

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月14日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656037

研究課題名（和文）：フリーカーボンを含む低摩擦コーティング膜の開発とその難削材加工への適用

研究課題名（英文）：Development of low friction coating films containing free carbon and their application to machining difficult-to-machine materials.

研究代表者：

細川 晃 (HOSOKAWA AKIRA)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：40199493

研究成果の概要（和文）：アンバランスド・マグネトロン・スパッタ法によるコーティング技術を高度化し、耐熱性を確保した上で潤滑性を有するフリーカーボンを含むPVDコーティング工具の開発に成功した。特に、UBMS-TiCN工具は摩擦係数が極めて小さく、代表的な難削材であるSUS304のエンドミル加工において、切削抵抗および切削温度が低く、かつ、平滑な仕上げ面が得られ、工具逃げ面への被削材の凝着も抑制されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, some low friction coating films by Unbalanced Magnetron Sputtering (UBMS) method are developed, and are applied to high-speed milling of difficult-to-machine materials. The UBMS coated films, especially UBMS-TiCN have smoother surface without droplets and lower friction coefficient than those of any other AIP coated tools studied. The lubricating ability of the UBMS-TiCN film reduces the cutting force, cutting temperature and adhesion of chips, so that long tool life and good finished surface are obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	360,000	3,560,000

研究分野：切削加工学

科研費の分科・細目：機械工学・(生産工学・加工学)

キーワード：コーティング工具，PVD，UBMS法，フリーカーボン，摩擦係数，難削材

1. 研究開始当初の背景

ここ数年来、航空機部品や発電機部品などを対象に、チタン合金やニッケル基耐熱合金の切削加工の要求が急増している。しかし、これらの材料は低い熱伝導性、高い加工硬化性および工具との高い親和性などの特性によって切削温度の上昇や切りくずの凝着をまねき、工具寿命が極めて短いなどの問題が

発生している。そのため、これら難削材の高効率加工が可能な工具の開発が急務となっている。

このような状況の下、難削材の切削加工を目的として種々のコーティング工具が開発されており、中でも、アーキイオンプレーティング法(AIP法)によるコーティング膜が主流となっている。これは“母材に耐熱性を付与する”ことに主眼をおいている。

これに対し、本研究では“母材に潤滑性を付与する”ことによって、切削抵抗、延いては切削熱の発生自体を抑制し、かつ、仕上げ面の劣化や工具寿命の低下に直結する切りくずの凝着を抑制するコーティング膜の開発を目的として、研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究は、アンバランスド・マグネトロン・スパッタ法(UBMS法)によるコーティング技術を高度化し、ステンレス鋼やTi合金およびNi基合金などの耐熱性難削材の高効率切削を可能にする新しいコーティング工具を開発することを目的としている。現在、DLC(Diamond Like Carbon)-コーティングを除き、ほとんどすべての切削用工具に用いられているPVDコーティングは、アーキオン・プレーティング法(AIP法)によるもので、TiAlNやAlCrN膜などが主流となっている。これは母材に耐熱性を付与することを主眼において開発されたものであるが、その耐熱性には限界があり、例えばインコネルなどの高温強度が大きく凝着性のある材料の切削に対しては工具寿命が極めて短い。

そこで本研究では、発想を変え、潤滑性を重視したフリーカーボンを含有させたコーティング膜の開発に挑戦した。潤滑性に富むコーティング膜の条件は、①平滑性、②低摩擦係数、③工作物材料との不活性、である。UBMS法はこれらを実現できる唯一の膜生成法であると考えられる。具体的には、TiN/C-、TiCN/C-膜を生成し、切削工具への適用性を検討した。ここで、/Cは他の元素と結合していない(炭化物になっていない)フリーカーボンを意味し、潤滑剤のような優れた摩擦特性が期待できる。コーティング膜に要求される特性は、(1)母材との密着性；(2)膜表面の平滑性($R_z=0.1\ \mu\text{m}$ 以下)；(3)フリーカーボン含有による低摩擦性；(4)耐熱性；である。

3. 研究の方法

UBMS法による成膜装置を使用し、フリーカーボン含有コーティング膜の生成を行う。すなわち、UBMS炉内にカーボンターゲットと金属ターゲットを設置し、同時放電させることによって、フリーカーボン含有コーティング膜を生成させる。UBMS法による金属窒化物膜の生成原理を図1に示す。UBMS法では陰極である金属ターゲットにArイオンを衝突させ、はじき出された金属が N_2 ガスと結合することによって金属窒化物を基板に生成する。イオン化率が低い特性を利用することにより、炭化物の含有を抑えたフリーカーボン主体のコーティング膜を生成することができ、摩擦係数の小さい工具の開発が可能となる。

具体的な研究計画は以下の通りである。

- (1) UBMS装置内のターゲット印加電力を調整し、様々な組成のフリーカーボン含有コーティング膜を作製する。作製するフリーカーボン含有コーティング膜は、TiN/C膜およびTiCN/C膜である。
- (2) 作製したコーティング膜について、機械的性質(硬度、膜粗さ、摩擦係数、母材との密着性)、耐熱性、組成分析、構造解析を行い、コーティング膜の基本特性を測定する。
- (3) 難削材(ステンレス鋼、Ti合金)を被削材として切削実験を行い、工具の損傷機構を評価する。切削試験は、金型加工用の高速マシニングセンタ(エンドミル加工)を用い、切削抵抗、切削温度、切りくず形態、工具損耗形態・凝着性などを測定し、コーティング工具の特性を評価する。
- (4) 切削実験の解析結果をコーティング膜の構造設計にフィードバックさせ、コーティング膜組成の再構成、多層コーティング、コーティング膜の厚化など、従来にない新しいコーティング工具を開発し、難削材の高効率・高精度加工の可能性を実証する。

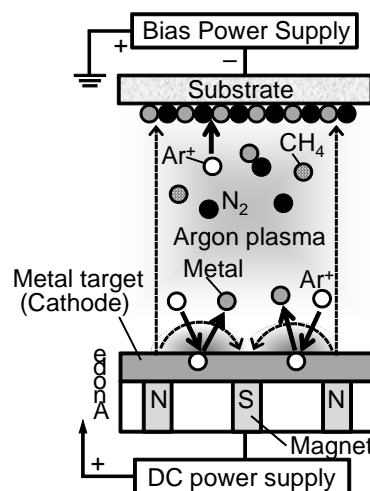


図1 UBMS法によるコーティング装置
アンバランスド・マグネトロン・スパッタ法(UBMS法):真空チャンバー内に金属ターゲットとカーボンターゲットを設置し、高電圧をかけてイオン化させたアルゴンガスをターゲットに衝突させ、弾き飛ばされたカーボンや金属原子が基板に到達して膜を生成する。

4. 研究成果

本研究は耐熱性を確保した上で潤滑性を有するフリーカーボンを含有させたコーテ

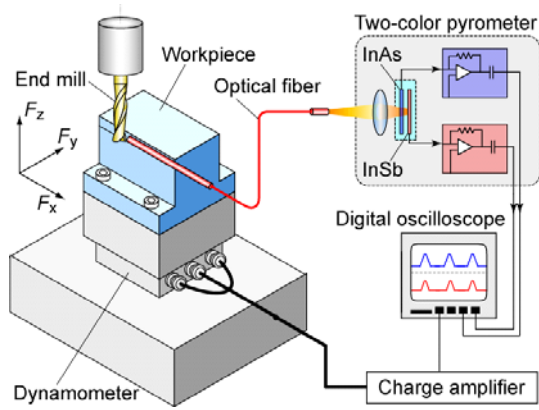


図2 切削実験装置

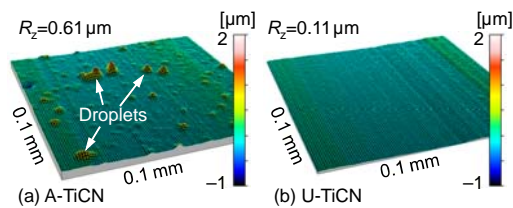


図3 UBMSコーティング膜の平滑性

表1 各種コーティング膜の特性

Sample	Hardness H_{N1} (GPa)	Critical load in scratch test (N)	Surface roughness R_z (μm)	Friction coefficient	Oxidation temp. ($^{\circ}\text{C}$)
U-TiN	35	142	0.10	0.62	600
U-TiCN	31	148	0.11	0.19	500
A-TiN	28	151	0.53	0.60	600
A-TiCN	35	116	0.63	0.61	500
A-TiAlN	37	140	0.69	0.62	800

ング膜の開発に成功し、コーティングエンドミルによるSUS304の高速ドライ切削に適用し、以下の成果を得た。実験装置を図2に示す。

- (1) 図3に示すように、UBMS法によるコーティング膜は表面の突起物やピンホールが極めて少なく、表面平滑性に優れる。また、UBMS法によるTiCNは摩擦係数が低い(表1)。
- (2) UBMS法によるTiCN(U-TiCN)は、炭化物ではなくC-C結合のフリーカーボンが多く生成されるため、摩擦係数が小さい。
- (3) 図4に示すように、一般的な切削速度($v=50$ m/min)だけでなく、熱的負荷の大きい高切削速度($v=220$ m/min)においても、U-TiCNを施したエンドミルは、他のコーティングエンドミルより圧倒的に小さい逃げ面摩耗幅を示す。
- (4) 被削材のむしれが発生しやすい高切削速度 $v=220$ m/minにおいても、U-TiCNコーティング工具は平滑な仕上げ面が得られる。
- (5) U-TiCNの場合、工具逃げ面への被削材の凝着や工具すくい面への切りくずの

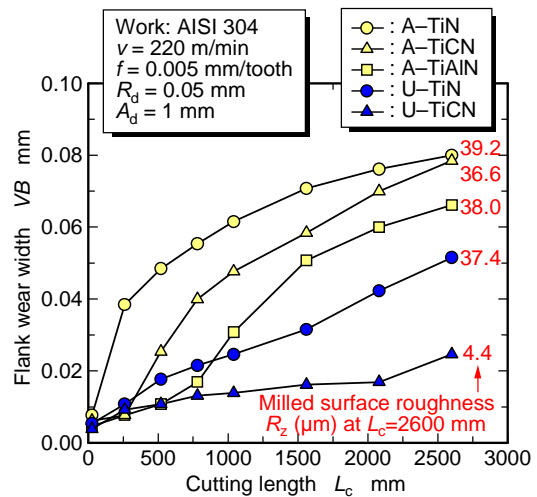


図4 切削距離と逃げ面摩耗幅の関係

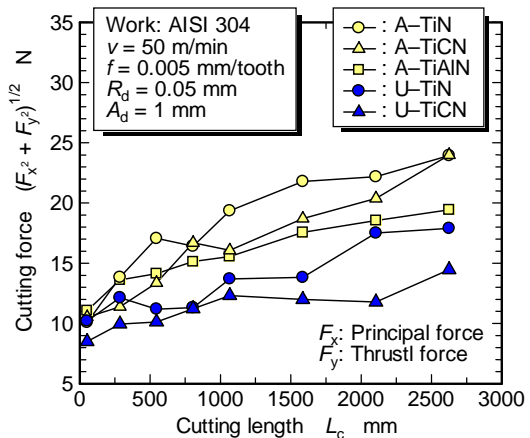


図5 切削距離と切削抵抗の関係

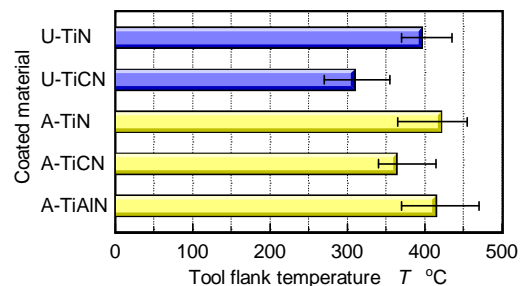


図6 コーティング工具における切削温度

堆積が大幅に抑制される。

- (6) U-TiCNコーティング工具は、切削初期から著しく低い切削抵抗を示す。(図5)
- (7) フリーカーボン含有TiCNコーティング膜は加熱温度 500°C 以上で酸化が進行する。これは、AIP法によるTiCNコーティング膜と同等の耐熱性である。
- (8) フリーカーボン含有TiCNコーティング膜のTiCN層は、非常に微細(数十nm)な

TiCN結晶粒が形成されている。

- (9) SUS304の高速乾式切削において、フリーカーボン含有TiCNコーティングエンドミルは最も低い逃げ面温度を示す。AIP法によるTiAlNコーティングエンドミルと比較するとおよそ100°C低い値である。(図6)
- (10) すくい面近傍においても、フリーカーボン含有TiCNコーティングエンドミルは切削熱の発生が抑制される。

以上のように、研究課題名に記載された、“フリーカーボンを含有させた低摩擦コーティング膜の開発”および“その難削材加工への適用”の両者を達成し、公的な学術雑誌に投稿して掲載された。なお、本研究に関する論文は第10回(2010年度)精密工学会研究奨励賞を受賞している。

本研究において、UBMS法によって作製したTiCN膜はドロップレット(溶滴)のない極めて平滑な面を有するとともに、(炭化物ではなく)フリーカーボン(C-C結合)を含有するため、非常に低い摩擦係数($\mu=0.19$)をもつことを明らかにした。そして、膜の構造分析により、ターゲット(被膜形成材料)のスパッタにおけるイオン化エネルギー量を調整(促進)できれば、更なる低摩擦化や高硬度化および耐熱性を有するコーティング膜の創成が可能であることを確信した。これを踏まえ、今後は“ホロカソード放電型スパッタ装置によるフリーカーボン含有高潤滑コーティング膜の創成”というテーマで研究をさらに発展させる予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Hosokawa, A., Shimamura, K., Ueda, T., Cutting Characteristics of PVD-coated Tools Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering Method, Annals of the CIRP, 61(2012), in press, 査読有
- ② 嶋村公二, 細川 晃, 上田隆司, 政 誠一, PVDコーティング工具による難削材の高エネルギー・高精度切削(第2報) —UBMS法によるフリーカーボン含有TiCNコーティングエンドミルの膜特性および切削温度—, 精密工学会誌, 78巻2号(2012), 321-326, 査読有
- ③ Shimamura, K., Hosokawa, A., Ueda, T., Masa, S., Cutting Characteristics of TiCN-Coated Carbide End Mill Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering Method -Application to Dry High-speed Milling of SUS304, Proc. 4th CIRP Int. Conf. on High Performance Cutting, (2010), 337-340, 査読有

- ④ 嶋村公二, 細川 晃, 上田隆司, 政 誠一, PVDコーティング工具による難削材の高エネルギー・高精度切削(第1報) —UBMS法によるTiCNコーティングエンドミルを用いたSUS304の高速ドライ切削, 精密工学会誌, 76巻10号(2010), 1182-1187, 査読有

[学会発表] (計1件)

- ① 嶋村公二, 細川 晃, 上田隆司, 政 誠一, PVDコーティング工具による難削材の高エネルギー・高精度加工に関する研究(第2報) —UBMS法によるTiCNコーティングエンドミルの切削温度, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月16日, 東洋大学白山キャンパス(東京都)

[その他]

ホームページ等

<http://www.jspe.or.jp/shokai/kakusho/kenkyushoreisho.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細川 晃 (HOSOKAWA AKIRA)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 40199493

(2) 研究分担者

上田 隆司 (UEDA TAKASHI)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 60115996

田中 隆太郎 (TAKAKA RYUTARO)
金沢大学・機械工学系・講師
研究者番号: 60361979

古本 達明 (FURUMOTO TATSUAKI)
金沢大学・機械工学系・講師
研究者番号: 60432134

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

嶋村 公二 (SHIMAMURA KOJI)
株式会社北熱 (金沢大学大学院・自然科学研究科・博士後期課程)