# 金属、合金の延性に及ぼす応力状態の影響

Ductility of Metals and Alloys as a Function of Hydrostatic Pressures

矢 島 正 美*	石 井	満*	小	林	勝*
Masami Yajima	Mitsuru Isl	nii	Mas	aru Koba	yashi

#### 要 旨

金属材料を静水圧下で引張り変形させた場合一般に著しい延性の増加が見られるが、この延性増加を記述す る式として次式を提出した。

 $\left(\frac{P}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \left\{ e''(P)^{3/2} - e''(0)^{3/2} \right\} + \frac{1}{3} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \left\{ e''(P) - e''(0) \right\} + \frac{1}{2} \left\{ e''(P)^{1/2} - e''(0)^{1/2} \right\}$ 

ここに e" は局部収縮開始後破断するまでのひずみ (局部ひずみ), on はくびれ応力, do/de は加工硬化係数, Pは負荷した圧力である。これは等方引張り応力一定条件より出てくるものであるが、多くの材料は上の式を 満足し、これからこの応力条件は延性破壊の応力条件として最も妥当であることを示唆した。一方積層欠陥エ ネルギーの低い二、三の銅合金はあきらかに上の式を満足しないが、これから積層欠陥エネルギーの大小は延 性破壊の機構を左右する一つの重要な因子であることを示唆した。

試 料	熱処理 (1h,℃)	結晶粒度   (µ)	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	e (0)	e'(0)	e''(0)
Aluminum	300	22	7.8	2.25	0.26	1.99
Copper	600	70	23.6	1.25	0.34	0.92
Iron	700	30	29.0	2.55	0.35	2.20
Impure iron	700	28 -	25.0	1.75	0.32	1.43
Fe-0.02%C	700	23	36.5	1.65	0.22	1.43
Fe-0.27%C	900	##	53.1	0.90	0.20	0.70
Fe-0.49%C	850	##	70.0	0.65	0.14	0.51
Cu-15%Zn	600	8	35.3	1.75	0.34	1.41
Cu-30%Zn	600	20	42.6	1.55		
Cu-40%Zn	600	25	56.5	1.50		
Cu-4.5%Ge	500	23	28.9	3.00	0.55	2.45
Cu-6.7%Ge	500	31	32.4	2.35		
Cu-9.7%Ge	500	30	43.6	1.75		
Cu-10.1%Ni	700	28	45.4	2.10	0.50	1.60

試料の熱処理ならびに常圧における引張り特性値

1. 緒 言

材料の延性を支配する要因として、もっとも重要なものは応力状

態である。経験事実によれば圧縮応力状態では延性は大きく, 逆に 引張り応力状態では延性は小さい。一般に材料の延性に及ぼす静水 圧効果として知られている現象, すなわち, 静水圧下における延性 の増大は上で述べた理由により説明できる。Bridgman 氏<sup>(1)</sup>によれ ば、この静水圧効果は丸棒の引張り変形の場合のみならず、伸線加 工,押出し加工,打抜き加工などほとんどすべての場合に見られる 現象である。このうち引張り試験による材料の延性、すなわち絞り の試験圧力による変化については、近年多くの研究者により詳細に 追試されている<sup>(2)~(6)</sup>。その中で, Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>の結果は特に興 味深い。彼らによれば、延性の圧力による増加は、比較的圧力が低 い所では Bridgman 氏が述べたとおりおおむね直線的であるが, 圧 力を高めて行くと延性の増加は飽和する傾向を示しはじめる。すな わちある圧力  $P_{\kappa}$  以上では延性の直線的増加は認められず,延性の 変化(増加)は小さくなる。 ここで  $P_{\kappa}$  は各材料に固有な値である。 この結果は、延性が圧力とともに直線的にかつ無限に増大するとい う Bridgman 氏の主張とは明らかに矛盾するものである。Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>はまた,直線関係が成り立つ圧力範囲での延性の増加率は材 料の変形抵抗の大小に強く依存し, 鋼の場合, 焼入れなどにより硬 化した材料では延性の増加は小さくなることを示している。彼らの 結果でもう一つ注目しなければならないのは、黄銅の場合、その延 性の圧力による変化が特異であるという事実である。すなわち, 黄 銅の延性は圧力が4,000 kg/cm<sup>2</sup> ぐらいまでは大略直線的に増加す るが,それ以上ではまったく変化せず一定値を取る。この結果は, 4,000 kg/cm<sup>2</sup> という非常に低い圧力で延性の直線的増加が消失す ること、臨界圧  $P_{\kappa}$  以上では延性が一定値を取ることという二点か ら判断して明らかにほかの一般の材料とは異なっている。

-

れから平行部 4.0 mm Ø×20 mm の丸棒引張り試験片を切り出し,適 た実用的にも非常に興味あるものであるが, Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>の論 当な熱処理(焼なまし)を施した。各試料の熱処理,結晶粒度は表1 文をも含めて,従来延性の圧力による変化に関する定量的な議論は に示すとおりである。それらの常圧における引張り特性値は同じく ほとんど行なわれていない。これは金属材料の延性破壊の応力条件 表1に示したとおりである。高圧引張り試験装置ならびに試験の方 がまだわかっていないためであるが、本研究ではこの問題に再び注 法の詳細は前報(7)で述べたとおりであるが、要約すれば piston-目し,変形抵抗の異なる数種の金属,合金の丸棒引張り試験を静水 cylinder 形の高圧発生装置を用い、かつ試験中圧力変動を1%以内 圧下で行ない, 延性に及ぼす応力状態の影響に関する議論を進め に押え,引張り荷重,伸びを自動記録しながら試験を行なったもの 日立製作所中央研究所 である。試験室となるシリンダの内径は25mm, 長さは245mm,

— 67 —

# 表中の合金濃度は重量 % である。

## 焼準組織

表1

### たい。

本報告では、延性破壊の応力条件として、等方引張り応力一定条 件を仮定すれば,多くの金属,合金の延性の圧力による変化をうまく 説明できること,この応力条件に従えば比較的低圧下における延性 の直線的増加、ならびに増加率と材料の変形抵抗の関係を説明でき ることを述べる。また Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>が見出した黄銅における異 常は Cu-Ge 合金でも見られること、しかし Cu-Ni 合金ではそのよ うな現象は生じないことを述べる。最後にこれら銅合金の結果か ら, 黄銅などで見られる異常が積層欠陥エネルギーの大小と関連す るものであることを示唆する。

#### 2. 試料ならびに実験方法

実験はアルミニウム,銅,純度の異なる2種の鉄,軟鋼,ならび に3種類の銅合金, すなわち Cu-Zn, Cu-Ge, Cu-Ni 合金, につい て行なった。供試材はいずれも10mm
Øの丸棒引抜き材である。こ 金属材料の延性が高圧下で増大するという事実は、理論的にもま



ピストン・ストロークは65mm である。

延性は破壊ひずみ

で表示されるが、ここに A<sub>0</sub> は変形前の試験片断面積、A は破断後 局部収縮部の断面積である。破壊ひずみ e は破断試料を突き合わせ 投影機を用いて局部収縮部を 20 倍に拡大し、その直径を測定するこ とにより算出された。

## 3. 実験結果

3.1 純金属ならびに軟鋼の結果

純金属および軟鋼の結果を図1,2に示した。図で縦軸は前述した とおり破壊ひずみ e であり、横軸は試験圧力である。

図から明らかなとおり、すべての場合延性は低圧側で圧力ととも にほぼ直線的に増加しており、かつその増加の程度は明らかに材料 間で大幅に差がある。試験圧力が高くなると、延性と圧力との関係 は必ずしも一次的ではなくなる。すなわち、純金属の場合、明らか に試験圧力範囲内で直線関係からのずれが生じている。 軟鋼の場 合、試験圧力範囲では直線関係からのずれは認められないが、この 場合でも試験圧力を高めれば、純金属の場合と同様な現象が現われ るであろうことは、次章で述べる考察の結果からも期待される。 以上より、これらの結果は緒言で述べた Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>の主張 を支持するものであると結論することができる。

純金属の結果のうち,銅に対してはとくに焼なまし温度を高くし, 結晶の粗大化を図っている。この結晶粒度の大きい銅の結果は延性 と圧力との関係に対し結晶粒度が影響するとしても,それは非常に わずかであり重要でないことを物語っている。これは,高圧下にお ける延性の変化が少なくとも純金属では単に応力状態の変化に基因 するものであると考えれば,当然期待できる結果であろう。すなわ ち,延性に及ぼす圧力効果は材料の変形抵抗に直接依存するが,結 晶粒度は重要な因子とはならないであろう。

図2に示した impure iron は,電解鉄を脱酸剤を用いずに真空 中で再溶解したものであり,その主要不純物は 600 ppm の酸素であ る。この鉄には 1~5µの球状介在物 FeO が分散している。一方, 同じく図2に示した軟鋼のうち0.27あるいは0.49%炭素を含むもの は,表1に示した温度で焼ならししたものでその組織はフェライト とパーライトより成る。したがってこれらの金属は,いずれも第2

相を含む点で共通しており、その延性破壊の機構も純金属のそれと は異なることが期待される。しかし、図2の結果は、これらの場合 にも延性に及ぼす圧力効果が顕著であり、延性と圧力との関係に関 する限り、第2相の存在は大きな影響も持たないことを示している。 3.2 銅合金に関する結果 Cu-15~40% Zn、Cu-4.5~9.7% Ge 合金に関する結果は図3、4 に示すとおりである。Cu-Zn、Cu-Ge 合金の延性の圧力依存性は合 金濃度が低い限り純金属の結果と類似している。すなわちCu-4.5% Geの延性は,試験圧力範囲では圧力とともに直線的に増加する。 一方,Cu-15%Znのそれも直線的増加を示し,高圧側でわずかに 直線的変化からのずれを示している。しかし,これらの合金では, 合金濃度を高めて行くとその延性の圧力依存性が純金属あるいは軟 鋼のそれと著しく異なってくる。合金濃度の高いCu-Zn,Cu-Ge合 金の延性は,低圧の所でやや増加するが,その増加はそれらの材料 の変形抵抗の大きさに比較して非常に低い圧力の所で停止し,かつ それ以上の圧力範囲では延性はほとんど圧力に依存せず一定値を取 るようになる。これら銅合金の結果はBeresnev氏ら<sup>(2)</sup>の黄銅(亜 鉛濃度は不明)の結果と同じものと思われる。延性が試験圧力に依 存しなくなる圧力はCu30~40%Znでは約4,000 kg/cm<sup>2</sup>で,この 値はBeresnev氏ら<sup>(2)</sup>の報告と一致する。一方Cu-6.7~9.7%Geの それはやや低く,約3,500 kg/cm<sup>2</sup>である。

上記の結果は、Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>が報告した黄銅の特異な現象が 黄銅に固有なものではなく Cu-Ge 合金にも存在することを明らか にするものである。かつ,これらの合金において,延性の特異な圧 力依存性が生ずる条件は明らかにある値以上の合金濃度を持つこと である。これらの合金, すなわち Cu-Zn, Cu-Ge に共通する特長 は、ここで配合した合金濃度範囲において材料の積層欠陥エネルギ ーが濃度とともに急激に減少することである(8)(9)。しかし、現在の ところ延性破壊と積層欠陥エネルギーを関係ずけるような理論は存 在せず, これから直ちにこれらの合金の結果が積層欠陥エネルギー の大小に基因すると見ることは正しくない。そこで、合金濃度とと もに逆に積層欠陥エネルギーが増大する(10) Cu-Ni 合金を選び、こ れに関して延性の圧力依存性を見た結果が図5である。この場合, 延性は圧力とともに直線的に増加し, 8,000 kg/cm<sup>2</sup> では e が 4.0 に 達する。このことは、Cu-Zn、Cu-Ge 合金で見られた延性の特異な 圧力依存性が積層欠陥エネルギーの値と密接に関係していることを 示すにじゅうぶんであろう。

2

の発生ならびにその成長に関する議論はいくつかの論文で行なわれ ている<sup>(15)~(17)</sup>。しかしこれらの議論からは延性破壊に関する定量的 な応力条件は出てこないようである。ただしMcClintock氏ら<sup>(17)</sup>の hole growthに関する議論は注目に値する。彼らはこの問題を塑性 力学的に取扱い応力状態の影響も論じている。したがって局部収縮 とか,試料形状,静水圧負荷の影響も考慮できる。さらに材料の加 工硬化指数も応力条件の中にはいっている。しかし,彼らの議論は, ポリスチレンの球を含む plasticene の中の hole の成長に関する実 験的ならびに理論的研究に基礎をおいており,このような粘性材料 において成立した式がそのまま金属にも適用できるという仮定から 出発していることに難点がある。さらにもう一つの問題は,彼らの 理論は先在的に hole がある場合のそれであるが,実際には金属材料 の延性破壊では hole の発生にはかなり大きな塑性ひずみが必要で あることは Palmer 氏ら<sup>(11)</sup> ならびに Gurland 氏<sup>(12)</sup>の実験より明 らかである。

高瀬氏<sup>(18)</sup> ならびに Kolmogorov and Shishimintsev 氏<sup>(19)</sup>はおの おの別個に延性に及ぼす応力状態の影響を調べ、鋼の延性は応力静 水圧成分の簡単な関数で与えられることを明らかにした。すなわ ち,高瀬氏(18)は帯板試片の長手方向に引張り力を加えつつ試片の 両面に丸棒ダイスを圧入して平面ひずみ変形をさせるような2軸材 料試験機を用いて軟鋼の延性(破壊ひずみ)と応力静水圧成分との関 係を求めた。その結果、延性は応力静水圧成分とともに直線的に増 加することを明らかにした。また, Kolmogorov and Shishimintsev 氏(19)は応力状態をいろいろ変えて数種の鋼の延性を調べ、いずれ の場合も延性は (om/r)とともに単調に減少することを見い出した。 ここに  $\sigma_m = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  応力静水圧成分,  $\tau$  は最大せん断応 力である。これらの結果はいずれも延性破壊の応力条件が応力静水 圧成分の簡単な関数であることを示唆するものである。本報告では 引張り変形の場合の延性破壊の応力条件として、等方引張り応力 一定条件を仮定し,これが静水圧下における金属,合金の延性の変 化をどの程度説明できるかを調べる。

3.3 材料の引張り強さ **G** と延性の圧力依存性との関係

ここまでの結果は二,三の例外を除き,多くの金属,合金において,延性の大きさは応力状態に敏感であり,引張り試験の場合,ある試験圧力範囲では延性が圧力とともに直線的に増加することを示している。すなわち,ある圧力範囲で延性破壊ひずみ e は次式を満足する。

 $e(P) = \alpha \cdot P + e(0) \dots (2)$ 

ここで $\alpha$ は延性増加率を示す材料常数であり、e(0)は常圧での延 性破壊ひずみである。前にも触れたとおり、 $\alpha$ は明らかに材料の引張 り強さ $\sigma_B$ に依存しており、 $\sigma_B$ が大きくなると $\alpha$ は小さくなる。図 **6**は $\alpha$ を $\sigma_B$ に対してプロットしたものであり、 $\alpha$ が近似的に $\sigma_B$ に 逆比例していることがわかる。このことは、(2)式の $Pe(P/\sigma_B)$ で おきかえれば、その係数が材料に依存しない常数になることを示唆 している。もしこれが正しければ静水圧下における材料の延性の変 化は、少なくとも直線関係が成立する範囲では、単純に応力状態の 関数で表わせるはずである。

4. 考 察

金属および合金の延性破壊の機構に関する組織学的研究は比較的

丸棒試片の引張り変形における延性破壊は局部収縮部で生じ,破 壊は等方引張り応力が最大である試料中心部から始まり,これが円 周方向に伝播する。したがって破壊の応力条件としては試料中心部 について考えればよい。 試料中心部では主応力は次式で与えられ る<sup>(20)</sup>。

ここでr,  $\theta$ , zは円柱座標における半径方向, 円周方向ならびに 長さ方向を表わし, aは局部収縮部の最小断面積の径を, Rは局部 収縮部の試料表面の子午線断面における主曲率を表わしている。ま た $\sigma_{eq}$ は相当応力である。静水圧Pのもとでは, 等方引張り応力は

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) - P = \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{3a}{2R} \right) \sigma_{eq} - P \dots (4)$$

この値の破壊時における大きさは、以下にのべるとおり、(a/R)、  $\sigma_{eq}$ が延性の尺度として用いた破壊ひずみ e[(1)式]の関数として 与えられれば知ることができる。

まず相当応力はくびれ応力 (necking stress)  $\sigma_n$  を用いて次のように表わされる。

多くあり、普通介在物表面にクラックが発生し、これが成長してい  $\sigma_{eq} = \sigma_n + \frac{d\sigma}{d\epsilon} \left( e - e' \right) \dots (5)$ くこと、非常にひずみの高いひずみ模様 (shear bands) が存在し、 これが同じくクラック発生個所あるいはクラックの成長, 伝播の経 ここで e' は一様伸びひずみである。(do/de) は加工硬化による相 路となることが知られている(11)~(14)。 この場合 クラックはもちろ 当応力の増加率であり,ひずみ増分を表わすものにdeを用いたのは, んぜい性破壊の場合のクラックのように弾性的なものではなく、ク 前記の破壊ひずみeあるいは一様伸びひずみeと区別するためで ラックの発生とくにその成長, 伝播には非常に大きな塑性ひずみが ある。(5)式は線形加工硬化(linear work hardening)を前提として 必要であり,多くの場合それらは hole と呼ばれる。このような hole いるが、局部収縮以後の大きなひずみのところでこの仮定が成り立 

つことは工藤氏ら(21),高橋氏(22)そのほかの報告から明らかである。 ここで改めて  $(d\sigma/d\varepsilon)$  を加工硬化係数と呼ぶ。なおくびれ応力とは 引張り変形においてくびれが始まるときの応力であり、引張り強さ  $\sigma_B$ とは近似的に $\sigma_n \simeq \sigma_B \cdot (1+e')$ である。次に(a/R)が、材料の種類 はむろんのこと試験圧力にも無関係に(破壊)ひずみと実験的にある 一義的な関係があることを Bridgman 氏<sup>(1)</sup>が明らかにしている。 (a/R)とeとの関係を求めた彼の実験結果にはかなりのばらつきが ある。またそれをどのような関数で近似したらよいかは問題である が、少なくとも本報告で扱っているような大きなひずみの範囲を取 るかぎり, 放物線で近似することができる。その結果によれば

が成り立つ。

ここで延性破壊の応力条件として等方引張り応力一定条件を仮定 すると,以上の式から,

$$\frac{\sigma_n}{3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} e^{\prime\prime 1/2} \right\} \left\{ 1 + \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} e^{\prime\prime} \right\} - P = \text{const} \dots (7)$$

ここで e" は(e-e')であり、局部収縮開始後破壊するまでのひず みを表わす。常圧におけるひずみ e''(0) ≡ e(0) - e'(0) を用いて定数 項を消去すると,

$$\left(\frac{P}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \left\{ e^{\prime\prime} \left(P\right)^{3/2} - e^{\prime\prime} \left(0\right)^{3/2} \right\}$$

$$+\left\{\left(\frac{2}{3}e''(0)^{1/2}+\frac{3}{2}e''(0)\right)\frac{1}{\sigma_{n}}\frac{d\sigma}{d\varepsilon}+\frac{1}{2}\right\}\mathcal{I} \dots \dots \dots (10)$$

ここで

 $\varDelta \equiv e''(P)^{1/2} - e''(0)^{1/2} \simeq e(P)^{1/2} - e(0)^{1/2}$ また一様伸びひずみ e' は圧力に依存しないものとしている(7)。 図7,8は図1~5の実験結果を用いて、 $(P/\sigma_n)$ 対 $\Delta$ をプロットし たものである。図中の実線は(10)式で与えられる理論曲線であり、 曲線は常圧における破壊ひずみ e"(0)に強く依存する。これらの図 から、実測値と理論曲線との一致はじゅうぶん満足すべきものであ ることが明らかであろう。この結果は、少なくとも引張り変形の場 合,等方引張り応力一定条件が延性破壊の応力条件になっているこ とを証明するものであり,一般に延性破壊の応力条件として,ここ で提案した応力条件が最も妥当であることを示唆している。

Bridgman 氏(1)以来多くの研究者は高圧下において延性は圧力と ともに直線的に増加することを主張しているが、これが正しくない ことは以上の考察から明らかであろう。これに対し、前にも述べた とおり Beresnev 氏ら<sup>(2)</sup>は静水圧下における延性の直線的増加は, 圧力が高くなると成り立たず, 飽和してくることを示した。また, 同様な見地から Ryabinin 氏<sup>(24)</sup>は Bridgman 氏<sup>(1)</sup>の実験結果を再 検討することにより, Bridgman 氏が実験した15種類の鋼の結果の うちいくつかの鋼の延性の増加は高圧側で飽和することを明らかに した。図9はRyabinin 氏の解析結果であり、高圧側で8個の点は

1

これは延性  $e \simeq e''$  と圧力 P との関係が 3/2 乗法則に乗ることを物 語っている。右辺各項の係数は材料定数であって、くびれ応力 on な らびに加工硬化係数 (do/dɛ) がわかっておれば計算できる。表2は 加工硬化係数のわかっているアルミニウム(23),銅(22),軟鋼(21)につ き  $(1/\sigma_n \cdot d\sigma/d\varepsilon)$  を求めたものであり、表から  $(1/\sigma_n \cdot d\sigma/d\varepsilon)$  の値の 材料間の差は小さく、この差は加工硬化係数の測定誤差からくるも のと思われる。すなわち、ここで  $(1/\sigma_n \cdot d\sigma/d\epsilon)$  は約 ±20% 以内で 材料に依存しない定数であると仮定することができる。

$$\left(\frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right) = 0.332 \pm 0.075....(9)$$

(8) 式はさらに一般的な形として次のように書くことができる。

$$\left(\frac{P}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \Delta^3 + \left\{\frac{1}{3} + \frac{3}{2}e^{\prime\prime} \left(0\right)^{1/2}\right\} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \Delta^2$$

明らかに直線からずれている。この図に引用された鋼の種類、熱処 理履歴などについては Bridgman 氏の文献(1)の中の表6に明記され ている。これらのことは本報告で述べた延性破壊の応力条件から出 てくる延性の圧力依存性と定性的に一致している。

一方,比較的圧力が低い範囲,すなわち $(P/\sigma_n) < 1$ では,近似的 に直線関係で結果を整理することが可能であり, その場合, 延性増 加の圧力係数は(10)式により,

供 試 材	くびれ応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} (\text{kg/mm}^2)$	$\frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$
Aluminum	10.3	4.2(23)	0.407
Copper	35.0	10.0(22)	0.286
Fe-0.02%C	48.7	12.5	0.257
Fe-0.27%C	67.0	17.5	0.261
Fe-0.49%C	82.7	27.5	0.333

表2 供試材のくびれ応力ならびに加工硬化係数





ここで前にも述べたとおり  $(1/\sigma_n \cdot d\sigma/d\varepsilon)$  を材料に依存しない定数 と仮定すれば(de/dP)はくびれ応力  $\sigma_n \simeq \sigma_B$ (1+e')に反比例するこ とになり,図6の結果を説明できる。ただし比例定数は常圧での延 性の大小,すなわち,e"(0)に依存し,図6の点を一つの曲線で結ぶ ことは正しくない。また直線近似の仕方により (de/dP) の値は異な るから図6に示した実測値 α との比較を行なうこともできない。

通常の延性金属の破壊では、前述したとおり、holeの発生、成長 とその link-ups により生ずるが(11)~(14), 上で述べた議論は, この 過程が等方引張り応力の大小により大きく左右されることを物語っ ている。一方, Cu-Zn, Cu-Ge 合金など積層欠陥エネルギーの小さ い金属の延性の圧力依存性は、明らかに上述の等方引張り応力一定 条件では説明できないものであり、これから、これらの材料の延性 破壊は hole mechanism 以外の別の過程で生ずることが考えられ る。この過程は等方引張り応力ではなく、せん断応力により支配さ れるものであることが示唆される。

> 言 5. 結

が、その場合、延性増加の圧力係数は近似的にくびれ応力 $\sigma_n \simeq \sigma_B$  (1) +e') に逆比例する。この結果は直線関係が成立する範囲での延性 増加率が材料の引張り強さ oB に著しく依存するという実験結果を 説明してくれる。

次に積層欠陥エネルギーの低いCu-Zn, Cu-Ge 合金では,延性と 圧力の関係が一般の金属とは異なり、比較的低い圧力(3,500~4,000 kg/cm<sup>2</sup>) で延性は圧力に無関係となり、一定値を取るようになる。 この結果は、上述の応力条件ではあきらかに説明のできないもので あり, 積層欠陥エネルギーの低い材料の延性破壊では等方応力の影 響はあまり重要でなくなることが示唆される。

#### 文 献 考

- (1) P.W. Bridgman: "Large Plastic Flow and Fracture", 1952 (McGraw-Hill Book Company, Inc.)
- B. I. Beresnev, L. F. Vereshchagin, Yu. N. Ryabinin and (2)L. D. Livshits: "Some Problems of Large Plastic Deformation at High Pressures", 1963 (Pergamon Press)
- H. Ll. D. Pugh and D. Green: Proc. Instn. Mech. Engrs., (3)179, 415 (1964–65)
- (4) A. Bobrowsky: ASME Paper, 64-WA/PT-29 (1964)
- M. Nishihara, K. Tanaka and T. Muramatsu: Proc. 8th (5) Japan Congr. Test. Mater., 8, 73 (1965)
- (6) T. E. Davidson, J. C. Uy and A. P. Lee: Acta Met., 14, 937 (1966)
- (7) 矢島,石井: 塑性と加工,9.405 (1968)

金属材料を静水圧下で引張ると,一般に延性すなわち絞りが著し く増加することは周知である。しかし、従来この現象に対する解釈 は必ずしもじゅうぶんではない。本報告では延性破壊の応力条件と して等方引張り応力一定条件を考えれば,延性金属,合金の延性の 静水圧力による変化(増加)をうまく説明できることを示した。この 応力条件に従えば、静水圧と延性(破壊ひずみ)は次式を満足しなけ ればならない。

$$\left(\frac{P}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \left\{ e''(P)^{3/2} - e''(0)^{3/2} \right\}$$
  
 
$$+ \frac{1}{3} \frac{1}{\sigma_n} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \left\{ e''(P) - e''(0) \right\} + \frac{1}{2} \left\{ e''(P)^{1/2} - e''(0)^{1/2} \right\}$$

ここで σ<sub>n</sub>は引張り試験を行なった場合に現われるくびれ応力 (necking stress),  $d\sigma/d\varepsilon$  は加工硬化係数である。e'' は局部収縮開始 後破断するまでの破壊ひずみであり、一様伸びによるひずみを e'と すれば e''=e-e' である。また  $(1/\sigma_n \cdot d\sigma/d\varepsilon)$  は材料に依存しない定 数となり ≃0.332 であった。数種の金属ならびに合金に関する実験 結果は大略上の式を満足することが示された。この式はまた比較的 圧力が低い範囲 P/on<1ではじゅうぶん直線近似することができる

- (8) A. Howie and P. R. Swann: Phil. Mag., 6, 1215 (1961)
- (9) P. R. Thornton, T. E. Mitchell and P. B. Hirsch: Phil. Mag., 7, 1349 (1962)
- (10) N. Nakajima and K. Kumakura: Phil., Mag., 12, 361 (1965)
- (11) I. G. Palmer, G. C. Smith and R. D. Warda: Conference Proc., "Physical Basis of Yield and Fracture", p. 53, 1966 : London.
- J. Gurland and J. Plateau: Trans. A. S. M., 56, 442 (1963) (12)
- H. C. Rogers: Trans. Met. Soc. A. I. M. E., 218, 498 (1960) (13)
- K. E. Puttick: Phil. Mag., 4, 964 (1959) (14)
- J. Gurland: Trans. Met. Soc. A. I. M. E., 227, 1146 (1963) (15)
- (16) M. F. Ashby: Phil. Mag., 14, 1157 (1966)
- (17) F. A. McClintock, S. M. Kaplan and C. A. Berg: Inter. J. Fracture Mechanics, 2, 614 (1966)
- (18) K. Takase: Proc. 1st Inter. Conf. on Fracture, Vol. 3, p. 1837, 1965 : Sendai, Japan.
- (19) V. L. Kolmogorov and V. F. Shishmintsev: Fiz. metal. metalloved., 21, 910 (1966)
- N. N. Davidenkov and N. I. Spiridionova: Proc. A. S. T. (20)M., 46, 1147 (1946)
- (21) 工藤,佐藤,沢野: 塑性と加工,6,499 (1965)
- 高橋: 塑性と加工, 9, 804 (1968) (22)
- T.A. Trezera: Trans. A.S.M., 56, 780 (1963) (23)
- Yu. N. Ryabinin: Inzhener. Fiz. Zhur., 1, 90 (1958) (24)

