

技術展望

# 環境に優しい自動車用ステンレス鋼板

## Eco-friendly Stainless Steel Sheets for Automobiles

濱田 純一\*  
Jun-ichi HAMADA

林 篤剛  
Atsutaka HAYASHI

### 抄 録

パワートレイン、燃料および燃焼方式の多様化とその先にあるカーボンニュートラルに貢献可能な基幹素材として、ステンレス鋼は耐食性、耐熱性、加工性、耐水素脆化性、耐摩耗性および高強度といった多彩な特性を活かして次世代自動車に貢献する。本報では、自動車の各部品系列の中で特に環境対策として用いられる独自ステンレス鋼板およびそれを素材とした鋼管の適用について概説するとともに、今後の社会情勢の変化、多様なニーズおよび更なる環境対策に対応可能なソリューション提案について展望する。

### Abstract

As a core material that can contribute to the diversification of powertrains, fuels and combustion method, and ultimately to carbon neutrality, stainless steel will contribute to the next-generation automobiles by utilizing its diverse properties, such as corrosion resistance, heat resistance, formability, hydrogen embrittlement resistance, wear resistance, and high strength. This paper provides an overview of the application of unique stainless steel sheets and pipes, which are used particularly as environmental measures among the various parts of automobiles, and looks ahead to future changes in social conditions, diverse needs, and proposed solutions that can respond to further environmental measures.

## 1. 緒 言

自動車におけるステンレス鋼の使用は装飾用モールから始まり、排気ガス規制の強化、軽量化・燃費向上ニーズから排気系部品を中心に適用が拡大した<sup>1)3)</sup>。この他、燃料系部品等も併せてステンレス鋼の使用量は1台当たり20~30kgである<sup>1)3)</sup>。内燃機関を搭載するICE (Internal Combustion Engine) 車、HV (Hybrid Vehicle) 車およびPHV (Plug-in Hybrid Vehicle) 車における排気系の各部品に使用されることで地球環境対策に大きく貢献している素材である。また、近年の自動車産業は“100年に1度の変革期”にあると言われており、“コネクティッド (Connected)”, “自動運転 (Automatic)”, “シェアリング (Sharing)”, “電動化 (Electric)”といった“CASE”と呼ばれる新しい領域で技術革新が進んでいる。この中で“電動化”は、地球の気候変動を抑制するカーボンニュートラルを2050年までに実現するために、図1に示す様に各種パワートレインの中で構成比率が大幅に増加すると予測されている<sup>4)</sup>。一方でパワートレインの構

成比率は各国毎に大きく異なる予測が成されている<sup>5)</sup>。これは、BEV (Battery Electric Vehicle) やFCV (Fuel Cell Vehicle) の場合、インフラ整備、航続距離等の他、バッテリー生産のためのCO<sub>2</sub>排出の影響があると思われる。国内では自動車メーカーによって戦略は異なるものの、“2050年カー

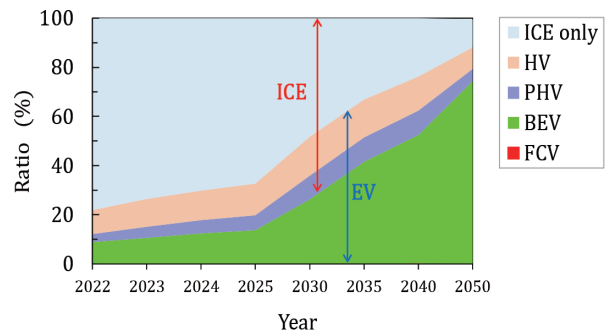


図1 世界の乗用車生産におけるパワートレインの構成比率の推移・予測<sup>4)</sup>

Trend and forecasts of powertrain composition ratios in global passenger vehicle production<sup>4)</sup>

\* 山口技術研究部長 博士(工博) 山口県光市大字島田3434 〒743-8550

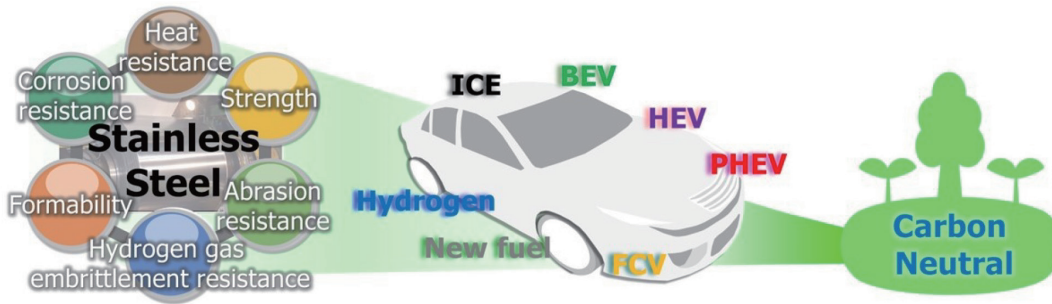


図2 ステンレス鋼の特徴と多様化する自動車への貢献  
Characteristics of stainless steel and its contribution to diversifying automobiles

ボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”の中では、“特定の技術に限定することなく、パワートレインやエネルギー・燃料等を最適に組み合わせ、多様な道筋を示す必要がある”と掲げられている<sup>9)</sup>。また、ICE車の燃料についてもバイオ燃料、合成燃料(e-fuel)等の他、アンモニアや水素を燃焼させるエンジン車が開発される等、パワートレインのみならず燃料および燃焼方式の多様化も進んでいる。

ステンレス鋼は様々な元素を組み合わせしつづ、製造プロセスを最適化することによって多彩な特性を引き出すことが可能な素材である。図2にイメージを示す様に、ステンレス鋼は多彩な特性を活用してパワートレイン、燃料および燃焼方式の多様化とその先にあるカーボンニュートラルに貢献可能な基幹素材と言える。本報では、自動車の各部品系列の中で特に環境対策として用いられる独自ステンレス鋼板およびそれを素材とした鋼管の適用について概説するとともに、今後の社会情勢の変化、多様なニーズおよび更なる環境対策に対応可能なソリューション提案について展望する。

## 2. 排気部品

エンジンから出た排気ガスはエキゾーストマニホールドで集合され、各種環境対応部品で浄化された後にマフラーを通り排出される。これらの部品に適用される素材に対する要求特性は多岐に渡っているが、ホットエンドと呼ばれるエンジンに近い部品は主として耐熱性、コールドエンドと呼ばれるマフラーに近い部品は主として耐食性が要求される。

### 2.1 エキゾーストマニホールド

エンジン直下のエキゾーストマニホールドを通る排気ガスの温度は700~950℃と言われており、主に高温強度、耐酸化性、高温疲労、成形性および溶接性が要求されるが、オーステナイト系ステンレス鋼よりも熱膨張係数が小さいフェライト系ステンレス鋼が用いられることが多い<sup>7)</sup>。この中でNSSC® FHZ (13Cr-1Si-0.4Nb)<sup>8)</sup>が汎用的に適用されており、排気ガス温度の高温化や薄肉・軽量化対応として上

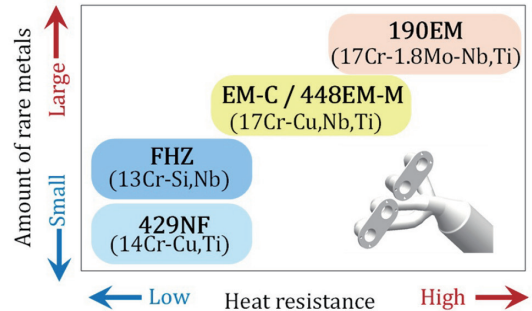


図3 ホットエンド用耐熱フェライト系ステンレス鋼の位置づけ

Positioning of heat-resistant ferritic stainless steel for hot-end parts

級鋼であるNSSC 190EM(17Cr-1.8Mo-0.5Nb-0.1Ti)<sup>9)</sup>がある。これらはNbやMoの固溶強化を主体的に利用して高温強度や熱疲労寿命を向上させている。これに対して、レアメタルであるNbやMoを低減してCu添加をキー技術としたNSSC 429NF (14Cr-1.2Cu-0.1Ti)<sup>10-12)</sup>、NSSC EM-C (17Cr-1.4Cu-0.5Nb-0.1Ti)<sup>13)</sup>、NSSC 448EM-M (17Cr-1.2Cu-0.3Mo-0.5Nb-0.1Ti)<sup>10,14,15)</sup>をメニュー化し、省合金化、薄肉・軽量化ニーズに対応している。これらの鋼に含有されるCuは製品の出荷段階では固溶状態であるが、排気ガスにより部品が高温化した際にCu粒子として析出し、析出強化を発現するというユニークな技術であり、Cuの析出・粗大化<sup>16-18)</sup>、高温変形における転位との相互作用<sup>19)</sup>、熱疲労過程のCu粒子の形態変化<sup>20)</sup>、大気および排気ガス雰囲気における耐酸化性への影響<sup>21,22)</sup>等、数多くの基礎研究の上で実用化された。また、NSSC 190EMよりも高耐熱化したNSSC EM-T (17Cr-1.5Cu-2Mo-1.3W-0.5Nb)<sup>23)</sup>の開発も完了しており、更なる高排温化にも対応可能なメニューを構築している。これら耐熱フェライト系ステンレス鋼の位置づけを図3に示す。車種やエンジンによって排気ガス温度や部品拘束状態が異なるため、多彩なラインアップから鋼種選択されることになる。顧客での鋼種選択においてエンジン耐久試験が行われるが、日本製鉄(株)では熱疲労損傷に関する基礎研究に基づく寿命予測技術<sup>24-26)</sup>の他、耐酸化性や成形性を考慮して最適鋼種の提案を行い、排気部品設計・開発費用の削減や期間短縮にも貢献する。部品形状も複雑

かつ多様で比較的厚手であるため、成形性の向上ニーズに対しては製造条件の最適化による深絞り性の向上<sup>14,15)</sup>を行っているとともに、FEM (Finite Element Method) シミュレーションを活用したソリューション提案を行っている<sup>27)</sup>。また、近年では化石燃料を水素やアンモニアで代替する水素エンジンやアンモニアエンジンの開発も成されており、従来とは異なる燃焼環境における適材選定の技術開発も進めている。

## 2.2 ターボチャージャー

ターボチャージャーは現在では主にダウンサイジングの観点から搭載され、ハウジング、ウエストゲートバルブ、ノズルプレート・マウント等の複数の部品にはオーステナイト系鋳鋼や Ni 基合金が適用されることが多い。近年では薄肉・軽量化、ターボ性能向上の観点から板金化の流れがあり、耐酸化性やクリープ特性に加えて、高温撓動性に優れた SUSXM15J1 (19Cr-13Ni-3Si) をベースとした NSSC LHT, 305B が VG (Variable Geometry) ターボの内部部品であるノズルプレート・マウントに採用されている<sup>28)</sup>。この鋼に添加される Si は外部酸化によって形成される層状酸化皮膜がペーンとの撓動時の凝着摩耗を抑制する効果を有し、クロマイジング処理等の表面処理を省略することを可能とする。また、タービンとの仕切り板で耐熱性の他、加工性や表面平滑性が要求されるバックプレートには SUS310S (25Cr-20Ni) が適用されており、オーステナイト系ステンレス鋼板による板金化が進んでいる。また、N 添加による高温強化に関する新知見<sup>29,31)</sup>を活用し、更に高耐熱性能を有する NSSC 701 (24Cr-12Ni-2Si-0.6Mo-0.1C-0.2N) も開発されている。図 4 に示す様に NSSC 701 は高温強度が高い他、耐酸化性、高温疲労、クリープ特性および高温撓動性にも優れている<sup>32)</sup>。

## 2.3 EGR クーラー

EGR (Exhaust Gas Recirculation) システムは、排気ガスの一部を吸気側へ再循環させて燃費の向上を図る装置で、EGR クーラーは排気ガスを冷却することで NO<sub>x</sub> 発生抑制、エンジンの損失低減およびノッキング防止のための部品である。主としてコスト低減の観点から、従来の SUS304 や SUS316 といったオーステナイト系ステンレス鋼から図 5 に示す様に NSSC 442M3, NSSC 180 (19Cr-0.4Cu-0.4Nb) や NSSC 444M1 (19Cr-2Mo-0.4Nb) といった耐凝縮水腐食性に優れたフェライト系ステンレス鋼板への切り替えが進んでいる。EGR クーラーの内部構造は熱交換効率を高めるために複雑であり、接合不良は水漏れに繋がるため高いろう付け性が要求される。また、熱交換部でのろうの濡れ広がり性について表面エネルギーの観点から考察され、微量の Al, Ti 量を制御して優れたろう付け性が得られている<sup>33)</sup>。更に、ケースやコンについて深絞り性や穴抜け性が要求され、製造プロセスの最適化による高 r 値フェライト系

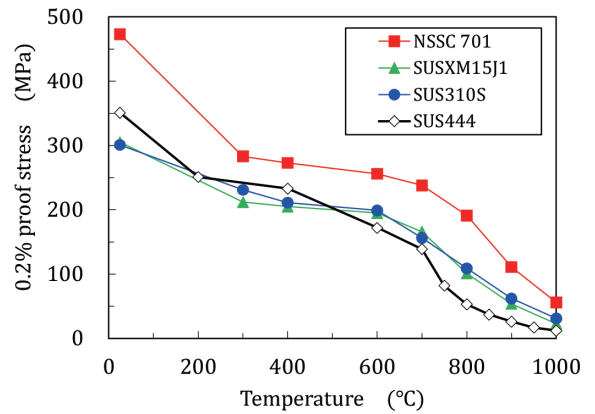


図 4 NSSC 701 と他鋼種の高温強度の比較<sup>32)</sup>  
Comparison of high-temperature strength between NSSC 701 and other stainless steel sheets<sup>32)</sup>

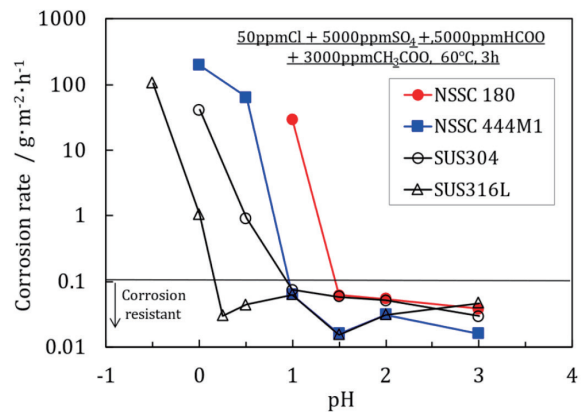


図 5 ステンレス鋼の耐凝縮水腐食性  
Condensation corrosion resistance of stainless steels

ステンレス鋼板の適用が有効である。

## 2.4 フレキシブルチューブ

フレキシブルチューブは、排気系部品の熱歪の緩和と振動を制御する部品である。冬季に融雪塩が使用される場合、加熱されたフレキシブルチューブ外面に融雪塩が付着して腐食する高温塩害腐食が課題となる。これに対して塩化物との反応、Si や Mo 等の合金元素の影響が基礎的に研究され<sup>34,35)</sup>、既存の SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo) や SUSXM15J1 (19Cr-13Ni-3Si) より高耐食で溶接性にも優れた NSSC 307FX (17Cr-13Ni-3Si-1.5Mo)<sup>36)</sup> が実用化され、薄肉・軽量化や排気ガスの高温化に対応している。

## 2.5 触媒コンバーター

排気ガスに含まれる CO, NO<sub>x</sub>, HC を触媒と接触させて無害化する環境対応部品である。触媒コンバーターはフェライト系ステンレス鋼板製のシェル内部にハニカム形状の触媒担体が挿入されている。シェルには耐熱性が要求されるため、エキゾーストマニホールドに使用される耐熱フェライト系ステンレス鋼板が用いられる。貴金属触媒を担持

させる触媒担体にはセラミック担体とメタル担体があり、四輪車はセラミック担体、二輪車はメタル担体が主流である。メタル担体には高 Al 添加フェライト系ステンレス鋼板 NSSC 205M1 (20Cr-5Al-REM)<sup>37)</sup>、NSSC 21M (18Cr-2Al-0.5Si-0.2Ti)<sup>38)</sup> および NSSC NCA-1 (18Cr-3Al-0.2Ti) が使用されている。

## 2.6 尿素 SCR

尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) システムは、NO<sub>x</sub> を窒素と水に分解して排出ガスを浄化する装置で、ディーゼルエンジンを搭載したトラック、バス、一般車両、建設機器等に搭載されている。ディーゼルエンジンが排出した炭化水素と一酸化炭素を、酸化触媒で無害化するとともに、高温下で尿素水を噴射し SCR 触媒という触媒に通すことで加水分解された NH<sub>3</sub> と NO<sub>x</sub> が化学反応を起こし、大気は無害な N<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O になる。シェル内の凝縮水腐食対策として NSSC 439 (17Cr-0.2Ti)、NSSC 436S (17Cr-1Mo-0.2Ti) が使用されるが、尿素水吹付部で腐食損傷が生じる箇所には更に耐食性に優れた NSSC 447M1 (30Cr-2Mo-0.2Nb-0.2Ti) が適用される場合がある。

## 3. 燃料部品

### 3.1 燃料給油管

北米での LEV II、P-ZEV 等の排出ガス規制により、燃料タンクや燃料給油管等の燃料系部品には耐久性に加え、大気中への燃料の漏れ防止の観点から燃料透過率が規制されている。樹脂の場合、燃料透過率ゼロを達成するためには積層による製造コスト高や環境リサイクル性の課題があるため、鉄系材料が有効である。フェライト系ステンレス鋼は応力腐食割れが発生しないが、隙間腐食の進展を考慮する必要があり、カチオン電着塗装された NSSC 436S (17Cr-1Mo-0.2Ti) 製燃料給油管が採用されている<sup>39), 40)</sup>。また、燃料給油管の拡管部は素管の 2 倍以上の一体拡管が成されることから、TIG (Tungsten Inert Gas)、ERW およびレーザー溶接管には優れた拡管性が必要とされる。これに対して、素材に高加工材を適用することにより 2D 拡管や複雑形状への加工を可能にしている。この高加工材は、成分および一貫製造条件の最適化により {111} 集合組織を先鋭かつ板厚方向に均一に発達させており、平均 r 値が極めて高い<sup>41)</sup>。図 6 に TIG 管の拡管性に及ぼす素材の平均 r 値の影響について、FEM 解析した例を示す。高加工材の適用により鋼管の成形自由度の向上や一体成型化を図ることが出来る。

### 3.2 バイオ燃料

バイオ燃料は化石燃料の代替として既に利用されており、エタノールとガソリンを混合したバイオエタノール、脂肪酸メチルエステルと軽油を混合したバイオディーゼルがある。各種バイオ燃料に対するステンレス鋼の耐食性が

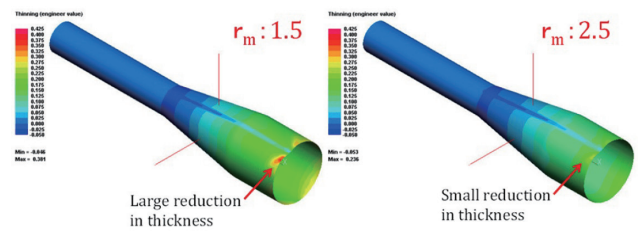


図 6 鋼管の拡管性に及ぼす r 値の影響  
Effect of r-value on expandability of pipe

評価され、最も過酷な条件を想定した場合においても NSSC 436S (17Cr-1Mo-0.2Ti) や NSSC 190M (19Cr-2Mo-0.2Nb-0.1Ti) は優れた耐食性を示すことが報告されている<sup>42)</sup>。

## 4. 電動部品

### 4.1 電池ケース

EV 車等に搭載される車載用 Li イオン電池 (LIB: Lithium-ion Battery) のケースは円筒型、角型およびパウチ型があり、素材としてはアルミ製が多い。一方で図 7～9 に示す様に強度、ヤング率および高サイクル疲労強度はアルミよりもステンレス鋼の方が圧倒的に高く、剛性、疲労特性および衝突安全性に優れている。ここで、A3003 は Mn を添加したアルミで、A3003-O は焼きなまし材、A3003-H は加工硬化材である。例えば、剛性はヤング率、板厚、耐力が影響するが、ステンレス鋼への転換により 30～64%の薄肉化が可能となり、その分電解液容量を増やすことが出来るため、エネルギー密度の増加に有効である。また、アルミは融点が 600℃程度であるため、短絡により電解液と負極が反応 (80～90℃)、セパレーターのメルトダウン (120℃)、正極の熱分解 (220～300℃) 後、急激にアルミの融点を超えて熱暴走の連鎖が生じ、発火に至る<sup>43)</sup>。ステンレス鋼はアルミに比べて高温強度が極めて高く、融点も 1500℃程度のため、熱暴走時の類焼性の面でも優位である<sup>44)</sup>。この様に、ステンレス鋼はアルミよりも電池の安全性向上にも貢献出来、NSSC 439 (17Cr-0.2Ti) が角型電池ケースに採用されている。電解液中における Fe 溶出量に及ぼす合金元素の影響について、図 10 に示す。ここで電解液は 1M-LiPF<sub>6</sub>, EC (エチレンカーボネート): DEC (ジエチルカーボネート) = 1:1 体積比、1～5mL とし、H<sub>2</sub>O を 300ppm 添加、試験温度は 25℃と 80℃である。Cr、Ni および Mo 添加量に応じてステンレス鋼の耐食性は向上し、電解液に溶出する Fe イオン量は減少しており、電解液の特性に応じて鋼種選定することが可能である<sup>45)</sup>。

### 4.2 集電体

ステンレス鋼箔は高い耐食性や強度、広い電位窓等、他の金属箔には無い優れた特性があるため、電池の構成材料の一つである集電体に適用することにより、電池性能の大幅な向上が期待出来る。具体的には、高容量な正極および

負極の実現や飛躍的な長寿命化等の実現が可能となる。また、高エネルギー密度化と安全性の観点から精力的に研究されている全固体 LIB においても各種ステンレス鋼は優れた耐食性を示すことが報告されている<sup>46)</sup>。

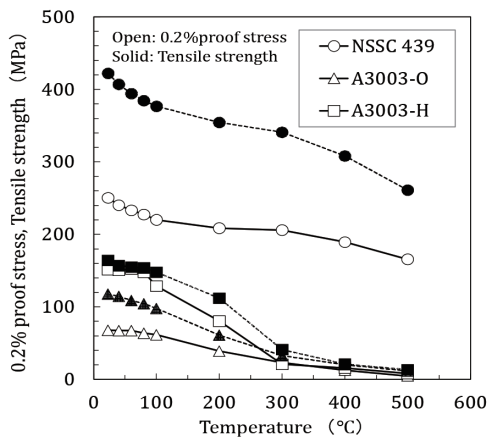


図7 フェライト系ステンレス鋼 (NSSC 439) とアルミ (A3003) の高温強度の比較  
Comparison of high-temperature strength between ferritic stainless steel (NSSC 439) and aluminum (A3003)

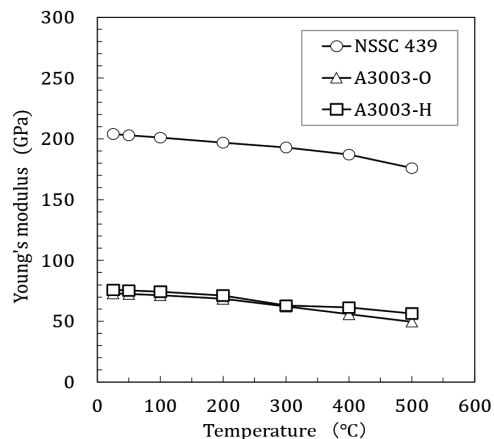


図8 フェライト系ステンレス鋼 (NSSC 439) とアルミ (A3003) のヤング率の比較  
Comparison of Young's modulus between ferritic stainless steel (NSSC 439) and aluminum (A3003)

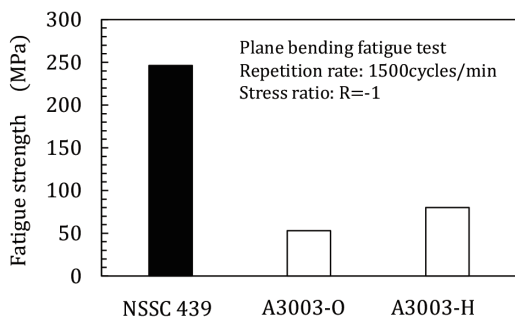


図9 フェライト系ステンレス鋼 (NSSC 439) とアルミ (A3003) の常温疲労強度 (10<sup>7</sup> サイクル) の比較  
Comparison of room temperature fatigue strength (10<sup>7</sup> cycles) between ferritic stainless steel (NSSC 439) and aluminum (A3003)

### 4.3 モーター

EV 車はバッテリーから供給される電気を使ってモーターを駆動し、車輪に直接動力を伝える。このモーターには永久磁石型同期モーター、巻線界磁型同期モーター、誘導モーターといった種類があるが、ローターの両サイドにはエンドプレートが使用されており、SUS304 やアルミが使用されている。エンドプレートの機能は主にノイズバイブレーションの低減、ローターコアの保持、磁束の漏れ防止であり、高強度材および非磁性材の適用により薄肉・軽量化およびモーター効率の向上が期待出来る。また、部品製造において打ち抜き性等の精密加工性が要求される場合もあり、図 11 に示す様な非磁性オーステナイト系ステンレ

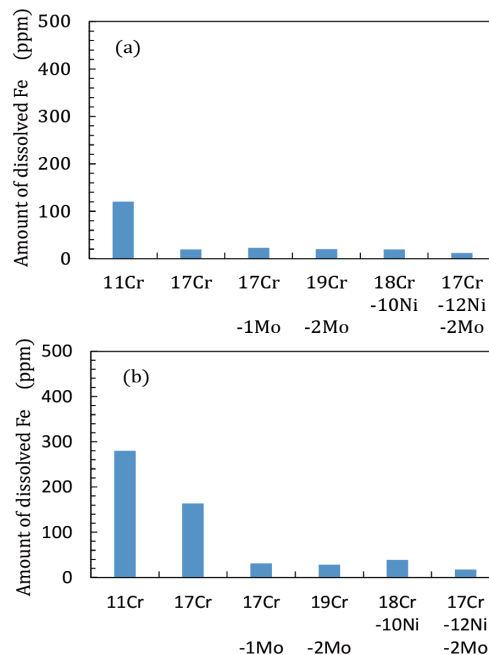


図10 (a) 25°Cと (b) 80°Cの電解液に500時間浸漬した後のFe溶出量に及ぼす合金元素の影響<sup>45)</sup>  
Effect of alloying elements on amount of Fe dissolved after immersion test in electrolyte for 500 hours (a) at 25°C and (b) at 80°C<sup>45)</sup>

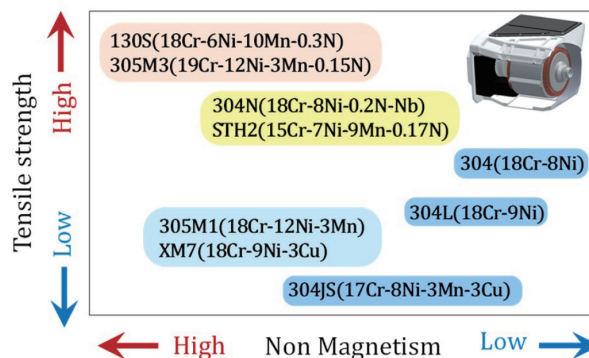


図11 モーター用非磁性オーステナイト系ステンレス鋼の位置づけ  
Positioning of non-magnetic austenitic stainless steels for motor parts

ス鋼板をメニュー化し、各種ニーズに対応している。

## 5. 熱マネジメント部品

### 5.1 排熱回収器

排熱回収器とは、エンジンの排気ガスから熱を回収して有効活用する熱マネジメント部品であり、暖気時間の短縮や燃費向上を図るために搭載されている。内部は排気流路や冷却流路が複雑であるが、耐食性に優れた NSSC 436S (17Cr-1Mo-0.2Ti) や NSSC 190M (19Cr-2Mo-0.2Nb-0.1Ti) が採用され、熱設計の最適化や小型・軽量化が進んでいる。

### 5.2 熱交換器、冷却器

EV の課題の一つがバッテリーの長寿命化であり、使用時や特に急速充電時の発熱が寿命を低下させることから、熱交換器や冷却器の様な熱マネジメント部品の搭載が進んでいる。これらの部品には熱伝導率に優れたアルミが主に用いられているが、積層型プレート熱交換器や冷却器の様に板厚方向に伝熱する場合、板厚が 0.5mm 以下の様な薄手材では熱交換性能がアルミと同等であることが確認されている<sup>47)</sup>。また、先述した様にフェライト系ステンレス鋼板はアルミよりも高強度であるため、図 12 に示す様に積層型プレート熱交換器の耐圧性は約 10 倍高くなる事が計算されており、今後、冷媒の種類や冷却能に応じた部品内部の高圧化、薄肉・小型化のニーズに対して、ステンレス鋼板の適用が有望である<sup>47)</sup>。

## 6. 水素部品

### 6.1 高圧水素ガス用

水素をエネルギー媒体とした水素エネルギー社会の構築に向けて様々な取り組みが成されており、水素を燃料とする FCV の水素貯蔵方式としては高圧水素ガスが主流となっている。オーステナイト鋼はマルテンサイト鋼やフェライト鋼よりも水素ガス環境脆化が生じ難く、高圧水素ガス容器のみならず、水素ガス経路となる容器から燃料電池までの配管、継手、圧力調整弁等の各種バルブ類において、オーステナイト系ステンレス鋼の適用が期待される。また、高圧水素ガスを自動車に供給する水素スタンドにおいても、蓄圧器からディスペンサーまでの各種部品への適用が期待される。日本製鉄では図 13 に示す様に、高圧水素ガス環境の例示基準を満足するためにオーステナイト安定度の指標である Ni 当量 (Ni+0.72Cr+0.88Mo+1.11Mn-0.27Si+0.53Cu+12.93C+7.55N) を高めた SUS316L (316L-HiNi, Ni 当量 >28.5) に加え、SUS316L に比較して Cr, Ni, Mo 添加量を 40%削減することで価格安定性に優れ、N 添加により高強度化した NSSC STH<sup>®</sup>2 (15Cr-7Ni-9Mn-0.17N, Ni 当量 >30.2) の厚板および薄板を商品化している<sup>48-51)</sup>。これらの拡散接合材や TIG 溶接材に対しても高圧水素ガス中において絞りの低下が生じ難く、優れた耐水素脆性を有することが確認

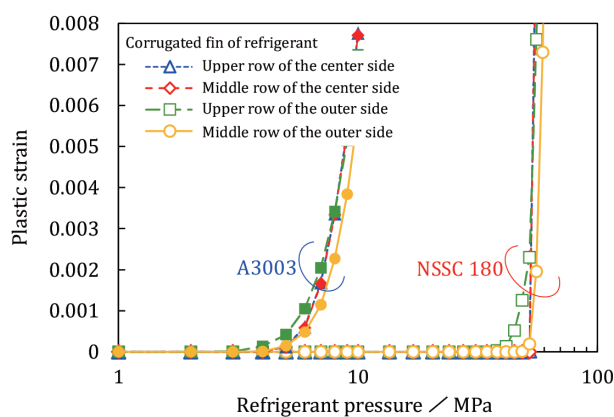


図 12 フェライト系ステンレス鋼 (NSSC 180) とアルミ (A3003) をコルゲートフィンに用いた場合の冷媒圧力と相当塑性歪の関係<sup>47)</sup>

Effect of refrigerant pressure on plastic strain of corrugated fins made of ferritic stainless steel (NSSC 180) and aluminum (A3003)<sup>47)</sup>

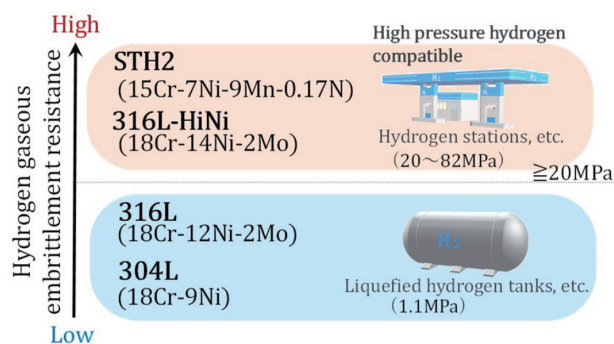


図 13 耐水素ガス脆化オーステナイト系ステンレス鋼 Hydrogen gas embrittlement resistant austenitic stainless steels

されており、FCV や水素ステーションにおける溶接構造部品への適用が期待される。

### 6.2 セパレーター、バイポーラープレート

FCV は PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) で発電し、発電を担っているのが FC スタックである。このスタックは平板状のセルを積層したもので、スタックに使用されるセパレーター材料として、カーボンよりも安価で成形性にも優れたオーステナイト系ステンレス鋼板が注目されている。セパレーターは、電解質膜から硫酸イオンやフッ化物イオンが溶出し、塩化物イオンも混入する環境となる。また、カソード側の電位は 0.6~1V 程度まで上昇する。低 Ni 省 Mo 型開発鋼 218N (21Cr-8Ni-0.15N) は、PEFC 環境を模擬した環境で SUS304 や SUS316L よりも耐金属溶出性に優れており、省資源でコストパフォーマンスに優れた素材である<sup>52)</sup>。

## 7. 制動部品

### 7.1 二輪用ブレーキディスク

二輪車のブレーキディスクにはパッドとの摩擦による摩耗や鳴きを抑制するために適正な硬さ（32～38HRC程度）、制動発熱による軟化の抑制および意匠性の観点からの耐食性が要求されている。ブレーキディスク用材料として、マルテンサイト系ステンレス鋼板 NSSC 410DE (11Cr-0.03C-0.04N-1Mn)、NSSC 410M4 (12Cr-0.06C-0.01N-0.8Mn) が使用されている。これらは主に C と N 量を適正に調整することで焼き入れ後に所定の硬さを得ることが出来るため、その後の焼き戻し処理を省略することが可能である。

### 7.2 四輪用ブレーキディスク

自動車のブレーキディスクは現状鋳鉄が使用されているが、錆が発生した場合に美観を損なう課題がある。また、特に錆発生後はブレーキディスクとパッドの摩耗粉がブレーキダストとして大気へ放出されるため、環境負荷が大きい。欧州の環境規制である Euro7 ではブレーキダストに対する規制が導入され、日本においてもブレーキの粉塵に対する規制や基準が組み込まれる可能性は十分にある。高強度で耐摩耗性、耐食性に優れた NSSC 410DE や SUS420J2 (13Cr-0.4C) は、このような環境対策に有望な鋼である。NSSC 410DE と鋳鉄 (FC150) の塩水噴霧試験 (SST 試験 3hr) 後および塩水噴霧試験後にブレーキ試験 (JASO C406) を行った後の外観を図 14 に示す<sup>53)</sup>。NSSC 410DE の場合は発錆していないが、鋳鉄は顕著に発錆し、ブレーキ試験時のパッドとの摩擦・摩耗によって錆が飛散する。図 15 に塩水噴霧試験時間とその後のブレーキ試験時に発生するブレーキダスト量の関係を示す<sup>53)</sup>。鋳鉄は塩水噴霧試験時間の増加に伴い発錆が進み、摩耗により大気へ放出されるブレーキダスト量も増加する。NSSC 410DE は本試験条件では発錆しないため摩耗量の変化が少なく、鋳鉄に比べてブレーキダストは少ない。実際の大气暴露による発錆とブレーキダスト量の関係から、ディスクのステンレス鋼化によってブレーキダスト量を年間約 13% 低減する見積もりが成されている<sup>53)</sup>。今後、環境対策および美観の観点から自動車のブレーキディスクへのステンレス鋼板の適用が有効である。

## 8. 構造部品

ステンレス鋼の高耐食、高強度-高延性特性を活かし、海外では衝撃吸収部材や外板にステンレス鋼を適用した例が報告されている<sup>54,55)</sup>。日本製鉄でも高強度ステンレス鋼板のメニューを多数揃えており<sup>56)</sup>、鉄道車両等に使用されている代表的な高強度オーステナイト系ステンレス鋼 SUS301 (17Cr-7Ni) 系材料は、変形中の変態誘起塑性 (TRIP: Transformation Induced Plasticity) により極めて優れた強度

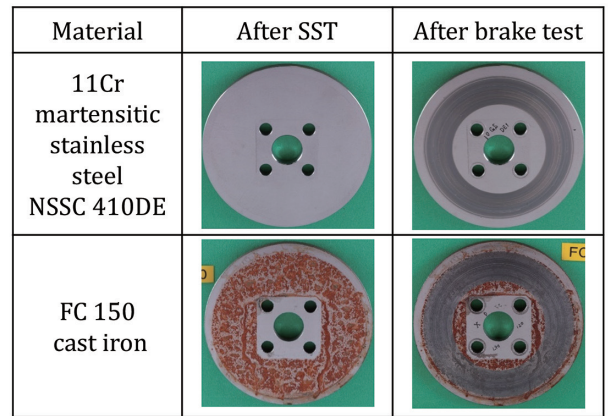


図 14 NSSC 410DE と鋳鉄の塩水噴霧試験 (3hr) 後およびブレーキ試験 (JASO C406) を行った後の外観<sup>53)</sup>  
Appearances of NSSC 410DE and cast iron after salt spray test (3hr) and after brake test (JASO C406)<sup>53)</sup>

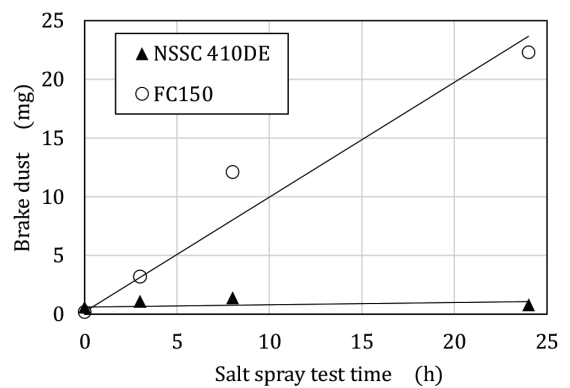


図 15 NSSC 410DE と鋳鉄に対して塩水噴霧試験後にブレーキ試験を行った際のブレーキダスト量<sup>53)</sup>  
Amount of brake dust when NSSC 410DE and cast iron were subjected to a salt spray test followed by a brake test<sup>53)</sup>

ー延性バランスを示すとともに、製造条件の適正化により強度グレードを造り分けることが可能である。また、フェライト-オーステナイト 2 相ステンレス鋼の中で N を活用して省 Ni 化したリーン 2 相鋼 NSSC 2120 (21Cr-2Ni-3Mn-1Cu-0.17N)、NSSC 2351 (23Cr-5Ni-1Mo-0.17N) も高耐食・高強度材として塗装省略等のニーズに対応可能な材料である<sup>57-59)</sup>。更に、フェライト-マルテンサイト 2 相ステンレス鋼 NSSC 431DP2 (16Cr-2Ni)、析出硬化型ステンレス鋼 NSSC HT1770 (14Cr-7Ni-1.5Si-0.7Cu-Ti)、NSSC HT2000 (14Cr-8Ni-3Si-2Mo) 等、鋼成分や組織制御により多彩な鋼種メニューがあり、ニーズに応じた適材提案が可能である<sup>56)</sup>。

## 9. 結 言

自動車のパワートレイン、燃料および燃焼方式の多様化に対応するとともに地球環境対策に貢献するステンレス鋼板およびそれを素材とした鋼管について、部品系列毎に概説した。カーボンニュートラルという未来へ向けた選択肢

は様々あり、日々進化している中で、ステンレス鋼は多彩な特性を活かして“マルチパスウェイ”に貢献し、我々の生活を更に豊かにする素材である。

### 参考文献

- 1) 細井裕三監修：ステンレス鋼の科学と最新技術。初版。東京、ステンレス協会、2011、217p
- 2) 菊池正夫：特殊鋼。49 (10)、10 (2000)
- 3) 梶村治彦：ふえらむ。11 (2)、67 (2006)
- 4) (株)富士経済：エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2024—電動自動車・車載電池分野編一。東京、2024、p.9
- 5) Mortor Fan illustrated 200。東京、2023、p.42
- 6) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略。2021、p.60
- 7) 矢川敦久：特殊鋼。67 (6)、8 (2018)
- 8) 樽谷芳男、樋口賢次、松田隆明、宮原光雄、平出信彦：住友金属。47 (4)、77 (1995)
- 9) 藤田展弘：新日鉄技報。(371)、30 (1999)
- 10) 濱田純一、林篤剛、神野憲博、小森唯志、伊藤宏治、福田望、井上宜治：まてりあ。56 (1)、33 (2017)
- 11) 神野憲博、濱田純一、林篤剛、矢川敦久、井上宜治、寺岡慎一：自動車技術会論文集。48 (4)、939 (2017)
- 12) 林篤剛、濱田純一、神野憲博、平出信彦、矢川敦久、井上宜治、寺岡慎一：日本製鉄技報。(416)、83 (2020)
- 13) 富田壮郎、奥学：日新製鋼技報。(90)、30 (2009)
- 14) 濱田純一、神野憲博、林篤剛、平出信彦、梶村治彦、井上宜治：自動車技術会 学術講演会前刷集。46-14、13 (2014)
- 15) Hamada, J.-I., Kanno, N., Hayashi, A., Hiraide, N., Abe, M., Nishimura, K., Takushima, C., Yakawa, A., Fudanoki, F.: International Journal of the Italian Association for Metallurgy. (5), 33 (2018)
- 16) Kobayashi, S., Takeda, T., Nakai, K., Hamada, J.-I., Kanno, N., Sakamoto, T.: ISIJ International. 51 (4), 657 (2011)
- 17) Kobayashi, S., Takeda, T., Oe, T., Hamada, J.-I., Kanno, N., Inoue, Y., Nakai, K., Sakamoto, T.: ISIJ International. 54 (7), 1697 (2014)
- 18) 山中大輔、小林千悟、濱田純一、神野憲博：鉄と鋼。104 (7)、385 (2018)
- 19) 小林周平、金子賢治、山田和広、菊池正夫、神野憲博、濱田純一：鉄と鋼。101 (6)、315 (2015)
- 20) 神野憲博、濱田純一、金子賢治：鉄と鋼。103 (9)、539 (2017)
- 21) Hayashi, A., Doi, T., Hiraide, N., Otsuka, N.: International Symposium on High-Temperature Oxidation and Corrosion 2018, 191 (2018)
- 22) 林篤剛、平出信彦、濱田純一、井上宜治：日本金属学会誌。88 (4)、36 (2024)
- 23) 藤村佳幸、岡義洋、今川一成、奥学：日本製鉄技報。(416)、76 (2020)
- 24) 濱田純一、森弘尚希、梶村治彦：日本金属学会誌。81 (12)、527 (2017)
- 25) 多久島睦子、濱田純一：日本金属学会誌。83 (11)、424 (2019)
- 26) Hamada, J.-I., Takushima, C.: Materials Transactions. 60 (5), 743 (2019)
- 27) 石丸詠一朗、高橋明彦、小野直人：新日鉄技報。(289)、26 (2009)
- 28) 熊野尚仁、中村定幸、今川一成：日新製鋼技報。(98)、1 (2017)
- 29) 河原康仁、寺西亮、多久島睦子、濱田純一、金子賢治：鉄と鋼。106 (11)、816 (2020)
- 30) Kawahara, Y., Kobatake, S., Kaneko, K., Sasaki, T., Ohkubo, T., Takushima, C., Hamada, J.-I.: Scientific Reports. 14, 4360, (2024)
- 31) 矢吹創、河原康仁、小島駿也、多久島睦子、濱田純一、金子賢治：鉄と鋼。110 (10)、779 (2024)
- 32) 多久島睦子、濱田純一、林篤剛、矢川敦久、寺岡慎一：自動車技術会 2018年春季大会学術講演会講演予稿集。20185079, 1 (2018)
- 33) 林篤剛、平出信彦、溝口太一郎、小野直人：日本製鉄技報。(416)、101 (2020)
- 34) 平出信彦、梶村治彦：材料と環境。58、20 (2009)
- 35) 平出信彦、宗野達久、梶村治彦：材料と環境。58、348 (2009)
- 36) 平出信彦、梶村治彦：自動車技術会 2016年秋季大会学術講演会講演予稿集。20166070, 367 (2016)
- 37) 伊藤功、大村圭一、深谷益啓、田中宏幸、久富良一、札軒富美夫、森本裕、荒川基彦：新日鉄技報。(354)、60 (1994)
- 38) 井上宜治、菊池正夫、天藤雅之、田上利男、梶村治彦：新日鉄技報。(389)、45 (2009)
- 39) 小野直人、高橋明彦、坂本俊治、松橋亮、田上利男、菊池正夫：自動車技術会 学術講演会前刷集。90-03、13 (2003)
- 40) Ono, N., Takahashi, A., Tanoue, T., Sakamoto, S., Matsuhashi, R., Kikuchi, M.: SAE Technical Paper. 2005-01-1335 (2005)
- 41) Hamada, J.-I., Ono, N., Inoue, H.: ISIJ International. 51 (10), 1740 (2011)
- 42) Hiraide, N., Sakamoto, S., Yakawa, A.: International Journal of Automotive Engineering. 10 (2), 144 (2019)
- 43) 向井孝志、境哲男、柳田昌宏：表面技術。70 (6)、301 (2019)
- 44) 川本浩輔、後藤靖人、永田辰夫：自動車技術会論文集。56 (2)、213 (2025)
- 45) 三平啓、林篤剛、濱田純一：自動車技術会 2025年春季大会学術講演会講演予稿集。20255171, 1 (2025)
- 46) 海野裕人、永田辰夫、藤本直樹、福田将大：日本製鉄技報。(412)、173 (2019)
- 47) 林篤剛、濱田純一、田母神剛、大西晶：2024年秋季大会学術講演会講演予稿集。20246125, 1 (2024)
- 48) 秦野正治、松本和久：JRCM NEWS。(375)、2 (2018)
- 49) 秦野正治、松本和久、菅生三月、服部憲治：日本製鉄技報。(416)、58 (2020)
- 50) 秦野正治、菅生三月、山本洋一、濱田辰巳：日本製鉄技報。(422)、58 (2023)
- 51) 秦野正治、菅生三月：自動車技術会論文集。54 (5)、826 (2023)

- 52) 関向晃太郎, 今川一成, 松橋透, 奥学: 日本製鉄技報. (422), 73 (2023)
- 53) 吉澤俊希, 林篤剛, 濱田純一, 加藤孝憲, 阪山由衣子: 自動車技術会 2025 年春季大会学術講演会講演予稿集. 20255172, 1 (2025)
- 54) Andersson, R., Schedin, E., Magnusson, C., Ocklund, J., Persson, A.: SAE Technical Paper. 2002-01-2020 (2002)
- 55) <https://www.sae.org/news/2020/06/tesla-cybertruck-stainless-steel>
- 56) 溝口太一郎: 日新製鋼技報. (99), 20 (2018)
- 57) 及川雄介, 柘植信二, 江目文則: 日本製鉄技報. (416), 23 (2020)
- 58) 石丸詠一郎, 柿原豊彦, 加賀祐司: 日本製鉄技報. (416), 29 (2020)
- 59) 櫻庭拓也, 石丸詠一郎, 川真知: 日本製鉄技報. (416), 34 (2020)



濱田純一 Jun-ichi HAMADA  
山口技術研究部長 博士(工博)  
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



林 篤剛 Atsutaka HAYASHI  
山口技術研究部  
ステンレス薄板研究室 商品研究課長