

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高周波加熱によるシャフトの高強度化熱処理法の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 7月

委託者 九州経済産業局

委託先 財団法人佐賀県地域産業支援センター

目 次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	4
1-4	当該研究開発の連絡窓口	5
第2章	本論一（1）	6
2-1	20 mm及びφ 30 mmシャフトの連続高周波焼入れシステムの高精度化	6
2-2	目的と目標	6
2-3	実験方法	6
2-4	実験結果	7
2-5	研究成果と今後の課題	10
第3章	本論一（2）	11
3-1	φ 20 mm及びφ 30 mm丸シャフトの焼入れ鋼の高強度化と制御システム	11
3-2	目的と目標	11
3-3	実験方法	11
3-4	実験結果	13
3-5	研究成果と今後の課題	15
第4章	本論一（3）	17
4-1	研究統括、プロジェクトの管理運営	17
4-2	実施概要	17
4-3	今後の課題と取り組み	18
第5章	全体総括	19
5-1	研究成果の全体総括	19
5-2	サブテーマの総括	19
5-3	今後の事業化に向けての取り組み	20

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) 研究の背景及び目的

工作機械用シャフトの製造においては、シャフトの高耐摩耗化、高強度化とともに、高強度化における熱処理時間の短縮、省エネ化、及び適切な熱処理特性が求められている。本研究では、シャフトを構成する結晶粒の微細化技術により、短時間で高強度化、高耐摩耗化を可能とする、連続高周波焼入れシステムを開発する。このシステムは局所加熱・冷却により応力集中部を集中的に高強度化することも可能であるため、従来法に比べ、より複雑な工作機械・建設機械用大型シャフトにも適用可能である。鋼の高強度化には、焼入れ以外にもいくつかの手法があり、その一つとして合金元素を添加する手法があるが、部品成形時の加工性の悪化、コストアップなどの問題がある。特に近年、合金価格が著しく高騰しているため、合金元素に頼らない高強度化が強く望まれている。

この点、本研究が取り組む結晶粒の微細化は、合金元素の添加に頼らず、安価な鋼であっても高強度化を実現する技術であり、材料の延性や靱性を損なわずに高強度化が可能のため、どのような成分の材料にも適用できるという利点がある。

本研究は、この結晶粒の微細化処理を行うため、連続高周波焼入れシステムを開発し、高強度シャフトの設計強度を提供することで、信頼性の高い製品を市場に提供することを目的とし、高温炉に比べ10倍以上の時間短縮技術を確立する。更には、シングルコイルによる従来の焼入れ技術では、旧オーステナイト粒径の達成度は $20\mu\text{m}$ であったが、本研究は、最終的に $10\mu\text{m}$ となる高強度化技術を開発する。対象とするシャフトの大きさは、 $\phi 8\text{mm}$ から $\phi 60\text{mm}$ を目指す。

(2) 研究の目標及び実施結果

本研究は上記のとおり、シャフトを構成する結晶粒の微細化を行うものであるが、これを、従来の高温炉による繰返し焼入れに代わり、これまでに例のない、連続高周波焼入れシステムにより実現するものである。具体的には、丸シャフトの①連続高周波焼入れシステムの高精度化、及び②焼入れ鋼の高強度化と制御システムの基礎データベース化により上記目的を達成する。

$\phi 20\text{mm}$ 及び $\phi 30\text{mm}$ 丸シャフトの連続高周波焼入れシステムの高精度化に関しては、シングルコイルでの微細化組織の開発に成功し、さらに、ダブルコイル制御によるストレートシャフトの微細化と1/20以下の微細化時間の短縮を実現した。また、焼入れ装置の高度化に資する技術開発では、エアカーテンの製作に取り組み、ストレートシャフトでは熱処理に成功した。

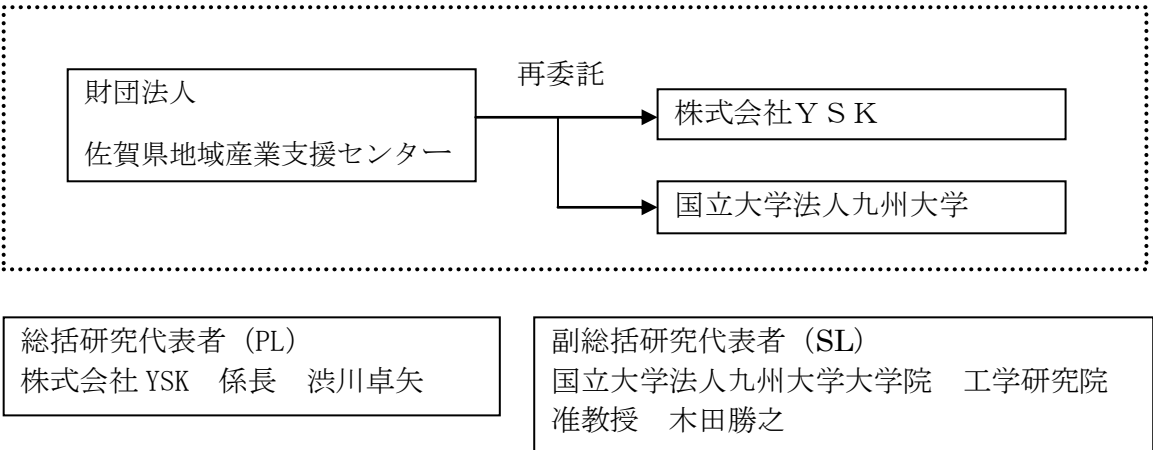
$\phi 20\text{mm}$ 及び $\phi 30\text{mm}$ 丸シャフトの性能管理に関しては、焼入れ焼戻しによる組織構造の変化を硬さ、組織、X線回折、電子顕微鏡観察(EBSD観察)の観点から評価した。その結果、高周波焼入れを用いると、その回数を増やした場合に、旧オーステナイト粒子の微細化がおこることが分かった。マルテンサイト組織、残留オーステナイト組織の偏析も起こらないこと、さらに、これらマルテンサイト組織、残留オーステナイトは微細になりながら、分散することが分かった。この機構をダブルコイルによる熱処理材で確かめるため、ダブルコイルで焼入れ焼戻しされた試験片とシングルコイルで特殊焼入れ・焼戻しした試験片で組織を比較した。その結果、ダブルコイルの硬化層はシングルコイルのものと同等かそれ以上であることが分かった。

制御システムの基礎データベース化では、φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの複数回の熱処理材の強度を比較し、焼入れの回数が強度に与える影響を調べた。その結果、焼入れ回数の増加にともない強度が増加した。また、この特長は長寿命域でも維持された。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

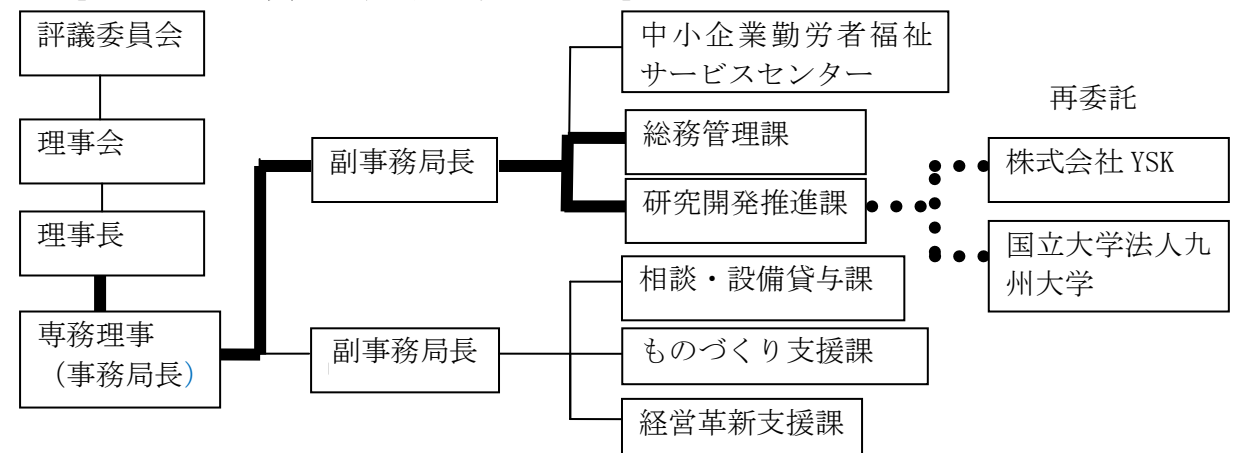
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

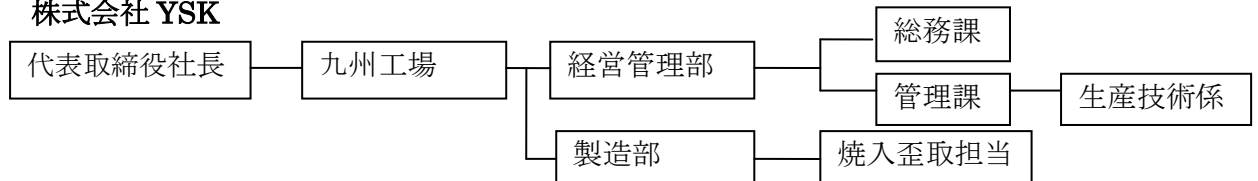
① 管理法人

【財団法人 佐賀県地域産業支援センター】

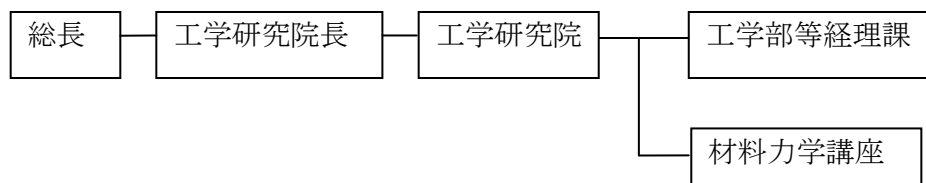


② (再委託先)

株式会社 YSK



国立大学法人九州大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人佐賀県地域産業支援センター

①管理員

氏 名	所属・役職
野田 仁 坂田英明 安田誠二 北村 玲	副事務局長（総務管理課長兼務） 研究開発推進課長 科学技術コーディネータ 主査

②【再委託先】※研究員のみ

株式会社 YSK

氏 名	所属・役職
寺澤 英樹	取締役 経営管理部長
渋谷 卓矢	生産技術係 係長
金子 貴	製造部 グループ長

国立大学法人 九州大学

氏 名	所属・役職
木田 勝之	機械工学部門 准教授
Santos, Edson Costa	機械工学部門 学術研究員

(3) 協力者

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
上田悟史	株式会社ミラック 営業課長	アドバイザー
田邊裕貴	滋賀県立大学工学部機械システム工学科 准教授	アドバイザー
田原竜夫	産業技術総合研究所九州センター 主任研究員	アドバイザー
臼井一郎	佐賀県工業技術センター 副所長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
寺澤英樹	株式会社 YSK 取締役経営管理部 部長	委員長
渋谷卓矢	株式会社 YSK 生産技術係 係長	PL
金子 貴	株式会社 YSK 製造部 グループ長	
木田勝之	国立大学法人九州大学 工学研究院 准教授	SL
Santos Edson Costa	国立大学法人九州大学 工学研究院 学術研究員	
野口正久	財団法人佐賀県地域産業支援センター 専務理事	

1-3 成果概要

(1) 20 mm及びφ30 mmシャフトの連続高周波焼入れシステムの高精度化 (株式会社 Y S K)

1) φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの微細化技術の開発

従来の技術では、1つのコイルを用いた昇温⇒保持⇒冷却の工程を 数回繰り返し微細化する。本研究ではφ20、φ30 mm丸シャフトでコイル内径を変更し、発振出力、丸シャフトの回転、移動速度、及び温度の熱処理条件を変更して得られた測定結果を基準に、特殊焼きの組織観察用試料、及び強度疲労試験用としてφ12*φ20 mmの段付シャフトを製作し、特殊焼きの強度試験片の測定データから微細化技術の最適化を図ることが出来た。

2) φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトのダブルコイル制御による微細化時間の短縮

加熱テスト用のダブルのヒートテストコイルを使用し、電流の流れ方向を変化させた2種類のコイルで材料の温度状態を測定し、さらにジャケット付コイルで材料の温度を測定すると共に、加熱後の冷却された材料温度を測定する事により、コイルの上下のコイル間の距離設定へ反映させ、冷却水の角度の状態も考慮した特殊コイルを開発し、シャフトの微細化時間を短縮できた。

3) φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの焼入れ装置の高度化に資する技術の開発

ダブルコイル開発に伴い、一段目から噴射される冷却水を二段目コイルへ影響させないエアーカーテン、温度測定システムとしてエアーカーテンの内径クリアランス、エアーの噴出し方向、エアー圧の設定、及びエアーカーテンの形状を確定した。また、一段目の冷却温度を測定するために、温度センサーを設け表面温度の測定が可能となった。これらの技術開発により、焼入れ装置の高度化を実現した。

(2) φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの焼入れ鋼の高強度化と制御システムの基礎データベース化(国立大学法人九州大学、株式会社 Y S K)

1) φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの性能管理

本研究では、コイルについては JIS 標準径φ20 mmを基準に最大径φ30 mmまでを対象

とし、この場合の焼入れ条件を基準に、コイル、硬度、組織及び強度についてデータベースを構築することを目的に研究を行った。組織の微細化に有効な高周波発振機の制御条件を把握するため、シングルコイルを用い、第1回目の熱処理から第2回目、3回目までの時間制御により、組織の微細化を評価した。その結果、焼入れ回数の増加にともない、微細化が進行することが分かった。

2) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトのデータベース構築に資する技術の開発

シャフトは回転と垂直荷重が付加される疲労によって破壊される場合が最も多い。このため、シャフトの強度については、疲労強度を指標として評価することが重要であるが、表面の摩耗強度には定量的な指標がないのが現状であり、新たに疲労試験を行う必要がある。しかしながら、従来の疲労試験機は、比較的に小型のものが主流であったため、本研究で取り組む JIS 標準径 $\phi 20$ mm の試験ができず、製品化に向けた性能を評価することが困難であった。

そこで、疲労試験機を作成し、 $\phi 20$ mm シャフトの疲労強度の測定を行った。その結果、焼入れ回数の増加とともに強度が向上することが分かった。

(3) プロジェクトの管理・運営（財団法人佐賀県地域産業支援センター）

研究推進委員会及び研究小委員会を委託期間内に各2回開催し、研究の方向付けや研究進捗状況の発表等を行い、プロジェクトマネージャーを中心に研究の方向付けや計画の見直し等を議論し、研究統括の初期の目標を達成した。また、管理法人は研究実施場所を訪問して購入物品等の確認を実施するとともに、経理処理要領や従事日誌作成などの説明会を開催し、随時参加機関に電話・メール等で予算執行について指導・助言を行って効率的な経費の運用に努めた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人 佐賀県地域産業支援センター 研究開発推進課 課長 坂田英明

- ・住所；〒849-0932 佐賀市鍋島町八戸溝 114
- ・電話；0952-34-4413
- ・FAX；0952-34-4412
- ・E-mail；h_sakata@mb.infosaga.or.jp

第2章 本論一（1）

2-1 $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mmシャフトの連続高周波焼入れシステムの高精度化

従来は、1つの高周波コイルを用い、昇温→保持→冷却という工程のみで表面の硬さを上げているが、焼入れによる組織制御には限界がある。本研究ではこれらの課題を解決するため、高周波焼入れに温度測定システムを組み入れた連続処理を行う方法を開発する。当面 JIS 標準径 $\phi 20$ mm を基準に最大径 $\phi 30$ mm までのシャフトを対象とし、ダブルコイルによる高周波熱処理の温度、保持時間、冷却時間の最適条件を見出し、連続焼き入れシステムの高精度化を図る。

2-2 目的と目標

鋼の高強度化には、一般に合金元素を添加する手法が用いられてきたが、合金元素の添加は、部品成形時の加工性の悪化、コストアップなどの問題があり、その添加量には制約があり、近年、合金価格の著しい高騰により、合金元素に頼らない高強度化が強く望まれている。合金元素の添加に頼らず鋼を高強度化するための一手法として結晶粒の微細化が考えられるが、この手法は材料の延性や靱性を損なわずに高強度化が可能であり、どのような成分の材料にも適用できるという利点があり、シャフト用軸受鋼以外にも、有効な手法と言える。

本研究では高周波誘導加熱装置による連続工程の熱処理により、鋼の結晶粒の微細化処理を行うことを目標とする。

2-3 実験方法

1) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトの微細化技術の開発

温度測定用コイルを用い、非接触温度管理システムにて $\phi 20$ mm、 $\phi 30$ mm ストレートシャフトの焼入れ温度を測定し、適正な出力を見つける。更には加熱されたシャフトの冷却スピード、冷却温度状態も温度管理システムで測定した上でダブルコイルの一段目コイルから二段目コイル間の距離位置へ反映させる。温度測定用コイルのデーターを元に、出力を設定した上で、ソリブル液温度、鋼の移動速度、回転速度の適正值を探り全ての条件の適正值で一回焼入れ、二回焼入れ、三回焼入れを実施した試験片の製作を製作する。本研究では、 $\phi 20$ mm、 $\phi 30$ mm のストレートシャフトで試験片を製作したのちに、九州大学にて組織の観察を行う。次に $\phi 12$ mm * $\phi 20$ mm の段付シャフト試験片を設計から製作し、こちらも同様に一回焼入れ、二回焼入れ、三回焼入れを行い、シャフト用ストレート往復回転疲労試験システムへセットし、強度評価を行う。

2) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトのダブルコイル制御による微細化時間の短縮

1)の結果をもとに一段目のコイル、二段目のコイル間の距離を基準でダブルコイルを製作し、更には冷却角度も考慮したダブルコイルを作る。

3) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトの焼入れ装置の高度化に資する技術の開発

2)のダブルコイル間に一段目から噴射される冷却水を二段目のコイルの加熱に影響させないように、エアーカーテンを取付け、エアーカーテンの外部よりエアーを内部へ供給し、鋼とエアーカーテンの内径よりエアーを上側方向へ噴出させ、冷却水が鋼から伝わって落ちるのを防ぐ。また、エアーカーテンへ非接触式のセンサーを固定し、一段目コイルの冷却後温度を測定する。

2-4 実験結果

(1) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトの微細化技術の開発

1) 温度測定

温度測定用コイルで丸シャフトの焼入れを行い、非接触温度管理システムを使用してシャフトの表面温度を測定した結果、以下(図 2.1) の温度分布となった。

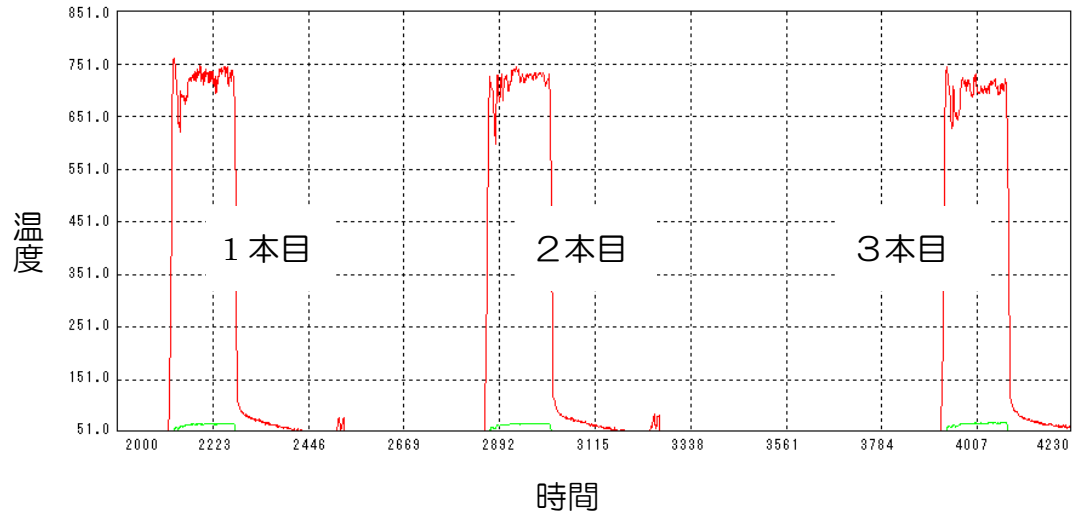


図 2.1 (シャフトの加熱温度分布)

2) 発信機出力の影響

発振機出力を変化させて、シャフトの表面温度変化状態を測定した結果、出力 150、材料温度：794～843℃が最も適当であった。

連続で数本の温度を測定した結果、図.2-1 の温度分布のグラフで表すように、上限値：843℃、下限値：794℃であり、SUJ2 の焼入れ適正温度が 800℃～850℃であるため、出力 150 が発振機の適正出力値と判断した。

3) 冷却温度の測定

加熱・冷却後の温度状態では、図.2.2 に示すように、コイルの下面を 0 点として、下面を基準として測定した温度が 116.9℃、99.5℃、79.0℃の結果となり、一段目のコイルの冷却水の噴出角度も同時に設定した。

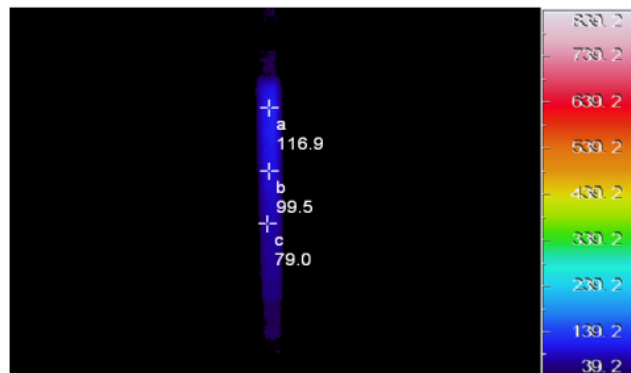


図 2.2 加熱・冷却後の鋼材の冷却温度

4) 試験片の試作

焼入れの強度評価として試験片を設計から製作までを検証しながら、各種の形状より試作を始め、最終形状として図 2.3 の形状とした。この形状で、焼き入れ条件を変更した試験片を製作し、強度疲労の評価を九大で行った。

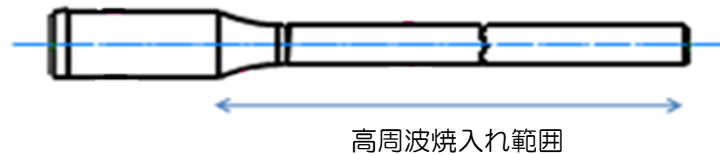


図 2.3 試作シャフト

(2) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトのダブルコイル制御による微細化時間の短縮

1) ダブルコイルの形状設定

温度観察ダブルコイル（対象径 $\phi 20$ mm）を使用し、鋼材へ加熱される温度の状態を上側及び下側のコイル温度を非接触温度管システムを使用して測定した。その結果、温度差が少ない形状を選択し、こちらのコイル形状、冷却温度の測定結果、及び冷却水の噴射角度をもとに、コイル間の距離とし、ダブルコイルを試作した。

2) ダブルコイルの製作

温度観察ダブルコイルの温度差を考慮し、コイルの温度が低いので、コイルの内径と鋼のクリアランス差をつける事で、温度差をなくしたコイルを試作した。

一般的な方法としては、一段目コイルの出力と二段目コイルの出力を単独で調整可能にする事が考えられるが、発振機が2台必要となるので、本研究では両コイルを1台の発信機で制御した。

(3) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトの焼入れ装置の高度化に資する技術の開発

1) エアーカーテンの開発

一段目の加熱部より冷却水が噴射されるソリブル液を二段目の加熱部へ影響させないように、図 2.4 のようなコイル間にエアーカーテンを設けた。試作1では、傘状に作り中央の穴から、上部方向にエアーを噴出させた。



試作 1



試作 2

図 2.4 試作エアーカーテン

試作 1 では、エアーカーテンの両側に切欠いた部分より冷却水が二段目コイルへ垂れ落ち、二段目の加熱に影響する。更には、外部的にコイル本体を冷却する冷却水等がコイルを伝わり、二段目のコイル上面へ冷却水が溜まる傾向にあるので、エアーカーテンの下面へエアーを噴出するようにエアー穴を追加し、冷却水の溜まりを減らした。この改良を試作 2 へ反映させた。試作 2 においては、水溜まりを作り 2 箇所冷却水を吐き出すようにしたが、冷却水の量が多く吐き出しが間に合わず冷却水が溜まり、逆に一段目へ冷却水が跳ね上がり、またエアーを中央より噴出しているため、エアーの流れに乗りコイル上面まで冷却水が噴上がり、この形状では不適當であった。試作 1 を改良し、一段目からの冷却水防止として、ゴム板をエアーカーテン上部へ取付けシャフトの径より 2 mm 大きめの穴を設け焼入れを実施することとした。

2) 温度測定システムの開発

エアーカーテン部分へ非接触式温度センサー（図 2.5）を固定し、エアーカーテンで冷却水を遮断してエアーカーテンの下部で冷却した鋼の温度を測定した。この時の測定温度を室温+80℃を目標とした。当初センサーのみで測定していたため、鋼の温度ではなく、一段目からの冷却水の温度を測定していた。対策としてセンサー本体の先端部分へ丸パイプ形状を取付け、外部よりエアーを供給し、パイプの先端部分より鋼に向けエアーを噴出し、冷却水の影響を減らすことができた。



図 2.5 温度センサー

2-5 研究成果と今後の課題

- (1) シングルコイルでの微細化組織の開発に成功し、引き続き ϕ 数を変えての研究を進めていく。
- (2) ダブルコイルでは、 $\phi 20$ mm、 $\phi 30$ mm ストレートシャフトの微細化に成功したが、強度評価するためダブルコイルでの試験片製作ができなかった。試験片の形状が $\phi 12$ mm * $\phi 20$ mm の段付であり、ダブルコイルの内径が $\phi 20$ mm 対応により、焼入れの適正条件を見つける事ができず、一回焼入れの試験片より強度が出ない結果となった。今後の課題として、他 ϕ 数に適したダブルコイルを開発し、強度評価するためダブルコイルでの試験片の焼入れ条件を検討する。
- (3) エアーカーテンでは鋼材とエアーカーテン内径でクリアランスが大きい場合は一段目のコイルから噴射される冷却水が鋼材を伝わり鋼材に水膜を作ってしまうことにより、二段目コイルの加熱に影響し、鋼材に硬度が入らず素材の状態と同じであった。また冷却水の噴射量に対し、エアーカーテンから出るエアー圧では鋼材とエアーカー

テン内径のクリアランスの差を補う事ができなかった。今後の課題として各φ数に対してのエアーカーテンの開発を行う。現在冷却水を止めるような構造変更を検討している。

第3章 本論一（2）

3-1 φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの焼入れ鋼の高強度化と制御システム

前記2章で行う高周波熱処理による組織制御技術の高度化のためには、高周波熱処理条件の情報化、得られる組織、強度に関するデータベース化が必要不可欠である。しかし、従来はこの情報化が行われておらず、高強度化を実施する環境が整備されていなかった。

3-2 目的と目標

従来の高温炉による微細化においては、最低、複数回の熱処理が必要とされており、前後工程が複雑で時間がかかった。本研究では、前述の2段階焼入れの最適条件に基づき、微細化を高速化するために、ダブルコイルを用いて、2つのコイル間の距離・コイル径、冷却時間、冷却水の噴射角度、鋼の上昇速度、及び回転数を加味した更なる最適化を行い、組織の微細化にかかる時間を短縮する。

シャフトは回転と垂直荷重が付加される疲労によって破壊される場合が最も多い。このため、シャフトの強度については、疲労強度を指標として評価することが重要であるが、表面の摩耗強度には定量的な指標がないのが現状であり、新たに疲労試験を行う必要がある。しかしながら、従来の疲労試験機は、比較的的小型のものが主流であったため、本研究で取り組む JIS 標準径φ20 mmの試験ができず、製品化に向けた性能を評価することが困難であった。

そこで、疲労試験システムを用いた、丸シャフトの疲労試験を行う。これにより、シャフト特有の表面近傍から壊れやすいという問題、体積効果及び表面熱処理の関係を、従来よりも効率よく把握し、川下産業が求める最終製品の焼入れ特性を体系的にデータベースとしてまとめることができる。

3-3 実験方法

（1）φ20 mm及びφ30 mm丸シャフトの性能管理

上記2-1で行う高周波焼入れによる微細化技術の高度化のためには、高周波熱処理条件の情報化、得られる組織、強度に関するデータベース化が必要不可欠である。しかし、従来はこの情報化が行われておらず、高強度化を実施する環境が整備されていなかった。本研究では、コイルについては JIS 標準径φ20 mmを基準に最大径φ30 mmまでを対象とし、この場合の焼入れ条件を基準に、コイル、硬度、組織及び強度についてデータベースを構築することを目的に研究を行う。

そこで、組織の微細化に有効な高周波発振機の制御条件の把握を行うため、シングルコイルを用い、第1回目の熱処理から第2回目、3回目までの時間制御により、組織の微細化を評価した。

試験片は、熱処理後、機械により切断し、切断面を研磨剤で研磨し、最終的に鏡面仕上げたものである。観察は、電子顕微鏡画像および、EBSD 画像により行った。

(2) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトのデータベース構築に資する技術の開発

本課題では、図 3.1 に示す疲労試験機を用いて第 1 回焼入れ焼戻し材、第 2 回焼入れ焼戻し材、第 3 回焼入れ焼戻し材の強度を比較した。

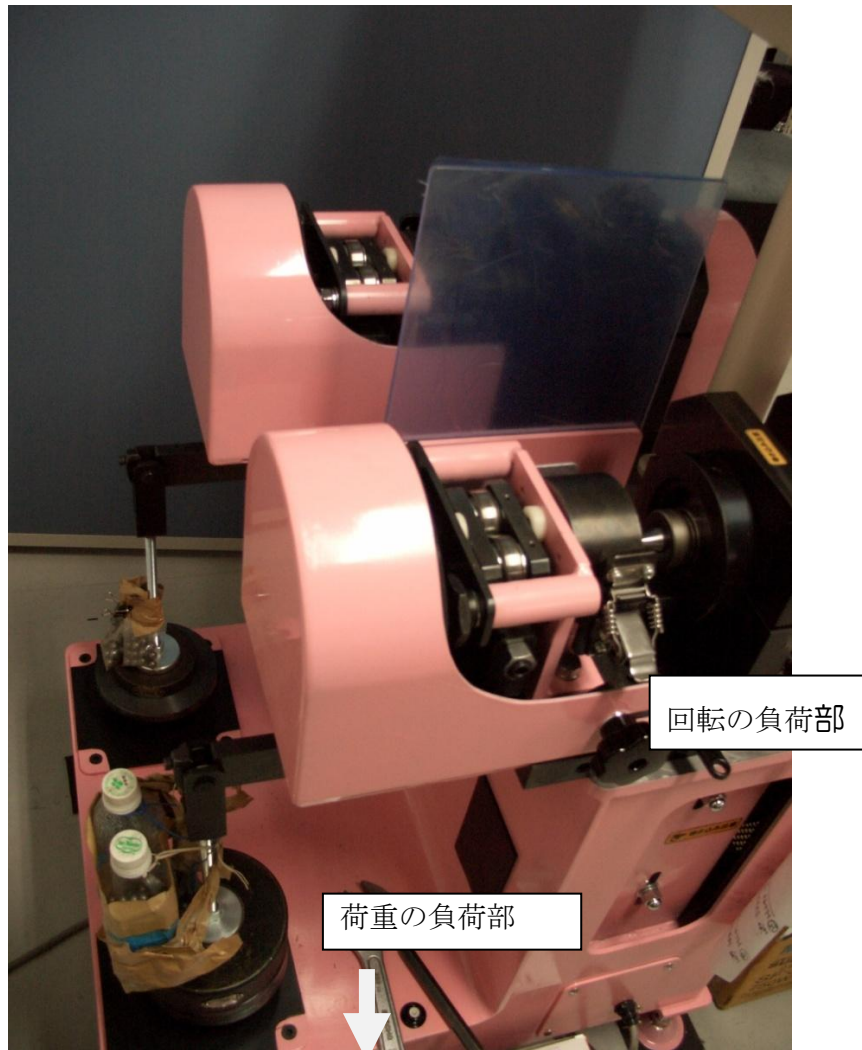


図 3.1 回転式疲労試験機

3-4 実験結果

(1) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトの性能管理

図 3.3～図 3.8 までにそれぞれ、第 1 回目の熱処理から第 2 回目、3 回目で得られた表層近傍の組織観察結果を示す。

図 3.3 から、マルテンサイト組織の確認ができる。次にその組織の構造を詳細に把握するために、FEG SEM による EBSD 観察を行った。その結果を図 3.1.4 に示す。図 3.4(a)は方位差(オイラーアングル)による結晶分離画像、(b)は緑部分と赤部分に組織を二値化処理もので、緑の部分がマルテンサイト組織、赤の部分がオーステナイト組織である。図 3.4 から、焼入れ後の組織は、マルテンサイトと残留オーステナイトであり、ほぼ均一に分散していることがわかった。

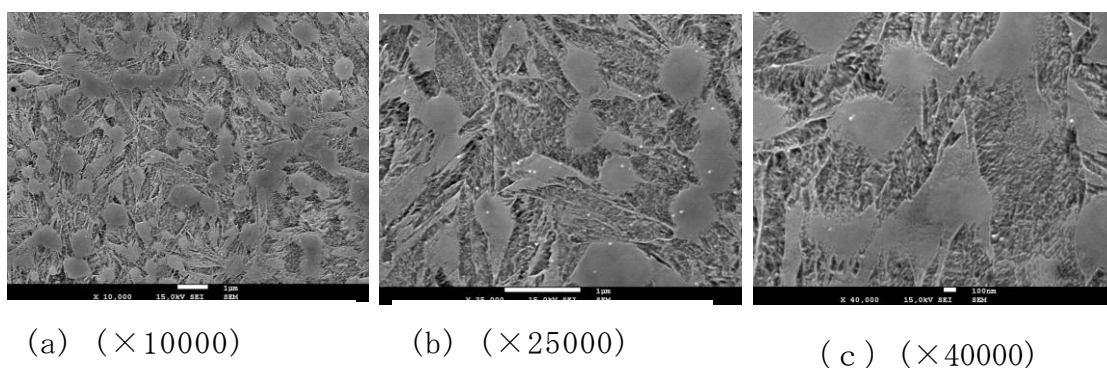


図 3.2 第 1 回目焼入れ焼戻し材の組織（電子顕微鏡像）

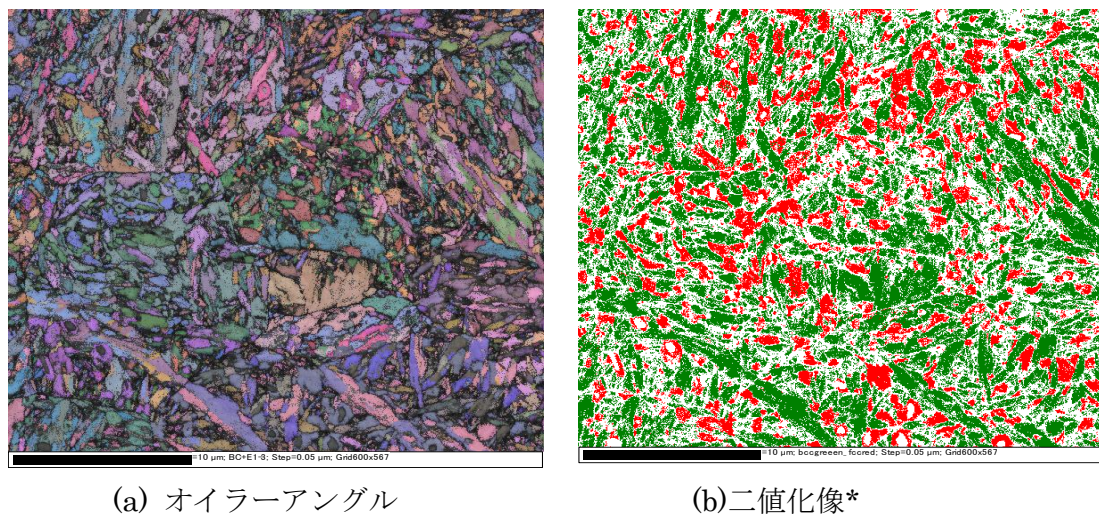
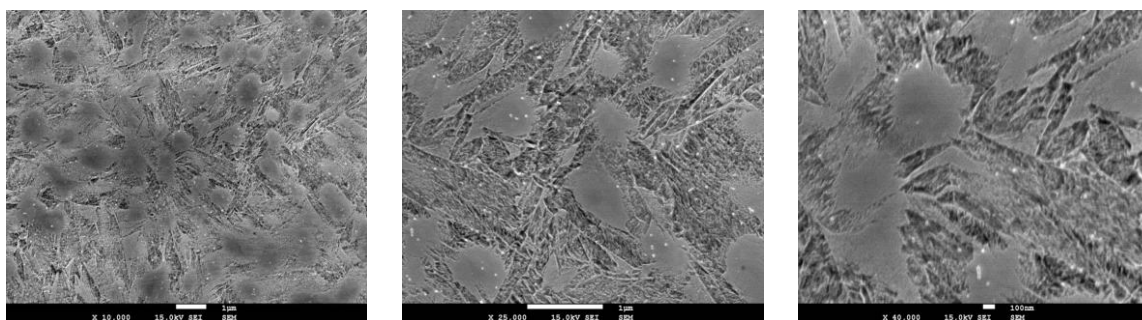


図 3.3 第 1 回目焼入れ焼戻し材の組織（EBSD 顕微鏡像）
 (緑色相： bcc マルテンサイト),(赤色相 fcc 残留オーステナイト)

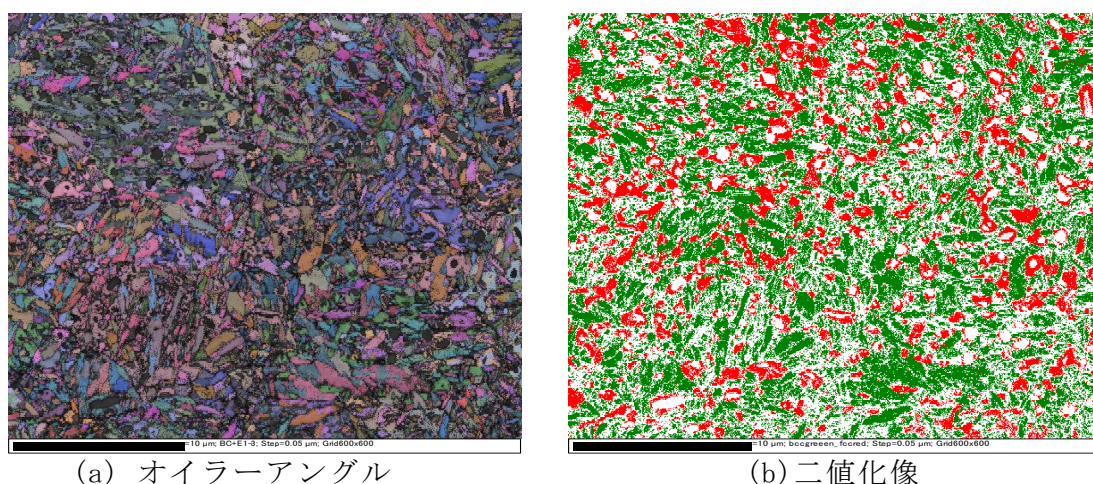


(a) ($\times 10000$)

(b) ($\times 25000$)

(c) ($\times 40000$)

図 3.4 第 2 回目焼入れ焼戻し材の組織（電子顕微鏡像）



(a) オイラーアングル

(b) 二値化像

図 3.5 第 2 回目焼入れ焼戻し材の組織（EBSD 顕微鏡像）

図 3.5 から、第 2 回目焼入れ焼戻し材の組織はち密なマルテンサイト構造であることがわかる。図 3.6 から、EBSD 観察により、第 2 回目焼入れ焼戻し材のマルテンサイト層は図 3.4 の第 1 回目焼入れ焼戻し材のからさらに微細化されていることがわかる。

次に、図 3.7 と図 3.8 に第 3 回目焼入れ焼戻し材の電子顕微鏡観察結果を示す。

図 3.7 から、第 3 回目焼入れ焼戻し材の組織は第 2 回目焼入れ焼戻し材の構造よりも微細化されていることがわかる。

EBSD 画像である、図 3.4 (a)、図 3.6(a)、図 3.8(a)のオイラーアングルはマルテンサイトの針状組織の構造変化を表している。これらの針状組織の分布を比較すると、分布形態には偏析がなく、等しく分布していることがわかる。さらに、その細さを比較すると、焼入れの回数が増えると細くなっていることがわかる。これは、図 3.3、図 3.5、図 3.7 の電子顕微鏡観察から示唆された構造変化、つまり、マルテンサイトの微細化の進行を表すものである。この結果から、微細化は焼入れ回数の増加により進行すると結論付けられる。

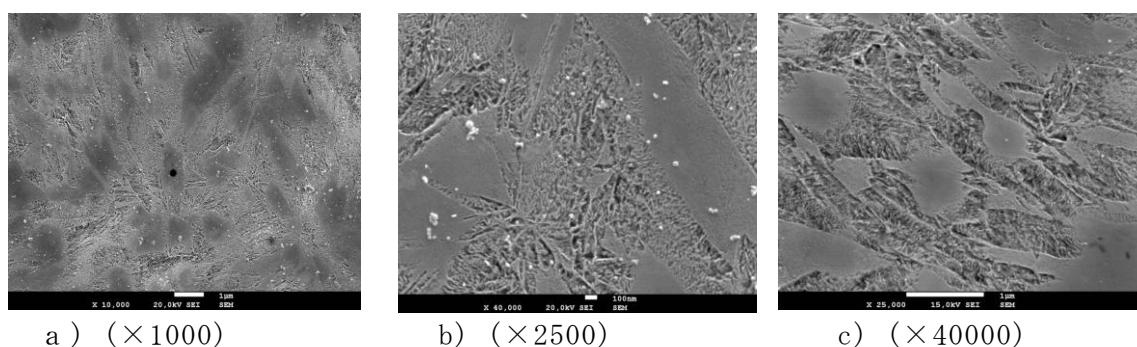


図 3.6 第 3 回目焼入れ焼戻し材の組織（電子顕微鏡像）

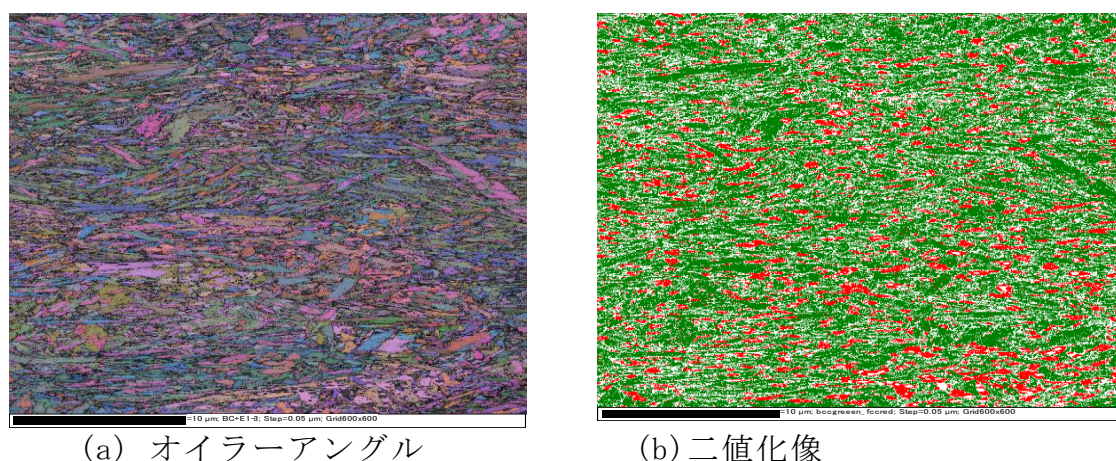


図 3.7 第 3 回目焼入れ焼戻し材の組織（EBSD 顕微鏡像）

3-5 研究成果と今後の課題

焼入れ焼戻しによる組織構造の変化を硬さ、組織、X線回折、電子顕微鏡観察(EBSD 観察)の観点から評価した。その結果、高周波焼入れを用いると、その回数を増やした場合に、旧オーステナイト粒子の微細化がおこることが分かった。マルテンサイト組織、残留オーステナイト組織の偏析も起こらないこと、さらに、これらマルテンサイト組織、残留オーステナイトは微細になりながら、分散することが分かった。

この機構をダブルコイルによる熱処理材で確かめるため、ダブルコイルで焼入れ焼戻しされた試験片とシングルコイルで 2 回焼入れ焼戻しした試験片で組織を比較した。その結果、ダブルコイルの硬化層はシングルコイルのものと同等かそれ以上であることが分かった。

複数回の熱処理材の強度を比較し、焼入れの回数が強度に与える影響を調べた。その結果、焼入れ回数の増加にともない強度が増加した。また、この特長は長寿命域でも維持された。

以上のことから、高炭素鋼の高周波による複数回の焼入れ処理は、旧オーステナイトの微細化がマルテンサイトと残留オーステナイトの微細の原因であることが分かった。

組織に続き、強度のデータベース化を行うことが認定計画の目標である。このため、

焼入れの回数と強度の関係を回転曲げ疲労試験機を用いて、破断寿命を測定することにより行った。測定は通常の疲労限度である 1.0×10^7 回までを焼入れ回数 1 回、2 回、3 回の試験片について行い、長寿命域である 1.0×10^9 回までを焼入れ回数 1 回と 3 回の試験片について行った。この結果、いずれの場合も、焼入れ回数が最も多い 3 回の試験片が最も強くなった。

以上のことから、焼入れの回数を増加させることにより、旧オーステナイト粒子の微細化と強度の増加に成功したと結論づけられる。

また、上記の結果をダブルコイルにより確かめるため、表面から内部に向かう断面上の硬さ分布を測定した。その結果、ダブルコイルでも硬さの分布が維持されることが分かった。

今後、焼入れ回数の制御と強度の関係、ダブルコイルにより作製した試験片を用いた疲労試験により強度のデータベース化を行う。

また、焼入れにはシャフトの大きさ(直径)や、その高周波条件が影響を与える。これらの影響について、特に、強度を上昇させるために必要な制御という観点からデータベース化を行う。

【顕微鏡用語の説明】

- FEG SEM: ショットキー電界放射電子銃 (FEG) を使用し、高真空、低真空の真空モードに対応した走査電子顕微鏡(SEM)で、細く絞った電子ビームを試料に照射して、試料から得られる信号を使って像を観察する顕微鏡。
- EBSD 観察: 多結晶材料の物性を知る上では、結晶粒および粒界の評価が必要であり、電子後方散乱回折像法 (EBSD : Electron BackScatter Diffraction Pattern 法) を用いることで、電子線回折法より容易にかつ広い領域の結晶情報を得ることが出来る。
- 二値化处理: カメラからの入力画像をある明るさより明るい部分と暗い部分を二色に置きなおした画像処理。
- オイラーアングル: 三次元空間中の剛体の姿勢を表現する方法のひとつ。ある座標系 (基準座標系と原点を共有する) の空間中の姿勢を、基準座標系から座標軸まわりの回転を繰り返すことで表す。

第4章 本論一（3）

4-1 研究統括、プロジェクトの管理運営

総括研究代表者及び副総括研究代表者は事業管理者と連携を取りながら、全体の研究進捗状況の把握や研究計画等の見直し、予算の配分等を研究者と討議しながら進めた。特に、進捗が遅れているサブテーマについては、原因を調べるとともに今後の進め方について助言を行った。

事業管理者である財団法人佐賀県地域産業支援センターは本プロジェクトの円滑な推進と研究の進捗管理のため、研究推進委員会及びプロジェクト会議を主催するとともに、必要に応じて特許出願の支援、技術情報の調査収集、研究機関間の連絡調整、予算等の事務管理を行った。また、中間検査や確定検査に対応するとともに、21年度の報告書のとりまとめを行った。

4-2 実施概要

1) 研究推進委員会

○第1回；平成21年12月2日、（場所；ホテルマリターレ創成佐賀、佐賀市）

委員の紹介の後、事業管理者より本委員会設置要綱や本事業の制度概要を説明し、全体の研究内容を概説した。また、サブテーマごとに21年度の研究計画を説明し、質疑応答を行った。

○第2回；平成22年3月3日、（場所；グランデはがくれ、佐賀市）

事業管理者から繰り越しが認められたこと、それに伴う経理処理の進捗状況、及び今後のスケジュール等を説明し、研究分担者から研究の進捗状況の説明の後、質疑応答を行った。

2) 研究プロジェクト会議

○第1回；平成21年11月25日、（場所；九州大学工学研究院）

事業管理者の佐賀県地域産業支援センターから(1)事業の契約書（委託契約・委託金）、(2)経理規定、(3)設備・人件費・旅費、(4)研究推進委員会規程について説明した。また、研究業務の内容については、(株)YSK及び九州大学からサブテーマ毎に今後の研究計画の内容について説明をし、意見交換を行った。

○第2回；平成22年1月25日、（場所：九州大学工学研究院）

事業の繰り越し申請の手続き及びその進捗状況を説明し、平成22年6月30日までの繰り越しを申請しており、承認された場合の今後のスケジュールについて意思統一を図った。また、購入機器や外注費等の経理処理の進捗状況を報告し、(株)YSK及び九州大学からサブテーマ毎にこれまでの研究の進捗状況を報告した。

○第3回；平成22年5月13日、（場所：九州大学工学研究院）

6月30日までの繰り越しが認められたことを受け、事業管理者から成果報告書の作成、確定検査、事後評価等のスケジュールについて説明した。また、予算執行状況、今後の支出見込みを確認し、契約期間内にすべての経理処理が終了するように意思統一した。(株)YSK及び九州大学からはこれまでの研究の進捗状況を報告し、22年度本事業の提案に向けての意見交換を行った。

3) その他の管理運営

中間検査や繰越し手続き、計画変更等のスケジュールについて随時内部打合せを行って確認した。これらの打合せ結果を踏まえて、事業管理者は繰越し申請、計画変更、特許出願の事務処理を行うとともに、中間検査や確定検査のための書類作成や検査対応を行った。また、購入物品の検収や現地確認を行った。

4－3 今後の課題と取り組み

本事業は、21 年度補正予算で進めた事業であり、研究期間も短かったので、電話やメールにより日常の連絡を密にする必要があった。また、参加企業は国の事業に初めて参加するものであり、経理処理等の経験が無く、戸惑いが見られたので管理法人が密に指導・助言した。認定を受けた残りの事業計画について平成 22 年度の戦略的基盤技術高度化支援事業に応募することとした。

第5章 全体総括

5-1 研究成果の全体総括

工作機械用シャフトの製造においては、シャフトの高耐摩耗化、高強度化とともに、高強度化における熱処理時間の短縮、省エネ化、及び適切な熱処理特性が求められている。本研究では、シャフトを構成する結晶粒の微細化技術により、短時間での高強度化、高耐摩耗化を可能とする、連続高周波焼入れシステムを開発した。このシステムは局所加熱・冷却により応力集中部を集中的に高強度化することも可能であるため、従来法に比べ、より複雑な工作機械・建設機械用大型シャフトにも適用可能である。

鋼の高強度化には、焼入れ以外にもいくつかの手法があり、その一つとして合金元素を添加する手法があるが、部品成形時の加工性の悪化、コストアップなどの問題がある。特に近年、合金価格が著しく高騰しているため、合金元素に頼らない高強度化が強く望まれている。

この点、本研究が取り組む結晶粒の微細化は、合金元素の添加に頼らず、安価な鋼であっても高強度化を実現する技術であり、材料の延性や靱性を損なわずに高強度化が可能なため、どのような成分の材料にも適用できるという利点がある。

本研究は、この結晶粒の微細化処理を行うため、連続高周波焼入れシステムを開発し、高強度シャフトの設計強度を提供することで、信頼性の高い製品を市場に提供することを目的とし、高温炉に比べ10倍以上の時間短縮技術を確立した。このため、認定計画の初年度の課題に取り組んだ。一段コイルによる複数回の熱処理による、微細化熱処理に成功し、これをダブルコイルで再現するための研究開発を行い、微細化に成功した。顕微鏡観察により、新しく開発したコイルで熱処理して得られた微細化された旧オーステナイト粒から発生したマルテンサイト組織であることを確認した。シャフト径とコイル高周波条件を最適化し、それらをデータベース化した。

5-2 サブテーマの総括

(1) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトの微細化技術の開発

従来の技術では、1つのコイルを用いた昇温⇒保持⇒冷却の工程を数回繰り返し微細化する。本研究では、 $\phi 20$ 、 $\phi 30$ mm丸シャフトでコイル内径を変更し、熱処理の条件（発振出力、丸シャフトの回転、移動速度、温度）を変更した測定データを基準に、一回、二回、三回焼きの組織観察用試料、及び強度疲労試験用として $\phi 12 \times \phi 20$ mmの段付シャフトを製作し、一回、二回、三回焼入れの強度試験片として製作し評価の基準をつくった。

(2) $\phi 20$ mm及び $\phi 30$ mm丸シャフトのダブルコイル制御による微細時間の短縮

加熱テスト用のダブルのヒートテストコイルを使用し、電流の流れ方向を変化させた2種類のコイルで材料の温度状態を確認した。さらにジャケット付コイルで材料の温度を測定すると共に、加熱後の冷却された材料温度を測定する事により、ダブルコイルの上下のコイル間の最適間隔の設定へ反映させ、冷却水の角度の状態も考慮してダブルコイルの開発を行った。

(3) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトの焼入れ装置の高度化に資する技術の開発

ダブルコイル開発に伴い、一段目から噴射される冷却水を二段目コイルへ影響させないエアーカーテン開発し、温度測定システムとしてエアーカーテンの内径クリアランス、エアーの噴出し方向、エアー圧の設定、及びエアーカーテンの形状を最適化した。また、一段目の冷却温度を測定するために、温度センサーを設け表面温度の測定を実施した。

(4) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトの性能管理

本研究では、コイルについては JIS 標準径 $\phi 20\text{ mm}$ を基準に最大径 $\phi 30\text{ mm}$ までを対象とし、この場合の焼入れ条件を基準に、コイル、硬度、組織及び強度についてデータベースを構築することを目的に研究を行った。また、組織の微細化に有効な高周波発振機の制御条件の把握を行うため、シングルコイルを用い、第1回目の熱処理から第2回目、3回目までの時間制御により、組織の微細化を評価した。その結果、焼入れ回数の増加とともない、微細化が進行することが分かった。

(5) $\phi 20\text{ mm}$ 及び $\phi 30\text{ mm}$ 丸シャフトのデータベース構築に資する技術の開発

シャフトは回転と垂直荷重が付加される疲労によって破壊される場合が最も多い。このため、シャフトの強度については、疲労強度を指標として評価することが重要であるが、表面の摩耗強度には定量的な指標がないのが現状であり、新たに疲労試験を行う必要がある。しかしながら、従来の疲労試験機は、比較的的小型のものが主流であったため、本研究で取り組む JIS 標準径 $\phi 20\text{ mm}$ の試験ができず、製品化に向けた性能を評価することが困難であった。そこで、疲労試験機を作成し、 $\phi 20\text{ mm}$ シャフトの疲労強度の測定を行った。その結果、焼入れ回数の増加とともに強度がよくなることが分かった。

5-3 今後の事業化に向けての取り組み

(1) 高強度シャフトの事業化

研究終了後、シングルコイルでの高強度化シャフトを工作機械メーカーである(株)ミラック、(株)牧野フライス製作所のスピンドル等の熱処理シャフトに応用したサンプルを出荷し、寿命の評価後、工作機械メーカー向けのスピンドル、印刷機械メーカーのロール、圧延機械メーカー向けの圧延ロール等への提案、試作を実施し、製品として販売する。また、トリプルコイル技術開発後はトリプルコイルによる高強度化シャフトを生産し、製品化し販売する。

シャフトの事業化においては、

- 1)高強度化の実現により、現状の高周波熱処理では対応できていない製品分野への進出が可能であり、売上拡大ができる。
- 2)現行の弊社の主力商品であるスライドシャフトの新商品として高強度化スライドシャフトを商品化し、既存のスライドシャフトとの機能差別化での販売拡大を狙う。
- 3)各分野の焼入シャフトの需要は高強度化、低フリクション化を実現することで、高負荷、高摩擦の条件で使用するシャフトについては、特に、今までの高価な材料を使わずに、より高性能のシャフトの実現により必ずユーザーニーズを実現できるものとして採用されるものとする。

(2) 連続高周波焼入システム

研究終了後、連続高周波焼入システムとしての評価を行い、補完研究の中で改善・改良を実施し、高周波装置メーカーに提案する。連続高周波焼入システムとして、連続高周波制御装置とトリプルコイルのシステムを販売する。既存の高周波装置にこのシステムを組み込むことで連続高周波焼入技術での微細化熱処理へのシステムアップを図る。また、既存の高周波装置にこのシステムを組み込むことで連続高周波焼入技術での微細化熱処理へのシステムアップを図る。

装置の特徴としては、

- 1)連続高周波制御装置は発振機制御、冷却制御、回転速度制御、移動速度制御など本事業の成果であるデータベース技術を活用し、条件の最適化を自動的に行うシステムにすることにより、生産性の向上、品質の安定が図られる。
- 2)トリプルコイルによる連続高周波焼入での微細化技術により、生産する焼入製品の高強度化製品を生産することができ、高付加価値製品の開発ができるようになる。
- 3)高強度、省エネ、短時間加工のメリット活かした製品作りは、総合的にエコロジー社会に適した製品づくりが実現でき、本装置の活用は社会的に大きなニーズを実現できるものとする。

今後、熱処理装置メーカーに対しライセンス付与を行い、連続高周波焼入システムを組み込んだ高周波焼入装置の開発を実施し製品化してもらう。ターゲットは直動部品メーカーなど高強度化、耐摩耗性を必要とされる製品を製造している川下産業向けに販売する。ライセンス付与のロイヤリティとして販売額の5%としている。

事業化する連続高周波焼入システムの特徴としては、

- 1)連続高周波制御装置は発振機制御、冷却制御、回転速度制御、移動速度制御など本事業の成果であるデータベース技術を活用し、条件の最適化を自動的に行うシステムにすることにより、生産性の向上、品質の安定が図られ、ナレッジ機能を強化したシステムとしての差別化が可能である。
- 2)トリプルコイルによる連続高周波焼入での微細化技術により、生産する焼入製品の高強度化製品を生産することができ、現行の高周波焼入装置とは違う高機能製品の生産が可能になり、販売分野の拡大が可能になる。