

複合材料の適用技術に関する研究
～ 複合材料の信頼性評価手法の確立 その4 ～

素材開発室 長瀬 尚樹, 西川 康博, 菅根 仁一

Study on Applied Technology of Composite Materials
～ Development of Reliability Evaluation Method for Composite Materials Part4 ～

Naoki NAGASE, Yasuhiro NISHIKAWA and Jinichi SUGANE

CFRPは軽量で高強度・高剛性であることから、様々な分野への適用が進んでいる。本研究ではCFRP積層板(強化材:CFクロス,マトリックス:エポキシ樹脂,積層数:10ply,板厚:1.9mm)の各層間に剥離を模擬した欠陥を入れた試験体を作成し、水浸式パルス反射法により超音波探傷を実施した。周波数やフォーカス距離の異なる探触子により得られたAスコープを用いて、観察表面近傍にある欠陥の距離分解能の比較や厚み方向における減衰の比較を行った。また実際に剥離のある衝撃試験片においてもCスコープの観察を行い適切な探傷条件について検討した。

1. 緒言

CFRPは軽量で高強度・高剛性であることから、主として航空宇宙用の構造材料として用いられてきたが、近年、汎用機器への適用も進んでいる。特に燃費の節減等の低環境負荷用途として省エネ技術への活用が期待されている。CFRPは面外強度には優れているものの面内強度、特に衝撃による剥離により圧縮強度が低下する。成形中に発生するボイドや使用中に生じる剥離や亀裂などの欠陥を検出することは健全性を確保するのに重要である。

CFRPに衝撃試験を行った試験片を水浸式パルス反射法で超音波探傷を行うと、試験片に合った適当な探触子の選定やどの層から現われている波形であるかの判断が困難である。本研究では、板厚1.9mmのCFRP積層板(強化材:CFクロス,マトリックス:エポキシ樹脂)における各層間に剥離を模擬した人工欠陥入り積層板を作製し、水浸式パルス反射法により超音波探傷を行った。Aスコープ(波形表示)により(1)周波数やフォーカス距離の異なる探触子による距離分解能の比較(2)各層間の厚み方向における減衰の状況(3)疑似当方性積層板に衝撃を加えた超音波探傷画像について調べた。

2. 実験方法

2.1 人工欠陥入りCFRP試験片の作製

CF(炭素繊維)クロスプリプレグ(三菱レイヨン社製 TR3110-331GMPa)10枚をステンレス製の型に設置して卓上型ホットプレス機を用いて2MPaの圧力をかけながら130℃で2時間保持した後、自然冷却してから取り出した。人工欠陥として、成形前に積層したプリプレグ1~10の各層間に厚み0.04mm 20mm×20mmのアルミテープを厚み方向に重ならないように入れた。また、成形の際にはCFクロス内の空気を抜くために積層したCFプリプレグをバキュームバック内に入れて真空引きした状態で行った。成形した積層板は幅119mm×長さ159mm、板厚は1.9mmである。図1に成形した積層板を図示する。

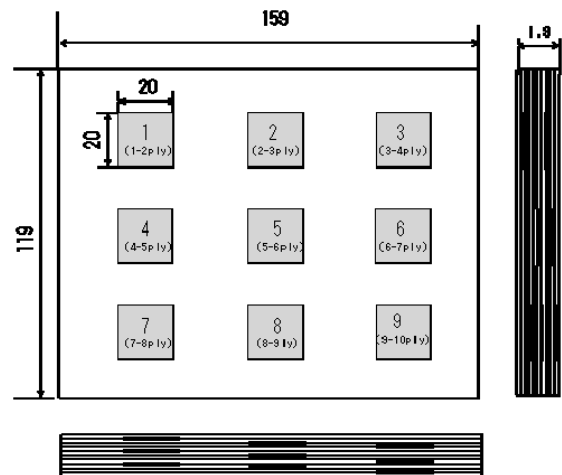


図1 Test piece of the CFRP laminate.

表1 Frequency and focus distance of probe

周波数 (MHz)	フォーカス距離(mm)
5	40
10	40
15	25
25	20

表2 Frequency and wavelength

周波数 (MHz)	波長 (mm)
5	0.608
10	0.304
15	0.203
25	0.122

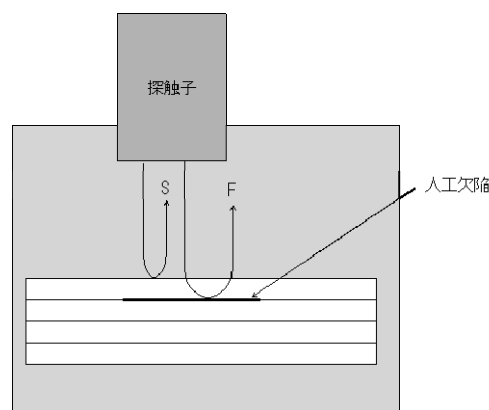


図2 Flaw detection situation

2.2 人工欠陥入り試験片の超音波探傷

超音波探傷は、超音波映像装置（日立建機（株）製 AT7500）を用いて水浸式パルス反射法で行った。使用した探触子の周波数及びフォーカス距離（水中焦点距離）は 5MHz-40mm focus, 10MHz-40mm focus, 15MHz-25mm focus, 20MHz-20mm focus の 4 種類（表 1）である。図 2 に探傷の概要図を示す。探触子から試験体までの水距離は表面エコー探触子から試験体までの水距離は表面エコー（S エコー）が最大となる位置とした。探傷は各層間に入れた人工欠陥位置からの波形（F エコー）を観察した。また、各層間の人工欠陥において、健全部の S エコーに対する減衰を確認するため、各層の F エコーの波形強度をモニタ上の目盛線を基準にして、S エコーと比較して減衰を調べた。

3. 人工欠陥入り試験片の超音波探傷結果及び考察

3.1 各周波数による波長

今回使用した CFRP 積層板は板厚が 1.9mm, 積層数 10ply のため 1ply あたりの厚みは約 0.2mm 程度である。積層した表面エコーと裏面エコーの往復伝搬時間を計測したところ 1.25 μ s であった。測定した往復伝搬時間 t と板厚 h から成形した CFRP 積層板の音速 c は式 $c=h/t$ より 3040m/s と計算できる。また、各周波数 f の波長は式 $c=f$ より計算すると表 2 のように表すことができる。

3.2 探触子による波形の比較

観察する波形を図 3 :1-2 層間の F エコー（モニタ上 90%）、図 4 :6-7 層間の F エコー（モニタ上

45%）、図 5 :底面エコー（モニタ上 45%）として、それぞれモニタ上の基準線にエコー感度を調整して撮影した波形写真を示す。図に横軸 1/2 と記した波形写真では装置によるもので横軸のスケールが他の写真と比較して 1/2 となっている。

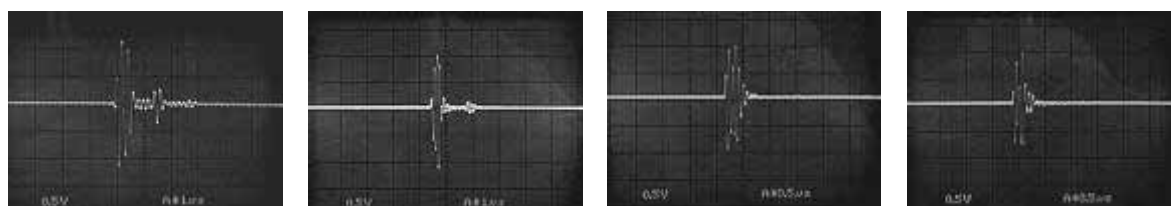
図 3 に示すように 5MHz 及び 10MHz では、S エコーに 1-2ply 間の F エコーが含まれた。表 1 より 5MHz では理論上の波長が 0.6mm, 10MHz の波長は 0.3mm と表面から 1-2ply 間までの距離約 0.2mm より長く、S エコーと F エコーが分離できないためである。一方、15MHz 及び 25MHz では波長が短いため表面エコーときずエコーが分離している。

図 4 の 6-7 層間では、5MHz, 10MHz では表面エコー、F エコー、底面エコーがはっきりと確認できるが、15MHz 及び 25MHz では底面エコーを確認することが難しく表面近傍からのノイズと思われるエコーが大きくなっている。高い周波数で深い位置の欠陥を検出しようとして音圧レベルを上げると界面からの散乱エコーが大きくなるためである。図 5 の底面エコーでは、5MHz の S/N 比が高い。今回で使用した積層板より厚い積層板では、5MHz が有利になる。

3.3 探触子による減衰の比較

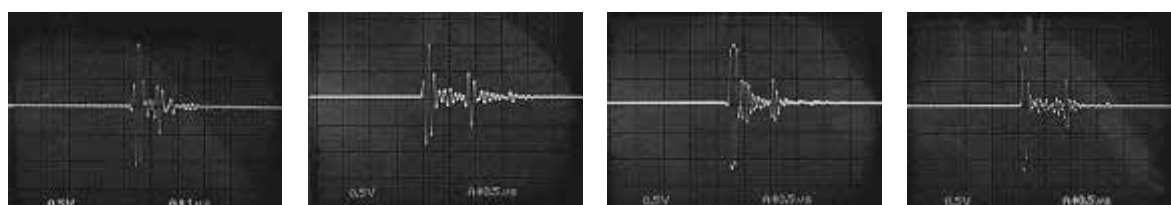
図 6 に表面エコーと比較した各層間位置における F エコーをプロットしたグラフを示す。層間位置 1~4 までは各探触子とも同じような減衰の傾向を示した。層間位置 4 ではどの探触子でも 9dB 程度減衰することがわかる。層間位置 5 ではどの探触子でも大きく減衰しているが、これは中央部にボイドが多く含まれたためと考えられる。

層間位置 6 以降になると、15 及び 20MHz の探触子では、5MHz 及び 10MHz と比較して F エコーの減衰が大きくなる。前記のとおり高い周波数では散



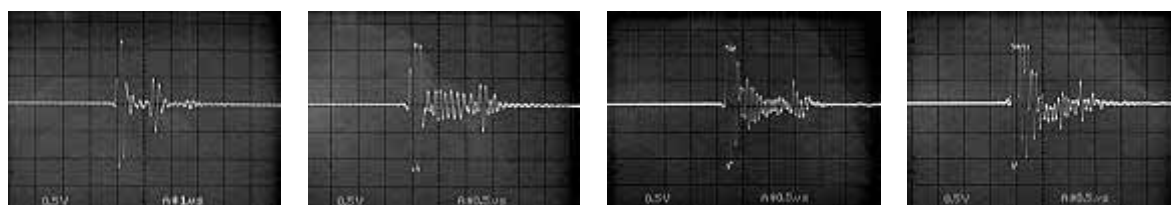
(a) 5MHz(横軸 1/2) (b) 10MHz(横軸 1/2) (c) 15MHz (d) 25MHz

図3 Ultrasonic waveform in the 1-2 intercalation



(a) 5MHz(横軸 1/2) (b) 10MHz (c) 15MHz (d) 25MHz

図4 Ultrasonic waveform in the 6-7 intercalation



(a) 5MHz(横軸 1/2) (b) 10MHz (c) 15MHz (d) 25MHz

図5 Ultrasonic waveform of bottom face

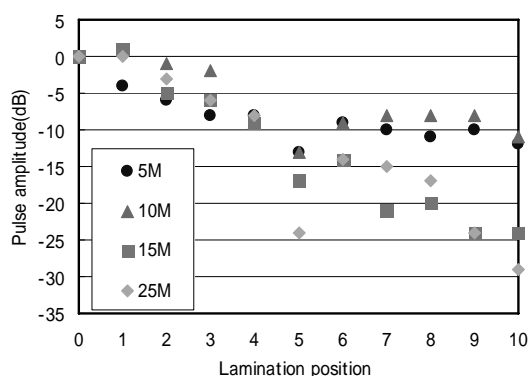


図6 Pulse amplitude in the laminate

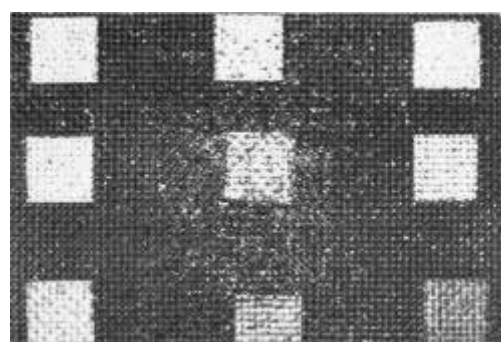


図7 C-scope image(10MHz)

乱や内部摩擦による減衰が大きくなるためと考えられる。また、15MHz及び25MHzの底面エコーは表面エコーと比べて25dB以上減衰することがわかった。本来、周波数による指向性や減衰の比較を行う場合は比較する場合は円形振動子で同じ探触子径を用いるのが通常であるが、今回、用いた探触子はフォーカスタイプであり、さらにダンピングの状況も異なるために周波数による単純な比較はできない。

しかし、実際にCFRPの探傷を行う際の参考デー

タとなるため記載した。10MHzで探傷した画像を図7に示す。中央部付近にはボイドが多く含まれているが、先に記した層間位置5においてどの探触子でも大きく減衰したのはこのためであると考えられる。これらのボイドは成形の際にポンプで真空引きを行う時間が短かく、中央部の空気が抜けなかったために発生したものである。板厚2mm程度の試験片では10MHzの探触子を用いれば板厚方向の層間剥離についてはゲート位置の設定により、全体的に探傷できることが可能であることが

わかった。

4. 衝撃試験片における超音波探傷

一方向材繊維を積層した疑似等方性積層板に先端径 16.9mm の半球型の圧子を落下させて衝撃を付与した試験片の剥離状況を把握するために水浸法による超音波探傷を行った。

積層構成は[(45/0/-45/90)s]2, 16ply で試験片のサイズは 100mm×150mm, 板厚 3.2mm である。与えた衝撃エネルギーは板厚あたり 7J/mm であった。

試験片の健全部による比較を行うために底面エコーを一定のレベルに合わせた際の波形を観察した結果を図 8 に示す。5MHz 以外の高い周波数の探触子では減衰が大きく、底面に焦点を合わせて探傷を行うと表面界面近傍からのノイズが多く生じることがわかる。

5MHz と 10MHz の C スコープ画像 (図 9) を観察すると、10MHz では剥離面積が小さく見えることがわかるが、この結果は探傷する際の探触子の選定を誤れば、きずを過小評価するおそれがあることを示唆している。今回は 5MHz が適当な探触子であることがわかる。

一方、インパクト箇所において 25MHz の探触子を用いて探傷を行うと、表面近傍における積層間の剥離と繊維方向が観察可能である。

5. 結言

今回、CFRP 積層板 (板厚: 1.9mm) の各層にアルミテープを入れた欠陥入り試験体を作製し、水浸式パルス反射法により F エコーの観察を行いさらに疑似当方性の衝撃試験片を探傷した結果、以下のことがわかった。

- (1) 15MHz 及び 25MHz の探触子を用いれば、表面エコーと 1-2 層間の F エコーを分離して検出することが可能で、減衰を考慮しても層間位置 1~4 では、精細な探傷が可能となる。
- (2) 板厚 2mm 程度の板厚方向全般に対しては 10MHz の探触子は適用可能であるが、3.2mm の板厚に対しては 5MHz の探触子が良好であった。
- (3) 探触子により、きずを過小評価するおそれがあることから、板厚や積層構成等により適切な探触子の選定が重要である。

本研究にあたっては、(独)宇宙航空研究開発機

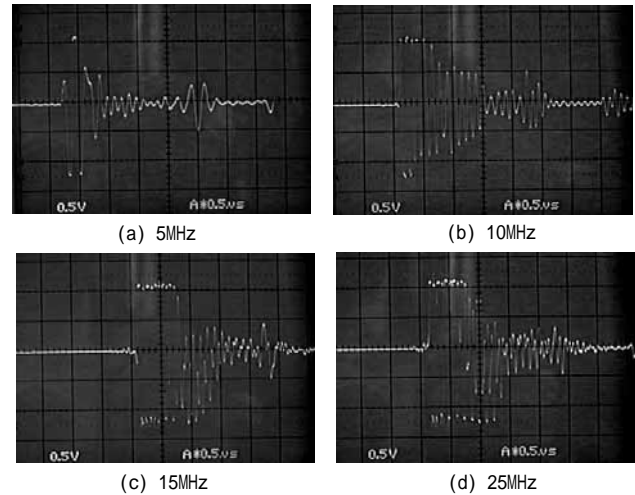


図 8 Ultrasonic waveform of bottom face of Impact test specimen (no-damage area)

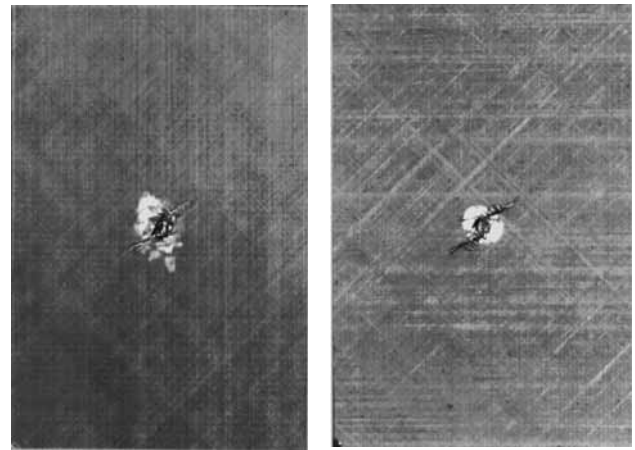


図 9 C-scope of impact test spesimen

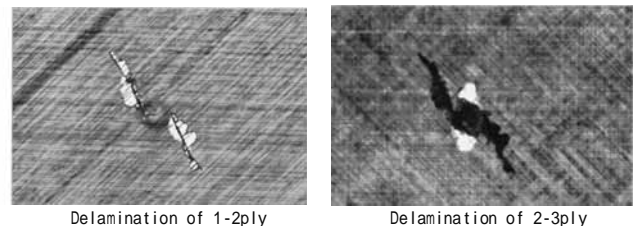


図 10 C-scope of damage area(25MHz)

構の松嶋主任研究員より衝撃試験片を貸与していただき、実験に際して貴重なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松嶋正道: 先進材料の非破壊評価 繊維強化複合材の非破壊評価, Vol. 49, No. 9, Page 588-591
- 2) 座古 勝: 日本機械学会論文集, Vol. 61, 592
- 3) 邊 吾一, 石川隆司: 先進複合材料工学, 培風館