# 大型3D超音波探傷システム

Large-Scale 3D Ultrasonic Inspection System

新井良一	山根憲幸	磯部 英夫	浜島隆之
ARAI Ryoichi	YAMANE Noriyuki	ISOBE Hideo	HAMAJIMA Takayuki

CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Plastics:炭素繊維強化プラスチック)は強度や剛性が高く、疲労強度に優れるため、航空機、ロケット、自動車などの材料として注目を浴びている。超音波によるCFRPの検査として、単眼の超音波プローブを機械的に走査する手法やフェーズドアレイプローブを用いた手法が検討されているが、複雑形状をした大型部品の検査要求を 十分満足するようなものは作られていない。

東芝は,独自に開発した3次元(3D)超音波検査技術をベースに,機構制御技術並びに画像化処理技術を組み合わせること により,大型部品を効率よく検査し,かつ,湾曲した形状やコーナ部を持つ部品に対しても適用可能な,大型超音波探傷システ ムを開発した。

The use of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) in aircraft, rocket, and automotive parts has recently been a focus of attention because of their light weight, high strength, high durability, and excellent fatigue performance. However, an effective nondestructive inspection system for large and three-dimensionally curved CFRP parts has not yet been fully developed, although single type and phased-array type mechanical scanning ultrasonic probes have been studied.

Toshiba has developed a new type of large-scale 3D ultrasonic inspection system based on our proprietary 3D ultrasonic inspection technologies combined with machine and tool control technologies as well as image-processing and analysis technologies. This system can instantly execute the inspection of large CFRP parts having complex shapes.

# 1 まえがき

航空機やロケットといった航空宇宙分野あるいは自動車関 連分野で, CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Plastics)の適 用検討が進められている。従来, アルミニウム合金が主体で あった航空機でも, 次世代機ではかなりの割合でCFRPが使 用され, 主翼や胴体といった主要部分がCFRP製となる機種 も計画されている。

部品材料の変更に伴い,検査にも異なる手法が必要とな る。今後適用が拡大されるCFRPに対しては,従来のアルミ ニウム合金の検査とは異なり超音波による検査が適しており, 超音波検査装置の需要拡大が見込まれる。更に,主翼や胴体 といった大型構造物も含まれるため,大型超音波探傷システ ムが必要とされている。

超音波を使ったCFRPの検査手法としては、単眼プローブ を機械的に走査させる方法が一般的で、素子を複数直線上に 並べたフェーズドアレイと呼ばれるプローブを走査させる方法 も検討されているが、将来のCFRP部品の高度化に十分対応 できる検査システムは確立されていない。

東芝は, 圧電振動子をマトリックス状に配列し, 内部欠陥 を立体的に可視化する3D超音波検査装置<sup>(1)</sup>を開発し販売し ているが, 圧電振動子を直線状に配列したリニアアレイプロー ブを機械的に走査させながらデータを取得することにより, 3D 探傷データを用いたCFRP検査を効率的に行うことが可能と なる。

ここでは、3D 超音波検査装置の概要と、それを応用した大型部品用の3D 超音波探傷システムの特長について述べる。

## 2 3D 超音波検査装置の概要

3D超音波検査装置は、マトリックス配列又はリニア配列 された超音波送受信素子(圧電振動子)から成るプローブで 高速収集された超音波データを開口合成処理し、3D画像を 生成する探傷装置である。この装置は、3D開口合成法(3D SAFT:3D Synthetic Aperture Focusing Technique)によ る3D画像合成処理を採用しており、以下に示す特長がある。

- (1) 均一で高解像度の3D 画像化が可能
- (2) 距離変化に対して解像度が一定
- (3) 数千点もの波形を加算して画像化を行うため、SN比(信号と雑音の比)が良好

3D 超音波検査装置による画像化例を図1に示す。透明な アクリル板の背面に "TOSHIBA" という文字を掘り込み、こ れに超音波を前面側から送受信し、画像化したものである。

図2の装置構成図に基づき,3D 開口合成法による画像化



Examples of imaging by 3D ultrasonic inspection system



の原理と処理概要を説明する。

- (1) 圧電振動子P1, P2, P3から順次指向角の広い超音波 を送信し, そのつどP1からP64の圧電振動子で反射エ コー信号を受信する。
- (2) 受信した全反射エコー信号をAD (Analog to Digital)
  変換してデジタル信号とし、画像化処理部に保存する。
- (3) 画像化処理部に内蔵した並列演算回路を使って,以下 の手順で3D画像を合成する。
  - (a) P1(送信点)-P1(受信点)波形データから, P1→A
    →P1経路の超音波伝播(でんぱ)時間T<sub>11</sub>に相当する
    反射エコー強度を取り出し、メッシュ Aに加算する。
  - (b) 引き続いて、P1-P2、P1-P3、P1-P4、・・・、P64-P64
    について同様の処理を行い、メッシュ Aの画像化デー タを作成する。

以上の処理を全3D画像化領域に対して計算することによ

り, 3D 画像を合成する。

メッシュ Aのように反射対象物があると、反射エコーが同 位相で加算される。一方、メッシュBのように反射対象物がな いところでは、ランダムなノイズ成分が加算により打ち消され るため、良好なSN比が得られる。

大面積を検査するシステムでは,素子をリニア配列したプローブを走査しながら走査距離に応じて出されるトリガ信号を取り込み,次々に前記の画像を合成処理して3D画像データを 作成する。

## 3 3D 超音波検査装置による測定事例

#### 3.1 平板中の異物検出

4種類の異物を3段階の深さ(表面から0.4 mm, 5 mm, 裏面から0.4 mm)に含入した,板厚10 mm (50 Ply (Plyは層の数を表す単位))のCFRP平板の探傷結果を図3に示す。異物は,(a)バックフィルム,(b)セパレータフィルム,(c)セパレータ,及び(d)バギングフィルムで、サイズは6.4 mm×12.7 mmである。図3は3Dデータから作成したTOF(Time Of Flight)画像であり、どの材質、深さも検出できていることがわかる。



## 3.2 コーナ部の異物検出

複数の異物を,板厚5mm (25 Ply)のCFRPコーナ部の表 面から2.5mmの深さに,位置をずらして含入した試験片の画 像化について述べる。コーナ部の検査では,素子を円弧状に 配列したプローブを使用する。圧電振動子を配列した円弧の 曲率中心と,検査対象となるコーナ部表面の円弧の曲率中心 が一致するようにプローブを配置して,探傷を行う。各素子か ら送信される超音波はコーナ表面に直行し,かつ各素子から コーナ部表面までの距離はすべて同じとなる。このため,コー ナ部を探傷した画像は平面と同様な画像が得られる。図4に コーナ部測定時の外観,及び得られた3Dデータをもとに作成 したC-SCAN画像<sup>(注1)</sup>を示す。凹コーナ部及び凸コーナ部と



もに位置の違いを含めて異物を検出できていることがわかる。 3.3 層間はく離(デラミネーション)の検出

CFRP平板(宇宙航空研究開発機構提供:64 Ply,板厚 約10 mm)の打こん部のはく離状況を,10 MHz,64チャネル (ch)のリニアアレイプローブを用いて打撃面側から探傷した 画像を図5に示す。なお、図5は、CFRP内部を深さでカラー マッピングした画像である。また、打こん部付近を打撃面側か ら撮影した写真を図6(a)に示す。図6(b)は、図5と同じ画像 データを鳥観図用のビューワソフトウェアを使って表示したも のである。打こん部を中心にらせんを描きながらCFRPの厚 さ方向へ扇型に広がっていく画像が確認できる。CFRPの典







型的な層間はく離は、円すい状に広がるが、超音波反射法の 特性上、中央部はいわゆる影になるため、らせん状に広がる 画像が得られる。3D超音波検査装置はこのように、CFRPの 特徴的な層間はく離もとらえることが可能である。

# 4 大型超音波探傷システムの構成

大型超音波探傷システムは、図7に示すように、スキャン機 構部、制御装置、及び計算機システムなどで構成される。ス キャン機構部は、プローブを検査対象に密着させるホルダ機 構や、大型の検査対象を保持・移動させる駆動機構などから



Overall structure of large-scale 3D ultrasonic inspection system

成る。ホルダ機構は、検査対象面とプローブとの位置関係を 正しく保持する必要があり、バネやエアシリンダを組み合わせ ることで、プローブを密着させながら探傷できる倣い機構を開 発した。制御装置及び計算機については、次の三つが主要な 機能となる。

- (1) プローブあるいは検査対象の駆動を制御し,検査対象 面をスキャンして探傷を行う機能
- (2) 3D 超音波検査装置が生成する検査対象の3D 探傷画 像を処理して,大面積の探傷画像を生成する機能
- (3) 探傷画像を解析し評価する機能

(1), (2)はオンラインの機能であり, 検査対象の3D形状面 をスキャン制御しながら, リアルタイムに大面積探傷画像を生 成する機能が要求される。これらの機能を実現するため, NC (Numerical Control) 制御装置と階層分散した計算機システム が連携動作する仕組みを新たに開発し, システムを構築した。

検査を行うためには、検査対象面に沿って超音波プローブ を動作させるためのスキャンパスプログラムをあらかじめ作成 しておく必要がある。複雑な3D形状を持つ検査対象を扱え るようにするため、3D-CADのデータを用いてスキャンパスプ ログラムを自動生成できるシステムを開発した。このシステム のスキャンパスプログラムの生成フローを図8に示す。



図8のフローは5軸加工機などでも一般的に使われている が、今回、最大8軸構成の特殊な検査機構用スキャンパスプ ログラムを生成する必要があり、市販品では不可能であったた め、新たに独自のものを開発した。

開発したシステムは、3D-CADとしてフランスのダッソー・シ ステムズ社が開発したCATIA (Computer graphics Aided Three-dimensional Interactive Application)を対象とし、 NC入力言語であるAPT (Automatically Programming Tools)を生成するAPTジェネレータと、入力したAPTから NCコード (Gコード)を生成するポストプロセッサから成る。 APTジェネレータの画面例を図9に、ポストプロセッサの画 面例を図10に示す。APTジェネレータは一般性を持たせる ため、CATIAからSTL (STereo Lithography)形式でエクス ポートした3Dデータを入力対象とし、パラメータ指定だけで 自動的にパスが生成できるソフトウェアとして構成した。短時 間で簡便にAPTが生成可能である。ポストプロセッサは、ス キャン用のNCコード以外に、検査タイミングや検査位置に応 じた各種の制御指令を付加して出力できるようにしており、検 査対象の形状に応じた最適な探傷が行えるものとなっている。

大型超音波探傷システムの実現に際しては、検査を短時 間で行う必要があるため、64 ch 並列 AD変換回路を持った 高速タイプの3D 超音波検査装置(高速機)を新たに開発し、 64 chのリニアアレイプローブを80 mm/sの速度で探傷できる ようにした。装置の外観を**図11**に示す。大型超音波探傷シ ステムでは、3D 形状をした部品の探傷結果を2次元画像に展 開し、C-SCAN 画像の形で表示する必要がある。また、同時 に複数のリニアアレイプローブを使用して検査を行う要求があ







り,高速機が生成する複数の3D探傷画像を並列かつリアル タイムに処理できる能力が必要である。これを実現するため, 高速機1台ごとにFEP (Front End Processor)を設け,3D探 傷画像の前処理を行った後,それらを2次元化して結合し,表 示する仕組みとした。

検査は、NC制御装置と計算機システムの連携動作により 実行される。計算機システムは、検査用NCコードをNC制御 装置に送信し、NC制御装置がこれを実行してスキャンを行う とともに位置情報を計算機システムに送信する。計算機シス テムは3D探傷画像からC-SCAN画像を生成して、NC制御装 置の位置情報に基づいて展開し表示する。この一連の動作 により検査が進行する仕組みとした。検査の進行に伴って、 C-SCAN画像がリアルタイムに画面表示されるので、検査員 は検査の状況を即座に把握することができる。 検査終了後,検査結果の解析を行うことになるが,こ のための機能として,図12に画面例を示すオフラインの 解析ソフトウェアを製作した。このソフトウェアは波形表示 (A-SCAN<sup>(注2)</sup>),断面表示(B-SCAN<sup>(注3)</sup>),C-SCAN生成, D-SCAN<sup>(注4)</sup>生成,DAC (Distance Amplitude Correction), ゲート機能など,解析に必要な基本機能を持っている。計算機 システム内に大型部品の3D探傷データを記録しているため, C-SCAN/D-SCAN画像は,DACやゲート条件を設定し直し て再生成することができる。統計評価,領域面積の計算,測 長などの解析評価も可能である。なお,解析ソフトウェアは通 常のパソコン (PC)でも動作でき,解析作業が効率的かつ容 易に行えるようにした。

# 5 あとがき

3D 超音波検査技術, プローブ及び検査対象物の駆動制御 技術, 並びに画像処理・解析技術を統合して開発した, CFRP 部品向けの大型3D超音波探傷システムについて述べた。

当社は、複雑形状部の検出性能の向上や検査時間の短縮 など、更なる改良を行い、今後予想されるCFRP部品への適 用拡大に向けて、よりいっそう使いやすい検査システムを提供 できるよう取り組んでいく。

# 文 献

阿部素久, ほか. ボータブルタイプ3D 超音波検査装置 Matrixeyerm. 東芝レビュー. 60, 4, 2005, p.48-51.



- (注2) 反射エコーの強さ(振幅)を縦軸,距離を横軸にした波形表示のグラフ。
  (注3) 反射エコーの強さを明るさの強弱(あるいは色の変化)に変換した 断面画像。
- (注4) 反射エコーの戻ってくる時間を明るさの強弱(あるいは色の変化)に 変換した平面画像。



## 新井 良一 ARAI Ryoichi

電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用シ ステム技術部主務。3D超音波検査システムの開発及びエン ジニアリング業務に従事。

New Technology Application Business Div.

### 山根 憲幸 YAMANE Noriyuki

電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用シ ステム技術部参事。3D超音波検査システムの開発及びエン ジニアリング業務に従事。

New Technology Application Business Div.

#### 磯部 英夫 ISOBE Hideo

東芝プラントシステム(株)情報・制御システム事業部 制御ソ リューション技術部主幹。3D超音波検査装置及びその応用シス テム(制御,計算機)の開発に従事。電子情報通信学会会員。 Toshiba Plant Systems & Services Corp.

### 浜島 隆之 HAMAJIMA Takayuki

東芝電力検査サービス(株)技術部 検査技術グループ長。 原子力や火力プラント等の検査における、3D超音波検査や カラーI.I.など新しい検査技術の実機適用に従事。 Toshiba Power Systems Inspection Service Co.,Ltd.