

# 計測技術部の「売りの技術」

## 1. 残留応力測定

残留応力は、溶接、鍛造、圧延、表面処理など種々の要因によって発生する。残留応力に供用応力が重畳した場合、疲労や損傷の原因となることがある。そのため、残留応力測定が必要となり、種々の方法で測定が実施されている。残留応力測定法は、図1に示すように、非破壊法、準非破壊法および完全破壊法に大別できる。

当社が提供している残留応力測定技術について、その概要を紹介する。

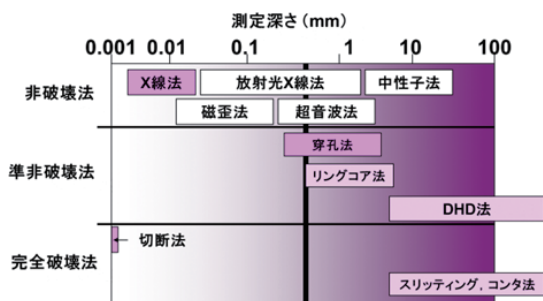


図1 各種残留応力測定技術と測定深さ

### 1.1 切断法

図2に示すように、測定部にひずみゲージ（通常2軸または3軸）を貼り、ひずみゲージやリード線を傷つけないように注意しながら、部品を段階的に切断（荒切 → 短冊 → サイコロ）し、各段階で解放されるひずみを測定し、最終段階のサイコロ切断時の累積解放ひずみから表面の残留応力を計算するもので、最も古典的な方法である。

測定対象物が複雑形状であっても、ひずみゲージを貼ることができれば測定可能である。



図2 実合せ溶接部の残留応力測定

### 1.2 穿孔法 (ASTM E837 規格)

図3に示すように、測定対象物の表面にロゼットひずみゲージを貼り付け、その中心を穿孔した際に半径方向に解放されるひずみを3方向のひずみゲージで測定し、平面応力理論に基づいて残留応力を解析する技術である。

特徴：

- ・ 深さ方向に不均一な応力分布の測定が可能
- ・ プラスチック材料やCFRPの測定も可能
- ・ 測定深さは0.5mm、1.0mm、2.0mm（穿孔径はそれぞれ、約1mm、2mm、4mm）

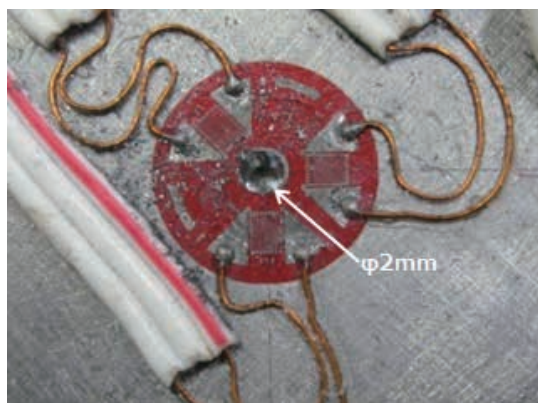


図3 ロゼットひずみゲージ（穿孔後）

- ・ 測定深さに対して 1/20 の測定分解能（たとえば、1.0mm の場合、0.05mm ピッチで 20 ステップの応力が測定される）
- ・ 主応力（ $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ ）の解析が可能
- ・ 現地出張測定が可能

穿孔装置はエアタービン駆動（約 40 万 rpm）とモータ駆動（約 200rpm）の 2 種類があり、前者は金属やセラミックス、後者は樹脂や CFRP などの穿孔に適用している。

穿孔装置の外観写真を図 4 に示す。

### 1.3 DHD 法

Bristol 大学／VEQTER 社（英国）が開発した技術であり、当社は VEQTER 社の日本代理店として測定サービスを提供している。

DHD 法は、肉厚方向に参照孔（ $\phi 1.5 \sim \phi 5\text{mm}$ ）をガンドリルで穿孔した後、参照孔を包含するコア（ $\phi 5 \sim \phi 15\text{mm}$ ）を放電加工により切り抜き、参照孔の直径変化をエアゲージにより測定し、その結果から平面応力理論に基づき肉厚方向の残留応力を解析する方法である。現地出張測定が厚肉溶

接構造物の深さ方向残留応力測定に適している。

図 5 に一例として溶接部を測定した後の表層部の状況を示す。

残留応力が降伏点の 80%を超える場合は、塑性の影響を考慮するため、段階的に DHD 法を適用する iDHD 法が開発され、既に多くの測定実績がある。図 6 に T 継手の DHD 測定後の断面観察写真の一例を示す。溶接金属部を貫通する参照孔（ $\phi 3\text{mm}$ ）とコア（ $\phi 10\text{mm}$ ）が明確に観察されている。

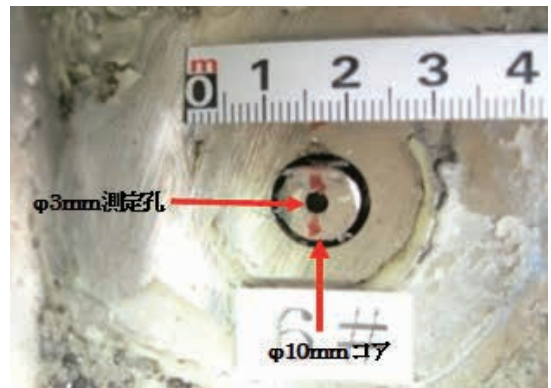


図 5 溶接部の DHD 測定後の状況



(a) エア駆動



(b) モータ駆動

図 4 穿孔装置の外観

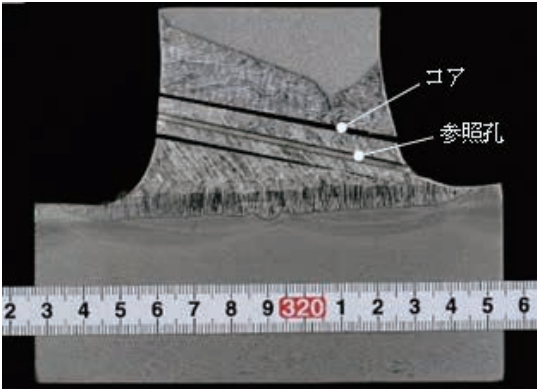


図6 T継手 DHD 測定後の断面観察写真

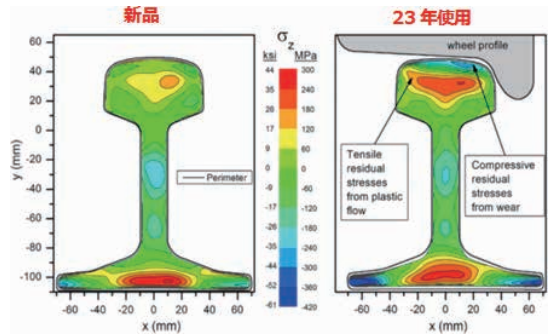


図7 新旧レールの軸方向残留応力分布<sup>(1)</sup>

#### 1.4 Contour（コンタ）法

2001年に米国のLos Alamos国立研究所で発明された技術で、数ある残留応力測定技術の中では最も新しいものである。この方法は工業部品内の残留応力分布を2次元マッピングできるため、近年、欧米を中心に実機への適用が進んでいる。測定の手順は以下の通りである。

- ①ワイヤ放電加工により部品を二つに切断
- ②切断面の変形測定（レーザー変位計など）
- ③部品のFEMモデルで逆の変形を負荷
- ④切断面に垂直方向の応力マップを決定

測定例としてレールの残留応力解析結果を図7に示す。新旧レールの残留応力分布の相違が一目で理解できる。

#### 1.5 X線回折法

当社はStresstech社（フィンランド）の日本代理店として、XSTRESS 3000などの残留応力測定装置の販売と測定サービスを提供している（図8参照）。波長 $\lambda$ のX線を入射し、その回折角度を $\sin^2\Psi$ 法により測定し、Braggの回折式からひずみ（応力）を計算する方法であり、残留応力を非破壊で測定できるのが最大の利点である。測定深さは0.01～0.02mmである。

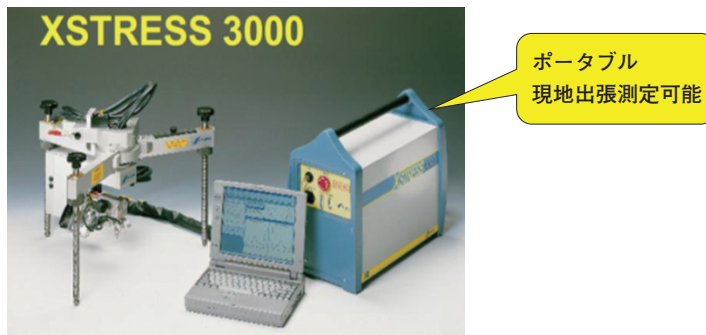


図8 XSTRESS 3000 残留応力測定装置

## 2. 三次元計測サービスの紹介

近年、製造分野に限らず多様な分野において対象物の形状などの三次元座標情報を取得する三次元計測技術の導入・活用が進んでいる。

当部では、トータルステーション等の測量機器に加え、1998年に専用デジタルカメラで撮影した画像を用いてターゲットの座標を算出する三次元計測器を導入し、主にプラント分野で既設構造物の寸法測定・位置標定に適用してきた<sup>(2)</sup>。最近ではレーザースキャナや光切断法による三次元形状測定機を導入し、現場出張や計測対象の持込み計測など、多様化したニーズに対応している。本記事ではその概要と適用例を紹介する。

### 2.1 専用デジタルカメラでの画像を用いた計測

本手法では対象物にターゲットを設置し、カメラで撮影することでその位置の座標を計測する。ターゲットを貼付する手間は必要であるが、本手法は大型構造物を比較的精度良く計測することができる。当部では今までに大口径配管の断面形状計測を数多く実施してきた。図9、図10は計測状況と解析の事例である。製作時や荷重によって生じた真円からの変形が問題であるが、適切に計測を行うことで変形状態が確認できている。従来は金型により型取りを行い1週間以上の日数を要し種々のデータを取得していたが、画像を用いた三次元計測

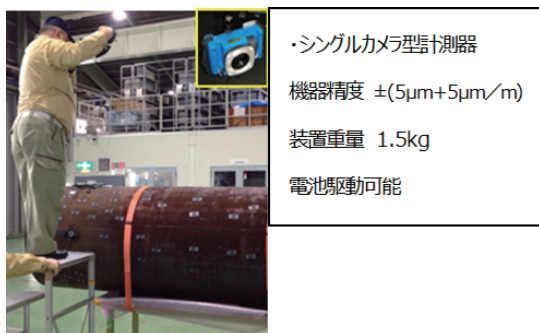


図9 デジタルカメラでの計測

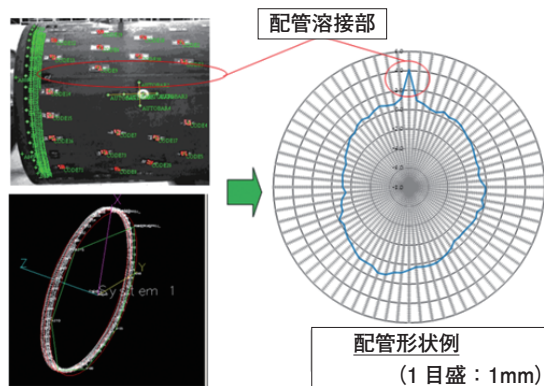


図10 配管断面形状の解析例

手法を採用し、計測したその日に結果を算出できるようになり、現地での工程の短縮に寄与した。

### 2.2 レーザースキャナを用いた計測

地上設置型レーザースキャナは、図11に示すように、赤外線レーザー光を放射状に照射し、測定機を中心に全方向のスキャンを行う計測機器である。レーザースキャナは半径100mの広範囲を高速かつ高分解能で自動スキャンすることが可能であり、取得した点群データから対象の外形形状を捉えることができる。

取り扱えるデータ量が増加していることを背景に、性能が著しく向上し、工場、現場での実用性が増している。当部でも計測の対象に合わせ、小回りの利くハンデイスキャナ、100m近い計測距離を持ち、工場フロアや大型構造物の計測に適した地上設置型レーザースキャナを保有し、計測対象の状態や精度に合わせて機器を選定し、適用している。

また、レーザースキャナの特長は計測した点群

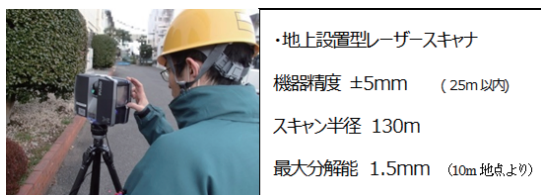


図11 レーザースキャナ概要



データを用いた設計形状との出来形・変形量の確認や、CAD データへの変換、さらに CAD データから FEM 解析データを作成し、実構造を反映した構造解析も可能であることなど、計測データを即座に設計データとして用いることができる利便性である。当社でも、計測から解析まで一貫したサービスを提供し、要望に沿ってさまざまな角度から製品開発や保守点検の支援に貢献している。

ここでは地上設置型レーザースキャナに関して、計測結果の一例を紹介する。図 12 は工場内の設備配置計画において現状態を計測し、新たな配管を設置する上で問題がないかを確認した事例である。また、図 13 はある荷重下で使用されていた円筒形状の鋼構造物が真円断面形状からどのように変形しているかを計測した事例である。

### 2.3 光切断法を用いた計測

材料試験部でも光切断法を用いた形状測定を提

供している。図 14 のようにステージに平置きした計測対象物に縞投影光を投影し、対象に当たって反射した縞画像を解析し、3D プロファイルを作成することができる。主に小型具材などに適用し、最大  $0.5\mu\text{m}$  の高い繰り返し精度で計測することが可能である。当社では金属具材の凹みや亀裂の観察、面粗さの測定などに適用している。

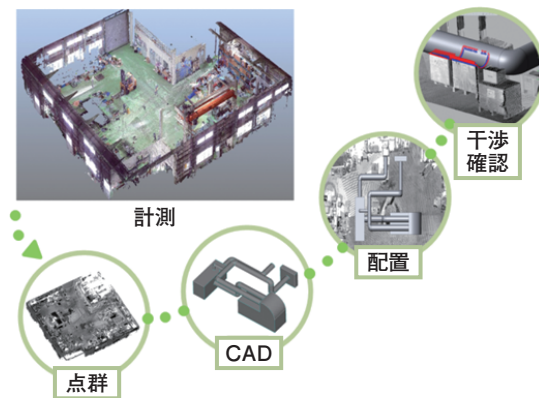


図 12 フLOOR内のレイアウトおよび干渉チェック例

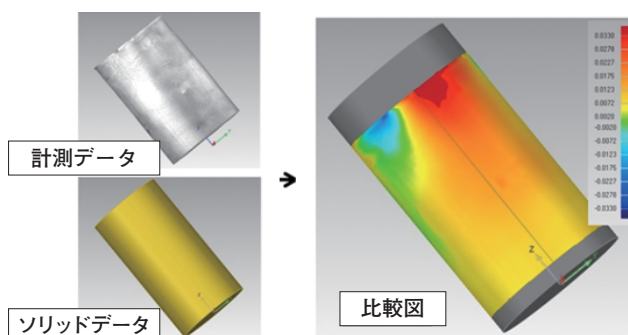


図 13 円筒鋼構造物の比較検討例



図 14 測定機外観とネジのプロファイル

### 3. Acoustic Emission (AE)

Acoustic Emission (AE) とは、材料に応力を加えたときに材料に蓄積されたひずみエネルギーが変形や破壊に伴い超音波領域の弾性波 (AE 波) を放出する現象を指し、AE 試験では、その AE 波を計測し、発生頻度や波形特徴などから、材料の強度や健全性を評価するほか、AE 波の到達時間差から損傷位置の標定が行うことも可能である。近年では、材料上で擬似的に発生させた AE 波の伝播挙動から損傷範囲や程度を評価する方法など応力を伴わない試験技術が開発され、本来の AE 事象とは異なるものの、対象物を伝播する超音波領域の弾性波を検出し何らかの評価に用いることを広義として AE 試験と位置付けている。

現在、AE 技術は、自動車、航空宇宙、発電事業、インフラ保全などさまざまな分野で利用されているが、あらゆる物をインターネットに接続することで得られるデータを管理や開発に役立てようとする動き IoT (Internet of Things) におけるセンシングの一つとしての活用が期待されている。

当社では、ドイツ・Vallen Systeme 社の日本総代理店として同社製 AE 計測システムを販売するとともに、AE 計測サービスを展開している。

#### 3.1 AE 計測の概念

図 15 に AE 計測の概念を示す。AE センサは、超音波探傷試験における垂直探触子と同様の構造を持ち、円筒形のケースの中にセンサの周波数特性に応じた圧電素子が組み込まれている。材料中を伝播する AE 波は、AE センサに到達するとセンサ内の圧電素子により電圧信号に変換され出力される。センサの出力は、 $10^{-5}\text{V} \sim 10^{-4}\text{V}$  と微弱であるためプリアンプで増幅した後に AE 計測装置に入力し、AE 基板上で A/D 変換され、波形データや波形特徴を数値で示す AE パラメータデータとして記録される。測定対象物が複雑形状であっても、ひずみゲージを貼ることができれば測定可能である。

#### 3.2 AE 技術活用の展望

現在、AE 計測は CFRP などをはじめとする材料評価での用途が主であり、この傾向はしばらく続くものと思われる。一方、近年、日本国内でも多くの分野で IoT を活用しようとする動きがみられるが、AE 技術は、無人でのインターネットを介した遠隔モニタリングが可能なることから、IoT におけるセンシング技術の一つとして期待される。

海外では、老朽インフラや危険性の高いプラント設備を対象とした遠隔モニタリングサービスの

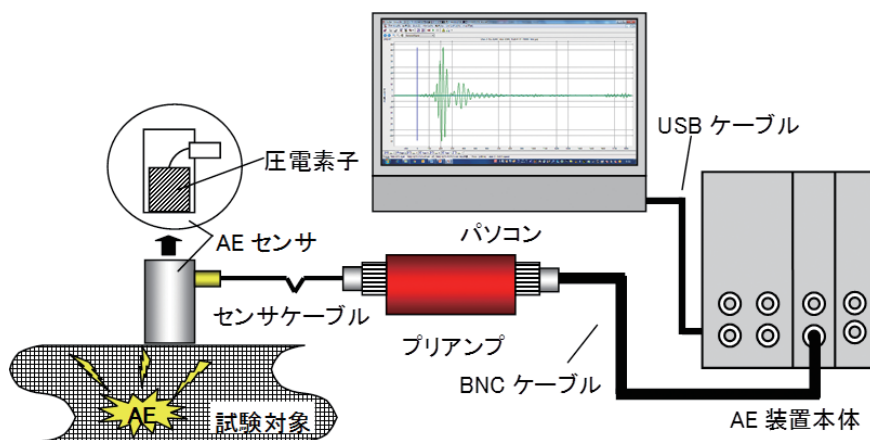


図 15 AE 計測の概念

事業化が進んでおり、構造物に AE を主としたモニタリングシステムを取り付け、インターネットを介し常時モニタリングを行い、異常が検知された場合に構造物のユーザーにアラームを発するというモニタリングサービス会社が 1999 年以前の時点で存在しており、まさに IoT の先駆けである<sup>(3)</sup>。

日本国内では、構造物の多くが、法令により点検手法が規定され、その多くはタイムベースである。しかしながら、今後、構造物の老朽化が進む中、常時モニタリングを行いながら老朽プラントを使い続ける状況も出てくるのが予想される (図 16)。

## 参考文献

- (1) M. B. Prime and A.T. DeWald : The Contour Method, Chapter 5 in Practical Residual Stress Measurement Methods, G. S. Schajer, (ed.), Wiley-Blackwell, 2013, pp.109-138
- (2) 軽部、長坂：デジタルカメラによる三次元形状計測技術、IIC REVIEW、No.30、2003/10、pp.24-28
- (3) 財団法人エンジニアリング振興協会：平成 11 年度“貯蔵設備の信頼性評価技術の研究開発成果報告書”、2000、p.82

## 文責

技師長室	フェロー	三上 隆男
計測事業部	計測技術部	倉内 友己
計測事業部	計測技術部長	中村 英之

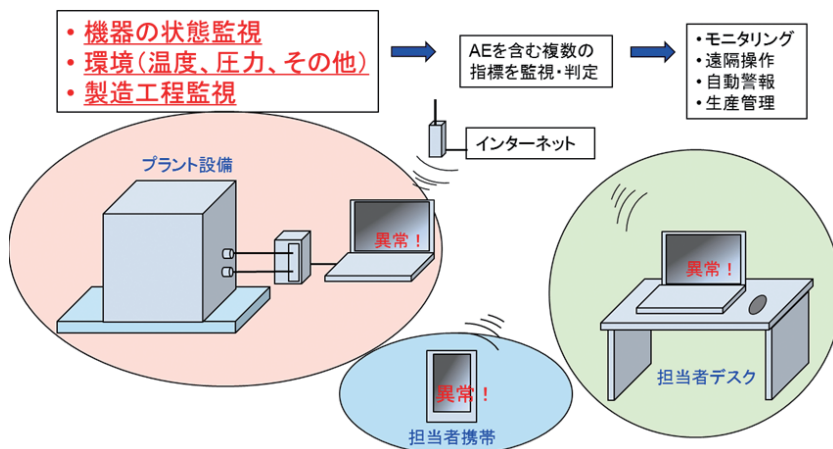


図 16 AE による遠隔モニタリングの概念図