研究報告

折り曲げ加工製品のひずみとかたさ

嵯峨 卓郎*・佐藤 金司*

Strain and hardness distributions of folded sheet products

UDC 669.715-12:539.4.016

SAGA Takuro* and SATO Kinji*

The measurements of hardness and strain distributions on the bend points of metals suggest the forming mechanism for the bending operation.

This paper reports their distributions of the sheet products for folding operation.

The materials used for the experiments were aluminum and mild steel. At first, uni-axial strains were given to a cylindrical test piece, and then, the correspondence between the specified strains and hardness were examined.

The specified strains given for test pieces were tension, compression, and compression after tension.

Secondly, plane test pieces were cut out of the same materials to perform folding tests. After the tests, the strain and hardness distributions on the bend point of specimens were measured.

The results obtained were as follows:

- 1) The propagation of strain and hardness distributions was made more clear with the proceeding of operation.
- 2) The relations between strain and hardness on the bend point were obtained.
- 3) In the early stage of folding operation, the neutral plane of the specimen moved from the central position in thickness to tension side.
- 4) The position of moved neutral plane could be estimated from the minimum value of hardness distribution.
- 5) The error of the above estimation was analyzed and the mechanism due to material properties was explained.

(Received Sep. 8, 1970)

1. ま え が き

アルミニウム薄板の曲げ加工は、軽電機部品に広く行なわれている。この曲げの成形機構を調べるため、突き曲げ加工製品の曲げ部分のかたさ分布について Kienzle が測定例を示している。^{1)~2)} 加工精度のよい点では折り曲げ加工の方式がすぐれていることがよく知られ、実際の加工にもみられる。折り曲げ加工の諸因子が、加工の過程と結果にどのように影響するかは、すでにある程度の検討が行なわれている。^{3)~6)} さらに折り曲げ加工の成形機構を明らかにするため、単軸状態でのひずみとかたさの関係を検討し、進んで折り曲げ部分のひずみとかた

さの分布を実験的に調べ、中立面の挙動を検討した結果を報告する。

2. 材料および方法

2.1 材 料

直径 15 mm のアルミニウムと軟鋼の丸棒を使用した。成分は JIS の分類で、アルミニウムは A2B2、軟鋼は SUY, B1 である。軟鋼については、かたさ分布の傾向がアルミニウムより明確に出るのでこの点の補足と、一般に使われる材料なので軽金属との対照の目的との二つの点より合わせて行なった。材料の力学的性質は引張りの応力～ひずみ関係を、つぎのようにおいたときに

* 東京都立大学 (東京都) Tokyo Metropolitan University (Tokyo)

$$\sigma = F \varepsilon^n \dots \dots \dots (1)$$

加工硬化指数 n と塑性係数 F で表わされる。2.3 の条件で真空焼鈍した後に求めた値はつぎのとおりである。

材 料	F 値 (kg/mm ²)	n 値
アルミニウム	15.24	0.288
軟 鋼	55.80	0.283

2.2 実験計画

実験は二つの段階に分れる。

第一段階は材料に単軸のひずみを与え、ひずみ状態とのかたさの関係を調べる。具体的には、1) 単純な引張りひずみを与えた場合、2) 単純な圧縮ひずみを与えた場合、3) はじめに圧縮ひずみを与えた後に引張りひずみを与えた場合、に対するかたさを測定する。規定されたひずみに対してかたさがどのように対応するか、ということがこれで明らかになる。

第二段階は平板試片の折り曲げ加工を行ない、曲げ部分のかたさ測定により中立軸の挙動を調べる。つまり第一段階と同じ丸棒材料より平板状試片を削り出し、真空焼鈍後に折り曲げ試験をして、側面上のかたさとひずみ分布の測定をする。これから材料の引張り側を前記の引張りひずみと、圧縮側を圧縮ひずみと、曲げによる中立軸の移動からはじめ圧縮側にあつた部分で引張り側に移行する部分を圧縮ひずみ後引張りひずみと対応させて検討する。これより中立軸の移動をかたさの測定により推定することに、³⁾より確実な情報がえられると予想される。

2.3 材料のかたさの基準

アルミニウム	340℃	30分間
軟 鋼	750℃	1時間

の真空焼鈍を、材料の予ひずみを除くため、すべての実験の全試片について行なつた。真空焼鈍でも表層にいくらかの酸化による硬化層の存在が考えられるので、つぎと同じ腐食法で薄層を除去しながら各段階で10点ずつか

たさを測り、この最ひん値が一定におちついたときの値を母材かたさの基準状態とした。

アルミニウム	26.0 (Hv) ₀₅₀
軟 鋼	97.3 (Hv) ₁₀₀

焼鈍した試片を切断すると、切断による加工硬化層がかたさに影響するので、この硬化層の深さを調べた。両材料とも切断面をナイトル液で腐食し硬化層を少しずつ除きバフで軽く研磨する操作をくりかえし、除去ごとのかたさを測定しその値が基準状態に収束するまでの除去層の厚さを求めた。アルミニウム、軟鋼とも50~60 μ の除去ではば基準状態に収束し、バラツキも少ないことが認められた。

焼鈍状態は材料の延性が最大限に保有され同じ切断条件でも硬化層が最も深いので、規定されたひずみ量を与えた試片を切断したときは上記の量の腐食を行なえば、切断による硬化の影響が附加されるのを防ぎ試片自体のかたさがえられる。

2.4 単軸ひずみの場合の方法

引張り試片と圧縮後引張り試片は、直径 14 mm に加工し標点距離は 40 mm とした。圧縮試片は直径 14 mm、高さ 15 mm に仕上げた。圧縮後引張りのときは座屈を防ぐため治具を作成し、それに取りつけて行なつた。どの場合も試験の過程を、(弾性ひずみ)+(塑性ひずみ)の全ひずみ量で規定し、ひずみ速度 $2.5 \times 10^{-3}/\text{min}$ に統一した。圧縮は端面をグリス潤滑したが、実験範囲内で barrelling 現象はわずかであつた。ひずみの規定値はつぎのとおりである。

ひずみ条件	ひ ず み 量 (%)
引 張 り	5, 10, 15, 20, 25, 30
圧 縮	5, 10, 15, 20, 25, 30
圧縮後引張り	圧縮: 3~10, 引張り: 5~30

2.5 折り曲げ試片についての方法

丸棒材料より、アルミニウム: $14.5 \times 50 \times 2.0$ (mm)

(a) Appearance of sheet folding apparatus.

(b) State attached on amsler testing machine.

Photo. 1 Appearance of sheet folding apparatus and its use in experiments.

軟鋼：14.5×50×1.5(mm) に削り出し，真空焼鈍しつぎの条件で折り曲げ試験をした。折り曲げ装置は **Photo. 1**

(a) Location of mark for strain measurement (Unit mm)

(b) Position of hardness measurement on bend part of specimen (Unit mm)
(Left) Aluminum (Right) Mild steel

Fig. 1 Position of strain and hardness measurement on specimen.

(a) Aluminum

(b) Mild steel

Fig. 2 Relation between simple uniaxial strain and hardness for cylindrical test pieces.

に示す。

材 料	$r_p/2t$	$r_a/2t$	$c/2t$
アルミニウム	1.0	1.0	1.2
軟 鋼	1.54	1.54	1.2

ここに， r_p ：ポンチ肩半径， r_a ：ダイス肩半径， $2t$ ：板厚，で試片寸法は平面ひずみ条件を満たすようにとつた。

折り曲げ試験を各ストロークごとに停止した試片を作り，**Fig. 1 (a)** に示す位置の相対的变化を測りひずみを

(a) Aluminum

Fig. 3 Relations between total strain and hardness for cylindrical test pieces.

求めた。かさは最大の曲げひずみを受ける点で (b) に示すよう板厚方向に沿って測定した。

3. 実験結果

3.1 単軸ひずみの場合の結果

全ひずみ履歴を与える絶対値の和、(圧縮ひずみ量) + (引張りひずみ量) を合ひずみとよぶことにする。引張りおよび圧縮に対するかたさを **Fig. 2 (a), (b)** に、また圧縮後引張りの合ひずみに対するかたさを **Fig. 3 (a), (b)** に示す。両材料とも傾向は類似だが、軟鋼の方が値が高く傾向も明確にでるので、さきののべた対照の役目をよく果たしている。引張り破断様式は典型的なカップ・コーン型で、カップ底を基点とする軸上長手方向のかたさ分布測定例を **Fig. 4(a), (b)** に示した。

3.2 折り曲げ試片の結果

ひずみの測定結果を **Fig. 5(a), (b)** に、かたさを **Fig. 6(a), (b)** にあげた。

Fig. 4 Hardness distribution of neighbouring region of fractured surface broken line shows saturated value and distance.

Fig. 5 Propagation of strain in specimen with proceeding of sheet folding operation.

Fig. 6 Propagation of hardness distribution specimen with proceeding of sheet folding operation.

4. 考 察

4.1 単軸ひずみの考察

(1)式は真応力%真ひずみ関係であり、さきの表で規定されたひずみは公称ひずみである。真ひずみ ϵ と公称ひずみ e との間にはつぎの関係がある。

$$\epsilon = \ln(1+e) \quad (2)$$

よつて規定された公称ひずみまで引張るとき、対応する真ひずみ、それより(1)式で真応力が順に求められる。

圧縮のときは軸より任意の半径 r の変形前の最初の半径を R としたとき、ひずみは次式で表わされる。⁷⁾

$$\epsilon = 2\ln(dR/dr) \quad (3)$$

この両方の場合とも規定したひずみに対応した塑性ひずみが残る、加工硬化しているが一様なひずみ状態なので残留応力は存在していない。かたさの増加は主として残留応力によると考えられ現在の場合はあまり影響されないのではないか、同じ大きさのひずみなら圧縮に対す

るかたさの方が引張りに対するより高いのではないか、など予想された。実験結果は回答を与え、単軸引張りや圧縮で一様な変形状態では残留応力は存在しないのに、かたさはひずみの増加につれ相当上昇し、加工硬化の程度が進むことによることを示している。かたさ測定では多くの因子の影響によるバラツキはさけられないが、^{8)~10)}それでも圧縮を与えた方が同じ量の引張りを与えたときよりも高いかたさを示すことがみられる。

圧縮後引張りを与えたときのかたさと、圧縮または引張り単独の場合を比較すると、材質による差が現われる。アルミニウムは合ひずみと同じ大きさの引張りひずみのとき、大体同じかたさを示す。一方、軟鋼は大体同じ値かまたは合ひずみの方が少し低目の値で、Baushinger 効果と類似な現象¹¹⁾と考えられ、アルミニウムはこれが現われにくいものとみられる。実験の範囲で圧縮と引張りの比が異なつても合ひずみとして同じ値であれば、かたさの値は大体同じであることが認められる。

引張り破断点付近は三軸応力状態で厳密な処理はむずかしいが、ここではごく簡単な近似をする。このときも非圧縮性の条件が成立するとし、Nadai にならい単軸的な処理をすると、¹²⁾ ひずみ e は次式により与えられる。

$$e = \delta l/l_0 = (d_0/d)^2 - 1 \quad (4)$$

ここに、 l_0, d_0 : 試片のはじめの標点間距離と直径

l, d : " の変形後の " と "

これより対数ひずみ ϵ はつぎのようになる

$$\epsilon = 2(\ln d_0 - \ln d) \quad (5)$$

Fig. 7(a), (b) はこのひずみと破断点近くのかたさを対応させたもので、実験点に対し引いた線は初期の実線部分が普通の標点間距離の測定より求め、後期の点線部分が(4), (5)式により求めた部分である。引張り特性を含め機械的性質とかたさの関係が研究されているように、^{13)~15)} この曲線の形状が引張りの応力~ひずみ曲線に類似しており、両対数グラフにとり比較したのが **Fig. 8(a), (b)** でよい対応を示し片方を測定すれば他が推定できる。

合ひずみとかたさの関係を直観的に示すため平面上に直交する二軸をとり、各軸上に引張りと圧縮のひずみを目盛る。単軸の引張りと圧縮を与えるときは、この各軸上の点を対応させる。平面上の任意点はその座標に対応する両種のひずみを受けることを意味し、現在は圧縮後引張りなので必ず圧縮を先に受けているものとする。原点でこの平面に垂直に立てた第三軸上にかたさを目盛れば、実験条件を細かくとればひずみの組み合わせに対しかたさの分布を示す曲面がえられる。現在は中立軸の移動する領域を調べるため圧縮側の実験値が少ないので、

Fig. 9(a), (b) のような柱状図で示した。

Fig. 7 Relations between strain and hardness in large strain region.

4.2 折り曲げの場合の考察

折り曲げの条件として比較的ゆるいのに引張りひずみが大きく、中央面も引張りひずみ領域に早く移行することがみられる。だが圧縮ひずみの領域が存在しているので中立面は材料内にとどまり、もとの圧縮側に移動している。ひずみ分布の変化をストロークの進行につれてのものにプロットし直すと **Fig. 10(a),(b)** のようになる。

かたさより中立面位置の推定を単軸ひずみとの関連で考察すると、現在の測定値より板厚を横切つてのかたさ分布は **Fig. 11(a)** のように近似される。同じく板厚を横切つてのひずみ分布は **(b)** のように近似され、ひずみ 0

Fig. 8 Correspondence between hardness and tensile stress of material used in experiments.

の軸と交わる点が中立面位置を与える。両者を対応させるため、ひずみの絶対値分布をとると(c)のようにさきの

Fig. 9 Three dimensional histogram representing relations between hardness tensile and compressive strain.

交点は接点に変わるが、軸上の位置は変化しない。最終のひずみの絶対値分布に到達する過程を調べると、(a)と(c)は直接に対応はできない。微小変形理論の成立つ変形のごく初期では中立面と中央面は一致し、以後中央面は引張りを受けるはじめ、ひずみ履歴は0より引張りだけである。よって中央面を含め引張り側は、ひずみは単調に増加しひずみの絶対値分布が同時に合ひずみ分布を一意的に与える。中央面と最終の中立面の間の領域は、初め圧縮でこれを引張りがしだいに打消しついに0となり、さらに引張り域に移行させた結果が計測されたものである。合ひずみ履歴は圧縮と引張りの和としての履歴なので、単なる絶対値の分布(c)より大きい。同じことが中立面と圧縮側表面の間の領域にもいえ、圧縮ひずみ量が大きかったので引張りにより打消された以外の圧縮が残留している。

実験より計測されるのはかたさとひずみ絶対値分布だが、この対応には中間に計測できないが、

〔かたさ分布〕 $\longleftrightarrow$ 〔合ひずみ分布〕 $\longleftrightarrow$ 〔ひずみ絶対値分布〕のように合ひずみ分布を入れて考えなければならない。単軸試験ではかたさと合ひずみの対応ができ、これより合ひずみ分布は **Fig. 11 (d)** のように近似しても大きな誤りはないであろう。かたさ測定により中

(a) Tensile and compressive surface

(b) Mid plane of specimen thickness

Fig. 10 Propagation of strain distribution in specimen with proceeding of sheet folding operation representing shape of strain distribution.
material: mild steel.
s: Punch stroke

立面位置を推定する問題は、(c)の接点位置を(d)の極小点位置で推定することに帰する。

この誤差がどの程度になるかじやつかんの仮定をおき検討すると、中央面より引張り側は合ひずみと絶対値が一致するので対象外としてよい。圧縮側の分布を一次近似として二次曲線により表わされるとし、両分布は同形

Fig. 11 Diagrammatical view of strain and hardness distribution in specimen.

Fig. 12 Approximation of strain and hardness distribution by parabolic curve.

で平行移動により重ね合わされるものとする。この二つの仮定をおき **Fig. 12** のように座標軸をとり、絶対値分布を

$$y = a(x-b)^2 \quad (6)$$

で表わすと b が中立面位置を与える。中央面と圧縮側表面のひずみはこれよりつぎのようになる。

$$y_{x=0} = ab^2, \quad y_{x=t} = a(t-b)^2 = c \quad (7)$$

α, β を未定とし合ひずみ分布をつぎの形におく、

$$y - \alpha = a(x - \beta)^2 \quad (8)$$

これより中央面と圧縮側表面で次式が成立つ。

$$x = 0: \quad ab^2 - \alpha = a\beta^2 \quad (9)$$

$$x = t: \quad c + \Delta c - \alpha = a(t - \beta)^2 \quad (10)$$

(9), (10) 式より未定係数 α, β がつぎのように定まる。

$$\alpha = a \left[b^2 - \frac{1}{4a^2t^2} \{a(t^2 + b^2) - (c + \Delta c)\}^2 \right] \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{2at} \{at^2 + ab^2 - c - \Delta c\} \quad (12)$$

極小点位置は β なので、問題は b の代りに β とするとどれだけの誤差を生ずるかということになる。(7) 式を使い (12) 式をかき直すとつぎのようになる。

$$\beta = b - \frac{\Delta c}{2at} \quad \text{または} \quad |\beta - b| = \left| \frac{\Delta c}{2at} \right| \quad (13)$$

板厚 $2t$ を一定とすると、 Δc が小さいほど、 a が大きいほど、誤差は小さい。物理的意味は、 Δc が小さいのは引張力が小さいことを意味し、 a が大きいのは曲線が急なことで加工硬化に応じてかたさが大きく上昇することを意味している。

実験結果よりみるとストロークの進行につれかたさもひずみ分布も飽和状態となる。軟鋼は傾向が拡大してみられるのでモデルとしてとり、このときのストロークをみると $s = 6 \sim 8 \text{ mm}$ で $s/2t = 4.6 \sim 6.2$ の範囲で、両者とも大体同じストロークで飽和状態となる。板厚方向の値にプロットし直してみると、かたさの極値を与える点は引張り側表面より 0.8 mm 付近にあり、ひずみの絶対値分布の極小点つまり接点は同じく 0.8 mm 付近にあることがみられた。よつて誤差はあまり小さくなく、かたさより中立面位置を推定することは妥当な値を与える。この結論はアルミニウムについても適用できることは明らかである。

5. む す び

単軸ひずみの場合を基礎とし、折り曲げ加工製品の曲

げ部分のひずみとかたさの関係を検討した。この結果、折り曲げ部分のかたさ分布より中立面位置を推定することが近似的に容認されることを確証した。

単軸状態の加工硬化とひずみの関係を、加工状態に適用することは圧延の場合にも行なわれているが、せん断応力の影響でいくらかのずれを生ずることが知られている。¹⁶⁾ 折り曲げでもせん断応力の作用はあり、この点の検討が現在の方法の精度を高める一つの問題であり、改めて検討することを考えている。

終わりに、多くの有益な御教示を頂いた東京都立大学宮川松男教授に厚く御礼申し上げる。また、細川卓也、遠藤勝二、関口隆弘、荒井教雄、織戸克美、平林次夫の諸君の協力を受けたことを感謝する。

参 考 文 献

- 1) Kienzle, O.: Microtecnic. 9-4 (1955) 177.
- 2) Kienzle, O.: Microtecnic. 13-2 (1959) 51.
- 3) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工, 8-80 (1967) 493.
- 4) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工, 8-80 (1967) 502.
- 5) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工, 8-82 (1967) 597.
- 6) Saga, T., Sato, K. & Mizusawa, S.: Memoirs Facul. Tech. Tokyo Metro. Univ. No. 17 (1967) 1379.
- 7) 葉山: 塑性学と塑性加工, 46ページ オーム社
- 8) James V. L.: Sheet Metal Industries 36-390 (1959) 639.
- 9) James V. L.: Sheet Metal Industries 36-392 (1959) 809.
- 10) Kayser T. F.: Sheet Metal Industries. 37-395 (1960) 173.
- 11) 斎藤: 機械の研究, 10-1 (1958) 43.
- 12) Nadai, A. & Manjoine M.: J. App. Mech. 8 (1941). A-77. (Trans. A.S.M.E. 63).
- 13) Dugdale D. S.: J. Mech. Phys. Solids 2-1 (1953) 14.
- 14) James V. L.: Sheet Metal Industries, 37-394 (1960) 125.
- 15) Davis H. E., Troxell G. E. & Wiskocil C. T.: The Testing and Inspection of Engineering Materials. McGraw-Hill (1964 3rd ed) 213.
- 16) Ford, H.: Metallurgical Reviews, 2-1 (1957) 1.