

(技術資料)

# 1,700 MPa級マルテンサイト鋼板

白木厚寛\*1・中屋道治\*1・森原竜司\*2

## Martensitic Steel Sheets of 1,700 MPa Grade

Atsuhiko SHIRAKI・Michiharu NAKAYA・Ryuji MORIHARA

### 要旨

自動車の衝突安全性向上、軽量化によるCO<sub>2</sub>削減のため、自動車部品への高強度鋼板の適用が検討されており、既に1,470 MPa級鋼板が適用されている部品では、さらなる高強度化が期待されている。当社が開発した1,700 MPa級鋼板は、水焼入れ方式の連続焼鈍設備を活用することで低合金でありながらマルテンサイト単相組織を有しており、高強度化に伴う適用課題である曲げ性、溶接性、耐遅れ破壊性などを解決した。なお、水焼入れでは急速冷却時の熱ひずみによる平坦度の悪化が課題だが、強力テンションレベラーによる矯正で改善を図り、1,470 MPa級と同等以上の平坦度を実現した。本稿では、材料設計の考え方と鋼板の特徴を紹介する。

### Abstract

The application of high-strength steel sheets to automotive parts is being considered to improve the collision safety of automobiles and reduce CO<sub>2</sub> emissions through weight reduction, and further strengthening is expected in parts that already use 1,470 MPa grade steel sheets. The 1,700 MPa grade steel sheet developed by Kobe Steel utilizes continuous annealing equipment with water quenching and has a martensite single-phase structure despite being a low alloy. This solves the application challenges associated with strengthening, such as bending workability, weldability, and delayed fracture resistance. One issue with water quenching is the deterioration of flatness due to thermal distortion during rapid cooling. This, however, has been improved by straightening with a powerful tension leveler, achieving flatness equal to or better than that of the 1,470 MPa grade. This report introduces the concept of material design and the characteristics of steel sheets.

### 検索用キーワード

マルテンサイト、曲げ性、溶接性、遅れ破壊性、平坦度、1,700 MPa級

まえがき = 自動車の衝突安全性向上、排出ガス削減のための軽量化を目的として、自動車部品への高強度鋼板の適用が進んでいる。高強度鋼板を用いた自動車部品の成形法としては、ホットスタンプに代表される熱間成形とプレス成形やロールフォーミングなどの冷間成形がある。例えば、バンパーレインフォースメント（以下、バンパーR/Fという）やクロスメンバー、ルーフレールといった部品にはロールフォーミングで加工した1,470 MPa級の高強度鋼板が適用されている。また、フロントピラーやより複雑で寸法精度要求が厳しいボデー骨格部品などのプレス成形部品への1,470 MPa級鋼板の適用が進展している。直近では1,470 MPa級鋼板よりもさらに高強度の鋼板の適用が期待されている。

当社では、今後ますますの部材高強度化に備え、1,700 MPa級のマルテンサイト組織鋼を開発した。この開発材は、高速冷却が可能な水焼入れ装置を有する連続焼鈍ラインを活用しており、高強度化における主要課題である加工性、溶接性および耐遅れ破壊性において必要特性を有する特長がある。本稿では、開発材の設計の考え方、主要特性を紹介するとともにボデー用途での適用も見据え、部品の寸法精度に影響を及ぼす平坦度の改善についても紹介する。

## 1. 開発鋼の設計の考え方

バンパーR/Fやルーフレールといったロールフォーミングで成形される部品では、鋼板を複数のロールに通板することで逐次曲げ加工を行い、部品の断面形状を成形するため、鋼板には曲げ性が必要となる。また成形時に部品に生じる残留応力による遅れ破壊も懸念される。よって単に強度を上昇させるのではなく、これらの特性を兼ねできるように材料設計を行う必要がある。

上記特性を達成するためには、低合金で高強度を達成可能なマルテンサイト単相組織とすることが効果的と考えた。マルテンサイト組織は、均熱処理によりオーステナイト化したのち、急速冷却することで生成される。当社では、水焼入れ設備を有する連続焼鈍炉を活用することで急速冷却を可能とし、多量の合金を添加せずに急冷中のフェライトやベイナイトなどの軟質組織の混入を抑制できる。そのため、溶接性や遅れ破壊性に悪影響を及ぼす元素を削減でき、特性改善に有利な成分設計とすることが可能である。以下に特性達成の考え方の詳細を述べる。

### 1.1 強度

バンパーR/Fのような部品では、衝突時の乗員保護の観点で塑性変形しないことが求められるため、1,700 MPa

\*1 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 \*2 技術開発本部 材料研究所

以上の引張強度に加えて、高い降伏強度が必要となる。マルテンサイト組織は、炭素が侵入型位置に過飽和に固溶しているため非常に硬い<sup>1)</sup>が、焼入れままでは靱性(じんせい) および降伏比が低い<sup>2)</sup> という特徴がある。開発鋼では、靱性の確保と高い降伏強度を実現するため、比較的低温で焼戻し処理を行い、焼戻しマルテンサイト単相組織とした。

### 1.2 曲げ加工性

焼戻しに伴う組織変化は、曲げ加工性に大きく影響を及ぼすため、適切な処理が必要となる。焼戻し温度の上昇に伴い、針状に成長したセメンタイトの個数密度が増加すると曲げ加工性が劣化するため<sup>3)</sup>、加工性の劣化の生じない温度域で焼戻し処理を行い、曲げ性を確保する設計とした。また、曲げ加工時の応力集中源となる鋼板表面の介在物が割れの起点となり、曲げ性を悪化させる<sup>4)</sup> ため、鋼板成分の適正化により改善を図った。

### 1.3 遅れ破壊性

遅れ破壊は、一定の引張応力を受けている材料がある時間経過した後、突然破壊する現象で水素脆化によるものであることが知られている。その破壊の過程は、①水素侵入、②水素拡散、③亀裂発生、④亀裂伝播の過程をとるといわれている<sup>5)</sup>。したがって、①～④の各過程への対策をとることが遅れ破壊の抑制に対して有効と考えられる。

開発鋼においては、1,470 MPa級鋼板でも適用している耐食性を向上させる元素<sup>6)</sup>の添加による①水素侵入の抑制に加え、焼戻し温度の高温化により生成する炭化物の水素トラップサイトを活用した②水素拡散の抑制、合金炭化物形成による粒成長の抑制により結晶粒を微細化することで、③亀裂発生の抑制と④亀裂伝播の抑制を図る方針とした。これらの耐遅れ破壊性改善効果を確認するため、ラボ検討を行った。

合金元素の添加および製造条件の調整により、表1に記載の焼戻し炭化物を増加させた鋼種A、Bおよび旧 $\gamma$

粒径を微細化させた鋼種B、Cについて、図1に示すU曲げ-塩酸浸漬法により、遅れ破壊性を評価した。端面を機械加工仕上げとした150 mm (圧延方向に垂直な方向) × 30 mm (圧延方向) の短冊状の鋼板について、曲げ稜線(りょうせん)が圧延方向となるように曲げ半径10 mmでU曲げ加工を行い、ボルト締結により応力を負荷して試験片を作製した。応力は、ひずみゲージで測定したひずみ量にヤング率を乗算した値が所定の応力となるようにボルト締結により負荷した。作製した試験片を0.1N-HClに200時間浸漬し、割れの有無を評価した。その結果を表1に示す。負荷応力は、1,500 MPaおよび2,000 MPaで実施し、各条件につきN=3の評価を行い、割れの発生しなかったものは○、発生したものを×と表記している。鋼種Bは鋼種Aより旧 $\gamma$ 粒径が微細であり、鋼種Cより炭化物が多い。いっぽう、遅れ破壊性の評価において、鋼種Bは割れが発生せず、鋼種AおよびCでは割れが発生しており、鋼種Bの遅れ破壊性が優れる結果となっている。したがって、焼戻し炭化物の増加、旧 $\gamma$ 粒径の微細化により、遅れ破壊性の改善を確認できたため、これらを開発鋼の設計に反映させた。

## 2. 開発鋼の主要特性

### 2.1 機械的特性および適正溶接電流範囲

開発鋼および従来鋼の代表組織を図2に示す。開発鋼は微細な針状の組織を呈しており、均一なマルテンサイト単相組織になっていることがわかる。また、従来鋼と比較して微細な組織になっており、耐遅れ破壊性の観点で意図した組織になっていることが確認できた。

表2に機械的特性の評価結果を示す。なお、引張特性はJIS5号試験片を作製し、JIS Z 2241に規定される引張試験にて評価を行った。また、伸びフランジ性を調査する目的でJIS Z 2256に規定されている穴広げ試験にて評価を行った。曲げ性の評価はJIS Z 2248にて規定される90度V曲げ試験にて実施した。曲げ稜線が圧延方向

表1 焼戻し炭化物および結晶粒微細化の耐遅れ破壊性への影響

Table 1 Effects of tempered carbide and grain refinement on delayed fracture resistance

| Steel type | Corrosion resistance element | Tempered carbide | Prior gamma particle size | Thickness (mm) | TS (MPa) | Delayed fracture evaluation results                |  |
|------------|------------------------------|------------------|---------------------------|----------------|----------|--|--|
|            |                              |                  |                           |                |          | Bending radius : 10R<br>Applied stress : 1,500 MPa | Bending radius : 10R<br>Applied stress : 2,000 MPa |
| A          | addition                     | increase         | -                         | 1.0            | 1,785    | ○×○  | ×××  |
| B          | addition                     | increase         | fine                      | 1.0            | 1,757    | ○○○  | ○○○  |
| C          | addition                     | -                | fine                      | 1.0            | 1,744    | ××○  | -  |

○ : No fracture × : Fracture

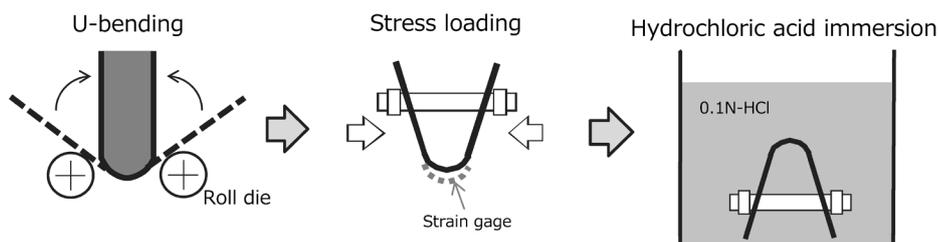


図1 U曲げ試験片を用いた遅れ破壊評価方法

Fig.1 Delayed fracture evaluation method using U-bending test pieces

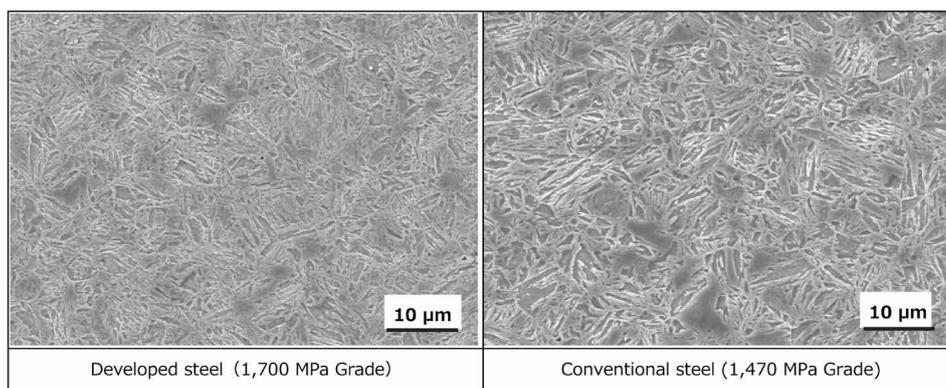


図2 開発鋼（1,700 MPa級）および従来鋼（1,470 MPa級）の代表組織  
Fig.2 Microstructure of developed steel and conventional steel

表2 機械的特性  
Table 2 Mechanical properties of developed and conventional steels

|                                      | YS(MPa) | TS(MPa) | El.(%) | λ (%) | R/t |
|--------------------------------------|---------|---------|--------|-------|-----|
| 1,700 MPa Grade (Developed steel)    | 1,503   | 1,768   | 6      | 39    | 3.6 |
| 1,470 MPa Grade (Conventional steel) | 1,332   | 1,544   | 6      | 47    | 3.5 |

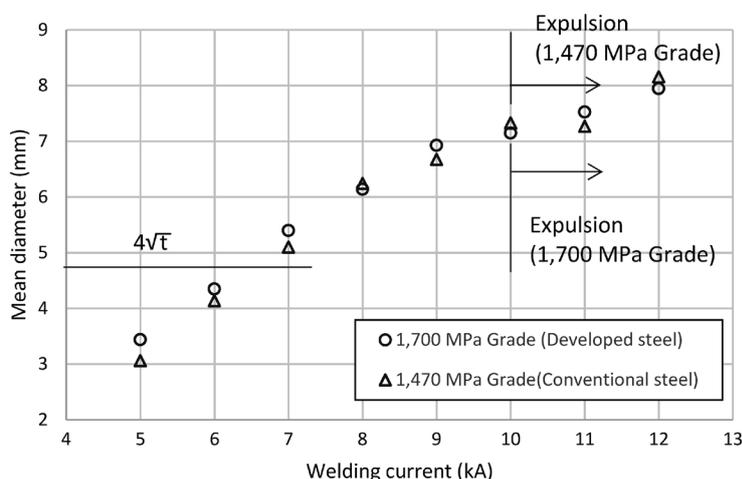


図3 溶接電流とナゲット径の関係  
Fig.3 Relationship between welding current and nugget diameter

となるように曲げ加工を行い、曲げ表面にクラックが生じない最小曲げ半径を板厚で除したR/tを指標とした。

開発鋼は1,470 MPa級と同様に高YR特性を有しており、1,700 MPa以上の引張強度に加えてYSも高く、高強度部品に好適である。また全伸び(El)、穴抜け性(λ)、曲げ性(R/t)は1,470 MPa級とほぼ同等レベルを維持しており、1,470 MPa級が適用されている部品であれば、成形性の観点では問題ないと考えられる。

図3に適正溶接電流範囲を示す。ボデー用途ではスポット溶接性も必要なため、板厚1.4 mmの供試材を用いて、表3に示す条件でスポット溶接を行い、ナゲット径が $4\sqrt{t}$ (t:板厚)の電流値からチリが発生するまでの電流値範囲を評価した。高強度化によりチリ限界電流は低下する場合もあるが、開発鋼は7 kA~10 kAと広い電流範囲を有している。これは1,470 MPa級と同等であり、同じ溶接条件で所定のナゲット径を確保できることを確認できた。

表3 スポット溶接条件  
Table 3 Spot welding condition

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| Electrode tip   | 1%Cr-Cu dome radius type |
| Tip diameter    | 6 mm                     |
| Electrode force | 5.0 kN                   |
| Welding time    | 18 cycles/60Hz           |
| Squeeze time    | 60 cycles/60Hz           |
| Hold time       | 1 cycle/60Hz             |
| Welding current | 5-12 kA                  |

## 2.2 遅れ破壊性

遅れ破壊は塑性ひずみや残留応力により助長されるため、自動車部品では大きな塑性ひずみが導入される成形加工部およびブランクングの際に加工された切断端部において発生の懸念がある。これらの懸念箇所における開発鋼の耐遅れ破壊性を確認するため、自動車部品の成形加工部を模擬したU曲げ加工部とせん断加工端部について評価を実施した。

U曲げ加工部は、端面を機械加工仕上げとした150 mm（圧延方向に垂直な方向）× 30 mm（圧延方向）の短冊状の鋼板について、曲げ稜線が圧延方向となるように曲げ半径5 mmでU曲げ加工を行い、ボルト締結により応力を負荷して試験片を作製した。応力はひずみゲージで測定したひずみ量にヤング率を乗算した値が所定の応力となるようにボルト締結により負荷した。作製した試験片を0.1N-HClに300時間浸漬し、割れの有無を評価した。評価結果を表4に示す。1,700 MPaの応力で割れが発生せず、弾性限を超えてさらに高いひずみを付与しても割れが発生しないことを確認できた。

せん断加工端部の耐遅れ破壊性は、長手が圧延方向に垂直な方向となるように15 mm × 30 mmにせん断加工した試験片について、0.1Nの塩酸に24時間浸漬後、端面の割れ有無を目視または顕微鏡にて確認して評価した。せん断加工の模式図を図4に示す。評価する端面は圧延方向に垂直な端面とし、切断後に下刃とブランクホルダーに挟まれた鋼板の端部を評価した。せん断加工はシャープ角を0°、クリアランスを5, 10, 15, 20, 25%の条件で実施した。評価結果を表5に示す。各条件に

ついて、N=3実施したがいずれの条件でも割れが発生せず、良好な遅れ破壊性であることが確認できた。

### 3. 鋼板の平坦度改善への取組み

水焼入れで製造したマルテンサイト鋼は、急速冷却に伴う熱ひずみにより、鋼板の平坦度が悪化する。ピラーなどのボデー部品では高い寸法精度が要求されるため、平坦度が問題になる場合がある。そのため、最後に当社での平坦度矯正に関しても言及する。

当社では焼鈍後に高強度鋼板の平坦度不良を矯正可能とする矯正能力の高いテンションレベラーを導入している。これまでに、寸法精度が厳しいボデー部品へ適用できるような1,470 MPa級マルテンサイト鋼板において、材料特性と良好な平坦度を両立可能な矯正技術を確認している。1,700 MPa級鋼板も、今後、ボデー部品への適用が想定されるため、1,470 MPa級材にて培った矯正技術を1,700 MPa級材にも適用し、平坦度の改善を行った。図5, 6に、テンションレベラー矯正による平坦度の変化および矯正後の外観を示す。平坦度の指標としては、圧延方向の長さが500 mmとなるように切断した鋼板に

表4 U曲げ加工部の遅れ破壊試験結果  
Table 4 Delayed fracture test results for U-bending part

| Steel              | Grade     | TS (MPa) | Thickness (mm) | Applied stress (MPa) | Evaluation results |
|--------------------|-----------|----------|----------------|----------------------|--------------------|
| Developed steel    | 1,700 MPa | 1,798    | 1.2            | 1,700                | ○○○                |
| Conventional steel | 1,470 MPa | 1,488    | 1.4            | 1,500                | ○○○                |

○ : No fracture × : Fracture

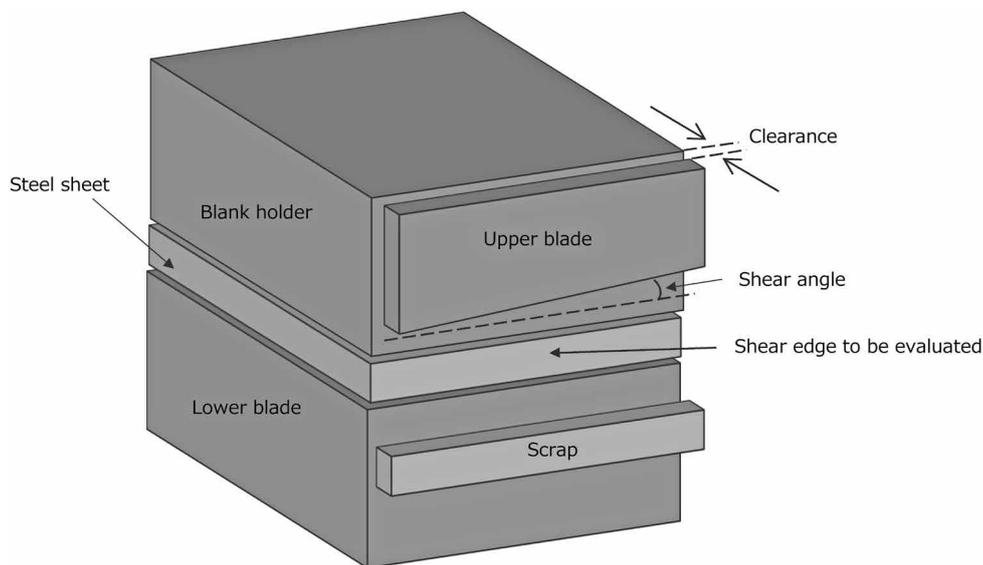


図4 せん断加工の模式図  
Fig.4 Schematic diagram of shear processing

表5 せん断加工端部の遅れ破壊試験結果  
Table 5 Delayed fracture evaluation results for sheared ends

| Steel           | Grade     | TS (MPa) | Thickness (mm) | Evaluation results |        |        |        |        |
|-----------------|-----------|----------|----------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
|                 |           |          |                | CL=5%              | CL=10% | CL=15% | CL=20% | CL=25% |
| Developed steel | 1,700 MPa | 1,755    | 1.0            | ○○○                | ○○○    | ○○○    | ○○○    | ○○○    |

○ : No fracture × : Fracture

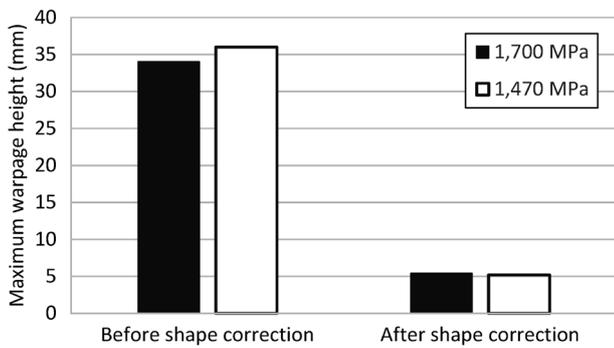


図5 平坦度測定結果  
Fig.5 Flatness measurement results



図6 形状矯正後の鋼板の外観  
Fig.6 Appearance of steel sheet after shape correction

ついて、定盤上に置いたときの反りの最大高さを使用した。テンションレベラーによる形状矯正を行うことで反り高さが低減され、良好な平坦度が得られることを確認できた。なお、当該開発材および1,470 MPa級材の平坦度は、長手方向におおよそ一定形状となる。また、水焼

入れ時には形状不良とともに板面内に大きな残留応力が形成される。この残留応力により、コイルからブランク材を切り出したときに大きな変形が生じる。この残留応力についても、テンションレベラーによる矯正で十分低減できることを確認し、開発した1,700 MPa鋼は切断時の変形が少ないことが特徴である。

むすび=さらなる高強度化ニーズに対応するため、新たに開発した1,700 MPa級マルテンサイト鋼の成分、組織制御の考え方と主要特性、平坦度改善への取組みについて紹介した。本鋼は曲げ加工性、遅れ破壊性が良好であることに加えて、矯正により優れた平坦度を有することが特徴である。

当社は自動車用におけるボデー用途での適用拡大や、さらなる高強度化などのニーズに応えるべく、材料開発を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 牧 正志. あたりあ. 2015, 第54巻, 第11号, p.557-563.
- 2) 和泉 修ほか. 講座・現代の金属学材料編 第4巻 鉄鋼材料. 公益社団法人日本金属学会, 1985, p.99.
- 3) 長滝康伸ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.3, p.245-253.
- 4) 森永孝三ほか. 鉄と鋼. 1966, Vol.52, No.4, p.304-306.
- 5) 白神哲夫. 材料と環境. 2011, 第60巻, 第5号, p.236-240.
- 6) 小若正倫. 日本金属学会会報. 1973, 第12巻, 第8号, p.533-545.