

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420065

研究課題名(和文) 大気圧プラズマによる細径ダイヤモンドコーテッドエンドミルの刃付け研磨技術の開発

研究課題名(英文) Development of Polishing Technology for the Preparation of Cutting Edge of Diamond-Coated Thin Endmill using Atmospheric Pressure Plasma

研究代表者

竹内 貞雄 (Takeuchi, Sadao)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：90216846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高精度・長寿命節密金型を実現するために、超硬合金を自由な形状に切削加工するための工具を開発する。具体的には微細加工用ダイヤモンドコーテッドエンドミルの刃先部分のダイヤモンド膜を軽負荷で研磨する技術を検討した。

その結果、高密度大気圧プラズマを安定して連続照射できるプラズマトーチを開発した。さらに、プラズマによる気相エッチングとダイヤモンドのグラファイト化を促進するCoの触媒効果を併用した、メカノケミカル方式のダイヤモンド研磨技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：To realize the production of a durable mold with high precision, this study aims at developing a tool for the cutting of cemented carbide into various shapes. Specifically, the technique for light load polishing of the diamond film, coated onto the cutting edge of the endmill for micro machining, is discussed. The experimental results show that continuous irradiation of stable high-density atmospheric plasma is effective results in the development of plasma torch to be applied. In addition, mechano-chemical diamond polishing technology using gas-phase etching together with catalysis of Co, which promotes graphitization of diamond, is developed.

研究分野：生産工学

キーワード：ダイヤモンド膜 研磨 切削加工 気相エッチング

1. 研究開始当初の背景

工業立国日本を支える金型関連技術において、新興国にまねの出来ない付加価値の高い次世代金型製造に関わる基幹技術の確立が重要課題となっている。小型部品の製造に関して、複雑な形状製品を一連のプレス加工で成型する「ファインプランキング」が注目されている。小型精密部品の製造のためのファインプランキング金型における加工面の面粗さ Ra は $0.025\ \mu\text{m}$ (25nm) 程度が要求され、加工精度は $-0.001\sim+0.003\text{mm}$ といった水準が要求されている。プレス加工の最終工程で、この金型による一種の冷間鍛造により鋼板には金型の凹凸が転写されて製品となる。したがって最終製品の寸法精度を保証するための金型には極めて高い寸法精度と、大量生産に耐えられる優れた耐摩耗性が要求され、既存のダイス鋼や高速度工具鋼では、十分な型寿命を得ることが困難である。

このような過酷な摺動環境で使用可能な素材は超硬合金に限定されている。しかし、超硬合金は工具用の素材であり自由形状の切削加工を施すことは出来ない。加工は放電加工や研削加工に限られるために、納期と費用の点で実用的でない。一般に切削加工において、工具硬さは被加工材の3倍以上は必要であり、ピッカース硬度 HV:2000 程度の超硬合金を切削加工するには、ダイヤモンド工具 (HV:10000) が不可欠である。ダイヤモンドコーテッドドリルやエンドミルについては、直径数 mm 以上のサイズについては、市販されており実績もある。しかし、精密金型の加工には、直径 1mm 以下の細径エンドミルが必要である。図に直径 0.3mm のスクエアエンドミルに気相法でダイヤモンド膜をコーティングした時の刃先部分の観察結果を示す。気相法によるダイヤモンド膜特有の凹凸面 (自形面) が認められるとともに、コーティング膜厚の関係から、切れ刃が丸みを帯びてしまい、シャープな切れ味を損ねてしまうことが予想される。すなわち、先に示した金型の加工ツールとして、要求される摩耗特性は満たせるものの加工面粗さが劣るという問題を抱えている。この問題を解決するためにはコーティングされたダイヤモンド膜の凹凸を研磨するとともに鋭利な刃先エッジを形成するための研磨加工を施す必要がある。

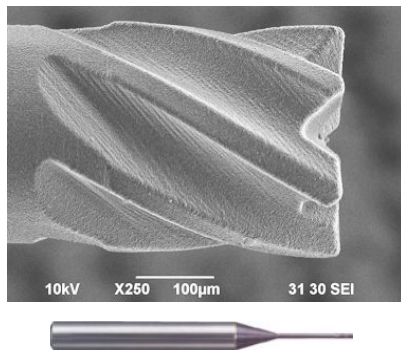


図1 ダイヤモンドコーテッド
エンドミルの刃先

2. 研究の目的

今回、主に対象としている小径エンドミルは図1に示したように 3.0mm のシャンクから 0.3 mm の太さで首下長さ 5~10 mm を有して先端部分に刃付けされている。このような形状の先端部分に荷重を负荷すればたわんでしまうことは容易に想像できる。すなわち、細径エンドミルにコーティングされたダイヤモンド膜を研磨する場合、工具としての寸法精度を保証するためには、軽荷重で効率的な研磨が不可欠である。具体的には、下地基板となる超硬合金にダイヤモンド砥石でねじれ刃形状を形成した時の荷重以下で、全物質中で最も硬いダイヤモンド膜の研磨を行う必要がある。

本研究ではマイクロ波を用いた大気圧プラズマを研磨部分に照射しながらメカノケミカル反応による研磨を併用することで、ダイヤモンドコーテッド細径エンドミルを軽荷重下で効率的に刃付け研磨できるダイヤモンド膜研磨技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 大気圧プラズマトーチの性能向上

長時間安定したプラズマを維持するために、プラズマ発生のトリガーとなるアンテナの材質、形状、設置方法の検討を行った。さらに、プラズマ発生に伴う発熱対策としてプラズマ発生部の用いる石英ガラス管の冷却方法の見直しを行った。

(2) 大気圧プラズマによるダイヤモンドのエッチング特性の評価

予備的研究から Ar プラズマに O_2 を添加することでダイヤモンド膜が効率的に気相エッチングできることを確認している。ダイヤモンドは結晶面の方位により、機械的特性はもとより、エッチング特性が異なることが知られている。そこで、代表的な (100), (110), (111) 面についてエッチング特性の比較を行った。

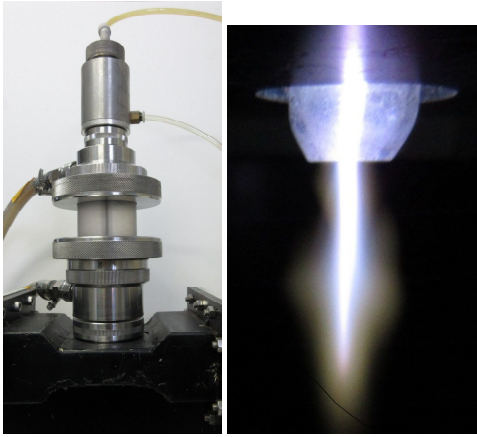
(3) 金属触媒による気相エッチング効率の向上

気相エッチングだけの刃先研磨では良好な仕上げ面を得ることは出来ない。ダイヤモンド膜を平滑に研磨するためには機械研磨を併用する必要がある。軽荷重で効率的なダイヤモンド膜の研磨を実現するために、プラズマ照射部に触媒金属を設置することでエッチング効率の向上と、平滑面形成の両立を図れる研磨技術を検討した。

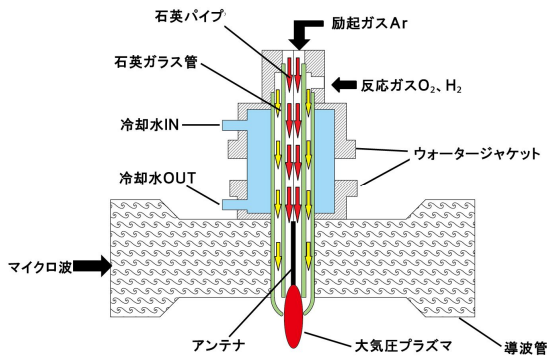
4. 研究成果

(1) 大気圧プラズマトーチの性能向上

図2にベースとなったマイクロ波励起大気圧プラズマトーチの概略を示す。(a)は外観(b)に構造を示す。導波管により誘導された 2.45GHz のマイクロ波中に 2重構造の石英パイプを導入する。内側のパイプにはアルゴンガスを供給しパイプ下部のアンテナがプラズマ発生のトリガーとなり Ar プラズマが形



(a) プラズマトーチの外観とAr+O₂プラズマ



(b) プラズマトーチの構造

図 2 大気圧プラズマトーチの概略

成される。その外側のパイプに反応ガスとして酸素を供給する 2 重構造となっている。すなわち、プラズマ維持が容易な Ar プラズマ中に酸素を供給することで化学的活性度の高い反応性大気圧プラズマジェットを生成できる。

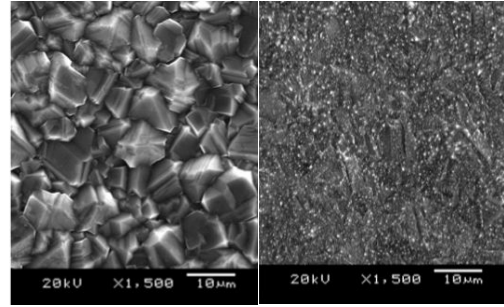
従来使用していた炭素アンテナは消耗が激しく、先端形状の変化によりプラズマ発生点が移動するため安定性および再現性に問題があった。アンテナ材質をカーボンファイバー(CFRP)に変更するとともに、24000 本もの CFRP を内側パイプ内に設置した。これは、Ar ガスの流量を低下させない上限の本数でこのように設置することで内側パイプ内でアンテナが動くことが無く、さらに 250W の投入電力で 15min の安定したプラズマ照射が可能となった。なお、この時の CFRP の消耗長さは 0.5mm 以下であった。基本的なプラズマ照射条件を表 1 に示す。

表 1 プラズマ生成条件

Ar 流量 (L/min)	0.5
O ₂ 流量 (L/min)	0.25
投入電力 (W)	250
フィラメント数	24000
照射時間 (min)	15

(2) ダイヤモンドのエッチング特性

図 3 に気相合成による多結晶ダイヤモンド



(a) プラズマ照射前 (b) プラズマ照射後
図 3 プラズマ照射前後のダイヤモンド膜の観察結果

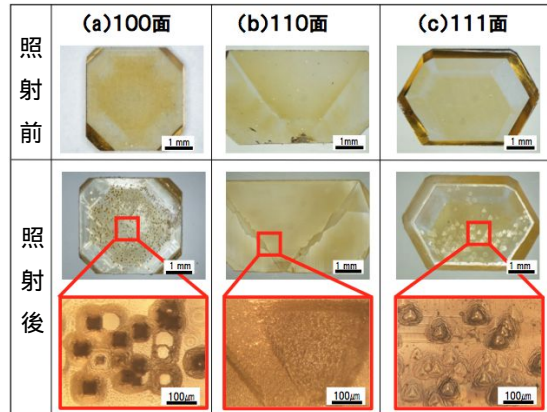


図 4 Ar+O₂ プラズマ照射による単結晶ダイヤモンドのエッチング結果

膜について、Ar+O₂ プラズマの照射によりエッチングにより平滑化された状況を示す。極端な結晶方位依存性や粒界の選択的なエッチングが生じないがわかる。すなわち Ar+O₂ プラズマは多結晶ダイヤモンドの自形面を平滑化するのに適していることがわかる。さらに、詳細なエッチング特性を調査するために結晶方位の異なる単結晶ダイヤモンド基板(100), (110), (111)についてエッチング特性の比較を行った。照射条件は表 1 の通りである。ダイヤモンド基板の設置位置は、プラズマトーチ先端から 15mm とした。

図 4 に結晶方位の異なる単結晶ダイヤモンドのエッチング結果を示す。いずれの単結晶ダイヤモンドにおいて、特有のエッチングが認められた。(a)(100)面の場合、4 角形のエッチピットが、(c)(111)面の場合、3 角形のエッチピットが顕著に認められた。これに対して(b)(110)面の場合、セクター部分の選択的なエッチングが認められたが、それ以外の(110)面では、照射した全面でエッチングが認められ、いわゆるエッチピットに相当する局所的なエッチングは認められなかった。

このように結晶方位によりエッチングの進行に違いが認められたため、エッチングレートについての検討を行った。プラズマ生成条件は同じであるが、基板設置位置を先の実験における 15 mm から 5 mm とし、より高い基板温度設定でのエッチングを行った。照射時間は試料により異なり 2~5min とした。

	(100)面	(110)面	(111)面
照射前			
照射後			
エッチングレート (mm ³ /min)			
	0.534	4.66	1.13

図5 Ar+O₂ プラズマ照射による単結晶ダイヤモンドのエッチングレート

図5に結晶方位の異なる単結晶ダイヤモンドの Ar+O₂ プラズマ照射による形状変化の様子とエッチングレート(1分間当たりの除去堆積)の算出結果を示す。(100)面の場合、明らかに形状が小さくなっていることがわかる。エッチングレートは0.534 mm³/minと最も小さい値を示した。(111)面の場合、形状の変化は少なかったものの、板厚の減少分が大きく、エッチングレートは(100)面のほぼ2倍となる1.13 mm³/minを示した。これに対して(110)面では極めてエッチングレートが大きく、わずか2min(他は5min)の照射で形状が大きく変化した。セクターの境界部分が消失してしまい、4.66 mm³/minと(100)面の9倍近いエッチングレートを示した。

これらの事からダイヤモンドは結晶方位によりエッチングレートが大きく異なること、また(110)面のエッチングレートが極めて大きいことが明らかになった。

(3) 金属触媒によるエッチング効率の向上

先に示したように大気圧 Ar+O₂ プラズマの照射だけでは、工具刃先に要求される平滑面を得ることは困難であり、何らかの機械的な研磨を併用する必要がある。ダイヤモンドは金属との摺動において、鉄系金属と反応することが知られている。例えば鉄は炭素を固溶することが可能であり、高温高压法によるダイヤモンド合成では、触媒金属として Co が用いられている。そこで Co とダイヤモンド膜を接触させた状態で Ar+O₂ プラズマ照射を行い、ダイヤモンド膜のエッチング状況を確認した。図6にトーチとダイヤモンド基板および Co 板の設置状況を示す。

図7に照射結果を示す。外観観察によれば、Co 板と接触した円弧状領域のダイヤモンド膜に変化が認められる。この領域の拡大観察結果によれば Co との接触界面のダイヤモンド膜は選択的に除去されており下地の超硬合金の素地が露出している。また、その周辺部分のダイヤモンド膜にはグラファイト化が進行していることが認められる。これらの観察結果より、Ar+O₂ プラズマをダイヤモンド膜に照射する際に Co とダイヤモンド膜を

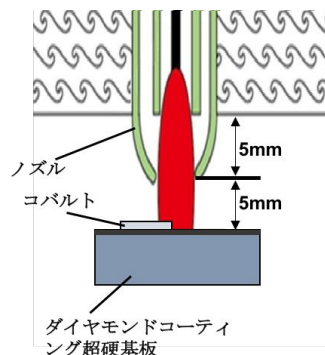
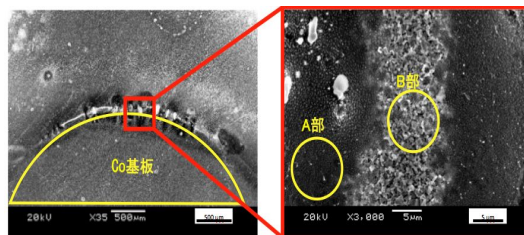


図6 トーチとダイヤモンド基板、Co 板との位置関係



① 外観 ② 拡大観察結果

図7 Co と Ar+O₂ プラズマを併用したダイヤモンド膜のエッチング

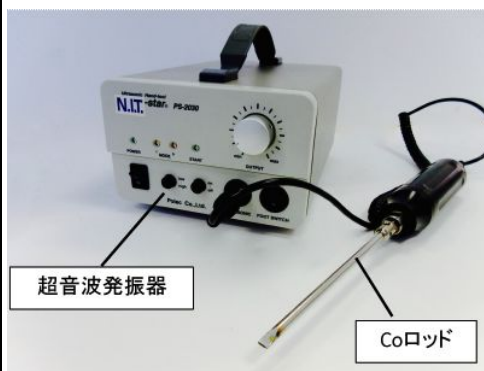


図8 触媒効果を併用する超音波振動 Co ロッド

接触させることでダイヤモンド膜のエッチングが急速に進行することが明らかになった。さらにこの反応は、基板温度が低く、エッチングレートが低い条件においても急速なダイヤモンドのグラファイト化と気相エッチングが進行することが明らかとなった。このことは、細径のダイヤモンドコーテッドエンドミルに対してダイヤモンド膜の基板への密着性に悪影響を及ぼさない比較的低い温度領域でダイヤモンドを効率的にエッチングできる事を示している。

さらにこの現象は、Co 板をダイヤモンド膜表面に摺動させながら Ar+O₂ プラズマを照射することで、Co の触媒効果を利用した気相エッチング効率の向上とメカニカルな摺動を伴う平滑面の形成が実現できることを示唆している。この原理を具体化する手段として、Co の研磨ホーンを超音波振動(20kHz、振幅:3 μm)によりダイヤモンド膜に接触させながら Ar+O₂ プラズマ照射する機構を開発した。この外観を図8に示す。チャンバー等を使用

しない大気圧プラズマトーチであればプラズマ中に Co ロッドを自由に装入して基板上の任意の領域に接触させることが可能であり、今後の発展が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 2 件)

土屋晃海、白井里歩、竹内貞雄、大気圧プラズマを用いた DLC 膜の表面改質、ニューダイヤモンドフォーラム第 29 回ダイヤモンドシンポジウム、2015 年 11 月 17 日、東京理科大学金町キャンパス

土屋晃海、竹内貞雄、大気圧プラズマを用いたダイヤモンド膜のエッチング、ニューダイヤモンドフォーラム第 28 回ダイヤモンドシンポジウム、2014 年 11 月 21 日、東京電機大学(東京都足立区)

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 貞雄 (TAKEUCHI, Sadao)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：90216846

(2)研究分担者

なし ()

(3)連携研究者

なし ()