研削加工層における残留応力とひずみにおよぼす 研削条件の影響

米谷 茂* 能登谷久公** 高辻雄三**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 47, No. 1 (1983), pp. 72-79

On the Influence of Grinding Condition on Residual Stress and
Distortion in Ground Layer

Shigeru Yonetani*, Hisakimi Notoya** and Yuzo Takatsuji**

Up to this time, many researches regarding grinding residual stress have been reported. About the distribution of residual stress below the ground surface, large tensile stress is found in the layer neighboring the surface. Usually it is considered that residual stress may mainly be caused by the heat occurring due to the grinding. Simultaneously, it is necessary to consider that plastic deformation generated under the wheel-work contact zone results in the occurrence of residual stress.

In this report, the authors have investigated residual stress from the above view point. We used carbon steel S45C as specimens and measured residual stresses of the specimens ground under various grinding conditions.

We measured plastic distortion at each point of the specimens which were taken out in the process of grinding, and investigated the influence of plastic distortion on the occurrence of residual stresses.

(Received July 13, 1982)

Keywords : grinding surface, grinding residual stress, plastic distortion of subsurface,
grinding force, grinding temperature, carbon steel

* 金沢大学工学部機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa)

** 富山大学工学部生産機械工学科 (Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Toyama University, Takaoka)

I. 緒 言

従来、研削残留応力に関して多くの研究結果が報告されている^{(1)~(5)}。これらは、残留応力の発生および発生状況におよぼす研削条件の影響を調べたものが多く、また、その残留応力の発生を熱応力によるものとして、発生機構の解析を行ったものなどがある^{(6)~(10)}。

普通、研削面直下で発生している残留応力は、引張応力である。この原因として研削熱の発生にともなう熱応力の影響によることは当然であるが、研削時、砥石接触面下で外部応力により生じる塑性変形の影響をも考慮する必要がある。しかし従来の研究には、研削点下の塑性変形を考慮して残留応力の発生を検討した報告は殆どない⁽¹¹⁾。

本研究では基本的実験として、焼鈍した S45C 材を、各種研削条件で研削を行い、砥石-試料接触面下の塑性ひずみの発生状態や残留応力を詳細に測定し、残留応力発生におよぼす工作条件の影響や、発生過程についての考察を行った。

II. 実験方法

試料は市販の S45C $\phi 50$ mm の丸棒を鍛造し、60 mm $\times$ 10 mm $\times$ 3 mm および 60 mm $\times$ 10 mm $\times$ 15 mm に機械仕上げを行った後、無酸化炉で約 1100 K (約 830°C) に 1.8 ks (30 min) 保持後炉冷して加工ひずみを除き実験に供した。

実験は試料速度と砥石切込み深さを変えて行った。使用砥石および実験条件を Table 1 に示す。研削抵抗は、長八角形リングにひずみゲージを貼付した研削動力計⁽¹²⁾を自製し測定した。また研削温度の測定を行った。 $\phi 0.1$ mm のコンスタンタン線の一端を偏平にし、絶縁を施したものを、分割した試料にはさんで軽く研削を行う。このとき、コンスタンタン線は試料と共に流動を生じ、絶縁を破壊して試料と接触し、この点を高温部とする熱電対を形成する。この出力は増幅器を介して記録計に接続される。温度校正の際、この接点の近くに、温度計に接続した標準の AC 熱電対をおき、光熱源によって加熱し、表面温度と熱起電力の校正曲線を求めた^{(13)~(15)}。

残留応力の測定は次のように行った。まず各種の条件で研削した試料について、機械的方法によって残留応力を測定した。60 mm $\times$ 10 mm $\times$ 3 mm に仕上げた試料を所定の条件で研削した後、その試料の片面にひずみゲージを貼付

し、片面の除去を行う層除去法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾によって行った。測定に用いた式は次のようである。厚さ h の試料を深さ a まですり除去したとき、測定ひずみを ε 、この深さの応力を $\sigma_{(a)}$ とすると、

$$\sigma_{(a)} = -E/2(1-\nu^2)$$

$$\cdot \left[(h-a) \frac{d\varepsilon}{da} - 4\varepsilon + 6(h-a) \int_0^a \frac{\varepsilon}{(h-x)^2} dx \right]$$

E : ヤング率, ν : ポアソン比,

また、研削過程である砥石-試料接触域における試料の各部の残留応力の測定を行うため、60 mm $\times$ 10 mm $\times$ 15 mm の試料を研削の途中でとり出し、これについて X 線法により残留応力の測定を行った。これには Fig. 1 に示すように、バネの弾性を利用した試料の離脱装置を自製し、研削中の試料をとり出すこととした。このとき、変位計、デジタル記録計、シンクロスコープ等を用いて試料の離脱時間を求めた。ここでは試料が 20 μ m 離脱するには約 7.7 ms、40 μ m では約 10 ms 要した。各試料で、それぞれ砥石-試料接触域(接触長さ: $l = \sqrt{DA}$, D : 砥石直径, A : 切込深さ)について未研削端(研削の削り上り点)を基準点とし、0.3 mm ずつ離れた部分に X 線を照射し、0°-45° 法によって残留応力を求めた。測定には外層を逐次除去し、内部までの残留応力を求めた(実際にはこの値は除去前の残留応力とは異なるが、その差は微小であるので、測定値を補正しないで示す)。測定条件を Table 2 に示す。X 線照射の際、第一スリットを 1/6° とすると $\phi_0 = 0^\circ$ で試料面の照射幅は約 0.5 mm, $\phi_0 = 45^\circ$ で約 0.75 mm である。したがって、試料を 0.3 mm ずつ移動させたとき、求められた結果にはオーバーラップしたものが含まれることになる。

このように残留応力を測定した試料について、同時に接

Fig. 1 Scheme of grinding stop equipment and recession distance from grinding point.

Table 1 Grinding condition.

Grinding Wheel	WA 60 H 8 V
Wheel Speed	30~33 m/s (1800~2000 m/min)
Work Speed	0.05, 0.1, 0.15, 0.2 m/s (3, 6, 9, 12 m/min)
Depth of cut	10, 20, 30, 40 μ m/pass
Fluid	Dry

Table 2 X-Ray condition.

Target & Filter	CrK α , V,
Voltage & Current	30 kV, 10 mA,
Scanning Speed	1.16×10^{-3} rad/s (4°/min)
Count Full Scale	125 or 250 c/s
Chart Speed	6.67×10^{-4} m/s (40 mm/min)
Time Constant	1 or 2 s
Divergence Slit	1/6 degree
Receiving Slit	0.3 mm

触面下の各部におけるひずみを測定した。研削を行うに際し、試料の側面をラップ仕上げし、05, 06 番のエメリー紙で軽くこすると細かい条痕が残る。次に、この条痕と直角方向に再びエメリー紙でこすると 5~20 μm の細かい格子が得られる。この格子面にマークとしてマイクロビッカースの圧痕をつけ、研削前後でその圧痕近くの格子面の顕微鏡写真をとる。約 1000 倍に引伸ばされた写真において、研削面下 20~50 μm の深さの範囲で任意の 3 方向について、それぞれ適当な 2 点を決め、研削の前後でその 2 点間の長さの変化を求め、これより水平方向(研削面方向)と垂直方向のひずみを求めた。

しかし、この方法は細かいエメリー紙を用いても、ラップした側面に残る条痕は顕微鏡写真で約 1000 倍に引伸ばされるためかなり太く、それらの交点も大きくなることから、測定精度を高めるためには測定回数を多くする必要がある。

Fig.2 Scheme of workpiece for measurement of distortion below wheel-work contact zone.

Fig.3 An example of the grid at the side of specimen.

ある。そこでもう一つの方法として、同様にラップ仕上げを行った側面に格子の代りにヌーブ痕をつける方法をも併用した。研削予定面下 30 μm 程度の深さから約 20 μm の間隔で 4 点のヌーブ痕をつけ、研削方向には約 300 μm の間隔で、15~20 箇所ヌーブ痕を施した。この場合も、研削前後に顕微鏡写真を取り、圧痕の先端間の長さを測定し、これらの長さの変化より、水平方向(研削方向)、垂直方向のひずみを求めた。以上、二つのひずみ法をそれぞれ格子法、ヌーブ法と名付けて、Fig.2 にその概略を示す。同図において、(a) 格子法、(b) ヌーブ法、いずれの場合も実線は研削前の状態であり、点線は研削後の移動した状態であり、研削前に測定した長さ l_1, l_2, l_3 が研削後、 l'_1, l'_2, l'_3 に変化した状態を示したものである。また Fig.3 に格子法の一例を示す。これらより 3 方向のひずみ $\epsilon', \epsilon'', \epsilon'''$ および交角 α, β が得られ、これより図示のように主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 を計算し、さらに、水平方向ひずみ、垂直方向ひずみ ϵ_x, ϵ_y を求めた。せん断移動量の測定は、格子法における条痕の移動量を各深さについて測定したもので、5~7 本の条痕の平均値である。なお、写真の長さの測定には 5/100 mm のスケールの測定器を用いたが、写真の伸縮や視差を考慮すると、測定精度は $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ のオーダーである。

III. 実験結果

1. 各種研削条件における残留応力分布について

(1) 残留応力分布と試料速度および切込深さの関係

Fig.4 に機械的方法による残留応力の分布を示すが、その分布はすべて最外表部でわずかに低下した部分があるが、直ちに急増し、引張応力は最大値となる。その後再び急激に減少し、ある深さからゆるやかな低下に移るような分布となっている。各条件における残留応力の分布状態を詳細にしらべると、試料速度や切込深さによってそれぞれ異なる様相がみられる。Fig.4 にみられるように試料速度が大となると、切込深さ 10 μm の場合を除いて、20,

Fig.4 The distribution of grinding residual stress in various grinding conditions.

30, 40 μm のものでは速度が大きくなると最大残留応力は大きくなっている。このとき外表より内部にかけての引張応力部分の表面よりの深さについては、試料速度が大の場合、その深さは小であり、また、速度が小の場合に深さは大きくなっている。

次に切込深さの影響は、Fig.4 でみられるように、試料速度 0.05 m/s の場合は不明瞭であるが、それ以上の速度では、切込深さが大きくなるにつれて最大残留応力の値は大きくなる。この傾向は速度の増加の場合と同じである。しかし、このとき最大応力のあらわれる位置は、切込深さの増加にともなうやや外表に移っていく。また、外表より内部までの引張応力部分の深さは、切込深さが大となる場合に大きくなる。この傾向は速度増加の場合とは逆である。

(2) 最大残留応力について

最大残留応力について、試料速度および切込深さとの関係を示したのが Fig.5 である。同図によれば、最大応力は切込深さが大きくなると、試料速度 0.05 m/s の場合は別として、それ以上の各速度の場合には同じような増加を示している。しかし、試料速度を増加したときの最大応力の変化は、各切込深さによって異なる。これより、切込深さが残留応力発生に大きな影響を与えることが推定できる⁽¹⁸⁾。

研削抵抗を求めた結果を Fig.6 に示す。研削抵抗におよぼす試料速度、切込深さの影響としては、水平抵抗、垂直抵抗のいずれも試料速度、切込深さが大となると、最大

Fig.5 Relations between maximum residual stress and grinding conditions.

Fig.6 Relations between grinding forces and grinding conditions.

残留応力の場合と同じように増加している。これについては、普通研削抵抗が大きい程、研削熱の発生も大となることはよく知られており、このため熱応力を生じし、引張残留応力が発生すると考えると、外表部の最大残留応力に対し、これら水平抵抗、垂直抵抗が関係していることがわかる。

研削面温度の測定結果を Fig.7 に示す。温度は試料速度、切込深さのいずれによっても変化する⁽¹⁹⁾。このうち、Fig.5 の最大残留応力の場合と同じく、切込深さによる影響の方が試料速度の場合より明瞭である。

つぎに、最大残留応力と研削温度との関係を Fig.8 に示す。温度が大きくなると最大応力も大きくなり、試料速度の小さい 0.05 m/s の場合はややこの関係からはずれるが、温度と最大残留応力の関係は一応対応している。試料速度、切込深さがある条件範囲では、いずれの条件の場合も、最大残留応力は、その研削面温度に関係することが知られる。

Fig.7 Relations between grinding temperature and grinding conditions.

Fig.8 Relations between maximum residual stress and grinding temperature.

2. 残留応力の発生に関する検討実験

従来、研削による残留応力の発生原因の殆どは熱的作用によるものとされていた。ここでも、その最大残留応力については、研削面温度とよく対応することから、少なくとも最外表部にあらわれる最大応力値については、熱的原因によるものと考えられる。しかし、外表より内部にかけての残留応力の分布全体について考えると、表面より内部にゆくと、熱の影響は急速に小となるはずであるが、かなり内部まで引張残留応力であること、また、これらの残留応力が試料速度や切込深さの大小によって、特徴ある分布が得られることなどから、ここで残留応力の発生について、研削時、表面下において、外力の効果で生じる塑性変形の影響も検討する必要があると思われる。この目的のため、実験方法のところで述べたように、研削を途中で停止し、砥石-試料接触域を残して取出した試料について、未研削端より、それぞれ 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 mm はなれたところの、おのおのの部分について表面下の塑性ひずみの測定を行った。

(1) ひずみの測定結果

Fig.9 に研削面下における、研削方向と垂直方向のひずみ ϵ_x, ϵ_y の測定結果を示す。ここで求められたひずみは表面下約 20 μm から 50 μm の深さの部分における平均ひずみである。表面直下の ϵ_x, ϵ_y の測定は困難であった。また Fig.10 に表面から内部にかけてのせん断移動量を示す。ここで表面下の各部での実際の垂直ひずみの状態は、実測したせん断移動量の測定結果から推察すると、せん断移動と垂直ひずみの発生が同じ原因であるとすれば、両者は無関係ではないと考えられ、この垂直ひずみもせん断移動と同じように、外表より内部にかけて深く存在しているものとする。

残留応力の発生に関して ϵ_x, ϵ_y の状態をみると、まず ϵ_x については、材料が連続状態であれば、外表近くの表面下では、水平方向ひずみ ϵ_x は塑性ひずみに弾性的応力によるひずみが加わったもので、その状態は零に近いはずである。垂直ひずみ ϵ_y については外表部は自由であり、ここで外表方向の応力は零である。そこで垂直方向のひずみ ϵ_y については塑性ひずみであって、これは伸縮の値を自由にとり得る。また、 ϵ_x に直角な板幅方向のひずみ ϵ_z は、板幅が十分広く、 ϵ_x にくらべて小さいので、ここでは近似的に ϵ_z を零と置く。

そこで、体積不変の考えから、例えば垂直方向の塑性ひずみが収縮であれば、この部分の表面に平行な方向の塑性ひずみは伸長となり、そのため、この方向には圧縮残留応力が発生することがわかる。また ϵ_y が伸長ひずみのときは、同様にして表面に平行な方向に引張残留応力が生じる。このように、表面下のひずみの状態も残留応力の発生に関係する。

Fig.9 より、実際に表面下にあられるひずみの発生状態をみると、 ϵ_x はあまり大きくない。残留応力に関係するものとして垂直ひずみ ϵ_y に注目すると、いずれの場合も同じような傾向であらわれている。平均垂直ひずみ ϵ_y は未研削端より 0.3, 0.6, 0.9 mm と位置が移ると、圧縮ひずみが大きくあらわれ、これが 1.2 mm 付近になると減少し、これ以上では引張ひずみになってゆく。

普通、外力がなく、単に発熱のみによる熱応力が原因のときは、発熱による体積膨張抑制のため、表面にそった x 方向には圧縮ひずみを生じ、垂直方向には伸長の塑性ひずみとなる。この場合は表面下 20~50 μm の部分の垂直塑性ひずみであるが、研削のかなり進んだ状態では垂直方向は引張ひずみであるが、研削の初期においては引張ひずみではなく、大きな圧縮ひずみがみられる。このことは、熱的な影響があるとしても、外部からの力学的影響が加わったことによるものと考えられる。そして、結果としての残留応力は、もちろん、 x 方向の塑性ひずみが第一原因であり、このような垂直ひずみの影響は 2 次的な原因と考えられ、これは後述のように、内部の残留応力分布に影響する。

Fig.9 Plastic distortions below wheel-work contact zone.

Fig.10 Shearing displacement below wheel-work contact zone.

おのおの場合について述べると、試料速度の影響としては、切込深さ $20\mu\text{m}$ の場合、試料速度が大きくなると、未研削端より圧縮側にあらわれた垂直ひずみ ε_y の最大部分が未研削端側に移行し、全体としての圧縮ひずみ部分も大となっている。切込深さ $40\mu\text{m}$ の場合も同様である。1.5 mm 以上離れた点では ε_y は伸びひずみとなり、これ以降の状態においてはあまり差がない。

このことと Fig.4 に示した残留応力の測定結果と対比してみると、最大残留応力は別として、試料速度が大きくなると、外表より内部へかけての分布において、その引張応力部分の深さがより小となっている。このことは、垂直ひずみ ε_y が圧縮側に早く、大きくあらわれることと対応しているが、ここで、残留応力ではその内部において、試料速度の大きいものは、小さいものにくらべ、引張応力部分が小となり、すなわち、圧縮応力側に移行している。前述のように、垂直ひずみ ε_y の圧縮ひずみが大きくあらわれることは、2次的ではあるが、圧縮残留応力を生じる原因になるとすると、この力学的影響によるひずみがさらに表面下 $50\mu\text{m}$ 以下でも存在し、研削が進んだ状態になってもかなり残存して、残留応力に影響を与えていると考えられると、両者の関係は符合する。

次に切込深さの影響の場合を述べる。試料速度 0.05 m/s 、 0.1 m/s いずれの場合も、未研削端より 0.6 mm 付近にみられる ε_y の圧縮ひずみの大きさに大差ないが、 ε_y はこの付近より内部の引張側にうつる部分が、分布に多少の屈曲はあるが、切込深さが大きくなると、1.2 mm 付近から 1.5 mm 付近に移行し、また最終状態の引張ひずみは、切込深さの大きい場合は明らかに大となっている。

残留応力の分布との対比を考えると、まず垂直ひずみ ε_y については、研削初期にあらわれて、圧縮残留応力の原因になる圧縮ひずみは表面下、このようにあるいはこれ以下でもかなり残存するとしても、切込深さが大きいときは、この圧縮ひずみはより多く除去される。またこのとき、研削行程の終りにあらわれる引張ひずみも大きい。こ

れは残留応力分布において、まず内部での、引張残留応力部分が、切込深さが大きいほど大きく、また、表面近くまでの、全体としての残留応力部分も大となっていることに対応する。このように、残留応力の発生の主な原因は、熱応力による外表部での引張残留応力発生によることはもちろんのことであるが、上記のように研削初期の未研削端近くにあらわれる、このような塑性変形の影響もかなり関係することが考えられる。

(2) 砥石 - 試料接触域の残留応力について

ここでの残留応力の測定はX線法によって行ったものである。ここでの結果は、最外表は明瞭な引張応力であり、外表部にやや低い応力があらわれる機械的測定法の場合とは異なる。これはX線の浸透深さが $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度 (CrK α) であり、応力値はこの部分を含む平均値であること、また機械的測定法の場合、除去深さ - ひずみ関係曲線の勾配から計算を行ったもので、直接の測定値でないことによる。

Fig.11 は未研削端より 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 mm はなれた各点について、その部分の表面および表面下の残留応力をしらべたものである。まず、試料速度の影響についてのべる。各部の残留応力分布としては、切込深さ $20\text{ }\mu\text{m}$ の場合、各試料速度において、未研削端より 0.3 mm の付近ですでに残留応力を生じ、その表面下 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の深さで変動した分布となり、未研削端より 0.6, 0.9 mm でこれが変化し、1.2 mm で変化の終わったような分布となり、また 1.5~1.8 mm になると若干変化したような分布になっている。切込深さ $40\text{ }\mu\text{m}$ の場合でも同じような分布である。両者とも、試料速度の大きいものは 0.3, 0.6, 0.9 mm の部分における残留応力は全体として小さい。このとき、前述の ϵ_y の圧縮ひずみが表面下に大きく存在して影響を与えている場合に相当する。また、0.3, 0.6, 0.9 mm の点における表面よりの応力分布において、

引張残留応力の分布が下方にわん曲し、応力が低下したような状態がみられる。これは明らかに ϵ_y の収縮ひずみの影響によるものであろう。

次に、切込深さの影響についてみると、いずれの試料速度の場合においても、未研削端より 0.3, 0.6, 0.9 mm の各点の残留応力分布の状態は、切込深さの大きいものは、まず、最外表部に大きな引張残留応力を生じている。これはもちろん、まず研削熱の影響によるものと考えられる。各点における応力分布の状態では、未研削端より 0.3, 0.6, 0.9 mm 離れた位置で、引張残留応力の分布が屈曲して低下している部分が、しだいに深い位置にあらわれている。未研削端より 1.2, 1.5, 1.8 mm 離れた部分にかけての応力分布では、切込深さの大きい方がここでは明らかに大きな引張残留応力を生じている。これらは、前述したように切込深さの大きい方が研削初期に生じた収縮ひずみが大きく除かれること、また、研削の進んだ状態で、垂直ひずみがより大きく引張に移行することにも対応する。

IV. 結 言

0.45% C 炭素鋼材の試料について、各種の条件で研削を行ったものについて残留応力を調べ、残留応力発生におよぼす研削条件の影響や残留応力発生の原因について検討した。

(1) 研削による残留応力は、いずれの条件の場合も外表部に大きな引張残留応力を生じる。そして、残留応力の分布において、試料速度や切込深さを変えた場合、それぞれ特徴のある分布がみられる。

(2) 研削過程中的砥石 - 試料接触域の各点の表面下のひずみと残留応力を調べた結果、研削初期の未研削端近くで表面下 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ においても、表面に垂直な方向に大きな圧縮ひずみが存在することが知られ、研削の進んだ接触

Fig.11 The distribution of X-ray residual stress below wheel-work contact zone.

域の各部でこれが変化し、最終的には引張ひずみとなり、残留応力の発生に関係することが知られた。

残留応力の発生原因は、主として研削熱の影響による熱的原因によるものと思われるが、詳細にみると、このような試料と砥石との接触面で生じた力学的効果による塑性変形の影響も考慮すべきものと考ええる。

文 献

- (1) E.K.Henriksen : Trans. ASME, **73** (1951), 69.
- (2) H.R.Letner and H.J.Synder : Trans. ASME, **75** (1953), 873.
- (3) 西本 廉 : 精密機械, **30** (1964), 121.
- (4) H.Bühler and H.D.Klein : Werkstatt und Betrieb, **102** (1969), 845.
- (5) J.H.Kahles and M.Field : Proc. ICPE, (1974-8), 95.
- (6) W.E.Littmann : Proc.ICPE, (1967), 1308.
- (7) 貴志浩三, 江田 弘 : 日本金属学会誌, **35** (1971), 896.
- (8) 鍵和田忠男, 齊藤勝政 : 日本機械学会論文集, **43**, 372 (1977), 3125.
- (9) 江田 弘, 貴志浩三, 大久保昌典 : 精密機械, **45** (1979), 1347.
- (10) 江田 弘, 貴志浩三, 大久保昌典, 上野秀雄 : 精密機械, **47** (1981), 314.
- (11) 大越 諄 : 理研彙報, 第十一輯四号, (1931), 606.
- (12) C.T.Yang : Trans. ASME, **90** (1968), 127.
- (13) W.E.Littmann and J.Wulff : Trans. ASM, **47** (1955), 692.
- (14) J.Peklenik : Industrie-Anzeiger, 1-3 (1958), 10.
- (15) 津和秀夫, 山田弘文, 河村未久 : 精密機械, **41** (1975), 358.
- (16) F.Staeblein : Kruppsche Monatshefte, **12** (1931), 93.
- (17) 米谷 茂 : 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1975).
- (18) J.Frisch and E.G.Thomsen : Trans. ASME, **73** (1951), 337.
- (19) 高沢孝哉 : 精密機械, **30** (1964), 914.