

(解説)

## 高強度弁ばね用鋼の歴史と今後の展望

### The Past and Future of High-strength Steel for Valve Springs



須田澄恵\*  
Sumie Suda



茨木信彦\*  
Nobuhiko Ibaraki

For reduced fuel composition, the demand for downsizing and weight reduction in automobile engine valve springs is rising. As part of this trend, Kobe Steel has developed a high tensile strength steel for valve springs and greatly improved conventional manufacturing methods for such springs. This report describes present trends in high strength steels for valve springs and the current development status of super high strength steels.

まえがき = CO<sub>2</sub> 排出量削減のため自動車の燃費改善が強く求められている。エンジン内の摩擦によるエネルギーロス(フリクションロス)は熱損失以外の損失の約4割を占め、その中で、動弁系のフリクションロスが15~50%を占めると言われている。そのため、動弁系のフリクションを低減することが燃費向上に有効である。

また、歩行者保護の観点から、衝突時の歩行者頭部保護基準が法制化された。本基準を満たすため、エンジンルーム内に衝撃吸収スペースを確保したいとの要望があり、エンジンの小型化が求められている。

これらの要求に対応するため、エンジン部品である弁ばね(図1)においても小型・高応力設計が指向されてきた。弁ばねは、1個の重さが20~50gの小さな部品であるが、1分間に数千回という繰返し荷重を受け、長期間にわたり高い信頼性が要求される。

このような、弁ばねへの負荷応力の増大に伴い、高疲労強度および高耐へたり性を有する弁ばね用鋼の開発<sup>1)2)</sup>が進められてきた。

また、高強度化のため、表面改質技術の適用が図られてきた。弁ばねの一般的な製造工程を図2に示す。疲労強度を向上させるため、窒化処理、ショットピーニング

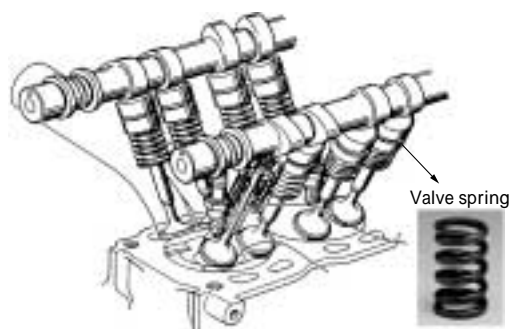


図1 自動車エンジンに組み込まれた弁ばね  
Fig. 1 Valve spring in automobile engine

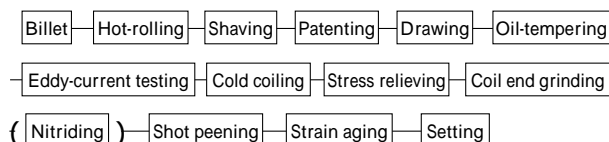


図2 弁ばねの製造工程  
Fig. 2 Manufacturing process of valve spring

処理が適用されている。

本稿では、当社弁ばね用鋼の高強度化の変遷と最近の開発状況について紹介する。

#### 1. 当社弁ばね用鋼の高強度化

##### 1.1 高強度化の歴史

弁ばねに使用されている線材には、高炭素鋼線を伸線加工したピアノ線と、伸線された鋼線を焼入れ焼戻し処理したオイルテンバ線がある。

第二次世界大戦以前はスウェーデン製のピアノ線が使われていた。当社は1930年に高炭素鋼線材の国産化に着手した。1941年には弁ばね用線材開発に成功し、弁ばね用ピアノ線の生産を開始した。当時は主に航空機エンジン用弁ばねに使われていたが、その後、自動車エンジン用弁ばねに使用されるようになった<sup>3)</sup>。1952年には、スウェーデン鋼に匹敵する線材(KPR; Kobe Piano wire Rod)の製造に成功<sup>4)</sup>した。

また、戦後アメリカよりオイルテンバ線が紹介され、1955年より炭素鋼、Cr-V オイルテンバ線が国産化され、自動車エンジン用として徐々に使用されるようになった<sup>5)</sup>。

さらに、1964年ごろより高疲労強度化、耐へたり性向上のため、耐熱性に優れたSi-Cr オイルテンバ線(SAE 9254, JIS SWOSC-V)が使用されるようになってきた。現在では、これが一般的に使用されている。

\* 鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼開発部

表 1 弁ばね用鋼の化学成分

Table 1 Chemical compositions of wire rod for valve spring (mass%)

		C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Steel grade
High Si-Cr-V steel	Super high tensile	0.56 - 0.61	1.80 - 2.20	0.70 - 1.00	0.20 - 0.40	0.85 - 1.05	0.05 - 0.15	KHV10N
Si-Cr-V steel	High tensile	0.60 - 0.65	1.30 - 1.60	0.50 - 0.70	-	0.50 - 0.70	0.08 - 0.18	KHV7
Si-Cr steel	SWOSC-V	0.51 - 0.59	1.20 - 1.60	0.50 - 0.80	-	0.50 - 0.80	-	SAE9254
Cr-V steel	SWOCV-V	0.45 - 0.55	0.15 - 0.35	0.65 - 0.95	-	0.80 - 1.10	0.15 - 0.25	SAE6150
Carbon steel	SWO-V	0.60 - 0.75	0.12 - 0.32	0.60 - 0.90	-	-	-	SAE1070

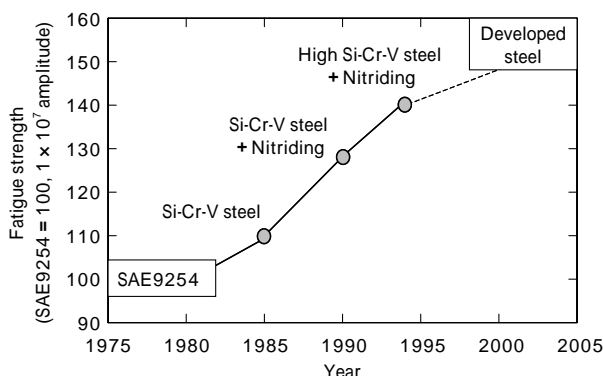


図 3 当社高強度鋼の開発経緯

Fig. 3 Trend of high strength steel for valve springs in Kobe Steel

JIS 鋼および当社で開発した弁ばね用鋼の化学成分を表 1 に、各鋼の開発経緯を図 3 に示す。当社では、高強度化を図るため、オイルテンパ線の疲労強度を低下させる原因となる表面きずと脱炭層の低減技術や、線材表面を全長にわたって皮削りする方法<sup>6)</sup>などを開発してきた。1980 年代前半には介在物の評価技術と介在物清浄化技術<sup>7)</sup>を確立し、実用化を図ってきた。本技術を SAE9254 に適用することにより、弁ばねの疲労強度が向上した。

さらに、高強度化に適した成分の研究を進めて、1980 年代半ばごろ、SAE9254 に対して、引張強度増大のための C 増量、軟化抵抗性向上およびオーステナイト結晶粒の微細化を図るための V 添加を行った Si-Cr-V 鋼を開発し、実用化を図ってきた。SAE9254 のオイルテンパ線の引張強度は約 1 900MPa であるのに対し、Si-Cr-V オイルテンパ線の引張強度は 2 050MPa 級である。本鋼の適用により、SAE9254 比約 1.1 倍の疲労強度を達成した。さらに、窒化処理を適用することにより、約 1.3 倍の疲労強度を達成した。

1990 年代前半には焼戻し軟化抵抗向上のため、Si を 2.0% 添加した高 Si-Cr-V 鋼を開発した。これによりオイルテンパ線の引張強度を 2 200MPa 級に増大させるとともに、窒化処理の適用とショットピーニング技術の改良により、SAE9254 比約 1.4 倍の疲労強度を達成した。

図 4 に当社の高強度化比率を示す。近年、高強度鋼の採用が急速に増えてきており、全世界の約半分を占めるまでになっている。この比率はさらに高まっていくものと予想される。

## 1.2 高強度化手段

疲労強度  $w$  は、欠陥が存在しない場合、

$$w = 1.6HV \dots \dots \dots (1)$$

の関係<sup>8)</sup>がある。

一方、自動車用エンジンの弁ばねは長時間、高温・高応力の厳しい使用環境下にさらされるため、約 10  $\mu$ m 以

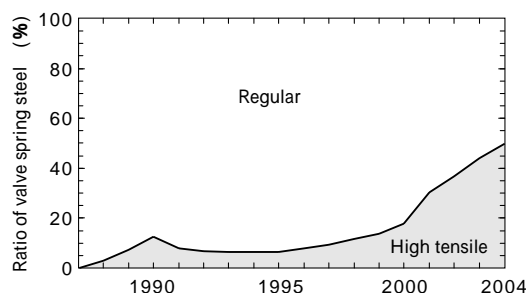


図 4 当社弁ばね用鋼の高強度化比率

Fig. 4 Ratio of valve spring steel in Kobe Steel

上の非金属介在物を起点に疲労破壊する。

村上によると、介在物などの内部欠陥が存在する場合、疲労強度  $w$  は、次式により推定<sup>8)</sup>される。

$$w = \frac{1.56(HV + 120)}{\sqrt{area}^{1/6}} \left( \frac{1 - R}{2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $R = (m - w)(m + w)$

$$= 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

$area$  : 欠陥面積,  $m$  : 平均応力

従って、疲労強度の向上には、硬さの増大と欠陥サイズの低減が必要である。

これまで、オイルテンパ線の強度を増大させて疲労強度を向上させる方法もとられてきたが、引張強度が 1 800MPa を超えると、図 5 に示すように非金属介在物を起点とした折損が起こり、疲労強度がばらつく<sup>1)</sup>ことがわかっている。そのため、素線強度増大による疲労強度向上には限界がある。そこで、窒化処理による表面硬度の増大、ショットピーニング処理による圧縮残留応力の付与といった方法がとられている。圧縮残留応力は平均応力として扱うことができ、実効応力を低減できる。

一方、耐へたり性を向上させるためには、図 6 に示す

Material	Initiation of fracture		Chemical compositions (wt%)				
	Inclusion	Surface	C	Si	Mn	Cr	V
Si-Cr Steel			0.55	1.40	0.70	0.70	-
Cr-V Steel			0.67	0.25	0.75	0.50	0.20
Plain carbon steel	-	-	0.82	0.25	0.45	-	-

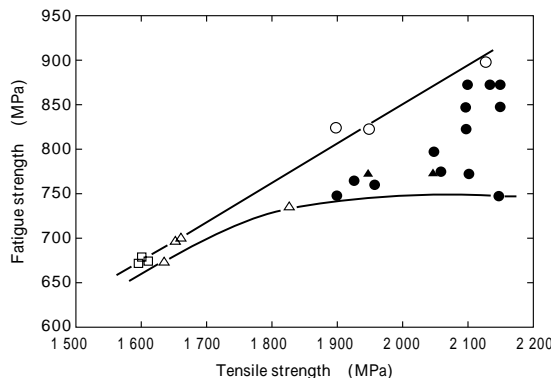


図 5 疲労強度に及ぼす弁ばね用鋼線の引張強度の影響

Fig. 5 Effect of tensile strength of steel wire for valve spring on fatigue strength

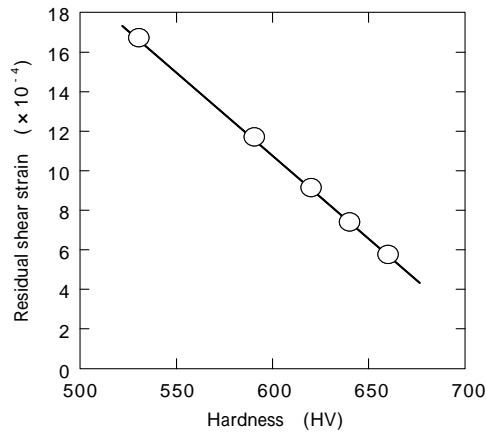


図6 内部硬さと残留せん断歪の関係

Fig. 6 Relationship between core hardness and residual shear strain

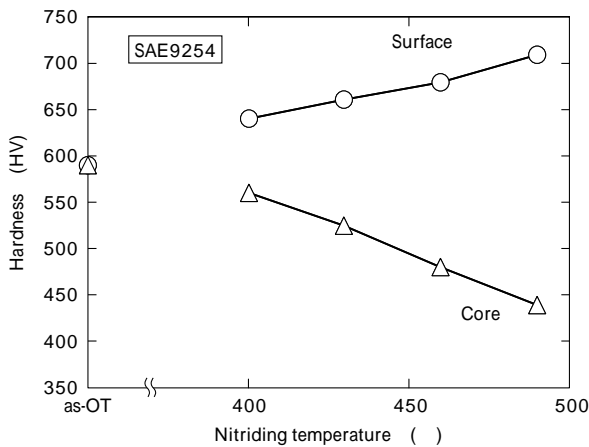


図7 窒化温度と硬さの関係

Fig. 7 Relationship between nitriding temperature and hardness

ようにばね素線の引張強度の増大（内部硬度の増大）が有効である。

以下に各高強度化手段の詳細を示す。

### 1) 窒化処理の適用

図7に窒化温度と表面硬さ、内部硬さの関係を示す。窒化処理は、一般的に400~600°Cで処理され、ばね表面部の硬さを増大させるとともに、圧縮残留応力を高め、疲労強度を飛躍的に向上させることができる。一方で、内部硬さが低下するという問題が生じ、疲労強度と耐へたり性を両立させることは難しい。この問題を解決するためには、オイルテンパ線の焼戻軟化抵抗性向上が非常に有効である。

### 2) ショットピーニング処理の適用

ばねのように高い疲労強度を要求される部品では、ショットピーニングにより圧縮残留応力を高めるとともに、表面硬度を上昇させることも疲労強度の向上に有効である。ショットピーニング技術に関しては、これまで多段ショットピーニングの適用により疲労強度の向上を図ってきた<sup>9)</sup>。近年では、微細粒ショットピーニングにより残留応力を改善する方法<sup>10),11)</sup>、強加工ショットピーニングにより表面をナノ結晶化させ疲労強度を向上させる方法<sup>12)</sup>などが報告されている。高強度化達成のためには、このような表面改質技術との組み合わせも必要である。

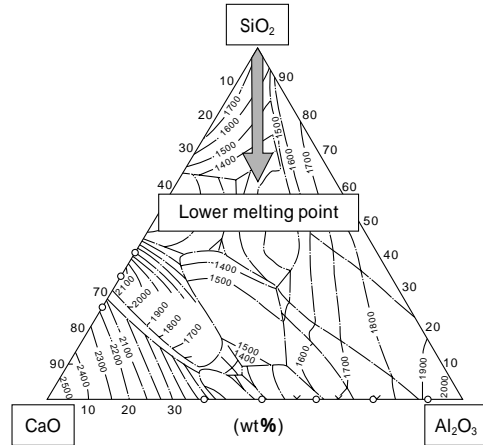


図8 介在物組成の低融点化

Fig. 8 Composition of inclusion

### 3) 介在物の清浄化

弁ばねの折損原因となる非金属介在物としては、 $Al_2O_3$ 、 $MgO-Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 系介在物が挙げられる。これらの非金属介在物の制御として図8に示すように、介在物を高延性領域に組成制御<sup>2)</sup>している。

この領域に組成制御するためには、Si量に応じてスラグ塩基度コントロール、極少 $Al_2O_3$ 量の最適化を行う必要がある。

### 2. 超高強度弁ばね用鋼の特性

当社は、高Si-Cr-V鋼よりもさらに疲労強度を向上させることができる次世代の超高強度弁ばね用鋼を開発した。ここでは本鋼の特性について紹介する。

#### 2.1 成分設計の考え方

窒化特性を向上して結晶粒の微細化を図るため、高Si-Cr-V鋼に対しCr、Vを増量するとともに、Siの増量により焼戻軟化抵抗を増大させ、窒化処理による内部の硬度低下を低減し、耐へたり性の向上を図った。

#### 2.2 オイルテンパ線の特性

表2にオイルテンパ線の機械的性質および結晶粒度を示す。オーステナイト結晶粒度番号14の超微細組織が得られた。このオイルテンパ線を用いて、歪取焼鈍相当の20分の低温焼鈍を行った。焼鈍後の機械的性質を図9に示す。開発鋼は、高Si-Cr-V鋼よりもさらに高い軟化抵抗性を示し、高温でも強度の低下は少なかった。

#### 2.3 ばねの疲労特性

ばねでの疲労強度を図10に示す。開発鋼は、窒化との組み合わせにより、SAE9254に比べ約1.55倍の疲労強度を達成することができる。これにより、ばね重量を約半分にすることが可能である（写真1 開発鋼を用いたばねの一例）。

### 3. 今後の展望

近年の地球環境問題への対応から、「安全で環境負荷

表2 オイルテンパ線の特性  
Table 2 Properties of oil-tempered wire

	Tensile strength (MPa)	Reduction of area (%)	grain size No.
Developed	2 157	46.4	14.0

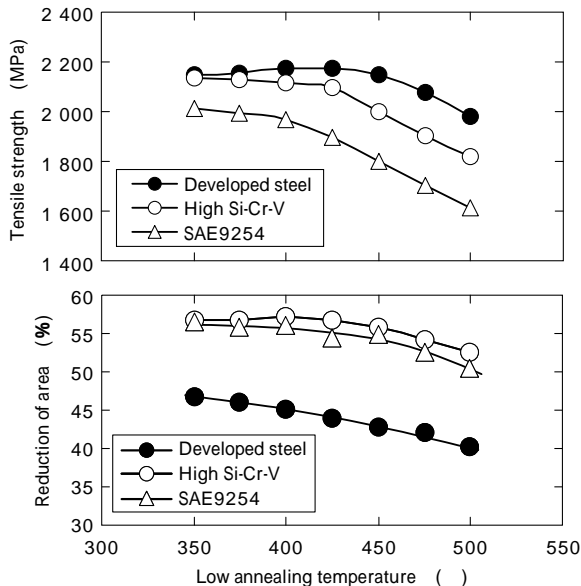


図9 低温焼鈍温度における機械的性質の変化

Fig. 9 Relationship between low annealing temperature and mechanical properties

の少ない車」への要望が高まっている。弁ばねは、燃費改善によるCO<sub>2</sub>排出量の削減およびエンジンの小型化を図るのに効果の高い部品であり、高強度化に対する要望はますます強くなっている。

もともと、日本を中心に弁ばねの高強度化が進んできたが、最近では、欧米での高強度化指向が加速しており、高強度化は急速に進んでいくと考えられる。

今後、さらなる高強度化を達成するためには、ショットピーニング技術の改良、新しい表面改質技術の適用といったばね加工技術の改良も必要である。

また、超高強度弁ばねの適用に当たっては、信頼性向上が必要であり、非金属介在物のいっそうの低減が不可欠である。介在物サイズを最大10～20μm以下の大きさに抑えることのできる製鋼技術が確立できれば、さらに高強度化が進むものと考えられる。

むすび=今後とも、高強度かつ信頼性の高い弁ばね用鋼を提供することを通じて、環境保護の一翼を担うことで社会に貢献していきたい。

最後に、超高強度弁ばね用鋼の開発にあたり多大なご協力を頂いた日本発条(株)、神鋼鋼線工業(株)の関係者の皆様に感謝の意を表します。

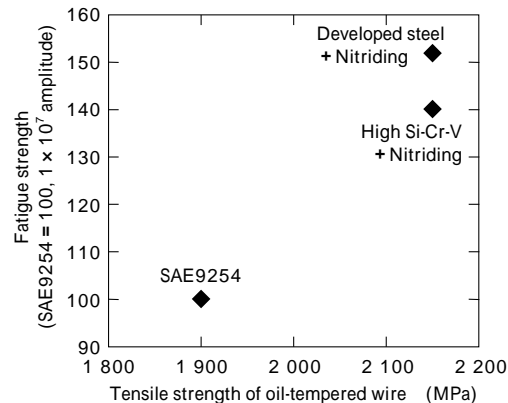
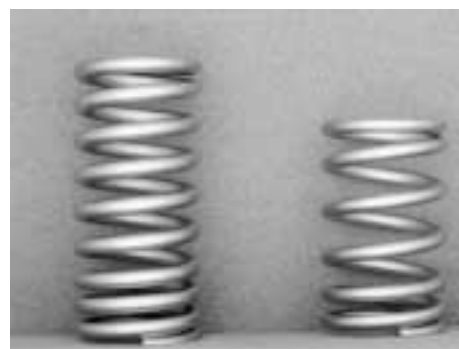


図10 オイルテンバ線強度と疲労強度の関係

Fig.10 Relationship between fatigue strength and tensile strength of oil-tempered wire for valve spring



SAE9254 Developed steel

写真1 弁ばね

Photo 1 Valve spring

#### 参考文献

- 1) 茨木信彦：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000) p.27.
- 2) 吉原直ほか：ばね論文集，No.45 (2000) p.15.
- 3) 日本ばね工業会：日本のばねの歴史 (1984) p.173.
- 4) 裏川康一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.18, No.4 (1968) p.29.
- 5) 線材製品協会編：線材製品読本(改訂第3版)，(1980) p.115.
- 6) 中村芳美ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.24, No.1(1974) p.115.
- 7) T. Ohshiro et al. : Stahl und Eisen, 109 (1989) Nr.21, p.1011.
- 8) 村上敬宜：微小欠陥と介在物の影響 (1993) p.90, 養賢堂.
- 9) 俊野英男ほか：ばね論文集，No.32 (1987) p.31.
- 10) Y. Yamada et al. : SAE paper 2000-01-0791.
- 11) Y. Yamada et al. : SAE paper 2003-01-1312.
- 12) 間野日出男ほか：ばね技術研究会 2003 秋季講演会講演論文集，p.23.