

焼結金属の被削性

－穴あけ加工における樹脂含浸の影響－

大石 健司*・山内 優暢**

Machinability of Sintered metal

－Influence of resin impregnation in the drilling－

Kenji Oishi*, Masanobu Yamauchi**

Abstract

Sintered metal is difficult to cut. However, it becomes easy to cut sintered metal with resin impregnation. In turning, the chip formation becomes brittle more than untreated. In this paper, studies on the influence of resin impregnation in the drilling are carried out. As a result, 1. Cutting force is decreased with resin impregnation same in turning. 2. Surface roughness of impregnated is better than that of untreated. 3. Resin impregnation is more effective than using cutting oil. 4. Tool life has extended to twenty times or more.

1. 緒 言

焼結金属は、鉄粉をプレスし、融解温度以下の1000℃から1300℃位の温度で固めたものであり、そのプロセスは焼結法・粉末冶金などといわれている。生産性が高く、寸法精度が良好なことなどからFig.1¹⁾に示すように、自動車部品・精密機械部品など広い範囲で使用されている。また、多孔体という特徴を活かして、潤滑油を補充しない無給軸受などの製品に応用されている。

焼結品では後加工の必要性は概して低いが、ねじや穴、あるいは寸法公差のため、焼結後に機械加工が必要になることがある。このとき、焼結金属は被削性が悪い²⁾ことが知られており、被削性改善のため、焼結時に添加物を加えるなど、種々の方法^{2),3)}が考案されている。

ところで、焼結金属はFig.2に示すように多孔体であるため、メッキ加工を施す際に孔を埋める必要がある。このために、樹脂含浸が多く行われている。ところが、この樹脂含浸によって、「切削加工がやりやすくなる」ということが経験的に知られている。これまでの著者らの研究^{4),5),6)}で旋削加工において、切りくず生成形態が脆性的な挙動⁷⁾を示すため切削抵抗が低下し、工具寿命も延長することが明らかにされている。そこで焼結金属では、旋削加工より穴あけ加工の需要が多いと考えられることから、

本報では実際の穴あけ加工における樹脂含浸の影響を明らかにした。



Fig.1 Example of product

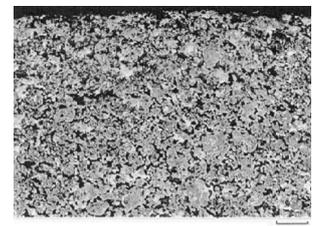


Fig.2 Sintered metal microstructure

2. 実験方法

2. 1 被削材

被削材は、焼結材 (Untreated)、樹脂含浸材 (Impregnated) 共に日立粉末冶金 (株) 製18EPC：密度6.75g/cm³ (空孔率 14.0%)、見掛け硬さHRB67。および比較材として機械構造用炭素鋼S45Cを使用した。成分はTable1に示す。

2. 2 実験装置

穴あけ工具は市販のねじれ刃ドリル (直径10mm, ハイス, およびハイス+TiNコーティング, 理研製鋼 (株) 製) を用いた。工作機械は東亜機械 (株) ラジア

* 電子機械工学科

** 専攻科生産システム工学専攻 (現：マツダ (株))

Table 1 Workpiece

Composition of the workpiece	Sintered metal	C : 0.8wt%, Cu : 1.5wt% Fe : balance
	Impregnated material	Resin : Resinol90C (Locktite)

ルボール盤TDR-600C(回転数1100rpm,動力0.55kW), 工具動力計は佐藤マシナリー(株) AST-BH1901(定格容量トルク500kgf・cm, スラスト600kgf), 動ひずみ測定器はミネビア(株) DSA-606C, 記録計は日置電機(株) HIOKI 8808を用いた。加工面の粗さ測定には(株) ミットヨサーフテスト301を用いた。



Fig.3 Experimental device

2. 3 実験条件

切削条件は切削速度をV : 5, 10, 15, 25m/min, 送りはf : 0.05, 0.09, 0.15mm/revとし, 切削抵抗(トルク, スラスト)の測定, および切りくずを回収し, 観察を行った。加工面の粗さは穴加工後に軸方向に切断し測定した。また, 樹脂含浸の影響を示す指標として, 切削抵抗の減少率をdとして表した。

$$\text{減少率 } d = \{1 - (A/B)\} \times 100 \text{ [\%]}$$

ここで, A : 樹脂含浸材の切削抵抗

B : 焼結材の切削抵抗

減少率dが大きいほど, 樹脂含浸の影響が大きく, 切削抵抗が減少している。

3. 実験結果

3. 1 穴あけ加工の切削抵抗

Fig.4にハイス工具(以下HSS工具)の場合, Fig.5にTiNコーテッド工具(以下TiN工具)の場合の切削抵抗を示す。送りが増加するといずれの工具でもトルク, スラスト共にほぼ比例して増えていることがわかる。今回の実験の範囲内では, 切削速度の影響はほとんどないことも示されている。そして, 工具の違いでは, TiN工具がHSS工具と比べるとスラ

ストが, 小さい値であるが, これはドリル先端形状の違いによるものと考えられ, 傾向としてはほとんど影響がないことがわかった。

被削材による切削抵抗の大小関係は, S45C>焼結材>含浸材となっている。樹脂含浸による切削抵抗の減少率は, Fig.4のHSS工具では, トルクでは約40%, スラストでは約50%の減少率が得られた。Fig.5のTiN工具では, トルクは約40%, スラストでは約30%の減少率が得られた。

つまり, 穴あけ加工においても旋削加工と同様に, 樹脂含浸を施すことによって, 切削抵抗が大幅に減少することがわかった。

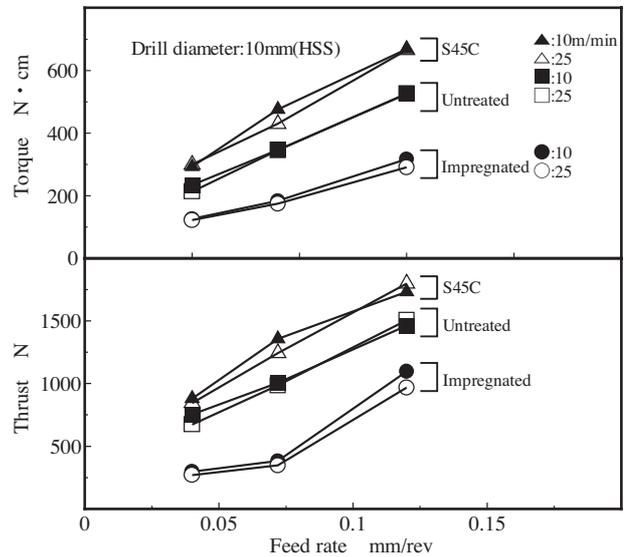


Fig.4 Effect of cutting speed and feed rate for the cutting force (HSS)

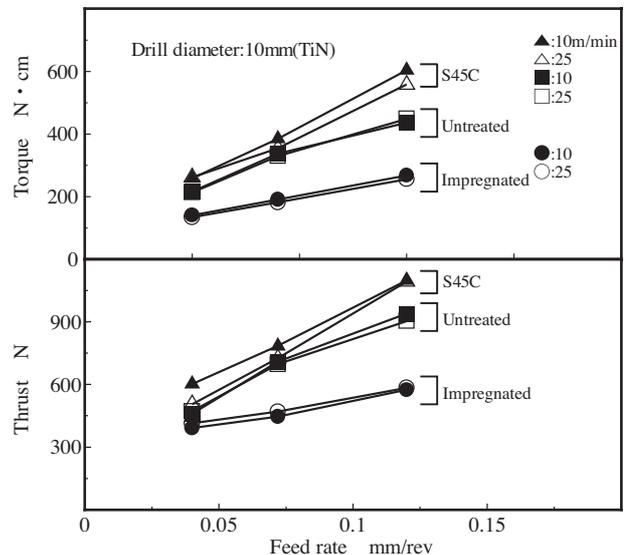


Fig.5 Effect of cutting speed and feed rate for the cutting force(TiN)

3. 2 穴あけ加工面の粗さ

Fig.6,7に切削条件と仕上げ面粗さの関係を示す。ドリルでの穴あけ加工では、ドリルの振り回りのためにライフルマークといわれる、らせん状の模様が形成される。このため、仕上げ面粗さは場所によって異なることになる。ライフルマークはドリルのコーナー部で擦られ形成されるため、凹凸は無くなりRzは小さくなるが、全体としては溝になっており粗さを増大させるものである。

そこで、本報では通常の仕上げ面とライフルマークの部分の両方の仕上げ面粗さを測定した。

結果として送り、および切削速度が変わっても、仕上げ面粗さに対して顕著な傾向は表れなかった。工具材質の違いでは、ほとんど傾向は変わらなかったが、概してTiN工具のほうが良好な仕上げ面が得られた。

また、被削材の比較では、仕上げ面のどちらの場所においても、切削条件により多少ばらつきはみられたが、全ての条件で含浸材の方が焼結材に比べて良好な仕上げ面が得られている。

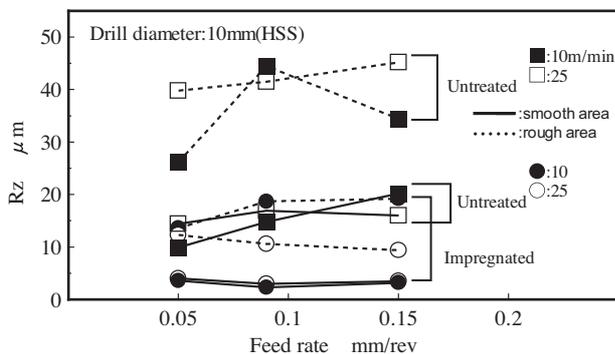


Fig.6 Surface roughness in drilling(HSS)

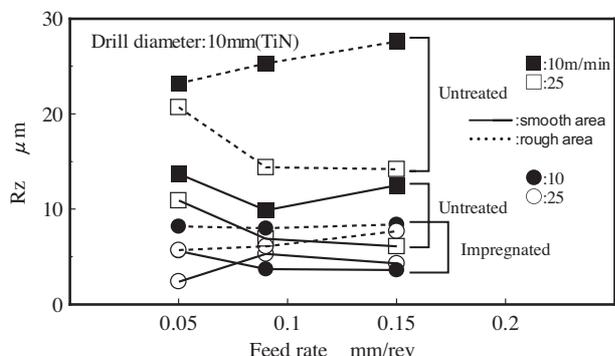


Fig.7 Surface roughness in drilling(TiN)

4. 検 討

4. 1 切削抵抗減少の機構

穴あけ実験の結果、樹脂含浸によりトルク40%、スラスト30~50%程度切削抵抗が減少することがわかった。そこで、切削抵抗が減少した要因について検討を行う。

旋削加工では、樹脂含浸を施すことによって、切りくず生成形態が脆性的な挙動を示し、切りくずが短く折断し、薄くなり切削抵抗が減少したことが示されている⁴⁾。そこで、穴あけ加工の切りくず形態、および潤滑効果を検討する。

4. 1. 1 穴あけ加工の切りくず観察

Fig.8, 9に切削速度10, 25m/minの切りくずを示す。含浸材は、送り0.05, 0.09mm/revでは外観からも、焼結材に比べて明らかに切りくずが短くなっている。送りが0.15mm/revでは、外観からは他の二つの条件に比べると顕著ではないが、Table2に示す切りくず厚さを比較すると、送りが0.15mm/revも含めて全ての条件で、焼結材に比べて含浸材の切りくずは薄くなっていることがわかる。さらに、切りくず形態を精密工学会切削性専門委員会の切りくず形状の分類法 (Table3) で分類すると、穴あけ加工での焼結材、含浸材の切りくずは、3, 4, 5型に分類され、旋削加工での脆性的な切りくずに相当することがわかる。その中でも、焼結材に比べて含浸材の切りくずは3型に近くなり、より脆性的な切りくずであることがわかる。つまり、穴あけ加工においても、樹脂含浸によって、切りくず生成形態が脆性的な挙動を示し、切りくずが薄くなったといえる。

また、この外観写真から切削速度25m/minでの焼結材の切りくずでは、S45Cの切りくずと比べて、送りが増大するに従って切りくずが青く変色してお

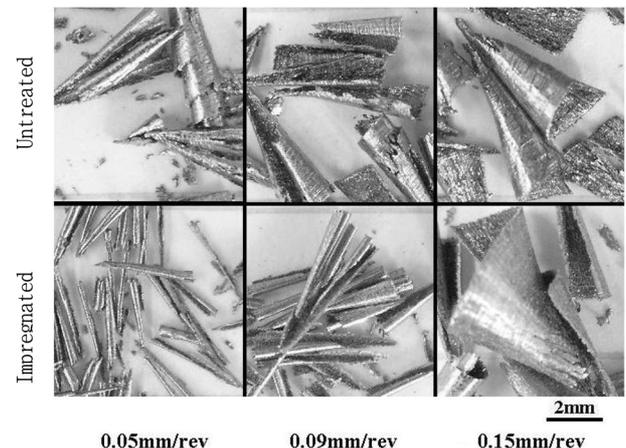


Fig.8 Chip formation D:10mm(HSS) V:10m/min

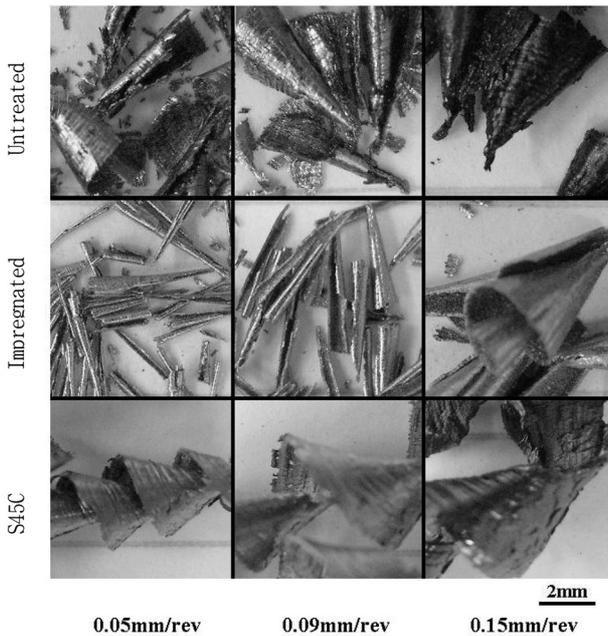


Fig.9 Chip formation D:10mm(HSS) V:25m/min

Table 2 Chip thickness

Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Chip thickness (mm)	
		Untreated	Impregnated
10	0.05	0.08	0.06
10	0.09	0.07	0.08
10	0.15	0.14	0.09
25	0.05	0.11	0.04
25	0.09	0.12	0.06
25	0.15	0.13	0.10

Table 3 Classification of chip formation

種類	記号	形状	旋削	穴あけ
1型	1	粉状片状		
2型	2	短冊状		
3型	3	1/2巻き程度以下に折断されたもの		
4型 (C型)	4	1巻き程度に折れたもの		
5型 (E型)	5	2~10巻き程度に折れたもの		
6型	6	形が不規則に変動する不連続切りくず		
7型	7	規則的形狀の連続切りくず		
8型 (無限型)	8	不規則な形の連続切りくず		

り、焼結金属は熱伝導率が悪く、難削材であることも理解できる。

4. 1. 2 切削油の潤滑効果

切削油を用いて穴あけ加工を行い、焼結材に対する切削油の潤滑効果の影響を調べた。工具は直径10mm (HSS)、切削速度V:10m/min、送りf:0.09mm/revとし、不水溶性切削油 (ユシロンオイルCA16, ユシロ化学工業(株))を用いた湿式切削と、合わせて乾式切削を行った。

実験結果をFig.10に示す。焼結材加工に切削油を使用するとトルクは約30%の減少率が得られるが、樹脂含浸材のドライ切削では約40%の減少率である。スラストでは、切削油で約30%に対し、樹脂含浸では約50%の減少率であった。つまり、切削油の潤滑効果による切削抵抗の減少より、樹脂含浸による切削抵抗の減少のほうが大きいことが明らかである。

樹脂含浸による切削抵抗の減少は、樹脂の潤滑効果によるものという考えもあるが、今回使用した樹脂は熱硬化樹脂であり、加工熱のため軟化し潤滑効果を示すとは考えられない。その上、潤滑による切削抵抗減少ならば切りくず生成形態がより延性的になるはずだが、樹脂含浸により脆性的な切りくず形態になることがわかっている。これらのことから、樹脂の潤滑効果により切削抵抗が減少するのではないと考えられる。

また、焼結金属は多孔体であるため、切削油を使用すると空孔部に加工後も残留することが考えられる。これが後工程や製品性能に不具合となる恐れがある。

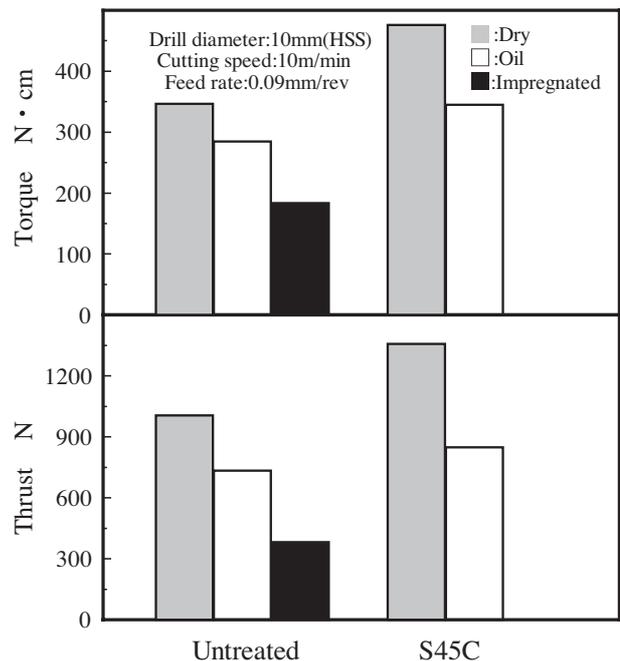


Fig.10 Effect of cutting oil for the cutting force

このようなことから、切削油を使用するより樹脂含浸が被削性改善には有効であると考えられる。

4. 2 穴あけ加工と旋削加工の仕上げ面

4. 2. 1 旋削加工との相違

穴あけ加工での仕上げ面粗さは、3.2のように焼結材に比べて含浸材のほうが明らかに良好であるという結果が得られた。これは、これまでの旋削加工での実験結果⁴⁾とは全く逆の結果である。

今回の穴あけ加工と、過去の旋削加工での切削条件の違いを考えると、まず工具材質の違いがある。穴あけ実験ではHSS工具、およびTiN工具を用いたが、旋削実験では超硬を用いている。これにより、切削速度と送りが大きく異なっている。穴あけ実験は切削速度5~25m/minで行っているが、超硬工具による旋削では150m/min前後である。同様に、穴あけ実験では送りは0.05, 0.09, 0.15mm/revであるが、ドリル加工の実質送りはこの1/2になる。これは旋削加工では微小送りである。つまり、切削条件が大きく異なっていることになる。

そこで、次の切削条件で旋削加工実験を行い、切削抵抗、仕上げ面粗さ、切りくずなどを測定し、検討した。

工具は超硬K10, およびTiNコーテッド超硬, ホルダーはCSBNR2020, 工作機械は滝沢鉄工所(株)NC旋盤TSL-360, 工具動力計は、共和電業(株)TD-500KAを用いた。切削速度V: 5~150m/min, 送りf: 0.01~0.3mm/rev, 切込み a: 1mmとして、乾式長手旋削を行った。

4. 2. 2 穴あけ加工の仕上げ面

Fig.11に旋削加工での仕上げ面粗さを示す。焼結材は低速側で仕上げ面が粗く、ある切削速度でピークがあり、高速になると良好になる。これに対して含浸材は、実験範囲内の速度ではほぼ一定の良好な仕上げ面粗さである。低速側で焼結材の仕上げ面粗さが悪化することはS45Cなどの軟鋼などでも見られるもので、付着物(構成刃先)が生成されていると考えられる。含浸材では脆性的な切りくず生成のため、付着物が発生しないので良好な仕上げ面となる。また、送り量が大きいほど、焼結材の仕上げ面粗さが良好になる切削速度が小さくなるのは、送り量が大きくなると切削温度がより高温になるため、付着物が低速で消滅したためであると思われる。

Fig.12ではFig.11の結果を検証するため、旋削加工での焼結材の主成分と仕上げ面粗さの関係を示す。合わせてFig.13に切りくず形態を示す。切りくず形態は送り0.025mm/revの場合、切削速度50, 100m/min間で生成形態が変化している。Fig.12でも同様に切削速度が100m/minに達した時点で切削抵

抗が極小値から増大し、同時に仕上げ面粗さが極大値から良好になっており、切りくずの外観からもこれらの結果と一致していることがわかる。送り0.1mm/revの場合でも、同じ傾向が見て取れる。工具材質では少し値の差は生じたが、傾向性はほぼ同じものが得られた。

これら結果、穴あけ加工で旋削と異なる結果となった焼結材と含浸材の仕上げ面粗さの関係は、切削速度、送りなど切削条件が旋削の場合と異なるため、付着物の生成や切りくず生成形態が大きく異なるためであることがわかる。

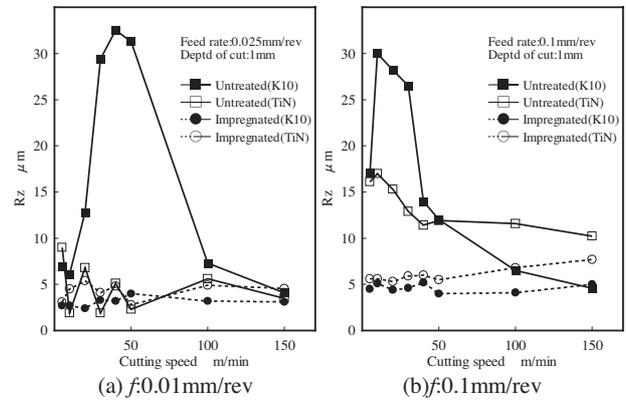


Fig.11 Surface roughness in turning

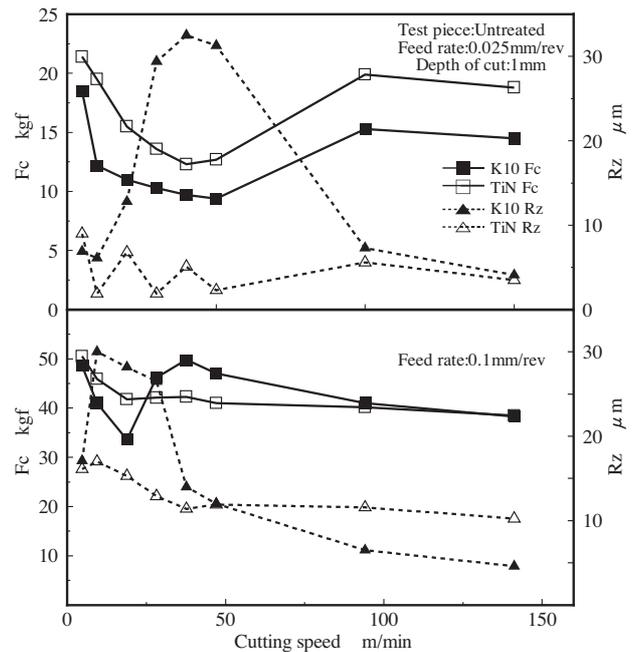


Fig.12 Surface roughness and cutting force in turning with untreated (f:0.025mm/rev, f:0.1mm/rev)

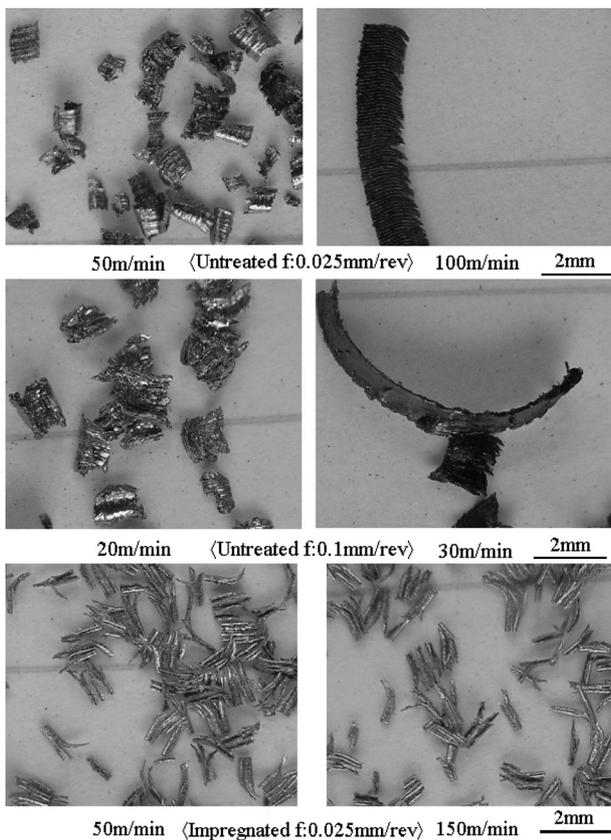


Fig.13 Chip formation in turning (K10)

4. 3 工具寿命への影響

これまでの結果から、穴あけ加工においても樹脂含浸により切りくず生成形態が脆性的になり、切削抵抗が減少することがわかった。これに伴い旋削加工では工具寿命も延長している。穴あけ加工でも同様に延長できるのか次の条件で実験を行った。

工具は直径4mmのHSSおよび、TiNコーテッドドリル、切削速度V：20m/min、送りf：0.05、0.09、0.15mm/rev、穴あけ深さを20mm貫通穴（S45Cのみ10mmで20mmに換算）、寿命判定基準を「ドリル折損」として、折損までの穴あけ個数で評価した。また、同時に逃げ面摩耗幅の測定を適宜行った。

Fig.14にHSS工具の折損時までの穴あけ個数を示す。焼結材は、送り0.05、0.09mm/revの際にはそれぞれ31、16個の穴あけが行えた。含浸材は共に150個の穴あけを行っても折損には至らなかった。送り0.15mm/revでは焼結材は1個目の穴あけ中に折損したが、含浸材は13個の穴あけが行えた。含浸材の送り0.09mm/revでさらに連続して穴あけを行うと、300個に達しても折損には至らなかった。つまり、工具寿命は焼結材の20倍に延長したことになる。

Fig.15に送り0.09mm/revでの加工後のドリルの逃げ面の写真を示す。焼結材は16個の穴あけで切れ刃が欠損していることが確認できる。含浸材は300個の

穴あけ後も切れ刃は摩耗しているが、摩耗幅はあまり進展していないことがわかる。つまり、さらにこれ以上の数の穴あけが行えることが推定できる。

Fig.16にTiN工具の折損時までの穴あけ個数を示す。焼結材は送り0.05mm/revでは71個で折損し、0.09mm/revの際には150個の穴あけを行っても折損には至らなかった。含浸材では共に150個の穴あけを行っても折損には至らなかった。送り0.15mm/revでは焼結材、含浸材共に穴あけ個数1個で折損に至った。TiN工具では焼結材でも寿命が大幅に延長し、

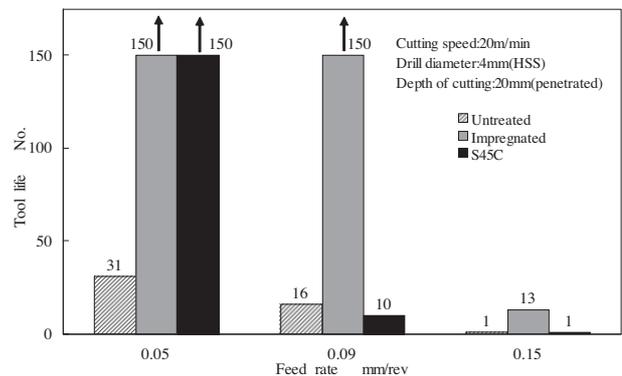
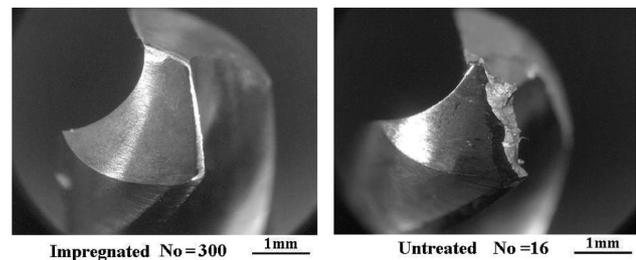


Fig.14 influence of resin impregnation on drilling tool life(HSS)



V:20m/min f:0.09mm/rev phi:4mm
Fig.15 Photograph of drill edge after cutting (HSS)

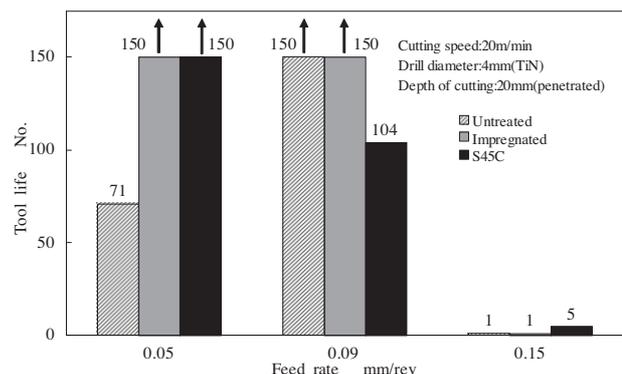


Fig.16 Influence of resin impregnation on drilling tool life(TiN)

含浸材もHSS工具の際と同様に150個の穴あけが行えたが、Fig.17に示すように、ドリル溝に切りくずが詰まり圧縮され排出が困難となり加工が行えなくなる現象が発生した。場合によっては折損に至るといったこともあった。これは、HSS工具の際には発生しなかった現象であるが原因は検討しきれず、今後の課題である。

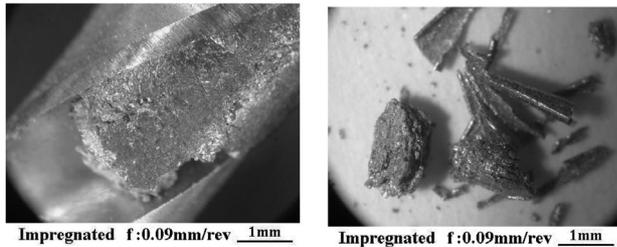


Fig.17 Photograph of drill groove which is filled with chip, and blocked chip (TiN)

5. 結 言

穴あけ加工における樹脂含浸の影響を調べるため、切削条件の変化、切削油を使用、旋削加工での検証実験、工具寿命の測定を行った。これらの実験により、以下のことが結論として得られた。

- (1) 穴あけ加工においても旋削加工と同様に、樹脂含浸により切削抵抗は減少した。これは旋削加工と同様、切りくず生成形態が脆性的な挙動を示し、切りくずが薄くなったためである。
- (2) 広範な穴あけ加工条件でも、樹脂含浸による切削抵抗の減少率に変化はなく、樹脂含浸の効果がある。
- (3) 樹脂含浸による切削抵抗の減少は、切削油の潤滑による減少より大きいことがわかった。
- (4) 穴あけ加工では、含浸材の仕上げ面粗さが焼結材に比べて良好であった。これは、焼結材ではドリル加工の条件では付着物が発生し、粗さが増大するためである。
- (5) 穴あけ加工でも樹脂含浸により工具寿命が延長し、適切な条件では20倍以上に延長できる。

謝 辞

本研究の実験遂行に協力した電子機械工学科卒業研究生岩本佳記氏（現：日信電子サービス（株））、野間慶彦氏（現：三浦工業（株））に感謝する。

本実験の被削材は、日立粉末冶金（株）の提供を受けた。記して深謝する。

参考文献

- 1) 日立粉末冶金ホームページ
<http://www.hitachi-pm.co.jp/index.html>
- 2) 鳴瀧則彦, 村越昭男: 焼結鋼の被削性, 精密機械, 47, 12 (1981) 1516.
- 3) 山口勝美, 中本剛, 水野哲哉, 大道重樹: 非金属物質添加快削焼結材の開発研究 (第1報, 純鉄粉焼結材), 日本機械学会論文集 (C編), 53, 485 (昭62-1)
- 4) K.OISHI and T.YASUDA: "MACHINABILITY OF RESIN IMPREGNATED SINTERED IRON", MATADOR CONFERENCE, 31, July 1997
- 5) 仙田卓司, 豊田真之: 2004年度卒業論文 "焼結金属の被削性改善"
- 6) 山内優暢, 岡幹也: 2006年度卒業論文 "焼結金属の被削性" (2006)
- 7) 中山一雄, 上原邦雄, 新版機械加工, 朝倉書店
- 8) 小川誠: "ねじれ刃ドリルに関する研究" (学位論文), (1990)

