

# 第40回 残留応力測定

鈴木金属工業(株) 林 博昭

## 1. 残留応力とは

物体に外力が作用していない状態でも、内部に応力が存在し、目には見えないが、内部でつり合いを保っている場合がある。このような内部応力を残留応力 (residual stress) という。この残留応力には、ショットピーニングによる残留応力のように、ばねにとって有益な場合と鋼線をコイルリングしたときに生じる残留応力のように、ばねにとって有害な場合とがあるが、この残留応力を知るといことは、取りも直さずより良いばねを作るといことにつながるので非常に重要なことである。

## 2. 残留応力の発生

残留応力の発生を原因別に分類すると

① 塑性変形によるもの

② 熱処理の変態に伴う体積変化によるもの

に大別できる。塑性変形による残留応力の発生モデルを図1に示す。塑性変形が起こると程度の差こそあれ、必ず残留応力は発生する。特に硬い材料ほど同じ塑性変形量でも残留応力は大きくなる。熱処理時の変態に伴う変形の例を図2に示す。不均一な組織間及び本来の形状から変形した個所にも残留応力が発生する。①の例は冷間成形ばね材料を成形した際に発生し、②は熱間成形ばね、プレス金型の熱処理などで発生し、焼割れとなって現れる。

## 3. 残留応力の測定法

### 3.1 測定方法とその特徴

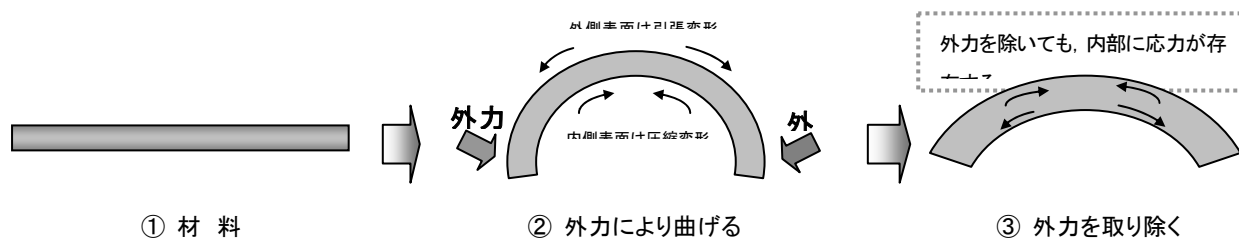


図1 塑性変形による残留応力発生機構の模式図

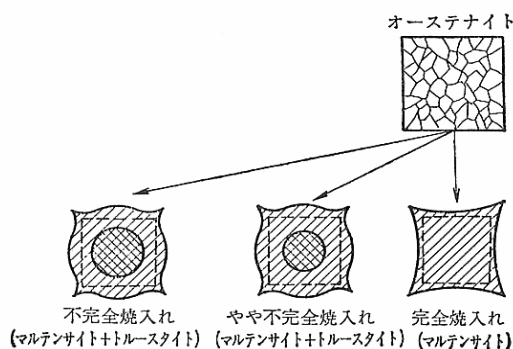


図2 焼入れによる組織と変形



図3 微小部X線応力測定装置 PSPC-RSF (株式会社リガク)

表1 残留応力測定法の分類と方法の概要

分類	方法の概要	備考	
破壊法	ひずみゲージ法	測定したい箇所数方向にひずみゲージを貼り、その部分のひずみを測定する。その後、その部分を含んだ小片を切り出し、再度ひずみ測定を行い、前者との差を求める。	構造物向け
	表層除去法	丸棒など軸対称残留応力が軸に沿って一定である場合、この丸棒を表層から研削、溶解などで除去していき、長さの変化から求める。ねじり残留応力も測定できる。	ヘイン法 (Heyn 法)
		帯板の片面を研削、溶解などにより除去すると、残留応力のつり合いが崩れて板が反るので、その曲率から算出する。	曲率法
	中心除去法	丸棒など軸対称残留応力が軸に沿って一定である場合、この丸棒の中心に穴をあけ、長さの変化から求める。	ザクス法 (Sachs 法)
非破壊法	スリット法	被測定物の中央に切り込みを入れ、股部両端の変位量から求める。	
	X線応力測定法	金属材料に応力が加わると結晶格子がひずみ、本来の格子間隔より伸びたり縮んだりする。X線回折現象を利用してこの格子間隔を求め、このひずみから残留応力を算出する。	深さ方向には破壊測定となる。

残留応力の測定法には様々な方法がある。表1に残留応力測定法の分類と方法の概要を示す。

### 3.2 ばね及びばね材料における測定法

表1に示した測定法の中で、ばね業界で広く用いられている方法はX線による応力測定法である。この方法はX線回折の条件が  $n\lambda = 2d\sin\theta$  というブラッグの式で表されるため、 $\lambda$  (波長) と  $\theta$  (回折角) が求まれば  $d$  (格子間距離) が計算できるという原理に基づく。

測定には応力測定専用機が市販されているので、これを用いるのが便利である。特にPSPC (Position Sensitive Proportional Counter : 位置敏感比例検出器) というX線検出器を備えた装置は、従来の比例カウンタを用いた装置より、高速かつ高精度に測定できる。また、この検出器は微弱なX線でも測定が可能なので、高輝度微小焦点のX線管との組み合わせた微小部X線応力測定装置(図3)が開発されている。

X線応力測定法は便利な手法であるが、測定する試料は、以下のような条件を満たす必要がある。

- 1) 結晶粒数が十分にある
- 2) 強い集合組織を持たない
- 3) X線の侵入深さ内で平面応力状態にある。
- 4) X線の侵入深さ内に応力勾配がない
- 5) 複合組織となっていない

結晶粒径については、応力測定に必要な結晶粒の数は1000~5000個とされている。ばね用材料の結晶粒径は5~30 $\mu$ mなので、X線の照射領域は3.5mm<sup>2</sup>程度あれば良い。

一方、集合組織は強加工を施した材料に発達している。このようなばね材料にはピアノ線、ばね用ステンレス鋼線、冷間圧延鋼帯(調質R)などがあり、ばね用材料には意外と多い。焼入焼戻しあるいは溶体化処理をした材料では、 $2\theta - \sin^2\psi$ 法 ( $\sin^2\psi$ 法とも呼ぶ) により測定するが、集合組織の発達した材料の場合は $\psi$ 一定法という手法が用いることが望ましい。

X線の侵入深さは普通数十 $\mu$ mなので、ショットピーニングなど微妙な応力勾配を持つものは注意を要する。また、平面応力については、応力の平面性よりも、試料の平面性の方に問題がある場合が多い。

X線応力測定法は、原則的に単一の結晶構造であることを前提としている。鉄鋼材料の中でもばね材料はそうでない場合が多い。ピアノ線に代表される共析鋼はフェライトとセメントタイト、ばね鋼はマルテンサイトと残留オーステナイト、ばね用ステンレス鋼線はオーステナイトと加工誘起マルテンサイトから成り立っている。片方の組織の残留応力を無視して良いのか否か、よく考えておく必要がある。

現在市販されているX線応力測定装置は無資格者でも使用でき、X線作業主任者も不要であるが、旧式の装置の場合にはX線作業主任者という資格者が敷地内に必要の場合があり、その管理対して責任を負う。使用者は特にバツジなどによる被爆管理をおろそかにしてはならない。

高価なX線応力測定装置がないと、ばねの残留応

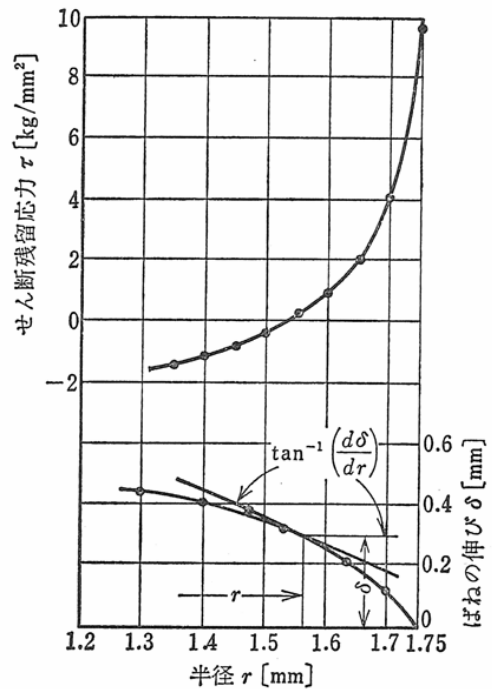


図4 コイルばねのセッチングによるせん断残留応力 (村上 他)

鋼種: SUP2 線径: 3.5mm コイル径: 17.5mm  
有効巻数: 6.0 自由高さ: 37mm  
ばね成形後焼入焼戻し 焼入れ: 820°C×1hr 油冷  
焼戻し: 450°C×1hr 空冷

力測定をあきらめなくてもよい。ばねに適用できるX線法以外の残留応力測定法として表面除去法がある。

コイルばねを腐食液に浸し、腐食によって直径を減らしながら、ばねの高さ変化を精密に測定すると、除去後の表面における応力は次式<sup>2)</sup>で表される。

$$\tau = - \left( \frac{Gd}{\pi n D^2} \right) \cdot \left( \frac{d}{8} \cdot \frac{d\delta}{dr} + \delta \right)$$

d: 線径 D: コイル径 n: 有効巻数 G: 横弾性係数  
dr: 除去半径 dδ: dr 除去した時のばね高さ変化量  
δ: ばねの高さ変化量

図4にこの手法を用いて、セッチングにより発生した残留応力を求めた例<sup>1)</sup>を示す。この方法は集合組織の影響を考慮しなくてもよいが、測定する残留応力はばね全体の平均的なものであり、コイル内側だけといった局所的な測定はできない。また、ばね全体を均一に腐食することが、精度高いデータを得るポイントである。ステンレス鋼線のように耐食性のある鋼種は難しいかもしれない。

#### 参考文献

- 1) 大和久 重雄 「熱処理ノート」 日刊工業新聞社
- 2) 川田 雄一、平 修二、多田美朝  
「応力測定マニュアル」 オーム社