

## 解 説

UDC 669.14-415:621.98.011:669.14.018.262

## 薄鋼板の総合特性認識\*

武 智 弘\*\*・佐藤 泰一\*\*\*

白田 松男\*\*\*\*吉田 清太\*\*\*\*\*

## Extensive Understanding of Sheet Steel Properties

Hiroshi TAKECHI, Taiichi SATO,

Matsuo USUDA, and Kiyota YOSHIDA

## 1. 緒 言

薄鋼板の利用目的の拡大ならびに利用形態の多様化あるいは加工製品の長寿命化や再利用など省資源を旨とした社会的要請により薄鋼板に対する要求が一層複雑化している。このような背景の下では従来行なわれてきた薄板の量産方式や品種構成の再編成がなされねばならない事情も生ずる。塑性変形の利用による成形工程（本稿では2次加工とよぶ）においてもその後に加えられる工程-溶接、表面処理など-の技術や作業の分析に基づく使用材料の適正化に多大の努力がはられるようになっていく。しかしながら、板の生産から利用に至る一貫した技術体系を総合的に意識した取組みがなされなければ真に効率的な技術開発あるいは最適な材料選択はなし得ないであろう。このような総合認識は潜在的には従来にも存在しなかつたわけではない。個別の技術の内部では新しい現象に対する理解と対応あるいは周辺技術とのやりとりなどによりおのおのの技術における材料の特性認識の輪を着実に拡げている。

薄鋼板のプレス成形に例をとるならば、従来の材料特性の設計と成形技術は破断回避を主体に展開されてきたが、近年、しわなどの形状不良の発生や消去および後工程への影響を配慮した形状凍結、表面性状まで含めた形において成形限界ならびに成形性を取扱う場が確立されてきている。しかし、我々を取り巻く環境、情勢は最近急速にきびしさを増しつつあり、さらに成形物の後処理性や機能寿命にも責任を持つ姿勢を問われると同時にそれらの特性をも含んだ薄板のあらゆる特性を総合的に考察し処理していくためのシステムの確立が迫られている。

本稿はこのような問題意識と薄板製造と自動車車体部品成形に関する共同研究の場における最近の知識、経験を基に薄鋼板の代表的な成形方法（プレス成形、ロール成形、回転成形、製缶）について成形時の不良現象と材料特性の寄与関係を概観し、そこにみられる共通性を確認し、成形以降の問題にまでその共通性を押し広げるといって薄板の特性認識の総合化の必要性を提起するものである。

## 2. 総合特性の定義と構成

薄鋼板の総合特性とは生産-利用-再生の循環系を効率的かつ経済的に回転させるために必要な諸特性の集りとして定義できようが、このような系の完備あるいはこれより最適の組み合わせを見出すといったことはかなり先の将来問題であろう。

ここでは図1に示すような2次加工とその後に行う処理に対する適性を総合し、薄鋼板の材料選択、成形ならびに諸処理技術の評価を行なうことができる主要特性群を総合特性とよぶ。各過程における諸特性の内容にはかなりの相違がある。例えば2次加工ではバルクとしての力学的特性が重要であるが、脱脂、洗滌、塗装では板の表面諸特性が本質的な役割りを果たす。又、溶接では表面のみならず表層の化学成分が重視される。それゆえ総合特性は非常に多数の複雑な特性で構成されることになるが、そのような構成を細かく提示するのがここでの主旨ではない。むしろ各加工技術部門の協力によつてより単純な要因で総合特性を構成するための論議と研究を行なう場をつくりたい旨を主目的としている。

現実的な総合特性は次の3つの過程を経て究明構築されよう。

\* 昭和51年4月27日受付 (Received April 27, 1976)

\*\* 新日本製鉄(株)君津製鉄所 工博 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

\*\*\* 新日本製鉄(株)本社 (Nippon Steel Corp.)

\*\*\*\* 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

\*\*\*\*\* 理化学研究所 工博 (The Institute of Physical and Chemical Research)

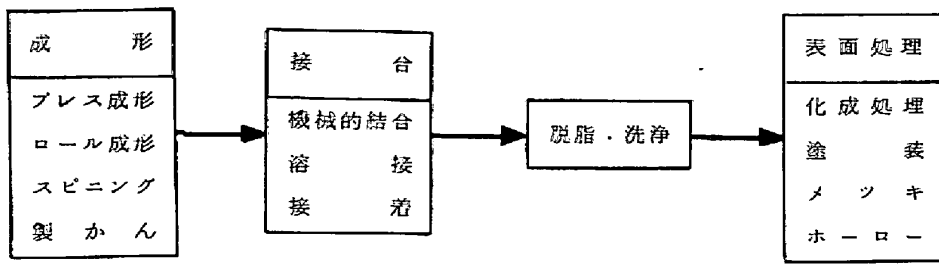


図 1 薄鋼板の加工・処理工程例



図 2 薄鋼板の基本特性の分類

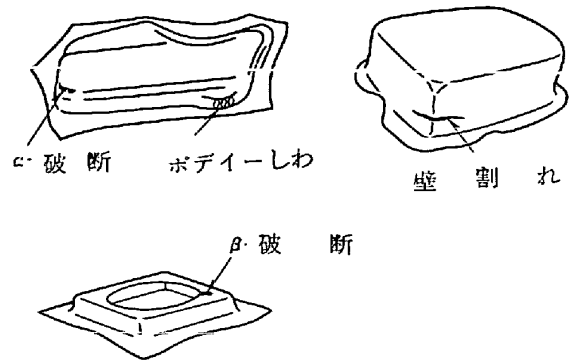


図 3 プレス成形における代表的成形不良

(1) おおのこの成形法内における総合化をはかる。たとえばプレス成形において、破断、しわ、形状不良、表面不良などすべての不良現象を対象にした材料特性の構成を考える。

(2) あらゆる成形法を対象にして共通特性を求める。たとえば2次加工における各種成形法の不良現象に対する材料特性の影響を比較把握する。

(3) 後処理への適応性を広く検討する。2次加工と後処理工程で交絡する要因、特性を調べあげる。詳細な例は今後にまたねばならないが、成形以降の必要特性を2次加工に際する材料選択に組込むためには薄鋼板を図2のように取扱うことが適当であろうと考える。

### 3. 2次加工における不良現象と材料特性の影響

鉄鋼材料の代表的な2次加工(1次加工製品としての薄鋼板に加えられる)方法であるプレス成形、ロール成形、回転成形(スピニング)、製缶などで発生する不良現象およびそれらを支配する材料特性に関する知識と問題点の現状をまとめて述べよう。

#### 3.1 プレス成形

プレス成形においては主として破断と形状性不良の2大不良現象により成形限界が規制される。破断では深絞りや張出し成形で生ずる破断(α破断)、伸びフランジ縁での破断(β破断)、曲げ破断、絞り壁破断(Wall Breakage)などが代表的である<sup>1)</sup>(図3)。形状不良現象の主なものは縮みフランジ部に発生するフランジしわ、ダイキャピティー内で発生するポディーしわ、ひずみと呼び慣らされている微少しわ、弾性回復に起因するスプリングバック、そり、ねじれなどである。

α破断はくびれに続いて生ずる破壊現象として塑性不安定理論の対象ともなっているが、Swiftの拡散くびれ条件式<sup>2)</sup>とHillの局部くびれ条件式<sup>3)</sup>を基盤としてその後幾人かの研究者が不安定理論を展開し、材料のn乗

硬化則や塑性異方性係数を導入することにより種々の応力比における不安定荷重や限界ひずみと材料特性値の関係を導いた<sup>4)~13)</sup>。深絞り成形限界はこの不安定荷重と縮みフランジ力( $P_d$ )ならびにその絞り行程( $s$ )に伴う増加特性の相対関係で定まる。すなわち $P_d$ は $r$ 値と、 $P_d-s$ 関係は $n$ 値と強い相関がある。

高 $r$ 値材の供給に関しては成分元素、圧延条件、焼鈍条件など影響が精力的に調べ上げられるとともに好ましい集合組織が形成される機構もほぼ解明され、実用的に満足すべき材料が相次いで開発されてからもう久しい<sup>14)~16)</sup>。

$n$ 値に関する金属学的な研究も進められてきたが<sup>17)~19)</sup>、特性設計の観点からは相対的に変化させ得る範囲が小さい。しかし材料の加工硬化特性は全変形能の支配的特性であり、かつ変形初期の不均一応力分布状態のひずみの伝播性を決定する因子として、 $n$ 値あるいはそれに変わるべき特性値の重要性はいささかも衰えない。

β破断はおもに自由境界面(せん断面、切削面)の局部延性に支配されるので極限変形態と定義される特性値およびその板面内方向性とよい対応があり、金属学的には結晶粒径や介在物の形態の制御が有効な特性改善方法である<sup>20)~21)</sup>。

通常の鋼板ではヘミング加工のような強度の子変形を受けた部分の曲げ変形でない限り曲げ破断はほとんど発生しない。

壁割れは深絞りにおいてダイス肩で苛酷な曲げ・曲げもどし変形を受けた材料が局所的引張り応力によりせん断引張り破断をおこす現象で、対応策として材料流れの

不均一を避ける方向に成形をもつていくことが提案されている<sup>22)~24)</sup>。材料特性上の有効な破断回避策は見出されていない。

プレス成形で生ずる各種のしわは原理的には不均一な引張り力に起因する塑性座屈現象であるが、発生、成長消滅に至る過程すなわち外型による素板の固定から内型の素板への接触、離脱までの成形工程全般にわたって応力条件が複雑に変化するために解析が著しく困難であり研究データも少ない<sup>25)</sup>。この困難さは板面内ならびに板厚方向の不均一残留応力が原因である弾性回復現象-形状凍結不良についても同様である<sup>26)~29)</sup>。しわや形状不良は比較的成形条件に強く支配されやすいが、材料特性の寄与も決して小さくはない。なかんずく降伏点の形状性不良一般に対する影響は明白で、低降伏点材料の開発がなされなかつたならば、今日日常的な複雑形状の大型外板部品の成形などは容易ではなからうと推測される程である。しかし、しわや形状不良に対する材料特性の効果については明確になつていない面が多い。前述したしわの各段階における材料特性の寄与関係あるいは相補関係、種々のタイプの形状不良における材料特性の影響の定量化等等未検討の問題が残されているが、しわの消去における材料特性の検討など、徐々にではあるが残された壁を突きくずす地道な研究はなお続けられている。

以上のように、プレス成形においては過去の膨大な研究の成果として、成形機構の分類の大筋ならびに成形不良と材料特性の寄与関係が半定量的である場合が多いにしても比較的整然とした形でととのえられているといえよう。しかしながら、これらの分類および関係は成形における不良現象の回避のような対症療法的利用には有効であるが、型設計や材料選択など生産準備のシステム化に必要な predictive な利用形態に対しては限界があることが指摘された。近年、大型寸法、複雑形状成形における成形難易問題への取組みが急速に盛んになり、前述の不良現象の多様化に対する取扱いとも相まって膨大なデータ蓄積がなされている<sup>30)</sup>。手法としても線長増加率などの全体変形量による評価、成形限界ひずみと変形状態図の関係から難易を診断する方法などが複合的に用いられており、最近では成形品の寸法形状因子に材料特性を組み込んで構成される成形判別式にまで発展し、形状あるいは部品種を限れば実用にたえる実験式が得られている<sup>31)~35)</sup>。

### 3.2 ロール成形

ロール成形の成形機構は成形中の材料各部の変形様式により5種類\*に分類される<sup>36)</sup>。いずれの場合も変形量がたかだか1%程度の弾塑性領域にまたがるひずみ量であることが多いため、小さな不均一ひずみ分布によつても容易に形状不良を生ずる。発生する形状不良はひずみ

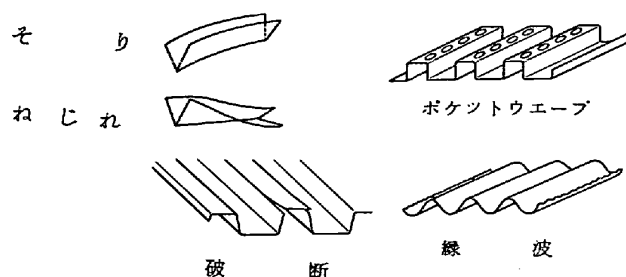


図4 ロール成形における代表的成形不良

の分布状況により「そり」、「ねじれ」などの全体形状不良と「ポケットウエーブ」、「縁波」、「スプリングバック」、「腰折れ」などの局部形状不良に分類される(図4)。これらの形状不良を支配する材料特性として降伏点(Y P)、 $n$ 値、 $r$ 値、弾性率( $E$ ,  $G$ )、降伏伸びおよびバウシinger効果などが考えられる。一般に軟質材(Y P小、 $n$ 値大)では断面形状が得やすいが長手方向の形状不良が発生しやすく、硬質材(Y P大、 $n$ 値小)では逆の結果になること、 $r$ 値の小さい材料ほど幅寄せ時に長手方向の波の発生が少ないことが実験により確認されている<sup>37)</sup>。又、ロール成形中の材料は一度引張り変形をうけた部分が次の工程で圧縮変形を受け、はじめに圧縮変形をうけた部分は引張り変形をうけるという特徴があるので、バウシinger効果の大きい材料ほど長手方向の「そり」が生じにくい事実が指摘されている<sup>38)</sup>。

しかし、こうした挙動も製品形状、ロール形状、パススケジュールなど成形条件に著しく依存するので、材料特性の寄与度の問題は今後の研究にまつところが大きい。

ロール成形において破断の発生が主要なトラブルとなる場合は少ない。しかし冷延未焼鈍材など極度に延性にとぼしい材料の成形ではロール肩に接する引張りないし曲げ変形部で破断することがある。

一般にロール成形においては材料特性のバラツキ以上に板厚分布、板厚変動、板厚バラツキが重要な因子である。

### 3.3 スピニング

スピニングは「絞りスピニング」とフランジ外周を変化させずに板厚減少のみで面積増加をはかる「しごきスピニング」に大別されるが、薄鋼板の成形では前者が主たる対象である。

絞りスピニングにより円筒形状の容器を成形する場合、成形作業能率と不良現象の回避は相反関係にある。能率を向上させるためにピッチを大きくするとロールが材料に食いこんで破断に至り、フランジの外周に近い部分から絞り変形を加えると縮みフランジ部の円周方向の圧縮応力により座屈(しわ)を生ずるようになる(図5)。しごきスピニングのしわの発生条件式として次式が提案されている。

$$\Delta Z/t_0 \geq C \cdot (w/r)$$

\* 1. 巾方向曲げ変形, 2. 面内変形, 3. 巾方向曲げ変形, +面内変形, 4. 巾方向曲げ変形, +長手方向曲げ変形, 5. 巾方向曲げ変形, +巾方向しごき変形

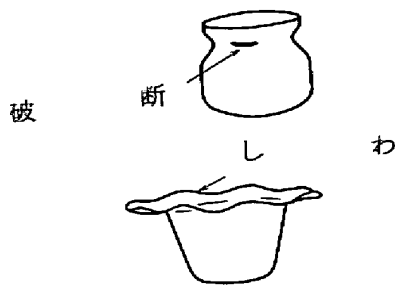


図5 スピニングにおける代表的成形不良

$\Delta Z$ : 1回転あたりの送り量,  $t_0$ : 板厚,  $C$ : 定数,  
 $m/r$ : フランジ幅比である.

上式の関係はフランジ外周に近づくほどしわが発生しやすいこと, しわを避けるためには送り速度を小さくする必要のあることを示している.

成形不良現象の発生形態をみると, 破断は小さい半径のロールによりしごき引張り変形をうけた部分に発生した微小クラックが合体, 成長したものであり, 通常は円周方向に伝播するが鋼板中の巨大介在物がクラック発生の原因となるときは素板の半径方向に伝播する.

この破断形態は金型との接触, 離脱の工程を経てから発生する点でプレス成形における「壁割れ」に類似している. 又, スピニングにおけるしわは縮みフランジ部の円周方向圧縮応力による座屈現象である点でプレス成形における「フランジしわ」に相似しているが, 板面に垂直方向に拘束力を受けないところが特徴的である.

スピニングにおける材料特性の影響に関するデータは薄鋼板の成形の場合ほとんどみられない.

著者らが現場作業員から得た材料特性の効果に関する感触をまとめると, (i)スピニングにおける不良現象と直接対応する機械試験値は認められないが, 延性の著しく劣る材料は加工困難である. (ii)急速に加工硬化する材料は不適當である. (iii)結晶粒の粗大な材料は使いにくい. (iv)大型介在物, 不均質部分の可能な限り少ない材料が望ましい. 以上で概観したようにスピニング性に適した材料はどのようなものかを評価する特性値がまだほとんど見出されていないのが現状であり, 研究の推進が強く要望される場所である.

### 3.4 製かん

食品容器などとしてのかんは構造上から天地のふたと胴からなるスリーピースかんと底と胴とが一体となつたツーピースかんの2種にわけられる.

前者の胴成形において問題となる不良現象は曲げ加工の際の「ダイヤモンド」, 「スプリングバック」および口拡げ時の「フランジわれ」などである(図6). ダイヤモンドは腰折れ現象であるから曲げ作業方式の改善や材料の降伏点伸びの抑制により容易に避けることが可能である. スプリングバックは最近ロールフォーム方式が採用されるようになってから問題が少なくなっている. フラ

### フランジ割れ



図6 製かんにおける代表的成形不良

ンジわれは介在物に起因する場合は多いので素材の圧延方向をかんの周方向に一致させるのが一般的である. かんのふたの成形においては「そり」や「ねじれ」が問題となる.

一方, ツーピースかんの本体(胴と底)は深絞り成形もしくはD I(絞りとしごき)成形でつくられる. プレス深絞り成形においては既に述べたように破断としわの両方を回避する条件, 材料選択が必要である. D I成形の場合は必要な絞り性の性格が異なつて絞り成形時に耳の発生, 小さい材料, 加工部分の伸びフランジ性の劣化の少ない材質が要望される. 又, 板厚精度や後に詳述する表面特性(表面潤滑性, 塗料密着性など)などについてもD I成形用材料にはきめ細かい配慮が必要である.

その他製かんにおける共通の特徴と問題点を素材面にに関してまとめると, (i)板厚が薄い. しわや座屈が生じやすく,  $\alpha$ 破断,  $\beta$ 破断などに対する介在物感受性を高める役割をもたしている. (ii)硬質である. ((i)の効果を助長する.) (iii)メッキ(錫あるいはクロム)が施されている. メッキ層の成形性におよぼす影響はメッキ層が軟質である限りおおむね有利な方向であることが知られている. 最近急激に増加しているツーピースかんにみられる強度の変形を受けた材料の2次成形性におよぼす表面層の効果(レビンダー効果)などは早急に検討されるべき課題であろう.

製かん用材料は特有の材料評価法で処理されているケースが多いが, この方面の高度化も今後の問題である.

### 3.5 2次加工における主要成形方法に関する総合

前節までに2次加工における代表的成形方法の現状と問題点について, 成形時に発生する各種不良現象とそれらを回避するためになし得る材料特性の改善に重点をおき概説した. 各方法を比較し認められる特徴と共通点を以下に要約する.

(1) 各種成形における不良現象は発生機構および発生形態ともに共通しており, 成形法に特有な不良現象は数少ない.

(2) プレス成形における材料特性の寄与形態が極めて多様であるに比して, ロール成形, スピニングなどでは成形条件の支配する度合いが強く, 材料特性の影響の評価は今後の研究課題となつている.

(3) 各不良現象と力学的材料特性の影響関係をまとめると表1のようになる.

表 i 成形不良の支配因子

(\*\* おおいに関係あり, \* 関係あり)

成形様式	成形不良		力学的要因				
			YP	n 値	r 値	極限変形能	パウシंगाー果
プレス成形	破断	α 破断 β 曲げ割れ		** * *	**	** *	
	形状不良	フランジしわ ボディー割れ スプリングバック ねじれ・ひねれ	** * ** *	* * *	** **		*
ロール成形	破断	ロール肩破断		*		*	
	形状不良	全体	そねじり ねじれ	* *	* *		*
		局部	ポケットウェーブ 縁波 スプリングバック	* * **	* * *	*	
スピニング	破断	周方向破断 半径方向割れ		*		* **	
	形状不良	フランジしわ	*		*		
製かん	破断	フランジ割れ α 破断		**	*	**	
	形状不良	スプリングバック そねじり	** * *	* * *			
金属学的要因	結晶粒径 析出物 折非金属 集合組織		** ** **	** * *		** *	* * *

#### 4. 薄板材料の設計と選択における新しい特性認識

3章までに述べてきたことは従来の成形性つまり鋼板のバルク特性が主として関与する現象—についてである。これらの問題については諸成形法間の共通性の認識を含めて、現象の少数基本パラメーターによる一般化あるいは関係の定量化における精密化が進められていくであろう。多数の因子の寄与関係における等価性の追及という形でそのような作業は既に始められている。

さてここ数年、大きな社会情勢の変化により省資源あるいは無公害などトータルの生産システムの変革が要求され、薄板の生産と利用の場においても軽量化、長寿命化などが共通の中心検討課題にとり入れられるようになってきた。その際に従来にない特徴的な変化—特性群の

多様化なかんずく表面特性の重要性の認識—が生じた。

本章では薄鋼板の表面特性および特性の多様化のサーベイに好適な高強度鋼板に例をとつて新しい特性認識の必要性を説いてみたい。

##### 4.1 薄板の表面特性に関する問題

###### 4.1.1 表面不良成形限界

成形にともなう表面性状の変化に規制される従来の成形限界の自然な拡張が可能である。ストレッチャーストレイン、オレンジピール、介在物などの表面への影響などバルクの性質の表面性状の反映に関しては既にかんりの検討が進められている。たとえば肌荒れ限界線についてのユニークで系統的な研究はその代表的な成果例である(図7)<sup>40)</sup>。さらに成形と交絡する後処理性(脱脂以降の諸特性に対する成形加工度、成形様式の影響、あるいはメッキ鋼板における成形時のメッキ層の剝離等)上の問題は表面特性成形限界として上記の概念の延長で限界

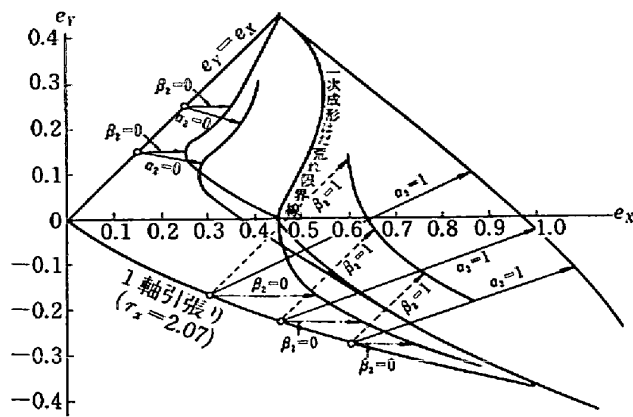


図7 2次成形肌荒れ限界線<sup>16)</sup>

ひずみ又はそれらの組合わせでとらえることができる。

4.1.2 工具との接触摺動による表面不良

前述の自由表面における表面不良現象に加えて、型工具との接触面の表面損傷が注目されている。型かじりあるいは焼付きなどとして知られているこれらの表面損傷は工具と材料間に生ずる塑性摩擦（滑り、凝着、剝離、掘りおこしなどの混合現象）に起因するもので、損傷度は接触面圧、温度、潤滑条件などの作業条件と鋼板および工具材質に依存する。プレス成形、ロール成形などの加工現場において工具の補修、研磨など生産性を著しく減ずる現象であるにもかかわらず、抜本的な検討が比較

的遅れている。最近、自動車部品に対する高強度鋼板の使用に際して成形荷重の増大化にともなう型かじりの多発がきっかけになつて工具と板材の親和性、板材の適正表面あらさ、適正な潤滑剤の使用選択法などの検討が急速になされると同時に表面損傷発生機構の解明の努力が払われている<sup>41)</sup>。図8はそれらの一例で型材と板材の組み合わせにより型かじり現象の形態の移りかわりが巧みにとらえられている<sup>42)</sup>。

しかしながら、総体的には研究の端緒についたばかりであり、たとえば、鋼板の型かじり性評価試験法をとりあげても表2のような諸方法が提案されているが、評価加速条件の妥当性など課題が残されており、今後の研究にまたねばならないところ大である<sup>42)-46)</sup>。

4.1.3 耐食性

製品の耐久寿命に対してかつてないほどの関心が寄せられている今日、耐食性向上に関する各方面の期待は大きく、環境条件の多様さ、諸技術の組合わせの複雑さ、判定基準の問題など適切な対策技術の確立が極めて困難で材料の供給側と利用側との密接なコンタクトによる技術の発展がこれくらい望まれているものはない。

薄鋼板製品の大部分は通常防食あるいは装飾のため塗装を施されるが中間工程として脱脂、洗浄、化成処理などの工程を経るのが普通である(図1)。これらの工程を総合的に配慮した材料の表面性状（表面アラサ、表面層

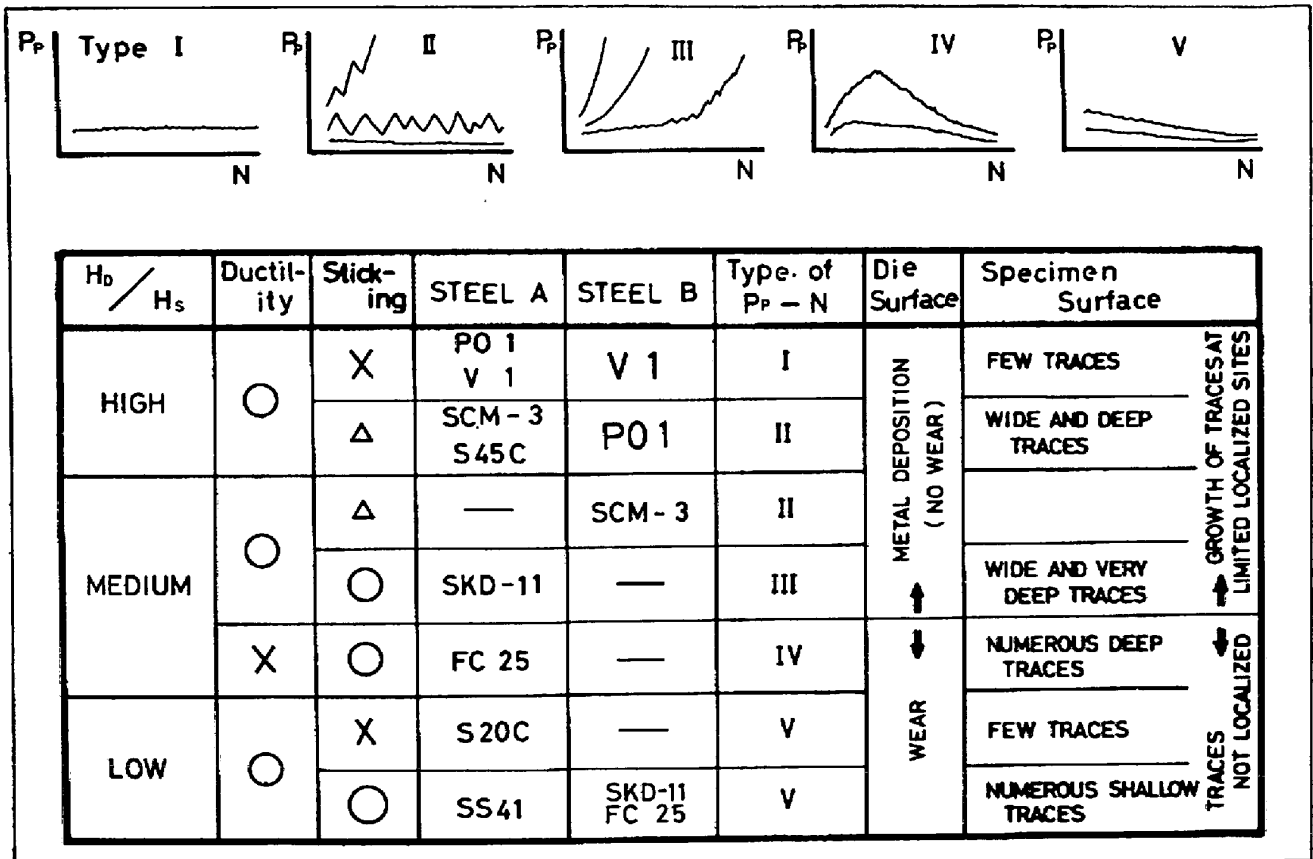


図8 型かじり発生様式と工具鋼板材質の関係<sup>18)</sup>

表 2 各種型かじり性評価試験法の特徴

名 称	接 触 面 圧	限界パラメータ	長 所	短 所
ハット型曲げ成形	5 kg/mm <sup>2</sup> 以下	すべり距離 成形個数	簡 便	試験数が多い
引張り曲げ曲げ戻し法	10 〃	〃	プレス成形に類似	型かじりが発生しにくい
引き抜き法	5~20 〃	面加圧力	面圧測定が容易	条件範囲が狭い
シェーパー法(パウデン式)	10~30 〃	すべり距離	簡便, 判定が容易	変形がない 往復運動
しごき成形	50~100 〃	すべり距離 きずの程度	試験数が少ない	面圧測定が難かしい 低面圧の試験困難

表 3 防食用表面処理鋼板の評価例

(×:非常に問題あり, △:問題あり, ○:ほとんど問題なし)

特 性 材 料	プレス成形		点溶接		素材の耐食性		ED塗装後の耐食性		問題となる特性例
	成 形 性	表面層のはくり	ダ イ レ ク ト	シ リ ー ズ	無 変 形 の 素 材	変 形 を 与 え た 素 材	無 変 形 の 素 材	変 形 を 与 え た 素 材	
冷延鋼板	○	○	○	○	/	/	○	○	
電気 Zn メッキ鋼板	○	○	△	×	△	△	△	△	溶接性, 高度の耐食性
熔融 Zn メッキ鋼板	△	○	×	×	△	△	△	△	成形性・溶接性・化成処理性 片面メッキの可能性
合金化 熔融 Zn メッキ鋼板	△	△	△/○	△	△	△	△/○	△/○	成形性・パウダリング・シリーズ溶接性 片面メッキの可能性

成分, 防錆油, その他メカノケミカルな表面状態) コントロールに関する検討は従来あまりなされていない。これらの検討を組み込んだ新しい塗装系の開発を進める必要がある。

最近, 著しく腐食の進行しやすい部分や塗装のまわりきらない個所を持つ部品に亜鉛メッキ鋼板が多用されている。メッキ層の効果と経済性から熔融亜鉛メッキ鋼板が注目され, 既に通常の冷延鋼板相当の成形性を有する鋼板も開発されている。しかし, 総合的には加工部分の耐食性劣化, 塗装後耐食性が必ずしも改善されない問題, 溶接性の諸問題などの検討課題をかかえた状態で素材と事後処理の優れた組み合わせが模索されている。表3に防食用各種表面処理鋼板の利用者側の評価結果の一例を与える<sup>47)</sup>。

さらに一段と厳しい耐食性の要求される場合にはステンレス鋼板が用いられるが, ステンレス鋼板に関して板の製造と利用の間で共通の関心が持たれている問題として, 低コストのフェライト系鋼板の加工性向上による使用用途の拡大, さらに耐食性の効率化, 適正化を目的とした省資源型新製品の開発等をあげることができる。その他, 鋼板の表層処理に威力を発揮すると考えられるイオンメッキ, イオン打込などの新技術も着実に実用化の

基礎固めがなされているが, 製品開発の照準は当然耐食性向上に合わされよう。

#### 4.2 高強度(高張力)薄鋼板に関する諸問題

エネルギー危機以来, 高強度の鉄鋼材料を用いて製品の軽量化をはかろうという動きが薄板利用の分野でも本格化してきた。船舶や構造物に従来用いられている高張力鋼厚板にくらべ薄ゲージの高強度鋼板には高度の成形性, 溶接性そして耐食性など特徴的な諸特性が要求され又, 従来の設備を用いて製造しなければならないなど鋼板製造上種々の困難に直面している。本節では特性の面から高強度鋼板の現状を概説する。

なお, 強度の高い鋼板を用いることにより可能となる板厚減少量は種々の形態の変形による実験で調べられており, 図9のように整理されている<sup>48)</sup>。

##### 4.2.1 強度~延性バランス

一般に鋼板の場合, 強度と延性は相反関係にあり, 強度を高めると加工硬化特性, 引張り試験における全伸びなどは必然的に低下する。したがって, 高強度鋼板の延性は強度レベルに応じて考えねばならない。又, 図10のように強化構造の違いによりこの関係がずれることが明らかになつており<sup>49)</sup>, 特性の設計法を複雑にしている(図11)<sup>50)</sup>。

深絞り性については引張強さ 50 kg/mm<sup>2</sup> 以下の鋼板では高r値付与設計も可能であり、又、最近開発されている固体潤滑剤を用いるなどの問題点は少ない。

しかしながら、しわの発生や形状凍結不良は鋼板の強度レベル増にもない著しく悪化することは避け難く(図12) 高強度鋼板使用の際の成形上の最大の障害とな

っている<sup>23)</sup>。強化機構コントロールによる低降伏点高強度鋼板が開発されているが、成形技術の改善と協調してうまく使い方を見出すべきであろう。

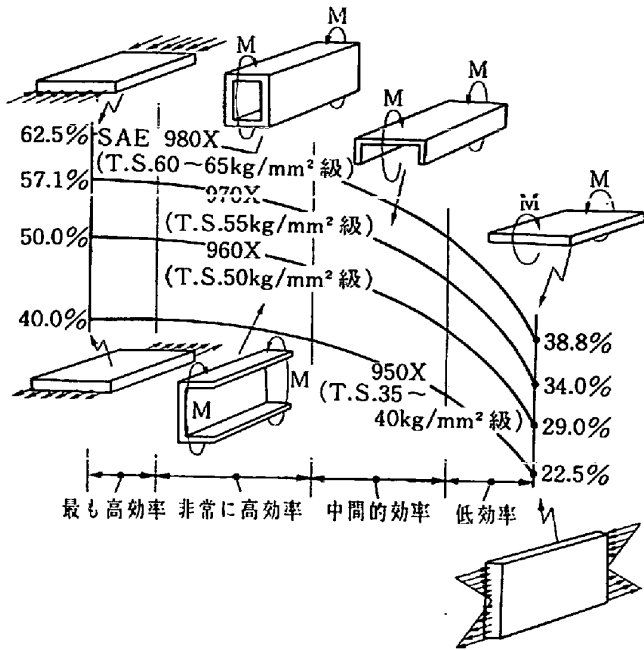


図9 高強度鋼板の利用により可能な板厚減少<sup>21)</sup>

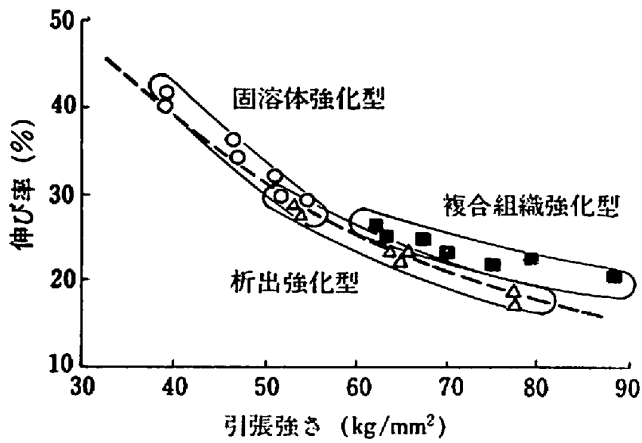


図10 冷延高強度鋼板の強度～延性バランス

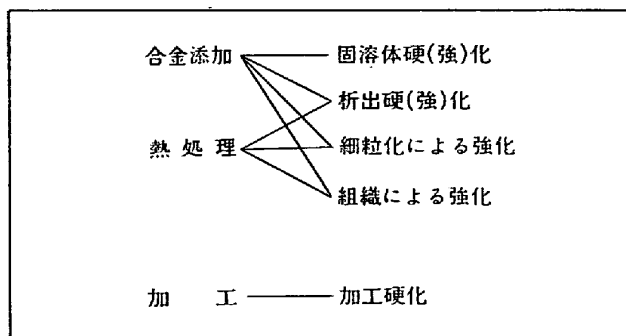


図11 鋼の強化方法と強化機構

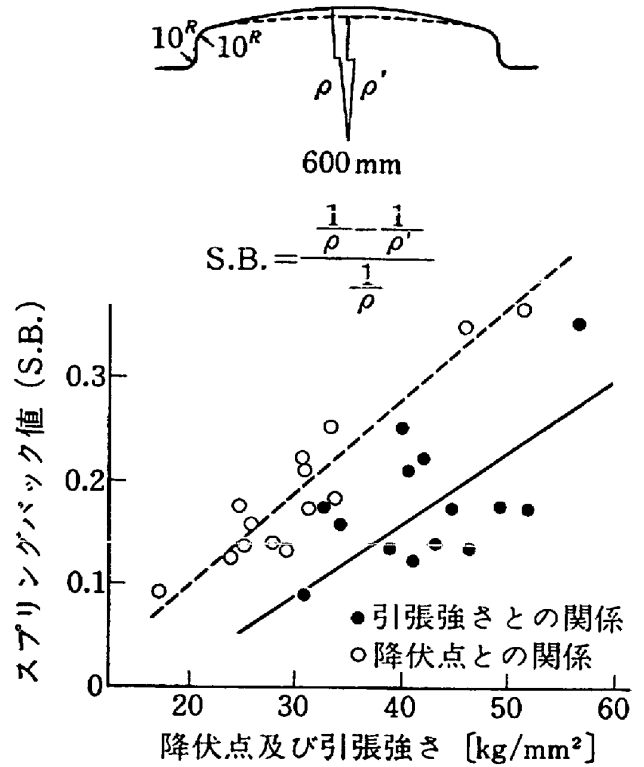


図12 かまぼこ状四角筒成形におけるスプリングバックと鋼板強度の関係

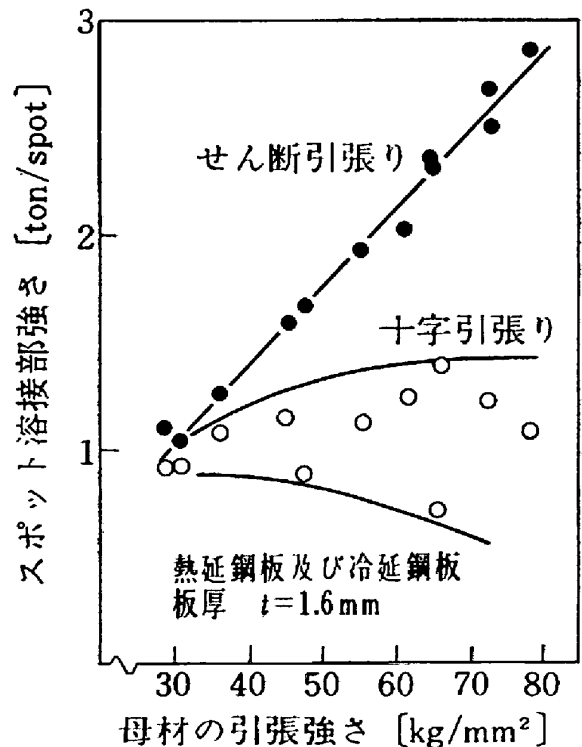


図13 点溶接性と母材強度の関係



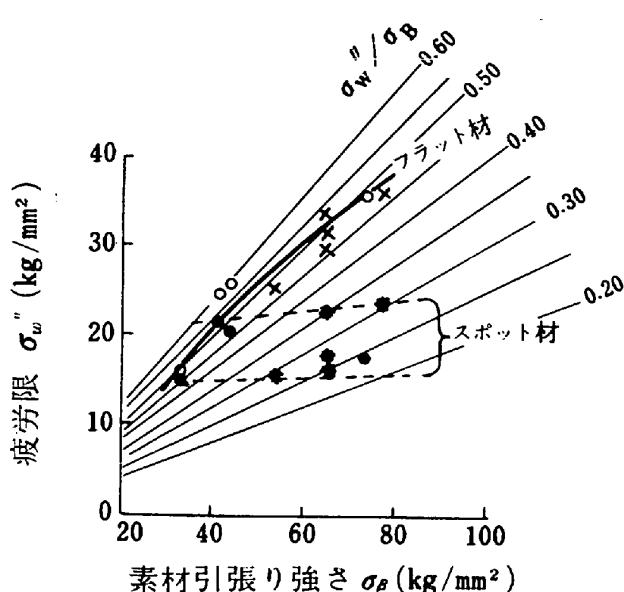


図14 点溶接部の疲労強度と母材強度の関係<sup>24)</sup>

#### 4.2.2 点溶接性 (スポット溶接性)

強化元素が添加される高強度鋼板の点溶接性の問題点は適正溶接条件の狭化と溶接部の垂直方向強度である。図13に示すように溶接部せん断強度は母材強度とともに増加するが、十字引張り強さは添加元素の種類に対する依存性が大きく、むしろ強度が著しく低下する場合がありますので注意を要する<sup>5)</sup>。

#### 4.2.3 疲労特性

鋼板の疲労限は素材の状態では強度の増加とともに上昇するが、点溶接部、強度に変形をうけ部分についての疲労限は強度にあまり依存せず一定であるが、むしろ強度増とともに劣化する方向にある。点溶接部疲労の検討例を図14に示す<sup>51)</sup>。又、強い加工を受けた部分の疲労に関する報告例は少ないが、最近図15に示すような疲労限と曲げ部引張り試験による限界値の対応を利用した方法による調査が進められている<sup>52)</sup>。

#### 4.2.4 耐食性

軽量化をもくろんで板厚を減少させると従来にも増して耐食性が重要になってくる。種々の添加元素の耐食性におよぼす影響、塗装処理性に対する効果などの研究が実車テストなどにより内外でおこなわれはじめています。

又、上述の理由で亜鉛メッキ化はさらに重要になってこようが、メッキの付着性に関しても添加元素の選択に大きな制約がある。前節に述べた通常の鋼板に比してはるかに厳しいこのような条件の下で、満足すべき特性をもつ新製品を開発品質設計するためには製造と利用の境界をとり除いた総合評価体制がほとんど不可欠といえよう。

#### 4.2.5 その他

高強度鋼板の成形時、型かじりが生じやすいことは既に述べたが、添加成分元素の耐かじり性におよぼす影響

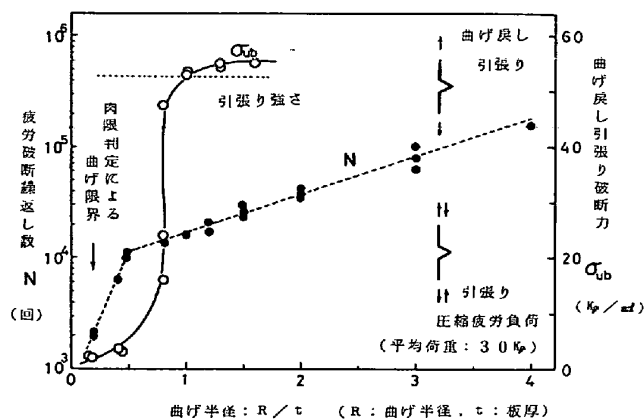


図15 曲げ変形部の疲労限界と曲げもどし強度の関係

等も調べられている。

その他、高強度鋼板の製造プロセス上の最大の問題は連続焼鈍による製造法と製品特性であろう。詳細は既に報告されている<sup>53)</sup>で、特性面の特徴的事項のみまとめると、(i)急冷処理の利用により、少量の添加元素により強度の高い鋼板の製造が可能である。(ii)少ない添加元素で成形性の良好な組織強化型鋼板が製造しやすい。(iii)一様な成形特性の鋼板が得やすい。

## 5. 総括

前章までに述べてきたように薄鋼板に要求される特性は多様かつ複雑になっており、今後もその傾向は深まるであろう。それらの諸特性はたがいに制約的あるいは相補的な関係にあるものを含む。試みに、これまで考察を加えてきた諸特性におよぼす鋼板の化学成分の影響をまとめた例を表4に示しているが、著しくその利害得失がいろいろであることがわかる。今後はこれらの関係をさらに容量化するために鋼板材料の巨視的変形挙動のみならず微規的状态すなわちバルク、表層、表面にわたる知識、情報の集積がはかれねばならない。そして鋼板の製造例と利用側の一層綿密なコンタクトにより解析、検討をくり返す中から、鋼板の総合特性の最適化への集束さらには新しい生産プロセスや画期的な新製品誕生が期待される。

## 文献

- 1) K. YOSHIDA: Sci. Pap. IPCR, 53(1959), p. 1514
- 2) H. W. SWIFT: J. Mech. Phys. Solids, 1(1952), p. 1
- 3) R. HILL: J. Mech. Phys. Solids, 1(1952), p. 19
- 4) S. P. KEELER and W. A. BACKOFEN: Trans. ASM, 56(1963), p. 25
- 5) 久保寺, 中岡, 渡辺, 天満: 塑性と加工, 7(1966) 68, p. 455
- 6) 青木, 山田: 塑性と加工, 7(1966) 67, p. 393
- 7) 中島, 菊間, 長島: 塑性と加工, 9(1968) 89,

表 4. 鋼板の総合特性と鋼中化学成分の関係

--悪くなる -やや悪くなる +やや良くなる ++良くなる \*\* 最適値で良くなる \* 最適値でやや良い

			化 学 成 分											
			C	Si	Mn	P	S	Al	N	O	Ti	Cr	Cu	Total
ブ レ ス	バルク特性	張出し性 (n)	-	-	-	-	--	**	--	--	**	-	--	-
		深絞性 (r)	-	-	**	**	*	**	**	--	**	-	**	**
		延性 (局部伸び)	-	-	-	-	--	-	-	++	**	+	-	-
		伸びフランジ性	-	-	**	**	--	**	-	-	**	+	*	**
		脆形状不良 (局部)	**	-	**	-	--	-	-	--	*	+	-	*
		形状不良 (全体)	-	-	-	-	++	++	-	**	*	-	-	
成 形	表面性状	表面性状	**		*		--	-	-	--	-	-	-	*
		ストレッカ	-	+	**		+	++	--	+	++	+	-	**
ロ ール 形	耐形表	破面	-	-	-	-	+	-	--	-	-	-	-	-
		不性	-	-	*	-	++	-	--	--	-	-	-	-
ス ピ グ ニ	耐形表	破面	-	-	**	--	--	**	-	--	-	-	-	-
		不性	-	-	**	--	-	--	--	-	-	-	-	-
製 か ん	3ピース	伸びフランジ	-	-	**	**	--	**	-	-	-	-	-	**
		深絞り (含加工部)	-	-	**	**	*	**	**	--	-	-	-	**
3 次 加 工	溶接	点シム	--	-	-	--	-	--	-	-	-	-	-	--
		溶解	--	-	-	--	-	--	-	-	-	-	-	--
3 次 加 工	表面処理	素材耐食性	--	-	*	+	+	++	-	-	-	++	++	+
		酸化ハホ脱塗	--	-	*	-	*	--	-	**	*	-	-	*

p. 363

8) Z. MARCINIAK: 5th IDDRG, Trino (1968)

9) 小森田, 吉田: 理研報告, 45(1969), p. 133

10) 林: 塑性と加工, 10(1969) 107, p. 917

11) 久保寺, 中岡, 上野: 塑性と加工, 11(1970)109, p. 134

12) 山田: 日本機械学会誌, 67(1964) 542, p. 453

13) 福田: 塑性と加工, 5(1964) 36, p. 3

14) W. T. LANKFORD, S. C. SNYDER, and J. A. BAUCHER: Trans. ASM, 42(1950), p. 1197

15) R. L. WHITELEY: Trans. ASM, 52(1959), p. 154

16) R. S. BURNS and R. H. HEYER: The Annealing of Low Carbon Steels, (1958), p. 29

17) W. B. MORRISON: Trans. ASM, 59(1966), p. 824

18) D. J. BLICKWEDE: Trans. ASM, 61(1968), p. 653

19) 増井, 河原田, 武智: 鉄と鋼, 58(1972) 8, p.68

20) 細野, 中川, 吉田: 塑性と加工, 9(1968) 92, p. 637

21) 中川, 滝田, 吉田: 塑性と加工, 11(1970) 109, p. 142

22) 岡本, 林: 塑性と加工, 7(1966) 70, p. 584

23) 中川, 古川, 吉田: 第 20 回塑加連会前刷, (1969), p. 313

24) 高階, 小森田, 西本, 山田: 第 20 回塑加連会前刷, (1970), p. 347, p. 351

25) K. YOSHIDA, H. HAYASHI, K. MIYAUCHI, K. ABE, M. USUDA, Y. OIKE, and R. ISHIDA: Sci. Pap. IPCR, 68(1974), p. 85

26) 吉田: 塑性と加工, 5(1964) 37, p. 56

27) 津山, 昌谷, 阿部, 吉田: 理研報告, 41(1965), p. 16

28) 山口, 岡, 吉田: 理研報告, 40(1964), p. 55

29) 津山: 塑性と加工, 6(1965) 58, p. 607

- 30) 花井, 佐藤, 小森田, 菊間: 塑性加工春季講演会前刷, (1973), p. 207
- 31) 吉田: 第9回西山記念講座, (1974), p. 103
- 32) 飯田: 同上, (1974), p. 131
- 33) 小林, 村田, 石垣: 塑性と加工, 10(1969) 106, p. 793
- 34) 菊間, 蓮香, 中島: 日本機械学会論文集, No. 710(1971) 18, p. 49
- 35) 薄鋼板成形技術研究会資料, (1974)
- 36) 木内: 特殊鋼, 22(1973) 9, p. 1
- 37) 木内: 生産研究, 24(1972), p. 310
- 38) 加藤: 塑性と加工, 16(1975) 176, p. 802
- 39) 葉山: 塑性と加工, 10(1969) 105, p. 701
- 40) 小林, 村田, 石垣, 阿部: 11(1970) 114, p. 495
- 41) 岩崎: 第51回塑性加工シンポジウム, (1975), p. 52
- 42) 戸来, 江嶋: 鉄と鋼, 61(1975)11, S 575
- 43) 林, 西原, 須藤: 鉄と鋼, 60(1974) 11, S 482
- 44) 武智, 増井, 河野, 白田, 藤井, 佐藤, 小甲:
- 45) 鉄と鋼, 61(1975) 4, S 169
- 46) 吉田, 宮内, 池: 塑性加工春季講演会前刷, (1975), p. 105
- 47) 薄鋼板成形技術研究会資料, 昭和50年度, No. 41
- 48) D. C. YOUNGER: 16th Mechanical Working and Steel Processing Conference (AIME), (1974)
- 49) 増井, 武智: 鉄と鋼, 60 (1974) 2, p. 284
- 50) 花井, 佐藤: 塑性と加工, 15 (1974) 166, p.885
- 51) 田海, 戸来, 坂本: 鉄と鋼, 60 (1974) 11, S 547
- 52) 今富, 池, 土居, 吉田: 塑性加工春季講演会前刷 (1975), p. 129
- 53) M. ABE: Heat Treatment '73 (The Metals Society), p. 172