

## 726 高次デジタル画像相関法の開発と応力急変部のひずみ勾配計測

大阪工業大学[院] ○阿部真哉 大阪工業大学 西川 出

## Development of the High Order Digital Image Correlation Method and Measurement of Strain Distribution at the Vicinity of Notch Root and Crack Tip

Shinya ABE and Izuru NISHIKAWA

## 1 緒 言

切欠き部などの応力集中部では複雑なひずみ状態となっているが、このような部位における変位・ひずみを広範囲にわたって非接触でかつ高精度に計測する手法として、これまでにデジタル画像相関法(DCM)が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、ひずみ勾配のある場合の分布計測は困難である。そこで本研究ではサブセット内に非線形ひずみ分布を考慮することにより切欠き底のような複雑なひずみ分布の高精度計測を試みることにした。

## 2 計算アルゴリズム

## 2.1 相関値計算

画像の相関関係の判定には次式で定義する相関係数  $S$  を用いた。

$$S = 1 - \frac{\sum \{f(x, y) \cdot g(x^*, y^*)\}}{\sum \{f^2(x, y)\} \cdot \sum \{g^2(x^*, y^*)\}} \quad (1)$$

$f, g$  は変形前後の画像の輝度値である。 $\Sigma$  は注目している点を中心とした小領域(サブセット)内について各画素の輝度値を足し合わせることを意味する。この  $S$  値が最小となる移動先を Newton-Raphson 法により探索することで、変形前画像のサブセット中心点の移動先を変形後画像から検出する。

## 2.2 変形前後の画像の同一点探索

デジタル画像相関法ではサブセットをもとに同一点を探索しサブセットの中心点の変位を検出しているために、ひずみを得るためには切欠き底にある程度の標点距離を必要とする。一方切欠き底のひずみ分布は直線型の分布とはならないのでこのような標点距離を短くする必要がある。この矛盾する要求を満足するためにはサブセット内のひずみを直接計測する手法の開発が望まれる。そこでここではサブセット内における任意の点のひずみを直接検出するために、Fig.1 に示すようにサブセット内の非線形ひずみ分布を考慮した方法(3次近似DCM)を考案した<sup>2)</sup>。すなわち変形後の座標( $x^*, y^*$ )を次式で与える。

$$x^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \Delta x^3 + 3 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} \Delta x^2 \Delta y + 3 \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \Delta x \Delta y^2 + \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \Delta y^3$$

$$y^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + 2 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} \Delta x^3 + 3 \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} \Delta x^2 \Delta y + 3 \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} \Delta x \Delta y^2 + \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \Delta y^3$$

ここで  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$  はサブセット中心のひずみ成分を表し、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}, \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y}, \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}, \frac{\partial^3 u}{\partial y^3}, \frac{\partial^3 v}{\partial x^3}, \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y}, \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2}, \frac{\partial^3 v}{\partial y^3}$$

はサブセット内のひずみ勾配・ひずみ勾配変化成分を表している。なお計算の収束安定性を高めるために  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$  のひずみ変化成分には減衰係数 0.2 を乗じた。

変形後の座標( $x^*, y^*$ )は画素が存在する点に位置するとは限らない。そこで、評価したい場所の輝度値をその周囲の画素の輝度値を用いてラグランジュ補間を行い算出する<sup>3)</sup>。これにより同一点探索の高精度化をはかった。

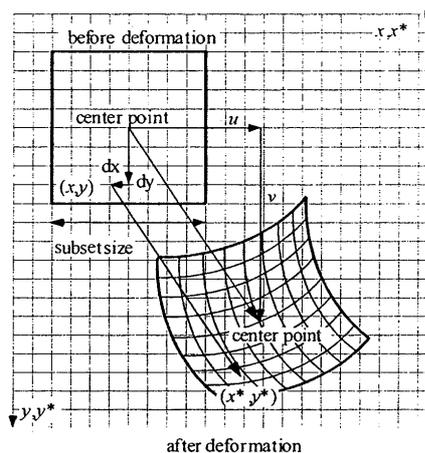


Fig.1 Subsets before and after deformation

## 2.3 計測システム

CCD カメラを用いて試験片表面を撮影した。この画像をパーソナルコンピュータに取り込み変形前後の二枚の画像を用いて DCM 処理を行った<sup>2)</sup>。

## 3 計測結果

アルミニウム切欠き材(5×10mm,  $\rho=2\text{mm}$ ,  $\alpha=1.45$ )を用いた 4 点曲げ試験を行った。最大曲げ応力が 100MPa となるように負荷を加え、3 次近似 DCM によりひずみ計測を行った。このとき試験片長手方向を  $x$  軸、負荷方向を  $y$  軸とした。

## 3.1 ひずみ分布

曲げ負荷下において  $x$  軸方向の垂直ひずみ分布計測を行った。Fig.2 に示すような切欠き底近傍において 3 次近似 DCM を用いてサブセットの中心点と切欠き底にあたる計測対象点の 2 点に対してひずみ分布を求めた。

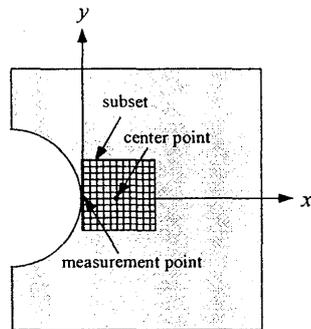


Fig.2 Measurement at the vicinity of notch

このとき  $x$  軸方向の垂直ひずみ値は式(2)を  $\Delta x$  で微分した次式により求めた.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta y + 3 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \Delta x^2 + 6 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} \Delta x \Delta y + 3 \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \Delta y^2 \quad (4)$$

ここでサブセット内の中心点は  $\Delta x = 0, \Delta y = 0$ , 計測点は  $\Delta x = 0, \Delta y = -subset/2$  とし, その結果を Fig.3 に示した.

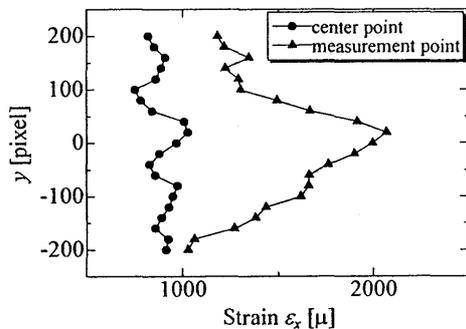


Fig.3 Strain distribution at the vicinity of notch root

Fig.3 より中心点の計測結果と比較して切欠き底近傍においては計測点のひずみ値が増大していることが確認できた. このことから本手法によりサブセット内の任意の点でのひずみ計測が実用の精度で十分行えていることがわかった.

### 3.2 サブセット内ひずみ分布

曲げ荷重下においてサブセット内の  $x$  軸方向の垂直ひずみ分布計測を行った. Fig.2 に示すようにサブセットを切欠き底に設定し, 3次近似 DCM を用いて切欠き底近傍のひずみ分布を異なるサブセットサイズにより求めた. このとき  $x$  軸方向の垂直ひずみ値は式(4)により求めた. 計測点は  $\Delta x = 0, -subset/2 \leq \Delta y \leq subset/2$  とし, その結果を Fig.4 に示した. また各サブセットサイズにおける切欠き底のひずみ値を Table 1 にまとめた.

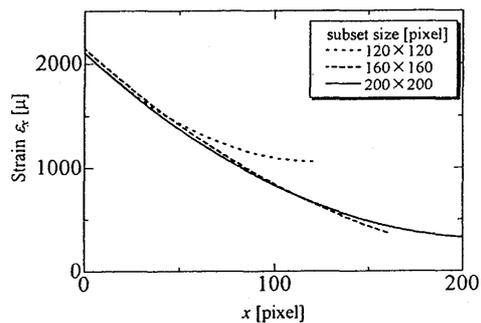


Fig.4 Strain distribution in subset

Table 1 Strain values at notch root

| Subset size [pixel] | Experimental value [μ] | Theoretical value [μ] |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 100×100             | 2219                   | 2101                  |
| 120×120             | 2104                   |                       |
| 140×140             | 2085                   |                       |
| 160×160             | 2145                   |                       |
| 180×180             | 2114                   |                       |
| 200×200             | 2103                   |                       |

Fig.4 より異なるサブセットサイズでひずみ分布の計測値に多少の違いが見られた. このことから本手法では 140×140[pixel]から 200×200[pixel]のサブセットサイズが有効であると考えられる. また Table 1 より各サブセットサイズにおいて切欠き底のひずみ値は理論値に近い値が得られた. これらのことから 3次近似による DCM が切欠き底のような部分のひずみ分布計測に有効な方法であることがわかった.

### 3.3 き裂先端近傍の変位計測と応力拡大係数

き裂入りのチタン試験片(4.38×12.05mm, き裂長さ 5.01mm)を用いて 4 点曲げ試験を行った. そのとき最大応力拡大係数が 10MPa√m となるように負荷を加え, 3次近似 DCM により  $x$  軸方向の変位計測を行った. この変位から次式により応力拡大係数を求め, その結果を Fig.5 に示した.

$$v = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ \sin \frac{\theta}{2} \left( \kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \right\} \quad (5)$$

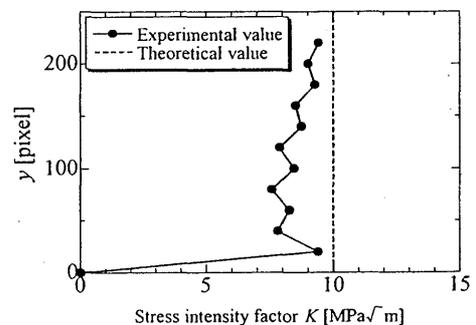


Fig.5 Distribution of stress intensity factor

Fig.5 より変位から求めた応力拡大係数は理論値に比較的近い値となった. このことから本手法が応力拡大係数の算出に有効であることがわかった.

## 4 結 言

ここでは 3 次近似デジタル画像相関法の開発を行い, 4 点曲げ試験により切欠き底近傍のひずみ分布計測を行った. その結果, サブセット内の任意の点でのひずみ計測が精度良く行えること, また切欠き底やき裂先端部のひずみ/変位分布に対しても計測が精度良く行えることがわかった.

### 参考文献

- (1) Chu, T.C., Ranson, W.F. and Sutton, M.A.: Experimental Mechanics, 25-3 (1985), 232-245
- (2) 西川 出, 阿部真哉: 日本機械学会関西支部講演論文集, No.054-1(2005), 7.1-7.2
- (3) 西川 出, 阿部真哉: 日本実験力学会講演論文集, No.4-2(2004), 278-281.