

## 高強度鋼板の製造技術と製品特性

中沢 吉\*・松塚健二\*・佐藤泰一\*<sup>2</sup>・大野勇一\*

## The Production Technology of High Strength Steel Sheets and Their Properties

Kichi NAKAZAWA, Kenji MATSUZUKA, Taiichi SATO, and Yuichi OHNO

## Synopsis:

The paper reviews Nippon Steel's research and development systems and describes its approach to dealing with the requirements of the automobile industry for high strength steel sheets in terms of steel properties, such as, formability, weldability, paintability and corrosion resistance.

The paper also explains the corporation's technologies for the production of hot-rolled, cold-rolled and surface treated high strength steel sheets and the properties of these products.

For the trends of the expanding applications of high strength steel sheets and the growing demand for higher strength steel, the paper emphasizes the necessity for overall measures to promote technical improvements in both the manufacture and the fabrication of high strength steel sheets.

## 1. 緒 言

高強度鋼板の使用が自動車乗員安全対策から軽量化目的へと拡大されるにともない、使用部位や形態が多岐にわたつてきており、鋼板強度に加えて成形性・溶接性・塗装性・疲労強度といった諸特性の向上が要請されている。

このような需要動向に対して、実使用に近い状態での諸現象解析により、鋼板への要求特性を定量化することが新製品開発の基盤につながり、ひいては高強度鋼板実用化拡大に貢献できるという思想から、当社では自動車の実部材規模でのプレス成形・溶接等の性能評価システムを完備し、要求特性の明確化や定量化を図りつつ、それに合致した製品開発を推進している。

新鋼板の開発体制を Fig. 1 に示すが、「評価技術開発」は社会環境や鋼板利用面のニーズを受けて、開発目標の設定と、新しく開発された鋼板の性能解析が主業務である。とくに実物規模での評価研究は実用化への早期対応を容易にすると同時に、加工利用技術研究の手段として活用されており、鋼板製造と利用加工両面に立つた総合的な材料動向予測をも可能にした。

「鋼板製造技術開発」には、高純度化・介在物形態制御・寸法形状制御等の固有技術開発や、製鋼と熱延を結ぶ連続鍛造・冷延後の焼鈍から精整工程を含む薄鋼板の連続焼鈍化等相互に関連した技術を有機的に結合させる

等の総合技術開発がある。

当社の高強度鋼板は、以上述べたような一貫した研究開発体制を基盤として、各種用途に応じた製造方法および特性を備えた製品の体系化がなされている。

## 2. 高強度鋼板の成形性と鋼板製造技術

## 2.1 高強度熱延鋼板

当社の高強度熱延鋼板の製品体系は Fig. 2 に示すように、絞り用としての複合組織 (Dual Phase, 以下 DP と略す) 鋼板と一般加工用の析出強化型鋼板に大別される。

DP 鋼板は延性および低降伏化 (高加工硬化性) に優れ、しかも通常 7~10 kgf/mm<sup>2</sup> の焼付硬化性を有している。

熱延 DP 鋼板の製造法は、一般にオフライン焼鈍法 (熱延後あらためて熱処理する) と As Roll 法 (熱延ままで DP を得る) に大別される。当社が開発した As Roll 型超低温巻き取り法は、DP 化のために適正な温度で圧延を後了後、急速冷却をおこない、非常に低い温度で巻き取る方法で、少ない合金元素の量で良好な成形性が得られることを特徴とする。ホットランテーブル上での冷却速度や冷却パターンが広範囲に精度よく制御できることが前提となる。

材質におよぼす仕上げおよび巻き取り温度の影響は顕著で、その例を Fig. 3 に示す。伸びフランジ性に対

昭和 56 年 10 月 15 日受付 (Received Oct. 15, 1981)

\* 新日本製鉄(株)本社 (Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku 100)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Products R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

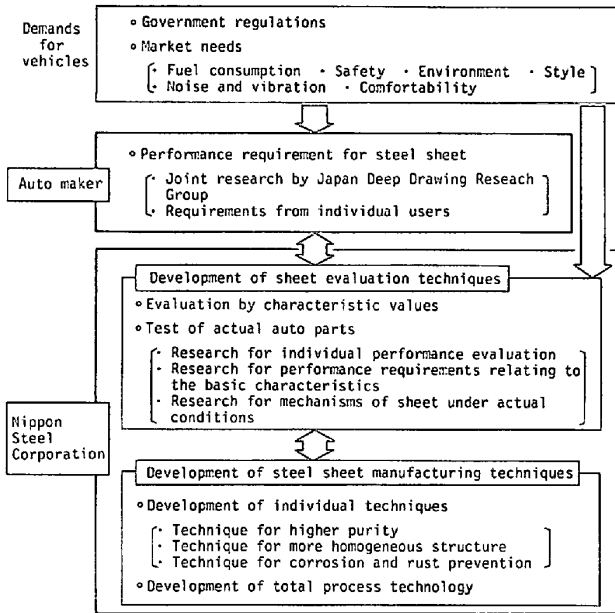
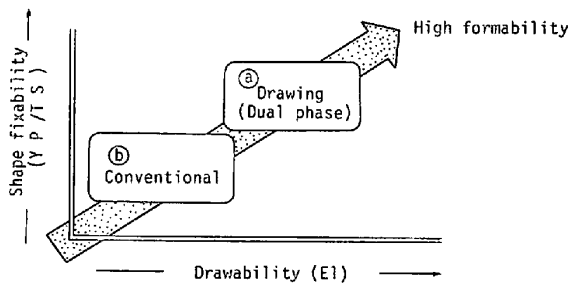
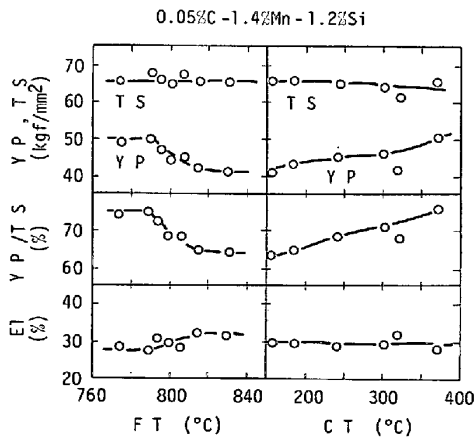


Fig. 1. Diagram of system of development of steel sheets.



(EI: Elongation, YP: Yield point, TS: Tensile strength)

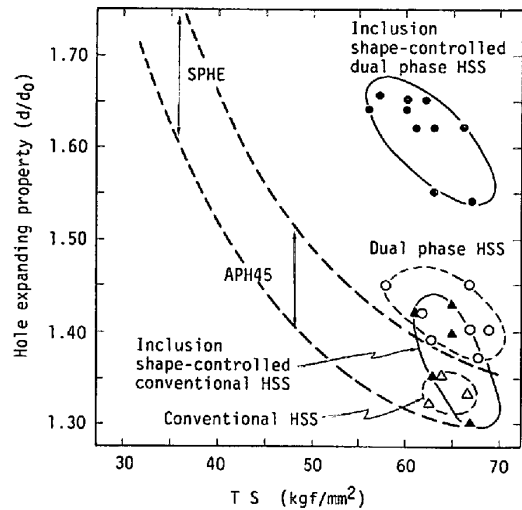
Fig. 2. Schematic classification of HR HSS products.



(FT: Finishing temperature, CT: Cooling temperature)

Fig. 3. Effects of finishing temperature and cooling temperature on mechanical properties of Mn-Si steel.

しては、鋼板中の硫化物の量と形態が重要な意味をもつ<sup>2)</sup>。カルシウム添加による硫化物形態制御の効果を Fig. 4 に示すが、DP 鋼板についてもマルテンサイト量が適正に制御されていれば、析出型鋼板と同様に大き



( $d_0=20\text{ mm}\phi$ ,  $D_{d10}=42.5\text{ mm}\phi$ ,  $D_{punch}=30^\circ_{\text{corr}}$ ,  $C=0.4\text{ mm}$ )

Fig. 4. Relationship between tensile strength and hole expanding property.

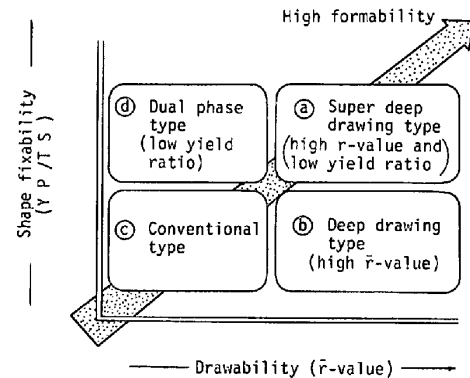


Fig. 5. Schematic classification of CR HSS products.

な効果がある。

### 2.2 高強度冷延鋼板

一般に高強度鋼板は軽量化対策として使用される場合には、板厚減少ともなることから、成形性に対する要求は実質的にはきわめて厳しいと判断される。さらに外板等に対しては面ひずみ・肌荒れ等成形後の外観も重視される。

プレス成形に際して、高強度鋼板においても各種成形形状に応じて極軟鋼と同様に所要  $\bar{r}$  値に下限があること<sup>3)</sup>、一方なじみおよび形状凍結性に対しては、降伏点または  $\bar{r}$  値が寄与することはよく知られている。

当社の高強度冷延鋼板は Fig. 5 に示すように多用途のプレス成形性、すなわちプレス成形技術における基本要素である深絞り性と形状凍結性を念頭において体系化されている。

高強度冷延鋼板の製造技術は、冷延以降の焼鈍～精整工程の連続化設備 (Continuous Annealing and Processing Line, 以下 CAPL と略す) により画期的進歩をと

げた。

連続式の焼鈍では一般に急速加熱・短時間均熱・急速冷却・過時効処理の過程をとるが、従来のバッチ式焼鈍炉では得られなかつた高精度で広範囲な熱サイクルが容易に達成可能である。したがって素材成分と種々の熱サイクルの組み合わせにより異なつた鋼板特性を具備する高強度鋼板の製造が極めて容易となつた。なお当社CAPLは現状2基稼動中で、昭和57年にはさらに2基が操業開始予定となつている。

① 超深絞り型高強度鋼板シリーズ

フェンダーやクォーターパネルのように極軟鋼においても難成形部品とされ、他のタイプの高強度鋼板では成形困難な大外板等に対しては、高 $\bar{r}$ 値と低降伏点を兼ね備えた超深絞りタイプが有効である。

CAPLにより優れた延性や深絞り性を得るためには、短時間焼鈍で再結晶および粒成長をいかにして促進するか、また焼鈍後の冷却過程で固溶Cをいかにして低減するかが重要課題である。

② 当シリーズの素材であるTi添加鋼は、真空脱ガス処理によりCを0.005%程度に低減したのちTiを添加し、残存したCやNなどを完全に固定し固溶炭素および固溶窒素が無い状態をつくり出している。さらにCAPLでの高温焼鈍により再結晶および粒成長を促進させ、非時効性と優れた深絞り性を確保している。

高強度を付与し $\bar{r}$ 値を低下させない強化元素としては、SiおよびPが適している<sup>4)</sup>。しかし化成処理性やコストの点から主としてP添加により所定の強度を得ている。一般にPは結晶粒界に偏析しやすく極低C材では二次加工割れの原因となる場合があるが、粒界割れ防止用元素として微量のB添加により対策を講じている。

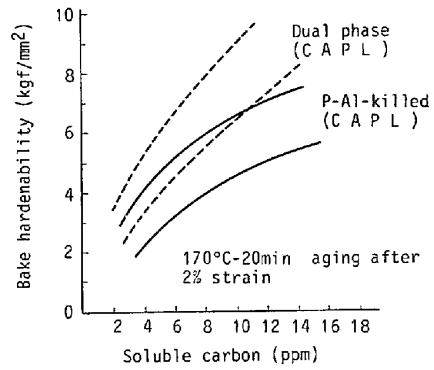


Fig. 6. Relationship between soluble carbon and bake hardenability.

③ 高 $\bar{r}$ 値型高強度鋼板シリーズ

自動車外板に対しては深絞り性、形状凍結性のほかに板厚低減設計の場合耐デント性が新たな問題となる場合がある。当シリーズは高 $\bar{r}$ 値タイプでプレス成形性に優れ、しかもCAPLで製造した鋼板はFig. 6に示すように高焼付硬化性を有しているので、耐デント性改善にも有効である。

当鋼板は、P添加Alキルド鋼を素材としCAPLでの高温焼鈍および適正な一次冷却速度の採用により、優れた加工性が付与される。

Alキルド系鋼板においては、均熱後の冷却条件がきわめて重要な意味をもち<sup>5)</sup>、一次冷却速度が高いとFig. 7に示すように炭化物がフェライト粒内に細かく析出し、加工性を劣化させる。またFig. 8に示すように焼鈍後室温近傍までいつたん冷却してから再加熱過時効処理をおこなうと、炭化物の析出状態が異なり材質は劣化する<sup>6)</sup>。したがって連続焼鈍において良加工性を得るには、一次冷却速度が比較的緩やかで、しかも冷却終了が

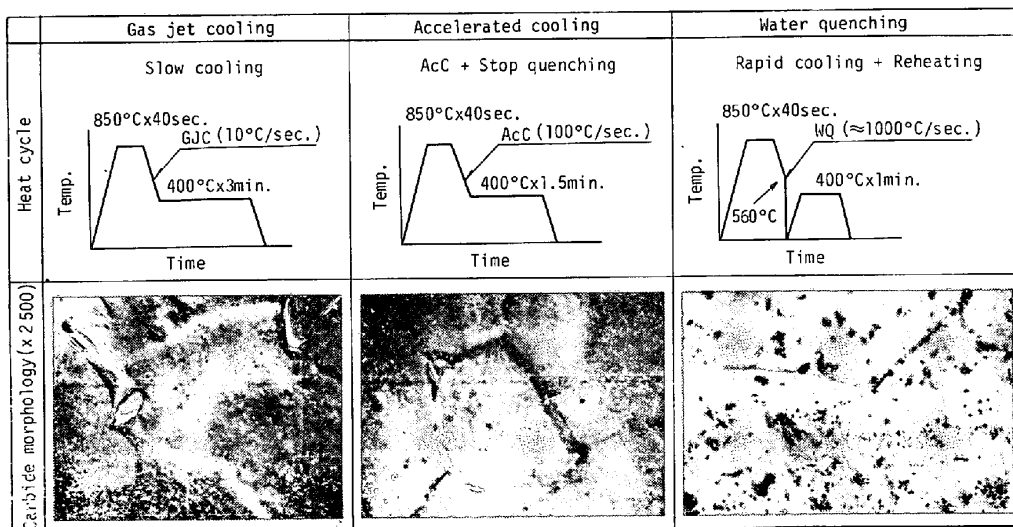


Fig. 7. Effect of cooling rate on carbide morphology.

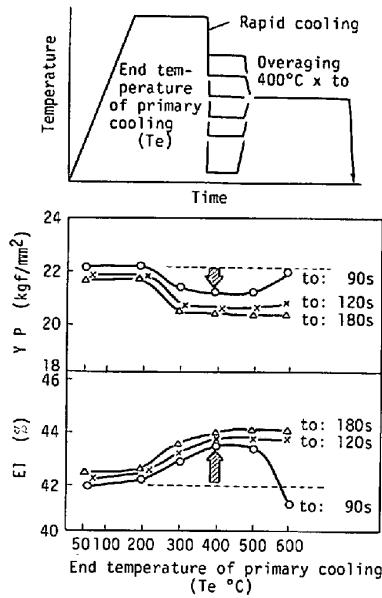


Fig. 8. Effect of end temperature of primary cooling on mechanical properties.

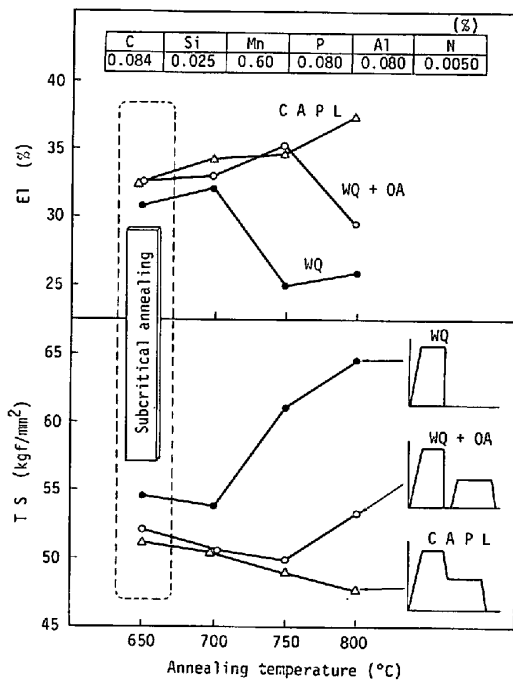


Fig. 9. Relationship between annealing temperature and mechanical properties.

過時効処理の開始温度に制御可能な方式が有利である。

◎ 一般加工用高強度鋼板シリーズ

バンパーやインパクトバーのような比較的成形の容易な構造部材用として開発されたシリーズで、高延性および焼付硬化性を有している。

当シリーズは、再結晶温度直上でのいわゆる Subcritical 焼鈍による細粒強化と固溶体強化を利用している。Subcritical 焼鈍とは Fig. 9 に示すように 650°C 前後の比較的低温で完全に再結晶をおこなわせると同時に、

均一な温度により結晶粒度を精度良くコントロールし、高温焼鈍と同等の強度-延性バランスを得るいわゆる省エネルギー焼鈍で、CAPL の板温制御精度の有利さを活用した技術である。

強度-延性バランスは Fig. 10 に示すように、バッチ焼鈍材および CAPL 材の高  $\gamma$  値型 P 添加 Al キルド鋼と比較して遜色が無い。

④ 低降伏比型高強度鋼板シリーズ

当シリーズは熱延材と同様、低降伏化、高伸び特性と同時に高焼付硬化性を有する DP 鋼板で、比較的高強度側での実用化推進にあたっては有望な材料である。

$\gamma$  相を安定化させ DP を得るために必要な Mn 量は、

$$\log[CR] + 2.36 Mn_{eq} \geq 5.36$$

ただし  $Mn_{eq}$ : Mn 当量 (%)

$$Mn_{eq} = Mn + 0.45 Si + 1.15Cr + 2P$$

(元素記号はその元素の wt%)

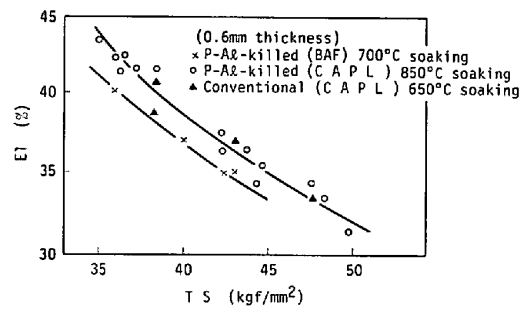


Fig. 10. Tensile strength-elongation balance of subcritical annealed conventional HSS by CAPL.

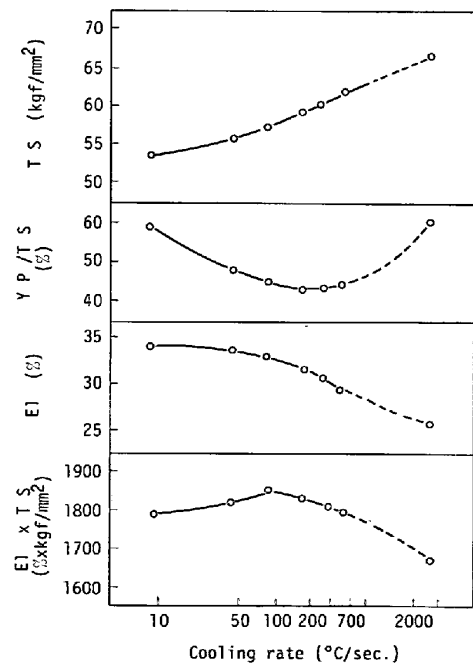


Fig. 11. Effect of cooling rate on mechanical properties of dual phase steel.

CR : 冷却速度 (°C/s)

で表され、さらにB添加により所要の Mn 当量は 0.2~0.4% 低減し得る<sup>8)</sup>。

冷却速度と材質特性の関係を Fig. 11 に示す。図から明らかなように DP 鋼板の最大の特徴である強度-延性バランス (引張強さ×伸び) および低降伏比は、比較的低い冷却速度で得られる。

つまり、DP 化に必要な Mn 当量は実験式に示すごとく高冷却速度の方が少なくすむが、良好な伸び・低降伏比は比較的低温冷却速度で得られる。

### 2.3 高強度表面処理鋼板

防錆対策としての表面処理鋼板化とともに強度を兼ね備えた高強度表面処理鋼板 (片面処理を含む) の実用化が急速に進みつつある。

防錆用表面処理鋼板には、i) 溶接可能塗装鋼板 ii) 電気亜鉛めつき鋼板 iii) 溶融亜鉛めつき鋼板がある。

鋼板の高強度化に際しては、i) および ii) は熱延あるいは冷延鋼板を素材とし表面処理工程で材質に影響を及ぼすような熱処理が加わらないため、原板のままの機械的性質を示す。したがってすでに述べた熱延および冷延鋼板と同様の特性を示す。

一方iii) の溶融亜鉛めつき鋼板については、一般にインライン連続焼鈍のため鋼の組成と熱サイクルによって材質特性が決定される。基本的には CAPL における冶金原理と何ら変わるところは無い<sup>9)</sup>。ただし強化元素の中には亜鉛密着性や合金化特性に影響するものがあるため、添加元素の種類や量には配慮が必要である。

表面処理高強度鋼板のプレス成形時における皮膜損傷・型かじり・異物付着等に対しては、鋼板での対策も重要である。

### 3. 高強度鋼板の溶接性と鋼板製造技術

自動車の組み付け手段として溶接、中でもスポット溶接の占める割合は高く、鋼板の高強度化が進む中で安定した溶接強度を得ることは重要な課題である。

一般に溶接強度は鋼板の成分に依存することが知られている。Fig. 12 は各種成分の高強度鋼板 (0.8 mm) のピール試験の結果で、

$$C + Si/30 + Mn/20 + 2P + 4S$$

$$\leq 0.24 \text{ (保持時間 25 サイクル)}$$

$$\leq 0.31 \text{ (保持時間 5 サイクル)}$$

という関係式が得られ、成分的には C, P, S の影響度が高い。保持時間が短い場合は通電後の冷却速度が低

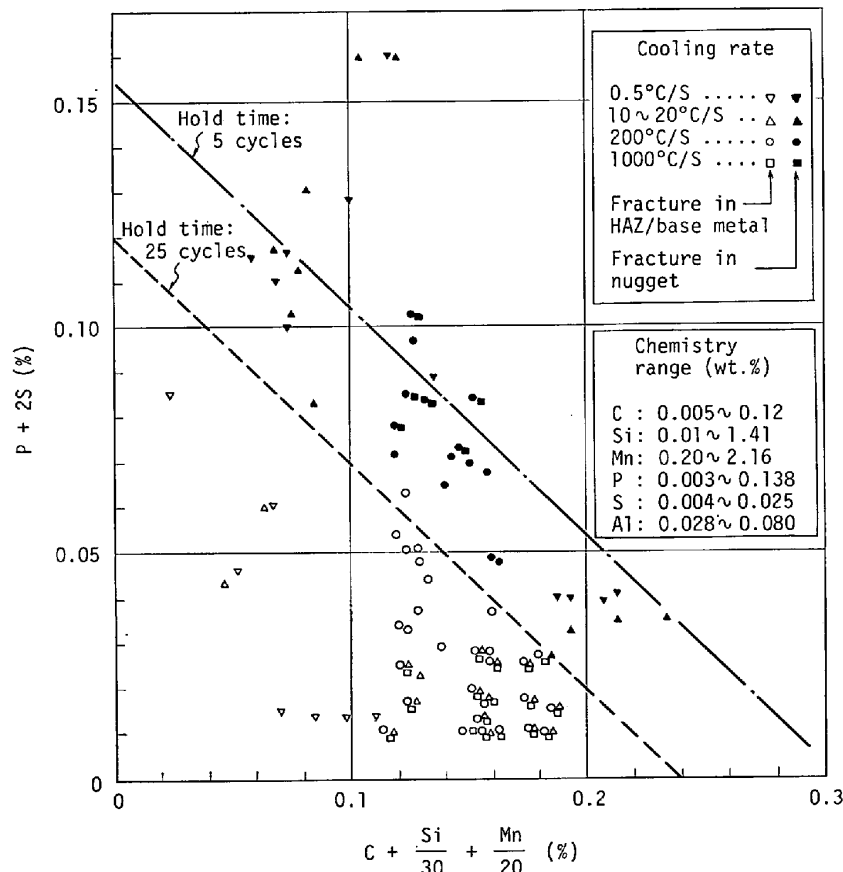


Fig. 12. Influence of chemistry on fracture appearance in peel test.

いたため限界の成分条件は緩和される<sup>10)</sup>。板厚の増加によっても同様に緩和される傾向にある。

フラッシュバット溶接やアーク溶接においても類似した溶接熱影響部の挙動が確認されており、適正成分の選択は安定した溶接性確保のための重要な管理ポイントの一つとなっている。

表面処理鋼板の溶接においては、チップ寿命の問題や合金化溶融亜鉛めつき鋼板に特有のナゲット内溶融金属の飛散(爆飛)現象が起こる場合があり、鋼板製造と溶接技術の両面からの解決が必要である。

今後の高強度化指向の中で、接合部強度を確保するためには、適正溶接条件の見直しや接合部の設計面からの改善あるいは新接合法の開発といった観点からの検討も必要となろう。

#### 4. 高強度鋼板の塗装性、耐食性と鋼板製造技術

高強度鋼板の化成処理性、塗装性および耐食性に関しては、多量に添加した場合に特性を変化させる元素があることは知られており<sup>11)</sup>、有害元素の使用は極力控える

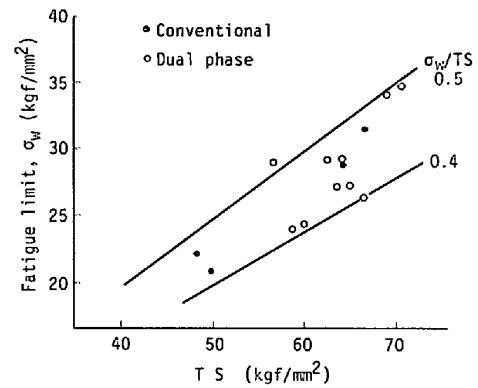


Fig. 13. Relationship between tensile strength and fatigue limit of base metal.

べきである。しかし鋼板として備えるべき特性が強度・成形性・溶接性・疲労特性等広範囲にわたるため、腐食防食に関しては構造設計や表面塗装条件等をも含めた総合的な対策が必要であると考えられる。

当社では鋼板そのものや表面塗装処理後の耐食性に関する基礎研究とともに、実車走行中に水が入りやすいすきまや袋部、接合部等について構造上の問題もあわせて

Table 1. HR-HSS specifications and characteristics\*.

|                           | Grade (T S) | Hardening mechanism                        | Typical mechanical properties ( $t=2.7\text{mm}$ ) |                            |        |             |                    |
|---------------------------|-------------|--|--|----------------------------|--------|-------------|--------------------|
|                           |             |  | Y P (kgf/mm <sup>2</sup> )                         | T S (kgf/mm <sup>2</sup> ) | El (%) | Y P/T S (%) | Hole expansion (%) |
| Conventional type         | 50          | Solid solution and precipitation hardening | 38   | 55                         | 33     | 69          | 40                 |
|                           | 55          |  | 42   | 60                         | 29     | 70          | 35                 |
|                           | 60          |  | 51   | 65                         | 26     | 78          | 30                 |
| Drawing type (dual phase) | 50          | Dual phase                                 | 33   | 55                         | 34     | 60          | 65                 |
|                           | 55          |  | 37   | 59                         | 31     | 63          | 60                 |
|                           | 60          |  | 41   | 64                         | 30     | 64          | 50                 |

\* Specifications and characteristics of electrogalvanized HR-HSS are the same as those of HR-HSS.

Table 2. CR-HSS specifications and characteristics\*.

|  | Grade (T S) | Hardening mechanism      | Typical mechanical properties ( $t=0.8\text{mm}$ ) |                            |        |             |           |           |
|--|-------------|--------------------------|--|----------------------------|--------|-------------|-----------|-----------|
|  |             |                          | Y P (kgf/mm <sup>2</sup> )                         | T S (kgf/mm <sup>2</sup> ) | El (%) | Y P/T S (%) | $\bar{n}$ | $\bar{r}$ |
| Conventional type  | 38          | Solid solution hardening | 27   | 40                         | 35     | 68          | 0.19      | 1.3       |
|  | 40          |                          | 30   | 43                         | 34     | 70          | 0.19      | 1.3       |
|  | 45          |                          | 34   | 47                         | 33     | 72          | 0.17      | 1.2       |
|  | 50          |                          | 41   | 54                         | 31     | 76          | 0.17      | 1.0       |
|  | 55          |                          | 43   | 61                         | 29     | 70          | 0.16      | 1.0       |
| 60   | 48          | 63                       | 26   | 76                         | 0.15   | 1.0         |           |           |
| Deep drawing type (high $\bar{r}$ value)                     | 35          | Solid solution hardening | 25   | 38                         | 38     | 66          | 0.21      | 1.6       |
|  | 38          |                          | 27   | 41                         | 37     | 66          | 0.21      | 1.6       |
|  | 40          |                          | 28   | 43                         | 36     | 65          | 0.21      | 1.5       |
|  | 45          |                          | 34   | 48                         | 34     | 71          | 0.20      | 1.4       |
| Dual phase type (low yield ratio)                            | 40          | Dual phase               | 26   | 44                         | 35     | 59          | 0.23      | 1.0       |
|  | 45          |                          | 28   | 48                         | 34     | 58          | 0.23      | 1.0       |
|  | 50          |                          | 32   | 55                         | 32     | 58          | 0.23      | 1.0       |
|  | 55          |                          | 34   | 58                         | 30     | 59          | 0.22      | 1.0       |
|  | 60          |                          | 37   | 66                         | 27     | 56          | 0.22      | 0.9       |
|  | 80          |                          | 46   | 85                         | 20     | 54          | 0.18      | 1.0       |
| 100  | 56          | 106                      | 15   | 53                         | 0.15   | 0.9         |           |           |
| Super deep drawing type (high $\bar{r}$ and low yield ratio) | 35          | Solid solution hardening | 21   | 36                         | 40     | 58          | 0.21      | 1.9       |
|  | 38          |                          | 23   | 39                         | 39     | 59          | 0.21      | 2.0       |
|  | 40          |                          | 25   | 42                         | 37     | 59          | 0.21      | 1.9       |
|  | 45          |                          | 28   | 47                         | 36     | 59          | 0.20      | 1.8       |

\* Specifications and characteristics of electrogalvanized CR-HSS are the same as those of CR-HSS.

実物大での解析を推進中である。

### 5. 高強度鋼板の疲労特性と鋼板製造技術

一般に鋼板の疲労強度は Fig. 13 に示すように引張強さに比例して増加する。DP 鋼板は低降伏点であるが疲労強度が高く、良成形性と疲労強度が要求されるホイールディスク等には有利な材料である。

高強度鋼板の多用化に際し、スポット溶接等接合部の耐久強度確保はきわめて重要な課題であるが、テストピースによるスポット溶接接合部の疲労強度は、鋼板強度や成分の影響を受けないという結果が得られており、設計上留意すべき点である。

### 6. 高強度鋼板の材質特性

当社の高強度鋼板は、需要動向と当社独自の評価システムを軸とする新鋼板開発体制により総合的な改善・開発を推進している。これら成果を受けて昭和 56 年秋に従来の体系を改め、新しく規格体系化した。熱延・冷延および表面処理高強度鋼板の材質特性を Table 1~3 に示す。

Table 3. GI-HSS specifications and characteristics.

| Grade | Hardening mechanism | Typical mechanical properties ( $t=0.8\text{mm}$ ) |                               |           |                |           |           |
|-------|---------------------|--|-------------------------------|-----------|----------------|-----------|-----------|
|       |                     | Y P<br>(kgf/mm <sup>2</sup> )                      | T S<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | EI<br>(%) | Y P/T S<br>(%) | $\bar{n}$ | $\bar{r}$ |
| 35    |                     | 24   | 37                            | 38        | 65             | 0.19      | 1.3       |
| 38    | Solid solution      | 26   | 40                            | 36        | 65             | 0.19      | 1.4       |
| 40    | hardening           | 28   | 42                            | 34        | 67             | 0.18      | 1.4       |
| 45    |                     | 32   | 48                            | 32        | 67             | 0.19      | 1.3       |

### 7. 結 言

自動車の安全および軽量化対策としての鋼板の高強度

化は、今や精力的に推進されており、高強度鋼板がホワイトボディの半量以上を占めるのはきわめて近い将来と予想される。

高強度鋼板の開発および実用化が世界に先がけて推進されたのは、自動車メーカー各社のなみなみならぬ努力と、薄鋼板成形技術研究会を主体とした実用化推進研究に負うところがきわめて大きいと考える。

今後の高強度鋼板適用部材の拡大と、鋼板のより一層の高強度化を推進するにあたり、当社の評価技術研究および鋼板製造技術が広く役立てば幸甚である。

### 文 献

- 1) 橋本嘉雄, 佐藤豊彦, 長尾正喜, 山本一男: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1187
- 2) 徳永良邦, 堀田 孝, 田代 守, 岸田宏司: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1186
- 3) 日戸 元, 戸来稔雄, 佐藤泰一: 製鉄研究, (1981) 304, p. 120
- 4) 高橋延幸, 柴田政明, 古野嘉邦: 鉄と鋼, 66 (1980), S 1127
- 5) 武智 弘, 加藤 弘, 小川一夫, 川崎宏一, 豊田洋民: 鉄と鋼, 67 (1981), S 461
- 6) 秋末 治, 山田輝昭, 高階喜久男: 鉄と鋼, 66 (1980), S 126
- 7) 高橋延幸, 福永正明, 野坂詔二: 鉄と鋼, 66 (1980), S 125
- 8) 高橋延幸, 古野嘉邦, 福永正明, 浅井 徹, 松田貞之: 鉄と鋼, 67 (1981), S 526
- 9) 岸田宏司, 水山弥一郎, 徳永良邦, 竹本長靖: 鉄と鋼, 67 (1981)
- 10) 小平一丸, 山田有信, 高橋靖雄, 佐直康則: 鉄と鋼, 66 (1980), S 1128
- 11) 前田重義, 浅井恒敏, 林 知彦, 鈴木堅市, 柳沢義昭: 鉄と鋼, 66 (1980), S 1129