

研究開発センターの「売りの技術」

1. 残留応力測定技術

機械部品の品質管理や、構造部材の健全性、安全性評価に残留応力測定が用いられている。残留応力測定には、X線回折法、中性子回折法、切断法、穿孔法、DHD法、Contour法などさまざまな手法があるが、そのなかでも、広く用いられているのは、X線回折法と穿孔法である。この2つの手法は、大きな設備が要らず、小型装置によって、非破壊および微破壊で残留応力測定ができる。当社は、これらの手法を用いて、持ち込みサンプルから、現地出張によるプラント設備や構造物の残留応力測定サービスまで対応している。

近年、残留応力測定のニーズは高まり、また、多様化してきている。幅広い残留応力測定ニーズに応えるために、近年導入した新しいX線残留応力測定技術($\cos\alpha$ 法)と穿孔法によるプラスチックの残留応力測定技術を紹介する。

1.1 X線残留応力測定

X線残留応力測定法としては、 $\sin^2\Psi$ 法が一般的であり、当社でも、 $\sin^2\Psi$ 法を採用した可搬型X線残留応力測定装置(Stresstech社製Xstress3000)によりサービスを提供してきた(図1)。 $\sin^2\Psi$ 法は測定実績が十分にあるが、測定対象に対して異なる角度からX線を照射する精密回転機構が必要であり、装置の構造から、隅角部など装置が干渉してしまう箇所は測定できなかった。

そういったなかで、精密回転機構が不要で、1度のX線照射で残留応力が測定できる $\cos\alpha$ 法を採用した簡易応力測定装置 μ -X360nが開発された⁽¹⁾⁻⁽³⁾(図2)。この装置は図3のようにセットすれば、隅角部の測定も可能である。2013年にこの装置を導入し、これまでの装置と同等の結果が得られるかを確認した。SM490の短冊試験片に4点曲げにより、既知の応力を負荷してそれぞれの装置で測定し、値を比較した。その結果が図4である⁽⁴⁾。 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\Psi$ 法は、初期値の圧縮応力から負荷荷重に

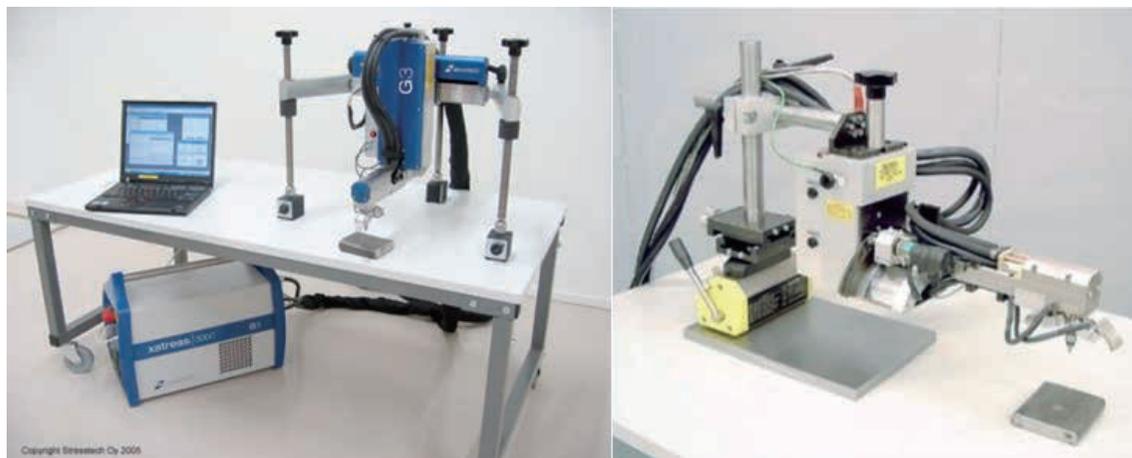


図1 Xstress3000

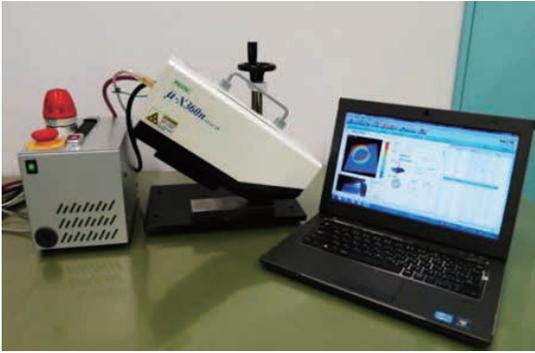


図 2 μ-X360n

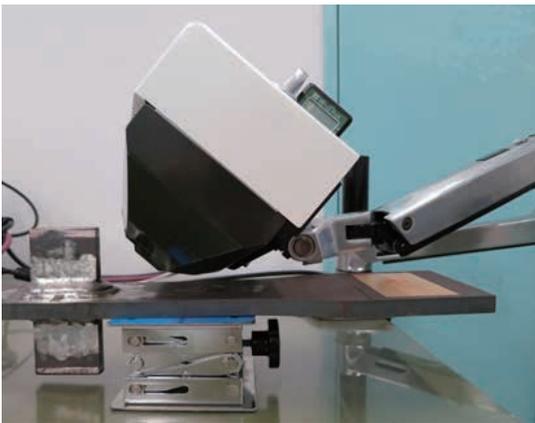


図 3 隅角部の測定

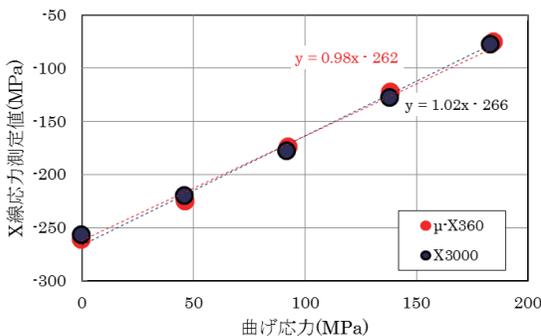


図 4 4点曲げ負荷試験測定結果⁽⁴⁾

よる応力変化において傾き 1 の直線関係が得られた。これにより、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\Psi$ 法の測定値は同等であることが確認できた。今後は、Xstress3000、 μ -X360n を併用して、X 線残留応力測定サービスを広く提供していく。

1.2 穿孔法によるプラスチック材料の残留応力測定技術

近年、強度や耐熱性に優れたプラスチックが開発され、工業製品への適用が著しく進んでいる。こういった背景から、プラスチック材料の残留応力測定の実用性が高まってきている。

プラスチック材料の残留応力測定には、穿孔法が適している。穿孔法は ASTM で規格化された残留応力測定法であり⁽⁵⁾、規格の適用範囲は均質等方性材料のみの限定で、プラスチック材料にも適用できる。穿孔法は、深さ方向に均一な残留応力だけでなく、不均一な残留応力の測定にも適用できる。また、主応力とその方向も測定できるため、X 線回折法と比較すると得られる情報量が格段に多い。ここでは、穿孔法によるプラスチックの残留応力測定例を紹介する。

プラスチックの残留応力測定をする際、金属を穿孔するためのエアタービン駆動のドリルをそのまま使用すると、高速回転のため発熱してプラスチックが溶融したり、その熱によって新たな応力が付与されてしまう。そのため、回転数が 200rpm のモータ駆動のドリルを採用している (図 5)。ま



図 5 プラスチック材料用穿孔装置

た、穿孔法用のひずみゲージは、プラスチックの線膨張係数に対応したものがない。プラスチックの線膨張係数は、金属よりも大きく、僅かな熱でも見かけひずみが発生してしまう。そのため、最適な送り速度、熱を冷ますための遅延時間の設定が重要である。

X線残留応力測定の場合と同様に、4点曲げにより試験体に既知の負荷を与え測定した例を紹介する。試験体は、PPS (Poly Phenylene Sulfide Resin) の多目的試験片を用いた。4点曲げ治具の構造的な制約から、試験片の両端部を切断し、寸法は、長さ110mm、平行部幅10mm、厚さ4mmとなっている。試験体の弾性率は3.8GPa、ポアソン比は0.35である。試験体の写真を図6に、測定状況を図7に示す。

穿孔面の裏側に貼った単軸ひずみゲージにより測定したひずみから負荷応力を算出し、試験体に20MPa負荷した。ロゼットひずみゲージの第1軸は試験体の長手方向(曲げ応力負荷方向)としている。測定した累積解放ひずみを図8に、ASTM E837-13規格により、深さ1mmまで残留応力解析した結果を図9、図10に示す。図9は主応力を、図10は平面応力の3成分を示している。

図10の理論値は、直線応力分布(両表面で応力が最大と最小、中立軸で応力が0)となる梁理論に従い、試験体裏側で測定したひずみより算出している。 σ_x の測定値は、負荷応力値に沿って深さ方向に変化し、おおむね一致している。理論値から外れているところは、試験体の内部に存在していた初期残留応力と測定誤差の影響であると考えら

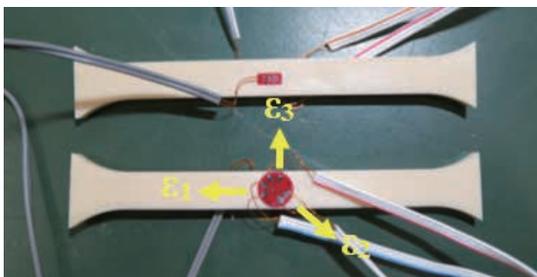


図6 試験片写真

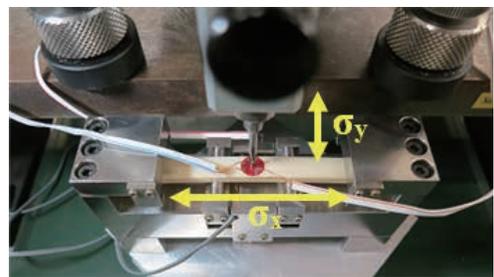


図7 測定状況

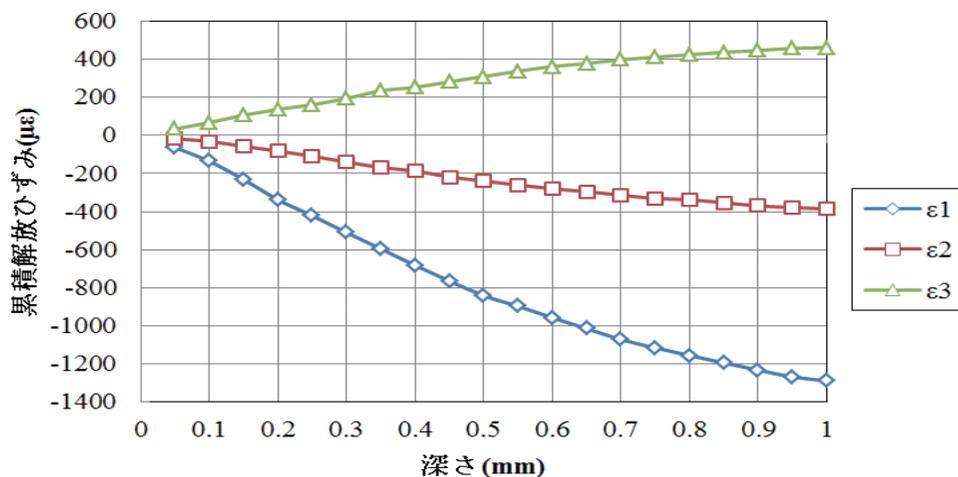


図8 累積解放ひずみの測定結果

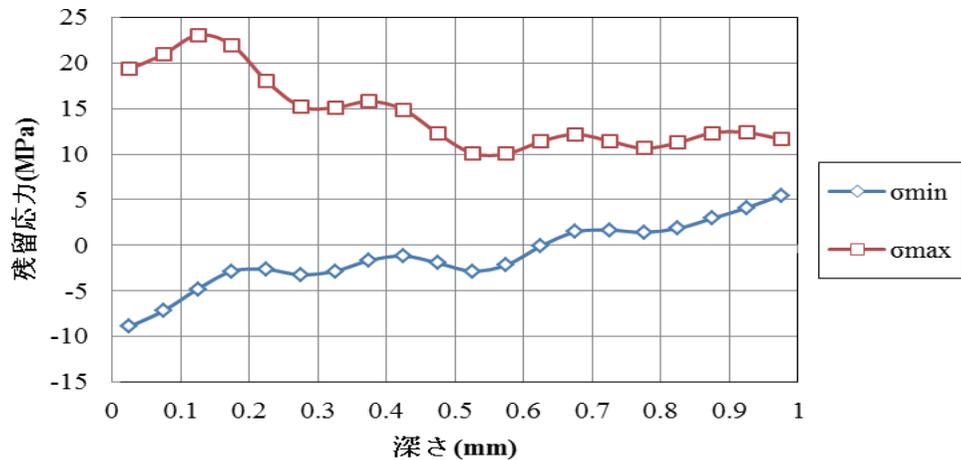


図9 主応力の解析結果

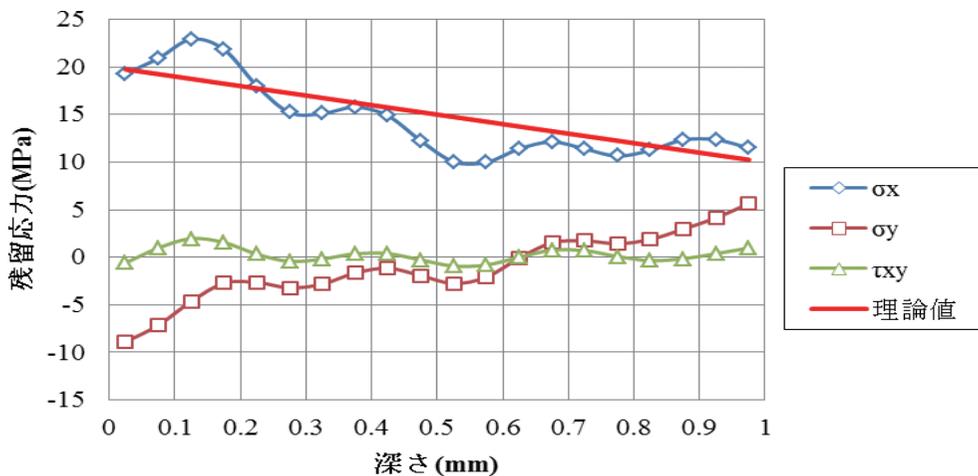


図10 平面応力3成分の解析結果

れる。この測定結果より、穿孔法によるプラスチック材料の残留応力測定の妥当性を確認することができた。

プラスチック材料のなかには、繊維強化プラスチックがあり、これらは異方性を有している。穿孔法の規格の範囲外になるが、異方性を考慮した応力解析も可能であり、現在 CFRP を対象に、検証実験に取り組んでいる。

2. インフラ構造物のモニタリング技術

2014年7月に国土交通省は長さ2m以上の橋と全てのトンネルについて、5年に1度の近接目視による点検を省令で規定した⁽⁶⁾。その結果、Ⅱ予防保全段階、Ⅲ早期措置段階⁽⁷⁾では、5年後の点検までの間に目視以外の点検が必要になる場合もある。目視点検では、点検時に足場の設置や検査員などの費用がかかる。また、点検回数が限定的になってしまうなどの問題がある。

そこで、新たな方法による常時監視が考えられる。目視点検時にセンサ等の設置を行い、無線でその状態を知ることができれば、遠隔地の測定場所や、測定のための足場が必要となる場所では、移動時間や測定作業のための費用削減が可能となる。しかし、そのような場合には、長期間計測できるセンサや計測装置の常設が必要となるため、高価なセンサや装置を使用しなければならないという欠点がある。そこで、このような問題点を解決するために、FBGセンサによる無線システムを開発した。

2.1 無線測定システム

2.1.1 FBGセンサの優位性

開発したシステムでは、従来のひずみ計測で使用されるひずみゲージではなく、光ファイバを使ったFBGセンサを採用した。以下にFBGセンサの優位性を示す。

- (1) 電気的影響を受けず、防爆性を要する対象物の計測に向いている。
- (2) 1本のFBGセンサで複数点の計測が可能である。
- (3) 分解能が高い。
- (4) ひずみ、加速度、温度の計測が可能である。
- (5) センサ自体の劣化がない。

このような特徴から、FBGセンサによる長期計測が可能と考え、無線計測システムに使用した。橋

梁の目視点検は5年ごとに行われるので、その間測定できることを目標とした。長期間計測を実施する上での課題は、計測の無線化とセンサの腐食と劣化による計測不良の改善である。

2.1.2 計測系機器の検討

市販されている計測器には計測系機器全てが含まれており、機能面では優れているが高価となる(波長レンジ:1500-1600nm)。そこで、計測系の機器である光源(波長レンジ:1528-1565nm)、サーキュレータ、光電変換器(波長レンジ:1525-1565nm)を個別に選定、購入して組み合わせることで、費用を抑えることを考えた。さらに、適用方法を考慮して市販品よりも計測点数を減らした。ひずみ計測範囲を $\pm 3000\mu\epsilon$ とするとFBGセンサのブラッグ波長変化は、 $\pm 3.6\text{nm}$ 相当となる。その結果から、選定した機器での計測点は5点となる。

2.1.3 通信系機器の検討

計測の無線化について、計測データをリアルタイムで受信するための遠隔通信方法を検討した。屋外を想定した遠隔通信については、Sim内蔵型Virtual Private Network(以下VPN)ルーターを使用して、仮想プライベートネットワークを構築した。VPNとは、インターネットに接続されている利用者の間に仮想的な通信トンネルを構成したプライベートなネットワークのことであり、遠隔地との通信を行うことができる。

2.1.4 無線計測システムの構成

2.1.2項および2.1.3項で選定、購入した機器を使って無線計測システムを構築した。図11に本システムの構成を示す。本システムでは、計測したデータをVPNによりインターネット経由で受信し、監視PCからの指示により保存されたデータを表示する。なお、FBG用の機器をひずみゲージ用

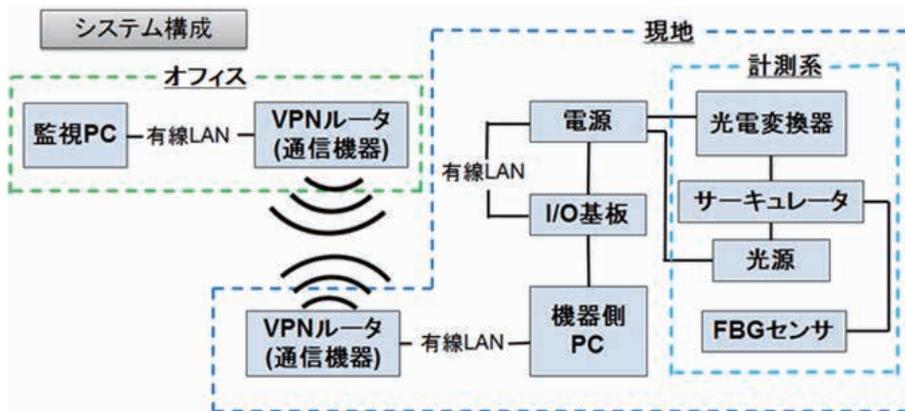


図 11 FBG センサ無線計測システムの構成

の機器に変更することで、ひずみゲージによるひずみ計測にも適用可能となる。

計測されたデータは、機器側 PC に保存され、オフィス側の監視 PC からの指示でデータを取得できる。また、計測データは CSV ファイル形式で保存される。

2.1.5 装置の消費電力の改善

無線計測システムは消費電力が 18W と大きく、本システムで使用している 12V24Ah の鉛蓄電池では、16 時間しか連続して駆動することができない。そのため、計測する時以外は、装置の主要電源を OFF にすることで、消費電力を削減した。タイマーユニットを使用し、一定間隔で装置の電源を ON/OFF できる機能を加えた。1 時間中 10 分間だけ装置の電源を入れると仮定すると、消費電力は 3W に削減できる。また、電源の切り替えに必要なタイマーユニットの消費電力は 1W である。このように、計 4W まで消費電力を削減することにより、72 時間 (3 日間) 連続して駆動することが可能となる。

さらに、太陽電池を組み込むことで、外部電源の供給がない場合でも測定可能とした。使用した太陽パネルは、変換効率に優れている単結晶構造で発電量 50W である。また、表面を防水、耐積雪加工しており、変換効率は 16.7% である。

2.2 無線測定システムの実証試験

無線計測システムの実証試験を実施した。本試験では、ピーク中心波長を正確に計測できることや、太陽電池のみで計測が可能であることを確認した。図 12 に無線計測システムを示す。1 人でも持ち運びが容易となるように小型、軽量化した (11kg)。



図 12 無線計測システムの外観

実証試験は、当社の芝生広場で実施した。図 13 に装置の設置状況を示す。太陽パネルは、最も発電効率の良い南側向き、角度を 35° に傾けて設置した。図 14 のように試験片 (材質: アルミニウム 線膨張係数: $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) に FBG センサ (中心波長: 1548nm) を貼り付けて計測した。接着剤は、市販品 (CC33A) を使用し、ゴム系のコーティング剤

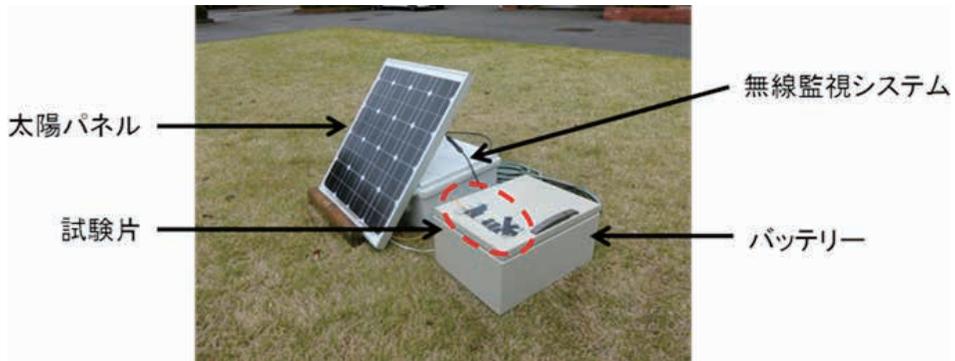


図 13 装置の設置状況

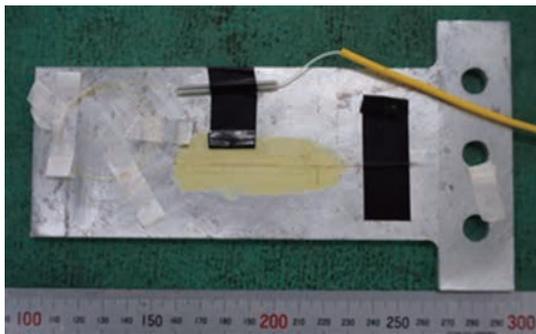


図 14 FBG センサを貼り付けた試験片

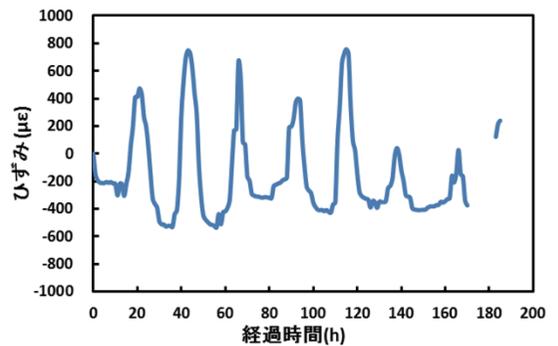


図 15 モニタリング試験結果

を塗布した。その上から、IKS 耐候テープで養生した。計測間隔は、1 時間に 1 回とし、8 日間モニタリングを実施した。気温の変化に伴うブラッグ波長からひずみの変化を計測した。

図 15 にモニタリング試験結果を示す。気温の上昇する昼間と低下する夜間のひずみ変動を確認することができた。昼間と夜間のひずみの最大変化量は、約 $1200\mu\epsilon$ である。この大きな変化量は試験片面に IKS 耐候テープ（黒色）を貼っているため、試験片に太陽光が集中して温度が上昇したことや、夜間の雨による試験片の温度低下が要因であると考えられる。また、170～185h 間は、バッテリーの充電がなくなり計測できなかった。経過時間 50～170h 間の日照時間の合計は 9 時間と短く、十分に充電できなかったと考えられる。十分な電源を確保するため、容量の大きいバッテリー（12V50Ah）

や太陽パネル（100W）を使用する必要がある。

2.3 橋梁支承への適用

本研究の適用先の例として、支承のモニタリングを考えた。支承は、温度変化による主桁やコンクリート床版の伸縮の吸収を目的としている。また、上部構造の荷重を下部構造（橋台や橋脚）に伝達する役割を担っている。支承が正常に機能すれば、移動や回転などの動作をするので、ひずみは発生しない。しかし、機能が低下した場合、支承は拘束されるため、ひずみが発生する。支承に発生したひずみを継続的にモニタリングすることにより、異常を検知することが可能であると考えられる。

支承のひずみ計測の有効性を確認するため、鋼単純合成床版全体に加え、支承部をモデル化し、有

限要素解析を行った。図 16 に解析結果を示す。この解析では、支承の機能が低下したと仮定（移動、回転を拘束）した状態から、コンクリート床版、鋼桁が共に 20℃ 上昇した状態を再現している。解析により斜材の中央部に大きな応力（100MPa）が発

生していることがわかった。このことから、図 17 のように支承の斜材の上下方向に FBG センサを貼り、ひずみを計測することで、支承の機能低下を検知することが可能となる。

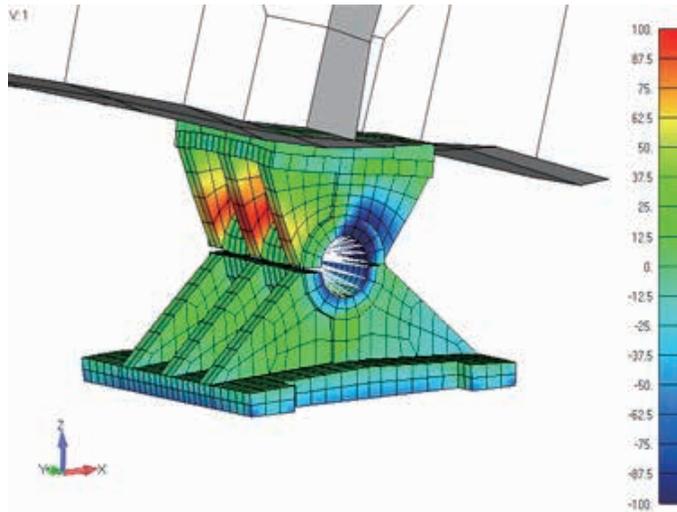


図 16 解析結果

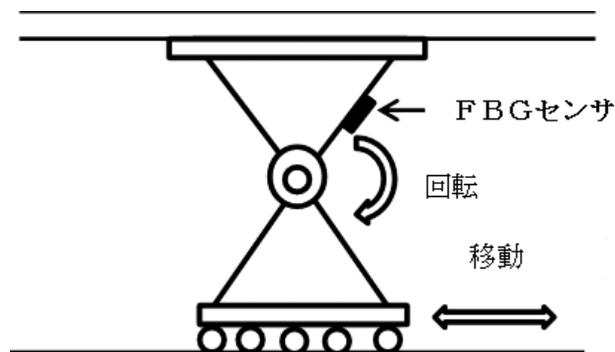


図 17 支承の計測箇所为例

3. 配管などの曲面形状の欠陥検出技術

火力発電所プラントを構成しているボイラ配管は多くの本数を有しており、その検査に多くの時間とコストを費やしている。これら火力発電用配管は、配管外径や厚さ等が異なり、それらに対する超音波探傷は、配管の径によって課題がある。また、火力発電用配管では、ファイヤークラックやクリーブ損傷といった微細な欠陥が問題となっている。そのため、超音波探傷のさらなる探傷精度向上が求められる。

3.1 シミュレーションの活用

コンピュータによるシミュレーション技術は、複雑な試験形状、欠陥の導入や、異なる仕様の探触子を作製することなく、コンピュータ上で探傷結果の確認が可能となった。

当社では、配管の探傷精度向上にシミュレーション⁽⁸⁾を活用しており、配管の径によってシミュレーション内容を変えている。

径の小さい配管は、曲率面をもつため、探触子から入射した音は、曲率面で屈折し広がってしまう⁽⁹⁾。また、適用先の現場では、配管間の距離が近い場合、大きい探触子を入れるのが困難である。シミュレーションでは、マニュアル探触子を中心に曲率による影響を確認し、種々の径に対する最適な探触子を早く選定できるようにしている。

径の大きな配管は、曲率面の影響が少ないが、肉厚となるため、深い位置の探傷精度の向上が求められている。シミュレーションでは、深い位置の評価精度を改善させるため、アレイ探触子の素子配列などを変え、より探傷精度の良い探触子の設計をしている。

ここでは、大口径配管において、シミュレーションで得られた探傷技術の紹介をする。

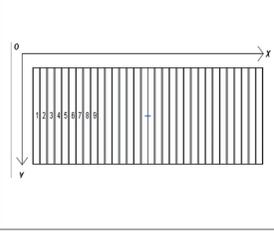
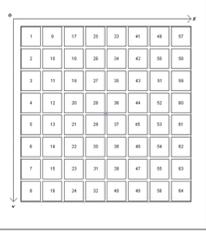
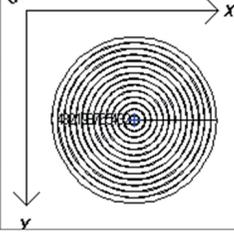
3.2 大口径配管の探傷方法

大口径配管では、高クロム鋼配管のクリーブ損傷などをより早期に正確に評価する非破壊検査手法が強く望まれている⁽¹⁰⁾。この目的に対して、フェーズドアレイ探傷が適用されて、その有効性が報告されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。適用方法は、一般にリニアアレイ探触子を用いて、板厚方向に超音波ビームを集束させて、探傷屈折角を順次変化させるセクタスキャンにより行われている。しかし、この方法での集束は板厚方向のみで、きずの長手方向には超音波ビームが拡散しており、長さ測定における測定精度などには課題がある。なお、セクタスキャンとは、各素子のパルス発生時間を制御することで、超音波ビームを斜めにし、扇形に超音波ビームをスキャンすることである。

さらなる検査精度の改善を行うには、点集束したフェーズドアレイ探傷の適用により、微小きずの検出性をさらに改善し、きずの形状をより正確に把握することが望まれる。点集束したフェーズドアレイ探傷の適用としては、マトリクスアレイ探触子を用いる方法とアニュラアレイ探触子を用いる方法がある。

表1に各探触子の特徴を示す。表1より、マトリクスアレイ探触子は、必要なチャンネル数がリニアアレイ探触子の素子数の二乗チャンネル数が必要となる。仮に現在広く活用されているフェーズドアレイ探傷装置の64チャンネルを考えると、素子の分割は8×8となる。一方あたりの素子数が少なくなると、各素子からの波の合成が不十分になってしまう。アニュラアレイ探傷の場合には、任意の深さに点集束させる効果が広く知られているが、セクタスキャンができない欠点がある。アニュラアレイ探傷では、極めて細かいピッチでの精密探傷が必要になり、さらにきずの傾きによってはエコー高さが低下することが危惧され、リニアアレイ探傷に比べてあまり広くは用いられていない。

表1 探触子タイプごとの特徴

探触子タイプ	リニアアレイ	マトリクスアレイ	アニュラアレイ
素子配列図			
素子配列	直線	格子状	同心円状
長所	素子配列方向にセクタスキャン可能	点集束、前後左右にセクタスキャン可能	点集束可能、任意の深さ方向に焦点可能
短所	点集束不可、素子の幅方向に音が拡散	一方向の素子数が少なく、電子走査に制約	セクタスキャン不可

3.3 点集束かつセクタスキャンが可能な探触子の設計

探触子を設計するに当たり、設計概念をいくつか設定した。火力発電関連における配管検査では、厚肉の大口徑配管が対象になる。今回、深さが75mmの位置にあるきずを検査対象とし、探傷する材質を鋼材とした。探触子タイプはアニュラアレイ、64チャンネルとし、寸法は $\phi 35\text{mm}$ 程度とした。また、周波数を5MHzとした。

アニュラアレイ探傷では、探触子をきずの前後にも走査する必要があり、探傷時間が増大する。アニュラアレイ探触子のリング状に分割した素子を、さらに

平行な直線で分割することで、リニアアレイ探傷と同様にビームの進行方向を変化させることが可能であると考えた。これにより、アレイ探傷と同様な走査方法で、探傷時間を増大させることなく測定精度の改善を図ることができる。64チャンネルでの最適な振動子の分割を検討し、**図18**のような素子配列とした。

3.4 設計した探触子のシミュレーション結果

図19では、シミュレーションを用いて、設計した探触子を従来法と比較している。導入きずは、 $20 \times 20\text{mm}$ の平面きず、および5mmピッチで上下左右に配置した $\phi 3\text{mm}$ の球形きずとした。各探触

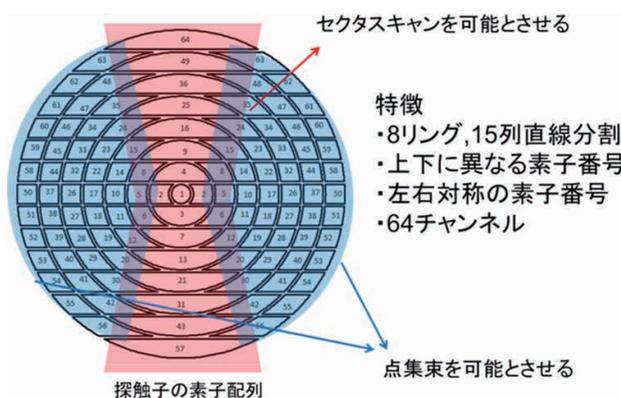
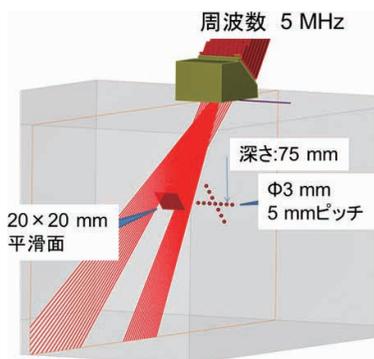
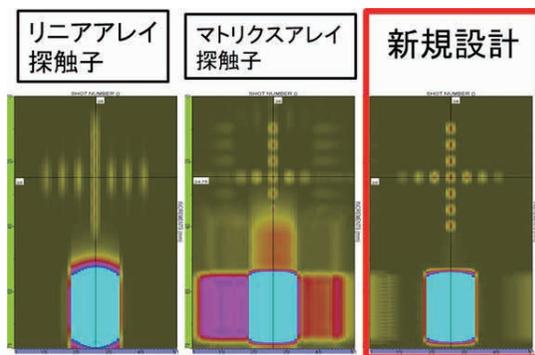


図18 提案したセクタスキャン可能なアニュラアレイ探触子の振動子の分割方法



(a) シミュレーションモデル



(b) 各種アレイにおける結果

図 19 セクタスキャンを伴うアニュラアレイ探傷と従来法との比較

子のスキャンパターンはセクタスキャンである。図 19 より、従来のリニアアレイ探傷では、ビームを幅方向に集束できないために、幅方向の分解能が悪くなっている。マトリクスアレイ探傷では、深部で集束させるために素子を 35×35mm と大きくする必要があり、8×8 分割では一つの素子の大きさが大きくなる。よって、現実的な探触子の大きさに合わせると、十分な干渉ができずに副極が大きく表れ、像が多重化することで評価が困難になっている。提案した方法が、最も像が鮮明であった。

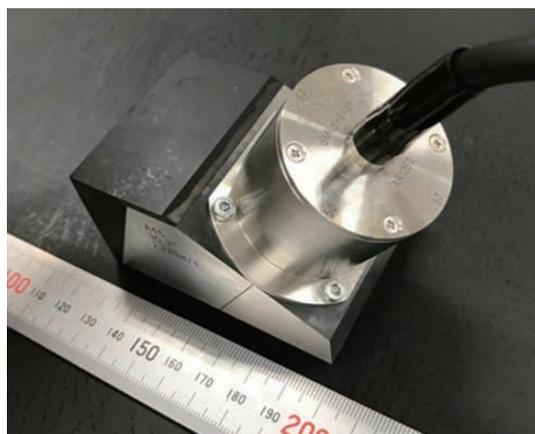


図 20 リング分割型アニュラアレイ探触子の外観

3.5 探触子の試作と性能評価

図 18 の分割方法で探触子を試作したものを図 20 に、仕様を表 2 に示す。この素子配列で作製した探触子の名称をリング分割型アニュラアレイ探触子とした。なお、外観写真は横波用くさびを装着させたものである。

試作した探触子の性能評価をするために、図 21 に示す、平底穴試験片を用いて、64 チャンネルのリニアアレイ探触子と比較した。図 21 より平底穴は、探傷面から深さ 75mm の位置にあり、φ1mm の大きさで、5mm ピッチで 9 個配置されている。

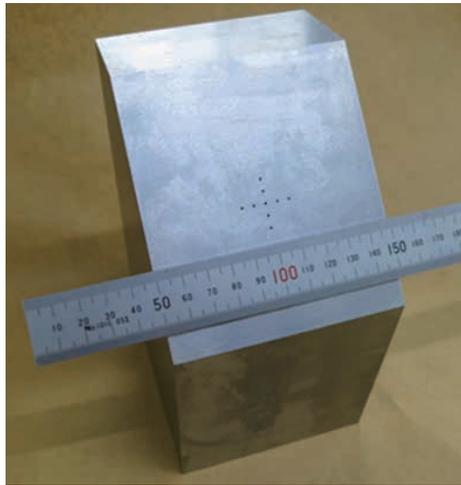
図 22 に探触子の設置状況を示す。本探触子は、フェーズドアレイプローブの複数振動素子の発信タイミングを制御し、図 22 に示す電子走査方向に

表 2 探触子の仕様

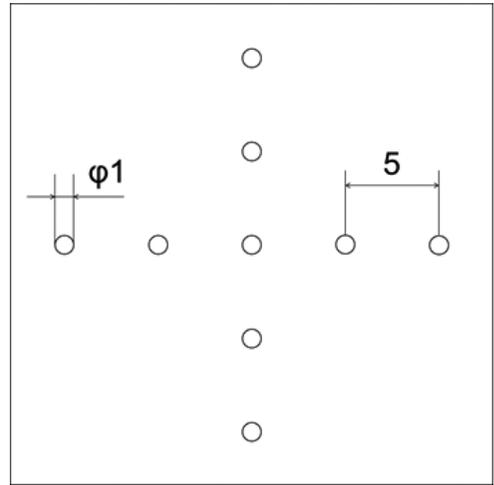
周波数	5 MHz
振動子寸法	φ34.4 mm
総素子数 (チャンネル数)	8 リング×15 列=113 素子 (64 チャンネル)

焦点を合わせ、超音波を発信する。なお、横波屈折角 45 度のくさびを使用した。また、左右走査方向においては、手で探触子を移動させた。

図 23 に探傷結果である、平底ピッチ穴底面上の C スキャン画像を示す。図 23 より、リニアアレイ探触子は平底穴がつながって探傷されたが、試作品は、9 つの平底穴が分離されて探傷されていることが確認できた。

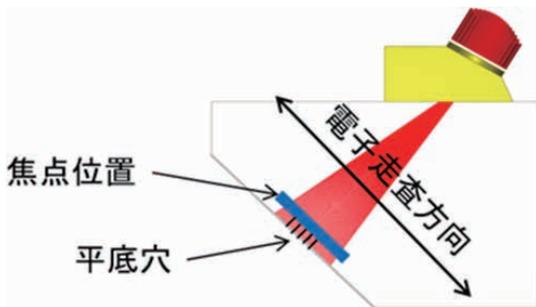


(a) 外観

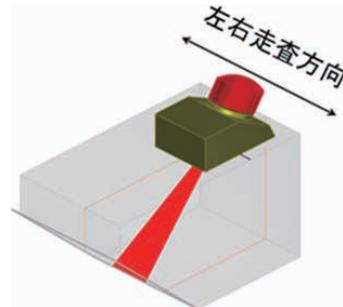


(b) 平底穴の配置

図 21 平底穴試験片

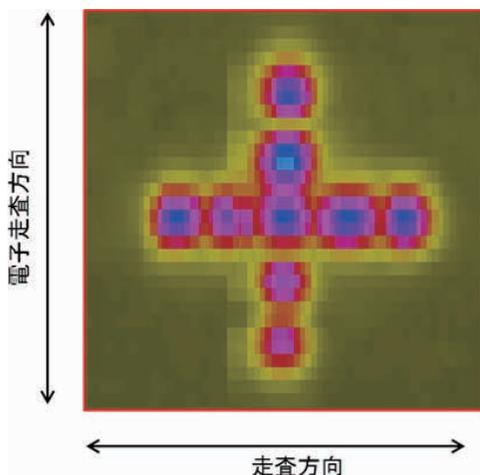


(a) 電子走査方向の視点

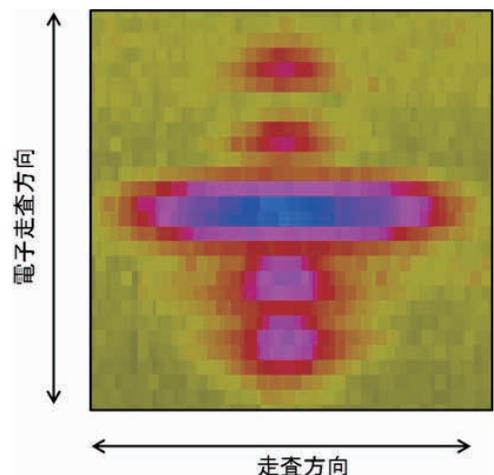


(b) 左右走査方向の視点

図 22 探触子の設置状況



(a) 試作品



(b) リニアアレイ探触子

図 23 平底ピッチ穴底面上の C スキャン画像

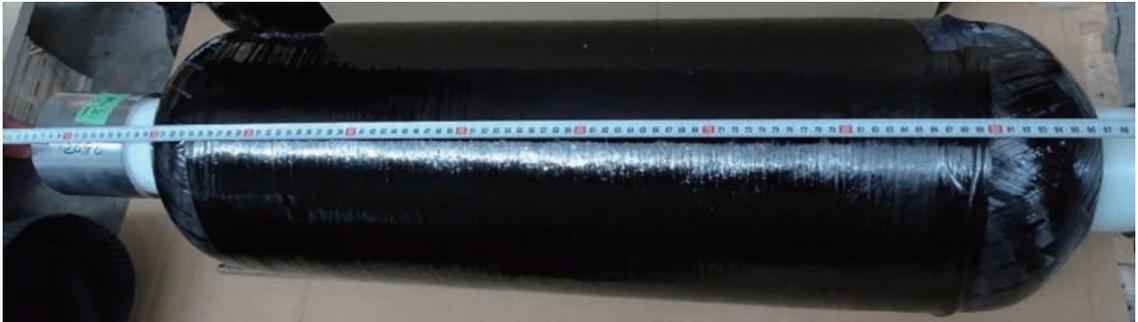
4. 複合構造物の欠陥や損傷状態の検出技術

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）製で製造されたタイプIV圧力容器において、損傷位置特定方法の開発を行っている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾。損傷を導入した圧力容器において、水耐圧試験における水中を伝播するAE信号を解析することにより、損傷箇所および破壊起点の位置特定の可能性を得たので紹介する。

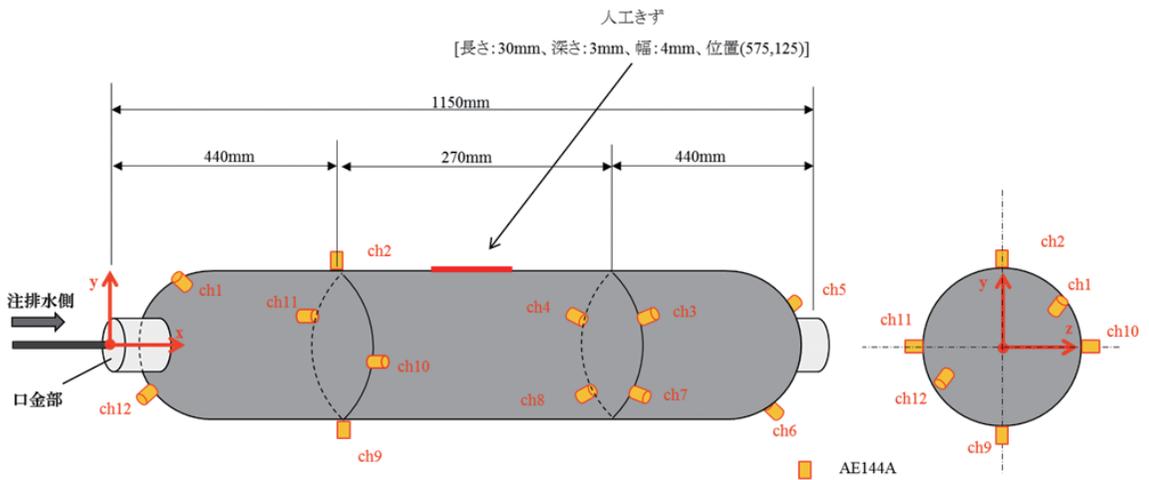
4.1 CFRP 製圧力容器の作製

水耐圧試験における損傷位置特定の検討を行うため、CFRP製タイプIV圧力容器を作製した。図24(a)に試験体の外観を示す。作製した試験体は東レT700の繊維を採用し、炭素繊維の巻き厚を6mm、樹脂ライナーが15mmとしており、保証圧力を7～8MPaとして設計した。外形は260mm、全長1150mmである。

図24(b)に試験体に設置したセンサ配置を示す。人工きずはグラインダを用いて導入しており、形状や導入時の状況を図25に示す。



(a) 試験体外観



(b) センサ設置位置

図24 CFRP タンクとセンサ設置位置



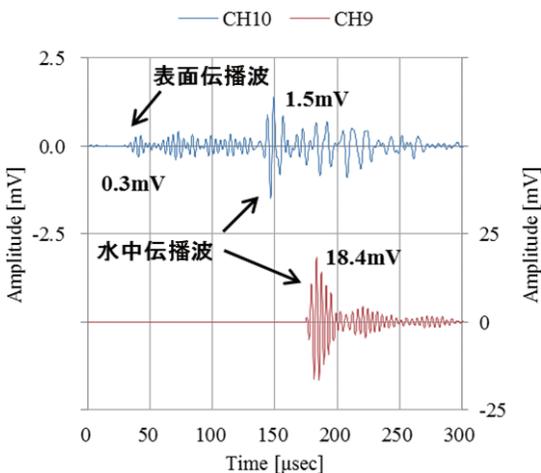
図 25 人工きず導入概要

4.2 疑似 AE 信号を用いた確認試験とエリア標定

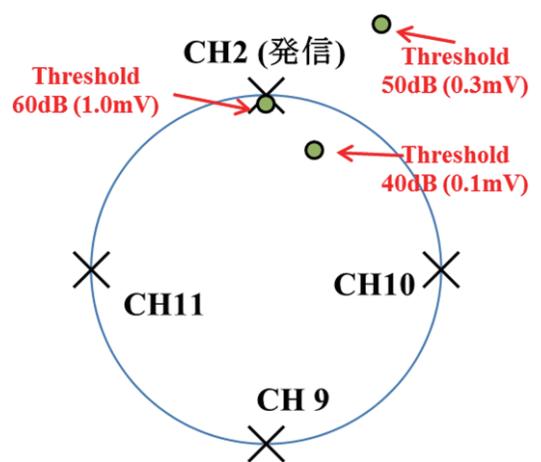
CH2 より発信した疑似 AE 信号を用いて位置標定方法を検討した。図 26 (a) に取得波形を示す。CH10 では CFRP を伝播した表面伝播波と水中を伝播した波形が、CH9 では水中伝播波のみが確認できる。CH10 における水中伝播波は表面伝播波に比べて高い振幅値を有しているが、CH10 に比べるとその差は少ないため、しきい値の設定次第では表面伝播波に信号取得時のトリガがかかる可能性がある。図 26 (b) にしきい値を 0.1mV、0.3mV、1.0mV とした際の位置標定結果を示す。しきい値 1.0mV 以下では標定精度が低いことが確認できる。これ

は、表面伝播波が 0.3mV であるため、しきい値 1.0mV 以下では、表面伝播波と水中伝播波が混在した状態で位置標定をしていることとなる。このことから、AE 信号の発生位置付近では表面伝播波と水中伝播波が混在することがわかる。

本結果より、図 27 に示すように位置標定のエリアを 6 つに分けるエリア標定を考案した。本標定方法は各エリアの位置標定を計算する際に、計算するエリアの外側にあるセンサを用いる方法である。これにより、水中を伝播した AE 信号のみを抽出することが可能となる。



(a) 疑似 AE 信号 受信波形



(b) センサ位置と位置標定結果

図 26 疑似 AE 信号を用いた位置標定結果

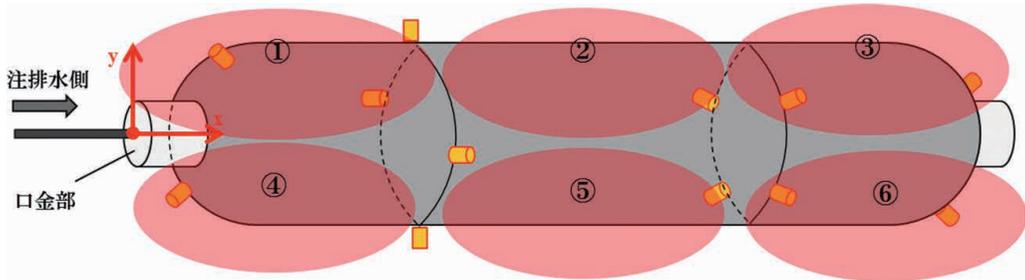


図 27 エリア標定方法

4.3 位置標定結果

図 28 に試験体の破壊過程を示す。負荷圧力 86% において表面の CFRP が一部はく離した。これは人工きずを導入した位置を起点に発生した。最終的にははく離が両側に広がり、破壊したことが確認できる。このことから、水耐圧試験では人工きずを起点に周方向全体に損傷が発生していることがわかる。

図 29 に従来の 3 次元位置標定結果を、図 30 にエリア標定を用いた 3 次元位置標定結果を示す。(a) に試験体を横方向からみた側面図、(b) に断面図を示す。赤枠は試験体の形状を示しており、緑

丸が水耐圧試験によって得られた AE 信号を用いて計算した位置標定結果となる。従来の方法では、人工きずに位置標定の結果が集中しているが、(a) 側面図より試験体下側にも多く標定されており、標定されている位置も試験体から大きく外れている。(b) 断面図の結果も同様で、標定位置の多くは容器外表面ではなかった。これは、AE 発生源近傍のセンサで取得した信号も位置標定計算に使用しているため、表面伝播波と水中伝播波が混在した状態で位置標定しているためであると考えられる。

一方でエリア標定の結果では、(a) 側面図より位置標定結果は人工きず導入位置の近傍に集中し

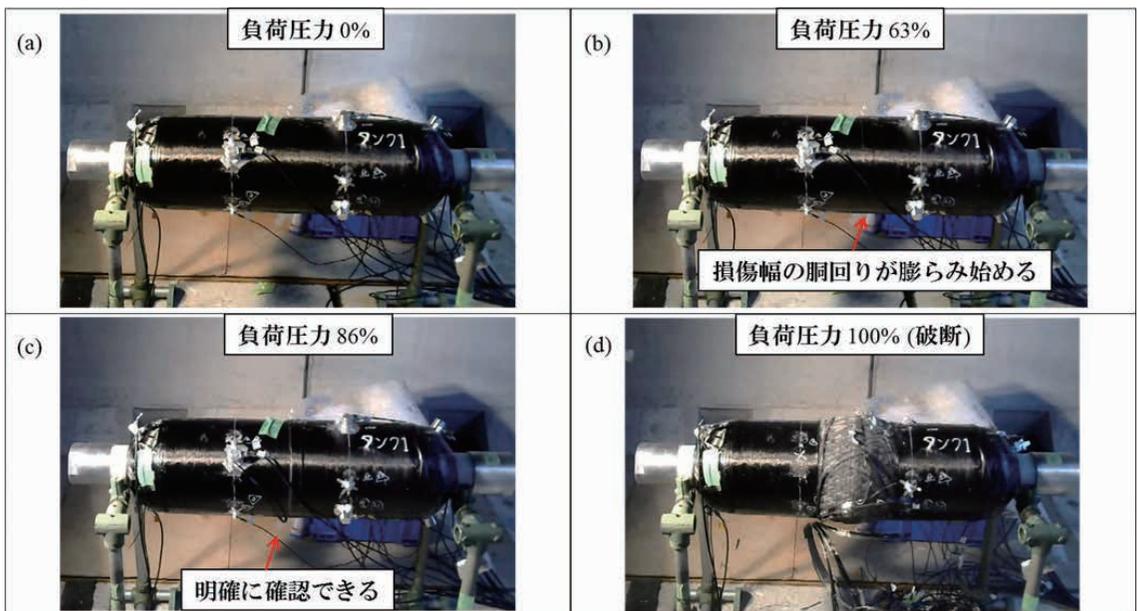
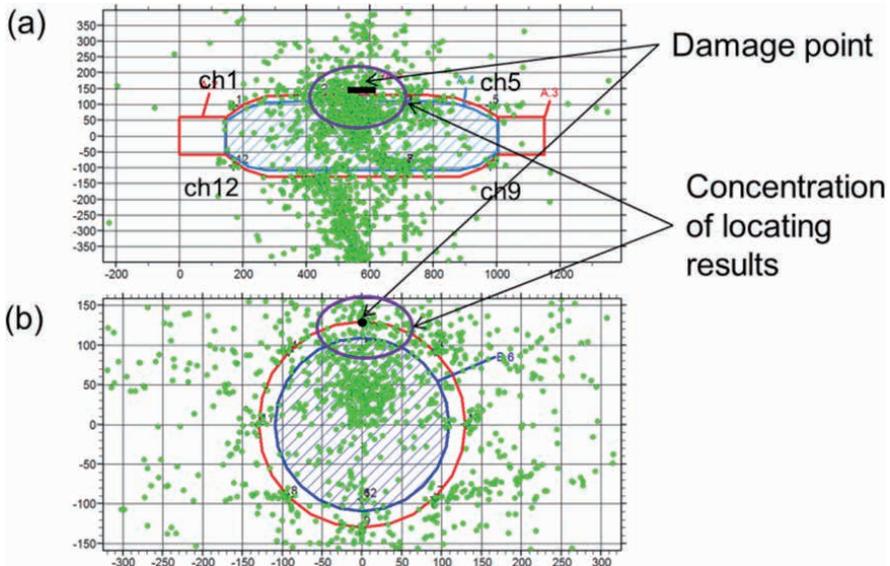
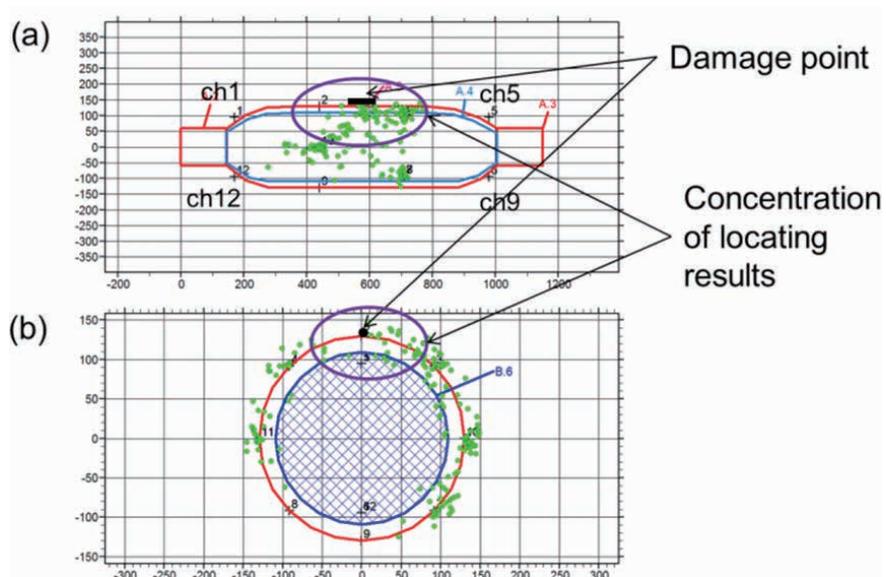


図 28 試験体の破壊過程



(a) 試験体側面図、(b) 試験体断面図
 図 29 従来法 3次元位置標定結果



(a) 試験体側面図、(b) 試験体断面図
 図 30 エリア標定を用いた 3次元位置標定結果

ていることがわかる。(b) 側面図に着目すると AE 波は試験体の外表面に標定されているが、人工きず導入位置以外にも多く確認できる。破断時の試験体は周方向の CFRP が一気に断線していること

から、人工きず以外の損傷を位置標定でとらえていると考えられる。今回は定性的な評価にとどまっているが、今後 CFRP 材の破壊機構を把握し、位置標定が適用できる損傷程度を検討する。

文責

研究開発センター 郡 亜美
検査事業部 技術部 今川 峻
研究開発センター 福本 伸太郎
研究開発センター 川崎 拓

参考文献

- (1) 佐々木敏彦、広瀬幸雄：2次元 X線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射 X線応力測定、材料、Vol.44、1995、pp.1138-1143
- (2) 佐々木敏彦、宮崎利行、内山宗久、三原毅：第12回保守検査シンポジウム講演論文、2013、pp.39-42
- (3) 山田順也、深井康宏、中谷光良、丸山洋一、佐々木敏彦：溶接学会平成24年度秋季全国大会講演概要、2012、pp.352-353
- (4) 郡亜美、高久泰弘、鈴木健次、中代雅士： $\cos\alpha$ 法を用いた X線残留応力測定の有効性確認、IIC REVIEW、No.53、2015/04、pp.48-53
- (5) ASTM E 837-13a：Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method、2013
- (6) 道路メンテナンス年報：国土交通省、2017
- (7) 国土交通省ホームページ：インフラメンテナンス情報 (http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_03_01_01.html)
- (8) CEA-SACLAY：シミュレーションソフトウェア CIVA、CIVA 2015 11.1 US
- (9) 一般社団法人日本非破壊検査協会：超音波探傷試験Ⅱ、2000、pp.19-26
- (10) 神代修平、引地達矢、梶ヶ谷一郎、齋藤規子：フェーズドアレイ法を用いた高クロム鋼溶接部の余寿命検査技術、日本非破壊検査協会、Vol.67、No.2、2018、pp.70-75
- (11) 荒川敬弘：圧力容器における非破壊検査の最近の動向（特集 非破壊検査の最近の動向）、溶接技術、2000、pp.59-63
- (12) 火力設備における電気事業法施行規則第94条の2第2項第1号に規定する定期事業者検査の時期変更承認に係る標準的な審査基準例および申請方法などについて（20120919 商局第66号）
- (13) 中島富男、川崎拓、佐藤明良：薄肉 CFRP 圧力容器耐圧試験における AE 音源位置標定に関する実験的考察、日本機械学会論文集 A 編、79 巻、797 号、2013 年、pp.115-118
- (14) 中島富男、川崎拓、佐藤明良、中村英之：薄肉 CFRP 圧力容器耐圧試験における AE 音源位置標定に関する実験的考察（水中伝播信号を利用した三次元位置標定の試み）、IIC REVIEW、No.50、2013/10、pp.23-30
- (15) 福本伸太郎、西土隆幸、荒川敬弘、大森真実、大森征一：CFRP 製タンクの水中伝播波による損傷位置標定、IIC REVIEW、No.58、2017/10、pp.34-41
- (16) 特許第 5840084 号：AE 位置標定装置及び方法