

ISSN 0452-2982
UDC 620.179.18:
534.6:
539.4

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-503

AEによる構造部材の健全性評価のための予備試験

祖父江 靖

1983年4月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

AEによる構造部材の健全性評価のための予備試験*

祖父江 靖**

1. まえがき

Acoustic Emission(以下AEと略す)は、転位の運動およびき裂の進展等における弾性エネルギーの解放によって生ずるAE波(弾性波および音波)を検出するものである。AEの活動度は試験体の形状に影響される力学因子(平均応力, 平均歪状態)と材料組織に影響される材料因子とに依存し, AEの大きさは, AE発生源の変形量と変形に伴う応力の降下に要する時間の長短によって支配されるといわれている。⁸⁾

AE発生源から生じたAE波は, 縦波および横波となり, さらに波が境界面に反射して表面波となって伝搬する。小型の試験片では, 多くの反射が繰返され多重反射波形となる。このためAE波形は試験片の形状や固有振動によって影響され, AE変換子の周波数応答特性によっても大きな影響を受ける。

AE特性を求めるパラメータとしては, 計数率, 計数総数, 事象率, 事象総数, 波形, 周波数スペクトラム, エネルギー, 振幅, 振幅分布, 変換子への到達時間差等がある。本報告では, 振幅分布で損傷の型, 事象数の発生挙動で損傷の頻度, 変換子への到達時間差で位置標定等三つのパラメータの計測を行ってAE特性を調べた。

AE法の適用分野としては, AEが材料内の変化を敏感にかつ動的に検出できるため, 大型構造物の健全性評価法として圧力容器に実用化されている。また, 金属材料の塑性, き裂の挙動等材料強度に関係した多くの研究がある。航空機用複合材(FRP)の負荷による損傷過程の追跡,^{4),5),6)} 耐火物の熱衝撃

による損傷過程の追跡等AE法をモニターとして用いる研究³⁾も行われている。

原動機構造研究室では, チタン合金, 複合材, ニューセラミック等を材料とした航空原動機用部品の健全性の確認方法としてAE法が適用できるか検討している。本報告は, AE法による健全性評価の予備試験として, 単純な形状の試験片を用いて静的引張試験によるAE特性を求めようとするものである。試験片材料はAE発生頻度の高い高力アルミニウム合金と低いS45C鋼を用いた。試験片の形状は中央部の形状が異なった三種類のものである。これらの試験片を用いて材料の塑性変形領域の広狭および変形量など塑性変形状況の細かな変化によるAE発生挙動や振幅の違いを求め, 試験片の材料や形状の違いによるAE特性の差異を求めた。

S45C鋼は構造材として一般的なものであるが, AE発生頻度が低い場合塑性変形状況の細かな変化をAE法で検出することが困難であった。そこで素材の場合, 焼入して表面に酸化被膜のある場合, 焼入後酸化被膜を除去した場合, 素材の表面に接着剤(シアノアクリレート系)を塗布した場合, 酸化被膜のある焼入材の表面に接着剤を塗布した場合など計測条件を変えて, それぞれのAE特性を比較した。

2. AE装置とAE波の計測

試験に用いたAE計測装置(DUNEGAN/ENDEVCO社製)のブロックダイヤグラムを図1に, 各部の仕様を表1に示す。AE変換子は圧電型トランスジューサーを用いている。なお, トランスジューサーは二種類のものを用いた。試験片表面に酸化被膜などの付着物がない試験に用いたトランスジューサーの周波数応答特性を図2の(a)に, 試験片表面に酸化被膜, 接着剤などを塗布した試験で用いたトランスジュー

* 昭和58年3月9日 受付

** 原動機部

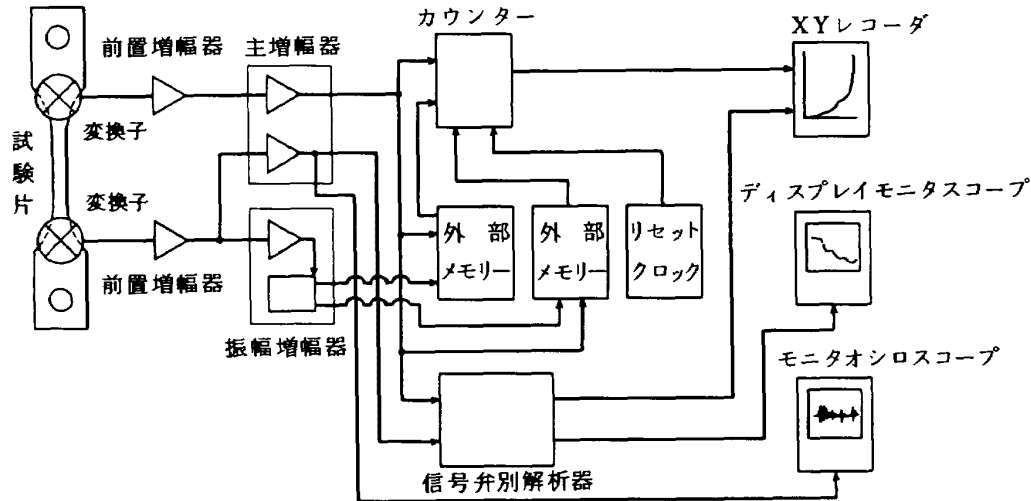


図1 AE計測装置のブロックダイヤグラム

表1 AE計測装置の各部仕様

前置増幅器	利得 40 dB 周波数特性 20 kHz ~ 2 MHz
主増幅器	利得 0 dB ~ 60 dB 連続可変 しきい値 1 V 周波数特性 20 kHz ~ 2 MHz
カウンター	カウント数 1 ~ 999,999 周波数特性 DC ~ 2 MHz 動作形式 { トータルカウント レイトカウント
リセットクロック	レイトカウント計測に用いる 0.1 sec, 0.2 sec, 1 sec, 2 sec, 10 sec, 30 sec 1 min, 2 min, 10 min, 20 min から選択
振幅増幅器	校正 前置増幅器からの入力 100 μ V を 0 dB とし, 入力信号の比を dB 表示する。 10 V ピーク入力で 100 dB 100 μ V ピーク入力で 0 dB 周波数特性 20 kHz ~ 2 MHz
信号弁別解析器	事象の識別のため diad tim, 50 μ sec, 100 μ sec, 1 msec, 10 msec から選択 機能 { 事象の位置標定 トランスジューサ間を 0 から 100 に区別し事象を標定する。 リングダウン計測による事象のカウント数の検出 事象における AE 波の最大振幅の検出 事象のパルス幅の検出 事象の時間を 10 μ sec 単位でカウントする。 雑音除去のための空間フィルター

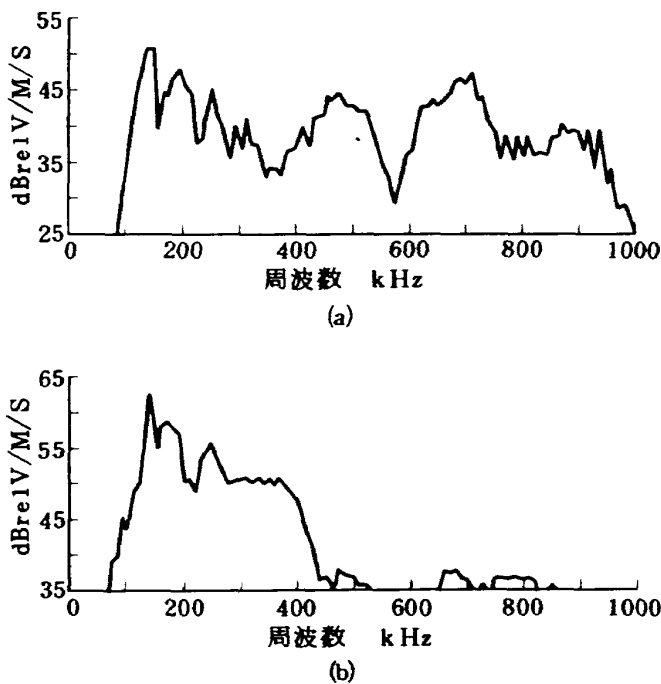


図2 トランスジューサの周波数応答特性図

サの周波数応答特性を図2の(b)に示す。試験片のAE波は、トランスジューサによって電気信号に変えられ20kHz~2MHzの広帯域フィルターを通り利得40dBの前置増幅器で増幅し主増幅器に入力される。主増幅器の周波数帯域は20kHz~2MHzである。ここでゲイン可変アンプにより零から60dBの範囲で適当なゲインを選択する。この主増幅器出力のAE波形は1Vのしきい値と比較され、これを越えたすべての波のサイクル数がデジタル表示(AE計数)される。この方法は、リングダウン計数法(図3の(a)参照)といわれるもので振幅による重みづけ法である。信号弁別器には4種の機能がある。AE信号を受信したとき一定時間(50μsec, 100μsec, 1msec, 10msecの内の適当な値)の不感時間を設定し、この時間内に次の信号を受信されない場合1事象と弁別する方法でdead time法(図3の(b)参照)と呼ばれる機能である。これは1事象のAE波を2チャンネルで計測し、信号の到達時間差からAE源の位置標定を行なう場合欠かせない機能である。この外に1事象のAE波形で、しきい値を越えたサイクル数をカウントする機能および1事象の持続時間を10μsec単位でカウントする機能がある。なお、空間フィルターを用いれば任意のAE発生源のAEパラメータを消去できる機能があり、外部雑音を除去す

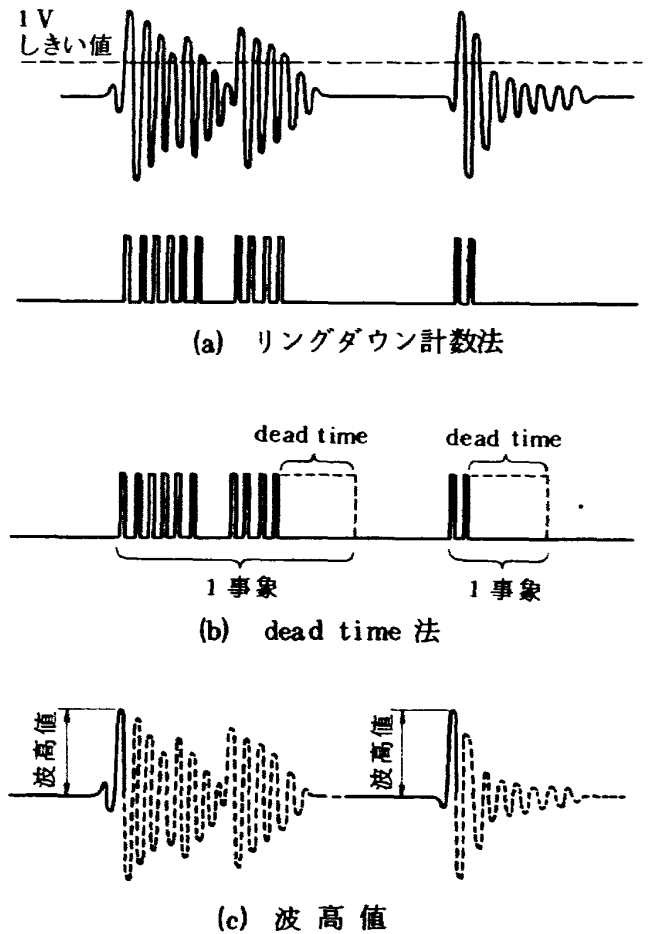


図3 AEパラメータ

ることができる。振幅検出器の機能は、対数増幅器によりAE波を対数変換し、1事象の最大振幅(図3の(c)参照)のレベルをdBで表示できるようにしたものである。このdB表示は前置増幅器からの出力電圧を校正したもので、100μVピーク出力のとき0dB、10Vピーク出力のとき100dBと校正されている。100μV以上の出力信号については、
$$\text{振幅 (dB)} = 20 \log \frac{V_{in}}{100 \mu V}$$
の関係がある。なお、振幅の分解能は1dBである。

3. 試験片と引張試験装置

材料および形状に違いがある場合、AE特性にどのような差異が生ずるか、AE発生頻度の高い高力アルミニウム合金と低いS45C鋼を用いて調べた。

図4に高力アルミニウム合金の寸法形状、図5にS45C鋼の寸法形状を示した。試験片の中央部が平行で特別な加工がされていない形状(1)、中央部に1φのキリ穴があり、最小断面積が形状(1)と同じになるようにした形状(2)、幅は平行で中央部の最小断面積が

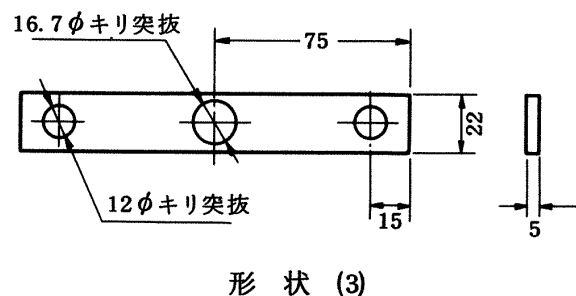
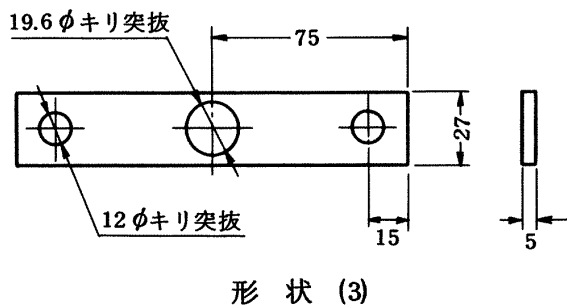
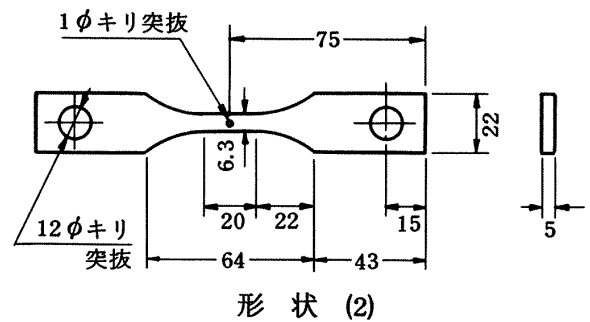
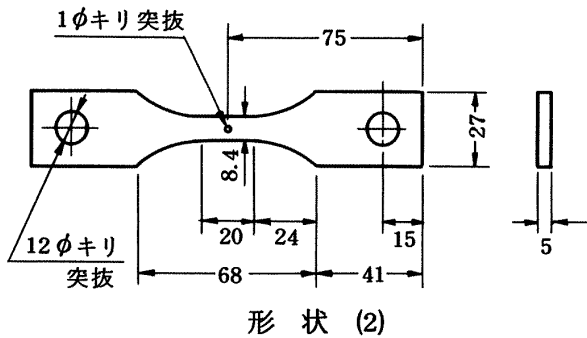
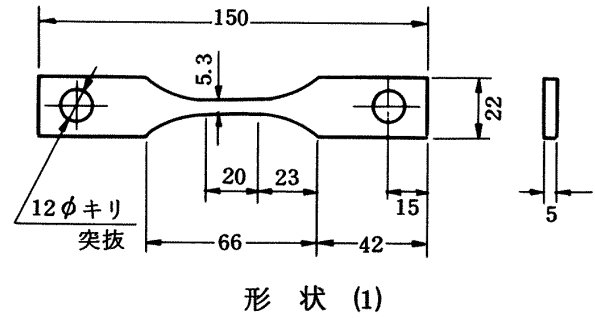
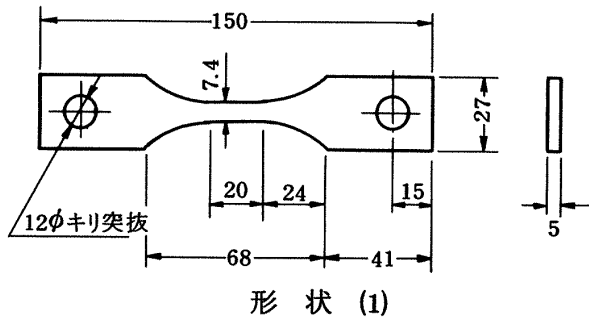


図4 高力アルミニウム合金の寸法形状

図5 S45C鋼の寸法形状

形状(1)と同じにするため、高力アルミニウム合金では19.6φのキリ穴、S45C鋼では16.7φのキリ穴を明けた形状(3)がある。また、試験片の左右には引張試験装置とピン接合するため12φのキリ穴を設けた。

ピンおよびピン穴には、カイザー効果を利用してピン接合部から発生するAE雑音を除去するため、予荷重を負荷することが行われる。本試験では、トランスジューサ間のAE源受感領域を空間フィルターを用いて任意に設定できること、また、ピン接合部から発生しているAE特性も調べる必要があるため、ピン穴には予荷重を負荷していない。なお、後述するようにピン接合部からの雑音は破壊まで絶えず発生しており、予荷重を加えることによって雑音を除去することはできないと思われる。

図6に装置全体、図7に試験片を引張試験機に取付けた写真を示す。引張試験機には、能力10 ton f

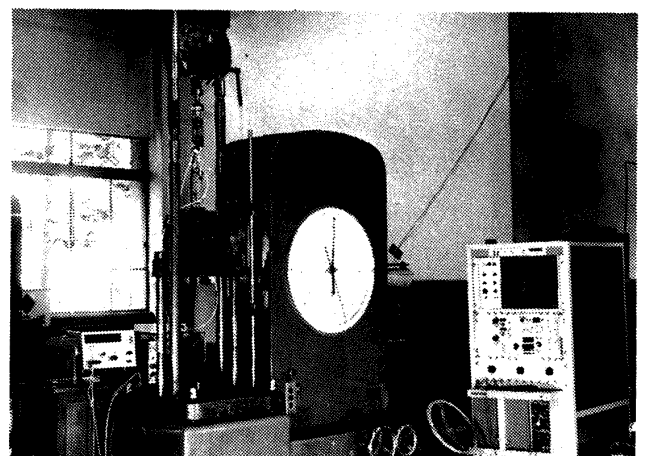


図6 AE計測状況

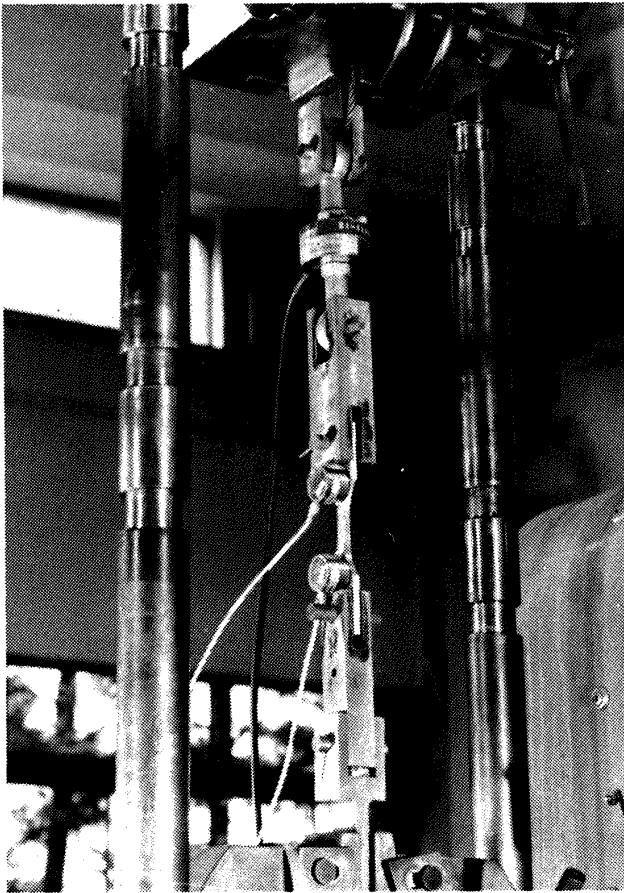


図7 試験片取付状況

のオルゼン式万能試験機(森試験機製)を用いている。

図8は引張試験機のチャックに取付けるチャック用治具およびロードセル、接続治具、試験片など引張試験を行なう場合の構成図を示したものである。引張試験機のチャック部にチャック用治具を挟む。チャック用治具とロードセル(最大能力2 ton f, 引張圧縮兼用)、ロードセルと接続治具、接続治具と試験片、試験片とチャック用治具の接合はすべてピン接合として、試験片にねじりや曲げが作用しないようにした。

上に述べた場合とは別に、試験片の表面に酸化被膜または接着剤など硬質の付着物のある場合のAE特性を調べた。AE発生頻度の高い材料では、硬質の付着物の影響を明瞭に区別できないためAE発生頻度の低いS45C鋼を用いた。焼入後酸化被膜を除去した焼入材と素材のAE特性、試験片の中央部に焼入による酸化被膜がある場合および接着剤を塗布した場合のAE特性を計測した。なお、この試験ではAE発生頻度が低い材料の健全性確認の手段とし

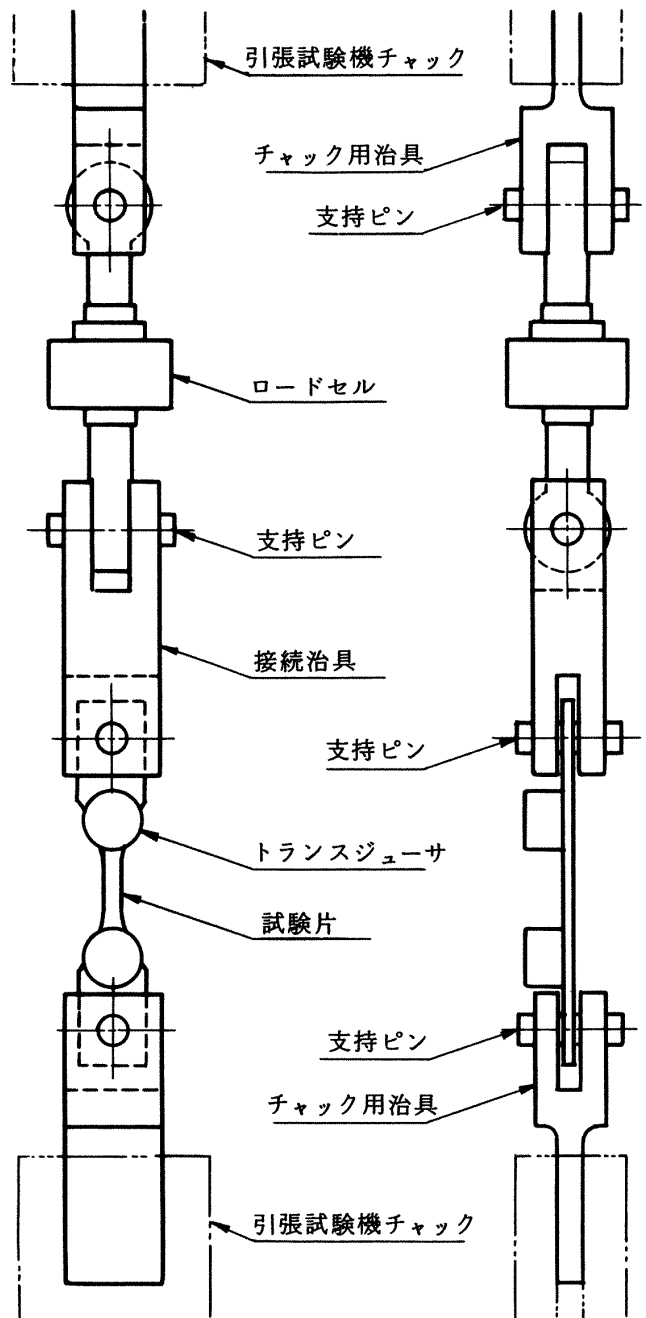


図8 引張試験構成図

て、硬質の付着物を利用した場合の有効性の検討も目的の一つであった。

4. 試験方法と結果

4.1 試験片の材料および形状が違う場合のAE特性

試験は、図4および図5に示す試験片を用いて図8のような構成で静的引張荷重を負荷し、これによって発生するAEを計測しようとするものである。試験片には、位置標定を行うため適当な距離をお

いて2個のトランスジューサを配置している。トランスジューサはシリコングリスを介して試験片表面に密着させ、ビニールテープで巻付けて固定した。試験にさきだち位置標定検定のため、装置付属の発振装置で試験片の任意の位置に擬似AE信号を入力し、擬似AB源の確認を行った。位置標定は、トランスジューサ間を100等分の座標値として表示する。本試験で用いたような比較的小型の試験片では、到達時間差計測における分解能など精度上正確な位置標定が困難であると思われたが、擬似AEによる結果では中央部で入力した場合と両トランスジューサ近傍で入力した場合には、図9-1に示すように十分な幅をもって区別できることを確認している。静的引張試験では荷重を増加する過程で20kgf、または40kgfごとに荷重を停止させ、試験片の伸びをダイヤルゲージで読み、計数総数および空間フィルター内で発生した事象総数を順次記録した。高力アルミニウム合金の試験片では、非常に多くのAE事象が計測されたので、塑性変形状況の変化によるAE発生挙動の違いを調べるため、事象総数が約2000個に達したときに荷重を停止し、除荷および再荷重を繰り返した。AE計測装置は、試験の開始から終了までに発生した計数総数、空間フィルター内で発生した事象総数、発生位置と頻度、振幅分布を記憶している。荷重の停止に際しては、除荷過程の雑音によるAE信号が入らないようにAEデータをホールドした。また、除荷に際しては50kgfごとに停止させながら試験片の戻り量をダイヤルゲージで計測した。

高力アルミニウム合金の形状(1)の試験片は、上述のような荷重を負荷し、除荷および再荷重する一連の静的引張試験を12回繰り返して1850kgfで破壊した。形状(2)、形状(3)は、それぞれ4回繰り返して1840kgf、1760kgfまで荷重した。このような荷重の繰り返しによって、最初の荷重過程と二回目の荷重過程のAE発生状況を比較し、カイザー効果の確認と発生状況の違いを調べた。なお、形状(1)では破壊までに至るAE特性の変化を調べた。

図9-1、図9-2、図9-3は高力アルミニウム合金の形状(1)の各荷重までにおけるAE発生源を発生分布図として示したものである。分布図は縦軸

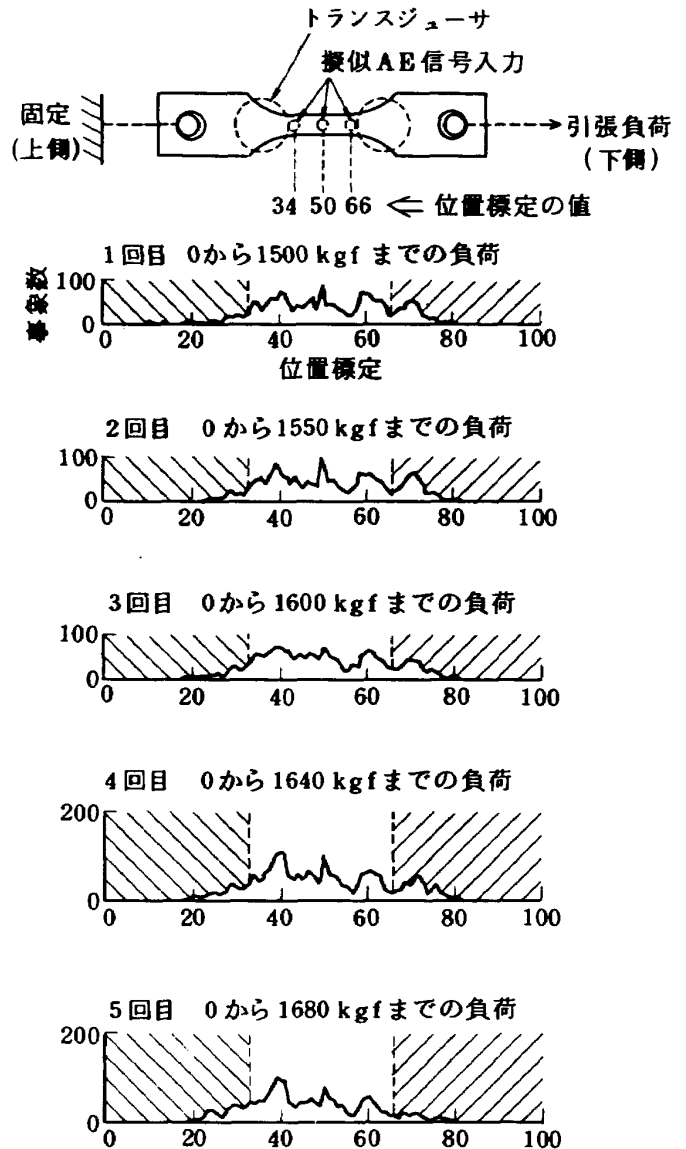


図9-1 高力アルミニウム合金の形状(1)のAE発生位置標定

に事象数、横軸に位置を示している。斜線部分は空間フィルター外で、これらの部分から発生したAEについてはAE特性から除外した。図9-1の上部の試験片形状に擬似AE入力位置と位置標定の結果を示してある。ここで34、66はトランスジューサ近傍における座標値である。この値より小さい場合、または大きい場合、図で示した擬似AE入力位置よりトランスジューサ側で発生していることを示している。なお、この場合の空間フィルターは34から66の範囲に設定した。

図9-1によると最初の1500kgfまでの荷重から得た結果では、平行部のAE発生がほぼ平均していることがわかる。この状況は1550kgf、1600kgfま

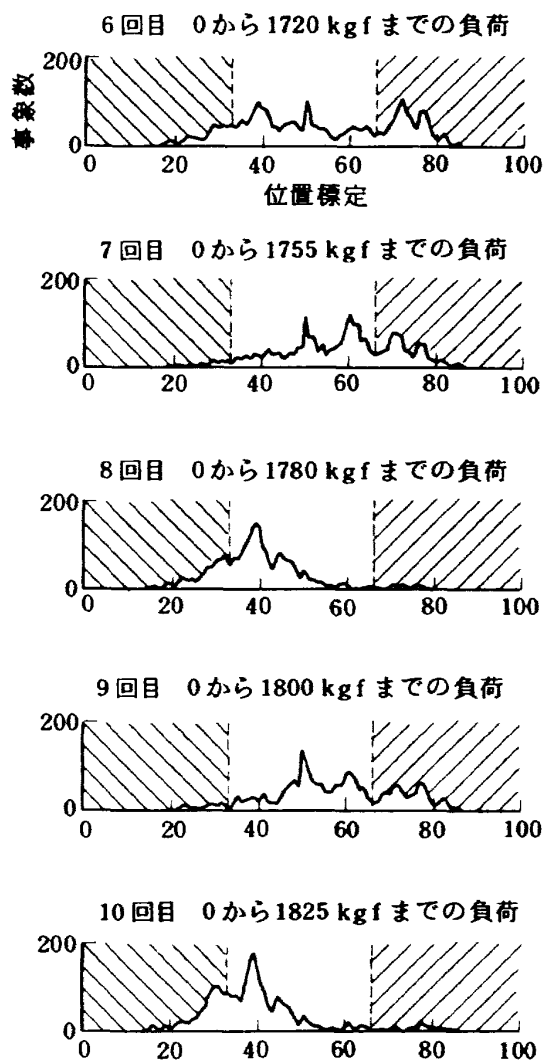


図9-2 高力アルミニウム合金の形状(1)のAE発生位置標定

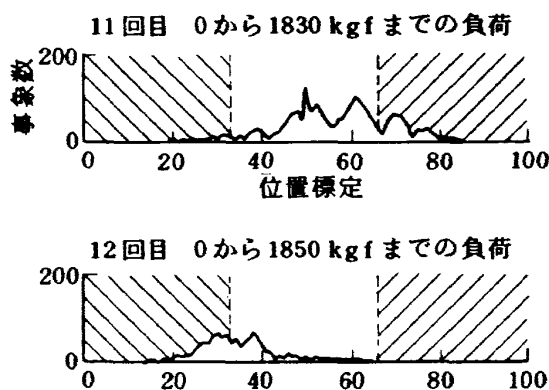


図9-3 高力アルミニウム合金の形状(1)のAE発生位置標定

での場合もほぼ同様な結果である。負荷が進み1640 kgf, 1680 kgf, 1720 kgf までの場合、位置標定40付近でAE事象が頻発していることを示している。この位置は、1850 kgfにおける破壊位置に対応していた。このように穴がなく応力集中が生じないような形状の場合、負荷の初期では一様にAEが発生する。しかし、ある程度負荷が進むと比較的弱い部分にAEが頻発する傾向が現われる。また、破壊に近くなる1755 kgfまでの負荷では位置標定50および60付近、1780 kgfまででは40付近、1800 kgfまででは50および60付近、1825 kgfまででは40付近、1830 kgfまででは50および60付近とAE頻発位置が交互に変動している。これらのことから高負荷になると転位のすべり、粒界割れなど塑性変形要因の頻発する領域が変動する傾向があることを示している。なお、破壊までの1850 kgfの負荷の場合には、破壊位置とAE発生位置は一致していた。後述の振幅分布で示すが、破壊直前では、き裂の進展や割れなどエネルギーの高いAEが頻発する傾向があり、破壊位置付近で発生していると考えられる。

位置標定における0位置および100位置のAEは、トランスジューサ間以外のピン接合部を含めたすべての部分から生じたものである。0位置および100位置のAEは、負荷の初期だけに発生するのではなく、表2に示すように負荷が増すと荷重増加分当りの事象増加率が高くなる傾向もある。なお、破壊直前の場合でも多くの事象が検出されている。このような状態から推察すると、AE計測では予荷重を負荷するだけで試験片の支持部やその他の治具からの雑音を除去することは非常にむずかしいと考えられる。従って、健全性の検査において雑音発生源を除去するために空間フィルターを適用しなければならないことがわかった。

図10は、高力アルミニウム合金の形状(2)の負荷までにおけるAE発生源を発生分布図として示したものである。図の様式は図9-1と同様である。この試験片には、中央部に1φのキリ穴がある。最初の1640 kgfまでの負荷では穴付近からのAEがそれ以外の部分に比較して著しく多い。1740 kgf, 1790 kgfまでと負荷の増加が進むと穴付近以外でも発生率が高くなる。小さい穴がある形状(2)のような場合には、

表2 高力アルミニウム合金形状(1)の位置標定における0位置, 100位置の事象数

負 荷 荷 重	0位置の事象数	100位置の事象数
1回目 0 から 1500 kgf までの負荷	507 個	605 個
2回目 0 から 1550 kgf "	388 "	480 "
3回目 0 から 1600 kgf "	425 "	564 "
4回目 0 から 1640 kgf "	433 "	570 "
5回目 0 から 1680 kgf "	381 "	503 "
6回目 0 から 1720 kgf "	479 "	598 "
7回目 0 から 1755 kgf "	341 "	438 "
8回目 0 から 1780 kgf "	437 "	545 "
9回目 0 から 1800 kgf "	310 "	412 "
10回目 0 から 1825 kgf "	354 "	460 "
11回目 0 から 1830 kgf "	206 "	313 "
12回目 0 から 1850 kgf の破壊まで	137 "	203 "

注：0位置および100位置の事象は、トランスジューサの一方だけにAE信号を検出し、他方には検出しなかった場合である。

負荷の初期に穴付近の応力集中によってAEが頻発するが、塑性変形が進行すると周囲に塑性領域が広がり相対的にAE発生頻度が平均化されてくる。このような結果から、部品に応力集中が生じる小さな傷など欠陥部分が存在する場合には、比較的低い負荷を加えることによって、その場所を特定できることを示唆している。また、1840 kgf までのAE発生分布図ではほぼ均等に発生しており、形状(1)の初期の負荷の場合と同様な傾向を示している。なお1840 kgf までの試験終了後1φのキリ穴部の形状を計測したところ、長径1.06 mm、短径0.96 mmの長円形になっていた。このような変形が生じたことは塑性変形が相当進んでいることを示している。

図11は、高力アルミニウム合金の形状(3)の各負荷までにおけるAE発生源を発生分布図として示したものである。図の様式は図9-1と同様である。この試験片は27 mm幅の中央に19.6φのキリ穴があり、周囲に比較して中央部が著しく弱い。AE発生分布図は、最初の1480 kgf までの負荷では、形状(2)と

同様に最小断面位置付近から頻発している。1600 kgf、1670 kgf、1760 kgf までと負荷の増加が進むと順次最小断面周辺からのAE発生が増加する。なお、負荷の増加が進んでも中央部からのAE発生は他の部分と比較して依然顕著である。このように、試験片に著しく弱い部分がある場合、負荷の初期からAE発生位置分布図によって特定できる。また、この位置は形状(2)のように途中で不明確になることはなく、最終破壊まで表示されると考えられる。1760 kgf までの試験終了後19.6φのキリ穴を計測したところ、長径20.05 mm、短径19.25 mmの長円形となっており、最小断面部の形状はくびれていた。以上述べたように、位置標定によるAE発生位置分布図で試験片形状(1)、(2)、(3)の違いを区別できる。従って、健全性の確認法としてAE計測を用いる場合、位置標定は重要なパラメータとなる。

図12に高力アルミニウム合金の形状(1)の支点間変位に対する事象発生累計を上半に、負荷荷重を下半に示した。なお、最初の負荷を実線、二回目の負荷

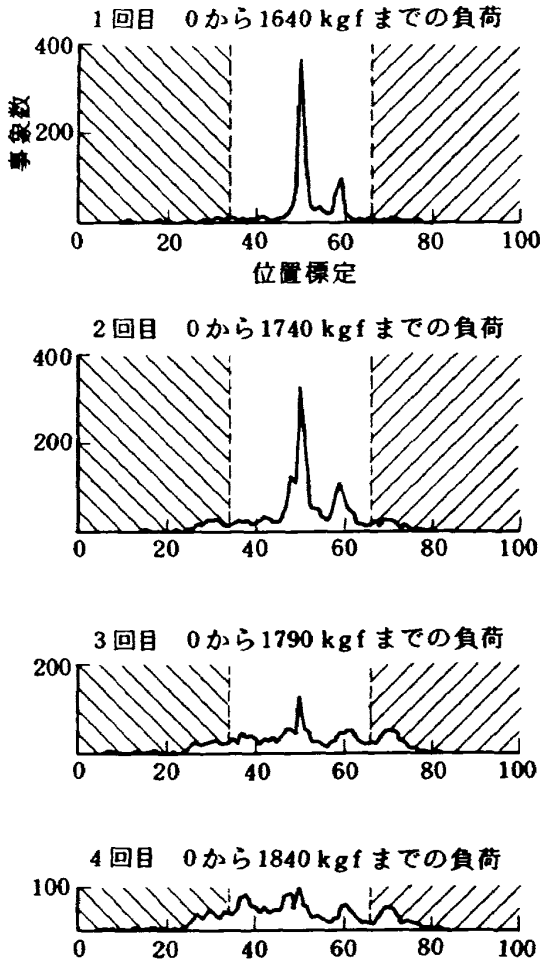
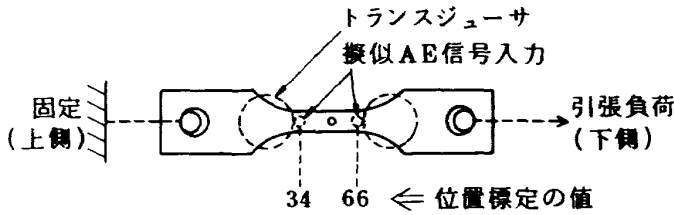


図10 高力アルミニウム合金の形状(2)の AE発生位置標定

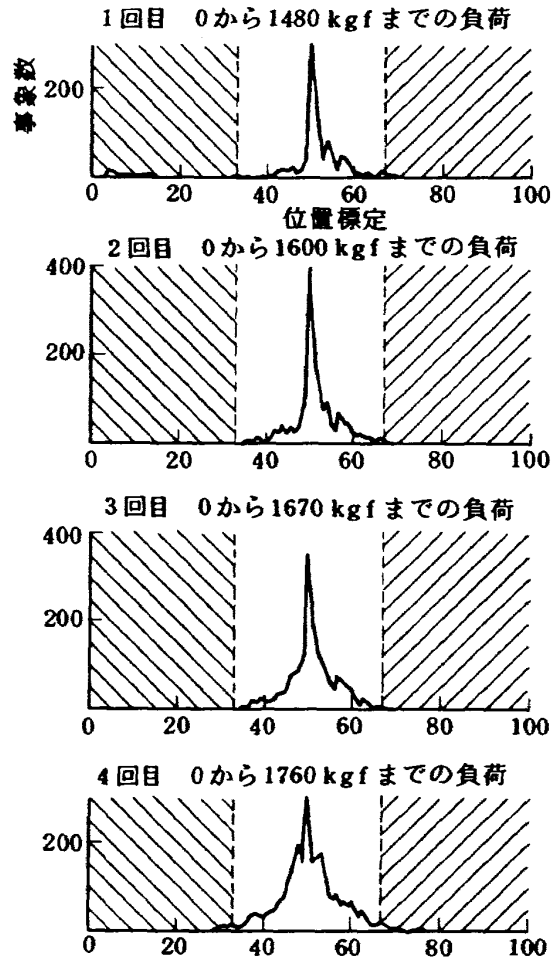
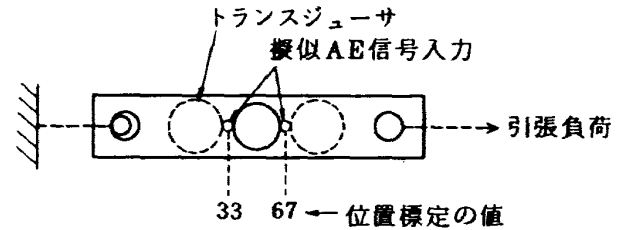


図11 高力アルミニウム合金の形状(3)の AE発生位置標定

を破線で示した。最初の負荷では、荷重 850 kgf で支点間変位 0.46 mm のとき 3 個の事象が発生した。この荷重は、下半に示すように比例的増加域内であり、破壊荷重の約 46% の負荷である。従って、850 kgf の AE は転位の発生など初期の塑性変形を検出したと考えられる。なお、1100 kgf から 1350 kgf までは塑性変形が明らかに認められるが AE 発生は僅かである。1400 kgf 以上、破壊荷重の約 76% 以上になると頻発するようになる。2 回目の荷重と変位の関係は、1 回目の除荷過程と同様な軌跡となるが、塑性変形が進展すると 1 回目の荷重と変位の関係を延長するような形で変化する。1 回目の最大負荷は

1500 kgf であるが、2 回目の初めの事象発生は 1350 kgf であり、前歴より低い負荷でも僅かな AE の発生が認められる。このような現象を生じるのは、負荷を除去すると組織の回復が多少行なわれて、次の負荷に際しては前回の最大負荷以前でも転位等が生じる場合もあるためと考えられる。

図13に形状(1)の負荷荷重に対する AE 事象総数を上半に、計数総数を下半に示した。なお、事象数はトランスジューサ間で発生した AE を計測対象とするが、計数は発生した全ての AE を計測対象とする。1 回目の計数は実線で示したものであるが、450 kgf において始めて記録した。これに対して、空間フィ

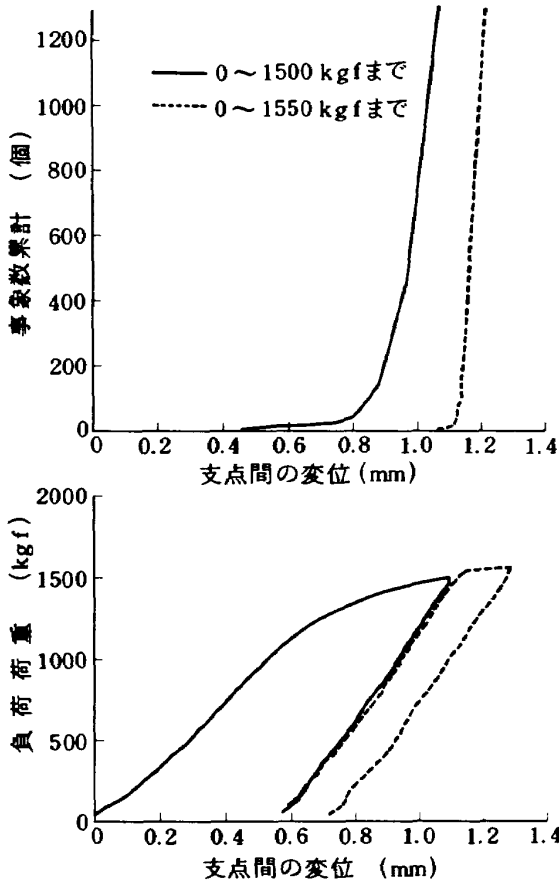


図12 高力アルミニウム合金の形状(1)のAE計測

ルター内の事象発生は 850 kgf で初めて記録した。従って、450 ~ 850 kgf で発生した計数総数は、機械的雑音を含んだ支持部等からの AE を検知したものである。2 回目の計数総数は 1300 kgf から発生し始め、1530 kgf 以上になると急増している。このように、予荷重を負荷することは支持部等の雑音除去に有効であるが、前回の最大荷重より低い負荷でも発生することがあり、完全に雑音を除去することはできない。なお、負荷荷重に対する AE 事象総数と計数総数の増加傾向は類似しており、AE の急増する点も一致している。

図14, 図15は高力アルミニウム合金の形状(2)の場合、図16, 図17は形状(3)の場合の形状(1)における図12, 図13と同じ内容を示したものである。支点間の変位と事象の発生数の関係は形状の違いで明らかに差異がある。形状(1)では事象の発生は緩やかに増加するが、ある変位を越えると急増する。形状(3)は発生直後から遡増している。形状(2)はこの中間の増加傾向を示している。このような事象の発生挙動の違いは、形状による応力分布の差異を示していると考

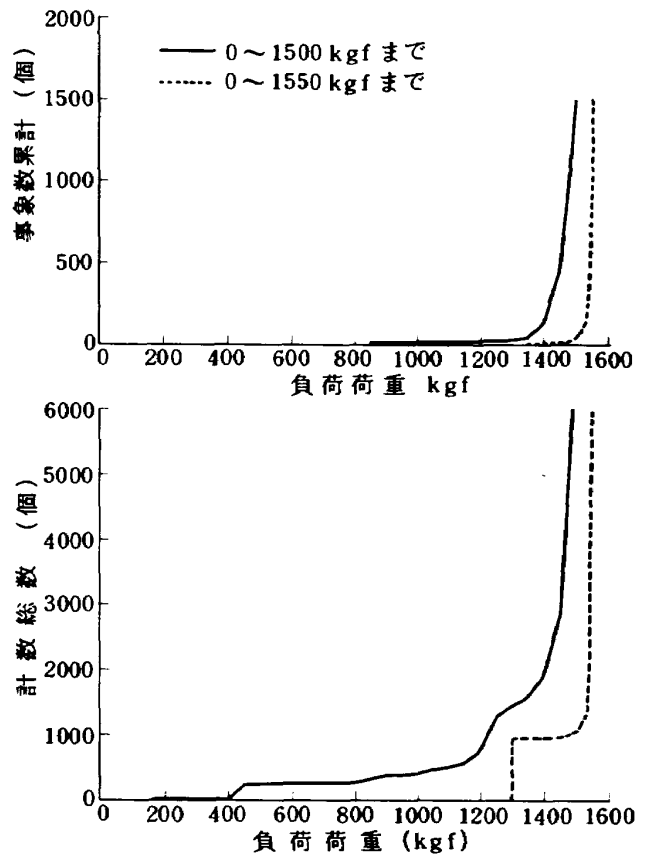


図13 高力アルミニウム合金の形状(1)のAE計測

えられる。また、負荷荷重と AE 事象総数の関係、計数総数の関係も同様な傾向を示した。

図18は、高力アルミニウム合金の形状(1)の振幅分布を示したものである。この振幅分布は空間フィルター内で発生した AE 事象の最大振幅を dB 表示したもので、横軸には最大振幅、縦軸には事象数を示す。事象数は振幅の等しい事象とその振幅より高い振幅の事象を累積した値である。

AE の振幅の大きさは、物体内の変位に伴う不安定状態から安定状態に移るとき開放されるエネルギーの大きさおよび状態変化に要する時間の長短に関係するといわれている。転位または小さなすべりなどでは低振幅の AE が発生するが、粒界割れ、き裂の発生、き裂の進展などでは高振幅の AE が発生すると考えられる。なお、最大振幅 V_p と $V_p + dV_p$ との間での AE 事象数 $n(V_p)$ には $nV_p dV_p = n_0 V_p^{-m} dV_p$ 、 $\log n(V_p) = -m \log V_p + \log n_0$ の関係式が比較的広い振幅領域で成立し、この関係は両対数で表示すると負こう配 m の直線分布となる¹⁾ このこう配 m は材料の変質や劣化に敏感に影響するといわれている。

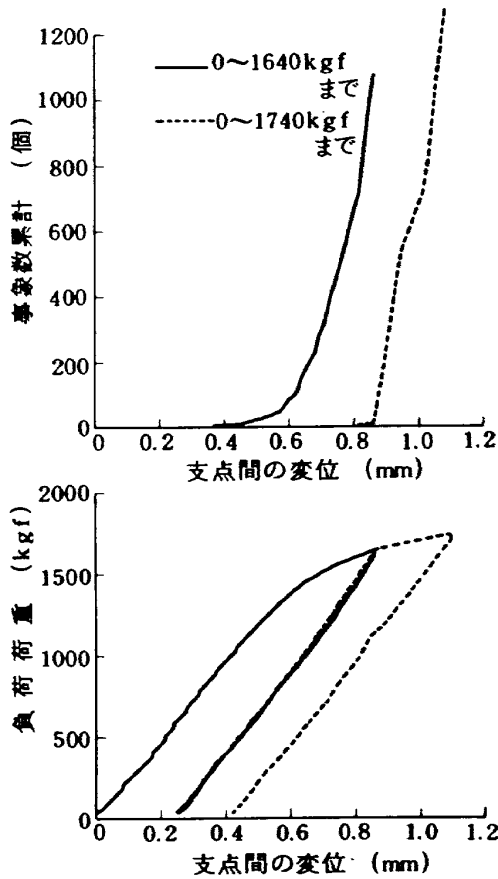


図14 高力アルミニウム合金の形状(2)のAE計測

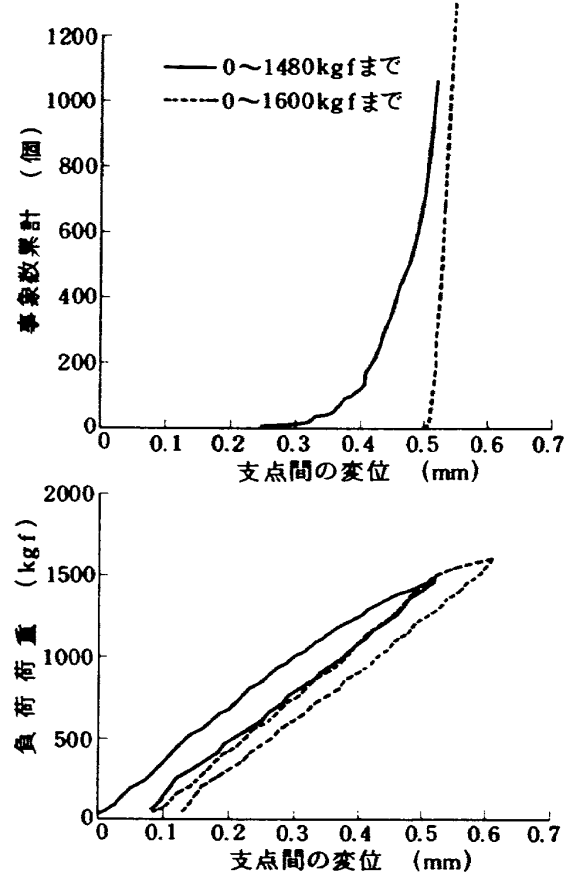


図16 高力アルミニウム合金の形状(3)のAE計測

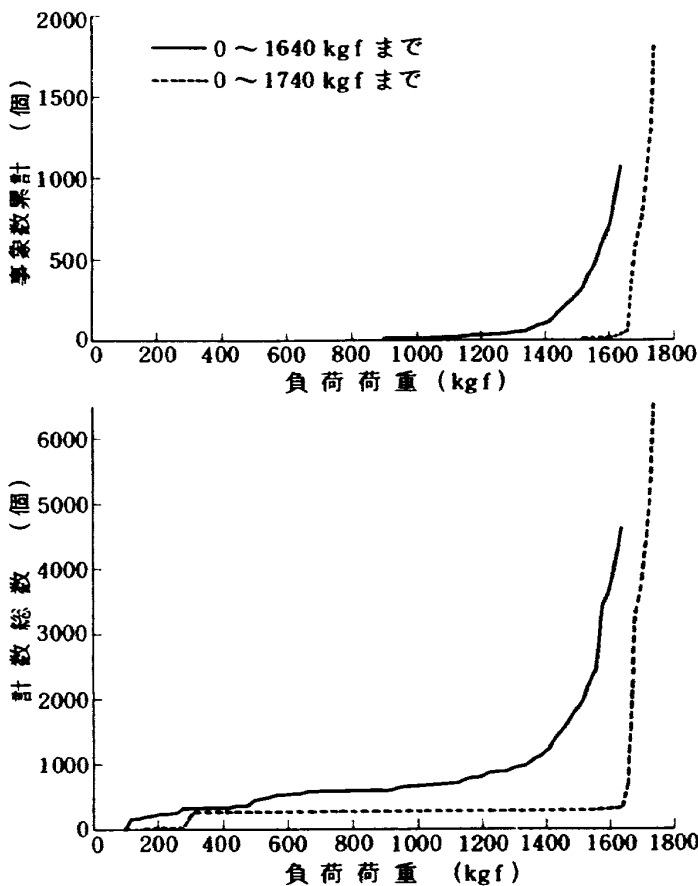


図15 高力アルミニウム合金の形状(2)のAE計測

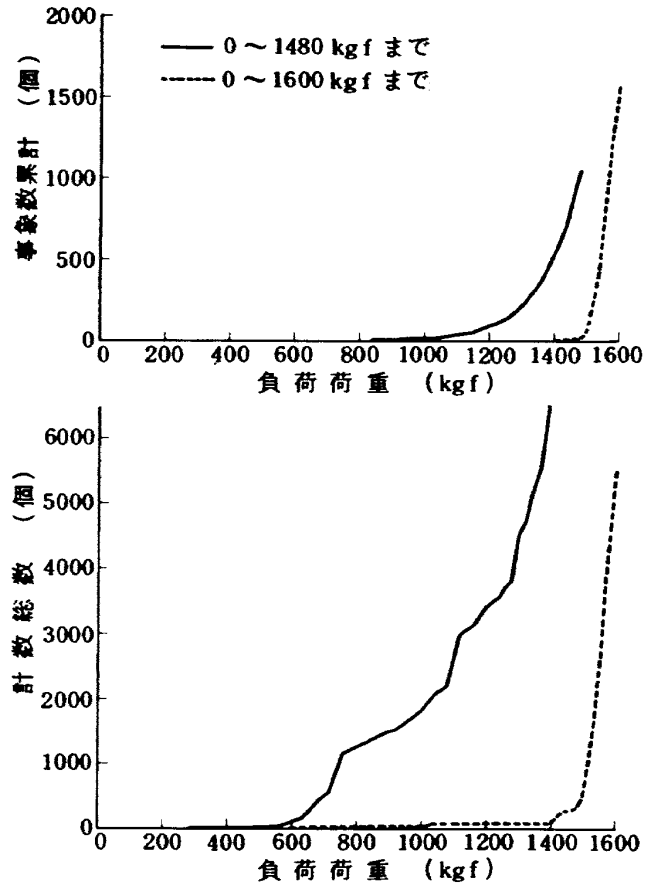


図17 高力アルミニウム合金の形状(3)のAE計測

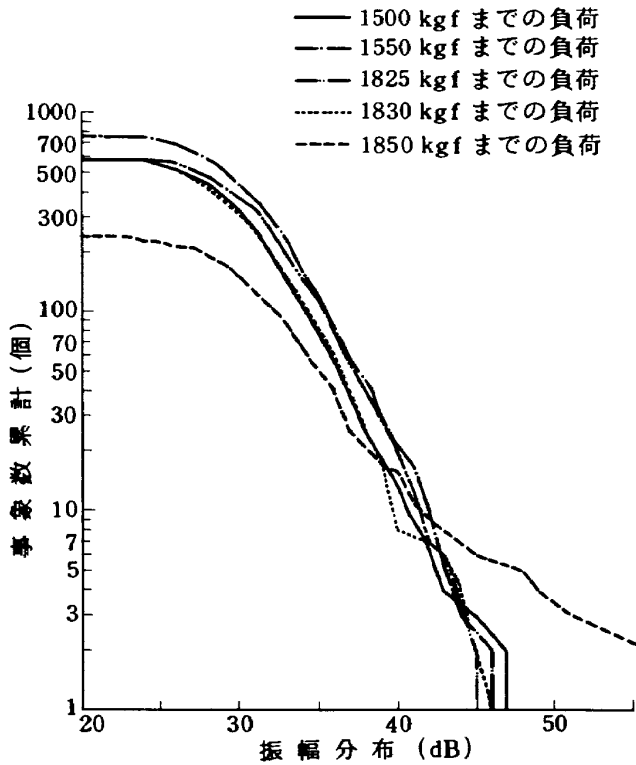


図18 高力アルミニウム合金形状(1)の振幅分布

振幅分布にはこのような関係があるため図18のこの配の変化によって劣化の挙動を調べようとした。

1500 kgf までの試験から 1830 kgf までの試験の振幅分布は比較的低振幅の AE が頻発し高い振幅は少ない。また、これらの振幅分布の傾向は類似している。しかし、1850 kgf の破壊まで行った試験の振幅分布は他の場合と著しく異なっており、粒界割れ、き裂の発生、き裂の進展等これまでになかった大きなエネルギーの AE が発生したことを示唆している。このように高力アルミニウム合金の静的引張試験では、破壊直前にならなければ振幅分布の差異は認められなかった。このような結果から推察すると、試験片の局部的な欠陥による応力集中部などを検出する比較的低負荷の非破壊検査では AE の振幅分布を求めることはあまり意味がないと思われる。しかし、破壊直前に大きな振幅が生じることから、大きな負荷の生じる部材のモニターとして AE を用いる場合には安全性を確保する上で振幅の計測は重要であると考えられる。

次に S45C 鋼の場合の形状の違いによる結果を述べる。図19は形状(1)、図20は形状(2)、図21は形状(3)の支点間変位と事象発生挙動の関係および負荷荷重と支点間変位の関係を上半および下半に示した。な

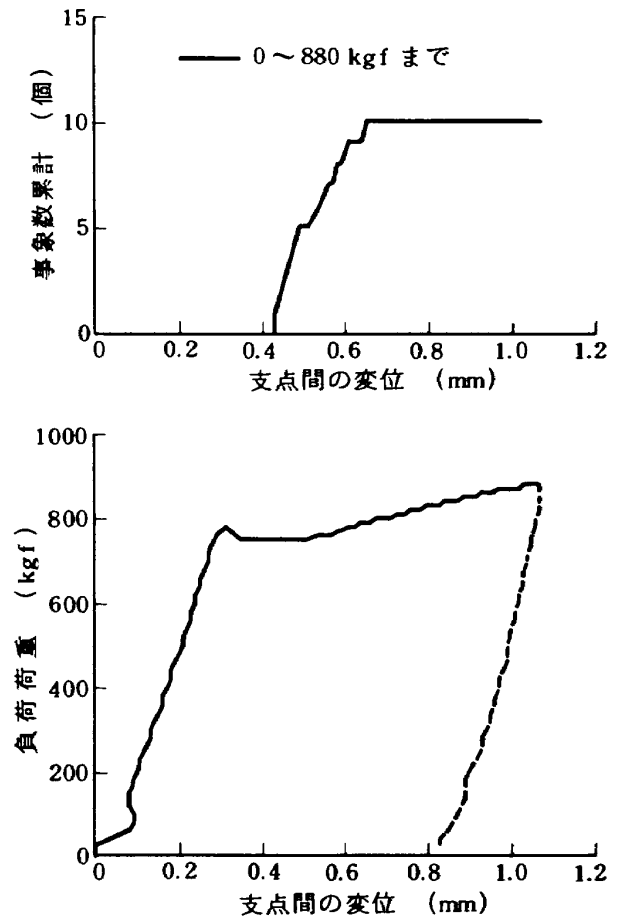


図19 S45C 鋼の形状(1)の AE 計測

お、下半の実線は荷重の増加過程を破線は除荷過程を示したものである。これらの図に示すように S45C 鋼は高力アルミニウム合金に比較して AE 事象の発生数は極めて少ない。図19では始めの AE 事象は降伏点を過ぎても発生せず塑性変形がある程度進んだ後でないと発生していない。また、比較的初期の内に AE 事象の発生は停止し、以後荷重の増加に伴って伸びは増加するが、AE の発生はみられない。このように塑性変形が進んでも AE が僅かしか発生しない材料があり、非破壊検査として AE 法を用いる場合、材料の AE 特性から適さない材料がある。図20で示すように応力集中が生じるような形状(2)の試験片では塑性変形が生じる初期に AE が発生する。また、AE の発生は形状(1)よりも広い範囲で発生する傾向がある。図21で示すように最小断面積が同じでも大きな穴がある形状(3)の試験片では形状(1)、形状(2)に比較して AE 事象の発生数は著しく少ない。これは、塑性変形の生じる体積が小さいためであると考えられる。

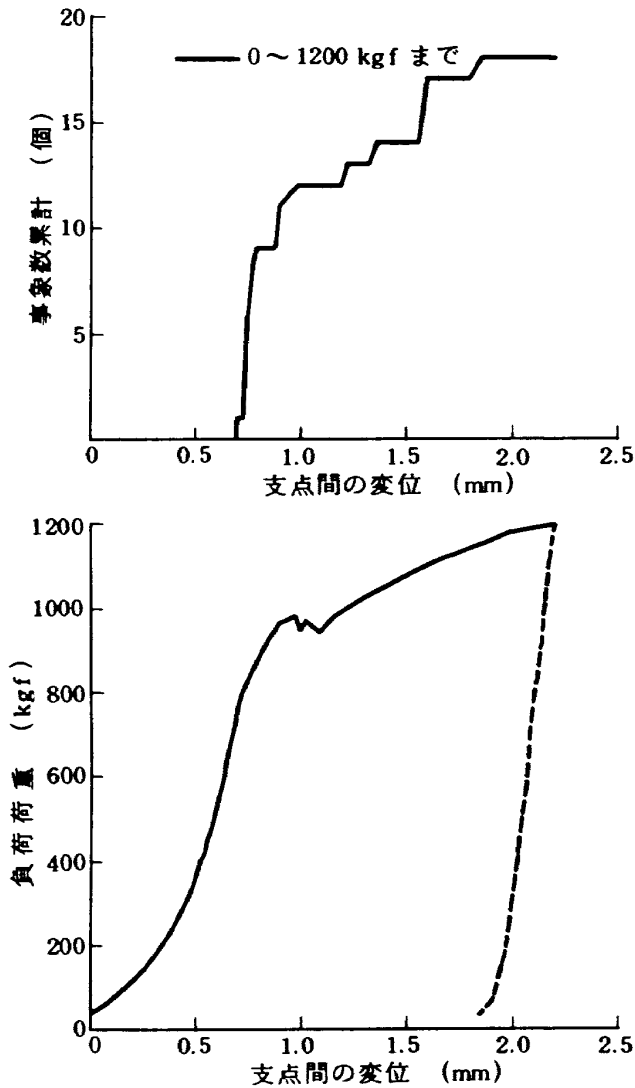


図20 S45C鋼の形状(2)のAE計測

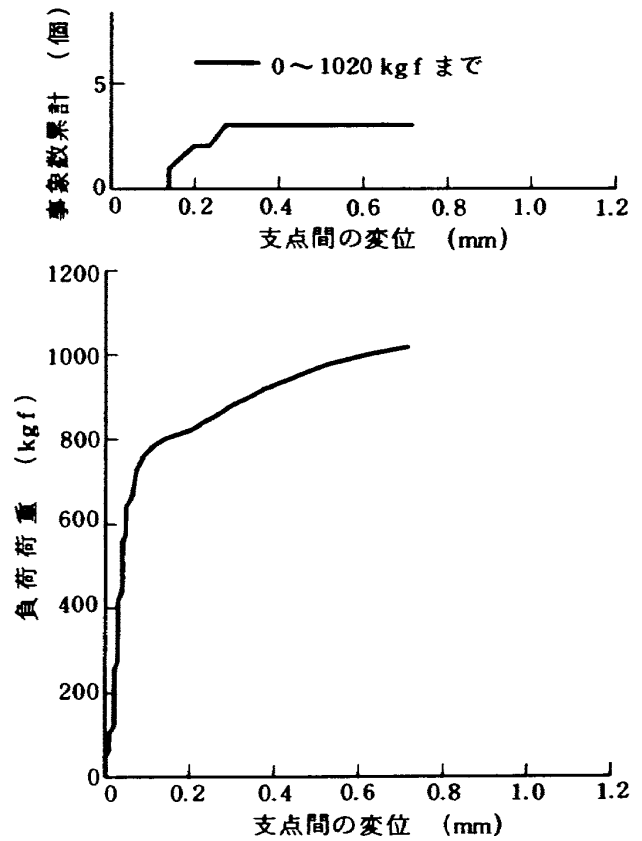


図21 S45C鋼の形状(3)のAE計測

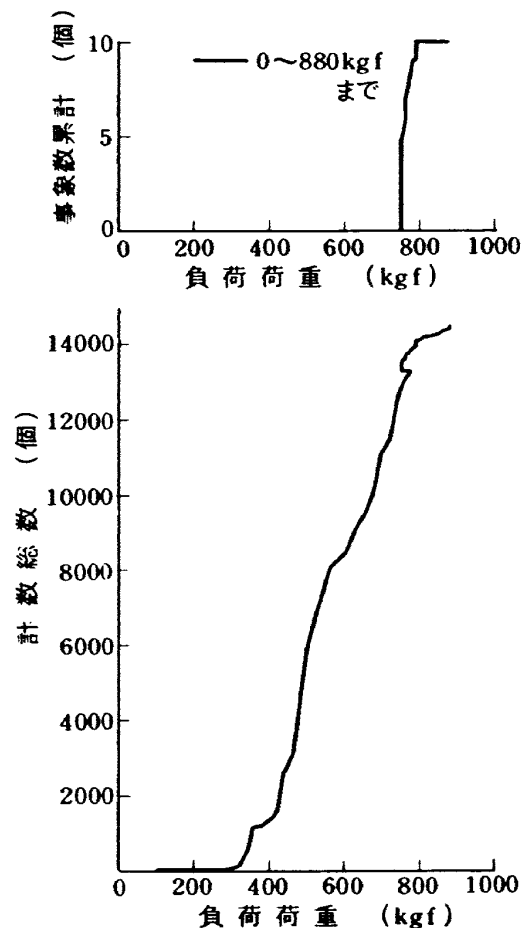


図22 S45C鋼の形状(1)のAE計測

図22は形状(1)、図23は形状(2)の負荷荷重と事象発生挙動の関係および負荷荷重と計数総数の関係をそれぞれ上半および下半に示した。これらの図で示すようにS45C鋼の場合でも高力アルミニウム合金と同様、空間フィルター内のAE事象が発生するより低い荷重の負荷で計数総数が計測されており、その発生源は支点等の機械的雑音によるものである。計数総数の発生挙動は高力アルミニウム合金の場合と異なっている。比較的低い負荷では比例的に増加するがAE事象が発生する程度の高い負荷になると逡減する傾向がある。この原因は、負荷の初期に支点のピンとピン穴のずれやなじみによって比例的に増加するが、これが安定することによって発生要因が減少するため、また、S45C鋼のAE発生は極めて少ないので、高負荷になると計数総数の増加が小さくなるためであると思われる。

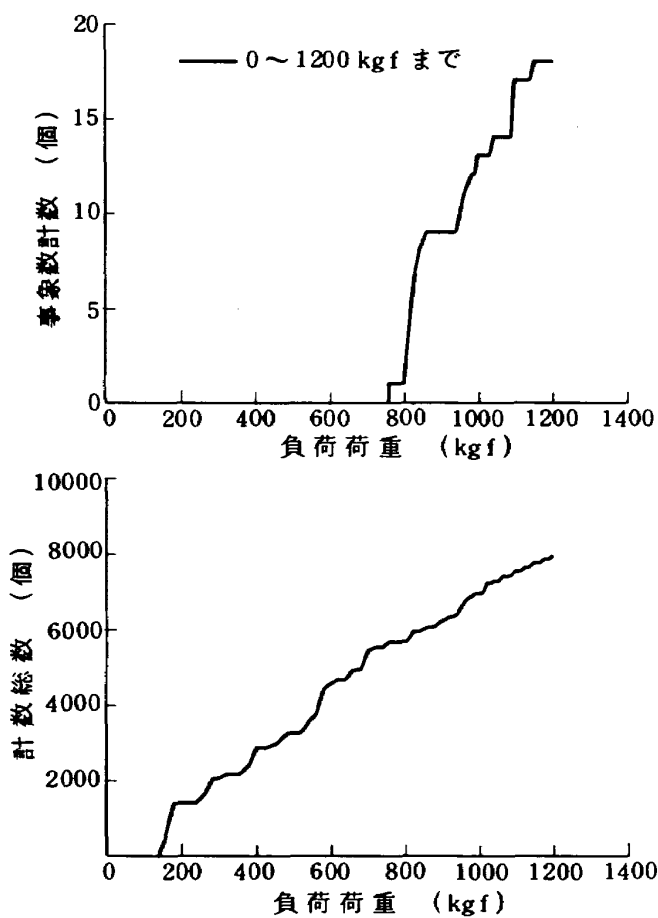


図23 S45C鋼の形状(2)のAE計測

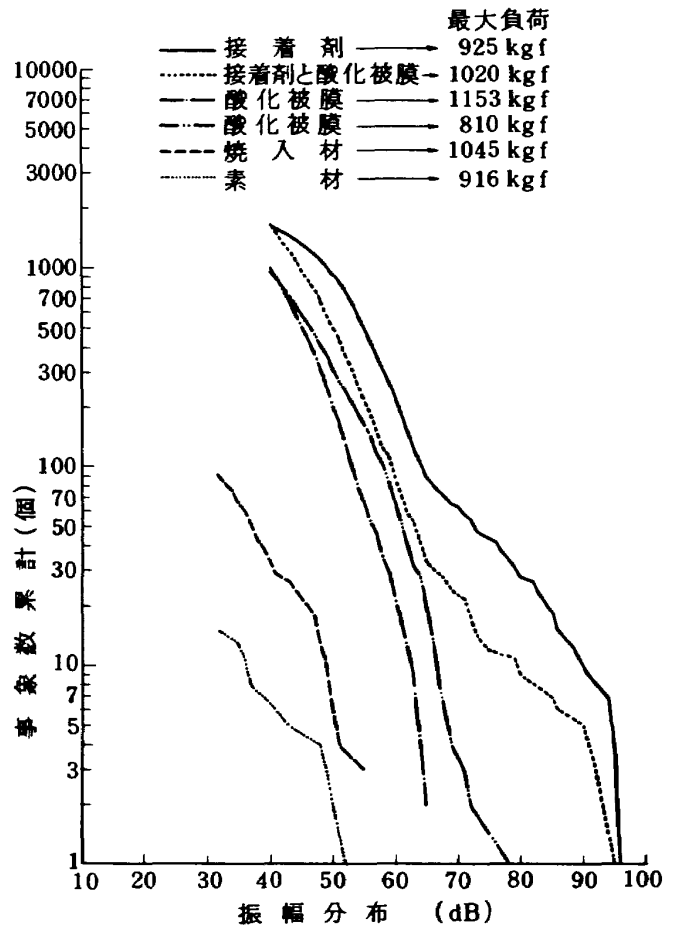


図24 試験片(S45C鋼)表面の塗布物による振幅分布

4.2 試験片の表面付着物によるAE特性

図24はAE発生極めて少ないS45C鋼を試験片として、その表面に酸化被膜や接着剤の付着した場合、素材および焼入材などの振幅分布の状況を示したものである。なお、酸化被膜はガスバーナで焼入に際して形成されるものを用いた。また、焼入材は酸化被膜をサンドペーパーで除去した試験片である。

酸化被膜がある試験片では0~810 kgfまでの場合と1077 kgfまでの負荷履歴のある試験片を、0~1153 kgfまで負荷した場合を示した。両者を比較すると1153 kgfまでの方が事象の振幅が小さい場合が多い。これは、負荷履歴のない試験片を負荷した場合、伸びの小さい硬質の被膜の割れや剝離によって大きな振幅のAEが頻発するが、高い負荷履歴のある試験片では伸びの小さい硬質のものは少なくなり、比較的軟質の伸びのある被膜が残ったため、低振幅のAEが多くなったと思われる。なお、AE発生が少ない材料でも酸化被膜がある場合には、表面の応力集中部分を検出でき非破壊試験として用いること

ができると考えられる。

接着剤を素材および酸化被膜のある試験片に塗布した場合では、両者とも酸化被膜だけの場合に比較して約20 dBも高い振幅のAEが発生している。素材のAE発生が極く少なく無視できる量であるから、前者のAE特性は接着剤によるものであり、後者のAE特性は接着剤と酸化被膜とを含んだものである。従って、著しく高い振幅は接着剤によるものである。なお、両者の事象発生総数は同程度であるが接着剤の塗布面積の影響で高振幅域では素材の場合の方が多量に発生した。これらの結果から、試験片のAE計測と歪ゲージによる応力測定を同時に行うことには問題があることがわかった。

素材および焼入材の場合では、硬質の表面付着物がある場合に比較してAE事象の発生総数は著しく少なく、振幅は著しく小さい。素材のAE事象発生総数は表面付着物のある場合の約1/100であり、振幅は酸化被膜の方が約20 dB高く、接着剤の場合で

は約 40 dB も高くなっている。なお、焼入材の AE 事象発生総数は素材の場合より 32 dB で約 6 倍、43 dB では約 5.4 倍多くなるが振幅分布には大きな差異は認められなかった。

5. あとがき

本報告は、AE 計測法を比較的小型な部品の非破壊検査に応用する場合の問題点を調べるため、簡単な試験片を用いて、静的引張試験を行い試験片の条件が異なる場合の AE 発生状況を検討した。その結果、次のことを確認した。

高力アルミニウム合金は S45C 鋼に比較して著しく多くの AE が発生する。高力アルミニウム合金の破壊まで行った試験片によると履歴のない材料を約 2000 個の事象が発生する 1500 kgf まで負荷した場合と、その後 1830 kgf までの間に 10 回行った試験の振幅分布を比較しても大きな差異は認められないが、破壊直前の振幅分布では著しい違いがみられ大振幅の発生頻度が高いことを示している。これらのことから、材料の塑性変形状況の細かな変化は振幅分布から調べることができないことがわかった。なお、AE 発生位置標定の結果から、試験片の中央部に応力集中が生じるような小さい穴がある場合には負荷の初期にその部位から発生する。また、負荷の増加により発生部位が分散する傾向がみられ塑性域が拡大していく様子がわかった。試験片の最小断面積が同じでも中央部に大きな穴があるため周囲と比較して著しく弱い部位がある場合には、塑性域の拡大は少なくその部位に集中して発生している。

試験片の伸びと AE 事象の関係では、高力アルミニウム合金の場合塑性変形の初期で発生し、以後漸増的に発生するが、S45C 鋼の場合には塑性変形が相当進展しなければ発生せず、しかも一時的に発生だけで継続的な発生は認められなかった。

AE の不活発な材料 S45C 鋼に酸化被膜および接

着剤を試験片表面に塗布した場合についての AE 計測も行った。その結果、硬質の付着物のある場合には著しく多くの AE 事象が発生することがわかった。また、振幅分布は付着物の種類によって大きな差異が認められた。

以上述べたように、材料の種類によって AE 計測が適するものと不適当なものがあることがわかる。また、試験片形状によっても AE 発生挙動は異なる。従って、部品の非破壊検査においては、供試体の AE 特性を充分把握して行わなければならない。

本報告を作成するに際しては、原動機総括室の池田為治室長、当研究室の宮地敏雄室長、松末勝利主任研究官、小河昭紀主任研究官から有益な助言を受けた。

ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 尾上守夫；アコースティック・エミッションの基礎と応用，1977年，コロナ社
- 2) 熊谷正人，内村良治，川上辰男；熱衝撃条件下の耐火物に発生するき裂の AE 法による検出，窯業協会誌 87(5)，1979年
- 3) 岸 輝雄；AE による材料強度の評価(I)，「材料」第 29 巻 第 323 号，1980年
- 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，TR-663，1981年 4 月
- 5) 林 洋一，角田義秋，中井映一；炭素繊維複合材(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，TR-707，1982年 4 月
- 6) 角田義秋，林 洋一，中井映一；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，TM-468，1982年 8 月

航空宇宙技術研究所資料503号

昭和58年4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 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
