

高硬度難加工材の旋削加工技術の確立（第二報）*

堀田 昌宏**，若槻 正明**，和合 健**，
飯村 崇**，多田 三郎**

高硬度難加工材として焼入鋼を取り上げ、切削速度、送り速度、冷却方法といった切削条件が表面粗さ、残留応力という工作物の製品品位に及ぼす影響を調べた。その結果、切削（円周）方向において、送りが残留応力変化に影響を与えることが判明した。

キーワード：焼入鋼，旋削，送り，残留応力

Study on Turning Technique for Difficult-to-machine Materials of High Hardness

HOTTA Masahiro, WAKATUKI Masaaki, WAGO Takeshi,
IIMURA Takashi and TADA Saburo

We took up hardened steel as Difficult-to-machine Materials of High hardness, and we examined the effect of cutting conditions, such as cutting speed, feed rate and cooling, on the dignity of roughness and residual stress of the work. As a result, the feed rate affect the amount of residual stress, as for a cutting direction.

key words : hardened steel, turning, feed rate, residual stress

1 緒 言

切削加工でも、製品品位（寸法精度、面粗さ、残留応力）に及ぼす加工の影響は大きい。特に残留応力の影響は、製品の機械的性質を劣化させたり、工作物の変形をもたらす、その結果、幾何学的精度を満たさなくなったりする。そのため、この残留応力を発生させない、また、発生させても小さくする方法として、笹原ら¹⁾²⁾は切削工程毎の切削厚さを変えることにより残留応力を制御できる可能性を示している。

本報は、前年度³⁾に引き続き、上述をふまえ、切り込み配分を変えることで工作物の製品品位（表面の粗さ及び残留応力）がどのように変化するかについて、さらに切削条件を変化させながら焼入鋼を切削し、検証した。

2 実験方法

切削は外周旋削とし、仕上がり寸法を任意の被削材径（40mm）- 2mmと設定し、仕上げしるを2mmに固定した。

また、1回で仕上げることは無いこと、1回目の切り込みが総切り込み量の半分以下とはならないと仮定し、また加工能率も考慮し、最高3回の切り込みとした。なお、総切り込み量1.0mmに対する0.1mm刻みでの切り込み配分は3通り組み合わせとなる。

一方、切削時には1回目切り込み / 2回目切り込み / 3回目切り込みと各仕上げ面の表面を段差をつけて残しておき、触針式表面粗さ測定機で表面粗さの測定を行った。なお切り込みの設定は、図1に示すようにレーザ変位計で確認した。

工具は表1に示すようにSNGN120408型アルミナ系セラミックスローアウェイチップ（以下セラミックスと称す）工具を用いた。表2、表3に本実験の使用機器、被削材の化学成分を示す。なお、今回簡単に冷風を得る手段として、市販の超低温空気発生器（以下コルダールと称す）を用い、工作機械に取り付けた。そして、コンプレッサーからコルダールに圧縮空気を供給し、吐出口から

* 高硬度難加工金属材料の高精度加工技術の開発（東北ブロック広域共同研究推進事業）

** 電子機械部

冷風が吹き出していることを確認後、工具刃先付近の温度を測定した結果、約-10℃を観測した。また、被削材として、熱処理済のSKD11(850×3h-1040×2h-0.5h油冷, 180×1.5h空冷, HRC60)を使用した。

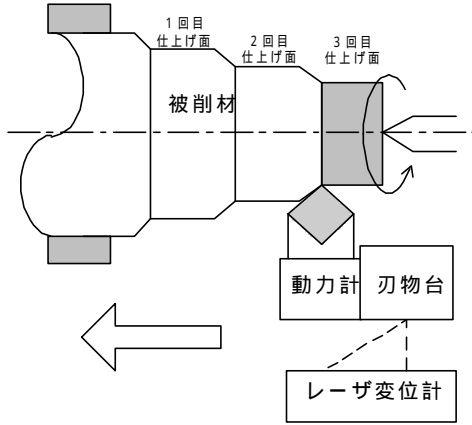


図1 実験模式図

表1 使用工具

物理的・機械的特性	密度 (g/cm ³)	硬さ (HRA)	抗折力 (GPa)	破壊靱性値 K _{IC} (MPa m ^{1/2})	ヤング率 (GPa)
材種	4.3	94	0.9	5.7	400
刃先形状	セラミックス -6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8mm (メーカーカタログより抜粋)				

表2 使用機器の仕様

・工作機械	汎用旋盤 昌運カズヌーブ(無段変速)
冷風発生装置	超低温空気発生器 サンワエンタープライズ V-175-40S
・表面粗さ測定	触針式表面粗さ測定機 テラホブソン Form Talysurf S5
・応力測定	微小部X線応力測定装置 理学電機
・切削力測定	圧電式3成分動力計 キスラー 9257B マルチチャンネルチャージアンブ キスラー 5019A 広帯域記録8mmデータレコーダ ティアック RX-808WB
切削温度測定	赤外線放射温度計 NEC三栄 TH3 104

表3 被削材の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
SKD11	1.46	0.26	0.37	0.25	0.01	0.07	0.15	12.83	0.82	0.23

なお、本文中の記号や符号は下記のとおりである。

- V: 切削速度 (m/min)
- f: 送り (mm/rev)
- a: 切り込み (mm)
- t: 切削時間 (min)
- R_{th}: 理論粗さ (μm)
- R_y: 実際の仕上げ面粗さ (μm)
- R: ノーズ半径 (mm)
- α: 前切刃角 (deg)

3 実験結果及び考察

3-1 工作物の表面粗さ

切削条件変化による仕上げ面の粗さについて検証するため、表4の切削条件で実験を行った。

表4 切削条件1

切り込み配分(単位mm)			切削条件	
No.	1回目	2回目	3回目	
	0.5	0.4	0.1	V 50,100,120m/min
				f 0.05,0.1,0.2mm/rev
	0.5	0.3	0.2	a 左記切り込み配分による
	0.6	0.4		冷却方法 無, 冷風
	0.7	0.3		被削材 SKD11(HRC60)
				工具 アルミナ系セラミックス

図2に表4による切削最終仕上げ面の粗さを示す。

この時の最終仕上げ面の理論粗さR_{th}は、送りfに対応して約0.4, 1.6, 6.3μmとなる。

$$\text{理論粗さ } R_{th} = f^2 / 8R \times 1000 \quad (\mu\text{m})$$

(ただし f < 2Rsin α である場合)

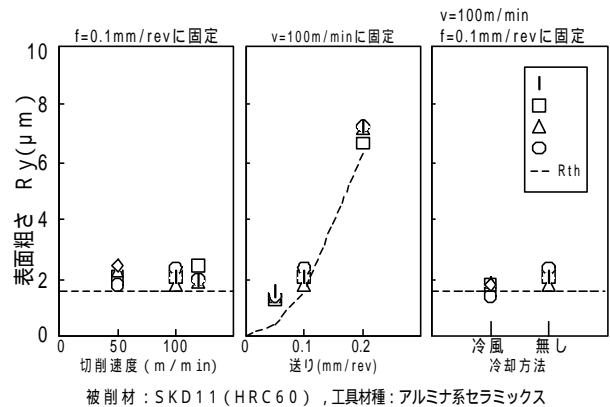

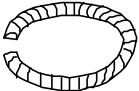



図2 最終仕上げ面の表面粗さ





実際の仕上げ面粗さは、理論粗さよりも外乱(構成刃先, 工具, 被削材の振動, 工具摩耗等)の影響により大きくなっており、特に送りが0.05mm/revの場合は4倍近い値となる。通常、切削速度が低速域の場合、構成刃先の影響で仕上げ面粗さが大きくなるが、今回の切削条件ではそのようなことは見られない。原因としては、切削

温度が高く、また被削材の硬度が高いために構成刃先が生成しない⁴⁾ことが考えられる。冷却の有無では、冷風切削の方が冷風無しの場合より、わずかではあるが表面粗さが小さく、各仕上げ面における表面粗さのばらつきが小さくなっている。一方、表4の切削条件で被削材SKD11の切り屑の形態は、主として図3の〔4〕S3S形及び〔6〕形のせん断形切り屑であり、送りを0.2mm/revにそして1回の切り込みを0.5mm以上にすると、図3の〔1〕形のせん断形切り屑が排出される。⁵⁾このようなせん断形切り屑は、四・六黄銅のような比較のもろい材料を切削した際に見られ、この理由は大規模なせん断破壊がocこり、成長・伝播をくり返したために生成すると言われており、今回は被削材の硬度が高いため同じような現象が起こったと推察される。

種類	〔1〕形	〔4〕S3S形	〔6〕形
形状			
説明	粉状又は片状	1巻き程度に折れたもの（C字型）	形が不規則に変動する不連続切り屑

(精機学会切削性専門委員会切り屑処理小委員会による)

図3 切り屑形状の分類

v=100m/minに固定 f=0.05mm/rev	v=100m/min f=0.1mm/revに固定 冷風無し
	
f=0.2mm/rev	冷風切削
	

切削条件 : a = 0.7mm, 被削材 : SKD11(HRC60),
工具 : アルミ系セラミックス

写真1 セラミックス工具による被削材SKD11における切削加工時の切り屑

写真1に表4の切削条件でかつ切り込み0.7mmで切削した場合の切り屑を示す。切り屑の色はほとんど薄青色又は青色⁶⁾をしており、このことは切削速度、送りを変化させてもあまり切削温度に違いがない⁷⁾ことを示している。また、切り込みが小さいとほとんどの切り屑の色が黄褐色になり、切削温度が低いことを示している。一方、冷風切削の場合、切り屑の色は濃青紫色を示すが、これは外部から強制的に冷却されたためであると考えられる。

今回設定した条件において、冷風無しの場合よりも冷風切削の方が表面粗さが良い結果が得られた。そこで、この理由を追求するため、再度表5の切削条件を設定し、外周旋削を実施した。

表5 切削条件2

切削条件	
V	100m / min
f	0.1mm / rev
a	0.5mm
冷却方法	無, 冷風
被削材	SKD11(HRC60)
工具	アルミ系セラミックス

以下に、この時の工具摩耗状況について記載する。すくい面において、冷風無しの方が冷風切削よりもチャンファー部のところが大きくえぐられていることが観察される。刃先部において、冷風無しの方が冷風切削よりも摩耗幅が大きいことが観察される。横逃げ面において、ノーズR部の先端に近い方に摩耗が存在するが、冷風無しの方が冷風切削よりも摩耗条痕が切れ刃稜に見られた。前逃げ面において、どちらの場合も一定の幅で摩耗しているが、冷風無しの方が摩耗痕が深い。表5の切削条件で切削した場合の工具摩耗状態の1例を写真2に示す。

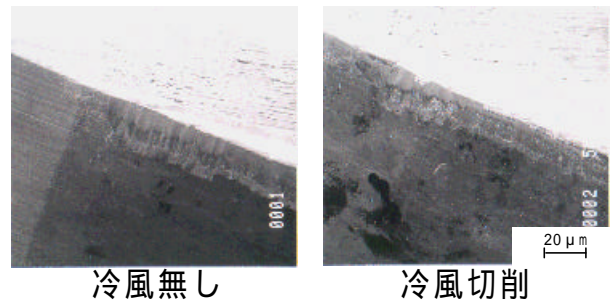


写真2 SKD11における前逃げ面工具摩耗

これらのことから、冷風無しの方が摩耗が早く進行す

と思われる、そのため冷風をかけて切削の方が工具摩耗の進行を抑える可能性があるかと推察される。

3-2 残留応力

切り込み配分及び切削条件(切削速度, 送り, 冷却方法)が被削物の残留応力にどのような影響を及ぼすかを検証するため, 表4の切削条件で実験を行った。なお, 切削面の応力測定は微小部X線応力測定装置を用いて行い, \sin^2 法により応力を求めた⁸⁾。特性X線はCrK線を使用し, 管電圧30kV, 管電流40mA, コリメータの直径を1.0mmとした。

図4に, 切削条件(送り, 冷却方法)を変化させた場合の送り(長手)方向の残留応力変化を示す。ここで, 正の値は引張りの残留応力を, 負の値は圧縮の残留応力を示す。予め表面に引張りの残留応力が存在しても, 1回目にある程度切り込むことにより, 残留応力は圧縮応

力に変わる。また, 2回目, 3回目と切り込んで, 残留応力の変化はあまり見られないが, 冷風無しの場合よりも冷風切削の方が切り込み配分が異なっても応力値のばらつきは小さく, 応力値のばらつきを抑える可能性があることが推察される。

なお, 送り(長手)方向において, 切削速度を変化させた場合でも, 1回目の切り込みで残留応力は圧縮応力に変わる。また, 切削速度や送りを変化させた場合, 若干ではあるが送りを早くした方が1回目に切り込んだ場合の残留応力変化が大きいと思われる。

図5に, 切削条件(送り, 冷却方法)を変化させた場合の切削(円周)方向の残留応力変化を示す。送り方向の残留応力変化と同じように, 予め表面に圧縮または引張りの残留応力のどちらかが存在していても, 1回目の切り込みで残留応力は圧縮応力に変わる。そして, 送りを速くした方が1回目の残留応力変化がより大きいこと

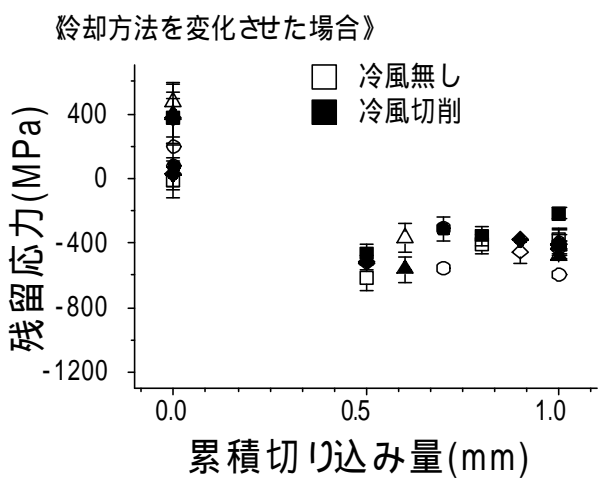
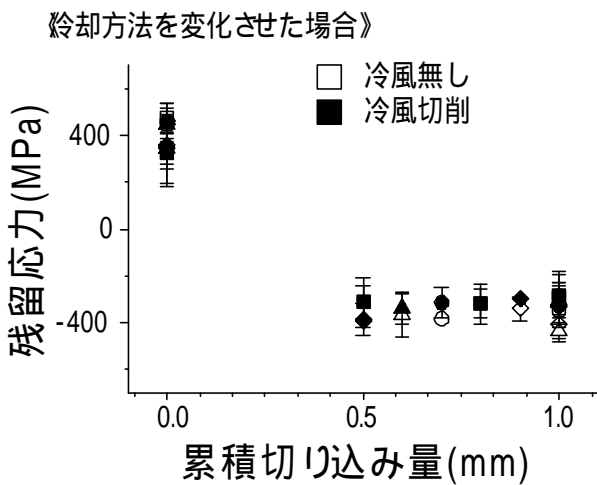
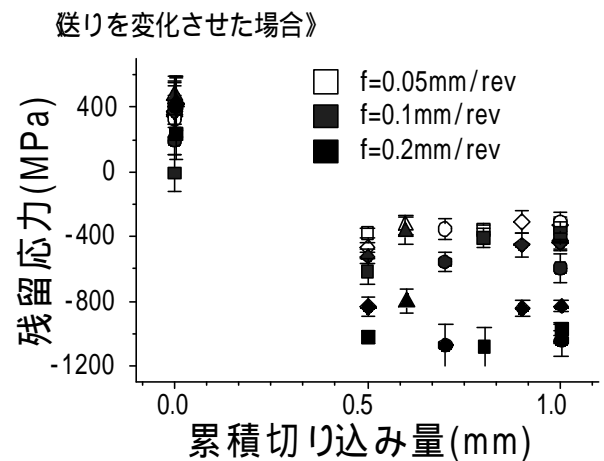
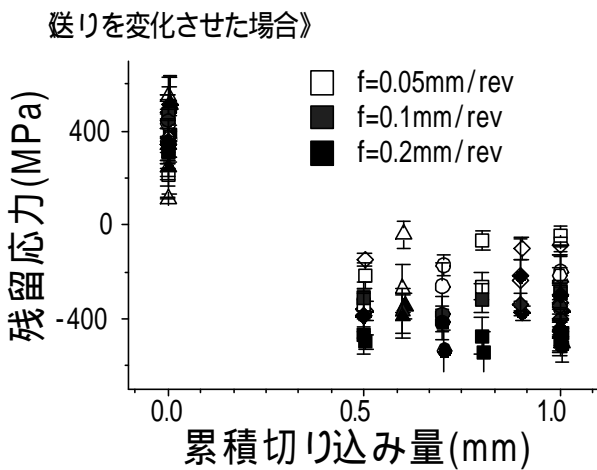


図4 送り方向の残留応力

図5 切削方向の残留応力

切り込み配分
 □ 0.5 0.4 0.1 ◇ 0.5 0.3 0.2 △ 0.6 0.4 ○ 0.7 0.3

切り込み配分
 □ 0.5 0.4 0.1 ◇ 0.5 0.3 0.2 △ 0.6 0.4 ○ 0.7 0.3

がわかる。このことから、送りが残留応力に最も影響することがわかった。また、2回目、3回目と切り込んで、送り方向と同じく残留応力の変化はあまり見られないが、切り込み配分が異なると、冷風供給の有無に関わらず、送り方向に比べて応力値がばらつく。しかし、今回設定した切削条件で、なぜ送りが残留応力変化に最も影響を与えるのか原因が不明なため、さらに表6の条件で再度実験を実施した。

表6 切削条件3

切削条件	
V	50,100,120m / m in
f	0.05,0.1,0.2mm / rev
a	0.5mm
冷却方法	無,冷風
被削材	SKD11(HRC60)
工具	アルミナ系セラミックス

切削抵抗で、切削速度及び冷却方法を変化させた場合、切削抵抗に特に違いはないが、送りを変化させた場合（図6）、送りが速くなるに従い切削抵抗が増加する。また、主分力、送り分力は送りが速くなるに従いある程度線形的に増加するが、背分力で、送りが0.2mm/revの場合、他の送りに比べて増加が大きい。

刃先近傍の平均切削温度で、切削速度を変化させた場合、切削速度を速くすると切削温度は上昇するが、 $v=100\text{m/min}$ 以上になると温度はさほど変わらない。また、送りを変化させた場合（図7）、送りが速くなると切削温度は低下し、特に送りが0.2mm/revの場合は送りが速いためか、切り粉が刃先前方に飛ぶ現象が発生しており、今回設定した切削条件の中では一番刃先付近の平均切削温度が低い結果となった。原因としては、送りが速くなることにより切り屑の発生量も増え、その結果切り屑への熱の流入も増大し、刃先近傍の切削温度が低くなった⁷⁾と考えられる。冷却の有無による切削温度変化では、冷風切削を行った方が冷風無しの場合と比べて約30 くらい低い結果が得られた。

これらのことから、最も残留応力変化が大きい切削条件では、最も切削温度が低く、かつ切削時にかかる力が最も大きい結果が得られた。

以上のことから、今回の設定条件では、切削温度よりも切削抵抗の方が残留応力変化と深い関係があると推察される。一方、若林ら⁹⁾は圧縮残留応力が発生する原因として、切削の際除去されるべき切り屑の一部が表面に押し込まれ、かつ表面上に伸長される現象を挙げている。

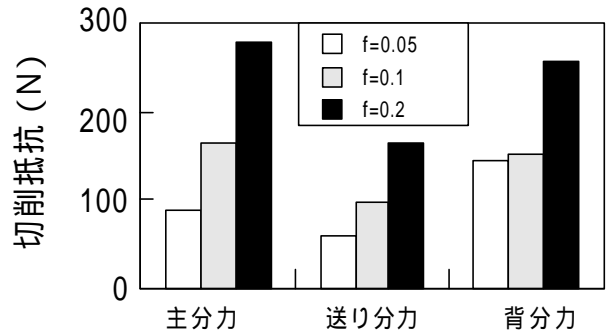


図6 送りを変えた場合の切削抵抗

切削条件： $v=100\text{m/min}$ ， $a=0.5\text{mm}$

工具材種：アルミナ系セラミックス

被削材：SKD11 (HRC60)

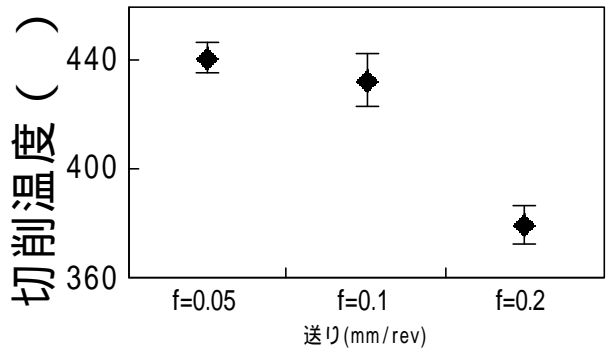


図7 送り速度による刃先近傍の平均切削温度

切削条件： $v=100\text{m/min}$ ， $a=0.5\text{mm}$

工具材種：アルミナ系セラミックス

被削材：SKD11 (HRC60)

残留応力はせん断変形による機械的要因と組織がせん断変形する際に生じる切削熱等による熱的要因とが重畳されて残ると考えられているが、送りが速いほど残留応力変化が大きいのは上述の同じような現象が発生していると推察される。

4 結 言

焼入鋼切削における切り込み配分の変更により、工作物の製品品位（表面の粗さ及び残留応力）がどのように変化するかについて、切削条件を変化させながら検証した結果、以下のことがわかった。

- 1) 冷風無しの場合よりも冷風切削の方が、表面粗さが良い。
- 2) 切削（円周）方向において、送りが残留応力変化に最も影響を与える。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、東北工業技術研究所金属材料部主任研究官高橋利夫氏の貴重なご意見をいただき、厚く御礼申し上げます。

本研究は中小企業庁技術開発研究費補助事業(東北ブロック広域共同研究推進事業)として実施したものです。

文 献

- 1) 笹原, 帯川, 白樫: 切削工程による加工変質層の推移と制御, 精密工学会誌, 61, 1453(1995)
- 2) 笹原, 帯川, 白樫: 加工工程による切削仕上面の残留応力制御, 1997年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集誌, 137(1997)
- 3) 堀田, 若槻, 和合, 飯村, 多田: 高硬度難加工材の旋削加工技術の開発, 岩手工技セ研報4, 7(1997)
- 4) 大石健司: 焼入鋼の仕上げ切削(第1報), 精密工学会誌, 59, 509(1993)
- 5) 杉田, 上田, 稲村: 基礎切削加工学, 共立出版, 98(1992)
- 6) 新井実: 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社, 43(1990)
- 7) 新井実: 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社, 35-42(1990)
- 8) 日本材料学会: 改著 X線応力測定法, 養賢堂, 146
- 9) 若林三記夫, 中山守, 橋本猛, 丸谷哲史: 旋削加工層の高圧縮残留応力の研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991)295-296