

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03746

研究課題名（和文）切除術の手術用メスへの燃焼炎によるナノ結晶ダイヤモンド皮膜合成と切開性能評価

研究課題名（英文）Synthesis of Nanocrystalline Diamond Films by Flame Combustion on Surgical Scalpels in Ablative Surgery and Evaluation of Incision Performance

研究代表者

高橋 護（TAKAHASHI, Mamoru）

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90261651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、燃焼炎により界面はく離を抑制しながらナノ結晶ダイヤモンド皮膜を切除術の手術用メス材料であるステンレス鋼基板上ならび手術用メスに合成することを目的に実験を行った。また、得られた合成皮膜の接合強度を検討するため引っかかり試験を行った。その結果、ステンレス鋼基板上へ燃焼炎によってナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成が可能となり、手術用メスにも皮膜の合成が可能となった。さらに、合成皮膜の接合強度を評価した。また、合成条件を変化させることによりナノ結晶ダイヤモンド皮膜の形態、ならびに合成皮膜の界面はく離に影響を及ぼすことを確認し、合成皮膜の界面はく離を抑制することが可能な合成条件を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、医療界では切除術の手術用メスの需要が増加している。しかしながら、切除術の手術用メスは使用している間に摩耗し、さらには様々な荷重が掛かることで、手術用メスの破損が問題となっている。このことから、その都度、手術用メスを取り換えなければならないといった問題が発生する。本研究では、これらの問題を解決するため切除術の手術用メス材料であるステンレス鋼基板上ならび手術用メス上に高硬度、耐摩耗性、耐久性に優れているナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成を行った。本研究で得られた成果は、手術用メスの摩耗や破損の抑制により長寿命につながると考えられ、手術用メスへの新たな皮膜技術につながるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, to obtain nanocrystalline diamond films and to achieve good adhesion, diamond films were deposited on stainless steel substrate surface and surgical scalpel by flame combustion. To obtain the bonding strength of synthesized films, the scratch test was performed. The microcrystalline diamond films and nanocrystalline diamond films were synthesized on stainless steel substrate surface by flame combustion. And, the films were synthesized on surgical scalpel surface by flame combustion. The bonding strength of synthesized films was discussed by the scratch test. The nanocrystalline diamond films and the delamination of synthesized films were affected by the synthesis conditions. The delamination of the nanocrystalline diamond films was prevented.

研究分野：機械工学

キーワード：ダイヤモンド皮膜 材料加工・処理 表面・界面物性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)ダイヤモンドは高硬度、耐摩耗性、低摩擦係数等の優れた性質を有するため、機械切削の工具等の工業用に幅広く利用されている。また、切削性能や工具寿命の向上、高速切削かつ切削時間の短縮を目的に、化学気相堆積法(CVD法)によるダイヤモンド皮膜のさらなる開発が盛んに行われている。近年では、耐摩耗性、工作物の加工表面の粗さ精度、切削寿命をさらに向上させるためダイヤモンド結晶のナノ結晶化が求められ、研究開発が進められている。さらには、ダイヤモンド結晶のナノ結晶化により、最近では医療用デバイス等への適用に関する研究も行われている。しかしながら、これらのダイヤモンド皮膜の合成において、通常の合成法等では装置が大掛かりなものとなり、ダイヤモンドを成長させる時間が非常に長時間にわたるといった問題がある。

(2)ここで、医療界に目を向けると手術用メス、ハサミ、鉗子等の鋼製器具類の市場拡大が期待されている。この際、手術器具として使用される切除術の刃物である手術用メスは、高炭素鋼やステンレス鋼の金属製メスが通常使用されているが、手術用メスは耐摩耗性に乏しく、切刃の鋭さに欠ける部分があり、あざやかな切開面を得ることは難しいという問題がある。また、手術中に破損してしまった場合、破損片を発見するのが困難で患者の体内に残留してしまう危険性がある。特に近年、これらの問題を解決するため手術用メス上に高硬度、耐摩耗性、耐久性に優れているダイヤモンドを金属上に皮膜する研究が注目されている。ここで、ナノサイズのダイヤモンドには毒性が無く、炎症を起こさないことが明らかになってきている。しかしながら、未だ手術用メスの破損等で手術用メスそのものの長寿命を得ることが難しい等の問題が存在する。

(3)申請者らは、CVD法の一種であり大気中でのアセチレン-酸素の燃焼炎によるダイヤモンド合成に着目してきた。燃焼炎法は、装置が安定、安全、安価であり、合成速度が他の方法と比較して格段に速く、また、平面や凹凸面にも合成可能である等様々な工業的に有利な特徴を有している。よって申請者らは、この燃焼炎によるダイヤモンド合成法を応用して、モリブデン(Mo)基板や切削工具等で使用されているタングステンカーバイド(WC)基板表面、人工股関節等で使用されるコバルトクロム(Co-Cr)合金表面、歯科用インプラント等で使用されるチタン(Ti)基板表面にダイヤモンド皮膜が初めから強固に接合されるような合成を試みてきた。しかし、ダイヤモンド合成後に熱応力により界面はく離が発生する問題があった。

(4)そのため、界面はく離の抑制を考慮した新たな合成方法として、ダイヤモンドの合成途中に皮膜の表面温度を変化させる合成法をはじめ様々な合成条件の検討を行い、界面はく離を防ぐ合成法を確立してきた。さらには、ダイヤモンド結晶のナノ結晶化に関しても合成条件の検討を行い、ナノ結晶ダイヤモンドの合成を可能としてきた。

(5)しかし、燃焼炎法による切除術の手術用メス材料上に接合強度の高いナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施し、その切開性能を評価している研究は見あたらない。

2. 研究の目的

本研究では、現在まで確立してきた合成方法、ならびに最適な合成条件を応用して、燃焼炎法により界面はく離を抑制しながらダイヤモンド結晶のナノ結晶化を行ったダイヤモンド皮膜を切除術の手術用メス材料であるステンレス鋼基板上に合成し、その接合強度の評価を行う。また、実際に使用されている手術用メス表面にナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成を行い、切開性能の評価を行うことを目的とする。そのため、燃焼炎法により様々な合成条件を用いてダイヤモンド皮膜合成を行い、以下のことを明らかにする。

基礎実験としてステンレス鋼基板上への燃焼炎によるダイヤモンド皮膜の合成、接合の可能性

ステンレス鋼基板上への燃焼炎法によるナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成、接合の可能性

ナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施したステンレス鋼基板の引っかかり試験によるダイヤモンド皮膜の接合強度の定量化

実際に使用されている手術用メス表面(ステンレス鋼)へのナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成
ナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施した手術用メスの切開性能の評価

3. 研究の方法

(1)申請者らは、高純度アセチレン-酸素に窒素を添加した際、窒素がダイヤモンド合成に影響を与えることを明らかにし、混合ガスに窒素を添加することで、ダイヤモンド結晶のナノ結晶化が可能であることを確認している。そのため、本研究においても高純度アセチレン-酸素を用いた燃焼炎によりダイヤモンドを合成する際に窒素に注目し、高純度アセチレン-酸素に窒素を添加することで、ダイヤモンド結晶のナノ結晶化が可能と考えた。また、燃焼炎の白心から基板

表面までの距離(白心距離)を変化させることでダイヤモンド結晶の成長速度をコントロールすることが可能なことがわかっており、ダイヤモンド結晶のナノ結晶化が可能と考えた。

(2) 図1に示すような燃焼炎によりダイヤモンドを合成することが可能な実験装置を使用する。この実験装置は、窒素を添加することが可能である。この装置によりステンレス鋼基板上に、燃焼炎によりナノ結晶ダイヤモンド合成を行う。この際、ナノ結晶ダイヤモンドが合成可能な添加する窒素の流量、ならびにダイヤモンド結晶の成長速度をコントロールできる白心距離を変化させ、ナノ結晶ダイヤモンドが合成可能な最適値を求める。

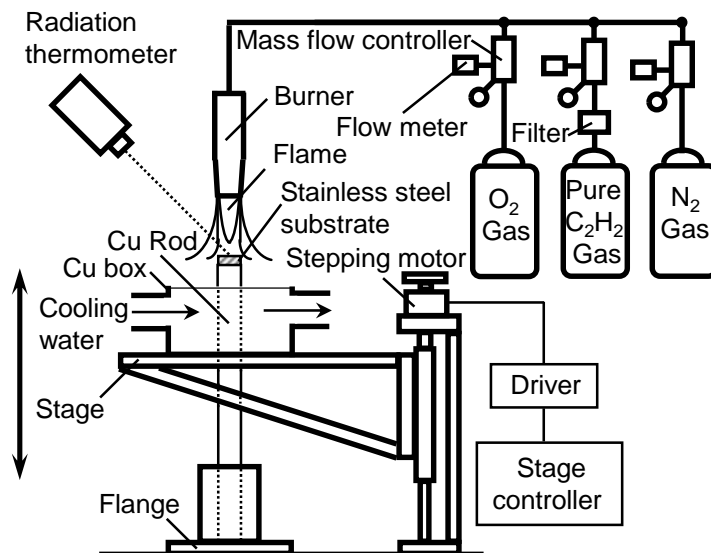


図1 燃焼炎によるダイヤモンド皮膜合成装置

申請者らは、接合強度が高いダイヤモンドの合成を行ってきた。そこで、これら最適な合成条件を応用してステンレス鋼基板上にダイヤモンドの合成を行い、その接合状況を確認する。

ここで、基板の表面形状がダイヤモンド皮膜の接合に影響を与えることがわかっている。そのため、ダイヤモンドを合成する前に基板表面のスクラッチング処理を施し、その影響を接合状況により確認し、最適な前処理の条件を決定する。また、白心距離がダイヤモンド皮膜の合成ならびに接合強度に影響を与えることもわかっている。そのため、白心距離も変化させて合成を行い、その影響を接合状況により確認し、最適な白心距離の条件を決定する。

合成されたダイヤモンド皮膜を走査型電子顕微鏡 (SEM)、X線回折装置 (XRD) によりその結晶形状や成分等の特性を評価する。

(3) 既存の引っかかり試験装置を用いてナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施したステンレス鋼基板の引っかかり試験を行い、はく離が生じる限界荷重を測定する。ここで、垂直方向から荷重をかけたダイヤモンド圧子を用いて、試料をステッピングモータにより一定速度で水平方向に移動させる。

得られた限界荷重と引っかかり痕からせん断応力を求め、ナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施したステンレス鋼の接合強度を定量的に求める。

(4) ステンレス鋼基板上で得られたナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成条件を応用し、実際に使用されている切除術の手術用メス(ステンレス鋼)上にナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成を行う。

手術用メス(ステンレス鋼)上に合成されたナノ結晶ダイヤモンド皮膜を施した手術用メスの切開性能の評価を行う。

4. 研究成果

(1) まず、基礎試験として切除術の手術用メス材料であるステンレス鋼基板上への燃焼炎によるダイヤモンド皮膜の合成、接合の可能性について検討した。この際、通常市販されているアセチレン-酸素ガスを使用し合成を行い、ダイヤモンド皮膜の合成が可能か確かめた。

現在まで、基板の表面形状がダイヤモンド皮膜の接合に影響を与えることがわかっている。そのため、ダイヤモンドを合成する前にステンレス鋼基板の前処理として基板表面のスクラッチング処理を施し合成を行った。この際、スクラッチング処理に使用するエメリーペーパーの粒度を変化させ基板表面の粗さを変化させた。このような合成条件と現在まで確立してきた合成方法ならびに最適条件を応用して、燃焼炎によりダイヤモンド合成を行った。その結果、図2に示すように、ステンレス鋼基板上にダイヤモンド皮膜を合成することが可能となった。しかしながら、合成後に皮膜の界面はく離が発生し、はく離を完全に抑制することができなかった。

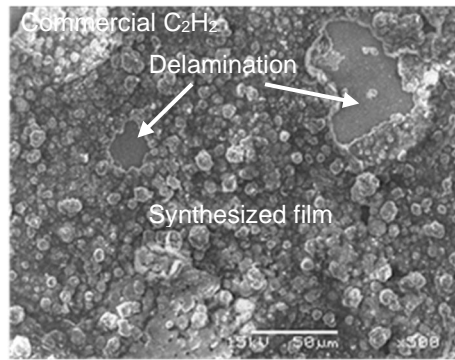


図2 ステンレス鋼基板上に通常のアセチレン用いた燃焼炎により合成したはく離が発生したダイヤモンド皮膜のSEM 画像

さらに、白心距離も合成されたダイヤモンドに影響を及ぼすこともわかっており、この距離を変化させ合成を行った。その結果、図3に示すように、ステンレス鋼基板上にダイヤモンド皮膜を合成することが可能となった。また、上述のような合成条件を変化させ合成を行うことで、合成されたダイヤモンド皮膜の形態が変化することを確認した。さらに、これら合成条件を変化させることでダイヤモンド皮膜のはく離に影響を与えることを確認した。

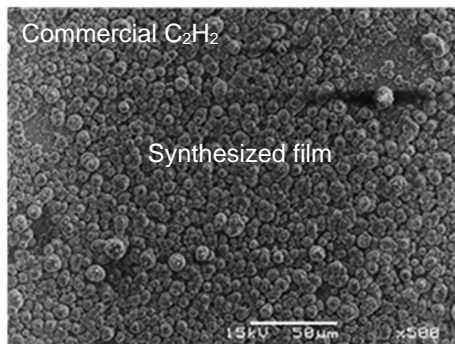


図3 ステンレス鋼基板上に通常のアセチレン用いた燃焼炎により合成したはく離が発生していないダイヤモンド皮膜のSEM 画像

(2) ステンレス鋼基板上で得られたダイヤモンド合成条件を適用して、ステンレス鋼基板上への燃焼炎によるナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成、接合の可能性について検討した。この際、高純度アセチレンを用い、窒素を高純度アセチレン - 酸素ガスに添加して、合成を行った。また、ステンレス鋼基板の前処理として基板表面のスクラッチング処理を施し基板表面を粗くし、基板表面の形態を変化させ合成を行った。その結果、最適な窒素流量ならびに基板の前処理条件において、ステンレス鋼基板上にナノ結晶ダイヤモンドを合成することが可能となった。しかしながら、この際も合成後に合成皮膜の界面はく離が発生した。

また、上述のような合成条件を変化させ合成を行うことで、合成されたナノ結晶ダイヤモンド皮膜の形態が変化することを確認した。さらに、これら合成条件を変化させることでダイヤモンド皮膜のはく離に影響を与えることを確認した。この際、通常市販されているアセチレン - 酸素ガスを使用した際にはく離を抑制できる合成条件を適用し、合成を行った。さらに、白心距離も合成されたダイヤモンドに影響を及ぼすこともわかっており、この距離を変化させナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成、接合の可能性について検討した。ここで、合成後の皮膜のはく離を抑制することが可能な合成条件を確立することができた。その結果、図4に示すように、最適な窒素流量ならびに基板の前処理条件、白心距離において、ステンレス鋼基板上に、ナノ結晶ダイヤモンド皮膜を合成することが可能となった。

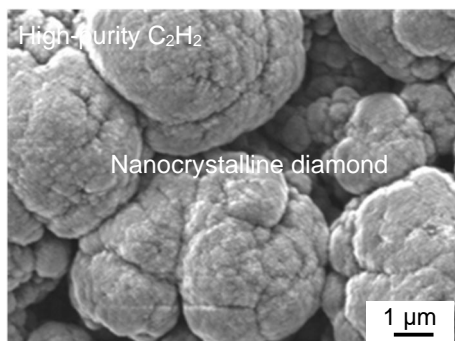


図4 ステンレス鋼基板上に高純度アセチレン用いた燃焼炎により合成したナノ結晶ダイヤモンド皮膜のSEM 画像

ステンレス鋼基板上に合成されたナノ結晶ダイヤモンド皮膜の引っかかり試験を既存の引っかかり試験装置により行い、接合強度について検討した。この際のダイヤモンド圧子による引っかかりによって生じるナノ結晶ダイヤモンド皮膜の表面の引っかかり痕の結果を図5に示す。ここで、合成されたナノ結晶ダイヤモンド皮膜に対して、引っかかり試験を行った際に得られた結果から接合強度の評価を行った。

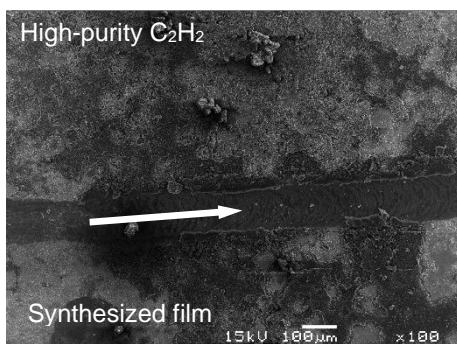


図5 ステンレス鋼基板上的のナノ結晶ダイヤモンド皮膜の引っかかり痕のSEM画像

(3) さらに、現在、実際に使用されている切除術の手術用メス（ステンレス鋼）を用意し、燃焼炎によるダイヤモンド合成を行うための実験装置に適用できるように、図6に示すように試料を作成した。

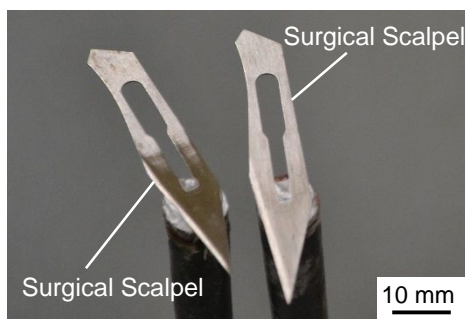


図6 製作した手術用メス試料

この際、現在まで得られた最適な合成条件を適用して、実際に使用されている切除術の手術用メス（ステンレス鋼）上へナノ結晶ダイヤモンド皮膜の合成を図7のように行った。ここで、手術用ステンレス鋼メスが基板と形状が異なり、また厚さが非常に薄くなることで温度が上昇する問題があったが、皮膜を合成することが可能となった。今後は、さらなる冷却効率の向上をはかってダイヤモンド皮膜合成を行い、再現性の高い皮膜合成を行う必要があることがわかった。

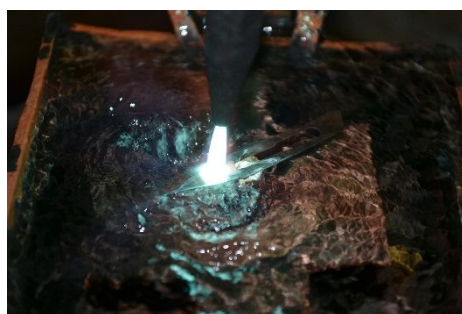


図7 燃焼炎による製作した手術用メスへのナノ結晶ダイヤモンド皮膜合成実験画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 護, 依田孟士, 神谷 修
2. 発表標題 切除術の手術メス用ステンレス鋼基板表面への燃焼炎によるダイヤモンド皮膜合成
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期秋期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 依田 孟士, 高橋 護, 神谷 修,
2. 発表標題 手術メス用ステンレス鋼基板表面への燃焼炎によるナノ結晶ダイヤモンド皮膜合成
3. 学会等名 日本素材物性学会 令和5年度(33回)年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永田 隼大, 依田 孟士, 高橋 護, 神谷 修
2. 発表標題 切除術の手術メス用ステンレス鋼基板表面への燃焼炎によるダイヤモンド皮膜合成に及ぼす白心距離の影響
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第59期秋期講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------