

高強度薄鋼板の成形性

阿部 英夫*

Formability of High Strength Steel Sheets

Hideo ABE

1. 緒言

1960年代の自動車用薄鋼板の材質は成形性の向上(高 r 値, 高延性)のために軟質化の道をたどつたが, 1970年代に入り自動車乗員の保護を目的に制定された安全規制に対処した第一期の高強度化時代(1973年), さらに石油ショックを契機とした燃費向上, 車体重量軽減の要求に対する第二期の高強度化時代(1977~)を迎えた。第一期には低い強度領域では固溶体強化型の, 強度の高い領域では Ti, Nb などによる析出強化を併用した高強度鋼板が開発され, パンパー, ドア補強, ブラケット類に使用された。第二期には複合組織鋼板と高 r 値型高強度冷延鋼板が開発され, パネル類にその使用範囲が拡大した。さらに今は超深絞り用高強度鋼板, 焼付硬化性を有する鋼板, 100 kgf/mm² 級以上の超高強度鋼板などが開発され実用段階に入っている。これら材料とその利用技術の開発の成果として, 既にホワイト・ボディ重量の 30% 以上に高強度鋼板を使用している乗用車が開発されている¹⁾。高強度鋼板の成形性に関して既に多くの優れた解説が報告されているが^{2)~14)}, できるだけ新しい話題, データを紹介して解説を試みたい。

2. 総論

2.1 高強度冷延鋼板の機械的性質と成形性との関係

[深絞り性] 写真1に40 kgf/mm² 級各種高強度冷延鋼板の r 値, 限界絞り比(LDR)と絞つたカップの外観を示す¹⁵⁾。純粋深絞り性は r 値が高いほど優れ, 強度にはほとんど依存しないので¹⁶⁾, 最近開発された超深絞り用高強度冷延鋼板の深絞り性は軟鋼板(Alキルド)のそれより優れていることがわかる。

[張り出し性] 図1に球頭ポンチにより張り出し加工した場合の最大高さ(H_s)と全伸び(EI)との関係を示す¹⁷⁾。EIが大きいほど H_s が大きいのは当然であるが, 複合組織鋼(以下DP鋼と記す)の H_s は他の材料の H_s -EI相関より上に位置しており, 軟鋼板並みの張り出し性を有することがわかる。これはDP鋼が非常に大きな n 値を有しているためであり, DP鋼の大きな特徴の

1つである。

[伸びフランジ性] 図2に打ち抜き穴広がり率と r 値との関係を示す¹⁷⁾。周知のとおり r 値が大きいほど板厚減肉がしにくいために伸びフランジ性に優れる。したがって n 値が大きいといえども r 値が小さいDP鋼の伸びフランジ性はP添加Alキルド鋼(以下Rephos鋼と記す)のそれより劣る。さらに超深絞り用高強度鋼板の伸びフランジ性は軟鋼板(Alキルド, ◇印)のそれより優れていることがわかる。しかし引張強さが50 kgf/mm²以上になると r 値の向上が一般には望めなくなるので, 清浄度の改善(S量の低減, 介在物の形状制御)が重要となる。DP鋼の伸びフランジ性は他の鋼種に比し切削穴の場合優れるが, 打ち抜き穴の場合には同等か, やや

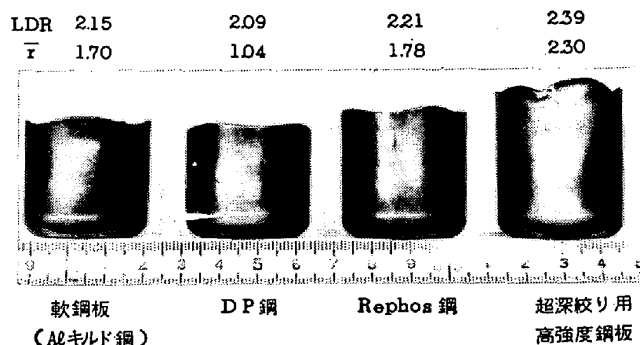


写真1 40kgf/mm² 級高強度冷延鋼板の深絞り性

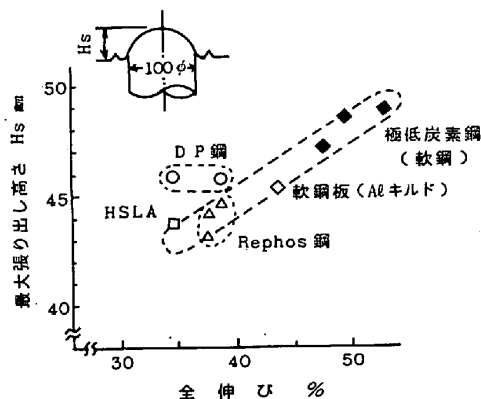


図1 球頭ポンチによる張り出し高さとの関係

昭和 56 年 12 月 2 日受付 (Received Dec. 2, 1981) (依頼解説)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki, Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

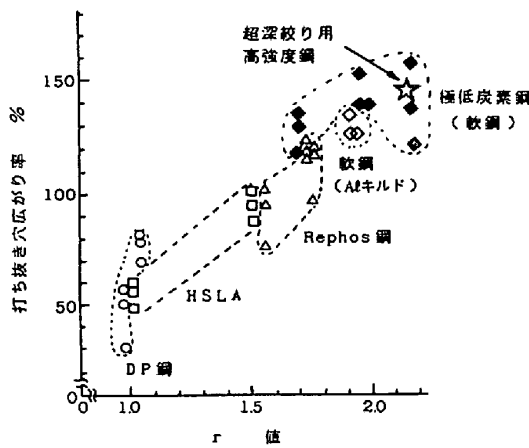


図2 打ち抜き穴広がり率とr値との関係

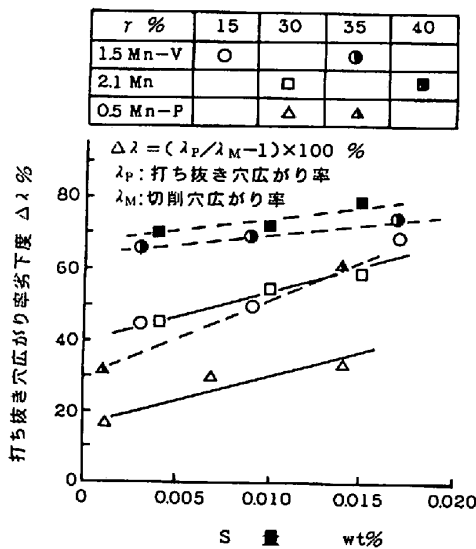


図3 打ち抜きによる穴広がり率の劣下割合(Δλ)に及ぼすSと第2相体積率(γ)の影響

劣る¹⁸⁾¹⁹⁾。図3にDP鋼の切削穴広がり率 λ_M に対する打ち抜き穴広がり率 λ_p の劣下の度合 $\Delta\lambda$ とS量、第2相体積率 γ との関係を示す²⁰⁾。同図からS量と γ が多いほど $\Delta\lambda$ が大きく、打ち抜きによる劣下度が大きいことがわかる。またS量と γ が同じ場合、高Mn系の $\Delta\lambda$ が大きい。この材料では打ち抜き穴縁の加工硬化部でマルテンサイトとフェライトの界面に割れが観察されている。

【成形限界線】 図4-Aには単純ひずみ径路の場合の成形限界線(以下FLDと記す)を示す¹⁰⁾。強度の上昇に伴いFLDは劣下するが、60kgf/mm²級ではDP鋼は強度のわりに高い限界値を示す。図4-Bにはひずみ径路が変化する場合のFLDを示す¹⁹⁾。等二軸引張りまたは一軸引張変形を与えた後の平面ひずみ引張限界線は単純ひずみ径路の場合のそれに比し著しく低い値を示している。その劣化の鋼種間の差は十分明らかにされていない。

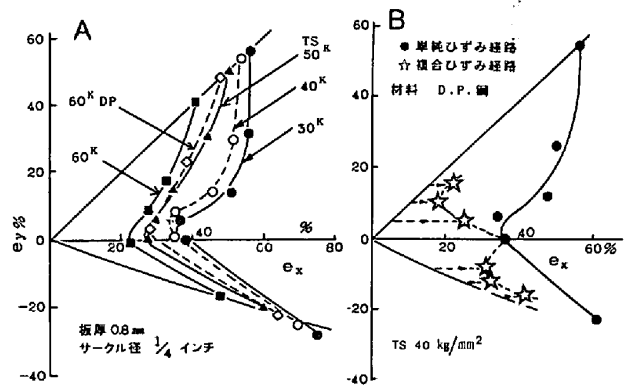


図4 成形限界線に及ぼす強度、ひずみ径路の影響

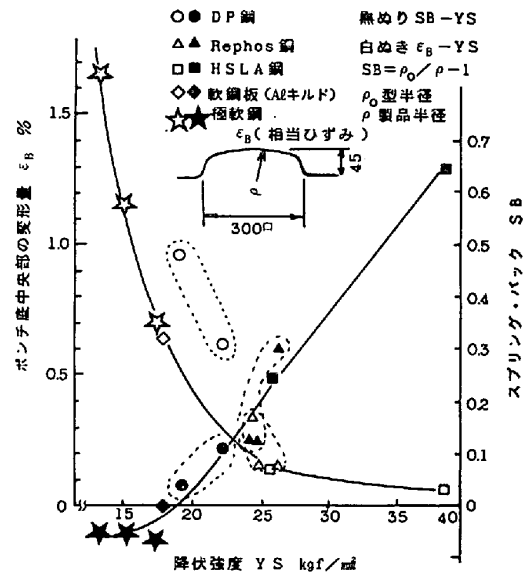


図5 四角筒浅絞り成形したときのポンチ底の変形量 ϵ_B とスプリングバックSBに及ぼす降伏強度の影響

【形状凍結性】 図5に四角筒浅絞り成形をしたときのポンチ底中央部のひずみ ϵ_B 、スプリングバックSBと材料の降伏強度(以下YSと記す)との関係を示す¹⁷⁾。YSが低いほど ϵ_B は大きく、SBは小さくなりひずみ伝播性と形状凍結性が優れている。DP鋼の ϵ_B が他の材料のYS- ϵ_B 相関より上に位置するのは加工硬化が大きいためである。ひずみ伝播性に関する理論解析によれば¹⁷⁾²¹⁾、 $(1/\sigma) \cdot (d\sigma/d\epsilon)$ が大きいほど、すなわち材料強度 σ が低く、加工硬化が大きいほどひずみ伝播性が優れる。またr値の効果は応力状態に依存し、平面ひずみないしは等二軸引張応力状態ではr値が低いほど、一軸引張応力状態ではr値が高いほどひずみ伝播性に優れることが報告されている。

【面形状不良】 高强度鋼板の使いにくい理由の1つにしろ、面ひずみ、ねじれなどの面形状不良が発生しやすいことがあげられる。耐しろ性に対して一般に低YS、高r値が有効である²²⁾。図6に円錐台成形においてボディしろも破断も生じない適正しろ押しえ力の幅 ΔBHF

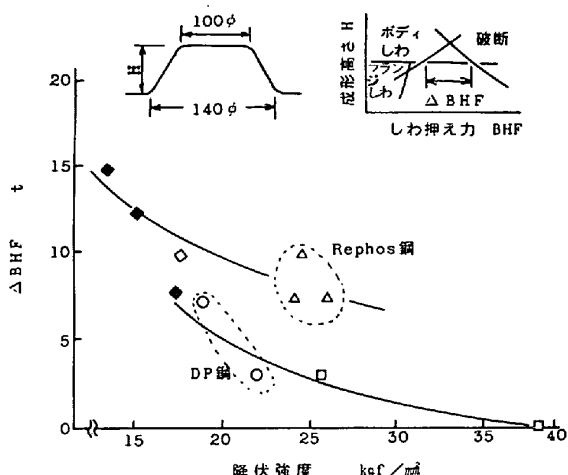


図6 円錐台成形における成形余裕度(ΔBHF)と降伏強度(YS), r値との関係

とYSとの関係を示す¹⁷⁾。r値が高いRephos鋼の方が、YSが低くてもr値の低いDP鋼よりもΔBHFが大きく、耐しわ性を考慮した深絞り性に優れていることがわかる。実物成形においては、しわのほかにポンチ底面の比較的平坦な部分に面ひずみと呼ばれる微小な形状不良が生じる。これに関しては、3・5節で詳述するようにYSが低く、低ひずみ域でのn値が大きくひずみ伝播性がよい材料ほど面ひずみが軽度であるが、r値の効果については複雑である。

〔張り剛性と耐デント性〕 薄い高強度鋼板を使用した外板パネルの重要な特性は張り剛性と耐デント性である。張り剛性はパネルに面外荷重Pを加えた時のたわみδとPとの関係で評価され、本来弾性範囲内での現象であり、パネルの寸法l、曲率半径ρ、板厚tのみに依存する。したがって高強度鋼板を用いる場合、tを薄くすることによる張り剛性の低下は避けられず、ρなどパネルの形状寸法の変更でこれを補う必要がある²³⁾²⁴⁾。材料特性としては、DP鋼のようにYSが低く形状凍結性のよい材料ほど小さなρが得られるので、張り剛性は向上する¹⁷⁾。耐デント性はパネルに局所的な面外荷重が加わるときの塑性変形に対する抵抗であり、(パネルのYS)・t^αに比例することがよく知られている¹⁷⁾²⁵⁾²⁶⁾ (α=2~2.5)。したがって薄肉化による耐デント性の低下をパネルのYSを高くして補うためには(1)母材のYSを高くする、(2)プレス時の加工硬化を利用する、(3)塗装焼付け時の硬化(以下BH性と称す)を利用する方法などが考えられる。(1)の対策では前述の面形状不良を解消することが難しい場合が多いので、(2)と(3)の優れた特性を有するDP鋼が有利である。3・1節で述べるBH性を有するRephos鋼や超深絞り鋼は面形状不良と耐デント性の両者を満足させたいというニーズから生まれたものである。

〔部品強度〕バンパーなどの強度部材では、部材の曲

げ変形強度が板厚の決定要因となつている。従来曲げ強度はt²・TSに比例するとされていたが²⁷⁾、降伏比が低いDP鋼を含めた最近の詳細な実験結果によれば、TSの代わりに5%変形応力¹⁷⁾、3%変形応力²⁸⁾あるいは(YS+TS)/2²⁹⁾で評価した方が精度がよいと報告されている。

〔深絞り加工後の脆性〕 一般に鋼中のPはプレス加工(特に深絞り加工)後の脆性を促進することが知られているが、連続焼鈍材であればその劣下度は小さく、箱焼鈍で作つたRephos鋼でも、P≤0.1%程度であれば実用上問題がない³⁰⁾。Pを添加した極低炭素鋼でも連続焼鈍における冷却速度を制御することにより脆化を防止できる³¹⁾。DP鋼の場合にはマルテンサイトを微細に分散させることにより深絞り加工後の靱性を向上でき、フェライト・パーライト鋼の場合にはSiによる脆化が著しいことが報告されている³²⁾。

上述のように高い延性、n値、r値の特性を有する高強度鋼板が開発されているので、破断に対する成形性については、ある程度満足できる状態に到達していると思われるが、しわ、スプリングバック、面ひずみなどの形状不良は本質的に強度が高いほど発生しやすいものであり、その解決に苦慮しているのが現状といえよう。

2.2 高強度熱延鋼板の機械的性質と成形性との関係

高強度熱延鋼板のプレス成形上の最大の問題点は伸びフランジ性不足とスプリングバックの発生である。図7にDP鋼、固溶強化型鋼、析出強化型鋼の3種について、打ち抜き穴広がり率とTSとの関係を示す³³⁾。DP鋼は他鋼種に比べて低降伏比、高延性であり、張り出し性と曲げ性には優れているが打ち抜き穴広がり率に関しては大きな向上は認められない。これは冷延鋼板の場合と同様、DP鋼では打ち抜き穴縁の加工硬化が大きく、穴縁の変形能が低下しやすいためである。高強度鋼板の場合の打ち抜きクリアランスは軟鋼板の場合より大きくし、板厚の20%程度とるのが、打ち抜き刃具の凝着摩耗の点からも、また穴広がり率の点からも望ましいこ

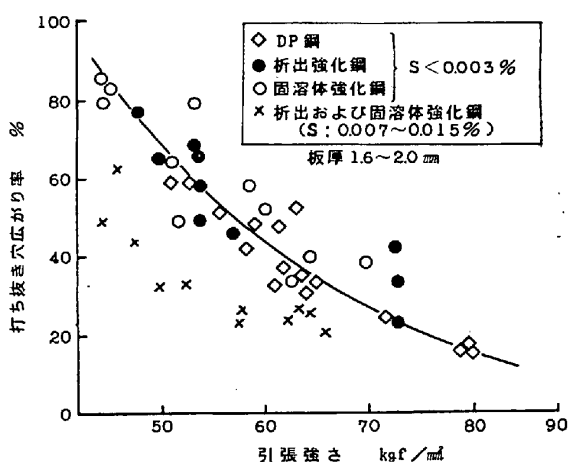


図7 打ち抜き穴広がり率と引張強さとの関係

とが報告されている¹⁴⁾³⁴⁾。熱延鋼板の場合には r 値による伸びフランジ性の向上が望めないで、清浄度の改善(Sの低減と介在物形状制御)が重要なのは言うまでもない³³⁾³⁵⁾。

図8にDP鋼、析出強化型鋼及び固溶強化型鋼の3種の鋼板をハット型に曲げたときのポンチ底、ポンチ肩部及び側壁各部で生じるスプリングバックとダイ肩半径(r_d/t)との関係を示す³⁶⁾。同図からポンチ底と肩部でのスプリングバックによる寸法変化 ΔW_2 はDP鋼が最も少なく、図10に示すDP鋼の特徴である低YSの効果が見られているが、側壁のそり ρ_w はDP鋼の方が大きく低YS効果はなく外そり傾向になつて³⁶⁾³⁷⁾。このように場所ごとに材料特性の効き方が異なるが、ダイ肩相当部の幅変化 ΔW_1 で形状性を評価すれば、 $r_d/t > 2$ ではDP鋼の ΔW_1 が最も小さく、次いで固溶強化型、析出強化型の順である。 $r_d/t < 2$ では固溶強化型が最も優れる。曲げ変形量の小さいU曲げではYSとスプリングバックとの相関が強いが、曲げ変形量が大きくなると(ハット曲げまたは曲げ半径が小さい場合)TS依存が強くなり、DP鋼の低YS効果は軽減するデータも報告されている³³⁾。

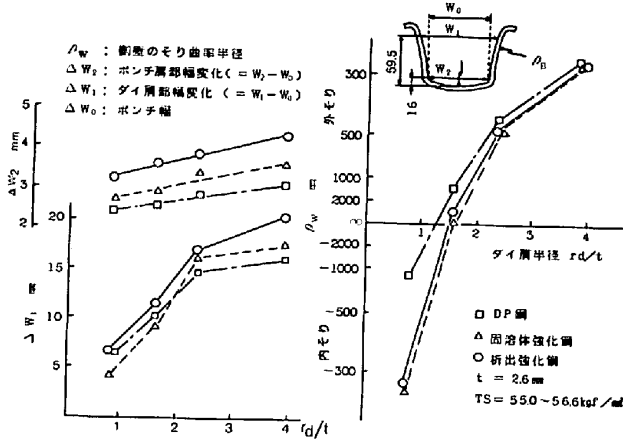


図8 高強度熱延鋼板のハット曲げ成形におけるスプリングバック

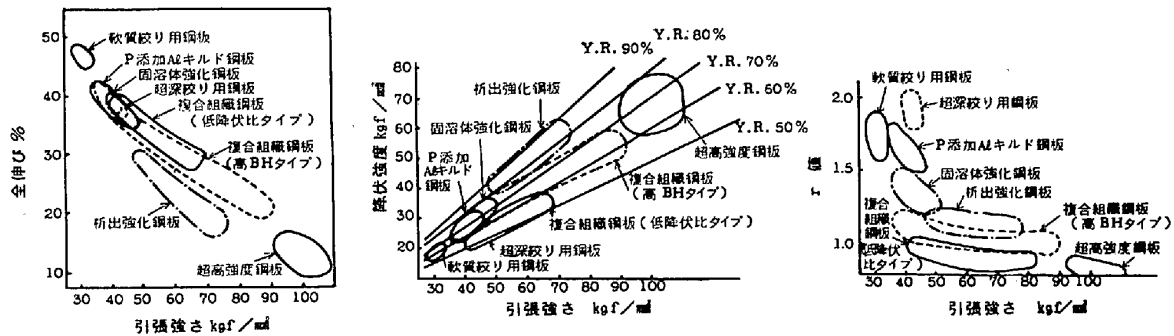


図9 各種高強度冷延鋼板の引張強さ、伸び、降伏強度、 r 値の関係

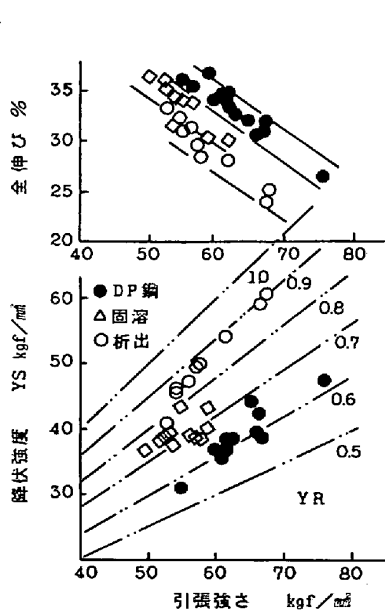


図10 高強度熱延鋼板の引張強さ-降伏強度-全伸びとの関係

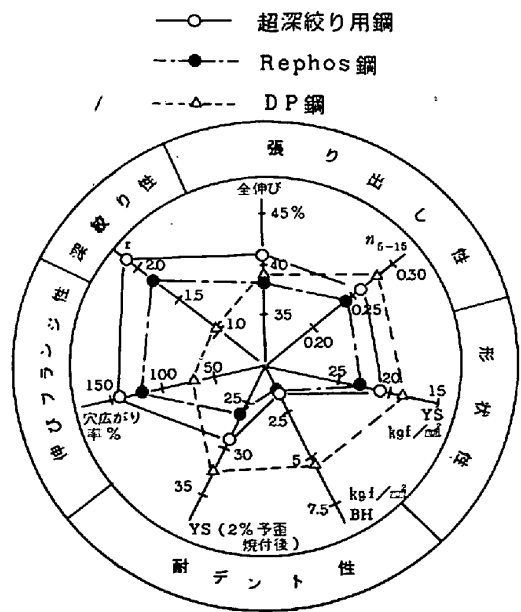


図11 40kgf/mm²級高強度冷延鋼板の機械的性質、成形性の特徴

2.3 各種高強度鋼板の成形性の特徴のまとめ

各種高強度鋼板の TS-EI-YS-r の関係をまとめて図 9, 図 10 に示す⁹⁾¹⁰⁾。同図からわかるように現在, 多種多様な高強度鋼板が開発され, それぞれの特徴を生かした実車適用が進行している。特に TS 40 kgf/mm² 級高強度冷延鋼板に種類が多いが, 図 11 にそれぞれの機械的性質, 成形性の特徴を示す¹⁵⁾。

3. 最近の二, 三の話題

3.1 焼付硬化性を有する高強度冷延鋼板

2 節で述べたごとく, 外板パネルには TS40 kgf/mm² 級冷延鋼板 (Rephos 鋼, DP 鋼) が実用化されてきたが, 部品によつては面形状不良の点から強度を少し下げざるを得ない場合がある。そこで耐デント性を同時に満足させるためにプレスによるひずみ硬化 (WH) と塗装焼付硬化 (BH) を利用することが試みられた。DP 鋼は両者が期待できる鋼板であるが, r 値が低い欠点を有している。そこで r 値の高い Rephos 鋼に適当量の固溶 C を残すことにより BH 性を付与することが試みられた。しかしこの種の鋼板は常温時効の危険性を含んでいるので, あまり大きな BH 性は付与できない。BH 性を付与した Rephos 鋼, 軟質 Al キルド鋼及び DP 鋼を非時効軟質 Al キルド鋼と同一条件にてプレスした時にそれぞれに対し起こりうる WH と BH を加算したパネルの降伏強度を予測し同一の耐デント性を得るのにどこまでゲージダウンできるかを計算した。計算結果を図 12 に示す。例えば面形状不良対策のために TS 35 kgf/mm² の鋼板を用いた場合 $\Delta\sigma_{BH} = 5 \text{ kgf/mm}^2$ の BH 性があれば 7~10% の, $\Delta\sigma_{BH} = 3.5 \text{ kgf/mm}^2$ の場合には 5~7% のゲージダウンが可能である。最近では超深絞り用高強度鋼板でも BH 性を有する鋼板が開発されており³⁸⁾, 従来成形難度が高いため実用化できなかった部品にまで高強度鋼板を使用することが可能になつてきた。

3.2 超深絞り用高強度鋼板

クォータパネル, フロントフェンダーなどのような高度の深絞り性が要求される部品に対し, 超深絞り用高強

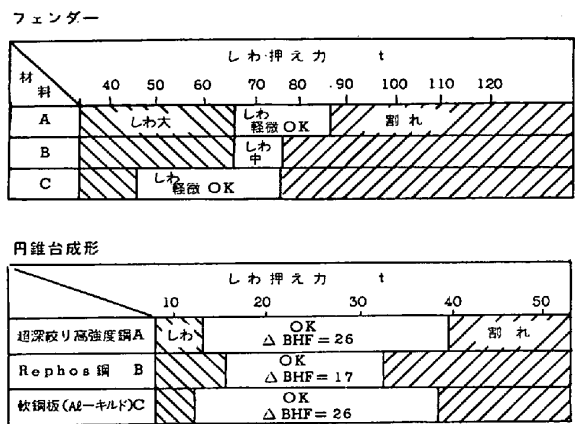


図 13 40kgf/mm² 超深絞り用高強度鋼板の円錐台及びフェンダー成形テストの結果

度鋼板が開発されている。鋼種としては極低 C-Ti に更に Si, Mn を添加したもの³⁹⁾, P を添加したもの⁴⁰⁾, 極低 C-Nb に P を添加したものなどが⁴¹⁾, 2.0 を超える非常に高い r 値を有する 40 kgf/mm² 級高強度鋼板も開発されている。最大の特徴は r 値が高いことであり, 写真 1, 図 2 および図 11 に示したように深絞り性と伸びフランジ性に特に優れている。本材料の成形性を円錐台成形およびフェンダー成形テストにより調査した結果を図 13 に示す。ここでは割れとしわとも発生しないしわ押さえ力の範囲 (ΔBHF) の大小により, 材料の成形性の総合的な評価とした。超深絞り用高強度鋼板の ΔBHF は従来の Rephos 鋼よりも大きく, 成形性が大幅に改善されていることがわかる。

3.3 超高強度冷延鋼板

ドア補強ビームなど加工度が小さい部品には引張強さ 100 kgf/mm² 以上のいわゆる超高強度鋼板が使用されている。製造方法としては (1) r 相から水焼入れしたマルテンサイト (α') 単相⁴²⁾, (2) $\alpha + \gamma$ 相から水焼入れした $\alpha + \alpha'$ の 2 相⁴³⁾, (3) r 相からガスジェット冷却するベーナイト + α の 2 相⁴³⁾, (4) 冷間圧延後に回復焼鈍のみ行う⁴⁴⁾, (5) 回復焼鈍と変態強化を併用した未再結晶 $\alpha + \alpha'$ の DP 鋼⁴⁵⁾ などがある。それらの引張強さ-全伸び関係を示す図 14 から明らかのように DP 鋼が良好な伸びを有する。このような鋼板を使うとき単に強度に比例してゲージダウンするのではなく, 座屈変形による強度低下を断面形状の変更などにより防止することが有効であり, 納所らは⁴⁶⁾ ドア補強ビームに従来より 26% 薄い 100 kgf/mm² 級超高強度鋼板を用い, 20% の軽量化を達成したことを報告した。100 kgf/mm² 級の回復鋼で作ったドア補強ビームを曲げ変形テストした結果では, 最高荷重点で脆く折れ急激に荷重が低下しているのに対し, DP 鋼の場合, 最高荷重点以後もゆるやかに荷重が減少しエネルギー吸収も大きいので, DP 鋼が有利であると報告されている²⁸⁾。

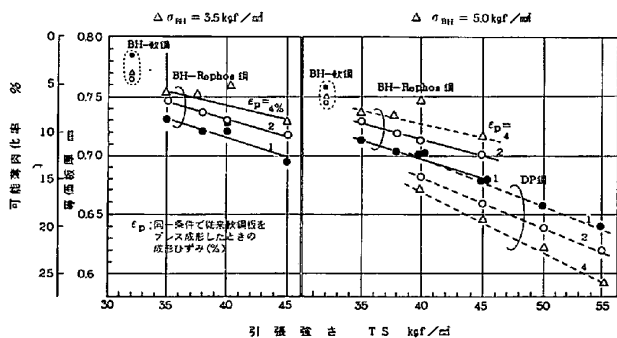


図 12 耐デント性に対する焼付硬化性-引張強さ-板厚の等価関係から求めた可能薄肉化率

3.4 面形状不良制御と材料特性

自動車パネルに高強度冷延鋼板を使用する際生じる面形状不良が大きな問題として取り上げられてきた。フェンダーの例について、面形状不良をしわ高さ h で評価し、成形ストロークに対しプロットしたなじみ曲線を図15に示す⁴⁷⁾。石垣は、しわの発生、増大、消去の特性を定量的に評価するために、表1の付図で定義される諸量を求め、母材の機械的性質との関係を調べた。その結果をまとめて表1に示す⁴⁸⁾。これからYS, TS, n 値および変形量の小さい範囲での n 値と面形状不良と強い相関を有するが、 r 値との相関は弱いことがわかる。面形状不良のもう一つの代表例として、ドア把手まわりの面ひずみと材料特性との関係を図16に示す。古林らは官能検査による評価とYS, TS との関係を調べ、 $YS \leq 27$

kgf/mm², $TS \leq 45$ kgf/mm² であれば使用できる可能性を提示した(図16-a)⁴⁹⁾。図16-bに示すように、梅原らによれば⁵⁰⁾、ドア把手まわりの面ひずみを定量的に評価するのに凹凸プロフィルの勾配 θ が有効であり、2% 変形応力が低いほど θ が小さく面ひずみが軽度である。また2~4% のひずみ範囲での n 値及び r 値と θ との相関は比較的弱いと報告している。また成形負荷中のプロフィルをも測定し、除荷時の弾性回復により θ が増大することを見出し、面ひずみの発生に対し弾性回復挙動が重要な役割をすることを示した。そこで残留する圧縮応力 σ_R に及ぼす機械的性質の影響に関し、短形板に不均一な引張応力をかけた場合についてFEMを用いて計算した結果を表2と図17に示す⁵¹⁾。試片中央に残留する

	C	Si	Mn	Ti	備 考
1	0.06/0.09	-	0.3/0.6	-	$\gamma \rightarrow$ 水焼入れ
2	0.15	-	0.7	-	$\alpha + \gamma \rightarrow$ 水焼入れ
3	0.13	0.50	2.6	-	$\gamma \rightarrow$ ガスジェット冷却
4	0.07	-	0.9	0.22	回復鋼
5	0.09	-	2.11	0.08	

表1 フェンダー上部に生じるしわのなじみ特性と機械的性質との相関

	YS	n_2	n_5	n	\bar{r}
h_{BH}	○	○	×	○	△
θ_0	○	○	△	○	○
S_1	◎	◎	△	○	○
θ_1	○	×	○	△	×
h_{max}	◎	○	○	○	△
S_2	◎	○	△	◎	△

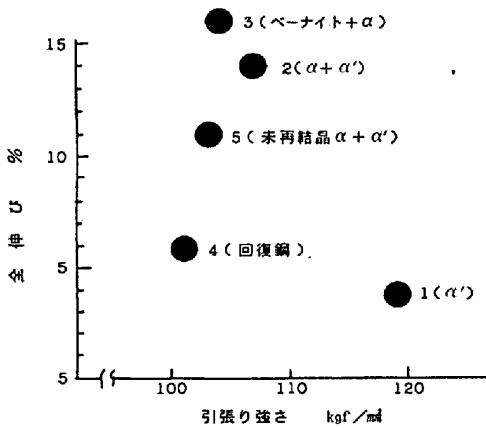


図14 超高強度冷延鋼板の引張強さと全伸びとの関係

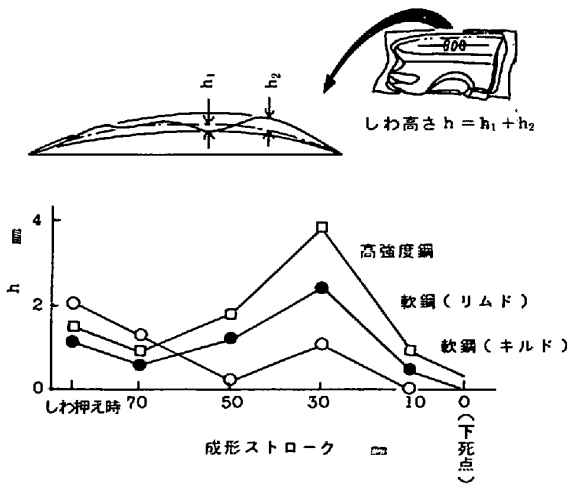


図15 フェンダーに生じるしわのなじみ曲線

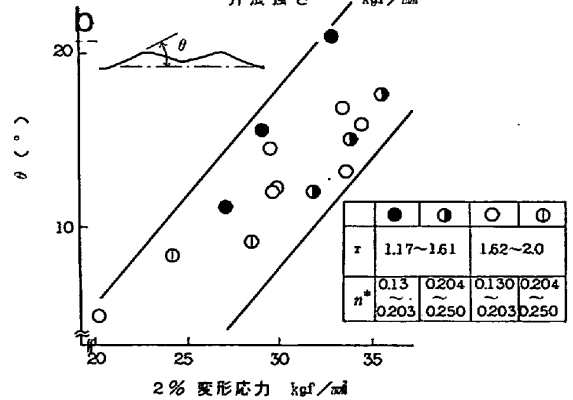
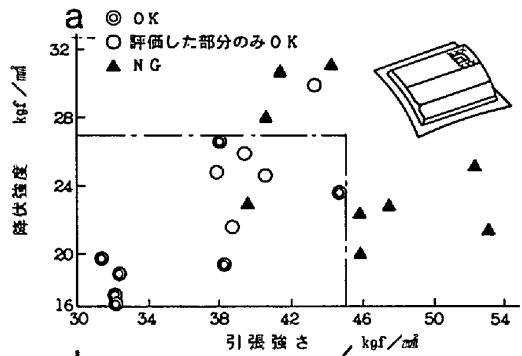
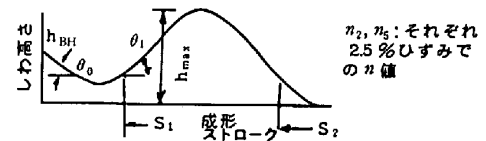


図16 ドア把手まわりの面ひずみと機械的性質との関係

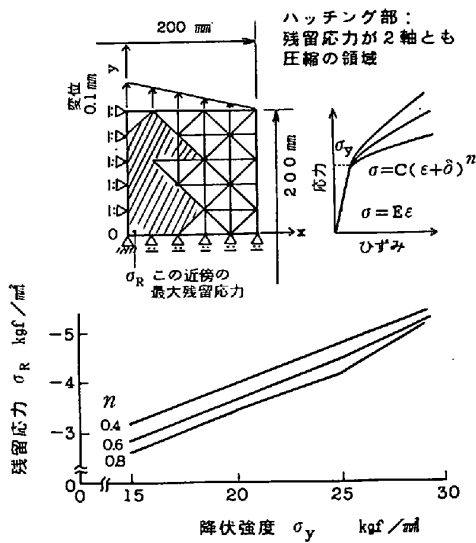


図17 不均一引張り後の残留応力に及ぼす機械的性質の影響

表 2. 不均一引張り後の残留応力に及ぼす r 値の影響

No.	r_x	r_o	r_y	残留応力 kg/mm^2
1	1.0	1.0	1.0	-4.0
2	2.0	2.0	2.0	-3.6
3	1.0	1.5	2.0	-3.2
4	2.0	1.5	1.0	-4.4
5	2.0	3.0	2.0	-3.2
6	2.0	1.0	2.0	-4.3

応力 σ_R は、YS が低いほど、 n 、 r が大きいほど小さい。 r 値の面内異方性については引張方向の r 値 (r_y) が大きいほど、また引張りと 45° 方向の r 値が大きいほど σ_R は減少する。

ここで紹介した他にも多くの面形状不良の事例が報告されているが⁵²⁾、いずれの報告でも共通して降伏強度（厳密にはひずみ量を考慮した強度）が低いことが最も重要であり、加工硬化特性（ひずみの小さい範囲での n 値、 $d\sigma/d\epsilon$ 、 $(1/\sigma) \cdot (d\sigma/d\epsilon)$ など）と引張強さも考慮すべきであると報告されている。 r 値の影響については複雑であり、 r 値が大きいことは破断限界向上によつて張力を十分かけられる、しわの吸収性がよい⁵³⁾点では望ましいがスプリングバックが大きくなる⁵⁴⁾、応力条件（二軸引張応力下）によつてはひずみ伝播性を悪くする¹⁷⁾²¹⁾。あるいはエンボス部周辺のメタルフローが大きいなどの点では不利となる場合がある。成形中のメタルフロー制御の点からの摩擦と潤滑、表面粗度の役割が、さらに複雑な応力とひずみ履歴が生じている点からパウシंगाー効果の影響が示唆されており⁶¹⁾、いずれも今後の解明すべき課題として残る。しかし高強度鋼板を用いることは本質的に面形状不良を悪くするので、材料特性による改善効果にも限界があろう。成形技術上の面形状不良対策として張力の付加または面圧の付加が有効であることが

知られているが、その付加する時期設定も重要である⁶⁵⁾。最も効果的なのは曲げ変形を与えた後に張力を付加する方法である。しかし成形中のしわ発生を防ぐために曲げ変形前にも張力を加える場合には、引張力はできるだけ小さくし、しかも曲げ変形後一度除荷して再び引張力を最初以上に加えるのがよい。しわ、面形状不良の材料評価試験法として、不均一引張法⁵³⁾、CCBT 法 (Conical Cup Buckling Test)⁵⁶⁾ や対角方向引張試験法⁵⁷⁾などが提案されており、今後の有効利用が期待される。

4. 結 び

以上、熱延及び冷延高強度鋼板のプレス成形性について概説した。破断に対しては、高延性の DP 鋼、 r 値の高い Rephos 鋼、さらに絞りの厳しいものに Nb または Ti を添加した超深絞り用高強度鋼板が開発され、かなり満足できる状態にあると思われる。しかし面形状不良に対しては材料特性の改善、安定と合わせて成形技術上の対策が重要であり、自動車メーカーと鉄鋼メーカーの協力のもとでの研究開発が望まれる。熱延鋼板についても高延性の DP 鋼の使用が有効であるが、成形性と同等以上に溶接性、疲労強度、溶接部の加工性と疲労強度などが重要である。

自動車への高強度鋼板の使用量が急激に拡大しつつあり、本資料が材料開発、材料選択、成形技術の改善などに際し参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 日経メカニカル, 9 (1981) 14, p. 82
- 2) 佐藤泰一: 自動車技術, 33 (1979) 8, p. 666
- 3) 青木 至: 鉄と鋼, 65 (1979) 6, p. 105
- 4) 中川吉左衛門, 阿部英夫: 塑性と加工, 21 (1980) 229, p. 116
- 5) 石垣秀生: 塑性と加工, 21 (1980) 229, p. 99
- 6) 塩川昌男, 古林 忠: 塑性と加工, 21 (1980) 229, p. 105
- 7) 武智 弘: 塑性と加工, 21 (1980) 229, p. 109
- 8) 武智 弘: 塑性と加工, 21 (1980) 237, p. 872
- 9) 西田 稔: 第 74 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1981), p. 33
- 10) 松藤和雄: 同上 (1981), p. 95
- 11) 佐藤 満: 同上 (1981), p. 163
- 12) 山本多門: 同上 (1981), p. 179
- 13) H. TAKECHI, M. USUDA, N. IWASAKI, and Y. HAYASHI: Int. Symp. on New Aspects on Sheet Metal Forming, (1981), p. 8
- 14) S. SATOH, K. YAMAZAKI, T. SHIMOMURA, and H. ABE: 同上, (1981), p. 24
- 15) T. IRIE, S. SATOH, K. HASHIGUCHI, I. TAKAHASHI, and O. HASHIMOTO: Kawasaki Steel Technical Report, 2 (1981), p. 14
- 16) 阿部英夫, 中川吉左衛門: 川崎製鉄技報, 5 (1973) 2, p. 210
- 17) 阿部英夫, 山本健一, 中川吉左衛門: 同上12 (1980) 4, p. 611
- 18) J. F. BUTLER and J. H. BUCHER: Sheet Metal Ind., 57 (1980), p. 726.

- 19) T. SHIMOMURA, M. YOSHIDA, M. SAKOH, and K. MATSUDO: *Memoires Scientifiques Revue Metallurgie*, 77 (1980) 4, p. 465
- 20) 西本昭彦, 細谷佳弘, 中岡一秀: 鉄と鋼, 67 (1981) 5, S 529
- 21) 中島浩衛, 菊間敏夫: 塑性と加工, 9 (1968) 84, p. 46
- 22) 阿部英夫, 中川吉左衛門: 同上, 13 (1972) 13, p. 949
- 23) A. V. VADHAVKAR, M. G. FECEK, V. C. SHAHAND, and W. E. SWENSON: SAE paper No. 810230 (1981)
- 24) H. F. MAHMOOD: SAE paper No. 810099 (1981)
- 25) Y. YUTORI, S. NOMURA, I. KOKUBO, and H. ISHIGAKI: *Memoires Scientifiques Revue Metallurgie*, 77 (1980) 4, p. 561
- 26) J. A. DICELLO, and G. A. GEORGE: SAE paper No. 740081 (1974)
- 27) 坂本 徹: 薄鋼板成形技術研究会資料 48-26 (1973)
- 28) 林 豊: アマダ技術ジャーナル. 臨時増刊号 (1981) 76, p. 27
- 29) 塩川昌男, 古林 忠, 納所 宏, 山崎勝二郎, 田中敏夫, 福田水穂: 日産技報, 16 (1980), p. 59
- 30) S. HAYAMI: *Micro Alloying*, 75 (1975), p. 78
- 31) T. IRIE, S. SATOH, K. HASHIGUCHI, I. TAKAHASHI, and O. HASHIMOTO: *Trans. ISIJ*, 21 (1981), p. 793
- 32) 須藤正俊, 東 正則, 大木継秋, 堀 広巳, 柴田善一, 神戸章史: 鉄と鋼, 66 (1980), A197
- 33) 松藤和雄, 大沢紘一, 酒匂雅隆, 下村隆良, 由田征史: 塑性と加工, 21 (1980) 237, p. 890
- 34) 日本鋼管: 薄鋼板成形技術研究会, 56-16 (1981)
- 35) I. AOKI, T. HORITA, and T. HERAI: Preprint of International Symp. Formability 2000 A. D. (1980) [ASTM]
- 36) 平田基博, 阿部英夫, 中川吉左衛門: 昭和 56 年度塑性加工春季講演会論文集, (1981), p. 477
- 37) 林 豊, 高木美智雄: 第 32 回塑性加工連合講演会論文集, (1981), p. 525
- 38) 佐藤 進, 橋本 修, 入江敏夫: 鉄と鋼, 67 (1981) 13, S 1183
- 39) 松藤和雄, 下村隆良, 大沢紘一, 奥山 健, 苗村博: 鉄と鋼, 65 (1979), S 838
- 40) 高橋延幸, 柴田政明, 古野嘉邦: 同上, 66 (1980), S 1127
- 41) 入江敏夫, 橋口耕一, 佐藤 進, 小西元幸, 高橋功, 橋本 修: 同上, 66 (1980), A 205
- 42) W. H. MCFARLLAND and H. L. TAYLOR: SAE paper No. 690263 (1969)
- 43) 濟木捷郎, 嶋田泰雄, 永井秋男, 岡本篤樹, 長尾典昭: 鉄と鋼, 66 (1980), S 957
- 44) P. B. LAKE and J. J. GRENAWALF: SAE paper No. 770613 (1977)
- 45) 権藤 永, 武智 弘, 河野 彪, 小山一夫: 鉄と鋼, 62 (1976), S 591
- 46) H. NOUSHO, Y. SASAKURA, and H. SAKURAI: SAE paper No. 810031, (1981)
- 47) 石垣秀生: 第 77 回塑性加工シンポジウム (1981) p. 43
- 48) 石垣秀生, 岡本勲夫, 中川憲彦, 有馬幸一, 青木至: 第 31 回塑性加工連合講演論文集, (1980), p. 83
- 49) 塩川昌男, 古林 忠, 山崎勝二郎: 日産技報, 15 (1979), p. 58
- 50) Y. UMEHARA: *Memoires Scientifiques Revue Metallurgie*, 77 (1980) 3, p. 247
- 51) 阿部英夫: 第 77 回塑性加工シンポジウム (1981), p. 76
- 52) 自動車パネルのプレス図解集 (薄鋼板成形技術研究会編) (1979)
- 53) 林 史: 学位論文 (1977)
- 54) 守 時一: 日本機械学会論文集, 38 (1972) 314, p. 2514
- 55) 馬場秋次郎, 戸沢康寿: 日本機械学会誌, 67 (1964) 542, p. 413
- 56) 阿部英夫, 中川吉左衛門: 昭和 50 年度塑性加工春季講演会論文集 (1975), p. 121
- 57) K. YOSHIDA, H. HAYASHI, K. MIYAUCHI, M. HIRA, T. HIRA, and S. UJIHARA: Preprint. Int. Symp. on New Aspects on Sheet Metal Forming (1981), p. 14