

# プレス成形性評価因子の変遷とその将来

黒 崎 靖\*  
Yasushi KUROSAKI

## 1. まえがき

金属その他の材料の塑性加工分野の中で、自動車ボデー、家庭用器物などの成形のように、素材である板としての形を保ちながら外観を変える加工法は、プレス成形あるいは板材成形と呼ばれている。製品の種類は無数に違いないが、基本となる成形様式は図1に示すように、深絞り、張出し、伸びフランジングおよび曲げの4種類である<sup>(1)</sup>。

この種の加工領域では古くから、できるだけ広範な材種にわたって通用する成形性評価因子と試験法を求めて、絶え間ない研究が積み重ねられてきた。その究極的目的は、プレス作業成績の予知、材料選定と工程設計の最適化、材質改善などに対する具体的な情報手段を確立することである。成形性評価の研究活動は、成形性の価値判断を行う基準（破断、しわ、工具寿命、製品の形状精度、表面性状など）を定量的に表示することから始められる。例えば、破断発生までの成形量を表す尺度には、通常、円筒深絞り加工では限界絞り比（＝絞り成功する最大素板直径 / ポンチ直径）、また、張出し加工では限界成形深さが採用される。本稿では以後、成形性表示尺度の大小を予知するための材料固有の物理量を、広い意味で成形性評価因子と呼ぶことにする。図2は、成形性評価因子とプレス作業ならびに板製造の現場とのかかわりを模式的に示したものである。図には、主な評価因子を実加工に対する類似度によって分類した結果が記入してある。実加工を単純化したいわゆる模擬的試験（simulative test）による測定値（エリクセン値、Swift LDR、コンカルカップ値 CCV など）は実加工に対して当然評価因子の意味を持つが、実験室的研究においては表示尺度として位置づけされる。

本稿では、1950年以降今日まで、約30年間にわたる評価因子に関する研究活動を振り返り、図2に示した相補関係がどのように具体化されたかを概観しつつ、将来への展望を試みる。

## 2. 研究活動の概要

板材の加工法の歴史はきわめて古く、紀元前よ

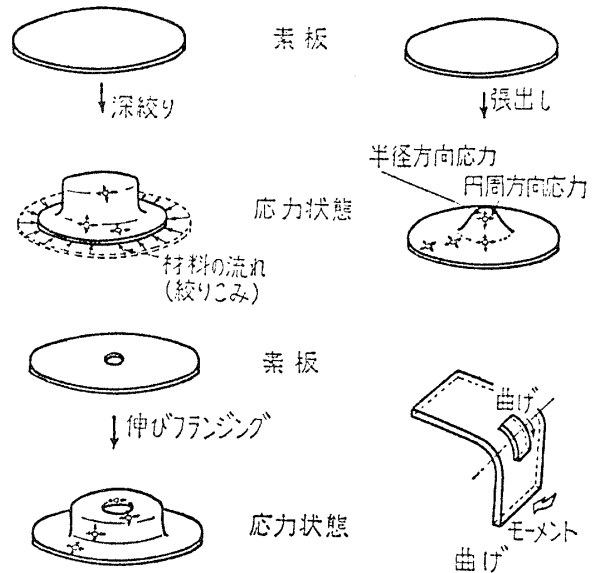


図1 基本的なプレス成形（プレス加工便覧より）

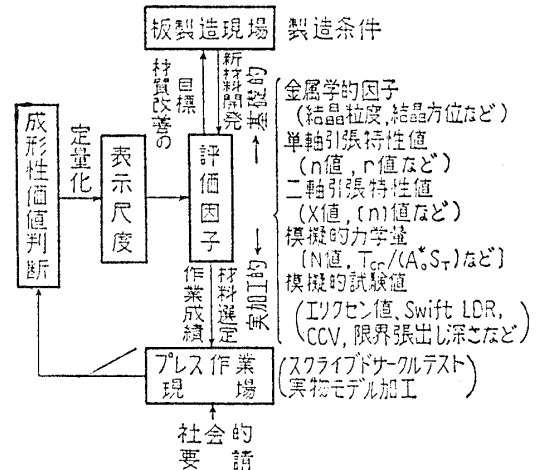


図2 成形性評価活動の概要

\* 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

り経験的および伝承的工芸技術として、武器、農器具、装飾品などの製作に利用されてきた。圧延機、プレス機械および型工具を使用する現代のプレス成形に対して、科学的検討が加えられたのは、1900年以降である。1900年代の前半までに、古典的塑性理論が完成され、1930年以降国内外で深絞りの解析に関する研究論文が発表された<sup>(2)(3)</sup>。

成形性評価因子の研究が活発化したのは、1950年以降である。これには、戦後の経済復興と生活水準の向上という時代要請下で、高品質の素板の安定供給ひいてはプレス成形現場における生産性の向上が急務とされた背景があった。1950年代は、破断を主題とした基礎研究期間で、 $n$  値<sup>(4)</sup>、 $r$  値<sup>(5)</sup>の提案をきっかけとして、引張特性値および模擬的試験値の特性が追究された。1960年代にはいると、基礎的研究成果が実際の場に活用された。特に軟鋼板においてめざましい材質改善（延性向上と高 $r$  値化）が達成され、上述目的がほぼ完遂された（量産体制確立期）。一方、非鉄金属材料の深絞り性評価に対して、 $n$  値、 $r$  値の不備が指摘された。

1970年代にはいって大きな転換期を迎えた。いわゆる省資源・省エネルギー問題が新たな時代要請となり、プレス製品の軽量化と高張力化を主題とした成形性研究が着手された。

表1は、上記研究活動の過程で提案された各種評価因子を年代順にまとめたものである。以下、その詳細をたどることとする。

### 3. 単軸引張特性値

各種材料試験の中で、試験方法が簡単なことおよび試験値の物理的意味が把握しやすいことなどのため、まず、単軸引張試験に期待が集まった。主な引張特性値として、加工硬化指数  $n$  値、塑性異方性係数  $r$  値（＝幅ひずみ / 板厚ひずみ）、縦弾性係数、降伏点、引張強さ、一様伸び、全伸びなどが挙げられる。

**3.1 深絞り性と  $n$  値、 $r$  値** 図3に、 $r$  値の提案者 Lankford (1950)<sup>(5)</sup> の歴史的な実験結果を示す。図は、鋼板を用いて乗用車のフェンダをプレス成形した際の作業成績と  $n$  値、 $r$  値との関係をみたものである。図より  $r$  値の有効性がめいりょうに認められる。一方、Arbel (1950)<sup>(4)</sup> および福井ら (1952)<sup>(6)</sup> は、限界絞り比と  $n$  値の間に正相関関係が成立する実験結果を得た。これらの研究報告がきっかけとなって、以後、破断を主題として、引張特性値と模擬的試験値間の相関関係が追究された。同時に、各種模擬的試験法の標準化が行われた（表1参照）。

1960年代にはいると、深絞り性と  $r$  値の関係

表1 プレス成形性に関する研究活動

年代	研究活動	成形性評価法	年代	研究活動	成形性評価法
1900	◦古典的塑性理論の研究	エリクセン試験装置(1913) 円筒深絞り試験装置(1915) 液圧バルジ試験装置 (Jovignot, 1930)	1960	◦板の材質改善 ◦形状性 ◦非鉄金属のプレス成形性評価	結晶方位(Whiteley) 結晶粒度と深絞り性 (五弓ら) スウェーデン式純粋 張出し試験
			1965	◦FLDの予知 ◦二次成形性 ◦Wall Breakage性	$u$ 値(吉田) スクライブドサークルテスト $T$ 値(林)
1950	◦引張特性値とプレス成形性(基礎研究) ◦模擬的試験法の標準化	$n$ 値(Arbel) $r$ 値(Lankford) コンカルカップテストの提案(福井) JIS エリクセン試験方法制定	1970	◦新評価因子の模索 ◦高張力板の開発とプレス成形性(基礎研究)	$[n]$ 値、 $X$ 値(吉田) $N$ 値(Thorp) $T_{cr}/(A_0 S_T)$ (河合ら)
1955		Swift Cup-forming Test 方法提案(Kemmis) T.Z.P. 試験 (Engelhardt)	1975		$\bar{Y}$ , $\bar{S}$ (後藤) $L_b$ (河合ら) $m$ 値(Ghosh) デンツ試験(林)

をめぐって活発な論争が行われた。大別すると、両者の間に正相関関係が成立するとした報告<sup>(7)-(9)</sup>とこれを否定した報告<sup>(10)-(12)</sup>に分けられる。図4に Whiteley ら (1961)<sup>(7)</sup> による軟鋼板の実験結果を示す。また、図5に Wright (1962)<sup>(10)</sup> の実験結果を示す。図5より、深絞り性の $r$ 値依存性は材種により異なる(例えば、アルミニウム合金板の深絞り性は $r$ 値と関係がない)こと、また、図4および図5より、鋼板の場合にのみ正相関関係が成立することが看取される。この理由は現在にいたるもなお十分解明されていないが、(1)  $n$  値と $r$  値の重合効果、(2) 面内異方性の影響、(3) Hill の異方性理論の不備、(4) 破断形式に対する検討不足、などが指摘された。こうして、新評価因子の発見をめざして新たな追求が始まった。(1) に関して、山田 (1964)<sup>(17)</sup> による限界絞り比の向上係数、吉田 (1965)<sup>(12)</sup> による各種インデックス  $F(n, r)$  による検討、また (2) に関して、 $r_{min}$  説<sup>(8)(13)</sup> (板面内の最小 $r$ 値が深絞り性を支配するという考え方)が注目された。(3) と (4) に関しては、第4章において述べる。

**3.2 純粋張出し性と引張特性値** 1964年にスウェーデンから純粋張出し試験法(フランジ部完全拘束)が提案されて以来、純粋張出し性に及ぼす材料性質の影響について、実験<sup>(18)(19)</sup>および理論<sup>(19)(20)</sup>の両面から検討された。純粋張出し性を支配する性質は、破断部における限界ひずみの大きさと周辺部へのひずみ伝ば能力の2項目に集約される。この観点から、 $n$  値、一様伸び、全伸びといった延性表示値が注目された。 $n$  値につい

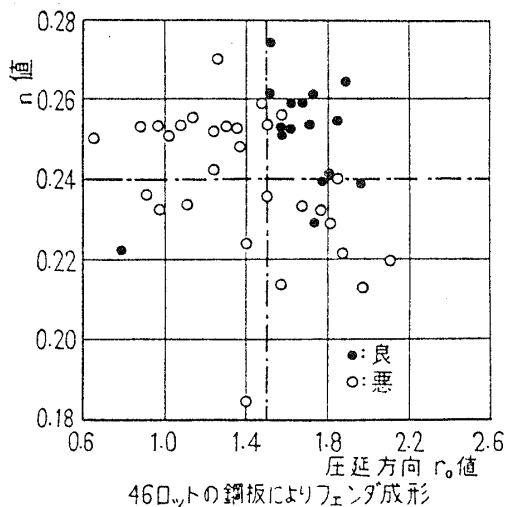


図3  $n$  値、 $r$  値およびプレス成績の関係 (Lankford)<sup>(5)</sup>

て、変形量および変形様式依存性<sup>(21)</sup>、 $n=0.2$  近辺における不連続現象<sup>(19)</sup>などの問題点が指摘されたが、大筋として上記延性表示値が張出し性支配因子となることが確認された<sup>(18)(19)</sup>。

4. 新評価因子の模索

$r$  値が深絞り性評価に有効とする理論的誘導に、Hill の異方性理論が用いられた<sup>(17)(22)</sup>。平面応力場、面内等方性を仮定すると Hill の降伏条件は図6のように描かれる<sup>(35)</sup>。 $r$  値が増加すると、降伏曲線は第一象限(引張り・引張り)で拡大し、第四象限(引張り・圧縮)で収縮する。これがポンチ頭部の強度を高め、逆に深絞り力を低下させ、ひいて深絞り性を向上させる理由とされた。

しかし、1960年代後半から、実際の金属材料は必ずしもこの理論に従わないとした報告が相つぎ<sup>(14)(15)</sup>、 $r$  値主義に対する反省の意見が数多く

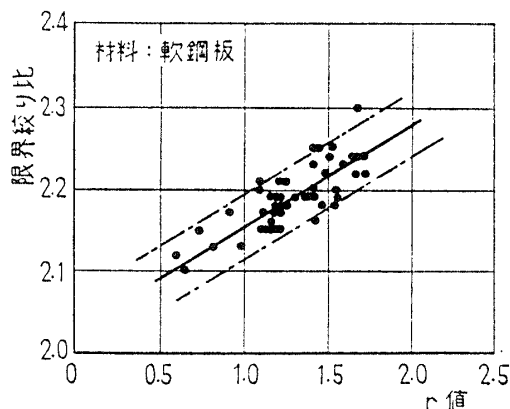


図4  $r$  値と限界絞り比の関係(破線は90%信頼限界線)(Whiteley ら)<sup>(7)</sup>

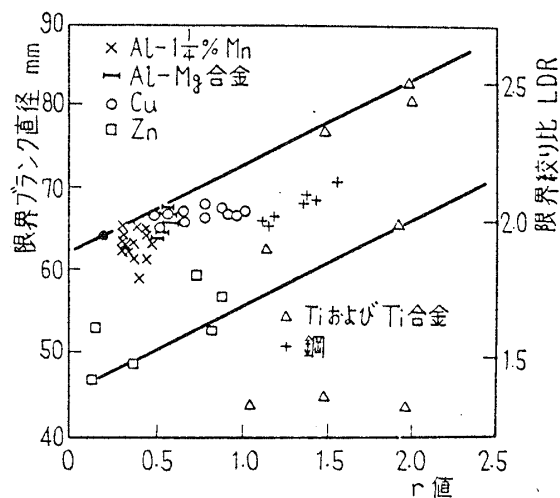


図5 深絞り性と $r$  値の関係 (Wright)<sup>(10)</sup>

提出された。一つの傾向として、問題を材料性質のひずみ履歴依存性としてとらえ、実加工に近い変形様式を与える試験法に活路が求められた。こうして、液圧バルジ試験（等二軸引張応力状態）において測定される異方性パラメータ  $X$  値<sup>(14)</sup> および加工硬化指数  $[n]$  値<sup>(21)</sup>（吉田 1969-1970）が新しい材料定数として提案された。また、模擬的試験より求まる力学量  $N$  値（Thorp, 1973）<sup>(23)</sup>、相対荷重負担能力  $T_{cr}/(A_0 S_T)$ （河合ら, 1975）<sup>(16)</sup>、みぞ付円板の液圧バルジ試験から求められる  $L_0$  値（河合ら, 1977）<sup>(24)</sup> などが提案された。一方、理論面から、新しい降伏関数を基礎とした評価因子  $\bar{Y}$ ,  $\bar{S}$ （Gotoh, 1977）<sup>(25)</sup> が提案された。上述因子のいずれが突破口となるか、今後注目してゆきたい。

以上の問題とは別に、河合ら（1975）<sup>(16)</sup> は成形性評価の議論を破断形式（破断のタイプ）別に行うべきことを指摘した。これは、材料が同一でも破断形式が異なると、成形性そのものが別種の材質依存性を示すので比較ができないためである。林（1969）<sup>(26)</sup> は角筒の深絞り実験において、Wall Breakage という特殊な破断現象を観察し、通常の深絞り性因子と異質の  $T$  値を提案した。この方面に関する情報はなお不十分と思われるので、今後の検討に待ちたい。

5. スクライドサークルテスト（実物試験）

1960年代後半から、プレス作業現場において、スクライドサークルテスト（scribed circle test）と呼ばれる対症療法的な作業成績評価法が普及し始めた。あらかじめ、与えられた素板に一

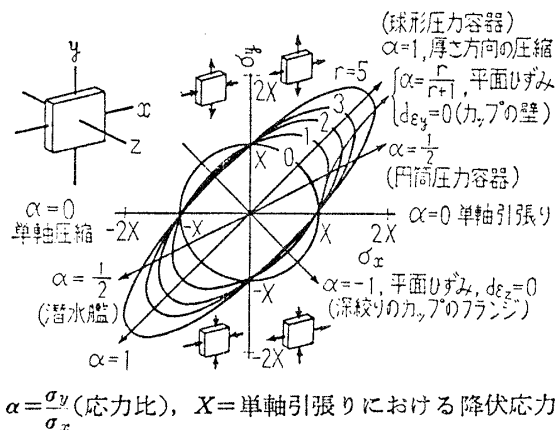


図 6 平面応力場における Hill の降伏条件 (Hosford-Backofen)<sup>(35)</sup>

定の直径の円をけがいておき、それに各種ひずみ経路を与えて破断時の主ひずみ ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) を求めておく。次に図 7 に示すように、 $\epsilon_x, \epsilon_y$  を座標軸とする平面（変形状態図）<sup>(27)</sup> 上にプロットして破断限界線〔あるいは成形限界線 (FLD) とも呼ばれる〕を描く。実加工において、同様に破断ひずみを求めて図中にプロットすれば、破断発生までの余裕度（成形難易）がわかる。また、型修正を施してひずみ経路を変更させるといった破断回避策の検討に役立つ。

破断限界線の基本概念は、Keeler（1965）<sup>(28)</sup> と Goodwin（1968）<sup>(29)</sup> の提案によるもので、新しい成形性表示尺度の登場ともいえる。以後、FLD の理論的予知<sup>(30)-(32)</sup>、変形経路の影響<sup>(33)</sup> などが主題となり、活発に研究が行われた。

6. 金属学的因子と材質改善

6.1 金属学的因子 金属の塑性的挙動は、結局、金属学的因子の応答結果であるから、これに評価因子の期待が集まっても不思議でない。主として、化学成分、結晶方位（集合組織）および結晶粒度が検討対象とされた。五弓、鈴木ら（1964-1966）<sup>(34)</sup> は各種金属材料を用いて系統的に深絞り性研究を行い、深絞り性が結晶方位依存性を示す材料（軟鋼, 2S アルミニウム, 18 クロムステンレス鋼など）と結晶粒度依存性を示す材料（70/30 黄銅, 18-8 ステンレス鋼, 洋白など）が存在することを報告した。この種の因子はいずれも、異種材料間の量的比較に使用できないのが弱点である。しかし、材質改善に対する指標としての利用価値はきわめて高い。

6.2 材質改善の歩み 前述のように、軟鋼板の材質改善要因は、 $r$  値および  $n$  値（あるいは延性）の向上である。結晶塑性力学によれば、体

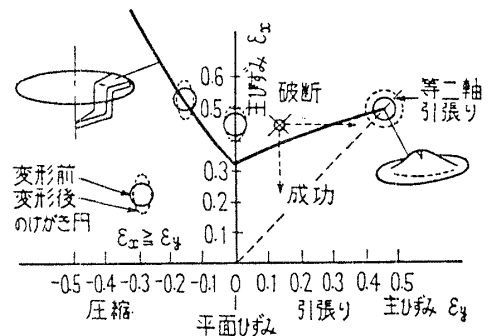


図 7 破断限界線 (Schey)<sup>(47)</sup>

心立方, 面心立方金属のいずれも (111) 方位の増加, (100) 方位の減少が  $r$  値を向上せしめる<sup>(35)</sup>.  $n$  値 (あるいは延性) の向上要因は, 軟質化するわち転位移動に対する障害物の除去 (純鉄化) と結晶粒成長の促進である<sup>(35)</sup>.

軟鋼板の製造現場ではこれらを指標として, 化学成分の調整, 鑄造組織, 圧延条件, 焼なまし条件などにおける最適条件が探られた. 図8は, しばしば引用される Whiteley と Wise (1962)<sup>(37)</sup> の実験結果を示すものである. 焼なまし前の冷間圧下率を調整することにより,  $r$  値向上の有効方位 (111) の増加と有害方位 (100) の減少を達成することができる.

日本における材質改善の歩みをたどってみると, オープンコイル焼なまし法による脱炭・脱窒鋼板 (1961), 低降伏点鋼板 (1963), 2回冷延2回焼なまし鋼板 (1967), Ti 添加鋼板 (1972), などほぼ 1960 年代に集中して高級冷延鋼板が開発

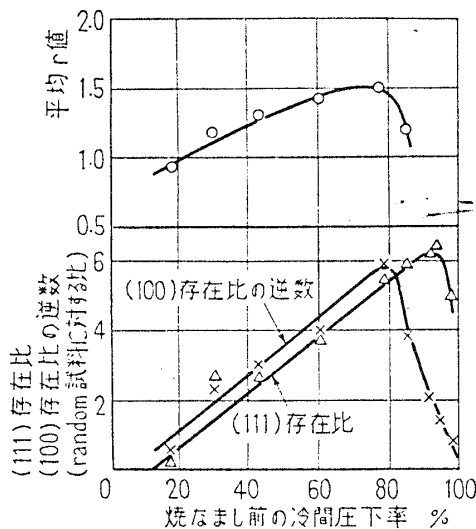


図8 アルミニウムキルド鋼の  $r$  値 (Whiteley-Wise)<sup>(37)</sup>

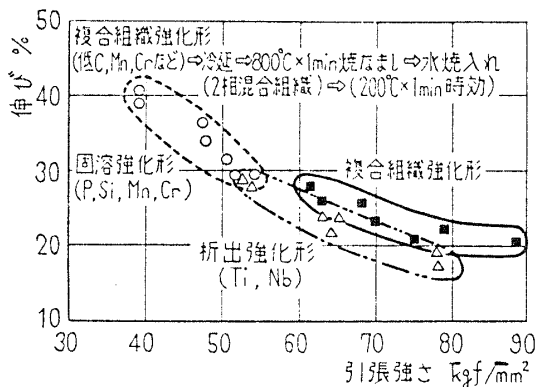


図9 高張力鋼板の強度-延性関係 (吉田)<sup>(40)</sup>

された. こうして,  $n=0.25$  以上,  $r=2.2$  以上<sup>(38)</sup> と鋼板として極限ともいえる材質改善が実現された. 以上の結果がプレス成形現場にフィードバックされ, 生産性向上に大きな貢献を果たしたことはいうまでもない.

これに対してアルミニウム板の場合, 成形性向上という意味での材質改善の歩みは若干地味である. この原因として, 成形性評価因子の決着がつかなかったこと, 美観と歩どまりの観点から肌荒れと耳の防止が制約条件として加えられたこと (深絞り性の向上, 結晶粒の微細化を達成する製造条件は  $45^\circ$  耳を助長する場合が多い)<sup>(39)</sup> が挙げられる. しかし, 最近になって, 成形性に優れ, 耳もほとんど発生しない合金板 (Al-Fe-Si 系合金)<sup>(41)</sup> が開発された.

**6.3 材質改善に対する新たな要請** 1970年代にはいると, 省資源・省エネルギーの時代要請に基づいて, プレス製品の軽量化が不可避の課題として登場した. 軽量化の方法には, 製品の肉厚減少と軽金属材料の採用の二とおりが考えられる. いずれの場合も強度および剛性の不足はまぬがれないので, 素板の高張力化が不可欠となる. こうして, 高張力化とプレス成形性という本来二律背反とされる問題の同時解決 (強かつよく伸びる材料の開発) が求められた. すでに各種金属板の製造現場において, 新材料の開発研究が積極的に進められており, 最適解の出現も間近いようである. 図9に, 高張力鋼板における引張強さと伸びの関係<sup>(40)</sup> を示すが, 両者ともに大きな値が得られる複合組織強化形鋼板が今後の焦点になると思われる. 一方, アルミニウム合金板では, 自動車ボディシート用に開発された 30-30 合金<sup>(48)</sup> (引張強さ  $30 \text{ kgf/mm}^2$ , 伸び  $30\%$ ) と呼ばれる Al-Mg-Zn-Cu 系合金が最近の話題である.

## 7. 今後の動向と問題点

1980年代の少なくとも前半は, 現在直面している二つの問題点, すなわち, (1) 板の高張力化と成形性, (2) 破断を基準とした成形性評価因子の究明, が主題とされよう. (1) に関して, 高張力化に伴う各種不良現象の出現が新たな問題点をもたらした<sup>(42)</sup>. このため, 破断, しわに加えて, 形状性 (なじみ性, スプリングバック), 耐焼付き性 (型かじり), デンツ抵抗<sup>(42)</sup> (くぼみに対する抵

抗)など多面的な成形性評価が求められるに至った。したがって今後は、作業成績の予知と向上対策を主眼とした各種模擬的試験法の開発が一つの動向となろう。

一方、(2)の破断を主題とした1950年代からの懸案は、今や高張力板材を含めた中で、新評価因子が追究されることになった。今後検討すべき項目をまとめてみると、(1)面内異方性の影響、(2)構成式からの検討、(3)破断形式に対する配慮、(4)工具寸法および工具・素板間の摩擦の影響、などである。(2)に関して、最近、単軸引張試験より求められるひずみ速度敏感度  $m$  値 ( $\sigma = F \varepsilon^m$ ) が、 $n$  値、 $r$  値につぐパラメータとして有力視されつつある<sup>(43)</sup>。

## 8. あとがき

加工の成否にかかわる基本事項である破断に焦点を絞って、過去30年間にわたる成形性評価に関する研究活動のごく概要を紹介した。いっそう深い関心をお持ちの読者は、以下の文献を参照されたい。板製造技術の進歩について文献(34)、成形性評価因子の詳細について文献(44)、(45)、軟鋼板の材質改善について文献(46)、高張力鋼板について文献(42)。本稿が多少とも今後の発展に寄与できれば望外の幸せである。

(原稿受付 昭和55年1月24日)

## 文 献

- (1) 吉田, 理化学研究所報告, 35-3 (昭 34-5), 199.
- (2) Sachs, G., *Mitt. d. deutschen Materialprüfungsanstalten*, 16 (1931), 11.
- (3) Fukui, S., *Scient. Papers of Inst. of Phys. and Chem. Res.*, 34-849 (1938), 1422.
- (4) Arbel, C., *Sheet Metal Indust.*, 27 (1950), 921.
- (5) Lankford, W.T., ほか2名, *Trans. ASM*, 42 (1950), 1197.
- (6) 福井・ほか3名, 東京大学理工研報告, 6-6 (昭 27), 351.
- (7) Whiteley, R.L., ほか2名, *Sheet Metal Indust.*, 38 (1961), 349.
- (8) Lilet, L. and Wybo, M., *Sheet Metal Indust.*, 41 (1964), 783.
- (9) Wilson, D.V., *J. Inst. Metals*, 94 (1966), 84.
- (10) Wright, J.C., *Sheet Metal Indust.*, 39 (1962), 887.
- (11) Warwick, J.O. and Alexander, J.M., *J. Inst. Metals*, 91 (1962-1963), 1.
- (12) 吉田, 理化学研究所報告, 41-1 (昭 40-1), 39.
- (13) 河合・ほか2名, 機論, 35-270 (昭 44-2), 449.
- (14) 吉田・ほか3名, 塑性と加工, 11-114 (昭 45-7), 513.
- (15) Horta, R.M.S.B., ほか2名, *Int. J. Mech. Sci.*, 12 (1970), 231.
- (16) 河合・ほか2名, 精密機械, 41-4 (昭 50), 351.
- (17) 山田, 塑性と加工, 5-38 (昭 39-3), 183.
- (18) 吉田・ほか8名, 理化学研究所報告, 41-5 (昭 40-9), 208.
- (19) 河合・ほか2名, 機論, 40-338 (昭 49-10), 2956.
- (20) 小森田・ほか2名, 理化学研究所報告, 42-4 (昭 41-7), 139.
- (21) 吉田・ほか2名, 理化学研究所報告, 45-5 (昭 44-9), 116.
- (22) Backofen, W.A., ほか2名, *Trans. ASM*, 55 (1962), 264.
- (23) Thorp, J.M., *Sheet Metal Indust.*, 50 (1973), 99.
- (24) 河合・黒崎, 機論, 43-365 (昭 52-1), 369.
- (25) Gotoh, M., *Int. J. Mech. Sci.*, 19 (1977), 513.
- (26) 林, 塑性と加工, 10-101 (昭 44), 422.
- (27) 玉沼・吉田, 理化学研究所報告, 45-4 (昭 44-7), 79.
- (28) Keeler, S.P., *Sheet Metal Indust.*, 42 (1965), 683.
- (29) Goodwin, G.M., *La Metallurgia Italiana*, 8 (1968), 767.
- (30) Swift, H.W., *J. Mech. & Phys. Solids*, 1 (1952), 1.
- (31) Hill, R., *J. Mech. & Phys. Solids*, 1 (1952), 19.
- (32) Marciniak, Z. and Kuczynski, K., *Int. J. Mech. Sci.*, 9 (1967), 609.
- (33) 吉田・ほか2名, 機誌, 72-600 (昭 44-1), 129.
- (34) 五弓, 金属塑性加工の進歩, (昭 53), 342, コロナ社.
- (35) Hosford, W.F. and Backofen, W.A., *Fundamentals of Deformation Processing*, (1964), 259, Syracuse University.
- (36) Morrison, W.B., *Trans. ASM*, 59 (1966), 824.
- (37) Whiteley, R.L. and Wise, D.E., *Flat Rolled Products III*, (1962), 47, Interscience Publishers.
- (38) 福田・菊間, 塑性と加工, 15-159 (昭 49-4), 290.
- (39) 池野・松野, 日本金属学会報, 9-2 (昭 45), 92.
- (40) 吉田・佐藤, 機誌, 80-698 (昭 52-1), 47.
- (41) 馬場・河合, 金属, 11 (昭 53), 20.
- (42) 青木, 鉄と鋼, 65-6 (昭 54), 687.
- (43) Ghosh, A.K., *Trans. ASME, Ser. H*, 99-3 (1977-7), 264.
- (44) Wright, J.C., *Sheet Metal Indust.*, 38 (1961), 649.
- (45) 河合・黒崎, 機械の研究, 27-4 (昭 50), 527; 27-5 (昭 50), 655.
- (46) 吉田・ほか2名, 機誌, 78-683 (昭 50-10), 929.
- (47) Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, (1977), 170, McGraw-Hill.
- (48) 宇野・馬場, 軽金属, 29-8 (昭 54), 360.