

表面疲労き裂評価のための超音波周波数分析*

平尾雅彦^{*1}, 東條公資^{*2}, 福岡秀和^{*1}

Ultrasonic Spectroscopy for Evaluating Surface Fatigue Cracks

Masahiko HIRAO, Koji TOJO and Hidekazu FUKUOKA

Cracks act as the sources of acoustic scattering when they are illuminated by incident ultrasonics. They radiate scattering signals, which carry information on the cracks such as location, orientation, shape, and size. In this paper, the spectrum of the reflected Rayleigh wave from the small fatigue crack is interpreted to provide estimates of crack depth and aspect ratio. The crack is initiated at a Vickers indentation and develops by cyclic cantilevered bending. The approach is based on a theoretical calculation of reflection coefficient by sectioning the half-elliptic crack face into small strips; the reflection coefficient for each strip has been given by the two-dimensional calculation for an edge crack. This nondestructive technique can measure the crack depth larger than 0.13 mm and the crack closure stress from the spectrum response to static bending stress.

Key Words: Ultrasonic Inspection, Fast Fourier Transform, Fatigue, Crack Propagation, Crack Closure, Rayleigh Surface Wave, Aluminum Alloy, Vickers Indentation

1. 緒 言

超音波を用いたき裂の定量的非破壊評価法の中でも材料表面を伝わるレーリー波(表面波)を用いる方法は、表面き裂を評価するのに特に有効であり、微小き裂から長いき裂まで幅広い適用が可能である。レーリー波は表皮効果、すなわち自由表面から内部への浸透深さが約一波長であるという性質を有している⁽¹⁾。高周波数のレーリー波は主としてき裂開口部に関する情報を、低周波数レーリー波はき裂先端部をも含んだ情報をもたらす。そのため、き裂面で反射したレーリー波の広帯域信号を周波数解析すれば、表面き裂の深さ方向の特性を評価できる。現在実用化されているき裂計測法は主としてき裂表面長さを検出するもので、き裂の表面下の情報を得ることは困難である。本研究では、このレーリー波固有の性質を生かして、一つの表面疲労き裂が成長していく過程を微小き裂の段階から破壊寸前に至るまで連続的に追跡し、き裂深さとき裂閉口応力を非破壊的に測定した。

2. 実験方法

市販のアルミニウム合金圧延板 7075-T651 (板厚 10 mm) から製作した平等強さの片持ばりを試料とした。ヤング率は 68.9 GPa, 降伏応力は 466 MPa, 引張強さは 548 MPa であった。この試験片中央部につけた対角線長さ 0.61 mm, 深さ 0.12 mm のビッカース圧痕を疲労き裂の発生源とした。疲労条件は表面応力振幅 225 MPa の両振り曲げである(応力比 $R = -1$)。繰返し周波数は 5 Hz である。き裂は圧痕の一端から対角線方向に発生・成長し、最終段階で圧痕を横断した。繰返し負荷は 6×10^4 回で終了した。液体窒素で冷却した後、破断して求めたき裂寸法は、深さ 2.05 mm, 幅 4.40 mm の半だ円形であった。

図 1 は、疲労回数 3.0×10^4 回後に超音波顕微鏡で観察した表面き裂である。周波数 400 MHz, 開口角 120° の音響レンズを焦点深さ 18 μm と 20 μm で走査して得た合成画像である。画像左側の圧痕角部に、試料表面で正反射した水中縦波とき裂からの反射レーリー波によって作られる干渉じまが認められる。

測定装置の概略を図 2 に示す。送受信兼用の探触子として、レーリー波の臨界角に設定したウエッジをもつ広帯域型圧電素子(中心周波数 5 MHz, 直径 6.3

* 原稿受付 平成 3 年 3 月 15 日。

^{*1} 正員, 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町 1-1)。^{*2} 准員, (株)島津製作所けいはんな研究所 (〒619-02 京都府相楽郡精華町大字乾谷小字砂ヶ谷)。

mm)を用いた。音響結合剤にはスピンドル油を用いた。き裂面に垂直に入射したレーリー波パルスは正反射した後、逆の経路をたどって同一の探触子で受信される。ピッカース圧痕と探触子の距離は54mmである。増幅後、時間幅2μsの受信信号を分解能8bitでA/D変換し、256回にわたって積算平均して得た波形データにパーソナルコンピュータにおいてFFT(高速フーリエ変換)処理を施して反射スペクトルを得た。

波形データの取り込みは、一定の疲労回数を経るごとに繰返し負荷を中断し、試験片に静的曲げ荷重を加えながら行った。き裂閉開口挙動の観察のため、静的曲げ荷重を13段階に変化させ、それぞれの荷重において測定を行った。反射レーリー波は疲労回数 1.2×10^4 回で始めて確認され、深さは0.13mmと測定された。図3は疲労回数の増加に伴う反射スペクトルの変化を示す。これは $\sigma_{max} = 225$ MPaの最大曲げ応力に対する結果であり、き裂は完全に開いている。

図3で見たように疲労進展とともに反射スペクトルは増大し、同時にその中心周波数は低周波数側に移動する。この反射スペクトル分布からき裂の形状・深さを

を評価するためには、任意の半だ円形表面き裂に対する反射係数が必要となるが、これまで求められていない。一様深さで無限に幅の広い二次元表面き裂にレーリー波が垂直入射した時、遠距離場における反射レーリー波の強度はHiraoら⁽²⁾とJungermanら⁽³⁾の数値計算と実験により得られている。単色波に対し、入射振幅と反射振幅の比を反射係数 C_r と定義すれば、 C_r は波長 λ で無次元化したき裂深さの関数となる。 λ は周波数 f と伝ば速度 V から $\lambda = V/f$ で与えられる。

単位ビーム幅のレーリー波が表面に垂直な任意形状の表面き裂に垂直入射した場合の反射スペクトル $S(f)$ を近似的に計算するため、き裂を表面に垂直な短冊状領域に細分化する(図4)。き裂幅を深さ z のなめらかな関数 $b = b(z)$ と与えると、深さが z と $z + dz$ の間の部分のき裂幅は $-(db/dz)dz$ である。振幅スペクトル $A(f)$ を持つ入射レーリー波に対して、この小領域からの反射強度は二次元き裂に対する反射係数 C_r を用いて

$$-A(f) \frac{db}{dz} dz C_r(z/\lambda) \dots \dots \dots (1)$$

で表現できる。本実験のように探触子径に比べて十分小さいき裂を取扱う場合、 $A(f)$ はビームの幅方向に

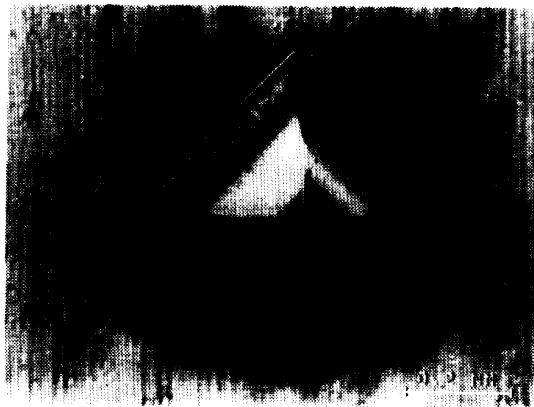


図1 超音波顕微鏡による疲労き裂の観察 (上下方向が応力軸方向)

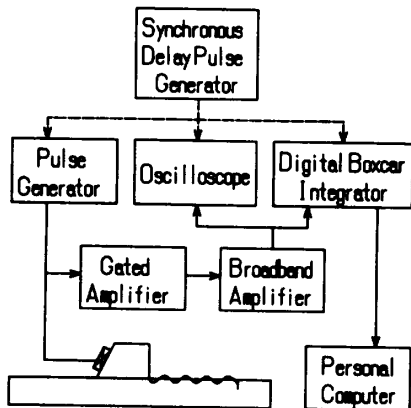


図2 測定装置の概略

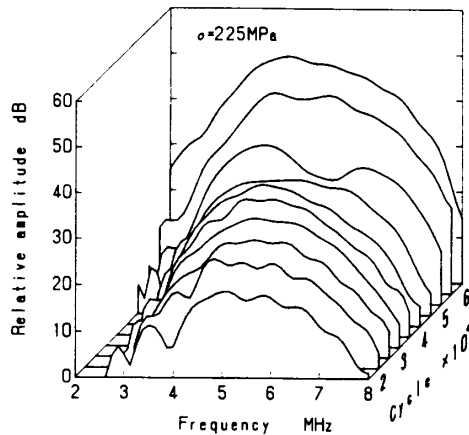


図3 疲労進展に伴う反射スペクトルの増加

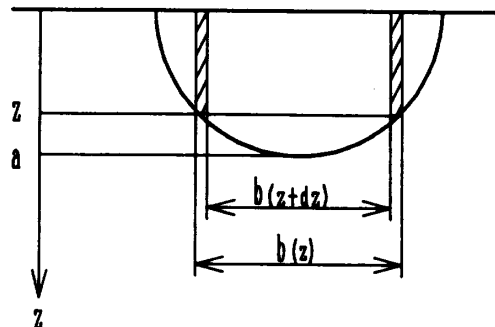


図4 き裂面の短冊状領域への分割

一様としてよい。上式を $z=0$ から $z=a$ まで積分すれば全き裂面からの反射スペクトル $S(f)$ を得る。さらに、 $b(z=a)=0$ および $C_r(z=0)=0$ を考慮して部分積分すれば

$$S(f) = A(f) \int_0^a b(z) \frac{dC_r}{dz} dz \dots\dots\dots (2)$$

が導かれる。実際の測定と対応づけるため、上式を無限に深いき裂からの反射スペクトル $A(f)C_r^\infty$ で規格化し、これを新たに $S(f)$ とすれば

$$S(f) = \int_0^a b(z) \frac{d(C_r/C_r^\infty)}{dz} dz \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 $C_r = C_r(fz/V)$ 、 $C_r^\infty = 0.4$ である。式(3)によれば、反射スペクトル $S(f)$ は、深さ z の関数として与えられるき裂幅 $b(z)$ のみに依存し、形状の詳細に関する情報は含んでいない。

式(3)において C_r は既知であり⁽²⁾、左辺の $S(f)$ は測定によって与えられるから、同式は $b(z)$ に対する積分方程式になる。半円形の表面き裂を仮定し、式(3)によって計算される反射スペクトルを、半き裂長さ c をパラメータとして図5に示す。図では反射スペクトルは深さが無限大の短冊状き裂からの反射スペクトルで規格化している。実際にはアスペクト比 a/c の異なるさまざまな半だ円形き裂に対する反射スペクトルを求めておく。これをマスタカーブとして実験結果のスペクトルと比較することによりき裂深さを推定した。深さを測定する時はき裂を完全に開かせるため、試験片に最大曲げ応力 σ_{max} を静的に負荷した。実験結果のスペクトルの規格化には、2 mm 幅の短冊状き裂を用いた実験で得られるスペクトルを用いた。

図6に規格化された反射スペクトルとマスタカーブの比較例を示す。推定されたアスペクト比は、疲労回数 4.5×10^4 回(推定深さ 0.44 mm)まで2であった。こ

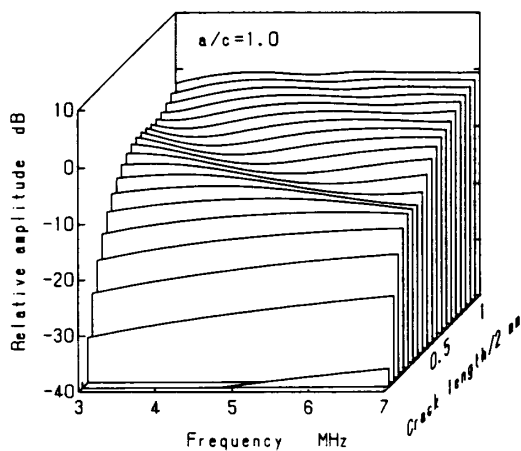


図5 半円形き裂からの反射スペクトル (計算結果)

こで推定されたアスペクト比が2であったということは圧痕角部に発生したき裂面のうちレーリー波の反射に寄与した部分の幅 $b(z)$ が円の四半分と同じであったことを意味する(式(3)参照)。レーリー波の伝ばは圧痕によって乱されるため、き裂のうち圧痕下部に位置する部分は反射に寄与しない。

き裂が進展し、深さが波長と同程度かそれ以上になると、レーリー波の一部はき裂開口部からき裂面に沿って垂直に下降し、き裂縁において散乱される。最深部での散乱波の一部は再びレーリー波となり、入射経路を逆にたどって、探触子に到達する。この信号、 R_f はき裂開口部からの反射信号、 R_o に遅れて検出される。 R_o と R_f は時間軸上で重畳し、合成波の振幅スペクトルには干渉の結果としてうねりが生じる。図3において疲労回数 5×10^4 回の反射スペクトルにこの現象に起因する大きなうねりが観察される。レーリー波の伝ば速度と R_o - R_f の到達時間差からき裂深さを測定した。これら二つの信号が重畳している場合には、図7に示すようにパワーセブストラム法⁽⁴⁾を用いて到達時間差を求めた。き裂がさらに進展し、両者が時間軸上で完全に分離した段階では受信波形から直接時間差を求めた。本実験のようにき裂破面が粗い場合、 R_f は破面上で著しく減衰する。したがって、 R_f を利用する評価法は大きいき裂に対して適用しにくい。

以上の3通りの方法で測定したき裂深さと疲労回数との関係を、測定方法を区別して図8に示す。

4. き裂開閉口挙動の観察

疲労き裂は、伝ばに伴う塑性変形のためき裂縁に沿って圧縮残留応力が発生し、部分的に閉口している。試験片に曲げ応力を加えながら測定したレーリー波反

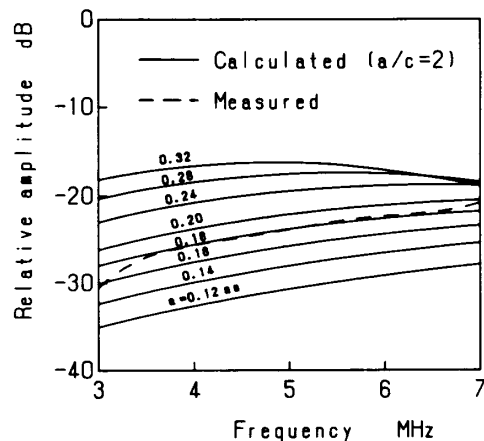


図6 測定された反射スペクトルとマスタカーブとの比較 (疲労回数 2×10^4 回での測定結果は $a=0.18$ mm のマスタカーブに一致した)

射スペクトルはき裂の開閉口挙動に敏感に反応した。

図9にき裂深さが0.20 mmの時の静的曲げ応力と反射スペクトルの関係を周波数別に示す。曲げ応力を圧縮から引張りへと変化させると、周波数の高い成分ほど早くスペクトル強度が増加し始める。これは試料表面に近いき裂面から開口し始めることに対応する。図9の例では、無負荷状態でき裂はほとんど閉じている。引張応力を加えていくと、き裂は徐々に開き始め、それとともに反射強度は単調に増加してある上限値に漸近する。圧縮応力や低い引張応力のもとではき裂面は互いに接触しているため、入射レーリー波はき裂面を透過し反射波はほとんど発生しない。したがって反

射スペクトルは極めて小さくなるが、測定系のノイズが存在するため受信される信号の強度は一定値(-50 dB)以下になることはない。

引張応力に対する反射スペクトルの上昇はなめらかであるため、き裂開口点が判明しにくい。本報では、それぞれの周波数について、上限値との差が2 dBとなる応力をその周波数におけるき裂開口応力 σ_c とした。図10はこのように定義した σ_c の疲労回数による変化を周波数別に示す。ここで、 σ_c は σ_{max} (=225 MPa) で無次元化している。 σ_c は周波数にかかわらず、疲労過程の初期に増加し、 $\sigma_c/\sigma_{max}=0.5\sim 0.9$ の最大値を経た後減少する。最終的には周波数間の差異も小さくなる。これより明らかなように、低い周波数による結果ほど σ_c は大きな値をとる。浸透深さが約一波長であるというレーリー波の表皮効果から、低周波数の成分ほどより深部でのき裂開閉口に関する情報を持っているので、図10の結果はき裂先端部ほど開口させるのに高い引張応力が必要であることを意味している。なお、こうして測定された σ_c は機械研磨による残留応力やピッカース圧子押付け時に発生した塑性変形に

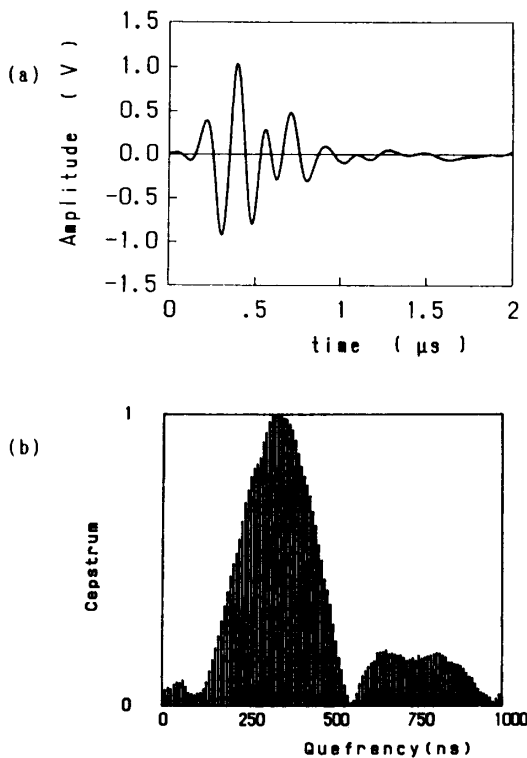


図7 疲労回数 5.1×10^4 回における重畳した (a)波形信号と(b)パワーセブストラム

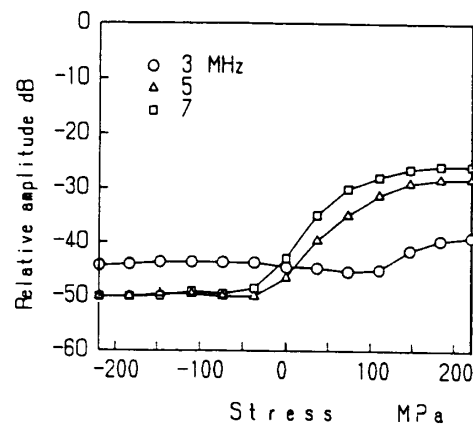


図9 反射スペクトルと静的曲げ応力の関係 (疲労回数 2.5×10^4 回)

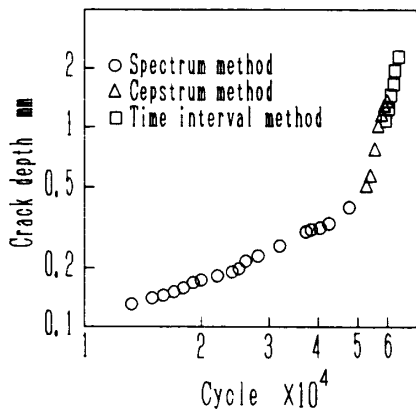


図8 レーリー波を用いて測定されたき裂深さ

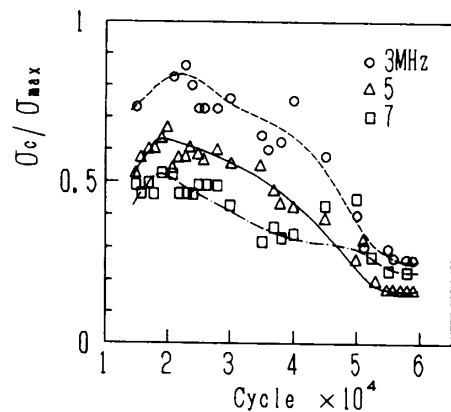


図10 異なる周波数に対するき裂開口応力

よる残留応力も含んでいる。

反射レーリー波による以上の測定結果からき裂進展速度 da/dN と有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を計算した。両者の関係を図 11 に示す。ここでは、図 8 のき裂深さの測定結果を多項式近似し、各点における傾きからき裂進展速度 da/dN を求めた。また ΔK_{eff} の計算には圧痕の切欠効果を無視し、Newman-Raju の計算式⁽⁵⁾を用いた。 ΔK_{eff} を計算する際はき裂最深部におけるき裂開口応力として低周波数成分のスペクトル変化から求まる σ_c を用いるべきであるが、低周波数領域ではノイズによる誤差が相対的に大きいため、最も振幅が高い探触子中心周波数 5 MHz において求めた σ_c の値を用いた。

図 11 からわかるように、 ΔK_{eff} の増加に伴ってき裂進展速度はいったん増加するがその後減少し、極小値をとってから再び増加している。このき裂進展挙動は、微小き裂が進展し長いき裂に遷移していく過程に対応する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。微小き裂の進展速度は一般に同じ応力拡大係数範囲のもとでは長いき裂のそれよりも大きく、長いき裂の下限界応力拡大係数範囲以下でも発生・進展する。長いき裂の段階 ($a > 0.32$ mm) での進展速度と ΔK_{eff} との線形的な関係を経験則⁽⁸⁾、 $da/dN = C(\Delta K_{eff})^m$ に適用して $m=2.6$ を得た。

5. 結 言

反射レーリー波に対して周波数解析を行うことにより、微小き裂から長いき裂にいたるまで圧痕から発生した表面疲労き裂の進展を連続的に追跡し、各段階で深さとき裂開口応力を測定することができた。測定できた最小き裂深さは 0.13 mm であった。

ここで用いた計測原理は二つに大別できる。一つは、き裂の異なる部位で反射したレーリー波信号の到達時間差から表面き裂の深さを評価する方法である。この原理は以前から知られており⁽⁹⁾、比較的大きいき裂に適用できる。他は、反射レーリー波の強度を利用する方法で、代表的な波長に比べてずっと小さい表面き裂に適用できる。London ら⁽¹⁰⁾ の手法はその一つであるが、周波数解析を行っていないため、煩雑な校正実験を要する。また、適用範囲も狭い。本研究では、これら二つの計測原理を周波数領域で接続し、単一の測定システムによる広範囲の表面き裂計測が可能であること

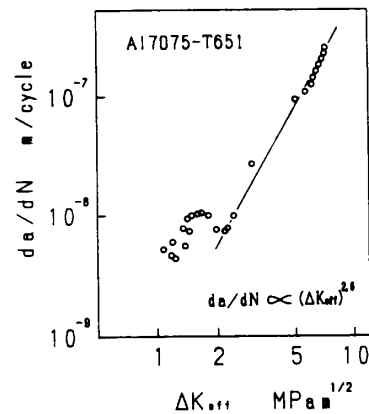


図 11 レーリー波反射スペクトルから計算された da/dN - ΔK_{eff} 関係

を示した。

反射スペクトルの周波数依存性を利用するき裂計測法の特徴は、非破壊的にき裂内部の状態を検出できる点である。微小き裂深さや開口応力の測定も従来法では困難なようである。短所は、式(3)で述べたように、レーリー波の反射スペクトルがき裂形状の情報を持たない点である。これは多くのき裂計測法に共通の問題点で、これを補うには、経験に基づいたき裂形状の仮定が必要となる。

最後に、デジタル信号処理に関して貴重な助言をいただいた筑波技術短期大学、村上芳則助教授に感謝する。

文 献

- (1) Viktorov, I. A., *Rayleigh and Lamb Waves*, (1967), Chap. 1, Plenum Press.
- (2) Hirao, M., Fukuoka, H. and Miura, Y., *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**(1982), 602.
- (3) Jungerman, R. L., Khuri-Yakub, B. T. and Kino, G. S., *Mater. Eval.*, **42**(1984), 444.
- (4) 村上・ほか 4 名, *機論*, **55-512**, A(1989), 910.
- (5) Newman, Jr., J. C. and Raju, I. S., *Eng. Fract. Mech.*, **15**(1981), 185.
- (6) Suresh, S. and Ritchie, R. O., *Int. Met. Rev.*, **29**(1984), 445.
- (7) 田中, *機論*, **54-497**, A(1988), 1.
- (8) Paris, P. and Erdogan, F., *J. Basic Eng.*, **85**(1963), 528.
- (9) Tittmann, B. R., ほか 4 名, *Appl. Phys. Lett.*, **33**(1978), 6.
- (10) London, B., Nelson, D. V. and Shyne, J. C., *Met. Trans.*, **A**, **20**(1989), 1257.