

技術資料

Technical Data

DSA3015 製耐熱ボルトの開発

大木優太郎*¹, 杉山健二*¹, 小柳禎彦*², 木村友和*³, 秋月孝之*³, 飽浦常夫*³

Development of DSA3015 Heat Resistant Fastener

Yutaro OKI, Kenji SUGIYAMA, Yoshihiko KOYANAGI, Tomokazu KIMURA, Takayuki AKIZUKI and Tsuneo AKIURA

Synopsis

Improving the efficiency of internal combustion engines remains a priority for decarbonization, and improving the thermal efficiency of turbochargers is a similar challenge. In this study, the DSA3015 developed for exhaust valves was investigated as a fastener to fasten exhaust manifolds to turbochargers to improve heat resistance and reduce cost. DSA3015 fasteners were thread-rolled without cracking, and tensile strength and relaxation properties of the DSA3015 fasteners was superior to those of the SUH660 and comparable to Alloy 80A up to 650 °C. Although the relaxation property of the DSA3015 fasteners was slightly inferior to Alloy 80A over 700 °C, η phase was not observed up to 750 °C after exposure at 192 hrs. It is expected that DSA3015 fasteners will be sufficient for use in high-temperature fastener applications for microstructural stability.

1. 緒言

これまで自動車の排ガス規制および燃費規制に対応するため、熱効率向上を目的に材料の耐熱性を向上させる材料開発が行われてきた。しかし、近年急激にカーボンニュートラルに向けた技術開発が進んでおり、電気自動車 (EV) への完全移行が世界的に叫ばれているが、わが国は電力供給の課題から、ハイブリット車 (HEV) や燃料電池車 (FCV) は当然のこと、バイオ燃料や水素エンジンなどの開発にも力を入れており、脱炭素化を目標に多様なシナリオを描いている。従って、内燃機関の効率向上は依然として注力すべき課題であり、その施策としてのターボチャージャの熱効率向上もまた同様の課題である。最近では HEV へのターボチャージャの適用も増えてきているが¹⁾、通常のエンジンと比較して、バッテリーやモータなどが追加されるため、コストアップ

は避けられない。本研究では、ターボチャージャとエキゾーストマニホールドや触媒コンバータとの接続に使用される締結ボルトのラインナップ拡充を目的に、まずは耐熱性向上とコストを両立できる材料の検討を行った。

一般的に耐熱ボルトとして使用される材料は、Fe 基耐熱材料である SUH660 (A286) が主流であり、より低温用途向けとして原材料コスト低減を狙い、Ni 量を低減した材料開発が行われてきた^{2), 3)}。一方で、さらに高耐熱用途として Ni 基合金である Alloy80A が一部使用されることもあるが、SUH660 の Ni 量が 25 mass% であるのに対し、Alloy80A は約 75 mass% もの Ni 量を有するため、原材料コストが大幅に上昇する課題がある。また、Alloy80A は冷間加工性も悪く、ボルト成形時のコストアップの一因となっている。

そこで本研究では、自動車エンジン排気バルブ用省 Ni 合金として開発された DSA3015⁴⁾ に着目し、耐熱ボ

2022年4月19日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 日本精線(株)研究開発部開発室 (Development Section, Research & Development Department, Nippon Seisen Co., Ltd.)

ルトとしての可能性を検討した。

2. 実験方法

Table 1 に本研究に供した材料の成分を示す。DSA3015 の特徴は、Al や Ti を積極添加し、 γ' 相 ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) により優れた高温強度を担保しつつ、原材料コストと組織安定性のバランスを考慮し、Ni 量を 30 mass% 程度に抑えている。さらに、高温環境で使用されるため、耐酸化性の向上を目的に Cr が 16 mass% 程度含まれる。本研究では DSA3015 の比較材として、Alloy80A、SUH660 および低温用途向けに開発されたボルト用鋼である DHN2662 (RS307)²⁾ を評価した。

供試材はいずれも細径に圧延した素材を、溶体化熱処理および焼なまし-伸線した後に、M8 スタットボルト形状に転造してから時効熱処理を行い、各評価に供した。時効硬化挙動および組織安定性の調査については、実体ボルトを大気炉にて高温長時間保持後に空冷し、光学顕微鏡での組織観察およびピッカース硬さ試験にて評価した。組織観察にはエメリー紙およびダイヤモンド研磨剤を用いて鏡面仕上げした後、ピレラ液（塩酸：ピクリン酸：メタノール希釈液 = 40：1：100）にてエッチングし、ボルトのネジ山部と中心部をそれぞれ観察した。引張試験については、実体ボルトが評価可能な治具を準備し、室温から 800 °C で引張強度を評価した。リラクセーション試験についても同様に、実体ボルトにて 650 °C /550 MPa、700 °C /500 MPa および 750 °C /450 MPa の条件でリラクセーション特性を評価した。その際、試験前温度保持時間は 24 h とし、試験時間は 50 h までとした。なお、組織安定性の観点から、700 °C 以上では DSA3015 および Alloy80A のみの評価とした。

また、冷間加工性の評価は細径に圧延した素材を溶体化熱処理および焼なまし後、 $\phi 7.8$ mm ワイヤ状態に伸線した後、評価した。室温引張試験は伸線ままおよび時効熱処理後に実施し、圧縮試験は伸線まま状態にて実施した。Fig. 1 に圧縮試験の模式図を示す。試験片形状は $\phi 7.8$ mm \times 10 mm とし、ひずみ速度は 1%/min、圧縮率は 30% までとした。

Table 1. Chemical composition of alloys (mass%).

Material	Fe	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	V
DSA3015	Bal.	32	16	-	1.2	2.7	0.8	-
Alloy80A	<1	Bal.	19	-	1.4	2.2	-	-
SUH660	Bal.	25	15	1.2	0.2	2	-	0.3
DHN2662	Bal.	20	11	-	0.25	2.75	-	-

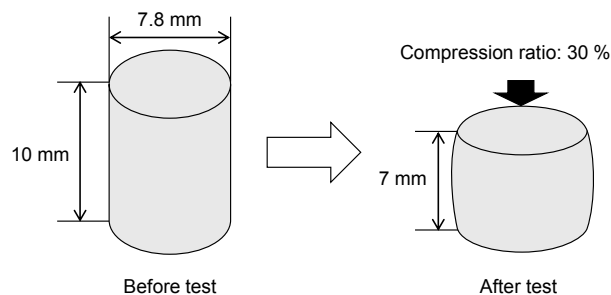


Fig. 1. Schematics of compression test.

3. 結果および考察

3. 1 時効硬化挙動

Fig. 2 に DSA3015 実体ボルトの 700、750 および 800 °C におけるネジ山部およびネジ中心部の時効硬化挙動を示す。ネジ山部において、いずれの温度でも 1 h の時効熱処理で硬さは急激に上昇し、750 および 800 °C では 1 h でピーク時効に達しており、800 °C ではその後緩やかに硬さが低下していくのに対し、700 °C あるいは 750 °C では 9 h まで硬さは大きく変化しない。一方ネジ中心部において、750 および 800 °C では 3 h 程度でピーク時効に達し、その後の挙動はネジ山部と同様に 800 °C では緩やかに硬さが低下していくのに対し、750 °C では 9 h まで硬さは変化しない。700 °C においては 9 h まで硬さが上昇する。以上の結果から、ボルト全体の強度バランスを考慮し、750 °C /3 h を DSA3015 実体ボルトの時効熱処理条件とした。

Fig. 3 に 750 °C /3 h の時効熱処理を施した DSA3015 実体ボルトのネジ山部およびネジ中心部の光学顕微鏡写真を示す。ネジ山部では転造による塑性変形に伴うすべり線が認められ、いずれの部位においても結晶粒径は同程度であった。

3. 2 組織安定性

高温で用いられる材料は高温で長時間曝露されたときの組織安定性を考慮する必要がある。DSA3015 は Ti を多量に添加しているため、高温長時間の使用中に η 相 (Ni_3Ti) が析出する。この η 相は強化相である γ' 相の消失を招き、大幅な高温強度の低下をもたらすため、析出しない温度・時間での使用が望まれる。Fig. 4 に時効熱処理を施した DSA3015 実体ボルトを、600 °C ~ 850 °C にて最長 192 h の熱処理を施した際の、硬さおよび η 相の析出の有無を示す。850 °C では早期に η 相が析出して硬さが大きく低下する。800 °C では 10 h まで硬さが緩やかに低下するが、その後は η 相の析出に伴い硬さが

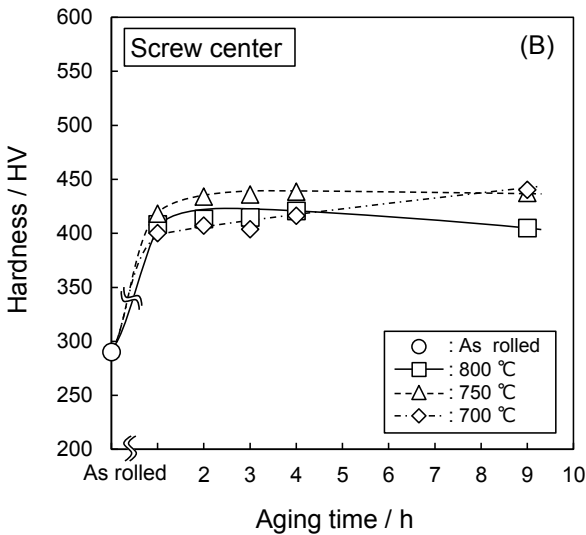
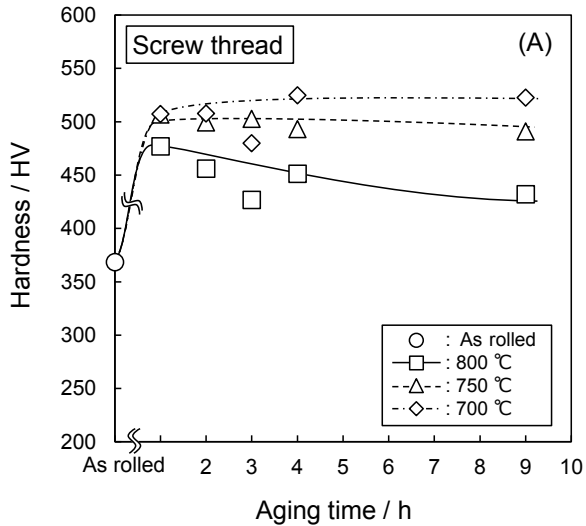


Fig. 2. Age hardening behavior at (A) screw thread and (B) screw center of DSA3015 fastener.

顕著に低下する。750 °Cでは192 hまで η 相の析出は認められず、硬さが緩やかに低下する。700 °C以下の温度域では η 相は認められず、硬さは緩やかに増加したのち低下するが、高温曝露による大きな変化は認められない。Fig. 5に850 °Cおよび700 °Cで192 h保持した際のネジ山部における光学顕微鏡写真を示す。850 °C/192 h保持材では針状の析出物の周りが白く見えるが、これは η 相析出により周囲の γ 相が消失したためである。

3. 3 高温引張特性

Fig. 6に各供試材の実体ボルトでの室温から800 °Cまでの引張強度を示す。DSA3015は600 °C程度までは1200 MPa以上の引張強度を有し、それ以上の温度域では強度が低下するが、700 °CまではAlloy80AやSUH660よりも引張強度が高く、800 °CでAlloy80Aと同等となる。

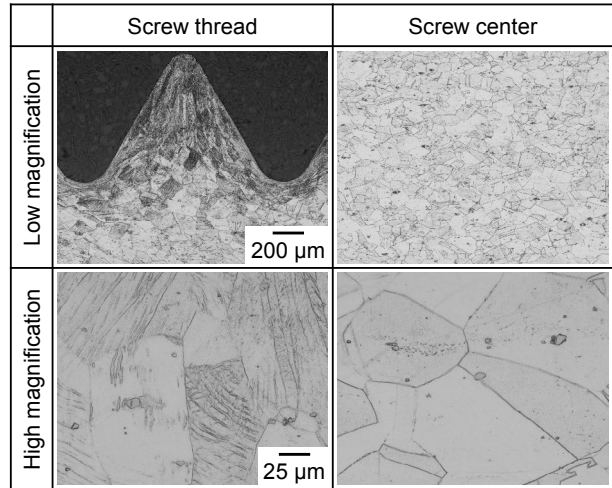


Fig. 3. Microstructure of aging heat treatment at 750 °C/3 h of DSA3015 fastener.

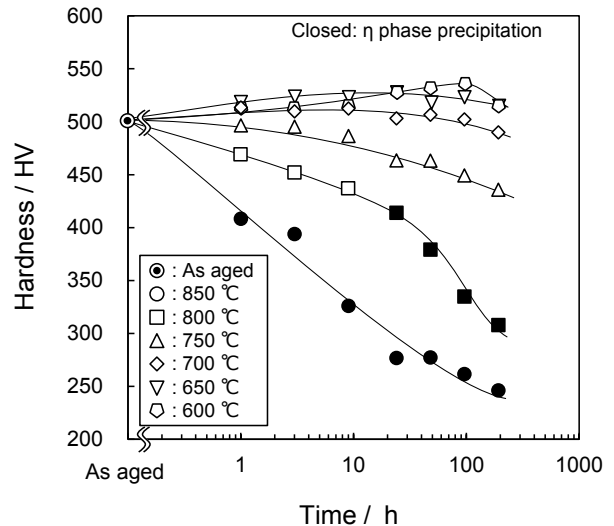


Fig. 4. Effect of heat treatment on the hardness of screw thread and η phase precipitation.

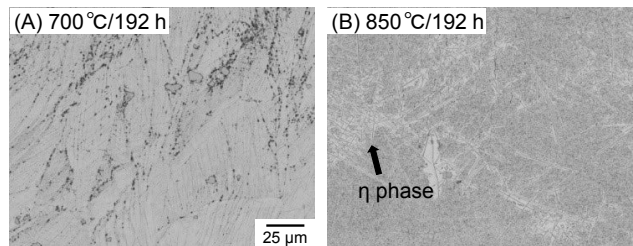


Fig. 5. Microstructures of DSA3015 fastener exposed at (A) 700 °C/192 h, and (B) 850 °C/192 h.

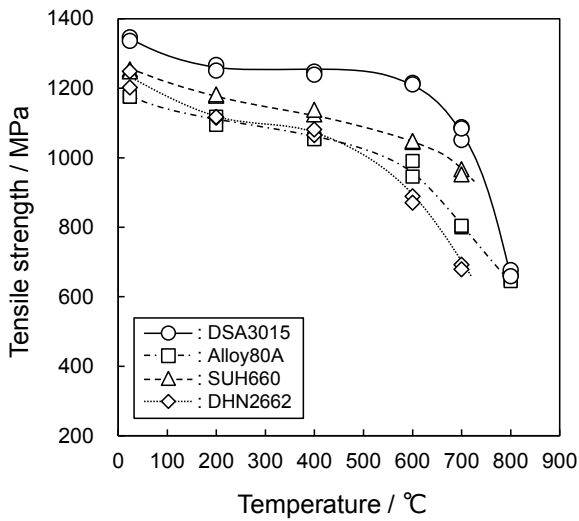


Fig. 6 Tensile strength of fastener sample.

3. 4 高温リラクゼーション特性

高温では時間経過に伴いボルトの締結力が低下するリラクゼーション（応力緩和）が生じるため、その締結力の低下挙動を把握することは重要である。Fig. 7に各供試材の実体ボルトでの高温リラクゼーション特性を示す。650℃/550MPaにおいて、いずれの材料も5h程度まで急激に応力が低下し、その後は緩やかな低下を示す。また、DSA3015はSUH660より優れ、Alloy80Aとほぼ同等のリラクゼーション特性を有する。700℃/500MPaおよび750℃/450MPaにおいては、いずれも5h程度までの急激な応力低下とその後の緩やかな低下挙動に変わりはなく、50h保持後のDSA3015の軸力はAlloy80Aより低いものの急激な低下は生じていない。なお、750℃

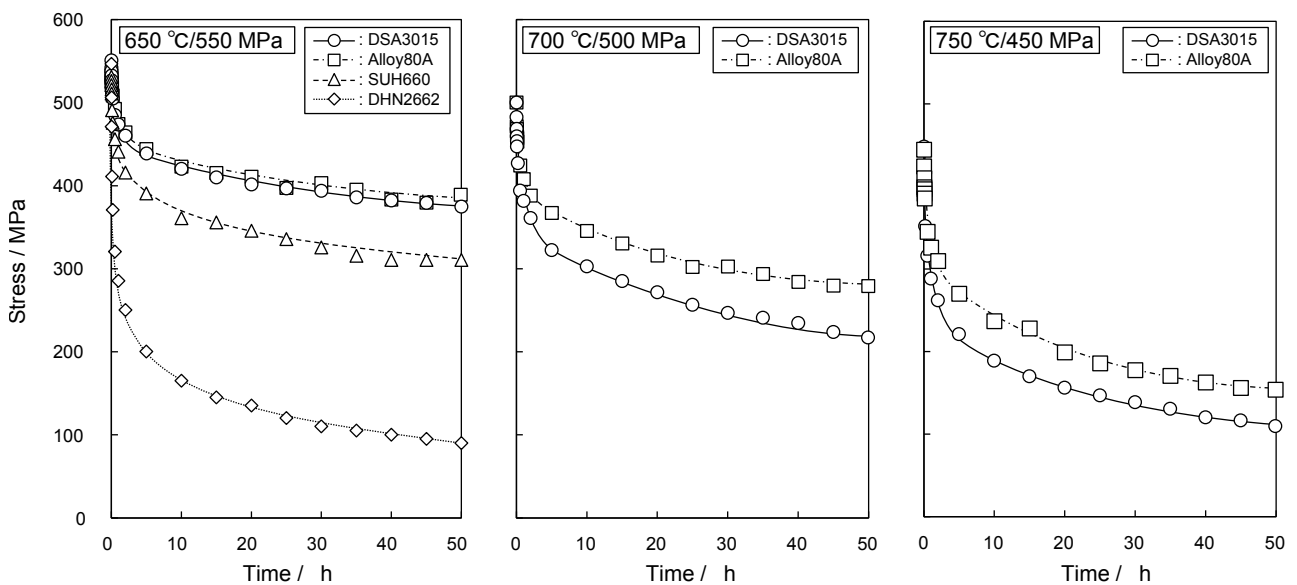


Fig. 7. Relaxation property of fastener sample.

/450 MPa のリラクゼーション試験後の組織観察においても、 η 相は認められなかった。

3. 5 冷間加工性

まず伸線後のワイヤ状態での機械的特性について調査するため、溶体化熱処理および焼なまし-伸線後の素材を用いて評価を実施した。Table 2に伸線ままおよび時効熱処理後の引張特性と硬さを示す。伸線ままにおいて、DSA3015の引張強度はいずれの材料よりも低くかつ伸びが高い。また、時効熱処理後においては、 γ 相の析出により引張強度が大幅に向上しており、いずれの材料よりも高い引張強度と硬さを有する。

ボルト成型時の冷間圧造性の評価として、圧縮試験を実施した。Fig. 8に圧縮応力-ひずみ曲線を示す。DSA3015はSUH660、Alloy80Aよりも圧縮変形抵抗が低いため、冷間圧造性に優れる。以上より、DSA3015は締結ボルトなどへの加工性に優れ、さらに時効熱処理をすることで強度面においても優れた特性が得られることがわかった。

Table 2. Tensile property and hardness as wire.

Material	As drawn		As aged	
	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Tensile strength /MPa	Hardness /HV
DSA3015	634	40	1200	430
Alloy80A	892	37	1123	353
SUH660	675	32	1060	336
DHN2662	688	22	1110	354

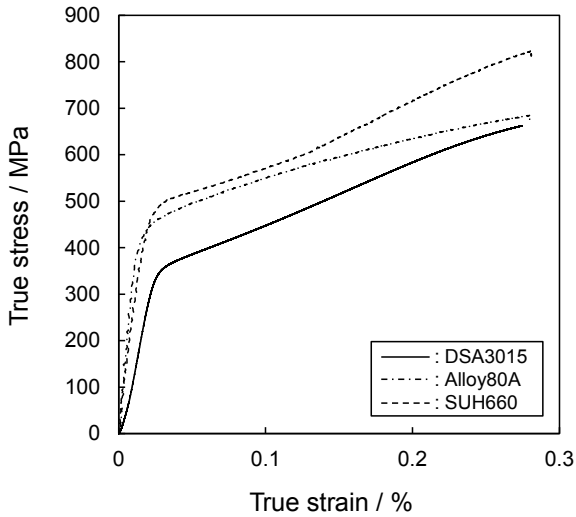


Fig. 8. Compressive stress-strain curves.

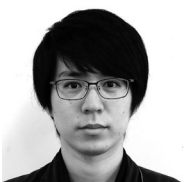
4. 結 言

エンジン排気バルブ用途として開発された DSA3015 を、M8 スタットボルト形状に試作し各種高温特性について評価した。その結果、DSA3015 は 650℃ までは Alloy80A と同等以上の引張特性およびリラクセーション特性を有し、750℃ まではリラクセーション特性でやや劣るものの、組織安定性の観点からも高温ボルト用途としては使用可能と考えられる。

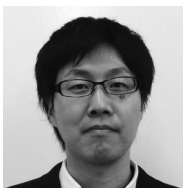
以上、カーボンニュートラルへの対応策の一つとして、熱効率の向上と省資源化へ貢献できる DSA3015 ボルトを紹介した。今後も世界情勢に伴う原材料リスクの課題は残るものの、素材メーカーとして柔軟な対応で貢献していきたいと考える。

(文 献)

- 1) 尾崎誠, 吉田豊隆, 藤田豊, 二江貴也, 新井貴, 山田祐樹: 三菱重工技報, 58(2021), 2, 1.
- 2) 岡部道生, 磯部晋: 電気製鋼, 58(1987), 122.
- 3) 大野丈博: 日本ねじ研究協会誌, 33(2002), 9.
- 4) 佐藤克明, 坂勉, 大野丈博, 野田俊治: HONDA R&D Technical Review, 9(1997), 185.



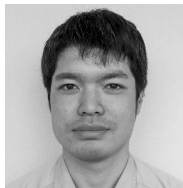
大木優太郎



杉山健二



小柳禎彦



木村友和



秋月孝之



飽浦常夫