

(解説)

# 高強度弁ばね用鋼の開発の歴史

## History of Development of Wire Rods for Valve Springs



吉原 直\*1

Nao YOSHIHARA

To reduce fuel consumption, the weight of automotive valve springs needs to be decreased. Kobe steel has developed high strength steel for valve spring to meet this requirement. Furthermore by continuously developing technology for the control of non-metallic inclusions i.e., internal defects, high strength valve spring steels with good robust quality has been provided. This paper describes the development history of wire rods for valve spring with high fatigue strength.

まえがき=弁ばね(図1)は、内燃機関の動弁機構において吸排気弁をカムの揚程曲線どおりに運動させながら弁をシートに密着させて圧縮もれを防ぐ役割がある。また、動弁系部品の摩擦損失を増加させないための適度な張力が必要となる。近年の地球環境問題における自動車のCO<sub>2</sub>排出規制を受け、低燃費を目的とするカムとの追従性、動弁系自体の慣性重量低減、さらにはエンジンの小型化を図るための弁ばねの軽量・コンパクト化傾向が強い。軽量・コンパクト化によってばね素線応力は高くなるうえに、1分間に数千回という繰返し荷重を受けることから、長期間の耐久性が求められる。さらに、経年劣化によってばね長が縮む、へたりと呼ばれる現象があり、高応力下での高い耐へたり性も要求される。弁ばね用鋼線は、1970年代後半に1,700MPa程度の抗張力を有する高炭素鋼の硬引き線から1,900MPa級のオイルテンパ線が使用されるようになり、現在では2,100~2,200MPa級のオイルテンパ線が実用化されている<sup>1),2)</sup>。さらには耐久性を高めるために表面の窒化処理が採用されている(図2)。

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材について紹介する。

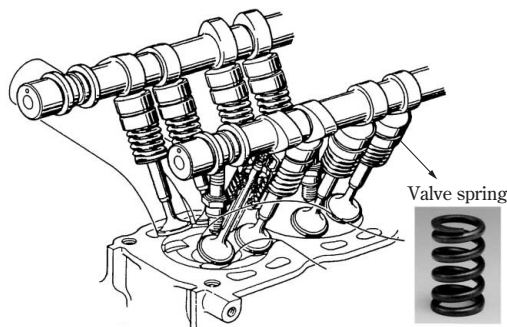


図1 自動車エンジンに組込まれた弁ばね  
Fig. 1 Valve spring in automobile engine

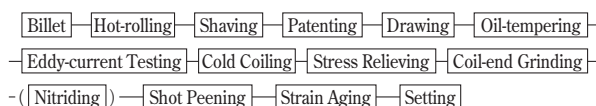


図2 弁ばねの製造工程

Fig. 2 Manufacturing process of valve spring

### 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パ線がある。

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)の開発に成功した<sup>4)</sup>。

また、戦後アメリカよりオイルテンパ線が紹介されたことから、当社も1955年より炭素鋼とCr-Vオイルテンパ線の生産を開始し、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オイルテンパ線(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。

SAE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、オイルテンパ線の疲労強度を低下させる原因となる表面きずや脱炭層の低減技術、線材表面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

\*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

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、弁ばねの疲労強度を向上させることができた。

さらに、高強度化に適した成分の研究も進めてきた。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のオイルテンパ線の引張強度は約1,900MPaであるのに対し、KHV7の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比で約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比で約1.4倍の疲労強度を達成した。

これに続いて、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する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、当社の出荷量の約6割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

一般に、疲労限度 $\sigma_w$ とビッカース硬さHVとの間には、欠陥が存在しない場合、

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

の関係<sup>8)</sup>がある。ただし、単位は $\sigma_w$ :MPa、HV:kgf/mm<sup>2</sup>

である。

一方、自動車用エンジンの弁ばねは、高温・高応力という厳しい環境下で長時間使用されるため、約10 $\mu$ m以上の非金属介在物が存在したとき、それを起点に疲労破壊する。

村上によると、介在物をはじめとする内部欠陥が存在する場合の疲労限度 $\sigma_w$ は次式によって推定される<sup>8)</sup>。

$$\sigma_w = \frac{1.56(HV+120)}{(area)^{1/2}} \cdot \left[ \frac{(1-R)}{2} \right]^\alpha \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $R = (\sigma_m - \sigma_a) / (\sigma_m + \sigma_a)$

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

area: 欠陥面積 [ $\mu$ m<sup>2</sup>]、 $\sigma_m$ : 平均応力 [MPa]

$\sigma_a$ : 応力振幅 [MPa]

ただし、単位は $\sigma_w$ :MPa、HV:kgf/mm<sup>2</sup>である。

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、オイルテンパ線での強度を増大させて疲労強度を向上させる方法も採られてきたが、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れ、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採られている。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>。

以下に高強度化に向けた各種処理・技術を概説する。

### 1.2.1 窒化処理の適用

窒化処理は一般的に400～600℃で行われる。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

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 | —    | —    | —    |

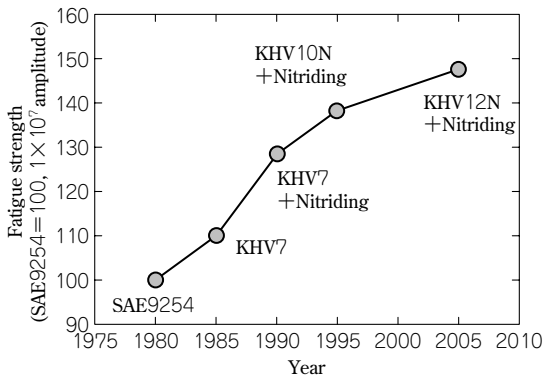


図3 当社高強度鋼の開発経緯

Fig. 3 Trend of high strength steel grades for valve spring in KOBE STEEL

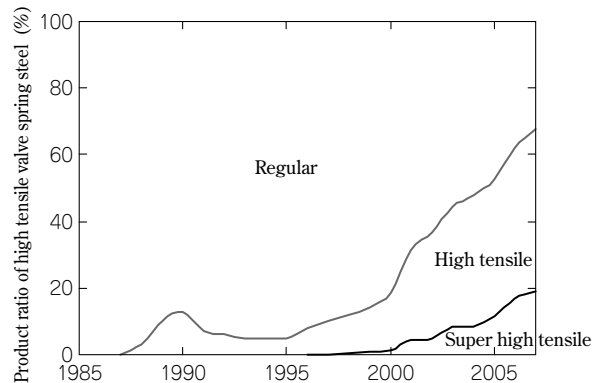


図4 当社弁ばね用鋼の高強度化比率

Fig. 4 Product ratio of valve spring steel grades in KOBE STEEL

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。

### 1.2.2 ショットピーニング処理の適用

弁ばねのように高い疲労強度を要求される部品では、表面の圧縮残留応力を高めるとともに、硬度を上昇させることによって疲労強度を向上させるショットピーニングが有効である。ショットピーニング技術に対してはこれまで、多段ショットピーニングの適用によって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て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み合わせも必要である。

### 1.2.3 介在物制御技術の適用

弁ばねの折損原因となる非金属介在物として、SiO<sub>2</sub>系介在物が挙げられる。これらの非金属介在物に対しては、図6に示したような低融点化制御<sup>2)</sup>を行っている。

この領域に組成制御するためには、二次精錬工程におけるスラグ塩基度などのコントロール精度の向上を図る必要がある。

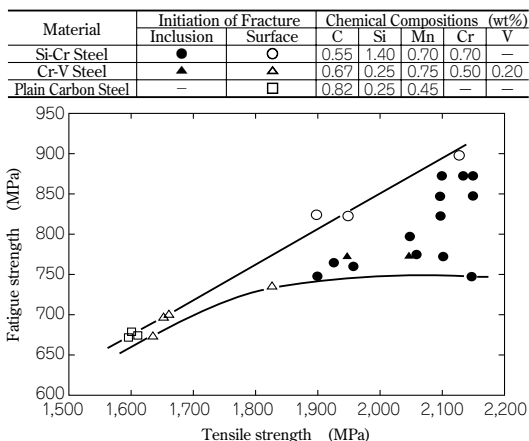


図5 疲労強度に及ぼす弁ばね用鋼線の引張強度の影響

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

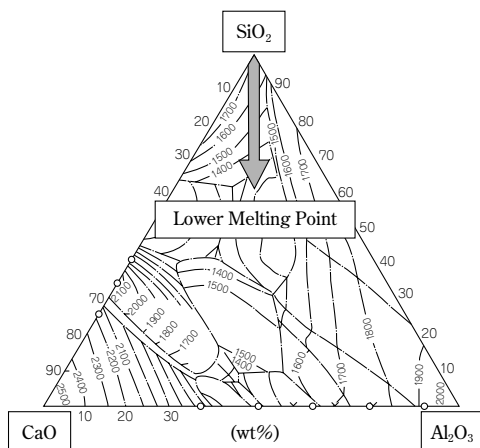


図6 介在物組成の低融点化<sup>9)</sup>

Fig. 6 Composition of inclusion

## 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。本章ではKHV12Nの特性を紹介する。

### 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、先に開発したKHV10Nに対してCrやVを増量した。さらに、Siの増量によって焼戻し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、ひずみ取り焼鈍相当の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

ばねの疲労寿命とへたり量を図8に示す。KHV12Nは窒化との組み合わせにより、SAE9254に比べて約1.6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にKHV12Nを用いたばねの一例を示す。

ばねの耐へたり性を図10に示す。KHV12Nはもっと

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 [%] | $\gamma$ grain size No. |
|--------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| KHV12N | 2,157                  | 46.4                  | 14.0                    |
| KHV10N | 2,155                  | 52.4                  | 12.0                    |

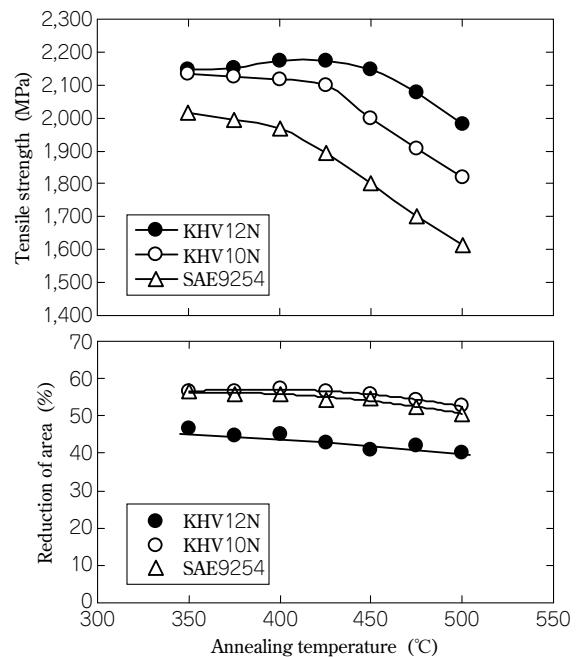


図7 低温焼鈍温度における機械的性質の変化

Fig. 7 Relationship between annealing temperature and mechanical properties

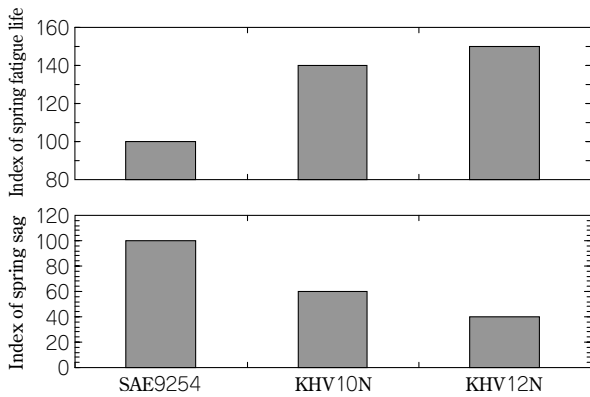


図8 超高強度弁ばねの疲労寿命とへたり量  
Fig. 8 Fatigue life and sag index of high-tensile valve spring

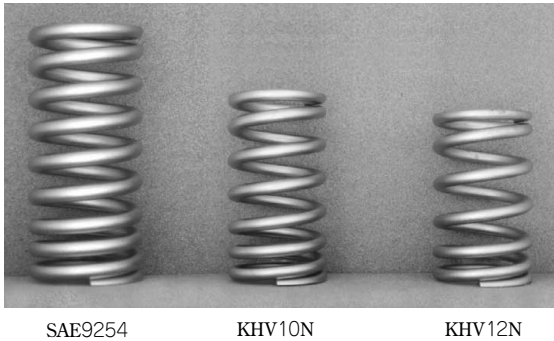


図9 超高強度弁ばねの形状比較  
Fig. 9 Comparison of valve spring height

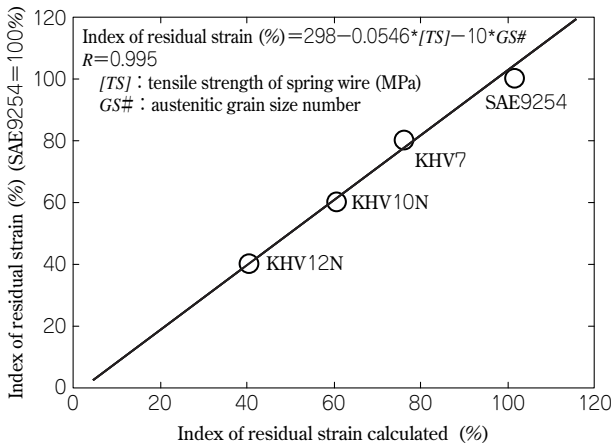


図10 ばね素線引張強さとオーステナイト結晶粒度とへたりの関係  
Fig.10 Sag resistance with a function of tensile strength and austenitic grain size number

も優れた耐へたり性を示し、オーステナイト結晶粒度とばね素線の引張強さとの高い相関がみられた。KHV12Nのへたり量は、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Cr添加量と結晶粒径の関係を、図12にKHV12NとKHV10Nの結晶粒境界エッチング写真を示す。KHV12Nでは、Crを増量添加しているため、炭化物の熱安定性を向上し、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、耐へたり特性が向上したと考えられる。

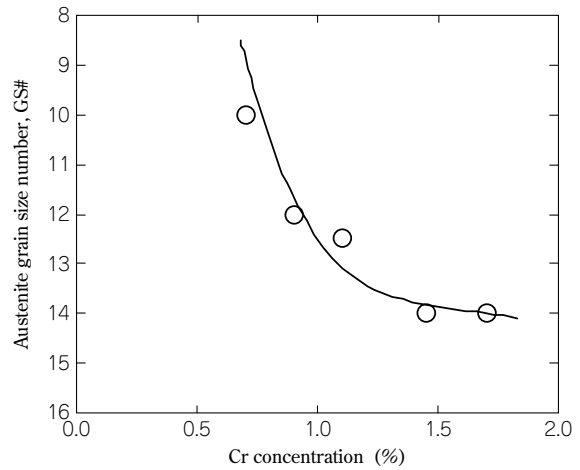


図11 結晶粒径とCr添加量の関係  
Fig.11 Relationship between austenitic grain size number and Cr content

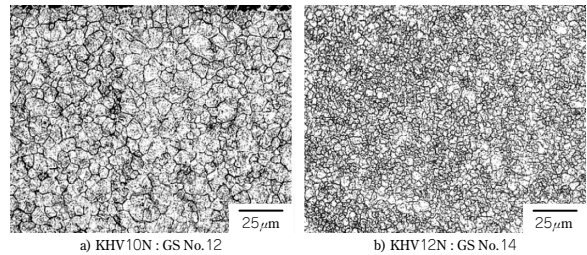


図12 高強度弁ばねの結晶粒  
Fig.12 Etched austenitic grain of high tensile valve spring

むすび＝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いわれている。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やガソリンエンジンの燃費改善に有効であり、今後も自動車産業の発展と地球環境問題への取組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，養賢堂，(1993)，p.90.
- 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.