

平成 2 3 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高強度および低フリクションを併せ持つ  
熱処理の複合化に関する技術の開発」

研究開発成果等成果報告書

平成 2 5 年 1 月

委託者 関東経済産業局

委託先 川崎窒化工業株式会社

## 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
- 1-2 研究体制
  - 1-2-1 研究組織及び管理体制
  - 1-2-2 管理員及び研究員
  - 1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名
  - 1-2-4 他からの指導・協力者
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 2-1 研究開発装置の製作
- 2-2 基本実験方法
- 2-3 基本実験の結果
- 2-4 厚膜化と高密着性および低摩擦特性の開発
- 2-5 基材強度向上に関する開発
- 2-6 生産性向上に関する開発
- 2-7 まとめ

### 第3章 全体総括

- 3-1 全体総括
- 3-2 研究開発の課題
- 3-3 事業化計画

### 参考文献

## 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

#### 1-1-1 研究開発の背景および当該分野における研究開発動向

本研究開発は、中小ものづくり高度化法および中小ものづくり高度化指針の(1)自動車に関する事項、キ 低フリクション化に係わるものである。

その研究背景は次のようになる。

自動車摺動部品に DLC 皮膜が適用される事例が増えてきている。適用事例としては、例えば F-1 エンジン部品のバルブリフターなどがあり、DLC 皮膜が有する耐摩擦摩耗特性が十分発揮されている。しかしながら、例えばピストンリングや歯車などの駆動系摺動部品へ DLC 皮膜の低フリクションと耐摩擦摩耗特性を利用するためには、DLC 皮膜の厚膜化、高密着性、高硬度化などが必要であり、自動車会社および関連会社からそれらの特性を、熱処理および表面処理の観点から、DLC 皮膜コーティングした部材そのものの信頼性をトータル的にあげるよう要請がある。さらに、一般車両用自動車部品に適用するには生産コストを下げるよう要請がある。従来、こうした課題解決のため、①母材の表面改質、②母材と DLC 皮膜の中間層、③ DLC 皮膜の成膜方法と皮膜特性などの研究開発が行なわれている。図 1. に従来技術の例を示す。各々次のようになる。

- ①母材+窒化+TiN などの PVD プロセスいわゆるセラミックスコーティング+P-CVD による DLC 皮膜
- ②母材+金属コーティング+スパッタリングによる DLC 皮膜
- ③母材+イオン注入+プラズマイオン注入・成膜(PBIID)による DLC 皮膜

#### (1) 自動車に関する事項 キ. 低フリクション化

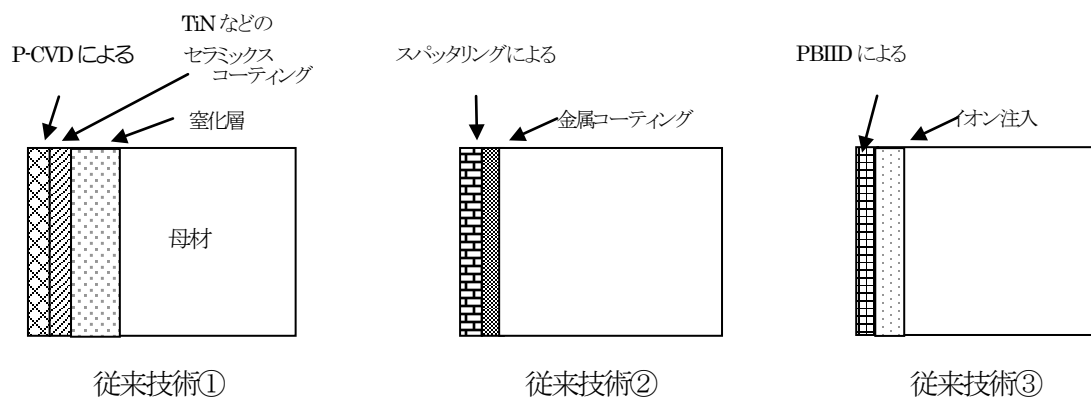


図1. 従来技術イメージ図

このような典型的な従来技術は、いずれも自動車摺動部品に適用するには前述の厚膜化、高密着性、高硬度、高生産性が不十分である。

さらに、自動車摺動部品の材質として使える材料に着目すると、次の特許がある。すなわち、ガイド装置に対し JIS 規格の機械構造用合金鋼であるクロムモリブデン鋼の表面上にラジカル窒化法により硬度上昇した窒素拡散層を形成し、スパッタリング法により該窒素拡散層の上に形成された

窒化物の膜の上に DLC 皮膜を形成せしめることを考案した特許 {第 4218831 号 (発明者: 本事業の共同研究体メンバーである(有)アイエス技術研究所の池永勝ほか2名)}。しかしながらこの特許をしても前述の自動車摺動部品の必要特性を十分満足していない。

本研究開発でこれらの課題を解決する具体的な方向性は、この特許をベースに、摺動部材の鋼で、特にクロムモリブデン鋼 (例えば JIS 規格の SCM415 材や SCM440 材) などの金属組織のフローがつつながらる冷間鍛造が可能な機械構造用合金鋼に対し、コーティングの下地として、化合物層をつくらず窒素拡散層のみをつくるイオン拡散窒化処理、真空低温浸炭処理あるいは真空浸炭窒化処理をし、その直後にスパッタリング処理をベースに中間層皮膜と DLC 皮膜を成膜する。この際、①セラミックスコーティングと DLC 皮膜の内部応力をコントロールする。②これらの処理を連続的にこなす。また、成膜したコーティングの膜厚、硬さおよび内部応力状況などを総合的に分析する。これらにより前述の課題の解決を図り新たな熱処理複合化に資する技術開発の確立を目指す。

### 1-1-2 研究開発の高度化目標および技術的目標値

熱処理に係る技術において達成すべき高度化目標として イ. 工程短縮や高機能化を可能とする高度熱処理技術の開発がある。本研究開発では、自動車の摺動部材に対し、低フリクションと信頼性を付加するために、拡散窒化あるいは真空低温浸炭窒化とセラミックスコーティングと DLC 皮膜をより良く複合化させ DLC を含むコーティング膜の厚膜化、高密着性化、高硬度化を実現できる技術を開発する。また、複合化させる段階で低コストになるような新規技法を盛り込む。

#### ①厚膜化と高密着性課題への対応

従来 : 1~3  $\mu\text{m}$  程度。スクラッチテスト 60~80N

新 : 10  $\mu\text{m}$  の厚膜で、なおかつスクラッチテスト 100N 以上あるいは、HRC 圧痕試験でクラックなきこと。

#### ②低摩擦特性課題への対応

従来 : 1~3  $\mu\text{m}$  程度の膜厚の DLC 皮膜の摩擦係数は 0.1~0.2  $\mu\text{m}$  前後である

新 : 摩擦係数 0.05 程度 (ボールオンディスク試験機などによる)。

#### ③強度向上課題への対応

従来の窒化物+コーティングに比べ、より良い強度であること。あるいは十分に自動車摺動部品に適用が可能な程度の強度であること。(Hv600 程度)

#### ④生産性向上

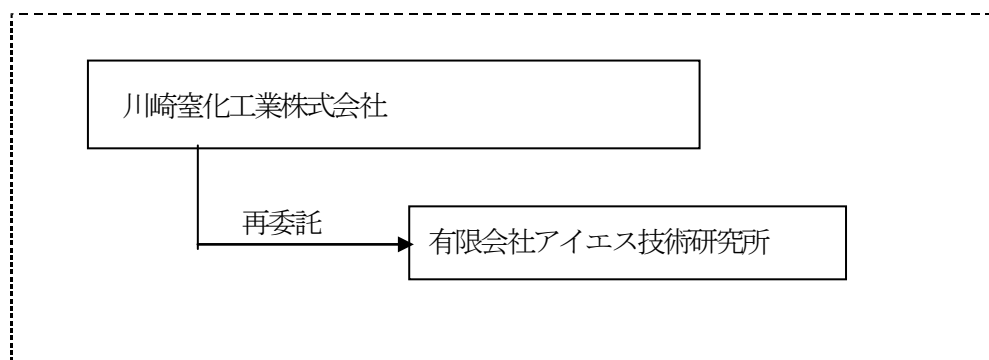
表面改質の受託加工として、十分に、自動車各社に売込みが可能な程度の高生産性であること。

(参考指標 : サイクルタイム (1 チャージ/4 時間))

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1-2-1 研究組織及び管理体制

1-2-1. a 研究組織（全体）



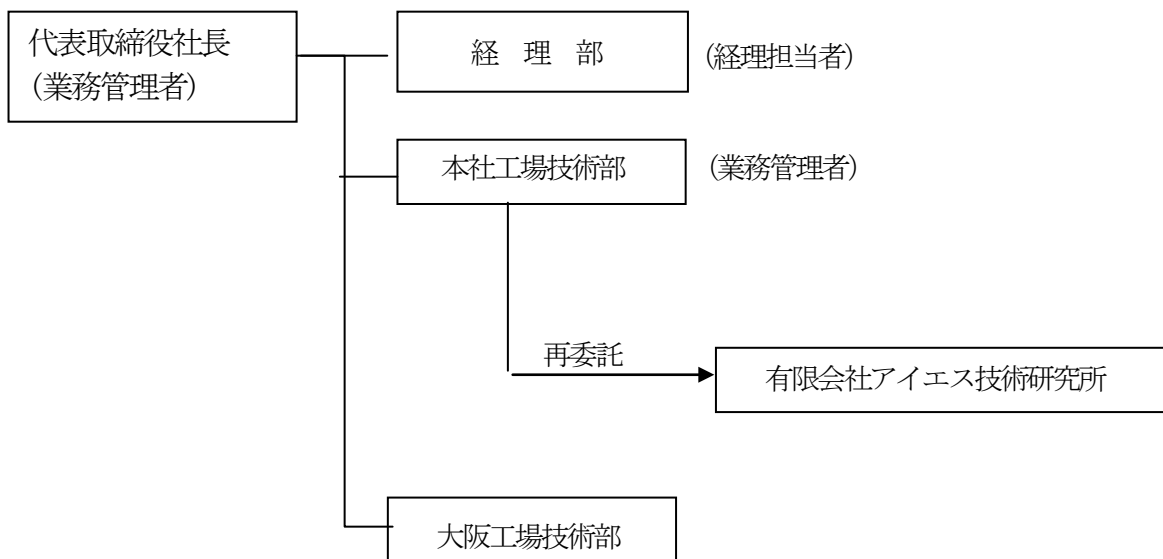
統括研究代表者（P L）  
川崎窒化工業株式会社  
本社工場技術部長 臼井 可隆

副統括研究代表者（S L）  
川崎窒化工業株式会社  
大阪工場技術部長 原田 哲

1-1-1. b 管理体制

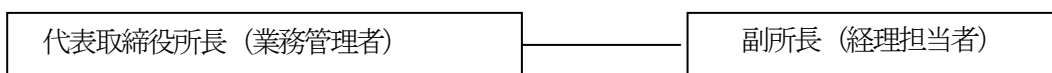
① 事業管理機関

[川崎窒化工業株式会社]（業務管理者：代表取締役社長 平田 健介  
本社工場技術部長 臼井 可隆）



② 再委託先

[有限会社アイエス技術研究所]（業務管理者：代表取締役所長 池永 勝）



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理機関】川崎窒化工業株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
臼井 可隆	本社工場技術部長	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
臼井 可隆 (再)	本社工場技術部長	①②③④
堀江 宏之	熱処理加工本部長	①②③④
原田 哲	大阪工場技術部長	①②③④
飯田 啓史	本社工場技術部主任	①②③④
坂本 仁	大阪工場技術部主任	①②③④

【再委託先】

(研究員)

有限会社アイエス技術研究所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
池永 勝	代表取締役所長	①②③④

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

川崎窒化工業株式会社

(経理担当者)	経理部	大津 雅史
(業務管理者)	代表取締役社長	平田 健介
	本社工場技術部長	臼井 可隆

(再委託先)

有限会社アイエス技術研究所

(経理担当者)	副所長	宮崎 忠男
(業務管理者)	代表取締役所長	池永 勝

1-2-4 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
平田 健介	川崎窒化工業株式会社 代表取締役社長	委 PL
臼井 可隆	川崎窒化工業株式会社 本社工場技術部長	
原田 哲	川崎窒化工業株式会社 大阪工場技術部長	SL
池永 勝	有限会社アイエス技術研究所 代表取締役所長	
宮崎 忠男	有限会社アイエス技術研究所 副所長	
森田 辰郎	国立大学法人京都工芸繊維大学 准教授	アドバイザー
福原 弘之	パナソニック株式会社 技術本部 主任技師	アドバイザー

(注) PL : 総括研究代表者 (プロジェクトリーダー)

SL : 副総括研究代表者 (サブリーダー)

### 1-3 成果概要

本研究開発の目的は、自動車の摺動部品に対し、低フリクションと信頼性を付加するために、拡散窒化又は真空低温浸炭窒化とセラミックスコーティングと DLC 皮膜をより良く複合化し、DLC を含むコーティング膜の厚膜化、高密着性化、高硬度化を実現する技術を開発することであり。また、複合化する段階で低コストになるような新規技法を開発することである。

本研究の提案書であげた目標値は、次の4点である。

#### (a) 厚膜化と高密着性課題への対応

10 $\mu$ m の厚膜で、なおかつスクラッチテスト 100N 以上あるいは HRC 圧痕試験でクラックなきこと。

#### (b) 低摩擦特性課題への対応

摩擦係数 0.05 程度 (ボールオンディスク試験機などによる)。

#### (c) 強度向上課題への対応

従来の窒化品+コーティングに比べ、より良い強度であること。あるいは十分に自動車摺動部に適用が可能な程度の強度であること。(Hv600 程度)

#### (d) 生産性向上

表面改質の受託加工として、十分に、自動車各社に売込みが可能な程度の高生産性であること。

#### (1) 研究開発装置の製作

「プラズマ拡散窒化から、中間層のセラミックスコーティングおよび DLC 皮膜までの工程を一連の連続プロセス」として実施できる「スパッタ装置試作型」装置 (株神戸製鋼所製) を製作した。この装置により、自動車部品の駆動系摺動部品へ DLC 皮膜の低フリクション特性と耐摩擦摩耗特性を十分に活用するための厚膜化、高強度化および高硬度などの研究開発を行った。

また、基材のプラズマ拡散窒化から DLC 成膜までのプロセスを連続的に実施し、なおかつ生産性を向上させるための「生産性向上用スパッタ試作」装置 (株昭和真空製) を製作した。

#### (2) 基礎実験

本研究の基礎となる部分の実験を行い、(a) SCM440 材および SKD11 材に関し、元材の基本的な性状。(b) 各種下地処理 (プラズマ窒化, CrN 被覆処理) の有無、および DLC 被覆時の水素添加量、表面性状および DLC 層の特性値 (ヤング率, 硬さ, 密着性) の関係について基本的なデータの蓄積をした。

#### (3) 厚膜化と高密着性の開発

① プラズマ拡散窒化で下地処理をし、引き続き連続的に積層コーティングをすると、膜厚は 12.5 $\mu$ m までの厚膜化が可能である。この際、圧痕試験での密着性は良好である。ただしスクラッチ試験で 100N 以上の臨界荷重を出すためには、同様にプラズマ拡散窒化で下地処理をし、引き続き連続的に分散コーティングをする必要がある。

② SCM440 材よりも SKD11 材の方が、プラズマ拡散窒化後を含め、DLC 層の密着性は高い。

#### (4) 低摩擦特性の開発

① 摩擦摩耗特性に関し、SCM440 材および SKD11 材ともに、プラズマ拡散窒化後の方が DLC 層の耐久性は高かった。一方、プラズマ拡散窒化後の CrN 被覆は返って DLC 層の耐久性を低下させた。

② 摩擦摩耗特性に関し、SCM440 材および SKD11 材ともに、DLC 皮膜生成時の水素添加量が多いほど摩擦係数が低減し、同時に耐久性も高かった。結果としては、PD200 材が最も良好な摩擦摩耗特性を示した。

③ 摩擦摩耗特性に関し、SCM440 材では DLC 層の機能喪失 (はく離, は摩滅) が急激に生じる一方、SKD11 材では徐々に生じた。

④ 試験力が比較的低い場合、各種 DLC 材の摩擦係数は PD100 材および PD200 材と同程度であったが、耐久性に劣っていた。

表.1.3.1 成果のまとめ

項目		目標値	結果 (コーティング方法別)		
			分散 コーティング	積層 コーティング	Low バイアス
厚膜化		10 $\mu\text{m}$ 以上	2.3 $\mu\text{m}$	12.5 $\mu\text{m}$	4.4 $\mu\text{m}$
密着性	スクラッチ試験	100N 以上	※80~100N	40 N	30 N
	圧痕試験	剥離なし	良好	良好	良好
摩擦係数	(試験力; 2N)	$\mu$ ; 0.05 以下	0.13~0.18	0.18~0.22	0.05~0.19
	(試験力; 9.8N)		水素添加量多い (PD200)		
			0.05~0.07		
	(試験力; 29.4N)		水素添加量標準 (PD100)		
			0.03~0.04		
基材強度	疲労強度	従来品より良いこと	処理前 비해改善率 56%		
生産性	サイクルタイム	4Hr/ch 以下	3Hr50min/ch		

## (5) 基材強度向上に関する開発

- ①SCM440 材および SKD11 材において、プラズマ拡散窒化により表面硬化層が形成された。SCM 材ではプラズマ拡散窒化後も母材部の硬さは維持されたが、SKD 材ではプラズマ拡散窒化にともなう熱履歴のために焼戻しが進み、母材部の硬さは若干低下した。プラズマ拡散窒化後に DLC 皮膜を施した場合には、SCM 材および SKD 材ともに、プラズマ拡散窒化により形成された硬化層の硬さ分布に影響が及ぶことはなかった。
- ②プラズマ拡散窒化および DLC 皮膜は、SCM 材の機械的性質に影響を及ぼさなかった。
- ③SCM 材の疲労強度は、プラズマ拡散窒化により 48%、DLC 皮膜により 28% 改善した。これは、形成された硬化層あるいは DLC 層が表面からの疲労き裂の発生を抑制した結果であると言える。さらに、プラズマ拡散後に DLC 皮膜を行うことにより、両処理の相乗効果を通じて疲労強度の改善率は 56% と著しく高い水準に達した。
- ④一方、SKD 材には極めて多数の Cr 炭化物が含まれており、プラズマ拡散窒化、DLC 皮膜およびそれらの複合処理を施した場合のいずれの場合にも、疲労き裂の発生起点は介在物 (Cr 炭化物) であった。その結果、上記の表面処理の疲労強度に及ぼす効果は限定的であった。しかしながら、それらが疲労強度を大きく損なうことはなかった。
- ⑤以上のように、プラズマ拡散窒化と DLC 皮膜からなる複合表面処理は、SCM 材の耐摩耗性を高めるだけでなく、機械的性質を維持しつつ大幅な疲労強度の改善をもたらした。上記の複合表面処理は、SKD 材においても機械的性質および疲労強度に悪影響を及ぼすことなく、耐摩耗性を高めた。

## (6) 生産性向上に関する開発

- ①サイクルタイムは、生産性向上用スパッタ試作装置での検証結果から、従来技術およびスパッタ試作型装置と比較しても、大幅に低減することができた。

※ (2) 基礎実験、(4) 低摩擦特性の開発、(5) 基材強度向上に関する開発は、京都工芸繊維大学と川崎窒化工業株式会社の共同研究成果になる。

## 1-4 当該研究開発の連絡窓口

川崎窒化工業株式会社 技術部 白井可隆

所在地：神奈川県川崎市川崎区小島町 2-10

TEL : 044-288-5876 FAX : 044-288-4557

E-mail : [usuiyoshitaka@kawasaki-chikka.co.jp](mailto:usuiyoshitaka@kawasaki-chikka.co.jp)



## 第2章

### 2-1 研究開発装置の製作

平成 22 年度に、本研究に適した「プラズマ拡散窒化から、中間層としてのセラミックスコーティングおよび DLC 皮膜までの工程を一連の連続プロセス」として実施できる装置は、現在、市販装置としては販売していない。このため、本共同体が装置仕様をつくりこみ、真空装置メーカーに「スパッタ装置試作型」として製作した。基本実験装置には、この装置を利用した。

装置仕様のポイントは、「プラズマ窒化とスパッタリングおよびイオンプレーティングが連続的にできる試作タイプの装置」である。

#### 2-1-1 スパッタ装置試作型

##### 2-1-1. a 装置の特徴

本装置はプラズマ窒化、イオンプレーティングおよびスパッタリングの処理が連続的にできることが特徴である。

##### 2-1-1. b 装置の構成

試作型スパッタリング装置の概略図を図 2.1.1 に示す。プラズマ窒化は、装置内部に備え付けられた内部ヒーターとテーブルから供給される直流電力により加熱され、窒素ガスと水素ガスの雰囲気において DC プラズマ中で窒化反応が進む。

スパッタリングの蒸発源 2 つは互いに対向した形になっている。イオンプレーティングの蒸発源がそれに対し 90° の位置にある。



写真 2.1.1 装置写真 (全体)



写真 2.1.2 装置写真 (チャンバー)

写真 2.1.1~2.1.2 に装置の写真を示す。チャンバーの手前にアーク式イオンプレーティングのターゲットがあり、両サイドにスパッタリングのターゲットがある。制御は、各パラメータをセットすれば、自動運転が可能で、スイッチを切替えることで手動運転も可能である。チャンバーの大きさは、550 W×550D×550H であり、チャンバー内の有効容積はφ200×110Hである。

#### 2-1-2 生産性向上用スパッタ装置

##### 2-1-2. a 装置の特徴

本装置は、窒化室とスパッタ室の 2 室から構成している。被処理品 (ワーク) は、装置内に搭載された 300mm×300mm の搬送トレイ上にセットされ、窒化室とスパッタ室の下部に設置されたローラーによって搬送します。窒化室とスパッタ室の間には、搬送トレイと被処理品が通過可能なゲートバルブを搭載しています。

窒化室には、500°C に加熱するヒーターが設置され、窒素雰囲気中で加熱し、DC バイアスを印加することで、プラズマを発生し、プラズマ窒化処理を実施します。

スパッタ室には、5×10 インチの角型カソードを設置し、C ターゲットなどをセットできます。

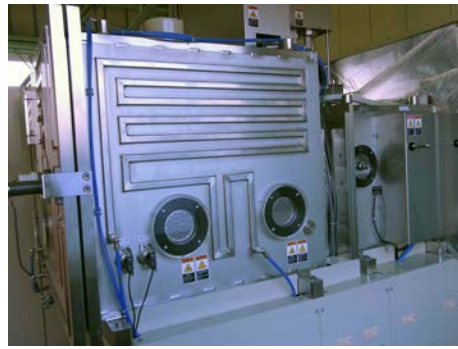


写真 2.1.3 生産性向上用スパッタ装置

### 2-1-3 生産性向上用装置の改造

生産性向上用装置の性能の拡充を図るため、搬送装置および制御方式などの改造を行った。

### 2-2 基本実験方法

#### 2-2-1 納入材および熱処理条件

表 2.2.2 に、本研究で使用した SCM440 の化学成分および熱処理条件を示す。表 2.2.4 には、SKD11 の化学成分および熱処理条件を示す。図 2.2.1 には、各試験片の形状をまとめて示す。

各材に、表 2.2.2 および表 2.2.4 に示す熱処理をそれぞれ施した後、図 2.2.1 に示す試験片形状に機械加工した。図 2.2.1 (a) に示す円盤型試験片は主に摩擦摩耗試験に使用したが、表面や断面の観察にも使用した。以降では、納入材の種別を表す記号として「SCM」および「SKD」を用いる。

各試験片の試験部は、エメリ研磨およびバフ研磨により鏡面状に仕上げた。

表 2.2.2 SCM440 の熱処理条件

Heat treatment	
Disc-type specimen	850°C, 1 h, WQ→630°C, 1 h, AC
Tensile and fatigue specimens	850°C×0.5 h, WQ→630°C×1 h, AC

表 2.2.4 SCM440 の熱処理条件

Heat treatment	
Disc-type specimen	1040°C, 1 h, AC→530°C, 3 h, AC→530°C, 3 h, AC
Tensile and fatigue specimens	1040°C, 1 h, AC→530°C, 3 h, AC→530°C, 3 h, AC

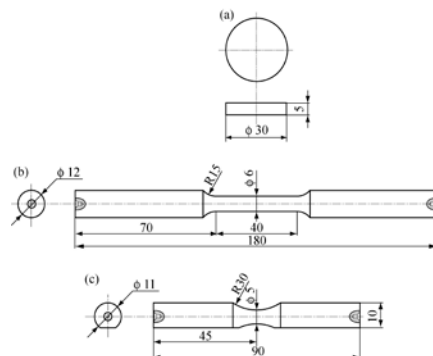


図 2.2.1 (a) 円盤型試験片, (b) 引張試験片 (JIS Z 2201, No. 14), (c) 疲労試験片 (JIS Z 2274, No. 2)

## 2-2-2 納入材に関する実験

SCM 材および SKD 材の基本的な性状を把握するため、組織観察、硬さ分布測定、引張試験、および疲労試験を行った。硬さ分布の測定は、マイクロビッカース硬さ計を用いて、鏡面状に仕上げた試験片の断面上で表面から内部へ向かって行った。

組織観察は、図 2.2.1(a)に示す円盤型試験片の断面をエメリ研磨およびバフ研磨により鏡面状に仕上げ、1%ナイトール腐食液によりエッチングを行った後に光学顕微鏡を用いて行った。硬さ分布の測定は、マイクロビッカース硬さ計を用いて、鏡面状に仕上げた試験片の断面上で表面から内部へ向かって行った。

引張試験は、図 2.2.1(b)に示す試験片を用いて、試験力の上昇速度 100 N/s、室温・大気中の条件で行った。その際、ひずみは試験部中央へ軸方向に貼付したひずみゲージにより、また試験力はロードセルにより測定した。平面曲げ疲労試験は両材について繰り返し速度 25 Hz、応力比 $R=-1$ 、室温・大気中の条件で行い、繰り返し数 $N=10^7$ で試験打ち切りとした。

## 2-2-3 表面処理材に関する実験

### 2-2-3.a 下地処理の効果

下地処理が DLC 被覆後のしゅう動特性および耐久性に及ぼす効果について調べるため、数種類の材料を準備した。プラズマ拡散窒化は、化合物層が形成されない条件で行った。DLC 被覆はメタンガスの比率を変化させて行った。以降では、各処理を区別するため、未処理を記号「UN」、プラズマ窒化を「PN」あるいは「P」、DLC 被覆を「D」で表す。

上記の材料について、各種実験を行った。具体的には、表面層性状を調べるため、走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面観察、ナノインデンテーション試験、およびスクラッチ試験を行った。また、硬さ分布測定を行うとともに、摩擦摩耗試験および摩耗痕の SEM 観察・EDS 分析を行った。

ナノインデンテーション試験は、DLC 層のヤング率および硬さを調べるために行った。また、DLC 層の密着性はスクラッチ試験により調べた。

摩擦摩耗試験 (図 2.2.2) は、直径 3 mm のアルミナボールを使用し、回転直径 3 mm、しゅう動速度 40 mm/s、試験力 1.96 N (0.2 kgf)、9.8 N (1 kgf) あるいは 29.4 N (3 kgf) の条件で行った。試験後、摩耗痕の SEM 観察および EDS 分析を行った。

## 2-3 実験実験の結果

### 2-3-1 納入材の性状

SCM 材は典型的なソルバイト組織を有していた。また、SKD 材ではマルテンサイト生地に Cr 炭化物が認められた。

表 2.3.1 に、SCM 材の機械的性質を示す。この表に示す結果は、他の文献等で報告されている値と同程度であることから、今回使用した SCM 材は健全であると判断された。

図 2.3.2 に、SCM 材および SKD 材の S-N 曲線をまとめて示す。この試験は、両材の健全性を確認すること以外に、実施予定の疲労試験に供する各種 DLC 材の形状や試験方法の妥当性を確認するために実施された。疲労試験の結果、高硬さを有する両材に対しても、今回採用した試験片形状および試験方法は適切であることが明確となった。また、同図に示すようにデータのばらつきは少なく、疲労強度についても硬さから想定される値と比較して妥当であった。

表 2.3.1 SCM 材の機械的性質

	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
SCM440	210	863	934	12	64

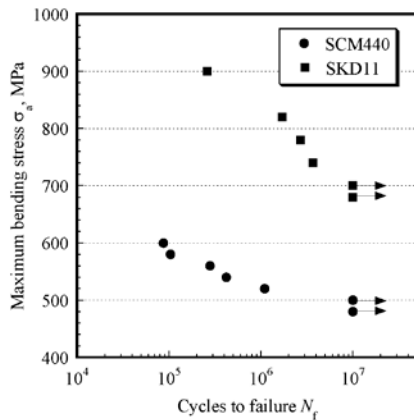


図 2.3.2 SCM 材およびSKD 材のS-N 曲線

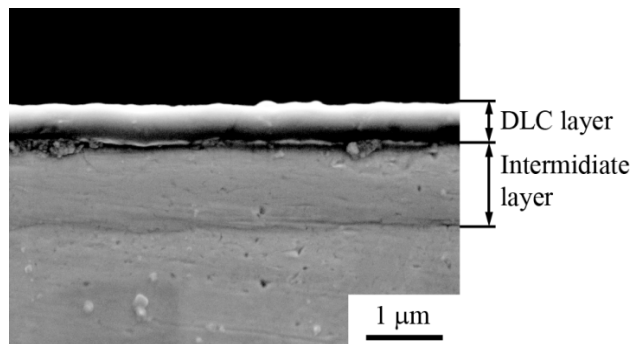


図 2.3.6 代表的な DLC 層の様相 (SCM-PD100 材)

図 2.3.6 には、代表例として SCM-PD100 材の DLC 層を断面上で観察した結果を示す。同図から理解されるように、DLC 皮膜により均一に形成された表面層は、最表面の DLC 層と密着性を改善させるために傾斜的に組成を変化させた中間層の 2 層から形成している。以後、両層を含めて単に DLC 層と称する。DLC 層の厚さは  $1.5 \mu\text{m}$  であった。

### 2-3-3 DLC 層の特性値

表 2.3.2 および表 2.3.3 に、SCM440 および SKD11 の各 DLC 被覆材について、ナノインデンテーション試験を通じて調べた DLC 層のヤング率および硬さを、上記の方法で求めた密着力とともにまとめて示す。下地が異なる 3 種類の DLC 材の結果を比較する。なお、これらの材料の DLC 被覆はすべて同じ条件 (D100) で実施した。SCM 材および SKD 材ともに、プラズマ窒化により DLC 層のヤング率、硬さおよび密着力は上昇しており、明瞭な効果が認められた。

表 2.3.2 DLC 層の特性値 (SCM 材)

		Young' s modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Adhesion force (N)
Effect of pre-treatments	SCM-D100	157	21	26
	SCM-PD100	193	30	59
	SCM-PCD100	196	30	46
Effect of quantity of hydrogen	SCM-PD30	221	27	59
	SCM-PD50	220	31	44
	SCM-PD200	138	22	43

表 2.3.3 DLC 層の特性値 (SKD 材)

		Young' s modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Adhesion force (N)
Effect of pre-treatments	SKD-D100	183	27	45
	SKD-PD100	243	41	96
	SKD-PCD100	194	28	90
Effect of quantity of hydrogen	SKD-PD30	240	34	91
	SKD-PD50	167	21	94
	SKD-PD200	129	19	95

図 2.3.10 に、SCM 材および SKD 材の各材に関し、硬さ分布をまとめて示す。DLC 被覆が母材部の硬さに影響を及ぼさないことがわかる。また、PN には厚さ  $150 \mu\text{m}$  の表面硬化層が形成され、その分布は内部へ向かって徐々に低下していた。

一方、SKD 各材の硬さ分布は全般的に SCM 材よりも高硬さ側に位置していた。DLC 被覆が母材部の硬さに影響を及ぼすことはなかった。

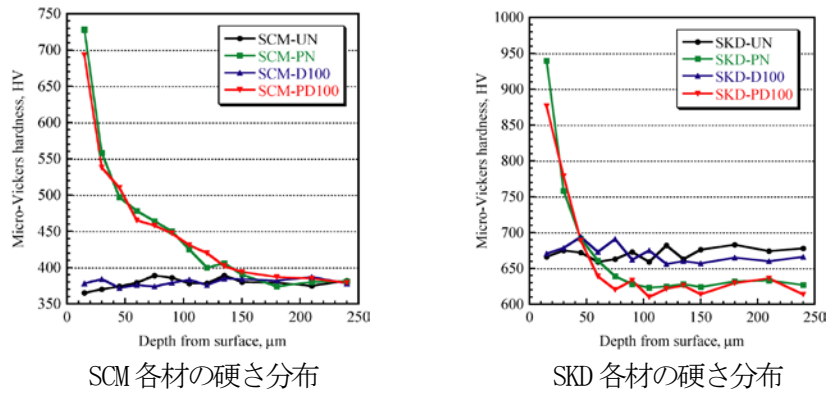


図 2.3.10 断面硬さ分布

2-3-4 表面処理材の摩擦摩耗特性

2-3-4.a プラズマ拡散窒化およびDLC 被覆の効果

図 2.3.11 に、SCM 材および SKD 材ごとに、未処理材、プラズマ拡散窒化材、および各 DLC 材 (D100 材, PD100 材) の摩擦摩耗試験の結果を示す。図 2.3.12 には、各材の摩耗痕の様相および EDS 分析結果を示す。

2-3-4 表面処理材の摩擦摩耗特性

2-3-4.a プラズマ拡散窒化およびDLC 被覆の効果

図 2.3.11 に、SCM 材および SKD 材ごとに、未処理材、プラズマ拡散窒化材、および各 DLC 材 (D100 材, PD100 材) の摩擦摩耗試験の結果を示す。図 2.3.12 には、各材の摩耗痕の様相および EDS 分析結果を示す。未処理材およびプラズマ拡散窒化材の結果に示すように、SCM 材においてはプラズマ窒化により摩擦係数の低下は認められなかったが、SKD 材では摩擦係数が低下した。その一方、図 2.3.12 から理解されるように、両材ともプラズマ拡散窒化後には摩耗痕の幅が狭くなり、硬化層の形成により耐摩耗性が改善した。一方、SCM 材および SKD 材ともに、D100 (DLC 被覆のみ) 材および PD100 (プラズマ拡散窒化+DLC 皮膜) 材の摩擦係数は 0.1 以下の極低い値を推移し (図 2.3.11)、また摩耗痕の幅は顕著に小となった (図 2.3.12)。以上のように、比較的低い試験力下では、プラズマ拡散窒化の有無によらず、DLC 層の形成は摩擦係数の顕著な低減および耐摩耗性の改善をもたらした。

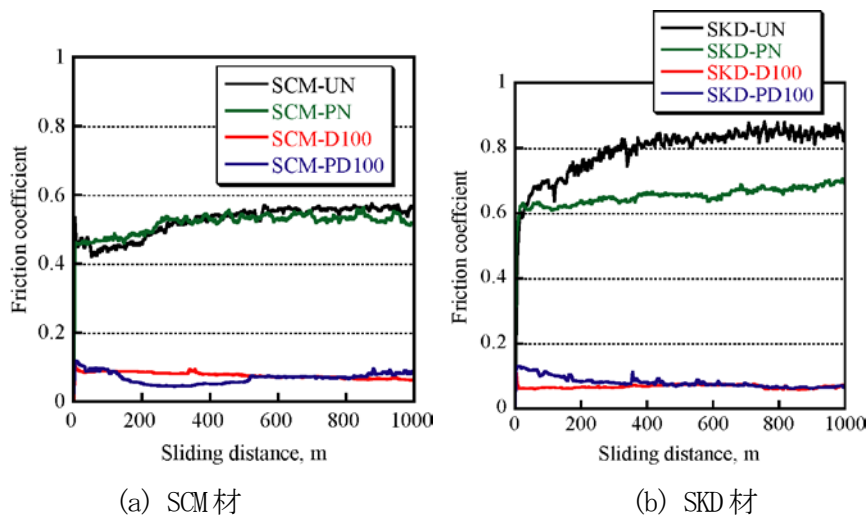
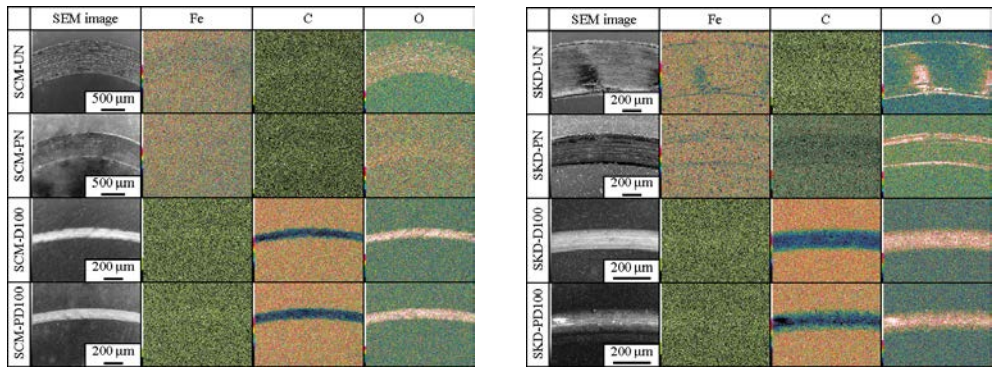


図 2.3.11 未処理材、プラズマ拡散窒化材および各 DLC 材 (D100 材, PD100 材) の摩擦摩耗試験結果 (試験力 9.8 N)



(a) SCM 材

(b) SKD 材

図 2. 3. 12 未処理材, プラズマ拡散窒化材および各 DLC 材の摩耗痕の様相および EDS 分析結果 (試験力 9.8 N, しゅう動距離 1000 m)

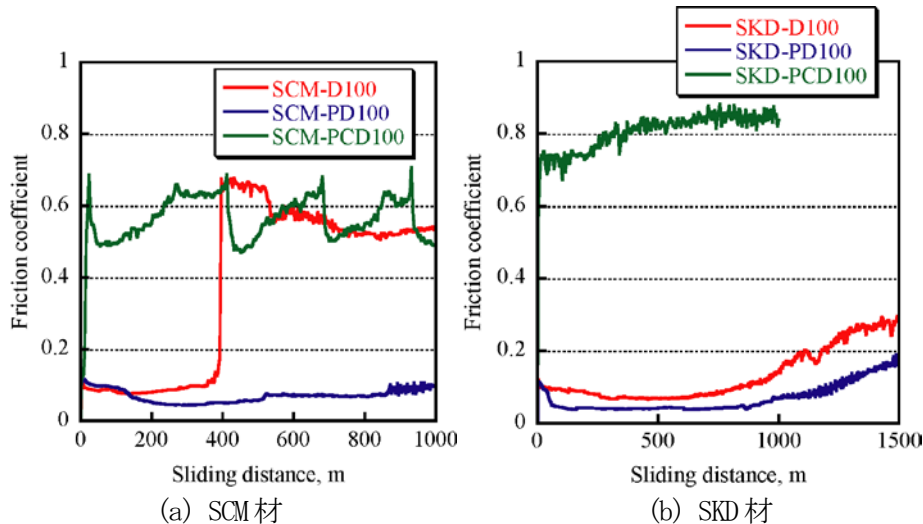
### 2-3-4.b 下地処理の効果

図 2. 3. 13 に、SCM 材および SKD 材ごとに、下地が異なる 3 種類の DLC 材に関する摩擦摩耗試験の結果を示す。この試験では、各 DLC 層の耐久性の評価を併せて行う目的から、試験力を 29.4 N に高めて行った。

SCM 材および SKD 材について、D100 材と PD100 材の結果を比較すると、D100 材の摩擦係数よりも PD100 材の摩擦係数の方が明らかに低いことがわかる。このように、高い試験力では、プラズマ拡散窒化により形成された硬化層が DLC 層下に生じる塑性変形を抑制する効果が顕著に発現し、DLC 層の表面を平坦に保持して摩擦係数を低下させることが明らかとなった。

さらに、D100 材では早期に DLC 層の剥離・摩滅が進行して摩擦係数の上昇が生じた一方で、PD100 材は高い耐久性を示した。このことは、摩耗痕の様相にも反映された。すなわち、図 2. 3. 15 において D100 材の摩耗痕には C が認められず、DLC 層は完全にはく離あるいは摩滅していたのに対し、PD100 材の摩耗痕には明らかに C が検出され、DLC 層が残存していた。

一方、下地処理としてプラズマ窒化および CrN 皮膜を行った PCD100 材の場合、SCM 材および SKD 材ともに、摩擦係数は試験開始直後から急激に上昇した。これは、高い試験力の下では DLC 層下の CrN 層に破壊が生じ、DLC 層のはく離が早期に生じたためと考えられる。



(a) SCM 材

(b) SKD 材

図 2. 3. 13 しゅう動距離と摩擦係数の関係 (試験力 29.4 N)

### 2-3-4.c 水素添加量の影響

図 2.3.14 に、SCM 材および SKD 材ごとに、水素添加量が異なる各 DLC 材の摩擦摩耗試験の結果を示す。図 2.3.15 には、それらの摩耗痕の様相および EDS 分析結果を示す。

研究当初には、水素添加量が多いほど DLC 層の硬さが低下して摩擦係数は低下する一方、早期に DLC 層の摩滅等が生じて耐摩耗性および耐久性は悪化すると予想した。実際、図 2.3.14 から理解されるように、DLC 材の中で最も水素添加量が多かった PD200 材の摩擦係数は、他材と比較して低い値を示した。しかしながら、予想に反し、水素添加量が多いほど DLC 層の耐久性は改善し、より長いしゅう動距離まで DLC 層の効果は維持された。

PD200 材で DLC 層の耐久性が改善したことは、図 2.3.15 に示す結果からも明らかである。すなわち、水素添加量が少ない DLC 被覆材の方が摩耗痕の幅が狭く、同時に C の残存状態も良好であった。以上のように、SCM 材および SKD 材に関しては、水素添加量が多い方が摩擦係数の低減および耐久性の向上という点から適切であると言える。

上記のように、水素添加量が多いほど良好な摩擦摩耗特性を示した原因としては、2 つの事柄が考えられる。第 1 は、水素添加量の低下にともない DLC 層の生成状態が不安定となり、硬さの上昇や耐久性の向上が生じなかったことである。第 2 は、水素添加量の増加にともなう摩擦係数の低下が返って DLC 層の不均一な摩滅を防止したことである。

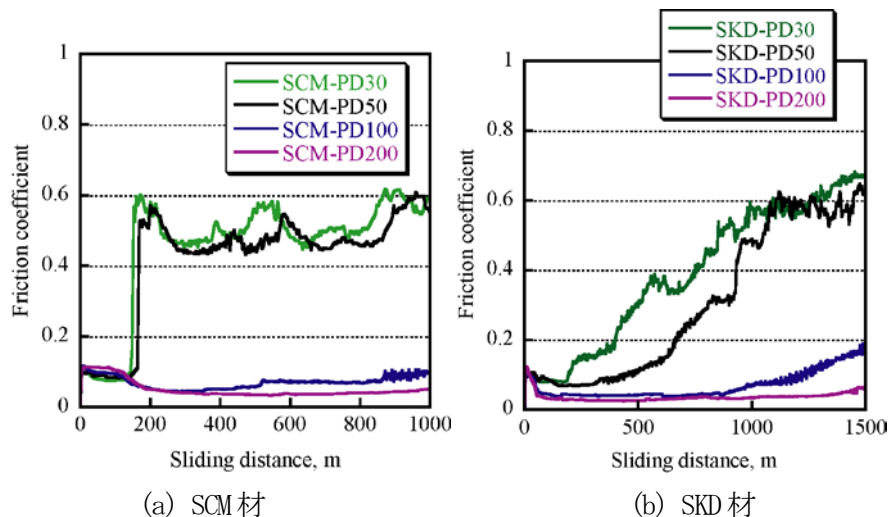


図 2.3.14 しゅう動距離と摩擦係数の関係 (試験力 29.4 N)

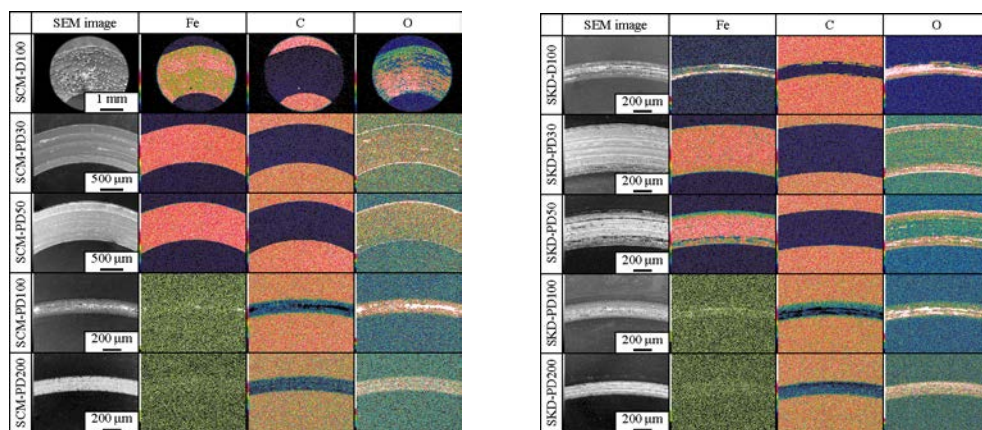


図 2.3.15 各 DLC 材の摩耗痕の様相および EDS 分析の結果 (試験力 29.4 N)

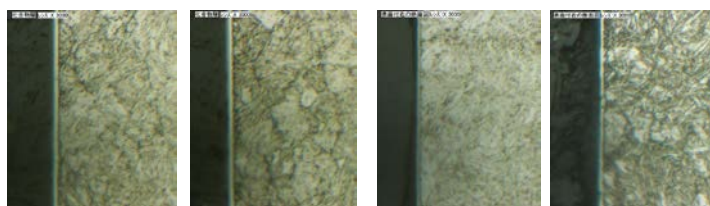
## 2-4 厚膜化と高密着性および低摩擦特性の開発

2-3項；基礎実験の結果と、平成22年度の結果を踏まえ、共同体で検討した結果、コーティングの厚膜化と高密着性および低摩擦係数に対する試験の候補になったのが、分散コーティングと積層コーティングおよびLowバイアスによるコーティングであった。ここでは、主に3種類のコーティングを比較した。

### 2-4-1 分散コーティングの結果

分散コーティングをした時の断面観察写真を図2.4.3に示す。

No1は、DLCにAlを分散させたもので、密着性も良く摩擦係数も小さい(0.14)。No2は、DLCにCrを分散させたもので、密着性も良く摩擦係数も小さい(0.13)。No24とNo28のTiとCrを分散させたものは、前者に比べ密着性が劣る結果となった。



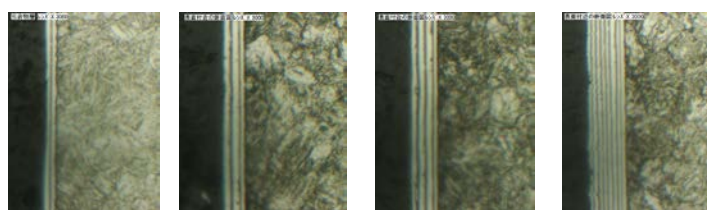
DLC(Al)/PN    DLC(Si)/PN    DLC(Ti)/PN    DLC(Cr)/PN

図. 2.4.3 断面観察写真 (分散)

### 2-4-3 積層コーティング

図2.4.2のタイプで積層コーティングをした結果を表.2.4.2に示す。密着性はスクラッチ試験で評価した。また、その時の断面観察写真を図2.4.4に示す。

写真で積層したDLC皮膜が明瞭にわかる。この内、DLCを8層にしたコーティングでは、膜厚が12.5 $\mu\text{m}$ までになり厚膜化が可能であることがわかった。但し、摩擦係数が大きいのと密着性の弱いということがわかった。後述する圧痕試験結果では、DLCを4層にしたコーティングの密着性は特に悪くもないので、今後、実用段階でよい評価が得られる可能性が残った。



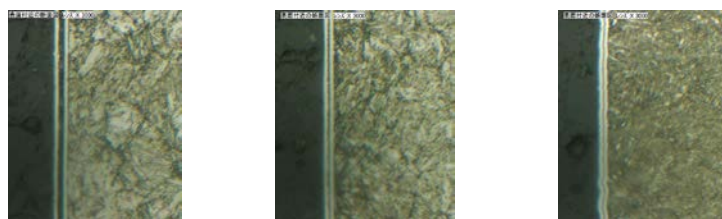
DLC2層    DLC3層    DLC4層    DLC8層

図. 2.4.4 断面観察写真 (積層)

### 2-4-4 Lowバイアスによるコーティング

成膜時のバイアス電圧を低くしてコーティングをした結果を表.2.4.3に示す。密着性はスクラッチ試験で評価した。また、その時の断面観察写真を図2.4.5に示す。

DLCコーティングを2層にして膜厚4.4 $\mu\text{m}$ のコーティングは、密着性が良く摩擦係数が低い結果を得られた。



LowバイアスDLC/PN    LowバイアスDLC/GSN    LowバイアスDLC/VHC

### 2-4-5 密着性試験と摩擦摩耗試験の状況

#### 2-4-5.a 密着性評価 (HRC圧痕法)



密着性評価試験として、ロックウェル硬度計による圧痕試験を行った。

分散コーティング、積層コーティング、Low バイアスによるコーティングの HrC 圧痕試験の結果、いずれも、良好な結果とが得られた。

#### 2-4-5.b SKD11 材へのコーティングの密着性 (スクラッチ試験)

図 2.4.7 に示すように、一部の処理条件では、スクラッチ試験で臨界荷重が 100N に達した。これは、拡散窒化+Si ベースのコーティング+DLC のコーティングである。

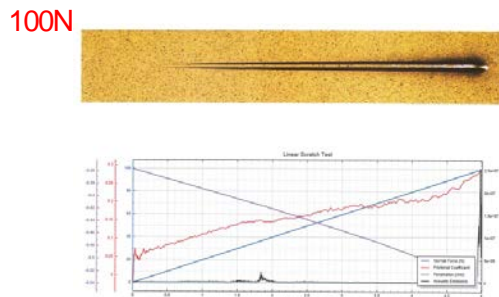


図 2.4.7 スクラッチ試験結果 (SKD11)

#### 2-5 基材強度向上に関する開発

##### 2-5-1 実験方法

納入材は、2-2 項に記載したものと同一である。

表 2.2.4 に、本研究で調べた供試材を列挙する。前処理としてのプラズマ拡散窒化は、基本実験と同様、化合物層が形成されない 550°C、1 h の条件で SCM440 材および SKD11 材それぞれに施し、また DLC 被覆はメタンガスの比率 9.1 % の条件で行った。なお、以降では各処理を区別するため、未処理を「UN」、プラズマ拡散窒化を「PN」、DLC 皮膜を「D100」、プラズマ拡散窒化後に DLC 皮膜を施した場合を「PD100」のように表す。

##### 2-5-2 評価試験方法

###### 2-5-2.a 引張試験

引張試験は、図 2.2.1 (b) に示す試験片を用い、試験力の上昇速度を 250 N/s として室温・大気中で行った。その際、ひずみは試験部中央へ軸方向に貼付したひずみゲージにより、また試験力はロードセルにより測定した。引張試験後には、試験片の破面および側面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。なお、SKD 材についてはジグの変更等、各種取り組みを行ったが、残念ながら高硬さを有するために試験片のチャッキングができず、引張試験は実施できなかった。

###### 2-5-2.b 平面曲げ疲労試験

平面曲げ疲労試験は、SCM材およびSKD材の各材について、繰返し速度 25 Hz、応力比  $R = -1$ 、室温・大気中の条件で行い、繰返し数  $N = 10^7$  で試験打ち切りとした。破断した試験片については、き裂の発生形態を詳細に調べるために破面をSEMにより観察した。

##### 2-5-3 実験結果および考察

###### 2-5-3.a 組織および硬さ分布

表 2.5.1 に DLC 層の特性値を示す。

表 2.5.1 DLC 層の特性値 (SCM-PD100 材)

Young's modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Adhesion force (N)
193	30	59

### 2-5-3.b 機械的性質

表 2.5.2 に、SCM 各材の機械的性質をまとめて示す。また図 2.5.1 に、引張試験後に観察

表 2.5.2 SCM 材の機械的性質 (SCM 材)

	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
SCM-UN	209	1003	1158	14	50
SCM-PN	205	1007	1154	13	50
SCM-D100	209	1004	1146	14	51
SCM-PD100	214	1009	1152	16	50

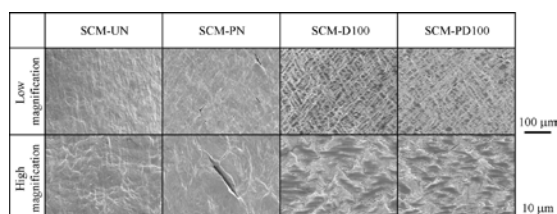


図 2.5.1 引張試験後の側面様相 (SCM 材)

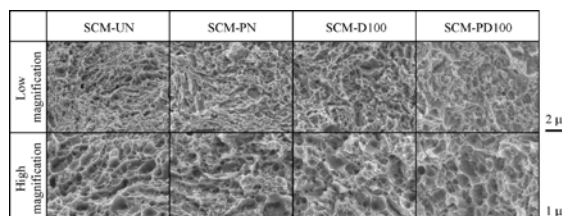


図 2.5.2 引張破面様相 (SCM 材)

した各材の側面様相を、また図 2.5.2 にそれらの引張破面の様相をそれぞれまとめて示す。

表 3.2 から理解されるように、プラズマ拡散窒化および DLC 被覆を単独で施した場合にも、またプラズマ窒化後に DLC 皮膜した場合にも、静的強度および延性値は UN 材と同程度であった。このように、各表面処理が SCM 材の機械的性質に影響を及ぼすことはなかった。

実際、図 3.5 に示す側面様相から、PN 材において一部に硬化層の割れが認められたものの、それが内部へ大きく進展する様子は認められなかった。また、DLC 皮膜を施した D100 材および PD100 材においても、薄い DLC 層の割れが内部へ向かって進展した様子は認められなかった。さらに、各材の破面はいずれも延性的な様相 (ディンプル) を呈していた。

なお、D100 材および PD100 材の DLC 層は母材部の大きな変形に追従できずに細かく割れたが (図 3.5)、顕著に剥がれ落ちることはなかった。このことは、同層が比較的強固に母材部へ密着していたことを示していた。

### 2-5-3.c SCM 材の疲労特性

図 2.5.3 に、SCM 各材の S-N 曲線をまとめて示す。図 2.5.4 には、各材のき裂発生部の近傍の破面をまとめて示す。

図 2.5.3 で SCM-UN 材と PN 材の S-N 曲線を比較すると、PN 材の S-N 曲線は UN 材よりも顕著に上方に位置していた。また、PN 材ほどではなかったが、D100 材の S-N 曲線も UN 材よりも上方に位置していた。このように、プラズマ拡散窒化あるいは DLC 皮膜は SCM 材の疲労寿命および強度を改善する上で極めて効果的であり、疲労強度はプラズマ窒化により 48%、DLC 被覆により 28%改善した。

SCM 各材の疲労破面を観察したところ (図 2.5.4)、UN 材のき裂は表面から介在物を起点とすることなしに発生していた。一方、PN 材では表面の介在物から、また D100 材では DLC 直下の介在物からき裂が発生していた。このことから、上記のプラズマ拡散窒化あるいは DLC 皮膜による大幅な

疲労強度の改善は、両処理それぞれにより形成された硬化層あるいは DLC 層が表面からのき裂の発生を高い応力水準まで抑制した結果であると言える。

このように、プラズマ拡散窒化により形成された硬化層はき裂発生を抑制したが、その起点は表面の介在物であった。プラズマ拡散窒化後に DLC 皮膜した場合、硬化層の効果と相まって表面からのき裂発生はより強く抑制され、PD100 材の疲労き裂の発生起点は母材部の介在物となった。同時に、典型的な内部き裂が発生した際に特徴的な様相であるフィッシュアイが認められた (図 2.5.4)。結局、PN 材の疲労強度は DLC 皮膜によりさらに改善し、その改善率は 56%と極めて高い水準に達した。

DLC 皮膜は耐摩耗性を改善するだけでなく、以上のように SCM 材の疲労強度の改善上、極めて効果的であった。特に、下地処理を施した後に DLC 被覆すれば、それらの相乗効果により、疲労強度は著しく高い水準とすることが可能であった。

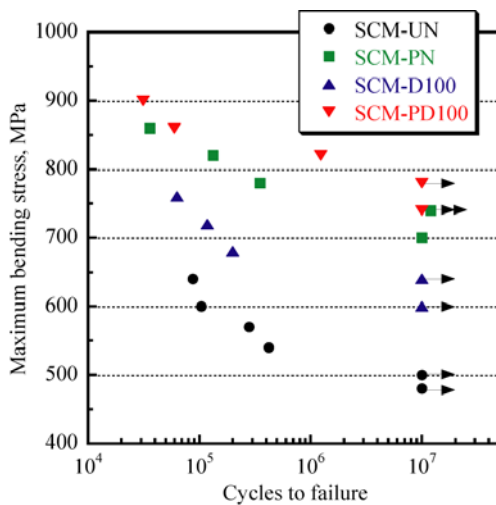


図 2.5.3 SCM 各材の S-N 曲線

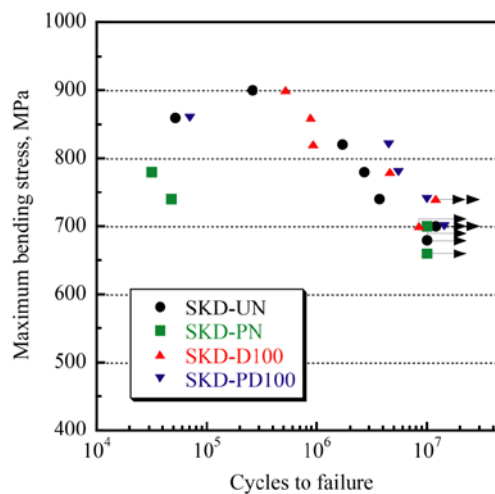


図 2.5.5 SKD 各材の S-N 曲線

### 2-5-3.d SKD 材の疲労特性

図 2.5.5 に、SKD 各材の S-N 曲線をまとめて示す。図 2.5.6 には、各材のき裂発生部の近傍の破面をまとめて示す。

SKD 材に及ぼすプラズマ拡散窒化および DLC 皮膜の効果は、前述の SCM 材の場合と大きく異なっていた。そのような相違は、以下で説明するように、基材の硬さが高いために欠陥に対する感受性が大であるとともに、容易に疲労き裂の発生起点となる極めて多くの Cr 炭化物が含まれていた結果であると考えられる。

図 2.5.5 において、UN 材と PN 材の疲労データを比較すると、それらはほぼ同じ位置にあることがわかる。これは、多数の介在物 (Cr 炭化物) が存在するために、例え表面に硬化層が形成されても、それとは無関係に疲労き裂が介在物から発生するためと考えられる。実際、UN 材では母材部の介在物から、また PN 材では硬化層内の介在物からき裂が発生していた。

以上のように、SCM 材の場合とは大きく異なり、SKD 材の疲労強度に及ぼすプラズマ窒化および DLC 被覆の効果は限定的であった。しかしながら、各処理あるいはその複合化処理が疲労強度を大きく損なうことはなかった。

## 2-6 生産性向上に関する開発

生産性向上を目的に生産性向上用スパッタ試作装置を製作した。前述したように本装置は、窒化室とスパッタ室の2室から構成している。被処理品（ワーク）は、装置内に搭載された 300mm×300mm の搬送トレイ上にセットされ、窒化室とスパッタ室の下部に設置されたローラーによって搬送する。窒化室とスパッタ室の間には、搬送トレイと被処理品が通過可能なゲートバルブを搭載している。また、これを改造することで、スパッタ試作型コーティング装置のノウハウを純分に搭載させた。

本装置は、拡散窒化処理工程と DLC コーティング工程が連続的に問題なく動作し、生産性を向上させるためのセミ連続炉が可能であることのテストである。サイクルタイムを検討する際、複合表面改質プロセスの処理パターンを検討した。これを従来のスタイルと1室タイプのスパッタ試作型コーティング装置と比較した。

従来、窒化工程とコーティング工程を別々に行うと合計 910 分掛かっていた工程を、スパッタ試作型コーティング装置を利用し、一連の工程を1つのチャンバー内で行うことで、530 分までに短縮できた。これは、処理時間で 41%の改善になった。さらに、生産性向上用スパッタ試作装置で行い、さらに図 2.6.2 のように実施した場合、サイクルタイムは、230 分にすることができる。これは、スパッタ試作型コーティング装置の 68%の改善につながる。

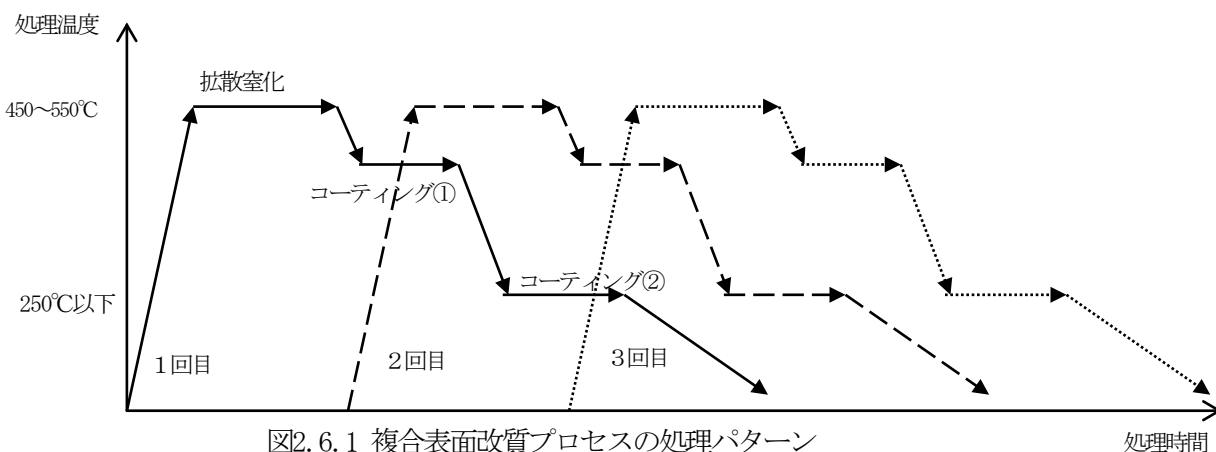


図2.6.1 複合表面改質プロセスの処理パターン

表 2.6.2 従来方法との比較表

	拡散窒化時間	コーティング①時間	コーティング②時間	トータル時間 (サイクル)
従来	昇温；70分 保持；80分 降温；180分	昇温；60分 保持；40分 降温；180分	昇温；30分 保持；120分 降温；150分	910分 (15時間10分)
スパッタ試作型	昇温；70分 保持；80分	降温；20分 保持；40分	降温；50分 保持；120分 降温；150分	530分 (8時間50分)
生産性向上型	昇温；70分 保持；80分	降温；20分 保持；40分	降温；50分 保持；120分 降温；150分	170分 (2時間50分)

※生産性向上型の場合、サイクルタイムは今回の条件では、170 分となる。実際にはこれに真空引き時間などを+50分加味すると 230 分となる。

## 第3章 全体総括

### 3-1 全体総括

自動車摺動部品に DLC 皮膜が、その特性である高硬度、低摩擦性、耐摩耗性などを備えていることから適用される事例が増えてきている。しかしながら、DLC 皮膜をコーティングした部材の信頼性向上及び高機能化などの課題が残っているため適用は限定されている。本研究開発では、材料からコーティングまでトータルの複合表面改質処理を実施して課題の解決を図り、DLC 皮膜特性を最大限利用できるようにするとともに、この DLC 皮膜を通して省エネに貢献することを目指してスタートした。

自動車などの摺動部材に対し、DLC 皮膜の低フリクション特性を利用するためには、その厚膜化と高密着性、高硬度を同時に満たす必要があり、なおかつ安価なプロセスにするため生産性向上が課題としてある。ここで、DLC 皮膜の研究開発当初、鋼上に DLC 皮膜を形成させたい場合、鋼上に直接 DLC 皮膜を形成させるのは DLC 皮膜自体の内部応力が大きいため困難であった。そこでたとえば特許第 4218831 号（発明者：池永勝ほか2名）のようにガイド装置に対し JIS 規格の機械構造用合金鋼であるクロムモリブデン鋼の表面上にラジカル窒化法により硬度上昇した窒素拡散層を形成し、スパッタリング法により該窒素拡散層の上に形成された窒化物の膜の上に DLC 皮膜を形成せしめることを考案した。しかしながら、前述した自動車の摺動部材に対するこれらの課題は、この特許では解決されなかった。本研究開発でこれらの課題を解決する具体的な方向性は、この特許をベースに、摺動部材の鋼で、特にクロムモリブデン鋼（例えば JIS 規格の SCM415 材や SCM440 材）などの金属組織のフローがつながる冷間鍛造が可能な機械構造用合金鋼に対し、コーティングの下地として、化合物層をつくらず窒素拡散層のみをつくるイオン拡散窒化処理あるいは真空浸炭窒化処理をし、その直後にスパッタリング処理をベースに中間層皮膜と DLC 皮膜を成膜する。

本研究開発の目的は、自動車の摺動部品に対し、低フリクションと信頼性を付加するために、拡散窒化又は真空低温浸炭窒化とセラミックコーティングと DLC 皮膜をより良く複合化し、DLC を含むコーティング膜の厚膜化、高密着性化、高硬度化を実現する技術を開発する。また、複合化する段階で低コストになるような新規技法を検討する。

研究の目標として、次の項目をあげた。①厚膜化と高密着性課題に対し、10 $\mu$ m の厚膜でなおかつスクラッチテスト 100N 以上又は HRC 圧痕試験でクラックしないこと。②低摩擦特性課題に対し、ボールオンディスク試験等で摩擦係数 0.05 程度。③強度向上課題に対し、従来の窒化及びコーティングに比べ、より良い強度であること。（参考値：Hv600 程度）。④生産性向上課題に対し、表面改質の受託加工として、自動車各社に受け入れられる高生産性であること。（参考指標：サイクルタイム、1チャージ/4時間）

具体的な研究の概要は、次のようになる。

自動車の摺動部材は、セラミックコーティング前の母材改質として、浸炭焼入又は窒化をするのが一般的である。求められる部品特性により材質と熱処理を選択することになるが、例えば、JIS 規格の機械構造用合金鋼である SCM440 材を考えた場合、浸炭焼入をするのが普通であり、その後、セラミックコーティング工程へと続く。それに対し新技術では、SCM440 材に対し、拡散窒化を施す。この拡散窒化処理は、浸炭の処理温度が 830~930 $^{\circ}$ C 程度に対し、拡散窒化の処理温度は 400~500 $^{\circ}$ C であり、低歪で高硬度（Hv500~600 程度）が得られる。結晶も成長しないため、摺動部材の母材としては良好である。また、省エネの観点からも望ましい。

その後のセラミックコーティング工程において、従来技術では、皮膜の内部応力分布が良くないため、厚膜化と高密着性が課題となっている。また、セラミックコーティング工程の前処理として、母材改質後研磨工程を入れ、最表面の異常層又は異常層に準ずる層をとっている。

これに対し、本研究開発では次のことを行う。①セラミックコーティングと DLC 皮膜の内部応力

をコントロールする。②拡散窒化後連続的にセラミックスコーティングに移行させる連続化。③拡散窒化などの適正化。④セラミックスコーティング及び DLC 皮膜の内部応力を適切に組み合わせる。⑤厚膜化した段階で DLC 内へ窒化物などを添加し、従来技術より低フリクション化を推進する。本研究は、平成 23 年度 3 次補正予算による「前倒し実施」の採択を受けたことにより、当初の研究開発計画を繰り上げ、研究開発内容を変更した。

研究開発計画の前倒しをする必要性として、次のようになる。昨今の円高により、日本の競争力は低下している。本事業は、「高強度および低フリクションを併せ持つ熱処理の複合化に関する技術の開発」であり、特に自動車業界や電機業界に早急に展開できれば、新規の技術とその生産性向上で非常に有益となる。

具体的な研究開発としては、生産性向上用スパッタ試作装置の性能の拡充を図ることで、生産性向上の実証実験の速度を速めることができ、熱処理の複合化の事業化に結びつく成果がより早期に得られることである。

本研究の成果は、第 2 章で詳しく述べた通りであり、当初の目的を達成することができた。特に、プラズマ拡散窒化と DLC 被膜からなる複合表面処理は、SCM440 材の耐摩擦特性を高めるだけでなく、機械的性質を維持しつつ大幅な疲労強度の改善をもたらした。このことは、まだ、解決すべき課題があるにせよ、開発目標である「低フリクション化」に貢献できる可能性が大きいといえる。

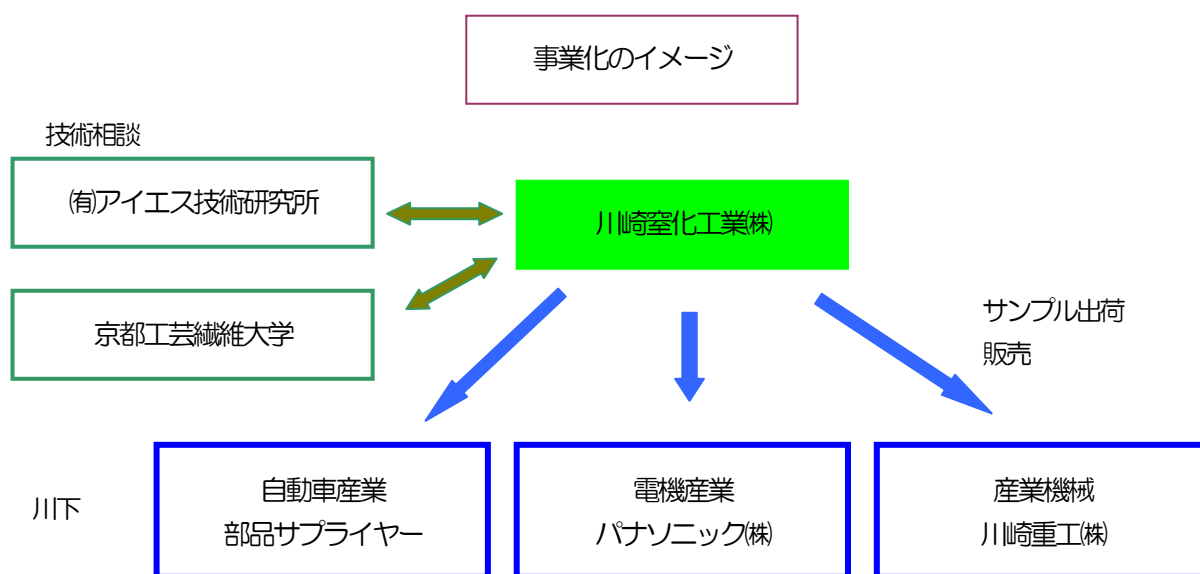
### 3-2 研究開発の課題

研究開発後の課題を以下に記す。これらの課題は、補完研究により対応していく予定である。

1. 事業化に向けた具体的な案件ごとの実証開発
2. 実用化装置の開発または改造

### 3-3 事業化計画

本事業と密接に結びつく分野は、自動車部品・機械部品（電器）・機械部品（重機）などになる。本事業の製品は受託加工であり、サンプル出荷が重要になるので、最大限のサンプル出荷を行なう。最初のサンプル出荷①は、自動車部品メーカーと自動車メーカーに対して行なう。次のサンプル出荷②は、家電用コンプレッサー部品などを扱う電器産業に対して行なう。サンプル出荷③は、重工産業の機械部品に対して行なう。



### 参考文献

熱処理 第 51 巻 第 1 号 (2011) 池永勝

ドライコーティング研究会 No31 宮崎忠男

M&M2012 カンファレンス・2012 年 9 月 22～24 日資料 OS0202 森田辰郎ほか