

自動車用高強度薄鋼板とその成形*

青 木 至**

High Strength Sheet Steel and Its Formability in Automotive Applications

Itaru AOKI

1. 緒 言

製品の主要部分を構成している材料を積極的に変更しようとする動機は、純粋に技術上の要請からというよりは、社会的な要請からという場合の方が多いのではなからうか。その製品の機能を満たす材料については、すでに理論的および経験的な多くの技術蓄積がなされているため、強力な社会的要求が出されない限り、材料変更の指示が純技術的に提案されることは少ない。予想される多くの難問にもかかわらず、自動車用の内外板素材として高強度薄鋼板の適用が企図されはじめているのは、自動車用材料の選択にも社会的経済的な事情の関与する割合が増してきたということであろう。

日本における自動車産業と製鉄業との関連は、1950年代の揺籃期、1960年代の量産体制確立期、1970年代の社会的要請支配期および1980年代の(予想される)技術分極期というように、およそ10年単位で整理されるという説がある。その過程で、車体用薄鋼板の材質はプレス成形性を主要目標として、軟質化、高 r 値化および低降伏点化の方向をたどつた歴史であつた。だから、素材の高強度化は軟質化傾向の極限からの転進というべきかもしれない。降伏点が $16\sim 22\text{ kg/mm}^2$ で、引張強さが $29\sim 34\text{ kg/mm}^2$ という普通の軟鋼板で、すべての自動車車体製造体系が構成されてきているのを、部分的にせよ高強度鋼板に変更するには多くの解決すべき課題が存在しよう。しかしながら、従来の軟鋼板も、たまたま降伏点や引張強さが上述の値になつていたにすぎないのであつたと考えれば、高強度鋼板の使用も十分に可能と考えられる。

静的あるいは動的な構造物に使用される厚板に関しては、材料の高強度化について大きな成果を挙げてきている。厚板と比較して薄板に要求される特質は成形可能性である。どんなに強度が高くても、直角曲げができないような材料は薄板の世界では役立たない。自動車用高強度鋼板と特定されれば、かなりの延性(例えば、10%以

上の伸び率)が要求される。これまでの軟鋼板の製造あるいは使用上の諸経験が、高強度鋼板でも生かされることは言うまでもない。むしろ、従来の技術の蓄積があればこそ、高強度鋼板の自動車車体部品への導入の展望が開けたといえる。

厚板では高張力鋼という名称が一般的である。この類推から、薄板でも高張力薄鋼板という論文が多い。JIS規格では抗張力という名称が引張強さとなつたように、薄板では軟鋼板という一般基準があることから、高張力鋼というよりは高強度鋼というほうが妥当ではないかと考える。したがつて、この報文では高強度(薄)鋼板という呼称で統一して記述する。ちなみに、SAE(Society of Automotive Engineers)会議での論文ではHigh Strength Sheet Steelという呼び方が一般的である。

自動車用の高強度薄板については、これまでも多くのすぐれた解説^{2)~8)}が公表されている。この報文では、主に重点を製造法というよりは使用法において、著者の最近の研究成果などもまじえて、説明したいと考える。

2. 社会的な背景

2.1 高強度薄鋼板の最近の状況

米国の自動車製造技術の動向は、毎年2月末に開催されるSAE年次大会の発表論文で把握できる。ここ数年間、論文件数400編を越える巨大会議である。ここでの報文は内容的には古くなつているのかも知れないが、参考とすべき事項も多い。最近の話題は米国の商業誌を見ればこと欠かない。掲載された自動車関係の材料に関する記事を拾つてみると次のようである。

1) GM社、1985年に自動車のアルミニウム使用量は現在の2倍になると予想(6/30'78, American Metal Market)

2) 米国NHTSA(高速道安全局)、きたるべき5年間の乗用車、バン、軽トラックの安全規制、燃費走行マイル規制を発表(5'78, Automotive Industries)

3) J & L社、自動車用高強度鋼VAN-QNの製造

* 昭和53年12月1日受付(Received Dec. 1 1978)(依頼技術資料)

** 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所(Nagoya Works, Nippon Steel Corp., 5-3 Tokai-cho Tokai 476)

拡大計画を発表、Pittsburgh 製鉄所で月産 1 万 5 千 t 製造を計画 (6/19 '78, Iron Age)

4) Armco 社の開発した HSLA 鋼(50HR と 70HR)が自動車重量削減用として使用開始(7 '78, Metal Progress)

5) NASA, 黒鉛系複合材料の普及で、自動車用鋼材の使用量は 1985 年以後では現在の半分にすることを予想 (7/3 '78, Iron Age)

6) Ford 社軽量化のためにプラスチック部品製造工場を完成 (7/10 '78, American Metal Market)

7) GM社, 1979年2月よりサブコンパクト車 Chevette の生産量 60% 増を計画 (7/10 '78, American Metal Market)

8) Peugeot-Citroen 社と Fiat 社, 新軽量車の共同研究開発に合意 (7/17 '78, American Metal Market)

9) Chrysler 社, 1979 年車の亜鉛めつき鋼板の使用量は前年の 2 倍を予想(8/21, American Metal Market)

10) Ford 社, 1979 年社のアルミニウム製ホイール使用量の増加を予定 (8/21, American Metal Market)

これら 10 項目の記事は任意に抽出したものであり、内容を一読すれば、米国の自動車産業が置かれている位置あるいは問題がどのようなものであるかが理解される。最大のねらいは、自動車の軽量化をいかにして効果的に達成すべきかということである。自動車の製造からスクラップになるまでの間において、使用される総エネルギーのうちわけは、素材製造に要するエネルギーが10%、車体製造に要するエネルギーが5%、走行に要するエネルギーが 85% といわれている。したがって、総合的観点からのエネルギー節減は走行エネルギーの低減が最も有効なことがわかる。これには、空気抵抗の低減、回転部摩擦抵抗の低減および道路環境の整備などがあるが、車体重量の低減が最も効果が大いと考えられる。このため、前述のような雑誌の記事がはん濫しているものと思われる。軽量化のための手段や方法も種々あり、恐らく1985年頃までは、車体重量軽減対策として、さまざまな提案がなされることであろう。

2.2 安全対策車

自動車用高強度薄鋼板は、まず安全車対策としての必要性から脚光をあびてきた。自動車の社会的効用はいうまでもない。しかし 1970 年において、米国での自動車事故の損害額は 186 億ドルで、死亡者は 54,800 人である。この犠牲者のうち車対車の衝突による乗員の死傷事故が全体の 8 割を占めていた。これらの対策を国家的規模で推進して、自動車安全法が施行された。この法律を端緒として、将来の安全車の技術開発を目標とした E S V (Experimental Safety Vehicle) 計画と現行車の段階的な安全規制としての FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard) の制定が企画された。

前者は試験的な安全車の開発計画である。その目的は

- 1) 徹底した安全仕様の確立
- 2) 安全対策有用性の一般者への啓もう
- 3) 自動車業界の安全努力への刺激
- 4) 将来の安全基準の基礎資料作成

などである。ESV 仕様による試作車の製作は米国、西独、日本の自動車メーカーで実施され、1973年3月の第4回 ESV 国際会議までに、ほぼ全体的なその製作状況および安全性能についての報告がなされている。基本的な課題は、車体構造強度の面からは、衝突時の乗員の生存空間の確保と衝撃エネルギーの吸収対策である。これら諸仕様はあくまでも与えられた車体重量制限を満足しなければならぬため、各社とも、高強度薄鋼板、ウレタン樹脂、アルミ合金などを使用した。

後者の主な内容は次の項目である。

- 1) 衝突時の乗員保護規定
- 2) 衝突エネルギー吸収による乗員への影響軽減に関する規定
- 3) 操縦安定性に関する規定
- 4) 運転者の視野に関する規定
- 5) 運転者の環境に関する規定

これら諸規定は段階的に逐次拡大適用を企図しており、対米輸出車について、ドア補強材やバンパー補強の取付けなどの構造改良が実施されてきている。そのための、必然的な重量増加を少なくするため、高強度鋼板の適用が行なわれている。ESV 計画が 1970 年代後半における生産車への応用を目標としているが、RSV (Research Safety Vehicle) 計画⁹⁾は 1980 年代の安全車である。この計画は量産化を前提としているため、経済性、資源および環境への配慮も含まれる。

2.3 自動車鋼板の一般動向

薄鋼板の製造技術と利用技術との関係は相互の技術交流¹⁰⁾の中で発展してきた。製造技術面からは、新しい製造法の導入、工程の改善、新知見の発見などにより、通常の薄鋼板の安定製造ということについては、かなりの水準に達していると考えられる。利用技術面からは、加工技術に関する諸知見の開発、材料使用の最適な技術などにより、薄鋼板の総合的な効率利用ということについて進歩が大きい。これらの技術の発展は日本の高度成長経済と同一歩調で進んできたように思える。その経済が時にさしかかった頃から、自動車の安全性、排気ガス規制および燃費改善などの問題、めつき公害回避や耐食性向上に関連した表面処理鋼板の需要増加の問題など、社会的な制約と関連したことが陸続してきたように考える。このような、自動車産業と鉄鋼産業との間における、薄鋼板の状況をとりまく関係を図 1 に示すように整理して概念的に把握している。今後、目標とするところは、素材製造者、需要家および消費者なども含めた全体の系の中で最適な方法(全体としての利益が最大となる解)を模索していくことではないだろうか。本稿の主題である自

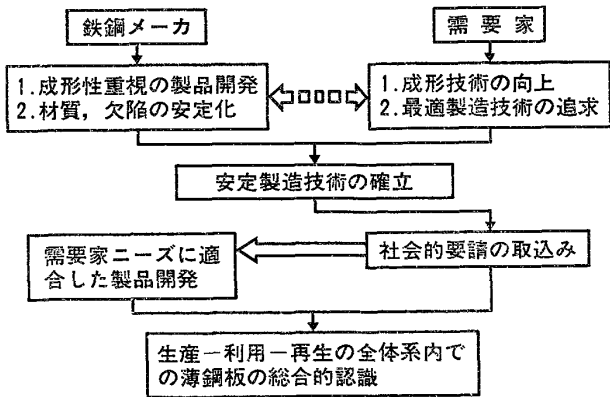


図1 薄鋼板製品開発の推移

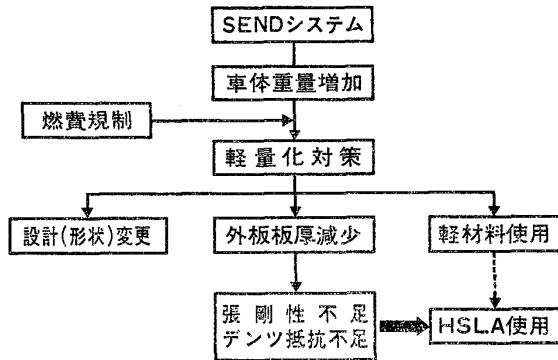


図2 高強度薄鋼板使用の背景

自動車用高強度鋼板の使用の背景を、以上に述べてきたことを基にして集約すると、図2のようになる。ここで、SENDとはSafety, Emission, Noise and Damageabilityのアクラニム(acronym)であり、今後の自動車の方向を探る起点をまとめた用語である。HSLAはHigh Strength Low Alloy Sheet Steelの略称である。この用語には車体部品の成形、溶接および疲労などに配慮したときできる限り添加元素を少なくして強度を高めなければならぬという意趣が込められている。

3. 高強度鋼板使用の効果

3.1 重量軽減の考え方

騒音防止、安全向上、排気ガス規制および燃費向上という課題の中で、車体重量軽減効果が最も影響する項目は燃費向上である。米国では、1975年にエネルギー政策および保守法(Energy Policy and Conservation Act)が制定された。この法律には、1978年から各年ごとの燃費基準が決められている。平均燃費基準は1978年の18 mile/gal(7.7 km/l)から1985年の27.5 mile/gal(11.7 km/l)まで段階的に引き上げられている。そして、この基準を達成できない自動車メーカーには燃費不良車税を課すという厳しい内容のものである。その後、この基準は流動的であり、決定的なものとはなっていないようだがエネルギー保護政策に関する政府のなみなみならぬ意気

込みが感ぜられる。

高強度鋼板の適用による重量軽減効果は、荷重条件に対して、強度(例えば降伏点)と板厚との関係¹¹⁾をどのように考えるかによって決定される。現用の板厚と降伏点を t_1 および σ_{y1} としたとき、 σ_{y2} の降伏点をもつ高強度鋼板の板厚 t_2 は、断面に一樣に引張りまたは圧縮力の加わる荷重条件では

$$t_2 = t_1 (\sigma_{y1} / \sigma_{y2})$$

のように表わされる。また、曲げ力による荷重条件では

$$t_2 = t_1 (\sigma_{y1} / \sigma_{y2})^{1/2}$$

である。これによれば、降伏点21 kg/mm²の材料を35 kg/mm²の高強度材に変更したとき、単純引張りまたは圧縮力の荷重条件では40%、曲げ力の条件では22%の板厚減少が可能となる。補強材の模型であるハット型断面チャンネルの衝撃変形の実験結果⁵⁾を図3に示した。上述の式に示されているように、変形量は(板厚)×(強度)^{1/2}に比例して減少することが明らかとなっている。

3.2 具体事例

車輪の重量軽減例を表1に示した。降伏点20 kg/mm²の普通鋼板を、降伏点38 kg/mm²、降伏比0.58の高強度鋼板に変更して、全体として25.7%の重量減を達成した事例¹²⁾である。

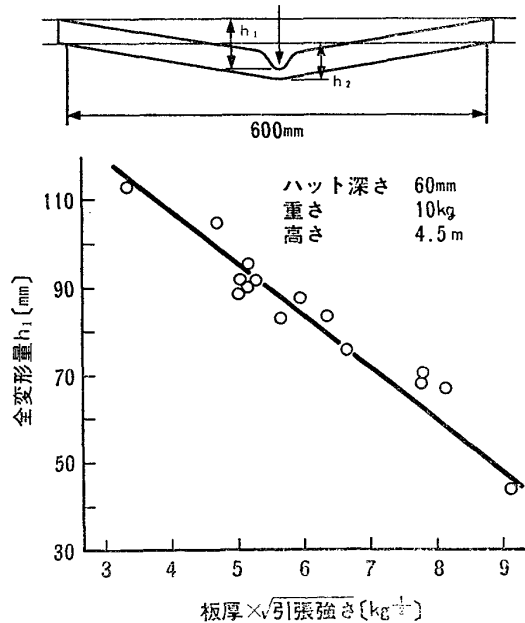


図3 ハット断面チャンネルの落重衝撃特性

表1 小型トラック用車輪の重量軽減

	降伏点	引張強さ	伸び	部品	板厚	車輪重量
	kg/mm ²	kg/mm ²	%		mm	kg
普通鋼	20	34	38	リム	3.8	12.1
				ディスク	4.2	
高強度鋼	38	65	30	リム	2.9	9.0
				ディスク	3.7	

表 2 重量相互作用による車体重量軽減

	モデルによる軽減予測量	試作車による軽減達成量	説明
X ₁	90.7 kg	90.7 kg	ボディの材料変更による初期軽減量
X ₂	100.2	115.7	ボディとシャシの相互作用による軽減量
X ₃	79.4	79.4	シャシ部品の材料変更による軽減量
X ₄	76.2	——	シャシ部品間の相互作用による軽減量
計	346.6 kg	285.8 kg	重量総軽減量

一体構造物である自動車車体では、部分的に軽量化をはかれば、他の部分にも何んらかの影響を及ぼすはずである。車体重量を軽くすれば、エンジン容量も小さくなりうるので、重量軽減対策は波及効果をもつといわれる。車体各部の重量干渉作用の概念を用いて ADAMS ら¹³⁾は軽量化達成の可能量予測の手段を論じている。それによれば、車体の構成部品を、上部構造、下部構造およびエンジンを含めたシャシ部に分類し、これらの各部品群の重量 Y と車体総重量 X との間に

$$Y = aX^b$$

の関係が成立するとしている。総重量 X が各車格毎にきまれば、各部の重量 Y は各部品毎にきめられる定数 a 、 b (a 、 b は過去の 5 車種より算出) により定まる。このような重量算出モデルにより、車体重量 4000 ポンド車について理論解析した結果と、それに基づいて試作された実験車で得られた結果を表 2 に示した。

3.3 車体外板のデント抵抗

自動車車体のフード、ルーフおよびドアなどのように外板を構成する部品は、そのパネルの大部分の領域において、ひずみが数%以下¹⁴⁾である。このため、成形に伴う加工硬化はほとんどなく、原板の材料特性を保存している部分が多い。緒言でも述べた低降伏点化の材質設計指向は、このような外板部品のプレス型へのなじみ性向上のための手段であつた。高強度化は、まさにこの方向と逆行するものである。型へのなじみ性はスプリングバックと関係し、さらに外力による弾性変性と関連する張り剛性に関与している。内板あるいは強度部材の高強度化は重量軽減の目的が大きいが、外板部材の高強度化は、普通材の板厚減少化で問題となる局所的な塑性変形に対する抵抗を補う意味が加わる。この局所的な塑性変形への抵抗力はデント・レジスタンス (凹み性に対する抵抗、デント抵抗) と呼ばれている。

時効硬化あるいは塗装焼付硬化に関して、アルミキルド鋼に対するリムド鋼の優位性¹⁵⁾は、つとに知られていた。外板部材への高強度鋼板の適用は、デント抵抗向上が主要目的となりつつある。デント抵抗は DiCELLO ら¹⁶⁾

による検討によれば

$$W = K(\sigma_y \cdot t^2) / S$$

と表現される。ここで、 K は比例定数、 σ_y は降伏点、 t は板厚、 S はパネル剛性である。この式より、同一のデント抵抗に対して板厚の減少を補う降伏点の必要上昇量を見積ることが可能となる。例えば、降伏点を 21 kg/mm² から 35 kg/mm² に向きさせたとき、パネルの剛性 (材料の弾性係数とパネルの形状) を同じとすれば、板厚は 0.9 mm から 0.7 mm に低減することができる。降伏点 32 kg/mm² の高強度鋼板の使用により、板厚を 10 から 15% 減少させて、なおかつデント抵抗を改善することができたとする実車での報告¹⁷⁾もある。デント抵抗の測定例などについては後の項でふれることにする。

4. 製造技術における諸問題

4.1 強化の方法

金属を強化する機構¹⁸⁾として、次のような方法が考えられている。

- 1) 固溶元素の添加による固溶体強化
- 2) 分散する析出物または分散相による強化
- 3) 加工硬化 (部分再結晶による強化)
- 4) 粒界による強化 (細粒化による強化)
- 6) 組織の微細化による強化 (変態などの利用)
- 6) 点欠陥の導入による強化 (急冷または放射線照射の利用)
- 7) 低温時効による転位の固着による強化
- 8) 熱処理による強化

実用鋼で用いられるものは、これらの強化方法の複合した場合が多い。これらのうち、高強度鋼板の製造で利用されている方法は、固溶体強化、析出強化および組織強化であり、細粒化による強化が、これらに付随する。強化方法の選択は、必要とする強度、使用条件、製造設備能力の制約および経済性などの勘案によりなされる。自動車用鋼板としては、かなり厳しい塑性変形を予定していること、個々の部品を接合するのにスポット溶接を用いることのため、できる限り添加元素を少なくして強度を高めることが企図される。強化手段による引張強さと

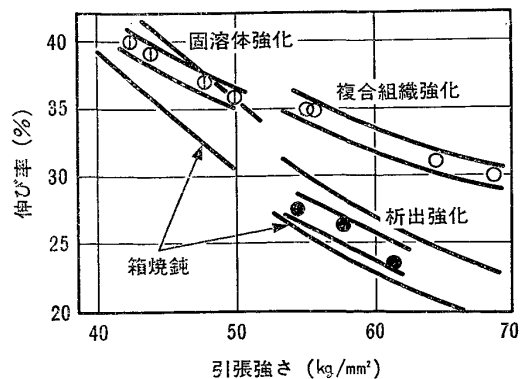


図 4 強度-延性関係におよぼす強化方法の影響

伸び率の関係³⁴⁾の差異を図4に示した。

4.2 低合金高強度鋼板

鋼の強度上昇をもたらす固溶元素は多く、その固溶濃度と降伏点の増加分との関係は詳細に明らかにされている。炭素や窒素などの侵入型固溶元素の強化能は置換型に比較して格段に大きいが、常温における固溶量が少なく、かつ移動の自由度が大きいため、強化には急速冷却の方法を用いねばならない。強化能の高い元素は固溶量が少ないので、実際に利用可能な固溶型元素は P, Si, Mn, Cr, C および N などに限られる。これらの元素は鋼の基本的なものだから、高強度鋼板の基本成分として Fe-C-Mn 系あるいは Fe-C-Mn-Si 系などになる。図5に Fe-C-Mn 系の熱延鋼板および冷延鋼板の引張強さと成分量との関係³⁶⁾を示した。熱延鋼板では固溶体強化に、フェライト-パーライト組織による強化が加わって、60 kg/mm² 程度の引張強さが得られる。冷延鋼板では、図示した成分範囲では焼鈍の影響により、45 kg/mm² 程度にしかなりえない。その他の固溶型強化元素のうち、Pは強化能の著しく高い元素であるが、鋼のぜい化を促進するので、引張強さが 50 kg/mm² を越える場合には用いられない。Siは強化能も比較的高く、材質上の劣化作用も少ない元素であるが、脱スケール性を悪くするので添加量が制限される。

析出強化は析出物の大きさ、形状、分布および母相との凝集力などが転位移動の障害となつて強度が得られるという機構である。析出物として、Ti, Nb, V および Zr などの炭窒化物形成元素が利用される。これらの元素による析出物の形成および熱間圧延時の結晶粒の細粒化のため、熱延鋼板では 60 kg/mm² 以上の引張強さが得られる。冷延鋼板では再結晶焼鈍の過程で成長する微細析出物のため、同一成分で強度は熱延鋼板の 8 割程度

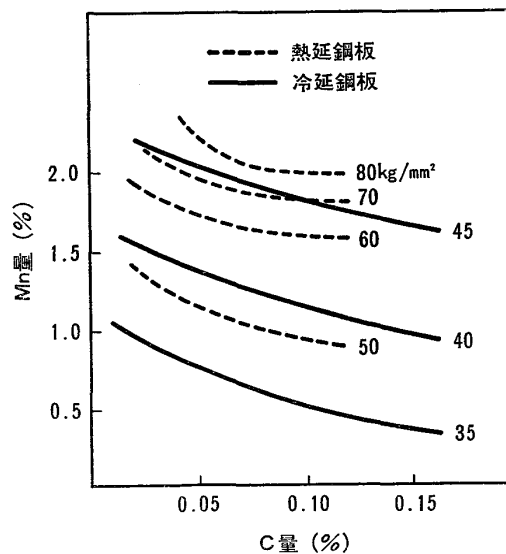


図5 固溶強化型における引張強さにおよぼす化学成分の影響

に低下する。Ti は Nb にくらべて、同一添加量で強化能が高い。これは微細な炭窒化物の析出状態の違いと推定されている。析出物の利用による強化は少量の添加元素で効果大きいという特徴がある。また希土類元素の添加³²⁾により、硫化物系介在物の形態を分散させて、延性を向上させることも行われている。

4.3 複合組織鋼板

適当な合金元素の添加とオーステナイト領域からの冷却速度の選択により、フェライトとマルテンサイトの二相組織を有する高強度鋼板が最近の話題である。この組織の高強度鋼板は図4に示したように、同一強度で比較した場合、他の強化方法の場合よりも延性が優れている。また、基本成分が Fe-C-Mn-Si 鋼であつて、冷延鋼板でも熱延鋼板でも熱処理条件さえ同じなら、材料特性上の相違がほとんどない。引張試験により得られる特徴は低降伏点、高伸び率、高 n 値および降伏点伸びがないことなどである。フェライト中に分散しているマルテンサイト組織周辺の可動転位の存在が低降伏点の理由とされ、さらに、フェライト固相の清浄性の高いことが高延性の原因と考えられている。

複合組織の熱延鋼板の製造法としては、熱間仕上げ後の冷却テーブル上での冷却速度の制御、あるいは通常の変態熱処理による方法がある。引張強さが 60 kg/mm² で、降伏比が 0.5 程度の複合組織熱延鋼板³³⁾が製造可能となつている。

冷延鋼板では焼鈍時の冷却速度の制御が重要である。このため、従来のバッチ式焼鈍よりも連続焼鈍法が適している。例えば、C-Si-Mn 系の鋼種で冷却速度を変えたときの引張試験値³⁴⁾の変化を図6に示した。なお、図4から複合組織鋼の特徴は引張強さが 60 kg/mm² 以上

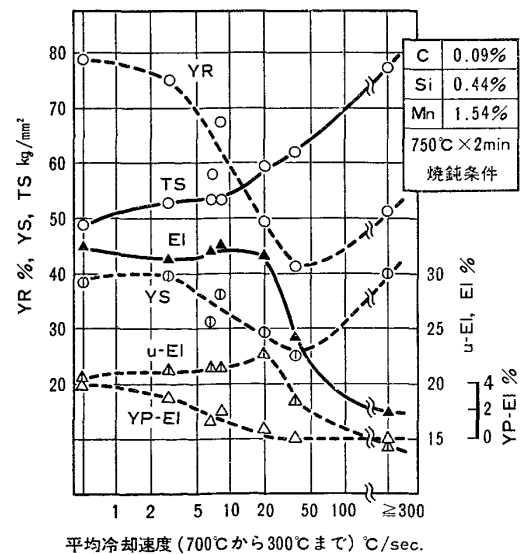


図6 連続焼鈍後の冷却速度の影響
YS: 降伏点, TS: 引張強さ, EI: 伸び率, YR: 降伏比,
u-EI: 一様伸び, YP-EI: 降伏点伸び

で生かされる。引張強さが $40\sim 50 \text{ kg/mm}^2$ では添加元素も少量になり、複合組織鋼を工業的に安定製造することには問題が多い。さらに、引張強さと伸び率の関係は、低強度域では固溶体強化の場合とほぼ同じになる。

4.4 製造工程での留意事項

製鋼では成分の適中や偏析などが注意すべきことであり、Mn や Si の添加量の制限を考慮しなければならない。分塊圧延ではスラブの表面われなどのことから、スラブの冷却条件に配慮する。析出型高強度鋼板では連続熱延の加熱、仕上げおよび巻取り温度の影響が重要である。固溶型では析出型よりも圧延負荷が大きい。冷間圧延では熱延と反対に析出型の圧延負荷が大きくなる。焼鈍温度に対する感受性は固溶型の方がにぶい。したがって、固溶型の方が均一な強度を得やすい。固溶型の方が一般に降伏点が低く、調質圧延でも降伏点の極小値がみられないこともある。その他、板の形状、板厚のばらつき、目標板厚の確保などは安定した成形を保証するために重要である。外板材では表面あらさに対しても配慮¹⁸⁾しなければならない。

5. 使用技術における諸問題

5.1 高強度鋼板の成形

薄鋼板のプレス成形といえば、自動車車体構成部品が想定されるほどになっている。一昔前の深絞り性という言葉で代表される円筒絞り成形とは、現在の車体プレス成形はかなり異なつたものと考えている。一般のプレス成形とは、その要求される性質がかけ離れた、むしろ特殊な成形の領域を占めているものである。車体部品の複雑な曲面形状を平板から成形していく過程における、材料に付与される応力とひずみの状態は、一つの部品でも位置によりすべて異なり、その状態を数値的にシミュレーションすることには容易ならざるものがある。変形状態図とか成形限界図とかの有用性を否定するものではないが、これらの表現として、成形のある特定位置での特定の変形径路での状態を表わしているにすぎない。このような複雑な現象を解明して、最小の労力で最大の効果あるいは利益を得るために、これまで多くの努力が払われ、現状の認識と現象の抽象化により、プレス成形技術の統一的総合的な集約をはかる試みがいくつかなされてきている。以上のような状況の中で、従来の普通鋼板がたどってきた車体プレス部品とのつき合いのわだちらに、強度の高い性質をもつた鋼板が参入してきたわけである。従来鋼がそのつき合いの中で苦勞したことが、高強度鋼板の場合に、量的にそのままあてはまるわけではない。これまでの歴史の過程で、車体成形では何が問題で、どのように解決すべきかなどについて、かなり明らかにされているからである。しかしながら、高強度鋼板の成形では、それらの問題、例えば、しわなどの形状不良や型かじりなどが、従来鋼の場合よりも強調されてあらわれて

くることは想像に難くない。結局、車体を構成する個々の部品につき、高強度鋼板の使用による長所と短所とを総合的にはかりにかけて、長所が多ければ高強度材を使用するというような利益較量論により検討すべきことである。その上に、車体という全体の構造物が機能および性能などのあらゆる面で、目標とした最適解に到達したかどうか議論の対象となる。成形技術はこのような判断の対象となる重要な項目である。

1) せん断

所定の成形品を得るための素板形状は複雑なものから単純なものまでさまざまである。いずれも、コイルあるいはシートからのブランピングにより、金型へセットされる形状が打抜かれる。最近では、特殊な部品に対してファイン-ブランピング技術も確立しているが、モデルチェンジの多い車体部品には一般的には適用されない。せん断時のクリアランスは板厚の $8\sim 12\%$ 前後が標準となつている。クリアランスはせん断刃の摩耗により過大になり、せん断面のだれやかえりが徐々に大きくなる原因となる。せん断面に生じるバリはプレス成形時に金型のフランジ面でつぶされて板から脱落し、金型内部に侵入すると成形品の表面欠陥の原因となる。また、伸びフランジ成形では、このバリ(加工硬化している)にき裂が入り、それが伝播して破断の原因になることもある。高強度鋼板のせん断では、軟鋼板の場合よりもクリアランスを 5% ほど大きくすることにより、せん断力を吸収することができる²⁰⁾とされている。また、軟鋼板とくらべて延性にとほしいため、クリアランスを大にしても、バリはそれほど成長しない。高強度鋼板の伸びフランジ性の調査を穴ひろげ試験で調査した結果²¹⁾を、穴を打抜くときのクリアランスとの関係で示したのが図7である。打抜きせん断で生じたバリのある方をポンチ側にして、バリをコイニングするような方法にすれば、穴ひろ

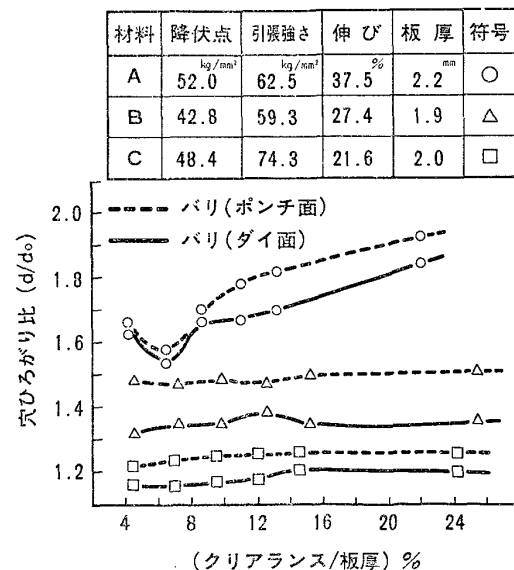


図7 せん断のクリアランスと伸びフランジ性

がり限を 10% ほど向上させることができる。クリアランスによる影響は、この場合にはほとんど見られない。

2) ひずみの伝播

フェンダー、ドアおよびフードなどのような車体外板部品で、比較的寸法の大きいものの成形では、しわ押え面の形状は、円筒面あるいは円錐面の一部と傾斜面とで構成されたものが多い。しわ押え面の形状は成形の良否を左右する重要な要素であり、これまでの経験と実績をもとにした法則により、その形状の設定と材料の選択がなされてきている。成形品の破断やしわを回避しても、成形品の局部的な形状不良（面ひずみ、loose metal あるいは shadowing）が結果的に発生する場合がある。この微小な形状不良現象は塗装まですると、しろうと目にもわかるようになり、外観形状を損うことになる。この現象には、応力とひずみの量およびその勾配が関与していると考えられる。もちろん普通鋼で問題となつてはいるのであるが、高強度鋼板ではこの現象がどのようなになるか、今後の検討をまたなければならない。面ひずみの発生は、成形初期でのしわの発生、成長およびスタンピングの最終工程での消去という過程と関連していると考えられている。特に、成形初期の塑性変形が微小な状態でのひずみ状況が重要である。塑性ひずみゲージを鋼板に貼布して、その変形状態を調査²²⁾したのが図 8 である。冷延鋼板 A は普通キルド鋼板で、B は降伏点 37 kg/mm² 引張強さ 55 kg/mm² の高強度鋼板であり、板厚はいずれも 0.8 mm である。成形は一辺が 600 mm の四角筒平底成形で、成形深さの進行に伴うひずみの発達状況を示している。中心部における等二軸変形、コーナ部の平面ひずみ変形および直辺部の単純引張変形で構成されている。軟質材 A は、底面全体がほぼ塑性変形しているのに、硬質材 B ではコーナ部を除く大部分がこの程度の成形では弾性変形内にとどまっている。特に、硬質材では素材がポンチ肩部になじんだ後に、ひずみの成長が著しく小

さくなる特徴を有する。材料 A および B とともに成形条件一定としての比較であるが、このようなひずみの伝播能力の相違は、面ひずみとの関係で高強度鋼板の使用にあつては十分に配慮すべきことである。

3) r 値の寄与

引張強さが 40~45 kg/mm² の高強度冷延鋼板では、r 値を普通アルミキルド鋼と同程度にすることが可能である。現場で実用的に製造されている r 値の例²³⁾を図 9 に示した。引張強さが 10 kg/mm² 上昇したことに伴う成形性（あるいは延性）劣化を r 値増加によつて補うためには破断限界に対しては 0.3、しわ限界に対しては 1.1 の増加が必要⁶⁾とされている。これより、高強度鋼板の成形にあつては、しわの発生に注意すべきことが理解される。しわには、フランジしわとボディしわがあり、フランジしわはしわ押え面の損傷をもたらすが、しわ押え力が十分に作用すれば防止可能である。ボディしわについては、ひずみの伝播性との関連があり、しわ押

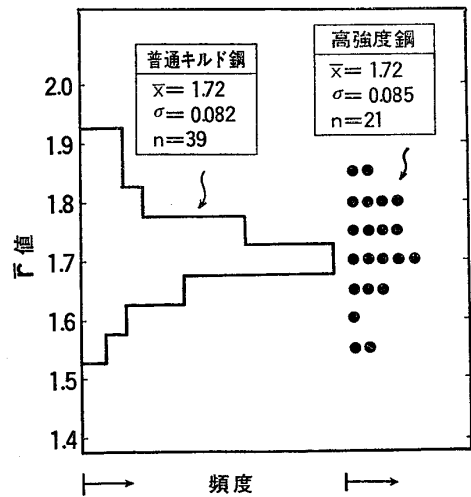


図 9 引張強さ 40 kg/mm² 級高強度冷延鋼板の r 値 (板厚 0.7 mm)

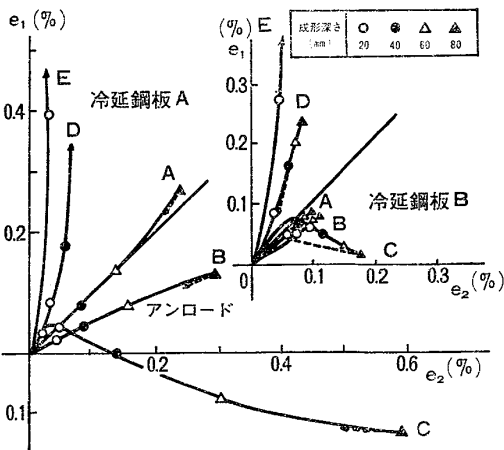


図 8 ひずみの発達状態 (平底四角筒)
A, B, C, D, E は測定位置を示す。
A: 中心部, E: コーナ部, C: 長辺部

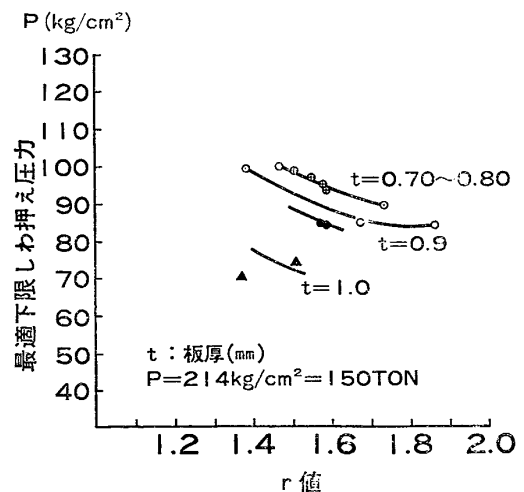


図 10 フェンダー成形における r 値の寄与

え力の調整のみでは消去不可能である。このため材料として r 値の増加は意味のあることである。

単純な円筒容器成形の場合に²⁴⁾、ポンチ肩部で破断するときの荷重 P は、 n 値と r 値とにより

$$P = A_0 T_s \left(\frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \right)^{1+n}$$

と表わされる。 T_s は材料の引張強さ、 A_0 はポンチ直径を d_p 、素材板厚を t_0 として $\pi d_p t_0$ で与えられる。この式より、破断荷重を向上させる要因は n 値と r 値以外に素材の板厚と引張強さの存在を無視できないことがわかる。すなわち、破断荷重だけをみれば、 n 値や r 値よりも板厚や引張強さを向上させた方が良い場合のあることを示唆している。引張強さ 40 kg/mm^2 材の実物フェンダ成形における板厚と r 値の寄与の度合を示したのが図 10 であり²⁵⁾、しわと破断の存在しない成形可能しわ押え力範囲の下限のしわ押え力により成形のしやすさを表示している。高強度鋼板の適用が板厚を薄くすることにあるのなら、 r 値に対する配慮が重要なことを示している。

4) スプリング・バック

低降伏点鋼板は成形時の材料の型へのなじみ性を向上させ、所定の目的形状を得やすいというところに意味があつたことを思えば、高強度鋼板の成形にとって、スプリング・バックの防止はかなりの難関であることが予想される。通常の高強度鋼板では降伏比も高いことから、ひずみの伝播を局所化してしまうため、形状不良を生じやすく、外板パネル部品の張り剛性を弱めることになる。張り剛性の測定結果²⁶⁾を図 11 に示した。降伏点の異なる材料を一定の成形条件で成形した後に、成形品の成形深さと飛移り荷重の関係を示している。降伏点の高い材料は型へのなじみ性が悪く、飛移り荷重が低い。車体のメンバやレール類を高強度鋼板におきかえる例が多く、そこでは成形性よりもスプリング・バックに代表される形状不良が問題視される。これを防ぐため、スタン

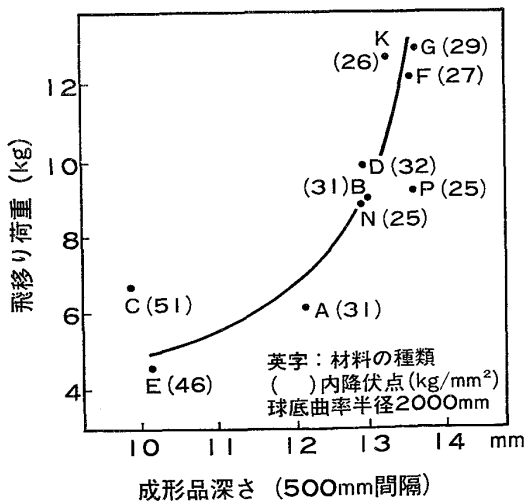


図 11 角筒球底面プレス品における張剛性 (飛移り現象がある場合)

ピング荷重の上昇も効果があり、その例²⁷⁾を図 12 に示した。成形品をテンプレートにあてたときのすき間をなくすには、スタンピング荷重を増加させることによつても可能であることを意味している。使用した HSLA の降伏点は 60 kg/mm^2 、引張強さ 70 kg/mm^2 および伸び率 16% の材料である。複合組織鋼の特徴の一つに低降伏点があつたが、これはスプリング・バックにどのような効果をもつのであろうか。図 13 は単純曲げにおけるスプリング・バックを析出強化型材料と比較したものであり³⁵⁾、曲げひずみが小さい場合には低降伏点の効果が明瞭である。ひずみ量が大きくなると低降伏比の効果がなくなる。この結果より、曲率半径の比較的大きな部品に対して複合組織鋼の低降伏点特性はスプリング・バックの低減効果に寄与することがわかる。

5) デンツ抵抗

デンツ抵抗の意味はさきに述べたとおりである。デンツの問題は車の使用時だけでなく、成形時や組立て時の材料の取扱いにも関連している。したがつて、負荷の形態としては静的な場合と動的な場合とがある。現状では

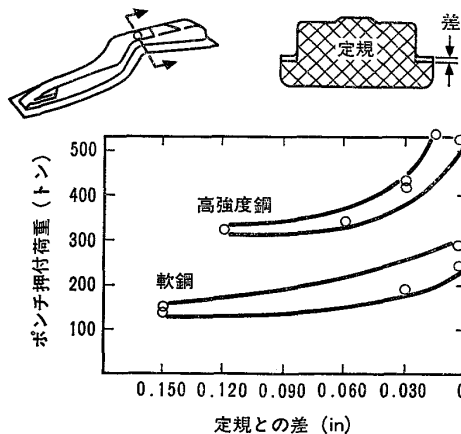


図 12 スプリング・バックにおよぼすポンチ押付荷重の効果

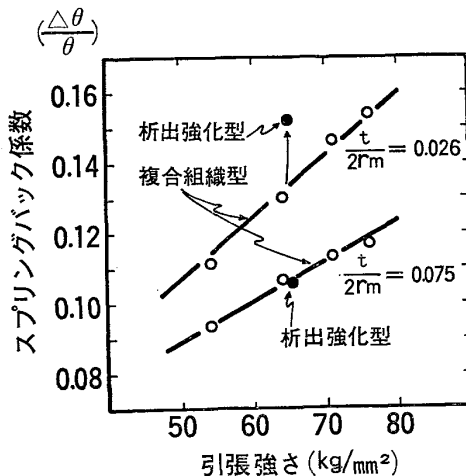


図 13 単純曲げ加工における弾性回復現象 (t: 板厚, r_m : 曲げ半径)

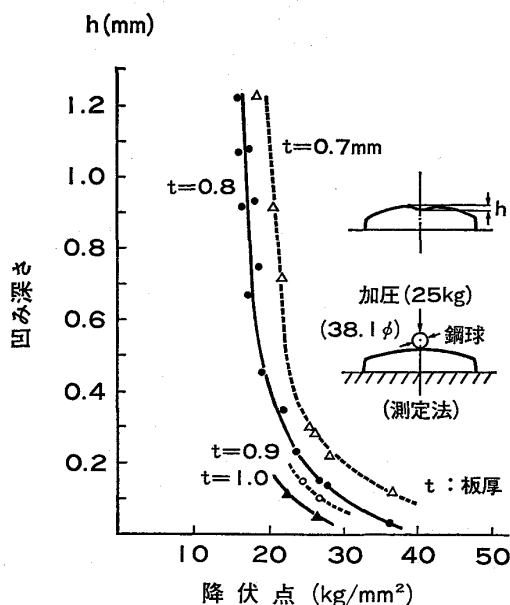


図14 ドアモデル型におけるデント抵抗
(かまぼこ底曲率半径 2000 mm)

主に静的負荷に対するデント抵抗が重視されている。測定法についてはまだ統一されたものではなく、各社ともそれぞれの方法で実施している。負荷をかける工具の形状パネルへの負荷の位置、負荷されるパネルの支持方法、凹み量の測定方法などデータをばらつかせる要因が多い。図14はデント抵抗の測定例²⁸⁾である。板厚が0.7か0.8mmの場合に、降伏点20~22 kg/mm²が限界であることを示している。実車部品の測定では、上述した問題のため、図14のように、降伏点と板厚だけでは整理できない場合が多い。

6) 型かじり

板材の成形では金型面上での材料のすべりを伴いながらの拘束が基本となっている。この拘束の条件は金型と材料との焼付きを発生させる要因を含んでいる。発生の原因として、実際のプレス工場では異物の飛び込みによるものが多いと報告されている。材料については、一般的に表面あらさが大きいほど型かじりは発生しにくい。これはあらさが大なるほど工具との真実接触面積が小さくなり、工具と材料間に持ち込まれる潤滑油量が増加するからである。型かじりは主として熱延鋼板と高強度鋼板の成形で発生しやすい。前者は一般に板厚が厚く、後者は引張強さが高いため、ともに成形荷重の上昇をもたらし、このためダイス肩部と材料間の面圧が高くなり、型かじりを生じやすい。図15には、同一の型材を用いて型かじり性におよぼす接触面圧の影響を軟鋼板と高強度鋼板との比較で示したもの²⁹⁾である。高強度鋼板は低面圧では傷がつきにくく、高面圧では型かじりを発生しやすい結果となっている。

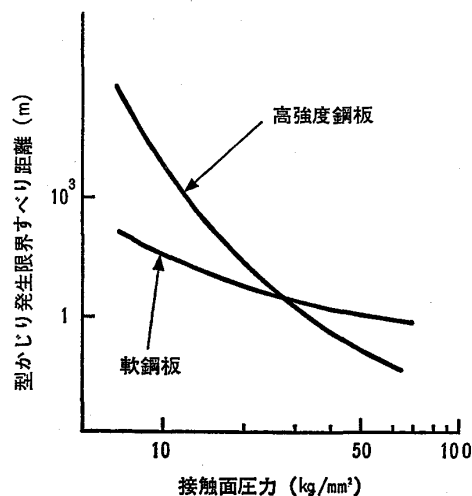


図15 高強度鋼板と軟鋼板の型かじり発生限界比較

5.2 成形事例

1) 高強度鋼板使用による自動車製造 (その1)³⁰⁾

重量が970 kgの車体に77 kgの高強度鋼板を適用した例が報告されている。その種類は49%が耐デント性鋼板、8%が窒素添加鋼、33%がHSLA鋼および10%が超高強度鋼である。降伏点は30~55 kg/mm²および60~100 kg/mm²である。設計段階で、部品の機能と材料費を基準として各部品の材料をほぼ選定して、トライアウト段階で、成形性に必要な特性を抽出して適用材料を決定している。主な部品の材料と成形について述べる。

- ① フロント・サイドレール 普通鋼ではしわ押えなしの成形で、トリミングなしのまま製品となった。高強度鋼板では伸びフランジわれとスプリング・バックのため、しわ押え力の拘束とトリミングにより、これらの問題を解決した。キルド鋼とキャップド鋼のDRS (Dent Resistance Steel) で、前者は型かじりを発生しやすかった。板厚1.6 mmのDRS適用で17%の重量軽減ができた。
- ② レール・リインフォースメント ①の部品の補強部材で3部品からなりたち、板厚1.3 mmと1.8 mmのDRSと2.5 mmの窒素添加鋼を用いた。組立時の精度のことから、スプリング・バック防止が主眼点であった。伸びフランジわれ危険部に対しては、ひずみの集中を避ける対策を講じた。
- ③ ドア・インパクト・ビーム このビームの製造法として分割型と一体型がある。一体型ではビームが外板パネルに接着され、両端部が内板パネルに溶接されている。前ドア用は板厚0.85 mmのマルテンサイト鋼で、後ドア用は短いビームだから、同じ板厚の未焼鈍冷延鋼板を使用している。
- ④ ブレーキ・ペダル 板厚6.4 mmで、降伏点42 kg/mm²のHSLA鋼を使用した。有限要素法に

より最適な形状と材料を設計したものである。

⑥ フード・パネル 表面品質, デンツ抵抗, スプリング・バックなどが重要な管理項目である。板厚 0.75 mm の軟鋼板よりも, 0.65 mm の DRS の方がデンツ抵抗がすぐれていた。13% の重量軽減と 10% のデンツ抵抗増大を達成した。さらに, DQ (drawing quality) や DQSK (special killed) 材では成形にともなつて表面あらさの増大が見られることがあるが, DRS ではこのようなことがなく表面外観がすぐれていた。

2) 高強度鋼板使用による自動車製造 (その 2)³¹⁾

現在, すでに高強度鋼板を採用している部品, またはその可能性あるものは次のように分類されている。(a) 補機, 電装品などに使用されている小物機能部品で, 打抜きや曲げ成形が主体となるもの, (b) 商業車用のフレームやシャーシなど, 比較的単純な断面形状をもつ部品で, 曲げ, 穴抜き, 軽度の絞り成形が主となるもの, (c) FMVSS に適合させるため, 新たに必要となつた強度部材, 高強度鋼板の採用を促進させる直接的な動機となつたもの, (b) 車体構成上の主要部品で軽量化の対象となるもの。以下, 代表的な部品について紹介させていただく。

① バンパー・リインフォースメント SAPH 材では板厚 3 mm が必要であつたが, 引張強さが 60 kg/mm² の材料では 2 mm 弱の板厚にすることができた。工程は, フォーミング, トリミング, ベンディング, リストラッキングおよびカムピアシングの 5 作業で, 型かじり対策, 寸法精度管理およびしわ防止対策が工程設計の留意事項である。材料のすべり距離をできるだけ短くする設計, 型材への銅基合金の使用および油性潤滑剤の適用により型かじりを防止できたとされている。

② ドア・サイド・ビーム 長手方向に 3 本の山形が通つて, 両端部では同一平面となる部品である。中央の山形部は張出し変形主体となるため, 破断防止対策が重要である。引張強さが 60 kg/mm² 材を適用するにあたり, 成形工程を 2 工程にわけ, さらにポンチ肩やダイス肩半径を大きくして, 型かじり対策もかねて油性潤滑剤を用いて成功している。寸法精度対策としては, しわ押え力の不足に対して型内にウレタンゴムを設定したこと, 両端平面部の肉余りしわに対してのしわ取りビードの設定, フランジ面のスプリング・バックや全体形状のそりに対しては, みこみ代の設定などである。

3) 成形事例まとめ

以上は米国と日本で公表されている高強度鋼板の成形事例である。高強度鋼板の適用にあつては, 適用すべき部品に適した材料を選定して, 材料固有の成形能に見あつた工程設計をしなければならない。成形品の寸法精

度については, プレス機械の能力 (とくに, しわ押え力能力), 型の剛性に注意すれば, スプリング・バック量は予め見込むことができるので問題ない。型かじり対策としては, 工程をわけて, 各工程でのすべり量を少なくすること, 型表面の処理, 潤滑剤の適用などが有効である。いずれの問題にも, 軟鋼板で培われてきた理論と経験が高強度鋼板でも十分に生かされることと思う。

6. 結 言

自動車用への高強度鋼板の適用は, 日本と米国では, 車体重量の相違から, その考え方に多少の違いが感ぜられる。しかしながら, 米国のサブ・コンパクト車あるいはコンパクト車への積極的な移行姿勢をみると, いずれその適用にあつての思想は同一のものになつていくであろう。高強度薄鋼板の需要予測では, どの資料をみても, ここ数年間, かなりの勾配で増加の一途をたどるようになってきている。そのため, 今後とも鋼板製造者と利用者との間の密接な技術交流の必要性がましてくる。使用技術の諸問題には, 成形だけでなく, 溶接, 疲労, 塗装および耐食なども含めなければならない。それらの項目については, いずれ他の専門家の解説を望みたい。高強度鋼板の製造法の概略とその成形にあつての留意事項

表 3 各種高強度鋼板の製造法

	強化機構	強化方法	使用合金元素	強度レベル TS (kg/mm ²)
箱焼純 低合金高強度鋼板 (HSLA)	固溶, 析出, 細粒化	合金添加	C, Mn, Si, Ti, Nb 等	~60
連続焼純 低合金高強度鋼板 (HSLA CA)	固溶, 析出, 細粒化	合金添加	P, Si, Mn, Ti 等	~80
	変態組織 (混合組織)	合金添加 熱処理	Si, Mn, Cr 等 (P, Si)	~100 ~140
時効硬化鋼板 (AA Steel)		時効 (~200°C)	N	~50
析出硬化鋼板	析出処理 (~600°C)	合金添加	Cu	~50
IF 鋼板窒化処理 (Armco IF (HT))		合金添加窒化処理 (~600°C)	Ti, Nb, N	~80
1Mn-1Ni-3.5Cr 鋼板 (INCO Formable HSS)	固溶	合金添加 A ₃ 点以上に上温	Mn, Cr, Ni	~100 (Low C)

表 4 各種成形性と材料の寄与関係

成形性	要因	r 値の効	強度効果	低降伏点効	板厚減少効	その他
深絞り性	円筒	◎	○	○	△	
	角筒	◎	○ (enhance)	○	△	
	円錐台	◎	△	◎	×	
張出し性	T 字型	われには◎ しわには○	われには○ しわには△		△	n 値の付与 高延性化
	球筒	◎	△	○	△	
しわ	実物モデル	◎	△	○	△	
	フランジ	◎	△	◎	×	
バウンス性	ボディ	◎	△	◎	×	
	角筒 (かまぼこ面)	◎	△	○	△	
伸びフランジ性	実物モデル	◎	△	○~◎	△	形状, 加工条件の変更
	伸びフランジ性	◎	○	○	△	
	張鋼性	◎	△	○~◎	×	
	デンツ抵抗	◎	◎	○	×	BH の付与

×: 成形性を非常に悪化させる。△: 成形性を悪化させる。
○: 成形性改善効果無または小さい。◎: 成形性改善効果有。

のまとめを表 3 と表 4 とに示して、本稿の幕を閉じたい。

最後に、理化学研究所の吉田清太博士、トヨタ自動車工業(株)の石垣秀生博士、岩崎誠夫氏、新日本製鉄(株)君津製鉄所の武智 弘博士、基礎研究所の古川 敬博士、本社技術開発部の安藤成海氏、製品技術研究所の佐藤泰一氏、名古屋製鉄所の花井 諭博士には、本稿をまとめるにあたり、多くの助言と協力を得たので感謝申し上げます。

文 献

- 1) 吉田: 鉄と鋼, 63 (1977) 9, p. 1588~1596
- 2) 吉田: 自動車技術, 30 (1976) 2, p. 108~116
- 3) 高橋・大橋: 塑性と加工, 17 (1976) 190, p. 914~921
- 4) 武智・佐藤・白田・吉田: 鉄と鋼, 62 (1974) 14, p. 1887~1897
- 5) 花井・佐藤: 塑性と加工, 15 (1974) 166, p. 885~892
- 6) 佐藤・吉田: 塑性と加工, 17 (1976) 190, p. 860~866
- 7) 青木・花井: プレス技術, 14 (1976) 12, p. 103 108
- 8) 吉田・佐藤: 日本機械学会誌, 80 (1977) 698, p. 47~52
- 9) 吉見: 機械の研究, 26 (1974) 8, p. 997~1003
- 10) 吉田: 塑性と加工, 16 (1976) 176, p. 808~816
- 11) D. G. YOUNGER: 16th Mech. Working and Steel Processing Conf. (AIME), (1974)
- 12) M. S. RASCID and G. D. LAWRENCE: SAE 780138(1978)
- 13) D. G. ADAMS and S. DINDA: SAE 760207(1976)
- 14) 石垣: 塑性と加工, 19 (1978) 210, p. 589~597
- 15) R. D. BUTLER and D. NORTH: Proc. ICSTIS, Suppl. Tsans. ISIJ, 11 (1971), p. 848~856
- 16) J. A. DICELLO and R. A. GEORGE: SAE 740081 (1974)
- 17) S. DINDA and R. W. KARRY: SAE 760207 (1976)
- 18) 竹内: 鉄と鋼, 55 (1969) 1, p. 69~83
- 19) S. DINDA and A. S. KASPER: SAE 770209(1977)
- 20) R. J. MARKS: SAE 760011 (1976)
- 21) 青木・堀田: 未発表
- 22) 堀田・青木: 昭和53年度塑加春季講演会 (1978) p. 321~324
- 23) 今林・岸田: 未発表
- 24) 山田: 塑性と加工, 5 (1964) 38, p. 183
- 25) 青木・堀田: 未発表
- 26) 花井・青木, ほか: 第23回塑加講演会 (1972) p. 153~160
- 27) J. P. MALONEY and A. H. ROGER: Auto. Engineering, 82 (1974) 7, p. 24~32
- 28) 青木・堀田: 未発表
- 29) 堀田・青木・佐藤: 塑性と加工, 19 (1978) 204, p. 17~24
- 30) S. DINDA, D. K. KELLEY, and A. S. KASPER: SAE 780139 (1978)
- 31) 岩崎, ほか: 塑性と加工, 17 (1976) 190, p. 930~936
- 32) M. KORCHYNSKY: Symp. Low Alloy High Strength Steel (1970), p. 17~27
- 33) 今村・古川: Nippon Steel Tech. Rep. Overseas, 10 (1977), p. 103~113
- 34) 武智: 金属学会第4総合分科会 (1978-2), p. 13~16
- 35) 青木・堀田: 未発表
- 36) S. HANAI, T. SATOH, and I. AOKI: 第8回 IDDRG (1974), p. 92~105