

補助事業番号 2023M-429

補助事業名 2023年度 切削性能の拡張に資する

高硬度・高耐熱性テトラヘドラル型DLCの開発 補助事業

補助事業者名 佐賀大学 理工学部 理工学科 機械工学部門 教授 長谷川 裕之

1 研究の概要

輸送機器の軽量化に貢献し、環境に調和する炭素繊維複合材料(CFRP)の切削加工では、ダイヤモンド被覆工具が用いられるが、CFRPが誘発する工具摩耗・切削熱によりダイヤモンド薄膜は劣化する。本研究では、ダイヤモンドの副産物として誕生したダイヤモンドライクカーボン(DLC)を研究対象とし、硬度ならびに耐熱性を兼ね備えるDLCの創製を目的とする。

本研究では、周期的に放電下でイオン群を放出するその瞬間に高活性状態を創出するパルスアークプラズマ蒸着法により、高い運動エネルギーを持つ炭素イオンならびに金属イオンを基板に入射させDLC系膜を合成した。そして、耐摩耗機能を決定づける微細構造・機械的性質・熱的性質を体系的に解明するとともに、切削試験による応用面での検証を行った。

2 研究の目的と背景

地球温暖化の主要因になるCO₂排出の削減に向け、炭素繊維複合材料(CFRP)などの先端材料を用いて、輸送機器の軽量化を図り、燃費向上を目指すことが試みられている。CFRPは、マトリックスとする樹脂に炭素繊維を規則的に配列することにより軽量かつ高強度な特性を持つことから車体・機体の軽量化に寄与している。しかしながら、CFRPでは、硬質な炭素繊維が切削工具の刃先を摩耗させ、樹脂の熱伝導率の低さが要因になり、加工熱が切削領域に蓄積し、加工温度は上昇する。この難削性は、複合材料の層の剥離を促進させ、表面粗度・形状精度の悪化を助長する。一方、切削工具には、切削抵抗と呼ばれる力が作用し、加工熱は工具に流入するため、著しい工具損傷が生じ、工具の低寿命化へと導く。環境問題の解決に寄与するCFRPの高効率加工・高精度加工の実現に向け、切削工具向けの秀逸な耐摩耗膜が求められている。

本研究では、微細構造、機械的性質、熱的性質、切削性能をキーワードとして、過酷な切削環境に耐えうる機械的性質および熱的性質を両立するDLCの創製を目的とした。

3 研究内容

(1) パルスアークプラズマ法によるDLCの合成

DLCは、水素含有DLCと水素フリーDLCに分類される。水素含有DLCは、高温下での水素の離脱により機械的性質の劣化が懸念されるため、水素フリーDLCをテーマとした。また、作製手法であるパルスアークプラズマ法は、アーク放電を周期的に発生させ、高活性プラズマを生み出す(図1)。本研究を通じて、新しい手法によるDLCならびに耐熱性を向上させた

金属添加DLCの合成に成功した。

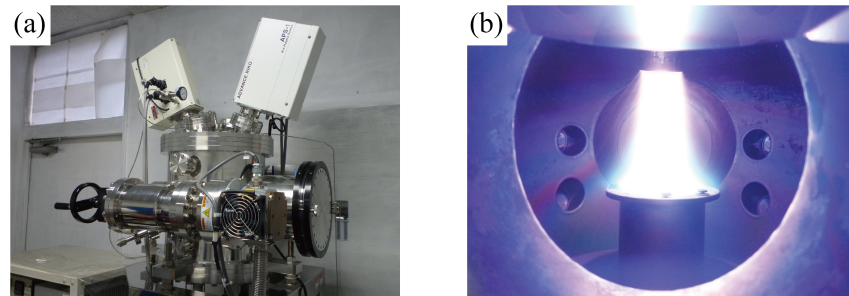


図1: (a) パルスアークプラズマ装置 (b) 周期的アーク放電の様子

(2) DLCの開発

パルスアークプラズマ法により合成したDLCの組織および結合状態を明らかにした。主要な成膜条件である放電電圧の増加により、基板上的原子拡散を促進させ、緻密組織を得ることができた(図2(a), (b))。また、DLCはダイヤモンド結合とグラファイト結合を内在する。放電電圧の増加により、ダイヤモンド結合の形成が進み、その内在率は73%まで増加した(図2(c))。

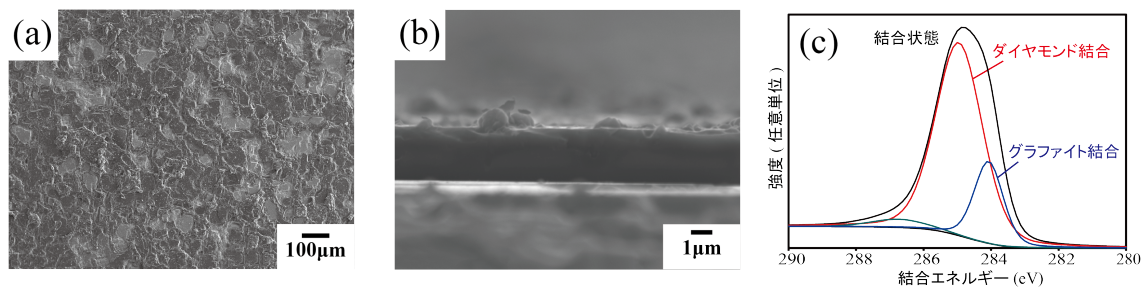


図2: DLCの微細構造 (a) 表面組織 (b) 断面組織 (c) 結合状態

(3) DLCの機能性評価

DLCの機械的性質と摩擦係数を測定し、機能性を評価した。ダイヤモンド結合の増加に依存して20GPaから68GPaまで増加し、弾性率は201GPaから325GPaまで上昇した(図3(a))。また、DLCの機械的性質および組織の緻密化により摩擦係数の低減し、最小となる平均摩擦係数は、0.1未満を示した(図3(b))。これらの機能性の結果を踏まえ、DLCを切削工具に被覆したところ、DLCが一様に被覆され、剥離のないコーティング工具を完成することができた(図3(c))。

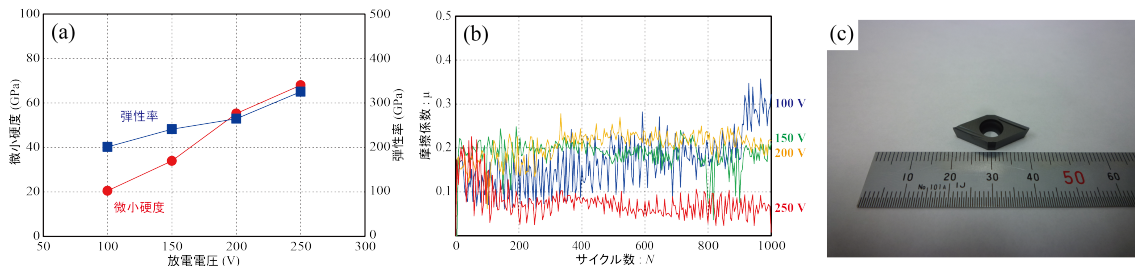


図3: DLCの機能性 (a) 硬度・弾性率 (b) 摩擦係数 (c) コーティング工具

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

(1) 周期的アーク放電を用いるDLCの合成

カソードイオンプレティング法など連続放電を用いてDLCは、合成されてきた。本研究では、周期的な放電を用いるパルスアークプラズマ法によりDLCを合成したが、薄膜組織の連続性ならびに緻密性が得ることができた。さらに、DLCの特性改善に寄与する炭素と金属からなるDLCの合成も可能にした。本手法により複雑組成となるDLCのみならず、多種多様なセラミック薄膜の創製が期待できる。

(2) 金属添加DLCの切削工具への応用

DLCをコーティングした工具は、アルミニウム合金などの粘りがあり、工具との凝着が発生しやすい延性材料の切削に用いられる。DLCの長所である低摩擦特性は延性材料の切削に有益な効果を与えるが、高強度材料の切削により生じる加工熱に対応できず耐熱性に問題がある。本研究では、Si-DLC示す良好な機械的強度および耐熱性を示した。これらの特性を活用することにより切削材料の拡張とともに過酷条件下での切削を可能にするコーティング工具への展開が期待できる。

(3) DLCを活用する耐摩耗膜の機能設計

切削工具に応用される耐摩耗膜の構造は、単層構造と積層構造に分類され、本研究では、単層構造の構築を試みた。積層構造は、複数の薄膜を幾重にも積み重ね、それぞれの薄膜が持つ長所の相乗効果を得ることを企図している。従来、立方晶や六方晶など結晶構造を持つ結晶材料からなる積層構造を構築は試みられているが、結晶材料と非晶質材料からなる積層構造の事例は少ない。本研究において開発したDLCおよびSi-DLCは非晶質材料になり、これらの薄膜と結晶材料を積層させることにより、非晶質材料が高負荷の緩和とクラックの進展を抑制し、ランダムな原子配列により薄膜間の接合強度を高めることが予想されるため、本研究の成果は、耐摩耗膜の機能向上に貢献する構成要素としての活用が期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者は、切削工具・機械部材への被覆を目的とする表面処理技術の研究に従事しており、チタン、クロムを代表とする遷移金属を含有する窒化物耐摩耗膜を開発している。耐摩耗膜の機能性は、微細構造・機械的性質・熱的性質の最適化により得られるといった着想をもと

に研究活動を推進している。さらに、耐摩耗膜の秀逸な機能性を発現するため、周期的なアーク放電により高エネルギー状態を作り出すパルスアークプラズマ法を開発し、新しい表面処理法としての有用性を検証している。

本研究では、パルスアークプラズマ法により、炭素系膜の代表例であるダイヤモンドライクカーボン(DLC)をテーマとした。DLCの高強度化には、DLCに内在するダイヤモンド結合を増加させる必要があり、パルスアークプラズマ法の高活性プラズマを用いて結合状態を制御することを試みた。そして、DLCは高温下で気化しやすい性質があるため、耐熱性の問題が指摘されている。本研究において、DLCに金属を添加したところ、金属添加DLCは未添加に比べ耐熱性が改善することを明らかにした。本研究で得られた成果を活用し、切削工具への応用範囲が限定的であるDLC系膜の応用展開を進め、高寿命・高効率・高精度加工に資する耐摩耗膜の創製を試みる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (1) “工業部材への応用を指向する高強度・高耐熱性コーティングのプラズマプロセスによる創製”, 2023年度 精密工学会 秋季大会 学術講演会.
- (2) “パルスアークプラズマ法によるダイヤモンドライクカーボンの合成 -DLCの機械的性質に及ぼす放電電圧依存性-“, 2024年度 精密工学会 秋季大会 学術講演会.

7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの <http://saga-mech-surface.jimdo.com>
<https://saga-mech-surface.jimdofree.com/jka-%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%A6%82%E8%A6%81/>

研究成果をまとめ、3編の研究概要を作成した(図4)。

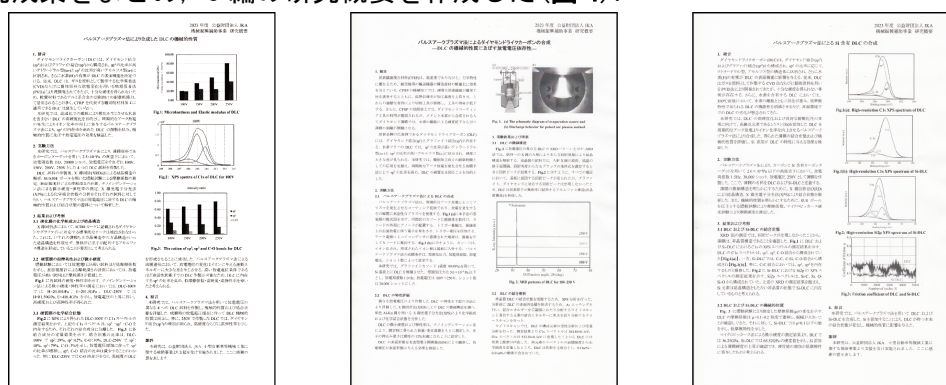


図4： 本事業の研究概要

- (2) (1)以外で当事業において作成したもの
 該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 佐賀大学（サガダイガク）

住 所： 〒840-8502

佐賀県佐賀市本庄町1番地

担 当 者： 教授 長谷川 裕之（キョウジュ ハセガワ ヒロユキ）

担 当 部 署： 理工学部 機械工学部門（リコウガクブ キカイコウガクブモン）

E-mail: hasegawa@me.saga-u.ac.jp

URL: <http://saga-mech-surface.jimdo.com/>