

## 残留応力の基礎（その2）残留応力計測方法の紹介

中代 雅士\*  
Masashi Nakashiro

### 1. はじめに

材料特性の中で一般にあまり知られていないものに残留応力がある。残留応力は、外観からは見えないものであり、一般に認識されることが少ないが、工業界ではこの残留応力を積極的に利用しており、機械加工精度向上には残留応力の管理・把握が重要である。機器の損傷では、しばしばこの残留応力が損傷要因になっていることがあり、部材の健全性評価、余寿命診断を行う上でも残留応力の評価は必要不可欠なものである。図1は配管の残留応力でクリープ損傷した事例、図2は溶接時の残留応力で応力腐食割れ（SCC）が発生した事例である。今回は、残留応力の基礎的な解説をしたが、本稿では、その計測方法について紹介する。計測方法には、破壊試験法と非破壊試験法があり、個々の手法について紹介する。

### 2. 破壊試験法による残留応力計測法

残留応力は材料部材内部の応力であるため、対象部位での残留応力を計測するには、周囲の部材を取り除き、開放すればよく、残留応力値は開放する前後の変形量を評価することで求まる。被計測材を小さくすればするほど残留応力は開放され、物体の内部応力は0に近づく。極限はパウダー状の粒子であり、粒子になれば物質内部に持って

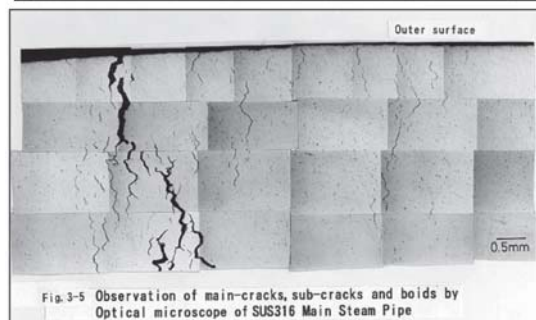
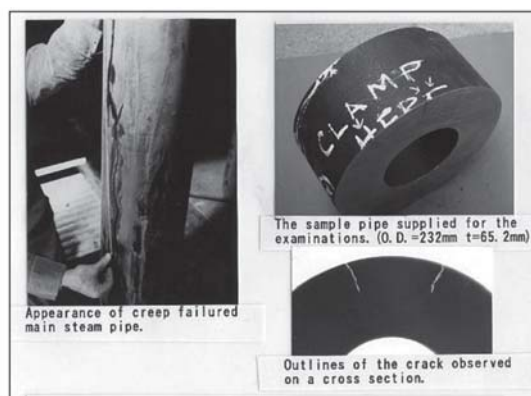


図1 火力発電プラント主蒸気管のリーク事故

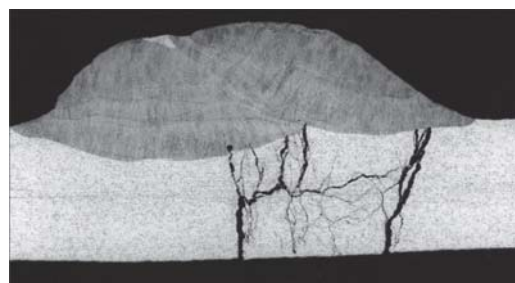


図2 溶接部の残留応力が原因で発生した応力腐食割れ（SCC）

\* 計測事業部 技師長 工学博士 技術士（金属部門 総合技術監理部門）

いる残留応力は0と考える。この切断プロセス中のひずみ変化を計測すれば、フックの法則から切断前の残留応力値が求められる。これが破壊試験方法の原理であるが、ひずみゲージの張り方、応力開放の手順が工夫され、各種の手法が実用化されている。そのいくつかを紹介する。

(1) 切断法（ひずみゲージ法）

残留応力の計測対象部材、部位の周囲にひずみゲージを貼り付けておき、対象部位の大きい範囲から部材を順次切断していきながら、切断過程での開放ひずみ変化を計測し、最終的には小さいサイコロ状（5～10mm角サイズ）にまで切断する。ひずみゲージは図3に示すような構造になってお

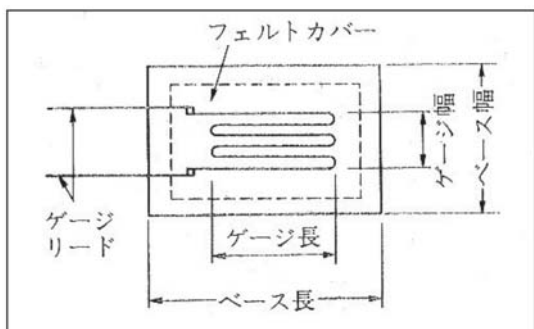


図3 抵抗線ひずみゲージの構造

り、材料、大きさ、形状など種々のものがあり、目的に応じて選択されている。代表的なゲージの種類を図4に示す。ひずみゲージの原理は、変形でゲージ線が伸び、電気抵抗が変化する。この電気抵抗変化量が伸び（変形）と比例関係にあるので、電気抵抗変化量から変形が求まる。

ボイラ伝熱管溶接継手部の残留応力計測例を図5に示す。残留応力計測部位の周囲に多数のひずみゲージを貼り付け、初期状態を0設定して順次小さく切断していく。切断後の最終状態を図6に示す。この時に注意しなければならないことは、開放前後のひずみ量変化を極端に大きくしないことである。材料の変形には弾性と塑性変形があるが、塑性変形は元に戻らないので、ひずみ開放時には出来るだけ塑性変形が起きないようにす

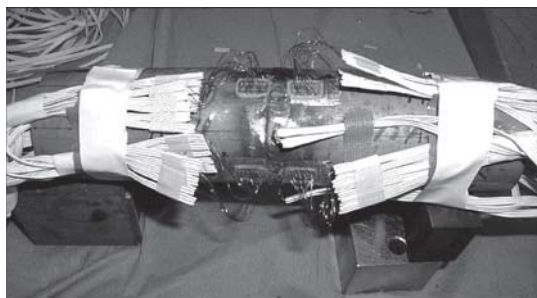


図5 ボイラ伝熱管溶接継手部のひずみゲージ取付状態

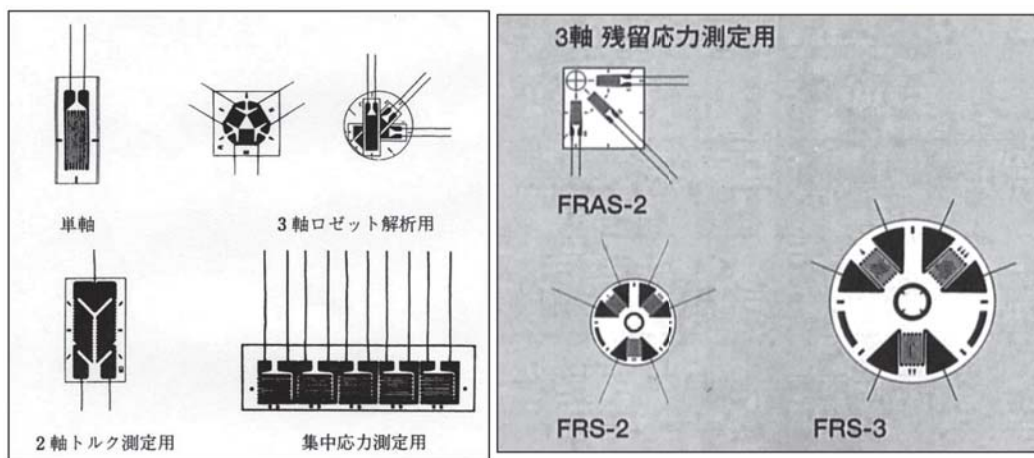


図4 各種ひずみゲージの形状

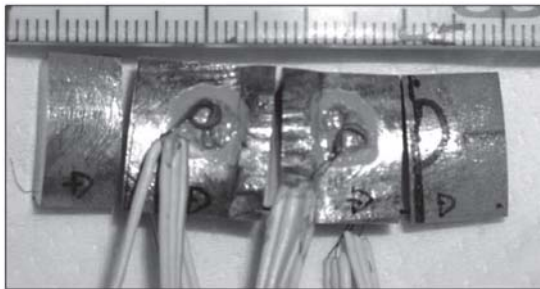


図6 切断法による最終切断形状

る必要がある。一回切断した時に大きな変化（変形）が起きた場合、計測対象部材内で剛性の小さい箇所に変形が集中し、塑性変形がおきる可能性がある。塑性変形が起これば、構造材内部の応力分布が変化することになり（ひずみ再配分）、本来の正確な残留応力値が計測できない場合がある。従って、ひずみ開放の切断手順を検討する時には、残留応力分布をあらかじめ予想しておき、その応力変化を弾性域内の範囲で収まるような開放手順を検討することが重要である。また、図5に示すように多数のひずみゲージを貼り付けているので、供試体切断時にリード線の断線、ひずみゲージの剥離、切断時の部材の発熱などがおきないように注意しなければならない。

#### (2) センタードリル法

センタードリル法は図7に示すような中心部の周囲にひずみゲージを貼り付けたゲージを採用す

る。ひずみゲージを貼り付けた状態で0バランスを取り、中心部にドリルで穴を開け、中心部の応力を開放する。その時のひずみ変位量から、中心部の応力を求める。

この方法の特徴は、切断法のように切り刻む必要がなく、ひずみゲージの中心部に小さな穴（貫通していなくても良い）を開けるだけでよいので、切断法と比較して簡便に計測可能である。また、残留応力の計算には、理論式と形状効果を考慮した計算およびキャリブレーションが必要である。

この手法で特に注意しなければならないのは、ドリルの穴開け作業である。この穴は内径サイズと位置を正確にあける必要があり、キリの切削過程でも削り量が大きすぎないようにできるだけ切削時にひずみが発生しないようにしなければならない。

通常は専用の治具が製作されており、コンピュータ制御などで自動化が進んでいる。また、穴開け深さを順次深くしていく過程でのひずみ変化から、図8に示すように深さ方向の応力変化も計測できる手法が英国 Stresscraft 社で開発され、実用化されている (Ref.1)。本手法の特徴は、ドリルのサイズが小さく、0.3mm 径のドリルを円形に移動しながら切削していき、穴計の寸法、深さを計測し、その時のひずみを計測することにより、

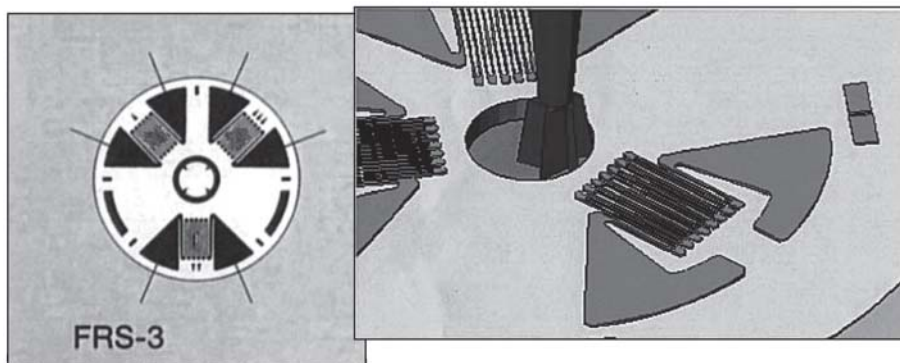


図7 センタードリル法用のひずみゲージとゲージ中心穴の加工状況

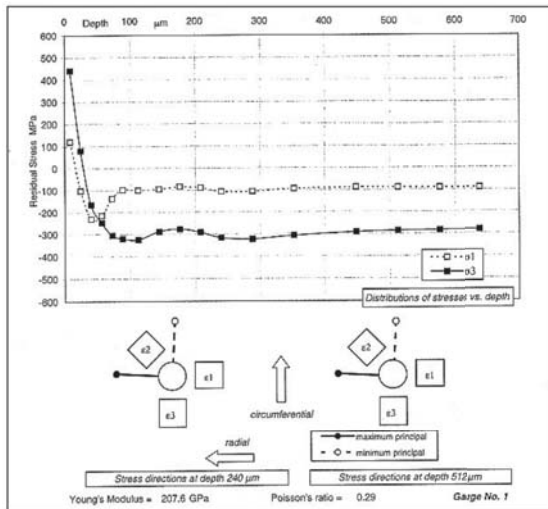


図8 センタードリル法で深さ方向に残留応力を計測した結果

図8に示すような深さ方向の応力分布が短時間で計測できる。

### (3) DHD 法

DHD (Deep Hole Drilling) 法は英国 University of Bristol で David Smith 教授が開発した技術である。現在、同教授が大学のベンチャー企業 Veqter Ltd. を興し (大学スピンアウト会社)、計測サービスを実施している。特徴は、厚肉部材に対して板厚方向の応力計測範囲内の深さまで中央に穴をあけることで、板厚方向 (深さ方向) の残留応力が計測できる。貫通した場合には全厚さ方向の応力分布が計測できる。計測の原理と装置を図9に示す。

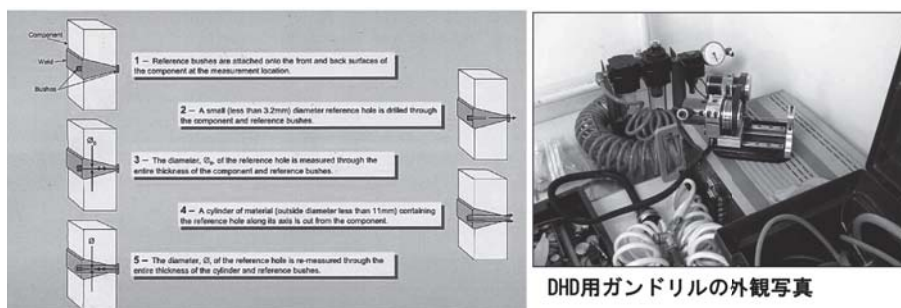


図9 DHD 法の測定原理と測定装置

まず、小さな穴をガンドリルで深さ方向に開け、その穴の深さ方向の内径変化量を複数方向に正確に計測する。計測データは、計測方向、深さ、穴径であり、ミクロン単位の高精度で計測記録する。次に、中心部の穴に対して一回り大きい穴を放電加工機 (EDM) で削り落として竹輪状 (円筒状) のサンプルを作成し、再度先に開けた穴の深さ方向・円周方向に寸法変化を計測する。その寸法変化をひずみ開放として残留応力を計算する。これらの手法は Veqter 社のノウハウとして開示されていない (Ref.2)。

本手法の特徴は深さ方向の計測に制限がないことである。残留応力を深さ方向に制限無く計測できるのは、本法と非破壊法である中性子法 (深さ方向は出力で制限される) の2つの手法だけである。中性子法は線源の強さに依存して深さ方向に制限があるのに対し、DHD 法は穴が開けられる深さの範囲内が可能であり、100mm 以上の厚板部材を計測した実績がある。

### (3) 光干渉模様を使用する方法、ESPI 法

ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) 法は、フィンランドの STRESSTECH 社 (St. 社) が技術サービスしている方法 (アメリカの開発ベンチャー会社から購入した技術) で、St 社が計測サービスと計測装置販売活動をしている。本手法の特徴は、表面を研磨しておくだけで、ひずみゲージを必要としない点である。穴を開けて中心

部を開放したときの表面の凸凹状況を光り干渉法で計測し、干渉縞から応力を計算する。測定原理と計測方法を図10に示す。St社では、現在汎用タイプの装置を開発中である。

### 3. 非破壊検査による残留応力計測法

#### 3.1 原子間距離を計測する方法

金属材料は原子の配列によって構成されており、原子間距離は金属原子固有のものであるが、応力がかかれば応力に応じて原子間距離が変化する。この変化距離を計測し、応力を直接求める方法である。従って、前項の切断法による相対的变化を計測するのとは性質が異なる。残留応力計測で、切断法とX線法のどちらが正確であるかとの質問をよく受けるが、あまり意味のない質問である。切断法はある大きさをもつブロックの相対変化を求めており、X線法などの原子間距離を計測する手法は、計測部位の微小な絶対的の評価である。計測者は、どの部位をどれくらいの大きさで計測する必要があるかを検討し、目的とする応力が計測できる方法を選択する必要がある。構造部材では、マクロ的な応力と、溶接部などのように局部的な応力分布で大きく異なることもあり、計測対象としている応力の特徴、分布状態を理解して計測する必要がある。

##### (1) X線回折法

破壊試験法と言えば切断法と言われるように、

非破壊検査法ではX線回折法が最も一般的な方法である。残留応力計測と言えば、X線回折法と言われるほど技術的に確立しており、計測法としてよく利用されている。計測原理を図11に示すが、原子間配列の原子間距離をX線回折でブラッグの関係式から $d$ を求め、標準格子間距離 $d_0$ との差、 $(d - d_0)$ からひずみを求め、ヤング率、ポアソン比から応力を計測する。計測の対象となるのは、計測表面近傍(約 $20\mu$ の深さ)のみである。

当社が販売、計測サービスしているX線応力測定装置(Xstress3000、St.社製)は従来の固定式装置とは異なり、装置を小型化、計測を自動化し、短時間で計測が可能であり、現場でも計測できる。従って、計測対象物に制約を受けず、残留応力を非破壊で計測できるようになった。計測例としては、図12に示すような水車ケーシング内部の計測、橋の橋脚や配管計測、タービンケーシング計測、タンク溶接補修部計測など、幅広く利

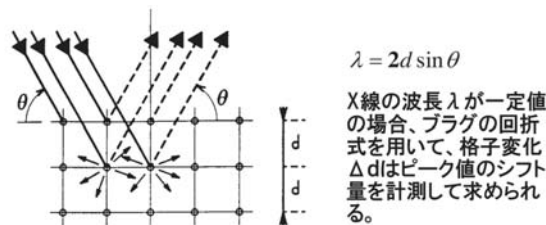


図11 X線回折法による残留応力計測原理

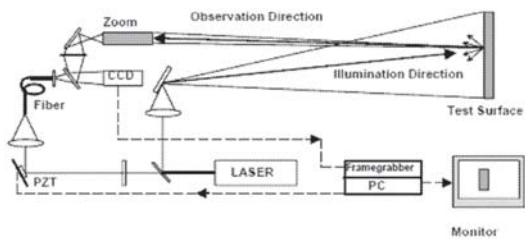


Figure 1. Typical ESPI system layout

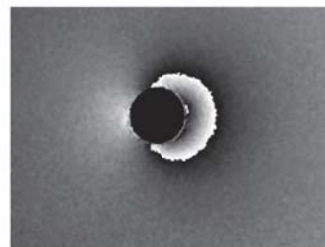


Figure 1. Wrapped phase data for drilled hole

図10 光干渉模様を利用する方法 (ESPI法の測定原理と測定例)



線量が小さいので、狭隘部でも安全に計測が可能  
自動計測により、2m以上離れて操作が可能

図 12 水車ケーシング内での残留応力計測状況

用されている。

#### (2) シンクロトロン放射光を用いる測定

エネルギーの高いシンクロトン（加速器）を用いて電子を光速近くまで加速後、強力な磁場で円軌道上を周回させると、接線方向に周波数領域が X 線領域から電波領域までの幅広い電磁波が発生する。これをシンクロトン放射光(SR 光)といい、以下のような特徴を持つ。

- ・高輝度である。：強い電磁波が得られる。
- ・連続スペクトルである。：X 線のように特性 X 線を使用するのではなく、解析に適した波長を選択できる。
- ・強度が安定している。
- ・指向性が鋭く、ほとんど平行光線である。
- ・光源の性質が明らかであり、厳密な計算を行うことができる。

この SR 光を X 線応力測定に利用した場合、以下の特徴がある。

- ・任意の波長が得られる。
- ・特性 X 線の場合の  $K\alpha_2$  重線の処理のような煩わしさが無い。
- ・結晶が特定方向に配向している集合組織材料でも問題なく計れる。

- ・X 線浸透深さを任意に制御できるので、応力勾配の大きい場合の残留応力の計測でも目的の箇所が正確に計測できる。
- ・光源の強度が強く、短時間計測ができるので動的観察にも使用できる。
- ・高エネルギー白色 X 線（放射光）は、特性 X 線では困難な数 mm レベルの深さに浸入でき、中性子法では難しい  $\mu\text{m}$  オーダ領域の応力計測が可能である。

放射光による計測は、一般的な特性 X 線計測と厚肉まで計測できる中性子測定法の相補的な役割が期待される。日本国内では、財団法人・高輝度光科学研究センター（JASRI）大型放射光施設（SPring-8）を使用した研究が報告されている（Ref.3）。

#### (3) 中性子法

X 線の代わりに中性子を使用し、計測原理、手法は X 線と同じで原子回折から格子間距離を計測する方法である。X 線は表面だけであり、放射光は数 mm なのに対し、中性子は数十 mm の材料内部まで浸入するので、厚板部材内部の応力分布も計測できる。最近、装置を持っている日本原子力研究機構の研究用原子炉 JRR-3 ガイドホール T2-1 ポート、残留応力解析用中性子回折装置 RESA を使用した多くの研究が報告されている（Ref.3）。計測装置の説明と外観写真を図 13 に示す。今後の利用範囲拡大が期待される。

### 3. 材料物性値変化を利用する方法

材料は応力が作用したときに、種々の物性値が変化する。例えば、ピアノでピアノ線の張力を変化させることで音の音域が変えられることはよく知られている。この原理を用いて音域と張力の関係を調べておき、材料をハンマーリングして発生した音の共振周波数を調べ、基準値との相違値から張力（残留応力）が求められる。これを利用し

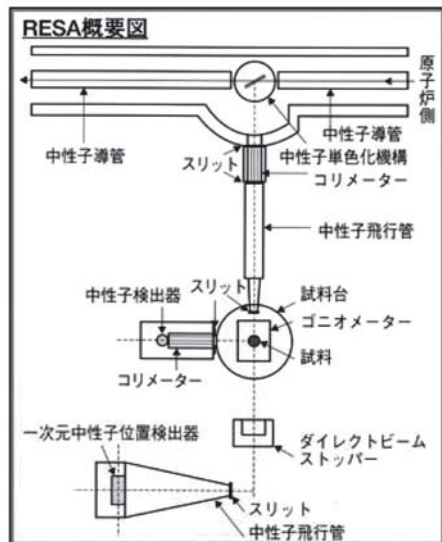


図 13 中性子法に残留応力測定装置と測定例 (Ref.5)

たのが「共振による張力計測法」で吊橋のワイヤー張力測定に実用化されている。物性値の変化として、音、磁力、磁化特性、光の屈折率などが利用されており、代表的な計測例を紹介する。

#### (1) 磁歪法

鋼材のような磁性体を磁化すれば応力に対応した磁気ひずみ (magnetostriction) が生じる。これを逆に利用して、磁気ひずみの大きさから応力を推定する方法である。

この方法は、鉄道の線路、鉄骨構造部など、単純形状で強磁性体材料、かつ材料特性が明らかなものに適用されており、X線と比較して計測時間が短く、保護設備不用などの特徴を持つので、建造物の現地計測に利用されており、鉄道会社、重工メーカー、鉄鋼メーカー等で採用されている。計測原理を図 14 に示すが、部材の磁気異方性を利用し、磁気異方性センサ (磁歪センサ) を用いて、透磁率の異方性を計る。この異方性は直交する 2 軸の応力差に比例するので、換算定数 K 値 (磁歪感度) を乗じれば、応力差が求まる。この計測法は内部応力の絶対値を計るのではなく、X-Y 方向の応力差 (計測方向の応力差で、材料力学用語

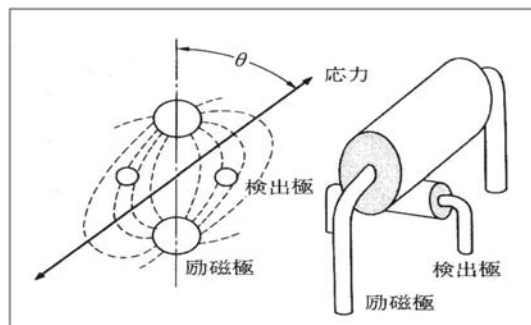


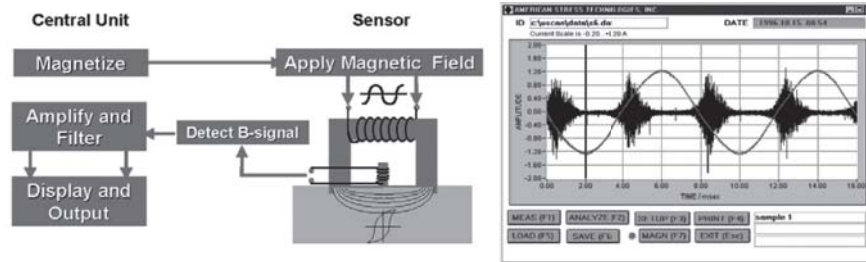
図 14 磁歪法による残留応力計測法の原理 (主応力方向の検出)

で主応力と呼ばれている) が計測できる。

#### (2) バルクハウゼンノイズ法

(1) の磁歪法と類似した方法であるが、強磁性体である鉄鋼材料の残留応力評価に利用されている。計測原理と方法を図 15 に示すが、短時間で相対的・簡易的に評価できる。

本計測方法の特徴は、計測して得られる数値が材料・形状によって異なるので、計測対象部品別の判定基準試料を作成し、合格品・不合格品の計測値を用いた判断基準値を作成しておく必要がある。ヨーロッパでは、自動車メーカー、重工メーカー



- ・磁性材が磁化するときに電気信号が発生する。
- ・バルクハウゼンノイズ(BN)の振幅は応力が高くなると大きくなる。
- ・BNの振幅は材料が硬くなると小さくなる。

図 15 バルクハウゼンノイズによる残留応力計測の原理

で盛んに採用されている。

本計測法を実用化した製品としては、ベアリング、クランクシャフトの残留応力値の品質管理に特化した装置を St. 社が製造販売している。

### (3) 音弾性法 (Acoustoelastic method)

音の伝播速度を調べる方法で、超音波の伝播方向と応力値で音の伝播速度が変化することを利用している。主応力差 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) は主応力方向に偏向した剪断波の相対速度値 ( $V_1 - V_2$ ) の関係式で次式が成り立つ。

$$(V_1 - V_2)/V_0 = Ca (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{式 9})$$

$$Ca = (1 + \nu^3 / \mu) / (2\mu)$$

$V_0$  : 無応力状態の剪断波伝播速

$\mu$  : 剛性率、 $\nu$  : 3 次弾性係数

$Ca$  は音響弾性係数

本手法は、材料の組織の影響を受けるために、同材による応力と音速変化をキャリブレーションして計測する必要がある。同一箇所を縦波、横波の音速計測を利用すれば、超音波伝播距離が同じなので縦波・横波の音速比は時間比に変換できる。ボルトなど材質と形状が決まっている場合に簡易的に短時間で計測できる。計測原理を図 16 に示す (Ref.4)。

ボルトの締付力を音の伝播時間変化で評価する装置が利用されているが、これは、締付力によるボルトの弾性変形量 (弾性変化で音の伝播距離が変化する、通常締付力で長くなる) を音の伝播時

間計測から計算する特殊な方法の装置であり、市販されている。

### (4) 被計測モデルによる光弾性法

ガラスやプラスチック等の透明な固体はそれが無負荷状態で等方、等質であっても、負荷状態では分子の配向が変化して複屈折現象を示す。

この現象を利用してひずみ分布を観測できる材料を光弾性材料といい、要求される特徴としては、

- ① 透明度が高く、無色、または単色である
- ② 応力感度が高く、応力-ひずみ-複屈折間に比例関係がある
- ③ 初期応力を 0 にするために、試験片製作時の残留応力を焼きなまし等により容易に消滅させることができる
- ④ 弾性係数が高く、ポアソン比が実物に近い、比例限、引張強度が高い
- ⑤ 一定の応力をかけた状態での光学的性質の時間変化、光学的クリープの小さい材料であるなどの要求を満たす材料が選定される。

セルロイド、ポリカーボネート、フェノール、エポキシ、ポリエステル系プラスチック等の材料に適用される。当初は光弾性材料を用いて計測対象とする機械部品のモデルを作り、各部の応力集中の状態をモデル実験的に求められる方法として開発された。その後、光弾性被膜法が開発され、実物表面に光弾性被膜を貼り付けて、ひずみを観



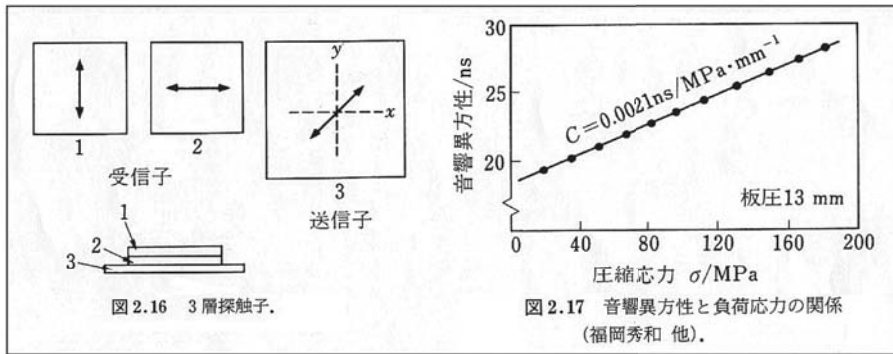
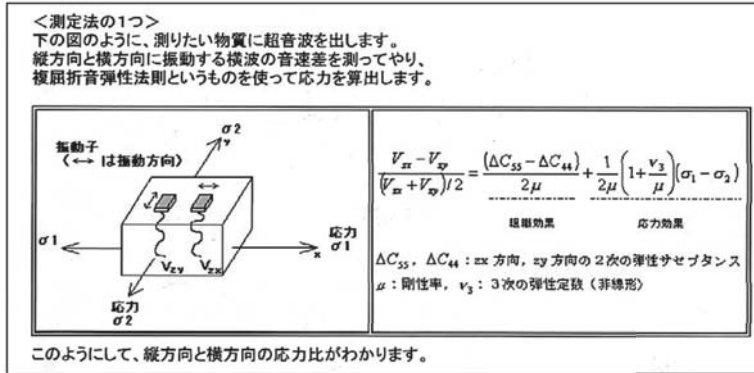


図 16 音弾性法による残留応力計測

察する方法に拡張している。20 年前ぐらいには盛んに研究されていた技術であるが、最近では数値解析技術が進歩し、本手法は金属材料にはあまり採用されていない。ガラス、プラスチック、複合材料などの応力計測に利用されている。

おわりに (その 2)

その 2 では、残留応力の計測法について紹介した。次回は、最近身近になっている数値解析法による評価、残留応力計測技術の社会ニーズと背景、今後の課題について紹介する。

参考文献

- Ref.1) Stresscraft home page. (<http://www.stresscraft.co.uk>)
- Ref.2) Veqter Ltd homepage. (<http://www.veqter.co.uk>)  
[http://www.veqter.co.uk/Expertise\\_Technology](http://www.veqter.co.uk/Expertise_Technology).

htm

- Ref.3) 第 42 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集：日本材料学会、2007.7
- Ref.4) 高橋，菊地，山口 home page (<http://www.isc.meiji.ac.jp/~saiken/laser.htm>), 「レーザ超音波による応力の測定」



計測事業部  
 技師長 工学博士  
 技術士 (金属部門 総合技術監理部門)  
 中代 雅士  
 TEL:045-784-6842  
 FAX:045-784-6826