

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870932

研究課題名(和文) 難削材の超精密ダイヤモンド切削における被削性改善技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of machinability improvable technique for ultra-precision diamond turning of difficult-to-machine materials

研究代表者

古城 直道 (FURUSHIRO, Naomichi)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：80511716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超精密切削に用いられる単結晶ダイヤモンド工具は、鉄系金属の切削において著しく摩耗する。本研究では、表面改質を用いて組織を変化させることで、被削性を改善した鋼の開発を行った。浸炭処理によって表面に炭化物を析出させた鋼では、粒界付近に析出する炭化物に工具摩耗抑制効果があることを明らかにした。また、窒化処理によって表面に窒化物を析出させた鋼においても、粒界付近に析出する窒化物によって工具摩耗抑制効果が高くなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Ultra-precision diamond cutting tools show severe wear in turning of ferrous materials. In this study, we have investigated surface modifications of steels to improve their machinability. Carbides precipitated around grain boundaries suppressed the tool wear in turning of carburized steels. Additionally nitrides precipitated on grain boundaries have increased the effect of wear suppression in turning of nitrided stainless steels.

研究分野：超精密加工

キーワード：ダイヤモンド工具 摩耗 鋼 超精密切削 炭化物 窒化物 分子動力学法

1. 研究開始当初の背景

超精密ダイヤモンド切削加工技術は、高品位な加工面を実現できる高精度・高能率加工技術として一般化しているが、鉄系金属、ニッケルなどの加工は、工具が激しい損傷を起し、不可能とされている。光学素子の型材として使われるニッケル-リン(Ni-P)メッキは加工できるものの、銅やアルミニウム合金の加工に比べて工具寿命は極めて短い、光学素子の高機能化にともない、金型の微細化・高精度化に対応するためにはダイヤモンド工具の損傷による輪郭形状の変化の抑制、すなわち長寿命化が不可欠である。我々は、これまでにダイヤモンド工具を摩耗させ難い鋼を開発することを目標に、各種の実用鋼材の組織を分析した上で、切削を行ってダイヤモンド工具の摩耗を調べた。得られたデータに帰納推論アルゴリズムを適用して、鋼の組織がダイヤモンド工具の摩耗に及ぼす影響を推論し、母相に析出物が生じる鋼はダイヤモンド工具を摩耗させ難いことを明らかにした。これらの知見を元に、鋼の表面層を改質する試みとして、浸炭および窒化処理を行った上で、ダイヤモンド切削を行った。鋼の表面改質によって、従来の加工に比べて工具摩耗は1/10以下に抑えられ、仕上げ精度も向上することがわかった。しかし、どのような組織が工具摩耗を効果的に抑制するかは明らかではなかった。また、切削中にダイヤモンド中の炭素原子が解離し、鉄中に拡散する挙動について、これまで明らかではなかった。

2. 研究の目的

(1) 鉄結晶中への炭素拡散挙動の解明

鉄系材料を切削した際のダイヤモンド工具の摩耗は、ダイヤモンド中の炭素原子が解離し、鉄中へ拡散することが原因と考えられている。従来、鉄中への炭素原子の拡散挙動は、単純接触において調査されており、切削に際しては十分に調べられていない。本研究では、ダイヤモンドと鉄との間に圧力および相対速度が働く場合の炭素拡散挙動を解明する。

(2) 表面改質した鋼の超精密切削特性の実験的解明

浸炭および窒化した鋼には、表面層にそれぞれ炭化物および窒化物が析出する。表面改質された鋼を切削すると工具摩耗が大幅に減少する。しかし、工具摩耗抑制効果を向上させるためにはどのような組織が効果的であるかは明らかではない。本研究では、浸炭処理および窒化処理を施した鋼の超精密切削において工具摩耗抑制効果が高い鋼の組織を実験的に解明する。

(3) サブミクロンオーダー切削の高精度化

超精密切削において、サブミクロンオーダーの切削では様々な要因が加工誤差を引き起

こす。加工面の大面積化・複雑化に伴い、長時間加工における精度向上が必要とされている。本研究では、長時間加工における加工誤差の要因を調査し、加工精度向上の指針を得る。

3. 研究の方法

(1) 鉄結晶中への炭素拡散挙動の解明

切削時のダイヤモンドからの炭素拡散挙動を解明するため分子動力学法を用いる。予備実験として、純鉄をダイヤモンド切削した結果、従来知られている単純接触における拡散係数を用いて算出した拡散量をはるかに上回る摩耗量であることがわかった。切削のようにダイヤモンドと鉄の間に圧力および相対速度が働く場合、その拡散挙動は単純接触の場合とは異なると考えられる。そこで、本研究では、ダイヤモンドと鉄の間の圧力の有無、相対速度の有無および大小の影響について、分子動力学法を用いて解析する。

ダイヤモンド中の炭素原子間ポテンシャルには Tersoff ポテンシャルを用いる。Tersoff ポテンシャルは結合力が強いという特徴を持つ。一方、鉄結晶中の鉄原子間ポテンシャルには Johnson ポテンシャルを用いる。また、炭素原子と鉄原子との間のポテンシャルにも Johnson ポテンシャルを用いる。Johnson ポテンシャルは原子の組み合わせおよび原子間距離によってポテンシャルが変化する。ただし、炭素原子が鉄結晶中に侵入したところで炭素原子間ポテンシャルを Born-Mayer ポテンシャルに切り替える。Born-Mayer ポテンシャルは斥力のみポテンシャルである。

圧力を加えるため、鉄との接触面の反対側のダイヤモンド表面の各原子に一定の力を加える。また、相対速度を加えるために、移動方向の反対側のダイヤモンド表面に対して斥力を持つ原子を配置し、一定速度で移動させる。作成したダイヤモンドと鉄の接触モデルを図1に示す。

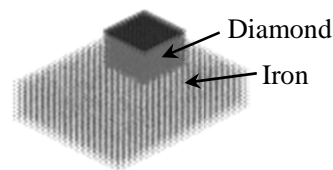


図1 ダイヤモンド - 鉄接触モデル

(2) 表面改質した鋼の超精密切削特性の実験的解明

浸炭した鋼の超精密切削特性の実験的解明

本研究では、浸炭処理によって表面から深さ方向に組織および硬さの変化が大きい合金工具鋼を試料として用いる。浸炭した鋼の表面から深さ方向の各位置で硬さ測定、組織観察、X線回折および元素分析を行い、母相および析出物を定量的に分析する。図2に、

浸炭処理を行った表面から深さ 100 μm の組織の SEM 画像を示す。図から、浸炭処理によって多くの炭化物が析出していることが分かる。浸炭処理によって析出する炭化物については、それぞれ面積、寸法および形状を定量的に分析する。ここで形状とは円形率であり、次式で算出される。

$$\text{円形率} = 4\pi \times (\text{面積} / \text{周長}^2)$$

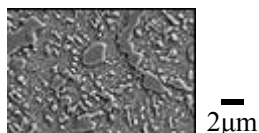


図2 浸炭した鋼の組織
(表面から深さ 100 μm)

浸炭した鋼の表面から深さ方向の各位置に対し、超精密旋盤を用いてダイヤモンド切削し、工具摩耗抑制効果を調べる。使用した工具は天然単結晶ダイヤモンドであり、刃先角 130°、すくい角 0°、逃げ角 7°、すくい面(100)である。また、切込み 3.5 μm 、送り 3.1 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 、切削距離 16m、切削速度 3.3m/s とする。工具摩耗の測定箇所は、摩耗幅が最も大きなコーナ摩耗幅とする。

窒化した鋼の超精密切削特性の実験的解明

本研究では、JIS に規定された窒化用鋼のほかに 5 種のステンレス鋼、1 種の工具鋼、1 種の合金工具鋼、1 種の耐熱鋼、純鉄の計 10 種の鋼材に窒化処理を行い、析出する窒化物が工具摩耗抑制効果に及ぼす影響について調査する。窒化した鋼の表面から深さ方向の各位置で硬さ測定、断面組織の観察、X 線回折および元素分析を行う。

窒化した鋼材から表面近傍の硬脆な化合物層を除去し、窒素拡散層に対して超精密旋盤を用いてダイヤモンド切削し、工具摩耗抑制効果を調べる。切削条件は と同様とする。工具摩耗の測定箇所は、 と同様に摩耗幅が最も大きなコーナ摩耗幅とする。また、工具形状の運動転写性を定量的に比較するため、粗さ係数を用いて評価する。粗さ係数は次式で算出される。

$$\text{粗さ係数} = \text{最大高さ粗さ } R_z / \text{理論粗さ}$$

ここで、理論粗さは工具摩耗による刃先形状の変化を考慮し、算出する。

次に、工具摩耗抑制効果が高い鋼材について、長距離切削時の超精密切削特性を調べる。長距離切削は、連続切削試験および断続切削試験を行う。

(3) サブミクロンオーダ切削の高精度化

本研究では、はじめに環境温度変化によって生じる加工中の変位補正を行う。次に、加工後の誤差要因である加工変質層を低減するため、加工条件を変更し、その影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 鉄結晶中への炭素拡散挙動の解明

切削を模擬し、圧力および相対速度を付加したシミュレーションを行った。その結果を図 3 に示す。図より、鉄上を移動することによって、ダイヤモンド中の炭素原子が順次解離し、拡散していることがわかった。また、相対速度を大きくすると、小さい場合に比べて外部に流出する炭素原子の数が増加した。解離した炭素原子の拡散挙動として拡散係数を比較すると、圧力を加えることによって拡散係数は増加しなかった。一方、相対速度があることで拡散係数は大きくなった。これは、ダイヤモンドが移動することで鉄と接触する面積が増加し、表面拡散の影響が大きくなったためと考えられる。

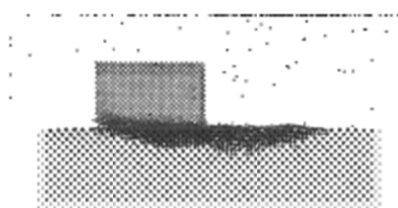


図3 圧力および相対速度付加時の挙動

(2) 表面改質した鋼の超精密切削特性の実験的解明

浸炭した鋼の超精密切削特性の実験的解明

硬さ測定結果から、浸炭した鋼は表面から深さ 500 μm まで同程度の硬さであった。したがって、表面から深さ 500 μm までを浸炭層とする。浸炭層の各深さ位置において析出した炭化物が占める割合は、深さ方向に対して減少していた。ただし、表面近傍では微細な炭化物がその大半を占めるのに対し、深さ 500 μm 近傍では、粗大な炭化物が多く析出する傾向であった。

元素分析結果および X 線回折結果から、析出した炭化物のうち、深さ方向で寸法および形状が変化していたのは Cr 炭化物であることが分かった。その他の炭化物については、微細かつ深さ方向の各位置での変化が少なかった。そこで、以降は Cr 炭化物について詳細な分析を行った。図 4 に、浸炭処理を行った表面から深さ 100 μm の元素分析結果を示す。図から、浸炭処理によって複雑な形状の Cr 炭化物が析出していることが分かる。

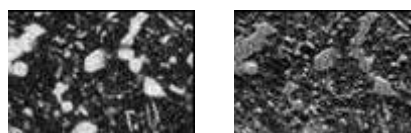


図4 浸炭した鋼の元素分析結果
(表面から深さ 100 μm , 左:Cr, 右:C)

超精密切削実験結果から、表面から深さ

500 μm 近傍でのコーナ摩耗幅が最も大きくなった。また、深さ 250 μm 近傍でのコーナ摩耗幅が表面近傍よりも小さくなった。これらの結果と、析出した炭化物を定量的に分析した結果から、粒界付近に面積が小さく、円形率が低い Cr 炭化物が析出する場合に工具摩耗抑制効果が高くなることが明らかになった。

窒化した鋼の超精密切削特性の実験的解明

窒化した純鉄、工具鋼および窒化用鋼に比べて、窒化した合金工具鋼、耐熱鋼およびステンレス鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗は非常に小さかった。

X 線回折結果から、工具摩耗が抑制されたこれらの鋼材には γ' - Fe_4N および Cr 窒化物が析出していることが分かった。また、鋼材の Cr 含有量増加とともに工具摩耗が抑制される傾向にあることが明らかになった。そして、工具摩耗が小さい鋼材ほど工具形状の運動転写性を示す粗さ係数が 1 に近く、転写性も良好であった。

硬さ測定結果および元素分析結果から、Cr 含有量が多い鋼材ほど窒化層厚さが薄く、硬さが大きくなる傾向であった。これは X 線回折でも確認された Cr 窒化物の影響であると考えられる。ここで、これらの鋼材の中で Cr 含有量が同等であるにもかかわらず、工具摩耗抑制効果が高いステンレス鋼があることが分かった。そこで、この鋼材について元素マッピング分析を行った。結果を図 5 に示す。図から、粒界付近に面積が小さく、円形率が低い Cr 窒化物が析出していることが分かる。この結果は得られた結果とも定性的に整合している。

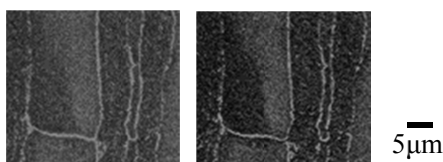


図 5 窒化した鋼の元素分析結果 (ステンレス鋼, 左:Cr, 右:N)

続いて、窒化したステンレス鋼における長距離連続切削試験および断続切削試験を行った。その結果、連続切削、断続切削いずれにおいても切削距離 1km でのコーナ摩耗幅は 2 μm 以下であり、従来の鉄系材料におけるダイヤモンド切削に比べて大幅な長寿命化を実現した。コーナ摩耗幅は、断続切削の方が連続切削よりも小さな値で推移した。一方、粗さ係数については、連続切削において 1 近傍で推移したのに対し、断続切削では、1 を超えるとともに変動が大きかった。これは断続切削において切りくず生成が不安定であった影響であると考えられる。

(3) サブミクロンオーダ切削の高精度化

はじめに、環境温度変化および加工機の変

位を 24 時間測定した。その結果、温度変化は ± 0.1 , 変位は $\pm 0.3\mu\text{m}$ であった。この変位が加工中に生じると、サブミクロンオーダの形状精度を達成できない。そこで、約 2 時間おきに実測した変位を用いて補正を行った。この補正によって、形状精度は $\pm 0.05\mu\text{m}$ 程度に抑えることができた。

次に、加工変質層の深さは、切込みを小さくし、さらに加工回数を増加させることにより、低減することが可能であった。

最後に、新しい加工条件で加工変質層を低減させた表面に対して溝加工を行った結果を図 6 に示す。図から、従来条件で生じていた弾性回復量を抑えることができた。

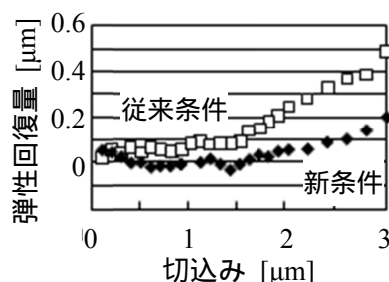


図 6 溝加工における弾性回復量の比較

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

山本 卓也, 山口 智実, 古城 直道, 廣岡 大祐, 齋藤 賢一: 分子動力学法を用いた純鉄中への炭素拡散接触モデルの構築 荷重と移動速度の付与による検討, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4 日, 東北大学 (宮城)

畠中 佑斗, 古城 直道, 廣岡 大祐, 山口 智実, 松田 茂敬, 岩佐 康弘, 寺内 俊太郎: ダイヤモンド切削における工具摩耗を抑制する窒化した鋼の分析, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4 日, 東北大学 (宮城)

杉谷 泰希, 古城 直道, 廣岡 大祐, 山口 智実: サブミクロンオーダ切削の高精度化に関する研究, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 18 日, 東洋大学 (東京)

山崎 智史, 古城 直道, 廣岡 大祐, 山口 智実, 松田 茂敬, 岩佐 康弘, 寺内 俊太郎: 浸炭した鋼のダイヤモンド切削において炭化物が工具摩耗抑制に及ぼす影響, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 18 日, 東洋大学 (東京)

Naomichi FURUSHIRO, Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Shigetaka MATSUDA, Yasuhiro IWASA, Shuntaro TERAUCH: Suppression of Tool Wear in Turning of Steels by Surface Modification - Effect of Nitriding -, ASPE 2014 Annual

Meeting, 2014年11月11-12日, Boston, Massachusetts (USA)

池内 靖貴, 古城 直道, 廣岡 大祐,
山口 智実, 松田 茂敬, 岩佐 康弘,
寺内 俊太郎: 表面改質した鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗抑制(第4報) 窒化したステンレス鋼における摩耗特性 -, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014年3月19日, 東京大学(東京)

Naomichi FURUSHIRO, Daisuke HIROOKA, Tomomi YAMAGUCHI, Shuntaro TERAUCHI, Yasuhiro IWASA, Shigetaka MATSUDA: Suppression of Tool Wear in Diamond Turning by Surface Modification of Steels - Effect of Carbides in Carburized Steels -, ASPE 2013 Annual Meeting, 2013年10月22-23日, St. Paul, Minnesota (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古城 直道 (FURUSHIRO, Naomichi)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 80511716