擬似 AE 波に対する Michelson 干渉計型光ファイバセンサの応答*1

津田 浩*2

物質工学工業技術研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 65, No. 9 (2001), pp. 831-834
© 2001 The Japan Institute of Metals

Response of Michelson Interferometric Fiber-Optic Sensors to Simulated Acoustic Emission

Hiroshi Tsuda

National Institute of Materials and Chemical Research, Tsukuba 305-8565

AE signals propagate as extensional and flexural plate modes in thin plates. The relative amplitude of the two modes depends on the directionality of AE source motion. It has been reported that the directionality of AE source motion can be determined by distinguishing the dominating mode of plate waves. In the present study, response of Michelson interferometric fiber-optic sensors to AE with either in-plane or out-of-plane motion was investigated. AE signals simulated by pencil lead break were given to a thin unidirectional carbon fiber-reinforced plastic plate. The resulting plate waves were detected with surface-bonded interferometric fiber-optic and piezoelectric AE sensors. Responses of both sensors were compared and frequency characteristics of signals were evaluated by the Fast Fourier Transform. The directionality of source motion could be determined from the interference signal behavior in the beginning of response.

(Received April 4, 2001; Accepted August 1, 2001)

Keywords: Michelson interferometric fiber-optic sensor, acoustic emission, plate wave, frequency characteristics, carbon fiber-reinforced plastics

1. 緒 言

板厚の薄い複合材やパイプ、殻といった形状の物体を伝播する弾性波は平面波として近似的に取り扱うことができる。平面波は縦波 (extensional wave) と曲げ波 (flexural wave) の二つのモードから構成され、それぞれのモードの相対強度は平面波発生源の変位方向に依存することが知られている¹⁾。複合材を例にとると、層間はく離が生じたとき面外方向変位が発生する。このとき現れる平面波は曲げ波が支配的で、縦波の強度は非常に低い。また繊維破断、マトリックス割れが生じた場合、面内方向変位が発生する。このとき生じる平面波の主成分は縦波で、曲げ波はほとんど発生しない。このことから検出される平面波の主要なモードを識別することにより、生じた破壊形態を特定することができ、健全性評価において有益な情報を与えることができる。Gorman と Prosser は数 MHz までの幅広い周波数帯域を持つ超音波センサを用いて、平面波の主要モード識別から平面波発生源の変位方向を評価した研究を報告した^{2,3)}。

近年、電磁波障害を受けないこと、また一本のプロープで種々の物理量の測定が可能など利点から光ファイバ

センサを材料の健全性評価に適用する技術が注目されている^{4,5)}。著者はこれまでに FRP の引張り負荷、または衝撃負荷における損傷発生を Michelson 干渉計型光ファイバセンサにより検知することを試みてきた。そして同センサが圧電型 AE センサと同程度の損傷検知能を有することを報告した^{6,7)}。しかしながら同センサの AE に対する応答挙動、感度といった基礎的特性は十分に明らかにされていないのが現状である。そこで本研究ではペンシル圧折により面内、および面外方向変位を一方向 FRP に与え、そのとき発生した擬似 AE に対する Michelson 干渉計型光ファイバセンサと圧電型 AE センサの応答信号を収録した。そして両センサの応答挙動と周波数特性を比較し、光ファイバセンサによる平面波発生源の変位方向識別の可能性について検討した。

2. 実験方法

用いた計測システムとセンサの貼り付け位置を Fig. 1 に示す。一方向 8 プライ炭素繊維強化エポキシ複合材料 (T800H/3631, 東レ) を供試材とした。供試材の形状は 296 mm × 287 mm × 1 mm で、強化繊維軸方向長さは 287 mm である。直径 0.5 mm、硬度 HB の黒色シャープペンシル用芯を圧折して擬似 AE を発生させた。またペンシル圧折により生じる振動の減衰を抑制するため、スパーサーとして 20 mm × 20 mm × 2 mm のシリコンラバーを供試材底面四隅に

*1 2001 年 3 月 29 日日本金属学会春期大会において発表

*2 現在：産業技術総合研究所 (Present address: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Fig. 1 Diagram of measuring system and position of sensors.

貼り付けた。

面外方向変位を発生させる場合、供試材平面中央でペンシル圧折を行った。その際、光ファイバセンサと AE センサはペンシル圧折点から強化繊維軸方向に 100 mm 離れた位置に対称に貼り付けた。また面内方向変位を与える場合、供試材側面中央でペンシル圧折を行った。このとき AE センサは光ファイバセンサを取り付けた箇所の反対の面に貼り付け、擬似 AE 源-センサ間距離を 243.5 mm とした。

光ファイバセンサシステムと同センサの試験片への貼り付け方法については以前の論文に詳細を記した⁶⁾。光ファイバセンサのゲージ長は 4 mm である。AE センサ (Model 304, 富士セラミックス) は周波数帯域が 2 MHz までの圧電型センサで、大きさは直径 4 mm である。AE センサ信号は利得を 11 dB に設定した AE アンプを用いて増幅させた。光ファイバセンサからの出力である干渉信号、および AE センサ信号はサンプリング速度 10 MHz でデジタルオシロスコープに収録された。

3. 実験結果および考察

3.1 擬似 AE に対するセンサ応答挙動

面内方向変位を与えた時のセンサ応答開始前後を Fig. 2(a) に示す。このときの平面波は縦波に支配され、曲げ波はほとんど現れない。縦波に対して AE センサは立ち上がりの鋭い高周波応答を示し、振幅は応答開始から数十 μ s までは増大するがその後は時間とともに低下した。干渉信号は AE センサ信号と比較すると低周波の周期的応答を示し、応答開始から 1 ms までは振幅と周波数に大きな変化は観察されない。

面内方向変位を与えた時の両センサの応答全体を Fig. 2(b) に示す。AE センサ信号の振幅変化は試験時間 3.1 ms に応答以前に見られるノイズレベルまで低下した。一方、干渉信号に現れる周期的振動の振幅は徐々に小さくなり、試験時間 7.5 ms において応答の周期性はなくなった。

面外方向変位を与えた時のセンサ応答開始前後を Fig. 3(a) に示す。このとき発生する平面波においては最初に高速で強度の低い縦波が伝播し、引き続き強度の高い曲げ波が現れる。AE センサは縦波を試験時間 0~10 数 μ s に現れる高周波の小さな振幅群として検出している。縦波が到達したとき干渉信号には Fig. 2(a) に示したような周期的振動は現れないが、若干の出力増加が観察される。面外方向変位時に

Fig. 2 (a) An enlargement of the beginning of sensor response to pencil lead break which simulates in-plane AE sources. (b) Response of fiber-optic and AE sensors to pencil lead break on the edge of CFRP plate which simulates in-plane AE sources.

現れる縦波の強度は低いことから、光ファイバセンサの応答変化は小さかったと考えられる。その後、AE センサ信号に曲げ波に対する応答である大きな振幅変化が現れた。干渉信号には曲げ波到達時点から小さな振幅の周期的振動が現れ、曲げ波応答開始から約 300 μ s までは時間とともにその振幅と周期は大きくなった。その後は徐々に振幅を小さくするが、周期に大きな変化は観察されない。

面外方向変位を与えたときのセンサ応答の全体を Fig. 3(b) に示す。AE センサは曲げ波到達時に大きな振幅の高周波応答を示すが、周波数と振幅は急激に低下した。試験時間 7.0 ms に AE センサの応答はなくなった。一方、干渉信号は曲げ波に対し周期的振動を示し、振幅は応答開始直後を除き時間とともに徐々に低下した。干渉信号は試験時間 11.6 ms まで周期的に振動し、その後は周期性の乏しい挙動を取った。

強度の高い縦波が現れる面内方向変位にともなう擬似 AE に対して、干渉信号は応答開始から大きな振幅をともなう周期的振動を示した。一方、面外方向変位にともなう擬似 AE を検出したときは最初に到達する強度の低い縦波に対して干渉信号の出力はわずかに増加した。強度の高い縦波が現れる面内方向変位時の応答と異なり、この場合の縦波に対して周期的応答は観察されなかった。引き続き到達する強度の高い曲げ波に対し、応答開始から約 300 μ s に渡り振幅と周期が時間とともに大きくなる周期的振動が現れた。このように与

Fig. 3 (a) An enlargement of the beginning of sensor response to pencil lead break which simulates out-of-plane AE sources. (b) Response of fiber-optic and AE sensors to pencil lead break on the surface of CFRP plate which simulates out-of-plane AE sources.

えた変位方向により応答開始から数百 μs に渡り異なる干渉信号挙動が観察された。また干渉信号の擬似 AE に対する応答は AE センサの場合と比較すると長く続いた。

3.2 擬似 AE に対するセンサ応答の周波数解析

光ファイバセンサと AE センサの擬似 AE に対する応答を詳しく調べるため、試験時間 0~1 ms に収録された各信号の周波数成分強度を FFT によりパワースペクトル解析した。この解析における周波数分解能は 1 kHz で、各周波数成分強度は最大強度を有した周波数成分を 1 として正規化した。本研究では正規化された成分強度が 10^{-2} を越える周波数帯域を比較的高い成分強度が現れていると考えて注目した。

面内方向変位にともなう擬似 AE に対する AE センサ信号、および干渉信号のパワースペクトルをそれぞれ Fig. 4(a)、および(b)に示す。AE センサ信号は 137 kHz を最大強度として、103~224 kHz の周波数帯域において正規化された成分強度が 10^{-2} を越える比較的高い強度を有した。この場合に発生する平面波の主要モードは縦波であることから、AE センサは縦波に対して上記した周波数帯域の応答信号を出力すると考えられる。またこの場合の干渉信号は 4 kHz を最大成分とし、7 kHz 以下で比較的高い成分強度を取っている。そして周波数の増加にともない成分強度は低下した。

面外方向変位にともなう擬似 AE に対する AE センサ信号、および干渉信号のパワースペクトルをそれぞれ Fig.

Fig. 4 (a) Power spectrum diagram of the AE sensor signal responding to simulated in-plane AE. (b) Power spectrum diagram of the interference signal responding to simulated in-plane AE.

5(a)、および(b)に示す。AE センサ信号は 4 kHz を最大強度として、2~88 kHz の帯域において比較的高い強度を有した。この場合、高い強度の曲げ波が発生していることから、この周波数帯域は AE センサの曲げ波応答に対応すると考えられる。そして周波数の増加にともない成分強度は一旦低下するが、Fig. 4(a)に示した縦波に対する応答の周波数帯域と良く一致する 107~217 kHz の範囲で再び成分強度が 10^{-2} を越えた。面外方向変位を与えた場合、AE センサ信号には曲げ波応答、および縦波応答に対応する二つの異なる周波数帯域で比較的高い成分強度が現れた。一方、干渉信号は 5 kHz を最大強度として、9 kHz 以下で比較的高い成分強度を有した。そして周波数の増加とともに成分強度は低下した。この場合、1~3 kHz に正規化された成分強度が 10^{-1} を越える高い成分強度が現れているが、この低周波成分は干渉信号のゆらぎに対応し、周期的振動の周波数とは異なる。

本計測系において AE センサの縦波、および曲げ波に対する応答信号はそれぞれ約 100~220 kHz、および数~数十 kHz の異なる周波数特性を有した。AE センサを用いた場合、センサ信号の周波数特性から平面波発生源の変位方向を特定することができる。一方、光ファイバセンサにおいては Fig. 4(b)と Fig. 5(b)に示したように変位方向の相違による明確な周波数特性変化はなく、いずれの場合も周波数が数 kHz の応答信号が現れた。このため干渉信号の周波数解析から平面波発生源の変位方向を識別することは困難である。

Fig. 5 (a) Power spectrum diagram of the AE sensor signal responding to simulated out-of-plane AE. (b) Power spectrum diagram of the interference signal responding to simulated out-of-plane AE.

干渉計型光ファイバセンサにおいてはセンサファイバが受けるひずみ速度の絶対値に比例した周波数の干渉信号が現れる^{6,7)}。面内、および面外方向変位を与えた場合において計測された干渉信号の周波数帯域がほぼ等しかったことから、両方向変位を与えた場合においてセンサファイバが受けたひずみ速度は同程度であったと考えられる。

4. 結 言

本研究では一方向炭素繊維強化複合材平板にペンシル圧折により変位方向の異なる二種類の擬似 AE を発生させ、そのときの Michelson 干渉計型光ファイバセンサと圧電型 AE センサの応答を比較した。そして以下の結論を導いた。

(1) 高い強度の縦波が現れる面内方向変位を与えた場合、干渉信号には応答開始から大きな振幅をとまなう周期的振動が現れた。

(2) 面外方向変位を与えた場合、最初に到達する強度の低い縦波に対して干渉信号はわずかに増加した。引き続き現れる曲げ波に対しては応答開始から約 300 μ s に渡り時間とともに振幅と周期が徐々に大きくなる周期的挙動を示した。

(3) AE センサの場合、センサ信号の周波数特性から AE 源の変位方向を識別することができる。干渉計型光ファイバセンサの場合、AE 源の変位方向による干渉信号の周波数特性変化はなかった。しかし、与える変位方向により干渉信号には異なる立ち上がり挙動が観察された。

本研究で使用した AE センサ、および AE アンプは産業技術融合領域研究所長 岸 輝雄氏(現物質・材料研究機構理事長)から借用しました。また本実験の遂行にあたっては、東京理科大学大学院生 大岩 功佳君(現 JR 東日本)から多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) K. Graff: *Wave Motion in Elastic Solids*, (Dover, New York, 1991) pp. 213-272.
- 2) M. Gorman: J. Acoust. Soc. Am. **90**(1991) 358-364.
- 3) M. Gorman and W. Prosser: J. Acoustic Emission **9**(1991) 283-288.
- 4) B. Hofer: Composites **18**(1987) 309-316.
- 5) E. Udd: *Fiber Optic Smart Structures*, (John Wiley & Sons, New York, 1995) pp. 155-169.
- 6) H. Tsuda, T. Ikeguchi, J. Takahashi, H. Nagai and K. Kemmochi: Journal of the Japan Society of Composite Materials **24**(1998) 96-105.
- 7) H. Tsuda, S. Takeda, K. Urabe, J. Takahashi and T. Kishi: Journal of the Japan Society of Composite Materials **26**(2000) 121-129.