

塑性ひずみ測定法の検討と微小域のせん断ひずみ測定

瀧本 昭夫*・峠 睦*

Discussion on Plastic Strain Measurements and an Application of the Developed Scribed Circle Method to Shear Strain Measurements of a Micro-surface

Akio TAKIMOTO and Mutsumi TOUGE

Abstract

The best method, available at present, of measuring the largest plastic strain in the smallest area of a specimen surface is discussed on the developed scribed circle method presented in the previous report, the strain gage method and three different X-ray methods of diffraction profiles, Debye films and the residual stress measurement. The developed scribed circle method is found to be the best one among the above.

The application test of this method to measure large shear strain in a micro-surface was performed on a thin walled tube specimen of aluminum. Shear strain of nearly forty percent was measured with sufficient accuracy and that of nearly ninety percent was possibly obtained within a five percent off the condition of pure shear.

1. 緒 言

前回の報告¹⁾²⁾において、改良スクライブドサークル法は、引張試験による塑性ひずみ約20%までの、微小域での塑性ひずみ測定が可能であることを明らかにした。今回の報告では、本方法と従来塑性ひずみ測定に用いられて来た方法とを、測定精度、測定可能なひずみ領域、及び測定に必要な最小面積などについて比較検討することを目的とした。

また、本方法の、せん断成分が加わるような部材への適用を考え、純せん断ひずみが得られる様、スクライブドサークルを貼り付けたアルミニウム薄肉円筒のねじり試験を行ない、本方法のせん断ひずみ測定の可否および適用限界について、実験的に明らかにした。

その結果、塑性ひずみの測定については、従来の方法と比較して、本方法は微小域のひずみ測定ではきわめて優れており、またせん断ひずみの測定にも充分適用できることが明らかとなった。以上の過程について報告する。

2. 実験方法

2.1 ねじり試片の準備

供試材は市販の実用アルミニウム棒材であり、純せん断ひずみを与えるために、Fig. 1 に示す形状に旋盤等を用いて仕上げた。試片成形後、加工ひずみを除去するため、試片を350°C 1hrにてアルゴン雰囲気中で焼鈍を行なった。この処理により、試片の平均結晶粒径は約40 μ m程度となるが、更に大きな結晶粒径を得る場合(約120 μ m径迄)は550°C 2.3hrにおいて同様に焼鈍を行なった。熱処理後、1000番のエメリー紙、及びバフ研磨により表面を鏡面とし、5% HF水

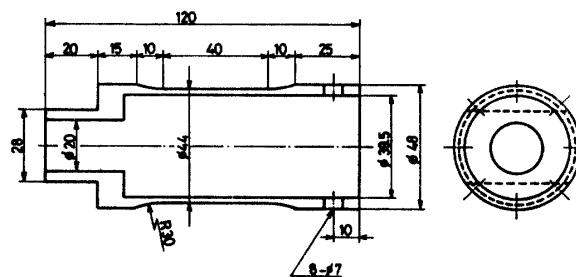


Fig. 1 Thin walled tube specimen of aluminum.

* 生産機械工学科

溶液中に約15min浸漬して粒界腐蝕し、試片の平均結晶粒径を測定した。

Fig. 1 より明らかな様に、ねじり試片は、平行部の肉厚 $2.25 \pm 0.05 \text{ mm}$ を有する薄肉円筒であり、図の左端下部のチャック部をバイス（万力）に軸に垂直になる様に注意深く固定し、中心部分に、棒状のねじり用器具を挿入した。器具と試片は、右端上部8カ所にあけた取り付け用の穴を通してM6のボルトにより固定した。ねじり試験は、中央の器具を充分長い腕により回転トルクを与え回転させることにより行なった。その器具の回転角が、約 10° 毎に除荷してスクライブドサークルの形状を写真撮影、測定し、接着膜に亀裂が入るまでこの操作を繰り返した。用いたスクライブドサークルは、前回報告したのと同じものを使用し、Fig. 1 の試片の平行部（40mm長さ）の中央部にひずみゲージ用接着剤により貼り付けた。サークル径は $1700 \mu\text{m}$ 、 $320 \mu\text{m}$ 、及び、 $90 \mu\text{m}$ の3種類用意し、試片の結晶粒径 $38.2 \mu\text{m}$ 、 $107.3 \mu\text{m}$ 、および $117.7 \mu\text{m}$ と適宜組合わせてねじり試験に供した。解析は実体顕微鏡と金属顕微鏡を使用し、投影機による拡大写真倍率を含めた解析倍率は16.2倍（ $1700 \mu\text{m}$ の場合）から、360倍（ $320 \mu\text{m}$ の場合）であった。

2.2 塑性ひずみ測定法

前回報告したように、従来、ひずみ状態を測定する方法としては、様々なものが用いられているが、本報告では、これらの方法のうち、実験装置的な制約や測定物の局部的平面の大きさなどの制約から、ひずみゲージ法及びX線法について、その測定可能なひずみ領域、測定に必要な最小面積、あるいは測定精度等について検討を加えた。

まず、ひずみゲージ法は、共和電業（株）製のひずみゲージを用い、そのゲージ長さが一般的な 5.0 mm のもの（KFC-5-C1タイプ）と現在入手可能な最小ゲージとして 0.2 mm のもの（KFR-0.2-C1タイプ）の2種類を選んで測定に供した。測定は前回の報告に用いたアルミニウム JIS13B 号試片の所定位置にゲージを接着剤*（KYOWA EC-24A）にて貼り付けた後、基準とする引張ひずみを測定するため、差動トランス変位測定（以後 D.T.F. と略）による伸び計を装着して引張試験を行ない、同時にひずみゲ

* この接着剤は、スクライブドサークルの接着に用いたものと同一であり、その後の熱処理等も全く同一とした。

ージによる動ひずみ測定器を通してひずみを測定することにより、測定可能な塑性ひずみ量を算出検討した。

X線法には、東芝製の残留応力測定機とX線回折装置（X-ray-Diffractometer）および島津製 Compax による Debye Camera 法を使用した。用いた試片はそれぞれ平均結晶粒径の異なる3種類のアルミニウム JIS 13 B号試片であり、約5%の塑性ひずみごとに除荷し、直ちに残留応力の測定及びX線回折図形（X-ray Diffraction Pattern）の測定、記録およびデバイ環の撮影を行なった。X線の条件は、応力測定の場合、管電圧、管電流はそれぞれ 30 KVp 、 8 mA であり、回折装置の場合 30 KVp 、 10 mA とし、対陰極はいずれの装置共に Co、フィルターに Fe を使用した。残留応力測定は $\sin^2 \psi$ 法とし、X線の入射角 ψ_0 が 0° 、 15° 、 30° 、 45° の時の、それぞれにおけるアルミニウム（420）回折面の回折角度位置を精密に測定して、引張軸方向と平行な方向についての残留応力値を算出した。

X線回折図形はカウンター法とフィルム法の両者について行なった。カウンター法はシンチレーションカウンターによりアルミニウム（400）回折面の回折図形について、約5%の塑性ひずみ毎に調べた。島津製 Compax によるフィルム法は C_r の対陰極を用いて、アルミニウム（222）、あるいは（311）回折面について背面反射ラウエ法にてデバイ環（Rebye Ding）の状態をフィルム上に記録した。なお、フィルム一試料間は $55 \sim 60 \text{ mm}$ とした。X線のフィルムは、Fuji X線フィルム Rx Medical タイプを使用し、露出時間は3 hr である。

また、X線の照射面積は、カウンター法がもっとも大きく $10 \times 20 \text{ mm}^2$ 、次に、応力測定法の 2×2 、及び $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 、そして最後にフィルム法の $\phi 2.5 \text{ mm}$ の順になる。

3. 実験結果及び考察

3.1 塑性ひずみ測定法の検討

Fig. 2 は、ひずみゲージをアルミニウム JIS 13 B 号試片に貼り付けた後、引張試験に供した際に得られたひずみゲージからの出力ひずみと試片に与えた D. I. F. によるひずみとの相関性を示したものである³⁾。Fig. 2 左側の (a) はゲージ長さ 0.2 mm 幅 1 mm のものであり、前述の通りこのメーカーのカタログの中で、もっとも小さなゲージ長さを有すると思われる

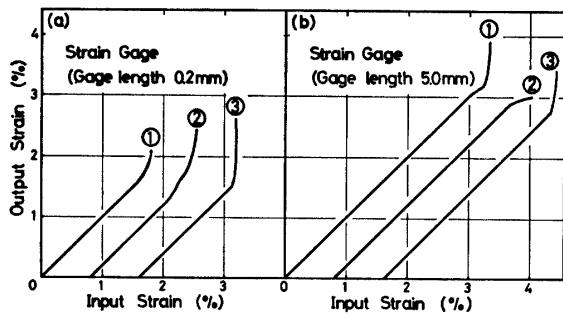


Fig. 2 The relationship between the output strain obtained by the strain gage and the input strain by the differential transformer (D.T.F).

ひずみゲージの場合であり、右側の (b) は一般的なひずみゲージの場合であり、ゲージ長さ 5.0mm、幅 2.0mm である。(a) の場合、図中の記号①、②、③、で示す通りそれぞれ 1.579%、1.303%、および 1.488% を過ぎて急激にゲージ自体の電気的な平衡がとれなくなり、程度の差はあるが、いずれの場合も記録計はオーバースケールした。従って、ひずみゲージの最小と考えられる $0.2 \times 1.0 \text{mm}^2$ の測定領域での測定可能な最大塑性ひずみ量は①～③の平均値 1.46% 程度であることがわかった。一方、(b) の場合、図中の記号①、②、③、で示す通りそれぞれ 3.040%、2.704%、および 2.883% が測定可能な塑性ひずみ量であり、これらの平均値 2.90% が、一般的なひずみゲージの測定可能範囲の上限と考えられる。

スクライプドサークルと比較して、ひずみゲージは、ひずみの測定手段としては電気的に増幅させる分だけ人手がかからず手軽であり、測定精度も Fig. 2 からわかるように、ほぼ出力ひずみと与えたひずみが対応しており、かなり良好であると判断できる。しかし、本研究の目的である微小域で、なおかつ抗張力相当ひずみに至るような大変形領域への適用は、Fig. 2 を見る限り、不可能であると断言せざるを得ない。今回の報告では実際に確かめてはいないが、KYOWA 製のひずみゲージ中には約 20% 以上の塑性ひずみ測定に適用できるという超大ひずみゲージ (KLM-6-A 9 タイプ) があるが、そのゲージ長さは 6.5mm、幅は 3.8mm を有しており、測定面積は 24.7mm^2 となることから、微小域とは相違いことがわかる。従って、微小域でしかも大変形という本研究の目的に合致するひずみゲージは存在しないと断言できる。

次に X 線法の検討結果について述べる。

Fig. 3 は、1 mm ϕ の径を持つピンホールスリットを用いてアルミニウム試片における塑性ひずみ量と

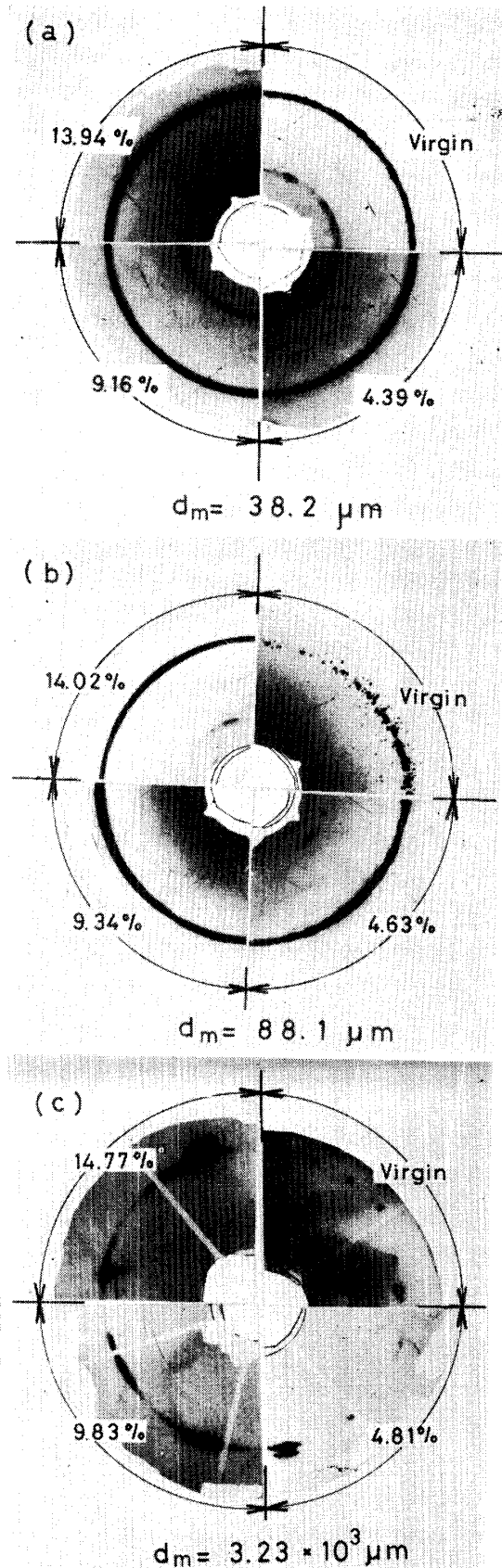


Fig. 3 Line broadening and spot diffusing in X-ray Debye rings photographed at different applied plastic strain in aluminum tensile specimens.

デバイ環 (Debye Ring) の形状との相関性について求めたもので、試料の平均結晶粒径は、(a) 試料で $38.2\mu\text{m}$ 、(b) 試料で $88.1\mu\text{m}$ 、及び (c) 試料で 3.23mm である。X線の照射中、試料は一般のデバイカメラのように、回転させず、固定式としたため、結晶粒の比較的大きい (b) の場合、デバイ環が連続環とならず、回折した X線の斑点は若干 spotty になっているのが認められる。一方 (c) の場合、試料が粗大結晶であるため、X線照射域に結晶粒が 2~3 個程度しか含まれていないため*、斑点はラウエスポット

(Laue Spot) に近いものである.** (a) (b) (c) いずれの場合も、ひずみ加わることにより、各 X線の斑点が拡がるため、全体のデバイ環も拡がっており、デバイ環の太さそのものも増加していることがわかる***.ここでは約15%の塑性ひずみ領域においても顕著な変化は認められなかった。従って、このデバイ環の変化状態などから、塑性ひずみ量を定性的に推定することは出来るが定量的に言及することは非常に難しいと考えられる。また、本質的な問題として、X線によりデバイ環を得ようとすれば、その X線照射域内にかなり多数の結晶粒が必要であり、ということは逆に必要なだけの結晶粒を得ようとすれば、必然的にピンホール径も大きくして X線の照射面積を大きくせざるを得ず、微小域での測定という目的から、益々掛け離れて行くことになる。従ってこの X線によるフィルム法は、特に比較的大きな結晶粒が大きい場合の試料における微小域の測定において、定量化は不向きとも思われる。

次に、X線によるカウンター法の結果について述べる。

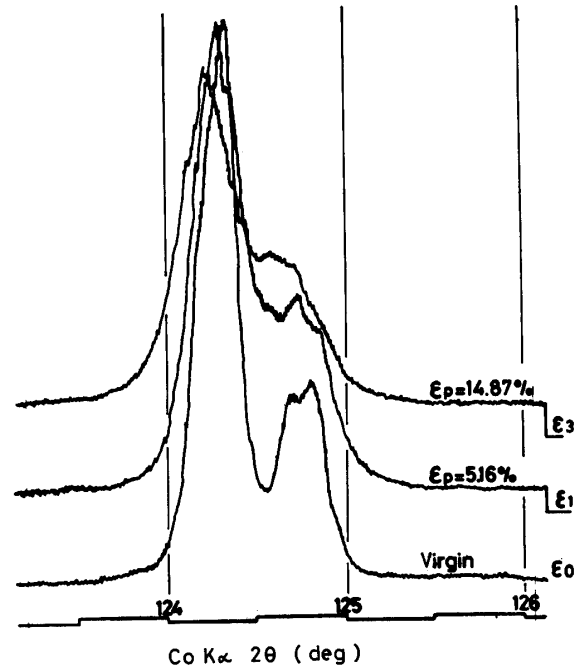
Fig. 4 は、Fig. 3 (a) および (b) で用いた試料を X線回折装置によりその (400) 回折面の X線回折図形を記録した時の、各塑性ひずみごとの回折図形の変化の仕方を示したものである。Fig. 4 (a) および

* ピンホール出口の穴の径は $1\text{mm}\phi$ であるが、若干発散成分があるため実際に試料を照射している面積は $1\text{mm}\phi$ より大きく、 $2.5\text{mm}\phi$ 程度と考えられる。

** この場合、フィルターをかけているため完全な Laue Spot とは言い難い。

*** なお、Fig. 3 (b) の $\epsilon_p=14.02\%$ において、リングの太さが若干細くなっているように見えるが、これはフィルムの地のカブリから考えて露出時間の不足あるいは X線光学軸のズレによると考えられる。

(a) Aluminum
 $d_{\text{mean}}=88.1\mu\text{m}$



(b) Aluminum
 $d_{\text{mean}}=38.2\mu\text{m}$

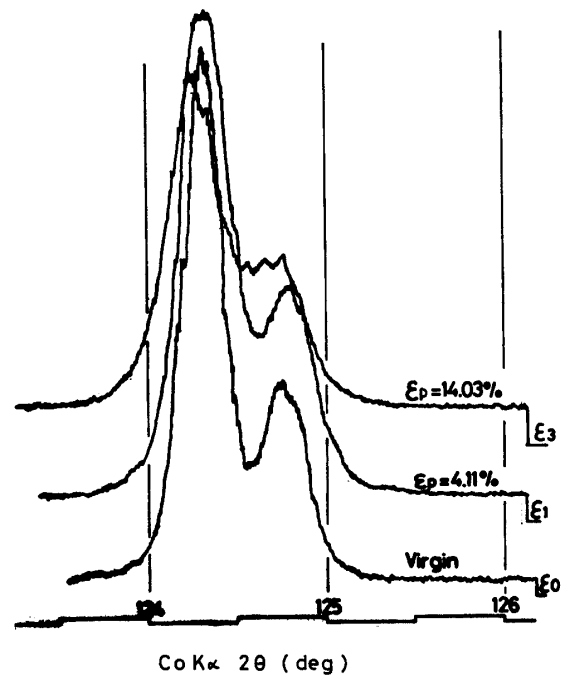


Fig.4 Variations in broadening and the height of peak intensities in X-ray diffraction profiles obtained in aluminum specimens strained plastically in tension.

(b) 共に引張試験に供する前の回折図形は、 $k_{\alpha 1}$ 、 $k_{\alpha 2}$ 線のそれぞれの分離も明瞭であり、試料は良好に焼鈍され、加工ひずみ等は、ほぼ完全に除去されていることがわかる。この状態に塑性ひずみを加えると、次第にX線回折強度も低下し、回折図形は回折角方向に広がり始める。ここで半価幅を測定すれば当然ひずみが加わる前に比較して増加していることは³⁾⁴⁾⁵⁾明らかであろう。あるいは $k_{\alpha 1}$ 、 $k_{\alpha 2}$ 線の分離もひずみが大きくなるに従って、次第に不明瞭になることを利用してフーリエ解析法⁶⁾による副結晶粒の大きさ及びひずみの推定も計算により求めることもできる。しかし、いずれにしても、付加された塑性ひずみ量の大きさを正確に、しかも簡潔な方法で求めることは出来ない。

最後に、X線による残留応力の測定例について、Fig. 5 に示した、X線による残留応力の測定は、一般には弾性域内に限られると考えられ、事実、Fig. 5 から明らかなように、塑性ひずみ量と残留応力値との間には全く相関性は認められない。平均塑性ひずみが大きくなると、結果として 1 Kg/mm^2 近傍の負の残留応力値を示している。これは引張方向と 90° をなす方向に、非平衡的な変形余効果が残り、圧縮ひずみの値で示されているのではないかと考えられる。

以上のように、X線による塑性ひずみの測定は、いずれの方法も予期された通り、塑性ひずみの定量化に

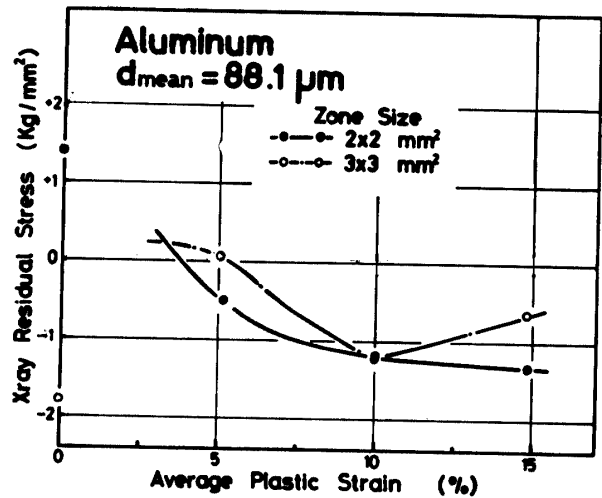


Fig. 5 Relationships between X-ray residual stress measured on surfaces of two different dimensions of a strained specimen and the average plastic strain applied.

は困難を供なうことが明らかとなった。

以上の結果と、前回報告した結果を考慮に入れて作成したのが、Table 1 である。表において、縦の欄は測定に必要な面積を示したもので、例えば、Fig. 2 (a) のひずみゲージの場合、ゲージ長さと同幅が $0.2 \times 1.0 \text{ mm}^2$ であり、この面積全体についてのひずみ測定を考えると考えれば、 $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ すなわち 10^{-1} の欄に

Table 1 A comparison of the smallest limit in a micro-surface and the range of strain measurable in each strain measurement: the scribed circle method developed here, commercial strain gage method and three different X-ray methods.

Strain Range ϵ_p (%)	0	1.0	2.5	5.0	10.0
	Zone Size S ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)	1.0	2.5	5.0	10.0
10^{-2}	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁	S ₁
10^{-1}	G ₁	G ₁			
	S ₂ S ₂ *	S ₂ S ₂ *	S ₂ S ₂ *	S ₂ S ₂ *	S ₂ S ₂ *
1	X ₂ X ₃				
	S ₃ S ₃ *	S ₃ S ₃ *	S ₃ S ₃ *	S ₃ S ₃ *	S ₃ S ₃ *
10^{+1}	G ₂	G ₂	G ₂		
	X ₁				
	S ₄ S ₄ *	S ₄ S ₄ *	S ₄ S ₄ *	S ₄ S ₄ *	S ₄ S ₄ *

G ₁	Strain Gage	(0.2mm)
G ₂	Strain Gage	(5.0mm)
X ₁	X-ray Diffraction Pattern	
X ₂	Debye Ring	
X ₃	X-ray Residual Stress	
S ₁	Scribed Circle	(90μm)
S ₂	Scribed Circle	(320μm)
S ₃	Scribed Circle	(1700μm)
S ₄	Scribed Circles of Industrial Use	

Note: A star mark indicates the data obtained in the experimental shear strain measurements using 10~20 scribed circles.

相当することがわかる。一方、前回のスクライブドサークルのうち、 $90\mu\text{m}$ を有するサークル径の場合、 $90 \times 90 \times 10^{-12}\text{m}^2$ 、すなわち $0.008 \times 10^{-6}\text{m}^2 \div 10^{-2} \times 10^{-6}\text{m}^2$ となり 10^{-2} の欄に相当する。横の欄は、測定可能なひずみ領域の大きさを示している。この縦、横の面積とひずみの大きさが合致した所に、表の右に示す各測定法の諸記号を書き入れた。例えば、G1のひずみゲージは、Fig. 2 (a) に示した結果から、面積は 10^{-1} 、ひずみの大きさは 1.46% であるから $0 \sim 1.0$ 及び $1.0 \sim 2.5$ の2つの桁目を埋めることになる。

この表からわかるように、いずれの桁目も S の記号で占められており格子焼付法（スクライブドサークル）は他の方法と比較しても、かなり優れた方法であることがわかる。なお、X線はその測定に要する面積は別として、測定可能なひずみ領域が明確でないが、一応弾性範囲、及び若干塑性域に入った領域まで適用できるのではないかということで $0 \sim 1.0$ の桁目に入れた。 10^1 のオーダーの欄はスクライブドサークルについては実験していないが、すでに工業界で実用されているのであり、上限は何れの方法もむしろ困難を伴わない。なお、表中の*印はねじり試験の結果であり、その詳細については次の項で説明する。

3. 2 微小域におけるせん断ひずみ測定への応用⁷⁾

Fig. 6 は、平均結晶粒径 $120\mu\text{m}$ を有するアルミニウム薄肉円筒の外表面に、 $1700\mu\text{m}$ 径を有するスクラ

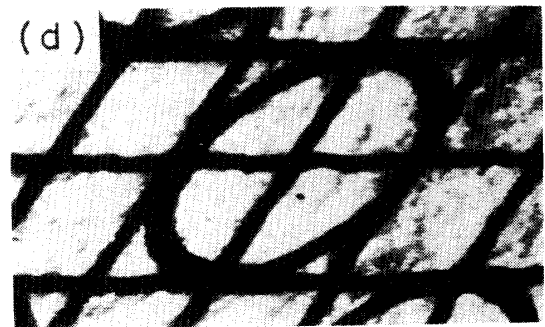
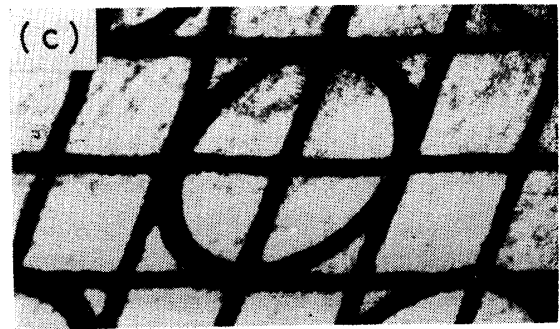
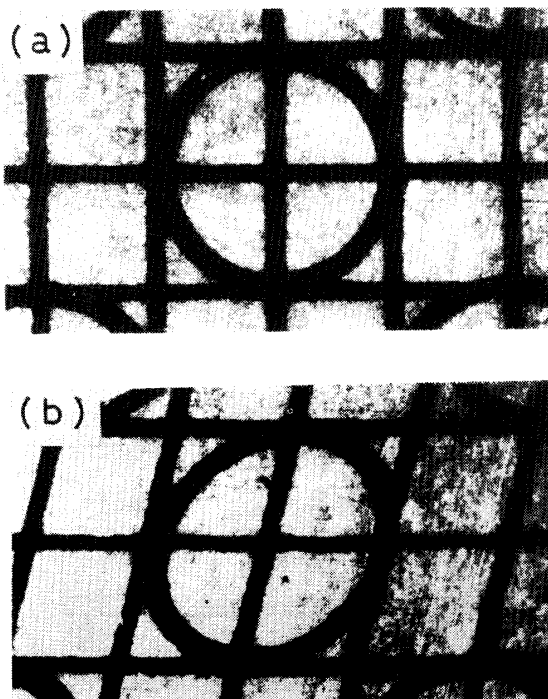


Fig. 6 Photographic presentations of a scribed circle plastically deformed successively up to the maximum strain of 91.3% in shear, which were shown on an aluminum thin walled tube specimen.

イブドサークルを焼付けた接着膜を貼り付け、純せん断ひずみが負荷されるよう、ねじり試験に供した時の、各段階における同一スクライブドサークルの形状変化の様子を示した一例である。これからわかるように、相当大きなせん断ひずみの測定が可能になることがわかる。たとえば、Fig. 6 (c) の場合、その変化の様子を模式的に Fig. 7 のように示すと、同図において、格子の縦方向の長さ l_1 は 1.755mm 、横方向長さ

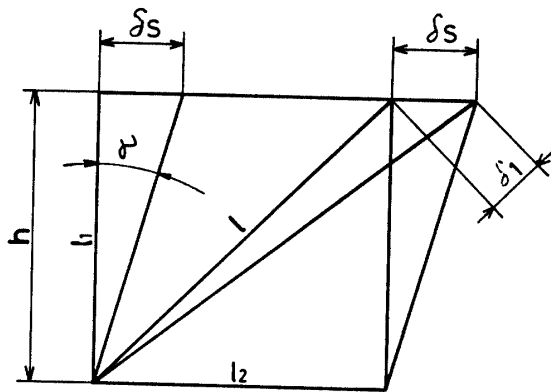


Fig. 7 Schematic presentation of normal strain and shearing strain in pure shear.

l_2 は 1.759mm であり、せん断ひずみは 36.0% である。従ってこの段階までは、ほぼ完全なせん断変形をしている。更に大きなせん断ひずみを与えた Fig.

(e) の場合、Fig. 7 において、格子の縦方向の長さ l_1 と変形後の縦方向の高さ h との間に少々のずれが生じ、その比は約 0.95 近傍である。従って、もし 5% 前後の誤差を許せばその最大ねじり角は 42.4° すなわちせん断ひずみ約 91.3% にまで達していることがわかる。この程度のひずみの大きさは、同時に測定した他の 9 点においてもそれぞれに若干差はあるものの、ほぼ同じ値が得られ、本研究で用いたスクライブドサークル法は、せん断変形の問題にも充分適用できることがわかった。

Fig. 7 において、純せん断変形を考えた場合、次の関係が、成立する⁸⁾。すなわち

$$\tau \equiv \delta_s / l_1 \dots \dots \dots (1) \quad \epsilon_1 \equiv \delta_1 / l \dots \dots \dots (2)$$

ここで純せん断変形であれば

$$l_1 = h, \quad \delta_1 = \delta_s / \sqrt{2}$$

また、 $l = \sqrt{2} l_1 = \sqrt{2} h$ であるから、

この δ_1 と l を (2) 式に代入すると

$$\epsilon_1 = \delta_s / \sqrt{2} l = \delta_s / 2 h = \tau / 2 \dots \dots \dots (3)$$

$$(\tau = \delta_s / h)$$

従って、完全に試料に純せん断変形が起これば、(3) 式より明らかなように、 ϵ_1 と $\tau/2$ の値は等しくなる。今その比を α とし、また、変形後のスクライブドサークルの高さ h および横方向長さ l_2 (Fig. 7 参照) の比を β として、Fig. 6 における実験について調べてみたのが Fig. 8 である*。図において、横軸はせん断ひずみの大きさをパーセント単位で表示したもので、縦軸は、上記の α, β をそれぞれとって

* 実際の測定は、 h, l_2, l および δ_s について行ない種々の関係を検討した。

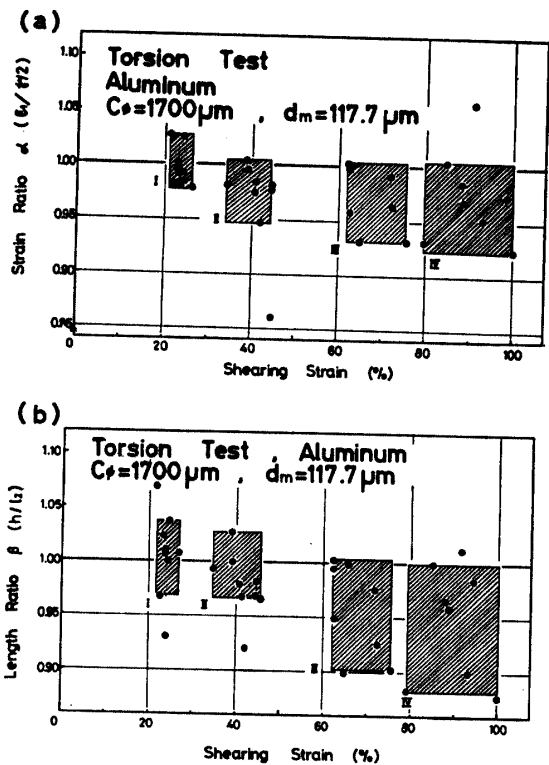


Fig. 8 (a) A variation in the ratio of normal strain to the half of shear strain obtained by a deformed grid with the increase in shear strain applied.

(b) A variation in the ratio of the height to the lateral length of a deformed grid with the increase in shear strain applied.

いる α, β 共、せん断ひずみが小さい所では若干ばらついているものの、せん断ひずみが大きくなるに従って 1 より小さくなる傾向を持つ。この原因の一つにはねじり試験により試片に与えるせん断変形が、非常に大きくなると(約 40% を越えると)マイクロねじり座屈がはじまり、ねじり試片の長手方向に圧縮成分が働き、格子自体若干押しつぶされたような形となり、その結果、 h は小さくなり、 l は大きくなり、 α, β の値は 1 より小さくなると考えられる。また図中の I~IV は実験回数であり、回数の増加すなわちせん断ひずみが極端に大きくなるにつれて、縦ばかりでなく横方向へのばらつきも大きくなっているのが、この測定でハッチングで示した大きさ程度の広がりより認められる。因にこの場合、サークル径は、 $1700\mu\text{m}$ 、平均結晶粒径は $117.7\mu\text{m}$ であるから、その比 C_ϕ/d_m は 14.5 となる。 C_ϕ/d_m については、Fig. 6 に示した実験の他に、44.7 ($C_\phi=1700\mu\text{m}, d_m=38.0\mu\text{m}$), 3.0 ($C_\phi=$

320 μm , $d_m=107.3\mu\text{m}$), 及び0.8 ($C_\phi=90\mu\text{m}$, $d_m=107.3\mu\text{m}$)について行なった. このうちサークル径 C_ϕ が 90 μm のものを使用して行なった実験は, 焼付けたスクライブドサークルがやや不明瞭なため, 格子と内側に描いた円の接合点測定の正確さの保証に困難を伴ったため, 今回はひずみ解析には至らなかった. 従って以上の結果を加味して作成したものが, Table 1 の*印の結果であり, サークル径1700 μm のものは, 測定面積が $2.89 \times 10^{-6}\text{m}^2$ となるため1の柘目に入れ, 320 μm のものは $0.10 \times 10^{-6}\text{m}^2$ となるから 10^{-1} の柘目に入れた.

4. 結 言

(1) 改良スクライブドサークル法に加えて, 従来より用いられて来た塑性ひずみ測定法のうち, ひずみゲージ法, 及びX線法について, 測定可能なひずみ量及び測定に要する面積等について検討を加えた.

(2) ひずみゲージ法は, 最小のもので $0.2 \times 1.0\text{mm}^2$ の測定面積を有するものがあるが, 測定可能な塑性ひずみ量は1.5%と小さい. また, 測定可能な塑性ひずみ量が大きくなれば, それに要する測定面積も大きくなる.

(3) X線法は, 塑性ひずみ測定の定量化には不向

きであることが明らかになった.

(4) 改良スクライブドサークル法は, その微小域と引張塑性ひずみ量では他の追従を許すものでない事は, 前報にも報告し, ここでも検討を加えた通りであるが, 純せん断ひずみが付加される試片にも適用でき, 約90%までのせん断ひずみが測定可能であることがわかった.

参 考 文 献

- 1) 瀧本昭夫, 峠 陸, 赤沢実, 山口守衛: 山口大学工学部研究報告 31, 51 (1980)
- 2) 瀧本昭夫, 峠 陸, 赤沢実: 日本機械学会講演集文集No. 807-2, 113 (1980)
- 3) 大井光四郎: 塑性と加工, 13, 553 (1972)
- 4) Stokes, A. R., Wilson, A. J. C., Proc. Phys. Soc., 56, 174 (1944)
- 5) Paterson, M. S, J. Appl. Phys., 23, 805 (1952)
- 6) たとえば 日本材料学会: X線材料強度学, 基礎編・実験法編, 養賢堂 (1973) p. 304
- 7) Alexander Geleji 著, 五馬勇訳: 金属塑性加工の計算, 上, コロナ社 (1966) p. 36
- 8) Cedric W. Richards: Engineering Materials Science, Wadsworth Publishing Co. (1961)p.200

(昭和55年10月15日受理)