

金属名	抵抗率 $\rho \times 10^{-8} (\Omega \cdot \text{m})$	導電率 $\sigma \times 10^6 (\text{S/m})$	導電率 (%IACS)
銀(47)	1.59	62.9	108.4
銅(29)	1.6~2.3	43.5~62.5	75.0~107.8
金(79)	2.35	42.6	73.4
アルミニウム7075-T0	3.6~3.8	26.3~27.8	45.4~47.9
アルミニウム7075-T3	4.1~4.6	21.7~24.4	37.5~42.1
ジュラルミン	3.4~5.5	18.2~29.4	31.3~50.7
黄銅	4~7	14.3~25.0	24.6~43.1
マグネシウム(12)	4.45	22.5	38.7
アルミニウム7075-T6	5.4~6.2	16.1~18.5	27.8~31.9
亜鉛(30)	5.92	16.9	29.1
コバルト(27)	6.24	16.0	27.6
ニッケル(28)	6.84	14.6	25.2
リン青銅	6.5~17	5.88~15.4	10.1~26.5
リチウム(3)	8.55	11.7	20.2
白金(78)	10.6	9.43	16.3
パラジウム(46)	10.8	9.26	16.0
スズ(50)	11.5	8.70	15.0
クロム(24)	12.9	7.75	13.4
鉛(82)	20.6	4.85	8.4
ハフニウム(72)	35.1	2.85	4.9
ジルコニウム(40)	40	2.50	4.3
ジルカロイ2	69~75	1.33~1.45	2.3~2.5
SUS304L	71~80	1.25~1.41	2.2~2.4
インコネル	90~98	1.02~1.11	1.8~1.9

第7回 耐熱ばね材料

鈴木金属工業(株) 林 博昭

1. 熱へたりのメカニズム

耐熱ばねの明確な定義はないが、常温より高い温度で用いられるばねを耐熱ばね、また、この常温より高い温度で発生するへたりを熱へたりと称している。ばねが高温で用いられる時、折損が起きてはならないことはもちろんであるが、へたりが常温よりはるかに大きくなることが問題となる。

ところで、へたりの捉え方には、クリープと応力リラクセーション(応力弛緩)の2種類がある。応力一定下のひずみの変化がクリープ、ひずみ一定下の応力の変化が応力リラクセーションである。応力とひずみのどちらを主に扱うかという違いであり、材料内で発生している現象は同じと考えてよい。

さて、高温の場合のへたりはどのようなメカニズムで発生するのであろうか。高温になるとへたり発生の原因是、以前「ばねのへたり」で説明した転位によるすべり(以下転位すべりという)だけではなくなる。図1に純ニッケルのクリープ変形機構領域図(等ひずみ速度線を消してある)を示す。温度が高くなると転位すべり以外に転位クリープ、拡散クリープという現象が低応力下でも発生するようになる。

転位クリープは転位すべりと拡散クリープの中間的存在で、比較的高温域で転位すべりと回復により、塑性変形が時間的につれくつと進む現象である。拡散クリープはさらに温度の高い領域で、原子の拡散による物質移動そのものが変形の源となる現象である。つまり常温と高温ではへたり発生のメカニズムが異なるのである。また、金属材料は高温で長時間保持されると、多少なりとも金属組織の変化が生じる。特に常温で高強度の材料ほど高温では変化を起こしやすい。常温ではあまり問題にならなかった結晶粒径が問題となる場合もある。材料と温度にもよるが、熱へたりを常温でのへたりの延長と考えることは、大きな危険が伴うので注意されたい。

2. 耐熱ばね材料の種類

耐熱ばね材料に適用される材料は、既存のばね用材料と耐熱鋼を中心とする耐熱性の高い構造用鋼に大別される。耐熱ばね材料調査委員会が実施したアンケート結果を図2に示す。様々な材料が幅広い温度で使用されている。しかし、注意しなければいけないのは、この図の各データのばね強度基準は統一されておらず、許容へたり量はまちまちであるということである。そのことを考慮せず、最も右側の実績直が、いずれの条件においてもその材料の使用可能最高温度と考えてはならない。これらの材料について、分類・解説すると以下のようになる。

21 薄板ばね

薄板ばねとしてはSK5を含むみがき特殊帶鋼、線ばねとしてはピアノ線・硬鋼線、SWO-ABVが用いられているが、使用温度は低範囲に限られる。

22 低合金鋼

線ばね用としてはSWOSC-V,B、SWOSM-ABC、SWOCV-Vが大荷重のばねには、ばね鋼のSUP6～SUP13が用いられる。薄板ばねの場合はみがき特殊帶鋼のSUP10があるが、低合金鋼が用いられる温度域ではむしろ次のステンレス鋼が用いられるケースが多い。

23 ステンレス鋼

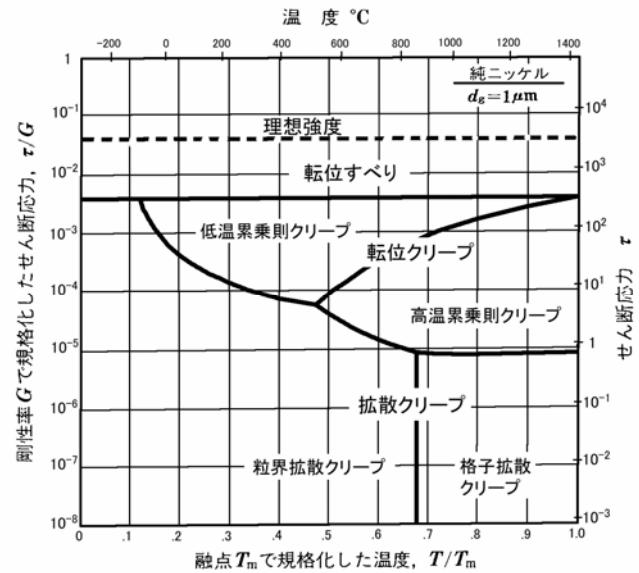


図1 純ニッケルのクリープ変形機構領域図

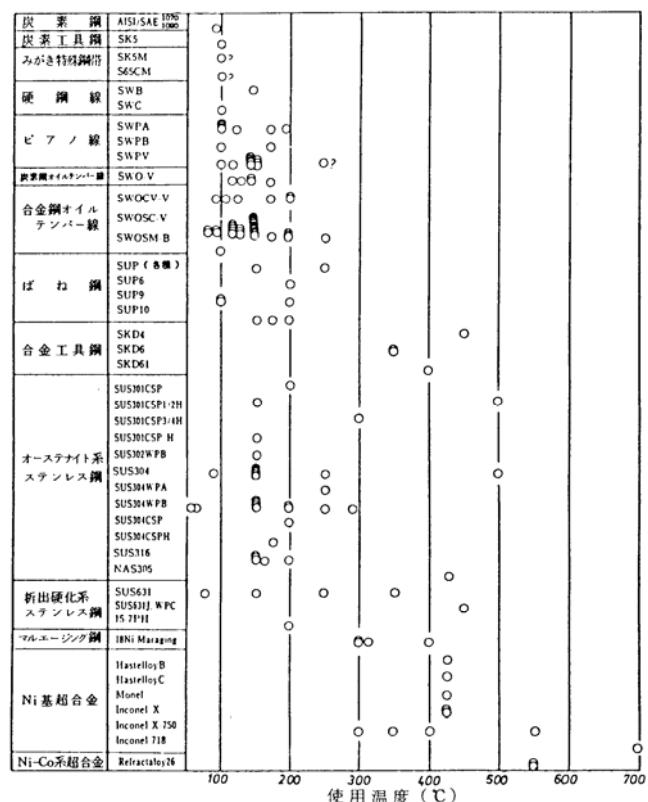


図2 ばね材料と使用温度

ステンレス鋼は耐熱性があるだけでなく、耐酸化性、耐薬品性にも強いので重宝な材料である。薄板ばねではオーステナイト加工強化型のSUS301、SUS304、SUS316が用いられ、線ばねではSUS304、SUS316が用いられる。析出硬化系のSUS631、SUS631J1はJISの鋼種の中では最も耐熱性に優れており、薄板、線ばね両方で用いられる。

24 工具鋼

SKDを主とする低合金工具鋼も耐熱性に富んでおり、高温用途に用いることができるが、市販の鋼材形状の種類が少なく、適用できるばね形状

が限られるのが難である。

2.5 耐熱鋼・耐熱合金

構造材料で用いられる耐熱鋼及び耐熱合金は、ばね材料より常温での強度が低いが、試験応力次第で耐熱ばね材料にも適用できる。Feベースの合金を耐熱鋼、Ni及びCoベースの合金を耐熱合金あるいは超合金と呼んでいる。

耐熱鋼は①少量のCr、Moを含む低合金鋼、②10%前後のCrを含むフェライト系耐熱鋼、③相当量のCrとNiを含むオーステナイト系耐熱鋼に分類される。耐熱ばねとして代表的なものにオーステナイト系耐熱鋼のA-286 (SUH660) があげられる。

Niベースの耐熱合金にはInconel、Incoloy、Hasteloyといった種類の材料があり、成分系の違いによりさらに細分化されている。これらのいくつかはJISにも耐食耐熱合金 (NCF) として規格化されている。耐熱ばね用としては析出硬化系のInconel X-750 (NCF750)、Inconel 718 (NCF718) が、Ni-Coベースの合金ではRefractaloy 26 がさらに高温域で使用されている実績がある。

3. 耐熱ばね設計のポイント

耐熱ばねの設計においては、常温で使用するばねの場合と異なった事項について考慮する必要がある。圧縮コイルばねについては、JSMA規格SD003に試験基準が設けられているので、詳細はこれを参照されたい。次に高温で使用するばねで、注意しなければいけない点について触れる。

3.1 弹性係数の温度依存性

弾性係数はばね定数あるいは荷重試験のためには非常に重要な要素である。高温になると常温より弾性係数は低下するので、設計にあたっては使用する温度での弾性係数が重要となる。図3に代表的な耐熱ばね材料の横弹性係数の温度依存性を示す。

3.2 使用条件と許容へたり量

高温では常温と異なったメカニズムでへたりが発生し、常温のようにへたりを無視できない場合が多い。設計にあたっては、まず、事前応力、温度、時間などから使用中に許容へたり量を把握し、適切な材料を選択しなければならない。しかし、現在公開されている熱へたりのデータはそう豊富ではない。耐熱用ばね材料調査委員会による「耐熱用ばね・材料の高温データ集」第1巻、第2巻に数多くのデータがまとめられているが、現在は在庫切れとなっている。前述の耐熱圧縮コイルばね試験基準では、主な材料についての応力、温度、許容へたり量の関係を示されており、その一部を表1に示す。これらはいずれも40~500時間のデータであり、耐熱ばねを試験する上では必ずしも十分ではない。SWOSC-VとSUS304-WPBについては、3000時間までの共同研究がばね論文集34号に示されており、この

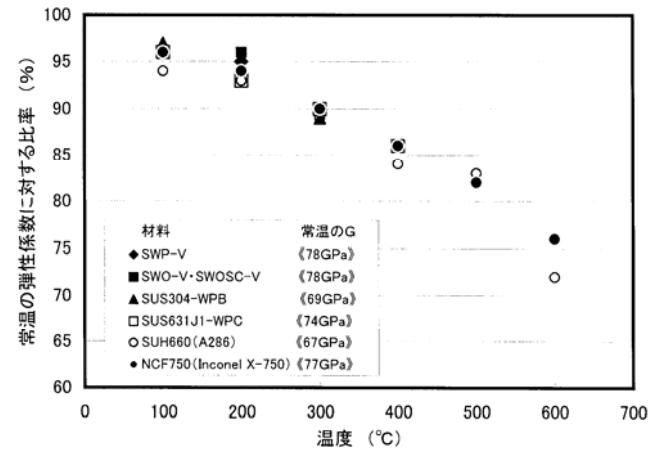


図3 横弹性係数の温度依存性

研究成果を他の線条・材料にも適用すれば非常に有効な設計資料となる。

3.3 高温での酸化及び雰囲気

許容へたり量以外にも高温で用いられる場合には、酸化によるばね材料の損耗に注意しなければならない。また、雰囲気についても高温ガスの場合は常温より影響が強いので注意を要する。

3.4 ショットピーニング、ホットセッティングと熱へたり

250°C以上の温度で使用される耐熱ばねの場合、加熱雰囲気により残留応力が解放されてしまうのでショットピーニングは効果がない。ショットピーニングにより導入されたひずみがへたりを助長させるので、耐熱ばねにはむしろ逆効果である。

常温で熱へたり性を高めるのに有効であったホットセッティングは、耐熱ばねでも基本的には有効である。ただし、そのセッティング温度は使用温度より高温でなければならぬ。

参考文献

- 丸山公一、中島英台 「高温強度の材料科学 クリープ理論と実用材料への適用」 内田老舗
- JSMA規格 SD003: 1987 耐熱圧縮コイルばね試験基準
- 耐熱用ばね材料調査委員会 「耐熱ばね材料の高温強度データ集」 ばね技術研究会

表1 残留せん断ひずみ $\gamma = 0.05\%$ を許容するねじり応力の例

上段: τ_0 下段: τ_0 / σ_B

材料	温度°C												データ算出 締付時間
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
SWP-V	61 0.36	51 0.31	36 0.22	21 0.14									80時間
SWO-V		55 0.38	45 0.31	31 0.22									80時間
SWOSC-V			70 0.38	54 0.3									80時間
SUS304-WPB				65 0.39	45 0.28	18 0.11							80時間
SUS631J1-WPC					70 0.38	40 0.23	19 0.11						40時間
SUH660(A286)						54 0.4	52 0.4	50 0.39	47 0.38	35 0.28	18 0.15		100時間
NCF750 (Inconel X-750) (No.1テンパー)									39 0.28	34 0.25	29 0.22		500時間
NCF750 (Inconel X-750) (スプリングテンパー)											31 0.25	25 0.22	

* σ_B は各温度における引張強さである。

*  は適用範囲(目安)を示す。