

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

**「自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の
高精度仕上げ転造システムの開発」**

成 果 報 告 書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関 東 経 済 産 業 局

受託者 特定非営利活動法人

ものづくり支援機構

目 次

第 1 章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景及び目標	1
1-1-1	研究開発の背景	1
1-1-2	当該分野における研究開発動向	1
1-1-3	研究開発の目標	3
1-1-4	研究開発の具体的内容	4
1-2	研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）	7
1-3	研究成果の概要	11
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	14
第 2 章	自動車トランスミッション用高強度焼結 歯車の高精度仕上げ転造システムの開発 (各開発項目の設計概要)	15
2-1	ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発	15
2-1-1	ダイスに自動設計ソフトウェアの開発	15
2-1-2	転造状態可視化ソフトウェアの開発	15
2-2	有限要素歯形解析システムの開発	15
2-2-1	転造歯車の変形解析ソフトウェアの開発	15
2-2-2	歯形誤差評価ソフトウェアの開発	16
2-3	データベースシステムの開発	16
2-3-1	工具修正歯形自動生成ソフトウェアの開発	16
2-3-2	自動修正のためのデータ保管・管理ソフトウェアの開発	16
2-4	歯車の転造実験・精度評価	17
2-4-1	転造金型の設計・試作	17
2-4-2	焼結歯車の設計・試作	18
2-4-3	転造実験	18
2-4-4	工具最適化	19
2-5	圧密度合い(空孔率)測定用渦電流計測システムの開発	19
2-5-1	歯車測定用渦電流検出センサの開発	19

2-5-2	歯車測定用励磁コイルの開発	20
2-5-3	入力信号増幅・同期整流装置の設計・試作	20
2-5-4	抵抗率・透磁率校正用試験片の製作	21
2-5-5	空孔率校正用試験片の製作	21
2-6	歯車疲労強度評価	22
2-6-1	面圧疲労強度試験	22
2-6-2	曲げ疲労強度試験	22
第3章 自動車トランスミッション用高強度焼結歯車		
	の高精度仕上げ転造システムの研究概要	23
3-1	ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発	23
3-1-1	ダイスに自動設計ソフトウェアの開発	23
3-1-2	転造状態可視化ソフトウェアの開発	23
3-2	有限要素歯形解析システムの開発	23
3-2-1	転造歯車の変形解析ソフトウェアの開発	23
3-2-2	歯形誤差評価ソフトウェアの開発	24
3-3	データベースシステムの開発	24
3-3-1	工具修正歯形自動生成ソフトウェアの開発	24
3-3-2	自動修正のためのデータ保管・管理ソフトウェアの開発	25
3-4	歯車の転造実験・精度評価	26
3-4-1	転造金型の設計・試作	26
3-4-2	焼結歯車の設計・試作	26
3-4-3	転造実験	27
3-4-4	工具最適化	33
3-5	圧密度合い(空孔率)測定用渦電流計測システムの開発	34
3-5-1	歯車測定用渦電流検出センサの開発	34
3-5-2	歯車測定用励磁コイルの開発	35
3-5-3	入力信号増幅・同期整流装置の設計・試作	36
3-5-4	抵抗率・透磁率校正用試験片の製作	37
3-5-5	空孔率校正用試験片の製作	37

3－6	歯車疲労強度評価	．．．．．	38
3-6-1	面圧疲労強度試験	．．．．．	38
3-6-2	曲げ疲労強度試験	．．．．．	40
第4章	得られた成果および今後の課題の検討	．．．．．	42
4－1	得られた成果	．．．．．	42
4－2	当初の目標に照らした達成状況	．．．．．	43
4－3	今後の課題の対応	．．．．．	43
第5章	研究総括	．．．．．	44

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景及び目標

1-1-1 研究開発の背景

転造に用いる粉末焼結技術は加工工程が少なく、歯車のような複雑形状部品の大量生産には特に適している。近年、高速・高荷重下で作動する自動車のトランスミッション用歯車にも適用できる超高密度で高性能な焼結鋼素材が開発された。

この焼結鋼歯車に仕上げ転造を施し、歯表面層の組織を緻密化し、適切な熱処理を施せば、溶製合金鋼浸炭焼入れ歯車と同程度の荷重負荷能力を持つことも当社の研究で実証されつつある。

しかし、転造後の総合的な歯車精度の確保に関しては依然不十分であり、多くの問題を抱えている。その主な原因はこの種の仕上げ転造では、加工後正しいインボリュート歯形をもつ歯車を得るためには、転造用ダイス工具に適切な歯形修整を施さなければならない。

ところが、その最適化は現場での実験的な試行錯誤に頼っているのが現状であり、極めて多くの工程と時間が必要とされるためである。

これらの問題を解決するために、転造される種々の諸元をもつ素材焼結歯車に対して、工具修整歯形をある程度机上で設計・最適化できる汎用歯形解析システムを開発するとともに、歯面の圧密度合い（空孔率）を測定するシステムを開発し、これらを用いて実証テスト評価を行ない、高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムの技術確立を図る。

1-1-2 当該分野における研究開発動向

当該分野における自動車のトランスミッション用歯車は、高速・高荷重の下で使用されているため、それに用いる材料は一般に機械構造用合金鋼などが用いられ、歯の曲げ疲労強度と面圧疲労強度を同時に高くできる浸炭焼入れなどにより、表面硬化処理が施されている。しかし、自動車のトランスミッション用歯車の生産には多くの加工工程を要し、コストの抑制が難しく生産コスト高の要因となっている。近年、切削加工を省くことのできるニアネットシェイプの要求が高まっており、多種多様な自動車用部品が塑性加工や粉末焼結により生産されるようになってきている。

粉末焼結技術は、歯車のように複雑な形状部品の生産には特に適しているが、しかし、一方では通常の焼結鋼には 10%程度の気孔が残存するため溶製鋼に比べ強度が低く、そのままでは自動車トランスミッション用歯車として、活用することはできなかった。他方、焼結鋼に鍛造や転造などの冷間二次成形を施し、表面層を緻密化すれば、曲げ疲労強度や面圧疲労強度が著しく改善されることが多く報告されている。ところが、焼結鍛造では歯車精度に問題があり、通常焼結鋼では転造による緻密化に必要な変形量の大きさが歯車精度に悪影響を及ぼす問題があった。

当該分野の自動車業界における要求等については、以下の状況である。

(1) 焼結部品の特徴と自動車部品としての使用状況

自動車には、コスト優位性から、非常に多種の粉末冶金法による部品（POWDER METAL PART：以下焼結部品という）が使用されている。これら焼結部品の特徴は以下のとおりである。

- 金型を使用した製法のため大量生産によるコスト削減が可能。
- 金型を使用した製法のため複雑形状部品に向いている。
- 粉末を押し固めて形を作り、それを焼く事で金属同士を結合させる為、他工法に比較し、歩留まりが優れている。
- 弱点としては、多孔質の組織であり、高強度の用途には向かないとされる。

(2) 自動車トランスミッションへの焼結歯車使用の可能性

自動車のトランスミッション用歯車の一般的な工程は、「円筒素材加工→ホブ切り→シェーピング→表面硬化熱処理→仕上げ加工→歯面仕上げ」という多くの工程を経て生産されるため、加工コストの抑制が非常に難しい。

一方、粉末焼結は、「圧粉→焼成」という極めて短い工程により最終製品に近い形状をもつプリフォームを成形できるため、これを直接トランスミッション用歯車として用いることができれば生産効率は飛躍的に向上し、生産コストは大幅に低減できると試算されている。

しかし、通常の焼結鋼には上述したとおり 10%程度の気孔が金属組織内に残存するため溶製鋼に比べ強度が著しく低い。このプリフォーム歯車に仕上げ転造を施し、表面層を緻密化すれば荷重負荷能力は著しく改善されるが、緻密化に必要な変形量の大きさが歯車精度に悪影響を及ぼす問題があった。

近年、粉末焼結技術の著しい進歩により超高密度(気孔率 5%以下)で高強度な焼結鋼素材が開発されことにより、強度と精度の問題を一挙に解決できる可能性が高まったことに着目した。

これにより、本研究開発では高性能な粉末焼結鋼素材歯車に、自社が独自開発した高精度 CNC 成形転造盤を用いて、技術融合によるトランスミッション用焼結歯車の仕上げ転造システムの開発を行うことが可能となった。

1-1-3 研究開発の目標

当該研究開発における高度化目標は、従来の溶製鋼歯車から焼結歯車への転換の促進であり、大幅な省資源化の実現に加え焼結歯車の高強度化と高精度化による「自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムの開発」である。

当該研究開発では、転造用ダイス工具の修整歯形を実験ではなく数値解析により机上で設計・最適化できる汎用歯形解析システム等の構築の課題を解決し、加えて歯面の計測システムの開発することにより、量産時の面圧強度の管理などを目指し以下の項目について研究開発を行なう。

- 1-1 ダイスの自動設計ソフトの開発
- 1-2 転造状態の可視化ソフトの開発
- 2-1 歯形解析システムの開発
- 2-2 歯形誤差評価ソフトの開発
- 3-1 工具修正歯形自動生成ソフトの開発
- 3-2 データベース開発
- 4-1 転造実験
- 4-2 精度評価
- 4-3 顕微鏡による計測
- 5-1 計測システムの設計・製作
- 5-2 校正システム構築
- 6-1 面圧疲労強度評価
- 6-2 曲げ疲労強度評価

研究開発の技術的目標値

高度化指針の（五）- 2 - （１）-①、②に対応して、自動車トランスミッション用の焼結鋼歯車について、転造加工による高強度化加工技術の開発と、高精度成形加工の開発をする。

そのため、（イ）転造金型の歯型修正用ソフトウェアの開発と、（ロ）高強度化のパラメータのひとつである圧密度合いを計測する測定方法の開発を行なう。

（イ）開発により、歯形修整の工数は従来の 1/5 まで短縮できる。

（ロ）の開発により、従来の破壊検査法（切断片を顕微鏡で確認する方法）に比較して、1/10 程度までに工数削減が可能になる。

以下に、研究開発の具体的な目標を示す。

自社の CNC 転造盤は、両主軸の回転同期精度（0.01 度以下）及び主軸間距離調整精度（1 ミクロン以下）が極めて高く、数値シミュレーションの結果を、加工プログラムに反映できるようにすることに加え、何れは歯車表面の圧密度合い（空孔率）を自動計測する方法を開発し、両主軸間の加圧力にフィードバックする事を目指す。

また、（ハ）として実際の成形金型の試作およびその金型による焼結鋼歯車の仕上げ転造加工を行ない、面圧強度、曲げ強度、形状精度を確認する。そして、従来の溶製材歯車と同等の強度、精度の焼結鋼歯車が得られることを目標とする。

1-1-4 研究開発の具体的内容

粉末焼結技術は加工工程が少なく、歯車のような複雑形状部品の大量生産には特に適している。近年、高速・高荷重下で作動する自動車のトランスミッション用歯車にも適用できる超高密度で高性能な焼結鋼素材が開発された。

この焼結鋼歯車に仕上げ転造を施し、歯表面層の組織を緻密化し、適切な熱処理を施せば、溶製合金鋼浸炭焼入れ歯車と同程度の荷重負荷能力を持つことも当社の研究で実証されつつある。しかし、転造後の総合的な歯車精度の確保に関しては依然不十分であり、多くの問題を抱えている。

その主な原因は、この種の仕上げ転造では、加工後正しいインボリュート歯形をも

つ歯車を得るためには、転造用ダイス工具に適切な歯形修整を施さなければならない。

ところがその最適化は現場での実験的な試行錯誤に頼っているのが現状であり、極めて多くの工程と時間が必要とされるためである。

そこで本研究では、転造される種々の諸元をもつ素材焼結歯車に対して、工具修整歯形をある程度机上で設計・最適化できる汎用歯形解析システムを開発し、これを用いて実証テスト評価を行ない、高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムの量産技術確立を図る。

汎用歯形解析システムの開発を研究の主眼とし、同時にシステムの実用性を高めるために、2～3種類の諸元の異なる歯車に対し、解析と実験・計測の両面から修整工具歯形の最適化を図り、構築されたシステムの妥当性を評価する。なお、ここで開発を目指すシステムソフトウェアは以下の三つのモジュールから構成され、非常に実用的で取扱い易いものになる予定である。

- 1) 任意の素材歯車に対して、仕上げ転造用丸ダイス工具の最適諸元を自動計算し、かつ転造時の工具と素材の幾何学的かみ合い状態をビジュアルにかつ正確に再現できる可視化ソフト。
- 2) 仕上げ転造による素材歯車の弾塑性変形状態や緻密化の状態をシミュレートすると同時に、転造後歯形を予測できる有限要素解析ソフト。
- 3) 数値シミュレーションあるいは転造実験の結果から、工具修整歯形の自動設計・評価と最適転造スケジュールを推論できるエンジンを兼ね備えたデータベースソフト。

本研究では上記ソフトウェアの開発を行い、高強度焼結歯車の仕上げ転造システムの実用化を目指す。

本研究で開発される高強度焼結歯車のソフトウェアシステムは、基本的に当社の2丸ダイス数値制御成形転造盤を用いて歯車の仕上げ転造を行うことを想定している。

したがって、このソフトウェアシステムは当社製の転造盤に対して工具修整歯形の設計最適化を迅速・簡便かつ容易に行えるよう特化した仕様になる。

当社のCNC転造盤は、両主軸の回転同期精度（0.01 度以下）及び主軸間距離調整精度（1 μ m 以下）が極めて高く、数値シミュレーションの結果を、加工プログラムに反映できるようになっている。また、何れは歯車表面の圧密度合い（空孔率）を

自動計測する方法を開発し、両主軸の加圧力のフィードバックすることも考えている。

具体的には、渦電流センサの開発と、それを用いた測定システムの開発することになる。

この計測システムは、仕上げ転造システムの実用化のときの、面圧強度の管理に役立つ。

開発テーマ6項目についての、具体的対応方法は以下の通り。

1. ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発

1-1 ダイスの自動設計ソフトウェアの開発

1-2 転造状態可視化ソフトウェアの開発

2. 有限要素歯形解析システムの開発

2-1 転造歯車の変形解析ソフトウェアの開発

2-2 歯形誤差評価ソフトウェアの開発

3. データベースシステムの開発

3-1 工具修整歯形自動生成ソフトウェアの開発

3-2 自動修正のためのデータ保管・管理ソフトウェアの開発

4. 歯車の転造実験・精度評価

4-1 転造金型の設計・試作

4-2 焼結歯車の設計・試作

4-3 転造実験

4-4 工具最適化

5. 圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの開発

5-1 歯車測定用渦電流検出センサの開発

5-2 歯車測定用励磁コイルの開発

5-3 入力信号増幅・同期整流装置の設計・試作

5-4 抵抗率・透磁率校正用試験片の製作

5-5 空孔率校正用試験片の製作

6. 歯車疲労強度評価

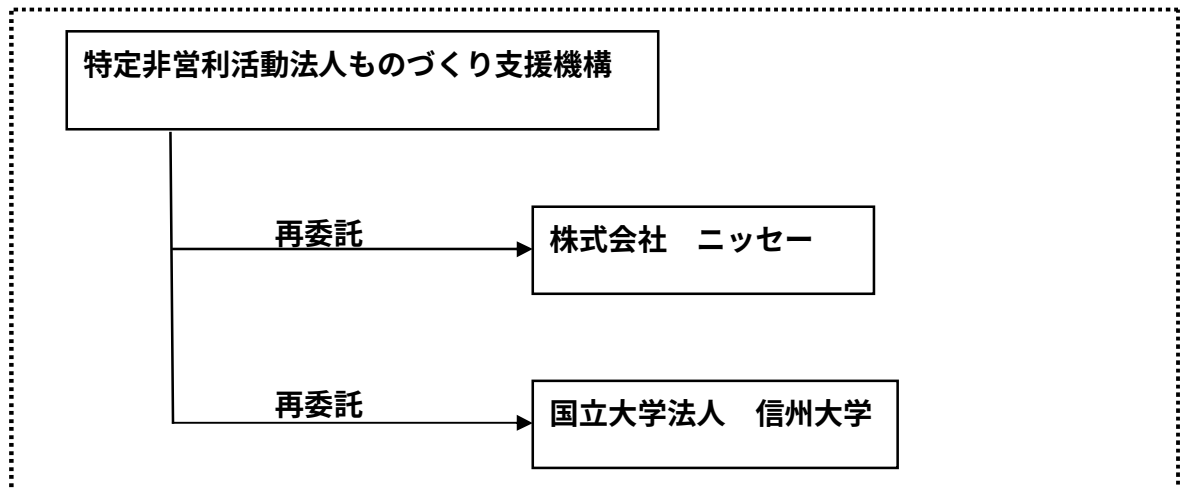
6-1 面圧疲労強度試験

6-2 曲げ疲労強度試験

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（P L）

所属：株式会社 ニッセー

役職：代表取締役社長

氏名：新仏 利仲

副総括研究代表者（S L）

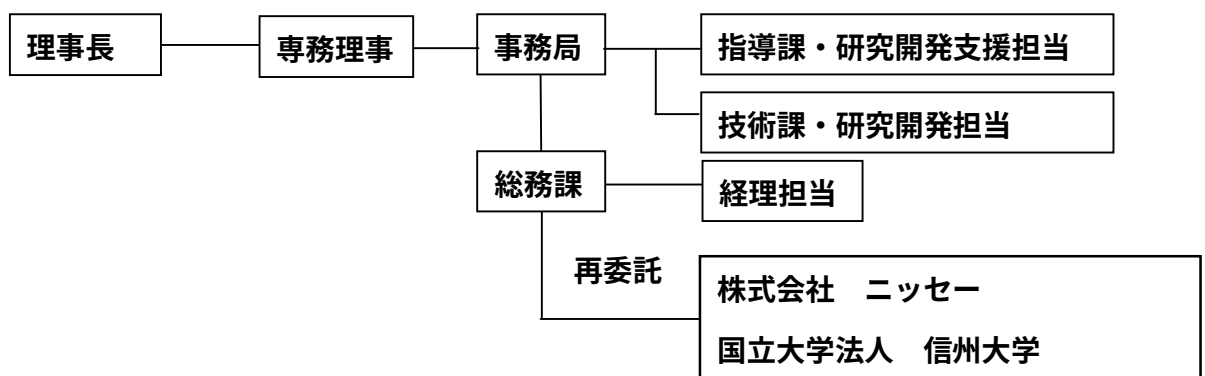
所属：株式会社 ニッセー

役職：技術部 担当部長

氏名：吉川 紘

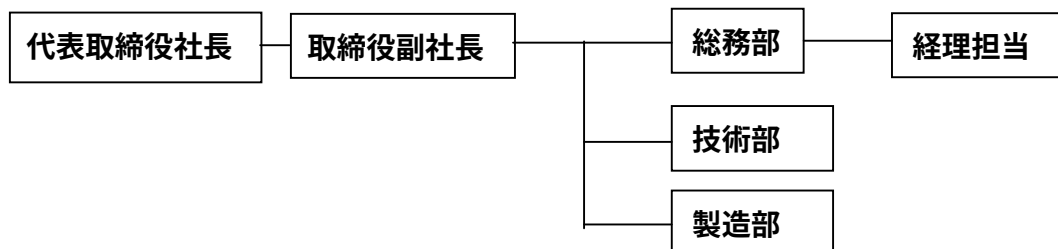
2) 管理体制

①プロジェクト事業管理者 [特定非営利活動法人ものづくり支援機構]

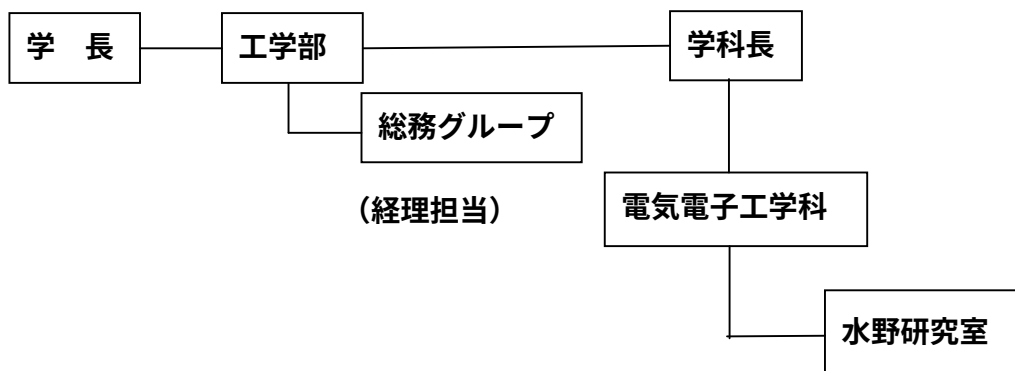


②（再委託先）

〔株式会社 ニッセー〕



〔国立大学法人信州大学〕



（２）研究員及びプロジェクト管理員（役職、業務内容別担当）

【事業管理者】 特定非営利活動法人ものづくり支援機構

管理員（プロジェクト管理員）

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
安留 勝敏	理事（研究総括）	⑦
羽田 功一	事務局長	⑦
清水けい子	総務課長	⑦

【再委託先】

(研究員)

株式会社ニッセー

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
長谷川慎也	技術部 研究員	①②③④⑥
劉 林生	技術部 研究員	①②③④⑥

国立大学法人信州大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
水野 勉	工学部 准教授	⑤

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

特定非営利活動法人ものづくり支援機構

(経理担当者) 総務課 課長 清水けい子
(業務管理者) 事務局 局長 羽田 功一

(再委託先)

株式会社ニッセー

(経理担当者) 総務部 経理担当 奈良 興一
(業務管理者) 代表取締役社長 新仏 利仲

国立大学法人信州大学

(経理担当者) 工学部総務グループ 主査（研究協力担当） 清水 貞浩
(業務管理者) 電気電子工学科学科長 上村 喜一

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

・委員会構成

研究開発委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
新仏 利仲	株式会社ニッセー 代表取締役社長	PL
吉川 紘	株式会社ニッセー 担当部長	SL
堀内 憲男	株式会社ニッセー 取締役副社長	
天野 秀一	株式会社ニッセー 常務取締役	
長谷川慎也	株式会社ニッセー 研究員	委
劉 林生	株式会社ニッセー 研究員	委
水野 勉	国立大学法人信州大学工学部 准教授	
竹増 光家	諏訪東京理科大学 システム工学部教授	アドバイザー (謝金、旅費)
伊藤 耕三	住友電工焼結合金株式会社 開発部	アドバイザー (謝金、旅費)
安留 勝敏	特定非営利活動法人ものづくり支援機構 理事 (研究総括)	
羽田 功一	特定非営利活動法人ものづくり支援機構 事務局長	
清水けい子	特定非営利活動法人ものづくり支援機構 総務課長	

アドバイザー (任意)

氏名	所属・役職	備考
竹増 光家	諏訪東京理科大学 システム工学部教授	
伊藤 耕三	住友電工焼結合金株式会社 開発部	

1-3 研究成果の概要

当該研究開発事業（H21年度）においては、「自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムの開発」を、下記の6テーマ17項目に分けて行った。

1-3-1 ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発

本研究では、転造される種々の諸元をもつ素材焼結歯車に対して、工具修整歯形をある程度机上でダイスの設計・最適化できる汎用歯形解析システムを開発した。

これにより、限りなく量産に近い、高品質成形品試作が可能となり、それにより、多品種少量金型・簡易金型・試作金型の試作をシミュレーション段階での機能評価及び量産性が見極めが行いやすく、試作段階で量産に起こりうるトラブルを事前に解消することが可能となった。

次年度における研究開発の新たな課題としては、ダイスの自動設計・転造状態可視化システムに反映すべき修正値等のデータの蓄積などが主な研究項目となる。

1-3-2 有限要素歯形解析システムの開発

有限要素法(FEM)による数値解析(シミュレーション)は歯形解析の分野で非常に強力なツールであり、様々な物理的問題を解くことができるため、有限要素法による歯形解析にあたって、従来では次のような2つの問題に直面していた。

- 1) 任意の解析対象の構造に適合した精度の良い要素分割（メッシュ作成）
- 2) 膨大な量の数値出力データの効率的な解析（ポストプロセッシング）

これらのデータ処理を行なうプロセスには、膨大な時間と労力に加え、試作段階における作業時間や試作費が必要であった。

このため本研究開発では、これらの諸問題を解決するために取り組んだもので、この有限要素歯形解析システムの開発により、開発者は有限要素法の解法のみに集中することが可能になり、特に歯形解析分野での解析を行う場合にも、多品種少量の歯車解析に適したシステムとなっている。

次年度における研究開発の課題としては、この構造化されたメッシュに基づき、シンプルでかつ、独自のファイルフォーマットへの改良を行なうことである。

1-3-3 データベースシステムの開発

上記1及び2のデータについて、工具修整歯形自動生成ソフトウェア及び自動修

正のためのデータ保管・管理ソフトウェアを開発した。これにより各種の歯車に関するデータの保管・管理とデータの自動修正が可能となった。

次年度における研究開発の新たな課題としては、上記したシステムに反映するべき修正値等のデータの蓄積などが主な課題となる。

1-3-4 歯車の転造実験・精度評価

歯車の転造実験は、下記の4種類の歯車について金型と焼結素材を用意し、転造実験を行った。実験の効率を高めるため、センター台を製作した。

①平歯車 $M=4.5$ 、歯数 $Z=16$

②はすば歯車 $M=3.0$ 、 $Z=16$

③はすば歯車 $M=3.0$ $Z=25$

④はすば歯車 $M=1.3$ $Z=20$

金型（工具）の修正については、開発したソフトウェアシステム(修正歯形の自動生成システム)を活用することにより、最適化をはかった。

21年度の開発では、噛み合いに関与する1歯または複数歯についての歯形の誤差を修正する評価方法を採用した。仕上げ転造実験の結果からみると、転造歯形の形状精度は、平歯車よりはすば歯車の方が形状誤差は少ない。はすば歯車のような複雑な形状の方が平歯車より、転写精度がよいことがわかった。従来の切削による歯車仕上げとは、逆の傾向であり、転造仕上げの有利な点のひとつである。自動車トランスミッション用歯車は、はすば歯車が多用されるので、この特長は大いに生かせる。川下企業が要求する歯車諸元は、歯形誤差のみでは不足であり、全周にわたる歯筋誤差、ピッチ誤差などの提供が必要である。21年度は、1歯または複数歯のモデルによる計測・解析をしたが、川下企業の要求に答えるには、全周モデル（または円筒モデル）について計測・評価するシステムの構築が必要であることがわかった。

1-3-5 圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの開発

圧密度合い測定用渦電流計測システムの開発は、歯車の歯形に合わせた渦電流検出コイルの開発が必須条件となる。したがって、コイルの試作開発関係の下記の3項目を優先し、転造条件との関連付けのための校正用試験片の作成に関する開発の2項目については、必要に応じて試作開発をすすめることにした。各項目について

の開発成果は次の通り。

1-3-5-1 検出コイルの試作・開発

歯車形状 $M=3, Z=25$ と $M=4.5, Z=16$ の 2 種類について、検出コイルの設計・試作をして検出電圧と励磁した周波数との関連を調べた。

1-3-5-2 励磁コイルの試作・開発

歯車形状 $M=3, Z=25$ と $M=4.5, Z=16$ の 2 種類について、励磁コイルの設計・試作をして、励磁した周波数と検出された渦電流の位相差などをしらべた。

1-3-5-3 入力信号増幅・同期整流装置の開発

計測用の構成部品（検出信号の増幅器、励磁用発振器、同期整流器など）については、新たに回路設計をすることなく、汎用の計測器を組合せることで計測システムを構築した。専用設計されたシステムに比較して、操作が複雑、重い、大きいなど使い勝手は悪いが、設計・製作時間が大幅に削減できたので、その分コイルの試作開発に十分な時間をかけることができた。

1-3-5-4 抵抗率・透磁率校正用試験片の製作

実際に転造加工した歯車表面についての校正用試験片については、その加工方法がみつからず、手付かずの状態である。歯車形状に加工する前のブランク材に、等価的な転造加工を施し、校正用試験片の代替とした。残留応力との関連付けのためには、適切な焼結合金試験片作製装置の開発が必要である。

1-3-5-5 空孔率校正用試験片の製作

実際に転造加工した歯車表面の空孔率の観察については、専用の顕微鏡観察システムを購入して観察した。空孔のある焼結材の顕微鏡観察試験片の研磨については、従来の遊離砥粒による研磨方法では、空孔の肩の部分までが研磨されてしまい、孔径が実際より広がってしまうため、空孔率が高めに観測されてしまうことがわかった。空孔率を精確に測定するためには、電解研磨方式の試験片作製装置の開発が必要である。

1-3-6 歯車疲労強度評価

破壊検査方式であるため、一度の試験結果を得る上でも長時間を有する為、21 年度については、事前に用意してあった供試サンプル(本研究の焼結材料と同一材質)の平歯車 $m3.0$ を使用しての評価結果であるが、想定した面圧強度、曲げ強度が得ら

れることがわかった。22 年度は、本年度の歯車を使用して、統計的に説得力のある疲労試験データを蓄積していく計画である。

平成 21 年度の本研究開発で判明した「テーマ 4」および「テーマ 5」において発現した新たな課題、すなわち「全周モデル歯車計測システムの開発」および「残留応力・空孔率試験片用電解研磨装置の開発」の新規 2 テーマについては、次年度に優先課題と位置づけし、当初、特定研究開発等計画に係る認定申請に基づき計画した平成 22 年度において実施予定の 6 テーマについては、22 年度に実施すべきテーマ、先送りするテーマなど優先順位を見直し、また開発期間の延長、開発費用の増額なども視野に入れて、実計画を立てなおす。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

連絡先・連絡担当者		住 所
株式会社 ニッセー 代表取締役社長 新仏 利仲	〒409-0502	山梨県大月市富浜町鳥沢 2022 番地 電話番号 0554-26-5311
国立大学法人 信州大学 准教授 水野 勉	〒380-8553	長野県長野市若里四丁目 17 番 1 号 電話番号 026-269-5000
特定非営利活動法人 ものづくり 支援機構 事務局長 羽田 功一	〒403-0004	山梨県富士吉田市下吉田 757 電話番号 0555-23-4780

第2章 自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の高精度 仕上げ転造システムの開発(各開発項目の設計概要)

2-1 ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発

2-1-1 ダイスの自動設計ソフトウェアの開発

仕上げ転造における素材歯車の歯形が、転造ダイス歯面の包絡面として創成され、また、その中で素材歯車と転造ダイスが定速比転がり、つまり滑り接触の相対関係にあり、歯形の機構学的必要条件を満たされると考える。工業上の歯車は、殆どインボリュート歯車であるので、設計する転造ダイスの歯形は、上記の事を満たす為にインボリュートになる。

既に開発されている転造丸ダイス自動設計は、平歯車及び、はすば歯車を対象とし、素材歯車の諸元を与える事により、転造ダイスの基本諸元が自動的に計算される仕組みと成り、また、素材歯車のねじれ角、モジュール・ピッチ、圧力角に対して、転造ダイス諸元を最適な組み合わせに成るよう最適化できる。

上記ダイス自動設計ソフトウェアに、被転造歯車の歯筋に対して、転造ダイスの歯筋補正量を自由に設計できる機能を追加した。この機能により、転造ダイスの歯形は、歯筋補正時に被転造歯車の歯形が変化しないよう設計出来るように成った。また、転造時の噛み合い関係も、歯筋補正の影響を全く受けないようになった。

2-1-2 転造状態可視化ソフトウェアの開発

転造時の工具と素材の幾何学的噛み合い状態をビジュアルにかつ正確に再現できる可視化システムソフトウェアは、既に開発されているが、対応諸元範囲の拡大と、可視化状態のビジュアル性を向上させると共に、次に上げる機能を追加する事で、操作性を向上させる。

描画される線の色と太さを指定できるよう、操作パネルを追加した。また、実測されたダイスの歯形を設計歯形と比較できるようにし、実測されたダイス歯形とワーク歯形を噛みあわせ実際の転造状態の可視化がより鮮明に確認出来るようになった。

2-2 有限要素歯形解析システムの開発

2-2-1 転造歯車の変形解析ソフトウェアの開発

歯車の仕上げ転造プロセスにおけるダイスと素材歯車の創成噛み合い状態をでき

るだけ厳密にシミュレートし、素材歯車の弾塑性変形状態を予測できる有限要素プログラムを基本とする変形解析システムソフトウェアを開発した。

尚、このプログラムでは焼結材歯車のような多孔質体の変形特性や緻密化の状態も取り扱うことができ、また、歯車の転造状態に大きな影響を及ぼす同時噛み合い歯数、駆動方式、摩擦等のパラメータの影響も考慮できるようになっている。また、三次元の変形解析も一部取り入れている。

2-2-2 歯形誤差評価ソフトウェアの開発

実験および FEM(Finite Element Method)変形解析システムで得られた転造前後の素材歯形から、歯形誤差、実転造量分布、転造率（実転造量／転造代）分布、歯筋誤差、ピッチ誤差等の結果を、実験のそれと比較しながら妥当性や相異を検証する事が可能と成るソフトウェアである。

尚、このプログラムでは、二次元ばかりでなく、三次元の変形状態および歯形誤差も評価できるようになった。

2-3 データベースシステムの開発

2-3-1 工具修正歯形自動生成ソフトウェアの開発

実験及び、解析より得られた歯形解析の結果から、工具(ダイス)修整歯形を自動生成し、かつ逐次最適化できるシステムソフトウェアであり、以下の機能を有する。① 転造歯車の変形歯形を理想歯形に対して軸対称変換しミラーイメージを作り、それを非修正工具歯形に転写し重ね合わせるにより、基本となる第一近似の修整工具歯形を計算する機能 ②基本修整歯形を元に、変形解析システムによるシミュレーション結果及び、実験結果を参照しながら工具歯形を自動的に逐次修正する機能 ③修整工具歯形による創成転造シミュレーションにより転造代分布を求め、実験あるいはシミュレーションにより得られた実転造量および転造率の分布を計算し、それらの関係を組み合わせることにより新修整歯形工具で転造した場合の素材転造歯形を予測する機能 ④上記プロセスを繰り返すことにより工具修整歯形を自動で逐次最適化する機能

全体的な機能アップと特に②③④の完全自動化を実現した。

2-3-2 自動修正のためのデータ保管・管理ソフトウェアの開発

工具集積歯形自動生成システムにより、最適化された工具修正歯形および、プロセ

スをデータベース化し、保管管理するソフトウェアである。

本システムの役割は、歯形解析結果の全プロセスをデータベース化する事により、以降類似した諸元の歯車を仕上げ転造する場合に、より短時間に且つ、より少ない工程数で効率的に最適化を図る為の重要な指針と成る事である。

本年度は、4種類の焼結合金鋼歯車を仕上げ転造する為のダイスの修正歯形を設計した。それは、「工具修整歯形の自動生成システム」を用いて行われたが、その実行プロセスがそのままデータベース化される仕組みになっている。

データベース資料としては、対象歯車の工具修整歯形の自動生成プロセス、素材歯車用ラック歯形、素材歯車のホブ切り形状、素材歯車の比較、素材歯車の歯形解析、転造前後の素材歯車の歯形曲線、基準転造歯形の歯形解析、基準転造歯形曲線、歯形の回転移動、工具(ダイス)用ラック歯形、工具(ダイス)のホブ切り形状、非修整工具(ダイス)歯形、非修整工具(ダイス)の歯形解析、非修整工具(ダイス)の歯形曲線、工具(ダイス)と転造歯車の接触判定、転造歯形を工具(ダイス)に転写、転写された歯車の歯形解析、転写された歯形の歯形曲線、転写歯形から修整工具(ダイス)歯形の算出、修正工具(ダイス)歯形の描画、修整工具(ダイス)歯形の歯形曲線、以上のデータが含まれる。

2-4 歯車の転造実験・精度評価

2-4-1 転造金型の設計・試作

転造金型(ダイス)の歯形設計と歯形の最適化のために開発したシステムを用いて実際のダイスの設計・試作を実施した。具体的には、自動設計・可視化ソフトによって設計したダイス仕様で工具修整歯形自動生成ソフトにより標準インボリュート曲線のダイス歯形を生成し、歯形解析ソフトにより変形解析する。解析結果を歯形誤差解析ソフトにより評価し、工具修整歯形自動生成ソフトにおいてダイス補正歯形を生成する。その繰り返しにより、解析結果に目的の歯形が得られるダイス補正歯形を導き出す。

対象となる歯車は、歯数、モジュール、ねじれ角の有無などの違いにより表2-4-1に示す仕様の歯車4種類とした。これらの歯車を転造するための工具として3種類のダイス(金型 1-1, 金型 2-1, 金型 3-1)を設計・試作した。ここでワーク②とワーク③は歯数のみが異なり、他項目ほぼ同一の歯車仕様である。この2種の仕様に

表 2-4-1

	ワーク①	ワーク②	ワーク③	ワーク④
	平歯車	はすば歯車	はすば歯車	はすば歯車
歯 形	インボリュート	インボリュート	インボリュート	インボリュート
歯 形 基 準 平 面	歯直角	歯直角	歯直角	歯直角
モ ジ ュ ー ル	4.5	3.0	3.0	1.3
圧 力 角	20°	20°	20°	20°
歯 数	16	16	25	20
ねじれ角(方向)	-	20°(右)	20°(右)	17.57°(左)
歯 先 円 直 径	φ82.45	φ58.491	φ85.813	φ29.85
歯 底 円 直 径	φ65.40	φ44.991	φ71.832	φ23.65
使 用 金 型	金型1-1	金型2-1		金型3-1

関しては転造実験において同一のダイス(金型2-1)を用いてその結果の違いを調査するものである。そのためここでの変形解析ではワーク③の歯車仕様を用いた。

2-4-2 焼結歯車の設計・試作

転造実験に使用する焼結歯車として表 2-4-1 に示す歯車のための素材歯車を設計・試作した。

転造歯車の強度が確保できると予想される圧密度(歯面変位)の設定より、素材歯車の仕様を自動設計ソフトにより算出した。

素材歯車の材質には自動車用のミッションに適用するために、高密度焼結合金鋼を使用した。

ワーク①は素材歯車の精度確保のために歯研仕上げとした。その他の素材歯車はホブ加工仕上げとした。

2-4-3 転造実験

1)補正歯形ダイスによる転造実験

歯形解析結果の検証のために転造実験を実施した。

表 2-4-1 に示す 4 種類の仕様の焼結歯車について、それぞれ 2-4-1 項、2-4-2 項により試作したダイス、素材を用いて転造した。

転造には主軸の同期回転と送りの位置決めに高精度制御が可能な CNC 転造盤を使用した。

2)修整歯形ダイスによる転造実験

2-4-4 項による修整歯形ダイスを用いて転造実験を実施した。

ダイス以外の条件については前記実験と同一である。

3) ワーク同期駆動による転造実験

通常、転造はダイスとの接触によってワークが回転させられている。ワークを駆動することによって、より理想的な成形状態を保つことができる。また、現状の変形解析で与える条件に即した変形状態を再現することができる。そこで、ワークを任意の回転速度で駆動することができるワーク支持装置（センター台）を用いて転造実験を実施した。

転造した歯車は表 2-4-1 に示すワーク①、ワーク②、ワーク③である。

4) 転造歯車の空孔観察

転造歯車の圧密度合いを調べるために転造歯車の歯の断面を、レーザー顕微鏡を用いて観察し、材料に存在する空孔の面積を測定した。測定した転造歯車は本転造実験において試作した 4 種類の歯車である。また、その他に歯車転造との比較調査として、単純円筒ワークを円筒形状のダイスを用いて転造・圧密した試料の断面観察を行った。素材は比較のために 2 種類、本転造実験で用いた素材と同一材質の素材 A と、素材 A よりも密度が低い素材 B を用いた。

2-4-4 工具最適化

補正歯形ダイスによる転造実験の結果を踏まえて更に変形解析を実施し、転造金型の歯形の最適化を図った。前項の補正歯形ダイスによる転造実験の結果である転造歯車の形状と補正歯形による解析結果の差を埋めるべく変形解析の条件を改善し、ダイス歯形を修整した。

ここでは 2-4-1 項にて試作した転造金型(ダイス)より、それぞれ歯形補正量を変更した修整歯形ダイス、計 3 種類を設計・試作した。2-4-1 項と同様にダイス仕様や歯形の設計には開発した各ソフトを用いた。

2-5 圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの開発

圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの設計においては、主要構成要素（下記の 5 項目）ごとに、達成目標を実現するための設計上の制約を考慮して、装置の仕様をきめた。

2-5-1 歯車測定用渦電流検出センサの開発

標記の項目について設計上考慮すべき電氣的、機械的な特性は、次の 3 点があげ

られる。

(1) 検出コイルは、歯車の1歯に装着できる大きさであること

(2) 検出コイルは、0.3～500 kHz までフラットなインピーダンス特性であること

(3) 検出コイルは、歯先、歯中央部、歯元の空孔率が測定できること

(1)、(3) を同時に満足させるため、外径 80 μ の絶縁銅線を 30 回巻 1 層巻も検出コイルを、1 歯あたり 3 個装着することにした。30 回巻きの検出コイルを実際の歯車に装着して、インピーダンス特性、共振周波数など 0.3～10MHz の範囲にわたって、800 点のデータを取った。検出コイルの共振周波数は 6.3MHz、インピーダンスは、上記周波数範囲で 10～90 Ω と十分低く、フラットな特性であることが確認できた。(試作検出コイルの詳細、インピーダンス測定データの詳細は、信州大学 工学部 電気電子工学科 水野研究室 平成 21 年度研究報告書 No2010(H21)0312 を参照願いたい。)

2-5-2 歯車測定用励磁コイルの開発

励磁コイルについても、検出コイルと同様な試作評価をおこなった。励磁コイルは、歯面全体をカバーする必要があるので、100 回巻き 1 層コイルとした。共振周波数は 8.1MHz、インピーダンスは、上記周波数範囲で 40～250 Ω で、汎用の発振器で、十分駆動可能である。

検出コイル、励磁コイルともに 0.3～500 kHz の周波数範囲でフラットな特性をもつことが確認できた。これは、渦電流を上記の周波数範囲で計測すれば、表層から 2.0mm の深さまでの圧密度合いが、非破壊方式で測定できるということで、実用化の段階での品質管理に役にたつ。

2-5-3 入力信号増幅・同期整流装置の設計・試作

検出コイル、励磁コイルについては、歯車にあわせて設計したが、入力信号増幅・同期整流装置については、汎用機の組合せで、渦電流の電圧および位相の測定が可能なシステムを構築することにした。システムの構成要素として、下記の四つの汎用計測器を選定した。

①発振器	横河電機製	FG320 励磁用
②信号増幅器	NF 回路製	BX-31A 入力信号増幅用

- | | | |
|-----------|--------|-------------------------|
| ③周波数クステンダ | NF 回路製 | 5571 同期・整流用 |
| ④ロックインアンプ | NF 回路製 | LI5640 同期・整流用 |

上記の計測器は、筐体にマウントされ計測システムとして一体化し、EC-2009 と呼ぶことにした。

2-5-4 抵抗率・透磁率校正用試験片の製作

透磁率を測定する方法については、一般的に2つの方法がある。

- ①直流磁化法
- ②試料振動磁化法

標記の2方法について、試験法にあわせた試験片の製作仕様書を作成し、どの方法を採用するか検討した。①直流磁化法は、測定器も安価で普及している。しかし、リング形状の試験片が必要となるので、歯車のような複雑な形状の場合には、試験片の製作が難しい。

②試料振動磁化法は、試験片の形状に対する制約が少ないが、測定器が高価で、測定依頼先が限られている。21年度は、2方法について、どのような試験片が必要になるのかを検討するため試験片製作仕様を作製した。

2-5-5 空孔率校正用試験片の製作

空孔率試験片の作製は、①顕微鏡観察による方法、②渦電流の浸透深さを利用する2つの方法を検討した。圧密の度合いを、深さ2mmまで測定するには、顕微鏡観察に勝るものはない。21年度は、主として②の電気的方法で空孔率を測定することにする。22年度には、歯車の歯面形状にそって顕微鏡観察データと電気的方法での測定データの比較検証を試みる。

2-6 歯車疲労強度評価

2-6-1 面圧疲労強度試験

面圧疲労強度試験実施にあたり、本研究で転造加工したギヤを用いる必要があるが、時間的に余裕がない為、材料成分、空孔率とも同じ素材で作った平歯車を用いた。平歯車諸元はモジュール 3，圧力角 20° ，歯数 26，歯幅 10 mm であり、焼結合金鋼の円盤状焼結体(直径・100 mm，厚さ 30 mm)から削り出した素材を、ホブにより粗歯切りして製作した。

転造した焼結平歯車は、浸炭焼入れをし、有効浸炭焼入れ深さは 0.6mm とした。

焼結合金鋼の歯車材としてのトルク負荷性能を調べるために、歯車運転試験を行う動力循環式歯車運転試験機を用いる。動力には出力 3.7 kW の VS モータを使用し、最大循環動力は 10 kW である。負荷トルクは軸に接着したトルク検出用ひずみゲージにより測定する。実験時の小歯車回転数は $1,800 \text{ min}^{-1}$ 一定に設定し、本運転は軽荷重(面圧疲労限度 40 %)下で 10^5 回ならし運転した後行う。実験では焼結材大歯車に着目し、それが折損し振動感受装置により試験機が自動停止するか、その歯面損傷面積率が 2 %になったときの繰返し数をもって面圧疲労寿命とし、S-N 曲線を求める。また、繰返し数が 1.5×10^7 回に達したときを疲労限度とする。

2-6-2 曲げ疲労強度試験

曲げ疲労強度試験実施にあたり、本研究で転造加工した歯車を用いる必要があるが、時間的に余裕がない為、材料成分、空孔率とも同じ素材で作った焼結平歯車を用いる。平歯車諸元はモジュール 3，圧力角 20° ，歯数 26，歯幅 10 mm である。

転造した焼結平歯車は、浸炭焼入れをし、有効浸炭焼入れ深さは 0.4~0.5mm とした。

単一曲げ疲労試験機を用いる。実験条件は歯先に曲げ荷重をかけ、付加サイクルを 12Hz (1 分当たり 710 サイクル) とし、繰返し数が 5×10^6 を超えても歯が折損しないときの荷重をもって曲げ疲労限度とする。また曲げ疲労強度実験に使用する歯車について、歯車の危険断面付近を転造していると実験結果に影響を及ぼすことになる。

第3章 自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の高精度 仕上げ転造システムの研究概要

3-1 ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの開発

3-1-1 ダイスの自動設計ソフトウェアの開発

ダイス自動設計は「入出力ウィンドウ」において素材歯車の諸元を入力したら、ダイスの諸元が自動的に計算され、最適に設計される。しかし、ダイスの歯筋補正が必要とされる場合、通常の「ダイスとワークの歯筋が同一である」という制約で自動設計は正常に行われなくなる。そこで、今回「被転造歯車の歯形と転造時の噛合い関係が歯筋補正前と同一である」ことを満たすように、自動設計に新アルゴリズムを開発した。これによって、ダイスの歯筋補正機能は自動設計ソフトに追加された。

3-1-2 転造状態可視化ソフトウェアの開発

転造状態可視化ソフトウェアは以下の二つの基本機能を備えている。これで、設計段階でも転造状態を確認・評価できる。

- ① 転造時のダイスとワークの噛合い状態の静的可視化と動的可視化機能
- ② 転造時のワークを静止としてのダイスの創成転造状態の可視化機能

また、上記のような設計値に対する転造状態可視化だけでなく、転造ダイスと転造歯車の実測歯形を読み込んで、実測値を用いる転造状態可視化もできる

3-2 有限要素歯形解析システムの開発

3-2-1 転造歯車の変形解析ソフトウェアの開発

本ソフトウェアは、焼結歯車の仕上げ転造における素材歯車とダイス工具の創成噛み合い状態を有限要素法（FEM）によりできるだけ厳密にシミュレートし、素材歯車の弾塑性変形状態を予測することが主な目的である。

本ソフトウェアには二次元変形解析ソフト「FEM2D_PMGearRolling.exe」および三次元変形解析ソフト「FEM3D_PMGearRolling.exe」の2種類がある。

上記の2次元モデルを扱う「FEM2D_PMGearRolling.exe」では解析は二次元平面ひずみ条件下で行われ、3次元モデルを扱う「FEM3D_PMGearRolling.exe」では通常の3次元条件下で解析が行われる。いずれもモデルも実際の仕上げ転造プロセス

同様、とダイス工具が素材歯車に対して創成運動しながら加工が進行する。

また、材料特性として、素材は弾塑性多孔質体としたが、工具は剛体とした。

プログラム実行中には転造加工されている様子がリアルタイムで表示され、視覚的にも分かりやすいソフトである。

3-2-2 歯形誤差評価ソフトウェアの開発

本ソフトウェアは、有限要素法を用いた歯車仕上げ転造の数値歯形解析において、解析を行って得た素材歯車の変形状態に関する種々の結果を、実験のそれと比較しながら妥当性や相異を検証することが主な目的である。

本ソフトウェアは“歯形誤差評価ソフトウェア「FEMTPA.exe」”から構成される。FEMによる数値解析で得られた転造前後の素材歯形から、歯形誤差、実転造量分布、転造率（実転造量／転造代）分布、実験で得られたそれらの結果と直接的に比較しながら、妥当性や相異について評価することができる。このプログラムでは、二次元ばかりでなく三次元の変形状態および歯形誤差も評価できるようになっている。

3-3 データベースシステムの開発

3-3-1 工具修正歯形自動生成ソフトウェアの開発

本ソフトウェアは、歯車の仕上げ転造加工において使用される丸ダイス工具の修正歯形設計プロセスを支援するものであり、その目的は、実験及び解析より得られた歯形解析の結果から、工具修正歯形を自動生成し、かつ逐次最適化することである。

本ソフトウェアは“工具修正歯形自動生成ソフトウェア「mkDTP.exe」”と“工具修正歯形最適化ソフトウェア「optDTP.exe」”2種類のソフトウェアから構成される。各々のソフトウェアは実験結果や解析結果を組み合わせる使用することにより、そのまま工具歯形を自動修正するためのデータ保管・管理ソフトウェアとしての役割もはたす。

工具修正歯形自動生成ソフトウェア「mkDTP1.exe」および「mkDTP2.exe」の機能

- 1) 非修正の素材歯車を非修正の転造工具により転造したときの素材歯車の変形歯形を元に、修正工具を設計する上での基準となる素材歯車の転造歯形および歯形曲線を計算する機能。
- 2) その基準転造歯形を座標変換し、工具に対して創成運動させることにより、基

準転造歯形をダイス工具歯形に転写する機能。

- 3) 転写された歯形からダイス工具の修正歯形を自動的に算出し、第一近似の基本修正工具歯形および歯形曲線を計算する機能。
- 4) 上記1)～3)の手順を繰り返すことにより、修正工具歯形を自動的に逐次最適化していく機能。

工具修正歯形最適化ソフトウェア「optDTP.exe」の機能

- 1) 転造歯車の変形歯形を理想歯形に対して軸対称変換しミラーイメージを作り、それを非修正工具歯形に転写し重ね合わせるにより、基本となる第一近似の修整工具歯形を計算する機能。
- 2) 基本修整歯形を元に、変形解析によるシミュレーション結果および実験結果を参照しながら、工具歯形を逐次修正する機能。
- 3) 修整工具歯形による創成転造シミュレーションにより転造代分布を求め、実験あるいはシミュレーションにより得られた実転造量および転造率の分布を計算し、それらの関係を組み合わせることにより新修整歯形工具で転造した場合の素材転造歯形を予測する機能。
- 4) 上記プロセスを繰り返すことにより工具修整歯形を逐次最適化する機能。

3-3-2 自動修正のためのデータ保管・管理ソフトウェアの開発

本ソフトウェアは、工具修正歯形自動生成システムにより歯形解析された全プロセスから生じるデータを保管管理することを目的とする。

本ソフトウェアの役割は、歯形解析結果の全プロセスをデータベース化することにより、以後類似した諸元の歯車を仕上げ転造する場合に、より短時間にかつより少ない工程数で効率的に最適化を図るための重要な指針となることである。

3-4 歯車の転造実験・精度評価

3-4-1 転造金型の設計・試作

転造金型(ダイス)の歯形設計と歯形の最適化のために開発したシステムを用いて実際のダイスの設計・試作を実施した。具体的には、自動設計・可視化ソフトによって設計したダイス仕様で工具修整歯形自動生成ソフトにより標準インボリュート曲線のダイス歯形を生成し、歯形解析ソフトにより変形解析する。解析結果を歯形誤差解析ソフトにより評価し、工具修整歯形自動生成ソフトにおいてダイス補正歯形を生成する。その繰り返しにより、解析結果に目的の歯形が得られるダイス補正歯形を導き出す。

2章2-4-1項に示す4種類の歯車を対象とし、これらの歯車を転造するための工具として3種類のダイス(金型1-1, 金型2-1, 金型3-1)を設計・試作した。ここで金型2-1はワーク②とワーク③の2種類を対象としている。そのため金型2-2のための変形解析ではワーク③の歯車仕様を用いた。

ワーク③の歯形解析ソフトによる変形の状態を図3-4-1に示す。下側の歯車が転造歯車のモデルである。上側の歯車形状のモデルがダイスである。

このような解析結果に基づき各ダイス補正歯形設計した。

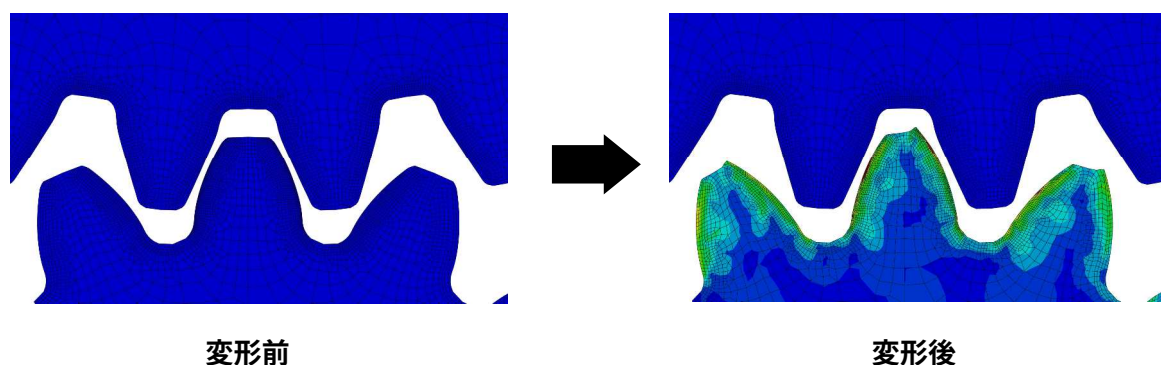


図 3-4-1 FEM 解析による転造歯車の変形状態

3-4-2 焼結歯車の設計・試作

転造実験に使用する焼結歯車として2-4-1に示す歯車の素材歯車を設計・試作した。

素材歯車は、転造歯車の強度が確保できると予想される圧密量(歯面変位)の設定

から、自動設計ソフトによって仕様を算出した

素材歯車の材質には自動車用のトランスミッションに適用するために、高密度焼結合金鋼を使用した。

3-4-3 転造実験

1)補正歯形ダイスによる転造実験

歯形解析結果の検証のために転造実験を実施した。

前述の 4 種類の仕様の焼結歯車について、それぞれ 3-4-1 項に示したダイス、3-4-2 項に示す素材を用いて転造した。

転造には主轴の同期回転と送りの位置決めに高精度制御が可能な CNC 転造盤 (図 3-4-14) を使用した。



図 3-4-14 CNC 転造盤

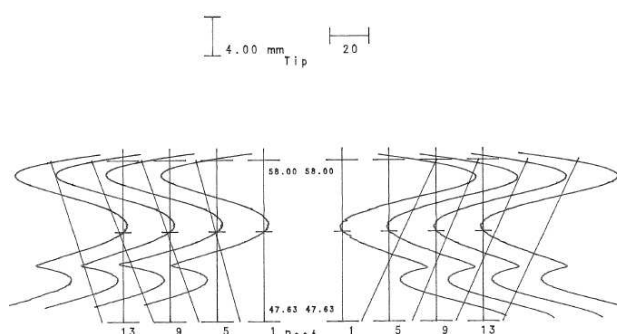


図 3-4-15 ワーク①歯形測定図

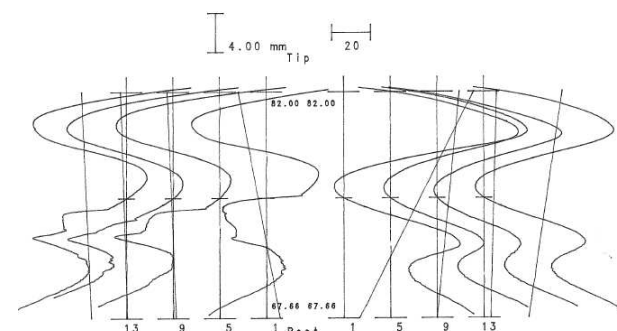


図 3-4-16 ワーク②歯形測定図

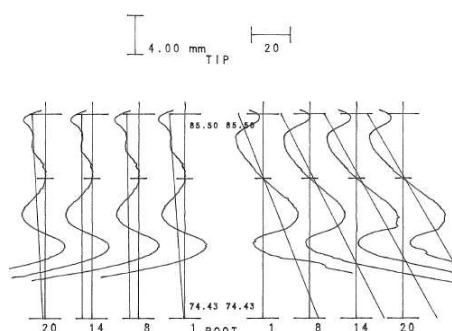


図 3-4-17 ワーク③歯形測定図

ワーク①の転造歯車の歯形測定図

を図 3-4-15 に示す。歯面中央部が大きく凹んだ歯形となった。この結果はダイス

歯形の補正量が不足していたためと考えられる。歯形誤差量が大きく、改善する必要がある。

ワーク②の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-16 に示す。またワーク③の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-17 に示す。

これらはともに金型 2-1 を用いて転造した歯車である。ワーク②は歯面中央部が大きく凹んだ歯形となったのに対して、

ワーク③は誤差量が小さく比較的良好な歯形が得られた。これはダイス歯形の設計においてワーク③の歯車仕様を用いて解析・設計したためと考えられる。この結果より、転造される歯車の仕様においては歯数の違いも転造後の歯形に大きく影響することが予想される。ワーク③の歯形精度については、実用化の要求を満たすには不十分であり、ダイス歯形の改善が必要である。

ワーク④の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-18 に示す。歯形精度は他のワークに比べて非常に良好である。形状誤差量としては $10\mu\text{m}$ 以内であり、一般的な要求レベルに達している。但し、その形状として歯面中央部が凹む傾向があり、これは歯車の騒音の原因とされるために改善する必要がある。

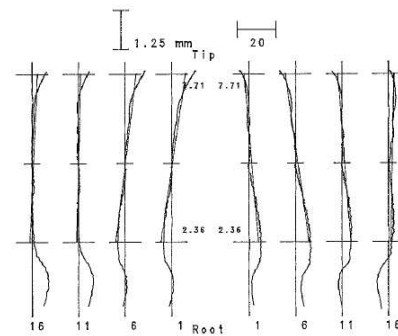


図 3-4-18 ワーク④歯形測定図

2)修整歯形ダイスによる転造実験

3-4-4 項による修整歯形ダイスを用いて転造実験を実施した。ダイス以外の条件については前実験と同一である。

金型 1-2 を用いて転造したワーク①の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-19 に示す。ダイス歯形を修整したことにより歯面の凹み部分が歯末に移っている。誤差量は大きく、要求を満たされる結果は得られなかった。

ワーク②の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-20 に示す。またワーク③の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-21 に示す。これらはともに金型 2-2 を用いて転造した歯車である。ワーク②は前実験の金型 2-1 による転造歯車と比較して歯形誤差が大きく改善されている。対してワーク③は歯形誤差量が増加しており、歯元歯面に掛けて

凸傾向が見られる。これはダイス歯形の設計においてワーク②の歯車仕様を用いて解析・設計したためと考えられる。この結果より、転造される歯車の仕様においては歯数の違いが転造後の歯形に大きく影響することが分かった。この点は現状の歯形変形解析ソフトにおいて十分には加味されておらず今後の課題といえる。また、ワーク②の歯形精度について、圧力角誤差と形状誤差があり、ダイス歯形を改善する必要がある。

金型 3-2 により転造したワーク④の歯形測定図を図 3-4-22 に示す。金型 3-1 による転造歯車に見られた歯面中央部の凹み形状は改善され、歯形精度としては実用化の要求を満足するレベルと判断される。このような僅かな修正であっても、変形解析を用いたダイス歯形設計が有効であることが実証された。

前実験も含めて結果をまとめると、ワーク①のようにモジュールが大きく、歯のねじれていない平歯車に対しては今回の解析結果が不十分であった。ワーク②、③、④のようなはすば歯車に対しては、比較的良好な転造品歯形精度が得られた。モジュールの小さいはすば歯車のワーク④では特に

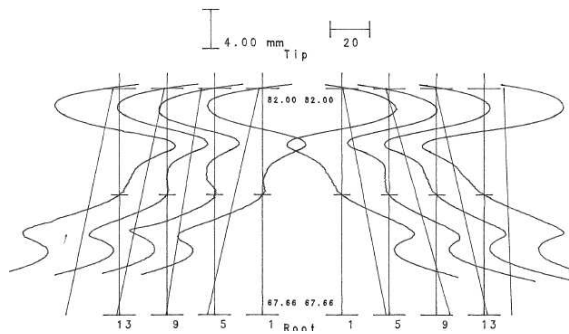


図 3-4-19 ワーク①歯形測定図

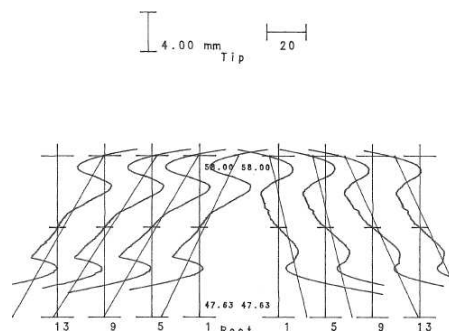


図 3-4-20 ワーク②歯形測定図

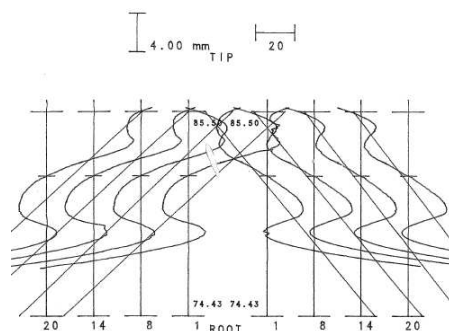


図 3-4-21 ワーク③歯形測定図

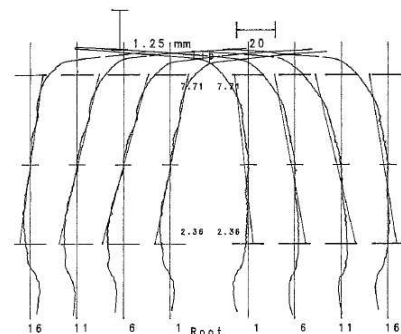


図 3-4-22 ワーク④歯形測定図

良好な歯形精度が得られた。これから歯車の仕様による実験結果への差異が大きく、特にモジュールが小さいはすば歯車に対しては現状の解析プログラムが有効であるが、モジュールが大きい平歯車に対しては解析プログラムの改善が必要であると言える。

3) ワーク同期駆動による転造実験

通常、転造はダイスとの接触によってワークが回転させられている。ワークを駆動することによって、より理想的な成形状態を保つことができる。また、現状の変形解析で与える条件に即した変形状態を再現することができる。そこで、ワークを任意の回転速度で駆動することができるワーク支持装置（センター台）を用いて転造実験を実施し、その結果を前項のワーク非駆動時の結果と比較する。

転造した歯車は前実験に使用したワークのうちワーク①、ワーク②、ワーク③である。

ワーク①の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-24 に示す。歯面中央部の凹み形状が改善されているが、誤差量としてはまだ大きい。

ワーク②の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-25 に示す。歯末側の凹み形状の誤差量に若干の改善が見られる。

ワーク③の転造歯車の歯形測定図を図 3-4-26 に示す。形状誤差に大きな改善は見られないが、圧力角誤差の左右歯面の差に影響が見られた。

これらの結果より、歯車仕様やワーク非駆動での誤差量などの条件の違いによってワーク駆動による影響に差があるものと考えられる。

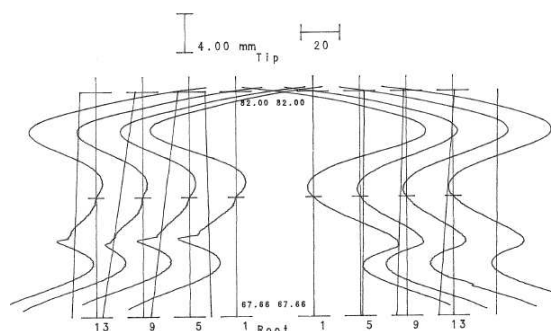


図 3-4-24 ワーク①歯形測定図

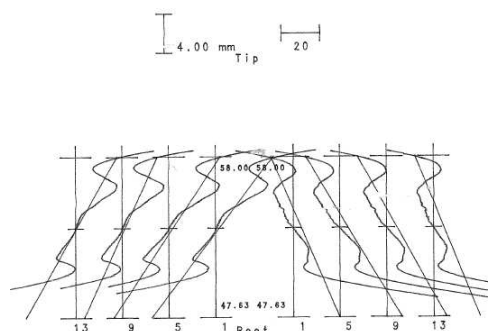


図 3-4-25 ワーク②歯形測定図

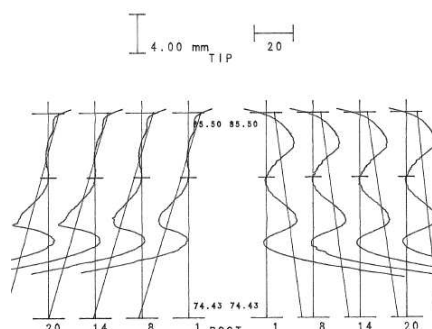


図 3-4-26 ワーク③歯形測定図

4) 転造歯車の空孔観察

転造歯車の圧密度合いを調べるために図 3-4-27 に示すレーザー顕微鏡を用いて転造歯車の歯の断面を観察した。またレーザー顕微鏡の粒子解析機能を利用して、材料に存在する空孔の面積を測定し空孔率(任意の断面範囲の面積に対する空孔の合計面積の割合)を算出した。

測定した転造歯車は本転造実験において試作した 4 種類の歯車(ワーク①、ワーク②ワーク③、ワーク④)である。またその他に歯車転造との比較調査として、単純円筒ワークを円筒形状のダイスを用いて転造・圧密した試料の断面観察を行った。素材は比較のために、本転造実験で用いた素材と同一材質の素材 A と、素材 A よりも密度が低い素材 B の 2 種類を用いた。このワークの圧密量は転造歯車と合わせるために、直径の減少量が 0.3mm となるように転造条件を設定した。



図 3-4-27 レーザー顕微鏡
(オリンパス製 OLS4000-SAT-SP)

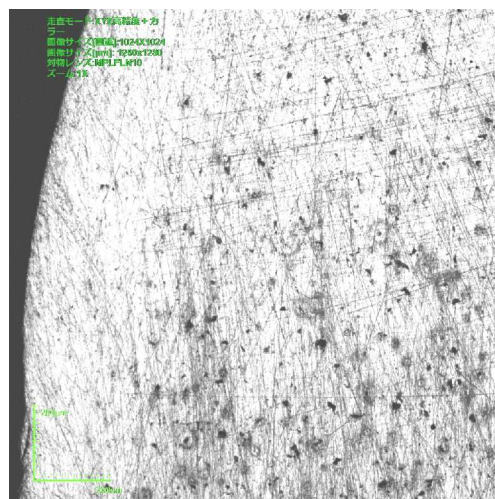


図 3-4-28 転造焼結歯車の
歯断面圧密状態(ワーク④)

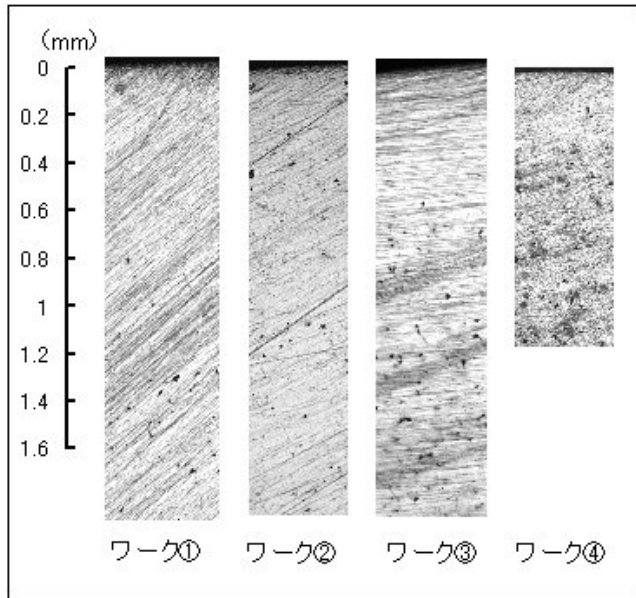


図 3-4-29 歯面からの深さによる
圧密の状態の違い(転造歯車)

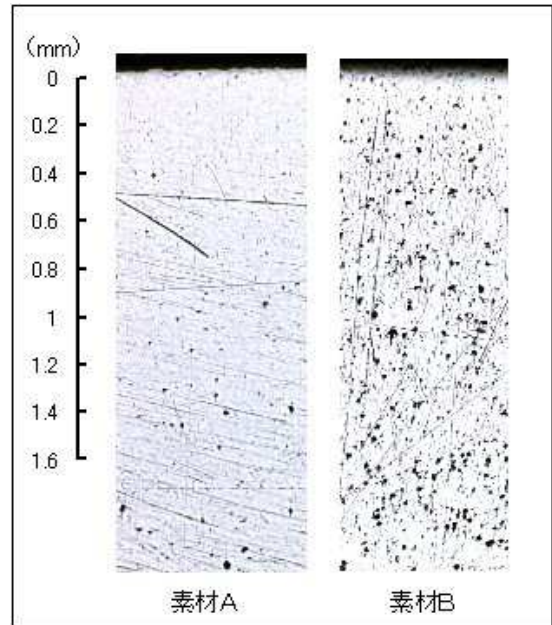


図 3-4-30 歯面からの深さによる

レーザー顕微鏡による
歯面圧密状態の画像を図
3-4-30 に示す。また各ワー
クの表面層付近の圧密状
態を図 3-4-29(転造歯車)、
図 3-4-30(円筒ワーク) に
示す。表面からの深さによ
る空孔率の変化を図
3-4-31(転 造 歯 車)、図
3-4-32(円筒ワーク) に示
す。

いずれの転造歯車も歯
面から一定の深さまで圧
密されており、それより深
い部分では空孔率が徐々
に上がり素材の状態と変

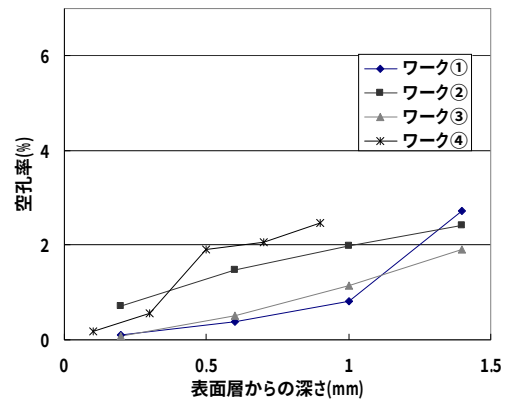


図 3-4-31 転造歯車の空孔率グラフ

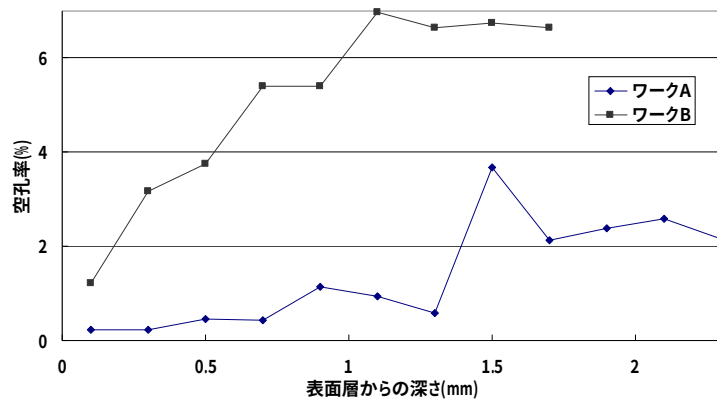


図 3-4-32 円筒ワークの空孔率グラフ

わらなくなっている。モジュールの大きいワーク①では 1mm 程度まで圧密されているのに対して、モジュールの小さいワーク④は深さ 0.5mm の部分で空孔率が素材の状態に近づいている。モジュールなどの歯車仕様により圧密状態に差があるものの、何れも圧密された表面層は空孔率が 1%以内であり、焼結合金としては非常に低い値であり表面層の十分な強度確保が予想される。より理想的な圧密状態が期待される円筒ワークにおいては、ワーク A で深さ 1.3mm 程度まで高い圧密状態が得られている。転造歯車よりも深い位置まで圧密されている。転造歯車であってもモジュールが大きいと同様の圧密状態が得られるが、モジュールが小さい歯車は圧密される深さは小さくなった。歯車のモジュールによる求められる強度の違いを考慮すると、この結果は実用化のためには問題とされないと考えられる。素材の空孔率が高いワーク B は、高い圧密が得られるのはより表面層に近い部分のみとなっている。このように良好な圧密状態を得るためには素材の密度も重要であることがわかる。

3-4-4 工具最適化

前項 1) 転造実験の結果を踏まえて更に変形解析を実施し、転造金型の歯形の最適化を図った。転造実験の結果である転造歯車の歯形と補正歯形による解析結果の差を埋めるべく解析条件を改善し、ダイス歯形を修整した。

歯形誤差評価ソフト及び工具修整歯形自動生成ソフトによりダイス歯形を生成し、実際のダイス補正歯形と比較した。また、歯形変形解析ソフトによる変形解析結果が実際の実験結果に近づくように解析の条件を改善した。

このように金型 1-1、金型 2-1、金型 3-1 より歯形補正量をそれぞれ修整した 3 種類のダイス(金型 1-2、金型 2-2、金型 3-2)を設計・試作した。

金型 2-2 及び金型 3-2 に関しては時間的な制限のために転造実験の結果を反映することができなかった。そのためにワーク②、③用の金型 2-2 はワーク②の歯形仕様を用いて自動設計及び変形解析を行い、一個目の金型 2-1 とは大幅に変更した。また、ワーク④用である金型 3-2 は、一個目の金型 3-1 より改善された解析条件によって更に変形解析を繰り返し、修整歯形を設計した。

3-5 圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの試作開発結果

3-5-1 歯車測定用渦電流検出センサの開発

平歯車用検出センサとはすば歯車用検出センサの試作をした。供試歯車の諸元は下記の2種類（平歯車1種、はすば歯車1種）である。

①平歯車諸元

モジュール M	4.5
歯数 Z	16
圧力角 PA	20 度
歯先円直径	82.4mm
歯元円直径	65.4mm
基礎ピッチ円直径	72.0mm
基礎円直径	67.6mm

②はすば歯車諸元

モジュール M	3.0
歯数 Z	25
圧力角 PA	20 度
歯先円直径	85.8mm
歯元円直径	71.8mm
基礎ピッチ円直径	79.8mm
基礎円直径	74.4mm

また検出センサは、3 個のコイルを歯元、歯中央部、歯先 3 箇所に密着して巻付け、測定時に順に切り替えて、歯面全体の空孔率を測定する方式にした。コイルの形状（電氣的仕様）は各々次の通りである。

③平歯車用検出コイルの電氣的仕様

	歯先コイル	歯中コイル	歯元コイル
巻数	30	30	30
層数	1	1	1

直流抵抗Ω	7.6	7.9	8.2
-------	-----	-----	-----

はすば歯車検出コイルは、歯先と歯元に密着して巻付け、測定時に順に切り替えて、歯面全体の空孔率を測定する方式にした。コイルの形状（電氣的仕様）は各々次の通りである。

④はすば歯車検出コイルの電氣的仕様

	歯先コイル	歯元コイル
巻数	30	30
層数	1	1
直流抵抗Ω	12.6	12.1

3-5-2 歯車測定用励磁コイルの開発

前記2種（3-5-1①、②）の歯車について、励磁コイルの設計・試作を行い、その電氣的特性を調べた。励磁コイルは、検出コイルのうえに絶縁物を挟み、重ね巻きをした。

①平歯車用励磁コイルの電氣的仕様

	励磁コイル
巻数	130
層数	1
直流抵抗Ω	36.1

②はすば歯車検出コイルの電氣的仕様

	歯先コイル
巻数	70
層数	1
直流抵抗Ω	26.6

3-5-3 入力信号増幅・同期整流装置による計測結果と評価

(1) 測定方法および測定結果

試作した焼結合金空孔率測定装置は、EC-2009 と名づけ、この装置を使用して、試作した検出コイル、励磁コイルを測定対象（供試歯車）に装着し、励磁周波数 $f = 0.3 \sim 500 \text{ kHz}$ の範囲で「出力電圧」と「位相差」を測定した。圧密の度合いは、検出コイルの出力電圧変化量として観測する場合と、検出コイルの位相差の変化量として観測する場合の2方法にわけて、データをとった。変化量の定義は、各々の場合について、次の式のとおり。

①出力電圧の変化量 $\Delta V_0 = V_0 (\text{圧密有}) - V_0 (\text{圧密無})$

②位相差の変化量 $\Delta \theta = \theta (\text{圧密有}) - \theta (\text{圧密無})$

また表面からの深さ方向の圧密度合いの傾斜特性は、渦電流の浸透深さが励磁周波数に対応することを利用して、表面から2mmの深さまで観測した。周波数 $0.3 \sim 500 \text{ kHz}$ の帯域を26ポイントに分けて、(すなわち0.05mm~2.0mmまでを25層にわけて) 出力電圧の変化量、位相差の変化量を観測した。観測データは膨大な量になるので、ここでの記載を省く。(詳細は、信州大学 工学部 電気電子工学科 水野研究室 平成21年度研究報告書 No2010(H22)0312 を参照されたい。) データを分析・評価した結果、次の2点で渦電流検出方式の優位性が判明した。

①周波数が低い部分では、位相差の変化量を観測したほうが、圧密度合いの差がはっきり観測される。(1mmから2mmの深さの部分について、圧密度合いのデータが得られる。)

②平歯車よりはすば歯車のほうが、圧密の差がはっきりでる。

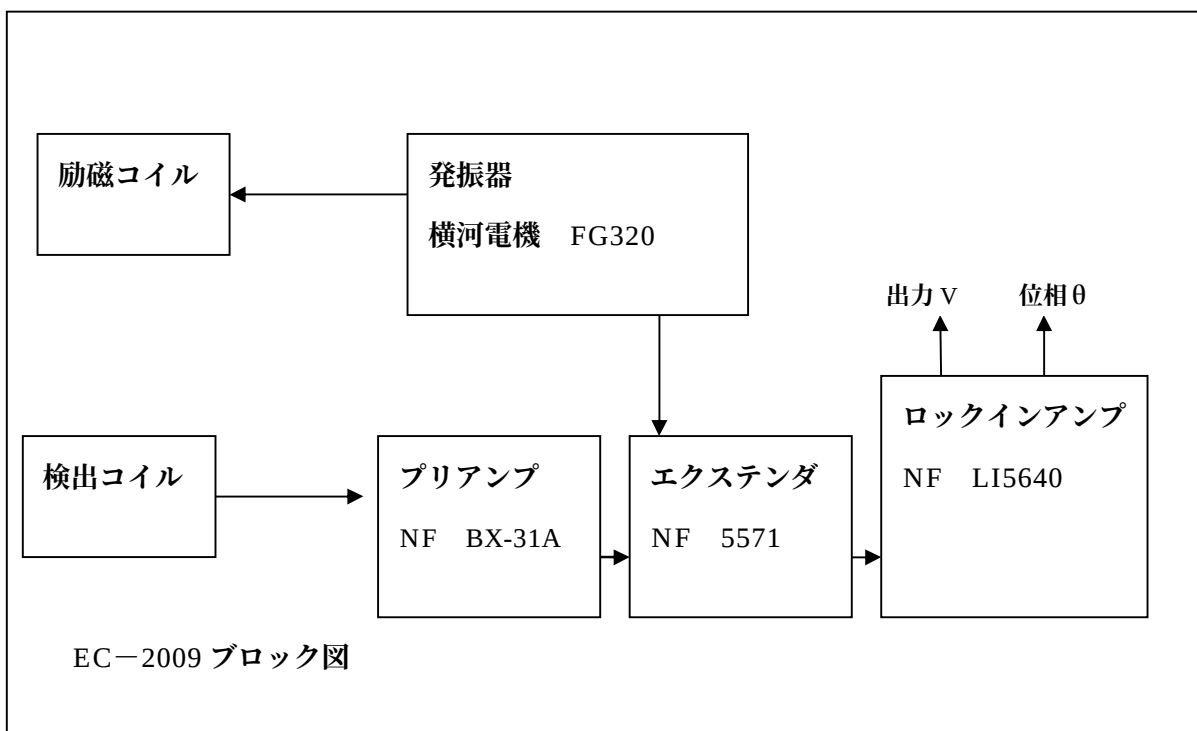
ともに、自動車トランスミッション歯車に多用されるはすば歯車の転造仕上げ加工の評価方法に対しては、優位に働く特長である。焼結合金の空孔率の非破壊検査方として、実用化の可能性は十分にあることが確認できた。

(2) その他の実験条件など

①計測システム EC-2009 の構成図

渦電流の検出コイルの出力電圧および位相差の測定には、入力信号増幅・同期整流装置が必要であるが、専用の計測装置の設計試作は、本研究の主目的ではないので、短期間に試作可能な、汎用計測器の組合せによりシステムを構築し、EC-2009

と名付けた。下記にそのブロック図を示す。



②供試歯車の個数・諸元

平歯車：5 個（うち 1 個は、無転造）

はすば歯車：5 個（うち 1 個は、無転造）

3-5-4 抵抗率・透磁率校正用試験片の製作

抵抗率・透磁率校正用試験片については、空孔率の違う 4 種の焼結合金の歯車素材を用意して、空孔率と抵抗率・透磁率の校正をした。22 年度には、実際に転造加工された歯車素材から、0.2mm ないし 0.4mm 厚の試験片を表面から 10 層ないし 5 層切り出し、各層の残留応力との関係を計測する計画である。

3-5-5 空孔率校正用試験片の製作

転造盤により、ロール加工した歯車素材 4 種について、半径方向に切断して、顕微鏡で観察した。平歯車の歯面に沿って、検出コイルに装着位置の断面を切断・研磨した試験片を作製してみた。従来の砥粒研磨方式では、遊離砥粒が焼結合金の空孔の肩の部分まで研磨してしまうため、空孔率は高く観測される傾向がある。22 年度は、電解研磨方式を試みる計画である。

3-6 歯車疲労強度評価

3-6-1 歯面圧疲労強度

1) 試験試料の諸元

面圧疲労強度試験実施にあたり、本研究で転造加工した歯車を用いる必要があるが、時間的に余裕がない為、材料成分、気孔率とも同じ素材で作った平歯車（表 3-6-1）を用いた。図 3-6-1 に転造に使用した素材焼結鋼歯車の外観写真を示す。焼結材の円盤状焼結体(直径・100 mm、厚さ 30 mm)から削り出した素材をホブにより粗歯切りして製作した。

図-3-6-1 試験ワーク



表 3-6-1 歯車諸元

	平歯車	ピニオン
モジュール	3	
圧力角	20	
歯数	26	13
歯巾	10	17

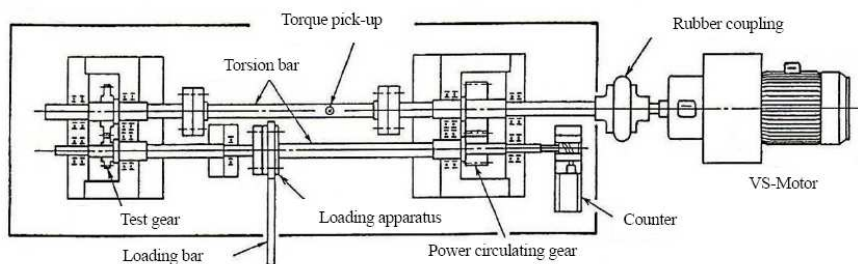
転造歯車は圧密度(転造後の片歯面歯厚減少量)を 0.15 mm とした。これは転造実験での同一モジュールであるワーク②、③と同じ圧密度である。また歯元隅肉部の危険断面付近は転造されない歯形になっている。転造歯車の表面層緻密化の状態は、表面から深さ 0.5 mm までの空孔率が 0.5 %以下であり転造実験したワークと同等である。

2) 歯車運転試験

各焼結材の歯車材としてのトルク負荷性能を調べるために、歯車運転試験を行った。有効浸炭焼入れ深さは約 0.6mm に、全浸炭焼入れ深さは 1mm 以上になった。図 3-6-3)に動力循環式歯車運転試験機の概略図を示す。動力には出力 3.7 kW の VS モータを使用し、最大循環動力は 10 kW である。負荷トルクは軸に接着したトルク検出用ひずみゲージにより測定した。実験時の小歯車回転数は $1,800 \text{ min}^{-1}$ 一定に設定し、本運転は軽荷重(面圧疲労限度 40 %)下で 10^5 回ならし運転した後行った。実験では P/M 大歯車に着目し、それが折損し振動感受装置により試験機が自動停止す

るか、その歯面損傷面積率が2%になったときの繰返し数をもって面圧疲労寿命とし、S-N 曲線を求めた。また、繰返し数が 1.5×10^7 回に達したときを疲労限度とした。

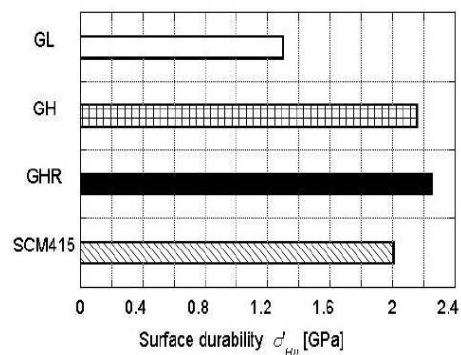
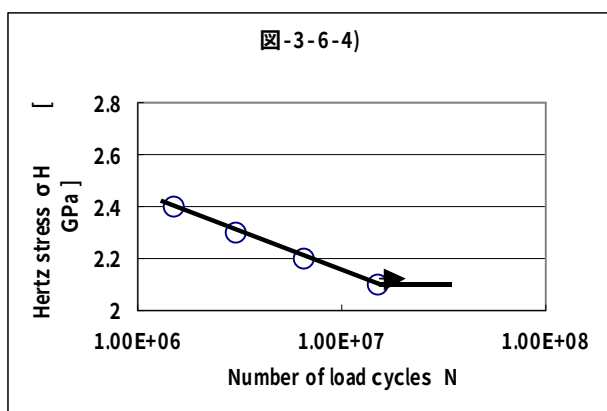
図 3-6-3)



3) 歯面圧疲労試験結果

焼結転造歯車を用いて運転試験を行い得られた S-N 線図を図 3-6-4)に示す。本報では、転造の有無に関わらず、 $E = 190 \text{ GPa}$, $\nu = 0.29$ としてヘルツの最大接触応力 σ_H を算出する。図 3-6-5)に焼結歯車と SCM415 溶製鋼浸炭焼入れ歯車の繰返し数 $N = 2 \times 10^7$ における面圧疲労限 σ'_{Hu} の比較を示す。目標とした SCM415 歯車のそれ(2.0 GPa)と同等以上であり、転造した焼結歯車はさらに 5%程度増加し、目標値を十分上回っている。なお歯車が運転試験中折損することはなかった。

図-3-6-5)



3-6-2 曲げ疲労強度

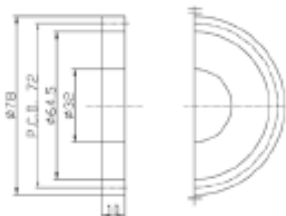
1) 試験試料の諸元

曲げ疲労強度試験実施にあたり、本研究で転造加工した歯車を用いる必要があるが、時間的に余裕がない為、材料成分、空孔率とも同じ素材で作った焼結平歯車を用いる。平歯車諸元はモジュール 3，圧力角 20° ，歯数 26，歯幅 10 mm である。

転造した焼結平歯車は、浸炭焼入れをし、有効浸炭焼入れ深さは 0.4~0.5mm とした。歯車形状を図 3-6-6)に示す。

図 3-6-6

表 3-6-2)ギヤ諸元



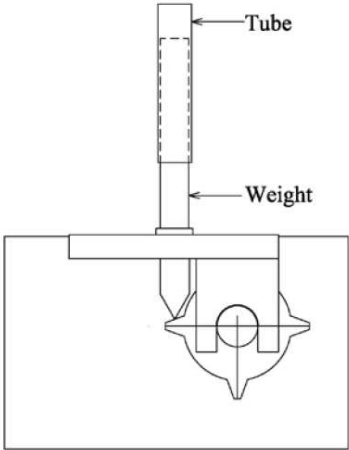
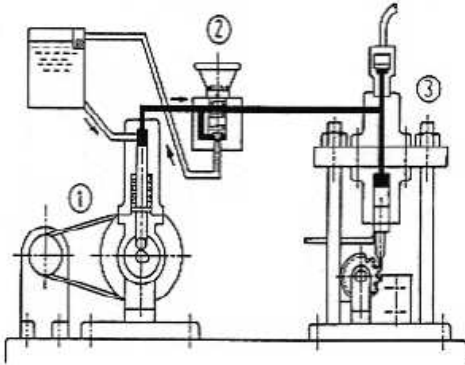
	平歯車
モジュール	3
圧力角	20
歯数	24
歯巾	10

2) 曲げ疲労試験機

単一曲げ疲労試験機を図 3-6-7 に示す。装置の各部位の名称は、①脈動油圧発生装置、②圧力制御装置、③荷重負荷装置よりなっている。実験条件は歯先に曲げ荷重(図 3-6-8)をかけ、付加サイクルを 12Hz (1 分当たり 710 サイクル) とし、繰り返し数が 5×10^6 を超えても歯が折損しないときの荷重をもって曲げ疲労限度とした。また曲げ疲労強度実験に使用する歯車について、歯車の危険断面付近を転造していると実験結果に影響を及ぼすことになる。

図 3-6-7

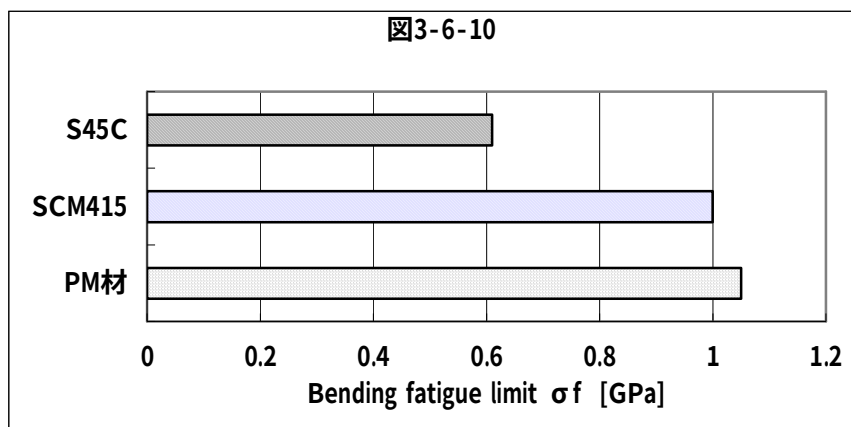
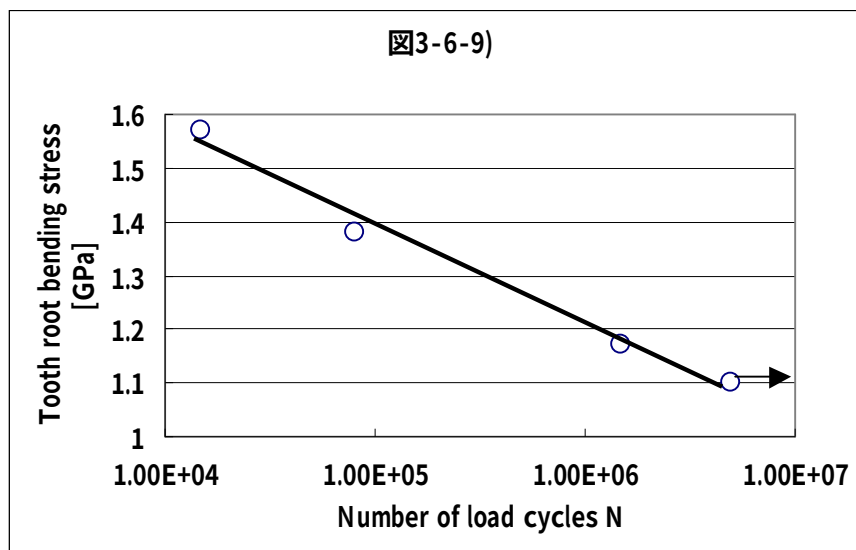
図 3-6-8



3) 曲げ疲労試験結果

図 3-6-9 に STBF 試験から得られた各焼結歯車の S-N 曲線の比較を示す。P/M 歯車の疲労限は、歯表面の緻密化を施している場合は 1.05GPa の疲労限を持っている。

図 3-6-10 には各素材の曲げ疲労限度を示している。一般的に自動車のトランスミッションに使用されている SCM415 の曲げ疲労限度が 1.0GPa なのに対し、本焼結材の限度が約 1.05GPa、と若干上回っている。これより、実際に自動車のトランスミッションに使用する際に通常の溶製材より曲がりにくく、長い間使用可能ということになる。



第4章 得られた成果および今後の課題の検討

本研究では、今年度に試作した各種の装置、ソフトウェアシステムを用いて、自動車トランスミッション用の高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムについて、6 テーマにわけて、研究開発をすすめてきた。得られた成果および今後の課題について検討する。

4-1 得られた成果

本研究で本年度実施した下記の6 テーマについて、その成果を吟味する。

- ① ダイスの自動設計・転造状態可視化システムの試作開発結果
- ② 有限要素歯形解析システムの試作開発結果
- ③ データベースシステムの試作開発結果
- ④ 歯車の転造実験・精度評価
- ⑤ 圧密度合い（空孔率）測定用渦電流計測システムの試作開発結果
- ⑥ 歯車疲労強度評価

得られた成果を、目的別、課題別にまとめると以下のとおり。

4-1-1

仕上げ転造システム構築のネックである転造金型設計・製作のリードタイム短縮については、①、②、③のソフトウェアシステムの活用により、予想通り短縮できることが確認された。

4-1-2

歯形形状精度については、平歯車よりはすば歯車の転造のほうが精度の高い仕上げができることが④の実験で確認された。

4-1-3

仕上げ転造システムによる量産時に問題となる、圧密度合いの管理方式の高速化、非破壊検査方式化については、⑤の検出コイルをもちいた渦電流検査方式の採用で解決できることが確認された。

4-1-4

疲労強度については、面圧疲労強度、曲げ疲労強度ともに、溶製材の歯車と同等の強度が得られることが⑥の評価試験で確認できた。

4－2 当初の目標に照らした達成状況

当初の目標に対しては、ほぼ予想通りの成果がえられたが、新たに大きな課題が浮上ってきて、その対応のため全体の開発スケジュールを見直す必要がでてきた。

4－2－1

全周モデル（円筒モデル）による歯車精度の検証の必要性が高いことが、研究成果を川下企業に照会していく過程で、判明してきた。従来の加工システムと置き換える戦略をとる以上は、歯形形状誤差の提示と修正の容易さを強調するだけでは、新規加工システム導入の動機として弱い。実用化推進のためには、従来加工システムで蓄積されてきた歯車全周について精度測定をおこない、たとえば歯すじ誤差、ピッチ誤差などを、比較データとして提示する必要がある。それには現状の3次元測定機で計測するのでは、時間的に問題がある。データ提供の高速化と焼結歯車特有の誤差評価のできる、専用の歯車測定装置の開発が必要である。

4－2－2

圧密度合いの計測については、深さ方向の空孔率を測定することで代替してきたが、残留応力との厳密な校正データが必要であることがわかった。電解研磨機による試験片作製装置をつくる必要がある。電解研磨方式による校正用試験片の製作は、空孔率試験片の製作についての問題点（空孔率が高く観測されるという問題）に対しても、解決策を提供できる。

4－3 今後の課題の対応

4－2で提起された二つの新規課題に対して、開発のスケジュールと開発費用の見直しをして、場合によっては、開発期間を3年に延ばしてでも対応していく考えである。

第5章 研究総括

本開発事業では、自動車トランスミッション用高強度焼結歯車の高精度仕上げ転造システムの開発を行なった。従来から動力伝達用に使われている溶製材歯車と精度・強度とも同等であることを実証するため、4種の動力伝達用歯車を転造加工して、その歯形精度と疲労強度の検証をした。検証用の計測システムについて、一部は開発し、一部は購入した。

検証用の歯車については、3次元測定器により歯形誤差を測定するとともに、面圧疲労強度・曲げ疲労強度について、疲労試験データを収集した。

データを見る限りでは、溶製材歯車に比肩する精度・強度をもつ焼結材歯車を量産できる可能性が十分にあることが確認できた。22年度においては引き続き、精度・強度の向上と試作を行ない、川下企業に対して、焼結歯車の優位性を訴求していく。また、訴求効果をあげるため、次の二つが、22年度に最優先で対応しなければならない研究開発課題として浮上してきた。ひとつは、焼結歯車専用の歯車測定器を開発し、川下企業が要求する歯車諸元データを、迅速に提供できる体制にまでもっていくことである。もうひとつは、疲労試験データについては、定量データだけでなく、定性データまで提供できるよう、渦電流方式による歯車表面の残留応力測定システムより発展させることである。新たな開発テーマの発現により、研究開発期間は、当初計画の2年間より、3年間に延長せざるを得ない。川下企業説得のための回り道と考えるより、事業化を確実に推進する近道と考えて、認定計画の見直しをする。

以上が平成21年度における研究開発成果であり、実績に基づく決断でもある。