

技 術 資 料

近年におけるばね鋼の発展について

内 山 道 良*

Development Trends of Spring Steels in Recent Years.

Michira UCHIYAMA

I. 緒 言

ばねが広汎な用途をもつ機械要素であることはいまさらいうまでもないが、このためわが国のばね生産は単独部品工業中1, 2を争う優位を示すにいたつた。しかしこのような発展は新たな理論分野の開発によつてもたらされたものではないばかりか、金属ばねの理論は今日一応尽されたといわれているのであつて、金属ばね発展の本質はむしろばね使用の条件と適切な材料との結びつきにあつたと思われる。そしてこの傾向は今後ますます強まつて行くであろう。

このためか、最近における金属ばね材料の研究はほとんど他の部門で開発された材料のばね面への応用となつているが、この間の様子は竹内²⁾・河田⁶⁾・筆者⁸⁾・¹⁰⁾らによつて取まとめられたことがある。しかしばね鋼にはその後の新たな考え方によつて利用面の拡大したものや、その後に取り上げられまたは取上げられつつある2, 3の問題もあるので、本稿ではこれらの点を中心に最近のばね鋼事情を概説することとした。

II. 最近の諸問題

ばね鋼に関する最近の問題も大小とり合せればいろいろであるが、ここでは一応解決または新発展の段階に達した次の数種類について述べる。

(1) 熱処理ばねの寸法

熱処理ばねは、直径 32mm または巾 100mm 厚さ 13mm を限度とした材料で設計されて来たが、最近は大規模機械が発達したため材料の寸法も直径 70mm または巾 190mm 厚さ 40mm と言うようになり、焼入性のよい合金鋼の必要が生じた。

(2) 負荷応力への対策

ばねに生ずる応力は、捩りと曲げとに関係なく表面が最大で中心が零であることはいまさらいうまでもないが、ばね鋼

の寸法が小さい間はこのような負荷応力の勾配を特に考える必要はなかつたにも拘わらず、ばねの寸法が大きくなつて、質量効果の点からばねの各部をばね硬度に保持することが困難になると、あらためてばねの表面から中心までの負荷応力の変化に応じて内部各部分の機械的性質も変化して差支えないのではないかという点が論じられるようになった。

(3) 不完全焼入の許容度

不完全焼入組織がばねとして好ましくないことは従来からの定説であつて今日もなお変つてはいないが、上記のように負荷応力の勾配を考慮に入れたくなるような実際の大形寸法ばねでは、負荷応力と不完全焼入とを結びつけて、ばねを有利に設計し製造し得るようなばね鋼の研究が行はれ出した。

(4) 疲労強度の研究

従来ばね強度の問題は耐荷重性の点だけで論ぜられていた。それがここ数年ばねに対する疲労強度の研究が活発になり、特にこれまで不足していた黒皮ばね鋼の疲労性が明らかになると、この方面からのばね鋼の優劣が論議の対象となるようになった。

(5) 表面硬化ばね

近年になつて高周波焼入による表面硬化は耐疲労性を増すことが明らかになると、これを早速ばねの寿命延長に応用することが考えられ、さらに進んで、浸炭窒化などによる表面硬化法のばねへの利用も試みられるようになった。

(6) ショットピーニング

ばねの製造において、ショットピーニングほど大きな変革を与えた作業は近年まれである。今日ピーニングを行はなばねはほとんど無いばかりか、ある意味ではピーニングといえばばね加工方法の一部であるとまでいい

* 三菱鋼材株式会社, 工博

うるほどになったが、この方法はただいまでも広い応用面が開拓されつつある。

(7) オイルテンパー線

最近における熱処理技術の発達には、わが国ばね用鋼線のうちにオイルテンパー線を送り込んだ。そして従来のピアノ線とは異なつたこの線の特徴はばねそのものの特性値にも変化を与えたが、今日では炭素鋼によるオイルテンパー線からさらに発達して、合金鋼によるこの種の線の開発がすすんでいる。

(8) ステンレス鋼の利用

耐食性が必要な化学工業用などのばねとしてステンレス鋼が使われるのはこれまでと変りがないが、最近新しい傾向としては、従来特に耐食性が重要だとは考えられていなかった部分、例えば高速小形機械などの分野でのステンレス鋼線・鋼帯などの利用が目立つて来た。いうまでもなく、素材加工技術の発達がその根源である。

(9) 高温ばね鋼

高効率で運転される蒸気タービン・ガスタービン・ロケットエンジンなどの研究発達はばねの上にも大きく影響し、実用温度 300~400°C では主として耐熱・ステンレス系鋼が、また 500~600°C を要求されるものでは耐熱合金がばねとして使われるようになってきたが、この分野における研究は急速な進歩をしつつある。

III. 最近の諸発展

本項では前述の各問題を順次説明して行くが、1つの結果が2つ以上の解決となつている場合もあれば、これと逆の結果となる場合もあるので、IおよびIIの中の個々の項目は必ずしも対応してはいない。

(1) SUP 9 および SUP 11 について

両者はともに最近 JIS¹¹⁾ に定められた Mn-Cr 系の熱処理ばね鋼であつて、前者は C 0.50~0.60%, Mn 0.65~0.95%, Cr 0.65~0.95% を主成分とし、後者はこれに B>0.0005% を含ませたものであるが、それぞれの原形は SAE 5150~5160 および 50B60~51B60 であり、SAE 9260 を原形とした従来の Si-Mn 系の熱処理ばね鋼 SUP 6 に比べて多くの利点を有している。

1. 焼入性

熱処理ばね鋼で焼入性が勝れていることは、大型ばねの製造が可能となり耐荷重性を増すこととなるためきわめて大事なわけであるが、次の図1は各鋼の H-band によりその程度を比較したものである。いま、熱処理ばねは各部分とも完全焼入の状態から均一に焼戻すべきである¹³⁾¹⁴⁾という本来の考え方¹⁵⁾に従つて、各鋼のばねと

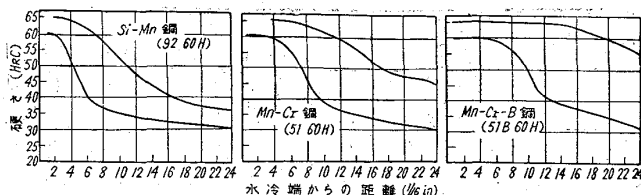


図 1. 合金ばね鋼の焼入性¹²⁾

しての使用寸法限界を調べて見ると、これは H-band の下限から求めた臨界直径になるため、丸鋼の場合 9260 で 18mm・5160 で 31mm・51B60 で 42mm という値が得られて、Mn-Cr 鋼殊に Mn-Cr-B で著しい好結果をうることを知りうる。

2. 疲労性

ばね鋼の疲労性はそのまばねの寿命に通じるので、応力振巾または繰返数の高い種類のばねにとり疲労強度は大切な問題であるが、疲労限度が引張強さしたがつて硬さと一定の関係を有するのは¹⁶⁾熱処理ばね鋼に共通した事柄であるので、“ばね硬度”¹⁷⁾¹⁸⁾での拘束をうけている熱処理ばねでは疲労限度も自らその範囲に限られ、このため研磨状態にある熱処理ばね鋼に対しては格別の期待をもつことが出来ない¹⁹⁾。ところが熱処理ばねの大部分は一次または二次的黑皮の状態で使用されるから、黒皮肌²⁰⁾の状況次第では疲労強度が大巾に変化するものであつて、結局鋼種による影響が大きいことになる²⁰⁾。ここに図2は同一の研磨試験片に 850°C × 2h の空气中加熱を行なつて黒皮を生じさせた Si-Mn および Mn-Cr ばね鋼のばね硬度下での S-N 曲線であるが、両鋼の間に生ずるこのような著しい疲労限度の違いは、表面粗れおよび脱炭深さの違いに起因するものと考えられている²¹⁾²²⁾。ちなみに図2の場合は、粗さでは Si-Mn 鋼 15μ に対し Mn-Cr 鋼 6μ であり、脱炭では Si-Mn 鋼 0.18mm に対し Mn-Cr 鋼 0mm である。

3. ばね寿命

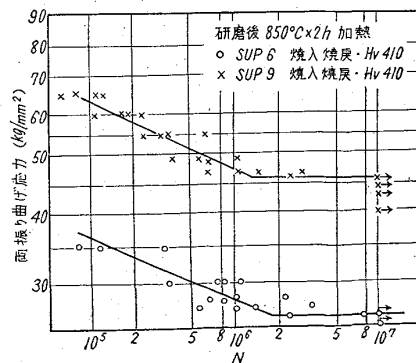


図 2. Si-Mn および Mn-Cr 黒皮ばね鋼の疲労強度の比較²⁰⁾

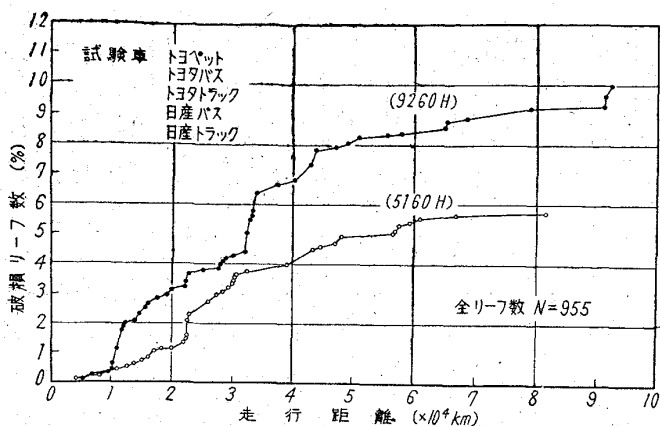


図 3. 実車による Si-Mn および Mn-Cr 鋼ばね性能比較²³⁾

さて、このような黒皮材での疲労強度の違いが、実車の走行成績にどのように影響するかを、過般各方面の人々によって行なわれた共同研究²³⁾の結果から引用すると図3の通りとなり、Si-Mn 鋼に比べ Mn-Cr 鋼の寿命は 50% も上廻ることがわかるのである。なお本項で取上げた SUP 9 および SUP 11 と同時に新たに JIS 化されたばね鋼に Cr-V 鋼 SUP 10 があるが、この鋼種はわが国でも従来特殊な高級ばね用として使われていた²⁴⁾ものであるため、ここでは対象から除外した。

(2) 強度の不均一性について

すでに (1) で述べたごとく Mn-Cr 鋼、ことに Mn-Cr-B 鋼の登場についての考え方は勝れた焼入性のばね鋼を使用することによる大型ばね製造への期待が大きかつたし、これらの鋼の開発によつて確かにその一部は達成された。

しかし一方ではばねに生ずる振りまたは曲げの負荷応力が表面の最大値から中心の零にわたる直線的な変化であることも良く知られている。そこでこのような負荷応力のものに対し外側から中心までの強度を等しくして置かねばならないかという点に対する疑問が生ずるのは当然であるし、事実このような考えは存在した。²⁵⁾そして今日まで実質的な動きがなかつたのはむしろ意外である。

また、これまでの考え方ではばねのスラック焼入は回避した方がよいとされて来た¹⁵⁾。しかし中には不完全な焼入がばねに対し真に劣性能であるかどうかという点に疑問をもつ向もあつた²⁶⁾わけで、結局この問題は最近まであまりはつきりしてはなかつたのである。

1. A.S.M. の見解

ところが最近 American Society for Metals は上記の点についてはつきりした態度を示し²⁷⁾、焼入時における熱処理ばねの内外部分の硬さの違いを認めるとともに、焼入硬さ HRC 35~45 というスラック焼入を許容してその見解を明らかにした。図4はこの図示であるが

このような A.S.M. の態度は少なくともわが国の熱処理ばねに対する大きな刺激である。

2. 焼入焼戻ばねの硬さ勾配

上述のような A.S.M. の考え方の中、表面と中心との間に硬さの違いを認めることは、結果として硬さ勾配、したがつてばね内部の強度勾配を認

める²⁸⁾ことであるが、これは表面が十分に硬化された場合次式によつて導かれる²⁹⁾。

$$\tau_{max} = \tau_p \cdot d / (d - 2t)$$

ただし d = 棒鋼の直径 (mm)

t = 強度勾配曲線と負荷応力直線との交点の表面からの深さ (mm)

$$\tau_{max} = \text{表面最大応力 (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\tau_p = t \text{ の位置の振り比例限度 (kg/mm}^2\text{)}$$

図5はこの式を図示したものであるが、表面に生ずる最大応力はばねの直径とその中心部の硬さをパラメータとする上向きの曲線で示されている。すなわち図において X-Y はばねが均一に Hv 400 のばね硬度に熱処理されている場合の最大振り応力の限界であり O はばねが Hv 250, 350, 400 および 450 の硬さにそれぞれ均一に熱処理された場合の表面最大振り応力であつて、各曲線は表面が X-Y よりも高い表面応力に耐えうるよう

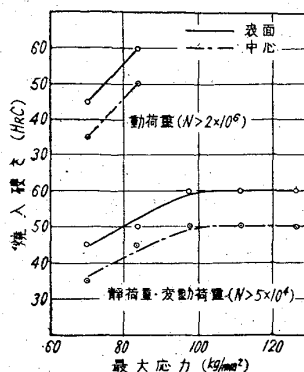


図 4. 巻ばねの最大応力と所要焼入硬さとの関係²⁷⁾

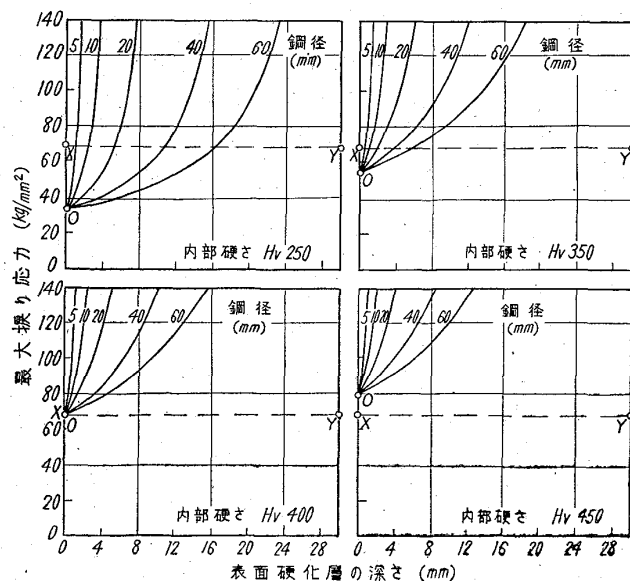


図 5. 表面硬化層の深さと内部各位置の最大振り応力との関係²⁹⁾

に硬化された場合の表面硬化部の深さとOとX-Yとの関連を最大振り応力について示しているのである。

このようにばねの硬化部分は深さが深いほど応力的に好ましいのであつて、この点は F. B. STULEN ら³⁰⁾が構造物を対象として述べていることと一致するし、またこの図は同時に中心部の硬さがばね硬度までの間、硬ければ硬いほど応力的に有利であることを意味しているが、これは結局、ばね鋼は表面から中心まで均一なばね硬度であるのがよいという考え方に連なるのであつて、古くからの経験的事実と一致する。これを要するに本項で述べたことは、焼入焼戻ばねにおける硬さ勾配の理屈はなんらの矛盾なく従来の熱処理方式を裏付けるばかりでなく、この考え方に基ついてばねは寸法に応じ、有効なばね鋼ならびに熱処理の方法を定めるべきであるということにほかならない。

3. 表面硬化ばねの性質

ばねの表面に作られた硬化層は、その厚さが薄いにも拘わらず、ばねの疲労特性をいちじるしく上昇させることが明らかになつたのは比較的最近のことであり、高周波焼入その他の表面硬化法が取上げられるにいたつた。

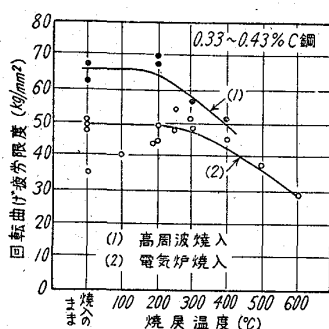


図 6. 高周波焼入および電気炉焼入鋼の疲労限度の比較³¹⁾

ばねの高周波焼入については中村による多くの研究が取まとめられているが、いまこれに基づけば図6を画くことが出来³¹⁾、これまでの諸焼入方法によるものに比べて、高周波焼入を施したものの疲労限度が焼入のままおよび低温焼戻の分野で高いことを示しているし、実物ばねについても国鉄使用のノーズばねについて平均応力を40 kg/mm²とした場合の結果が図7のように示されていて³²⁾、高周波焼入の効果が強調されている。そしてこの原因は高周波焼入の際に表面に生ずる圧

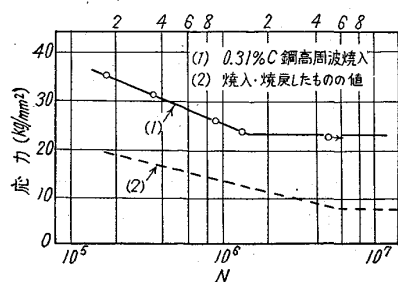


図 7. 国鉄ノーズばねを高周波焼入した時の S-N 曲線³²⁾

縮残留応力であると考えられている³¹⁾。

次に浸炭窒化によつて生ずる表面硬化層もばね上に取上られつつある疲労性上昇法の一つであり、吉川らの研究がある³³⁾。そしてその値は焼入焼戻を行なつたものよりかなり大きく、素材のC量や硬化層の厚さおよび生成組織などで効果に変化があるというが、本法への期待はむしろ今後にあるといえよう。なお浸炭窒化による疲労限度の上昇に対しても G. W. POWELL ら³⁴⁾は、その硬化層は負荷応力との関連において十分の深さをもつていなければならないと述べ、焼入焼戻ばねについて行なつた既述の硬さ勾配への考察と良く似た考え方の説明を行なつている。

ショットピーニングもまた高周波焼入や浸炭窒化と同様、表面に生ずる圧縮残留応力によつて疲労性の上昇を計る1種の加工法であるが、その方法は鋼の小粒を被加工物の表面に打ちつけ

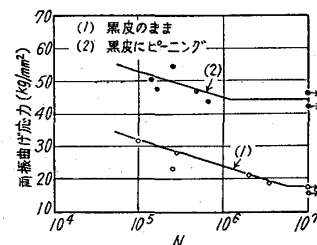


図 8. ショットピーニングによる疲労強度の上昇³⁵⁾

るという全く機械的なものである。ばねの疲労限度を上昇させる上でのショットピーニングの効果はまことにいちじるしくて図8のようであり³⁵⁾、この場合表面から内部におよぶ残留応力分布は図9のごとく測定されている³⁶⁾他、残留応力と疲労限度との関係は図10のように求められている³⁷⁾。

(3) スラック焼入について

先きに述べた ASM の考え方の中には、従来のようなスラック焼入回避の思想¹⁵⁾をはなれ、熱処理ばねの焼入時における表面硬さを HRC 35~45 の範囲まで、最大振り応力 70 kg/mm² という高い状態のまま認めることであつて、この焼入に対する新しい処置といえるが、わが国でも良

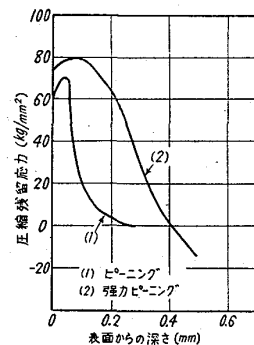


図 9. ショットピーニングによる圧縮残留応力の分布³⁶⁾

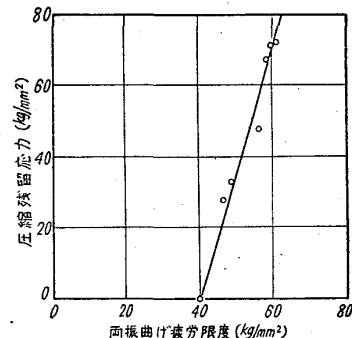


図 10. ショットピーニングによる圧縮残留応力と疲労限度との関係³⁷⁾

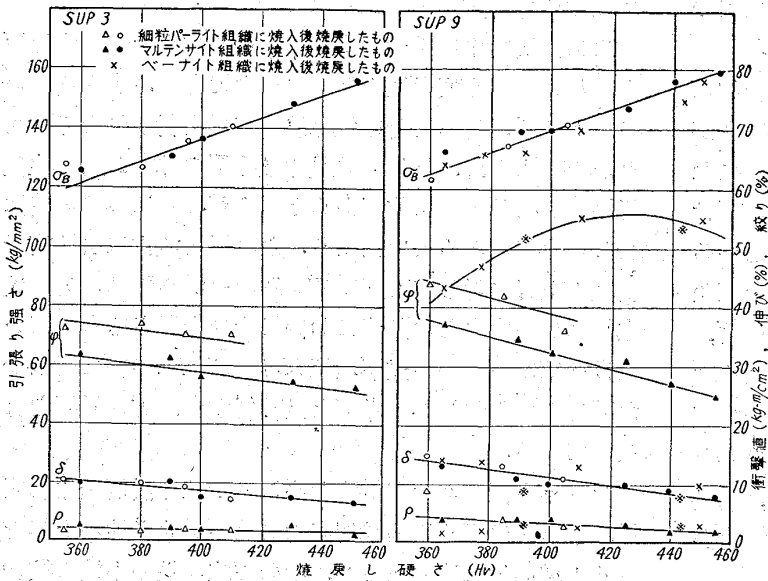


図11. ばね鋼の均一なスラック焼入組織と機械的性質との関係

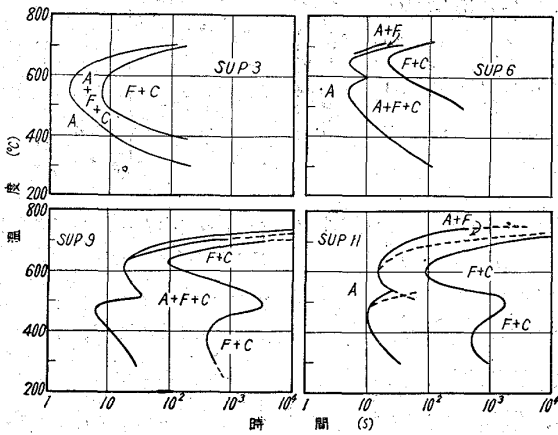


図12. 各種ばね鋼のS曲線^{38)~40)}

く似た結果が得られている。

1. 引張特性

いま、Cばね鋼 SUP 3 と Mn-Cr ばね鋼 SUP 9 とに対し、硬さが Hv 385~449 であるような細粒パーライトまたはベイナイト組織のスラック焼入を行なったものと、硬さが Hv 695 以上であるようなマルテンサイト組織の完全焼入を行なったものについて、各種のばね硬度に焼戻した後の引張強さを調べれば図 11 の結果が得られるが、これは同一焼戻硬さで比較した場合、ばね鋼は焼入組織に関係なく引張強さ・伸び・衝撃値に変わりがなくて絞りはパーライト殊にベイナイトに焼入られた SUP 9 の値が勝れていることを示している。このような SUP 9 のベイナイト組織の機械的性質に対しては上野³⁸⁾らも同様の結果を得ており、SUP 9 が他のばね鋼に比べてベイナイト組織を生じやすいものであるという点に対しては図 12 に示した各S曲線の比較においてこの鋼のベイナイト・ノーズが特に発達していることが

その答であるといえる。

2. 振りおよび曲げ特性

図13は上と同じ熱処理条件の試料について得られた曲げ比例限度の値であるが、これによれば硬さと比例限度とは直線的な関係を有するほか、Cばね鋼を不完全焼入した場合以外は鋼種と焼入組織とに関係なく、同一硬さの下では同一の値を得ることがわかる。そしてこのことは振り比例限度についても全く同じことが言えた⁴¹⁾。なおこの場合C鋼を不完全焼入したものの値が低いのは W. CRAFTS ら⁴²⁾、または SAE⁴³⁾などが示している降伏比の問題であつて鋼種的な影響がある⁴⁴⁾と考えられる。

3. 疲労特性

上記と同様の熱処理を行なった試料から求めた疲労強度は図 14 のごとくであるが、これから見るとばね鋼の疲労限度は硬さがひとしければ同じであると見做すことが出来、図 11 における引張強さと同様の関係を示して

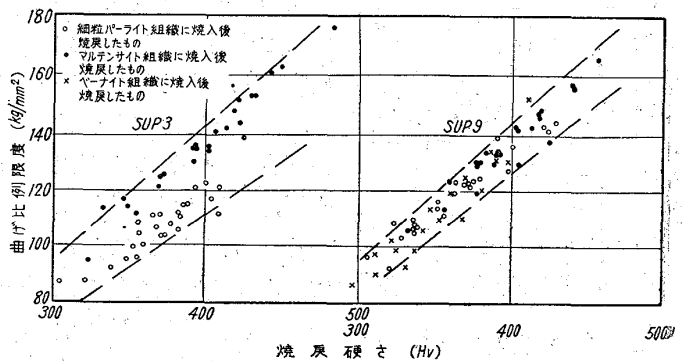


図13. ばね鋼の硬さと曲げ比例限度との関係

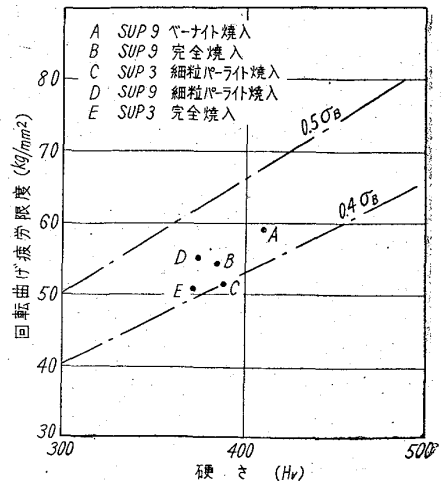


図14. ばね鋼の焼入組織と焼入後の疲労限度との関係

表 1 わが国オイルテンパー線の成分

| | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | |
|--------|-------------|-----------|-----------|--------|--------|---------|-----------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | V | Cu |
| SWOC A | 0.55~0.75 | 0.15~0.35 | 0.60~1.20 | <0.030 | <0.030 | — | — | — |
| SWOC B | 0.75~0.85 | 0.15~0.35 | 0.30~0.90 | <0.030 | <0.030 | — | — | — |
| SWOC V | 0.60~0.70 | 0.12~0.32 | 0.50~0.80 | <0.030 | <0.030 | — | — | <0.20 |
| SWOCVV | 0.45~0.55 | 0.15~0.35 | 0.65~0.95 | <0.030 | <0.030 | 0.8~1.1 | 0.15~0.25 | <0.20 |

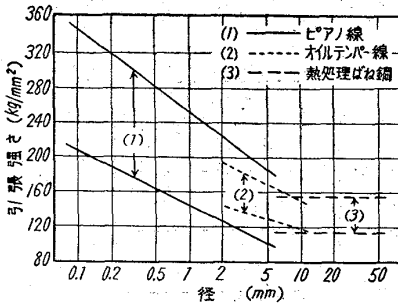


図15. オイルテンパー線の寸法と強度

HOLLOMON, 他⁴⁶⁾らが種々の条件の下で焼入れた鋼について得た数値よりも幾分低目である。

(4) オイルテンパー線について

オイルテンパー線がばねに使われたのはかなり以前のことであるが、この線の製造がわが国で行われるようになったのはここ数年来のことである。そのためか、この線にはまだ JIS の規定もなく、JSMA⁴⁷⁾の規定だけが使用の必要上出来ているに過ぎない。この線はばね用鋼線の新しい代表の1つといえるが、表1はわが国オイルテンパー線の化学成分を示している。

1. 寸法と強度

オイルテンパー線が、寸法範囲の上からもまた強度の点からも、ピアノ線と熱処理ばね鋼の中間に位するものであることは、わが国におけるこれらの諸規格^{11)47)~49)}を比較した図15によつて明らかであるが、この理由はオイルテンパー線の製法を見てもうなずかれる。

オイルテンパー線は、ピアノ線と同じC鋼線材から伸線して作った鋼線に焼入を施した後 400~500°Cでの焼戻を行なった熱処理線であるため、その機械的性質は、前述の熱処理ばね鋼と同様主として熱処理によつてきまり、線径には直接関係のないはずのものである。しかし熱処理操作の上からは径2mm以下のものの取扱いが困難であつて品位も低下しがちであるし、C鋼素材に対する焼入性を考慮すると径12mm以上は好ましくないの、寸法は自らこの中間ということになる。ただしばねの製造の立場からはオイルテンパー線の寸法が大きくなればなるほど好都合な技術ならびに経済上の要素がある

いる。なお図14の疲労限度が引張強さに対する50%の線よりも40%の線に近くなっているのは試験片の仕上の影響と思われるこの値は F. BORIK, 他⁴⁵⁾, あるいは J. H.

ので、最近ではばね用冷間成形機の発達と相まつて、この線の最大寸法も径14~16mmとなり、このため母材をC鋼から合金鋼に切替えて焼入性を上昇させることが目論まわれている。なおこれとは別に高級弁ばね用としてCr-V鋼が使用されるが、この意味はピアノ線にCr-V鋼を使うのと同じであつて、勝れた特性の利用である。

また、ピアノ線のような冷間加工効果に頼っている鋼線では、その機械的性質が加工度したがつて多くの場合線径に直接関係するわけであるが、オイルテンパー線のような熱処理鋼線の場合にも加工度は鋼線の靱性を始めとする諸性質に影響する⁵⁰⁾上に、実際には仕上り寸法に応じた径の線材からの製造が行なわれるので、線材の性質の良否と相まち、ピアノ線の場合と同様線径の小さいものほど一般に強度は大きくなつて

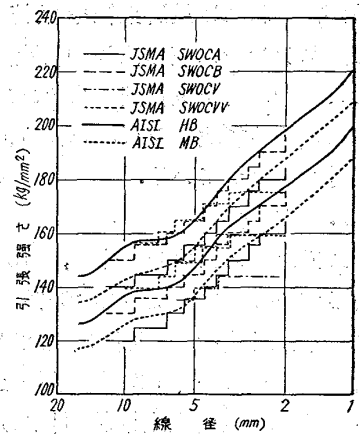


図16. オイルテンパー線の線径と引張強さとの関係

線材からの製造が行なわれるので、線材の性質の良否と相まち、ピアノ線の場合と同様線径の小さいものほど一般に強度は大きくなつて

2. 従来の鋼線との相違点

これまでのばね用鋼線であるピアノ線とオイルテンパー線との本質的な違いがその製法によることは先に述べたが、外観的にはピアノ線が光輝表面であるのに対してオイルテンパー線は加熱表面であり、それだけにまた発錆に対する抵抗も大きい、使用上から見ればピアノ線より線癖が少なく、その反面ばね成形の折の巻込みが大きいという欠点がある。そして性質的にはピアノ線の比例限度に比べてオイルテンパー線のそれはいちじるしく高い代りに、これにブルーイング¹⁴⁾⁵¹⁾を施してもピアノ線に見られるような比例限度の上昇は起らない。次の図17はこの関係を示している。ただし必要によつては加工歪を除去する目的でばね成形の後においてブルーイング

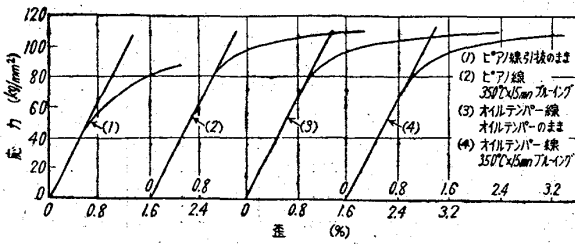


図17. 径 5mm のばね用鋼線の振り性能

と同じ作業を行なうことはある。

(5) ステンレス鋼について

最近、計算機・時計・通信機などに使われるぜんまいや線細工ばねの破損が、ばねの表面に生ずる微細な錆からの疲労によるものであることが知られて以来、これらの分野のばねに対するステンレス鋼の利用が増加しているが、これには最近鋼線や鋼帯の冷間加工技術が進んで、ステンレス鋼のばね的な性質がいちじるしく向上したことや、析出硬化型のステンレス鋼が生まれて、熱処理による性能改善が行なわれるようになったことがその裏付けとなっている。

1. 鋼線

ステンレス鋼線の主体は、18-8系のオーステナイト鋼 JIS SUS 27 と C<0.09%, Ni 7%, Cr 17%, Al 1.2% を基準とした析出硬化鋼 17-7 PH とであるが、図 18~19 は SUS 27 の線径と引張強さとの関係および SUS 27 冷間引抜線に対するブルーイングの効果を示したものである。そして

17-7 PH 鋼線では適切な溶体化ないし析出硬化処理を行なうことによつて、線径に関係なく各線に所要のばね的な性質を与え得るのはいうまでもない。ここに表 2 はばね用としての 17-7 PH 鋼線の代表的な熱処理とそれによつてえられた機械的性質とを示したものであり⁵²⁾、ほとんどピアノ線・オイルテンパー線などに匹敵しているのがわかる。

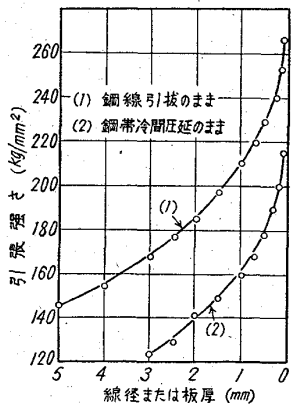


図18. SUS 27 ばね用硬質鋼線および鋼帯の引張強さ

表 2 17-7 PH ばね用鋼線の処理と性質⁵²⁾

| | 熱 処 理 (°C × mn · 冷却) | 降 伏 点 (kg/mm ²) | 引 張 強 さ (kg/mm ²) | 硬 さ (HRC) |
|---------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------|
| TH 1050 | 1065×1→760×90・空→565×90 | 129.5 | 140.0 | 43 |
| RH 950 | 1065×1→955×10・空→-75°C × 480→510×60 | 154.0 | 164.5 | 48 |

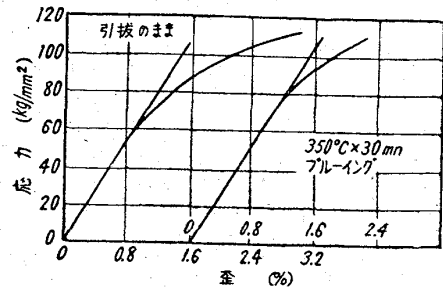


図19. 径 4×5mm の SUS 27 ばね用鋼線の振り性能

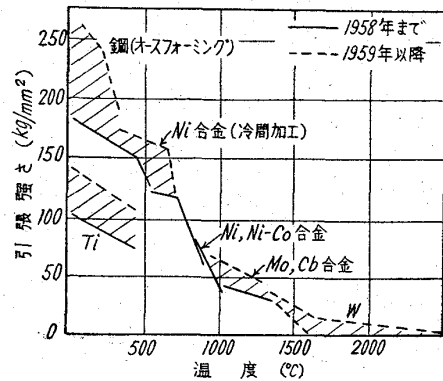


図20. 最近に於ける耐熱鋼の発達⁵³⁾

2. 鋼帯

ステンレス鋼帯の中心も鋼線の場合と同様に SUS 27 と 17-7 PH の両鋼であるが、前者の引張強さは図 18 の中に併記した通りであり、当然ブルーイングの影響も受けるわけである。しかし図 18 から知りうるように線径と板厚との数値のひとしい鋼線と鋼帯の比較では、鋼帯の引張強さは鋼線より低目となるもので、この点から見ると析出硬化型の鋼である後者は線径や板厚に関係なく目的の強さを与ええる利益がある。

(6) 高温ばね材料について

最近における高温ばね材料の種々の温度での引張強さを E. S. JONES ら⁵³⁾ は図 20 のごとく示しているが、この図でもわかるように、引張強さが十分に高い 170 kg/mm² 以上のところはオーステンitic鋼の分野で、温度は 250°C 位までであり、耐熱性の十分高い 1600°C 以上のところは金属 W にしめられていて、引張強さは 20 kg/mm² 以下になってしまうが、これら両極端の間には Ni 合金・Ni-Co 合金・Mo 合金・Cb 合金などがほぼ

直線状に連なっているので、高温ばね材料も必要な強さと温度との関連によつてこれらの中から選ばねばならないものと見られる。

元来高温ばねは冷間加工の状態では線ばねあるいは薄板ばねとして使われる小形のものも多く、熱間加工による中形以上のものは少ないが、使用温度の上から見ると、300~400°C程度の温度を目標にすればよいものと、500~600°Cまたはそれ以上の高温でもばね性能の低下が起らないものが望まれるものとの両者がある。そして今日では高温ばね鋼と呼ばれる熱間工具鋼系およびステンレス鋼系の鋼が前者のために、またNi・CoおよびNi-Co系の合金が後者のために使用され出した。ここに図21~22はこれらの中のおもなもの的高温強度を降伏点について比したものであるが、最近目立つのは高温ばね鋼・ばね用耐熱合金ともに析出硬化型のものが進出して来たことである。

1. 高温ばね鋼

この分野のばね鋼には工具鋼系、ステンレス鋼系、耐

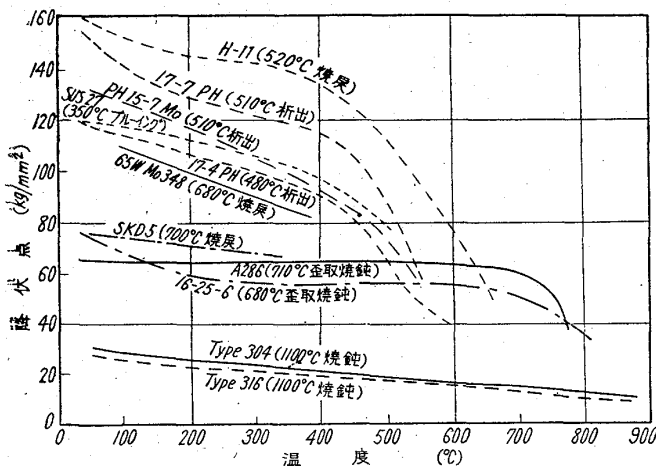


図21. 高温ばね鋼の高温強度^{54)~60)}

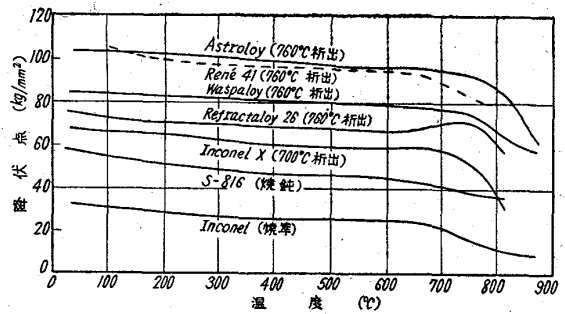


図22. ばね用耐熱合金の高温強度^{61)~63)}

熱鋼系の3種類があり、それぞれ特徴を有するが、次に表3としてそのおもなもの化学成分を示す。

熱間工具鋼は高温で強度が低下しにくい鋼であるという意味から、18-4-1型の高速度鋼 JIS SKH2 や AISI T1 が高温ばね用として使用されるのは従来と変りがないが⁶⁴⁾⁶⁵⁾、これより安価でもあり加工性もよいという点で今日では9% W が広く使われるようになって来た。AISI H20⁶⁵⁾ JIS SKD5^{66)~70)} DIN 65W Mo 348⁶⁸⁾などはその代表的存在であり、このほか Cr-Mo-V系の熱間工具鋼 AISI H11⁵⁴⁾などもばね用に供せられている。

オーステナイト系のステンレス鋼も鋼線あるいは鋼帯として冷間加工状態のまま高温ばね用に供することが多くその性能も熱間工具鋼に近接しているが⁶⁶⁾⁷¹⁾、この場合は使用温度による冷間加工効果の消失に伴つて比例限度が低下するので高い温度下での使用には無理がある。AISI 304⁶⁰⁾⁷²⁾、316⁶⁰⁾⁷²⁾はオーステナイト系ステンレス高温ばね鋼の代表であるが、これらの鋼の冷間加工状態での使用が好ましくないということは、オーステナイト系のステンレス鋼が低応力のばねにしか使えないことになり、17-4 PH⁵⁷⁾、PH 15-7 Mo⁵⁷⁾、17-7 PH⁵⁵⁾ら

表3 最近の高温ばね鋼の成分

| | 化学成分 (%) | | | | | | | | | | | | | 備考 |
|------------|----------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| | C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | W | V | Cu | Cb+Ta | Al | Ti | Fe | |
| H20(SKD5) | 0.3 | — | — | — | 2.5 | — | 9.0 | 0.4 | — | — | — | — | bal | (1) |
| 65W Mo 348 | 0.65 | — | — | — | 4.0 | 0.85 | 9.0 | 0.7 | — | — | — | — | 〃 | |
| H11 | 0.4 | — | — | — | 5.0 | 1.3 | — | 0.5 | — | — | — | — | 〃 | |
| 17-4 PH | <0.07 | <1.0 | <1.0 | 4.0 | 17.0 | — | — | — | 4.0 | 0.3 | — | — | bal | (2) |
| PH 15-7 Mo | <0.09 | — | — | 7.0 | 15.0 | 2.3 | — | — | — | — | 1.2 | — | 〃 | |
| 17-7 PH | <0.09 | — | — | 7.0 | 17.0 | — | — | — | — | — | 1.2 | — | 〃 | |
| Type 316 | <0.08 | — | — | 12.0 | 17.0 | 2.5 | — | — | — | — | — | — | 〃 | |
| Type 304 | <0.08 | — | — | 10.0 | 19.0 | — | — | — | — | — | — | — | 〃 | |
| 16-25-6 | 0.06 | 0.7 | 1.4 | 25.0 | 16.0 | 6.0 | — | — | — | — | — | — | bal | (3) |
| A 286 | 0.08 | 0.5 | 1.4 | 26.0 | 15.0 | 1.3 | — | 0.3 | — | — | 0.3 | 2.0 | 〃 | |

(1) 工具鋼系, (2) ステンレス鋼系, (3) 耐熱鋼系

表 4 最近の高温ばね鋼の熱処理

| | 熱 処 理 | | | | | | 性 質 | |
|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------|
| | 焼 鈍 (°C・冷却) | 焼 入 (°C・冷却) | 焼 戻 (°C・冷却) | オーステナイト化 (°C × mn) | 溶体化 (°C × mn) | 析出硬化 (°C × mn) | 引張強さ (kg/mm ²) | 硬 さ (HrC) |
| H20 | 820~840・予 | 1150~1180・空 | 510~620・空 | — | — | — | — | 47~50 |
| SKD 5 | 800~850・徐 | 1050~1100・空 | 500~600・空 | — | — | — | — | 46~50 |
| 65WMo348 | — | 1150~1200・油 | 650~700・空 | — | — | — | 140~170 | 46~50 |
| H11 | 790~820・予 | 1000~1020・空 | 540~600・空 | — | — | — | — | 43~51 |
| 17-4PH | — | — | — | — | 1065×1 | 550×60 | — | 約38 |
| PH15-7Mo | — | — | — | — | 1065×1 | 565×90 | — | 約44 |
| 17-7PH | — | — | — | — | 1065×1 | 565×90 | — | 約43 |
| Type316 | — | — | — | 980~1150・水 | — | — | 約 60 | — |
| Type304 | — | — | — | 980~1150・水 | — | — | 約 60 | — |
| 16-25-6 | — | — | — | — | 1180×10 | 680×240 | 約 95 | — |
| A 286 | — | — | — | — | 980×60 | 720×960 | 約105 | — |

表 5 最近のばね用耐熱合金の成分

| | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | | | | 備 考 |
|----------------|-------------|----|----|---|----|-----|-----|----|------|----|-----|
| | Ni | Cr | Mo | W | Cb | Al | Ti | Co | B | Fe | |
| Inconel | 78 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | 7 | (1) |
| Inconel X | 73 | 15 | — | — | 1 | 0.9 | 2.5 | — | — | 7 | |
| Astroloy | 60 | 15 | 5 | — | — | 4.5 | 3.5 | 15 | 0.03 | — | (2) |
| Refractaloy 26 | 37 | 18 | 3 | — | — | — | 2.8 | 20 | — | — | |
| Waspaloy | 56 | 19 | 4 | — | — | 1.3 | 3 | 14 | — | 1 | |
| René 41 | 54 | 19 | 10 | — | — | 1.5 | 3 | 11 | — | — | |
| S 816 | 20 | 20 | 4 | 4 | 4 | — | — | 42 | — | 4 | (3) |

(1) Ni 合金系 (2) Ni-Co 合金系 (3) Co 合金系

表 6 最近のばね用耐熱合金の熱処理

| | 熱 処 理 | | | 性 質 |
|----------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----|
| | 焼 鈍 (°C × h・冷却) | 溶 体 化 (°C × h) | 析 出 硬 化 (°C × h) | |
| Inconel | 9002×2・徐 | — | — | 71 |
| Inconel X | — | 1180×4 | 850×24 | 116 |
| Astroloy | — | 1150×0.5 | 900×4 | 134 |
| Refractaloy 26 | — | 1100×1 | 820×24 | 105 |
| Waspaloy | — | 1080×4 | 870×4 | 135 |
| René 41 | — | 1180×0.5 | 900×4 | 101 |
| S 816 | — | 1180×1 | 760×12 | 105 |

の析出硬化型のステンレス鋼を登場させた。なお析出硬化型のばね鋼にはばね成形後の熱処理による変形が少ないため、精密さや複雑さを必要とする小型ばねに適するという利点がある。

耐熱鋼系のばね鋼も最近のものは析出硬化型のものが多く 16-25-6⁽⁶⁰⁾⁷³⁾, A-286⁽⁶⁰⁾⁷³⁾ などはその代表といえる。そしてこれらは析出硬化型ステンレス鋼の Ni 含有量を 14~15% も増して耐熱性の向上を計つたと見做することができる。次の表 4 および図 23 は上記の各高温ば

ね鋼についての熱処理と高温時における弾性係数とを示したものである。

2. ばね用耐熱合金

前項で明らかのように、比較的低い温度で使用する高温ばね鋼の最大応力は常温で用いるばねとあまり変わらないが、同じ応力の下で 500~600°C の温度に耐えるばね鋼は見当らない。そこでこのような高い温度下で使用するばねに対しては、Ni-Co-Ni-Coなどを基とした耐熱合金が使用されるが、これらはばね鋼とはいえないため

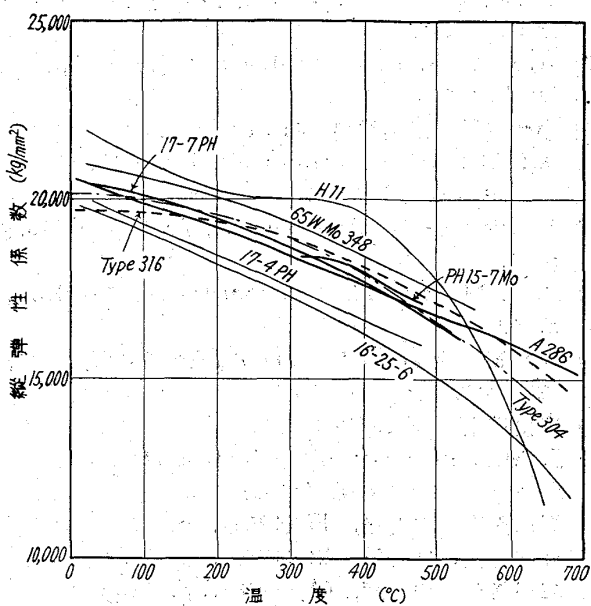


図23. 高温ばね鋼の高温に於ける縦弾性係数^{55), 57), 58), 72)~75)}

ばね用耐熱合金として区別されている。次の表5~6および図24は、この種の合金の化学成分・熱処理方法・ならびに高温時における縦弾性係数の値であるが、Ni・Cr・Co・Moなど耐熱性合金元素の含有量が多いことと、析出硬化温度の高いことが特徴である。わが国で最も広く使われるのは Refractaloy 26^{63), 73)}, Inconel X^{63), 72)}の両者であるがこのほかにも Waspaloy⁶³⁾, Inconel^{63), 72)} René 41^{62), 63)}, Astroloy⁶¹⁾, S816⁶³⁾などに関する研究が進められている。

IV. 結 言

本稿は最初に述べた主旨のもとに近年わが国におけるばね材料殊にばね鋼を中心とした鉄系材料について概説したのであるが、意余つて筆足らずの感も深く、最新の有意義な研究であつても工業上での発展の域に達していないものは割愛せざるをえなかつたらみもある。拙文がばねに関心をもたれる方々にとつてなんらかの御参考になれば筆者望外の幸せである。(昭和37年4月寄稿)

文 献

- 1) 亙理 厚: 日本機械学会誌, 56 (1953), p. 207
- 2) 竹内 栄, 他: 日本金属学会誌A, 14 No.8 (1950), p. 20
- 3) 竹内 栄, 他: 日本金属学会誌A, 14 No.9 (1950), p. 16
- 4) 竹内 栄, 他: 日本金属学会誌A, 14 No.10 (1950), p. 19
- 5) 竹内 栄, 他: 日本金属学会誌A, 14 No.11 (1950), p. 17
- 6) 竹内 栄, 他: 日本金属学会誌A, 14 No.12

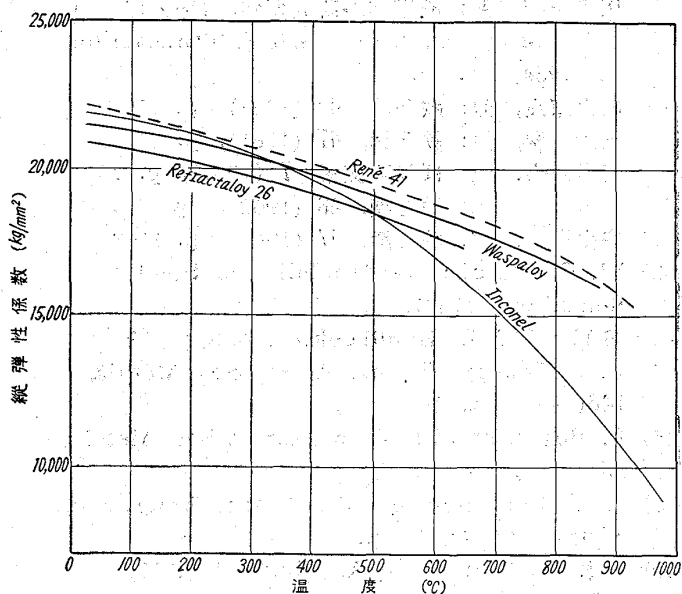


図24. ばね用耐熱合金の高温に於ける縦弾性係数^{62), 73)} (1950), p. 26

- 7) 河田和美: 日本機械学会誌, 61 (1958), p. 478
- 8) 内山道良: 鉄と鋼, 37 (1951), p. 45
- 9) 内山道良: ばね (昭34), p. 9
- 10) 内山道良: 応用金属学大系, 5 (近刊)
- 11) JIS: G 4801 (1959)
- 12) SAE: SAE Handbook (1960) 83, 77, 78
- 13) JIS: B 2701 (1958)
- 14) JIS: B 2702~2703 (1956)
- 15) D. K. BULLEN: Steel & Its Heat Treatment 3 (1949), p. 297
- 16) USS: The Making, Shaping & Treating of Steel, (1951), p. 1407
- 17) 内山道良: ばね, (昭34), p. 41, 309
- 18) 富田勝信: 熱処理技術便覧, (昭36), p. 569
- 19) 内山道良: 鋼の熱処理, (昭36), p. 416
- 20) 内山道良, 他: ばね論文集, 7 (1961), p. 88
- 21) 川田雄一: 日本機械学会誌, 62 (1959), p. 19
- 22) 樋田 章: ばね論文集, 1 (1952), p. 26
- 23) パネ技術研究会: ばね論文集, 4 (1957), p. 110
- 24) 技術院: 日本航空機規格, 6403, 6404 (昭16)
- 25) 内山道良: ばね, (昭36), p. 12
- 26) Chilton Co.: Iron Age, 181 No.4 (1958), p. 80
- 27) ASM: Metals Handbook, 1 (1961), p. 170
- 28) 内山道良, 他: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 1163
- 29) 内山道良, 他: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 864
- 30) F. B. STULEN, et ali.: Machine Design, May (1961), p. 146
- 31) 中村 宏: 鉄道技術研究報告, No.82 (1959), p. 115
- 32) 中村 宏: 鉄道技術研究報告, No.82 (1959), p. 145
- 33) 吉川文岳, 他: ばね論文集, 7(1961), P.121
- 34) G. W. POWELL, et ali.: Metal Progress, 75 (1959), No.4 p. 88

- 35) 広瀬正吉, 他: 鉄道業務研究資料, 11-8 (昭29)
- 36) R. L. MATTSON, et ali.: S.A.E. Transactions 62 (1954), p. 547
- 37) 内山道良, 他: 鉄と鋼, 44 (1958), p. 157
- 38) 上野 学, 他: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 817
- 39) 内山道良, 他: ばね論文集, 7 (1961), p. 15
- 40) 星野明彦, 他: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 571
- 41) 内山道良, 他: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 1163
- 42) W. Crafts ali: Hardenability & Steel Selection. (1949), p. 190
- 43) SAE: S.A.E. Handbook, (1960), p. 99
- 44) E. F. BAILEY: Trans. Amer. Soc. Metals, 146(1954), p. 830
- 45) F. BORIK, et ali.: Trans. Amer. Soc. Metals, 50 (1958), p. 242
- 46) J. H. HOLLOMON, et ali.: Trans. Amer. Soc. Metals, 38 (1947), p. 807
- 47) 日本バネ協会: J.S.M.A., No.2~4 (1957)
- 48) JIS: G 3522 (1957)
- 49) JIS: G 3521 (1958)
- 50) 武尾敬之助: 鋼の熱処理, (昭32), p. 522
- 51) A.S.M.: Metals Handbook, 1955 Supplement (1955), p. 79
- 52) A.S.M.: Metals Handbook, 1 (1961), 415
- 53) E. S. JONES, et ali.: Metal Progress 78 (1960) No.4 p. 131
- 54) P. E. RUFF: Metal Progress, 75 (1959) No.3, p. 103
- 55) M. W. MARSHALL, et ali.: Metal Progress, 70(1956) No.1, P.94
- 56) 鈴木金属工業: コイルばね用各種鋼線の加熱振り試験について, (昭35)
- 57) A.S.M.: Metals Handbook, 1 (1961), p. 506
- 58) DIN: 17220 (1952)
- 59) 小柴定雄: 工具材料, (1956), p. 282
- 60) A.S.M.: Metals Handbook, 1 (1961), p. 509, 510, 503, 504
- 61) J. LUCHOK: Metal Progress, 79 (1961) No.2 p. 91
- 62) R. J. MORRIS: Metal Progress, (1959) No.6, p. 67
- 63) A.S.M.: Metals Handbook, 1 (1961), p. 518, 520, 517, 521, 515, 519
- 64) 内山道良: ばね, (昭34) 31
- 65) J. M. THORNTON: Materials in Design Engineering, Aug. (1960), p. 111
- 66) 堀田秀次: 鉄と鋼, 40 (1954), p. 613
- 67) 堀田秀次: 鉄と鋼, 42 (1956), p. 333
- 68) 堀田秀次: 鉄と鋼, 44 (1958), p. 38
- 69) 堀田秀次: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 449
- 70) 堀田秀次: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 573
- 71) 特殊金属工業: 特殊鋼, 7 (1958) No.4, p. 69
- 72) J. T. MILEK: Materials in Design Engineering, Aug. (1959), p. 115
- 73) M.A.P. 資料 No.1136: Nucleonics, 52(1960) No.6 p. 65, 66
- 74) A.S.M.: Metals Handbook, 1 (1961), P.499
- 75) M. W. MARSHALL, et ali.: Metal Progress, 75 (1959) No.3, p. 121