

連携記事

自動車の革新に貢献する先端鉄鋼材料とそれを支える応用技術

Advanced Steel Materials and its Application Technology Contributes to Automotive Innovation

JFEスチール(株)
スチール研究所 薄板研究部
主任研究員

木村英之
Hideyuki Kimura

JFEスチール(株)
スチール研究所 薄板加工技術研究部
主任研究員

新宮豊久
Toyohisa Shinmiya

JFEスチール(株)
スチール研究所 電磁鋼板研究部
主任研究員

大久保智幸
Tomoyuki Okubo

1 緒言

近年、自動車に求められる機能は多様化しており、次世代自動車技術やサービスを表した、Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared & Service (カーシェアリング)、Electric (電動化) の頭文字をつなげたCASEと呼ばれる新しい領域での技術革新が進んでいる。

この次世代技術の一角を担う電動化は、駆動系をガソリンエンジンのみから、ハイブリッドや電気モータへ変更することでCO₂排出抑制が期待されるため、環境問題に対して有効な技術である。従来、ガソリン車では燃費向上のため、鋼板の高強度化による車体軽量化が進められてきた。一方で、電気自動車はガソリン車に比べて航続距離が短いので、航続距離を延ばすために大容量のバッテリーが搭載される傾向にあるが、この場合、重量増が避けられないことから、電気自動車でも車体軽量化による航続距離の延長が重要な課題である。

航続距離の延長にはバッテリーに蓄えられた電気エネルギーの利用効率を上げることも有効である。このため、電気自動車の心臓部である駆動モータには高効率化が強く求められる。さらに、居住空間やバッテリー用スペースを最大化するためには限られたスペースに各部品を搭載する必要があることから、駆動モータには小型化も要求されている。

このようにCASEで代表される自動車の大きな変革に対して、車体軽量化やモータの高効率化、小型化を実現するための鉄鋼材料への要望が高まっている。本報では、これらの要望に応えるための自動車車体用の高張力鋼板および駆動モータ用の電磁鋼板について、最新の特徴的な高機能材料を

紹介する。さらに鋼板の高強度化に伴い難易度が高まる冷間プレス成形について、超高強度鋼板を使いこなすプレス成形技術や車体剛性・衝突性能向上技術などの利用技術を紹介する。

2 冷間プレス用超ハイテンと利用技術

2.1 1.5GPa級高張力冷延鋼板

衝突時の乗員保護と軽量化による燃費改善のため、980MPaを超える高強度鋼板を車体骨格部品に適用する動きが加速し、近年では1.5GPaを超える強度部品も増加している。1.5GPa以上の部品強度を得るための工法として、鋼板を高温に加熱して、そのままプレス型の中で急冷して高強度化する、熱間プレス工法が普及しているが、プレス後にマルテンサイト変態が完了するまで金型で押さえておかねばならないため、冷間プレス品と比べて生産能率が低いという課題があった。また、熱間プレス工法は高温への加熱や酸化スケール除去のための後処理、プレス成形後のレーザートリム等が必要のため、高額な設備コストもかかり、部品単価は冷間プレス品と比べて高価である。さらには加熱工程における熱エネルギーの消費が大きいと、省エネルギーの課題もあった。このような生産性、コストおよび環境負荷の問題から、冷間プレス用1.5GPa級高張力冷延鋼板が望まれていた。

JFEスチールは独自のWQ (Water-Quench) 方式の連続焼鈍プロセスの高い冷却能力を活用し、フルマルテンサイト型冷間プレス用1.5GPa級高張力冷延鋼板 (1.5GPa-MS) を開発した¹⁾。WQ方式を採用した開発鋼は炭素や焼入れ元素の添加を抑制できるため、効果的に高強度化が可能であり、遅れ

破壊特性や溶接性も優れた性能を有する。また急速冷却により鋼板の微視組織の不均一性を極限まで低減したことで、優れた穴広げ性(λ)や曲げ性(R/t)などの良好な冷間プレス成形性も有している。代表的な機械的特性およびミクロ組織を、表1、図1にそれぞれ示した。

図2は1.5GPa-MS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板厚で除した値)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、1.5GPa-MSのような超高強度材では遅れ破壊が懸念される。遅れ破壊は鋼中に侵入した水素に起因した鋼の脆化・破壊現象であり、その支配因子は、強度や組織などの材料因子、負荷応力、侵入水素量と考えられている。これら因

表1 1.5GPa-MSの機械的特性例

板厚 (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	λ (%)	限界 R/t
1.6	1270	1510	7	50	2.5

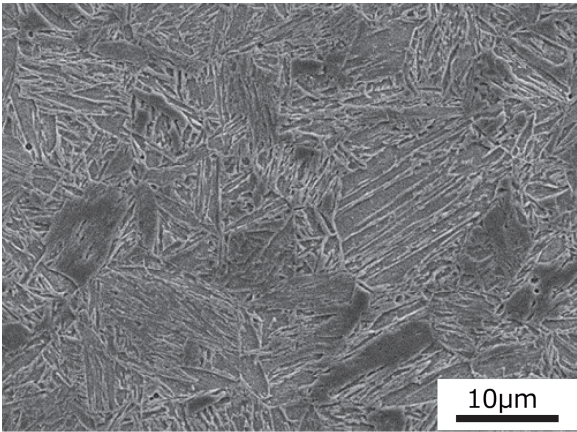


図1 1.5GPa-MSのミクロ組織

子の影響を表す方法として、負荷応力、塑性ひずみ、侵入水素の3次元マップを用いた材料評価が提案されている。図3はその評価結果を示した例であり、遅れ破壊は応力、ひずみ、拡散性水素のいずれも高い条件で発生するが、適用する条件を図中に当てはめることで、遅れ破壊の発生の危険性を定量的に評価できる²⁾。この遅れ破壊評価によって、1.5GPa-MSは通常の使用条件において十分な性能を有していることが確認できたため、実部品サイズでの遅れ破壊特性を評価することを目的に、1.5GPa-MSのモデル部品をpH1の塩酸水溶液に100時間浸漬した。その結果を図4に示す。浸漬後の部品において割れの発生は認められず、1.5GPa-MSは微視組織の不均一性を極限まで低減し、ミクロン単位で硬さが均一なため、水素脆化特性にも優れていることが確認できた。

1.5GPa-MSのもう一つの特徴は高い降伏強度であり、耐衝突性能の向上に大きく寄与する。図5に強度レベルが590MPa~1.5GPaの鋼板を用いて自動車部品を模擬したM字ハット部品(長さ400mm)を作製し、部品の中央部を半径R100の鋼製パンチで3点曲げ試験を行い、耐衝突特性と

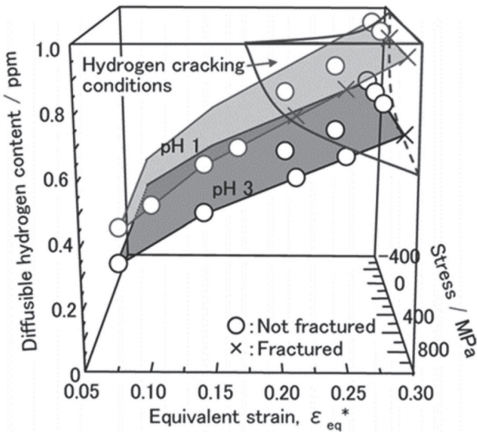


図3 遅れ破壊評価マップの例²⁾

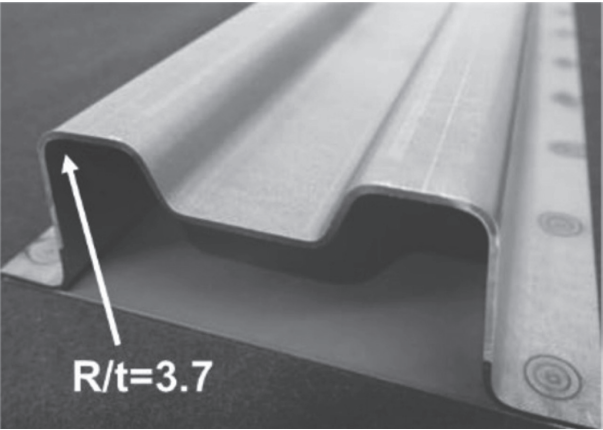


図2 モデル部品成形例

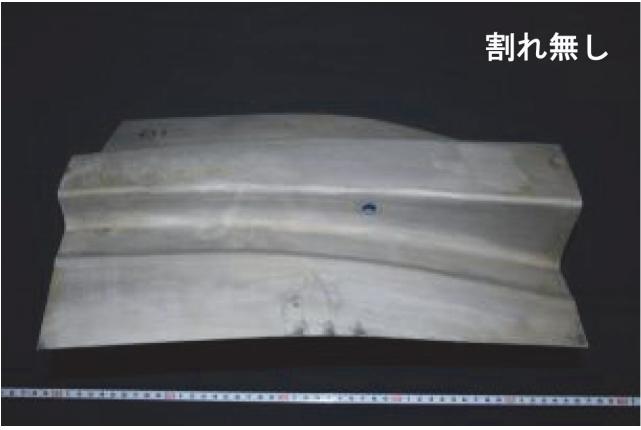


図4 モデル部品の遅れ破壊評価結果(pH1塩酸100時間浸漬後)
(Online version in color.)

降伏強度の関係で整理した結果を示す。1.5GPa-MSの降伏強度は約1300MPaと高いため、降伏強度が900-1000MPaの1180MPa材と等価の性能を維持しながら1.6mmから1.4mmにゲージダウンでき、約13%の軽量化効果が試算できる。また、1.5GPa級の熱間プレス材 (HS1.5GPa) の降伏強度は1000~1200MPaと想定³⁾されることから、同一強度の熱間プレス材を凌駕する性能を有することがわかる。このように1.5GPa-MSは優れた加工性と遅れ破壊特性を具備するため、クロスメンバーやルーフサイドレールを代表とする衝突時の変形抑制が必要なキャビンを構成する部品に適用が可能と考えられる。このような特性を有する1.5GPa-MSは冷間プレス用途として世界で初めて自動車骨格部材に採用され、実車への適用を開始した⁴⁾。

JFE スチールでは、超高張力鋼板の適用範囲を車体骨格部品のエネルギー吸収部品まで拡大するため、図6に示した樹脂を活用したマルチマテリアル化による超高強度スチール製のエネルギー吸収構造を提案した^{5,6)}。この新構造は車両衝突時の座屈・曲げ変形する際の変形部の破断抑制により、エネルギー吸収性能が大幅に向上する。このため、将来的な自動車のエネルギー吸収部品への超高張力鋼板の適用技術として期待される。

2.2 超高張力鋼板の成形技術

前節で述べたように、車体骨格部品の生産に980MPaを超える超高張力鋼板を用いた冷間プレス成形が用いられている。一般的に鋼板の高強度化に伴い、全伸び (EI) や穴広げ率 (λ) などの機械的特性が低下するため⁷⁾、プレス成形性は低下する。高張力鋼板の冷間プレス成形における主な課題は、①絞り張出し割れ／しわ、②伸びフランジ割れ、③寸法精度不良であり、それぞれの課題に対してCAEでの予測技術や対策技術が報告されている。

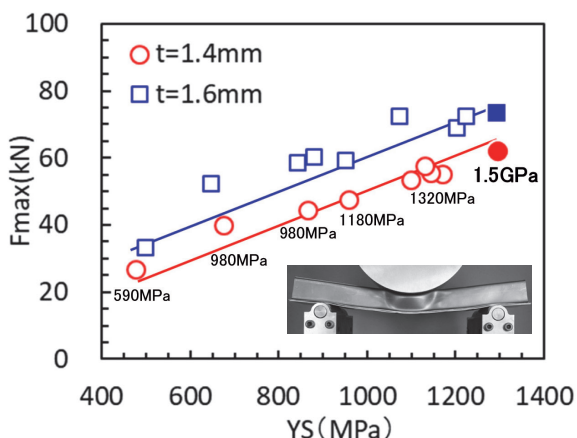


図5 耐衝突特性と降伏強度の関係 (Online version in color.)

例えば、①絞り張出し割れ／しわに関しては予成形技術を用いた新しいプレス工法が提案されている^{8,9)}。予成形技術は、複数のプレス成形工程において各工程の成形形状を最適化することで割れ／しわを改善する技術である。また、②伸びフランジ割れは材料の延性以外にせん断加工時のクリアランスやひずみ勾配が大きく影響することから、それらの影響を考慮した変形限界を得る手法が近年提案されている。この変形限界を用いることでCAEでの割れ危険度評価ができ、せん断条件の適正化などの対策手法の検討が可能である^{8,10)}。

③の寸法精度不良はスプリングバック (以後、S/B) が起因で発生する。S/B量は材料強度が高いほど大きくなることから、980MPaを超える超高張力鋼板を用いたプレス部品において特に問題となることが多い。従来は金型見込みによって寸法精度を確保していたが、S/Bの大きな超高張力鋼板では金型見込み技術のみでは不十分であり、S/Bそのものを低減させる対策技術が開発・採用されている。

S/Bはプレス下死点で発生する応力が離型時に解放されることで発生する現象である。複雑な形状の骨格部品では壁開きやねじれなど種々のS/Bが複合して発生する。S/B対策技術の開発にはS/Bの発生要因応力の分析が重要であることから、CAEを用いたS/B要因分析手法が開発されている¹¹⁾。図7にS/B要因分析の手順を模式的に示す。この技術は、通常の方法で行ったS/B解析結果と、ある特定領域の下死点応力をゼロに置き換えて行ったS/B解析結果とを比較することで、ある特定領域の下死点応力の影響度合を知ることが可能である。図8に980MPaフロントピラーR/F部品への適用例を示す¹¹⁾。図に示す18個の領域に分割し、各領域の下死点応力をゼロにして評価した結果、領域A3, B1, B2, E2において基準からの変化が大きく、下死点応力の影響度が強いことが分かる。

また、S/B対策技術の一例として、図9に示す長尺の湾曲部品で発生するS/Bに対しパウシグナー効果 (応力反転時に

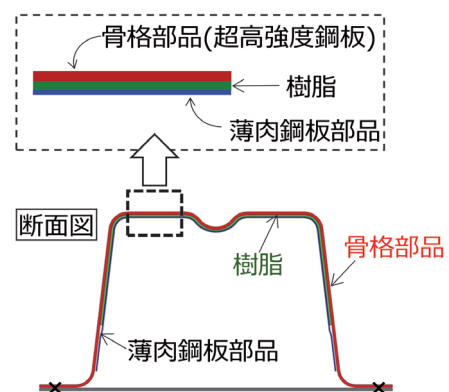


図6 高延性・高密着性樹脂と超高強度鋼板製の部品本体のサンドイッチ構造⁵⁾ (Online version in color.)

降伏応力が低下する現象)を活用して要因応力を低減する技術¹²⁾が報告されている。図10は上記技術を適用した1.5GPa-MSのルーフセンターR/F試作品であり、大きなS/B抑制効果を確認している。

上述の様々な技術が採用され、現在では多くの車種の骨格部品に超高張力鋼板が使用されており、最近では1.5GPa級の骨格部品が量産車に採用されている⁴⁾。

3 モータの高効率化に寄与する電磁鋼板

3.1 高周波用薄電磁鋼板

無方向性電磁鋼板は主に回転機の鉄心材料として使用される材料である。固有抵抗を高めて鉄損(励磁による発熱)を

低減するために、最大で3 mass %程度のSiが添加されている。モータの発熱を低減し高効率化をはかるには、鉄損の低い電磁鋼板を使用することが有効である。

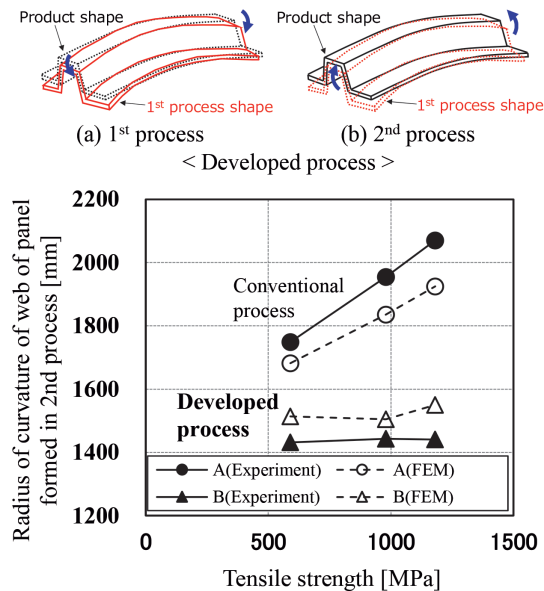


図9 バウシンガー効果活用S/B対策技術¹²⁾ (Online version in color.)



図10 ルーフセンターR/F試作品 (Online version in color.)

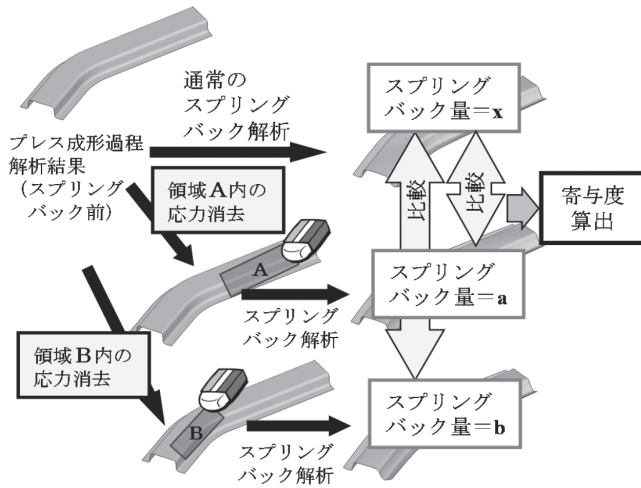


図7 S/B要因分析手法¹¹⁾

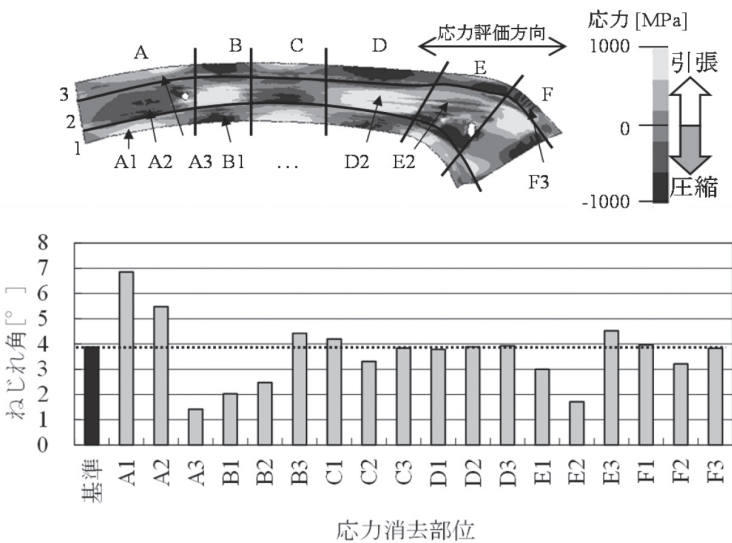


図8 フロントピラーR/Fへの適用例¹¹⁾

電気自動車の駆動モータには小型化が要求され、小型化による出力低下を補償するために高速回転化が進展すると予想される。これに伴い鉄心材料として使用される電磁鋼板の励磁周波数も高くなり、自動車用電磁鋼板には特に高周波鉄損の低減が要求される。電磁鋼板の鉄損はヒステリシス損と渦電流損から構成されるが、このうち渦電流損は周波数の2乗に比例することから、高周波化にともない急激に増加する。この渦電流損を低減するためには板厚の低減が有効である。図11に薄電磁鋼板の磁気特性例を示す¹³⁾。板厚0.35mmの最高級材に比べて薄電磁鋼板では鉄損が10~20%程度低減されている。これらの低鉄損材料を使用することによりモータの高速回転時の発熱を低減できるため、モータのさらなる小型化・高効率化が可能となる。

3.2 高い素鋼板

前述の通り、一般的な電磁鋼板には最大で3 mass %程度のSiが添加されている。一方、Si含有量を6.5 mass %まで増加させることで優れた軟磁気特性が得られることが古くから知られていた。しかし、Si含有量が高くなると材料が急激に脆くなり冷間圧延を行うことが困難になるため、工業的な生産は困難とされていた。これに対し、JFEスチールはCVD法（化学気相蒸着法）による連続浸珪技術を確立し、6.5%けい素鋼板（JNEX[®]）の工業生産を世界で唯一実施している。図12にCVD法による6.5%けい素鋼板の製造方法の概要を示す¹⁴⁾。またこのCVDプロセスを応用し、板厚方向にSi濃度勾配を有するSi傾斜磁性材料（JNHF[®]）も開発された。これはSi濃度差による透磁率差を利用して磁束を鋼板表面に集中させ、渦電流損を低減した材料であり、特に10 kHz以上の周波数領域では6.5%けい素鋼板よりも低い鉄損を示すという特長がある。

これら高い素鋼板は極めて低い鉄損を有するという特長

があるが、一方で、モータの高トルク化の観点から鉄心材料には高磁束密度化も求められる。近年、JFEスチールは低鉄損と高磁束密度を両立する新しいSi傾斜磁性材料（JNRF[®]）を開発した¹⁵⁾。開発材と従来の電磁鋼板の磁気特性を図13に示す。開発材は浸珪量とSi拡散条件の最適化によるSi濃度分布のコントロールおよび結晶方位制御により磁束密度を向上させた材料であり、従来の6.5%けい素鋼やSi傾斜磁性材料に比べて高い磁束密度を示すという特長がある。

開発材と20JNEH1500（従来3%けい素鋼、0.2 mm厚）の磁気特性データを用いて、8極48スロットIPMモータで数値解析を行った結果の例を図14に示す¹⁶⁾。高速回転に対応する条件において、0.2 mm厚の開発材では0.66ポイント、0.1 mm厚の開発材では1.2ポイントのモータ効率向上が認められている。これらのモータ効率向上は、低鉄損材を用いたことでモータ駆動時の発熱が減少したことに対応するものである。開発材は従来3%けい素鋼と同等の磁束密度を有するため、モータのトルクを低下させることなく、モータの小型化・

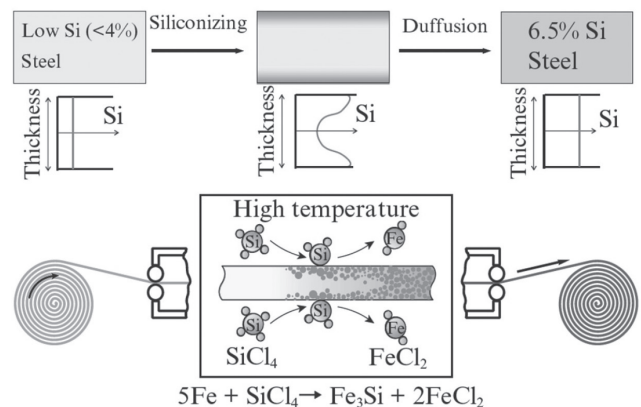


図12 6.5% Si鋼板製造方法の概要¹⁴⁾

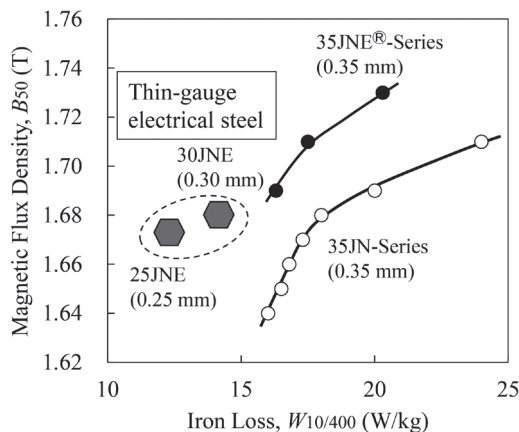


図11 薄電磁鋼板の磁気特性¹³⁾

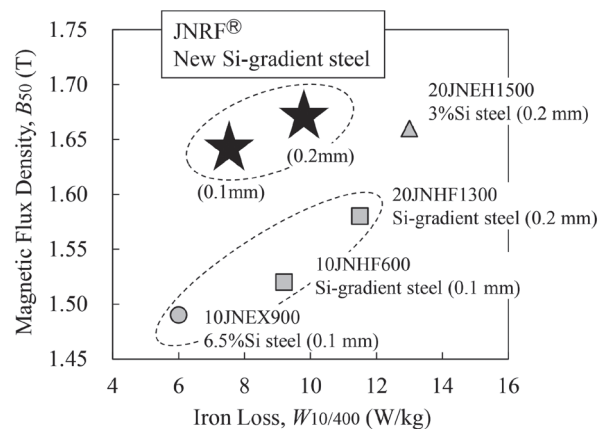
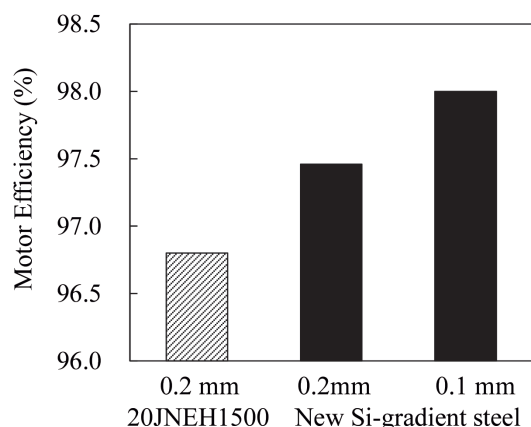


図13 開発材の磁気特性¹⁵⁾

図14 モータ効率解析結果¹⁶⁾

高効率化に寄与できると期待される。

4 結言

本稿で紹介した冷間プレス用1.5GPa級高張力鋼板は、部品の衝突性能が飛躍的に向上するため、部品性能を維持しつつ、薄肉・軽量化が可能となり、1180MPa材からの材料置換で約13%の軽量化効果が期待される。また車体軽量化により燃費向上が達成されるだけでなく、鋼板の使用量そのものが削減されることで鋼板製造時や輸送時のCO₂排出量削減にも貢献するため、ライフサイクル全体での省エネに貢献できる。この1.5GPa級高張力鋼板の冷間プレス成形における割れ／しわ、伸びフランジ割れ、スプリングバックに対する様々な対策技術も開発され、これらの成形技術によって1.5GPa級高張力鋼板が冷間プレス用途として世界で初めて自動車骨格部材に採用された。

今後拡大が予想される電気自動車においても、車体の軽量化やモータの高効率化のニーズは高い。CVD法による連続浸珪技術を活用して開発された低鉄損と高磁束密度を両立する新しいSi傾斜磁性材料は自動車用駆動モータのさらなる小型化・高効率化に寄与し、自動車の電動化推進に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 吉岡真平, 小野義彦, 船川義正: 日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす, 97 (2018), 244.
- 2) 田路勇樹, 高木周作, 吉野正崇, 長谷川浩平, 田中靖: 鉄と鋼, 95 (2009) 12, 887.
- 3) O.Çavuşoğlu, O.Çavuşoğlu, A.Gürkan Yılmazoğlu, U.Üzel, H.Aydınc and A.Güral: J. Mater. Res. Technol., 9 (2020) 5, 10901.
- 4) T.Kondo: Materials in car body engineering 2021, Virtual Conference, (2021).
- 5) ニュースリリース, https://www.jfe-steel.co.jp/release/2021/03/210302_2.html, (2021年3月2日).
- 6) 樋貝和彦, 塩崎毅, 玉井良清, 馬淵直樹, 北村繁明: 自動車技術会論文集, 52 (2021) 1, 160.
- 7) 占部俊明, 細谷佳弘: 塑性と加工, 46 (2005), 534.
- 8) 新宮豊久, 卜部正樹, 藤井祐輔: JFE技報, 41 (2018), 34.
- 9) 藤井祐輔, 卜部正樹, 山崎雄司, 玉井良清: 塑性と加工, 61 (2020) 710, 63.
- 10) 飯塚栄治: 塑性と加工, 57 (2016) 662, 220.
- 11) 卜部正樹, 石渡亮伸, 平本治郎: ふらすとす, 1 (2018) 12, 840.
- 12) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎: 塑性と加工, 60 (2019) 701, 155.
- 13) 尾田善彦, 大久保智幸, 高田正昭: JFE技報, 36 (2015), 6.
- 14) 笠井勝司, 浪川操, 平谷多津彦: JFE技報, 36 (2015), 12.
- 15) ニュースリリース, <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2020/12/201203.html>, (2020年12月3日).
- 16) 財前善彰, 千田邦浩, 尾田善彦, 吉崎聡一郎, 大久保智幸, 宮本幸乃: 令和3年電気学会全国大会, 5-040 (2021).

(2021年9月21日受付)