

自動車排気系材料の現状と今後の動向

Present and Future Trends of Materials for Automotive Exhaust System

佐 藤 栄 次^{*)} 田 上 利 男^{*)}
Eiji SATO Toshio TANOUÉ

抄 録

排気ガス浄化や軽量化による燃費向上などの社会ニーズから、ステンレス鋼が自動車に適用されるようになり、この10年間で約4倍の大きな量の伸びを示した。そのほとんどは排気系材料として適用され、使用される鋼種も従来409系が主体であったが、種々の高機能ステンレス鋼が使用されるようになった。本報ではメタルガスケット、エキゾーストマニホールド、フロントパイプ、フレキシブルパイプ、排気ガス浄化用メタル担体、マフラーの排気系部位ごとの材料の変遷と今後の材料動向について述べた。

Abstract

Stainless steel has come to be used for automobiles to meet social needs of such as better cleaning of exhaust gas, improvement in fuel economy by weight reduction and so, and its resultant consumption for automotive application has almost quadrupled during the last ten years. Most were applied to the material of exhaust system, with type 409 stainless steel being predominant. However, in recent years, the use of various high performance types has been on the increase. This paper discusses the trends of materials used in various automotive parts in the exhaust system, such as metal gasket, exhaust manifold tube, front pipe, metal catalyst carrier, and muffler, and their future prospects.

結 言

米国では1960年代に Type409ステンレス鋼の排気系への適用が始まった。日本では排気ガス規制強化に対応して3元触媒が設置され、1970年代から409系等のステンレス鋼が適用されるようになった。その後、1989年に国内自動車メーカーによって、施行された排気系部品の寿命保証期間延長(3年又は6万km)に伴い、溶融アルミニウムめっき鋼板からステンレス鋼への材料転換が加速された。現在では、日本や米国の乗用車に、図1のガスケットからテールパイプまで、ほとんど全ての部位にステンレス鋼が使用されている^{1,2)}。

乗用車1台当たりの排気系用ステンレス鋼使用量は車種等によって異なるが、表1に示す部位別重量とステンレス鋼化率(エキゾーストマニホールド(以下、エキマニと記す)約25%、フロントパイプ以降ほぼ100%と推定)から平均的には約15kg/台と考えられる。国内の年間乗用車生産台数が約938万台(1992年)であることから排気系分野のステンレス鋼使用量は十数万t/年と推定され、市場規模が大きく拡大したことが分かる^{3,4)}。

自動車全体の約75%を占める乗用車のステンレス鋼化率がエキマニ等を除き、ほぼ100%に達しているの、これまでのような急激な量の伸びは期待できない。しかし、排気ガス規制等の社会ニーズに対応して、いまだステンレス鋼化が進展していないトラックを主体としたディーゼル部門で、今後緩やかに拡大するものと思われる。

排気系材料として使用される鋼種は従来、米国と同様409系がほと

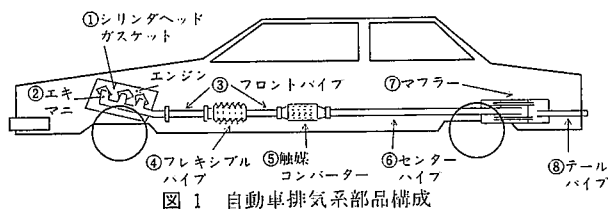


図 1 自動車排気系部品構成

んどであった。最近では燃焼改善に伴うエキマニ用高耐熱フェライト系ステンレス鋼、騒音防止等を目的としたフレキシブルパイプ用オーステナイト系耐高温塩害腐食ステンレス鋼、腐食寿命延長を目的としたマフラー用フェライト系高耐食ステンレス鋼等の高機能ステンレス鋼の開発ニーズが高まり、表1に示すステンレス鋼が使用されている。更に、最近では国内の景気後退からコストダウン指向が強くなり、品質を維持し低コスト化を狙ったステンレス鋼の開発ニーズが高まっている。

一方、米国や欧州では409系をベースとして、より高機能が要求される部位には高Crのフェライト系ステンレス鋼が使用され、欧州ではフェライト系に加え、オーステナイト系ステンレス鋼も使用されている⁵⁾。

2. 各排気系材料の現状と今後の動向

2.1 メタルガスケット

従来シリンダヘッドガスケット(以下、ガスケットと記す)に

*) ステンレス鋼板営業部 部長代理

表 1 部位別環境温度と使用鋼種

(温度: °C, 重量: kg/台)

No	部位	環境温度	鋼 種	重量
①	シリンダヘッドガスケット	100	SUS301L	0.3
②	エキゾーストマニホールド	950~800	YUS409D, YUS180	4
③	フ ロ ン ト パ イ プ	800~600	YUS409D, YUS436S, YUS180	2
④	フ レ キ シ ブ ル パ イ プ		SUS304, SUSXM15J1, SUS302B	0.5
⑤	触 媒 コ ン バ ー タ ー		YUS205M1	2
⑥	セ ン タ ー パ イ プ	600~300	YUS409D, YUS436S, YUS432	3
⑦	マ フ ラ ー	300~100	YUS409D, YUS436S, YUS432, NSA1YUS409D, NSA1YUS432	6
⑧	テ ー ル パ イ プ		YUS436S, YUS432, NSA1YUS409D	

YUS409D:11Cr-0.2Ti, YUS436S:17Cr-1.2Mo-0.2Ti, YUS432:17Cr-0.5Mo-0.2Ti, SUS301L:17Cr-7Ni
 YUS205M1:20Cr-5Al-Ln, YUS180:19Cr-0.4Nb-0.4Cu-0.4Ni, SUSXM15J1:18Cr-13Ni-4Si
 NSA1YUS409D, NSA1YUS432は溶融アルミニウムめっきステンレス鋼を示す。

は、アスベストが適用されてきた。しかし、アスベストの健康への影響が懸念された結果、使用禁止の法規制が強化されたこと、またエンジン高出力化に伴うガスシール性の問題から代替材料への転換が急速に進んだ。現在ガソリン車系エンジンのガスケット材料の主流はグラファイトであり、メタル系の適用は少ない。ディーゼル系エンジンではメタルガスケットが主体になっている。

この場合、ビード成形した高強度ステンレス薄板の積層構造(3~4枚)でSUS301などが使用されている。メタルガスケットは、耐熱性、熱伝導性、復元性、耐圧縮性、メンテナンス性、及び無公害性の点からアスベスト製に比べ優れている。

新日本製鐵は、乗用車系エンジンの1層型ガスケット用に表1に示すSUS301Lを開発した。SUS301Lは、機械的強度を冷間加工によって広範囲に選択でき、低炭素化によって溶接部の粒界腐食性を改善し、調質後の加工性、靱性に優れた特徴を有している。1層型は、ステンレス鋼の優れたばね特性によって、シリンダヘッドとシリンダブロックの間の十分なシール性が確保できることから、シリンダボアの歪みを最小限に抑制できる。

メタルガスケットは、高強度で、かつビード成形性が優れていることが必要である。又、現状1層型のガスケットはシムリングをレーザ溶接により取り付けており、完全1層型が今後の目標であろう。高強度、高延性で且つ使用性能の優れたガスケット材料の開発が望まれている。

2.2 エキゾーストマニホールド

エキマニはフランジを通じてエンジンと直結し、高温の排気ガスにさらされる部位で、従来からFCD41等の铸铁が使用されてきた。国内では1980年代半ばから軽量化や出力向上等の目的で、薄肉化可能で耐酸化性や耐熱疲労性に優れたYUS409DやYUS180系等のフェライト系ステンレス鋼(板厚2.0mm)が適用されるようになった。ステンレス鋼化の進展と共に、铸铁の比率は減少傾向にあるが、減圧鋳造法の開発により肉厚2.5mmのステンレス鋼エキマニも製造されるようになった。特に高温強度等が必要とされる一部の車種に採用されている^{6,7)}。

エキマニに要求される特性には高温の排気ガスに耐え得る耐酸化性と熱疲労特性、触媒機能を高めるための低熱容量化、搭載性等を高めるための加工性や溶接性が上げられる。1990年代半ばから施行される米国大気浄化法案(排気ガス規制)や欧州等での高速燃費向上等への対応から、今後排気ガス温度はますます上昇する傾向にあり(図2~4参照)、より耐熱性に優れたステンレス鋼が求められている。最近ではNbやMoの固溶強化を活用して、熱疲労特性を改善し、更に、耐酸化性や使用環境での組織安定性を向上させたフェラ

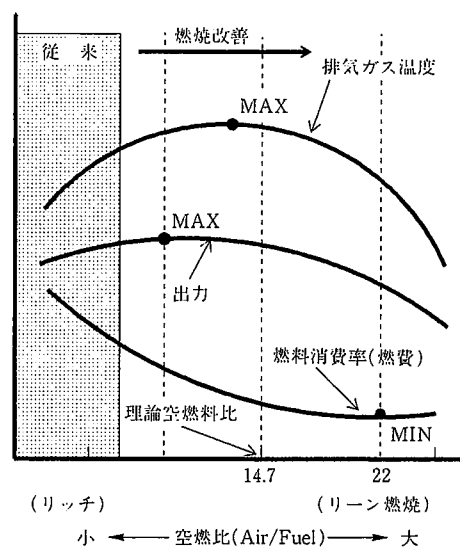


図 2 燃費と排気ガス温度に及ぼす空燃比の影響

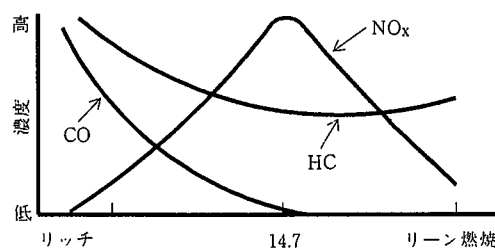


図 3 排気ガス組成に及ぼす空燃比の影響

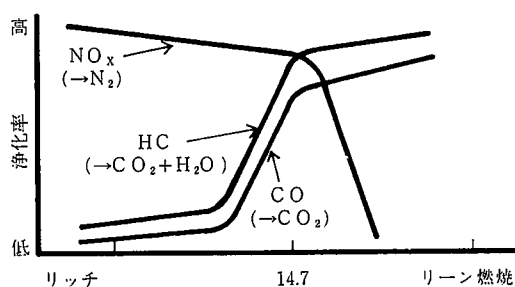


図 4 三元触媒性能に及ぼす空燃比の影響

イト系ステンレス鋼等が、開発されている^{8,9)}。

一方、米国や欧州では1980年代初頭からエキマニへのステンレス鋼の適用が試みられ、米国では主にType409やType439等、熱膨張

係数の小さいフェライト系ステンレス鋼が使用されている。欧州では高速走行による排気ガス温度の高温化（約1000°C）からNi基合金やオーステナイト系ステンレス鋼が使用され、熱歪緩和のための構造的工夫も行われている¹⁰⁾。

今後、ステンレス鋼への材料転換を促進するためには、現在鋳鉄に対し高価となっているステンレス鋼エキマニの製造コスト低減が必要である。そのためには材料と共に、コスト構成割合の大きい加工メーカーでのコストを含めた総合コスト低減が、必要と考えられる。

図2は燃費と排気ガス温度に及ぼす空燃比の影響、図3は排気ガス組成（エンジン出側）に及ぼす空燃比の影響、図4は三元触媒性能に及ぼす空燃比の影響、図5は19%Crステンレス鋼の0.2%耐力（950°C）への合金元素の影響を示す^{11,12)}。

2.3 フロントパイプ

フロントパイプはエキマニとフレキシブルパイプの中間に位置し、触媒機能（排気ガス浄化）を高めるために極力放熱量を小さくし、排気ガス温度の低下を防ぐ機能が求められる。このため、従来は一重のパイプがほとんどであったが、最近は前述の排気ガス温度低下防止や騒音防止等の目的も兼ねた薄肉中空2重パイプ（レーザ、TIG等）の開発が国内や米国で盛んに行われている。

材料としては国内では、エキマニ用材料と同じく、排気ガス温度等に対応してYUS409D、YUS436S、YUS180等が使用されている。今後は排気ガスの高温化や材料の薄肉化から、より耐酸化性や耐食性に優れたYUS436S、YUS180系とそれらのコスト低減材の使用比率が高まるものと思われる。

米国での材料動向も日本とほぼ同じくType409がベースである。薄肉の中空2重パイプの内側パイプには、加工性等の観点からオーステナイト系ステンレス鋼のTIG溶接パイプが適用されている例もある。欧州では、ERW造管性（加工性）等からまだオーステナイト系ステンレス鋼の321系等が使用されているが、安価で熱膨張係数も小さいYUS180系等のフェライト系ステンレス鋼のニーズが強い。

現在、日本、米国、欧州でそれぞれの理由により、フェライト系からオーステナイト系ステンレス鋼まで、各種の薄肉中空2重パイプが開発されている。将来は耐酸化性や耐熱疲労等の使用性能に優れ、コスト的にも有利なフェライト系ステンレス鋼に収めんするものと思われる。

2.4 フレキシブルパイプ

フレキシブルパイプ（以下、フレキと記す）はエンジン振動の排

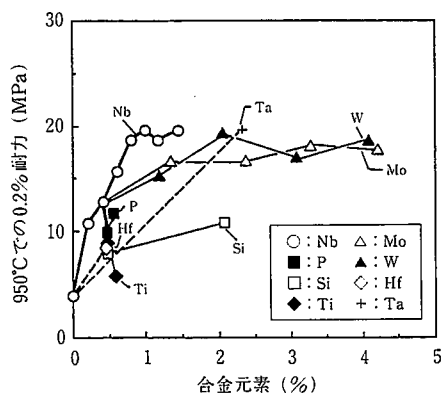


図5 19Crステンレス鋼の950°C、0.2%耐力への合金元素の影響

気系への伝達防止を目的として、通常エキマニと触媒コンバーターの間に設置され、蛇腹形状の2重パイプ（板厚0.3～0.4mm）とそれを覆うステンレスワイヤメッシュ（ブレード）等から構成されている。

フレキは、造管時の溶接性や厳しい液圧バルジ加工から、加工性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼が適用されている。

通常、国内では高温疲労が主なる使用環境となるので、SUS304が広く使用されている。寒冷地では道路の凍結防止から融雪塩が使用され、フレキの外側では高温塩害と高温疲労が複合した非常に厳しい環境になるため、Siを添加し、Ni量を増したSUSXM15J1やMoを添加し、Cr量も適正化した改良材も使用されている^{13,14)}。

又、材料面からの改善だけでなく、厳しい使用環境となる車種にはインターロック付多層構造フレキが適用されており、構造面からも材料強度を補完する等の幾つかの工夫が行われている。

しかし、北米等厳しい融雪塩環境の地区では、SUSXM15J1クラスでも比較的短期間に穴明きが経験されている。今後北米で10年10万マイル保証が施行されることを考え併せると、材料と構造の両面から更なる改善が必要と考えられる。

2.5 排気ガス浄化用メタル担体

排気ガス浄化触媒は、排気ガスを浄化するため、排気マニホールド直下の床下などに搭載されているが、高温条件で使用されるため、触媒担体の耐久性向上が重要課題となっている。従来から触媒用担体には、コーゼライト製のセラミック担体が適用されているが、熱衝撃特性に優れ、かつ熱容量の小さいフェライト系ステンレス鋼箔が適用されるようになった。しかし、メタル担体は、エンジン始動時や加速時の急速な昇温や担体半径方向の温度分布による局所的な熱応力発生が不可避であるので箔素材の設計だけでなく耐熱疲労性に優れた構造が必要である。写真1にメタル担体の外観、図6に担体支持ジャケットをそれぞれ示す。

メタル担体用ハニカムコアは、高耐熱性のフェライト系ステンレス鋼箔（厚さ約50μm）の平板と波板を巻き高温熱サイクルに耐える適正なろう付け接合構造となっている¹⁵⁾。

ここでは箔素材の基本成分設計の考え方を述べる。通常のステンレス鋼製造プロセスでの製造が可能な、且つ比較的低熱膨張で優れた耐高温酸化性を有する箔素材としてCr-Al系フェライト系ステンレス鋼が適している。Fe-Cr-Al合金の熱膨張係数は、Cr量にあまり依存せずAl添加量とともに増加する。又、図7¹⁶⁾に示すように、エンジン排気ガス中での耐酸化性改善効果はCr20%で飽和する。従って、Cr量は20%が最適であるがAl量は低めにすることが有効である。ろう付け接合部の耐酸化性を考慮すると20Cr-5Alが最適であ

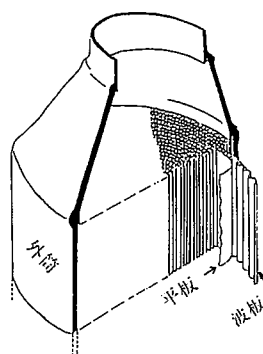


図6 担体支持ジャケット

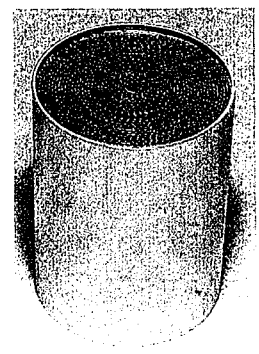


写真1 メタル担体外観

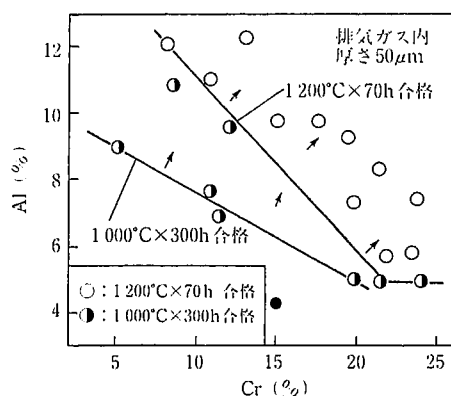


図7 Fe-Cr-Al合金鋼の耐酸化性に及ぼす Al, Cr含有量の影響

る。

Fe-Cr-Al系合金の耐酸化性、特に酸化皮膜の密着性向上には Hf, Sc, Y, Ce など希土類元素の少量添加が有効であることが知られている。図8¹⁸⁾は、20Cr-5Al合金に希土類元素(Y, Sc 以外の REM:ランタノイド、以後 Ln と記す)を添加した場合の耐酸化性改善効果を示す。Lnの添加は、 Al_2O_3 皮膜の成長方向を酸素の内方拡散のみに規制し、皮膜/母材界面のボイド生成を抑制して皮膜の密着性を向上する。0.1%以上の過剰添加は酸化を促進するので、適正添加範囲が存在する。

又、20Cr-5Al鋼のような高Cr-高Alは実ラインで割れ易く熱延板靱性改善は必要である。これにはC, Nの低減と共に適正量のTi添加が有効である。図9は有効Ti量($[\text{Ti}] = \text{Ti} - 48 \times [\text{C}] / 12 - 48 \times [\text{N}] / 14$)とシャルピー衝撃特性(vT_2 : 2kgfm/cm²になる温度)との関係を示す。靱性は、 $[\text{Ti}]$ 量=0のとき最も改善される。Ti無添加では、粒界にCr炭化物が析出し靱性は低下するが、Ti添加によって粒界析出は抑制される。しかし、過剰添加すると粗大化したTiNが破壊の起点になり靱性は再び低下する^{16,17)}。以上の知見を基にメタル担体用箔素材として、20Cr-5Al-0.05Ti-0.08Ln-低C, Nの成分系(YUS205M1)を決定し、通常のステンレス鋼量産ラインでの製造を可能にした。

メタル担体は、排圧が小さい、高温耐久性が優れるなど多くのメリットを有する。しかし、コストが高く世界的にも約4%がメタル化されているに過ぎない。又、排気ガス浄化性能向上(米国/加州のLEV規制対応)にメタル担体は有利とされており、メタル担体の適用量は増加するものと予測される。今後の高温排気温度(950°Cまで)への技術的対応には20Cr-5Al-REM系が適用されていくものと考え

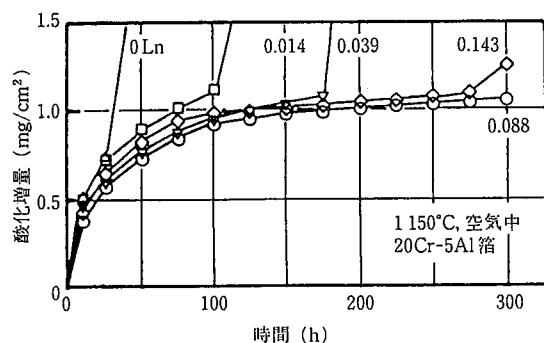


図8 Fe-20Cr-5Al合金鋼の耐酸化性に対する希土類元素(Ln系)の添加効果

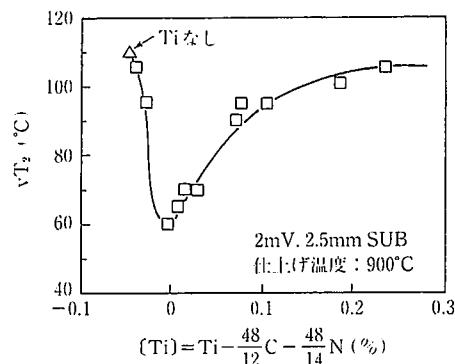


図9 Fe-20Cr-5Al合金鋼の熱延板靱性改善に対するTi添加効果

られる。又、床下など熱的に厳しくない分野には、低コストの低級耐熱鋼が適用される可能性もある。

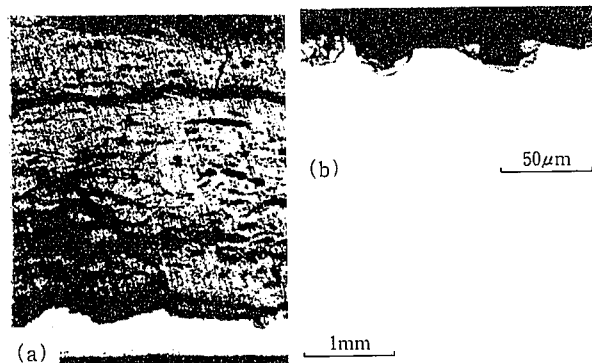
2.6 マフラー

自動車の安全性向上、耐久性、特に品質保証の観点から各自動車メーカーは、排気系部品の保証制度を発足させた(1989/10)。マフラーも現在では一般部品として3年又は6万kmが保証されている。マフラー材料の変化は、次の点が特徴である。1)1978年排気ガスによる汚染防止対策として三元触媒搭載義務化による排気ガス凝縮液環境の形成、2)1989年マフラー3年又は6万km寿命保証制度の発足など時代の要請、社会環境の変化に対応して適用材料が大きく変化してきた。

写真2(a), (b)は、それぞれ2.5年以上実使用したAlめっき鋼板、及びSUS410級鋼製マフラー内面の腐食状況を示す¹⁹⁾。Alめっき鋼板は厚いさび層を形成しながら全面的腐食が進行するのに対して、ステンレス鋼は局部腐食になる傾向がある。Alめっき鋼板の進行の程度は早く、短期に穴あきを生じるため、今日ではほとんどがステンレス鋼化している。

自動車を長距離連続走行する場合、排気ガス温度は100°C以上となり排気ガス中の水分の凝縮は生じない。しかし、短距離短時間走行の場合、排気ガス温度も上昇せずマフラー低温部で凝縮液が生成する。この凝縮液中には、表2に示すように NH_4^+ 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- や有機酸が含まれ、pHは約8~9の値を有する¹⁹⁾。ステンレス鋼化されたマフラーのこの凝縮液による腐食が問題となる。

図10は、凝縮液成分をそれぞれ1000~5000ppm添加した溶液を用い、半浸漬加熱法によるステンレス鋼の腐食深さを測定した結果を示す。実マフラー環境で経験された孔食は、塩化物イオンの共存



(a) Alめっき鋼板 (b) ステンレス鋼(SUS410系)
写真2 実走行マフラーの腐食実態

表 2 排気ガス凝縮液の成分

排気ガス 凝縮液	Cl ⁻ ×10 ⁻³	SO ₄ ²⁻ ×10 ⁻³	CO ₃ ²⁻ ×10 ⁻³	NO ₃ ⁻ ×10 ⁻⁵	NH ₄ ⁺ ×10 ⁻³	Fe ³⁺ ×10 ⁻⁴	pH
①	0.69	0.82	2.8	1.6	8	3.1	8.1
②	2.80	2.6	9.8	1.6	54	2.5	8.4

その他、有機酸も少量含まれる。

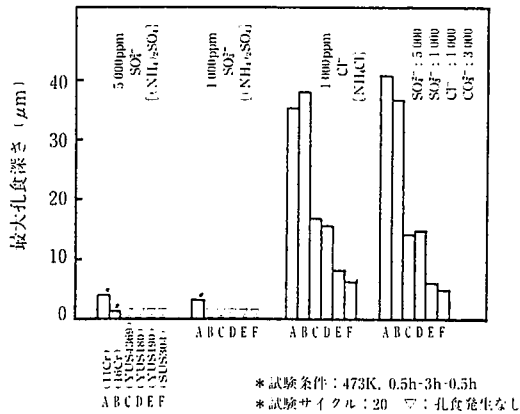


図 10 凝縮液環境でのステンレス鋼の局部腐食発生に及ぼすアニオン種の影響

する環境でのみ観察され局部腐食誘発要因として、塩化物イオンの影響が大きいことを示している²⁰⁾。通常凝縮液は pH も高く環境的にはマイルドであるが、走行条件によって生成した凝縮液は内面温度上昇によって液組成の変化が加速される。

図11は、表3の模擬凝縮液の一定量を50°Cから500°Cまで加熱し、ビーカー内に残留した凝縮液成分を分析した結果を示す¹⁹⁾。pH は加熱温度の上昇とともに低下し、473K 前後で約2を示した。塩化物イオンは200°Cでは数 ppm 以下になり、更に高温ではほとんど残存しない。硫酸イオンは300°Cまで残存する。従って、ステンレス鋼の局部腐食に影響する領域は、図11の Cl⁻と SO₄²⁻の共存する領域IIと推定される。高速連続走行の多い車では、マフラー内に腐食性物質が残留する可能性は小さく、腐食を生じにくい²⁾、短時間短距離走行

表 3 模擬排気ガス凝縮液組成

pH	Cl ⁻ (mol/l)	SO ₄ ²⁻ (mol/l)	CO ₃ ²⁻ (mol/l)	NH ₄ ⁺ (mol/l)	NO ₃ ⁻ (mol/l)
8.86	2.81×10 ⁻²	5.21×10 ⁻²	5.0×10 ⁻²	2.07×10 ⁻¹	1.61×10 ⁻³
	1 000ppm	5 000ppm	3 000ppm	3 740ppm	100ppm

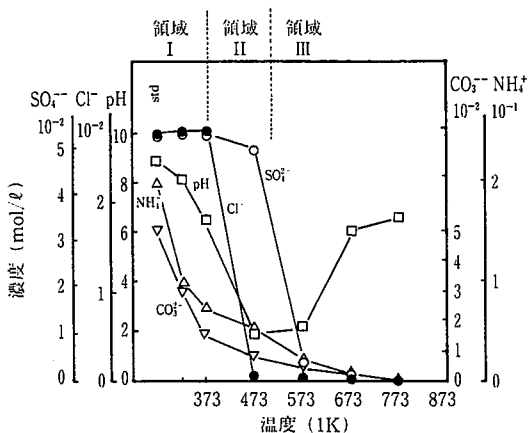


図 11 マフラー内での凝縮液性変化に及ぼす温度上昇の影響

車では、運転、停止が繰り返され、Cl⁻、SO₄²⁻が次第に濃縮し、局部腐食を誘発することを示唆している。

このような使用条件を考慮したステンレス鋼評価試験法として、DIP&DRY 法²¹⁾、半浸漬試験法²²⁻²⁴⁾、加熱湿潤サイクル試験法^{23,25)}などが提案されている。新日本製鐵は、前述の実環境条件変化を考慮した半浸漬加熱サイクル試験法（以下、NSC 試験法と記す）を提案した¹⁹⁾。図12はマフラー腐食試験の模式図を示す。マフラー内部での凝縮、湿潤状態を再現するため、1)試験片を半浸漬状態に保持し、2)加熱温度を図11の領域IIの130°Cに保持してサイクルごとに凝縮液面を上下させることによって、実マフラー腐食の状況を再現することを中心としている。加熱サイクルは、昇温30分-130°C保定4時間-降温30分/1サイクルとした。模擬凝縮液組成は表4に示す組成を標準とした。

凝縮液中でのステンレス鋼の局部腐食発生抑制に Cr, Mo 添加が有効である¹⁸⁾。図13, 14は、それぞれ NSC 腐食試験法によって得られた Cr-Mo 添加鋼と実用ステンレス鋼の孔食深さ変化を示す。保証制度発足前は高耐食材料として 19Cr 系 (YUS180 系) が用いられていたが、上記知見を基に表1に示す YUS436S を開発した。YUS436S の特徴には、1)Cr-Mo 量の適正化によってマフラー寿命を決定する孔食の発生、進展を抑制した、2)Nb 添加を Ti 添加系にすることにより高効率の普通鋼製造プロセス (タンデムミルによる冷間圧延-連続焼鈍-脱スケール処理) による造込みを可能とし、生産性を向上させた、3)成分適正化によって絞り性など加工性を向上した点が挙げられる。現在 YUS436S は排気系部材として広く適用されている。又、材料の適材化、低コスト化ニーズから使用性能の見直しも進められ YUS432 (17% Cr-0.5% Mo-Ti 系) も開発され実用に供されている。

又、マフラーの外表面は、腐食環境にさらされるため見栄えと防食対策から Al めっきが施されている。YUS409D, YUS432, YUS436S への Al めっきは、Al めっき層中に鋼中 Cr が微量含有されることにより Al めっき層 (Al 層+合金層) 自身の耐食性と素地の犠牲防食効果向上に一段と効果を発揮する²⁶⁾。

マフラー材料は耐食性などの使用性能と寿命保証制度の観点から、Al めっき鋼板からステンレス鋼板への転換が急速に進んだ。現在、YUS436S の使用性能の見直しから、低価格材への移行も見られるが、安全性、寿命保証の点から現状レベルの使用性能を有するマフラー材料は必要と思われる。今後は、騒音規制強化や排気音制御、更に、

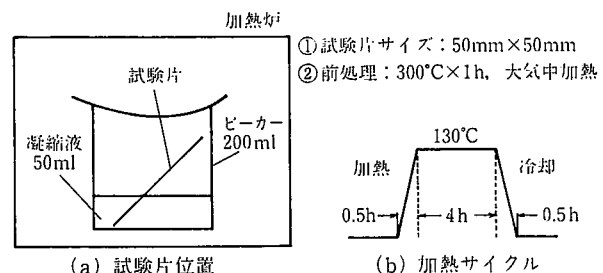


図 12 NSC 試験法の模式図

表 4 NSC 試験に用いる模擬試験液組成 (ppm)

pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	HCOOH
8.5	50	100	500	—	220	—

* pH: NH₄OH で調整

* いずれもアンモニウム塩で添加

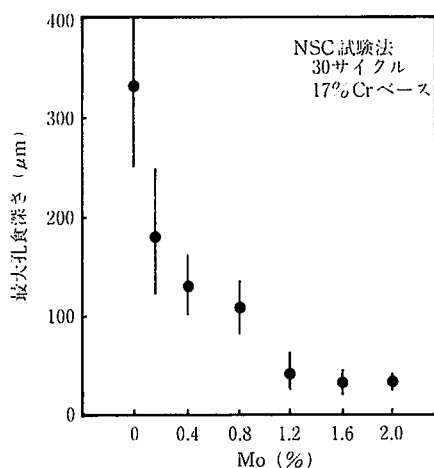


図 13 NSC試験法によるCr-Mo添加鋼の孔食深さ

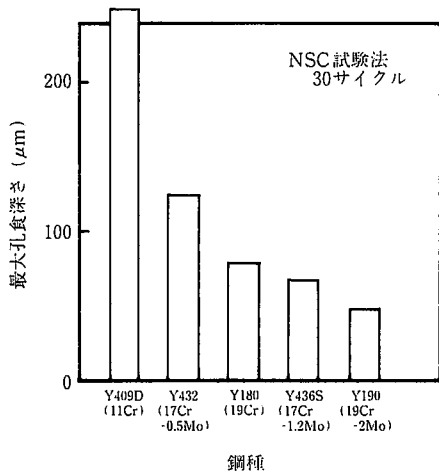


図 14 NSC試験法による実用ステンレス鋼の孔食深さ

排気圧力損失低減からマフラーはより大型で複雑な形状になる傾向にあり、素材の加工性、溶接性の一層の改善が必要と考えられる。

3. 結 言

現在では排気系部品へのステンレス鋼の適用は次第に定着してきている。耐久性向上、加工性や溶接性を含む総合性能向上とコストとのバランスを考慮した適用材料の適材適所化が進むと同時に、各種規制や社会的要請がめじろ押しの状況において、今後もステンレス鋼の適用割合の増加が期待される。自動車の安全性、性能向上などにステンレス鋼の特性を生かした材料開発を一層推進すると同時に、これまで以上にコストパフォーマンスに優れた高性能材料を開発し、素材開発メーカーとしての責務を果たしていきたい。

参 照 文 献

- 1) Hill, J. B.: Automotive Engineering. (Jul.) p.29 (1991)
- 2) 松井仁志: ステンレス. p.8 (1992)
- 3) 須山脉蔵: 自動車技術. 44(12), (1990)
- 4) 主要国自動車統計. 日本自動車工業会, (1993)
- 5) Decroix, J. et al.: Matériaux et Techniques. p.433 (1986)
- 6) 本間正幸: 自動車技術. 43(9), (1989)
- 7) NIKKEI NEW MATERIALS. p.64 (1989)
- 8) 大村圭一 ほか: 材料とプロセス. 4, p.1796 (1991)
- 9) 中村定幸 ほか: 材料とプロセス. 4, p.1784 (1991)
- 10) Clark, R.: Focus Rostfrei. 32, (1991)
- 11) 井口 哲: 自動車技術. 45(8), p.18 (1991)
- 12) 触媒. 19 (3), p.147, (1977)
- 13) 石川秀雄: 鉄鋼協会西山記念講座. 1994, p.255
- 14) 富士川尚男: 材料とプロセス. 4, p.1812 (1991)
- 15) 今井篤比古 ほか: 新日鉄技報. (349), p.39 (1993)
- 16) 山中幹雄 ほか: 材料とプロセス. 4, p.1784 (1991)
- 17) Ohmura, K. et al: Proc. of Int'l Conf. on Stainless Steels. Chiba, (1991) p.1212
- 18) 佐藤栄次 ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集. 901, (1990) p.225
- 19) 佐藤栄次 ほか: 自動車技術会論文集. 22(2), p.35 (1991)
- 20) 佐藤栄次 ほか: 第39回腐食防食討論会予稿集. C-212, (1992) p.349
- 21) 服部保徳 ほか: 材料とプロセス. 2, p.1684 (1989)
- 22) 内田幸夫 ほか: 日新製鋼技報. (60), p.122 (1989)
- 23) NACE: Material Protection. 9, p.60 (1970)
- 24) 富士川尚男 ほか: 材料とプロセス. 2, p.720 (1989)
- 25) Chrysler Spec. 461-H-83
- 26) 樋口征順 ほか: 鉄と鋼. 77(2), p.258 (1991)