耐熱ばね用ステンレス鋼線および超合金線の 高温特性について

High Temperature Properties of Stainless Steel and
Super Alloys Wire for Heat Resisting Springs

米田 辰夫*・北嶋 均*・福井 伸介*

Tatsuo YONEDA, Hitoshi KITAJIMA, Shinsuke FUKUI

1. 緒 言

ばね用ステンレス鋼線としては、一般に SUS 304, SUS 302 が、使用されているが、最近射出成型やガスレンジなど高温で使用する装置には、さらに耐熱性のあるばね材が使用される。また自動車関係や特殊な高温環境などで使用されるばねにも耐熱ばね材の使用が検討されている。耐熱ばね材としてステンレス鋼線を使用する場合、冷間加工硬化だけによると、高温ではその特性が失われるため、これに代って SUS 631 J₁ (17-7 PH 相当) などの折出硬化型ステンレス鋼線の使用が一般的である。さらに厳しい使用環境、温度、負荷応力などの使用条件に応じて、各種耐熱鋼、超合金高ステンレス鋼が使用されている。

ばね設計の際、材料の高温特性について利用出来るまとまった資料は、ほとんど見られないので今回一連の高温における特性調査を行い、ばね設計上の参考に供する次第である。

2. 供 試 材

各鋼種の化学成分および、その特徴を表 1, 2 に示す供試材の線径は 2.0 mm ϕ とした。ただし高温引張試験

については、試験機の容量上 1.0 mm ϕ とした。各鋼種の伸線加工率および低温焼なましまたは、折出硬化処理温度（以下硬化熱処理と総称する）は表 3 に示す。

3. 試験方法

3.1 高温引張試験

冷間線引加工したものおよびこれに硬化熱処理を施した試片について、インストロンタイプ引張試験機（容量 500 kg 東洋精機製）にて常温から 700°C までの縦弾性係数 (E)、引張強さ (σ_B)、耐力 ($\sigma_{0.2}$) について測定した。高温装置については同試験機に電気管状炉を取付け、所定の温度に昇温したのち、15 分間均熱し負荷を開始した。

3.2 高温ねじり試験

試験片の条件としては、高温引張試験と同様であり、常温から 700°C までの横弾性係数 (G)、ねじり強さ (τ_B)、ねじり降伏点 ($\tau_{0.2}$) を測定した。試験機は三精工業製、電気精密ねじり試験機（容量 0.5 kg-m）を使用した。高温装置については、同試験機に電気管状炉をセットし所定の温度に昇温し 15 分間均熱後試験を行った。

3.3 高温締付試験

ボルトナット式締付具により、予め硬化熱処理を施し

表 1 供試材の化学成分 (%)

鋼 種	C	Mn	Ni	Cr	Co	Mo	Nb+Ta	Ti	Al	Fe
SUS 631 J ₁	0.07	0.71	7.97	16.69	—	0.05	—	—	1.29	—
SUS 347	0.04	1.47	9.97	17.97	—	0.05	0.705	—	—	—
SUS 310 S	0.05	1.47	19.54	24.85	—	—	—	—	—	—
AISI 660	0.04	1.41	25.97	15.11	—	1.29	—	2.06	—	—
*NASMA 164	0.016	0.03	4.17	12.53	12.70	5.04	—	—	—	—
*NAS 604 PH	0.13	1.08	16.68	21.58	41.75	6.32	—	—	—	—
AISI 688	0.05	0.50	Ba1	16.44	—	—	1.17	2.41	0.55	7.98

* 日本冶金工業株式会社規格。

*日本精線株式会社

表2 供試材の特徴

供 試 材	特 徴
SUS 631 J1	17-7 PH 折出硬化型ステンレス鋼, 高温強度大
SUS 347	SUS 304+耐粒界腐食性 ばね特性としては SUS 304 とほとんど変らず
SUS 310 S	特に高温における耐酸化性にすぐれた高温用耐酸化鋼
AISI 660	高温強度および耐酸化性, 折出硬化型鉄基オーステナイト耐熱鋼
*NAS MA 164	超高張力ステンレス鋼
*NAS 604 PH	Co 基ばね合金, 高耐食性, 高強度, 高弾性限ばね材
AISI 688	Ni 基超合金高温耐食性良好

* 日本冶金工業株式会社規格.

表3 供試材の伸線加工率および硬化熱処理

鋼 種	伸 線	加 工 率	硬 化 熱 処 理	備 考
SUS 631 J1	4.00→2.0	75.0	475°C×1 hr	高温ねじり試験 高温締付試験
SUS 347	" → "	"	400°C×0.5 hr	
SUS 310 S	" → "	"	450°C×0.5 hr	
AISI 660	" → "	"	600°C×2 hr	
NASMA 164	2.68→"	44.5	525°C×2 hr	
NAS 604 PH	2.60→"	41.0	500°C×2 hr	
AISI 688	4.00→"	75.0	700°C×1 hr	
SUS 631 J1	2.00→1.0	75.0	同 上	高温引張試験
SUS 347	" → "	"		
SUS 310 S	" → "	"		
AISI 660	" → "	"		
NASMA 164	1.43→"	51.0		
NAS 604 PH	1.30→"	40.5		
AISI 688	2.00→"	75.0		

表4 ばね諸元

線 径	コイル平均径	総 巻 数	有効巻数	自由高さ
2.0 mm	16.5 mm	6.5	4.5	45 mm

表5 供試材の横弾性係数 (G)

kg/mm²

SUS 63 J1	SUS 347	SUS 310 S	AISI 660	NASMA 164	NAS 640 PH	AISI 688
7900	7570	7200	7360	8480	8500	7900

た各供試材について, それぞれ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 kg/mm² の応力を与え, 温度 300, 350, 400, 450, 500°C の電気炉中に 40 時間保持し, 試験前後における荷重減少量より残留せん断歪を求めた.

締付応力および残留せん断歪は次式より求めた.

$$\tau = 8 DP / \pi d^3 \quad \text{kg/mm}^2 \quad (1)$$

$$\gamma = \tau / G \times 100 \quad \% \quad (2)$$

なお本試験に用いた横弾性係数 (G) の値は次式より求め, 表 5 に示す.

$$G = 8 n D^3 P / \delta d^4 \quad \text{kg/mm}^2 \quad (3)$$

4. 試験結果および考察

4.1 硬化処理と引張強さの関係

図 1 (a) に硬化処理温と引張強さ, 図 1 (b) に硬化処理時間と引張強さの関係を示す. 表 6 に最適処理条件における引張強の挙動を示す.

各鋼種の最適処理条件における引張強さの上昇は, NASMA 164 が最も大きく 57 kg/mm² ついで SUS 631 J1, NAS 604 PH, AISI 660 の 35~40 kg/mm², AISI 688, SUS 347 で 22~25 kg/mm², 最も引張強さ

表 6 硬化熱処理における引張強さの挙動 (線径 2.0 mm ϕ)

鋼 種	最適熱処理条件	引張強さ (kg/mm ²)		
		伸線まま	処理後	増加量
SUS 631 J1	475°C×1 hr	180	220	40
SUS 347	400°C×0.5 hr	170	192	22
SUS 310 S	450°C×0.5 hr	150	166	16
AISI 660	600°C×2 hr	135	170	35
NASMA 164	525°C×2 hr	148	205	57
NAS 604 PH	500°C×2 hr	180	220	40
AISI 1688	700°C×1 hr	160	185	25

注) 低温焼なまし又は折出硬化処理。

図 1 (a) 低温焼なましおよび折出硬化処理温度と引張強さ

図 1 (b) 引張強さと低温焼なましおよび折出硬化処理時間

図 2 高温における縦弾性係数

図 3 高温における引張強さ

上昇の小さい鋼種は SUS 310 s で 16 kg/mm² である。

4.2 高温引張試験

図 2, 3, 4 に高温における縦弾性係数 (E), 引張強さ (σ_B), 耐力 ($\sigma_{0.2}$) を示す。

4.2.1 縦弾性係数 (E)

硬化熱処理を施したものは線引のままに比べて、500°C位まではその差を維持するが、それ以上の温度では、硬化熱処理を施したものは低下が著しく両者の差がなくなる傾向にある。しかし NAS 604 PH については 700°Cにおいても差は縮まらない。

折出硬化型である AISI 688, NAS 604 PH, AISI

図4 高温における耐力

660, NAS MA 164 等は 500°C までは比較的ゆるやかに低下するが、非折出硬化型である SUS 347, SUS 310s は 300°C を超えると急激に低下する。また折出硬化型でも SUS 631 J₁ は 400°C 位から急激に低下し、500~600°C では SUS 347, SUS 310s と同等あるいはそれ以下となる。NAS MA 164 は SUS 631 J₁ より若干高く 500°C 位までは AISI 688 等とほぼ同等であるが 500°C を超えるとその低下は大きい。これらは同じ折出硬化型でも合金成分の差が大きく働いているものと思われる。

4.2.2 引張強さ

常温における引張強さの高い SUS 631 J₁, NAS MA 164, NAS 604 PH 等は低温側から低下は大きい、400°C 付近でも 180 kg/mm² の引張強さを保持している。しかし SUS 631 J₁, NAS MA 164 はこの温度を超えると、急激に低下が大きくなる。それらに比べて NAS 604 PH は 400°C を超えても 600°C 位までは比較的ゆるやかな低下であり 600°C においても 150 kg/mm² 程度の引張強さを保持する。常温での引張強さの比較的低い折出硬化型 AISI 688, AISI 660 等は全体にゆるやかな低下しか示さない。

線引のままとこれに硬化処理を施したものとの比較は、縦弾性係数同様、SUS 347, SUS 631 J₁ で 440°C ~450°C, SUS 310 s, NAS MA 164, NAS 604 PH で 550°C~600°C, AISI 688, AISI 660 は 700°C で同等の引張強さとなる。

4.2.3 耐力

AISI 660, AISI 688, NAS 604 PH が 700°C まで 80~100 kg/mm² の耐力を保持するのに対して、他の鋼

図5 高温における横弾性係数

図6 高温におけるねじり強さ

種は 500°C~600°C でこの値と同等またはそれ以下となる。その他の挙動について、引張強さ等と同じである。

4.3 高温ねじり試験

図5, 6, 7 に高温における横弾性係数 (G), ねじり強さ (σ_B), ねじり降伏点 ($\sigma_{0.2}$) を示す。

4.3.1 横弾性係数 (G)

500°C までの温度においては、各鋼種供との低下に差はないがこの温度を超えると SUS 631 J₁, SUS 347, SUS 310 s 等は急激に低下する。それらに比べて NAS 604 PH, AISI 688 等はその低下がゆるやかである。

4.3.2 ねじり強さおよびねじり降伏点

引張強さ同様、NAS 604 PH, AISI 688, AISI 660, NAS MA 164 と SUS 347, SUS 310 s, SUS 631 J₁ の二つのグループに傾向的な差があり、前鋼種グループは 500°C、他のグループは 400°C~450°C でねじり強さ、ねじり降伏点は急激に低下する。特に SUS 631 J₁ の 450°C を超えてからの低下は著しい。

伸線のままと硬化熱処理を施したものを比べた場合 300°C 付近までは低下の度合に差はないが、400°C を超えると硬化熱処理を施したものが低下の度合は大きい。

図7 高温におけるねじり降伏点

図8(a) 300°C×40hr 締付における残留せん断歪

5. 高温締付試験

図8(a)~(e)に 300, 350, 400, 450 および 500°C における 40 時間締付に伴う残留せん断歪の測定結果を示す。

300°C では SUS 347 が他鋼種に比べて残留せん断歪が大きく、締付応力が 60 kg/mm² を超すと残留せん断歪は 0.1% を超える。

350°C ではその残留せん断歪量から三つのグループに分られる。すなわち一番残留せん断歪の大きい SUS 347, 二番目の SUS 310 s, SUS 631 J₁, そして残留せん断歪の小さい AISI 688, NAS 604 PH, AISI 660, NAS MA 164 のグループに大別される。

図8(b) 350°C×40hr 締付における残留せん断歪

図8(c) 400°C×40hr 締付における残留せん断歪

図8(d) 450°C×40hr 締付における残留せん断歪

図8(e) 500°C×40hr 締付における残留せん断歪

400°C では SUS 347, SUS 310 s, SUS 631 J₁ 等は低応力側より残留せん断歪は大きくなる。350°C までは、一つのグループを形成していたが AISI 660, NAS MA 164 と AISI 688, NAS 604 PH に分れる。

450°C では SUS 347 と SUS 631 J₁ はほぼ同等となり、SUS 310 s もこれら二鋼種に近づき、その他の鋼種についても締付応力が高くなるにつれ残留せん断歪の差は顕著になる。

500°C ではすべての鋼種の残留せん断歪は大きくなる。SUS 631 J₁, SUS 347, SUS 310 s はほぼ同一の値となり、締付応力 10 kg/mm² 前後ですでに残留せん断歪は 0.1% を超える。その他の鋼種の残留せん断歪 0.1% を超える締付け応力は NAS MA 164 は 20 kg/

図9 各応力における耐熱限界
(耐熱限度リラクセーション6%)

mm², AISI 660 は 40 kg/mm², NAS 604 PH および AISI 688 は 50 kg/mm² である。図9は各応力における耐熱限界を示したものである。耐熱限界の設定については、普通ばねで許しうるリラクゼーション率(Rate of Relaxation)は許容値が6%¹⁾といわれていることからこの値をもって耐熱限界とした。各鋼種の使用温度範囲としては、NAS 604 PH, AISI 688 で 400~500°C, AISI 600, NAS MA 164 で 350~450°C, SUS 631 J₁, SUS 310 s で 250~350°C となり、SUS 347 は 300°C 以下での使用にしか耐えられない。なお今回の試験においては、各鋼種供加工率が一種類しか取ってなく、且つかなりの強度の冷間加工を施してある。一般に加工率が大きい程高温におけるヘタリが大きいとされている。このことから今回の調査においても最も耐熱性の良い鋼種でも 500°C が上限となったものと思われる。

6. まとめ

SUS 631 J₁, SUS 347, SUS 310 s, AISI 660, NAS MA 164, NAS 604 PH, AISI 688 の耐熱ステンレスおよび超合金線について高温での各種特性調査した結果、Co 基析出硬化型合金である NAS 604 PH および Ni 基析出硬化型合金 AISI 688 が最も耐熱性は良く、次に Fe 基析出硬化型合金である AISI 660 マルエージ型ステンレス鋼 NAS MA 164 がこれに続き、更に SUS 631 J₁, SUS 310 s, SUS 347 の順となる。

参考文献

- 1) 石原康正: コイルばね, q. 126, 昭 30, 養賢堂.