

## 論文

## 切断砥石の性能評価に関する研究

— 切断砥石性能試験機の試作 —

原稿受付 2004年1月16日

“トライボロジスト” 第49巻 第7号 (2004) 587~594

田 上 晴 久

沖縄職業能力開発大学校 生産機械システム技術科  
(〒904-2141 沖縄県沖縄市池原2994-2)

菊 澤 大 和

広島研磨工業(株)  
(〒798-1333 愛媛県北宇和郡広見町永野市37)

三 村 和 令

スターライト工業(株)  
(〒520-3004 滋賀県栗東市上砥山2222)

南 一 郎

岩手大学 工学部応用化学科  
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5)

**Abstract** Cutting-off wheels are widely used, especially metalworking and stoneworking as convenient tools. However, to the best of our knowledge, universal test method to evaluate cutting-off wheels is not known at present. A new method for evaluation of cutting-off wheels was proposed in this work. The apparatus is connected with a computer to control the test conditions. Also the computer was programmed to monitor rotating speed, cutting force, torque and workpiece temperature throughout the test. The results on cutting force monitoring were very complicated. Therefore the results obtained by several tests are normalized to understand the phenomena clearly. Cutting energy is derived by integration of cutting force. This paper describes that the comparison of cutting energy and those standard deviation can be applied to evaluate efficiency of cutting-off wheels. Repeatability and reliability of the test results are discussed.

## 1. 緒 言

切断砥石は軽量で持ち運びに優れ、比較的簡単に扱えるため、建設現場をはじめとする各種の生産現場で広く利用されている。切断砥石の用途としてはパイプやアングル等の一般鋼材が挙げられるが、切断に伴って火花が発生するため火災などの原因になるという問題がある。また切断作業に伴って被削材が過熱されるため、被削材切断面に熱影響が残るといった問題もある。こうした切断作業環境は十分に最適とはいえず、今後更なる改善が必要である。

切断砥石の性能と性質は、砥粒、粒度、結合度、組織および結合剤の5因子で決まる。そのため各砥石製造メーカーは、用途に応じてこれら5因子の組合せを工夫すると同時に、砥粒、結合剤、充填剤および補強剤といった各要素の改良を行うことにより、砥石の性能向上や作業効率の改善を図っている。

いっぽう、切断砥石の性能評価については、性能指数として次式によって与えられている。

$$P = \frac{G}{E} \quad (1)$$

ただし、 $P$  は性能指数、 $G$  は切断比、 $E$  は能率で

## Study on Evaluation of Performance for Cutting-Off Wheels

— Development of the Testing Machine for Cutting-Off Wheels —

By Haruhisa TAGAMI, Department of Advanced Mechanical Technology for Production System, Okinawa Polytechnic College (2994-2, Ikehara, Okinawa-shi, Okinawa 904-2141), Hirokazu KIKUZAWA, Hiroshima Kenma Kogyo Co., Ltd. (37, Naganoichi, Hiromi-cho, Kitauwa-gun, Ehime 798-1333), Kazunori MIMURA, Starlite Co., Ltd. (2222, Kamitoyama, Kuriazuma-shi, Shiga 520-3004) and Ichiro MINAMI, Department of Chemical Engineering, University of Iwate (3-5, Ueda 4-chōme, Morioka-shi, Iwate 020-8551)

**Key Words**: cutting-off wheel, metalworking, cutting force, cutting energy, efficiency of cutting-off wheel

ある。式中にある切断比とは、切断した被削材の総面積を切断砥石の摩耗面積で除したもので、能率とは被削材の総面積を切断するのに要する時間である。

切断砥石の性能としては、一般的に素早く切断できて長持ちするものが良いとされている。つまり同じ用途で同じサイズの切断砥石を比較した場合、耐摩耗性が高く切断速度の速いものが良い性能の切断砥石ということになる。すなわち、式(1)において性能指数  $P$  が大きいほど良い切断砥石と評価している。そのため各砥石製造メーカーでは、性能指数  $P$  を大きくすることを基本に、切断面のきれいな砥石や被削材に残るバリの少ないものなど、その用途に応じて各種の切断砥石を開発している。

しかしながら、現在、切断比  $G$  を求めるために行われている切断試験は、熟練工の定性的な評価に頼っているのが現状である。つまりこの切断試験は、熟練技能者の手作業により、切断時に伝わってくる抵抗や振動を適度に調節しながら行ったものであり、その試験結果より切断比が算出されている。また切断試験時に手に伝わる切断抵抗なども切れ味といった定性的なものとして性能評価の対象としている。

筆者らが調べた範囲では、切断砥石の性能を客観的に評価する試験方法がないのが現状であり、このことが安定した品質管理や新しい切断砥石を開発するうえでの障害になっていると考えられる。そのため今後、製品の信頼性を高め、切断効率の高い砥石を開発するためには、まず切断砥石の定量的な試験方法の確立が必要不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、切断砥石開発の効率化を目的として、まず基本性能を評価する試験機を試作することにした<sup>1,2)</sup>。そして、試作した試験機において切断時に各種パラメータを変化させ、試験機の有効性について検証した。また、これまでの熟練工による切断試験時の定性的な評価の代わりとして、切断抵抗より算出した切断エネルギーとその標準偏差により、切断効率を評価することが有効であることを報告する。

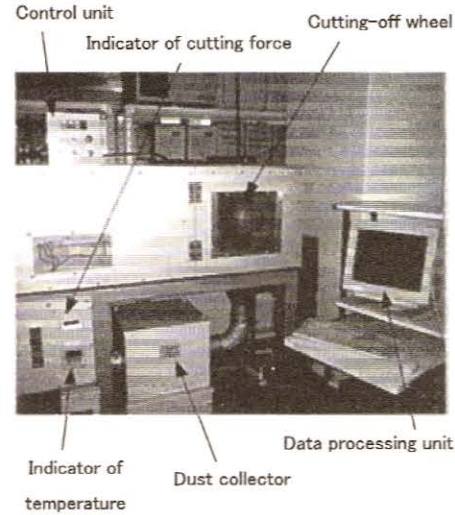


Fig.1 Overview of the apparatus

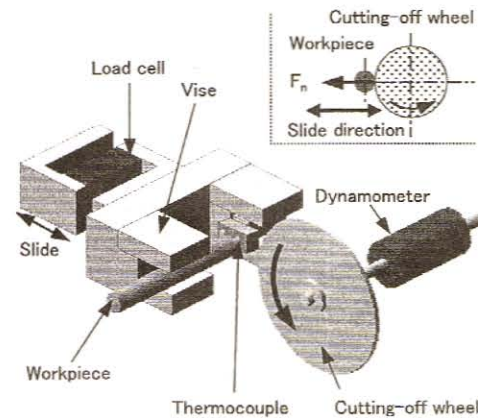


Fig.2 Detail of cutting mechanism

## 2. 実験方法

### 2.1 切断試験機の構成

試作した試験機(以下、本試験機と呼ぶ)を Fig.1 に示す。本試験機は試料を切断するための本体部、試験条件の設定や試験状態をモニタリングするコンピュータ部および集塵装置部の三つの部分から構成されている。このうち本体部には切断砥石回

転部、試料取付け部、試料送り機構部、制御盤および各種表示部などが含まれている。Fig. 2は切断部の詳細を示したものである。本試験機で試料を切断する場合、回転する砥石部分は固定して、試料を取り付けたバイス部を自動的に送りながら切断する。本試験機では切断抵抗の測定にロードセルを用いた。この切断抵抗についてはFig. 2の右上に示すとおり、法線方向の切断抵抗  $F_n$  を測定している。温度測定についてはFig. 3に示すとおり、切断して切り落とされる部分を測定できるように熱電対を取り付けた。また本試験機では、様々な形状の試料を取り付けられるように、試料の保持具として汎用のバイスを用いた。

2.2 切断試験機の概要と仕様

本試験機では切断時の切込み送り速度や回転数をコンピュータで設定し、その運転を制御している。また試験中に、切断抵抗、被削材の温度、回転数および回転トルクのデータをそれぞれデジタル変換して、コンピュータにとり込める。データは1秒間に5~7点読み込むことができるようにプログラムし、表計算ソフトを用いて解析することが可能である。砥石の摩耗量については、試験が1回終わるごとにノギスにより測定を行い、コンピュータに入力しておく。また砥石の回転はインバータ制御で、回転数一定の状態で行うこともできる。本試験機の仕様をTable 1に示す。

2.3 切断試験機の有効性の検討

試作した試験機の有効性を検証するために、各種パラメータを変化させて実験を行った。実験条件をTable 2に示す。

試料は一定送りでスライドさせ、切込み送り速度 1.0mm/s と 1.5mm/s で切断した場合について比較した。ここで設定した両条件は、切断砥石の作業面が適度に摩耗し、自生発刃が作用する範囲とした。切断した試料は JIS における SS400 と S45C で直径 25mm の丸棒を用いた。これらの試料の化学成分をTable 3に示す。供試切断砥石は A30PBF と A36PBAF を使用した。これらは JIS に準じており、砥粒は純度約 95% のアルミナの結晶で、結合剤はグラスファイバ製補強剤入りのレジノイドである。次に試験に用いる切断砥石の初期条件について説明する。切断砥石は自生作用が活発に起こる

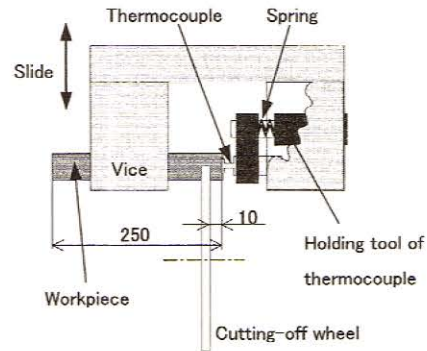


Fig.3 Details of temperature measurement

Table 1 Specification of the apparatus

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| Revolution of wheel | 500~4300 rpm                  |
| Cutting feed        | 0.5~3.5 mm/s                  |
| Size of wheel       | 255~305 mm                    |
| Size of work        | 5~50 mm                       |
| Cutting feed mode   | Constant feed, Constant force |

Table 2 Experimental conditions

| Method | Cutting speed<br>m/s | Cutting feed<br>mm/s | Workpiece<br>(φ25) | Wheel<br>(305×2.5×25.4) |
|--------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|
| A      | 30                   | 1.0                  | SS400              | A30PBF                  |
| B      | 30                   | 1.5                  | SS400              | A30PBF                  |
| C      | 30                   | 1.0                  | S45C               | A30PBF                  |
| D      | 30                   | 1.0                  | SS400              | A36PBAF                 |

Table 3 Chemical composition of workpiece

|       | Chemical composition, wt% |      |      |      |      |      |     |      |         |
|-------|---------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|---------|
|       | C                         | Si   | Mn   | P    | S    | Cu   | Ni  | Cr   | Fe      |
| SS400 | 0.16                      | 0.2  | 0.64 | 0.02 | 0.04 | -    | -   | -    | Balance |
| S45C  | 0.44                      | 0.19 | 0.75 | 0.01 | 0.03 | 0.16 | 0.5 | 0.14 | Balance |

ことに加えて、1回の切断試験後に摩耗する量が多いため、たとえ初期条件として作業面性状を整えたとしても、すぐに目替わりすることになる。また切断砥石

の厚みは薄く、今回の試験で焦点にしている粗粒の砥石は、砥粒分布が不均一で、肉眼で見ても砥粒のある場所とない場所を確認することができる程度であるため、作業面のドレッシングにより初期条件をそろえるのはかなり困難である。また、こうした初期条件の調整に時間やコストをかけることは、試験方法としての実用性も欠くことになると考えられる。そのため本試験方法では、試験ごとに作業面を整えるような操作は行わないことにした。

切断試験方法としては、長さ 250mm の丸棒を Fig.3 に示すように 10mm ずつ切断した。この場合、バイスで固定する部分を残して、1本の丸棒で9回試験を行っている。この丸棒1本に対して9回切断を行う作業を本試験法では1シリーズと呼ぶことにした。また切断試験では1シリーズごとに新しい切断砥石を用いて試験を行った。試料は1回切断試験を行うたびに冷却し、試験開始温度を一定に保つようにした。そしてコンピュータに取り込んだデータのうち、ここでは切断抵抗と被削材温度のデータについて解析を行うことにした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 切断抵抗

3.1.1 データ処理の方法 Fig.4とFig.5はTable 2の条件Aで得られた1回目と2回目の切断抵抗の経時変化を示したものである。両データとも切断の進行に伴って切断抵抗が上昇し、接触弧の長さが最大となる丸棒の中心付近で最大値となり、その後減少する傾向にあることがわかる。しかしながら、切断抵抗は切断中非常に大きく振幅しており、また1回目と2回目の結果からも観察されるように、試験ごとに切断抵抗の経時変化のパターンが異なるため、解析が困難である。そこで、Fig.4のデータを1秒ごとに平均化し解析を試みた。そのグラフをFig.6に示す。切断抵抗は13~14秒付近で最も高い値を示し、その後急激に値が減少し、再度小さなピークを迎え減少している。これは抵抗値が最大になった付近で、結合剤の砥粒保持力が臨界点に達したために、砥石作業面に目替わりが発生したと推察される。そのため砥石切れ味がいったん回復し抵抗が一時的に下がり、その後試料との接触が落ち着いたために

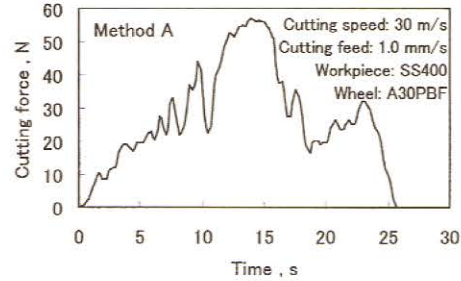


Fig.4 Result of cutting force, Run 1

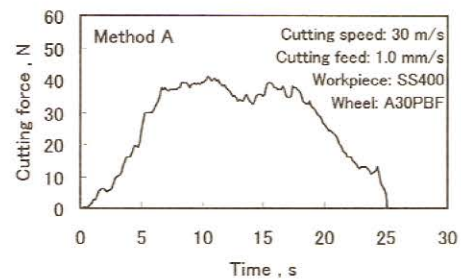


Fig.5 Result of cutting force, Run 2

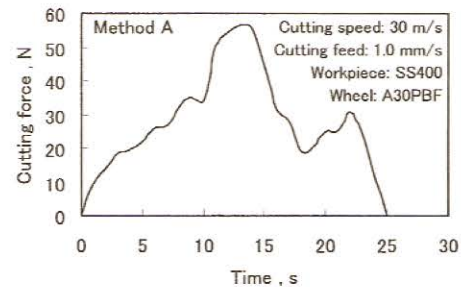


Fig.6 Result of cutting force, Average of Run 1

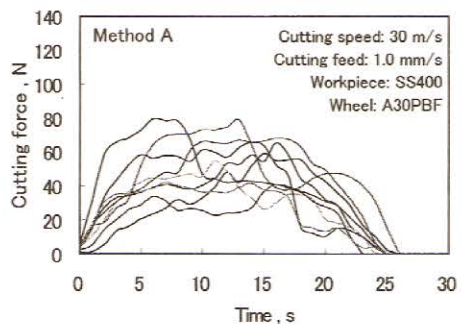


Fig.7 Results of cutting force with method A

再び抵抗が上昇したと考えられる。以後、すべての試験結果について同様の平均化処理を行った。

Fig. 7はTable 2の条件Aで得られた9回分の切断抵抗の経時変化を示したものである。Fig. 7より、測定ごとに切断抵抗は大きく変化する明確な相関性が見られないことがわかる。またFig. 8で示すように、条件Bにおいても条件Aの結果と同様、明確な相関性が見られなかった。また、この状態では条件Aと条件Bの試験結果を比較し、解析することも困難であることがわかった。

そこで本試験では、データ処理方法として各条件における9回分のデータを平均化し、その結果について比較検討することにした。

**3.1.2 データ解析** 各条件における平均化処理後の切断抵抗をFig. 9, Fig. 10およびFig. 11に示す。Fig. 9は切込み送り速度の違い、Fig. 10は試料の違いおよびFig. 11は供試砥石の違いについてそれぞれ比較した結果である。これらの結果を比べると、それぞれの条件によって切断抵抗の経時変化パターンに差異を生じており、それぞれのデータを比較検討することが可能であることが確認できる。

切込み送り速度を変化させた条件Aと条件Bを比較すると、Fig. 9で示すように切込み送り速度が速い条件Bの切断抵抗の最大値が条件Aよりも高くなっている。つまり切断条件が同じ場合、切込み送り速度が速い条件のほうが、切断抵抗の最大値が高くなることを示している。次に被削材の材質を変化させた場合、Fig. 10に示すように条件Cより条件Aの切断抵抗の最大値が低くなっている。このことから試料としては、切断抵抗が低いSS400の方がS45Cより切断が容易であることを示している。最後に、切断砥石の種類を比較した場合、Fig. 11に示すように両砥石とも切断抵抗の最大値に大きな差異は認められない。しかし、切断開始後の抵抗上昇時の傾きが、条件Aより条件Dのほうが小さいことがわかる。これは条件Dで用いた砥石のほうが砥粒が細かいため、同時研削砥粒数も多く、びびりや偏摩耗が少なく安定した切断が行われたためと推察される。

### 3.2 切断エネルギー

本試験法により切断抵抗の比較を行えば、前述

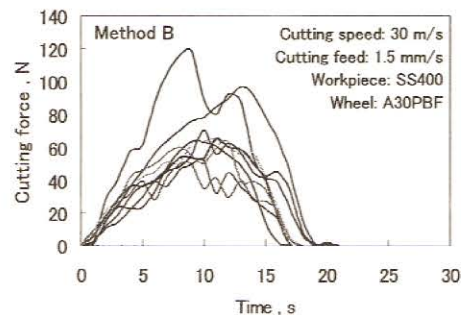


Fig.8 Results of cutting force with method B

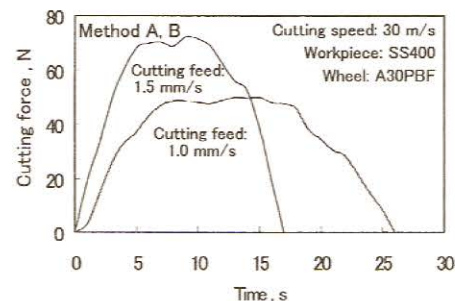


Fig.9 Effect of cutting feed on cutting force

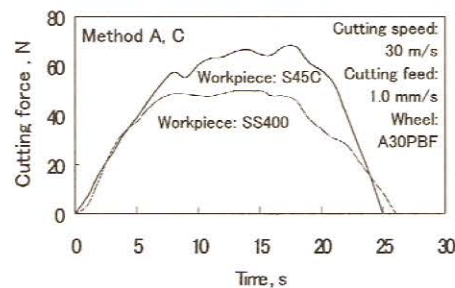


Fig.10 Effect of workpiece material on cutting force

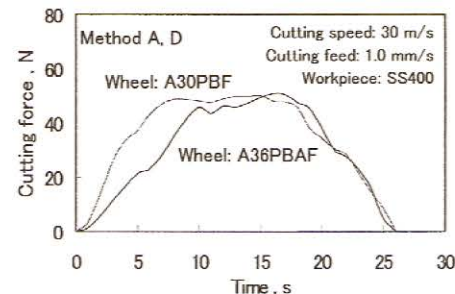


Fig.11 Effect of wheel on cutting force

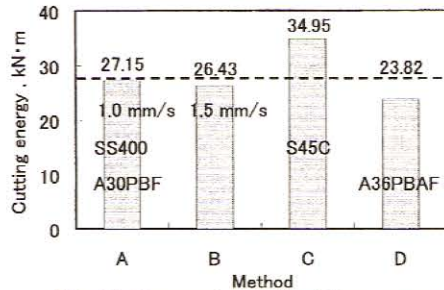


Fig. 12 Comparison of cutting energy

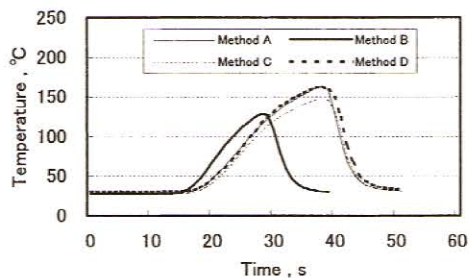


Fig. 13 Results of temperature

したような各種条件における結果を解析できることが分かった。しかしながら、切断抵抗経時変化からの解析は、切込み送り速度の違いといったような、あるパラメータに限って比較する場合は有効だが、本試験条件における条件 B と条件 C のような、二つのパラメータが異なる場合についての比較が難しい。そのためここでは、本試験法で得られた切断抵抗の値を測定時間で積分し、それに切断砥石の周速度をかけた値を切断に要するエネルギーと考えた。以後これを切断エネルギーと称し、それぞれの条件で得られた結果について比較検討することにした。

Fig. 12 に各条件における切断エネルギーの結果を示す。Fig. 12 より、どのような条件であっても、一目で切断に要したエネルギーの大小を比較することが可能になったことがわかる。例えば条件 A と条件 B の場合、切断エネルギーはほぼ等しくなっている。つまり両条件では、切込み送り速度が速くても遅くても切断に要するエネルギーはほとんど変わらないことを示している。また条件 A と条件 C を比べると、SS400 を切断するよりも S45C のほうが切断エネルギーが大きい。つまり

試料としては、切断に要するエネルギーの小さい SS400 のほうが切断しやすいことを示している。最後に、条件 A と条件 D を比較した場合、条件 D の砥石のほうが切断に要するエネルギーが低く、切断効率がよいことがわかる。

以上の結果より、試作した試験機による本試験法は、切断砥石の性能評価に有効であることが検証された。

### 3. 3 試料の温度

本試験機による温度測定は、切断点の温度を知ることではなく、同じ材種の試料について異なる砥石で試験したような場合の温度上昇の比較を目的としている。この温度測定の結果についても、切断抵抗と同様に 9 回分のデータを平均化して比較した。Fig. 13 は、それぞれの条件における測定結果を示したものである。Fig. 13 より全体的に、切断開始後しばらくしてから温度が上昇し始め、最大値を迎えた後急激に温度が下がるのが観察できる。これは Fig. 3 に示すとおり、温度測定を試料の端面で行っているため、切断点の温度上昇が切断開始から少し遅れて測定点へ伝わり、切断を終えると試料が切り落とされ、試料と熱伝対が離れるために急激に温度が下がると考えられる。

Fig. 13 より、切込み送り速度の異なる条件 B を除いて、温度変化の推移についてほとんど相違がないことがわかる。これは条件 B の切込み送り速度が他の条件よりも速く、切断時間が短いため、測定温度の最大値が低くなったものと推察される。切込み送り速度が速くなると、試料と切断砥石の接触弧長さが長くなり、切断砥石の単位時間あたりの除去量が増大する。その結果、Fig. 9 に示したように送り速度が 1.0mm/s の条件よりも相対的に研削抵抗が高くなると考えられる。このとき発生する熱量は研削抵抗に比例するため<sup>3)</sup>、他の条件に比べて、切断開始後早い段階から熱の発生が激しくなり、温度上昇が認められたものと考えられる。

また条件 C で温度の最大値が条件 A より低いのは、切断した試料の熱伝導率が違うためと考察される。これらの結果より、本試験機では切断時に発生する振動等に影響されることなく、各条件における温度の経時変化を連続的に測定し、その結

Table 4 Sample of cutting-off wheels

| Sample | Wheel   |
|--------|---------|
| No.1   | A30PBF  |
| No.2   | SA30    |
| No.3   | A36TB2F |
| No.4   | A36SX   |
| No.5   | AZ30T   |
| No.6   | A30SBF2 |

果について解析ができることが検証された。

#### 4. 切断砥石の性能評価

##### 4.1 実験方法

本研究で開発した試験法により、切断砥石の性能評価を行った。性能評価に用いた6種類の切断砥石をTable 4に示す。試験条件は、Table 2に示した条件Aにより、1枚の砥石につき1シリーズの切断試験を行った。また、各種類の砥石は新品をそれぞれ3枚ずつ用意し、同じ条件下で3回試験を行い、データを収集した。なお、性能評価用の供試切断砥石は、いずれも市販されているものである。

##### 4.2 実験結果

収集した3回分のデータより算出した、切断砥石摩耗量の平均値をFig. 14に示す。この場合、摩耗量は切断して摩耗した砥石の半径減で表している。Fig. 14より、No.1, No.3, No.4 および No.5 が相対的に低い値を示し、摩耗量が少なかったことがわかる。次にFig. 15は性能指数を示したものである。Fig. 15より、摩耗量の結果と同様、No.1, No.3, No.4 および No.5 が相対的に値が高く、優れた性能の砥石と判断することができる。

ここで、上記の結果に加え、本試験法による切断エネルギーとその標準偏差の結果をFig. 16とFig. 17に示す。Fig. 16に示す切断エネルギーの平均値より、No.1, No.4 および No.5 が相対的に低い値を示し、切断に要するエネルギーが少なかったことがわかる。またFig. 17に示す切断エネルギーの標準偏差より、No.1, No.4 および No.5 が相対的に低い値を示し、データのばらつきが少なかったことがわかる。

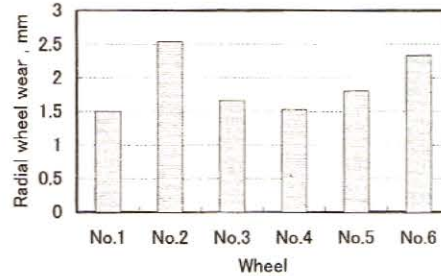


Fig.14 Wear of Cutting-off Wheel

Cutting speed: 30 m/s, Cutting feed: 1 mm/s, Workpiece: SS400

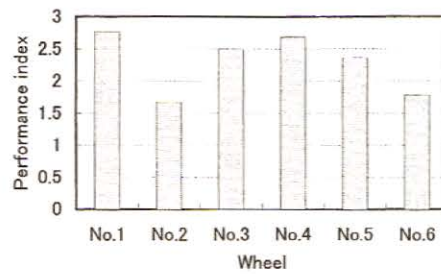


Fig.15 Performance index

Cutting speed: 30 m/s, Cutting feed: 1 mm/s, Workpiece: SS400

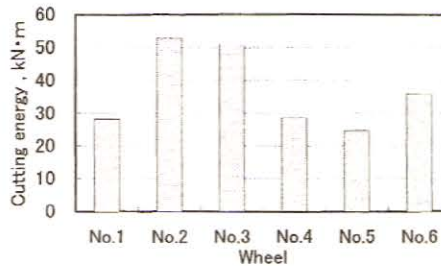


Fig.16 Cutting energy

Cutting speed: 30 m/s, Cutting feed: 1 mm/s, Workpiece: SS400

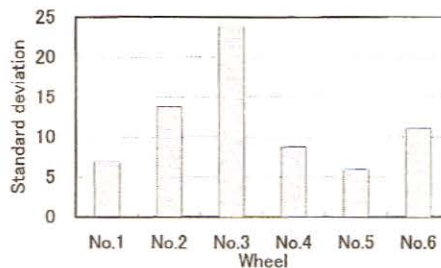


Fig.17 Standard deviation

Cutting speed: 30 m/s, Cutting feed: 1 mm/s, Workpiece: SS400

これらの結果より、従来までの性能指数による評価法では、No.1, No.3, No.4 および No.5 が相対的に値が高く、優れた性能の砥石と判断できる。しかし、この結果に本試験法による切断エネルギーとその標準偏差の結果を重ね合わせると、No.3 は切断エネルギーが大きく標準偏差の値も大きい。そのため優れた性能の切断砥石とは言えないことがわかる。そのため性能評価には、本試験法による切断エネルギーとその標準偏差の結果を総合的に判断することが望ましいと考えられる。つまり今回の性能評価では、No.1, No.4 および No.5 が相対的に安定した品質で、良い性能の切断砥石であると判断できる。

以上の結果より、試作した切断試験機は切断砥石の性能評価に有効であることが実証されたと考えられる。また今後は、本試験機により優れた切断砥石の開発を行っていくことが可能であると考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、切断砥石開発の効率化を目的として、基本性能を客観的に評価する試験機を試作し、

その有効性について検討した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 切断試験により得られるデータは、毎回ばらつくため、数回分を平均化したデータの解析が有効である。
- (2) 切断抵抗から算出した切断エネルギーとその標準偏差は、切断性能を評価するために有効である。
- (3) 試作した試験機により、切断砥石の性能を客観的に評価できることを実証した。

## 文 献

- 1) 田上晴久・三村和令・菊沢大和・末政正道・南一郎：切断砥石のトライボロジー，トライボロジー会議予稿集高松 1999-10(1999) 275.
- 2) H. Tagami, H. Kikuzawa, M. Suemasa, K. Mimura, I. Minami : Tribology of Cutting-off-Wheels, 2nd World Tribology Congress Abstracts of Papers, Vienna(2001)685.
- 3) 河村末久・欠野章成・樋口誠宏・杉田忠彰：切削加工と砥粒加工，共立出版社（1984）48.