

(論文)

# 高強度冷間巻き懸架ばね用線材

## High Strength Suspension Spring Wire Rods for Cold-forming Process



吉原 直\*

Nao YOSHIHARA



永松清佳\*

Sayaka NAGAMATSU

Newly developed suspension spring steel, especially designed for cold-forming, allows for the design of suspension springs with design stresses, in terms of the maximum shear stress, up to 1300MPa. The steel was adapted for retaining hardness higher than HRC55 even after tempering at a temperature higher than 420 . The effect of alloying elements on hydrogen embrittlement and corrosion resistance was studied. As a result, new suspension spring steel has been developed which exhibits an excellent corrosion fatigue life at a spring stress as high as 1300MPa.

まえがき = 近年の自動車業界においては、二酸化炭素排出規制や運動性能向上として懸架ばねの小型軽量化を志向する動きは著しく、それに伴って懸架ばねには高い設計応力が要求されてきている。高応力化に対しては耐へたり性および耐久性の観点から、ばね素材の強度を高める必要があり、ばね素材強度にて HRC52 から 56 程度の範囲が高強度懸架ばねと呼ばれる。しかし、ばね素材を高強度化すると欠陥感受性が増し、例えば冬期の融雪剤で発生した腐食ピットからの破壊を生じやすく、図 1 に示すように信頼性を確保することが困難である。当社は、高強度と優れた環境脆化特性（主に腐食疲労特性）を兼備した最大せん断応力(  $\sigma_{max}$  )が 1200MPa 級である UHS1900 を展開しているが、さらに設計応力を 100MPa 向上した 1300MPa 級の冷間巻きばね用鋼を開発した。本稿では、優れた腐食疲労特性を確保しつつ、高強度を達成する冷間巻きばね用鋼の具体的特性を報告する。

### 1. 高強度懸架ばね用鋼の成分設計の考え方

従来より、懸架ばねの製造工程は冷間巻きおよび熱間巻きに分れる。この工程の選択はばねメーカーの設備選択に委ねられるが、工程による鋼材への要求特性も若干異なる。冷間巻き工程は、熱間圧延線材を引抜き加工後、焼入れ焼戻し処理したオイルテンパ線を冷間巻きし、その後ひずみ取り焼鈍を施してセッチング、ショットピーニング処理する。熱間巻き工程は、冷間巻き工程と同様に熱間圧延線材を引抜き加工後磨棒にし、オーステナイト領域まで加熱しその状態でコイリングして焼入れ。その後焼戻してセッチング、ショットピーニングを行う。両工程の大きな違いは、冷間巻き工程は調質後にひずみ取り焼鈍という熱処理が入るのに対し、熱間巻き工程は調質後にそのような熱処理がない。そのため、熱間巻き工程では焼鈍での軟化を考慮する必要がないのに対し、冷間巻き工程では軟化を考慮する必要がある。軟化させないための手段としては、

焼戻し温度をひずみ取り焼鈍温度より上げる方法  
軟化抵抗を向上する合金元素を添加する方法

がある。現状では、合金コストや熱間圧延製造性を考慮して、焼戻し温度をひずみ取り焼鈍温度より高く設定する方法がとられる。そのため、高い焼戻し温度にて高強度を得るためには C, Si, Cr などの増量添加が必要となる。

腐食疲労特性の向上には腐食疲労の機構を理解することが重要である。懸架ばねの腐食疲労機構を図 2 に示す。まず飛石などで塗装がはがれた箇所から融雪剤などの影響で腐食ピットが発生し、ある程度の大きさに成長した際に腐食ピット底に応力集中が起こることによって疲労き裂が発生する。その後疲労き裂は進展するが、その際に腐食過程で発生した水素が腐食疲労寿命を低下させると考えられている<sup>1)</sup>。

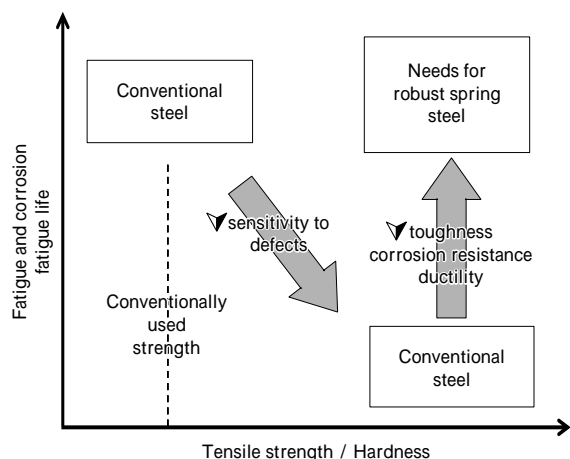


図 1 懸架ばね用鋼への要求特性

Fig. 1 General background for suspension spring steel

\* 鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼開発部

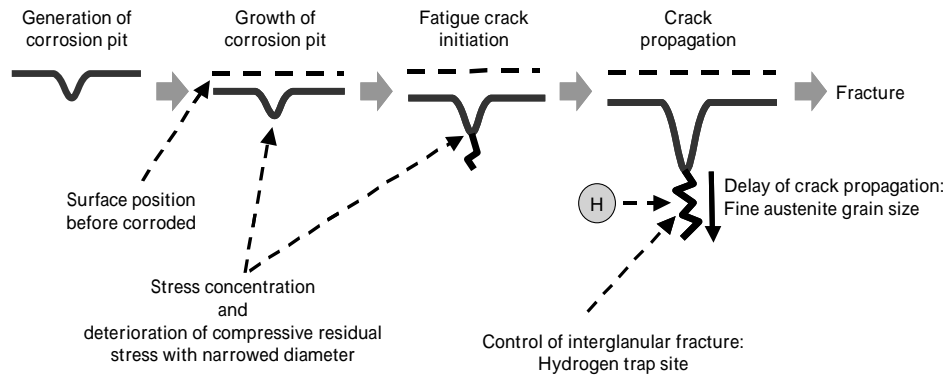


図2 懸架ばねの腐食疲労機構

Fig. 2 Mechanism for corrosion-fatigue fracture of suspension spring

表1 供試材の化学組成

Table 1 Chemical compositions of tested steels (mass%)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Ti	Nb	Al	Manufacturing process
SAE9260	0.59	2.06	0.94	0.012	0.011	tr.	tr.	0.15	tr.	tr.	tr.	0.019	Continuous casting Billet Hot rolling
60SCV7Nb	0.60	1.73	0.88	0.010	0.019	0.19	0.08	0.20	added	tr.	added	0.002	
A	0.52	2.07	0.24	0.001	0.004	0.50	0.59	1.24	tr.	added	added	0.024	Ingot casting Billet Hot rolling
B	0.48	2.01	0.44	0.005	0.001	0.23	0.25	0.63	tr.	added	tr.	0.022	
C	0.50	1.72	0.26	0.006	0.002	0.38	0.15	0.81	added	added	tr.	0.022	

腐食ピットの大きさを低減する手段としては、合金元素添加による生成さびの非晶質化、合金元素添加による腐食ピット底のpH増加がある。生成さびの非晶質化にはCr, Ni, Cu, Tiの添加およびC量の低減が必要となる<sup>2)</sup>。

水素脆化を抑制する手段としては、旧オーステナイト結晶粒の微細化、炭化物などの析出物による水素トラップ、結晶粒界の清浄化、マトリックスの靱性向上

がある。旧オーステナイト結晶粒の微細化および炭化物形成のどちらにもTi, Vの添加が有効である<sup>3)</sup>。結晶粒界の清浄化には不純物元素であるP, Sの低減が重要である。また、マトリックスの靱性向上にはSiの添加およびC量の低減が必要となる。すなわち、冷間巻きばね用鋼では、高温での焼戻しで強度を確保しつつ腐食ピットを小型化し、水素脆化を抑制できる最適なC量と合金元素のバランスを見出すことが重要課題となる。

これらの点を考慮して成分設計した三鋼種を対象に、材料特性およびばね特性を評価した。

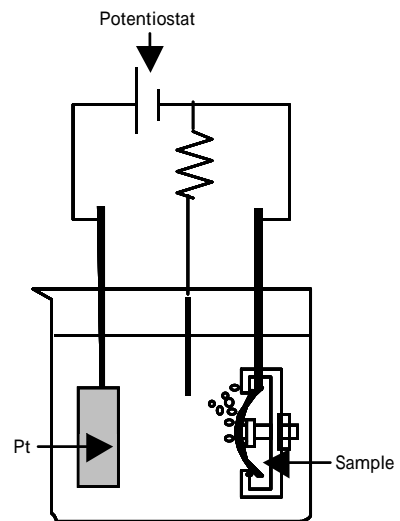
## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

表1に供試材の化学成分を示す。一般鋼SAE9260を転炉溶製した。また1,200MPa級である60SCV7Nbおよび今回の開発鋼であるA, B, C鋼を電炉溶製した。いずれの鋼種も13.5mmに熱間圧延し、各試験片を作製した。

### 2.2 材料特性

各試験の調質処理は850~1,050 × 10min加熱後70に油焼入れし、250~450 × 1h焼戻した。シャルピー衝撃試験では、55mmL × 10mmH × 7.5mmWのサブサイズのJIS3号Uノッチ試験片を加熱温度925で焼入れし、



Sample : 65mmL × 10mmW × 1.5mmT  
Solution : 0.5mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.01mol/L KSCN  
Bending stress : 1,400MPa  
Potential : -700mV

図3 陰極チャージ四点曲げ試験の概略図

Fig. 3 Schematic image of 4-point bending test under cathodic hydrogen charge

油焼入れからは上記の条件にて調質して常温で実施した。水素感受性の試験においては、65mmL × 10mmW × 1.5mmT平板試験片を加熱温度925で焼入れを行った。さらに油焼入れ以降は上記の条件にて調質し、図3に示す陰極チャージ四点曲げ試験を行った。サンプルは調質後に機械加工にて切出し、さらに表面を800番のエメリー紙で仕上げた。これを初期最大曲げ応力が1,400MPaとなるように四点曲げ治具にて固定し、そのまま溶液中で水素をチャージして破断までの寿命を測定した。溶液は0.5mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>と0.01mol/L KSCNの混合液で陰極電位は-700mVとした。

腐食特性については、焼入れ加熱温度を925にし、

表2 実体ばねの作製工程

Table 2 Process of preparing spring specimen

Steel: SAE9260				
Billet	Hot rolling ( 13.5mm)	Drawing ( 12.5mm)		
Hot coiling	Quenching	Tempering	Shot peening	Setting Aging
Steel: 60SCV7Nb				
Billet	Hot rolling ( 13.5mm)	Peeling ( 12.5mm)		
Hot coiling	Quenching	Tempering	Shot peening	Setting Aging
Steel:A,B,C				
Billet	Hot rolling ( 12.0mm)	Drawing ( 10.8mm)		
OT/IT heat treatment	Cold forming	Tempering		
Shot peening	Setting	Aging		

表3 実体ばねの諸元

Table 3 Dimension of spring specimen

Steel	SAE9260, 60SCV7Nb	A, B, C
Wire diameter	12.5mm	10.8mm
Average coil diameter	110mm	110mm
Active number of coils	5.39	5.39
Free height	382mm	382mm
Spring constant	33.4N/mm	18.6N/mm

加熱後 70 に油焼入れし、250~450 にて 1h 焼戻した後に機械加工にて切出し、さらに表面を 800 番のエメリー紙で仕上げた 10mm x 100mmL 丸棒試験片を用いた。8h 塩水噴霧 (SST) 16h 恒温恒湿保持 (35 , 60%RH) を 1 サイクルとする複合サイクル試験 (CCT) を最長 14 サイクルまで行い、腐食減量および腐食ピットの深さを評価した。腐食減量は、試験前重量とさび除去後の試験後重量の差を面積で除した値とした。腐食ピット深さは、レーザ顕微鏡によって 753mm<sup>2</sup> 面積におけるピット深さを測定し、最大深さの上位 3 点を平均した。

### 2.3 ばね特性

ばね腐食疲労特性を調査するため、表 2 に示す工程により表 3 に示した諸元の実体ばねを作成し、腐食疲労試験に供した。腐食疲労試験は、30min 塩水噴霧 (SST) 3,000 回加振 (100rpm) 23h 恒温恒湿保持 (26 , 95% RH) を 1 サイクルとして破断まで繰返し、加振回数合計にて評価した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 材料特性

#### 3.1.1 結晶粒度

図 4 に各鋼種の加熱温度と旧オーステナイト結晶粒度との関係を示す。各開発鋼種で 900~950 の加熱領域で 9 番以上の結晶粒度を示し、SAE9260 よりも微細な結晶粒を確保した。

#### 3.1.2 焼戻し軟化抵抗

図 5 に各鋼種の焼戻し温度と硬さとの関係を示す。各開発鋼種は低 C 含有量のため、400 以下での低温領域では既存鋼である SAE9260 および 60SCV7Nb より低い硬さを示すが、425 を超えた高温領域では既存鋼より硬く、優れた軟化抵抗を示した。

#### 3.1.3 韌性

図 6 に、韌性の評価指標であるシャルピー衝撃値と硬

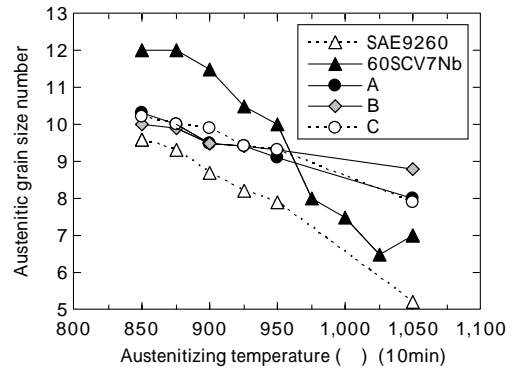


図4 加熱温度とオーステナイト結晶粒度との関係

Fig. 4 Relationship between austenitizing temperature and austenitic grain size number

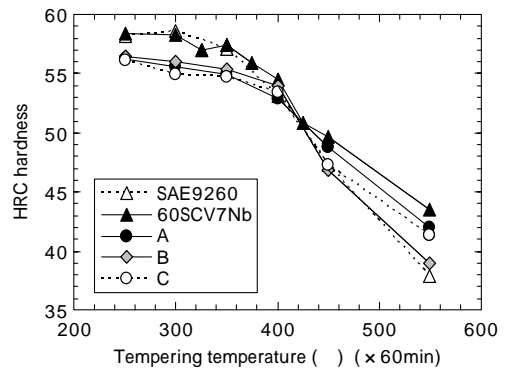


図5 焼戻し硬さ

Fig. 5 Effect of tempering temperature on HRC hardness

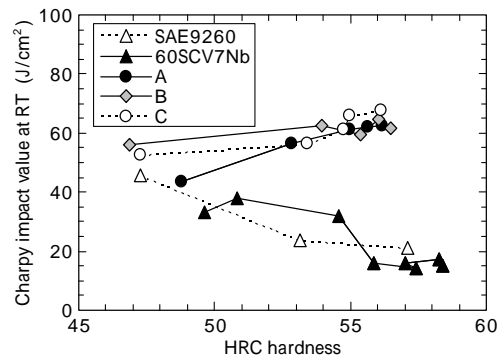


図6 シャルピー衝撃値と HRC 硬さとの関係

Fig. 6 Relationship between Charpy impact value and HRC hardness

さとの関係を示す。各開発鋼は既存鋼よりも高い衝撃特性を示し、とくに HRC55 以上の硬さ領域では焼戻し温度が低下するために既存鋼の韌性が悪化しているのに対し、各開発鋼は優れた韌性を示した。

#### 3.1.4 水素感受性

図 7 に、陰極チャージ四点曲げ試験による各種鋼の水素感受性評価結果を示す。既存鋼では焼戻し温度の低下による硬さの増大にともない、短時間で破断する。しかし、各開発鋼ではとくに HRC55 以上の硬さ領域で改善されており、高い耐水素脆性を示した。また、含有する P 量とオーステナイト結晶粒界に偏析する P 量が水素感受性におよぼす影響を図 8 に示す。水素脆性は P 含有量およびオーステナイト結晶粒度に対して高い相関関係を示した。さらにオージェ分光分析にて測定したオーステ

ナイト結晶粒界に偏析するP量もP含有量の増加にともなって増加し、水素感受性を助長することがわかった。それらの鋼種のばね腐食疲労結果を、同様にオーステナイト結晶粒度とP含有量で整理した(図9)。P含有量およびオーステナイト結晶粒度によればばね腐食疲労寿命は高い相関で整理できることがわかった。水素感受性におけるPとオーステナイト結晶粒度の相関がばね腐食疲労にも影響していると考えられる。すなわち、間接的ではあるが、水素感受性がばね腐食疲労に影響をおよぼしていることが示唆された。

### 3.1.5 腐食特性

複合サイクル腐食試験(以下、CCT という)で得られたSAE 9260, A鋼, B鋼, およびC鋼の4鋼種の腐食減量, 腐食ピット深さおよび腐食ピットのアスペクト比の経時変化を, それぞれ図10, 図11および図12に示す。SAE9260と比較して, B鋼およびC鋼は同等の腐食ピット深さであり, A鋼は優れる結果となった。またアスペクト比の比較においてもSAE9260より低く, 腐食ピット底での応力集中を軽減することによる腐食疲労特性の向上が期待できる。これは, 各開発鋼にCu, Ni, Crを増量添加したことによって耐食性が向上したと考えられる。

### 3.2 ばね特性

実体ばねを対象にばね腐食疲労試験を行った。その結果を負荷応力と破断寿命の関係で示したのが図13であ

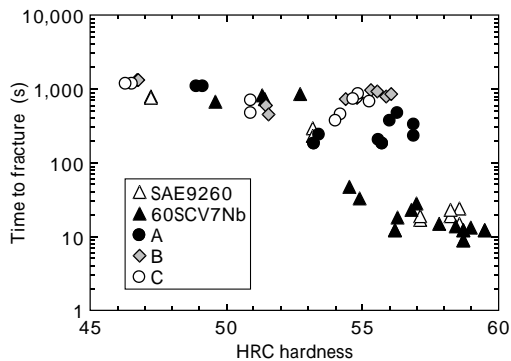


図7 水素感受性と硬さとの関係

Fig. 7 Relationship between hydrogen embrittlement and HRC hardness

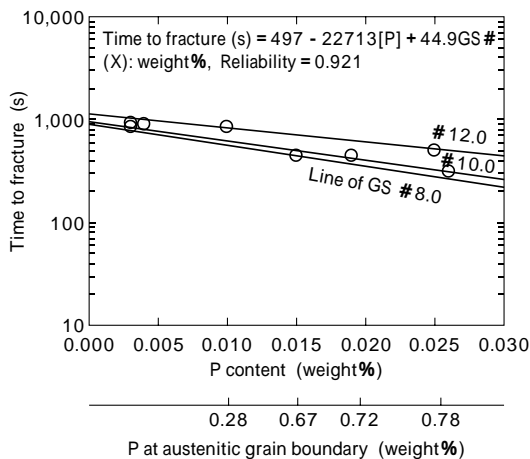


図8 P含有量およびオーステナイト結晶粒度が水素感受性におよぼす影響

Fig. 8 Effect of P content and austenitic grain size on hydrogen embrittlement

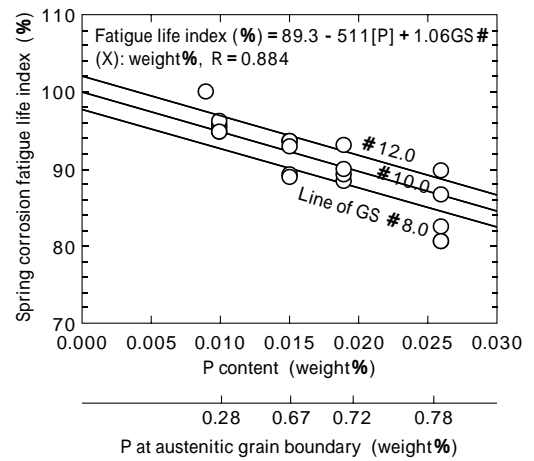


図9 P含有量およびオーステナイト結晶粒度が腐食疲労におよぼす影響

Fig. 9 Effect of P content and austenitic grain size on the spring fatigue life

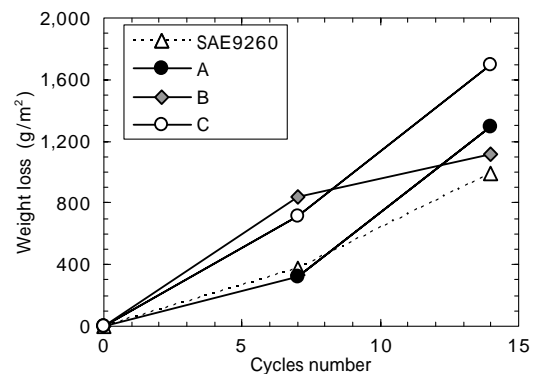


図10 腐食減量の経時変化

Fig.10 Weight loss after CCT

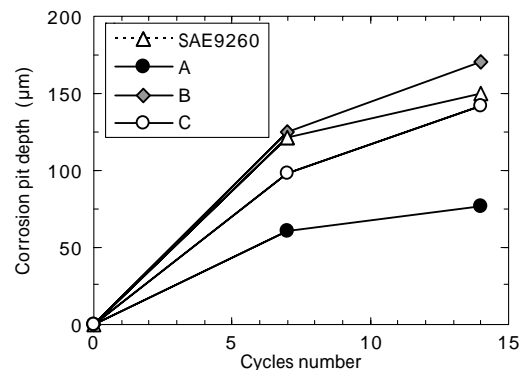


図11 腐食ピット深さの経時変化

Fig.11 Corrosion pit depth after CCT

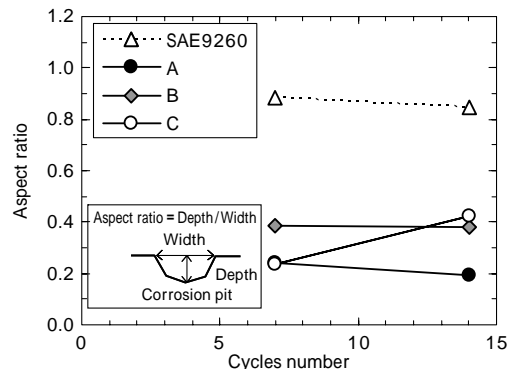


図12 腐食ピットのアスペクト比の経時変化

Fig.12 Aspect ratio of corrosion pit depth after CCT

る。SAE9260 は、HRC50.5 から HRC53.2 へとばね硬さを上げ、1,200MPa の最大せん断応力を負荷すると疲労寿命は低下し、現行で用られている 1,000MPa 級の疲労寿命である 44,000 から 52,000 回を確保することができない。また、既存鋼の 60SCV7Nb でも 1,000MPa 級での SAE9260 程度の疲労寿命が 1,200MPa の負荷応力で確保できていないことがわかる。それに対し、HRC54.4 の硬さの C 鋼では 1,300MPa の負荷応力で SAE9260 と同等もしくは若干劣る疲労寿命を示した。また、B 鋼ではさらに腐食疲労寿命が向上し、1,000MPa 級での SAE9260 と同等である。A 鋼は最も腐食疲労に優れ、1,000MPa 級での SAE9260 よりも高い腐食疲労寿命を示した。

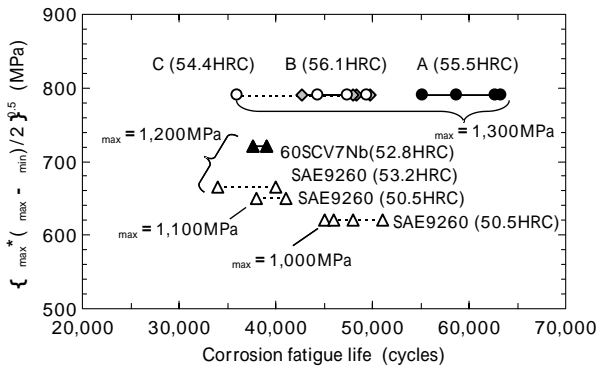


図13 ばね腐食疲労試験結果  
Fig.13 Results of spring fatigue test

むすび= 開発した高強度冷間巻き懸架ばね用鋼の特性を下記にまとめる。

冷間巻きに向けたワイヤ熱処理での高温焼戻しでも高硬さを確保できる。

汎用鋼 SAE9260 よりも高硬さの領域で耐水素脆性に優れる。

汎用鋼 SAE9260 よりも腐食ピットを小型化、無害化でき耐食性に優れる。

A 鋼は、1,300MPa 級の最大せん断応力を付与しても HRC55 以上の硬さにて 1,000MPa 級の SAE9260 以上のばね腐食疲労寿命を有する。また B 鋼は同等のばね腐食疲労寿命であり、市場での使用に十分耐え得ると判断できる。

A 鋼および B 鋼は HRC55 以上の硬さにて、1,300MPa の最大せん断応力でばね設計することが可能である。

本開発鋼は、当社の高強度懸架ばね用鋼シリーズのなかでもばね設計応力およびばね腐食疲労にて最高位に位置づけられる。

#### 参考文献

- 1) Atsushi Inada et al. : Kobelco Technology Review, 21 (1998) p.21.
- 2) 石川達雄ほか：材料と環境, 52 (2003) p.140.
- 3) 吉原 直ほか：ばね論文集, 51 (2006) p.1.