

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03887

研究課題名（和文）表面改質・熱処理による鋼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 steel by surface modification and heat treatment

研究代表者

古城 直道（Furushiro, Naomichi）

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80511716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ダイヤモンド工具の摩耗が著しいことで知られる鉄系材料を研究対象として、工具摩耗抑制機構を解明することで、より実用的加工に対する指針を明らかにすることを目的とする。研究期間全体を通じて、被削性に優れたマイクロ組織に基づき、浸炭・窒化処理前の熱処理条件を変化させて切削実験を行った。特に、窒化による工具摩耗抑制効果が高いステンレス鋼を中心に組み、ガス窒化前にショットピーニング処理を施すことで鋼材表面の不働態膜を破壊し、切削可能な窒化層の領域が増加することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ダイヤモンド工具が著しく摩耗する鉄系材料の超精密切削において、実用的加工への展開の可能性を示せたところにある。一方、社会的意義としては、従来、鉄系材料の超精密切削に用いられてきた超音波振動切削が抱えてきた、切削速度と工具軌跡の制約を克服できる点にある。

研究成果の概要（英文）：In ultra-precision cutting of ferrous materials, diamond tools are subject to severe wear. The purpose of this study is to obtain a guideline for practical machining by clarifying the mechanism of tool wear suppression. Based on the microstructure with better machinability, cutting experiments were conducted by varying the heat treatment conditions before carburizing and nitriding. In this study, we focused on stainless steels, which are highly effective in suppressing tool wear by nitriding. The following was found: Shot peening before gas nitriding destroys the passive layer on the steel surface and increases the depth of the nitride layer that can be machined.

研究分野：超精密加工

キーワード：超精密切削 ダイヤモンド工具 摩耗抑制 鋼 表面改質 熱処理 ショットピーニング

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超精密切削には単結晶ダイヤモンド工具が用いられる。現在、焼入れ鋼を金型としてダイヤモンド切削する要求が高まっている。しかし、鋼を切削するとダイヤモンド工具は著しく摩耗する。この摩耗は鉄とダイヤモンドとの熱化学的反応が要因とされる。そのため、鋼をダイヤモンド切削する際には超音波振動が付与される。しかし、切削速度と工具軌跡に制限がある。一方、鋼の窒化は摩耗を抑制するという報告がある。しかし、摩耗が抑制される機構については十分に明らかでない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ダイヤモンド工具の摩耗が著しいことで知られる鉄系材料を研究対象として、工具摩耗抑制機構を解明することで、より実用的加工に対する指針を明らかにすることである。

3. 研究の方法

対象鋼材に対し、超精密旋盤（豊田工機製、AHP-20-25N）を用いて、 $10 \times 5 \times t5\text{mm}$ の試料に対し、切削距離 16m の乾式正面旋削を行い、コーナ摩耗幅 VBC、境界摩耗幅 VBN を調べた。使用した工具は、単結晶ダイヤモンド、刃先角 $\theta = 130^\circ$ 、すくい角 $\alpha = 0^\circ$ 、逃げ角 $\beta = 7^\circ$ 、すくい面(100)である。また、切込み $d = 3.5\mu\text{m}$ 、送り $f = 3.1\mu\text{m/rev}$ 、切削速度 $V = 3.3\text{m/s}$ とした。また、鋼材の観察手法としては SEM 観察、EDS 分析、硬さ計測等を用いた。

4. 研究成果

過去の研究で浸炭した鋼において、析出した炭化物の面積と形状が工具摩耗に影響を及ぼすことを示した。また、窒化前の熱処理が窒化された鋼のマイクロ組織に影響を及ぼすことを示した。

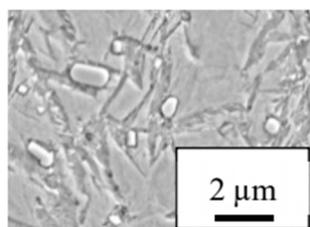
浸炭した鋼のダイヤモンド切削においては、過去の研究で得た知見から浸炭前後の熱処理の影響を調査した。我々は既に重回帰分析、主成分分析、決定木を用いて摩耗抑制効果が期待できるマイクロ組織の条件を得ている。

- $0.07 \sim 1.0\mu\text{m}^2$ 、円形度 0.5 未満の炭化物が多く析出している
- $1.0\mu\text{m}^2$ 以上の炭化物は面積が小さく、円形度が低い
- 炭素濃度が高い

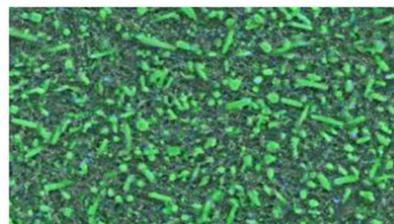
つまり、結晶粒内には微細で円形度の低い棒状の炭化物が多く析出し、結晶粒界に沿って析出する炭化物は粗大になり過ぎないように鋼材が理想と言える。このようなマイクロ組織の鋼を作成するために、浸炭前後の熱処理条件を検討したところ次の二点に分かった。

- 浸炭前に 1200°C で焼なましを行うことで、微細で円形度の低い炭化物が多く見られ、粗大な炭化物は円形度が低くなる
- 浸炭後、 1000°C で長時間保持することによって、キューブ状、粒状の炭化物を棒状の炭化物に変化させ、条件を満たす炭化物をより多く析出させることが出来ると考えられる

下図に、浸炭のみの鋼材の SEM 画像および浸炭前に焼なましを行った鋼材の SEM 画像に EDS 分析結果を重ねた画像を示す。

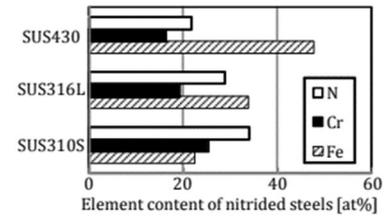
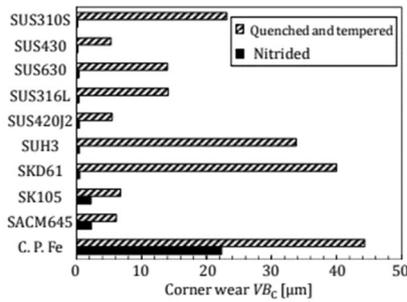


浸炭のみ



浸炭前焼なまし

一方、これまでの研究において、鋼の窒化もまた摩耗を抑制することを確認しており、同時に窒化前の熱処理が窒化された鋼のマイクロ組織に影響を及ぼすことが分かっている。左下図に、各種鋼の窒化による工具摩耗抑制効果の比較を示す。



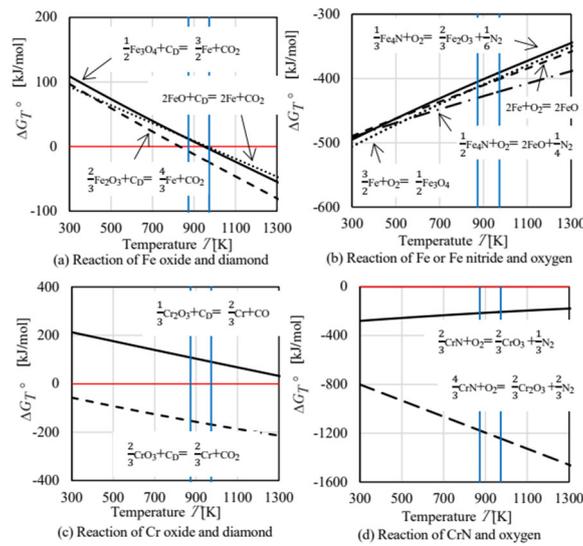
窒化されたステンレス鋼の元素組成の比較

各種鋼の窒化による工具摩耗抑制効果の比較

特に工具摩耗が抑制された三種のステンレス鋼に着目する。右上図に、窒化されたステンレス鋼の元素組成の比較を示す。図より、Crが増えると鉄が減少し、また、いずれもCrよりNの量が多くなっているのが分かる。Crが多くなると、窒化したときの拡散層の窒素濃度が上がる。ここで、Cr窒化物であるCrNはFe窒化物より先に析出することがわかっており、Crは全てCrNとして析出していると考えられる。

Gibbsの標準自由エネルギー変化を用いて、CrNとダイヤモンドの反応を考察する。下図に、各種反応のエリンガムズを示す。図より次の二点が言える。

- ダイヤモンドと酸化鉄は831K以上で酸化還元反応を起こすため、加工中に高温となる境界部で摩耗が生じうる
- 鋼中のCr炭化物から変化したCrN及びCr₂O₃は切削温度域でダイヤモンドと反応せず、工具を摩耗させない



各種反応のエリンガム図

よって、前述のように析出したCrNが工具の摩耗を抑制させることが確認でき、これより次の知見が得られた。

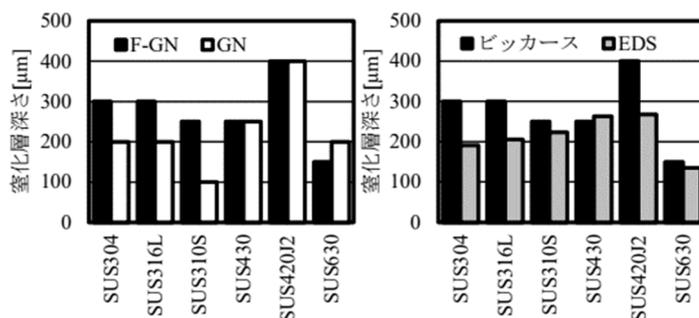
- Cr濃度が上がると、窒化したときの拡散層の窒素濃度が上がり、鉄濃度が減少するため、鉄に対して鉄窒化物が生成される割合が増える
- 鋼材に含まれるCr含有量が増加するほど、窒化した鋼の工具摩耗が抑制される

工具摩耗を抑制させる鋼のマイクロ組織が明らかとなってきたので、窒化前の熱処理や表面処理により更なる摩耗抑制効果を検討していく。

窒化前の熱処理については、調質材および非調質材に追加の熱処理を施し、その時間を変化させた。すると以下の三点の結果が得られた。

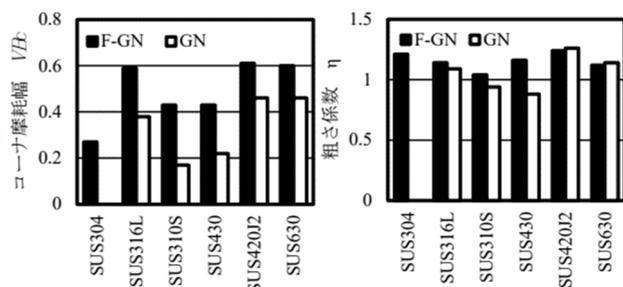
- 調質材、非調質材ともに工具の摩耗抑制効果を得られる熱処理時間がある
- 調質を行わないと摩耗抑制効果を得られない熱処理時間がある
- 従来の熱処理方法より摩耗抑制効果の得られる熱処理時間がある

一方、窒化前の表面処理についてはショットピーニング処理に着目し、表面を梨地にした後にガス窒化処理を施した。下図に、ショットピーニング後にガス窒化を施した鋼材とガス窒化のみの鋼材の窒化層深さの比較、ダイヤモンド切削時の工具摩耗幅および粗さ係数の比較、ショットピーニング後にガス窒化を施した各種鋼材の仕上面の比較を示す。

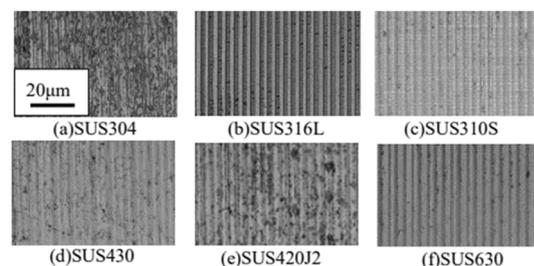


ショットピーニング+ガス窒化(F-GN)とガス窒化 (GN) の窒化層深さの比較

ショットピーニング+ガス窒化(F-GN)の窒化層深さの比較



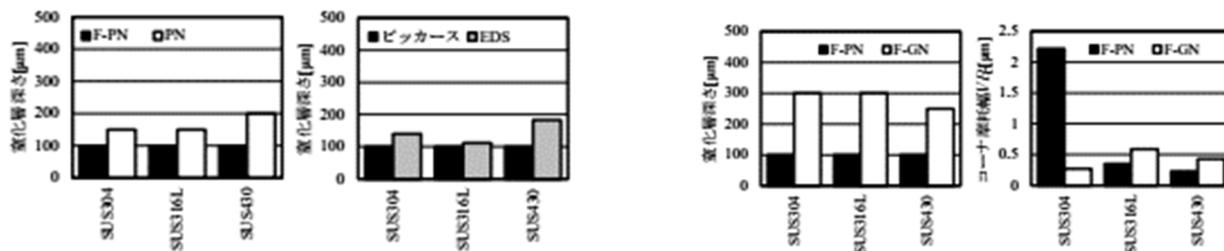
ショットピーニング+ガス窒化(F-GN)とガス窒化 (GN)のコーナ摩耗幅および粗さ係数の比較



ショットピーニング+ガス窒化(F-GN)鋼の仕上面の比較

その結果、オーステナイト系ステンレス鋼にショットピーニングを施すと、切削可能な窒化層の領域が増加すると分かり、また工具の摩耗抑制効果は非ショットピーニング材と同程度に見られ、仕上げ面性状は従来通りであった。このことから窒化処理前のショットピーニングは有効であると言える。

そこで、窒化層の浅さが知られているプラズマ窒化に対しても窒化前のショットピーニングが有効かどうかを検証した。下図に窒化層深さの比較およびコーナ摩耗幅の比較を示す。



ショットピーニング+プラズマ窒化(F-PN)とプラズマ窒化(PN)の窒化層深さの比較

ショットピーニング+プラズマ窒化(F-PN)とショットピーニング+ガス窒化(F-GN)の窒化層深さおよびコーナ摩耗幅の比較

すると、プラズマ窒化に関しては、窒化前にショットピーニングを施しても窒化層域は増加しないと分かった。工具の摩耗抑制効果は見られ、前述のガス窒化と比較しても同程度と言えるが、窒化層深さはガス窒化の1/2~1/3であった。

よって、ショットピーニングを施すのであれば、その後の窒化処理はガス窒化が有効であると明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furushiro Naomichi, Yamaguchi Tomomi, Hirooka Daisuke, Shirakawa Masaya, Matsuda Shigehiro, Iwasa Yasuhiro, Terauchi Shuntaro	4. 巻 54
2. 論文標題 Effect of microstructure on mitigating tool wear in diamond turning of nitrided steels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 388 ~ 395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2018.07.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口智実, 古城直道	4. 巻 65(9)
2. 論文標題 ダイヤモンドのクラック進展に対する分子動力学解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 471 ~ 474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安原佑, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 窒化された鋼の超精密切削において窒化前の表面処理が及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井内優輔, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 サブミクロンオーダ切削の高精度化に関する研究（第3報） 微小傾斜面加工の周期的誤差補正における切削速度の向上
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤駿亮, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 窒化された鋼の超精密切削において窒化前の熱処理が及ぼす影響(第3報) ミクロ組織が被削性に及ぼす影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳森泰生, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 サブミクロンオーダ切削の高精度化に関する研究(第2報) エンコーダ値に基づく周期的誤差の補正
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 駿亮, 古城 直道, 山口 智実, 廣岡 大祐
2. 発表標題 窒化された鋼の超精密切削において窒化前の熱処理が及ぼす影響(第2報) 工具摩耗機構の熱力学的解析
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古城 直道, 山口 智実, 廣岡 大祐
2. 発表標題 窒化された鋼のダイヤモンド切削においてミクロ組織が工具摩耗抑制に及ぼす影響
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古城 直道, 廣岡 大祐, 山口 智実
2. 発表標題 銅単結晶(111)の超精密切削機構に関する研究
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上晋, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智実
2. 発表標題 浸炭した鋼のダイヤモンド切削においてミクロ組織が工具摩耗に及ぼす影響(第2報) 浸炭前後の熱処理の影響
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田侑平, 山口智実, 古城直道, 廣岡大祐
2. 発表標題 ダイヤモンド工具による純鉄切削における工具摩耗現象の解明実験による初期炭素拡散挙動に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安原佑, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 プラズマ窒化されたステンレス鋼の超精密切削において窒化前の表面処理が及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井内優輔, 古城直道, 山口智実, 廣岡大祐
2. 発表標題 サブミクロンオーダ切削の高精度化に関する研究(第4報) 正弦波信号の周期的誤差補正
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

関西大学 システム理工学部 機械工学科 生産加工システム研究室 ホームページ https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/msl/

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
研究分担者	山口 智実 (Yamaguchi Tomomi) (10268310)	関西大学・システム理工学部・教授 (34416)	

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
---------	---------