

# 解説

## 受賞技術 - 45

# 自動車のCO<sub>2</sub>排出抑制に貢献する 「1.5ギガパスカル級冷延鋼板」

## 1.5 GPa Grade Cold-rolled Steel Sheet Contributing to a Reduction of CO<sub>2</sub> Emission from Automobiles

JFEスチール(株)  
知的財産部  
主任部員(副部長)

小野義彦  
Yoshihiko Ono

JFEスチール(株)  
薄板加工技術研究部  
主任研究員(課長)

二塚貴之  
Takayuki Futatsuka

JFEテクノリサーチ(株)  
取締役

船川義正  
Yoshimasa Funakawa

JFEスチール(株)  
薄板加工技術研究部  
主任研究員(部長)

佐藤健太郎  
Kentaro Sato

JFEスチール(株)  
薄板研究部  
主任研究員(副課長)

吉岡真平  
Shimpei Yoshioka

## はじめに

自動車の燃費は、車体の軽量化により大きく向上する。ガソリン車では車体の重量が10kg軽くなることで燃費は0.1~0.2km/L改善する。これは、年間の総走行距離を10000kmとすると年間およそ12kg/台のCO<sub>2</sub>削減に対応する。運輸部門でのCO<sub>2</sub>排出量は、日本のCO<sub>2</sub>総排出量の約17%を占め、なかでも、自動車からのCO<sub>2</sub>排出量は、運輸部門の約87%を占める<sup>1)</sup>。したがって、自動車の燃費向上は日本のエネルギー消費量を削減する上で重要である。

また、自動車用鋼板の場合、素材製造~自動車走行に至るライフサイクルにおけるエネルギー消費は、①素材製造時、②輸送時、③プレス加工時、④自動車走行時の各工程で生じる。これら各工程におけるエネルギー消費量の比は、鋼板1ton当たり、およそ1:0.02:0.06:13<sup>注1)</sup>と見積もられ、冒頭で述べた④自動車走行時のエネルギー消費量が最も大きく、①素材製造時のエネルギー消費量も比較的大きいことが分かる。したがって、ライフサイクルでのエネルギー消費抑制を考える場合、例えば、自動車の軽量化効果を極限まで高めて、必要となる素材の製造量と車体重量を削減することが、①、④をともに抑制する観点から非常に有効な手段と言える。さ

らに、このような効果を享受するためには、市場での普及促進を図ることが重要である。

現在、自動車の骨格を構成する素材には主に1ギガパスカル級(破断するときの耐荷重が100kgf/mm<sup>2</sup>)の高張力鋼板(ハイテン)が使われている。建材用などの一般的な鉄の強度に比べて、約3倍の強度を有する。自動車の骨格には乗員を保護する重要な役割があり、自動車が衝突した場合に骨格部品が力を受け持ち、車体の変形を抑えることで座席空間への侵入を抑える。自動車の骨格にこのような超高張力鋼板を使用することで、衝突性能を維持して車体を軽量化することが可能となる。

一方で、近年、燃費向上を実現するために、より一層の骨格部品の軽量化が求められつつあり、一部に1.5ギガパスカル級の鋼板も使われ始めている。しかしながら、従来の1.5ギガパスカル級の鋼板は、Fig.1に示す通り、加工性や遅れ破壊(水素脆化)に対する懸念から、熱間での成形を必要とするものであった。熱間での成形は、上記③のエネルギーロスを生じさせるばかりでなく、生産性を損なうので、普及を阻害する要因となる。この他に、アルミニウムやCFRPの適用拡大も検討されているが、コスト・電食・異種材接合・リサイクル性等の点で、骨格部品への適用拡大には課題も残って

\*令和5年度全国発明表彰 経済産業大臣賞受賞

注1) ① 鋼材製造時のエネルギー消費量: 23GJ/ton、② 製鉄所からエンドユーザ間の輸送距離: 800km、輸送方法: 船舶、③ 対象プロセス: 従来の熱間成形プロセス、対象エネルギー: 850°Cへの加熱分、加熱方法: 発熱効率70%の電気加熱、④ 年間走行距離: 10000km、当該走行時のCO<sub>2</sub>排出量: 2ton、走行期間: 10年、と仮定した場合のエネルギー消費量

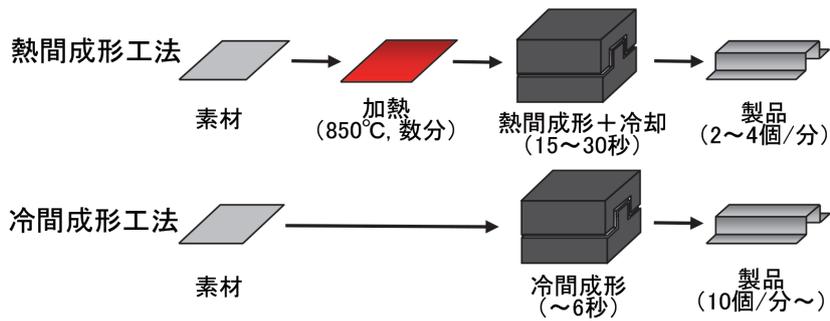


Fig.1 熱間成形工法と冷間成形工法における各工程の模式図 (Online version in color.)

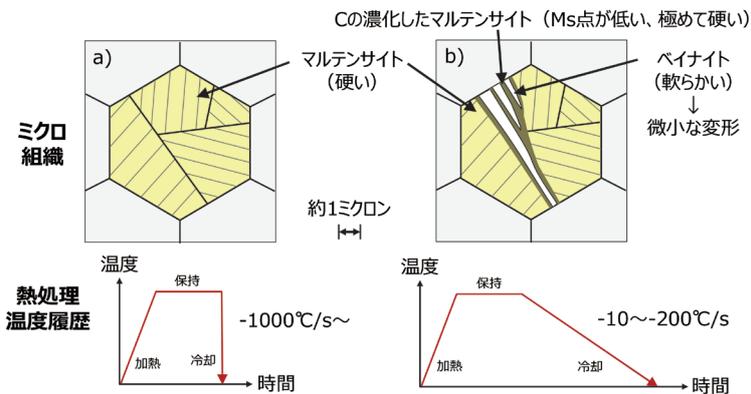


Fig.2 鋼板の冷却速度とマイクロ組織の関係, 冷却速度; a)  $-1000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , b)  $-10\sim-200^{\circ}\text{C}$  (Online version in color.)

いる。

そこで当社では、従来の1ギガパスカル級鋼板に対して大幅に軽量化が可能で、しかも普及を促進する観点から熱間での成形を必要としない新たな1.5ギガパスカル級鋼板の開発を行った。

## 2 開発材の特性

### 2.1 高い降伏強度とそれによる大幅な軽量化効果

大きな軽量化効果を実現するために、本開発では、水を冷媒とした急速冷却技術を活用した。自動車部品の衝突性能は、自動車用鋼板を規格として分類する引張強度より素材が変形し始めるときの強度、すなわち降伏強度に強く依存する。また、素材の降伏強度は、素材を熱処理する過程で急速に冷却することで増加する。

Fig.2に鋼板を焼鈍した後の冷却過程における冷却速度とマイクロ組織の関係を示す。冷却速度とマイクロ組織の関係は、添加する元素に応じて変化するが、自動車用高張力鋼板として一般に採用される範囲の成分組成の場合を例にとると、焼鈍後の冷却速度が $-10^{\circ}\text{C}/\text{s}\sim-200^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の範囲では冷却中にベイナイト変態が生じやすく、マルテンサイト単相組織は

得にくい。ベイナイト変態が生じると、ベイナイト内部ではCの分配や比較的粗大な炭化物の生成が生じて軟質な領域が生成する。このため降伏強度が低下する<sup>2)</sup>。また、ベイナイトに隣接してCの濃化した領域が生成しやすく、このような領域ではMs点が低く極めて硬質なマルテンサイトが形成される。このようにMs点の低いマルテンサイトと軟質組織が隣接した領域では一層低い応力にて降伏が生じやすくなる<sup>3)</sup>。

このような軟質なベイナイトや硬質なマルテンサイトの混在する降伏のしやすい領域は、旧 $\gamma$ 粒径と焼鈍後の冷却速度を制御することで大幅に抑制される。つまり、旧 $\gamma$ 粒界近傍でのベイナイト変態は急速に生じやすいので、 $-100^{\circ}\text{C}/\text{s}$ を超える急速な冷却を行ったとしても、完全には抑制できない場合がある。したがって、旧 $\gamma$ 粒径を所定の範囲に制御し、なおかつ冷却速度を $-1000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ を超える大きな冷却速度に制御することがベイナイト変態の抑制には重要である。なお、比較的高合金成分鋼においてマルテンサイト変態のみが生じる場合においても、冷却速度が不十分であると、部分焼入れ後に粗大な炭化物析出やC分配<sup>4)</sup>が同様に生じ得るので、いずれにしても旧 $\gamma$ 粒径の制御と急速冷却が重要となる。Fig.3に従来のガス冷却を行った1ギガパスカル材と旧 $\gamma$ 粒径と冷却速度を制御した1.5ギガパスカル材の降伏強度を

示す。上述した熱処理制御を行うことで、開発材では降伏強度を従来の1ギガパスカル材の2倍に引き上げることに成功した。これは従来の金型内冷却を行う熱間成形1.5ギガパスカル材の降伏応力を上回る。

Fig.4にモデル部品を用いた自動車衝突模擬試験の結果を示す。ここで、曲げ変形モーメントとは部品の変形荷重と支点間距離から求めた値であり衝突性能の指標である。曲げ変形モーメントは降伏強度の増加により増加し、開発材は従来の1ギガパスカル材や熱間成形用の1.5ギガパスカル材よりも高い衝突性能を示す。Fig.5は部品強度を同一とした場合の必要な鋼板重量を比較した結果である。開発材では、従来の1ギガパスカル材に対し同一部品強度を維持して20%以上の軽量化（板の厚さの低減）が可能である。

## 2.2 冷間成形を実現するプレス加工性と耐遅れ破壊特性

開発材による省エネ効果を拡大するためには、従来の熱間

成形工法と比べて生産性が格段に高い冷間成形工法を可能とし、普及を促進する必要がある。マルテンサイト鋼の加工性（曲げ性）の改善には、240℃以下の低温域で焼戻し処理を行い、炭化物を微細分散させることが有効である<sup>5)</sup>。開発材では、当該手法に基づいて曲げ性の改善を図っている。Fig.6は開発材を曲げ加工によりモデル部品に成形した例であり、R/t（曲げ工具半径を素材の厚みで除した値）で4.0以下程度の厳しい曲げ加工でも割れることなく成形できる。

また、高強度材の実用化においては、部品製造工程や自動車走行時に鉄中に侵入する水素による遅れ破壊を抑制する必要がある。開発材は耐遅れ破壊特性にも優れている。Fig.7は開発材を使用したモデル部品ならびに曲げ加工して1200MPaを超える応力を付与した試験片をpH1の塩酸水溶液に浸漬して耐遅れ破壊特性を評価した結果である。開発材では96時間の塩酸水溶液への浸漬後も割れが発生しないことを確認した。マルテンサイト鋼の耐遅れ破壊特性の改善に

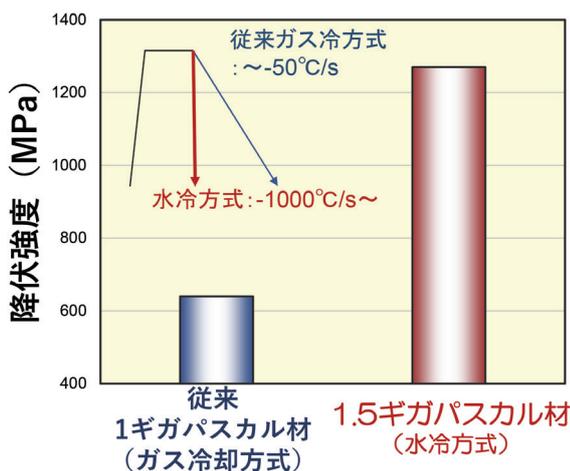


Fig.3 従来1ギガパスカル材と開発した1.5ギガパスカル材の降伏強度 (Online version in color.)

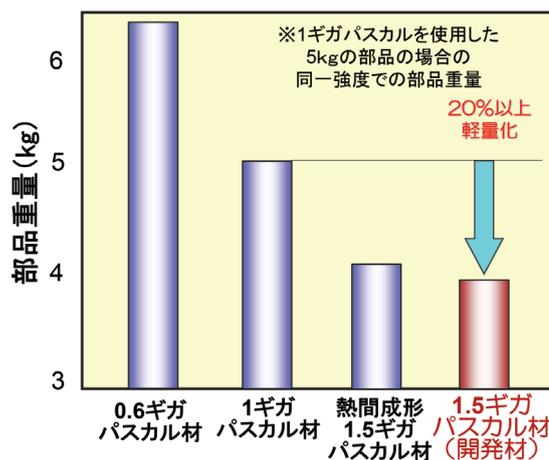


Fig.5 同等の部品曲げ強度を得るために必要な素材毎の部品重量 (Online version in color.)

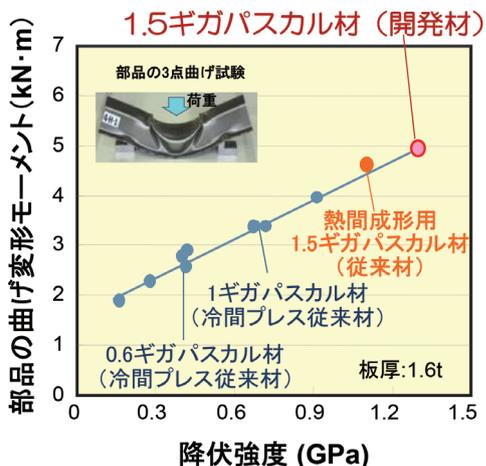


Fig.4 各種素材の降伏強度と部品変形強度の関係 (Online version in color.)

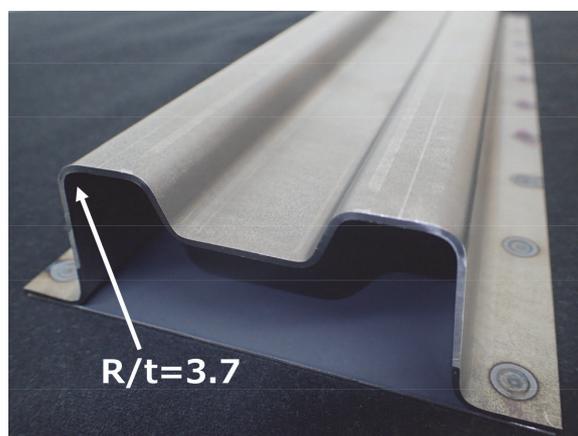


Fig.6 1.5ギガパスカル材 (開発材) の部品成形例 (Online version in color.)

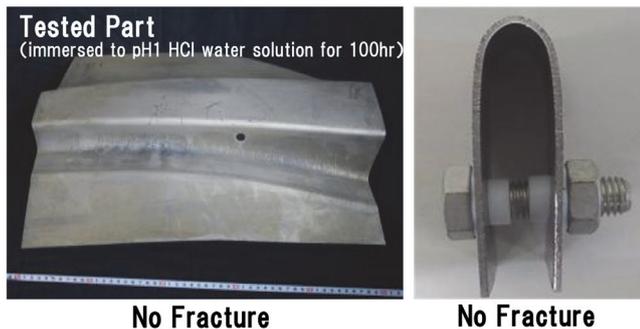


Fig.7 1.5ギガパスカル鋼を用いたモデル部品ならびに曲げ試験片の耐遅れ破壊試験結果。pH1 塩酸水溶液に96hr浸漬 (Online version in color.)

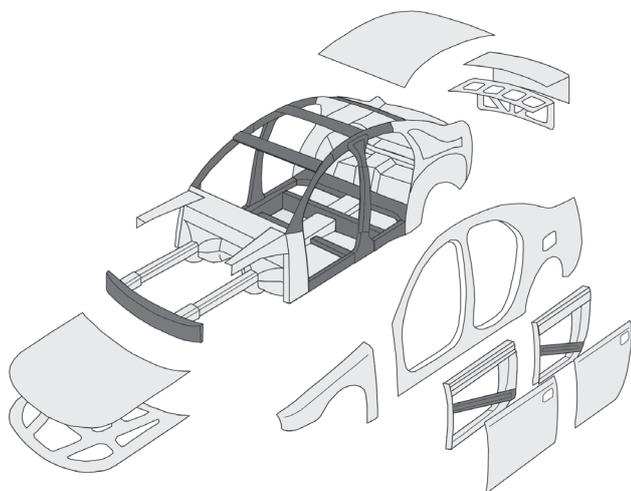


Fig.8 自動車部品の模式図 (Online version in color.)

は、曲げ性と同様に、240℃以下の低温域で焼戻し処理を行い、炭化物を微細分散させることが有効である<sup>6)</sup>。開発材では、当該手法に加え、上述した旧 $\gamma$ 粒径の制御と超急速冷却の組合せによりベイナイト変態を極限まで抑制して組織の均質化を図ること、Nb,Ti等のマイクロアロイ元素の適量添加により介在物を極限まで抑制して組織の均質化を図ること、一層の耐遅れ破壊特性の改善を図った。

以上のように開発材は優れた曲げ加工性と耐遅れ破壊特性を具備するため、冷間成形が可能である。冷間成形が可能になったことで、従来の熱間成形用の1.5ギガパスカル材で必要だった加熱工程の省略、生産性の向上に繋がり、本製品の普及促進が期待される。

Fig.8は自動車の骨格を中心とした各種部品を示し、朱色で示した部品は衝突時に殆ど変形させない部品である。新たに開発した1.5ギガパスカル材は、非変形部品の多くで適用が進んでいくものと期待される。

### 3 まとめ

運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量は我が国のCO<sub>2</sub>排出量の中でも多くを占め、自動車の燃費向上は重要な課題である。新たに開発した1.5ギガパスカル級冷延鋼板は、微細なマイクロ組織を精緻に制御することにより、極めて高い降伏強度を具備しており、自動車部品において従来1ギガパスカル材に対して20%以上の大きな軽量化効果が得られる。これは、素材の使用量の削減を通じて、鋼板製造、輸送、自動車走行の各工程で、CO<sub>2</sub>排出抑制に大きく貢献することを意味する。加えて、優れた冷間加工性(曲げ加工性)と耐遅れ破壊特性を具備することにより、冷間成形での部品製造が可能であり、従来の熱間成形工法で必要であった加熱によるエネルギー消費が削減可能であることに加え、部品製造時の生産性にも優れていることから、今後の普及拡大が期待される。1.5ギガパスカル級冷延鋼板が世界の自動車の主要部品に適用されれば、そのCO<sub>2</sub>排出抑制効果は極めて大きなものとなる。今後も持続可能な社会構築に向け、鉄の可能性を引き出し続けていきたい。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 : [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html#:~:text=,](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html#:~:text=,) (accessed 2024-01-31)
- 2) 吉岡真平, 金子真次郎, 知場三周: CAMP-ISIJ, 34 (2021), 425, CD-ROM.
- 3) 坂木庸晃, 杉本公一, 福里俊郎: 鉄と鋼, 69 (1983), 470.
- 4) J. Speer, D. K. Matlock, B. C. De Cooman and J. G. Schroth : Acta Mater., 51 (2003), 2611.
- 5) 長滝康伸, 津山青史, 細谷佳弘: 鉄と鋼, 99 (2013), 245.
- 6) 長滝康伸, 津山青史, 細谷佳弘, 大北智良: CAMP-ISIJ, 6 (1993), 688.

(2024年2月1日受付)