加工誘起マルテンサイト変態 SUS ばねの破損事例

In cases of springs breakage in strain induced martensitic transformation SUS

Osumi Corporation . Namie Suzuki

Abstract

We conducted investigations into the factors causing stainless steel spring failures, including visual inspections and examinations of fracture and cross-sectional surfaces.

As a result, the cause of spring failure is thought to be the formation of cracks in the plating layer of the outer surface layer due to the usage environment and aging, allowing chlorine, hydrogen, and other substances to continuously enter the base material surface through these openings. As a result, the stainless steel's unique passive film disappeared, causing oxidation and grain boundary cracking on the surface. Furthermore, repeated rotational stress from the spring's operation kept being applied, which likely started the cracks at the grain boundaries and caused them to spread into the base material, eventually leading to final fracture.

Based on the elemental composition analysis, Vickers hardness, and microstructure, the base material was determined to be a spring steel of a cold forming austenitic stainless steel with strain induced martensitic structure.

From these results, it seems that this failure was caused by SCC(stress corrosion cracking) of the spring.

1．はじめに

近年、腐食性環境や厳しい乾湿環境下などで使用される部品材には、優れた耐食性と機械的強度の両立が求められている。例えば、クロム(Cr)やニッケル(Ni)を含有するオーステナイト系ステンレス鋼は、耐食性に優れ、成形性やコスト面にも優れた材料として、医療用部品、自動車部品、家庭用品などに一般的に広く使用されている。同鋼種においても、冷間加工を施すことで強度が向上し、高い引張強さを得る鋼種や、チタン(Ti)やニオブ(Nb)の添加による耐粒界腐食性の向上、あるいはニッケル(Ni)やけい素(Si)の増量による応力腐食割れ(SCC)の軽減など、用途に応じた鋼種選択が必要である。

しかしながら、ステンレス鋼の破損事例においては、腐食に起因するものが多く、その形態は、SCC、孔食、全面腐食および粒界腐食が多く発生している。

そこで本件では、冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼のばね材の SCC 破損についてレポートした。

2．調査方法および装置

調査方法を以下に記す。

(1)外観および破面マクロ観察

デジタルマイクロスコープ(KEYENCE 社製 VHX-7000 型)(以下、“DMS”と記載する)

(2)破断面詳細観察調査

・SEM-EDS(日本電子㈱製 JSM-7600 型、Thermo FisherScientific 社製 NORAN System7 312E)

・卓上型 SEM-EDX(㈱日立ハイテク製 MiniScope TM4000Plus Ⅲ、オックスフォード・インストゥルメンツ㈱製 AZtecLiveOne Explore)

(3)硬さ調査

・MMT-X7B (㈱マツザワ社製)(負荷荷重/500gf)

3. 調査結果

3.1 外観観察

折損したコイルばねの外観観察では、ϕ400μm、全巻き数 24 巻に対し、樹脂接着部より 11 巻目で折損していることが観察された。破損部周辺の外環側には褐色の腐食生成物が観られ、また、ばねの一方向で擦れ、損傷した様な形態も観察された。一方、内環側には線軸に対し垂直方向へ擦られたような平坦面が観察された(図 2)。

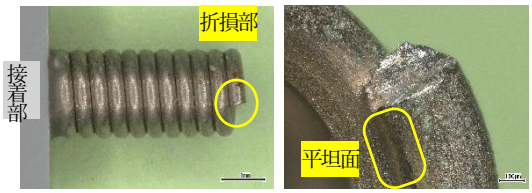


図 2　折損コイルばね(左図:全形、右図:内環側)

3.2 破面マクロ観察

破面観察では、内環側周辺を起点とし、その反対側で最終破断した形態で観察された。その破面形態は、起点推定部ではラチェットマーク様に観られ、破面中央部では回転を伴い破壊進展した段差形態であり、最終破断部では線軸上に延性された破面形態で観察された(図 3)。



破面全形　　A 部(起点部)　　B 部(最終破断部)

図 3　破面マクロ観察図

3.3 破面 SEM 詳細観察

破面 SEM 詳細観察では、起点推定部周辺で線軸上に沿って粒界割れした様な形態やその近傍で肉厚内部に進展するラビングが観察された。また破壊伝播部においては、各伝播部位で破壊進展方向に向かうストライエーションが観られ、最終破断部では、ばね引張方向へ延伸するディンプルが観察された。これらのことから、破壊は回転(ねじれ)を伴う引張応力負荷による内環側から発生した破壊と言えた。

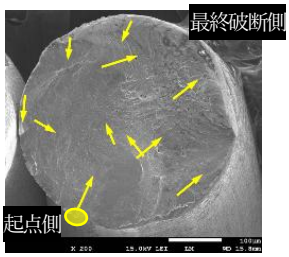
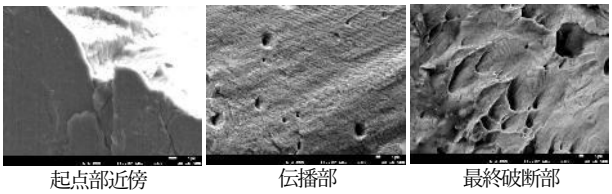


図 4　破面全形 SEM 像
(←:破壊伝播方向))



起点部近傍　　伝播部　　最終破断部

図 5　SEM 詳細観察像

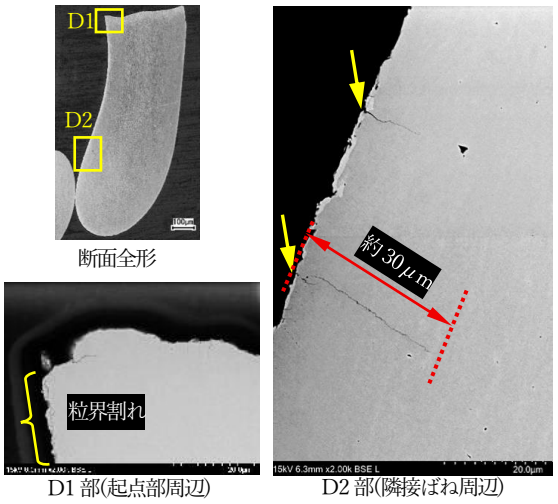
3.4 断面観察

外観観察にて腐食生成物が確認されたことから、腐食の影響について、断面からも確認および調査した。

その結果、外表層部にはニッケルメッキ層が観られ、特に起点側折損部を含む内環側では、メッキ割れが著しく、また一部では欠損して観察された。このメッキ割れした部位より、肉厚内部に進展する亀裂が複数ヵ所で観られ、これらの亀裂形態は、長さは約 10 μm～約 30 μm となり、直線かつ分岐した形態であり、SCC の兆候を示していた(図 6)。なお、外環側では、メッキ割れは観られるが、亀裂は確認されなかった。

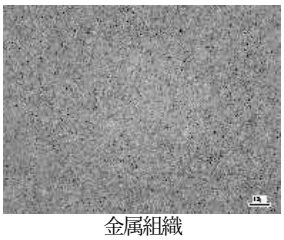
これらの結果より、ばね破損は、使用環境や経年変化に伴い、メッキ割れが生じ、素材表面に各種元素が侵入したことで、ステンレス鋼特有の不働態被膜が消失した。素材表層面では、酸化や粒界割れが発生し、肉厚内部へ亀裂が伝播したものと考えられた。

なお、金属組織においては、加工誘起マルテンサイト組織と言えた。



断面全形

D1 部(起点部周辺)　　D2 部(隣接ばね周辺)



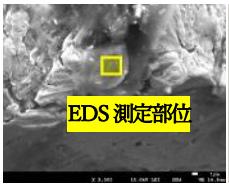
金属組織

図 6　断面観察図

3.5 元素組成分析

各部位の元素組成分析調査も実施した結果、起点部近傍では、素材の組成元素以外に、ナトリウム(Na)、塩素

(Cl)、カルシウム(Ca)、カリウム(K)が含まれていたことが確認できた。塩素(Cl)が明らかに検出されていたことからも破損要因は SCC であることが伺える。また、外表層面ではニッケル(Ni)が多く含まれ、母材には、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)、モリブデン(Mo)が含まれていたことから、ニッケルメッキ処理を施したオーステナイト系ステンレス鋼と言える(ただし、含有量においては半定量値分析であり種類の記号を判定するには至らない)。



起点近傍の SEM 像

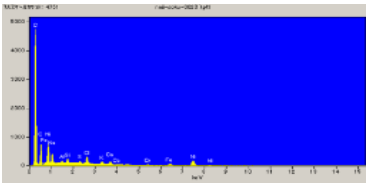

起点近傍部の元素組成スペクトル図

表 1　組成分析結果

		C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	合計
Area1	起点部近傍	50.4	16.4	3.9	0.7	1.1	0.6	2.5	1.3	1.5	0.7	-	2.7	18.2	-	100
Area3	表層面	5.2	5.4	-	1.1	0.5	-	0.5	-	0.3	6.2	0.6	20.1	59.5	0.6	100
Area4	母材	37.1	1.8	-	4.8	0.3	-	-		-	10.4	0.9	37.2	6.5	1.1	100

図 7　各部位の元素組成分析結果

3.6　ビッカース硬さ試験

最後にビッカース硬さ試験による硬さを測定した結果、外表層部では約 410HV となり、中央部では平均約 460HV となった。外表層部の硬さ低下は、腐食起因により低下したものと思われる。

表 2　硬さ測定結果(n=5 平均)(HV)

	1	2	3	4	5	平均
外表層部	424.1	402.3	384.5	411.1	405.6	406
中央部	462.9	463.9	463.9	459.8	462.9	463

4.　結果のまとめ

本調査および解析結果より、ばねが破損に至った要因は、使用環境や経年変化に伴い、外表層部のメッキ層にクラックが生じ、その開口部から母材表層部へ塩素や水素などが連続的に侵入したことと考えられる。これにより、ステンレス特有の不働態被膜は消失し、表層での酸化および粒界割れが発生した。さらに、ばねの作動に伴う繰り返し回転応力が負荷し続けたことで、この粒界割れを起点とし、母材内部へ亀裂が進展し最終破断に至ったと考えられた。

また、ばねは素線を円形に曲げて製造されることから、外環側に比べて、内環側の方が線材密度は高くなる。そのため内環側の応力負荷が大きく、割れやすいと考えられる。

母材においては、元素組成分析やビッカース硬さ試験結果より、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)、モリブデン(Mo)が含まれ、平均硬さ約 460HV となった。また金属組織より加工誘起マルテンサイト組織であることから、冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼のばね材と判定された。

以上の結果より、本破損はばねの SCC によるものと考えられる。

以上

参照文献

1)阿部孝之、金澤健二. "ばね鋼の繰返しねじり及び軸荷重疲労強度に及ぼす介在物の影響." ばね論文集 第 39 号, 1994.

2)監修　石原只雄. *最新　腐食事例解析と腐食診断法*. 2008.

3)金﨑俊彦、楢崎千尋、峯洋二、松岡三郎、村上敬宜. "ステンレス鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす水素の影響とマルテンサイト変態." 日本機械学会論文集(A 編)72 巻 723 号, 2006 年.

4)荒川次郎、上林三郎、西田彰、藤田照夫、佐藤和良. "ばね用耐孔食ステンレス鋼線について(第一報)." ばね論文集 第 20 号, n.d.

5)山本進、山尾憲人、小林智. "弁ばねの疲労破壊の進展." ばね論文集　第 41 号, 1996.

6)小泉義明、下田秀明、斉藤鉱夫. "線ばねの疲労破壊起点部の特徴について." ばね論文集 第 28 号, n.d.

7)中島正貴、植松美彦、秋田正之. "予ひずみを付与したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の疲労挙動に及ぼす加工誘起マルテンサイト変態の影響." 日本機械学会論文集(A 編)75 巻 759 号, 2009.

8)徳田慎平. "応力下でのステンレス鋼の局部腐食発生." まてりあ　第 61 巻 第 7 号, 2022.

株式会社オオスミ
分析技術グループ チーフ 鈴木奈美枝

