

# 高強度懸架ばね用鋼の腐食疲労特性とその改善

中山武典(工博)\*・岩田多加志\*・長尾 護\*・下津佐正貴\*\*・茨木信彦\*\*・稲田 淳\*\*

\*技術開発本部・材料研究所 \*\*神戸製鉄所・条鋼技術部

## Corrosion Fatigue Life Improvements in High Strength Wire Rods for Suspension Springs

Dr. Takenori Nakayama・Takashi Iwata・Mamoru Nagao・Masataka Shimotusa・Nobuhiko Ibaraki・Atsushi Inada

A new suspension spring steel JHS1900 designed with a maximum shear stress of 1 200MPa and having excellent corrosion fatigue properties has been developed. Corrosion fatigue life improvement was achieved by improving resistance to pitting corrosion and hydrogen embrittlement. Corrosion resistance was improved through rust composition control with the addition of copper, nickel and chromium. Hydrogen embrittlement was improved through the introduction of a hydrogen trapping site with the addition of titanium.

まえがき = 近年、地球環境保護への関心が高まる中で、自動車に代表される輸送機に対しては、軽量化による燃費の向上やCO<sub>2</sub>ガス排出の抑制などの要求が高まっている。こうした軽量化対策の一環および居住空間の拡大指向などから、自動車にもちいられる懸架ばねにおいては、従来より高強度材の採用が進んでいる。ちなみに、乗用車用懸架ばねにおける設計最大応力は、最大せん断応力( max)で1980年に820MPaから980MPaレベル、1987年1 080MPaレベルにまで高められ、現在では1 270MPaレベルの懸架ばねが一部実用化されている<sup>1)</sup>。懸架ばねの高強度化には、耐へたり性、疲労特性確保の観点から、素線の強度を高める必要があるが、懸架ばね用鋼の高強度化および設計応力の増大により、腐食疲労などのいわゆる環境強度特性の劣化が懸念されている。

一般に、鋼の腐食疲労強度低下については、腐食ピットが疲労の起点となってき裂発生を促進するためといわれている<sup>2)</sup>。筆者らも先に、 max = 1 270MPa級の高強度懸架ばね用鋼の疲労強度と腐食ピットの間関係を調べた結果、疲労き裂は素線表面の腐食ピットを起点として発生し、第1図に示すように、腐食ピットを低減することにより、疲労特性がいちじるしく改善されることが知られている<sup>3)</sup>。また、腐食ピットは素線表面の腐食生成物の構造・組成と関係があり、生成物の構造が非晶質であるほど腐食ピット深さが浅くなることも明らかにされている<sup>4)</sup>。また、腐食ピット先端では溶出金属イオンの加水分解反応あるいは錆生成反応によるpH低下が考えられることから、腐食疲労強度低下への水素の寄与も予想される。したがって、高強度ばね用鋼の腐食疲労特性の改善には、成分調整によって、生成物を非晶質化して腐食ピットを低減するとともに水素脆化を制御するこ

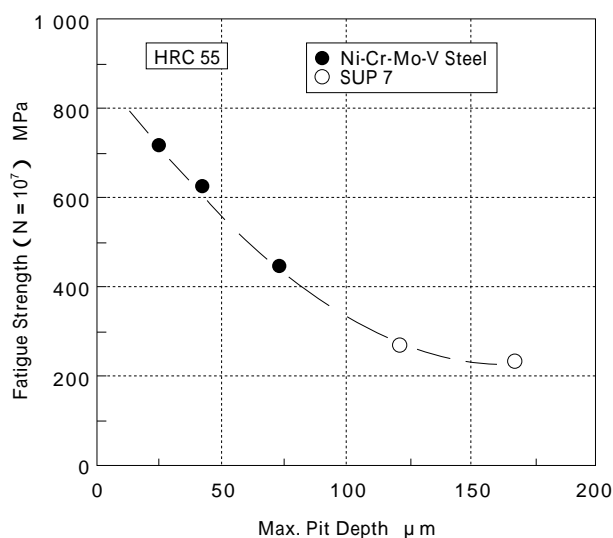
とが効果的であると考えられる。

本稿では、 max = 1 200MPa級の高強度ばね用鋼について、成分調整による腐食ピット低減の観点より腐食疲労特性の改善を試みるとともに、水素脆化感受性を考慮することによって、よりいっそうの腐食疲労特性の改善が達成されることが明らかになったので、以下に報告する。

### 1. 実験方法

#### 1.1 供試材

供試材の化学組成を第1表に示す。現用SAE9260鋼(JIS SUP7相当)に加えて、生成物の非晶質化・緻密化元素として知られているCu, Ni, Crなどの添加により腐



第1図 高強度鋼の腐食ピット深さと疲労強度の関係<sup>2)</sup>  
Fig. 1 Relationship between maximum pit depth and fatigue strength (N=10<sup>7</sup>) in high strength steels<sup>2)</sup>

第1表 供試材の化学組成  
Table 1 Chemical compositions of steels tested (mass%)

| Steel Grade | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | V    | Ti   | Al    |
|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| UHS1900     | 0.42 | 1.69 | 0.18 | 0.004 | 0.007 | 0.20 | 0.33 | 1.06 | 0.15 | 0.05 | 0.027 |
| Ti-free     | 0.48 | 1.56 | 0.29 | 0.012 | 0.002 | 0.19 | 0.40 | 1.01 | 0.16 | tr.  | 0.019 |
| SAE9260     | 0.59 | 2.06 | 0.94 | 0.012 | 0.011 | tr.  | tr.  | 0.15 | tr.  | tr.  | 0.019 |

第2表 実体ばねの諸元

Table 2 Dimensions of spring tested

|                        |          |
|------------------------|----------|
| Wire Diameter          | 12.5mm   |
| Average Coil Diameter  | 110 mm   |
| Active Number of Coils | 5.39     |
| Free Height            | 382 mm   |
| Spring Constant        | 33.4N/mm |

食ピット低減をねらったTi無添加鋼(以下Ti-freeと略す),さらにTi添加により耐水素脆化性向上をねらったUHS1900を試作した。

UHS1900とTi-freeの両鋼は真空溶製材,SAE9260鋼は転炉溶製材であり,いずれも調質して硬さ(HRC)調整をおこなった後に各試験片を作製した。とくに指定のない場合には,SAE9260はHRC50.5,Ti-freeおよびUHS1900はHRC53.5とした。

### 1.2 材料特性評価

腐食特性については,11×60mm寸法の丸棒試験片をもちい,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サイクルまでおこない,腐食減量,腐食ピットの深さおよびアスペクト比,ならびに生成錆の組成を評価した。腐食減量は,試験前重量と錆除去後の試験後重量の差を腐食面積で除した値とした。

腐食ピット深さは,レーザー顕微鏡によって24mm<sup>2</sup>面積×14区画の各最大ピット深さを極値統計解析し,サンプル全表面積(691mm<sup>2</sup>)の最大ピット深さを推定した。アスペクト比は,各区画の最大ピット深さをピット径で除した値を算出し,それら14個の平均値をもちいた。生成錆の組成は,外層錆を除去した内層錆を対象とし,内部標準法をもちいたX線回析<sup>5)</sup>により定量した。

水素脆化試験は,1.5×15×65mm寸法の平板サンプルをもちい,4点曲げにて所定の応力を負荷後,室温,0.5mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.01mol KSCN水溶液中にて陰極チャージ(-700mV vs SCE)をおこなって破断時間を求めた。さらに,一部のサンプルについては,API-MS法<sup>6)</sup>により鋼中拡散性水素量の測定をおこなった。

腐食疲労特性およびばね特性は,第2表に示した諸元の実体ばねを試作して評価した。腐食疲労試験条件を第2図に示す。

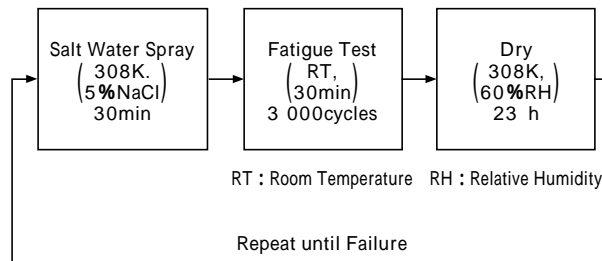
そのほか,抽出レプリカ/分析電子顕微鏡法による鋼中介在物・析出物の観察やEPMAによる錆層断面の元素分析なども実施した。

## 2. 実験結果および考察

### 2.1 腐食特性

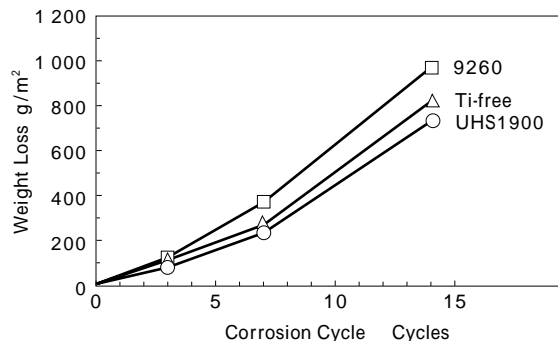
CCT試験でえられた各鋼の腐食減量,推定腐食ピット深さ,および腐食ピットのアスペクト比の経時変化を,それぞれ第3図,第4図および第5図に示す。

SAE9260に比較して,Ti-freeおよびUHS1900の両鋼は,腐食減量および腐食ピット深さの値がともに小さく,耐食性に優れることが明らかである。また,両鋼の腐食



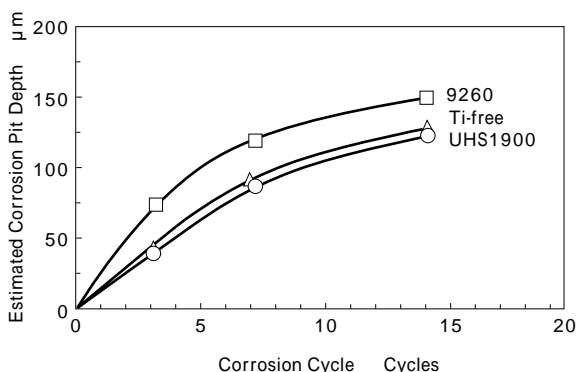
第2図 実体ばねによる腐食疲労試験条件

Fig. 2 Spring corrosion fatigue test condition



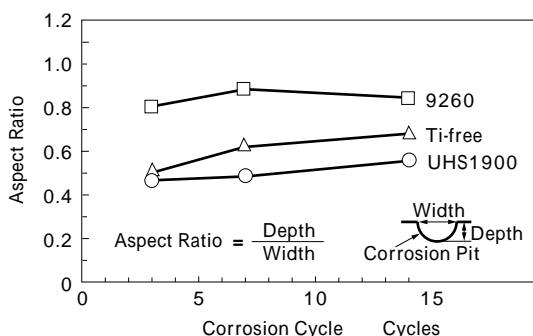
第3図 腐食減量の経時変化

Fig. 3 Relationship between corrosion cycle and weight loss



第4図 推定腐食ピット深さの経時変化

Fig. 4 Relationship between corrosion cycle and corrosion pit depth



第5図 腐食ピットのアスペクト比の経時変化

Fig. 5 Relationship between corrosion cycle and aspect ratio of pits

ピットのアスペクト比もSAE9260より小さいことから,応力集中を小さく抑える効果<sup>7)</sup>も期待される。ここで,Ti-freeおよびUHS1900の両者の比較では,腐食ピット深さは同等であるが,腐食減量とアスペクト比については後者の値が若干ながら小さく,腐食疲労特性には有利

と思われる。

## 2.2 水素脆化特性

第6図に、陰極チャージ4点曲げ試験による各鋼の水素脆化感受性評価結果を示す。本試験では、各鋼ともにHRC53.5を標準硬さとしたが、SAE9260については現行硬さのHRC50.5のサンプルも加えた。

一般に、負荷応力の増大にともない、短時間で破断する傾向が見られる。また、SAE9260に注目すると、硬さ(HRC)を50.5から53.5に高めることにより破断時間が短くなっている。したがって、負荷応力あるいは硬さ(強度レベル)の増大により、水素脆化感受性が高まることが明らかである。

次に、HRC53.5の各鋼の破断時間を比較すると、耐水素脆化特性はUHS1900 > SAE9260 > Ti-freeの順に優れている。すなわち、UHS1900は前述の耐食性序列と同様に、三者のなかで耐水素脆化特性にもっとも優れるが、Ti-free鋼はSAE9260よりも水素脆化感受性が高く、後二者の耐水素脆化特性の優劣が耐食性の場合と逆転することがわかった。

## 2.3 腐食疲労特性

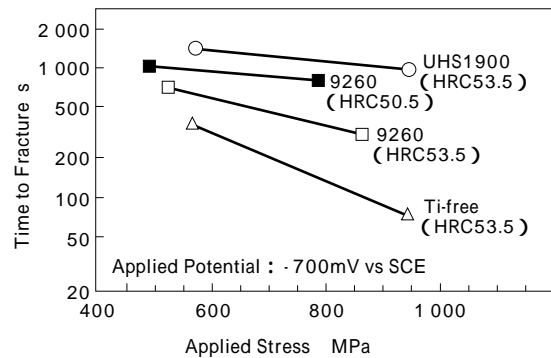
第7図に、実体ばねをもちいて、評価した各鋼の腐食疲労試験結果を示す。第6図の水素脆化試験と同様に、各鋼の硬さ(強度レベル)はいずれもHRC53.5を標準としたが、SAE9260については比較のため現行硬さのHRC50.5のサンプルも加えた。

全鋼種において応力振幅の増大あるいはSAE9260において硬さあるいは $\sigma_{max}$ の増大にともない、腐食疲労寿命が低下している。各鋼の寿命を比較すると、UHS1900 > Ti-free > SAE9260の順に腐食疲労特性が優れており、UHS1900の $\sigma_{max} = 1200\text{MPa}$ の腐食疲労寿命が現用のSAE9260鋼の $\sigma_{max} = 1000\text{MPa}$ と同等の寿命であることが明らかである。ここで、各サンプルの破面をSEM観察したところ、UHS1900は粒内破壊が主体であったが、Ti-freeおよびSAE9260は粒界破壊が主体であり、後述するように水素の寄与を示唆する破面形態であった。

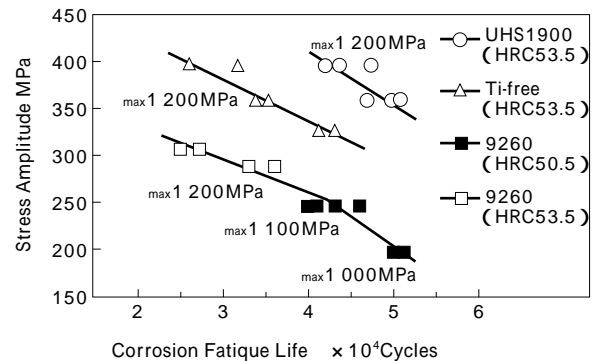
## 2.4 UHS1900の腐食疲労改善機構

以上の結果をまとめると、腐食疲労特性の改善には腐食ピット低減が効果的であるが、水素脆化も関与しており、水素脆化感受性を低下させることによって、なおいっそうの腐食疲労特性の改善が達成されることがわかった。すなわち、耐食性と耐水素脆化特性にともに優れたUHS1900が腐食疲労特性にもっとも優れることが確かめられた。以下に、UHS1900の腐食疲労特性改善に寄与したと考えられる耐食性と耐水素脆化感受性それぞれの向上機構について述べる。

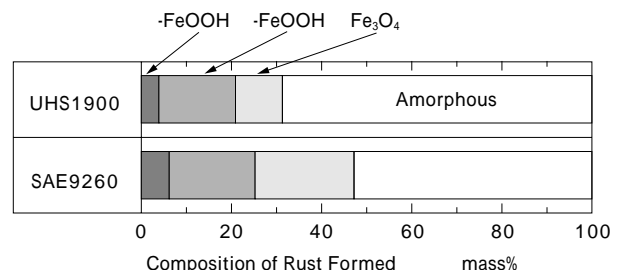
前述のように、一般に、鋼の耐食性には生成錆が関与するとされることから<sup>8)</sup>、UHS1900とSAE9260鋼の生成錆組成を調べた結果、第8図に示すように、前者は後者にくらべて、非晶質錆の割合が多いことが確認された。非晶質錆は、保護性に優れ、その割合が多いほど耐食性を向上させるといわれている<sup>9)</sup>。事実、著者らは、 $\sigma_{max} = 1270\text{MPa}$ 級のばね用鋼で、非晶質錆の割合の多いほど腐食ピット生成が軽減できることを報告している<sup>4)</sup>。



第6図 陰極チャージ4点曲げ試験結果  
Fig. 6 Results of cathodic charge four-point bending test



第7図 ばね腐食疲労試験結果  
Fig. 7 Spring corrosion fatigue test results



第8図 複合サイクル試験で形成された生成錆組成  
Fig. 8 Composition of rust formed by cyclic corrosion test

ここで、SAE9260とUHS1900の錆層断面のClの特性X線像を写真1に示す。前者では錆層断面全体にClが分布し、地鉄/錆層界面にもClの濃縮が見られるが、後者においては地鉄/錆層界面のみならず錆層中においてもClの分布(濃縮)は見られず、生成錆層が前者にくらべて緻密であることを示唆している。よって、UHS1900がSAE9260よりも耐食性に優れたのは、Cu、Ni、Crなどの添加により生成錆が非晶質化して保護性が高まり、塩化物イオンや水分などの腐食促進因子の侵入が抑制されたためと考えられる。その結果、疲労き裂の発生が遅延されて、腐食疲労特性の改善に寄与したものと思われる。

次に、陰極チャージ後にAPI-MS法により測定した各鋼の拡散性水素量と水素脆化感受性(第6図の破断時間)の関係を第9図に示す。一般に、鋼の水素脆化は鋼中拡散性水素が関与し、拡散性水素量が増大するにともない水素脆化感受性が高まるといわれている<sup>8)</sup>が、第9図においても今回の水素脆化感受性序列がこうした鋼中拡散性水素量で整理できることを示している。すなわち、

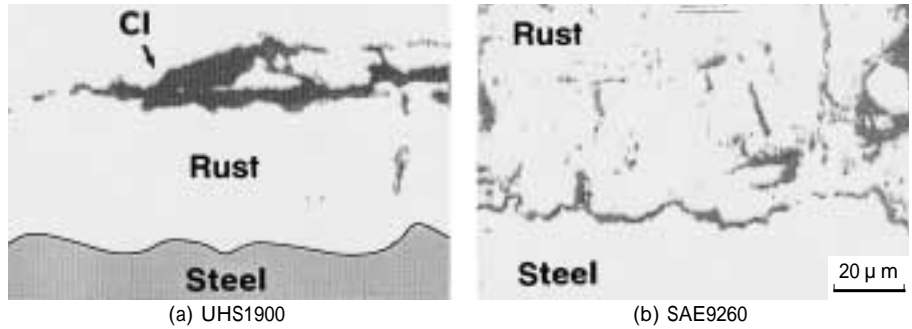
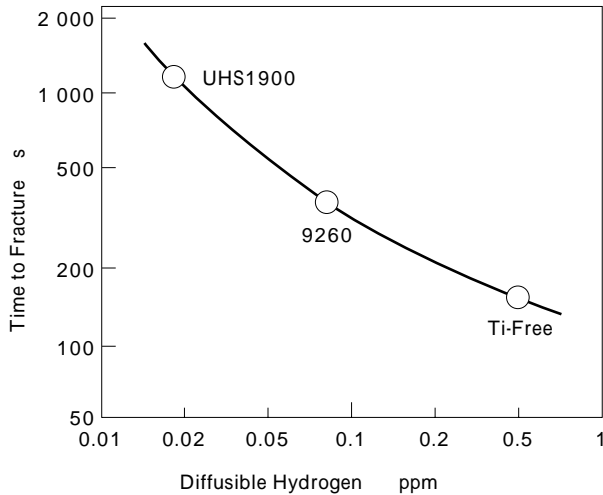


写真1 錆層断面中のCl元素の分布状況  
Photo.1 Distribution of Cl in rust



第9図 鋼中の拡散性水素量と水素脆化感受性との関係  
Fig. 9 Relationship between diffusible hydrogen and susceptibility to hydrogen embrittlement in high strength steel

拡散性水素量が少なくなるほど耐水素脆化特性に優れており、UHS1900はTi-freeおよびSAE9260にくらべて拡散性水素量が少ないことから耐水素脆化特性に優れたものと見なすことができる。

ここで、UHS1900とTi-freeを比較すると、成分的な違いはわずかに0.05mass%Tiの有無であるが、両鋼の拡散性水素量と水素脆化感受性には顕著な違いがあり、水素脆化に及ぼすTi添加の効果の大きさを示唆している。Tiは鋼中で炭窒化合物として存在するものと考えられることから、その存在状態を確認することを目的にUHS1900について抽出レプリカ法により分析電子顕微鏡観察をおこなった。粒内には $\mu\text{m}$ オーダサイズのTiN系析出物に加えて、写真2に示すように、サブ $\mu\text{m}$ オーダサイズの微細なTiC系析出物が多数観察された。いっぽうで、UHS1900の結晶粒度番号は11.5でSAE9260(粒度番号8.4)やTi-free鋼(粒度番号9.8)にくらべて結晶粒が細かく、韌性に優れる結果であった。

以上のことを考え合わせると、UHS1900においては、Tiを含有することにより、結晶粒が微細化して韌性が向上するとともに、粒内に微細なTi系析出物を分散させて、鋼中拡散性水素をトラップし非拡散性とすること(結晶粒微細化による粒界面積増大も水素トラップに寄与するものと考えられる)で、耐水素脆化特性がいちじるしく向上したものと考えられる。

むすび=高強度懸架ばね鋼の腐食疲労特性の改善には、疲労起点となる腐食ピット低減が有効であり、そのため

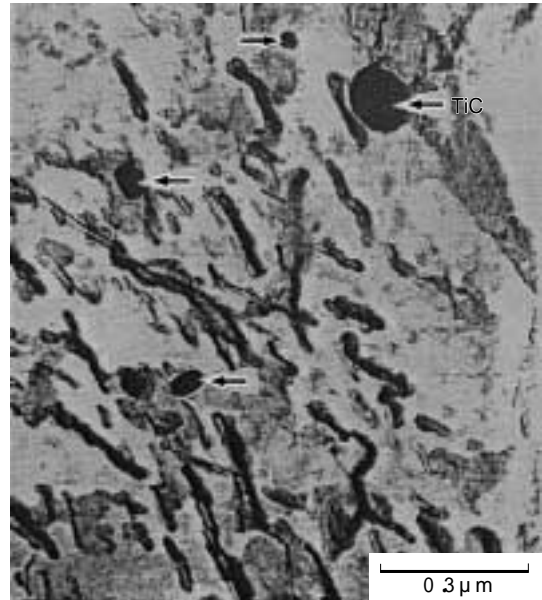


写真2 分析電顕より見られたUHS1900中のTiC析出物  
Photo.2 TiC precipitates in UHS1900 observed by STEM

には成分調整による生成錆の緻密化・非晶質化が効果的である。さらに、Tiを添加することによって、結晶粒を微細化させて韌性を高め、Ti系微細析出物を粒内に分散させることにより、拡散性水素がいちじるしく低減して耐水素脆化特性が格段と向上し、腐食疲労特性のさらなる改善にも寄与することが判明した。今回紹介したUHS1900は以上のような腐食ピット低減と耐水素脆化改善の両面から腐食疲労向上をはかった新鋼種であり、 $\sigma_{\text{max}} = 1200\text{MPa}$ の設計応力において現用のSAE9260鋼の $\sigma_{\text{max}} = 1000\text{MPa}$ と同等の腐食疲労寿命を有している。実体ばね評価で、大気疲労性や耐へたり性などのばね特性も優れていることが確かめられている。今後、環境脆化特性に優れたUHS1900は $\sigma_{\text{max}} = 1200\text{MPa}$ 級の新たな高応力懸架ばね用鋼として期待される。

#### 参考文献

- 1) 中村守文: 第141回, 第142回西山記念講座, “条鋼製品の高強度化” p.191.
- 2) 駒井謙治郎ほか: 材料, Vol.36 (1987), p.141.
- 3) 下津佐正貴ほか: 材料とプロセス, Vol.6 (1993), p.839.
- 4) 宮内重明ほか: 材料とプロセス, Vol.7 (1994), p.1802.
- 5) 岩田多加志ほか: 腐食防食1995講演集, C306 (1995), p.341.
- 6) 中山武典ほか: 材料とプロセス, Vol.6 (1993), p.838.
- 7) たとえば, 中山武典ほか: 鉄と鋼, 第76巻 (1990), p.131.
- 8) たとえば, 南雲道彦: (社)日本鉄鋼協会, 高強度鋼の遅れ破壊研究会編集 “遅れ破壊解明の新展開” (1997), p.1.