線ばねの折損，その形態と対応

Wire Spring Fractures — Configurations and Countermeasures

竹之下伸治**・調 公二郎**・青木 由充**

Nobuharu TAKENOSHITA・Kimijiro SHIRABE・Yoshimitsu AOKI

There are many properties required in wire springs and the most important is that the spring must be capable of maintaining its elasticity for a long period of time. Nevertheless, fractures in wire springs caused by a variety of factors are not uncommon, and as a manufacturer of steel wire for mechanical springs, we have many opportunities to analyze such fractured springs. This report is a summary of the results of the spring fracture analyses which we have carried out, and herein we have attempted to classify the configurations and causes of such fractures, especially for cold-coiled helical springs, and to offer some preventive measures.

1. 緒 言

線ばねには、多くの性質が要求されるが、最も重要なことは、長期にわたってその機能を維持すること、すなわち、早期折損や著しい永久変形（へたり）を生じないことである。特に折損は突然発生するために思わぬ事故につながることもある。しかしながら、実際には、種々の要因による線ばねの折損事故が発生する。本報告ではこれまで、筆者らが行った折損ばねの解析結果を整理し、主に、冷間成形コイルばねを対象にして、折損の形態、要因、並びに対策について述べ、ばねの製造、設計へフィードバックし、折損事故を未然に防ぐことに役立てたい。

2. 線ばねの折損事故要因

線ばねの折損事故は、ばね使用中に発生する場合が多いが、ばね成形中や機器への装着時に発生することもある。折損事故には種々の要因があり、大別すると表1のように分類できる。これらは、折損サンプルの破面観察において、破壊起点の位置や、そこに存在する欠陥の種類、更には、破面形態（延性破面、ぜい性破面、疲労破面など）を観察することによって分類が可能であり、また、折損に至るまでのプロセスを解明することもできる。最近では、電子顕微鏡や各種 X 線機器を活用することにより、詳細な観察も可能である。

しかしながら、線ばねの折損事故が発生した場合に最も大切なことは、折損破面の観察、並びにその後に

行う種々の材料調査から推論された仮説を、事故現場において検証することであり、その結果に基づく諸対策が、再発防止の鍵を握ることは言うまでもない。

3. 線ばねの折損要因と対策

3.1 素材欠陥に起因する折損

折損の要因となる素材欠陥は、大別すると、(1)表面きず、(2)表面ミクロ欠陥、(3)内部欠陥に分類される。
(1) 表面きず
(a) 線材圧延きず
写真1は、ばね成形中に発見された線材圧延きずであるが、きずの形態（形状・深さ）により、ばね成形中に折損したり、そのまま残存して、ばね使用中に疲労破壊の起点となって折損することがある。この種のきずは、鋼片の肌荒れ、横割れ、表面直下のブローホールなどの欠陥が、線材圧延時に潰されたり、圧延ロールの調整不良によって生ずる場合が多く、形状は、線状や折れ込み状である。比較的浅いきずの場合は、ばね成形後に、線表面層に圧縮残留応力を与え、ばねの疲労寿命を向上させる目的で施すショットピーニング処理の付随効果によって、きず形状が滑らかになり、切欠感受性が低下し、きずの影響は小さくなる。
対策としては、線材圧延時の品質管理を充実させて、

表1 折損要因とその具体例

折 損 要 因	具 体 例
素 材 欠 陥	表面きず、表面ミクロ欠陥、内部欠陥
ばね加工時欠陥	加工きず、メッキスパッタリング、水素ぜい性
使用環境、設計条件	腐食疲労、ばね形状、高応力疲労

原稿受付 昭和 61 年 10 月 31 日
* 住友電気第 128 号に掲載
** 住友電気(Sumitomo Electric Industries, LTD.)

きず発生防止を図ると共に、圧延及び伸線加工時の渦流探傷により、きずを検出したり、線材表面の皮剥処理²⁾により、きずを除去することなどがある。

(b) 伸線きず

写真2は、伸線中に発生した横割れきずを起点として、ばね成形中に折損した例である。横割れきずは伸線時の潤滑不十分により発生するきずであり、ばね成形中に折損する場合が多い。伸線きずには、伸線ダイスの損傷により、線表面がきずつつけられた直線状のきずもある。この場合には、ばね成形中に折損することは少いが、そのまま残存して、疲労破壊の起点になることがある。線材圧延きず同様、比較的浅いきずは、ショットピーニング処理により、その影響は小さくなる。

対策としては、横割れきずに対しては、伸線中の潤滑を十分に行うこと、直線状きずに対しては、伸線ダイスの品質管理を十分に行うことである。

(c) 取扱い時のきず

写真3(a)は、材料取扱い時に生じた表面きずを起点として、ばね成形中に折損した例である。この種のきずは、そのまま残存し、ばね使用中に疲労破壊の起点となって折損を招くことも多い。また、本例のように、比較的焼入性の高い低合金鋼オイルテンパー線では、きず発生時の摩擦熱により、表面に焼入硬化層—マルテンサイト（写真3(b)）—が生ずることもあり、その結

果、ばね成形中に折損しやすい。

対策としては、材料の運搬、保管、取扱いに十分な配慮を払うと共に、表面きずを発生させないように、ハンドリング装置を工夫することが大切である。

(2) 表面マイクロ欠陥

(a) ミクロピット

写真4(a), 4(b)は、線表面のミクロピットを起点として、ばね使用中に疲労破壊が進行し、折損した例である。このような折損形態は、ショットピーニング処理を施さないばねや、比較的高い応力条件下で使用されるばねに多く見られる。ミクロピットは、もともと素材に存在している場合のほかにも、メッキ処理前の酸洗や、ばね使用中の局所的な錆により発生することがある。

対策としては各工程での発錆防止や、酸洗条件の管理を十分に行うことであるが、ショットピーニング処理を施して切欠感受性を減少させることも有効な対策である。

(b) ミクロボイド

写真5(a), 5(b)は、線表面のミクロボイド（ミクロポケットとも言う）を起点として、ばね使用中に疲労破壊が進行し、折損した例であり、ミクロピットと同様、ショットピーニング処理を施さないばねや、比較的高い応力条件下で使用されるばねに多く見られる。ミクロボイドは、主に熱間圧延や製線工程における熱処理、

写真1 線材圧延きず外観 (SWC 4.5 mmφ)

写真2 横割れによる折損 (SWC 8.0 mmφ)

(a) 折損部外観

(b) 破壊起点部組織 (→: 白色部がマルテンサイト層)

写真3 取扱い時のきずによる折損 (SWOSM-B 6.0 mmφ)

酸洗により生じた微小な肌荒れが、伸線加工により伸ばされたものである。

対策としては、熱間圧延を含めた製線技術の改善により、材料の表面品質を向上させることであるが、一方では、皮剥処理による表面改善、ショットピーニング処理による切欠感受性の減少も有効な対策である。

(3) 内部欠陥

(a) 非金属介在物

写真 6(a), 6(b)は、非金属介在物を起点として、ばね使用中に疲労破壊が進行し、折損した例である。この種の折損は、表面に大きなきずがなく、十分なショットピーニングが施されたばねで、しかも、比較的高い応力条件下で、繰返し使用回数の多い場合に見られる。また、起点となる非金属介在物の位置は、表面から深さ 0.15~0.30 mm であることが多いが、これはショットピーニング処理による圧縮残留応力や表面硬化の影響が小さい領域で負荷応力が最大になることに起因している。非金属介在物は、鋼を溶解、鑄造する段階で、Si, Al, Ti, Ca, Mg などが、酸化物、硫化物、炭素化合物の状態で残留したものであるが、その形態により、A 系, B 系, C 系に分類され、中でも硬くて展延性に乏しい B, C 系介在物が破壊起点となっている。

対策としては、B, C 系介在物の低減および微細化を図ることであり、最近では、レードル精錬技術（二次

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 起点部表面 (→: ミクロボイド)

写真 5 ミクロボイドによる疲労折損 (SWP-B 1.8 mmφ)

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 起点部表面 (→: ミクロピット)

写真 4 ミクロピットによる疲労折損 (SWP-A 2.4 mmφ)

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 起点部の非金属介在物 (→: 非金属介在物)

写真 6 非金属介在物による疲労折損 (SWOSC-V 4.3 mmφ)

精錬，介在物浮上促進)が普及向上^{3),4)}し，非金属介在物を起点とする折損例は極めて少なくなった。

(b) 内部偏析

写真 7(a)は，ばね成形中に折損した例で，破断部が円錐状を呈しており，「カッピー状破面」と呼ばれる。この種の折損は，写真 7(b)に示すような，材料中心部の矢じり状空洞が起点となって生じたものである。この空洞は，炭素を主体とする内部偏析により，中心部の変形能が低下し，伸線加工中に生じたものである。このカッピー折損は，ばね成形中に発生することが多い。

対策としては，鋼片鑄造技術の進歩や，鑄造時の電磁攪拌技術の普及^{5),6)}により，内部偏析を原因とする折損例は極めて少なくなった。

3.2 ばね加工時の欠陥に起因する折損

(1) ばね成形時の欠陥

(a) ツールマーク

写真 8(a)，8(b)は，ばね成形時に発生するツールマーク（打痕）を起点として，ばね使用中に疲労破壊が進行し，折損した例である。このようなツールマークは多くのばねに見られるが，きずの形態として比較的浅く平坦であることから，これによる折損事例は少ない。しかし，本例はきずが比較的深く，かつ最大応力の作用位置であるばねの内側に生じていたために折損に至ったものと考えられる。

対策としては，鋼片鑄造時の偏析を少なくすることで

あり，近年，日常のツール管理を十分に行い，常に正常な状態で作業すると共に，材料の硬さに応じた適切な材質のツールを選択することが大切である。

(b) 打痕きず

写真 9(a)は，ばね成形時に生じた打痕きずを起点として，ばね使用中に疲労破壊が進行し，打損した例である。写真 9(b)にはきず部の組織を示すが，打撃により本来の伸線組織（繊維状組織）が変形している様子がわかる。本例はばね成形時の打痕きずであるが，そのほかにも，ばね使用中，その周辺部品との接触により生じる場合もある。

対策としては，ばね加工（特にフッキング，プレス曲げ）状況，ばね使用状況を詳細に観察し，打痕きずが発生しないよう適切な処置を講ずることである。

(c) ステンレス鋼線の局部ねじれ

写真 10(a)は，SUS304 ステンレス鋼線を用いたばねのフック立上り加工部において見られた局部ねじれを原因とする折損事故例である。その折損破面の特徴は，写真 10(b)に示すように，線軸に対してほぼ直角で，しかも，ねじれによる渦巻き状の模様を呈していることである。ステンレス鋼線は，ねじり加工を受けた場合，局部ねじれが生じやすい性質をもっており，特に本例のようなフック加工においては注意を要する。

対策としては，原則としてねじり加工を避けることであるが，止むを得ない場合には，可能な限り材料を

(a) 折損部外観

(b) 中心部の矢じり状空洞

写真 7 カッピー折損 (SWP-B 4.5 mmφ)

(a) 折損部外観 (→: 破壊起点)

(b) 破壊起点部拡大 (→: 破壊起点)

写真 8 ツールマークによる疲労折損 (SUS304-WPB 2.3 mmφ)

(a) 破損起点部 (→: 打痕きず)

(b) 打痕きず部の組織

写真9 打痕きずによる疲労折損 (SWC 1.6 mmφ)

(a) 折損部外観 (○: 局部ねじれ)

(b) 破面中心部拡大

写真10 ステンレス鋼線の局部ねじれ

拘束しない加工方法を取り、かつ、加工速度も緩和することが大切である。なお、フック形状は曲げフックにすることが望ましい。

(2) メッキ処理、酸洗処理時の欠陥

(a) メッキスパッタリング

写真 11(a)は、電気メッキ処理時のスパッタリング箇所を起点として疲労破壊が進行し、折損した例であり、写真 11(b)に示すように起点部にスパーク痕が観察される。このメッキスパッタリングは、電気メッキにおいて、ばね間、あるいは、ばねと電極の間のスパーク現象により生じるものである。その結果、材料は瞬間的に「加熱-急冷」状態となり、その箇所は、写真 11(c)に示すようにマルテンサイト組織となる。また、比較的細い線径のばねの場合、線全体がマルテンサイト化し、その結果、機器へばねを装着する際に折損することが多い。

対策としては、メッキ電流密度を必要以上に高くしないことや、メッキ槽のばねを、最適かつ一定の量に管理することがあげられる。

(b) 水素ぜい性

写真 12(a), 12(b)は、ピアノ線、写真 13(a), 13(b)は、オイルテンパー線を用いたばねにおいて生じた、水素ぜい性による折損の例である。この種の折損は、機器へばねを装着する際に生じる場合が多いが、ぜい化部が局部的である場合は、そこを起点として疲労破壊が進行し折損に至ることもある。折損破面の特徴としては、伸線組織（繊維組織）を有するピアノ線はへき開破面、焼入焼戻し組織を有するオイルテンパー線は粒界破面を呈する。

水素ぜい性は、ばねの表面処理（酸洗、化成処理）やメッキ処理において発生する発生期の水素が材料内部に侵入し、材料がぜい化する現象であり、特に強度の伸線加工を加えた材料は、引張残留応力が大きく、ぜい化感受性が高い。また、明瞭な結晶粒界を有するオイルテンパー線は、粒界からの水素の侵入が容易であるため、水素ぜい性を受けやすく、表面処理やメッキ処理は避けるべきである。

対策としては、十分な低温焼鈍処理により残留応力を緩和させること、過酷な酸洗や過度の厚メッキ処理を避けることであり、更にベーキング処理も有効な対策である。

3.3 使用環境及び設計条件に起因する折損

(1) 腐食疲労

写真 14(a), 14(b)は、ばね使用中に腐食が進行し、その結果生じたピット（孔食）を起点として疲労折損した例である。前述のマイクロピットが局部的な腐食であるのに対し、この場合はばね全体が腐食を受けていることが多く、その結果、線表面に多数のピットが観察される。

一般に、腐食環境下でばねが繰返し応力を受ける場合、疲労強度が極端に低下し、厳しい環境下では疲れ限度が存在しなくなる場合がある。この現象を腐食疲労といい、設計の際に十分考慮する必要がある。

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 起点部のスパーク跡 (→: スパーク跡)

(c) 起点部組織 (白色部がマルテンサイト組織)

写真 11 スパッキングによる疲労折損 (SWP-A 1.5 mmφ)

対策としては、表面処理（メッキ、塗装等）を施して耐食性を向上させることであるが、過酷な腐食環境に対しては、ステンレス鋼などの高耐食材料への材質変更を検討する必要がある。この場合も環境によりそ

(a) 折損破面

(b) ぜい性を示すへき開破面

写真 12 水素ぜい性による折損 (SWP-B 0.6 mmφ)

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) ぜい性を示す粒界破面 (→: 結晶粒界面)

写真 13 水素ぜい性による折損 (SWO-B 1.0 mmφ)

の耐食性は異なるので材料選定は慎重に行うべきである。

(2) ばね形状

(a) 曲げ R

写真 15 は、過度の曲げ加工を行った結果、ばね加工中に折損した例である。このような小さな曲げ R で加工された箇所は、加工中に折損しなくても、応力が負荷された時に応力拡大係数が高くなり、疲労破壊を招く要因となりやすい。したがって、特に引張ばねのフック立上り形状に対しては細心の注意が必要である。

(b) 圧縮コイルばねの座巻接触

写真 16(a), 16(b) は、ばね使用中に座巻立上り付近で疲労破壊により折損した例である。このような場合、本例のように、座巻との接触-非接触の繰返しにより摩

滅(フレッティング)した箇所が疲労破壊の起点となっていることが多い。またこの箇所には、ショットピーニング時のショットが残存しやすく、摩滅を促進する結果となるので注意を要する。

対策としては、座巻からの立上り角度を小さくして単位面積当りの接触圧を減少させることが効果的である。

(3) 高応力条件下の疲労

ばねの疲労折損においては、これまで述べてきたさまざまな欠陥が疲労破壊の起点となることが多いが、一方では、使用時に作用する応力条件が大きなポイントであることは言うまでもない。したがって、ばねの設計に際しては、材料のもつ許容応力以下で使用されるような条件に設定すべきであるが、実際の折損事例をみると、許容応力以上で使用されている場合も少ない。又、設計応力では起り得ないような疲労折損が見られることも比較的多く、このような場合、実際のばね作動状況を詳細に観察し、設計条件との違いが無いかを十分調べることも原因究明上大切なことである。

写真 17(a), 17(b) にねじり応力作用、写真 18(a), 18(b) に曲げ応力作用による、いずれも高応力条件下での疲労折損の例を示す。

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 腐食によるピット

写真 14 腐食疲労による折損 (SUP-6 18.0 mmφ)

写真 15 過度の曲げ加工による折損 (SWB 1.8 mmφ)

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 摩滅状況 (→: 摩滅部)

写真 16 圧縮コイルばねの座巻接触による疲労折損 (SWP-A 10.0 mmφ)

(a) 折損破面 (→: 破壊起点)

(b) 破壊起点部 (→: 破壊起点)

写真 17 ねじり応力による疲労破面 (SWP-A 1.6mmφ)

(a) 折損部外観

(b) 折損破面 (→: 破壊起点)

写真 18 曲げ応力による疲労破面 (SWC 1.6mmφ)

表 2 素材欠陥と対応策

発生部位	形態	製造上の対応策
内 部	非金属介在物	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 特殊レールドル精錬³⁾ ◦ 無酸化連続鑄造⁴⁾
	中 心 偏 析	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 電磁攪拌⁵⁾ ◦ ブルーム, ブレークダウン⁶⁾
表 面	線材表面きず	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ビレット探傷, 疵取り ◦ ウォーキングハース ◦ ロール抽出テーブル ◦ 熱間渦流探傷システム ◦ 線材皮剥²⁾
	伸線加工きず	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 振動酸洗 ◦ 強制潤滑 ◦ 高性能渦流探傷¹⁾

4. 線ばね用材料製造上の対応

線ばねの折損事故の中には材料製造時の欠陥に起因するものもあるが、このような素材欠陥に対して、当社は国内唯一の製鋼から線材圧延、二次伸線加工の一貫メーカーである特徴を生かして対応を図っており、その状況を表2に示した。

線ばねは、自動車エンジン弁ばねのように高温高応力発条件下での耐疲労性が要求される高級ばねから、玩具用ばねに至るまで、要求特性の範囲が非常に広い。そのため用途に応じて各種の材料規格が規定されており、製造プロセスもそれぞれ異なっている。

当社としては、線ばね用材料の選択にあたって、使用条件を検討する段階から参画し、使用条件にマッチした材料規格および製造プロセスの適用によって、品質保証、経済性両面での対応を進めている。

5. 結 言

本報告では、ばねの折損例の代表的と思われるものの幾つかを紹介したが、その折損原因は必ずしも単純ではなく、実際には、種々の要因がいくつも重なり合って折損に至ることもあり、正確な折損原因が究明できないことも少なくない。この要因の1つとして、ばねが「材料メーカー～ばね加工メーカー～部品メーカー～アセンブリメーカー」と多くのメーカーを経て機器に組み込まれるため、相互間の情報交換が不足し、原因究明に必要な全てのデータが得られないことがあげられる。本報告が、このような現状を打破するための一助となり、ばねの折損事故防止に寄与することができれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 丹羽 勤, 他: ばね技術研究会春期講演会前刷集 (1978)
- (2) 上林三郎, 他: ばね技術研究会秋期講演会前刷集 (1972)
- (3) 山田勝彦, 他: 鉄と鋼, 71 (1985), S 1084, S1085
- (4) 山田勝彦, 他: 鉄と鋼, 66 「1980」, 11, S 736
- (5) 岩田 斉, 他: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2972
- (6) 山田勝彦, 他: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 298