



## 私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

# ショットピーニングによる懸架ばねの高性能化に関する新たな視点

A New Aspect of The Effect of Shot Peening on Performance Improvement of Suspension Springs

久保田 学 新日鐵住金(株)  
鉄鋼研究所  
Manabu Kubota 上席主幹研究員

## 1 はじめに

鉄鋼材料を用いて優れた機能性・経済性を持つ機械部品・構造用部材などを実現する手法として、新しい材料の開発、または材料は従来のもので、加工や熱処理技術などの工法開発、あるいは両者を組み合わせた技術開発などが挙げられる。拙著「多段ショットピーニング後に人工腐食ピットを施した懸架ばね用鋼の疲労特性に及ぼす水素の影響<sup>1)</sup>」は、自動車のサスペンションなどに用いられるコイルばねである、懸架ばねの軽量化の指針を得ることを目的として行われた一連の研究のひとつであり、上記の開発手法のうち、加工技術(ショットピーニング)によって懸架ばねの性能を向上することに着目したものである。本稿では、ショットピーニングの活用に着目した経緯と、実験、考察にあたって工夫したいいくつかの点について述べる。

## 2 研究の背景

自動車の懸架ばねは自動車一台あたりの重量が8~20kgと比較的重い部品である<sup>2)</sup>ことから、その軽量化は自動車の燃費の改善に貢献する。懸架ばねを軽量化するためには、鋼材の疲労強度を向上することが必要である。懸架ばねの疲労強度を向上する手段のひとつとして、ショットピーニングが活用されている。ショットピーニングとは冷間加工の一種であり、多数の投射材粒子を高速で金属表面に衝突させる処

理である。ショットピーニングにより表面の硬さが増し、また繰り返し荷重に対しては表層部に付与される圧縮残留応力が相殺する形で作用するため、部品の疲労強度を向上することができる。ショットピーニングは比較的簡単な操作で得られる効果が大きいため、さまざまな分野に適用されている<sup>3)</sup>。

一方、自動車の足廻りの使用環境では、懸架ばねの塗装が跳ね石、ばねの線間接触などによって損傷し、そこから侵入する水分や融雪剤に起因する塩分の影響によって鋼材が腐食し、疲労強度が低下する、いわゆる腐食疲労が問題となる場合があり、懸架ばねの高強度化のおもな阻害因子の一つとなっている。腐食環境の厳しい北米で走行していた乗用車から回収した懸架ばねの腐食ピットの深さを調査した例をFig.1 (a) に示す<sup>4)</sup>。また、回収した懸架ばねに対して疲労試験を行ない、疲労折損させたときの破面の起点部に認められた腐食ピットの例をFig.1 (b) に示す<sup>4)</sup>。これらの例は、走行中に深さ150 $\mu$ m程度の腐食ピットが形成され、腐食ピット底の応力集中部を起点として疲労き裂が生成することを示している。最近、ショットピーニングによる残留応力分布と試験片表面に施した人工欠陥の関係について系統的な研究が行われており、ショットピーニングによって表面欠陥による疲労強度の低下を抑制することが可能であることが示されている<sup>5-9)</sup>。したがって腐食ピットとショットピーニングの間には何らかの関係があり、腐食疲労特性にも影響を与えていることが予想される。

本研究対象の懸架ばね用鋼は、高炭素低合金鋼を引張強さ

\* [今回の対象論文]

久保田学(新日鐵住金、金沢大)、鈴木崇久(新日鐵住金)、平上大輔、潮田浩作(新日鐵住金、金沢大):「多段ショットピーニング後に人工腐食ピット加工を施した懸架ばね用鋼の疲労特性に及ぼす水素の影響」, 鉄と鋼 Vol.100 (2014), No. 8, pp.974-983 (第78回俵論文賞受賞)

1800MPa 程度に調質した低温焼戻しマルテンサイト鋼であって、鉄鋼材料の中でも高強度の部類に属する。このため、腐食疲労と水素脆化の関係も懸念されている<sup>10)</sup>。また、水素が疲労寿命や疲労強度を低下させることも数多く報告されている<sup>11,12)</sup>。さらに、一般に高強度鋼は低強度鋼に比べて靱性が低いことから、靱性が腐食疲労特性に影響していることも懸念される。

このように、懸架ばね用鋼の腐食疲労特性には腐食、水素、靱性、ショットピーニングによる残留応力など、複数の因子が関係しており、各因子が互いに影響し合っていると考えられる。このような状況から、懸架ばねの腐食疲労特性にはさまざまな因子が関係しているけれども、それぞれの因子の寄与率ほどの程度なのだろうか？その中でも、支配因子と呼べるものはあるのだろうか？これらを明らかにすることによって、より合理的な懸架ばね用鋼材の設計やばね製造の工法を見出すことができないだろうか？という疑問を持った。このため、一連の研究の出発点として、腐食疲労特性を向上するための最も有効かつ合理的な対策を明らかにするため、懸架ばね用鋼の腐食疲労特性に及ぼす旧オーステナイト粒径（靱性にかかわる指標）、腐食ピット、ショットピーニングによる残留応力、水素脆化の因子を取り上げ、これらを極力分離して評価することに取り組んだ。

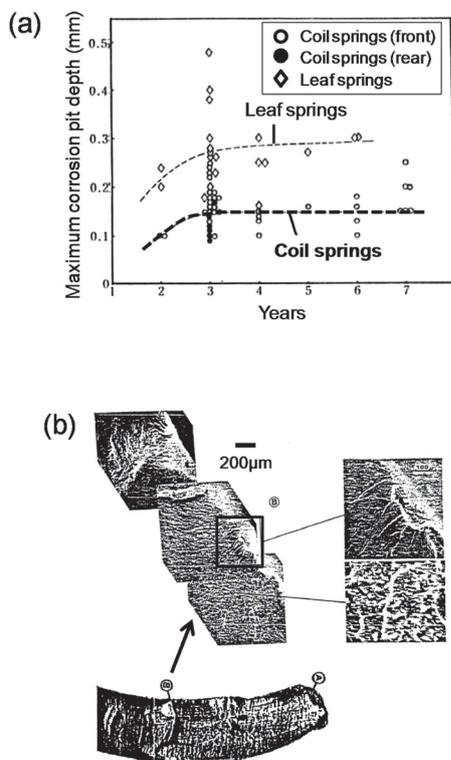


Fig.1 Investigation into the suspension springs which were collected from automobiles used in North America<sup>4)</sup>; (a) relationship between number of years and maximum corrosion pit depth and (b) fatigue fracture surface by additional fatigue test of collected spring, showing a corrosion pit as the fatigue crack initiation site.

### 3 懸架ばね用鋼の腐食疲労特性の支配因子解明に関する取り組み<sup>13,14)</sup>

本研究に着手するに先だって取り組んだ、腐食疲労特性の支配因子解明に関する研究について述べる。腐食疲労特性の支配因子を検討するため、旧オーステナイト粒径、人工腐食ピットの有無、ショットピーニングの有無、水素吸蔵量などについて、種々組み合わせた多種類の回転曲げ疲労試験片を準備した。水素にかかわる実験については共同研究者らが担当し、安定した水素チャージ方法、疲労試験中の試験片からの水素逃散を防止する方法、試験片破断後に速やかに試験片中の水素量を測定する仕掛けなど、当社のこれまでの水素脆化研究で培った実験的なノウハウを総合的に活用してデータを採取した。

疲労特性に及ぼすショットピーニング、拡散性水素量、および人工腐食ピット深さの影響を Fig.2 に示す。回転曲げ疲

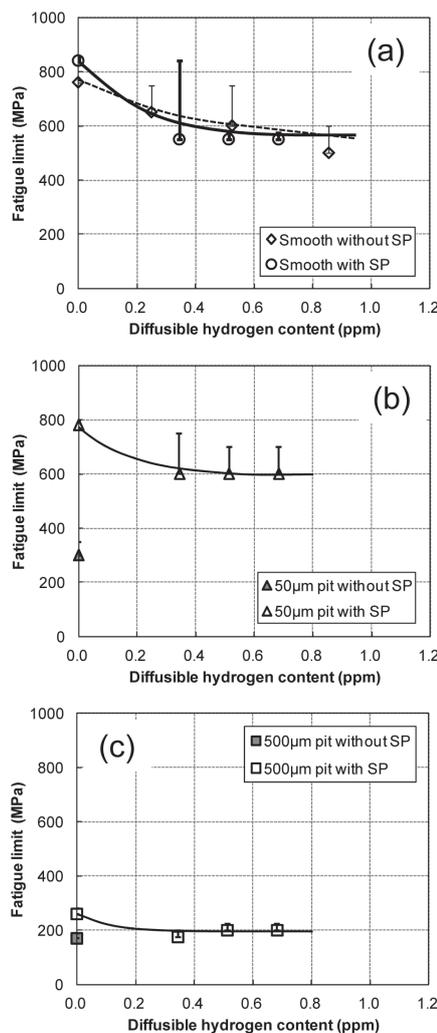


Fig.2 Relationship between diffusible hydrogen content and fatigue limit of specimen with and without shot peening<sup>4)</sup>; (a) smooth specimen, (b) specimen with 50 μm depth artificial corrosion pit and (c) specimen with 500 μm depth artificial corrosion pit.

疲労強度はショットピーニングの有無によらず、拡散性水素量の増加によってゆるやかに低下していくことが分かった (Fig.2 (a))。これに対して、ショットピーニングを行っていない場合には、ごく浅い人工腐食ピットを施しただけで疲労強度が大幅に低下し、その低下量は拡散性水素による低下量よりも大きいことが分かった (Fig.2 (b))。また、ショットピーニングを行った場合には浅い人工腐食ピットはほぼ無害化することができるが (Fig.2 (b))、圧縮残留応力が存在している深さを超える深さの人工腐食ピットを施した場合にはいずれの試験片においても疲労強度が大幅に低下すること (Fig.2 (c)) などについて、定量的に示すことができた。これらの結果により、腐食疲労強度に対して最も影響が大きい因子は腐食ピット深さと圧縮残留応力の関係であり、この関係を改善することが懸架ばねの腐食疲労特性の向上に対して最も効果的であることが分かった。この研究は日本ばね学会の論文誌である「ばね論文集」に2報の論文<sup>13,14)</sup>としてまとめられており、2013年度の日本ばね学会賞論文賞を受賞することができた。

## 4 多段ショットピーニング材の疲労特性に及ぼす水素の影響<sup>1)</sup>

### 4.1 ショットピーニングの強化による腐食疲労特性の向上

低合金鋼の成分範囲では、懸架ばねの表面に不可避免的に形成される腐食ピットの深さを安定して抑制することは難し

い。一方、前節の取り組みによって、懸架ばねの表層部に従来よりも大きく、深い圧縮残留応力分布を導入することによって腐食疲労特性を効果的に向上することができる可能性が示唆された。そこで本研究では、懸架ばねの製造において一般的に行われている二段ショットピーニング (一段目に大きな投射材粒子を使用 (深い位置の圧縮残留応力を付与) + 二段目に小さな投射材粒子を使用 (表面近くの圧縮残留応力を付与)) に加えて、最初にさらに大きな投射材粒子を使用する処理を追加した、三段ショットピーニングを新たに検討した。これにより、回転曲げ疲労試験片に対して、二段ショットピーニング材よりも大幅に深い圧縮残留応力分布を付与することができた。疲労試験の結果、三段ショットピーニング材は二段ショットピーニング材と比べて、深い腐食ピットが形成された場合においても効果的に疲労強度を向上することができること、ショットピーニング強化の効果は水素チャージを行った場合においても有効であることを明らかにすることができた。

### 4.2 水素チャージによる疲労き裂の起点部の変化

三段ショットピーニング後に深さ 250  $\mu\text{m}$  という比較的大きな人工腐食ピット加工を施した試験片の疲労破壊の起点部は、水素チャージを行わない場合は人工腐食ピットの底であるが、水素チャージを行った場合は人工腐食ピット以外の試験片内部に変化した (Fig.3)。この理由について本論文では、三段ショットピーニングによって深い位置まで大きな圧縮残

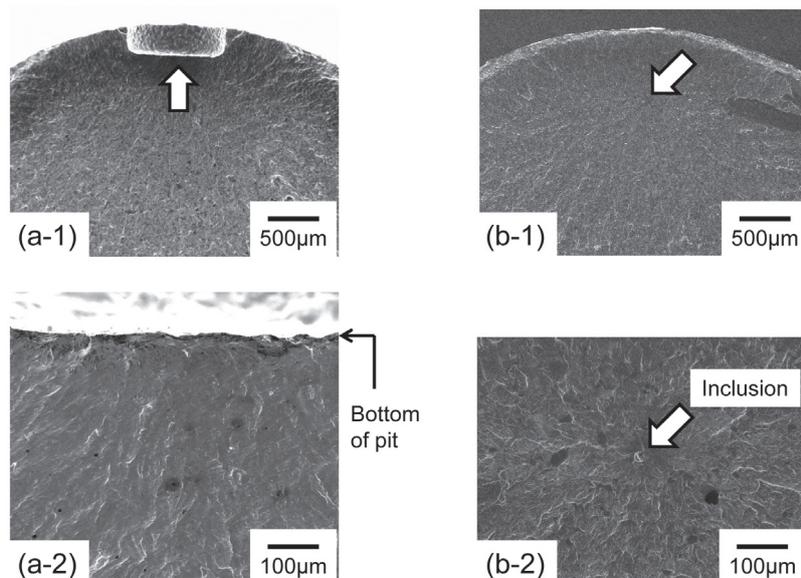


Fig.3 Typical fracture surface of specimen with 250  $\mu\text{m}$  depth artificial corrosion pit after triple shot peening<sup>1)</sup>. (a-1) specimen without hydrogen charging (SEM micrograph with low magnification), (a-2) high magnification, showing an artificial corrosion pit as the fatigue crack initiation site, (b-1) specimen with hydrogen charging (low magnification) and (b-2) high magnification, showing an inclusion as the fatigue crack initiation site.

留応力分布が導入された結果、圧縮残留応力が作用している深さよりも深い位置に存在する、微細な非金属介在物の周囲にトラップされている水素の影響によって初期疲労き裂が生成し、その後の疲労き裂の進展がマトリックス中に存在する拡散性水素によって助長されたためであると考察した。しかしながら疲労試験を行っていた当時はこのような見解までは思い至らず、深い位置まで圧縮残留応力が存在しているとはいえ、大きな人工腐食ピットが疲労き裂の起点とならないことを不思議に思った。そこで、試験数の増加による再現性の確認、破面の詳細観察、人工腐食ピット加工および疲労試験過程における残留応力の変化、残留応力に及ぼす水素の影響など、当時考えついた要因について共同研究者らとともに追加調査を行っていった。最終的な考察に至るまでには時間がかかったが、追加調査のデータは論文にまとめる段階で活用することができた。

介在物と水素、およびそれらの相互作用に着目してからは、高強度鋼の疲労破壊に関して、介在物と水素の影響について研究された例は従来から数多く報告されているので<sup>15-19)</sup>、考察するにあたってこれらの先人の方々の知見が大いに参考となった。また、介在物起点の疲労破壊に及ぼす応力モードの影響に関する研究<sup>20,21)</sup>からは、本研究の工業的な応用可能性を考察するための有益な示唆を得ることができた。

## 5 おわりに

本研究を含む一連の研究は、複数の因子が関係する複雑な現象について、多種の実験結果を総合することによってそのメカニズムを説明する試みでもある。このため研究を始めた当初は、すべての実験結果について最終的に首尾一貫して説明することができるのかどうか、危惧を抱いたこともあった。依論文賞の受賞理由として“各因子の影響を分離する実験手法を開発して各因子に関する統一的な解釈を導き、今後の工業的な材料設計指針に資する知見を導いた”ということを挙げていただいたときには、報われる思いであった。

本研究によって、ショットピーニングは懸架ばねの疲労強度を向上する効果があるだけでなく、ショットピーニング条件を強化することによって腐食疲労特性をも改善することができることを示すことができた。しかしながら、さらなる腐食疲労特性の改善を図るためには、本研究では未着手の要因である腐食ピットの形成、および水素による介在物を起点とする疲労破壊の助長に対して研究を進めることによって、これらの抑制技術開発のための指針を提示することが必要であると考えている。おそらく、材料開発、工法開発のいずれか一

方からのアプローチのみでは実現が難しいと思われる。今後はこれらの材料・工法の両面からのアプローチによる技術開発の進展について期待したい。

## 参考文献

- 1) 久保田学, 鈴木崇久, 平上大輔, 潮田浩作: 鉄と鋼, 100 (2014), 974.
- 2) 稲田淳: 特殊鋼, 60 (2011) 7, 15.
- 3) ショットピーニングの方法と効果 ー金属疲労・残留応力ー, ショットピーニング技術協会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1997), 1.
- 4) 懸架ばね腐食疲労試験委員会: ばね論文集, 29 (1984), 115.
- 5) 高橋宏治, 天野利彦, 宮本貴正, 安藤柱, 高橋文雄, 丹下彰, 岡田秀樹, 小野芳樹: ばね論文集, 57 (2007), 9.
- 6) 高橋宏治, 林卓見, 安藤柱, 高橋文雄: ばね論文集, 55 (2010), 25.
- 7) 中川真樹子, 高橋宏治, 長田俊郎, 岡田秀樹, 古池仁暢: ばね論文集, 59 (2014), 13.
- 8) 高橋宏治, 安田順, 古池仁暢, 岡田秀樹: ばね論文集, 60 (2015), 7.
- 9) 高橋文雄, 丹下彰, 安藤柱: ばね論文集, 53 (2008), 1.
- 10) 中山武典, 稲田淳, 下津佐正貴, 茨木信彦, 河田和久: まてりあ, 41 (2002), 230.
- 11) 江原隆一郎: 日本機械学会論文集 A 編, 73 (2007), 1325.
- 12) M. Nagumo, H. Shimura, T. Chaya, H. Hayashi and I. Ochiai: Mater. Sci. Eng. A, 348 (2003), 192.
- 13) 久保田学, 平上大輔, 潮田浩作: ばね論文集, 58 (2013), 1.
- 14) 久保田学, 平上大輔, 潮田浩作: ばね論文集, 58 (2013), 9.
- 15) 村上敬宜, 野本哲志, 植田徹, 村上保夫, 大堀学: 材料, 48 (1999), 1112.
- 16) 村上敬宜, 植田徹, 野本哲志, 村上保夫: 日本機械学会論文集 A 編, 66 (2000), 311.
- 17) 村上敬宜, 小西寛, 高井健一, 村上保夫: 鉄と鋼, 86 (2000), 777.
- 18) 村上敬宜, 横山ナンシー尚子, 高井健一: 材料, 50 (2001), 1068.
- 19) 村上敬宜, 長田淳治: 材料, 54 (2005), 420.
- 20) 金澤健二, 阿部孝行: ばね論文集, 37 (1992), 15.
- 21) 阿部孝行, 金澤健二: ばね論文集, 39 (1994), 17.

(2016年7月15日受付)