

|           |                            |             |           |
|-----------|----------------------------|-------------|-----------|
| 氏名        | やまざき しげかず<br>山 崎 繁 一       |             |           |
| 授与学位      | 博士（工学）                     |             |           |
| 学位授与年月日   | 平成 16 年 3 月 25 日           |             |           |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 4 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)機械電子工学専攻 |             |           |
| 学位論文題目    | 超高速研削切断用ブレードの開発に関する研究      |             |           |
| 指導教官      | 東北大学教授 庄司 克雄               |             |           |
| 論文審査委員    | 主査 東北大学教授 庄司克雄             | 東北大学教授 井上克己 |           |
|           | 東北大学教授 厨川常元                | 東北大学教授 伊藤耿一 | (情報科学研究科) |

## 論文内容要旨

超高速研削の長所として、研削能率を飛躍的に向上できることがあげられる。しかし、精密研削を目的とした実用化の例は、スピンドルの振動が加工面品位などに影響するため、周速は 200m/s 以下がほとんどである。一方、周速 300m/s を超える周速での研削実験の例は、これまで砥石の遠心破壊の危険があるため非常にまれであり、研削現象を考慮した砥石の開発は行われていなかった。そこで、本研究では、魅力ある超高速研削を、スピンドルの影響を受けにくい研削切断に応用することを考え、周速 400m/s で使用可能な超高速研削切断ブレードの開発を行った。そして、開発したブレードを用いて、周速 300m/s 以上の研削切断実験を行った。それらの内容について本論文にまとめた。

第 1 章は序論であり、超高速研削ホイール開発の技術的課題、従来の研究、そして、研究の目的と概要について述べた。

第 2 章は、周速 400m/s で使用可能な超高速研削切断ブレードを開発するため、FEM を用いた応力解析を行った内容についてまとめた。

超高速研削ホイールは、センタ穴を設けない設計が望ましいとされている。しかし、ブレードの場合、研削切断や溝入れなどの重研削用途への適用を想定すれば、砥石の消耗が比較的早いことが予想される。したがって、本研究では、ブレードにセンタ穴を設けてフランジに組み込んで使用するフランジタイプの構造について検討した（図 1）。この場合、遠心力のために起こるブレードコアの変形は、フランジを用いて抑えることができる。この場合、ボルトによる拘束と、フランジとコア間の摩擦力が、コアの伸びを抑える役目を果たすと考えられる。そこで、コアだけの自由回転円板の解析、ボルトだけでコアを拘束する場合、フランジとコア間の摩擦力だけでコアを拘束する場合、フランジとコア間の摩擦力とボルトの両方でコアを拘束する場合について線型静解析を行った。

その結果、コアだけの自由回転円板の解析では、コアの材料としてチタン合金や CFRP のように比ヤング率、比強度の高い材料が必要であることを示した。次に、フランジを用いてコアの変形を拘束する場合についての解析では、ボルトだけでコアを拘束した場合には、フランジの材料としてチタン合金や CFRP を用いる必要があることを示し、チタン合金コアと組み合わせるフランジ材としてはチタン合金、CFRP コアには CFRP フランジが

必要であることを示した。ボルトの数については、外周側のボルトの数を増やせばコアに発生する応力を低減させることができることがわかった。一方、フランジとコア間の摩擦力だけでコアを拘束する場合の解析では、摩擦力だけでもコアの伸びを抑える効果があることを示した。フランジとコア間の摩擦力とボルトの両方でコアを拘束する場合の解析では、ボルト穴側面に発生する応力集中を摩擦力により低減できることを示した。

以上の解析により、超高速研削切断ブレードの構造として、フランジタイプが有効であることを示し、コアとフランジの材料として、両方をチタン合金にするか CFRP とする必要があることを明らかにした。

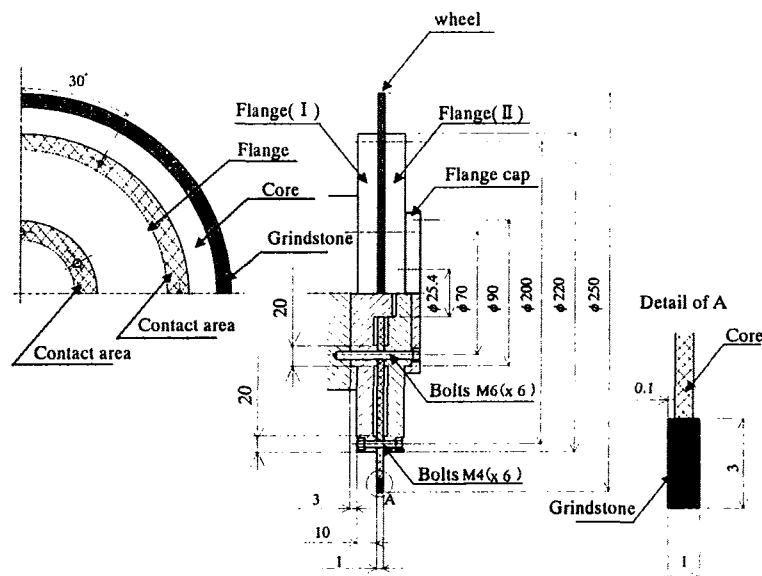


図1 ブレード構造図

第3章では、第2章の応力解析の結果を用いて、実際に超高速研削切断ブレードを試作した内容についてまとめた。

コアの材料としては、チタン合金か CFRP が考えられるが、CFRP に比べて低価格なチタン合金を用いるほうが実用的と考えた。しかも、コアが金属材料の場合、砥石の結合材にも金属材料を用いれば、砥石を焼結するときコアとの接合界面における金属反応が起こるので、それを利用して高い接合強度が得られることが期待できる。そこで、砥石の結合材の材料として、Cu-Sn 系の金属材料を用いた。また、コアがチタン合金の場合には、砥粒層とコアとの密着性を高めるために、接合部に濡れ性の高い活性銀ろうの層を設ける必要がある。このような構造にすると、活性銀ろう中の成分とコアの成分が反応すると脆性材料の生成が起こるため、活性銀ろう層とコアとの間に Ni 層を設けた。そして、ブレードを試作する前に、この接合構造の強度について引張強度試験を行い、十分な強度が得られていることを確認した。

これらの結果に基づいてブレードを試作し、周速 450m/s までの回転試験を行った。試験機には、最高回転数  $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$  が可能な回転試験機を使用した。試験のサンプルとして、活性銀ろう層とブレードコアとの間に Ni 層を設けた場合 (M-1) と設けなかった場合 (M-2) の種類を対象とした。その結果、M-1 は周速 450m/s まで破壊も変形もなかったが、M-2 は周速 400m/s で砥粒層が剥離する結果となった。M-2 の破壊部分を詳細に調査

すると、コアの外周部には砥粒層も活性銀ろう層も残っていないことがわかった。

以上の結果より、コアとしてチタン合金を用いた場合、予めコアの外周部表面に Ni 層を設け、その上に活性銀ろう層を設けて砥粒層の焼結を行えば、金属反応を有効に利用した高い接合力が得られることを実証した。本章で試作したブレード（図 2）を用いれば、砥石周速 400m/s で研削切断実験を行うことができる。



図 2 チタン合金コア，フランジを装備した超高速研削切断ブレード

第 4 章では、第 3 章で試作した超高速研削切断ブレードを用いて、周速 350m/s までの研削切断実験を行い、高周速域で発生する工作物（FC200）の研削焼けの発生原因と防止方法について検討した。

まず、コンティニュアスタ型のブレードを用いて、周速と研削焼けの関係を調べた。研削抵抗と工作物の切断側面の形状から、高周速域で研削焼けが起こる原因は、ブレードの側面と工作物との接触によることがわかった。この結果から、ノズルから供給されたクーラントが砥石に到達した後、高速回転により飛散する可能性が高いため、クーラントを研削点に確実に供給する砥石の構造が必要であると考えた。

そこで、砥石端面に円弧形状の溝を設け、接線方向のクーラント供給を促し、さらに、砥石側面に矩形断面の溝を設け、側面方向のクーラント供給を促す効果について検討した（図 3）。その結果、周速 300m/s までの超高速域において、20 パスの連続加工を行っても、研削焼けが発生しなくなった。

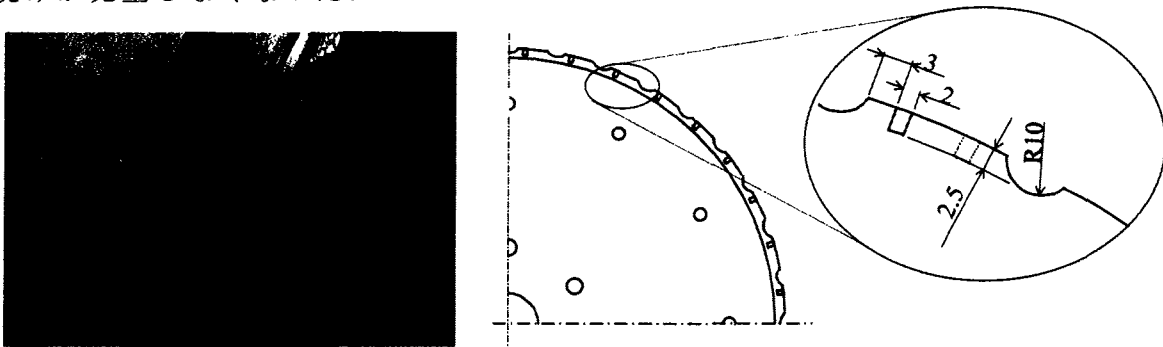


図 3 側面溝付きセグメントタイプのブレード

周速 300m/s において研削焼けが起こらない結果が得られたので、さらに高周速の実験を試みた。その結果、320m/s まで正常な加工が行えたので、350m/s の実験に試みたところ、切断側面にわずかに研削焼けがみられ、ブレードの砥石部分が一部損傷した。この結果から、工作物に伝わった研削熱を十分に冷却することができていることがわかった。しかし、ブレード側に伝わる研削熱が非常に大きくなっている可能性が高く、そのために砥石部分

が強度低下を起こしたものと考えられる。この結果により、砥石部分の材質を見直せば、メタルボンドブレードを用いた周速 350m/s 以上の超高速研削切断の実現が期待できることがわかった。

第 5 章は、結論である。

以上のように、砥石の端面に円弧形状の溝を設け、側面に矩形断面の溝を設けることにより、砥石側面と工作物側面の接触による研削焼けを防止する効果が非常に高まり、周速 300m/s の超高速研削切断加工が可能であることを明らかにした。そして、周速 350m/s までの研削切断実験の結果より、周速 350m/s 以上の超硬周速域においては、工作物の冷却よりもブレードの砥石部分の冷却と、砥石の熱に対する強度低下への対策がさらに重要となることを示した。

以上

# 論文審査結果の要旨

研削加工では、研削能率が砥石周速度に比例することは理論的に良く知られている。すでに東北大学では、世界最高の周速 400m/s の超高速研削盤を開発したが、これまでは 300m/s を超える周速で使用可能な砥石が製作できなかった。本論文は、高い研削能率を最大限に発揮できる研削方式は研削切断であるとの考えの基に、周速 300m/s を超える超高速下で使用可能な研削切断用ブレードを開発した研究をまとめたもので、全編 5 章からなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、超高速研削切断用ブレードの基本的な設計指針について述べている。従来の超高速研削用砥石は、破壊強度の点からセンタ穴のないものを使用しなければならないとされていたが、実用性を考えあえてフランジ方式にし、センタ穴付きのブレードを使用した。そして、有限要素法を用いてフランジとブレードの強度計算を行い、超高速研削切断用ブレードの基本的な設計指針を明らかにした。特にブレードとフランジの材質の適合性について検討し、最終的に両者をチタン合金製にするか、あるいは CFRP 製にする必要があるという結論に達した。

第 3 章では、ブレードの試作について述べている。前章の結果からブレードコアはチタン合金か CFRP になるが、超高速研削切断用ブレードとしてレジンボンドは適さないので、コア材はチタン合金にせざるを得ない。そこで、チタン合金コアと Cu-Sn 系ボンドの CBN 砥石部との接合を強化するために、活性銀ろう層で両者の密着性を高め、さらに活性銀ろう層とブレードコアとの間に Ni 層を介在させて、接合部の脆化を防止する方法を考案した。この結果、周速 450m/s での回転試験に耐え得る高強度のブレードが製作可能になった。

第 4 章では、試作したブレードを用いた超高速研削切断実験について述べている。超高周速下での研削では大きな研削熱が発生するため、できるだけ研削点近くにクーラントを供給し冷却する必要がある。そこでブレードの砥石部に丸鋸状にスリットを設け、さらに側面に放射状の導水溝を付けた。その結果、周速 320m/s で研削焼けを発生することなく、2mm 厚さの鋳鉄板を切断することができた。これは、ブレードはもちろんホイールも含め、現時点で世界最高速のである。

第 5 章は結論である。

以上、要するに本論文は、初めて 300m/s を超える超高速下で研削できるブレードを試作し、研削切断実験を行ったもので、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、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。