研究論文

FRP の 破 壊 と AE 計 測

——AE センサの周波数感度特性およびしきい値が
計測結果に及ぼす影響——

森中 泰章*, 藤 井 透**

(1992 年 7 月 21 日受付)

Fracture of FRP and AE Measurement—Effect of Frequency
Characteristics of AE Sensors and Threshold on
Acoustic Emission Measurement

H. MORINAKA* and T. FUJII**

(Received July 21, 1992)

This paper presents how the frequency characteristics of AE sensors and threshold affect acoustic emission measurement. Static and fatigue tests of FRP reinforced by plain woven glass fabric were conducted. Three different types of AE sensors having different sensitivities with respect to frequency were used simultaneously to distinguish the difference of observed AE data. Following results are obtained from the test. 1. Threshold of AE system strongly affects observed AE data. Namely, observed AE under a certain threshold condition is different from that under another condition. This threshold dependence is due to the dead time and resolution time of AE measuring system. Total AE events and rate do not always increase as the threshold becomes lower. AE observation at a different threshold condition might derive different conclusions. 2. The frequency characteristics of AE sensors strongly affect the observed AE data as well as the threshold under a static loading while a rough tendency of total AE count record agrees with each other under a fatigue loading. The above results attract a strong attention that AE sensors must be carefully selected according to material AE nature taking the machine characteristics (*i.e.*, dead time and so on) into consideration. It is quite difficult to compare the AE data obtained at a certain condition with the data obtained using different AE sensors or different condition.

1. 緒 言

Acoustic Emission (AE) 法を FRP の静的引張り試験に適用した例として、孫ら¹⁾の GFRP 積層板を用いて AE 振幅分布と破壊機構の関連について述べた報告、CFRP の場合の AE 振幅分布と破壊機構に関する研究^{2,3)}等がある。また、福田ら^{4,5)}のガラスマット FRP を用いて AE と破壊機構の関連について述べた研究等も

見られる。このように繊維強化プラスチック（以下、FRP と称する）の破壊過程に対する知見を得るため、一般の強度試験では AE の計測が幅広く行われている⁶⁻¹¹⁾。

岸ら¹²⁾は AE の計測方法や計測するにあたっての様々な注意点について述べている。しかし、著者の調べた限りでは、AE 計測に用いたセンサの周波数感度特性が計測結果に与える影響について詳細に調べた報告は見当たらない。AE センサが共振型か広帯域型か、あるいは共振型であってもどの共振周波数のセンサを用いるかは研究者の選択に依存している。その結果、研究データを相互に比較することが難しくなるだけでなく、得られた結果が普遍的でないおそれがある。また、しきい値の設定についても個々の研究者で異なる。低いしきい値を設定

*,** 同志社大学 (602 京都市上京区今出川烏丸)
Doshisha University, Imadegawa, Karasuma,
Kamigyo-ku, Kyoto 602, Japan

* 大学院生 Graduate Student, ** 工学部教授
Professor, Department of Mechanical Engineering

Table 1 Materials of the specimen.

Matrix	Polyester resin (Polylite FG-284)
Reinforcement	Plain woven glass cloth (MG-252)
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardener	Cobalt naphthenate 0.6% solution

Table 2 Mechanical properties of the specimen fabricated by 18 sheets of glass cloth.

Weight content W_g	58.3%
Volume content V_g	40.0%
Tensile strength σ_{ult}	263 MPa
Young's modulus E	19.5 GPa

し、数多くの AE 事象をとりあえず記録すれば、そのデータを基にしきい値を新たに設け、対応するしきい値に応じて後日データを再解析できるように思えるが、AE 解析装置の計測特性によって、計測器のしきい値が異なれば結果が異なるおそれがある。

本研究では平織ガラス布で強化された FRP の静的および疲労試験を行い、同試験中の AE 事象発生挙動を異なる周波数感度特性を有する三種類の AE センサを用いて計測し、AE センサならびに計測器のしきい値の違いが AE 計測結果に及ぼす影響について実験的に明らかにする。

2. 試 験 片

本研究には強化材として平織ガラス布、母材として不飽和ポリエステル樹脂を用いた平織 GFRP 積層板を試験片として用いた。積層板の構成素材を Table 1 に示す。手積法により積層板を製作し、24 時間常温硬化させた後、電気炉で 80°C、4 時間のアフタ・キュアを施した。ガラス布積層枚数は 18 枚である。Fig. 1 に試験片の形状、寸法を、Table 2 にガラス繊維含有率および静強度特性を示す。ガラス布の縦糸方向は試験片の長手方向と一致させた。

3. 実験装置および実験方法

3.1 静的引張り試験

試験機には電気油圧式サーボ疲労試験機を使用した。引張り負荷の荷重速度を 2.45 MPa/s とした。ひずみは標点間距離 25.4 mm の変位計 (MTS MODEL 632.11 C-20) を用いて測定した。

AE 計測には、AE 解析装置 (9502U-PLOT; NF 社

Fig. 1 Dimensions of the specimen.

製)を用いた。AE 信号を、試験片の表面に取り付けた 2 個のセンサにより検出し、プリアンプ (NF AE-912) により利得 40 dB (100 倍) まで増幅した後、簡易 AE 解析装置に入力した。本装置では AE パラメータとして個々の AE 事象について、その発生時間、振幅、二つのチャンネルのイベント信号の時間差 (これより、AE の発生場所が標定できる) が記録できる。これ以外に AE 事象発生時の外部入力信号値 (例えば応力、またはひずみ) も記録できる。同装置の諸特性を Table 3 に示し、表中の特性値の定義を Fig. 2 に示す。本装置では AE センサからの入力信号がしきい値を越えるとトリガパルスが発生し、リゾリュージョンタイムが始まる。この時、AE 事象 (イベント) パルスも始まる。リゾリュージョンタイム中に再び入力信号がしきい値を越えると再びトリガパルスが発生し、その時点から再度リゾリュージョンタイムが始まる。さらに、入力信号がしきい値を越えると再度リゾリュージョンタイムが始まる。リゾリュージョンタイムの終わりまでに入力信号がしきい値を越えることがない場合、AE 事象パルスが終了するとともに引き続いてデッドタイムが始まる。デッドタイムとは、この期間中に AE 信号がしきい値を越えたとしても、AE 事象として認識しない時間のことである。リゾリュージョンタイムが継続している間を 1AE 事象と見なす。試験片内にクラック等が発生すると弾性波が発生するが、試験片内を反射しながら伝播してセンサに計測されるため、何度も AE 信号がしきい値を越える。しきい値を越える度にカウントすると、正しい AE 事象数が計測されないため、このような処理が施されている。真の AE 事象持続時間はリゾリュージョンタイム 1 回分を除いた時間である。ただし、今回使用した AE 解析装置では AE 事象持続時間は記録されない。しきい値を越えた波の回数のことを AE ringdown 数というが、これも記録されない。

本研究でしきい値は、

65, 70, 75, 80 dB

の四種類とした。AE 解析装置への入力電圧としきい値

との関係については後述する。

実験に使用したセンサは、広帯域型センサ (AE-900S-WB) と共振周波数が 155 kHz および 470 kHz である共振型センサ (AE-901S, AE-904S; いずれも NF 社製) の三種類である (以下、センサ A, センサ B, センサ C と称する)。AE 信号を確実に検出するため、センサと試験片の接触部に真空グリースを塗布した。Fig.1 に示す位置に、センサは特製のホルダを用いて一定の圧力で試験片に取り付けた。

試験片の同じ場所に三種類のセンサを取り付け、同時に AE の計測ができれば各センサから得られた結果を相互に精度よく比較できる。しかし、薄板試験片のため三種類のセンサを同一場所に同時に取り付けることはできない。そこでセンサ A, センサ B, センサ C の三種類のセンサの中から二種類のセンサを選び、同一の試験片の両側面にそれぞれ 2 個で取り付け、同時に二種類の AE 計測結果が得られるようにした。

計測系の試験システムを Fig.3 に示す。使用した三種類のセンサの周波数感度特性を Fig.4 にそれぞれ示す。

3.2 疲労試験

疲労試験には、静的引張り試験と同様な試験システムを用いた。荷重は正弦波、引張り完全片振荷重とした。最大繰返し応力は 172 MPa、繰返し速度は 1 Hz とした。

AE 計測には、広帯域型センサ (センサ A) と共振周波数が 155 kHz である共振型センサ (センサ B) を用いた。静的試験の場合と同様に、センサ A, センサ B を同一の試験片の両側面に取り付け、同時に二種類のセンサによる AE 計測結果が得られるようにした。

試験は静的、疲労いずれも室温、実験室環境下で行った。

3.3 AE 解析装置の入出力特性

センサからプリアンプへの入力電圧は数十 μV から数十 mV 程度の微弱な信号であるため、それをプリアンプ

Table 3 Characters of analysis equipment of acoustic emission.

Resolution time t_r	800 μsec
Dead time t_d	1 msec
Coincidence t_c	16 μsec

Fig.2 Data processing in U-PLOT (AE measuring system).

Fig.3 Block diagram of the AE measuring system.

Fig.4 Frequency characteristic of AE sensors.

で増幅した。本研究に使用されたプリアンプにおける利得は 40 dB であるので、次式より 100 倍に増幅された。

(利得 dB) = 20 × log (増幅倍率)

AE 解析装置のログアンプの入出力特性を次式に示す。

(出力電圧 V) = 0.8 × log (入力電圧 V) + 2.2

ログアンプからの出力電圧と振幅値との関係を次式に示す。

(出力電圧 V) = 0.04 × (振幅値 dB) - 1.8

したがって、ログアンプへの入力電圧と振幅値との関係は次式のようになる。

(入力電圧 V) = 10 exp(0.05 × (振幅値 dB) - 5)

4. 実験結果

4.1 静的引張り試験における AE

静的引張り試験の四種類のしきい値に対応する AE 計測結果を Fig.5~8 に示す。横軸は負荷応力を破断応力で除してパーセントで表したものであり、縦軸は AE 事象発生率およびひずみである。公称応力と AE 事象発生率の関係については、破断応力を 100 等分し、各区分応力下での AE 事象数により表した。静的の場合、各試験について試験片を 3 本用い、図中の AE 事象発生率およ

びひずみは各条件下での計測結果を平均したものを示した。

図から、80% 以下の応力域では、いずれのセンサを用いてもしきい値が高くなるにつれて AE 事象発生率が減少していることがわかる。特に、しきい値が 80 dB の場合 (Fig.8) にはいずれのセンサでもほぼ同じ結果を示し、応力レベルが 80% 以下で AE はあまり計測されていない。このことは、応力レベルが 80% 以下では幅広い周波数域でも大きな振幅を有する AE 事象の発生が少ないことを示している。

低い応力レベルでは、しきい値の違いとセンサの違いが AE 計測結果に大きく影響することがわかる。Fig.5 はしきい値を 65 dB に設定した場合の計測結果であるが、広帯域センサであるセンサ A の結果と他の二種類の共振型のセンサの計測結果に大きな違いが見られる。センサ B, C による計測結果では応力レベルが 40~45% において AE 事象発生率のピークが見られるが、センサ A の計測結果にこのピークは見られない。このピークは応力-ひずみ関係における Knee 点と対応している。ガラス繊維布強化 FRP の場合、Knee 点前後で横繊維束内に割れが発生するが¹²⁾、このときに発生する AE の振幅は小さい。広帯域センサ A では、AE 感度特性は幅広い周波数域にわたって比較的フラットであるが、感度は低い。そのため、しきい値が 65 dB と低いにもかかわらず Knee 点付近での AE 事象発生率のピークを捕らえることができなかったと考えられる。一方、この付近の AE 波形の周波数は 80~180 kHz である^{2,6)} ことから、この周波数に近い共振周波数を持つ共振型 AE センサ B, C では AE の振幅が小さいにもかかわらず、しきい値が低く設定されているので多くの AE 発生を計測することができたと考えられる。

同じ共振型センサである B と C について、Knee 点付近での AE 事象発生率の計測結果を比較すると興味深い違いが認められる。しきい値が 65 dB と低い場合には Knee 点付近での AE 事象発生率のピーク値はセンサ C のほうが高い。前述のように、この付近での AE 波形の周波数はセンサ B の共振周波数付近に分布すると言われている。周波数が 80~180 kHz で両者の感度は感度曲線からわかるように 20 dB 程度異なっており、この場合、Knee 点付近の AE 事象発生率はセンサ B のほうが C に比べてはるかに多く観察されることが期待される。しかし、実験は逆の結果を示している。しきい値が 70 dB と高く設定した場合は、両者の差は縮まる (Fig.6 参照)。さらに、75 dB とした場合 (Fig.7) にはセンサ

B の計測結果がセンサ C を大きく上回る。一方、しきい値が 65 dB と低い場合であっても Knee 点手前ではセンサ B による AE 事象の発生計測数はセンサ C を上回る。

他方、負荷応力が 80% 以上の高応力側での AE 計測結果にもセンサの種類、しきい値による大きな影響が見られる。しきい値が 65 dB と低い場合に高応力負荷時の AE 事象発生率は広帯域センサ A による結果が最も大きい。しきい値が 70 dB の場合、より一層破断直前での AE 計測数が増えてくる。負荷に対する AE 事象発生率分布の形も大きく変化する。しきい値が 80 dB ではピークの計測数は少し減少する。しかし、共振型ではしきい値が 65 dB と低い場合、負荷の増加に伴う AE 事象発生率の増加は計測しない。特に、センサ B では 90% を越える応力では AE 事象はほとんど計測されなくなってしまう。この傾向はしきい値が 75 dB まで変わらない。このように FRP の引張り破壊過程で、AE センサが異なれば全く異なった AE 発生特性を計測することがわかった。これによって材料を評価しようとするセンサごと異なった結論を導き出すおそれがある。

同じセンサであっても計測器のしきい値が異なると AE の計測結果に違いが出たことについて述べる。計測器のしきい値を 65 dB とし計測した AE 事象発生率の中から振幅 80 dB 以上の AE 事象発生率のみを取り出した結果を Fig.9 に示す。これと、計測器のしきい値が 80 dB の場合の AE 事象発生率の計測結果である Fig.8 を比較する。前者のしきい値が 65 dB の状態での AE 計測で、設定値である 65 dB 以上の振幅の AE 事象が適切に計測されているのであれば Fig.8 と Fig.9 は同じとなるのが期待される。しかし、いずれのセンサについても両者が全く異なっていることがわかる。同じ振幅の AE 事象であっても、解析装置のしきい値が異なると計測される AE 事象発生率は大きく異なった。解析装置のしきい値が低く設定された状態で計測される場合（しきい値 65, 70, 75 dB の場合）には、高負荷応力域で AE 事象発生率がかなり低下した。これらのことから、解析装置の設定するしきい値により得られる AE 計測結果が異なることも明らかとなった。解析装置の AE 事象記録容量に余裕があるからといってしきい値を低くすればそのしきい値以上の AE 事象がすべて計測できるわけではないことが強調される。

4.2 疲労試験における AE

疲労試験における AE 事象発生率を Fig. 10 に示す。図中、縦軸は寿命比 1% に対応する荷重繰り返し間の

Fig.5 Variation of AE event rate with respect to % stress under static loading (threshold : 65 dB).

Fig.6 Variation of AE event rate with respect to % stress under static loading (threshold : 70 dB).

Fig.7 Variation of AE event rate with respect to % stress under static loading (threshold : 75 dB).

AE 事象発生率を表す。しきい値はそれぞれ 80, 90 dB に設定した。後述の考察の項で述べるが、短期間で多くの AE が発生したときの取りこぼしが無い理想的な条件では、本来多くの情報を得るため、AE 計測においてしきい値をできる限り低く設定するほうがよい。しかし、センサ A を用いしきい値を 75 dB に設定した場合、また、

Fig. 8 Variation of AE event rate with respect to % stress under static loading (threshold : 80 dB).

Fig. 9 Variation of AE event rate with respect to % stress under static loading. Threshold is virtually set at 80 dB. AE data were taken under the condition that the machine threshold was set at 65 dB.

センサBを用いしきい値を85 dBに設定した場合、寿命比が40~60%において非常に多くのAEの発生を検知し、AE解析装置の記憶容量を越えるので、それぞれのセンサについて上述のしきい値を設定した。

図より明らかなように、いずれのセンサで計測した場合でも疲労荷重下のAE事象発生率は試験開始直後で高く、繰返し数の増加とともに急激に低下し、いったん寿命比が20%付近で最も低くなる。その後、AE事象発生率はわずかに増加し、寿命比40~60%でピークが認められる。さらに繰返し数が増えたとAE事象発生率は再び低下するが破断直前に再度高くなり、破断直前は最も高い発生率を記録する。

5. 考 察

AE計測に及ぼす影響として、センサの特性であるデッドタイムおよびリゾリューションタイムが挙げられ

Fig. 10 AE event rate under fatigue loading.

る。それぞれの特性値がAE計測にどのような影響を及ぼすかを検討する。まず、デッドタイムがAE計測に及ぼす影響について検討する。Fig. 11に、しきい値が65 dBの場合と80 dBの場合におけるAE解析装置の内部信号処理に伴うタイミング図を示す。Fig. 11(a)に示すようにしきい値が65 dBの場合、AEセンサからの入力信号がしきい値65 dBを越えるとトリガパルスが発生し、リゾリューションタイムが始まる。あわせてAE事象パルスも始まる。リゾリューションタイム中に再び入力信号がしきい値を越えると、その時点から再度リゾリューションタイムが始まる。さらに、入力信号がしきい値を越えると再度リゾリューションタイムが始まる。リゾリューションタイムの終わりまでに入力信号がしきい値を越えることがない場合、AE事象パルスは終了し、引き続いてデッドタイムが始まる。このデッドタイム中に、AE信号がしきい値を越え、新たにAE事象が発生していたとしても、別のAE事象として認識しない。これに対し、Fig. 11(b)に示すようにしきい値が80 dBの場合、AEセンサからの入力信号がしきい値80 dBを越えるとトリガパルスが発生し、リゾリューションタイムが始まる。先ほどよりしきい値が高い分だけ、AE信号がしきい値より低くなる時間は速く、デッドタイムが始まるのも終わるのも速い。デッドタイム終了後、AE信号がしきい値80 dBを越えると、新たなAE事象と認識する。同じAE信号であっても、デッドタイムにより、しきい値の設定の仕方によってAE事象数が異なるという現象が生じる。同じAE信号であってもしきい値が高いほど速く次のAE事象を感知し、その結果AE事象数が多く観察されるという事態が生じる。本研究では、同じセンサであってもしきい値が異なるとAEの計測結果に違いが出た。計測器のしきい値を65 dBとし計測したデータの中から振幅80 dB以上のAE事象のみを取り出した

AE 事象発生率は、計測器のしきい値を 80 dB とした場合の AE 事象発生率に比べて小さくなった。これはデッドタイムが AE 事象数に及ぼす影響が現れたと考えられる。ただし、このことはしきい値の設定の仕方により AE 事象数が全体的に多くなったり少なくなったりすることを意味しているだけであり、AE 事象率が大幅に異なるわけではない。

次に、リゾリューションタイムが AE 計測に及ぼす影響について検討する。一般に、静的試験において高応力レベルでは急激に AE 事象発生率は増加する。このときのタイミング図をしきい値 65 dB, 80 dB とし、Fig. 12 に示す。しきい値が 65 dB の場合 (Fig. 12(a)), AE センサからの入力信号がしきい値 65 dB を越えるとトリガパルスおよび AE 事象パルスが発生し、リゾリューションタイムも始まる。リゾリューションタイム中に再び入力信号がしきい値を越えると、その都度、その時点からリゾリューションタイムが始まる。このリゾリューションタイム中に、新たに AE 事象が発生していても、別の AE 事象とは認識せず、先ほどから続いている AE 事象の続きと認識してしまう。これに対し、同じ AE 信号であっても、しきい値が 80 dB と高い場合、低い場合と同様新たな AE 事象とは認識しないことも生じるが、AE 信号がしきい値を越えなくなる可能性が高く、デッドタイムの後 (Fig. 12(b)), 次に AE 信号がしきい値を越えたとき、イベントパルスが発生し、別の AE 事象が発生したと認識する。本研究では、しきい値が 65, 70, 75 dB の場合、静的強度の 80% 以上に達すると AE 事象発生率が低下した。FRP の破断直前付近で AE の発生率が低下するとは考えにくい。これは、リゾリューションタイムが AE 事象数に及ぼす影響が現れたためと考えられる。実際、試験中、しきい値が低い場合には、試験中 80% 以上の高応力では AE 解析装置の AE 感知ランプが点灯し続けていた。このランプは入力された AE 信号の振幅がしきい値以上になりトリガパルスが発生すると点灯する。したがって、試験片では対応する AE が多数発生していることを裏づけていると考えられる。

“実験結果”で述べたように、Knee 点付近での AE 事象発生率のピーク値は、センサ C に比べセンサ B のほうが高くなると予想されるにもかかわらず、実際の計測結果ではセンサ C のほうがセンサ B より高かった。前述のことを考慮してこの現象を捉えた場合、次の可能性が考えられる。実際には Knee 点付近においてもセンサ B のほうがセンサ C よりかはるかに多く AE を感知していた。しかし、個々の AE の発生間隔が短すぎたため、セ

ンサ B ではリゾリューションタイムの AE 計測に及ぼす影響が現れ、結果として実際に計数された AE 事象はセンサ C より少なくなった。両センサにおいて、しきい値別にそのピーク値を比較するとしきい値が低いほどピーク値は高い。このことから、最大振幅が 65~75 dB 未満と低い AE が多数発生していたことがわかる。

このように、しきい値の設定の仕方によって、AE 事象数を正確に計測することができないこともあることが明らかとなった。また、センサによって周波数感度特性が異なるため、試験片に損傷が生じてセンサによっては感知する場合としない場合があった。センサの周波数感度特性と試験片から発生する AE の周波数特性を十分理解した上で、使用するセンサを選択する必要があることがわかった。

同様な観点から疲労試験結果についてもセンサの違いと AE 計測結果の違いを理解することができる。今回の例では、異なるセンサを用い、しきい値を変えれば寿命比に対する AE 事象の発生記録に大きな差が見られなかった。本装置では周波数解析装置が付いていないため、明確なことは言えないが、次のようなことが考えられる。本疲労試験では最大繰り返し荷重が静的強度に比べて低いため、AE の多くは繰り返し荷重の大きなところで発生している。疲労試験の場合、AE が急激に発生したとしてもミリ秒オーダーのごく短時間に連続的に発生するわけではないため、しきい値以上の AE 事象はほとんど記録することができる。他方、静的試験の場合、常に荷重が増加しているため、AE が発生し続ける。しかし、静的試験の場合と同様、AE の発生状況により、しきい値を下げたり、センサの感度特性が異なった場合には疲労試験でも見かけの試験片の AE 特性が大きく変わるおそれがある。

疲労試験では荷重が時間とともに変動する。一般には AE は繰り返し荷重にあって最も高い応力時に発生することが期待されるが、実際には常に最大応力の時に AE が発生するとは限らない。AE の発生応力レベルを知ることとは内部損傷を評価する上で重要であり、AE 計測において重要なパラメータでもある。本実験では繰り返し周波数は 1 Hz であり、AE がどの応力レベルで発生したかを識別することができる。Fig. 13, 14 はそれぞれ周波数感度特性の異なるセンサ A, B で計測された AE について、AE が計測されたときの応力レベルをパラメータとして繰り返し数と AE 総カウント数（その応力レベル以下で計測された AE 事象の総数）を示す。ここで、応力レベルは最大繰り返し荷重を 100 としている。負荷が

Fig.11 Acoustic emission counting; case (1)

Fig.12 Acoustic emission counting; case (2)

最大繰り返し荷重の80~100%で発生するAE事象の総カウント数の変化に着目し、両図を比較する。すなわち、いずれのセンサで計測された結果でも、図において80%と100%の二つの曲線の差は寿命比約15%まで増加し、その後は破断直前までほとんど増加しないという似通った傾向が見られた。これらのことから、センサが異なっても、試験片に同一の現象が生じたときにAEを

計測したと考えられる。疲労試験においてAE計測に用いたセンサの周波数感度特性が異なっても、しきい値が高く二つのセンサでしきい値を適当に変えた場合には、センサ特性の違いがAE計測結果に及ぼす影響は静的荷重下ほど大きくないことがわかった。ところで志波ら⁹⁾によると、最大繰り返し荷重付近で発生するAEはき裂の進展時に伴うものであり、負荷および除荷時に発生す

Fig.13 Total AE event counts by Sensor A under fatigue loading.

Fig.14 Total AE event counts by Sensor B under fatigue loading.

る AE は破面の擦れ（摩擦）に伴うものであると報告されている。このことから本 GFRP では、疲労損傷は疲労の初期に多く発生し、その後大きな損傷の進展が顕著に計測されないまま、急に疲労破壊に至る様子が推測される。

6. 結 言

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

FRP の静的、疲労破壊に伴う AE 計測を行う場合、見かけの AE 事象発生率に及ぼすセンサならびにしきい値の影響が見られた。同じセンサであってもしきい値を変えた場合、また、センサが異なった場合も試験片の見かけの AE 特性が全く異なってくる。特に同じセンサでも AE 計測器のリゾリューションタイムやデッドタイムおよび機器のデータ記録システムの関係から、多数の AE 現象を記録することを期待し、しきい値を低く設定した場合、記録された個々の AE データを基に振幅分析を行うことができないおそれがある。試験片の発生 AE の性状（周波数特性、発生頻度 etc.）、センサの周波数感度特性および AE 解析装置の計測、記録システムを十分考慮した上で、使用するセンサを選択する必要がある。

終わりに、本研究に当たって樹脂を提供して頂いた大日本インキ化学工業株式会社ならびにガラス繊維を提供して頂いた旭ガラスファイバ株式会社に感謝の意を表をし

ます。

参 考 文 献

- 1) 孫 峰, 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念栄一: 材料, 37 (1988), 517-552.
- 2) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森 旭, 孫 峰: 日本機械学会論文集 (A編), 53 (1987), 1459-1466.
- 3) 関根英樹, 鈴木 寛, 根村雅晴: 日本複合材料学会誌, 13 (1987), 72-78.
- 4) 福田武人, 逢坂勝彦, 藤井太一, 高田政宏: 日本機械学会論文集 (A編), 53 (1987), 1459-1466.
- 5) 福田武人, 逢坂勝彦, 谷口 誠: 日本複合材料学会誌, 17 (1988), 58-65.
- 6) 湯山茂徳: 強化プラスチック, 31 (1985), 433-438.
- 7) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森 旭: 材料, 35, 392 (1986), 521-526.
- 8) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 小池 清: 材料, 36 (1987), 229-235.
- 9) 志波光治, 湯山茂徳, 岸 輝雄: 第六回 AE 総合コンファレンス論文集 (1987), pp. 171-176.
- 10) 鈴木 恵, 伊村 真, 岩本正治, 自念栄一, 藤原照彦: 日会機械学会論文集 (A編), 55 (1989), 1081-1087.
- 11) 上野谷敏之: 第21回 FRP シンポジウム (1992), pp. 46-50.
- 12) 岸 輝雄, 志波光治: 日本複合材料学会誌, 12 (1986), 241-250.