

(解説)

弁ばね用線材の発展

茨木信彦

鉄鋼部門・神戸製鉄所・糸鋼技術部

Developments in Automotive Valve Spring Wire Rods

Nobuhiko Ibaraki

To increase engine power and reduce fuel consumption, automotive valve spring weight reduction is of great importance. Automotive manufacturers have requested wire rod mills to develop high-fatigue, high-strength, super-clean valve spring wire rods, without surface defects, in order to greatly reduce valve spring weight. This paper describes the development history of high-fatigue, high-strength valve spring wire rods. Special attention is given to technology related to the control of non-metallic inclusions and surface quality assurance.

まえがき = 弁ばねは、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ることを目的に使用される。自動車のエンジンに使用される弁ばね(第1図)は、一個の重さが30~50gと小さな部品であるが、高い繰り返し荷重を受け、長期間の信頼性が要求される。エンジンの高速回転化、低燃費化のため、弁ばねの小型・高応力設計が指向されてきた。これに対応するため高疲労強度あるいは高耐へたり性を有する弁ばね用鋼の開発が進められてきた。

弁ばね用線材の歴史を振り返る場合、まず、弁ばね用素線の高強度化について触れる必要がある。また、弁ばね用素線の高強度化にともない、非金属介在物あるいは表面きず、脱炭などの改善が必要であった。第2図に弁ばねの製造工程を示す。表面きず、脱炭の除去の観点から、皮削り工程、ワイヤでのきず探傷工程など、一般のワイヤ製造にはない工程も採用されている。本稿ではこれらの製造工程の変遷についても触れることにする。

1. 弁ばね用鋼線の種類と変遷

弁ばねに使用されている鋼の化学成分および引張強さを第1表に示す。弁ばね用鋼線は高炭素鋼線材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とに大別できる。第3図に弁ばね用鋼線の変遷を示すが¹⁾、歴史的にみると1940年以前はスウェーデン製のピアノ線がもちいられていた。1940年以降ピアノ線の国産化がはかられ、航空機用弁ばね用鋼線として国産ピアノ線が実用化された。その後、自動車用弁ばね材料として使用されるようになった。戦後、欧米よりオイルテンバ線の製造技術が紹介されると、徐々に自動車用弁ばねとして採用されるようになった。現在でもピアノ線は弁ばね用としてもちいられている

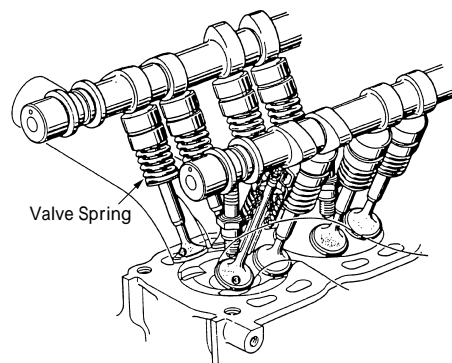
第1表 弁ばね用鋼線の化学成分および引張強さ

Table 1 Chemical compositions and tensile strengths of wires for valve spring

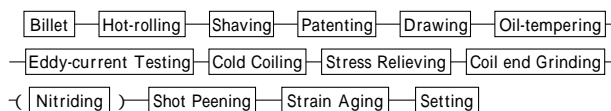
	JIS Standard	Chemical Compositions mass%				Tensile Strength MPa	Remark
		C	Si	Mn	Cr		
Piano Wire	SWP-V	0.82	0.25	0.50	—	1 600	1080
Oil-tempered Wire	SWO-V	0.68	0.25	0.75	—	1 700	A230
	SWOCV-V	0.50	0.25	0.80	1.00	1 700	SAE5160
	SWOSC-V	0.55	1.45	0.70	0.70	1 900	SAE9254

が、その使用比率はかなり低い。ピアノ線からオイルテンバ線へ移行した理由として、オイルテンバ線はピアノ線にくらべ、高い疲労強度がえられること、耐へたり性に優れること、が挙げられる。ピアノ線(JIS SWP-V)では、ワイヤ強度が約1 600MPaで使用されるのに対し、SAE9254 Si-Cr 鋼オイルテンバ線(JIS SWOSC-V)では引張強さは約1 900MPaである。

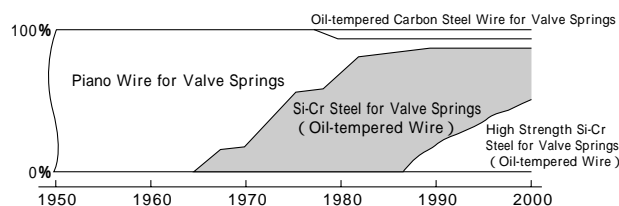
このSAE9254は疲労強度が高く、またピアノ線にくらべSi含有量が高いため耐熱性に優れ、耐へたり性も改善することができる。近年、高強度化に適した化学成分の研究が進められ、SAE9254よりC含有量高め、Vを添加した鋼をもちいた2050MPa級の高強度オイルテ



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



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



第3図 国内向け弁ばね用鋼線の生産比率の変遷
Fig. 3 The change of production ratio in steel wires for valve spring for domestic use

ンパ線が実用化されている。国内での高強度弁ばねの使用比率は約40%であるが、自動車メーカからさらなるエンジンの高出力化あるいは低燃費化が要望されており、今後高強度弁ばねの使用比率はさらに高くなることが予想される。

弁ばね用鋼の高強度化には製鋼方法の改良が重要な役割を果たしている。以下に製鋼方法の変遷を示す²⁾。

1960年代 電炉・脱ガス・造塊法

1970年代 転炉・取鍋精錬(AI脱酸法)・脱ガス・造塊法

1980年代 転炉・取鍋精錬(Si脱酸法)・脱ガス・連続鋳造法

1970年代に入ると鋼の溶製に転炉が採用されるようになった。これによりスクラップから混入する不純物元素が低減され鋼の純度が向上した。また、取鍋精錬法の採用により介在物制御が開始された。1980年代に入ると弁ばねの信頼性向上の観点から、非金属介在物の微細化、清浄化が要望され、Si脱酸法による取鍋精錬法と連続鋳造法の採用により非金属介在物の微細化が推進された。1990年代に入ると高強度弁ばねが採用されるようになった。取鍋精錬法においても組成制御にもちいるフラックスや溶鋼処理時間の最適化が実施され、鋼の清浄度が飛躍的に向上した。

2. 弁ばねの疲労特性の向上

弁ばねの疲労強度を向上させるため、ばね素線の高強度化、疲労強度を低下させる非金属介在物や表面きずなどの欠陥の低減、表層部を強化するためのショットピーニングや窒化処理などの表面改質技術の採用などがはかられてきた。

2.1 ばね素線の高強度化

一般的に、疲労限度と引張強さの間には比例関係があり、疲労強度を向上させる方策としてばね素線の引張強さを高める方策がとられてきた。第4図に清浄度の異なる線材をもちい、引張強さを変化させ鋼線の疲労限を調査した結果を示す³⁾。ワイヤの引張強さが1800MPa以下では破壊起点は表面となり、疲労限は引張強さにほぼ比例して向上している。しかし、1800MPa以上では非金属介在物を起点とする疲労破壊が支配的となり、疲労強度がばらつき引張強さ依存性が失われている。この高強度領域での疲労強度低下は、疲労試験での負荷応力の増加に加え、非金属介在物や表面きずなどの欠陥に対する感受性が高まるためと考えられる。

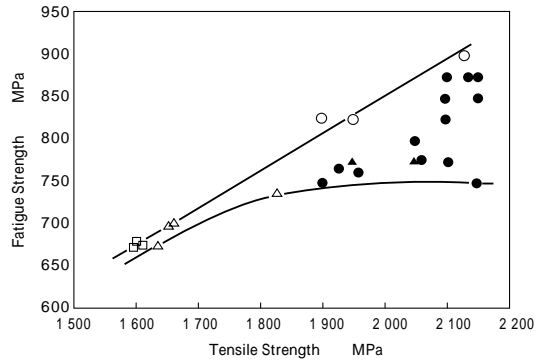
第5図は疲労破壊の起点介在物の大きさとその介在物の表面からの深さから求めた介在物まわりの応力拡大係数範囲を疲労寿命との関係で整理して示したものである⁴⁾。供試材としては引張強さ1900MPaのSAE9254 Si-Cr鋼オイルテンパ線をもちい、応力拡大係数範囲 K の計算は式(1)および式(2)により算出した。

$$K = 0.5 \sqrt{\frac{a}{d}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

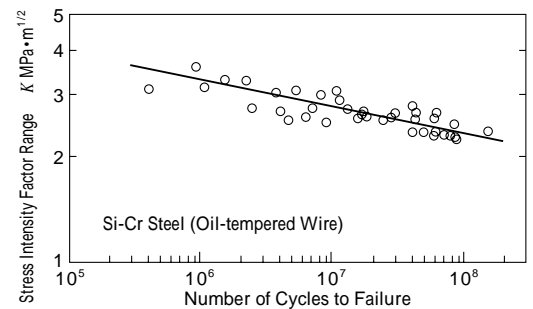
$$= (1 - D/d) \sqrt{\frac{a}{d}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 a : 介在物の大きさ、 d : 試験片の直径、 D :

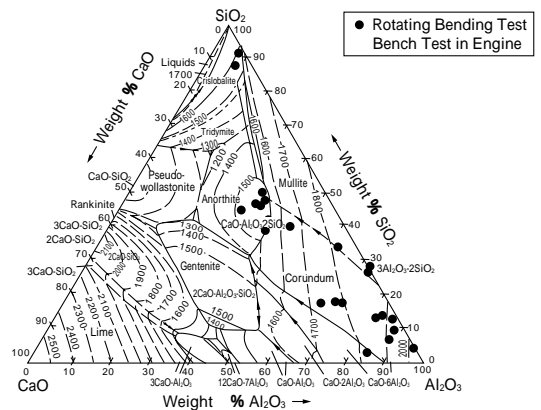
Material	Initiation of Fracture		Chemical Compositions					wt%
	Inclusion	Surface	C	Si	Mn	Cr	V	
Si-Cr Steel			0.55	1.40	0.70	0.70	-	
Cr-V Steel			0.67	0.25	0.75	0.50	0.20	
Plain Carbon Steel	-		0.82	0.25	0.45	-	-	



第4図 疲労強度に及ぼす弁ばね用鋼線の引張強さの影響
Fig. 4 Effect of tensile strength of steel wires for valve spring on fatigue strength



第5図 介在物まわりの応力拡大係数範囲と疲労寿命の関係
Fig. 5 Relationship between stress intensity factor range at inclusion and fatigue life



第6図 疲労破面に出現する非金属介在物の化学組成
Fig. 6 Chemical compositions of non-metallic inclusion appeared on fatigue fracture surface

介在物の表面から深さ、 \circ : 試験応力である。

応力拡大係数範囲と疲労寿命には相関が認められ、一定の応力下では非金属介在物の大きさと疲労寿命との相関が認められる。この観点から非金属介在物の微細化、清浄化が図られてきた。また、高強度化に比例した疲労強度の向上を達成するため、さらに非金属介在物を微細化することが必要であることがわかる。

2.2 非金属介在物の低減法

自動車用エンジンの弁ばねは長時間厳しい使用環境下(高応力、高温)にさらされるため、鋼中の約10~50 μ mの非金属介在物を起点に疲労破壊する。第6図に弁ばねの疲労破面に出現する非金属介在物組成を示す⁵⁾。アルミナ(Al_2O_3)、スピネル(MnO, MgO , または CaO) Al_2O_3 、シリカ(SiO_2)などの硬質で融点が高い非金属介在物が

有害である。これらの非金属介在物を低減するため取鍋精錬プロセスが採用されている。現在使用されている取鍋精錬を利用した非金属介在物の低減法には大きくわけて低酸素法、Si脱酸による非金属介在物組成制御法がある。

2.2.1 低酸素法

低酸素法は鋼中の酸素量を極力低減し非金属介在物の絶対量を低減させる方法である。鋼中の酸素は凝固中にCと反応してCOガスとなりきずの原因となる。これを防止するため、Al、Ca、Si、Mnなどの脱酸剤などで酸素を固定することにより製造される。脱酸剤としてAl、Ca、Siがもちいられるが、弁ばね用の低酸素鋼ではAlによる脱酸が採用されている。また、脱酸後スラグ、耐火物および大気からの酸素供給を断つとともに、脱ガス処理により非金属介在物を低減することがおこなわれてきた。

Cr-V鋼（弁ばね用オイルテンバ線、JIS SWOCV-Vの素材）ではAl脱酸による低酸素法が適用されている。Al脱酸による低酸素法では硬質の Al_2O_3 系の非金属介在物が残留することと Al_2O_3 粒子が凝集しクラスタ状に鋼中に存在することなどの問題があり、比較的低強度の弁ばね用鋼に採用されてきた。

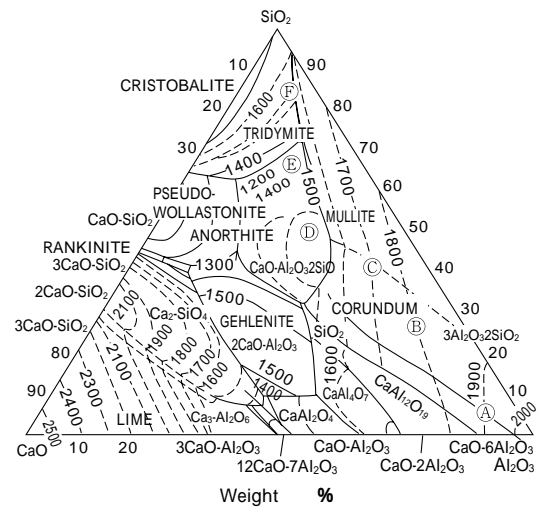
2.2.2 Si脱酸による非金属介在物組成制御法

Si脱酸による非金属介在物組成制御法は非金属介在物の組成を SiO_2 を主成分とする多元系低融点酸化物とし、熱間圧延時あるいは伸線加工時に非金属介在物を伸延または細かく破碎し無害化する方法である。第7図a)のCaO- Al_2O_3 - SiO_2 の3元状態図上でA~Fの異なる非金属介在物組成をもつ6種類のSi-Cr鋼線材からオイルテンバ線を試作し、回転曲げ疲れ試験を実施した。その結果を第7図b)に示す。非金属介在物組成の融点が1300にあるEでは非金属介在物起点による疲労破壊は発生していない。CaO- Al_2O_3 - SiO_2 系複合介在物において、非金属介在物を熱間で延性に制御するには Al_2O_3 含有率を20%前後に制御するのがよいといわれている。鋼中の酸素量は前述した低酸素法に比べて高く、通常20ppm前後は必要とされている⁵⁾。

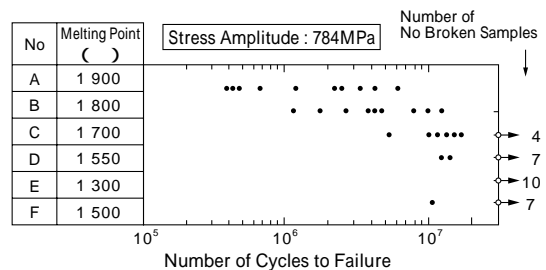
極低酸素法（Al: 0.033%, O: 0.0007%）およびSi脱酸（Al: 0.001%, O: 0.0019%）による非金属介在物組成制御法によって製造された弁ばね用Si-Cr鋼の疲労試験結果では、後者のほうが介在物分布、疲労寿命ともに優れていると報告されており³⁾⁶⁾、Si脱酸による非金属介在物組成制御法が弁ばね用線材の非金属介在物制御法の主流となっている。

いっぽう、組成制御法の改善とともに非金属介在物の適切な評価技術の確立も重要となってきている。現在国内で規格化されている主な評価方法として検鏡法による面積率法（JIS）と、標準図との比較法（ASTM, VDEh）がある。また、非金属介在物を大きさ別に計数し、それぞれに重み係数を掛けて集計するペナルティポイント法などがある。

また、温硝酸で鋼を溶解し残渣を抽出分離する方法、エレクトロン・ビームにより溶解する方法も試みられているが、これらの評価方法は Al_2O_3 などの高融点介在物



a) Chemical Compositions of Non-metallic Inclusion in Billet



b) Fatigue Test Results

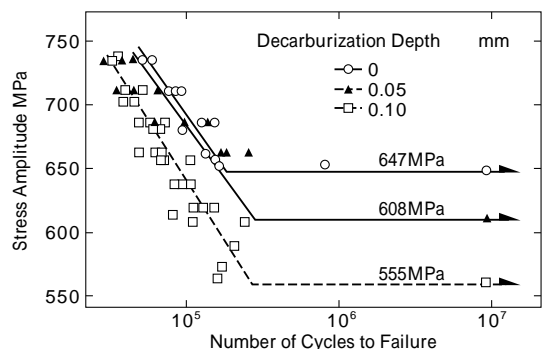
第7図 鋼片介在物の組成と疲労寿命の関係

Fig. 7 Relationship between chemical compositions of non-metallic inclusion in billet and fatigue life

には有効であるが、シリケート系などの低融点介在物の評価には好ましくない。さらに清浄度の高い弁ばね用鋼がもてられており、より精度の高い介在物の評価技術の確立が望まれている。

2.3 表面きずおよび脱炭の低減

弁ばねの表面きずと脱炭は疲労特性を劣化させる典型的な欠陥として知られており、これらを防止、除去する努力がなされてきた。第8図にSi-Cr鋼オイルテンバ線の全脱炭深さと疲労強度との関係を示す。脱炭が生じると疲労強度が極端に低下することがわかる⁴⁾。熱間圧延線材の表面きずや脱炭を除去するため、線材全長にわたって皮削りする技術が適用されてきた⁷⁾。切削深さは熱間圧延線材の表面きずおよび脱炭レベルから0.1~0.15 mm程度に設定されている。その後のオイルテンバ線の製造工程においてもすりきず対策によるきずの発生防止や加熱工程での雰囲気調整による脱炭防止など工夫がな



第8図 疲労強度に及ぼす脱炭の影響

Fig. 8 Influence of decarburization of steel wires on fatigue strength

されている。また、最終工程では表面きず検査がおこなわれている。表面きずの探傷方法として、磁気探傷法、渦流探傷法および超音波探傷法があるが、冷間渦流探傷器の利用が普及し、きず深さとしては0.04~0.06mm以上のきず探傷が可能となっている。これらの努力により弁ばねの信頼性は飛躍的に向上した。

2.4 表面改質技術の適用

弁ばねのように高い疲労強度が要求されるばねでは、ばね表層部に高い圧縮残留応力の付与と表面硬度上昇を目的としてショットピーニングが施されている。ショットピーニングに使用されるショット粒の硬さ、大きさ、投射速度などのショットピーニング条件と残留応力および疲労寿命との関係に関する研究がなされているが、ダブルショットピーニングに代表される多段ショットピーニングの実施により高疲労寿命化が達成されてきた⁸⁾。

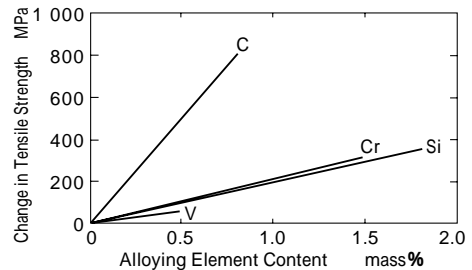
弁ばねの疲労強度を向上するため窒化処理も採用されるようになった。窒化処理は、ばね表層部のみを効率的に硬化させるとともに、圧縮残留応力も高くなり、飛躍的に疲労寿命を向上させることができる。窒化処理は拡散熱処理であるため400~500の高温で処理される。しかし、弁ばねは疲労強度だけでなく、耐へたり性も重要な要求であるため、内部硬さを確保する必要がある。この問題を解決するためSi, Crの増量, Vの添加により焼戻し軟化抵抗を向上させた鋼が開発されている。

3. 超高強度弁ばねの特性

弁ばねの高強度化の動向については冒頭に述べたので、ここではもっとも高疲労特性がえられる弁ばね用鋼KHV10Nについて紹介する。第9図に引張強さの増加に及ぼす合金元素の影響を示す⁹⁾。C, Si, Cr, Vの添加が高強度化に有効であることがわかる。KHV10Nの化学成分を第2表に示すが、従来鋼SAE9254にくらべC, Si, Crを増量し, Vが添加されている。これによりオイルテンパ線では韌延性を劣化させることなく100MPa以上高い引張強さがえられている。また, Si, Crの増量およびVの添加はワイヤの焼戻軟化抵抗を向上させ¹⁰⁾, 窒化処理時のワイヤ内部の硬度低下も防止でき、弁ばねの重要特性の一つである耐へたり性を損なうことなく高疲労強度が達成できる。ばねでの疲労強度を第10図に示す。KHV10Nは窒化処理と組み合わせることでSAE9254にくらべ約40%疲労強度が向上でき、高性能スポーツ車を始め一般市販車用弁ばねとしてその採用が拡大している。

4. 今後の展望

今後も弁ばねの耐久性・信頼性の向上が要望されてくるであろう。このため、ばね素線のさらなる高強度化が指向され、それに適した化学成分の検討が必要となる。その前提としては非金属介在物の一層の低減とそれを評価するための精度の高い評価方法の確立が必要となる。またショットピーニングや窒化処理などの表層部の強化技術や欠陥感受性の低減技術の一層の進歩が望まれる。

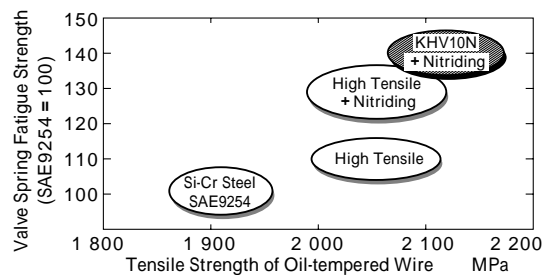


第9図 焼戻し材の強度増加に及ぼす合金元素の影響 (450 × 1時間焼戻し)

Fig. 9 Relationship between alloying element contents and change in tensile strength (450 for 1 hour tempering)

第2表 鋼の化学成分

	Chemical compositions of steel grade							mass%
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Remark	
KHV10N	0.59	1.95	0.85	0.90	0.10	0.25	Developed Steel	
9254	0.55	1.45	0.70	0.70	—	—	Conventional Steel	



第10図 弁ばね用 OT 線の引張強さと弁ばねの疲労強度の関係

Fig. 10 Fatigue strength of valve spring as a function of tensile strength of oil-tempered wire for valve spring

むすび=自動車が開発され1世紀が過ぎた。この間少しでも速く走りたいとの人間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。いっぽう、環境問題に対する意識の高まりから燃費の良いエンジン開発も求められている。当社としてはさらに高強度化でき、かつ信頼性の高い弁ばね用鋼を提供することで、今後も自動車産業の発展に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 富永治朗: ばね技術研究会, ばねの耐久に関するシンポジウム前刷集(1989), p.17.
- 2) 金澤憲二ほか: ばね論文集, No.37(1995) p.97.
- 3) T. Ohshiro et al.: Stahl und Eisen, 109(1989)Nr.21, p.1011.
- 4) N. Ibaraki et al.: 第1回ばね国際会議前刷集, DSSD(1990), p.1.
- 5) 奥島 敢: 第126/127回西山記念技術講座(1988) p.147.
- 6) 山田凱朗ほか: ばね論文集, No.31(1986) p.1.
- 7) 川上平次郎ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.4(1991) p.71.
- 8) 俊野英男ほか: ばね論文集, No.32(1987) p.31.
- 9) 隠岐保博ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.1(2000) p.33.
- 10) 隠岐保博ほか: ばね論文集, No.34(1989) p.26.