

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.023:
629.7.018.4

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-468

CFRP構造要素模型の静強度試験における
アコースティック・エミッション計測

角 田 義 秋 ・ 林 洋 一 ・ 中 井 暎 一

1982年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

CFRP構造要素模型の静強度試験における アコースティック・エミッション計測*

角 田 義 秋** 林 洋 一** 中 井 暎 一**

1. ま え が き

近年、航空機の軽量化設計の開発研究は省エネルギーやペイロードの効率向上を意図して進められ、金属一次構造を複合材料で置換することによって全体でおよそ20%以上の重量軽減が期待されている^{1),2)}。航技研では特別研究“ファンジェットSTOL機の研究”の一部として³⁾、水平尾翼を軽量かつ高性能な材料特性を有している炭素繊維複合材(Carbon Fiber Reinforced Plastic; 以下CFRPと略記する)で置換するのに必要な技術資料を取得するため、各種CFRP構造要素模型の強度試験を実施している^{4),5)}。

CFRPを構造物の一次部材として使用する場合にはその機械的諸特性値や構造強度特性などを調べることも重要であるが、それと同時に構造部材成形中に生じる初期欠陥(炭素繊維の破断、マトリックスの割れ、接着不良、気泡等の混入等)や環境条件(温度、湿度、腐食性の気体や液体との接触等)による劣化および運用中に生じる損傷などを監視することによって安全性を維持・管理できるような検査方法の確立も必要となる。複合材料の非破壊検査法としてはX線透過法、超音波探傷法、中性子ラジオグラフィ法およびアコースティック・エミッション(Acoustic Emission; 以下AEと略記する)法などがある。米国においてはAE法を航空機に適用した例として、飛行中の航空機構造に発生する疲れき裂の検出⁶⁾およびロケットモータケースやロケットノズルの保証試験のモニター⁷⁾などがある。著者らはこのAE法が複合材料製構造物の破壊モニターにも有用であるとの知見を、CFRP桁/リブ要素模型試験⁸⁾からすでに得ている。AEとは固体が塑性変形あるいは破壊する際に、それまで貯えられていた

ひずみエネルギーが解放されて弾性波を生じる現象⁹⁾といわれており、物が破壊するときが発生する音を電気信号に変換し、それを解析処理することによって微視的破壊の位置、疲れき裂の進展挙動およびそのき裂が危険であるかどうかの評価など種々の用途が期待されている。本報は試作された各種CFRP構造要素模型の静強度試験にAE法を用いて、CFRP模型の破壊挙動とAE信号の関係から構造要素模型の最終破壊を予知することの可能性について検討したものである。

2. AE の 計 測

試験に用いたAE計測装置(エヌエフ回路設計ブロック社製)の外観写真および仕様をそれぞれ図1、表1に、AE計測システムの簡単なブロック・ダイヤグラムを図2に示す。

AE法は供試体にき裂や局所的な破壊を生じた際に発生するAEをAE検出器で捕らえて電気信号に変換し、これを増幅・信号処理することによって、(1)AE計数率(レートカウント)、(2)AE計数総数(トータルカウント)、(3)振幅、(4)振幅分布、(5)実効値またはエネルギー、(6)波形・周波数スペクトル、(7)時間差または位置標定、などのAE特性を表現するパラメータとして得ることができる。ここでは検出されるAE信号のうち、特に(1)レートカウントおよび(2)トータルカウントの2つに注目して、これらと負荷荷重および供試体変位の関係について定性的な検討を試みた。

AE検出器は図3に示すような不平衡形のPZT検出器(チタン酸ジルコン酸鉛圧電セラミックス: 公称共振周波数140kHz)を用いて、供試体の破壊標定部近傍のCFRP部分にグリースを介して押え金具で固定した。AE検出器で検出される電気信号は数10 μ V~数10mV程度の微弱な電圧であるため、

* 昭和57年7月17日

** 機体第二部

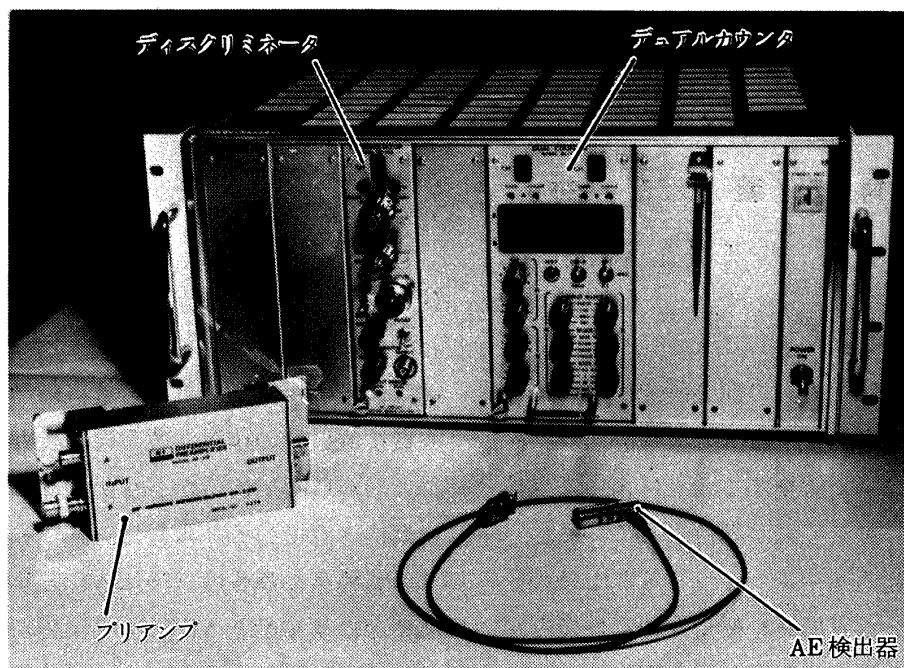


図1 AE計測装置

表1 AE計測装置の仕様

	型式番号	定 格
A E 検 出 器	AE-901 S	共振周波数；140kHz 出力型式；シングルエンド
プ リ ア ンプ	AE-912	周波数特性；50kHz～2MHz 利得；40 dB ± 1 dB 出力電圧；2V _{p-p} MAX(75Ω終端時)
ディスクリミネータ (メインアンプ)	AE-922	周波数特性；20kHz～2MHz 利得；60 dB (10ステップ及び20 dB連続可変) HPF；THRU, 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz LPF；200 kHz, 500 kHz, 1 MHz, THRU
デュアルカウンタ	AE-932	チャンネル数；2 入力電圧；TTLレベル負論理 桁標示数；8 レート計測時間；0.1, 1, 10, 100sec 及び EXT

信号処理を行なう場合には50～100 dB程度の電圧増幅が必要となる。AE検出器とアンプの間を長い同軸ケーブルで直接接続するのはケーブルロス等によって微弱な電気信号の減衰を招くので、AE検出器の近傍にプリアンプを設置して入力信号を一旦40 dBに増幅している。増幅された信号には目的とするAE信号のほかに、電氣的雑音や機械的雑音なども

同時に含まれるが、このうちの雑音成分はバンド・パス・フィルタ(BPF)を挿入することによって、除去あるいは低減させることができる。前段で増幅されたAE信号の入力周波数帯域はAE検出器の周波数特性や試験環境における雑音の程度に合わせて、BPFによって100～500 kHzの範囲に設定した。入力信号の電圧増幅率はプリアンプも含めて総計で

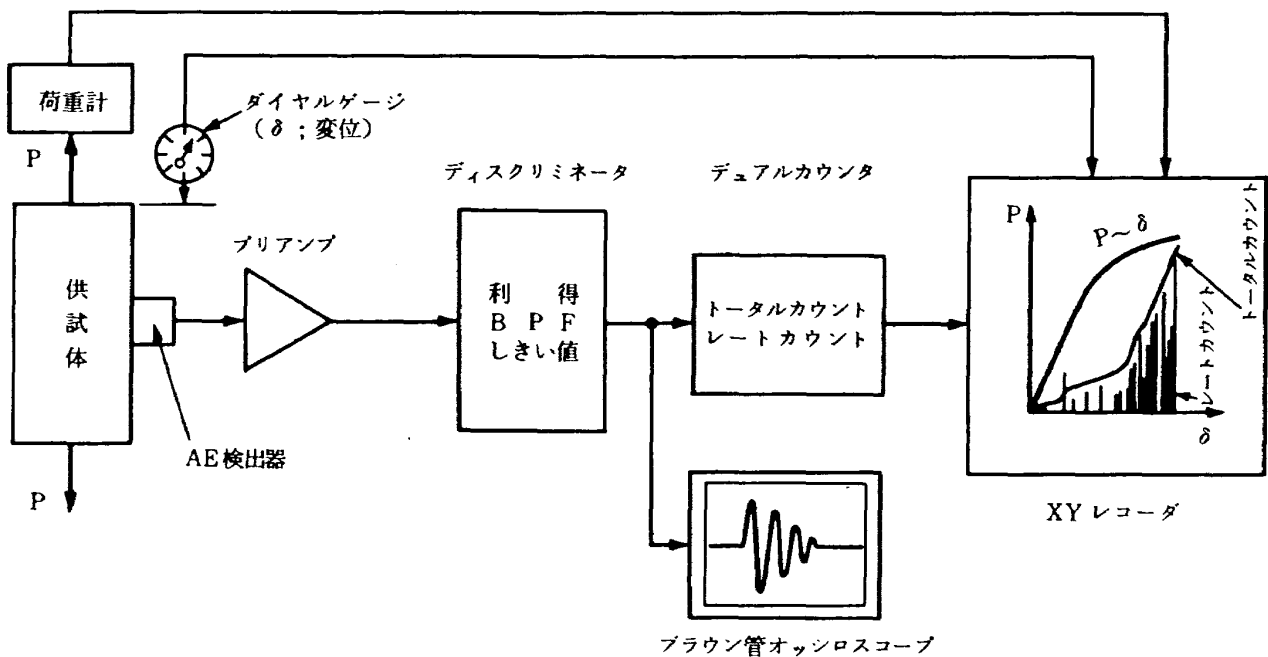


図2 AE計測システム

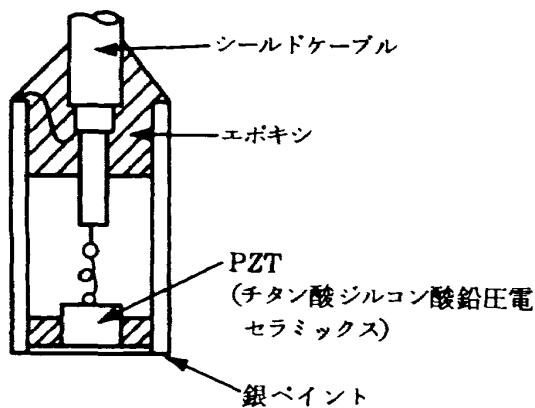


図3 不平衡形AE検出器

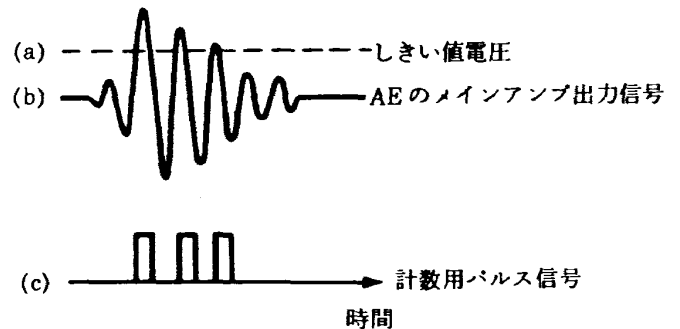


図4 リングダウン計数法

70～80 dBとした。ここで用いたカウント法はリングダウン計数法とも呼ばれ、図4に示すような設定されたしきい値電圧(破線)を越えた波の数をすべてパルス信号に変換して単位時間当たり(ここでは0.1秒に設定)のパルスを計数したものがレートカウントであり、トータルカウントはこのレートカウントの累積総数となる。なお、設定したしきい値電圧は試験環境の雑音などを考慮した結果、280mVとした。AE信号の波形はブラウン管オシロスコープを用いて、試験のあいだ常時観察した。

3. 供試体⁵⁾

供試体のCFRP素材としては一方向炭素繊維/エポキシプリプレグ(三菱レーヨン製:公称0.15mm

厚)および織物炭素繊維/エポキシプリプレグ(三菱レーヨン製:公称0.4mm厚の8枚朱子織)の2種類が用いられ、その機械的性質を表2に示す。同表からもわかるように一方向材の方が織物材に比べて引張り強さで約3倍、弾性率および層間せん断強さについても6割程度高い値になっている。供試体はNAL STOL実験機の水平尾翼を想定したもので、これをCFRP構造に置換する上で必要となる基礎的な設計資料を得るため、主要構造をいくつかの部分要素模型にモデル化したものとなっている。具体的には補強外板要素模型(模型A)、外板・補強材結合要素模型(模型B)、桁・リブ結合要素模型(模型C)および桁・金具結合要素模型(模型D)の4種類のモデルが用いられ、その形状寸法と積層構成

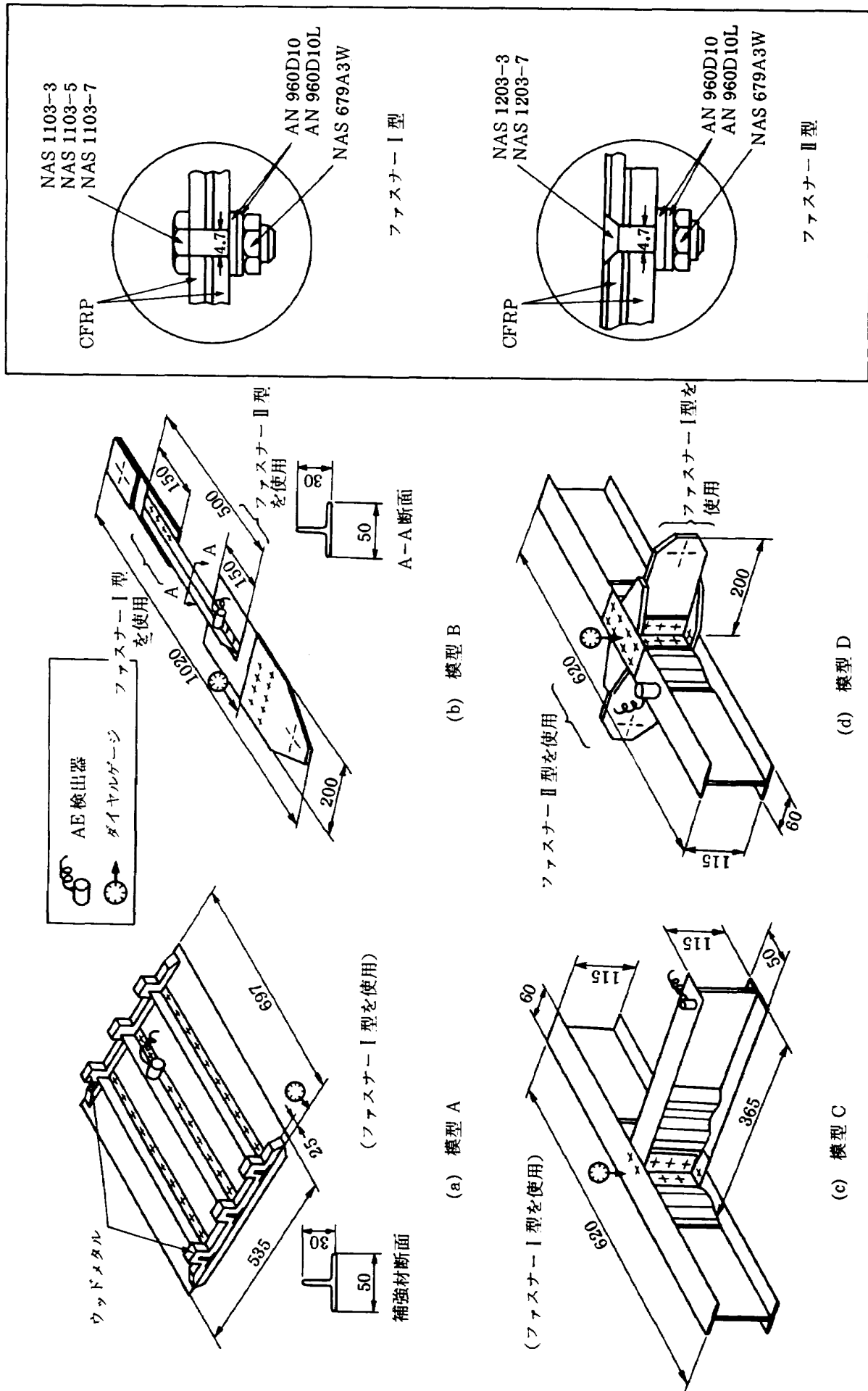


図 5 各種要素模型の形状寸法

表2 CFRPの機械的性質

	一方向炭素繊維 / エポキシプリプレグ	織物炭素繊維 / エポキシプリプレグ
引張り強さ [MPa]	1670	539
弾性率 [GPa]	115	70
層間せん断強さ [MPa]	107	66
ポアソン比	0.3	0.077
比重	1.8	

をそれぞれ図5, 図6に示す。図5には模型の結合部に使用したファスナーの形状 (I型, II型; ボルト径 4.7mm ϕ) と AE 検出器およびダイヤルゲージの取付け位置も合わせて示してある。各供試体の成形加工はオートクレーブを用いてプリプレグからレイアップした模型を真空パックに包み 120 $^{\circ}$ C, 686.5 kPa で 1 時間保持し, その後真空を解除して 180 $^{\circ}$ C, 686.5 kPa で 2 時間保ち硬化させたものである。

4. 試験方法

静強度試験は供試体の種類によって負荷方式および標定部が異なるため, 以下に各模型について試験の概略を述べる。

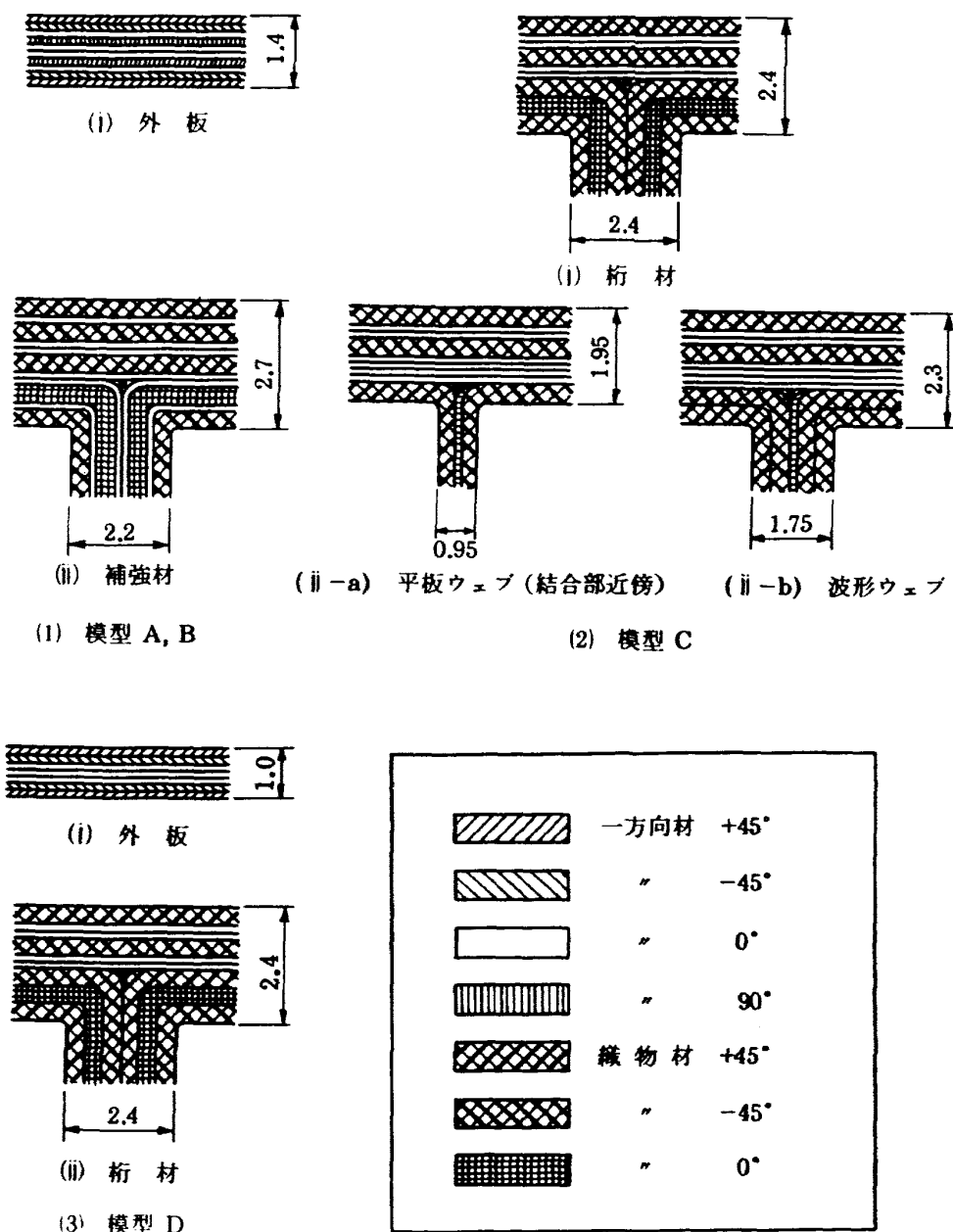


図6 積層構成

4.1 模型 A

模型 A の試験状況を図 7 に示す。圧縮荷重を受ける供試体は補強材方向と垂直な端面部に図 5-(a) に示すような形状にウッドメタル（低融合金）が鑄込んである。図 7 はアムスラー型万能試験機（島津製作所製）のベット上に供試体と圧縮用治具が設置されている様子を示している。ナイフエッジを備えた圧縮用治具は外板要素の両側縁部をはさむことによって、単純支持の条件を満たす構造になっている。AE 検出器は供試体の外板に等間隔に配置された補強材 3 本のうち、真ん中の補強材ウェブ部に取付けた。荷重は 0～58.8kN, 58.8kN～117.6kN および 117.6kN～最終破壊に分けて、それぞれ 4.9kN, 25.4kN および 4.9kN の荷重増分で負荷した。供試体の変位量は圧縮荷重が作用する荷重端部間の相対的な変位として、ダイヤルゲージを用いて計測した。

4.2 模型 B

模型 B の試験状況を図 8 に示す。供試体の標定部は外板要素と補強材要素を 8 本の鋼製ファスナーで結合した箇所を想定した。AE 検出器は結合部近傍の補強材ウェブ部に取付けた。供試体は補強材要素が上側に位置するように門形架台に垂直に吊り下げ

られ、電気油圧サーボ式ジャッキを用いて引張り荷重が負荷された。荷重は 0～9.8kN, 9.8kN～19.6kN, 19.6kN～29.4kN および 29.4kN～最終破壊に分けて、それぞれ 1.96kN, 4.9kN, 9.8kN の荷重増分で負荷した。供試体の変位量は外板要素部のチャック端部にダイヤルゲージを取付けて計測した。

4.3 模型 C

模型 C の試験状況を図 9 に示す。供試体の標定部は桁・リブ要素の結合部とリブ要素の CFRP 波形ウェブ部を想定した。なお、桁・リブ要素の結合部には A ℓ 製のアンクルおよび鋼製のファスナーが用いられている。AE の検出器はリブ要素先端部の上側フランジ部に取付けた。供試体は球面座 2 個および支持ローラー 1 個の 3 点単純支持の状態に保ち、リブ要素のフランジ部上面に取付けた負荷金具を介して、電気油圧サーボ式ジャッキを用いて下向きに負荷された。荷重は 0～19.6kN および 19.6kN～最終破壊に分けて、それぞれ 1.96kN, 0.98kN の荷重増分で負荷した。供試体の変位量は桁要素中央のフランジ部上面のたわみとして、ダイヤルゲージを用いて計測した。

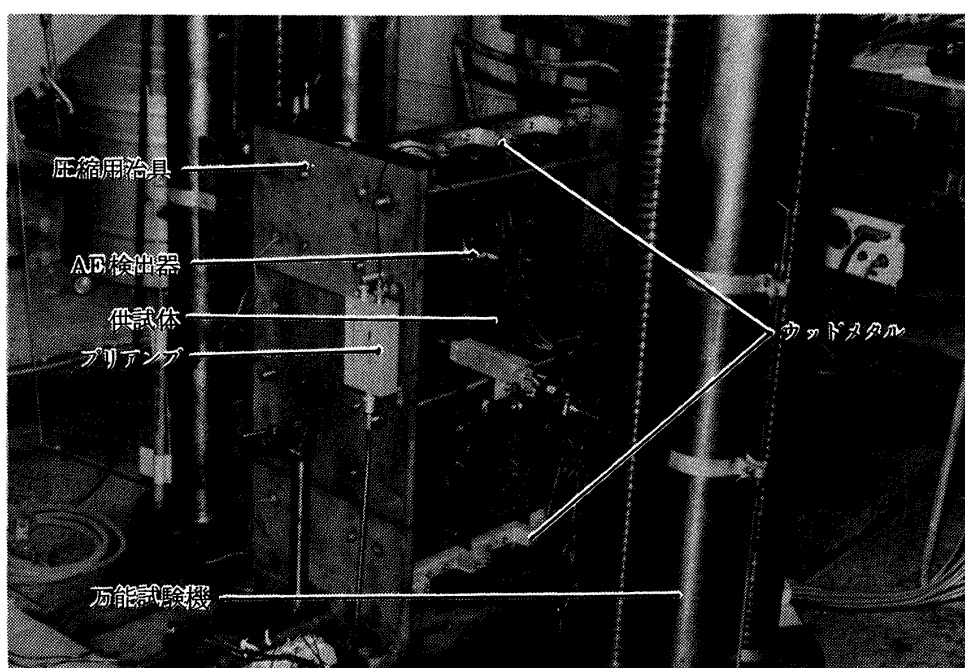


図 7 模型 A の試験状況

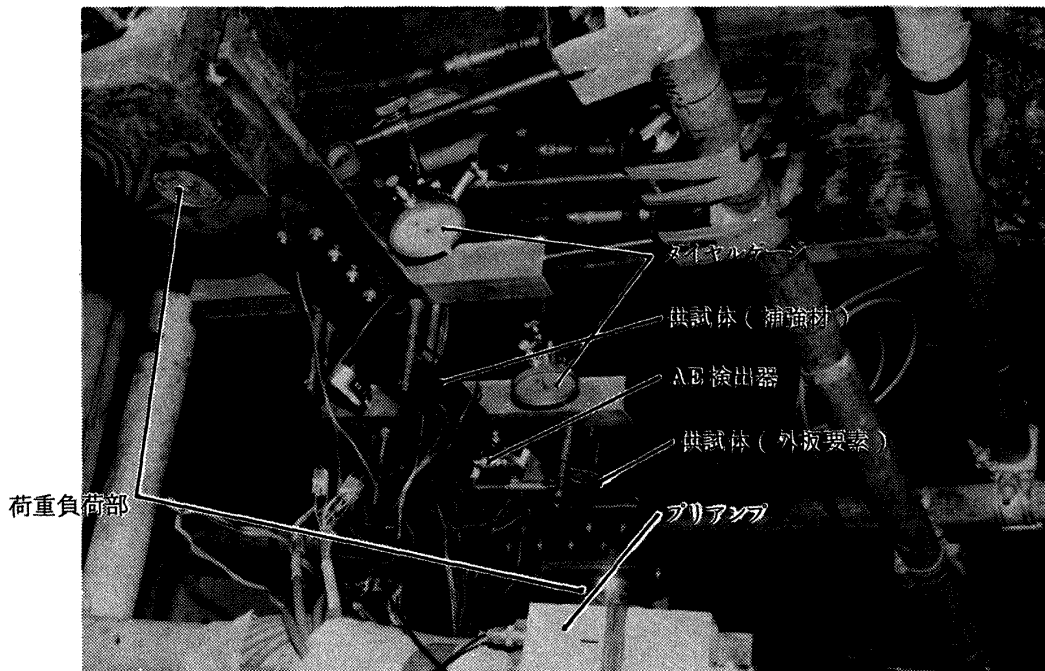


図 8 模型 B の試験状況

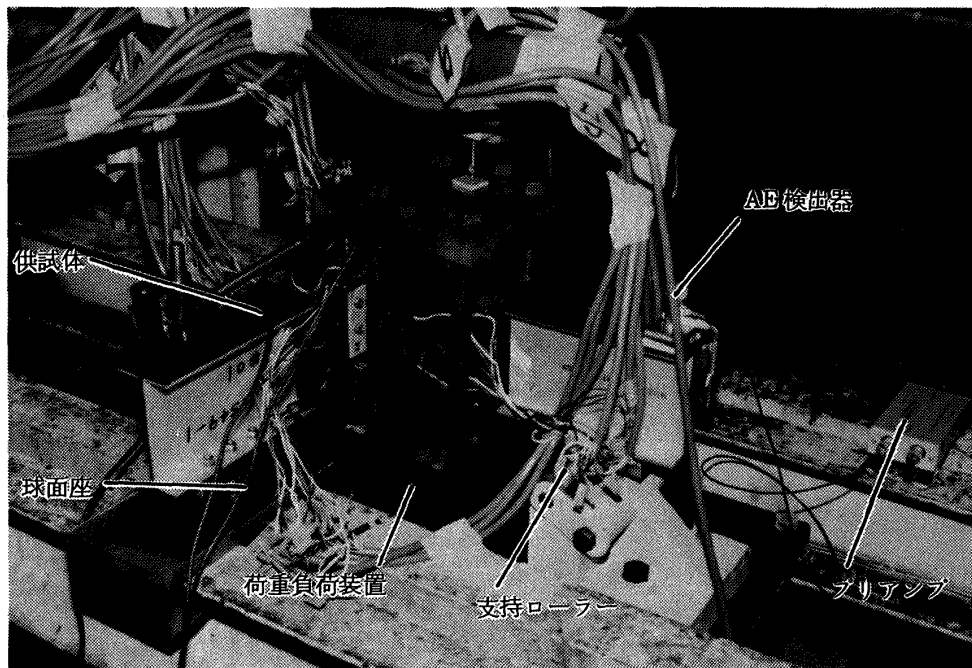


図 9 模型 C の試験状況

4.4 模型 D

模型 D の試験状況を図 10 に示す。供試体の標定部は桁要素の中央に位置する CFRP 波形ウェブ部とそれに直交する鋼製の金具ダミーを A ϕ 製のアンゲルを介してファスナーで結合した箇所を想定した。AE 検出器は結合部近傍の桁要素フランジ部上面に取付けた。供試体は桁要素部を 2 個の支持ローラー

を用いた 2 点単純支持の状態に保ち、金具ダミーの両端を U 字型金具を介して電気油圧サーボ式ジャッキによって下向きに負荷された。荷重は 0 ~ 30 kN および 30 kN ~ 最終破壊に分けて、それぞれ 2 kN, 1 kN の荷重増分で負荷した。供試体の変位量は標定部の最上面に位置する外板要素中央部のたわみとして、ダイヤルゲージを用いて計測した。

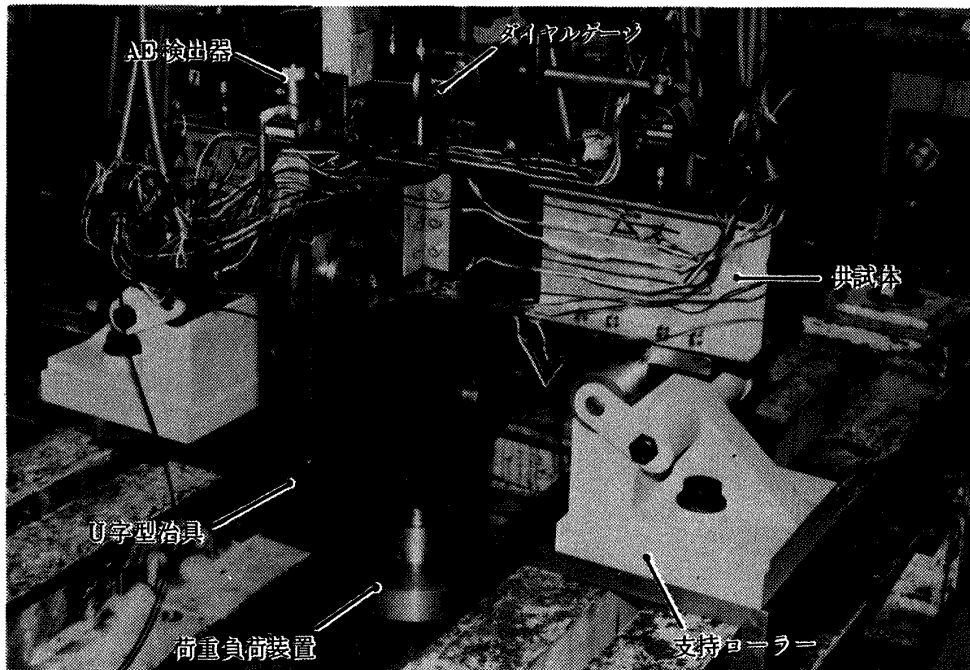


図10 模型Dの試験状況

5. 試験結果と考察

供試体はA, B, CおよびDの4種類の模型を各々2個ずつ用い、合計8個について試験を行った。各模型について得られたAE計測結果の一例を、それぞれ図11, 図13, 図15および図17に示す。ダイヤルゲージによって測定された供試体の変位を横軸にとり、縦軸には負荷荷重、トータルカウントおよびレートカウントを図示してある。欄外の矢印は可聴音の発生が認められた箇所に対応させて示したものである。ブラウン管オシロスコープ上でのAE波形は負荷荷重の増大に伴って間欠的に現われ、破壊直前になると一層頻繁に発生してくる様子が認められた。

5.1 模型A

模型AのAE計測結果を図11に示す。負荷の初期段階においては数回の可聴音が認められ、これに対応した高いレベルのレートカウントの発生とトータルカウントの急増を生じている。これは観察の結果から、供試体の損傷に起因するものでなく、供試体と圧縮用治具等の整合に伴う音であると推定される。もう一つの供試体については供試体を支える

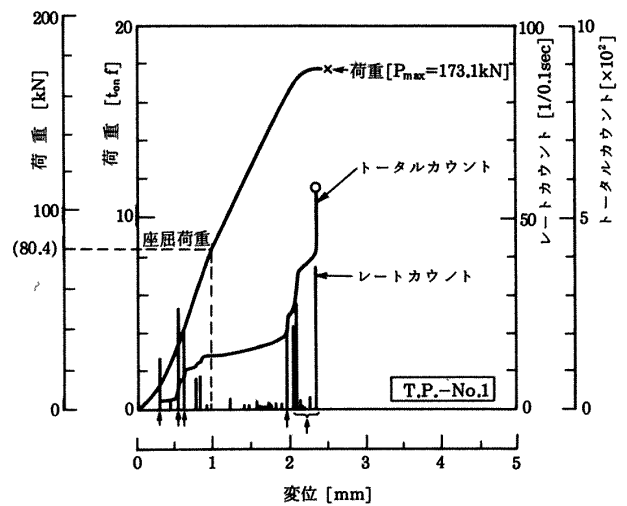


図11 模型AのAE計測結果

ナイフエッジの締付け等に注意を払ったところ、そのような音の発生がなかった。負荷荷重と供試体の変位はその後ほぼ線形な関係を保ち、AE信号もおだやかな推移を示している。AE信号の急増は供試体の変位が約2mmに達した時に生じているが、それと同時に2回ほど可聴音の発生も認められた。目視による外観検査では供試体の外板要素部に全体屈服変形が見られる程度で、特にCFRP自体の

層間剝離や破断等の損傷を認められなかった。さらに荷重を上昇させて 173.1 kN に至ると、供試体の変位が約 2.2 mm から 2.44 mm まで急増すると同時に突然大きな可聴音を発生して、破壊が圧縮荷重端部の近傍に生じた。供試体の破壊状況は図 12 に示すが、3 本の補強材ウェブ部上下 6ヶ所に局所的な“くの字”変形および層間剝離している様子が観察された。

三本木ら¹⁰⁾は同じ供試体について行なったひずみ計測の結果から、外板要素の局部座屈が 80.4 kN の荷重で起こり、その時の最大ひずみ値が約 1,800 μ であると報告している。実際、供試体の外板要素はこの荷重を越える付近から顕著な変形が認められたが、除荷することによって試験前と同じ状態に戻ることもわかった。仲佐ら¹¹⁾は AE 法を“切欠き付ステンレス鋼バンド管に対する曲げ試験”に適用して、局部座屈によって AE 計数値(トータルカウント)の増大することを示している。AE 法が CFRP の座屈現象の検知に対しても有用であるかど

うか興味あるところであったが、結果としては図 11 に見られるように座屈荷重に対応した AE 信号を検出できなかった。FUWA ら¹²⁾は CFRP 一方向材の引張り試験から、ひずみが約 0.45 % で繊維破断の急増と AE トータルカウントの増大することを報告している。このことを考慮すれば、模型 A は外板要素が座屈荷重に達しても最大で約 1,800 μ のひずみ値であったため、CFRP 自体に局所的な破壊に至るような損傷を受けなかったものと推定される。

AE 法は負荷の最大荷重の 96.3 % に相当する 166.7 kN (供試体の変位にして約 2 mm の箇所)で、可聴域の破壊音を伴った高いレベルのレートカウントの発生およびトータルカウントの急上昇する点が認められ、模型 A に対する破壊の前兆を検知していたものと推定される。

5.2 模型 B

模型 B の AE 計測結果を図 13 に示す。引張り荷重を受けている模型 B の“荷重～変位”曲線は圧縮

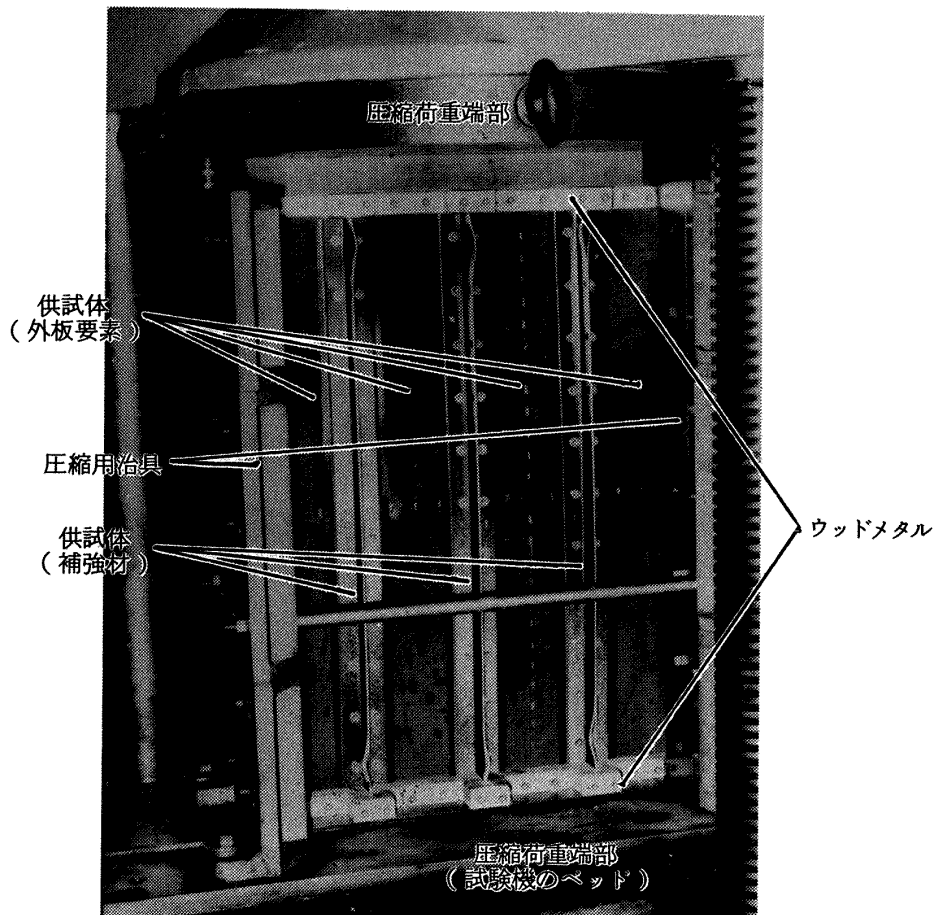


図 12 模型 A の破壊状況

荷重を负荷した模型 A の場合と同様に、ほぼ線形な関係となっている。荷重の上昇に伴って比較的小さいレベルの AE の発生を捕らえているが、最も高いレベルのレートカウントの発生は供試体の変位が約 3.1mm に達した時であった。これは供試体が引張り軸に対して非対称な形状であるため、外板と補強材を 8 本の皿頭型ファスナーで結合している標定部が荷重の上昇にともなって弓状に変形し、結合部の最上部に位置するファスナー頭部が 1 ケ所だけ外

板要素を突き抜けていたことと対応していた。さらに荷重を上昇させて 33.3kN に保持している時、供試体の変位が約 3.6mm から 3.8mm まで急増して、標定部に残存しているファスナー皿頭部が順次外板要素を突き抜けていった。トータルカウントは変位の増加に伴って急増し、また“ミシッ”という可聴音の発生も頻繁に認められた。最終的には外板要素と補強材とが 2 つに分離した。供試体の破壊状況を図 14 に示す。同図(b)に見られるように、補強材

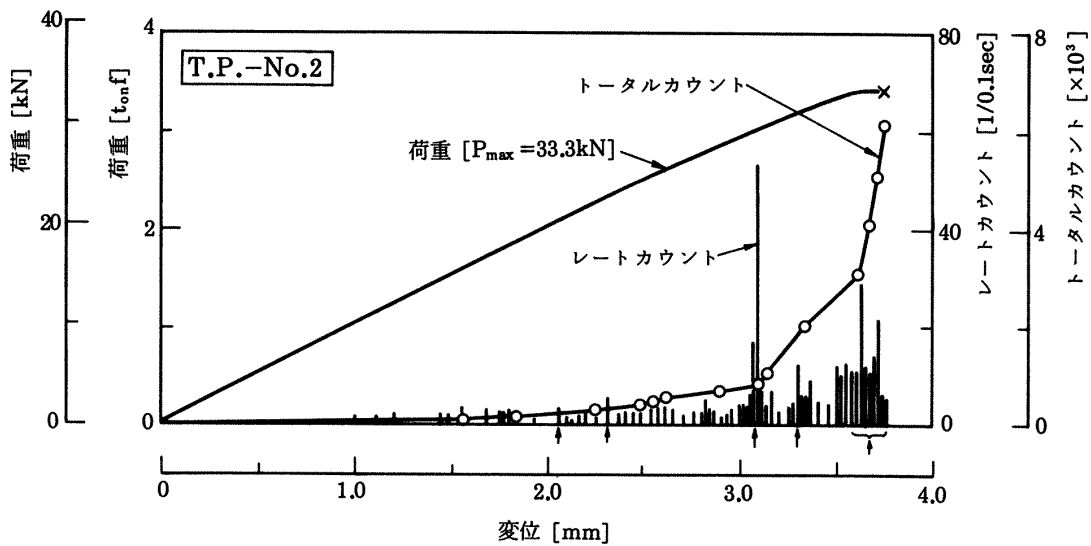


図 13 模型 B の AE 計測結果

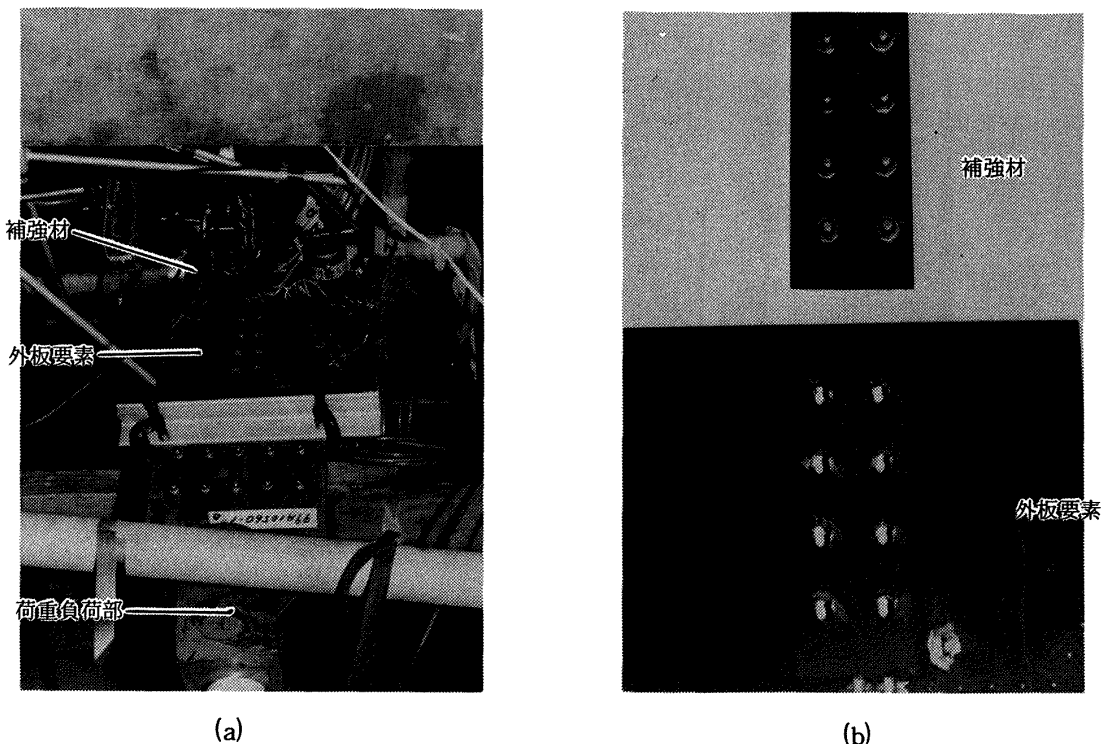


図 14 模型 B の破壊状況

の標定部はファスナー、ナットいずれも試験前と同じ状態を保っているのに対して、外板の方はファスナー孔が楕円状に引き伸ばされており、かつ孔縁の上側がいずれもファスナー皿頭部の突き抜けによって損傷している様子が観察される。

AE法は負荷の最大荷重の 88.3 % に相当する 29.4 kN (供試体の変位にして約 3.1mm の箇所) で、模型 B に対する破壊の前兆を検知していたものと推定される。

5.3 模型 C

模型 C の AE 計測結果を図 15 に示す。模型 C の“荷重～変位”曲線は他の模型と同様に、ほぼ線形な関係を示している。図 15 において、最も高いレベルのレートカウントは供試体の変位が約 0.8mm

の箇所、負荷荷重にして 15.7kN の時に発生しており、トータルカウントも急増している。その後、AE は供試体の変位にして約 1.0mm と 1.15mm の 2ヶ所で高いレベルのレートカウントを発生したが、トータルカウントで見ると比較的小さな推移を示している。トータルカウントの急増は供試体の変位が約 1.2mm の所でも見られた。さらに荷重を上昇させて 25.5kN に保持している際に、可聴音を伴って供試体は破壊した。供試体の破壊状況を図 16 に示す。桁要素については外観上まったく損傷を認められないが、リブ要素については同図(b)に示されているように、結合部近傍の平板ウェブ部の上方が破壊起点となって、波形ウェブ部へ向けて約 45° の角度を保ってき裂の進展している様子が観察される。多田¹³⁾は同じ供試体について行なったひずみ計測

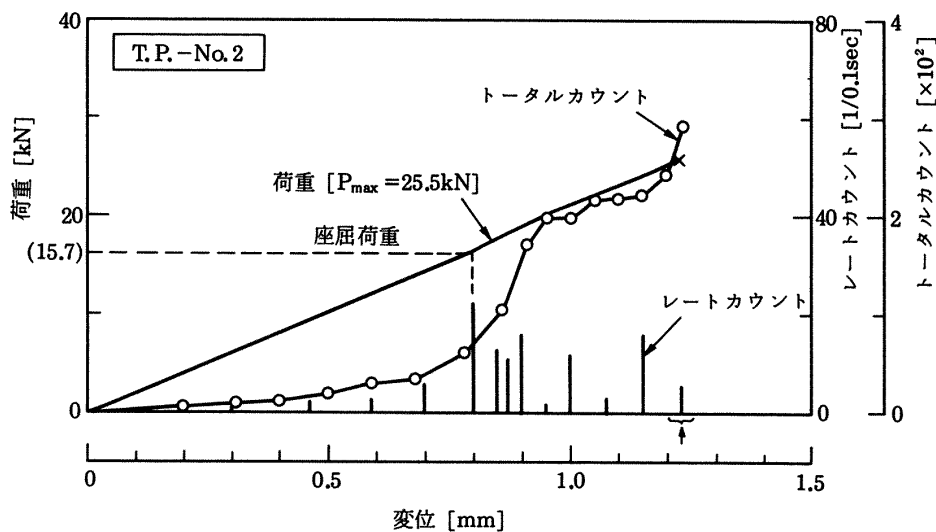
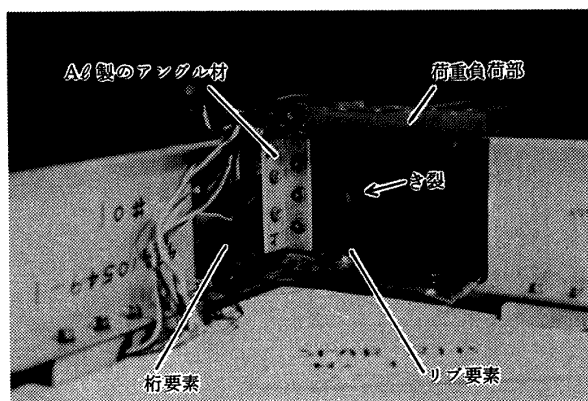
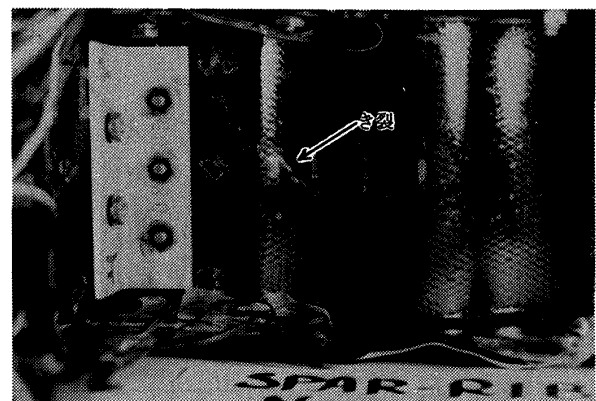


図 15 模型 C の AE 計測結果



(a)



(b)

図 16 模型 C の破壊状況

の結果から、15.7kNの荷重でリブ要素ウェブ部に座屈による面外変形が生じ、その時の座屈近傍における最大ひずみ値が約5,000 μ であると報告している。図15はこの座屈荷重とAE信号（供試体の変位にして約0.8mmの箇所）とのよい一致を示している。これは前述の模型Aの場合と異なり、FUWARの報告と得られたひずみ値が約5,000 μ であったことを考慮に入れると、座屈直前あるいはそれと同時にCFRP自体に損傷が起こり、それに伴ってAEを発生したものと考えられる。

AE法は負荷の最大荷重の61.5%に相当する15.7kN（平板ウェブ部の座屈荷重に一致）で、模型Cに対する破壊の前兆を検知していたものと推定される。

5.4 模型D

模型DのAE計測結果を図17に示す。“荷重～変位”曲線は他の模型と同様に、ほぼ線形な関係が得られた。この模型では負荷の初期段階から破壊荷重に至るまで比較的高いレベルのレートカウントを頻りに捕らえており、トータルカウントの急増も供試体の

変位にして約1.5mmと1.8mmの2ヶ所で認められた。供試体に顕著な変化が現われるのはトータルカウントの急増する点に対応した28.3kNの荷重に達する頃からで、供試体の変位が約1.5mmの所である。標定部は最上面に外板要素、次いで桁要素フランジ部、金具ダミーの順序になっており、これを8本のファスナーを用いて結合している。そして、さらに桁要素の波形ウェブと金具ダミーがA θ 製のアングルをそれぞれ四隅に配置して1ヶ所3本のファスナーで結合している。供試体の破壊状況を図18に示す。同図(a)には最上面に位置する外板要素が28.3kN付近の荷重で局所的な盛り上がりによって、フランジ部との間に空隙を生じた様子が見られる。それに伴ってファスナー皿頭部が外板要素に食い込んで、ファスナー孔8個のうち手前内側2ヶ所の孔まわりおよびその下に位置するフランジ部に損傷を与えている。その後、ファスナー孔まわりに損傷を受けた位置のファスナー2本も破断した。同図(b)はさらに荷重を上昇させると、波形ウェブと金具ダミーを結合している3本のファスナーのうち2本が、上側から順次破損して最終破壊に至った様子を示し

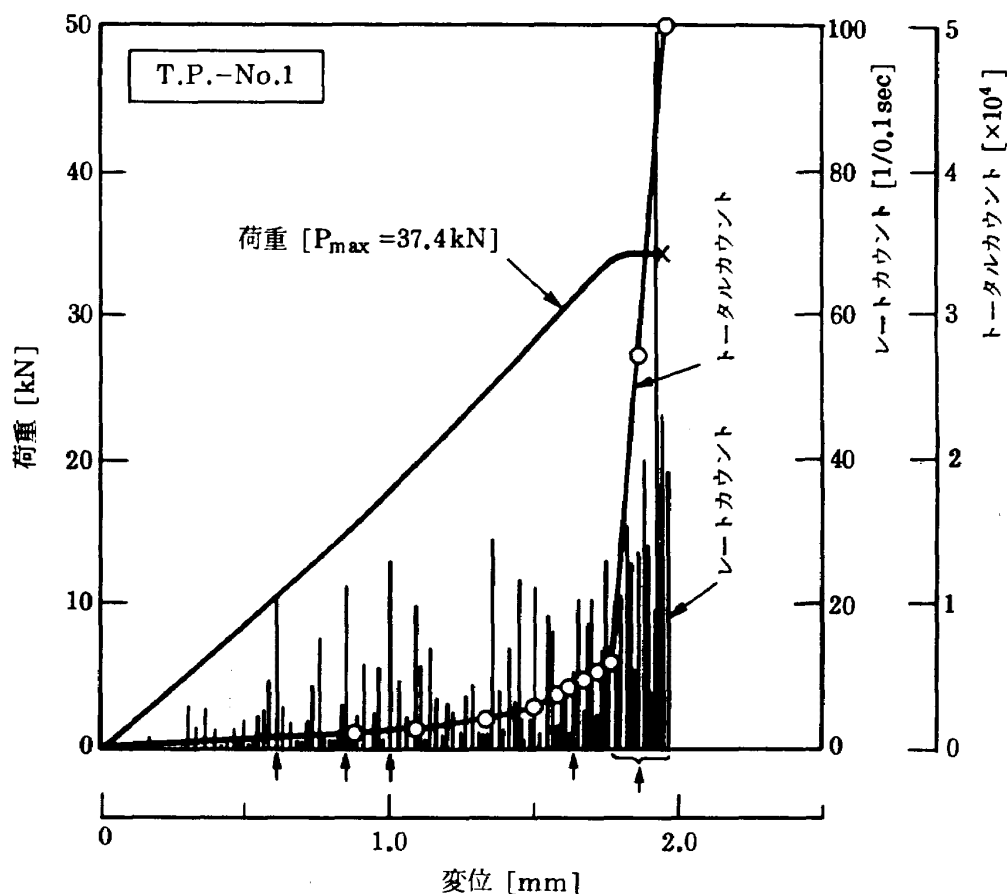


図17 模型DのAE計測結果

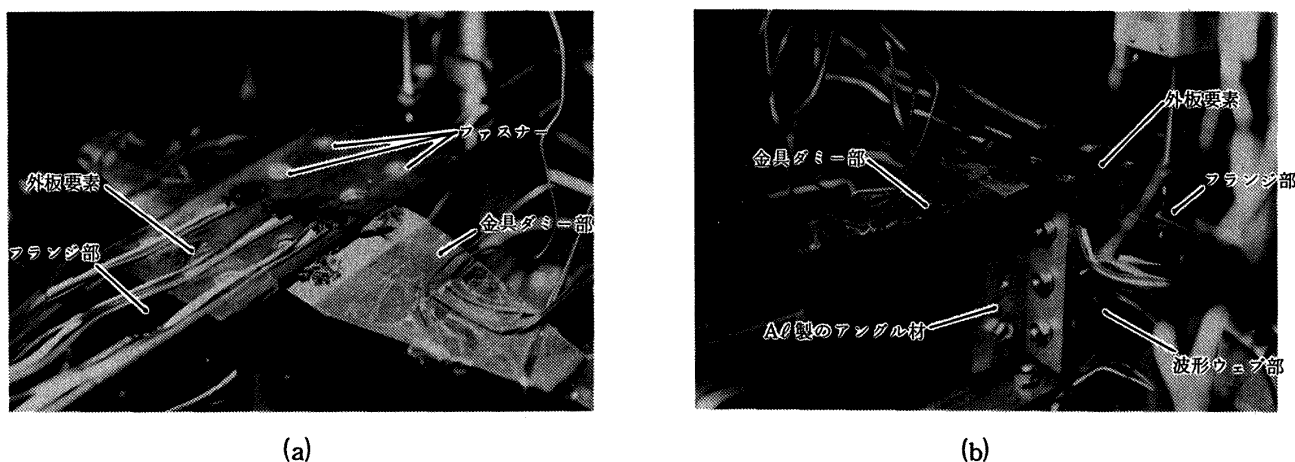


図 18 模型 D の破壊状況

ている。

これらの損傷順序と AE 信号との正確な対応関係を示すには現在のところまだデータが十分に整っていないため、ただちに結びつけて論じることができない。しかし、供試体が可聴音を発生する以前の段階および可聴音と次に発生する可聴音の間にも AE 信号を検出していることから、AE 法はファスナー、ファスナー孔まわりあるいはフランジ部の内部損傷過程を捕らえていたものと考えられる。

AE 法は負荷の最大荷重の 75.7% に相当する 28.3 kN (供試体の変位にして約 1.5mm の箇所) で、模型 D に対する破壊の前兆を検知していたものと推定される。

6. 結 論

ここでは 4 種類の CFRP 構造要素模型の静強度試験に AE 法の適用を試みたが、その結果を要約すれば次のようになる。

(1) 模型 A, B, C および D に対する局所的な損傷や最終的な破壊を生じるかどうかの判断はレートカウンターの発生頻度ならびに発生レベルの大きさ、トータルカウンターの急増する点から、ある程度の推定をすることができる。したがって、AE 信号のレートカウントおよびトータルカウントは AE 特性の基本的なパラメータになるものと考えられる。

(2) AE 法は、模型の形状や負荷方式などによって異なった破壊挙動を示すものに対しても、各々の破壊経過を現象論的に解釈する上で有用な資料を提

供してくれる。

(3) AE 法は模型 A のように弾性変形による座屈を検知できないが、模型 C のように座屈に伴って CFRP 自体に損傷を生じる場合には検知できる。

(4) 負荷中に発生する可聴音は AE のレートカウンターの急増と良い対応を示している。

(5) AE 法は模型 A, B, C および D に対して、それぞれ破壊荷重の 96.3%, 88.3%, 61.5% および 75.7% に相当する負荷で、破壊の前兆を検知していたものと推定される。

7. あとがき

この試験は昭和 55 年 3 月から 56 年 4 月まで、模型 A の座屈試験については機体 1 号館実験場、その他の模型については調布分室実機強度試験場において実施したものである。CFRP 構造要素模型の一連の静強度試験に AE 法の適用をするに際して、種々のご配慮を下された機体第一部の竹内和之部長をはじめ、同部複合材研究室古田敏康室長、実機強度研究室小野幸一室長、機体第二部の強度研究室多田保夫室長、構造研究室三本木茂夫室長、疲労研究室飯田宗四郎室長に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Korb, L.J.; Composite Materials, Vol. 3 ('72), 69.
- 2) 日本航空宇宙工業会, “航空宇宙技術動向”, No.10, ('78-3), 16/17.

- 3) 中井暎一；“最近の航空宇宙における複合材構造(その1)”，日本航空宇宙学会誌，第28巻，第319号，('80-8)，11/23.
- 4) 機体第一部・機体第二部；“炭素繊維複合材(CFRP)桁/リブ要素模型試験”，航空宇宙技術研究所報告，TR-663，('81-4).
- 5) “炭素繊維複合材(CFRP)部分構造模型試験”，航空宇宙技術研究所報告に投稿予定.
- 6) David O.Harris；“A Review of Aerospace Applications of Acoustic Emission”，ISA-ASI 76237，('76)，225/234.
- 7) Charles P.Wright；“Development of an Acoustic Emission Inspection Technique for Hydraulic Components with Moveable Parts”，ISAASI 76238，('76)，235/246.
- 8) 林洋一，角田義秋，中井暎一；“炭素繊維複合材料(CFRP)桁/リブ要素模型試験におけるアコースティック・エミッション計測”，航空宇宙技術研究所報告，TR-707，('82-4).
- 9) 尾上守夫 外著；“アコースティック・エミッションの基礎と応用”，('76-12).
- 10) 三本木茂夫，戸田勲，中井暎一；“CFRP製補強板の座屈強度”，日本航空宇宙学会誌，第30巻，第338号，('82-3)，11/17.
- 11) 仲佐博裕，永田敬；“配管の疲れ損傷追跡へのAE法の適用について”，圧力技術，13(2)，('75)，72/79.
- 12) M.FUWA, A.R.BUNSELL, B.HARRIS；“Tensile Failure Mechanisms in Carbon Fiber Reinforced Plastics”，J.of Materials Science，('75-10)，p.2062.
- 13) 多田保夫；第5回複合材結合構造研究会資料，('82-4).

航空宇宙技術研究所資料468号

昭和57年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町12三河ビル
