平面ひずみ状態での炭素鋼の変形強度とひずみ速度依存性*

内 田 猛** 岡 部 永 年**
矢 野 利 行*** 森 忠 夫**

Deformation Strength and Strain-Rate Dependence of Carbon Steels under Plane Strain State

by

Takeshi UCHIDA, Nagatoshi OKABE, Toshiyuki YANO and Tadao MORI

(Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corporation, Fuchu)

The dependence of strain rate on deformation strength was investigated on various pre-strained specimens of carbon steels under plane strain. The strain rate was from 4×10^{-3} to $2 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$. In the range of high strain rate, a newly developed Stress-Strain Curve Direct View Device was used for the measurement of deformation strength. Furthermore, Digital Memory Scopes were utilized to obtain highly accurate experimental data. The results obtained are summarized as follows:

(1) The deformation strength σ in plane strain is related to strain ϵ , strain rate $\dot{\epsilon}$ and temperature T by

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = k_0 \epsilon^{n_1} \dot{\epsilon}^{n_2} \exp(\alpha/T)$$

where n_1 is the strain hardening exponent, n_2 the strain rate exponent, α the temperature dependence index and k_0 the strength constant.

(2) The carbon equivalent value of yield stress C_y and the strain hardening exponent n_1 and the temperature dependence index α are related each other. If C_y is known, the deformation strength in plane strain can be estimated from the average value of n_2 of all kinds of steel by using this correlation.

(Received Apr. 19, 1979)

キー・ワード：変形強度，平面ひずみ，ひずみ速度，温度，降伏応力の炭素当量

1 緒 言

最近，圧延あるいは圧力容器，防爆容器などで高ひずみ速度下における材料の変形強度を知る必要性がますます高くなってきている。これまで鉄鋼材料および非鉄材料の変形強度のひずみ速度依存性については，^{1)~4)} 単軸応力状態下において種々求められている。しかし平面ひずみ状態での高ひずみ速度範囲における炭素鋼の変形強度のひずみ速度依存性についてはあまり求められていない。この理由の一つとして，高ひずみ速度下における平面ひずみ状態での変形挙動をとらえるには実験上むずかしい問題を含んでいる事，したがって圧延，圧力容器，防爆容器などで問題となる平面ひずみ状態での変形強度は，単軸応力状態で実験的に求めた変形強度を Von Mises の塑性条件から換算，推定して用いているのが現状である。しかし最近の技術の進歩に対応して，ますます精度良いデータが要求さ

れてきている時勢に，直接高ひずみ速度下における2次元変形挙動をとらえる必要が高まってきた。以上のことから本研究では平面ひずみ状態下において広範囲の種類の炭素鋼板を用いて低ひずみ速度範囲($4 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$)から高ひずみ速度範囲($2 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$)までに行わたる実験を行った。⁵⁾ 高ひずみ速度範囲においてはHopkinson Bar 法による平板圧縮で行った。変形強度の測定に対しては新しく開発した応力-ひずみ曲線直視装置を用い，さらにデータの高精度化を図るためデジタルメモリスコープを用いて解析を行った。⁶⁾

これら実験結果から各種鋼の平面ひずみ状態下での変形強度とひずみ，ひずみ速度および温度依存性について実験的に明らかにした。また降伏応力に関する炭素当量との相関性についても検討した。

2 実 験

2・1 供試材および実験装置

供試材として用いた熱間圧延鋼板の鋼種，化学成分，機械的性質を Table I に示す。試験片の形状は酸洗後の熱延供試コイルの中央から幅 20 mm，長さ 200

* 原稿受理 昭和54年 4月19日

** 正 会 員 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 府中市東芝町

*** 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 府中市東芝町

Table I. Chemical compositions and mechanical properties of materials.

Material symbol	Chemical composition (%)				Yield strength $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation δ (%)
	C	Si	Mn	P			
A	0.006	0.01	0.40	0.021	26.2	38.5	43.3
B	0.16	0.02	0.49	0.016	28.4	43.9	36.6
C	0.40	0.06	0.83	0.016	43.3	59.6	25.9
D	0.43	0.08	0.76	0.023	45.2	75.4	19.0
E	0.046	0.01	0.32	0.015	23.4	31.9	41.9
F	0.036	0.01	0.34	0.012	22.0	29.3	44.5
G	0.045	0.01	0.35	0.021	23.2	33.0	45.0
H	0.051	0.08	0.46	0.021	27.3	37.2	37.4
I	0.054	0.06	0.44	0.017	30.5	40.1	34.5
J	0.048	0.06	0.39	0.028	29.9	38.1	36.1

mm で、その長手方向は熱延コイルの圧延方向に平行になるように採取した。試験片は供試材の板厚を原厚(2 mm)とし各鋼種ともそれぞれ5種類の予ひずみを真のひずみで $\varepsilon_0 = 0, 0.2, 0.51, 0.92, 1.6$ を与えたものを用いた。

ひずみ硬化特性および温度依存性を調べるための静的平板圧縮試験にはインストロン材料試験機を用い、試験片のひずみ速度がほぼ $4 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ になるようにして実験を行った。Fig. 1 に静的平板圧縮用ダイスおよび試験片の取付け状態を示す。このように試験片横幅 w を板厚 h に対し充分大きくとり、($w/h \approx 10$)

Fig. 1. Shape and dimension of the dies used in the static test, and set up situation of test piece.

Fig. 1 に示すような圧縮を行えば板内の変形は近似的に平面ひずみ状態となる。本実験では $w/h \geq 20/2 = 10$ である。また試験片の平板圧縮が進行してもダイスのテーパ部で試験片の圧縮変形荷重の一部を担うことのないようにテーパ側面は圧縮面と 60° の角度をもたせた。ひずみ速度効果を調べるための高速平板圧縮試験には Hopkinson Bar 法によりひずみ速度範囲を $8 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4 \text{sec}^{-1}$ で行った。

2.2 実験方法

高速平板圧縮の実験方法としては試験片が高速平板圧縮変形を受けているときの入力棒および出力棒の弾性ひずみ挙動を、Fig. 2 に示す測定ブロック図のように、入力棒および出力棒のほぼ中央位置の円周上に 90° 間隔で貼った4枚のひずみゲージを直列接続した

Fig. 2. Block diagram of direct measurement of stress-strain curve.

もので検出した。応力-ひずみ曲線およびひずみ速度-ひずみ曲線は応力-ひずみ曲線直視装置を介してデジタルメモリスコープ上に同時に直接記録し、これからそれぞれの予ひずみを与えられた試験片の降伏初期(塑性ひずみ $\varepsilon_p = 0.01$)における応力およびひずみ速度を求めた。ここで入出力棒の横断面積を A 、ヤング率を E 、鋼中の弾性波の伝ば速度を C_0 、入射ひずみ波を ε_I 、反射ひずみ波を ε_R 、透過ひずみ波を ε_T 、試験片厚さとその横断面積をそれぞれ h , A_0 とすれば、試験片に加わる平均応力 σ 、平均ひずみ ε 、平均ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は次のように表される。

$$\sigma = \frac{E}{2} \left(\frac{A}{A_0} \right) (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{C_0}{h} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{h} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (3)$$

高速平板圧縮用ダイス部を Fig. 3 に示す。高速平板圧縮を行うに際し、丸棒の先端に断面形状の異なる部分をもつ場合、その部分における弾性波の反射、透過によるひずみ波について考慮する必要がある。本研究における試験にはこれらの点を充分考慮し、高速平板圧縮用ダイス部形状を選定した。Fig. 3 で断面形状の異なる部分の断面積は丸棒の断面積に可能な限り近くす

Fig. 3. Shape and dimension of the dies used in the dynamic test.

る事, またその長さは極力短くする事が望ましいが, 試験実施上の問題から Fig. 3 に示す形状寸法とした。さらに得られたひずみ波形で誤差の比較的多く含まれる極く初期(約 $6\mu\text{sec}$)を除き, それ以降のひずみ波形についてデータ解析を行った。これらの点を配慮することにより圧縮ダイス部の形状による誤差を極力少くし, 実用上無視できる程度にした。試験片の取付状態は Fig. 1 に示すものと同じである。また試験に際してダイスと試験片表面には MoS_2 を塗布して摩擦の影響を極力少くして行った。

3 実験結果および考察

3.1 静的圧縮変形強度

それぞれ予ひずみを与えた圧縮平板試験片を用いて静的圧縮試験を行い, 全ひずみ ϵ と圧縮変形強度 σ_{cs} の関係を求めたものが Fig. 4 である。全ひずみ ϵ が 1.0 以下では(4)式の関係が得られる。

$$\sigma_{cs} = k_1 \epsilon^{n_1} \quad (4)$$

Fig. 4. Relation between σ_{cs} and ϵ .

ここに k_1 は強度係数, n_1 はひずみ硬化指数である。

平面ひずみ状態での圧縮変形強度⁸⁾については, Watt & Ford⁷⁾の実験, Green の理論解などによって明らかにされているが, それによると本実験の場合, ダイス幅 b と試験片厚さ h との関係 h/b は 0.4 以下であり, 試験片板厚 h とダイス幅 b との比の影響による圧縮変形強度の過大評価はたかだか 2% にとどまるので実用上は問題とならない。しかし接触面の摩擦係数 μ の影響については μ が小さくても h/b の比が小さくなると圧縮変形強度 σ_{cs} は増大し, その程度は試験片の板厚 h が薄くなるほど大きくなる。 $\epsilon > 1.0$ で実験値が (4) 式よりはずれてくるのはこのような接触面の摩擦の影響によるものと考えられる。このようにして得られた各種鋼板の k_1 , および n_1 の値を Table II に示す。

3.2 高速圧縮変形強度

それぞれ予ひずみを与えた各種鋼板について Hopkinson Bar 法により, ひずみ速度と圧縮変形強度との関係を求めた。Fig. 5 には応力-ひずみ曲線直視装置を介してデジタルメモリスコープ上に得られた $\sigma-\epsilon$, $\dot{\epsilon}-\epsilon$ 曲線を示す。このようにして得られた $\sigma-\epsilon$, $\dot{\epsilon}-\epsilon$ 曲線から必要とする値をデジタル量として正確に求めた。Fig. 6 は予ひずみ $\epsilon_0 = 0.51$ を与えた全鋼種の試験片について, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と圧縮変形強度 σ_{cd} との関係を, Fig. 7 は鋼種 I について予ひずみを種々に変えて試験を行い, $\dot{\epsilon}$ と σ_{cd} との関係について求めたものである。これらの図から, いずれの鋼種でも, ひずみ速度のかなり広い範囲にわたってひずみ速度と圧縮変形強度との間に(5)式で近似できる関係が得られる。

$$\sigma_{cd} = k_2 \dot{\epsilon}^{n_2} \quad (5)$$

Fig. 5. Examples of $\sigma-\epsilon$ and $\dot{\epsilon}-\epsilon$ curves.

Table II. Various indexes n_1 , n_2 , α and constants k_1 , k_2 , k_3 .

Material symbol	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
k_1	74.8	96.6	120.6	139.9	71.7	73.0	76.0	80.9	82.5	82.5
n_1	0.219	0.235	0.181	0.127	0.222	0.237	0.237	0.204	0.204	0.224
k_2	65.6	69.1	97.1	83.1	68.1	73.4	63.1	71.4	64.2	61.2
n_2	0.077	0.076	0.045	0.074	0.059	0.064	0.082	0.066	0.081	0.090
k_3	22.8	30.3	50.2	76.4	22.2	26.3	27.0	29.1	29.3	27.4
α	319.6	297.4	223.2	145.2	313.9	248.7	261.0	267.0	282.2	286.1

 Fig. 6. Relation between σ_{cd} and $\dot{\epsilon}$ of various carbon steels. (at $\epsilon_0 = 0.51$)

 Fig. 7. Relation between σ_{cd} and $\dot{\epsilon}$. (on steel I)

ここに k_2 は強度係数で、 n_2 はひずみ速度依存指数である。

各鋼種の予ひずみ $\epsilon_0 = 0.51$ を与えた試験片について得られた k_2 、および n_2 の値を Table II に示す。

また(5)式による σ_{cd} の値が静的圧縮変形強度の値と一致するときのひずみ速度を下限ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ と呼び、各鋼種の予ひずみ $\epsilon_0 = 0.51$ を与えた試験片について、その値を示すと Table III のようになる。

3・3 圧縮変形強度に及ぼす温度の影響

平面ひずみ状態での変形強度に及ぼす温度の影響を調べるためには時効の影響を除くよう考慮しておく必要がある。しかし時効の影響が現れず、軟化の影響だけが現れるような平面ひずみ状態での変形強度を実験により測定することは時効硬化鋼において特にむずかしい。Fig.8 は予ひずみを与えない熱延のままの時効硬化鋼の鋼種Jを用いて、各ひずみにおける温度と変形強度の関係を示したものである。図中にはひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ と $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ の場合について示している。室温 (23℃) ～80℃程度までは温度の上昇とともに軟化が進行して変形強度は減少するが、80℃～170℃の範囲では時効による硬化が軟化にまさり、変形強度は温度の上昇とともに増加していく。

このような実験結果を考慮に入れて、本実験では時効による硬化の影響が無視できると考えられる室温～80℃において予ひずみを与えない熱延のままの各鋼種での静的圧縮変形強度 σ_{ct} を測定し、温度 T と σ_{ct} との関係を(6)式で近似し、その外挿によって高温域における温度の影響を推定した。

$$\sigma_{ct} = k_3 \exp \frac{\alpha}{T} \quad (6)$$

 Fig. 8. Relation between σ_{ct} and t . (on steel J)

 Table III. Lower limits of strain-rate ($\dot{\epsilon}_1$).

Material symbol	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
$\dot{\epsilon}_1$	8.20×10^{-1}	1.03×10	8 31	3.56×10^2	1.94×10^{-1}	7.48×10^{-2}	1.33	8.37×10^{-1}	4.59	6.15

ただし k_3 は強度係数, α は温度依存指数, T は絶対温度である.

Table II に 1 例として全ひずみ $\varepsilon=0.51$ のときにおける各鋼種の k_3 と α の値を示す.

3・4 変形強度の推定式

ひずみ硬化指数 n_1 はひずみ速度および温度に無関係な材料定数であるとして, 室温での静的圧縮試験の場合の n_1 を用い, またひずみ速度依存指数および温度依存指数はそれぞれひずみ速度および温度によって一義的に決まるものとする, 平面ひずみ状態での変形強度 (以下 2 次元変形強度と称す) は実験的に (7) 式で表すことができる.

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = k_0 \varepsilon^{n_1} \cdot \dot{\varepsilon}^{n_2} \exp\left(\frac{\alpha}{T}\right) \quad (7)$$

ただし, k_0 は強度係数である.

ここで, 強度係数と各鋼種の炭素当量との関連づけにおいて実用上便利なように, 圧縮ひずみ $\varepsilon=0.5108$ (40%慣用ひずみ), ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}=1000 \text{ sec}^{-1}$ における 30℃での 2 次元変形強度を k_d とし, (7) 式を変形すると (8) 式のようになる.

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = k_d \left(\frac{\varepsilon}{0.5108} \right)^{n_1} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000} \right)^{n_2} \exp\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right) \quad (8)$$

Fig. 7 に (8) 式を用いて得られた値を実線にて示してある. 実験点と比較的良好一致を見せていることが知られる.

鋼の変形強度に関する数式モデルとしては多くの研究者によって提唱されているが, ここでは五弓-木原^{9)~11)}により報告されている数式モデルと, 本研究で得た実験式と比較する. 五弓-木原の数式モデルは (9) 式で与えられ, ひずみ ε によって決まる項 k_{fa} とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$, 温度 T によって決まる項とからなっている.

$$\sigma_0(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = k_{fa} + e^{6.5} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{kT/0.14} \quad (9)$$

ここで, ε_0 は定数, k はボルツマン定数である.

(9) 式を Von Mises の塑性条件から 2 次元変形強度の式として換算し, また本実験における鋼種 J の場合

を例として整理しなおすと (10) 式で表される.

$$\sigma_0(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[e^{4.217} \varepsilon^{0.2236} + e^{6.5} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{kT/0.14} \right] \quad (10)$$

Fig. 9 は鋼種 J の $\varepsilon=0.5108$ に対する高ひずみ速度下の 2 次元変形強度の実測値と本研究による実験式の (8) 式, および 五弓-木原の数式モデルの (10) 式によって推定した場合について示している. 本研究による実験式の (8) 式と五弓-木原の数式モデルの (10) 式とは比較的良く一致し, また実測値を精度よく推定できると考えて良いであろう.

つぎに本実験にはそれぞれの予ひずみを与えられた試験片の降伏初期における変形強度をもって整理することにより圧縮過程での温度上昇の変形強度に及ぼす影響を除いている. しかし, 高ひずみ速度で大きなひずみが瞬時に与えられた所での変形強度は, 断熱変形熱として (11) 式で表される温度上昇分 $\Delta\theta$ の影響を無視することはできない.

$$\Delta\theta = \frac{0.95}{S\rho J} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) d\varepsilon \quad (11)$$

ただし ρ , S , J はそれぞれ鋼の密度, 比熱, および熱の仕事当量である.

鋼種 I について (8) 式により得られた σ - ε の関係および (8) 式に (11) 式の温度補正を行い求めた σ - ε の関係と実験値を比較して示したものが Fig. 10 である. (11) 式による温度補正を行わないものは $\varepsilon=0.08$ 程度から ε が大きくなるに従い実験値との差が大幅に増大してくる. 一方, (11) 式による温度補正を行うと $\varepsilon=0.3$ 程度までは比較的实验値と一致する. しかしそれ以上に ε が大きくなると次第に実験値との差が大きくなっていく. このように ε が大きくなっていくと, その変形強度を (11) 式だけで補正することはむずかしくなってくるが, 実用的に良く使用される $\varepsilon \leq 0.3$ の範囲では実験値と比較的良好一致と考えると良い.

3・5 降伏応力の炭素当量と圧縮変形強度

熱間圧延のまま, または焼準状態での引張強さ σ_B が 40~70 kg/mm² の範囲の鋼板の場合, 降伏応力に及ぼす化学成分の影響を炭素当量の式で示すと (12) 式と

Fig. 9. Comparison in deformation strength between experimental results and estimated ones by formula (8), (10)

Fig. 10. Comparison in σ_{cd} - ϵ curves between experimental results and calculation corrected by formula (8).

Fig. 12. Relation between α and C_y .

Fig. 11. Relation between n_1 and C_y .

なり、降伏応力の炭素当量として一般に使われている。¹³⁾

$$C_y = C + \frac{1}{5} \text{Mn} + \frac{1}{7} \text{Si} + \frac{1}{7} \text{Cu} + \frac{1}{20} \text{Ni} + \frac{1}{2} \text{Mo} + 1.1\text{V} \quad (12)$$

Fig. 11 は各種鋼板のひずみ硬化指数 n_1 と C_y との関係を示したもので、これを(13)式で近似したのが図中の曲線である。

$$n_1 = 0.2365 \exp\left(\frac{0.0284}{C_y - 0.645}\right) \quad (13)$$

Fig. 12 は各種鋼板の温度依存指数 α と C_y との関係を示したもので、 C_y の大きい鋼種ほど温度依存性

が小さくなる傾向にある。これを式で表すと(14)式で近似できる。

$$\alpha = \exp(-1.085C_y + 5.874) \quad (14)$$

なお n_2 と C_y との間には明りょうな相関性を認めることはできなかった。 n_2 の値の範囲は n_1 の値に比べても一層小さい値であるので、各種鋼板に無関係に、それらの平均値 $\bar{n}_2 = 0.0683$ を用いても(8)式から得られる変形強度の推定値に現れてくる誤差は極めて小さい。したがって実用的には $\bar{n}_2 = 0.0683$ および C_y から任意のひずみ、およびひずみ速度における2次元変形強度を推定することが可能である。

3・6 単軸応力状態での変形強度と平面ひずみ状態での変形強度の比較

鋼種Cについて、円柱状試験片(10φ×15I)における単軸応力状態での変形強度 σ_e と平板試験片における平面ひずみ状態での変形強度 σ_{cd} とを実験的に求め比較すると $\sigma_{cd}/\sigma_e = 1.08 \sim 1.12$ の関係が得られた。これは Von Mises の塑性条件から得られる(15)式の関係よりやや小さい値になっている。

$$\sigma_{cd} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \doteq 1.15 \sigma_e \quad (15)$$

実験には装置などからくる実験誤差の含まれていることが予想されるが、しかしほぼ(15)式の関係が成立していることが知られる。

4 結 論

予ひずみを与えた各種炭素鋼の平面ひずみ状態での変形強度のひずみ速度依存性について実験的に明らかにした。ひずみ速度は $4 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^4 \text{sec}^{-1}$ において行い、高ひずみ速度範囲においてはHopkinson Bar法により、また変形強度の測定に対しては新しく開発した応力-ひずみ曲線直視装置を用い、さらにデータの高精度化を図るため、デジタルメモリスコープを用いて記録し解析した。

得られた結果をまとめると次のようである。

(1) 平面ひずみ状態での変形強度(2次元変形強度) σ と、ひずみ ε 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ 、および温度 T との間には、ひずみ硬化指数 n_1 、ひずみ速度依存指数 n_2 、温度依存指数 α 、強度係数を k_0 とすると、実験的に次式で良く表される。

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = k_0 \varepsilon^{n_1} \cdot \dot{\varepsilon}^{n_2} \exp\left(\frac{\alpha}{T}\right)$$

(2) 高ひずみ速度で、大ひずみを瞬時に与えたときの2次元変形強度は上式に断熱変形熱を考慮した温度補正を行うことにより、 $\varepsilon \leq 0.3$ の範囲までは比較的实验値と一致するようである。

(3) 降伏応力の炭素当量 C_y と、ひずみ硬化指数 n_1 および温度依存指数 α との間のそれぞれの相関性をもとに、 C_y が既知の場合、ひずみ速度依存指数 n_2 に全鋼種での n_2 の平均値を用いることにより、2次元変形強度を推定することができる。

(4) 本実験で求めた単軸応力状態での変形強度 σ_e と平面ひずみ状態での変形強度 σ_{ed} との間には、Von

Mises の塑性条件から得られる次式の関係がほぼ成立している。

$$\sigma_{ed} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

(昭和53年9月20日 第22回材料研究連合講演会，昭和53年3月31日 日本機械学会「衝撃と破壊調査研究分科会」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 有井 満, 岡部永年, 森 忠夫, 矢野利行, 塑性と加工, **15**, 968 (1974).
- 2) 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 有井 満, 塑性と加工, **16**, 566 (1975).
- 3) Okabe, N., T. Mori, M. Ariei, J. Masuda, M. Motomura, and Y. Matsuura, Annals of the CIRP, **23**, 67 (1974).
- 4) 田中吉之助, 松尾俊三, 木下元洋, 前出恒夫, 日本機械学会論文集, **31**, 883 (1965).
- 5) Kolsky, H., Proceedings of the Physical Society, **62**, 676 (1949).
- 6) 有井 満, 内田 猛, 岡部永年, 非破壊検査, **23**, 2 (1974).
- 7) Watts, A. B., and H. Ford, Inst. Mech. Engrs., **169**, 1141 (1955).
- 8) Green, A. P., Phil. Mag., **42**, 900 (1951).
- 9) Arimura, T., M. Kamata, and J. Kihara, Proceedings ICSTIS. Suppl. Trans. ISIJ, **11**, 659 (1971).
- 10) 五弓勇雄, 木原淳二, 小豆島明, 塑性と加工, **14**, 12 (1973).
- 11) 志田 茂, 塑性と加工, **13**, 935 (1972).
- 12) Douglas, J. R., and T. Altan, Transaction of the ASME, Series B, **97**, 66 (1975).
- 13) 溶接学会編, 溶接便覧, 712 (1966) 丸善