



入門講座

鉄鋼の日本工業規格— 10

ばね鋼 (SUP)

Spring Steels

増田智一

Tomokazu Masuda

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門
技術開発センター 線材条鋼開発部
線材条鋼開発室 主任研究員

1 はじめに

ばねとは機械的要素の一つであり、弾性体としての特性を利用することでエネルギーの吸収や緩和を最大化することが求められているものである。そのため、ばねはその用途に応じて、以下のいずれかの機能を発揮させる必要がある¹⁾。

- ①荷重と変形の関係においてばね定数が一定であること
- ②弾性エネルギーを吸収または蓄積できること
- ③固有振動の性質を有すること
- ④振動を絶縁できること
- ⑤衝撃を緩和できること

物体が弾性を有していればばねとして用いることができるが、使用の際、作用する外力がその物体の弾性限を超えてしまうと、永久変形の発生によりばねとしての性能を発揮することができなくなる。そのため、ばねには弾性限の高い材料が求められている。

表1に、ばね材料に要求される荷重の種類と材料に必要な性質をまとめた¹⁾。①弾性限の高いこと、②疲れ強さの大きいこと、③衝撃値の大きいこと、④寸法精度の高いことのいずれかあるいはそれら複数の性質が求められている。これら

の要求を満たす材料として、例えば、ゴム、木材、竹もしくは空気、液体等が上記の目的によって利用される場合もある。かつては、これらは工業上ばねとは呼ばれず、ばねは金属をその材料とする場合に限られるとされてきた²⁾。今日においては、鉄鋼材料のほか、非鉄金属として銅、チタン等のばね、非金属としてセラミックスのばねも種々実用化されておりJISとして規定されている。本報では、その中で最も使用量の多いばね鋼鋼材について、JIS G4801に規定されているSUPに焦点を絞って詳しく説明する。

2 JIS G4801について³⁾

JIS G4801は、ばね鋼鋼材の規定として、1950年に制定された。当時、JES金属4801が規定されており、それらばね鋼は、第1種から第10種と呼ばれていた。ばね鋼鋼材の規格はその後計7回の改定が実施され、現在のSUP6～SUP13の8種となった⁴⁾。表2に各ばね鋼鋼材SUPの化学成分、表3にその用途と代表的に用いられるばね鋼鋼材の種類を示す。

現行のばね鋼に用いられる鋼は、成分で大別するとSi-Mn鋼 (SUP6、SUP7)、Mn-Cr鋼 (SUP9、SUP9A)、Cr-V鋼

表1 ばね用材料に要求される荷重の種類と材料特性

荷重の種類		知るべき数値	材料に必要な性質
静的荷重	常に一定不変の荷重がかかっている場合(わずかの荷重変動を含む)	荷重たわみ	弾性限の高いこと
繰返し荷重	一定の荷重が繰返しかかる場合	平均荷重 荷重振幅 たわみ 繰返し数	疲れ強さの大きいこと
衝撃荷重	衝撃的に荷重がかかる場合	衝撃力 たわみ 繰返し数	弾性限の高いこと 衝撃値の高いこと
荷重規定用	秤のようにたわみに対して荷重が広範囲にわたり正確である場合	ばね定数 最大荷重	弾性限の高いこと 寸法精度の高いこと

表2 ばね鋼鋼材の化学成分

種類の 記号	単位 %									
	C	Si	Mn	P*)	S*)	Cu	Cr	Mo	V	B
SUP6	0.56-0.64	1.50-1.80	0.70-1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.30	-	-	-	-
SUP7	0.56-0.64	1.80-2.20	0.70-1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.30	-	-	-	-
SUP9	0.52-0.60	0.15-0.35	0.65-0.95	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.65-0.95	-	-	-
SUP9A	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.70-1.00	-	-	-
SUP10	0.47-0.55	0.15-0.35	0.65-0.95	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.80-1.10	-	0.15-0.25	-
SUP11A	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.70-1.00	-	-	≥0.0005
SUP12	0.51-0.59	1.20-1.60	0.60-0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.60-0.90	-	-	-
SUP13	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.30	0.70-0.90	0.25-0.35	-	-

この表に規定のない元素は、溶鋼を仕上げる目的以外に意図的に添加してはならない。
*)P及Sの値は、受渡当事者間の協定によってそれぞれ0.035%以下にしてもよい。

表3 ばねの種類、用途と使用材料 (SUP種抜粋)

種類	用途	材料の種類							
		SUP6	SUP7	SUP9	SUP9A	SUP10	SUP11A	SUP12	SUP13
重ね板ばね	自動車懸架用、 鉄道車両懸架用	○		○	○	○	○		
コイルばね	自動車懸架用、 鉄道車両懸架用	○	○	○				○	
	鉄道車両懸架用、 一般機械用大型ばね				○	○	○		○
トーションバー	自動車トーションバー			○					
	自動車スタビライザー			○					
薄板ばね	産業機器、自動車、 家電製品など					○			
渦巻ばね	産業機器、自動車、 家電製品など							○	

(SUP10)、Mn-Cr-B鋼 (SUP11A)、Si-Cr鋼 (SUP12)、Cr-Mo鋼 (SUP13) に分類されている。ばね鋼鋼材は高い弾性限を得るため、全ての鋼材においてCが高めに設定されている。また、ばね鋼鋼材には同時に焼入性も必要とされるため、SiあるいはCrが多く含有されている。表3に示すとおり、JIS G4801で規定されているばね鋼鋼材は自動車、鉄道車両、産業・建設機械といった特に高品質が要求される分野に使われている。多くの場合、ばねの種類によって使用される鋼材はおおよそ決まっており、SUPの後ろの番号が高いほど焼入性が高く、より大きな構造体のばねとして用いられている⁵⁾。

3 ばね鋼鋼材の種類について

3.1 Si-Mn鋼

Si-Mn鋼は、Siが多く添加 (SUP6：1.50～1.80%Si、SUP7：1.80～2.20%Si) されている鋼種であり、SUP6とSUP7の違いはSi量のみである。図1にSi-Mn鋼のジョミニー曲線の一例を示す¹⁾。

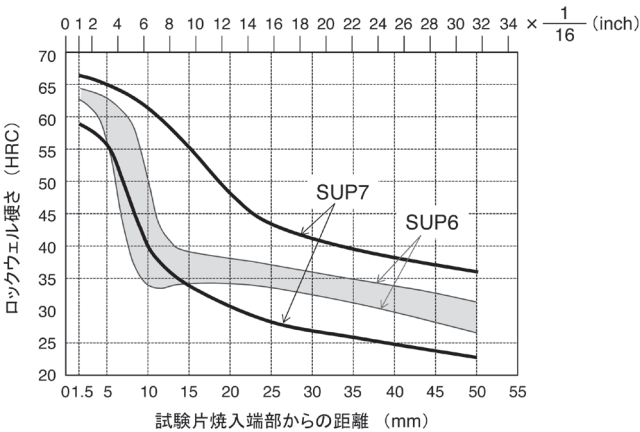


図1 Si-Mn鋼 (SUP6、SUP7) のジョミニー曲線の一例

示す¹⁾。SUP7はSUP6と比較して、Siが高い分高い焼入性が得られている。Siには、セメンタイトの周囲に濃化することで、熱やひずみに加わることによるセメンタイトの分解・凝集を抑制する働き、およびCの拡散を抑制する働きがある⁶⁾。この作

用は、焼戻し軟化抵抗として知られており、SUP6、SUP7は、焼戻し軟化抵抗向上を図った鋼種であるといえよう。図2に、SUP7とSUP9の引張り強度の焼戻し温度による変化を示すが、SUP7の方が焼戻しに伴う引張り強度の低下が少ないことが示されている⁷⁾。また、Siは耐へたり性に対しても、特に大きな改善効果を発揮する。図3に、残留せん断ひずみとSi量の関係を示す⁸⁾。Si量が高いほど耐へたり性の指標である残留せん断ひずみが小さくなることがわかる。これらのことから、SUP6よりもSUP7の方が特に繰返し荷重が加わる部品、すなわち、耐へたり性が要求される部材に用いられている。ただし、Siは耐へたり性に有効である一方、脱炭を助長する元素であるとされている。例えば、Siによる耐へたり性向上効果の高いSUP7は、約2%のSiを含有しており、鋼表面において脱炭が生じやすく、製造条件によってはフェライト脱炭が発生するので、圧延や熱処理の際には注意が必要である¹⁾。

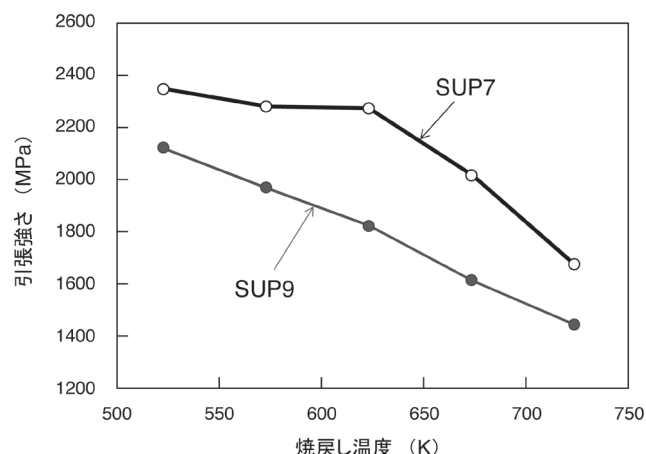


図2 SUP7とSUP9の焼戻し軟化抵抗の比較

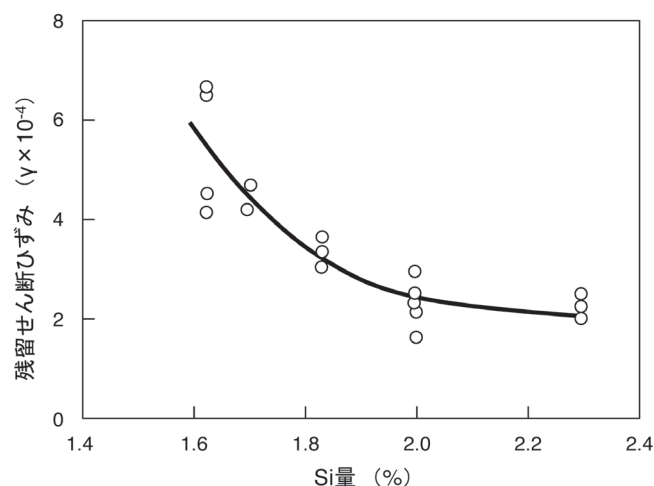


図3 Si量とへたりの関係

3.2 Mn-Cr鋼

Mn-Cr鋼は、Si-Mn鋼と比較してSiが低く、焼入性確保のための合金元素としてCrが多く添加されている鋼種である。Mn-Cr鋼としてSUP9とSUP9Aが分類され、SUP9Aは、SUP9に対してC、Mn、Crの上下限値が少し高い (SUP9 : 0.65~0.95%Cr, SUP9A : 0.70~1.00%Cr)。図4に、Mn-Cr鋼のジョミニー曲線の一例を示す¹⁾。CrはSiとは異なる働きがあり、Crがセメンタイトに固溶することで、セメンタイトの分解・凝集を抑制する作用、Cの拡散を抑制する作用があるため、焼入時のパーライト、ベイナイトといった不完全焼入組織の形成を抑制することができる⁹⁾。SUP9よりもSUP9Aの方が図4からもわかるとおり不完全焼入組織が形成されにくい鋼種である。不完全焼入組織は、マルテンサイトよりも硬さが低く、その部分が集中的に負荷を受けるため、疲労、衝撃特性が低下する原因となりやすい。SUP9Aは、特に焼入性に優れるため、大型ばね等に使用されている。

3.3 Cr-V鋼

Cr-V鋼には、SUP10が分類されている。Mn-Cr鋼と比較して、C範囲が少し低く、Cr範囲は少し高く、Vを添加した鋼種である (SUP10 : 0.15~0.25%V)。Vは炭窒化物の形で鋼中に存在しており、オーステナイト結晶粒度の微細化に寄与させることができる。図5に、オーステナイト結晶粒度と焼入温度の関係に及ぼすV添加の影響を示す¹⁰⁾。焼入温度950~1000℃付近においては、V炭窒化物が分解するため、オーステナイト結晶粒の成長抑制のためのピン止め効果が発揮されない。一方、焼入温度900℃以下では、オーステナイト化温度においてもV炭窒化物が残存しているため、結晶粒が微細化していることがわかる。また、図6に、シャルピー衝撃値に及ぼすVの影響、図7に硬さと衝撃値の関係に及ぼすVの影響を示す^{10,11)}。結晶粒が微細化することによって鋼が強靱化し、シャルピー衝撃値が向上している。すなわち、SUP10

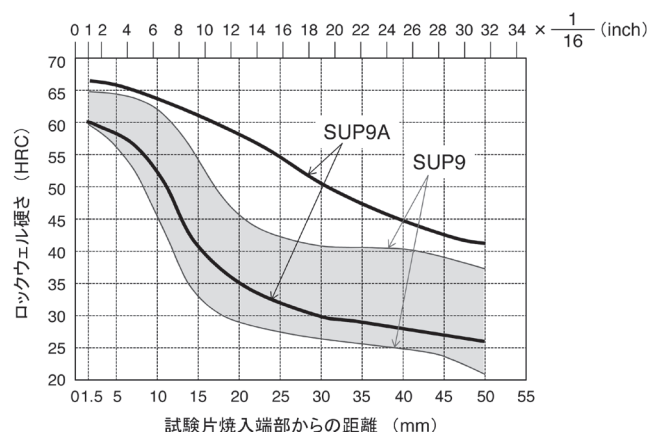


図4 Mn-Cr鋼 (SUP9、SUP 9 A) のジョミニー曲線の一例

はSUP9、9Aと同様の高い焼入性に加え、V炭窒化物によるオーステナイト加熱時の結晶粒粗大化が抑制されている効果が付与されるため、靱性を向上させることができる。ばね鋼に限らず鋼材は、一般的に強度の増加に伴い靱延性は低下することから、高強度化に伴いへたり性は向上するものの、耐衝撃性が劣化する問題があった。図5～7からもわかるとおり、SUP10は組織制御によって靱性が改善されているばね鋼であり、他のばね鋼鋼材が成分設計によるものであるのに対して、少し趣旨が異なっている。図8にSUP10のジョミニー曲線の一例を示す。比較として、SUP9のジョミニー曲線も合わせて示した¹⁾。結晶粒微細化による焼入性低下は、Crを少し高めに設定することで改善されている。また、SUP10は

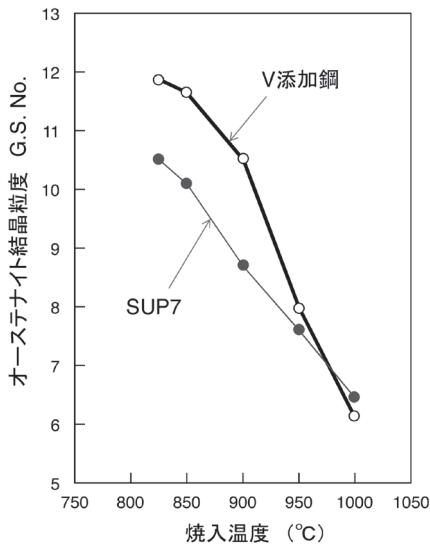


図5 オーステナイト結晶粒度と焼入温度の関係

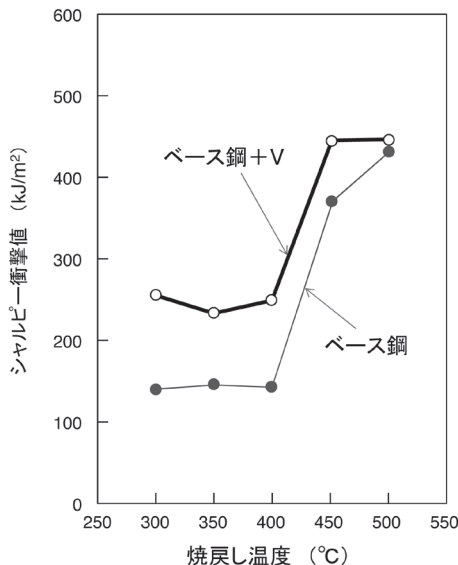


図6 シャルピー衝撃値に及ぼすVの影響

Vが添加されており、耐水素脆性や破壊靱性の改善効果も期待される鋼材である。V系析出物が腐食環境から鋼中に侵入する水素をトラップすることによって、高強度材の遅れ破壊を抑制することができる^{12,13)}。ただし、Vは腐食ピットを深くすることで腐食疲労寿命を低下させる報告もあり、注意が必要である^{12,13)}。

3.4 Mn-Cr-B鋼

Mn-Cr-B鋼には、SUP11Aが分類されている。SUP11Aは、かつてSUP11と表記されていたが、1977年のJIS G4801改正時に、SUP11Aへと変更された。ちなみにこの改正によってSUP9Aが新たに追加されることとなった。SUP11AはSUP9AにBが添加された鋼種である (SUP11A: $\geq 0.0005\%B$)。図9にMn-Cr-B鋼のジョミニー曲線の一例を示す¹⁾。Bは、オーステナイト化温度まで加熱される際、オーステナイト粒界に偏析する。不完全焼入組織は、主にオーステナイト粒界から粒内に向かって拡散しながら生成するが、Bの粒界偏析はその発生を抑制することができるため、高い焼

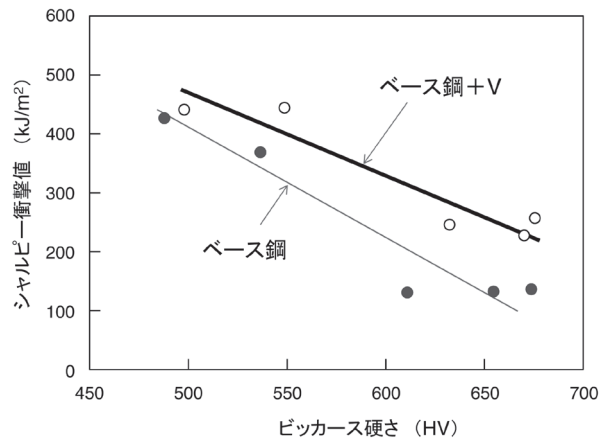


図7 硬さと衝撃値の係に及ぼすVの影響

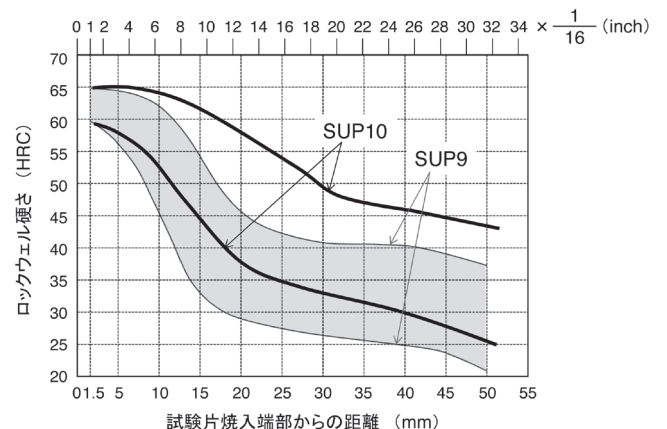


図8 Cr-V鋼 (SUP10) のジョミニー曲線の一例

入性を発現させることができる。ただし、Bの焼入性を発揮させるためには、Bを固溶状態で存在させる必要がある。元来Bは鋼中に固溶しているNと結合しやすく、熱処理条件によってはBはBNとなってしまう、その効果を発揮させることができない場合がある。

3.5 Si-Cr鋼

Si-Cr鋼は、SUP12に分類される鋼種であり、また、SAE9254にも相当する鋼種である。図10にSUP12のジョミニー曲線¹⁾の一例を示す¹⁾。1959年以前、JIS G4801にはSi-Cr鋼としてSUP8が規格化されていた。しかしながら、当時、SUP8は熱間ばね用鋼材として使用が難しく実績も少なかったため、規格から廃止されることとなった。使用が困難である理由として、SUP8にはフェライト生成元素であるSiとCrが多く含有されているためオーステナイト域が狭く、温度が上側に振れると結晶粒が大きくなる、下側に振れると不完全焼入組織が出やすくなることから当時の製造技術では取扱いが困難であったためと推察される。しかしながら、近年においては、Si-Crオイルテンパー線としての実績や、熱処理制御技術、設

備能力の向上が相まって、SUP12 (SAE9254) の使用実績が着実に増えてきている。SUP12は、耐へたり性に有効なSiと焼入性に有効なCrがバランスよく添加されている鋼種であり、今日においては特に自動車用弁ばねや懸架ばねとして使われることが多い。

3.6 Cr-Mo鋼

Cr-Mo鋼には、SUP13が分類される。SUP9に対して、Crの上限を少し下げ、Moを添加 (SUP13 : 0.25~0.35%Mo) した鋼種である。図11にSUP13のジョミニー曲線¹⁾の一例を示す¹⁾。Moを添加することによって、焼入性を向上させた鋼種であり、SUP11Aと同様に大型の重ねばねやコイルばねに使用されている。

表4に、現行ばね鋼鋼材の焼入性の比較を示す^{1,14)}。SUPの後ろの数字が大きいほど焼入性が高い。ただし、鋼の焼入性は鋼材成分のほか、オーステナイト結晶粒度にも影響を受けることにも注意が必要である。オーステナイト結晶粒度が大きいほど焼入性が良好であるが、粗大なオーステナイトから焼入・焼戻した鋼は韌性が劣化する。その理由としては、

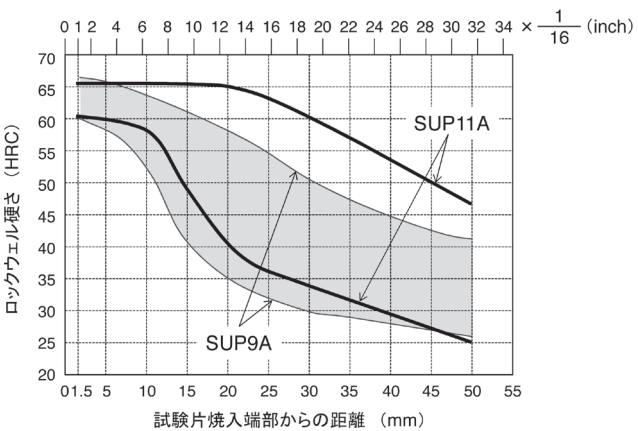


図9 Mn-Cr-B鋼 (SUP11A) のジョミニー曲線の一例

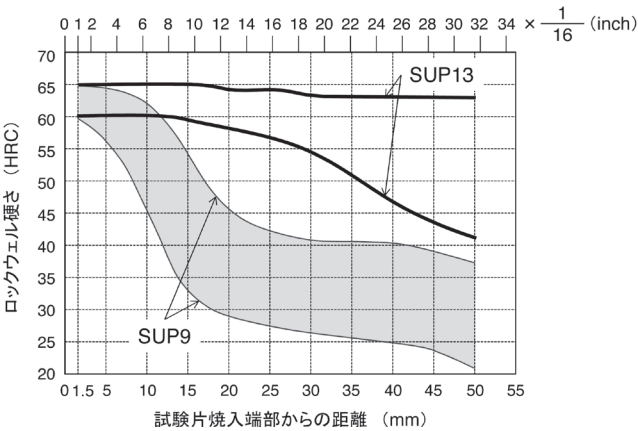


図11 Cr-Mo鋼 (SUP13) のジョミニー曲線の一例

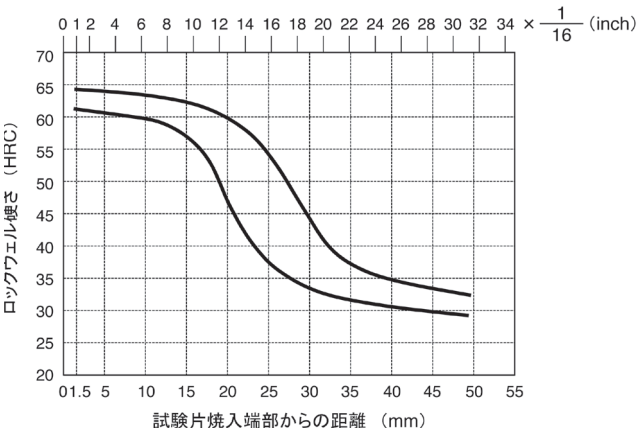


図10 Si-Cr鋼 (SUP12) のジョミニー曲線の一例

表4 ばね鋼鋼材の焼入性の比較

鋼種	記号	中心を50%マルテンサイトに油焼入できる寸法 (mm)	
		直径	板厚
Si-Mn鋼	SUP6	30	18
	SUP7	40	24
Mn-Cr鋼	SUP9	55	33
	SUP9A	60	36
Cr-V鋼	SUP10	60	36
Mn-Cr-B鋼	SUP11A	75	45
Cr-Mo鋼	SUP13	75	50

結晶粒が粗大であるほど結晶粒界の単位面積あたりの不純物の偏析量や炭化物の析出量が多くなるからと考えられている。ばね製造の際には、靱性と焼入性能両立のため、適正な結晶粒度となるよう熱処理温度を選定する必要がある。結晶粒度と靱性の関係については、川寄らによる誘導加熱焼入を利用した研究があり、ある程度までの細粒化は靱性を向上させるが、それ以上微細化しても靱性の改善効果が小さくなると報告されている¹⁵⁾。

4 ばねの成形方法について

ばねの成形方法は大きく分けて、熱間成形と冷間成形に分けられる。図12に一例として、コイルばねの製造工程について、熱間成形と冷間成形の比較を示す^{16,17)}。熱間成形は、線径が太く、常温で加工することができないばね加工に適している。熱間成形コイルばねを製造する場合、まず、熱間圧延材を用い、2次加工メーカーにて、所定の線径まで引抜き加工され、あらかじめ設定されていた長さに切断される。この工程で製造される棒は磨棒と呼ばれる。磨棒は、ばねメーカーに納入され、オーステナイト単相域まで加熱された後、巻付け加工が施されることによってばね形状へと成形される。その後、焼入焼戻しによって、コイルばねに必要な材料特性が付与される。

一方、冷間成形は、常温でのばね加工を指す。冷間成形コイルばねを製造する場合は、まず、2次加工メーカーにて、熱間圧延材から所定の線径まで伸線加工が施される。伸線材には、連続炉によって焼入焼戻しが施され、あらかじめコイルばねに必要な材料特性が付与される。熱処理が施された線材はコイルの形でばねメーカーに納入され、常温でコイル加工することによって、ばねへと成形される。熱間成形コイルばねが棒状の治具に巻付けながらばね形状に加工されるのに対して、冷間成形コイルばねの多くは、線材を繰り出しな

がらコイルピンあるいはコイルローラーに線材を押し当て、コイル状に曲げながらばね形状に加工される。その後、加工時に導入されたひずみを除去する目的で、焼戻し温度よりも低い温度でひずみ取り焼鈍される。

ばねに所定の特性を付与させた後の工程は、熱間成形ばね、冷間成形ばね共に同一である。セッチングは、ばねに最大使用荷重以上の荷重を付与し、塑性変形を加えることで弾性限度を上げる工程である。セッチングによって、ばねの耐へたり性を向上させると共に、ばね毎の強度特性のばらつきを低減させることができる。ショットピーニングは、ばねの疲労強度を向上させるため、表面に圧縮残留応力を付与するために実施される。その後、塗装、検査を経て、コイルばねとして出荷されこととなる¹⁸⁾。

5 ばね鋼の高強度化に関する研究事例

ばね鋼鋼材は、伸線、圧延などの冷間加工によって要求特性を持たせるもの、あるいは、熱処理によって要求特性を持たせるものがある。その製造工程については4章で述べたとおりである。ばね鋼鋼材SUPとして成分が限られていることから、ばね鋼鋼材の高強度化、高靱性化は製造工程によって達成される必要がある。以下、ばね鋼鋼材SUPにおいて、種々の手法による高強度化、高靱性化が検討された研究事例の一部を紹介する。

瀬戸らは、誘導加熱方式 (IH : Induction Heat-treated) の特徴である短時間加熱を活用することで組織を微細化させ、高強度と高靱性の両立を検討した。SAE9254を用い、IH焼入、IH焼戻しを適用した結果、微細組織を得ることができ、また引張試験、捻り試験、シャルピー衝撃試験において、高い靱性を示すことを明らかにした¹⁹⁾。一方、川寄らも同様にIHの靱性向上効果について検証した結果、短時間加熱によるオーステナイト化は、結晶粒微細化効果だけでなく、その後

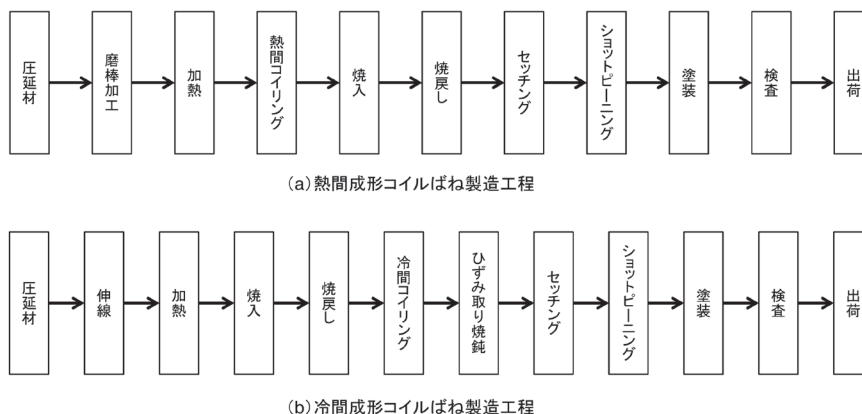


図12 熱間および冷間成形コイルばねの製造工程の比較（一例）

の焼戻しによる組織変化に重要な効果を与えている可能性を報告している。川畠らは更なる検討を続けた結果、このIH焼戻しによる優れた諸力学特性改善効果は、炭化物の粒内微細分散析出による析出強化および粒界析出量低減による粒界強度向上によるものであることを示すことができている²⁰⁾。

加熱後の熱間加工を制御することによって特性改善を試みた研究事例もある。加工熱処理の活用による強靱化として、さらには、過冷オーステナイト域で引抜き加工、等温保持するオースフォームドベイナイトの利用の可能性を検討している。SUP7を対象とし、オースフォームによる変態挙動、組織、諸力学特性を調査した結果、30%加工後に573Kで保持した結果、硬さHV650の下部ベイナイト組織が得られたことが報告されている²¹⁾。伊藤らはSUP10を用い、オーステナイト域で圧延加工を付与した後、直ちに油焼入する改良オースフォーム処理の有効性を検討している。改良オースフォーム処理によって得られるマルテンサイトは、特に加工温度850～1000℃において、通常熱処理のマルテンサイトよりも硬さが上昇し、また、焼戻し軟化抵抗も改善されることが明らかとなった²²⁾。

一方、規格鋼に微量元素を添加することで靱性改善を試みた報告も、種々存在する。栗本らは、へたり改善の技術課題に対応するため、当時国内で主流であったSUP6に代わって使用され始めたSUP7の改善手段について検討している。更なるへたり抑制のためには、固溶強化、析出強化、結晶粒微細化が有効と考え、それら強化機構の効果を検証するため、SUP7にVおよびNbを添加したSUP7改良鋼を提案している。結果、V、Nbの添加によって焼戻し軟化抵抗の向上が確認され、焼戻し過程における炭化物の再析出が有効であることが明らかとなった。また、結晶粒微細化効果も確認され、VとNbの複合添加によって、SUP7に比べ粒度番号で2程度微細化させることが可能であり、耐力も結晶粒微細化強化によって約100MPaの引張強度向上効果が確認されている。ただし、疲労特性においてはSUP7に対し、改善効果が認められない結果となった²³⁾。荻口らは、SUP10をベースに硫化物、酸化物生成元素 (Ca、La、Y、Ce)、炭窒化物生成元素 (Nb、Ti、Ta、W、N) を添加し、オーステナイト結晶粒度への影響を調査している。結果、硫化物および酸化物生成元素は結晶粒微細化に効果を示さず、炭窒化物生成元素の場合はN量と関係が深いことが明らかとなった²⁴⁾。内堀らは、SUP12 (SAE9254) をベースに、衝撃特性に及ぼすC増加の影響、Mo、V、Ti、NbおよびB添加の影響を調査している。結果、成分よりも硬さの影響のほうが大きく、硬さHV600を超えると次第に衝撃特性が低下することが明らかとなった。その低下の傾向は、C増量が大きく低下しているのに対し

て、Mo、V、Ti、NbおよびBを添加するとその衝撃値の低下が抑制されている²⁵⁾。

疲労特性向上のため、ばね表面に対してショットピーニングを施すことも有効である。ばねを高強度化すると、ばね表面における欠陥感受性が高くなり、微小な材料欠陥があっても疲労強度が大幅に低下する可能性がある。ショットピーニングは、ばね表面の欠陥を無害化させるだけでなく、圧縮残留応力の付与によって疲労き裂の発生・進展を抑制することができるため、種々のショットピーニングあるいは表面加工方法が提案されている。福田らは、ショット粒を使用しないキャビテーションピーニングによる疲労強度向上効果を検討している。キャビテーションピーニングの条件を検討した結果、平滑試験片で深さ0.040mm、切欠き試験片で深さ0.075mmまでの欠陥を無害化することができ、圧縮残留応力付与の効果も相まって、疲労限度を向上させることができたことを報告している²⁶⁾。松井らは更なる疲労特性向上のため、通常のショットピーニングの後、粒径100 μm 以下の微細ショット粒を用いて再度ショットピーニングを施す二段ショットピーニングの効果を検討している。対象はばね鋼ではないものの、表層に-1400～-1500MPaといった非常に高い圧縮残留応力が付与できることが報告されている²⁷⁾。ショットピーニングに関する技術は、そのほかにも自動車用懸架ばねの使用環境下で形成される腐食ピットとの関係、無害化欠陥寸法との関係など、種々の報告がなされている。また、ばね鋼鋼材の高強度化に伴い微小欠陥だけでなく介在物や脱炭による疲労強度低下要因の影響も大きくなっていくため、これらを含めた総合的評価も進められている²⁸⁾。

6 おわりに

ばね鋼鋼材の基礎として、ばねに要求される特性、ばね鋼鋼材SUPの成分と用途、各成分系の概略、コイルばねの製造方法、近年の高強度化、高靱性化に関する研究事例について、ごく一部ではあるが簡単にまとめた。ばねは、身近な機器から大型機械や構造物までほとんどの機器において利用されており、ばね技術は日々進化を続けている。ばね鋼鋼材においても、近年、地球環境保護の観点からCO₂排出量の削減、省資源化、省エネルギー化が進められており、将来においても高強度化、高靱性化がますます重要になってくる。ばねを利用する技術者は、ばねだけでなくばね鋼鋼材についても理解を深め、その性能を最大限発揮させる使い方を考えていく必要がある。本内容のみでは甚だ不十分であるが、ばね鋼鋼材に関する理解のきっかけしていただければ幸いである。

参考文献

- 1) 第3版ばね, ばね技術研究会編, 丸善, (1982)
- 2) 服部宗三: ばね, 東京鋼材, (1931), 2.
- 3) JIS G 4801 ばね鋼鋼材, (2011)
- 4) 日本のばねの歴史, 「日本のばねの歴史」編纂委員会編, 日本ばね工業会, (1984), 231.
- 5) 用途別ばねの紹介, 日本ばね学会, (2010)
- 6) 隠岐保博, 茨木信彦, 鹿嶋正人, 槇井浩一: R&D 神戸製鋼技報, 49 (1999) 2, 8.
- 7) 「降伏強度と組織」研究会・報告書Ⅱ―課題研究編―, 日本鉄鋼協会, (2007)
- 8) 新倉芳治, 小川登, 高橋栄治: ばね論文集, 24 (1979), 2.
- 9) 増本慶, 鹿嶋正人, 茨木信彦: R&D 神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 67.
- 10) 川口康信, 佐藤仁資, 山田凱朗: ばね技術研究会1991年度春季講演会前刷集, (1991), 27.
- 11) 内堀勝之: 三菱製鋼技報, 33 (1999) 41, 29.
- 12) 吉原直, 茨木信彦, 杉山充弘, 丹下彰: ばね論文集, 51 (2006), 1.
- 13) 木村和良, 木村利光, 羽生田智紀: 電気製鋼, 75 (2004) 1, 19.
- 14) 小玉正雄, 杉坂治元, 岩崎茂夫: ばね使用と設計のポイント, 日本規格協会, (1977), 17.
- 15) 川寄一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 73 (1987) 16, 2298.
- 16) H.Yoshikawa, T.Sakakibara and M.Wakita: SAE Technical Paper Series, (2002-01-0370), 1.
- 17) 山岡拓也: 特殊鋼, 64 (2015) 4, 27.
- 18) 「ばねの歴史」編纂ワーキンググループ: ばねの歴史, 日本ばね工業会, (2012), 8.
- 19) 瀬戸芳樹, 曾我栄市, 内野勝芳, 川寄一博: ばね論文集, 27 (1982), 28.
- 20) 川寄一博, 古賀久喜, 山崎隆雄: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1136.
- 21) 辻伸泰, 綾田倫彦, 高島大知, 齋藤好弘: 鉄と鋼, 85 (1999) 5, 67.
- 22) 伊藤伸英, 大森宮次郎, 熱処理: 32 (1992) 6, 334.
- 23) 栗本衛, 小曾根敏夫, 横手信久, 三宅文行, 小林良平: ばね論文集, 27 (1982), 20.
- 24) 蓑口光樹, 田村至, 内堀勝之, 安部強: ばね技術研究会1993年度春季講演会前刷集, (1993), 29.
- 25) 内堀勝之, 元村博春: 三菱製鋼技報, 34 (2000), 14.
- 26) 福田晋作, 天野利彦, 高橋宏治, 松井勝幸, 石上英征, 安藤柱: ばね論文集, 54 (2009), 1.
- 27) 松井勝幸, 山田明德, 伊禮忠雄, 神康行: ばね論文集, 59 (2014), 7.
- 28) 村上敬宜, 小林幹和, 牧野泰三, 鳥山寿之, 栗原義昭, 高崎惣一, 江原隆一郎: ばね論文集, 39 (1994), 7.

(2015年9月7日受付)