

チタン合金における疲労き裂進展に伴う AE 発生特性

日大生産工(院) ○岩永 英利 日大生産工 小幡 義彦

日大生産工 高橋 清造

1. 諸言

近年、微小な損傷により疲労破壊等が起こる事故がたびたび起こっており、金属を構造物等で扱っていく上では、疲労破壊による事故は常に警戒していなければならない。昨今においては、自動的に監視を行う構造ヘルスマニタリングの研究が盛んに行われており、突発的な問題が発生した場合でも危険回避ができ、安全性を各段に向上させることが期待されている。¹⁾

アコースティックエミッション (Acoustic Emission ; AE) 法は、対象となる構造物に取り付けたセンサより、構造物の状態をオンラインモニタリングが可能である検査法である。そのため、破壊に至る欠陥の早期発見に有効な検査法であると言える。しかし、実際に検査を行う環境下では、様々な機器類の稼動による雑音の AE 波も同時に計測されているため、環境雑音との区別が困難であると言える。また、き裂進展に伴う AE 発生特性に関しても報告が少なく、様々な材料の AE 特性に関する

情報が必要不可欠である。そのため本研究では、AE が比較的活発であるチタン合金を用いた疲労試験を行い、環境雑音の除去およびき裂進展に伴う AE 発生特性の調査を目的とした。

2. 実験方法および評価方法

Fig. 1 に試験片の形状寸法およびセンサの取り付け位置を示す。本実験に用いたコンパ

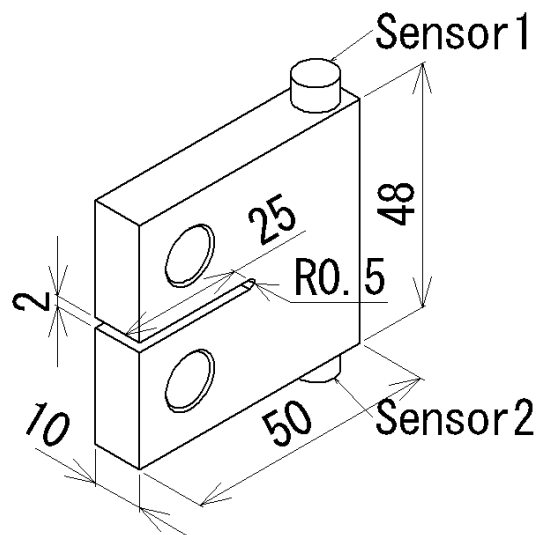


Fig. 1 Shape size and sensor position of compact specimen

クト試験片は、純チタンおよび Ti-6 Al-4 V (以下, 64 合金) を用い、人工欠陥は導入せず、き裂発生前から破壊に至るまでの AE およびき裂長さを 30 分間隔で計測した。疲労試験機には、島津製作所社製 EHF-EB5-10L 型疲労試験機を使用し、最大試験荷重は各試験片が疲労破壊に至る 3 kN を基準に、4 kN および 5 kN の 3 条件とし、応力比 $R=0.1$ および繰返し速度 1Hz 一定とした。AE センサには、小型 AE センサ (PICO) を用い、試験機からの振動による雑音を除去するため、しきい値を 40 dB とした。また、センサ 1 およびセンサ 2 における AE 計測誤差を $\pm 50 \mu s$ とし、条件に満たないものは全てサンプルより除去した。

評価方法は、パルスカウンターより dA 変換機を通すことで、AE 発生時の時間を電圧

Acoustic Emission Characteristics from Titanium Alloy during

Fatigue Crack Propagation

Hidetoshi IWANAGA, Yoshihiko OBATA and Seizo TAKAHASHI

で記録することが出来る．その際の電圧による AE の荷重位相は 0 V および 10 V が最小荷重，また 5 V が最大荷重となる．また，0 ～5 V が引張負荷，5～10 V が圧縮負荷となる．以上の方法により求めた AE 発生時の荷重位相の他に，AE event 数，振幅，センサ 1 およびセンサ 2 の AE 到着時間差により評価を行った．

3. 実験結果および考察

3.1 実験値による AE 到着時間差

Fig. 2 に，純チタン 4 kN の AE 到着時間差が $\pm 50 \mu\text{s}$ 以内の AE 発生荷重位相分布図を示す．様々な位相で多くの AE が発生おり．これらの中には環境雑音による AE も含まれている．環境雑音の多くは機械摩擦雑音による AE であると考えられる．そのため，機械摩擦雑音が発生するであろう箇所より，シャープペンシル圧折法による疑似 AE 源により，AE 到着時間差による調査を行った．試験片にピンを取り付ける深ピン部上下で計測を行った結果，平均して約 $\pm 3 \mu\text{s}$ 付近で AE が発生していることが分かった．また，取り付けられたピン側面部で計測を行った結果，界面の影響を受け，伝播速度が減衰した結果，約 $\pm 4 \mu\text{s}$ と先ほどより $1 \mu\text{s}$ 遅い結果となり，ピンより発生される AE の到着時間差は $\pm 3 \sim 4 \mu\text{s}$ であると考えられる．その他の箇所からも機械摩擦雑音が発生されていると考えられるが，様々な箇所計測を行った結果，ピン以上にセンサ間距離が開くと大きく AE 到着時間差がばらつく結果となった．

以上の結果を基に，純チタン 4 kN で発生した AE の発生箇所を調べた結果を **Fig. 3** に示す．調査方法は，P1～P8 の領域において，AE event 数を 1000 event ずつ抜粋し，行った．き裂進展による AE が発生する P3 および P4 では，破壊直前の P4 で発生した AE の多くは $0 \mu\text{s}$ 付近で多くの AE が発生しているため，き裂進展による AE が発生している

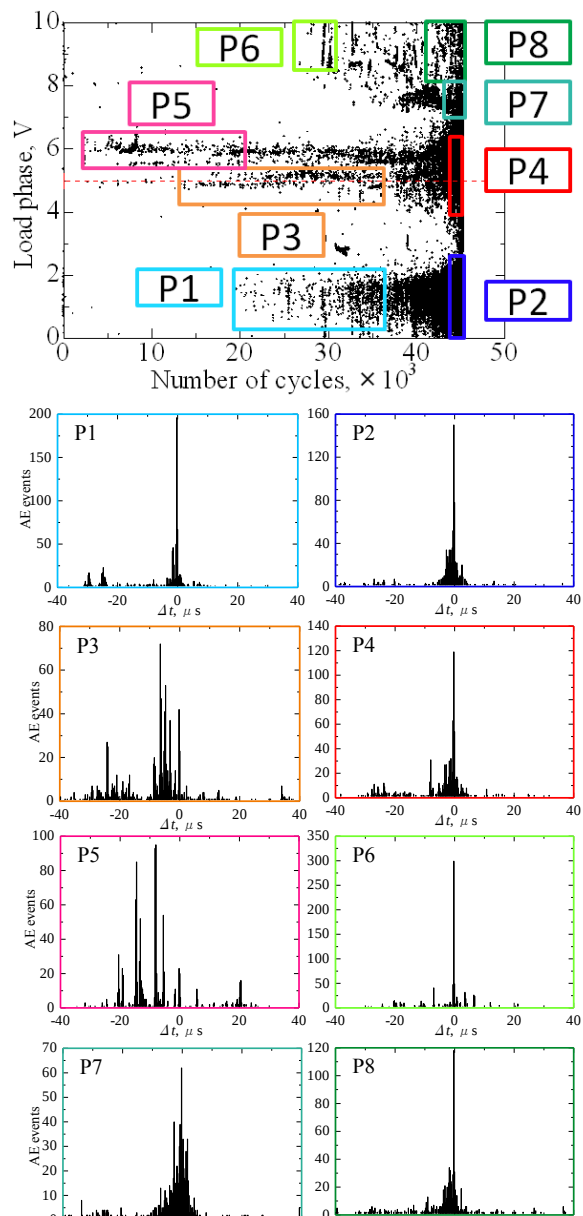


Fig.2 Arrival time lag for Pure Ti 4 kN

ことが分かるが，P3 においては，その他の領域で多くの AE が発生しているため，AE 到着時間差による機械摩擦雑音の特定に有効であると言える．また，最大荷重付近の P5 においても P3 と同様の結果が得られた．

引張負荷部の P1 および P2 においては，AE の多くは $0 \mu\text{s}$ 付近で発生しているため，この領域では，き裂進展により発生した破面摩擦による AE であると考えられる．また，圧縮負荷部の P6，P7 および P8 においても引張負荷部の結果と同様の結果が言えるが，P7 においては $\pm 3 \mu\text{s}$ においても多くの AE

が発生しているため、圧縮負荷部においては疲労の経過に伴い、機械摩擦雑音による AE も発生すると考えられる

3.2 計算値による AE 到着時間差

機械摩擦雑音による AE 伝播経路は、全てにおいてピンを経由しなければセンサに伝播することはない。そのため、試験片の深ピン部からの最小距離差を求めることで、最小 AE 到着時間差を求めることが出来る。本試験片の平均伝播速度は実験値より 5.55 km/s であることを求めた。その結果、最大で $\pm 3.04 \mu\text{s}$ 、最小で $\pm 1.16 \mu\text{s}$ という結果が得られた。理論上ではき裂進展に伴う AE 発生源の伝播距離差は $0 \mu\text{s}$ に限りなく近い場所で発生すると考えられるが、実際の実験における誤差を考慮すると、場合によっては深ピン部からの最小 AE 到着時間差を超える可能性も十分に考えられる。しかし今回は、き裂進展に伴う AE を抽出することを目的としているため、 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以上の AE に関しては全て除去を行い、評価を行っていきたいと思う。

3.3 純チタンの評価結果

Fig. 3 に純チタン 4 kN における疲労き裂進展に伴う AE 発生荷重位相分布図、AE event 数およびき裂長さを示す。AE 発生荷重位相分布図においては、図に示す 3 つの領域に分けることができる。そのため、 $0 \sim 3 \text{ V}$ を Opening AE、 $3 \sim 7 \text{ V}$ を Load Peak AE、 $7 \sim 10 \text{ V}$ を Closure AE とし評価を行う。各領域の AE 箇所を見てみると、Peak Load AE では表面き裂長さが 3 mm 程度伸びた後に多くの AE が発生し始めているが、Opening AE においては表面き裂発生前より多くの AE が発生している。各領域に分けた際の AE event 数においても、き裂進展による AE が発生されている Peak Load AE 以上に、Opening AE の AE event 数が多い結果となっており、その他の荷重においても同様の結果が得られた。これらの AE はき裂進展に伴う AE であると

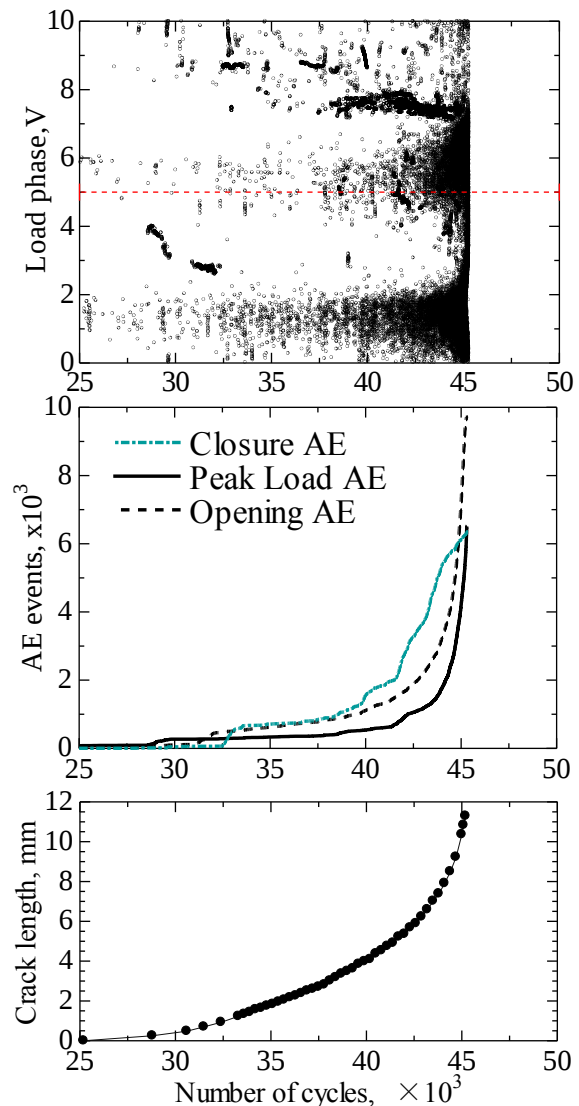


Fig. 3 Load phase behavior of acoustic emission, AE events and crack length for Pure Ti 4 kN .

考えられるため、純チタンにおいては引張負荷時の Opening AE においてき裂進展により発生した破面摩擦による AE が発生しやすいと考えられる。だが、全ての領域においてき裂進展に伴い AE event 数が増加しているため、比較的欠陥を発見しやすい材質であると考えられる。また、 $\pm 50 \mu\text{s}$ 時の AE event 数と比較した結果、各荷重とも約 30% のき裂進展による AE の計測が行えた。

3.3 Ti-6 Al-4 V の評価結果

Fig. 4 に Ti-6 Al-4 V 4 kN における疲労き裂新挙に伴う AE 発生荷重位相分布図、AE

event 数およびき裂長さを示す。AE 発生荷重位相分布図では、純チタンと同様、3つの領域に分けられた。しかし Fig. 4 においては、き裂進展による AE が発生する Peak Load AE の AE event 数が少なく、Closure AE の AE event 数が極端に多いことが見受けられる。各領域の AE event 数は、Peak Load AE が 3000 event 程度に対し、Closure AE では 35000 event と約 10 倍近い発生数となった。他の荷重条件においても同様の結果が得られているため、Ti-6 Al-4 V においては、圧縮負荷時の Closure AE においてき裂進展により発生した破面摩擦による AE が発生しやすいと考えられる。だが、き裂進展による AE が発生されている Peak Load AE における AE event 数が少ない。±50 μ s 時の AE 発生荷重位相分布図を確認すると、き裂進展による AE と考えられる AE が発生しており、これらの AE 到着時間差が 0 μ s から大きく外れていた。そのため、Ti-6 Al-4 V のき裂進展による AE 発生特性のさらなる研究が必要であると言える。また、50 μ s 時の AE イベント数と比較した結果、純チタンと同様、平均して約 30% のき裂進展による AE の計測が行えた。

4. 結言

- (1) 機械摩擦雑音の AE をセンサ間の AE 到着時間差により求めた結果より、純チタンおよび Ti-6 Al-4 V 合金において、総 AE event 数の約 30 % ものき裂進展に伴う AE の計測が行えた。
- (2) 純チタンにおける Peak Load AE の AE event 数は荷重の増加に伴い増加する傾向を得られたが、Ti-6 Al-4 V 合金においては荷重の増加に伴い減少した。
- (3) き裂進展に伴う破面摩擦により発生したと考えられる AE は、純チタンでは Opening AE、Ti-6 Al-4 V 合金では Closure AE が多く計測された。

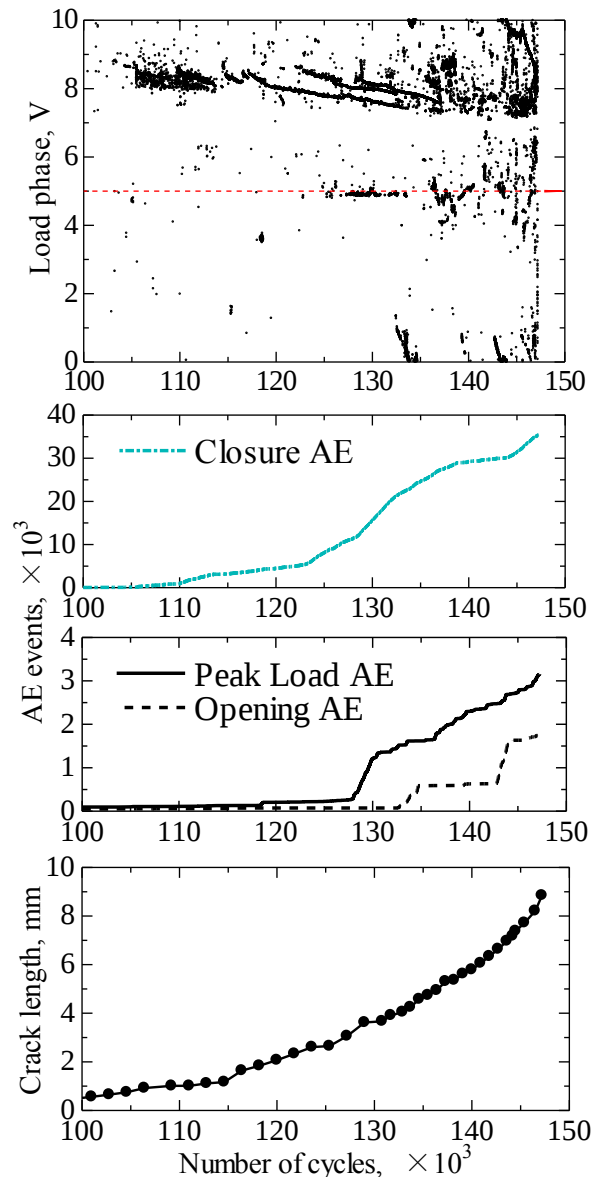


Fig. 4 Load phase behavior of acoustic emission, AE events and crack length for Ti-6 Al-4 V 4 kN.

- (4) 純チタンではき裂進展と AE との間に良い相関関係が見受けられたが、Ti-6 Al-4 V 合金においてはその相関が現れず、特異な結果となった。

参考文献

- 1) 福永久雄, 跡部哲士: 構造物に内蔵したセンサによる構造健全性診断技術, 日本信頼性学会誌, 第 32 巻, 第 5 号, pp.299-306 (2010)