

Formable Sheet Steel Used for Automobile Inner and Outer Parts



登坂 章男
Akio Tosaka

技術研究所 薄板研究
部門 主任研究員(課
長)



比良 隆明
Takaaki Hira

技術研究所 薄板研究
部門 主任研究員(課
長)



古君 修
Osamu Furukimi

技術研究所 薄板研究
部門長・工博

要旨

自動車車体重量を軽減するため、自動車内外板用として有利に適用できる薄鋼板製品およびこれらの利用技術について述べる。冷間圧延鋼板、熱間圧延鋼板およびこれらのめっき鋼板については軟鋼から種々の強度レベルの高張力鋼板まで開発されている。本論文では塗装焼き付け硬化性を有する鋼板、高 r 値鋼板などについてその特長を述べる。また FEM 手法のプレス成形への適用例として、高い r 値を有する鋼板を角筒成形に適用する場合の板取方向の影響について示す。これらの薄鋼板製品は成形適用技術の開発とあいまって、車体重量の軽減、衝突安全性向上に寄与するものと期待される。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed various kinds of cold-rolled, hot-rolled and galvanized sheet steels for automobile inner and outer parts to reduce car weight. In this paper, process principles and typical mechanical properties of BH (bake hardenable) steel and an ultra high r -value steel are introduced. An application example of FEM analysis to press forming is also shown: a simulation of rectangular deep drawing of an ultra high r -value steel. The effect of r -value on deep drawability is quantitatively clarified. The newly developed steels combined with new utilization technology and new analysis tool are expected to contribute to weight reduction and crash worthiness of car body.

1 緒 言

CO₂ ガス排出規制の強化、地球環境保全の観点から、自動車の燃費を改善するための車体軽量化技術が重要な開発課題となっている¹⁾。一方、昨今、耐衝突安全性向上に対するユーザーニーズの高まりから、車体の衝突特性改善も重要な課題となっているが、これは板厚の増加、補強部材の追加などによってむしろ車体重量を増加させる要因となっている。したがって、鋼板の高強度化によって耐衝突特性の向上と車体軽量化を両立させることが急務となっている。

アルミニウム、マグネシウムおよび樹脂など種々の軽量化材料の適用も研究されているが、リサイクル性などを考慮した環境負荷、適用技術、信頼性およびコスト面などから多くの問題を内在している。このような点を考慮して、薄肉化による重量の低減に寄与する高張力鋼板およびその適用技術の開発が望まれている^{2,3)}。

全車体重量に対して、ホワイトボディは重量比で約 20~30% を占めており、この軽量化は極めて重要である。ホワイトボディに対する自動車用鋼板の適用部位は大きく外板、内板、足回りおよびその他に分類できる。内板はさらにパネル、骨格および補強部材に分けることができ、各々の要求される部品特性によってその板厚、強度レベルが異なっている。たとえば、ドア、フェンダー、各種メン

バーなどの部品の薄肉化、軽量化を図るためには部品の一体成形化が可能な優れた深絞り成形性と、特に外板においては耐デント性を示す鋼板が要求される。また、比較的軽度の絞り成形、曲げ成形などで成形される部品用としては、延性に優れた高張力鋼板が要求される。

Table 1 には、主として内外板用に開発された各種冷間圧延鋼板について強度レベルと (社)日本鉄鋼連盟規格および当社の社内規格を示す。汎用の低炭素アルミキルド鋼、Nb、Ti などの炭窒化物形成元素により組織の微細化と析出強化を図った鋼、軟質なフェライト地にマルテンサイトを微細に分散させた複合組織からなる dual phase 鋼、さらに残留オーステナイトを利用した高延性型 TRIP 鋼がある。一方、特に高い r 値と伸び特性を得るために鋼中の C 量を 20ppm 以下まで低減し、さらに炭窒化物形成元素である Nb、Ti などを添加することで、固溶 C を固定した鋼板 (IF 鋼: interstitial atom free 鋼) も開発されてきた。さらに、この鋼板をベースに固溶強化元素を添加した高 r 値、高延性の高強度鋼板も開発されている⁴⁾。

また、これまで、冷間圧延鋼板が主として用いられていた部品を加工性、寸法・形状精度を改善した薄物の熱間圧延鋼板で代替することが考えられる⁵⁾。

Table 2 には主として内板用に開発された各種熱間圧延鋼板の強度レベルと (社)日本鉄鋼連盟規格および当社の社内規格を示す。熱間圧延鋼板による冷間圧延鋼板の代替を想定した場合、その板厚精度と材質の均一性が重要な因子となる。たとえば成形性の 1 つの

* 平成11年12月2日原稿受付

Table 1 Line up of cold-rolled sheet steels

TS (MPa)	JFS grade (Kawasaki Steel original grade)	Note
270～	JSC270C JSC270D JSC270E JSC270F JSC260G	B-added ultra-low C steel base Excellent press performance Excellent fatigue strength in spot welded joint
	(KTUX5)	Ultra-high r -value Sophisticated texture control with lubricated hot-rolling α -region $r \sim 3$
	JSC270H	
340～	JSC340W JSC340H JSC340P	Nb-added ultra-low C steel, Excellent press performance and BH
370～	JSC370W JSC370P	
390～	JSC390W JSC390P	
440～	JSC440W JSC440P	
	(CHLY440)	Dual Phase (α + martensite), Low YR, Excellent press performance
590～	JSC590R	
	JSC590Y	Dual Phase (α + martensite), Low YR, Excellent press performance
	(TRIP)	Containing retained γ with high elongation
780～	JSC780Y	
980～	JSC980Y	
1180～	JSC1180Y	Strengthening with martensite and/or bainite, high bendability

Table 2 Line up of hot-rolled sheet steels

TS (MPa)	JFS grade (Kawasaki Steel original grade)	Note
270～	JSH270C JSH270D JSH270E	High accuracy of gauge and shape Available for thin and wide sheet New hot strip mill
	(KFN3)	Excellent press formability with ultra-low C steel
310～	JSH310W	
370～	JSH370W · J	
400～	JSH400W · J	High accuracy of gauge and shape Available for thin and wide sheet New hot strip mill
440～	JSH440W · J JSH440R	
	JSH440B (SAPH440BH)	High bake hardenability
490～	JSH490W JSH490R JSH490B	
540～	JSH540W JSH540R	
	JSH540Y	Available for thin and wide sheet with excellent elongation
	JSH540B	
590～	JSH590W JSH590R	
	JSH590Y	Available for thin and wide sheet with excellent elongation
	(RHA590DX)	TRIP steel
	(RHA590FG)	Ultra-fine microstructure (super HSLA)
780～	JSH780W JSH780R JSH780Y	
	(RHA780FG)	Ultra-fine microstructure (super HSLA)
	(RHA780DH)	Hybrid dual phase steel, excellent elongation and fatigue proofness

評価項目であるスプリングバック特性は板厚、降伏応力 (YS)、引張強度 (TS) などが影響因子として挙げられる^④が、これらの均一性をより高めることでスプリングバックの制御は有利となる。

Table 3 に内外板用に開発された各種めっき鋼板の強度レベルと(社)日本鉄鋼連盟規格および当社の社内規格を示す。めっき鋼板ではめっき性確保の観点から鋼中に添加する強化元素の種類や量が制

Table 3 Line up of galvanized sheet steels

Substrate	TS (MPa)	JFS grade (Kawasaki Steel original grade)	Note
Cold-rolled	270～	JAC270C JAC270D JAC270E JAC270F JAC260G JAC270H	B-added ultra-low C steel base Excellent press performance Excellent fatigue strength in spot welded joint
		(RAKTUX5)	Ultra high- r value galvanized sheet steel with KTUX5
	340～	JAC340W JAC340H JAC340P	Nb-added ultra-low C steel, Excellent press performance and BH r -value > 2.0
	390～	JAC390W JAC390P	
	440～	JAC440W JAC440P	(RACHLY440)
	590～	JAC590R	Dual Phase (α + martensite), Low YR, Excellent press performance HSLA with low C steel, excellent weldability
	780～	(RACHLY590)	Dual Phase (α + martensite), Low YR, Excellent press performance
		(RAAPFC780)	
Hot-rolled	270～	JAH270C JAH270D JAH270E	
	370～	JAH370W・J	
	400～	JAH400W・J	
	440～	JAH440W・J JAH440Y	High accuracy of gauge and shape Available for thin and wide sheet
	490～	JAH490Y	New hot strip mill

限されるが、おおむね冷間圧延、熱間圧延のいずれの品種も製造可能である。

本論文では、自動車車体の軽量化を目的に適用される自動車用薄鋼板のうち、主として外板と内板に使用される TS が 440MPa 級以下の鋼板について概説する。

2 自動車内外板用高張力鋼板に求められる特性と達成手段

2.1 求められる特性

自動車内外板には、部品により重要度は異なるが、成形性、耐デント性、溶接性などの諸特性が、また防錆性を向上するためにめっき鋼板が必要な部位に用いられる鋼板には良好なめっき特性が要求される。以下、当社が開発した鋼板の特性についての概要と達成手段について述べる。

2.2 成形性

車体重量の軽減を目的として高強度鋼板を使う場合、最初に直面する問題は成形性の低下である。各種の成形性と材料特性の関係を Table 4 に示す⁷⁾。一般的に鋼板を高強度化すればプレス成形品の形状、プレス条件に対応して割れ、しわ、その他の形状不良などの、いわゆる成形性低下を生ずる。これらに対する鋼板の機械的性質の影響は複雑であるため、対象とする部品の成形様式にあわせて、おのおのの材料特性のバランスを最適化することが重要な課題となる。

2.3 耐デント性

耐デント性は外板パネルで主として要求される特性であるが、板

Table 4 Relation between formability and mechanical properties

Formability	Deep drawing	Stretchability	Stretch flanging	Shape fitting
Mechanical properties				
Yield stress YS				◎
Tensile stress TS				△
Elongation El		◎	○	
n -value	○	○	○	○
r -value	◎	△	◎	△

(Effective ← ◎ ○ △ → Ineffective)

厚と降伏強度に依存する⁸⁾。したがって、耐デント性を維持したまま薄肉化を達成するためには鋼板の高降伏強度化が必要であるが、これはプレス成形時のしわ発生の問題などで困難であった。

これらの問題を解決すべく開発された焼付け硬化性鋼板は鋼板の有する歪み時効硬化現象を積極的に活用するもので、加工時の強度は低く、成形性に優れ、その後の塗装焼付け工程での加熱による歪み時効硬化で強度が増加し、部品として十分な耐デント性が得られる点に優位性がある。

歪み時効硬化性 (BH 性) を得るためには、固溶 C、N を残留させる必要があるが、これが過度になるとプレス成形時にストレッチャーストレインが生じ⁹⁾、また少なすぎる場合は、焼付け硬化量が足りずに十分な耐デント特性が得られない。したがって、最適範囲にこれらの量を制御する必要がある。また、冷間圧延鋼板の製造時、焼鈍の工程で固溶 C、N が存在する状態で再結晶した場合は r 値が低下し、深絞り性が低下するという問題もある。これらを改善し、優れた成形性と安定した BH 性を兼ね備えた鋼板を得るため、以下に述べる技術が開発された。すなわち、まず Nb 添加極低炭素 IF

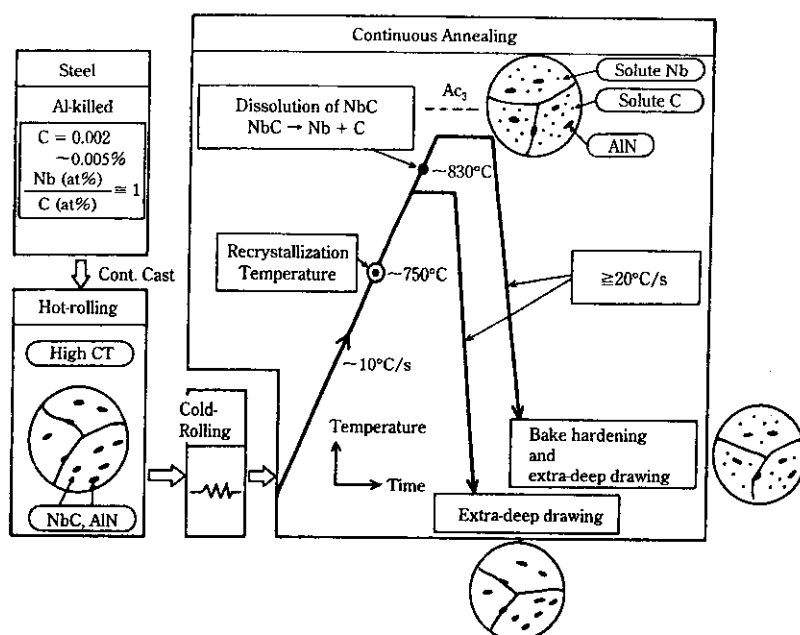


Fig. 1 Processing principle of bake-hardening and extra-deep drawing sheet steel

鋼を素材とし、熱間圧延母板の段階では NbC として固溶 C を枯渇させておく。その後の冷間圧延に引き続く連続焼鈍に際し、まず、加熱段階では固溶 C のない状態で再結晶完了させる。その後にさらに高い温度に加熱することで一部の NbC を分解・再固溶させ、それを室温まで急冷することで固溶 C を適正範囲に制御する超深絞り用 BH 鋼板の製造法が開発された。この冶金技術内容を模式的に Fig. 1 に示す¹⁰⁾。この技術をもとに、固溶強化元素を添加することで TS340MPa 級の焼付け硬化型深絞り用高張力冷間圧延鋼板を開発した¹¹⁾。

2.4 溶接性

自動車車体の組み立てには、その生産効率の高さからスポット溶接が多用されている。その際、継ぎ手部の強度のみならず、一般にナゲット内の破断を生ずることは好ましくない。これを支配する重要な因子の一つが鋼組成であり P, S, C, Si, Mn など等を等価換算した合計値が一定の値を超えるとナゲット内破断を起こすことが知られている¹²⁾。特に強化能をもたず、機械的性質の異方性などの面で有害である S の低減は必須であるが、他の元素は鋼の強化元素でもあるので、これらの調整は高張力鋼板の製造においては重要である。固溶強化、析出強化および変態組織強化のいずれにおいても最も重要な影響を持つ強化元素である C 量の制御はとりわけ重要である。

また、より低強度の鋼においては成形性に優れた極低炭素鋼が広く使われているが、これらのスポット溶接継ぎ手の疲労特性について調査した結果を Fig. 2¹³⁾ に示す。またこれらの供試材の化学組成と引張特性を Table 5 に示す。継ぎ手部の疲労強度は Ti-Nb-B 複合添加の極低炭素鋼がもっとも優れており、低炭素鋼と同等以上の特性を示す。これは、低炭素鋼ではクラックの伝播経路となる HAZ 部がマルテンサイトとフェライトの 2 相組織となり、この部分に生ずる残留応力が疲労強度を低下させると考えられるのに対し、Ti-Nb-B 複合添加極低炭素鋼ではマルテンサイトを生ずることがなく、また後述するような顕著な粗大化が生じないことで、優れた耐疲労特性が得られたものと考えられる。次いで、Ti-Nb 複合添

加鋼も良好な特性を示すが、Ti 添加鋼は明らかに特性が劣る。これは、Ti 添加鋼では HAZ 部の組織が顕著に粗大化しており、強度が低下していることに起因すると推定される¹⁴⁾。

また、スポット溶接以外の抵抗溶接においても C 量の影響が大きいことが知られており、主として溶融部の焼入れによる硬化現象で説明されている。

車体重量の軽減化の手法として、異なる板厚・強度の鋼板を接合したブランクを形成した後にプレス成形をおこなうテーラードブランクが広く適用されつつある¹⁵⁾。ここで溶接方法として溶接部面積が小さく、素材への熱影響が小さいレーザ溶接による接合も適用されている。本溶接においては接合部の形状精度の重要性が指摘されており、素材の寸法精度、機械的性質の均一性の向上が重要である。また、テーラードブランク材のプレス成形においては、溶接部という特異部分の挙動を解析するために FEM を有効活用することが重要であり、これにより素材組み合わせの最適化を図ることが可能となる。

最近検討されている、溶接以外の機械的な接合法あるいは接着などの技術が適用されれば、上述の拘束条件は軽減され、さらに鋼板の多様性は増加するものと考えられる。

2.5 めっき性

高張力鋼板の適用で板厚減少を図った場合には、腐食代の低減という意味から耐食性の向上が重要な課題となる。特に厳しい腐食環境にさらされる部品においては耐食性の向上は重要である。成形性に優れた極低炭素鋼をベースとし Cu, P を添加した耐食性冷間圧延鋼板が開発されている¹⁶⁾。さらに高い耐食性が要求される部位では亜鉛を主体としためっき鋼板が必要となる。近年特にわが国においては、電気亜鉛めっき鋼板に続いて、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の開発が重要な課題となった¹⁷⁻¹⁹⁾。

上記鋼板を製造するための連続溶融亜鉛めっき工程では、鋼板は焼鈍後にまず溶融亜鉛浴に入り、その後に合金化する熱サイクルが必須である。すなわち、500°C 前後の温度域に一定時間滞留することが不可欠である。この条件下において、機械的な諸特性の冷却バ

Table 5 Chemical compositions and mechanical properties of steels used

Steel	C	Ti	Nb	B	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	av. r -value
ULC (Ti-Nb-B)	0.002	0.03	0.003	0.0004	157	314	48	2.0
ULC (Ti-Nb)	0.003	0.03	0.008	—	137	294	51	1.9
ULC (Ti)	0.002	0.06	—	—	127	284	52	2.1
Low-C	0.040	—	—	—	176	304	46	1.7

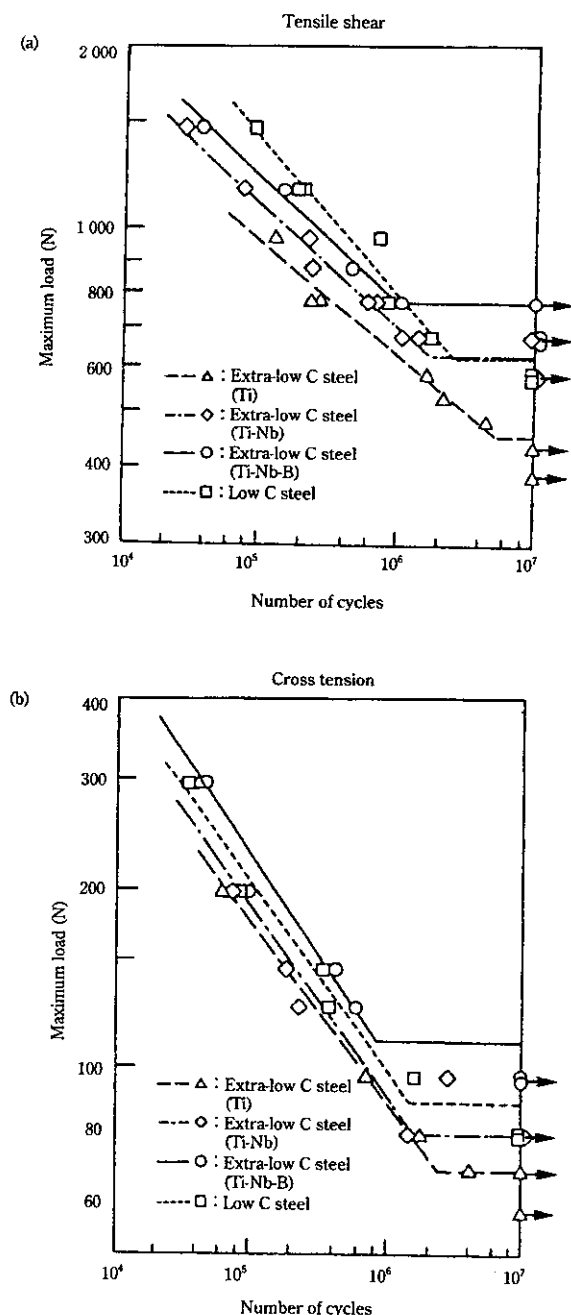


Fig. 2 Fatigue strength of spot-welded joints: (a) Tensile shear, (b) Cross tension

ターン依存性が小さい極低炭素鋼は操業性の点では有利である。また連続溶融亜鉛めっきラインではその焼鈍工程で Si, Mn などの添加元素が表面に濃化して酸化物を形成し、これらが Zn と鉄との反応を阻害することから、めっきを生じやすい。また、P は合金化を遅らせる元素であることが知られており、操業の阻害要因の一つ

となる²⁰⁾。このように合金化溶融亜鉛めっき特有の成分調整も必要となる。

2.5.1 固溶強化

Si, Mn, P などの固溶強化元素の添加は、前述のようにめっき性の観点から、その添加量の上限が規制される。

2.5.2 析出強化

析出強化元素としては Nb, Ti, V などが適用されるが、通常はその添加量の絶対値は少なく、めっき性の観点では問題とならないことが多い。また、析出強化鋼は曲げ加工、伸びフランジ加工には優れた特性を有するという特長がある。

2.5.3 変態組織強化

変態組織強化はいわゆる複合組織鋼に代表される軟質なフェライト母相と硬質な第2相としてマルテンサイトあるいは広義にはベイナイトさらには残留オーステナイトを含むものである。マルテンサイトを主体とする第2相を含む場合は内部での微視的な歪みの不均一性に起因して、良好な伸び特性、特に良好な均一伸び特性を有することが知られており、残留オーステナイトを含む場合はさらに良好となる。またマルテンサイトを含む場合は低降伏比となり、大きな曲率半径での成形の場合は、形状凍結性の観点で利点を有する。またベイナイト含有量が多い場合は局部伸びが向上し、伸びフランジ加工性が改善されることが知られている。すなわち、母相中に分散させる第2相、第3相を適正に制御することで機械的諸特性を調整できる^{21, 22)}。

2.5.4 塗装焼き付け硬化 (歪み時効硬化)

冷間圧延鋼板で開発された技術であるが、合金化溶融亜鉛めっき鋼板にも同様に応用されている。ここでも材質のヒートパターン依存性が小さいということから、極低炭素鋼の適用が有利である。

2.6 内外板用の各種鋼板の比較

これまでに述べた TS440MPa までの内外板用鋼板のうちで特に成形性に優れた冷間圧延鋼板について引張特性の一例 (冷間圧延鋼板) の比較を Table 6 に示す。これらは、GA にもほぼ同様に展開できる。

3 高成形性鋼板と FEM シミュレーションの応用例

3.1 超高 r 値冷間圧延鋼板

鋼板の深絞り成形性を高めるため、さらなる高 r 値を有する鋼板が開発された。従来の方法では熱間加工プロセスでの $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のために集合組織のランダム化が不可避であり、これを冷間圧延、焼鈍して得られる冷間圧延鋼板の r 値は 2.4 程度が上限であった。しかし、成分を調整した極低炭素 IF 鋼をフェライト域で強潤滑圧延することで熱間圧延母板の集合組織において $\{111\}$ 再結晶集合組織を発達させることにより、冷間圧延焼鈍後に約 3.0 という超高 r 値を有する鋼板が開発された²³⁾。この熱間圧延プロセスの概要を Fig. 3 に示す。本鋼板の製造にあたっては、高潤滑圧延の際のコイ

Table 6 Example of mechanical properties of formable sheet steels

		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (MPa)	r -value	BH (MPa)
270 MPa	B-added ULC	147	284	53	2.1	—
	BH	167	294	48	2.0	40
	Ultra-high r -value	167	294	52	2.8	—
340 MPa	B-added ULC	230	371	42	2.0	—
	BH	235	371	42	2.0	40
380 MPa	B-added ULC	257	403	39	1.6	—
	Dual phase	200	420	39	1.0	60
440 MPa	B-added ULC	310	445	37	1.5	—
	Dual phase	267	442	37	~1.0	60

BH (bake-hardening): 2% pre-strain 170°C × 20 min aging

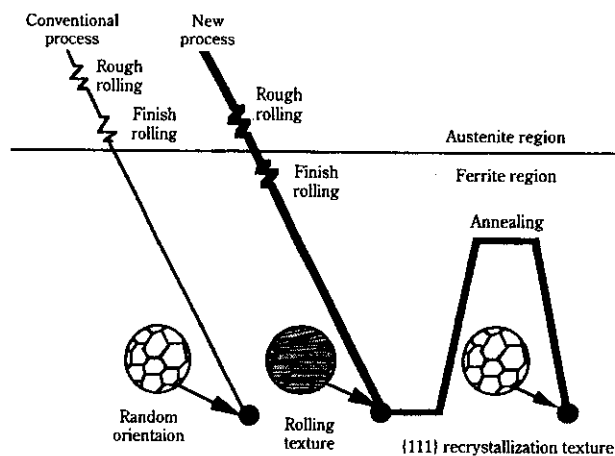
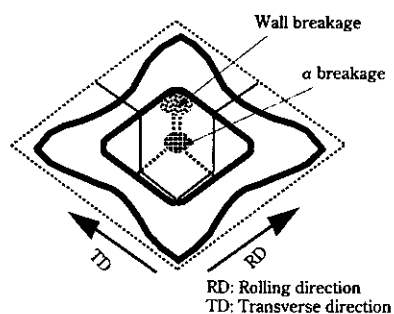


Fig. 3 Comparison of mechanism of {111} texture development in lubricated ferrite rolling process with conventional one



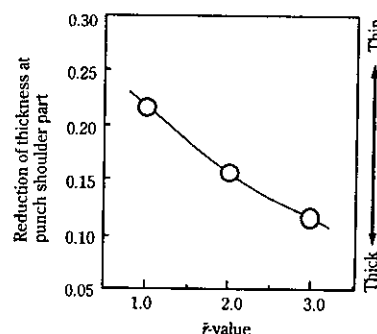
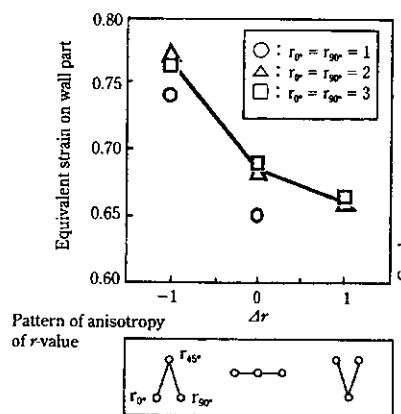
Press forming condition
Blank side length: 100 mm
Punch side length: 70 mm
Forming height: 30 mm
YS: 173 MPa
TS: 311 MPa
t: 0.78 mm
BHF: 19.6 kN

Solver: LS-Dyna

Fig. 4 FEM analysis condition

ル先端、後端の通板性の不安定化を防止するために、コイル先端、後端を次々に接合して圧延する完全連続熱間圧延技術が有利に適用される²⁰。

このような r 値の高い鋼板を角筒に深絞り成形する場合は α 破断に対しては高 r 値の有用性が認められる。Fig. 4 に示すような条件で有限要素法 (FEM) により計算機シミュレーションした結果を Fig. 5 に示す。 r 値を向上させることで、深絞り成形の際に破断危険部となるパンチ肩部の板厚減少が有効に防止される。また、壁割

Fig. 5 Effect of r -value on the reduction of sheet thickness at punch shoulder partFig. 6 Effect of Δr on equivalent strain on wall part

れについてはその面内異方性を考慮して適応することの必要性が同じくシミュレーションにより明らかになった。この結果を Fig. 6 に示す。ここでは板取方向を圧延方向がパンチの直辺方向と並行になるようにしている。壁割れを防止するには Δr を大きくすることが重要であり、平均の r 値の影響度は小さいことがわかる²⁰。この傾向は実験室の小型のプレス実験でも確認された。

3.2 プレス成形品への FEM の適用事例

近年、新車開発のリードタイム短縮のために、FEM 法を活用した金型設計が主流となりつつある。FEM を用いカーメーカーでは形状の、素材メーカーでは素材の最適化を双方で図ることにより上記の目標を達成するのが合理的である。

当社においても、CAD データをベースに FEM 解析が行なえるシステムを構築し、リードタイム短縮に寄与している。

4 結 言

自動車車体の内外板用薄鋼板として各種鋼板が開発されている。

これらの鋼板は各使用部位の必要特性を満足するものと考えられ、成形、適用技術を適正に組み合わせ、自動車車体に適用することで車体重量の低減化および衝突安全性の向上に寄与できるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 湊 清之：自動車技術，53(1999)9, 58-64
- 2) E. Drewes and B. Engle：1998 材料フォーラム，自動車技術会，(1998)，37-46
- 3) 橋本浩二，栗山幸久，滝田道夫，ULSAB 委員会：1998 材料フォーラム，自動車技術会，(1998)，1-9
- 4) 瀬戸一洋，奥田金晴，坂田 敬：川崎製鉄技報，27(1995)3, 156-162
- 5) 潮海弘實，加地孝行，北浜正法：川崎製鉄技報，31(1999)3, 150-154
- 6) 薄鋼板成形技術研究会編：「プレス成形難易ハンドブック」，(1987)，[日刊工業新聞社]
- 7) 瀬戸一洋，坂田 敬，加藤俊之：塑性と加工，35(1994)404, 1042-1047
- 8) 柚島善之，野村伸吾，小久保一郎，石垣秀生：塑性と加工，21(1980)229, 168
- 9) 周藤悦郎：「ストレッチャーストレイン」，(1970)，[日本金属学会]
- 10) 橋本 修：第 141、142 回西山記念技術講座，(1992)，113
- 11) 佐藤 進，岡田 進，加藤俊之，橋本 修，花沢利健，恒川裕志：川崎製鉄技報，23(1991)4, 293-299
- 12) 斉藤 亨，高橋 靖，山田有信，西 武史：自動車技術会シンポジウム，(1982)，88-93
- 13) 岡田 進，佐藤 進，篠崎正利，阿部英夫：CAMP-ISIJ，2(1989)，1922
- 14) 岡田 進，佐藤 進，阿部英夫，池田東至朗：CAMP-ISIJ，3(1990)，1788
- 15) W. Prange and C. Schneider：1998 材料フォーラム，自動車技術会，(1998)，47-53
- 16) 今中 誠，松岡才二，坂田 敬，薄田 茂，佐野 哲，加藤俊之，黒川重男，橘 林三：(社)自動車技術会 学術講演会前刷集 942，1994-5，9433254
- 17) 喜安哲也，飯田祐弘，重本晴美，菅沼七三雄，坂本 実，岩本周治：川崎製鉄技報，23(1991)4, 327-332
- 18) 安田 顕，大堀 学，高村日出夫，安田功一，橋口耕一：川崎製鉄技報，23(1991)4, 333-339
- 19) 望月一雄：川崎製鉄技報，31(1999)1, 34-40
- 20) 五味修二，藤村 亨，下村順一，加藤千昭，望月一雄，片山道雄：材料とプロセス，8(1995)，546
- 21) 坂田 敬，古君 修，望月一雄，平瀬幸一，関田貴司：まてりあ，38(1999)2, 166-168
- 22) 飛山洋一，大沢一典，平田基博：川崎製鉄技報，31(1999)3, 181-184
- 23) 西村恵次，福井義光，川辺英尚：川崎製鉄技報，31(1999)3, 161-164
- 24) 小川靖夫，中村武尚，北尾齋二：川崎製鉄技報，27(1995)，131-135
- 25) 奥田金晴，河端良和，比良隆明，登坂章男，古君 修：自動車技術会講演大会前刷り，(1999)，9940297