

(論文)

低Ni, Vフリー高強度懸架ばね用鋼ACROS1950

High Strength Wire Rod with Low Nickel and Vanadium-free for Suspension Spring ACROS1950



丸尾知忠*1
Tomotada MARUO



吉原直*1
Nao YOSHIHARA

Newly developed suspension spring steel, ACROS1950, has low Ni but has no V, in order to avoid the risk of increased alloy costs. ACROS1950 can enhance the suspension spring design stress up to 1,200MPa as the maximum shear. Hydrogen embrittlement resistance was maintained by controlling only the Ti, and corrosion properties by controlling the Cr, Cu and Ni. As a result, the suspension spring steel has the same corrosion fatigue life as UHS1900 at 1,200MPa of spring stress.

まえがき＝近年、中国市場を中心に鋼材消費量が伸長し、添加合金コストの高騰リスクが高まりつつある。懸架ばね用鋼は、小型軽量化や耐へたり性、耐久性の観点からばね素材の強度を上げる必要がある。さらに、寒冷地においては融雪材散布の影響で水素脆化や腐食疲労の危険性が增大する懸念が加わる。したがって、高強度と優れた環境脆化特性（主に腐食疲労特性）を兼備するために合金元素が添加され、当社では最大せん断応力（ τ_{max} ）が1,200MPa級で使用できるUHS1900、 τ_{max} が1,300MPa級で使用できるUHS1970を展開してきた。しかし、添加合金コストの高騰リスクを低減させるため、合金元素を低減させた懸架ばね用鋼が必要となってきた。そこで今回、UHS1900よりも合金元素添加量を低減させて、 τ_{max} が1,200MPaで使用できるACROS1950を開発した。本稿では、優れた腐食疲労特性を確保した低Ni, VフリーであるACROS1950の特性を報告する。

1. ACROS1950の成分設計の考え方¹⁾

懸架ばねに要求される特性として大気耐久性、耐へたり性および腐食疲労特性が挙げられる。大気耐久性とは、大気中で静的破断荷重以下の繰返し応力を受けた

際、破断に至るまでの繰返し回数を示す。耐へたり性とは、繰返し荷重下における負荷方向への塑性変形の生じにくさを示す。腐食疲労特性とは、腐食性のガスや液体中で繰返し応力を受けたときの破断に至るまでの時間の長さを示す。

大気耐久性および耐へたり性の向上にはばね素線の硬さを増加させる必要がある。ばね素線の硬さを高める手段としては、

- ①合金元素添加
- ②熱処理条件の変更

がある。顧客の生産性を考慮に入れると、硬さを高めるために焼戻し温度を下げることはばね生産工程上難しいため、硬さを高める合金元素であるC, Si, Crなどをある程度確保することが必要となる。

腐食疲労特性の向上には腐食疲労の機構の理解が重要である。懸架ばねの腐食疲労の機構を図1に示す²⁾。まず、飛び石などで塗装がはがれ、そこから融雪剤に含まれるCaCl₂の影響によって腐食ピットが発生する。腐食ピットがある程度の大きさに成長した際、ピット底に応力集中が起こって疲労き裂が発生する。その後疲労き裂は徐々に進展し、その際に腐食過程で発生した水素が耐

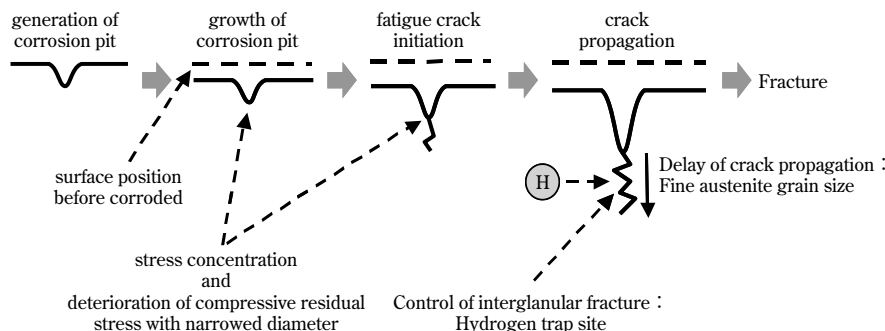


図1 懸架ばねの腐食疲労の機構
Fig. 1 Mechanism of spring corrosion fatigue fracture

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

水素脆性を低下させると考えられている³⁾。

腐食ピットの形状は、ピット面積とピットアスペクト比（腐食ピット深さ／腐食ピット幅）によって表される。成分設計の考え方（図2）で示したように、開発当時のUHS1900では、ピット面積を小さくすべく耐食性向上効果が得られるCu, Ni, Crを積極的に添加した。さらにその後、ピットアスペクト比にもCu, Ni, Crが影響を及ぼしていることがわかった。Cu, Niには腐食中に生じる錆（さび）のアモルファス合金組成物を増加させてピットアスペクト比を低減させる効果があると報告されている⁴⁾。また、Crには腐食ピット底のpHを下げる効果があり、積極的な添加はむしろピット深さを増大させ、アスペクト比を高めてしまう⁵⁾。

そこで、ACROS1950の開発にあたっては、腐食疲労寿命を向上させるためにピットアスペクト比に着目した。具体的には、腐食ピットの面積拡大抑制ではなく、ピットアスペクト比を小さくすることによって腐食ピット底への応力集中を緩和する方法を考えた（図2）。したがって、ACROS1950では耐食性をある程度確保しつつ、ピットアスペクト比を小さくする最適なCu, Ni, Crバランスとした。

また、水素脆性を抑制する手段としては、

- ①旧オーステナイト結晶粒の微細化
- ②炭化物などの析出物による水素トラップ
- ③結晶粒界の清浄化
- ④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対してもTiやVの添加が有効である。ACROS1950では、高価なV添加を抑制するためにTi単独添加を試みた⁶⁾。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。

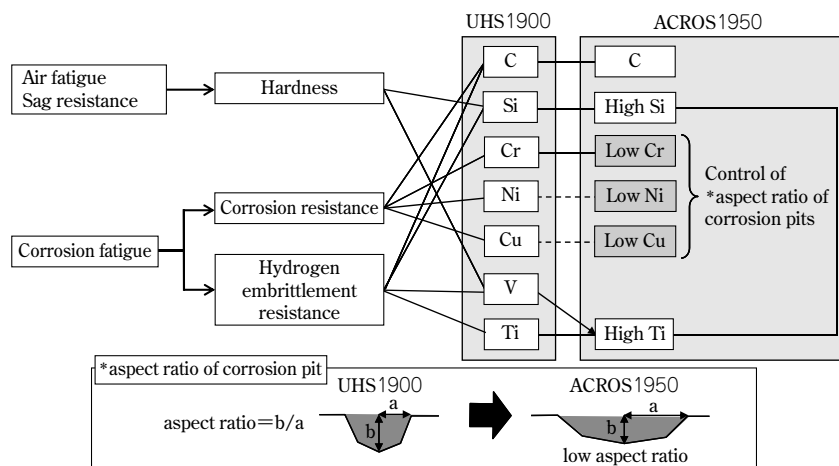


図2 ACROS1950の成分設計の考え方
Fig. 2 Chemical compositions design of ACROS1950

2. 実験方法

2.1 供試材

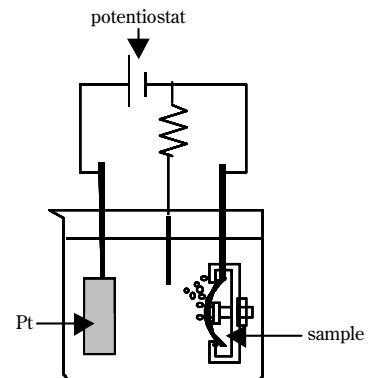
表1に供試材の化学成分を示す。一般鋼SAE9260, τ_{max} が1,200MPa級であるUHS1900, および今回の開発鋼であるACROS1950を転炉溶製した。いずれの鋼種も ϕ 13.5mmに熱間圧延し、各試験片を作製した。

2.2 材料特性

水素感受性の試験には図3に示す陰極チャージ4点曲げ試験を行った。試験片は、長さ65mm、幅15mm、板厚1.5mmの平板を925℃に加熱し、油焼入れ以降は上述の条件にて調質した後、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せん断応力が1,400MPaとなるように4点曲げ治具にて固定し、そのまま溶液中で1分間に0.7mL/gの水素を吸蔵させて破断までの寿命を測定した。なお、溶液は0.5mol/L H_2SO_4 と0.01mol/L KSCNの混合液で陰極電位は-700mVとした。

腐食特性は、塩水噴霧（以下、SSTという）8時間→恒温恒湿保持（35℃, 60%RH）16時間を1サイクルとする複合サイクル腐食試験（以下、CCT試験という）を最長14サイクルまで行って評価した。試験片は、 ϕ 10×100mm丸棒を925℃で10分間加熱、70℃で油焼入れし、350℃にて1時間焼戻した後に機械加工にて切り出し、さらに表面を800番のエメリー紙で仕上げた。腐食ピット深さは、腐食表面積2,514mm²におけるピット深さをレーザ顕微鏡によって測定し、最大深さから上位3点を平均して求めた。ピットアスペクト比に対しても同様に、ピット幅（a）およびピット深さ（b）を測定して求めた。

腐食疲労特性は、CCT試験にて腐食させた試験片を用いた回転曲げ疲労試験を実施し、応力と破断までの回数



Sample : 65×1.5×10⁻³mm
Solution : 0.5mol/L H_2SO_4 +0.01mol/L KSCN
Stress : 1,400MPa
Potential : -700mV

図3 陰極チャージ4点曲げ試験の概略図
Fig. 3 Schematic image of 4-point bending test under cathodic hydrogen charge

表1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of tested steels

Steel grade	Chemical compositions (mass%)										Manufacturing process
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Ti	
SAE9260	0.60	2.00	0.90	0.012	0.005	—	—	0.15	—	—	Continuous casting → Billet → Hot rolling (ϕ 13.5mm)
UHS1900	0.41	1.75	0.18	0.009	0.003	0.27	0.51	1.05	0.157	0.060	
ACROS1950	0.42	2.10	0.93	0.012	0.005	0.25	0.25	0.35	—	0.095	

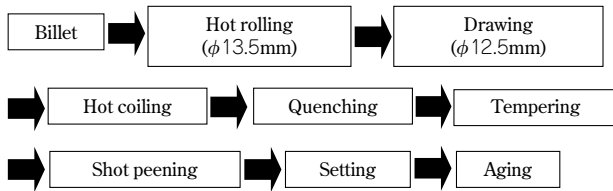


図4 ばね試験片の作製工程
Fig. 4 Process of preparing spring specimens

の関係で評価した。なお、試験片は、925℃で10分間加熱した後、70℃で10分間油焼入れし、さらに350℃にて1時間焼戻した。その後、機械加工にて切り出してJIS Z 2274の1号試験片とした。CCT試験は、先に述べたようにSSTを8時間→恒温恒湿保持(35℃, 60%RH)16時間を1サイクルとする試験を14サイクルまで行った。回転曲げ疲労試験は大気中の室温下で400MPaおよび500MPaの片振り曲げ応力を負荷し、3,500rpmの回転数で行った。吸蔵された水素量はAPIMS法(Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometry: 大気圧イオン化質量分析法)を用いて測定した。

2.3 ばね特性

腐食疲労特性を調査するため、図4に示す工程によってばね試験片を作製した。腐食疲労試験は、SSTを30分間→加振3,000回(100rpm)→恒温恒湿保持(26℃, 95%RH)23時間を1サイクルとして破断するまで繰返し、加振回数の合計にて評価した。なお、ばね硬さはHRC52.0とし、最大せん断応力 $\tau_{max} = 1,200\text{MPa}$ で腐食疲労試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 材料特性

3.1.1 水素感受性

図5に、陰極チャージ4点曲げ試験による各鋼の水素感受性評価結果を示す。SAE9260では焼戻し温度の低下による硬さの増大に伴い、短時間で破断する。しかしUHS1900およびACROS1950ではHRC52以上で600秒以上の破断時間を示す。さらにACROS1950はUHS1900と同等の破断時間であり、同等の水素感受性を持っていると考えられる。

3.1.2 腐食特性

CCT試験で得られたSAE9260, UHS1900およびACROS1950の3鋼種の腐食ピットの深さ、およびピットアスペクト比の経時変化をそれぞれ図6、および図7に示す。UHS1900およびACROS1950のピットの深さ、ピットアスペクト比ともにSAE9260より小さいことから、応力集中を小さく抑えることによって優れた腐食疲労特性を有することが期待できると考えられる。また、ACROS1950のピットアスペクト比はUHS1900に比べて小さく制御できている。さらに、試験片にある6個のピットアスペクト比からばね1本分のピットアスペクト比を極値統計法によって算出した結果を図8に示す。極値統計法は次の通りである。算出した6個のピットアスペクト比を用いて累積分布関数からばね1本分の面積中に

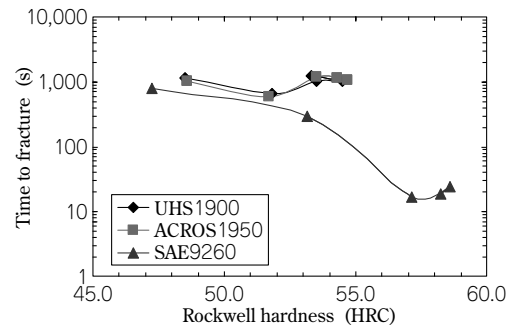


図5 水素チャージした各種試験片の硬さと破断時間の関係
Fig. 5 Relationship between hardness and breaking time of each specimen charged hydrogen

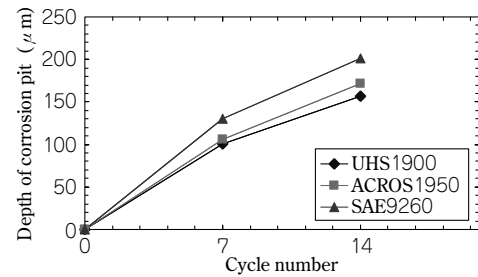


図6 サイクル数と腐食ピット深さの関係
Fig. 6 Relationship between cycle numbers and depths of corrosion pits

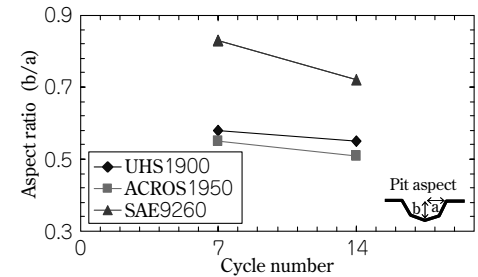


図7 サイクル数と腐食ピットのアスペクト比の関係
Fig. 7 Relationship between cycle numbers and aspect ratios of corrosion pits

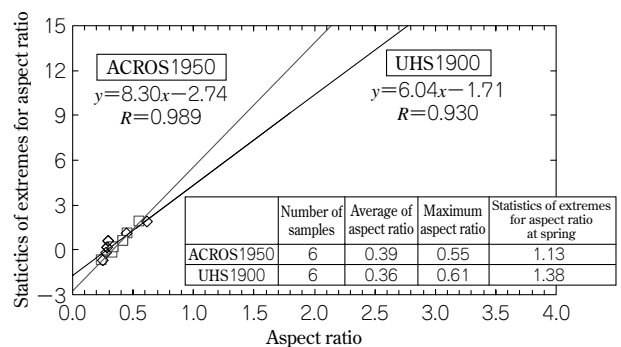


図8 極値統計による腐食ピットのアスペクト比結果
Fig. 8 Aspect ratios of corrosion pits by statistics of extremes

存在するピットアスペクト比の極値を求めた。ACROS1950のピットアスペクト比の極値はUHS1900に比べて小さくなり、ピットアスペクト比を低く制御できることがわかった。

3.1.3 腐食疲労特性

回転曲げ疲労試験で得られた腐食後のUHS1900およびACROS1950の破断までの回数を図9に示す。この図

から ACROS1950 の腐食疲労特性は UHS1900 に比べて同等以上であることがわかる。図10 に腐食疲労試験後の疲労破面を示す。ACROS1950 は UHS1900 に比べて粒内破壊領域が約 65% 広い。さらに図11 に示すように ACROS1950 は UHS1900 に比べて発生水素量が少ない。また Cr 量の低下はピット底の pH を上昇させることが報告されており⁷⁾、水素吸蔵量が少なくなると推定できる。したがって、UHS1900 に比べて低 Cr である ACROS1950 は腐食疲労特性が優れると示唆される。

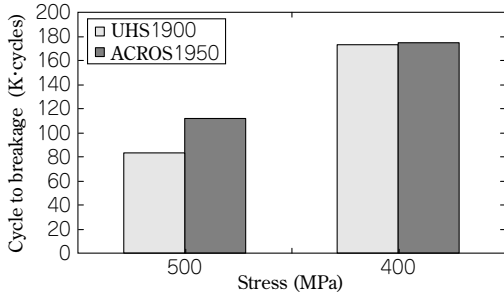


図9 腐食後回転曲げ疲労試験結果

Fig. 9 Results on rotating bending fatigue test after corrosion test

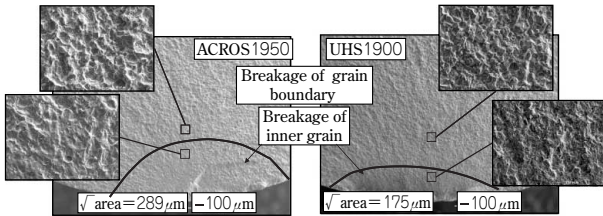


図10 腐食疲労破面

Fig.10 Corrosion fatigue fracture

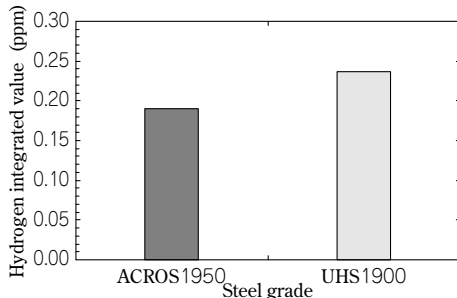


図11 CCT試験 (14 サイクル後) の水素含有量

Fig.11 Hydrogen integrated value after CCT test for 14 cycles

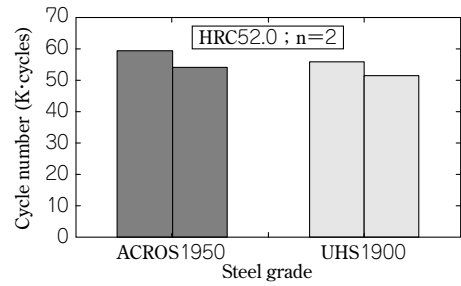


図12 ばね腐食疲労試験結果

Fig.12 Results of corrosion fatigue test at springs

3.2 ばね特性

図12 に UHS1900 および ACROS1950 のばね腐食疲労試験結果を示す。この結果から HRC52.0 にて UHS1900 と比較して、同等の腐食疲労特性が得られた。

むすび=開発した低 Ni, V フリー高強度懸架ばね用鋼 ACROS1950 の特性を下記にまとめる。

- ① V フリーとし、UHS1900 と同等の水素感受性を確保することができた。
- ② Cr, Ni, Cu 量を適正化することによって UHS1900 に比べてピットの深さ、アスペクト比を低減することができた。
- ③ ばね腐食疲労試験結果から、HRC52.0 にて UHS1900 と同程度の腐食疲労特性を確保できている。

また、ACROS1950 は以下の特長を有する高強度懸架ばね用鋼である。

- ① 最大せん断応力 1,200MPa でばね設計ができる。
- ② UHS1900 と同等の腐食特性を持つ。
- ③ 低 Ni, V フリーであることから合金コスト高騰リスクを低減する。

参考文献

- 1) 公開特許：2009-046764.
- 2) 吉原 直ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.56, No.3 (2006), pp.48-52.
- 3) A. Inada et al. : Kobelco Technology Review, No.21 (1998), p.21.
- 4) 石川達雄ほか：材料と環境, Vol.52, No.3 (2003), pp.140-154.
- 5) 中山武典ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.47, No.2 (1997), pp.50-53.
- 6) 特許：第 4423253 号.
- 7) 中山武典ほか：第 47 回材料と環境討論会, (2000), p.314.