



わが国のばね鋼の進歩発展について 特別講演

阿部 芳平*

Recent Development of Spring Steel in Japan

Yoshihei ABE

Synopsis:

The report discusses the recent development of spring steel in Japan during last 40 years. There has been a great increase in this steel production with the increase of production of automobiles. The technical trends of spring steel and springs are discussed in connection with hardenability, fatigue, high-stressed design and productivity. Especially, ways of improvement of performance of springs for suspension of automobiles were studied in respect to chemical composition, heat-treatment and manufacturing process.

Key words: development of spring steel; spring steel; hardenability; fatigue; shot peening technology; settling; heat-treatment; alloying element; strength.

1. はじめに

このたび、図らずも栄えある渡辺義介賞を受賞し、誠に光栄に存じます。御関係の皆様方に心から御礼申し上げます。

私は昭和19年に特殊鋼業界に職を奉じましてからあしかけ47年になりますが、その間鋼材の溶解・精錬、圧延・熱処理及びばねの製造部門と、いわゆる現場部門に約33年間、その後研究開発及び管理部門を担当して現在に至っています。要するにばね鋼の製鋼から始まって完成ばねまで、一貫した仕事に係わったこととなります。

従いまして、本日はばねの製造技術を含めまして、ばね鋼の技術の発展についてお話し申し上げてみたいと思います。

2. ばね鋼の変遷

ここでいう“ばね鋼”とは、重ね板ばね、コイルばね及びトーションバーなど、主として熱間成形ばねに使用される鋼材のことをいいます。さて、わが国のばね鋼の変遷について、まず量の面からながめてみます。

図1はわが国のばね鋼熱間圧延鋼材生産量の年次推移を昭和24年から63年まで示したものです。昭和20年代から30年代の前半にかけては、第2次大戦後の産業の復興とか朝鮮動乱等の影響で生産量はしだいに増加の傾向を示しています。しかし量的には昭和24年当時で

2万t弱と、まことにわずかな量でありました。昭和30年代の後半から40年代にかけては、日本経済の高度成長、なかんずく自動車産業の急成長の影響を受けて生

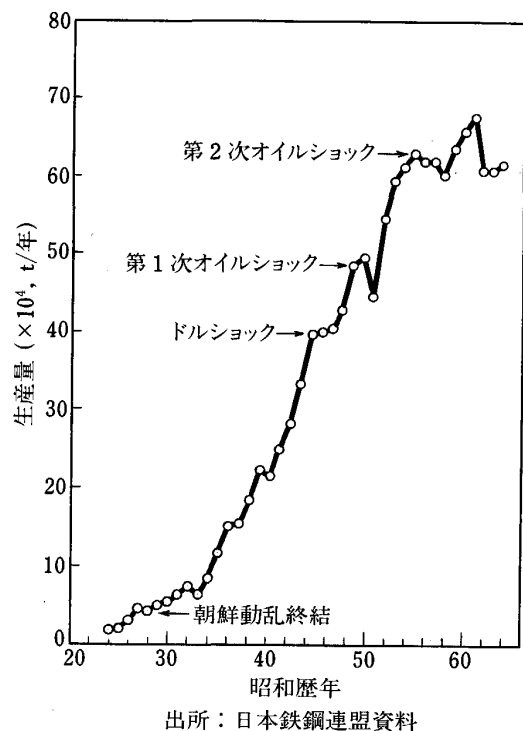


図1 ばね鋼熱間圧延鋼材生産量の年次推移

平成2年4月本会講演大会における渡辺義介賞受賞記念特別講演 平成2年5月14日受付 (Received May 14, 1990)

* 三菱製鋼(株)代表取締役会長 (Chairman of the Board, Mitsubishi Steel Mfg. Co., Ltd., Harumi Park Building, 3-2-22 Harumi Chuo-ku, Tokyo 104)

産量が急増しています。昭和 40 年代の後半から 50 年代にかけては、ドルショック、2 回にわたるオイルショック等の影響にもかかわらず、生産量は全体的には増加の傾向を示しています。昭和 50 年代の後半から 60 年代については、昭和 61 年に円高という経済変動の影響を受けて生産量が一時的に急落していますが、基本的には漸増の傾向をたどっていると言つてよいかと思ひます。

現在のばね鋼の生産量は、年産約 62 万 t で、この数字は全特殊鋼の熱間圧延鋼材の約 3.8% であります。

用途別にみますと、最近では自動車向けが全体の約 95% を占めています。また形状別では、板ばね用として使用される平鋼が全体の約 57% と半分以上を占めています。最近の傾向としては、主として乗用車用のコイルばねの増加に伴い、丸鋼及び線材の比率が漸増しています。

つぎに、ばね鋼の変遷について質の面からみます。図 2 に JIS にみるばね鋼の移り変わりを示します。JIS は一般に鋼材の使用実績に従つて鋼種を採用していく傾向がありますので、この鋼種の採用の移り変わりをみるにより、その時代のニーズの動向がわかるかと思ひます。

昭和 25 年に制定された鋼種は、以前の JES (Japan Engineering Standard) の内容を引き継いだものです。C 系が SUP 1, 2, 3, 4 の 4 鋼種、Si-Mn 系が SUP 5,

6, 7 の 3 鋼種で、その外に Si-Cr 系の SUP 8 がありました。昭和 34 年に、本格的な見直しが行われ、現在のばね鋼の鋼種体系の骨格がほぼできたといえるかと思ひます。すなわち、C 系は SUP 3 及び 4 の 2 鋼種に、また Si-Mn 系は SUP 6 及び 7 の 2 鋼種に、それぞれ減少し、替わつてばねの大形化のために焼入性を増加させる必要性から、新たに Mn-Cr 系の SUP 9, Cr-V 系の SUP 10 及び Mn-Cr-B 系の SUP 11 が採用されています。昭和 52 年の改正では、さらに、焼入性の改良に重点がおかれて、SUP 9 の改良型として SUP 9A, SUP 11 の改良型として SUP 11A がそれぞれ制定されました。昭和 59 年には、当時、ばねの軽量化がとくに強く要請され、これに対応して高応力で設計されるさいの耐へたり性の高い鋼種として、Si-Cr 系の SUP 12 が新しく採用されました。また、超大型ばね用として、Cr-Mo 系の SUP 13 が採用されています。さらに、C 系は SUP 3 の 1 鋼種に減少して現在に至っています。

以上のような変遷を経て、現在のばね鋼の鋼種が規格化されています。

ここで、現在のばね鋼の鋼種の特徴の概略を述べてみます。表 1 に JIS ばね鋼鋼材の主要化学成分を示します。SUP 3 は、C 系のばね鋼としては、現在ただひとつ残っているもので、鉄道貨車の補修用にわずかに使用される程度で、外にはほとんど使用されていません。

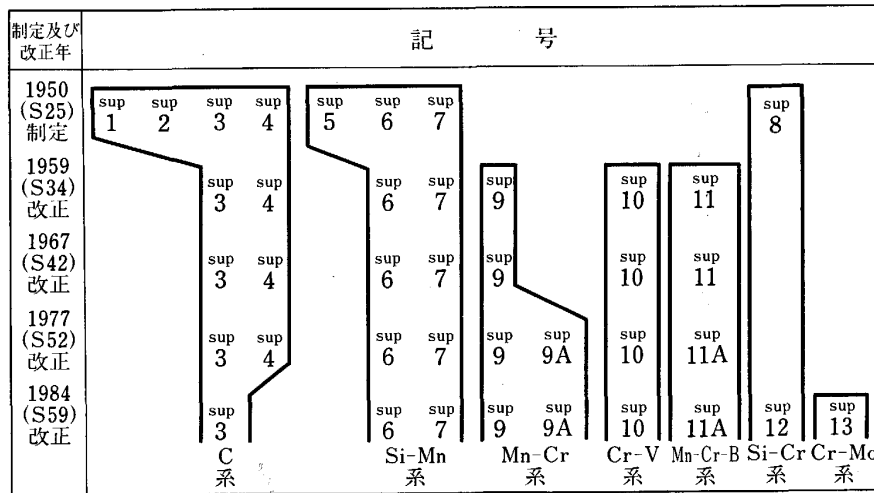


図 2 JIS にみるばね鋼の移り変わり

表 1 JIS ばね鋼鋼材の主要化学成分

種類の記号	化 学 成 分 (%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	B
SUP 3	0.75~0.90	0.15~0.35	0.30~0.60	—	—	—	—
SUP 6	0.56~0.64	1.50~1.80	0.70~1.00	—	—	—	—
SUP 7	0.56~0.64	1.80~2.20	0.70~1.00	—	—	—	—
SUP 9	0.52~0.60	0.15~0.35	0.65~0.95	0.65~0.95	—	—	—
SUP 9A	0.56~0.64	0.15~0.35	0.70~1.00	0.70~1.00	—	—	—
SUP 10	0.47~0.55	0.15~0.35	0.65~0.95	0.80~1.10	—	0.15~0.25	—
SUP 11A	0.56~0.64	0.15~0.35	0.70~1.00	0.70~1.00	—	—	0.0005 以上
SUP 12	0.51~0.59	1.20~1.60	0.60~0.90	0.60~0.90	—	—	—
SUP 13	0.56~0.64	0.15~0.35	0.70~1.00	0.70~0.90	0.25~0.35	—	—

出所：JIS G 4801-1984

SUP 6 は、Si-Mn 系のばね鋼として、昭和の初期から使用されている基本的な鋼種です。SUP 7 は、SUP 6 と同様に Si-Mn 系で、Si 含有量がより多くなっていて、最近のばねの設計応力の高応力化に対応して、耐へたり性の優れた鋼種として使用量が増加の傾向にあります。SUP 9 は、Mn-Cr 系で、米国で広く使用されていたものを昭和 30 年代にわが国に導入し、ある程度の実績を積んだ上で JIS に採用された焼入性の優れた鋼種です。SUP 9A は、SUP 9 の C, Mn, Cr を高めにし、焼入性をさらに向上させたものです。SUP 10 は、Cr-V 系で、とくに靱性が優れているので、特殊でかつ苛酷な条件で使用されるばね用の鋼種です。SUP 11A は、Mn-Cr-B 系で、焼入性の優れた鋼種です。SUP 12 は、Si-Cr 系の高応力ばね用で、耐へたり性の優れた鋼種です。SUP 13 は、Cr-Mo 系で、焼入性が SUP 11A よりもさらに優れた鋼種で、超大型のばねの高応力化に対応して使用されるという特徴を持っています。材料径で 100 mm までのコイルばねへの使用実績があります。

以上のごとく、SUP 3, SUP 6 は戦前から多用されている鋼種であり、また、SUP 9, 9A, 10, 11A, 12, 13 はいずれも昭和 34 年以降、逐次採用された鋼種です。このことは、時代の進展とともに、ユーザーニーズの高度化及び多様化に対応して、鋼種が採用されていることを示しています。ばね鋼メーカーとしては、ばねメーカー及び自動車メーカー等のユーザーの協力のもとで、共同研究という形で、常に新しい鋼種を開拓してきました。SUP 9~13 についても、常に研究開発が先行し、ある程度の実績が確認された段階で JIS に採用されてきたわけです。

ばね鋼の鋼種別の生産比率は、Si-Mn 系 (SUP 6, 7) と Mn-Cr 系 (SUP 9, 9A) が両者合わせてばね鋼全体の約 80% 強を占めており、また、それぞれがほぼ半分の 40% ずつを占めています。

3. ばね鋼の品質の進歩発展

3.1 ばね鋼の要求される主な性質

ばね鋼に要求される主な性質としては、①弾性限 (降伏強度) が高いこと。②寸法精度が良いこと。③機械的性質が良好なこと。④疲れ強さが大きいこと。⑤へたり (ばねの使用中に生じた永久変形) が小さいこと。などが挙げられます。その他、重要事項として、耐食性が要求されますが、これは主に表面塗装の問題ですので割愛し、本日はこれらの項目の中で、疲れ強さとへたりに関連したお話をさせていただきます。

3.2 ばねの性能向上に関する技術動向

ばねの性能向上に関する技術動向を表 2 に示します。ばねにとって、各時代を通じて、耐久性の向上すなわち疲れ寿命の延長とそれと並行して、軽量化すなわち高応

表 2 ばねの性能向上に関する技術動向

年 代	問 題 点	対 応 策
昭和 20~30 年代	大型化 耐久性向上	焼入性 (炭素鋼→合金鋼) ショットピーニング、脱炭管理
昭和 40 年代	大量生産 耐久性向上 軽量化	圧延 (黒皮精密丸, 自動探傷) ストレスピーニング ロングテーパーリーフ
昭和 50 年代	軽量化・高応力化 耐へたり性向上 耐久性向上	高硬度化 高 Si 化 (SUP 6,9→SUP 7,12) 丸こぼ
昭和 60 年代	生産性向上	ブルーム連続

表 3 ばね鋼とばねの臨界寸法 (mm)

種 類 鋼 種	臨界板厚 (油焼入れ)		臨界直径 (油焼入れ)	
	試 片	板ばね	試 片	巻ばね
炭素鋼 (SUP 3)	11	6	18	10
Si-Mn 鋼 (SUP 6,7)	18	12	30	20
Mn-Cr 鋼 (SUP 9,9A)	33	20	55	34
B 鋼 (SUP 11A)	41	30	67	45
Cr-Mo 鋼 (SUP 13)	68	50	110	75

出所:「ばね」第 3 版 (ばね技術研究会編), p. 17

力化が最大の課題であるといえます。同時に、もちろんのことですが、ばねの各強度レベルにおける信頼性の確保も重要な命題です。しかし、ばねに関する技術の進歩の過程において、すなわち各時代において、大きくクローズアップされた問題点と、それに対する対応策があります。それらの二、三についてふれてみたいと思います。

3.2.1 大型化

昭和 20~30 年代において、いろいろの形状のばね、たとえばバス、トラック及び建設機械用のばねが大型化しましたが、それに対応して、ばねの種類にかかわらず熱処理をいかに完全に行うか、言い換えると、完全に焼入れされたものを焼きもどすということ、量産工程でどれだけ理想に近づけるかということが、当時の最大の課題となっておりました。これに対応して、まず材料の焼入性が重要視されてきたわけで、材料自体に要求されることとして、もちろん十分な焼入性が必要ですが、その焼入性が過大であると焼割れとかひずみなどの弊害が生じます。必要にして十分な焼入性が理想ですが、実際の生産現場においては、ある程度のばらつきの幅があります。しかし、時代とともに製鋼技術の進歩、たとえば取鍋精錬とかコンピューター管理等によって、焼入性管理に対する“きめ”の細かい対応ができるようになってきました。これが、後で述べるばねの製造技術の進歩とあいまって、ばねの軽量化、すなわち高応力化の大切な基本となっています。

一つの例として、建設機械用のコイルばねの高応力化の例を紹介しますと、昭和 40 年頃の設計応力は 60 kgf/mm² 以下でしたが、現在では 90 kgf/mm² をこえて使われています。表 3 に各種のばね鋼の焼入性の比較を臨界寸法の大小によって示します。

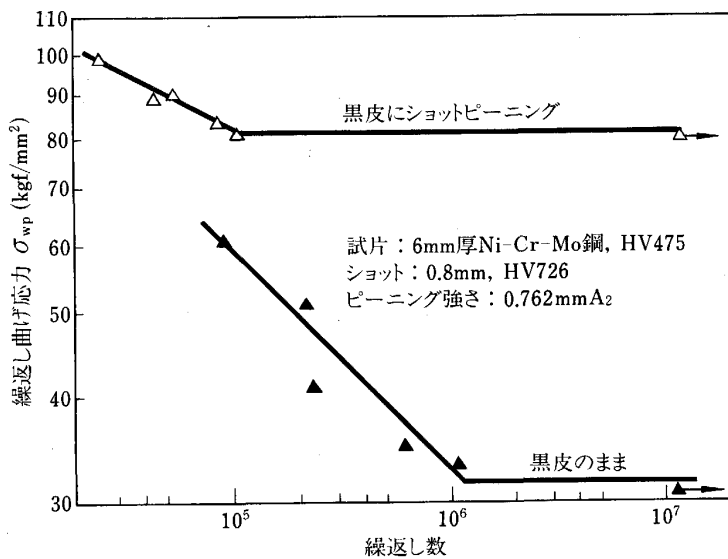


図 3 疲れ強さに及ぼすショットピーニングの影響

3・2・2 耐久性の向上

昭和 20～30 年代の懸架ばねの耐久性向上の対応策として、ショットピーニング技術がありました。ショットピーニングはもともと米国で開発された技術ですが、小さな鋼球をばねの表面に高速で打ちつけて表面を塑性加工し、最表面を若干硬化させるとともに、表面層に圧縮の残留応力を生成させて疲れ強さの増加を図る処理です。図 3 に当時の実験例を示しますが、ショットピーニングの効果は顕著であって、ほとんどすべてのばねに行われるようになりました。

また、表 2 の昭和 40 年代の耐久性の向上に関する対応策にストレスピーニングがありますが、これは、ばねに初期応力をかけた状態でショットピーニング処理を行う技術で、その効果がさらに増大します。このストレスピーニングは板ばねによく用いられています。

さらに、耐久性の向上の根本的な対策として、脱炭管理があります。表面に脱炭層があると疲れ強さが低下する傾向を示します。従って、材料の製造工程はもとより、ばねの製造を含む全工程における脱炭管理が重要であります。とくに、ばねが高応力化するほど脱炭の悪影響が顕著に現れるので、この管理は時代とともに厳しさをましています。

以上の外に、耐久性の向上に関する対応策として、丸こばがあります。これは板ばねのこばの半径を板厚の半分の大きさの形状としてこばへの応力集中を避ける技術であります。

3・2・3 大量生産技術の進歩

昭和 40 年代の自動車産業の急成長に対応して、ばね鋼の圧延技術の進歩も顕著なものがありました。すなわちばね鋼の寸法精度が向上し、あわせて、上述の脱炭の管理技術、さらには自動探傷技術などの向上により、圧延肌のままでも従来のコイルばねの素材であったみがき

棒鋼と同等の性能が得られることが確認され、実用化されて大量生産に寄与しました。

また、昭和 50 年代の後半から 60 年代にかけて、特殊鋼のブルーム連铸技術が開発されて生産性の向上に寄与しています。

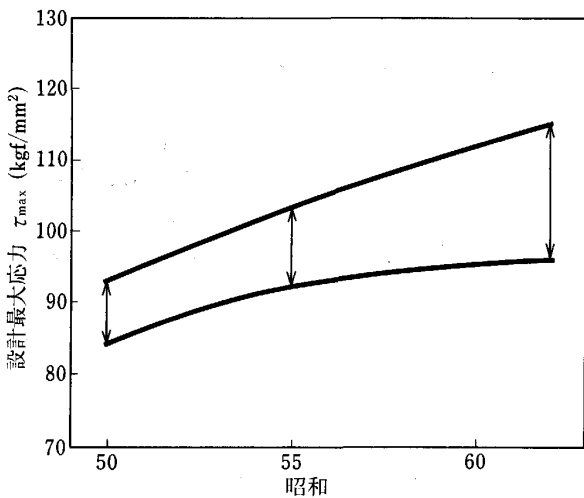
3・2・4 軽量化・高応力化

昭和 40 年代の問題点として、板ばねの軽量化がありました。この問題に対しては、ロングテーパリーフという板の形状、すなわち設計の面からの対応がなされ、大きな効果を挙げています。

昭和 50 年代に入り、オイルショックに関連して自動車の燃費向上が叫ばれ、ばねの軽量化すなわち高応力化が一段と強く要求されました。

高応力化の対応策としては、とくに、疲れ強さとへたりに対する配慮が必要で、後述のような種々の対策が講じられました。そのさい、従来よりも高応力下で使用されることや、材料の高強度化に伴う靱性の低下もあり、靱性の問題を含んで、いわゆる信頼度の確保について従来以上に考慮する必要がありました。このためには脱炭、表面疵、介在物及びオーステナイト結晶粒度 (γ 粒度) などの問題を含んで、総合的な技術の向上が一段と強く要求されてきました。

ここで、ばねの高応力化の例を図 4 の乗用車用懸架コイルばねの設計最大応力の推移によって説明します。昭和 50 年頃の設計最大応力は最大せん断応力 (τ_{max}) で約 90 kgf/mm² でしたが、昭和 55 年頃は約 100 kgf/mm²、昭和 62 年頃は約 110 kgf/mm² と増加の傾向を示しています。ちなみに材料のせん断強さが 10 kgf/mm² だけ増加したと仮定しますと、コイルばねの重量は応力の増加前のものと比較しておよそ 10～15% 軽量化が期待できるといわれています。



出所：ばね技術研究会，最新ばね技術 p.118～119より作成

図 4 乗用車懸架コイルばねの設計最大応力の推移

表 4 耐へたり性の向上対策

項目	対応策
材 料	固溶強化 (高 Si 化) 細粒化 析出強化 (V, Nb などの添加)
熱 処 理	硬さ (低温焼もどし)
ばね加工	塑性ひずみの付与 (ホットセッチング)

出所：ばね技術研究会，最新ばね技術，p.118

3.3 ばね鋼の耐へたり性

3.3.1 材料面からの対策

ばねの高応力化にさいして、検討すべき特性として疲れ強さと耐へたり性があることはすでに述べました。実際には耐へたり性が許容応力を決めていますので、ばね鋼の耐へたり性の向上対策が重要となります。

耐へたり性の向上対策としては表4に示すように、材料の面からは、固溶強化、細粒化及び析出強化などの強化手段が考えられます。固溶強化の点からは、Si含有量を増加させることによるフェライト組織の強化に着目し、ばね鋼の SUP 6 とか SUP 9 に替わってより Si 含有量の多い SUP 7，または SUP 12 へと、耐へたり性の大きい鋼種への変換が行われました。

ここで、耐へたり性に及ぼす Si の影響についてその一例を紹介します。図5は SUP 9A に Si を種々添加してコイルばねを作成し、耐へたり性に及ぼす Si 含有量の影響を示したものです。どの硬さのばねも Si 量が増加するにつれて、残留せん断ひずみ (γ) が減少し、へたりが小さくなっていることが分かります。Si 含有量が 1.5% 付近でへたりが最低値を示していますが、これは鋼種的にみると SUP 12 に相当します。

また降伏強度を高める意味から γ 粒の細粒化が行われました。さらに V, Nb などを添加して、その炭窒化

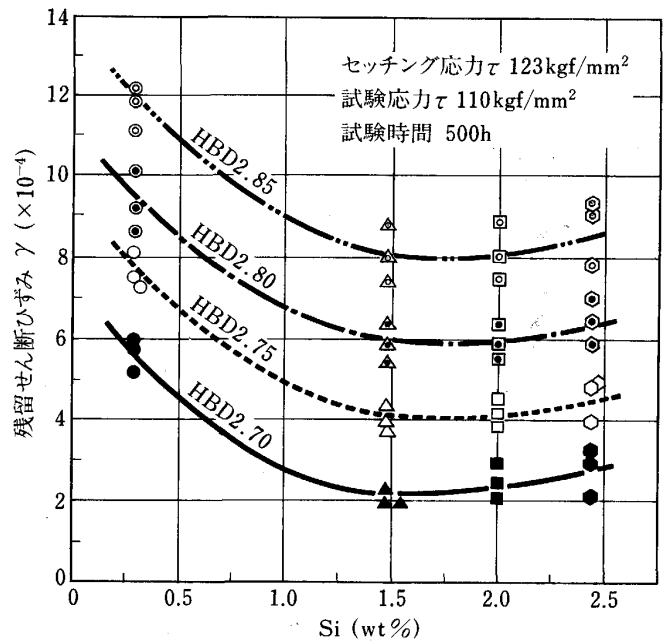


図 5 耐へたり性に及ぼす Si 含有量の影響 (ベース鋼 SUP 9A)

物の析出強化により、耐へたり性を向上させる鋼種も研究開発され、実用化されています。

3.3.2 熱処理面からの対策

熱処理の面からは、硬度を上げることが最も簡単な耐へたり改善策であります。焼もどし温度をより低くして、高硬度化すなわち強度上昇を図ることが考えられます。この場合は、高硬度化によって切欠感受性が高くなるため、靱性の向上が必要となります。

3.3.3 セッチングによる耐へたり性の向上

ばねの加工の面からは、塑性ひずみの付与による耐へたり性の向上が考えられます。ほとんどのばねはその製造の最終工程近くで、そのばねが受けると同方向の過荷重が加えられ、若干の塑性ひずみが付与されます。このことを一般にセッチングと呼び、ばねの降伏強度を高め、耐へたり性を向上させるのに有効な工程であります。このセッチングは通常、常温で行われますが、これを 150～300°C の間の適当な温度で行うことをホットセッチングと呼びます。このホットセッチングは耐へたり性をさらに高める方法であって、乗用車用のコイルばねの製造工程においてインライン化されています。

ばねの高応力化の状況は以上のようなのですが、これと並行して耐久性も年々その保証寿命の延長が要求されていまして、材料の品質に対する要求は極めて厳しいものになっています。

4. ばね鋼の今後の課題

ばねの軽量化のための高応力化と信頼性の向上は、今後とも強く要請されるものと思われます。それらに対応

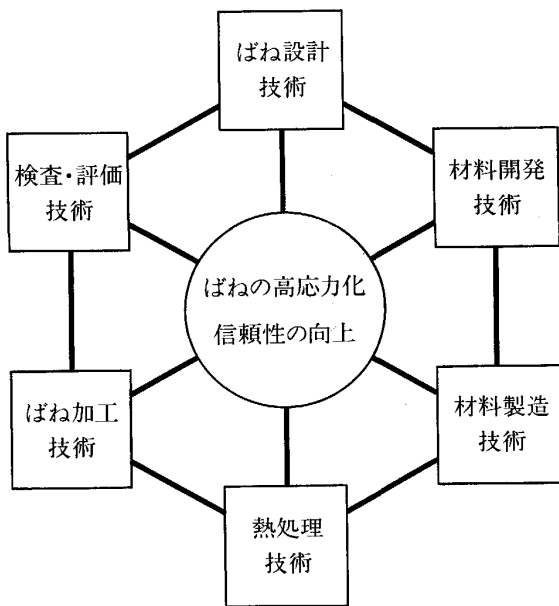


図 6 ばねの高応力化と信頼性の向上対策の模式図

するためには、ばね鋼メーカー及びばねメーカーともに、ハードの面とソフトの面の技術を総合化し、対応していかなければならないと思います。図6にそれらに関する模式図を示しますが、材料の製造、熱処理及びばね加工技術というハードの面と、材料開発、ばね設計及び検査・評価技術というソフトの面のそれぞれ相互に関連し

た問題を解決しなければならないと思います。

ここで、わが国のばね鋼の国際的水準についてはどうかといいますと、これは私見になりますが、現状はかなり高いレベルにあると言ってよいと思います。一例を紹介しますと、北米において、わが国の自動車メーカーの生産が開始され、軌道にのっています。私どもも、ばねを現地で生産し、自動車メーカーに納入してすでに数年になりますが、材料は現地での調達がいまだに難しく、わが国から輸送している状況であります。これはいつにかかって現在のばねの設計応力の水準と信頼性の保証水準の問題であります。

5. む す び

省エネルギーに端を発しましたばねの軽量化、すなわち高応力化と信頼性の向上の要求は、今後とも続くものと思われま。これらの要求に対する新しい材料の開発は、研究開発部門だけではなく、製鋼、鋳造、圧延、精整、検査等鋼材の全工程での対応が必要となります。

ばね鋼の開発には周辺技術を含めて、まだまだ向上の可能性が多く残されている分野がありますので、今後は若い技術者の活躍に大きな期待をかけている所でありま。

たいへんつたないお話を申し上げましたが、ご静聴ありがとうございました。