

『ばね設計に関する資料』

ばねの種類と応力

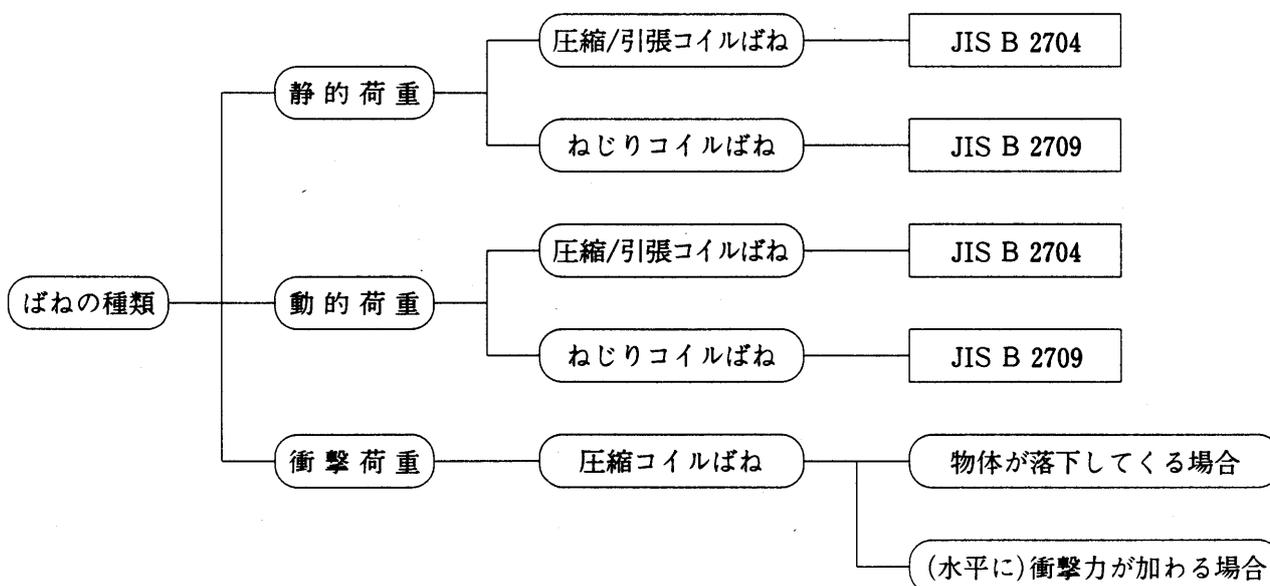
設計しようとするばねの種類によって応力の種類が異なるので、設計に際しては正しい計算式・図表を用なければならない。

コイルばねに加える荷重の方向と応力の関係を表1および図1に示す。

表1 コイルばねに加わる荷重の方向と応力の関係

ばねの種類	コイルばねの荷重方向	応力の状態	JIS関連規格
圧縮コイルばね	圧縮	ねじり	B 2704(設計基準)、B2707
引張コイルばね	引張り	ねじり	B 2704(設計基準)、B2708
ねじりコイルばね	ねじり	曲げ	B 2709(設計基準)

図1 コイルばねに加わる荷重の方向と応力の関係



コイルばねに加わる荷重の状態による分類を表2に示す

表2 コイルばねに加わる荷重の状態

コイルばねに加わる荷重の状態	説 明	設計のポイント
静 荷 重	ばねの使用状態で荷重変動のほとんど無いもの、あるいは繰返し荷重があってもばねの生涯を通じて数千回以下のものを含める。	$\tau = \tau_0$ コイル部の曲率による応力修正係数を考慮しなくて良い。
繰返し荷重	普通のばねは繰返し荷重がかかるものが多い。したがって、ばねの折損までの繰返し回数を設計上予測しなければならない。この点において静荷重のかかるばねとは別な許容応力のとり方が必要となる。	$\tau = K \cdot \tau_0$ コイル部において曲率による応力修正係数を乗じる。
衝 撃 荷 重	ばねは衝撃荷重を緩和する役目も持っているので、しばしば緩衝装置としてばねを介し、物体の速度をゆるめ、衝撃力を小さくすることが行なわれる。このような場合には、静荷重、繰返し荷重を受けるばねの場合の計算式がそのまま使用できない場合が多いので注意する必要がある。	衝突する物体の速度、重量、ばねの重量、ばね定数及びばね仕様により決定されるが、複雑である。

ばねの設計に用いる基本式 1), 2), 4)

表3 ばねの設計に用いる記号

記号	記号の意味	単位
d	材料の線径	mm
D_1	コイル内径	mm
D_2	コイル外径	mm
D	コイル平均径 $= \frac{D_1 + D_2}{2}$	mm
N_t	総巻数	—
N_s	有効巻数	—
N_f	自由巻数	—
H_s	密着高さ	mm
p	ピッチ	mm
P_i	初張力	N {kgf}
τ_i	初張力によるねじり応力	N/mm ² {kgf/mm ² }
$c = \frac{D}{d}$	ばね指数	—
G	横弾性係数	N/mm ² {kgf/mm ² }
τ_o	ねじり応力	N/mm ² {kgf/mm ² }
τ	ねじり修正応力	N/mm ² {kgf/mm ² }
a, h	長方形断面の半径方向の長さ(長辺)	mm
b	長方形断面のコイル軸にそった長さ(短辺)	mm
σ	曲げ応力	N/mm ² {kgf/mm ² }
E	縦弾性係数	N/mm ² {kgf/mm ² }
M	ねじりモーメント(トルク)	N·mm {kmf·mm}
$\phi(\phi_d)$	ばねのねじり角	rad(度)
$R(R_1, R_2)$	荷重作用半径	mm
l	線または棒の長さ	mm(πNaD)
$k(k_T)$	ばね定数	N/mm {N·mm/rad} {kgf/mm {kgf·mm/rad}}
κ	応力修正係数	—
κ_b	曲げ応力修正係数	—
κ_b'	曲げ応力修正係数(長方向断面)	—
a_1, a_2	腕の長さ	mm
P	荷重	N {kgf}
δ	たわみ	mm
ω	材料の単位体積当たり重量	N/mm ³ {kgf/mm ³ }

○圧縮コイルばねのNa

両端オープンエンド $Na = Nt - 1.5$

両端クローズドエンド $Na = Nt - 2.0$

○引張コイルばねのNa

半コイルフック $Na = Nt + 0.2$

1コイルフック $Na = Nt + 1.0$

通常 $Na = Nt$

ばねの基本式

表 4 圧縮引張コイルばね

種 類		Pより	δ より	τ_0 (τ)より
円形断面の圧縮コイルばね及び初張力を考えない引張コイルばね	Pを求める式		$P = \frac{Gd^4}{8NaD^3} \delta$	$P = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_0$
	δ を求める式	$\delta = \frac{8NaD^3}{d^4 G} P$		$\delta = \frac{\pi NaD^2}{d G} \tau_0$
	τ_0 を求める式	$\tau_0 = \frac{8D}{\pi d^3} P$	$\tau_0 = \frac{dG}{\pi NaD^2} \delta$	

注 1 $\tau = \kappa \tau_0$ (κ はワールの修正係数 2. 4 参照)

注 2 引張コイルばねで初張力を考える場合は、 δ より P, τ_0 を求める式にそれぞれ P_i , τ_i をプラスし、また P, τ_0 より δ を求める式は、得られた式より算出する。($P_i = \pi d^3 \tau_i / 8D$, $\tau_i = G/100c$ あるいは図5による。)

表 5 ねじりコイルばね

		Mより	ϕ より		σ より
			rad	度	
円形断面のねじりコイルばね	Mを求める式		$M = \frac{Ed^4}{64NaD} \phi_r$	$M = \frac{Ed^4}{3667NaD} \phi_d$	$M = \frac{\pi d^3}{32} \sigma$
	ϕ を求める式	rad	$\phi_r = \frac{64NaD}{Ed^4} M$		$\phi_r = \frac{2\pi NaD}{Ed} \sigma$
		度	$\phi_d = \frac{3667NaD}{Ed^4} M$		$\phi_d = \frac{360NaD}{Ed} \sigma$
	σ を求める式	$\sigma = \frac{32}{\pi d^3} M$	$\sigma = \frac{Ed}{2\pi NaD} \phi_r$	$\sigma = \frac{Ed}{360NaD} \phi_d$	

注 1 腕の長さを考慮する場合、 $\phi_r = \frac{64M}{\pi Ed^4} \left\{ \pi DN a + \frac{1}{3} (a_1 + a_2) \right\}$ を求め各式に代入する。

注 2 $(a_1 + a_2) \geq 0.09 \times \pi NaD$ の時、腕の長さを考慮する。

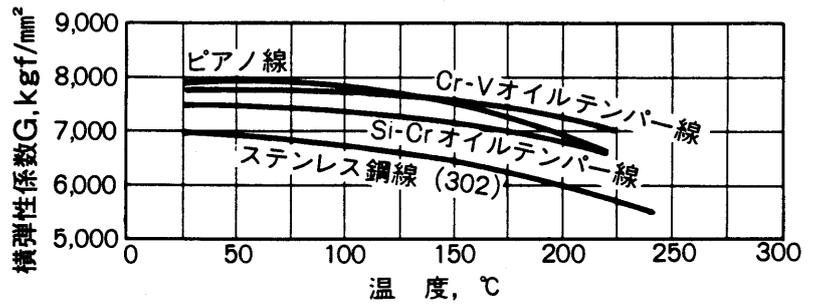
注 3 巻き戻す場合のコイル内側に働く最大応力

円形断面 $\sigma_{max} = 32 (R + D/2) P \times b / \pi d^3$

表6 横弾性係数(G)と縦弾性係数(E)
1), 2) など

		Gの値 N/mm ² {kgf/mm ² }	Eの値 N/mm ² {kgf/mm ² }
硬鋼線		78000 {8000}	206000 {21000}
ピアノ線		78000 {8000}	206000 {21000}
オイルテンパー線		78000 {8000}	206000 {21000}
ステンレス鋼線	302	69000 {7000}	186000 {19000}
	304		
	316	74000 {7500}	196000 {20000}
	631J1		
	クライオS		
黄銅線		39000 {4000}	98000 {10000}
洋白線		39000 {4000}	108000 {11000}
リン青銅線		42000 {4300}	98000 {10000}
ベリリウム銅線		44000 {4500}	127000 {13000}
純チタン チタン合金線		34000~39000 {3500~4000}	88000~108000 {9000~11000}
プレコZ		69000 {7000}	186000 {19000}

図2 横弾性係数と温度の関係
(Metals Handbookより)



応力修正係数 1)

図3 圧縮・引張コイルばね

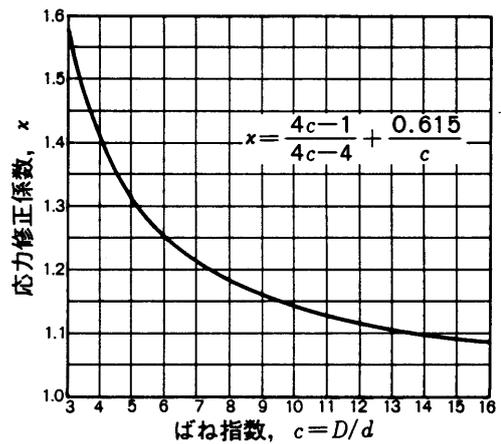
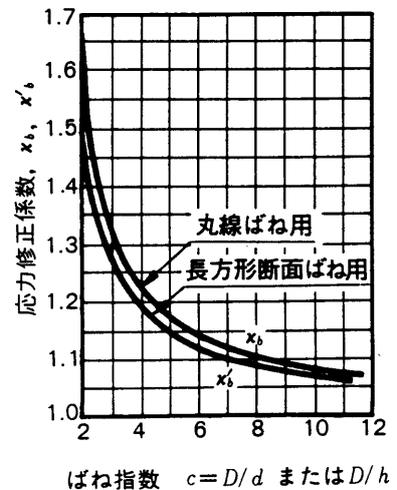


図4 ねじりコイルばね 5)



$$x_b = \frac{4c^2 - c - 1}{4c(c-1)} \quad \left(c = \frac{D}{d}\right)$$

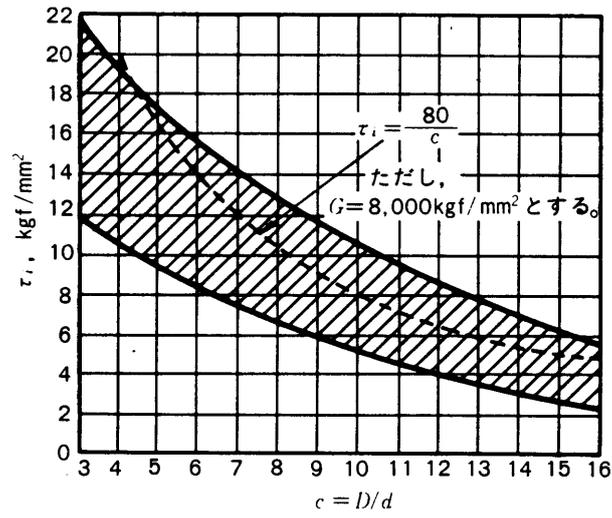
$$x'_b = \frac{3c^2 - c - 0.8}{3c(c-1)} \quad \left(c = \frac{D}{h}\right)$$

表7 ばね定数 (κ , κ_T)

ばねの種類		κ (N/mm kgf/mm), κ_T (N·mm/rad kgf·mm/rad)
圧縮・引張 コイルばね	円形断面	$k = Gd^4 / 8NaD^3$
	長方形断面	$k = a^2 b^2 G / \omega NaD^2$
ねじりコイルばね	円形断面	$k_T = Ed^4 / 64NaD$ $k_T = \pi Ed^4 / 64 \{ \pi NaD + \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \}$
	長方形断面	$k_T = Ebh^3 / 12\pi NaD$

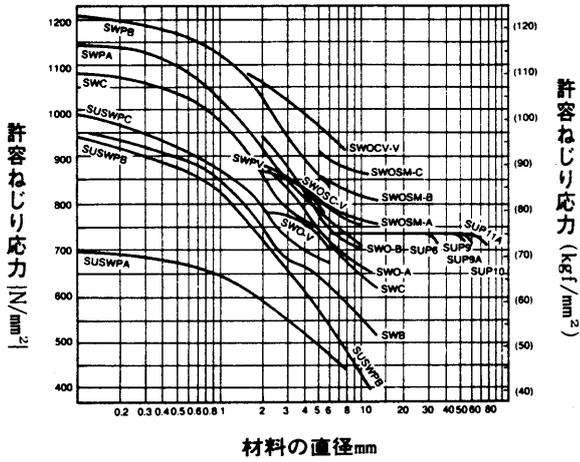
4)

図5 ばね指数と初応力の関係 (「ばねの設計」丸善)

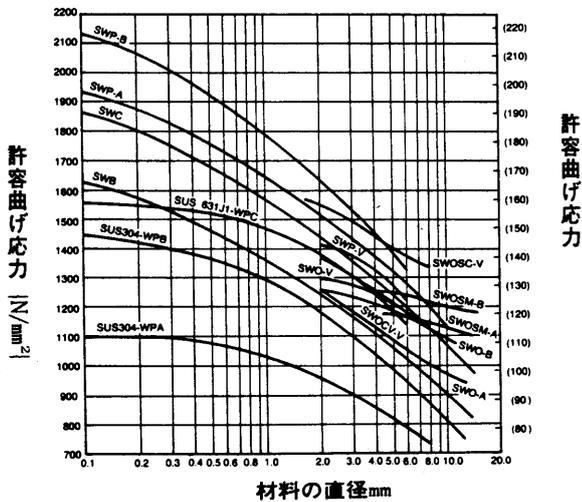


円筒コイルばねの許容応力 1), 2),

図6 静荷重を受ける場合
(繰返し応力を無視できる場合)
圧縮・引張コイルばね



ねじりのコイルばね



1. 静荷重を受ける圧縮ばね

- 1) ばねの許容ねじり応力は、図の値とし、ばねの密着応力は、この値を超えないことが望ましい。また、試験荷重時の応力は、この値に等しくとる。
- 2) ばねの使用上の最大応力は、図の値の80%以下にするのがよい。

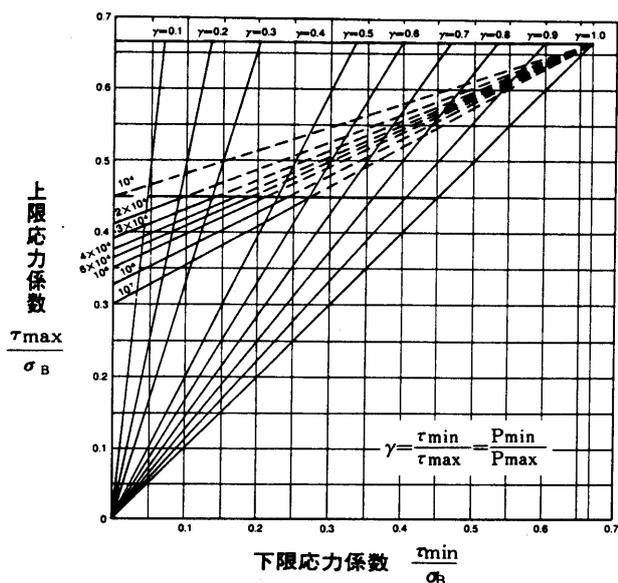
2. 静的荷重を受ける引張ばね

- 1) ばねの許容ねじり応力は図の値の80%とし、試験荷重時の応力は、図の値の80%に等しくとる。
- 2) ばねの使用上の最大応力は、図の値の64%以下にするのがよい。

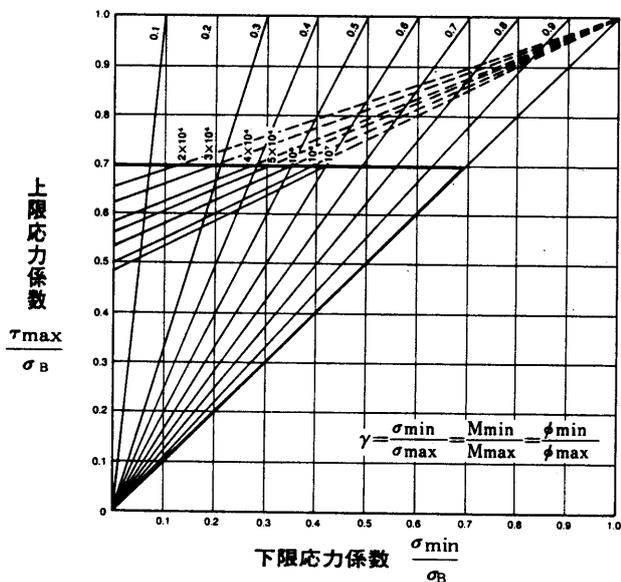
動荷重を受ける場合

(繰返し荷重を受け、疲労を考慮する場合)

圧縮コイルばね



ねじりコイルばね



[例]

材料：SWP-B

d : 1.0mm

$H_1 = 24\text{mm}$, $P_1 = 1.0\text{kgf/mm}^2$

D : 10mm

$H_2 = 12\text{mm}$, $P_2 = 2.0\text{kgf/mm}^2$

$N_a : 8$

繰返し速度800回/分

$N_t : 10$

$H_o : 32\text{mm}$

$$\tau_{max} = \chi \times (8DP) / \pi d^3 = 73.2\text{kgf/mm}^2$$

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_B} = \frac{73.2}{230} = 0.318 \quad r = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{1}{2.5} = 0.4$$

×印の点は 10^7 回の疲れ限度内であるので 10^7 回以上の寿命を期待することができる。

[注] ステンレス鋼線の場合も同様にして求められます。

[例]

材料：SWP-B

d : 1.0mm

$M_{max} = 10\text{kgf}\cdot\text{mm}$

D : 9.0mm

$M_{min} = 2\text{kgf}\cdot\text{mm}$

N : 4

繰返し数： 10^5 回

端末の形状：ショートフック

$$\sigma_{max} = \frac{32M_{max}}{\pi d^3} = 102\text{kgf/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_B} = \frac{102\text{kgf/mm}^2}{230\text{kgf/mm}^2} = 0.44 \quad r = \frac{M_{min}}{M_{max}} = 0.2$$

×印の点は 10^7 回の線の近くにあるので、このばねは 10^7 回の使用寿命は保証できる。

[注] ステンレス鋼線の場合も同様にして求められます。

図7 疲れ限度線図

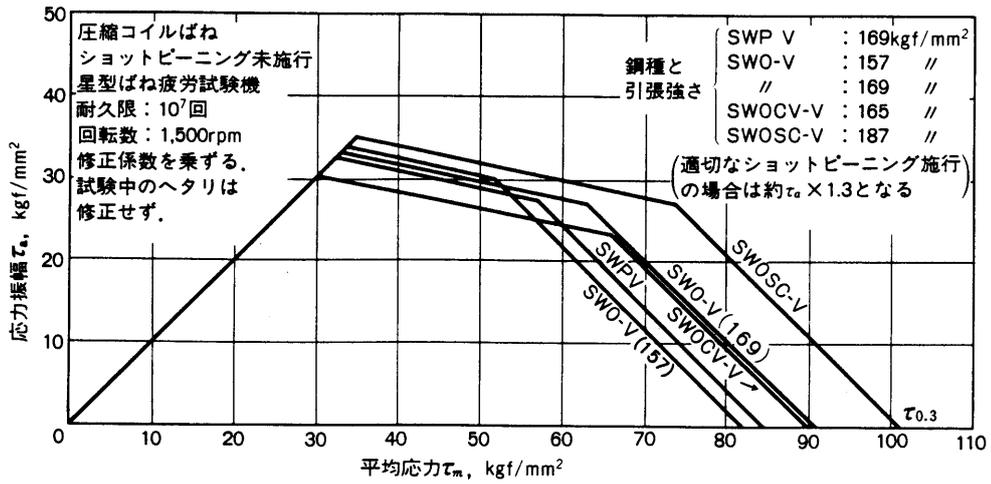


図8 各種鋼線の疲れ限度線図

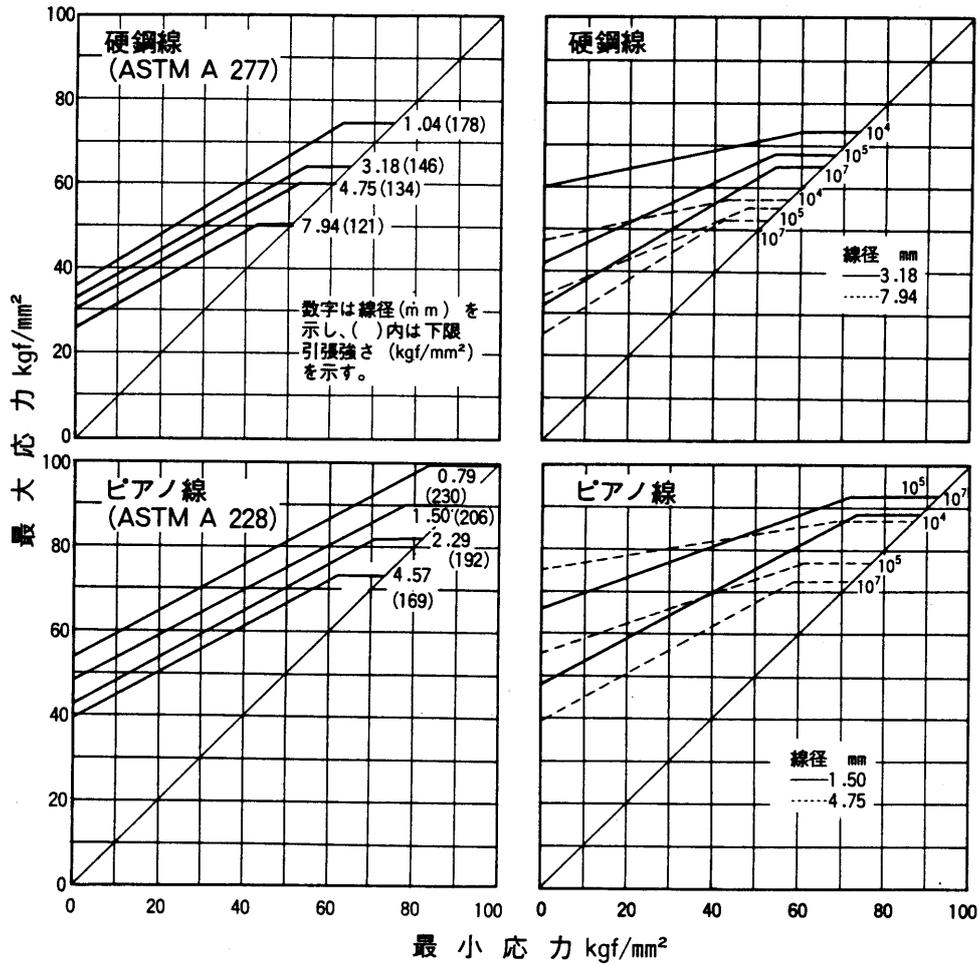
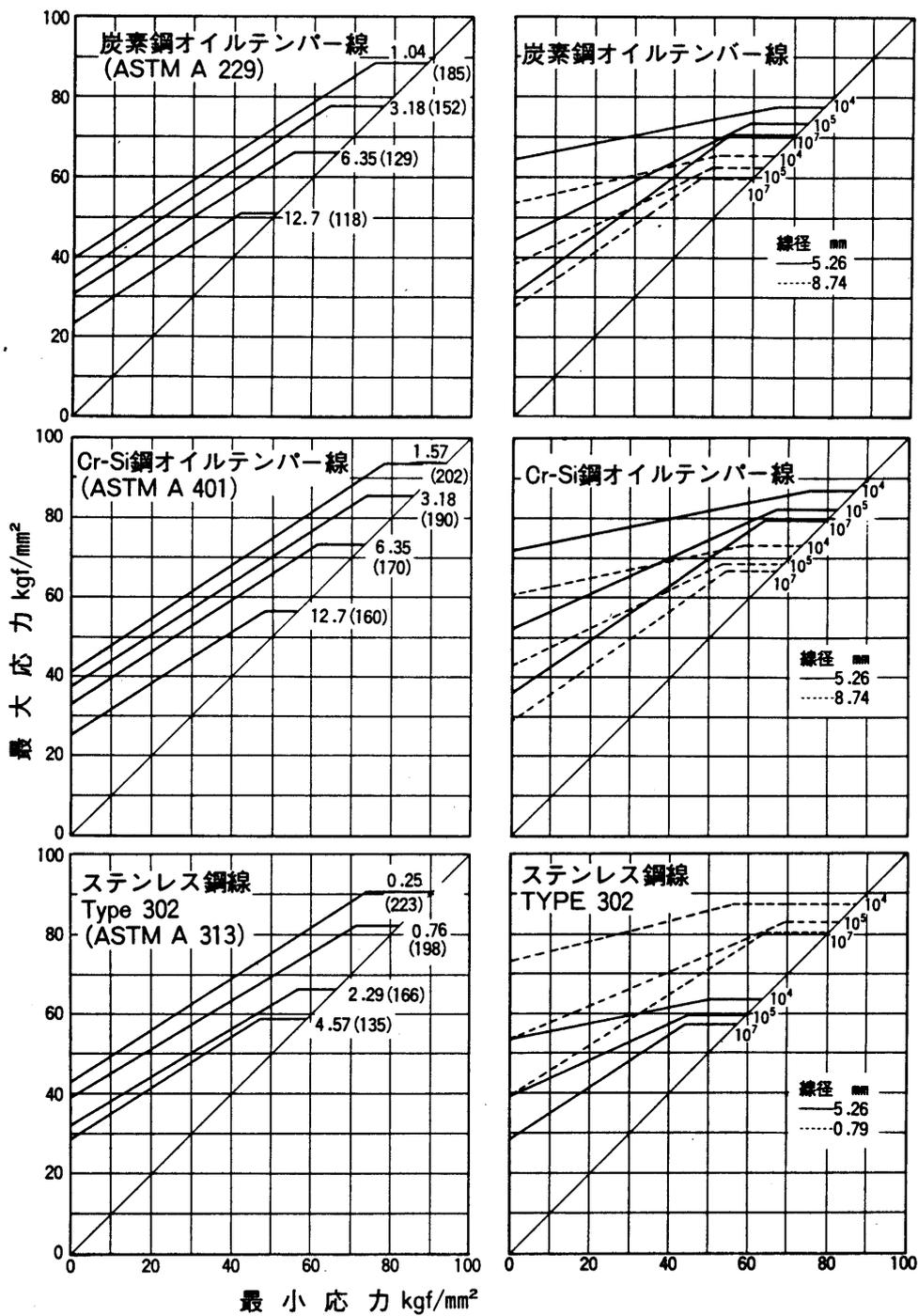


図8 (つづき)



各種ばね材料の機械的性質と低温焼鈍(ブルーイング)温度の関係

図9 0.08% C (ピアノ線、硬鋼線)の低温焼鈍特性(減面率の相違)

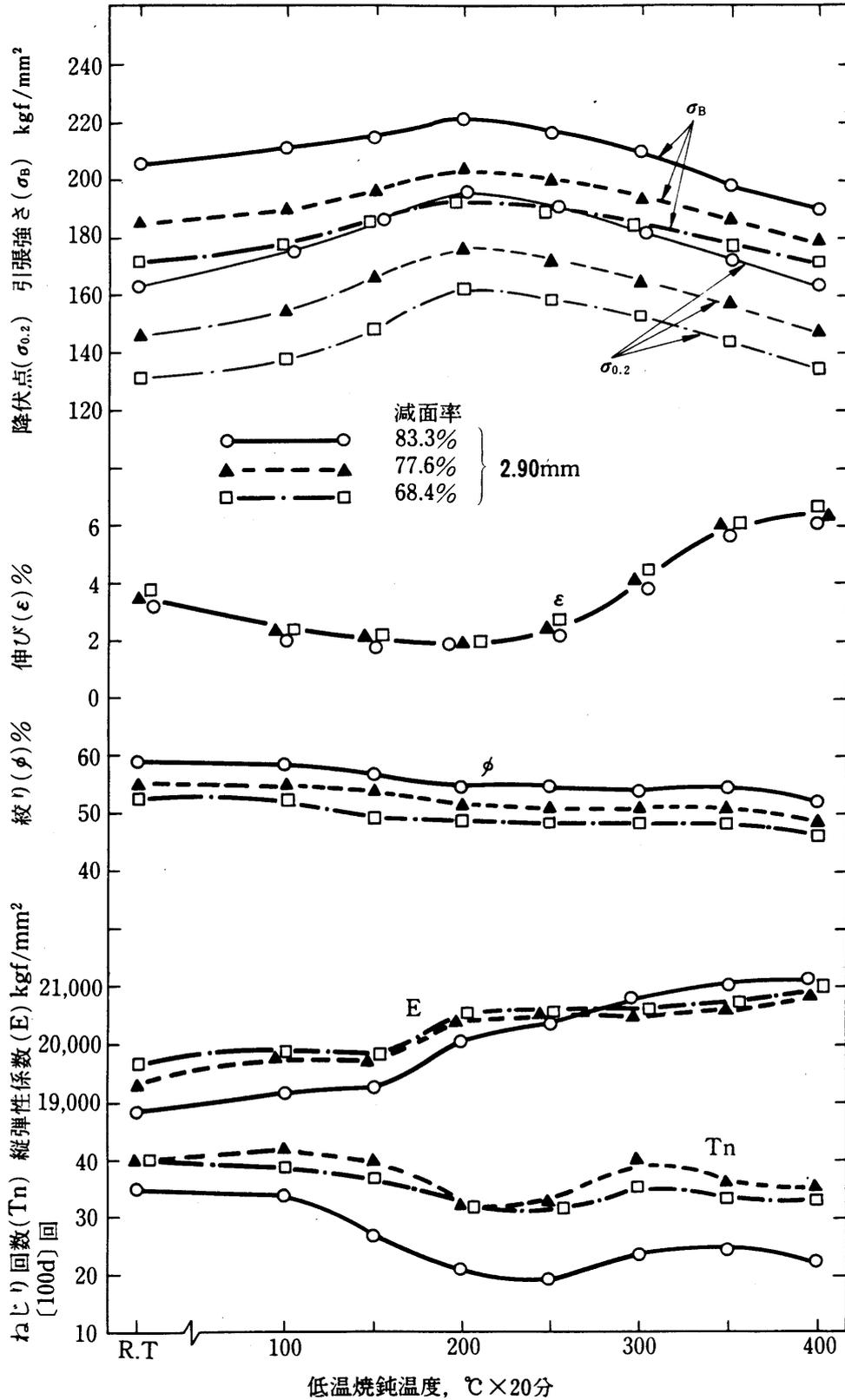


図10 弁ばね用オイルテンパー線の低温焼鈍特性

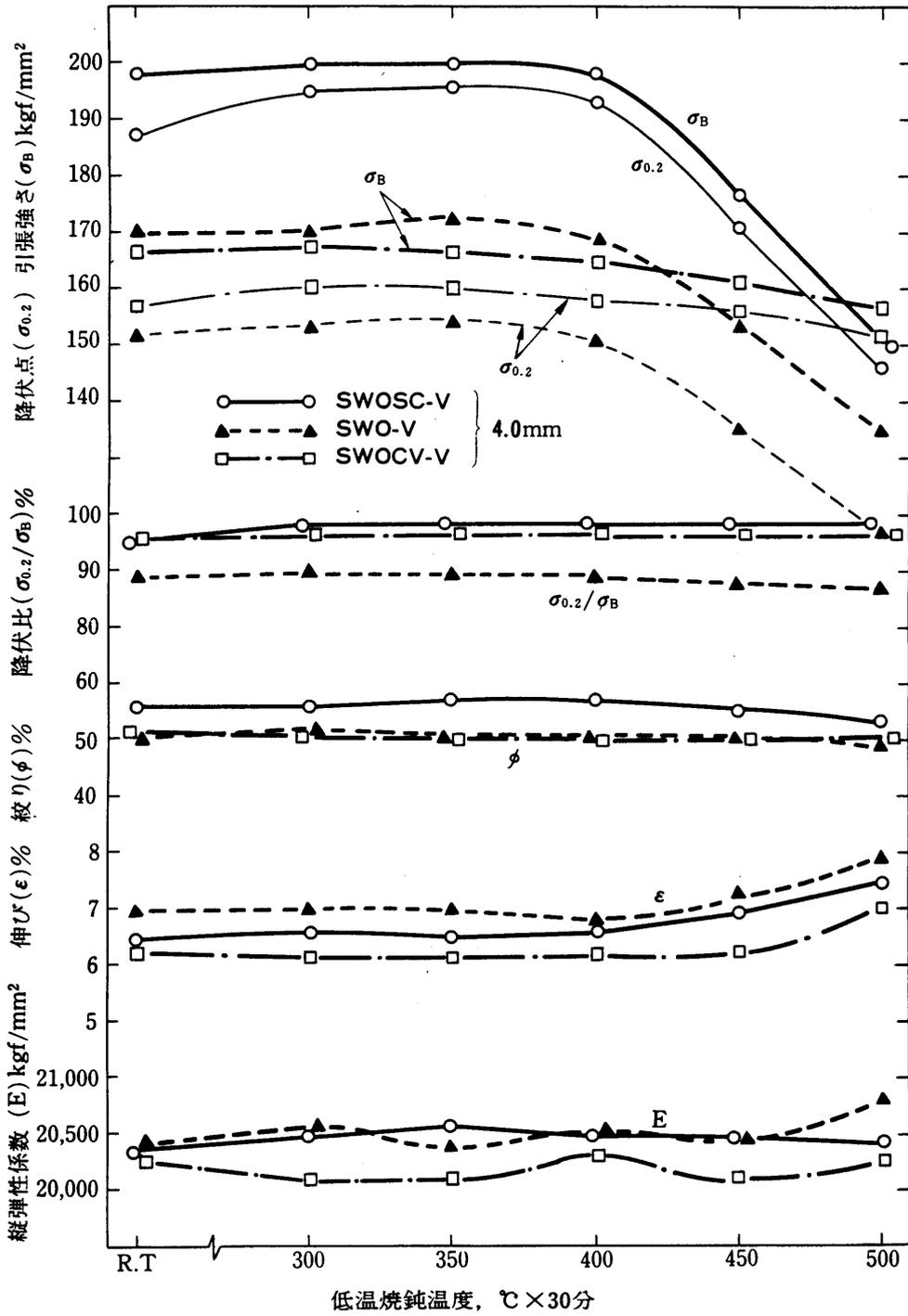
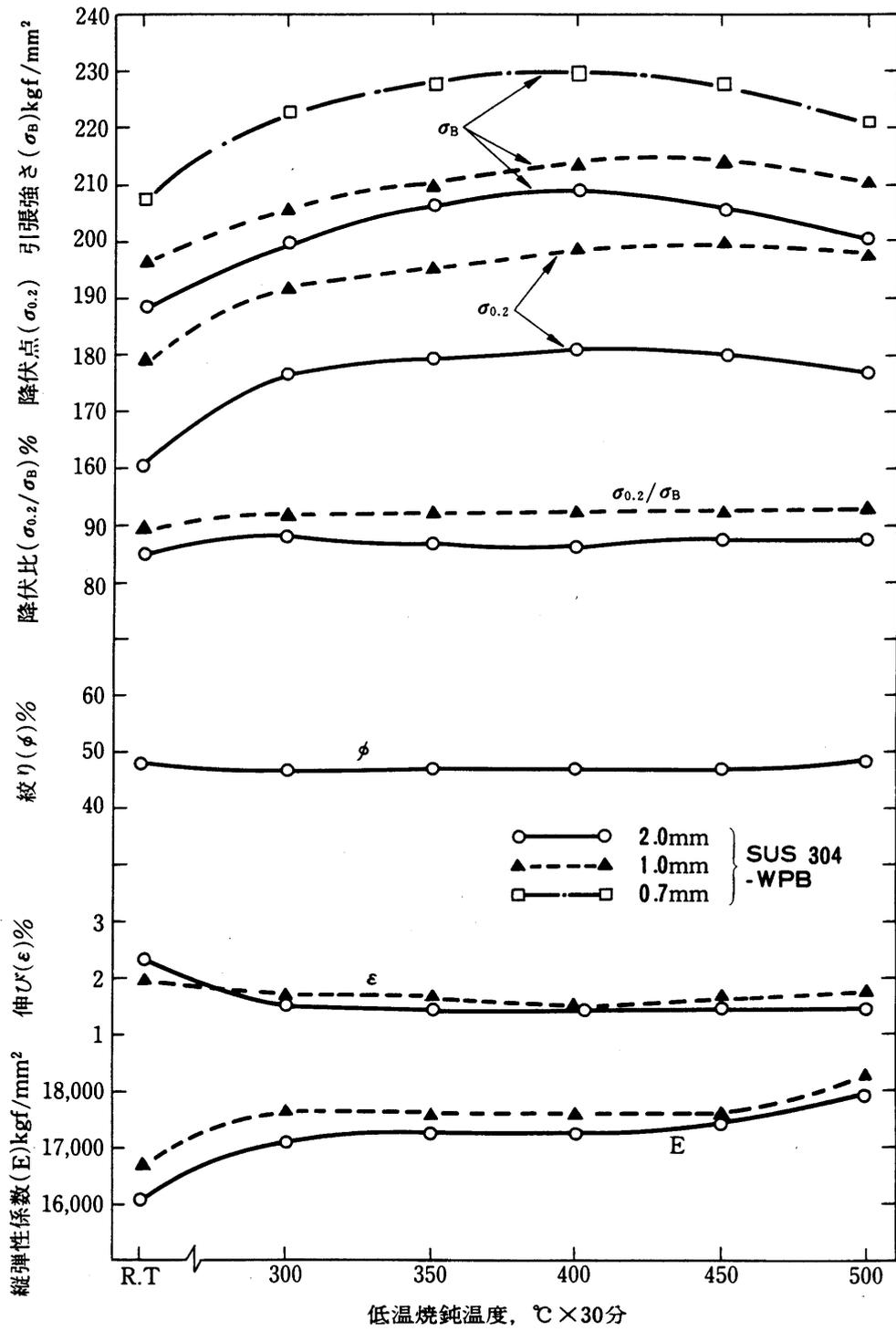


図11 ばね用ステンレス鋼線の低温焼鈍特性(線径の相違)



低温焼鈍の目的及び注意点

1. 低温焼鈍の目的

- 1) 伸線加工、ばね成形（コイルリング）、フォーミングなどの冷間加工において発生する有害な残留応力を除去し、耐疲労性や耐へたり性を高める。
- 2) 弾性限、降伏点を高め、耐へたり性を向上させる。

2. 低温焼鈍の注意点

低温焼鈍は、ばねの用途、目的により同一鋼線でも異なる条件の処理が必要であったり、低温焼鈍による弊害もあるので注意を要する。標準的な条件としては表8を用いるのが良い。また、低温焼鈍にあたっては表9のような点に注意しなければならない。

表8 ばね用鋼線の最適低温焼鈍温度（「小物ばね熱処理マニュアル」ばね技術研究会編）

種 類		振幅の少ないばね，静的に使用するばね		耐疲労性を要求されるばね		
		熱処理温度(℃)	時 間(分)	熱処理温度(℃)	時間(分)	
ピアノ線 硬鋼線	SWP	200～350	15～20	動的用	300～350	20～30
	SW			静的用	200～250	20～30
炭素鋼オイルテンパー線	SWO	200～350	15～20	300～350	20～30	
弁ばね用クロムバナジウム鋼 オイルテンパー線	SWOCV-V	230～400	15～20	300～400	20～30	
シリコンマンガン鋼 オイルテンパー線	SWOSM	230～400	15～20	300～400	20～30	
弁ばね用シリコンクロム鋼 オイルテンパー線	SWOSC-V	300～450	15～20	400～450	20～30	
ステンレス鋼線	SUS 302 304	250～400	15～20	350～400	20～30	
析出強化型ステンレス鋼線	SUS 631J1	470±10	60	470±10	60	

- コイルリング後の低温焼鈍（ブルーイング）にのみ適用し、ショットピーニング後の低温焼鈍には200～250℃にて20分を適用する。
- ねじりコイルばねにおいてはコイルリングによる残留応力を有効に活かすため、低温焼鈍をしない方が良い場合がある。
- 静的用：初張力を必要とする引張ばね，静的の高応力ばね，動的用：動的の高応力ばね。

表9 低温焼鈍時の注意事項

温 度 と 時 間	標準温度より高温での短時間加熱はさけるべきである。
圧 縮 ば ね	ピーニング又はセッチング後に軽く低温焼鈍すると変形防止になる。
引 張 ば ね	初張力が減少するので、許容差はこの減少を見込んでつける。
ね じ り ば ね	コイリングによる残留応力を有効に活かすため、鋼線の場合成形後の低温焼鈍は280℃、その後部分加工したときの低温焼鈍は250℃。ばねによっては焼鈍しない場合もある。
コイル径の縮小	引抜鋼線、オイルテンパー線は縮小するので、コイリング時にこの量を見込んで成形する。自由高さやばね常数も大となる。
コイル径の増大	18-8系のステンレス鋼線は増大するので、自由高さやばね定数も小さくなるので、上記同様に成形時に注意する。
引張ばねのフック	焼鈍とともに位置が変わる。フック対向角が指定されているものはこの量を見込んで成形時に見込まなくてはならない。
ねじりばねのアーム	上記と同様に变化するから成形時に変化量を見込む。
硬 さ	一般に焼鈍温度をあげると硬さは若干増加した後低下する傾向を示す。耐疲労用の焼鈍域は硬さが最高値を示す点かやや下りかけた点である。
テンパーカラー	テンパーカラーは酸化膜であるから、温度や通気の分布によって変化する。均一色指定された場合は炉や装入法に注意する。又テンパーカラーを嫌う場合は発色しない低温で焼鈍する。
変 色	ばねに油や指紋が付着していると、その部分に変色したりテンパーカラーにむらが生ずる場合が多いので事前に洗滌するとよい。
低温焼鈍と後加工	ピアノ線や硬鋼線を200～250℃で低温焼鈍すると引張強度は最大となり、逆に伸びや絞りなどの靱性は最小となる。したがって低温焼鈍後、フックやアームの加工を行なう場合は折損するので、特に避けなければならない。
めっきの前処理	電気めっきを行なうものは少なくとも最低の温度で低温焼鈍をした方がよい。