

高硬度難加工材の旋削加工技術の確立*

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

cBN工具など高性能な工具材の進歩・普及によって仕上げ加工が研削から切削へと移行する動きが見られ、この動向に対応するための基礎研究を実施した。切り込み配分の変更を積極的に行いながら焼入鋼を旋削加工したところ、送り方向において切削後の残留応力が、材質や切削前の表面状態よりも、切削条件に依存することが判明した。その結果、切削条件により残留応力を制御できる可能性が出てきた。

キーワード：焼入鋼，旋削，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

There is a few motion that is the change from finish grinding to finish cutting by progress and spread of high potential tool(ex. cBN),and we performed basic research for dealing with this trend.when we turn hardened steel with actively changing of cutting distribution,we found that residual stress after cutting depend on cutting conditions than the quality of the material and the surface condition before cutting, as for a feed direction.Hence residual stress seems to be controlled by cutting conditions.

key words : hardened steel, turning, residual stress

1 緒 言

従来、熱処理（焼入れ）を伴う部品加工は切削加工による荒加工終了後、熱処理を行い研削加工や放電加工により仕上げるのが通例である。しかし、cBN工具などの高性能な工具の進歩及び普及により、熱処理を最初に行い、その後、切削による荒加工、仕上げ加工を行う例が増えている。ところが、仕上げ加工を研削から切削に置き換えた場合、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、切削仕上げ面に引張応力が残留する場合、時効割れ、腐食割れ、疲れ強さの低下等の原因となり、また工作物の変形をもたらし、その結果、幾何学的精度を満たさなくなったりする。この残留応力を除去するには、低温焼

きなまし等の熱処理や、ショットピーニング等の機械的方法がある。しかし、上記のような方法が不可能な製品の切削加工では、切り込みや送りを小さくして、加工変質層や残留応力を少なくする方法がとられている。そこで、引張り残留応力を発生しない切削加工法、更には残留応力そのものを制御する指針として、笹原・帯原・白樫ら¹⁾は各切削工程毎に切削厚さの変更を積極的に利用することで、工作物表面の残留応力・ひずみの状態が制御可能であることを提言している。

上述のことをふまえ、切削加工による最終仕上げの場合、一回の切り込みで終了することはあり得ないから、切り込み配分の変更を行うことで工作物の幾何学的精度及び表面の残留応力がどのように変化するかについて、

* 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

焼入鋼を切削し検証した。また工具損耗及び切削抵抗についても、併せて検証を行った。

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 ($\phi 40\text{mm}$, $\phi 100\text{mm}$) -2mmと設定し、仕上げしろを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、また加工能率をも考慮し、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38通りの組み合わせとなる。一方、切削時には被削材表面/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わずかつ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及び段差量の測定を行った。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。また、切り込み方向の分力で工作精度に影響する²⁾背分力及び切削方向の分力である主分力といった切削抵抗も測定した。

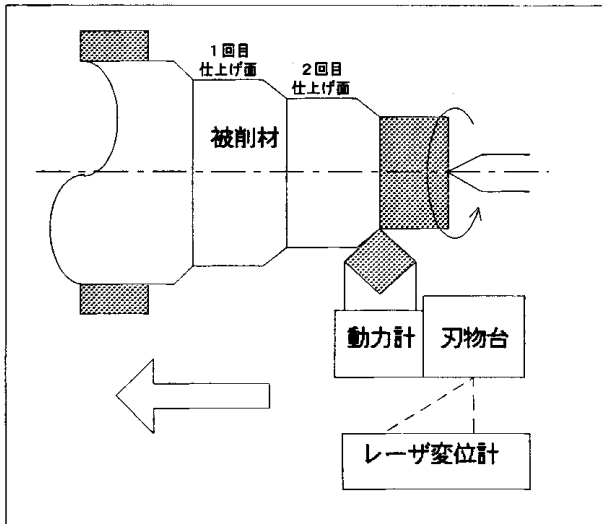


図1 実験模式図

工具は表1に示すように超硬 (K10)、炭化チタン窒化チタン系サーメット (以下サーメットと称す)、アルミナ系セラミックス (Al_2O_3 結晶粒子を微細化したもの、以下セラミックスAと称す) 及び同じくアルミナ系セラミックス (Al_2O_3 に炭化チタンTiCを添加したもの、以下セラミックスBと称す) の4種とcBN (セラミックスバインダを用いてcBN微粒子を焼結させたもの) 工具を用いた。表2、表3に本実験の使用機器、被削材の化学成分及び機械的性質を示す。また、今回被削材として、SKS3、SKH51、2種類の硬さが異なるSKD1

1を使用した。

なお、本文中の記号や符号は下記の通りである。

- 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_{max} : 仕上げ面粗さ (μm)
- R : ノーズ半径 (mm)
- γ : 前切刃角 (deg)

表1 使用工具

物理的・機械的特性	刃先形状				
	密度 (g/cm ³)	硬さ (HRA)	抗折力 (GPa)	破壊靱性値 K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	ヤング率 (GPa)
超硬		92	2.4		620
サーメット		92	1.7		
セラミックスA	4.3	94	0.9	5.7	400
セラミックスB	4.24	94.3	0.8	4.3	370

(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)
・段差及び表面粗さ測定	触針式表面粗さ測定機
・応力測定	テラホフゾン Form Talysulf S5 微小部X線応力測定装置
・切削力測定	3分力切削動力計 佐藤マシナリー AST式旋削工具動力計

表3 被削材の化学成分及び機械的性質

被削材	化学成分(%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
SKD11-A	1.42	0.27	0.47	0.24	0.01	0.07		12.8	0.84	0.23
SKD11-B	1.42	0.27	0.47	0.24	0.01	0.07		12.8	0.84	0.23
SKS3	0.89	0.23	1.15	0.15	0.06	0.07	0.07	0.42	0.1	0.43
SKH51	0.88	0.3	0.26	0.15	0.01	0.06	0.19	4.13	5.73	1.79

被削材	熱処理条件			HRC
	焼き入れ	焼き戻し		
SKD11-A	850°C-180分 50分-油冷	1040°C-120分	600°C 90分 空冷	45
SKD11-B	850°C-180分 30分-油冷	1040°C-120分	180°C 90分 空冷	58
SKS3	830°C 油冷		250°C 90分 空冷	60
SKH51	1210°C 油冷		560°C 空冷	60

(メーカー提供mill sheetより抜粋)

3 実験結果及び考察

3-1 工作物の幾何学的精度

切り込み配分変更による工作物の幾何学的精度変化について検証するため、表4の切削条件で実験を行った。なお、硬度の点から被削材SKD11-Aは焼入鋼と考えにくい、他の被削材と比較するため使用した。

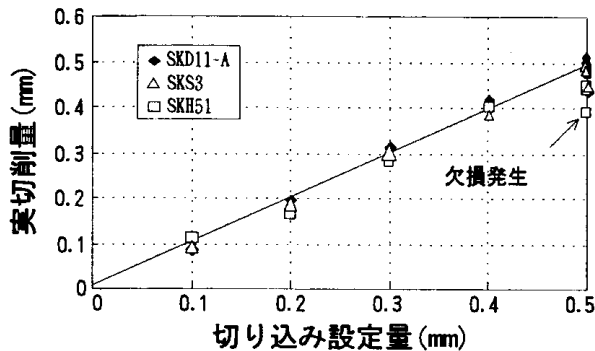
図2は、切り込み設定量に対する実切削量の関係である。SKS3、SKH51において、設定切り込みが0.4mm以内では、実切削量のばらつきの程度がほぼ同じであ

高硬度難加工材の旋削加工技術の確立

表4 切削条件1

No.	切り込み配分(単位:mm)			切削条件
	1回目	2回目	3回目	
①	0.5	0.4	0.1	V 150m/min(乾式) f 0.1mm/rev a 左記切り込み配分による 被削材 SKD11-A, SKS3, SKH51 工具 セラミックスB
②	0.5	0.3	0.2	
③	0.5	0.5		

のに対し、設定切り込み0.5mmではばらつきが大きいが大きい。それに対し、SKD11-Aの場合、表4で設定した切り込みに対する実切削量のばらつきは小さい。これは被削材の硬さの影響が考えられ、硬度の低い方が切り込み設定量と実切削量が一致する傾向にある。



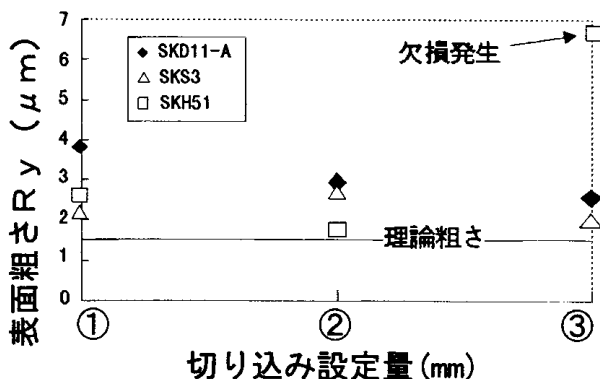
切削条件: V=150(m/min), f=0.1(mm/rev)
工具材種: セラミックスB

図2 切り込み設定量に対する実切削量

図3に表4による切削最終仕上げ面の表面粗さを示す。この時の最終仕上げ面の理論粗さは、下記計算式により計算すると約1.6μmとなる。

$$R_{max} = (f^2 / 8R) \times 10^3 \quad (f \leq 2R \sin \gamma)$$

欠損した値を除くとRyで2~4μmの範囲内にあり、SKD11-Aを除いて考えれば、ほぼ同じ粗さにあると考えられる。



切削条件: V=150(m/min), f=0.1(mm/rev)
工具材種: セラミックスB

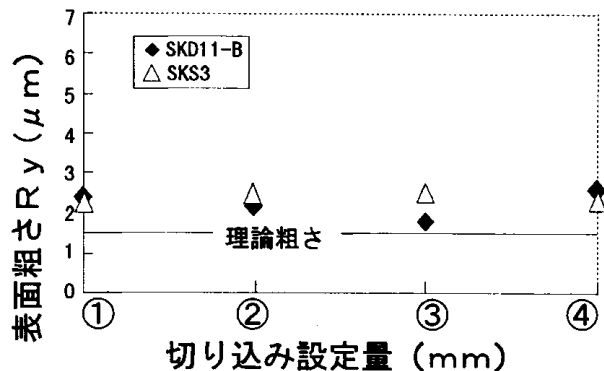
図3 最終仕上げ面の表面粗さ

また図4は切り込み配分、切削速度及び工具を変えて切削した際の最終仕上げ面の表面粗さを示す。なおこのときの切削条件は表5の通りである。

表5 切削条件2

No.	切り込み配分(単位:mm)			切削条件
	1回目	2回目	3回目	
①	0.5	0.4	0.1	V 100m/min(乾式) f 0.1mm/rev a 左記切り込み配分による 被削材 SKD11-B, SKS3 工具 セラミックスA
②	0.5	0.3	0.2	
③	0.6	0.4		
④	0.7	0.3		

なお、最終仕上げ面の理論粗さは、表4の切削条件と同じ約1.6μmである。最終仕上げ面の粗さRyには多少数値のばらつきはあるが、2回切り込み、3回切り込みといった切り込み配分の影響はそれほど見られない。また、図3、図4において、SKS3の3回切り込み①、②に着目すると、切削速度及び工具材種が異なっても、最終切り込みの影響は表面粗さの差として現れていない。さらに、焼入鋼の仕上げ切削面の表面粗さは、理論粗さに近くなる傾向が見られる。



切削条件: V=100(m/min), f=0.1(mm/rev)
工具材種: セラミックスA

図4 最終仕上げ面の表面粗さ

3-2 工具損耗

工具損耗における被削材と工具材種との関係を検証した。切削条件は、V=100(m/min), f=0.1(mm/rev), a=0.3(mm), t=1.0(min)とし、被削材はSKS3及びSKH51を、工具は超硬、サーメット、セラミックスA、セラミックスB、cBNを使用した。今回切り込みが0.3mmと小さいため、工具摩耗はほとんどノーズR部に発生している。

(1) 被削材SKS3の場合

写真1にSKS3切削時の工具材種別による工具損耗状況を示す。サーメット工具は横逃げ面から垂直方向に欠損が生じた。すくい面において、セラミックスA及びB工具は刃先部に摩耗が観察される。横逃げ面において、

セラミックスB工具の刃先部に境界摩耗が少しではあるが観察される。前逃げ面において、どの材種にも摩耗している部分が観察される。特に超硬工具には一定の幅で摩耗している部分があることが観察される。なお、セラミックスB工具には、セラミックスA工具に比べて摩耗が若干多く現れている。ところで、cBN工具は切削時間が短かったこともあり、摩耗は他の材種のものより少なかった。これらのことより、本条件でサーメット工具を使用しSKS3を切削するには問題があると思われる。

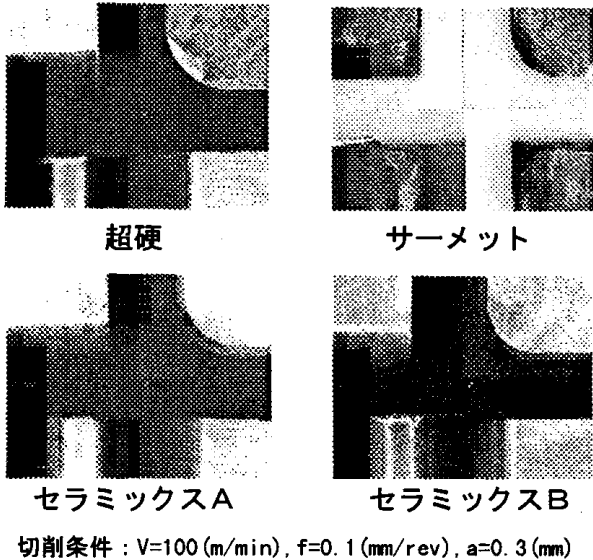


写真1 SKS3切削時の工具材種別による工具損耗

(2) 被削材SKH51の場合

写真2にSKH51切削時の工具材種別による工具損耗状況を示す。サーメット工具は横逃げ面から垂直方向に欠損が生じ、超硬工具は刃先部から前逃げ面にかけて欠損が生じた。すくい面において、SKS3切削時と同様にセラミックスA及びB工具には刃先部に摩耗が観察される。横逃げ面において、セラミックスA及びB工具の刃先部に境界摩耗が観察される。なおセラミックスB工具には、セラミックスA工具に比べて摩耗が若干多く現れている。前逃げ面において、どの材種にも摩耗している部分が観察される。また、セラミックスB工具はセラミックスA工具に比べて条痕が多い。ところで、cBN工具は切削時間が短かったこともあり、摩耗は他の材種のものより少なかった。これらの結果より、本条件で超硬工具及びサーメット工具を使用しSKH51を切削するには問題があると思われる。

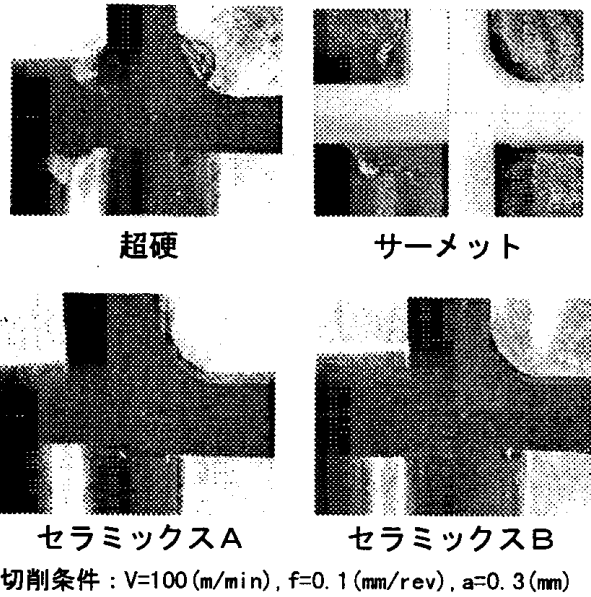
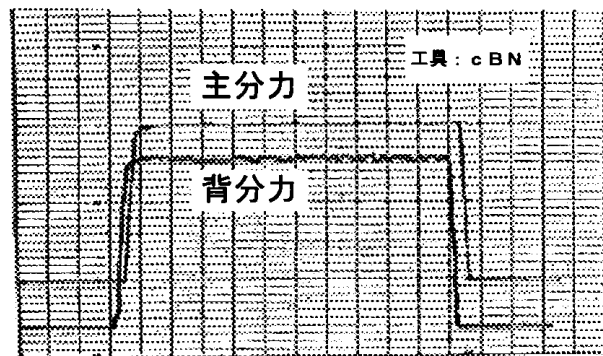
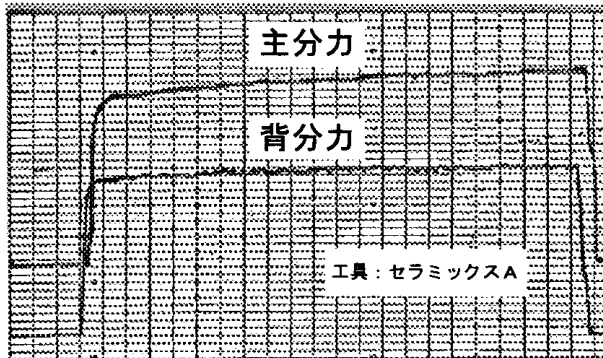


写真2 SKH51切削時の工具材種別による工具損耗
3-3 切削抵抗

被削材及び工具材種による切削抵抗の関係について検証を行った。切削条件は、 $V=100$ (m/min), $f=0.1$ (mm/rev), $a=0.3$ (mm)とし、被削材はSKS3及びSKH51を、工具は超硬、サーメット、セラミックスA、セラミックスB及びcBNを使用した。

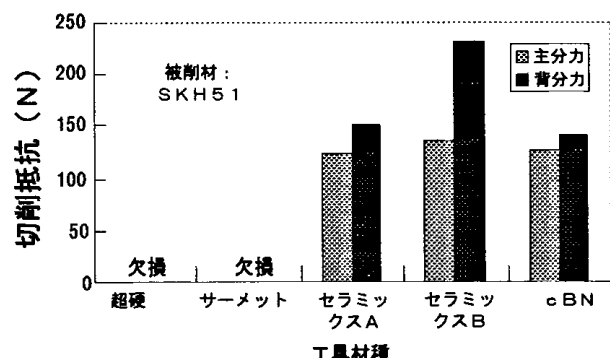
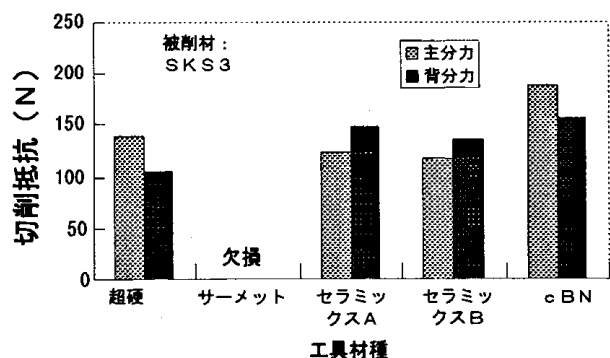


切削条件: $V=100$ (m/min), $f=0.1$ (mm/rev), $a=0.3$ (mm)

図5 SKH51を材種の異なる工具で切削した時の切削抵抗チャート図

図5は、SKH51をcBN工具及びセラミックスA工具で切削した際の切削抵抗のチャートを示す。図5において、cBN工具は抵抗が定常状態となり、ほぼ一定値を示しているのに対し、セラミックスA工具は定常状態とならず漸増傾向にある。このような傾向は、SKH51をセラミックスB工具で、SKD11をサーメット工具で、SKS3を超硬工具で切削した場合でも見られるが、原因の1つとして工具摩耗が進行し切れ味が落ちたためと考えられる。また、SKH51を超硬工具で切削したときは工具が欠損し、測定不可能となった。この状態は、SKS3及びSKH51をサーメット工具で切削した際にも見られる。

図6は、焼入鋼（SKS3、SKH51）を材種の異なる工具で切削した際の切削抵抗を示したものである。サーメット工具でSKS3及びSKH51を、超硬工具でSKH51を切削した際、欠損が生じたため、測定不可能となった。また、低硬度鋼を切削した場合と異なり、背分力は主分力より大きい値を示している。これは硬いものを切削するためには大きな押付力を要するから、そのために大きな背分力が発生したものと考えられる。ところで、SKH51をセラミックスB工具で切削した際の背分力が他の工具材種で切削したときよりも高くなっているが、その原因は不明である。これらのことから、



切削条件：V=100(m/min), f=0.1(mm/rev), a=0.3mm

図6 工具材種別による切削抵抗

焼入鋼の切削にはcBN、セラミックス工具が適していると考えられる。しかし、cBN工具は高価であり、荒加工からcBN工具を用いることは加工コストの増大を招くので、荒加工においてセラミックス工具での切削が不可能である場合にのみ用いる等の工具選択が重要であると思われる。

3-4 残留応力

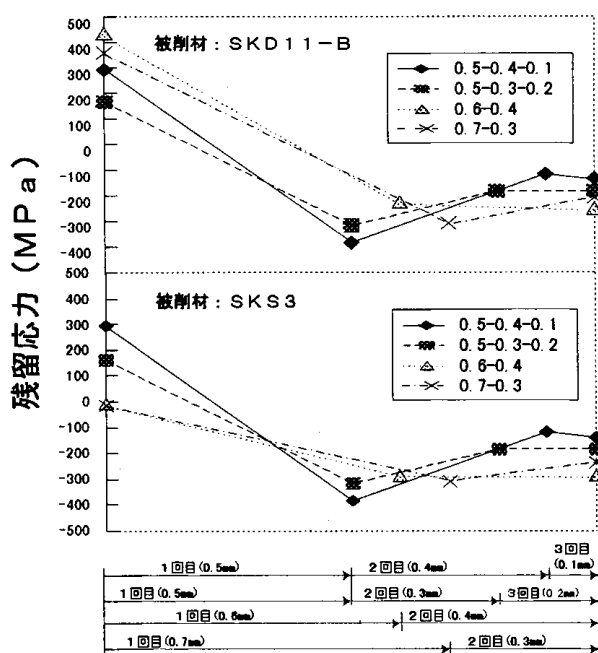
切削工程毎に切り込み配分の変更を積極的に行うことで、工作物表面の残留応力の状態が、どのように変化するかを検証するため、表6の切削条件で実験を行った。

表6 切削条件3

切り込み配分(単位:mm)			切削条件
1回目	2回目	3回目	
0.5	0.4	0.1	V 100m/min(乾式) f 0.1mm/rev a 左記切り込み配分による 被削材 SKD11-B, SKS3 工具 セラミックスA
0.5	0.3	0.2	
0.6	0.4		
0.7	0.3		

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、 $\sin^2 \psi$ 法により応力を求めた³⁾。特性X線はCrK α 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7は、送り方向の残留応力変化を示す。ここで、正の値の残留応力は引張りの残留応力を、負の値の残留応力は圧縮の残留応力を示す。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も、1回目にある程度切



切削条件：V=100(m/min), f=0.1(mm/rev)
工具材種：セラミックスA

図7 送り方向の残留応力

り込むことにより、残留応力は圧縮の方向に向かっている。逆に2回目、3回目と切り込む毎に、残留応力は引張りの方向に向かっているのが見られる。このことは、切削後の残留応力が、材質や切削前の表面状態よりも、切削条件に依存することを示しており、切削条件により残留応力の制御が可能であることが推察される。

図8は、円周方向の残留応力変化を示す。ここで、図7と同様に、正の値の残留応力は引張りの残留応力を、負の値の残留応力は圧縮の残留応力を示す。円周方向の残留応力変化は、送り方向ほど大きくない。最終仕上げ面の残留応力量は切削前の残留応力量とほとんど変化がないと思われる。

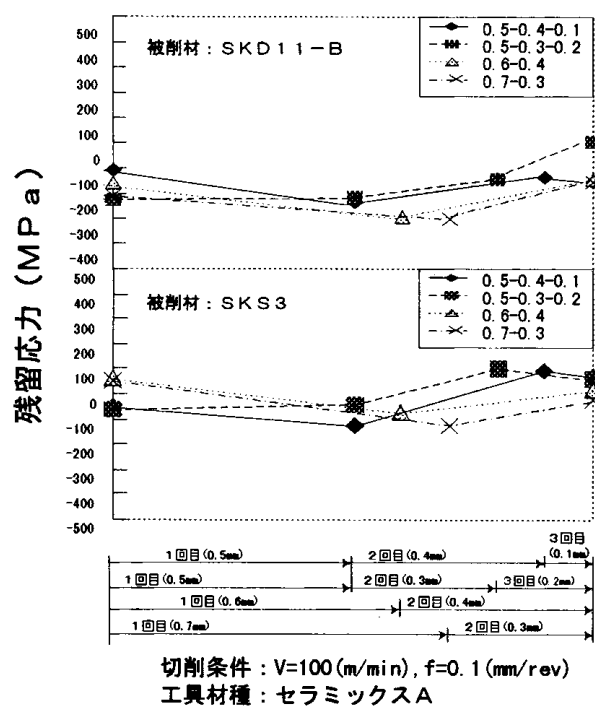


図8 円周方向の残留応力

4 結 言

高硬度難加工金属材料の仕上げ加工を研削加工から切削加工へ置き換えようとする試みに対応するため、切り込み配分の変更を積極的に行うことで工作物の幾何学的精度及び表面の残留応力がどのように変化するかを、また工具損耗及び切削抵抗についても検証した。その結果以下のようなことがわかった。

- (1) 焼入鋼はcBN, セラミック工具の組み合わせで切削可能である。
- (2) 表面粗さに対する切り込み回数の影響はあまり見られない。
- (3) 送り方向における切削後の残留応力量は、材質や切削前の表面状態よりも、切削条件に依存しており、切削条件により残留応力量を制御できる可能性がある。

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素材部主任研究官高橋利男氏及び岩手県技術アドバイザー一仁科健治氏の貴重な助言をいただき、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ある。

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 中山, 上原: 機械加工, 朝倉書店, 37(1983)
- 3 日本材料学会: 改著X線応力測定法, 養賢堂, 146(1981)