

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による
機械要素の高度化」

研究開発等成果報告書

平成25年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公立大学法人 滋賀県立大学

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（研究組織・管理体制，研究者名，協力者）	5
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11
第 2 章	サブテーマ①の研究開発成果	12
2-1	ガルバノミラーを用いたレーザ焼入れシステムの構築 （サブテーマ①-1）	12
2-2	レーザ照射部温度の計測と制御（サブテーマ①-2）	13
第 3 章	サブテーマ②の研究開発成果	14
3-1	実験方法	14
3-2	加熱によるセラミックスコーティングの特性変化に関する研究 （サブテーマ②-1）	14
3-3	基材との組合せに関する研究（サブテーマ②-2）	15
第 4 章	サブテーマ③の研究開発成果	16
4-1	レーザ焼入れによるセラミックスコーティングの高機能化に 関する研究開発（サブテーマ③-1）	16
4-2	レーザ焼入れ処理自動化システムの研究開発（サブテーマ③-2）	24
第 5 章	LCA による総合環境負荷低減（サブテーマ③-3）	28
第 6 章	全体総括	31
6-1	研究開発成果	31
6-2	研究開発後の課題・事業化展開.....	32

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

本研究開発では、高機能で高精度の鋼製セラミックスコーティング部品を実現するために、セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による新しい表面改質技術を提案し、多品種少量生産に対して低コスト、短納期で対応可能で、かつ環境にも優しい製造プロセスを確立するための各種技術を開発する。

以下では、研究開発の背景・研究目的及び目標について説明する。

1-1-1 研究開発の背景と目的

一般機械，電気機械，輸送機械，精密機械，金属製品等の高度化の要求に伴って，これらの部品の強度や耐久性等の向上及び高精度化が求められている．例えば，ニット製品を編成するコンピュータ横編み機の最新機種（図 1-1）では，編成の高速化を実現するために，ベッド上を往復するキャリッジの速度も高速化しており，ニードルの運動を司る溝カムには，高い強度と耐摩耗性，耐衝撃性が求められている．また，高品質のニット製品を生産するためには，個々の部品の高精度化が必要であり，溝カムにも高い寸法精度が要求されている．機械要素部品に対するこれらの要求に応えるべく，これまでにとられてきた代表的な方法として，1．熱処理 2．高強度材料の利用 3．セラミックスコーティングの利用 が挙げられる．しかし，これらの各方法には，それぞれに長所と短所があり，これらのうちのどれか単独の技術のみでは，川下製造業者等の抱える課題及びニーズに応えることは困難な状況にある．それぞれの技術の長所を兼ね備え，かつ短所を克服した新しい技術を開発することが必要である．

そこで本研究開発では，高機能で高精度の鋼製セラミックスコーティング部品を実現可能な新技術として，セラミックスコーティングとレーザー熱処理とを複合化した画期的な表面改質技術を研究開発し，多品種少量生産に対しても低コスト，短納期で対応可能で，かつ環境にも優しい製造プロセスを確立することを目的とする．

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化



図 1-1 コンピュータ横編み機

1-1-2 研究開発の概要と目標

1-1-1 で示した目的を達成するために設定したサブテーマの概要と、それぞれの目標を以下に示す。図 1-4 は、本研究開発の流れをまとめたものである。下記の通り、本研究開発のサブテーマは、①-1, ①-2, ②-1, ②-2, ③-1, ③-2, ③-3 の計7つから構成される。各サブテーマの実施内容ならびに目標を以下に示す。

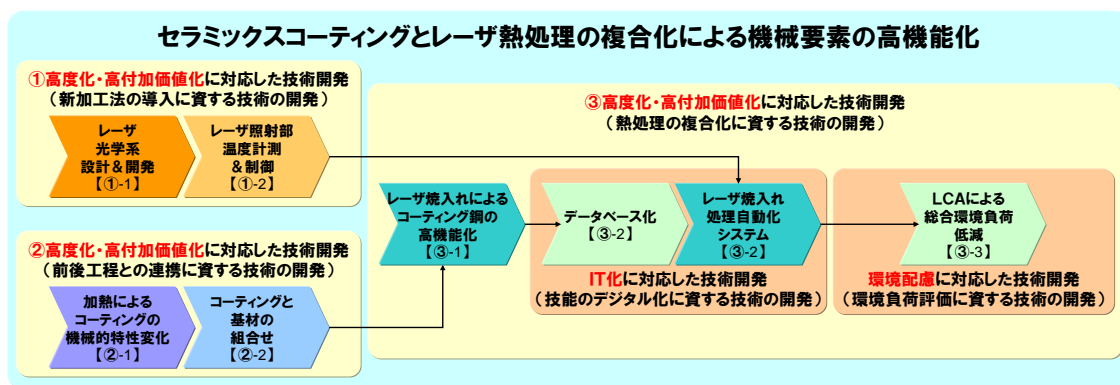


図 1-2 研究開発の流れ

①新加工法の導入に資する技術の開発(高度化・高付加価値化に対応した技術開発)

ガルバノミラーを用いたレーザー焼入れシステムの構築, およびレーザー焼入れ時の処理温度制御システムの開発を目標とする。

①-1 ガルバノミラーを用いたレーザー焼入れシステムの構築

レーザーのスキヤニングにより照射部の温度分布を高度にコントロールできるガルバノミラー

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

とロボットシステムを用いて、複雑形状品や多品種少量生産に対応可能なレーザー焼入れシステムを構築する。システムは、レーザー加工機、ガルバノミラー、ロボットシステム、および①-2の処理温度制御システムにより構成する。

①-2 レーザ照射部温度の計測と制御

均一なレーザー焼入れを実現するために、レーザー照射部温度のリアルタイム計測とフィードバック制御による処理温度制御システムの開発を目標とする。

②前後工程との連携に資する技術の開発（高度化・高付加価値化に対応した技術開発）

コーティングの各種特性とそれらのレーザー焼入れ処理に伴う変化を明らかにし、その結果を基にレーザー焼入れ処理に適したセラミックスコーティングを開発することを目標とする。

②-1 加熱によるセラミックスコーティングの特性変化に関する研究

セラミックスコーティングに関する基礎データとして、セラミックスコーティングの各種特性の加熱温度依存性を調べ、各種コーティング毎に適切な加熱温度条件を決定することを目標とする。

②-2 基材との組合せに関する研究

焼入れ温度（鋼種によって決定）と②-1の結果から、用途や使用条件に応じた、コーティングと基材の適切な組合せを決定することを目標とする。

③熱処理の複合化に資する技術の開発（高度化・高付加価値化に対応した技術開発）

③-1 レーザ焼入れによるセラミックスコーティングの高機能化に関する研究開発

各種セラミックスコーティングについて、それぞれに適したレーザー焼入れ条件の設定を目標とする。

<目標値> 評価の前提条件: 溶融、薄膜の割れ・はく離が発生しないこと

- ・基材硬さ…未被覆の場合の焼入れ硬さと同等、焼入れ深さ 0.5mm 以上
- ・密着強度…スクラッチ強度が処理前の 500% 以上
- ・膜硬さ…処理前の 80% 以上
- ・耐摩耗性…処理前の 10 倍以上

セラミックスコーティングとレーザ熱処理の複合化による機械要素の高度化

- ・摩擦係数…処理前の 50%以下
- ・処理歪み…炉焼入れ時の歪みに比べ 10%以下

さらに、溝カム、トムソンパンチの試作品を作製し、川下製造業者の協力を得て実機性能評価試験を実施する。

<目標> 川下製造業者の要求仕様を満足すること

③-2 レーザ焼入れ処理自動化システムの研究開発（技能のデジタル化に資する技術の開発（IT化に対応した技術開発）も含む）

適切なレーザ照射条件を短時間で設定するためのデータベース構築，および設定したレーザ照射条件で安定的に焼入れ処理を実行可能で，表面状態等の変化に対応してレーザ照射条件を自動修正するプログラムとシステムの開発を目標とする。

③-3 LCA による総合環境負荷低減（環境負荷評価に資する技術の開発（環境配慮に対応した技術開発）も含む）

LCA による環境負荷の定量評価，ならびに環境負荷の小さいレーザ照射条件を提示する最適熱処理条件決定システムの構築により，総合環境負荷の大幅低減を目指す。

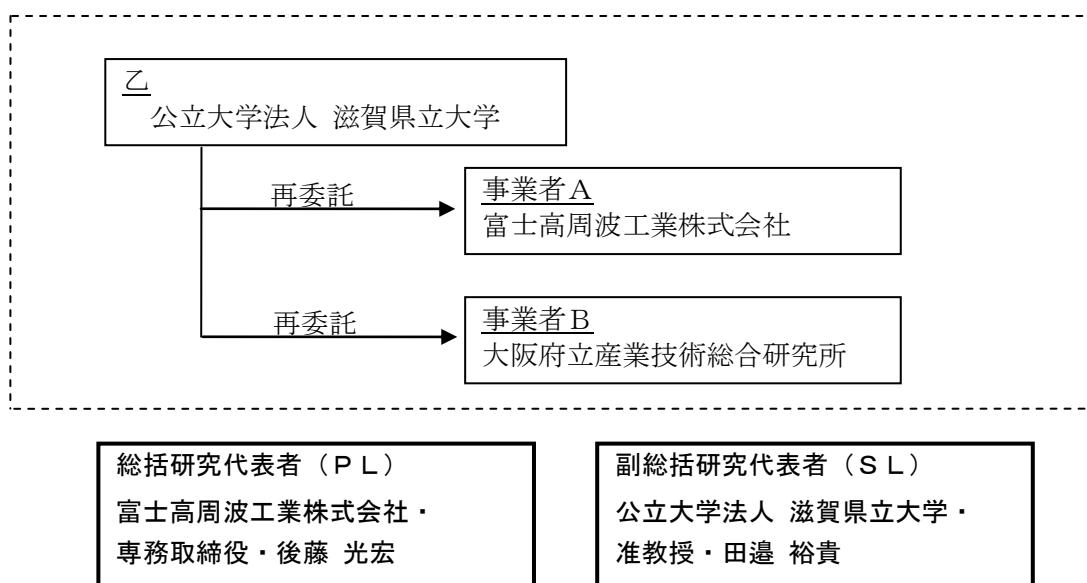
④プロジェクトの管理・運営（公立大学法人滋賀県立大学）

本プロジェクト事業が適切かつ効果的に運営され，所期の目的が達成されると共に大きな成果が得られるよう，再委託先間の情報共有化と連携に留意し，適切な経費の執行がなされるようプロジェクトの運営・管理を実施する。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制，研究者名，協力者）

1-2-1 研究組織及び管理体制

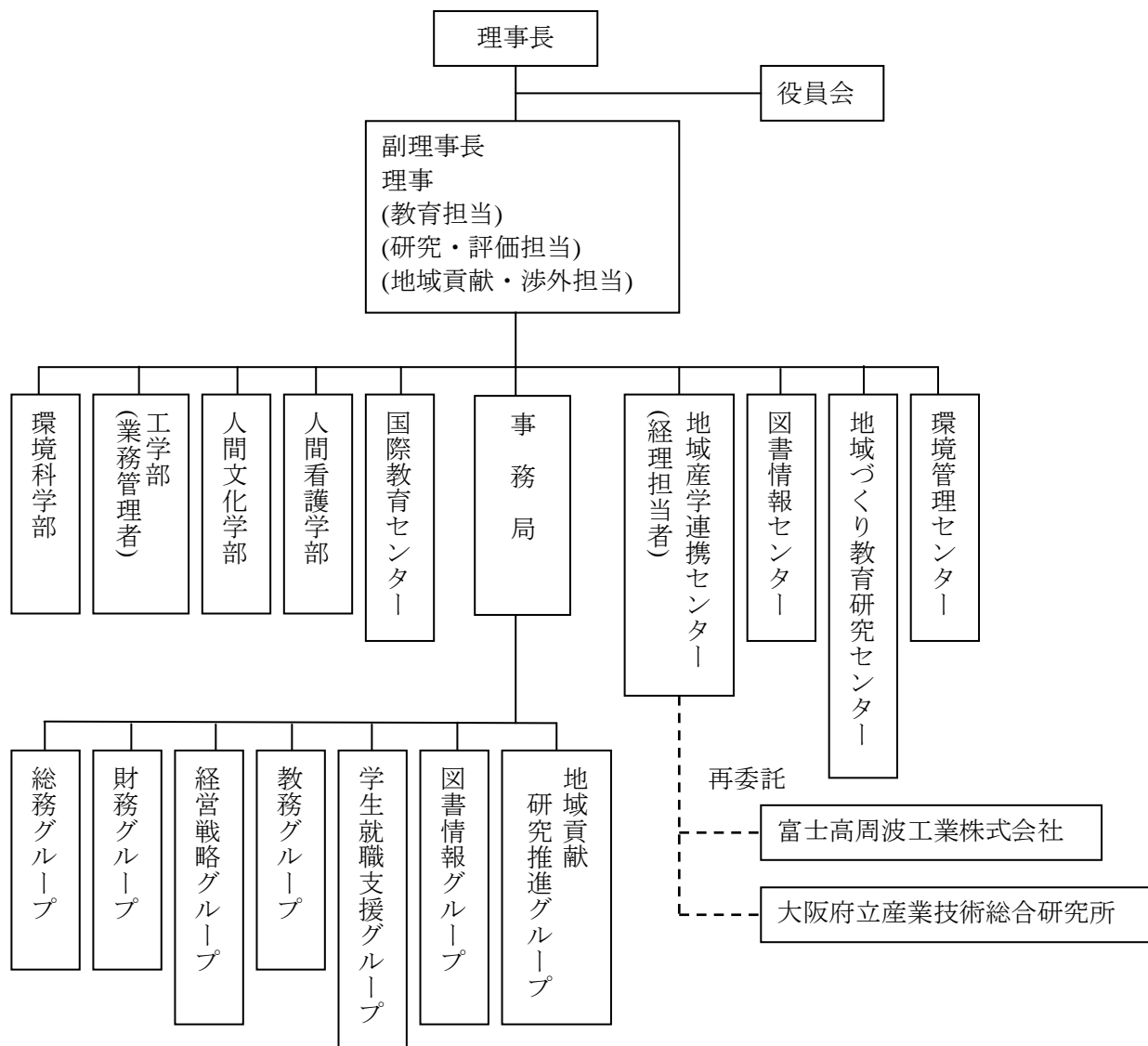
1-2-1-1 研究組織（全体）



1-2-1-2 管理体制

①事業管理機関

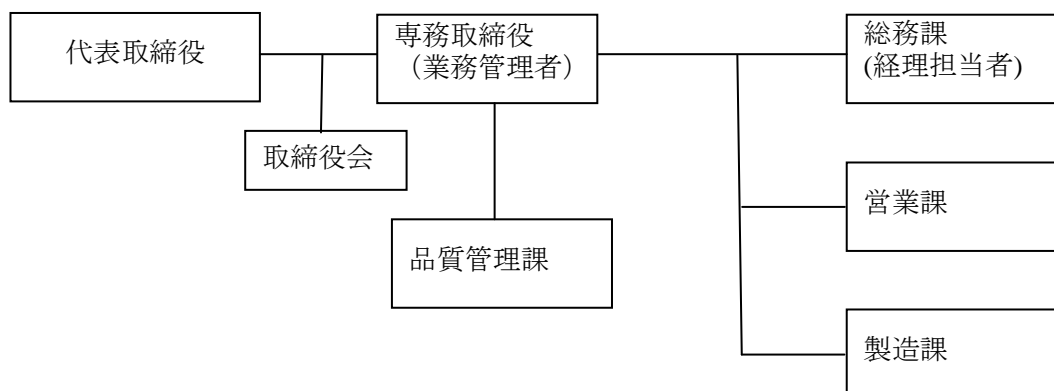
[公立大学法人 滋賀県立大学]



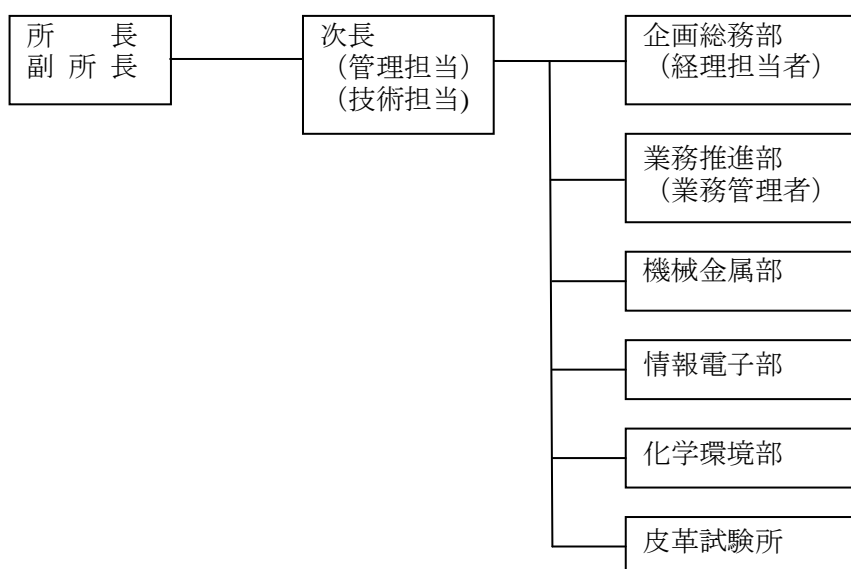
セラミックスコーティングとレーザ熱処理の複合化による機械要素の高度化

②再委託先

[富士高周波工業株式会社]



[大阪府立産業技術総合研究所]



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公立大学法人滋賀県立大学

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安田 昌司	地域産学連携センター 教授	④
青田 容明	地域産学連携センター 地域連携コーディネーター (業務契約職員)	④
小森 聡	地域貢献研究推進グループ 主査	④

セラミックスコーティングとレーザ熱処理の複合化による機械要素の高度化

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
田邊 裕貴	工学部 准教授	①-2, ②-1, ②-2, ③-1, ③-2
中川 平三郎	工学部 教授	③-1, ③-2
高松 徹	工学部 教授	②-1, ②-2, ③-1,
小川 圭二	工学部 助教	①-2, ②-1, ②-2, ③-1, ③-2
和泉 遊以	工学部 助教	①-2, ②-1, ②-2, ③-1, ③-2

【再委託先】

富士高周波工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
後藤 光宏	専務取締役	①-1, ①-2, ②-1, ③-1, ③-2
竹下 司	品質管理課 技術開発担当	①-1, ①-2, ②-1, ③-1, ③-2

大阪府立産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
萩野 秀樹	機械金属部 主任研究員	①-1, ③-1, ③-2
山口 拓人	機械金属部 研究員	①-1, ③-1, ③-2

1-2-3 研究推進委員会委員

氏名	所属・役職	備考
安田 昌司	公立大学法人 滋賀県立大学 地域産学連携センター 教授	
後藤 光宏	富士高周波工業株式会社 専務取締役	PL
竹下 司	富士高周波工業株式会社 品質管理課 技術開発担当	
中川 平三郎	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 教授	
高松 徹	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 教授	

セラミックスコーティングとレーザ熱処理の複合化による機械要素の高度化

田邊 裕貴	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 准教授	SL
小川 圭二	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 助教	
和泉 遊以	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 助教	
萩野 秀樹	大阪府立産業技術総合研究所 機械金属部 主任研究員	
山口 拓人	大阪府立産業技術総合研究所 機械金属部 研究員	
辻 靖樹	株式会社シマファインプレス 第3グループ課長	アドバイザー
高木 正博	株式会社島精機製作所 製造技術部 次長	アドバイザー
藤波 泰志	日本アイ・ティ・エフ株式会社 久世工場PVD技術課主査	アドバイザー
池田 隆果	財団法人 大阪科学技術センター ATAC	アドバイザー
和泉 康夫	株式会社 新日本テック 代表取締役社長	アドバイザー

1-3 成果概要

本研究開発では、高機能で高精度の鋼製セラミックスコーティング部品を実現可能な新技術として、セラミックスコーティングとレーザ熱処理とを複合化した画期的な表面改質技術を研究開発し、多品種少量生産に対しても低コスト、短納期で対応可能で、かつ環境にも優しい製造プロセスを確立することを目的とした。得られた成果の概要は以下の通りである。

サブテーマ①-1 ガルバノミラーを用いたレーザ焼入れシステムの構築

ワークに応じてレーザの走査パターンを高度にコントロール可能なガルバノミラーとロボットシステムを用いたレーザ焼入れシステムを開発した。また、本システム用いて、溝カム、トムソンパンチに対するレーザ焼入れ処理を行い、目標を達成した。

サブテーマ①-2 レーザ照射部温度の計測と制御

レーザ照射部温度のリアルタイム計測とフィードバック制御による処理温度制御システムを開発した。

サブテーマ②-1 加熱によるセラミックスコーティングの特性変化に関する研究

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

4 種類のセラミックスコーティング鋼に対して加熱処理を行い、密着強度、膜硬さ、耐摩耗性、薄膜の破壊強度など各種特性の加熱温度依存性を明らかにした。

サブテーマ②-2 基材との組合せに関する研究

②-1 の知見をもとに、必要とする特性に応じて、成膜後炉熱処理における適切な薄膜と基材鋼種を選択する方針をまとめた。

サブテーマ③-1 レーザ焼入れによるセラミックスコーティングの高機能化に関する研究開発

平板形状の各種セラミックスコーティング鋼について、ガルバノスキャナを用いたレーザー焼入れ実験を実施し、基材硬さ、密着強度、膜硬さ、耐摩耗性、摩擦係数、処理ひずみに及ぼすレーザー焼入れ処理の影響を明らかにした。密着強度、膜硬さ、処理ひずみについては目標を達成した。焼入れ深さ、耐摩耗性、摩擦係数については、当初目標の達成には至らなかった。

溝カム、トムソンパンチについては、試作品を作製し、実機性能評価試験を実施した。溝カムについては、試作品に対する初期の目標として川下製造業者が設定した耐久時間に関する要求仕様を満足する試作品の作製に成功した。トムソンパンチについては、目標達成には至らなかった。

サブテーマ③-2 レーザ焼入れ処理自動化システムの研究開発

レーザー焼入れ処理自動化システムを完成させ、本システムにより、設定したレーザー照射条件で安定的に焼入れ処理が実行可能であることを確認した。また、各種の薄膜と基材を組み合わせたセラミックス被覆鋼について、各種特性をコントロールするためのレーザー照射条件に関するデータベースが得られた。現状では、設定した目標の達成に至っていないが、根幹となるハードウェアとデータベースはともに完成した。

サブテーマ③-3 LCAによる総合環境負荷低減

レーザー焼入れが従来の炉焼入れよりも低環境負荷であることを定量的に明らかにした。溝カムについては、CO₂ ガス排出量 92%の低減が見込まれ、総合環境負荷としても目標値

を十分に達成できた。トムソンパンチについては、目標値が達成される見込みがあることが示された。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者：公立大学法人滋賀県立大学

住所：〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町 2500

電話番号：0749-28-8200（代表）

担当者：青田容明

地域産学連携センター 地域連携コーディネーター

電話番号：0749-28-8610, FAX 番号：0749-28-8473

E-mail：aota.y@office.usp.ac.jp

プロジェクトリーダー：後藤光宏

富士高周波工業株式会社 専務取締役

住所：〒590-0002 大阪府堺市堺区砂道町 2 丁目 2 番地 13 号

電話番号：072-229-0230, FAX 番号：072-233-7583

E-mail：laser@fuji-koushuha.co.jp

サブリーダー：田邊裕貴

公立大学法人滋賀県立大学

工学部 准教授

住所：〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町 2500

電話番号：0749-28-8380, FAX 番号：0749-28-8523

E-mail：tanabe@mech.usp.ac.jp

第2章 サブテーマ①の研究開発成果

2-1 ガルバノミラーを用いたレーザー焼入れシステムの構築（サブテーマ①-1）

本研究で開発したレーザー焼入れシステムを図 2-1 に示す。本システムは、高出力半導体レーザー、ガルバノスキャナー、ロボットシステム、ポジショナー、温度計測部、およびこれらをコントロールする制御部から構成される。高出力半導体レーザーには、最大出力 1kW の LDM1000-40（独、Laserline 製）を使用した。スキャナヘッド内には、x 軸と y 軸に対応した 2 枚のガルバノミラーがあり、ミラーの動作を制御することでレーザー光を高速でスキャンさせることが可能である。本システムでは、ロボットシステムによるレーザーヘッドの移動だけでなく、ポジショナーを用いて工作物を自動回転させることが可能であり、製品が複雑な 3 次元形状の場合でも、スキャナヘッドを高速で大角度回転運動する必要がなくなり、高精度・高速でのレーザー照射処理を行うことを可能とした。また、温度計測部には 2 色温度計を採用し、放射率が未知のワークに対しても温度測定が可能となるようにした。

本システムを使用して、実際に種々の形状のワークや、溝カム、トムソンパンチに対してレーザー焼入れ処理を実施し、表 2-1 の目標値を達成した。

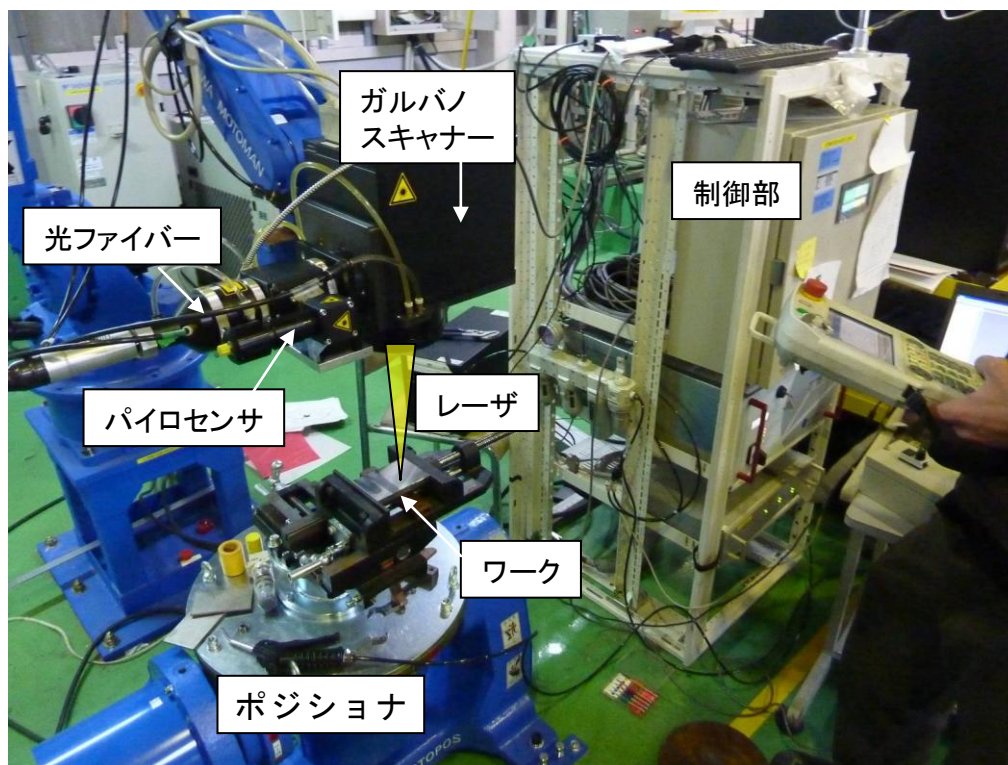


図 2-1 開発したレーザ焼入れシステム

表 2-1 目標値

ワーク	焼入れ幅	硬 度 の バラツキ	焼入深度	その他
平板	5, 10 mm	±50 (HV)	0.3~0.6mm	S50C, SCM440, SUS420J2
丸棒	外径部	±50 (HV)	0.2 mm以上	外径φ3~10
溝カム	カム面	±50 (HV)	0.3~0.6mm	ニードルとの接触面
トムソンパンチ	刃先のみ	±50 (HV)	0.2~0.5 mm	刃先のみ

2-2 レーザ照射部温度の計測と制御（サブテーマ①-2）

レーザ照射時の試料表面の温度は、焼入れ結果に大きな影響を与える。高精度なレーザ焼入れを実現するために、本研究で開発した図 2-1 のシステムに、レーザ照射時の表面温度のリアルタイム計測とフィードバック制御による処理温度制御システムを組み込んだ。

その結果、レーザー焼入れの高品質化に成功した。その効果を確認するために実施した実験結果の一例を、後の 4-2 に示した。

第3章 サブテーマ②の研究開発成果

3-1 実験方法

基材には、SK105, S50C, SCM440 の 3 種類の鋼を用いた。基材表面は、研削仕上げとした。使用した薄膜は、TiN 薄膜, CrAlN 薄膜, TiAlN 薄膜, CrN 薄膜の 4 種類である。いずれの薄膜もアークイオンプレーティング法により成膜した。

これらの試料に対して加熱処理を行い、セラミックス被覆鋼の各種特性に及ぼす加熱処理ならびに加熱温度の影響を調べた。試料の加熱には、窒素雰囲気炉を用いた。加熱温度は、760°C から 1060°C で変化させた。加熱時間は 20 分とした。冷却は、室温大気中での空冷とした。

膜硬さの測定には、超微小硬さ試験機を用いた。密着強度は、スクラッチ試験により評価した。摩耗試験には、ボールオンディスク試験機を使用した。

3-2 加熱によるセラミックスコーティングの特性変化に関する研究 (サブテーマ②-1)

以下では、サブテーマ②-1 で得られた成果をまとめるが、具体的な数値は伏せて報告する。

CrAlN 薄膜は、本研究開発で取り扱った薄膜の中で最も耐摩耗性に優れた薄膜であり、加熱によってさらにその耐摩耗性を向上させることが可能であった。また、耐熱性にも優れ、高温で加熱しても硬さが低下しにくい点も特徴であった。さらに、加熱処理によって密着強度の改善も図れた。これらの結果より、加熱処理により膜特性の向上を図るのに適した薄膜であるといえる。本研究により得られた適切な温度での加熱により、非常に優れた薄膜が得られる可能性があることがわかった。

CrN 薄膜は、CrAlN 薄膜に次いで高い耐摩耗性を示す薄膜であり、ある適切な温度での加熱により、特に優れた耐摩耗性を発揮した。ただし、それ以上の温度で加熱した場合に

は、急激に耐摩耗性が悪化するため注意が必要である。一方、CrN 薄膜において高い密着強度が得られる加熱温度では、加熱による耐摩耗性の向上効果は得られない。さらに、膜硬さは加熱温度に対してほぼ一定であった。したがって、CrN 薄膜を利用するには、その用途において耐摩耗性と密着強度のいずれをより優先すべきかを明確にし、加熱温度条件を決定する必要があることがわかった。

TiAlN 薄膜は、他に比べて全体的に耐摩耗性に劣るが、適切な温度での加熱処理により、他の薄膜と同等のレベルまで耐摩耗性を向上させることができた。それ以上の温度で加熱すると、耐摩耗性は低下するが、密着強度は加熱温度とともに向上し、ある温度で非常に優れた密着強度が得られた。したがって、TiAlN 薄膜についても、CrN 薄膜と同様、耐摩耗性と密着強度のいずれをより優先すべきかを明確にし、加熱温度条件を決定する必要があるが、特に高い密着強度が必要とされる場合には、TiAlN 薄膜を採用することが望ましい。

TiN 薄膜は、ある加熱温度範囲において、高い耐摩耗性と密着強度を兼ね備えた薄膜を得ることができた。しかし、顕著な硬さの低下が生じるため、硬さが要求される用途には適さないことがわかった。

3-3 基材との組合せに関する研究（サブテーマ②-2）

3-2 の結果を踏まえ、成膜後基材焼入れ処理によるセラミックスコーティング鋼の高機能化を図る上での、基材とコーティングの適切な組み合わせについて検討した。なお、ここでは炉熱処理による成膜後基材焼入れ処理を想定して議論を進める。

まず、高い密着強度が必要となる用途では、優れた密着強度の得られる TiAlN 薄膜の採用が適している。TiAlN 薄膜では、特に、ある温度において非常に優れた密着強度が得られた。したがって、その温度に近い焼入れ温度を有する鋼種と組み合わせるのが適切である。

次に、高い耐摩耗性が必要となる用途では、CrN 薄膜か CrAlN 薄膜のいずれかの採用が望ましい。ここで、CrN 薄膜と CrAlN 薄膜では、適切な加熱温度が異なる。それぞれの適切な加熱温度に焼入れ温度がほぼ等しい鋼種を組み合わせることで、耐摩耗性に優れたコーティング鋼を得ることができる。

なお、耐摩耗性、密着強度、膜硬さの全てを兼ね備えたコーティング鋼を得るには、総

合的に優れた特性の得られた CrAlN 薄膜を採用し、CrAlN 薄膜における適切な加熱温度で処理する必要がある。焼入れ温度が、その温度と同程度の鋼種と組み合わせることによって優れたコーティング鋼を得られると考えられる。

上記の通り、電気炉による成膜後基材焼入れ処理によるセラミックスコーティング鋼の高機能化を図る上での、基材とコーティングの適切な組み合わせに関する方針を明らかにすることができた。しかし、本年度の研究も含めて考察すると、この方針を成膜後レーザー熱処理に適用することは必ずしも適切でないこともわかった。

炉熱処理を施した場合とレーザー熱処理を施した場合とでは、加熱時間が大きく異なるため、加熱温度を考慮するのみでは、基材とコーティングの適切な組み合わせを決定することはできない。例えば、炉熱処理の場合、薄膜の硬さや破壊強度は大きく低下する場合があるが、レーザー熱処理ではほとんど低下は認められない。また、炉熱処理では大幅な向上が認められた摩擦摩耗特性も、レーザー熱処理ではほとんど効果が認められない場合があった。成膜後レーザー熱処理における基材とコーティングの適切な組み合わせは、炉熱処理のデータをもとに検討するのではなく、レーザー熱処理のデータをもとに考察する必要がある。

なお、レーザー熱処理によって生じるセラミックス被覆鋼の各種変化は明らかとなっており、この情報をもとに、用途に応じて適切な薄膜を選択し、レーザー照射条件を決定することができる。

第4章 サブテーマ③の研究開発成果

4-1 レーザ焼入れによるセラミックスコーティングの高機能化に関する研究開発（サブテーマ③-1）

4-1-1 実験方法

供試材には、SK105、S50C、SCM440、SUS420J2 の 4 種類の鋼を用いた。基材表面は、研削仕上げとした。使用した薄膜は、CrAlN 薄膜、TiAlN 薄膜、CrN 薄膜の 3 種類である。いずれの薄膜もアークイオンプレーティング法により成膜した。各薄膜をコーティングした試験片の様相を図 4-1 に示す。また最終年度には、実部品として溝カム、トムソンパンチに着目し、これらを対象とした実験も併せて実施した。



図 4-1 試験片の外観

レーザー照射には、サブテーマ①-1 で開発したシステムを使用した。本システムは、最大出力 1kW、レーザー波長 935nm の高出力半導体レーザー発振器 (LDM1000-40 レーザライン社 (独) 製) でレーザーを発振させ、光ファイバを介してスキャナヘッドに導光し、試験片に対してレーザー照射を行うことができる。スキャナヘッド内には、x 軸及び y 軸走査用の 2 枚のガルバノミラーが内蔵されており、これらのガルバノミラーを高速で動かすことで、面焼入れを行った。

図 4-2 にレーザーの走査パターンを模式的に示した。x 軸方向のレーザーの速度をスキャン速度、y 軸方向のレーザーの速度を送り速度、x 軸方向に 1 往復する時にビームが y 軸方向に進む距離をピッチとし、図に示すように、非常に短いピッチでジグザグに高速でレーザーをスキャンすることにより、擬似的に 10mm 幅のビームを形成した。送り速度はピッチとスキャン速度を変化させることにより調整し、10mm×50mm の面に対してレーザー照射を行った。

レーザーの出力は、ガルバノミラーが損傷しないよう 800W 以下とした。スキャン速度は $F=1000\text{mm/s}$ と $F=2000\text{mm/s}$ の 2 条件を設定した。ピッチは送り速度がともに 4mm/s になるように設定した。

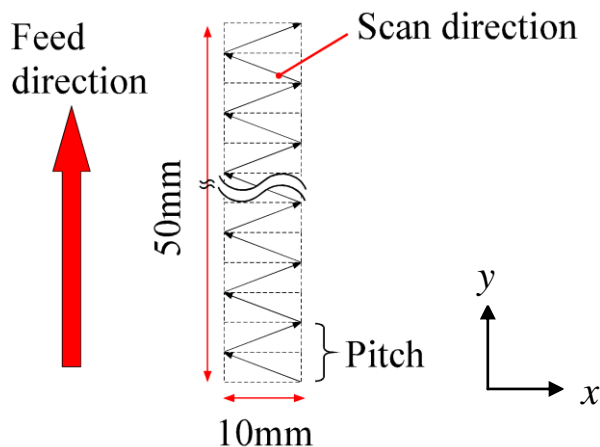


図 4-2 レーザ走査パターン

4-1-2 基材硬さ

薄膜は CrN, TiAlN, CrAlN の 3 種, 基材は SK105, S50C, SCM440, SUS420J2 の 4 種を組合せたセラミックス被覆鋼に対して, 各種条件でレーザー照射を行った. その結果得られた表面は, 基材の焼入れ硬化と表面損傷の有無にもとづいて, Type A, Type B, Type C の 3 種類に分類できた. Type A は, 基材が焼入れ硬化され, 薄膜に熔融やはく離などの損傷が確認された表面である. Type C は, 基材の焼入れ硬化, 表面損傷がともに認められなかった表面である. Type B は, 薄膜に損傷を生じることなく基材が焼入れ硬化された表面である. 結果の一例として, $F=2000\text{ mm/s}$ で基材が SK105 での結果を図 4-3 に示した. 他のセラミックス被覆鋼についても同様の実験を行い, それぞれについて焼入れ可能な条件を明らかにした.

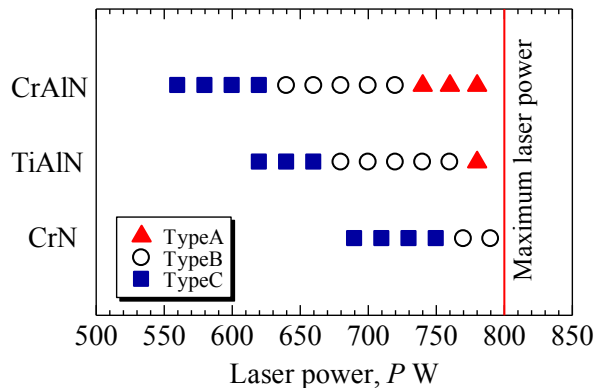


図 4-3 レーザ照射実験結果 (SK105 基材, $F=2000\text{mm/s}$)

セラミックスコーティングとレーザ熱処理の複合化による機械要素の高度化

断面のナイタル腐食により出現する金属組織（図 4-4）によって基材の硬化領域を確認し、その大きさを計測した。また、基材断面において硬さ試験を実施し、深さ方向の基材硬さ分布を測定した。図 4-4 に示すように、深さ方向の硬さ分布は、スキャン幅の中央部分の深さ 50 μm 以上の位置で測定した。例として、SK105 基材と S50C 基材の 2 種の基材に、CrAlN 薄膜を成膜した被覆鋼に対して、送り速度 $f=4\text{mm/s}$ 、スキャン速度 $F=1000\text{mm/s}$ 、出力 $P=640\text{W}$ の条件でレーザ照射した時の硬さ分布測定結果を図 4-5 に示す。同図より、SK105 基材に CrAlN 薄膜を成膜した被覆鋼で約 HV800 程度、S50C 基材に CrAlN 薄膜を成膜した被覆鋼で約 HV700 程度の基材硬さが得られた。これは、他のセラミックス薄膜を用いた場合や他の照射条件においても同様であった。JIS 規格の炭素鋼の炭素の量を参考にして、SK105 の有効硬化硬さを HV500、S50C の有効硬化硬さを HV450 とし、それぞれの有効硬化深さを求めた。同様に、各種セラミックス被覆鋼について、基材断面における硬さ分布を調べた結果、焼入れ深さは最大で 0.4mm 程度であり、目標（0.5mm）の達成には僅かに至らなかった。

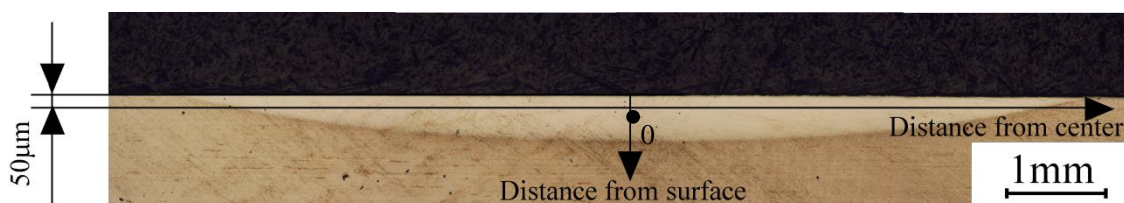


図 4-4 硬さ分布測定位置

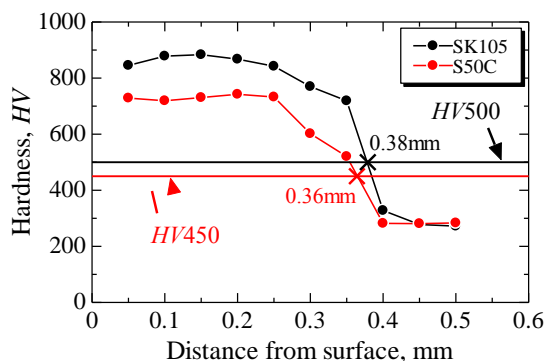


図 4-5 深さ方向の基材硬さ分布 (CrAlN, $P=640\text{W}$, $f=4\text{mm/s}$, $F=1000\text{mm/s}$)

4-1-3 密着強度

CrN, TiAlN, CrAlN の3種のセラミックス被覆鋼に対して、種々の条件でレーザー照射を行い、密着強度を測定した。密着強度測定結果を図4-6に示す。図中の線は熱処理前の密着強度の平均値を表している。いずれのセラミックス被覆鋼についても、レーザー照射を行うことにより密着強度が大幅に向上することが明らかとなった。

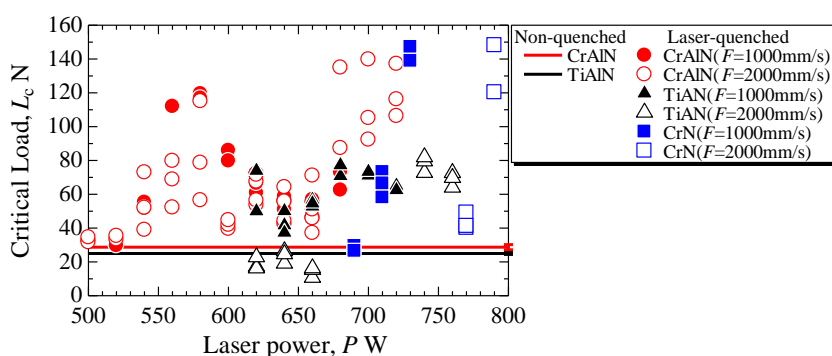


図 4-6 CrAlN 薄膜の密着強度

4-1-4 摺動特性

レーザー熱処理した各被覆鋼に対してボールオンディスク試験を実施し、摩耗過程における薄膜の摩耗量と摩擦係数の変化を調べた。摩耗量の測定結果の一例として、CrAlN 被覆鋼での結果を図4-7に示す。同図より、レーザー出力の増加とともに、摩耗量が減少することがわかる。その他のセラミックス被覆鋼についても同様の傾向が得られた。また、摩擦係数を測定した結果、レーザー照射により摩擦係数が低下する傾向も認められた。これらの結果より、レーザー照射により摺動特性の向上が図れることが明らかとなり、摺動部への本処理の適用が有効であることを示すことができた。ただし、現状では、摩耗量、摩擦係数ともに当初目標の達成には至っていない。今後、補完研究により、さらなる摺動特性の向上を目指したい。

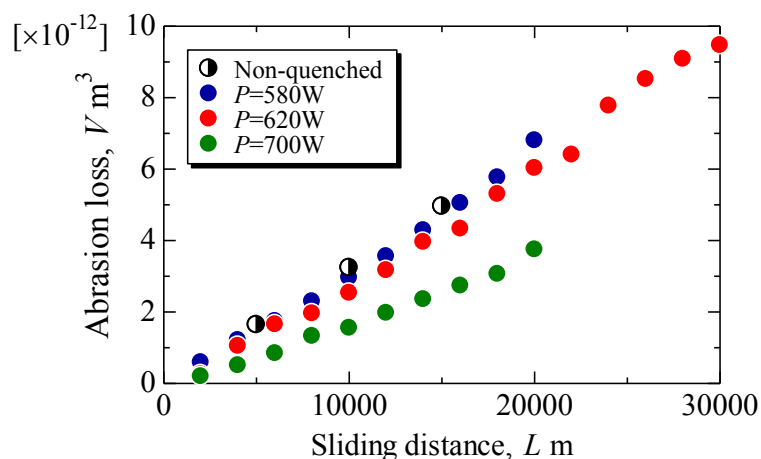


図 4-7 摩耗量 (CrAIN 被覆鋼)

4-1-5 膜硬さ

レーザー照射した各被覆鋼の薄膜の硬さを、超微小硬度計により測定した。炉熱処理を行った場合、大幅な膜硬さの低下が認められたが、レーザー照射した薄膜の硬さは、レーザー照射前とほぼ等しく、目標とした処理前の 80%以上の硬さを得ることができた。

4-1-6 溝カムの特性評価結果

SK105, S50C, SCM440, SUS420J2 の基材に、CrAIN 薄膜, TiAIN 薄膜, CrN 薄膜, ヴィーナスコート (JCC) の 4 種の薄膜を成膜した溝カムを作製し、基材硬さ, 膜硬さ, 密着強度を評価した。

図 4-8 は、レーザー熱処理後のそれぞれのカムの深さ方向における硬さ分布を示している。図の結果より、S50C 基材の被覆鋼で約 $HV700\sim750$ 程度の基材硬さが得られた。また、有効硬化深さ (有効硬化硬さは $HV450$ とした) は、いずれの被覆鋼とも当初の目標であった「 $0.3\sim0.6$ mm」を達成した。また、図 4-9 に示すように、表面近傍の硬さもほぼ均一で、目標である硬さのばらつきが「 $HV\pm 50$ 以下」も達成できた。

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

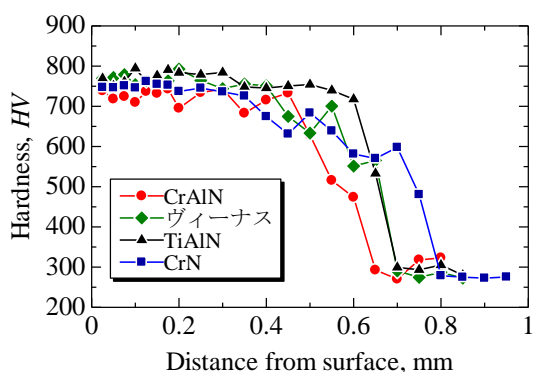


図 4-8 カムの深さ方向硬さ分布

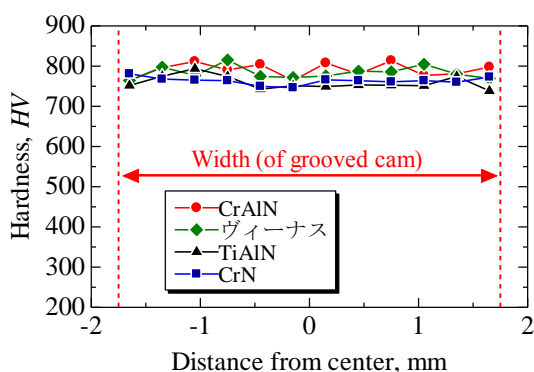


図 4-9 カムの幅方向硬さ分布

次に、CrN、TiAlN、CrAlN、ヴィーナスコート of 4 種のセラミックス薄膜を被覆したカムに対してレーザー照射を行い、それぞれの膜硬さを測定した。その結果を図 4-10 に示す。CrN 被覆カムでは膜硬さの大幅な低下が認められたが、それ以外のカムでは、レーザー照射前後で膜硬さがほぼ等しく、当初の目標である「処理前の 80% 以上」を達成できた。

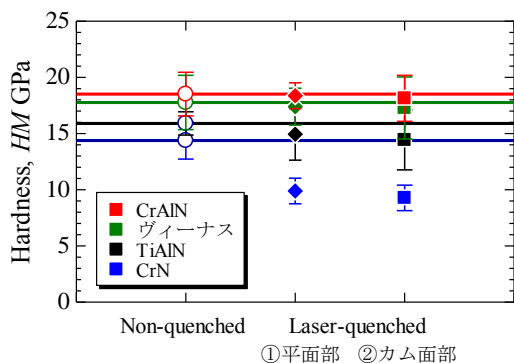


図 4-10 カムの膜硬さ

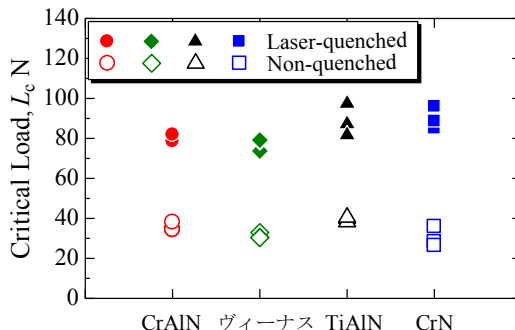


図 4-11 カムの密着強度

CrN、TiAlN、CrAlN、ヴィーナスコート of 4 種のセラミックス薄膜を被覆したカムに対してレーザー照射を行い、それぞれの密着強度を評価した。その結果を図 4-11 に示す。図中の結果は、左から順に CrAlN、ヴィーナス、TiAlN、CrN の各薄膜の密着強度を表しており、中空のプロットはレーザー未照射のカムの結果を、中塗りプロットはレーザー照射したカムの結果を表している。いずれのカムとも、当初目標の「処理前の 500% 以上」はクリアできなかったものの、レーザー照射により密着強度は大幅に向上した。

次に、薄膜、レーザー照射条件を変化させた複数の試作カムを作製し、これらに対して実

機性能評価試験を実施した。実用化に向けたより詳細かつ高度な性能評価試験への移行の可否を判断するために、川下製造業者が設定した試作品に対する要求仕様は、実機の最大編成速度下で、ある設定時間以上の耐久性を実現することであったが、本要求仕様を満足するカムの作製に成功した。さらに、目標達成後も研究開発を継続し、当初目標を上回るさらに高い耐久性を有するカムの作製の目処が立った。

ところで、本プロジェクトで試作したカムの実機性能評価試験において、カムと接触する相手材の摩耗が確認された。相手材は、表面改質処理が実施された高硬度の材料であり、従来、摩耗が生じることはなかった部品である。このような相手材に摩耗が生じたことは、本プロジェクトで試作したカムが優れた硬さを有することを証明しているが、当然のことながら相手材の摩耗は好ましくない。現在、その対策を講じたカムの試作を補完研究として進めている。

4-1-7 トムソンパンチの特性評価結果

トムソンパンチについては、膜硬さ、密着強度等の測定が困難であることから、断面における基材硬さの測定を行った。測定は、図 4-12 に示すように、刃先端から 100 μm を始点とし、図中赤矢印の方向に 1200 μm まで 100 μm ピッチで行った。図 4-13 に示すように、試験を行った 4 ヶ所全てで、刃先部の最大硬さは HV750 程度で、刃元部は HV250 程度であった。なお、従来の方法でトムソンパンチを作製した場合、このような硬さの分布を得ることは不可能である。我々の提案手法を活用すれば、刃先を焼入れにより硬化し、かつ、刃元にじん性を持たせることで高い折損抵抗を有する優れたトムソンパンチを作製し得ると期待できる。現在、この特徴を活かした、他に類を見ない新しいトムソンパンチの技術開発もあわせて進めている。

トムソンパンチについても、カムと同様、複数の試作品を作製し、携帯電話の保護フィルムなどで使われる材料を打ち抜き材として、実機性能評価試験を実施した。現段階では、現状品を上回る性能は得られていないが、実機性能評価試験の結果、解決すべき問題点が複数明らかとなった。これら問題を解決できれば、優れたトムソンパンチを作製できる可能性があるため、現在、改良品の製造方法について検討を進めている。

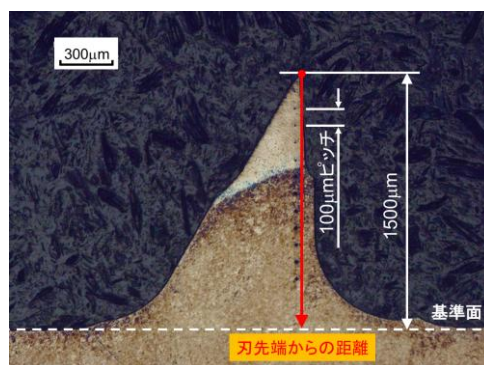


図 4-12 測定位置

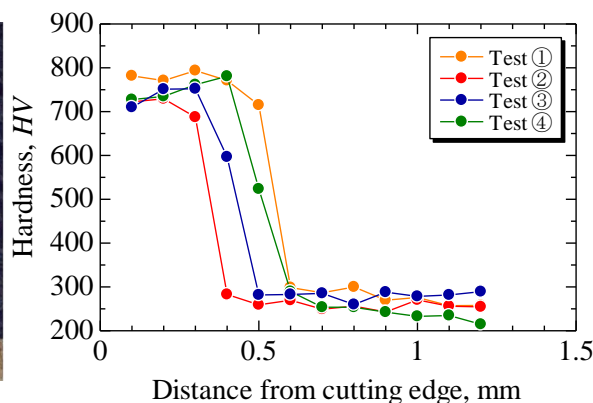


図 4-13 刃先端からの硬化分布

4-2 レーザ焼入れ処理自動化システムの研究開発（サブテーマ③-2）

レーザー照射時の試料表面の温度は、レーザー焼入れ結果に直接影響する重要なパラメータである。図 4-14 は、赤外線サーモグラフィで測定したレーザー照射時の試料表面上のある点における温度履歴である。断面観察の結果から、a や b は加熱不足により焼入れ領域が形成されない、あるいは形成されても焼入れ深さが極めて浅い状態であり、e は過加熱により表面の溶融が発生してしまう状態であることがわかった。このように、表面の温度と焼入れ結果は対応しており、レーザー照射部の表面温度が c や d の状態になるようなレーザー照射条件を設定することで良好な焼入れ結果が得られることがわかった。

しかし、実際のレーザー焼入れでは、ワークの面粗度や板厚によっても到達する温度に違いが生じるため、そのつど適正なレーザー照射条件に設定しなおす必要がある。特に同一ワーク内で、場所ごとに最適条件が異なる場合、均一な焼入れが難しくなる。このような場合に、自動で均一な焼入れを実現するために、本事業では、温度フィードバック制御を組み込んだレーザー焼入れシステムを開発した。また、実際にフィードバック制御をかけることで焼入れの均一性を高められるかどうかを検証した。

一般に、板厚の異なる部分からなるワークに対してレーザー焼入れを行うと、板厚の小さい領域では、十分な板厚があるときと比較して過剰に加熱される。ここでは、開発したシステムのフィードバック制御機能により、板厚の変化に対して出力を適正に変更できるかを検証した実験の結果を示す。

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

ワークの供試材にはSK105を使用し、ワークの板厚を10mm、5mm、2.5mmと3段階に変化させた(図4-15)。レーザーのスキャン幅は5mm、スキャン速度は1000mm/sとした。フィードバック制御無しの条件では、レーザー出力は605Wとし、フィードバック制御時の設定表面温度は900℃とした。

図4-16および図4-17にレーザー照射後の外観とレーザー焼入れを行ったワークの断面マクロ写真を示す。図4-16はフィードバック制御無し、図4-17はフィードバック制御有りでの結果である。

外観の酸化膜の状態を観察すると、板厚が10mmから5mmに減少する際には、大きな違いは見られないが、板厚が5mmから2.5mmに減少するところから、酸化膜の形成された領域が大きく広がっていることが確認された。特にフィードバック制御無しの場合には、その広がりは大きく、表面にやや溶融している領域も見られた。これは板厚が減少したことで、ワークの熱容量が小さくなり、過加熱の状態となったためと考えられる。一方、フィードバック制御をかけた場合には、酸化膜の広がりは抑えられている。

図4-18に各場所での焼入れ深さを比較した結果を示す。フィードバック制御有りの場合、フィードバック制御無しの場合と比較して焼入れ深さの変化が抑えられている。本研究で開発したシステムのフィードバック制御により、板厚が途中で変化するワークに対してより均一な焼入れが実現できた。

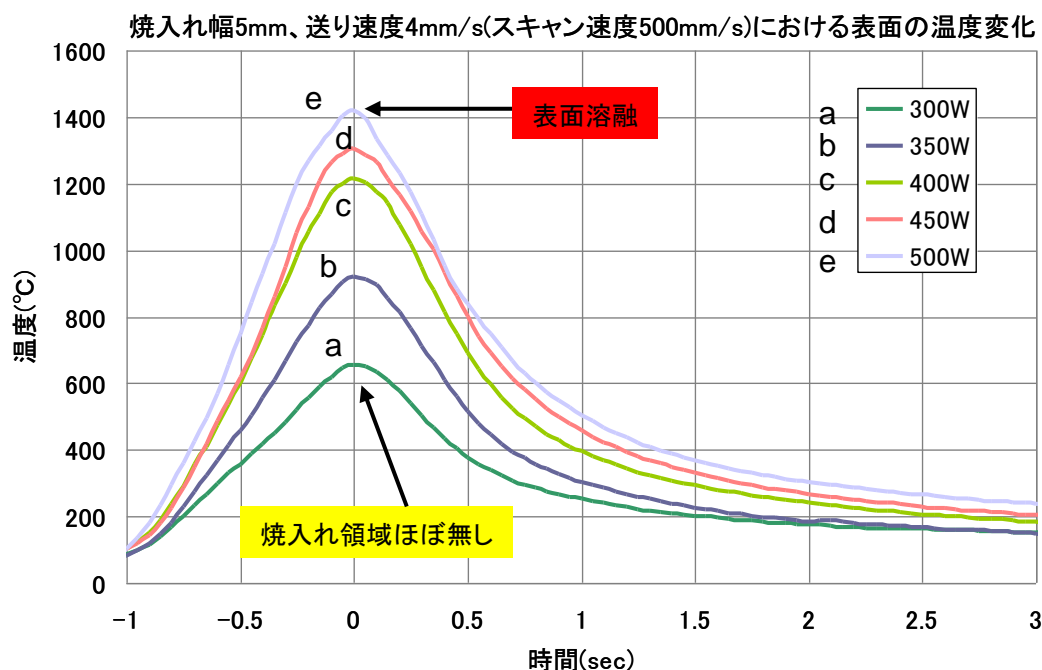


図4-14 ワーク表面上のある点をレーザー光が通過するときの温度履歴

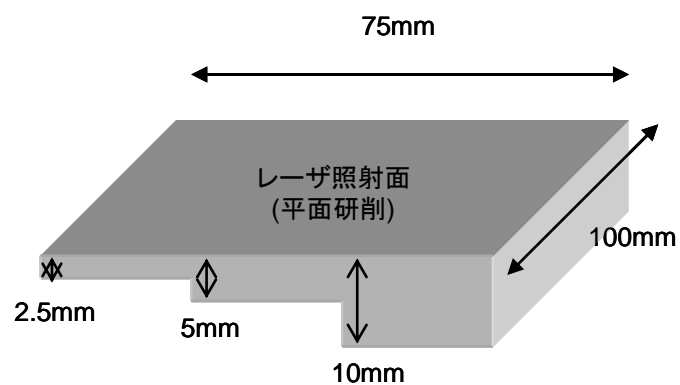


図 4-15 ワークの外観

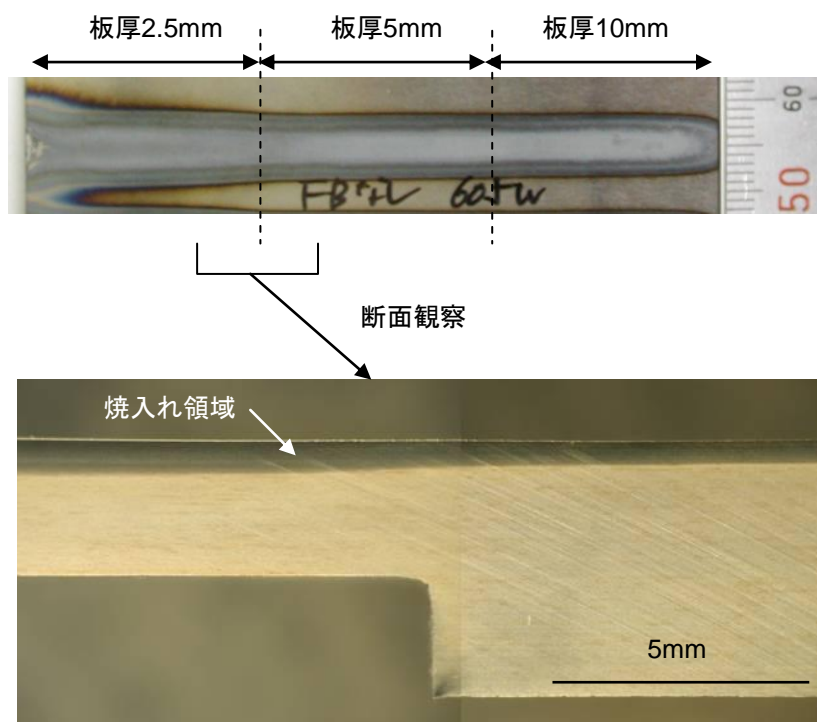


図 4-16 レーザ照射後の外観と断面 (フィードバック制御無し)

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

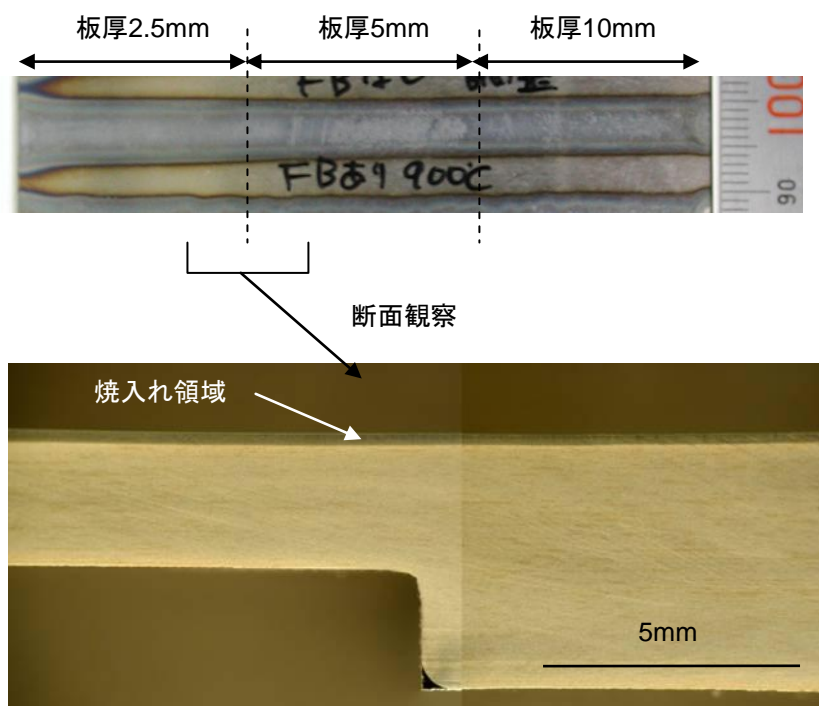


図 4-17 レーザ照射後の外観と断面（フィードバック制御有り）

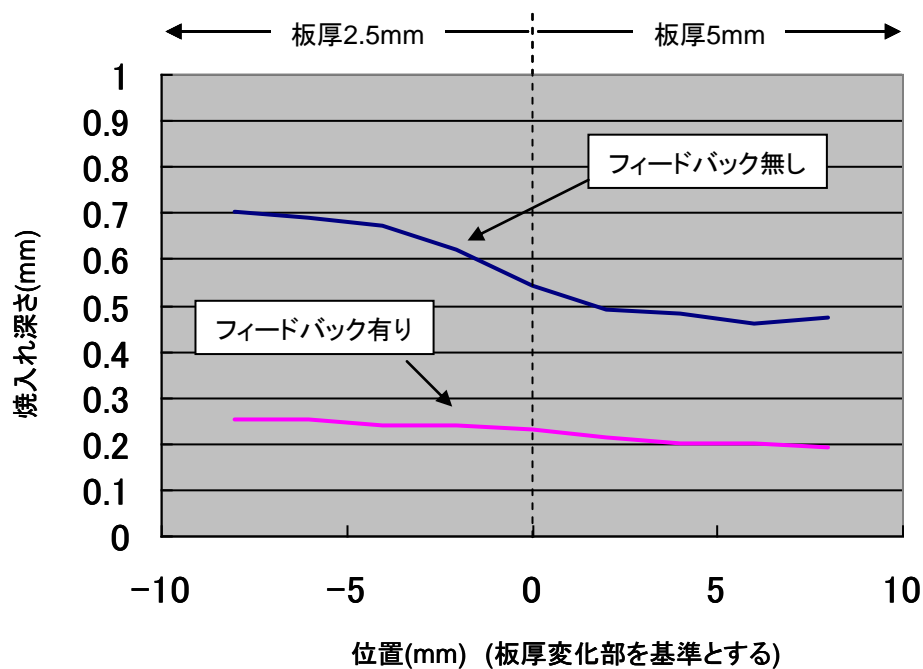


図 4-18 フィードバックの有無による焼入れ深さの変化

第5章 LCA による総合環境負荷低減（サブテーマ③）

-3)

まず、レーザー焼入れ処理と炉焼入れ処理における CO₂ ガス排出量を試算し、その結果を比較評価した。CO₂ ガス排出量 Q は、熱処理プロセスによらず式 (5-1) で算定した。

$$\text{CO}_2 \text{ ガス排出量 } Q \text{ (kg-CO}_2\text{)} = \text{CO}_2 \text{ 排出係数 } k \text{ (kg-CO}_2\text{/kWh)} \times \text{消費電力量 } P \text{ (kWh)} \quad (5-1)$$

ここで、CO₂ 排出係数 k は各電力会社が公表しているが、今回は関西電力が公表している最新の値 0.414 (H23 年度) を用いた。消費電力量 P は消費電力実測値をもとに試算した。

まず、レーザー焼入れプロセスの消費電力量の試算を行った。図 5-1 は、サブテーマ③-2 で開発したレーザー焼入れ処理システムの外観および消費電力測定の様子を示す。レーザー焼入れプロセスにおける消費電力の測定には、クランプオンハイパワーテスタを用いた。消費電力量の試算にあたっては、レーザー焼入れの特徴である部分焼入れを生かし、必要な部分のみを焼入れする方法を採用した。レーザー照射条件は、耐久試験で特に良好な結果が得られたヴィーナスコートでの条件とした。

その結果、製品 1 個あたり 0.028kWh の電力量を消費することがわかった。したがって、処理数が N 個の場合の総消費電力量 $P_{\text{Laser}}(N)$ は式 (5-2)、総 CO₂ ガス排出量 $Q_{\text{Laser}}(N)$ は式 (5-3) で求めた。

$$\text{総消費電力量 } P_{\text{Laser}}(N) = 0.028 \times N \text{ (kWh)} \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned} \text{総 CO}_2 \text{ ガス排出量 } Q_{\text{Laser}}(N) \text{ (kg-CO}_2\text{)} \\ = \text{CO}_2 \text{ 排出係数 } 0.414 \text{ (kg-CO}_2\text{/kWh)} \times \text{総消費電力量 } P_{\text{Laser}}(N) \text{ (kWh)} \quad (5-3) \end{aligned}$$

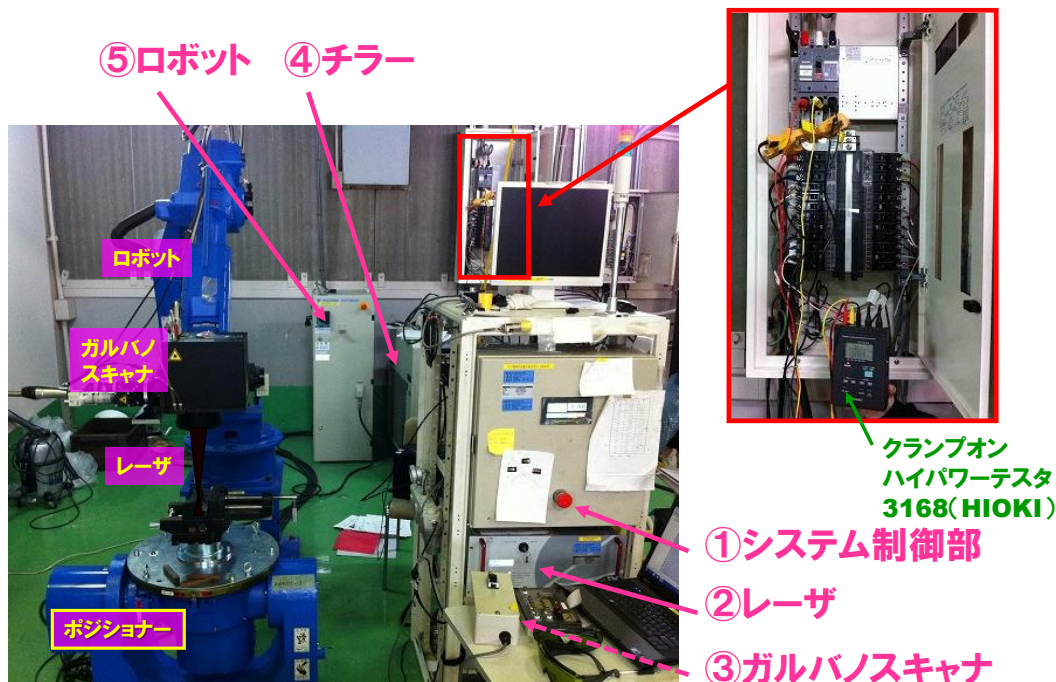


図 5-1 レーザ焼入れプロセスにおける消費電力の測定の様子

次に、炉焼入れプロセスの消費電力量を試算した。炉焼入れプロセスについては、測定の結果、1回の処理での消費電力量が 68kWh であることがわかった。川下製造業者にヒアリング調査を行った結果をもとに、本試算においては、月 1 回処理で 200 個/処理とした。

炉焼入れはバッチ処理であるから、処理数が N 個で 1 回の処理数が m 個 (今回は $m=200$) の場合の総消費電力量 $P_{\text{Furnace}}(N, m)$ は式 (5-4)、総 CO_2 ガス排出量 $Q_{\text{Furnace}}(N)$ は式 (5-5) で求めた。

$$\begin{aligned} \text{総消費電力量 } P_{\text{Furnace}}(N, m) &= 68 \times ([(N-1) \div m] + 1) \\ &= 68 \times ([(N-1) \div 200] + 1) \text{ (kWh)} \end{aligned} \quad (5-4)$$

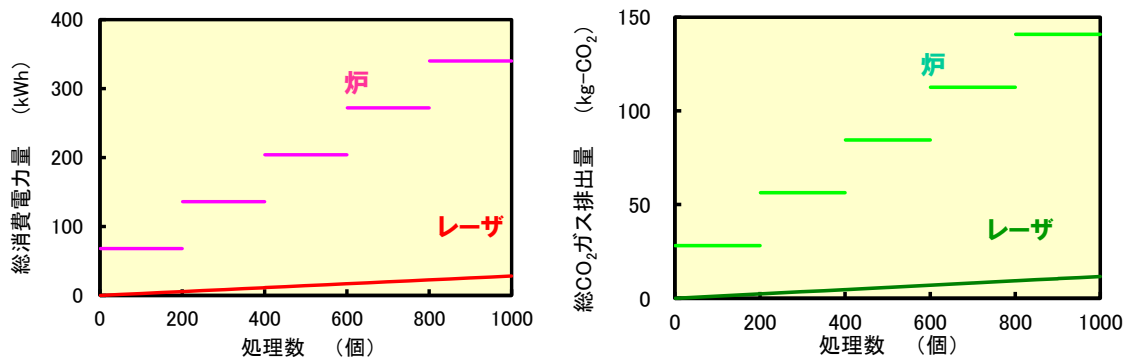
$$\begin{aligned} \text{総 } \text{CO}_2 \text{ ガス排出量 } Q_{\text{Furnace}}(N, m) \text{ (kg-CO}_2\text{)} \\ = \text{CO}_2 \text{ 排出係数 } 0.414 \text{ (kg-CO}_2\text{/kWh)} \times P_{\text{Furnace}}(N, m) \text{ (kWh)} \end{aligned} \quad (4-5)$$

※式(5-4)の $[(N-1) \div m]$ は $(N-1) \div m$ の値を越えない最大の整数を意味する (ガウス記号)。

以上の結果をもとに、処理数にともなう総消費電力量および総 CO_2 ガス排出量の変化をレーザー焼入れの場合と炉焼入れの場合で比較した。その結果を図 5-3 に示す。図 5-4 は、処理数にともなう製品 1 個あたりの消費電力量および CO_2 ガス排出量の変化をレーザー焼入

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

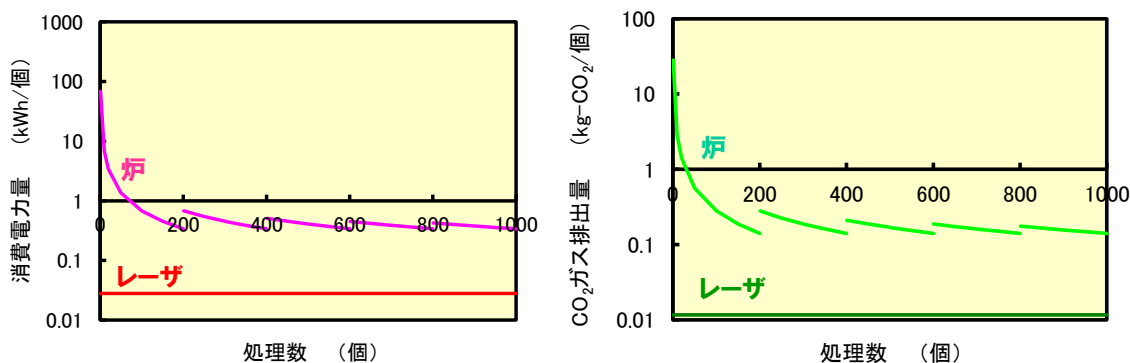
この場合と炉焼入れの場合で比較した結果を示す。同一処理数で比較すると、総消費電力量、総 CO₂ ガス排出量とも、レーザー焼入れの場合は炉焼入れの約 8% 以下と極めて少ない。



(a) 総消費電力量

(b) 総 CO₂ ガス排出量

図 5-2 総消費電力量および総 CO₂ ガス排出量



(a) 消費電力量

(b) CO₂ ガス排出量

図 5-3 製品 1 個あたりの消費電力量および CO₂ ガス排出量

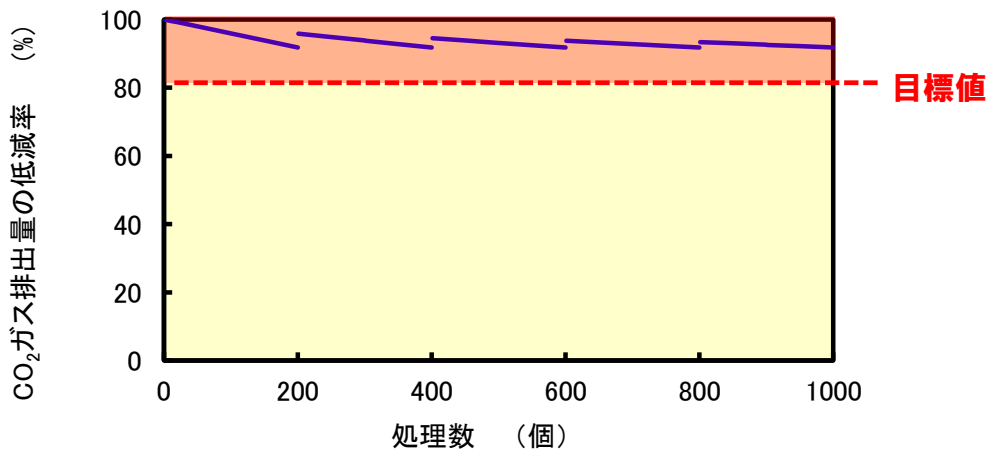


図 5-4 レーザ焼入れの CO₂ ガス排出量の低減効果

図 5-5 は、処理数にともなう CO₂ ガス排出量の低減率を示す。レーザー焼入れの場合は炉焼入れと比較して低減率が約 92% 以上であり、目標値を十分に満足していることがわかった。LCA 解析において、消費電力量が種々の環境負荷に与える影響は大きく、消費電力量が小さいことは総合的な環境負荷低減に大きく貢献することから、上記の結果により総合環境負荷も目標値を達成できることが十分に見込まれる。

以上の結果をもとに、トムソンパンチの場合について考察する。刃物として焼入れ硬化が必要な部分は、刃先のみである。刃先部分は熱容量が小さく過加熱により刃先が熔融して鈍化しやすいため、広い面積の平面処理が多い溝カムの場合と比較して、高送り速度ないし低レーザー出力での処理になる。しかも、溝カムに比べて処理面積が小さいことから短時間での処理になる。すなわち、より少ない消費電力量でのレーザー焼入れ処理になり、CO₂ ガス排出量も少なくなることが推測される。したがって、目標値を達成できる見込みは十分にあるといえる。

第6章 全体総括

6-1 研究開発成果

- (1) レーザの走査パターンを高度にコントロール可能なガルバノミラーとロボットシステム、エネルギー変換効率の良い高出力半導体レーザーからなる、レーザー焼入れシステムを開発した。
- (2) (1)のシステムを用いて、各種の薄膜と基材を組み合わせたセラミックス被覆鋼に対して、様々な条件でレーザー焼入れ処理を実施した。また、得られた被覆鋼の基材硬さ、密着強度、膜硬さ、耐摩耗性、摩擦係数、処理ひずみを詳細に調べ、これらとレーザー照射条件の関係を明らかにした。
- (3) (2)の結果をもとに、各セラミックス被覆鋼に対して、熔融、薄膜の割れ・はく離などの表面損傷を生じることなく基材の焼入れが可能で、各種特性の向上を図ることができる適切なレーザー照射条件を明らかにした。
- (4) (3)の成果をベースとし、成膜後レーザー熱処理により高度化したカムの開発・実用化を目標として、複数の試作品を作製した。また、これらに対する実機性能評価試験を実施した。その結果、試作品に対する初期の目標として川下製造業者が設定した耐久

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

時間に関する要求仕様を満足する試作品の作製に成功した。さらに、目標達成後も研究開発を継続し、当初目標を上回るさらに高い耐久性を有するカムの作製の目処が立った。

- (5) (3)の成果をベースとし、成膜後レーザー熱処理により高度化したトムソンパンチの開発・実用化を目標として、複数の試作品を作製した。また、これらに対する実機性能評価試験を実施した。現段階では、現状品の耐久性を上回る試作品の作製には至っておらず、川下製造業者の要求仕様を満足することはできなかった。しかし、従来法では不可能な、刃先の硬さと刃元の高じん性を兼ね備えたトムソンパンチを実現できる可能性を見出すことができた。また、現在の試作品の性能を改良するための方策を検討・立案した。
- (6) (1)のシステムに、レーザー照射部の温度をリアルタイム計測する温度計測部、温度計測部で測定した温度をフィードバックして安定したレーザー焼入れを実施する温度制御部を追加したレーザー焼入れ処理自動化システムを開発した。また、本システムにより、レーザー焼入れ品質の向上が図れることを確認した。
- (7) レーザー焼入れが従来の炉焼入れよりも低環境負荷であることを定量的に明らかにすることを目的に、環境負荷低減効果を試算して比較した。溝カムの現状の生産数を鑑みて試算した結果、CO₂ガス排出量92%の低減が見込まれ、総合環境負荷としても目標値を十分に達成できることが示された。しかも、今後増産されることになっても非常に高い低減効果が見込まれることがわかった。また、溝カムでの試算結果をもとに、トムソンパンチについても低減効果を考察した結果、目標値が達成される見込みがあることが示唆された。

6-2 研究開発後の課題・事業化展開

まず、我々の研究開発成果の事業化の柱は、開発した技術を利用した受託加工事業、ならびにセラミックスコーティング部品の販売事業である。本事業の特徴は、高価で加工の困難なセラミックスや粉末ハイスなどを用いた機械部品等の代替として利用可能なセラミックスコーティング部品を、低価格、短納期で供給可能なことである。

本プロジェクトの川下ユーザで、アドバイザーでもある榎島精機製作所の協力を得て、当初、事業終了後1年目を想定としていたコンピュータ横編み機用溝カムのサンプル提供を、既にプロジェクト期間内に実施した。また、試作品に対する初期の目標として島精機が設定した耐久時間に

セラミックスコーティングとレーザー熱処理の複合化による機械要素の高度化

関する要求仕様を満足する試作品の作製に成功した。これにより、実用化に向けたより細かい高度な実機性能評価試験への移行を許可頂いた。今後の補完研究により、さらに改良を加え、価格と性能の両面で、現状品を凌駕するカムを開発し、実用化を目指す予定である。

ところで、本プロジェクトで試作したカムの実機性能評価試験において、カムと接触する相手材の摩耗が確認された。相手材は、表面改質処理が実施された高硬度の材料であり、従来、摩耗が生じることはなかった部品である。このような相手材に摩耗が生じたことは、本プロジェクトで試作したカムが優れた硬さを有することを証明しているが、当然のことながら相手材の摩耗は好ましくない。表面粗さを調整したカムを試作するなど、相手材の摩耗を低減させるための対策も講じる必要がある。

開発力、技術力、製品の品質管理などにおいて産業界から高い評価を得ている島精機の製品に採用が決まれば、製品の性能・品質の絶好の PR 材料となり、実用化事例の拡大に繋がると期待できる。まずは、島精機での採用を目標として研究開発を進める予定である。

トムソンパンチについても、アドバイザーである(株)新日本テックの協力を得て、試作品の作製・実機性能評価試験を実施した。現段階では、現状品を上回る性能は得られていないが、カムと並ぶ事業化の柱として補完研究により研究開発を推進する予定である。その上で、重要な検討事項は、成膜時の高電圧印可による刃先部への影響を明らかにすること、ならびに影響が生じにくい成膜時のワークのセッティングを検討することである。本問題を解決できれば、優れたトムソンパンチを作製できる可能性があるため、成膜業者の立場からアドバイザーとして本プロジェクトに参画頂いた日本アイ・ティ・エフ(株)の協力を得て改良を図り、事業化へと繋げたい。

また、本プロジェクトで開発を進めてきたレーザー焼入れ処理自動化システムのさらなる研究開発も、事業化に向けた重要な課題である。他品種少量品を対象とした受注処理を、高品質、高効率で行うには、本システムが必要不可欠となる。既に本システムに関する特許は出願済みであり、ハードとデータベースも完成している。補完研究により本システムの早期完成を目指す予定である。

ところで、これまで展示会等に参加し、成膜後レーザー焼入れ技術を PR してきたが、その経験から、本プロジェクトの事業化規模の拡大を図る上で特に重要と考えられることは、レーザー焼入れ技術の周知である。レーザー焼入れ技術は、新しい技術ではなく学術的には既に広く認知されているが、産業界、特に本技術の川下ユーザとなる可能性が高い中小企業における認知度は、これまでの経験から判断して決して高くはない。ホームページ、展示会、マスコミなどを積極的に利用して、レーザー焼入れ技術、さらには成膜後レーザー焼入れ技術を PR する必要がある。