

自動車エンジン弁ばね用“高疲労強度”鋼線の歴史と今後

History and Future of High-Fatigue-Strength Steel Wire for Automotive Engine Valve Springs

泉田 寛*
Hiromu Izumida

松本 断
Sadamu Matsumoto

村井 照幸
Teruyuki Murai

弁ばねは高い疲労強度と耐熱性を求められる自動車エンジン部品の一つである。近年の自動車軽量化やエンジン小型化の傾向によって、弁ばね用材料であるオイルテンパー線は、より細く、より高強度であることを求められている。約80年前、住友電工がピアノ線の生産を始めて以来、常に新しい材料や弁ばね用鋼線製造技術の開発に努めている。本報告では、これまでの高強度鋼線開発の歴史を振り返ると共に、その開発の方向性について述べる。

Valve springs are one of the automobile engine components that require a very high degree of fatigue strength and heat resistance. With the recent trend toward lighter cars and smaller engines, oil tempered wire used for valve springs needs to be smaller in diameter and higher in strength. About 80 years ago, Sumitomo Electric Industries, Ltd. started the production of piano wire, and has since been working hard to develop new materials and techniques for manufacturing steel wire for valve springs. This paper describes the history of the development of high-strength steel wire and its future.

キーワード：弁ばね、オイルテンパー線、疲労強度向上

1. 緒 言

自動車エンジンの動弁系(図1)とは吸排気弁を駆動させる機構のことを指し、近年厳しくなっている排ガス規制への対応や燃費向上のニーズ、運動性能の向上において重要な役割を果たしている。その中でも弁ばねは動力軸からの回転運動をカムを通して往復運動に変換する為の基幹部品であり、極めて厳しい耐久性と耐熱性(耐へたり性)が要求される部品の一つである。自動車の軽量化、エンジンの省スペース化に伴い、弁ばねに用いられるオイルテンパー線^{*1}は細径化とともに高強度化が要求されている。弁ばねに用いられる鋼線には、SiCr(シリコンクロム)鋼オイルテンパー線が一般的に用いられてきたが、高強度化の要求に応じて、これまでSiCr

鋼からC(炭素)を高めた高C-SiCr鋼、さらにV(バナジウム)を添加したV添加高C-SiCr鋼、そして耐熱性を向上させるため、Siを高めた高Si鋼オイルテンパー線^{(1),(2)}や、窒化性向上を考慮しCrやVを高めた高Cr、V鋼オイルテンパー線⁽³⁾などが開発されてきた。本稿では、これらの弁ばね用高強度鋼線に関する当社開発の歴史と今後の方向性について報告する。

2. 弁ばね用鋼線の高強度化の歴史

当社の弁ばね用材料の開発の歴史は古く、1932年、それまでスウェーデンからの輸入に頼っていた航空機エンジンの弁ばね用ピアノ線^{*2}の国産化より始まっている。戦後、その用途は自動車エンジン用に推移し、生産量増加の一途を辿るが、欧米よりオイルテンパー線の製造技術が紹介されると共に、その主役はピアノ線よりオイルテンパー線へと移行していった。オイルテンパー線はピアノ線に比べ、高強度、高耐熱性、及び高い疲労強度が得られる鋼線である。当社では1954年に日本で最初に熔融鉛浴加熱方式の試作炉を製作し、翌1955年には炭素鋼オイルテンパー線の試作を開始、ばね技術研究会(現日本ばね学会)で発表後、本格的生産・販売を開始した。

その後、1960年代半ばより、より特性に優れたSi-Cr鋼オイルテンパー線(SAE9254, JIS SWOSC-V)が使用されるようになり、1980年代にCを高めた高C-SiCr鋼、さらにVを添加したV添加高C-SiCr鋼などが開発され、現在に至るまで主流となっている。

従来、オイルテンパー線の疲労強度は、内部欠陥(介在

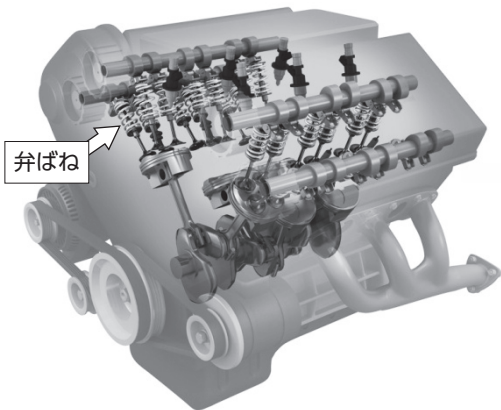


図1 自動車エンジンの動弁系と弁ばね

物^{*3)} サイズと硬さから推定可能⁽⁴⁾とされ、ひたすら介在物サイズの低減と材料の高強度化が行われてきた。然しながら更なる高疲労強度化を目指すとき、単なる高強度化では疲労強度が向上しないという矛盾も見えてきている。

住友電工では1981年に自社溶解材での弁ばね用SiCr鋼オイルテンパー線の製品化に成功して以来、材料設計技術の開発を推し進めてきた。本稿では、材料設計技術を中心に住友電工の高疲労強度鋼線開発の経緯を振り返ると共に、今後の方向性について考察する。

3. 住友電工における高強度鋼線開発

3-1 高Si鋼オイルテンパー線

当社では90年代の半ばより、疲労強度と耐熱性をより高く向上させた、高Si含有型Si-Cr鋼オイルテンパー線“VHS”（以下、VHSと記述）の開発を行った⁽¹⁾。このとき、従来の高強度材料⇨高疲労強度を有するばねという概念からの脱却を行っている。開発コンセプトは2つあり、1つは製品ばねにおける高強度化と高靱性化、もう1つは結晶粒微細化による疲労強度向上である。

図2は鋼線からばねまでの製造工程概略である。製品工程の至るところで熱処理が行われるが、VHSでは特にばね成型後の低温焼なまし時の強度向上を狙い、焼なまし軟化抵抗を向上させるSiを多く添加している。表1にVHSの化学成分を示す。

VHSは従来材（V添加Si-Cr鋼）と比較してSiを約1.5倍に増加し、Vを約2/3倍に低減させた組成となっている。各成分

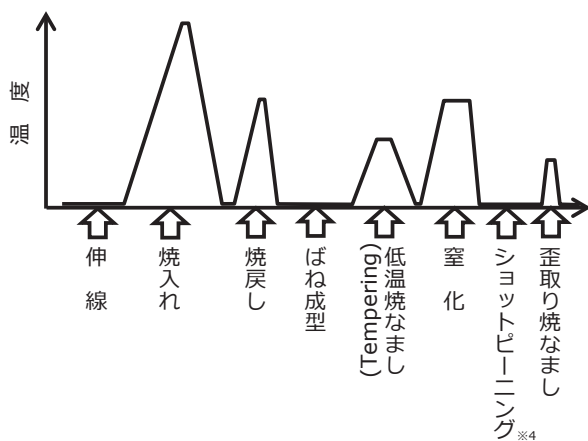


図2 鋼線からばねまでの製造工程概略

表1 高Si含有Si-Cr鋼オイルテンパー線VHSの化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	V
VHS	0.63	1.95	0.77	0.71	0.08
従来材	0.66	1.41	0.75	0.71	0.14

調整の効果を以下に示す。

まずSiを高めた効果についてであるが、Siは焼きなまし軟化抵抗を高める元素であるため、以下のような熱処理高温化の効果が期待できる。(1) 焼戻し温度の高温化：転移が動きやすくなることからマイクロ欠陥が低減し靱性が向上、ばね成形が容易になる。(2) 低温焼なましの高温化：ばね成形で導入された残留応力が十分に低減する。また疲労破壊の起点となるマイクロ欠陥低減により疲労限が向上する。(3) 窒化処理の高温化：窒素が拡散しやすくなるため、窒化層が厚くなり、かつ窒化されない内部においても硬度の低下が小さく、疲労限が向上する。

V添加は、Vが焼戻し時微細に析出し二次硬化現象を示す元素であることから、耐熱性向上効果を有し、且つ比較的高温で安定なV炭化物を形成することで、結晶粒微細化効果を有する。然し、添加量が多すぎるとV炭化物の存在が靱性を低下させるデメリットがある。そこで、上記Si増加による耐熱性向上効果が期待できることから、V量低減を行った。

この2つの元素の増減を考慮し、製造工程の最適化を図ることでVHSの開発が行われた。結晶粒径の微細化は、焼入時の加熱条件を従来よりも低温化短時間化させることで、旧 γ 粒径^{*5}を約10~11 μm (JIS粒度番号^{*5}で10~11) から約3~4 μm (同13) に低減している。

図3は結晶粒径を変化させたVHS及び従来材の低温焼なまし後の引張強さを示している。図中、凡例に記載の数字は粒度番号である。オイルテンパー線の状態では従来材とVHSの引張強さは変わらないが、焼なまし温度が400 $^{\circ}\text{C}$ より高くなると従来鋼は急激に引張強さが低下していることが判る。このとき、VHSの結晶粒径は軟化抵抗にほぼ影響していないことが判る。

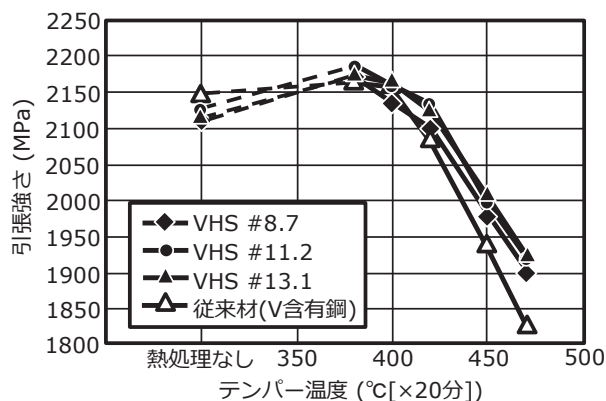


図3 VHS及び従来材の低温焼なまし後の引張強さ

図4は結晶粒径を変化させたVHSと従来材を当社で開発した疵付けシャルピー衝撃試験^{*6}で評価した結果である。試験において折損が発生した最小疵深さを比較すると、従来鋼

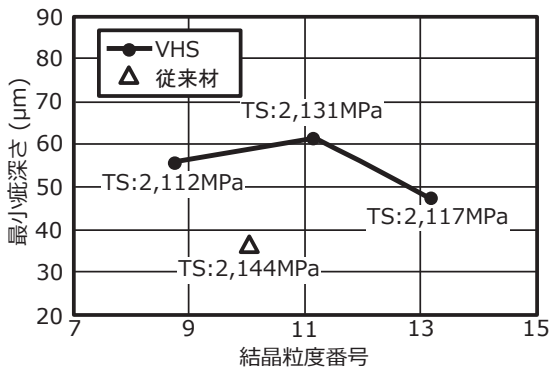


図4 VHSと従来材のシャルピー衝撃試験の結果、折損が発生した最小疵深さ

が深さ40μm以下の疵で折損しているのに対し、VHSは粒度番号に関わらず、それよりも大きな値となっており、従来材よりも高い靱性を有していることが確認できる。

図5に結晶粒径を変化させたVHSと従来材の疲労強度の結果を示す。試験は中村式回転曲げ疲労試験機^{*7}を用い、曲げの繰返し数 1×10^7 回で未折損を以て疲労限とした。VHSは粒度番号が大きくなるにつれて疲労限が高くなっており、従来材と比較しても、同レベルの結晶粒度で約10%程度の疲労限向上が確認できる。また図中のrの値は疲労強度を材料強度で割った値である。図から明らかなようにrの値は結晶粒度番号が増える、即ち結晶粒微細化と共に増加傾向にあり、材料強度以外のパラメータで疲労強度が向上していることが判る。

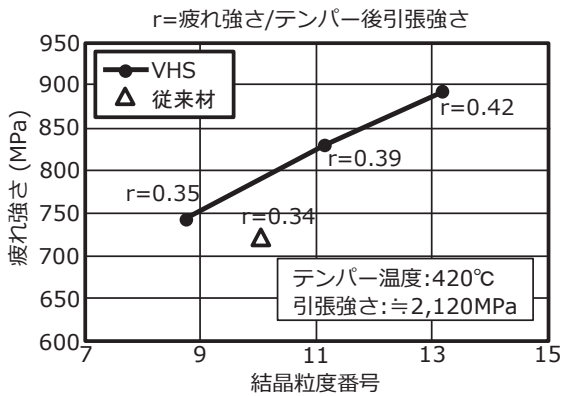


図5 VHSの粒度番号と疲労限の関係

3-2 高Cr, V含有鋼オイルテンパー線

2000年代に入って、VHS以上の高疲労強度鋼線として高Cr, V含有鋼オイルテンパー線VHR (以下、VHRと記述) の開発を行った。そこではVHSの開発コンセプトを推し進め、更にユーザーでの製造工程を意識した開発が行われた。ばねの実用条件では、ばね表面に最も高い荷重応力が加わるた

め、疲労破壊はばね表面近傍で起こることが多い。そのため窒化処理により表面硬度を上げ、さらにショットピーニング(SP)により表面に圧縮残留応力を与え、実質応力を低減させる製造方法が一般的である(図2)。

しかし、一方でばねの内部は窒化時の高い温度によって軟化してしまい疲労破壊の起点となること(図6)、また高強度化することによって靱性が低下し量産性を阻害するという問題がある。そこでVHRの開発においては従来鋼の強度と靱性はそのままに高強度ばねの特性を決定する工程である窒化処理時に、ばね表面の窒化が促進され、内部硬度が低下しない材料を開発することとした。

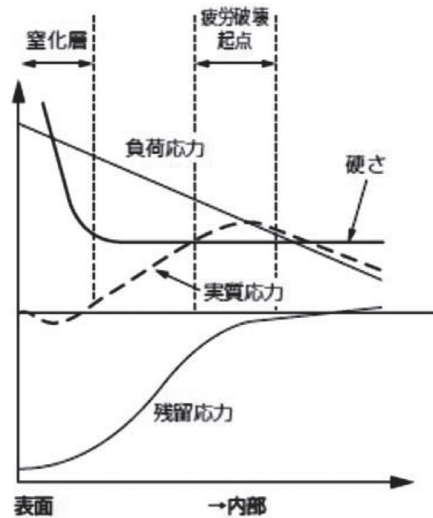


図6 ばねの内部応力状態

材料成分を表2に示す。高Si鋼オイルテンパー線VHSに対して窒化性を向上させるためにCr, Vを増量している。また耐熱性を向上させるために前述のCr, Vに加えSiを増量し、更にCoを添加した。Si, Coは固溶強化により、Cr, Vは析出強化により耐熱性を向上させる。Crは焼戻し工程においてフェライト中よりも炭化物中に分配されやすい性質があり、一方でその拡散速度が小さいために炭化物の粗大化を抑制^{(5), (6)}、更に量産性を考慮し、Mnを減量することで焼入性の低減と靱性(加工性)の確保を行った。

表2 住友電工スチールワイヤーの高強度オイルテンパー線(mass%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Co
VHR	0.64	2.2	0.55	1.2	0.15	0.2
VHS	0.63	1.95	0.77	0.71	0.08	-

*VHSはSi添加による高軟化抵抗材

VHRはVHS開発コンセプトにCr, Vを増量することで窒化性を向上させた。

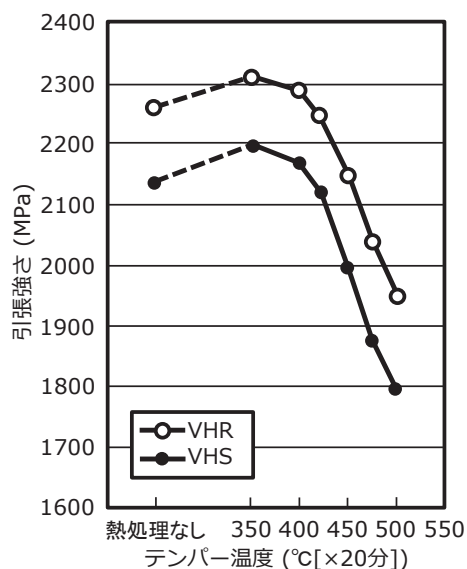


図7 VHR及びVHSの低温焼なまし後の引張強さ

図7はVHR及びVHSの低温焼なまし後の引張強さを示している。

VHRはいずれの温度においてもVHSに比べて高い値を示している。また、VHSの方がテンパー後の引張強さの低下量が大きく、450°C加熱後では両者の差は約150MPaと大きくなっている。

VHR及びVHSのワイヤーに450°C×2時間で窒化処理を行った後の硬度分布を図8に示す。VHRの表層から20μmでの表面硬度は770HVとなりVHSよりも高い値を示した。また疲労破壊起点になりやすい200~300μmでの内部硬度においてもVHSよりも高い値を示した。

窒化処理を想定した熱処理 (450°C×2時間) を施した際のVHRの疲労強度を図9に示す。

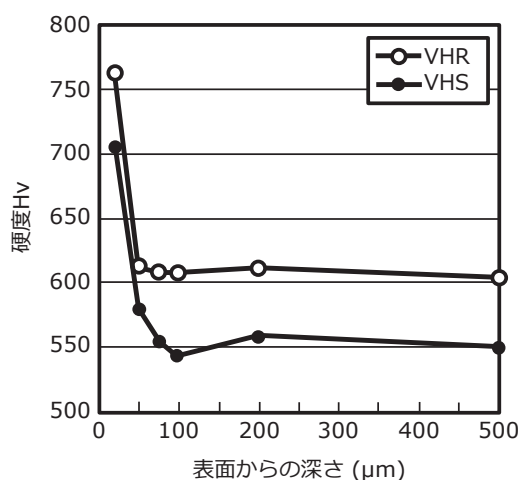


図8 VHR及びVHSの窒化処理後の内部硬度分布

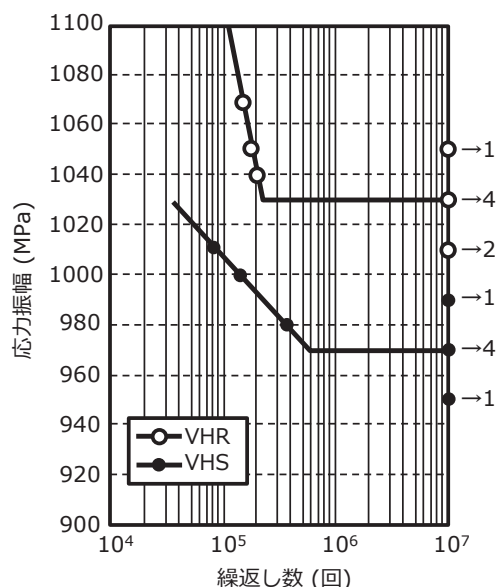


図9 窒化相当熱処理 (450°C×2時間) 後のVHRの疲労強度

供試材は実際に窒化処理を行っておらず、窒化処理時の加熱に因って軟化された材料内部の疲労強度の評価を目的としている。図から明らかなように、軟化された材料内部が破壊起点となる際も、VHRはVHSと比較して高い疲労強度を有していることが確認できる。

4. 更なる高強度材の開発

自動車エンジンの弁ばねは自動車の運動性能や燃費を向上させるための重要な部品であるため、まだまだ高強度化の要望は大きい。

VHR開発時、結晶粒内の炭化物の微細化が観察された(写真1。透過型電子顕微鏡 (TEM) 像。写真中黒点が粒内炭化物)。画像処理によってVHRの炭化物平均サイズは20.8nmであることが確認され、VHSのそれ (同27.8nm)

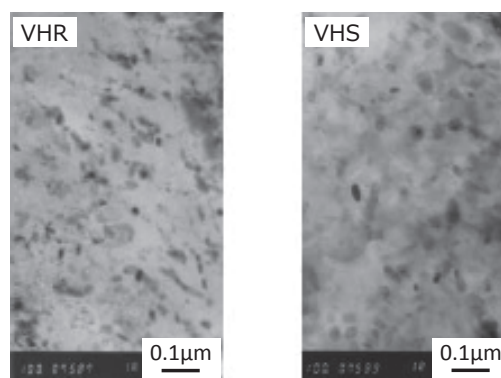


写真1 窒化処理後VHR及びVHSの結晶粒内TEM像

と比較し約2/3に微細化されており、それが高い疲労強度の原因であることが推測されている。これは材料中のCrの拡散律速により炭化物の粗大化が抑制されたためと思われるが、同様の結晶粒内炭化物微細化は急速加熱や急速冷却などの熱処理条件設定によって、炭化物生成元素の拡散速度を制御することで実現可能と考えられる。

当社では、合金設計の他に熱処理や加工技術を組み合わせることで材料設計技術と考えている。1994年には、当時としては画期的な高周波誘導加熱炉と水焼入れ方式を導入した焼入工程ラインを導入し、急速加熱や急速冷却による金属組織微細化技術開発に着手している。今後、更にナノオーダーの組織制御を行うことで、従来の金属材料の状態図では予想できない高強度材料の開発を進めている。

5. 結 言

弁ばね用オイルテンパー線は、他の鉄鋼材料にない高い疲労強度と靱性、耐熱性を兼ね備えた特長を有し、日本の自動車業界において、エンジンのパフォーマンスや燃費向上に大きく貢献してきた。依然、ばね性能向上のニーズは高く、当社の持つ合金設計技術と伸線技術、熱処理技術を組み合わせ、ユーザーでのばね製造工程を考慮した材料をデザインすることで、更なる性能向上や低コスト化を提案していきたい。

用語集

※1 オイルテンパー線

焼入焼戻処理を施すことで、金属組織を焼戻しマルテンサイトとした調質鋼の線。高(疲労)強度、高耐熱性を特長とする。

※2 ピアノ線

長手方向に繊維状の鉄炭化物を多く含むことを特徴とする鋼線。高強度を特長とする。鉄炭化物は Fe_3C であり、鋼の金属組織をオーステナイト化するまで加熱した後、500～600℃付近で恒温変態させることで得られるパーライト組織を伸線加工して製造される。語源はピアノの弦に使うミュージックワイヤーから来ている。

※3 介在物

製鋼時脱酸剤を用い、鋼中酸素と結びつけ、出来た酸化物を除去するが、全て捕りきれず鋼中に僅かに残存したもの。非金属介在物。成分調整による低融点化を行い、圧延時軟質化・無害化を行う等の対策が実施されている。

※4 ショットピーニング

ばね製造工程の1つで、無数の鋼鉄あるいは非鉄金属の小さな球、もしくは鋼線を線径程度に短く切断したものを高速で

噴射し、ばね表面に衝突させることで、塑性変形による、表面の平滑化や加工硬化、圧縮残留応力の付与を図る処理である。疲労強度の向上が得られる。

※5 旧 γ 粒径、粒度番号

近年、材料の結晶粒径微細化が開発のキーワードになりつつある。そこでオイルテンパー線に於いては、焼入れにおける加熱時オーステナイト化した金属組織の結晶粒径(旧 γ 粒径)を議論することが多い。粒度番号とは結晶粒径を規定する指標のことで次のように定義されている(JIS 0551に準拠)。

$$b = 2^{(n+3)}$$

n: 粒度番号、b: 材料断面1mm²あたりに存在する粒数

※6 疵付けシャルピー衝撃試験

ばね用鋼線は一般に引張強さが高くなるとばね成形時に小さな傷でもそれを起点に折損しやすくなる傾向がある。このため、材料の疵感受性を評価するために当社独自の評価方法として疵付けシャルピー衝撃試験を行っている。疵感受性は切削工具によって鋼線に着けた疵の後側をシャルピー試験機のハンマーで叩き、折損の発生した最小疵深さを求めることで判定している。歪速度(供試材に衝突する際のハンマーの速度)は、ばね成形時の歪速度にできるだけ近い値になるように振り上げ角度を調整した。

※7 中村式回転曲げ疲労試験

実際のばねは、低温焼なまし、もしくは窒化後に使用される。このため、鋼線の疲労試験もできるだけこれに近い状態での特性を把握するため、ばね加工後の低温焼なましを想定した熱処理(420℃×20分)や窒化想定熱処理(430℃×3時間)、そして表面粗さの影響を除去する目的でショットピーニングを選択的に鋼線に施し、試験を実施している。

参考文献

- (1) 河部望、泉田寛、村井照幸、山尾憲人、松本断、山口浩司、藤本佐代志、SEIテクニカルレビュー第159号(2001) p.90
- (2) H. Izumida, Wire Journal International, Vol.36 (April 2003)
- (3) 藤野善郎、塩飽孝至、山尾憲人、河部望、村井照幸、SEIテクニカルレビュー第169号(2006) p.68
- (4) 村上敬宜、「微小欠陥と介在物の影響」、養賢堂(1993) p.90
- (5) A. Hultgren and K. Kuo, Mem. Sci. Rev. Met., 50 (1953) p.847
- (6) T. Sakuma, N. Watanabe and T. Nishizawa, Trans. JIM, 21 (1980) p.159

執 筆 者

泉田 寛* : アドバンストマテリアル研究所
メタル材料研究部 グループ長



松本 断 : 住友電工スチールワイヤー(株)
精密ワイヤー技術部 部長



村井 照幸 : 監査部 部長付



*主執筆者