

技術展望

NSafe®-AutoConceptにおける自動車用高強度鋼板の開発

Development of Advanced High Strength Sheet Steel for NSafe™-AutoConcept

上 西 朗 弘*
Akihiro UENISHI

抄 録

NSafe®-AutoConcept は材料、構造、工法を組み合わせた統合的アプローチによる軽量かつ衝撃吸収能と車体剛性に優れた構造を提案するプロジェクトである。鉄鋼材料は車体構造に用いられる主要な材料であり、様々な開発が実行されてきた。日本製鉄(株)において近年開発してきた自動車用鋼板について、その組織や機械的特性の制御の基本的な考え方に触れながら技術概要について紹介した。

Abstract

NSafe™-AutoConcept is a project to achieve a light weight car with enhanced crashworthiness and body rigidity by integral approaches from materials, forming technologies and structural studies. Steel products constitute the principal material used in an automobile structure. Further improvements of steels have been carried out. In this report, advanced high strength sheet steels recently developed at Nippon Steel Corporation have been reviewed with their basic concepts for microstructure and mechanical properties controls.

1. 緒 言

近年、自動車メーカー各社の車体軽量化や衝突安全ニーズは高まり続けており、また電動化や新エネルギー対応、自動運転の普及など、社会や産業が大きく変化しようとしている。日本製鉄(株)では、こうした自動車産業の大変革期をビジネス進化の新たな起点と捉え、鉄による次世代自動車コンセプトである“NSafe®-AutoConcept”を構築した。次世代自動車およびそれを構成する部品に求められる性能を想定し、材料、構造、工法を組み合わせることで、自動車全体の付加価値の向上策を提案することを目的としている。

一般的な乗用車は1トン程度の質量があり、その7割を鋼材が占めると言われている。軽量化は自動車に使用する材料を薄くすることで実現できるが、一方で車体に求められる機能である衝突安全性や剛性を確保する必要がある。従って、材料自体の性能を向上させることが軽量化のための重要な鍵の一つとなる。本報告では各部品に求められる特性を明らかにしながら、それらに対応して開発してきた各種の自動車用鋼板について述べる。さらに今後の技術展望について紹介する。

2. 鉄鋼材料の基本的性質と自動車用鋼板の開発

図1に様々な材料の密度とヤング率の値を原子番号の順に並べたものを示す。密度は原子番号に対して周期的に変化する。これは原子そのものの質量に加えて空間的な配置を決める結晶構造にも影響されるためである。鉄(Fe)は

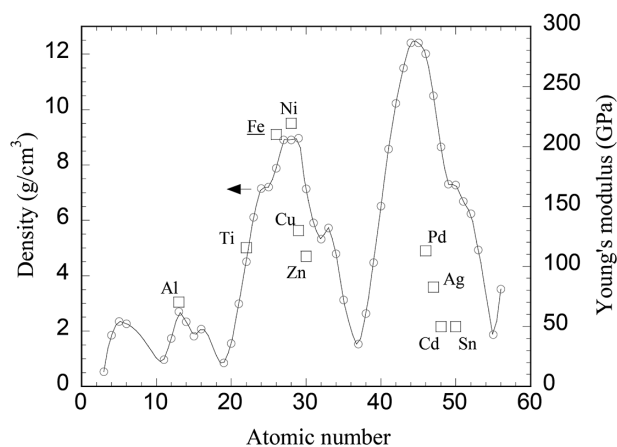


図1 種々の材料の密度とヤング率との関係
Relationship between density and Young's modulus of various materials

この周期的な変動の頂部に位置しており近傍の材料に比べて密度が高い材料であることが分かる。ヤング率を見てみると鉄のヤング率の絶対値は他と比較して高い。すなわち鉄は剛性に優れる材料であることが分かる。ヤング率は原子間の結合力を反映するものであり、密度やヤング率の値は鉄が稠密な結晶構造を持っていることを示している。自動車用軽量化素材として広く検討されているアルミニウムと比較すると、鉄のヤング率はほぼ3倍である。一方、密度も3倍程度であり、比剛性としてはアルミニウムと鉄は同等である。

現在、自動車用鋼板は引張強さにして270MPa級から1.8GPa超級までの広い強度クラスが実用化されている。その強度-延性バランスを図2に模式的に示す。元来の自動車用鋼板は炭素含有量を低減してすべてをフェライトとし、270MPa級の引張強度と40%超の優れた伸びを持つ軟鋼板である。この基本の組織に対して固溶強化や析出強化、あるいは硬質組織を用いた組織強化などにより高強度化が行われる。一般に材料強化により伸びは低下していく傾向にある。従って図2では右下がりの領域を構成することになる。自動車への適用が検討されているアルミニウム合金やマグネシウム合金に目を転じると、その強度範囲は鋼板に比べると低い範囲に留まっている。

自動車に使用されているアルミニウム合金は300MPa程度の引張強度を持つものが多く、引張耐力で比較すると980MPa級以上の高強度鋼板でアルミニウム合金以上の軽量化が可能となる。実際の自動車での使用時は引張だけでなく曲げ等の異なる強度特性が必要とされる。曲げの場合は耐力が板厚の n 乗($n \sim 2$)に比例することが知られており、その場合は低密度の材料を用いて板厚を増すことが耐力向上に有利となる。言い換えると、高強度化に特徴のある鉄鋼材料を最大限活用するためには材料の面内で力を受ける(=引張または圧縮)ことが構造面での工夫となると考えられる。また、そのような構造を実際の部品で実現する

ための優れた成形性を持つ材料と、その材料特性に合わせた工法の開発が重要であり、様々な検討がなされている。

自動車用鋼板はパネル、車体骨格、シャシーなどに多用されている。1990年代後半から自動車用に適用される鋼板の種類は大きく変化してきた^{1,2)}。衝突安全規制の強化と二酸化炭素低減のための燃費改善とを目的として、高強度材による材料置換が盛んに検討されたためである。一般に高強度鋼板は“ハイテン”と呼ばれることが多い。近年ではハイテンをさらに高強度化した“超ハイテン”が開発され、自動車への適用も始まっている。

種々のハイテン(超ハイテン含む)の中で最も広範囲に使用されている鋼板は図2に示したDual Phase鋼(DP鋼と呼ばれることが多い)である。DP鋼はフェライトとオーステナイトの二相となる温度域から急冷し、フェライトとマルテンサイトからなる組織としたものがその起源であるが、それ以外の組織(例えばベイナイト)を含む複雑な組織構成のものもDP鋼と呼ばれることが多い。その機械的特性の特徴は比較的低い降伏強度(あるいは降伏比)と優れた延性にある。このような特性は、強度を硬質組織であるマルテンサイトに、低い降伏強度と延性を軟質組織であるフェライトに結び付けて議論されることが多い。

さらに室温でも変態しないように安定化させたオーステナイトを含む複合組織鋼はTRIP (TRansformation Induced Plasticity) 鋼と呼ばれている。オーステナイトが加工によりマルテンサイトに変態することで高い伸びが得られることがTRIP鋼の特徴である。現在、世界的に1GPaを超える引張強度を持ち、優れた伸びを示す鉄鋼材料の探索が盛んに行われている。成分系の工夫と製造プロセスの最適化を行うことで現実的なコストで優れた特性の実現を目指すという動きであり、これらは総称して第三世代ハイテンと呼ばれている³⁾。それらの試みの多くはTRIP現象を起こす残留オーステナイトの組織分率を増やそうとするものである。しかしながら、残留オーステナイトを利用するために炭素やマンガンを含合金元素として多量に添加すると、溶接性に代表される使用特性が劣化してしまう。自動車用材料として活用していくためには求められる特性を成分制約の中で発現させる必要がある。

これまで自動車用鋼板はその基本的性質を活かし、適用される部位に応じた種々の材料が開発されてきた。NSafe[®]-AutoConceptにおいて抜本的な軽量化を鉄鋼素材で実現するソリューションを提案しているが、そのためには求められる使用特性を把握し、その特性を材料として実現する必要がある。以降、その基本的な考え方について紹介する。

3. 車体骨格向け高強度自動車用鋼板

3.1 車体骨格系部品と必要材料特性

車体骨格向けに適用される材料に必要な特性は二つの性能軸に分けて考えることができる。その一つは強度である。

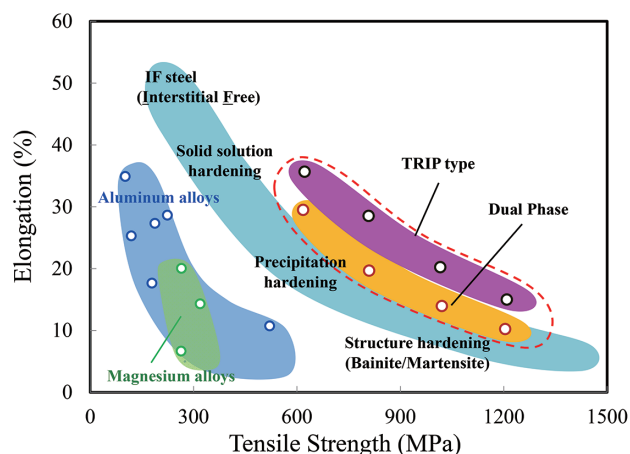


図2 種々の材料の強度-延性バランス
Relationship between tensile strength and elongation in various materials

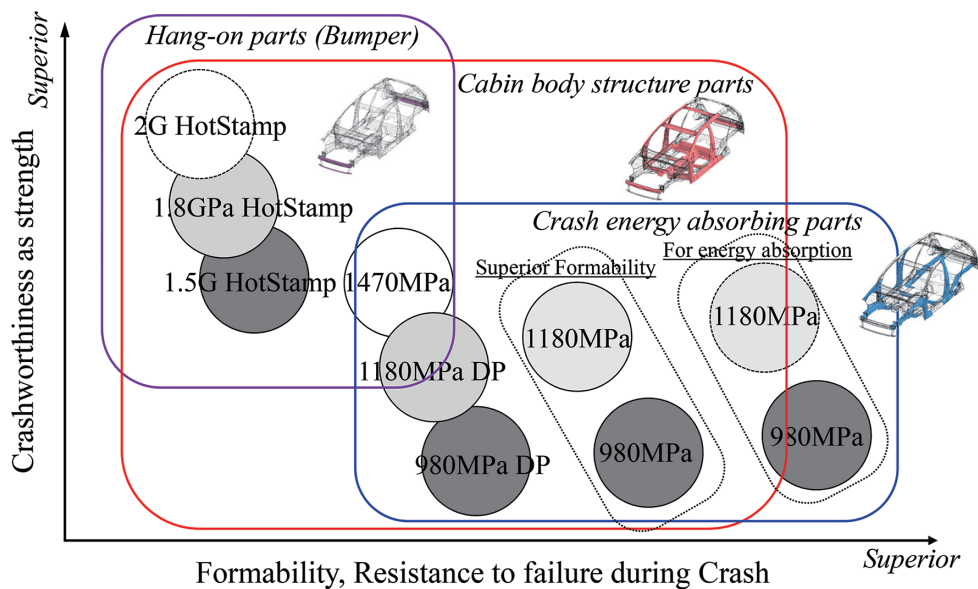


図3 車体骨格向け高強度自動車用鋼板の材料進化
Evolution of high strength sheet steels for automobile body structure

衝撃吸収に代表される車体強度特性は材料の高強度化により向上させることができる。またこの性能向上は車体の軽量化としても活用可能である。もう一つの軸は変形能である。プレスなどによる冷間成形では、深絞り性、張出し性、伸びフランジ性、曲げ性、など部品形状や加工法に応じた種々の成形性が必要とされる⁴⁾。また部品となり構造を形成した後の大変形時にも耐える変形能が必要とされる。強度と変形能という二つの指標で車体骨格向けの高強度自動車用鋼板の進化を示したものが図3である。

図3には種々の材料を図示しているが、強度と変形能の観点から適用する部品群を三つに大別して示している。分類の一つはハングオン部品と呼ばれるものでバンパーなどに代表されるものである。これらの部品は車体の中で最も高強度化が進んでいる。ホットスタンプ技術が盛んに適用されており、近年1.8GPa級ホットスタンプ用鋼板も実用化された。この詳細については後述する。

また、ハングオン部品群の次に高強度化が進んでいるのはキャビン骨格に使用される部品群である。1.5GPa級ホットスタンプ用鋼板や、1180MPa級の冷間成形用ハイテンが現在適用されている。NSafe[®]-AutoConceptでは、材料、構造、工法を総合的に検討することにより1470MPa級冷間成形用ハイテンを多くの部品に適用することを提案している。

キャビンの前後に配置される部品群（フロント／リアサイドメンバーなど）が第三の分類である。これらの部品群は前面や後面衝突の際に軸圧潰変形や曲げ変形により大変形し、衝突エネルギーを吸収する機能を持っている。これらの部品に適用される材料は十分な強度を持つことで軽量化と衝撃吸収能とを両立させることと、大変形時に破断せず変形進展（主に座屈進展）に不連続を生じさせない十分

な変形能を持つこと、が必要である。これまでの鋼板の高強度化の歴史を振り返ると第一のハングオン部品群でまず高強度材が適用され、それがキャビン系に、さらに大変形衝撃吸収の部品群へと展開されてきた。現在の自動車構造では590～780MPa級の鋼板がこの第三の部品群に適用されることが多い。

3.2 車体骨格系部品に向けた材料の進化

1.5GPa級以上の強度を持つ部材を得るためにホットスタンプ技術が実用化されている。この技術は冷間成形時に課題となる破断や形状精度確保の難しさを回避し、かつ超高強度を得ることができる優れた方法で、900℃程度まで加熱しオーステナイトとした鋼板をプレス成形し、金型内で冷却することにより焼き入れを行い、マルテンサイトとする技術である。ホットスタンプにおいては高温で成形されることからプレス荷重は小さく、かつ金型内でマルテンサイト変態が起こることから形状不良を引き起こす残留応力が小さなものとなるため良好な形状精度が得られることが知られている⁵⁾。

これまでの1.5GPa級のホットスタンプ用鋼板に加えて、1.8GPa級ホットスタンプ用鋼板を実用化した⁶⁾。ホットスタンプ用鋼板は主にマルテンサイトの活用により強度を確保している。マルテンサイトの強度は鋼中に含まれる炭素量を増やすことにより増加させることができるが、その場合は靱性が不足し十分な性能が得られないことがある。実用化した1.8GPa級ホットスタンプ用鋼板の焼き入れ後のミクロ組織を従来材である1.5GPa級ホットスタンプ用鋼板とともに図4に示す。焼き入れ後組織はいずれもラスマルテンサイトとなっている。旧オーステナイト組織を見ると1.8GPa級材で微細化している。また引張試験後は延性

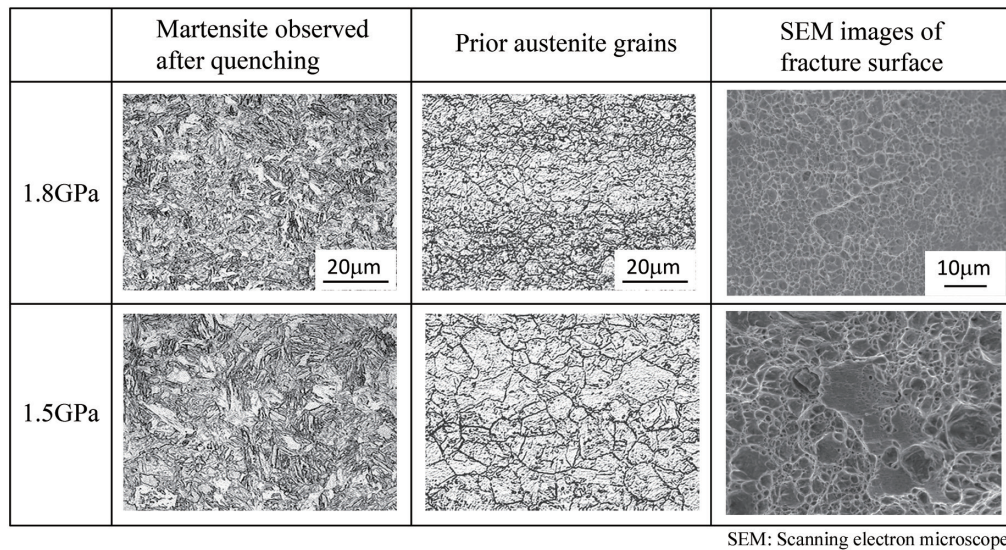


図4 1.5GPa および 1.8GPa ホットスタンプ用鋼板のマイクロ組織の比較
Comparison of microstructures between 1.5GPa and 1.8GPa grade hot-stamping steels

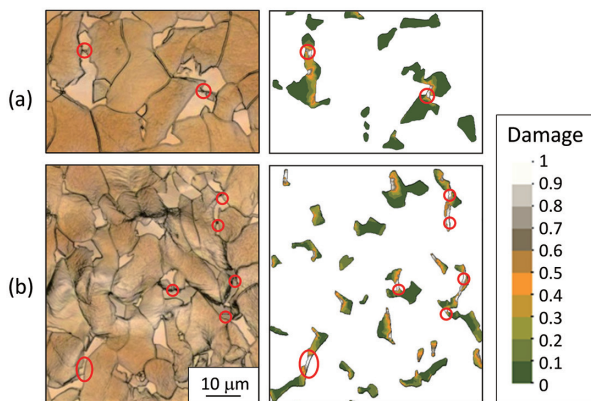


図5 その場観察結果とマルテンサイト破壊シミュレーション結果の比較 ((a) ひずみ 0.1, (b) ひずみ 0.28)
Comparison of in-situ observations and martensite fracture with simulation results ((a) 0.1 strain, (b) 0.28 strain)

破面を示し、ディンプルもより微細な構造を呈していた。この材料は必要とされる 1.8GPa 級の強度を確保しつつ、靱性や溶接性、耐水素脆化特性などを具備することを確認している⁹⁾。図3に示したようにさらなる強度特性向上を目指して 2GPa 級以上のホットスタンプ用鋼板の開発も進めている。

冷間成形用ハイテンについて複合組織強化を用いた DP 鋼や TRIP 鋼により伸び (引張試験における延性) が向上することについてはすでに述べた。硬質組織と軟質組織が共存する場合には材料内部で複雑に変形が分配される。図5は 590MPa 級の DP 鋼を引張を行いながらレーザー顕微鏡により観察した結果であり、その数値解析結果も示してある⁷⁾。レペラ腐食によりマルテンサイトを白く、フェライトを黄銅色に着色してある。ひずみ 0.1 ではマルテンサイトのくびれ部に塑性変形が集中し、破壊が生じ始めていることが分かる (破壊部を赤丸で示す)。またひずみ 0.28 では破壊部が増えるとともに、フェライト部に表面凹凸が観察

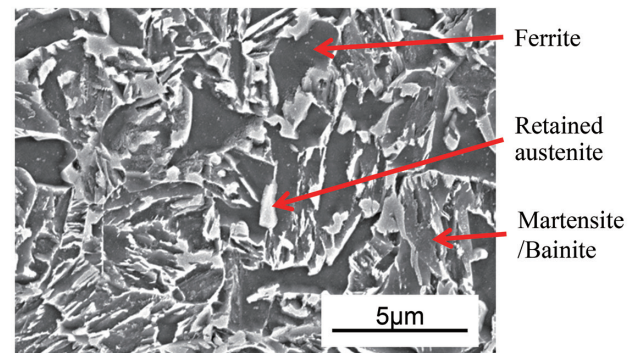


図6 1180MPa 級高延性超ハイテンの材料組織
Microstructure of 1180MPa grade high strength steel with enhanced elongation

されるようになっており、大きな変形が加わっていることを示していると考えられる。

このように引張変形の場合は硬質組織を囲む軟質組織が変形することで硬質組織の変形能を補い、優れた伸びを示すと言える。しかしながら、例えば曲げのように変形が集中する場所が特定される場合は、その部位に硬質組織があると早期に破壊が生じてしまう。このような観点から 980MPa 級鋼においては均一組織を母相とする曲げ型や、延性に優れたフェライトを素地にマルテンサイトなどを分散させた伸び型、など用途に応じて選択できるような鋼板が開発され、適用されてきた^{8,9)}。

キャビン骨格系や大変形衝撃吸収用の部品には複雑な形状を持つものがあり、高強度化をする場合にも優れた成形性を兼ね備える必要がある。その場合には軟質なフェライトや TRIP 現象を示す残留オーステナイトなどを用いる必要がある。1180MPa 級の高成形性冷間成形用自動車用鋼板のマイクロ組織の例を図6に示す¹⁰⁾。1μm 以下の構成要素を持つ複雑な組織が形成されていることが分かる。フェラ

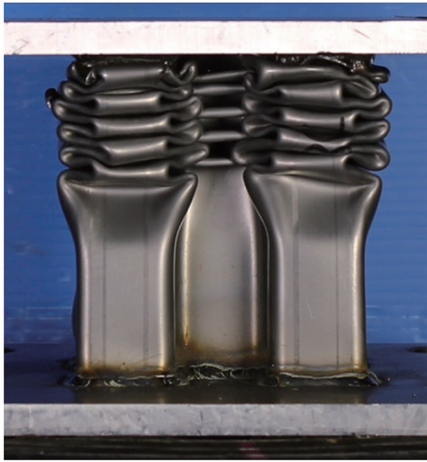


図7 1180MPa 級衝撃吸収用鋼の軸圧潰試験結果
Axially crushed specimen of 1180MPa high strength steel for energy absorbing parts

イト、マルテンサイト／ベイナイト、オーステナイトからなる組織であり、高延性と優れた伸びフランジ性（～曲げ性）が両立できることが報告されている。最適な成分設計と製造プロセスにより、材料の組織を極限まで微細化した結果であると考えられる。

大変形衝撃吸収用部品については成形性ととも到大変形時に破断による変形進展の不連続化を起こさないことが必要であり、高強度鋼板の適用が590～780MPa 級に留まることが多いことはすでに述べた。それに対して構造面での工夫により、さらなる高強度化が可能であることが分かってきた。

図7は1180MPa 級高強度鋼板を最適断面に成形した後に軸圧潰試験を行った際の座屈形態を示す¹¹⁾。590MPa 級鋼を使用したモデル部材（角筒形状）に比べて30%軽量化しつつ、1.6 倍のエネルギー吸収能があることが分かった¹¹⁾。軸圧潰変形時の座屈部を詳細に観察し、その変形が曲げ変形であることを突き止めた。そこで1180MPa 級鋼板として曲げ性に優れたものを選択したことが優れた衝撃吸収能を示した要因の一つである。図2に示すように980MPa 級以上の超高強度材は軟鋼に比べると延性（伸び）は低下するが、使用される部品に求められる機能／性能（例えば曲げ性）を適切に高めることにより、材料置換によるさらなる軽量化が可能になると考えている。

4. シャシー向け高強度自動車用鋼板

シャシー系部品は重要保安部品が多く、強度、剛性、耐久性、耐食性など高い信頼性が求められている。またその使用板厚範囲から熱間圧延鋼板が多く用いられていることも特徴である。440MPa 級が主流であるが一部には590MPa、780MPa 級ハイテンが適用されており、さらに高強度な材料の開発も進んでいる。

シャシー系部品に適用される高強度熱間圧延鋼板では、

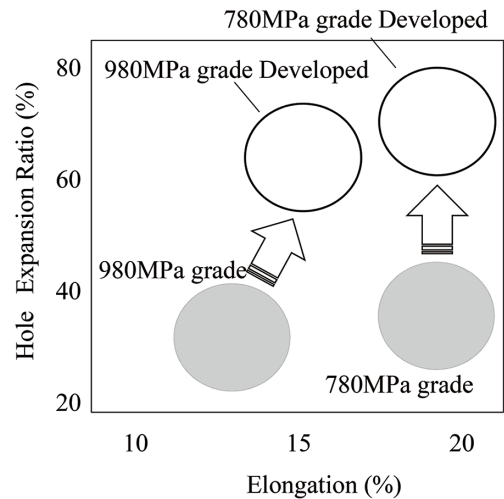


図8 780MPa および980MPa 級熱間圧延高強度鋼板の機械的特性

Mechanical properties of the developed 780MPa and 980MPa hot-rolled steels

張出し性（引張試験における伸びと相関が高い）と同時に高い伸びフランジ性（ロアームのバーリング部（ブッシュの嵌合部）など）が要求される場合が多い。延性を向上させる軟質フェライトと硬質組織の組合せは伸びフランジ成形における大変形時に硬質相の割れや硬質相界面での亀裂発生により伸びフランジ成形性が劣化する（図5参照）。従って、伸びフランジ成形性の向上のためにはマイクロ組織の均一化が有効であり、ベイナイト単相やフェライトとベイナイトの複合組織で組織間の硬度差が少なくなるように成分、製造条件が選択されている。特に粗大なセメンタイトは伸びフランジ成形性を大きく劣化させるために、セメンタイトの微細分散化や添加炭素レベルを下げる成分選択がなされることが多い¹²⁾。

図8に780MPa 級の開発鋼の特性を示す。従来鋼に比べて伸びフランジ成形性の指標である穴広げ値が高く、伸びと穴広げ性を両立させている。またこの開発鋼は外観に優れ、十分な疲労耐久性を持つことも確認されている¹³⁾。

先に述べたように980MPa 級以上の鋼板を適用できればアルミニウム部品同等以上の軽量化が視野に入ってくる。フレーム向けとしてアーク溶接性に優れ、曲げ性や疲労特性にも優れる980MPa 級鋼がある。さらに780MPa 級と同様にマイクロ組織と組織間硬度差を制御することにより伸びと穴広げ性をさらに高めた熱間圧延鋼板も開発している（図8）。

5. 結 言

鉄による次世代自動車の構造コンセプトであるNSafe[®]-AutoConcept について、特に材料の観点からこれまでの技術知見と今後の展望について述べた。鉄鋼材料は高強度化に対するポテンシャルが非常に高く、その活用により自動車軽量化に今後も貢献できると考えている。また、国内で

培った技術を海外に展開し高機能な製品をグローバルに展開することで、世界規模での地球温暖化防止と衝突安全性の向上に寄与すると考えている。

近年の自動車用鋼板は構造材料としては他に類を見ないほどの変化を遂げており、部位にもよるが2000年頃の2倍を超える強度の材料が使用されるようになってきた。種々の課題が克服されてきたが、本分野では材料開発と同期して加工、溶接などの利用技術開発が行われることで発展してきたことが特徴である。今後も高強度化の進展とともに技術的ハードルが高くなると考えられるが、材料開発と利用技術開発に関する技術革新を進めていく必要がある。鉄鋼材料開発と利用技術との相乗が世界をリードする我が国の自動車産業を支えるものづくりの基盤となることを期待したい。

参考文献

- 1) 高橋学：新日鉄技報. (378), 2-6 (2003)
- 2) 高橋学：鉄と鋼. 100 (1), 82-93 (2014)
- 3) Matlock, D.K. et al.: Proc. of Microstructure and Texture in Steels, Jamshedpur, 2008, p.185-205
- 4) 例えば薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック. 第4版. 東京, 日刊工業新聞社, 2017, p.24
- 5) 瀬沼武秀 ほか：ふえらむ. 11 (2), 86-93 (2006)
- 6) 匹田和夫 ほか：まてりあ. 52 (2), 68-70 (2013)
- 7) Matsuno, T. et al.: Int. J. Plasticity. 74, 17-34 (2015)
- 8) 野中俊樹 ほか：新日鉄技報. (378), 12-14 (2003)
- 9) 藤田展弘 ほか：新日鉄技報. (393), 99-103 (2012)
- 10) 川田裕之 ほか：自動車技術会 2014 年学術講演会前刷集. (46-14), 5-8 (2014)
- 11) 三日月豊 ほか：日本製鉄技報. (412), 52-58 (2019)
- 12) 高橋学 ほか：新日鉄技報. (378), 7-11 (2003)
- 13) 首藤洋志 ほか：自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会講演予稿集. (113-16), 20166073 (2016)



上西朗弘 Akihiro UENISHI
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員 博士
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511