S45C 炭素鋼の研削層における残留応力

米谷 茂* 今井克哉** 能登谷久公***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 56, No. 6 (1992), pp. 691-699

Residual Stresses in Ground Layer of S45C Carbon Steel

Shigeru Yonetani*, Katsuya Imai** and Hisakimi Notoya***

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology,
Science University of Tokyo, Noda

**Research and Development Department, Nippon Koshuha Steel Co., Ltd., Shinminato

***Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering,
Toyama University, Toyama

The specimen of S45C carbon steel was dry ground under various grinding conditions and residual stresses in the ground layer of the specimen were measured. On the measurement of the residual stresses, normal residual stress and residual shearing stress parallel to the grinding direction in each part were measured simultaneously. In order to investigate the influence of the structure on the occurrence of residual stresses, the textures at the ground surface part and at the slightly inner part from the surface of the specimen were measured. The normal residual stress in the ground layer was of tensile character. With increasing work speed or the depth of cut, the normal residual tensile stress in a region from the outer to the inner part increases, while the residual shearing stress in the region decreases slightly. Textures formed at the outermost part in the ground layer were varied with the grinding conditions. The effect of the heat produced in grinding on the occurrence of the residual stresses at the outer part was discussed.

(Received November 24, 1990)

Keywords: residual normal stress, S45C carbon steel, grinding, residual shearing stress, half-value breadth, texture

I. 緒 言

鋼材を研削したときの研削層における残留応力については、従来より多くの研究結果が発表されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。著者らはさきに研削条件や材料の異なるものについて研削層の残留応力を測定し、残留応力におよぼす各種の影響を検討した。また、研削時に生じる塑性ひずみを測定し、残留応力発生におよぼす塑性ひずみの影響を検討した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。現在多くの研究結果があり、いずれも外表部に引張残留応力の発生がみられるが、研削による残留応力の発生原因については十分解明されていない。

最近研削材や圧延材について、X線的方法を用いて研削方向の垂直残留応力を求めると同時に、また、表面にそって加工方向に生じるせん断残留応力の測定も行われている⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。本研究では、S45C 焼なまし材を、研削条件として工作物速度および砥石切込深さを変えて乾式で研削を行ったものについて、研削方向の垂直残留応力およびこの

方向のせん断残留応力の測定を行い、残留応力の発生を詳細に調べた。

また、これまで鋼材を研削したものについて集合組織を測定し、研削層に形成される残留応力と集合組織との関連について考察したものはほとんどない。本研究では、研削層における集合組織を測定し、各条件のものの残留応力に対応する組織の変化を調べ、残留応力発生と組織との関連を調べた。

II. 実験方法

1. 供試材

市販の直径φ50 mmのS45C丸棒材を平板状に鍛造した後、素材寸法として24 mm×10 mm×12 mmのものを切出し機械仕上げを行った。これを無酸化炉で1103 Kで焼なまし(1800 s保持後、炉冷)を行って加工ひずみを除いたものを研削用素材とした。Table 1に試料の化学成分と機械的性質を示す。

* 東京理科大学理工学部機械工学科

** 日本高周波鋼業株式会社技術開発部

*** 富山大学工学部機械システム工学科

Table 1 Chemical composition (mass%) and mechanical properties of specimen used.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
S45C	0.45	0.30	0.60	0.030	0.030	0.20	0.30	0.25

Tensile strength : σ_B	644 MPa
Elongation : ε	19.2%
Hardness	175 HV

Table 2 Grinding condition.

Grinding wheel	WA 60 H 7 V
Wheel speed : V	30 m/s
Work speed : v	0.05, 0.10, 0.15 m/s
Depth of cut : t	20, 30, 40 $\mu\text{m/pass}$
Fluid	Dry

研削は試料の 24 mm×10 mm の面について、工作物速度および砥石切込深さを変え、乾式、一工程で行った。研削は up cut で行ったもので、研削条件は Table 2 に示すようである。

2. 残留応力の測定

研削を行ったものは、研削層において、研削面方向に垂直残留応力が発生することが従来より知られている。また最近、研削層に研削面にそってせん断残留応力が発生していることが報告されている。本研究では X 線的方法を用い、Dölle⁽¹²⁾、Noyan⁽¹³⁾ によって開発された方法を用いて、研削方向に作用する垂直残留応力、および研削面にそって研削方向に作用するせん断残留応力を求めた。測定方法は、著者らがさきにアルミニウム引抜材⁽¹⁴⁾の残留応力の測定を行った場合と同様であるので、ここでは概略を説明しておく。

試料の研削方向を x 方向、研削方向に垂直で研削面に平行な方向を y 方向とし、また研削面に垂直な方向を z 方向とする。残留応力の測定に際し、研削方向にそった x 方向と試料面に垂直な z 方向を含む (zx) 面内において、試料面に垂直な方向を角度 0° とし、これより砥石の進入してくる方向 (にげ面側) に種々な角度 ϕ ($+\phi$ とする) 傾けて X 線を入射し、また同じく (zx) 面内で反対方向に角度 ϕ ($-\phi$ とする) 傾けて X 線を入射した。この X 線の入射に対する、各場合の回折線の移動からそれぞれ回折面に垂直にとった角度 ϕ 、 $-\phi$ 方向の格子面ひずみ $\varepsilon_{x,+\phi}$ および $\varepsilon_{x,-\phi}$ を求めた。X 線照射部において、このように求めたひずみ $\varepsilon_{x,+\phi}$ 、 $\varepsilon_{x,-\phi}$ と、研削方向の垂直残留応力 σ_x と研削面にそって作用するせん断残留応力 τ_{xz} との間にはつぎの

関係が成立する⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。

$$\frac{\varepsilon_{x,+\phi} + \varepsilon_{x,-\phi}}{2} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_x \sin^2 \phi - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{x,+\phi} - \varepsilon_{x,-\phi}}{2} = \frac{1+\nu}{E} \tau_{xz} \sin 2\phi \quad (2)$$

ここで E はヤング率、 ν はポアソン比である。そして $\{\varepsilon_{x,+\phi} + \varepsilon_{x,-\phi}\}$ に対する $\sin^2 \phi$ 、 $\{\varepsilon_{x,+\phi} - \varepsilon_{x,-\phi}\}$ に対する $\sin 2\phi$ の関係を示す図上で勾配をとり、これらから表面残留応力 σ_x 、 τ_{xz} を求めた。

X 線的方法を用いて応力測定を行うとき、材料が集合組織のような組織的異方性をもつ場合は、X 線の格子ひずみに対する $\sin^2 \phi$ の関係は、一般には非直線性を示すといわれている。Dölle⁽¹²⁾ は集合組織を有する試料の残留応力の測定には (h00) 面または (hhh) 面を測定することを推奨しており、本実験では、X 線は $\text{CrK}\alpha$ 線を用い、試料の (200) 面の回折による格子面ひずみを求めた。本実験の場合、実際の測定結果では式 (1)、(2) の $\{\varepsilon_{x,+\phi} + \varepsilon_{x,-\phi}\}/2$ に対する $\sin^2 \phi$ の関係、および $\{\varepsilon_{x,+\phi} - \varepsilon_{x,-\phi}\}/2$ に対する $\sin 2\phi$ の関係は、ほぼ直線の関係が得られた。

試料内部における残留応力を求めるため、試料の研削面より、腐食によって外層を逐次除去し、この外層除去過程中的試料表面部の研削方向の垂直残留応力とせん断残留応力を測定した。除去前に試料内部に存在した研削方向の垂直残留応力分布は、除去過程に測定される表面残留応力から計算によって求めた⁽¹⁵⁾。

ここで計算に用いた弾性定数は、素材について X 線的な較正実験を行って求めたものを用いた。すなわち、 $E=214.6 \text{ GPa}$ 、 $\nu=0.29$ である。

3. 集合組織の測定

集合組織の測定は、各研削条件のものの研削面から深さ 10 μm の位置において行った。また、砥石切込深さが 40 μm で、工作物速度がそれぞれ 0.05 m/s、0.15 m/s で研削を行ったものについては、研削部表面の集合組織を、また、砥石切込深さ 40 μm 、工作物速度 0.10 m/s で研削を行ったものは、研削面から深さ 30 μm および 70 μm の位置の集合組織を測定した。X 線は $\text{CrK}\alpha$ 線を用い、Schulz の反射法によって {100} 極点図を作製した。極点図は、紙面に垂直な方向を試料の研削面法線方向に、また上方向を砥石の進入してくる方向 (にげ面側) に合わせた。図中の {100} 極の等強度線はバックグラウンド強度を 1 としてその倍数で示した。

III. 実験結果

1. 垂直残留応力分布

従来より研削層には引張残留応力が発生することが知られている。著者ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、さきに各種の条件で研削した鋼材について残留応力の測定を行った。この際、研削時の砥

石接触面下の塑性ひずみの測定を行い、研削時砥石接触部に著しい塑性ひずみが生じていることを示し、これが残留応力に関連を持つことを示した。また、研削によって発生する熱が著しいことから、残留応力発生を主として熱応力によるものとして説明を行っている報告もある⁽¹⁶⁾。実際の研削時には、砥石接触部で急速な局部加熱が起り、このため熱応力を生じてこれによる塑性変形を生じ、この結果として研削層に引張残留応力が生じる場合が考えられる。この熱応力による残留応力の形成とともに、また、材料の高温降伏強度の低い場合はこの熱と応力下でクリープ変形を生じて、このため熱応力ないし残留応力が緩和することもある⁽¹⁷⁾。残留応力の発生原因には、以上のように、研削時の砥石接触部を通して作用する外部的な力による塑性変形と、研削時に発生する熱的原因によって生じる塑性変形が考えられる。しかし、両者の影響の詳細なことは不明である。

各条件で研削した試料の研削方向の垂直残留応力の測定結果について述べる。Fig. 1 に砥石速度を 30 m/s、切込深さを 40 μm として、工作物速度が 0.05 m/s, 0.10 m/s, 0.15 m/s の場合の残留応力を示す。また、Fig. 2 に砥石速度を 30 m/s、工作物速度を 0.10 m/s として、切込深さをそれぞれ 20 μm , 30 μm , 40 μm と変えた場合の残留応力の測定結果を示す。いずれの研削条件のものも研削層において、研削方向の垂直残留応力は引張応力となっており、研削表面で最も大きい。残留応力分布の形はいずれも、研削表面で大きな引張応力が内部に入ると急に低下し、表面から約 50~70 μm 内部に入った所で低下がゆるやかになり段のようなものがあらわれる。そしてさらに内部に向って大きく低下するような分布になっている。この分布の傾向は、最外表面部を除き、機械的方法で従来測定されている結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾と同様である。機械的方法で測定した場合、最外表部においては引張残留応力は急に低下したようなものになっており、X 線的方法で測定した結果と差がみられる。この差については、機械的方法による測定値は、研削層表面より逐次除去を行って残った部分の弛緩ひずみを測定し、このひずみから勾配計算を行って最外表面部の応力を間接的に推定した値であるが、X 線の測定値は、直接的に、入射 X 線の浸透深さ内の、最外表を含めた内部までの各部の応力の平均値として求められた値であり、この両方法による本質的な違いが、このような差の原因になっているものと思われる。さらに、研削部表面に集合組織の発達がみられるほど甚だしい塑性変形を行ったものについては、X 線の測定値は、測定回折面によって応力値が異なるような回折面依存などの組織的な影響を受け、機械的測定値と異なったものになることも考えられる。

Fig. 1 に示す工作物速度を変えた場合の残留応力の状態について述べる。一般に工作物速度が大きくなれば研削抵抗および発生熱は大きくなる⁽¹⁸⁾。研削部表面の最大引張

Fig. 1 Residual stress distribution in the specimen ground at different work speeds. V ; wheel speed, v ; work speed, t ; depth of cut.

残留応力は、工作物速度の増加につれて大きくなっている。研削部表面から約 70 μm の深さにかけての引張残留応力の大きさも、工作物速度が 0.05 m/s より 0.10 m/s までは工作物速度の増加とともに大きくなる。しかし、0.15 m/s の工作物速度では、上に述べたように最大引張残留応力は大きい、研削面から約 70 μm の深さにかけての引張残留応力は逆に小さくなっている。

次に、Fig. 2 に示す切込深さを変えた場合の残留応力について述べる。切込深さが大きくなると砥石と試料との切込部の接触面積が増加し、加工熱の発生も大きく、また研削面下の内部における塑性変形も大きくなる。切込深さの増加につれて研削部表面の最大引張残留応力は、工作物速度を増加させた場合と同様に大きくなっている。また、研

Fig. 2 Residual stress distribution in the specimen ground at different depths of cut. V ; wheel speed, v ; work speed, t ; depth of cut.

削面から約 70 μm の深さにかけての引張残留応力も、切込深さの増加とともに大きくなっている。残留応力分布の形はいずれのものも、表面から約 50~70 μm 内部に入った所で低下がゆるやかになり、段を呈している。切込深さが 20 μm のときの残留応力に比べて 40 μm のときのそれの方が、この段の部分から表面に向かって急速に増加している。

2. 研削層の集合組織

研削加工を行うと試料の砥石接触面下では著しい塑性変形を生じ集合組織が発達することが考えられる。しかしこれまで鋼材について研削層の集合組織を測定した例はほとんどない。残留応力は、研削時の砥石接触面下の材料内各

部で、場所的に不均一な塑性変形が生じる結果として発生するものである。よりくわしくいえば、残留応力の生成は、数理塑性論でとり扱われる相当塑性ひずみ(組織変化には何ら言及しない)の多寡と不均一性のほかに、塑性異方性をもたらし結晶学的繊維組織の種類と発達程度にも関係するものと考えられる。

Fig. 3 に砥石速度を 30 m/s、切込深さを 40 μm とし、工作物速度をそれぞれ 0.05 m/s, 0.10 m/s, 0.15 m/s で研削した場合の研削部表面および表面から各深さの部分における{100}極点図を示す。また、Fig. 4 に砥石速度を 30 m/s、工作物速度を 0.10 m/s として、切込深さをそれぞれ 20 μm , 30 μm , 40 μm と変えて研削した場合の、表面から深さ 10 μm の部分における{100}極点図を示す。

本実験の研削材では、表面および表面から各深さの部分において、いずれの研削条件のものも、{100}極が極点図内で比較的一様に分散しており、特定の方位成分に対応する強い集積があまり認められない。鋼圧延材や鋼引抜材⁽¹¹⁾⁽¹⁹⁾の場合と比較して、研削層における特定方位への結晶の配向は非常に少ない。

いずれも顕著な集合組織の様相は呈していないが、各集合組織の状態を詳細にみると、Fig. 3 の工作物速度 0.05 m/s の(a), (c) また 0.15 m/s の(b), (e) に示すように表面と表面から深さ 10 μm の部分、さらに(d), (f), (g) で示すように深さ 10 μm , 30 μm および 70 μm の部分の、各部の集合組織には幾分差が生じている。また、表面から深さ 10 μm の部分においては、Fig. 3(c), (d), (e) および Fig. 4(a), (b), (c) に示すように、工作物速度、切込深さを変えた場合も集合組織の状態がやや異なってみられる。Fig. 3(a) に示す砥石速度 30 m/s、切込深さ 40 μm 、工作物速度 0.05 m/s で研削した試料の、研削部表面の集合組織の様相としては、研削面に平行な{001}面に対する集積が、他の方位に対する集積よりも幾分強くあらわれている。また、極点図の中央部には、ある一定の方位が研削方向に平行になっている繊維集合組織のような、横方向に帯状の集積の広がり認められる。Fig. 3(b) の工作物速度 0.15 m/s で研削した試料の研削部表面の集合組織も、ほぼ同様な傾向を示している。表面から深さ 10 μm の部分の集合組織は、Fig. 3(c), (d), (e) にみられるように、いずれの工作物速度の場合にも、研削部表面における集合組織に認められた極点図中央部の横方向への帯状の集積の広がりみられなくなり、研削部表面に比べ、研削面に平行な{001}面に対する集積が他の方位に対する集積よりも強くなっている。さらに表面から深さ 30 μm および 70 μm の部分になると(Fig. 3(f), (g) の工作物速度 0.10 m/s で研削した試料にみられるように)、集合組織の状態はまた変化し、深さ 10 μm の部分の集合組織に比べ、研削面に平行な{001}面に対する集積状態がまた弱くなっている。深さ 30 μm と 70 μm の部分の集合組織の状態は比較的似ている。

Fig. 3 {100} pole figures in the specimen ground at different work speeds.

各条件で研削した試料について表面から深さ $10 \mu\text{m}$ の部分の集合組織の状態を述べる。切込深さを $40 \mu\text{m}$ とし、工作物速度を 0.05 m/s 、 0.10 m/s および 0.15 m/s で研削した場合の集合組織については、まず、Fig. 3(c)にみら

れる工作物速度 0.05 m/s の場合の集合組織は、Fig. 3(a)の研削部表面にみられた集合組織と比べて、集積の横方向への帯状の広がり状態が認められなくなるが、工作物速度を 0.10 m/s および 0.15 m/s と大きくした場合の Fig.

Fig. 4 {100} pole figures in the specimen ground at different depths of cut.

3(d), (e)と比較して{100}極が極点図内でまだ比較的一様に分散した状態がみられ、特定方位へ{100}極の集積が集中する傾向はあまり強くあらわれていない。しかし、工作物速度が0.10 m/s, さらに0.15 m/sと大きくなるにつれて、Fig. 3(d), (e)にみられるように、極の集積部がいくつか細かく分割してゆく傾向が強くなり、また集積の比較的強い部分と弱い部分との強度の差が大きくなる傾向が認められる。このような変化の原因は、研削熱のため、研削加工によって生じた組織内の結晶粒のひずみが幾分緩和されたものと考えられる。工作物速度が大きいものほど研削部表面の温度が高くなると考えられるので、結晶のひずみがより緩和され、極の方位分散が少なくなり、個々の集積部に対する方位の集中がより強くなったものと考えられる。このことは、著者ら⁽¹⁷⁾がさきにアルミニウム研削材について同じく集合組織を測定し、研削熱の影響により集合組織が変化することを示した。

砥石速度を30 m/s, 工作物速度を0.10 m/sとし、切込深さを20 μm, 30 μm, 40 μmに変えた条件で研削した場合の集合組織の変化について述べる。Fig. 4(a)の切込深さが20 μmのものの集合組織は、Fig. 4(b), (c)の切込深さが30 μm, 40 μmのものに比べて{100}極が極点図内で幾分広く分散している。しかし、切込深さが30 μmと40 μmのものの集合組織にはあまり差が認められない。上述のように切込深さを変えると、発生した加工熱の影響があらわれる。すなわち、切込深さが大きい条件のほうが小さい条件のものより極の集積部以外の方位分散が少なくなり、個々の集積に対する方位の集中が幾分強くなっているようである。なお、本実験における集合組織の変化は、切込深さを変えたときの方が工作物速度を変えたときより小さい。

Ⅳ. 考察—せん断残留応力と垂直残留応力の発生原因

研削加工を行うと、砥石と試料の接触部ではせん断力が作用し、研削部表面から内部の各層において研削方向に不均一なせん断塑性変形を生じ、せん断残留応力が発生することが考えられる⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾。このせん断残留応力は、巨視的に、加工時の各層の塑性的なせん断変形の不均等さに起因するものと考えられる。ここでは、各条件で研削した試料についてせん断残留応力を測定した結果と、半価幅を測定した結果を述べ、残留応力の発生に対する考察を行う。せん断残留応力は、応力測定時、毎回外層除去の際の試料の外表面部において求めたせん断残留応力で、X線を入射したときの浸透深さの範囲内における各部の応力の平均値である。せん断残留応力は、応力測定の際に研削方向の垂直残留応力の測定と同時に、式(2)により、すなわちX線回折像の移動をもとにした関係から得られる応力であり、この意味で、巨視的残留応力であるが、またその応力の発生は微視的にも加工時の組織と密接に関係をもち、発生を微視的機構によって説明している研究もある⁽²⁰⁾。また、半価幅値は応力測定の際の入射角 $\psi=0^\circ$ と 45° でX線を入射した場合の回折像から求めた。この半価幅は結晶内ですべりの交叉や停滞などがあって結晶格子の配列が乱れたことに起因する微視的な内部ひずみに対応する。

Fig. 5に砥石速度を30 m/s, 切込深さを40 μmとして、工作物速度を0.05 m/s, 0.10 m/s, 0.15 m/sと変えた場合のせん断残留応力および半価幅を測定した結果を示す。また、Fig. 6に砥石速度を30 m/s, 工作物速度を0.10 m/sとして、切込深さを20 μm, 30 μm, 40 μmと変えた場合のせん断残留応力と半価幅の測定結果を示す。まず、Fig. 5とFig. 6に示す各研削条件のせん断残留応力は、いずれのものも研削部表面から内部の深さ約50~70 μm付近にかけて急に低下し、それから低下はなく約

Fig. 5 Residual shearing stress and half-value breadth measured in the specimen ground at different work speeds.

V ; wheel speed, v ; work speed, t ; depth of cut, $\bullet$: residual shearing stress, $\circ$: half-value breadth.

Fig. 6 Residual shearing stress and half-value breadth measured in the specimen ground at different depths of cut.

V ; wheel speed, v ; work speed, t ; depth of cut, $\bullet$: residual shearing stress, $\circ$: half-value breadth.

100 μm 内部に入った所でやや増加して、さらに内部では再びゆるやかに低下するような分布となっている。この分布は、Fig. 1 や Fig. 2 にみたように、垂直残留応力が表面からやや内部にかけて急に低下して段を生じてのち、また低下するような分布と良く対応している。また、せん断残留応力の値は垂直残留応力より小であるが、せん断残留応力の内部での分布の形は垂直残留応力の分布に比べ変化が大きくあらわれている。また半価幅は、研削部表面から内部に向って急に低下し、さらに内部でまた幾分増加し、また低下するような分布で、せん断残留応力の分布とよく似ている。

工作物速度を変えた場合 (Fig. 5) のせん断残留応力と半

価幅について述べる。まず、研削表面から深さ約 50 μm までのせん断残留応力の大きさは、工作物速度が 0.05 m/s から 0.10 m/s になると幾分増加している。しかし、工作物速度がさらに大きい 0.15 m/s になると、0.10 m/s のものよりも減少している。一方、微視的な内部ひずみを示す半価幅の大きさは、研削面から約 50~70 μm 付近までの内部にかけて、工作物速度が 0.05 m/s と 0.10 m/s の場合の大きさとあまり差はないが、0.15 m/s の場合は、前 2 者よりやや大きくなっている。一般に工作物速度の大きいものほど、研削部表面付近におけるせん断塑性変形は大きく、このときせん断残留応力も大きくなり、また微視的内部ひずみを示す半価幅も大きくあらわれると思われる。

る。実際、最も工作物速度の大きい 0.15 m/s の場合の研削面から内部にかけての半価幅は、他の工作物速度の場合より大きくなっている。しかし、せん断残留応力は上述の推定とは逆に小さくなっている。工作物速度が大きくなってもせん断残留応力が増加していない原因としては、工作物速度が大きいほど大きなせん断塑性変形を生じ、大きなせん断残留応力を生じると考えられるが、またこのとき研削によって発生する熱は大きく、この熱によってせん断残留応力が緩和することが考えられる。さきに著者ら⁽¹⁷⁾は本実験試料に比べて降伏強度の低いアルミニウム合金について同様な実験を行い、研削層の垂直残留応力とせん断残留応力、および組織との関係を調べた。その結果、研削時に発生する熱の影響によって、研削層の表面近くでは、垂直残留応力とせん断残留応力のいずれも小となり、この熱による緩和効果は垂直残留応力に対してよりもせん断残留応力に対して敏感にあらわれることが明らかにされている。詳細なことは不明であるが、本実験の場合も同じように、せん断残留応力に対して熱による緩和効果が敏感にあらわれたものとする。本実験の集合組織の測定結果においても、工作物速度の大きな試料の研削表面から $10 \mu\text{m}$ 内部の集合組織は、工作物速度の小さな試料より極の集積部がいくつか細かく分割される傾向があり、また集積の比較的強い部分と弱い部分との強度の差も幾分大きくなっており、加工熱が組織変化に強く影響しているのがみられる。このような組織変化はせん断残留応力の緩和に関連しているのではないかと考える。

なお、ここで Fig. 5 に示すように工作物速度 0.05 m/s , 0.10 m/s で研削したとき、せん断残留応力は、かなり内部に入ったところで研削面の応力と符号が逆転している。また、 0.15 m/s の場合も内部で幾分の逆転がみられている。内部でこのような異符号のせん断残留応力があらわれることは、研削時、砥石接触面下で複雑な塑性変形が生じたことによるものと考えられる。著者らがさきにはほぼ同種の炭素鋼試験片を研削したものについて調べた結果では⁽⁴⁾、表面下約 $30 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ の内部で、研削初期に、すでに砥石接触部の端部付近では、かなりの塑性ひずみが生じ、このひずみは研削過程の進行とともにさらに大きく変化していくのがみられた。本実験の場合も、研削面から $100 \mu\text{m}$ の深さにおいてもなおかなりの塑性変形が生じているものと推察され、このようなせん断残留応力の分布のものも生じたと考えられる。

切込深さを変えた場合 (Fig. 6) について述べる。Fig. 5 でみたと同じく、せん断残留応力の分布と半価幅は、いずれも研削部表面から約 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ の深さまで急に低下し、さらに内部でやや増加している。いずれの切込深さのものもよく似た分布であるが、せん断残留応力分布を詳細にみると、研削表面から深さ約 50 ないし $70 \mu\text{m}$ の間において、切込深さが増加するにつれて、研削表面の応力の大きさはやや低下し、また内部で応力がひとまず低下して極小とな

る位置は研削面に近づいており、研削面から深さ約 50 ないし $70 \mu\text{m}$ までのせん断残留応力の大きさは小となっている。半価幅は切込深さが変化してもさほど差はみられない。切込深さが増加すると研削抵抗が大きく加工熱の発生が大きくなるので、切込深さの増加とともにせん断残留応力の低下は、さきの工作物速度が大きくなった場合と同様に、研削時に発生する熱によるせん断残留応力の緩和が大きくなったためと考えられる。研削表面から $10 \mu\text{m}$ 内部の集合組織 (Fig. 4) をみると、熱の影響によると思われるが、切込深さの大きな条件の試料の組織では、切込深さの小さな条件のものより極の集積部は幾分細かく分割される傾向がみられている。しかし、さきに Fig. 2 に示した垂直残留応力分布においては、切込深さの増加とともに研削表面近くの引張残留応力は大きくなっており、せん断残留応力分布にみられるような熱による緩和効果はみられていない。

研削層における垂直残留応力は、いずれの条件で研削した場合も、研削表面から内部にかけて引張残留応力である。この原因については、研削初期にすでに、砥石接触部を通じて作用する外部的力によって内部に大きな塑性ひずみが生じ⁽⁴⁾、さらに研削終了までの間に、材料表面付近では集合組織が形成されるほどの甚だしい塑性変形が生じ、また内部でも、さらに塑性変形がひき続き行われ、これに、研削熱によって生じた熱応力の影響が加わって、結果として (詳細なことは不明であるが) 研削表面から内部にかけて引張残留応力を生成するような塑性ひずみが生じたことによるものとする。研削熱の影響としては、これはちょうど溶接の場合の局部加熱と同じように、急速な加熱によって膨張した高温の部分は、低温の周辺部の拘束の下に熱応力を発生して圧縮塑性変形を生じ、冷却後の部分に引張残留応力が生じる。このような熱による影響が、研削時の外部的な力によって生じる塑性変形の影響に加わって、どのように研削層における残留応力生成に関与しているかは不明である。これに関し、著者らはさきに同様な研削残留応力に関する実験において⁽⁵⁾、単純な推定であるが、各種条件の研削材の外表面の最大残留応力が、発生加工熱に、外部的な力による塑性変形の影響を示す値 (実測による値を補正したもの) を単純に加えたものに相関性があることを示した。

また、垂直残留応力分布において (他の実験結果でもみられているが)、応力が研削表面より急に低下してひとまず段のようなものがあらわれ、逆にいえば、この段の部分より研削表面に向って、引張残留応力が急増しているのがみられる。これについては、残留応力発生に際し、外部的な力による塑性変形は、表面よりかなり内部まで生じ、内部における残留応力形成に関係するが、これに比べ、研削熱の影響は、表面近くであらわれ、最外表の部分では前述の急速加熱効果によって、この部分の引張残留応力生成に関係するが、やや内部の発生熱が低いところ (応力分布に

段があらわれる付近)では、熱による応力の緩和の影響が大きくあらわれて、このような応力分布を生じたものと考ええる。

V. 結 言

S45C 鋼材を工作物速度および砥石切込深さを変えて乾式で研削し、研削層における残留応力を測定した。また研削層の集合組織を測定し、残留応力発生に関連して組織の変化を調べた。

(1) 研削方向の垂直残留応力はいずれの研削条件のものも引張残留応力であり、その分布は、研削部表面から内部に向かって急に低下し、約 50~70 μm 内部に入った所で低下が一旦ゆるやかになり、さらに内部に向かって再度ゆるやかに低下する分布である。また、せん断残留応力および半価幅の深さ方向分布も、垂直残留応力分布と似た状態であらわれている。研削部表面近くでは、工作物速度あるいは砥石切込深さが大きくなると、垂直残留応力は大きくなるが、せん断残留応力は小さくなっている。

(2) 研削層においては、各研削条件に対応した集合組織がみられた。表面から深さ 10 μm の部分における集合組織は、どの研削条件のものも特定の方位に対する強い集積はあまり認められないが、研削面に平行な{001}面に対する集積が、他の方位に対する集積よりも幾分強くあらわれている。工作物速度や切込深さが大きくなると、極の集積部が細かく分割される傾向があり、また集積の比較的強い部分と弱い部分との強度の差も幾分大きくなっている。これは研削時の熱発生の影響によるものと考えられる。

(3) 残留応力の発生には、研削時、砥石接触部から加わる外部的な力による影響と研削熱の影響が加わることによるものと考えられるが、垂直残留応力分布において、内部

の約 50 μm 付近から研削部表面に向かって引張残留応力が急増している部分は、この熱による影響があらわれたものと考ええる。

文 献

- (1) H. R. Letner: Trans. ASME, **77**(1955), 1089.
- (2) H. R. Letner and H. J. Snyder: Trans. ASME, **75**(1953), 873.
- (3) 西本 廉: 精密機械, **30**(1964), 121.
- (4) 米谷 茂, 能登谷久公, 高辻雄三: 日本金属学会誌, **47**(1983), 72.
- (5) 米谷 茂, 能登谷久公, 高辻雄三: 材料, **33**(1984), 1250.
- (6) 米谷 茂, 能登谷久公, 高辻雄三: 日本金属学会誌, **48**(1984), 611.
- (7) H. Dölle and J. B. Cohen: Metall. Trans., **11A**(1980), 159.
- (8) I. C. Noyan: Metall. Trans., **14A**(1983), 1907.
- (9) 若林三記夫, 中山 守, 玉村謙太郎: 精密機械, **50**(1984), 1481.
- (10) 英 崇夫, 藤原晴夫: 材料, **31**(1982), 227.
- (11) 米谷 茂, 今井克哉, 能登谷久公: 日本金属学会誌, **54**(1990), 1120.
- (12) H. Dölle: J. Appl. Cryst., **12**(1979), 489.
- (13) I. C. Noyan: Metall. Trans., **14A**(1983), 249.
- (14) 米谷 茂, 今井克哉: 日本金属学会誌, **53**(1989), 126.
- (15) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1987), 105.
- (16) 江田 弘, 貴志浩三, 大久保昌典, 上野秀雄: 精密機械, **47**(1981), 314.
- (17) 今井克哉, 米谷 茂, 能登谷久公: 軽金属, **40**(1990), 573.
- (18) J. C. Jeager: Proc. Roy. Soc. N. S. W., **76**(1942), 203.
- (19) 米谷 茂, 今井克哉: 日本金属学会誌, **54**(1990), 336.
- (20) P. Gondi, G. Mattogno, R. Montanari and A. Sili: Z. Metallkde., **81**(1990), 570.