



理あるいは焼入れ焼戻しなどの熱処理が施される。一方、調質圧延や時効処理を施すことなく高強度と優れたばね性が得られる成分系についてはほとんど検討されていない。そこで、ばね性の面よりマルテンサイト相比を高くすること、かつ時効処理や調質圧延を回避する上で、特にマルテンサイトの強度に大きく影響するCおよびNの添加量を調整して、焼入れにより所定の強度が得られる新たな成分系を検討した。その上で、ばね材として多用されているSUS301Hと同等の強度が客先での時効処理などの熱処理を行うことなく得られ、かつ優れたばね性を有する焼入れ硬化型高強度ステンレス鋼NSS1500SPを合金設計した。本報では、NSS1500SPの合金設計の考え方、諸特性ならびに具体的用途例について紹介する。

## 2. 供試材および実験方法

### 2.1 供試材

表1に供試材の化学成分を示す。検討鋼は16mass% Cr-4mass% Ni鋼を基本成分とし、焼鈍後に焼入れを行った際の常温での硬さに及ぼす合金成分およびMs点の影響を検討するために、C量を0.04~0.10mass%、Ni量を4.1~5.5mass%、Cr量を12.7~17.0mass%およびN量を0.05~0.10mass%の範囲で変化させた。30kgの高周波誘導真空溶解炉にて溶製したインゴットより50mm厚の鋼塊を切り出し、1230℃で7.2ks保持後に板厚3mmとな

レス鋼の代表鋼であるSUS630の化学成分を示す。SUS301Hは板厚1.6mmの焼鈍材に40%の調質圧延を施して板厚1.0mmとした。調質圧延後のマルテンサイト量は35体積%で、残部はオーステナイトであった。SUS630は板厚1.0mmの焼入れ材に480℃で3.6ksの時効処理を施したものを、マルテンサイト単相であった。

### 2.2 実験方法

硬さはJIS Z2244に規定される方法で、ビッカース硬さ試験機により測定した。常温における引張試験は、JIS Z2241に規定される13B号試験片を用いた。オートグラフ型試験機を用いて、0.2%耐力まではひずみ速度 $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、0.2%耐力以降はひずみ速度 $6.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ にて引張試験を行った。試験後、突き合せ法により全伸びを測定した。

マルテンサイト量は振動試料型磁力計により測定した<sup>6)</sup>。試料を8mm角に切断後、切断により導入されたひずみを除去するために電解研磨を行い、外径5mmの形状として供試材とした。

ばね限界値試験はJIS H3130に準拠して行った。板厚1mm、板幅10mm、長さ200mmの試験片を、つかみ部と引掛金具の距離が $\sqrt{4000t}$ (t:板厚)となるよう調整した試験機にセットし、200回/minの速さで50回繰り返したわみを付与し、永久ひずみが0.1mmとなった場合の表面最大応力をばね限界値 $Kb_{0.1}$ とした。

耐食性は、耐候性促進試験の一つである塩乾湿複合サイクル試験<sup>7)</sup>(以下、CCTと述べる)により評価した。

表1 供試材の化学成分

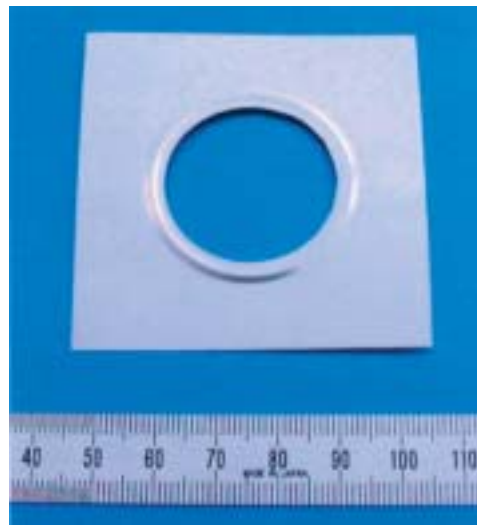
Table 1 Chemical compositions (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	N	Cu
検討鋼	0.04 ~ 0.10	0.5	0.5	4.1 ~ 5.5	12.7 ~ 17.0	0.05 ~ 0.10	-
SUS301H	0.10	0.7	0.9	6.8	17.2	0.04	-
SUS630	0.04	0.5	0.8	4.5	16.5	0.03	3.3

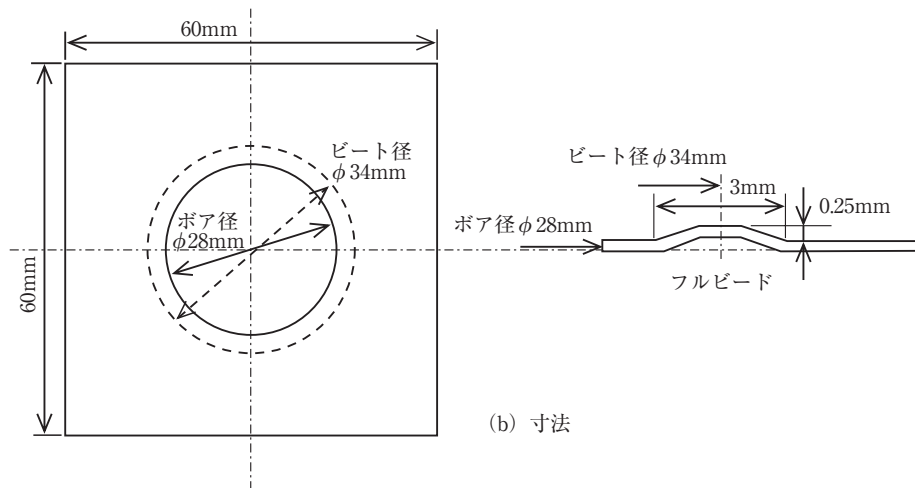
るまで熱間圧延した。600℃で3.6ksの焼鈍を施した後、冷間圧延により板厚1mmとし、1000℃で均熱60s保持した後、水焼入れを行った。

同表1中に比較鋼として、準安定オーステナイト系ステンレス鋼でかつ高強度ばね材として多用されているSUS301H、ならびに析出硬化型マルテンサイト系ステン

板厚1mm、板幅50mm、長さ100mmの試験片を耐水研磨紙#600で研磨仕上げ後、常温、大気中で24h放置したものを、5%のNaClを35℃で900s噴霧する塩水噴霧工程、60℃で湿度35%で3.6ks乾燥する乾燥工程ならびに50℃にて湿度95%で10.8ks保持する湿潤工程を1サイクルとして、50サイクル繰り返した後の試験片外



(a) 外観



(b) 寸法

図1 耐へたり性試験片の外観および寸法図

Fig.1 Appearance and scale diagrams of a fatigue setting specimen.

観により評価した。

本報では、自動車エンジンのガスケット用途へNSS1500SPを適用することを想定し、ガスケット材として重要な特性の一つである耐へたり性をSUS301Hと比較調査した。図1に耐へたり試験片の外観および寸法を示す。耐へたり試験片は1ボアを模擬したガスケット形状とした。板厚0.2mm、60mm角の試験片の中央に径28mmの穴を打ち抜いた後、ビード径34mm、幅3mm、高さ0.25mmのフルビードを成形し、常温での圧縮によりビード高さを $0.21 \pm 0.01$ mmに調整した。図2に耐へたり性試験の模式図を示す。試験片を板厚6mmのSUS310Sの板で挟み込み、SUS304のボルトおよびナツ

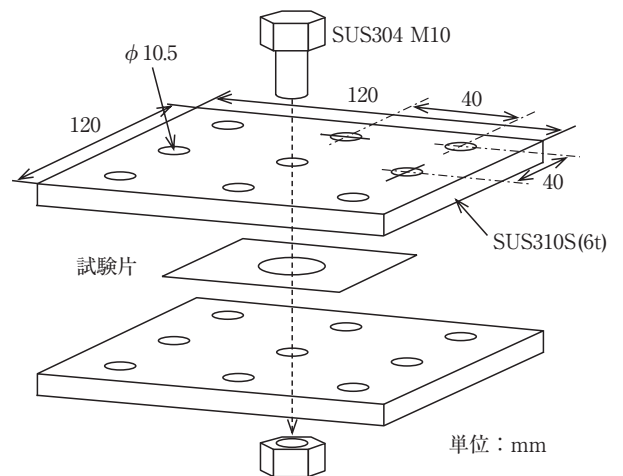


図2 耐へたり性試験の模式図

Fig.2 Schematic diagram of fatigue settling test.

トを用いてトルク9.8N・mで締結した。この締結品を大気中で常温から500℃の所定温度で720ks保持した後、常温まで冷却して取り外し、試験片のビード高さを測定した。試験前後のビード高さの変化量をビードへたり量として耐へたり性を評価した。

### 3. 合金設計の考え方

合金設計においては、焼入れ状態でほぼマルテンサイト単相組織とし、時効処理を行わなくてもSUS301Hと同等レベルの硬さ430HV以上が安定して得られること、さらにSUS301H並みの耐食性を得ることを目標とした。一般的に、焼入れ後の硬さはマルテンサイトと残留オーステナイトの相比に依存するとともに<sup>8,9)</sup>、マルテンサイト相の硬さは主にC量、N量に大きく依存する<sup>10)</sup>。そこで、硬さ430HVを得るためのC、N量および残留オーステナイト量に主眼を置いて検討した。

残留オーステナイト量はマルテンサイトの変態開始温度であるMs点と相関があるが、本報ではMs点として、Eichelmanらが提示している(1)式から算出されるMs点の値<sup>11)</sup>を用いた。

$$Ms点 = (75(14.6 - Cr - Mo) + 110(8.9 - Ni - Cu) + 60(1.33 - Mn) + 50(0.47 - Si) + 3000(0.068 - (C + N)) - 32) \times (5/9) (\text{℃}) \dots\dots\dots (1)$$

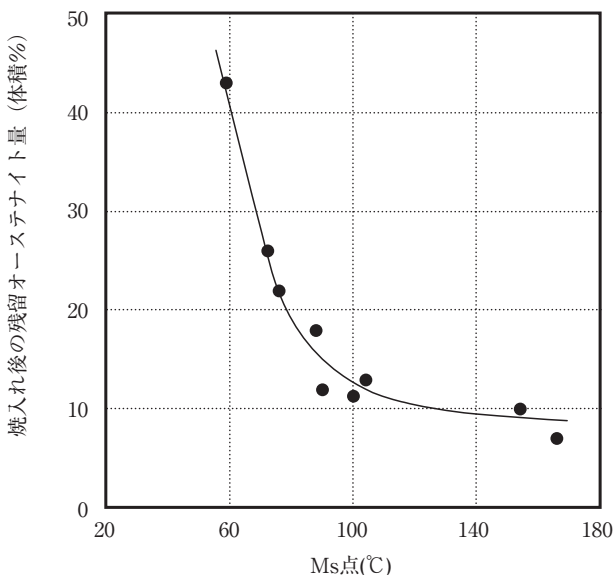


図3 焼入れ後の残留オーステナイト量とMs点\*の関係  
Fig. 3 Relation between Ms temperature and amount of retained austenite after quench.

\*Ms点(℃) = (75(14.6 - Cr - Mo) + 110(8.9 - Ni - Cu) + 60(1.33 - Mn) + 50(0.47 - Si) + 3000(0.068 - (C + N)) - 32) × (5/9)

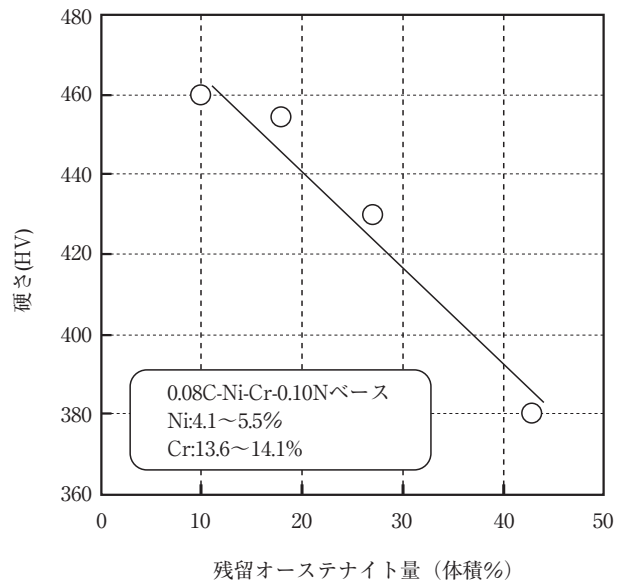


図4 硬さに及ぼす残留オーステナイト量の影響  
Fig. 4 Effect of amount of retained austenite on hardness.

なお、各元素量の単位はmass%である。

図3に焼入れ後の残留オーステナイト量とMs点の関係を示す。Ms点と残留オーステナイト量は良い対応関係にあり、Ms点が低くなるほど残留オーステナイト量が多くなる傾向を示し、80℃以下では残留オーステナイト量が急激に多くなる。残留オーステナイト量が過度に多い場合には、製品材の曲げ部など加工が施された部分で残留オーステナイトの一部がマルテンサイト変態し、スプリングバック量などの特性がばらつく恐れがあるため、できる限り少なくなるよう成分調整する必要がある。

図4に、C量が0.08mass%、N量が0.10mass%と一定でNi量およびCr量を変化させた鋼の焼入れ後の硬さに及ぼす残留オーステナイト量の影響を示す。残留オーステナイト量が多くなるほど焼入れ後の硬さは低下する傾向を示す。つまり、安定して高い硬さを得る上でも残留オーステナイト量は少ないレベルに設定する必要がある。本検討では硬さ430HV以上を安定して得る上で、Ms点を80℃以上とし、残留オーステナイト量が20体積%以下となるように合金設計した。

図5にN量は0.10mass%と一定とした鋼の硬さに及ぼすC量の影響を示す。なお、C量の変化にともないMs点も変化するが、Ni量およびCr量を調整することでMs点の変動範囲を76~90℃と小さくした。C量が多くなるほど硬さは高くなり、高強度を得る上ではできる限りCを

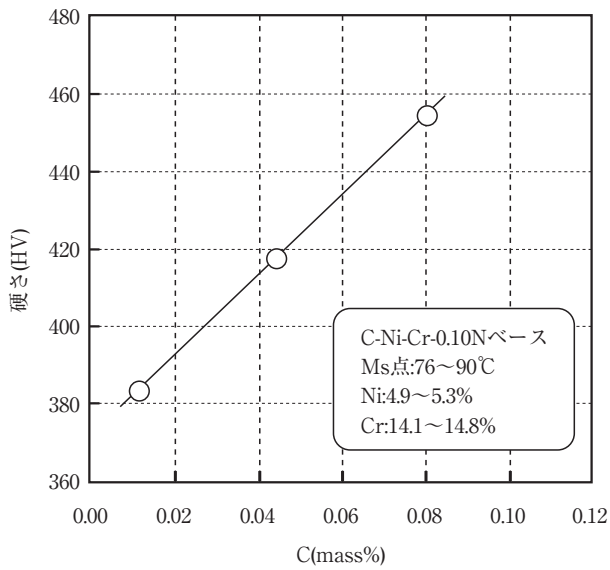


図5 硬さに及ぼすC量の影響  
Fig. 5 Effect of C content on hardness.

多く含有させることが有効である。ただし、多量に含有させた場合は耐食性が劣化する恐れがあることから<sup>12)</sup>、C量はSUS301と同等レベルの0.08mass%添加を目標とした。

図6にC量は0.08mass%と一定とした鋼の硬さに及ぼすN量の影響を示す。なお、N量に応じてNi量、Cr量も変動させることで、Ms点の変動範囲を88~104℃と小

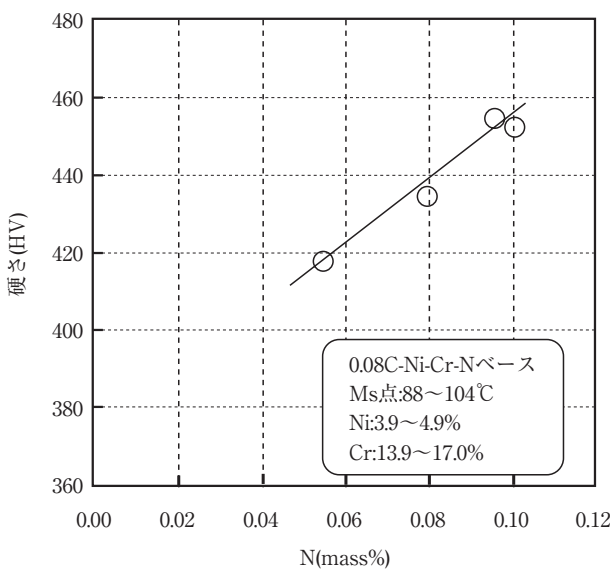


図6 硬さに及ぼすN量の影響  
Fig. 6 Effect of N content on hardness.

さくした。Cと同様、N量が多くなるほど硬さは高くなり、C量0.08mass%をベースとした場合、0.07mass%以上のNを含有させることで430HV以上が得られる。

したがって、NSS1500SPの合金設計においてはC、N量をそれぞれ0.08、0.07mass%とし、かつMs点が80℃以上となる範囲で主要元素であるCrおよびNiの含有量を設定した。

なお、フェライト生成元素であるCrの含有量が17mass%前後の場合、焼入れ状態で軟質なδフェライトが生成する。図7にはばね限界値に及ぼすCr量の影響を示す。δフェライトが観察された17mass%Cr含有鋼

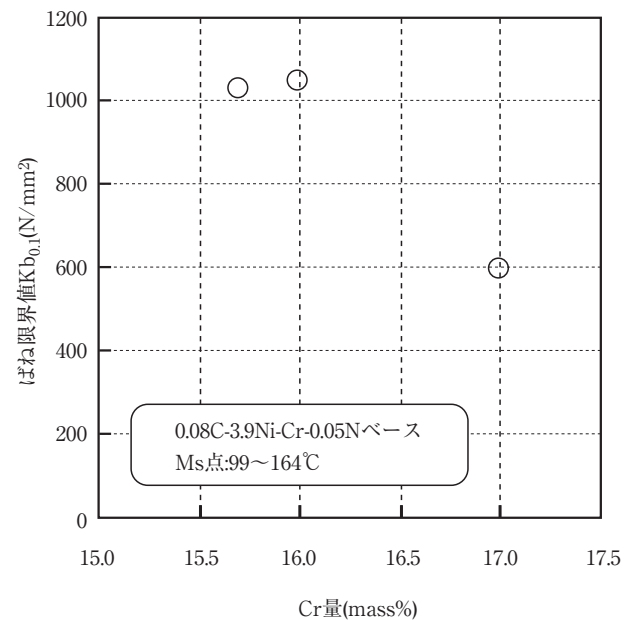


図7 ばね限界値Kb<sub>0.1</sub>に及ぼすCr量の影響  
Fig. 7 Effect of Cr content on threshold value of spring, Kb<sub>0.1</sub>.

のばね限界値は、Cr量が16mass%前後の鋼に比べ低い。この結果より、軟質なδフェライトがばね性を低下させると考えられ、焼入れ後にδフェライトが残留しないようにする上で、Cr量は16mass%前後に設定した。

以上の合金設計の考え方にに基づき、表2に示すように、NSS1500SPは15.7mass%Cr-4.0mass%Niを主成分として

表2 NSS1500SPの代表的な化学成分  
Table 2 Typical example of chemical composition of NSS1500SP (mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	N
0.08	0.5	0.2	4.0	15.7	0.07



表3 NSS1500SPおよび高強度ステンレス鋼の常温における機械的性質

Table 3 Mechanical properties of NSS1500SP and high strength stainless steels at ambient temperature

鋼種	代表成分 (mass%)	加工熱処理	硬さ (HV)	圧延方向			
				0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ばね限界値 (N/mm <sup>2</sup> )
NSS1500SP	0.08C-4.0Ni-15.7Cr-0.07N	焼入れ	482	1310	1540	5	1030
SUS301H	0.10C-6.8Ni-17.2Cr-0.04N	焼鈍 →40%調質圧延	431	1300	1480	5	560
SUS630	0.04C-4.5Ni-16.5Cr-3.3Cu	焼入れ →480℃×1h時効処理	443	1440	1460	8	930

CおよびNをそれぞれ0.08mass%、0.07mass%を含有させた成分系とした。この代表成分におけるMs点は115℃であり、焼入れ後のマルテンサイト量は約90体積%である。

#### 4. 諸特性

##### 4.1 常温における機械的性質および耐食性

表3にNSS1500SPの常温における硬さおよびL方向の

引張特性を示す。表にはSUS301H、SUS630のデータも付した。NSS1500SPの硬さは482HVと、目標であった430HV以上が得られた。0.2%耐力は1310N/mm<sup>2</sup>、引張強さは1540N/mm<sup>2</sup>、ばね限界値は1030N/mm<sup>2</sup>である。

図8にNSS1500SP、SUS301H、SUS630のCCT 50サイクル試験後の試験片外観を示す。NSS1500SPの耐食性はSUS301Hとほぼ同等で、SUS630よりも優れる。

##### 4.2 耐へたり性

図9に、NSS1500SPおよび自動車エンジン用ガスケット

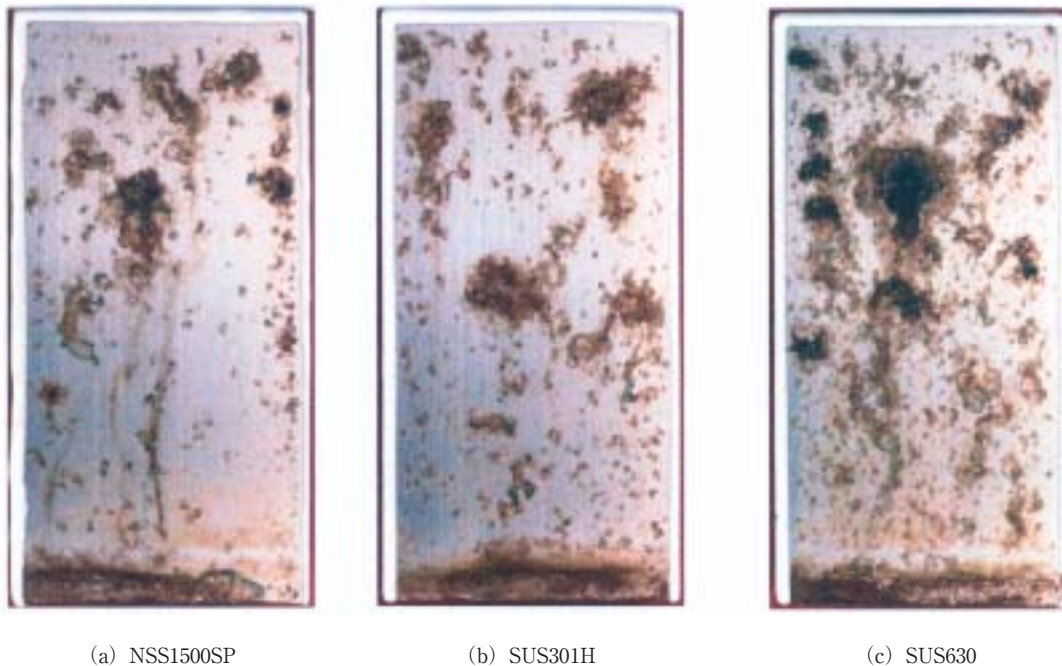


図8 CCT50サイクル経過後の#600研磨仕上試験片の外観  
(試験片寸法:板厚1.0mm、板幅50mm、長さ100mm)

Fig. 8 Appearance of #600 polish finished test pieces after 50 CCT cycles.

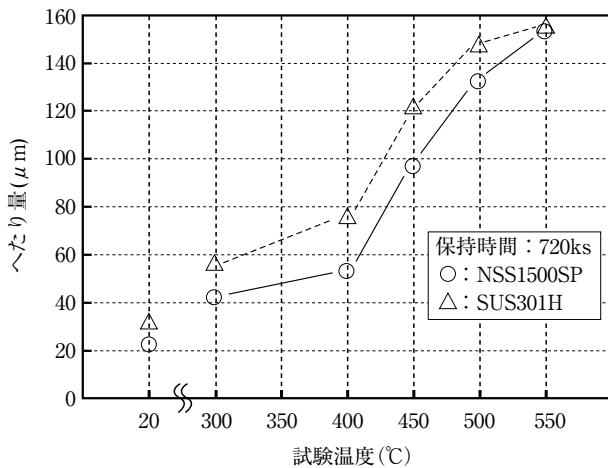


図9 へたりに及ぼす試験温度の影響  
Fig. 9 Effect of test temperature on amount of fatigue setting.

ット材として最も多く使用されているSUS301Hについて、常温から500℃の各温度で720ks保持後のへたりに及ぼす試験温度の影響を示す。へたりに及ぼす試験温度が高くなるにともない大きくなり、特に400℃から500℃の温度域では顕著である。常温から500℃におけるNSS1500SPのへたりに及ぼす試験温度はSUS301Hよりも小さく、300℃におけるNSS1500SPのへたりに及ぼす試験温度はSUS301Hの2/3程度である。図10にNSS1500SPおよびSUS301Hを300℃で720ks保持し、そのまま300℃でひずみ速度 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で引張試験を行った際の応力ひずみ曲線を示す。(a)に示すように、0.2%耐力は両鋼とも1000~1100N/mm<sup>2</sup>の範囲にあり、その差は小さい。一方、(b)に示すように、弾性限の指標である0.01%耐力については、NSS1500SPはSUS301Hに比べ2倍以上高い。このように、耐へたりに性は0.2%耐力よりはむしろ0.01%耐力と相関があると推察される。弾性限は、オーステナイトやフェライトよりも硬質であるマルテンサイトの量が多いほど高くなると考えられる。また、300℃に昇温した際には、転位の回りにC、Nなどが集まる、いわゆるコ Cottrell 雰囲気形成<sup>13)</sup>、これにより転位が運動しにくくなるために弾性限が高くなるが、この現象はマルテンサイト量が多いほど起こりやすいと思われる。つまり、300℃におけるNSS1500SPの弾性限がSUS301Hに比べ高いのは、NSS1500SPのマルテンサイト量がSUS301Hに比べ多いことが関与していると推定される。

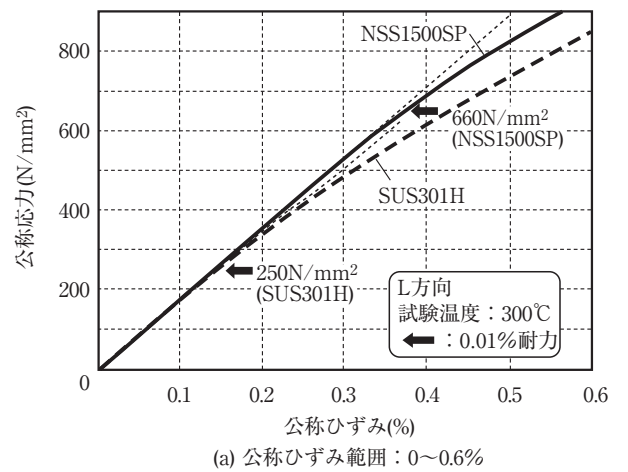
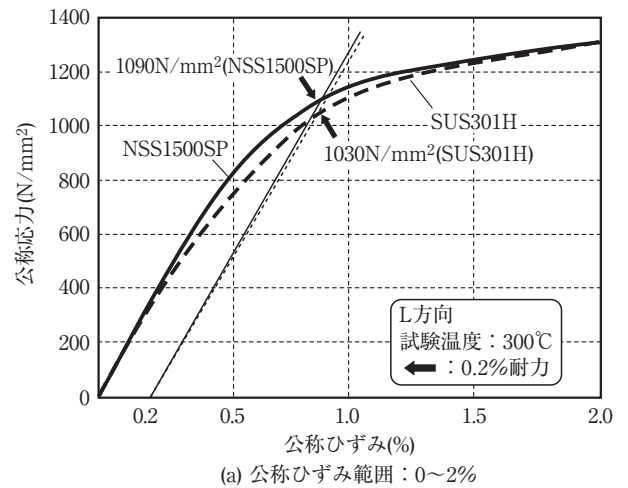


図10 300℃で720ks保持後の300℃における公称応力ひずみ曲線  
Fig.10 Nominal stress vs. strain curves tested at 300℃ after holding at 300℃ for 720ks.

### 5. 用途例

NSS1500SPは焼入れの状態では硬さHV480の高強度を有する。しかもSUS301Hに比べ常温から500℃における耐へたりに性に優れる。耐食性もSUS301H並みであり、SUS630よりも優れる。図11にこれらの特徴を活かしたガスケット、プレスプレートの製品例を示す。

### 6. 結言

客先での熱処理を施すことなく優れた強度と耐へたりに性を発現させるため、焼入れ硬化型高強度ステンレス鋼NSS1500SPを開発し、機械的性質、耐食性ならびに自動車エンジン用ガスケットを模擬した試験片を用

いての耐へたり性を調査した。以下にその結果を要約する。

- (1) 焼入れ後の硬さが430HV以上となり、かつほぼマルテンサイト単相組織が得られる成分系を検討し、主要成分を0.08mass%C-4.0mass%Ni-15.7mass%Cr-0.07mass%Nとした。本鋼は焼入れ後状態で硬さ480HV、ばね限界値1030N/mm<sup>2</sup>を有する。
- (2) NSS1500SPの耐発錆性はSUS301Hとほぼ同等で、SUS630よりも優れる。
- (3) NSS1500SPの常温から500℃における耐へたり性はSUS301Hに比べ優れる。

本鋼は、高強度でかつ良好な耐食性を有するとともにばね性に優れる。したがって、例えば機械部品あるいは配管継手部材などのうち耐食性が要求される部位に使用されるばね素材、あるいはガスケット材として優れた性能を発揮する。今後、多様な高強度分野での活用が期待できる。



(a) ガスケット  
(板厚0.2mm)



長さ方向  
幅方向

(b) プレスプレート  
(製品寸法：板厚1.55mm×板幅1060mm×長さ1260mm)

#### 参考文献

- 1) ステンレス鋼便覧 第3版, ステンレス協会編, 日刊工業新聞社, (1995), 619.
- 2) K.C.Antony: J.Metals, 15 (1963), 922.
- 3) 湯川夏夫, 水谷正義, 坂公恭: 日本金属学会誌, 31 (1967), 855.
- 4) 宮楠克久, 藤本廣, 井川孝, 植松美博: CAMP-ISIJ, 5 (1992), 2102.
- 5) 武本敏彦: 鉄と鋼, 72 (1986), S1446.
- 6) 田中照夫, 星野和夫: 日新製鋼技報, 52 (1985), 36.
- 7) 白山和, 原田和加大, 宇都宮武志, 足立俊郎, 植松美博: ステンレス鋼の耐候性研究会報告書, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1995), 81.
- 8) 田村定男: 特殊鋼, 13 (1964) 3, 37.
- 9) 日下邦男, 堀越弘彦: 特殊鋼, 14 (1965) 12, 24.
- 10) C.A.ゾッフィー著, 長谷川正義訳: ステンレス鋼入門, 特殊鋼倶楽部, 東京, (1965), 155.
- 11) G.H.Eichelman and F.C.Full: Trans.Am.Soc.Met., 45 (1953), 77.
- 12) 下平三郎: 腐食・防食の材料化学, アグネ, 東京, (1995), 227.
- 13) 講座 現代の金属学 材料編第3巻 材料強度の原子論, 日本金属学会編, 仙台, (1985), 195.

図11 NSS1500SPの適用例

Fig.11 Examples of application for NSS1500SP.