冷間引拔鋼丸棒の残留応力

米 谷 茂* 今 井 克 哉**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 54, No. 3 (1990), pp. 336-345

Residual Stress in Cold Drawn Carbon Steel Bar

Shigeru Yonetani* and Katsuya Imai**

Residual stresses in 0.25% carbon steel and 0.45% carbon steel bar specimens which were cold drawn to cross-sectional reductions from 5 to 29% were measured. The cold drawing was carried out several times by the cross-sectional reduction of about 5% per pass. The residual stresses in the section of specimens after drawing were tensile at the outer part of the specimens, and compressive at the inner part of the specimens. The maximum residual stress at the outer part increased successively with the cross-sectional reduction to about 20%, and decreased over 20%. There are differences in the variation of the normal residual stress distribution with increasing cross-sectional reduction below and over at 20%. The textures in the outer and inner parts of these specimens were measured. The influence of the structure for the occurrence of residual stresses was discussed.

(Received November 8, 1989)

Keywords: residual stress, cold drawing, carbon steel bar, texture, residual shearing stress, half-value breadth

I. 緒 言

引拔丸棒材の残留応力については、古くより Bühler らによって詳細な研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。引拔材に生じる残留応力は、外表部には引張残留応力があらわれ、断面減少率の増加とともにかなりの大きさの引張残留応力が生じることが報告されている。Bühler ら⁽⁶⁾は次元解析を用い、鋼や黄銅などの引拔材について、降伏応力、弾性定数や断面減少率等を因子として断面内各部の残留応力を計算によって求める式を求めている。しかしこれらは引拔きの断面減少率が一回の引拔きで約10%程度まで行ったもので、さらに強度に引拔いたものについて残留応力の測定を行った例はほとんどない。

ここでは0.25%および0.45%炭素鋼丸棒材についてこれを数パスにわたって逐次に引拔きを行い、全断面減少率で約29%まで強度に引拔きを行ったものの、各種の引拔段階における丸棒の残留応力を測定した結果を述べる。強度に引拔きを行ったものは断面内に集合組織が生じている。ここではこのような集合組織を生じたものの残留応力の測定を行った。また残留応力の発生におよぼす組織の影響についても検討を行った。

II. 実 験 方 法

1. 供試材

供試材は Table 1 に示す化学成分をもつ、直径 16 mm の工業用の S25C, S45C 圧延丸棒材である。これを直径 15 mm まで研削によって外表を除去した後、S25C は 1143 K, S45C は 1103 K で真空焼なまし(3.6 ks(1 h)保持後炉冷)を行ったものを引拔用素材とした。引拔加工は絞り部ダイス角14°の円錐ダイスを用い、引拔速度約 2 mm/s で行った。潤滑は素材にフッ素系樹脂潤滑剤を塗り、引拔時には粉末状金属石鹸を用いた。引拔きのパススケジュールを Table 2 に示す。引拔きは1回の引拔きを行ったものではなく S25C, S45C とともに同じ条件で1パス約5%で逐次に引拔きを行ったもので、S25C については全断面減少率5.3%, 9.9%, 15.1%, 19.8%, 29.2%, のもの、

Table 1 Chemical composition of specimen (mass%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
S25C	0.22	0.21	0.54	0.030	0.012	0.06	0.02	0.01
S45C	0.43	0.27	0.80	0.027	0.012	0.08	0.02	0.02

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

** 金沢大学大学院生 (Graduate Student, Kanazawa University, Kanazawa)

Table 2 Reduction in cross-section of bar specimens in each stage of the drawing sequence.

S25C

Diameter (mm)	14.97	14.57	14.21	13.79	13.41	13.00	12.60
Total Re (%)	0	5.3	9.9	15.1	19.8	24.6	29.2
1 Pass Re (%)	0	5.3	4.9	5.8	5.4	6.0	6.1

S45C

Diameter (mm)	14.97	14.58	14.22	13.81	13.42	13.01	12.62
Total Re (%)	0	5.1	9.8	14.9	19.6	24.5	28.9
1 Pass Re (%)	0	5.1	4.9	5.7	5.6	6.0	5.9

S45C については全断面減少率 5.1%, 9.8%, 14.9%, 19.6%, 28.9% のものを作った。

2. 残留応力の測定

残留応力の測定には X 線的方法を用いた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。引抜きを行った棒材は断面内に軸方向、円周方向、半径方向の残留応力を持っている。また試料は引抜時のダイス壁との摩擦によって、断面内各層で引抜方向に不均一なせん断変形が生じ、このため引抜後せん断残留応力が生じることが考えられる。最近庄延または研削したものについて、X 線的方法によって表面下のせん断残留応力を測定した結果が発表されている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。ここでは Dölle⁽¹³⁾ および Noyan⁽¹⁴⁾ によって開発された方法を用いてせん断残留応力の測定も行った。なお著者はさらに、アルミニウムの引抜材について残留応力を測定した結果を発表しており、ここで垂直方向の残留応力およびせん断残留応力の測定はこれと同じように行った⁽¹⁵⁾。

残留応力測定の概略を述べてる。いま試料の表面にそった軸方向を z 、円周方向を t 、半径方向を r とし、また試料表面に垂直な方向を N とする。X 線を入射したときその回折格子面に垂直にとった方向を L とする。 Nz 面内で L を N から種々な角度 ψ 傾けた方向より X 線を入射し、また反対方向に同じく角度 $-\psi$ 傾けて X 線を入射し、その回折線の移動を測定して、それぞれの場合の回折格子面に垂直な方向の格子面ひずみ $\varepsilon_{z,+\psi}$ および $\varepsilon_{z,-\psi}$ を求める。また Nt 面内でも L を N から種々な角度 ψ 傾けた方向より X 線を入射してそれぞれの回折面に垂直な方向の格子面ひずみ $\varepsilon_{t,\psi}$ を求める。このとき試料表面の軸方向、円周方向残留応力 σ_z, σ_t および軸方向と半径方向にそった面に作用するせん断残留応力 τ_{zr} と、ひずみ $\varepsilon_{z,+\psi}, \varepsilon_{z,-\psi}$ および $\varepsilon_{t,\psi}$ との間にはつぎの関係が成立する⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

$$\frac{\varepsilon_{z,+\psi} + \varepsilon_{z,-\psi}}{2} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_z \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_z + \sigma_t) \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{z,+\psi} - \varepsilon_{z,-\psi}}{2} = \frac{1+\nu}{E} \tau_{zr} \sin 2\psi \quad (2)$$

$$\varepsilon_{t,\psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_t \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_z + \sigma_t) \quad (3)$$

ここで E はヤング率、 ν はポアソン比である。そこで $\{\varepsilon_{z,+\psi} + \varepsilon_{z,-\psi}\}$ と $\sin^2 \psi$, $\{\varepsilon_{z,+\psi} - \varepsilon_{z,-\psi}\}$ と $\sin 2\psi$ および $\varepsilon_{t,\psi}$ と $\sin^2 \psi$ の関係を示す図上で勾配をとり、これから表面応力 σ_z, σ_t および τ_{zr} を求めた。

測定材料が集合組織を呈する場合、普通このようにして得られる回折面の格子ひずみ ε に対する $\sin^2 \psi$ の関係においてその直線性が問題となる。Dölle⁽¹³⁾ は集合組織をもつ材料の残留応力の測定について検討を行い、測定には $(h00)$ 面または (hhh) 面を採用することを推奨している。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。本実験の結果では、式 (1) における $\{\varepsilon_{z,+\psi} + \varepsilon_{z,-\psi}\}/2$ に対する $\sin^2 \psi$ の関係、式 (2) における $\{\varepsilon_{z,+\psi} - \varepsilon_{z,-\psi}\}/2$ に対する $\sin 2\psi$ の関係および式 (3) における $\varepsilon_{t,\psi}$ に対する $\sin^2 \psi$ の関係において、それぞれほぼ直線の関係が得られた。

実際の残留応力の測定には腐食によって試料を外表面より外層除去し、外層の逐次除去過程中的試料表面部における軸方向、円周方向残留応力 σ_z, σ_t およびせん断残留応力 τ_{zr} を式 (1), (2), (3) より求めた。ここで、外層の腐食除去は硝酸によって行った。応力測定はこの面を電解研磨して行った。ついで、この除去過程中的表面残留応力 σ_z, σ_t から、除去前に試料内部で釣合いを保って存在していた軸方向、円周方向および半径方向の残留応力を計算によって求めた⁽⁷⁾。

集合組織を生じるとき弾性定数はその優先方位によって異なるが、ここでは近似的に断面内一様として、平均的な弾性定数をつぎのようにして求めた。各断面減少率の各条件の試料について圧縮試験を行い、機械的に応力とひずみの関係から弾性定数を求めた。また曲げ試験を行い、抵抗線ひずみ計による機械的なひずみ測定と X 線による表面部のひずみ測定を同時に行い、負荷荷重下での試料の (200) 面によるひずみと機械的ひずみの較正を行った。そして機械的負荷荷重下での試料 (200) 面によるひずみと応力の関係から X 線の弾性定数を求めた。このように求めたヤング率 E 、ポアソン比 ν の値を Table 3 に示す。ま

Table 3 Young's modulus and Poisson's ratio of bar specimens after drawing to various cross-sectional reductions.

S25C

Total Re (%)	0	5.3	9.9	15.1	19.8	29.2
Young's modulus (GPa)	225.3	237.4	227.9	219.3	218.4	236.3
Poisson's ratio	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29	0.30

S45C

Total Re (%)	0	5.1	9.8	14.9	19.6	28.9
Young's modulus (GPa)	222.9	227.8	226.7	230.3	240.2	240.1
Poisson's ratio	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31

た、ここで軸方向、円周方向のヤング率は同じとした。

応力測定用に選択した(200)面はその回折角は 2θ 約 106° で低回折角度領域に位置するため測定には側傾法を用いた。(なおこれによって求められる応力値と、一般に応力測定に用いられる(211)面(2θ 約 156°)を用いた通常法による応力測定値との比較検討を行ったが、両者の測定値の差は約10%であり、この場合この程度の面間依存による応力の差が認められた。)

各条件の試料は後述の集合組織の測定結果から知られるように、断面減少率によって程度の差はあるがその組織は異なっており、またその断面内の各部でも様な組織ではない。応力の測定にさいし、このような試料について外層除去をして、試料内部の各部についての(200)面のひずみを求めて応力分布を計算している。ここで弾性定数は断面内一様として、このようなX線的方法によって残留応力を求めた結果と、また一般に用いられている機械的測定による結果との比較を行ってみた。これには次のような実験を行った。両方法によって残留応力分布まで求めると、これにはこの過程で誤差が入ることが考えられもっと直接的な比較として、つぎのようなことを行った。引抜材に穴をあけ中空円筒状試験片をつくった。この外半径 b 、内半径 a の円筒について外表より外層を半径 r まで除去し、外層除去過程における試料円筒内層のひずみを、機械的方法で求めた結果とX線的に求めた値から計算した結果の比較を行った。外層除去過程の試料表面の軸方向、円周方向残留応力をそれぞれ σ'_z, σ'_t (これはX線的方法によって求められる)とする、また円筒内面に外層除去によって生じた軸方向および円周方向の機械的ひずみを ϵ_z, ϵ_t (抵抗線ひずみゲージによって測定する)とすると、両者には次の関係が求められる⁽¹⁶⁾。

$$\epsilon_z = \frac{2}{E} \left[\int_r^b \frac{r}{(r^2 - a^2)} (\sigma'_z - \nu \sigma'_t) dr \right] \quad (4)$$

$$\epsilon_t = \frac{2}{E} \left[\int_r^b \frac{r}{(r^2 - a^2)} (\sigma'_t - \nu \sigma'_z) dr \right] \quad (5)$$

ここで、式(1)、(2)、(3)から実験的に求められる $((1+\nu)/E) \times \sigma'_z, ((1+\nu)/E) \times \sigma'_t$ を用いて、これを式(4)、(5)に代入してX線的に計算して得られるひずみ ϵ_z, ϵ_t を求めて、機械的に測定したひずみ ϵ_z, ϵ_t と比較検討を行った。結果をFig. 1に示す。S45Cの試料の断面減少率14.9%、28.9%のものについて測定した結果である。Fig. 1において、両方法によって得られたひずみはほぼ同じようであり、本実験ではX線的方法によって残留応力を求めるさいに、第一近似として弾性定数が断面内一様と仮定しているが、この方法によっても、機械的方法で求められるものとはほぼ等しい程度の残留応力が得られると考えられる。

3. 集合組織の測定

集合組織の測定は、各断面減少率のものについて、断面

Fig. 1 Comparison between strains measured by strain gauge and calculated from strain by the X-ray method. Specimens of 0.45% carbon steel are drawn to 14.9 and 28.9% reductions. ●: axial strain calculated from strain by the X-ray method, ○: axial strain measured by strain gauge, ■: circumferential strain calculated from strain by the X-ray method, □: circumferential strain measured by strain gauge.

内の外表近く、内部の各位置で{110}極点図を作製し行った。用いた特性X線はCoK α 線で反射法⁽¹⁷⁾によって極点図を作製した。図中の等高線はランダム試料の回折強度との比で表わした。

III. 実験結果

1. 断面硬さ

はじめに、S25C, S45C材の各断面減少率のものの断面硬さを調べた結果について述べる。断面減少率の増加とともに断面硬さは増加している。また断面内の各部の硬さは、いずれのものも外表より内部に入るにしたがって幾分であるがしだいに増加してゆき、約4 mm程度内部に入ったところまでに高い値があらわれ、そしてさらに内部に入ると外表部程度の硬さになってゆくような分布となっている。Fig. 2に外表よりやや内部に入った部分における

Fig. 2 Maximum hardness at the outer part and hardness at the inner part of specimen after drawing to various cross-sectional reductions. ●: maximum hardness at the outer part, ○: hardness at the inner part.

最大硬さと内部の硬さを示す。この断面内の硬さの変化は断面減少率の増加にともなって示されている硬さの変化よりはるかに小さい。S25C 材, S45C 材の各断面減少率のものについて硬さと後述の残留応力分布との対応をみると、外表から硬さが増加してさらに低下したところが残留応力分布で引張残留応力が現われ、さらに圧縮残留応力に変化してゆくまでの部分に相当している。

2. 残留応力分布

残留応力を測定した結果について述べる。S25C 材を 1 パス断面減少率約 5% ずつ逐次に引抜き、断面減少率 5.3%, 9.9%, 15.1%, 19.8%, 29.2% まで引抜いた試料の残留応力を測定した結果を Fig. 3 に、また S45C 材を同じく断面減少率 5.1%, 9.8%, 14.9%, 19.6%, 28.9% まで引抜いたものの残留応力を測定した結果を Fig. 4 に示す。発生した残留応力分布はまずいずれのものも軸方向、円周方向ともに外表近くで大きな引張残留応力が現われる。軸方向の残留応力は引抜段階が進むにつれてその分布の状態は変化するが、円周方向の残留応力分布は、各引抜段階で変化しつつも軸方向残留応力分布ほどの変化はない。

S25C 材, S45C 材おのおの各断面減少率のものの残留応力の状態を述べる。まず S25C 材の場合は、外表近くの部分の軸方向引張残留応力は、断面減少率が 5.3% から

Fig. 3 Residual stress in the section of 0.25% carbon steel bar specimens after drawing to various reductions.

Fig. 4 Residual stress in the section of 0.45% carbon steel bar specimens after drawing to various reductions.

15.1%までは断面減少率の増加に伴ってしだいに増加している。しかしさらに引抜段階が進んだ断面減少率 19.8%, 29.2% のものになると軸方向引張残留応力は低下し 15.1% のものよりも小さくなっている。この傾向は S45C 材の場合も同様で、外表近くの部分の軸方向引張残留応力は断面減少率 14.9% まで増加し、19.6%, 28.9% のものになるとさらに大きく低下している。軸方向と円周方向の残留応力分布の状態をみると、S25C 材, S45C 材いずれのものも断面減少率約 15% までは両分布に大きなずれがあり、くいちがった分布が現われている。しかし S25C 材では断面減少率が 19.8%, 29.2% になると、分布のずれは比較的小さくなっていく。S45C 材では 19.6%, 28.9% のものは分布のずれは多少現われているが、分布の形はよく似たものになっている。このように逐次に引抜きを行ってゆく過程における残留応力分布の変化の傾向は、S25C 材では断面減少率 5.3%, 9.9%, 15.1% のものから 19.8%, 29.2% のものになると異なり、また S45C 材では断面減少率 5.1%, 9.8%, 14.9% のものから 19.6%, 28.9% のものになると異なっている。Bühler ら⁽¹⁾⁽⁵⁾による断面減少率 8% 程度までの引抜材についての残留応力測定結果では、断面減少率の増加とともに外表部における軸方向や円周方向の引張残留応力が増加する結果が知られており、本実験でも断面減少率がまだ小さい場合は同様の傾向がみられるが、断面減少率が約 20% 以上になるとこれらと異なった傾向があら

われている。これらの原因についてはあとの考察において述べる。

3. 断面内集合組織

引抜加工によって試料内部には特有な集合組織が形成されるといわれている。引抜過程の進行に伴って試料内で集合組織が発達してゆき、また各段階の試料断面内各部においても、それぞれ異なった集合組織が発達していることが考えられる^{(15) (18)~(20)}。残留応力の発生におよぼす組織的な影響を検討するため集合組織の測定を行った。S25C材を断面減少率5.3%, 15.1%, 29.2%まで引抜いたもの、またS45C材について断面減少率5.1%, 14.9%, 28.9%まで引抜いたものの断面内外表部および内部の各位置における $\{110\}$ 極点図の測定結果をFig. 5, Fig. 6に示す。

まず、S25C材、S45C材の断面減少率が約5%のものは、断面内外表部および内部の各位置でいずれもやや結晶粒の粗い傾向が認められるが、特定方位への集積はまだ弱く明瞭な集合組織の様相は呈していない。

古くより体心立方金属は、引抜加工によって $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織が発達することが知られている。また最近、鋼線を引抜いたものには $\langle 110 \rangle$ 繊維集合組織のほかに、円筒状集合組織(cylindrical texture)が形成されることが報告さ

れている⁽²⁰⁾。断面減少率が約15%のものでは、S25C, S45Cいずれのものも断面内の各位置で、まだ明瞭な集合組織の様相は呈していないが、 $\{001\}\langle 110 \rangle$ や $\{111\}\langle 110 \rangle$ などの $\langle 110 \rangle$ 繊維軸成分にいくぶん集積が認められる。さらに引抜きが進んだ断面減少率約29%のものになると、断面内各部に発達する集合組織の様相がそれぞれかなり明瞭に認められるようになる。断面内各部における集合組織の傾向はS25C材もS45C材もほぼ同様である。試料の内部においては $\langle 110 \rangle$ 繊維軸成分が強くあらわれており、 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 方位から $\{111\}\langle 110 \rangle$ 方位にわたって集積が分布している。またこのなかでは $\{001\}\langle 110 \rangle$ および $\{112\}\langle 110 \rangle$ 方位の近くに比較的強い集積が認められる。試料の外表面近くの部分でも $\langle 110 \rangle$ 繊維軸成分に集積が認められる。ここでは $\{111\}\langle 110 \rangle$ 方位に比較的強い集積が認められる。しかし試料内部の集合組織の傾向と異なり、半径方向に垂直な面($\{001\}$ 面から $\{111\}$ 面にかけて)の、 $\langle 110 \rangle$ 軸を中心とした引抜方向まわりの集積の拡がりはいずれも顕著ではなく、また集積の中心は $\langle 110 \rangle$ 繊維軸方位に対してやや下側にずれており、引抜き的前後方向の対称性も少ない。このように引抜材の外表面と内部とでは、いずれも $\langle 110 \rangle$ 繊維軸成分が強くなるものの、形成される集合組織の状態が異なっている。

Fig. 5 $\{110\}$ pole figures at the outer and inner parts of 0.25% carbon steel bar specimens after drawing to 5.3, 15.1 and 29.2% reductions.

Fig. 6 {110} pole figures at the outer and inner parts of 0.45% carbon steel bar specimens after drawing to 5.1, 14.9 and 28.9% reductions.

断面減少率約29%の試料の場合、その内部の集合組織は、引抜きの前後方向に対して対称性は比較的良好傾向が認められるが、外表近くの部分では引抜きの前後方向の対称性が弱くなっており、また半径方向に垂直な面の引抜方向まわりの集積の拡がりも少ない。このように引抜きにさいし断面内各所で異なる集合組織の状態が認められるのは、引抜き時、外表部および内部では引抜荷重によってそれぞれの部分に引張応力が作用するが、外表近くの部分にはこれにさらに試料とダイス壁との摩擦によるせん断力が加わる。この力学的条件の差によって、試料外表部と内部では異なる塑性変形状態が生じ、このような加工集合組織を形成したものと考える。

IV. 考 察

残留応力発生におよぼす各種の影響を述べるまえに、断面内各所の検鏡組織について述べておく。S25C 材の引抜き前の素材および断面減少率15.1%、29.2%のもの、断面内外表近くの部分と内部における顕微鏡組織を Fig. 7 に示す。引抜き前の素材では、外表近くの部分(表面から1.1 mm 内部)と内部にも伸びた帯状のセメンタイトがみられ、外表近くの部分では幾分粒状のセメンタイト粒もみ

られる。引抜きを行ったものでは、断面減少率が15.1%のものは、内部ではセメンタイトが素材のものと同じく長手方向に帯状になっており、これにはさまれるようにフェライト粒が存在している。しかし外表近くの部分では、セメンタイトの帯状にのびた部分は分断され減少し、逆に粒状のセメンタイトがやや大きくなっている。断面減少率が29.2%のものでは、これは外表部、内部ともに集合組織が明らかにあらわれる場合であるが、内部は同じようにセメンタイトの帯状にのびた状態がみられる。しかしここではセメンタイト帯にはさまれて存在しているフェライト粒は引抜方向にそって細長く伸ばされている。一方外表近くでは、帯状にのびたセメンタイト粒はあまり認められず、フェライト粒とともに引抜方向に対してやや斜めにうねったように湾曲した状態が認められ、この部分でかなりの塑性変形があったことが推察される。

つぎに応力測定のための外層除去時、逐次現われた試料のその表面部で測定されたせん断残留応力と、また同時にこの部分の半価幅値を測定した結果を述べる。このせん断残留応力は格子面ひずみと応力との関係から、これより軸方向および円周方向応力を求めるのと同時に求められた応力でありこの意味で巨視的な応力である。これは巨視的なせん断変形があったとき各層のすべり変形の不均等さに起

Fig. 7 Optical micrographs of the outer and inner parts in longitudinal sections of 0.25% carbon steel bar specimens drawn to 0, 15.1 and 29.2% reductions, (A) the place 1.1 mm inside from the surface; 0% reduction, (B) the place 5.6 mm inside from the surface; 0% reduction, (C) the place 1.0 mm inside from the surface; 15.1% reduction, (D) the place 5.0 mm inside from the surface; 15.1% reduction, (E) the place 0.8 mm inside from the surface; 29.2% reduction, (F) the place 5.0 mm inside from the surface; 29.2% reduction.

因するものと考えられる。また半価幅は、入射角 $\psi=0^\circ$, 45° で X 線を入射した場合の回折像のひろがりから求めたものである。この半価幅は結晶粒子の大きさと結晶構造の乱れに起因する微視的な内部ひずみに対応するものである。

Fig. 8 および Fig. 9 に S25C 材および S45C 材における各断面減少率のもののせん断残留応力および半価幅を対応させて示した結果を示す。まずせん断残留応力についてみると、S25C 材、S45C 材いずれの場合も引抜後、どの試料も引抜方向と逆方向のせん断残留応力が最外表部にあらわれる。断面減少率が約 5% から 15% までのものでは内部に入っただちに引抜方向と同じ方向のせん断残留応力が現われている。そして、このせん断応力がかなりの大

きさで内部でみられる。しかし、組織内に集合組織が発達してくる断面減少率が約 20%, 29% のものでは、負の方向(引抜方向)に現われるせん断残留応力はあまり小さくなく、外表に現われる正の方向(引抜と逆方向)のせん断残留応力はより内部に現われており、また内部で現われる負の方向のせん断残留応力は小さい。

半価幅については、その各部でのせん断残留応力の分布との対応では、垂直方向の軸方向残留応力が引張残留応力より圧縮残留応力に移行する外表から内部に入った約 2 mm の付近までは、せん断残留応力分布とあまり一致しないが、それより内部ではせん断残留応力分布とよく似た分布を示している。ここでせん断残留応力と半価幅の分布の対応についての詳細なことは不明であるが、この結果か

Fig. 8 Residual shearing stress and half-value breadth as measured on the outer part of the successively removed specimen of 0.25% carbon steel after drawing.

ら外表部と内部では異なった状態の塑性変形があったのではないかと考える。

S45C 材の断面減少率 19.6%, 28.9% のものは、その外表近くでは、せん断残留応力の大ききところがかえって半価幅は低下しているのが明らかにみられる。集合組織の測定結果では断面減少率が約 29% になると顕著な集合組織が生じており、また外表近くと内部で明らかに異なった集合組織がみられる。断面内の検鏡組織からでも、顕著な集

合組織が生じている場合とそうでない場合とでは試料の断面内の巨視的組織も異なっている。とくに断面減少率 29% のものの外表近くの部分の検鏡組織には、セメンタイト粒、フェライト粒とも引拔方向に対してやや斜めにうねったように変形しているのが認められる。引拔時の変形に際して力学的には外表部と内部は異なった応力状態で塑性変形を行っているが、ここでは、通常の塑性力学的立場での塑性変形に、さらに集合組織形成による変形が加わ

Fig. 9 Residual shearing stress and half-value breadth as measured on the outer part of the successively removed specimen of 0.45% carbon steel after drawing.

るような場合も考えられる。いずれにしても塑性変形を甚だしく行った場合、普通このようなとき組織内に微視的な内部ひずみは大きく蓄積される。集合組織の発達していない断面減少率が約15%までのものは、外表部では微視的な内部ひずみが幾分大きくになっている。しかし集合組織が生じる断面減少率が約20%, 29%のものは、外表近くではせん断残留応力は大であるのに拘らず半価幅値は逆に大き

くなっていない。この場合、集合組織形成による変形が加わることによって内部ひずみが幾分緩和されたのではないかと考える。

外表部において垂直方向に引張残留応力が現われる原因としては、集合組織の発達していない断面減少率15%までのものでは、単純に力学的にダイス壁と試料との摩擦の影響のため、引拔時、外表部と内部で引拔方向への塑性変

形に差を生じ、すなわち外表部の伸長変形が内部より小となって生じたものと考えられる。しかし断面減少率20%以上のものでは、外表部では塑性変形に際し集合組織形成による引抜方向の変形がこれに加わり、そのため外表部と内部の引抜方向の塑性変形の差は小さくなり、この結果外表部の引張残留応力は断面減少率15%のものより低下したのになったと考える。また、このとき円周方向の残留応力分布も同時に異なったものとなったのではないかと考える。

V. 結 言

0.25%および0.45%炭素鋼丸棒材を、数パスにわたって逐次に断面減少率約29%まで引抜きを行い、各段階のものの残留応力を測定した。また残留応力発生と組織との関連を調べた。

(1) 数パスにわたって逐次に引抜きを行ったものは、いずれのものも外表部分に引張残留応力を生じる。引抜段階が軽度で顕著な集合組織がまだ発生しない場合、引抜きに際し断面減少率の増加とともに外表部分の軸方向引張残留応力が次第に増加するが、強度な引抜きを行って明瞭な集合組織を生じるようになると、外表部の引張残留応力は低下するようである。

(2) 強度に引抜きを行って明瞭な集合組織を生じる場合、残留応力の発生には単純な力学的な条件による影響の他に、組織形成による影響をうけると考えられる。このよ

うなとき、集合組織を生じないような場合と異なる傾向の残留応力分布が生じている。

文 献

- (1) H. Bühler und H. Buchholtz: Arch. Eisenhüttenw., **7**(1933/34), 427.
- (2) H. Bühler und E. H. Schulz: Z. Metallk., **26**(1934), 199.
- (3) H. Bühler und H. Püngel: Arch. Eisenhüttenw., **8**(1934/35), 165.
- (4) H. Bühler: Arch. Eisenhüttenw., **8**(1934/35), 465.
- (5) H. Bühler und E. H. Schultz: Stahl und Eisen, **70**(1950), 1147.
- (6) H. Bühler, T. Lehmann und F. J. Schmitt: Arch. Eisenhüttenw., **36**(1965), 29.
- (7) 米谷 茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1987), 105.
- (8) H. Dölle und V. Hauk: Haertere-Techn. Mitt., **31**(1976), 165.
- (9) E. Christ und H. Krause: Z. Metallk., **66**(1975), 615.
- (10) V. Hauk und P. J. T. Stuitje: Z. Metallk., **76**(1985), 445.
- (11) 英 崇夫, 藤原晴夫: 材料, **30**(1981), 1095.
- (12) 若林三記夫, 中山 守, 玉村謙太郎: 精密機械, **50**(1984), 1481.
- (13) H. Dölle: J. Appl. Cryst., **12**(1979), 489.
- (14) I. C. Noyan: Metall. Trans., **14A**(1983), 249.
- (15) 米谷 茂, 今井克哉: 日本金属学会誌, **53**(1989), 126.
- (16) 米谷 茂: 材料, **18**(1968), 610.
- (17) M. Schwartz: J. Appl. Phys., **26**(1955), 1507.
- (18) 稲数直次, 山本 久: 日本金属学会誌, **37**(1973), 1224.
- (19) 稲数直次: 軽金属, **37**(1987), 381.
- (20) 小川陸郎, 金築 裕: 鉄と鋼, **66**(1980), S1110.