

レーザスペckルひずみ計測法を用いた疲労き裂先端開口荷重の測定

藤田 和孝* 橋本 基† 永田 一也‡ 浜崎 真充§

Measurement of Fatigue Crack Tip Opening Load Using Laser Speckle Strain Meter

by

Kazutaka FUJITA*, Hajime HASHIMOTO†, Kazuya NAGATA‡ and Masamitsu HAMASAKI§

* Department of Mechanical Engineering, Ube National College of Technology, Tokiwadai, Ube 755-8555, Japan

† Department of Electrical Engineering, Ube National College of Technology, Tokiwadai, Ube 755-8555, Japan

‡ Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Undergraduate Student, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

§ Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology, Undergraduate Student, Kawazu, Izuka 820-8502, Japan

Abstract: A laser speckle strain gauge with a single laser beam and a double CCD sensor was made on the basis of the method shown in the literature.

The measuring method for the strain which represents the crack opening displacement(COD) of the point irradiated the laser striding over the crack was shown. The decision method for the fatigue crack tip opening load from the relation curve between the load and the strain obtained by the above method was also shown on the basis of a fracture mechanics study.

The relation between the fatigue crack propagation rate da/dn and the effective stress intensity factor range divided by Young's modulus $\Delta K_{eff}/E$, which is calculated on the basis of the COD obtained by using laser speckle gauge, almost agreed with the relation between the da/dn and $\Delta K_{eff}/E$ based on the strain obtained by using strain gauge. This means that the strain measurement method using the laser speckle gauge and the decision method for the crack tip opening load using the strain are appropriate.

Key words: Laser speckle, Crack tip opening load, Crack closure, Fatigue, Stress intensity factor

1 緒 言

き裂材において、き裂開口変位はき裂先端近傍の応力やひずみを代表する極めて重要な力学因子であり、その測定は破壊力学の研究・応用上不可欠である。従来この計測には主として、ひずみゲージが用いられてきた。しかし、ひずみゲージは微小き裂や、高温・腐食環境下等用いることができない場合も多い。

最近、レーザを照射して得られる干渉模様から非接触で開口変位を求める方法が、これらの場合に適用できる有力な手法の一つとして提案され、各種条件下の計測に成功を納めている¹⁾⁻¹¹⁾。

ここでは、この方法の中でも、あらかじめ試料に反射源を設ける等の下準備が不要なレーザスペckルひずみ計測法⁹⁾¹⁰⁾によるひずみ計を1レーザビーム2センサー法⁹⁾⁻¹¹⁾で作製した。これを疲労き裂先端近傍でき裂を跨ぐ領域のひずみ計測に適用し、そのひずみが

この点のき裂開口変位に相当するものであること、およびそのひずみと荷重の関係からき裂先端開口荷重値を求める方法を示し、その破壊力学的根拠を与えた。

2 レーザスペckルひずみ計の製作

2.1 測定原理¹¹⁾

レーザスペckルパターンは粗面にレーザを照射した時、粗面上の各粗点からの散乱光が互いに干渉しあうことにより Fig.1 のようなスペckルが任意方向に発生する。このスペckルパターンはレーザ照射領域内の表面変形に伴い変化する。レーザスペckルは複数の干渉現象が重なりあったものであり、基本的にスペckル自身は Bragg の式

$$d \sin \theta = n \lambda$$

を満足する。ここで θ は入射光と観察方向のなす角度、 λ はレーザの波長、 n は任意整数、 d は2つの発行源の間隔である。従ってある一つのスペckル輝点(同じ n)に着目すると、計測面の変形あるいはひずみによる標点間距離 d の変化 Δd は、回折角 θ の変化 $\Delta \theta$

(2000年11月30日受理)

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

† 宇部工業高等専門学校電気工学科

‡ 現 山口大学工学部機械工学科学生

§ 現 九州工業大学情報工学部機械システム工学科学生



Fig.1 レーザスペckルパターン ($L = 345\text{mm}$,
160×160 画素).

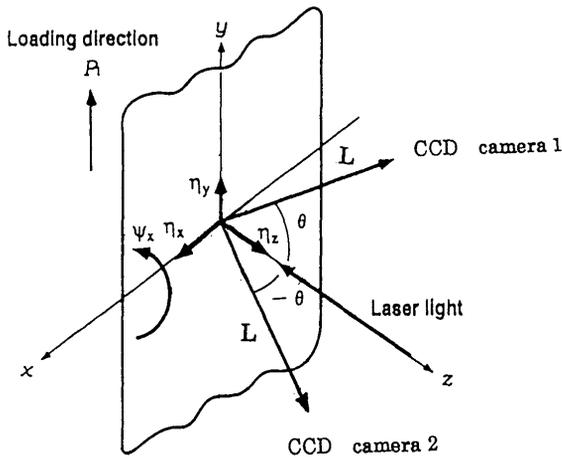


Fig.2 座標系.

から次式により求められる.

$$(d + \Delta d) \sin(\theta + \Delta\theta) = n\lambda$$

これより、ひずみ ϵ は

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\frac{\Delta\theta}{\tan\theta}$$

となる.

ここで、Fig.2 のように座標系を決め、Z 軸上からレーザを照射し、これと YZ 平面内で角度 θ をなす方向に距離 L だけ離れた位置を観測位置とする。また、3 つの軸方向への剛体移動量をそれぞれ η_x , η_y , η_z , x 軸まわりの回転移動を右ねじの方向を正にして ψ_x とする。計測方向として荷重方向、ここでは Y 軸方向を考える。Z 軸から角度 θ の位置で観察される投影面

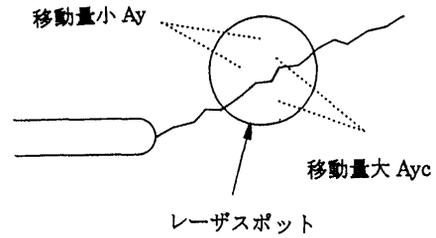


Fig.3 き裂を跨ぐ照射.

上のスペckル移動量 $A_y(\theta)$ は剛体回転 ψ_x の方向を正にすると、 θ の関数として次式で与えられる.

$$A_y(\theta) = \eta_y \cos\theta + L\psi_x - L\epsilon_y \tan\theta \quad (1)$$

ここで ϵ_y は計測対象領域の y 方向ひずみである。ひずみ計測では $\pm\theta$ の位置でステレオ的に計測し、その結果を減算することによって、剛体移動量の影響を取り除くことができる。 $-\theta$ の位置から見たときのスペckル移動量は次式で表される.

$$A_y(-\theta) = \eta_y \cos(-\theta) + L\psi_x - L\epsilon_y \tan(-\theta)$$

$$A_y(-\theta) = \eta_y \cos(\theta) + L\psi_x + L\epsilon_y \tan\theta \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) より ϵ_y について解くと、

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = -2L\epsilon_y \tan\theta$$

$$\epsilon_y = -\frac{A_y(\theta) - A_y(-\theta)}{2L \tan\theta} \quad (3)$$

が得られる.

一方き裂を跨ぐようにレーザを照射すると、Fig.3 に示すように照射領域はき裂の上下面 2 領域に分割される。その場合、同一領域を標点とするスペckルとき裂を挟む 2 領域を標点とするスペckルを生じる。前者は剛体移動とひずみの影響のみを受けたものであり、後者はそれに加えてき裂開閉口の影響も受けたものである。そのため後者のほうがスペckル移動量は大きくなり、CCD カメラの画像には移動量の大きいスペckルと移動量の小さいスペckルを生じる。よって、き裂開閉口の影響を受けた移動量の大きいスペckルに着目することによってき裂開閉によるひずみを求めることができる。Z 軸から角度 θ の位置で観察すれば、き裂開閉の影響を受けたスペckルの Y 軸方向の移動量 $A_{yc}(\theta)$ は次式のようなになる.

$$A_{yc}(\theta) = \eta_y \cos\theta + L\psi_x - L\epsilon_y \tan\theta - L\frac{\Delta d}{d} \tan\theta \quad (4)$$

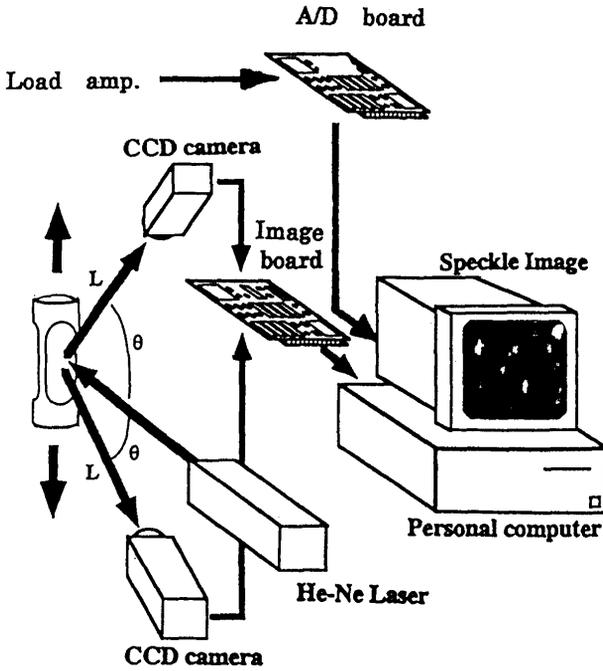


Fig.4 計測システムの構成.

ここで式 (4) と同様に, $-\theta$ の位置から見たときのスペckル移動量 $A_{yc}(-\theta)$ は,

$$A_{yc}(-\theta) = \eta_y \cos \theta + L\psi_x + L\epsilon_y \tan \theta + L \frac{\Delta d}{d} \tan \theta \quad (5)$$

となり式 (4) と (5) を差し引きすると,

$$A_{yc}(\theta) - A_{yc}(-\theta) = -2L(\epsilon_y + \frac{\Delta d}{d}) \tan \theta$$

$$\epsilon_y + \frac{\Delta d}{d} = -\frac{A_{yc}(\theta) - A_{yc}(-\theta)}{2L \tan \theta} \quad (6)$$

が得られる. 式 (6) において $\epsilon_y \ll (\Delta d/d)$ であれば, 式 (6) は次のようなる.

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{A_{yc}(\theta) - A_{yc}(-\theta)}{2L \tan \theta} \quad (7)$$

このとき 2 台の CCD カメラを使用して, き裂開口に伴うひずみを求めることができる.

2.2 装置

Fig.4 に計測システムの構成を示す. CCD カメラはレーザビームに対して 45 度とした. レーザビーム径は 1.5mm である. スペckル画像は CCD カメラより画像ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込み, 同時にそのときの負荷荷重を AD 変換しパーソナルコンピュータに記憶する. 画像取り込みモードはフィールドモード法⁴⁾を採用した. 用いたレーザ

は日本科学エンジニアリング (株) 製 He-Ne レーザ (出力波長 632.8nm, 最大出力 8mW) である. CCD カメラは SONY (株) 製の撮像面積 8.8mm×6.6mm, 8bit, 有効画素数 768 × 494 画素 (水平×垂直) のインターライン型 2 次元 CCD カメラ DXC-107A を, 画像ボードはマイクロ・テクニカ (株) 製 MTAT-MC をそれぞれ 2 コ使用した. A/D ボードは CONTEC (株) 製 AD12-16CG(PC), パーソナルコンピュータは CPU 400MHz, メモリ 128MB である. データ処理は, すべてコンピュータ内でソフトウェアにより行っている. 画像を処理するソフトウェアは C 言語で記述した. また, スペckル移動量を求める方法としては, 残差最小化法¹¹⁾を用いた.

3 結果と検討

3.1 ひずみの測定

直径 7.84mm の Ti-6Al-4V 合金製試験片 (ヤング率 $E=105\text{GPa}$) を使用し, 引張り試験を行った. 荷重は 4.9kN, 9.8kN, 14.7kN および 19.6kN の 4 種類とし, 長さ L も 295mm, 345mm, 395mm と変化させ, スペckルゲージによってひずみを計測した. また, 試験片の同一断面に 120 度毎に 3 枚のひずみゲージを貼り, ひずみを計測し, それらの平均値をひずみゲージの測定値とした. 試験片表面には明瞭なスペckルパターンを得るため酸化マグネシウムを蒸着させた.

ここで L を変化させると, 式 (3) より, ひずみの分解能が変化する. 式 (3) 中の分子において, スペckル移動量は 1 画素単位で計測されるため, 式 (3) 中の分子の最小分解能は 1 画素 (0.01818mm) である. よって分解能は L が 295mm のとき $31\mu\text{strain}$, 345mm のとき $26\mu\text{strain}$ であり, 395mm のとき $23\mu\text{strain}$ である. L を長くすると, スペckルゲージの分解能は良くなるが, スペckルは大きく, 不明瞭になり計測が難しくなるという欠点もある. よって L は, それらを考慮して決める必要がある.

ひずみの測定結果を Fig.5 に示す. ひずみゲージとスペckルゲージによって測定したひずみは, 荷重と直線関係にあるが, スペckルゲージによって測定したひずみは, ひずみゲージの測定値より, 誤差の大小はあるが約 20% 程度小さい. またスペckルゲージの測定値の誤差は, 累積によって生じ得る最大の誤差を大幅に超えているため, この誤差は累積によって生じるものだけではないと考えられる. 原因としては θ や 1 画素単位が正確でないことが考えられ, 今後検討が必要である.

しかし, スペckルゲージによって測定したひずみは, ひずみゲージのひずみと同様, 荷重と直線関係に

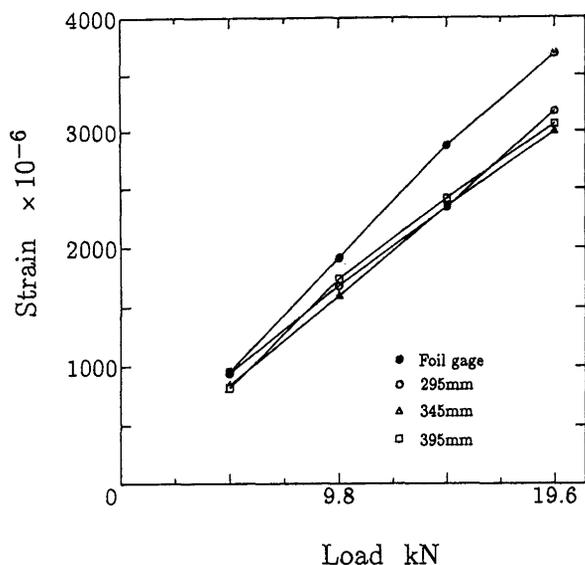


Fig.5 ひずみと荷重の関係.

あるため、この 20 % の較正を行なえばひずみ計測が可能である。また、き裂開閉口を計測することも問題ないと考えられる。

3.2 疲労き裂開口変位の測定

3.2.1 き裂を跨ぐひずみの計測

疲労き裂の入った Zr 基ナノ結晶分散バルク金属ガラス ($E=87\text{GPa}$)¹²⁾ に繰返し荷重をかけ、スペックル画像 (160×160 画素) を採取した。

取り込んだスペックル画像のうち、時間 $T=0\text{sec}$ の時刻の画像の X 方向の中心において、縦方向に上から 40~120 画素の全ての部分においてそれぞれの点を中心とする 40×40 画素の計測区画を設け、 $T = 0.3\text{sec}$ の画像と比較し、残差最小化法によってそれぞれの計測区画の移動量を測定した。その結果を Fig.6 に示す。縦軸に輝度をとり横軸に計測区画の Y 座標を取っている。このようにレーザをき裂を跨ぐように試料に照射させた場合、移動量の大きいスペックル (き裂の上下面からの反射光による) と移動量の小さいスペックル (き裂の上あるいは下面だけからの反射光による) を生じる。また、その移動量もまちまちである。これは、移動量の大きいスペックルが移動量の小さいスペックルに追いつき、それぞれが重なり合うこと等が考えられる。従って、き裂開口を含むひずみを計測する場合には、移動量の最も大きいスペックルに着目する必要がある。

ここでは、移動量の大きいスペックルを検出するために、全ての位置において残差最小化法を実施すると長時間を必要とするので、画像の Y 方向において輝度のピーク位置を探し、そのピーク位置全てに関して

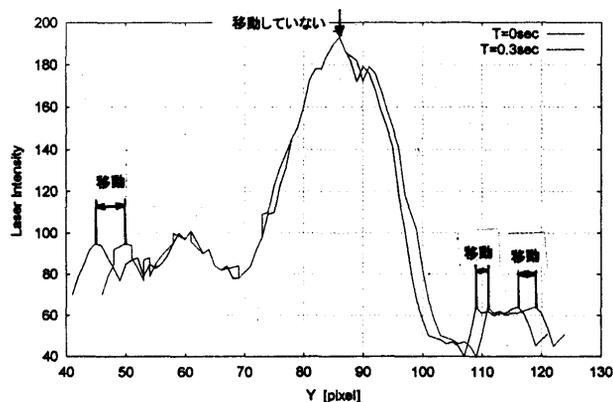


Fig.6 き裂を跨いで照射した場合のスペックル毎の移動量。

そこを中心とした計測区画を設けて、残差最小化法によってそれぞれの移動量を求め、その中から移動量が最大のものを採用した。

3.2.2 疲労き裂開口変位の測定

き裂のはいった Zr 基ナノ結晶分散バルク金属ガラスに繰返し荷重を周波数 $f=0.1\text{Hz}$ 、応力比 $R=0$ 、三角波で負荷し、き裂を跨ぐ場合とき裂先端前方でき裂を跨がないようにレーザを照射し、ひずみの計測を行った。また、同時にき裂先端前方にひずみゲージを貼り付け、ひずみゲージによってもひずみを計測した。

取り込んだスペックル画像からひずみを求め、それと荷重の関係を Fig.7(a) に示す。また、Fig.7(b) にはひずみゲージの結果を、Fig.7(c) にはスペックルゲージによるき裂先端前方のひずみ計測の結果を示す。ひずみゲージの結果とき裂を跨ぐように照射した場合のスペックルゲージの結果は、いずれもほぼ同じ荷重で折れ曲っている。しかし、き裂先端前方にレーザを照射した場合には、き裂先端前方のひずみ振幅が小さく分解能に近いため、滑らかな曲線が得られていない。き裂を跨ぐようにレーザを照射させた場合のひずみ振幅は約 $7700\mu\text{ strain}$ であるのに対し、き裂先端前方にレーザを照射した場合にはひずみ振幅は約 $78\mu\text{ strain}$ であり、き裂を跨ぐようにレーザを照射した場合には、約 100 倍大きなひずみが生じている。これは、き裂を跨ぐ場合は、跨がないき裂先端前方の場合と違い、き裂開閉口の影響を受けるためである。

次にき裂の先端付近と先端でき裂を跨ぐ領域および先端上部でき裂を跨がない領域 (Fig.8) にレーザを照射させ、計測を行なった結果を Fig.9 に示す。

スペックルゲージでき裂先端付近とき裂先端のき裂によるひずみの計測を行なった場合を比べる (Fig.9(a),(b)) と、いずれもほぼ同一荷重で折れ曲がっ

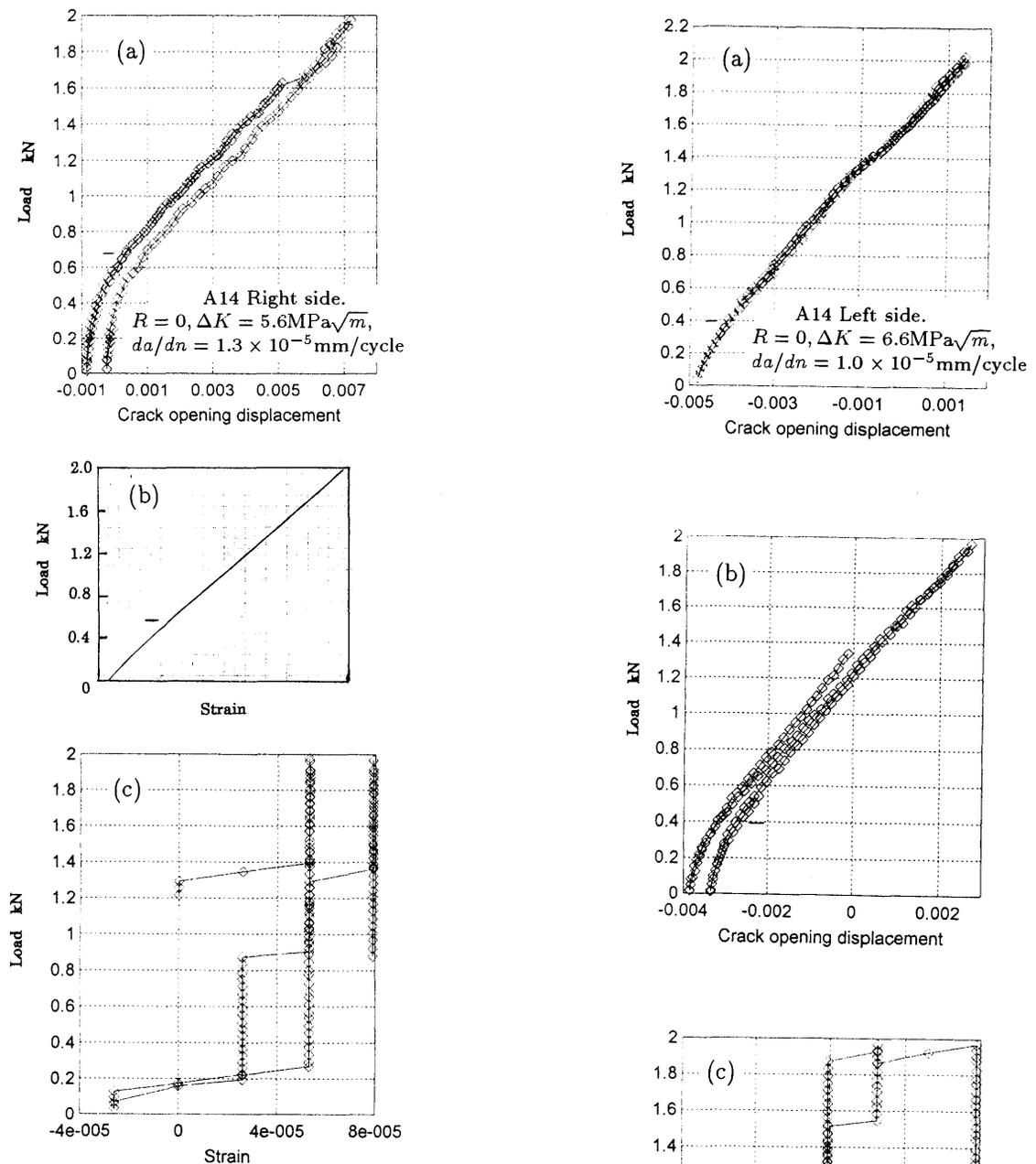


Fig.7 ひずみと荷重の関係. (a) スペックルゲージ (き裂を跨いだ場合). (b) スペックルゲージ (き裂先端直前). (c) ひずみゲージ (き裂先端前方)

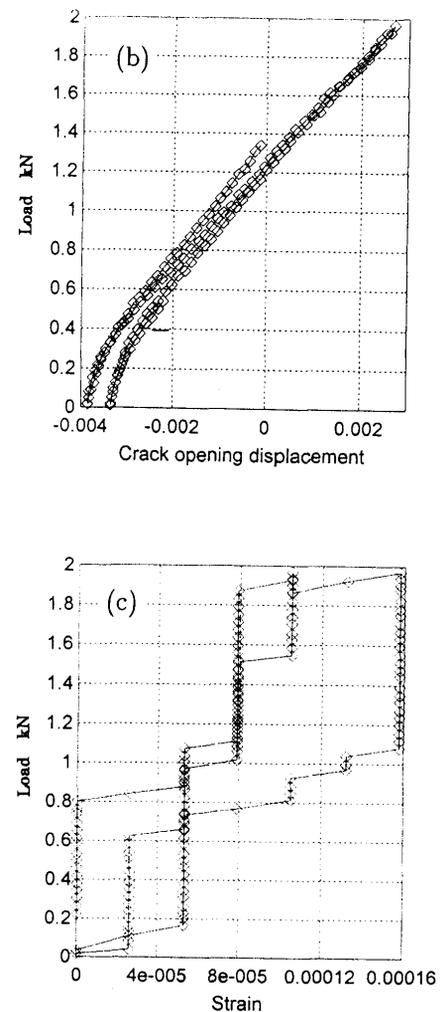


Fig.9 ひずみと荷重の関係. (a) 先端付近. (b) 先端. (c) 先端直上部.

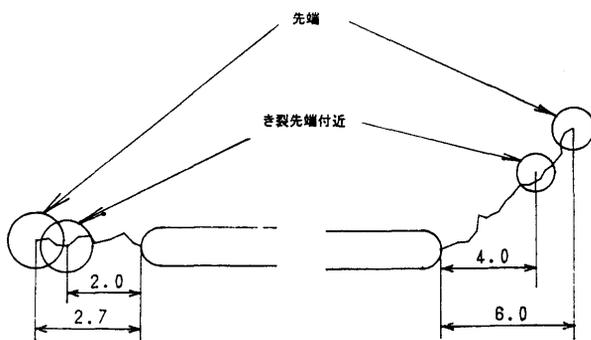


Fig.8 レーザ照射位置.

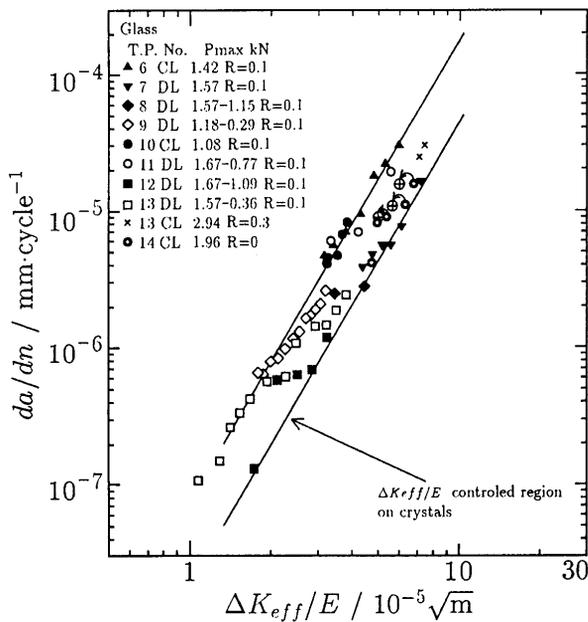


Fig.10 $\Delta K_{eff}/E$ と da/dn の関係.

ている。また、き裂先端にき裂を跨ぐようにレーザを照射させた場合のひずみ振幅は約 6200μ strain であるのに対し、き裂先端上部にき裂を跨がないように照射させた場合のひずみ振幅は約 105μ strain (Fig.9(c)) であり、き裂先端にき裂を跨ぐようにレーザを照射させた場合にはその上部に照射させた場合よりも 60 倍程度大きなひずみを生じている。

上記の通り、レーザをき裂先端付近(き裂を跨ぐ)とその前方(跨がない)に照射した場合、およびき裂先端(き裂を跨ぐ)とその上部(跨がない)に照射した場合で、ひずみはそれぞれ 100 倍と 60 倍前者が大きかった。よって 2.1 測定原理で仮定した $\epsilon_y \ll \Delta d/d$ は十分成り立ち、式(7)でき裂開口変位を代表するひずみが計測できると考えられる。

本法により測定したき裂先端開口荷重(開口荷重の決定法は次節)を基にして、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を求め、これをヤング率 E で除して $\Delta K_{eff}/E$ を計算し、疲労き裂伝ば速度 da/dn を再整理した結果を Fig.10 に \oplus で示す¹²⁾。スペックルゲージで計測した結果はひずみゲージで計測した結果よりもさらに結晶材のデータのバラツキを示す帯域(2本の実線間)の中心部を示す傾向がある。これよりスペックルゲージによる計測が、ひずみゲージによる計測と同等あるいはそれ以上の精度でき裂開口変位を測定できることを示唆している。

3.3 き裂先端開口荷重の決定法

長さ $2(a+x)$ のき裂が引張り応力 σ を受ける場合、試験片中央から距離 a の位置におけるき裂開口変位

COD は、

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a+x)^2 - a^2} \quad E: \text{ヤング率}$$

と与えられる¹³⁾。 COD の測定位置から x だけ前方をき裂先端(試験片中央から距離 $(a+x)$ の位置)と考える。き裂は引張り荷重の増加とともに、先端に向け開口して行き長くなり、先端まで開ききったとき長さは $2(a+x_0)$ で一定になる。ここで測定位置はき裂先端近傍とすると、 $a \gg x$ より、上式は

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{2ax}$$

となる。これより、き裂が先端に向け開口して行く間、 COD は σ と \sqrt{x} に比例し、 COD と σ の関係は曲線を示し、先端まで開ききると $x = x_0 = Const.$ となり、 COD は σ のみに比例し、 COD と σ の関係は直線を示す。従って、 $COD - \sigma$ 関係が直線を示し始める点がき裂先端開口点となる。

4 結 言

ひずみの測定

引張り試験において荷重とレーザスペックル法によって測定したひずみの間には、ひずみゲージによって測定したひずみと荷重の関係と同様、直線関係が見られ、ひずみの測定が可能であった。ただしレーザスペックル法によるひずみは、ひずみゲージによるひずみと比べて約 20% 小さい値を示した。今後、CCD カメラの設定角度、CCD カメラの画素の大きさの検討が必要である。

疲労き裂開口変位の測定

き裂先端後方とき裂先端において、それぞれレーザをき裂を跨ぐように当てた場合と跨がないように当てた場合から求めたひずみの大きさは、いずれもき裂を跨ぐ場合がそれぞれ 100 倍と 60 倍大きく、き裂を跨ぎ測定したひずみはき裂開口変位を代表していると言える。き裂先端前方に貼付けたひずみゲージ出力から求めたき裂先端開口荷重と、き裂先端および先端付近でき裂を跨ぐようにレーザを照射して求めた同荷重は、ほぼ一致した。

この際、開口荷重はひずみ・荷重曲線が負荷時に直線になり始める値とし、その破壊力学的根拠を与えた。

本レーザスペックルひずみ計を製作するにあたり、大阪大学基礎工学部・西川 出先生から多くの貴重なご助言を頂戴した。また山口大学工学部・大木順司先生には結果について有益なご議論をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) W.N.Sharpe, Jr., Int. J. Nondestructive Testing, **3**, 59(1971).
- 2) W.N.Sharpe, Jr. and J.J.Lee, ASTM ATP 905,253(1984).
- 3) 小倉敬二, 西川 出, 木村康樹, 日本機械学会論文集, **56**, 523, A, 526(1990).
- 4) 杵渕雅男, 秋庭義明, 田中啓介, 日本機械学会論文集, **56**, 522, A, 251(1990).
- 5) 田中啓介, 秋庭義明, 中尾真也, 杵渕雅男, 日本機械学会論文集, **56**, 524, A, 524(1990).
- 6) 大路清嗣, 中井善一, 藤本一男, 日本材料学会第38期学術講演会前刷, 198(1989).
- 7) K.Ogura, I.Nishikawa and Y.Miyoshi, Residual Stresses III, **1**, 531(1992).
- 8) 小倉敬二, 西川 出, 日本機械学会講演論文集, No.920-72, 619(1992).
- 9) 山口一郎, 非破壊検査, **35**, 7, 453(1986).
- 10) 山口一郎, 竹森民樹, 小林幸一, 非破壊検査, **39**, 8, 682(1990).
- 11) 西川 出, 小倉敬二, 山上正文, 桑山健太郎, 材料, **43**, 493, 1290(1994).
- 12) 藤田和孝, 井上明久, 張 濤, 日本金属学会誌, **64**, 9, 787(2000).
- 13) 例えば小寺沢良一, 材料強度学要論, 朝倉書店, 81(1990).