

平成 29 年度採択
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

「高性能窒化ホウ素膜のプラズマコーティング技術を用いた
革新的切削工具と製造装置の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 公益財団法人名古屋産業振興公社

目 次

第1章	研究開発の概要	3
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制	8
1-3	成果概要	10
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11
第2章	本論一（1）	12
	【1. 切削工具と cBN 膜コーティングの最適化】	12
	【1-1】 cBN 膜コーティングに適した切削工具の刃先検討	12
	【1-2】 cBN 膜コーティングの最適化	12
	【2. 大量コーティング装置の開発】	18
	【2-1】 大容量処理装置の開発	18
	【2-2】 電子ビーム走査機構の開発	20
	【2-3】 切削工具の大量コーティング技術の開発	20
	【3. 切削特性の評価と改良】	23
	【4. 中間層や cBN 膜の分析】	30
第3章	全体総括	32
3-1	複数年の研究開発成果	32
3-2	研究開発後の課題	32
3-3	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

(1) 研究開発の背景

切削加工は、自動車や航空機などの輸送機器、家庭用電気製品、情報通信機器などの製造を担う基幹技術である。また、それらの部品を製造するための金型や治具、工具の製作にも切削加工が用いられている。当該分野において、鉄系の難加工材である高硬度鋼(焼入れ鋼)や耐熱鋼、高合金鋼などの安定した切削加工や超精密加工、鋳鉄などの超高速切削加工、切削工具の長寿命化が強く望まれている。このため、鉄系材料以外の対象も含め切削工具の表面には、窒化チタン(TiN)や窒化アルミクロム(AlCrN)、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)、ダイヤモンドなどの硬質膜のコーティングが施されている。しかし、硬度、耐熱性、低反応性、低摩擦性、高熱伝導性を満足するコーティング膜がないといった課題が生じている。

立方晶窒化ホウ素(cubic boron nitride : cBN)は、ダイヤモンドに次ぐ硬度と熱伝導性を持ち、高い耐熱性(耐酸化性)、鉄と反応しないという優れたトライボロジー特性を持ち、従来の硬質材料を凌駕する。特に鉄系材料の切削加工においては、硬度と鉄との低反応性の他、低摩擦であることでの切削抵抗の低下、高い熱伝導性による工具の熱衝撃による劣化の抑制(精密工学会誌, 79, 515, 2013.)が期待できる。cBN と代表的な硬質材質の特性と工具への適用性を表1に示す。cBN を用いた切削工具としては、高温高圧で合成された小さな cBN の焼結体を加工したチップのみが市販されているが、非常に高価であるとともに、ドリルやエンドミルなどのような複雑形状のもの、大きなサイズのもの存在しない。したがって、安価で複雑形状、大面積へのコーティングを可能とする cBN 膜コーティング技術と装置、cBN 膜コーティング切削工具が開発できれば、鉄系材料は勿論のこと他材料における切削加工分野の革新となる。

表1 cBN と代表的な硬質材質の特性と工具への適用性

材質		ダイヤモンド	AlCrN	cBN	
状態		薄膜	薄膜	焼結体	薄膜
硬度[Hv]		~110[GPa] ~10,000[Hv]	~38[GPa] ~3,500[Hv]	~45[GPa] ~4,200[Hv]	~58[GPa] ~5,400[Hv]
耐熱性(酸化温度)[°C]		700	1,100	1,360	
摩擦係数		0.05	0.35	0.12	
熱伝導性[W/m・K]		2,000	<150(AlN)	1,300	
鉄系材料の切削		×	○	○	
適用性	コスト	○	○	×	○
	形状の多様性	○	○	×	○
	面積	○	○	×	○
	表面性状	×	○	○	○
総合判定		×	△	×	◎

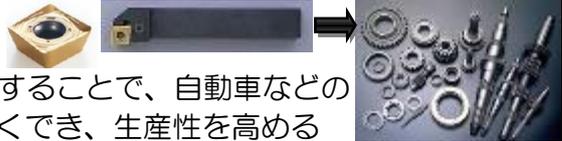
(2) 研究目的及び目標

難加工材である高硬度鋼(焼入れ鋼)や耐熱鋼、高合金鋼の切削加工において、従来技術としてサイズの小さな cBN 焼結体工具が用いられ、加工能率の向上は限界にきている。新技術では、工具への cBN 膜コーティング技術を開発し、サイズの大きな切削工具や従来の cBN 焼結体では製作が不可能であったドリルやエンドミルなどの三次元複雑形状の切削工具を開発し、鉄系の難加工材の高速切削加工や超精密加工を実用化することが目的である。

従来技術		新技術	
鉄系材料に対するダイヤモンド・DLC 工具と cBN 膜コーティング工具の比較			
cBN 膜コーティング工具は、ダイヤモンド等の炭素系材料では切削加工が不可能である鉄を含む材料に対して、高速で安定な加工を実現する。			
ダイヤモンドや DLC 工具は含まれる炭素が材料の鉄と反応するため、鉄を含む材料の切削加工には適用できない。		cBN は鉄との反応性が低いため、鉄を含む材料の切削加工に使用できる。	
AlCrN 膜と cBN 膜の比較			
cBN 膜コーティング工具は、現在焼入れ鋼などの高硬度鋼の切削加工に適用される AlCrN 膜コーティング工具より、高速に加工ができる。また、工具の寿命も長くできる。			
AlCrN はピッカース硬度が 3,500[Hv]と cBN よりも硬度が劣り、また摩擦係数も 0.35 と大きいため、加工速度を上げられない。工具の摩耗も大きい。		cBN の硬度は最大で 5,400[Hv]であり、摩擦係数も 0.12 と小さいため、高硬度鋼の加工速度を大きく向上させることができる。工具の摩耗も抑えられる。	

cBN 焼結体工具と cBN 膜コーティング 工具の比較

インサートチップ工具の事例



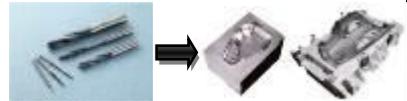
cBN 焼結体工具から cBN 膜コーティング工具にすることで、自動車などの焼入れ鋼を用いたシャフトやギヤの旋削加工を速くでき、生産性を高めることができる。

シャフトやギヤ製造

<p>cBN焼結体 切り込み小 送り速度小</p> <p>インサートチップ cBN焼結体 焼入れ鋼</p> <p>○cBN 焼結体の刃は小さい。そのため切り込み量が小さく加工速度が遅い。 ○焼結体は硬さの低いバインダを含んでおり、送り速度を上げられない。加工速度が遅い。</p>	<p>cBNコーティング膜 切り込み大 送り速度大</p> <p>インサートチップ cBNコーティング 焼入れ鋼</p> <p>○cBN 膜コーティングであるので刃の形状は基材次第で大きくできる。切り込み量も大きくできるため加工速度が速い。 ○表面は高純度の cBN であるため、硬度が高く、送り速度を大きくできるため加工速度が速い。</p>
--	--

cBN 焼結体工具と cBN コーティング工具の比較

ドリルやエンドミルの事例



cBN 焼結体工具から cBN 膜コーティング工具にすることで、焼入れ鋼が用いられる金型等の生産性を高めることができる。

金型製造

<p>cBN焼結体 加工面積小 切り込み量小 送り速度小 適用サイズ小 形状少ない</p> <p>cBN焼結体 金型鋼</p> <p>○大きな焼結体が製作できないため、刃は小さく、形状に限られる。 ○径が小さいため切り込み量も小さく、深堀できない。加工面積も小さく加工速度が遅い。 ○焼結体は硬さの低いバインダを含んでおり、送り速度を上げられず、加工速度が遅い。</p>	<p>cBNコーティング膜 加工面積大 切り込み大 送り速度大 適用サイズ大 形状多様</p> <p>cBNコーティング 金型鋼</p> <p>○cBN 膜コーティングのため、刃の形状は任意でドリルやエンドミルなどの三次元複雑形状の工具も製作できる。 ○大きな径で切り込み量も大きく、深堀りも可能。加工面積も大きく加工速度が速い。 ○表面は高純度の cBN であるため、硬度が高く、送り速度を大きくできるため加工速度が速い。</p>
--	---

cBN 焼結体工具と cBN コーティング工具の比較

工具寿命

cBN 焼結体から cBN 膜コーティングにすることで、工具寿命を長くすることができる。また、再コーティングが可能で、環境負荷を低減できる。

<p>○焼結体であるので靱性が低く、チッピングが発生しやすい。 ○チッピングが発生すると再生が難しく、廃棄となる。</p>	<p>○コーティング膜であるのでチッピングはしない。 ○切削量に応じて摩耗していくため、寿命が予測しやすく、生産管理しやすい。 ○再コーティングにより再生ができる。</p>
---	--

cBN 膜コーティングした工具を産業界に展開するには以下の課題を解決しなければならない。

- ①切削工具に適したコーティング技術の開発
- ②切削特性の評価
- ③大量生産の実現

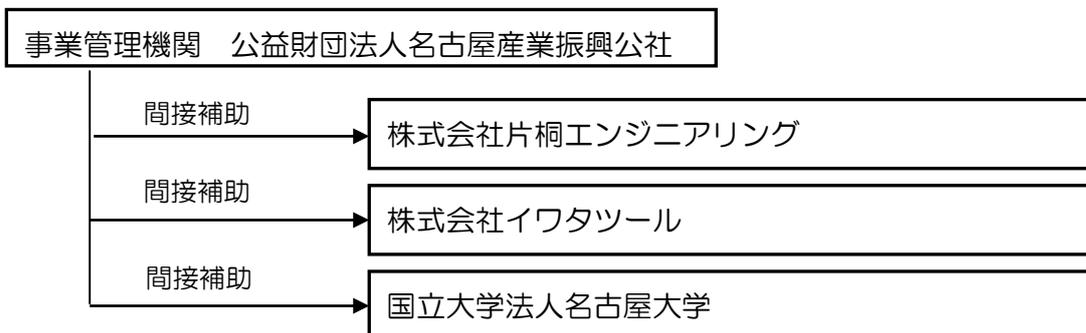
上記を実現するために掲げた目標と実施結果の概要を以下に示す。

テーマ	目標	実施結果の概要
1. 切削工具と cBN 膜コーティングの最適化	<ul style="list-style-type: none"> • 硬度 45GPa 以上 • 膜厚 0.5 μm 以上 • 剥離臨界荷重 60N 以上 	<ul style="list-style-type: none"> • cBN 膜コーティング時間 30 分で膜厚約 0.5 μm、800°C/30 分の昇温制御で硬度 50GPa、密着性 60N を達成した。 • 工具と治具等の重ね合わせなどによるシース制御により、工具(バイト、ドリル、リーマ)に対して、cBN 膜の三次元コーティングの見通しが得られた。
2. 大量コーティング装置の開発	インサートチップ 120 個/バッチ ドリル・エンドミル 24 個/バッチ	<ul style="list-style-type: none"> • 大量コーティング装置を開発した。 • カプス磁場技術による 200mm 範囲の cBN 膜コーティングを行い、均一膜厚の cBN 膜コーティングに成功したが、膜硬さに課題が残った。また、目標に掲げた数量の工具処理には至っていない。

<p>3. 切削特性の評価と改良</p>	<p>インサートチップ：cBN 焼結体以上 ドリル：AlCrN 膜コーティング 以上 インドリル：cBN 焼結体以上</p>	<ul style="list-style-type: none"> • cBN 膜のコーティング特性を活かした工具としてバイト(インサートチップ)とドリルへの応用を行い、TiN 膜や TiAlN 膜コーティングとの比較を行った。バイトにおいて TiN 膜以上、ドリルにおいて TiN 膜以上 TiAlN 膜以下の性能であり、目標の性能には至っていない。
<p>4. 中間層や cBN 膜の分析</p>	<p>上記研究開発の支援</p>	<p>以下により研究開発を支援</p> <ul style="list-style-type: none"> • 硬度(エッジ含む)：ナノゲッター • 表面性状、膜厚：SEM • 元素組成：EDX • cBN 比率：FT-IR(顕微を含む)

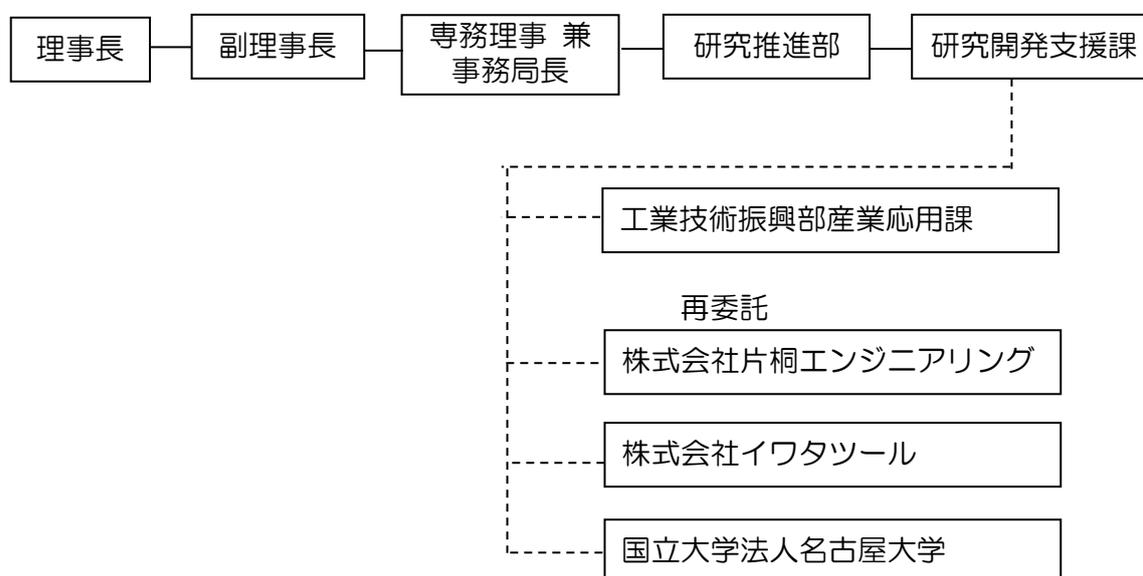
1-2 研究体制

(1) 研究組織



(2) 管理体制

事業管理機関



(3) 研究者氏名

株式会社片桐エンジニアリング

氏名	所属・役職	備考
山川 晃司	技術開発部・名古屋事業所所長	総括研究代表者 (PL)
山本 博之	技術開発部	
桑原 清	技術開発部	
賈 学英	補助員	

公益財団法人名古屋産業振興公社

氏名	所属・役職	備考
高島 成剛 毛利 猛	工業技術振興部・産業応用課長 工業技術振興部産業応用課・ 産学連携・プラズマ産業応用担当部長	副総括研究代表者(SL)

株式会社イワタツール

氏名	所属・役職	備考
岩田 昌尚 鈴木 成和 新帯 康生 末原 匠	代表取締役社長 製造課・主任 研究開発課 製造課生産技術G	平成29年度

国立大学法人名古屋大学

氏名	所属・役職	備考
石川 健治 堀 勝	大学院工学研究科・特任教授 低温プラズマ科学研究センター・教授	平成29、30年度

(4) 協力者

氏名	所属・役職
櫻井 正俊	オーエスシー株式会社 技術顧問
梅原徳次	国立大学法人名古屋大学大学院工学研究科 マイクロ・ナノ機械理工学専攻 教授
上坂 裕之	国立大学法人岐阜大学大学院工学研究科 教授

1-3 成果概要

【1. 切削工具と cBN 膜コーティングの最適化】

- 刃先エッジにおける cBN 膜コーティングの硬度や密着性を評価できるバイトを設計、製作し、研究開発の推進に繋げた。
- cBN 膜コーティング時間を 30 分にすることで、膜厚 $0.55\mu\text{m}$ となり、目標を達成した。また、cBN 膜コーティング時の温度制御技術($800^{\circ}\text{C}/30$ 分など)を開発し、硬度 52GPa 、密着力 66N を実現し、目標を達成した。当該技術を特許出願した(特願 2019-29844 「cBN 膜の製造方法」)。
- 工具と治具等の重ね合わせなどによるシース制御により、工具(バイト、ドリル、リーマ)に対して、cBN 膜の三次元コーティングの見通しが得られた。

【2. 大量コーティング装置の開発】

- ロードロックチャンバー、搬送機構、ゲートバルブ、回転昇降機構、及び約 500mm 角のプロセスチャンバーを備える自転軸 10 本の大容量処理装置を開発した。
- カスプ磁場技術による 200mm 範囲の cBN 膜コーティングを行い、均一膜厚の cBN 膜合成に成功した。
- しかし、膜硬さに課題が残った。また、目標に掲げた数量の工具処理には至っていない。

【3. 切削特性の評価と改良】

- 切削特性の定量的評価のための動力測定系と高速度カメラによる観測系の構築を行った。
- cBN 膜のコーティング特性を活かした工具としてバイトとドリルへの応用を行い、TiN 膜や TiAlN 膜コーティングとの比較を行った。バイトにおいて TiN 膜以上、ドリルにおいて TiN 膜以上 TiAlN 膜以下の性能であり、目標の工具開発には至っていない。

【4. 中間層や cBN 膜の分析】

以下により【1】から【3】項の研究開発を支援した。

- 硬度(エッジ含む)：ナノインデント
- 表面性状、膜厚：SEM
- 元素組成：EDX
- cBN 比率：FT-IR(顕微を含む)

1-4 当該研究開発の連絡窓口

総括研究代表者（PL）

株式会社片桐エンジニアリング

名古屋事業所 所長 山川 晃司

Tel : 052-739-2628

Fax : 052-739-2634

E-mail : k_yamakawa@kk-eng.co.jp

第2章 本論一（1）

【1. 切削工具とcBN膜コーティングの最適化】

【1-1】cBN膜コーティングに適した切削工具の刃先検討

切削試験ができ、且つ刃先エッジの硬度や膜密着性の評価ができるバイトを新たに設計、製作した。切刃の反対側を平面にすることで、ナノインデントーション法などで硬度、密着性が評価できる。新たに設計、製作したバイトの製作図とシミュレーション画像を図1-1に示す。

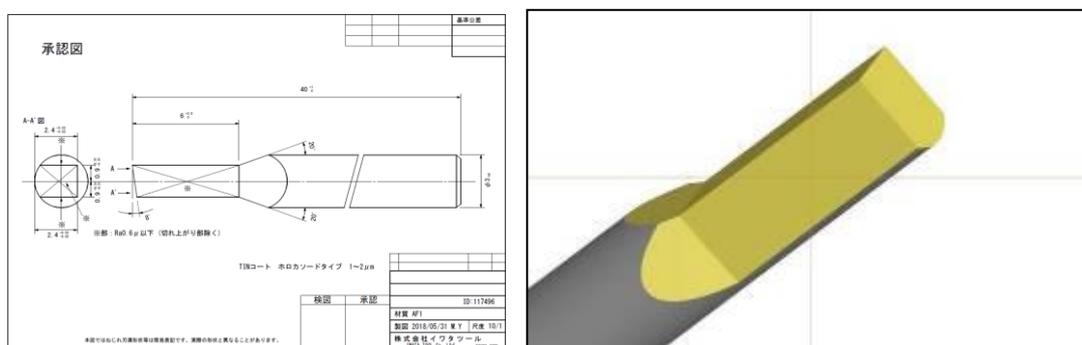


図1-1 新たに設計、製作した超合金製のバイトの製作図とシミュレーション画像

他の刃先検討およびcBN膜のコーティング特性に適した工具開発については、【3】に記載する。

【1-2】cBN膜コーティングの最適化

硬度、膜厚、密着性の向上は、評価の容易性からバイトではなく円柱もしくは平板状の試料で行った。膜厚は、cBN膜の成膜時間を30分にするこことで、約550nmとなり、目標を達成することができた。膜厚の成膜時間依存性を図1-2に示す。また、硬度はcBN膜コーティング時の基材温度をヒーターで約800℃にするこことで、高硬度化することができた。しかし、成膜時間30分では膜が剥離した。そこで、成膜時の温度を800℃一定ではなく、時間に対する温度制御の検討を行った。その温度制御パターンの例を図1-3に示す。この温度制御パターンにおいて、硬度52GPa、密着力66Nを得ることができ、目標を達成した。

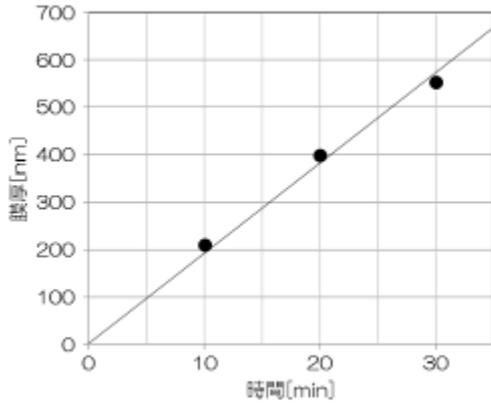


図1-2 膜厚の成膜時間依存性

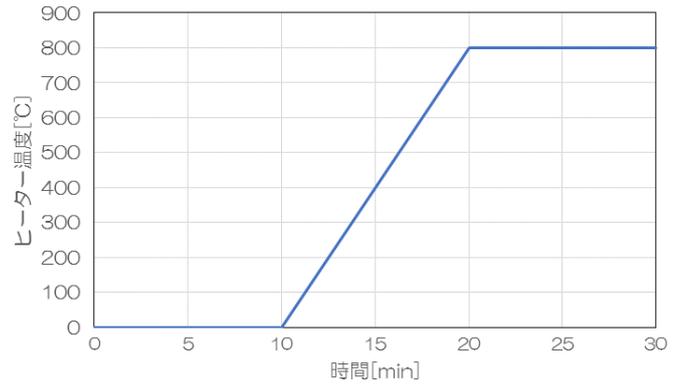


図1-3 cBN 膜コーティング時の温度制御パターン例

一方、平坦部の cBN 膜コーティングはできたが、刃先エッジへの cBN 膜コーティングができず、検討を行った。刃先エッジに cBN 膜がコーティングできないのは、エッジ部がプラズマ中にある場合、プラズマシースがエッジ部で曲がるため、平坦部と比較し、イオンの照射量が増加し、エッチングが進行するためである。この課題を解決するため、以下の検討を行った。

①イオン制御

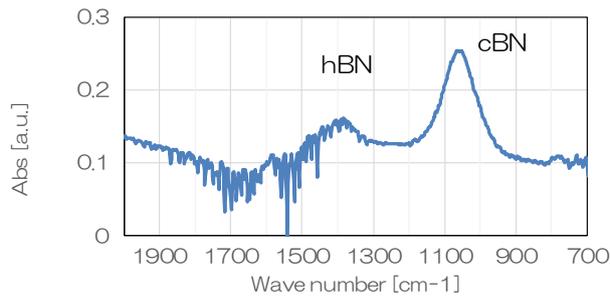
バイトへのバイアス印加を間欠的にし、イオンがバイトに照射される時間を制御する(減少させる)。RF パルス電源を用いることで、バイトへのバイアス印加を間欠的にすることができたが、刃先エッジへの cBN 膜コーティングを実現することはできなかった。

②シース制御

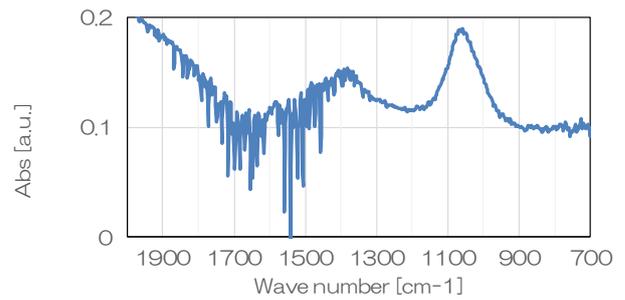
シース制御は、プラズマシースが曲がらないように工具の刃先エッジを工具もしくは治具と接触させ、平坦部を形成する方法である。

インサートチップに対し、2つのインサートチップを重ね合わせたシース制御による cBN 膜コーティングを行った。

インサートチップの cBN 膜コーティング後の顕微 FT-IR スペクトルを図1-4に示す。波数 $1380[\text{cm}^{-1}]$ の hBN の吸収だけでなく、 $1050[\text{cm}^{-1}]$ の cBN の吸収が確認され、エッジ部に cBN 膜をコーティングすることに成功した。



(a) 一方のインサートチップ



(b) もう一方のインサートチップ

図1-4 インサートチップのcBN膜コーティング後のエッジ部の

顕微FT-IRスペクトル

図1-1に示したバイトに対しては、図1-5に示すようにL型治具を製作し、バイトに取り付け、cBN膜コーティングを行った。

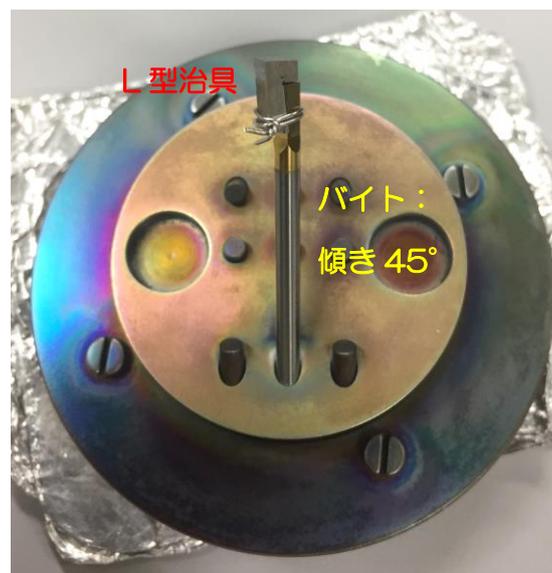
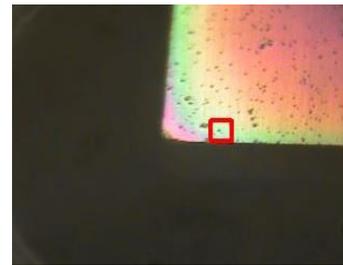
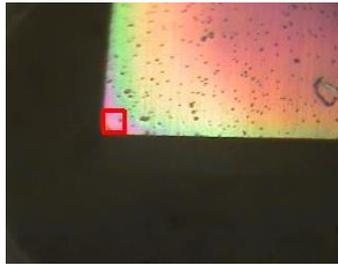
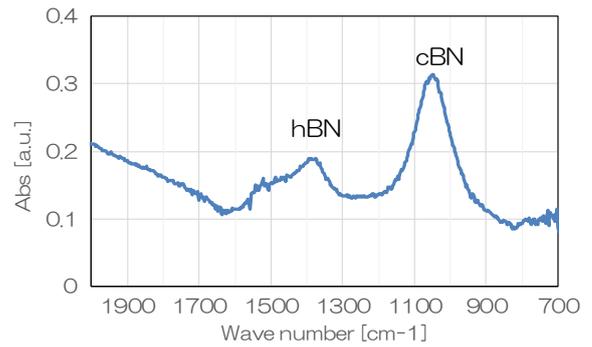
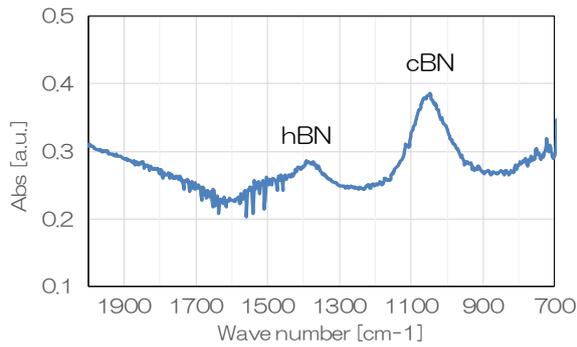


図1-5 L型治具を用いたバイトへのcBN膜コーティング

バイトのcBN膜コーティング後の顕微FT-IRスペクトルを図1-6に示す。波数1380[cm⁻¹]のhBNの吸収だけでなく、1050[cm⁻¹]のcBNの吸収が確認され、エッジ部にcBN膜をコーティングすることに成功した。



(a) 刃先エッジからの距離(0 μm , 0 μm) (b) 刃先エッジからの距離(50 μm , 0 μm)

図1-6 L型治具を用いてすくい面に cBN 膜コーティングしたバイトの顕微 FT-IR スペクトル (写真は顕微 IR の測定画面で赤い四角が測定箇所である)

次にドリルへ cBN 膜コーティングを応用することを考えた。しかし、これまではプラズマを生成する電子ビームに対し、バイト等の工具を 45° で配置しており、この場合、電子ビームが照射される側とそうでない側で膜質や膜厚の不均一が生ずると考えられた。そこで、ドリルへの全面一括コーティングの予備試験として、電子ビームに対し、垂直に配置した円柱基材の側面に cBN 膜がどのようにコーティングされるか検討した。評価を簡便にするため、ドリルを模擬し、直径 3mm、長さ 40mm の円柱超硬合金(上部 20mm に TiN 膜をコーティング)を図1-7のようにサンプルステージに配置し、cBN 膜コーティングを行った。

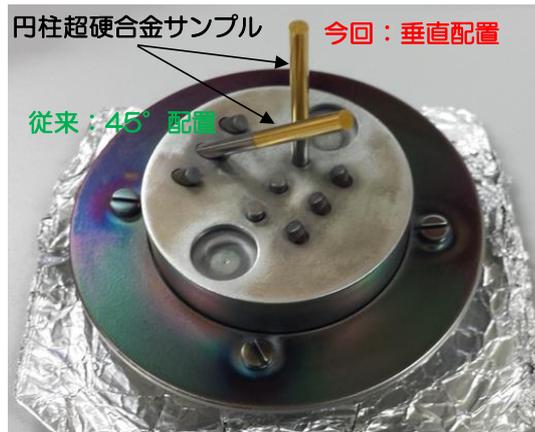


図1-7 全面一括コーティングの予備試験のサンプルセットアップ

cBN 膜コーティングした円柱超合金サンプルの長さ方向の顕微 FT-IR スペクトルを図1-8に示す。また、先端から 10mm の位置の円周方向の顕微 FT-IR スペクトルを図1-9に示す。全ての測定位置において、波数 $1050[\text{cm}^{-1}]$ の cBN の吸収が確認された。また、cBN 比率もほぼ同程度であり、電子ビームに垂直に円柱サンプルを配置しても、当該側面に均一な cBN 膜がコーティングできることが明らかとなった。

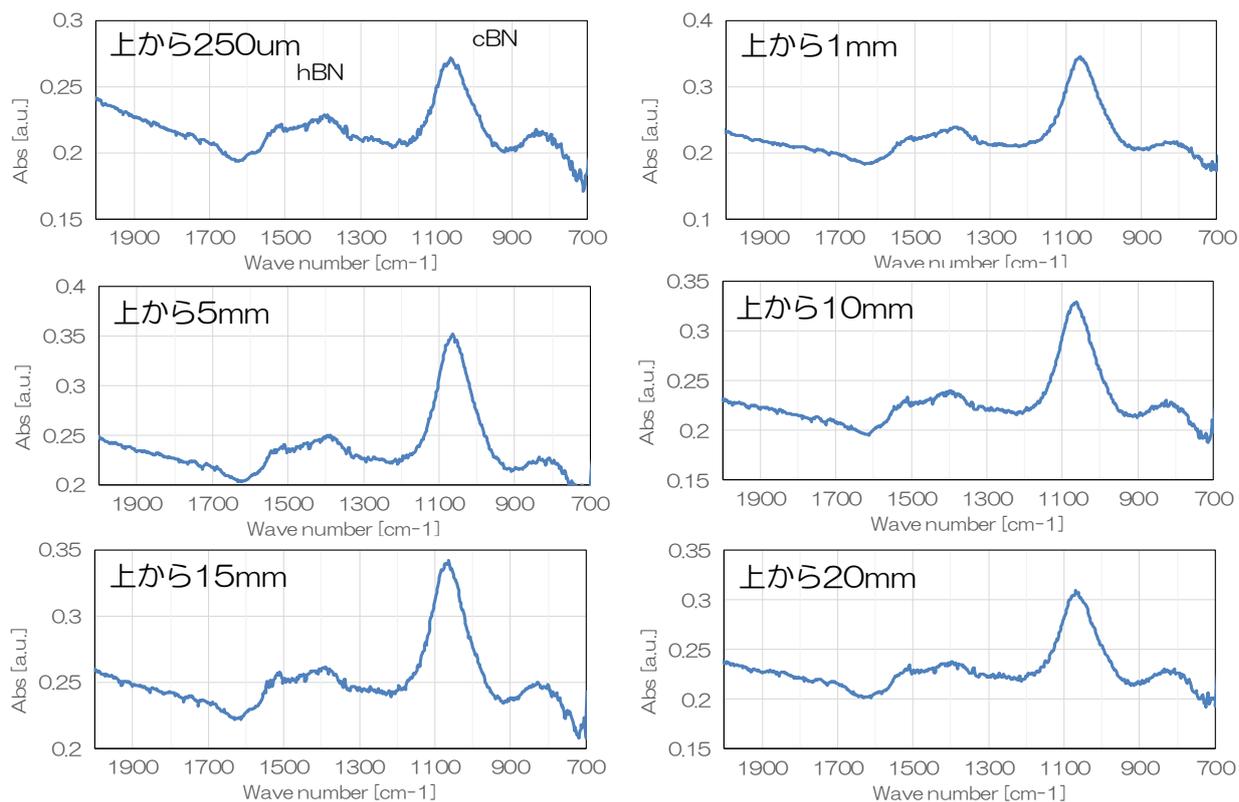


図1-8 cBN膜コーティングした円柱超合金サンプルの長さ方向の
顕微 IR スペクトル

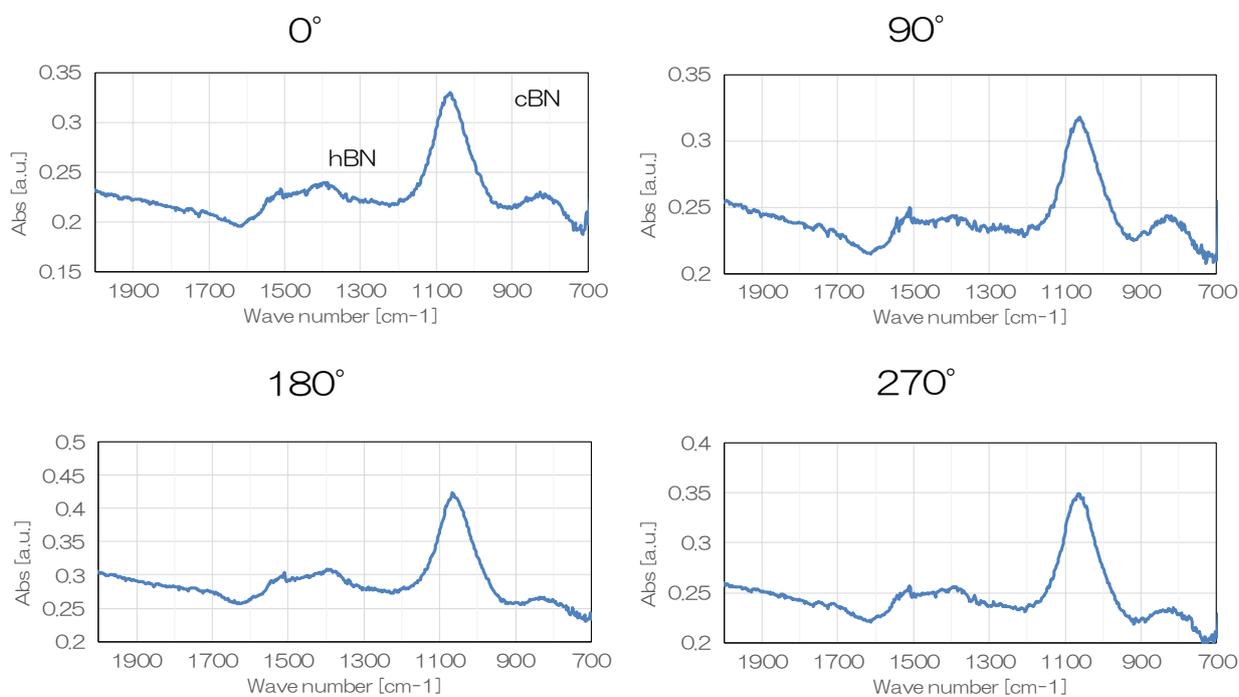


図1-9 cBN膜コーティングした円柱超合金サンプルの円周方向の
顕微 IR スペクトル(先端から 10mm)

上記した結果を踏まえ、直径 1mm の小径ドリルに cBN 膜のコーティングを行った。ドリルは、電子ビームに対し、垂直に配置した。小径ドリルは形状が複雑なため、任意箇所の顕微 FT-IR 測定が難しく、特定箇所の結果を図 1-10 に示す。当該箇所において、cBN 膜がコーティングされていることが分かる。

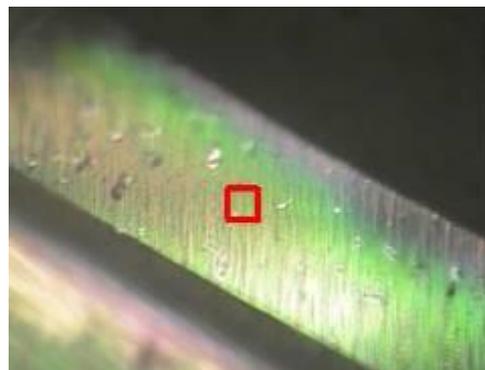
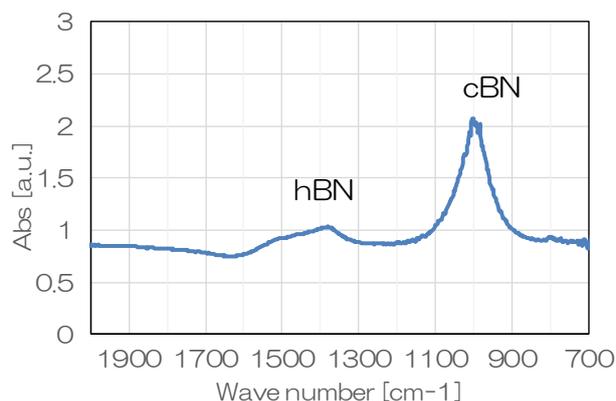


図 1-10 cBN 膜をコーティングした小径ドリルの顕微 IR スペクトル
(写真は顕微 IR の測定画面で赤い四角が測定箇所である)

【2. 大量コーティング装置の開発】

【2-1】大容量処理装置の開発

目標の同時処理数インサートチップ 120 個、ドリルまたはエンドミル 24 本を可能とする大量生産可能な装置を開発した。自転軸は 10 本である。図 2-1 に大容量 cBN コーティング膜プロセス装置の写真を示す。



図 2-1 大容量 cBN コーティング膜プロセス装置

構成を以下に示す。

●ロードロック/搬送機構

搬送機構はストローク 950mm、耐荷重 10kg、φ200mm ステージに対応する。これにより大量のサンプルを搬送することができる。搬送は手動トランスファーロードであり、リミットスイッチ 2 点を備える。これによりフォーク位置を把握することで制御アプリケーションにより安全に導入することができる。排気は主にゲートバルブ、ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプで構成される。

●ゲートバルブ

開口 330mm 角でφ200mm ステージに搭載した高さ 200mm のサンプルを通過可能である。エア駆動の複動式電磁バルブ1組を有する、またオートスイッチ 2 点を備え、開閉状態を把握することで制御アプリケーションにより安全に導入することができる。

●回転昇降機構

φ200mm ステージをチャッキング、最大 6rpm での回転、RF もしくは DC バイアス印加が可能である。バイアス電力を回転ステージに伝えるスリップリングを備える。昇降機構を備えステージ搬送に対応する。磁気シール及び大型 PEEK 絶縁フランジでステージをグランドと絶縁している。

●プロセスチャンバー

φ200mm ステージに搭載されたサンプルを、プラズマ処理で cBN 成膜プロセス可能な 500mm 角チャンバーである。5 系統のプロセスガスの導入が可能である。圧力制御可能なバトロングージとコントロールバルブを備える。また、CF114 の放射温度計用ポートを 2 箇所備える。

●EBEP(電子ビーム励起プラズマ源)

最大電流 30A、可変電圧(~150V)で制御された電子ビームを出力でき、プロセスチャンバー内にプラズマを生成する。

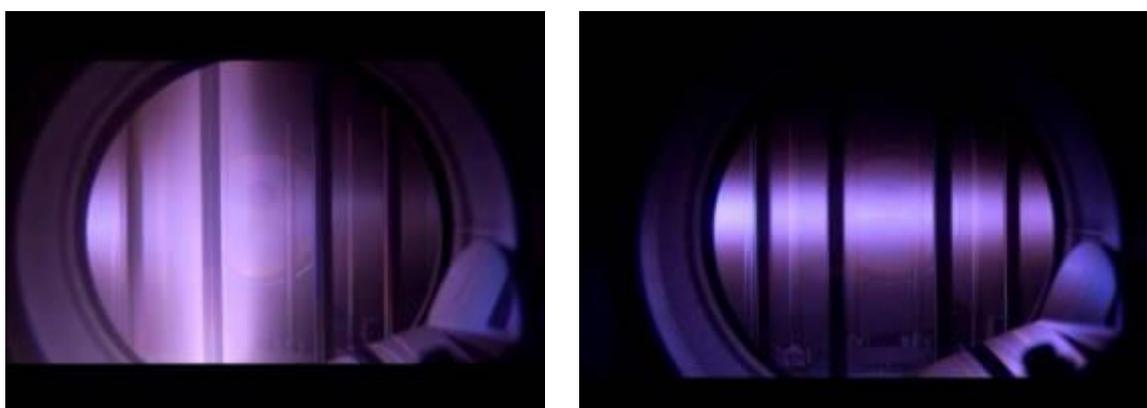
●制御アプリケーション

タッチパネル操作でバルブ動作や電源の ON/OFF が可能である。センサーによって、圧力やゲートバルブの位置等のパラメータを監視することにより、安全に運用できる。圧力やガス流量など重要な項目は出力端子台を設け、ロギング可能にしてある。また、

レシピ運転による自動制御にも対応できるように構築してある。

【2-2】電子ビーム走査機構の開発

電子ビーム走査機構として、カस्प磁場によるビームの収束を検討した。従来のプラズマを筒状に収束させるミラー磁場の収束に比べ、カस्प磁場のシート状の収束は目視によりプラズマ領域が長さ 200mm の治具を覆うくらいに広がることを確認した（図 2-2）。また、磁場の操作を装置レシピ運転アプリケーションで行える改造を行った。これによりプラズマの収束度合いや、位置をレシピ運転で行うことができる。



(a)カस्प磁場：新規方式

(b)ミラー磁場：従来方式

図 2-2 放電写真（棒状の治具の高さは 200mm）

電子ビーム走査において、電子ビームの収束度によりチャンバーやゲートバルブに熱損傷や異物の堆積が生ずる可能性がある。これらの対策としてチャンバーやゲートバルブを保護するための水冷ビームシャッターや防着板を設置した。

【2-3】切削工具の大量コーティング技術の開発

カस्प磁場での cBN 膜コーティングプロセスを実施した。膜厚は処理空間で均一であったが、膜質は hBN であったため、cBN を合成するためにパラメータの最適化を行った。バイアス電圧、パルス Duty、処理時間等のパラメータを変更して成膜を行った。特に cBN 合成に重要と考えられるバイアス電圧は-150V で最適化された。このとき電子ビーム軸である Z=0mm で cBN 比率 62.4%、硬さ 16.9GPa が得られた（図 2-3）。

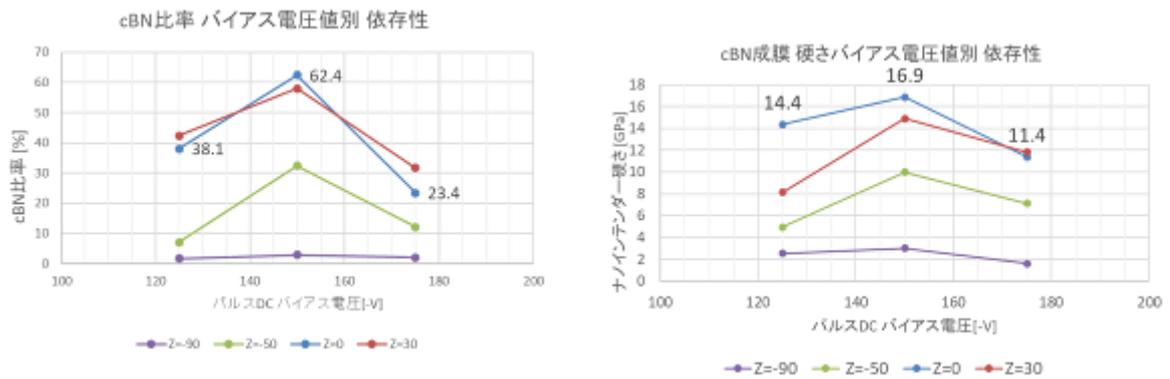


図2-3 バイアス依存性 cBN 比率（左） ナノインデントー硬さ（右）

このサンプルを断面 SEM で観察したところ膜厚は 342nm で、EDX で元素分析を行ったところ、BN からなる層と B からなる層が観察された。BN 層の厚さは約 150nm であった（図2-4、図2-5）。Z=0mm 以外の場所を SEM で観察した結果、膜厚は全ての箇所ではほぼ一定であり誤差は±3.1%と良好であった。しかし硬さは 3~17GPa と幅を持ち均一性が良くなかった（図2-6）。

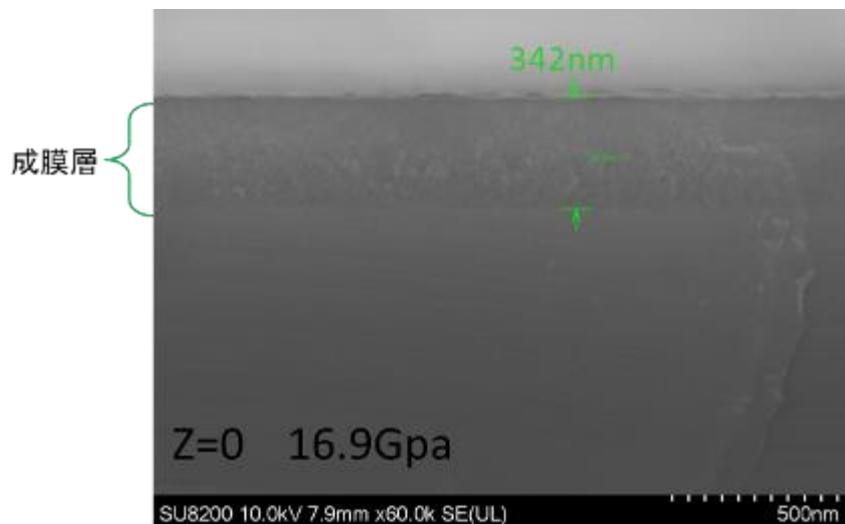


図2-4 Z=0mm の断面 SEM 像

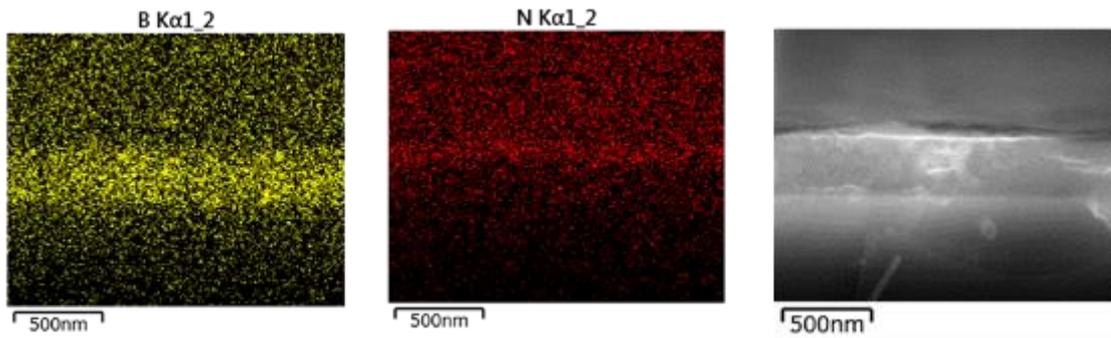


図 2-5 Z=0mm の断面 SEM-EDX

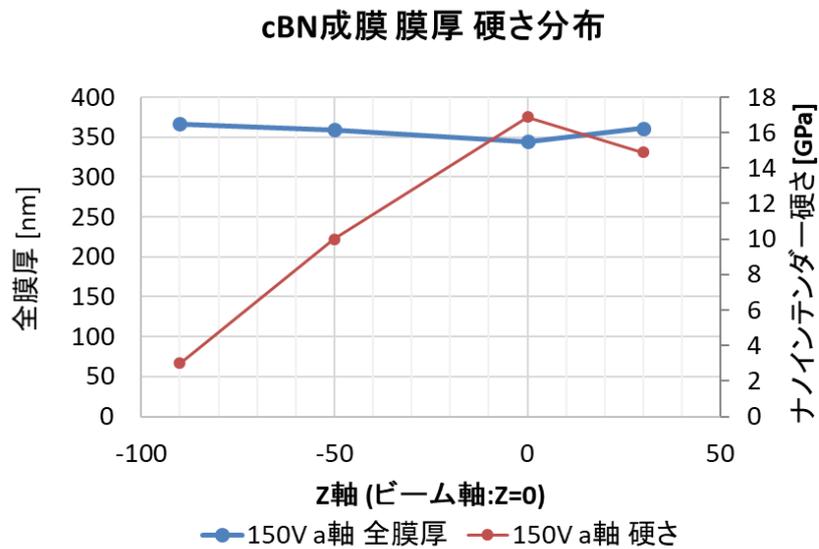


図 2-6 位置依存における膜厚と硬さの相関グラフ

膜厚が一定であることから、材料となるプラズマは均一であるが、合成が不均一であることが示唆された。この原因については温度、プラズマ種、電子が考えられ、特に温度が合成に影響を与えると思われる。そこで、温度について検討を行うことにした。インサートチップを用いて温度測定を行ったところ、BN 成膜時に約 120°Cの温度差が確認された。この時 cBN 比率は温度が高い z=0mm の位置で 68%、z=50mm の位置で 44%であった (図 2-7)。

これらの温度差を解消するために、パネルヒータを設置した。ヒーター部は 3ゾーンを持ち、加熱領域を選択できる。チャンバー内に設置しパネルヒータを用いたプロセスを開始した (図 2-8)。

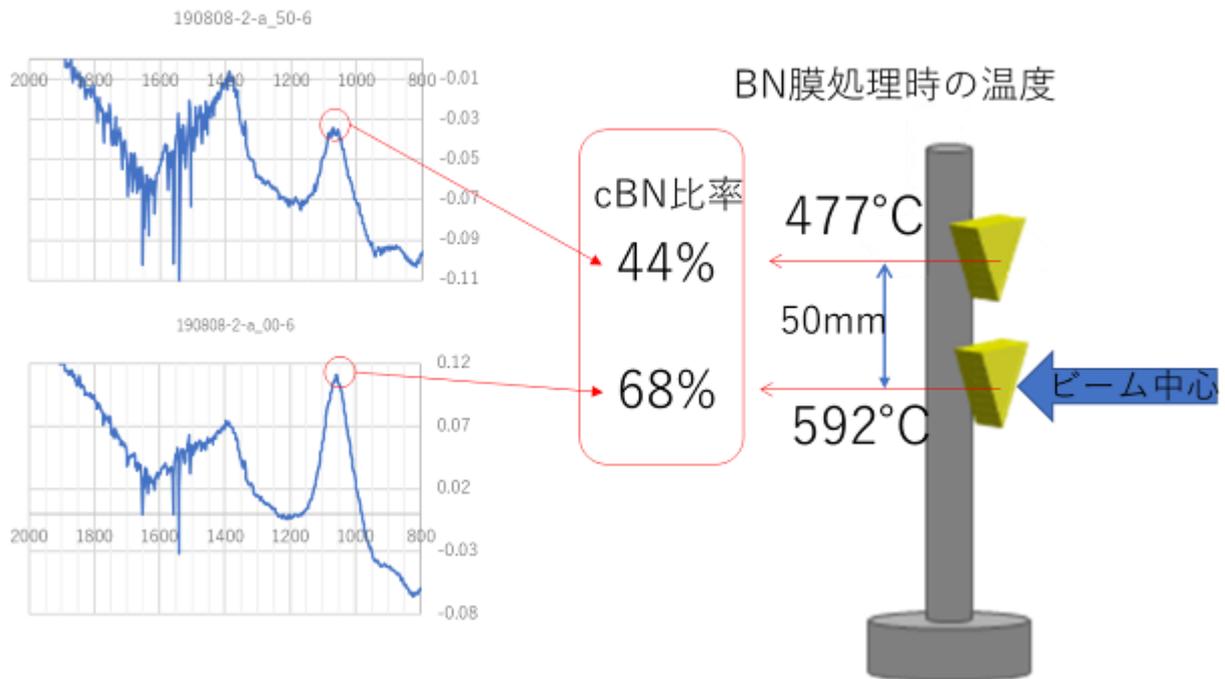


図2-7 位置依存における処理温度と cBN 比率の関係

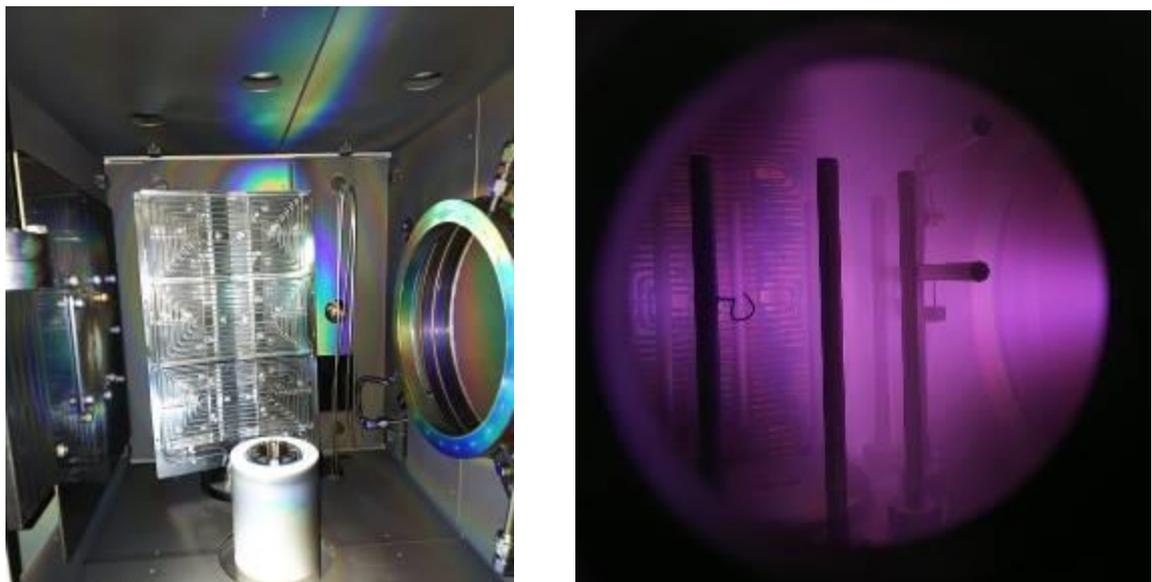


図2-8 ヒーター設置 (左) ヒーター加熱プロセス (右)

【3. 切削特性の評価と改良】

3-1 切削試験系の構築

切削特性の定量的評価のため、切削時に工具にかかる微小な力を評価する動力測定系（図3-1）及び切削時の切粉の挙動などを把握するための高速度カメラによる観測系（図3-2）の構築を行った。切削加工時の高速度カメラの静止画像の一例を図

3-3に示す。切粉の挙動が確認できた。

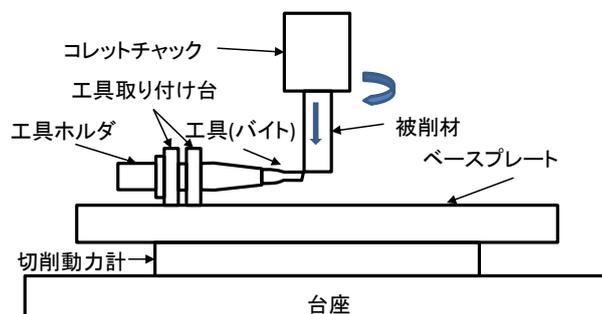
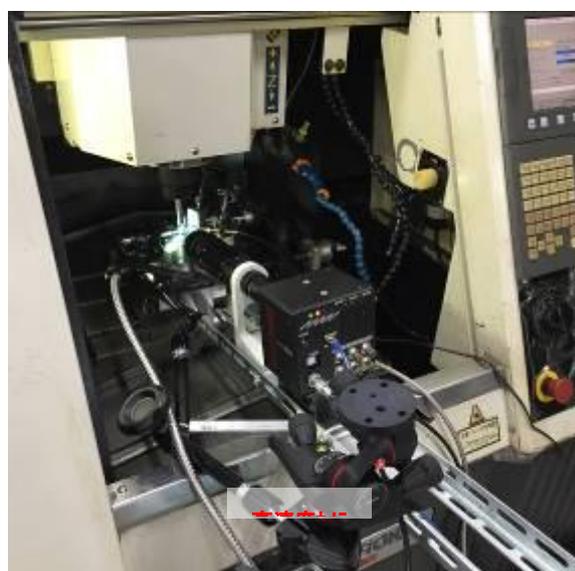
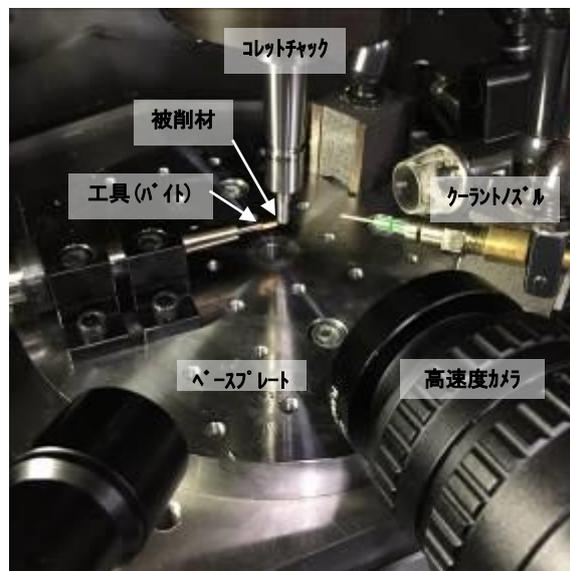


図3-1 動力測定系の概念図



NCマシンに設置した様子



加工時の観測の様子

図3-2 高速度カメラによる観測系

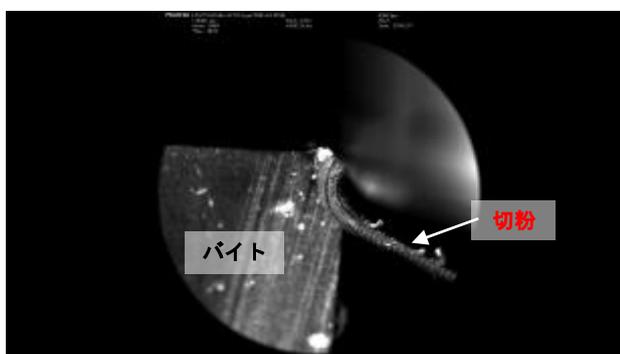


図3-3 高速度カメラによる画像例

3-2 バイト切削試験

バイト切削試験を行う為に、図1-1に示したバイトを用いた。使用した材料は微粒子超硬で、横切れ刃角および横逃げ角は8°に設定した。

製作したバイトにcBN膜をコーティングし、切削試験を行った。表3-1にバイト切削試験の切削条件、図3-4に切削試験の全体の写真を示す。試験はマシニングセンタを用いて行った。マシニングセンタのテーブル上にベースプレートとバイトを固定し、スピンドルの部分に被削材を取り付けて回転させた。回転させた被削材を一定の速度で移動させ、旋盤のように切り込んで切削を行った。1回の切込みにおける加工長は10mmであり、これを10回繰り返した。また、ベースプレートの下に切削動力計を配置することにより、切削中に発生するそれぞれ上下、左右、前後方向の3軸の切削力を記録した。ノンコート、下地のTiN膜コーティングのみ、cBN膜コーティングの3種類のバイトを使用して試験を行い、工具の摩耗状況や切削力を比較した。また、加工中の切削力について、図3-4中の切削力の軸Yが主分力、Xが背分力、Zが送り分力に対応している。

表3-1 バイト切削試験の切削条件

加工長	10mm
総切削長	$\frac{10^{-3}}{1-6} \times \phi 6 \times \pi \approx 188m$
切込み回数	10回
被削材	ハイス生材
回転速度	3000min ⁻¹
送り速度	9mm/min
送り(Z)	3um/rev.
切込量(X)	0.1mm

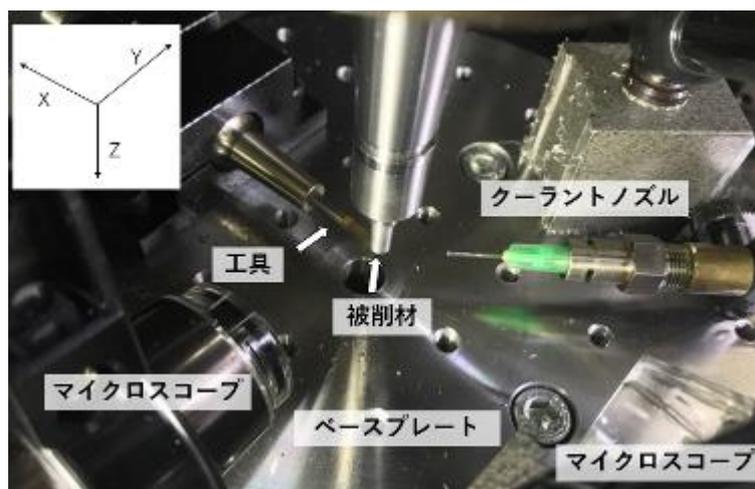


図3-4 バイト切削試験の全体写真

試験前と10回目の切込み後の各バイトのエッジ部の拡大写真をそれぞれ図3-5と図3-6に示す。図3-6は試験後の前逃げ面の摩耗部を丸で囲んでいる。切削試験後、cBN膜コーティングバイトのすくい面及び横逃げ面についてはコーティング膜がすぐに剥離し、大きく摩耗していた。ノンコートやTiN膜コーティングの摩耗と差は小さく、高い耐摩耗性は見られなかった。エッジ部のcBN比率が低く、刃先にうまくcBN膜のコーティングが成膜できていないと考えられる。しかし、すくい面や横逃げ面と比べ、かかる負荷の小さい前逃げ面の部分はノンコートやTiN膜コーティングの摩耗と比べ、摩耗が相対的に小さくなっていた。

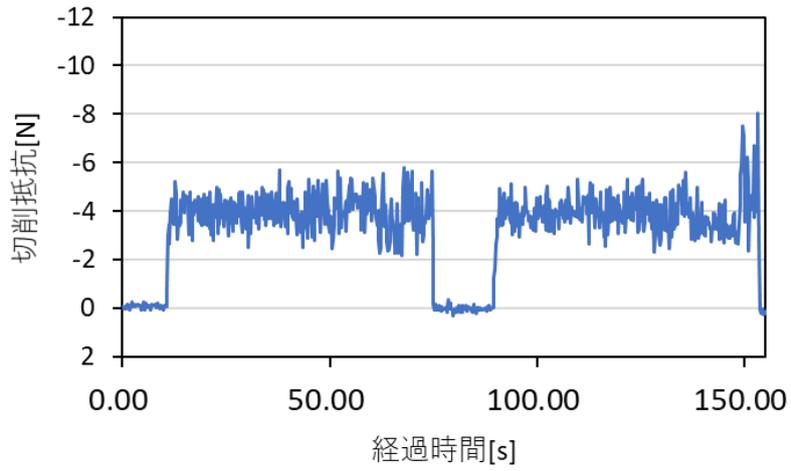


図3-5 試験前の各バイトのエッジ部拡大写真

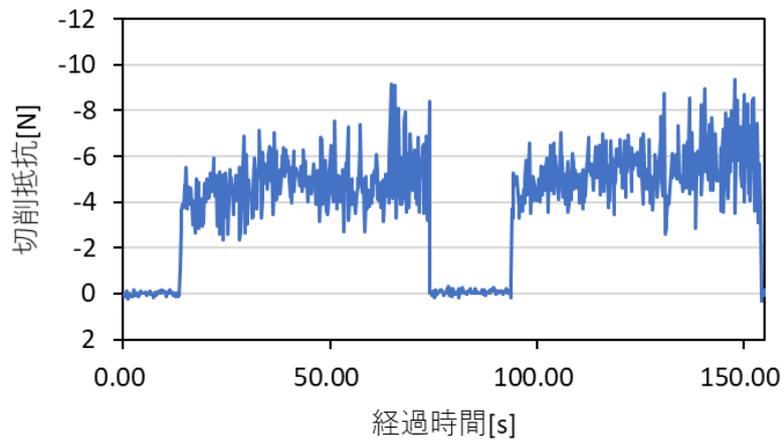


図3-6 10回目の切込み後の各バイトのエッジ部拡大写真

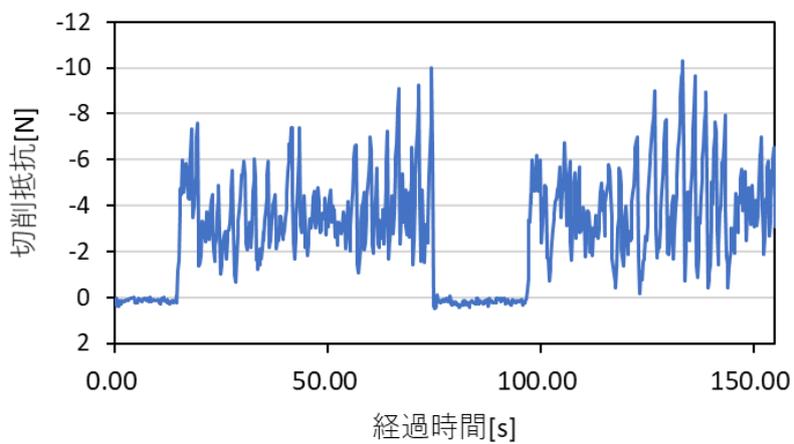
次に摩耗が相対的に小さかった前逃げ面にかかる切削力を比較した。図3-7に7回目及び8回目の切込みにおける各バイトのX軸方向の切削力(背分力)を示す。cBN膜コーティングは、ノンコートやTiN膜コーティングの切削力と比較するとノイズが大きくなっているが、平均的に切削力が小さくなっていた。以上より、cBN膜コーティングされたバイトの試験においては、前逃げ面の耐摩耗性が優れた結果となった。



ノンコート



TiN 膜コーティング



cBN 膜コーティング

図3-7 7回目及び8回目の切込みにおける各バイトのX軸方向切削力(背分力)

3-3 ドリル切削試験

cBN 膜のコーティングの成膜特性とバイトの切削試験の結果を鑑み、加工径が 1mm のドリルへの応用を検討した。図3-8にコーティング前のドリルの外観写真を示す。このドリルに cBN 膜コーティングを行い、切削試験を行った。



図3-8 ドリル外観写真

表3-2にドリル切削試験の切削条件、図3-9に切削試験の全体写真、図3-10に試験後の被削材ワークの写真を示す。試験はマシニングセンタを用いて行った。被削材をバイスで固定し、マシニングセンタのテーブル上に設置した。ドリルをスピンドルに取り付けて穴開けを行った。また、バイト切削試験同様バイスの下に切削動力計を配置し、切削時の動力を記録した。TiAlN 膜コーティング、下地の TiN 膜コーティングのみ、cBN 膜コーティングの3種類のドリルを使用して試験を行い、工具の摩耗状況や切削力を比較した。

表3-2 ドリル切削試験切削条件

コーティング種類	TiAlN 膜コーティング cBN 膜コーティング TiN 膜コーティング
加工径	1mm
加工深さ	3mm
被削材	S50C
周速	30m/min
回転数	9600min ⁻¹
1回転当たりの送り	0.03mm/rev.
送り速度	300mm/min
ステップ長	0.25mm

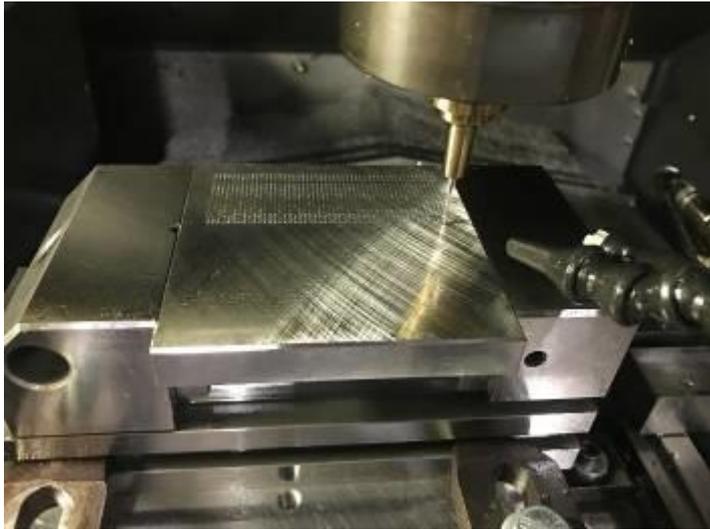


図3-9 ドリル切削試験全体写真

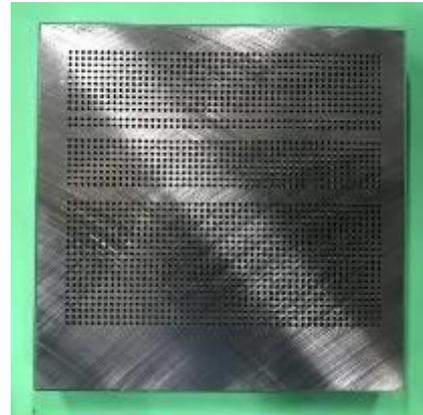
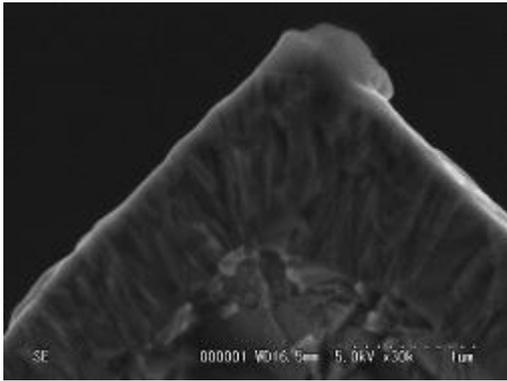


図3-10 試験後被削材ワーク写真

総合的には、TiAlN 膜コーティング、cBN 膜コーティング、TiN 膜コーティングの順で耐摩耗性が良かったが、cBN 膜コーティングについても一定の効果が出た。cBN 膜コーティングは下地の TiN 膜コーティングの上に成膜するため、試験を行った TiN 膜コーティングは相対的に膜厚が薄くなる。そのため、現段階では TiN 膜コーティングより cBN 膜コーティングが優れていると断定することは出来ないが、今後テストの試行回数を増やすことにより、より正確な結果を得ることが出来ると考えられる。

【4. 中間層や cBN 膜の分析】

cBN 膜コーティング試料の cBN 比率の評価をフーリエ変換赤外吸収分光、硬度をナノインデントで測定し、研究開発にフィードバックした。また、バイトの刃先エッジにおける微小領域 ($20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$) の cBN 比率を顕微フーリエ変換赤外吸収分光で評価し、その測定結果を研究開発にフィードバックした。更に、製膜条件を変えた TiN 膜、B 膜、BN 傾斜膜、cBN 膜のバイトの表面分析を SEM-EDX で行い、断面試料を作製し、膜厚測定を SEM 観察で行った。断面 SEM の観察の例を図4-1と図4-2に示す。

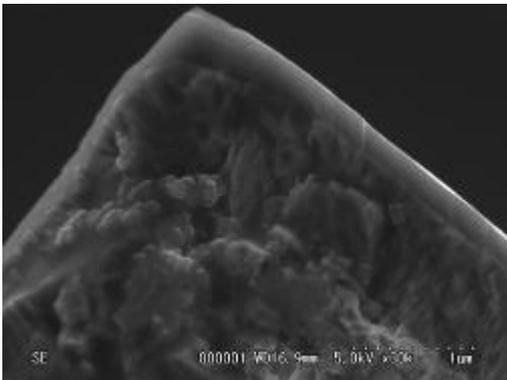


(a)従来条件：膜厚 0nm



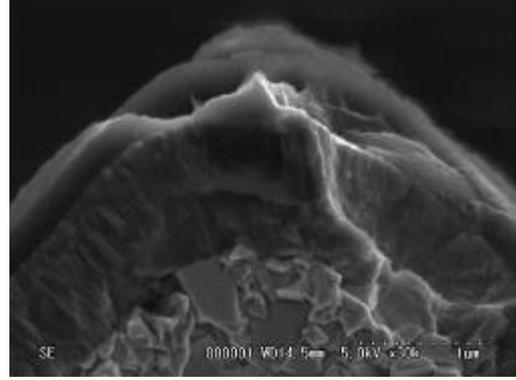
(b)改善：膜厚：200nm

図4-1 B膜の断面SEM像



(a)従来条件：膜厚 200nm

⇒B膜から膜厚増加無し



(b)改善：膜厚：400nm

⇒B膜から膜厚増加有り

図4-2 BN傾斜膜の断面SEM像

本項のデータは【1】項、【2】項にも示した。

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

- 平坦部においてであるが、高硬度で密着性の高い cBN 膜コーティング技術を確立した。
- 工具と治具等の重ね合わせなどによるシース制御により、工具(バイト、ドリル、リーマ)に対して、cBN 膜の三次元コーティングの見通しが得られた。
- 約 500mm 角のプロセスチャンバーを備える自転軸 10 本の大容量処理装置を開発した。
- カスプ磁場技術による 200mm 範囲の均一膜厚の cBN 膜コーティングを実現した。
- cBN 膜のコーティング特性を活かした工具としてバイトとドリルへの応用を行い、TiN 膜や TiAlN 膜コーティングとの比較を行った。
- 刃先エッジなどの微小領域における硬度や cBN 比率の評価方法を確立することができた。
- 研究開発の成果を基に、特許出願を 1 件行った。

3-2 研究開発後の課題

- 刃先エッジでの硬度と密着性の定量評価ができていない。
⇒評価方法は確立できたので、今後データを蓄積する。
- 任意形状の刃先エッジへの cBN 膜コーティング技術の確立が必要である。
⇒各工具の形状・大きさに合わせた治具の開発で解決できる。
- 大容量処理装置において、十分な硬度の cBN 膜コーティングが実現できていない。また、目標に掲げた数量の工具処理に至っていない。
⇒ヒーターによる大容量温度制御により、実現できる。
- バイト、ドリル・エンドミルにおいて目標の性能には至っていない。
⇒切削試験のデータ蓄積とコーティング条件の最適化により、実現できる。

3-3 事業化展開

- 現状の cBN 膜のコーティング特性を活かした工具候補を見出すことができたため、継続して研究開発を進め、cBN 膜コーティング工具の商品化を行う。
- 平坦部への cBN 膜コーティング技術を活用できる新たな応用先を探索し、切削工具に限らない事業化の検討を行う。