

# 球形ロケットチャンバ用チタン合金の 破壊靱性値とAcoustic Emission

齋 藤      敏・岸      輝 雄・堀 内      良  
中之瀬      恩\*・垣 見 恒 男\*

Fracture Toughness Anisotropy Values and Acoustic Emission  
Behaviours in Ti-Alloy Sheet of Spherical Rockets Chamber.

By

S. SAITO, T. KISHI, R. HORIUCHI, M. NAKANOSE, T. KAKIMI

**Abstract:** Acoustic emission technique was applied to fracture toughness testing in Ti-6Al-4V alloys to detect crack growth.

The results are as follows:

(1) From the analysis of acoustic emission signals, two characteristic points (A and B points) were found. The first A-point corresponds to the initiation of slow crack growth, and the second B-point the initial deviation of crack opening displacement. These results were also verified by the observation with microscope and crack gauge.

(2) The load of A-point was almost 60% of maximum load and that of B-point was 80–90%, while the load of  $K_{IC}$  value was 93–95% of maximum load. These results suggest that acoustic emission technique is a most sensitive one to detect slow crack growth.

(3) There exists planer anisotropy in this alloy.

$J_{IC}$  value defined by A point had the anisotropy, which corresponds to the inclination of  $COD_{crit}$ , but not to that of  $K_{IC}$ .

## 1 緒 言

金属材料が塑性変形するとき、あるいはき裂が伝播するときに、エネルギーの解放によって弾性波が発生する。この現象はAcoustic Emission（以下AEと略す）と呼ばれている[1], [2], [3], [4]。

近年の破壊力学の発展に伴ってこのAE信号を検出してその情報を破壊試験へ応用することが注目され、切欠試片の引張、疲労、応力腐食割れ、溶接の欠陥の検出、さらに構造物や圧力容器の破壊予知へ、非破壊検査の一手段として利用することが世界各国で進められている[5]。

---

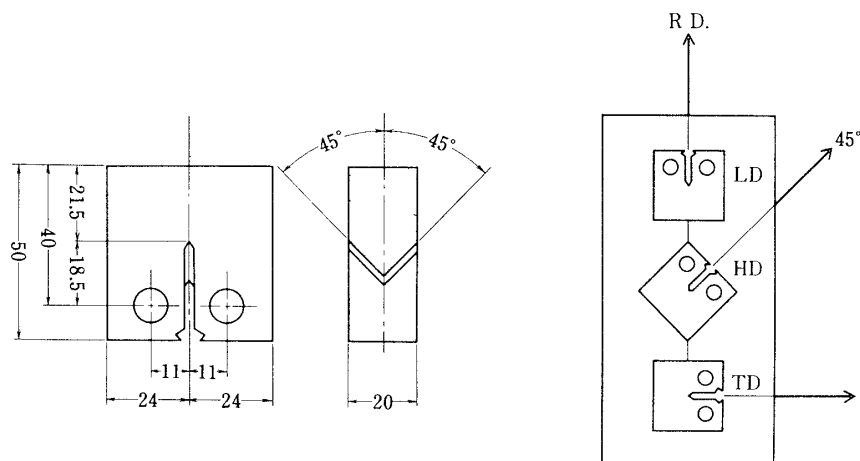
\* 日産自動車 宇宙航空部

このAE信号には、巨視的に均一な変形を呈する純金属の塑性変形などに観察される白色雑音に類似した連続的な波形と、巨視的な不均一変形などに見られる減衰振動状パルス波形の突発型と呼ばれる信号があるが、き裂の伝播に伴うAE信号は一般に突発型の信号として観察され、その振幅も連続型波形よりはるかに大きいことが知られている。

本研究では宇宙航空材料として広く使用されており本研究所のMロケットの球形ロケットモータケースとして使用されているチタン合金 Ti-6Al-4V の破壊靱性試験を行ない、板面異方性の破壊靱性値への影響を明らかにするとともに、このときのき裂の伝播に伴うAE信号を測定し、COD(き裂開口変位)法[6]、[7]や、電位差法などで試みられているように、AE信号の測定によって、き裂の進展を探知して破壊靱性値の評価を試みるとともに、破壊基準のパラメータである $K$ 値、COD法、および $J$ 値との関係を明らかにすることを目的とした。

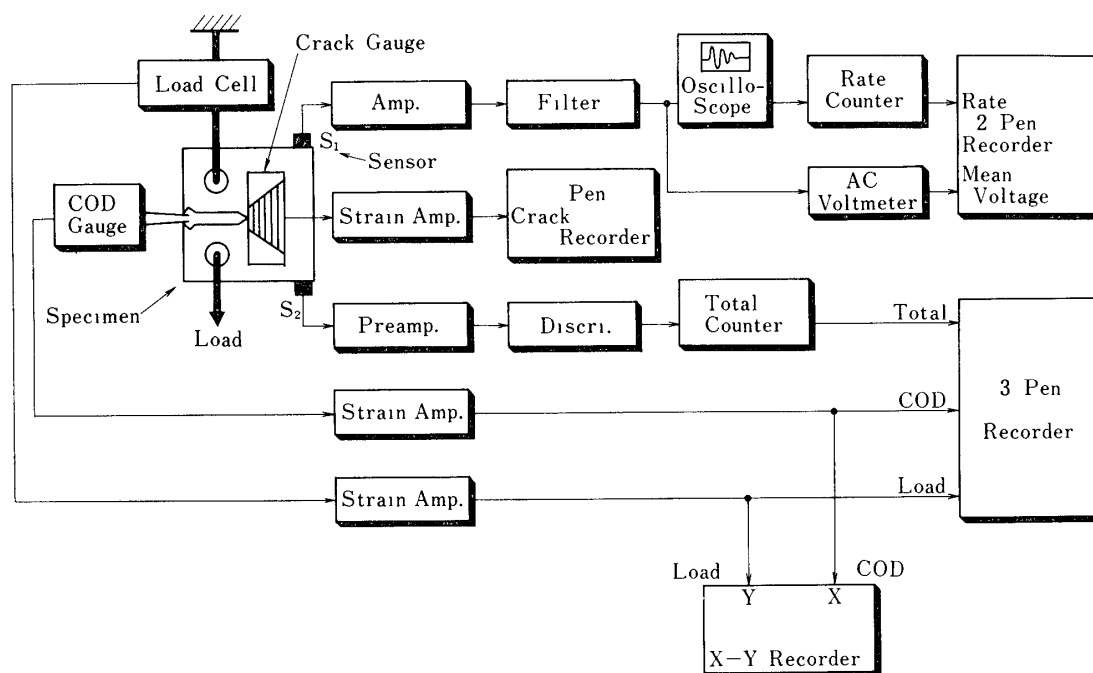
## 2 実験方法および試料

実験に用いた材料はMロケットの球形ロケットモータケースに使用している Ti-6Al-4V の熱間圧延材で、球形に加工する前の 30 mm 厚の板から、厚さ 20 mm の compact-tension 型の引張試験片を作製した。第1図はその試験片の寸法および形状を示したもので、chevron型のノッチが入っており、圧延方向(R. D.)に対してノッチの方向が $0^\circ$ のものをLD、 $45^\circ$ のものをHD、 $90^\circ$ のものをTDとして、試験片に切り出した。ノッチの先端には疲労き裂を入れてあり、荷重 800 ~ 1,200 kg で約  $5 \times 10^4$  回で疲労試験機により導入した。疲労き裂の長さは約 2 mm である。その一端にはき裂開口変位を測定するためのクリップゲージを装着するノッチを入れてある。なお試験片の寸法および形状はASTMのE 399[7]に準じて作製した。



第1図 試料形状と採取方向

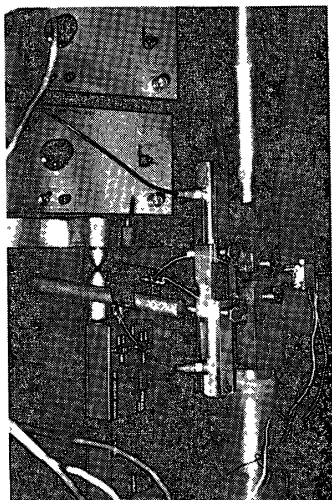
第2図に示したのが測定装置のブロック図である。疲労き裂の先端にはクラックゲージがはりつけてあり、き裂の進行方向に直角に 0.2 mm 間隔にならんだグリッドが、き裂の進行



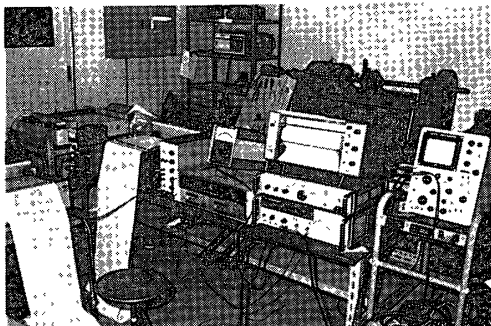
第2図 測定装置のブロック図

により切断された時の抵抗値の変化をひずみ測定器に入れ、き裂の伝播長さ、および伝播速度を測定した。き裂開口変位はクリップゲージを装着し、ひずみ測定器を通してペンレコーダーに記録した。

AEの測定は、検出器として共振周波数 140 kHz の PZT 厚み振動子を用い、試験片の上下に 2 つの検出器を圧着し、上部の検出器からの出力信号は増幅された後、機械的、あるいは電気的な雑音を除去するためのバンドパスフィルター（通過帯域 20～200 kHz）を通し



第3図



第4図

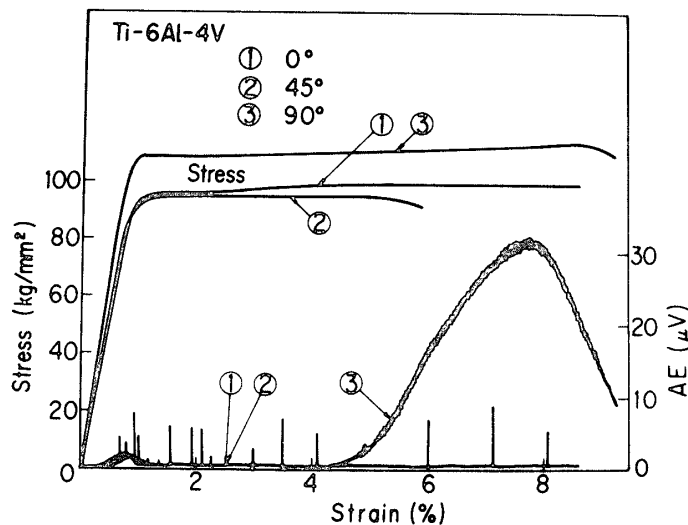
て rate count (AE 発生頻度) と平均電圧を測定してペンレコーダーに記録させた。その時の信号波形はブラウン管オシロスコープで観察し、写真撮影した。その時の全増幅率は70 db であった。

下部に取りつけた検出器の出力信号は増幅後、バンドパスフィルター(通過帯域 30 ~ 300 kHz)を組み込んだ振幅弁別器を通して total count (AE 発生累積総数)を測定し、3 ペンレコーダーに記録させた。また、荷重も同じく3 ペンレコーダーに記録させた。なお、 $K_{IC}$  を求めるための荷重-開口変位曲線を描かせるため、X軸にき裂開口変位、Y軸に荷重を入れ、X-Yレコーダーに記録させた。

引張試験は島津オートグラフ IS-10Tを使用し、引張速度 0.5 mm/min で行なった。第3図、第4図に試験片にAE検出器とき裂開口変位測定のためのクリップゲージを取りつけた状態と、計測装置の写真を示す。

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 応力-ひずみ曲線および組織観察



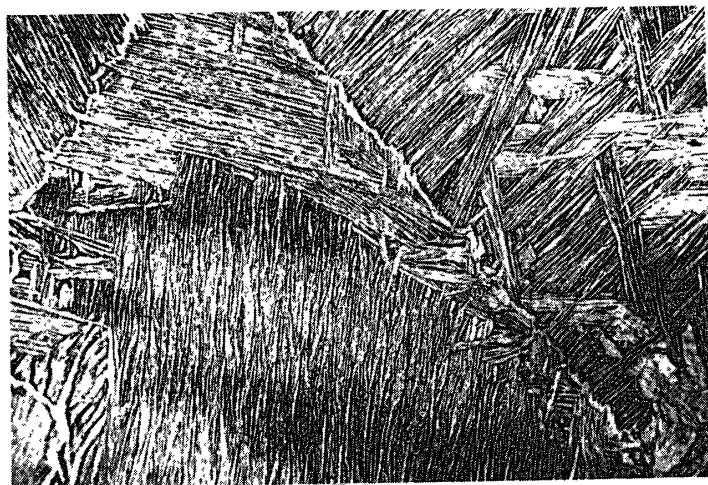
第5図

第5図は厚さ 3 mm の圧延板の単純引張で得られた各方向への引張試験の応力-ひずみ関係とその時の AE 挙動を示したものである[8]。TD, HD 方向は全体的な AE の発生量は非常に小さいが、LD 方向は双晶変形に伴ない、AE の発生が大きいことを示している。

第6図はTD方向の試験片の側面を研磨、エッチングして光学顕微鏡で観察した写真であるが、 $\alpha$ 相と $\beta$ 相の2相混合組織で、針状組織となっているのが見られる。HD, LD 方向の試験片についても同様の組織観察を行なったが、光学顕微鏡観察の結果からは3方向ともその組織には顕著な相異は見られなかった。

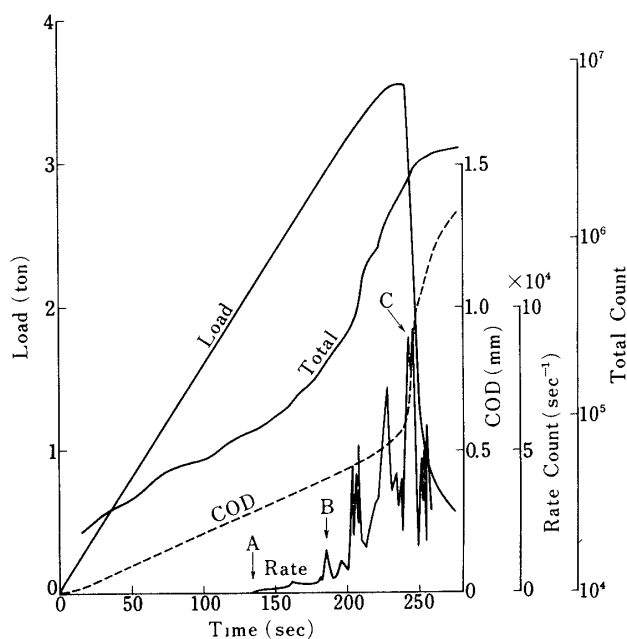
#### 3.2 破壊靱性試験における AE 挙動

第7図には本実験で得られた破壊靱性試験に伴う AE 挙動の代表的な例を示したもので、



第 6 図

荷重，AE total count，COD，およびAE rate count 曲線を示しており，横軸には試験時間をとってある．

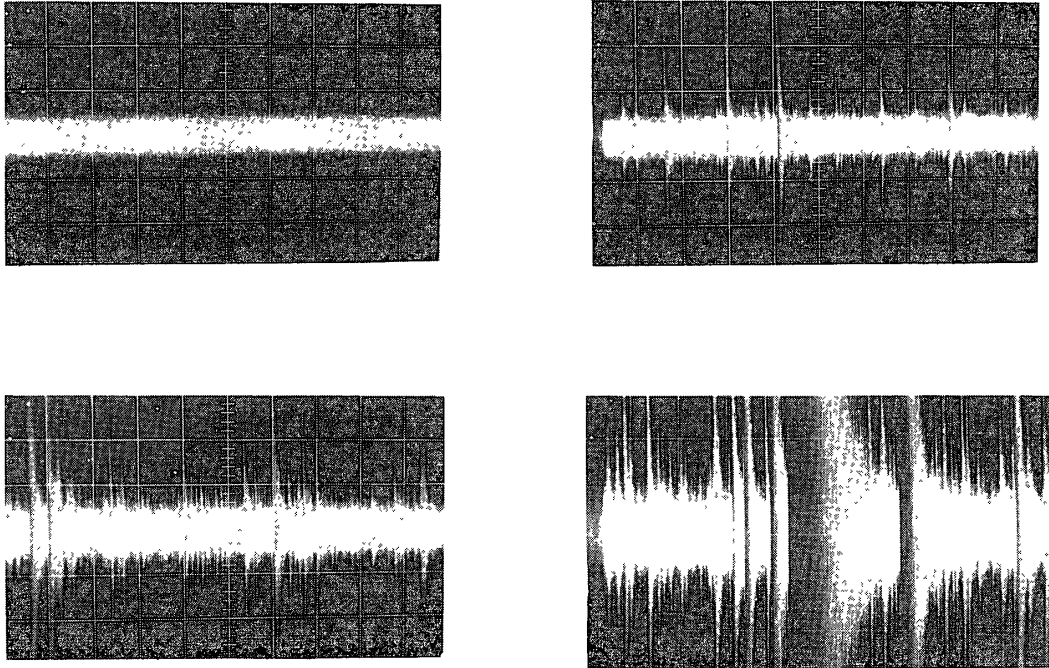


第 7 図 変形に伴う荷重，き裂開口変位(COD)，AE total

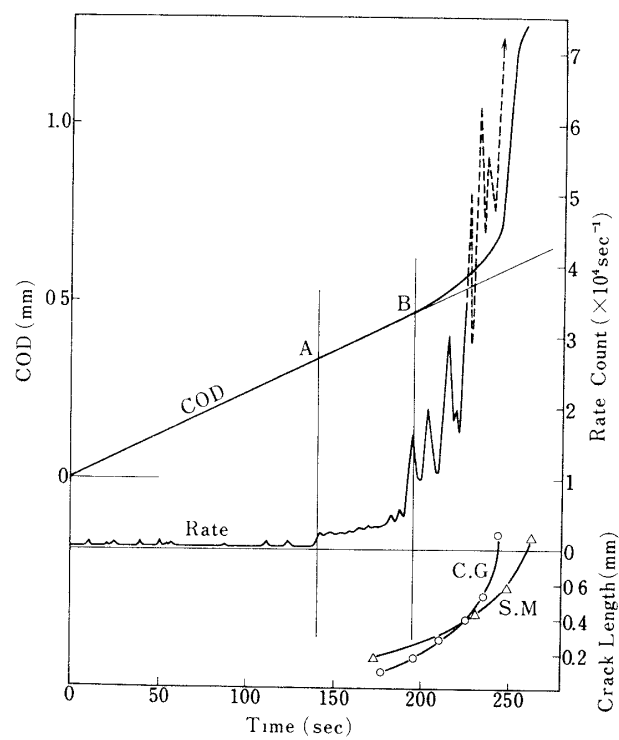
図に示すように，A点付近から数千カウントのAE信号が観察され，B点で急に上昇しはじめる．これはCOD曲線の最初の変化と対応し，クラックゲージの結果ともある程度相関を有しており，安定き裂成長に対応しているものと思われる．最大荷重点付近にくるとさらに大きな信号が発生し，total countも急激に増加してくる．最大荷重点に達した後はCOD曲線からも明らかなように，大きくき裂が進展したことを示している．それに伴って断続的に非常に大きな信号が観察される．

第 8 図はブラウン管オシロスコープで，試験中の各段階におけるAE信号の波形を観察し

たものであるが、(a)は引張開始時からA点に至るまでの信号であるが雑音レベル程度の信号しか見られないが、A点からは(b)典型的な突破型の信号が出始め、B点になるとその大



第8図



第9図 き裂進展に伴う側微鏡観察(S. M)クラックゲージ観察(C. G)結果とAE信号

きさも頻度も大きくなる(C). 最大荷重点直前の  $K_{Ic}$  測定付近では大きなき裂の進展に伴って写真に見られるようにきわめて大きな信号となっている(d). このようにき裂の伝播では突発型の AE 信号が観測されることが特徴的である.

第9図は第7図におけるA点, B点付近のCODと rate count の関係を拡大して示したものであるが, A点までは前述のように大きな信号の発生は見られないが, A点からは 1,500 ~ 2,000 count/sec の AE 信号が発生しはじめ, B点で急に 15,000 count/sec 程度に上昇する. このB点はCOD曲線がちょうど直線関係からはずれるところによく一致している. またクラッグゲージと試験片の側面から側微鏡ではかったき裂長さもB点付近より顕著に上昇しており, B点ではすでにかなりのき裂が進行していることがわかる. このA点, B点におけるAE信号はどの方向の試料にも共通して見られる. また, 側面は平面応力状態にあるので試験片の板厚中央部の平面歪条件を十分に満足している部分に比較してき裂の伝播は遅れると考えられる. これらの結果より, A点から安定き裂が進行し, B点で急に大きく成長するという2段階の変化が考えられる. ただしCODで変化の生ずるのはB点であるからAEは, より安全側にき裂を探知しているのは確かであろう.

### 3.3 $K$ 値および COD と AE の関係

$K$  値の求め方としては, 我々は ASTM の E 399-72 [7] に準じた. すなわち, 荷重-COD 曲線の立ち上がりの直線部分の勾配の95%で線を引き, 曲線との交点をもつて次式により  $K_{Ic}$  を求めた.

$$K = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[ 29.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017.0 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 638.9 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad \text{psi} \cdot \text{in}^{1/2}$$

$P$ : 荷重

$B$ : 板厚

$W$ : 板幅

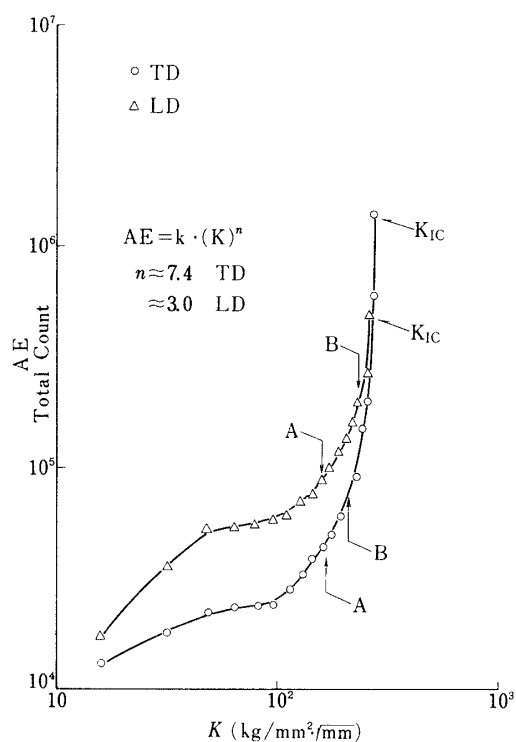
$a$ : き裂長さ

ここで valid な条件は

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

である. なお  $\sigma_{ys}$  は降伏応力である.

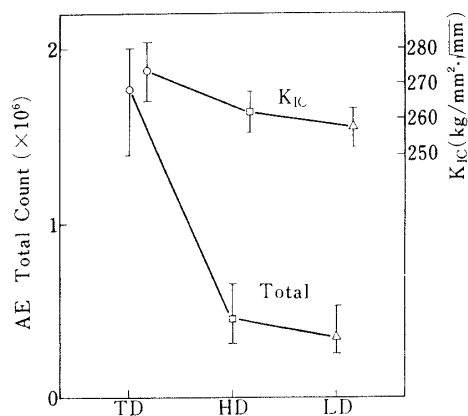
第10図は  $K$  値に対して AE の total count を両対数プロットしたものであるが, 図から明らかなように TD と LD では AE 信号の発生挙動に差があることがわかる. また,  $K_{Ic}$ , A 点, B 点をグラフ上に示してみると, LD は TD よりも A 点, B 点に至る total count 数は高くなっており, B 点での  $K$  値も LD の方が若干高い値を示している. さらに A 点に至るき裂近傍の塑性変形に伴う AE は LD が高く, 先の単純引張の結果 (第5図) とよく対応し

第10図  $K$  値と AE Total counts の関係

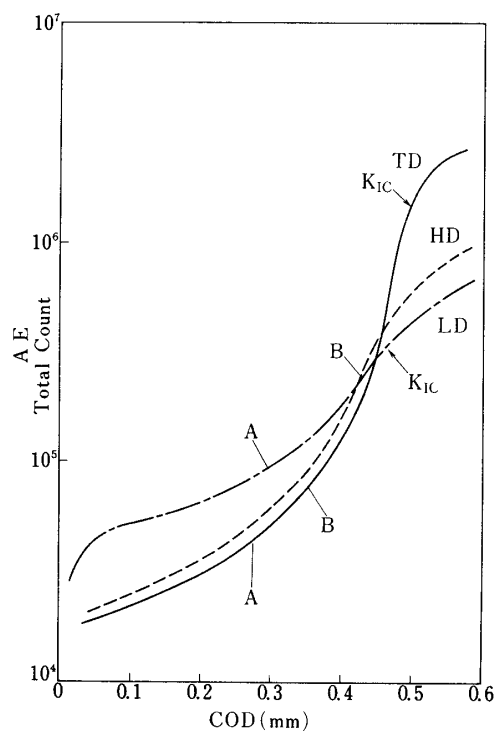
ていると考えられる。しかし  $K_{IC}$  測定値での AE は図から明らかなように逆転しており、すなわち TD の方が LD よりも  $K_{IC}$  に至る total count 数は高くなっている。

一般に、多くの実験結果から AE 発生数は応力拡大係数  $K$  で整理されることが知られている。すなわち、 $AE = k(K)^n$  で  $k$  と  $n$  は定数で  $2 \leq n < 8$  の値が数多く報告されている [3], [9]。第10図の最急勾配から求めた  $n$  の値は TD で 7.4, LD では 3.0 であった。

第11図は  $K_{IC}$  の板面異方性の値と  $K_{IC}$  に至るまでの AE total count を示したものである。

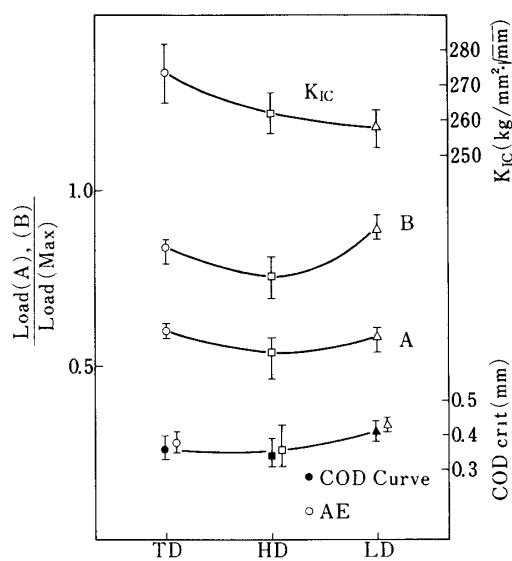
第11図  $K_{IC}$  および AE の板面異方性





第12図 COD と AE の関係

本実験の板厚20 mm は規格に入り， valid な  $K_{IC}$  が得られたと考えられる．これは  $K_{IC}$  に至るまでの total count とよく対応しており，それぞれ板面異方性があることがわかる．すなわち  $K_{IC}$  の高いものほどそこに至る AE が大であるといえる．



第13図 A点, B点の生ずる荷重と  $COD_{crit}$  ,  $K_{IC}$  の異方性

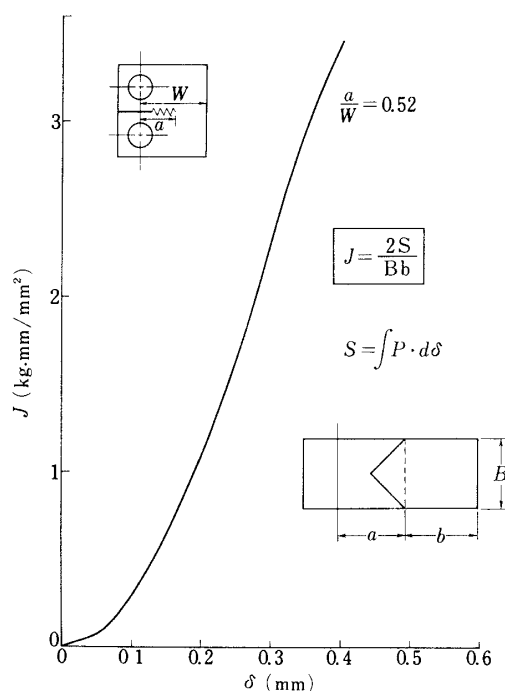
第12図はCODに対してAE total count を対数プロットしたものであるが、TD方向とでは $K_{IC}$ 付近ではAEのtotal countに顕著な勾配の差があることがわかる。

第13図はA点、B点があらわれる荷重点を最大荷重で割った値を各方向の試験片について示したものであるが、A点は各方向とも最大荷重の約60%付近にあることがわかる。B点は80%から90%の位置にあり、LDでは最大荷重点近くにならないと大きな音が発生しないことを意味している。それに対して $K_{IC}$ の値は最大荷重の約93~95%に対応するが、LDは低くTDは高い値を示している。

下の曲線はCOD曲線が直線からはずれる値を $COD_{crit}$ として各方向の試料について求めた値であるが、黒印がCOD曲線から読んだ直線からはずれる点の値で、白ぬき印がAE信号が急に大きくなる点、すなわちB点から求めた $COD_{crit}$ の値である。図から明らかなようにCOD曲線が直線からはずれる点が、AE信号が急に大きくなるB点と非常によく一致することがわかる。いづれにせよこの実験の範囲では、 $K_{IC}$ と $COD_{crit}$ の板面異方性には異なる傾向があるのは注意を要する。

### 3.4 $J$ 値とAEの関係

次に $K_{IC}$ と共に破壊靱性値のひとつである $J$ の値[10]、[11]を求めてみる。



第14図 荷重点変位と $J$ 値の関係

図14において、横軸の $\delta$ はCODの値を荷重点変位に換算した値である。 $J$ の求め方としては我々は次式に示すように、荷重- $\delta$ 曲線の下面積 $S$ をき裂残存面積で割ることにより求めた[12]、[13]。すなわち

$$J = \frac{2S}{Bb}$$

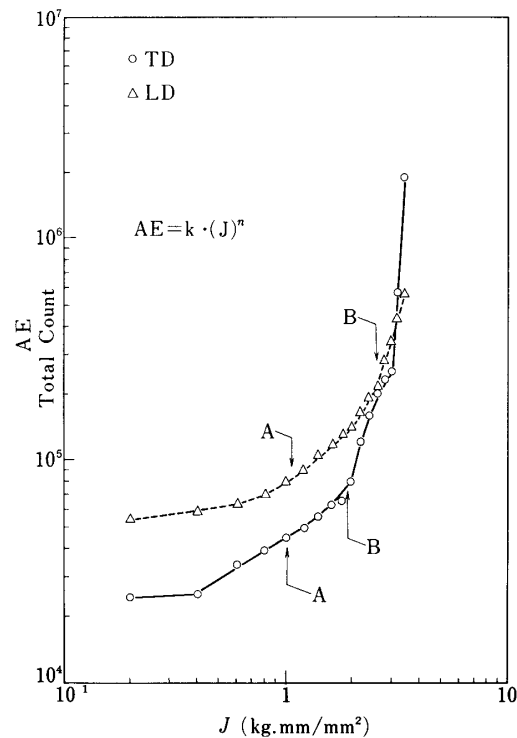
$B$ : 板厚

$b$ : リガメント, すなわち  $b = W - a$

$S$ :  $\int P \cdot d\delta$

もちろん  $J$  値は small scale yielding 領域では  $K$  値より直接求めることができるが,  $K_{IC}$  の定義がほぼ確立した現状においては, 定義にしたがって求めるべきものとして取り扱った.

これより求めた  $J$  の値は  $\delta$  に対して第14図のようになる. この図は TD 方向の例を示したもので  $a/W$  は 0.52 である.

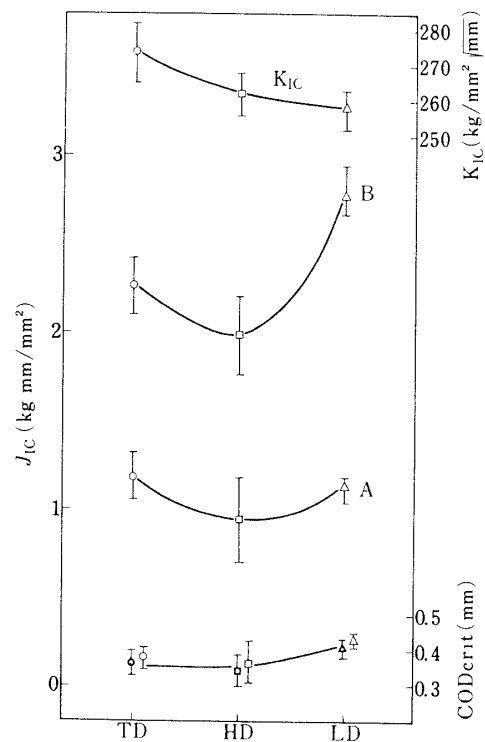


第15図  $J$  値と AE の関係

第15図は  $J$  値に対して AE の total count を両対数プロットしたものであるが,  $K$  値と同じく TD, LD では図から明らかなように差が見られる. また, A 点, および B 点の  $J$  値を示してあるが LD 方向の B 点は TD 方向の B 点より高いところにきている.

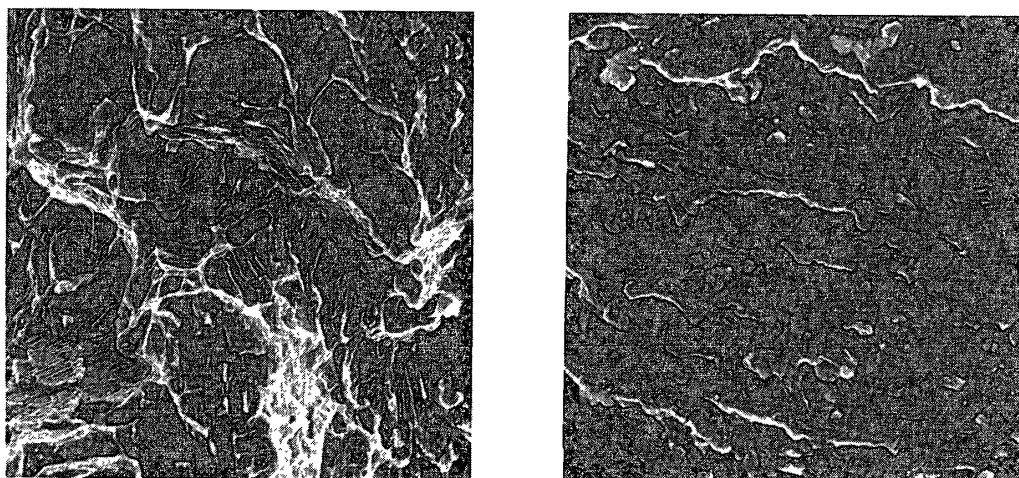
第16図は A 点, B 点に対応する  $J_{IC}$  の値を求めたものであるが  $K_{IC}$  と同じく板面異方性を有しているが,  $K_{IC}$  と AE より求めた  $J_{IC}$  の傾向は異なることが重要である. 著者らは安定き裂の開始点として A 点に対応する値を  $J_{IC}$  として提案したい. また  $COD_{crit}$  は AE から求めた  $J_{IC}$  とよく対応しているが,  $COD_{crit}$  の生じる以前にすでに安定き裂が生じているこ

とは重要である.



第16図  $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$  および  $COD_{crit}$  の板面異方性

このように AE により, 本論文中 A 点として, 安定き裂開始点が探知されたと考えられるが, 当然この値は電位差法, フラクトグラフィー的手法による結果と今後比較検討されなければならないところである. しかしながら物理的意味を考えると, 現在の  $K_{IC}$  の規定には



第17図

問題があるといわざるを得ない。

なお、第17図に走査電子顕微鏡によるフラクトグラフの例を示してあるが、試料はTD方向で写真の横方向がき裂の進行方向である。(a)は引張による急速破壊領域で、デインプル模様を呈している。(b)は疲労き裂領域である。写真は板厚中央部の平面ひずみ条件を十分に満足している部分を観察した。なお、フラクトグラフィ的解析は今後 bend 型試片について行なう予定である。

#### 4 総 括

以上、Ti-6Al-4V の compact-tension 型引張試片を用いて破壊靱性試験を行ない、その板面異方性を調べるとともに、このときのき裂の伝播に伴う AE を測定した。得られた結果は次の通りである。

- (1) AE 信号の解析、およびクラックゲージと側微鏡等の観察により、安定き裂に対応すると考えられる AE の信号(A点)、およびき裂開口変位の最初の変化に対応すると考えられる AE 信号(B点)がそれぞれ感知された。
- (2) A 点は最大荷重の約60%と低く、機械的性質の変化点 B 点(最大荷重点の80~90%)および  $K_{IC}$  を求めた荷重点(95%)よりかなり低い荷重に対応する。
- (3) A 点より  $J_{IC}$  を定義してその値を求めるとこの値は板面異方性を有している。この異方性は  $COD_{crit}$  の傾向とはよい一致を示したが  $K_{IC}$  の値とはその傾向が異なっている。

以上、AE は破壊靱性値  $K$ 、 $J$ 、COD などとよい相関を有しているのみならず安定き裂発生、および成長を感知する有力な手段となり得ると考えられる。フラクトグラフィ的解析と共に今後の発展が期待される。

終りに、実験を進めるにあたってお世話になった計測部の丹羽登教授、大学院学生田中博君、日大大学院学生小幡義彦君に感謝いたします。また有益な御討論をいただいた東京工業大学の小林英男助教授に感謝いたします。

1975 年 12月25日 材料部

#### 参 考 文 献

- [1] Acoustic Emission: STP 505 (Amer. Soc. Test. Mat., Philadelphia, 1972).
- [2] 尾上：非破壊検査, 21(1972), 207
- [3] 小野：鉄と鋼, 59(1973), 1338
- [4] アコースティックエミッションの基礎と応用：HPI/NDI, 1972
- [5] 日米合同 AE シンポジウム論文集：HPI/NDI, 1972
- [6] British Standards Institution DD19: 1972
- [7] ASTM E399-72 1972
- [8] 田中、堀内：東京大学宇宙研報告 第11巻 第2号(A) 1975, 427
- [9] H.L. Dunegan, D.O. Harris and C.A. Tatro: Eng. Fract. Mech., 1(1968) 1, 105
- [10] J.R. Rice: Journal of Applied Mechanics, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, June (1968), 379

- [11] J. A. Begley and J.D. Landes: ASTM-STP514 (1972), 1
- [12] J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle: ASTM-STP536 (1973), 231
- [13] 宮本：日本金属学会会報, 14(1975), 531