

焼結鋼の旋削加工における工具刃先温度と仕上げ面粗さ

田中隆太郎*1, 西本秀人*2, 田中大輔*3, 古本達明*4, 細川 晃*4, 上田隆司*4

Tool edge temperature and surface roughness in turning of sintered steel

Ryutaro TANAKA, Hideto NISHIMOTO, Daisuke TANAKA,
Tatsuaki FURUMOTO, Akira HOSOKAWA and Takashi UEDA

本研究では、焼結鋼の旋削加工における工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さの関係を調査した。焼結鋼と比較材料である炭素鋼を乾式と湿式条件下で加工を行い、CBN 工具とセラミック工具の工具刃先逃げ面温度を光ファイバ型 2 色温度計で測定した。乾式切削での CBN 工具の工具刃先逃げ面温度は炭素鋼より硬度が低い焼結鋼で 50-120°C 程度高くなった。また、熱伝導率が高い工具や水溶性クーラントを用いると工具逃げ面刃先温度の上昇を抑制できた。クーラントによる工具刃先逃げ面温度の抑制効果は、熱伝導率が大きい工具ほど顕著である。工具の種類によらず工具刃先逃げ面温度が上昇すると粗さが減少した。また、工具刃先逃げ面温度が同等であれば、乾式より湿式で切削した方が良好な仕上げ面が得られた。

Key Words : turning, CBN, sintered steel, carbon steel, tool flank temperature, cutting fluid, surface roughness

1. 緒言

粉末冶金法は、製品の精度も比較的高く歩留まりにも優れるため大量生産に適しており、多くの種類の焼結部品が製造されている。しかし、その製法の特性から、材料中への気孔の残留は避けられない。一般に焼結体の機械的特性はその密度が高いほど優れるとされているが、意図的に任意の割合の気孔を残留させ含油処理により潤滑機能を付与するなど機能的材料としての活用も行われている。このような利点を持っていることから、従来は溶製鋼を機械加工して製造されていた部品が焼結材料部品に置き換えられることが増えてきた。一般機械の構成部品として用いられている焼結材料の大部分は鉄系焼結材料である。以前は、焼結部品は焼結により最終形状に成形されてきたが、焼結材料の用途が次第に拡大するにともない部品が複雑化し、寸法精度への要求が厳しくなり 2 次加工として切削加工をおこなう必要が生じてきた。

焼結鋼の切削加工に関してすでに多くの研究が行なわれている。焼結鋼は内部に空孔を持ち、熱伝導率も普通炭素鋼などに比べると低いいため溶製材と比べ被削性が劣る

とされている。田中らは、低速で乾式切削するとむしれ型切りくずが発生し仕上げ面品位は低いが、含油した状態で切削する良好な仕上げ面が得られること¹⁾、被削材中の銅、炭素の含有量が大きいほど仕上げ面が良好であること²⁾を報告している。臼杵らは、焼き入れした状態でのドリル加工では焼結材が溶製材より被削性が優れていることを明らかにしている³⁾。最適な工具材種の検討として、鳴瀧らが、焼結鋼の基礎的な切削特性を調査し、超硬、サーメット、セラミック工具と比べると CBN 工具の工具摩耗が小さく焼結鋼の加工に適していることを明らかにしている⁴⁾。また和田らは、CBN 工具中の CBN 含有率の影響について調べ、CBN 含有率が高いほど工具摩耗の進行が遅いことを明らかにした⁵⁾。

しかしながら、2 次加工として切削加工をおこなう場合、工具摩耗特性に加えて仕上げ面品位に関する知見も重要である。焼結鋼の仕上げ面品位については、新谷らがバイングレス c-BN 工具を用いた旋削加工において純鉄を主成分とした焼結材料を負のすくい角を持つ工具で切削すると仕上げ面にむしれが発生する⁶⁾と報告している。このむしれが発生すると、仕上げ面粗さが理論粗さよりはるかに大きくなることもある。したがって、加工面のむしれの抑制は製品の品質の向上のためには重要な課題である。また、切削加工面の仕上げ面粗さは、切削温度に大きく依存することは周知の事実であるが、CBN 工具と焼結鋼について切削温度と仕上げ面品位との関係を詳しく検討した研究は見当たらない。

そこで本研究では、焼結鋼 SMF4040 の旋削加工において切削中の工具刃先逃げ面温度を光ファイバ型 2 色温度

*1 広島大学大学院工学研究院: 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1
Hiroshima University

*2 金沢大学大学院自然科学研究科: 〒920-1192 石川県金沢市角間町 (現三菱電機株式会社名古屋製作所)
Kanazawa University

*3 金沢大学大学院自然科学研究科
Kanazawa University

*4 金沢大学 理工研究域 機械工学系: 〒920-1192 石川県金沢市角間町
Kanazawa University

(学会受付日: 2012 年 6 月 22 日)

表1 切削条件

切削工具	すくい角 : 0° 逃げ角 : 7° ネガランド : 15° × 0.125mm ノーズ半径 : 0.8mm
被削材	SMF4040 (190HV) S45C (250HV)
切削速度 V	100 - 400 m/min
切り込み a	0.2 mm
送り f	0.1 mm/rev
潤滑条件	Dry&Wet
エア圧力	0.3 MPa
切削油	エマルジョン A1-1 (30 倍希釈)
流量	6.0 l/min

表2 切削工具特性

工具特性	CBN1	CBN2	セラミック
熱伝導率 (W/m·K)	105	52.5	25
結合剤	C	TiN	

o

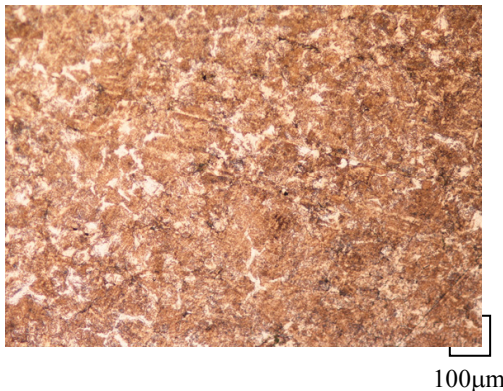


図1 焼結鋼 SMF4040 の組織写真

計⁷⁾⁸⁾により測定し、仕上げ面粗さとの関係について調査した。また、焼結鋼の加工特性を明確にするため比較の対象として機械構造用炭素鋼 S45C も用いた。さらに、切削油剤が工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さへおよぼす影響についても調べた。

2. 実験方法

表1に切削条件を示す。被削材として焼結鋼SMF4040を用いた。また、焼結鋼の加工特性を明確にするため、比較の対象として機械構造用炭素鋼S45Cを用いた。SMF4040は焼結材料の中では比較的密度が高い (>6.6g/cm³) Fe-C-Cu系の焼結金属である。切削速度100~400m/minと変化させ、切込み0.2mmと送り0.1mm/revは一定とした。

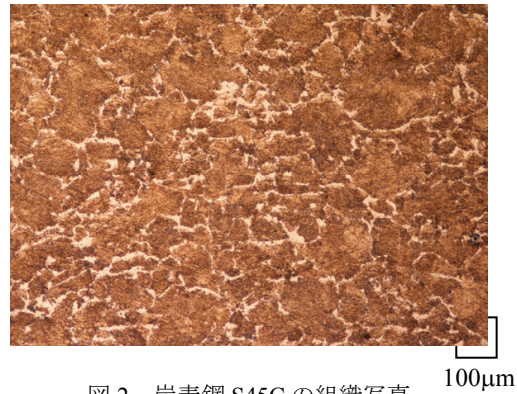


図2 炭素鋼 S45C の組織写真

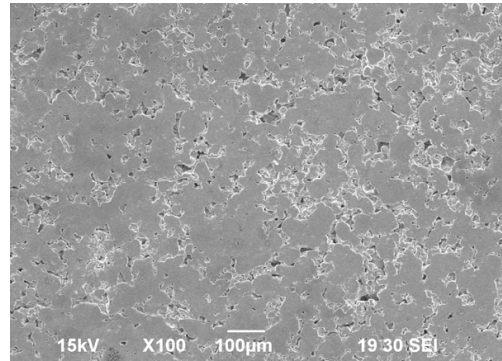


図3 焼結鋼 SMF4040 表面の SEM 像

表2に使用した切削工具の特性を示す。切削工具には CBN1 (c-BN含有率85-95vol%, Coバインダ), CBN2 (c-BN含有率50-60vol%, TiNバインダ)およびセラミック工具(炭化チタン-アルミナ系)を用いた。刃先には15° × 0.125mmのネガランドが設けてある。

図1にSMF4040, 図2にS45Cの組織写真をそれぞれ示す。試料はバフ研磨を行なったのち、ナイトル溶液にて腐食している。SMF4040はフェライト-パーライト組織でS45Cの組織と似ている。その硬さは190HVでS45C (250HV) と比べるとやや低い。また、図3に示すようにSMF4040は数十µm程度の空孔を内包している。

図4に実験装置の概略図を示す。旋削加工を想定し、マシニングセンタ(松浦機械製作所, MC-600V)のテーブルに固定された中空丸棒形状の被削材内面をボーリングバイトに装着した工具によって連続切削している。被削材には外周面と内周面の間にφ1.15mmの小孔が設けられており、加工中に工具刃先がこの穴を通過する際に、刃先逃げ面から放射される赤外線が光ファイバにより受光され、小型InAs/InSb2色温度計⁸⁾に伝送される。

この温度計は感度波長域が異なる2種類の光電変換素子を備えており、この2種類の素子からの出力電圧の比と図5に示す光ファイバ型2色温度計の出力校正曲線から測定対象の温度を算出する。また、光ファイバが挿入された小孔を工具刃先が通過する瞬間を加速度ピックアップにより検出した。湿式切削では、エマルジョンタイプのクーラント(新日本石油, ユニソルブルEM-S)を被削材上部から15本のノズルから6.0 l/minで供給した。このクーラン

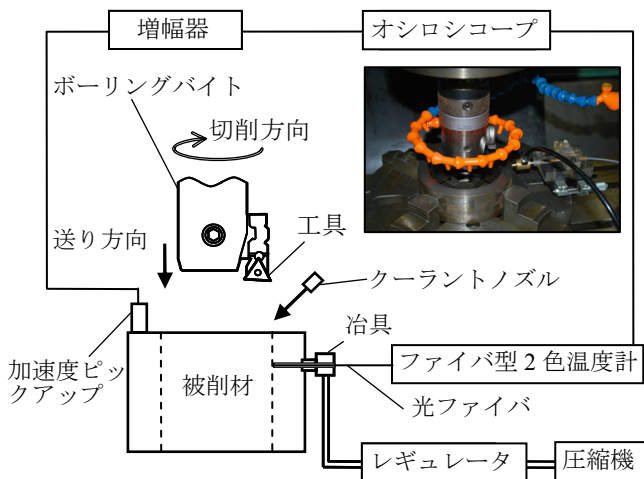


図4 実験装置概略図

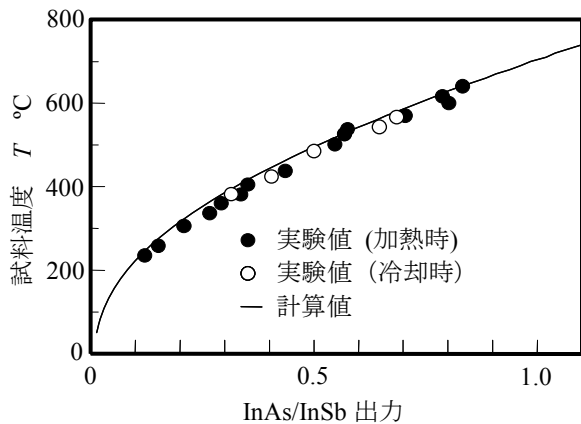


図5 InAs/InSb 温度校正曲線

トが光ファイバ端面に付着すると温度測定ができないため、ジグを介して0.3MPaのエアを光ファイバが挿入された小孔へ供給しながら切削をおこなった⁹⁾。

3. 実験結果

3.1 切削速度が工具刃先逃げ面温度におよぼす影響

図6に焼結鋼SMF4040を種々の工具で切削したときの切削速度と工具刃先逃げ面温度の関係を示す。使用した工具の熱伝導率の大きさは、CBN1>CBN2>セラミックである。乾式と湿式で工具刃先逃げ面温度を測定した。切削速度の上昇にともない、工具刃先逃げ面温度が上昇することがわかる。また、熱伝導率が高い工具ほど低い工具刃先逃げ面温度を示した。また、クーラント供給による刃先逃げ面温度の低減効果は熱伝導率が高い工具ほど顕著であることがわかる。たとえば、熱伝導率が小さいセラミック工具では50~70°C程度であるが、熱伝導率が高いCBN1工具では120~150°C程度の工具刃先逃げ面温度の低下が認められる。

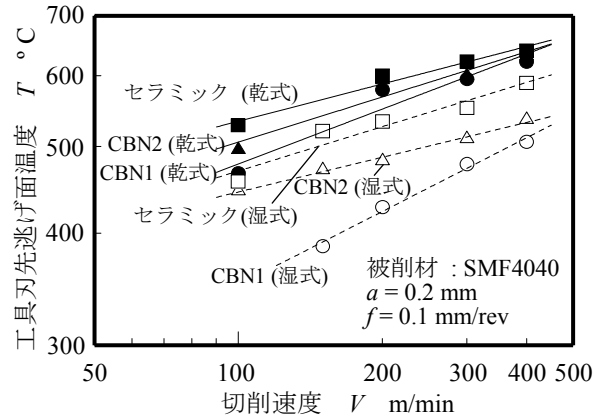


図6 焼結鋼 SMF4040 切削時の工具刃先逃げ面温度

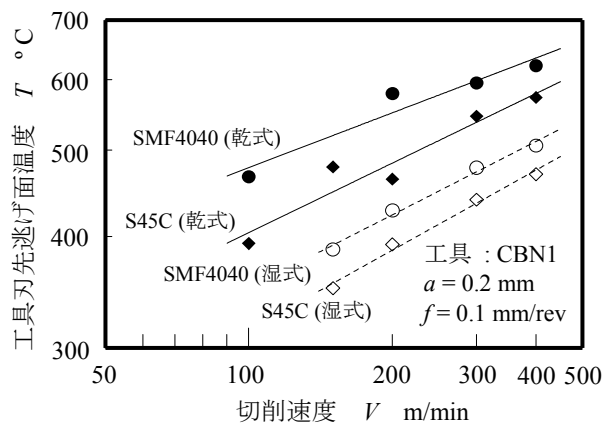
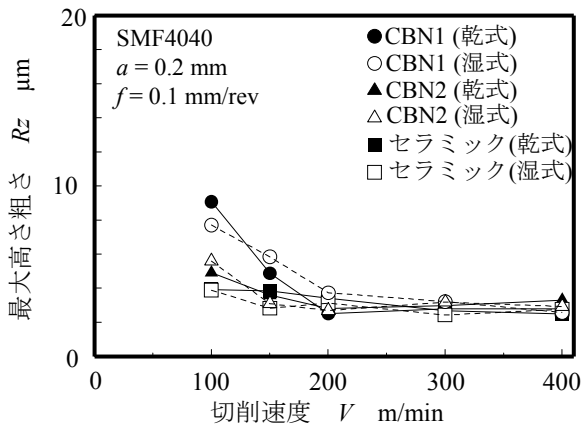


図7 焼結鋼 SMF4040 および炭素鋼 S45C 切削時の工具刃先逃げ面温度

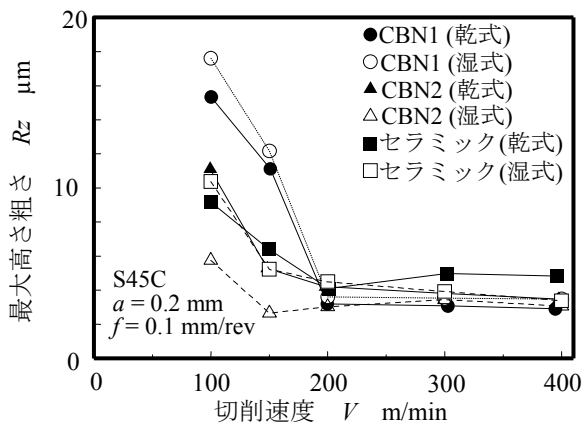
図7にCBN工具でSMF4040およびS45Cを切削したときの切削速度と工具刃先逃げ面温度の関係を示す。乾式および湿式のいずれの条件においてもSMF4040を切削したときの工具刃先逃げ面温度がS45Cを切削したときより高いことがわかる。SMF4040の硬度はS45Cよりも低いにもかかわらず乾式切削時の刃先逃げ面温度は50~120°C程度高く、この傾向は鳴瀧らの実験結果と一致し、SMF4040の熱伝導率がS45Cよりも低く切削熱が蓄積しやすいことが一因であると考えられている⁴⁾。S45C切削時のクーラント供給による工具刃先逃げ面温度の低減効果は70~130°CとSMF4040切削時よりもやや小さい。

3.2 切削速度が仕上げ面粗さにおよぼす影響

図8に種々の工具で切削したときの切削速度と仕上げ面における最大高さ粗さの関係を示す。なお、ボーリングヘッドによるS45Cの乾式切削では連続型の切りくずがバイトに絡みつき評価が難しかったため、汎用旋盤(オークマLS-540)による外周旋削で評価を行った。工具形状と送り速度から計算される理論粗さは1.56 μ mである。被削材をSMF4040としてCBN1およびCBN2を用いて乾式切削し

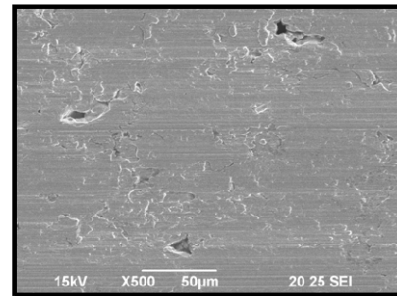


(a) SMF4040

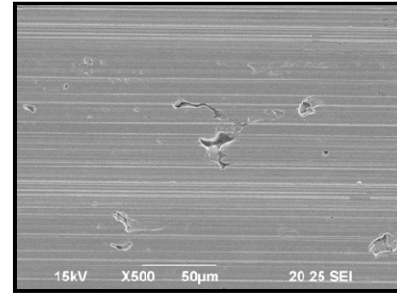


(b) S45C

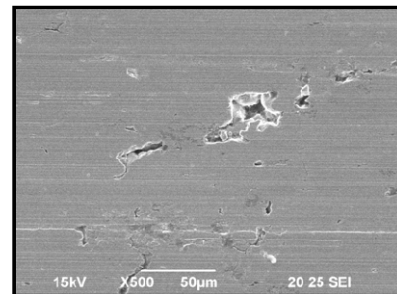
図8 切削速度と仕上げ面粗さの関係



(a) CBN1



(b) CBN2



(c) セラミック

($V = 150\text{m/min}$, $a = 0.2\text{mm}$, $f = 0.1\text{mm/rev}$, Dry)

図9 焼結鋼 SMF4040 の加工面の SEM 画像

たとき、切削速度の増加とともに最大高さ粗さは減少し、高速域では一定となった。一方、セラミック工具では、切削速度100m/minにおいても最大高さ粗さは3.94μmと非常に小さい値で、切削速度にかかわらずほぼ一定の粗さを示した。また、乾式と湿式で仕上げ面粗さに大きな差は見られない。

被削材をS45CとしたときもSMF4040とほぼ同様の傾向を示している。図9にSMF4040を切削速度150m/minで乾式切削したときの被削材表面のSEM像を示す。熱伝導率の高いCBN1を用いて切削したとき、被削材表面に小さいむしれが観察される。このむしれは最大高さ粗さ5μm以上の場合に多く観察された。CBN2およびセラミック工具を用いて切削したときの被削材表面には、このようなむしれは発生せず、平滑な面が得られていることがわかる。また、被削材のもつ空孔は押しつぶされずに残留していることがわかる。

3.3 工具刃先逃げ面温度が仕上げ面粗さにおよぼす影響

CBN工具は焼きならしたS45Cの切削には適していないため¹⁰⁾、実用では両被削材を同じ切削条件で加工することはないが、同じ条件で比較するとS45CよりSMF4040を

切削したときの方が良好な仕上げ面が得られることがわかり、CBN工具で低速で切削したときに仕上げ面粗さが大きくなるのは焼結鋼に特有の現象ではないことがわかる。ここで、同じ切削速度において乾式よりも湿式の仕上げ面粗さが大きくなる場合が認められている。一般的に鉄系材料を切削での仕上げ面粗さは、切削速度を高くするか、切削油剤を供給すると小さくなることが知られている。ただし、切削油剤の供給は、切削温度を低下させ、切削速度を低下させることと同等の影響も考えられる。そこで、工具刃先逃げ面温度が同じになる条件で、乾式と湿式における仕上げ面粗さの比較を行った。

図10に工具刃先逃げ面温度と最大高さ粗さの関係を示す。SMF4040の切削において、工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さに相関関係が認められ、工具刃先逃げ面温度の上昇にともない最大高さ粗さが減少する。また、工具刃先逃げ面温度が500°C以下のとき、乾式と比べ湿式のときの粗さが小さくなる。乾式では、工具刃先逃げ面温度530°C付近まで最大高さ粗さが減少傾向を示し、約530°C以上になるとほぼ一定となる。これは工具刃先逃げ面温度が被削材の再結晶温度付近まで上昇したために刃先への凝着が抑制され

たと考えられる。また、すくい面は逃げ面より温度が高くなるためこの温度以上に達していると推察できる。一方、湿式では、工具刃先温度470°C付近から最大高さ粗さ3 μm 程度の良好な仕上げ面が得られている。これはクーラントの供給により、工具刃先逃げ面温度が再結晶温度まで上昇していなくても凝着が抑えられたと考えられる。

S45C 切削時も SMF4040 切削時と同様に工具刃先逃げ面温度の上昇にともない最大高さ粗さが減少することがわかる。また、クーラント供給による最大高さ粗さの減少も確認できた。

焼結鋼切削時において工具刃先温度の上昇は仕上げ面粗さを減少させる、工具摩耗の主な要因にもなりうる考えると、工具刃先逃げ面温度の上昇をできる限り抑えて加工することが望ましい。そのためには、熱伝導率の高い工具を用いることが必要になる。しかし、切削速度が再結晶温度以下になれば刃先逃げ面およびすくい面への凝着が発生しやすくなり、仕上げ面にむしれが発生して仕上げ面粗さが増大するだけでなく、凝着に起因する工具摩耗の進行速度が増加する原因にもなりうる。SMF4040を乾式切削したときの工具刃先逃げ面温度は、熱伝導率の高いCBN1工具を用いれば切削速度400m/minでも620°C程度に抑えることができ、かつ良好な仕上げ面を得られたことを考慮すれば、この速度での切削も十分可能であると思われる。クーラントを供給すれば、仕上げ面を維持しつつ、工具刃先逃げ面温度を抑制できることがわかった。

4. 結言

焼結鋼を乾式および湿式にて旋削加工して工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さの測定および仕上げ面の表面観察をおこない、工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さについて以下の結論を得た。

- (1) 炭素鋼切削時と比べ、焼結鋼切削時の工具刃先逃げ面温度は50~120°C高い。
- (2) 工具刃先逃げ面温度は切削速度の上昇にともない増加する。熱伝導率の良い工具やクーラントを用いることで工具刃先逃げ面温度の上昇を抑えることができる。
- (3) 熱伝導率が大きい工具を用いて低速で切削すると、むしれが発生し仕上げ面粗さが大きくなる。むしれは最大高さ粗さが5 μm 以上の場合に多く観察された。
- (4) 工具刃先逃げ面温度が同じであれば乾式より湿式のときの仕上げ面粗さが小さくなる。クーラントを用いると工具刃先逃げ面温度が再結晶温度より低くても良好な仕上げ面を得ることができる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援を賜った住友電工ハードメタルに記して謝意を表する。

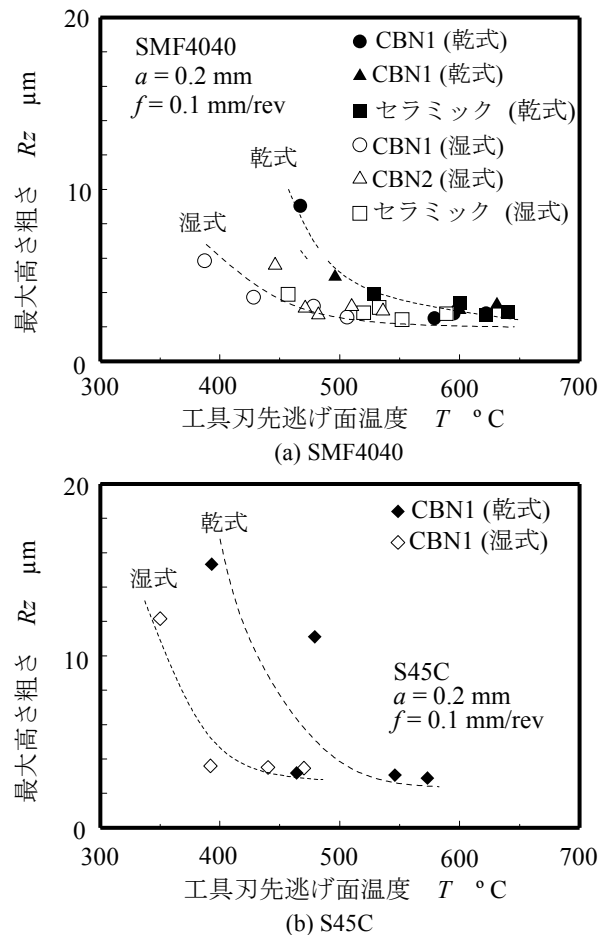


図10 工具刃先逃げ面温度と仕上げ面粗さの関係

5. 参考文献

- 1) Y. Tanaka, H. Tsuwa, G. Omori: Study on Cutting of Sintered Iron Parts (1st Report), J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 31, 1 (1964) 100.
- 2) Y. Tanaka, H. Tsuwa, G. Omori: Study on Cutting of Sintered Iron Parts (2nd Report) -Effect of Additional Composition on Surface Finish-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 32, 10 (1966) 703.
- 3) H. Usuki, Y. Yamane, N. Narutaki: Drilling of Hardened Sintered Steel (1st Report) -Machining Properties in Drilling of Hardened Sintered Steel-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 71, 7 (2005) 931.
- 4) N. Narutaki, A. Murakoshi: Machinability of Sintered Steels, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 47, 12 (1981) 1516.
- 5) T. Wada, T. Toihara: Cutting Performance of CBN Tools in Cutting of Sintered Steel, J. Jpn. Soc. Powder Powder metal., 49, 9 (2002) 773.
- 6) K. Shintani, H. Ushiro, Y. Takanami, A. Ikegaya: A study of High Speed Machining of Soft Magnetic Material by Binder-less PcBN Tool, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 76, 7 (2010) 809.
- 7) T. Ueda, M. Sato, T. Sugita, K. Nakayama: Thermal Behavior of Cutting Grain Grinding, CIRP Annals, 44, 1 (1995) 325.
- 8) 細川 晃, 岡田 将人, 上田 隆司, “エンドミル加工における工具温度モニタリング用小型2色温度計の開発”, 日本設備管理学会誌, 18, 1 (2006) 42.
- 9) H. Nishimoto, R. Tanaka, A. Hosokawa, T. Ueda, T. Furumoto: Development of Tool Edge Temperature Measurement Method in Wet Cutting -Application for CBN and poly crystalline diamond tools-, Proc. 6th Int. Conf. on LEM21 (2011) CD-ROM.
- 10) R. Tanaka, Y. Yamane, K. Sekiya, N. Narutaki, T. Shiraga: Machinability of BN Added Steels (4th report) -Wear Characteristics of Coated Carbide Tools and Ceramic Tools in Turning-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 72, 10 (2006) 1227.