

氏名	Zhou	Li	Bo
	周	立	波
授与学位	工学博士		
学位授与年月日	平成3年3月28日		
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻		
学位論文題目	ダイヤモンドホイールのツルージングおよび ドレッシングに関する研究		
指導教官	東北大学教授 庄司 克雄		
論文審査委員	東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 鎌田 治	
	東北大学教授 加藤 康司	東北大学講師 厨川 常元	

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

ダイヤモンドは、熱伝導率が大きく熱膨張係数が小さい。また硬度、耐摩耗性および引っかき強さなどの値が非常に大きいことから、砥粒としての性能が優れている。セラミックスのような硬脆材料の加工はもちろんのこと、近年精密加工分野においても、ダイヤモンドホイールを代表とする超砥粒ホイールに寄せる期待が非常に大きい。ダイヤモンドホイールは極めて硬く優れた工具であるが、そのツルージング作業（形直し）が困難である。またダイヤモンド砥粒とボンド材の濡れ性が悪くメタルボンドなどが多用されるため、ツルージングのほかドレッシング作業も行う必要がある。したがってダイヤモンドホイール、とくにメタルボンドのようなマトリックスタイプのホイールのツルージングおよびドレッシング技術を確立することは、セラミックスの精密加工分野において重要な課題となっている。

本論文は、マトリックスタイプのダイヤモンドホイールの高性能高能率のツルージングとドレッシングを目指したものである。GCカップルツアを中心とした種々の方法とそのメカニズムを検討し、次の4項目について研究を行った。

- 1) 砥粒突出し量の測定および研削特性に及ぼす影響（第2章）
- 2) ツルージングメカニズムの解明および最適ツルージング条件の確立（第3章）
- 3) ホイール作業面の解析および定量的な評価（第4章、第5章）
- 4) ホイールの微粒化に対応したドレッシング技術の確立（第6章、第7章）

## 第2章 メタルボンドホイールの砥粒突出し量と研削性能

マトリックスタイプのホイールの研削性能に対しては、ボンドベース面からの砥粒突出し量の影響が大きい。ドレッシングの結果を評価する際に砥粒突出し量の精度のよい測定法が必要になる。本章では、走査型電子顕微鏡から撮影した立体写真を用いた方法（SPM法）を提案し、3次元測定器を作成した。この方法は、非接触法であり、3次元形状測定と同時に立体観察ができることが特長である。またホイール表面のような凹凸の激しい複合体の経時変化を評価する場合に適している。測定精度は、写真の倍率、測定点の位置を読み取るデジタイザの分解能に依存するが、通常粗粒ホイールの場合数十～数百倍の立体写真からミクロンオーダーの測定精度が得られる。また微粒ホイールに対しては、高倍率の立体写真を使用することで簡単に相応の測定精度が得られる。

また、ツルーイング直後の砥粒突出し量を実測し、その後研削性能に対する影響を考察した。その結果、研削抵抗の増加率、ホイールの摩耗量および仕上げ面粗さなどの研削特性が初期の砥粒突出し量に大きく依存し、最適な砥粒突出し量が存在することが明らかになった。

## 第3章 メタルボンドホイールのツルーイングとドレッシングのメカニズム

本章ではGCカップツルアを用いて、メタルボンドダイヤモンドホイールのツルーイングとドレッシングを行い、そのメカニズムの解明を試みた。ツルーイング過程において砥粒突出し量をSPM法によって測定し、またホイール表面の変化を立体観察した結果、次のような事が明らかになった。

- 1) マトリックスタイプのダイヤモンドホイールでは、ツルアからの脱落粒によって砥粒周りのボンド剤が除去され、砥粒突出し量が次第に増加する。そして作用力に抵抗しきれなくなったところで砥粒が脱落する。このような砥粒の突出しと脱落の繰り返しによってツルーイングが進行する。
- 2) GCカップツルアによるツルーイングでは、ツルーイングだけでドレッシング効果が得られ、つまりドレッシング作業を不要にすることができる。

また、砥粒突出し量、ツルーイング比に及ぼす各ツルーイング条件の影響を調べた。その結果、ダイヤモンドホイールの仕様が決めれば、砥粒突出し量はツルーイング条件とツルーイングの回数に依存することが明らかになり、ツルーイング回数を十分大きくとれば、砥粒突出し量はツルーイング条件だけに依存することがわかった。したがってツルーイング条件を選択することによって砥粒突出し量を自由にコントロールすることができる。さらに、ツルーイングを研削モデルに置き換えてツルーイングに与える各因子の影響を理論的に考察した。砥粒切込み深さが大きくなるような条件でツルーイングを行えば、ツルアからの脱落粒の粒径が大きくなり、その結果ツルーイング後の砥粒突出し量が大きくなる。またツルア上面の脱落粒子の流失を抑制すればツルーイング比を向上させることができる。

## 第4章 ボンドテール

ダイヤモンドホイールの研削性能を正しく把握するには、ホイール作業面の構造を解明することが重要である。GCカップツルアによってツルーイングしたホイール表面では、砥粒後方部のボンドが干渉を受けず長く尾を引いて残存するのが特徴である。これをボンドテールと呼ぶ。ボンドテール

ルは砥粒切れ刃を後方から支え砥粒の脱落を防ぐ効果があるが、一方ではボンドテールが工作物と干渉しあい摩擦が生じると、研究に悪影響を与えることになる。

本章では、研削過程におけるボンドテールの相違によるホイール作業面の変化を観察し研削特性に与えるボンドテールの影響を確認すると共に、ボンドテールの形成メカニズムと形成過程について述べる。また触針式3次元形状測定器によってホイール表面のトポグラフィを測定し、得られたデータから平均ボンド面深さ、砥粒突出し量およびボンドテール断面積などに関する定量的な情報を取り出し、ツルイーグ条件との関係、さらに研削特性に与える影響を考察した。その結果次のようなことがわかった。

- 1) ボンドテールはツルアとホイールの相対速度ベクトル方向に形成される。また速度ベクトルが $180^\circ$ 相違したツルの両サイドを交互に使って交差ドレッシングした場合、ボンドテールの向きは研削方向に対して $180^\circ$ になる。
- 2) 交差ドレッシングでは、ホイールとツルアの周速比が大きいほど、ボンドテール断面積が大きくなり、それによって生じる砥粒の保持力が大きくなる。
- 3) ボンドテール断面積が大きいほど、砥粒突出し量が大きく、ホイール表面付近の砥粒切れ刃密度が小さくなる。その結果研削抵抗の増加率が減少する。

## 第5章 砥粒切れ刃密度とその分布

マトリックスタイプのダイヤモンドホイールでは、基本的な研究特性は砥粒の切れ刃密度およびホイール半径方向における分布に依存するが、作業中に砥粒の破碎や自生発刃などが起こりにくいのが特徴である。したがって砥粒切れ刃の分布形態は、母剤における砥粒の散在の仕方によるところが大きい。本章では、このようなホイールの表面構造をモデル化し、統計的手法を用いて砥粒切れ刃密度とその分布を求めた。

砥粒の脱落は突出し量の増加に伴う砥粒の保持力の低下によるものであることを踏まえて、突出し係数 $\kappa$ (最大砥粒突出し量と粒径の比)を用いて砥粒切れ刃の分布形態を評価した。その結果ホイール作業面に存在する砥粒の数は、集中度、平均粒径に関係するほか突出し係数 $\kappa$ に比例し、ツルイーグやドレッシングによって調整できることがわかった。またホイール外周付近では砥粒切れ刃密度は近似的三角分布に従い、それより内部で砥粒切れ刃密度は一様分布になる。三角分布をなすホイール深さは一様分布の領域の $1/2$ であるが、突出し係数と共に増加する。さらに突出し係数が高いほど、砥粒全体の数は増えるが、ホイール外周付近の砥粒切れ刃密度は逆に減少する。ツルイーグ直後の砥粒切れ刃の分布を実測した結果、理論計算に比べて一様分布領域での値はやや低いが定性的な形状はよく一致することがわかった。また研削実験では、突出し係数の大きい砥粒切れ刃分布をなしているホイールほど、有効切れ刃や研削抵抗の増加率は低くなるが、ホイールの減耗量は大きくなる。

## 第6章 極微粒ホイールのツルイーグ、ドレッシングおよび研削特性

セラミックスの高品位加工に対応するため、微粒ホイールが多用され、そのツルイーグとドレ

シング技術が重要な課題となる。本章では、GCカップツルアを極微粒（#1500）ホイールに応用し、その特性をインブリダイヤモンド工具と比較検討した。ツルア粒度の選択や研削液供給量の制御によってツルーイング比を向上することができるが、一方微粒ホイールでは目詰まりが生じ易いため、ツルーイング条件の不適によってホイール外周面にひびりマークが形成されることがある。また極微粒ホイールのドレッシングでは脱粒が激しく、ツルア粒度や切込み量が大きいほどツルーイング後の砥粒切れ刃密度が減少する。この傾向はメタルボンドよりレジンボンドの方が顕著であり、研削性能の低下を招く。

極微粒ホイールによる研削では、研削熱によりレジンボンドの硬度が低下し、砥粒の埋没が発生する。それに起因して次のような研削特性を示す。

- 1) 砥粒の脱落は研削初期に発生し、その数は全体の10%前後である。
- 2) 研削性能は主に砥粒切れ刃密度に依存し、砥粒切れ刃が密になるほど、研削抵抗、ホイール摩耗量および仕上げ面粗さは共に減少する傾向がある。
- 3) 研削の進行に伴い、仕上げ面粗さは一時的に小さくなるが、ホイール作業面の劣化と共に再び増加する。
- 4) ボンド剤に耐熱のポリイミド樹脂を使用すれば、あるいはCuを充填すれば、研削特性は大幅に向上する。

## 第7章 電解ドレッシング

電解ドレッシングは微粒ホイールの寿命を改善するため、メタルボンド、特に微粒ホイールのインプロセスドレッシングのために開発された手法である。特にツイン電極法は商用電源が使用できること、また絶縁対策が簡単であることが特長である。

本章では、電解ドレッシングのメカニズム、また電解ドレッシングの後の研削特性およびインプロセス電解ドレッシングの特性を解明した。粗粒ホイールの電解ドレッシングでは砥粒の脱落が非常に少なく、ホイール作業面に電解生成物の堆積および剥離が繰り返されるのが特徴である。研削初期では、電解生成物が除去されるため砥粒突出し量が一時大きくなるが、その後砥粒の脱落が発生し砥粒突出し量が減少する。さらに研削が進行するとホイールは次第に磨滅型摩耗に移行する。インプロセス電解ドレッシングでは、電解電流を小さくすれば、ホイールの実効硬さが硬くなり比較的良好的な仕上げ面が得られる。それに対して電解電流を大きくすれば、ホイールの実効硬さが軟らかくなり研削抵抗増加が抑制できる。

微粒ホイールのインプロセス電解ドレッシングでは、電解生成物の影響が大きく、一意に電解電流を大きくすれば、生成物の成長速度が早くなり、それによって目詰まりと同じ現象が生じて逆に研削抵抗の増加を招く、安定した研削性能を得るには、電解および研削条件を総合的に選択して電解生成物をうまく除去しながら研削を行う必要がある。

## 第8章 結 論

本章は結論であり、本研究で得られた結果について総括した。

## 審査結果の要旨

ダイヤモンドホイールでは、気孔を持たないいわゆるマトリックスタイプのボンド構造が一般的である。これらのホイールでは、ツルージングだけでなくドレッシングが不可欠である。しかし高い加工精度や仕上げ面粗さが要求される精密加工においては、ドレッシングによるホイールの成形精度の劣下や切れ刃密度の低下が大きな問題となっている。

本論文は、GC 砥石をツルージング工具として使用した場合、GC 砥石からの脱落粒のラッピング作用によってツルージングが進行するため、同時にドレッシング効果を持つことに着目し、そのメカニズムと特性を明らかにしたもので、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、SEM の立体写真による砥粒突出し量の測定法を提案し、ツルージング直後の砥粒突出し量が研削特性に及ぼす影響について、明らかにした。

第3章では、GC のカップ型砥石をツルージング工具として使用した場合のツルージング過程を SEM により克明に観察し、脱落した GC 砥粒によって砥粒周辺のボンド剤が僅かずつ削り取られることによってツルージングが進行することを明らかにした。このため同時にドレッシングも行われ、しかもツルージング条件を適当に選択することによって砥粒突出し量を自由にコントロールできることを示した。

このようなツルージング法では、砥粒の後背部にボンドテールが形成されるのが特徴である。ボンドテールは、砥粒を後方から支え脱落を防ぐ効果がある。第4章では、ボンドテール形成のメカニズムを解明し、その断面積とツルージング条件との関係を明らかにした。

砥粒切れ刃密度は、ホイールの研削性能を左右する重要な因子である。第5章では、砥粒切れ刃密度が砥粒突出し係数（最大砥粒突出し量／砥粒直径）に依存することを明らかにした。

第6章では、極微粒ホイールのドレッシングと研削特性について述べている。

特に、レジンボンドホイールにおいて研削熱のために砥粒が埋没する現象に関する知見は、注目される。

第7章は、インプロセス電解ドレッシングに関する成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、特にマトリックスタイプのダイヤモンドホイールについて、高能率かつ高精度なツルージングおよびドレッシング法を提案したもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。