

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560129

研究課題名（和文） 高機能光学素子加工のためのダイヤモンド切削工具の長寿命化

研究課題名（英文） Life extension of diamond cutting tool for ultraprecision machining of optical components

研究代表者

島田 尚一（SHIMADA SHOICHI）

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：20029317

研究成果の概要：

第一原理計算によって、鉄、ニッケルの切削におけるダイヤモンド工具損耗機構を解明し、被削材との相互作用によって工具表面の炭素原子のバックボンドが弱くなって脱離すること、被削材にリンが入っていると、脱離が抑制されることを明らかにした。また、ダイヤモンド原石中に含まれる窒素不純物の型と量によって損傷特性が異なり、窒素の多い原石は熱化学的な損耗速度が大きい、窒素が板状の欠陥を形成していると、耐チップング性が高いことを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：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：超精密加工、超精密切削、ダイヤモンド工具、工具寿命

1. 研究開始当初の背景

携帯電話用カメラレンズ、光センサー用集光器、フレネルレンズ、マルチステップ回折格子などの光学素子は、機器の高機能化にともない、その形状が益々複雑・微細化しつつある。また、液晶ディスプレイ用導光板、拡散板などは、機器の大型化にともない、メートル台の大きさが要求されている。これらの高機能光学素子およびその型の加工には、工具輪郭の転写性が極めて高く、複雑でアスペクト比の高い微細三次元形状の高精度・高能

率加工が可能なダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工が唯一の加工法である。しかし、ダイヤモンド切削工具は耐熱性の高い鉄系金属、ニッケルなどの加工は、工具が激しい損傷を起こすため、不可能とされている。ニッケル・リンメッキ（Ni-P）、シリコンなどの被削材は光学素子の型や赤外光学素子の材料として必要に迫られて加工されているものの、やはり工具寿命は短い。したがって、超精密切削加工の特性を生かし、より複雑化、高精度化、大型化する光学素子および

その型の安定した加工を実現するためには、工具の長寿命化と従来加工ができなかった高耐熱材料への適用範囲の拡大が不可欠である。

2. 研究の目的

被削材によって異なる形態を示す、ダイヤモンド切削工具の損傷発生機構を明らかにし、その結果にもとづいて、損耗抑制の可能性を探る。また、工具ごとに非常にばらつきのある大きな損耗特性と原石中の不純物との関係を明らかにし、工具寿命の長い原石選別法を提案、開発する。

3. 研究の方法

(1) 工具損耗機構の解明

スーパーコンピュータを用いた第一原理計算および切削中の工具刃先環境を模擬したダイヤモンドと被削材との接触加熱モデル実験によって、鉄、ニッケル、ニッケル・リンを切削するときの工具損耗機構を解明する。

(2) 工具寿命の監視技術の開発

切削中の工具切刃にチップングと呼ばれる工具の突発欠損が発生すると、仕上面の品位は大幅に低下する。したがって、致命的なチップングの発生が工具寿命を決定すると考えられ、寿命予測にはチップングの発生を監視する技術が不可欠である。本研究では、光学素子の型材として広く使用されているニッケル・リンの切削時におけるチップングの発生を切削抵抗の動的成分およびAE信号の振幅と事象率分布から監視する技術を開発する。

(3) 原石中の不純物と耐損傷性との関係解明

ダイヤモンド工具の寿命には大きなばらつきがあることは良く知られている。いくつかの天然および合成ダイヤモンドの赤外吸収スペクトルによって調べた原石中の窒素不純物の型と量とヘルツ強度や損耗速度との関係を明らかにし、耐損耗性、耐チップング性の高い原石選別の可能性を探る。また、切削実験によってその結果を検証する。

4. 研究成果

(1) 工具損耗機構の解明

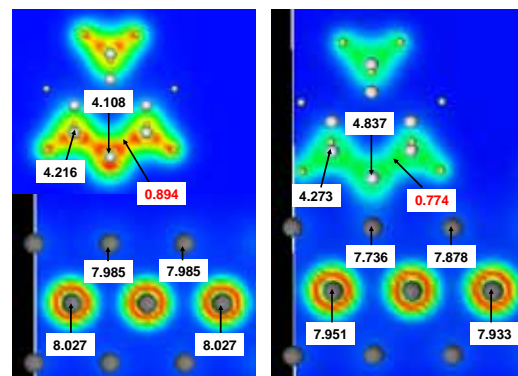
金属材料を切削中のダイヤモンド工具と被削材との界面での相互作用を解析するために、第一原理計算を用いた解析を行った。解析には、大阪大学大学院工学研究科、小野倫也助教、広瀬喜久治教授らが開発された実空間差分法を用いたプログラムを使用させていただいた。モデルには、ダイヤモンド表面の一部と被削材金属であるFe、Al、Niの一部とが接触するものを用いた。ダイヤモンド表面は、金属と反応するラジカルカーボン以外の炭素原子のダングリングボンドを水

素原子で終端化した $C_{10}H_{14}$ クラスターモデルとし、 3×3 の単位格子を持つ(100)面の金属モデルのブリッジサイトにラジカルカーボンを近づけた。表面であるx、y方向を周期境界、ダイヤモンドが近づく方向であるz方向は孤立境界とした。

ダイヤモンドおよび金属表面のモデルを最適化した後、ダイヤモンドを金属表面に近づけて反応を起こさせたときの最安定位置での原子状態を反応前のそれらと比較したものを図1から図3に示す。色の濃淡は電荷密度を示し、青から赤になるにしたがって大きくなる。図中の黒字はその原子に属する価電子の量であるアトミックポピュレーションを、また、赤字は原子間の結合に關与する電子の相対値であるボンドポピュレーションを示す。

Feとの反応後は、図1に示すように、鉄原子のアトミックポピュレーションが減少し、炭素原子のそれが増加していることから鉄側からダイヤモンド側に電子が移動していると考えられる。ラジカルカーボンと二層目の炭素原子は陰イオンとなり、鉄原子は陽イオン化しているため、ラジカルカーボンは二層目の炭素原子とは反発し、ラジカルカーボンのダングリングボンド方向にある鉄原子とはお互い引き合う方向の力が働いている。さらに、ラジカルカーボンと二層目の炭素原子間のバックボンドポピュレーションは減少しているため、ラジカルカーボンは界面の温度が上昇し、原子の運動エネルギーが増加すると脱離すると考えられる。

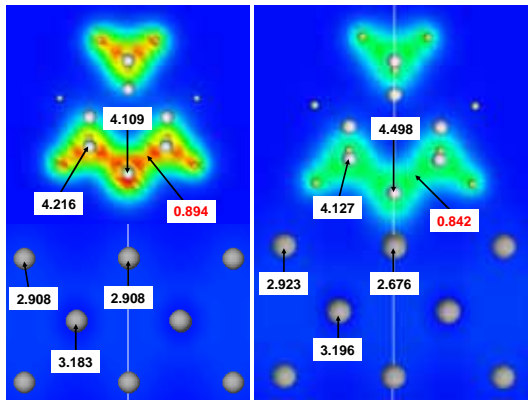
Alとの反応後は、図2に示すように、ラジカルカーボンのアトミックポピュレーションは増加して陰イオン化し、2層目と3層目の炭素原子のそれはわずかに減少している。バックボンドのポピュレーションは減少しているもののFeの場合と比較してその減少ははるかに少ないために、工具寿命もFeの切削に比べてはるかに長いと考えられる。Al表面では、ラジカルカーボンのダングリング



(a) 反応前

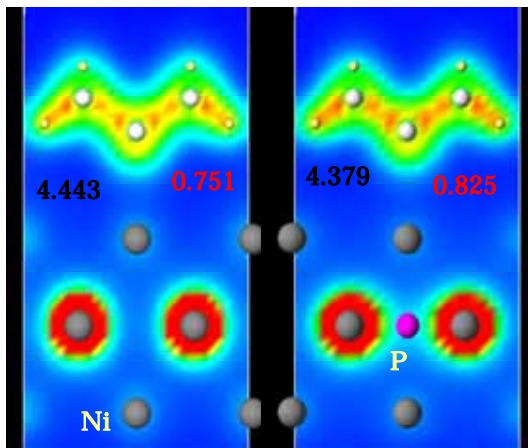
(b) 反応後

図1. 鉄と反応するダイヤモンドの電子状態



(a) 反応前 (b) 反応後

図2 アルミニウムと反応するダイヤモンドの電子状態



(a) ニッケル (b) ニッケル・リン

図3 ニッケルおよびニッケル・リンと反応するダイヤモンドの電子状態

ボンド方向の原子のアトミックポピュレーションが減少して、陽イオン化している。また、ラジカルカーボンとその下の Al 原子の間のボンドポピュレーションが増加している。さらに、ラジカルカーボンには Al 表面に向かう力が作用し、Al 表面の原子にはラジカルカーボンを迎え入れるためにスペースを空けるような力が作用している。この結果は工具 - 被削材界面で Al 炭化物を生成することを示唆している。

Ni との反応は Fe と同様であり、ラジカルカーボンは界面の温度が上昇すると、脱離するものと考えられる。しかし、Ni 中に P を侵入型の不純物として入れると、図3に示すように、ダイヤモンド表面ラジカルカーボンのバックボンドポピュレーションの減少が抑制されることが明らかになった。P が入ることによって、ダイヤモンド表面炭素原子のバックボンドポピュレーションの減少を防ぎ、

そのために、炭素原子の脱離が抑制されるものと考えられる。Ni の切削においては激しい損耗を示すダイヤモンド工具が Ni-P の切削においては損耗が少ないのはこの効果によるものと考えられる。また、この結果は、適切な原子を被削材またはダイヤモンドに入れてやれば、ダイヤモンド工具の損耗を抑制できる可能性があることを示唆している。

(2) 工具寿命の監視技術の開発

ニッケル・リンの定常切削において生じる漸進的な摩耗は切削力の動的成分のパワースペクトル解析を行うことによって検出することが出来る。図4に示すように、動的成分の周波数とパワースペクトルを両対数軸で表示すると、ある周波数範囲で波長の長いスペクトルほど振幅が大きくなり、両者の関係が最小二乗法を用いて直線近似できる。このときの傾きであるスペクトル指数 β はクレータ摩耗が進行すると大きくなり、1 以上になると加工面品位が低下する。また、切削中の工具の AE 信号を検出し、振幅とその振幅の事象率を両対数軸で表示すると図5の

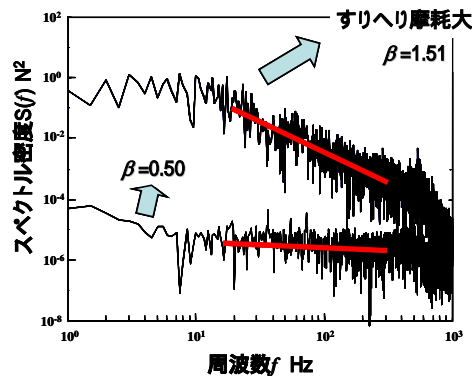


図4 切削力動的成分のパワースペクトル

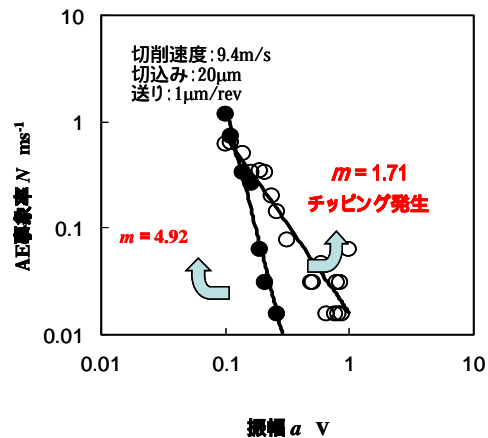


図5 AE 信号の振幅と事象率分布

ようになる。両者の関係を最小二乗法を用いて直線近似したときの傾きであるスケーリング指数 m は小さなチッピングが発生すると小さくなり、2 以下になると加工面品位はかなり低下する。したがって、切削力動的成分のスペクトル指数 および A E 信号のスケーリング指数 m によって工具損耗を監視でき、寿命を予測することができることを明らかにした。本手法によって、超精密切削加工において加工面品位を低下させる致命的なチッピングの発生の予測が可能になった。

(3) 原石中の不純物と耐損傷性との関係

ダイヤモンド中には窒素が不純物として含まれており、2 個の窒素原子からなる A センター、4 個の窒素原子が集まった B1 センター、窒素原子が直径数 nm から数百 nm の板状に集ったプレートレットと呼ばれる B2 センターなどの欠陥を形成している。赤外吸収スペクトルによって、欠陥の型と量を評価したいいくつかの天然および合成ダイヤモンド原石から工具を製作し、無酸素銅の切削におけるクレータ摩耗の進行速度および工具寿命との関係を調べた結果を図 6 に示す。ここで、クレータ摩耗速度は切削距離 (km) とクレータ摩耗深さ (μm) を両対数グラフにプロットしたときの傾きをいう。なお、工具寿命の監視および予測には、前項で開発した手法を用いた。

その結果、どのような型であろうとも、窒素不純物の総量が多い原石で製作した工具はクレータ摩耗速度が大きいことが明らかになった。クレータ摩耗は熱化学的な摩耗であるので、不純物窒素を含む原石ではダイヤモンド構造の結合が部分的に弱くなり表面炭素原子が脱離し易くなっているからであると考えられる。

しかしながら、プレートレットを形成する窒素不純物を含む原石で製作した工具は、クレータ摩耗が多いにもかかわらず、工具寿命は長いことが明らかになった。致命的な突発欠損の発生による加工面品位の急激な低下が工具寿命を支配するので、プレートレット

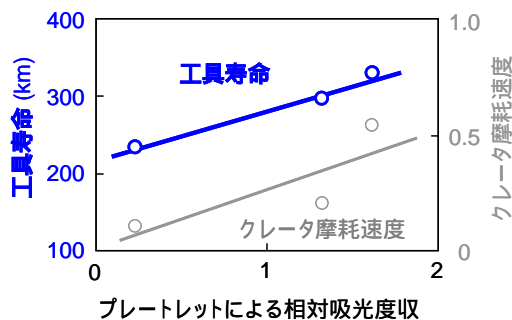


図 6 . プレートレット量とクレータ摩耗速度および工具寿命との関係

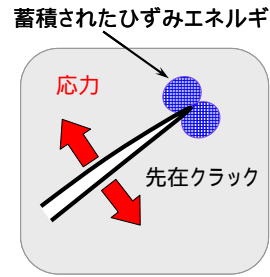


図 7 . 先在クラック先端部に蓄積されたひずみエネルギーの開放によるダイヤモンド中のクラック進展

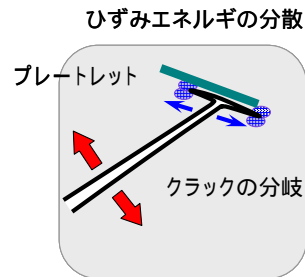


図 8 . プレートレットによるクラックの分岐にもとづく進展阻止効果

は突発欠損を抑制する働きがあると考えられる。そのひとつのメカニズムとして、図 7 および 8 に示すようなクラック進展を阻止する効果があると予想している。ダイヤモンドのような脆性材料では、外力が作用したときに、研磨時に導入された微小な先在クラックの先端に蓄積された弾性ひずみエネルギーがクラック進展によって増加する表面エネルギーより大きくなると、図 7 に示すように、突発的にクラックが進展して致命的な破壊に至る。しかし、先在クラック付近にプレートレットがあると、図 8 に示すように、そこでクラックは分岐し、そのひずみエネルギーを 2 分するとともに、プレートレットもクラックの一部として吸収するためにひずみエネルギーも消費する。そのために、より大きな外力が作用しなければクラックは進展せず、強度が増加することになる。したがって、プレートレットを多く含む原石では突発欠損の発生が抑制されることが考えられる。合成ダイヤモンドには天然ダイヤモンドに比べて窒素不純物は少なく、耐損耗性は高いが、プレートレットがないために、耐チッピング性は低い。また、天然ダイヤモンドに含まれる窒素不純物の型および量は大きくばらついているために、工具寿命にもばらつきが多いが、合成ダイヤモンドは比較的寿命が揃っている。無酸素銅の切削実験結果の一例では、合成ダイヤモンド工具の寿命が 700 ~ 800km で揃っているのに対し、天然ダイヤモンド工具

では、500～1900km と大きくばらついている。これらの結果は、赤外吸収スペクトルによって、プレートレットを多く含む天然の原石を選別し、それで工具を製作すれば、従来の数倍の長寿命が期待できることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- 1) T. YAMAGUCHI, M. HIGUCHI, S. SHIMADA, T. KANEEDA: Tool Life Monitoring during the Diamond Turning of Electroless Ni-P, Precision Engineering(査読有り), 31, pp196-201, 2007.

〔学会発表〕(計7件)

- 1) T. KANEEDA, T. NAKAYAMA, S. YOKOMIZO, S. SHIMADA, M. HIGUCHI, K. OBATA, L. ANTHONY: Reducing Diamond Tool Wear in Oxygen-Free Copper Precision Cutting Using Synthetic Tool Materials and a N₂ Atmosphere, Proc. euspen 9th International Conference, (査読有り) vol.1, pp33-36, 2009, 2009年6月3日, San Sebastian で発表.
- 2) 瀬戸健太、古城直道、樋口誠宏、山口智実、齋藤賢一、島田尚一：分子動力学法によるダイヤモンド切削工具の強度の解析、2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.337-338, 2009, 2009年3月12日東京・中央大学で発表.
- 3) 高橋功奈・古城直道・山口智実・樋口誠宏・島田尚一・吉永実樹：合成ダイヤモンド工具の耐摩耗性の評価、2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.45-46, 2008, 2008年9月19日仙台・東北大学で発表.
- 4) 高井俊平・島田尚一・樋口誠宏・山口智実・古城直道・吉永実樹：単結晶ダイヤモンド切削工具の損耗機構、2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.801-802, 2008, 2008年9月19日仙台・東北大学で発表.
- 5) 岡田考介、樋口誠宏、山口智実、島田尚一：拡散機構に基づくダイヤモンド切削工具の研磨、2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.229-230, 2008. 2008年3月19日東京・明治大学で発表.
- 6) 杉田耕陪、樋口誠宏、山口智実、齋藤賢一、島田尚一：ダイヤモンド中のクラック進展挙動の分子動力学解析、2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1027-1028, 2008, 2008年3月18日東京・明治大学で発表.
- 7) S. SHIMADA, H. TANAKA, M. HIGUCHI, T. YAMAGUCHI, M. YOSHINAGA:

Qualification of Raw Diamond from a Viewpoint of Chipping and Wear Resistance for Ultraprecision Cutting Tool, Proc. 7th International Conference of the euspen (査読有り), vol. 1. May 20-24, pp. 103-106, 2007, 2007年5月21日Bremenで発表.

6. 研究組織

(1)研究代表者

島田 尚一 (SHIMADA SHOICHI)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：20029317

(2)研究分担者

樋口 誠宏 (HIGUCHI MASAHIRO)
関西大学・工学部・教授
研究者番号：50067732
田中 宏明 (TANAKA HIROAKI)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：60330156

(3)連携研究者

なし