

【公開版】

平成29年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「歯切工具の高性能化を目指したドライコーティング技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人 栃木県産業振興センター

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、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 革新的な AIP コーティング基礎技術の開発
 - 2-1-1 装置導入・研究開発環境の構築
 - 2-1-2 密着性の向上
 - 2-1-3 表面性状の向上
- 2-2 機能層の要求特性をベストミックスさせた新コーティングの開発
 - 2-2-1 従来コーティングの切削性の確認
 - 2-2-2 新 AIP 法によるホブ用新コーティングの開発
- 2-3 ホブによる実証試験
 - 2-3-1 新 AIP 装置でのホブ成膜条件開発
 - 2-3-2 新コーティング技術によるホブ成膜適用
 - 2-3-3 新コーティング適用ホブでの歯切加工・評価

最終章 全体総括

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) 研究開発の背景

大型トラック、バス製造業界を取りまく国内市場環境は、東日本大震災での陸上輸送の重要さの再認識や円安基調による生産の国内回帰で、今後も堅調な需要が続くものと見られている。また、建設機械製造業では平成20年頃の米金融不安での落ち込みはあったものの、平成23年からは生産量も増大傾向を見せている。今後も東京五輪開催、政府の成長戦略政策などの後押しもあり、需要は拡大し続けている。我が国の高度な技術を備えた建設機械は輸出も拡大傾向にある。このような中、大久保歯車工業(株)は大型トラック・バス製造業界、建設設備製造業界等に対し、歯車や歯車を使ったアセンブリ品を幅広く提供しており、歯車需要拡大に応じ、歯車の生産効率向上、コスト低減が必要とされ課題となっている。



図1-1-1 ホブ(例)

歯車の生産工程の中でも、ホブ(図1-1-1)は歯車の歯切加工に使用される重要な工具である。ホブは通常工具メーカーからコーティングされたものを購入し歯車の歯切工程で使用するが、摩耗し切削性が悪くなったホブは再研削-再コーティング-再使用を繰り返している。生産性およびコスト面からホブの高性能化を図ることにより、再研削までの切削可能個数を延ばすことが有効である。本事業ではホブ表面に施されている硬質コーティングに注目し、切削寿命を上げることを目標にコーティング技術開発を進めた。コーティング技術を保有している(株)アイ・シー・エス、歯車メーカーである大久保歯車工業(株)、および切削性を高め、評価・解析技術を保有する栃木県産業技術センターを中心として本技術開発に取り組んだ。

2) 研究目的及び目標

最終目標 ホブ寿命 現状の2.5倍以上(800個/Reg.) (現状300個/Reg.)

注) 個/Reg. ホブ再研削までに加工できる歯車数で特定の歯車を想定

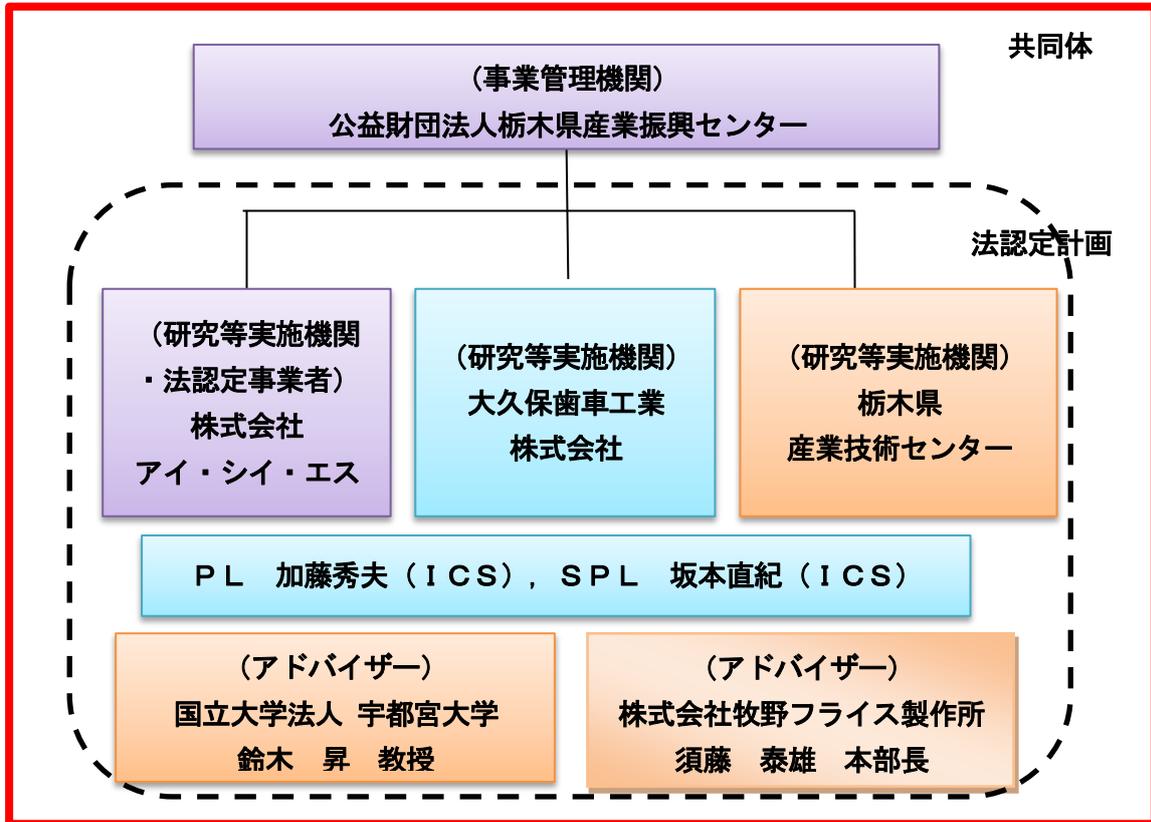
表1-1-1に本研究開発実施サブテーマと内容を示した。

表1-1-1 サブテーマと目標値

研究実施項目	内容
【1】革新的なAIPコーティング基礎技術の開発	
【1-1】装置導入・研究開発環境の構築	新AIP導入と基本機能確認
【1-2】密着性の向上	新装置の機能を生かし最適化
【1-3】表面性状の向上	同上
【2】機能層の要求特性をベストミックスさせた新コーティングの開発	
【2-1】従来コーティングの切削性の確認	従来コーティングの特性と切削性評価
【2-2】新AIP法によるホブ用新コーティングの開発	新規皮膜、改良皮膜開発 絞り込み
【3】ホブによる実証試験	

【3-1】 新 AIP 装置でのホブ成膜条件開発	ホブ実物の条件適正化と確認
【3-2】 新コーティング技術によるホブ成膜適用	新技術の歯切実評価用ホブに成膜
【3-3】 新コーティング適用ホブでの歯切加工・評価	開発技術の検証

1-2 研究体制



総括研究代表者 (PL) 株式会社アイ・シー・エス

取締役 加藤 秀夫

副総括研究代表者 (SPL) 株式会社アイ・シー・エス コーティング部

生産技術 2 課長 坂本 直紀

①事業管理機関

公益財団法人 栃木県産業振興センター

②法認定事業者・研究実施機関

株式会社 アイ・シー・エス (代表研究者) 取締役 加藤秀夫

③研究等実施機関・川下企業

大久保歯車工業株式会社 (代表研究者) 生産技術部長 中尾敬治

④研究等実施機関

栃木県産業技術センター (代表研究者) 特別研究員 竹澤信隆

1-3 成果概要

最終成果 開発した皮膜で最も優れた γ 皮膜は以下の通り。

ホブ寿命 >1427 個/Reg. (目標値>800 個/Reg.) (現状 300 個/Reg.)

目標値の170% 従来技術の4.7倍以上を達成した。

各サブテーマの目標値と成果を表1-3-1に示した。

表1-3-1 研究実施項目と目標および結果

研究開発実施内容	目標	評価(※)
【1】革新的なAIPコーティング基礎技術の開発 【1-1】装置導入・研究開発環境の構築 【1-2】密着性の向上 【1-3】表面性状の向上	2016年3月までに機能の確認 H1 (ロックウエル硬度試験法) 表面粗さ: Ra 0.1μm以下 Rz1.5μm以下 (JIS B 0601:2011 試験法) ドロップレット: 20%≦現行	◎装置導入、主機能動作の確認完了(2016年) ◎H1 ◎Ra=0.02 ◎Rz=0.4 ○20%以下達成
【2】機能層の要求特性をベストミックスさせた新コーティングの開発 【2-1】従来コーティングの切削性の確認 【2-2】ホブ用新規コーティング技術開発・評価	H27年度中に従来技術での摩耗現象データ収集と分析完了 耐熱性: 1000℃以上 ビッカース硬さ: 2000以上 摩擦係数: 0.5以下	◎3種の従来膜を評価基準と開発方向性確認 ○1000℃以上を確認 ○2700~3500 ◎0.2
【3】ホブによる実証試験 【3-1】新AIP装置でのホブ成膜条件開発 【3-2】新コーティング技術によるホブ成膜適用 【3-3】新コーティング適用ホブでの歯切加工・評価	ホブの必要部分へのコーティング膜厚公差: ±0.5μm 必要部分への欠陥がない均一な皮膜の確認 工具寿命: 800/個 Reg. 以上	◎処理炉有効空間内で2.7~3.2μm (N=6) ○密着性、欠陥のないことを確認 ◎>1427個/Reg.

※評価の見方 ◎目標を上回る ○目標どおり △目標をやや下回る ×目標を下回る

1-4 当該研究開発の連絡窓口

機関名 公益財団法人 栃木県産業振興センター

所属、役職 産業振興部 主査

氏名 吉原正臣

電話番号 028-670-2601

第2章 本論

2-1 革新的な AIP コーティング基礎技術の開発

2-1-1 装置導入・研究開発環境の構築

本研究開発の実施目標が達成可能なアークイオンプレーティング装置（AIP）の技術仕様とし、装置メーカーである（株）神戸製鋼所が製作、（株）アイ・シー・エス栃木工場に設置した。外観を図 2-1-1 に示した。



図 2-1-1 アークイオンプレーティング装置

以下に本 AIP 装置の特長を示した。

1) 従来にないエッチング機構の仕様

被コーティング品の表面を清浄にするためのエッチング（ボンバード）は密着性に大きな影響を与える。

本事業では図 2-1-2 のようなエッチング機能を持った設備仕様とした。その特長は

- ①蒸発源（カソード）をアノードとして利用することで Ar プラズマを均一にワーク全体に行き渡らせることができる。
- ②各蒸発源の電流値を制御することにより、上・中・下のプラズマ密度を制御可能。
- ③Ar プラズマ分布を広げることにより従来法よりプラズマ密度を下げられ、奥まった部位へのプラズマの侵入を促進できる。

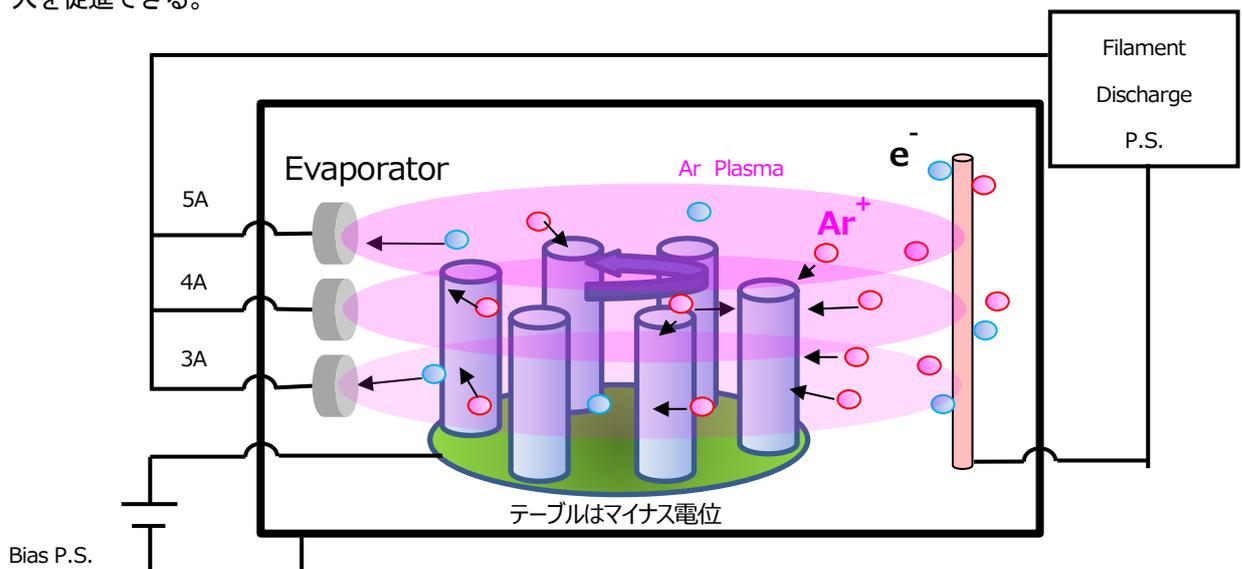


図 2-1-2 導入した AIP 装置のエッチング機能

2) 表面性状向上（ドロップレット減少）が可能な機構の仕様

皮膜の表面性状はホブ寿命に影響を与える。できるだけドロップレットが少なく、平滑な表面が望ましい。ドロップレットとは皮膜ターゲット材が成膜中、イオン化されずにそのまま皮膜に接着する現象で、アークがターゲット（蒸発源）の一定の箇所に集中することが原因である。今回導入したAIP装置にはアーク放電がターゲットの特定の箇所に集中しない方式を取った仕様とした。

2-1-2 密着性の向上

コーティング皮膜の密着特性は基材表面の状態に大きく影響される。これはコーティングの初期に行われる前処理（ボンバード）で表面がエッチングされることにより清浄性が確保されるが、弱いと密着性が悪くなり、逆に強すぎると表面粗度が粗くなる。新規導入したAIP装置の特徴である、図2-1-3に示すような広範囲なプラズマによるボンバード機能を生かし基本的なエッチング効果を確認し、密着性向上の見通しを得ていた。このボンバードの条件（プラズマ密度、Arガス流量、被処理物の配置、時間）を変化させ密着性の関係を把握し、前処理条件を最適化させ密着性を向上させることができた。

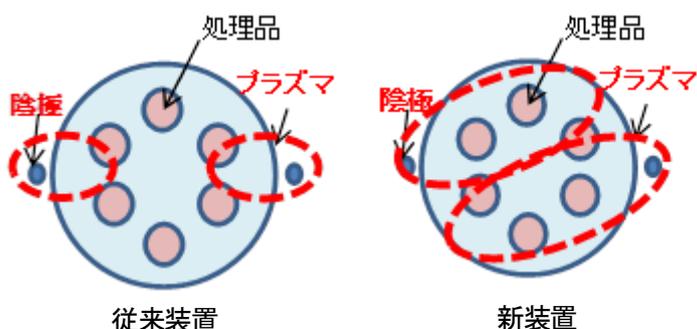


図2-1-3 ボンバード用プラズマの比較

ボンバード時間を変化させたときのエッチング深さを図2-1-4示した。また、密着性の評価結果を図2-1-5に示した。エッチング深さはボンバード時間に比例し、10分～60分（深さ0.1～1.0 μm ）の範囲では全て密着性は良好（H1）であった。また、凹凸形状の被処理材についても図2-1-6のように、広範囲プラズマを用いたボンバードによる密着性の向上を確認した。

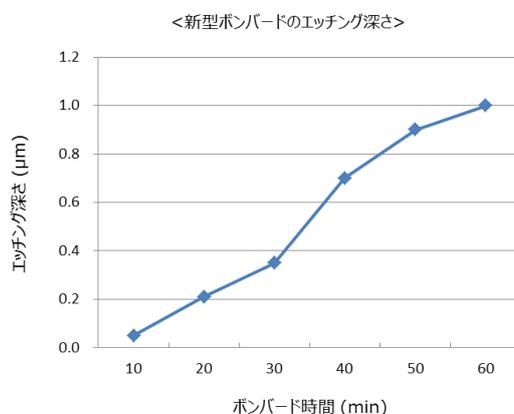


図2-1-4 ボンバード時間とエッチング深さ

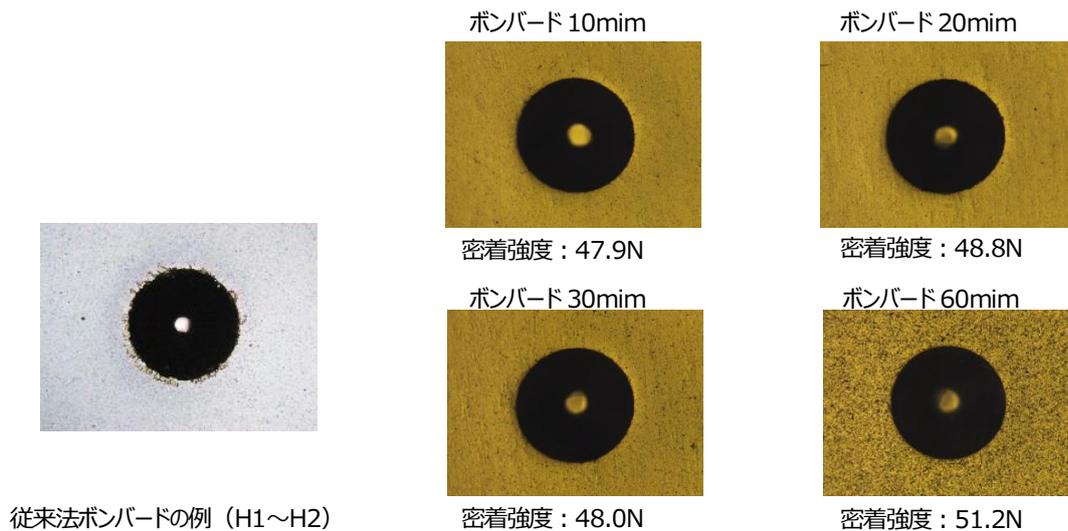


図 2-1-5 ボンバード時間と密着性評価結果（密着性はいずれも H1）

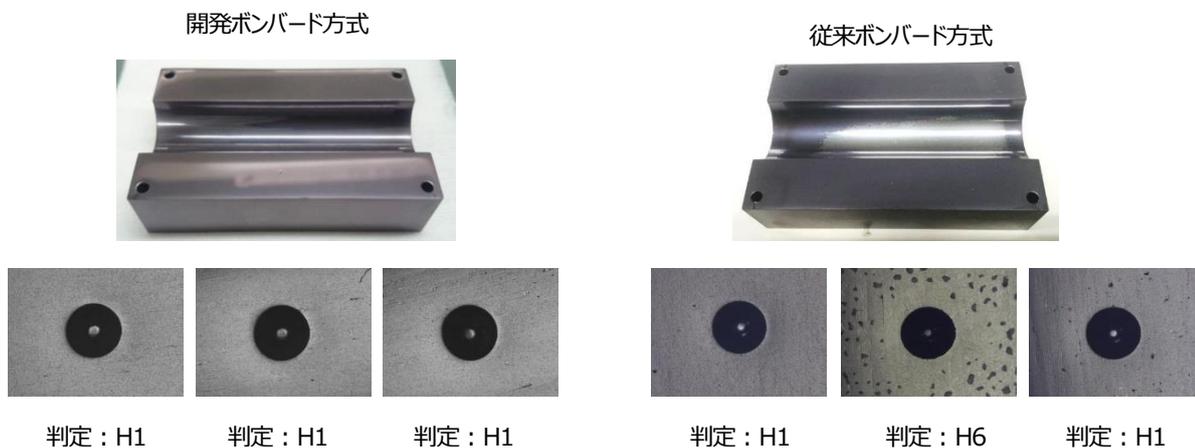


図 2-1-6 凹凸形状品へのボンバード方式違いによる密着性評価結果

2-1-3 表面性状の向上

ホブの長寿命化のためには、コーティング皮膜の均一性が重要である。現状では、ドロップレットという皮膜と同質の粗大な粒が表面に点在し局所的な欠陥となっており、ホブ工具の寿命を短くしている。ドロップレットは、蒸発源からイオン化が不十分なまま発生した中性の液滴が基板に付着したものであり、いわゆる副産物である¹⁾。新 AIP 装置にはドロップレットを少なく、表面平滑性を向上させる機能が付与されている。これはファインカソード方式と呼び、磁場を使ってターゲット（コーティング材質）の熔融状態を制御することで、蒸発源からのドロップレットの発生を抑える機構のことである。表面性状を改善するため、サンプルで実験を行った。最適なカソード電流、速度、時間、反応ガス圧などの制御機構を調整し、表面性状と成膜条件の関係データを集積し評価した結果、表面性状の向上を実現した。適正化された成膜条件での結果を図 2-1-7 に示した。表面粗度は従来法では $Ra=0.19$ であったが、開発した技術では $Ra=0.05$ と大幅に向上させた。また、ドロップレットの発生量についても従来に比べて目標である 20%以下に低減することができた。

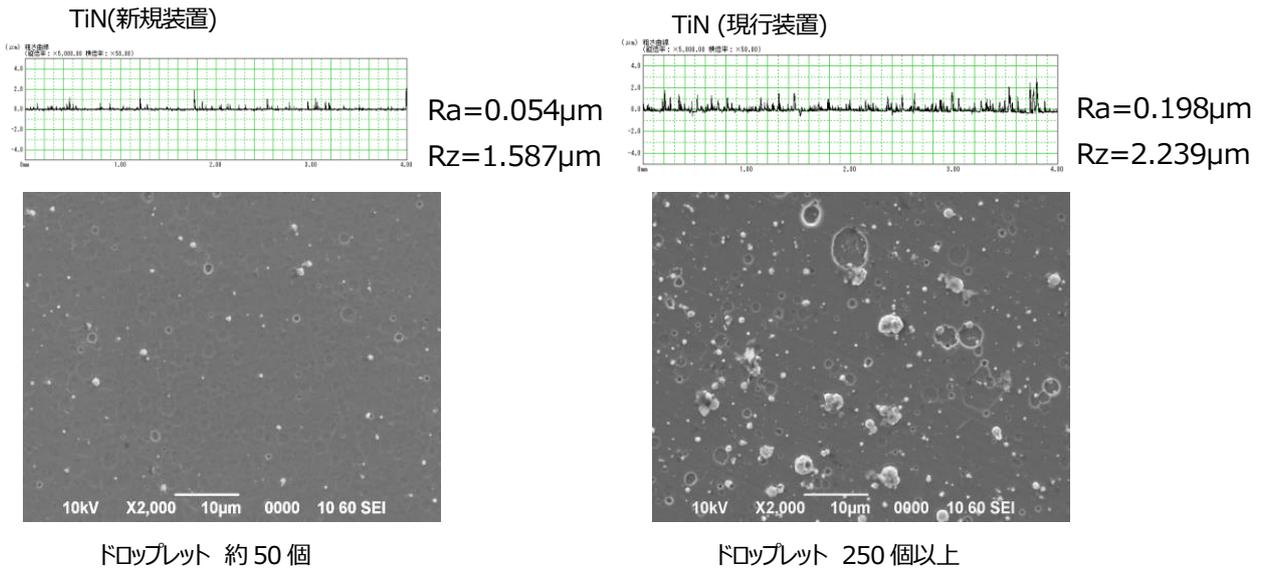


図 2-1-7 表面性状向上結果（膜種は TiN）

2-2 機能層の要求特性をベストミックスさせた新コーティングの開発

2-2-1 従来コーティングの切削性の確認

1) コーティング膜と評価サンプル

コーティング膜の種類は、TiN 膜、AlTiN 膜、AlCrN 膜の 3 種とした。特性評価用のテストピース（図 2-2-1 参照：φ50mm×4mm）は、材質を実際の工具材と成分構成が近い DEX40 とし、3 種の膜をいずれも従来の AIP 装置を用いて成膜した。切削性評価用のテスト工具は、歯切工具を模した形状で設計（後述）し、テストピースと同条件にてコーティング処理を施した。

コーティング膜の表面粗さは、ハイブリッド顕微鏡（キーエンス VN-8000）により測定した。諸々の物性は、ピンオンディスク型摩擦摩耗試験機（新東科学 HEIDON TIPE:20）、接触角計（協和界面科学 DMS-400YS）、ナノインデント（エニオニクス ENT-1100a）で評価した。また、膜の密着性は、スクラッチ試験機（レスカ CSR-5000）で評価した。膜の構造は、エックス線回折装置（以下、XRD）（リガク RINT）を用いて評価した。

2) コーティング膜の特性評価と結果

①表面性状

各コーティング膜の DFM 像を図 2-2-2 に、計測した表面粗さ Ra と Rz を表 2-2-1 に示す。表面粗さは、Rz で 0.9~2.1μm であり、全ての膜表面にサブミクロンから数ミクロンサイズのドロップレットと思われる突起物が観察された。表面性状の改善には、ドロップレットの基板への付着、あるいはその発生自体を抑制することが必要となる。

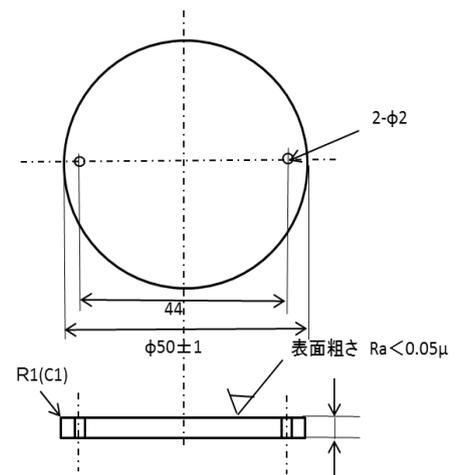


図 2-2-1 特性評価用テストピース形

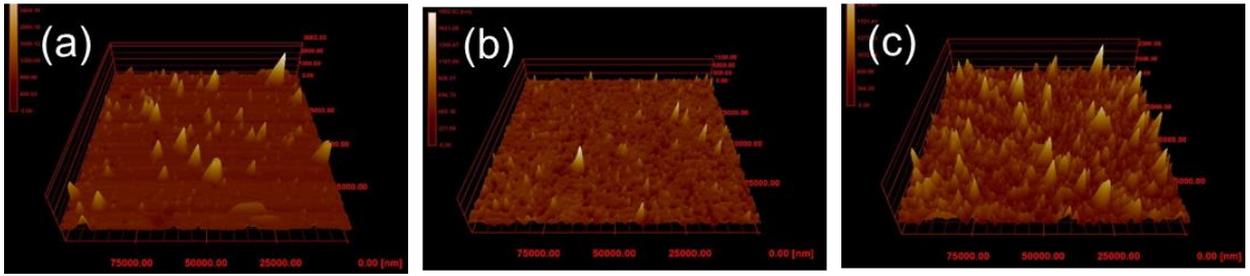


図 2-2-2 各コーティング膜のDFM 像（視野：100 μ m \times 100 μ m，(a) TiN，(b) AlTiN，(c) AlCrN）

表 2-2-1 各コーティング膜の表面粗さ

	TiN	AlTiN	AlCrN
Ra	0.08 μ m	0.08 μ m	0.15 μ m
Rz	1.9 μ m	0.9 μ m	2.1 μ m

② 摩擦摩耗特性

図 2-2-3 に、摩擦摩耗試験の結果を示す。動的摩擦係数は、TiN 膜と AlTiN 膜において、ともに 0.2~0.8 であるのに対し、AlCrN 膜においては 0.2~0.3 であり、AlCrN 膜が最も低い値であった。これは、TiN 膜と AlTiN 膜においては、しゅう動距離の増加に伴って進行した摩耗により、接触面積が増えたことで摩擦力が増加したと考えられる。一方、AlCrN 膜における摩擦係数が一定であったことは摩耗量が非常に少なかったことを示しており、AlCrN 膜が最も優れた耐摩耗性を示す結果となった。切削工具の摩耗は、機械的摩耗（アブレシブ、疲労）と化学的摩耗（酸化、凝着、拡散など）が複合した形で進行し、機械的な摩耗の代表であるアブレシブ摩耗は、表面の突起同士の衝突による突起の脱落、あるいは界面に存在する硬質粒子の掘り起こし作用によるものとされている²⁾。そのため、表面粗さの改善は、耐摩耗性の向上に直接的に寄与すると期待される。

なお、最も耐摩耗性に優れた AlCrN 膜の表面粗さは、Ra 値で 0.15 μ m であり、表面粗さ特性において他のコーティング膜より劣る結果であった。このことより、表面粗さの改善による耐摩耗性の向上は、AlCrN 膜において最もその効果が期待される。

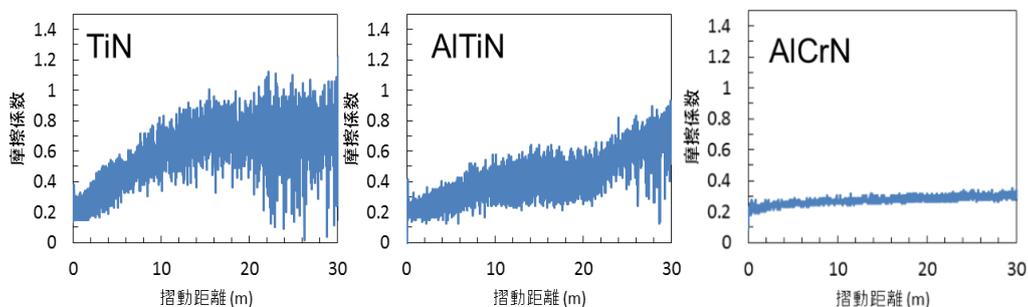


図 2-2-3 ピンオンディスク型摩擦摩耗試験結果

③ 硬さ特性

図2-2-4に、硬さ試験の結果を示す。AlTiN膜がHIT（ナノインデントー硬さ）で29GPaと最も硬く、次いでAlCrN膜の24GPa、TiN膜の22GPaであった。なお、圧子の侵入深さはいずれも30～50nmであり、コーティング膜のみの硬さを計測できている。

硬さと摩耗には相関があり、アブレシブ摩耗の摩耗量 v は、一般的に、Archardらによる次式（1）に従うことが知られている³⁾。

$$V = k \cdot \omega \cdot s / H \quad (1)$$

ここで k は比例定数、 $\omega \cdot s / H$ はそれぞれ垂直荷重、滑り距離および硬さである。

式（1）は、耐摩耗性の向上には、硬さを向上させる必要があることを示しており、コーティング条件のさらなる最適化や異元素の添加を視野に、硬さの向上を目指す。

④ めれ性

ホブを用いた切削加工は非常に高温下となるため、熱を効率良く逃がすことが課題となっており、特に切削油に対するめれ性が重要視されている。図2-2-5に各膜におけるめれ性試験の結果を示す。AlCrN膜は、水に対する接触角は88°、切削油に対する接触角は18°であり、実用上で最も優れためれ性を示した。

一般的に、Wenzelらによる次式（2）に従うことが知られている⁴⁾。

$$r = \cos \theta' / \cos \theta \quad (2)$$

ここで r は粗度（= 粗面の表面積/見かけ（平坦面）の表面積、1以上）、 θ' は見かけの接触角、 θ は粗面上の接触角である。

めれ性がよい $\theta < 90^\circ$ のときには、 $\theta' < \theta$ であり、 r が大きくなるほど、 θ' は小さくなる。つまり、（2）式は、表面粗さが粗くなるほど、よりめれやすくなる性質を示す。

AlCrN膜は、耐摩耗性を向上するため、ドロップレットを低減させることで表面粗さを改善する予定である。その際、 r が小さくなり、めれ性が損なわれることがないように、ある程度の微細な凹凸を維持することが必要である。また、めれ性の制御には、異元素の添加や配向性を制御する視点からのアプローチも検討が必要である。

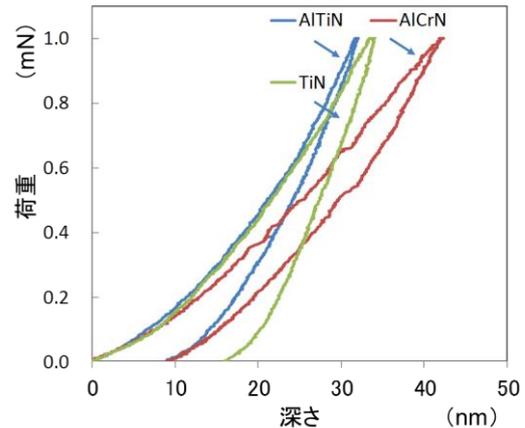


図2-2-4 ナノインデントー硬さ結果

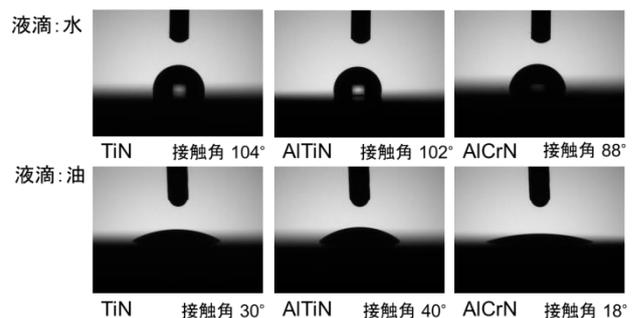


図2-2-5 めれ性試験の結果

(油：出光製切削油 HS-32)

⑤ 密着性

3種のコーティング膜をロックウェル試験機を用いて密着性を評価した結果、いずれも密着力はH1であった。図2-2-6に、スクラッチ試験装置による測定結果を示す。密着力は、AlTiN膜が403mNと最も強く、次いでAlCrN膜の391mN、TiN膜の175mNであり、スクラッチ試験装置で測定することにより、密着力を数値で評価できることを確認できた。

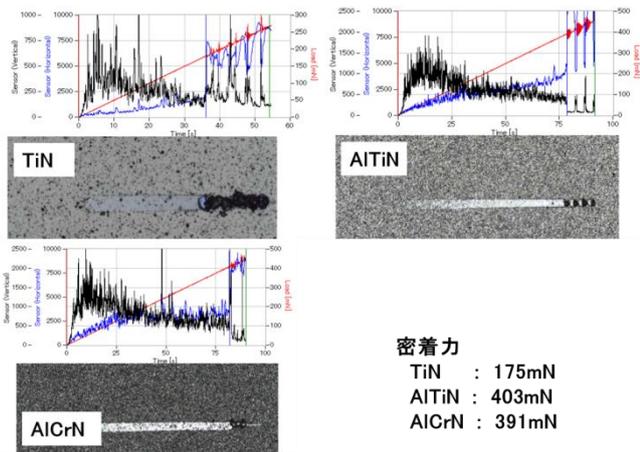


図2-2-6 スクラッチ試験装置による密着性評価の結果

2) 従来コーティングの切削性の確認 (コーティング膜評価)

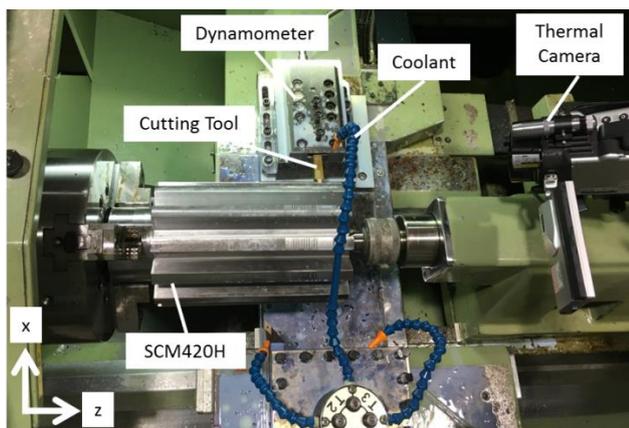
① 評価法

従来コーティングについて切削性の評価を実施した。評価用のテスト工具はホブを模した形状で設計した。材質はホブに用いられているPH-40とし、焼入れ熱処理によりHRC硬さ65~67に調整されている。コーティング膜の種類は前項と同じく、TiN膜、AlTiN膜、AlCrN膜の3種とした。また、切削性評価に使用した被削材の材質は歯車と同様のSCM420Hとし、被削材形状はホブ加工を想定し断続切削状態となるよう溝付きとした。切削性の評価に用いた工具を図2-2-7(a)に示す。当該工具を用い、図2-2-7(b)に示すNC旋盤(OKUMALS30-N)で切削試験を行った。被削材は図2-2-8に示す形状とし、切削速度、工具送り速度は順に87.9m/min、0.125mm/revとし、水溶性切削液をかけながら加工を行った。この時の切削力を圧電型切削動力計(Kistler 9265B)にて、工具逃げ面摩耗幅をデジタル顕微鏡(Hirox KH-8700)にて評価した。



すくい角, 6 deg.
逃げ角, 12 deg.
切れ刃長さ, 9 mm

(a) 切削工具



(b) 切削試験

図2-2-7 切削性評価試験

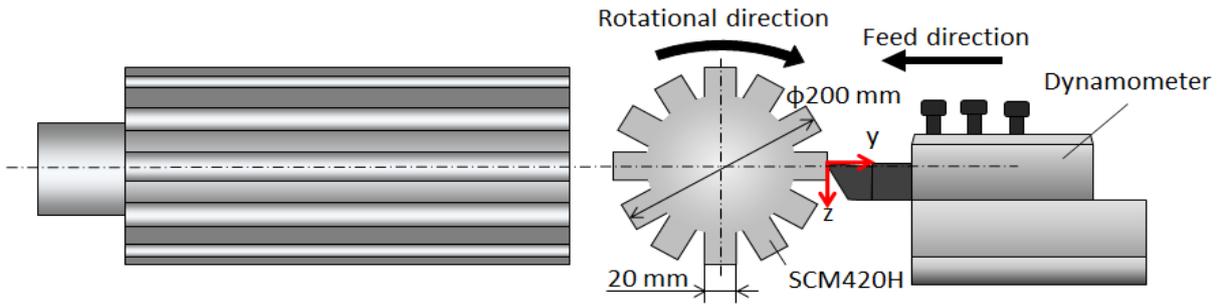


図 2-2-8 被削材形状

②切削性評価結果

切削力

図 2-2-9 に切削距離 5 m 時の各種コーティング工具における一山当たりの切削力を示す。TiN 膜と AlTiN 膜に比べ、AlCrN 膜を施した工具における z 方向の切削力が低いことが分かる。ここで、各種コーティング工具の形状は一定であり、y 方向の切削力が一致していることから、AlCrN における z 方向の切削力低下は低い動摩擦係数に起因するものと考えられる。

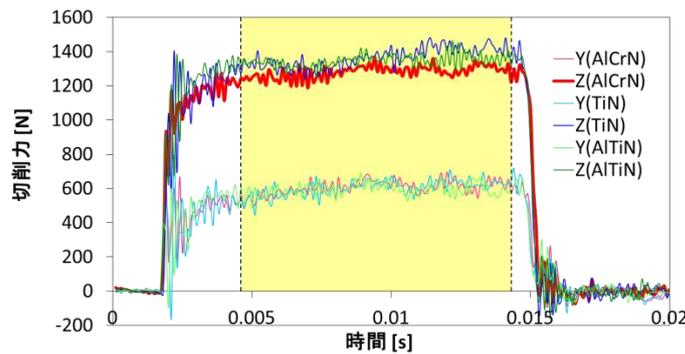


図 2-2-9 一山当たりの切削力

切削工具の摩耗特性

図 2-2-10 に切削距離による逃げ面摩耗幅の変化を示す。逃げ面摩耗幅は、AlTiN 膜<AlCrN 膜<TiN 膜という順で増加している。先述したように、硬さと摩耗には相関があり、本研究にて測定したナノインデンタ一硬さの値は AlTiN 膜>AlCrN 膜>TiN 膜という順の硬さであったことから、硬さに起因して摩耗幅が変化したと考えられる。

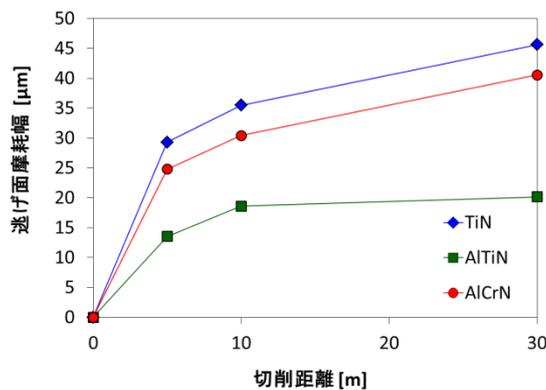


図 2-2-10 切削距離と逃げ面摩耗量の関係

結果

- ・3種のコーティング膜の密着力は、ロックウェル試験機による評価ではいずれも密着力はH1であったが、スクラッチ試験装置による評価では、密着力は、AlTiN膜が403mNと最も強く、次いでAlCrN膜の391 mN、TiN膜の175 mNであり、同じH1でも密着力に差がある。
 - ・AlCrN膜の摩擦係数は0.2程度であり、他(約0.8)と比較して低く、AlCrN膜の耐摩耗性が最も優れている。
 - ・AlCrN膜の表面性状はRa:0.8 μ m, Rz:2.0 μ mと、他と比較して粗かったため、AlCrN膜の表面性状を改善することで、耐摩耗性のさらなる向上が期待できる。
 - ・AlCrN膜のぬれ性は、切削油に対して18°(他は30~40°)と最も優れていた。表面粗さの単純な改善では、ぬれ性を低下させることが予測されるため、適切な表面性状の設計が必要である。
- 以上のことから、新規コーティング膜は、AlCrN膜をベースとして、適切な表面性状を設計しながら開発することとした。

2-2-2 新AIP法によるホブ用新コーティングの開発

開発目標(ホブ切削寿命従来の2.5倍以上)を達成するために、新規皮膜の開発を進めた。進め方は小サイズのサンプルを試作し、物理特性評価を行うと共に切削試験で切削性評価を実施した。この切削試験は、ホブ刃の形状を模擬した工具を用い評価した。これらの評価結果および従来皮膜の評価結果を基準にしながら解析し、実証試験用皮膜の選択を行った。

1) 新規コーティング技術開発

ホブ用として皮膜の切削面と接する機能層は硬質で低摩擦係数のコーティングが適していると考えられる。実用上、密着性は非常に重要な品質である。より硬質な機能層が直接基材と接触していると、機能層に非常に大きな圧縮応力が加わっており剥がれやすい。これまでの研究開発の結果、実用のコーティング皮膜においては中間層が必要である(必要でない場合もある)。密着性向上の基本は基材(被処理物)表面のエッチング処理にあるが、これに加えて中間層でこの応力を緩和させる働きを持たせることにより、密着性を向上させることができる。そこで機能層と中間層を合わせたコーティング技術の研究開発を行った。具体的には、機能層と中間層の構成を変えた3種類の新規皮膜を選択した。また従来皮膜(AlCr-Newと呼ぶ)について、新規に導入したAIP装置を用い、その機能を生かした皮膜も評価した。この皮膜は今後AlCr-New改と呼ぶ。表2-2-2および図2-2-1 1に開発膜の断面構成概要を示した。

表2-2-2 開発した新規皮膜と従来膜構成

皮膜呼び名		成膜装置	機能層	膜構造	研磨
開発膜	α	新AIP装置	AlCrTiN+添加元素 ^{※1}	単層	あり
	β	同上	同上	多層	あり
	γ	同上	同上	積層	あり
	AlCr-New改	同上	AlCrN	多層	あり
従来膜(比較)	AlCr-New	従来AIP装置	AlCrN	多層	なし

※1 主として耐熱性を向上させる元素



図 2-2-1 1 開発膜 α、β、γ および従来皮膜の構成概略図

2) 新規コーティング膜物性評価と結果

①評価方法

従来の AlCrN 膜をベースとして、AlCr-New 改 (従来の膜組成で成膜条件を開発)、α (アルミ量増加による耐熱性向上)、β (異元素ドーピングによる高強度化)、γ (α と β のナノ多層膜) の 4 種のコーティング膜を試作した。2-2-1 項で述べた従来コーティング特性評価と同じ試験方法とした。なお、耐熱性評価用のテストピースは、高耐熱性材料であるインコネル 614 (20mm×20mm) とした。切削性評価用のテスト工具は、ホブを模した形状で設計 (後述) し、テストピースと同条件にてコーティング処理を施した。

②特性評価結果

表 2-2-3 に、開発した新規コーティング膜及び従来のコーティング膜の特性を評価した結果を示す。

開発した 4 種類の膜は、いずれの評価項目においても目標値を超えた。

密着性は従来膜よりも低い値となっているがこれは前処理の際、3次元形状における密着性を改善することを目的として、プラズマを薄く広げてボンバード処理を施したことによるものである。この影響により、製品全体に均一にボンバード処理を施せるようになり凹部においても十分な密着性を確保できるようになったが、フラットな面における密着性はやや低下したものである。新規コーティング膜は、従来膜の切削液との良好なぬれ性を維持したまま、表面性状に優れた硬質な膜を実現できている。新規コーティング膜は、耐摩耗性を向上するためにドロップレットの低減を図ったことで表面粗さを改善しており、理論上はぬれにくくなると想定される。しかしながら、仕上げ工程のラッピング処理により新たに微細なくぼみを生成し、適度な凹凸 (Ra : 0.02 μm, Rz : 0.4~0.5 μm) に制御したことで表面粗度を維持することができ、良好なぬれ性を示したと考えられる。

被膜の特性評価結果を、5段階のレーダーチャートで比較した結果を図 2-2-1 2 に示す。レーダーチャートは、各評価項目のバランスを視覚的に把握し、特徴を理解し易くする手法として知られている。いずれも目標値を上回る 4 種の新規コーティング膜について、α 及び β の膜は従来膜と同様にいびつな形状を示した。一方、AlCr-New 改及び γ はきれいな五角形の形状を示し、特性のバランスが良い膜であることが分かった。この 2 種類の新規コーティング膜をホブ用コーティング膜の候補とした。

表 2-2-3 膜特性の評価結果

	AlCr(従来膜) (多層)	AlCr-New改 (多層)	α (単層)	β (多層)	γ (積層)	目標値
密着性 (N:2)	44.3N ◎	43.3N ◎	26.4N ○	24.9N ○	36.7N ◎	HF1 (24.9N)
表面粗さ	Ra:0.15 μ m Rz: 2.1 μ m ×	Ra:0.02 μ m Rz: 0.4 μ m ◎	Ra:0.03 μ m Rz: 0.4 μ m ◎	Ra:0.02 μ m Rz: 0.5 μ m ◎	Ra:0.02 μ m Rz: 0.4 μ m ◎	Ra: < 0.1 μ m Rz: < 1.5 μ m
動的摩擦係数 (vs S U J 2)	0.3 (< 10m) ○	0.2 (< 10m) ○	0.2 (< 10m) ○	0.2 (< 10m) ○	0.2 (< 60m) ◎	< 0.5
ぬれ性 (出光 HS-32) (N:10)	接触角 18° ◎	接触角 20° ◎	接触角 17° ◎	接触角 18° ◎	接触角 20° ◎	—
硬さ (N:3)	24 GPa ○	33 GPa ◎	30 GPa ○	38 GPa ◎	34 GPa ◎	21 GPa (HvC:2000)

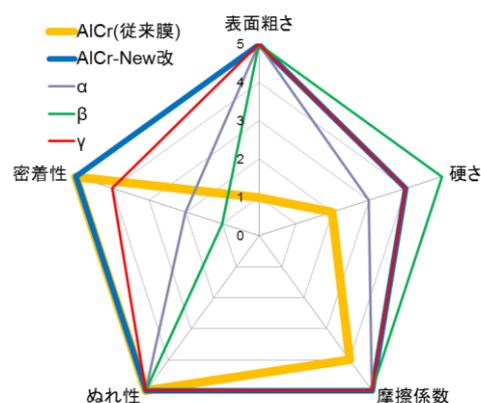


図 2-2-1 2 膜特性のレーダーチャート

続いて、この2種類の膜について、摩擦特性を評価した結果を図 2-2-1 3 に示す。摩耗試験初期の摩擦係数は、AlCr-New 改、 γ とともに 0.2 と低く、目標値の 0.5 を下回ったが、 γ は低い摩擦係数の状態を AlCr-New 改と比較して、6 倍以上のしゅう動距離において維持した。

このことは、AlCr-New 改の摩耗が γ と比較して早い段階で進むことを示している。しかしながら、AlCr-New 改と γ は同等の表面粗さを有するため、両者間の摩耗量の差は、機械的摩耗だけではなく化学的摩耗が影響していることが推察される。 γ の摩擦特性が AlCr-New 改を上回るとは、 γ をコーティングした工具を用いた切削において、切削抵抗の低下が見込めるため、 γ は AlCr-New 改よりも、優れた切削性能を示すことが期待される。

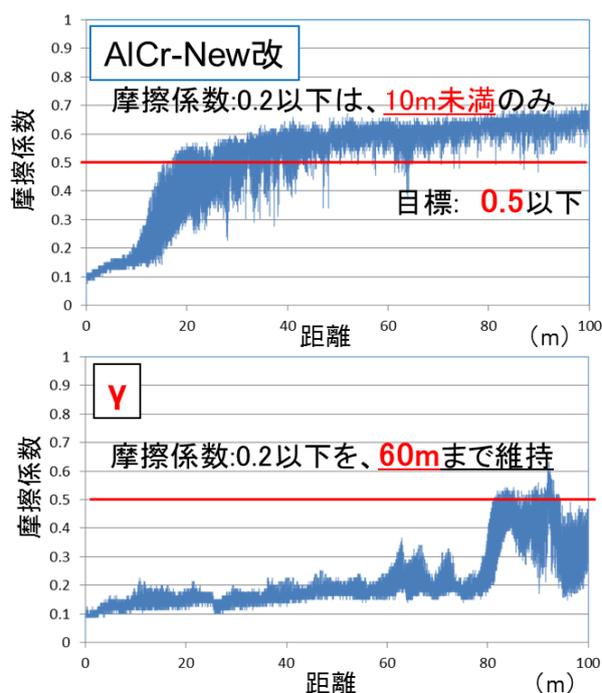


図 2-2-1 3 ピンオンディスク型摩擦摩耗試験結果

4) 新規コーティング切削性評価

① 評価方法

4 種類のコーティング膜 (AlCr-New 改, α , β , γ) について、舞ツールを用いクロム・モリブデン鋼 (SCM440H JIS) を切削したときの工具摩耗について調べた。ただし、図 2-2-1 4 に示す舞ツールの母材および形状は、歯切り用の高速度鋼製ホブカッターの形状に基づき、同材種ですくい角 6°、逃げ角 12°、ノーズ半径 2mm とした。舞ツールの刃先回転半径は 40.06 mm である。三軸縦型マシニングセンタ (YASDA YBM640 Ver.3) の主軸にツールホルダを介して舞ツールを保持し、表 2-2-4 の切削条件で直径 150 mm、長さ 300 mm のクロム・モリブデン鋼を切削した。切削距離に対する逃げ面摩耗幅をデジタル顕微鏡 (キーエンス VHX-100) にて測定し

た。

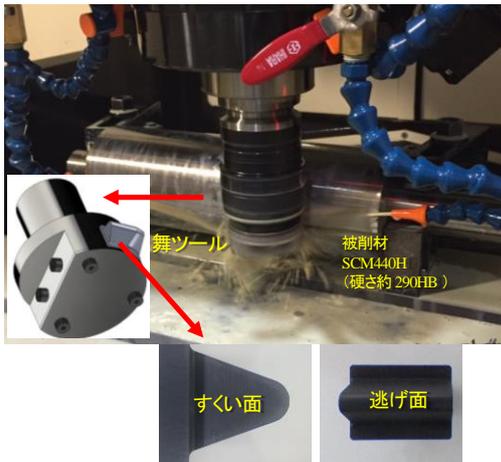


図 2-2-14 工具摩耗試験

②切削性評価結果

図 2-2-15 に切削距離に対する逃げ面の摩耗観察結果を示す。 α の場合、2.0m から 3.0m において小さな欠けが多数生じ、3.51 m の時点で大きな欠け及び大きな刃先後退が観察できた。 β の場合、1m の時点で小さな欠けが多数生じており、4.0m において大きな欠け及び大きな刃先後退が観察できた。AlCr-New 改の場合、5.0m から 6.0m において一部に大きな欠けが生じたが、大きな刃先後退は観察できなかった。 γ の場合、5.0m から 6.0m において一部に大きな欠けが生じたが、大きな刃先後退は観察できなかった。

図 2-2-16 に切削距離に対する逃げ面摩耗幅の経過を示す。 γ 及び AlCr-New 改は α 及び β に比べ、初期摩耗後の逃げ面摩耗幅の傾きが緩やかであり、摩耗が少ないことが分かった。 γ 及び AlCr-New 改は、 α 及び β より長い距離を切削できたことから、 α 及び β よりも工具寿命が長く切削性に優れることが示された。 α 及び β は γ 及び AlCr-New 改に比べ、密着性能が低いため、切削中に膜が偶発的に剥離したと考えられる。さらに、本実験で適用した切削速度 120m/min は、工具材種である高速度鋼に対して、大きい値である。そのため、一度コーティング膜が剥離すると、剥離した箇所急速に摩耗が進行したことが考えられる。また、チッピング（工具材エッジの小さい欠け）の発生は、力学的負荷及び工具面への被削材付着（凝着による化学的摩耗）などに影響される³⁾。 γ は、しゅう動距離 60m まで低い摩擦係数を維持するため、工具面への被削材

表 2-2-4 切削条件

切削条件	
切削速度	120 m/min (477 rpm)
送り速度	0.125 mm/tooth
切込深さ	8.5 mm
切削液	水溶性
切削方向	ダウンカット



(a) コーティング膜： α 切削距離：3.51m



(b) コーティング膜： β 切削距離：4.0m



(c) コーティング膜：AlCr-New 改 切削距離：6.75m



(d) コーティング膜： γ 切削距離：7.0m

図 2-2-15 工具逃げ面摩耗

への付着が抑えられることで耐チップング性が向上し、逃げ面摩耗が少なくなった可能性が考えられる。このため、4種類のコーティング膜の中で γ の逃げ面摩耗幅が一番小さくなり、開発被膜特性評価における摩擦係数の評価結果と同じ傾向を示した。以上の結果から、ホブ用コーティング膜として“ γ ”を選定した。

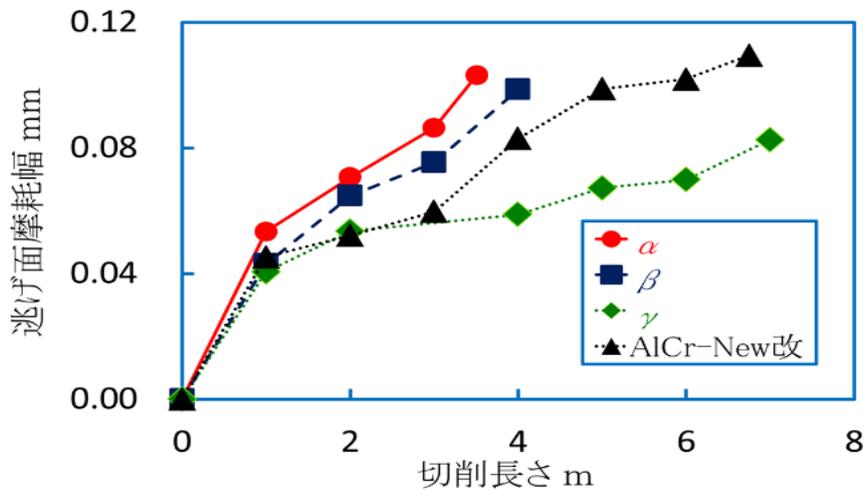


図2-2-16 逃げ面摩耗経過曲線

5) 選定膜の性能評価

① 靱性

セラミックの靱性は、JIS R1607 で規格化されている圧子圧入法（通称 IF 法）による評価方法が良く知られている。この手法は、マイクロビッカース硬度試験機を用いるもので、圧痕に発生する亀裂の長さから、式（2）に従って靱性値を算出する。

$$Kc = 0.018 (E / Hv)^{1/2} (P/C^{3/2}) \quad (2)$$

Kc : 破壊じん性値 ($\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、 E : 弾性率 (Pa)

Hv : ビッカース硬度 (Pa)、 P : 押し込み荷重 (N)

C : き裂長さの平均の半分 (m)、

a : 押し込みの対角線長さの平均の半分 (m)

図2-2-17a に、ホブ用コーティング膜として選定した γ について、IF法により靱性を評価した結果を示す。 γ には亀裂は発生せず、十分な靱性をもつことが確認できた。しかしながら、試験後の圧痕の大きさから、最小の押し込み荷重 (9.807 N) で試験を実施したものの、圧子の押し込み深さは $6.2 \mu\text{m}$ と算出され、膜厚が $3.5 \mu\text{m}$ である γ は貫通されていたことが分かった。このため、より信頼性のある靱性の評価結果とすべく、圧子の押し込み深さを膜厚以下に制御した試験の適用を試みた。具体的には、IF法にナノインデンターを用いて靱性を評価した。ナノインデンターは、JIS R1607 規定外の試験機であるが、マイクロ

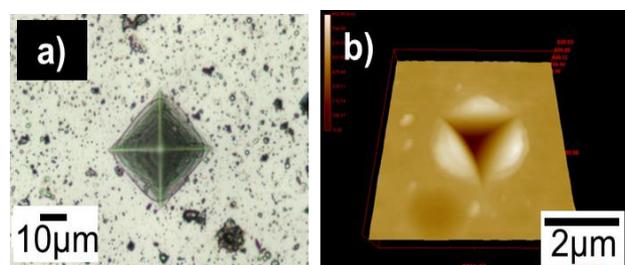


図2-2-17 IF法による靱性試験後の圧痕形状

a: マイクロビッカース試験器によるもの (光学顕微鏡像)

b: ナノインデンターによるもの (AFM 像)

インデンターを用いて靱性を評価した。ナノインデンターは、JIS R1607 規定外の試験機であるが、マイクロ

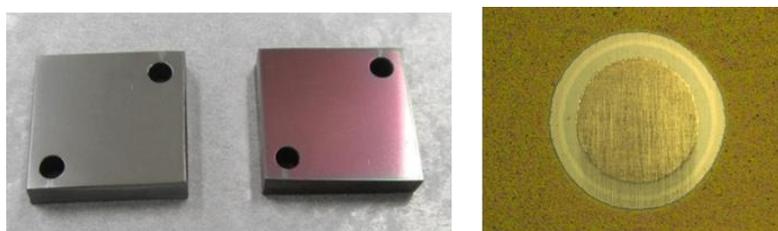
ビッカース試験機よりも小さな荷重 (0.1 N) で測定可能であり、圧子の押し込みが膜のみとなることが期待できる。

実際にナノインデントで試験したところ、押し込み深さは 834 nm であり、 γ の膜厚と比較して十分に浅い領域であった。また、発生する亀裂は微細な形状変化となることが想定されたため、試験後の圧痕は AFM によって評価した。その結果、ナノインデントによる試験でも、図 2-2-17b に示すとおり、圧痕に亀裂は発生せず、開発膜 γ は十分な靱性をもつことが確認できた。

②耐熱性

ホブ用コーティング膜として選定した γ は、耐熱性グレードとして開発した膜種であり、性能確認のために 1000°C の耐熱性試験を実施した。耐熱性の素材であるインコネル材に γ コーティングを成膜してテストピースとし、電気炉を用いて、大気雰囲気中 1000°C で、30min 保持後、カロテストによる膜厚測定およびスクラッチ試験機による膜の密着性を評価を実施した。 γ は、1000°C の熱処理によって、図 2-2-18 a に示すとおり灰色から赤紫色の干渉色へ外

観が変化した。これは、 γ の表層における構造が、熱と大気中の酸素により変質したことによるものと考えている。また、カロテストの結果から、膜厚は 24% 減少したものの、スクラッチ試験装置による測定の結果、膜と基板との密着力の低下は僅か (8% 減) であり、1000°C 大気



a) テストピースの外観写真
(左: 未処理、右: 熱処理後)

b) テストピース (熱処理後)
のカロテスト痕

図 2-2-18 耐熱性試験テストピースの外観写真

加熱後においても、実用上十分な密着力を維持していることが確認できた。また、 γ と比較試料として一般グレードの膜である AlCr-New 改について、熱処理に伴う構造の変化を XRD により評価した。Cr-Al-N で構成される膜は、熱により立方晶から六方晶に構造が変化することが報告⁴⁾ されており、AlCr-New 改、 γ とともに基本構造は Cr-Al-N 系であることから、1000°C の熱処理後は、立方晶から六方晶に構造が変化した。耐熱性を付与する手法として、酸素の膜内部への侵入を抑制する膜設計⁵⁾ が主流であり、 γ については、膜表面にアルミナ層を形成することで、膜全体の酸化を防ぐ設計としている。AlCr-New 改には熱処理後にクロムの酸化物 (Cr_2O_3) が生成されることが確認されたが、耐熱性グレードである γ にはクロムの酸化物は存在せず、アルミナ (Al_2O_3) が生成されることが分かった。このことは、 γ が 1000°C の大気中熱処理時において、設計どおりの挙動をとれたことを示す。また、これらの構造変化は、切削時に局所的な高熱状態に晒される膜の最表面においても、同様の挙動をとると予測され、アルミナはクロム酸化物よりも硬質であることから、 γ の切削特性が AlCr-New 改よりも優れていた先の結果を説明することができる。

※参考文献

- 1) 河合晃 : 欠陥を出さない! 良い塗布膜を得るためのコントロール技術, サイエンス&テクノロジー (2012)
- 2) 山本兼司、久次米進 : KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, 59, No. 1, (2009)
- 3) 社団法人精密工学会 : 新版 精密工作便覧, コロナ社 (1992)

4) 長谷川裕之: 高温学会誌, 33, No. 2, (2007)

5) 山本兼司: 高温学会誌, 33, No. 2, (2007)

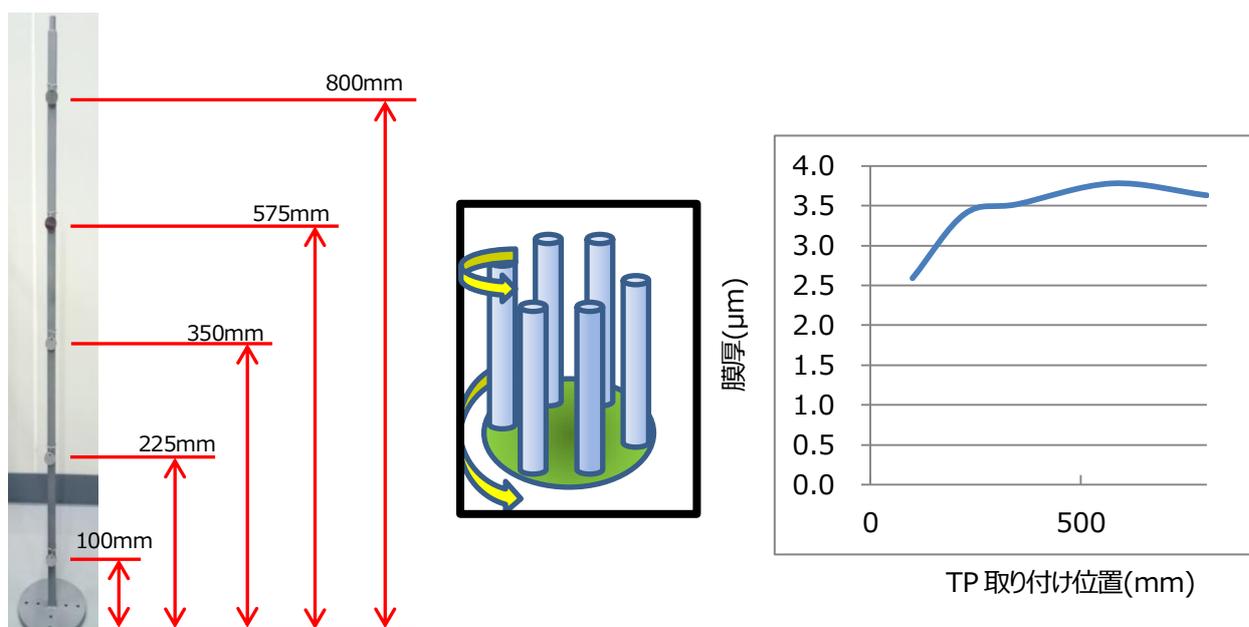
2-3 ホブによる実証試験

2-3-1 新 AIP 装置でのホブ成膜条件開発

実際のホブの形状は凹凸が多く複雑であり、可能な限り均一な皮膜を形成させる技術が必要である。コーティング運転パラメータ、成膜中の被コーティング材位置、回転速度を最適化させることで、均一な皮膜形成が可能な運転・設備条件を開発した。

1) 成膜有効範囲内での皮膜厚さ均一性の検証

新 AIP 装置はφ650mm×700mmの成膜有効空間を持っている。ホブ成膜開発において均一な皮膜厚さが得られる空間を把握する必要があり、試験片を高さ方向に配置しコーティング膜厚分布を調査した。その方法、結果を図2-3-1に示した。高さ200~800mm(長さ600mm)の範囲内ではどの位置でも膜厚3.2~3.7μm(目標±5μm内)とばらつきが少ないことを把握した。また密着性も評価し、全てH1と優れていた。



TP 取り付け写真

図2-3-1 成膜有効空間内での皮膜厚さ

2) 実ホブでのコーティング条件適正化

密着性を向上させるためには、テストピースの条件に対し実ホブでは条件の調整が必要なが分かってきた。このとき、ワーク加熱条件、ボンバード条件、成膜温度条件等を変え、適正化させた。これは実際のホブは質量、体積も異なることによる。一つのホブ内での膜厚ばらつきを小さくする開発を実施した。ホブでは多数の刃がある。例えば、本事業で実証評価に供するホブの構造は長手方向に15個、円周方向に12の刃があり、これらの皮膜はできるだけ均一な厚さであることが望ましい(設計値±0.5μm目標)。コーティング炉内で配置、セッティング方法およびコーティング条件をより適正化させることで目標を達成することができた。図2-3-2には膜厚測定設備および測定方法を示した。また、図2-3-3にはホブの長手方向の

刃の位置に対する膜厚測定結果を示した。この場合刃1、刃15はホブの両端部で刃7は中央に当たる。設計厚さ $3.5\mu\text{m}$ に対し3.4~3.7に収まっており目標の $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内を十分に達成できた。



蛍光 X 線方式膜厚測定器



膜厚測定

図 2-3-2 蛍光 X 線方式膜厚測定器を使ったホブの膜厚測定

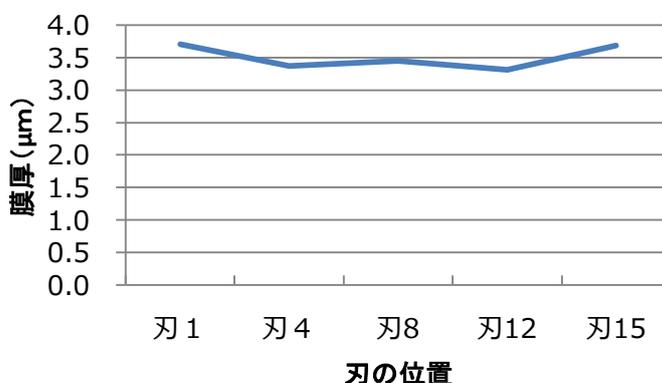


図 2-3-3 ホブの刃先膜厚測定結果

2-3-2 新コーティング技術によるホブ成膜適用

これまでに得られた技術開発成果およびデータを元の実証評価皮膜を絞り込み ‘ γ ’ に選定し、ホブへの成膜適用を行った。また、比較評価のため AlCr-New 改皮膜も実証用ホブへ成膜した。ホブの材質は高速度鋼（ハイス）で、その諸元を表 2-3-1 に示した。図 2-3-4 にセッティングしたホブの写真を示した。ワークは処理装置内で処理中は自公転している。コーティング後の写真を図 2-3-5 に示したが、剥がれもなく良好な外観であった。ホブと同時処理したテストピースの検査の結果、膜厚は約 $3\mu\text{m}$ 、硬さも目標の $\text{Hv} > 2000$ が得られている。重要特性である密着性に関してもロックウエル硬さ試験圧痕観察でも H1 評価で良好であった。

表 2-3-1 歯切加工実証評価用ホブ諸元

項目	値	項目	値
溝数	12	直径	100mm
条数	3	長さ	200mm
RA	6°	材質	ハイス鋼



図 2-3-4 ホブ成膜セッティング写真



図 2-3-5 ホブ成膜後の外観写真

2-3-3 新コーティング適用ホブでの歯切加工評価

γ 及び AlCr-New 改皮膜をコーティング加工したホブを使い従来から行っている条件で歯切加工評価を実施した。

1) 歯切加工評価方法

歯切加工には図 2-3-6 に示す大久保歯車工業（株）所有の三菱 GB40CNC ホブ盤を使用した。歯切加工評価対象の歯車は同社が月産 2000 個程度を製造しており、比較的汎用のトラック用ミッションギヤとして使われている。評価を行った歯車の諸元を表 2-3-2 に、切削前後の写真を図 2-3-7 に示した。



図 2-3-6 歯切加工評価に使ったホブ盤



加工前



加工後

図 2-3-7 被削材加工前後

表 2-3-2 歯切評価対象歯車の諸元

モジュール	4	外径	$\phi 198\text{mm}$
圧力角	20°	歯幅	26.5mm
ネジレ	$2^\circ 48'$	歯数	48

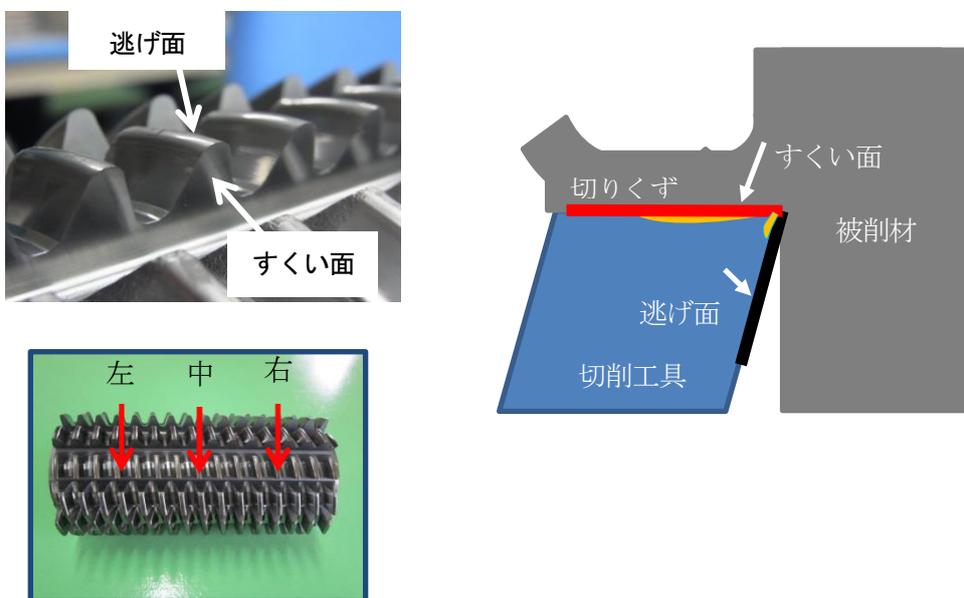
歯切加工条件を表 2-3-3 に示した。回転速度・送り量は従来の操業と同一条件で、水溶性切削油を使った

湿式切削法とした。また、歯車を 150~160 個切削ロット毎にホブの摩耗状況および被削材である歯車の品質（形状）を調査し、その都度歯切加工が継続可能かを判断した。

表 2-3-3 歯切加工条件

項目		値
切削条件	回転速度	89.7mm/s
	送り量	1.5mm/回転
方式		湿式（切削油）

ホブの摩耗については一般に図 2-3-8 に示したようにすくい面と逃げ面の摩耗があり、上記したロット毎に拡大観察・計測した。長手方向の調査結果の例を図 2-3-9 に示した。



摩耗は上記 3 点の平均

図 2-3-8 ホブのすくい面と逃げ面

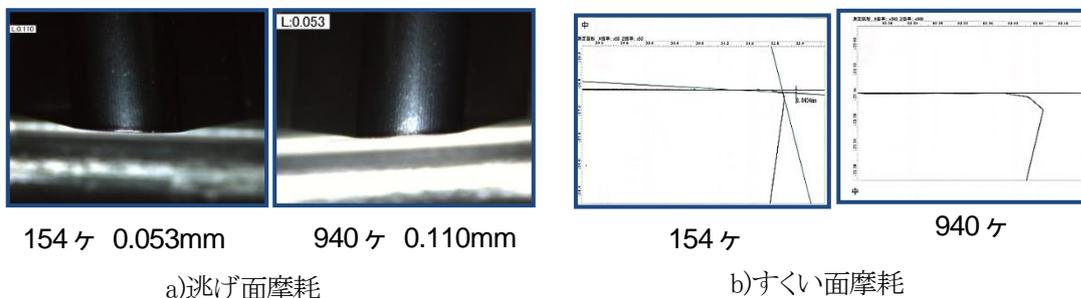


図 2-3-9 ホブの摩耗観察例

- a) 逃げ面摩耗で加工歯車個数と摩耗幅を記載（AlCr-New 改の場合）
- b) すくい面摩耗を調べた図でこの場合、摩耗はゼロ

2) 歯切加工結果

表2-3-1に示したホブについて実際の歯切加工を行い、摩耗状況、歯車品質を評価した。ここで評価を行った皮膜について再度確認すると

① γ 開発した新規皮膜の中で前記した膜評価、切削性評価で、表2-2-3、図2-2-12などから最もバランスが取れ、優れた耐摩耗が期待される皮膜

② AlCr-New 改 構成は従来と同一だが、新AIP技術(設備)を適用した皮膜

上記した2種の皮膜について歯切加工の結果、切削した歯車個数に対しての逃げ面摩耗幅を調査した結果を図2-3-10に示した。ここで従来コーティングについては、現状でトップ値データのイメージを示しており、製造経験から、すくい面摩耗深さ $>0.2\text{mm}$ 又は逃げ面摩耗幅 $>0.3\text{mm}$ でホブの切削寿命と判断していることによる。図2-3-10から分かるように今回開発した技術を適用することで、通常であれば加工が進むにしたがい大きくなる逃げ面摩耗幅が、従来よりも著しく小さくなることがわかる。特に新規開発の γ では初期摩耗発生から1400個強の歯車切削まで摩耗は殆ど進まなかった。また、AlCr-New 改では逃げ面摩耗は寿命判定の 0.3mm まで進展しないで、すくい面に微小なチッピングが発生したため評価を中断した。このチッピングについて観察した結果を図2-3-11a)に示した。歯切加工でホブに重い負荷のかかると考えられる箇所にも局所的チッピングが発生し、特定のホブ刃ではなくどの刃にも同様のチッピングが発生している。形状解析レーザー顕微鏡を使った3D解析結果を図2-3-11b)に示した。深さは $20\mu\text{m}$ 弱で微小であるが、これが拡がりすくい面に生じるクレータ摩耗に発展するものと推察される。

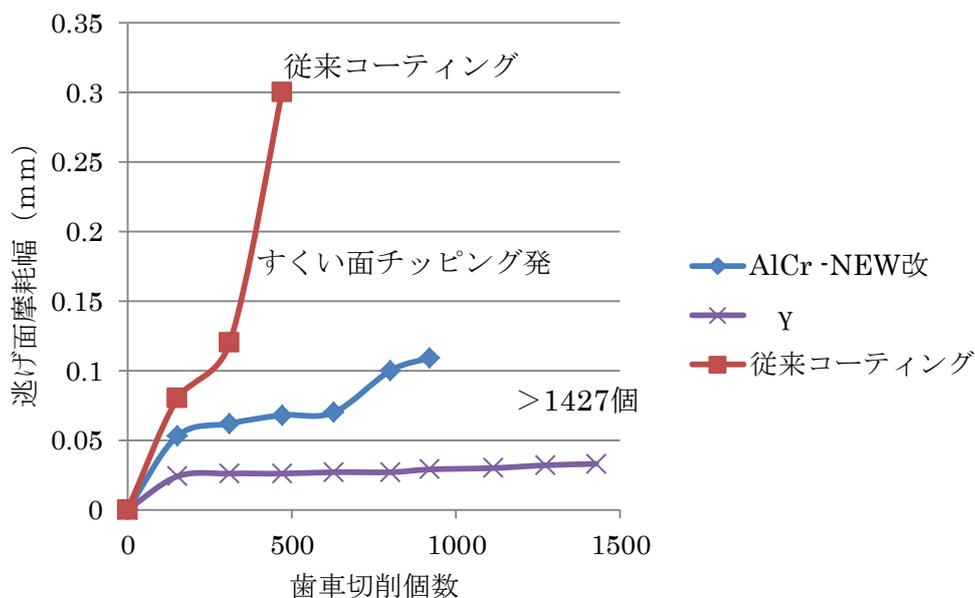


図2-3-10 開発膜 γ 、AlCr-New 改、および従来皮膜の歯車切削個数と逃げ面摩耗幅

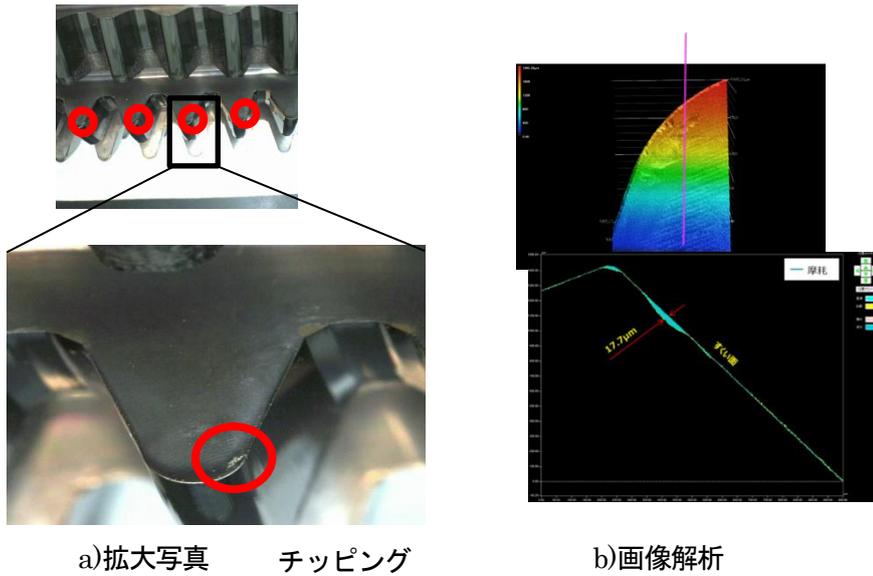


図 2-3-1 1 AlCr-New 改皮膜ホブの歯切加工で発生したチッピング

歯切加工の評価結果を図 2-3-1 2 に示した。今回開発した γ は従来の基準値に対して 4.7 倍、目標値に対しても 1.7 倍以上（歯切加工で歯車品質には問題なかったが切削評価は中断した）の結果が得られた。

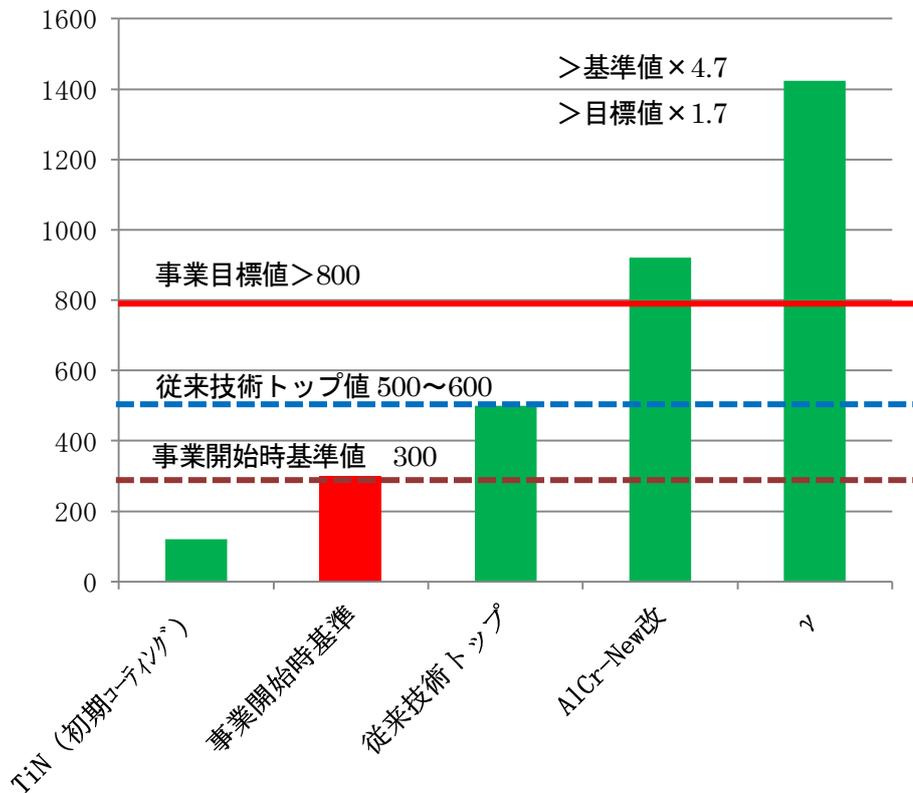


図 2-3-1 2 各皮膜の歯切加工評価結果（事業目標：従来の 2.5 倍以上， >800 個/Reg.）

ホブの摩耗とコーティングに関して、これまでのホブ切削との関連を整理すると表 2-3-3 のようになる。従来に比較すると摩耗の傾向が変わってきており、今後本現象の解明が必要なものの、ホブでの歯切加工長寿命

化に対して開発技術が非常に効果的であった。

表 2-3-3 従来および今事業で実施したホブのコーティングと摩耗、加工歯車数の整理

		コーティング皮膜	本事業で開発したコーティング技術	皮膜	切削加工限界事象	加工歯車数個/Reg.
1	従来	初期皮膜	なし	TiN 等	すくい面摩耗	約 120
2	従来比較基準	従来皮膜 (アイ・ツイ・エス開発)	なし	AlCr-New	逃げ面摩耗	300~500
3	本事業 で実施	従来皮膜	適用	AlCr-New 改	すくい面 チッピング	920
4		新規開発皮膜	適用	γ	更に可能?	>1427

最終章 全体総括

I 補助事業の成果及びその効果

1) ホブ用新規コーティング技術開発・評価

- ①ホブコーティング用として AlCr をベースに添加元素、皮膜構造を変えた新規の皮膜 α 、 β 、 γ の 3 種類および従来皮膜に新 AIP 装置・技術を適用した皮膜を開発した。
- ②開発した 4 種の膜 (AlCr-New 改, α , β , γ) についてテストピースによる物性を評価し、AlCr-New 改と γ が特性のバランスが良い膜であり、特に γ は摩擦特性に優れる膜であることが分かった。
- ③ホブの歯形状を模した工具を用いて加工実験を行い、切削性を評価した結果、摩擦係数が低い γ の逃げ面摩耗幅が一番小さいことが分かった。
- ④切削性の評価結果と物性の評価結果が一致したことから、ホブ用コーティング膜として“ γ ”を選定した。
- ⑤ γ はマイクロビッカース試験機及び、ナノインデント試験機による圧子圧入試験 (JIS R1607) において亀裂は生じず、十分な靱性を有していた。
- ⑥ γ は、1000℃の熱処理後も密着性を維持し、十分な耐熱性を有していた。
- ⑦上記①~⑥の結果、総合判断で歯切加工評価 (実証) は γ 及び AlCr-New 改について実施することとした。

2) 新 AIP 装置でのホブ成膜条件開発

- ①テストピースを用い、新 AIP 装置の高さ方向 600mm の長さ範囲で、膜厚は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ (目標 $\pm 1.5 \mu\text{m}$) の範囲に入り、均一な成膜が可能であることを確認した。また密着性も良好であることを確認した。
- ②実証試験で用いるホブはテストピースと比べ、重量・体積も大きいことからその成膜条件を調整し、適正化させた。蛍光 X 線方式膜厚測定器でホブ刃面の皮膜厚さを測定し、長手方向約 200mm の膜厚はほぼ均一であることを確認した。

3) 新コーティング技術によるホブ成膜適用

①ホブ歯切加工評価用として、 γ 皮膜を選択、比較として前述したAlCr-New改のコーティング加工を実施した。外観上問題はなく、実証試験用とした。

②ホブのコーティング前後ではラッピング工程を入れることで耐摩耗向上を図ることができることが分かっており、本工程を採用した。

4) 新コーティング適用ホブでの歯切加工評価

①所定のホブ形状と切削条件でAlCr-New改および γ をコーティングしたホブで歯切加工評価を実施した。

② γ 、AlCr-New改については所定歯車の歯切加工目標値 (>800 個/Reg.) を上回る 1427 個/Reg.、920 個/Reg. を達成した。

③上記開発膜を施したホブの摩耗形態は従来の摩耗形態である逃げ面摩耗の急激な進行は観察されず、AlCr-New改では新たな現象として微小チッピングが発生した。 γ は逃げ面摩耗は上記1427個加工後も進展していない。

II 補助事業の成果に係る事業化展開について

1) 市場、マーケット

本開発成果である歯切工具コーティング事業の対象市場サプライチェーンを図3-1のように想定した。歯車の市場は1200億円¹⁾で堅調な需要を維持していくと考えられる。一方、工具のコーティング市場は約72億円²⁾でこの内10%がホブのコーティング受託加工市場とすると約7億円が市場と推定する。

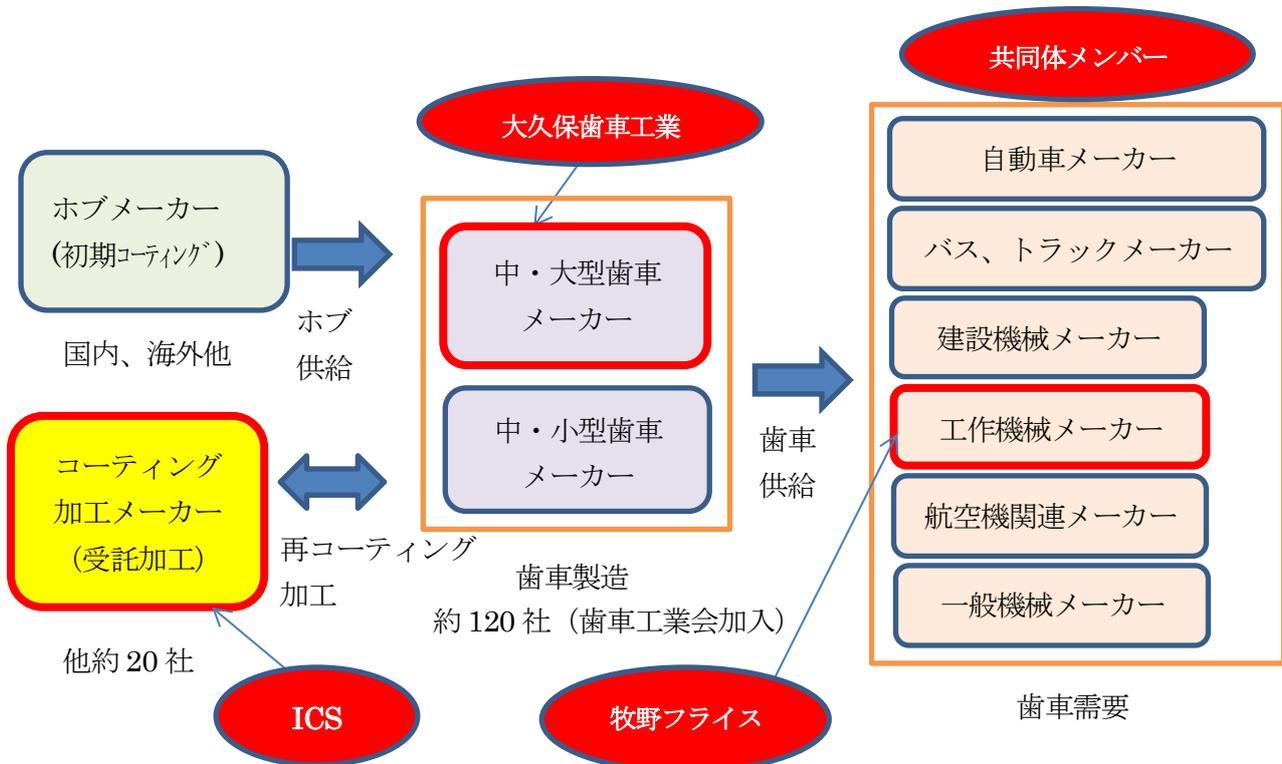


図3-1 歯車およびホブのサプライチェーン

技術的に類似した製品である歯切工具以外の切削工具（エンドミル、ドリルなど）へのコーティングは開発した技術を軸に開発を進めることで比較的容易に水平展開でき、長寿命化が実現可能である。上述した通り、

切削工具のコーティング市場は 72 億円程度であり、この市場が本技術の水平展開を含めた市場となる。

2) 事業化展開

本事業終了後の成果を使ったコーティング事業販売戦略は以下の通り

- ①開発終了後、まずは既存顧客（大久保歯車工業(株)）へ出荷開始。
- ②他歯車製造業者へのサンプル出荷・評価 納入開始。
- ③開発技術を展開し、エンドミル、ドリルなどの耐摩耗性・耐熱性が要求される切削工具へのコーティング技術の水平展開を行い、サンプル出荷・評価を経て新規コーティング受託加工の販路開拓を行う。
- ④本事業の成果は上記ホブや切削工具のみならず、金型や自動車部品等に幅広く展開が可能である。