

# 機械加工による残留応力の発生原因と特徴

## Causes and Features of Residual Stress Generated on Machined Surface

村田 一夫\*      山口 勝己\*      足立 和俊\*  
 Kazuo Murata    Katsumi Yamaguchi    Kazutoshi Adachi

本田 索郎\*  
 Sakuro Honda

(2001年 7月16日 受理)

キーワード：残留応力，切削加工，研削加工，塑性変形，熱応力，相変態，金属材料，セラミックス

### 1. はじめに

各種機械部品や金属製品は，製造工程の中で所定の形状に仕上げるために種々の加工が行われるが，なかでも切削や研削などの機械加工が多く施されている。機械加工では，一般に，加工された表面の形状や粗さなど加工精度に注目される。しかし，そのほか工作物表面には材料除去に伴う破壊や変形により，内部素地とは性質の異なる加工変質層が形成される。これは，加工面の品位に関わるものとして加工精度とともに重要視されている。加工変質層には加工ひずみや熱変質，母材とは異なる組織などが生じており，これにともなう時として残留応力が発生する。残留応力は，強度や形状精度に悪影響を及ぼすことが多く，製造現場ではあまり歓迎されるものではない。このような残留応力の発生に伴うトラブルに対処するためには，その符号（圧縮，引張），大きさ，深さ分布などを熟知しておく必要がある。しかし残留応力の発生状況は，加工法，加工条件，材料などによって種々異なるため，その特徴を統一的に理解することはなかなか難しい。

本稿では，基本的な残留応力の発生原因や発生例を解説するとともに，代表的機械加工法である切削，研削により生じる残留応力について，材料除去機構と残留応力発生原因および金属材料やセラミックスなど各

種材料の材料特性や加工条件と残留応力の関係（圧縮応力，引張応力，残留応力の大きさ，深さ方向分布形態など）などについて述べる。

### 2. 残留応力の基本的発生原因

残留応力は外力が作用していない状態で，物体内部で静的に釣合いを保っている弾性応力（内部応力）であり，外力や組織的变化などにより形状変化や体積変化が生じた時に発生する<sup>1)-3)</sup>。残留応力には，巨視的

表1 巨視的残留応力と微視的残留応力

残留応力の干渉領域による分類	発生原因による分類
<b>巨視的応力</b> (Macro stress) 広い範囲に渡って均一な応力	<b>全体的応力</b> (Body stress) 外部より機械的，熱的，あるいは化学的な作用が物体に不均一に加わった，外部的な原因によるもの
<b>微視的応力</b> (Micro stress) 一個の結晶粒から他の粒へ移ると組織の不均一性による，内部的な原 変化したり，一個の粒内でも顕微鏡 的尺度である部分から他の部分へ 移ると変化したりする応力	<b>組織的応力</b> (Textural stress)
残留応力	領域の長さ mm 10    1    10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-6</sup>
第1種 (巨視的)	不均一な外部 荷重による
第2種 (微視的)	組織的残留応力 ハイン応力
第3種 (微視的)	結晶粒内の 不均一な残留応力 転位による 不均一なひずみ

\* 生産技術部 精密機械グループ

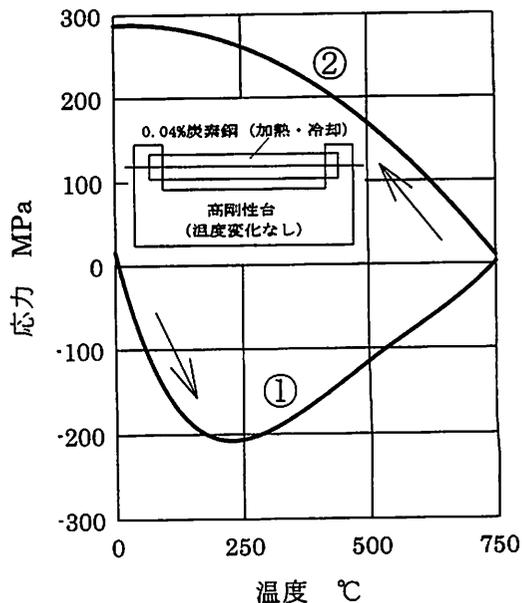
表2 残留応力の発生原因

負荷の種類	外部的原因	内部的原因
機械的負荷応力による不均一塑性変形	曲げ、圧延、引き抜きなど、均一でない応力が作用する場合	物体内の各部分で組織分率の差、あるいは結晶粒の方位差などで各部分が異なる降伏挙動を示す時
熱による変形	物体の幾何学的形状が不均等や複雑な時、加熱、熱伝導率、熱膨張係数などが異なり、さらに熱伝達状態が異なる場合、各部分に温度差が生じる。	物体内の各部分で弾性定数などが異なり、さらにその温度係数も異なるような場合。
作用による金属学的組織変化などによる部分的な容積変化	冷却に際し、各部分の冷却は均一でなく各部分の冷却速度は異なる。そのため、充分変態した部分と変態しなかった部分が生じた時、両者に容積変化の差があらわれる。	組織分率の差がある時、変態や析出による容積変化の程度も異なるため、充分変態した部分と変態しなかった部分が生じた時、両者に容積変化の差があらわれる。
化学的变化による残留応力	表面から内部に伝わっていく化学的变化、あるいは物理的变化。	

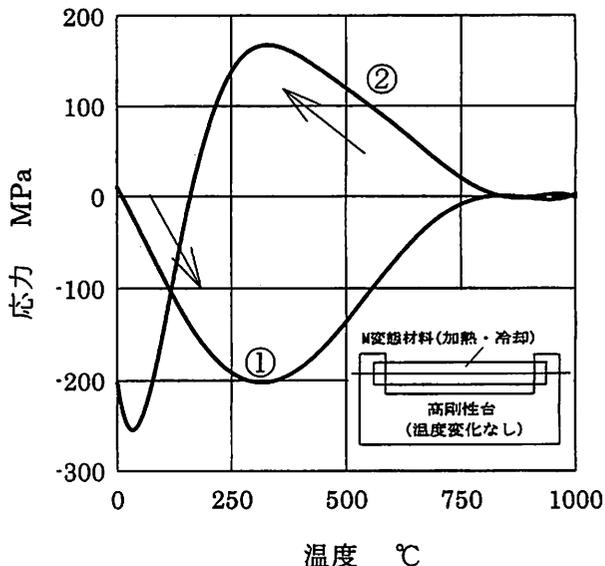
残留応力と微視的残留応力があり、干渉領域の大きさや発生原因により表1のように大別されている<sup>1)</sup>。一般に、残留応力といえば巨視的残留応力のことを言う。残留応力発生原因の詳細な検討を行う場合には、微視的残留応力について考慮する場合もあるが、ここで紹介する種々の残留応力は、すべて巨視的残留応力に関するものである。また、残留応力の発生原因は、外部的作用による外部的原因と物体内組織の不均質性に基づく内部的原因に分けられ、負荷の種類ごとに整理すれば表2のようになる<sup>1)</sup>。熱処理による残留応力は、主として加熱・冷却過程での熱応力による塑性変形や相変態による容積変化などが原因となって生じる。しかし、窒化や浸炭では、表面層に化合物が形成されることにより容積変化が生じ残留応力が発生する。この場合は化学的变化によるものとなる。機械加工の場合は、加工点での熱の発生や機械的負荷応力が残留応力の原因となる。これらの熱および機械的負荷応力の作用による基本的な残留応力の発生例を以下に紹介する<sup>1) 4) 5)</sup>。

(1) 熱応力による塑性変形

図1(a)は、熱変形しない高剛性の台に低炭素鋼を固定し、過熱、冷却する際の応力変化を示したものである。加熱過程①では、材料の熱膨張が抑えられ棒内部には圧縮の応力(負の符号)が生じ、圧縮応力は温度の上昇とともに増大する。さらに温度を上げ降伏応力を超えるようになると、塑性変形が起こり始め圧縮応力は減少する。750℃では応力はほぼ零となる。この時点から冷却②すれば、今度は棒内に引張応力が生じ、温度の低下とともに引張応力は増大し、最後には



(a) 熱応力による塑性変形



(b) 相変態による塑性変形

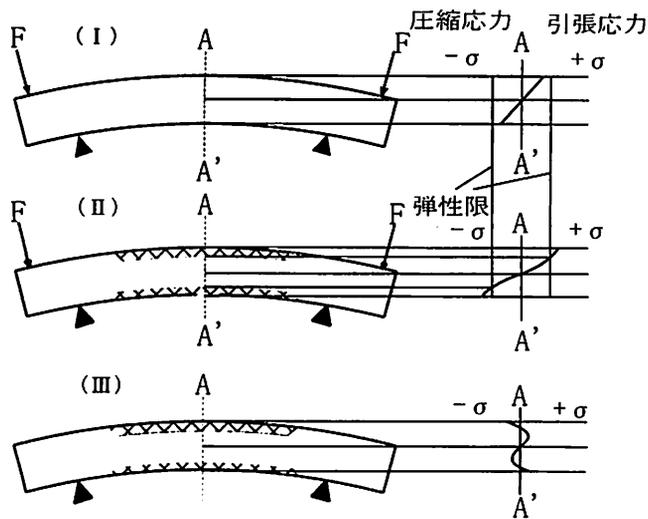
①加熱過程 ②冷却過程

図1 熱の影響による残留応力

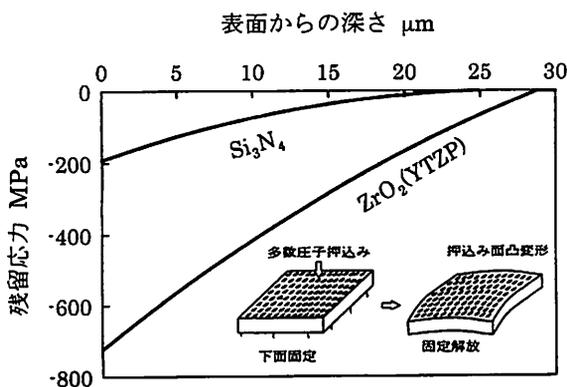
大きな引張残留応力が生じる。

(2) 相変態による塑性変形

図1(b)は、(a)の材料をマルテンサイト変態する材料としたもので、加熱による圧縮残留応力の発生、消滅は(a)の場合と同じであるが、この場合は冷却時にマルテンサイト変態が生じるよう変態点を超える1000℃まで加熱する。冷却時300℃付近でマルテンサイト変態が始まると体積膨張が生じるため、引張応力から急激に圧縮応力に変化するようになり最終的には圧縮の残留応力が残る。



(a) 一様曲げを受けるはりの場合



(b) 押込み負荷を受ける平板の場合

図2 機械的負荷による残留応力

(3) 機械的負荷による残留応力

(A) 一様曲げを受けるはりの場合<sup>4)</sup>

2点支持されたはりの両端に荷重をかけ、曲げ変形を与えた時の残留応力の発生過程を図2(a)に示す。最も大きな応力となるはりの上面、下面の応力が弾性限内であれば、除荷後もとの形状に戻る(I)が、弾性限を超えると上部には引張塑性変形、下部には圧縮塑性変形が生じる(II)。このため、除荷後に上部に圧縮、下部に引張の残留応力が生じる(III)。

(B) 押込み負荷を受ける平板の場合<sup>5) 6)</sup>

図2(b)は、切削や研削での垂直力による残留応力の発生を想定し、セラミックスに多数個のピッカース圧子押込みを行った時の残留応力を調べたものである。圧痕による押し広げのため表面は圧縮応力となる。部分安定化ジルコニアでは、応力誘起変態による体積膨張のためより大きな圧縮残留応力となる。

表3 残留応力の測定方法

機械的方法 (破壊的)		
測定法名称	方法	特徴
層除去法	円板、円筒、球の内外層の除去	層除去時のひずみの変化率の測定
たわみ法	はり、板、薄肉円管の外層(表面層)の除去	表面層除去による曲率変化の測定
局部ひずみ法	板、溶接構造物の切抜き、切込み孔あけ	残留応力解放前後のひずみ測定
物理的方法 (非破壊的)		
測定法名称	方法	特徴
X線応力測定法	X線を多結晶試料に照射した時の回折現象を利用して残留応力を測定する	表面から10μm程度の深さの平均応力
磁氣的測定法	強磁性体を磁化した時に生じる磁気ひずみが内部応力に影響されることを利用して磁気ひずみの大きさから応力を推定する	表面から0.1~0.5mmの深さの平均応力
超音波法 (音弾性法)	超音波偏光波は応力を受けた材料の厚み全体によって音響複屈折を生じ、二つの偏光波の伝播速度の差が応力状態に關係して変化する現象を利用して残留応力を測定する	材料の厚み全体における平均値

3. 残留応力測定法

残留応力の測定法には、表3に示すように、機械的方法と物理的方法がある<sup>1) 7) 8)</sup>。機械的測定法では、内層や外層を除去したり、部分的に孔をあけそのときのひずみや曲率の変化を測定する。この場合には被測定物に何らかの加工を行うため、破壊的方法とも言われる。機械加工面の残留応力測定には、加工面と反対側に歪ゲージをはり、加工面を逐次除去する方法が多く用いられているようである。一方、物理的測定法ではX線による方法が最も測定精度、信頼性が高く、比較的簡便で測定時間がかからないことから、近年、広く利用されている。物理的方法では被測定物に損傷を与えないことから非破壊的方法といわれているが、深さ分布を調べる場合には機械的方法と同様に表面除去を行わなければならない。

4. 切削加工による残留応力

(1) 切削機構<sup>9) -11)</sup>

切削による残留応力の発生を考えるにあたり、まず、切削による材料除去機構を簡単に述べておく。

切削を理解する上で最も基本となる2次元切削の状況を図3に示す。図に示すような単純な切削でも、材料や加工条件などによりいくつかの形態の切り屑が生成される。その形態として、流れ型、せん断型、むしろ型、き裂型切削があるが、流れ型、せん断型の切り屑を生成する場合が良好な切削状態で、この場合、

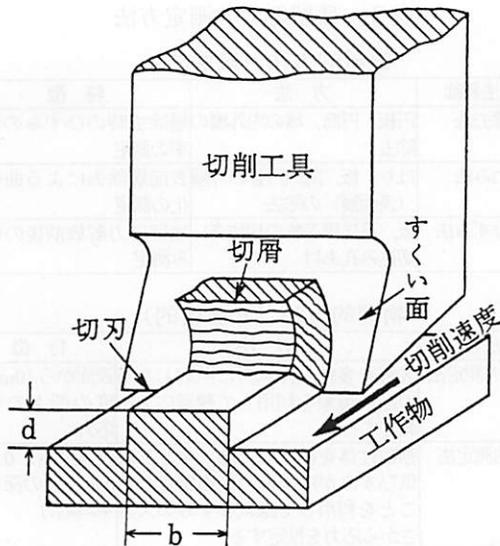


図3 2次元切削

切り屑の生成はせん断変形により起こり、顕著な破壊を伴わない。そのせん断面切削モデルを図4に示す。このモデルでは、切込み深さ $d$ で、工具刃先を $O'$ から $O$ に前進させるとき、平行四辺形 $OO'A'A$ がせん断変形して平行四辺形 $OCDA$ になると考える。このせん断変形した薄いブロックがすくい面に沿って順次上方に厚さ $t$ の切り屑として押し出される。このときのせん断ひずみは $\Delta S/\Delta y$ である。また、図中に示すように、せん断面には、工具すくい面を介して工具側から切削力 $R$ （切削抵抗）が伝えられる。その分力である $F_H$ は水平分力（主分力）、 $F_V$ は、垂直分力（背分力）と称される。

(2) 残留応力の発生原因

切削では、材料除去機構で述べたように、切削力による切削方向のせん断応力や工具刃先接触部から下方面への負荷力による押し込み応力が被削材に作用し、これらによる塑性変形の生成が残留応力発生の原因となる。また、工具刃先付近では、せん断変形や工具すくい面における摩擦などにより非常に高温となり、それに伴う熱応力により残留応力が発生する。さらに、材料によっては熱や加工力により相変態する場合があります、その相変態に基づく容積変化によって生じる残留応力も予想される。これらの4つの主要な残留応力発生原因について以下に説明する。

(A) 材料除去に伴うせん断応力

切削工具の刃先が鋭利で、図4に示したせん断面切削モデルのような理想的な切削が行われれば、仕上げ面に切削力による加工ひずみ層は殆ど残留せず熱応

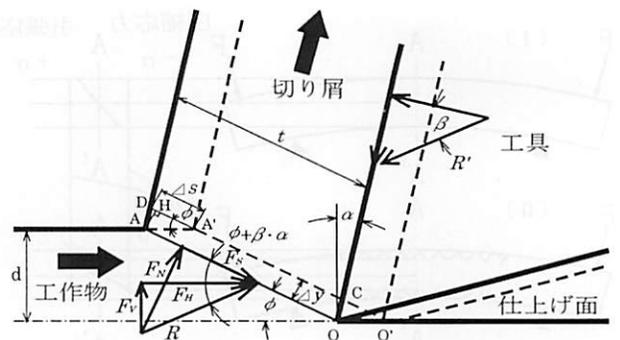


図4 2次元切削モデルと力のつりあい

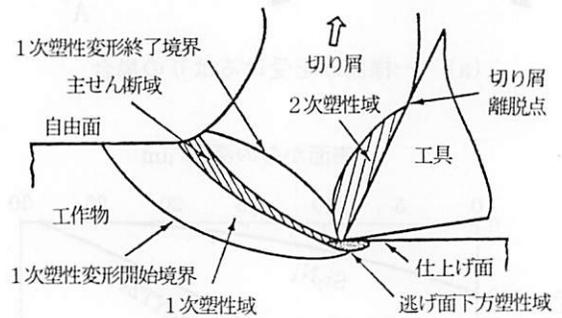


図5 切削変形域

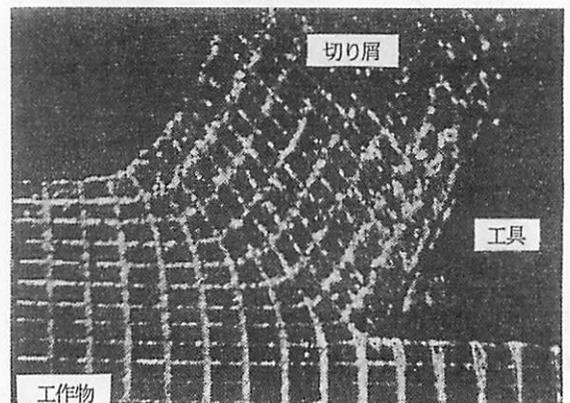


図6 流れ型切削における格子線変形

力や変態に伴う応力による残留ひずみのみが生じることになる。しかし、実際は図5に示すように切削変形域は広がりを持っており<sup>10)</sup>、変形域の状況は工具先端の丸み半径や加工条件によって影響される。この変形領域での応力状態は、白井らの詳細な解析<sup>9)</sup>によれば非常に複雑なものとなっている。この解析結果によると、工具前方域では大きなせん断応力が作用しており、これによって工具の前進とともに加工表面が塑性的に収縮するとすれば引張りの残留応力が生じることになる。図6は、2次元切削での連続型切り屑生成における格子線変形を観測したもので、加工点前

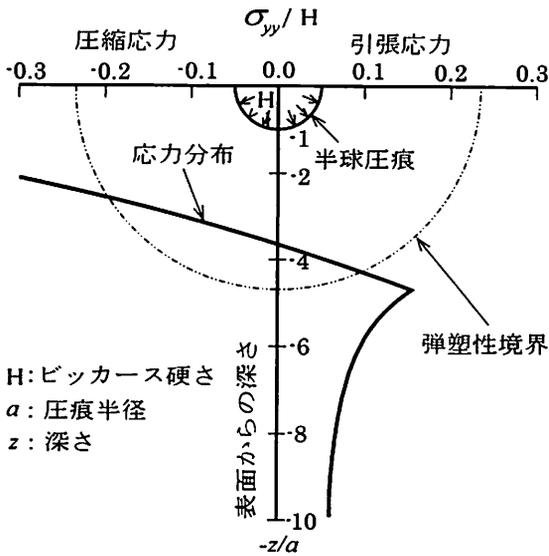


図7 圧子押し込み面下の残留応力分布

方ではせん断応力による格子歪みが生じている<sup>9) 11)</sup>。

(B) 押し込み応力

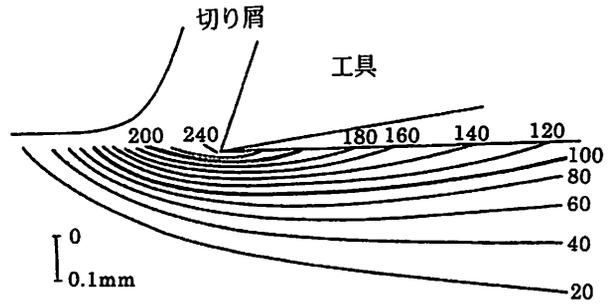
図4に示すような流動型の切り屑を生成する際、工具と被削材間には、被削材下方への押し付け力と切削方向の摩擦力が作用(パニシ作用)する。このパニシ作用は、被削材表面に大きな押し込み負荷を与える。一般に材料表面に降伏応力を超える大きな押し込み負荷が与えられたとき、表面から内部に塑性変形が生じ、除荷後に残留応力が発生する。図7は、材料表面に半球圧痕が与えられた場合の圧痕直下の残留応力深さ分布の解析例である。この場合、表面では押し込みによる押し広げにより除荷後に圧縮残留応力が生じ、内部では応力の釣合いから引張り応力となる。また、押し込みによる塑性変形域は半球状に広がり、弾塑性境界付近で最大の引張残留応力を示すものとなる<sup>12)</sup>。

(C) 熱応力

切削加工における熱応力と残留応力発生との関係は、残留応力の基本的発生のところでも述べた機構と同じで、切削により加工表面が高温になると内部から圧縮力が働き、それが降伏応力を超えれば圧縮塑性変形する。その結果、加工後(冷却後)には、変形を元に戻そうとする力の作用により引張残留応力が発生する。図8は、2次元切削における刃先の温度分布の測定例<sup>13)</sup>で、図9は、このような温度分布があるときの熱応力のみによる残留応力を解析的に求めたものである<sup>14)</sup>。切削速度が大きくなると切削点の温度が高くなり引張残留応力が増大している。

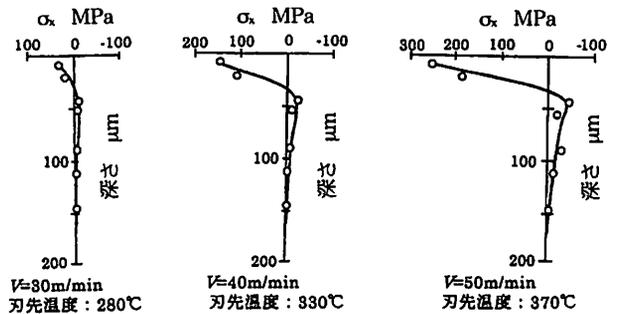
(D) 熱・加工力による相変態応力

残留応力の基本的発生例で説明したように、金属材料



被削材: S15C鋼 切削速度: 30m/min  
 切込み: 0.05mm 切削幅: 5mm  
 すくい角: 20° 逃げ角: 8°

図8 工具刃先付近の材料内部温度分布



被削材: S15C鋼 切削速度: 30~50m/min  
 切込み: 0.1mm 切削幅: 3mm  
 すくい角: 20° 逃げ角: 8°

図9 切削熱による残留応力(切削方向)

料の切削の場合も加工熱により表面でマルテンサイト変態すれば、体積膨張が生じ圧縮の残留応力が発生する。しかし、図8に示したように仕上げ面近傍の温度は変態点よりも低く、切削加工では相変態が生じる可能性は低いと言われている<sup>9)</sup>。また、加工力により応力誘起変態を生じる材料(オーステナイト系マンガン鋼, WC-Co系合金, 部分安定化ジルコニアセラミックスなど)の場合にも体積膨張や収縮に基づく残留応力を生じる可能性がある。

(3) 切削面残留応力の例

切削による残留応力の発生原因として上述の(A)~(D)の主原因を述べたが、実際にはいくつかの原因による残留応力が重畳するものと考えられ、いずれの原因が優先するかによって、表面で圧縮残留応力になるか引張残留応力になるかが定まり、また、その応力の大きさや深さ方向分布形状も異なってくる。それは、主として材料と加工条件の違いによるものと思われるが、その生成過程は複雑で明確に示されたものはない。以下に切削加工による残留応力の測定例を紹介

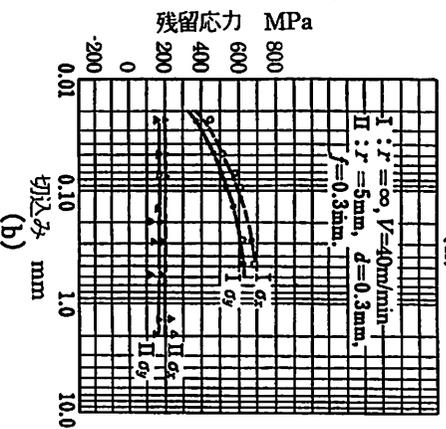
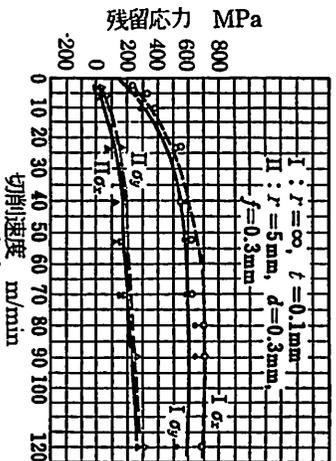
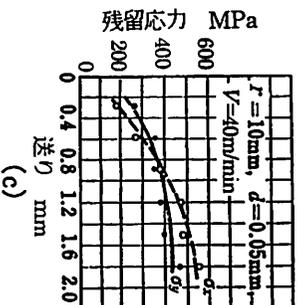
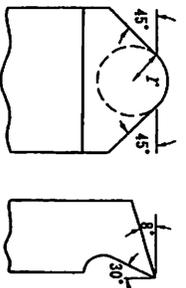


図10 2次元切削仕上げ面残留応力



$r$ : 丸刃バイト先端半径  
 $l$ : 切削厚さ,  $V$ : 切削速度  
 $f$ : 送り,  $d$ : 切込み  
 被削材: 軟鋼,  
 工具: 高速度鋼バイト、乾切削



応力の大きさは、 $\sigma_r$ より切削方向の残留応力 $\sigma_x$ の方が大きくなっている。

図11は、炭素鋼の材料組成とすくい角が残留応力に及ぼす影響を調べたものである<sup>9)</sup>。この場合、切削による板の曲げ変形から残留応力を求めており、図の縦軸の合応力は、除去薄層内の平均残留応力(切削方向)である。図によれば、正のすくい角の増加、炭素含有量の増加に伴って残留応力は減少する傾向を示している。また、この場合も引張残留応力となっており、パンシ作用による圧縮残留応力生成の影響は少ないものと思われる。組成の影響については、炭素量が少なくなれば、材料はより塑性変形しやすくなることから、せん断変形の量が大きくなり残留応力も増大するものと考えられる。図12は、3次元旋削仕上げ面の残留応力を示したものである<sup>9)</sup>。図によると、切削方向の残留応力は2次元切削の場合と同様に引張応力であるが、それに直交する方向の応力が圧縮となっている。これは切削方向に直交する方向では、母材を押し広げようとして圧縮塑性変形し、加工後には、それに対する母材側からの拘束のため圧縮残留応力が生じたものと思われる。

切削加工面の残留応力の符号と加工方向の関係は、概ね、図13のようになる。その特徴を整理すれば、2次元切削では、①切削方向、切削に直交する方向とも引張応力となり、その大きさは切削方向の方が大きくなる、②切削速度、切込みが大きいほど引張応力は増大する、③すくい角が小さいほど引張残留応力は大きい、という傾向を示す。3次元切削では、①切削方向には引張応力、送り方向には圧縮応力になる、②切削方向の引張残留応力は送り速度、送り量が増加すると大きくなり、切込みに対してはあまり変化しない、③送り方向の圧縮残留応力は切削速度が増加すると大きく、送りが大きくなると小さくなる、④切込みに対しては両方向とも応力の変化は小さい、という傾向を示す。

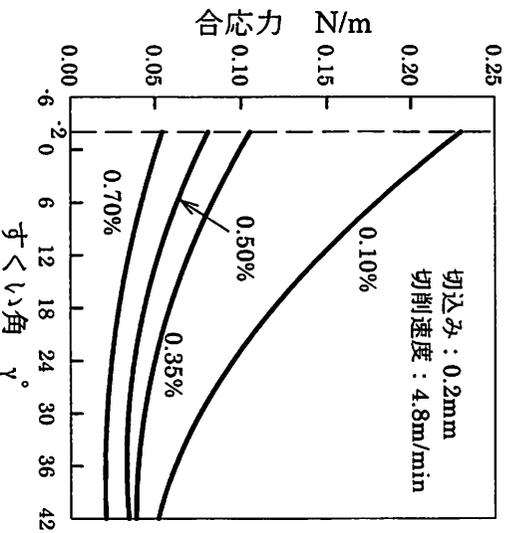
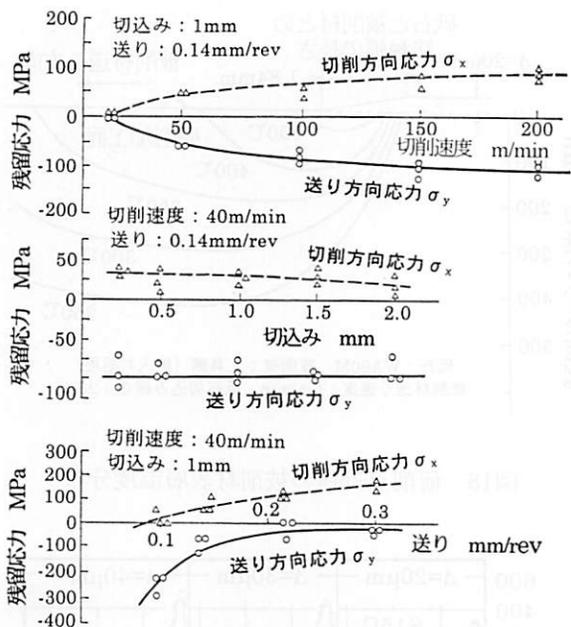


図11 残留応力に及ぼす材料組成とすくい角の影響

する。

図10は、種々の加工条件に対する平削り(2次元切削)仕上面の残留応力を示したものである<sup>9)</sup>。図の $\sigma_x$ は切削方向、 $\sigma_y$ は切削方向に直交する方向の残留応力である。図によれば、いずれも仕上げ面には引張残留応力が生じており、切削速度、切込み、送りなどが増大する(加工条件が過酷になる)と引張残留応力は増大する傾向を示すものとなっている。また、残留



0.37%炭素鋼，超硬工具，乾切削

図12 3次元旋削による仕上げ面残留応力

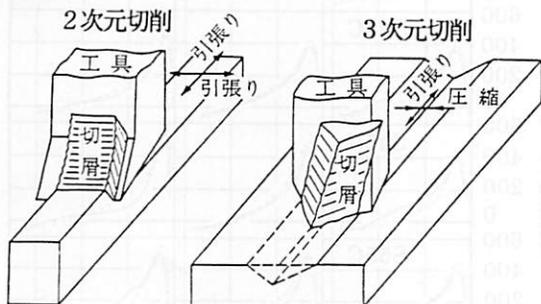


図13 切削方向と残留応力

## 5. 研削加工による残留応力

### (1) 研削機構

切削加工は、人為的に整えられた一個ないしは十数個の切れ刃により材料を除去するのに対し、研削では、図14に示すように、砥石の外縁上に平面的、立体的に無作為に点在する多数個の砥粒を切れ刃として除去加工する。砥粒にはセラミックス、立方晶窒化ホウ素(CBN)、ダイヤモンドなどが用いられ、切れ刃となる一個の砥粒は切削工具の刃先に比べ90℃に近い負のすくい角を持つ。また、通常、研削砥石の周速は2000m/min前後（旋削やフライス加工の10～50倍）、切込み深さは1/100～1/1000mm程度で、1個の砥粒からみれば、高速微小切削が繰り返し行われることになる<sup>11) 15) 16)</sup>。

図15は、上向き平面研削において、砥石上の一つの砥粒が被削材に干渉し材料を除去するときの過程を

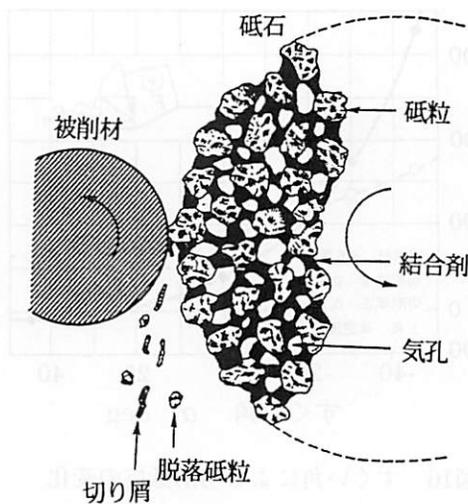


図14 研削砥石の構造

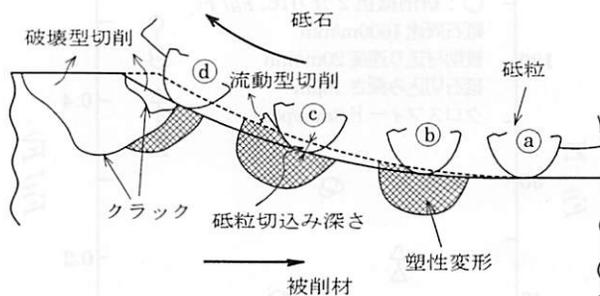


図15 研削の材料除去過程

示したものである<sup>17)</sup>。その過程は、切込み深さの小さい場合から順に、①砥粒が被削材表面をすべり、被削材は弾性変形のみを受ける、②被削材は塑性変形を受けるが未だ除去されない、③砥粒が被削材に食いつき、被削材は流動を伴う切り屑を生成して除去される、さらに脆性材料の場合には、④被削材は破壊を生じて除去される、と大別される。残留応力の原因となる材料の永久変形は②や③の状態而定められるが、脆性材料の場合には、その永久変形の程度や頻度は④での破壊の規模に影響される。

### (2) 残留応力の発生原因

研削加工による残留応力の発生も個々の砥粒による切削作用によるものであることから、切削の場合と同様に、(A)せん断応力(B)押し込み応力(C)熱応力(D)変態応力が主要原因となって生じると考えられる。しかし、切削加工の場合と比べて研削では次のような特徴がある。①砥粒は、切削工具に比べて大きな負のすくい角を有するため切削力の水平、垂直の分力割合が切削とはかなり異なる。図16は、切削におけるすくい角の大きさと切削抵抗の水平分力 $F_H$ 、垂直分力 $F_V$ の関係を示したものである<sup>9)</sup>。負のすくい角が大き

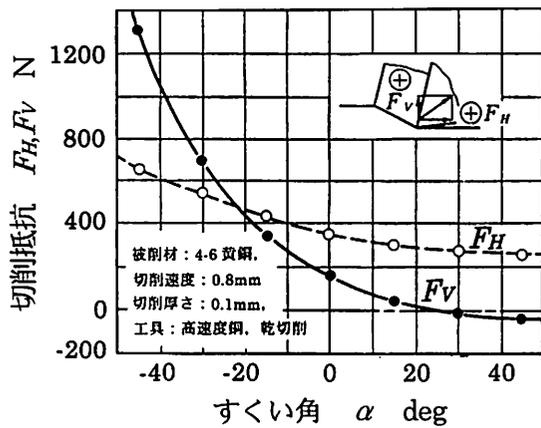


図16 すくい角による切削抵抗の変化

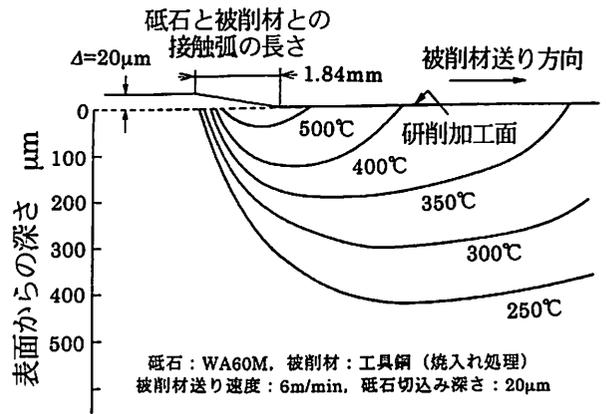


図18 研削点近傍の被削材表層温度分布

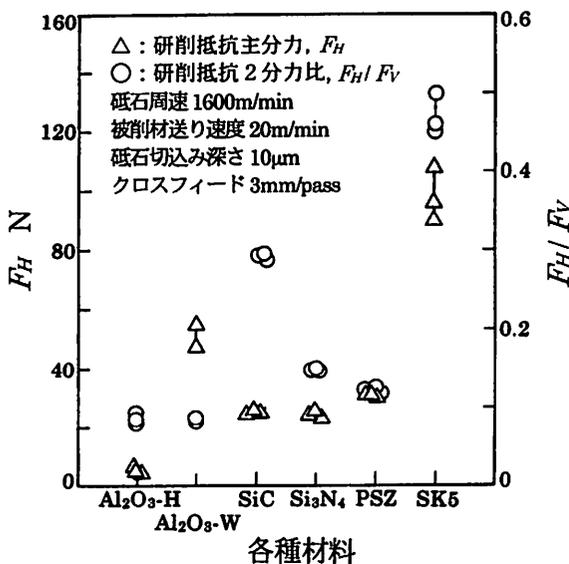
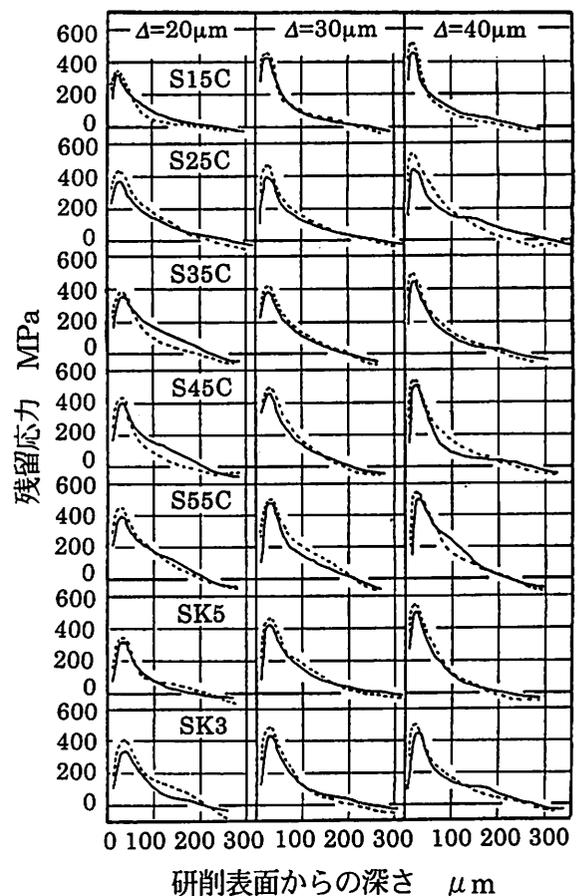


図17 セラミックスと金属材料の研削抵抗

くなるとせん断力よりも材料下方への垂直分力が大きくなる。図17は、工具鋼、セラミックスの研削抵抗2分力比 ( $F_H/F_V$ ，水平分力/垂直分力) を調べたもので炭素鋼では0.5程度，セラミックスでは0.1~0.3程度となっており切削に比べて垂直分力の占める割合が大きくなる<sup>17)</sup>。②多数の切れ刃による高速微小切削が行われるためかなりの発熱を伴う。図18は、研削点表層部の温度分布を調べたもので、図8に示した切削の場合の温度よりかなり高くなっている<sup>18)</sup>。そのため切削に比べて大きな熱応力の発生が予想される。③切削では高硬度材料の加工が困難であるが、研削では軟鋼だけでなく焼入鋼やセラミックスなど高硬度材の加工も行われる。材料特性の違いによって、(A)~(D)の発生原因のどれが優先するかが異なってくるため、研削残留応力の符号、大きさ、分布形態もかなり異なるものと思われる。



切削速度：-0.10m/sec … 0.15m/sec  
 砥石：WA60H8V，切込み深さ ( $\Delta$ )：20~40 $\mu\text{m}$

図19 焼なまし炭素鋼の研削面残留応力

### (3) 研削面残留応力の例

図19は、焼なまし炭素鋼の各種加工条件 (切削速度、切込み深さ) における研削面残留応力測定結果である<sup>19)</sup>。この特徴は、①どの材料の場合も表面で引張応力で、表面からやや内部にかけて引張応力は急増し、最大引張応力となった後緩やかに減少する分布となる。②切削速度、切込み深さが大きくなると、引張応力最大値は

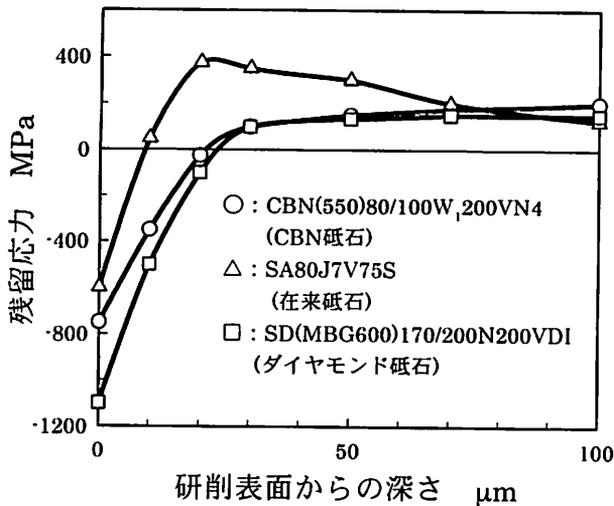


図20 在来砥石, CBN砥石, ダイヤモンド砥石による焼入鋼 (SKD11) の研削面残留応力

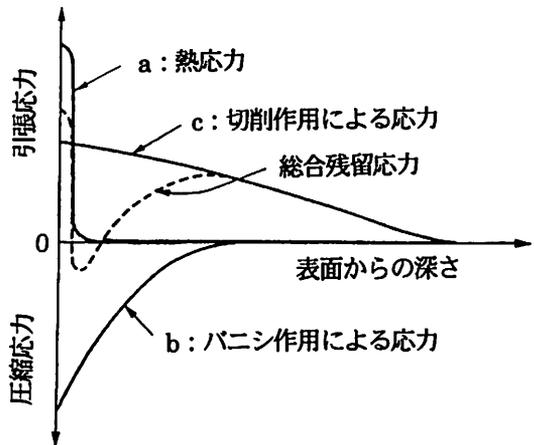


図22 残留応力分布の発生説明図

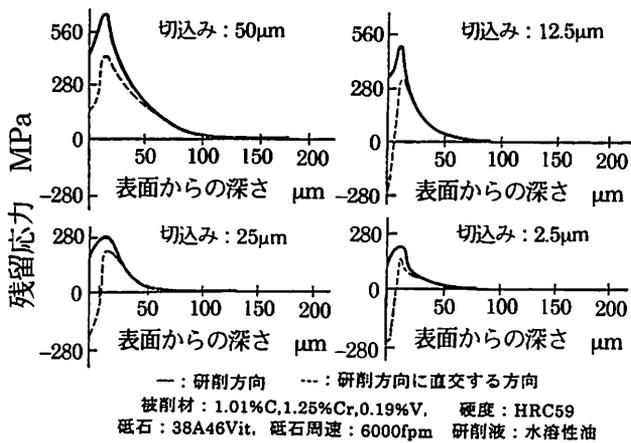


図21 焼入材の研削面残留応力

増加する。③炭素含有量の違いによる差は顕著でない。

図20は、超砥粒 (CBN, ダイヤモンド) 砥石と在来砥石 (アルミナ系SA砥石) による焼入鋼 (SKD11, HRC62) の研削面残留応力を比較したものである<sup>20)</sup>。この場合、いずれも表面で圧縮応力となり深さ方向に急激に減少する分布となっている。しかし、表面圧縮残留応力の大きさはダイヤモンド砥石, CBN砥石, SA砥石の順に小さくなり、内部での引張応力はSA砥石が最も大きくなる。これは、高硬度材の研削では、せん断応力や熱応力よりも砥粒のバニシ作用による押し込み応力が優先的になり圧縮残留応力が生じたものと思われる。また、在来砥石よりも超砥粒砥石によるものの方が大きな圧縮残留応力となるのは、ダイヤモンド, CBNの熱伝導率はアルミナに比べて大きく、研削熱が工具側へ拡散して熱応力の影響が少なくなるためと考えられる。一般に、在来砥石による高硬度材研削面の

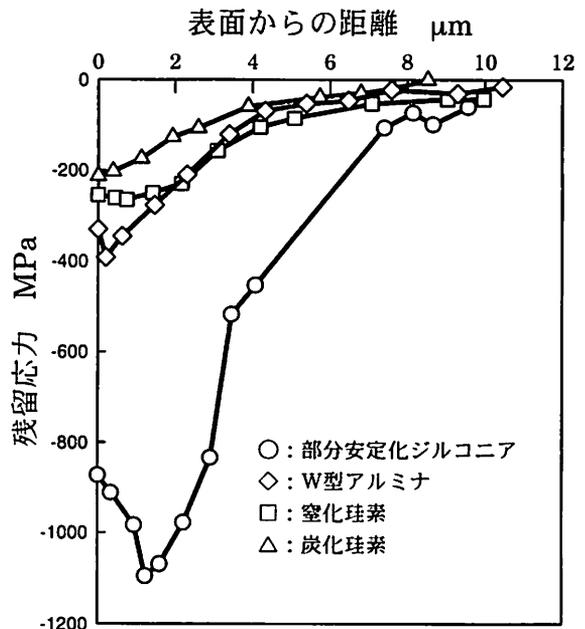


図23 各種セラミックスの研削面残留応力

残留応力は複雑で加工条件や研削液によって応力の符号や分布形状は異なる<sup>2)</sup>、といわれており、図21の測定例の場合には引張応力 (研削方向) が生じている<sup>1)</sup>。

図22は、研削面残留応力分布発生の説明として用いられているもので、(A), (D) の切削作用 (せん断応力) や熱応力では引張応力、バニシ作用 (押し込み応力) では圧縮応力が生じ、研削面の残留応力はこれらの総合作用によるものといわれている<sup>16)</sup>。超砥粒砥石による高硬度材料の研削加工の場合を除いて、研削の場合も、切削の場合と同様に残留応力の符号、大きさ、分布形状などと研削過程の関係は明確でないのが現状である。

次に、ダイヤモンド砥石を用いるセラミックスの研削面残留応力について紹介する。前述のようにダイヤ

モンドは熱伝導率が大きく研削熱が工具側に拡散すること、研削熱の原因となる比研削エネルギーが金属材料に比べて小さく発熱が少ないこと<sup>5)</sup>、などによりセラミックスの研削では熱応力の影響は少ない。したがって、セラミックスの場合は、常にダイヤモンド砥粒のバニシ作用による押込み応力が優先し、その研削面残留応力の特徴は比較的明確なものとなる。ダイヤモンド砥石による各種セラミックス研削面残留応力の測定例を図23に示す<sup>5)</sup>。この結果などからセラミックス研削面残留応力の特徴を整理すれば以下のようなになる。①いずれの種類のセラミックスの場合にも表面で圧縮応力となり、表面から内部にかけて急激に減衰する分布となる。②圧縮残留応力の大きさは、破壊靱性や硬度の高いものほど大きく、また、研削方向より研削方向に直交する方向の方が大きくなる。③部分安定化ジルコニアは、応力誘起変態により正方晶から単斜晶に組織変化し体積膨張を生じるため、他のセラミックスに比べて大きな圧縮の残留応力となる。

## 6. おわりに

冒頭に述べたように残留応力の発生は、強度や形状精度に悪影響を及ぼすことが多い。強度に対しては、表面に引張の残留応力が生じると疲労強度の低下、焼割れ、研削割れなどが生じるため、表面層には圧縮の残留応力を積極的に生じさせるべきであるといわれている。しかし、表面で圧縮であれば応力の釣合いから必ず内部には引張り応力が存在しており、特に圧縮応力が大きければ大きな引張り応力が残留している可能性がある。この引張り応力領域の部分に孔あけなどの加工を行うと破壊を生じることもある。また、残留応力は物体内部で釣合いを保って存在しているが、そこに外力や熱応力が負荷され残留応力に重畳し、降伏応力を超えれば塑性変形を生じることになり初期設計で期待していた強度とは異なる場合も起こり得る。形状については、表面層が摩耗や腐食、酸化などにより何らかの変化やわずかな除去が生じると変形を生じる可能性がある。ここでは切削や研削により生じる残留応力の特徴について述べたが、このような問題に対処するためには、残留応力の符号、大きさ、分布形状など加工後の残留応力の特徴を的確に把握しておく必要がある。切削、研削により生じる残留応力は、一部の除いてその生成過程は未だ明確でなく、加工後の残留応力状態を推定することがなかなか難しいが、ここに述べたような加工面残留応力の特徴を知ることにより、実際の残留応力トラブルに対して何らかの問題解決の

糸口にもなればと願っている。

## 参考文献

- 1) 米谷茂, 残留応力の発生と対策, 養賢堂(1987).
- 2) 中島利勝, 研削加工変質層 (特集: 加工変質層をめぐって), 機械と工具, 12, 33(1978).
- 3) 藤原晴夫, 英崇夫, 最近の加工変質層の測定法-残留応力を中心として-(特集: 加工変質層をめぐって), 機械と工具, 12, 41(1978).
- 4) B.D.Cullity, 新版X線回折要論 (松村源太郎訳), アグネ(1986)
- 5) 村田一夫, 水谷勝己, 田中芳雄, 材料, 43, 772(1994).
- 6) K.Murata, K.Mizutani, Y.Tanaka, Residual Stress due to Phase Transformation and Plastic Deformation in Multi-Indented Surface Layer of Partially Stabilized ZrO<sub>2</sub>, Proceedings of the 5th International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, (Sakai, Japan, 1995).
- 7) 須藤一, 残留応力とゆがみ, 内田老鶴圃(1988)
- 8) 磯村良蔵, 鋼の熱処理と残留応力-三次元的測定とその解析-, アグネ技術センター(2000)
- 9) 白井英治, 切削・研削加工学 (上) 切削加工, 共立出版(1977)
- 10) 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎, 基礎切削加工学, 共立出版(1993).
- 11) 白井英治, 白樫高洋, 加工の力学入門 (塑性変形・破壊・機械加工), 東京電機大学出版局(1996).
- 12) Y.Tanaka, K.Murata, K.Mizutani, O.Ogasawara, Ductile/Brittle Transition of Brittle Materials in Indentation, 3rd Int. Con. on Machining Technology in Asia-Pacific Region (3rd ICMT), (Taipei, Taiwan, 1997).
- 13) 奥島啓式, 垣野義昭, 精密機械, 34, 11(1968).
- 14) 垣野義昭, 奥島啓式, 精密機械, 35, 12(1969).
- 15) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰, 研削加工と砥粒加工, 共立出版(1993).
- 16) 白井英治, 切削・研削加工学 (下) 研削加工, 共立出版(1977).
- 17) 村田一夫, 水谷勝己, 田中芳雄, 材料, 41, 624(1992).
- 18) 高沢孝哉, 精密機械, 30, 12 (1964).
- 19) 米谷茂, 能登谷久公, 高辻雄三, 材料, 33, 373(1984).
- 20) 横川和彦, 横河宗彦, 超砥粒ホイールによる圧縮残留応力の増強に関する研削技術, 精密工学会中国・四国支部第13回難削材加工専門委員会資料(1992).