

(解説)

## 超高強度弁ばね用線材の開発

### Developments of Ultra-high Strength Wire Rods for Valve Springs with Excellent Fatigue Life



増本 慶\*  
Kei MASUMOTO



鹿磯正人\*  
Masato KAISO



茨木信彦\*  
Nobuhiko IBARAKI

High stress design has been adopted widely in the design of valve springs to reduce fuel consumption and/or to reduce engine height. Such design requires high-strength steel. However, increasing the tensile strength of a valve spring wire does not necessarily extend fatigue life of the wire unless the size of non-metallic inclusions is reduced to lower the wire's sensitivity to such inclusions. This paper describes the optimum chemical compositions which yield higher fatigue life and sag resistance in valve springs. Also reported are techniques for controlling non-metallic inclusions and the properties of ultra-high strength wire-rods for valve springs with excellent fatigue life.

まえがき = 昨今の世界的な環境問題に対応するため、自動車走行時のCO<sub>2</sub>排出量削減を目的とした燃費改善が強く求められている。自動車の燃費改善には、部品の小型化や軽量化など種々の方策があるが、なかでもエンジンの動弁系のフリクションロス（エネルギーロス）を低減することが非常に有効である。なぜなら、エンジン内の摩擦によるエネルギーロスは熱損失以外の損失の約4割であり、そのうちの動弁系のフリクションロスは15～50%を占めるためである。

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ことを受け、エンジンルーム内に衝撃吸収スペースを確保するためのエンジン高さ低減が求められている。

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分間に数千回の繰返し荷重を受け、長期間にわたる高い信頼性が要求される。

こうした弁ばねの負荷増大に伴い、高疲労強度および高耐へたり性を有する弁ばね用線材の開発<sup>1),2)</sup>が進めら

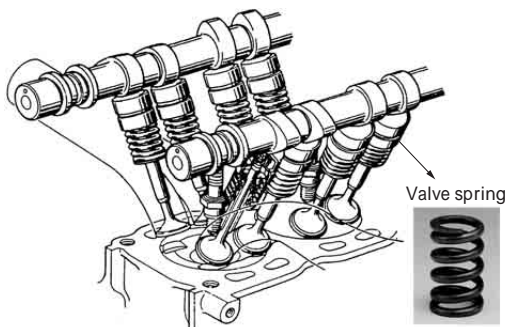


図1 自動車エンジンに組込まれた弁ばね  
Fig. 1 Valve spring in automobile engine

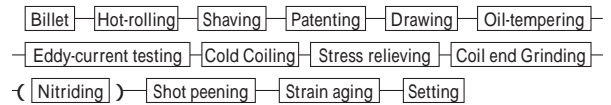


図2 弁ばねの製造工程  
Fig. 2 Manufacturing process of valve spring

れてきた。同時に、弁ばねの高強度化のため、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、窒化処理やショットピーニング処理が適用されている。

このように高強度線材と最適なばね製造工程の開発を続けてきたことが、当社の弁ばね用線材の世界シェアが長年にわたり約50%を維持していることに貢献している。

本稿では、当社弁ばね用線材の高強度化の変遷と世界最高強度を実現できる超高強度弁ばね用線材 KHV12N の特性について紹介する。

#### 1. 当社弁ばね用鋼の高強度化の推移

##### 1.1 弁ばね用鋼の高強度化の歴史

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。当社が高炭素鋼線材の生産に着手したのは1930年であり、1941年には弁ばね用線材の開発に成功して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）の開発に成功<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たことから、当社も1955年より炭素鋼とCr-V オイルテン

\* 鉄鋼部門 神戸製鉄所 糸鋼開発部

バ線の生産を開始し、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と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(SAE9254, 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。

JIS鋼および当社で開発した弁ばね用線材の化学成分を表1に、各線材の開発経緯を図3に示す。当社では、オイルテンバ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きた。1980年代半ばごろ、SAE9254に対して、C量増加による引張強さ増大、ならびにV添加によるオーステナイト結晶粒の微細化と軟化抵抗性向上を図ったKHV7を開発し、実用化した。SAE9254のオイルテンバ線の引張強度は約1,900MPaであるのに対し、KHV7のオイルテンバ線の引張強度は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KHV10Nを開発した。これによりオイルテンバ線の引張強度を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。

さらにKHV10Nよりも疲労強度や耐へたり性を向上することを目的とし、Cr, Vを増量添加して結晶粒の超微細化を達成したKHV12Nを開発し、2006年に実用化した。

図4に当社弁ばね用鋼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、出荷量の約半分を占めるまでになっている。今後、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

疲労限度 $w$ は、欠陥が存在しない場合

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

の関係がある<sup>8)</sup>。

一方、自動車用エンジンの弁ばねは、高温・高応力の厳しい使用環境下に長時間さらされるため、約10 $\mu$ m以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等の内部欠陥が存在する場合、疲労限度 $w$ は次式により推定される<sup>8)</sup>。

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

ここに、 $R = (m - w) / (m + w)$

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

area: 欠陥面積

m: 平均応力

したがって、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、オイルテンバ線で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、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<sup>9)</sup>。

表1 弁ばね用鋼の化学成分  
Table 1 Chemical compositions of wire rod for valve spring (mass%)

Steel grade		C	Si	Mn	Ni	Cr	V
KHV12N	Ultra-high tensile	0.60	2.15	0.45	0.20	1.75	0.27
KHV10N	Super-high tensile	0.58	2.00	0.85	0.30	0.95	0.10
KHV7	High tensile	0.62	1.45	0.60	-	0.60	0.12
SAE9254	SWOSC-V	0.55	1.40	0.65	-	0.65	-
SAE6150	SWOSV-V	0.50	0.25	0.80	-	0.95	0.20
SAE1070	SWO-V	0.70	0.25	0.80	-	-	-

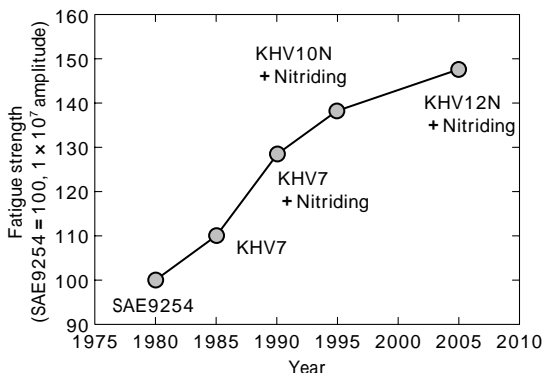


図3 当社高強度鋼の開発経緯

Fig. 3 Trend of high strength steels for valve spring developed by Kobe steel.

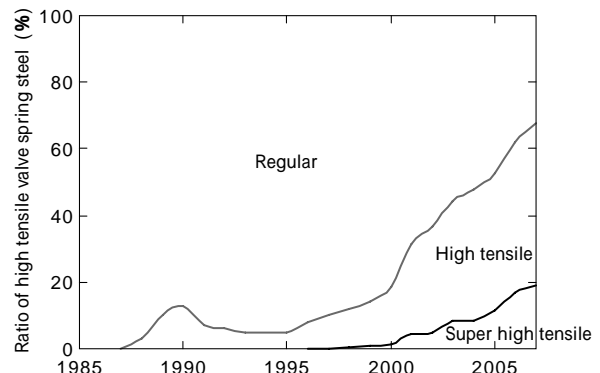


図4 当社弁ばね用鋼の高強度化比率

Fig. 4 Ratio of high tensile valve spring steel developed by Kobe steel.

以下に各高強度化手段の詳細を示す。

### 1) 窒化処理の適用

窒化処理は一般的に400~600℃で行われ、ばね表層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、オイルテンパ線の焼戻軟化抵抗性が非常に重要である。

### 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>10)</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>11), 12)</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>13)</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合せも必要である。

### 3) 介在物制御技術の適用

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6に示すように介在物を低融点に制御<sup>2)</sup>している。

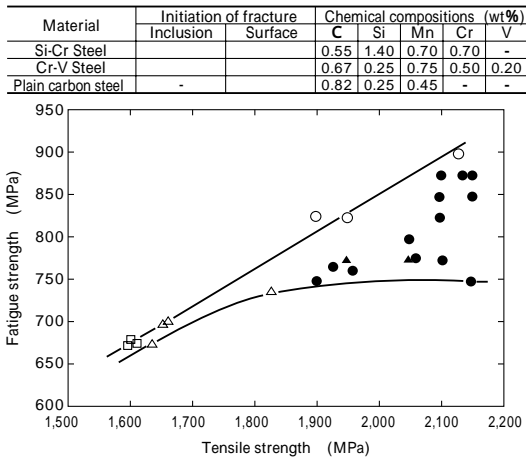


図5 疲労強度におよぼすばね用鋼線の引張強度の影響

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

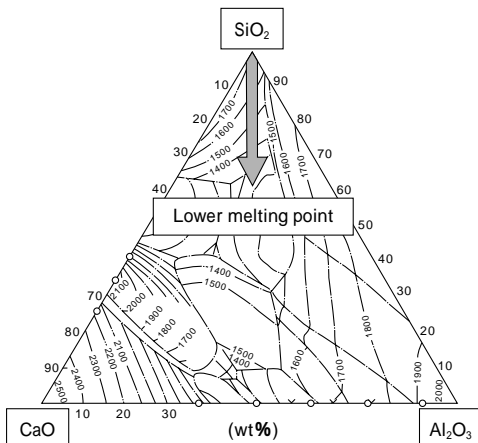


図6 介在物組成の低融点化<sup>9)</sup>

Fig. 6 Composition of inclusion<sup>9)</sup>

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や極少Al量の最適化を行う必要がある。

## 2. 超高強度弁ばね用線材の特性

当社は、世界最高の疲労強度を有する超高強度弁ばね用線材 KHV12N を開発し、2006年に実用化した。ここでは KHV12N を用いて試作したばねの特性について紹介する。

### 2.1 成分設計の考え方

窒化特性の向上や結晶粒の微細化を図るため、KHV10N に対して Cr や V を増量した。また、Si の増量によって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。KHV12N では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、ひずみ取焼鈍相当の20分の低温焼鈍を行った。焼鈍後の機械的性質を図7に示す。KHV12N は、高強度弁ばね用線材 KHV10N 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

ばねでの疲労強度とへたり特性を図8に示す。KHV12N は窒化との組合せにより、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(図9、

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.
KHV12N	2157	46.4	14.0
KHV10N	2155	52.4	12.0

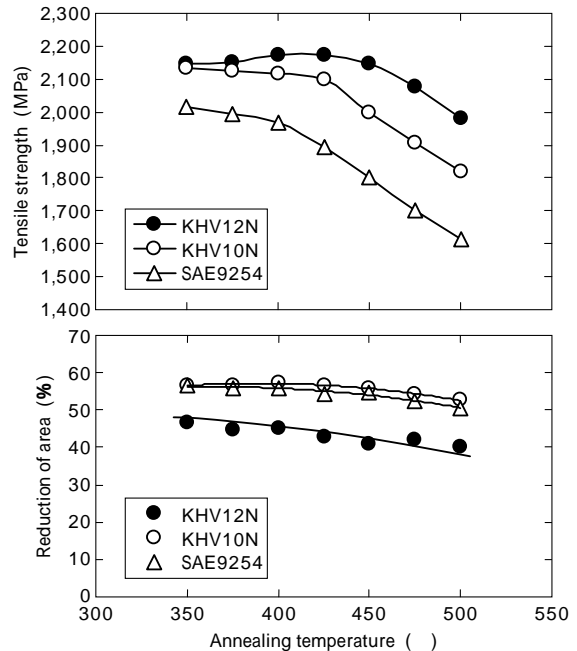


図7 低温焼鈍温度における機械的性質の変化

Fig. 7 Relationship between annealing temperature and mechanical properties



開発鋼を用いたばねの一例)

ばねでのへたり特性を図10に示す。KHV12NはKHV10Nと同一強度でもさらにへたり特性が高い。KHV12Nのへたりは、SAE9254に比べて約60%低減、KHV10Nに比べても約20%低減することができる。これは、結晶粒の微細化によるものと考えられる。図11に結晶粒径とCr添加量の関係、図12にKHV12NとKHV10Nの結晶粒を示す。KHV12NではCrを増量添加しているため、炭化物の熱安定性が向上し、結晶粒粗大化防止に効果のある炭化物を確保できた。さらに、Vを増量添加しているためV系炭化物が増加し、結晶粒度が14番という超微細化を達成できた。その結果、へたり特性が向上したと考えられる。

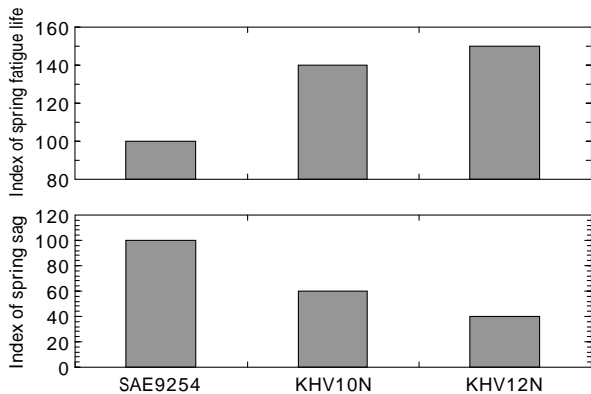


図8 超高強度弁ばねの疲労強度とへたり

Fig. 8 Fatigue life and sag index of high-tensile valve spring

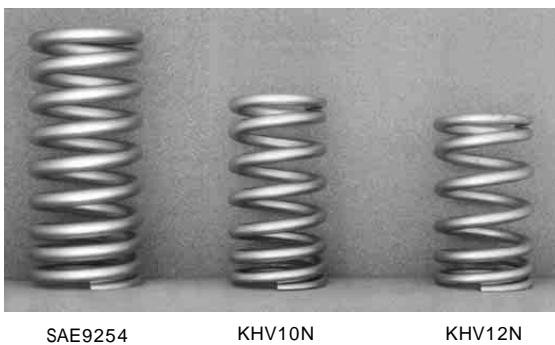


図9 超高強度弁ばねの形状比較

Fig. 9 Comparison of Valve spring height

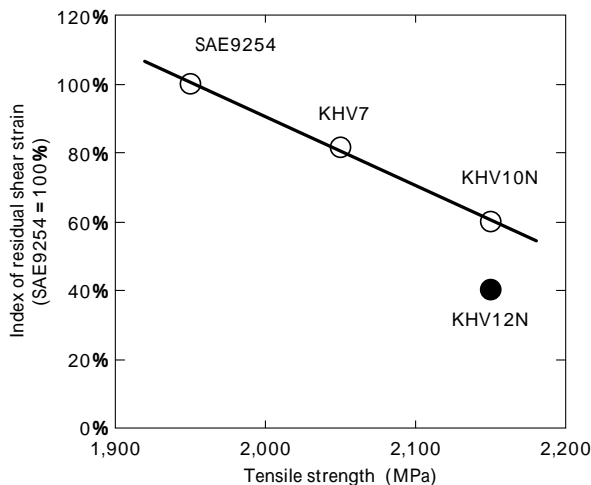


図10 オイルテンバ線強度とへたりの関係

Fig.10 Sag resistance of valve spring with a function of tensile strength of oil-tempered wire

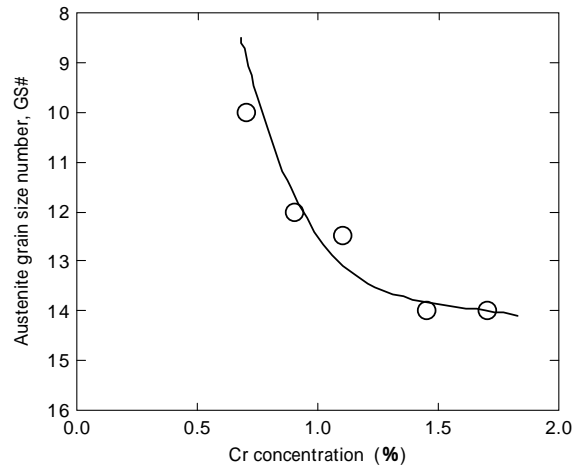


図11 結晶粒径とCr添加量の関係

Fig.11 Relationship between Austenite grain size and Cr concentration

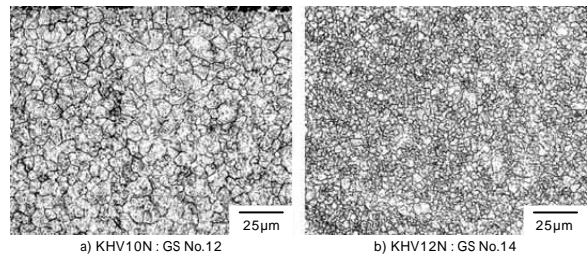


図12 高強度弁ばねの結晶粒度

Fig.12 Austenite grain size of high tensile valve spring

むすび=自動車が開発されて1世紀が過ぎた。この間、少しでも早く走りたいとの要求を満たすため、高性能なエンジンが開発されてきた。一方、環境問題に対する意識の高まりから燃費のよいエンジンが開発されてきた。これらの要求を満たすため、当社は信頼性が高く、高応力で使用できる高強度弁ばね用線材を他社に先駆け開発し、市場に提供してきた。2015年を過ぎるとエンジンとモータを併用するハイブリット車の生産台数が急速に増加すると言われている。当社の超高強度弁ばね用線材を含めた高強度弁ばね用線材は、ハイブリット車用エンジンの小型化、あるいは燃費改善にも有効であり、今後も自動車産業の発展に貢献できると考えられる。

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.170.
- 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) 須田澄恵ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.2(2005) p.22.
- 10) 俊野英男ほか：ばね論文集，No.32 (1987) p.31.
- 11) Y. Yamada et al. : SAE paper 2000-01-0791.
- 12) Y. Yamada et al. : SAE paper 2003-01-1312.
- 13) 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.