況での干渉量シミュレートによるものであることから今後サンプル点数を増やし更に整合性を詰めていく必要がある。しかしながら、図32、33のグラフを見ると切込み当初は歯先側の干渉量が大きく、歯丈の中央から歯先側にかけてのみ研削が進行し、歯元部分はあまり除去されていないが、切込みが進行すると中央より歯先側の除去量は減少し、反対に歯元側の除去量が拡大している。その結果、加工終了後には研削前と同様の曲線を描いており、干渉によって異常に除去された部分を除けば概ね加工前の歯面形状を維持できるとわかった。ただし、大端側左歯面については、歯元の研削量が少なく、狙い通りの歯形圧力角を達成できていない。

今後は、実加工結果を研削シミュレーションにフィードバックして検証を重ね、更に良好な噛合いをする歯面形成を目指し、干渉量を最小限に抑えた加工方法を導出する。

	研削途中			
	小端側		大端側	
	右歯面	左歯面	右歯面	左歯面
切込み量	0.4			
正規片歯面研削量	0.137			
現状片歯面研削量	0.17	0.23	0.27	0.14
干渉量（正規との差）	0.033	0.093	0.133	0.003
3D シミュレーション の干渉量	0.029	0.031	0.100	0.090
3D シミュレーションと の差	0.004	0.062	0.033	0.087

↓

3D シミュレーションとの差異なし

差異あり

表3 TP-02-1 研削途中歯面状況

	加工後			
	小端側		大端側	
	右歯面	左歯面	右歯面	左歯面
切込み量	0.75			
正規片歯面研削量	0.256			
現状片歯面研削量	0.23	0.52	0.44	0.24
干渉量（正規との差）	-0.026	0.264	0.184	-0.016

表4 TP-02-1 加工後の歯面状況

①-2 振動及び騒音評価の実施

①-2-1. 振動・騒音測定用駆動装置の設計製作

一般に、工作機械における騒音・振動の測定は機械に組み込まれた状態で行い、装置全体の騒音振動としてとらえ評価してしまう場合が多い。しかし、本研究開発では歯車そのものの精度向上による騒音・振動への影響を測定する必要があるため、振動・騒音測定用駆動装置（図9）を設計製作し、名古屋市工業研究所にて歯車単体の騒音・振動試験を行い、これを評価する。

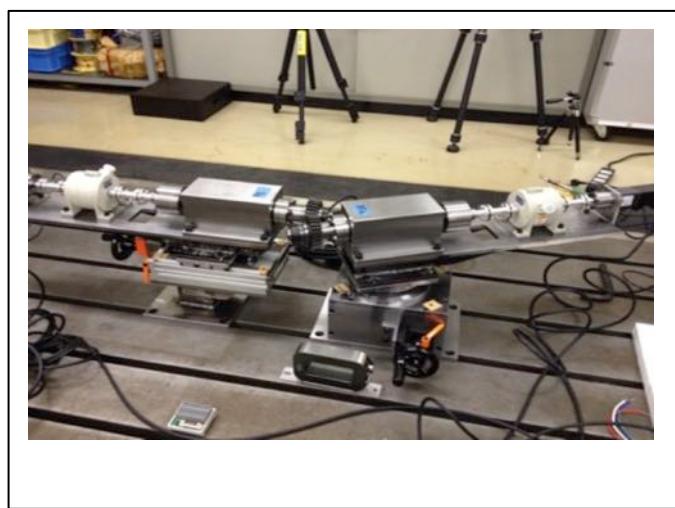


図9 振動・騒音測定用駆動装置

①-2-2. 振動・騒音測定用駆動装置の構造解析

本研究では、先ずすぐばかさ歯車の運転時に発生する振動・騒音を評価する試験機の強度・剛性について、設計及び改善を目的として、構造解析ソフト ANSYS を用いた強度・剛性評価を行います。先ずすぐばかさ歯車の運転時に発生する振動・騒音を評価する試験機において、振動・騒音の原因となる試験機スピンドルの剛性および発生応力について評価を行いした。

図10と図11に、荷重負荷時におけるスピンドル軸部に作用する相当応力と相当ひずみを示しています。図47から分かるように、スピンドルの最大相当応力は歯車設置側段付部の隅部で作用し、(b)に示す 50 mm の場合の歯面の変位は、(a)の 25 mm の場合の約 2 倍の応力が作用しています。しかし、応力の絶対値としては、それほど大きくはありません。

また相当ひずみは、軸受とスピンドルが接触し始める部分で大きくなることが分かります。しかし、(b)に示す 50 mm の場合と、(a)に示す 25 mm の場合で 30%程度

の差であり、ひずみの絶対値から考えても、問題ないと考えられます。図10の相当応力および図11の相当ひずみの値を加味すると、十分繰返し運転に耐えうると考えられます。

次に、すぐばかさ歯車の振動・騒音試験装置の構造解析を総合的に評価するため、ベースプレートにすぐばかさ歯車を取り付けたスピンドルを取り付けて構造解析を行い、歯車の歯面における変位について検討します。ベースプレートにスピンドルを取り付けた状態のすぐばかさ歯車の歯面に、1000 N の荷重を負荷し、その歯面がどの程度変位するかを解析を行いました。

図12を見ると、ベースプレート左右ではコンタ図の色は同じであることからベースプレートのねじれは少なく、どちらかと言うと、前後方向に変位の差が現れていることが分かります。図13中に白色で記した部分のy方向変位を示しています。y方向変位量は20 μm 程度と小さく、リブが1本の場合の5分の1程度であることが分かります。歯面位置での変位が小さいということは、歯車試験機としての剛性が高く、十分な性能を有しているといえます。

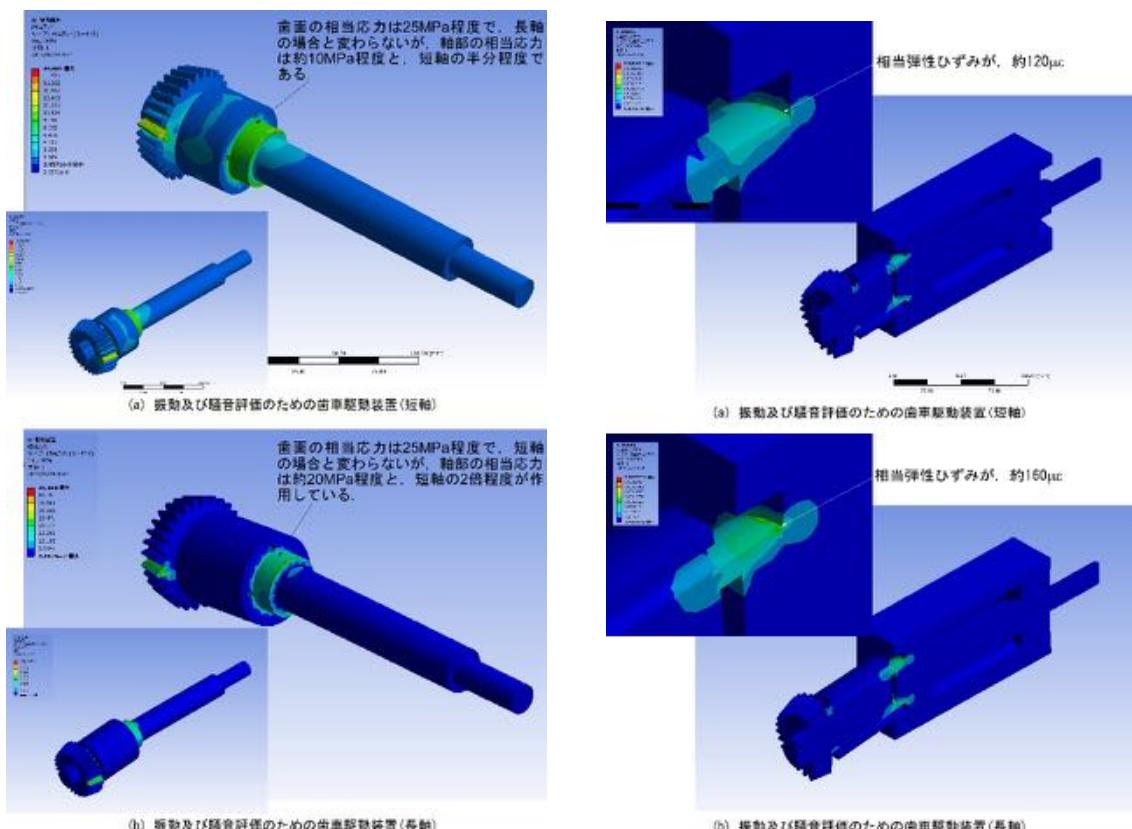


図10 荷重負荷時における
スピンドル軸部に作用する相当応力

図11 荷重負荷時における
スピンドル軸部に作用する相当ひずみ

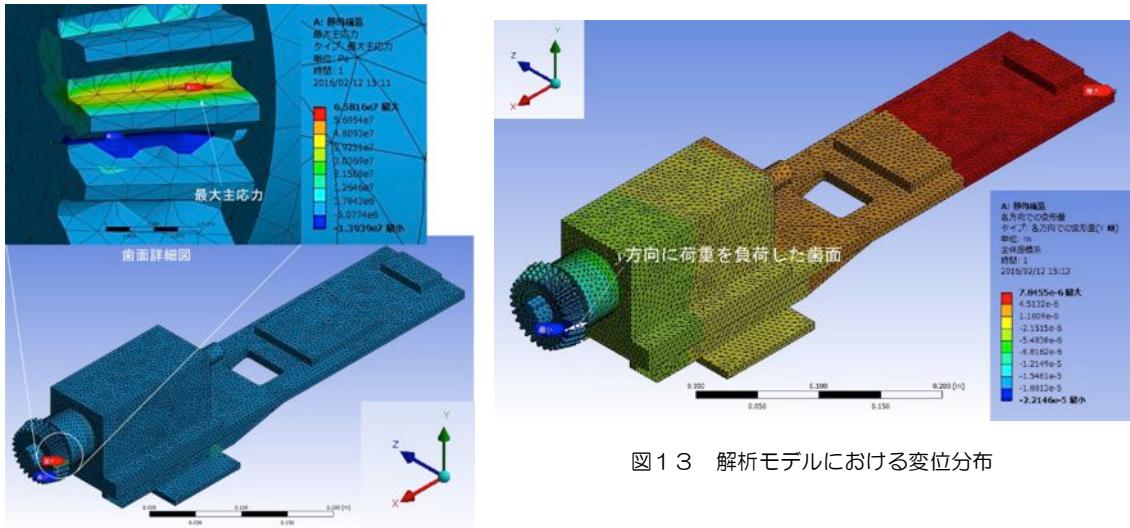


図12 解析モデルにおける最大主応力 σ_1 分布

図13 解析モデルにおける変位分布

①-2-3. 振動及び騒音評価の実施

(a) 音圧測定

表5に切削のみ（歯車A・B）、3段階修正砥石による研削（歯車C・D）、5段階修正砥石による研削（歯車E・F）の各組合せで歯車駆動装置を用いて100回／分で回転させた時の騒音の比較を示す。C・DおよびE・Fがほとんど変わらず暗騒音+約10dBとかなり静かであるのに対し、歯車A・BはE・Fに比べ14.5dB大きく騒音が大きかった。

(b) 音波形の測定

図13～15に歯車A・B、C・D、E・Fの組合せの運転音を計測マイクおよび鋭指向性マイクで取り込みFFT解析した結果を表示したものを示す。いずれも横軸に時間(s)、縦軸に周波数(Hz)を取り、音圧レベルを赤(強)～青(弱)の色表示で表してある。図14では騒音が最も大きかったA・Bの組合せでは3400Hz近辺の他に2500Hz以下全体と、6800Hzおよび9000Hzなどの高周波帯にもピークが見られる。しかし、噛み合わせ部分に焦点を当てた鋭指向性マイクによる結果(図14)では2500Hz以下にはピークが見られるものの、5000Hz以上の高周波帯にはほとんどピークが検出されない。これは計測マイクが駆動・従動双方のサーボモータの発する高周波や制御装置の運転音をも拾っているのに対し、鋭指向性マイクではその特性から噛み合わせ音だけを取得しやすいためだと思われる。図15で目立つピークを調

表5 音比較	
歯車	回転時の騒音(dB)
A・B	61.8
C・D	46.3
E・F	47.3
暗騒音	36.7

べると、500Hz、730Hz、1130Hz 周辺が見られ、人間の耳で良く聞こえる帯域であった。図中、低周波から 2000Hz 近辺まで時間変化する音は、記録装置類の発するノイズだと思われる。また 3400Hz の音は全てに共通して観測されるため、サーボモータなどの駆動音だと思われる。図 15 で見られる縦線で表される広い周波数にわたる音は、突発音である。図 15 のように鋭指向性マイクで噛み合い音だけを狙うと、120Hz とそれ以下の周波数帯ではピークが残るもの、それより高音域では非常に低い音圧レベルの音だけとなり、表 5 に示したように約 15dB 音圧レベルが下がったことを裏付けている。図 16 でも同様で、計測マイクで見られる周囲が発する様々な周波数の雑音は鋭指向性マイクを使うことでかなり低減できている。参考までに図 9 3 に駆動側のサーボモータをダンボール版で簡易的に遮蔽した場合の計測マイクでの結果を示す。5000Hz 以上の高周波帯については一定の遮音効果が見られ、これらの周波数帯の音がサーボモータによるものであることを確認できた。図 15・16 のいずれも図 14 に比べピークレベルがかなり下がっており、表面を研削した歯車 C・D および E・F の静音性能がかなり上がっていることが分かった。

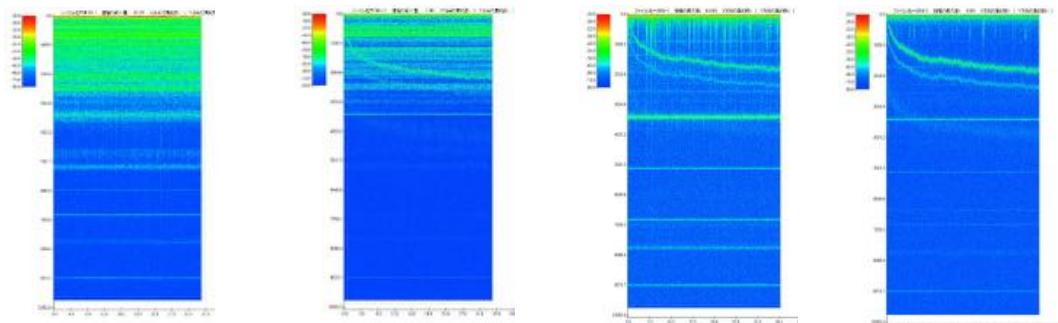


図 14 FFT 解析（歯車 AB）

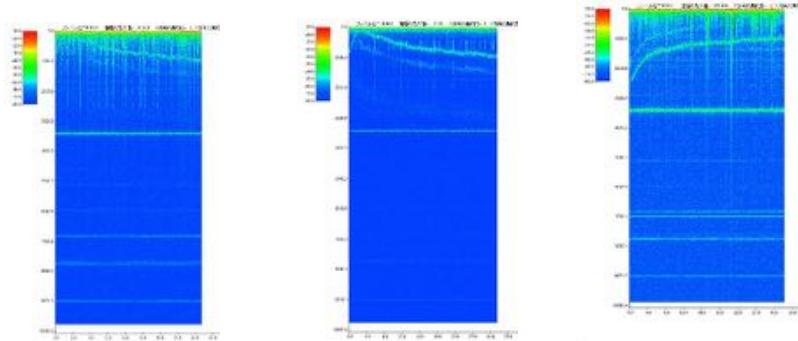


図 15 FFT 解析（歯車 CD）

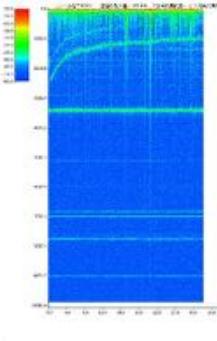


図 16 FFT 解析（歯車 EF）

(c) 振動測定

図17～19に歯車A・B、C・D、E・Fの組合せごとに、従動側のカバーに取り付けた3軸振動センサの出力をFFT解析した結果を示す。

回転軸方向をX軸、鉛直方向をZ軸としているので、歯車の円周方向はY軸となり、回転による影響を受けるのはYおよびZ軸となる。振動についても表5の結果を裏付けるように、歯車C・DおよびE・Fの組合せでの振動は、歯車A・Bの組合せの振動よりもレベルが低くなっている。3400Hz、5000Hz、7200Hz、9000Hzの高周波帯にもピークが現れているが、通常物理的接触による振動は比較的低周波帯に出ることが多く、これら高周波帯の振動は従動側サーボモータから伝わる振動であると思われる。X・Z方向に比べ、Y方向は特に高周波帯でのレベルがやや高く、回転による影響があると思われる。

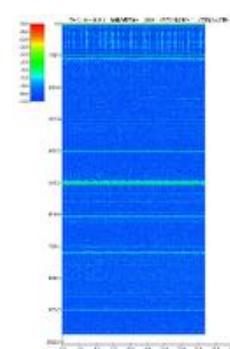
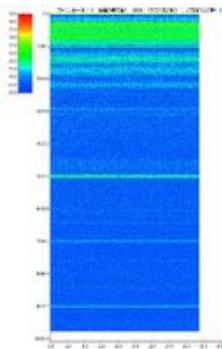
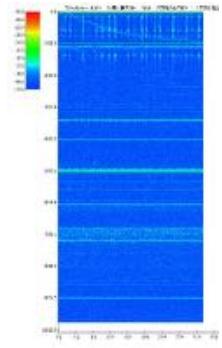
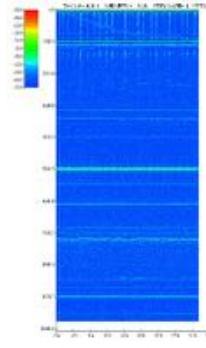
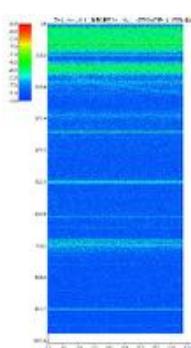
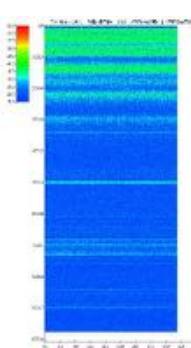


図17 X・Y・Zの振動 (A・B)

図18 X・Y・Zの振動 (C・D)

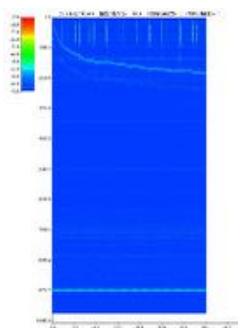
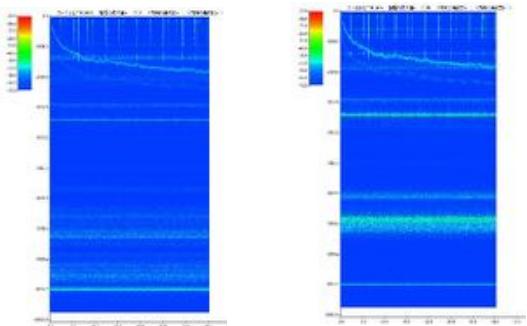


図19 X・Y・Zの振動 (E・F)

(d) トルク変動

表6にトルク計の出力の平均値を、図20にその時間変化を示す。歯車E・Fの組合せについてはノイズが大きかったため、表示を省いてある。駆動側の出力はほぼ同じであるのに対し従動側の出力値は33%増加し、また駆動・従動双方の出力が安定しており、これは駆動側の力が安定して従動側に伝わっているためだと思われる。

表6 トルク計の出力 (V)			
駆動 A)	従動 B)	駆動 C)	従動 D)
1.04	-1.29	0.94	-1.72

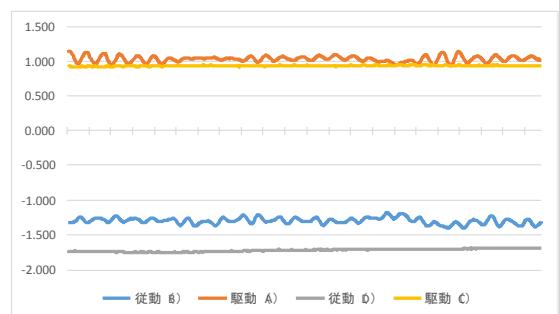


図20 トルク出力の時間変化
(横軸1目盛り=0.01s)

②-1 すぐばかさ歯車の新研削技術の開発

本研究では、これまで実用化されていないすぐばかさ歯車のねじ状砥石による創成研削加工を実現するために、3D-CAD を用いて、すぐばかさ歯車とねじ状研削砥石形状の創成研削加工シミュレーションを行い、適正なねじ状研削砥石形状を明らかにします。具体的には、まず正確なインボリュート歯形を持つすぐばかさ歯車の3D モデルを作成し、提案するねじ状研削砥石の3D モデルと創成研削動作を模擬した創成運動をさせて、歯車と砥石の干渉部分を明らかにします。次に、干渉部分は研削により除去されたとして、元のすぐばかさ歯車3D モデルからブーリアン演算により除去し、加工後のすぐばかさ歯車の形状を表します。

本研究の加工シミュレーションでは、Siemens 社製のハイエンド 3D-CAD である NX8.5 とその運動解析ソフトウェア Motion Simulation-RecurDyn を用いました。本研究では、円錐角 13° 以外は異なる諸元の2つのすぐばかさ歯車に対して、3つの異なる歯形形状を持つ研削砥石を用いて、加工シミュレーションを行いましたが、ここでは、圧力角を5段階に修正を施した砥石による TP-O 2-1 での研削シミュレーション結果を示します。図2 1 の砥石は、歯形をインボリュート曲線に近づけるように、歯形の圧力角 α を図2 1 のように5段階で修正した砥石です。すぐばかさ歯車は、歯車の上下でモジュール m が異なります。したがって砥石にも、その砥石の幅の中で、異なるモジュールを持たせておく必要があります。図2 1 に示す研削砥石は、砥石の右側で、歯車の下端を削るための大きなモジュール m を有し、砥石の左側で、歯車の上端を研削するための小さなモジュール m を有しています。また砥石の左側から右側にかけて、モジュール m とピッチは線形に変化しています。図2 1において、B 部詳細図が砥石の左側の歯形を示し、C 部詳細図が砥石の右側の歯形を示しています。本研究で用いる砥石の歯形形状は、歯形のピッチ線が同じ直徑を有するように設定していますので、砥石の外径は、砥石の右側から左側に行くに従い、徐々に小さくなる円錐形状となっています。

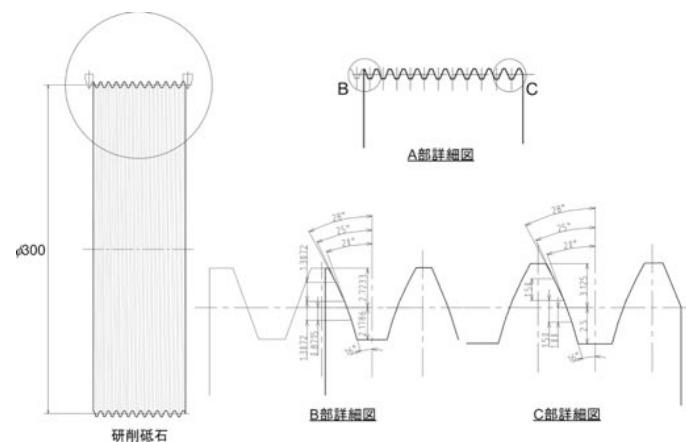
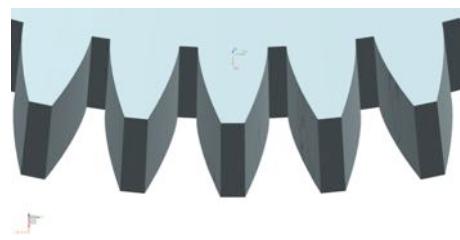
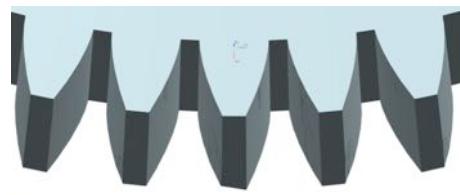


図2 1 歯形の圧力角を5段階で修正した研削砥石

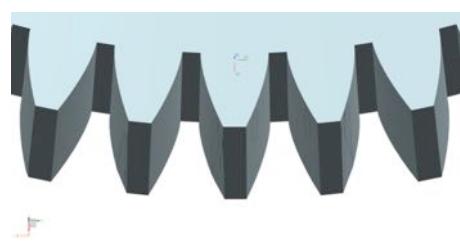
図22に、TP-02-1 を5段階修正砥石で研削加工した場合の加工シミュレーション結果を示します。図22(a)は Bottom にセットした場合の結果を示し、図22(b)は Middle にセットした場合の結果、図22(c)は Top にセットした場合の結果を示します。図22を見ると、すべての研削箇所において削りすぎがほとんど見られないことが分かります。この結果についても、実加工の結果を踏まえて、有効性の検証を行う必要があります。



(a) 研削砥石をすぐばかさ歯車の下端部(Bottom)にセットした場合の結果



(b) 研削砥石をすぐばかさ歯車の歯幅中央部(Middle)にセットした場合の結果



(c) 研削砥石をすぐばかさ歯車の上端部(Top)にセットした場合の結果

図 22 TP-02-1 と5段階修正砥石による加工シミュレーション結果

表7に、本研究開発において加工方法を含めた3種類の研削砥石による2種類の歯車での研削加工シミュレーションの実施条件をまとめています。次に、研削加工シミュレーション結果を説明する前に、表15に示すように、2つのすぐばかさ歯車に対して、それぞれ3つの歯形が異なる研削砥石を用いて加工シミュレーションを行いました。ここで、表15に示した4つ目の条件である「加工動作修正(逆クラウニング)」について説明します。歯車1に対して、砥石の歯形修正だけでは歯車として満足する歯形を得ることができませんでした。そこで研削砥石としては砥石3を用いて、図23に示すように研削加工動作における砥石の動きを、ワークの円錐母線に沿って直線に切りあがるのではなく、一般的なクラウニングとは逆に、歯幅の上下端で切込みをマイナスにし、歯幅中央で通常の切込みを行う動作でシミュレーションを行いました。ここでは、この動作は逆クラウニングと称することとします。ここで、歯車1はTP-01・歯車2はTP-02・砥石1は一般的なラック・砥石2は3段階修正砥石・砥石3は5段階修正砥石を指す。

表7 加工シミュレーション実施項目と対象歯車

シミュレーション項目	対象歯車	
1. 一般的なラック状歯形(砥石1)	歯車1	歯車2
2. 3段階圧力角修正(砥石2)	歯車1	歯車2
3. インボリュート形圧力角修正(砥石3)	歯車1	歯車2
4. 加工動作修正(逆クラウニング)(砥石3)	歯車1	

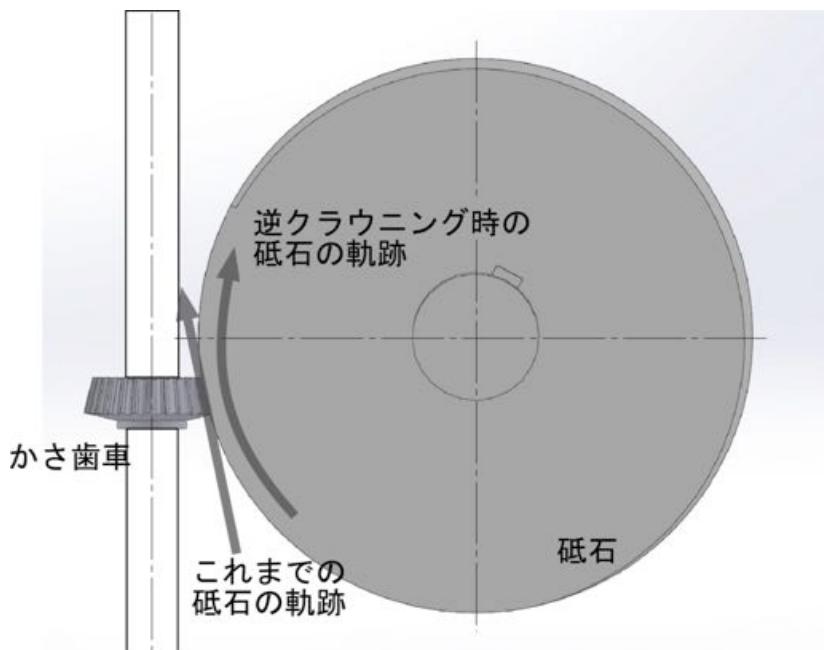
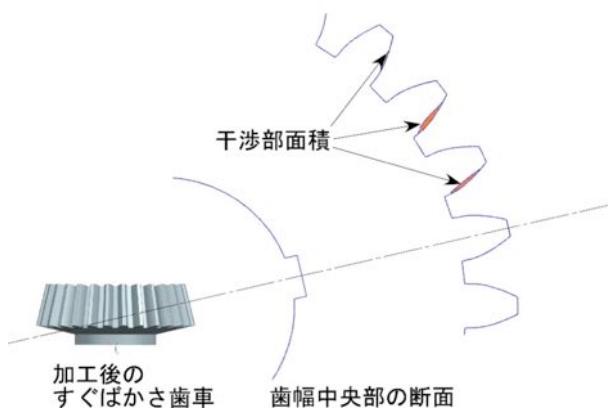


図23 歯形修正を施した研削砥石の形状（砥石3）

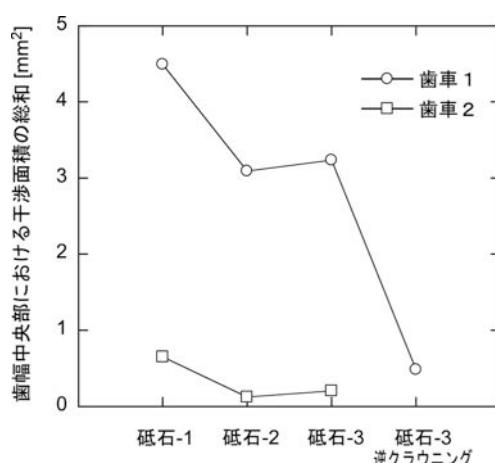
次に、3種類加工シミュレーションにおける研削砥石によるワークの削りすぎを定量化するために、図24(a)のように歯車の歯幅中央で断面をとり、その位置における歯面の削りすぎの面積を測定した結果を図24(b)に示します。図24(b)において、横軸は砥石番号と加工動作を示し、縦軸は削りすぎの面積の和を示します。

図121(b)の歯車1の結果を見ると、砥石1から砥石2は大幅に削りすぎが低減できていることが分かります。なお、砥石3は砥石2よりもわずかに削りすぎていることが分かります。また歯車1の逆クラウニング動作による加工では、検討にまだ不十分な点はありますが、大幅な削り過ぎの低減が可能であることが分かります。

次に、図121(b)の歯車2の結果を見ると、砥石1の時点で歯車1に比べて、極めて削りすぎの量が小さいことが分かります。また、歯車1と同様に、砥石1から砥石2で削りすぎは低減し、砥石3と砥石2では、砥石2の方が削りすぎは少ないことが分かります。



(a)すぐばかさ歯車の歯幅中央での干渉部



(b)各シミュレーションにおけるすぐばかさ歯車の歯幅中央での干渉部の面積

図24 各加工シミュレーション条件における研削砥石とすぐばかさ歯車の干渉量

以上の結果から、本研究の結論として、次のことが考えられます。

1. 齒車1を研削する場合、砥石形状としては砥石2が削りすぎは最も小さかったが、削りすぎの絶対量は大きく、研削加工として十分とは言い難い。この削りすぎの改善策として、逆クラウニング動作が有効である可能性があることが分かった。
2. 齒車2を研削する場合、砥石2を用いることで、砥石の研削動作を変更しなくても、創成研削加工ができる可能性があることが分かった。

以上の結果を踏まえて、今後も研究を継続していく予定です。

上述のように、3年間の研究の成果として、これまで創成研削加工が行われてこなかったすぐばかさ歯車の創成研削加工において、砥石形状のみの対応で創成研削加工実現の可能が高い場合と、砥石形状のみの対応では難しく、研削動作の見直しなどを検討しなければならない場合があることが分かりました。それらは、歯車の諸元で異なり、すぐばかさ歯車の円錐角や歯幅が大きい場合は、砥石形状のみの対応では創成研削加工が難しいことが分かりました。

これらの問題点を解決するために、今後の研究では次のことが考えられます。

1. 砥石形状の検討をさらに進める。
2. 砥石形状だけでなく、砥石と被削歯車との加工動作の検討を行う。
3. 本研究では、岐阜ギヤー工業で改造した機械で可能な動作をベースに、すぐばかさ歯車の創成研削加工の実現に向けて研究を行ってきましたが、その動作だけでは難しい面が出てきたことも事実です。そこで今後の研究として、上記2に加えて、これまでの機械動作にとらわれない加工技術の開発を進めて行くことも検討する。
4. 3における新たな加工動作を踏まえて、球形研削砥石による加工を行う。

以上、これまでに顕在化した課題を解決したいと考えています。

②-2 連続創成研削を実現する砥石形状成形技術の開発

本研究開発において②-1で導き出された砥石形状理論値を基に、忠実な砥石成形（ドレッシング）を行う必要がある。

これまでの研究により、砥石形状が単純な円筒形状に溝を切ったものにはならず、特殊形状となるため、既存のドレッシングユニットでは対応できない。そこで、岐阜ギヤー工業株式会社が三和精機株式会社及び淀川機工株式会社と協力して図122に示す「高機能ドレッシングユニット」（図26）を開発し、任意の形状に砥石成形が可能にするドレッシング制御プログラム（ファナック社 プログラム編集ソフトベース）の開発を行った。砥石の成形（ドレッシング制御プログラム）精度に関しては、フォトグラメトリーシステム（図28）による非接触による測定を行い検証した。

また、本研究開発にあたって改造を施した5軸ダイレクトモーター同期制御円筒歯車研削盤（25）・ドレッシング制御の様子を図27に示す。



図25 5軸ダイレクトモーター同期制御円筒歯車研削盤



図26 新開発高機能ドレッシングユニット



図27 ドレッシング制御プログラム実行時の様子

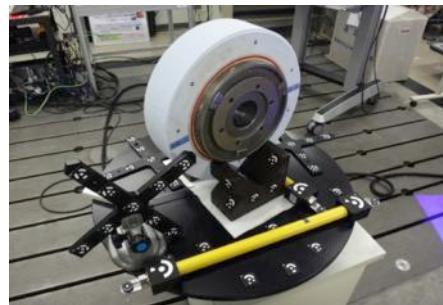


図28 フォトグラメトリーシステム測定

図28にフォトグラメトリシステムを併用して測定した5段階修正砥石の全景を示す。固定用フランジの中心の円錐と上面を基準にして座標系を設定した。円錐軸方向をZ軸とし、X軸は円周方向に任意にとった点を基準にして定めた。砥石の刃のピッチの変化を見るためにX軸から60度ごとに6枚の断面を作り、その形状を比較することとした（図29）。砥石にはピッチは異なるものの歯の形状の元となった3次元CAD（図32）のデータが存在するので、そこからも断面を切り取り併せて比較することとした。

5段階修正砥石は図29に示すように歯先に向かって圧力角を緩やかに変化させており、砥石断面の図29に対応する部分は図30のようになっている。設計と実際の加工された砥石断面の比較を図31に示す。今回得られたフォトグラメトリシステムの測定結果としては、理論形状に対し概ね0.01mm～0.04mmの形状誤差であることが解った。この成形精度の評価は一つの指針であり、より精度を高めることは今後の事業化に向け重要な要素であると考えている。

歯車を加工する砥石の成形精度が研削する歯車の精度に大きく影響を与える。従って成形精度を検証し、理論値との乖離を把握することは大きな意義がある。本研究ではフォトグラメトリシステムに専用治具を使い、回転対称体ゆえの測定の難しさを解決することができ、ある程度まで砥石の形状を把握できたことでその目的に大きく役立てることができた。しかし、砥石は表面に約0.1mmの砥粒とその間に気孔が分布しており、本研究で用いる光学的な測定機では砥粒が乱反射するのを防ぐために、酸化チタンを吹きかけているが、気孔が多く酸化チタンの吹きつけの効果が薄くなる。さらに使用した砥石であれば気孔に金属くずなどがはまり込み、やはり乱反射を起こし光学的なノイズとなって測定精度に影響を与える。より高精度で形状を測定するには、砥石独特の表面状態に応じた測定方法を検討する必要がある。しかしながら、従来とは異なる手法で砥石形状の評価を行えたことは本研究開発の成果であるといえる。

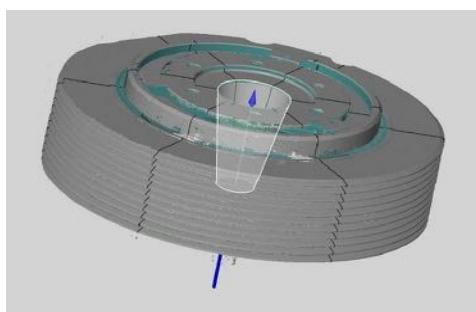


図28 測定した5段階修正砥石

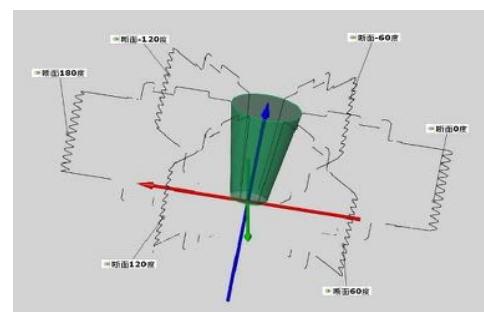


図29 5段階修正砥石の60度ごとの断面



図29 圧力角の設計図面

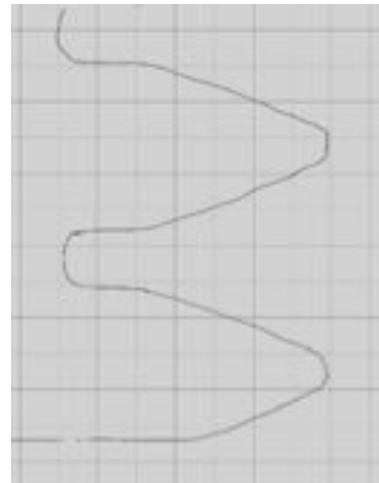


図30 図146に対応する断面

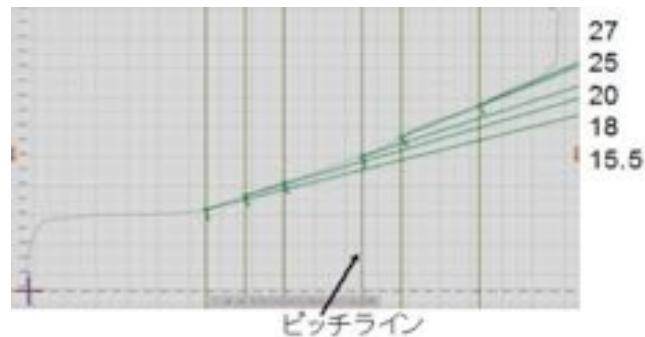


図31 実際の断面と設計圧力角に基づく勾配線

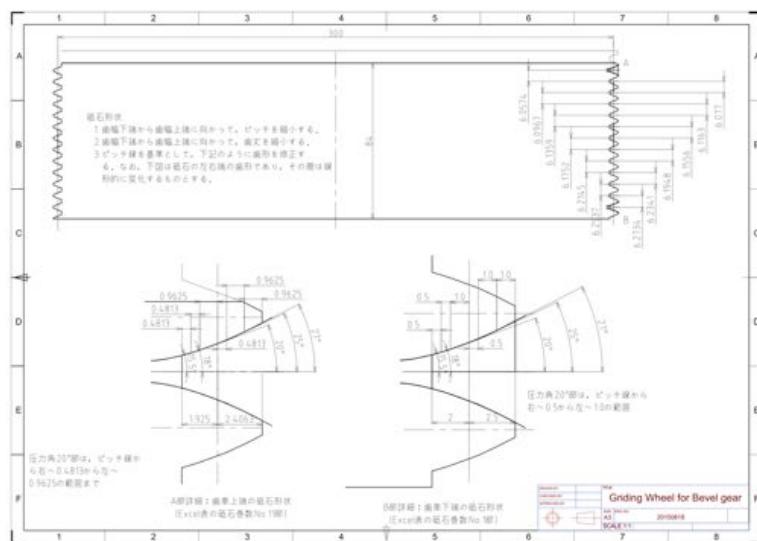


図32 5段階圧力各修正形状砥石 CAD データ

第3章 全体総括

工作機械メーカーでは、近年の諸外国との厳しい価格競争や環境負荷低減、不安定な電力供給事情を踏まえ、あらゆる産業において競争力の維持と省エネルギーに留意した技術革新が求められている。工作機メーカーにおいても、相次いで『省エネ・エコマシン』というコンセプトを明確に打ち出し、競争力強化のための低コスト化と、構成部品の効率向上による機械の環境負荷軽減を実現する技術革新が同時に求められている。

一般的なすぐばかさ歯車の創成工程は、切削の後に熱処理を行い、精度が必要であればさらに研削を行う。精度を向上させることで伝達効率が向上し、低騒音化が図れ、機械の環境負荷軽減に役立てることができる。しかし、一方で高精度化は高コスト化につながり、コストと精度にはトレードオフの関係が従来存在した。

本研究開発では、アドバイザーとして参画している「DMG 森精機株式会社」向けの ACT（オートツールチェンジャー）の構成部品の一つである「すぐばかさ歯車」を対象とし安価で生産効率の高い工法として既存の加工法と異なる「連續創成研削法」を提案し新工法として確立を目指し当初の技術的目標を達成できた。しかしながら、本研究開発の事業化に向け最終的な目標に到達しているわけではない。従って今後も引き継ぎ研究開発を継続し実用化に反映させるとともに技術レベルの向上を目指すものである。

3年に渡る研究開発で得られた技術的知見・展望としては以下に要約する。

- (1) 既存の「すぐばかさ歯車」の精度評価とは異なる手法での実験で比較ができた。
また、従来は出来なかった「すぐばかさ歯車」に於ける歯面性状を絶対値で評価できることで歯面研削状況を把握でき加工技術の向上を測れた。
- (2) 「すぐばかさ歯車対」単体での噛み合い状態を測定し、実際に駆動させて音や振動などを測定することで、歯車の総合的な評価を行うことができた。今後、この歯車の評価手法をより簡便に高精度で実施する手法を検討し、量産した歯車の評価についても対応できる手法についても検討していきたい。
- (3) 従来では「すぐばかさ歯車」が駆動している際の歯面状況の把握が難しかったが、フォトグラメトリーを使用することにより非接触で観察することに成功した。
また、「すぐばかさ歯車」対の組み立て距離及び、組み立て角度に非接触で計測することができた。
- (4) 3DCAD を用いた「連續創成研削の3D シミュレーション」を実施することで実際の加工前に歯面形成状況が把握でき、加工効率の向上を図ることができた。

これは、新しい3DCADの使用法として非常に有効ではないかと考える。

- (5) 3Dシミュレーションにより策定された特殊形状砥石成形技術を確立でき、従来では不可能であった砥石成形精度に関してもフォトグラメトリーによる非接触での形状測定に成功した。これにより設計通りのドレッシングができているかといった成形精度の評価が可能となり、フィードバックすることで生産性の向上につなげることができ、これは砥石単体で評価することで新たな評価法として可能性を感じるものである。
- (6) 歯車の性能評価全般に関しては、駆動装置を用い、噛み合いや音や振動の測定を利用した評価の手法を確立することができた。なかでも、フォトグラメトリシステムの導入により、歯車の噛み合い状態を3次元的に把握できるようになったのは大きな利点である。歯車の表面形状と位置情報が精度良く求めることができると、フィードバックすることでより高性能な歯車の噛み合い3Dシミュレーションを行うことができると期待される。さらに、噛み合い状態の測定をより簡便化することで、リアルタイムでの噛み合わせ検証に役立てたい。

今後の研究開発及事業展開への取り組み

3年間という短期間では加工サンプル数を増やすことができず今後は実証事例を増やすことが出来るような開発の効率化を目指すとともに実用化ベースでの試作開発を実施することでビジネスモデルを作りたいと考えている。

また、当技術を盛り込んだ「ギヤボックス」及び「ドレッシングユニット」の販売に関しては、新しい連続創成研削技術による「賃加工」での実績向上を図ったうえ新たな計画を策定し実行したいと考えている。

技術革新は常に続いていることも踏まえ本技術のレベルアップを行いより高精度で安価な工法の確立を目指す。