自動車用薄鋼板の高機能化

徳永良邦* 山崎一正**

1. はじめに

鉄鋼製品の中でも薄鋼板は、自動車産業の発展とともに伸び、今日の自動車産業の繁栄に寄与してきた。その品質・機能の向上は日本の自動車の質の向上の陰の力となっている。

図1に示すように、薄鋼板の生産量は自動車生産台数とともに拡大し、現在では粗鋼生産量の約10%、国内向け鋼材の約15%が自動車向けである。地域別に見ると、東海地区(愛知、三重、静岡)がその約50%を消費し、自動車産業の最大拠点となっている。

図1 粗鋼生産量、自動車生産台数、薄鋼板生産量の推移。
「地域別・用途別鉄鋼統計」(日本鉄鋼連盟)より。

2. 加工性

自動車に用いられる鋼材は、薄鋼板、ステンレス、棒鋼、線材と多岐にわたるが、中でも、熱延鋼板、冷延鋼板、表面処理鋼板の薄鋼板類が約80%を占め、重要な役割を果たしている。以下、自動車の発展を支えてきた自動車用薄鋼板の高機能化の進展についてまとめた。

鋼板の加工性のグレードは、一般的には、深絞り性を示す“ r 値”と延性を示す“全伸び”を評価指標として、図2のように、CQ(Commercial Quality: 一般加工用)、DQ(Draw-

図2 加工性のグレードと機械的性質。

* 新日本製鐵株式会社技術開発本部名古屋技術研究部部長

** 新日本製鐵株式会社技術開発本部名古屋技術研究部主幹研究員(〒476 東海市東海町5-3)

Development of the High Quality Steel Sheets for Automobiles; Yoshikuni Tokunaga, Kazumasa Yamazaki(Nagoya R & D Laboratories, Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation, Nagoya)

Keywords: steel sheet, formability, corrosion resistance, high strength steel sheet, shape control, thickness accuracy, surface defect, vibration damping steel sheet

1995年2月13日受理

ing Quality : 絞り加工用), DDQ (Deep Drawing Quality : 深絞り用), EDDQ (Extra Deep Drawing Quality : 高深絞り用), Super EDDQ (超深絞り用) に分けられる⁽¹⁾⁽²⁾。

深絞り用に適用される Al キルド鋼は, '50年代半ばに国産化され, 主として箱焼鈍法で製造されていた。Al キルド鋼は, 鋼中の Al が箱焼鈍中に AlN となって析出して再結晶集合組織を制御し, 深絞り性に好ましい板面に平行な{111}面を発達させ, 優れた深絞り性を示す。また, 970 K 前後の均熱温度に長時間保持されるので, C 量が0.04%前後であっても十分な延性が得られる。さらに, 均熱後ゆっくり冷却され, 鋼中の固溶炭素はほとんどなくなるので, 非時効性鋼板となる。 r 値は約1.7, 全伸びは46%の優れた成形性を示す。深絞り性と非時効性に優れていることから, 自動車用として大量に使用されてきた。

'70年代になると, 薄鋼板は連続焼鈍法により製造される時代に入った。連続焼鈍法は, 箱焼鈍ではおよそ3d かかっていた焼鈍を約60sで行うものである。'70年代半ばになって, 連続焼鈍ラインが続々と設置されるようになると, Al キルド鋼を用いて連続焼鈍法で深絞り用鋼板を製造する技術が開発された⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。連続焼鈍では, 箱焼鈍に比べて昇温速度が非常に大きいので昇温過程で AlN は析出せず, これを集合組織の制御に利用することができない。そこで, 熱延後の巻取温度を高くして, AlN と炭化物を粗大析出させ, 地鉄を高純化して結晶粒成長を促進する方法が採られている。また, 冷却が速いために固溶 C を低減するための過時効処理が行われる。これは, 急冷して C の過飽和状態をつくり, この後600~700 K に60~180 s 保持して固溶 C をセメントナイトとして析出させるものである。これにより, 実質的に非時効で深絞り性の良い鋼板が製造されるようになった。

一方, C 量を低下させて加工性を確保しようとする技術も検討された。'60年代半ばには, 真空脱ガス処理で得られた極低炭素鋼に Ti を添加して, 鋼中の固溶 C, N を Ti の炭窒化物として析出させ, 地鉄を高純化させた高深絞り性 (EDDQ グレード) の Ti 添加鋼板が開発された。しかし, 真空脱ガス技術が未熟であったこと, Ti 添加によるコストの上昇, 当時は箱焼鈍法であったため高温焼鈍が難しかったなどの点から, 量産材としてはあまり生産されず, 少量しか用いられなかった。

その後, 図3⁽⁶⁾に示すような真空脱ガス技術の進歩により, 20 ppm 前後の炭素量の鋼が容易に得られるようになると

図3 真空脱ガス法による到達炭素量の推移。

もに, 連続焼鈍設備の稼動により高温焼鈍が可能になったことから, 極低炭素鋼に Ti, Nb などの炭窒化物形成元素を添加して C, N などの侵入型固溶元素をゼロ近くにまで低減した IF 鋼 (Interstitial Free 鋼) が製造されるようになった。IF 鋼を用いて, 従来以上の加工性を持つ Super EDDQ というグレードの鋼板が開発された。

表1⁽¹⁾に, 加工用鋼板の化学成分と機械的性質を示す。現在では, 一般的には CQ から DDQ の一部までが Al キルド鋼で, DQ の一部から Super EDDQ までが IF 鋼で製造されている。連続焼鈍法とリファインされた IF 鋼の使用により加工性の最高級グレードは, 箱焼鈍時代の DDQ レベルから Super EDDQ レベルにまで拡大した。加工性の向上は, 難成形部品の成形を容易にするとともに, 大型パネルの一体成形化を可能にするなどコスト低減へも寄与している。

3. 耐 食 性

自動車車体に防錆鋼板が本格的に使用されるようになったのは'80年代になってからである。北米, 欧州で冬期に散布される融雪塩, 砂などによる腐食が社会問題化したのが契機であった。現在では, 自動車の廃車までの寿命が延びて, 車体の錆の評価が中古車の売れ行きに影響を及ぼすようになり, マイルドな腐食環境地域でも防錆対策が必要となっている。

防錆品質の基準として, カナダ, 北欧の防錆コードがあり, '80年代初めには「3年孔あきなし, 1年表面錆なし」であったものが, '80年代半ばになるとそれぞれ「5年—1.5年」,

表1 各種深絞り用冷延鋼板の化学成分と機械的性質の例。

深絞り用冷延鋼板	焼鈍方式	化 学 成 分 (質量%)									機 械 的 性 質			
		C	Mn	P	S	Sol Al	N	Ti	Nb	Sb	r 値	El (%)	YP (MPa)	TS (MPa)
Al キルド鋼板	箱	0.043		0.008	0.017	0.043	0.0058				1.55	47		299.1
Al キルド鋼板	連続	0.018	0.15	0.012	0.013	0.074	0.0020				1.73	46	167	310.7
OCA 脱炭鋼板	箱	0.006		0.032			0.0010			0.018	1.76	47		296.2
Ti 添加鋼板	箱	0.005	0.10					0.08			1.88			
Ti, Nb 添加極低炭素鋼板	連続	0.002	0.12	0.014	0.003	0.05	0.0012	0.059	0.007		2.52	51.0	143	288.1
Ti 添加極低炭素鋼板	連続	0.0014	0.13	0.008	0.003		0.0015	0.050			2.63	53.8	116	273

図4 防錆鋼板の変遷.

さらに「6年—3年」と厳しくなった. '80年代後半には自動車メーカーの自主的目標として, 「10年—5年」が設定されるに及んでいる. これに伴い使用される防錆鋼板も変化する. 図4⁽⁷⁾に示すような変遷をたどっている.

車体に要求される耐食性としては, 外観腐食と耐孔あき腐食に区別される. 外観腐食は, 飛石等による塗膜の損傷部分, 鋼板エッジ部などの塗膜欠陥部から腐食が起こり, 赤錆, カサブタ状のスカップ錆などが発生し, 車体の見栄えを損なう腐食である. 孔あき腐食は, 塗膜のつきまわりが不十分な部分に水分, 塩分が泥などとともに堆積して腐食が深さ方向に進行し, やがて鋼板に孔があく腐食である. 腐食の進行は, 電気化学反応であり, 酸素と水の共存下で局部電池が形成されて進行する. 特に塩素イオンの存在で反応は促進される. これらの腐食を防止するために各種の防錆鋼板が開発された. 代表的な例を図5に示す. 現在使用されている防錆鋼板はいずれも亜鉛を使用したもので, 亜鉛のもつ犠牲防食作用を利用している. それぞれの防錆鋼板の特徴は次のようである.

(1) 純 Zn めっき鋼板(溶融 Zn めっき鋼板, 電気 Zn めっき鋼板)

Zn の犠牲防食作用を利用する最も単純な系のめっき鋼板である. 純 Zn は, Fe との腐食電位差が大きいため, Zn の溶解が速く, アルカリにも弱いので塗膜ふくれを生じ易いなどの難点があり, 自動車車体に使用される比率は少ない.

(2) Zn-Ni 合金電気めっき鋼板

Ni 11%を含む Zn をめっき層として有するめっき鋼板である. 無塗装状態での腐食速度は極めて小さいが, 犠牲防食作用が弱く, 鋼板エッジ部で赤錆が発生しやすいなどの欠点がある. 塗装耐食性, スポット溶接性に優れているので, 使いやすいめっき鋼板として使用されてきた.

(3) 2層 Zn-Fe 合金電気めっき鋼板

下層に Fe 10~20%を含む Zn(目付け量 20 g/m²), 上層に Fe 80%を含む Zn(目付け量 3 g/m²)を有するめっき鋼板である. 耐食性は下層が分担し, 上層は, 電着塗装の際のクレターおよびプリスターと呼ばれる欠陥の発生防止, さらに塗料の耐水密着性を改善する効果を持つ. 特に, 塗装の前に行われる化成処理との適性が良いために効果を発揮したが, 現在では化成処理法の改善により, このような上層に頼らなくても良くなっている. 耐食性の要求が高まるにつれて, 厚目付け化が指向され, 電気めっき法で製造されるこの鋼板は厚い目付け量を得るのが難しく, 使用量は減少している.

(4) 合金化溶融 Zn めっき鋼板

Zn めっき後, 熱処理を施して鋼板から Fe をめっき層表面にまで拡散させ, めっき層の組成を Fe-Zn 合金としたものである. 塗装耐食性が優れている. この理由としては, 塗膜下の耐アルカリ溶解性に優れていること, 適正な犠牲防食作用によるものと考えられている. 現在では, この鋼板が防錆鋼板の主流となっている. 上層として, さらに, 80%Fe-Zn 層あるいは 99%Fe-P 層をめっきした 2層タイプのめっき鋼板も実用化されている. これは, 電着塗装時の欠陥を防止するとともに, プレス時の摺動特性の改善にも役立ち, 難成形部品に適用されている.

(5) 薄膜有機複合鋼板

Zn-Ni 合金電気めっき層 20~30 g/m² の上にクロメート層 50 mg/m², 樹脂層 1 μm を有するめっき鋼板である. 樹脂は, 一般的にはエポキシ系樹脂が用いられている. 樹脂が薄いために, 電着塗装, スポット溶接が可能である. 耐食性に対しては, Zn 層の犠牲防食作用の他にクロメート層の役

	純 Zn めっき鋼板	Zn-Ni 合金電気めっき鋼板	2層 Zn-Fe 合金電気めっき鋼板	合金化溶融 Zn めっき鋼板	薄膜有機複合鋼板
めっき層構造					
めっきプロセス	電気めっき 溶融めっき	電気めっき	電気めっき	溶融めっき	電気めっき

図5 実用化されているめっき鋼板.

図6 屋外暴露による表面錆の評価結果.

割が大きい。クロメート層には、電気的な絶縁性、電気化学反応の活性低下作用、被膜破壊部の補修効果があるとされている。

各種防錆鋼板の表面錆、孔あき腐食に対する効果を図6, 7⁽⁸⁾に示す。めっき層のない冷延鋼板に比べて、めっき目付量が多くなるほど優れた耐食性を示していることがわかる。現在、自動車車体中使用されているめっき鋼板のめっき量は、平均的には45~60 g/m²であり、めっき鋼板が使用されていなかった頃に比べて格段の耐食性の向上が見られ、車体の防錆性能は、表面錆なし5年—孔あきなし10年の目標が満足されつつある。

4. 強 度

'67に米国において、連邦自動車安全基準が発表されたのを契機に安全車に対する認識が高まり、高強度鋼板(ハイテン)適用の動きが現れた。しかし、高強度鋼板の使用比率が伸びるのは、その後に起こったオイルショック以降である。燃費向上のため車体の軽量化が図られ、これを実現するために高強度鋼板の適用拡大が進められた。高強度鋼板は、現在、ボディの約26%⁽⁹⁾を占めている。

薄鋼板が使用される部位のなかで、強度が必要とされるのは、耐デント性、耐久強度、大変形強度が支配的な個所である。これらの部位は、高強度鋼板を使用することによって、板厚を低減することができ、軽量化を図ることができる。

(1) 焼付硬化型ハイテン

ドア、フード、トランクリッドなどでは、人が押したり、小石が飛来して凹むことに対する抵抗(耐デント性)がなければならない。耐デント性には高い降伏点の鋼板が必要であるが、プレス成形に際し、高い面精度と張り剛性を得るためには、降伏点が高いことが望ましい。この矛盾する性能を得るために開発されたのが、焼付硬化型ハイテンである。成形時には低降伏点で、成形後の塗装焼付により硬化する材料である。これは固溶Cの制御によってもたらされる。このような考えは古くからあったが、固溶Cの制御が難しく、なかなか実現されなかった。連続焼鈍技術の発達とともに固溶Cの制御が容易になり、今では、340 MPaクラスの鋼板が広く使われるようになった。

図7 電着板合わせ試験片の穴あき腐食性試験結果.

図8 デント深さに及ぼす焼付硬化鋼板の効果.

最近では、IF 鋼で製造する技術も開発され⁽¹⁰⁾、溶融めっき鋼板でも焼付硬化型ハイテンが供給できるようになっている。焼付硬化型ハイテンは、図8⁽¹¹⁾に示すように、同じ耐デント性を得るための板厚が薄くて良く、0.05~0.1 mmの軽量化がはかられている。

(2) 複合組織ハイテン

軟質なフェライト地に硬質なマルテンサイトが分散した複合組織を有するハイテンである。降伏比が低く、降伏点伸びがなく、強度に比し伸びが大きいのが特長である。疲労耐久性が高い⁽¹²⁾ので、ホイールディスクに使用されている。590 MPaクラスが主流であるが、最近では780 MPaクラスのものも開発されている。

(3) 超ハイテン

バンパーの補強部材、ドアインパクトビームには780~1180 MPaクラスの超ハイテンと呼ばれる高強度鋼板が使用されるようになった⁽¹³⁾。超ハイテンは、連続焼鈍後の急冷を利用して、組織制御と析出強化が併用されて強度が確保されている。局部変形能を改善したもの、遅れ破壊を考慮したものが製造されている⁽¹⁴⁾。

(4) その他のハイテン

IF鋼にPなどの固溶強化元素を添加し、 r 値の低下を抑えて強化をはかった高い r 値を有する高 r 値型の350~450 MPaクラスのハイテン⁽¹⁰⁾、パーライトを減らし、フェライト・ベイナイト組織あるいはベイナイト単相組織として穴拡げ性を向上させた490~780 MPaクラスの高穴拡げ性熱延ハイテン⁽¹⁵⁾、オーステナイト相を残存させ強度に比して高い伸びを実現させた高残留 γ ハイテン⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、熱処理で硬化するCu添加ハイテン⁽¹⁸⁾などが開発されている。

5. 板厚精度・形状・材質バラツキ・表面品質

自動車の生産性向上には、加工性の向上もさることながら、板厚精度・形状の改善、材質バラツキの低減、表面品質の向上の寄与が非常に大きい。日本製の鋼板が使いやすく、優れていると言われているのはこの点にある。

(1) 板厚精度

X線厚み計の信号を圧延機の圧下力・張力にフィードバックし板厚を制御するAGC(Auto Gauge Control)と呼ばれる制御システムが熱間圧延機、冷間圧延機に装備され板厚精度は飛躍的に向上した⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

(2) 形状

圧延において形状制御が悪い場合には、鋼板のエッジが波打つ“端伸び”，中央部にうねりのある“中伸び”と呼ばれる形状不良が発生する。形状制御のために、圧延機のロールを曲げて制御するワークロールベンダーが開発され、ついで、圧延ロールとバックアップロールの間にロールを入れ、この中間ロールを動かすことにより制御する6重式圧延機が開発された。これにより、図9⁽²¹⁾に示すように、鋼板の形状は大きく改善した。最近では、圧延ロールをクロスして形状を制御する方式も開発されている⁽²²⁾。これらの技術革新により、鋼板の形状は大幅に向上した⁽²³⁾。

(3) 材質バラツキ

製鋼での成分的中技術の向上、熱間圧延後の冷却能力・制御技術の向上、焼鈍技術の向上により材質バラツキは減少してきた。連続焼鈍法が採用されるようになるとコイル間、コイル内部の材質バラツキはさらに減少した。しかし、熱延後の巻取時にコイル両端が冷えるため、コイル長手方向両端部の材質劣化の問題が発生した。これも図10⁽²⁴⁾に示すように、低C、低N化などにより改善されている。

(4) 表面品質

鋼板表面の疵は、自動車の外板などに使用する時には致命的な欠陥となる。表面品質には、製鋼段階で発生する介在物等に起因する疵、熱間圧延・冷間圧延・焼鈍行程で発生するすり疵・押し疵などの外部要因に起因する疵、表面処理工程で発生するめっき不良などがある。図11⁽²⁵⁾に、連続焼鈍化

図9 6Hi-MILLによる形状改善効果。
(a) 6Hi-MILLと4Hi-MILLの急峻度比較。
(b) 6Hi-MILLによる平坦度不良発生の減少。

図10 低C、低N系鋼種のコイル内材質変動。

図11 連続焼鈍化による疵の減少。

図12 制振鋼板の損失係数の温度依存性。

によりそれまでの箱焼鈍に比べて疵が減少した例を示す。このように、各製造行程での技術革新により表面品質は大きく向上している。

6. その他の特性

(1) 制振性

鋼板に振動を減衰させる制振性能を付与した制振鋼板が開発された⁽²⁶⁾。制振鋼板は、50 μm 前後の薄い粘弾性樹脂を2枚の鋼板で挟んだサンドイッチ構造の鋼板である。制振性は、曲げ振動を受けた際、樹脂の剪断変形で振動エネルギーを熱エネルギーに変えることによって発揮される。図12⁽²⁶⁾に示されるように、使用される樹脂によって制振性が発揮される温度が異なるので、使用環境に適した材料が選択される。エンジンのオイルパン、エンジンルームから室内への音を遮断するためにダッシュパネルなどに適用されている。この材料により、薄鋼板としても静粛性の向上に寄与できるようになり、静粛性向上手段の選択範囲が広がった。

(2) 潤滑性

Znめっき鋼板が多用されると、プレス時の潤滑性能が問題にされるようになった⁽²⁷⁾。Znめっき鋼板は摺動性が悪く、鋼板自体の成形性が高くても、金型内への滑り込みが不十分となり、成形可能範囲が狭いという問題点があった。これに対して、潤滑性の高い防錆油や潤滑処理方法⁽²⁸⁾が開発され、Znめっき鋼板のプレス成形性は改善されている。

7. おわりに

自動車メーカーからの要求とそれに応えた鉄鋼メーカーでの開発、鉄鋼メーカーからの提案とそれを適用した自動車メーカーの協調があって、自動車用薄鋼板の品質および機能は大きく向上してきた。今後とも両者の協調のもと、新たな機能が追求されて行くであろう。

文 献

- (1) 秋末 治：まてりあ，**33**(1994)，24.
- (2) 武智 弘：鉄と鋼，**78**(1992)，339.
- (3) K. Ushioda, O. Akisue, K. Koyama, T. Hayasida: Developments in the Annealing of Sheet Steels, Proceeding of an international symposium sponsored by the TMS Ferrous Metallurgy Committee and held at the Fall Meeting in Cincinnati, Ohio, Ed. by R. Pradhan and I. Gupta, TMS, (1992), 261.
- (4) 林田輝樹，織田昌彦，山田輝明，佐野裕司，河合謙二，佐藤泰生，大滝康永：CAMP-ISIJ，**5**(1992)，835.
- (5) 酒井 司，佐藤泰生，大滝康永，織田昌彦，山田輝昭，林田輝樹：CAMP-ISIJ，**5**(1992)，834.
- (6) 雀部 実：第143・144回西山記念技術講座「最近の高純度鋼溶製技術の進歩」，日本鉄鋼協会，(1992)，9.
- (7) 金丸辰也：第138・139回西山記念技術講座「表面処理技術の進歩と今後の動向」，日本鉄鋼協会，(1991)，169.
- (8) 祖式愛和，鬼沢浩二，飯田明穂，金丸辰也，森田順一：自動車技術，**42**(1988)，767.
- (9) 佐野 実：自動車用材料シンポジウム，日本鉄鋼協会・自動車技術会，(1993)，14.
- (10) 山田正人，徳永良邦，伊藤亀太郎：製鉄研究，**322**(1986)，90.
- (11) K. Yamazaki, T. Horita, Y. Umehara, T. Morishita: Microalloyed HSLA Steels, Proc. of Microalloying '88, 1988 World Materials Congress, Chicago, Illinois, USA, ASM International, (1988)，327.
- (12) 水井正也：材料，**38**(1989)，15.
- (13) 城井幸保，丹羽省三，岩田敏光：自動車技術，**42**(1988)，761.
- (14) 山崎一正，水山弥一郎，岡 賢：CAPM-ISIJ，**5**(1992)，1839.
- (15) 河野 治，江坂一彬，加藤征四郎，阿部 博，脇田淳一，高橋 学，片上幹史，原田慎三：製鉄研究，**329**(1988)，15.
- (16) 澤井 巖，内田尚志，神坂栄治：鉄と鋼，**71**(1985)，s1292.
- (17) 松村 理，佐久間康治，武智 弘：鉄と鋼，**71**(1985)，s1293.
- (18) 岸田宏司，秋末 治，池永則夫，黒澤文夫，植森龍治：CAMP-ISIJ，**5**(1992)，1827.
- (19) 三輪親光：第29・30回西山記念技術講座「薄鋼板製造技術の最近の進歩」，日本鉄鋼協会，(1974)，13.
- (20) 君嶋英彦：鉄と鋼，**79**(1993)，235.
- (21) 西 英俊：第92・93回西山記念技術講座「板圧延および圧延機の最近の進歩」，日本鉄鋼協会，(1983)，102.
- (22) 大森舜二，塚本顕彦，日野裕之，中島浩衛，中沢 吉：塑性と加工，**28**(1987)，1067.
- (23) 中野恒夫：鉄と鋼，**78**(1992)，312.
- (24) 苗村 博：第88・89回西山記念技術講座「ストリップの連続焼鈍技術の進歩」，日本鉄鋼協会，(1974)，283.
- (25) 苗村 博，福岡嘉和，逢坂 忍，石岡弘之：日本鋼管技報，**73**(1977)，47.
- (26) 遠藤 紘，江嶋瑞男，斉藤 亨，森田順一：製鉄研究，**334**(1989)，37.
- (27) 堀田 孝，野本徹也：プレス技術，**29**(1991)，39.
- (28) 鈴木真一，新井勝利，金丸辰也：CAMP-ISIJ，**6**(1993)，1545.

略 号

AGC : auto gauge control, 自動板厚制御。

CQ : commercial quality, 一般加工用。

DQ : drawing quality, 絞り加工用。

DDQ : deep drawing quality, 深絞り用。

EDDQ : extra deep drawing quality, 高深絞り用。

IF 鋼 : interstitial free 鋼, 侵入型固溶元素のない鋼のことであるが、一般には Ti, Nb の添加された極低炭素鋼を指す。

Super EDDQ : super extra deep drawing quality, 超深絞り用。