

## 技術資料

## 高温摺動性に優れるオーステナイト系ステンレス鋼“NSSLHT”の開発

熊野尚仁\* 中村定幸\*\* 今川一成\*\*\*

## Development of Austenitic Stainless Steel, NSSLHT Having Excellent Lubricated Property at High Temperature

Naohito Kumano, Sadayuki Nakamura, Kazunari Imakawa

## Synopsis:

We investigated the factors influencing high temperature tribology in the development of a new austenitic stainless steel. The main results are as follows.

- (1) Average dynamic friction in the high temperature tribology depends on the form of the surface oxide involved, and addition of Si forms a dense oxide that maintains low dynamic friction.
- (2) Scratches produced by sliding at high temperature are caused by aggregate acting as an abrasive. Scratch resistance is improved by addition of Si to prevent aggregate formation and by improvement of high temperature strength.
- (3) The newly developed austenitic stainless steel, NSSLHT (19Cr-13Ni-3Si-Nb), has excellent lubricant properties at high temperature and workability suitable for turbocharger applications.

## 1. 緒言

自動車の排ガスによる大気汚染や地球温暖化を抑制するために、ディーゼルエンジンの排ガス規制が強化されており、自動車メーカーでは規制対応に向けた新規技術や部品（ターボチャージャー、EGRクーラー、コモンレール、排ガス浄化システム等）の開発が進められている。その中で、ノズルバーン式ターボチャージャーは低回転域においても過給が働くため、PMやNO<sub>x</sub>の低減に有効な部品として多くのディーゼル車に搭載されている<sup>1)</sup>。

ノズルバーン式ターボチャージャーは高温排ガス環境下でノズルバーンの開度を調整することにより回転数を制御するため、ノズルバーンとプレート間で低い摩擦抵抗や優れる耐磨耗性といった高温摺動性が求められる<sup>2), 3), 4)</sup>。現行のノズルバーン式ターボチャージャーの主要部品は、SUS310S(25Cr-20Ni)やSCH21(25Cr-20Ni-0.3C)と

いった高Niの耐熱鋼が適用され、一部クロマイジング処理や窒化処理等の表面硬化処理も施されることから、ローコストで高温摺動性に優れる耐熱材料が要望されている。

当社では、高温環境下での摺動性を評価するため、独自の試験機を作製し、高温摺動性に及ぼす影響因子を検討してきた。本稿では、高温摺動性に優れるオーステナイト系ステンレス鋼NSSLHTを開発した結果について述べる。

## 2. 供試材および実験方法

表1に供試材の化学成分を示す。検討鋼には、19Cr-13~17Ni-0.1NbをベースにSi量を変化させたものを用いた。多量のSi添加はフェライト相を生成させるため、Ni添加量を調整し、オーステナイト単相化を図っている。比較鋼には現行のターボチャージャー部材として実績の

\*ステンレス・高合金研究所 材料第二研究チーム 主任研究員

\*\*中四国支社 商品開発チーム 上席主任部員（現 退職）

\*\*\*ステンレス・高合金研究所 材料第二研究チーム チームリーダー

表1 供試材の化学成分 (mass%)

Table 1 Chemical composition of specimen (mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	N
検討鋼	0.03	0.3 ~ 5.0	0.8	13 ~ 17	19	0.1	0.02
SUS310S	0.03	0.4	0.4	20	25	—	0.03
SUS304	0.06	0.4	0.8	8	18	—	0.02
NSS302B	0.06	2.5	0.8	9	18	—	0.03
NSS302BN	0.06	1.7	1.0	11	20	0.1	0.15

あるSUS310Sに加え、SUS304(18Cr-8Ni)や当社独自鋼種であるNSS302B(18Cr-9Ni-2.5Si)、NSS302BN(20Cr-11Ni-1.7Si-0.1Nb-0.15N)を用いた。

図1に高温摺動試験片を示す。30kg真空高周波誘導溶解炉で溶製した鋳塊の中央部から、 $100\text{mm}^w \times 100\text{mm}^l \times 40\text{mm}^t$ の熱間圧延用サンプルを切り出し、 $6.5\text{mm}^t$ まで熱間圧延した後、 $1150^\circ\text{C}$ で3minの焼鈍を施した。その後、酸洗し、 $4.0\text{mm}^t$ まで冷間圧延した後、 $1100^\circ\text{C}$ で30sの焼鈍を施した。得られた $4.0\text{mm}^t$ の冷延焼鈍板を $3.0\text{mm}^t$ ま

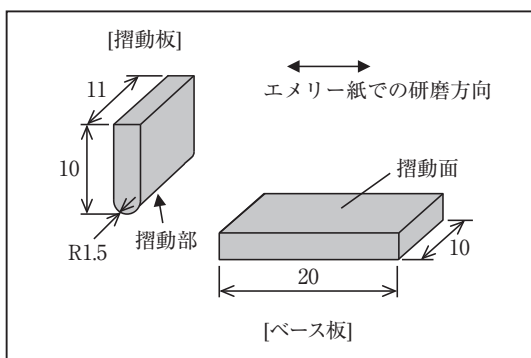


図1 高温摺動試験片

Fig. 1 Specimen for high temperature tribological test.

で表面切削加工した後、ワイヤーカット放電加工で摺動板 ( $11\text{mm}^w \times 10\text{mm}^h$ , 先端 $R=1.5\text{mm}$ ) および評価サンプルとなるベース板 ( $10\text{mm}^w \times 20\text{mm}^l$ ) を作製した。なお、摺動板とベース板が接する摺動部および摺動面は摺動させる方向と平行に#1500のエメリー紙を用いて研磨を施した。

図2に高温摺動試験機の模式図を示す。固定アームおよび摺動アームに摺動板およびベース板を取り付け、セラミックス分銅で垂直荷重を負荷した状態で高温に保持し、摺動アームを一定速度、一定間隔で往復させる機構となっている。

表2に高温摺動試験条件を示す。 $800^\circ\text{C}$ の大気雰囲気中で試験部位を1h均熱保持した後、摺動板に垂直荷重2Nを負荷し、摺動長さ10mmの往復を6s/サイクルの速度で1000サイクル実施した。

表2 高温摺動試験条件

Table 2 Conditions of high temperature tribological test

項目	条件
試験温度	$800^\circ\text{C}$ (均熱1h)
摺動荷重	2N
摺動長さ	10mm往復
摺動時間	6s(1サイクル)
摺動回数	1000サイクル
評価項目	①平均動摩擦力 ②最大疵深さ

図3に高温摺動試験での評価項目を示す。平均動摩擦力は1サイクル中の動摩擦力から摺動中の安定データを抽出し、絶対値の平均値をそのサイクルの平均動摩擦力として評価した。また、最大疵深さは1000サイクル後の表面粗さを摺動方向に対して垂直方向に10ヶ

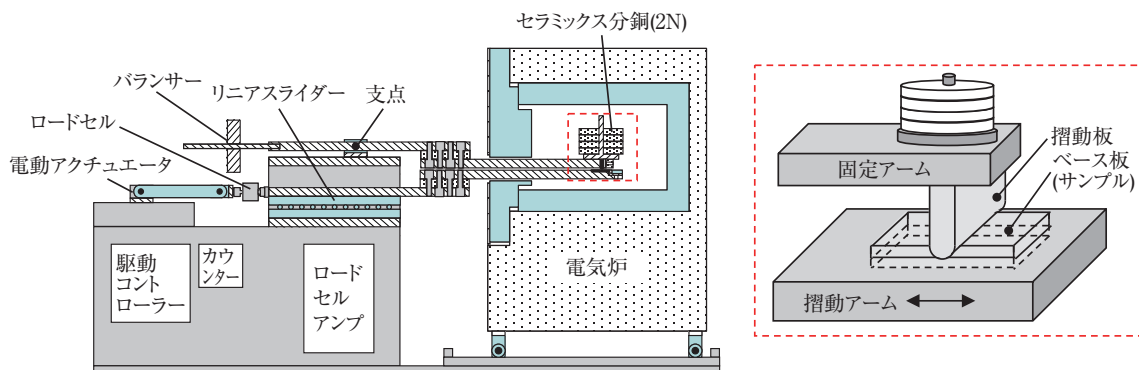


図2 高温摺動試験機の模式図

Fig. 2 Schematic illustration of high temperature tribological tester.

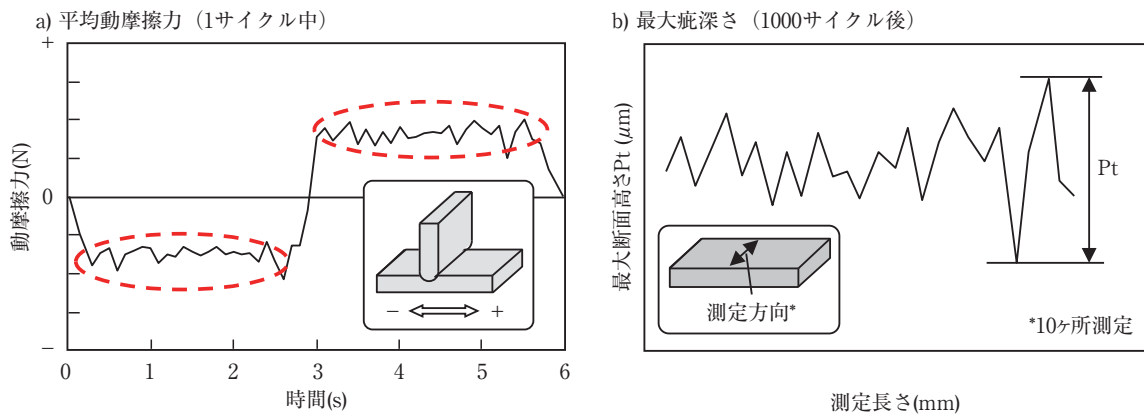


図3 高温摺動試験での評価項目  
 Fig. 3 Evaluation method of high temperature tribological properties.  
 a) average dynamic friction force at one cycle.  
 b) flaw depth after 1000 cycles.

所測定し、その最大断面高さ (Pt) を最大疵深さとして評価した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 高温摺動性評価結果

図4および図5にSUS304, SUS310Sおよび検討鋼を代表して3Si添加鋼の800℃における平均動摩擦力と1000サイクル後のベース板摺動面の外観を示す。SUS304およびSUS310Sは20サイクルまで高い平均動摩擦力を示し、その後、急激に低下するものの、摺動面には多数の凝着物と深い疵が発生している。一方、3Si添加鋼は100サイクルまで低い平均動摩擦力を維持し、1000サイクル後の摺動面における凝着物も少なく、最大疵深さも浅い。

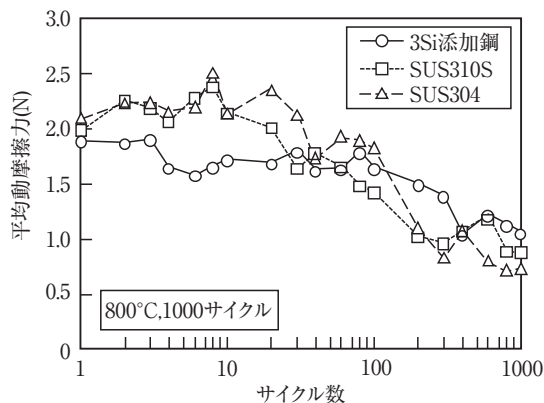


図4 平均動摩擦力の経時変化  
 Fig. 4 Change in average dynamic friction force of SUS304, SUS310S and 3Si addition steel.

供試材	外観(ベース板)	最大疵深さPt
3Si添加鋼	凝着物 → 摺動方向	26.8μm
SUS310S		58.3μm
SUS304	1mm	92.5μm

図5 800℃, 1000サイクル高温摺動試験後の外観 (矢印:凝着物)  
 Fig. 5 Surface appearance of base plates after 1000cycles at 800℃. Arrows show adhesion area.

図6に高温摺動試験前後の表面SEM像を示す。高温摺動試験前は試験開始直前である800℃, 1h加熱後を示しており、高温摺動試験後は面上でも疵発生有無で表面状態が大きく異なるため、疵発生部と疵未発生部をそれぞれ示している。SUS304およびSUS310Sにおいて、高温摺動試験前は表面に針状や角状の酸化物が全面に生成している。高温摺動試験後の疵未発生部では、この酸化物が摺動により剥離し、平滑化されており、疵発生部では粗大な凝着物と母材が露呈している部分が確認される。一方、3Si添加鋼においては、高温摺動試験前および高温摺動試験後の疵未発生部は緻密な酸化物で全面が覆われ、試験前の研磨目が残存した平滑な表面状態を維持している。疵発生部では、凝着物や母材が露呈した部分が確認されるものの、SUS304, SUS310Sに比べると凝着物は小さく、発生数も少ない。

図7に1000サイクル高温摺動試験後の疵発生部断面に

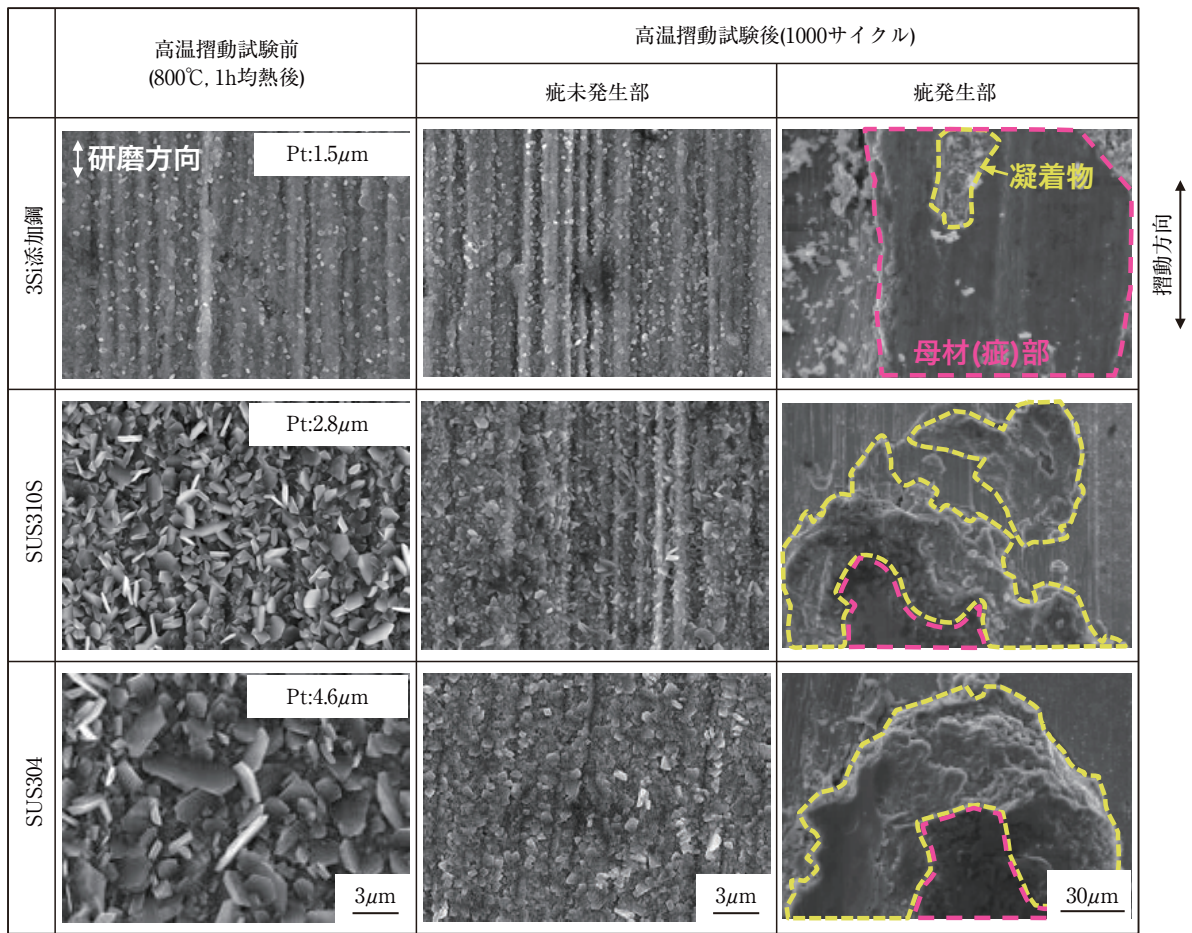


図6 高温摺動試験前後の表面SEM像  
Fig. 6 SEM images of surface before and after high temperature tribological test.

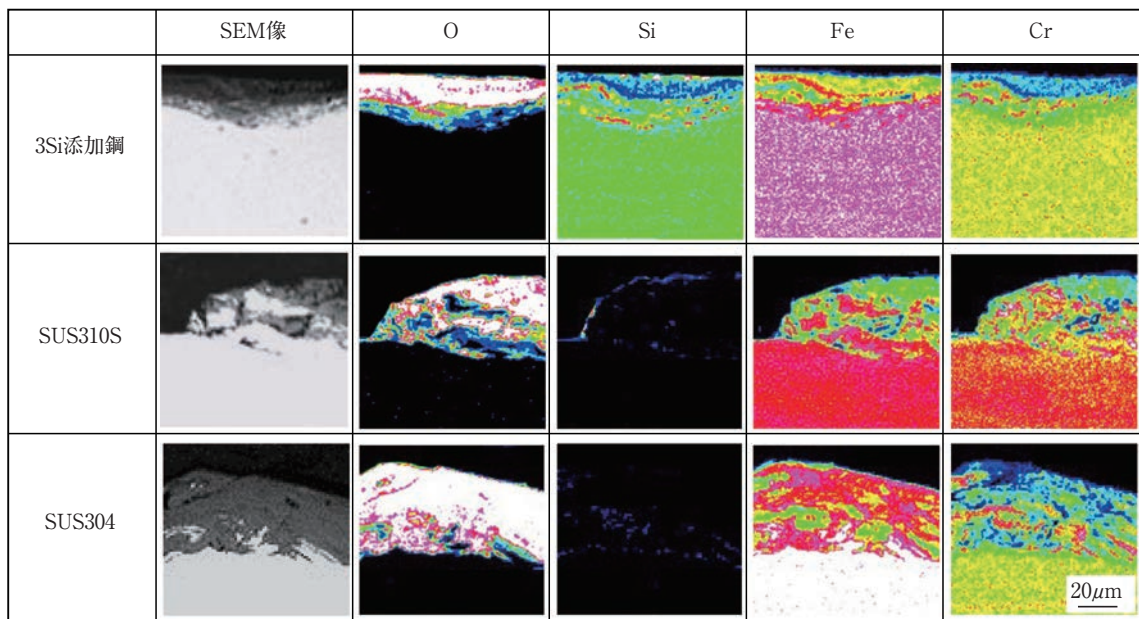


図7 1000サイクル高温摺動試験後の疵発生部断面のEPMA元素分析  
Fig. 7 Cross-sectional structure and distributions of elements scratches part at after 1000 cycles of high temperature tribological test.

におけるEPMA元素分布を示す。SUS304およびSUS310Sでは母材と酸化物が混合した凸状の粗大な凝着物が観察されるのに対し、3Si添加鋼では最表層に母材が混合した酸化物が存在しているものの、軽微なため、今回の断面観察では凸状の凝着物は確認されない。

以上の高温摺動試験および表面観察結果より、平均動摩擦力は、初期の摺動面の酸化状態、最大疵深さは摺動時に生成する凝着物が関与している可能性が高い。

図8に2～10サイクルの平均動摩擦力の平均値とSi添加量の影響を示す。初期の平均動摩擦力は、Si添加量の増加にともない、低くなる傾向を示し、比較鋼のSUS304やNSS302B等も相関性が高い。Si添加により、摺動開始初期から緻密な酸化物に覆われることで、安定して低い平均動摩擦力を維持できるものと推察される。

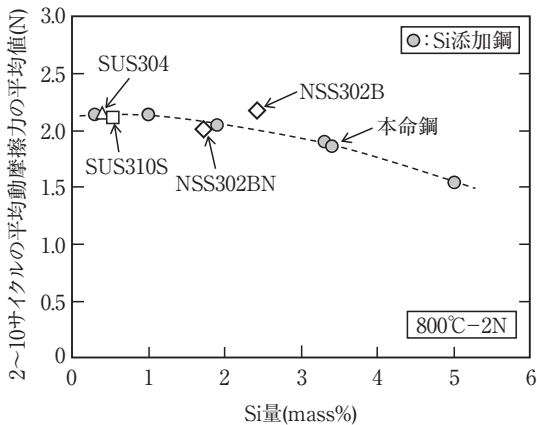


図8 2～10サイクルの平均動摩擦力の平均値に及ぼすSiの影響  
Fig. 8 Effect of Si addition amount on average of average dynamic friction force from 2 to 10 cycles.

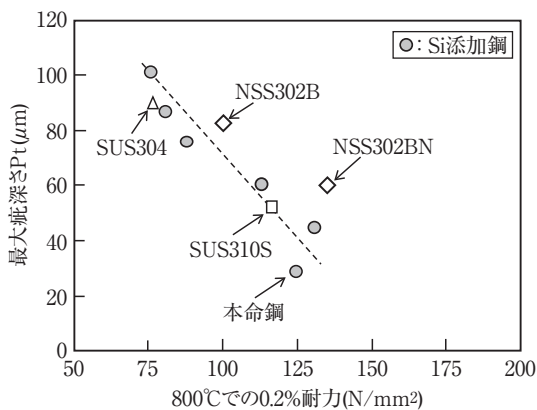


図9 800°Cでの0.2%耐力と最大疵深さの関係 (800°C, 2N, 1000サイクル)  
Fig. 9 Relationship between 0.2% proof stress at 800°C and the maximum scratch depth of specimens in sliding area after 1000cycles at 800°C.

図9に1000サイクル後の最大疵深さと800°Cでの0.2%耐力の関係を示す。1000サイクル後の最大疵深さは、高温耐力が高いほど浅くなる傾向を示し、比較材も含めて非常に良い相関がある。これは、生成した凝着物が研磨剤として作用する際、高温耐力が高いほど疵導入の抵抗となるためと推察される。

図10に上述した結果をもとに推定した、高温摺動時の平均動摩擦力と表面状態の関係を模式的に示す。Si添加量の少ないSUS310S等は加熱時に針状または角状の酸化物が生成するため、初期の動摩擦力が高く、摺動時にその酸化物が剥離し、平滑になると動摩擦力は低下する。しかし、剥離した多量の酸化物が摺動面に堆積、粗大凝着するため、深い疵が発生するものと推定される。一方、高Si添加鋼は、加熱時に表面が緻密な酸化物で覆われるため、初期の動摩擦力が低く、摺動時に発生する剥離量も少ないことから凝着物が少ない。加えて、高温強度も高いことから疵も浅いものと推定される。

以上の結果より、オーステナイト系ステンレス鋼への高Siの添加は、高温摺動部材に要求される低摩擦抵抗と耐磨耗性を両立できる可能性が示された。鋼板表面に緻密な酸化物を生成させるためには、Si添加量を3%以上とすることが望ましい。他方、過度のSi添加は鋼板の製造性および加工性を低下させる懸念があるため、Siの添加量は3%とした。

### 3.2 NSSLHTの基礎特性

#### 3.2.1 化学成分例

表3にNSSLHTの代表成分例を示す。NSSLHTは19Cr-13Ni-3Si-0.1Nbを主成分とする当社独自鋼種である。現行のターボチャージャー部材に適用されているSUS310SよりCr, Niを大幅に低減し, Si, Nbの添加により耐酸化性, 高温強度を向上させている<sup>5),6)</sup>。また, 加工性を考慮し, 低Cとしている。

#### 3.2.2 常温での機械的性質および成形性

表4にNSSLHTの常温での機械的性質および成形性評価結果を示す。なお, 成形性評価はエリクセン試験機を用いた穴広げ試験により評価した。

NSSLHTの引張強さおよび硬さはSUS310Sより約10%高い値を示すものの, 伸びはSUS310Sより約10%高く, 優れた穴広げ性を示すことから, NSSLHTはターボチャージャー部材への加工は可能と考える。

#### 3.2.3 高温での基礎特性

図11に高温引張試験結果を示す。600～800°Cのいずれの温度においても, NSSLHTはSUS310Sより高い高温強度を有する。

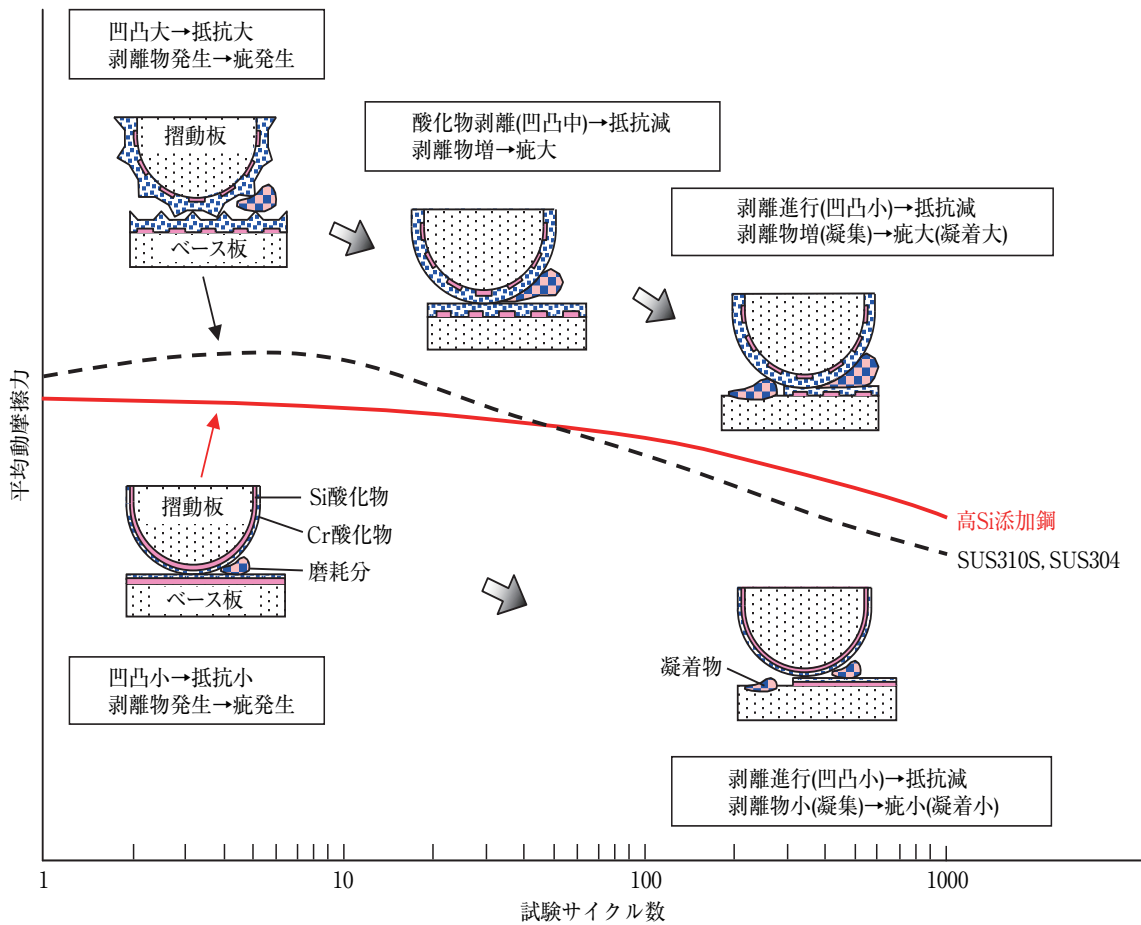


図10 高温摺動時の平均動摩擦力和表面状態の模式図

Fig.10 Schematic illustration during high temperature tribologies of SUS304, SUS310S and 3Si addition steel.

表3 NSSLHTの代表化学成分 (mass%)

Table 3 Chemical composition of NSSLHT (mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	N
NSSLHT	0.02	3.1	0.8	13	19	0.1	0.02

表4 機械的性質および成形性

Table 4 Mechanical properties and formability of NSSLHT and SUS310S.

	常温の機械的性質				成形性
	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	硬さ (HV)	穴広げ比
NSSLHT	290	660	58	160	2.3
SUS310S	290	600	45	155	1.6

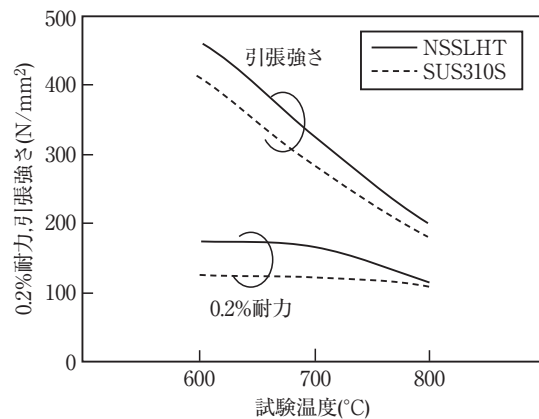


図11 高温引張特性

Fig.11 High temperature strength properties of NSSLHT and SUS310S.

図12に高温疲労試験結果を示す。試験温度範囲である600~800℃において、NSSLHTはSUS310Sより高温疲労限界応力が高く、優れた高温疲労特性を有する。

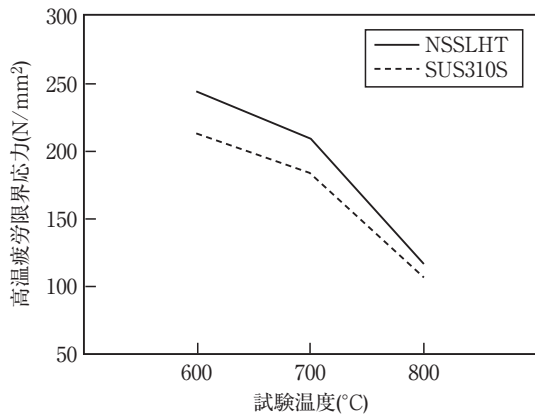


図12 高温疲労特性  
Fig.12 High temperature fatigue properties of NSSLHT and SUS310S.

図13に高温クリープ試験結果を示す。600~900℃のいずれの温度においても、NSSLHTはSUS310Sと同等レベルの高温クリープ特性を示す。

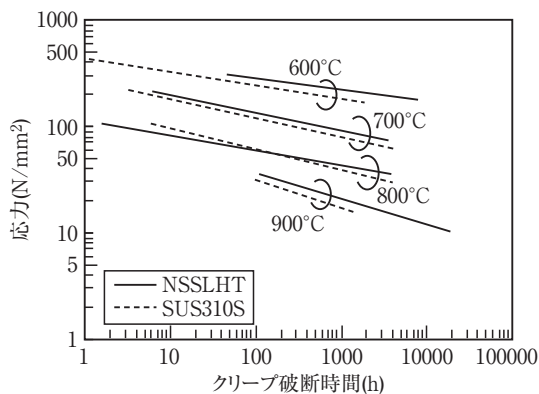


図13 高温クリープ特性  
Fig.13 High temperature creep properties of NSSLHT and SUS310S.

図14に高温酸化試験結果を示す。いずれの鋼種においても、1000℃以下では加速酸化は発生しておらず、良好な耐高温酸化性を示す。また、NSSLHTはSiの添加により酸化スケール中に保護性の皮膜を形成するため、SUS310Sに比べて酸化増量が低い傾向を示す。

図15に高温摺動試験結果を示す。平均動摩擦力および疵深さともにSUS310Sより小さく、優れた高温摺動性を示す。

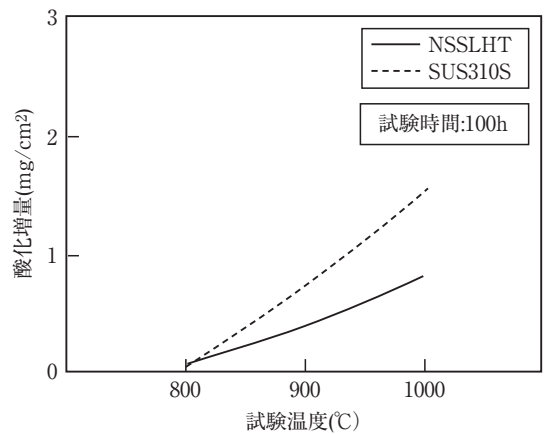


図14 高温酸化特性  
Fig.14 High temperature oxidation properties of NSSLHT and SUS310S.

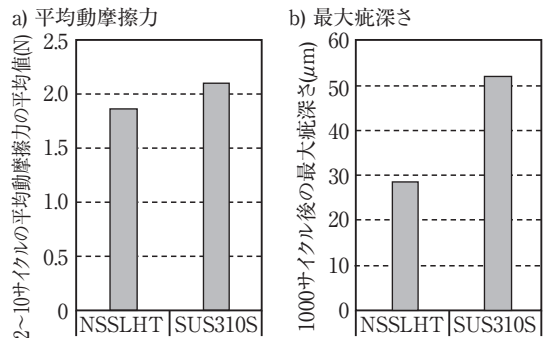


図15 高温摺動性  
a) 2~10サイクルの平均動摩擦力の平均値  
b) 1000サイクル後の最大疵深さ  
Fig.15 High temperature tribological properties of NSSLHT and SUS310S.  
a) average of average dynamic friction force from 2 to 10 cycles.  
b) maximum scratch depth of specimens in sliding area after 1000cycles.

を示す。

以上のように、NSSLHTはSUS310Sと同等の加工性と基礎的な耐熱性を有しており、ターボチャージャー部材等の優れた高温摺動性が要求される用途への適用が可能である。

#### 4. 結 言

SUS310Sより高温摺動特性に優れ、コストパフォーマンスに優れたオーステナイト系ステンレス鋼の開発を目的として、高温摺動性に及ぼす影響因子を検討し、当社独自鋼種NSSLHTを開発した。以下にその結果を要約する。

- (1) 高温摺動時の平均動摩擦力は、高温時に生成する表面酸化物の形態に依存し、Si添加により緻密な酸化物とすることで、低い動摩擦力を維持することができる。
- (2) 高温摺動時に発生する疵は、摺動時に生成する凝着物が研磨材として作用し発生する。そのため、Si添加による凝着物の抑制、および高温強度向上による疵付き抵抗向上が有効である。
- (3) 以上の検討結果をもとに開発したNSSLHTはターボチャージャー部材への加工性と実環境を想定した実機耐久評価において良好な高温摺動特性を有していることから、現在、ノズルベーン式ターボチャージャー用材料として採用いただいている。今後も本商品が様々な用途に適用されるのを期待する。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省 白書:第7回クリーンディーゼル乗用車の普及・将来見通しに関する検討会 (2005)
- 2) 大迫雄志, 陣内靖明, 佐保章, 鈴木浩, 茨木誠一, 林慎之:三菱重工技報, 43 (2006), 31.
- 3) 井上智裕, 小林祐二, 松山良満, 酒井康隆: IHI技報, 51 (2011), 48.
- 4) 築山宣司, 米澤幸一, 久間啓司, 中垣淳, 岩田昭寿, 沖俊典, 池上弘晃: TOYOTA Technical Review, 61 (2015), 111.
- 5) 植松美博, 飯泉省三, 星野和夫: 日新製鋼技報, 41 (1979), 65.
- 6) 衣笠雅普, 飯泉省三, 手嶋鎮博, 清水勇: 日新製鋼技報, 32 (1975), 20.