

論 文

UDC 539.52 : 539.381 : 669.14-415

薄鋼板の引張試験における局部伸びの支配因子*

水 沼 晋** ・ 山 口 重 裕***
 阿 部 光 延**** ・ 速 水 哲 博*****

Factors Affecting Necking Elongation of Steel Sheets

Susumu MIZUNUMA, Shigehiro YAMAGUCHI,
 Mitsunobu ABE, and Satohiro HAYAMI

Synopsis:

Necking behaviour in tensile tests has been investigated for typical steel sheets. Local elongation in spontaneously necked region depends mainly upon the strain diffusibility of materials. Using specimens having artificial necking, a formula describing this strain diffusibility has experimentally been deduced in relation to temperature and strain rate dependences of flow stress, and stress ratio. Furthermore, the relationship between necking elongation and macro-factors affecting it is formulated as follows,

$$\delta_n \propto \frac{\Delta P}{P} + 0.22 \frac{r}{r+1}$$

where, δ_n : necking elongation, P : maximum load, ΔP : increment of maximum load with the change in tension speed from 10 mm/min to 100 mm/min, r : Lankford value in tensile direction.

1. 緒 言

昨今自動車用を高強度鋼板の使用が試みられるなど、強度と延性（深絞り性、張出し性）を兼ね備えた鋼材にたいする需要が増大している¹⁾。これまで自動車用鋼板にたいしては特に良好な深絞り性が要求されてきたが、この深絞り性を支配しているマクロ的（力学的）因子が r 値、さらにこれを支配しているミクロ的（金属学的）因子が集合組織であることはよく知られている。一方張出し性については、そのマクロ的な主たる支配因子が n 値であることは知られているが、その他のマクロ的因子の定量的な把握、ミクロ的支配因子などについては未検討のまま残されている問題が多い²⁾。

張出し性の良否は引張試験の全伸びで判定されることが多い。張出し性は二軸引張試験における破断までのひずみ量に相当するから、これは一応妥当なことと考えられ、事実張出し性と引張試験の全伸びとの間には比較的良好な相関がある。

引張試験の全伸び（破断伸び）を一樣伸び（均一伸び）と局部伸び（くびれ伸び）とに分けたとき、一樣伸

びは主に n 値によつて決まる。局部伸びの支配因子としては、 n 値、 r 値、 m 値（応力のひずみ速度依存性）、破壊（板厚方向への局部くびれを含めて）などが考えられるが、これらの効果についていまだ定説はない。

本研究は、以上のような観点から局部伸びを支配しているマクロ的因子を定量的に求めることを目的に行われたものである。

2. 局部伸びに関するこれまでの研究結果

応力-ひずみ曲線（ σ - ϵ 曲線）を n 乗則で表示すると、一樣伸びは n 値に等しくなる。 n 乗則の仮定をおかなければ、 $d\sigma/d\epsilon = \sigma$ がくびれ開始の条件となり、ここまでの伸びが一樣伸びである。

変形応力にひずみ速度依存性がある場合には、以下の3つの考え方が可能である。

1) 荷重-伸び曲線上の最大荷重点でくびれが生じるとすると、 P を荷重、 ϵ を伸び率、 A_0 を変形前の試料断面積として、

$$dP/d\epsilon = 0$$

$$P = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) A_0 \exp(-\epsilon)$$

* 昭和 48 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 6 月 1 日受付 (Received June 1, 1979)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

**** 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

***** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 工博 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

従つてくびれ開始の条件は

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} + \frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} = \sigma \dots\dots\dots (1)$$

2) なんらかの原因でくびれが生じたとし、くびれ外とくびれ内のひずみ速度はいずれも時間増分 Δt の一次関数のかたちで一様変形から連続的にはなれてゆくと仮定する。くびれ外の荷重よりもくびれ内の荷重の方が小さくなるときがくびれの開始点とすると、その条件は³⁾

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} + A \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} = \sigma \dots\dots\dots (2)$$

ここで A は試験片の寸法、くびれ部分の長さ、ひずみ速度、くびれ発生時の断面積などに依存する。

3) くびれが生じたのち、くびれの内外で荷重が等しいとすると、くびれの内外のひずみの差 $\Delta \varepsilon$ は時間に対して次式のように変化する。

$$\Delta \varepsilon = C \exp\left(\int^t \frac{\sigma - \partial \sigma / \partial \varepsilon}{\partial \sigma / \partial \dot{\varepsilon}} dt\right)$$

したがって $\partial \sigma / \partial \dot{\varepsilon} > 0$ の通常の材料ではくびれ開始の条件は⁴⁾

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \sigma \dots\dots\dots (3)$$

このように、仮定のおき方によつてくびれ開始の条件が異なってくる。山崎ら⁵⁾は、くびれ発生点と最大荷重点とは一般には一致せず、 n 値が大きいほど最大荷重点より前でくびれが開始する、 r 値の影響はほとんどない、などを実験的に明らかにしているが、応力のひずみ速度依存性の影響については言及していない。

くびれの開始点を実験的に求めるには、くびれ部をはさんで大小 2 つの距離をもつ標点を入れておき、この 2 つの標点距離による伸びひずみに差があらわれはじめる点を求める方法が用いられる。しかし著者らの経験によれば、引張試験の $\sigma - \varepsilon$ 曲線上で $\partial \sigma / \partial \varepsilon = \sigma$ から求めた伸びひずみと、上記方法から実測したくびれ開始点の伸びひずみとは 2~3% の差しかない。したがって、応力のひずみ速度依存性がある通常の材料について、一様伸びを $\partial \sigma / \partial \varepsilon = \sigma$ から求めることにしても誤差はあまり大きくない。この報告では $\partial \sigma / \partial \varepsilon = \sigma$ を満たす点までのひずみを一様伸び、それ以降破断までを局部伸びと定義する。

局部伸びについては以下のような報告がある。山崎らは、局部伸びと n 値との間には負の相関、 r 値の間には正の相関があるとしている⁶⁾。中川は $\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$ の関係がある場合、局部伸びは m 値と強い相関があると報告している⁷⁾。また中島らは $n \times r$ と相関があるとしている⁸⁾。このように研究者によつて結論が異なっているのは、局部伸びに影響をおよぼす因子が多種であり、しか

もそれら因子の効果を明確に分離する方法がなかったためであろう。

局部伸びについては、まだその原因が解明されていないいくつかの現象がある。例えば、

1) 強度が高いほど局部伸びあるいは全伸びが小さくなるがこの原因はまだ解明されていない。(一様伸びについては、くびれの発生条件が $(\partial \sigma / \partial \varepsilon) / \sigma = 1$ であることから自明である。)

2) n 値が局部伸びと正相関をもたない理由が解明されていない。

これらの現象は局部伸びの支配因子が明らかにあれば解釈されるものである。なお、伸びと破壊とが混同されることが多く、伸びの大小を論ずる場合に非金属介在物の形態やボイドの発生、連結等と関連づける例が見られるが、これらは破壊(破断ひずみ)の直接的な支配因子であり、伸びの主たる支配因子ではない。

3. 実験結果および考察

前章で述べたように、局部伸びを支配している要因はきわめて複雑で、 n 値、 r 値など経験的に抽出されたマクロ的因子と相関をとるだけでは真の支配因子を記述することは不可能と考えられる。そこで著者らは、まず局部伸びを構成する要素が破壊ひずみとくびれ部でのひずみの拡散性だけであること、さらにこれら 2 要素のうち、通常の場合はひずみ拡散性の影響が支配的であることを明らかにし、つぎに人工くびれをつけた試験片で引張試験をおこなうことによりこのひずみ拡散性を支配している法則を導いた。これから局部伸びと相関をとるべきパラメータが決定され、この相関を実験的に確認することによつて局部伸びを支配しているマクロ的因子を明らかにすることができた。

通常の引張試験は、かなり速い速度で大気中でおこなわれるので、塑性変形によつて生じた熱は逃げにくく、試験片の温度が上昇する。この温度上昇の伸びにおよぼす影響は無視できないほどに大きい。そこで 3.1 節でこの温度効果を除く方法について述べ、3.2 節以降で実験の詳細を説明する。

3.1 引張変形中の温度上昇が伸びにおよぼす影響

引張変形中に一たん除荷し、ふたたび負荷して引張りを続ける試験を多段引張りと呼ぶ⁹⁾。荷重-伸び曲線は Fig. 1 のようになる。これに対して通常の引張試験を普通引張りと呼ぶことにする。また多段引張りで除荷したのち再負荷するまでの時間を保定時間(keeping time)と呼ぶことにする。

大気中および大気中と同じ温度の水中で、保定時間を

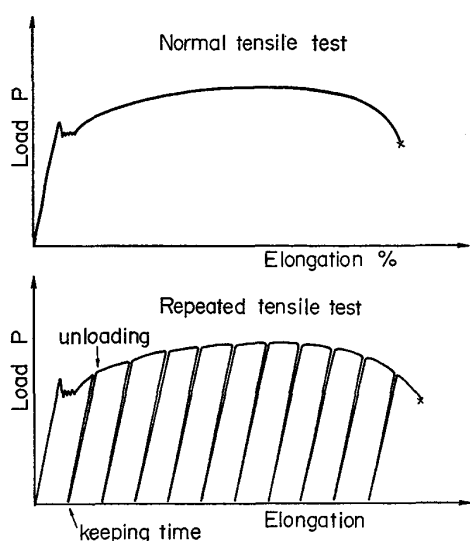


Fig. 1. Explanation of normal tensile test and repeated tensile test.

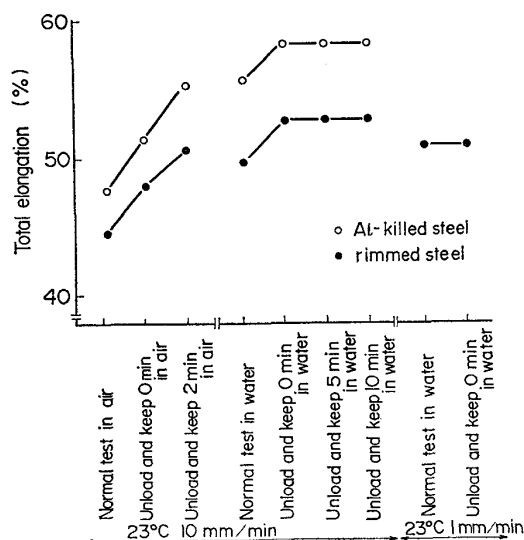


Fig. 2. Influence on total elongation of repeated tensile test.

変えて多段引張試験をおこなった結果を Fig. 2 に示した。供試材および実験条件は以下のとおりである。

供試材 : SPCC (リムド鋼冷延焼なまし板)
SPCE (Al キルド鋼冷延焼なまし板)

試験片 : JIS 13 号 B, 板厚 1.0 mm

引張速度 : 10 mm/min および 1 mm/min

温度 : 大気中, 水中とも 23°C

多段引張 : 引張荷重が最大になった点から伸び増分 2.5% おきに多段引張り。

引張速度 10 mm/min の場合, 大気中普通引張りにくらべて水中普通引張りの方が伸びが大きい。また普通引張りより多段引張りの方が伸びが大きく, しかも空中多段引張りでは保定時間が長いほど伸びが増加する。一方

水中多段引張りでは保定時間 0 ですでに伸びの増加は飽和する。塑性変形が他の部分より先行するくびれ中央部では加工熱による温度上昇が大きく, そのぶん加工硬化による変形抵抗の増加がおさえられ局部伸びが小さくなる。したがって水中多段引張りのようにくびれ部の温度上昇がない条件で試験をおこなえば, 局部伸びにたいする温度の影響を除くことができる。またリムド鋼, Al キルド鋼のいずれも同じ傾向を示していることから, ひずみ時効の影響もないと考えられる。

温度効果だけでなく, 負荷, 除荷の繰り返しそのものの伸びにおよぼす影響を調べるため, 引張速度 1 mm/min の実験も同時におこなった。このような遅い速度で水中引張試験をおこなえば, くびれ部での温度上昇は無視できると考えられる。Fig. 2 から明らかなように, この場合普通引張りとは多段引張りの 2 つの条件で伸びに差は認められない。したがって負荷・除荷の繰り返しは伸びにたいして影響をもたず, 多段引張りによる伸びの増加はくびれ部内外の温度の均一化によるものと結論される。

くびれ内のひずみ分布を測定する場合, 多段引張りは手軽な方法で, しかも温度分布の不均一さによる現象の複雑化もさけることができる。本報告中の実験はすべてこの多段引張りで, 温度効果の介在しない条件でおこなうことにした。

3.2 局部伸びを構成する要素

くびれ現象の一つの表示法を Fig. 3 に示した。横軸はくびれ中央部で G. L. 6 mm で測定した伸び, 縦軸はくびれ部を中央にはさんで G. L. 50 mm で測定した伸びである。測定点が一樣変形からそれはじめる点がかくびれの開始点となる。一樣伸び, 局部伸びは図中縦軸で表される。 e_{50}/e_6 はくびれ開始後のひずみ拡散の度合(ひずみ拡散性)を表す。これが大きいほどくびれの集中の度合は少なく, なだらかな形状のくびれとなる。 e_f は G. L. 6 mm で測定した破断伸びから一樣伸びを引いた

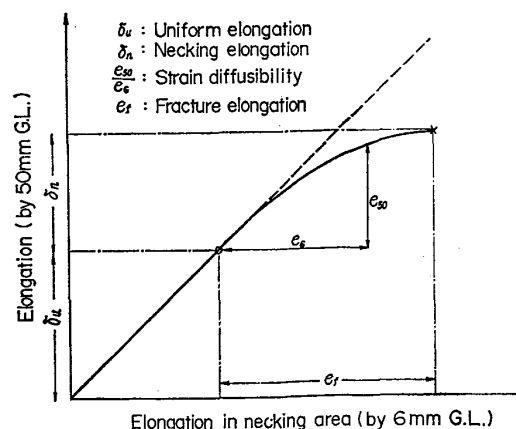


Fig. 3. Representation of necking phenomenon.

ものであるが、便宜上これを破断ひずみと呼ぶ。

局部伸びはひずみ拡散性と破断ひずみの2つの要素から構成されている。ただし、この破断ひずみは G. L. 6 mm で測定した量であるから、破断位置での真の破断ひずみ（極限変形能）ではなく、破断直前におけるひずみ拡散の度合をも含んだ量である。したがって、ここの破断ひずみ e_f の局部伸びにたいする影響が小さければ、真の破断ひずみの影響はさらに小さくなる。

Fig. 3 の破断近傍では曲線の傾きは非常に小さい。これは、この部分ではひずみがくびれ部にのみ集中し、大きい標点距離で測定した伸びの値にはわずかしきひずみが検出されないことを示している。したがって破断ひずみが多少変化しても大きい標点距離で測定される伸びにはわずかしき影響をおよぼさない。つまり局部伸びに対してはひずみ拡散性の方が破断ひずみよりもはるかに支配的である。

ところで、通常は破断に先だつて、速度不連続線の方に沿って板厚方向の局部くびれ⁹⁾が生じる。しかしこれが生じて破断するまでのひずみはほとんど伸びに寄与しないので、この局部くびれの影響は破断ひずみの影響と同様に扱ってよい。なお、この報告でくびれの開始点と呼ぶものは、通常局部くびれに対して拡散くびれ¹⁰⁾と呼ばれている。

局部伸びとひずみ拡散性 (e_{50}/e_6) の関係を Fig. 4 に示す。供試材、実験条件は以下のとおりである。

供試材：SPCE (Al キルド鋼冷延焼なまし板)

SAPH (45 kg/mm² 級熱延鋼板)

35 kg/mm² 級 Ti キルド熱延鋼板

HT 60 (60 kg/mm² 級高張力熱延鋼板) 純銅

引張速度：10 mm/min

試験温度：23°C (水中) および -50°C (ドライアイス+アルコール)

試験片：JIS 13 号 B 板厚 1.0 mm

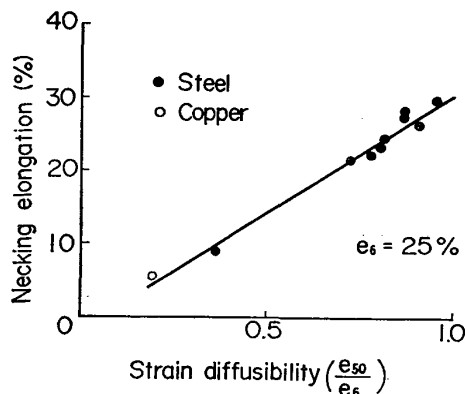


Fig. 4. Influence of strain diffusibility on necking elongation.

図中にみられるばらつきが破断ひずみによる影響であるが、これはきわめて小さい。

3.3 ひずみ拡散性を支配する法則

前節で局部伸びはひずみ拡散性によつて決まることを明らかにした。ここではひずみ拡散性を支配している法則について検討する。

3.3.1 くびれ発生直後のひずみ拡散性

くびれ変形が進行する状態を Fig. 5 に示した。くびれの進行に影響をおよぼす因子として、まず変形の進行にともなうくびれ部の応力増分 $\Delta\sigma$ が考えられる。 $\Delta\sigma$ が大きいほどひずみの拡散する範囲が広くなり、ひずみ拡散性が大きくなる。しかし $\Delta\sigma$ が同じ値でも、変形応力 σ が異なるとひずみ拡散性にも差が生じることが以下の議論から予想される。

Fig. 6 a) はくびれ開始直前の状態、Fig. 6 b) はくびれ開始直後の状態を示す。a) ではやがてくびれ中央部になる部分とくびれ外になる部分とで、ひずみ ϵ 、応力 σ 、断面積 A は等しい。b) ではくびれ中央部とくびれ外の部分とでこれらの値は異なり、それぞれの部分でのひずみ増分を $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$ とし、さらに断面積、応力をそれぞれ A_1 , A_2 および $\sigma(\epsilon_1)$, $\sigma(\epsilon_2)$ とすれば、

$$A_1\sigma(\epsilon_1) = A_2\sigma(\epsilon_2)$$

これを書き直すと

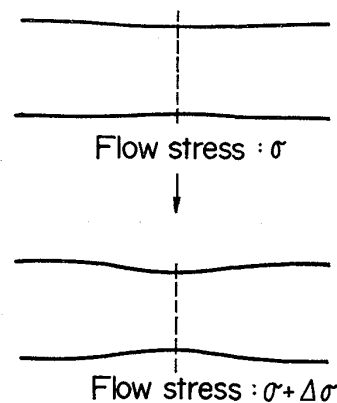


Fig. 5. Increment of flow stress in necked area in progress of necking.

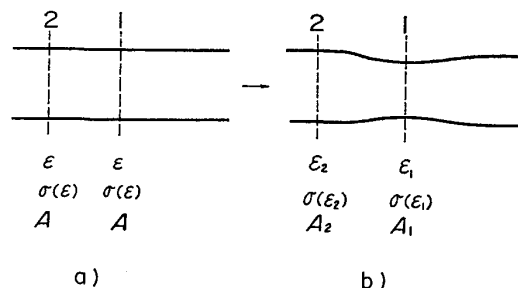


Fig. 6. Change of strain, stress and cross sectional area during necking.

$$Ae^{-(\varepsilon+\Delta\varepsilon_1)}\left(\sigma+\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\Delta\varepsilon_1\right) \\ = Ae^{-(\varepsilon+\Delta\varepsilon_2)}\left(\sigma+\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\Delta\varepsilon_2\right)\dots\dots\dots(4)$$

従つて

$$\Delta\varepsilon_2=f_n\left(\Delta\varepsilon_1, \frac{1}{\sigma}\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)\dots\dots\dots(5)$$

ひずみ拡散性は $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$ によつて決まるから(5)式はひずみ拡散性が $(d\sigma/d\varepsilon)/\sigma$ の関数であることを意味する。

上述の議論はくびれ開始直後の場合であり、くびれ変形が進行して大きくくびれになった場合にも成立するかどうかは不明である。そこでくびれ進行中における関係を推測するために、人工くびれ試験片を用いてひずみ拡散性と σ , $d\sigma/d\varepsilon$ の間に成り立つ関係式について検討した結果を次項で説明する。

3.3.2 くびれ進行中のひずみ拡散性

この項の目的は、くびれ進行中のひずみ拡散性が σ と $d\sigma/d\varepsilon$ のどのような関数形になるかを明らかにすることであるが、これを見出すための実験手法を説明するまえに、まず $d\sigma/d\varepsilon$ の内容について検討する。

引張応力 σ は、ひずみ ε 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ 、応力比 α 、温度 T などの関数である。ここで応力比 α とは Fig. 7 に示すように、引張軸と直角方向の応力 σ_2 の引張方向応力 σ_1 に対する比である。 $d\sigma/d\varepsilon$ はつぎのように表される。

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\alpha}\frac{d\alpha}{d\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{dT}{d\varepsilon} \\ \dots\dots\dots(6)$$

ここで $\partial\sigma/\partial\varepsilon$: 加工硬化率

$\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$: 応力のひずみ速度依存性

$\partial\sigma/\partial\alpha$: 応力の応力比依存性

$\partial\sigma/\partial T$: 応力の温度依存性

応力の応力比依存性は、次節で示されるように r 値のみの関数である。

(6)式であらわされる $d\sigma/d\varepsilon$ と変形応力 σ とがひず

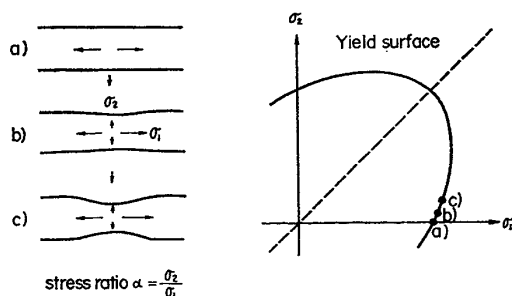


Fig. 7. Change of stress ratio during necking.

み拡散性に対してどのような効果をもっているかを実験的に求める場合、 σ , $\partial\sigma/\partial\varepsilon$, $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ などになるべく大きく変化させることが望ましい。そこで以下のような方法をとつた。 σ を大幅に変えるために、30~80kg/mm² 級鋼板を使用した。 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ は予ひずみ量によつて大きく変わるので、各種鋼板にあらかじめ 0~20% の予ひずみを与えてから試験片を切り出した。鋼は低温になるほど $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ が大きくなるので、試験温度を 23°C と -73°C の二水準で実験することにした。実験が煩雑になるのを避けるため、 r 値のほぼ等しい鋼材を用いることによつて $\partial\sigma/\partial\alpha$ の影響を除き、また多段引張試験を行うことによつて $\partial\sigma/\partial T$ 影響を除くことにした。

ひずみ拡散性はつぎのような量を尺度として用いる。人工くびれ試験片上に大小 2 つの標点をけがき、その各々について伸びひずみ ε_L , ε_1 を測定、これから $E = \varepsilon_L/\varepsilon_1$ を求める。この E をひずみ拡散係数 (strain diffusivity coefficient) と呼ぶことにする。具体的な実験方法を Fig. 8 に示した。まず 400mm×40mm の大型試験片を所定の予ひずみ量まで引張り、除荷したあと引張試験機からはずす。この予ひずみ材から R 型試験片 (人工くびれ試験片) と小型引張試験片とを切り出す。R 型試験片については 2~3% ごとに多段引張りをおこない、除荷のたびに 20mm と 3mm の大小 2 つの標点距離で伸びひずみ ε_L と ε_1 を測定した。これを横軸 ε_1 、縦軸 ε_L でプロットすると図のように直線がえられ、この傾きがひずみ拡散係数 E となる。小型引張試験片は 5 mm/min の速さで伸びひずみ 4% まで引張り、図中で荷重 P_1 , P_2 から平均変形応力 σ と加工硬化率 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ とを求めた。このあと引張速度を 5 mm/min から 50 mm/min に変化させて $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ を求めた。ここで、引張試験はいずれの試験片についても 23°C の場合は水中で、-73°C の場合は (ドライアイス+アルコール) 中でおこなつた。なお、予ひずみを与えてから実験に供するまでの間は、機械切削時以外は試験片を液体窒素中に保存し、ひずみ時効の影響を防いだ。

上記の方法で求めた E , σ , $\partial\sigma/\partial\varepsilon$, $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ の間の関係について述べる。 E と $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ の間の関係を Fig. 9 に示す。強度の高い材料ほど同じ $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ の値に対して E が小さい。Fig. 10 は E と $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)/\sigma$ の関係を表しているが Fig. 9 とくらべると $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ より $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)/\sigma$ の方がはるかに E とよい相関がある。つぎに $(\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon})/\sigma$ を一定としたときの $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ と E 、および $(\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon})/\sigma$ と E の関係を Fig. 11, Fig. 12 に示した。これは $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)/\sigma = 2.8$ の場合であるが、他の値をとつてもほぼ同様の結果となり、 $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ よりも $(\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon})/\sigma$ の方が E との相

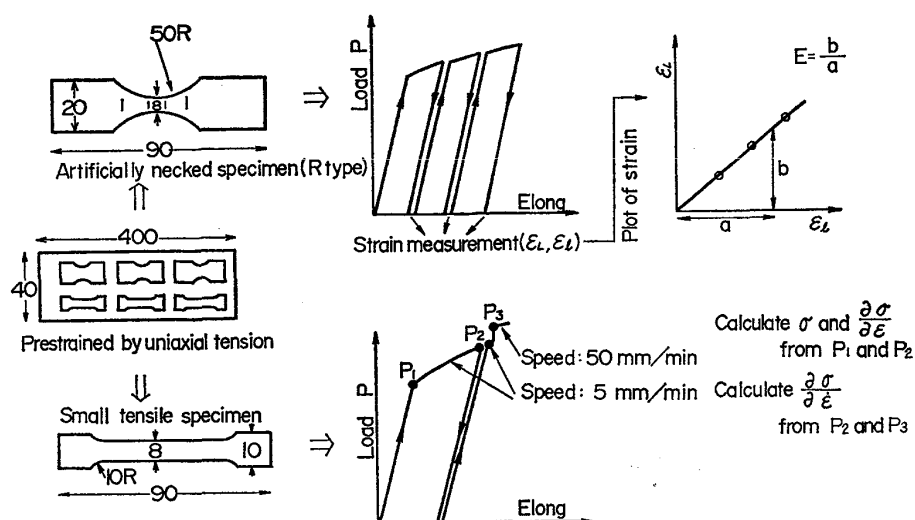


Fig. 8. Experimental method of measuring E , σ , $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$ and $\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}$.

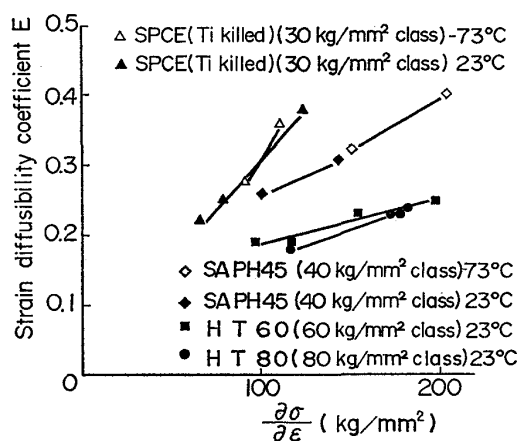


Fig. 9. Relation between E and $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$.

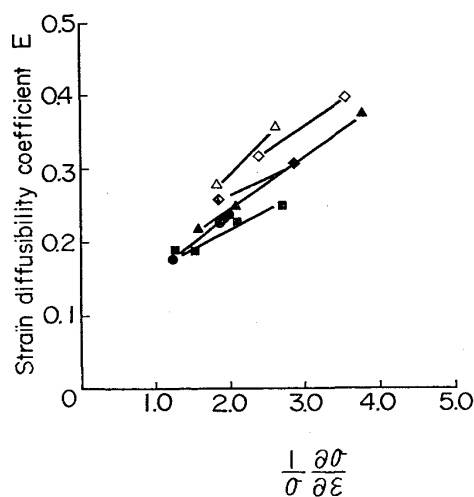


Fig. 10. Relation between E and $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$.

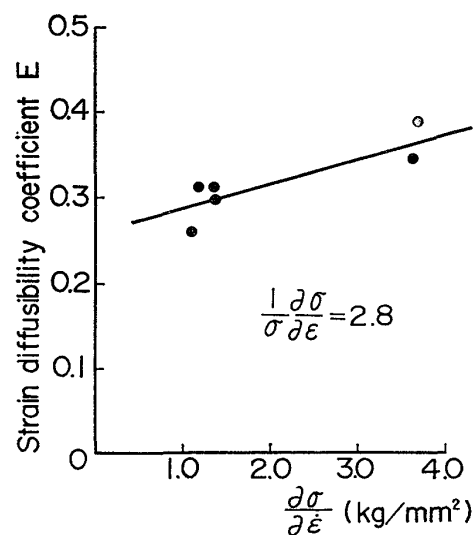


Fig. 11. Relation between E and $\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}$.

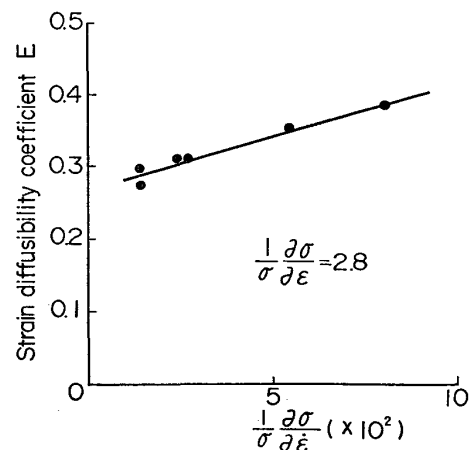


Fig. 12. Relation between E and $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}$.

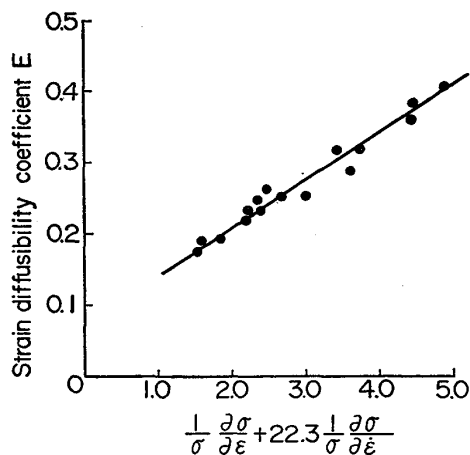


Fig. 13. Relation between E and $\left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + 22.3 \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}\right)$.

関がよい。Fig. 10 と Fig. 12 の傾きをそれぞれ α, β とすると、 E と $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma + (\beta/\alpha)(\partial\sigma/\partial\dot{\epsilon})/\sigma$ の間にもよい相関があるはずで、この関係を Fig. 13 に示した。ここで $\beta/\alpha=22.3$ である。

以上の実験から人工くびれ試験片のひずみ拡散性を支配しているパラメータは

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}$$

であることがわかった。従つて応力の応力比依存性や温度依存性をも考慮すれば次式の成立することが推測される。

$$E \propto \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + A \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} + B \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} + C \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \dots (7)$$

(7)式の右辺は(6)式の $d\dot{\epsilon}/d\epsilon$, $d\alpha/d\epsilon$, $dT/d\epsilon$ をそれぞれ定数 A, B, C としたものに等しい。ひずみの増分が小さい場合、 $d\dot{\epsilon}/d\epsilon$, $d\alpha/d\epsilon$, $dT/d\epsilon$ などは定数として扱つてよいから、ここでえられた結論は3.3.1項の結論と同一である。すなわち、くびれが発生した直後でも、あるいは大きい人工くびれが進行しているときでも、ひずみ拡散性は $(d\sigma/d\epsilon)/\sigma$ によつて支配されている。したがつて実際のくびれが進行しているときでも次式が成立すると推測しても無理がない。

$$E \propto \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

3.4 局部伸びの支配因子

前節で局部伸びと相関をとるべきパラメータは(7)式で表されることを予測した。ここでは実際の局部伸びと上記パラメータとの対応を実験的に検討する。実験は以下のような方法でおこなつた。

通常局部伸びは全伸びから一様伸びを引いて求める。

この方法は簡便ではあるが正確な方法ではない。なぜならば、2つの材料の局部伸びをこの方法で求めて比較する場合、この2つの材料の一様伸びが異なっていると局部伸びに対する実質的な標点距離が異なるからである。そこで引張試験片の長手方向に2mmおきに標線をけがいておき、一様伸び限界のときに標点距離が50mmとなるようなけがき線の間隔を標点距離として求めた全伸びから一様伸びを引いて局部伸びを算出した。これは一様伸びと同じだけの予ひずみを与えた材料を母材として全伸び(=局部伸び)を測定したと同じである。ただし試験片の幅の大きさまで統一したことにはならないが、この効果は無視することにした。

$(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ については、便宜的にくびれ発生後の伸びひずみ10%のときの値を採用することとし次式から求めた。

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} = \frac{n}{n+0.1} \dots (8)$$

上式の n 値は横軸に $\ln \epsilon$, 縦軸に $\ln \sigma$ をとつたグラフの傾きから求めた。この直線が折線になり、単一の n 値が得られない場合には大きいひずみ範囲の n 値を採用した。

$(\partial\sigma/\partial\dot{\epsilon})/\sigma$ については次式が成立する。

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} = \frac{1}{P} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \dot{\epsilon}}$$

ここで $\Delta P, \Delta \dot{\epsilon}$ は引張変形中引張速度を変化させたときのそれぞれ荷重およびひずみ速度の変化量である。したがつて $\Delta \dot{\epsilon}$ は試験法を定めれば一定になる定数なので便宜上次式で表現することにする。

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} = \frac{\Delta P}{P} \dots (9)$$

この $\Delta P/P$ は、一般にひずみの小さいときほど大きい値を示すが最大引張荷重に近づくにつれて一定値に近づくのでこの一定値を採用した。なお引張速度変化は10 mm/min→100 mm/minとした。

$(\partial\sigma/\partial\alpha)/\sigma$ については、くびれ発生時に成立する次式から求めた。

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} = \frac{r}{r+1} \dots (10)$$

この式は以下のようにして導かれる。異方性材料に対する Hill の降伏条件から、相当応力 $\bar{\sigma}$ は

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left[\frac{F(\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + G(\sigma_Z - \sigma_X)^2 + H(\sigma_X - \sigma_Y)^2}{F+G+H} + \frac{2L\tau_{YZ}^2 + 2M\tau_{ZX}^2 + 2N\tau_{XY}^2}{F+G+H} \right]}$$

ここで F, G, H などは異方性係数で、次式のように r 値で表示される¹¹⁾。

$$\frac{F}{H} = \frac{1}{r_{90}}$$

$$\frac{G}{H} = \frac{1}{r_0}$$

$$\frac{N}{H} = \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}} \right) \left(r_{45} + \frac{1}{2} \right)$$

r_0, r_{45}, r_{90} はそれぞれ x 方向 (引張方向) に対して 0 度, 45 度, 90 度方向の r 値である. 薄板の引張試験は平面応力状態であるから σ_x, σ_y 以外は 0 であり, さらに $\sigma_y = \alpha \sigma_x$ (α : 応力比) とおくと

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{2}{3} \left[\frac{r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}}{r_0 (1 + r_{90}) \alpha^2 - 2 r_0 r_{90} \alpha + r_{90} (1 + r_0)} \right]^{1/2}}$$

これからくびれ発生時の $(\partial \sigma_x / \partial \alpha) / \sigma_x$ を求めると

$$\frac{1}{\sigma_x} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=0} = \frac{r_0}{r_0 + 1}$$

となり (10) 式がえられる. Fig. 14 には r と $r/(r+1)$ の関係を示した.

$(\partial \sigma / \partial T) / \sigma$ は, 多段引張りを採用しているので

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} = 0$$

である.

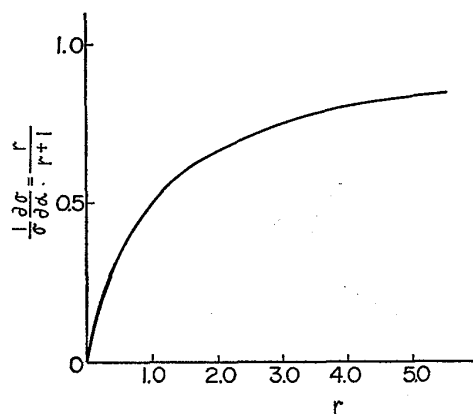


Fig. 14. Relation between $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha}$ and r .

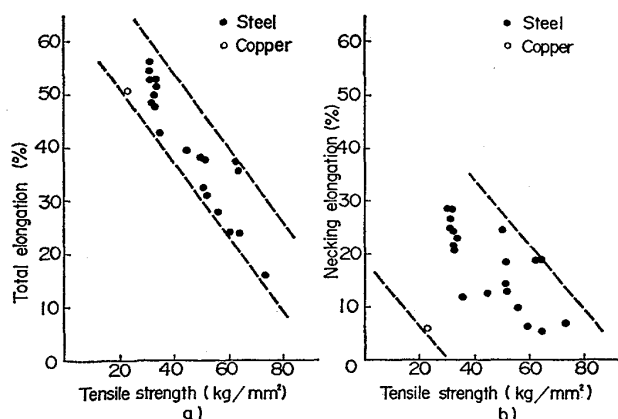


Fig. 15. Relation between elongation and tensile strength a) total elongation, b) necking elongation).

供試材および実験条件は以下のとおりである.

供試材 : 30~60 kg/mm² 級の冷延鋼板, 熱延鋼板および調質鋼, 純銅.

引張速度: 10 mm/min

試験片 : JIS 13 号 B, 板厚 1.0 mm

温度 : 23°C (水中) および -73°C (ドライアイス+アルコール)

供試材の強度と全伸び (δ_t) および局部伸び (δ_n) との関係 (強度-延性バランス) を Fig. 15 に示す. 全伸びにくらべ局部伸びの方が強度との相関は悪いようである.

局部伸びと $(\partial \sigma / \partial \epsilon) / \sigma$ および n 値との関係を Fig. 16, Fig. 17 に示す. 両図とも相関はみられず, これまでいわれていたように, 局部伸びと n 値の間にはほとんど関係がない.

Fig. 18 は局部伸びと $(\partial \sigma / \partial \epsilon) / \sigma$ の関係を示す. r 値が 0.7~1.0 の値の材料については直線関係が存在する. 局部伸びと $(\partial \sigma / \partial \alpha) / \sigma$ の関係を Fig. 19 に示す. この場合にも $\Delta P / P$ が同じ値 (0.02~0.03) の材料については直線関係が存在する. Fig. 19 の直線の傾き ($\beta = 62.0$) と Fig. 18 の直線の傾き ($\gamma = 280$) から, 局部伸び δ_n は

$$\delta_n \propto \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + \frac{\beta}{\gamma} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} \quad \dots \dots \dots (11)$$

あるいは実用的な形であらわせば

$$\delta_n \propto \frac{\Delta P}{P} + 0.22 \frac{r}{r+1} \quad \dots \dots \dots (12)$$

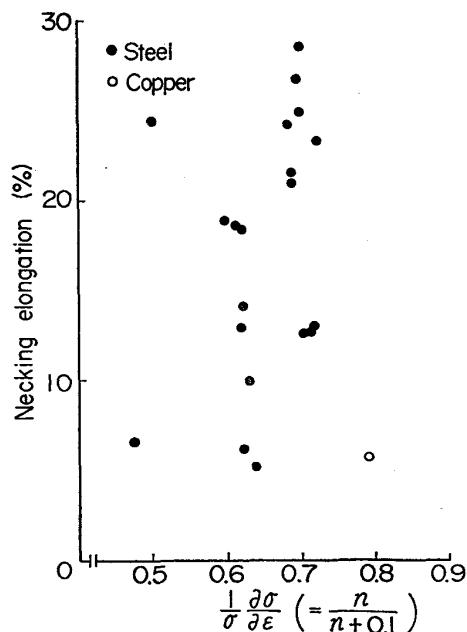


Fig. 16. Relation between necking elongation and $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$.

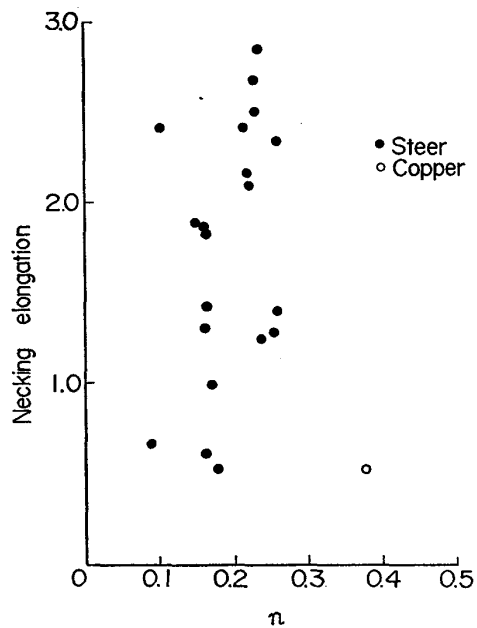


Fig. 17. Relation between necking elongation and n value.

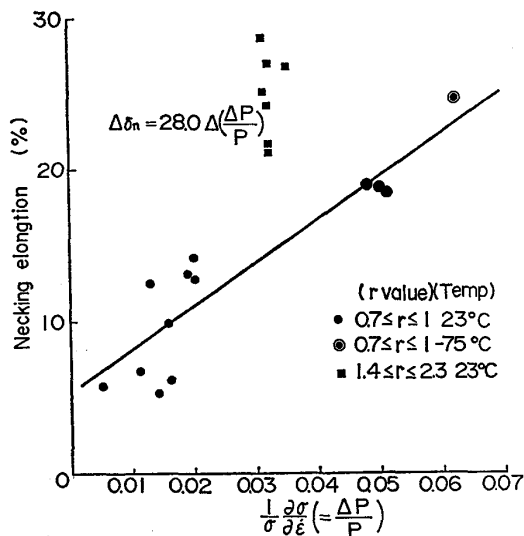


Fig. 18. Relation between necking elongation and $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$.

となる。この関係を Fig. 20 に示した。

r 値の変化する範囲が比較的に狭い場合には、Fig. 14 の r と $r/(r+1)$ の関係を r 値の変化する範囲内で直線化し $r/(r+1)$ を r で置き換えることができる。この実験の場合 r 値の変化範囲は 0.7~2.2 であるので、この r 値の範囲について上記のような操作をすると (12) 式は

$$\delta_n \propto \frac{4P}{P} + 0.032 r$$

と簡単化される。

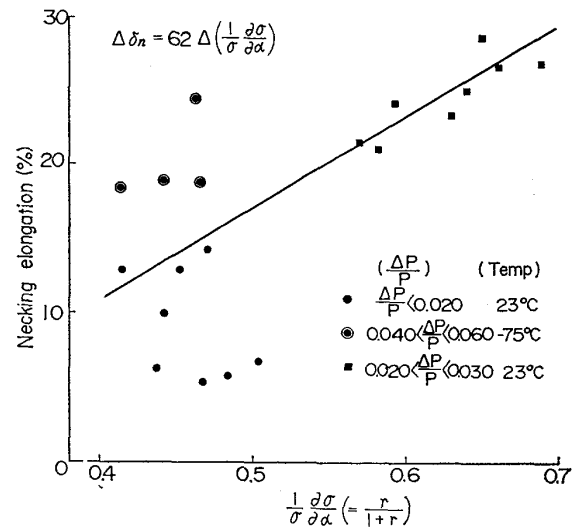


Fig. 19. Relation between necking elongation and $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha}$.

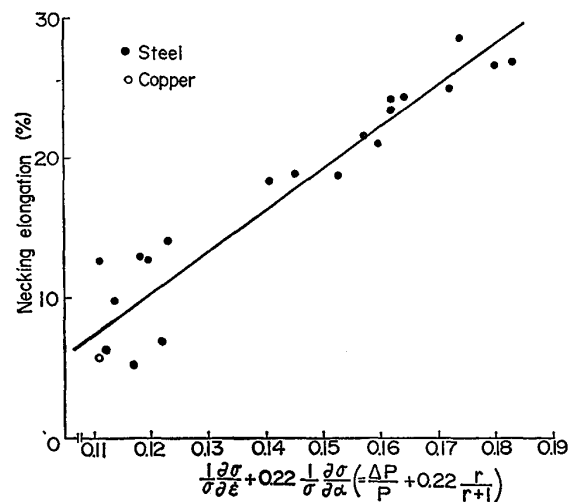


Fig. 20. Relation between necking elongation and $\left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + 0.22 \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} \right)$.

3.5 考 察

以上のようにして局部伸びの支配因子が明らかになったがつぎにこの結果をもとにして2章で述べた解明されるべき現象についての解釈を以下にのべる。

1) 強度と局部伸びの関係について

局部伸びが(11)式であらわされるかぎり、強度が高くなるほど局部伸びが小さくなる現象は自明である。

Fig. 15 に示した局部伸びと強度の関係がばらつくのは、材料間で $\partial \sigma / \partial \epsilon$, $\partial \sigma / \partial \alpha$ に差があるためである。したがって強度-延性バランスのすぐれた材料を開発するためには、 n 値のほか $\partial \sigma / \partial \epsilon$, $\partial \sigma / \partial \alpha$ を大きくする製造要因を見いだすことが必要となる。

2) n 値と局部伸びの関係について

2章で述べたようにくびれの開始条件は $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma = 1$ である。これは(7)式で $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ の値がくびれ開始時には材料のいかにかわらず同じ1という値をとることを意味している。すなわち、ひずみ拡散性の支配因子のうち $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$, $(\partial\sigma/\partial\alpha)/\sigma$ などはくびれ開始の有無にかかわらず変形の全過程を通じて材料間の差が保たれているが、 $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ だけは例外で、くびれ開始時にはいかなる材料も同じ値になる。ひずみ拡散性の局部伸びにおよぼす効果はくびれ変形過程のうちでもくびれ開始時に近いほど大きいから、そのときに $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ が材料によらず等しくなってしまうとは $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ と局部伸びとの間に相関がないのは当然である。応力-ひずみ曲線に n 乗則を仮定すれば、 $(\partial\sigma/\partial\epsilon)/\sigma$ は(8)式のよりに n 値の関数となり、したがって n 値と局部伸びとの間にも相関がみられないのである。

4. 結 言

薄鋼板の張出し性は引張試験の全伸びで判定されることが多い。全伸びを一樣伸びと局部伸びに分けた場合、一樣伸びを決めるマクロ的な材質因子が n 値であることはよく知られている。しかし全伸びに対して一樣伸びと同じ程度の割合を占める局部伸びに関しては、それを支配するマクロ的な因子を定量的に把握する試みはこれまで成功していなかった。

著者らは、局部伸びがくびれ部におけるひずみの拡散性によつて決まることに注目して、このひずみ拡散性を支配する法則を実験的に求め、これによつて局部伸びとマクロ的な材質因子との関係を明らかにすることができた。すなわち、局部伸び δ_n は

$$\delta_n \propto \frac{1}{\sigma} \frac{\partial\sigma}{\partial\epsilon} + C \frac{1}{\sigma} \frac{\partial\sigma}{\partial\alpha}$$

つまり変形抵抗のひずみ速度依存性と応力比依存性とい

う2つの材質因子によつて決まる。この関係を実用的な形に書き換えれば、

$$\delta_n \propto \frac{\Delta P}{P} + 0.22 \frac{r}{r+1}$$

ここで P : 最高荷重

ΔP : 最高荷重点において引張速度を 10 mm/min から 100 mm/min に変化させたときの荷重増分。

r : ランクフォード値

おわりに、本研究の発表を許可された新日本製鉄(株)基礎研究所長岡田秀弥博士に深謝するとともに、御助言御指導を賜った元同研究所長、現横浜国立大学教授長嶋晋一博士に深甚なる謝意を表する。

文 献

- 1) 佐藤泰一, 吉田清太: 塑性と加工, 17(1976), p. 860
- 2) 木原諄二: 鉄と鋼, 58(1972), p. 501
- 3) 武内朋之: 金属材料技術研究所研究報告, 10 (1976), p. 477
T. TAKEUCHI: J.J. Appl. Phys. 6(1976), p.156
- 4) 三村 宏, 藤井利光: 私信
- 5) 山崎安弘, 吉井康一, 阿部邦雄: 鉄と鋼, 55 (1969), S 179
- 6) K. NAKAGAWA: La Metallurgia Italiana 8 (1968), p. 667
中川吉左衛門: 日本材料学会第9回材料強度に関する討論会 (1972)
- 7) 中島浩衛, 菊間敏夫, 長嶋晋一: 日本金属学会会報, 6(1967), p. 699
- 8) 肥後実男, 世良真一, 兼重俊一, 田辺博一: 鉄と鋼, 55(1969), S 544
- 9) R. HILL: J. Mech. Phys. Solid, 1 (1952), p. 19
- 10) H. W. SWIFT: J. Mech. Phys. Solid, 1 (1952) p. 1
- 11) 山田嘉昭: 「塑性力学」[日刊工業新聞社]