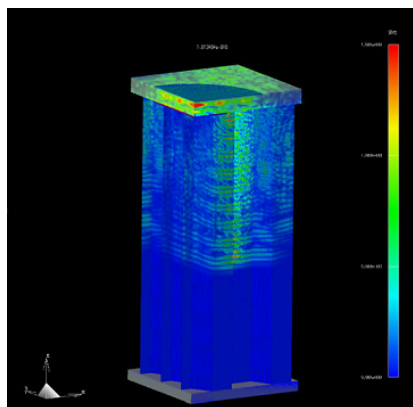


複合材の最新非破壊検査技術

The State-of-the-art Non Destructive Inspection Technology for Composite Materials



植松 充良*¹
Mitsuyoshi Uematsu

下向 貴仁*³
Takahito Shimomukai

久瀬 善治*²
Yoshiharu Kuze

竹本 浩*³
Hiroshi Takemoto

小林 誠治*²
Seiji Kobayashi

田中 章悟*³
Shogo Tanaka

複合材は、軽量・高強度・耐腐食性という利点から航空宇宙機器の構造材料への適用は増加傾向にある。それに伴って、複合材製品品質を担保するための非破壊検査技術に対してより高精度かつ高効率な評価が求められている。そこで当社では、複雑形状に対応する Time-Reversal フェーズドアレイ超音波探傷技術、表面リンクル(繊維のしわ)高さを効率的に計測する近赤外光断層画像化技術、従来の非破壊検査では検出できない弱接着を検出するレーザ接着部検査技術、非認定作業員でも可能な衝撃損傷簡易検査技術の適用検討・開発を推進している。

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を始めとする複合材は、軽量・高強度・耐腐食性という利点から航空宇宙機器の構造材料に用いられており、その重量比率はボーイング 787 やエアバス A350 で約 50%に達する等増加傾向にある。複合材には、基材・繊維材料・硬化/接着方法等の製造方法によって様々な形態があり、またそれに伴う品質レベルも様々であるため、対象製品に合わせて品質保証方法を開発・設定する必要がある。一般的に複合材では金属に比べて、材料強度特性及び形状精度のばらつきが大きく、製造コストに占める品質保証に関わるコストが金属に比べて大きい。したがって、複合材製品の製造を成立させるためには、高精度かつ高効率な検査技術を開発・確立し、製造現場に導入していく必要がある。

本稿では、当社において防衛省向け固定・回転翼機種及び民間航空機の製造又は定期整備を通して培われた複合材に対する非破壊検査技術を概説した後、当社にて開発又は適用検討され、導入されつつある最新の非破壊検査技術を数例紹介する。

2. 複合材の非破壊検査技術

航空機の主構造に多く用いられる CFRP 等の積層材では、内部の気泡(ボイド、ポロシティ)、非接着、剥離、異物が代表的な検出対象である。一方、動翼等の構造に採用されているハニカムサンドイッチ構造では、上記に加え、コアの変形・潰れ、水滴浸入等が検出対象となる。

それに対し、航空機に従来用いられている非破壊検査手法は、超音波探傷試験、放射線透過試験、蛍光浸透探傷試験、蛍光磁粉探傷試験、渦流探傷試験のいわゆる5大手法である。この他に、赤外線サーモグラフィ、シェアログラフィについては公共規格及び検査員技能認定の基準

*1 総合研究所製造研究部 主席研究員

*2 総合研究所製造研究部

*3 民間機セグメント民間機事業部

が整備され、適用が徐々に進んでいるものの国内で実機に適用されている例は少ない。現状、5大手法の中で複合材に対し多く用いられている手法は、超音波探傷試験及び放射線透過試験であり、特に積層材の検査には、剥離に代表される表面に平行な面状きずの検出に有効な超音波探傷試験が重要な役割を果たしている。特に近年では、探傷効率、きずの視認性、客観的記録の保存の観点から、フェーズドアレイ超音波探傷試験 (PAUT) が一般的となっている。

また上記のような検査技術の検出能力を定量化する手段として Probability Of Detection (POD) 評価が一般的となりつつある。図1(a)の超音波Cスキャンデータに関して、POD 評価を実施した例を図1(b)に示す。

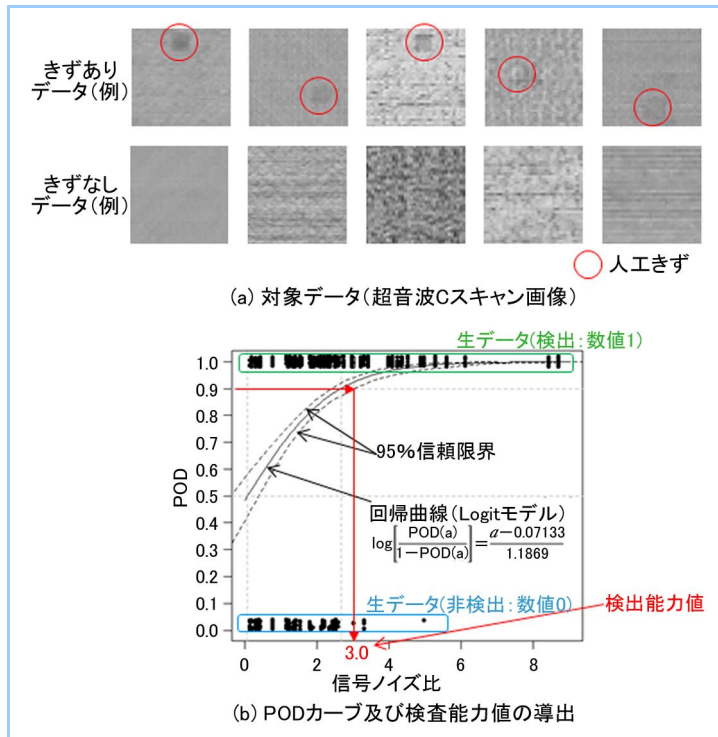


図1 POD 評価の実施例

3. 複合材最新非破壊検査技術の概要

3.1 Time-Reversal (T/R) PAUT 技術

複合材に伝搬する超音波の特性の一つとして、高い減衰率が挙げられる。複合材を構成する基材(樹脂)による粘性減衰、樹脂/繊維界面における散乱が原因と考えられ、その対応策として金属と比較して低い周波数(2~5MHz)の超音波が用いられることが多い。もう一つの特徴として、音速及び減衰率の異方性が挙げられる。即ち表面に垂直な方向には超音波が比較的透過しやすいが、入射角度が数度変化すると大きな減衰を示す。

一方で航空機機体の外形形状には曲率があり、重量軽減の要請から複合材板厚の変化が伴うことから、超音波を複合材表面に垂直に入射することが困難な場合がある。特にコーナーRを有する部品で、そのコーナーRの曲率が徐々に変化する場合、検査がボトルネックとなりうる。そこで当社では、ZETEC 社で開発された T/R PAUT 技術に着目し、その適用検討を行った。図2に示すように T/R PAUT の原理自体は比較的シンプルであり、複合材表面から反射した超音波の伝搬時間から表面形状を読み取り、それに応じて各圧電素子に負荷する電圧に時間差(遅延時間)をつけることで複合材表面に垂直に超音波を入射するものである。図2に T/R PAUT と従来の PAUT を同一試験片に適用した結果を示す。T/R を適用することで、コーナーR変化によらず安定した超音波信号が得られていることがわかる。

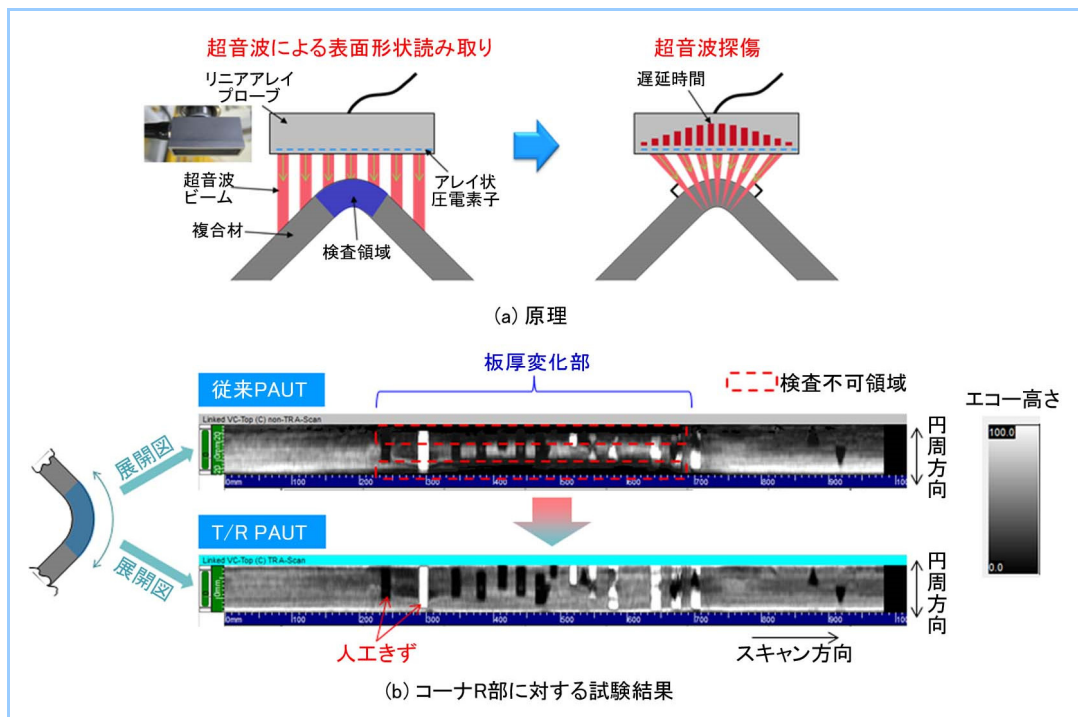


図2 T/R PAUT の原理及び試験結果

3.2 近赤外光断層画像化(OCT: Optical Coherence Tomography)技術

近赤外線の後方散乱光の干渉を利用して対象物の内部状況・構造をリアルタイムに可視化する技術である。当該技術は、医療分野、特に眼底検査で実用化されており、広く普及している。

複合材硬化時、主に形状変化部の表面においてリンクルが生じることが懸念される。表面リンクルで生じた凹みには周辺の樹脂が流れ込み、樹脂リッチな状態で硬化されるが、表面リンクルは製品の圧縮強度を低下させるため、その高さを精度良く計測することが求められる。目視検査によって樹脂リッチが検知された場合、物理的に樹脂を除去し、デプスゲージ等でその高さを計測し、樹脂を埋め戻す必要があるが、この一連の作業の代替として、OCT 技術の適用を検討した。

Santec 社 IVS-300 を用いて断面計測を実施した結果を図3に示す。対象物の断面観察の結果と比較し、±0.1mm の精度でリンクルの高さを計測できることを確認した。更に赤外線入射角の最適化によりSN比を向上させた上で、樹脂内の成分比、吸湿、UV等の影響を調査し、計測方法及び管理方法を規定したプロセススペックを発行した。当該技術及びスペックの実機への適用により、約90%の検査時間短縮が見込まれている。

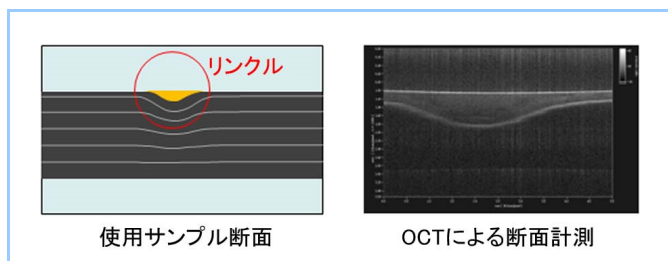


図3 OCT による断面計測

3.3 レーザ接着部検査(LBI: Laser Bond Inspection)技術

現在航空機の構造には接着継手が多用されているものの、米国航空局 (FAA) のガイドラインで、航空機の壊滅的損失を引き起こす可能性のある接着継手には、事実上ファスナによる結合が求められている⁽¹⁾ため、主構造には接着及びファスナ結合が必ず併用されている。これは、現状接着構造の信頼性が十分でないと考えられているからであるが、ファスナが無くなることのメリットとして、重量軽減(ファスナ・シール・パッドアップ削減)、低コスト化(ファスナ穴開け・接合作業

削減), 部品点数削減が見込まれる。接着構造の信頼性が十分でない理由の一つとして, 弱接着 (weak bond) を非破壊検査で検出し接着強度を担保することができないことが挙げられる。

弱接着検知に関する研究は, 欧州の ENCOMB プロジェクトで包括的に行われているが, 十分な信頼性を持つ検査技術は確立されているかは不明である。当社では, 様々な非破壊検査技術を調査した上で, 弱接着の要因に影響されにくい LBI 技術に注目し検討を行った。

レーザーによって部品内部に発生した衝撃波は部品底面で反射し位相変換し引張応力となる。その引張応力に曝された弱接着部を電磁超音波 (EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducer) で検出するというのが LBI 技術の基礎原理である。

米国 LSP Technology 社の設備を借用し基礎的試験を行った結果を図4に示す。レーザーによる衝撃波により弱接着界面に剥離を生じさせ, それを超音波探傷試験により検出できることを確認した。破壊靱性値 G1C 等の強度指標との関連付け, 曲率・板厚変化等の影響, 検出能力の定量評価が今後の課題である。

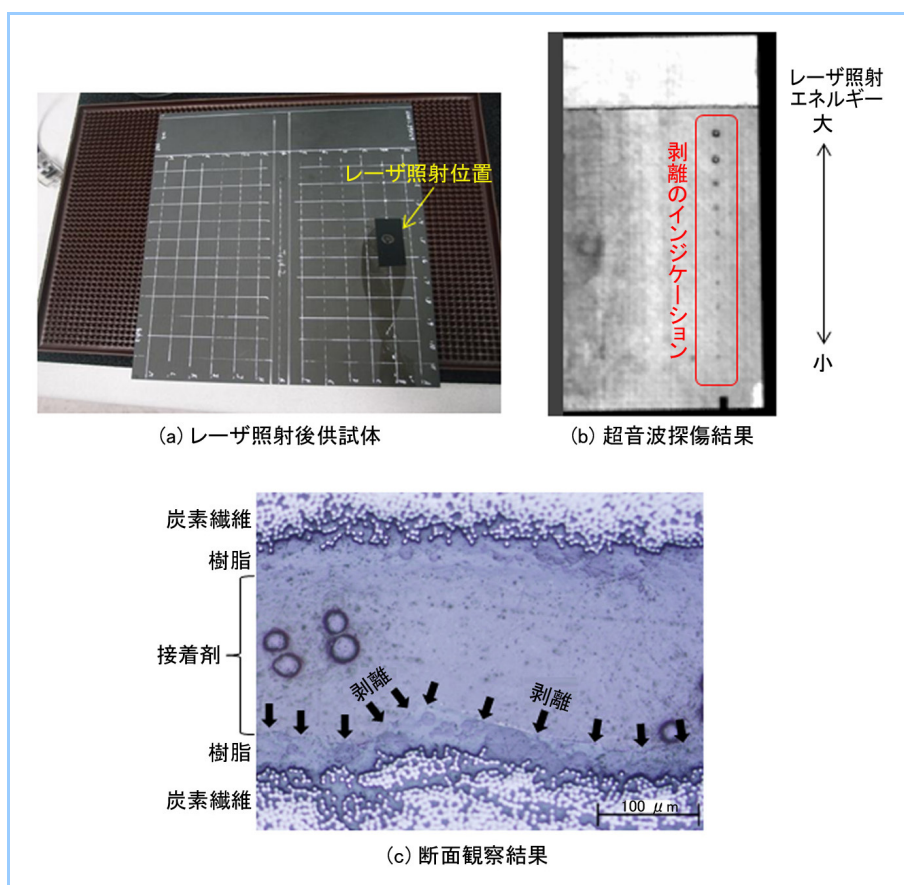


図4 LBI 試験結果

3.4 衝撃損傷簡易検査技術

航空機の運用中の定期整備では, 飛行中又は離着陸時に負荷された荷重による損傷, 被雷又は衝突物による偶発的な損傷を検知するために非破壊検査が用いられる。それに費やされる時間は航空機の可動率に直結するため, 運用中非破壊検査ではより効率的な検査技術が求められる。また, 航空機の製造時組立中にも工具の落下やハンドリング中の衝突により偶発的な損傷が発生する危険性がある。

一方で非破壊検査を実施する作業者には, 技量認定が必須であり, その資格を得るためには最低 80 時間の訓練及び最低 800 時間の作業経験が必要である⁽²⁾。したがって, 航空機の製造現場又は整備現場によっては, 認定検査員をタイムリーに確保することが困難である場合がある。

そこで当社では, 認定のない作業者でも Go/No Go で複合材中の衝撃損傷の有無を判断できる衝撃損傷簡易検査システムを開発中である。小型の超音波探傷器に接続されたフェーズドアレ

イ探触子内蔵タイヤ探触子により複合材表面をスキャンし、得られた超音波信号を独自技術によりモニタリングする。まずは当社製造現場への導入、その後航空会社・自衛隊基地への導入を目指す。

4. まとめ

航空機構造への複合材適用拡大に伴って、その製品品質を担保するための非破壊検査技術に対して更なる高精度かつ高効率な評価が求められつつある。本稿では、そのニーズに応じる当社の取組み例として、T/R PAUT, OCT, LBI, 衝撃損傷簡易検査技術を紹介した。今後、ハニカムサンドイッチ構造、接着構造などの複雑な形状に対しても、効率的な試験を実施していくために図5のような検査シミュレーション技術の導入を加速するとともに、AI・信号処理等を用いた自動評価技術や構造ヘルスマニタリングの開発・適用検討・導入を進め、非破壊検査の更なる高精度化・高効率化を図っていく所存である。

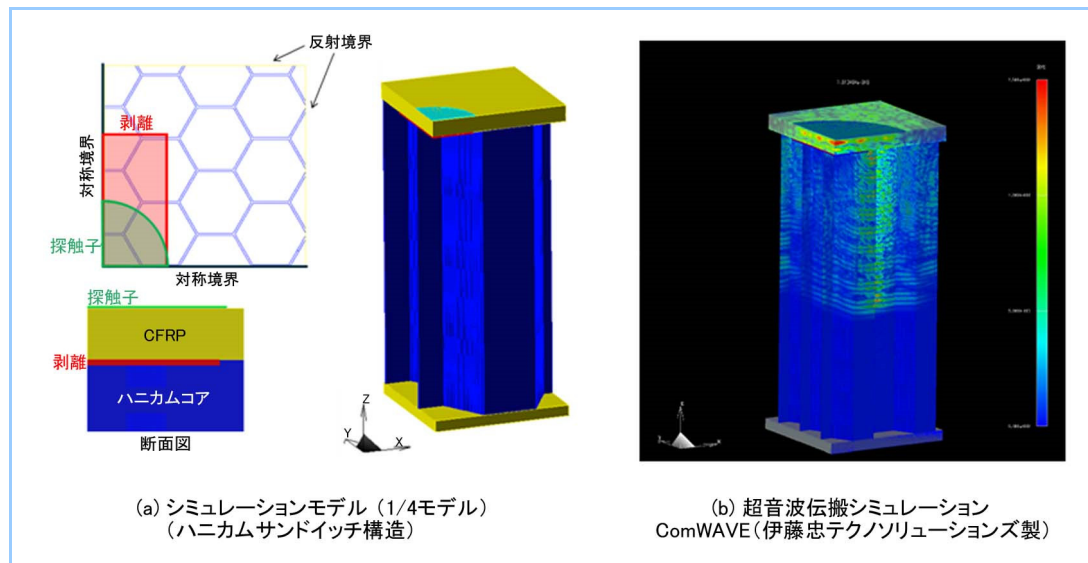


図5 超音波伝搬シミュレーション例

参考文献

- (1) Federal Aviation Administration, Composite Aircraft Structure, AC 20-107B (2009)
- (2) National Aerospace Standard, Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel, NAS410 Rev.4 (2014)