

コンパクト・テンション試験片における疲労き裂進展の自動計測*

角 田 義 秋*¹ 下 河 利 行*¹ 濱 口 泰 正*¹

An Automatic Measurement of Fatigue Crack Propagation in Compact Tension Specimens

Yoshiaki KAKUTA *¹, Toshiyuki SHIMOKAWA *¹, and Yasumasa HAMAGUCHI *¹

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate an automatic measurement system using a compliance method for analysis of fatigue crack propagation. This automatic measurement system consists of a combination of a clip-gage sensor and fatigue data acquisition software on the market. This system was used to measure fatigue crack propagation in 7150-T651 aluminum alloy specimens of a CT (compact tension) type. Fatigue tests of constant amplitude loading were carried out under the environment of constant temperature and humidity. At the same time, crack propagation observation by a CCD (Charge Coupled Device) microscope was video-recorded and analyzed later in order to confirm the accuracy of the crack length measured by this system. Comparison of crack propagation obtained by both methods indicated that the results of this automatic measurement system showed good agreement with those obtained from analysis of the recorded video images. This system is this effective for unmanned measurement of fatigue crack propagation.

Keywords : Automatic data acquisition, Fatigue crack propagation, Compliance technique, Compact tension specimen, CCD microscope, Video image analysis

概 要

本研究の目的は、無人で、疲労き裂進展データを収集するためのコンプライアンス法を用いた自動計測システムを評価することである。この自動計測システムは、市販のクリップゲージと疲労き裂の計測・収集ソフトウェアの組合せで構成する。このシステムを用いて、7150-T651アルミニウム合金厚板コンパクト・テンション(CT: Compact Tension)タイプ試験片における疲労き裂進展を計測した。なお、一定荷重振幅の疲労試験は温度・湿度を一定に保持した環境下で実行した。この自動計測システムによる測定値の妥当性を確認するため、同時にCCD(Charge Coupled Device)顕微鏡により観察したき裂進展をビデオ画像に記録し、試験後に解析した。両方の計測方法による結果を比較して、以下の結論が得られた。自動計測システムによるき裂進展データはビデオ画像解析結果と良い一致を示した。このため、本システムは疲労き裂進展の無人計測に有効であることが明らかになった。

記号・用語

a_0 : 初期き裂長さ(mm)
 a : 疲労き裂長さ(mm)
 B : 試験片の板厚(mm)
 $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$

: 多項式における回帰係数

$C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$

: 多項式における回帰係数

da/dN : き裂進展速度(mm/cycle)

E : 弾性係数(MPa)

E' : 平面ひずみ弾性係数、 $E/(1 - \nu^2)$

f : 繰返し速度(Hz)

K : 応力拡大係数範囲(MPa \sqrt{m})

K_{th} : 下限界応力拡大係数範囲(MPa \sqrt{m})

* 平成9年10月20日受付(received 20 October 1997)

*¹ 機体部(Airframe Division)

P	: 荷重全振幅(kN)
n	: 荷重繰返し数(cycle)
P	: 荷重(kN)
P _{max}	: 最大荷重(kN)
R	: 応力比、 $R=P_{\min}/P_{\max}$
	: 初期切欠き先端の半径(mm)
v	: き裂開口変位置、COD(mm)
W	: 試験片の板幅(mm)
X	: 荷重軸線からクリップゲージの計測位置までの距離(mm)

AFCP : Advanced Fatigue Crack Propagation
(ソフトウェア名)

CCD : Charge Coupled Device

CCT : Center Cracked Tension

COD : Crack Opening Displacement

CT : Compact Tension

1. まえがき

疲労試験は短時間で終了する静強度試験と異なって、 $10^6 \sim 10^7$ サイクルという長時間の連続運転となる場合が多い。例えば、 10^6 サイクルの疲労試験を繰返し速度 1Hz で実施すると、約 11.6 日かかる。疲労き裂進展データの取得は、一般に試験の開始から終了までである一定間隔毎に読み取り顕微鏡を用いた目視観察を行い、疲労き裂長さとその時の荷重繰返し数を観察者が記録している。従って、夜間など疲労き裂の観察を継続できない場合には、試験機を途中で停止させなければならない。そのため荷重レベル、繰返し速度、環境などの試験条件によっては、運転休止の影響によってき裂進展データの精度に問題を生じる場合がある。また、疲労試験の最終破壊近傍では、測定間隔を次第に短くする必要があるので、観察者によるき裂長さの計測ミスや測定データの記入ミスなど誤ったデータの混入も考えられる。これらの諸問題を解決するためには、1本の試験片が最終破壊に至るまで試験機を連続的に運転すると共に、き裂進展を無人で、安定して計測できるシステムの導入が必要となる。

疲労き裂長さの自動計測については、これまでクラックゲージ法、電磁誘導法、コンプライアンス法、背面ひずみ法、電位差法、アコースティック・エミッション法、超音波法など種々の方法が提案・研究され、Tunna¹⁾、Marsh²⁾、Beevers³⁾、國尾ら⁴⁾によって系統的に整理され、報告されている。著者ら⁵⁾も疲労試験中の負荷荷重、ひずみ、繰返し数などの試験データを、無人で一定間隔毎に収集・処理し、リアルタイムにグラフ表示するシステムの構築を図ってきた。しかし、同システムはき裂長さの自動計測を目的とするものでなかった。

本研究は、各種の疲労試験データを完全に無人状態で、リアルタイムに収集することが可能なコンプライアンス法による自動計測システムを選択し、その評価と運用上における問題点を抽出することを目的としている。き裂進展データの収集方式としては、市販のクリップゲージと、疲労き裂進展データ収集ソフトウェア AFCP (Advanced Fatigue Crack Propagation) プログラムを組合せた。自動計測システムによる取得データの妥当性を確認するには、従来から多用されている読み取り顕微鏡による目視観察に代えて、新たに CCD (Charge Coupled Device) 顕微鏡を使用した。CCD 顕微鏡方式は、試験データをリアルタイムに表示できないが、疲労き裂の先端部分が高倍率で撮影されること、き裂進展を撮影したビデオ画像の再点検が可能であることなどから、比較的誤りの少ない高精度な疲労き裂長さを測定することができる。疲労試験は、温度・湿度を一定に制御した環境下で、厚板 CT (Compact Tension) 試験片を用いて行った。以上の結果により、本システムの有効性を確かめると共に、運用上の問題点を明らかにした。さらに、インク浸透法によっても疲労破面のき裂先端形状の観察を行ったので、その結果についても述べる。なお、供試材料に用いた 7150-T651 Al 合金の静・疲労強度特性については、別報で報告する予定である。

2. 疲労試験データの収集方法

2.1 疲労き裂進展の自動計測法

疲労き裂長さの計測には、(1)読み取り顕微鏡を用いた目視観察による方法、(2)き裂の進展に対応した抵抗変化量を検出するクラックゲージ法、(3)渦電流を用いたき裂追尾装置による電磁誘導法、(4)き裂の進展に伴う試験片の開口変位置 (COD : Crack Opening Displacement) を検出するクリップゲージによるコンプライアンス法、(5)CT 試験片の背面中央に生じるひずみを検出する背面ひずみ法、(6)き裂の進展に対応した電圧変化量を検出する直流および交流電位差法、(7)超音波を利用する方法、など種々の方式がある。

(1)の方法は、疲労き裂長さを自動計測する方式と異なるが、自動計測システムによるき裂長さの測定結果と比較する直接的な手法として併用した。き裂長さの自動計測法として(2)~(7)の方式がこれまでに提案されているが、本研究では(a)疲労き裂長さが完全に無人な状態で連続計測できること、(b)取得されたデータがリアルタイムに表示されること、(c)取り扱いが簡便であること、(d)市販のソフトウェアを含めたシステム一式が準備されていることなどを考慮して、適切と思われる方法を選定した。その結果、現在使用している疲労試験機に適用できるクリップゲージと疲労き裂進展データ収集ソフトがすでに

開発されているため、自動計測システムとしては(4)のコンプライアンス法を採用した。

2.2 コンプライアンス法

本研究に使用した自動計測法におけるコンプライアンスは、縦弾性係数の逆数に相当するものと考えられ、き裂を有するCT試験片の変位 v と荷重 P の比によって与えられるとすれば、式(1)のように表示される。

$$\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{v}{P} \tag{1}$$

疲労き裂長さ a は、このコンプライアンスを測定することによって導き出される。また、コンプライアンス $BE' \cdot (v/P)$ と a/W の関係は、き裂長さの適用範囲が $0.2 \leq a/W \leq 0.975$ において、次の多項式(2)で近似されている。

$$BE' \cdot \left(\frac{v}{P}\right) = \left(1 - \frac{X/W}{a/W}\right) \left(\frac{1+a/W}{1-a/W}\right)^2$$

$$\left\{ b_0 + b_1 \left(\frac{a}{W}\right) + b_2 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + b_3 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + b_4 \left(\frac{a}{W}\right)^4 + b_5 \left(\frac{a}{W}\right)^5 \right\} \tag{2}$$

ここで、 X は荷重の作用軸とクリップゲージによるCODの検出位置までの距離を示す。この場合は、クリップ

ゲージを27.00mm離れた位置に取り付けたため、 $X = -27.00$ となる。 $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ は、CT試験片形状に対する弾性解析の結果を最小二乗法によって近似した回帰係数である。さらに、 a/W はコンプライアンス測定値 U の多項式⁶⁾として、式(3)のように近似される。

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U^1 + C_2 U^2 + C_3 U^3 + C_4 U^4 + C_5 U^5 \tag{3}$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{BE' \cdot \left(\frac{v}{P}\right)} + 1.0} \tag{4}$$

この場合の回帰係数は、式(3)と式(4)から、 $C_0 = 1.003, C_1 = -4.87, C_2 = 23.4, C_3 = -294, C_4 = 1510, C_5 = -2640$ の各値として導かれている。その結果、 W が既知で、疲労試験中のコンプライアンス $BE' \cdot (v/P)$ が測定されるならば、疲労き裂長さは上式から連続的に求めることが可能となる。

疲労き裂進展速度 da/dn と応力拡大係数範囲 K の関係を求めることは、供試材料のき裂進展特性を評価する上で重要な資料となる。CT試験片の応力拡大係数範囲 K は、荷重全振幅 P 、板幅 W 、板厚 B などが既知で、疲労き裂長さ a が上述の方法で求められれば、ASTM規格E647-83⁷⁾に示された次式(5)から導くことができる。ただし、 $a/W \leq 0.2$ の範囲で有効となる。

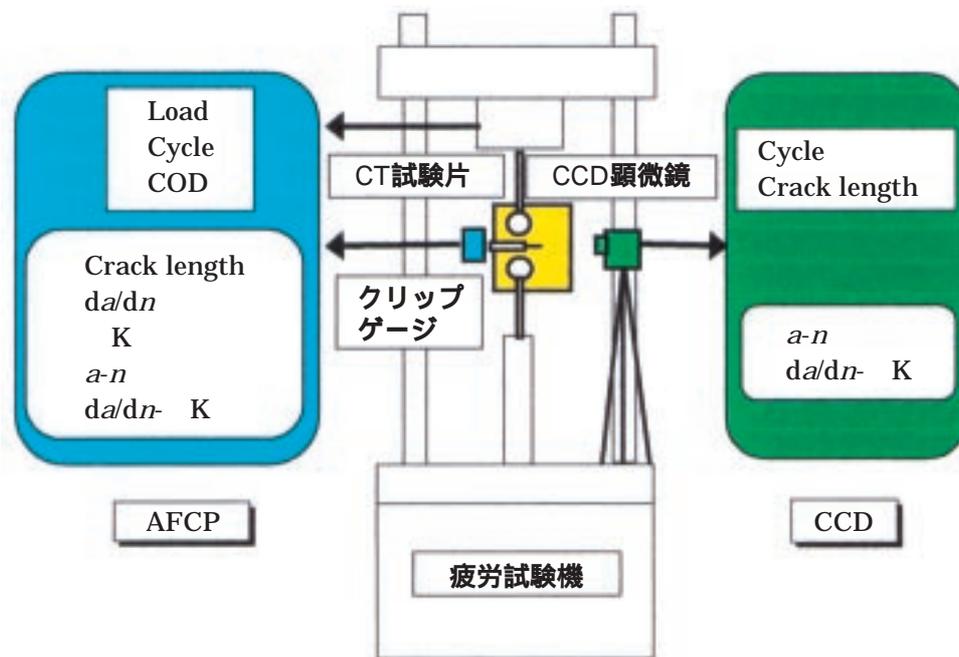


図1 疲労データ取得システム

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(2 + \frac{a}{W}\right) \left\{ 0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\} \left(1 - \frac{a}{W}\right)^2 \quad (6)$$

2.3 AFCP プログラム

本研究における疲労データ取得システムの概略を図1に示す。疲労き裂の自動計測方法は、同図の左側に示す疲労き裂進展データ収集ソフトのAFCPプログラム(インストロン社製)とクリップゲージ(インストロン社製)の組み合わせで構成される。AFCPプログラムは、片側切欠きを有するCT試験片、平板中央切欠き引張(CCT:Center Cracked Tension)試験片および3点曲げ試験片の3タイプの疲労試験に適用できるが、本研究ではCT試験片の場合について応用した。同プログラムは市販のパソコンにインストールされ、疲労試験機から荷重と荷重繰返し数、クリップゲージからき裂の進展に伴うCT試験片のコンプライアンスをそれぞれ数値データとして取り込むこと

ができる。その後、取得された各数値データはき裂進展速度 da/dn および応力拡大係数範囲 K 等にそれぞれ換算され、さらに“疲労き裂長さ a - 荷重繰返し数 n ”曲線、“ $da/dn - K$ ”曲線などとしてCRTの画面に表示される。最終的に取得される数値データは、疲労き裂に関連する測定データ21項目の中から、任意の7項目が一括して選択できるようになっている。例えば、き裂長さ a 、荷重繰返し数 n 、コンプライアンス(COD)、き裂進展速度 da/dn 、応力拡大係数範囲 K 、応力比 R 、最大荷重 P_{max} などの各数値データが、疲労試験の開始から供試材料が最終破壊するまでの間、準リアルタイムに連続して取得される。ただし、今回の試験では a 、 n 、 da/dn 、 K などの各数値データのみを活用して、“ $a - n$ ”曲線、“ $da/dn - K$ ”曲線などを市販の一般表計算ソフトを適用して求めた。この理由としては、突発的な試験機の停止による測定データの補正、表示曲線のレイアウト変更、使用単位の変更表示など、これら一連の作業が必要になったためである。

2.4 クリップゲージ

クリップゲージの仕様は、CODを測定するための評定間距離が5mm(最大移動量2mm)、使用温度範囲が0~80、そして重量が約35gである。クリップゲージのCODと検定器変位の関係を図2に示す。クリップゲージの最

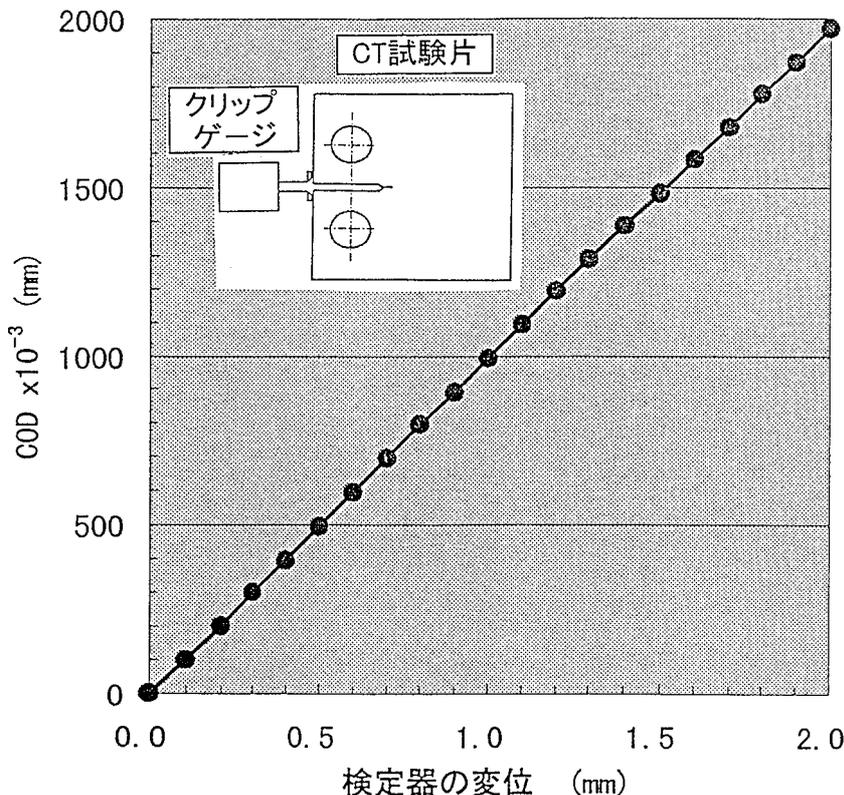


図2 クリップ・ゲージのCODと検定器変位の関係

大移動量(2mm)は、1,000倍に拡大して表示され、測定範囲内で良好な線形性が保持されている。クリップゲージは、CT試験片の荷重軸ラインより左側27mmの位置で、試験片側面の中央近傍に予め備え付けたナイフ・エッジ部分に取り付けた。CT試験片におけるCODデータは、初期き裂長さ約24mmから最終破壊する直前の約70mmまで、疲労き裂長さが0.1mm進展する毎にそれと対応した繰返し数 n を連続的に記録した。

2.5 CCD顕微鏡

図1の右側に示したき裂長さの直接観察は、従来使用していた測長器の付いた倍率20倍程度の読み取り顕微鏡に代えて、新たにCCD顕微鏡(ハイロックス社製)を使用した。CCD顕微鏡の大きな特徴は、供試材料の疲労試験中における損傷過程を、非接触で任意の指定された倍率に拡大してリアルタイムの監視、観察画像のビデオ録画、ビデオ再生などが可能なことである。CCD顕微鏡の性能は、画質が38万画素、水平解像度が約360本である。疲労き裂長さは主にCCD顕微鏡側のCT試験片の片面に注目して観察し、適宜裏面側を読み取り顕微鏡で観察した。これは厚板CT試験片の表裏で、疲労き裂の進展挙動に大きな相違を生じるかどうかを確認するためである。CCD顕微鏡は、倍率250倍に拡大した疲労き裂の先端を、試験片が最終破壊するまで間欠的に撮影した。また、き裂長さに対応した荷重繰返し数も音声で同時に記録した。観察したCT試験片の表・裏面には、き裂長さの測定が正確、容易となるように、予め0.5mm間隔のケガキ線を刻

んだ。き裂長さと同重繰返し数の各試験データは、疲労試験が終了した後、CCD顕微鏡で録画されたビデオ画像を解析することから得られる。ビデオ解析によるき裂長さと同重繰返し数の各数値データは、前述の一般表計算ソフトウェアを用いて“ $a - n$ ”曲線として表示される。クリップゲージによる自動計測法は、疲労試験機がアクシデントによって停止しないかぎり、観察者が不在でも疲労データの収集を連続的に実行できる利点がある。しかしながら、CCD顕微鏡の場合は観察者が夜間に不在となることにより、疲労データを連続的に収集できないという欠点を持っている。

3. 試験方法

3.1 試験片

疲労試験に用いた供試材料7150-T651 Al合金は、7075 Al合金に比べて圧縮強度が1割程度高いため、米国の航空機B757、B767における主翼上面外板やロンジロン、上面ストリンガーなど機体構造の一部に使われている。最近では新しく開発された熱処理条件T77511によって、B777の桁材、ストリンガー、キール・ビーム、シート・トラックなどに採用されている⁸⁾。コンパクト・テンション(CT)試験片は米国のASTM規格E647-83⁷⁾に準じており、その形状寸法を図3に示す。CT試験片はすべてL-T方向に切り出し、機械加工による人工切欠き長さが20mm、さらにその先端約4mmを板厚方向に平行で直線型となるように放電加工し、最終的な初期き裂長さを約24mm、初期切欠き先端の半径を約0.2mmとした。板

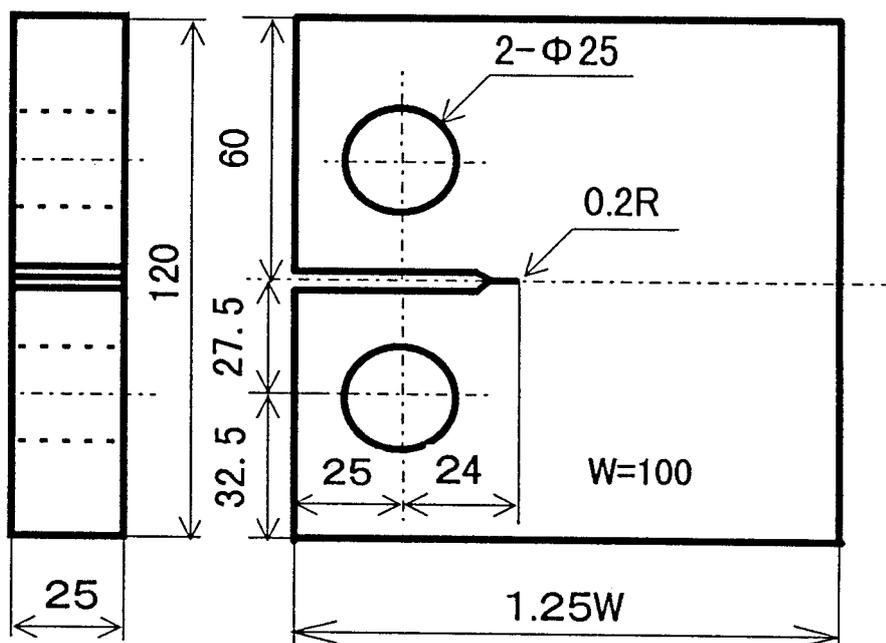


図3 コンパクト・テンション試験片の形状寸法

厚 $B = 25\text{mm}$ は同規格による板厚条件 ($W/20 \leq B \leq W/4$) を満足している。

3.2 疲労試験機と試験条件

疲労試験には、荷重容量 100kN のデジタル油圧サーボ式材料試験機 8502 型 (インストロン社製) を使用した。試験条件は、CT 試験片であるため部分片振り引張の荷重繰返しとし、最大荷重を 9.81kN ($1,000\text{kgf}$) 一定にして、応力比 $R=0.15, 0.3, 0.5$ の 3 種類を選んだ。これらの荷重条件は、ASTM 規格 E647-83 における疲労き裂の進展速度条件、 $da/dn > 10^{-8}\text{m/cycle}$ の範囲をほぼ満たしている。CT 試験片の個数は各応力比について 4 個づつ準備し、各 3 個を供試材料の試験データ取得に、残りの各 1 個をインク浸透法による疲労き裂先端の形状確認に用いた。繰返し速度は、クリップゲージの動的追従性の問題を避けるためと、ストロボ装置の併用なしでもき裂の観察が容易となるように 1Hz に設定した。試験環境は温度、湿度が一定に制御できる実験室で、それぞれ 22 ± 3 、 $50\% \pm 10\%$ に維持した。このような温度、湿度を一定に制御した試験環境は、クリップゲージを構成するひずみゲージの出力が温度、湿度の変化に伴って生じる不安定な変動を避けられること、疲労試験機の性能を長時間にわたって安定して維持できること、供試材料である 7150-T651 Al 合金におけるき裂進展速度のばらつき要因の一つを除去できることなどの利点が考えられる。

3.3 疲労試験データの収集状況

図 4 は疲労試験および疲労データの取得状況を示す。図中の (a) は温度・湿度を一定に制御した試験環境下で、疲労試験機、試験片、CCD 顕微鏡、読み取り顕微鏡、パーソナルコンピュータなど試験状況の全体構成を示す。(b) は CT 試験片の取り付け状態を拡大したもので、写真中央がクリップゲージと CT 試験片、その写真左側が CCD 顕微鏡、写真右側が読み取り顕微鏡である。(c) は疲労き裂進展データ自動計測の一例で、CRT 画面の上段には疲労データが準リアルタイムに取得される状況を表示し、その下段には “P - COD” 曲線と “ $a - n$ ” 曲線、“ $da/dn - K$ ” 曲線のどちらか一方を常時モニターできるようになっている。(d) は CCD 顕微鏡からのき裂画像を、CRT の画面上にリアルタイムに表示する様子である。

図 5 は CCD 顕微鏡による応力比 $R = 0.5$ の場合のき裂ビデオ画像を、ビデオプリンターに接続してハードコピーした一例で、疲労き裂の先端とケガキ線の位置関係から、き裂長さの数値データを高精度に取得できる。図中 (a) は、切欠き先端 (初期き裂長さ $a_0 = 23.75\text{mm}$) から疲労き裂が発生した直後の様子を示したもので、画像解析の結果から疲労き裂長さが $a = 24.06\text{mm}$ と測定された。

CCD 顕微鏡は、疲労き裂長さを切欠き先端から約 0.31mm 進展したところで確認したことになり、高精度な分解能を有していることがわかる。また、CCD 顕微鏡の照明装置内蔵光学レンズは、特別にストロボ装置を使用しなくても繰返し速度が 1Hz 程度であれば、疲労き裂を十分に捕捉できることが明らかになった。図中 (b) は、疲労き裂長さが十分に進展した $a = 35.77\text{mm}$ の場合である。

4. 試験結果と考察

4.1 疲労破面におけるき裂先端の形状

クリップゲージによる疲労き裂進展の自動計測システムは、従来から多用されている読み取り顕微鏡を用いた目視観察と比較し、き裂進展挙動におけるき裂長さ測定精度について確認する必要がある。ところが、今回のような厚板試験片においては、目視観察する試験片表面の疲労き裂長さとは裏面側におけるき裂長さでその進み方に違いを生じ、試験片の板厚方向に対してほぼ平行、または少し傾斜して進展する場合がある。あるいは試験片の表面とその内部で異なった進展挙動を示し、試験片内部の板厚中央近傍が先行し、き裂先端の形状が舌状にやや湾曲した形で進む場合も懸念された。そこで厚板 CT 試験片の疲労破面におけるき裂の先端部分は、どのような形状で進展するのかを確かめるため、各応力比における一部の疲労試験に対してインク浸透法を適用した。インクは市販の XY レコーダに用いられる赤、青、緑、茶色の 4 種類を使用した。インク浸透法は、疲労試験中におけるき裂先端の形状に関する痕跡を明確に残せる、き裂の目視観察が容易になるなどの利点がある。

図 6 は、疲労試験中における任意のき裂長さ 4ヶ所で破面にインクを注入し、各応力比に対応した最終破断面の一例を (a) $R = 0.15$ の場合、(b) $R = 0.3$ の場合、(c) $R = 0.5$ の場合について表示した。各応力比の左側には実破断面そのものを、その右側にはインク注入位置、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 における疲労き裂の先端部分および最終破壊部のき裂前縁箇所にそれぞれ実線を加筆して表示した。疲労き裂は、インクを注入したいずれの箇所においても板厚方向にほぼ平行で直線的な形状を示し、さらにこのような形態を一定に保ちながら進展して、最終破壊部に達している様子が認められた。なお、実線を加筆した以外で、き裂の先端部分が湾曲しているように観察される白い部分が認められるが、これはインクを 2 度、3 度と注入したことによるインクの滲みむらである。本材料は、7,000 系のぜい性材料であること、また静的破壊荷重が 88.4kN に対して、繰返し負荷の最大荷重が 9.81kN と比較的低い荷重レベルに設定したことなどから、き裂前縁が直線的に進展したものと考えられる。

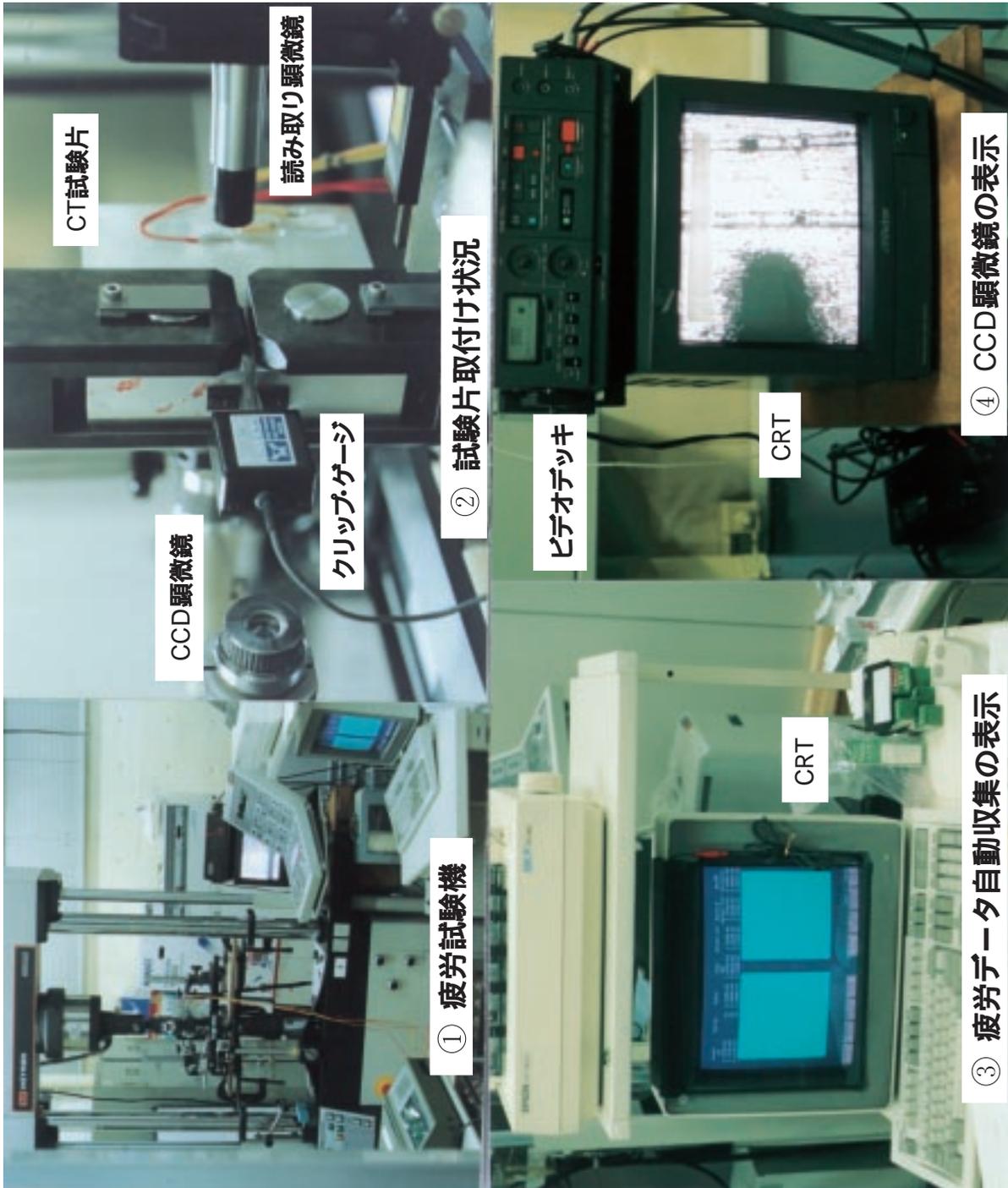


図4 疲労試験および疲労データの取得状況

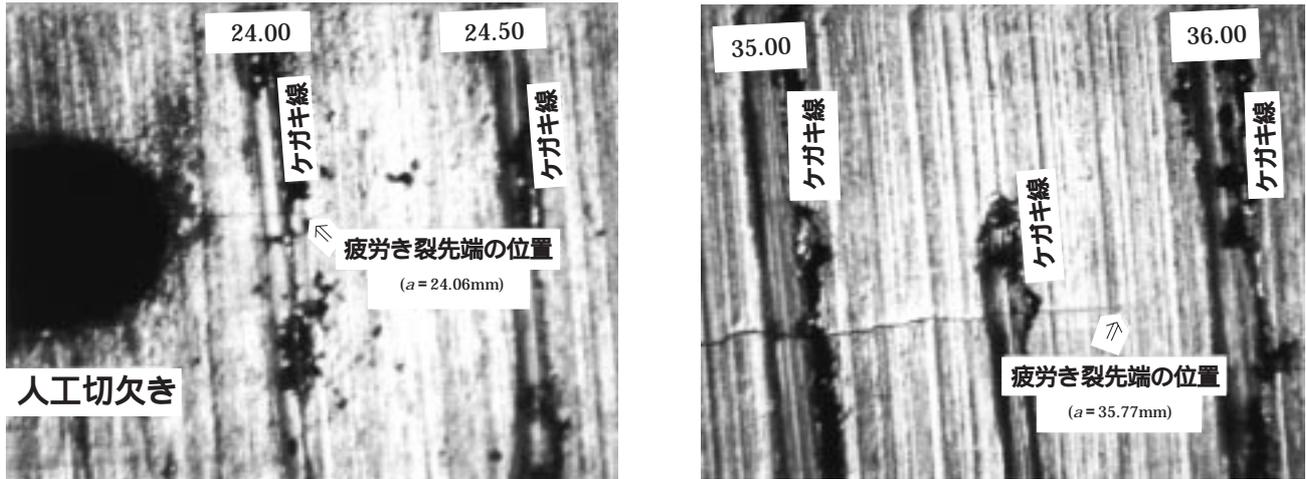


図5 CCD 顕微鏡画像の一例

CT試験片の最終破壊部におけるき裂先端の形状を図7に示す。疲労き裂の最終破壊部におけるき裂前縁は、観察した表・裏面のき裂長さ比べ板厚の内部がわずかに先行しているが、先行部分が板厚の中央でなく板厚の約1/4の所で見られ、この舌状に湾曲した小さな形状が2つ連なった状態であった。このような破壊形態はいずれの試験片においても認められた。疲労き裂は、目視観察している表・裏面が一致して進展する場合と、観察側のき裂が裏面側のき裂長さより若干大きく進む、あるいは小さく進む場合が観察されている。しかし、き裂長さとしては表・裏面で大きな相違を生じていない。

インク浸透法は、疲労き裂の観察やき裂先端形状の痕跡を残すのに有効であるが、インクを注入することによって一時的に疲労き裂進展速度を加速させる問題がある。その一例を応力比 $R=0.15$ の場合について図8に示す。図中において、実線がクリップゲージによる自動計測結果、印がCCDカメラによるき裂進展の画像解析データ値である。また、インク注入位置、
、
、
におけるき裂進展速度への影響を明らかにするため、インクを注入した近傍の疲労き裂自動計測結果を部分的に拡大して表示した。拡大図では、 $a = 34.04\text{mm}$ 、 $a = 44.10\text{mm}$ 、 $a = 57.91\text{mm}$ 、 $a = 66.25\text{mm}$ においてインクの注入位置を矢印で表示したが、その部分を境にして疲労き裂長さの傾きが急勾配となり、き裂進展速度の増加している様子が認められる。従って、供試材料の正しいき裂進展速度を求める試験には、インク浸透法の併用を推奨できない。

4.2 疲労き裂の計測結果

クリップゲージによる疲労き裂の自動計測とCCDビデオ画像解析結果の関係を図9.1～図9.3に示す。図中に

において、実線がクリップゲージによるき裂進展自動計測の結果を示し、応力比 $R = 0.15$ 、 0.3 、 0.5 におけるCCD顕微鏡によるき裂進展画像解析データ値をそれぞれ \times 印、

印、印で表した。疲労き裂の画像解析データは、CCD顕微鏡を設置した側の片面データである。各画像解析データの表示間隔は、ところどころ大きく開いている箇所がある。これは夜間に観察者が不在であっても、疲労試験機を連続運転していることを意味する。

応力比 $R = 0.15$ の“ $a - n$ ”曲線を図9.1に示す。この場合は3種類の疲労荷重の中で1番大きい応力振幅となっている。クリップゲージによる自動計測は、CCD顕微鏡による計測値と比較すると、初期き裂の発生から最終破壊寿命まで取得されたデータの全領域にわたって、3本の試験片におけるき裂進展すべてが良い一致を示した。最終破壊寿命としては、61.6万サイクル、62.3万サイクル、63.1万サイクルの各値であった。

応力比 $R = 0.3$ の“ $a - n$ ”曲線を図9.2に示す。この場合は3種類の疲労荷重の中で中間的な大きさの応力振幅となっている。クリップゲージによる自動計測は、CCD顕微鏡による計測値と比較すると、初期き裂の発生から最終破壊寿命まで取得されているデータの全領域にわたってほぼ一致する場合と、若干大きくなっている場合が認められた。後者の例は、CCD顕微鏡側とその裏面におけるき裂長さとの平均値をとれば、クリップゲージによる自動計測データとほぼ一致する。これは読み取り顕微鏡による目視観察の併用で確認されている。3本の試験データは、初期き裂の発生から最終破壊寿命まで、 $R=0.15$ の場合に比べて応力振幅が少し小さくなったためか、若干のばらつきが認められる。最終破壊寿命としては、79.9万サイクル、80.8万サイクル、85.3万サイクルの各値であった。

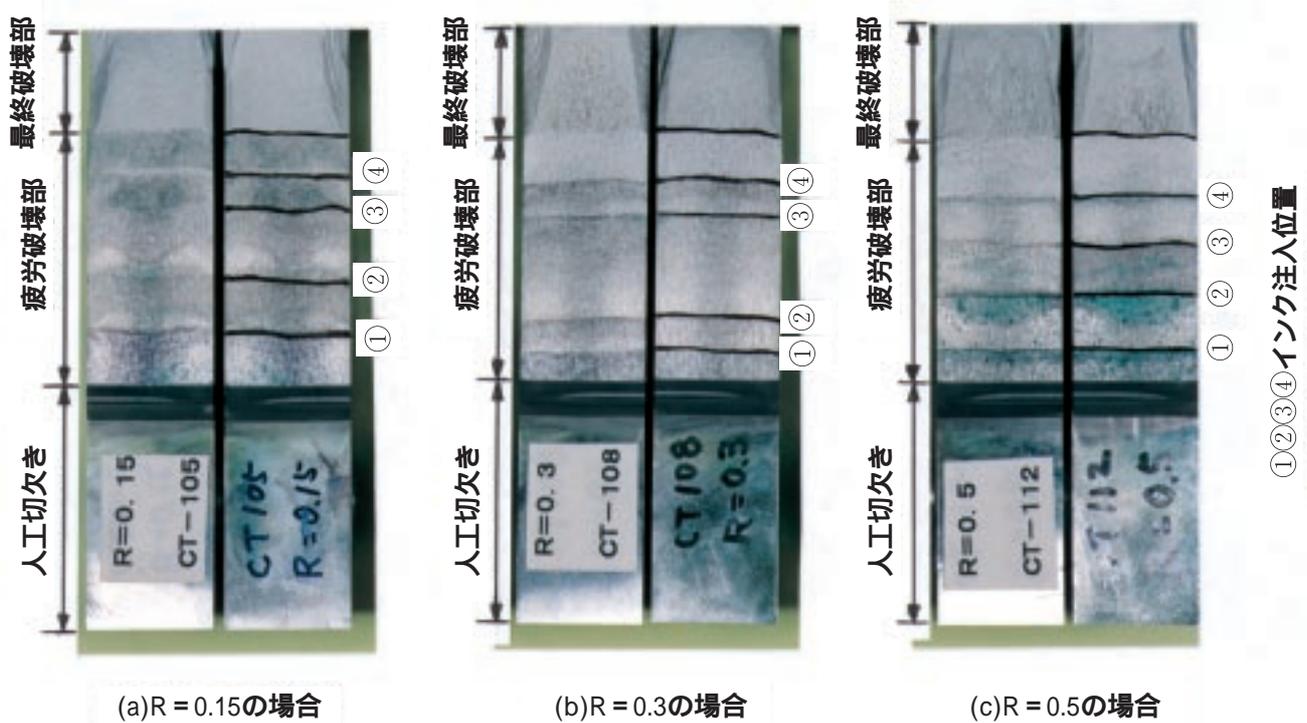


図6 インク浸透法によるき裂先端の形状と最終破壊状況

応力比 $R = 0.5$ の “ $a - n$ ” 曲線を図 9.3 に示す。この場合は 3 種類の負荷荷重の中で 1 番小さい応力振幅となっている。クリップゲージによる自動計測は、CCD 顕微鏡による計測値と比較すると、初期き裂の発生から最終破壊寿命まで取得されているデータの全領域にわたってほぼ一致する場合、若干小さくなっている場合が認められた。3 本の試験データは、応力比 $R = 0.15$ 、 0.3 に比べて応力振幅が 1 番小さいため、人工切欠きから初期き裂が発生するまでの繰返し数や最終破壊寿命に大きなばらつきが認められた。最終破壊寿命としては、267 万サイ

クル、278 万サイクル、289 万サイクルの各値であった。

図 9.1 ~ 図 9.3 の結果から、疲労データのクリップゲージによる自動計測結果は、各応力比とも画像解析データ値とほぼ同一の傾向が認められ、観察されたき裂長さ全体にわたって良い一致を示した。また画像解析データの方が若干高め、あるいは低めの場合、CCD 顕微鏡側のデータと裏面におけるき裂長さの平均値をとれば、クリップゲージによる自動計測データとほぼ一致することが確かめられた。最終破壊寿命は、負荷の最大荷重を一定にして応力振幅の影響について調べたが、応力振幅が

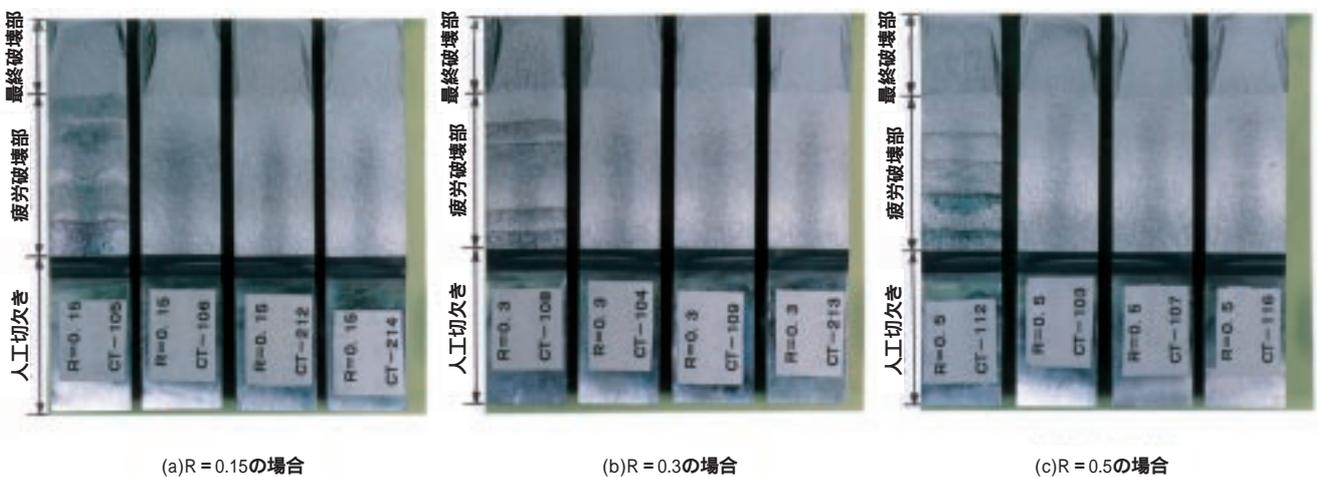


図7 各応力比における CT 試験片の疲労破壊状況

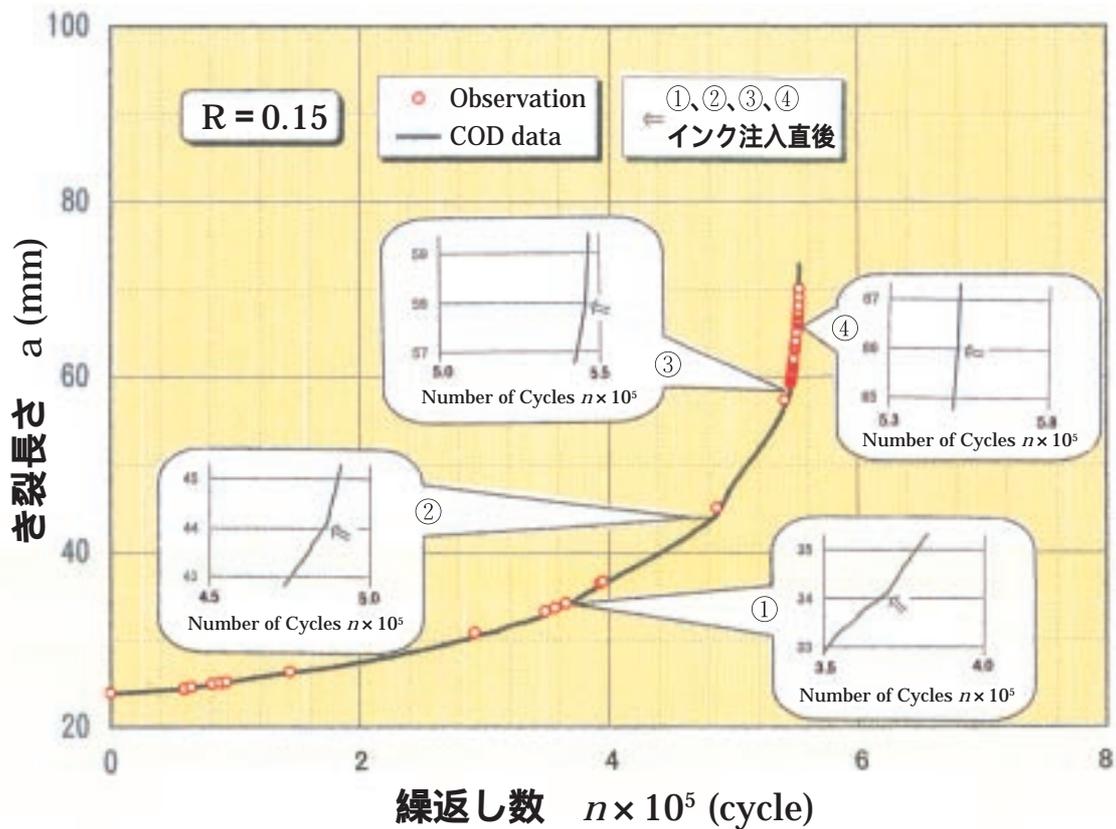


図8 インク浸透法によるき裂進展速度への影響

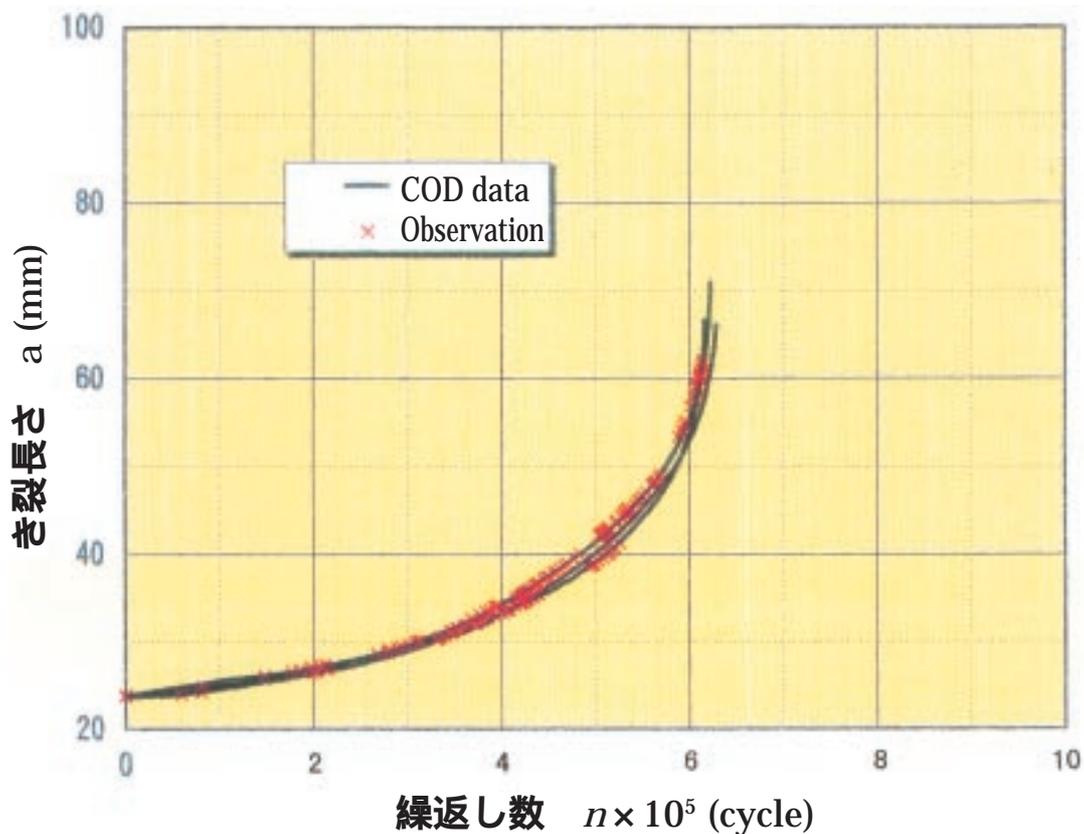


図 9.1 き裂の自動計測と CCD ビデオ画像解析結果の関係(R = 0.15)

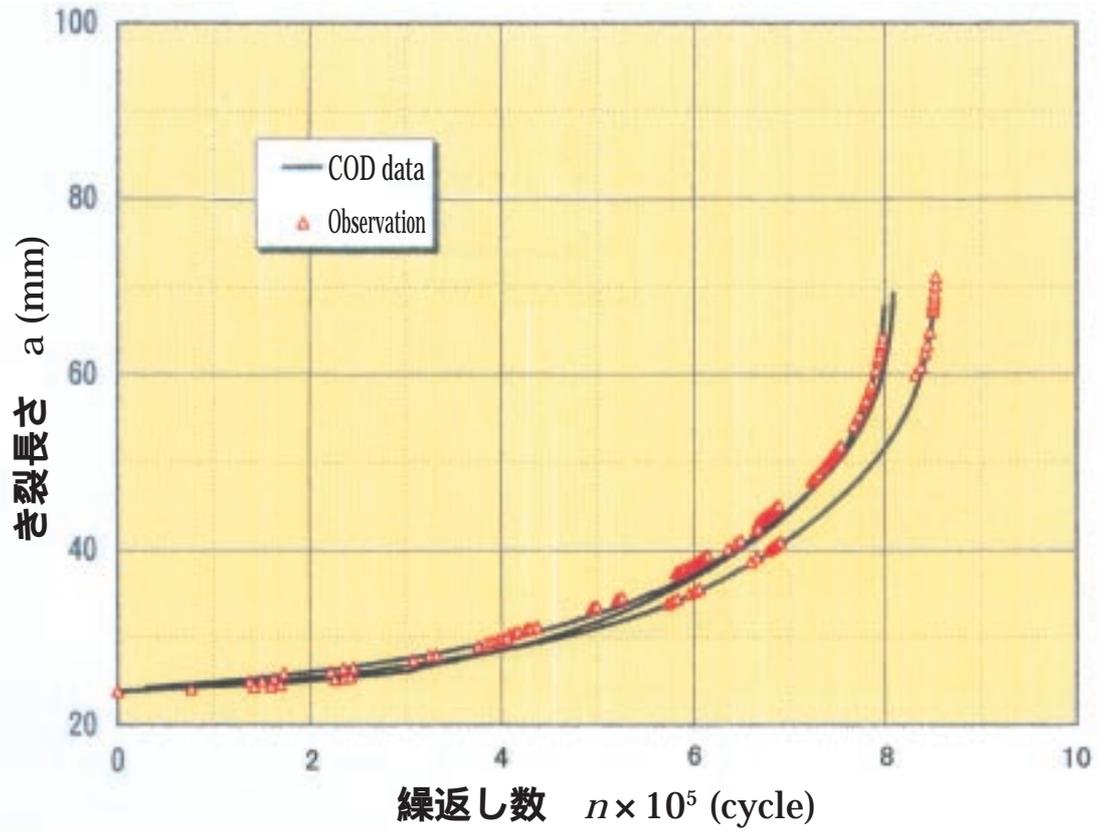


図9.2 き裂の自動計測と CCD ビデオ画像解析結果の関係(R = 0.3)

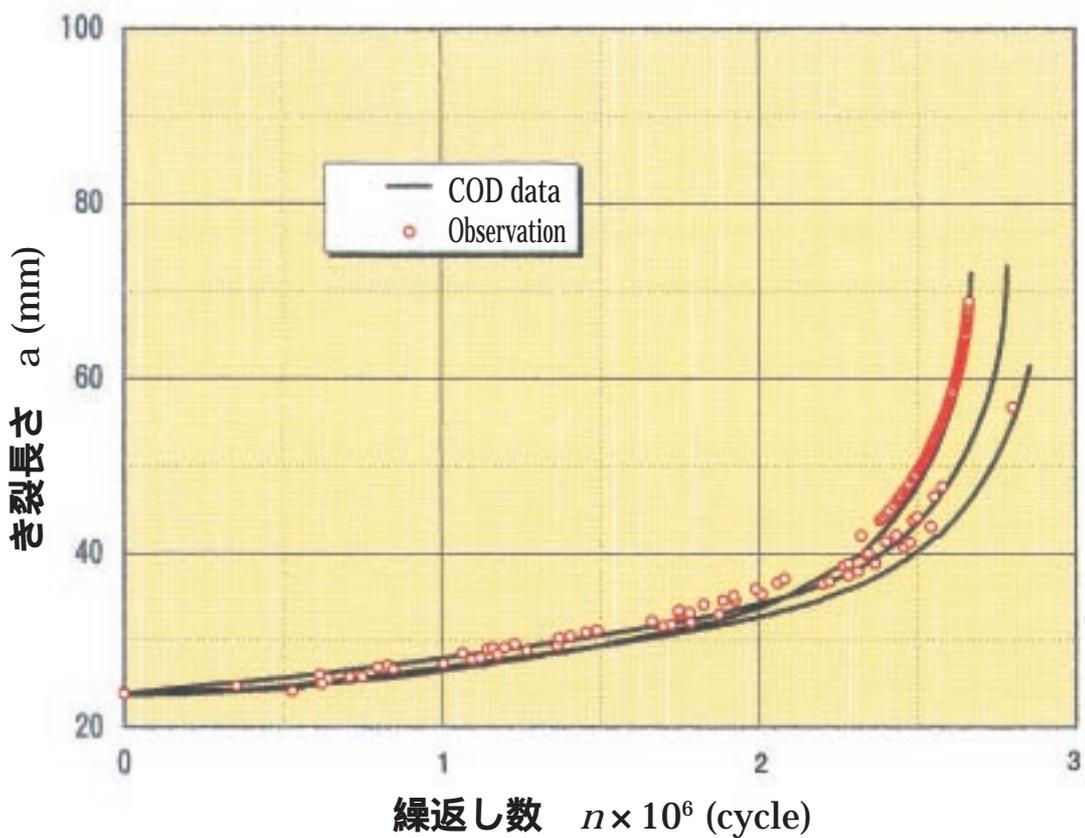


図9.3 き裂の自動計測と CCD ビデオ画像解析結果の関係(R = 0.5)

大きいとばらつきが小さく、応力振幅が小さくなるのに伴ってばらつきの程度が反対に大きくなる傾向を示した。

4.3 クリップゲージ法の長所、短所、および課題

クリップゲージを使用する場合には、次のような長所、短所が挙げられる。長所は、取り扱い操作が簡単で、無人で長時間にわたって安定した疲労試験データの取得が可能である。短所としては、(1)ピン荷重形式であるCT試験片に適用する場合には、試験片の取り付け方法やクリップゲージのゼロ点補正に工夫を要する、(2)試験機、油圧源、冷却系、データ処理のパーソナルコンピュータ系等の不具合による試験の突発的な停止があった場合には、試験の中断前後における取得データの補正作業をあとから強いられる、(3)クリップゲージは温度、湿度の変化に伴って不安定な変動を生じることがあるため、温度、湿度一定の環境条件下で使う必要がある、などが挙げられる。

クリップゲージを用いた自動計測システムにおける今後の課題としては、(1)負荷速度 f が1Hzより速い速度、例

えば $f = 5$ または10Hzなどにおいても追従性を有しているか、(2)試験片形状が異なる薄板平板(中央き裂)に有効であるか、(3)高温環境における疲労試験へ適用できるか、などについても明らかにする必要がある。

4.4 疲労き裂進展速度

疲労き裂進展速度 da/dn と応力拡大係数範囲 K の関係を両対数目盛で図 10 に示す。図中のデータ点は、クリップゲージによる自動計測を各応力比 3 本の試験片に適用した結果で、応力比 $R = 0.15$ の場合が \times 印、 $R = 0.3$ の場合が \square 印、 $R = 0.5$ の場合が \triangle 印としてそれぞれ示した。供試材料のき裂進展速度は、図中に模式的に示した領域 I、領域 II、領域 III の 3 領域特性⁹⁾を有しているものと考えられている。

領域 I は、疲労き裂進展が開始する下限界条件で、 $R = 0.15$ の場合が $K_{th} = 5.0 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 、 $R = 0.3$ の場合が $K_{th} = 4.0 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 、 $R = 0.5$ の場合が $K_{th} = 3.0 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ となる。

領域 II の直線関係には、簡便なパリス則 $[da/dn = C \cdot$

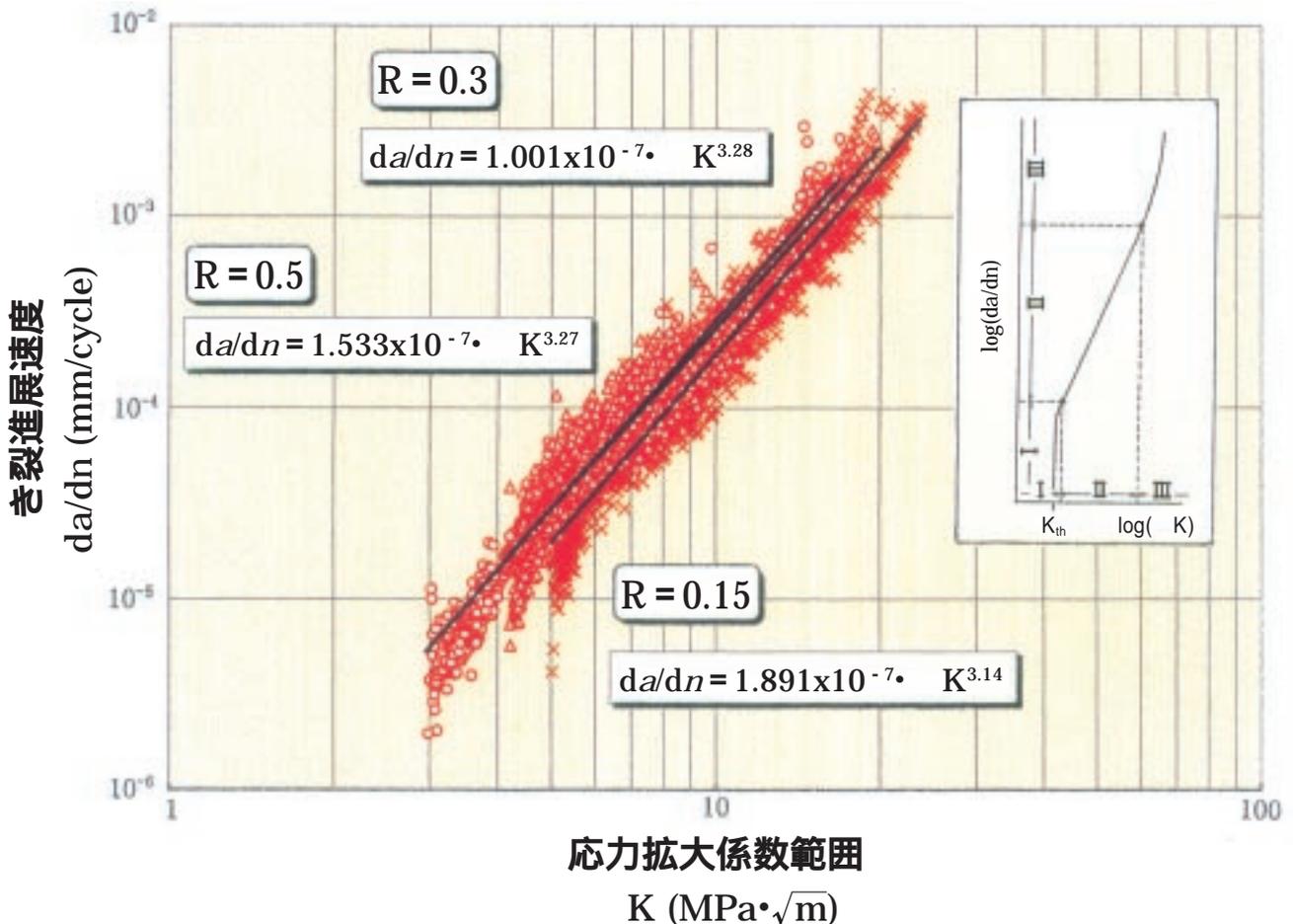


図 10 き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

K_m が提案されている。き裂進展速度は、供試材料に作用する荷重条件とその時のき裂長さが既知であれば、このパリス則を適用することによって容易に推定することができる。パリス則の係数Cと指数mは、これらの自動計測結果に最小二乗法を用いて導くことができる。最小二乗法の適用範囲としては、応力比 $R = 0.15$ の場合が $K = 5.0 \sim 14.8 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 、 $R = 0.3$ の場合が $K = 4.2 \sim 20.0 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 、 $R = 0.5$ の場合が $K = 3.0 \sim 23.5 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ である。その結果、係数Cと指数mは応力比 $R = 0.15$ の場合が $[C = 1.891 \times 10^{-7}, m = 3.14]$ 、 $R = 0.3$ の場合が $[C = 1.001 \times 10^{-7}, m = 3.28]$ 、 $R = 0.5$ の場合が $[C = 1.533 \times 10^{-7}, m = 3.27]$ となる。

領域は、供試材料のき裂進展速度が急激に増大し、破壊へ移行する。

5. まとめ

本研究は、温度・湿度を一定に制御した環境下で厚板CT試験片の疲労試験を実施し、市販のクリップゲージと疲労き裂進展データ収集ソフトウェアAFCPプログラムを組合せたコンプライアンス法が、各種疲労試験データを完全に無人な状態でリアルタイムに収集・表示する自動計測システムとして有効であるかを評価した。また、厚板CT試験片にインク浸透法を用いて、疲労破面のき裂先端形状について観察した。その結果を要約すれば以下の通りである。

- (1) 本自動計測法による疲労き裂データは、負荷速度が1Hzの場合であるが、CCD顕微鏡によるき裂画像の解析結果と比較したところ、き裂長さの観察できる全領域にわたって良い一致を示した。
- (2) 本自動計測システムは、疲労試験データが無人で、長時間にわたって安定してリアルタイムに収集、処理することができる。ただし、試験の突発的な停止があった場合は、取得したデータに対し後から補正する必要がある。
- (3) CCD顕微鏡による録画方式は、き裂進展の解析作業が疲労試験の終了後となるが、供試材料の損傷過程がリアルタイムに観察できる。また、取得したき裂進展画像は再点検が可能のため、高精度な疲労き裂長さ

の測定値が得られる。

- (4) インク浸透法は、疲労試験中におけるき裂長さの目視観察が容易になる、き裂の先端形状に対する痕跡を明確に残せるなどの利点を有するが、インクの注入によって一時的に疲労き裂進展速度の増加を生じる。従って、き裂進展速度を正確に計測したい場合には、インク浸透法の併用を勧められない。
- (5) 厚板CT試験片における疲労破面のき裂先端形状は、板厚方向にほぼ平行で直線的な形状を示し、さらにその状態を保ちながら最終破壊まで進展した。疲労き裂の最終破断部におけるき裂先端形状は、観察される表・裏面のき裂長さとは板厚の内部が先行してやや湾曲し、舌状に湾曲した小さな形状が2つ重なった状態を示した。

参考文献

- 1) J. M. Tunna : Measurement and Fatigue-EIS '86, EMAS, 1986
- 2) K. J. Marsh, R. A. Smith, and R. O. Ritchie : Fatigue Crack Measurement: Techniques and Applications, EMAS, 1991
- 3) C. J. Beevers : Advances in Crack Length Measurement, EMAS, 1982
- 4) 國尾武、中沢一、林郁彦、岡村弘之：破壊力学実験法、朝倉書店、1984
- 5) 濱口泰正、下河利行、角田義秋：汎用ソフトウェアによる疲労データ自動計測システムの構築、航空宇宙技術研究所資料TM-650、1992
- 6) Instron's manual : Instron 2490 Series Application Programs " Advanced Fatigue Crack Propagation ", 1991
- 7) ASTM E647-83 : Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/cycle, 1983
- 8) R. J. Bucci and C. J. Warren : Material Substitutions for Aging Aircraft(focus on existing and derivative product improvements), the First Joint DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft, 1997
- 9) 北川英夫：疲労き裂進展の破壊力学的解析(), 材料、第26巻、第284号、1977

ISSN 0452-2982

UDC 53.087.2

53.087.4

620.178.3

681.3.02

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-721

コンパクト・テンション試験片における疲労き裂進展の自動計測

角 田 義 秋 ・ 下 河 利 行 ・ 濱 口 泰 正

1997年12月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

航空宇宙技術研究所資料721号

平成9年12月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)47-5911 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

©禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、企画室
調査普及係にご連絡ください。