

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
(平成 23 年度補正予算事業)

「次世代トランスミッション用歯車硬化層の精密制御と  
量産技術に関する研究」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 1 2 月

委託者 中 国 経 済 産 業 局  
委託先 公益財団法人鳥取県産業振興機構

## < 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
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	13
第2章	本論	
2-1	熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発	14
2-2	高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善	16
2-3	高周波焼入に係る熱処理工程のFA化技術の開発	27
第3章	全体総括	29

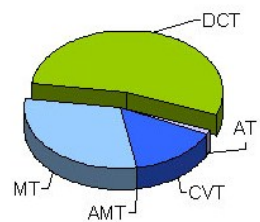
## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

各国において自動車に対する燃費規制、排気ガス規制等の環境規制が逐次強化されており、自動車産業では、環境対応が企業の競争力を大きく左右する状況となっている。このため、自動車の軽量化、エンジンの効率向上、燃料電池のコスト削減、ハイブリッドシステムの効率向上、バッテリー、モーターその他電子部品の効率向上等が必要となる。

その中で自動車のパワートレイン部分、特に変速機部分での効率アップは燃費などの面からも非常に重要であり、近年、従来のトルクコンバータ式トランスミッションとは一線を画す次世代型のトランスミッションが開発、市場投入されつつある。

その中で、デュアルクラッチトランスミッション（DCT）は次世代トランスミッションの一形式であり、従来のコンベンショナルな AT よりトルクコンバータの滑りによる伝達ロスが少ないため燃費に優れている。基本的な構造はマニュアルトランスミッション（MT）に似るがクラッチが 2 系統あり、それぞれが偶数段、奇数段を受け持ちクラッチの断続およびギアの変速が自動的に行われるオートマチック変則機構を持つこのトランスミッションは、人間の操作では不可能なほど走行状況に応じて頻繁に変速することが可能であり、燃費の向上のみならずスポーツ走行での性能向上にも寄与する。効率が良いクラッチ容量を増大させれば大型車などの大トルクを要求する車種にも対応できるため、次世代トランスミッションとして注目を集めている。



GETRAG Ford's view of 2020

ゲトラグ、フォードの将来予測では 2020 年にトランスミッション方式の 50% 以上がこの方式になると予測している形式である。

今回、研究開発を行なう部材は、この DCT 構成部品の一部である。

DCT 構成部品においては高強度化、短納期化、低コスト化が強く求められている。

これに応えるために今回は熱処理で対応し熱処理の種類は高周波焼入れを採用する。高周波熱処理は短時間で処理が出来、省エネ、短納期、低コスト化に有利なため、有望な技術であるためである。しかしながら、高周波熱処理には課題も多く加熱コイル設計など試作時には多くの面で勘や経験に頼っているのが実情である。そのためシミュレーション技術を中心とした研究が各所で実施されているものの完全ではない状況である。

例えば、平成 18 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（近畿経済産業局）による「シミュレーション利用技術による熱処理の高度化手法の開発」においては熱処理全般のシミュレーションの利用における基礎的研究は達成している。しかしながら現在、コスト高の要因の一部である高周波コイルの実際の設計に対する反映や、高強度化のための焼入れ硬化層の精密制御までの研究は実施されていない。また、2005 年のコマツの研究（KOMATSU TECHNICAL REPORT 2005① VOL.51 NO.155）である「熱処理データベースの構築とシミュレーション技術の向上」においては浸炭熱処理を中心に検討が実施され、高周波も含むデータベースがいくつか構築されているが、同様に今回の課題に即利用できるものではない。

このように、熱処理シミュレーションは重要視されているものの、ターゲット部材に即利用できる状況ではない実情である。

本研究においては、これらの問題点、上記に上げたような高周波焼入れの不利な面、設計時に想定できないこと等をシミュレーションを中心としたデジタル技術と実際の焼入れ品の機械的性質双方の面から研究をする。また対象材は実際のターゲット部材を中心に研究する。

### 研究の概要

次世代トランスミッション用歯車硬化層の精密制御と量産技術に関する研究を行なう。

歯車の硬化層は高周波焼入れにより生成する。理由は、高周波焼入れは短時間で処理が出来、省エネ、短納期、低コスト化に有利なためである。反面、複雑な形状のものは内部の渦電流が一定にならないため、場所によって温度差が出る。そのため硬化層を精密に制御するのは困難である。

硬化層を精密に制御するには、発振機器の精度だけでなく加熱コイルの設計、焼入れ条件の選定が非常に重要である。しかしながら、これらの諸条件は職人の勘と経験に頼っているのが実情である。本研究では勘と経験に頼らない加熱コイルの設計、焼入れ条件、治具等の最適化を実施する。

さらには歯車用途に見合った適正硬化層や熱処理後の歪を含んだシミュレートを行い、これらの時間を大幅に短縮することを目指す。これにより川下企業は開発期間を大幅に短縮できると考える

シミュレートと実際の熱処理の双方を行い精度の高い生産技術、予測技術等を確立する。歯車用途に見合った適正硬化層や熱処理後の歪を含んだシミュレートも行い試作に関わる時間も大幅に短縮することを目指す。ターゲットは大量生産を前提にしたものであり、効率的な生産を可能とする熱処理工程のFA化技術もあわせて実施する。

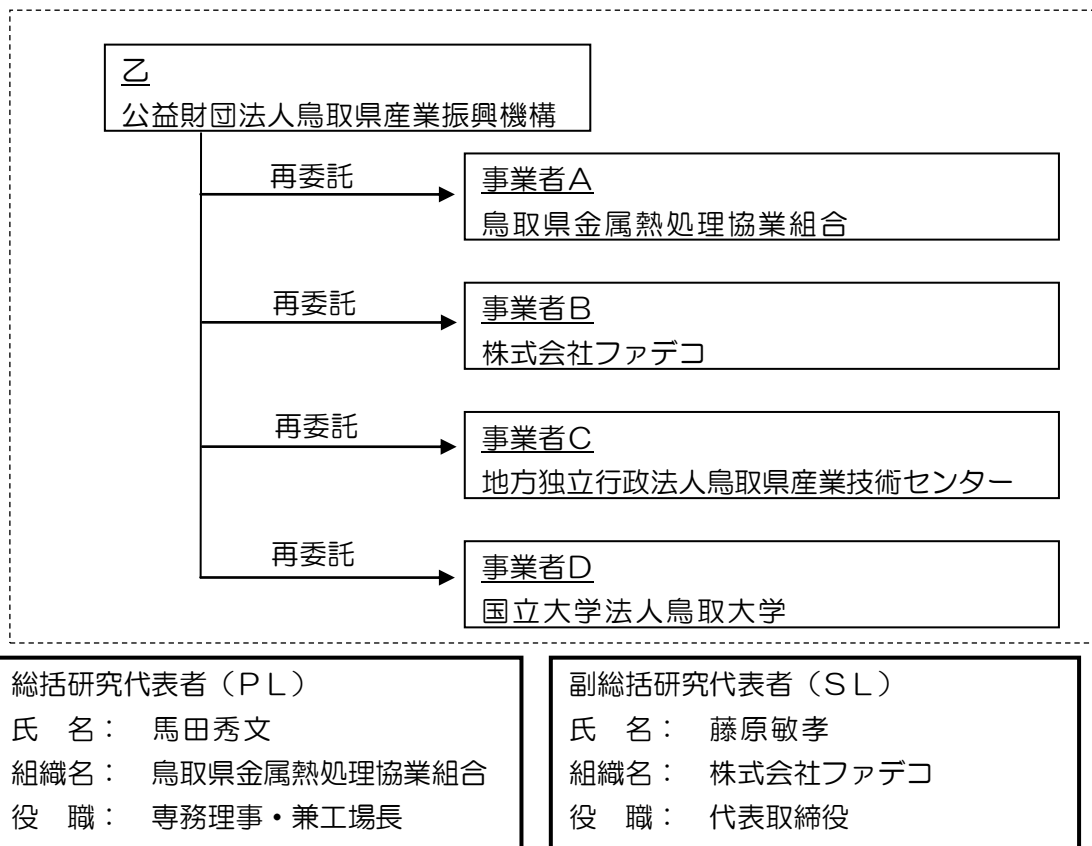
### <最終的に達成すべき目標>

研究項目	目標	目標値
【1】熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発	加熱コイルの設計を論理的に支援できるシステム、焼入れ前後の歯車形状を予測するシステムを構築する。	狙い値到達時間 60%以上削減
【2】高周波誘導加熱における焼入れ硬化層の精密制御と疲労強度の改善	所望の疲労強度を確保するための、0.2mm 単位での焼入れ硬化層の条件を確立する。	0.2mm 単位での硬化層制御
【3】高周波焼入れに係る熱処理工程のFA化技術の開発	高周波焼入れ作業の自動化を達成する。	人員作業時間 80%以上削減

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

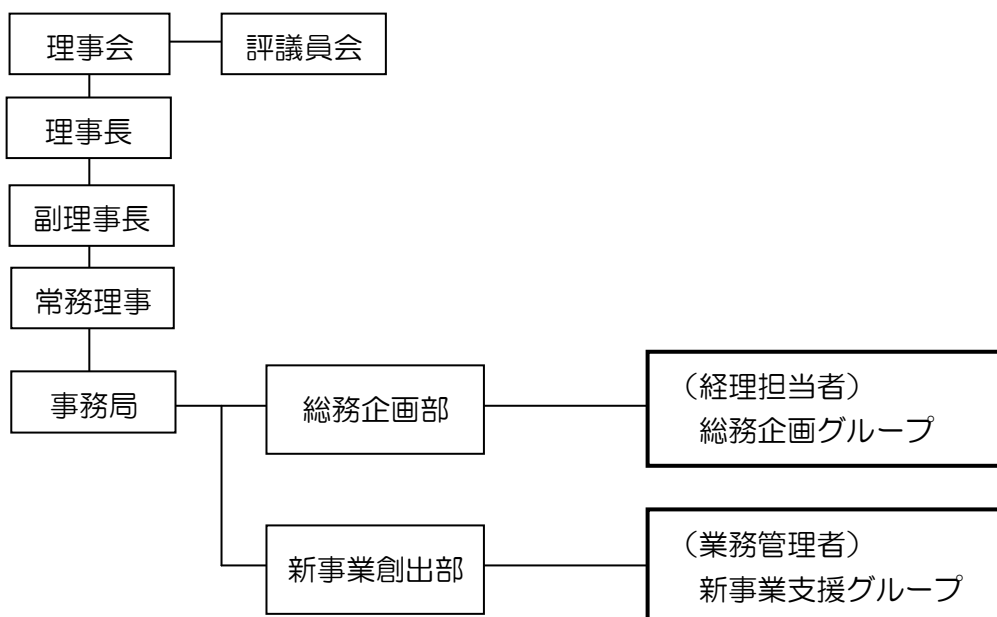
#### 1) 研究組織（全体）



#### 2) 管理体制

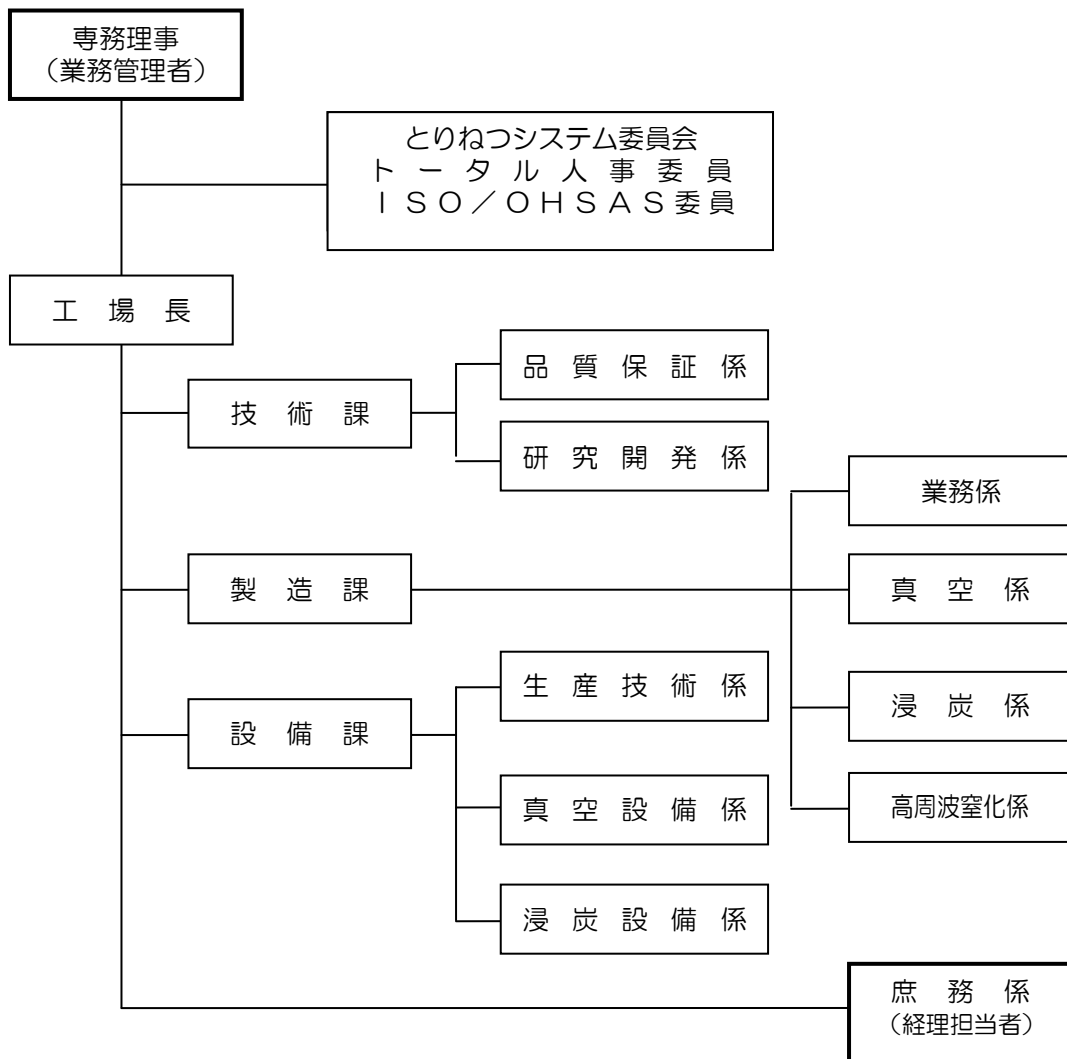
##### ①事業管理機関

[公益財団法人鳥取県産業振興機構]

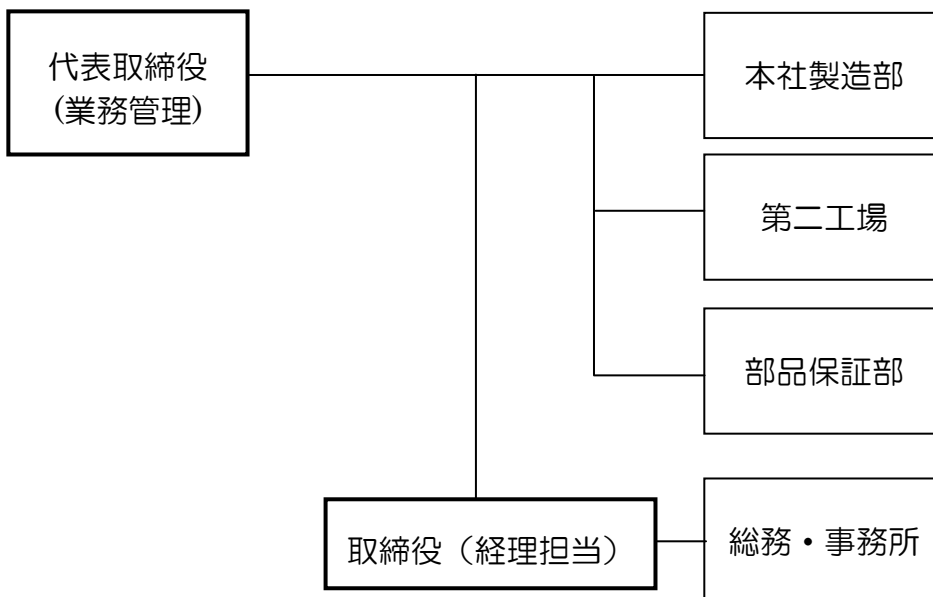


② (再委託先)

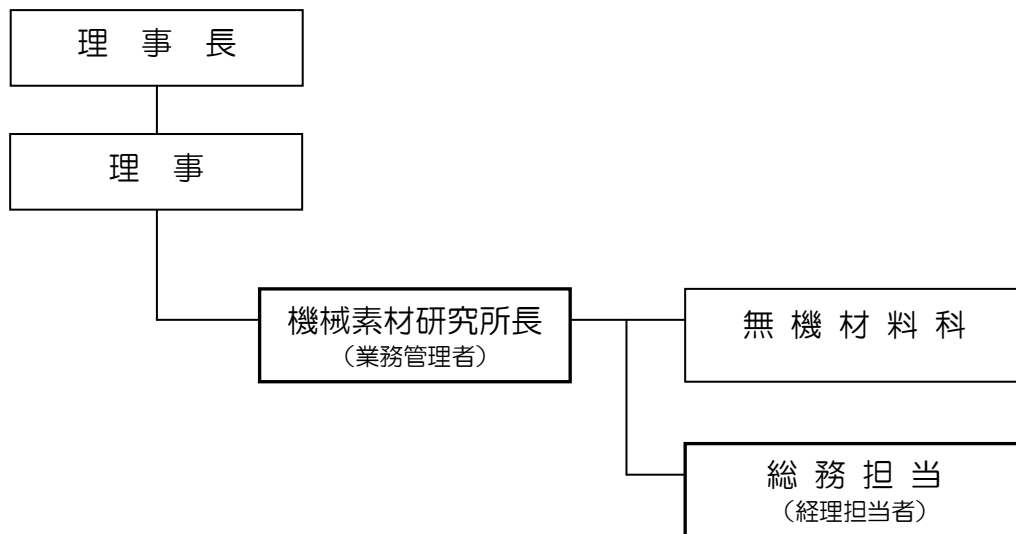
鳥取県金属熱処理協業組合



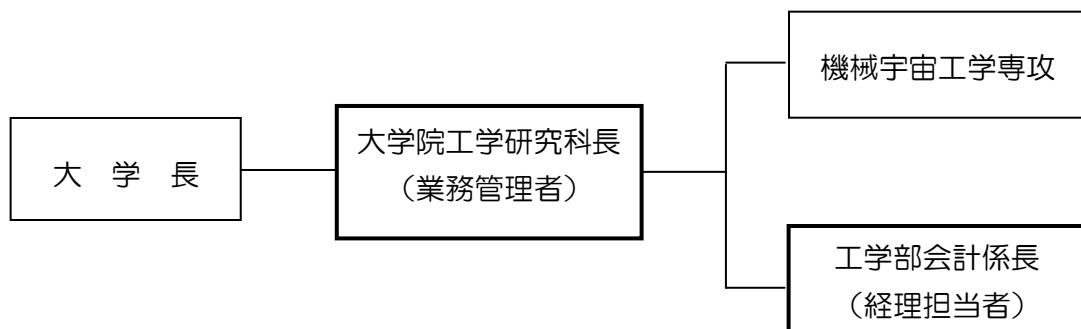
株式会社ファデコ



地方独立行政法人鳥取県産業技術センター



国立大学法人鳥取大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人鳥取県産業振興機構  
管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高野 博司	新事業創出部長	【4】
岡島 加奈	新事業創出部新事業支援G副グループ長	【4】
田中 幸一朗	総務企画部総務企画G副グループ長	【4】
小坪 一之	新事業創出部新事業支援Gコーディネーター	【4】
前田 千恵	新事業創出部新事業支援グループ事務員	【4】

【再委託先】※研究員のみ

鳥取県金属熱処理協業組合

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
馬田 秀文	専務理事・兼工場長	【1-1-1】 【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
小武 勝	設備課長	【3-1】
福間 充	生産技術係長	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
生田 智章	技術課長	【1-1-1】 【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
吉岡 幸一郎	技術課研究開発係長	【1-1-1】 【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
竹谷 雅和	技術課技術係員	【1-1-1】 【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
金田 務	製造課浸炭係長	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】
川上 昭徳	製造課浸炭係員	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】 【3-1】
生田 理	製造課高周波窒化係長	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】
佐々木 寛	製造課高周波窒化係員	【1-1-2】 【2-3】
提嶋 恭子	製造課高周波窒化係員	【1-1-2】 【2-3】
小谷 弘	製造課長	【1-1-2】 【2-3】 【3-1】
武部 輝幸	設備課浸炭係長	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】
青木 純一	設備課高周波窒化係長	【1-1-2】 【1-2-1】 【1-2-2】 【2-3】

株式会社ファデコ

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
藤原 敏孝	代表取締役	【1-1-2】 【1-2-2】
増田 勝己	本社製造部・第二工場 統括製造部長	【1-1-2】 【1-2-2】
藤原 大輔	第二工場長	【1-1-2】 【1-2-2】
永島 浩一	部品保証部 部長	【1-1-2】 【1-2-2】
小山 英昭	本社製造部 係長	【1-1-2】 【1-2-2】



地方独立行政法人鳥取県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
玉井 博康	機械素材研究所 無機材料科長	【2-3】
今岡 睦明	機械素材研究所 無機材料科 特任研究員	【2-3】
野嶋 賢吾	機械素材研究所 生産システム科 主任研究員	【2-3】
松田 知子	機械素材研究所 無機材料科 研究員	【2-3】
野口 慎	機械素材研究所 無機材料科 研究員	【2-3】

国立大学法人鳥取大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
宮近 幸逸	大学院工学研究科教授	【1-1-1】【1-2-1】
坂本 憲一	工学部技術部	【1-1-1】【1-2-1】

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人鳥取県産業振興機構

(経理担当者) 総務企画部総務企画グループ 田中 幸一郎

(業務管理者) 新事業創出部新事業支援グループ 小坪 一之

(再委託先)

鳥取県金属熱処理協業組合

(経理担当者) 庶務係長 中島 さつき

(業務管理者) 専務理事兼工場長 馬田 秀文

株式会社ファデコ

(経理担当者) 取締役 藤原 すみ子

(業務管理者) 代表取締役 藤原 敏孝

地方独立行政法人鳥取県産業技術センター

(経理担当者) 機械素材研究所総務担当主事 遠藤 晴美

(業務管理者) 機械素材研究所長 門脇 亙

国立大学法人鳥取大学

(経理担当者) 工学部会計係長 西尾 憲二

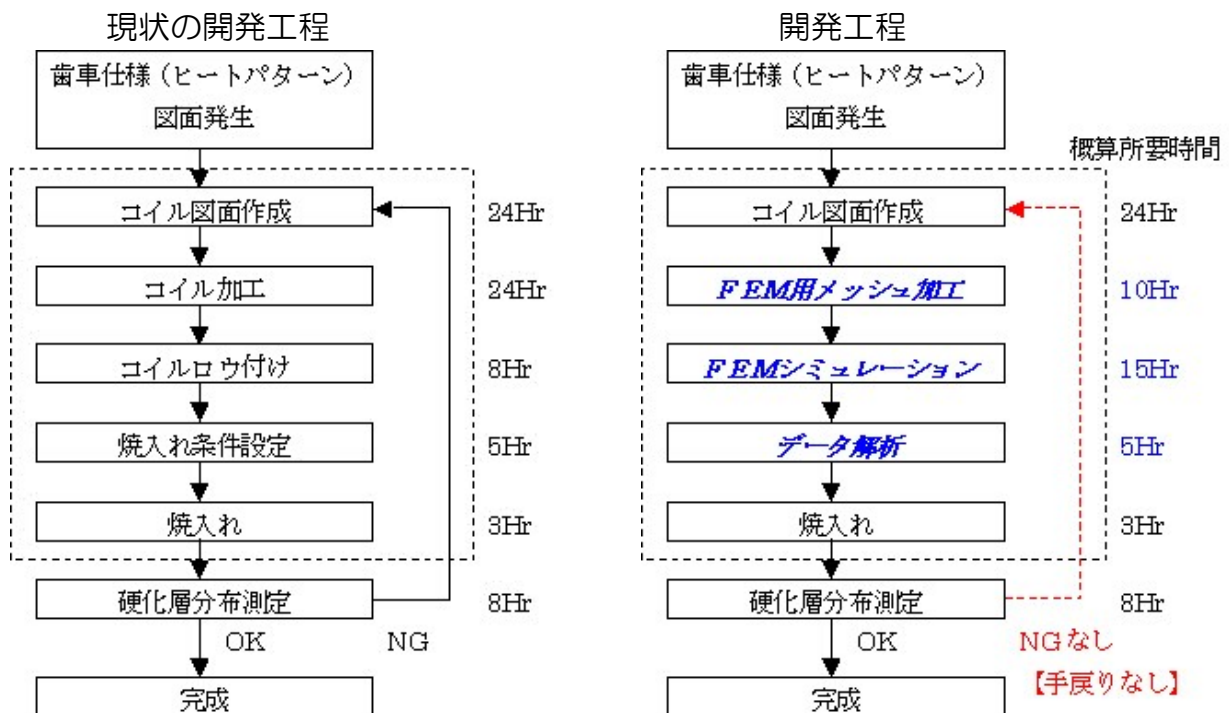
(業務管理者) 工学研究科長 田中 久隆

### 1-3 成果概要

＜当初目的達状況一覧表＞

研究項目	目標	目標値	達成値	成果達成率 (自己評価)
【1】 熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発	加熱コイルの設計を論理的に支援できるシステム、焼入前後の歯車形状を予測するシステムを構築する。	狙い値 到達時間 ≥60% 削減	手戻り ≥2で ≥69.9%削減	100%
【2】 高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善	所望の疲労強度を確保するための、0.2mm単位での焼入硬化層の条件を確立する。	0.2mm単位での硬化層制御	0.2mm単位での制御条件把握可能	100%
【3】 高周波焼入に係る熱処理工程のFA化技術の開発	高周波焼入作業の自動化を達成する。	人員作業時間 80%以上削減	87.5%削減	100%

#### 【1】 熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発



手戻りなし

合計 72Hr

手戻り 1

合計 144 Hr

手戻り 2

合計 216 Hr

現状の作業では最低でも手戻りは3である。

合計 65Hr 9.7%削減

合計 65Hr 54.8%削減

合計 65Hr 69.9%削減

【2】 高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善  
シミュレーション結果と実測データより $\leq 0.2\text{mm}$ 単位での制御条件把握達成

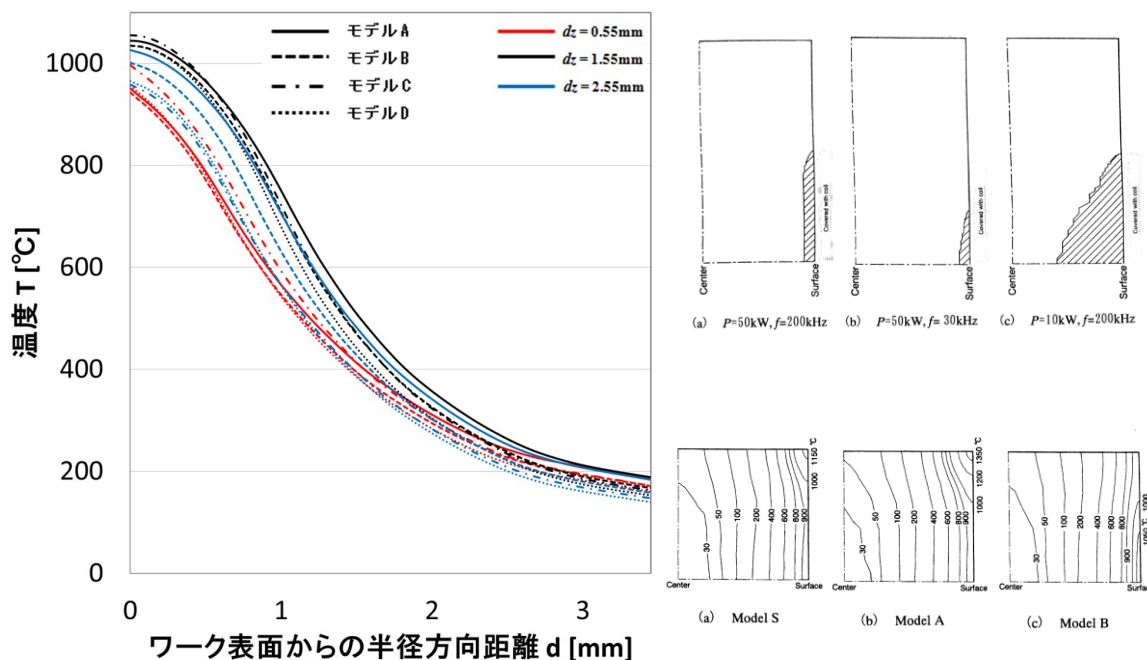
設定データ

加熱時間	加熱電流 (設定値)		
	170A	185A	200A
0.15s	A	B	C
0.20s	D	E	F
0.25s	G	H	I

硬化層データ

サンプル名	硬化層深さ (mm)		
	ワーク先端より 0.55mm	ワーク先端より 1.55mm	ワーク先端より 2.55mm
A	0.06	0.33	0.34
B	0.33	0.51	0.50
C	0.53	0.63	0.61
D	0.43	0.58	0.59
E	0.76	0.81	0.76
F	0.96	0.98	0.93
G	0.83	0.83	0.80
H	1.15	1.14	1.14
I	1.53	1.56	1.36

シミュレーション結果抜粋



【3】 高周波焼入に係る熱処理工程のFA化技術の開発

現状作業	完全手動の為、人員作業時間 (8Hr/日)	100%
開発後作業	自動機設定、焼入れ品準備 (1Hr/日)	87.5%削減

<平成22年度達状況一覧表>

テーマ名, サブテーマ名, 目標	目標 (数値, 内容)	実施結果	成果達成率 (自己評価)
【1-1】最適加熱コイル設計支援技術の開発			
【1-1-1】加熱コイル形状とワーク形状の関係による温度分布シミュレーション	温度分布シミュレーションの基礎プログラムを構築する。	・解析モデルの作成を実施した。3月には完成の予定。	80%
【1-1-2】加熱コイル形状とワーク形状の関係による硬度分布状況調査	各条件におけるワークの断面硬度分布状況を把握する。	・出力条件, Z軸座標情報を変更した断面硬度分布を把握した。 ・共振周波数の違う条件ではデータ数がまだ足りない。	90%
【2】高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善			
【2-1】小型歯車疲労強度試験方法の開発	・小型歯車の疲労強度評価システムを構築し, 疲労試験を行う。 ・疲労強度に及ぼす表面硬化層や金属組織の影響を調査する。	・当初計画どおり, 小型歯車の疲労強度等の耐久性を評価するための評価系を構築し, 当該システムの動作確認, 特性検証を行った。 ・開発対象の高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) について, 従来品の炭素鋼 (S45C), 一般構造用鋼 (SS) を比較サンプルとして回転曲げ疲労試験を行った。疲労強度に及ぼす高周波焼入れの効果を検証, 金属組織や微小介在物の影響を調査した。	100%
【2-2】焼入れ硬化層の精密制御技術の確立	・小型歯車の高周波焼入れ処理における取り付け位置のずれ許容限を把握する。	・加熱コイルに対する小型歯車の取り付け位置を偏心させた高周波焼入れ試験を行い, 硬度分布の変化を調査し, ずれ許容限を確認した。	100%
【3】高周波焼入に係る熱処理工程のFA化技術の開発			
【3-1】高周波焼入れ作業のFA化技術の開発	・FA化における各動作速度を決定する。 ・周辺治具の設計を行なう。	・動作速度を決定した。目標値 7.5sec/p ・FA用パレット治具を設計した。	100%

※平成22年度成果報告書より

＜平成23年度達状況一覧表＞

テーマ名、サブ テーマ名、目標	目標（数値、内 容）	実施結果	成果達成率 （自己評価）
【1】熱処理データ ベースの構築に向 けたシミュレー ション技術の開発			
【1-1-1】加熱コ イル形状とワーク 形状の関係による 温度分布シミュ レーション	S U J 2用温度分 布シミュレーショ ンのプログラムを 構築する	①軸直角断面の温度分布シミュレーショ ンを構築した。 ②軸対称モデルを応用し軸方向の温度分 布シミュレーションを構築した。	100%
【1-1-2】加熱コ イル形状とワーク 形状の関係による 硬度分布状況調査	加熱条件と炭化物 状況の関係を把握 する。加熱条件と 硬化層深さの関係 を把握する。	①加熱条件と炭化物残留状況を確認しつ つある。炭化物の残留状況の数値化に課 題を残している。 ②加熱条件と硬化層深さの関係を把握し た。	90%
【1-2-1】歯車形 状変化量シミュ レーション	歯車形状変化量シ ミュレーションの 基礎を構築する。	歯車形状変化量シミュレーションの基礎 を構築した。	100%
【1-2-2】焼入れ 後の歯車形状変化 量調査	硬化層深さと歯車 形状変化量の関係 を把握する。	硬化層深さと変形量の関係を把握した。	100%
【2】高周波誘導加 熱における焼入硬 化層の精密制御と 疲労強度の改善			
【2-2-1】焼入れ 硬化層の精密制御 技術研究	硬度分布に及ぼす 材質および加熱・ 冷却速度の影響を 把握する。	炭素量、合金元素添加量等の材質要因、 使用設備に支配される投入電力、加熱冷 却速度等の焼入れ条件等の複数要因を組 み合わせた一部実験法であるラテン方格 法に基づく条件設定を行い、S U J 2と炭 素量の異なる各種鋼材試験片について高 周波焼入試験を実施。硬度分布に及ぼす 材質および加熱・冷却速度の影響を把握 した。	100%
【2-2-2】各焼入 れ硬化層の実試験 検証	疲労寿命に及ぼす 硬化層深さの影響 を把握する。	焼入れ硬化層による歯車シャフト強度特 性の向上を検証するため、前年度に構築 した評価システムを改良、実製品形状の 歯車シャフトについて寿命試験を行っ た。複数要因の影響を調べるため、直交 表データの分散分析・誤差評価を行い、 疲労寿命に及ぼす硬化層深さの影響を把 握した。	100%
【3】高周波焼入に 係る熱処理工程の F A化技術の開発			
【3-1】高周波焼 入れ作業のF A化 技術の開発	治具の許容限度決 定目標値 7.5sec/pでの動 作を確立する。	①治具の許容公差を決定した。 ②7.0secで動作できる搬送機となっ た。	100%

※平成23年度成果報告書より

＜平成23年度補正分 達成状況一覧表＞

研究項目	目標値	達成値	成果達成率 (自己評価)
【1】 熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発			
【1-1】 最適加熱コイル設計支援技術の開発	SUJ2用温度分布シミュレーションの三次元プログラムを構築する。	構築完了	100%
	シミュレーションにて導かれた温度分布または硬度分布との相関を調査、フィードバックしシミュレーション精度を上げる。具体的にはシミュレーションと実際の焼入れ結果との差異10%以内を目標とする。	数値において $\leq 10\%$ の判定は困難だが、 $P_i=10.5\text{kW}$ の温度の計算値にほぼ対応することが分かった。	70%
【1-2】 歯車変形予測技術の研究	歯車形状変化量シミュレーションを構築する。	構築完了	100%
	シミュレーションにて導かれた変形量との相関を調査、フィードバックしシミュレーション精度を上げる。具体的にはシミュレーションと実際の焼入れ結果との差異10%以内を目標とする。	相関は平均 $\approx 10.5\%$ となったが、実測データの絶対値の差やバラツキが大きい	60%
【2】 高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善			
【2-3】 適正硬化層深さの確立	適正硬化層深さ決定法の指針を確立する。	確立完了	100%
【3】 高周波焼入に係る熱処理工程のFA化技術の開発			
【3-1】 高周波焼入れ作業のFA化技術の開発	防錆処置、洗浄処置を含めた前後のラインにおける動作を確立する。また大量生産を前提とした異常検出システムを構築する。	構築完了	100%

成果概要まとめ

- ① 三年計画の最終目標は100%達成したが平成23年度補正事業にて設定した目標は100%達成できなかった。
- ② 実生産においては満足を得る結果が得られたが、学術的には未解明の部分も多く残り今後の研究課題も明らかとなった。
- ③ シミュレーターの開発としては完了したが、精度の改善を進める必要があることもわかった。特に変形に関する計算結果は、未解決の領域も大きく傾向は合うが完全に一致させる計算は現状では困難であることもわかった。
- ④ シミュレーション実行時は狙いのポイントを明確にし実施すれば有効だが、完全に万能ではなく実験計画法とも組み合わせ、計算が合わない面もあることを理解し実データと照らし合わせ相互に補完させると効率よく開発をおこなえる事がわかった。
- ⑤ 歯車の破壊の挙動や適正硬化層の指針が明らかとなった。またSUJ2は歯車として利用する場合、従来からのスタンダードな材質S35Cと比べ曲げ疲労強度を著しく向上できること、衝撃破断は焼戻しを施すことによって改善されることがわかった。
- ⑥ FA化にはセンサー類の独自の困難面があるものの、人員は大きく削減できる目処が立った。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### 事業管理機関

法人名：公益財団法人鳥取県産業振興機構  
代表者役職・氏名： 代表理事理事長 金田 昭  
住所：〒689-1112 鳥取県鳥取市若葉台南7丁目5番1号

連絡担当者名：小坪・岡島（新事業創出部）  
Tel:0857-52-6704      Fax:0857-52-6673  
E-mail: [kkotsubo@toriton.or.jp](mailto:kkotsubo@toriton.or.jp)      [kokazima@toriton.or.jp](mailto:kokazima@toriton.or.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 熱処理データベースの構築に向けたシミュレーション技術の開発

高周波加熱コイルの設計は、被加熱物（ワーク）の形状と経験に基づいて試行錯誤によって製作されているのが現状である。このため、加熱条件（加熱電力、周波数、加熱時間）およびコイル形状が高周波加熱時の被加熱物の温度分布に及ぼす影響を明らかにすることができれば、最適な加熱条件とコイル形状を決定することが可能になる。

高周波焼入れによる硬化層の精密制御を行うために必要なコイルの形状設計法を確立するために、加熱条件とコイル形状が被加熱物の温度分布と硬化層に及ぼす影響について明らかにし、本事業の対象とする歯車の高周波焼入れ最適コイル形状を決定することとした。

#### 2-1-1 最適加熱コイル設計支援技術の開発

##### 加熱コイル形状とワーク形状の関係による温度分布シミュレーション

##### 温度分布に及ぼすコイル高さの影響

図2-1-1は、モデルA、B、C、Dの歯車表面の軸方向温度分布を示す。図2-1-1より表面の温度の高い範囲は、コイル高さの減少とともに歯車先端側に移動することが分かる。

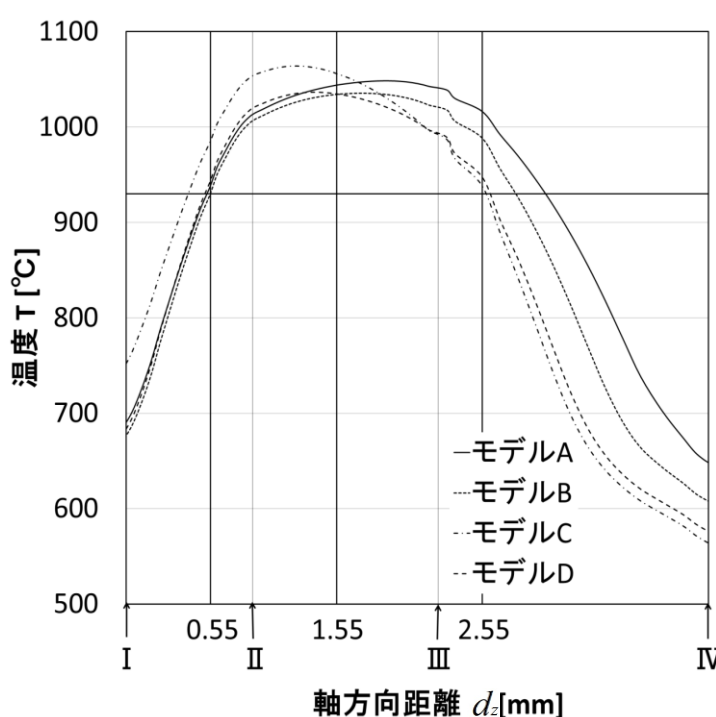


図2-1-1 表面の温度分布に及ぼすコイル高さの影響



モデル A の焼入れ過程の温度変化

加熱条件	
モデル	A
投入電力 $P_i$ [kW]	10.5
周波数 $f$ [kHz]	300

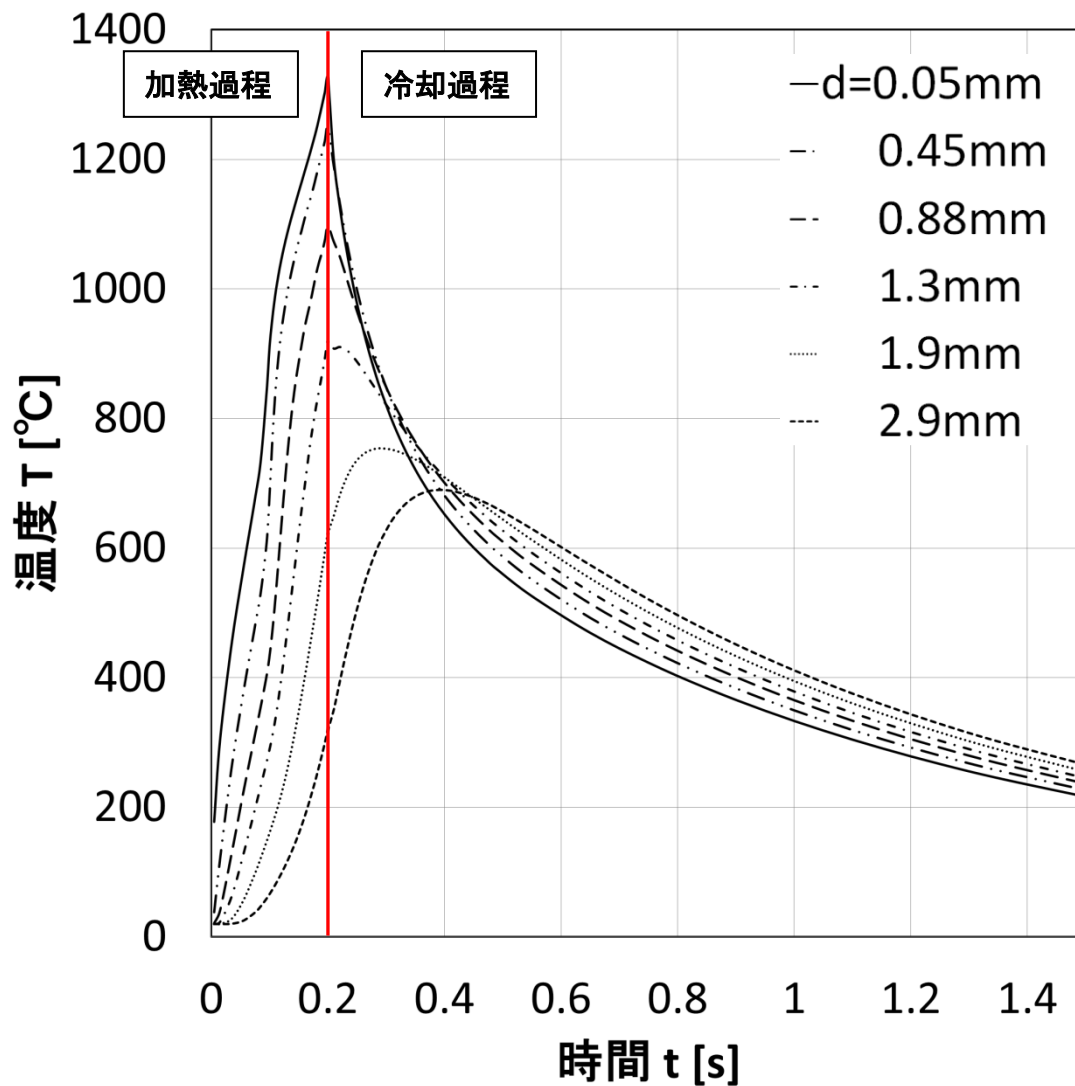


図 2-1-2 焼入れ過程の温度変化 (モデル A,  $dz=1.55\text{mm}$ )

図 2-1-2 は、歯車の焼入れ過程の  $dz=1.55\text{mm}$  の断面の温度変化を示す。図より表面温度は、加熱過程では、急激に上昇し、冷却開始初期には急激に低下し、時間の経過とともに冷却速度が減少して、冷却水の温度に近づくことが分かる。なお、中心の最高温度は  $700^{\circ}\text{C}$  程度まで上昇することがわかる。

## 2-2 高周波誘導加熱における焼入硬化層の精密制御と疲労強度の改善

複雑形状の小型歯車とシャフトが一体となり構成される次世代トランスミッション（DCT：デュアルクラッチトランスミッション）は、従来の A/T（オートマチックトランスミッション）方式に比べ15%以上の燃費向上が期待されることから、その実用化と量産化技術の確立が囑望されている。当該部材はドライバーの安全に係る根幹部材のため、高い強度と信頼性が要求される。その一方、競争力を確保するため、試作開発を含めた納期短縮と製造コストの低減も同時に求められている。従来、自動車部品の製造に用いられる熱処理手法として浸炭焼入が専ら適用され、部材表面の硬化と強度改善が図られてきた。しかし、全体を加熱するため、歪み発生量が大きく、処理後の歪み取りや寸法精度を維持するための後研磨が不可欠となり、コストアップの要因となっている。

本研究では、生産性向上とコスト低減を同時に達成する手段として、必要箇所のみ選択的に熱処理を行う高周波誘導加熱処理による歯車の焼入硬化層の精密制御について、シミュレーションと実試験の双方から検討を行い、精度の高い生産技術ならびに予測技術等の確立を目指している。

### (1) 適正硬化層深さの確立

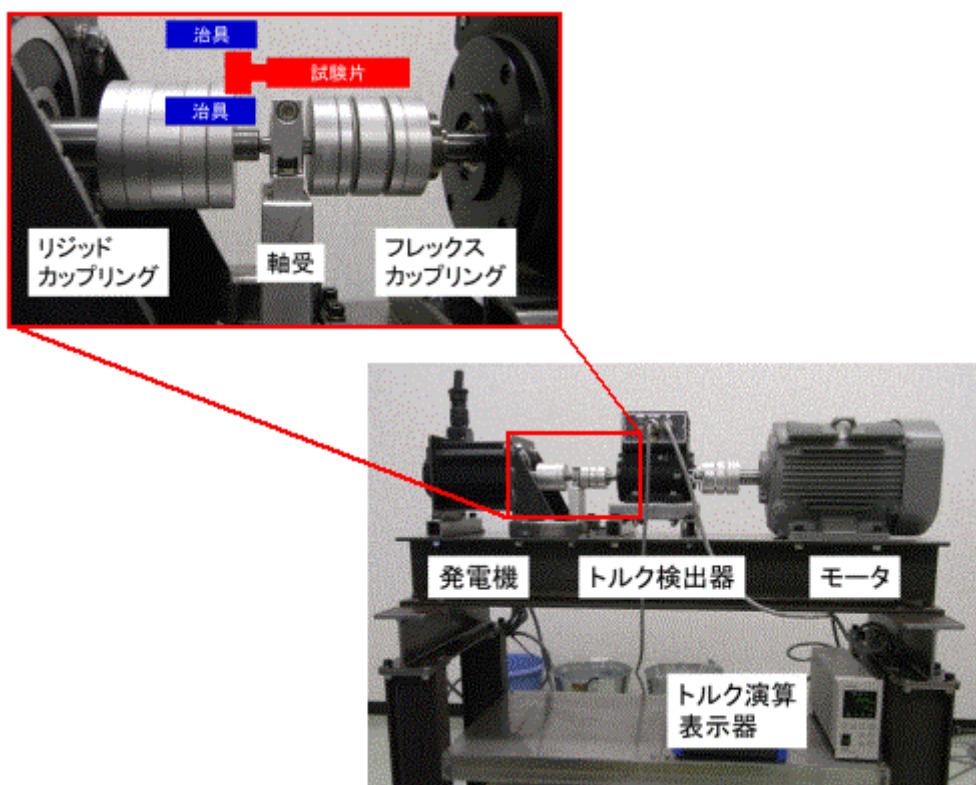
これまで、【2-1】小型歯車疲労強度の試験方法の開発、【2-2-1】焼入れ硬化層の精密制御技術研究、【2-2-2】各焼入れ硬化層の実試験検証、に関する検討を行ってきた。小型歯車の疲労強度等の耐久性を評価するための評価系を構築し、当該システムの動作確認と特性検証を行った。開発対象の高炭素クロム軸受鋼（SUJ2）については、炭素鋼（S45C）等を比較試料として回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼす高周波焼入れの効果について検討した。加熱コイルに対する小型歯車の取り付け位置を偏心させた高周波焼入れ試験を行い、硬度分布の変化を調査し、取り付け時のずれ許容限を確認した。焼入れ硬化層の精密制御技術の確立に向けて、硬度分布に及ぼす材質および加熱・冷却速度の影響を調査した。

本年度は、【2-3】適正硬化層深さの確立に向けて、実サンプルを用いたねじり疲労試験を行い、疲労強度や摩耗強度に及ぼす硬化層深さの影響を精査した。なお、本試験に先立ち、補完すべく基礎データとするため、焼入れ条件の異なる各種試験片について硬度分布状況、引張強度、耐摩耗性、耐衝撃性等の機械的特性を調査した。

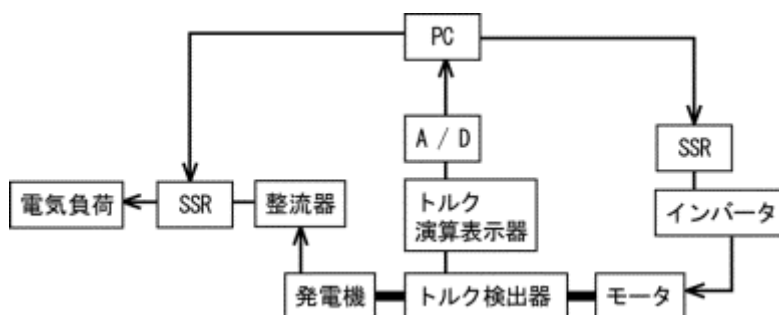
## 試験装置および試験方法

実機サンプルの疲労試験を図2-2-1に示すねじり疲労試験機により行った。この試験機は、モータ（1800rpm）で駆動される発電機により試験片にトルク負荷を与える方式のもので、発電機に接続される電気負荷をリレー（SSR）により ON/OFF することで、繰返し負荷を与える（負荷繰返し速度：約 3Hz）ことができる。

昨年度に実施した疲労試験において、スプラインの全ての歯をかみ合わせて試験を行った場合、スプラインの歯ではなく軸が破損することが明らかになった。このため、今回の疲労試験では、スプラインの 14 枚の歯のうち 3 枚がかみ合う治具（高速度工具鋼：65HRC）を用いて、無潤滑にて試験を行った。



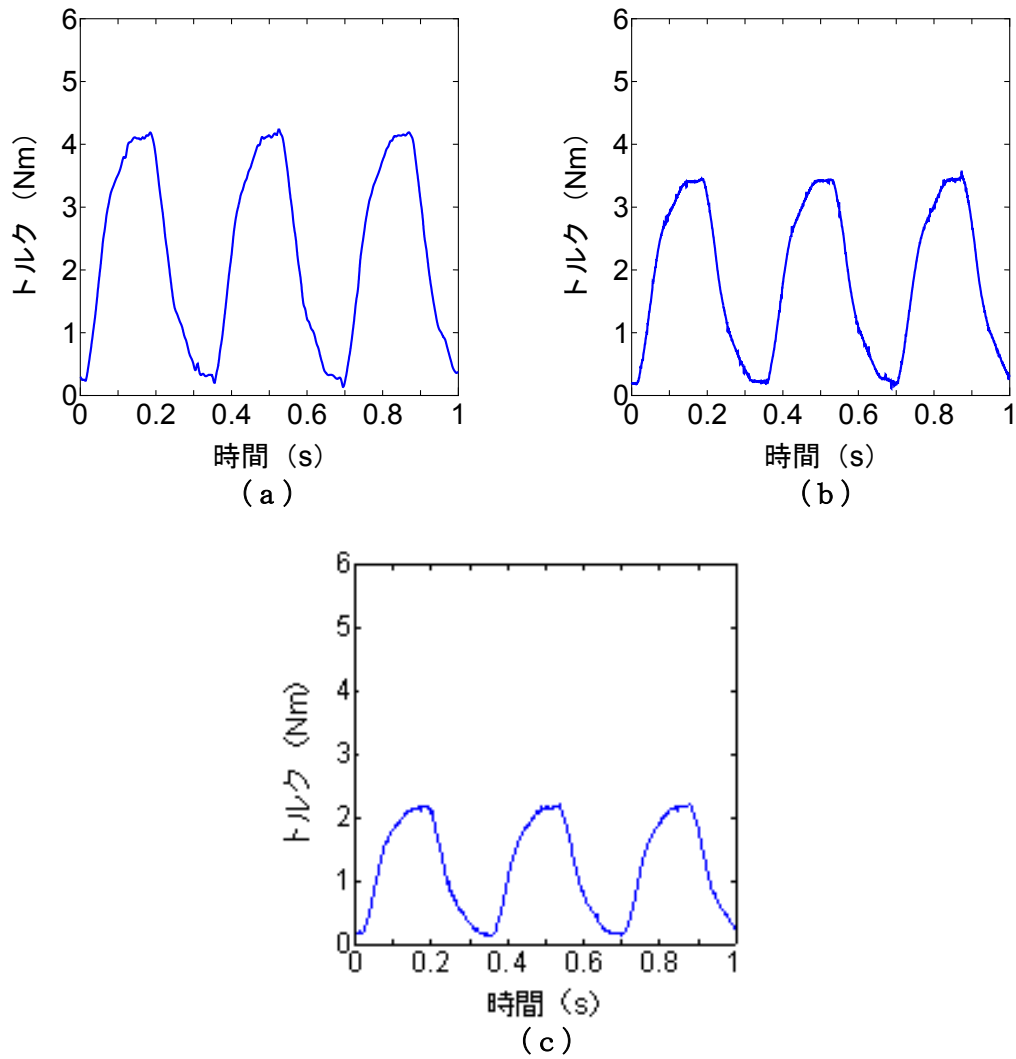
(a) 装置外観



(b) 機器構成図

図2-2-1 疲労試験機

疲労試験における負荷トルクは、図2-2-2に示すとおり、電気負荷の抵抗値を調整することにより、大、中、小の3条件に設定した。負荷の繰返し数の上限は、 $10^6$ 回とした。

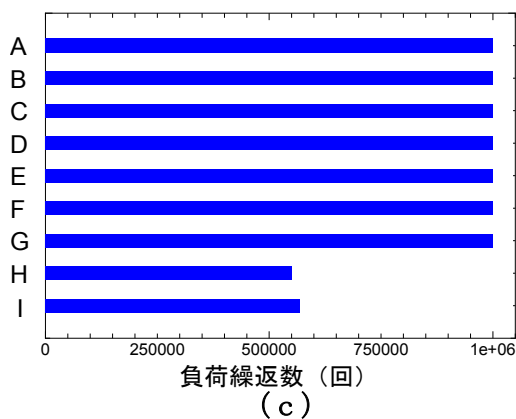
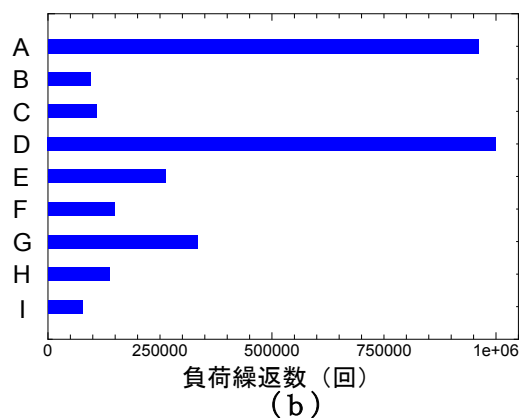
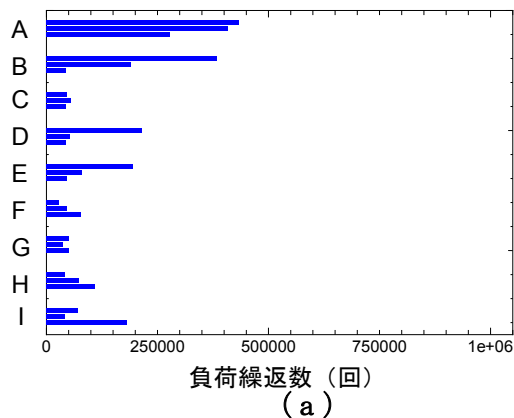


(a) 大                      (b) 中                      (c) 小

図2-2-2 負荷トルク

### 試験結果

疲労試験における破壊（スプラインが負荷を伝達できなくなる状態）までの繰返し数を図2-2-3に示す。



(a) 負荷トルク：大      (b) 負荷トルク：中      (c) 負荷トルク：小  
 図2-2-3 疲労試験結果（破壊までの繰返し数）

負荷トルクが「大」および「中」の場合には、いずれの試験片もスプラインの歯元において疲労破壊した。硬化層深さの大きい試験片 F, G, H, I では、歯車内部において疲労き裂が進展する傾向がみられ、複数の歯が同時に脱落する状況が確認された。

負荷トルクが「小」の場合には F, H, I の試験片のみ疲労破壊しており、相対的にひずみが大きくなっていった。硬化層深さの最も小さい試験片 A においては著しい摩耗が発生し、歯が摩滅している。試験片 C, D, E, G は、相対的に摩耗量が小さく、疲労および摩耗に対して高い耐久性を有している。

## (2) SUJ2 高周波焼入れ歯車の硬化層，曲げ疲労および衝撃強度

SUJ2 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労および衝撃強度について明らかにするために，試験歯車を製作し，硬化層の組織観察，硬さ測定，曲げ疲労試験および衝撃試験を行って，これらに及ぼす硬化層深さ（加熱時間）の影響について検討し，曲げ疲労および衝撃強度に対する最適硬化層深さについて明らかにした。

### 曲げ疲労試験

図2-2-4は，曲げ疲労試験に用いた曲げ疲労試験機を示す．油圧により繰り返し荷重を加えるもので，荷重位置は歯車の歯先で，荷重繰返し速度は 700 回/分である．図2-2-5に歯車支持・荷重負荷装置の写真を示す。

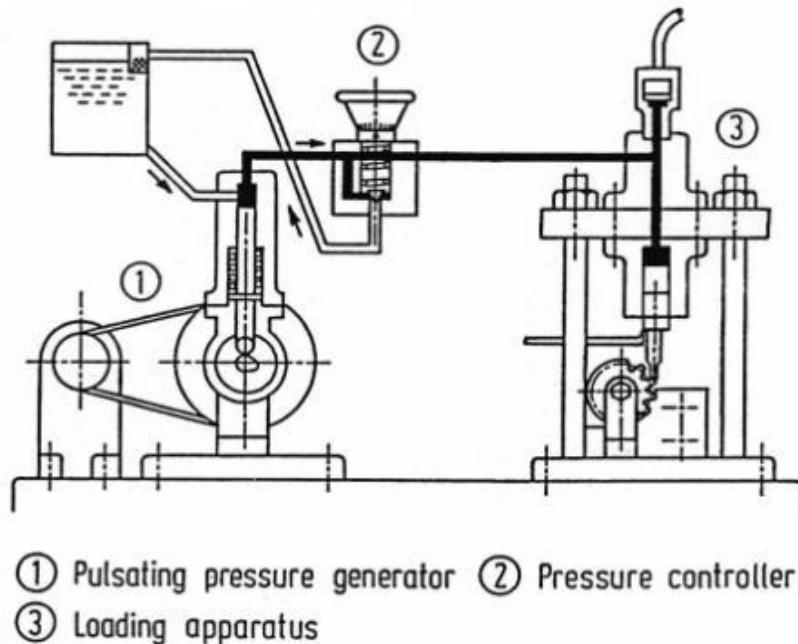


図2-2-4 曲げ疲労試験機概略図

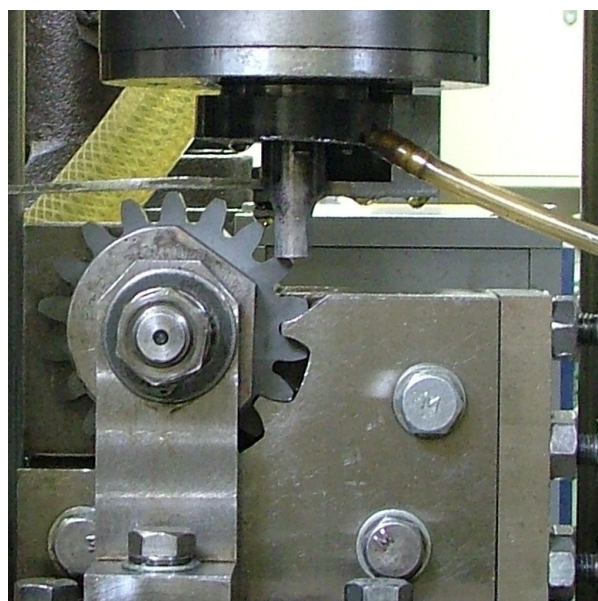


図2-2-5 曲げ疲労試験機の歯車支持・荷重負荷装置

## 衝撃試験

図2-2-6は、衝撃試験に用いた衝撃試験機を示す。おもりを自由落下させて荷重伝達棒に衝突させたときの衝撃破壊エネルギーを求める方式のものである。

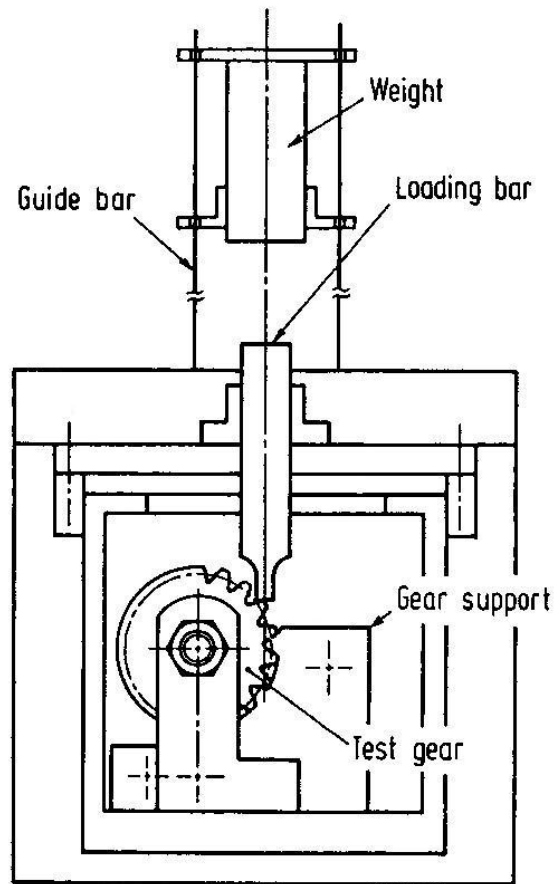


図2-2-6 衝撃試験機の概略図

## 実験結果および考察

### 硬化層の組織

図2-2-7は、試験歯車のホッファー危険断面における硬化層の組織と歯面から離れた芯部の組織写真を示す。焼戻された歯車と焼戻なしの場合の組織変化は、これらの組織写真ではほとんど認められない。

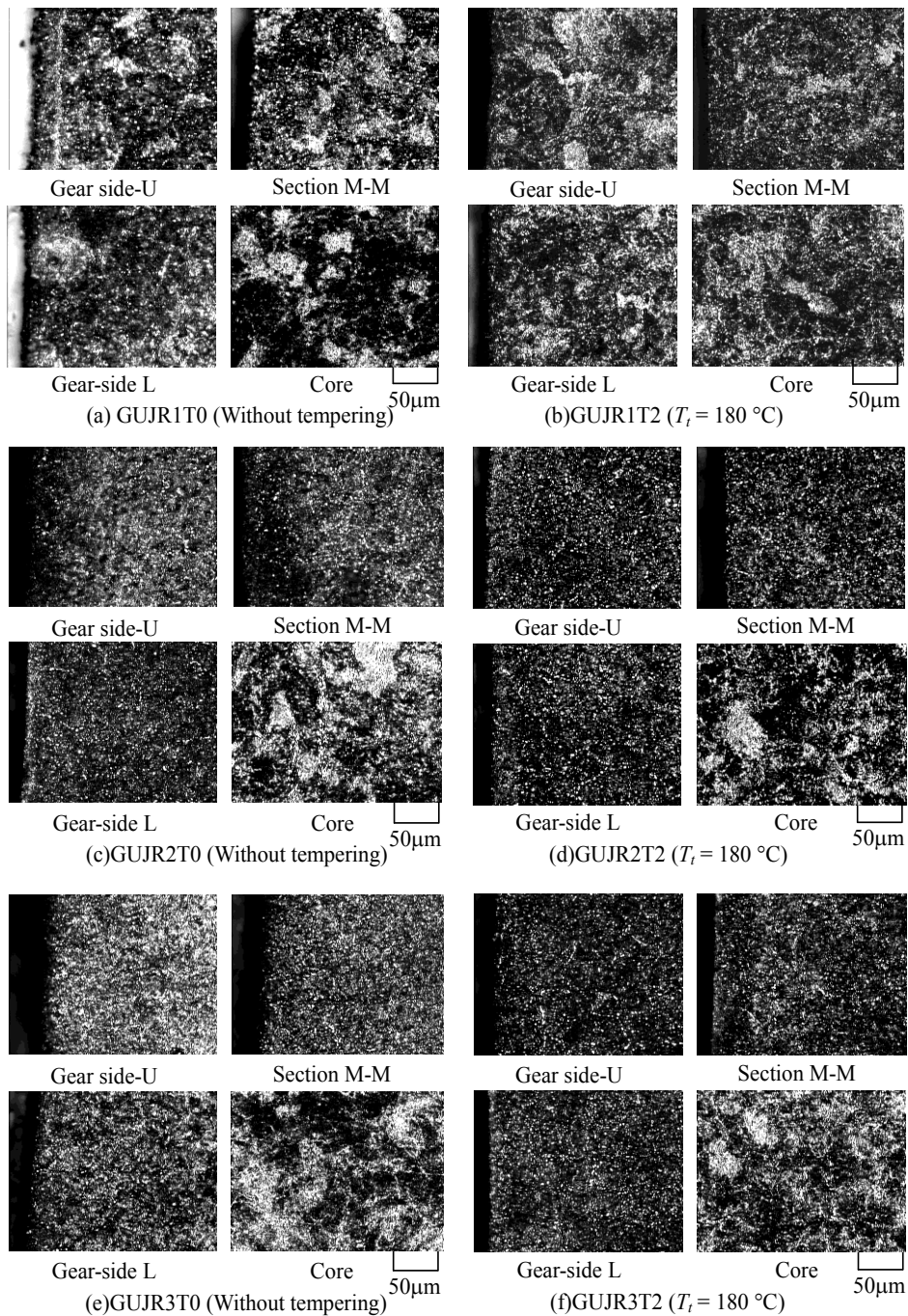


Fig.2 Photograph of micro structure of test gears  
(SUI2, As rolled,  $P=50$  kW,  $f=30$  kHz)

図2-2-7 硬化層の組織 ( $P=50$  kW,  $f=30$  kHz)



## 硬さ分布

図2-2-8は、試験歯車のホッファー危険断面における歯面垂直方向の硬さ分布を示す。横軸に表面からの距離を縦軸にビッカース硬さをとっている。硬化層の深さは、加熱時間の増加とともに増大することがわかる。

一方、焼割れの生じた  $t_h \geq 5.3s$  の歯車の場合には有効硬化層深さ ( $HV \geq 400$ ) が、3mm を超えることがわかる。また、焼戻しによって表面の硬さが減少することがわかる。これらの硬さ測定結果より求めた有効硬化層深さを  $d_e$  として表2-2-8に示している。

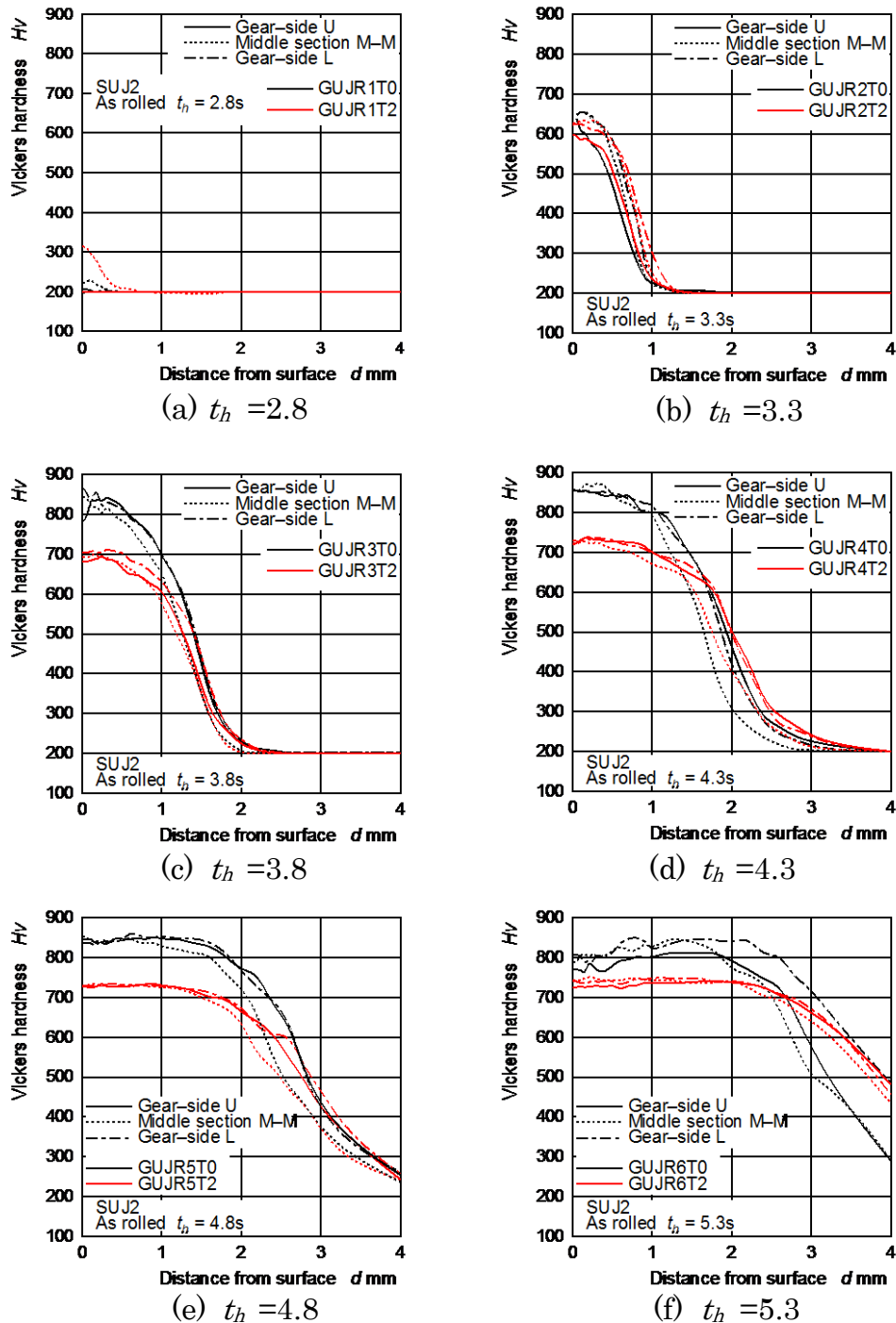
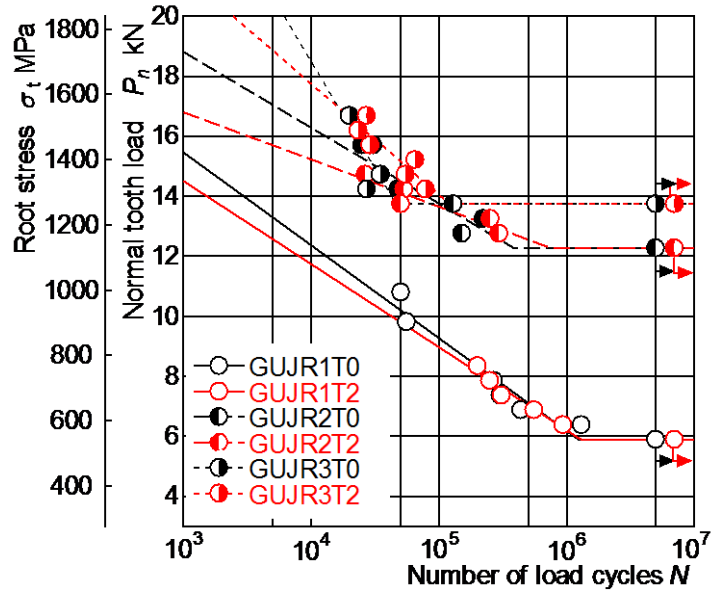


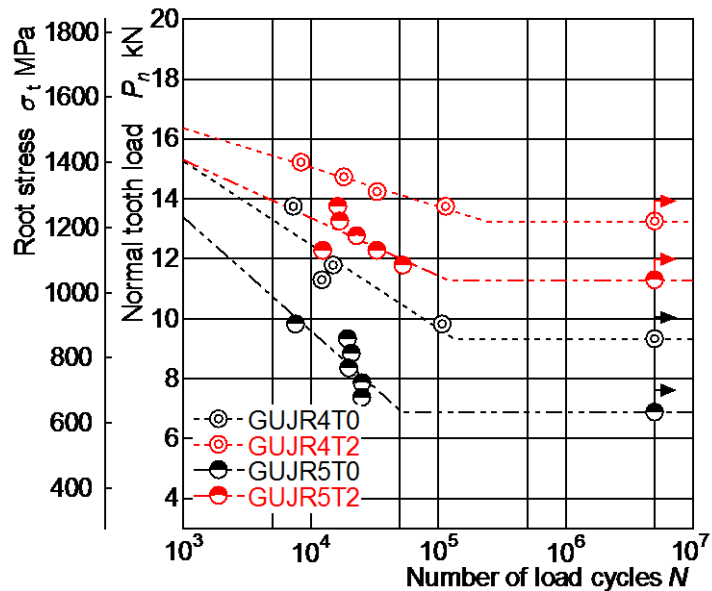
図2-2-8 ホッファーの危険断面の硬さ分布 ( $P=50kW$ ,  $f=30kHz$ )

曲げ疲労試験結果

図2-2-9は、試験歯車の曲げ疲労試験結果（ $S-N$  曲線）を示す。横軸に荷重繰返し数を縦軸に歯面荷重および歯元応力（歯面荷重および危険断面の歯形寸法を会田・寺内の実用歯元応力計算式に代入して求めた計算値）をとっている。図より曲げ疲労寿命、曲げ疲労限度 $\sigma_u$ は、加熱時間に依存して大きく変化し、また、焼戻しを施すことによっても増大する場合があることがわかる。



(a)  $t_h=2.8, 3.3, 3.8$  s



(b)  $t_h=4.3, 4.8$  s

図2-2-9  $S-N$  曲線

## 衝撃試験結果

図2-2-12は、試験歯車の衝撃荷重によるまたぎ歯厚増加量を示す。横軸に衝撃エネルギーを縦軸にまたぎ歯厚増加量をとっている。またぎ歯厚増加量は、図2-2-11に示すようにして測定した。また、衝撃エネルギーは、図2-2-10に示す計算式により求めた。図2-2-12の矢印↑は、衝撃エネルギー  $E$  を増加させたときのまたぎ歯厚増加量  $\Delta\delta$  が、急激に増加する直前の  $E$  を衝撃破断エネルギー  $E_b$  とし、これを各歯車に対して求めた。図2-2-12より、 $\Delta\delta$  は加熱時間の増加とともに減少することがわかる。

## 衝撃エネルギー

おもりと負荷棒の衝突直後の速度が等しくなると仮定すると、運動量保存則より

$$v_1 = \sqrt{2gh}$$

$$v_2 = \frac{W_1}{W_1 + W_2} v_1$$

$v_1$  : 衝突直前のおもりの速度  $v_1$

$v_2$  : 衝突直後の負荷棒とおもりの速度  $v_2$

・衝撃エネルギー  $E$

$$E = \frac{1}{2} \frac{W_1 + W_2}{g} v_2^2 = \frac{W_1^2}{W_1 + W_2} h$$

$E$  : 衝撃エネルギー [Nm]

$h$  : おもりの落下距離 [m]

$W_1$  : おもりの重量 [N]

$W_2$  : 負荷棒の重量 [N]

## 図2-2-10

衝撃エネルギーの計算法

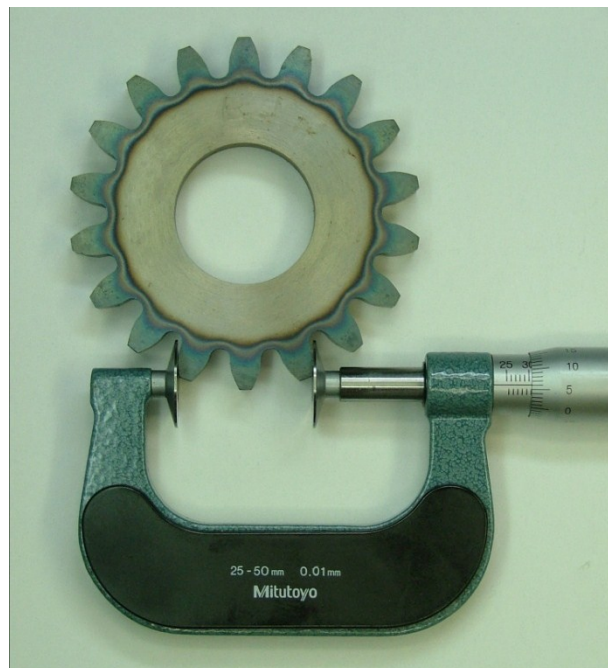


図2-2-11 またぎ歯厚増加量の測定法

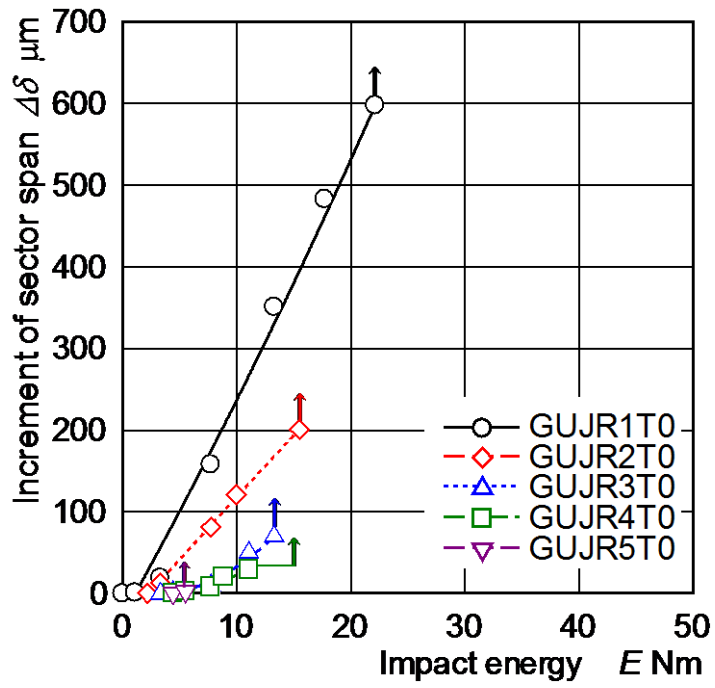


図2-2-12  $\Delta\delta$ と  $E$ の関係 (加熱時間の影響)

### 2-3 高周波焼入れ作業のFA化技術の開発

今回のターゲット部材は、自動車に使用される部品である。当然ながら、大量生産を前提とした部材となる。安定した性能の部品を国内において低価格で生産するには、自動化は欠かせない技術である。

今年度は焼入れ後の防錆処置等実働ラインの構築と動作の設計、及び異常検出システムを構築した。

#### 異常検出システム

異常検出システムは、赤外線センサーにより被処理物の到達温度を測定する事で異常を検出する。その他にも発振出力のパラメーターである、電圧や電流値なども総合的に管理し運用される。図2-3-1に赤外線センサーによる異常検出システムの構成概要図を示す。

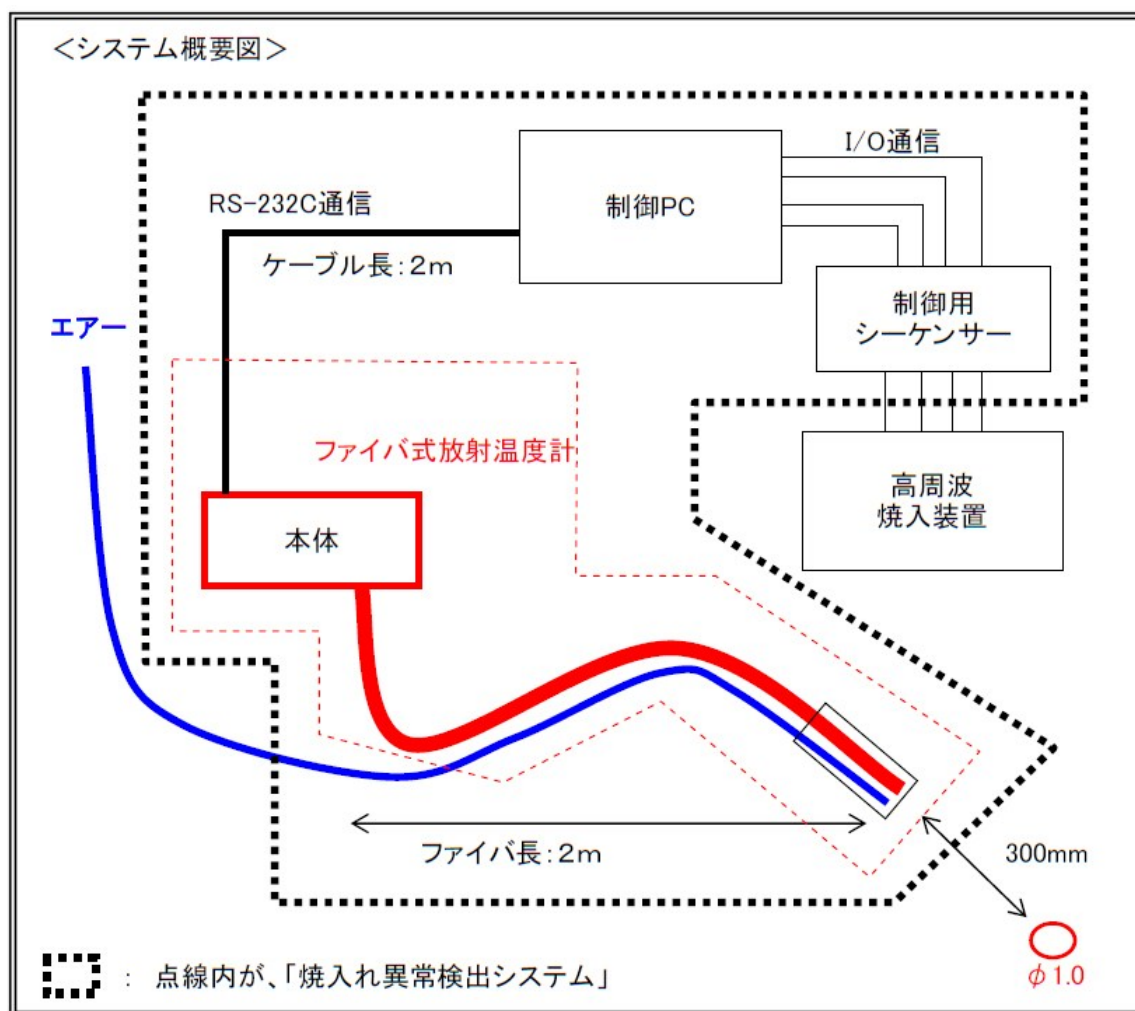


図2-3-1 異常検出システムの構成概要図

### 赤外線式異常検出システムの安定性評価

赤外線式異常検出システムにて焼入れ温度の計測は可能となったが、実生産においては信頼性評価も必要である。特に多量生産を考えた場合、長期間の安定性や経年変化の要因把握は重要と考えられる。一回のデータ収集のサンプル数を $\geq 4,500$ pで実施し温度測定状況やバラツキを検証した。

図2-3-2には計測温度データの経年変化の一部グラフを示す。経年変化においては微量の水分の付着が大きな原因と考えられ、水滴防止治具などの工夫が有効である事もわかった。

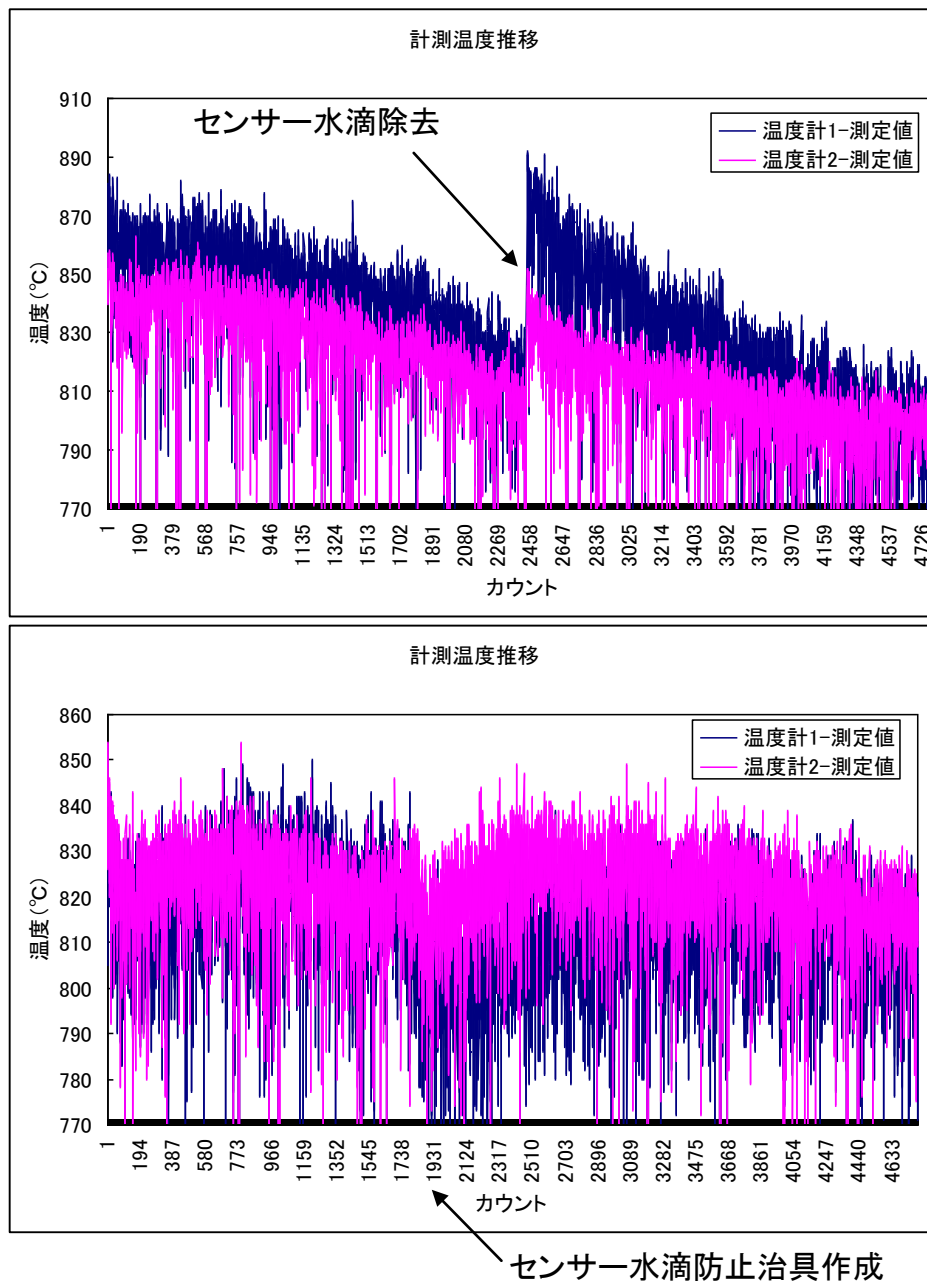


図2-3-2 計測温度データの経年変化

## 第3章 全体総括

### (1) 今後の課題

3カ年において達成すべき目標値は達成できたが、今後の課題も明らかになった。以下に、主だった課題を記す。

#### 1.シミュレーション精度の向上

開発したシミュレーターは、現状の検証範囲では精度良く温度や硬化層深さをシミュレーションできる。但し発振器の特性の変化や極端な大きさの違いや非対称製品での検証が充分であるとも言い難く、特に寸法変化については、応力計算や弾塑性解析など計算が複雑になりパラメーターの少しの変動により結果は大きく左右されることが分かった。今後はパラメーターの設定方法なども含めより精度を向上させたシミュレーターの開発が望まれる。

#### 2.シミュレーション作業の効率化

シミュレーションは有限要素法（FEM）により実施される。前準備として、要素分割パターンとしてメッシュの作成が必要である。この作業によっても結果は左右されるので効率的な分割パターンの手法の検討が必要である。実際の操作環境においてもユーザーフレンドリーなソフトの開発が望まれる。

#### 3. S U J 2 材料特性の追求

今回のメイン材料であるS U J 2は、高周波熱処理による歯車への適用事例は非常に少なく本研究により、既存の代表的材料S 3 5 Cに比べ飛躍的に疲労強度を向上させることが可能な材料であることがわかった。この知見は、動力伝達部品に適用する材料を考える上で今後の技術革新になりえる大きな成果と考える。今後この材料の各種特性を追及することが望まれる。

### (2) 事業化展開

3カ年において達成すべき目標も達成でき、ターゲット部材の試作も順調である。該当機種 of 量産は打診されており、適正化された熱処理条件にて量産を行える状況である。現状の形状を第一歩とし、類似形状での各種部材の適用を目指す。

