



Title	き裂開口に伴う光干渉縞の解析による応力拡大係数の評価
Author(s)	本村, 文孝; 今井, 康文; 才本, 明秀
Citation	長崎大学工学部研究報告 Vol.35(65), pp.1-4; 2005
Issue Date	2005-07
URL	http://hdl.handle.net/10069/3758
Right	

This document is downloaded at: 2019-03-19T19:28:14Z

き裂開口に伴う光干渉縞の解析による応力拡大係数の評価

本村 文孝*・今井 康文*
才本 明秀**

Estimation of Stress Intensity Factors from a Crack Opening Displacements Measured by Interference Fringes

by

Fumitaka MOTOMURA*, Yasufumi IMAI*, Akihide SAIMOTO**

Crack opening displacements were measured by the interference method, when a crack propagates in a transparent material like a glass. To determine the position of each order of the interference fringes, Discrete Fourier Transform and Maximum Entropy Method were applied to the digital image processing. Distribution of the stress intensity factors through a plate thickness and a shape of the crack front were successfully obtained.

key words: Thermal Stress Cleaving, Interference Fringe Method, DFT, MEM

1. まえがき

本研究室では硬脆かつ透明度の高いガラスに関する脆性破壊挙動に関する研究を継続的に行ってきた。一般に言われる脆性破壊は高速な破壊現象であり、き裂進展挙動の観察には高速度カメラのような高価な観測装置が必要である。しかし熱応力割断を利用すれば、比較的低速でき裂を進展させ、ガラスを対象とする限り材料内部を進展するき裂の様子を観察できる。観察から得られるき裂開口量から破壊の有益な情報を得ることができる。今回は光干渉法を用いた干渉縞の測定により、き裂進展中のき裂先端開口量及び応力拡大係数の算出を試みた。従来、干渉縞の整理に用いられてきたアナログ的手法を改め、デジタル画像処理を用いることで、高精度な干渉縞の抽出が可能となったので報告する。

2. 実験方法および実験結果

始めに材料内を進展するき裂の創成方法について説明する。き裂の創生には炭酸ガスレーザーによる熱応力割断を利用した。ガラス表面に局所的な温度勾配を発生させ、照射位置を移動させると、き裂は照射位置と等距離を維持しながら、熱源移動軌跡に沿って進展する。連続照射の場合、熱源移動速度とき裂進展速度はほぼ同じであり、き裂は安定して熱源を追従する。熱源移動速度とレーザー照射密度によって熱源とき裂先端の距離は決まる。実験ではレーザー照射位置を固定し、ガラスを支持したリニアガイドを移動させるので、レーザー照射位置と顕微鏡の距離を決めれば、き裂先端形状の連続的な観測ができる。

レーザー出力が時間的に変動するパルス照射の場合も同様に、出力変動に同期したき裂進展が観察された。

次にき裂進展に伴う干渉縞の観察方法について説明する。CCDカメラ装着可能なロールスコープ型の顕微鏡を用い、倍率 5 倍、作動距離 24 [mm] の対物レンズと撮影レンズ越しに動画撮影をおこなう。観察用光源には光強度特性として 4 つのピークを持つウシオ製の超高圧水銀ランプを用いた。このうち長波長側の 550 [nm] 近傍を透過するバンドパスフィルタを通過した波長でできる干渉縞を撮影した。

さらに、撮影された動画はビデオキャプチャにてパソコンに取込んだ後、付属のビデオ編集ソフトにて静止画像として保存した。

図 1 にパワーメータにて測定したパルス照射の時間変化を示す。サンプリング周期 10 [Hz] において、1.2 [sec] を 1 サイクルとした出力変動が確認された。図 2 に図 3 の板厚 1.1 [mm] のガラス板をレーザー割断した際に撮影されたき裂先端近傍の様子に相当する出力変化を示す。実験では割断中の出力変化と進展の様子を同期させるために、2 分岐のハンドピースをレーザー発振器先端に取付け、割断および計測を同時におこなった。図 3 (a) ~ (f) は板厚全体が十分観察できるように顕微鏡にて拡大した撮影画像である。リニアガイド移動速度は 1.2 [mm/sec] と低速であり、き裂先端形状は湾曲している。加熱時のき裂は右から左へ移動する。(a) の安定出力域から出力が低下し始めると、き裂は熱源から遠ざかるので、画面上では右側へ移動したように見え ((b), (c)), 再び出力が増加し始めると、熱源に追いつこうと加速す

平成 17 年 6 月 24 日受理

* 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

** 大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

る様子 ((d), (e)) が観察された。

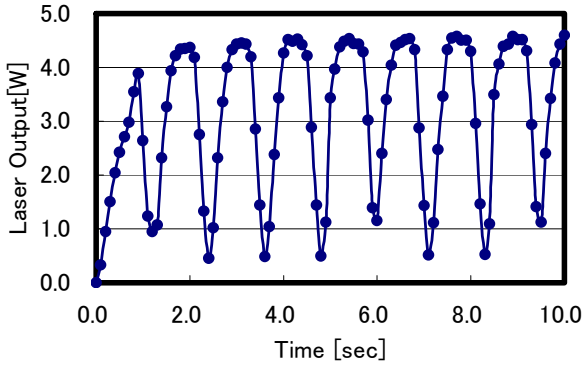


Fig.1 Laser output for the pulse mode

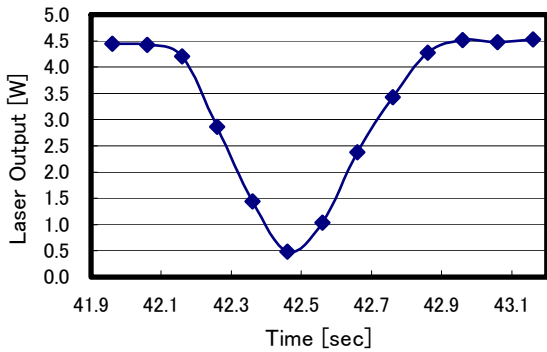


Fig.2 Laser output for one cycle

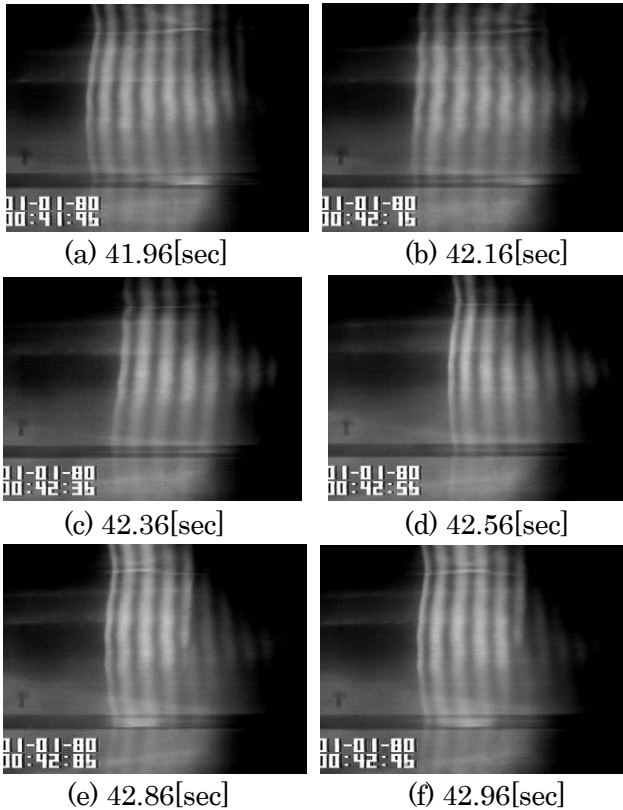


Fig.3 photograph for one cycle

3. 解析方法

画像処理には極力フリーソフトを用いることを心掛けた。今回使用した CCD カメラは約 40 万画素であり、静止画の画素数は水平方向 320[pixel]、垂

直方向 240[pixel]と小さいので、バイキュービック法にて補間処理を施し、887×665[pixel]に高画素化した。デジタル濃淡画像から輝度値を取出すために便利な画像の保存形式に PGM(portable gray map)形式を選び、ラスタ走査順に処理を進める。任意のラスタ走査線上で最初に行う処理はノイズの除去である。一般的には、平滑化手法を用いるが、ここでは離散的フーリエ変換 (以降、DFT) と最大エントロピー法 (以降、MEM) を併用した。

3. 1 ノイズの除去

始めに離散的フーリエ変換の構成式を以下に示す。

$$f^i(x) = a_0 + \sum_{j=1}^M g(i, j)$$

$$g(i, j) = a_n(j) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{2M} j \cdot x_i\right) + b_n(j) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{2M} j \cdot x_i\right)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i$$

$$a_n(j) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{2N} j \cdot x_i\right)$$

$$b_n(j) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{2N} j \cdot x_i\right)$$
(1)

上式はサンプル数Nが偶数の場合であり、MはNの半値である。ここでMをDFT次数と呼ぶことにする。図4の干渉縞の撮影画像 (画素数: 500×421[pixel]) を例に、干渉縞の縞次数を求める手順を説明する。任意のラスタ走査線上の輝度分布が図5のようになった。ここでは、ラスタ走査線上のサンプル数は水平方向画素数である。縞次数は繰り返される明線および暗線のピーク値に相当するので、輝度の増減する変曲点として求めることになるが、ノイズも拾ってしまいそのままでは特定できない。上式 (1) においてノイズを除去することは、適当なDFT次数を選ぶことと等価である。そこで、干渉縞の周期に相当する DFT 次数を決定するために MEM を適用する。今回用いたMEM (1) は赤池情報量基準 (AIC) に基づく自己回帰モデルを確率過程に用いたものであり、輝度データを観測波形と見なした時のパワースペクトルを周波数 (ここでは、DFT次数) の連続関数として推定することができる。図6にDFT次数に対するパワースペクトル分布を示す。結果としてM=37を得た。図7はDFT次数 (M) =37とした場合の輝度分布を元に、輝度値の変曲点をプロットしたものである。0次の明線の座標を決めれば、それ以降の縞次数の座標は随時求まり、縞次数に相当する輝度値のみをうまく取出すことができた。最終的にはこの操作を全ラスタ走査線についておこない、各縞次数毎に繋ぎ合わせることで、図8のように実寸法表示された線図を得ることができた。図8には3次の暗線までを示している。

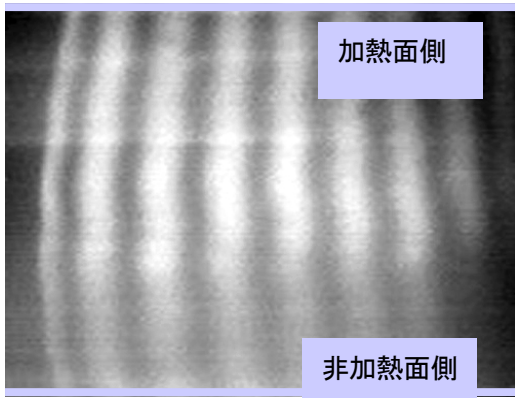


Fig.4 Interference fringe through a plate thickness

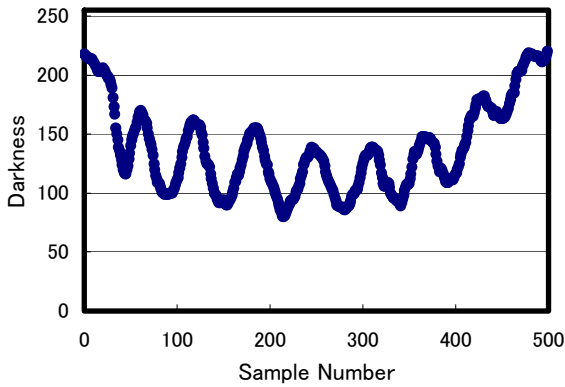


Fig.5 A distribution of original brightness

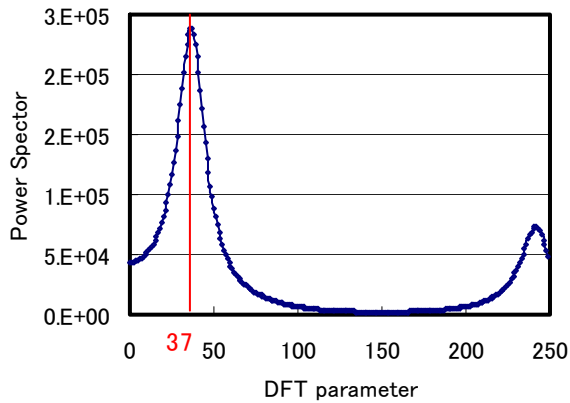


Fig.6 Determination for a DFT parameter (M)

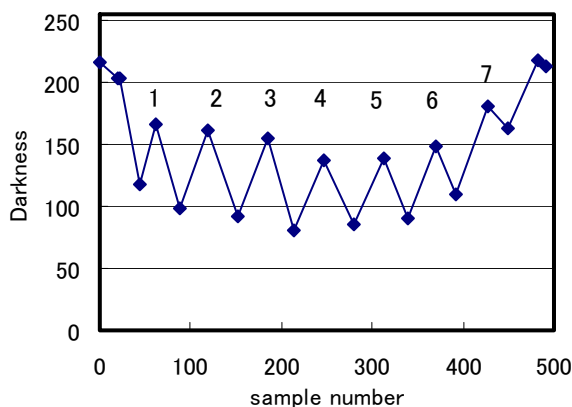


Fig.7 Interference fringe points after DFT

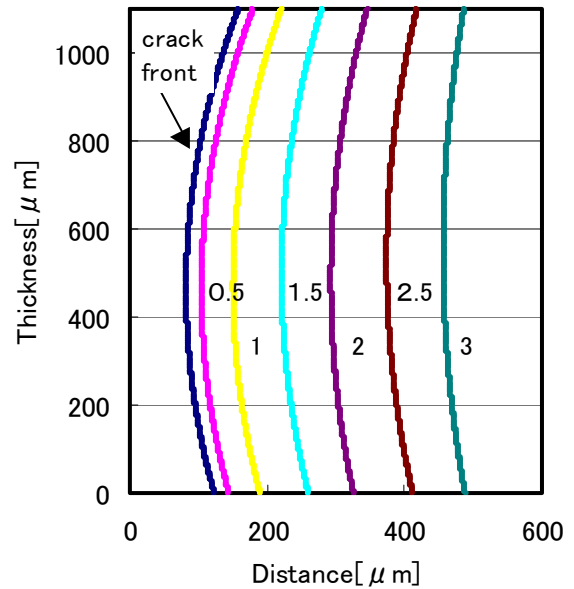


Fig.8 Distribution of the analyzed interference fringe

3. 2 き裂開口形状の関数近似

き裂開口量の半長を δ , 観察用光源の波長を λ とすると, ニュートンリングの関係と同様, (2) 式を得る。

$$\delta = \frac{1}{4} m \lambda \begin{cases} m = 0.5, 1.5, 2.5, \dots & : \text{明線} \\ m = 0, 1, 2, \dots & : \text{暗線} \end{cases} \quad (2)$$

ここで m は縞次数であり, 0.5 次の明線は波長の 1/8 として得られる。さらに, 得られたき裂開口形状から応力拡大係数を求める式に (3) 式を用いた。

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{\delta}{\sqrt{r}} \right) \quad (3)$$

ここで, r はき裂先端に垂直な方向への距離であり, 縦弾性係数(E)=71.6[GPa], ポアソン比(ν)=0.23 とした。(3)式より応力拡大係数を求めるには, き裂先端近傍の開口量の傾きを定める必要があるので, 開口形状を関数近似する。(3)式はき裂開口形状を近似する際, 応力の特異性を表わす \sqrt{r} の項 (以降, 初項) のみの関数を用いることを示している。結果として, 初項のみでは, ガラスの開口形状をき裂先端から約 100[μ m]までしかうまく近似できなかった。そこで, 応力の特異性を表わす項以外^② (以降, 2 項) を付加してみると, 開口形状をうまく近似できることがわかった。図 10 に関数近似に使用した, き裂先端に近い 0.5 次の縞からの縞次数に相当する離散データの数に対して得られた応力拡大係数をプロットしたものを示す。図中の赤丸は初項, 青丸は 2 項まで用いた場合である。初項の場合, き裂先端近傍のデータのみを用いた方が一般に用いられるガラスの破壊靱性値 0.75[MPa \sqrt{m}]に近づいた。2 項の場合は, き裂先端から離れた縞次数データを含む

につれ、応力拡大係数が減少したが、変化量は初項に比べて小さい。また、各項のデータ数ゼロへの外挿値はほぼ同じであった。このことは近似する関数に寄らず応力拡大係数はき裂先端の極近傍の開口形状に依存することを示唆している。そこで2項までを含む関数について、き裂先端近傍の0.5次の縞から3点のみのデータを用いて開口形状を近似した。

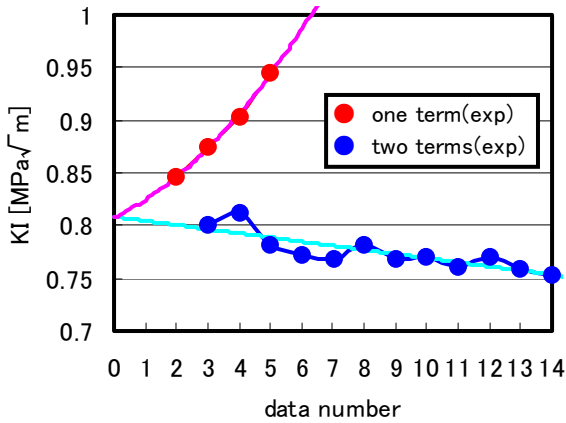


Fig.9 KI for each data number

3. 3 応力拡大係数の評価

板厚方向に分布するき裂先端全長について応力拡大係数を求めたいが、き裂先端は開口量ゼロの暗線中にあり、そのままでは特定できない。そこで、き裂先端は0.5次の明線から等距離にあり、0次の暗線であるき裂先端形状は0.5次の明線と同形状であるとして、応力拡大係数を算出した。関数近似によって算出されるき裂先端位置と初期値として与えたき裂先端位置が閾値内にある場合は補正の必要が無いとした。すべての画像に対して、2[μm]以内の誤差に収まった。パルス照射の場合、湾曲したき裂先端形状の先行位置の垂線は撮影画像の水平方向に一致するので、この点に関する関数近似によって得られたき裂先端位置を0.5次の干渉縞からのオフセット量として与え、板厚方向に分布するき裂先端の任意点におけるき裂先端に垂直な方向へのき裂開口量から応力拡大係数を算出した。

4. 解析結果

図10および図11に図3の干渉縞画像に対して得られたき裂先端形状および応力拡大係数の板厚方向分布を示す。レーザ照射出力の増減によりき裂先端形状は2つに大別でき、熱エネルギー供給量が安定域および増加域では、板厚内部にき裂先行位置がある。安定域の41.96[s]での応力拡大係数は板厚内でほぼ一致値を取っているが、増加域の42.86[s]と42.96[s]では、全体として大き目の値となり、非加熱表面近傍にて最大値となった。これはき裂は加速しており、動的な効果加わったためと考えられる。一方、熱エネルギー減少域のき裂先端形状は非加熱

面側が先行しており、応力拡大係数も加熱面側から減少し、42.16[s]の最も減速した時の応力拡大係数は0.7[$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]となった。

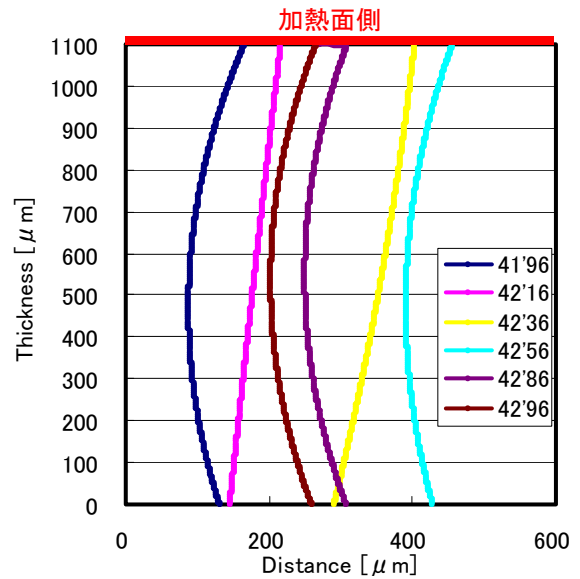


Fig.10 Shape of the crack front

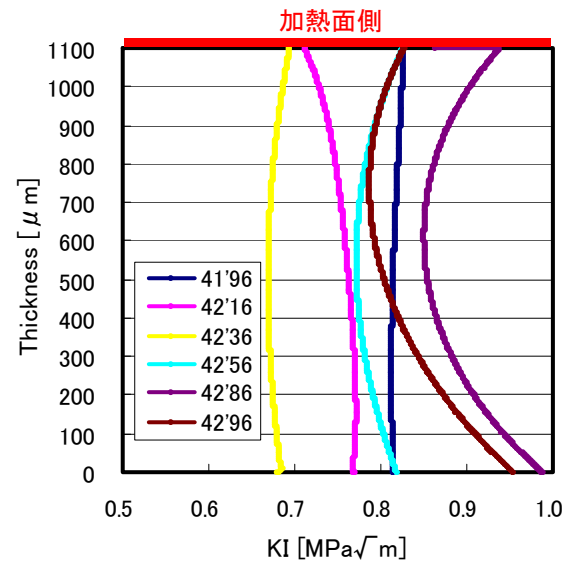


Fig.11 Distribution of the KI

5. まとめ

3次元物体内を進展中のき裂進展挙動について、光学手法である光干渉法を用い、き裂開口に伴う干渉縞の解析にデジタル画像処理をおこなうことで、板厚全長に同精度かつ高精度な開口量を評価することができた。また応力拡大係数はき裂先端近傍のみの縞次数データを用いた方がよいことが示された。

参考文献

- (1) 笹木敬司, インターフェース 2月号(1983), pp.276-285
- (2) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館(1976)