冷間圧延薄鋼板

武智 弘*・松村 理*

Cold rolled steel sheet

Hiroshi TAKECHI* and Osamu MATSUMURA*

1. 冷間圧延鋼板とその製造方法

冷間圧延鋼板は、自動車をはじめとし、建材、家具、電気器具等きわめて多方面に使用されている。とりわけ自動車向けには全冷間圧延鋼板（以下冷延鋼板または単に鋼板と略称）の60%強が使用されている（図1）。例を自動車にとり、その材料構成比を示したものが図2で、鋼全体として車体重量の75%強、そのうち冷延鋼板は表面処理鋼板を含めて35%以上も占めていることがわかりになると思う。

冷延鋼板は単純なパネル用として使用されることもあるが、主に自動車における外板などきびしいプレス成形を経る用途に使用されることが多い。以下冷延鋼板の具備すべき特性としてプレス成形性を中心に話を進めて行くこととする。表1には自動車における冷延鋼板の具体

的な用途を示してある。ここで一般用とは、表面が美麗で最も需要の多い品種で曲げ加工や簡単な絞り加工も可能な鋼板で、主に平板に近い用途に使用されている。絞り用は絞り性の優れた鋼板であり、深絞り用は絞り性の点でさらに優れ、結晶粒径調整などにより深絞り加工後も美しい肌が得られる。非時効深絞り用は、深絞り性において最も優れるとともに、非時効化のため配慮し、いわゆるストレッチャー・ストレインの生じない鋼板である。以上はJISに規定してある冷延鋼板であるが、その他にも低降伏点、低降伏比を特徴としプレス時の形状性あるいは張剛性（成形面に法圧をかけた時のたわみ）に優れる低降伏点鋼板、深絞り性においてJIS鋼板をしのぐ超深絞り用鋼板、それに近年安全性、エネルギー節約の要請から登場し、強度を上げなおかつ成形性も保証した数々の高強度冷延鋼板があり、適材適所に使い分けら

図1 冷延鋼板用途別受注比率¹⁾

図2 自動車の材料構成（重量比）¹⁾

* 新日本製鉄(株) 第2技術研究所 薄板研究センター（相模原市）。Sheet & Coil Research Div. R & D Laboratories. II. Nippon Steel Corporation. (Sagamihara).

表1 自動車における冷延鋼板の用途²⁾

規格	記 号	主 な 用 途
JIS	S P C C (一 般 用)	(一般用) 加工板の軽いフェンダー、ドア、サイドパネルなど
	S P C D (絞 り 用)	(絞り用) 自動車のルーフ、ボンネット、トランクリッド、フェンダーなど
	S P C E (深絞り用)	(深絞り用) 自動車のフロントパネル、リアフェンダーなど
	S P C E N (非時効性) (深絞り用)	(時効性を問題とする部品) ホイールキャップ、サイドパネル 深絞り外板部品等 (加工性を問題とする部品) フェンダー、ランプ、ボディー等
	低 降 伏 点 鋼 板	(形状性を問題とする部品) ドア、ルーフ、パネル、ボンネット、トランクリッド等
	超 深 絞 り 用 鋼 板	自動車用フェンダー、センタービラー等
	高 強 度 硬 板	(デント性を問題とする部品) フェンダー、ドア (強度を問題とする部品) バンパー、ドアガードバー メンバー類

図4 プレス成形の基本形態

狙いの厚み、幅に圧延する。冷延鋼板向けとしては均一結晶粒組成を得るために、 A_3 変態点 ($\gamma \rightarrow \alpha$ 変態) 以上で終了するよう管理されている。スケールを酸洗除去したのち、冷間 (常温) で圧延し、所定の最終製品の厚さとする。冷間圧延されたままのものは加工ひずみを蓄積し、このままでは硬くかつ加工性に乏しい。したがってこれを $600^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ に加熱し再結晶組織とする。再結晶組織は軟かく加工性に富む。以下形状調整とストレッチャー・ストレイン防止を兼ねて軽圧下 (調質圧延) をかけたものを市販に供する。以上の各工程は冷延鋼板の材質を制御する重要な工程であり、厳しい管理が必要とされている。

2. 冷延鋼板のプレス成形性

2.1 プレス成形性とは

冷延鋼板のプレス成形の様式は多種多様である。その基本は図4の示すような深絞り成形と張出成形に分けられるが、実際のプレス成形ではこれらが複合された成形になることが多い。この他にも曲げ性や伸びフランジ性などが必要で、とくに鋼板が高強度化するにともない重要性を増してくる。所望の形状に成形できるかどうかの話とは別に、プレス後の表面性状を問題とする場合もある。表2はプレス成形の場で具体的なクレームとして出てくる不良現象と、それに対応して鋼板に要求される性質および評価試験方法を示したもので、冶金学的な意味での対策とそれに関連する製造工程も併せて記している。

プレス成形に関わる各論に入る前に、まず冷延鋼板の強度および強度と成形性のバランスの問題に触れておきたい。

2.2 冷延鋼板の強度および強度と成形性のバランス

冷延鋼板のみならず一般に鋼材の加工性の良し悪しを判断する場合、同一強度レベルでの加工性の良し悪しを比較する。これは需要家においては、加工しやすさ以前に強さ (TS: tensile strength, YS: yield stress など) を設

図3 冷延鋼板の製造法

れている。

冷延鋼板の製造工程の概要を図3に示した。製鋼工程は転炉等を用いて所望の化学成分に調整する役割りを果しており、従来造塊一分塊法で行われていたものが、現在ほとんど連続製造法に代っている。熱延工程では素材スラブを加熱し、高温での鋼の変形しやすさを利用して

表 2 加工用冷延鋼板に要求される特性²⁾

不良現象	要求される性質	試 験 値	関連機械特性・要因	冶金学的対策	管理を必要とする製造工程				
					製鋼	熱延	冷圧	焼なまし	調圧
割 れ	深 絞 り 性	限界絞り比 (LDR) コニカルカップ値 (CCV)	$\bar{r}$ 値	集合組織の改良	◎	○	○	◎	
	張 出 し 性	エリクセン値 (E)	n 値, 伸び	結晶組織, 成分の調整	◎			◎	○
	伸びフランジ性	バ ード率	$\bar{r}$ 値, 伸び, 幅絞り 極限変形能	集合組織の改良, 介在物の低減	◎	○	○	◎	
	曲 げ 性	最小曲げ半径	伸び極限変形能	介在物の低減, 球状化	◎			○	
し わ	耐座屈性など		降状点, 引張強さ, n 値	結晶組織, 成分の調整	◎	○		◎	○
形状不良 (スプリング バックなど)	形 状 凍 結 性		降伏点, n 値	結晶組織, 成分の調整	◎			◎	○
ストレッチャ ストレイン	耐 時 効 性		降状点伸び	固溶 C, N 量の低減 (アルミキルド鋼の使用など)	◎			◎	◎
肌あれ (オレンジ ピール)			結晶粒度	結晶粒の細粒化	○	◎		◎	
強度不足	耐デント性など		降状応力 BH	強化元素の添加など	◎	○	○	◎	
脆性割れ	耐 2 次加工脆性	加工後遷移温度など	結晶粒度, 成分	P, O 量の低減と C 量の調整	◎			◎	
線状凹凸欠陥			鋼板の均質性	介在物の低減, 偏析防止	◎	○		○	

注) ◎印特に重要, ○印重要

図 5 冷延鋼板における強度と伸びの関係

計の基準とする場合が多いからである。冷延鋼板について強度と全伸びとの関係を示したのが図5である。ここで細粒強化とは結晶粒を細かくすることによる強化法、固溶強化とはC, Nなど侵入型固溶元素やSi, Mn, Pなど置換型固溶元素による強化法、析出強化とはTi, Nb, Vなどの炭窒化物による強化法、加工強化とは圧延などによるひずみ導入にもとづく強化法、そして変態強化とは、マルテンサイトやペーナイトなどの変態組織を利用した強化法である。

まず冷延鋼板の強度はTS 35 kg/mm²以下のJIS極軟鋼板のレベルからTS 100 kg/mm²以上の超高強度鋼板のレベルに至る広範囲での製造が可能であることが目をひく。この中には特殊鋼と称されるものは含まれておらず、他の金属では見られぬ鉄鋼の持つ際だった特徴である。つぎに冷延鋼板全体としてみても個々の強化機構に着目しても強度が上れば全伸びが低下すること、また同一強度レベルでも個々の強化機構次第で全伸びがかなり異なることが示されている。

この図のような整理方法は1970年代になって高強度の自動車用鋼板の実ライン製造が開始される頃から重用され始めたもので、以来強度—延性バランスという言葉が鋼板の成形性—とくに高強度鋼板のそれ—のいわば代名詞のように使用されてきた。フェライトとマルテンサイトの二相より成る鋼 (Dual Phase 鋼) は、析出強化型や固溶強化型の鋼より50~80 kg/mm²級で優れた強度—延性バランスを有する鋼板として、一時期鉄鋼各社でしのぎをけずって開発に努めた経緯がある。強度—延性バランスは通常TS×EIの値で評価されるが、必ずしも正確な表現とはいえず、種々の補正が試みられている。

強度—延性バランスの延性尺度としては、必ずしも図5のように全伸びを採用する必要はない。 n 値であれ伸びフラジ性であれ、また n 値であれプレス成形性にかかわる諸特性を強度と対応させて整理すると、おおむね強度が上れば成形性は劣化する。実用的には強度と成形性のバランスで評価することの重要性を念頭においていただくこととして、以下冷延鋼板のプレス成形性およびその支配要因を説明して行きたい。

2.3 延性もしくは張出性

延性という概念は非常に幅広いもので、どこまでを対象とするか問題のあるところで、例えば同じ鉄鋼でも厚板屋 (6 mm以上) と薄板屋では延性という言葉で具体的に抱くイメージが異なる。ここでは冷延 (薄) 鋼板が対象であるので、プレス成形における張出性という観点に絞りたい。

張出性は引張試験での全伸びの値やエリクセン値で評

図6 Fe基合金の n 値^{(3)~(6)}

価されることもあるが、引張応力—歪曲線が次式

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (1)$$

σ : 真応力, ε : 真歪, k : 定数

で近似できるときには、 n の値が均一伸びの値に等しくなるので、この n 値を加工硬化指数と称して延性の指標として用いる。 n 値に及ぼす合金元素の添加効果を調べた例は非常に多く、これらをまとめて示したのが図6である³⁾。合金元素の添加によって一般に n 値は低下するので、延性向上のためには鋼の純化が基本的な方向と考えられている。鉄基二元合金で合金元素量が増すと軟化し伸びも増大する現象がしばしば報告されている⁷⁾が、常温で起る場合の多くは合金元素が地中に固溶するC, NやSなどを固定し、地を清浄化 (scavenging) するためである⁸⁾とされており、結局は地鉄の純化により延性向上がなされている点で変りはない。

図6に示したような合金元素による n 値の低下は、(1)直接合金元素にもとづく効果と(2)結晶粒径を介した間接的效果に分離して考えるべきであろう。Morrison⁹⁾は n 値におよぼす結晶粒径の効果を調べ、 $n = 5 / (10 + d^{-1/2})$ の関係を得た。増井⁵⁾らはさらに直接効果と粒径効果の分離を試み、

$$n = 10 / (10 + \sigma_i + 1.3 d^{-1/2}) \quad (2)$$

なる関係を示した。ここで σ_i は粒径以外の強度支配因子、つまり合金元素による直接効果で同一合金元素量でも強化機構によって異なるはずのものである。結局 n 値 (= 均一伸びの大きさ) は鋼板の強度水準: $\sigma_i + 1.3 d^{-1/2}$ が上れば低下することになる。これは先に述べた強度—延性バランスの補正式の一つの例であるといえる。

張出性を評価する尺度としての n 値の妥当性を示す例を図7に掲げた。 n 値と張出性との相関は、鋼板 (体心立方金属) のみならず、結晶形の異なるAl, Cu, 黄銅 (いずれも面心立方金属) に対しても共通して成立つも

材料：0.9 mm 厚

素板：径33 mm にて完全クランプした純粋張出し

工具： $2r_1=20$ mm, $2r_2=23$ mm, $r_d=2$ mm

油圧自動エリクセン試験機

図7 ポンチプロフィール半径ならびに潤滑条件の違いの場合の n 値と限界張出し深さ¹⁰⁾

のであることがうかがえる。ただし n 値を評価尺度とする場合、式(1)による近似度の問題、つまり一般に n 値は対象としたひずみ域で異なった値をとること、とくに2相鋼などはひずみ域の違いで n 値の変化が大きいので扱いに注意が肝要である。

2.4 粒界脆化と2次加工性

n 値の向上には鋼の純化が基本的な方向であると述べたが、 C を減らすため脱炭焼鈍を施すと粒界が脆化し、伸びが減少する事実は古くから知られていた。例えばリムド鋼を脱炭焼鈍して C を0.001%程度に低減させると低温での伸びがいちぢるしく低下するが、浸炭すると伸びが回復する¹¹⁾。この現象の説明として粒界はもともと脆く、 C はこれを強化する効果を持つという見解がある¹²⁾。鋼中 P は熱処理次第で平均濃度の数十倍の粒界偏析を生じ、これによっても粒界は脆化する。もし C に粒界強化作用があれば、粒界にある程度の C を残しておけば P の粒界脆化を防止できるはずである。事実図8に示すように P 含有量が多いほど粒界脆化防止に必要な C の臨界量が増大することが確かめられている。

超深絞り用鋼板のように C , N を極端に減らした鋼板のプレス成形において、1次加工で圧縮変形を受けた場

図8 粒界強度に及ぼす C , P の影響
(液体窒素中引張)¹³⁾

所が2次加工で引張変形を受ける場合に粒界脆化は顕在化するので通常2次加工性と呼ばれることが多い。この対策として微量 B を添加する方法が提案されている¹⁴⁾。このように n 値の向上を目指した真空脱ガスによる高純化は、 P など粒界脆化元素も考慮した上で実施されねばならない。

2.5 r 値と深絞り性

深絞り性の評価尺度としては r 値がよく用いられている。 r 値は引張試験である一定量のひずみ(例えば20%)を加えたあとの幅方向ひずみ(ϵ_w)と厚さ方向ひずみ(ϵ_t)の比として定義される。

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t = \ln(W_0/W) / \ln(t_0/t) \quad (3)$$

W_0, t_0 : 引張前の試験片の幅および厚さ

w, t : 一定引張を与えた後の幅および厚さ

r 値は引張方向によって異なった値を示すので、例えば鋼板の圧延方向と $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ をなす3方向で得られる r 値を平均し、これを $\bar{r}$ 値として実際の材質評価に用いている。通常リムド・キャップド鋼の $\bar{r}$ 値は1.2程度、アルミキルド鋼 (SPCE, SPCEN クラス) のそれは1.6~1.8程度、極低炭化し Ti や Nb を添加した超深絞り用鋼になると2.0を超える。

$\bar{r}$ は鋼板の集合組織(結晶方位)と密接な関係にあり、集合組織の方位成分として $\{111\}$ が多く $\{100\}$ が少ないほど $\bar{r}$ 値は増大し、深絞り性は向上する¹⁵⁾。

冷延鋼板の集合組織を制御する技術は数多く提案されている。これらの技術は鋼の化学成分と密接に関連し、大きく分けて鋼を純化する方向と、合金元素を利用する方向の異なった二つの流れがある。ただし、集合組織的に調整を行っても結晶粒が微細な場合は $\bar{r}$ 値向上の効果を得られないという見方もある。図9は集合組織の効果と

図9 $\bar{r}$ 値と結晶粒径との関係¹⁶⁾ 図10 r 値と L.D.R.¹⁷⁾

結晶粒径の効果を分離して示したものである。粒径が大きくなると $\bar{r}$ 値は大きくなる。各鋼種間の $\bar{r}$ 値レベルの違いは集合組織の効果を示すものである。冷延鋼板の強度が高くなるにしたがって $\bar{r}$ 値を高めることは困難になる。これは必然的に合金元素量が増すため集合組織を制御する上で高純化効果に逆行することと結晶粒が微細化することによるものである。

図10は $\bar{r}$ 値と L.D.R. (限界絞り比) の関係を示す例である。L.D.R. とは深絞りの際に割れを発生させないで絞ることができる限界を示すもので、blank 径 D と割れずに絞られる円筒の直径 d の比 D/d で表わされて、深絞り性の一つの尺度である。各種の金属板を鋼板(体心立方)、アルミニウムおよび銅板(面心立方)、およびチタン板(六方晶)にグループ分けしてみると、それぞれのグループ内では $\bar{r}$ と L.D.R. の相関が強いこと

図11 穴上げ限界と清浄度、介在物数との関係¹⁸⁾

がわかる。各グループ間の差違については、鋼板では $\bar{r}$ 値増に伴い破断力が増加するため相関が強く、アルミニウムや銅板などでは逆に破断力が減少するため相関が弱いと理解されている。非鉄材料ではしばしば深絞り性に $\bar{r}$ 値は効果がないという報告もなされているようである。

2.6 伸びフランジ性

伸びフランジ性は板中央部に穴(直径 d_0)をあけた素板を金型ポンチで穴上げし、穴縁に破断が発生した時点での成形高さ、あるいは穴上げ率 $\lambda = (d - d_0)/d_0$ で評価される。穴の加工法として打抜きと切削があるが、打抜きの場合は穴縁にせん断加工による加工硬化層やマイクロクラックが形成されるため、切削加工の場合と比較して伸びフランジ性は劣る。伸びフランジ性の支配因子として、切削穴の場合には $r_{\min}$ (r 値最少方向の r 値) や Δr (r 値の面内異方性) が考えられているが、実際上はせん断打抜き穴の場合が重要で、図11に示すように穴縁に存在する介在物、析出物等の硬質第2相によるクラックの生成・伝播が支配要因になるものと思われる。

通常のプレス成形でよく行われる例の一つにバーリング加工(フランジ立て)がある。半径 r_0 の穴を中心部に持つ素板を半径 ρ の位置でフランジ立てする場合、最大成形高さ $h_{\max}$ は穴上げ率 λ を用いてつぎのように表わされる¹⁹⁾。ただし、 r_d はダイス肩半径である。

$$h_{\max} = \{0.905 - 0.915/(1 + \lambda)\} \cdot \rho + 0.58 \cdot r_d \quad (4)$$

鋼板の高強度化が進められ TS 100 kg/mm² を超える超高強度鋼板が登場している現在、従来軟鋼板で得られた見解が必ずしもうまく適合しない例が見受けられ、新しい観点からの検討が要請されている。その一つとして、従来軟鋼板では無縁と考えられていた靱性の問題もからんでくるように思われる。

曲げ性についての詳細は省略するが、剪断縁(近くの

介在物)が問題になる点、高強度化するにつれて介在物など硬質第2相の影響が大きくなる点など伸びフランジ性と似かよった点が多いことを述べておく。

3. 冷延鋼板のプレス成形後の表面性状

3.1 肌あれ (オレンジピール)

表面性状の問題は成形後の鋼板の美観の問題であり、われなど材質上の問題とは原因、対策とも異なる面があるので章を分けて述べることにする。

まず肌あれから述べる。結晶粒が大きいと $\bar{r}$ 値や n 値が増しプレス成形に好ましいことはすでに述べた通りであるが、結晶粒が極端に大きくなると板表面に結晶粒オーダーの凹凸が現われ美観をいちぢるしく損ねる。これを肌あれと称し粒度番号6~7番以下の粗粒鋼でとくに目立ってくる。結晶粒サイズよりもはるかに大きく圧延方向に長く伸びた凹凸が現れることもある。これは主にフェライト系ステンレス鋼板で見られる現象であるが、普通鋼板でも認められる場合があり、リジングと呼ばれている²⁰⁾。肌あれもリジングも要は結晶粒同志もしくはコロニーと呼ばれる同一方位に近い結晶粒群同志の塑性変形のくい違いによって生ずるものであり、組織の微細化により解決される問題である。成形性向上のための結晶粒粗大化には上限があることに注意すべきである。

3.2 ひずみ時効とストレッチャー・ストレイン

調質圧延を行わないままプレス成形するとストレッチャー・ストレインと呼ばれるひずみ模様が現れる。これは引張試験における降伏点伸びの発生に対応し、その原因として焼鈍後の冷却中に転位が固溶 C 、 N によって固着され²¹⁾、可動転位が減少することによるとされている。

降伏点伸びをなくすためには最終焼鈍後に1%前後の調質圧延を加えて可動転位を増す処置が有効である。しかし、鋼中の固溶 C 、 N が多いと調質圧延後長時間放置しておく間に転位が再び C 、 N で固着され、降伏点伸びが再度現われ、ストレッチャー・ストレインが発生する。これが一般にひずみ時効と呼ばれている現象である。

ひずみ時効の原因である固溶 C 、 N の量は通常内部摩擦法で測定されるが、ひずみ時効による降伏応力の上昇を利用して、図12に示すように予ひずみ・人工時効後の変形応力増を求め、これをひずみ時効指数としてひずみ時効の程度を予測評価する方法もある。この図のようにひずみ時効指数は固溶($C+N$)量に比例している。図13はひずみ時効による降伏点伸びの増加が結晶粒径の小さいほどまた固溶 N の量が多いほど大きくなることを

図12 固溶C+Nによる歪時効指数の変化²²⁾

図13 40°Cひずみ時効後の降伏点伸びに及ぼす N (ppm)と結晶粒径 d (mm)の影響(キャブド鋼)²³⁾

示している。

ひずみ時効によるストレッチャー・ストレインを防止するために種々の固溶($C+N$)低減策が講じられている。従来から N についてはAlを添加してAlNとして固定しており、また C については真空脱ガス法によりあるいはTiなど炭化物形成元素を添加することにより固溶 C を低減する。これらの処置が同時に $\bar{r}$ 値や n 値の向上にも寄与していることはすでに述べた。

3.3 面ひずみ

高強度冷延鋼板(35~40 kg/mm²)が自動車外板に適用されるに及んで大きくクローズアップされたのが面ひずみの問題である。面ひずみとは成形部品の形状が急激に変化する部位の周囲(例えばドアの把手周辺)に発生する落差が数十~数百 μ m程度の凹凸で、パネルのある

図14 目視検査の様子²⁴⁾

方向から見たときに光の反射ムラが生じるものをいう。よく似た現象にしわがあるが、これは凹凸の高さが0.2 mm 以上を指すとされている。しわはパネルの観察により発生部位およびその程度を容易に判定できるが、面ひずみは熟練した検査員の目視および触感によるいわゆるカンで評価される (図14)。

面ひずみの防止策として、成形条件からの対処と材料面からの対処がある。一般に鋼板の強度が高いほどまた板厚が薄いほど発生しやすい。外板の薄手軽量化を狙いとする高強度鋼板の普及と同時に面ひずみの問題が再燃した由縁である。各種材料特性と面ひずみとの関係を調べた結果によれば、面ひずみに最も強く影響する因子は降伏点 (σ_y) または2%耐力 ($\sigma_{2.0}$)、場合によっては比例限であり、通常の n 値、 r 値等は相関が弱いことが判明している。いずれにしても面ひずみ発生位置の変形量は小さく、それに相応して低ひずみ域でのひずみの伝播しやすさ (加工硬化係数) が関係しているようであり、所期の TS を保ちながら降伏応力や比例限を下げる処置が有効である。

4. プレス用冷延鋼板の新しい展開

以上、冷延鋼板のプレス成形性をオーソドックスに通観してみても、プレス成形性は強度レベルを固定する限り限界があり、プレス成形性を向上させると強度レベルが下るという宿命を逃れられぬとの印象を強く持つ。しかしながらこの隘路を切り抜ける方策として全く新しい観点からのアプローチも試みられており、つぎにいくつかの例を紹介する。

4.1 温間成形

深絞り加工は通常常温で行われるが、ポンチとダイスおよびしわ押えとの間に温度の差を付与することにより、成形限界を向上させることができる。図15は温間深絞り加工の考え方を模式的に示したもので、ポンチ肩部 (われ発生位置) を冷却し、この位置での破断抵抗を高い値に保ちながら同時にダイス部 (フランジ部) を加熱

図15 円筒深絞り成形での温度勾配付与の考え方²⁵⁾

することにより変形抵抗を低減することが狙いである。とくに固溶 ($C+N$) の大きい鋼板は青熱ぜい性での TS 変化が大で、室温成形時の超深絞り用鋼板 (極低炭 Ti 添加鋼) よりも優れた成形高さを示す。いい換えれば、最も安価な鋼板が温間加工用に適しており、しかも従来法の最高級鋼板よりも優れた成形性を示すことになる。

温間成形法は既にステンレス冷延鋼板については広範囲に採用されている。もし普通鋼においても経済的に成り立つものであれば、従来のプレス成形用鋼板の枠にはまらぬ鋼板体系が可能となる。成形方法・条件の柔軟な撰択ないし工夫により難かしい成形が容易になり、かつまた素材を提供する側にもインパクトを与えることを示す一つの例である。

4.2 BH 鋼板

図16(a)に示すように、プレス成形する時は鋼板の降伏応力はできるだけ低い方が面ひずみの発生は少ない。しかし自動車の外板として使用する時は走行中異物が当たっても凹まない性質 (耐デント性) が要求される。この性質は同図(b)に示すように焼付塗装後の降伏応力が高いほど良好である。すなわち自動車用外板としては降伏応力に関して互いに矛盾した二つの要求を満たす鋼板が望まれる。耐面ひずみ性と耐デント性を同時に満足するすべとして BH (Bake Hardenability) 鋼板が開発された。

この種の鋼板として最も出回っている P 添加アルミキルド鋼を例に説明しよう²⁶⁾。通常のアルミキルド鋼に強度を上げるために P を 0.04~0.08% 程度添加しても r 値を損なうことなく 35~40 kg/mm² の強度を有する冷延鋼板が得られる。この時 C 量と焼鈍条件を適宜選択すれば、プレス成形時には軟かくて成形しやすくかつ面ひずみやストレッチャー・ストレインが発生せず、組立てて焼付塗装したのちには 3~6 kg/mm² 程度の時効硬化

図16 面ひずみ、デントの発生しやすさと降伏応力

図17 TRIP の機構

を示すように C の存在状態 (固溶 C 量) を調整できる。常温では非時効でしかも BH 効果を期待できる鋼種としてこの他 2 相組織鋼 (Dual Phase 鋼) などがある²⁷⁾。BH 鋼板の例は成形性と強度とのジレンマを需要家での使い方を配慮して 2 段階で巧みに解決したものである。

4.3 TRIP 鋼

鋼の中に残留オーステナイトが含まれる時の害は、靱性を損なうものとして、厚鋼板の分野ではよく知られている。しかし一方で残留オーステナイトの安定性次第では、いわゆる TRIP 効果 (Transformation Induced Plasticity) として延性 (均一伸び) が向上することが知られており²⁸⁾、これはプレス成形性を重視する薄鋼板にとってきわめて望ましい性質といえる。図5に示したように、この種の鋼の強度-伸びのバランスは従来の鋼の常識をはるかに超える。しかも強度を上げるため C や Si など合金元素を増せば増すほど伸びは大きくなるという特徴を有している。

TRIP 効果による延性向上のメカニズムを図17に模式的に示した。残留オーステナイトを適度に安定化させる

図18 車輛構成材料比率の推移³⁰⁾

と、引張試験においてひずみの大きいくびれの部分もしくはその近傍でオーステナイトが硬いマルテンサイトに変態し、それ以後くびれの進展は妨げられ周囲に拡散し、さらに均一伸びが大きくなるとして説明される。製造方法は0.2~0.4%の C 、1.2%以上の Si 、0.8~1.5%程度の Mn を含む素材で連続焼鈍法を用いその過時効工程を利用して C によるオーステナイトの安定化をはかるという極めて単純なものである²⁹⁾。現時点では溶接性や伸びフランジ性に難点有りとの指摘もあるが、上述の延性向上のメカニズムから考えて、加工利用技術の上でも従来鋼の延長としてでなく、むしろ従来鋼に替る新素材として考えた方が当を得ているであろう。これは今まで顧みられず、埋もれたシーズを視点を変えて再発掘しようとする例である。

5. あとがき

鉄の最大の長所はコストあるいは強度当りのコストが安いことである。欠点の一つは錆びることであるが、この点は (本報では触れなかったが) 各種の表面処理で対処している。も一つの欠点は重いということである。これに対して高強度鋼板が開発されたことは纒々述べてきた通りである。

一方、しばしば鉄の競合材として対比されるアルミニウムは加工性も良く耐食性もそれ自体鉄よりも優れている。比重は鉄の1/3で強度、剛性の点から厚みを増しても重量は鉄の1/2程度に過ぎない。ところで図18に示すように、現在自動車材料として使われているアルミニウムは3~4%に過ぎず、それも大部分鋳物で板材はほとんど使われていない。これはいくつか理由があるが、何よりも鋼板より価格が高いことが原因である。しかしアルミニウム (それにプラスチック) の重量比率は年を追って増加の傾向にある。この傾向は車体軽量化の時代的要求を反映したものと考えられる。

自動車における高機能化、車体軽量化の流れはまだ当分止まる様子は無く、鉄に対する材質面での要求も一段

8

と厳しさを増している。鉄が競合材料に伍してその特徴を最大限に発揮できるよう、引き続き高性能化、低コスト化を押し進めて行かねばならない。鉄はまだまだ可能性を秘めている素材である。

参 考 文 献

- 1) 鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧，(1981)。
- 2) 日本鉄鋼協会：薄板マニュアル「冷延鋼板編，(1982)。
- 3) 阿部：学位論文，京都大学。
- 4) W. C. Leslie, G. B. Williams and D. H. Hutton: JISI, 199 (1961), 21.
- 5) 増井，河原田，武智：鉄と鋼，58 (1972)，1096。
- 6) J. Nunes and F. R. Larson: Trans. AIME, 227 (1963)，1369。
- 7) 竹内：鉄と鋼，55 (1969)，69。
- 8) W. C. Leslie and R. L. Sober: Trans. ASM, 60 (1967)，99。
- 9) W. B. Morrison: Trans. ASM, 59 (1966)，824。
- 10) 吉田，宮内，小森田：日本機械学会誌，69 (1966)，591。
- 11) J. R. Low Jr. and R. G. Feustel: Acta Met., 1 (1953)，185。
- 12) 木村：鋼中微量元素の偏析と粒界脆化，鉄鋼基礎共同研究会微量元素の偏析部会，(1976)，61。
- 13) 小西，小原，田中：鉄と鋼，63 (1977)，458。
- 14) 高橋，柴田，早川，古野，臼田，山本：鉄と鋼，(1983)，A297。
- 15) たとえば長島，武智，加藤：日本金属学会誌，29 (1965)，393。
- 16) 福田，清水，高橋：鉄と鋼，55 (1973)，S193。
- 17) T. Ōki, M. Miyahara: ICSTIC (Trans. ISIJ, 11), Tokyo (1970)，962。
- 18) 細野，滝田，中川：鉄と鋼，54 (1968)，S496。
- 19) H. Kubotera and Y. Ueno: Trans. ISIJ, 11 (1971)，832。
- 20) H. C. Chao Trans. ASM, 60 (1967) 37。
- 21) A. H. Cottrell: Strength of Solids, Phys. Soc., London (1948)，30。
- 22) 平松，花井，高階：富士鉄技報，14 (1966)，68。
- 23) 阿部，上原，小宮，武智：鉄と鋼，59 (1973)，189。
- 24) 吉田清太監修，薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック，日刊工業新聞社 (1987)，94。
- 25) 武智，大上，古野：第36回塑性加工連合講演会予稿集，長岡 (1985)，249。
- 26) 武智，小山，川崎，豊田：鉄と鋼，68 (1982)，229。
- 27) 古川：日本金属学会会報，19 (1980)，439。
- 28) V. P. Zackay: Trans. ASM, 60 (1967)，252。
- 29) 松村，佐久間，武智：鉄と鋼，71 (1985)，S1293。
- 30) 河田：薄鋼板成形技術研究会資料，(1987)。