

車体軽量化に貢献する自動車用高強度鋼板の開発

Development of Advanced High Strength Steel Sheets for Autobody Lightweighting

弘 中 諭* 岡 本 力
Satoshi HIRONAKA Riki OKAMOTO

抄 録

NSafe®-AutoConcept ECO³はカーボンニュートラル社会の実現に向け、軽量化や環境対応および経済性を考慮した総合的な提案を行う新たなコンセプトであり、その実現には優れた特性を有する先進高強度鋼板の開発が不可欠である。自動車の主要素材である鉄鋼材料の特徴や日本製鉄(株)において近年開発してきた自動車用鋼板の技術概要を紹介した。

Abstract

NSafe™-AutoConcept ECO³ is a new concept that offers a comprehensive proposal considering weight reduction, environmental response, and economic efficiency towards the realization of a carbon neutral society. The development of advanced high strength steel sheets with excellent properties is essential for its realization. This report reviews the characteristics of steel materials, which are the main materials for automobiles, and provides a technical overview of automotive steel sheets developed by Nippon Steel Corporation in recent years.

1. 緒 言

カーボンニュートラル実現のため、自動車産業では電動化や新エネルギー対応が加速している。こうした動力源の変化にともない自動車車体で各部品が担う役割が変化するとともに、新たな部品や無くなる部品も発生している。車体分野ではこれまでも、衝突安全と燃費に関する各国の基準強化への対応のため、高強度鋼やアルミニウム合金などを適用した車体軽量化が進められてきた。こうした状況の中、日本製鉄(株)は先進高強度鋼板に構造、工法を組合せ自動車全体の付加価値向上を実現する次世代自動車コンセプト“NSafe®-AutoConcept”を提案したり。さらに、軽量化、CO₂ 排出量削減などの環境対応および経済性の各視点で、顧客のニーズに合った最適なソリューションを提案する新概念“NSafe®-AutoConcept ECO³”も提案している。

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される材料の板厚を薄くすることで達成できるが、同時に衝突安全性や剛性を確保する必要がある。また、自動車は多くの部品によって構成され、各部品によって担う役割が異なるため、鋼板に求められる特性も適用部品によって様々で

ある。そのため、車体の軽量化を目的とした自動車鋼板の性能向上も、部品ごとに求められる特性に応じて行われてきた。本報では自動車用材料としての鉄の特徴を述べるとともに、各部品に求められる特性とそれに対応して開発してきた自動車用高強度鋼板について、今後の技術展望も含めて報告する。

2. 車体用材料としての鉄の特徴

自動車車体の質量を左右する主な要件は衝突安全性と剛性であり、それぞれを支配する材料の代表的な特性は強度とヤング率である。一方、カーボンニュートラルの評価として近年はライフサイクルアセスメントが重視され、材料の製造や廃棄におけるCO₂を含む温室効果ガスの排出量(以下、CO₂ 排出量)も材料選定における重要なポイントである。本章では自動車用材料として鉄鋼材料を適用する利点について、強度、ヤング率およびCO₂ 排出量の観点から他素材と比較し、そのポテンシャルを評価した結果^{2,4)}を述べる。

2.1 軽量化に対するポテンシャル

図1に種々の材料の比強度と伸びの関係を模式的に示

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 鋼材ソリューション研究第一室長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

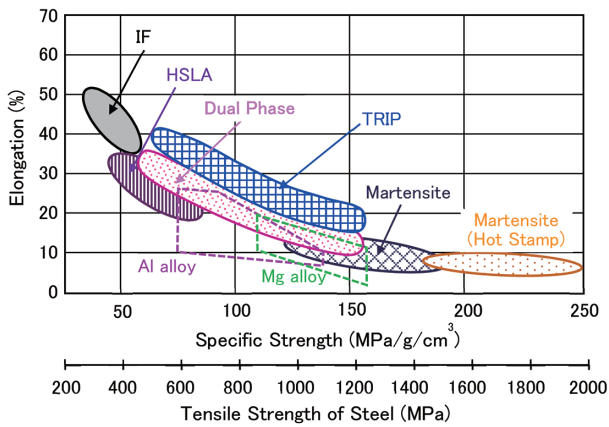


図1 種々の材料の比強度と伸び

Relationship between specific strength and elongation in various materials

す。比強度は引張強度を密度で除したもので、質量等価の条件で強度を比較できる指標である。自動車には引張強度で270MPa級から2.0GPa級までの幅広い強度クラスの鋼板が実用化されているが、980MPaを超える高強度鋼板は比強度でアルミニウム合金を凌駕し、軽量化に対して優れたポテンシャルを有していることがわかる。一方、材料の伸びは高強度化とともに低下するが、同一比強度で比較すると、鋼材はアルミニウム合金やマグネシウム合金よりも高い伸びを示す。DP (Dual Phase) 鋼や TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼に代表される高強度鋼板は、成分系の工夫と製造プロセスの最適化によって高い伸びを実現し、加工面からも他の軽量素材より使いやすい素材である。高強度鋼板が衝突安全性と軽量化の両立に好適な材料である理由がこの図からもわかる。

車体の実用性能は剛性にも依存するため、ヤング率を密度で除した比剛性も軽量化には重要である。鉄の密度は約7.87g/cm³でアルミニウムの約3倍あるものの、ヤング率も約205GPaとアルミニウムのほぼ3倍あるため、比剛性は鉄とアルミニウムではほぼ同等である。すなわち、剛性の視点において鉄はアルミニウムと同等の軽量化ポテンシャルを持つといえる。

実際の自動車部品では引張だけでなく、曲げ等の異なる変形モードに対する強度も必要となる。曲げにおける変形強度は板厚のn乗(n=2)に比例することが知られており、密度が高い鋼で軽量化するために板厚を薄くすると、曲げに対しては不利となりやすい。鋼の高い比強度や比剛性を活用し軽量化するには、閉断面化やフランジ連続化のように力を板面に沿って受ける構造やその構造を可能とする工法がセットで必要となる。

2.2 温室効果ガス排出削減に対するポテンシャル

カーボンニュートラルの評価として、車体製造から廃棄までのライフサイクル全体でCO₂排出量を評価する取り組み

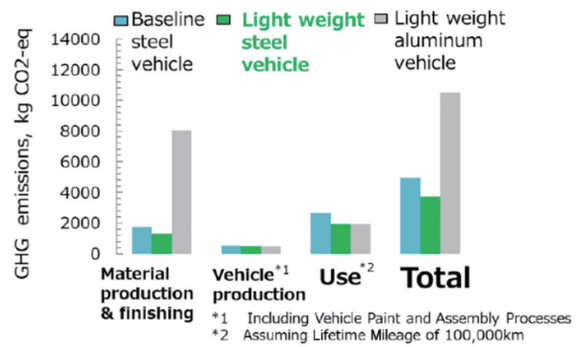


図2 車体のライフサイクルにおける GHG 排出量の試算例
Result of life cycle GHG emission of body

みが重視されつつある。自動車の場合、これまでは走行時のCO₂排出のみが注目され、車体軽量化による燃費改善(排出量削減)が注視されてきたが、ライフサイクルアセスメントの観点では、素材の製造や廃棄における排出量も考慮される。

材料製造、車体製造および走行のライフサイクルで鋼とアルミニウム合金製車体のCO₂排出量を評価した結果を図2に示す³⁾。高炉法で鋼を1トン製造する場合、約2トンのCO₂を排出するが、電気分解を必要とするアルミニウム精錬に比べると素材製造における排出量は圧倒的に低く、ライフサイクル全体で評価する場合、材料製造時の負荷を考慮した材料選択が重要であることがわかる。燃費規制や電動化で走行時の負荷が減少すると、ライフサイクル全体での削減の重要性がさらに増す。加えて、鋼は廃車後のスクラップの回収や再生も容易で、ライフサイクルアセスメントの観点では環境負荷の低い素材といえる。素材選定において従来は価格や特性が重視されてきたが、カーボンニュートラルの観点から今後は素材製造時のCO₂排出量やリサイクル性など総合的な環境負荷も重要な指標になると思われる。

3. 先進高強度鋼板の開発

NSafe®-AutoConceptにおいて提案している軽量車体を実現するには、優れた特性を有する先進高強度鋼板の開発が欠かせない。本章では、車体骨格部品向けの冷延、冷延めっき鋼板およびホットスタンプ用鋼板とシャーシ部品向け熱延鋼板について、それぞれの開発動向を紹介する。

3.1 車体骨格部品に求められる特性

車体骨格部品向け高強度鋼板の進化を強度と成形性または衝突時の変形能の2軸で整理した結果を図3~5に示す。材料の強度は衝撃吸収に代表される車体の衝突安全性に関係し、高強度化は衝突安全性の向上に加え車体の軽量化としても活用可能である。もう一つの軸は、プレス成形における伸びフランジ性や曲げ性などの成形性、または部品成形後の大変形にも耐える変形能を表している。

図3~5では強度と変形能の観点から、適用部品を3種類に大別している。一つ目はバンパーに代表される衝突時の高耐力が重視される部品(ハングオン部品)である。ホットスタンプ技術の適用も盛んで、最も高強度化が進んでいる。二つ目はセンターピラーに代表される客室周りの骨格部品やバッテリーボックス部材で、ハングオン部品に次いで高強度化が進んでいる。ホットスタンプ用鋼板に加え、

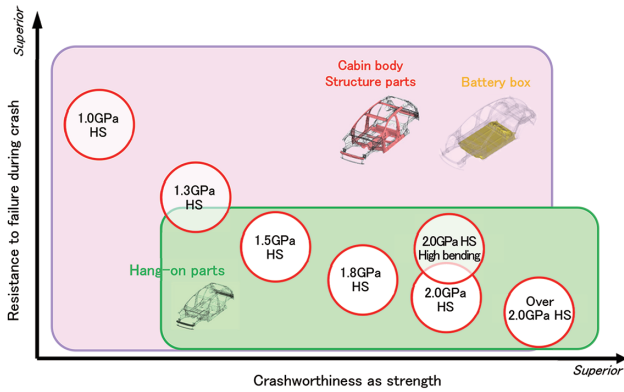


図3 骨格向けホットスタンプ用鋼板の材料進化
Evolution of hot-stamping steel sheets for automobile body structure

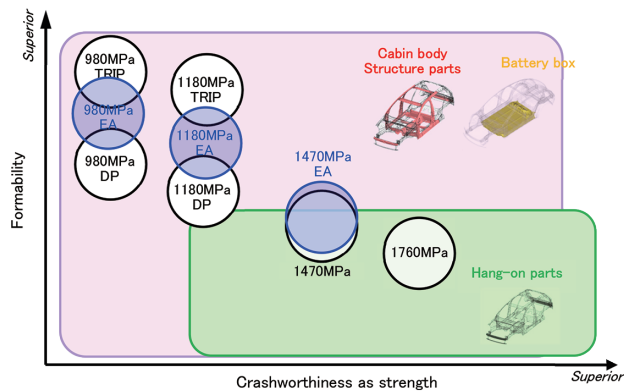


図4 骨格向け冷間成形用高強度鋼板の材料進化
Evolution of cold-formed high strength steel sheets for automobile body structure

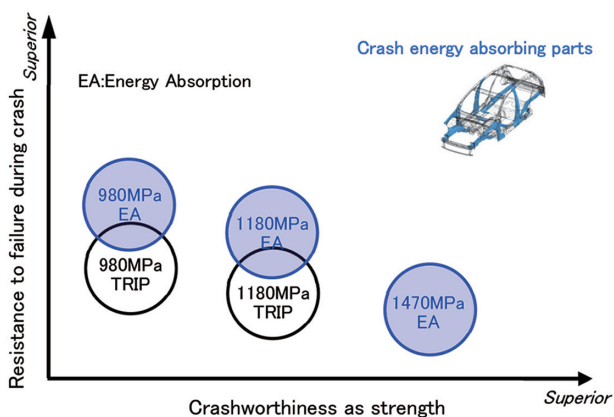


図5 衝撃吸収部品向け高強度鋼板の材料進化
Evolution of high strength steel sheets for crash energy absorbing parts

980MPa 超級の冷延および冷延めっき鋼板が適用されており、最近ではセンターピラーへの2.0GPa級ホットスタンプ用鋼板の適用⁶⁾やフロントピラーへの1470MPa級冷延鋼板の適用⁷⁾も報告されている。三つ目はフロント/リアサイドメンバーなど客室の前後に配置される衝撃吸収部品である。これらの部品は前面・後面衝突時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有しているため、強度とともに衝突による大変形でも破断しない十分な変形能が求められる。以下、各部品群に適用される材料として、ホットスタンプ用鋼板と冷延および冷延めっき鋼板の特徴を述べる。

3.2 ホットスタンプ用鋼板

高強度鋼板の冷間成形では、延性の低下にともなう板破断や形状凍結性の低下、プレス荷重上昇などの課題が発生する。これら課題を解決する手段の一つとしてホットスタンプ技術が実用化されている。ブランク板をオーステナイト単相域である900℃程度まで加熱し、その後、熱間でプレス成形し、同時にプレス金型での抜熱による急冷で焼入れることでマルテンサイトとし、高強度部品を作る技術である。高温で成形するため、プレス荷重は小さく、金型内で焼入れるため残留応力も低くすることができ形状凍結性にも優れる。ホットスタンプ後の強度は、ホットスタンプ前の強度によらず、焼入れ後のマルテンサイト組織が強度を決める。焼入れマルテンサイトの強度は、図6に示すように、炭素量の増加にともない単調に増加し、SiやMn等他の元素の影響は小さい。そのため、ホットスタンプ用鋼板の強度は炭素量でほぼ決まり、2.0GPa級ホットスタンプ用鋼板の炭素量は0.3mass%超となる。ホットスタンプ用鋼板の高強度化にともない実部品への適用においては、炭素量増加にともなう靱性や溶接性低下が課題となる。1.8GPa級ホットスタンプ用鋼板では、C量増加にともなう

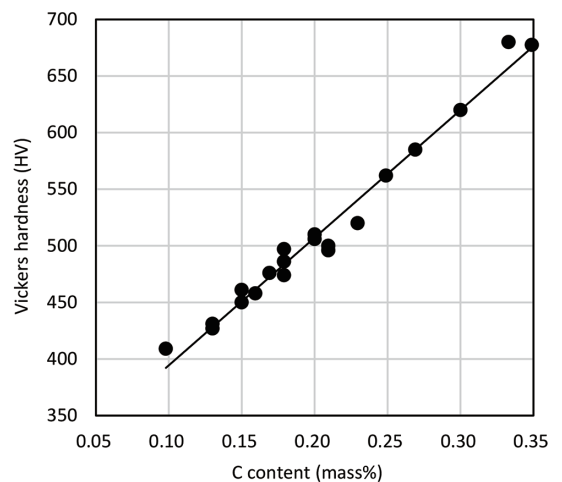


図6 焼入れマルテンサイトの硬さとC量の関係
Relationship between hardness in quenched martensite and C content

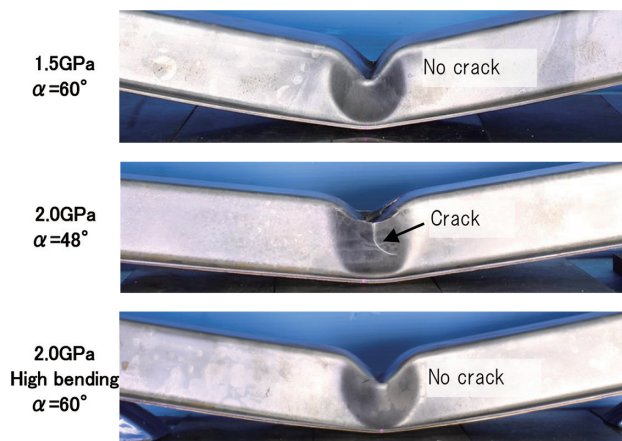


図7 ハット形状部品の3点曲げ試験後の外観 (1.6mmt)
Appearance after 3-point bend test in hat shape parts

これら課題に対し、旧オーステナイト組織を微細化することで靱性や溶接性などの必要特性を確保している⁸⁾。また、材料面だけでなく利用技術の観点からも対策を行うことで、さらなる高強度化を目指しており、現在は2.0GPaを超える強度レベルのホットスタンプ用鋼板の開発を進めている(図3)。

ホットスタンプ用鋼板の適用部品拡大を目指し、圧潰時の変形能の改善にも取り組んでいる。図7にホットスタンプ用鋼板をハット形状にプレス加工した部品の曲げ試験結果を示す。圧潰試験における割れ挙動と曲げ性には相関があり、ドイツ自動車工業会で規格化された曲げ試験VDA 238-100で求めたVDA曲げ角を曲げ性の指標として用いることが多い。通常の2.0GPa級ホットスタンプ用鋼板は、VDA曲げ角が48°と1.5GPa級に比べ10°程度低く、部品の曲げ試験において亀裂が発生した。一方、高曲げ型2.0GPa級は成分やプロセス条件を最適化することで1.5GPa級ホットスタンプ用鋼板と同等のVDA曲げ角が得られ、部品曲げ試験における亀裂発生を抑制できた。さらに、ホットスタンプ後の強度が1.3GPa以下の低強度ホットスタンプ用鋼板も実用化され、適用部品の拡大に貢献している⁹⁾。

ホットスタンプは非酸化性の雰囲気中で加熱されるが、加熱炉からプレス搬送時の酸化は阻止できず、酸化被膜が生成する。この酸化被膜は成形時に脱落し金型に堆積することで金型メンテナンスの増加を引き起こすだけでなく、部品に残った場合はショットブラストでの除去が必要となる。これら課題を解決するため、日本製鉄では合金化溶融亜鉛めっきや溶融アルミニウムめっきを施したホットスタンプ用鋼板をメニュー化している。溶融アルミニウムめっきでは加熱中にFe-Al金属間化合物が形成され、スケール形成を抑制し、スポット溶接や化成電着が可能となる。また、アルミニウムの不動膜の形成により部品の耐食性も付与できる。

3.3 冷延鋼板および冷延めっき鋼板

客室回りの骨格部品に主に適用される冷延鋼板および冷延めっき鋼板は、成形性に優れた高強度鋼板として前述したDP鋼やTRIP鋼が開発され、既に1180MPa級まで実用化されている。これら鋼板は軟質なフェライト、硬質なマルテンサイトやベイナイト、加工中にマルテンサイト変態する残留オーステナイトなど複数の組織で構成され、求められる強度や加工性に依りて各組織の分率やサイズを制御している。1470MPa級以上の強度レベルでは、ホットスタンプ用鋼板同様、マルテンサイト主体の組織となるが、前述したように、1470MPa級冷延鋼板は既に実用化され、現在は1760MPa級鋼板の開発を進めている(図4)。

冷延鋼板および冷延めっき鋼板においても、高強度化にともない靱性や溶接性、耐水素脆化特性などが課題となる点はホットスタンプ用鋼板と同様であるが、亜鉛めっき鋼板特有の課題として、スポット溶接における液体金属脆化(LME: Liquid Metal Embrittlement)がある。LMEは固体金属と液体金属の組合せによって生じる現象として知られており、高延性の金属や合金がある特定の液体金属と接し、負荷を受けた場合に延性が著しく低下する現象である。近年、高強度鋼板のスポット溶接において、LME割れが生じることが報告されている¹⁰⁾。スポット溶接におけるLME割れの発生因子は、応力・ひずみ、液体亜鉛および材料の感受性の三つであり、これらが重畳したときに発生する。そのため、高強度鋼板のLME割れを抑制するには、各因子に応じた対策を取ることが重要であり、LME割れ感受性を考慮した材料開発が行われている。さらに、有限要素法解析を用いたスポット溶接シミュレーションを活用し、クリアランスや電流値の影響をLME割れの起因となる応力・ひずみの観点から評価した例も報告されている^{11,12)}。

フロント/リアサイドメンバーに代表される衝撃吸収部品については、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(安定した圧潰性能を得る)ことが求められ、高強度鋼板の適用が590~780MPa級に留まってきた。これら部品の高強度化のため、成形性に優れたTRIP鋼の適用検討に加え、エネルギー吸収性能(EA: Energy Absorption)に優れた鋼板の開発が行われてきた。図8に980MPa級EA鋼板の特性例を示す。材料特性としては、従来のDP鋼に比べ延性は同程度であるものの曲げ性を高めた点が特徴で、VDA曲げ角は70°から95°まで向上し、部品を模擬した軸圧潰試験においても、破断することなく優れたエネルギー吸収能を示す。部品としてのエネルギー吸収性能は、材料特性だけでなく部品形状の影響も大きく、平面部幅と板厚の比(Wp/t)を小さく設計することで高まる¹³⁾ことが報告されている。今後は、部品形状の最適化と1180MPaおよび1470MPa級EA鋼板の開発を進めることで、本部品のさらなる軽量化が可能になると考えている(図5)。

3.4 熱延鋼板

熱延鋼板は主に自動車のホイールや足回り部品に使用される。これら部品は重要保安部品に分類されるため、鋼板には強度や剛性に加え、疲労耐久性、耐食性など高い信頼性が要求される。このため、自動車部品の中では高強度化の遅れた部品群で、440MPa や 590MPa 級が主流であったが、780MPa を超える高強度鋼板の適用も進みつつある。

高強度熱延鋼板の進化を強度と加工性で整理した結果を図9に示す。各種フレーム類などは足回り部品に比べ要求される加工性が比較的低く、高強度熱延鋼板の適用が進んでいる。例えば、中大型トラックの突入防止装置向けには、マルテンサイト組織を主体とした1180MPa級熱延鋼板が適用されている¹⁴⁾。一方、代表的な足回り部品であるロアアームでは部品形状から、延性に加え高い伸びフランジ性が要求される。延性を担保するため軟質なフェライトと硬質相の複合組織とし、かつフェライトを固溶強化や微細析出物で強化し、第二相にベイナイトを選択することで組織間

の強度差を低減し、伸びフランジ性を向上させている^{15,16)}。こうした組織制御指針を基に、延性と伸びフランジ性を高いレベルでバランスした上で、アーク溶接性や曲げ性、疲労特性に優れた780MPa級および980MPa級熱延鋼板が実用化されている。2章で述べたように、980MPaを超え高強度鋼板は比強度の観点でアルミニウム合金以上の軽量化効果が期待できるため、現在は延性と伸びフランジ性に優れた1180MPa級熱延鋼板の開発を進めている。

また、足回り部品は厳しい腐食環境にさらされることから、溶融亜鉛めっき鋼板が適用される場合もある。こうしたニーズに応えるため、熱間圧延工程と溶融亜鉛めっき工程の熱履歴を踏まえた一貫工程での組織制御によって組織間の強度差を低減し溶融亜鉛めっきを施した、高バーリング型590および780MPa級鋼板も開発されている¹⁷⁾。

4. 結 言

次世代自動車の新たなコンセプトであるNSafe®-Auto Concept ECO³の実現に不可欠な先進高強度鋼板について、これまでの技術知見と今後の展望を紹介した。鉄鋼材料は高強度化に対するポテンシャルが高く、カーボンニュートラルの観点からも優れた素材であり、その活用によりライフサイクル全体でのCO₂排出量の削減に貢献できる。高強度化にともない成形性だけでなく、靱性や溶接性、耐水素脆化特性など部品適用にともなう技術ハードルは高くなるが、材料開発に加え、加工や溶接など利用技術の開発も進めることでこれらの課題を克服し、持続可能な社会の発展に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 中澤嘉明 ほか：日本製鉄技報. (412), 2 (2019)
- 2) 上西朗弘：日本製鉄技報. (412), 8 (2019)
- 3) 樋渡俊二：ふえらむ. 27 (1), 6 (2022)
- 4) 岡本力：ぶらすとす. 75 (7), 119 (2024)
- 5) 久保雅寛 ほか：自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集. 文献番号 20225281 (2022)
- 6) 日本製鉄プレスリリース, https://www.nipponsteel.com/news/20220830_200.html (2022年8月30日)
- 7) 日本製鉄プレスリリース, https://www.nipponsteel.com/common/secure/news/20231204_300.pdf (2023年12月4日)
- 8) 匹田和夫 ほか：まてりあ. 52 (2), 68 (2013)
- 9) 日本製鉄プレスリリース, https://www.nipponsteel.com/news/20210513_100.html (2021年5月13日)
- 10) Bhattacharya, D. et al.: Materials Science and Technology. 34 (15), 1809 (2018)
- 11) 若林千智 ほか：自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集. 文献番号 20205239 (2020)
- 12) 上田秀樹 ほか：自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集. 文献番号 20205242 (2020)

	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	λ (%)	Bending angle (deg.)
EA	770	1000	14	55	95
DP	650	1000	15	25	70

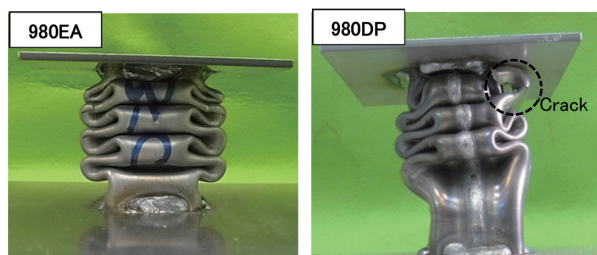


図8 980MPa級衝撃吸収用鋼板の特性および軸圧潰試験結果

Mechanical properties and axially crushed specimen of 980MPa high strength steel for energy absorption

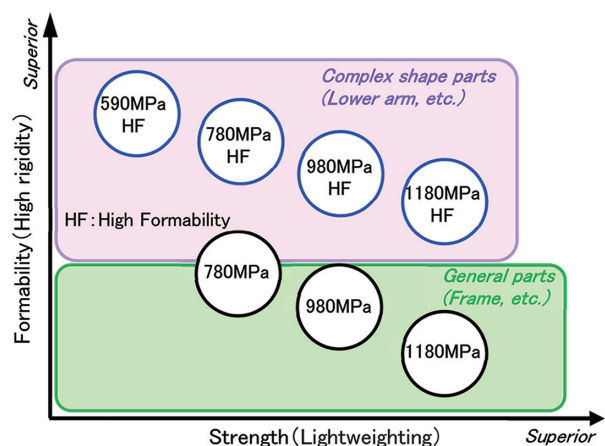


図9 高強度熱延鋼板の材料進化
Evolution of high strength hot-rolled steel sheets

- 13) 三日月豊 ほか：日本製鉄技報. (412), 52 (2019)
- 14) 日本製鉄プレスリリース, https://www.nipponsteel.com/news/20220719_100.html (2022年7月19日)
- 15) 高橋学 ほか：新日鉄技報. (378), 7 (2003)
- 16) 岡本力 ほか：まてりあ. 51 (1), 28 (2012)
- 17) 林邦夫 ほか：まてりあ. 52 (1), 17 (2013)



弘中 諭 Satoshi HIRONAKA
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
鋼材ソリューション研究第一室長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



岡本 力 Riki OKAMOTO
先端技術研究所 解析科学研究部長
博士(工学)