レーザ干渉変位計による
微小疲労き裂の開閉口挙動に関する研究*杵 渕 雅 男^{*1}, 秋 庭 義 明^{*2}, 田 中 啓 介^{*3}Crack Closure Behavior of Small Fatigue Cracks Measured
with an Interferometric Strain/Displacement Gage

Masao KINEFUCHI, Yoshiaki AKINIWA, and Keisuke TANAKA

An interferometric strain/displacement gage system was developed to measure the crack closure behavior of small fatigue cracks nucleated in smooth specimens by fatigue. Interference takes place between laser beams reflected by two Vickers indentations. Linear image sensors were used to detect the movement of interferometric fringes due to strain. The resolution in displacement of our system was $\pm 1\text{nm}$ for the gage length of $100\ \mu\text{m}$. The system was first applied to a through-thickness fatigue crack at the center of a low-carbon steel plate. The profile of crack opening displacement agreed with the prediction based on the Dugdale model. The crack opening point of small surface cracks in fatigue specimens of aluminum alloy 2024-T3 was determined from the record of load versus displacement. Surface cracks smaller than about $100\ \mu\text{m}$ in length mostly showed faster growth rates than those given by the da/dN versus ΔK_{eff} relation for long cracks.

Key Words: Fatigue, Experimental Stress Analysis, Interferometric Strain/Displacement Gage, Crack Closure, Small Cracks, Effective Stress Intensity Range

1. 結 言

金属材料の疲労過程はき裂の発生および伝ばに大別される。このうち長いき裂の伝ば挙動は、応力拡大係数をパラメータとする線形破壊力学(LEFM)によって定量的に取扱うことが可能となってきた。しかしながら、微小疲労き裂は同一の応力拡大係数範囲 ΔK に対して長いき裂より速く伝ばし、長いき裂の伝ば下限界以下の ΔK でも伝ばすることが知られている。この微小き裂の伝ば特性は主として微視組織との相互作用およびき裂開閉口挙動によるとされている⁽¹⁾。このうち切欠底から発生したき裂に対してはき裂開閉口の寄与が大きく、これを考慮した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} によって整理できることが明らかになってきた⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、平滑材に発生した微小表面き裂においては微視組織との相互作用が大きく複雑であり、かつその開閉口挙動の実測例はほとんどなく不明な点が多い。

この種の微小疲労き裂の開閉口挙動の測定法として

は Sharpe ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって開発されたレーザ干渉法が最も高精度の自動計測が期待できる。この測定法は、き裂の上下面に打ったビッカース圧痕を変位測定の特定点としそこからレーザ反射光による干渉縞の移動量から変位を測定するものである。

本研究ではレーザ干渉縞の検出にリニアイメージセンサを採用した干渉変位計(ISDG: Interferometric strain/displacement gage)を試作し、電気抵抗線ひずみゲージと比較することにより、その測定分解能および精度を明らかにした。ついで、これを疲労き裂に適用し、比較的長いき裂および微小表面き裂に対して開閉口挙動を測定した。

2. レーザ干渉による
微小変位の測定原理

図1のように四つの反射面を持つビッカース圧痕を距離 d だけ離して打ち波長 λ のレーザ光を当てると、4方向に干渉縞を生じる。このうち、上下2方向に生じる干渉縞について注目する。これは二重スリットによるフラウンホーファ回折となり、干渉縞の強度 I は次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$I = I_{\text{max}}(\sin\beta/\beta)^2 \cos^2\gamma \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\beta = \pi b(\sin\alpha_0 - \sin\alpha)/\lambda \cdots \cdots \cdots (2)$$

* 平成元年10月14日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年11月17日。

^{*1} 学生員、京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 准員、京都大学大学院。

^{*3} 正員、京都大学工学部。

$$\gamma = \pi d \sin \alpha / \lambda \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $I_{\max}$ は干渉縞の中央における最大の強度、 λ は入射光の波長、 α_0 は入射光と反射面の法線のなす角の2倍、 α は入射光と観測点とのなす角度、 b は反射面の幅である。式(1)の $(\sin \beta / \beta)^2$ 項は回折(Diffraction)を表し、 $\cos^2 \gamma$ 項は干渉(Interference)に対する。測定には干渉現象を用いる。

干渉縞の強度が最小となる位置は

$$d \sin \alpha = \lambda(1/2 + n), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \cdots (4)$$

で与えられる。いま観測点を固定して干渉縞を測定するとき、圧痕間の変位 Δd は縞次数の変化 Δn を用いて

$$\Delta d = \Delta n \lambda / \sin \alpha \cdots \cdots (5)$$

Δd の変化による干渉縞の移動距離を x とすると

$$\Delta n = x/w \cdots \cdots (6)$$

ここで w は干渉縞の縞間隔で次式で表せる。

$$w = L \lambda / d \cos \alpha \cdots \cdots (7)$$

ただし L は圧痕から観測点までの距離である。 Δd の値が小さいとすると初期圧痕間隔 d_0 を用いて

$$\begin{aligned} \Delta d &= (x/w) \cdot (\lambda / \sin \alpha) \\ &= d_0 x / (L \tan \alpha) \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

式(8)から、微小変位 Δd が干渉縞の移動距離 x として観測可能となる。

干渉縞の移動は圧痕間の相対変位だけでなく、剛体移動によっても生じるが、これは上側と下側の干渉縞の移動を平均することにより打ち消すことができる。

上述の手法による変位分解能は式(5)より評価できる。いまレーザ光としてHe-Neガスレーザを用いると、波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ である。圧痕としてビッカース圧痕を用いた場合、入射光と反射光との角度は $\alpha = 44^\circ$ となり、式(5)より縞次数の変化を1/100まで補間して測定することにより $0.009 \mu\text{m}$ の変位測定が

可能となる。

なお、変位が大きい場合には w の変化が無視できなくなるため厳密な変位 $\Delta d'$ を得るためには次式による変位換算が必要である。

$$\Delta d' = d_0 \{ \exp(x/L \tan \alpha) - 1 \} \cdots \cdots (9)$$

式(8)により計算される Δd を用いれば

$$\Delta d' = d_0 \{ \exp(\Delta d/d_0) - 1 \} \cdots \cdots (10)$$

微小変位に対しては式(8)が十分な精度を与え、本研究では式(8)によって計算した。

3. 実験方法

3.1 測定装置 本研究に用いたレーザ干渉変位計(ISDG)システムの概略を図2に示す。He-Neガスレーザ発振器、光路変換ミラー、センサを図のように配置し、試験片からの干渉光をセンサで受光する。センサにはPCDリニアイメージセンサ(浜松ホトニクスS2304-512Q)を用いた。このセンサは受光部にアパーチャサイズ $0.025 \times 2.5(\text{mm})$ のフォトダイオードを512個並べたもので、受光面の大きさは $12.8 \times 2.5(\text{mm})$ である。このセンサによって干渉縞の強度分布をアナログ出力(0~10V)し、データ処理ユニットを介して16ビットデジタル信号に変換した。変換したデジタル信号はパーソナルコンピュータを用いて処理し、微小変位を計算した。なお、プログラム言語としてはBasicコンパイラを使用した。

3.2 材料および試験片 本研究に用いた材料は、溶接構造用低炭素鋼熱間圧延材SM41B、および高張力アルミニウム合金2024-T3である。それぞれの化学成分を表1に、所定の熱処理後の機械的性質を表2に示す。

試験片は中央切欠平板および平滑材を用いた。それぞれの形状寸法を図3に示す。中央切欠平板にはSM41Bを用い、中央に1mmのドリル穴を開け、両

図1 レーザ干渉変位計の原理

図2 レーザ干渉変位計装置

端にワイヤ放電加工によりスリットを入れた。最終の切欠全長 6 mm, および切欠先端半径 0.16 mm である。平滑材には 2024-T 3 を用い試験片中央に鈍い切欠きを導入した。応力集中率は 1.03 である⁽⁶⁾。疲労試験前にはいずれの試験片もエメリー紙 0/6 まで研磨した後、電解研磨で片面 5~10 μm 除去した。レーザ干渉変位計の測定精度の検定には平滑材を用い、表面をダイヤモンドペーストで研磨した後、試験片中央部に一辺 30 μm , 間隔 100 μm のピッカース圧痕を導入し、圧痕の両側にゲージ長さ 1 mm のひずみゲージ (RSG : Resistance strain gage) を貼り付けた。なお、本研究の材料の疲労き裂伝ば挙動の詳細は既に報告した⁽²⁾⁽⁷⁾。

3.3 変位の計算方法 センサによって得られた干渉縞の強度分布の一部を多項式で近似しその極小値 (暗部) を決定し、センサ上の位置として記録した。極小位置の再現性を確認するため無負荷状態で 6 回測定し、そのばらつきから近似方法を決定した。ついで応力を負荷し、数種類の方法で変位を計算し、RSG 出力と比較することにより干渉縞移動量の計算方法を検討した。

3.4 疲労試験 疲労試験は電気油圧サーボ式疲労試験機を使用し中央切欠平板では応力振幅 $\sigma_a = 65\text{MPa}$, 平滑材では $\sigma_a = 150, 230\text{MPa}$ の 2 通りにつ

表 1 化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Fe				
SM41B	0.17	0.19	0.79	0.016	0.020	Bal.				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
2024-T3	0.12	0.20	4.59	0.52	1.48	0.016	0.029	0.032	Bal	

表 2 機械的性質

Material	Yield strength σ_Y (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Grain size d (μm)
SM41B	194	423	64
2024-T3	322	483	27

(a) 中央切欠平板

(b) 平滑材

図 3 試験片 (単位: mm)

いて行った。応力比は $R = -1$ とした。繰返し速度は 20~30 Hz であり、試験環境は常温、大気中である。

3.5 き裂開閉口の測定 中央切欠平板では、切欠きからのき裂長さが $c = 5.52\text{mm}$ ($\Delta K = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) となった時点で電解研磨により表面のすべり帯を除去し、ピッカース圧痕を右側に 4 点、左側に 5 点打ち、変位の大きな引張側では公称応力 1.28 MPa, 圧縮側では 1.91 MPa ごとに負荷しながらき裂開閉口挙動を測定した。また差動変圧器を利用した伸び計を用いて試験片中央部における開閉口挙動を測定し、ISDG による測定結果と比較した。

平滑材では、応力振幅 $\sigma_a = 150\text{MPa}$ ではき裂半長が約 50 μm に達したき裂を選んで 4.78 MPa ごとに負荷しながら測定した。 $\sigma_a = 230\text{MPa}$ では、5.97 MPa あるいは 9.16 MPa ごとに負荷しながら測定した。き裂開閉口荷重は除荷弾性コンプライアンス法⁽⁸⁾, および Sharpe⁽⁴⁾ による方法の 2 通りについて計算した。

4. 実験結果および考察

4.1 変位測定精度

4.1.1 無負荷状態での干渉縞位置の測定 一辺 30 μm , 間隔 100 μm のピッカース圧痕より得られる干渉縞の例を図 4 に示す。圧痕から観測点までの距離 L はおよそ 300 mm であった。ピッカース圧痕の形状を反映して三角形の干渉縞が得られる。またスペクルパターンも認められる。図中白枠はセンサ受光面を表している。この干渉縞の強度分布を図 5 (a) に示す。1~512 チャンネルは上側のセンサ、513~1024 チャンネルは下側のセンサの出力である。この波形から、乱れが小さくほぼ一定の強度が得られる極小側を解析

した。極小位置は、あるしきい値よりも下の部分の波形を多項式で近似して計算した。無負荷状態で6回測定し、極小位置のばらつきが最も小さくなる多項式の次数およびしきい値を決定した。これより近似曲線は2次曲線とし、しきい値は圧痕により強度に差があるためデータ数25個を基準とした。

図5(b)は(a)のA部分を拡大し2次曲線で近似したものである。データ点はほぼ2次曲線上にあり、近似が妥当であることを示している。

4.1.2 変位の算出とひずみゲージ測定との比較

次に前項と同一の試験片を用いて、-236～

図4 干渉縞の写真

(a) 強度分布の全体

(b) A部の拡大

図5 干渉縞の強度分布

354MPaまで23.6MPaごとに応力を負荷し、ビッカース圧痕の両側に貼り付けたRSG出力とISDGにより得られる変位を比較した。変位の計算は3種類の方法を試みた。ここで α は 44° を用いた。縞間隔 w は圧痕間隔 d とセンサまでの距離 L から式(7)により求められる。しかしながら L を精度よく測定することが困難であるため w を実測した。測定に際し、一つのセンサには五つの干渉縞が現れるよう、すなわち干渉縞間に約100個のフォトダイオードが存在するように L を調節した。ただし極小位置5箇所のうち1番めおよび5番めは波形が乱れやすく測定に適さないため両端を除いた3点で計算した。

ISDGとRSGの測定変位には極めてよい直線関係が認められた。そこでこれらを直線近似し、標準偏差の最も小さい方法を採用した。しかしながら、ビッカース圧子の対面角 136° より求められる $\alpha=44^\circ$ を用いた場合、ISDGによる変位とRSGによる変位とは厳密には一致しなかった。変位の計算に関与する値は Δn のほかに λ および α であるが、特に α についてはビッカース圧痕のスプリングバックなどによる角度変化が予測される。そこで本研究ではRSGによる変位をもとに α を逆に定めた。2本の試験片を用い、その平均値として $\alpha=42.004^\circ$ を得た。この値はSharpe⁽⁵⁾がビッカース圧痕に対して用いた 42° に一致する。図6に補正後のISDGとRSGより計算される変位の関係を示す。両者は極めてよく一致している。以上の手法を用いたときのRSG出力との差により計算される t 分布の95%信頼限界は、 $\pm 9.721 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ である。また無負荷状態における極小位置の95%信頼限界は $\pm 1.075 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ である。なお、100点の測定に要する時間はおよそ5分である。

4.2 長い疲労き裂の開閉口挙動 中央切欠平板に応力比 $R=-1$ 、応力振幅 $\sigma_a=65\text{MPa}$ で疲労き裂

図6 レーザ干渉変位計とひずみゲージとの比較

を導入し、き裂半長 $a=8.622$ mm (切欠半長 3.105 mm, 切欠底からの長さ $c=5.517$ mm) となった時点でのき裂開閉口挙動を測定した。このとき、応力拡大係数範囲 $\Delta K=20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 伝ば速度 $da/dN=2.64 \times 10^{-9}\text{m/cycle}$ で下限界に近い⁽²⁾。き裂開閉口応力は除荷弾性コンプライアンス法⁽⁸⁾により決定した。図7には試験片上での測定位置を示す模式図を、図8には切欠底から 90 μm の位置(左側)での開口部の弾性コンプライアンスを引いた応力-変位曲線を示す。表3にはそれぞれの測定位置でのき裂開閉口応力をまとめた。圧痕の位置は試験片中央からの距離で示した。切欠底に近い位置でのき裂開閉口応力は、伸び計による結果とよ

図7 き裂開閉口測定点の模式図

図8 減算後の応力-変位曲線

図9 き裂開口変位

く一致している。また、き裂先端に近いほど開口応力は大きくなる傾向を示す。

図9にはそれぞれの応力におけるき裂開口変位を示す。試験片中央部の結果は、伸び計によるものである。伸び計による結果はISDGの結果の延長線上にあり大きな変位に対してもISDGはよく対応していることがわかる。[厳密には式(10)より 10 μm の変位に対して約5%小さめの値を与える]図中の一点鎖線は、無限板中の理想き裂に対してDugdaleモデル⁽⁹⁾によって得られる開口変位CODを示す。実験結果はこのCODより全体的にやや小さいものの、定性的にはよく一致する。圧縮側では切欠きの影響により、試験片中央部に近いほど負の変位が大きくなる。

4.3 微小疲労表面き裂の伝ば

4.3.1 き裂の伝ば挙動 2024-T3アルミニウム合金平滑材について、き裂開閉口挙動を測定した12本のき裂について $da/dN - \Delta K$ の関係を図10に示す。 K の計算は、き裂を半円状と仮定し、き裂前縁の試験片表面の値としてRaju-Newmann⁽¹⁰⁾の解析結果を基に行った。なお、 $\Delta K=2K_{\text{max}}$ をとった(K_{max} :最大応力拡大係数)。ここで試験片番号V1, VA1は $\sigma_a=230\text{MPa}$ でき裂半長 80 μm ~773 μm まで5本のき裂を測定した。試験片番号V2, VA4, VA5は、 $\sigma_a=150\text{MPa}$ でき裂半長 80 μm ~306 μm まで7本のき裂を測定した。き裂にはF, Bと任意の番号を付した。図

表3 き裂開口応力

	ISDG								DTF	
	Left side					Right side				
Distance x (mm)	8.51	7.37	6.04	4.76	3.19	3.31	5.04	6.76	8.63	0
σ_{op} (MPa)	21.69	15.31	21.37	21.69	18.50	19.14	21.37	20.74	26.80	19.19

中実線は $R=-1$ の長いき裂の $da/dN-\Delta K$ の関係を示す。棒付印はき裂半長 $100\ \mu\text{m}$ 以下のき裂を示す。 $\sigma_a=150\ \text{MPa}$ では、長いき裂の下限界値以下でも伝ばし、また微視組織の影響を受けその伝ば挙動は不規則である。伝ば速度が 10^{-8}m/cycle 以上のき裂については長いき裂の関係に一致することが報告されているが⁽⁷⁾本研究においてもほぼ同様である。

4.3.2 き裂の開閉口挙動 図 11 に $\sigma_a=150\text{MPa}$ 、き裂半長 $78\ \mu\text{m}$ の表面き裂写真を示す。き裂より上下約 $50\ \mu\text{m}$ 離れた位置に一辺 $30\ \mu\text{m}$ のピッカース圧痕を打った。図 12 にこのときの開口部の弾性コンプライアンスを引いた応力-変位曲線を示す。これにより 2 種類の方法で開口応力 σ_{op1} 、 σ_{op2} を決定した。 σ_{op1} は通常の除荷弾性コンプライアンス法⁽⁸⁾による値である。 σ_{op2} は Sharpe⁽⁵⁾により採用された方法で、開口部および閉口部より直線を引き、その交点を σ_{op2} とした。その物理的根拠は明らかでないが、ここでは両者の値をとり比較した。

図 13 に $da/dN-\Delta K_{eff}$ の関係を示す。図 13(a) は除荷弾性コンプライアンス法による ΔK_{eff} を示す。図中実線は長いき裂の $da/dN-\Delta K_{eff}$ の関係を、棒付印はき裂半長 $100\ \mu\text{m}$ 以下のき裂を示す。 $\sigma_a=150\text{MPa}$ では伝ば速度のばらつきが大きく、長いき裂の下限界値以下でも伝ばし長いき裂の関係より高速で伝ばする。 $\sigma_a=230\text{MPa}$ ではデータ点は少ないが、長いき裂の関係にほぼ一致している。伝ば速度が $10^{-9}\sim 10^{-8}\text{m/cycle}$ で長いき裂の関係に一致するようである。

図 13(b) は、Sharpe により採用された方法で得ら

れた ΔK_{eff} を示す。 $\sigma_a=150\text{MPa}$ では $100\ \mu\text{m}$ 以下のき裂であっても長いき裂の関係に一致するものが存在するが、図 13(a) と同様に長いき裂の関係より高速側にずれる傾向を示す。 $\sigma_a=230\text{MPa}$ では V 1-B 1 以外は長いき裂の関係に一致するが、V 1-B 1 は長いき裂の関係より低速側に位置する。微小き裂に対しては Sharpe による方法が有効であるように見受けられ

図 11 開閉口挙動を測定したき裂の表面写真

図 12 減算後の応力-変位曲線

(a) 除荷弾性コンプライアンス法

(b) シャープの方法

図 13 き裂伝ば速度-有効応力拡大係数範囲の関係

るが、その物理的意味を明確にする必要があろう。

5. 結 論

本研究ではレーザ干渉変位計(ISDG)を製作し、ひずみゲージ出力と比較することにより、その精度を検討した。また、これを用いて疲労き裂の開閉口挙動を測定した。得られた主な結果は以下に示すとおりである。

- (1) 標点としてビッカース圧痕を用い圧痕間隔 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、圧痕の大きさを一辺 $30\text{ }\mu\text{m}$ として変位を測定した。ひずみゲージ出力との比較より求められる入射光と反射光とのなす角度は約 42° であった。無負荷状態において、極小位置のばらつきより求められる変位に対する t 分布の 95% 信頼限界は $\pm 1.075 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ であった。また、ひずみゲージ出力と ISDG 出力との差に対する信頼限界は $\pm 9.721 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ であった。
- (2) 溶接構造用低炭素鋼 SM 41 B の中央切欠平板に切欠底より 5.5 mm の疲労き裂を導入しき裂開口変位を測定した。静的な理想き裂に対する Dugdale モデルにより得られるき裂開口変位と比較すると、測定結果は小さめの値をとるものの開口形状はモデルとよく一致した。またき裂開口応力はき裂先端でやや大きくなった。
- (3) アルミニウム合金 2024-T 3 平滑材を用いて表面微小き裂のき裂開閉口挙動を、応力振幅 $\sigma_a = 150$

MPa においてき裂半長 $80\text{ }\mu\text{m} \sim 306\text{ }\mu\text{m}$ まで、 $\sigma_a = 230\text{ MPa}$ ではき裂半長 $80\text{ }\mu\text{m} \sim 773\text{ }\mu\text{m}$ まで測定した。伝ば速度 da/dN と除荷弾性コンプライアンス法より求められる有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} の関係は $\sigma_a = 150\text{ MPa}$ で $da/dN = 1 \times 10^{-9}\text{ m/cycle}$ 以下の短いき裂は長いき裂の関係より高速側で、かつ長いき裂の下限界値以下でも伝ばした。

本研究の一部は国産技術振興会・倉田奨学金の援助を得て行われた。またレーザ干渉変位計の設計にあたって Sharpe, W. N. Jr. 教授 (Johns Hopkins University) より助言を得たことに感謝する。

文 献

- (1) 田中・機論, 54-497, A(1988), 1.
- (2) 秋庭・田中, 機論, 53-487, A(1987), 393.
- (3) 秋庭・田中・谷口, 機論, 53-493, A(1987), 1768.
- (4) Sharpe, W. N. Jr., *Int. J. Nondestructive Testing*, 3 (1971), 59.
- (5) Sharpe, W. N. Jr. and Su, X., *Eng. Fract. Mech.* 30-3(1988), 275.
- (6) Neuber, H., *Kerbspannungslehre*, 2 Auflage, Springer-Verlag, Berlin, (1957), 39.
- (7) Akiniwa, Y., Tanaka, K. and Matsui, E. (Ritchie, R. O., ほか 2 名編), *Fatigue '87*, 1(1987), 361, EMAS, Warley, V. K.
- (8) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276(1976), 899.
- (9) Dugdale, D. S., *J. Mech. Phys. Solids*, 8-2(1960), 100.
- (10) Raju, I. S. and Newmann, J. C. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, 11(1979), 817.

討 論

〔質問〕 幡 中 憲 治 [山口大学工学部]

以下に示す 3 点につきご教示いただければ幸いです。

- (1) レーザ光反射面となる圧痕面の滑らかさは測定結果にどのように影響するのか。また、角度 α は常にひずみゲージによる測定結果との比較を通じて決定されることになるのか。
- (2) W は L の測定を通じて式(7)より算出される場合と、実測される場合があるとのことであるが、それぞれにより得られる値の精度はいかかなものか。また、レーザ干渉変位計により $0.009\text{ }\mu\text{m}$ までの変位が測定可能ということであるが、 W の測定精度と関連して実際の変位分解能はいかほどと考えられるか。
- (3) 長いき裂と微小き裂の開閉口変位を測定する場合、測定方法、および測定精度は、両者において同等と考えて良いか。

〔回答〕 (1) 反射面の滑らかさは干渉じまの強

度および得られる波形に対するノイズに影響を与える。強度の低下に対しては蓄積時間の変更によりある程度対応可能だが、ノイズについてはピーク決定時の誤差を増大させ、測定精度を低下させる。

$\alpha = 44^\circ$ と $\alpha = 42^\circ$ の場合、変位の差は約 4% であり、き裂開閉口の測定においては特にどちらを用いても大差ない。しかしながら、精密な変位測定装置という立場から、ひずみゲージとの比較により $\alpha = 42.004^\circ$ に補正した。Sharpe も $\alpha = 42^\circ$ を用いており、またかなりの材料でこうなる可能性があり、厳密な検定を行わない場合 $\alpha = 42^\circ$ が推奨される。

(2) 試験片表面からセンサまでの距離を精度良く(有効数字 5 ケタ程度)測定することが困難なため、 W を実測し変位計算を行っている。十分な干渉じまの強度が得られたとき、無負荷状態において、ピーク位置のばらつきによる変位に対する 95% 信頼限界は $1.075 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$ である。また、干渉じま間にフォトダイオー

ドが100個存在するとして、干渉じまがフォトダイオード1個分移動したときの変位が $0.009\mu\text{m}$ である。実際は波形を2次近似により補間してピークの位置を決定しており、分解能はさらに上昇する。ひずみゲージ出力との差における測定変位の95%信頼限界は $\pm 9.721 \times 10^{-4}\mu\text{m}$ である。

(3) き裂長さによる精度の低下はないが、長いき裂では変位が大きくなり、 W の変化による補正〔式(10)〕が必要と考えられる。この補正によると $10\mu\text{m}$ の変位に対して約5%の誤差となる。

〔質問〕 戸 梶 恵 郎〔岐阜大学工学部〕

興味深く拝見した。以下の点についてご教示願いたい。

(1) レーザを用いたき裂開閉口の測定において、ビッカース圧痕の一辺が $30\mu\text{m}$ 、間隔が $100\mu\text{m}$ としているが、これらの値に特別な意味があるのか。言い換えると、これらの値を変えたとき、測定結果にどのような影響を与えるのか。

(2) レーザを用いたき裂開閉口の測定法によって測定可能な最小のき裂寸法はどの程度か。

(3) σ_{op} を決定するに際して除荷弾性コンプライアンス法とSharpeの方法のいずれを用いても、 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係において微小き裂(特に $a < 100\mu\text{m}$)は依然として大きいき裂より速く、かつ大きいき裂の下限界以下でも成長している。この加速の理由についてご意見をお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) 使用したリニアイメージセンサは、ある蓄積時間内の受光量の積分測定を電圧として出力するもので、得られる干渉じまの強度はレーザ発振器の出力と圧痕の大きさにより決定される。現在、レーザ発振器の出力は 5mW 、蓄積時間は 30ms で測定を行っているが、このとき十分な干渉じまの強度が得られる圧痕の大きさが一辺 $30\mu\text{m}$ である。また、干渉じま間隔は式(7)で与えられるが、本装置において干渉じま間に約100個のフォトダイオードを割当てたときの圧痕間隔が $100\mu\text{m}$ である。

(2) 本実験条件では圧痕の大きさは一辺 $30\mu\text{m}$ であるから、大体き裂半長 $15\mu\text{m}$ 以上のき裂は測定できる。実際にはもう少しき裂が長くなければ十分なき裂開閉口測定にはならないと考えている。より大出力のレーザ発振器を使用し、圧痕を小さくすることができれば、さらに短いき裂でも測定可能であろう。

(3) 力学的微小き裂は ΔK_{eff} によると長いき裂と同じ法則で伝ばするが、本研究で開閉口を測定した $100\mu\text{m}$ 程度以下の微小き裂は、力学的にも微視組織的にも微小なき裂であり、このため長いき裂よりも加速側になったと考えられる。また、このような微小き裂の加速原因として、結晶学的様相を示していること、混合モード条件下で伝ばしていること、弱い結晶からき裂が発生しているため大規模降伏となっていることなどが考えられるが、これらの寄与度を定量的に分離するまでには到っていない。