

# ひずみ速度依存性材料の成形性に 及ぼすひずみ速度変化率の影響

法政大学 工学部 機械工学科

教授 大澤泰明

(平成元年度研究開発助成 AF - 89019)

## 1. 緒言

延性金属薄板のプレス成形性に関する研究は、強いひずみ速度依存性を示す超塑性挙動についての研究に触発された形で、約20年以上前から盛んに行われるようになった。FLDとひずみ速度依存性との関係については、M-K理論をひずみ速度依存性材料に適用したもの<sup>1)</sup>、Ghoshの一連の精力的な研究<sup>2)</sup>及びConradの変形中のひずみ速度の変化を考えにいたした論議<sup>3)</sup>などが本報告と関連が深い。恒温、一軸応力状態の引張変形に限定すると、不安定性に関するHartの論文<sup>4)</sup>では、変形の安定性を一つの簡単なパラメータによって論じているが、このパラメータIは超塑性の擬安定な巨大変形をうまく説明する。さらに、Ghoshは単軸引張りの数値シミュレーションによって延性と変形速度依存性の相関を論じている<sup>5)</sup>。

本報告では、これらの研究や既報<sup>6)</sup>を踏まえた上で、引張延性とひずみ速度依存性の関係を種々の観点から検討する。

## 2. $\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n$ と引張延性

$$\text{構成方程式 } \sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n \quad (1)$$

を金属の塑性流動に適用するならば、応力-ひずみ曲線上の加工硬化率は次式で評価すればよい。

$$n' = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \epsilon} = n + \bar{\gamma} m \quad (2)$$

ただし、

$$n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \epsilon}, \quad m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

さらに、 $\bar{\gamma}$ は変形中のひずみ速度の変化率である。

$$\bar{\gamma} = \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln \epsilon} \quad (4)$$

また、この $\bar{\gamma}$ は、同様に変形中のひずみ速度の変化率を表す $\gamma$ との間に式(6)の関係がある。

$$\gamma = \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \epsilon} \quad (5)$$

$$\bar{\gamma} = \gamma \epsilon \quad (6)$$

古典的なSwift、Hillの不安定限界論、あるいは、M-K理論ないしS-R理論に対して、式(1)を適用する場合には、いずれの場合も $n'$ が大きくなるにつれて、限界ひずみも大きくなるという結論が得られる。このことは、 $m$ 、 $n$ を固定した上で変形中にひずみ速度を加速する、即ち $\bar{\gamma}$ や $\gamma$ に正の値を付与することにより、より大きな限界ひずみが得られることを示している。Conrad<sup>3)</sup>は式(4)と同じパラメータを用いて実験結果を整理しているが、ひずみ速度を変形中に管制・制御することによって成形限界を向上させ得る可能性には気付いていない。

最高荷重条件に対する不安定ひずみ $\epsilon_u$ は、式(7)の不安定条件と式(1)を組み合わせて、式(8)によって与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad (7)$$

$$\epsilon_u = n' = n + \bar{\gamma} m \quad (8)$$

### 3. $\sigma = K' [\epsilon^n + m' \cdot \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)]$ と引張延性

式(1)の構成方程式に対して、Ghosh<sup>9)</sup>は次の形の構成方程式を使用して、引張延性を論じている。

$$\sigma = K' [\epsilon^n + m' \cdot \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] \quad (9)$$

式(9)では、加工硬化率は次式で与えられる。

$$n' = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} = n + \frac{\gamma m' \epsilon}{\epsilon^n + \gamma m' \epsilon} \quad (10)$$

ただし、

$$n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}, \quad m' = \frac{1}{K'} \frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (11)$$

この場合、不安定ひずみは式(7)と(9)より、代数方程式(12)を満足するひずみとして算出される。

$$\epsilon^n - n \epsilon^{n-1} + \gamma m' \epsilon - \gamma m' = 0 \quad (12)$$

ただし、変形中のひずみ速度変化率 $\gamma$ は一定としている。

図1には、式(8)の不安定ひずみ $\epsilon_u$ および式(12)を数値計算(逐次2分法)により求めた $\epsilon_u$ を一定なひずみ速度の変化率の値 $\gamma$ に対して示す。構成方程式(1)の場合と同様に、構成方程式(9)においても $\epsilon_u$ は $\gamma$ の影響を受けその傾向は定性的に一致している。いずれの場合も $\gamma$ の正の値に対して増加、負の値に対して減少する傾向が認められる。一方、式(12)による $\epsilon_u$ の方が、 $\gamma$ の影響を強く受けることがわかる。

式(2)と式(10)を各々式(13)、(14)のように書き変えて、各々の右辺第2項をひずみ $\epsilon$ に対して計算すれば、図2に示すような結果を得る。

$$n' / n = 1 + \gamma m' \epsilon / n \quad (13)$$

$$n' / n = 1 + \frac{\gamma m' \epsilon}{\epsilon^n + \gamma m' \epsilon} \frac{1}{n} \quad (14)$$

不安定ひずみ $\epsilon_u$ の値が $\gamma$ の効果によって増減する(図1)ことは、見かけの加工硬化率 $n'$ が $\gamma$ によって、ひずみとともに増減することと対応して

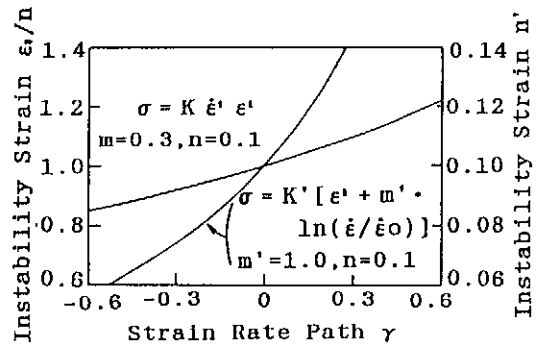


図1 式(1)や式(9)に従う材料では、ひずみ速度を加速することによって不安定ひずみが増加する。

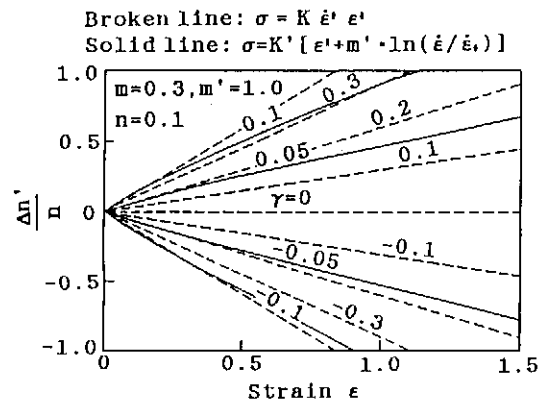


図2 式(1)や式(9)に従う材料では、加工硬化率 $n'$ は変形中のひずみ速度の変化率に応じて増減する。

いる。最高荷重点でのひずみ量が加工硬化率 $n$  ( $\sigma = F \epsilon^n$ )と一致しない理由として、Ghosh<sup>9)</sup>、山口ら<sup>7)</sup>は、変形中に $n$ が変わり一定でないことを挙げているが、ひずみ速度依存性を式(1)や(9)によって考慮する本研究の場合も、 $n'$ の値が変形につれて $\gamma$ により増減すると考えることで、図1の結果を矛盾なく受け入れることができる。

### 4. 引張試験

上述した最高荷重点や不安定ひずみ、言い換えれば、一様変形能に及ぼすひずみ速度加速の効果については、既報<sup>9)</sup>で実験結果を示した。そこでは、クロスヘッド速度を加速することによってひずみ速度を加速すれば、最高荷重点の発生は遅れ、

さらに、軸ひずみ分布の発達を観測した結果、遅れに伴って一様伸びも増加させることができるとした。

上述したように、破断伸びに対しても加速の効果が期待できる。しかしながら、対象となる変形は拡散くびれ後の局所変形集中過程であるから、各部のひずみ比の変化あるいは伸びを評価するための標点間距離 (GL) など、一様変形に対する場合と異なり、かなり複雑な状況を扱わなければならない。

図3から図5には、破断伸びに対するひずみ速度加速の効果を考察するために行った実験結果<sup>9)</sup>を引用した。

供試材は超塑性板 ( $t_0 = 0.8\text{mm}$ 、 $\bar{\gamma} = 0.58$ 、 $(m = 0.064, n = -0.068; \sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n)$ 、 $T = 60^\circ\text{C}$ ) である。図3a) に示す試験片形状・寸法に対して、クロスヘッド速度制御用の伸び計 (GL = 25mm) を付けて実験する。GL = 2、10、18mmの3場合に対して画像処理システムによりひずみを計測した。破断は図3b) に示すような形態であったので、ひずみ比の変化は無視できるほど僅かであった。通常の一定クロスヘッド速度のもとでの実験と、時間に対してクロスヘッド変位を2次関数形に従って増加させる (クロスヘッド速度は減速する) 場合を実施した。(図4参照)

図5には、軸ひずみ  $\epsilon$  に対する軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の変化の様子を示した。一定クロスヘッド速度の実験では、GLや速度の大きさにかかわらず、ほぼ一定なひずみ速度の変化率を示しており、傾きは正、ひずみ速度は加速されている。これに対して、記号Dで示す減速の場合では、一定クロスヘッド速度に比べてひずみ速度の変化率は小さい。図中の太い線は、同種実験結果を結んだ破断限界線である。加速と減速の比較では、加速について大きな破断ひずみが得られていることが分かる。さらに、GLが小さいほどその差が大きくなっているが、このことを説明する理由は、今のところ得られていない。

材料定数としてm値を扱うとき、あるいは、あ

る大きさのひずみ、ひずみ速度範囲のなかでの平均値としてこの値を扱いたいとき、最も困難な問題はそれ自身のひずみ速度依存性が無視できないほど大きいことである。この材料の延性は、この程度の温度でもほとんどm値によって支えられている。その結果、図5からもわかるように、破断伸びもひずみ速度依存性を示し、得られる最大伸びに固有な最適ひずみ速度範囲が存在する。図5中

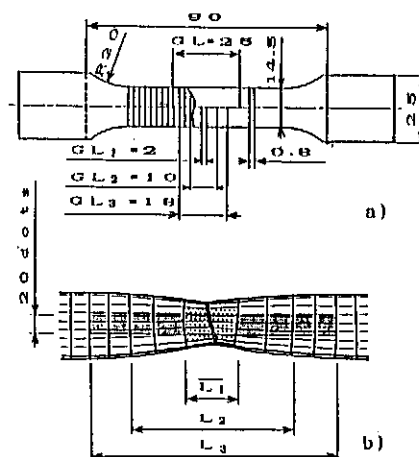


図3 引張試験片の形状・寸法と破断形態

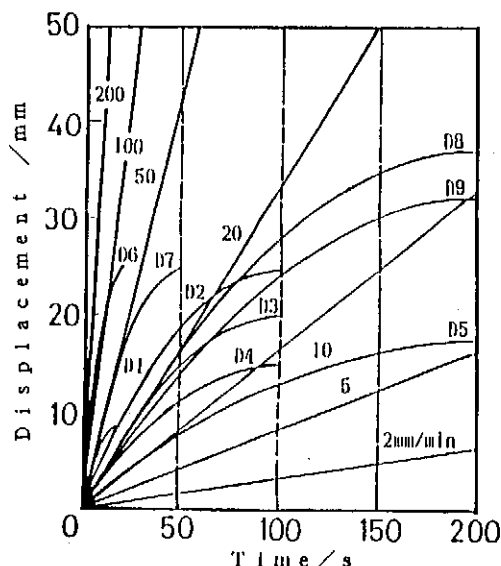


図4 速度条件 (縦軸の読みは、D1 - D5はGL = 25mm間、その他はクロスヘッドの移動量)

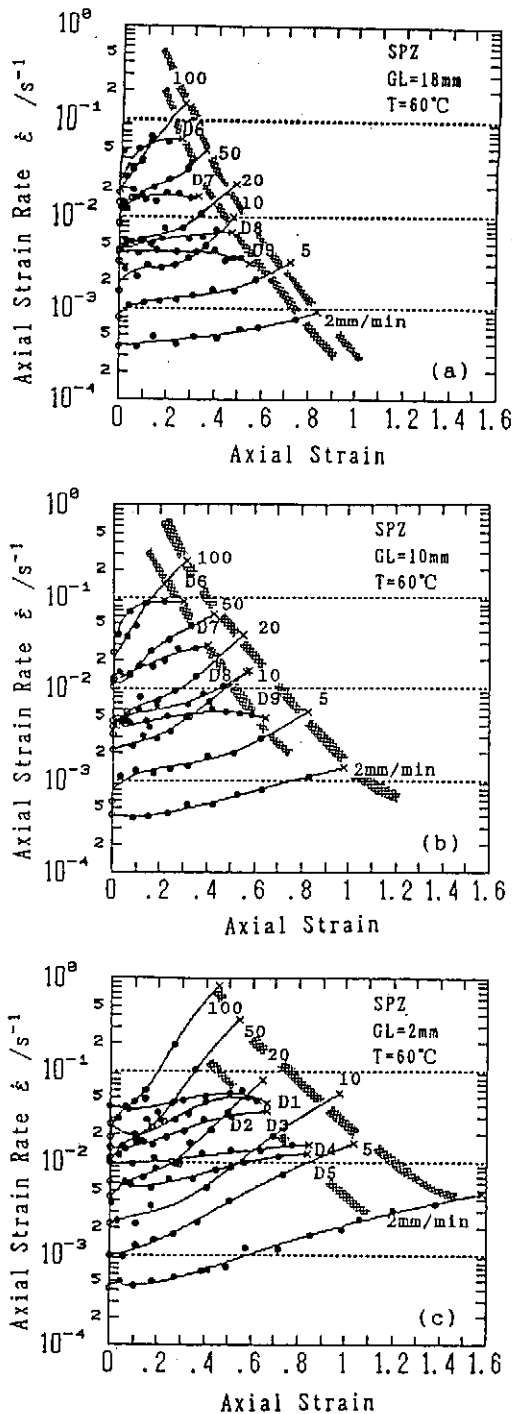


図5 ひずみ速度の変化率の相違による破断限界の違い。

の破断限界線もこのことを反映していると考えられる。加速、減速の破断伸びに及ぼす効果を実験結果から検討するとき、比較の基準としてなにをとればよいか不明である。加速でも減速でも、必ずある大きさのひずみ速度の幅が伴って生ずるので、一定ひずみ速度の結果と対比するとしても、一定ひずみ速度の大きさにより破断限界は異なるだろうから、加速、減速の効果を比較することには無理がある。m 値またはひずみ速度依存性の大きさがそれ自体問題であって、同時にまたそれ自体のひずみ速度依存性が、問題を複雑にし議論を不明瞭、曖昧にしている。

一方、ある大きさのひずみ速度の範囲で最高荷重点までのひずみ  $\epsilon_u$  は、m 値にひずみ速度依存性があったとしても、一定クロスヘッド速度条件下ではほとんど移動しないことが経験的に知られている。従って、この場合には加速、減速の効果を比較することには無理がない。

## 5. 単軸引張りの数値シミュレーション

### 5.1 仮定

これまで述べてきたことに対して、見通しのよい解決を探るために Ghosh<sup>9)</sup> を参考にして、限界ひずみ（破断ひずみ）を求めることを主な目的とする単軸引張りの数値シミュレーションを試みた。以下の仮定をした。

- 1) 変形はひずみ速度履歴に無関係であり、考えている時点のひずみ、ひずみ速度のみによって定まる。
- 2) 構成方程式中の材料定数及び異方性の性質は、考えているひずみとひずみ速度の範囲内において、変形中一定である。
- 3) 各々の要素（図6）は単軸引張りの状態にある。
- 4) 限界条件は平面ひずみ状態への移行ではなく、中央要素の軸ひずみが、ある一定値（実験結果より定める）に達することである。
- 5) 試験片内には、余弦曲線によって与えられる幾何学的初期不均一が存在する。（図7）

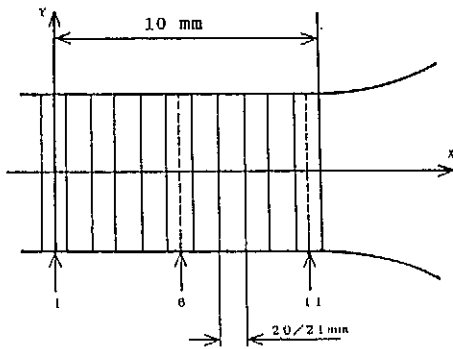


図6 試験片内のスラブ要素

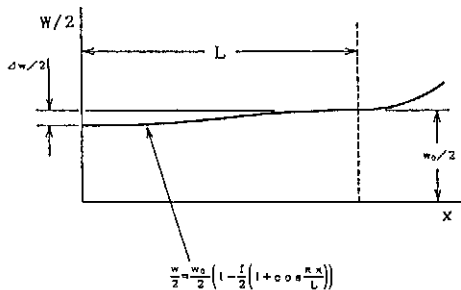


図7 余弦曲線で近似する初期不均一

表1 計算条件、材料定数

SPZ ( $t_0 = 0.8 \text{ mm}$ ), $150^\circ\text{C}$		
	$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n$	$\sigma = K' [\epsilon^n + m \cdot \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)]$
K, K'	23.0	1.78
m, m'	0.290	0.943
n	0.031	0.031
$\dot{\epsilon}_0$		0.00015 / s <sup>-1</sup>
$\bar{\epsilon}$		0.491
$l = \Delta W / W_0$		0.017
$\Delta \epsilon_0$		0.03
$\epsilon^*$		3.3

$\epsilon^*$ : 試験片中央要素の計算限界ひずみ。

これらの仮定は、単に数値計算上便宜的に設定したというよりも、本研究全般にわたって留意する事項である。特に仮定3)、4)については、著しく大きいひずみ速度依存性を示す超塑性状態にまでは達しないまでも、通常の室温における延性金属の応答に比べて、かなり大きいひずみ速度依存性を示す温度域での塑性流動を対象にしているこ

とからきている。

## 5.2 計算方法

21個の要素に分割した試験片の中央要素にひずみ増分を与え、その時点、その要素のひずみ、ひずみ速度から構成方程式を経由して軸方向応力を求め、荷重値を算出する。隣接する要素において、求めるひずみ増分を未知数として、同様に荷重値を計算、荷重はいたるところ同じことを表現する方程式を数値計算(逐次2分法)により解き、未知量を得る。これを繰り返して隣接する要素のひずみ増分を順次計算する。すべての要素のひずみ増分が求まった段階で、標点間(GL=20mm)全体にわたるひずみ、伸びを計算し、その伸びに要する時間を速度条件から決定する。この時間からひずみ速度が計算され、この値を次の段階の計算に使用する。ただし、計算の開始時には、GL間で一定な初期ひずみ速度を仮定する。中央要素のひずみがある一定値に達した時点で計算を終了する。

表1には計算条件、諸定数を示す。材料定数(K, m, n)は、対象となるひずみ、ひずみ速度の範囲における平均的な値をとった。(K', m', n)は、式(1)に対する(K, m, n)を使って、 $[\epsilon = \epsilon_0, \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0]$ 及び $[\epsilon = 1, \dot{\epsilon} = 1]$ に対する応力値が式(1)と式(9)で等しいことを利用して、算定することも考えられるが、ここでは同一の引張試験データからそれぞれ別個に定めた。式(9)中の基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ は、対象としたひずみ速度範囲の最も低い値とした。

## 5.3 シミュレーション結果と実験との比較

設定した試験速度条件を図8に示す。荷重-伸び線図の比較では、式(1)、式(9)によるシミュレーション及び実験結果はよい一致を示し、加速することによる最高荷重点の遅れは、解析的な予測に対応してシミュレーションでも生じ、実験とも一致した。

図9には、各速度条件に対するひずみ速度のひずみに対する推移と併せて、限界ひずみを示した。

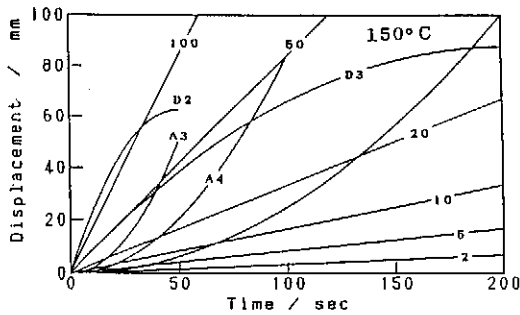


図8 速度条件 (150°C)

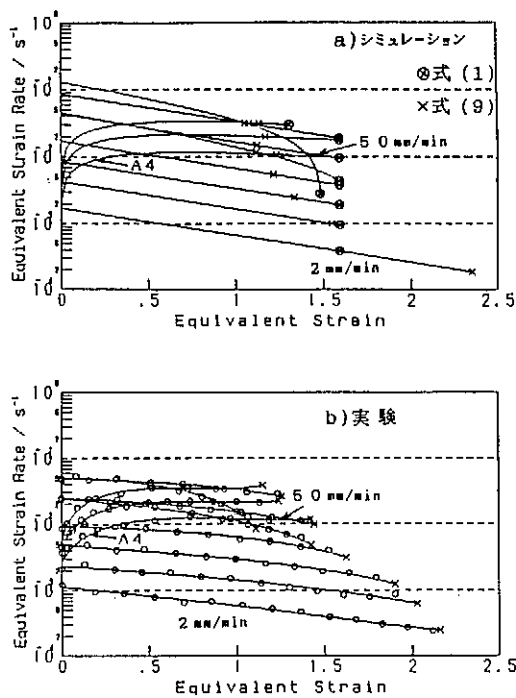


図9 ひずみ速度変化率の相違による限界ひずみの違い

一定クロスヘッド速度のもとでは、その大きさに関わらずひずみ速度の変化率は一定であり、シミュレーションもそれを裏づけている。一定クロスヘッド速度に対するひずみ速度変化率は、 $m$ 、 $m'$  値と同様に材料のひずみ速度依存性を反映して決まるものであって、一定クロスヘッド速度ならば一義的に定まるものではないことがわかる。

実験結果図9b) に示されているように、この材料の伸びは、本実験範囲内の一定クロスヘッド速度条件に対して、低速ほど大きいことが認められ

る。加速条件では、ひずみ速度の変化率が一定でなく、変形中に変化すること及び比較の基準が曖昧なことから安易に比較することは避けなければならないが、一定クロスヘッド速度に対して、小さい値で限界に達している。

一方、シミュレーション図9a) では、式 (1) による結果が、速度の大きさと独立に一定値を示している。このことは、実験ときわだった違いである。 $(K, m, n)$  をあるひずみ、ひずみ速度範囲で一定な材料定数として扱う立場からすれば、実験よりもシミュレーションが合理的な結果のように思える。しかし、同じように  $(K', m', n)$  を材料定数としながら、式 (9) による場合には、同じひずみ速度変化率でありながら、低ひずみ速度において大きな限界ひずみが得られ、ひずみ速度の大きさの違いによる相違が表現されている。構成方程式中の係数を材料定数と考え、変形挙動を論ずる際には、式 (9) は式 (1) より優れた表現力を有すると見なしてよい。これは、基準となるひずみ速度を含むか、含まないかの違いというよりは、方程式中の演算形式 (足し算、かけ算) などに起因するものであろう。

## 6. ひずみ分布の標準偏差による検討

最高荷重点から限界ひずみに達するまでの安定性の損失過程を、ひずみ分布の発達との対応で考察することが、一般的に行われている。材料特性  $m, n$  ( $\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n$ ) と破断時のひずみ分布との対応については、Ghosh の簡潔な説明<sup>9)</sup> がある。さらに、ひずみ速度加速による一様変形能の増加を認定する際にも、ひずみ分布が使用された<sup>9)</sup>。

しかしながら、いずれも定性的な論議の枠を越えてはいない。ここでは、式 (15) によるひずみ分布の標準偏差  $s$  を、変形局所化過程における安定性損失のパラメータとしてとる。 $s$  が大きければ、一様変形からの逸脱が大きいことを意味する。

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2 \quad (15)$$

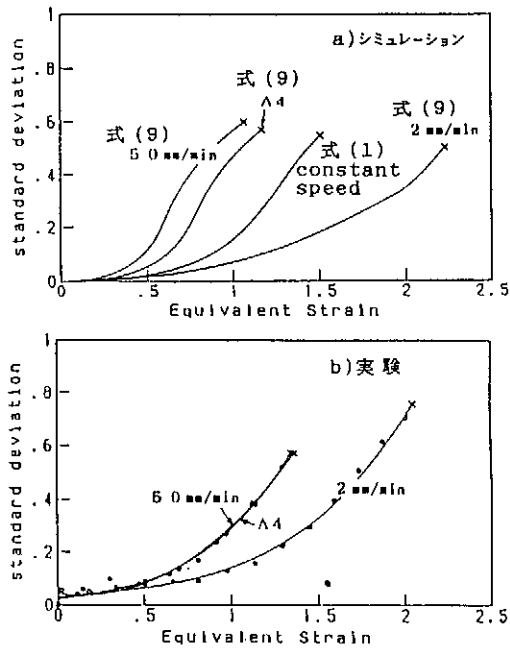


図10 変形に伴うひずみ分布の標準偏差sの推移

ただし、 $\bar{\epsilon}$ は平均ひずみ、データ個数nは、実験ではn = 10、シミュレーションではn = 21とした。

図10a)、b)には、ひずみ増加に伴う標準偏差sの変化の一例を示した。荷重-伸び線図上では、2mm/minの場合に対して、加速A4の最高荷重点は明らかに遅れて発生している<sup>9)</sup>が、図10b)を見る限り、変形の一様性は増大していない。a)のシミュレーション結果でも、加速することによる安定変形の増加は認められず、最低速(2mm/min)において最も安定な変形、従って大きな限界ひずみが得られている。本研究において実施したいいくつかの速度条件のなかで、この場合が最も安定で大きな限界ひずみを生じているが、このことはこれまでに言われているように、m値の最大となるひずみ速度域において最大延性が得られるとの考えによって説明される。

## 7. 結 言

ひずみ速度依存性材料の限界ひずみに及ぼすひずみ速度依存性の影響を、ひずみ速度の変化率と

表2 ひずみ速度依存性板材の引張試験において、ひずみ速度を加速する効果

		最高荷重点の遅れ	一様変形能の増加	破断伸びの増加
実 験		○	△	△
式(1)	解 析	○	○	○
	Simulation	○	×	×
式(9)	解 析	○	○	○
	Simulation	○	×	×

○：肯定的，×：否定的，△：未確定

の関連から、実験、解析及び数値シミュレーションにより検討した。穴広がり限に及ぼすパンチ速度加速の効果について、渡辺ら<sup>9)</sup>は肯定的な見解を述べているが、本研究の場合と同様に比較の基準の設定について、及び穴縁における単純引張状態を仮定しても、穴広がり限には応力・ひずみ勾配の存在が少なからず影響すること等について、今後さらに慎重に考察することが必要である。ひずみ局所化過程における安定性損失の割合を、標準偏差sにより定量的に検討した結果から、あるいはこれまでの議論を集約して、ひずみ速度加速の変形挙動に及ぼす効果をまとめれば表2のようになる。ここでの加速実験やそのシミュレーションでは、必ずしも十分な加速になっていないこと及び変形中に生ずる金属組織変化(Microstructural evolution)に基づく材料特性の変化については、考慮していないことに、注意する必要がある。

## 参考文献

- 1) Marciniak, Z. et al. : Int. J. mech. Sci., 15 (1973), 789.
- 2) 例えば、Ghosh, A. K. et al. : Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., 99-3 (1977-7), 264.
- 3) Conrad, H. : J. Mech. Working Technol., 2-1 (1978), 67.
- 4) Hart, E. W. : Acta Metall., 15 (1967-2), 351.

- 5) Ghosh, A. K. : Metall. Trans., A, 8A 10)、909。  
(1977 - 8), 1221. 8) 大澤ほか : 塑性と加工、27 - 302 (1986 -  
3)、375。  
6) Ohsawa, H. et al. : Advanced 9) 渡辺ほか : 79回秋軽金属講概、(1990 - 11)、  
Technology of Plasticity 1990, (1990 - 7), 143。  
1369.  
7) 山口ほか : 塑性と加工、21 - 237 (1980 -