

経済産業省「平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業」

**「金型・治工具の耐高面圧化に資する
拡散・表面被覆融合処理技術の開発」**

研究開発成果等報告書

平成 21 年 3 月

委託者 近畿経済産業局
委託先 学校法人 龍谷大学

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	4
1-2 研究体制（研究組織・管理体制・研究員等氏名・アドバイザー）	7
1-3 成果概要	13
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	14

第2章 本論

2-1 サブテーマ1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化	16
2-1-1 窒化+浸炭融合処理	
2-2 サブテーマ2 湿式法を用いた融合処理プロセス技術の開発	18
2-2-1 窒化処理と熔融塩法の融合処理	
2-2-2 浸炭処理と熔融塩法の融合処理	
2-2-3 浸炭処理と熔融塩処理の融合による VC 膜直下母材強化層の結晶粒微細化について	
2-3 サブテーマ3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価	26
2-3-1 寸法変化の評価	
2-3-2 実証試験 電縫鋼管切断用刃物への適用	
2-3-3 その他の実証試験	
2-3-4 高面圧摺動カムへの適応を想定した耐磨耗性評価試験機の開発および高負荷環境下における成膜の評価	

第3章 総括	41
--------	----

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

近年、自動車産業・機械装置産業などの国際競争力の維持及び向上のためには、素形材部品の小型・軽量化が不可欠となっており、また、地球環境問題の観点からも部材の小型・軽量化に加え摩擦抵抗の軽減が求められている。特に自動車産業では、安全性強化及び軽量化の観点から、車体あるいは筐体等に薄い高張力鋼材やテーラードブランク材等の難加工材を使用する機運が高まっている。このような背景のもと、これらの難加工材を加工するための金型・治工具に対して高強度化と高耐久性の付与が強く求められているが、現在、熱処理・表面被覆処理のいずれにおいても、未だユーザーニーズを満たす技術は実現していない。

本研究開発では、機械装置あるいは自動車等の小型・軽量化のため、高強度化・高耐久性が要求されているプレス金型・ロール及び刃物を含む治工具などへの応用を目指し、拡散・表面被覆融合処理技術を開発することを目的とする。本研究開発において設定する技術目標値は次の通りである。①母材強化層の厚み：2 mm 以上、②表面硬さ：ビッカース硬さ 3000 以上、③拡散・表面被覆の融合化により、表面被覆層から母材内部への連続した傾斜組織・組成の実現。これらの技術目標を達成し、成形ロール・金型においては従来品(SKD11 の処理材) に対し、3 倍以上の耐久性、切断用刃物従来品においては従来品(SKH51 の処理材) に対し、5 倍以上の耐久性を実現することを目的とする。

研究の概要

本研究開発では上記目標の達成のため、熱処理技術と湿式表面被覆処理技術の融合をはかる。本アプローチは、深さ 2 mm までの浸炭窒化処理による母材表面の強化と、湿式表面被覆処理の相乗効果により、ニーズに応え得る耐高面性を実現するものである。両技術の融合は、湿式表面被覆処理の熱拡散現象により界面及びその近傍に連続した傾斜組織・組成が形成されることに着目したものであるが、単なる両技術の複合では湿式表面被覆処理時にソフトニング層が生成されることにより、表面被覆層が剥離することが明らかになっている。よって、浸炭窒化処理、湿式表面被覆処理の各プロセス技術それぞれの向上をはかるとともに、その取り組みがソフトニング層の生成防止にもつながる、革新的な浸炭窒化・湿式表面被覆融合処理技術の実現を目指す。当該技術分野では、従来、経験やノウハウに依存する傾向があったが、本研究開発においては、大学及び公設試の有する技術シーズを活用することにより、プロセス管理技術の開発をあわせて行うことにより、研究開発の加速化をはかる。

サブテーマ1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化

ーパルス浸炭窒化と相変態による組織制御技術を利用したソフトニング層生成の防止ー

((株)カオス・国友熱工(株)・龍谷大学)

本サブテーマにおいては、浸炭処理に関しシーズを有する国友熱工(株)、窒化処理に関しシーズを有する(株)カオス並びに金属材料の物性に関し知見を有する龍谷大学理工学部を中心に、母材表面層の強化と表面被覆層の形成時におけるソフトニング層の生成防止を目的とし、母材

表面に表面被覆層を形成する際に必要とされる炭素・窒素を高濃度かつ高深度まで短時間で供給し（高深度化）、かつ母材中の合金元素を、炭化物や窒化物として固定化し、強化する（高深度浸炭窒化と炭窒化物の析出）拡散技術を開発する。

平成 19 年度の研究開発においては、浸炭処理、窒化処理それぞれの処理法における制御性の向上を目指し、浸炭処理においては処理炉中のガス分析を詳細に行うことによる浸炭処理条件のオンタイムでの制御、それに伴う浸炭深さ、組織の制御性の向上を達成した。また、窒化処理においては、処理炉内への窒素－水素混合ガスの導入プロセスを改良することにより、窒化層の制御性を高めることに成功した。

平成 20 年度の研究開発においてはこれらの知見を活かし、湿式法に先立つ処理である浸炭処理、窒化処理における処理時間の短縮を図ると共に、湿式法による表面被覆層の形成時のソフトニング層生成を防止する母材表面強化層の組成分布、組織分布のさらなる最適化を実施する。特に、湿式法との組み合わせというところに主眼をおいた母材表面強化層の設計また、実用化に際しては、母材として各種の鉄鋼材料が用いられることとなるが、このような組成の異なる鉄鋼材料に応じた母材表面強化層の設計と共に、平成 19 年度に得られた成果であるプロセスの制御性を活かし、さらに、設計通りの母材表面強化処理を行い、湿式法による表面処理に供する。

本実施項目に関しては、真空浸炭法に関し独自の制御ノウハウを有している国友熱工(株)と窒化処理にシーズを有する(株)カオスが取り組む。また、浸炭中の炭化水素系ガスの分解挙動や真空中でのガスの動き、浸炭窒化の機構解析等の基礎的な検討課題に関しては、龍谷大学理工学部が、国友熱工(株)及び(株)カオスを支援し、理論化を図る。

サブテーマ 2 湿式法を用いた融合プロセス技術の開発

－L-TRD 法の応用展開による炭窒化物の析出と傾斜拡散層の実現－

(株)ケンテック・(株)カオス・龍谷大学・滋賀県

本サブテーマにおいては、母材との密着性向上と、ビッカース硬さ 3000 以上の実現を目的とし、最適な傾斜組成・組織層の設計と炭窒化物の析出を行う。

平成 19 年度の研究開発において、浸炭処理後の L-TRD 法により、従来の L-TRD 法のみでは見られていた炭素欠乏層が見られず、表面被覆層直下のソフトニング層の形成が抑制されることを明らかとした。また、同時に処理時間の大幅な短縮（同じ被覆層厚みを得るための処理時間が半減）にも成功した。

平成 20 年度は、湿式法に先立つ処理である浸炭処理、窒化処理との連携をさらにより一層深めた上での、表面被覆層から母材へ向けた組成、硬さの傾斜化の最適化を図り、また、平成 19 年度の研究開発から継続した、摺動、摩耗特性の改善を目的とした金属窒化物、炭窒化物形成プロセスの開発、熔融塩浴の状態計測による塩浴管理技術の向上にも取り組む。

実施体制としては、湿式表面被覆処理に関しシーズを有する（株）ケンテック、熱処理と表面被覆処理との融合化についてシーズを有する(株)カオス、セラミックス・金属複合材料につ

いてシーズを有し、両社の基幹となる技術開発についていずれも技術支援を行った経験を有する龍谷大学理工学部、及び、複合炭窒化物の高精度測定に関しシーズを有する滋賀県を中心として実施する。

サブテーマ3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価

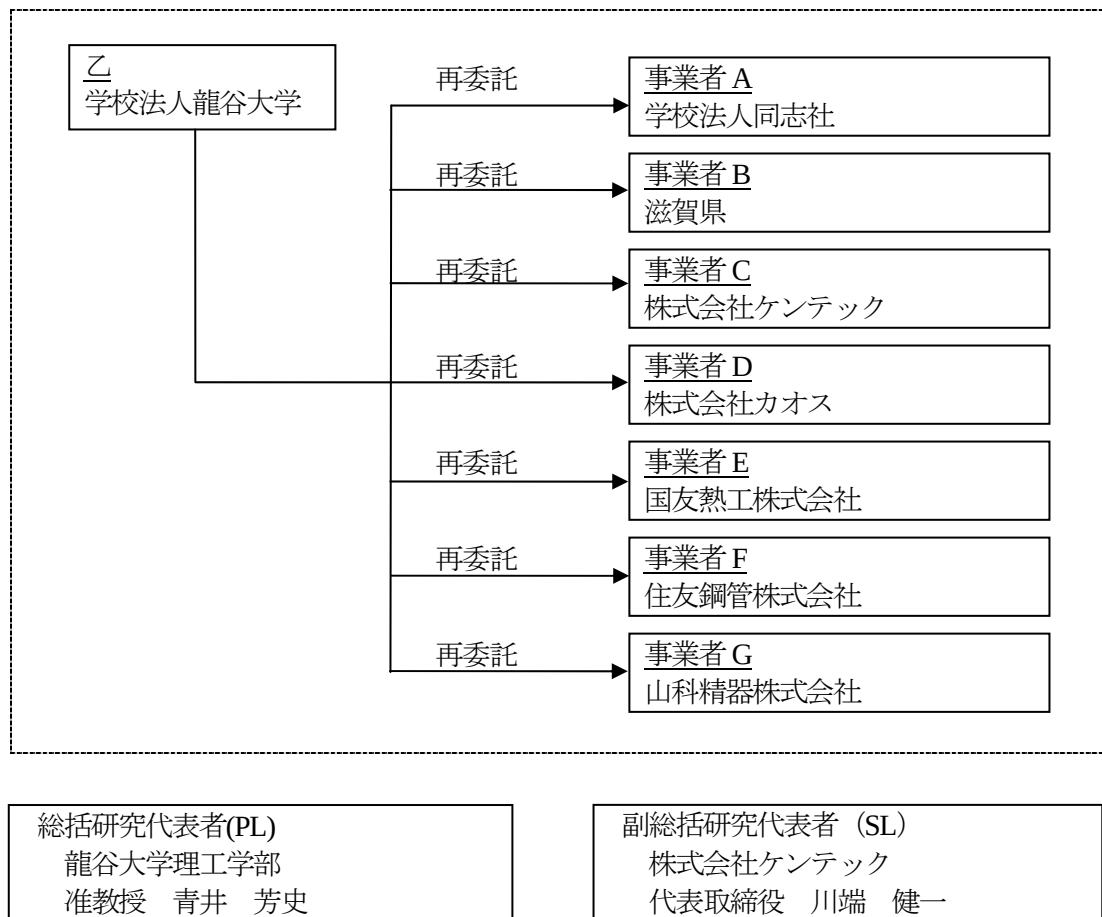
(住友鋼管(株)・山科精器(株)・同志社大学・滋賀県)

本サブテーマでは、評価技術の確立と、基礎特性及び実用特性の評価を、研究開発の進捗状況に鑑み適宜行うものとする。

平成20年度は、平成19年度においてすでに一部始めている、住友鋼管(株)における電縫鋼管製造工程における切断用刀物への本研究開発で得られた成果の適用、および、その他の各種事項具への実証評価をさらに進めて実施する。これらの実証評価により、実用上の課題等の洗い出しを行い、サブテーマ①、②へのフィードバックを行う。また、山科精器(株)及び滋賀県において、サブテーマ①、②で得られた処理品の高面圧下での摩擦摩耗評価の検討を実施する。

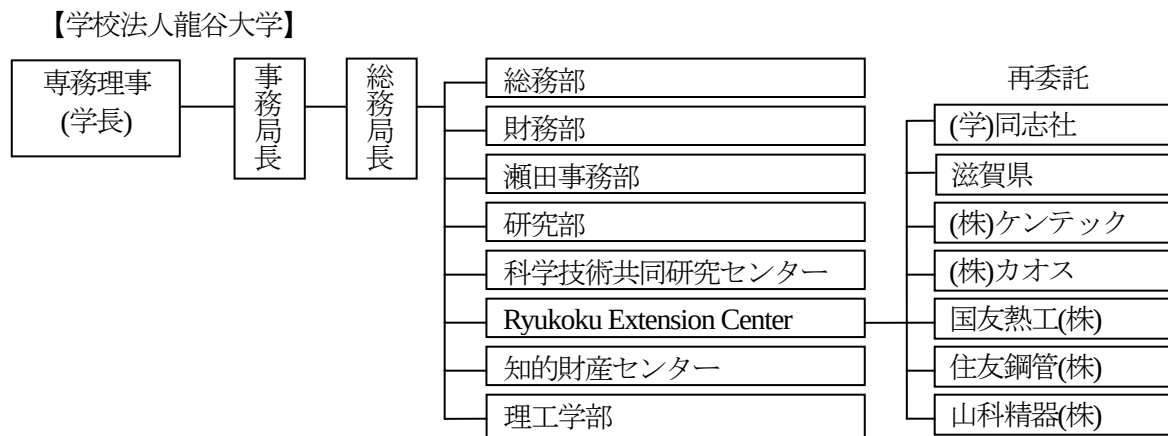
1 - 2 研究体制

(1) 研究組織



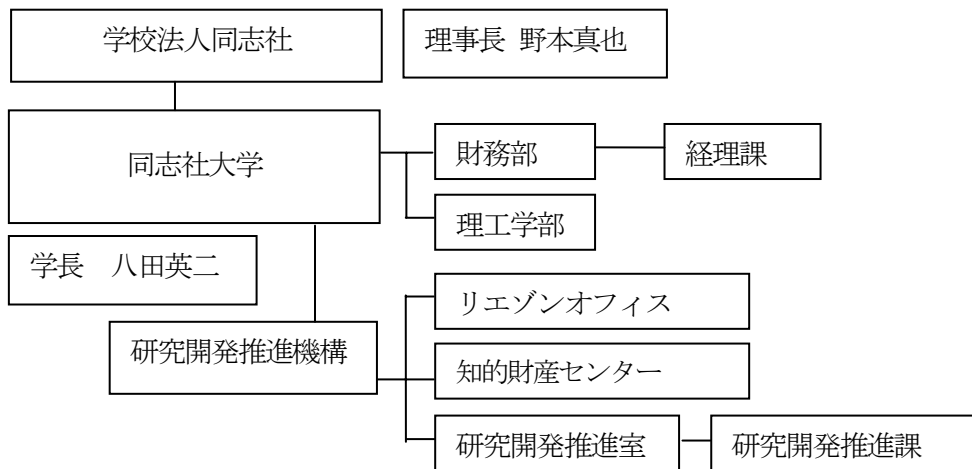
(2) 管理体制

①事業管理者

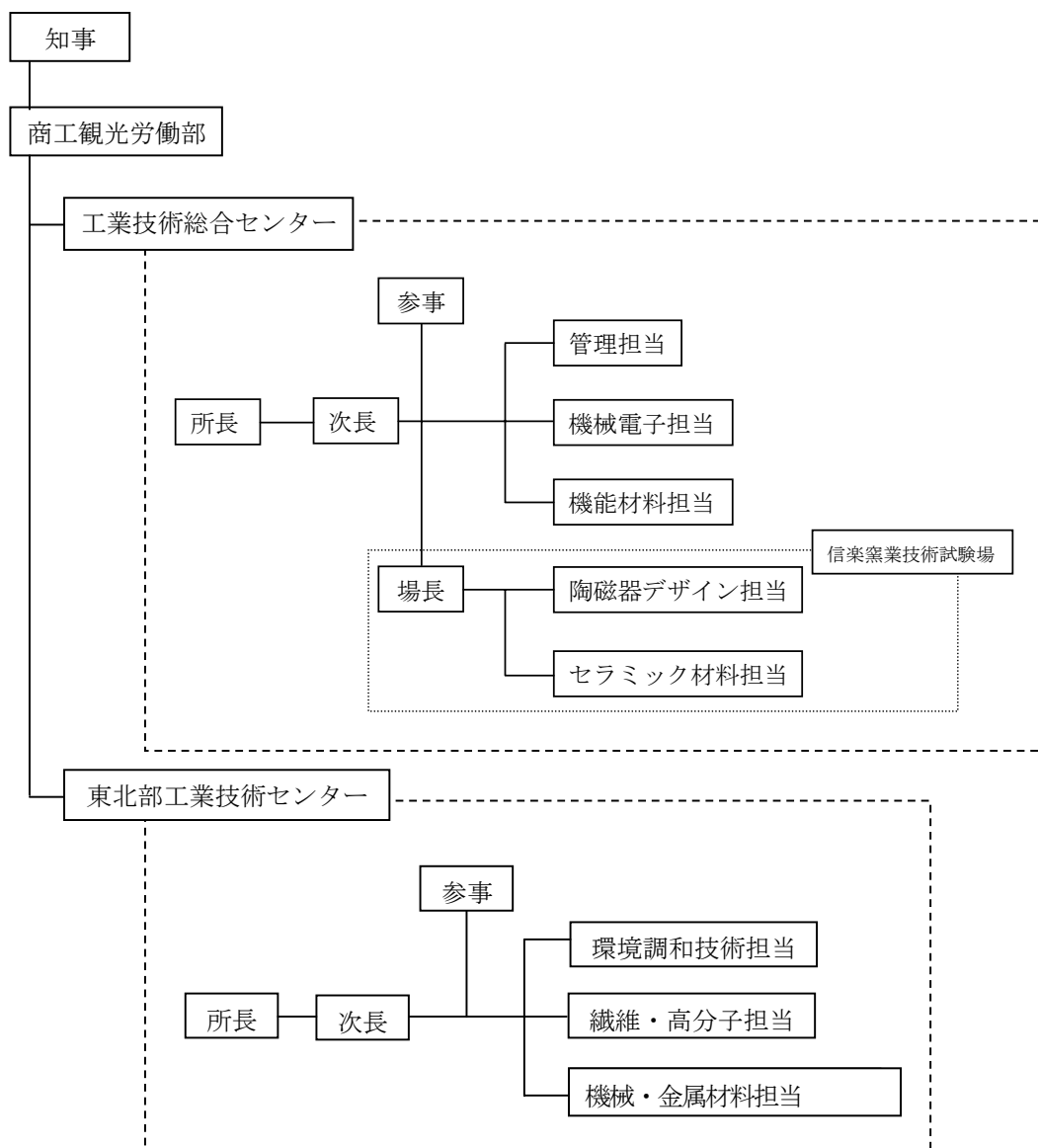


②再委託先

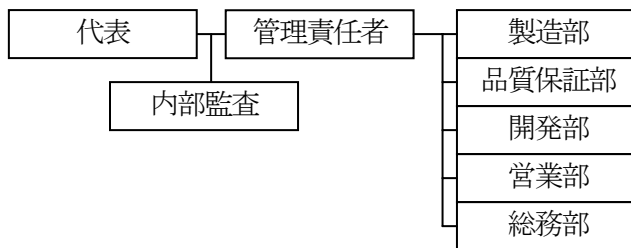
【学校法人同志社】



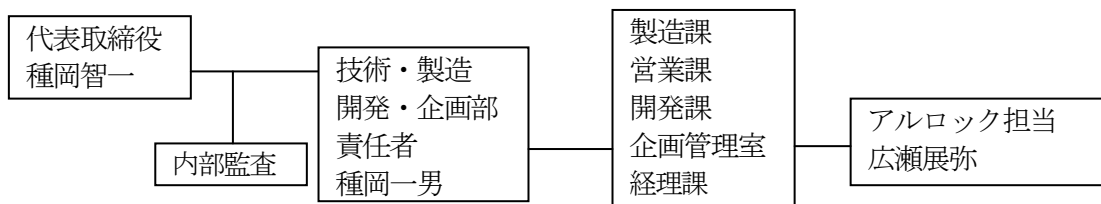
【滋賀県】



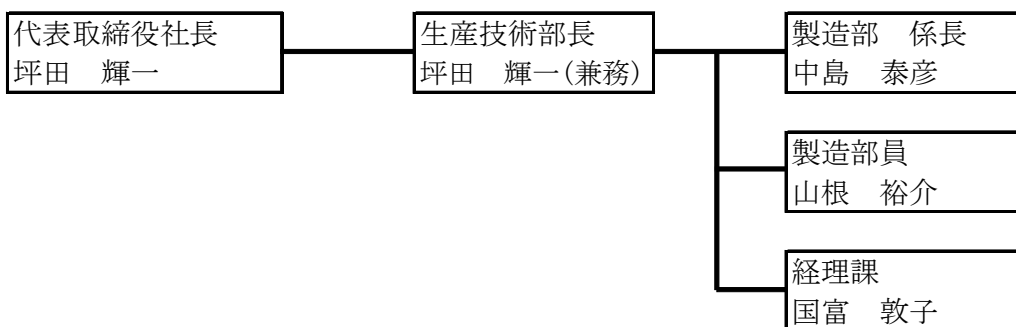
【株式会社ケンテック】



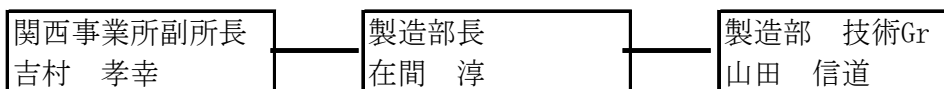
【株式会社カオス】



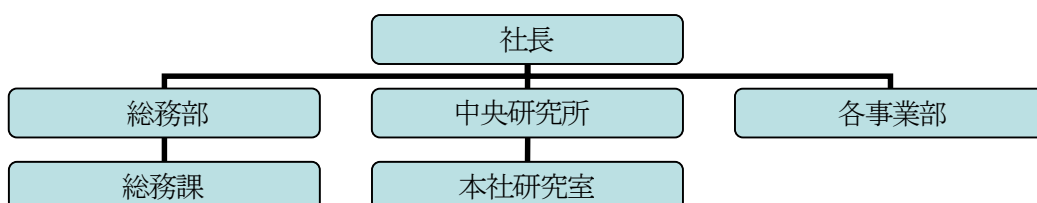
【国友熱工株式会社】



【住友鋼管株式会社】



【山科精器株式会社】



(3) 管理員及び研究員氏名（役職・研究項目別担当）

【事業管理者】 学校法人龍谷大学

①管理員（プロジェクト管理員）

氏 名	所属・役職	(番号)
山川 剛史	Ryukoku Extension Center 事務部	④

②研究員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
青井 芳史	理工学部准教授	①、②
中野 裕美	理工学部実験講師	①、②

【再委託先】

学校法人同志社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
松岡 敬	同志社大学理工学部教授	③
平山 朋子	同志社大学理工学部准教授	③

滋賀県

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
今道 高志	滋賀県東北部工業技術センター 機械・金属材料担当・主任主査	②、③
佐々木宗生	滋賀県工業技術総合センター 機能材料担当・主査	②、③

株式会社ケンテック

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
川端 健一	代表取締役	②
南 裕樹	開発部主任	②

株式会社カオス

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
種岡 智一	代表取締役社長	①、②
種岡 一男	専務取締役	①、②
広瀬 展弥	アルロック処理担当	①、②

国友熱工株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
坪田 輝一	代表取締役社長	①
中島 泰彦	製造係長	①
山根 裕介	製造部員	①

住友鋼管株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
吉村 孝幸	関西事業所大阪副所長	③
在間 淳	製造部長	③
山田 信道	製造部技術グループ	③

山科精器株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
石田 義孝	取締役 中央研究所所長	③
出田 智也	中央研究所	③

（４）経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理者）

学校法人龍谷大学

（経理担当者） 龍谷大学 研究部課長 津秋 博之

（業務管理者） 龍谷大学 Ryukoku Extension Center 事務部課長 石川 達也

（再委託先）

学校法人同志社

（経理担当者） 同志社大学 財務部 経理課長 浜 吉輝

（業務管理者） 同志社大学研究開発推進室 研究開発推進課長 藤井 邦宏

滋賀県

（経理担当者） 滋賀県工業技術総合センター 管理担当 主幹 横江 泰典

（業務管理者） 滋賀県工業技術総合センター 参事 川崎 雅生

株式会社ケンテック

(経理担当者) 総務部 経理担当 川端 真由美

(業務管理者) 代表取締役 川端 健一

株式会社カオス

(経理担当者) 経理担当 中川 香織里

(業務管理者) 専務取締役 種岡 一男

国友熱工株式会社

(経理担当者) 経理担当 国富 敦子

(業務管理者) 代表取締役社長 坪田 輝一

住友鋼管株式会社

(経理担当者) 関西事業所大阪 製造部長 在間 淳

(業務管理者) 関西事業所大阪 副所長 吉村 孝幸

山科精器株式会社

(経理担当者) 総務課長 杉田 悟

(業務管理者) 取締役中央研究所所長 石田 義孝

(5) アドバイザー

日本アイ・ティ・エフ株式会社

埴和 成佳 (ダイハツ工業株式会社 ユニット生技部生技開発室長)

緒方 清人 (高尾金属工業株式会社 技術本部工機課長)

1-3 成果概要

本研究開発では、機械装置あるいは自動車等の小型・軽量化のため、高強度化・高耐久性が要求されているプレス金型・ロール及び刃物を含む治工具などへの応用を目指し、拡散・表面被覆融合処理技術を開発することを目的としている。本研究開発ではこのような目的の達成のため、熱処理技術と湿式表面被覆処理技術の融合をはかり、次の実施内容について研究開発を実施した。サブテーマ1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化、サブテーマ2 湿式法を用いた融合プロセス技術の開発、サブテーマ3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価。

本年度の研究開発により得られた成果は次の通りである。

サブテーマ1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化

- ① 浸炭処理の前にあらかじめ窒化を施すと、同一時間の浸炭処理のみを施したものに比べて炭素原子の拡散浸入深さは深くなり、その影響は母材中にCとCr原子を多く含有する鋼ほど大きかった。
- ② あらかじめ窒化処理した後に浸炭処理を施すと窒素原子は内部に拡散浸透せず、処理品最表面に固溶層または窒化物を形成して濃化し、その内部側に炭素濃度の高い層を形成する

サブテーマ2-1 窒化処理と溶融塩法の融合処理

- ① 組織観察の結果、溶融塩のみの処理と比較して、表面被覆層直下の母材に微細炭化物が存在し、且つ組織が微細化していた。
- ② 表面被覆層直下の母材硬さ低下を抑え、ソフトニング層形成を防止することができた。
- ③ 表面に生成された被覆層は炭化バナジウムと窒化バナジウムから成っており、被覆層の表面側に炭化バナジウムが生成し、母材側に窒化バナジウムの存在が確認された。また、その組成は厚み方向に傾斜していると考えられた。
- ④ 窒化処理と溶融塩処理の最適化により3000HV以上の表面硬さを実現できた。
- ⑤ 減圧窒化法による窒化処理はプラズマ窒化法と同等の効果が得られた。

サブテーマ2-2 浸炭処理と溶融塩法の融合処理

- ① 浸炭による母材硬化層が確認され、ソフトニング層の形成を防止することができた。
- ② 表面から母材内部に向け、約2mmのなだらかな硬さ推移を示し、連続的な傾斜組織を実現できた。
- ③ あらかじめ浸炭処理を行うことにより、溶融塩処理による炭化物層の形成速度の大幅な向上が見られた。

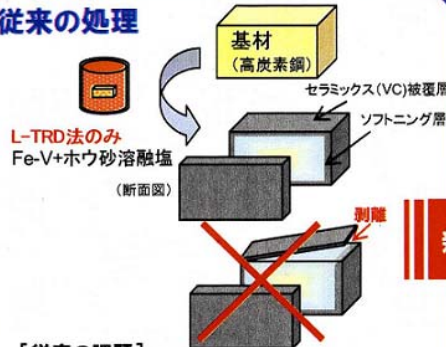
サブテーマ3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価

- ① 母材にSKH51鋼を用い、浸炭処理と溶融塩法の融合処理を行ったプレスカッター上刃での実証試験において、鋼管10000本切断時の刃物の摩耗を従来比で約85%低減することができ、5倍以上の耐摩耗性を実現できた。
- ② 浸炭処理と溶融塩法の融合処理を行ったサンプルについて耐摩耗性評価試験を実施した結果、特に長距離摺動において優れた耐摩耗性が見られた。

プロジェクトの概要

金型・治工具の高強度化・高耐久性を実現するため、熱処理技術と表面被覆処理技術の技術融合によるセラミックス表面被覆層形成のための新技術を開発。

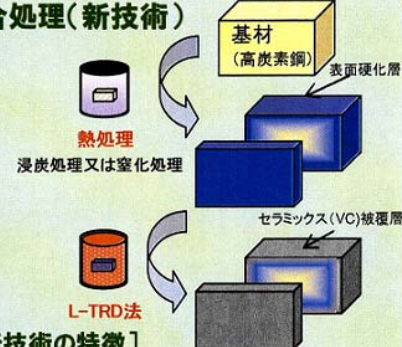
従来の処理



【従来の課題】

- ・熱処理技術(浸炭処理または窒化処理)のみでは、耐高面圧性が不足／表面硬度が不十分。
- ・湿式表面被覆処理技術(L-TRD法)のみでは、被覆層と基材界面でのソフトニング層形成による基材強度の低下／被覆層の剥離が発生

融合処理(新技術)



【新技術の特徴】

- 熱処理技術と湿式表面被覆処理技術の融合により
- ・界面でのソフトニング層生成抑制による表面被覆層剥離の発生抑制
- ・表面セラミックス被覆層から基材にかけての硬度傾斜形成の実現
- ・高強度セラミックス被覆層による耐高面圧性

プロジェクトの成果

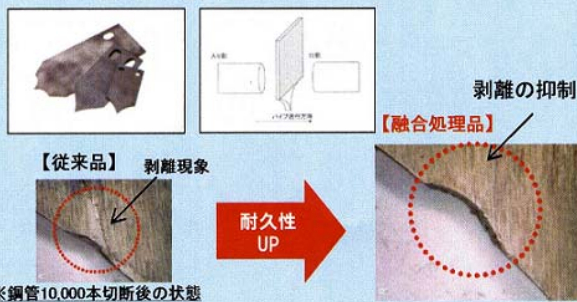


熱処理+L-TRD法で

- ◆ 基材ソフトニング層生成の抑制
- ◆ 被覆層と基材界面の粒子微細化による硬度傾斜層形成
- ◆ L-TRD処理時間の大幅短縮

金型、治工具の高強度化・耐久性向上

実証試験の一例 鋼管用切断刃物への処理



各種用途に適用可能



1-4 当該プロジェクト連絡窓口

龍谷大学 Ryukoku Extension Center (REC) 事務部

担当 山川 剛史

電話 077-544-7299

FAX 077-543-7771

E-mail rec@ad.ryukoku.ac.jp

第2章

本 論

2-1 サブテーマ1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化

2-1-1 窒化+浸炭融合処理

【目的】

浸炭処理の前に、予め窒化処理を施すことにより浸炭処理時の炭素原子の拡散速度を速め、短時間で母材表面層に2mm以上の深い浸炭強化層を得る。また、同時に浸炭処理温度の低温化を目的に窒化処理による浸炭処理への影響（浸炭・浸炭融合処理）を検討した。

【方法】

試料はSKD11、SKD61、SKH51の3鋼種のφ22丸棒を長さ50mmに切断して実験に供した。予備処理としての窒化処理は株式会社カオスにてプラズマ窒化を施した。

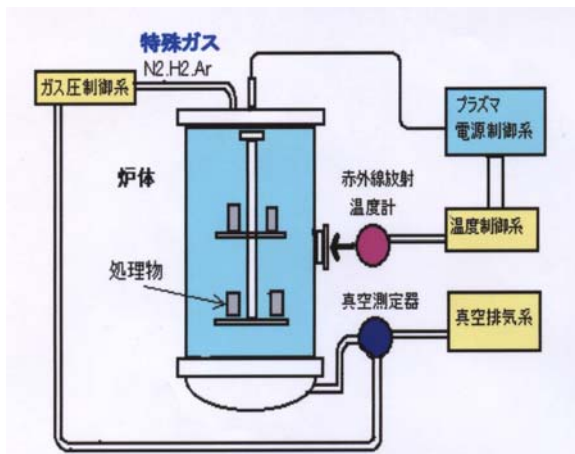


図 2-1-1. プラズマ窒化設備の概要

その後、プラズマ窒化した試料表面をアセトンにて洗浄し、真空浸炭設備を用いて浸炭処理を施した。

通常行われている浸炭処理は、ダイス鋼や高速度工具鋼のように炭化物形成元素を多く含む場合、炭素原子の内部への拡散よりも表面付近での炭化物形成が優先されるために、奥深くまで炭素原子を拡散浸透させることが困難である。

1150℃程度の高温域まで使用可能な真空浸炭法であれば、この問題を解消し任意の浸炭深さを得ることが可能である。



図 2-1-2. 真空浸炭外観

【結果と考察】

真空浸炭窒化处理による母材表面層の強化を目的として、窒化+浸炭融合処理技術の開発を行い、窒化によるその後の浸炭処理時間の短縮について検討した結果、以下のことが判明した。

- ・ 浸炭処理の前に予め窒化を施すと、同一時間の浸炭処理のみを施したものに比べて炭素原子の拡散侵入深さは深くなり、その影響は母材中に C と Cr 原子を多く含有する鋼ほど大きかった。
- ・ 予め窒化处理した後に浸炭処理を施すと窒素原子は内部に拡散浸透せず、処理品最表面に固溶層または窒化物を形成して濃化し、その内部側に炭素濃度の高い層を形成する。

また、GDS 分析および浸炭層組織観察の結果より、窒素原子は以下のような性質を持つものと推察される。

- ① 窒素原子は炭素原子よりも原子半径が小さいため、優先的に格子間位置に侵入固溶して炭素原子を強制的に拡散させる。
- ② 鋼に対し窒素原子の固溶は炭素原子のそれよりもエネルギー的に安定なため、一度侵入固溶した窒素原子は拡散しにくい。
- ③ α -鉄の温度域では窒化物のほうが炭化物よりも安定なため、窒素原子は炭化物中に固溶している炭素原子と置換されて窒化物や炭窒化物を形成し、炭素原子を拡散させる。
- ④ 窒素原子の固溶によりオーステナイト化温度が低下し、 γ -鉄中の炭素の固溶限が増加する。
- ⑤ γ -鉄中の窒素原子の固溶限は炭素原子のよれよりも大きい。

2-2 サブテーマ2 湿式法を用いた融合処理プロセス技術の開発

【目的】

熔融塩法は、表面で熔融塩浴中に添加した炭化物形成元素と母材内部の炭素を反応させて炭化物層を析出させる表面処理法である。乾式法に比べて母材との密着性に優れているのが特徴であるが、母材表面近傍の炭素が使用されたために表面被覆層と母材表面との界面直下には母材硬さよりも硬さの低いソフトニング層が生成される。このソフトニング層の存在により過酷な使用条件においては表面被覆層の剥離が生じる場合がある。また、被覆層から母材内部への組織分布や硬さが不連続であることも剥離の原因となる。今後需要の増加が予想される高張力材などの難加工材を加工する金型や機械部品等の寿命向上にはこれらの問題の解決が不可欠である。

上記問題点の解決の手段として、本研究では浸炭処理及び窒化处理と熔融塩被覆処理との融合処理の開発を行う。浸炭処理及び窒化处理は以前から一般的に鋼の耐摩耗性等の向上に単独に用いられているが、これらの処理であらかじめ母材表面層を強化しておくことで、熔融塩処理時のソフトニング層形成の防止を行う。さらに、表面被覆層から母材内部への傾斜的な元素分布、組織分布、硬さを実現し母材の強化を図る。

2-2-1 窒化处理と熔融塩法の融合処理

2-2-1-1 窒化 - 熔融塩融合処理

【目的】

窒化处理と熔融塩法との融合により、表面被覆層直下の合金元素の拡散を防止し表面被覆層と母材との界面に窒化物層を形成し硬さの傾斜化を図る。

【方法】

SKD11鋼（寸法φ22×50mm）を試料として実験を行った。熔融塩法の前にプラズマ窒化处理を施した。窒化处理の後、フェロバナジウム（Fe-V）を添加したホウ砂（ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）を加熱して保持した熔融塩浴（図2-2-1-1）中に試料（処理品）を数時間浸漬し、表面に炭化物被覆を行った。



図 2-2-1-1. 熔融塩浴



図 2-2-1-2. 処理品のセット方法

【結果と考察】

熔融塩単独処理と窒化 - 熔融塩融合処理の組織の比較を行った。各試料の切断面を研磨後、断面の組織観察を行った。エッチングにはナイトルを用いた。図 2-2-1-3 に熔融塩法のみを、図 2-2-1-4 に窒化 - 熔融塩融合処理の表面近傍の組織写真を示す。組織は SKD11 の焼入・焼戻し組織であり、白い粗粒はオーステナイトに未溶解の炭化物である。表面被覆層直下を比較すると、熔融塩法のみでは炭化物が減少しているのが見られたが、窒化融合処理では微細炭化物の存在が確認され、結晶粒度が微細であることがわかった。

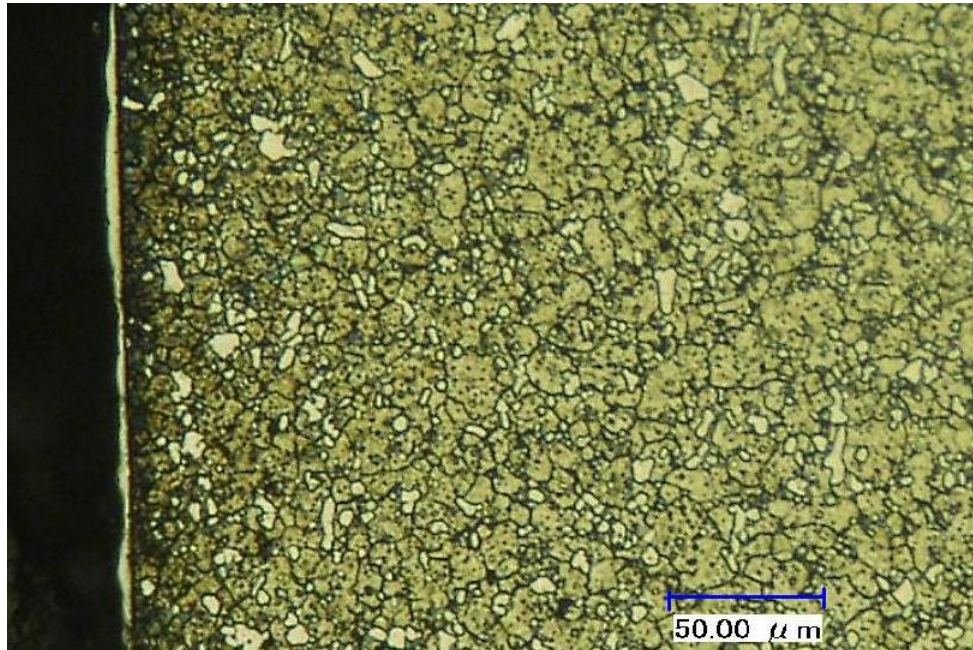


図 2-2-1-3. 熔融塩のみの組織 (×500)

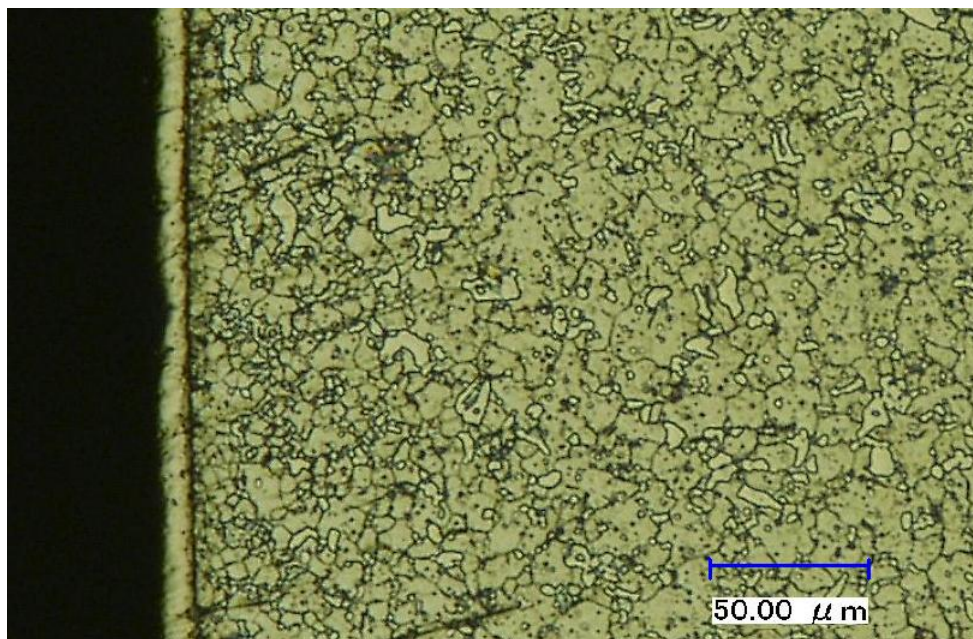


図 2-2-1-4. 窒化 - 熔融塩融合処理の組織 (×500)

試料の断面を観察し表面被覆層の厚みを測定した。断面観察の写真を図 2-2-1-5 に示す。表面被覆層の膜厚は熔融塩のみが $8.7\mu\text{m}$ 、窒化融合処理が $9.2\mu\text{m}$ であった。前処理として窒化することで $0.5\mu\text{m}$ 厚い膜厚が得られた。サブテーマ 1 で浸炭処理前にプラズマ窒化を行うことで炭素の拡散速度増加の効果があることを見出したが、この場合と同様に熔融塩処理前の窒化によるオーステナイト化温度の低下によって炭素の拡散速度が速くなったためであると考える。

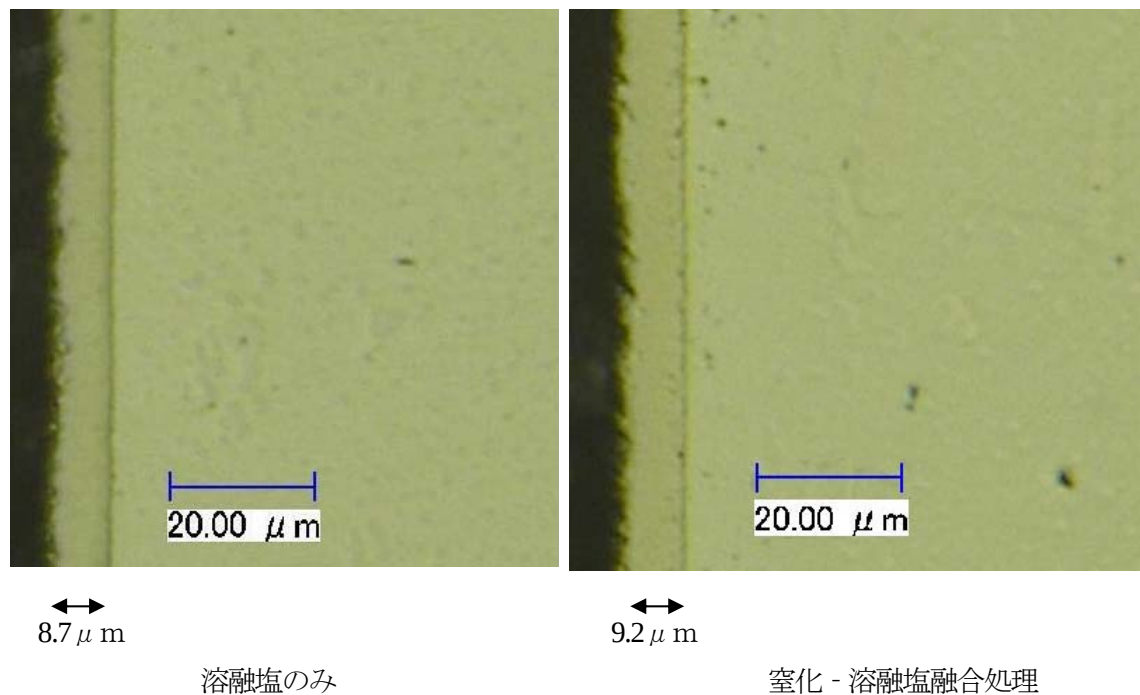


図 2-2-1-5. 熔融塩のみと窒化 - 熔融塩融合処理の膜厚

深さ方向への硬さ推移

テストピースの切断面を研磨して表面から深さ方向への微小硬さ測定を行った。表面の膜界面から母材中心に向って 4mm までの硬さ推移の調査を行い母材強化層の深さについて検討を行った。測定はベルコヴィッチ圧子を用い、測定荷重は 250mN で行った。

熔融塩のみでは表面被覆層直下で硬さが低くなっていたが、窒化 - 熔融塩融合処理では母材硬さよりも高い結果が得られた。窒化との融合処理によって、結晶粒が微細化され従来の熔融塩法単独の処理よりもソフトニング層からの被覆層の剥離が防止できると考える。

2-2-1-2 減圧窒化装置による窒化処理

【目的】

プラズマ窒化法はグロー放電を発生させて処理品の表面に窒化を施す処理である。そのため $\phi 5\text{mm}$ 以下の細穴にはグロー放電が発生せずに窒化が出来ない問題がある。これに対して減圧窒化法では、細穴にも処理が可能であり付き回り性の改善と生産性の向上が可能である。この事は、表面被覆処理において他の乾式法では困難な細穴や形状にも処理が可能な熔融塩法の利

点と一致し、窒化 - 溶融塩融合処理の細穴やスリットなど特殊形状の処理品への適用も可能にできる。

また、減圧窒化法はプラズマ窒化法よりも低コストなのが特徴である。さらに、従来のガス窒化装置では炭化水素変性ガスを使用するため CO₂ が排出されるが、使用ガスをアンモニアと窒素のみとして環境問題に対応した処理装置である。そこでプラズマ窒化法と減圧窒化法により処理した処理品の差異を検討し、減圧でアンモニア使用量の低減を目的として開発を行った。

【方法】

図に減圧窒化装置の概要を示す。炉内有効寸法φ600×L1300の装置を用いてアンモニア流量を変化させて窒化処理を行った。処理材質はSKD11とした。

【結果と考察】

減圧窒化処理を施した試料の硬さ測定を実施し、プラズマ窒化処理との比較を行った。減圧窒化処理により窒化した試料の表面硬さは、アンモニア流量が16L/minを除いては1000HV以上の表面硬さであった。プラズマ窒化処理も2.4%以上の窒素ガス濃度の処理条件で1100HV以上の硬さを得ており、減圧窒化はプラズマ窒化と比較すると平均的に150HV程低い硬さであったが、窒化処理の硬さとしては良好な結果である。

2-2-1-3 まとめ

窒化処理と溶融塩法の融合処理

- ・ 処理後の組織観察の結果、溶融塩のみの処理と比較して表面被覆層直下の母材に微細炭化物が存在し、且つ組織が微細化していた。
- ・ 表面被覆層直下の母材硬さ低下を抑えソフトニング層形成を防止できた。
- ・ 反射電子顕微鏡とGDSによる調査から、表面に生成された被覆層は炭化バナジウムと窒化バナジウムから成っており、被覆層の表面側に炭化バナジウムが生成し母材側に窒化バナジウムの存在が確認された。
- ・ 表面被覆層の原子濃度はゆるやかに変化し傾斜被膜が生成していると考えられる。
- ・ 表面硬さの向上には、窒化処理と溶融塩処理を最適な処理条件に設定することで3000HV以上の表面硬さを実現できた。
- ・ 減圧窒化法による窒化処理はプラズマ窒化法と同等の評価が得られ、溶融塩法との融合処理に適用できる。

2-2-2 浸炭処理と熔融塩法の融合処理

【目的】

浸炭により母材表面の炭素濃度をあらかじめ高くすることで熔融塩処理時の炭素欠乏を抑え被覆層直下の強化を図る。

【方法】

SKD11鋼（寸法φ22×50mm）を試料として実験を行った。

熔融塩処理時多くするため、目標浸炭深さを2mm以上とした。

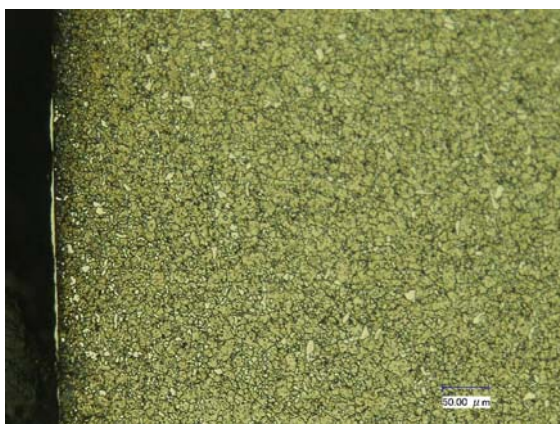
真空浸炭後、熔融塩法による表面被覆処理を施した。熔融塩処理後試料を洗浄し、適正な温度で真空焼入れ・焼戻しを実施した。

【結果と考察】

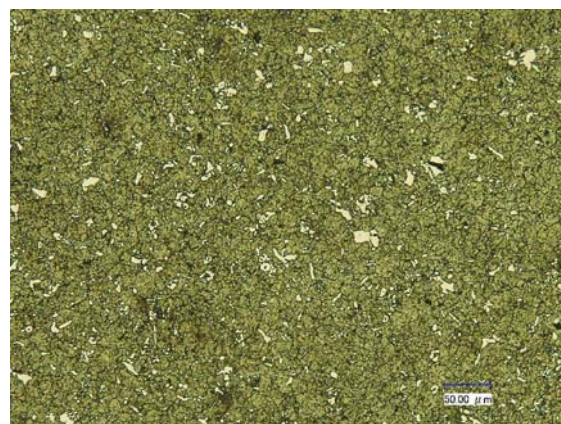
表面被覆層直下の母材強化

SKD11 のテストピース（φ22×50 mm）に熔融塩法による炭化物被覆処理のみと真空浸炭後に熔融塩処理を行った。各試料の切断面を研磨後、断面の組織観察を行った。エッチングにはナイトルを用いた。

まず熔融塩法単独処理の断面組織写真を図 2-2-2-1 に示す。試料の中心部の組織は SKD11 の焼入・焼戻し組織であり、白い粗粒はオーステナイトに未溶解の炭化物である。芯部と表面部の組織写真を比較すると、表面近傍では芯部よりも炭化物が少ないことがわかる。熔融塩処理によって、表面で炭化物層を析出させる際に塩浴中の炭化物形成元素と反応する炭素が母材表面から供給されたため、通常の組織にみられるような炭化物が表面近傍では減少したと考えられる。



(a) 表面部



(b) 芯部

図 2-2-2-1. 熔融塩処理のみ（1T1）の組織写真 ×500

次に浸炭 - 溶融塩融合処理の断面組織写真を図 2-2-2-2 に示す。溶融塩法のみの場合には表面近傍の炭化物の減少がみられたが、前処理で浸炭を行うことにより中心部以上に炭化物の白い粒がみられた。前処理を行わない場合には、表面に炭化物層を形成するとき母材の炭素が使用されたが、前処理に浸炭することによって母材表面中に通常の SKD11 よりも多量の炭素が固溶されており、炭化物層の形成に炭素が供給されても表面近傍で芯部と同等以上の炭化物がみられたと考えられる。

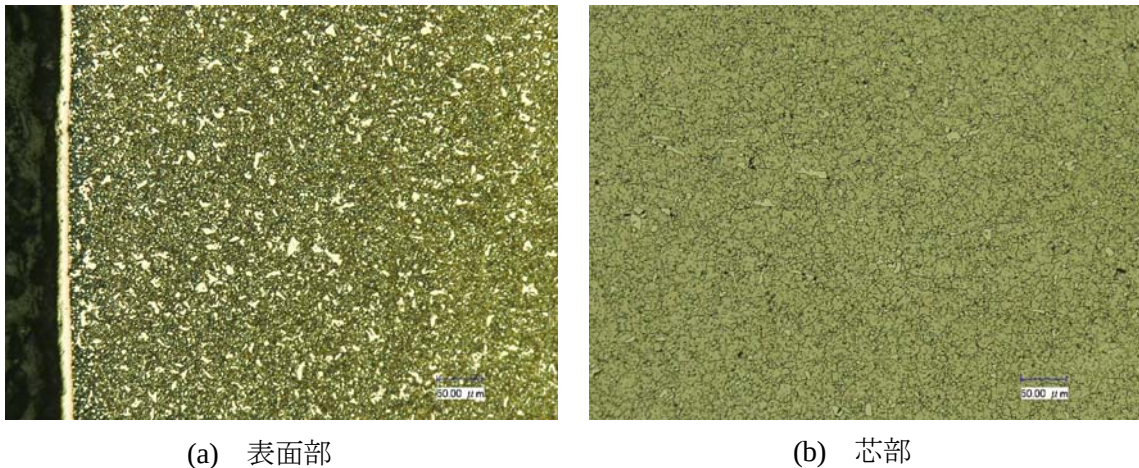


図 2-2-2-2. 浸炭 - 溶融塩融合処理 (1C1T1) の組織写真 ×500

深さ方向への硬さ推移

テストピースの切断面を研磨して表面から深さ方向への微小硬さ測定を行った。表面の膜界面から母材中心に向って 4 mm までの硬さ推移の調査を行い母材強化層の深さについて検討を行った。測定はベルコヴィッチ圧子を用い、測定荷重は 250mN で行った。

硬さ測定結果から、溶融塩のみでは表面近傍で硬さがわずかに低下しているのに対して、浸炭 - 溶融塩融合処理では母材表面近傍の硬さの低下が見られず、さらに本来の母材硬さ（中心部硬さ）よりも高い硬さであることがわかった。組織観察で確認したように、表面近傍には炭化物が多く存在し炭素の欠乏が抑制されたためである。さらに表面から内部に向かっては、なだらかな硬さ推移を示し約 2mm の硬化層が確認された。溶融塩処理後も前処理の浸炭層の効果を残し連続的な硬さ分布であることがわかった。

2-2-3. 浸炭処理と溶融塩処理の融合による VC 膜直下母材強化層の結晶粒微細化について

本融合処理プロセスでは、浸炭処理、溶融塩処理および真空焼入れの各プロセスで処理品は長時間高温下にさらされるため、母材の結晶粒が粗大化する問題が懸念された。この問題の解決には、微細炭化物のピンニング効果と加熱および冷却過程での相変態を利用して対応したが、実際の研究結果では母材強化層の結晶粒は本来のそれよりも微細化されていた。図 2-2-3-1 に融合処理を施した SKD11 鋼の表面層組織を示す。

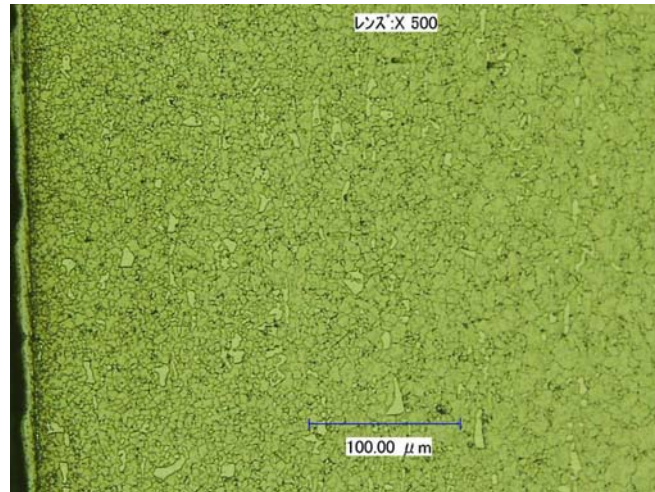


図 2-2-3-1. 融合処理を施した SKD11 鋼の表面層組織 ×500

写真左端の白色部が炭化物被膜であるが、被膜直下から 300 μm 程度までの結晶粒は写真右側の母材そのものの結晶粒に比べ非常に微細である。

図 2-2-3-1 の炭化物被膜直下の拡大を図 2-2-3-2 に示す。

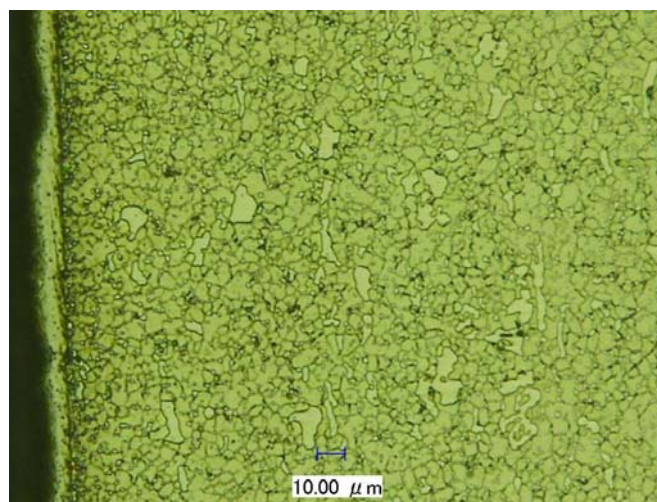


図 2-2-3-2. 融合処理を施した SKD11 鋼の母材表面強化層の組織

(図 2-2-3-1 拡大) ×800

粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の 1 次炭化物は炭化物被膜を形成した後も消失していない。また、結晶粒界や粒界の三重点には、粒径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度の非常に微細な炭化物粒子が多数析出しており、この粒子が母材表面強化層の結晶粒の微細化に大きく影響しているものと考えられる。

一般的に冷却過程におけるオーステナイト→フェライト変態時の基本的なフェライト粒微細化法には、

- ① 冷却速度を大きくする。
- ② 母相オーステナイトを細粒にする。
- ③ 転位密度の高いオーステナイト状態から変態させる。
- ④ オーステナイト粒内に約 $1\mu\text{m}$ 以上の介在物や析出物を分散させる。

以上の 4 つがあるが、本プロジェクトの融合処理プロセスでは②と④の効果が主流となるものと考えられる。

【まとめ】

浸炭処理と熔融塩法の融合処理

- ・ 組織観察の結果、中心部よりも表面近傍で明らかな炭化物の増加が確認され、浸炭による硬化層も確認できた。
- ・ 表面近傍でわずかに硬さ低下の見られた熔融塩のみの処理に対して、浸炭 - 熔融塩融合処理では母材硬さよりもはるかに高い硬さでありソフトニング層は改善出来た。
- ・ 表面から深さ方向への硬さ推移曲線から、約 2mm のなだらかな硬さ推移を示し連続的な傾斜組織を実現できた。
- ・ 熔融塩処理前に母材表面に炭素を高濃度に侵入させることで炭化物層の形成速度が速くなった。これにより、熔融塩処理時間の大幅な短縮が可能である。

2-3 サブテーマ3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価

2-3-1 寸法変化の評価

【目的】

各種金型、治工具への融合処理技術の適用にあたり、実用化するためには処理品の寸法精度が重要となる。融合処理プロセスでは、従来の単独処理よりも多く熱処理が繰り返されることとなり寸法変化を把握し、寸法変化を低減させるプロセスの確立が必要である。そこでテストピースによる寸法変化の調査を実施した。

【方法】

浸炭 - 熔融塩融合処理プロセスの中の真空浸炭、熔融塩処理、焼入れの3工程で各処理後にテストピースの寸法を測定し寸法変化の調査を行った。各工程の処理条件を以下に示す。浸炭では、目標浸炭深さを0.5、1.5 mmの2条件を設定し後の熔融塩、真空焼入れの熱処理が加わることを考慮してここでは焼きの入らない条件とした。

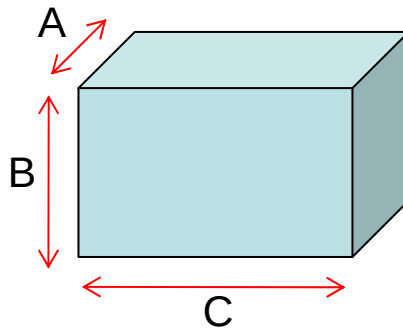
テストピース

材質 : SKD11 相当として一般に金型等に用いられている4種類を使用した。

SLD、KD11S、DC53、SLD-Magic

(各材料、前処理として焼入れ 1020℃×2h、焼戻し 510℃×3h 済み)

寸法 : 50×70×100 mm



【結果と考察】

各材質ともに浸炭、熔融塩と処理を進めるにつれて縮む傾向が見られた。そして最後の焼入れ焼戻しで元の寸法に近づくように戻っている。浸炭、熔融塩では、完全に焼入れを行わない条件で、最終工程でのみ正規の焼入れ条件で処理した結果であると考えられる。また、浸炭は2種類の処理時間で評価を行ったが、両条件とも変寸には同じ傾向がでていた。浸炭の保持時間よりも浸炭の後に焼入れを行わない条件に設定したことが変寸率の結果に影響していると思われる。テストの結果、変寸率は約0.08%以内であった。使用した材種はSKD11 相当または改良種であったが、材質によって変寸の違いが明らかに結果に現れた。材質ごとのデータ取りが今後必要である。

2-3-2 実証試験 電縫鋼管切断用刃物への適用

【目的】

本研究ではこれまで拡散・表面被覆融合処理技術の基礎的な開発を行い、真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化や湿式法を用いた融合処理プロセス技術の開発において成果を上げることが出来た。ここで得られた技術を実際に高強度化と高耐久性の付与が求められているプレス金型・成形ロール・刃物等の治工具に適用し、高面圧下や難加工等の実証試験を行う。そこで融合処理の効果を確認し、さらに生まれた課題を克服してより最適な融合処理プロセスの確立を目指す。融合処理の効果として、従来品に対して金型・成形ロールにおいては3倍以上の耐久性、切断用刃物においては5倍以上の耐久性を目標とする。

【方法】

浸炭・溶融塩融合処理を電縫鋼管切断用刃物に適用し寿命向上を試みた。浸炭・溶融塩融合処理を施した刃物を作製し、従来刃(溶融塩処理のみ実施)との比較を行い耐久性の評価を行った。評価方法は住友鋼管(株)の鋼管生産の切断工程で実際に刃物を使用して摩耗の比較を行った。図 2-3-2-1 に融合処理の工程を示す。被処理品の刃物の厚みが薄いため各工程で生じた刃物の反りを矯正する必要があるため、最終工程で反り矯正用の治具に挟んで焼戻しを行う(プレステンパー)。この工程を含めた熱処理や浸炭・溶融塩処理の最適な条件を見いだす為に試作を繰り返し実機試験により評価を行った。生産量の都合上寿命に到るまでの本数を切断して検証することが困難であったため、評価は主に 10000 本切断使用したのち摩耗状況を調査することとした。また、従来使用している SKH51 材よりも安価な SKD11 材でも試作を行い融合処理の効果によって代替が可能であるかの検証を行う。

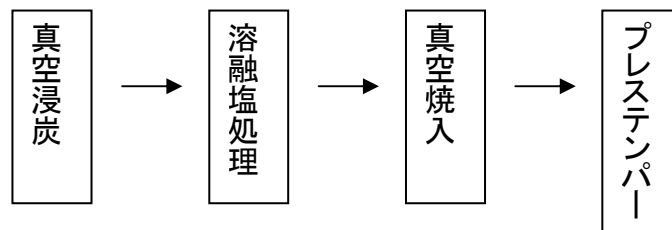


図 2-3-2-1. 刃物の融合処理工程

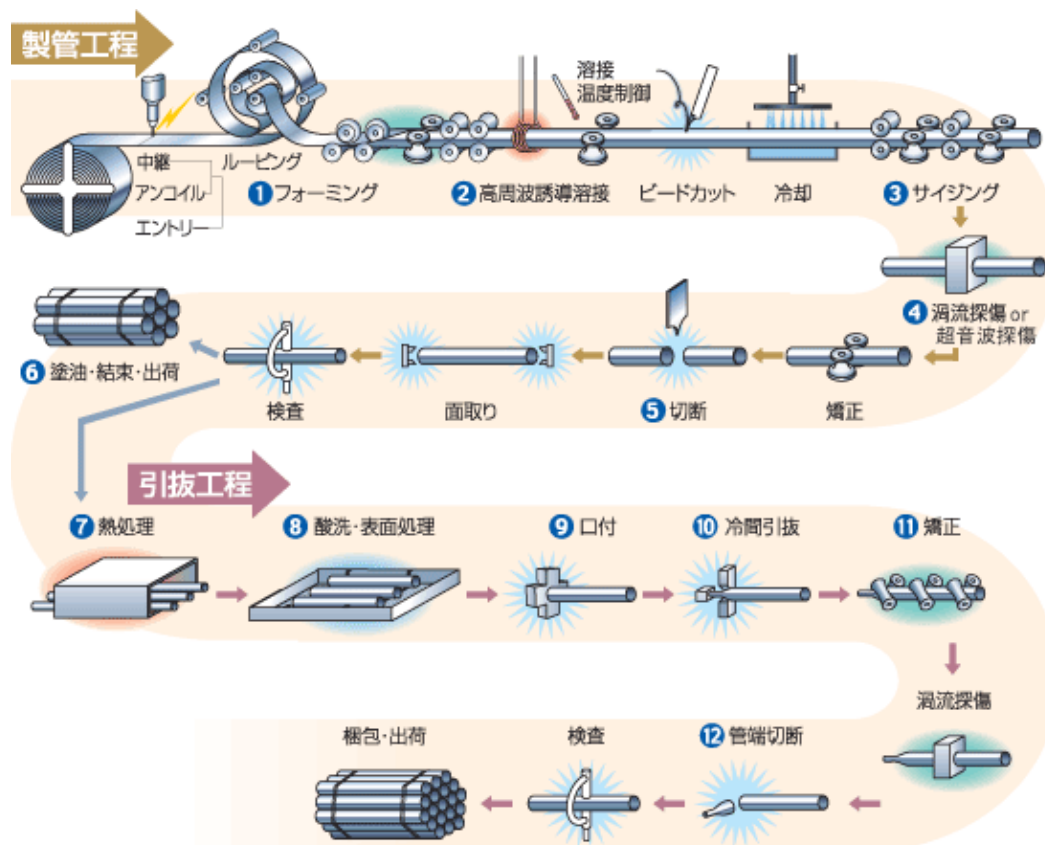


図 2-3-2-2. 鋼管の製管工程

※住友鋼管(株)HP より引用

上図の工程⑤切断に使用する切断刃に浸炭 - 溶融塩融合処理を施し、耐久性の向上を目指した。従来使用されている刃物は、SKH51 材に溶融塩処理のみを施して製造されている。

【結果と考察】

プレスカッター処理条件の検討として3つのテストを実施した。

実機テスト A 低温短時間の溶融塩処理

真空浸炭の条件は金型等の場合と異なり刃物の厚みが薄いため、深い浸炭は適さないことが予備実験で判明しているので浅い浸炭深さに設定した。溶融塩法の条件は従来よりも低温、短時間処理で行った。

実機テスト B 膜厚増加による影響の調査

SKH51、SKD11 共に母材硬さを上げる熱処理条件とし、溶融塩処理の成膜条件も従来処理と同じ条件で行った。実機テスト A では低温、短時間で溶融塩処理したために膜厚が薄かったので、従来よりも厚膜の製品を作製した。

実機テスト C 浸炭深さと母材硬さ増加による影響の調査

浸炭深さを 0.5 mm から 1.5 mm に変更し表面被覆層界面の母材の強化を狙った。SKH51 はテストピースによる予備実験で表面の炭素濃度を上げすぎると異常組織が確認されたので、浸炭は浅くしたまま最終の焼戻し温度を低めに抑え母材硬さを向上させた。

【まとめ】

実機テスト後のサンプルの摩耗状況の比較写真を図 2-3-2-3 (SKH51)、図 2-3-2-4 (SKD11) に示す。横軸に膜厚、縦軸に母材硬さを示し、それらと摩耗量の関係について比較を行った。

【SKH51】

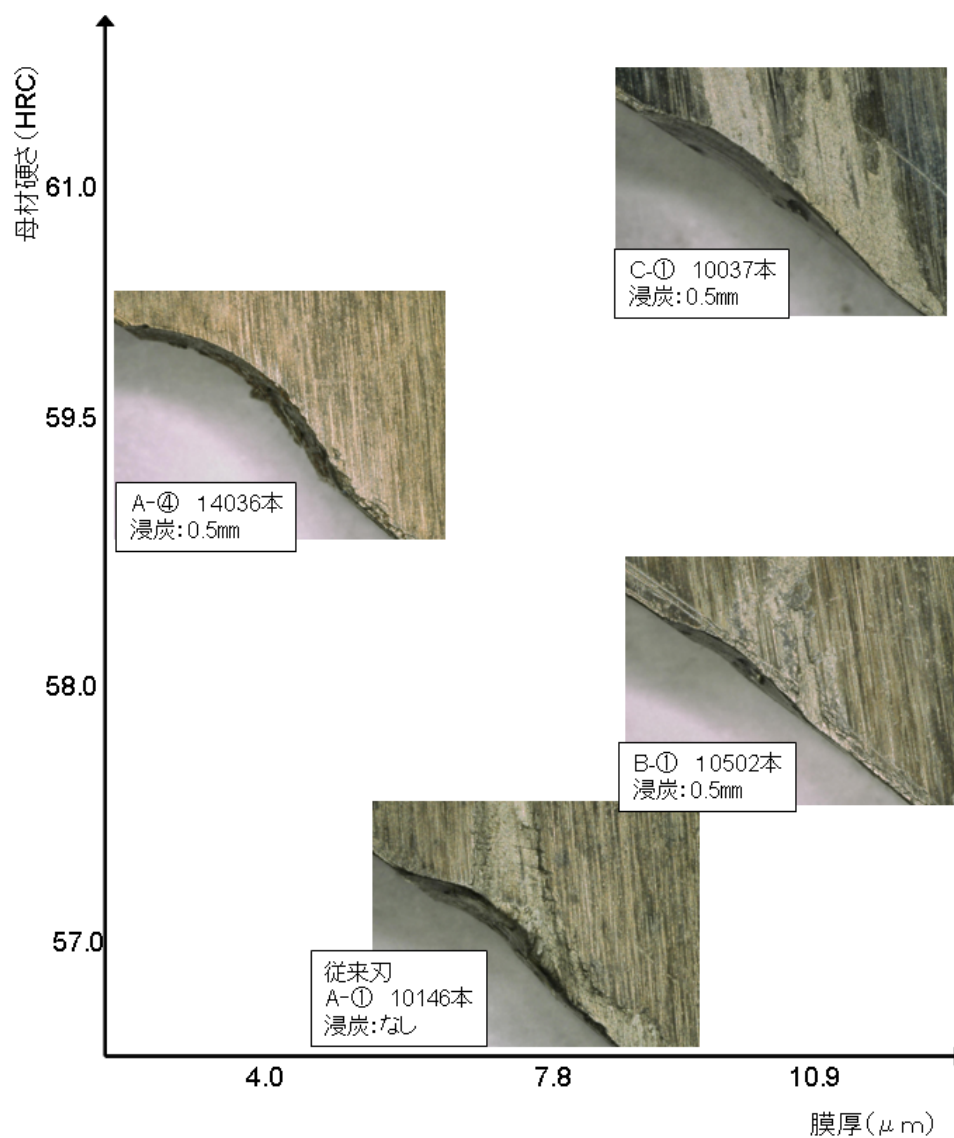


図 2-3-2-3. SKH51 材の摩耗状況の比較 (×50)

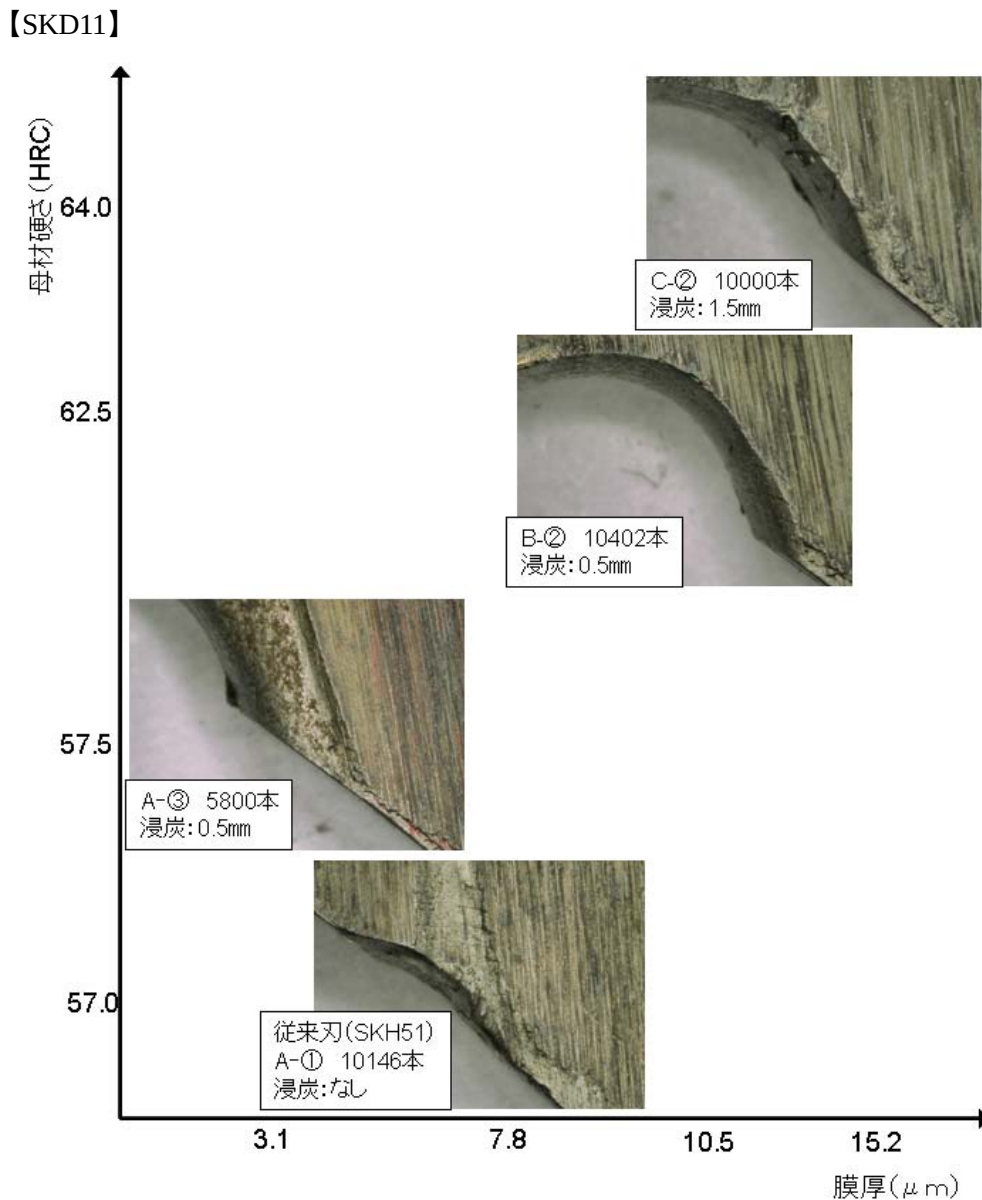


図 2-3-2-4. SKD11 材の摩耗状況の比較 (×50)

SKH51

- ・表面被覆層界面から深さ方向への母材の硬さ測定結果から、母材硬さの向上と表面付近の強化層形成により刃物の耐久性を上げることができ、800HV 程度の硬さで 300～400 μm 程度の強化層が必要である。
- ・膜厚は従来よりも薄い 4 μm 程度でも融合処理による母材強化によって長寿命化が可能である。これにより溶融塩処理を低温、短時間化できる。
- ・今回の処理条件から考察する最適な膜厚、母材硬さは、摩耗状況の比較から約 4 μm の膜厚と 59～60HRC 程度の母材硬さである。
- ・今回の試作品で鋼管 10,000 本切断時の刃物の摩耗を従来比で約 85% 低減することができ、5 倍以上の耐摩耗性を実現できた。

SKD11

- ・ 融合処理と最後の熱処理条件の変更によって、鋼管切断時に生じる縦傷はなくなり R 部の摩耗量も低減できたが、SKH51 と同等以上の耐摩耗性は得られなかった。
- ・ 今回の様な強い衝撃がかかる過酷な条件では靱性の高いSKH51 材に代替できなかったが、母材強化による摩耗量の改善は確認できたので使用用途を選定することで他の金型の長寿命化または安価な材料への代替が期待できる。

2-3-3 その他の実証試験

A. 切断刃 下刃

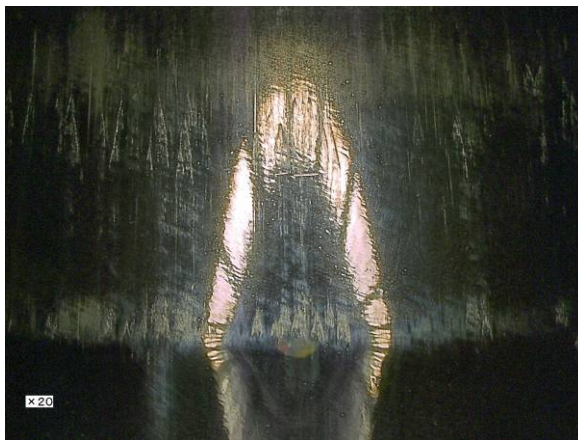
プレスカッター上刃物について実証試験を行ったが、その下刃物についても融合処理による寿命の向上を検討した。

従来は、SKD11 の焼入れのみの治具であるが、融合処理による高寿命化の成果については、実証試験中の結果が出なかった。ただ、表面硬さが上がったためと思われるが、鋼管本体へのキズが削減され外観上の品質が向上するといった副次的な効果が得られた。

B. 拡管パンチ

住友鋼管にて切断後の電縫管の耐久試験が行われており、そのための治具として拡管パンチである。これは、自動車の燃料給油口の成型用の部品であるが、その品質検査として生産ロットごとに実際に拡管作業を行い溶接部の強度を確認するものである。

パンチの寿命の判定はなかなか定性的には難しいが、 $\phi 28.6 \times 1.0t$ の SUS430 の鋼管において 140 本でパンチに傷が入った通常処理（VC）に対し、融合処理では倍近い 270 本の使用が確認された。



通常処理（溶融塩処理のみ）

縦の傷が早期に発生



浸炭 - 溶融塩融合処理

白く見える部分は剥離ではない、
縦の傷は通常処理よりも少ない。

図 2-3-3-1 拡管パンチ 280 本使用後の比較

C. 鉄筋用切断刃物

図 2-3-3-2 に示す鉄筋用切断刃物に融合処理を適用した。使用環境が過酷であり、従来は VC 処理を行っている。



図 2-3-3-2. 鉄筋用切断刃物 (QCM8)



図 2-3-3-3. ストロングフープ材 切断部

切断物：ストロングフープ材（降伏点 785N/mm²）φ13mm 及び φ16mm

加工トン数：約 2.3 トン/日

使用後 1 か月経過している状況。通常処理では 2 ヶ月で摩耗するので、それ以上の長寿命を期待している。

D. ピアノ線のガイド、ローラー

ピアノ線は 0.7-0.8% の高炭素鋼線であり、その製線工程ではたくさんのガイドやローラーが使用されており、その摩耗が生産効率を大きく左右している。通常は VC 単独での処理が使用されるが、その寿命の延長に融合処理を提案し、現在試験継続中である。



図 2-3-3-4. ガイドローラー（計尺、ターン） (SKD11)

本融合処理の実証試験については現在のところ継続使用中であるため、結論をまたなければ行けないが、総じて言えば寿命の延長が十分期待されている。当初の目標をクリアできると思われており、これからの事業化へこの事例が大きく影響を与えると期待している。

2-3-4 高面圧摺動カムへの適応を想定した耐摩耗性評価試験機の開発および高負荷環境下における成膜の評価

2-3-4-1 目的と方法

【目的・目標】

機械式工具クランプ装置の構成部品の一つである三角カムユニット（図 2-3-4-1）は、カムバーとそれによって上下作動するクランプ部品からなり、接触部分において約 2GPa 程度の高面圧環境下で摺動する。

現状では一般的にクランプ部品には SKD11 に焼き入れ・焼き戻し処理した（以下 SKD11 と表記）ものかもしくは窒化処理したものが、一方のカムバーにはイオン窒化表面処理したバネ鋼が用いられている。今日では部品間の接触回数で 10 万回程度の寿命が実現されているが、昨今、機械の高速・高サイクル化により、さらなる長寿命が必要となってきた。従来の窒化製品の摩耗状況を観察すると、表面硬化層の摩耗がある程度以上進むと急激に摩耗が進み寿命が早期に尽きることが判っている。

摺動部品の性能としては自らが摩耗しにくいことに加え、相手材に対してもダメージを与えにくいことが要求されるが、クランプ部品に用いられている SKD11 は硬度が高く摩耗しにくいものの、摩擦特性として相手材にダメージを与えやすいという一面がある。

そこで表面結晶粒の微細化及び硬化層の増大と脱炭層の低減などにより表面改質を行い、自らの耐摩耗性向上と相手材へのダメージ軽減により 100 万回以上の製品寿命を実現することを目的とし、そのために実際の使用環境に近い状況の下で高負荷・長時間にわたる寿命試験を行い、拡散・表面被覆融合処理技術の有効性を評価することを目標とした。



図 2-3-4-1. 三角カムユニット

【方法】

上記の評価を行うにあたり、実状に相当する高面圧環境を再現しつつ摩耗評価を行うことが出来る試験装置は市販されていない。そのためまず実状を想定した過酷な環境条件をつくることのできる摩擦摩耗試験機を作製し、その環境下で長時間にわたる寿命試験を行い、既存の表面処理と比較しながら拡散・表面被覆融合処理の有効性を評価する。

評価項目は試験材の摩耗、接触子である鋼接触子の摩耗、試験中の摩擦力とする。

同時にこの試験によって定量的計測を行うことで被覆融合処理した鋼材の耐久性の基礎データを示す。

寿命については目標 100 万回であるが、計測期間が長大になりすぎるため耐久試験においては実状の2倍以上の高負荷をかけた環境において現状の寿命である 10 万回以上を達成しているかどうかを目安とした。

2-3-4-2 高面圧摩耗試験機の開発

【構成・構造】

摩耗試験機はまず図 2-3-4-2 のように構想した。試験材の形状・寸法は他の試験や観察にも適用可能とするため、 $\phi 22 \times 100\text{mm}$ の中実円筒とした。対象となるいくつかのカムの面圧や近似のすべり速度を実現できるように、圧力・速度・を可変可能とすると共に、給油する油脂や潤滑状況を選択可能とした。また摺動運転時の径や摩擦力の変化を捉えることも可能にし、状態異常の際には自動停止機能を設けた。

加圧異常時の対策としては、加圧シリンダーの圧力の使用範囲を予め設定しておき、値がその上限・下限の範囲を出た場合には動作を停止する。また摩耗深さが設定値に達した際にも自動停止する。

完成した摩耗試験機を図 2-3-4-3 に示す。

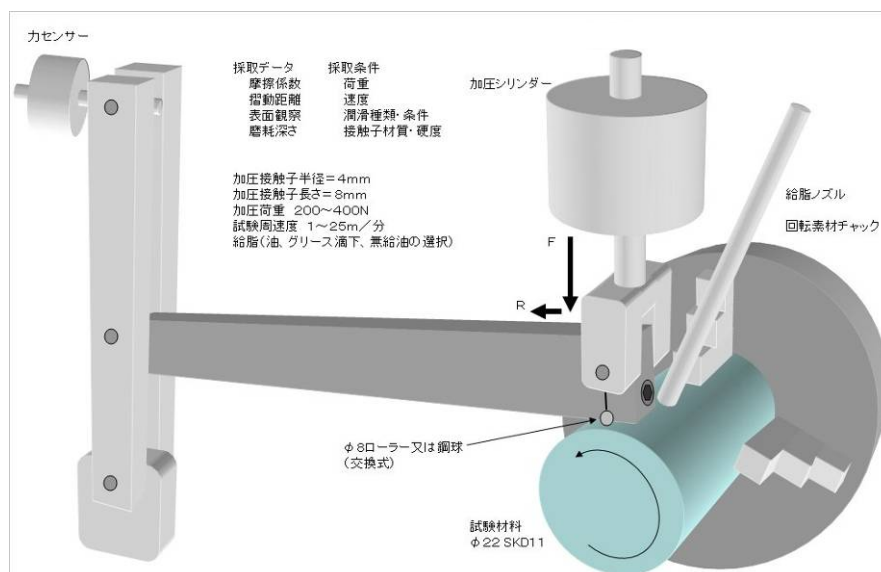


図 2-3-4-2. 磨耗試験機のイメージ

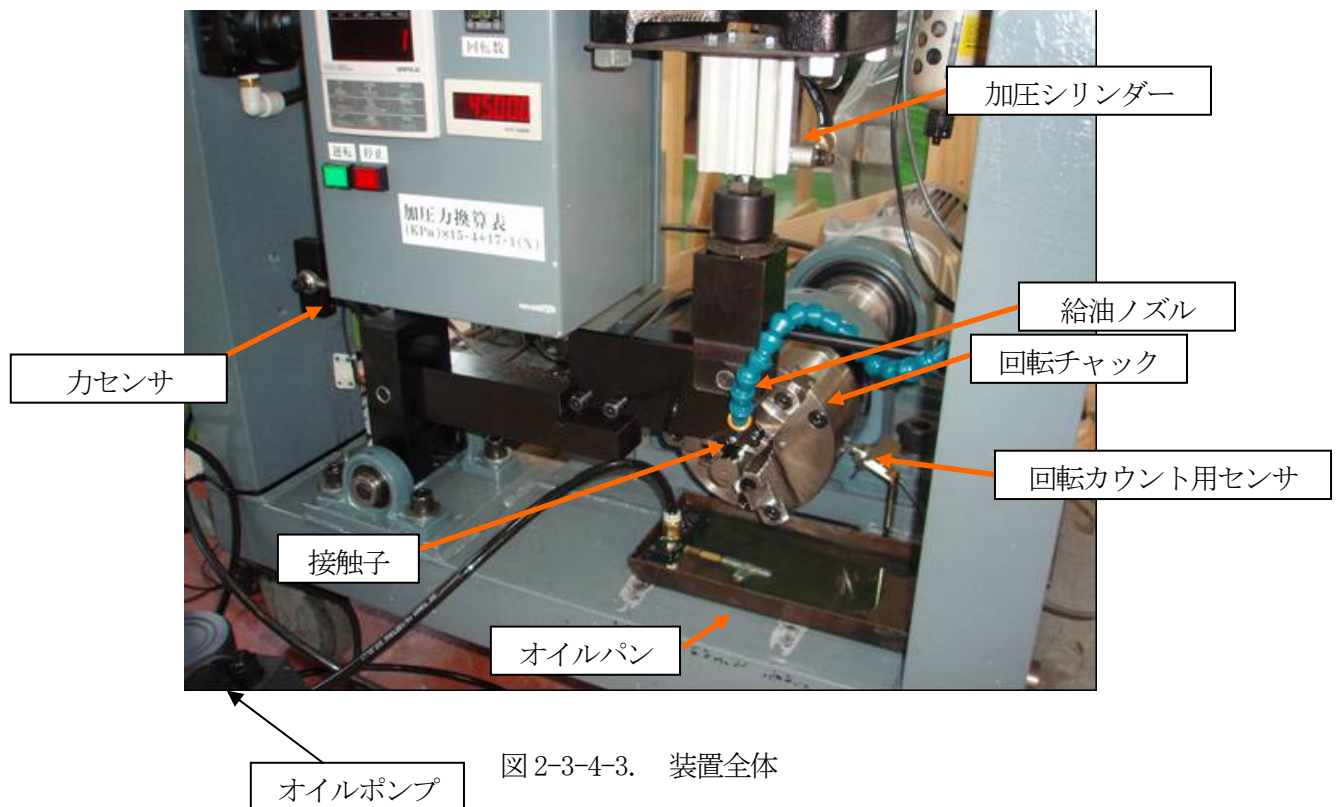


図 2-3-4-3. 装置全体

2-3-4-3 評価試験

SKD11 の棒材に異なる表面処理を施したものを数種類準備し、高面圧環境下でそれらの摩耗特性を評価した。また摩耗状況の確認のため、面粗度計や顕微鏡によって表面粗さや表面観察も適時行なった。

本プロジェクトでは部品の実用圧力環境について、最大面圧を約 2GPa と想定している。これを参考とし、これよりも厳しい環境下で試験を行った。まずは従来処理と融合処理との明確な差異を簡易的に確認するための予備試験として、累計周回数を少なめで評価できるように最大面圧を実用想定の方圧よりも大きい 3.8GPa に設定して試験を行った。

(圧力の計算にはヘルツの接触理論式を用いた)

これにより有効な処理条件を特定し、その後結果が良好であった処理材に対してのみ長距離摺動の耐久試験を行という手順を取った。

2-3-4-4 結論

高面圧摺動カムへの適応を想定した耐摩耗性評価試験機を開発し、これを用いてSKD11 の浸炭+溶融塩融合処理について従来の表面処理である焼き入れ処理や単体の窒化処理および溶融塩処理との比較検証を行った。また検証用の接触子には超硬球・SUJ2球の2種類を用いた。その結果浸炭+溶融塩融合処理について以下の有効な結果が得られた。

①特に長距離摺動において高性能を発揮し、長寿命化を実現する。

処理時間を同じくした場合、従来の溶融塩処理は膜厚が薄く、その直下にはソフトニング層があるため摩耗がそこに達すると急激に摩耗の進行が速くなるという問題がある。一方で融合処理は膜厚が厚いため長時間摺動させた際にも摩耗の進行が遅く、さらに母材との境界付近の層でもあまり強度が落ちることがないため耐摩耗性は摺動距離が長くなれば、既存の溶融塩処理と比較すると極めて優れた耐摩耗性を発揮する。

また、窒化処理の場合はアブレシブ摩耗がおこるが、融合処理はこれを防ぐことが出来る。

②相手材へのダメージが小さい。

浸炭と溶融塩処理の融合条件を最適にすれば、接触子がSUJ2・超硬のいずれにおいても相手材に与えたダメージは最も低くなった。

これら2点から、浸炭＋溶融塩融合処理は高面圧摺動部品において長寿命化を実現するために大変有効な手法であることが示せた。

第3章

総括

本研究開発では、機械装置あるいは自動車等の小型・軽量化のため、高強度化・高耐久性が要求されているプレス金型・ロール及び刃物を含む治工具などへの応用を目指し、拡散・表面被覆融合処理技術を開発することを目的としている。本研究開発ではこのような目的の達成のため、熱処理技術と湿式表面被覆処理技術の融合をはかり、3 年間に渡り研究開発を実施した。その結果、得られた成果は次の通りである。

【サブテーマ 1 真空浸炭窒化技術による母材表面層の強化】

- ① 浸炭処理の前にあらかじめ窒化を施すと、同一時間の浸炭処理のみを施したものに比べて炭素原子の拡散浸入深さは深くなり、その影響は母材中に C と Cr 原子を多く含有する鋼ほど大きかった。
- ② あらかじめ窒化処理した後に浸炭処理を施すと窒素原子は内部に拡散浸透せず、処理品最表面に固溶層または窒化物を形成して濃化し、その内部側に炭素濃度の高い層を形成する

【サブテーマ 2-1 窒化処理と熔融塩法の融合処理】

- ① 組織観察の結果、熔融塩のみの処理と比較して、表面被覆層直下の母材に微細炭化物が存在し、且つ組織が微細化していた。
- ② 表面被覆層直下の母材硬さ低下を抑え、ソフトニング層形成を防止することができた。
- ③ 表面に生成された被覆層は炭化バナジウムと窒化バナジウムから成っており、被覆層の表面側に炭化バナジウムが生成し、母材側に窒化バナジウムの存在が確認された。また、その組成は厚み方向に傾斜していると考えられた。
- ④ 窒化処理と熔融塩処理の最適化により 3000 HV 以上の表面硬さを実現できた。
- ⑤ 減圧窒化法による窒化処理はプラズマ窒化法と同等の効果が得られた。

【サブテーマ 2-2 浸炭処理と熔融塩法の融合処理】

- ① 浸炭による母材硬化層が確認され、ソフトニング層の形成を防止することができた。
- ② 表面から母材内部に向け、約 2 mm のなだらかな硬さ推移を示し、連続的な傾斜組織を実現できた。
- ③ あらかじめ浸炭処理を行うことにより、熔融塩処理による炭化物層の形成速度の大幅な向上が見られた。

【サブテーマ 3 金型・治工具への実用化に向けた特性評価】

- ① 母材に SKH51 鋼を用い、浸炭処理と熔融塩法の融合処理を行ったプレスカッター上刃での実証試験において、鋼管 10000 本切断時の刃物の摩耗を従来比で約 85%低減することができ、5 倍以上の耐摩耗性を実現できた。
- ② 浸炭処理と熔融塩法の融合処理を行ったサンプルについて耐摩耗性評価試験を実施した結果、特に長距離摺動において優れた耐摩耗性が見られた。

本プロジェクトで開発した融合処理技術は、従来ともすればそれぞれ独立に処理を行っていた熱処理と表面被覆処理の壁を崩すものであり、両者が互いの長所を活かし、欠点を互いに補うという面で画期的なものであるといえる。3年間の研究開発で得られた成果より、本プロジェクトにより開発した熱処理技術と湿式表面被覆処理技術の融合処理技術は、従来からの各種治工具への熱処理および表面被覆処理技術に比べて、大幅な寿命向上が期待されるものである。現時点で、各種治工具に対する実証評価を進めている段階であり、一部についてはすでに有効であるとの結果が出ており、実用化を進めている段階である。今後、さらに幅広く各種治工具に対して実証試験を進めることによりこの融合処理の信頼性を向上させることが求められる。

以 上