

シリンダヘッドガスケット用ステンレス鋼薄板の開発

Development of Stainless Steel Sheets for Cylinder Head Gasket

安達和彦* 中山英介 渋谷将行 福村雄一
Kazuhiko ADACHI Eisuke NAKAYAMA Masayuki SHIBUYA Yuichi FUKUMURA

藤澤一芳 栗田篤
Kazuyoshi FUJISAWA Atsushi KURITA

抄 録

環境問題に対応し、自動車に広く適用可能な高性能ガスケット用ステンレス鋼板の開発、実用化を推進中である。実用化に成功した微細粒準安定オーステナイト系ステンレス鋼である“NSSMC-NAR-301L HS1 (HS1)”, 窒素吸収を活用した超微細粒鋼“NSSMC-NAR-301L HSX (HSX)”, 経済的なマルテンサイト系ステンレス鋼を適用した“NSSMC-NAR-403 2D-Q (2D-Q)”について紹介した。(1) HS1 は結晶粒径 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ を達成し、従来の SUS301 と比較して疲労強度を 30% 以上向上した。(2) HSX は窒素吸収により表層部での結晶粒径 $1.2 \mu\text{m}$ というさらなる微細化を達成し、高燃焼圧化に対応する時効硬化とともに、HS1 に対して疲労強度をさらに 20% 向上した。(3) 2D-Q は二相域焼き入れにより結晶粒径 $10 \mu\text{m}$ 程度を維持し、SUS304 調質圧延材に対して引張特性の異方性を低減した。

Abstract

Stainless steels with high strength and high fatigue strength for cylinder head gasket were developed to contribute to development of conventional automobiles and improvement of environment. In this paper, practicable steels were presented, fine grained metastable austenitic stainless steel “NSSMC-NAR-301L HS1 (HS1)”, ultra-fine grained metastable austenitic stainless steel “NSSMC-NAR-301L HSX (HSX)” by nitrogen absorption treatment, and economical martensitic stainless steel “NAR-403 2D-Q (2D-Q)”. (1) HS1 has average grain diameter within $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$. The fatigue strength of HS1 is improved more than 30% as compared to one of conventional steel (SUS301). (2) HSX has average grain diameter within $1.2 \mu\text{m}$ near surface. The fatigue strength of HSX is improved around 20% as compared to one of HS1, with improvement of age hardening for increment of combustion pressure. (3) 2D-Q have average grain diameter around $10 \mu\text{m}$ after quenching from dual-phase area at high temperature. The anisotropy of tensile properties in 2D-Q is improved as compared to one of temper rolled SUS304.

1. 緒 言

自動車エンジンは、シリンダヘッド（以下、ヘッド）とシリンダブロック（以下、ブロック）に分割されている。ヘッドとブロックの間には、シリンダヘッドガスケット（以下、ガスケット）が挿入され、高圧の燃焼ガスや冷却水等の内部流体の漏出を防止している。1990 年代以前は、アスベストが主に使用されていた。しかし、近年、機能性、耐久性に優れるステンレス鋼が、内部流体の漏れ防止のため表面に薄いゴムをコーティングされ適用されている。

ガスケットを含むエンジンの構造を図 1 に示す。ガスケットは一般に薄板数枚で構成されており、燃焼室の周囲には

ビードと呼ばれる凸部がプレス成形され、その反発力により内部流体を分離、密閉している。このため、その素材には高い強度と優れた加工性を両立する準安定オーステナイト系ステンレス鋼が適用される。これらの鋼は加工誘起マルテンサイト変態をともなう大きな硬化を特徴とし、一般に冷間圧延により板厚 0.2mm 前後にて機械的性質を調整（調質圧延）した状態で使用される¹⁾³⁾。

ガスケットのビードに作用する応力を図 2 に示す。ガスケットは、図 1 のようにエンジンへの組み込み（非燃焼）時にはヘッドとブロックの間に挟まれ、上下からボルトにて締め込まれる。このため、ビード裾部などに局部的に高い引張応力が発生する。エンジンの燃焼時にはヘッドが持

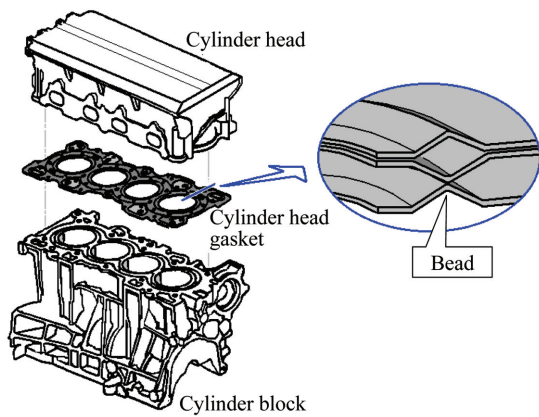


図1 ガスケットを含むエンジンの構造
Relationship between automobile engine and cylinder head gasket

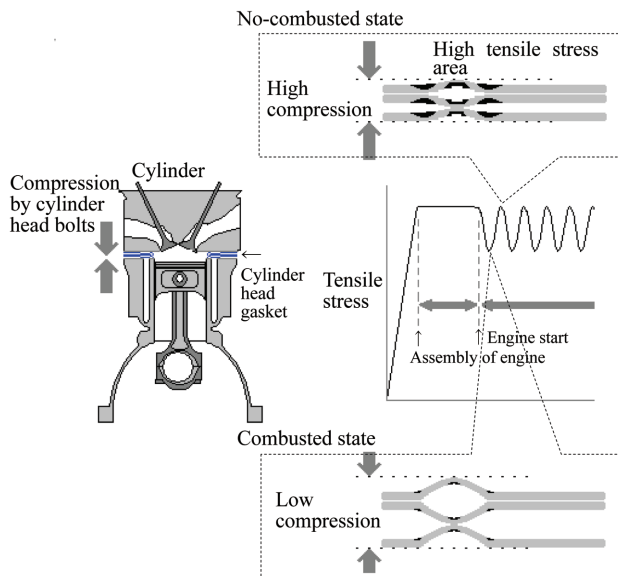


図2 ガスケットのビードに作用する引張応力
Tensile stress at bead of gasket during engine running

ち上げられ、ブロックとの間に隙間（口開き）を生じるが、ビードは弾性変形により追従して密閉性を維持する。このとき、裾部での引張応力は減少する。すなわち、ビード裾部には局部的に高い繰返し引張応力が作用するため、素材には疲労強度も必要となる。なお、この繰返し引張応力の変動範囲は、一般に口開きの量に比例すると考えられる³⁾。

自動車の販売台数は新興国を中心に現在も増加を続けている。自動車メーカーでは、環境問題に対応した低燃費化、CO₂ガスや環境汚染物質の排出量削減に対応する検討が進められている。これらには、燃焼効率の向上を目的とする高燃焼圧化や自動車のエンジンの軽量化が有効である。しかし、軽量化にはエンジンの剛性を低下させる一面もあり、これらの対策は、いずれもエンジン燃焼時の口開き量を増加させる。このため、素材にはより高い静的強度と疲労強度が必要となる。すなわち、素材メーカーとして検討すべき重要課題は、それらのニーズに対応する高性能材の開発である。

ここで、ビード成形前の素材（平滑な材料）の疲労強度は静的強度と正の相関がある⁴⁾のに対して、ビードを成形したガスケットの疲労強度は必ずしも静的強度と対応しないことが桂井らにより明らかにされている³⁾。これは、ガスケットがビード裾部に形成された塑性変形部の表面凹凸、すなわち応力集中部を起点として疲労破壊するためであり、ガスケット材の適正な評価のためには、応力集中の影響を評価できる疲労試験方法の確立が必要である。

今一つの重要課題は、自動車の増加に対応する稀少金属を低減した省資源型材料の開発である。これには環境問題としての側面もあり、新日鐵住金(株)を含めた素材メーカーで取り組みが既に進められている。具体的には、現在、適用される準安定オーステナイト系ステンレス鋼の主要成分の一つであり、レアメタルにも指定される高価なNiを含有せず、エンジンの高燃焼圧化に対応する高強度を熱処理にて得られるマルテンサイト系ステンレス鋼の開発が有効である⁵⁾。

新日鐵住金(株)では、上記課題に対応し、広く適用可能な高性能ガスケット用ステンレス鋼板を開発するとともに、その適用拡大のためにも疲労強度評価方法の検討を進めている⁶⁾。本報告では、実用化に成功した高疲労強度微細粒鋼である“NSSMC-NAR-301L HS1”⁷⁻⁹⁾、同材への窒素吸収活用により静的強度と疲労強度をさらに向上させた超微細粒鋼である“NSSMC-NAR-301L HSX”^{10, 11)}、および経済的なマルテンサイト系ステンレス鋼である“NSSMC-NAR-403 2D-Q”⁵⁾を紹介する。

2. 開発材の特徴および従来材との特性の比較

2.1 高疲労強度細粒鋼 NSSMC-NAR-301L HS1

ビード成形によるマイクロクラックの発生は結晶粒界の影響を受けると考えられ、結晶粒微細化での粒界密度上昇により粒界での不均一な変形を分散することで抑制が期待される。また、結晶粒の微細化は、延性の低下が少ない有効な強化手法であることも広く知られている。

ガスケット材に適用される SUS301 鋼が属する準安定オーステナイト系ステンレス鋼は、冷間加工での加工誘起マルテンサイト変態、その後の熱処理でのオーステナイト母相への逆変態により著しい微細粒組織を得られることが報告^{12, 13)}されている。この機構を安定して活用するため、素材は、①熱処理の低温化に際して、炭化物析出による γ 安定度の変動とCr欠乏層形成による耐食性の劣化を防止するため、低C、高NのSUS301L鋼を選択した上で、②析出物のピン止効果による粒成長抑制のためNbを添加し、③合金元素の調整によりオーステナイト安定度を最適化した。NSSMC-NAR-301L HS1（以下、HS1）の素材となるNSSMC-NAR-301L鋼の化学成分の代表例を表1に示す。HS1の熱処理後の透過電子顕微鏡（TEM）組織を写真1に示す。HS1は平均粒径で1.5～2.0 μm からなる転位密度の

低い等軸粒とともに、熱処理前の加工の影響を残す部分が一部残存した特徴のある微細粒組織を示す。

調質圧延することでガスケット材として最も多く使用されている SUS301 の JIS G 4313 に規定される H 仕様相当 (430HV ~ 490HV) の硬さに調整した。硬さを調整した引張試験片での伸びと応力に関係に及ぼす熱処理後の平均等軸粒径の影響を図3に示す。伸びと最大応力は結晶粒微細化により共に向上し、粒径 $1.8\mu\text{m}$ で極大値に至る。ただし、粒径 $0.8\mu\text{m}$ では、伸びが著しく低下した。同材には熱処理前の加工の影響を残す部分が 50% を超える高い割合で残存した。すなわち、熱処理が不十分であり、結晶粒微細化による効果を充分には得られず、伸びが著しく低下したと考えられる。微細粒開発材と従来の SUS301 (以下、従来材) の調質圧延後の硬さと伸びの関係を図4に示す。開発材は従来材に比べて優れた硬さと伸びのバランスを有することが確認される。

表1 NSSMC-NAR-301L の化学成分の一例 (mass%)
Chemical compositions of NSSMC-NAR-301L (mass %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Nb
0.02	0.49	1.35	17.3	6.6	0.12	0.05

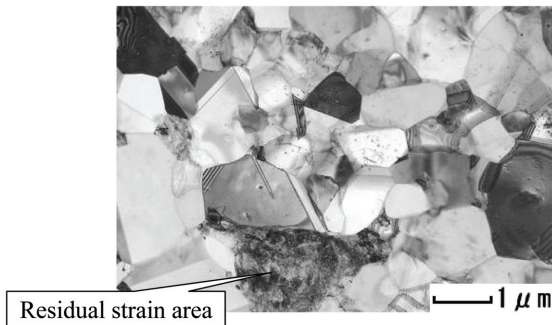


写真1 NSSMC-NAR-301L HS1 の熱処理後の TEM 組織
TEM image of NSSMC-NAR-301L HS1 after annealing

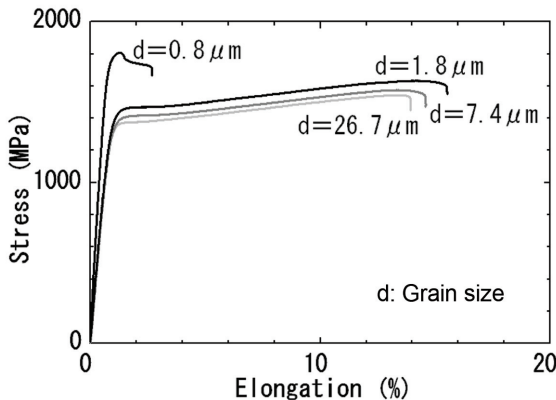


図3 調質圧延材 (460HV) の伸びと応力に関係に及ぼす熱処理後の結晶粒の影響

Effect of grain size after annealing on relationship between elongation and stress in temper rolled NSSMC-NAR-301L (460HV)

460HV 前後に調質圧延した HS1 製ガスケットの疲労試験結果を図5に示す。縦軸に示す所定量の口開きを 10^6 回繰り返した後に板を貫通する疲労き裂が生じた場合を ×, それ以外を ○ にて表記した。開発材は結晶粒微細化により疲労き裂が発生しない最大の口開き量 (以下, 限界口開き量) が増加し, 従来材に比べて限界口開き量が 30% 以上向上する。熱処理後の光学顕微鏡による断面のマイクロ組織とビード裾部表面の外観写真を図6に示す。開発材はビード裾部表面でのマイクロクラックが抑制される。すなわち, 開発材は結晶粒微細化により平滑なビード裾部の表面が維持され, 局所的な引張応力が低減されたと考えられる。これらより, HS1 の結晶粒径は前述の $1.5 \sim 2.0\mu\text{m}$ に限定した。

SUS301 の H 仕様相当 (430HV ~ 490HV) に調質圧延した HS1 の機械的性質の一例を表2に示す。

2.2 高性能超微細粒鋼 NSSMC-NAR-301L HSX

前述の HS1 の開発経緯より, NSSMC-NAR-301L HSX (以下, HSX) では, ビード成形時に最も大きく変形し, エン

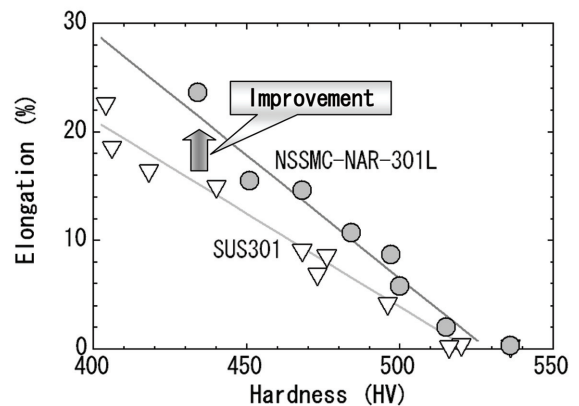


図4 調質圧延材の硬さと伸びの関係
Relationship between hardness and elongation on temper rolled sheets

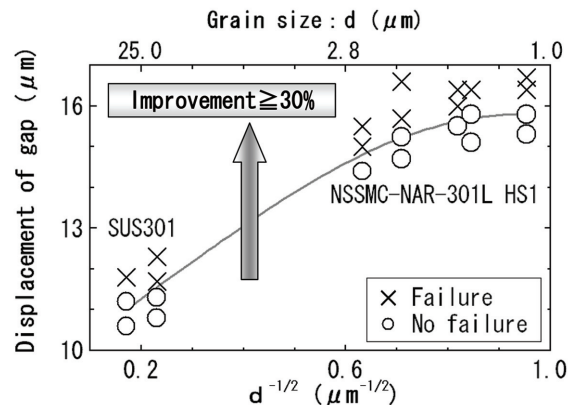


図5 10^6 回繰り返し疲労試験での限界口開き量に及ぼす結晶粒径の影響

Effect of grain size on displacement of limit gap by fatigue test (10^6 cycles)

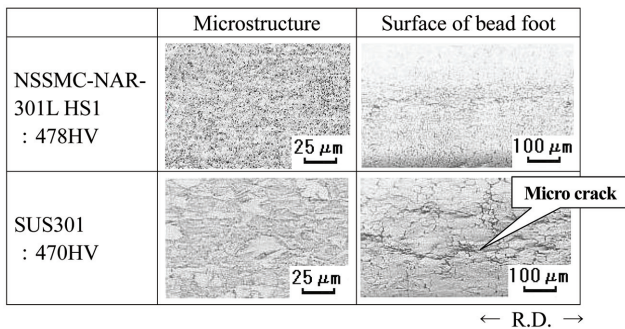


図6 熱処理後の組織とビード裾部表面
Microstructure after annealing and surface of bead foot

表2 NSSMC-NAR-301L HS1 の機械的性質の一例
Mechanical properties of NSSMC-NAR-301L HS1

0.2% Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	Elongation (%)	Hardness HV
1280	1350	15.0	450

エンジンの燃焼時には最大の引張応力が繰り返し付与される板表面に着目し、窒素吸収の活用により表層部のさらなる結晶粒微細化を検討した。また、高燃焼圧化対応のため、ビード成形後のゴムコーティング時の加熱を活用した低温時効硬化についても検討した。

HSXの素材はHS1と同じNSSMC-NAR-301L鋼である。製造工程の概略を図7に示す。以降では同工程に従って説明する。中間熱処理では、窒素と水素の混合ガス雰囲気から窒素を吸収させる。中間熱処理後の組織とElectron probe micro analyzer (EPMA)による線分析の結果を図8に示す。中間熱処理材は窒素吸収での固溶量増加により、表層部のオーステナイト相が安定化し、内部では研磨時に加工誘起変態したと考えられるマルテンサイト相が観察される。EPMAの結果より、表面から100μm程度にわたる窒素濃

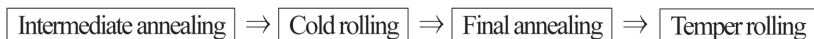


図7 NSSMC-NAR-301L HSX の製造工程概略
Schematic illustration of manufacturing process of NSSMC-NAR-301L HSX

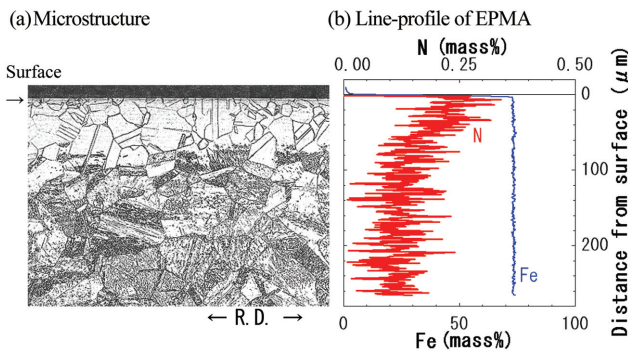


図8 中間熱処理後の組織とEPMA線分析結果
Microstructure and line-profile of EPMA after intermediate annealing

度の増加も確認される。その後、HS1と同様に加工誘起マルテンサイト変態を目的とした冷間圧延が実施される。

最終熱処理後のTEM組織を写真2に示す。表層部は多数の微細なCr-N化合物の析出が観察され、平均粒径にて1.2μm前後の転位密度の低い等軸粒が形成される。これに対して、内部は析出物が少なく、HS1と同様の組織となる。すなわち、表層部のさらなる結晶粒微細化を達成した。その後、SUS301のH仕様相当(430HV~490HV)への調質圧延が実施される。HSXの機械的性質の一例を表3に示す。

さらに、エンジンの高燃焼圧化に対応する高強度化のため、ゴムコーティングを想定した時効熱処理での硬化を調査した。HSXの時効硬化特性を図9に示す。HSXは200℃での十分な時効硬化が確認される。同温度はゴムコーティングでの焼成加硫条件に相当し、ガスケット製造の際に時効熱処理工程を追加すること無く、さらなる高強度が達成される。

HSX製ガスケットのシール性に及ぼす燃焼室内圧力の影響を図10に示す¹⁰⁾。シール圧はガスケットをエンジンに搭載した際の値が同等となるように調整し、燃焼室内圧力を増加させた際の値を測定し、減少率にて表示した。HSX製ガスケットのシール性は、室内圧の増加に対してHS1より高い値を維持する。HSX製ガスケットの疲労試験結果を図11に示す。評価は図5と同様に所定量の口開きを10⁶回繰り返した後に板を貫通する疲労き裂を生じた場合を×、それ以外を○で表記した。HSXはHS1を超える優れた疲労強度を示し、Hall-Petchの関係式にしたがう結晶粒微細化での強化を超え、限界口開き量でさらに20%向上を達成した。これらの高性能化は、写真2、図9に示した表層部での微細析出物による強化が一因として考えられる。

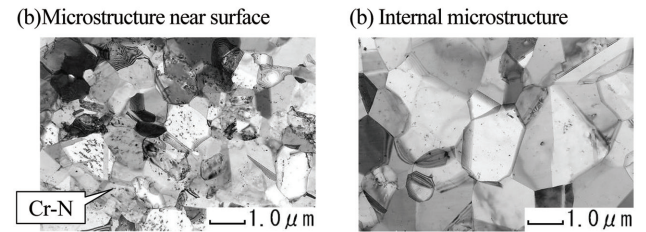


写真2 NSSMC-NAR-301L HSXの最終熱処理後のTEM組織
TEM images of NSSMC-NAR-301L HSX after final annealing

表3 NSSMC-NAR-301L HSXの機械的性質の一例
Mechanical properties of NSSMC-NAR-301L HSX

0.2% Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	Elongation (%)	Hardness HV
1363	1399	6.0	465

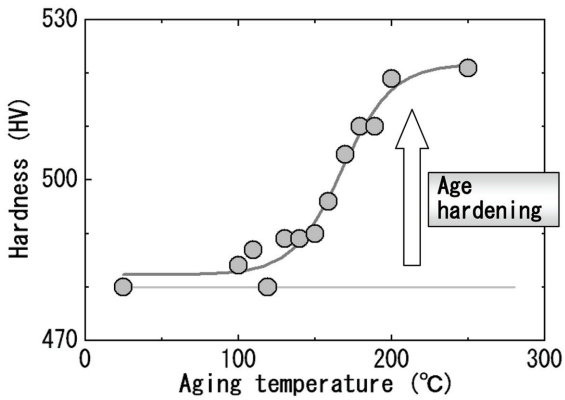


図9 NSSMC-NAR-301L HSX の時効硬化特性 (300s)
Effect of aging temperature (300s) on hardness in NSSMC-NAR-301L HSX

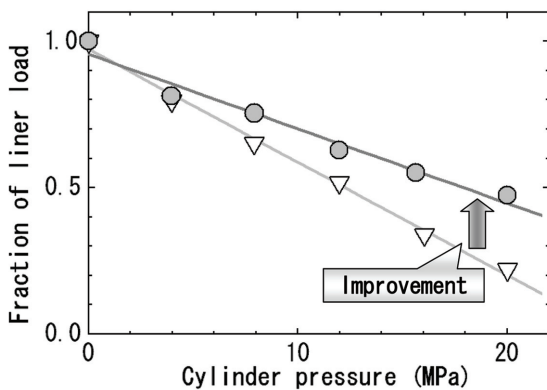


図10 開発材の燃焼室内圧力とシール圧の関係
Relationship between cylinder pressure and seal ability of developed steels

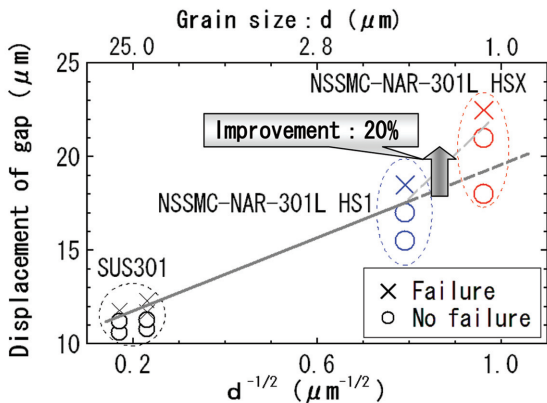


図11 10⁶回繰り返し疲労試験での口開き量に及ぼす結晶粒径の影響
Effect of grain size on displacement of gap by fatigue test (10⁶cycles)

2.3 NSSMC-NAR-403 2D-Q

前述の通り、ガスケットには準安定オーステナイト系ステンレス鋼が多用される。同鋼は冷間加工による加工誘起マルテンサイト変態により容易に高強度化できるものの、レアメタルに指定されるNiを約7mass%含有し、経済性に課題がある。一方、13Crを主成分とするマルテンサイト

系ステンレス鋼は、焼入れ処理により高強度化でき、かつ高価なNiを含有しないため経済性に優れる。そこで13Crを主成分としたマルテンサイト系ステンレス鋼NSSMC-NAR-403 2D-Q (以下、2D-Q)を開発した。

NSSMC-NAR-403 鋼の化学成分の代表例を表4、2D-Qの光学顕微鏡による組織の代表例を写真3に示す。同材は平均結晶粒径10 μ m程度の一部フェライト粒を含むマルテンサイト粒を主体とした二相組織が確認される。焼入れ後のマルテンサイト量と硬さ、伸びの関係を図12に示す。2D-Qは焼入れ条件を制御してマルテンサイトとフェライトの相比率を調整することにより、強度を調整できる。2D-Qの機械的性質の一例を表5に示す。

また、370HV前後に調整した2D-QとSUS304での引張特性の比較を図13に示す。2D-QはSUS304調質圧延材に比べて高強度で伸びが大きく、異方性の小さいことが確認される。すなわち、優れた燃焼ガスのシール性が期待される。これは、圧延方向に伸びた展伸粒と異なり、変態をとまなう焼き入れ熱処理での仕上げにより製品板に等軸粒組

表4 NSSMC-NAR-403の化学成分の一例 (mass%)
Chemical compositions of NSSMC-NAR-403 (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.13	0.30	0.45	0.026	0.03	12.4

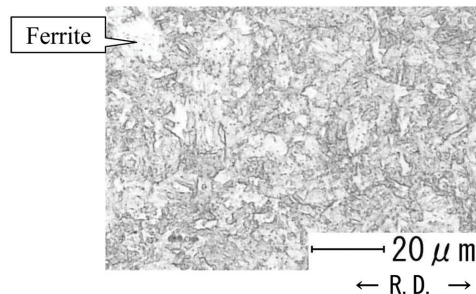


写真3 NSSMC-NAR-403 2D-Qの組織
Microstructure of NSSMC-NAR-403 2D-Q

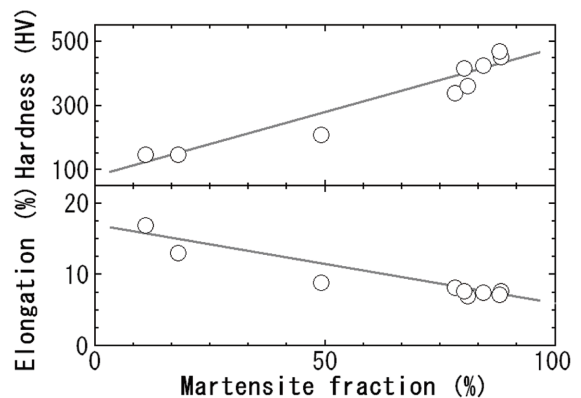


図12 NSSMC-NAR-403 鋼のマルテンサイト量と硬さ、伸びの関係
Relationship between martensite fraction and hardness, elongation on NSSMC-NAR-403

表5 NSSMC-NAR-403 2D-Q の機械的性質の一例
Mechanical properties of NSSMC-NAR-403 2D-Q

0.2% Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	Elongation (%)	Hardness HV
972	1113	10.0	378

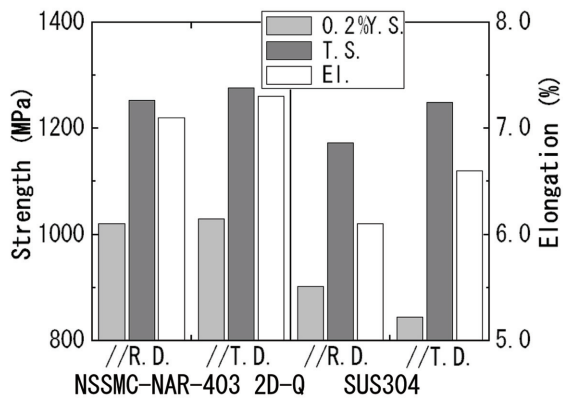


図13 370HV 前後に調整した NSSMC-NAR-403 2D-Q と SUS304 の引張特性の異方性
Anisotropy of tensile properties on NSSMC-NAR-403 2D-Q and temper rolled SUS304 (370HV)

織が維持されることが一因と考えられる。

3. 疲労強度評価方法の確立

ガスケットに適する高性能ステンレス鋼板の開発には、前述したガスケット加工後の疲労強度を正確に把握することが必要と考え、簡便な評価方法の確立を目指している。その一例を紹介する⁹⁾。

鋼板の疲労試験は、軸力負荷もしくは曲げ負荷によって実施されるのが一般的であり、例えば曲げ負荷の疲労試験方法は JIS Z 2275 “金属平板の平面曲げ疲れ試験方法”に規定されている。しかし、平滑な試験片では、ビード成形によって表面に発生するマイクロクラックの影響を評価することができない。また、ビード成形した試験片を用いても、単純な軸力負荷もしくは曲げ負荷では、ヘッドとブロックに挟まれて負荷される実エンジンの力学状態を模擬することは困難である⁹⁾。

そこで、ガスケットとしての疲労強度を適正に評価するために、素材となるステンレス鋼板に実際のガスケットを模擬した円環状のビードを成形した後、図14に示した実際のエンジンの動作環境に対応した繰返し負荷を付与する評価方法を検討した。疲労試験片の形状寸法を図15に示す。円板状に加工した後、中心に燃焼室を想定した穴加工を施してその周囲に高さ0.1mmの円環状のビードを成形した。所定の金型でビードを成形した後、試験初期の圧縮で大きな塑性変形を生じないように、試験前に一度圧縮して形状を整えている。疲労試験には、電気油圧サーボ疲労試験機を使用した。

写真4に、試験機の外観と試験治具の構造を示す。試験片を下側の試験治具上で位置決めし、外周部を固定した後、

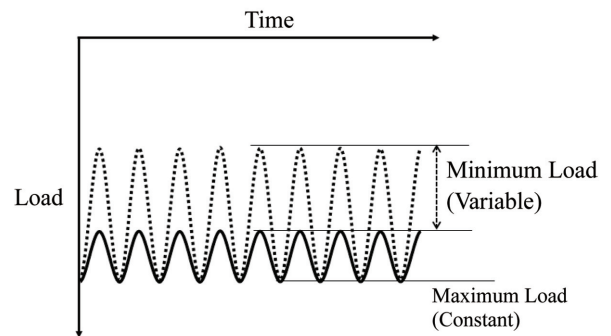


図14 疲労試験での繰返し負荷
Load wave form for fatigue test

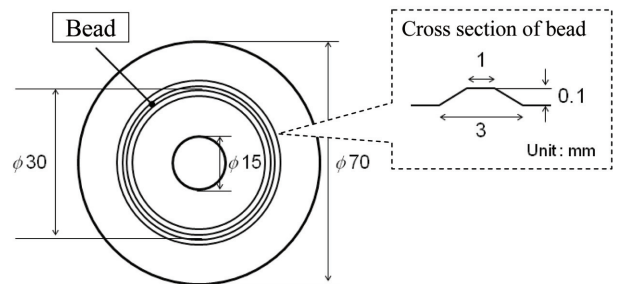


図15 ビード試験片の形状の一例
Shape and dimension of fatigue specimen with bead

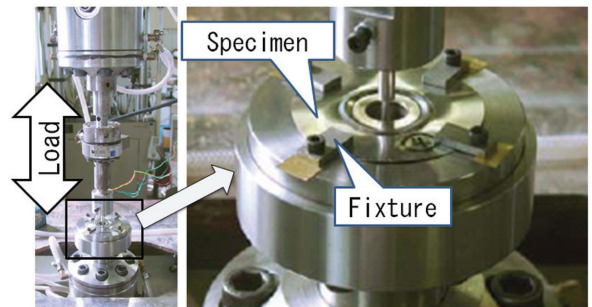


写真4 試験機の外観
Testing apparatus

上側の試験治具でビードに繰返し圧縮荷重を負荷する。疲労試験は室温、大気中において荷重制御で実施し、用いた荷重波形は正弦波、周波数は20Hzとした。ヘッドとブロックの締結状態および非燃焼時に対応するように最大圧縮荷重は40kNで一定とし、最小圧縮荷重を1.5kNから5.0kNの範囲で変化させた。口開き量に相当する上下の試験治具間の相対変位量は、差動トランス変位計を用いて正確に測定した。試験中は疲労き裂の発生有無を確認できないため、繰返し荷重を 2×10^6 サイクル与えた後、試験片を取り外してビード裾部の疲労き裂の有無を光学顕微鏡で確認した。図16に、疲労き裂の一例を示す。疲労き裂はビード裾部で発生しており、繰返し圧縮疲労試験は実際のガスケットと対応した応力負荷条件を再現していると推定される。

図17に、繰返し圧縮疲労試験結果を示す。疲労き裂が発生しない最大の変位量を水平線で示した。HS1は、従来

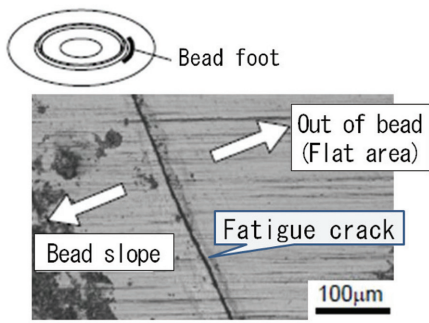


図 16 ビード裾部での疲労き裂
Fatigue crack at bead foot

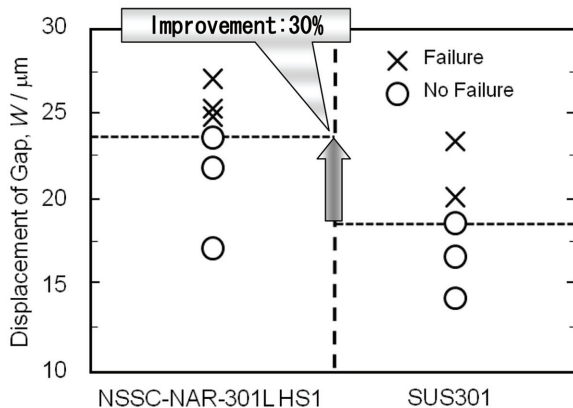


図 17 ビード試験片での疲労試験結果
Fatigue test result of bead specimen

材と比べて疲労き裂発生限界変位が6µm程度高く、実際のガスケットにおける疲労試験結果(図5)と同様に疲労強度が30%程度向上する結果が得られた。

4. 結 言

環境問題に対応し、自動車に広く適用可能な高性能ガスケット用ステンレス鋼板の開発、実用化を推進中である。

ここでは、実用化に成功した微細粒準安定オーステナイト系ステンレス鋼である“NSSMC-NAR-301L HS1 (HS1)”, 窒素吸収を活用した超微細粒鋼“NSSMC-NAR-301L HSX (HSX)”, 経済的なマルテンサイト系ステンレス鋼を適用した“NSSMC-NAR-403 2D-Q (2D-Q)”について紹介した。

- (1) HS1 は結晶粒径 1.5 ~ 2µm を達成し、疲労強度を従来の SUS301 に対して 30% 以上向上した。
- (2) HSX は窒素吸収により表層部での結晶粒径 1.2µm というさらなる微細化を達成し、高燃焼圧化に対応する時効硬化とともに、HS1 に対して疲労強度をさらに 20% 向上した。
- (3) 2D-Q は二相域焼き入れにより結晶粒径 10µm 程度を維持し、SUS304 調質圧延材に対して引張特性の異性を低減した。

参照文献

- 1) 飯泉省三 ほか：ステンレス. 35 (5), 6 (1991)
- 2) 中野恒夫：日本ステンレス技報. 25 (37), 37 (1990)
- 3) 桂井隆 ほか：鉄と鋼. 80 (11), 54 (1994)
- 4) 日本材料学会編：疲労設計便覧. 養賢堂, 1995, p. 9
- 5) 細井祐三：ステンレス鋼の科学と最新技術. 初版. 東京, 日刊工業新聞社, 2011, p. 244
- 6) 福村雄一 ほか：ばね論文集. 57, 25 (2012)
- 7) 桂井隆：Honda R&D Technical Review. 12 (1), 151 (2000)
- 8) 安達和彦 ほか：まてりあ. 47 (1), 36 (2008)
- 9) 安達和彦：ふえらむ. 16 (1), 23 (2011)
- 10) 西山忠夫 ほか：Honda R&D Technical Review. 20 (1), 105 (2008)
- 11) 安達和彦 ほか：まてりあ. 50 (3), 120 (2011)
- 12) 高木節雄 ほか：鉄と鋼. 74 (6), 118 (1988)
- 13) 富村宏紀 ほか：鉄と鋼. 77 (9), 139 (1991)



安達和彦 Kazuhiko ADACHI
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部
主幹研究員 博士(工学)
新潟県上越市港町2-12-1 〒942-8510



福村雄一 Yuichi FUKUMURA
チタン・特殊ステンレス事業部
特殊ステンレス商品技術室 主査



中山英介 Eisuke NAKAYAMA
鉄鋼研究所 交通産機品研究部
主幹研究員 博士(工学)



藤澤一芳 Kazuyoshi FUJISAWA
直江津製造所 製造部 技術室 主査



渋谷将行 Masayuki SHIBUYA
チタン・特殊ステンレス事業部
特殊ステンレス商品技術室長



栗田 篤 Atsushi KURITA
直江津製造所 製造部 技術室