マグネシウム板の塑性異方性と耳形成の関係

伊 藤 洋 一*

Yoichi Ito : The Relation between Plastic Anisotropy and Earing of Magnesium Sheet.

The behavior of plastic anisotropy of magnesium sheet, and the relation between R value and earing of magnesium sheet were examined at elevated temperatures. The results are as follows.

(1) R values increase as non-basal slip becomes active. Therefore, they increase with the angle between the tensile axis and the rolling direction, the tensile elongation, and the testing temperature.

(2) Earing occurs in the rolling direction, where R value is minimum. This result is explained from the relation between the parameters specifying the state of anisotropy and earing.

(3) No correlation is observed between ear height and R coefficient, $(R_{\max} - R_{\min})/R_{\text{average}}$, i.e. the latter decreases as the testing temperature is increased, but the former does not change.

(Received April 17, 1970)

I. 緒 言

Lankford ら⁽¹⁾は塑性異方性 R と加工硬化係数を組合せたものが深絞り性と高い相関性を持つことを示した。この塑性異方性 R は引張試験片の厚さ方向のひずみに対する幅方向のひずみの比として与えられ、集合組織に対する依存性の大きいこと⁽²⁾が知られている。一方 Wilson と Brick⁽³⁾は深絞りの際カップ上縁に生ずる高低、すなわち耳が集合組織と密接な関係を持つことを示した。そこで鋼をはじめとする立方晶金属において、 R 値と耳の関係を求めようとする試みがなされ、例えば Whiteley⁽⁴⁾は深絞り素板の半径方向の R 値が最大の位置に耳が発生することを見出し、また Wilson と Butler⁽⁵⁾および Whiteley⁽⁶⁾は引張方向による R 値の差が大きいほど、耳も発達すると報告している。

六方晶金属の R 値に関する研究は非常に少なく、特に深絞りとの関係を論じた報告は例を見ない。Avery ら⁽⁷⁾は室温で測定したマグネシウム合金の R 値は伸びが増すとともに増加し、伸び依存性の比較的小さい立方晶金属⁽⁸⁾とは対照的な挙動を示すことを見出し、この R 値の増加は変形初期に優勢であった $(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$ すべりが、伸びにともなう加工硬化や結晶回転のためすべりにくくなり、かわって $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ すべりが活動的になる結果であると説明している。

マグネシウムの変形は室温では主に $(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$ すべり、すなわち底面すべりによっておきるが、そのほかに $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$, $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ すべりのようないわゆる非底面すべりもわずかながらおきるといわれている⁽⁸⁾。しかし温度が上昇するにつれ、底面すべりと非底面すべりの臨界せん断応力の差が急速に縮まるため⁽⁹⁾非底面すべりの全

* 北海道大学工学部冶金工学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo)

- (1) W. T. Lankford, S. C. Snyder and J. A. Bauscher : Trans. ASM, **42** (1950), 1197.
- (2) R. S. Burns and R. H. Heyer : Sheet Metal Ind., **35** (1958), 261.
- (3) F. H. Wilson and R. M. Brick : Trans. AIME, **161** (1945), 173.
- (4) R. L. Whiteley : Blast Furnace and Steel Plant, **48** (1960), 1245.

(5) D. V. Wilson and R. D. Butler : J. Inst. Metals, **90** (1961-62), 473.

(6) R. L. Whiteley : Met. Progress, **94**, No. 5 (1968), 81.

(7) D. H. Avery, W. F. Hosford and W. A. Backofen : Trans. Met. Soc. AIME, **233** (1965), 71.

(8) F. E. Hauser, C. D. Starr, L. S. Tietz and J. E. Dorn : Trans. ASM, **48** (1955), 986.

(9) E. Schmid and W. Boas : *Plasticity of Crystals*, F. A. Hughes & Co., Ltd., London, (1950), 145.

変形量に占める比率が大きくなる。それゆえ、マグネシウムの R 値は大きな温度依存性を持つことが予想される。

このように R 値が伸び、温度に依存して複雑な挙動を示すと予想されるマグネシウムに対して、立方晶で経験的に認められている R 値と耳の間の関係をそのまま適用し得るか否かを明らかにするために以下の実験を計画した。

II. 実験方法

直径 50 mm のマグネシウム鋳塊 (99.9%) を、鑄造組織を破壊するために 350°C で押し出し 45×10 mm の断面を持つ帯板とした後、押し出し方向と平行に 300°C で圧延し、最終的に厚さが 1.00 ± 0.02 mm の板とした。

1. R 値の測定

圧延方向に対し、それぞれ 0°, 30°, 60°, 90° 方向を引張軸とするように試片を切り出し、平行部長さ 30 mm、幅 10 mm の引張試験片とした。Fig.1 に示すように平行部の中央に 5 mm 角に四つの標点をつけ、5% 伸び毎に長さ方向、幅方向の間隔を測定し、次式によって R 値を計算した。

$$R = \ln(W_0/W_1) / \ln(L_1W_1/L_0W_0)$$

L_0, W_0 は変形前の長さおよび幅、 L_1, W_1 は変形後の長さおよび幅である。

試験温度は 125°, 175°, 225°, 275°, 325°C の 5 段階とし、試験片の温度分布が所定温度に対し $\pm 1^\circ\text{C}$ を越えないよう注意した。なおひずみ速度は約 0.05/min である。

Fig.1 The schematic representation of the tensile specimen for the measurement of R ratio

2. 深絞り試験

ポンチ径に対する深絞り用素板の径の比、すなわち絞り比が約 2.0 となるように前記の圧延板から 42 mm 径の円板を打ち抜き、供試材とした。円筒深絞り試験機の概要を Fig.2 に示す。試験機は試験温度に保持された電気炉中におさまられ、ポンチおよびダイスはともに所定温度に対し $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に保たれた。なお 200°C 以下の温度では深絞り

Fig.2 The outline of the drawing apparatus

中に破断が生ずるため、試験温度は 225°, 275°, 325°C の 3 段階とし、ポンチ速度は 25 mm/min とした。

III. 結果と考察

1. 塑性異方性 R

Fig.3 には各温度で求めた R 値の伸びに対する変化を示してあり、これから次の結果が得られる。

- (1) R 値は圧延方向で最小、90° 方向で最大となる。
- (2) R 値は伸びが増すにつれて大きくなる。
- (3) R 値は温度依存性を持ち、約 250°C で最大となる。

Fig.3 The relation between the R value and elongation at various temperatures

Fig.4 は試料の (0001) および (11 $\bar{2}$ 0) 極点図であり、マグネシウムの典型的な圧延集合組織を示している。このような結晶配向を持つ板を引張った場合、Avery ら⁽⁷⁾も指摘しているように、その幾何学的関係から底面すべりは板幅方向に対するよりも板厚方向のひずみに大きく寄与し、 R 値

Fig.4 The inside texture of Mg sheet

を小さくするが、非底面すべり特に $\{10\bar{1}0\} < 11\bar{2}0 >$ すべりは板幅を減少させ、 R 値を大きくすることが容易に理解される。それゆえ全変形に対する底面すべりおよび非底面すべりそれぞれの寄与の程度を知り、それと結晶配向を組合せることによって Fig. 3 に示した R 値の挙動を説明することができるはずである。

先に述べた二つの非底面すべりのうち $\{10\bar{1}0\} < 11\bar{2}0 >$ すべりは室温以下の温度でも認められている⁽⁸⁾のに対し、 $\{10\bar{1}0\} < 11\bar{2}0 >$ すべりは高温になって始めて活動する⁽⁹⁾と言われている。しかし他方ではこのような特定の面ですべるのではなく、この二つのすべり面の間の最も大きな剪断応力を受ける面上ですべるといふ報告⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾もあり、非底面すべりについては未知の点が多い。そこで以後の解析には、底面すべりに対する幾何学的関係の最も簡単な $\{10\bar{1}0\} < 11\bar{2}0 >$ すべりをもって非底面すべりを代表させる。

いま単結晶試料に引張応力 σ を加えた時、底面すべりおよび非底面すべりに働くせん断応力は次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \tau(0001) &= \sigma \cos \phi \sin \phi \cos \kappa \\ \tau\{10\bar{1}0\} &= \sigma \sin^2 \phi \sin(30 + \kappa) \cos(30 + \kappa) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで ϕ は引張軸と $<0001>$ 方向との間の角であり、 κ は引張軸および $<0001>$ 方向を含む面と(0001)面の交線、すなわち引張軸に垂直な面と(0001)面とのなす角が最大になる方向(以下最大傾き方向という)とそれに最も近いすべり方向との間の角で、六方晶の対称性から考えて $0^\circ \sim 30^\circ$ の間の角度をとる。

(1)式で与えられるせん断応力が、それぞれのすべり系のせん断降伏応力 τ_y に達した時すべりがおきることから次の式によって、塑性変形を進行させるに十分な引張応力 σ のもとでいずれのすべり系が活動するかを知ることができる。

$$\begin{aligned} f &= [\tau\{10\bar{1}0\}/\tau_y\{10\bar{1}0\}]/[\tau(0001)/\tau_y(0001)] \\ &= \tan \phi \left[\frac{\sin(60 + 2\kappa)}{2 \cos \kappa} \right] \times \frac{\tau_y(0001)}{\tau_y\{10\bar{1}0\}} \end{aligned} (2)$$

τ_y は変形初期、または加工硬化を無視し得るような場合には臨界せん断応力と一致する。

(2)式は $f > 1$ の時非底面すべりが、 $f < 1$ の時底面すべりがおきことを示している。

長島ら⁽¹²⁾および Hosford⁽¹³⁾は低炭素鋼単結晶の R 値を計算によって求めようと試み、次の式を提案した。

$$R = \tan^2 \theta (3)$$

ただし θ は引張軸に垂直な面上に投影されたすべり方向と厚さ方向とのなす角である。

(3)式の関係は立方晶金属のみならず、マグネシウムのような六方晶金属にも適用し得るゆえ、(2)式によって f 値から活動するすべり系が決まれば、 R 値を(3)式から求めることができる。しかし、この考え方を多結晶体、とくに本実験で用いたような結晶配向の分散がかなり大きい試料に応用してその R 値を定量的に求めることは困難であるが、定性的な判定の尺度としては利用し得るので、以下これにもとづいて Fig. 3 に示された R 値の挙動について検討を行なった。

R 値と引張方向の関係：底面すべりにおいて活動するすべり方向は三つの $<11\bar{2}0>$ のうち最大傾き方向に最も近いものである。したがって最大傾き方向と活動するすべり方向との間の角を κ_a とすると、(1)式で定義した κ との間に $\kappa_a = \kappa$ の関係が成り立つ。これに対し、非底面すべりでは一般に $\kappa_a = 60 - \kappa$ という関係にある $<11\bar{2}0>$ 方向が活動する。引張試験片が Fig. 4 のような集合組織を持っている場合、すなわち(0001)面の圧延面に対する傾きが比較的小さい場合には、 κ_a が大きくなると θ も大きくなるので、(3)式から非底面すべりがおきると R 値は大きくなる。

Fig. 5 は引張変形を与える前の試料における(0001)極密度と ϕ 、すなわち引張軸と(0001)面法線のなす角との関係を示しており、圧延方向と引張軸の間の角度が大きくなる程極密度は ϕ の大きいほうに偏ることがわかる。ゆえに圧延方向と引張軸の間の角が大きくなる程大きな f 値を持つ部分、言いかえるならば非底面すべりによって変形する部分の体積率が増え、その結果 R 値は大きくなると考えられ、Fig. 3 の結果と定性的に一致する。

R 値と伸びの関係：Avery ら⁽⁷⁾は伸びとともに R 値が増加する理由として次の二つを挙げている。一つは底面すべりの加工硬化であり、これは(2)式において τ_y の比が増加することを意味する。他の一つは伸びによる結晶の回転

Fig. 5 The relation between the angle which the rolling direction makes with the tensile axis and the distribution of (0001) poles. Unity corresponds to the intensity observed on randomly oriented materials

- (10) A. R. Chaudhuri, N. J. Grant and J. T. Norton : Trans. AIME, **197** (1953), 712.
 (11) A. R. Chaudhuri, H. C. Chang and N. J. Grant : Trans. AIME, **203** (1955), 682.
 (12) 長島, 関野, 加藤 : 金属学会誌, **27** (1963), 481.
 (13) W. F. Hosford : Trans. Met. Soc. AIME, **227** (1963), 272.

であり、これは(2)式の $\tan \phi$ の増加を意味する。本実験では試験温度が高く、ひずみ速度が比較的小さいため、加工硬化の影響は室温の場合に比べてはるかに小さいと考えられる。これは R 値測定の時と同じひずみ速度すなわち 0.05/min で行なった引張試験の応力-ひずみ線図から求めた 0.2% 耐力に対する伸び 10% における flow stress の比が、室温では 1.6 に達するのに対し 225°C では 1.1 にすぎないことから裏づけられる。ゆえに R 値の増加は、伸びにともなう結晶回転のため (0001) 面が引張軸と平行になろうとすることによるものであろう。この点を確認するために 225°C で圧延方向に 10% および 20% の伸びを与えた試料について、 ϕ 角と (0001) 極密度の関係を求めた結果を Fig. 6 に示す。この図から伸びが増すにつれて極密度は ϕ の大きいほうに移っており、伸びにともなう R 値の増加が結晶回転の結果であることが確認された。

Fig. 6 The effect of tensile elongation on the distribution of (0001) poles. Specimens were strained along the rolling direction at 225°C

R 値と試験温度の関係: Table 1 に示すとおり、非底面すべりと底面すべりの臨界せん断応力の比は室温で 50 倍以上にも達するが、300°C 付近では 2 倍程度にまで小さくなる。ゆえに温度の上昇とともに $\tau_y(0001)/\tau_y(10\bar{1}0)$ が増加し、その結果 f 値は大きくなる。

Table 1 Critical resolved shear stresses (g/mm²) for slip in Mg

System	25°C	150°C	286°C	330°C	Ref.
(0001) <1120>	83 78	—	—	—	(14) (15)
{10 $\bar{1}$ 1} <1120>	—	1400	110	400	(16) (15)
{10 $\bar{1}$ 0} <1120>	4000	1600	130	—	(16)

(14) E. Schmid : Z. Elektrochem., **37** (1931), 447.

(15) P. W. Bakarian and C. H. Mathewson : Trans. AIME, **152** (1943), 226.

(16) R. E. Reed-Hill and W. D. Robertson : Trans. AIME, **209** (1957), 496.

Fig. 3 から約 250°C 以下では、 R 値は温度の上昇とともに大きくなり、上の考察を裏づけるが、それ以上の温度では逆に小さくなってゆく。本実験のように高温度、低ひずみ速度という条件下では粒界変形が全変形量に対してかなりの割合を占めるとされる⁽¹⁷⁾。粒界変形はすべりや双晶による変形と異なり、結晶方位依存性が比較的小さく、 R 値を 1 に近づける効果を持つと考えられ、その結果高温では逆に R 値は小さくなるのであろう。しかしこの現象を粒界変形のみで説明することには疑問があり、今後一層の検討を要する課題である。

2. R 値と耳の関係

R 値と耳の位置の関係: 緒言にも述べたように立方晶では一般に素板半径方向の R 値が最大の位置に耳が発達する⁽⁴⁾と言われている。しかし Fig. 7 (a) および (b) に示すようにマグネシウムでは素板半径方向の R 値が最小の位置、言いかえると素板周縁の接線方向の R 値が最大の位置に耳ができ、立方晶における R 値と耳の位置の対し $\pi/2$ のずれを示している。

Fig. 7 The relation between the angle to the rolling direction and (a) R value, (b) cup height and (c) 0.2% proof stress at 225°C, respectively

Hill⁽¹⁸⁾ は異方性材料を深絞りした時に生ずる耳の位置および数を理論的に求めようと試みた。深絞り用素板の周縁では板の面に平行に作用する応力は円周方向の圧縮力のみであり、耳および谷は応力とひずみ増分の主軸が一致する

(17) S. L. Couling and C. S. Roberts : Trans. AIME, **209** (1957), 1252.

(18) R. Hill : *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press, Oxford, (1950), 313.

位置に生ずるとして解析した結果、平面応力の条件で絞られる場合耳と谷は圧延方向に対して $0^\circ, 90^\circ, (90^\circ - \bar{\alpha})$ 方向にのみ生じ得ることを示した。なお $\bar{\alpha}$ は次式で与えられる。

$$(\tan \bar{\alpha})^2 = (N - G - 2H) / (N - F - 2H) \quad (4)$$

N, F, G, H は異方性パラメーターと呼ばれ、異方性材料の降伏条件から求めることができる。

(4) 式から耳の発生する位置および数を知るには N, F, G, H 相互の比を知る必要があり、この比は圧延方向と α の角をなす引張試験片で求めた R 値から次の式によって得ることができる。

$$R = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

以上の理論は立方晶金属においては実験結果と良く一致することが認められているが、結晶系とは無関係に導かれたもののゆえ、当然六方晶系にも適用し得ると考えられる。

異方性パラメーターはひずみの履歴によって変化すると考えられるので、最初に耳の発生する位置を知るためには絞りが始まった直後、すなわち塑性変形開始直後におけるパラメーターを知る必要がある。しかし伸びが小さい時の R 値を求めることは測定装置の精度上困難なので、2% から 8% まで 5 段階の伸びを与えた引張試験片の R 値を測定し、補外法によって塑性変形を開始した瞬間の R 値は、(5) 式から $F : G : H : N = 1 : 1.4 : 0.28 : 1.8$ という比になる。ところで F, G, H の相対的關係がわかると圧延方向と幅方向の引張降伏応力、 σ_{RD} と σ_{TD} の比を求めることができる。

$$\sigma_{TD} / \sigma_{RD} = [(H + G) / (H + F)]^{1/2}$$

この式から求めた降伏応力の比は 1.14、Fig. 7 (c) の 0.2% 耐力の実測値から求めた比は 1.11 となり、両者が測定誤差範囲内で一致することから、補外法によって求めた R 値の信頼性が裏づけられる。このようにして求めた異方性パラメーターの比を (4) 式に入れると、右辺は負となって $\bar{\alpha}$ の実数値は存在せず、耳および谷は圧延方向に対し 0° および 90° 方向に生ずるという結論が得られ、Fig. 7 (b) の実験結果と一致する。以上は 225°C で得られた結果について検討したものであるが、他の温度でも同じ結果が得られた。したがって Hill の理論は六方晶であるマグネシウムに対しても成り立つことが確認され、それと同時に立方晶では R 値が最大の方に、マグネシウムでは最小の方に耳ができるという一見矛盾した現象も、この理論によって説明できることがわかった。

R 値と耳の高さの関係：一般に立方晶金属では R 値と耳の高さの間に次のような関係が経験的に見出されている⁽⁵⁾。

$$(R_{\max} - R_{\min}) / R_a \propto (h_{\max} - h_{\min}) / h_a$$

R_a は板面内における R 値の平均値、 h_a はカップ高さの平均値である。

Fig. 8 はマグネシウム圧延板に 20% 伸びを与えた時の R coefficient ($R_{\max} - R_{\min}) / R_a$ 、および絞り比 2.0 で絞ったカップの Ear height ratio ($h_{\max} - h_{\min}) / h_a$ の温度に対する変化を示したものであり、 R coefficient は温度が高くなるにつれて小さくなる (20% 以外の伸びにおいてもほぼ同じ傾向が得られる) が、一方 Ear height ratio は一定である。このように板面内の異方性の差が小さくなるにもかかわらず、耳の高さには変化がないという結果が得られたことは一見奇異に感じられる。これは粒界変形を含めた変形機構の働き方が、 R 値測定のような単軸引張応力下にある場合と深絞りのように複雑な組合せ応力下にある場合とは異なるためであろうと考えられるが、この点については今後の課題である。

Fig. 8 The effect of testing temperature on the R coefficient and the ear height ratio.

R_a is the average of R value in the plane of the sheets at the tensile elongation of 20%, and h_a is the mean height of the walls of the cup drawn at a drawing ratio of 2.0

IV. 結 論

マグネシウム板の塑性異方性の試験温度による変化、およびそれと耳との関係について検討した結果次の結論を得た。

(1) 集合組織とすべり系の幾何学的関係から、非底面すべりが活動的になると R 値は増加する。すなわち引張軸と圧延方向のなす角が大きい程、伸びが増加する程、試験温度が高い程 R 値は大きくなる。

(2) 耳は深絞り用素板の半径方向の R 値が最小の位置、すなわち圧延方向に発達し、この実験結果は Hill によって提案された R 値と異方性パラメーターの関係から求めた耳の位置および数と一致する。

(3) 引張方向による R 値の差は温度が上昇するにしたがって小さくなるが、一方耳の高さは変化しない。

終りに本実験に対し御指導を賜りました北海道大学工学部松原嘉市教授に深く感謝の意を表します。