



特集記事・10

地球環境に貢献する鉄鋼製品

条鋼 (サスペンションスプリング)

Coil Spring Steel for Automotive Suspension

丹下 彰

Akira Tange

日本発条 (株) ばね生産本部 開発部

1 はじめに

ばねに求められる基本特性は荷重と変形の関係であるが、同時に許されるスペースと重量の制約や耐久性と価格の要求も満たさなければならない。一般に、スペースと重量は耐久性や価格とトレードオフの関係にあり、この両立が他の部品と同様ばねにおいても重要である。ここで、ばねにおける耐久性とは、腐食環境にない場合の疲労強度（以下大気疲労強度）と塩害腐食環境下での疲労強度（以下腐食疲労強度）そして室温付近の低温クリープである。大気疲労強度とクリープ強度は材料強度が高いほど優れる。このため、自動車用熱間成形コイルばね材料の引張り強さとして、JASO C605では1460 MPaから1850 MPaの範囲が推奨されているが、最近では2000 MPaを超える事例もある。しかし、この高強度化は切欠き感受性を増大させることから、高靱性材料の開発や表面や内部の欠陥寸法の管理そしてショットピーニングなどの表面改質技術の開発が盛んに行われてきた。さらに、ここ10年ほど冬場の路面凍結防止のために、融雪剤としての塩の散布が一般化しつつあり、ばねの腐食疲労強度への配慮が必要となってきた。腐食疲労強度は材料の引張り強さが高いほど低下することから、近年は耐腐食疲労強度に優れた高強度鋼の開発が中心となっている。

2 コイルばねの軽量化指針

ばねを設計する場合、まず第一に与えられる荷重と変形の関係（ばね定数）からコイルばねの諸元を調べる。(1)式は円筒コイルばねのばね定数と諸元の関係である。ここで、 k はばね定数、 G は横弾性係数、 d は線径、 N は有効巻き数、 R は平均コイル半径である。

$$\text{ばね定数の式 } k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot N \cdot (2 \cdot R)^3} \dots\dots\dots (1)$$

次に、コイルばねのねじり応力 τ は(2)式で与えられる。ここで、 P は荷重である。この τ はばねの耐久性と係わってくる。すなわち、求められる寿命を満たすように R と d との組合せを選択し τ の値を制限することとなる。

$$\text{応力の式 } \tau = \frac{8 \cdot (2 \cdot R) \cdot P}{\pi \cdot d^3} \dots\dots\dots (2)$$

一方、円筒コイルばねの重量 W は(3)式で与えられる。ここで、 ρ は比重である。

$$\text{重量の式 } W = \pi \cdot \rho \cdot (2 \cdot R) \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)、(2)、(3)より W を k 、 τ 、 P で表すと(4)式が得られる。

$$W = 2 \cdot G \cdot \rho \cdot \frac{P^2}{k \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (4)$$

k と P は固定であるから、円筒コイルばねの重量は ρ と G に比例し τ の2乗に逆比例することがわかる。したがって、軽量化するためには、(a) 比重の小さい材料の選択、(b) 横弾性係数の小さい材料の選択、(c) 設計応力すなわち疲労強度 τ の向上に尽きる。(a)、(b)に関してはTi合金、Al合金そしてMg合金の適用が考えられる。しかし、AlやMgは疲労強度が小さく、疲労強度向上が著しい鋼に比較しては、現状では軽量化に成功していない¹⁾。Ti合金は疲労強度も比較的大きいため軽量化効果は大きい²⁾、現状では価格競争力がなくサスペンションばね用材料として認知されてはいない。したがって、鉄鋼の材料の場合、軽量化は腐食環境有り無しでの疲労強度向上へ向けた努力に尽きる。図1はコイルばねの質量と疲労強度すなわち設計応力の関係を計算した結果である。設計応力900 MPaの場合の質量を100%とした場合、1200 MPaでは62%に軽量化できることから、疲労強度向上の軽量化効果の大きさがわかる。

3 コイルばねの軽量化の推移

図2はサスペンション用ばね鋼のおおよその年代別最大設計応力の推移である³⁾。1975年当時、最大設計応力は900 MPaであったが、約5年ごとに100 MPaづつ最大設計応力が増加してきたことがわかる。90年当時、1100 MPaから1300 MPaへと一気に200 MPa設計応力を増加させる材料

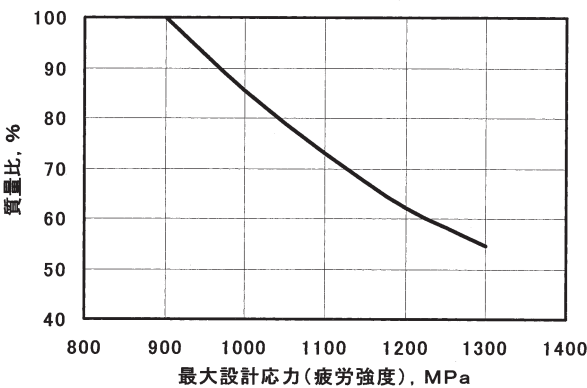


図1 コイルばねの最大設計応力と質量の関係

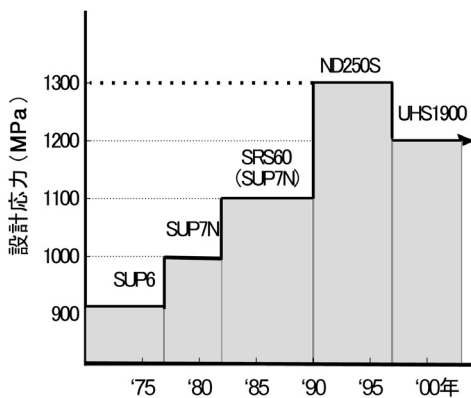


図2 コイルばねの年代別設計応力の推移

開発があった。これはCAFE規制による強い軽量化ニーズを背景として、JISばね鋼の組成と全く異なる発想のもとで、Ni-Cr-Mo鋼をベースとし、0.4C-2.5Si-2Ni-0.8Cr-0.4Mo-0.2Vの組成をもつ高強度・高靱性ばね鋼⁴⁾が開発できたためである。しかし、コストパフォーマンス重視の流れに戻り、現在では最大設計応力は1200 MPaが主流となっている。ここで、軽量化の達成は、新しいばね鋼の開発と同時に表面付近の圧縮残留応力を大きくそして深くすることを目的とした、ショットピーニング法の開発によるところも大きい。例えば、最大設計応力1100 MPaの時代には温間ショットピーニングが実用化され⁵⁾や現在では温間2段ショットピーニングの採用が一般化されている。

4 JISサスペンションコイルばね用材料

JISにはばね鋼鋼材G 4801：2005として、表1に示すような8種類のばね鋼が規定されている。同表にはその用途についてもコイルばねと板ばねとに大別して記した、もちろん場合によってはいずれの鋼種もコイルや板ばねに使用することは可能であるが、実績を示せばこのようになる。JISばね用鋼の化学組成の特徴は、C量が比較的高い中炭素鋼となっていることである。SUP10以外の鋼種は0.56～0.64%となっている。これはある程度の靱性付与を考慮した比較的高温の焼戻しでも高い強度を期待しているためと考えられる。次に、コイルばね材料と板ばね材料との組成の違いでは、Si量に顕著な差がある。板ばねに対し比較的小形であるコイルばね用のSUP6，SUP7，SUP12ではSiを1.5～2.2%とベアリング鋼など他の用途の材料に例を見ないレベルにまで増加させている。Siは低温での焼戻し軟化抵抗を高め、低温焼戻しでの靱性改善に寄与することと低温クリープ性を著しく

表1 JIS G4801：2005 ばね鋼の化学成分と用途

種類の 記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	B	用途
SUP6	0.56～0.64	1.50～1.80	0.70～1.00	0.030 以下	0.030 以下	—	—	—	—	コイルばね
SUP7	0.56～0.64	1.80～2.20	0.70～1.00	0.030 以下	0.030 以下	—	—	—	—	コイルばね
SUP9	0.52～0.60	0.15～0.35	0.65～0.95	0.030 以下	0.030 以下	0.65～0.95	—	—	—	板ばね
SUP9A	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.70～1.00	—	—	—	板ばね
SUP10	0.47～0.55	0.15～0.35	0.65～0.95	0.030 以下	0.030 以下	0.80～1.10	—	0.15～0.25	—	板ばね
SUP11A	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.70～1.00	—	—	0.0005 以下	板ばね
SUP12	0.51～0.59	1.20～1.60	0.60～0.90	0.030 以下	0.030 以下	0.60～0.90	—	—	—	コイルばね
SUP13	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	0.030 以下	0.030 以下	0.70～0.90	0.25～0.35	—	—	板ばね

改善する効果⁶⁾がある。一方、Siは2相域を広げることやC活量を高める⁷⁾ことから脱炭を助長することが指摘されている。そこで、板ばねのような大形ばねに用いられるSUP9, 9A, SUP10, SUP11AそしてSUP13では、熱間成形時間や焼入れ加熱時間が長くなるためSiを0.15～0.35%に制限している。SUP10はSUP9のC量を減らし、かつVを添加することで、高靱性を期待した鋼種である。SUP11AはSUP9にBを添加し焼入れ性を向上させた材料で、板厚の厚い重ね板ばねや大径の産業用コイルばねスタビライザに使用される。SUP12は乗用車用サスペンション用コイルばね材料として世界的に最も広く使用されている材料で、対応規格としてSAE9254や54SiCr6がある。SUP13はMo添加鋼で、JISばね鋼のうち最も焼入れ性の優れた材料として大形の重ね板ばねや産業用コイルばねに使用されている。JISばね鋼の疲労強度、靱性そして耐食性に関するデータを紹介する。図3は各種ばね鋼の回転曲げ疲労強度の硬さ依存性を示している⁸⁾。同図の破線のバンドは金材技研による低合金鋼における回転曲げ疲れ限度と硬さの関係であり、疲れ限度は硬さに比例して向上することをあらわしている。一方、図中小さい丸で示されたデータは酸素濃度20～30ppm程度に脱ガスされた通常のばね鋼の疲れ限度を示している。これらは400HV以下では金材技研のバンドに含まれるものの、400HV以上では実線のバンドで示されるように硬さに対する疲れ限度の向上が頭打ちになっていることがわかる。この理由は硬い材料では内部の非金属介在物によって疲労破壊が生じるためと説明されている。また、ULOと注記された、大きな丸、四角、三角のデータは酸素濃度10ppm以下まで脱ガスされたばね鋼の疲れ限度を示している。これらの鋼種間の疲れ限度の差は認められず550HV程度まで疲れ限度は硬さとともに向上していることがわかる。したがって、ばね鋼においても、疲

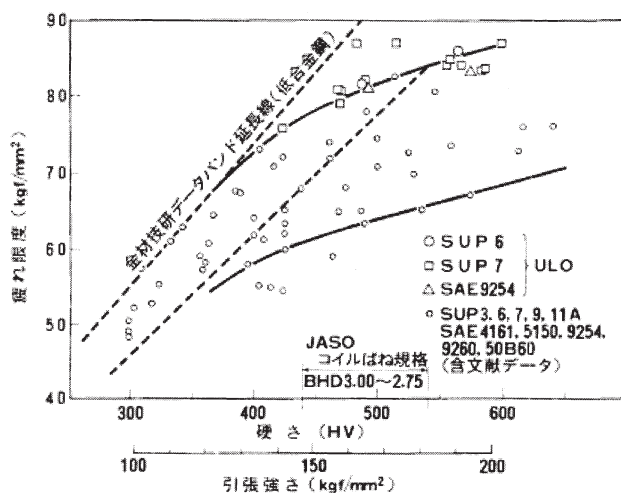


図3 JISばね鋼の回転曲げ疲労強度
金材技研、現物質・材料研究機構

労強度向上のためには脱ガス処理による非金属介在物の低減は必要となる。図4は種々の硬さを有するSUP7の疲労き裂伝播特性である⁹⁾。疲労き裂が伝播しなくなる臨界の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は硬さが高くなるほど低下することがわかり、切欠き感受性が増大することが定量的に理解される。しかし、この低下は56HRC以上ではほぼ $10 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$ に収敛してくることもわかる。この値は他の鋼種でも同様であり、JISばね鋼の切欠き感受性は他の鋼種と似た挙動を示すものと考えられる。種々の硬さを有するJISばね鋼の鋼に関する破壊靱性試験結果を図5に示す¹⁰⁾。いずれの鋼種においても硬さが高くなるにつれ、平面歪破壊靱性値は大きく低下してくる事がわかる。引張り強さ1850 MPaに相当する(52HRC) SUP7の平面歪破壊靱性値は約 $120 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$ となっていることがわかる。また、最も優れた靱性を示す鋼種はSUP10となっているが、この理由は炭素量が少ないことやVによる結晶粒微細化効果と考えられる。JISばね鋼の耐食性に関する研究は少ないが、元村らがアノード分極曲線により各種ばね鋼の耐食性を評価している。その結果、SUP9, SUP10, SUP12, SUP13などの<1%Cr, <2%Niのばね鋼では、アノード分極曲線の差異は小さく、これらの鋼種間での耐食性の差は小さいと報告している¹¹⁾。さらにショットピーニングありなしでのアノード分極曲線の比較においても、その差は小さく、ショットピーニング面の耐食性への影響は小さいとしている。しかし、ショットピーニングは耐食性の改善は認められないものの、大きな圧縮残留応力場を形成することから腐食疲労寿命向上には大きく貢献する¹²⁾。

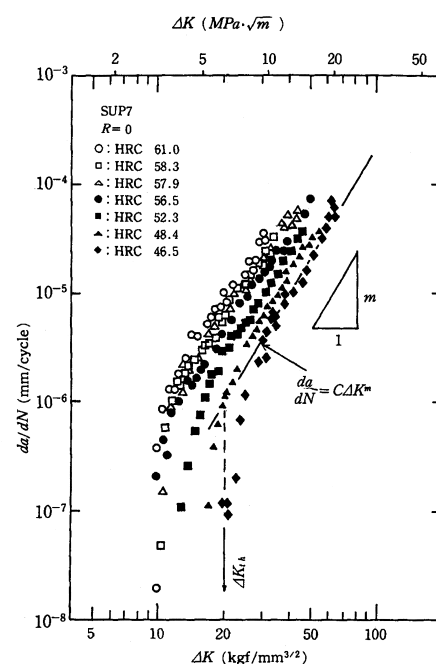


図4 SUP7の疲労き裂伝播特性と硬さ

5 最近の腐食疲労強度を考慮したサスペンション用ばね鋼

近年のサスペンション用ばね鋼の開発目標は最大設計応力1200～1300 MPaにおいて、従来の設計応力1100 MPaにおける大気疲労強度、腐食疲労強度かつ耐クリープ強度を維持することである。大気での疲労強度や耐クリープ強度を向上させるために、引張り強さは従来の1700 MPaから1900～2000 MPaへ高強度化することが必要となる。しかし、一般的にはこの高強度化は耐腐食疲労性を損なうと言われている。このため最近のサスペンション用鋼の開発は腐食疲労強度向上が主な課題となり、多くの研究が盛んに行われてきた。開発に際して、腐食疲労進展解析が行われている。中山は次のような腐食疲労進展過程を報告している¹³⁾。最初に腐食によってばねの表面に腐食ピットが発生する。この腐食ピットが成長し応力集中を生じる、この結果ピット底に腐食疲労き裂が発生する。最後に、腐食疲労き裂が成長しばねが破壊する。このとき、腐食疲労き裂は従来鋼では粒界を伝播することが特徴である。したがって、腐食疲労強度向上鋼の開発の指針として、耐食性改善による腐食ピットの発生と成長の抑制さらには耐水素脆性改善による腐食疲労き裂伝播抑制が提案された。図6にばね鋼の腐食疲労進展メカニズムの模式図¹³⁾と改善方法を示す。耐食性改善では、低C化やCu、Niなどの合金元素の添加や増量が提案されている。これは、腐食ピット底に形成する錆を非晶質化することを目的としたものである。この非晶質錆は緻密で保護的な性質を有し、水や酸素あるいは塩素イオンなどの腐食因子の侵入を防ぐとして

いる。さらに、水素が関与した腐食疲労き裂の粒界伝播を抑制するため、Tiの添加も提案されている。Tiの添加は、TiC系の多数の微細析出物による拡散性水素のトラップと結晶粒微細化による靱性向上に寄与する。このような合金設計コンセプトのもとでJISばね鋼とは全く異なる、0.4% C-1.8% Si-0.2% Mn-0.25% Cu-0.52% Ni-1.05% Cr-0.17% V-0.07% Ti鋼が開発された¹⁴⁾。図7¹⁴⁾は開発鋼と従来鋼SUP7との錆中の塩素分布の比較であるが、非晶質錆の多い開発鋼では塩素が地鉄に到達していないことがわかる。図8¹⁴⁾はばね製品として、開発鋼とSUP7との腐食疲労寿命を比較した

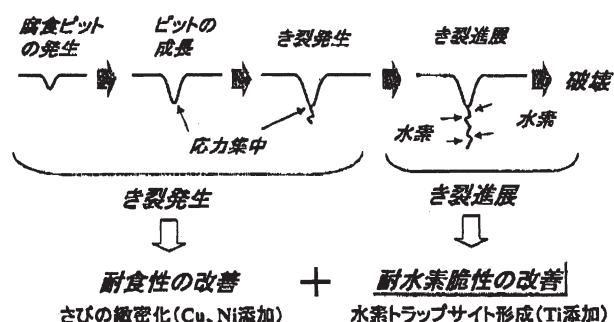


図6 ばね鋼の腐食疲労進展メカニズムと改善方法

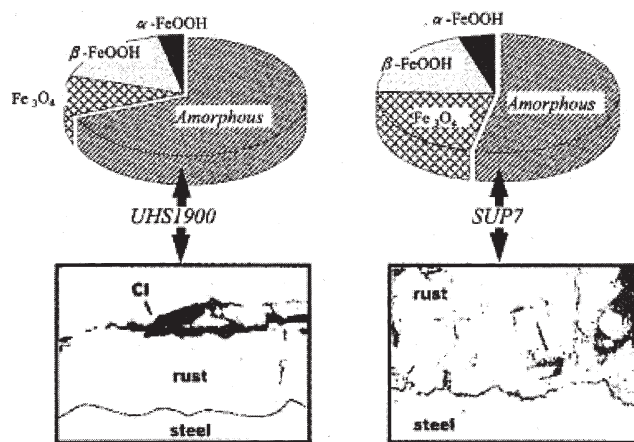


図7 錆中の塩素分布比較

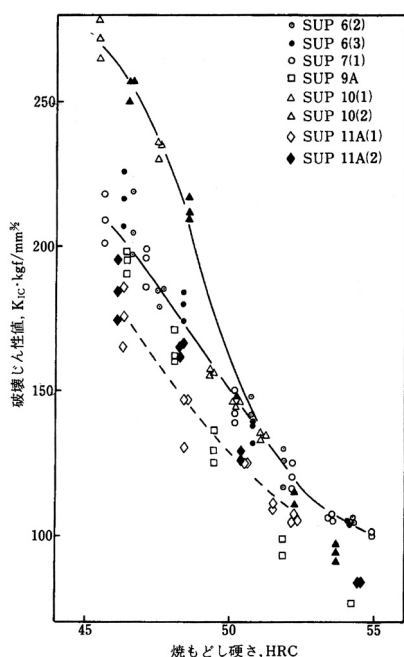


図5 JISばね鋼の破壊靱性と硬さ

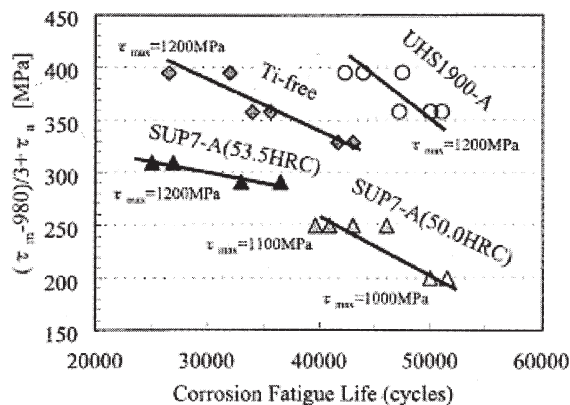


図8 ばねの疲労試験結果比較

ものである。Tiを添加した開発鋼は高応力下でも、低応力のSUP7の低硬さ材と同等の腐食疲労寿命を示すことがわかる。同様なコンセプトにより、低C化のマトリックス韌性向上、B添加の粒界脆化抑制、Nb添加の結晶粒微細化による韌性向上そしてNi、Cu、Crによる耐食性向上効果を期待した、0.4% C-1.7% Si-0.22% Mn-0.48% Ni-1.12% Cr-0.15% V-0.025% Nb-0.0015% B鋼も開発されている¹⁵⁾。また、低C化とV添加による韌性向上とNi添加による耐食性向上さらにVによる水素トラップ効果を期待した、0.47% C-2.0% Si-0.7% Mn-0.55% Ni-0.2% Cr-0.2% V鋼がある¹⁶⁾。さらに、0.52% C-1.49% Si-0.60% Mn-1.47% Ni-0.99% Cr-0.77% Mo-0.10% Cu-0.21% Vの組成を有する耐食性鋼の開発もなされている¹⁷⁾。これらの耐食性鋼の開発は主として日本で行われているが、韓国においても研究され、0.57% C-2.5% Si-0.5% Mn-0.5% Cr-2.0% Ni鋼の材料開発の情報がある¹⁸⁾。これらの研究に伴って、合金元素の耐食性への影響に関する系統的な研究報告がなされてきた。例えば、福住らは耐孔食性の評価としてステンレス鋼の孔食電位測定法に準拠した方法を提案している¹⁷⁾。SUP10をベース鋼としてSi、Cr、Mo、Cu、Ni、Co、P、Sb、Bを添加し、孔食電位（擬似孔食電位と呼んでいる）と添加元素との関係を図9のように報告している。この結果、Bは微量添加により最も耐孔食性を向上させ、Si、Ni、Cr、Cu、Co、Sbは添加量の増加にしたがって耐孔食性を増し、Mo、Pは孔食性を低下させるとまとめている。一方、木村らはCu、Ni、Crおよ

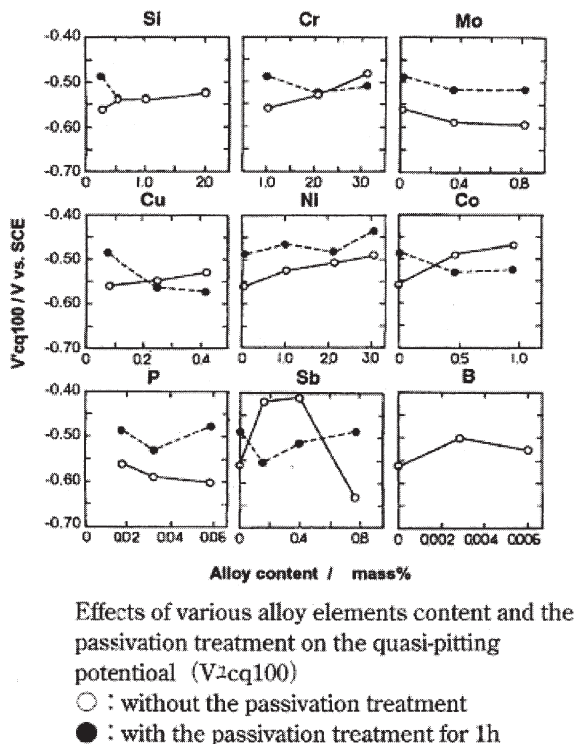


図9 種々の合金元素添加と不動態化処理の擬似孔食電位への効果

びVの添加の耐食性への影響を腐食減量により評価し、腐食疲労強度へのこれらの元素の影響を腐食後の疲労試験寿命によって評価した¹⁹⁾。この結果、図10のようにNi、Cr、Cuは腐食減量を少なくし、Vは逆に腐食を促進させるという結果を得ている。一方、腐食疲労寿命は図11のようにCuとNiの添加により向上し、CrとVの添加により劣化するとする興味深い結果を報告をしている。この解釈としてCrは耐食性（腐食減量）に効果を示すものの、腐食ピット底でのPHを低下させ結果として図12のように腐食ピット深さを大きくすることから腐食疲労寿命を低下させるとしている。このCrの腐食疲労寿命への影響は、図13のように腐食疲労寿命のピット深さとの強い相関から説明される。また、Vは耐食性・ピット深さともに悪影響を及ぼしている。Vは従来より結晶粒微細化効果のある元素として、また水素トラップ効果のある元素としてばね鋼では多用されてきたが、希少資源という背景もあり、今後はその利用に関し慎重になると予想される。最近では、Vと同様に結晶粒微細化効果を示すTiとの比較で、その結晶粒微細化効果や腐食疲労に及ぼす影響に

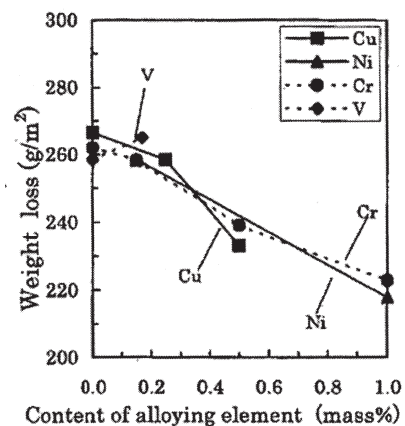


図10 合金元素量と腐食減量の関係

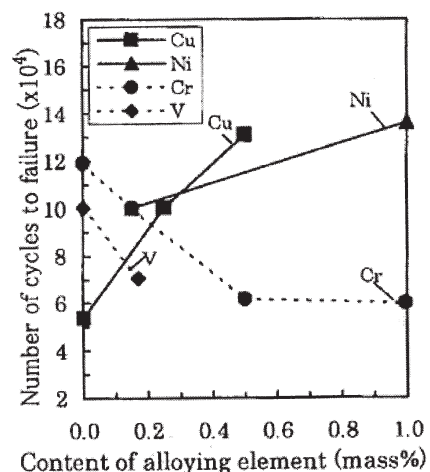


図11 合金元素量と腐食疲労寿命の関係

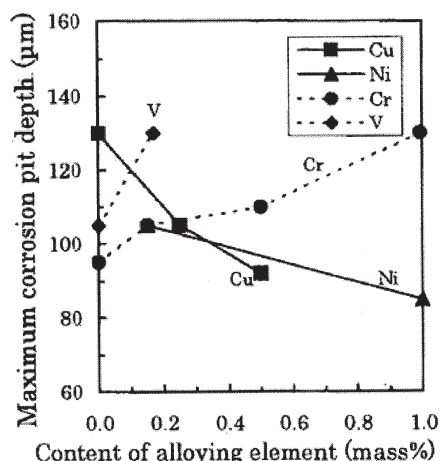


図12 合金元素量と最大腐食ピット深さの関係

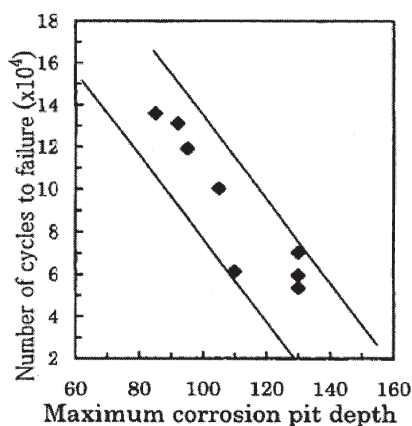


図13 最大腐食ピット深さと腐食疲労寿命の関係

関する研究がある²⁰⁾。

6 まとめ

ばねの軽量化要求は今後も続くと考えられる。しかし、ばねの腐食疲労の研究はまだ緒についたばかりであり、さらに価格面での制約も大きいことから、合金元素の腐食疲労への影響に関するより定量的な研究や評価法そのものの研究開発が今後とも重要になってくるものと考えられる。

参考文献

- 1) 丹下彰, 河部望, 石川裕二: ばね技術研究会2004年度春季講演会論文集, 軽合金材料のばね特性評価研究委員会, (2004), 25.
- 2) 戴下毅士, 高村典利, 丹下彰: チタン合金製弁ばねの開発, ばね論文集, (1996) 41, 1.
- 3) 杉山充弘: 懸架コイルばね, 特殊鋼, 54 (2005) 5, 21.
- 4) 阿久津忠良他: 高強度懸架ばね鋼の開発, 電気製鋼, 63 (1992) 1, 70.
- 5) 丹下彰, 小山博, 辻博人: ばねの疲労特性に及ぼす温間ショットピーニングの効果, ばね論文集, (1999) 44, 13.
- 6) 新倉芳治, 小川登, 高橋栄治: 耐へたり用High-Siばね鋼について, ばね論文集, (1979) 24, 2.
- 7) 山田凱郎, 小新井春朗, 川口康信, 芦田真三: 耐へたり性に優れた新懸架ばね用鋼 (SRS60), 日本金属学会会報, 23 (1984) 6, 526.
- 8) 斉藤誠, 伊藤幸生: 超清浄ばね鋼の特徴について, ばね論文集, (1985) 30, 11.
- 9) 小山博, 北村朗, 丹下彰: ばね鋼の疲労き裂伝播特性について, ばね論文集, (1984) 29, 30.
- 10) 小曾根敏夫, 横手信久, 栗本衛: ばね鋼の破壊靱性に関する研究, ばね論文集, (1983) 28, 1.
- 11) 元村博春: アノード分極曲線によるばね鋼の耐食性の評価, 三菱製鋼技報, 28 (1994) 1-2, 55.
- 12) 伊藤幸生, 米口明雄: ばね鋼の腐食耐久性評価方法とその応用, ばね論文集, (1998) 43, 37.
- 13) 中山武典: 第247回例会 鉄鋼の水素脆化, 腐食防食部門委員会資料, 日本材料学会, 44 (2005) 247.
- 14) 稲田 淳, 下津佐正貴, 茨木信彦, 辻 博人, 杉山充弘: 腐食耐久性に優れたTi添加懸架ばね用鋼の開発, ばね論文集, (2001) 46, 33.
- 15) 紅林 豊, 伊藤幸生, 米口明雄: 高強度ばね鋼の開発と自動車懸架用ばね鋼への応用, ばね論文集, (2000) 45, 1.
- 16) 中野智弘, 榊原隆之, 脇田将見, 杉本 淳: 腐食疲労強度の向上を重視した高強度懸架ばねの開発, ばね論文集, (2001) 46, 7.
- 17) 福住達夫, 三澤俊平: 合金元素の添加と化学的不働態化処理による自動車用ばね鋼の耐孔食性と孔食起点水素脆化特性の改善, ばね論文集, (2005) 50, 1.
- 18) XU Dexiang and YIN Zhongda: The Tendency to High Strength of Spring Steels and The Effect of Alloying Elements, Journal of Iron and Steel Research Int., China, 39 (2004) 1, 67.
- 19) 木村和良, 木村利光, 羽生田智紀: ばね鋼の腐食疲労寿命におよぼす合金元素の影響, 電気製鋼, 75 (2004.1) 1, 19.
- 20) 吉原 直, 茨木信彦, 杉山充弘, 丹下 彰: ばね腐食疲労におよぼすTi, V合金元素の影響, ばね論文集 (2006) 51, 1.

(2006年10月2日受付)