

## 自己センシング TDR 法を用いた CFRP 平板の損傷モニタリング\*

黒川 弘海<sup>\*1</sup>, 轟 章<sup>\*2</sup>, 水谷 義弘<sup>\*3</sup>

## Damage Monitoring of CFRP Plate Using Self-Sensing TDR Method

Hiroumi KUROKAWA <sup>\*1</sup>, Akira TODOROKI and Yoshihiro MIZUTANI<sup>\*1</sup> Graduate student of Tokyo Institute of Technology,  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

CFRP laminated structures are applied to many aerospace structures. Although the CFRP laminates have high specific strength and specific stiffness, an impact load easily creates damage of the CFRP laminates such as delamination cracking, matrix cracking and fiber breakages. The damages of the laminated CFRP are usually difficult to be detected by visual inspections. This requires a damage monitoring system for large laminated CFRP structures. Many researchers have already proposed self-sensing monitoring system using electrical resistance changes of the laminated CFRP. The method, however, requires a lot of electrodes. In the present study, Time Domain Reflectometry method is adopted using the reinforcement carbon fibers as sensors. The new self-sensing TDR method uses an electrical pulse signal and observes the reflected signal. The method is applied to a long CFRP strip plate specimen of 2 m length and an ideal damage of mechanical notch is detected from the reflected pulse signal. Effect of the orthotropic conductance of CFRP plate is experimentally investigated here using multiple electrodes. As a result, the effect of the orthotropic conductance is shown to be negligible.

**Key Words** : Composite Material, Smart Material, Damage Evaluation, Nondestructive Inspection

## 1. 結 言

CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は比強度、比剛性に優れ、航空宇宙機器の一次構造部材へ利用が拡大されている。しかし、面外荷重によって発生する層間はく離によって容易に圧縮強度が低下する問題が存在している。近年の Boeing787 においては、CFRP の層間に熱可塑性粒子を分散させて層間はく離靱性を向上させた高靱性 CFRP が採用されているが、完全に層間はく離が防止可能というわけではなく、大型 CFRP 構造用の簡易損傷検知システムが望まれる。

本研究では、CFRP 大型構造の損傷の検知として、CFRP 構造をそのままセンサとして利用する自己センシング TDR 法(Time Domain Reflectometry Method)を用いた CFRP 構造の新しい損傷検知法を提案する。TDR 法とは電気パルス波を伝送路に入射し、その反射波を観測する手法であり、長い同軸ケーブルの健全性評価に使用されている。Chen らは、同軸ケーブルを用いて、コンクリート構造に埋め込む方法で TDR を用いて建築物のき裂診断に適用した<sup>(1)</sup>。Lin らは同軸ケーブルに対して TDR 法を用いてひずみを測定する方法を提案した<sup>(2)</sup>。TDR 法の複合材料構造の損傷検知への適用に関しては、Okuhara ら<sup>(3)</sup>が炭素繊維の細線をガラス繊維複合材料に埋め込んで TDR 法を用いて損傷検知する手法を適用している。Obaid ら<sup>(4)</sup>は、DCB 試験片に設置したケーブルで層間はく離長さを測定する方法を提案している。

本研究においては、炭素繊維が高い電気伝導性を有することを利用し、CFRP 構造に直接電磁波伝送路を作成して TDR 法を適用する。つまり、構造材料の炭素繊維が直接センサとなっている自己センシング TDR 法を提

\* 原稿受付 2011 年 12 月 12 日

<sup>\*1</sup> 学生員, 東京工業大学 機械物理学専攻<sup>\*2</sup> 正員, フェロー, 東京工業大学 機械物理学専攻  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 il-58)<sup>\*3</sup> 正員, 東京工業大学 機械物理学専攻  
E-mail: hkurokaw@ginza.mes.titech.ac.jp

案する。超音波探傷、X線探傷などの従来の走査型の探傷法では、CFRPの大型構造では探傷領域の増加に伴い検査時間が増加しコストが大きくなるが、TDR法を用いたこの探傷法では広範囲を一度に検査できるため、大型構造の簡易損傷検知に適している。また、既に発表されている多数の電極を設置して電気抵抗変化を測定する方法<sup>5)</sup>と比較して、設置する電極数を劇的に減少させることが可能である。従来の電気抵抗変化法では電極間隔が30mm程度であった。本手法で2mの間隔で電極を設置すると、2m間で70個弱の電極を省略可能となる(1/67に削減可能)。減衰を考慮し、損傷での反射波を観測できる程度に間隔を広くすることで更に大幅に電極数を減少可能である。

実際の航空機の高じん性CFRP厚板構造では、損傷が発生する際には、大きな面外衝撃荷重が負荷されており、負荷点には圧縮応力集中によってデントや繊維微視座屈による繊維破断が発生する。また、高じん性CFRPには層間に熱可塑性エラストマー粒子を分散させた樹脂リッチ層を有すること、高周波では表皮効果により電流は表面に集中することから、電流は表面の炭素繊維層を流れると考えられる。本研究では、この自己センシングTDR法をCFRP大型模擬構造に適用して、厚板CFRPの衝撃損傷時に発生する損傷の一例として表面層の繊維破断を検知することを目的として、一方向CFRPを用いた電磁波伝送路を並行平板で作成し、長さ2mの一方向CFRPに対してTDR法による測定を行い、繊維方向および繊維直交方向の損傷位置検知に関して実験し、TDR法による繊維破断の位置検知可能性について実験的に検証した。

## 2. TDR法の原理

TDR法とはパルス状の電気信号を電磁波伝送路に入射し、時間を横軸として縦軸に反射波電圧を観測する手法である。図1のように波形発生器(Wave generator)、オシロスコープ(Oscilloscope)、検査対象ケーブル(Target cable)を接続し、波形の入射、反射波の観測を実施する。波形発生器から発生した波は、方向性結合器で検査対象のケーブル方向にだけ伝搬する。伝搬した電気信号は特性インピーダンスの違いにより、入力端部で部分的に反射し、残りは検査対象のケーブルに伝搬する。検査対象ケーブルを伝搬する電気パルス波は損傷位置と終端で透過波と反射波に分かれる。反射した電気信号は方向性結合器でオシロスコープに伝搬し、記録される。反射波の発生位置により伝搬距離が異なり、オシロスコープへの到達時刻も異なる。よって、反射波の測定により損傷の有無、位置を検知可能である。以下の式(1)より入射端から損傷までの距離 $L$ を求めることができる<sup>6)</sup>。

$$L = \frac{V_p \Delta T}{2} \quad (1)$$

ここで、 $V_p$ は伝搬速度、 $\Delta T$ は入射波と反射波の時間差である。 $V_p$ は伝送路により $0.6 \sim 0.9c$ ( $c$ は光速)となる。本研究では炭素繊維が高い電気伝導性を有することを利用し、図1の検査対象ケーブルの代わりにCFRPに対してTDR法を適用する。

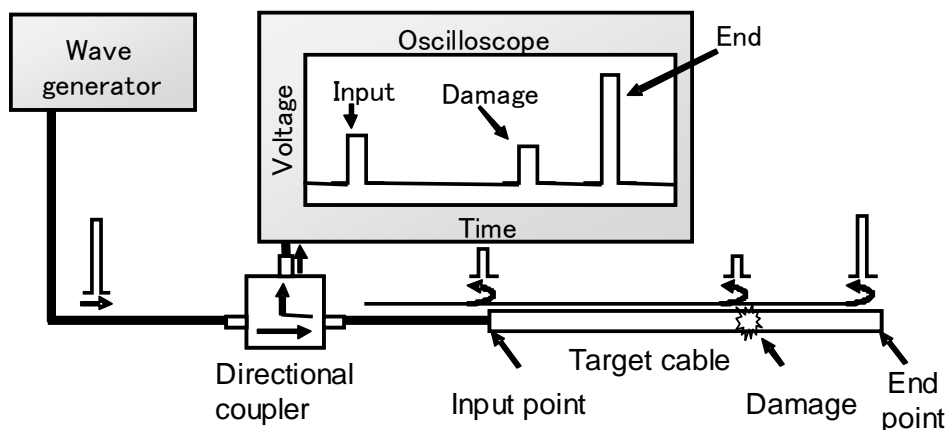


Fig. 1 Schema of principle of TDR method

この検査対象ケーブルの代わりに、単純に CFRP の平板を置き換える場合、波形発生器やオシロスコープを接続している同軸ケーブルと CFRP 平板との特性インピーダンスが著しく異なる。このため、CFRP 平板の入力端部でほぼ全反射し、CFRP 平板に電気信号が伝搬しない。そこで、インピーダンスマッチングが必要になる。また、CFRP 平板の導電率異方性が及ぼす影響についても不明であり、この研究では実験的にこれらを検討する。

### 3. 試験片および実験方法

#### 3・1 試験片の作成

CFRP 試験片は、三菱レイヨン製プリプレグ PYROFIL#380 を用いて $[0_4]_T$ に積層した。長さ 1980 [mm]×幅 120 [mm]の長い試験片を作製した。成形はシート状の電熱ヒーターを利用し、アルミニウム板で挟みこみ、ガラス繊維断熱材を利用して 130°C で 2 時間成形した。成形時にアルミニウム板治具にパイスで圧力をかけた。試験片形状を図 2 に示す。図 2 の左側半分は成形せずにプリプレグのまま測定した。これは、長大な試験片を成形することができないためである。なお、1 [m]長さの試験片で、CFRP 成形の有無が電気信号の伝搬速度に影響がないことを予備実験で確認している。損傷を与えない場合には成型せずプリプレグのまま実験することが可能であるが、損傷を付与する際には損傷を付与する周囲の樹脂の余計な変形を防ぎ、繊維破断の影響のみを検討するため、部分的に成型した。試験片の左端部は接続端とするため、銅めっき電極を取り付けた。銅めっき電極の作成は参考文献<sup>7)</sup>に詳細が示されている。

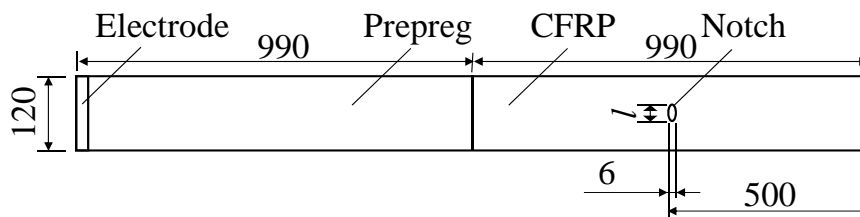


Fig. 2 Specimen configuration of Type A

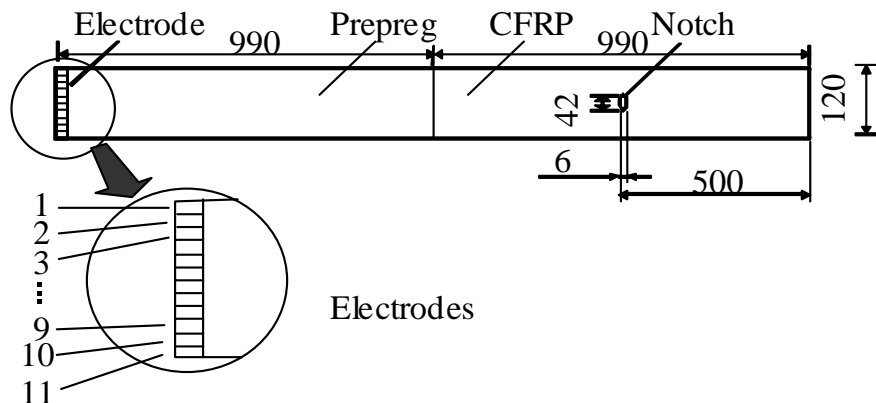


Fig. 3 Specimen configuration of Type B

この Type A 試験片では、電極は左端部全幅が長さ 10 [mm] でめっきされており、電気信号はこの CFRP 板幅全体に送信される。右半分が成形した CFRP 板であり、成形後に右端部から 500 [mm] の位置に機械的に直径 6 [mm] のドリルを用いて切欠を作成した。切欠の長さは 6, 18, 30, 42, 54, 66, 78, 120(全幅を切断) [mm] の 8 通りである。この試験片を用いて実験的に繊維破断の検出限界を検討する。

繊維直交方向の導電率異方性の影響を実験的に検討することを目的として、図 3 に示すように試験片端部の電気信号入力部の電極を 11 分割した Type B 試験片を作成した。試験片左半分はプリプレグをそのまま利用しており、銅めっきによって電極を作成後にカッターで試験片端部を 11 分割することで電極を分割した試験片を作成

した。分割した各電極間はビニールテープにより電氣的に絶縁した。Type A 試験片と同様の位置に切欠を作成し、切欠の長さは 42 [mm] である。CFRP は繊維方向の電気伝導性と比較して、繊維直交方向の導電率は非常に低く、繊維直交方向の導電率  $\sigma_{90}$  と繊維方向導電率  $\sigma_0$  の比  $\sigma_{90}/\sigma_0$  は 0.03 の程度である<sup>(8)</sup>。この試験片を用いることで、炭素繊維の方向のみにパルス信号波が伝搬するならば、分割したそれぞれの電極を用いて TDR 法による測定を行うことで繊維直交方向の損傷位置を検知が可能であると考えられる。あるいは、この CFRP の程度の導電率異方性が測定に影響を及ぼさなければ、あらゆる電極からのパルス信号の反射波が同じになる。これを実験的に確認することがこの試験片の実験目的である。

### 3・2 測定装置

測定装置は図 1 に既に示した。任意波形発生器としてはテクトロニクス社製のファンクションジェネレータ AFG3251(1ch, 最大 240MHz)を用いた。この任意波形発生器を用いて、矩形パルス波を入射し、Mini-Circuits 社製パワースプリッタ ZAPD-21(広帯域, 低ロス 0.25dB)により入力波形を 2 つに均等に分け、Mini-Circuits 社製方向性結合器 ZFDC-10-5 を介して CFRP 試験片に接続している。方向性結合器により被測定物から戻ってくる方向の信号のみを取り出している。測定は、テクトロニクス社製デジタルオシロスコープ TDS5034B の CH1 で入射波を測定し、CH2 で CFRP 試験片からの反射波を測定している。入射パルス波は 1 [V<sub>pp</sub>], 半値幅 4 [ns], サンプリング間隔は 0.01 [ns]として測定した。

### 3・3 インピーダンスマッチング

本実験でのパルス周波数はおおよそ 200 [MHz]程度であり、電磁波の波長は 1.5 [m]の程度である。電磁波の波長の 1/100 の長さを超える配線を考える場合、2 つの導体から成る電磁波の伝送路として考えなくてはならない。この場合、ケーブルと CFRP 試験片との高周波数領域での特性インピーダンスが著しく異なると、CFRP 試験片とケーブルの接合部でパルス信号はほぼ全反射してしまう。市販の同軸ケーブルは一般に 50 Ω の特性インピーダンスを有している。

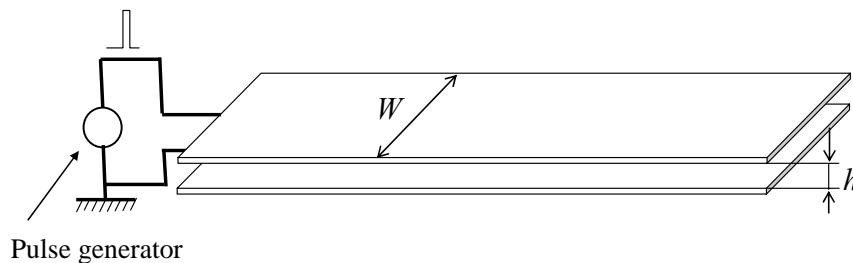


Fig. 4 Parallel strip model

CFRP 平板の特性インピーダンスを求めるために、図 4 に示す平行平板伝送路モデルを考える。この平行平板の伝送路の特性インピーダンスは次式で与えられる<sup>(9)</sup>。

$$Z_0 = \frac{h}{W} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (2)$$

ここで、 $h$  は平行平板の間隔、 $W$  は平板幅、 $\mu_0$  は真空の透磁率 ( $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]),  $\epsilon_0$  は真空の誘電率 ( $8.85418782 \times 10^{-12}$  [F/m]),  $\epsilon_r$  は平行平板間に設置された誘電体の比誘電率である。CFRP 平板だけの場合を考えると、 $h \rightarrow \infty$  となって特性インピーダンスは無限度となる。このために CFRP 平板だけでは電気信号は信号入射接続部で全反射してしまう。そこで、CFRP 平板と、グランドとして CFRP 平板と同じ面積の導体を用い、2 つの導体で平行平板伝送路を作製し、 $h$  を適切に設定する必要がある。本研究では、グランドの導体としてアルミニウム平板を用い、接続部での反射波と CFRP 端部での反射波、繊維破断部での反射波を明確に区別するため、接続端部でも反射波

が発生するように設定した。具体的には同軸ケーブルの特性インピーダンスである  $50 [\Omega]$  から若干低い  $30 [\Omega]$  程度を目標として、実用的に丸めた数字として平板間隔を  $10 [\text{mm}]$  とした。このために、特性インピーダンスは  $32 [\Omega]$  となっている。

実用的な観点からは、実機と同じ大きさの大きなアルミニウム平板を用意する必要はない。式(2)から、幅  $W$  を小さくすることで、小さな  $h$  のマイクロストリップ伝送路を作成することができる。これは、現在用いられている耐雷システム用の銅メッシュを利用する、または、銅メッシュと CFRP の間に薄い導電体を挿入することで実用化可能である。また、層間を電氣的に絶縁した CFRP では内部 CFRP 層をアルミニウム平板の代わりにして平行平板伝送路を作成可能である。これらについては今後の研究課題とし、ここでは最も簡単なアルミニウム平板を用いた平行平板伝送路を利用した実験を実施する。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 インピーダンスマッチング

インピーダンスマッチングを行わずに CFRP 平板試験片に直接パルスを送った場合の測定結果を図 5(a)に示す。図の横軸は時間であり、縦軸は測定された電圧である。6 [ns]にあるのが入射端での反射パルスであり、22 [ns] 付近の小さな電圧の山が CFRP 試験片端部での反射波である。入射パルスはほぼ全て CFRP 平板の接続端部で反射し、試験片端部からの反射は明確には観察できない。アルミニウム平板を用いて平行平板伝送路を作成し、図 1 の測定システムで測定した結果を図 5(b)に示す。インピーダンスマッチングでアルミニウム平板を用いて平行平板伝送路を作成したため、22 [ns]の反射波は非常に明確に測定できている。また、平行平板伝送路の特性インピーダンスが同軸ケーブルと比較して小さいために 6 [ns]の付近の CFRP 試験片入射端部からの反射波は逆位相になっている。なお、22 [ns]の反射波より後に測定されている波形は、試験片中の多重反射による波形である。以降の測定では 22[ns]の反射波までを評価対象とする。以上の結果から、インピーダンスマッチングによって CFRP に対して自己センシング TDR 法が適用可能であることが実証された。

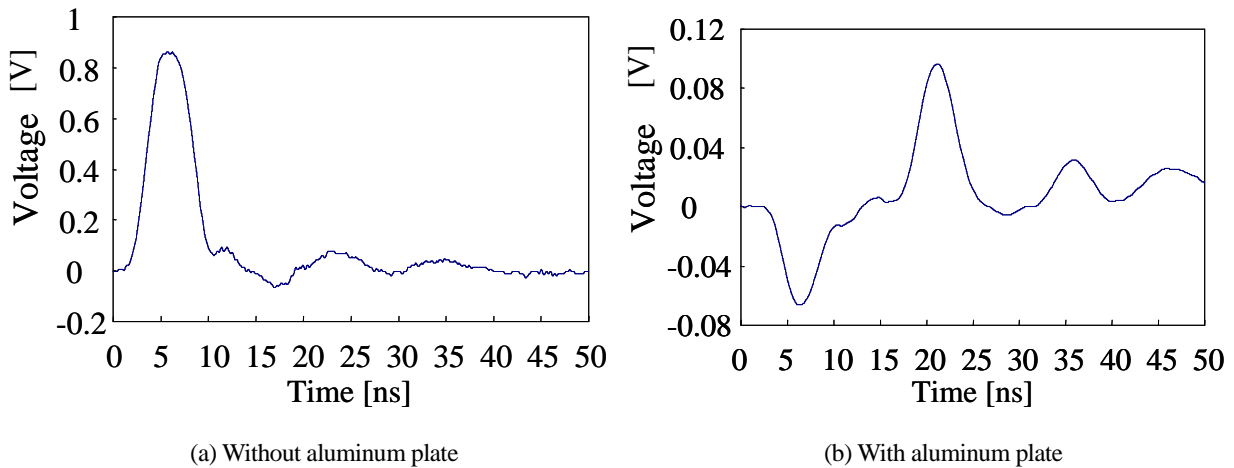


Fig. 5 Effect of impedance matching of measurement of TDR

### 4.2 検知可能性の検討

Type A の試験片を用いて、8種類の切欠長さの検出を実施した。結果を図 6 に示す。図 6 において、縦軸は測定した電圧であり、横軸は時間である。

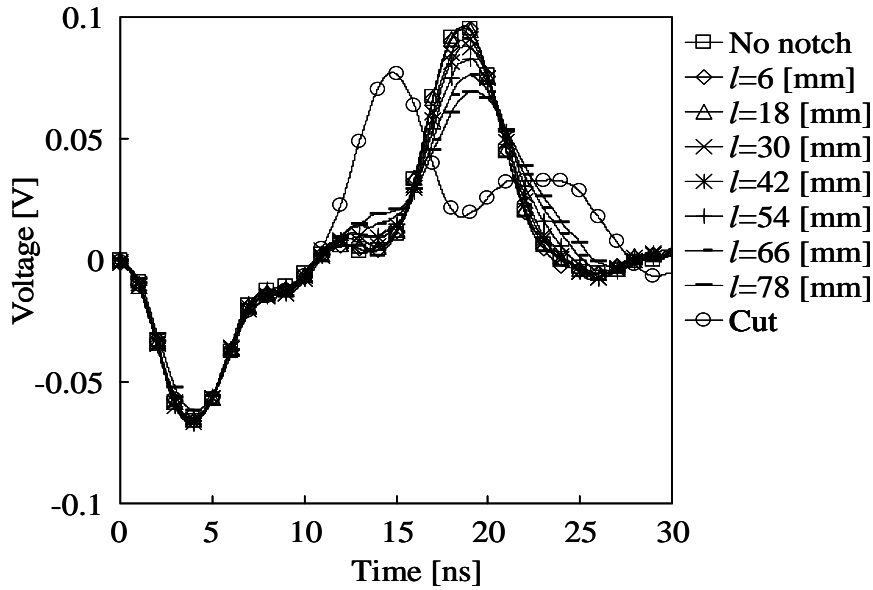


Fig. 6 Detection of various notches using TDR

図 6 において、○印が、右端から 500 [mm] の位置で、試験片の幅 120 [mm] を切断した場合である。この反射波はおよそ 14 [ns] の位置に認められる。他の切欠の反射波も非常に小さいが、この位置に反射波が存在していることがわかる。そこで、この部分だけを拡大して図 7(a) に示し、切欠作製前後の測定波形の差分を図 7(b) に示す。

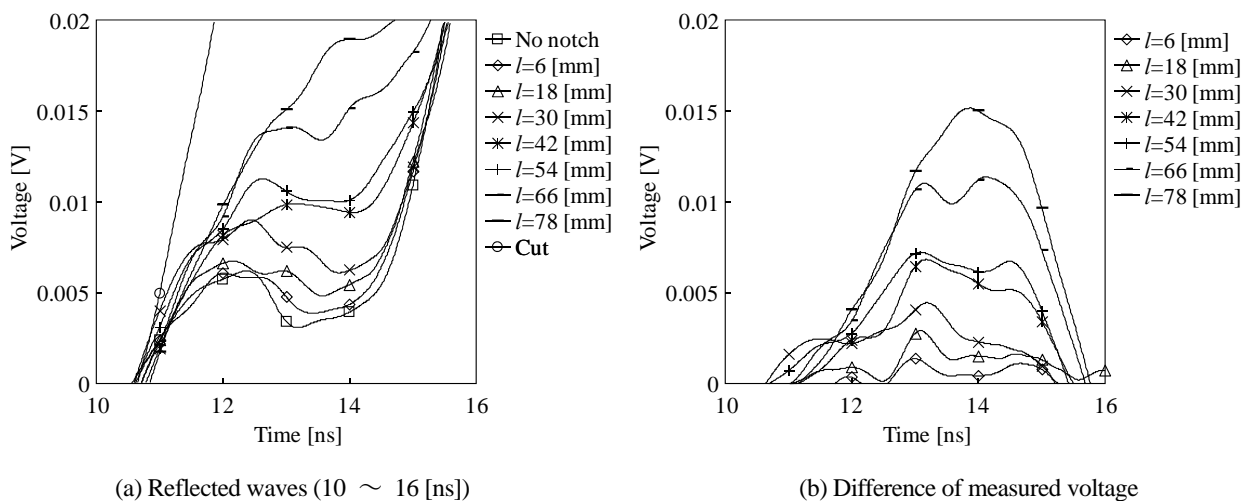


Fig. 7 Zoomed reflected waves from the notches

図 7(a) から、単純に拡大しただけで切欠長さが 30 [mm] (図中の × 印) までは反射波から簡単に判定が可能であることがわかる。また、図 7(b) から、切欠での反射波の時刻は同時刻に観測されていることがわかる。ノイズの影響により切欠長さと信号強度の関係性を正確に示すことはできないが、切欠長さが大きいほど大きな反射波が観測されていることがわかる。切欠長さが 18 [mm]、6 [mm] の場合には、切欠なしの場合 (□ 印) と区別が明確ではない。そこで、信号の相違を明確にする情報処理手段として利用されている相互相関解析手法<sup>(10)</sup>を用いてこの 2 例を検討した。

2 つの時系列信号  $\mathbf{a}=\{a_i\}$  と  $\mathbf{b}=\{b_i\}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) があるとする。この 2 つの信号情報の相互相関係数  $r$  は次式で定義される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{a}$  と  $\bar{b}$  は 2 つの情報の集合のそれぞれの算術平均値である。式(3)の  $r$  値が 1 であれば、2 つの信号は完全に同じである。1 より小さい場合には相関が少ないことを意味する。この相互相関解析を切欠のない場合のデータと切欠長さが 18 [mm] および 6 [mm] の場合のデータを用いて計算すれば、切欠のある場合とない場合の両者の信号の相関がわかる。ただし、全ての信号を対象として解析を実施すると相違がある時刻情報が失われてしまう。そこで、時刻を区切って、相互相関解析を実施し、相違がある時刻から切欠までの距離の情報が得られるようにした。可能な限り時刻情報を正確にするために、さまざまな時間間隔で検出可能性を解析した。

切欠長さ 18 [mm] の結果を図 8(a) に示し、切欠長さ 6 [mm] の結果を図 8(b) に示す。図中で横軸は解析に用いた時間幅の中央値を示し、縦軸は解析に用いた時間間隔を示す。色の濃淡で相互相関係数の値を表示している。黒がまったく相関がない場合で、白が完全に一致する場合を表している。時間間隔が大きくなると、切欠の有無で 2 つの信号の差異が信号全体から比較して小さくなるために、 $r=1$  に近い相関となっていく。一方、時間間隔が小さくなると、データ数が少なくなることによりノイズの影響による相関の低下が現れる。時刻 20 [ns] より後は試験片端部からの反射波の後の情報であるので、これは無視して考える。図 8(a) の切欠長さ 18 [mm] の場合と図 8(b) の切欠長さ 6 [mm] の場合の両方で 4 [ns] の時間間隔に着目したものをそれぞれ図 8(c), (d) に示す。どちらもノイズ情報に埋もれることなく、13 [ns] の時刻に相違が認められる。この結果から、切欠長さが 6 [mm] でも相互相関解析で繊維破断の検出が可能であることがわかる。また、4 [ns] の時間間隔で相互相関解析をすることで、繊維破断が検出可能であることがわかる。

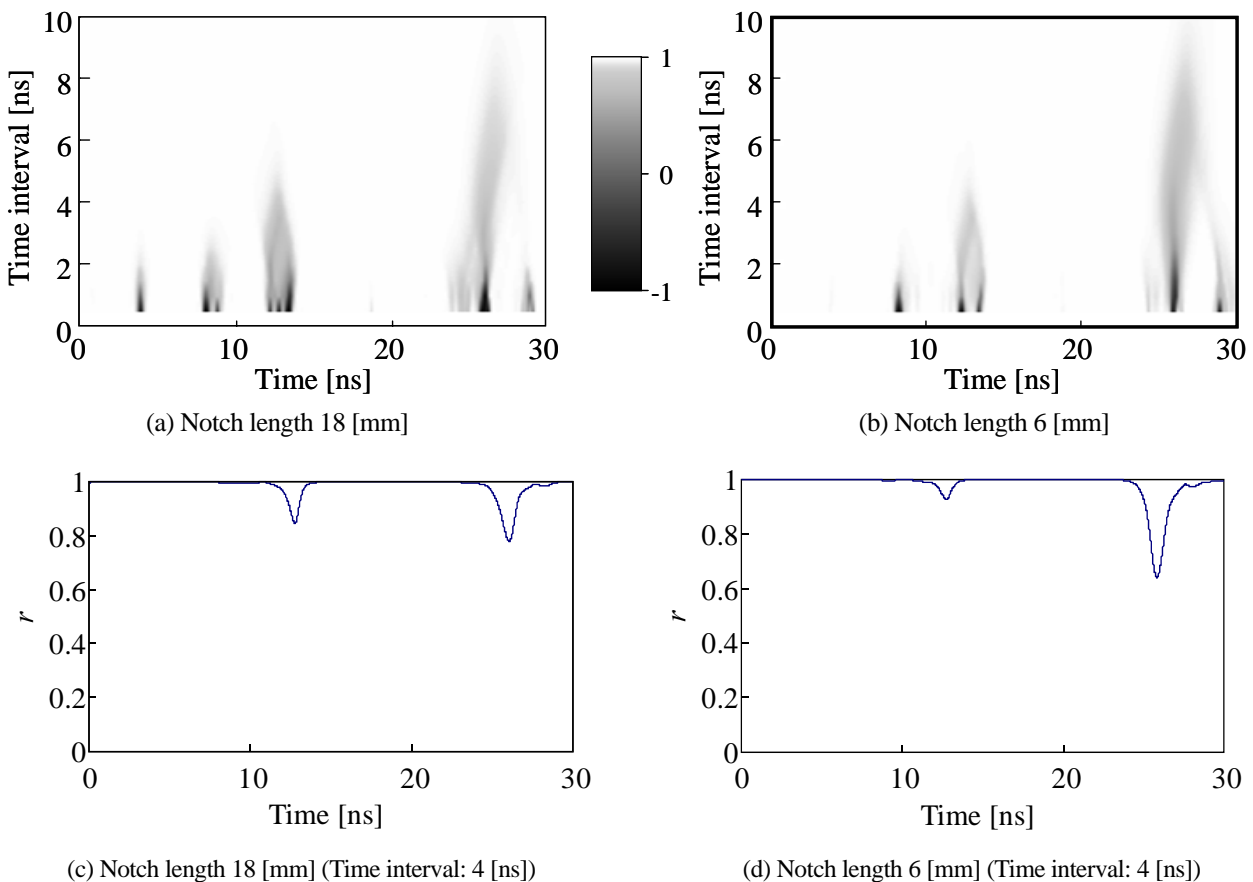


Fig. 8 Narrow band cross-correlation analysis

### 4・3 横方向伝搬の実験的検討

電極を多数設置した Type B 試験片を用いて、中央に作成した切欠の検出実験を実施した結果を図 9 に示す。図中で横軸は時刻、縦軸は測定電圧である。ただし、左右対称構造であること、データが類似していることから、電極番号(1)~(6)番の測定結果だけを示している。図 9 から、13 [ns]付近に微小な反射波の山が存在することがわかる。しかし、(1)~(11)の全ての電極でノイズレベル以下の差異であり、ほぼ同じ出力結果となっている。差異が非常に小さいため、切欠作成の前後のデータから電位の差を計算し、電位差を縦軸に、時間を横軸に表示した結果を図 10 に示す。

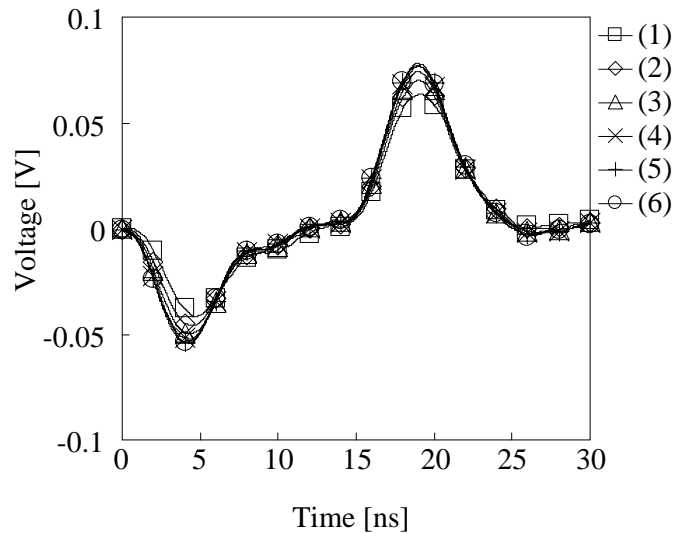


Fig. 9 Measured reflected waves of type B specimen

図 10 から、切欠作成前後のデータから電位差を求めても、電極番号ごとの差異はほとんどないことがわかる。どの電極からも 13 [ns]付近でわずかな反射信号が認められる。そこで、詳細に検討するために 13 [ns]付近のデータを 4 [ns]の時間間隔で前出の相互相関係数  $r$  を求めた。ただし、電極番号(6)を規準として、電極番号(6)の信号との相関を解析的に調査した。結果を図 11 に示す。図中縦軸は相互相関係数  $r$  の値であり、横軸は電極の中央位置である。相互相関係数の値もほぼ 1 に近い値である。切欠での反射波の大きさに対してノイズの大きさが大きく、多少ばらついているが、差異は認められない。

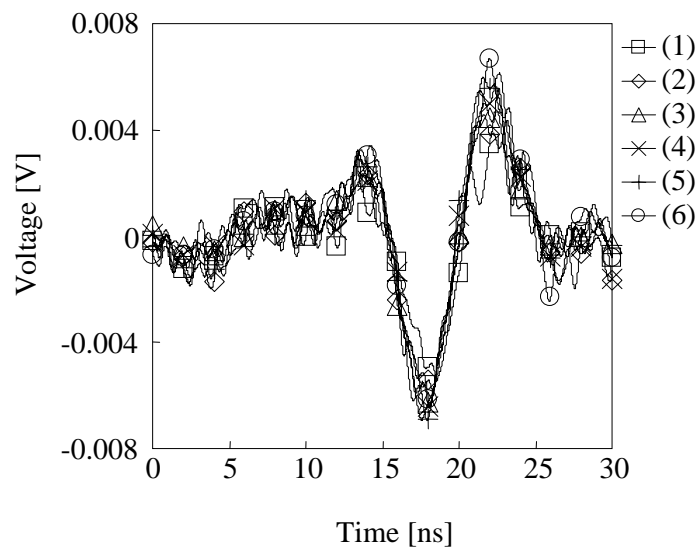


Fig. 10 Difference of measured voltage of type B specimen



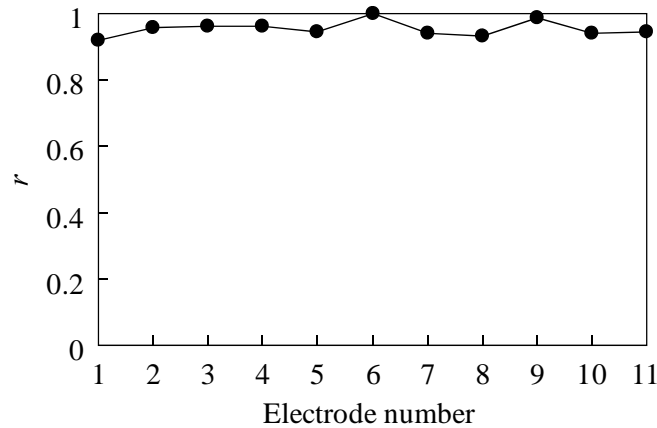


Fig. 11 cross-correlation analysis of the type B specimen around 13 [ns]

以上の結果から、CFRP が繊維方向と比較して、直交方向に著しく小さな直交異方性の導電性を有しているにもかかわらず、パルス信号は 120 [mm] の幅の試験片幅方位全体に伝搬していると判断される。詳細は伝送路の解析的検討が必要であるが、パルス信号は幅方向にも伝送され、電極を分割して繊維直交方向の欠陥位置情報を得ることは困難であり、直交方向の位置検出のためには別の手段が必要であることが明らかになった。つまり、CFRP 平板では、120 [mm] の幅の試験片では直交異方性の導電率の影響が認められない。電磁場解析を導入することにより、直交異方性の導電率を設定した場合の波形の伝搬の挙動を解明することで本実験結果の妥当性を示し、直交方向の位置検出を可能とする手法を提案することが今後の課題である。

## 5. 結 論

本研究では、炭素繊維が高い電気伝導性を有することを利用し、CFRP 構造に直接伝送路を作成して自己センシング複合材料構造を提案した。この自己センシング TDR 法を CFRP 大型模擬構造に適用して CFRP の繊維破断を検知することを目的として、CFRP を用いた伝送路を並行平板で作成し、長さ 2m の一方向 CFRP に対して TDR 法による測定を行い、繊維方向および繊維直交方向の損傷位置検知に関して実験を行い、自己センシング TDR 法による繊維破断の繊維直交方向の欠陥位置検知可能性について実験的に検証した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 平行平板伝送路を用いたインピーダンスマッチングで CFRP 平板に構造材料の炭素繊維をセンサとして用いる自己センシング TDR 法が適用可能であることを実証した。
- (2) 繊維破断検知を自己センシング TDR 法で実施し、長さ 6 mm の繊維破断まで相互相関係数を用いて検知可能であることを実証した。
- (3) 複数の幅の狭い電極を設置した CFRP 試験片を用いて、繊維直交方向のパルス信号の伝搬を実験的に調査した。その結果、CFRP の導電率異方性の影響は小さく、120mm の幅においては、全幅にパルス信号は伝搬しており、現状の試験片寸法では繊維直交方向の欠陥位置検出には適用できないことが実験的に明らかになった。

## 文 献

- (1) G.D. Chen, S.S. Sun, D. Pommerenke, J.L. Drewniak, G.G. Greene, R.D. McDaniel, A. Belarbi and H.M. Mu, "Crack detection of a full-scale reinforced concrete girder with a distributed cable sensor", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No.3, (2005), pp. S88-S97.
- (2) Mark W. Lin, Jagan Thaduri and Ayo O. Abatan, "Development of an electrical time domain Reflectometry (ETDR) distributed strain sensor", *Measurement Science and Technology*, Vol.16, No.7, (2005), pp. 1495-1505.

- (3) Yoshiki Okuhara, Soon-Gi Shin, Hideaki Matsubara, Hiroaki Yanagida and Nobuo Takeda, "Development of conductive FRP containing carbon phase for self-diagnosis structures", *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials*, Vol.4328, Issue1, (2002), pp. 314-322.
  - (4) A. Abu Obaid, S. Yarlagadda, M.K. Yoon, N.E. Hager, III, and R.C. Domszy, "A time-domain Reflectometry method for automated measure met of crack propagation in composites during mode I DCB testing", *Journal of Composite Materials*, Vol.40, No.22, (2006), pp. 2047-2066.
  - (5) Akira Todoroki and Yuuki Tanaka, Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method, *Composites Science and Technology*, Vol.62, No.5,(2002) pp. 629-639.
  - (6) Kevin M. O'Connor, Charles H. Dowding, "GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes", *CRC Press* (1999), pp. 15-35.
  - (7) Akira Todoroki, Kensuke Suzuki, Yoshihiro Mizutani and Ryosuke Matsuzaki, "Durability Estimates of Copper Plated Electrodes for Self-sensing CFRP Composites", *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.4, No.6, (2010) pp. 610-620.
  - (8) Akira Todoroki, Miho Tanaka and Yoshinobu Shimamura, "Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with electric resistance change method", *Composites Sciences and Technology*, Vol.62, No.5 (2002), pp. 619-628.
  - (9) Andrew F. Peterson and Gregory D. Durgin, "Transient Signals on Transmission Lines An Introduction to Non-Ideal Effects and Signal ntegrity Issues in Electrical Systems", *Morgan & Claypool Publishers*, (2009), p. 20.
  - (10) Isao Noda and Yukihiro Ozaki, "Two-Dimensional Correlation Spectroscopy: Applications in Vibrational and Optical Spectroscopy", *John Wiley and Sons Ltd, West Sussex England*, (2002) pp. 31-38.
-