

高張力冷延鋼板のプレス加工性

Press Formability of High Strength Cold-Rolled Steel Sheets

阿部 英夫*
Hideo Abe

山本 健一**
Ken-ichi Yamamoto

中川 吉左衛門***
Kichizaemon Nakagawa

Synopsis:

Formable high strength steel sheets effective in reducing automobile body weight with a potential saving in fuel have been developed in two types: one is a dual-phase steel, "CHLY", and the other a rephosphorized Al-killed steel with high r -value, "CHR". In comparing these two steels with the conventional steel, "APFC", the authors made both theoretical and experimental studies on press formability, stiffness and strength of these steels, in terms of strain propagation property, shape fixability, springback, stretch formability, deep drawability stretch flanging formability, resistance to wrinkle, panel stiffness, dent resistance, and bending strength of hat section beam. The suitability of each steel for auto-body parts is also discussed.

1. まえがき

従来、自動車用薄鋼板の材質はプレス加工性の改善を目的とし、 r 値上昇と軟質化（低降伏点、高延性）の道をたどってきた。しかし1970年に入ると米国における乗員保護のための法規制（FMVSS）が制定され、加えて排ガス規制が厳しくなり車体強度向上と重量軽減を目的として高張力鋼板の使用が検討された。しかし、当時の用途はバンパー、ドアの補強とブラケット類のごく限られた部品にとどまり、パネル類への適用の可能性は疑問視されていた¹⁾。1975年に米国では省エネルギー法が成立し燃費改善が法的に義務づけられ、自動車車体軽量化のために高張力薄鋼板をパネル類、メンバー類にまで使用する必要が生じ、すでに実用化の段階に入っている。この使用拡大を達成するために、車体設計と成形技術を改善するとともに成形性の優れた高張力鋼板の開発とその量産体制の整備が必要であろう。最近、当社では成

形性の優れた2種類の高張力冷延鋼板を開発しすでに量産体制が整っている^{2,3)}。一つはP添加Alキルド鋼で、比較的低廉なリン(P)を添加元素として用い、通常の高張力Alキルド鋼（引張強さ300MPa）と同等以上の高い r 値を有している（当社規格CHR）。他の一つは連続焼鈍または箱焼鈍による、マルテンサイト組織とフェライト組織のDual Phase鋼（当社規格CHLY）である。CHLYは固溶体または析出強化鋼に比べて降伏強度（以下YSと記す）、降伏比（以下YRと記す）が低い、加工硬化が大きい、TS伸び（以下EIと記す）バランスが優れている、などの特徴を有する。本資料ではこれら各種高張力冷延鋼板のプレス加工性の特徴と適正用途を明確にするために、モデル成形性試験および実用化試験をした結果について述べる。

2. 供試材と実験方法

実験に用いた材料は板厚（以下 t と記す）0.7～1.6mm、引張強さ（以下TSと記す）270～820MPa

* 技術研究所加工研究室主任研究員

*** 技術研究所次長兼加工研究室室長・工博
（昭和55年6月4日原稿受付）

** 技術研究所加工研究室

の冷延鋼板で、その主な材料の化学成分と機械的性質をそれぞれ Table 1, 2 に示す。グループ 1 の材料は成形性の実験に、グループ 2 の材料は曲げ部材（バンパーのモデル）の曲げ強度試験に用いた。

Fig. 1 に供試材の n 値のひずみ依存性を示す。CHLY40, 50 は 0.5Cr-1.2Mn を含有する連続焼鈍ラインで製造した Dual Phase 鋼であり、特にひずみの小さな範囲で高い n 値を、また CHR40 は高い r 値を有することが特徴である。

Table 3 にモデルプレス成形性試験条件を示す。試験 I はひずみ伝播性、形状凍結性、張り剛性、耐デント性を調査するための四角筒浅絞り成形試験である。試験 II では張り出し成形性を、III では深絞り性を、IV では耐しわ性と深絞り性の両者を、

V では伸びフランジ性を調べた。

3. 実験結果

3.1 ひずみ伝播性と形状凍結性

薄鋼板をドア、フードなど曲率の小さな面を有する部品に成形するとき、ボンチ底面でのひずみ伝播性がよく、弾性回復が小さい（形状凍結性がよい）ことが、そのパネルの張り剛性や耐デント性を高めるうえで重要である⁴⁾。

一辺 300mm、曲率半径 $\rho_0 = 2200\text{mm}$ の球底四角筒浅絞り成形をしたときのボンチ底中央のひずみ (ϵ_B) と YS との関係を図 2 に示す。YS が低いほど ϵ_B は顕著に増大するが、CHLY の ϵ_B は

Table 1 Chemical composition of steels mainly used

No.	Steel	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Others
1	CHLY40	0.030	0.03	1.25	0.016	0.006	0.0032	0.046	Cr 0.55
2	CHLY50	60	4	1.13	22	11	45	39	Cr 0.45
3	CHR40	50	2	0.21	82	9	87	50	-
4	APFC40	87	35	0.77	16	14	16	44	-
5	APFC50	76	14	1.03	18	7	66	50	Nb 0.03
6	SPCE	37	29	0.32	11	18	120	30	-
7	KTSA	2	2	0.32	5	9	8	-	-

Note CHLY40,50 : Dual phase steel, CHR40 : Rephosphorized Al killed steel,
APFC40,50 : HSLA type steel, SPCE : Al killed mild steel,
KTSA : Decarburized steel

Table 2 Mechanical properties of steels mainly used

No.	Steel (Symbols)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	n_{10-20}	n_{2-4}	YR (%)	r -value
Group 1	1 CHLY40 ($t=0.7$) ○	191	425	39	0.238	0.330	45	1.04
	2 CHLY50 ($t=0.7$) ⊙	222	471	34	0.212	0.250	45	0.94
	3 CHR40 ($t=0.7$) △	262	406	39	0.201	0.180	65	1.75
	4 APFC40 ($t=0.7$) □	259	425	34	0.193	0.230	61	1.50
	5 APFC50 ($t=0.7$) ⊥	385	482	31	0.186	0.160	80	1.01
	6 SPCE ($t=0.7$) ◇	180	317	44	0.220	0.240	57	1.97
	7 KTSA ($t=0.7$) ☆	132	269	53	0.255	0.255	49	1.69
Group 2	8 CHLY80 ($t=1.23$)	402	779	25				
	9 CHLY80 ($t=1.43$)	429	817	25				
	10 CHLY70 ($t=1.60$)	369	709	26				
	11 CHLY50 ($t=1.46$)	255	564	36				
	12 CHLY50 ($t=1.63$)	285	563	38				
	13 APFC50 ($t=1.39$)	388	493	30				
	14 APFC40 ($t=1.40$)	292	431	38				

Note Steels in Group 2 are used only for bending test of "hat" section member

Table 3 Forming test conditions

No.	Forming	D_p (mm)	r_p (mm)	D_d (mm)	r_d (mm)	BHF (kN)	Lubricant	Blank mm sq.
I	Square shallow shell	300	19	302.4	8.0	100~500	Rust prevent oil	450
II	Stretch forming	140	70	146.8	8.5	390	High visc. oil	180
III	Deep Drawing	100	12	102.6	6.0	74	Rust prevent oil	180
IV	Conical shell forming	100	12	146.8	8.5	50~500	Rust prevent oil	200
V	Stretch flanging (Bore expand test)	40	6	44	1.0	100	Rust prevent oil	100
		(12φ punched hole)						

Note D_p : Punch diameter or side, r_p : Punch profile radius, D_d : Die cavity diameter or side, r_d : Die profile radius, BHF: Blank holding force

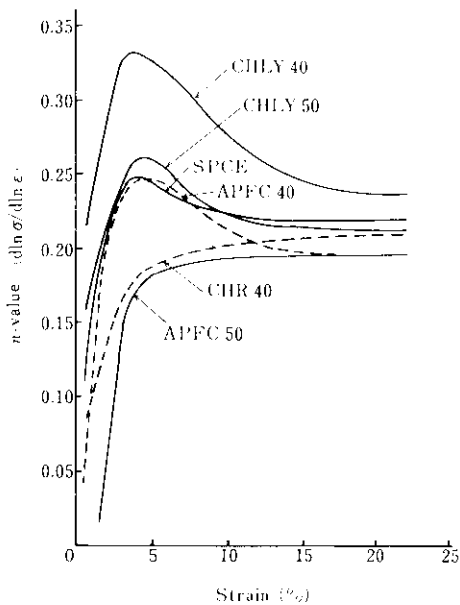


Fig. 1 Strain dependence of n value (work-hardening exponent) of steels tested

他の材料の ϵ_B YS 相関よりも ϵ_B が大きく、ひずみ伝播性の優れていることが明らかである。このパネルの除荷時のスプリングバック $\Delta\theta/\theta$ ($1 - \rho_0/\rho$) と YS との関係を図 2 に併記する。YS が低く、より大きな ϵ_B を与えることができる材料ほど $\Delta\theta/\theta$ は小さく、形状凍結性がよいことがわかる。しかし、Fig. 3 に示すように、ハット形断面にプレス曲げたときの CHLY のスプリングバック $\Delta\theta/\theta$ は、他の材料の $\Delta\theta/\theta$ YS 曲線より上に位置している。これは、CHLY の加工硬化が大きいためである。

以上の結果から、小さな曲率を有するパネルに

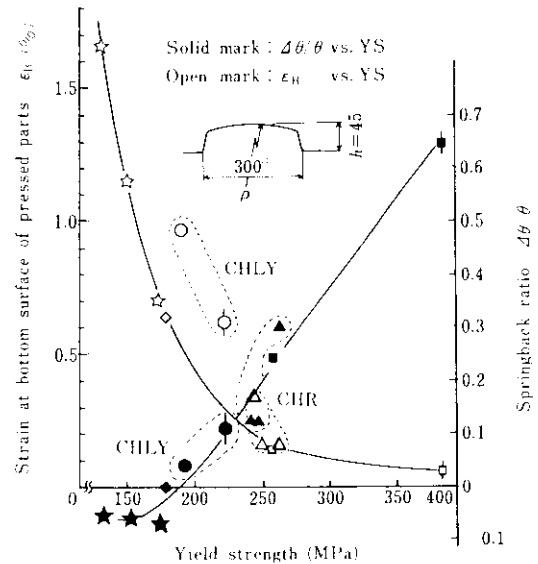


Fig. 2 Relations among strain at bottom surface ϵ_B , springback ratio $\Delta\theta/\theta$, and yield strength YS

成形するとき、CHLY の形状凍結性がよいのは、ポンチ底でのひずみ伝播性が優れ、十分な ϵ_B を与えられるためと考えられる。

3.2 張り剛性と耐デント性

張り剛性はパネルに面外集中荷重が負荷されたときの弾性的なたわみの大小で評価される。したがって、張り剛性は、パネルの曲率半径 ρ 、スパン長、板厚 t とヤング率により支配されることがよく知られている⁵⁾。300mm 四角筒浅絞りパネルの中央に荷重 P (24.5N) の面外集中荷重をかけたときの張り剛性 (これをたわみ量 δ_E または剛性 $S = P/\delta_E$ で評価する) と ρ , t との関係を図 4

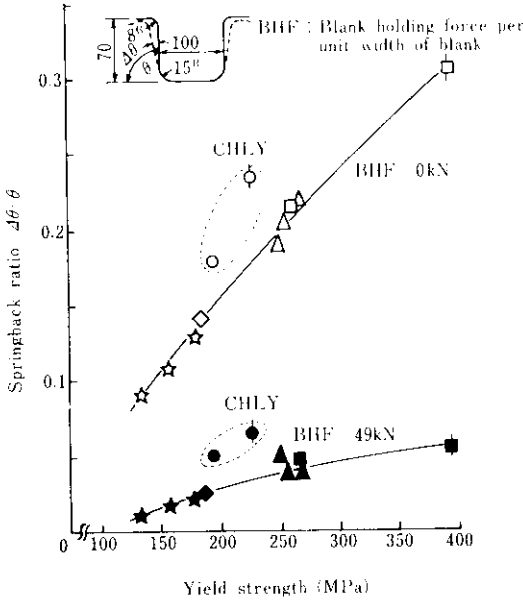


Fig. 3 Effect of yield strength on springback in stretch bend test

に示す。 ρ が小さいほど、また、 t が大きいほど S が大きいことがわかる。 S と ρ 、 t との関係を既報告のデータ⁶⁾をも含めて重回帰計算した結果、張り剛性に対する ρ と t の等価関係式 (曲率半径、板厚がそれぞれ ρ 、 t と ρ^* 、 t^* のパネルの張り剛性 S が等しい) を得た。

$$S = 53.3 \cdot t^{2.27} \cdot \rho^{-0.71}, \quad \frac{\rho}{\rho^*} = \left(\frac{t}{t^*} \right)^{3.19} \quad \dots\dots\dots (1)$$

高張力鋼板を用いる場合、 t を薄くすることによる張り剛性 S の低下は避けられず、 ρ の変更などで補う必要があるが、スプリングバックの増大 (ρ の増大) による S の低下分は、CHLYのように YS が低く形状凍結性のよい材料を用いることにより避けられる。Fig. 4において、CHLY40 (○印) のスプリングバックが小さく、軟鋼板 (△印) 並みの ρ が得られ、したがって張り剛性も SPCE 並みであることがわかる。それに比し、従来の APFC 材 (□、◇) の張り剛性はかなり劣下することがわかる。

耐デント性を 294N の面外集中荷重をかけたときの残留へこみ深さ δ_D で評価する。Fig. 5 にパネル YS と δ_D との関係を示す。しわ押え力 (以下 BHF と記す) が小さい場合、APFC (□) と CHR (◇) は変形ひずみ量 (ϵ_B) が小さいが、母材の YS が高いので高い耐デント性を有する。CHLY40 (○) は加工硬化、塗装焼付硬化が高く、CHR40 と同等の耐デント性を示す。BHF が大きい場合、CHLY40 (●) のパネル YS はさらに増大し、CHR40 より高く、APFC50 (◇) 並みの耐

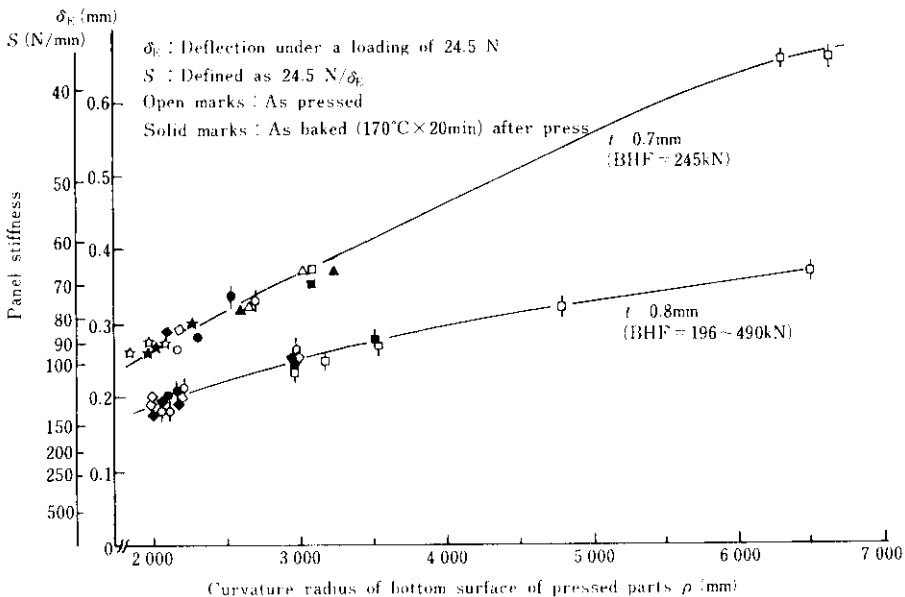


Fig. 4 Effects of curvature radius and thickness on panel stiffness

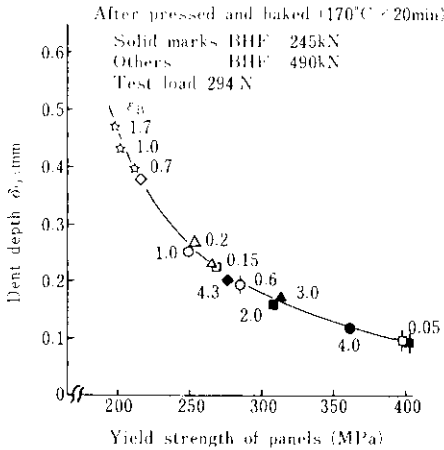


Fig. 5 Relation between dent resistance and yield strength of panels

デント性を有する。耐デント性に対するパネル YS, ρ, t の等価関係 (降伏強度, 曲率半径, 板厚がそれぞれ YS^*, ρ^*, t^* のパネルの耐デント性と YS, ρ, t のパネルのそれとが等しい) について重回帰解析した結果, 次式を得た。

$$\left. \begin{aligned} \delta_D = 0.454 \cdot t^{-5.307} \cdot (YS)^{-2.57} \cdot \rho^{0.085} \\ \left(\frac{YS}{YS^*} \right) - \left(\frac{t}{t^*} \right)^{2.06} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^{-0.033} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

3.3 張出し性, 深絞り性, 耐しわ性および伸びフランジ性

Fig. 6 に, 球頭ポンチにより張出し加工した場

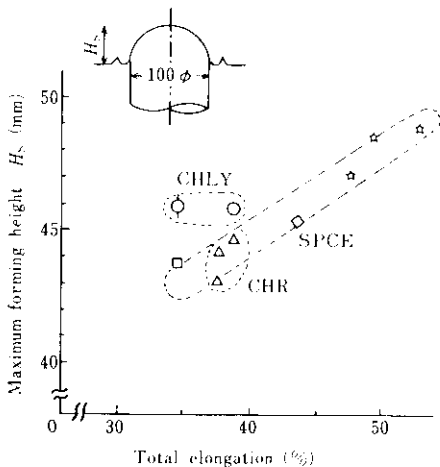


Fig. 6 Relation between maximum height in stretch forming and total elongation

合の最大高さ (H_S) と全伸び (EI) との関係を示す。 EI が大きいほど H_S が大きいのは当然であるが, CHLY (○, △) 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 (◇) 並みの張出し性を有していることがわかる。これは, CHLY がきわめて大きい n 値を有している (Fig. 1 参照) ためであり, 優れた形状凍結性, 耐デント性とともに CHLY のプレス加工性の特徴の一つである。

Fig. 7 に円筒深絞り成形における最大成形高さ (H_D) と r 値との関係を示す。本実験では, BHF 一定で成形しているのて, 軟鋼板の場合 BHF が過大となるために, H_D は高張力鋼板のそれより小さい。いずれのグループでも H_D は r 値と正の相関を有し, CHR が優れた深絞り性を有し CHLY のそれは劣ることがわかる。

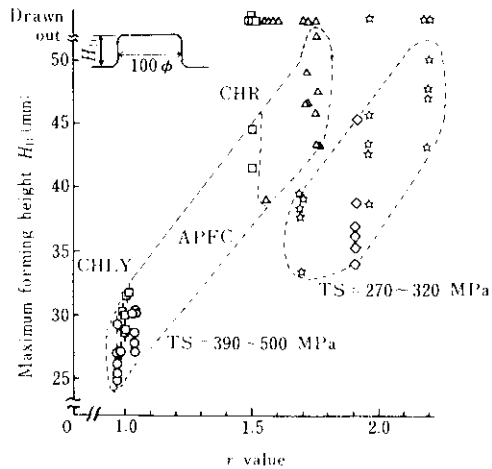


Fig. 7 Relation between r value and maximum forming height in deep drawing

Fig. 8 に, 円錐台成形においてポディーしわも破断も生じない適正 BHF の調整幅 (以下 ΔBHF と記す) と YS との関係を示す。 YS が低いほど, r 値が大きいほど ΔBHF が大きいことがよく知られている⁶⁾。同図から明らかなように, CHR の ΔBHF は CHLY, APFC の ΔBHF - YS 相関より上に位置しており, 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。

Fig. 9 に穴抜き率と r 値との関係を示す。 r 値が大きい CHR の伸びフランジ性が優れていることがわかる。

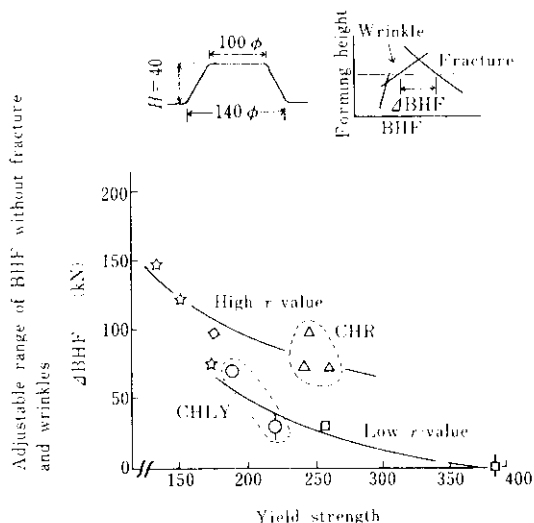


Fig. 8 Relation between yield strength and adjustable range of BHF without fracture and wrinkles, Δ BHF, in forming of conical shell

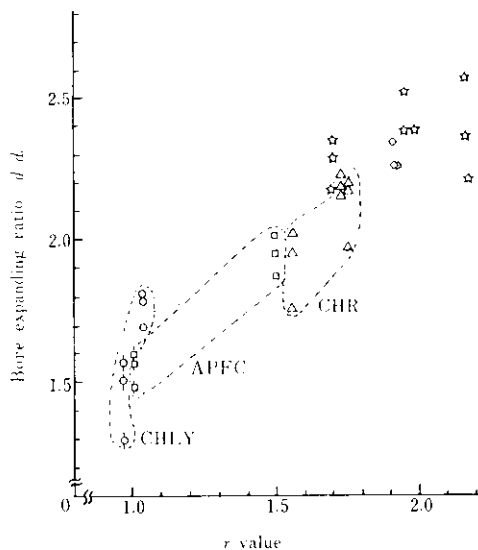


Fig. 9 Relation between bore expanding ratio and r -value

3.4 バンパーモデルの曲げ強度

バンパーには従来から強度向上、軽量化を目的とし APFC タイプの高張力鋼板が用いられてきたが、延性が優れ、スプリングバックも比較的小さな CHLY が最近多く使われている。バンパーの曲げ強度に対して板厚・強度等価式 ($TS \cdot t^2 = \text{一定}$) が知られているが⁷⁾、CHLY のように YR が非常に低い材料にもこの等価式が適用されるか疑問で

あった。そこで、それを確認するために Fig. 10 に示すバンパーモデルの曲げ強度試験をした。Table 1 に示すグループ 2 の材料およびそれらを 1~3% にスキンプラス圧延した後、170°C で 20 分間の熱処理を施した材料を用いた。曲げの進行に伴い、部材長手方向中央部で側壁が面内圧縮応力により座屈し、外側にせり出し、次いでこの部分が長手方向曲げモーメントにより折れ曲がる。この時点で最大荷重 P_m を示し、その変位は 20~30mm である。

スキンプラスをかけない $t = 1.2 \sim 1.6 \text{ mm}$ の材料について、 P_m に対する板厚の効果を検討した結果を Table 4 に示す。同表から明らかなように、 $P_m / t^2 \cdot TS$ はほぼ一定 (10.3~10.6) なので、以下 P_m を板厚補正した $P_m^* = P_m \cdot (t^*/t)^{2.0}$ を曲げ強度の評価値に用いることにする ($t^* = 1.4$)。 P_m^* と YS, σ_s , TS との相関を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a) において、各母材をスキンプラスした場合、YS は顕著に増大するが P_m^* の増大は小さい。またスキ

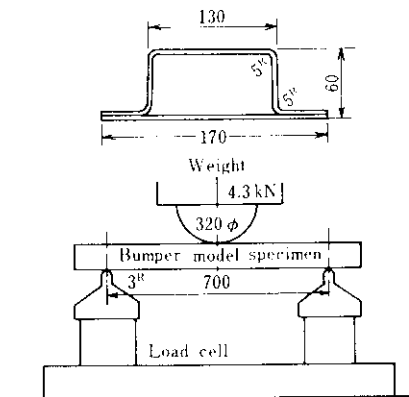


Fig. 10 Dimensions of bumper model specimen and bending test equipment

Table 4 Effect of thickness on the maximum force in bending test of hat section member

Steel No.	t (mm)	TS (MPa)	P_m (kN)	$P_m / t^2 \cdot TS$
8	1.227	786	12.53	10.6
9	1.431	830	17.52	10.3
10	1.598	711	18.85	10.4
11	1.464	545	12.20	10.4
12	1.632	562	15.42	10.3

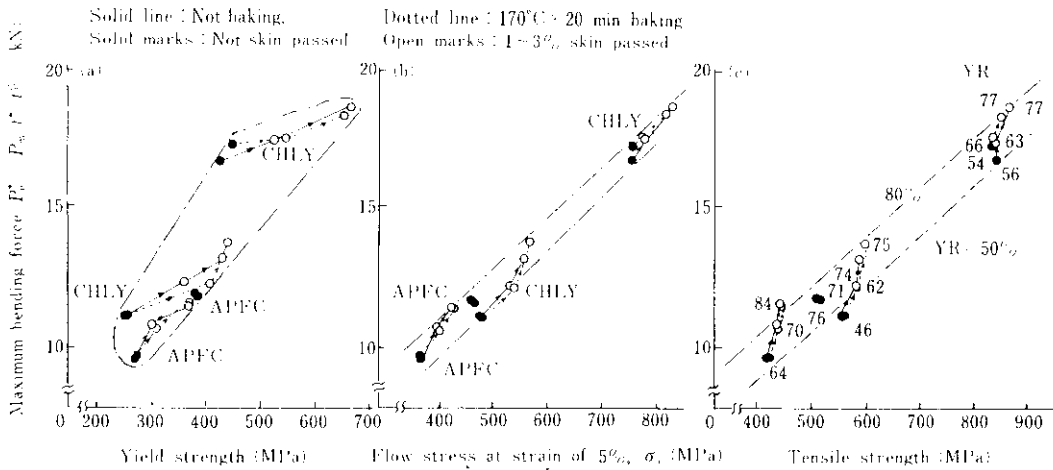


Fig.11 Effect of strength of steel on the maximum force in bending test of bumper model (hat section member)

パスしない材料 (●)に限っても、CHLYの P_m^* はYSが低いにもかかわらずほど小さな値を示さない。 P_m^* と最も強い相関を有するのは5%フローストレス (σ_5)である (Fig. 11 (b)参照)。これは、側壁のせり出し部の平均変形量に対応するものと思われる。しかし、 σ_5 で評価するのは実用上必ずしも容易でないので、Fig. 11 (c)に示すようにTSを基準に設計し、降伏比の影響を多少考慮すればよいものと思われる。TSと P_m^* の相関のバ

ラツキ幅は、YSと P_m^* とのその約1/3となり、YRの補正はYR - 50~80%の範囲で約10%である。

3.5 実物パネル成形試験例

Table 5にTS = 400~500MPaの高張力冷延鋼板を自動車実物パネルにプレス・テストした結果例を示す。

ドア・アウターは、成形深さは浅いがロックピ

Table 5 Applications of high strength steel sheets to autobody parts

Panel	Steel (Thickness)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	r	Formability (Δ BHF)	Wrinkles	δ_E (mm)	δ_0 (mm)	ϵ_R (%)	ρ (m)
Door outer	SPCE (0.8)	185	314	43	1.71	Good	Good	1.9	0.32	1.6	40
	CHLY40 (0.8)	235	386	38	1.04	Good	Good	2.1	0.14	2.7	38
	CHLY 50(0.8)	213	525	38	0.88	Good	Bad	3.1	0.10	1.4	45
	APFC40 (0.8)	311	434	36	1.10	Bad	Bad	4.1	0.20	0.7	48
Hood outer (1)	SPCE (0.70)	186	304	43	1.70	Good	Good	4.5	0.170	2.8	-
	CHLY40 (0.75)	196	441	38	1.05	Good	Good	3.9	0.025	3.3	-
	CHLY40 (0.70)	206	431	39	1.06	Good	Good	4.3	0.050	3.0	-
Hood outer (2)	CHLY40 (0.75)	226	422	34	1.49	Good	Good	7.1	0.044	2.0	-
	CHR38 (0.75)	265	373	38	1.87	Good	Good	7.4	0.046	1.5	-
Front fender	SPCE (0.75)	169	307	44	1.96	(1.4)	Good	-	-	-	-
	CHLY40 (0.75)	221	441	37	1.04	(0.5)	Good	-	-	-	-
	CHR38 (0.75)	253	364	38	1.94	(1.0)	Good	-	-	-	-
Rear floor rear	CHLY40 (0.75)	222	441	37	1.04	(0.5)	Good	-	-	-	-
	CHLY40 (0.7)	242	422	38	1.10	(0)	Good	-	-	-	-
	CHR38 (0.7)	277	368	38	1.88	(0.5)	Good	-	-	-	-

Note δ_E : Panel stiffness (deflection under a loading of 69 N)
 δ_0 : Dent resistance (dent depth after a loading of 245 N)
 Δ BHF : Adjustable BHF without fracture and wrinkles

ードにより材料の流れ込みを固定したいわゆる張り出し成形部品である。破断はロックビード部で発生するが、高張力鋼板のうちで破断が生じたのは、YRが高く、 n 値、EIの小さなAPFC40のみであり、CHLY40および50は破断が生じなかった。ドア中央部の変形量($\bar{\epsilon}_B$)でひずみ伝播性を評価すれば、CHLY40の ϵ_B はSPCEのそれ以上の値を示しており、3・1のモデル実験と同じ結果が得られた。これに対応し、CHLY40のドア中央部の曲率(ρ)、張り剛性(δ_E)はSPCEと同等の値が得られ、高張力化による形状凍結性、張り剛性の劣化がない。また、高張力化によるゲージダウンの決定要因の一つである耐デント性については、CHLY40のくぼみ量(δ_D)がプレスおよび塗装後のSub Assemblyの状態SPCEの約1/2.5になり、CHLYの加工および塗装焼付硬化の効果が非常に大きいことが実パネルで確認された。ドア・アウターへの高張力冷延鋼板の採用可否の決定要因に、ドア把手廻りの面ひずみがある。これは、絞りの最終ポンチストロークにおいて、ドア把手周辺に局部的に不均一な張力が付加されるために生じるもので⁸⁾、通常、高さ約50 μm の残留凹凸不良が問題とされる。この不良に対する材料特性の影響については十分明らかにされていないが、降伏強度(YSまたは2%フローストレス)が低いほどよいとされている。本実験結果ではCHLY40とSPCEのみが良い成績を示し、CHLY50はYSが低いにもかかわらず、面ひずみが大きく発生している。同一部品を用いた他の実験結果では、 $TS \leq 440\text{MPa}$ 、 $YS \leq 265\text{MPa}$ の特性が必要であると報告され⁹⁾、ドア把手廻りの面ひずみ不良対策にCHLYの使用が有効であるとの報告が多い。

フード・アウター(1)ではCHLY40の張り出し変形量が大きく(約3%)その特徴が生かされた例である。すなわち、CHLY40の ϵ_B が大きいため、張り剛性もSPCEよりわずかに高く、耐デント性は著しく向上している。しかし、フード(2)の例では $\bar{\epsilon}_B$ が比較的小さく、CHLY40のパネルでのYSは、比較的YSの高いCHR38のそれとはほぼ同等になり、したがって耐デント性も両者ではほぼ同じ値を示している。このように耐デント性を満足させつつ、より大きなゲージダウンをするためにロックビードまたは大きなBHFによりフラ

ンジを強く拘束した条件にてCHLYを用いるのが有効である。しかし、ゲージダウンに伴う張り剛性の劣化は避けられないので、他の対策(パネル曲率、ステイフナー、デトナなど)が必要である。

フロントフェンダーの例では、成形深さ h が比較的浅いので400MPa級高張力鋼板でも良品が得られ、CHLYに比べて高 r 値のCHRの方が良い成績を示している(ΔBHF が大きい)。しかし、一般的にはフェンダー類の h は大きく($h > 80\text{mm}$)、 $TS = 400\text{MPa}$ では良品が得られない場合が多い。このようなフェンダー用材料に対するCHRの低YS化、あるいはCHLYの高 r 値化が、今後の開発課題の一つである。

h の大きな内板パネルの典型例の一つであるリア・フロア・リアの場合には、いわゆる深絞り性が要求され、CHLYよりCHRが優れた成形性を示す。しかし、CHRの中でも n 値が小さく球頭ポンチ絞り最大高さの低い材料の ΔBHF が小さいという結果も得ており、多少の張り出し性も要求される。

これらの結果は高張力冷延鋼板の実用化試験の一例であるが、従来のAPFCシリーズの材料に比較して大きな成形性の改善が達成されている。

これらの優れた成形性を有する高張力冷延鋼板の開発は、成形技術の改善とともに、従来疑問視されていたパネルへの適用を可能にし、自動車車体重量減を実現化している。

4. 考 察

前節で得られた高張力冷延鋼板の各種プレス加工性と機械的性質との関係は、従来軟鋼板について得られた知見の延長として考えればよいことが確認された。すなわち、 r 値の高いCHRは深絞り性、伸びフランジ性に優れ、成形深さの大きい外板および内板に適し、低YR、YS、高 n 値のCHLYはドア、フード、トランク・リッド等の浅い張り出し成形部品に適する。しかし、CHLYは従来の材料に比し特別な加工硬化挙動を示すので、例えば、応力-ひずみ曲線を一つの n 乗硬化式($\sigma = C\bar{\epsilon}^n$)あるいは直線硬化式では表現し得ない。ここで、ひずみ伝播性およびスプリングバックに及ぼす加工硬化特性の影響について詳細な力学的検討を加える。

カーブから得られる $\sigma - \epsilon$ の関係を直接用以て、(13) 式を数値計算する。ダイ側の拘束によって生じる張力 σ_0 は、近似的に次式で与えられる。

$$\sigma_0 = e^{n^* \phi_0} \cdot \left[\beta_4 \frac{l \sigma_D}{4 r_D} + e^{\mu_p \phi_0} \left(2 \mu_D \frac{\text{BHF}}{t} + \beta_4 \frac{l \sigma_B}{4 r_D} \right) \cdot \beta_4 \frac{l \sigma_B}{2 r_B} \right] + \beta_4 \frac{l \sigma_D}{4 r_D} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし $\beta_4 = \sqrt{\frac{2(1+r)(2+r)}{3(1+2r)}} \quad \dots\dots\dots (17)$

成形高さ h と ϕ_0 との関係は幾何学的関係より得られる。

(13) 式は、材料の強度 (σ) が低く、加工硬化 ($d\sigma/d\epsilon$) が大きいほどひずみ勾配 ($d\epsilon/d\phi$) が小さいことを示している。まず加工硬化特性が次の二つの n 乗硬化式で表わされる場合の計算結果を示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= C \cdot \bar{\epsilon}^n & (\bar{\epsilon} > \bar{\epsilon}^* \text{ の場合}) \\ \sigma &= C^* \cdot \bar{\epsilon}^{n^*} & (\bar{\epsilon} < \bar{\epsilon}^* \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

ここで $\bar{\epsilon}^*$ は二つの n 乗硬化式の交点におけるひずみを表わす。 $\bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}^*$ における C, n の値を $\bar{\epsilon} > \bar{\epsilon}^*$ の値と区別して C^*, n^* と表わす。

(16) 式で与えられる壁張力が破断限界 ($\epsilon_0 = n$) に達するまで BHF を上昇した場合、ポンチ底中央のひずみ ϵ_B と n, n^* との関係を Fig. 13 に示す。同図からポンチとの摩擦係数 μ_p が小さいほど、 n, n^* の大きいほど $\bar{\epsilon}_B$ が大きく、 C, C^* に依存しないことがわかる。 n の効果として次の 2 点が考えられる。

- (1) 破断することなく大きな壁張力が与えられる。
- (2) ひずみ勾配が小さくなる。小さいひずみ域での n 値 (n^*) の効果は μ_p が大きく、 n が小さいときに顕著に表われる。

次に BHF を一定にした場合の n, n^*, C および C^* の効果について計算する。本条件では (16) 式で与えられる壁張力 (σ_0) のうち曲げ応力の項よりも BHF の項が大きいために、材料に依らず σ_0 はほぼ一定値となる。したがって強度が低い材料ほど相対的に ϵ_0 が大きくなるために ϵ_B が増大する。5% フローストレス (σ_5) と ϵ_B との関係を Fig. 14 に示す。バラツキはあるが、 σ_5 と $\bar{\epsilon}_B$ との間に強い相関が認められる。またバラツキ幅は $n, n^* = 0.15 \sim 0.3$ の変動幅に対応し、 n, n^* が大

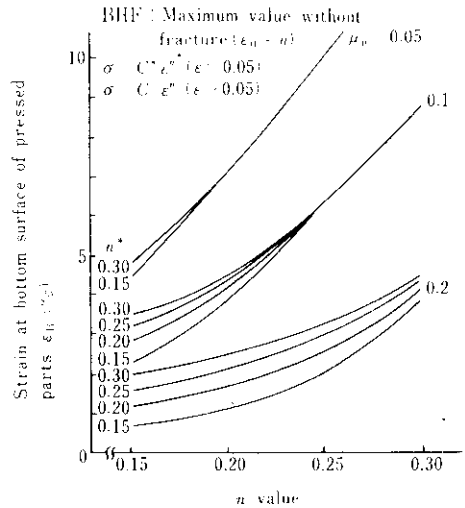


Fig. 13 Effects of workhardening exponent on strain at bottom surface of pressed parts

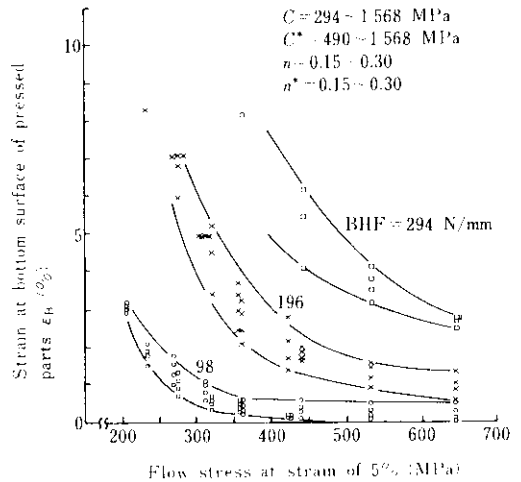


Fig. 14 Effect of strength of steel on strain at bottom surface of pressed parts under the condition of constant blank holding force

きいほど同図のバラツキ幅内で ϵ_B が大きい側に位置している。

Fig. 15 に r 値と ϵ_B との関係を示す。ポンチ肩および底部で単軸引張応力条件の場合 ($\beta = 0$) には r 値が大きいほど ϵ_B は増大するが、平面ひずみ ($\beta = r/(1+r)$) あるいは等 2 軸引張応力条件 ($\beta = 1$) では r 値が大きいほど ϵ_B は減少しひずみ伝播性は悪化する。 β が (11) 式で与えられる場合、 μ_p が小さい範囲では r 値が大きいほど、 μ_p が大きい範囲では r 値が小さいほど ϵ_B は減少する

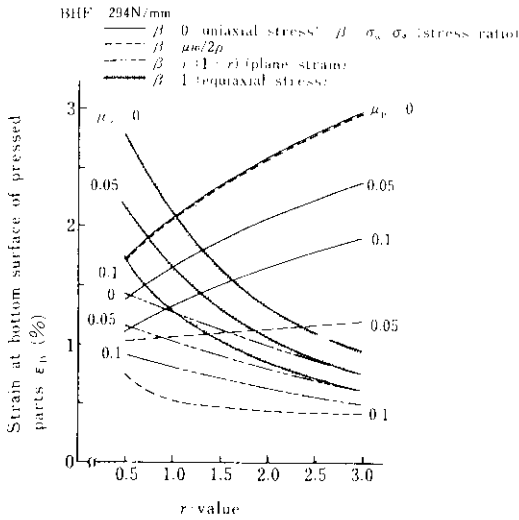


Fig. 15 Effect of r -value on strain at bottom surface of pressed parts

ことがわかる。中島らが報告した r 値の効果は、本解析で $\mu_p = 0$ とした場合と一致する¹²⁾。

次に実験値と計算値を比較するために、引張試験の S-S カーブから求まる $\sigma - \epsilon$ 関係をそのまま用いて (13) 式を直接積分することにより ϵ_B を計算する。壁、ポンチ肩およびポンチ底の各領域の境界点では β が変化するが、 σ_w は連続であると仮定する。500×500mm の四辺形広幅ブランクと 500×200mm の狭幅ブランクを用いた場合の $\bar{\epsilon}_B$ と YS との関係を図 16 に示す。広幅ブランクの場合、ポンチ肩部では平面ひずみ ($\beta = r/(1+r)$)、ポンチ底部では等 2 軸引張応力状態 ($\beta = 1.0$) と

して計算した。同図から、計算値と実測値とに少し差異が生じているが、材料ごとの特徴がよく現われている。すなわち、広幅ブランクの場合、高 n 値、低 r 値の CHLY の ϵ_B が他の材料の YS- $\bar{\epsilon}_B$ 曲線より上に位置しており、狭幅ブランクの場合、高 r 値の材料の ϵ_B が大きい。これは、Fig. 15 に示した ϵ_B に及ぼす r 値の効果が応力比 β に依存することある程度検証していると考えられる。従来、いわゆる CHLY のひずみ伝播性がよいのは n 値が高いためであると考えられてきたが¹³⁾、 r 値が低いことも一つの要因であることが示唆される。

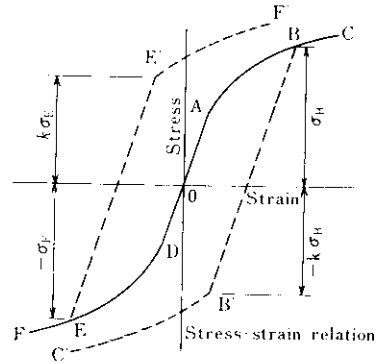
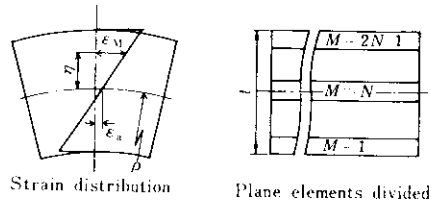


Fig. 17 Calculation of springback in bending of steel sheets

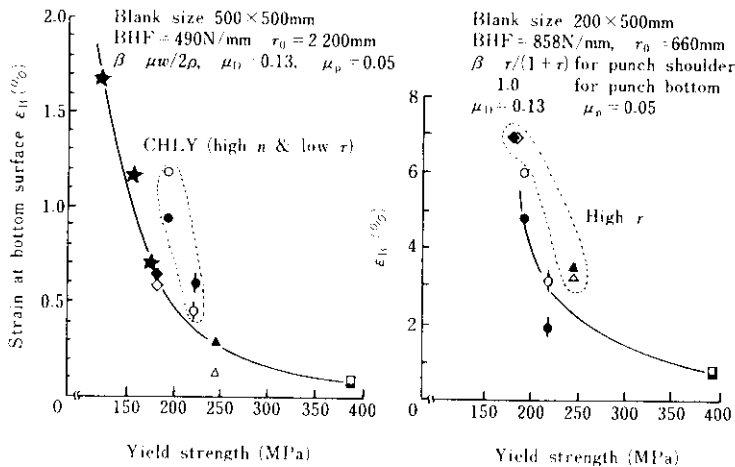


Fig. 16 Comparison of calculated ϵ_B with measured one (open marks: calculated, solid marks: measured)

4・2 スプリングバックの解析

薄板の曲げ加工におけるスプリングバックの解析は既に戸沢らの報告があるが⁽¹⁴⁾、ここでは、板厚方向に要素分割する手法を用いた。本手法を用いれば、CHLYのような単一な n 乗硬化では表現できない材料についても容易に計算ができる。

Fig. 17 に示すように板厚方向に $(2N-1)$ 分割した要素を考える⁽¹⁵⁾。要素 M の中央線と板厚中央との距離を η 、その面における曲げひずみを ϵ_M とする。軸力を伴わない曲げでは、

$$\eta = \frac{l(M-N)}{2(N-1)}, \quad \epsilon_M = \frac{\eta}{\rho} \quad \dots\dots\dots(18)$$

曲げ後面内に引張りまたは同時引張り曲げを与えたときは、板厚中央のひずみを ϵ_a とすれば、

$$\frac{(1+\epsilon_a) \cdot \eta}{\rho} + \epsilon_a \quad \dots\dots\dots(19)$$

で与えられる。 ϵ_M に対応する σ_M の計算法を Fig. 17 に従い説明する。応力増分ベクトルの方向の変化がなければ、(9) 式で表わされる曲線 OABC または ODEF 線上で σ_M が決定される。応力増分ベクトルの方向が変化した場合、例えば B 点から ϵ_M が減少した場合には $BB'C'$ の線上で σ_M が決定される。BC と $B'C'$ の曲線は BB' の中点に対称であり、またパウシング効果を考えて $\sigma_{B'} = -k\sigma_B$ となるように決定する。EF、 $E'F'$ についても同様である。 σ_M が求めれば、内部応力と外力(軸力 T 、曲げモーメント BM) との釣り合いから次式を得る。

$$T = \sum_{M=1}^{2N-1} \sigma_M \cdot \frac{l}{2N-1}$$

$$BM = \sum_{M=1}^{2N-1} \sigma_M \cdot \frac{l(M-N)}{2N-1} \cdot \frac{l}{2N-1} \quad \dots\dots\dots(20)$$

外力を除去 ($T \rightarrow 0$, $BM \rightarrow 0$) し、またスプリングバックした後の曲率 $1/\rho'$ は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\rho'} = \frac{1+\epsilon_a}{1+\epsilon_a - \frac{T}{El}} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{12BM}{Et^3 \left(1 + \epsilon_a \cdot \frac{T}{El}\right)} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで、 E はヤング率である。以下スプリングバックを $\Delta\theta/\theta (= 1 - \rho/\rho')$ で評価する。Fig. 18 に均等曲げの場合の $\Delta\theta/\theta$ と YS 、 ρ/l との関係を示す。各材料の加工硬化特性 ((9) 式) は引張試験

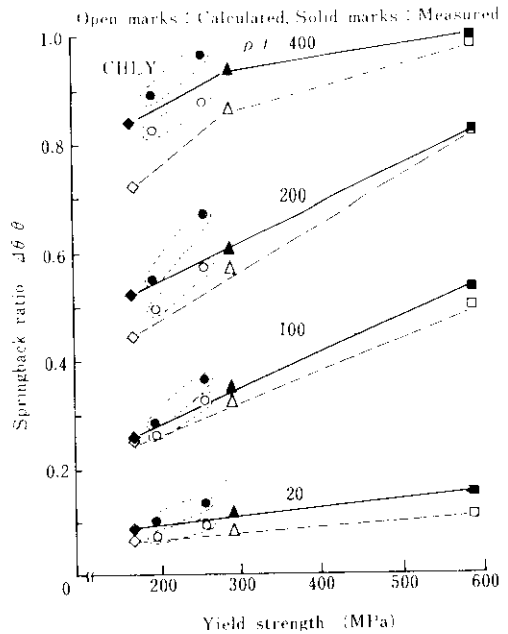


Fig. 18 Effect of yield strength on springback ratio in pure bending without axial force

の S-S カーブをそのまま用い、 $k = 1.0$ として計算した。同図から明らかなように、 YS が低いほど $\Delta\theta/\theta$ が小さいが、CHLY の $\Delta\theta/\theta$ は、他の材料の $YS - \Delta\theta/\theta$ の関係より上に位置している。これは加工硬化が大きいためであり、この特徴が計算値でもよく表われており、計算値と実験値が比較的よく一致している。

Fig. 19 に $\Delta\theta/\theta$ と T との関係 (計算結果) を示す。軸力を付加することにより $\Delta\theta/\theta$ が顕著に減少することは従来からよく知られているが、その減少の挙動は ρ/l および材料によって差がある。 ρ/l が大きい場合は、 $T/t \cdot YS = 0.7 - 0.8$ 以上与えないと $\Delta\theta/\theta$ の減少効果は得られないが、 ρ/l が小さい場合、わずかの $T/t \cdot YS$ でも $\Delta\theta/\theta$ は減少する。 ρ/l が大きいときは、CHLY の低 YS の効果が現われ、 $\Delta\theta/\theta$ が小さい。 ρ/l が小さいときは、低 YS の効果は軽減し、加工硬化が大きいために $\Delta\theta/\theta$ は比較的大きな値を示し、かつ軸力による $\Delta\theta/\theta$ の低減効果が小さく、CHLY の $\Delta\theta/\theta$ が APFC のそれより大きくなる場合がある。

5. まとめ

各種高張力冷延鋼板のプレス加工性の調査と自

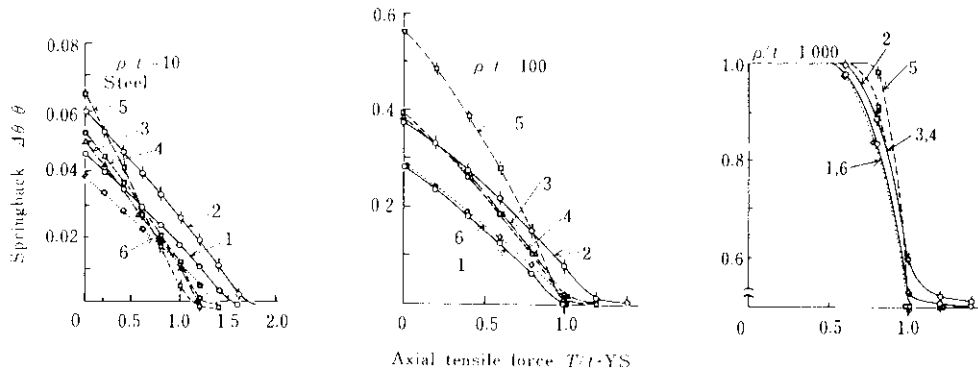


Fig. 19 Effects of axial tensile force and workhardening characteristic of steel on springback in bending of sheets (calculated, $k=1$)

動車パネルへの実用化試験の結果、次の結論を得た。

- (1) 高張力冷延鋼板のプレス加工性と機械的性質との関係は従来から軟鋼板について得られた結果と一致する。すなわち r 値が高いほど深絞り性、伸びフランジ性が優れ、 n 値、 EI が高いほど張り出し性が優れ、 YS が低いほど耐しわ性、形状凍結性、張り剛性が優れている。
- (2) CHLY および CHR は従来の APFC 材に比し成形性が著しく改善された。特に、 r 値が大きい CHR はフェンダー、リア・フロア・リアーなど深いパネルの深絞り性に、低 YR、高い焼き付き硬化性を有する CHLY は、ドア、フード、トランク・リッドなどの浅いパネルの張り出し性、形状凍結性、張り剛性、耐デント性および面ひずみ不良対策などに対して優れた性能を示した。
- (3) 張り剛性および耐デント性に対する板厚、 YS およびパネル曲率の等価関係式を得た ((1),

(2) 式)。

- (4) ひずみ伝播性に及ぼす加工硬化特性と r 値の影響について力学的解析をし、 $(1/\sigma) \cdot (d\sigma/d\epsilon)$ が大きいほどひずみ伝播性がよく、ボンチとの接触部で平面ひずみ～等 2 軸引張応力下 (実パネルでは多くの場合、これに対応する) では r 値が低いほど、また単軸引張に近い応力下では r 値が大きいほどひずみ伝播性が優れていることを示した。
- (5) スプリングバックに及ぼす加工硬化特性の影響について力学的解析をし、曲げ半径 ρ/t が大きい場合、CHLY の低 YS の効果が現われ、 ρ/t が小さく大きな軸力を伴う場合には、加工硬化のため低 YS の効果が軽減することを示した。
- (6) バンパーの曲げ強度は実用的には TS を基準に設計し、 YR が著しく低い場合には、 $YR = 80 \rightarrow 50\%$ の変動で最大曲げ荷重を約 10% 補正すればよい。

参 考 文 献

- 1) 誌上座談会：塑性と加工, 17 (1976) 190, 907
- 2) 高橋ら：塑性と加工, 17 (1976) 190, 883
- 3) 高橋ら：塑性と加工, 17 (1976) 190, 914; 川崎製鉄技報, 11 (1979) 1, 68
- 4) 吉田：塑性と加工, 5 (1964) 37, 56
- 5) 阿部, 中川：川崎製鉄技報, 5 (1973) 2, 210
- 6) 阿部, 中川：塑性と加工, 13 (1972) 143, 949
- 7) 坂本ら：薄鋼板成形技術研究会資料, No.48-26 (1973)
- 8) Umehara, Y.: Preprint of 11th IDDRG Conference, (1980)
- 9) Sato, S. et al.: ibid, (1980)
- 10) Hayashi: Preprint of 9th IDDRG Conf., (1976)
- 11) Duncan, J. L.: Preprint of 10th IDDRG Conf., (1978), 45
- 12) 中島, 菊間：塑性と加工, 9 (1968) 84, 46

-
- 13) Takechi, H. et al. : Preprint of 10th IDDRG, (1978), 221
 - 14) Tozawa, Y. : Proc. 7th Japan National Congr. Appl. Mech., (1957), 49
 - 15) 川田：塑性と加工, 17 (1976) 191, 944