

## Professional Report

## 高排温エンジン対応排気系耐熱鑄造材

Heat Resistant Casting Materials for Exhaust Components of High Temperature Exhaust Gas Engine

伊藤 賢児 Kenji Ito

高排温エンジン対応排気系鑄造材を取り上げ、その実用上の懸念因子である酸化、熱変形、熱き裂における問題点を明らかにするとともに、使用される各種耐熱鑄造材の材料特性を実験データと理論的な裏付けにより、各因子の使用温度の観点から整理し、取りまとめた。

その結果、基地中に炭素が黒鉛として晶出している耐熱鑄鉄では、フェライト系は、実用的には最高表面温度が750以下において、エキマニ(エキゾーストマニホールド)材として使用可能な材料であり、オーステナイト系は、主としてタービンハウジング材として、最高表面温度が850以下の温度域で安定して使われる材料であることを示した。一方、基地中に炭素が固溶している耐熱鑄鋼では、フェライト系は最高表面温度920以下の温度域での使用が推奨され、その優れた耐酸化性からディーゼルエンジン用エキマニ/タービンハウジング材として注目を浴びていること、ならびにオーステナイト系では20Cr-10Ni系が最高表面温度1,000以下の温度域で、25Cr-20Ni系が1,050以下の温度域で使用可能な次世代ガソリンエンジン用のエキマニ/タービンハウジング材として中心的な材料であることを示した。

## 1 はじめに

地球温暖化対策のため、1997年に採択された京都議定書により先進国等に対して義務づけられた温室効果ガス削減目標を達成するため、ガソリン車に関してはCO<sub>2</sub>排出量の低減、すなわち燃費の向上が最重点課題となっている。その対策として、大きく分けて二つの開発方針が検討されている。一つがエンジンの小型化であり、もう一つが新燃焼技術の開発である。エンジンを小型化すると、摩擦損失が低減され燃費が向上する。しかし、エンジンの小型化に伴う馬力の低下を補うためには、ターボチャージャー(以下、ターボと言う。)やスーパーチャージャー等の過給器システムの搭載が不可欠となる。このため、軽量コンパクトなタービンハウジングと、エキゾーストマニホールド(以下、エキマニと言う。)の鑄物化が進められている。

伊藤 賢児  
1978年日立金属株式会社入社  
自動車機器カンパニー  
素材研究所 所属  
現在、排気系耐熱部材  
「ハーキュナイト」の技術開発に従事  
技術士(金属)



一方、新燃焼技術としては、リーンバーン、直接筒内噴射、可変圧縮比システム(VCR: Variable Compression Ratio)および予混合圧縮着火(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition)といった新しい技術の実用化による燃費の改善が進められている。これらの新燃焼技術は、ストイキ燃焼(Stoichiometric Burning)が基本であり、空気と燃料が理想的な濃度で混合し完全燃焼を行うため、シリンダヘッドのアウトレットポートからの排出ガス温度は1,000を超え的可能性がある。そのため、高排温対応の耐熱鑄造材が必要になる。

ディーゼル車においても、コモンレールやDPF(Diesel Particulate Filter)の開発により、排出ガスの浄化環境は著しく改善されたが、このために排出ガス温度は次第に上昇し、850に到達しようとしており、従来材である耐熱鑄鉄材の適用が困難になりつつある。

今回は、主に高排温エンジン対応耐熱鑄造材に必要と

される耐熱特性とその使用温度域に関して、エキマニを例にして紹介する。

## 2 エキマニにおける技術課題と開発状況

### 2.1 エキマニ材が有する懸念因子

エキマニに起こる大きな問題としては、(1)酸化、(2)熱変形(反り、収縮)、(3)熱き裂の三つが挙げられる。以下、この三つの要因を詳細に説明する。

#### 2.1.1 酸化

酸化が起こると、エキマニ表面の酸化膜に生じる微細なき裂が貫通き裂の起点となる一方、はく離酸化膜片はターボの損傷や触媒の目詰まりを引き起こす懸念がある。

##### (1) 表面き裂

酸化が貫通き裂を発生させるメカニズムは以下のよう考えられる〔図1(a)、(b)参照〕。

- (a) エキマニ表面に酸化膜が生成する。
- (b) エキマニ表面との熱膨張率の違いにより、延性が小さな酸化膜上に微細なき裂が多数生じる。
- (c) そのうちの一つに熱ひずみが集中し、き裂が進展を始めると、新しい面が露出し、その面が酸化される。
- (d) 露出面の酸化と、き裂進展が交互に進み、最終的に貫通き裂に至る。

また、き裂内に生じた酸化膜は酸素と結合して体積膨張を引き起こし、「くさび」となってき裂面を開口させることにより、酸化の進行を速めている。エキマニに生じるき裂の大部分は、この表面の酸化膜に生じたき裂が起点である。

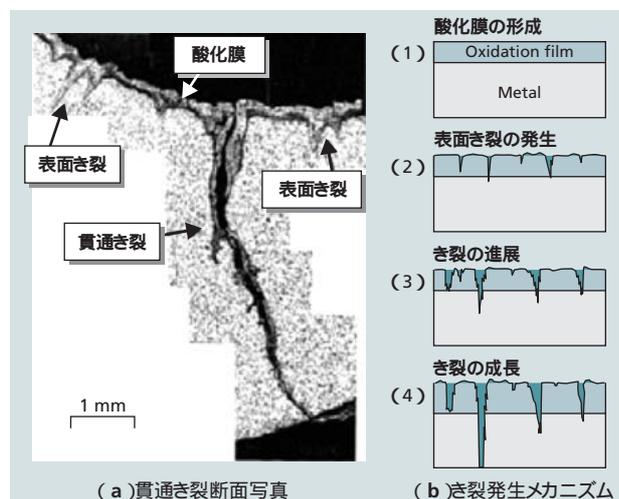


図1 酸化に起因する貫通き裂とその発生メカニズム

表面に生成した酸化膜とエキマニ(エキゾーストマニホルド)表面との熱膨張率の違いにより、延性が小さい酸化膜上に微細なき裂が多数生じ、そのうちの一つに熱ひずみが集中し、き裂が進展して新しい面が露出する。その露出面の酸化と、き裂進展が交互に進み、最終的に貫通き裂に至る。

##### (2) 酸化膜のはく離と肉厚の減肉

酸化膜のはく離については、はく離片の飛散による触媒の目詰まりやタービンブレードの損傷といった不具合が懸念される。また、このような酸化膜のはく離が進行すると、減肉によりエキマニの設計強度を満たさなくなり、寿命短縮の原因にもなってしまいます。このように、酸化膜と基地との密着性の確保も合金設計における重要な課題である。

#### 2.1.2 熱変形

熱変形の駆動力は、集管部の圧縮の塑(そ)性変形に起因する。つまり、耐久中にエキマニ集管部の熱膨張によるひずみの一部が、締結ボルトの締めつけ力やガスケットの摩擦力等により押さえられると、集管部に圧縮ひずみが生じ、圧縮の塑性変形により収縮する。その収縮にフランジ部が追従する間は、「収縮変形」によりエキマニに生じるひずみが開放される。しかし、フランジ部が締結ボルトにより拘束され、収縮変形が困難になると、エキマニは両端が反りあがる「反り変形」を起こすと同時に塑性ひずみが蓄積を始める。

したがって、もし高温で生じる圧縮ひずみに対して、集管部が十分に抵抗できる耐力やクリープ強度といった材料強度を確保できるならば、高温における塑性変形量は小さくなり、熱変形量が抑制される。

#### 2.1.3 熱き裂

前述の熱変形がさらに進むと、エキマニにき裂が生じる。そのメカニズムは以下の2種類に区分される。

##### (1) 自由収縮を伴わない熱疲労き裂

単体熱疲労評価試験装置(排気シミュレータ)<sup>1),2)</sup>を用いて、試験中に2気筒エキマニ収縮挙動を測定した(図2参照)。

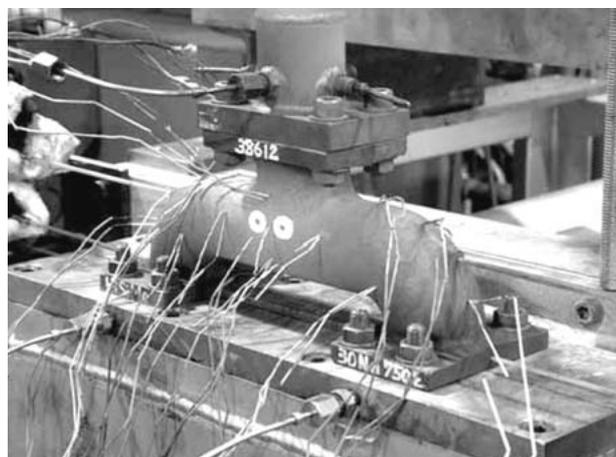


図2 排気シミュレータによる2気筒エキマニ赤熱試験状況

排気シミュレータにより、加熱10分×冷却10分の試験モードで耐久試験を行った。2気筒エキマニの集管部(標点間距離227 mm)とフランジ部に膨張収縮挙動を測定する測定器をセットしている。表面温度は、熱電対をスポット溶接して測定する。

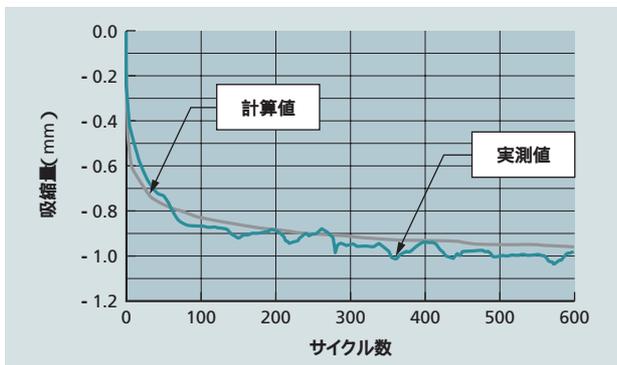


図3 2気筒エキマニの収縮挙動（フランジ移動なし）  
 加熱10分×冷却10分の試験モードで耐久試験を行った結果、エキマニの集合管部（標点間距離227 mm）に塑性ひずみが徐々に蓄積することにより、収縮量は曲線を描きながら増加し、やがて熱膨張量とバランスする。また、最小クリープ速度より計算で求めたクリープひずみ曲線が実測値と一致する。

エキマニのフランジ部が連結され一体化して収縮しない場合には、エキマニは耐久初期から加熱時に生じる塑性ひずみの蓄積が始まり、熱膨張量とバランスする大きさまで増加していく（図3参照）。

そのひずみの増加曲線は熱変形の影響を受けており、塑性変形のみと、後述するクリープ速度から計算により推定することが可能である。

そして、この蓄積された塑性ひずみは室温において引張ひずみに変わり、熱疲労き裂を引き起こす。このき裂寿命は、引張ひずみの値とMansonの式から整理されるひずみ疲労寿命線図からマイナー則により推定することが可能である。

(2) 自由収縮を伴う熱疲労き裂

エキマニのフランジ部が自由に収縮する場合、その収縮範囲内では、フランジが締結ボルトにより拘束されるまで塑性ひずみは蓄積しない。そして、ボルトに拘束されて初めて自由収縮を伴わない熱疲労き裂と同じメカニズムにより、塑性ひずみの蓄積が始まり、この蓄積された

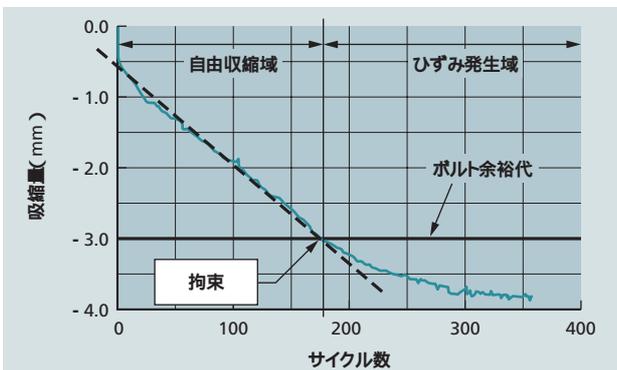


図4 2気筒エキマニの収縮挙動（フランジ移動あり）  
 加熱10分×冷却10分の試験モードで耐久試験を行った結果、フランジが自由収縮できる場合には、フランジ部が締結ボルト等に拘束されるまでは収縮変形により、ひずみエネルギーを開放するためにエキマニの集合管部（標点間距離227 mm）に塑性ひずみは蓄積しない。収縮量がボルト余裕代を超えると、拘束による塑性ひずみの蓄積が始まり、徐々に増加しながら、拘束後の収縮量が熱膨張量とバランスするまで続く。

塑性ひずみが室温において引張ひずみに変わり、熱疲労き裂を引き起こす。したがって、き裂寿命は、塑性変形による収縮速度と締結ボルトとボルト孔との間の余裕代との関係で決まり、余裕代が大きくなると拘束されるまでの時間が稼げるため、き裂寿命は長くなる（図4参照）。

2.2 主要耐熱材の適用温度範囲

2.2.1 耐酸化性

当社で測定した各主要耐熱材の酸化減量と雰囲気温度（試験片表面温度）との関係を図5に示す。

酸化減量は、大気雰囲気下で200時間の酸化試験終了後に表面の酸化膜を除去し、試験前後の試験片の重量差を試験片表面積で除して求めている。

酸化減量が0.20 kg/m<sup>2</sup>（膜厚にして約0.3 mm）を超える表面温度を酸化開始温度と定義して図5から求め、表1に記載する。

フェライト系耐熱鋳鉄材である高Si-Mo鋳鉄（以下、4.0Si-0.5Mo鋳鉄と言う。）は、Si添加により耐酸化性を向上させた球状黒鉛鋳鉄材であるが、700 以上の表面温度になると酸化が急激に進み始める。

オーステナイト系球状黒鉛鋳鉄のFCDA-NiSiCr35 5 2（以下、ニレジストD5Sと言う。）の酸化増加速度は緩や

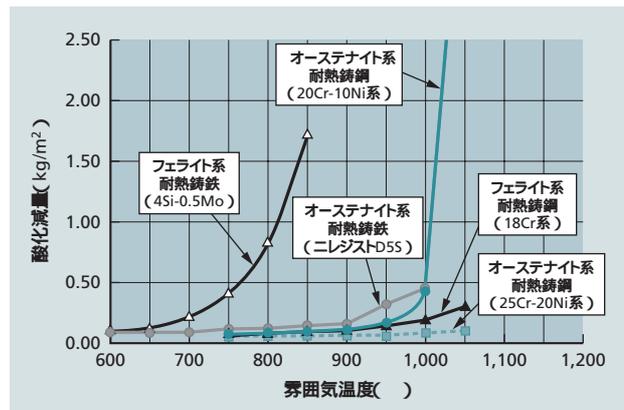


図5 主要耐熱材の耐酸化性比較（200時間）  
 フェライト系耐熱鋳鉄は約700 を超えると急激に酸化が生じる。また、20Cr-10Niのオーステナイト系耐熱鋳鋼も970 を超えると酸化が急激に進む。

表1 主要耐熱材の酸化開始温度

フェライト系耐熱鋳鉄材である4.0Si-0.5Mo鋳鉄の酸化開始温度は700 以下、20Cr-10Ni系耐熱鋳鋼はオーステナイト系であるにもかかわらず酸化開始温度が1,000 を切っている。

主要耐熱材料	基地	酸化開始温度
4.0Si-0.5Mo鋳鉄		690
ニレジストD5S		920
18Cr系耐熱鋳鋼		1,000
20Cr-10Ni系耐熱鋳鋼		970
25Cr-20Ni系耐熱鋳鋼		> 1,050

注：略語説明 （フェライト系）、（オーステナイト系）

かであり、4.0Si-0.5Mo 鋳鉄よりも優れた耐酸化性を示す。これは、基地に含まれるSiとCrの効果である。

18mass%のCrを含有するフェライト系耐熱鋳鋼は、耐酸化性に優れており、1,000 においても十分な耐酸化性がある。これは、フェライト系耐熱鋳鋼の基地が原子の充填(てん)密度が低いBCC (Body Centered Cubic) 結晶格子であるために、FCC (Face Centered Cubic) 結晶格子であるオーステナイト系耐熱鋳鋼と比較して、Crの拡散速度が速く、表面に緻(ち)密で強固なCr酸化物皮膜を形成しやすいためである<sup>3)</sup>。

20Cr-10Ni系オーステナイト系耐熱鋳鋼は、970 以上の表面温度になると酸化が急激に進行する。しかし、同じオーステナイト系耐熱鋳鋼でも、25Cr-20Ni系鋳鋼の材料は、1,000 以上の表面温度でも優れた耐酸化性を示している。この理由は、耐酸化性に寄与する元素であるCrの含有量の差によるためである。

このように、耐熱材料の耐酸化性は、SiやCrといった耐酸化性に影響を及ぼす元素をうまく添加することより改善することが可能である。したがって、新材料を開発する場合には、加工性や鋳造性とのバランスを考慮しながら最適な合金設計を行う必要がある。

## 2.2.2 耐熱変形性

3種類の異なるオーステナイト系耐熱鋳鋼で鋳造した全長約460 mmの6気筒エキマニによる耐久試験において、100サイクル時点における各エキマニの収縮量と同じ試験温度での各材料の最小クリープ速度との関係を求めた結果、両者の間に相関性があることが明らかになった(図6参照)。

同図より、両者の間に負の相関性があり、高温における最小クリープ速度が遅い材料ほど耐熱変形性に優れて

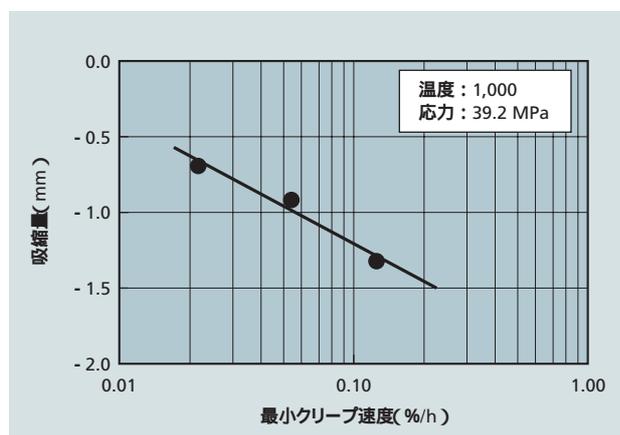


図6 100サイクル目のエキマニ収縮量と最小クリープ速度の関係

異なる材質のオーステナイト系耐熱鋳鋼により、表面温度1,000、加熱10分×冷却10分の試験モードの耐久試験中に実測された100サイクル時点の収縮量と、同材の応力39.2 MPaでの最小クリープ速度との間に負の相関性が認められる。これから、エキマニの塑性変形には最小クリープ速度が関係していることが明らかである。

いることが明らかである。

拘束率 = 0.25の条件で、材料ごとの熱膨張量により生じる熱応力から求めた800 と1,000 における最小クリープ速度を比較するとオーステナイト系の材料のほうが優れている(表2参照)。

800 における最小クリープ速度は、フェライト系耐熱材料である4.0Si-0.5Mo 鋳鉄と18Cr系耐熱鋳鋼が大きい。これは、フェライト基地の高温耐力や最小クリープ速度の値がオーステナイト基地と比較して大きいため、熱膨張によって生じたひずみに対して、十分に抵抗できずに圧縮の塑性変形を起こしやすいためである。

## 2.2.3 耐熱き裂性

エキマニに生じるき裂は、加熱時に圧縮塑性変形を起こしたエキマニが室温にまで冷却されたときに、塑性変形分だけ初期形状よりも余計に収縮して生じる引張ひずみにより、引き起こされる熱疲労により生じている。

主要耐熱材料の低サイクル疲労試験で得られた塑性ひずみ  $\rho$  と高サイクル疲労試験で得られた弾性ひずみ  $\epsilon$  の値を用いて全ひずみ範囲の式を求めた。

エキマニに生じるき裂は、基本的には低サイクル疲労によるものであるが、その原因となる表面ひずみは、特に熱疲労の場合には、近似的に  $\rho$   $\epsilon$  としてすべて塑性ひずみと見なすことができる<sup>4)</sup>。

以上の結果を基に1,500サイクルでき裂が生じるエキマニの表面温度を熱き裂開始温度と定義して求めた(表3

表2 主要耐熱材の最小クリープ速度

最小クリープ速度は耐熱変形性に影響を及ぼすが、基地がフェライト系である4.0Si-0.5Mo 鋳鉄および18Cr系耐熱鋳鋼はオーステナイト系と比較してクリープ速度が大きい。

主要耐熱材料	基地	最小クリープ速度(%/h)	
		800	1,000
4.0Si-0.5Mo 鋳鉄		0.0417	-
ニレジストD5S		0.0017	-
18Cr系耐熱鋳鋼		0.0099	-
20Cr-10Ni系耐熱鋳鋼		0.0001	0.0001
25Cr-20Ni系耐熱鋳鋼		-	0.0060

表3 主要耐熱材の熱き裂開始温度(  $\nu = 0.25$  )

耐久試験1,500サイクルで熱き裂が起こる温度は、オーステナイト系耐熱鋳鉄材のニレジストD5Sが際立って悪い。これは、オーステナイト系材料特有の大きな熱膨張率により生じる熱ひずみに対し材料強度が小さく、き裂によりひずみエネルギーを開放するためである。

主要耐熱材料	基地	熱き裂開始温度
4.0Si-0.5Mo 鋳鉄		800
ニレジストD5S		670
18Cr系耐熱鋳鋼		> 1,000
20Cr-10Ni系耐熱鋳鋼		990
25Cr-20Ni系耐熱鋳鋼		980

参照)。

同表より、フェライト系耐熱鋳鉄である4.0Si-0.5Mo鋳鉄の熱き裂開始温度は、ニレジストD5Sよりも高温になっている。これは、4.0Si-0.5Mo鋳鉄は、ニレジストD5Sと比較して高温耐力や最小クリープ速度に代表される材料強度が小さいものの高温における熱ひずみの原因となる熱膨張量も相対的に小さいために両者がバランスし、き裂が生じにくいのに対し、ニレジストD5Sは、オーステナイト系特有の大きな熱膨張による大きなひずみが生じるにもかかわらず、高温耐力や最小クリープ速度が相対的に小さいためにき裂を生じやすいためであると考えられる。

### 3 今後のエキマニやタービンハウジングの動向

#### 3.1 排気系部材としての材料

使用温度に対して最適な排気系部材を選択するには、前述した耐酸化性、耐熱変形性、耐熱き裂性の三つの材質特性と要求される耐久寿命とを考慮して総合的に決定する必要がある。

ここでは、上記結果を基に、500時間(1,500サイクル)程度の耐久評価条件における、主要耐熱材料の特長と今後の動向をまとめる。

エキマニの適用温度は、一般的なエキマニの表面温度分布を考慮して推定した最高表面温度で代表させた。

なお、エキマニの最高表面温度は、遮熱板を付けない場合には、排出ガス温度より約80~100℃低い温度であることが実験的に求められている。

##### 3.1.1 フェライト系耐熱鋳鉄

この系を代表する4.0Si-0.5Mo鋳鉄は、表面温度が約700℃を超えると耐酸化性が低下し微細な表面き裂が発生する可能性がある。また、最小クリープ速度が大きいいため、熱変形による大きな収縮により、比較的早い段階から大きな引張ひずみがエキマニに作用すると考えられる。

したがって実用的には最高表面温度が750℃以下であれば、安定して使用可能な材料であると考えている。最近では主にディーゼルエンジン用エキマニ材として使用されているが、材料としての使用限界に近づきつつある。

当社は、Siの含有量を高めて / 変態温度と耐酸化性を上げるとともに、耐熱変形性を向上させた新フェライト系耐熱鋳鉄材料として「ハーキュナイト-MX」を開発し、実用化している<sup>5)</sup>。

##### 3.1.2 オーステナイト系耐熱鋳鉄

この系を代表する耐熱鋳鉄材としては、ニレジストD5Sが挙げられる。この材料は、表面にSiの緻密な酸化膜を形成し、酸化開始温度が920℃という鋳鉄系としては非

常に優れた耐酸化性を有しているが、熱き裂開始温度が670℃と低く、耐熱き裂性に難点があるため、実用上は主にタービンハウジング材として、最高表面温度が850℃以下の温度域で安定して使用可能な材料であると考えている。

##### 3.1.3 フェライト系耐熱鋳鋼

この系を代表する標準的な耐熱鋳鋼材は少なく、実用材として各社が独自に開発している材料が使用されている。当社は、18Cr系ステンレス鋼をベースにNbを添加し、Crと結合するCをNbCとして固定し、基地に溶け込むCr量を増加させて大幅に耐酸化性を向上させ、同時に加工性を改善した耐熱鋳鋼材の「ハーキュナイト-F5N」を開発し、欧州市場のお客様を中心に採用されてきている<sup>6)</sup>。

本材料の耐酸化性は、表面に緻密で強固なCr酸化膜を形成するため非常に良好であり、かつ熱疲労き裂に対しても非常に優れている。しかし、最小クリープ速度がやや大きいため、耐熱変形性を考慮して最高表面温度920℃以下の温度域での使用が推奨される。近年、優れた耐酸化性からディーゼルエンジン用エキマニおよびタービンハウジング材として注目を浴びている。

##### 3.1.4 オーステナイト系耐熱鋳鋼

この系を代表する耐熱鋳鋼材は数多くあり、20Cr-10Ni系(SCH12)、25Cr-20Ni系(SCH21、SCH22、HK30、HK40、1.4848)、18Cr-37Ni系(1.4849、1.4865)等が挙げられる。また、当社が開発した実用材としてはNbやW等を添加することにより、高温特性を維持して鋳造性や加工性を向上させた20Cr-10Niの「ハーキュナイト-A3N、A3K、A4N」や25Cr-20Ni系の「ハーキュナイト-A5N」等があり、欧州市場を中心に需要が伸びている<sup>7)</sup>。

この系の材料は、耐酸化性、耐熱変形性、耐熱き裂性の三つの材質特性がほぼバランスしており、安定した高温特性を有する材料である。

20Cr-10Ni系は、最高表面温度が1,000℃以下の温度域で、25Cr-20Ni系は1,050℃以下の温度域で使用される材料である。実用的には、20Cr-10Ni系と25Cr-20Ni系の使用温度域の違いは、ほぼ酸化開始温度の違いによるものである。

これらの材料は、次世代ガソリンエンジン用の主にタービンハウジングやターボ一体型マニホールド「マニターボ」用として中心になる材料である。

#### 3.2 鋳物としての排気系部材

ターボを搭載しない自然吸気エンジンは、コストおよびヒートマスを含む軽量化の観点から板金プレスタイプや鋼管タイプのエキマニが主流であり、特に二重管パイ

プエキマニが高排温対応エキマニ用として用いられている<sup>8)9)</sup>。最近では、触媒の活性化時間短縮のためにはヒートマスを下げるより、排出ガスの流れを最適化してガスケット間の熱伝達量を低く抑えたほうがよい<sup>10)11)</sup>という考えから、形状自由度のある鑄造エキマニを採用する自動車メーカーも現れてきている。

一方、ターボ搭載エンジンでは、ターボの支持剛性と薄肉でかつ複雑な形状に対応するために、鑄造エキマニが採用されている。さらに、タービンハウジングに関しては、ツインチャージャ、2ステージターボやモーターアシストターボといった複雑な機構を有するものが増加する傾向にあり、その結果、タービンハウジングの形状が極めて複雑になり、鑄造品の重要度が増加している。

現在の欧州市場における最新の高性能ガソリンエンジンは、燃費向上を優先するために、排出ガス温度は1,050にもなっている。したがって、次世代エンジンに搭載される開発エキマニ用材料としては、25Cr-20Ni系のオーステナイト系耐熱鑄鋼がその優れた耐熱特性により選択されている。そして、鑄造エキマニにはターボ支持剛性や振動、騒音対策、排出ガスの流れを考慮した形状設計の自由度が大きく、かつ複雑形状でありながら、耐熱鑄鋼で肉厚2.5 mmの超薄肉のタービンハウジングやターボとエキマニの鑄造一体化品も製造できる柔軟性を持つというパイプエキマニにはない特長を有している。そのため、鑄造エキマニを選択するメーカーも増えており、今後もその重要性は増加していくであろう。

## 4 おわりに

今回、高排温エンジン対応排気系耐熱鑄造材を取り上げ、それらに関する一連の技術的な考えを述べたが、高温で使用される排気系部材に懸念される、(1)酸化、(2)熱変形、(3)熱き裂の三つの因子は、複雑に作用し、例えばエキマニ表面に生じる酸化膜は表面き裂の起点となり、熱変形による反りはガス漏れ、収縮はボルトに拘束されるまでの時間と引張ひずみの増加速度に関与し、き裂の原因となると考えている。このような現象はコンピュータで容易に解決できるものではなく、個々のエンジンの使用条件を把握して、その条件に合致した最適材料を提案し、そしてその材料特性を考慮した製品開発を行うことが重要である。

今日、当社の開発した排気系部品用の耐熱材料である「ハーキュナイト」をはじめとして、各社さまざまな特徴ある耐熱材料を開発してきている。高温で使用できるこれらの材料および製品が存在して、初めて高性能でかつ

省エネルギー、低燃費のエンジンが開発できるのである。

今後も、自動車用の排気系部材の提供を通じて地球環境の改善と地球温暖化防止に寄与できると信じて、開発を続けていきたい。

### 参考文献

- 1) 矢野，外：排気マニホールド単体加熱評価装置，日立金属技報，Vol.3，72（1987）
- 2) 三宅，外：非酸化雰囲気排気シミュレータの開発，日立金属技報，Vol.20，69（2004）
- 3) 梶村：自動車エンジン排気系への耐熱ステンレス鋼の適用，ふいらむ，Vol.11，No.2，12（2006）
- 4) 川田：金属の疲労と設計，オーム社，182（1982）
- 5) ハーキュナイト-MX製タービンハウジング，日立金属技報，Vol.22，20（2006）
- 6) 大塚，外：エキゾーストマニホールド用耐熱鑄鋼の開発，自動車技術会論文集，Vol.22，No.3，53（1991）
- 7) 伊藤，外：高性能ガソリンエンジン用 HERCUNITE-S NSHR-A5Nの開発，日立金属技報，Vol.22，51（2006）
- 8) 根元：自動車用ステンレス鋼 耐熱鋼の現状と将来，自動車技術，Vol.43，No.6，55（1989）
- 9) 奥：エキゾーストマニホールド用材料の耐熱性，シンポジウム「自動車用材料の高温特性研究の最先端」，No.2，5（2001）
- 10) S. Zidat ,et al.：「Exhaust Manifold Design to Minimize Catalyst Light-off Time」，SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2003-01-0940
- 11) 伊藤：熱容量と熱伝達を考慮した排出ガスの昇温特性に関する理論的考察，自動車技術会2007年春季講演会前刷集No.18-07，15（2007）