

自動車用鉄鋼材料の最近の動向

解説

武 智 弘*

The Recent Trend of Steel Products for Automobile

Hiroshi TAKECHI

1. 緒 言

自動車は大衆の足として文明生活の基盤を支えている。自動車によって社会は多大の恩恵を得ているが、一方、自動車も各時代の社会的要求に応えながら発展して来た。

現在自動車に対する社会的要求として環境性、安全性、快適性、リサイクル性などを挙げることができる。表1にこれらの要求と具体例、それに対する鉄鋼材料の

表1 自動車に対する社会的要求と鉄鋼業の対応

	社会的要求	鉄鋼業の対応
(1) 環 境	1. 地球温暖化の防止 排出CO ₂ 量低減→ CAFE規制 2. NO _x , SO _x 量低減 3. 排気用制御装置の長寿命化 4. 車外, 車内騒音の低減	1. 軽量化材料の開発 高性能ハイテン, 新特殊鋼, 複合材料 2. メタル担体 3. 新ステンレス鋼板 4. 制振鋼板 } の開発
(2) 安 全	1. アクティブセイフティーの 確立 ABS, 4WD等 2. パッシブセイフティーの確立 クラッシュプル構造, エアバ ッグシステム, 安全ベルト自 動装着装置, ドアガードバー 等	高性能ハイテンの開発
(3) ア メ ニ テ ィ	1. イージードライビング化 4WD, 4WS, ABS等 2. 自動化の拡大 AT車, 定速走行装置, オ ートロック, パワーウィンドウ, パワードアミラー等 3. 情報通信機能の拡大 自動車用電話, テレビ, ファ ックス, 衛星航法装置等 4. 耐食性の向上 10-5-2-1規制等 5. 車内騒音の低減	1, 2, 3 アメニティ用装置のため車重増 加傾向となるので, 高性能軽量 化材料を開発する。 4. 新表面処理鋼板の開発 5. 制振鋼板の開発
(4) リ サ イ ク ル	1. 廃車ダストの低減 2. 廃棄物再利用 3. 大型部品の簡易取外し 4. 異種材料接合技術	1, 2, 3, 4 リサイクルし易い材料の開発 スクラップ, メタラジーの検討

対応をまとめた。燃費改善等の省エネルギー性は自動車材料として見た時、環境性や快適性に関係する車体軽量化に含まれるため、特に項目立てはしていない。

以下表1に含まれる鉄鋼材料の最近の進歩について具体例を挙げながら、簡単に説明を行いたい。

2. 熱 延 鋼 板

熱延鋼板は構造部材、補強部材に広く使用されている。ここ10年余り、車体の軽量化のため熱延まま高張力鋼板(High Strength Steel, HSS)の開発が活発に行われた。抗張力が60 kgf/mm²のDual phase鋼(複合組織鋼)や55 kgf/mm²の熱延後冷却制御型HSSが開発され、ホイールディスクに使用されるようになった。また、板厚が1.6 mm程度で抗張力60 kgf/mm²のホイール・リムにはTi, Nbを添加した析出強化鋼が使われている。抗張力が80 kgf/mm²以上のいわゆるSuper HSSも近い将来大いに普及するものと思われ、140 kgf/mm²クラスくらいまでの試作が行われている。

抗張力100 kgf/mm²のレインフォースメントにはDual phase鋼が使用されている。このほか、10~20%の高残留オーステナイトによるTRIP効果(変態誘起塑性)を利用した高延性超高張力鋼が注目されている。

熱延による高残留オーステナイト鋼のうち抗張力が80 kgf/mm²クラスのものには既に工業生産ベースに入っている。この場合の製造条件と製品の機械的性質の例を表2に示した¹⁾。この鋼板の特徴は抗張力に比較して非常に大きな伸びを有することである。

HSSの使用のほかに車体軽量化の目的で異型断面鋼板も使用されている²⁾。異型断面鋼板は車体のモジュール化の増加に伴って今後更に使用量が拡大するものと思われる。

3. 冷 延 鋼 板

パネル用極軟鋼板については、従来以上に成形性の向

平成3年10月7日受付 (Received Oct. 7, 1991) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)参与 工博 (Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

Key words : automobile ; trip steel ; IF steel ; high strength steel ; surface coated steel sheet ; noise dumping steel ; exhauster steel ; special steel ; gear steel ; free cutting steel.

表 2 熱延 TRIP 鋼の製造条件と機械的性質

化 学 成 分 (重 量 %)							熱延条件 (°C)		機 械 的 性 質 (kgf/mm ²) (%)			
C	Si	Mn	P	S	T. Al	T. N	FT	CT	TS	YR	U. El	T. El
0.196	1.46	1.45	0.005	0.008	0.030	0.0036	820	385	77.6	79.5	21.9	35.3

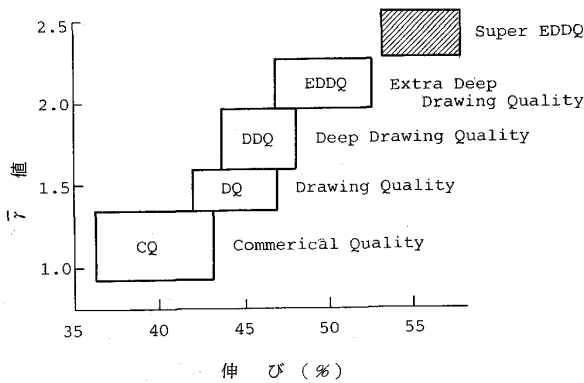


図 1 冷延鋼板のグレードと機械的性質

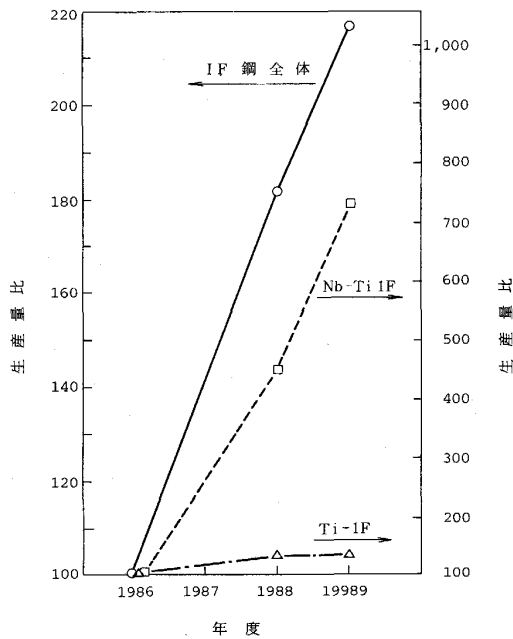


図 2 新日鉄における IF 鋼生産量比の変化

上が要求されるようになった。図 1 に示すように EDDQ グレードを上廻る Super EDDQ と呼ばれるグレードで \bar{r} 値は 2.3~2.5、全伸びは 55% 超の秀れた成形性を要求されている。冷延鋼板は近年表面処理化が著しく進んでいるが、例えば Zn めっき鋼板の \bar{r} 値はめっき層の拘束のため下地鋼板の \bar{r} 値より 0.2~0.3 劣化するとされており、こうした観点からも超成形性に対する要求は今後共強いと考えられる。

超成形性鋼板の製造には IF 鋼が不可欠であり、例えば 1986 年の生産量を 100 とした時の新日鉄における IF 鋼の生産量比は図 2 のごとくここ数年で飛躍的に増大している。もちろん IF 鋼では固溶 C, N が固定され

ているため過時効帯のない溶融 Zn めっきラインでの生産に適しているということも生産量の伸びの大きな理由となっている。

外板パネル用の HSS は高い \bar{r} 値と低い降伏強度を持つことが必要である。前者はプレス時の割れ発生を防ぐためであり、後者はプレス後スムーズな表面性状を確保するためである。Dual phase 鋼と析出強化鋼の場合には強度は十分であるが \bar{r} 値は 1.0~1.3 程度に止まっており、こうした鋼板はパネル類の成形には不向きである。P 添加 HSS の \bar{r} 値は約 1.6 でフェンダーのような深絞りパーツを除けば広く使用されている。しかし面歪みを発生させないためには鋼板の降伏強度を 24 kgf/mm² 以下にせねばならぬことが経験的に分かっており、P 添加鋼の降伏比から考えて外板用 P 添加 HSS の抗張力は 35~37 kgf/mm² 止まりとなっている。極低炭素鋼に Ti, Nb などを添加して C, N を固定し、更に Si, Mn, P の添加によって強度を高めた IF-HSS では \bar{r} 値で 2.0 程度の製品が得られている。また、この鋼板では降伏比が低い抗張力が 40 kgf/mm² 程度の製品を作ることも容易である。ただ IF-HSS の場合固溶 C, N 原子が結晶粒界からも奪い去られているため結晶粒界が不安定で二次加工時に粒界破壊を生じやすくなる。

これを防ぐためには数 ppm の B を添加をすればよく、B の添加によって脆性/延性遷移温度が 30~40°C 低下することが見出されている³⁾。

冷延 BH-HSS については多くの研究が行われている。冷延後の焼鈍に連続焼鈍と箱焼鈍の両方が用いられているが、固溶 C 量を制御するためには連続焼鈍の方が優れている。焼付け硬化性は鋼板中に固溶する C 量と共に大きくなるが、一方で固溶 C 量が大きくなるとプレス成形までの歪み時効性も増大して好ましくない。

プレス成形時許容される降伏点伸びの限界は約 0.2% なので、焼付け硬化性と歪み時効後の降伏点伸びとの関係から判断して歪み時効性と両立する焼付け硬化性は 4~6 kgf/mm² であると考えられる。近年 P 添加 Al キルド鋼で焼付け硬化性を持つ HSS が多量に使用されるようになったが、この場合鋼板中に固溶する C は約 8 ppm である。この鋼板のプレス時の降伏強度は 24 kgf/mm² であるが、プレスと焼付け塗装後の降伏強度は約 33 kgf/mm² にまで上昇しデント抵抗性を高めている。固溶 C が増加すると先に述べた歪み時効性のみでなく伸びとか降伏強度とか他の機械的性質も劣化するので適正条件の設定が重要である。

IF-HSS は非常に秀れた特性を持っているが、C は

表 3 BH 鋼板の実例^{5)~8)}

化学成分 (重量%)								板厚 (mm)	焼 鈍		機 械 的 性 質					
C	Si	Mn	P	S	Al	N	その他		プロセス	温度 (°C)	YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EI (%)	r_0	\bar{r}	BH (kgf/mm ²)
0.015	0.02	0.10	0.06	0.014	0.031	0.0030	B:0.0021	0.8	連続焼鈍	850	20.8	35.7	40.0	1.86	1.72	5.5
0.06	0.05	0.25	0.06	—	—	—	—	0.8		800	27.0	40.3	40.0	—	1.35	4.5
0.002	0.01	0.20	0.06	0.005	0.04	—	B:0.015	0.7		—	20.4	35.7	44	—	2.1	4.6
0.010	0.09	0.16	0.080	0.006	0.060	0.0026	—	0.7	箱焼鈍	730	23.1	36.6	39.1	1.56	—	4.7
0.009	0.06	0.14	0.046	0.008	0.051	0.0055	—	0.6		670	20.4	35.1	39.9	1.67	—	4.1
0.070	0.04	0.22	0.081	0.007	0.065	0.0050	—	0.7		730	23.7	39.6	39.4	1.87	—	4.5

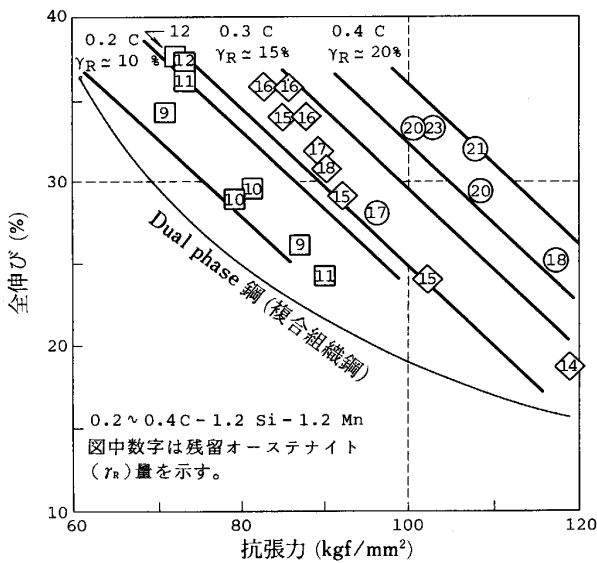


図 3 高残留オーステナイト鋼の強度-延性バランスに及ぼす C 量の効果¹⁰⁾

すべて固定されているため、焼付け硬化性を有しない。しかし連続焼鈍条件を適当にとると IF 鋼の場合でも少量の C を固溶させることができ、IF 鋼の秀れた特性を残しながら約 3 kgf/mm² の焼付け硬化性を付与することができる。

最近、Cu を約 0.15% 添加した HSS を成形後約 550°C で 10 min 程度局部加熱することによって、Cu の析出硬化により抗張力が約 20 kgf/mm² 増加する鋼板も開発されている⁴⁾。

TRIP 鋼は最初 ZACKAY ら⁹⁾ によって発明されたが、そこに示されているような高価な元素やオースフォーミングのような複雑な熱履歴を含むのでは自動車材料のように比較的安価で多量な需要を充たすことはできない。最近、通常の C-Si-Mn 鋼を連続焼鈍炉で 2 段焼鈍することにより約 10~20% の残留オーステナイトを作り出すことが報告されている¹⁰⁾。この場合 C 量を 0.2% から 0.4% まで増加させると残留オーステナイト量の増加によって延性の減少なしに強度を高めることができる。すなわち、図 3 に示すように鋼板の強度-延性バランスは右方にシフトする。高残留オーステナイト鋼の応

表 4 TRIP 鋼と Al の特性比較

	降伏強度 (kgf/mm ²)	抗張力 (kgf/mm ²)	伸び (%)	n 値	\bar{r} 値	ヤング率 (kgf/mm ²)
Al(5182-0)	15	30	25	0.3	0.7	7 000
TRIP 鋼	80	100	30	0.3	0.9	21 000

力-歪み曲線は Dual phase 鋼や従来鋼に比較して極めて特徴的な形をしている。すなわち、全伸びのほとんどは均一伸びであり面心立方金属の Al などに似ている。表 4 に TRIP 鋼と Al 薄板 (5182-0) の特性比較を示す。TRIP 鋼の抗張力は Al の約 3 倍であるが全伸びや n 値は同等ないしそれ以上になっている。Al と薄鋼板の競合関係は今後微妙であるが TRIP 鋼は鉄鋼サイドにとって興味ある材料と言える。

ただ、上記の TRIP 鋼では C 量が 0.2% を超えると通常条件下のスポット溶接性は劣化するので溶接条件を変えるか、機械的あるいは化学的接合を併用せねばならない。秀れた成形性と強度を保存し溶接性の改善された TRIP 鋼が期待される場所である。

4. 制振鋼板及び軽量ラミネート鋼板

近年、騒音に対する社会的関心の増大によって制振鋼板が脚光を浴びるようになって来た。制振鋼板は 2 枚の薄鋼板の間に厚さが約 50~100 μm の樹脂を挟んだもので、数年前まではトラックのオイルパンなど車外騒音対策用に使用されて来たが、最近ではダッシュパネルやフロアなど車内騒音対策用にも検討されるようになった。樹脂が騒音エネルギーを吸収するのはその粘弾性によるものであって、オイルパンでは 90°C 前後、車内パーツでは常温より少し高めに粘弾性のピークを有しなければならない。しかし、この鋼板は制振性のみでなくプレス成形性やスポット溶接性をも同時に満足する必要があるため、それらをすべて満足させる製造条件を設定せねばならない。車内騒音用の場合、連続スポット溶接性を確保するため熱硬化性樹脂の中に導電性のある物質、例えば金属粉などを混入させるが、図 4 に示すように樹脂厚と粉の粒径の比が 1.0~1.2 という狭い範囲にコントロールした時上記三つの特性を同時に満足させることができ

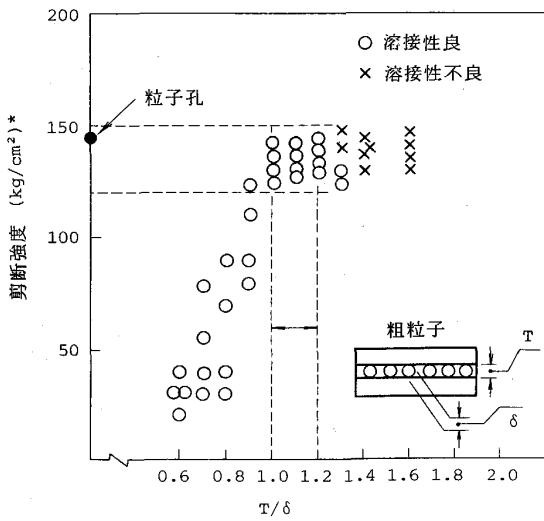


図4 制振鋼板の溶接性と剪断強度に及ぼす T (樹脂厚)/ δ (粒子径) の効果

る¹¹⁾。

軽量ラミネート鋼板は例えば板厚 0.2 mm の薄鋼板の間に板厚 0.4 mm の樹脂を挟んだサンドウィッチ鋼板であるが、前の制振鋼板に比し樹脂部の容積が非常に大きいので軽量化に著効がある。軽量ラミネート鋼板は樹脂を含むため同じ板厚の単体冷延鋼板に比べると曲げ剛性が低下するので全厚を少し厚くしなければならない。しかし、板厚を 5% くらい厚くしても全重量は 45% くらいに低減される。

軽量ラミネート鋼板に挟む樹脂は室温程度で使用される時はポリプロピレンでよいが、車体に組み込まれて 170°C 程度の温度で塗装焼付けをされる場合には耐熱性を見地からナイロンが必要となる。しかし、ナイロンはポリプロピレンより高温であり軽量化ニーズの度合いに

より今後の伸びが決まるであろう。軽量ラミネート鋼板では樹脂が非常に厚いので一般に溶接は困難であり、シリーズスポット溶接や加熱電極を用いて電極直下の樹脂を熔融排除するタイプの溶接法を用いなければならない。

5. 表面処理鋼板

表面処理鋼板については直近の「鉄と鋼」Vol. 77 (1991) No. 7 に特集号が刊行されたので詳細はそれを参照されたい。

寒冷地における融雪用の塩害から車体腐食を守るためスカンジナビア・コードやカナダ・コードなどの社会的規制が厳しくなり表面処理鋼板が従来の冷延鋼板に代わって著しく伸長した。この傾向をうけて図5に示すようにこの7~8年間に熔融 Zn めっき鋼板や電気 Zn めっき鋼板をベースとする多くの表面処理鋼板が開発された。通常の熔融 Zn めっき鋼板、合金化熔融 Zn めっき鋼板、電気 Zn めっき鋼板のほかにも図6に示すように合金化熔融 Zn めっき鋼板の上に鉄リッチの電気 Zn フラッシュめっきをした鋼板や図7のような Zn-Ni の電気めっき層の上にクロメートと樹脂有機皮膜をつけた鋼板も製造されている。

熔融 Zn めっき法と電気 Zn めっき法ではそれぞれ一長一短がある。すなわち、熔融 Zn めっき法では Zn 厚目付けが容易に行える反面、熱処理装置としてはシンプルなため下地鋼板に IF 鋼を用いる場合以外その加工性は電気 Zn めっき法の場合より劣る。また、厚目付けそのものによるプレス性やスポット溶接性の制約もある。電気 Zn めっき法では電気代の制約から厚目付けには不利であるが、冷延後の熱処理を専用装置で行えるため下地鋼板の加工性は秀れている。このため電気 Zn めっき法の場合は薄目付けでも耐食性を向上させるため Zn-Ni

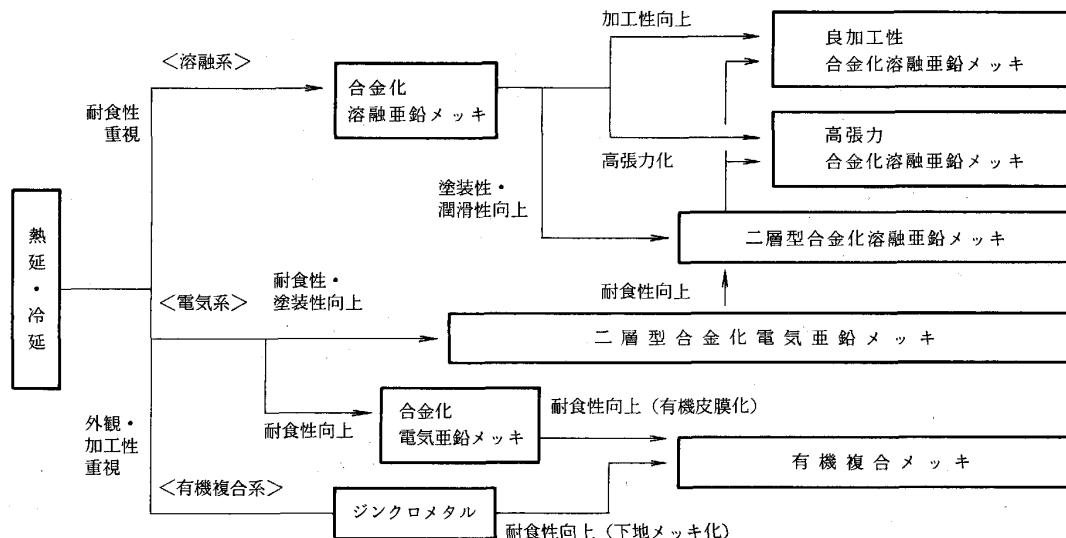


図5 自動車用 Zn めっき鋼板の多様化 (新日鉄資料)

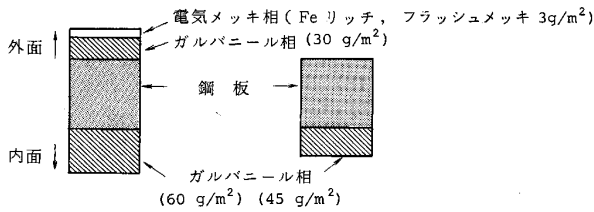


図 6 ガルバニール鋼板の断面

の合金めっきや Zn-Fe 2 層めっき, 更にこれら金属めっきの上に樹脂をコートする鋼板などが開発された訳である。しかし, 一般的に言って耐食性はいずれの場合も目付け量に直線的に比例するし, 純 Zn の場合穴あき 10 年保障を満足するには少なくとも 60 g/m^2 の目付け量が必要と言われていた。しかし, これも一般的に言って目付け量が 40 g/m^2 を超えるとプレス成形性やスポット溶接性が難しくなるため, 現在も薄目付けで更に耐食性に秀れためっき被膜の開発が精力的に行われている。

熔融 Zn めっき法の場合, 過時効帯を持っていないので良加工性のグレードには今後 IF 鋼の比率が高まるであろう。また, 軽量化のため下地に高張力鋼板 (HSS) を用いる場合, 焼鈍後の冷却速度が不足するので現状で

は化学成分で補完せねばならないが, HSS 用の熔融 Zn めっき技術についても検討する余地がいろいろとある。

自動車メーカーが商品の特徴を打ち出すため, 使用する表面処理鋼板の種類は多岐にわたっておりこの傾向は今後も続くであろう。我が国における電気 Zn めっきと熔融 Zn めっきの比率は昭和 61 年度 50 : 50 であったものが平成 5 年には 35 : 65 になると予測されている。

6. 排気系材料

図 8 に自動車の排気系と使用鋼材を示した。エキゾーストマニホールドには従来鋳鉄が主として使用されていたが, 軽量化のため鋼板や鋼管に置き換えられようとしている。また, エンジンの高出力化のため, 現行 900°C 程度の排ガス温度を 1000°C 程度に上昇させた場合の耐高温酸化性や耐熱疲労性が検討されている。普通鋼ではこうした動きに耐熱疲労強度の面で不安があるため, 409L (低 C-11.5Cr-Ti) や 430M (低 C-17Cr-Cu, Nb) など高 Cr フェライト系ステンレス鋼が使用されるようになったが, 更に高耐熱疲労性フェライト系ステンレス鋼の開発が鋭意進められている。

触媒コンバーターについては従来のセラミックスに代わり小型化, 軽量化, エンジン出力の増大などを目的と

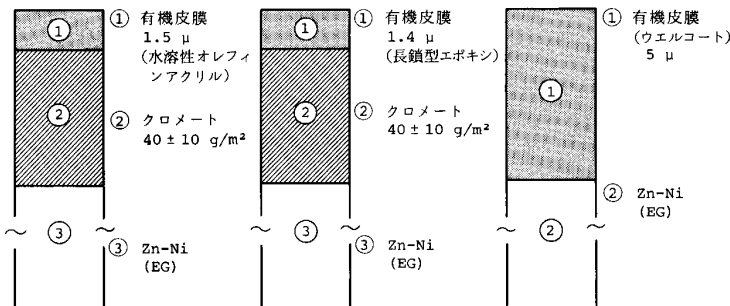
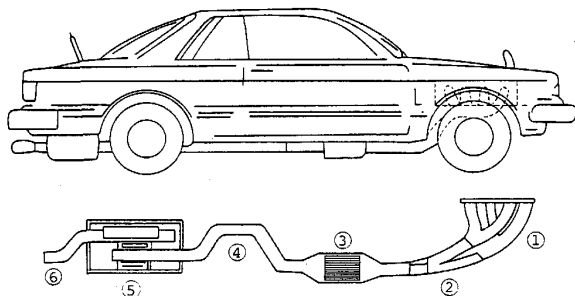


図 7 有機皮膜付き電気 Zn-Ni めっき鋼板例



⑥	⑤	④	③	②	①
テールパイプ	マフラー	エキゾーストチューブ	触媒コンバーター	フレキシブルチューブ	エキゾーストマニホールド
SUS410L 系 SUS304 系	SUS410L 系 SUH409 系 SUS430 系 外筒 (アルミメッキ鋼板)	SUH409 系 SUS410L 系	SUH410L 系 SCH409 系 外筒 (アルミメッキ鋼板)	SUS304 SUS302B SUSXM15J1	SUH409 系 SUS430 系

図 8 排気用システムと使用材料

した金属担体が開発された。1100°C を超える耐熱性が要求されることから高 Al フェライト系ステンレス鋼 (20Cr-5Al) 箔が使用されている。

フレキシブルチューブは製造時の厳しい加工に耐えるため SUS 304 などが使用されて来たが、最近北米向け輸出車の塩害対策に Si 含有オーステナイト系ステンレス鋼 (一例、日新製鋼: 15Cr-15Ni-4Si-1Mo) が開発されている。

マフラーについては現行の SUS 409, 410 に対し更に寿命 3 年、6 万 km 保証を目指した開発が行われており、最近では Mo, Ti を含有する高耐食性フェライト系ステンレス鋼 (SUS 436 系) が開発されている。上に述べた一連のステンレス化の動きに対しては普通鋼の場合の全面腐食と異なり、今後孔食、すきま腐食に対するより詳細な検討が必要となろう。この場合加熱サイクルによる凝縮液組成の変化に対する腐食のシミュレーション条件の検討も必要である。

7. 構造用特殊鋼

特殊鋼は自動車用構造材料の 15% を占めているにすぎないが安全部材や強度部材が対象であるため非常に重要である。

この分野における一つの特徴は加工費低減のためエンジンやシャシー部品用の快削鋼の使用比率が増加したことである。多くのカーメーカーでは構造用鋼の 50% 以上を快削鋼で置換している。この場合鉛快削鋼は鉛の融点が 321°C のため 250~300°C での使用は好ましくない。例えば、ギアやベアリングに鉛快削鋼を高面圧下で使用するとピitting抵抗が低下する。

従来の硫黄快削鋼の場合も MnS のため衝撃特性に異方向性があるため使用にある程度の制限が必要であるが、表 5 にこれら快削鋼の改良された成分例を示した¹²⁾。

サスペンションリング用鋼板に含有される酸素量は製

表 5 改良快削鋼の化学成分例

種類	化 学 成 分 (重量%)				
	Mn		P	S	Pb
	下限値	上限値			
L1	—	—	—	—	0.04~0.09
L2	—	—	—	—	0.10~0.30
S0	—	—	—	0.015~0.035	—
S1	0.10~0.20	0.20~0.30	—	0.04~0.07	—
S2	0.20~0.30	0.30~0.40	<0.040	0.08~0.12	—

表 6 新歯車用鋼の化学成分

グレード	化 学 成 分 (重量%)					
	C	Si	Mn	P, S	Cr	Mo
TSCM815J1	0.13~0.19	0.06~	0.55~	<0.030	0.85~	0.35~
TSCM820I1	0.17~0.23	0.15	0.90	<0.030	1.25	0.45

鋼技術の進歩によって 10~20 ppm 程度に低減されている¹³⁾。例えば新日鉄で開発された RH-SCS プロセスでは RH 脱ガス装置中で特殊合成フラックスにより非金属介在物を反応分離している。また、連続鋳造との併用によって非金属介在物のみならず偏析も更に低減されるが、非金属介在物の低減は製品の疲労特性を著しく改善している。

また、P や S の含有量を低減することによって製品の延性、靱性の尺度である断面減少率は顕著に改善される。こうした製鋼技術の進歩が自動車用構造用鋼の信頼性向上に大いに貢献したといえる。

歯車は軽量化効果の大きい部品である。従来、歯車には Cr-Mo 鋼の浸炭歯車が用いられて来たが粒界酸化層と不完全焼入れ層低減のため、表 6 のように Si 量を 0.1% 以下に減少させ Mo を 0.2~0.4% まで増加させた鋼が開発され使用され始めた¹⁴⁾。

また、ハードショットピーニングを行うことによ

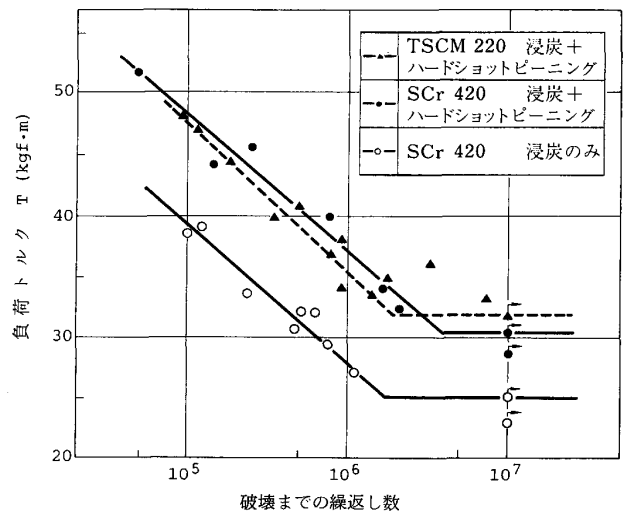


図 9 改良歯車の疲労試験結果

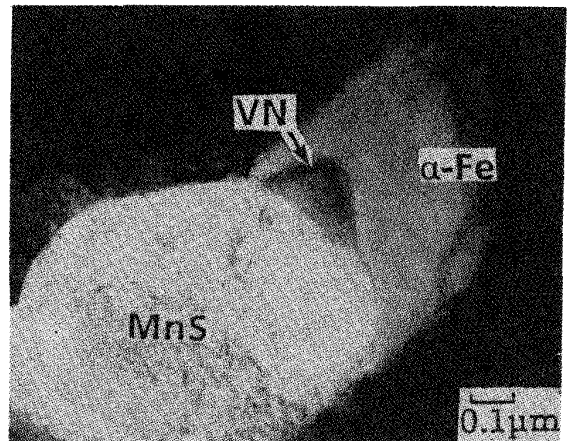


写真 1 複合析出物を生成核として成長する α-鉄変態粒

て圧縮残留応力のピーク値を 40 kgf/mm² から 100 kgf/mm² 以上に増加させることが可能である。従って浸炭窒化+ハードショットピーニング及び表面異常層低減鋼+ハードショットピーニングの組合せによって図9に示すごとく疲労強度は約 50% 向上している¹⁴⁾。しかし、歯元疲労強度が増加した結果、歯面の疲労損傷が顕在化して来ておりこの対策が今後の課題であろう。

アームなどの足廻り部品は従来 S 45C などの炭素鋼を熱間鍛造後焼入れ焼もどし処理して製造されて来たが、コストダウンと省力化のために高強度化と非調質化技術の開発が進められている。この場合複雑な部品形状に仕上げるため鍛造前加熱温度は 1 250°C 以上と高いので、組織の微細化による強度・靱性バランスの向上が必要である。このため写真 1 に示すようにオーステナイト粒内の MnS 上に VN を析出させ、この VN を核として粒内フェライトを生成させる技術が開発されている¹⁵⁾。これによって 80~100 kgf/mm² 級の強度で従来の焼入れ焼もどし部品並みの強度・靱性バランスが得られている。

8. 結 言

自動車材料の変化を見ていると、自動車というものがいかに社会生活に密着しているか、またそれゆえ社会の変化にいかに関心で反応しているかがよく理解できる。

本稿を書きながらこのような社会や自動車の目まぐる

しい変化に材料メーカーも敏感に反応してゆかねばならぬことを改めて痛感したしだいである。

文 献

- 1) 河野 修, 高橋 学, 脇田淳一, 阿部 博: 鉄と鋼, **72** (1986), S1386
- 2) JDDRG 提出資料 (日産自動車編) (1987)
- 3) 山田正人, 徳永良邦, 山本満治: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1049
- 4) 岸田宏司, 秋末 治: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 759
- 5) 武智 弘, 加藤 弘, 小山一夫, 川崎宏一, 豊田洋民: 鉄と鋼, **67** (1981), S461
- 6) 松藤和雄, 下村隆一, 大沢紘一, 奥山 健, 木下正行, 逢坂 忍: 日本鋼管技報, **84** (1980), p. 14
- 7) 黒沢光正, 佐藤 進, 小原隆史, 角山浩三: 鉄と鋼, **72** (1986), S633
- 8) 岡本篤樹, 高橋政司, 日野貴夫: 鉄と鋼, **66** (1980), A209
- 9) V. F. ZACKAY, E. R. PARKER, D. FAHR and R. BUSH: Trans. Am. Soc. Met., **69** (1967), p. 252
- 10) O. MATSUMURA, Y. SAKUMA and H. TAKECHI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **27** (1987), p. 570
- 11) H. ENDOH, M. EJIMA and Y. ZAMA: SAE Tech. paperseries, **890** (1989), p. 708
- 12) 大沢 恂: 特殊鋼, **35** (1986) 10, p. 23
- 13) F. OKA, T. EBIHARA, K. NISAWA, N. KUROSU and T. BANNO: Nippon Steel Technical Report, **30** (1986), p. 28
- 14) 小島芳彦, 三輪能久, 柴田伸也, 有見幸夫: 自動車技術, **42** (1988), p. 755
- 15) 石川房男, 高橋稔彦, 越智達朗: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1797