

き裂開閉口挙動に基づく穴材の疲労き裂発生
の検出法について*真壁 朝敏*¹, 兼城 英夫*²A Study of a Method of Detecting for Fatigue Crack Initiation
in a Holed Specimen Based on Crack Tip Opening and Closing

Chobin MAKABE and Hideo KANESHIRO

A simple and new method of detecting for crack initiation at a notched section of a moving machine element is proposed and applied to a specimen with a blind hole. In this experimental case, the fatigue crack tip opening and closing point can be measured using the relation between the following function h and cyclic stress σ : $h = \epsilon_y + \lambda \epsilon_x$, $\lambda = \Delta \epsilon_y / \Delta \epsilon_x$, where ϵ_y and ϵ_x are the strains measured in the vicinity of the edge of the hole in the center axis, and $\Delta \epsilon_y$ and $\Delta \epsilon_x$ are the ranges of ϵ_y and ϵ_x , respectively. Crack initiation at the hole edge can also be detected with the waveform of such a function h . Furthermore, until the crack reaches the hole bottom, the crack length can be evaluated with the range of the subtractive function related to h . The detective method proposed can be expected to be applicable to the monitoring of crack growth in many real cases.

Key Words: Fatigue, Crack Initiation, Detective Method, Crack Opening, Crack Closing, Holed Specimen

1. 緒 言

破壊力学の発達に伴って、機械構造物の非破壊検査の手法が発達してきている。また、近年の機械構造物の使用条件等の苛酷化、高速化に伴って、欠陥等から発生したき裂の進展を定量的に把握することが安全性の観点から重要視されている。

非破壊検査手法を用いたき裂発生を検出法およびき裂長さの精密測定法には、超音波探傷法⁽¹⁾、電気ポテンシャル CT 法⁽²⁾、電位差法⁽³⁾、疑似 AE による方法⁽⁴⁾および音弾性法⁽⁵⁾等の種々の方法が提案されている。これらの方法では機械構造物が運転を停止している時に、検査をするものが多く、例えば超音波探傷法についての解説⁽⁶⁾⁽⁷⁾には、無負荷状態でき裂長さを検出する方法や、静荷重あるいは振動荷重を加えて検査する種々の方法が紹介されている。

本研究では機械構造物の運転中にき裂長さを検出する新しい方法を検討した。本研究の範囲内では、一定荷重振幅の疲労試験で切欠から発生する疲労き裂の検

出という限定された場合の疲労き裂の検出法について提案するが、この方法によるとひずみの変動によって簡便にき裂発生を検出できる可能性がある。切欠材の弾塑性状態での疲労き裂伝ばにおいてはき裂先端の開閉口現象が生じることが多くの研究者によって報告されているので、本研究では特にそのき裂開閉口挙動に基づく切欠中心付近のひずみの変動に着目した。なお、切欠としては試験片ゲージ部中央に非貫通穴を加工し、き裂開閉口点の測定は前報⁽⁸⁾の方法を用いた。

2. 使用材料および実験方法

使用した素材は、S 15 CK 丸棒材 (直径 25 mm) である。それを 90°C で 1 h 焼なました後、試験片を作製した。その化学成分と機械的性質を表 1 および表 2 に示す。試験片形状を図 1 に示す。試験片ゲージ部中央には、直径、深さが約 2 mm の非貫通穴を放電加工し、その穴から疲労き裂を発生させた。疲労試験は島津サーボパルサ Lab 5 を用い、荷重制御方式により行った。応力振幅は $\sigma_a = 148$ MPa であり、応力比 R は -1 である。本研究ではき裂の開閉口挙動に基づき、き裂発生を検出する方法を検討したが、その際の繰返し速度は 0.01 Hz である。また、疲労き裂を進展させる際の繰返し速度は 1 Hz である。

* 原稿受付: 平成 2 年 1 月 24 日。

¹ 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原 1)。² 正員、琉球大学工学部。

き裂先端開閉口点の測定は前報⁸⁾とほぼ同様な手法によって行った。すなわち、図2に示すように穴縁より試験片軸方向に1mm程度離れた位置に貼り付けたゲージ長さ1mmの二軸形ひずみゲージより検出される試験片軸方向のひずみ ϵ_y とそれに垂直方向のひずみ ϵ_x の荷重に対する変動に基づいて開閉口点を測定した。ひずみゲージから検出される ϵ_y, ϵ_x の信号および荷重信号はADコンバータ(エルムデータ:FB-16-ADCH)を介してパーソナルコンピュータ(富士通:FM16 β)に取り入れ、データ解析を行った。実験データ解析は1サイクルについて行っているが、そのデータ点数は約2000点である。また、き裂進展半長 c は図2に示すように穴縁を基準とした両側の表面上で測定したき裂進展量の平均値で定義した。

3. き裂開閉口点の測定方法について

前報⁸⁾においては、次式に示すき裂中心軸付近の荷重軸方向のひずみ ϵ_y とそれに垂直方向のひずみ ϵ_x を用いたひずみ比 f と応力の関係によって中央き裂のき裂開閉口点が測定できることを示した。

$$f = \frac{\epsilon_y - \alpha}{\epsilon_x + \alpha} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 α は f の分母が零にならないようにするための ϵ_x および ϵ_y のオーダーの定数である。前報⁸⁾においては応力繰返し中のひずみの変動幅 $\Delta\epsilon_y(\epsilon_{y\max} - \epsilon_{y\min})$ と $\Delta\epsilon_x(\epsilon_{x\max} - \epsilon_{x\min})$ がほぼ同じであった。しかし、本実験における非貫通穴においては、図3の応力 σ と穴縁付近のひずみ ϵ_y, ϵ_x の関係に示すように、

荷重軸方向のひずみ幅 $\Delta\epsilon_y$ とそれに垂直方向のひずみ幅 $\Delta\epsilon_x$ の値は異なっており、式(1)で示した関数 f と応力 σ の関係による線図には折れ曲がり点が生じない。このような場合においては、次式で示す関数 g あるいは関数 h と応力 σ の関係によってき裂開閉口点が求められる。

$$g = \frac{\epsilon_y - \lambda\alpha}{\epsilon_x + \alpha} \dots\dots\dots(2)$$

$$h = \epsilon_y + \lambda\epsilon_x \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 α は式(1)と同様な定数である。また、 $\lambda = \Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x$ である。本実験範囲では穴からき裂が発生する前と発生した後で λ の値に大きな変動はなかったため、き裂発生前の値を用いて $\lambda=5.4$ とした。図4, 5にそれぞれ $\sigma-g$ 線図、 $\sigma-h$ 線図を示す。実験データは前報の中央き裂の場合に比べノイズのためバラツキがあるが、き裂開閉口点と思われる付近で線図に折れ曲がりが見られる。図中のOP, CLはそれぞれき裂開閉口点、閉口点と思われる点を示している。なお、本実験範囲内では、き裂開閉口挙動に基づくき裂発生検出の可能性を検討することを目的としている。そのためき裂開閉口点付近で $\sigma-g$ 線図、 $\sigma-h$ 線図に変化が生ずることを確認するだけで十分であるので、詳細にはき裂開閉口点の測定精度については考慮していない。しかし、後に示す平滑化処理等を行うと実用上の精度で

表1 化学成分(wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.15	0.30	0.50	0.013	0.013	0.05	0.19	0.14

表2 機械的性質(MPa, %)

Lower yield point $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Ultimate tensile strength σ_B (MPa)	True fracture stress σ_T (MPa)	Reduction of area ψ (%)
283	449	956	68.8

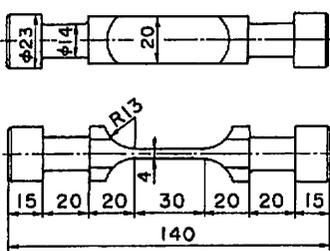


図1 試験片形状(mm)

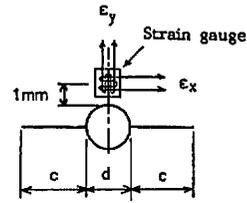


図2 ひずみ測定位置(d:穴径, c:き裂進展半長)

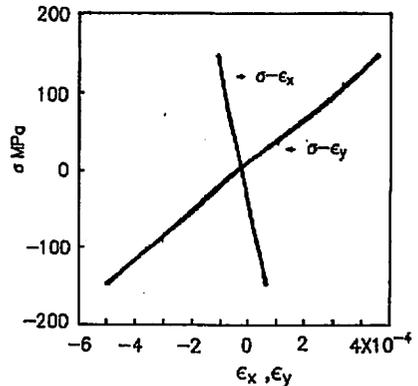


図3 繰返し応力 σ と ϵ_x, ϵ_y の関係($c=0.58$ mm)

き裂開閉口点が判断できると考えられる。また図4, 5のOP, CL点は平滑化を行ったデータを用いて判断した。開数 g, h 等によるき裂開閉口点の測定方法を“ひずみ干渉法”と称するが、その測定精度の検討については、今後検討していく予定である。

4. ひずみ関数 h によるき裂の検出の可能性について

前章において、式(2)および式(3)で示したひずみ関数 g と h によってき裂開閉口点が測定できることを示した。本章ではそのき裂開閉口挙動に基づき、き裂の発生を検出する方法について提案する。き裂開閉口点を求める際、ひずみ関数 g と h はどちらを用いても結果は同じである。しかし、 h を用いる場合は定数 α を決める必要がなく、ひずみ同志のたし算であるのでストレージスコープ等によって h の変動は連続的に監視できる。したがって、本章ではひずみ関数 h を用いて切欠中心付近のひずみによるき裂の検出の可能性について検討する。

図6, 7はそれぞれき裂が発生する前と発生した後における式(3)で示した関数 h と負荷重が変動していく際の時間 t との関係である。横軸の時間は荷重が圧縮から引張りに反転し、零になった時点を実原点とした1サイクル間の時間である。これらの図に示されるように、き裂発生以前と以後では関数 h の波形が異なる。き裂発生後では、き裂先端の開閉口挙動に起因して、図5に示すように σ - h 線図に折れ曲がりが生じるため、本実験範囲では h の波形は必ず1サイクル間に極大値を2個有する波形となっている。したがって、このような関数 h や g による波形を連続的に監視することによりき裂の発生を検出できるものと思われる。本研究ではADコンバータを介してパーソナルコンピュータによりデータ整理を行ったが、穴等の切欠からき裂が発生しているか、していないかのみを判定する際には、ストレージスコープ等で関数 h の波形を表

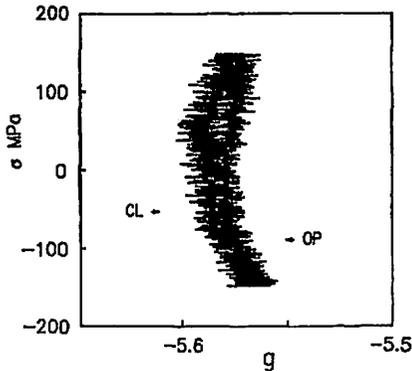


図4 σ - g 線図 ($c=0.58$ mm, $\alpha=9 \times 10^{-4}$)

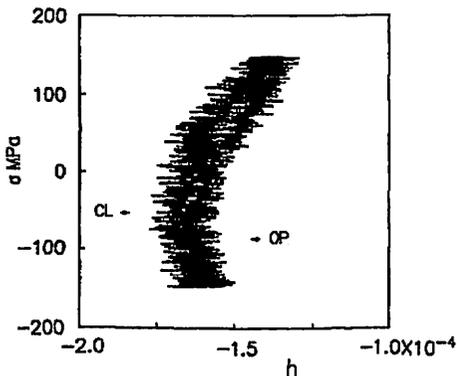


図5 σ - h 線図 ($c=0.58$ mm)

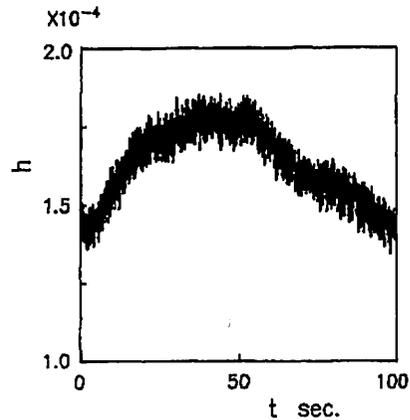


図6 き裂発生前の h の波形 ($N=1000$ 回)

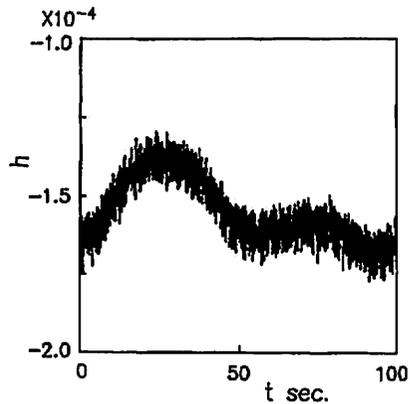


図7 き裂発生後の h の波形 ($N=55000$ 回, $c=0.58$ mm)

示させ連続的に監視するだけで十分である。このことから、本研究による方法はある限定された範囲でき裂が発生しているか、否かについて判断する場合、実用に供するものと考えられる。

次に、このような関数 h を用いたき裂長さの検出の可能性について検討する。図 6, 7 に示した実測データを用いるとバラツキのための実験結果を定量的に整理するうえで都合が悪い。そこで、移動平均⁹⁾によって波形を平滑化してデータを整理して検討した。その場合、図 8 に示す流れ図の手順に従って整理を進めた。すなわち、まず、基準となるき裂発生前のひずみ関数 h_0 とそれからある程度応力を繰返した後におけるひずみ関数 h_n を読み込み、それらを繰返し時間 t の

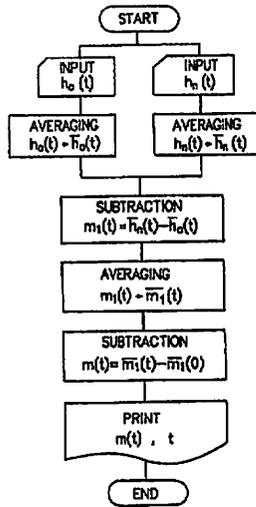


図 8 関数 $m(t)$ の求め方

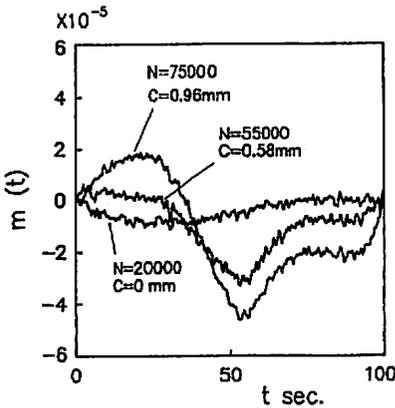


図 9 $m(t)-t$ 線図の変化

関数として、それぞれ $h_n(t)$, $h_0(t)$ とする。次にそれらを移動平均により平滑化した後、同じサイクル時間 t における基準データ $h_0(t)$ を繰返した後のデータ $h_n(t)$ から引き算し、 $m_1(t)$ とする。さらに $m_1(t)$ を平滑化し、線図の始点をそろえるため平滑化した任意の $\bar{m}_1(t)$ から荷重が零の際のデータ読み込み開始点 $\bar{m}_1(0)$ の値を引き算し、それを $m(t)$ とする。そのようにして得られた関数 $m(t)$ の時間 t による変動を図 9 に示す。 $m(t)$ の基準となる $h_0(t)$ は繰返し数 $N=1000$ 回 ($N/N_f=6.6 \times 10^{-3}$, N_f : 破断繰返し数) のデータを用いた。き裂発生前と発生後ではひずみ関数 $m(t)$ の波形は異なり、振幅も変化することがわかる。そこで $m(t)$ の変化によるき裂進展半長 c の検出の可能性を検討するため、 c と $m(t)$ の変化幅 $\Delta m [m(t)_{\max} - m(t)_{\min}]$ の関係を調べた。その結果を図 10 に示す。 Δm はき裂長さが増すとといったん増加して減少しさらに増加している。後に示すように c が約 2 mm でき裂が穴をほぼ覆いつくすと思われるが、その範囲までは Δm と c の間にはほぼ線形関係があり、 Δm によって、ある程度の精度でき裂進展半長 c が予測できることが期待できる。またその際の繰返し数比は $N/N_f=0.79$ である。き裂が穴を覆いつくした後のき裂伝ば過程では徐々に Δm が減少していく。この現象は後に示すように、き裂が穴を覆う前後におけるき裂開口点の変動に関係していると思われる。また、図 10 の最後のデータはき裂が試験片板厚を貫通し、不安定破壊が生ずる付近のデータであるため Δm の再上昇が生じている。図 11, 12 にそれぞれ、き裂進展半長 c とき裂伝ば速度 dc/dN の関係および破面に残されたき裂形状を示す。図 11 の $dc/dN-c$ 線図では約 $c=2$ mm のところでき裂伝ば速度が急変する。また、図 12 のき裂形状はアスペクト比 (深さ/表面長さ) が約 1/3 の半だ円形であり、穴径、穴深さがともに約 2 mm であるのでき裂が非貫通穴を覆いつくすのは約 $c=2$ mm と推測さ

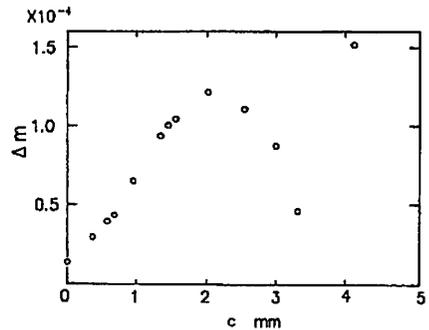


図 10 Δm のき裂進展半長 c に対する変動

れる。この長さは、図10の Δm - c 線図の極大値の点のき裂進展半長とほぼ一致している。応力レベルを変化させた場合の Δm とき裂伝ば挙動の関係および Δm - c 線図の傾向は、今後、数種の試験片を用いて検討していく予定である。

本実験のひずみ関数 h を用いる場合、城野ら⁽¹⁰⁾および大路・中井ら⁽¹¹⁾の除荷弾性コンプライアンス法⁽¹²⁾を用いた手法と同様にき裂発生後のひずみ関数 h_n からき裂発生前の h_0 を差し引き平滑化を行った場合、その関数と応力 σ の関係にはき裂閉開口点で比較的確な折れ曲がりが見られる。その一例として図5と同じデータについてこのような平滑化を行った関数を m (図9の m と同じ内容)として表示し m - σ 線図を描いたのが図13である。また、このような平滑化を行うと本実験範囲内では $c=0.3$ mm程度のき裂閉開口挙動が検出できた(それ以下のき裂長さについては測定していない)。このような手法によって求めたき裂閉開口点と閉口点のき裂進展長さに対する変化を図14に示す。これから、特にき裂閉開口点の値が約 $c=2$ mmで急に低下していくことがわかる。このことと図10を対比させるとこのようなき裂閉開口点の変動が図10の Δm - c 線図に影響すると考えられる。なお式(2)で示した関数 g を h のかわりに用いても定性的な結果はほぼ同じである。

本実験による関数 $m(t)$ によるき裂発生を検出では応用範囲に限られるが、運転中にき裂が発生しているのかどうかを検査する上では有用であると考えられ

る。また、精度上の問題はあるが、発生したき裂長さの検出については、さらに実験を重ねて切欠中心軸上のひずみ関数の変動幅とき裂長さのマスタカーブを作成すれば限られた範囲内で実用に供することが期待できると思われる。また、本研究の手法は除荷弾性コンプライアンス法⁽¹²⁾にも応用できる可能性がある。

5. 結 言

非貫通穴を有する試験片を用いて機械構造物の運転中に切欠部からのき裂の発生を簡便に検出する方法を検討した。疲労き裂が閉開口する際、穴部中心軸上の荷重方向のひずみ ϵ_y あるいはそれに垂直方向ひずみ ϵ_x と繰返し応力 σ の関係にはき裂閉開口点付近で折れ曲がり等の曲率の変化が生じる。本研究ではこのようなき裂の閉開口に伴うひずみの変化に着目したき裂の検出方法について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 本実験における非貫通穴材においては $h=\epsilon_y$

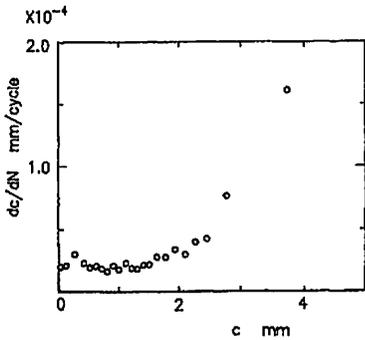


図11 dc/dN - c 線図



図12 破面に観察されるき裂形状

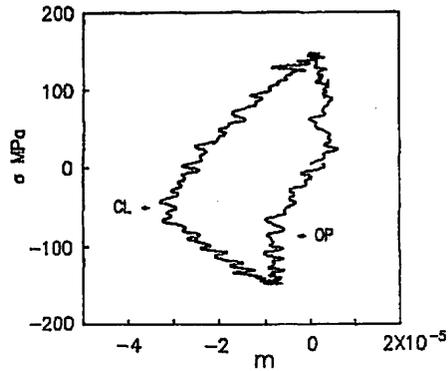


図13 関数 m と繰返し応力 σ の関係 ($c=0.58$ mmの場合)

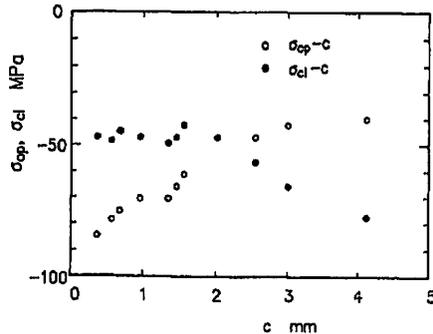


図14 き裂閉開口点のき裂進展による変化 (σ_{op} : き裂閉開口点応力, σ_{cl} : き裂閉開口点応力)

$\lambda \cdot \varepsilon_x$ と繰返し応力 σ の関係により簡便にき裂開閉口点が測定できる。ここで、 λ はひずみ幅の比 $\Delta \varepsilon_y / \Delta \varepsilon_x$ である。

(2) ひずみ関数 h の 1 サイクル間の負荷時間に対する変動を調べた結果、き裂の開閉口挙動に起因して、関数 h の波形がき裂発生前とき裂発生後で著しく変化することがわかった。このような波形の変化によって少なくともき裂が穴縁から発生しているか否かが十分に検査できる。

(3) き裂発生後のひずみ関数 h_n からき裂発生前の関数 h_0 を引き算して平滑化した関数 m の 1 サイクル間の振幅 Δm を繰返し時間 t に対して整理しき裂長さを検出を試みた。その結果、き裂が貫通穴を覆いつくすまでは Δm とき裂進展半長 c とはほぼ比例関係があり、き裂長さが Δm によってある程度の精度で検出できる可能性があることが考えられる。またその際の繰返し数比は $N/N_0 = 0.79$ である。

(4) Δm とき裂進展半長 c の関係はき裂の開閉口点の変動の影響を受けて変化する。

(5) ある限られた範囲内では本研究におけるき裂検出方法は、実用に供することが期待できる。

最後に卒業研究として実験を手伝っていただいた琉球大学学生、岡田義彦氏 [現・シーケーディ(株)] に感謝する。また、ご討論いただいた琉球大学、糸数真哉助手に感謝する。そして、九州大学、村上敬宜教授ならびに西谷弘信教授にお礼申し上げる。

付 録

穴径 $d = 2 \text{ mm}$ の貫通穴における穴中心軸上の荷重軸方向のひずみ ε_y とそれと垂直方向のひずみ ε_x によるき裂開閉口点の測定例を図 15 (平滑化は行っていない) に示す。実験条件、試験片形状は本文の非貫通穴の場合と同じであり、本文の式(3)で示した関数 h と繰返し応力 σ の関係を用いた。本実験では曲げの影響

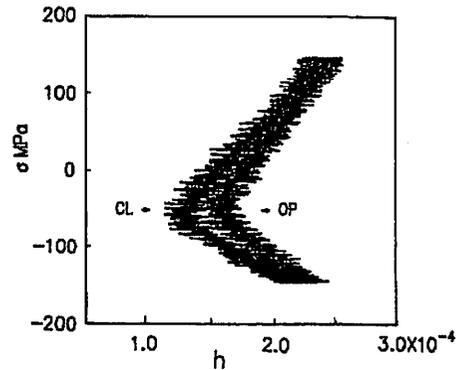


図-15 貫通穴における σ - h 線図
(OP:き裂開口点, CL:き裂閉口点)

のため片面から優先的にき裂が発生した。図 15 は片面のみにき裂が発生した場合の例であり、参考資料として示した。表面でのき裂進展半長は $c = 0.45 \text{ mm}$ であり、また $\lambda = 8.0$ である。貫通穴の場合は非貫通穴の場合よりき裂開閉口による線図の折れ曲がりは明りょうである。非貫通穴と貫通穴から発生するき裂の進展挙動の違いについては今後の検討課題である。

文 献

- (1) 小倉(国尾・ほか3名共編)、破壊力学実験法、(1984)、20、朝倉書店。
- (2) 久保・ほか4名、機論、54-498、A(1988)、218。
- (3) 中井・ほか3名、機論、55-511、A(1989)、543。
- (4) 高岸・ほか2名、機論、55-519、A(1989)、2320。
- (5) 小林・ほか4名、機論、機論、55-512、A(1989)、902。
- (6) 村上、機械の研究、41-9(1989)、993、同41-10(1989)、1109。
- (7) 坂、機誌、92-843(1989)、130。
- (8) 眞壁・ほか3名、機論、56-526、A(1990)、1360。
- (9) 雨宮・佐藤、信号処理入門、(1987)、19、オーム社。
- (10) 城野・ほか5名、機論、51-467、A(1985)、1677。
- (11) 大路・ほか3名、機論、54-498、A(1988)、196。
- (12) 菊川・ほか3名、材料、25-276(1976)、899。