

FRP における AE 法の応用*

Applications of Acoustic Emission in FRP

湯山茂徳**

Shigenori Yuyama

1. はじめに

固体内で生ずる割れ，変形などの局所的微視変化を探る手段として有力な AE 法¹⁾は，工業技術の一つとしてすでに十数年の発展をとげ，さらにその応用範囲が広がろうとしている。適用対象となる材料も，古くから用いられている金属材料や岩石のほかにも，FRP や FRM などの複合材料，セラミクス，プラスチックなど多岐にわたる。

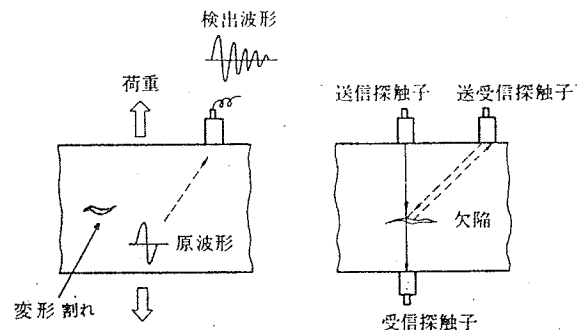
さて，FRP においては多数の繊維が異方的かつ不連続的に母材中に存在するため，放射線の透過や超音波の反射を用いる RT や UT は問題を生じ易いが，材料内で生ずる破壊現象そのものを捕える AE 法は，動的破壊過程を検出する優れた非破壊検査法として，大きな威力を発揮するものと考えられる。実際に AE 法を FRP に適用するにあたり，この手法は材料の力学的特性，疲労損傷，層間剝離，接着不良，き裂などを評価するのに適用性の高いことが報告されている⁽²⁾。こうした特長を利用し，米国ではすでに自動車産業，宇宙航空産業，化学産業などで多くの適用が行われ，大きな成果をおさめている。特に化学産業の分野では，耐食 FRP 製タンク，圧力容器，パイプの健全性評価試験として AE 法のコード化が SPI の手で進められ⁽³⁾，ASME 規格にも 1985 年夏に取り入れられた。一方我が国では，各大学，研究所などで FRP における AE の基礎的研究が広く行われており，これらの成果が産業界に反映されるのも近い将来と考えられる。

こうした点を踏まえ，本稿では FRP における AE 法適用の現状について述べ，その将来を展望する。

2. AE 法とは

AE とは物が応力下で破壊する時発する数 10 kHz ~ 2 MHz 程度の周波数を持つ弾性波のことを言う。物が壊れる時発する可聴域の音を聞いて危険を予知することは，我々が古くから行っている重要な日常動作の一つである。環境雑音および電気雑音の影響を排除するため上述の超音波領域に注目し，固体内で生ずる局所的，微視的破壊を検出する実験手法として，また重要な非破壊検査法の一つとして AE 法は 1960 年代の初頭より大きな発展をとげてきた。図 1 に AE 法と他の代表的な非破壊検査法の一つである超音波探傷法 (UT 法) との比較を模式的に示してある⁴⁾。AE 法が応力下で固体内に生ずる破壊現象そのものを捕えるのに対し，UT 法は超音波を入射することにより，破壊源となる欠陥の存在を検出するという違いがある。すなわち AE 法が動的かつ受動的検査法であるのに対し，UT 法は静的かつ能動的検査法であり，両者は相補的な関係にある。

さて AE を検出し，それを解析するには，AE センサーと AE 計測システムが必要である。一般的にセンサーは弾性波を電気信号に変換するため圧電素子



(b) AE

(c) 超音波探傷

図 1 AE 法と超音波探傷法の比較

* 昭和 59 年 10 月 31 日 FRP CON-EX '84 にて発表

** PAC/ダネガンジャパン (株) (PAC/Dunegan Japan Corp.), (株) 大日本樹脂研究所顧問

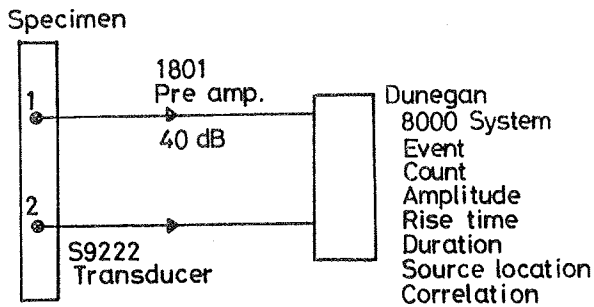


図 2 AE 計測系ブロック図

用いており、感度を高める目的で適当な周波数域に共振をもたせるのが普通である。被試験体に圧着されたセンサーにより検出された AE 信号は、プリアンプでいったん増幅された後、メインアンプあるいはログアンプを通して信号処理および解析が行われる。信号処理パラメータとしては、しきい値を越えた振動の回数をすべて数えるリングダウンカウンタ数（計数率および累積数）、AE 信号のひとかたまりを一事象と数える事象数（事象率および累積数）、発生した AE エネルギーの相対的な比較が可能な最大振幅値、最大振幅値に統計的処理を施すことによつて得られ AE 発生機構の分類がしばしば可能な振幅分布、さらにセンサー間の信号到着時間差を求めることで可能な AE 発生源の位置標定などがある。また最近では、AE 発生機構そのものを探る目的で、波形に注目した研究⁹⁾が行われ、AE 源の定量的評価に関して大きな成果をあげている。これら AE 計測系を簡単に表わしたブロック図と AE 信号処理パラメータをまとめて図 2 に示す。

現在汎用される AE 計測装置は、初期のものから数えて第 4 世代に属するものである。この装置では、以前には各モジュールごと個別に行われた多種の信号処理が、すべて一枚のボード上で可能になっている。複数のマイクロプロセッサを用い、AE 信号の取得、信号処理、データ転送、およびデータ表示を統一的行っており著しい高速化、安定化が計られている。チャンネル数の増設は、一チャンネルごと一枚のボードを装入するだけで済み、こうした小型化、軽量化により、たとえば 8~16 チャンネルを実装する卓上型装置が開発されている。データ解析には、装置内に内蔵する汎用ミニコンピュータが用いられ、付属する基本ソフトウェアにより、有効パラメータのオンライン解析を可能にしている。こうした装置は、実験室での基礎研究から、実機 FRP 製構造物の健全性評価試

験にまでいたる広い適用範囲を持つ。

3. FRP における AE 発生の特徴

FRP で発生する AE は、金属など他の材料のそれと比べて強度（エネルギー）の大きいことが知られている⁹⁾。最終破壊に至るまでの発生数が多く、比較的小さな応力から AE 発生が見られる。これは FRP が潜在的に持つ多数の応力集中や欠陥、また残留応力、母材となる樹脂の延性度の問題、さらに母材の強度が繊維と比較して小さいことなどが原因と考えられる。発生する AE 信号は、減衰の小さい低周波成分を多く含むため、他の材料に比べ AE 信号の検出は容易である。

FRP の破壊過程で生じる主な AE 発生源としては、繊維材の母材からの剥離、繊維材の破断、母材の破壊などが考えられる。また AE 計測で特徴的な点として、他の材料と異なり、初期破壊部となり易いたとえば母相・繊維境界部が材料中に広く分布するため微小破壊が各所で同時に多発し、AE 発生も広範囲にわたること、さらに FRP 内において、音速に異方性がある、減衰が大きい、個々の AE 信号振幅値間のバラツキの幅が大きいなどの理由により、正確なセンサー間信号到着時間差を求めるのが困難なため、AE 発生源の位置標定を行うのが難しいことなどがある。

図 3 および 4 に、著者らが CFRP の引張試験⁷⁾で計測した AE の発生状況を示す。図 3 は AE 発生挙動および荷重変化を示したもので、最初の AE は試

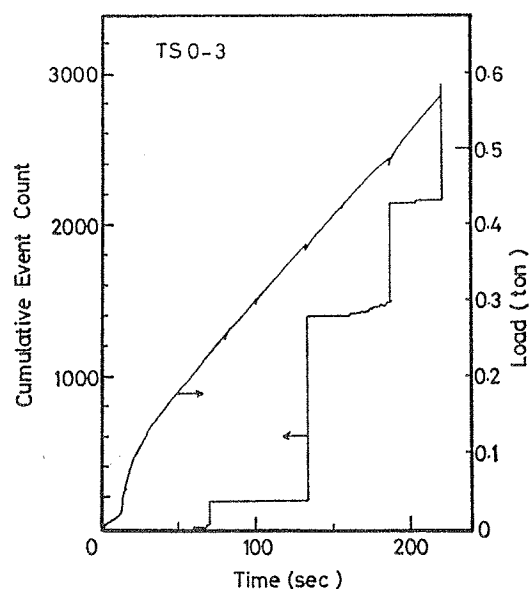


図 3 CFRP の引張試験における AE 発生挙動

強化プラスチック

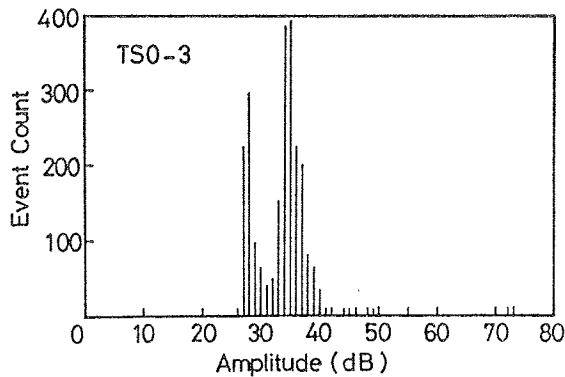


図4 CFRP の引張試験で得た AE 振幅分布

験開始後 60 秒（破断荷重の約 37%）で発生しており、その後荷重上昇過程で時々生ずる不連続荷重低下（繊維の破断によると考えられる）に対応し、ステップ状に多くの AE が発生する。図4にこの時得た振幅分布を示す。図から明らかなように、振幅分布上で AE のエネルギーレベルは、30 dB 以下の最大振幅値を持つ AE 事象、同 30~40 dB の事象、それ以上の最大振幅値を持つ事象と 3つのグループに分けられる。著者らが行った圧縮試験（繊維材の剝離が破壊の主要部分を占める）、母材のみの引張試験、繊維一本の引張試験によれば、剝離で生ずる AE の最大振幅は 30 dB 程度、母材の破壊による AE は最大 40 dB 程度、また繊維材の破断では最大 80 dB 程度の AE 発生が観察された。したがって、前述の 3つのグループは、3つの異なる破壊機構すなわち繊維材の母材からの剝離、母材の破壊、繊維材の破断にそれぞれ対応するものと考えられる。

振幅分布は、AE を生じた事象により解放されたエネルギーの大小の違いを相対的に比較できるため、異なる AE 発生機構を識別するうえで最も有効なパラメータと考えられている。FRP ではここで示されたように、異なる破壊機構が異なる最大振幅レベルに対応するのが一般的であるため、適当な信号計測しきい値を選ぶことにより、それぞれの破壊段階に応じた AE 信号の検出を行い、破壊過程を直接評価することが可能と考えられる。

4. AE 法の実機応用

4.1 宇宙航空産業

CFRP が宇宙航空用材料として使用される頻度が増し、その重要性が大きくなるにつれ、この材料の AE

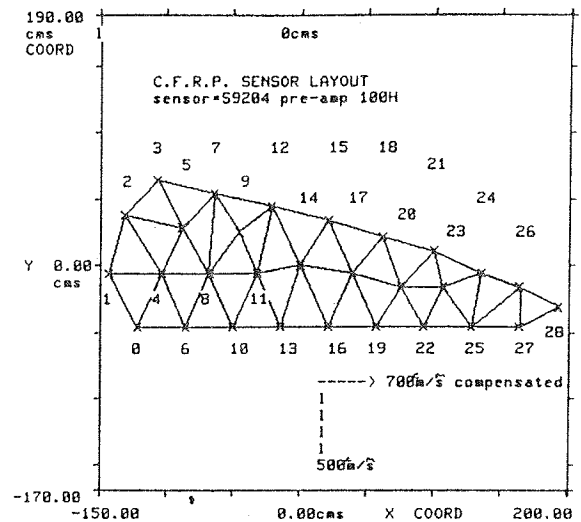


図5 CFRP 製主翼の AE 試験におけるセンサー配置

発生に関する研究も数を増している。我国でもすでにいくつかの基礎研究^{8),9)} がなされ、多くの成果を上げている。CFRP は、現在通信衛星用構造材、ロケットモータ用構造材、航空機の翼用材料などとして実用化が進み、その健全性評価の重要な手段として、AE 法は世界各国で適用されつつある。しかしながら、いずれの場合も最先端技術あるいは軍事技術に関連したものであるため、結果が公表されている例は極めて少ない。図5は公表された結果の一例¹⁰⁾ である。音速および減衰率に異方性のある点を考慮して作成したソフトウェアを用い、図に示されたセンサー配置をとることにより、全面 CFRP 製主翼の疲労過程で発生する AE を解析し、その破壊過程を評価しようとしている。

4.2 化学産業

SPI がまとめた健全性評価のための推奨法³⁾ をもとに、主として米国において FRP 製タンク、圧力容器、パイプなどの AE 試験が多く行われている。これら FRP 製構造物に対する AE 法適用の有効性を示すものとして、モンサント社の報告¹¹⁾ がある。図6は同社が 1972 年から 1983 年にかけて経験した FRP 製タンクの重大な破壊事故件数の推移を示している。これより 1970 年代には、毎年数件程度の事故が起っていたことがわかる。一方図7は、同社が行った AE 試験数の推移を示す。1980 年を境に、試験数が急速に増えている。それに対応して、図6に見られるごとく、タンクの事故発生数は 1980 年代に入ると

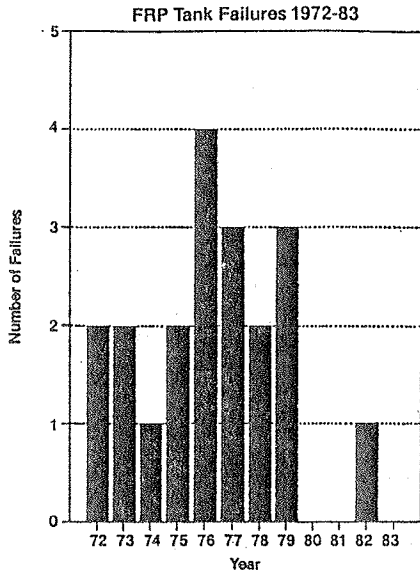


図 6 モンサント社における FRP タンク破壊数の推移

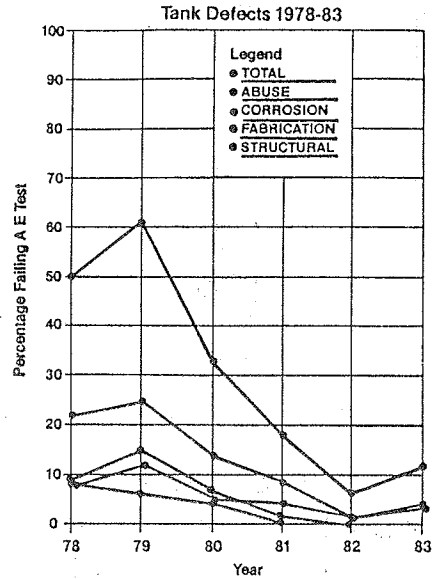


図 8 同発見された各種欠陥数の推移

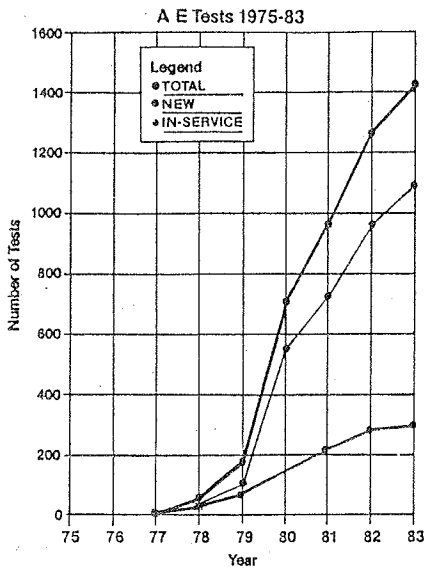


図 7 モンサント社における AE 試験数の推移

Note: Numbers refer to sensor/data channel number

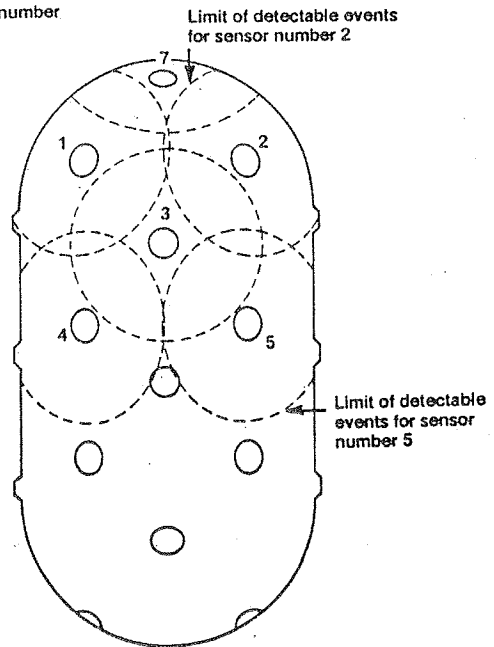


図 9 AE センサー配置図

急速に減少している。また図 8 は、FRP タンクに発見された各種欠陥数の推移を示す。やはり AE 試験が多く行われるようになって以後、発見される欠陥の数は大きく減少しており、さらにタンクに致命的影響を及ぼす構造的欠陥はほとんど見られなくなった。今日までにモンサント社では、1400 を越える FRP 製タンク、圧力容器に対して、また数 100 を越える FRP 製パイプに対して AE 試験を行っており、その健全

性評価に大きく貢献している。

SPI の推奨法では、AE センサーの種類と配置法、また負荷形態を指定している。AE 計測には、少数個の低周波用センサー（共振周波数 25~75 kHz）と多数個の高周波用センサー（共振周波数 100~200 kHz）を使用することが定められている。低周波センサーは伝搬損失の少ない AE の低周波成分を検出し、FRP

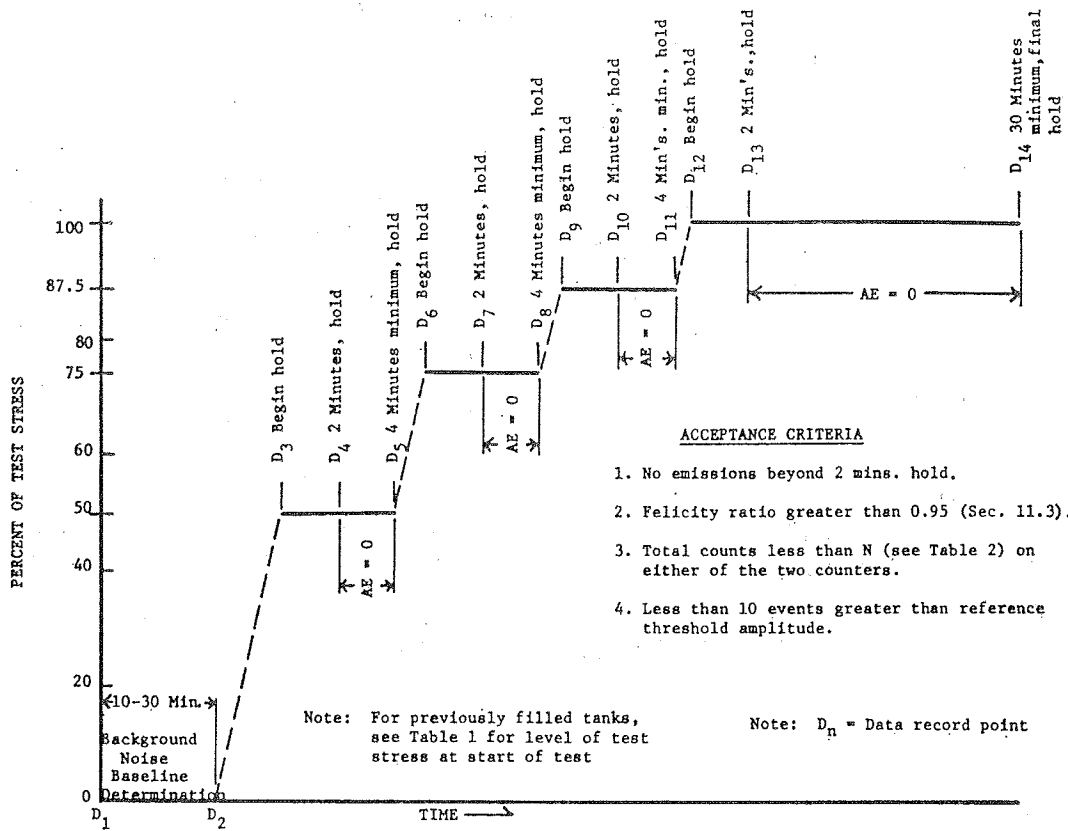


図 10 AE 試験における応力荷荷形態

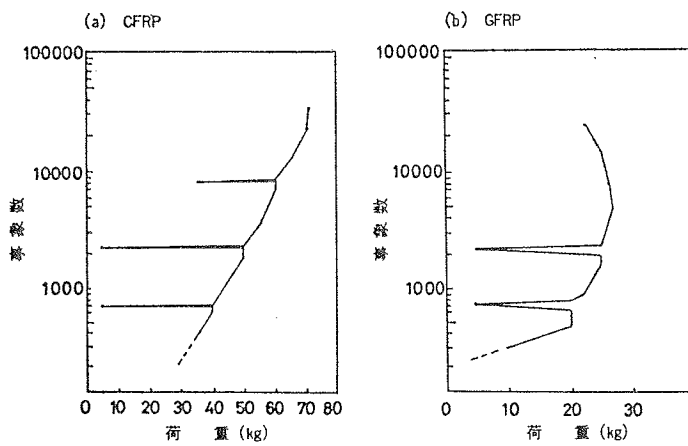


図 11 FRP のカイザー効果

構造物全体の AE 活動度をモニターするのに用い、一方、健全性などの定量的評価は、すべて高周波センサーで得たデータをもとにする。図 9 は、試験時における AE センサー配置を模式的に示したもので、センサー間信号到着時間差による位置標定は用いず、一個のセンサーに対して監視領域を定めるといった方法（ゾーン標定法）により、AE 発生源すなわち破壊の

生じつつある部位の標定を行っている。また図 10 は、FRP 製貯蔵タンクや真空容器の試験時に用いられる応力の荷荷形態を示す。このように応力上昇—保持をくり返し、階段状に荷荷を変化させた時の AE 活動度を調べ、その健全性評価は行われる。

ところで、AE に特有な不可逆現象としてカイザー効果がある。これは材料に荷荷を加えると AE が発生するが、一度除荷し再び荷荷すると以前に加えられた最大荷荷を越えるまで AE が発生しないという現象である。図 11 は一方向強化 FRP の

三点曲げ試験で記録されたカイザー効果で、CFRP は特に顕著な特性を示している。この効果は、荷荷が大きくなるにつれて薄れ、一度除荷して再荷荷する過程で以前に加えられた最大荷荷より小さい荷荷で AE が発生し始めるようになる。この荷荷と以前に加えられた最大荷荷の比をフェリシティ比と呼ぶ。その値は破断荷荷に近い荷荷を受けた FRP では 1 以下を示し、その材料が被った損傷の程度を表わす

指標となる。SPIの推奨法ではフェリシティ比は圧力容器、タンクともに0.95以上の製品を合格とするように勧めている。

これまでにSPIの推奨法をもとに行われたAE試験は、5000を越えると報告されている¹⁴⁾。こうした実績をもとに、本年夏AE法はFRP製構造物の健全性評価法としてASME規格に取り入れられ、標準化された。したがって、その適用は今後さらに広範囲に広まり、一般化していくものと考えられる。

5. おわりに

FRPにおけるAE法の応用についてまとめてみた。AE法は、材料の破壊現象そのものを捕えるという特長により、FRPの材料特性を評価する優れた評価法に、またその劣化損傷過程をモニターする非常に有力な手段となる。今後この特性を生かし、FRPの材料試験法の一つとして、また多くの実機FRP構造

物の健全性評価法として、さらに適用が広まるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 湯山茂徳：検査機器ニュース，1982年7月～11月
- 2) 金原 勲：日本複合材料学会誌，10，3，97 (1984)
- 3) SPI: Recommended Practice for AE Testing of FRP Tanks/Vessels
- 4) 岸 輝雄：軽金属，31，266 (1981)
- 5) 大平，岸：鉄と鋼，70，2188 (1984)
- 6) 大塚裕光：日本複合材料学会誌，10，3，102 (1984)
- 7) 湯山，長谷川，川上：第4回AE総合コンファレンス論文集，日本非破壊検査協会，114 (1983)
- 8) 林，角田，中井：航空宇宙研究所報告，TR707：(1982年4月)
- 9) 金原，大沢：AE委員会資料 No. 69，日本非破壊検査協会 (1983)
- 10) G.S. Whally and P.T. Cole: Proc. 1st Intern. AE Symp. on FRP (SPI CARP Intern. Symp.), San Francisco, July 1983
- 11) T.J. Fowler: Chemical Processing, March, 24 (1984)