立方体方位板の深絞りにおける金属の塑性流れ*

五 弓 勇 雄** 鈴木敬治郎** 田 辺 博 一***

Isao Gokyu, Keijiro Suzuki and Hirokazu Tanabe : Metal Flow in Deep-Drawing of Cube-Textured Copper. Many investigations have been made on the earing phenomenon of deep-drawn cup. In predicting the relationship between texture and earing, calculations have been carried out on the assumption that only the circumferential compressional stress is effective for the development of ears. Assuming as a first approximation that the radial and circumferential stresses equal in magnitude are uniformly distributed in the blank. Tucker has obtained good agreement between the predicted and experimentally measured values for cups pressed from aluminum single crystals.

To clarify the reason of such a good agreement in spite of the unrealistic assumption of such an overall uniform stress field, strain measurements during deep-drawing have been made on the blank of the cubically oriented copper sheet. From the measurement of strain variations in the blank during the deep-drawing operation, validity of Tucker's assumption can be explained. In this deep-drawing process, fractures are observed to initiate in the parallel and perpendicular directions to the rolling direction where the r -values are maximum and the elongation to fracture is minimum.

(Received February 9, 1966)

I. 緒 言

金属板の深絞りにおけるカップ耳の発生と深絞り加工限の二つの問題は金属学的に興味深いものである。カップ耳の発生については古くからかなり多くの報告^{(1)~(8)}がある。

耳を発生させる応力状態としては、(1) 素板半径方向の引張り応力だけである^{(2)~(4)}、(2) 素板縁近傍での円周方向圧縮応力のみである^{(5)~(7)}、(3) 半径方向の引張り応力と円周方向の圧縮応力が均等に作用する結果である⁽⁸⁾。これらのうち(1)、(2)より(3)の応力状態での扱いの方がよりよく耳を説明している。しかし(3)のような応力状態が第一近似にせよ素板のすべての点で存在するという事は、かなり非現実的な仮定といわねばならない。それにもかかわらず(3)の応力状態をもととした計算結果が実測値とかなりよい一致を示していることも見逃すことの出来ない事実である。このような非現実的な仮定での計算が、何故よ

く実験的結果を説明するのか検討する必要がある。

また優先結晶方位の存在は板面異方性を現わし、ひいてはカップ耳を形成させるものとして深絞り用金属板には面内等方性のものが望まれた。しかしある種の板厚異方性は深絞り性を向上させるものであるとして Lankford の r 値が提唱された⁽⁹⁾。そうしてこの塑性歪比 r は Whiteley ら⁽¹⁰⁾により深絞り性表示値として有用であることが実験的に示されてから、金属板の深絞り性を塑性歪比 r にもとづいて考え議論した報告^{(11)~(19)}がかなりみられる。とくに鋼板においては塑性歪比 r は深絞り性表示値として有効であることが知られている。しかし塑性歪比 r は結晶方位依存性が極めて強い⁽²⁰⁾ものであるから、鋼板の深絞り性は結晶方位によつて支配される度合の強いことが考えられる。これら結晶方位のうち板面に平行に存在する $\{111\}$ 面は深絞り性を向上させ、 $\{100\}$ 面は絞り性を劣化させる⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。Whitely and Wise⁽¹⁴⁾ および五弓、鈴木⁽²¹⁾の結果によれば、 $\{100\}$ 方位の深絞り性への影響はかなり鋭敏であつて、

** 東京大学工学部冶金学教室 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

*** 東京大学工学部大学院 (Postgraduate Student, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

* 1964 年 4 月東京および 10 月本会富山大会に発表

- (1) E.W. Palmer and C.S. Smith: Trans. AIME, **147** (1942), 164.
- (2) A. Phillips and C. H. Samans: Trans. AIME, **104** (1933), 171.
- (3) H. L. Burghoff and E. C. Bohlen: Trans. AIME, **147** (1942), 144.
- (4) M. Cook and T. Li. Richards: J. Inst. Metals, **69** (1943), 201.
- (5) F. H. Wilson and R. M. Brick: Trans. AIME, **161** (1945), 173.
- (6) L. Bourne and R. Hill: Phil. Mag., **41** (1950), 671.
- (7) A. J. McEvily, Jr. U.S. Nat. Advis. Comm. Aero. Tech. Note, (1955), No. 3439.
- (8) G. E. G. Tucker: Acta Met., **9** (1961), 275.

(9) W. J. Lankford, S. C. Snyder and T. A. Bausher: Trans. ASM, **42** (1950), 1197.

(10) R. L. Whiteley D. E. Wise and D. J. Blickwede: *Drawability and anisotropy of metals* (To be presented at the International Colloquium on the Forming of Sheet Metals, May, 1960, Paris, France)

(11) R. L. Whiteley, D. E. Wise and D. J. Blickwede: Sheet Metal Ind., **38** (1961), 349.

(12) R. L. Whiteley and D. E. Wise: Flat Rolled Products, **III** (1962), 47.

(13) R. S. Burns and R. H. Heyer: Sheet Metal Ind., **35** (1958), 261.

(14) J. A. Elias, R. H. Heyer and J. H. Smith: Trans. AIME, **224** (1962), 678.

(15) R. L. Whitely: Trans. ASM, **52** (1960), 154.

(16) 五弓、鈴木(敬)他: 鉄と鋼, **51** (1965), 1131.

(17) 福田: 塑性と加工, 5-36 (1964), 3.

(18) 山田: 塑性と加工, 5-38 (1964), 183.

(19) 吉井: 第 14 回塑性加工連合講演会前刷集, 23.

(20) 五弓、鈴木(敬): 本誌, **27** (1963), 68.

(21) 五弓、鈴木(敬): 本誌, **28** (1964), 284.

その量の減少は少量でも深絞り性を向上させるが{111}方位の多少の増減は絞り性にそれほど影響を与えていない。このWhiteley and Wiseの結果に対しHosford and Backofen⁽²²⁾は塑性歪比 r の計算をもととし、{100}方位の深絞り性への劣化性を補うためには、{111}方位の存在量が{100}の4~5倍必要であることから、{100}方位の深絞り性に対する鋭敏さを示している。しかしこれも単に理論計算的なものにすぎないから、{100}方位板を実際に深絞りしてその挙動を観察し、深絞り性への劣化性を検討する必要がある。以上2点に立つて行なつた実験につぎのように報告する。

II. 実験方法および結果

深絞り加工中、素板に生ずる応力状態は場所によつて異なる。すなわちポンチ近傍では半径方向の引張り応力が主で、これより遠ざかり、素板縁に近づくにつれ円周方向の圧縮応力が増し、素板縁では円周方向圧縮応力のみとなる。われわれは深絞り加工中、素板の場所によつて異なる応力状態での金属の塑性流れからカップ耳の発生、および深絞り加工限を検討するためつぎのように実験を行なつた。

1. 材料および素板

99.99% Cu の電気銅を鍛造後、厚さ35 mmから冷圧で約1 mm厚さとし、450°C×1 hr アルゴン気流中で加熱した。この試料のX線極点図は、すでに示した⁽²⁰⁾ように極めて鮮鋭な立方体方位であつた。この試料に同心円と放射状の標線を写真法で記入したものを素板とした。素板直径は40 mm、同心円のうち最小円の直径は10 mm、同心円の間隔は2.5 mm、放射状の線は、圧延方向から10°おきに刻んである。

2. 深絞り

この素板をJIS コニカルカップ試験法での工具17型を用いて、深絞りをした。ただし、ポンチは平底を使用した。カップに絞り上るまでのものについて、歪測定を行なつた。すなわち、(a)はPhoto.1に示すように、素板がダイスに密着した状態で、これよりポンチストロークが5 mm進んだ状態のものを(b)、さらに5 mm進んだものを(c)、絞り切つてカップに成形された状態のものを(d)とする4工程のものである。

3. 歪測定

深絞り加工の各過程での半径方向、円周方向および厚さ方向の変形量を、変形前の寸法に対する割合で示し、それぞれ e_r , e_θ および e_t とした。Fig.1に示すように、素板中心から同心円(I)までをA、同心円(I)から(II)までをB……、同心円(VI)から(VII)までをGとし、深絞りによつて

これらA, B, C……Gの部分の半径方向の長さの変化の割合 e_r が、圧延方向からの角度でどうなるかをFig.2に示した。なお、同心円(II)と(III)の間の点線は、ポンチ肩の

Photo.1 Cup drawn from cube textured copper shows earlier stage of deep drawing and development of ears. These ears are situated at the position 0° and 90° from rolling direction.

Fig.1 Concentric circles and radial lines marked as a reference on the cubically oriented copper. And A, B, C……G show e_r of circle (I)~(II), (II)~(III), (III)~(IV)……(VI)~(VII). Dotted line indicates punch profile. (IV)~(VII).

Fig.2 Variation of radial strain in the cup at the early stage of deep drawing [Photo.1-(a)]. Radial strain in the peripheral zone (VII) does not show directional variation, corresponding to the earing of cup.

(22) Fundamentals of Deformation Processing, (1964), 284.

位置を示す。Fig.2において横軸に平行な e_r を示すものは、A, B, C および G である。このうち A, B は Fig.1 か

らも明らかのように、ポンチ底部にあたる場所で、変形量は少なく主として張り出し変形をする場所である。またCはポンチのR部に対応するところで、曲げ、張り出し、引張りおよび円周方向圧縮の共存する複雑な応力状態の部分である。Gは素板の最外周部の e_r を示し、ここは主として円周方向の圧縮応力だけで変形する場所である。これら横軸に平行な e_r の変化を示すもののなかではB部の変形量が最も大で、G部での e_r の値はほとんど零である。したがってPhoto.1の状態の深絞り変形では素板縁近傍における半径方向の伸びはほとんど認められないことになる。しかるにこの状態でのカップはすでに $0^\circ-90^\circ$ 耳を明らかに有しているから、素板縁近傍の e_r からは耳の発生は説明出来ない。むしろカップ縁の凹凸はD, E, F部の e_r の加算的のものによく対応する。

Fig.3はPhoto.1-(a)の状態での e_θ の圧延方向からの各角度に対する変化を示している。同心円(I), (II) … (VII)

Fig.3 Variation of circumferential strain in the early stage of deep drawing [Photo.2-(a)]. Circumferential strain on the circle (VII) is maximum 25° from rolling direction.

の上で $0^\circ \sim 10^\circ$, $10^\circ \sim 20^\circ \dots 40^\circ \sim 50^\circ$ の間の変形の割合を e_θ とし、それぞれ $5^\circ, 15^\circ \dots 45^\circ$ にプロットした。Fig.3において同心円(I), (II)および(III)上での e_θ は角度による変化がなく横軸に平行であり、同心円(II)上の e_θ は(I)上より大で、同心円(III)での e_θ はほとんど零である。張り出し変形をうける同心円(I), (II)上の e_θ はプラス側にあり、フランジ変形部の同心円(III), (IV) (V), (VI)および(VII)上での e_θ はマイナス側にあつて、同心円(VII)上で e_θ の角度に対する変化以外はかなり類似した傾向にある。すなわち(VII)以外のものは角度の増加にともなつて絶対的に e_θ の値を減少しているが、同心円(VII)上の e_θ の変化は 25° で絶対値が最大となつている。

Fig.4はPhoto.1の状態における e_t の圧延方向からの各角度に対する変化を示している。同心円上で放射状標線が

交叉した近傍の厚さを測定し、その変形の割合を e_t とした。Fig.4より明らかのように、同心円(VII), (VI)および

Fig.4 Variation of thickness strain in the early stage of deep drawing [Photo.2-(a)]. Thickness strain on the circle (V) is small and does not show directional variation.

(V)上では深絞りにより厚さを増しており、同心円(IV), (III), (II)および(I)上では厚さを減少している。これらのうち厚さの増加する同心円(VII)と(VI)上の e_t の角度に対する変化はかなり類似したものである。すなわちこれらは横軸の角度の増加につれて厚さを増し 25° で最大となり、その後は値を減少して行くが、 45° の e_t の値は 0° のものより大である。同心円(V)上での厚さはやや増加しているが、角度によつては変化なく横軸に平行になつている。これに対して厚さを減少する側にあるもののうち張り出し変形をうける場所にある同心円(I), (II)上での e_t は角度に対し一定で横軸に平行な直線であることを別とすれば、同心円(II)~(III), (III)および(IV)上での e_t の角度に対する変化は傾向的によく類似しており、圧延方向から 25° のところで厚さが最も薄くなつている。なおFig.4では同心円(II)の厚さが素板中で一番薄い場所である。変形が進んだ状態での e_r, e_θ および e_t の角度に対する変化はFig.2, 3, 4と同じ傾向であつた。しかし e_t の変化ではFig.4で同心円(II)上の厚さが素板中で一番薄い場所であつたのが、ポンチ肩にあたる同心円(II)~(III)上の厚さが一番薄い場所になつていて、その中でも圧延方向から 25° のところが一番厚さが薄い。さらに変形が進んで(c)の状態での e_t の圧延方向からの各角度に対する変化をFig.5に示した。この状態になると耳はかなり顕著になつており、 e_t の角度に対する変化も前二者の状態とかなり異なつている。その一つは同心円(VII), (VI)上の厚さの角度に対する変化である。すなわち同心円(VII), (VI)上の e_t の変化は圧

延方向から 25° に最大値をもっていたが、Fig.5 では角度の増加で厚さを増し、カップ縁近傍の厚さ変化を示す(VII)

Fig.5 Variation of thickness strain at the later stage [stage (c) or Photo.2(a)]. Thickness on circle (II)~(III) is smallest and at 0° direction thickness decreases remarkable.

上の e_t の曲線では、谷となつている 45° 方向で原厚の 2 倍の厚さであることがわかる。

Fig.4 と Fig.5 の異なつたもう一つの点は、素板中で最も薄い場所である。すなわち Fig.4 では同心円(II)上の厚さが一番薄いのが Fig.5 ではポンチ肩部の同心円(II)~(III)上で、このうちでも 0° 方向が最も薄い部分になつてゐることである。なお、この状態で顕著な耳を有するカップ縁の凹凸も Fig.2 と同じように D, E, F の部分の e_r の加算の結果とよく一致している。また e_θ の変化も同心円(VII)上のものを除くと傾向的にはよく類似している。すなわち Photo.1 よりポンチストロークが 5 mm 進んだ (b) の状態までは同心円(VII)上の e_θ の絶対値は 25° が最大であつたが、(c) の状態では角度の増加にともなつて e_θ 絶対値も次第に増し、圧延方向から 45° で最大となつてゐる。

(d) の状態での e_r, e_θ の角度に対する分布は (c) の状態と傾向的には同じで、(c) での特徴的なものが助長されてゐた。

Fig.5 から明らかなように、圧延方向から 45° での板厚は加工前板厚の約 2 倍である。したがつて (d) にカップに成形するこの部分はしごかれて板厚は平均化してしまつたので (d) の状態での e_t は測定しなかつた。

4. 引張り試験

平行部長さ 70 mm, 巾 15 mm の試験片を用い、圧延方

向から $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ および 45° 方向を引張り軸とするものについて引張り試験を行なつた。その荷重-伸び曲線を

Fig.6 Lode-elongation curve tested at various angles to the rolling direction.

Fig.6 に示す。これから明らかなように 0° 方向のものは伸びが約 25 % ぐらいしかないが、 45° 方向のものは約 75 % 伸びでかなりの差がある。伸び量は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の順に増加している。このように立方体方位板では引張り軸方向の差により著しい伸び量の差があることがわかる。なおこのように $0^\circ \sim 45^\circ$ での試験結果が他の部分に繰返されることは結晶学的に明らかである。

5. エリキセン試験

深絞り加工での破断はポンチ肩に対応する部分に現われる。しかるにここは引張り応力のかなり強く働く場所であるから、エリキセン試験での割れも同じ挙動を示すものと考え、その破断箇所を観察した。Photo.2 はこの様子を示すものである。なお写真中の線は圧延方向を示すものであ

Photo.2 Beginning of fractures at 0° and 90° C from rolling direction in the erichen test.

る。これより明らかなように破断箇所は圧延方向から $0^\circ, 90^\circ$ 方向の 4 ケ所であつた。なおこのことは Fig.7 においてポンチ肩に相当する同心円(II)~(III)上で、 0° 方向の厚さが素板上で最も薄いことに対応するものである。割れを生ずる $0^\circ, 90^\circ$ 方向はこの板中で塑性歪比が最大⁽²⁾ であることは興味深いことである。

III. 結 果 の 検 討

深絞り加工中に素板に存在する応力状態は場所により異

なる。この応力状態の異なることが立方体方位板の深絞りではどのような歪となるべきかをつぎのように計算し、実

Fig. 7 Prediction of strain in the peripheral zone of the blank under condition that only $-\sigma_\theta$.

測歪に対応せしめながら耳の発生、および深絞り加工限を検討した。

1. 理論計算

コニカルダイスによる深絞りにおけるフランジ部の計算をつぎのような仮定のもとで行なった。

(1) 主応力方向は板厚方向 (σ_t)、素板半径方向 (σ_r) および素板円周方向 (σ_θ) とする。したがって素板周縁部では $\sigma_r = \sigma_t = 0$ で、 $\sigma_\theta (\sigma_\theta < 0)$ のみが存在する。ポンチ肩部では $\sigma_t = \sigma_\theta = 0$ で、 $\sigma_r (\sigma_r > 0)$ のみが存在する。なおこれらの中間状態として $\sigma_t = 0$ で $\sigma_r (\sigma_r > 0)$ と $\sigma_\theta (\sigma_\theta < 0)$ が存在し、かつ $\sigma_r = -\sigma_\theta$ であるとする。また素板中心から同一距離にある応力状態は変形開始時には、すべて同じであるとする。

(2) 絞り系に働く剪断応力は $\tau = \sigma_r \cos \varphi_1 \cos \lambda_1 + \sigma_\theta \cos \varphi_2 \cos \lambda_2$ であるとする。ただし φ_1 は絞り面の法線と半径方向のなす角、 λ_1 は絞り方向と半径方向のなす角、 φ_2 は絞り面の法線と円周方向とのなす角、 λ_2 は絞り方向と円周方向とのなす角である。このうち最も値の大きい絞り系が活動するものとする。

(3) 活動絞り系上での応力と歪の関係は $\gamma = k\tau^2$ であるとする。ただし γ は全活動絞り系上の絞り量の総和である。

(4) 絞り系の活動によって生ずる歪は $e_r = \gamma \cos \varphi_1 \cos \lambda_1$ 、 $e_\theta = \gamma \cos \varphi_2 \cos \lambda_2$ および $e_t = \gamma \cos \varphi_3 \cos \lambda_3$ であるとする。ただし γ は絞り系上の剪断歪であり、 φ_3 は絞り面の法線と板厚方向のなす角、 λ_3 は絞り方向と板厚方向とのなす角である。

(5) 多数絞り系が同時に活動する場合、加工軟化は全絞り量に依存する。

(6) 変形にともなう結晶回転は考慮しない。

以上により行なわれた計算結果のうち $\sigma_r = \sigma_t = 0$ で $\sigma_\theta (\sigma_\theta$

< 0) のみの応力下での歪分布を Fig. 7 に、 $\sigma_t = 0$ で $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下での歪分布を Fig. 8 に示した。

Fig. 8 Prediction of strain in the central zone of the blank under the condition that $-\sigma_\theta = \sigma_r$, $\sigma_t = 0$.

2. 歪分布と応力状態

このように、深絞り加工で素板に生ずべき代表的応力状態をもととした計算による歪分布と実測した歪分布を比較することにより、その応力状態を推定することが出来る。

Fig. 8 から $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下では、厚さの増減はなく横軸に重なっており、 e_r と e_θ は正負の差はあるが、横軸に示す圧延方向からの角度に対して全く同じであることを計算的に示すものである。他方 Fig. 4 においては同心円 (V) 上の e_t の分布は横軸に平行で変形量もかなり微量であつて、Fig. 8 の計算的 e_t の分布とかなり類似している。また Fig. 3 においても同心円 (V) 上の e_θ の分布は Fig. 8 の計算による e_θ の分布とよく対応している。すなわち Fig. 3 における同心円 (V) 上の e_θ が圧延方向から 25° で勾配が変つているのはその例である。ただし Fig. 8 での計算結果からはこの勾配の変る点が 22.5° となつてゐるが、実測上では標線の関係から 25° を測つたが、角度的に近いことから大ざつぱには計算結果と実測結果が一致するものと考えられる。Fig. 2 に示す E の e_r の分布は必ずしも Fig. 8 の計算結果に類似するものではないが、E の e_r は同心円 (IV) と (V) の間の半径方向の長さの変化割合であるから、応力的には $\sigma_r = -\sigma_\theta$ より σ_r の優つた状態であることを考慮すれば実測 e_r の分布からも同心円 (V) 近傍に $\sigma_t = 0$ で $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力状態が存在すると思われる。

同心円 (VII) は素板最外周の円で、ここでは円周方向圧縮応力のみが存在することは明らかであるが、その実測歪分布が計算結果と類似していることは Fig. 7 と Fig. 4, 3, 2 の同心円 (VII) 上の e_t, e_θ の分布および G の e_r を比較してみるとよくわかる。このうち e_r の分布は実測的のものと計算的のもので一見異なるようであるが、変形量としては僅少であることは共通している。また計算的歪分布では 22.5° で最大を示す曲線であるが、これは実測歪には σ_r が少して

あるが含まれていること、および変形量の僅少なことにともなう測定誤差的なものを併せて考慮すれば、実測歪分布から同心円 (VII) 上は $\sigma_r = \sigma_t = 0$ で $-\sigma_\theta$ のみの応力状態であることがわかる。ポンチ肩近くでは σ_r が極めて優つて存在する場所であるが、このことも上と同じように計算結果と実測歪を比較することにより説明出来る。Fig. 7 の計算歪分布図において、 $-\epsilon_\theta$ を e_r , e_r を $-\epsilon_\theta$ および e_t を $-\epsilon_t$ とすれば σ_r のみのとき歪分布を表わす。この σ_r のみでの歪分布と Fig. 3, 4 での同心円 (III) の e_θ , e_t の分布および Fig. 2 での C の e_r を比較すればかなりの類似性があることがわかる。ただしこの部分での応力状態はかなり複雑であるから、実測歪分布と計算結果が一致しないものもある。

3. 耳の発生

深絞りしたカップ縁の凹凸は素板の半径方向歪によるものであるから、 e_r の素板における分布を検討する必要がある。Fig. 2 において A, B の e_r はポンチ底部におけるものであるから、直接カップ縁の凹凸には関係ないものと考えられる。ポンチ肩からカップ縁の間にある C と G の e_r の分布は角度に関係なく横軸に平行である。とくに G の e_r はほとんど零であることは注目すべきことである。すなわちこの状態ですでに $0^\circ - 90^\circ$ 耳が発生していることは、Photo. 1 より明らかであるから、素板周縁部の半径方向歪である G の e_r はポンチ近傍の C の e_r とともにこのときの耳の形成に関与していないことになる。

従来、多くの研究では、耳の発生を円周方向圧縮応力のみによる素板周縁部の半径方向への変形であると説明しているが、上の事実はこの説明に疑問をいだかせるものである。Tucker⁽⁸⁾ は $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下での変形として計算した結果と、アルミニウム単結晶を深絞りしたカップ縁の凹凸とがかなりよく一致することを示している。しかし仮定した $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力状態のところは素板半径上の限られた場所にすぎないから、この部分の変形だけで耳の形成を説明するのは困難である。すなわち他の応力状態のところでの変形をも検討すべきである。Fig. 2 における D, E, F の e_r の分布を加算したものがカップ縁の凹凸にかなりよく対応している。すなわちカップ縁の凹凸は同心円 (III) から (VI) の間の半径方向の歪が支配している。しかるに同心円 (V) はこれら耳の形成に関与している場所の中央にあつて $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力のところであることは上に述べたとおりである。したがつて同心円 (V) よりポンチ肩よりのところでは $\sigma_r = -\sigma_\theta$ より σ_r が優つた応力場となり、カップ縁よりのところでは $\sigma_r = -\sigma_\theta$ より $-\sigma_\theta$ が優つた応力場となる。このように $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下で変形する場所を中心として、この応力状態より σ_r , $-\sigma_\theta$ の優つた応力下での変形部の半径方向の歪がカップ縁の凹凸を決めている。したがつて $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下の変形はこれら耳の形成に関係ある変形部の平均値的性格を有し、よくカップ縁の凹凸と一致するものと考えられる。なお耳の発生については (a) の状態でのみ論じて来たが、(b), (c), (d) の状態でも変形の程度

の差はあるが大体 (a) の歪分布の傾向が持続されていて同じようなことがいえる。

4. 深絞り加工限

深絞り加工の限界は金属板の破断を生ずることによつて示される。この場合金属板の破断は板厚減少によつて起るものであるから e_t の分布、変化によつて検討する。また破断はポンチ肩で生ずるのが普通であるから、それに相当する同心円 (II) ~ (III) 上の e_t に注目して考える。

(a) の状態の e_t の分布は Fig. 4 に示してあるが、同心円 (II) ~ (III) 上の e_t の分布は圧延方向から 25° のところが一番薄く、Fig. 7 の計算結果の歪分布と比較すると、この部分が半径方向引張応力を強くうけていることがわかる。ついで (b) の状態に変形が進むと同心円 (II) ~ (III) 上の板厚は素板中で最小の板厚となつて、その上の e_t の分布は前と同じで 25° 方向が板厚最小である。しかし (c) の状態に変形が進んで来ると、Fig. 5 に示すように同心円 (II) ~ (III) 上の板厚は板中最小であることは前の状態と同じであるが、その e_t の分布では 0° 方向の板厚が最小となつている。このように同心円 (II) ~ (III) 上の e_t の分布が 25° 方向最小で示されていることは、その応力状態から理解出来ることであるが、(c) の状態で 0° 方向の板厚が最小になることは応力状態からの説明は困難である。しかし Fig. 6 に示されているように 0° 方向の伸び量が他のものに比し著しく小さいことから局部収縮の現象として考えられる。したがつて変形が進めばこの局部収縮の場所に割れが見られるはずである。この割れを観測するため便利でかつ同じ応力状態と考えられるエリキセン試験を行なつた。結果は Photo. 2 に示すように 0° , 90° 方向の 4 ケの割れがみられる。なお 90° 方向に割れが入るのは結晶学的に 0° と 90° は等価であるから当然である。したがつて Fig. 5 の同心円 (II) ~ (III) 上の e_t の分布において、 0° 方向が板厚最小であることは一種の局部収縮であつて、深絞り時の破断はこの場所からはじまると考えられる。すなわちこの場合の深絞り加工限は 0° 方向の伸び量で決まることになるが、それは単軸引張りでの伸び量ではない。この応力状態は半径方向の引張り応力とポンチ拘束による円周方向引張り応力とであつて、加工限を定める 0° 方向の伸びは 2 軸引張り応力下での半径方向の歪量である。実測結果によると局部収縮がはじまつた状態によりさらに変形の進んだ (d) の状態での C の e_r は約 50% で、優に単軸引張りの伸び 25% を超えている。

なおこの立方体方位板における圧延方向から各角度に対する塑性歪比 r はすでに示したように⁽²⁰⁾ 0° , 90° では $r = 1$, 45° では $r = 0$ であるような 2 次曲線であるが、最大の r 値を示す 0° , 90° の 4 ケ所に割れの発生を見たことは興味深いことである。

IV. 総 括

極めて鮮鋭な立方体方位板に標線を記した素板を、深絞

りして得たカップにつき歪測定を行つた結果と計算から得られた歪分布とを比較して、カップ耳および深絞り加工限を検討してつぎの結果を得た。

1. カップ耳について：(1) 従来多くいわれているように、カップ耳の発生は円周方向圧縮応力のみで起るものではない。(2) ポンチ肩近傍の半径方向の引張り応力の優つたところの変形も耳の発生にはほとんど関係ない。(3) 素板周縁部およびポンチ肩近傍以外のすべての場合の半径方向の歪によつて耳は支配されている。(4) 耳の形成に参与している場所の平均的歪分布をもつのが $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力

場である。したがつて $\sigma_r = -\sigma_\theta$ の応力下での半径方向の歪はカップ縁の凹凸と一致するものと考ええる。

2. 深絞り加工限について：(1) 正常状態でのポンチ肩近傍における厚さ減少量は圧延方向から 25° のところで最大で、板厚は最小である。(2) 絞り加工限に近づくとき 0° , 90° 方向に局部収縮を起す。(3) エリキセン試験で、割れは 0° , 90° の 4 ケ所に生じた。(4) 0° , 90° の割れは塑性歪比では説明出来ない。(5) 0° , 90° は伸び最小のところである。(6) 深絞り加工限はポンチ肩における 2 軸応力下での半径方向伸び量で決まる。