

デジタル画像相関法に基づく多結晶金属の 多重すべりを考慮した微視的変形挙動推定手法の提案

Estimation of Microscopic Deformation Behavior by Digital Image
Correlation Method Considering Multiple Slip Systems in Polycrystalline
Materials

大阪大学大学院工学研究科	小田 和生	Kazuo ODA	Non-Member
大阪大学大学院工学研究科	三上 欣希	Yoshiki MIKAMI	Non-Member
大阪大学大学院工学研究科	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member

Abstract

Even when a macroscopically uniform deformation is applied to a polycrystalline material, the generated microscopic strain distribution will not be uniform due to factors such as the non-uniform grain orientation distribution and grain boundaries. Despite the strong need to accurately measure strain distributions, suitable method is limited. This study proposes an experimental method for estimating strain distributions in polycrystalline materials considering multiple slip systems. Firstly, a polycrystalline material SUS316L was tensiled under microscope observation. Secondly, in-plane strain distribution was determined by Digital Image Correlation (DIC) method combining Newton-Raphson method and moving least square method, and quantitatively and qualitatively adequate strain distribution was obtained. Thirdly, shearing strain in each slip systems in each measuring point was estimated by considering $\{111\}\langle 110\rangle$ slip system in face centered cubic and normal strain calculated by DIC method. Finally, six components of strain distribution were calculated by considering the shearing strain in each slip systems. A method to estimate detailed strain distribution was proposed.

Keywords: digital image correlation, crystal orientation, polycrystalline material, slip deformation

1. 緒言

今日、構造物に用いられている金属のほとんどは、数 μm ~数 $100\mu\text{m}$ の微細な結晶粒からなる多結晶金属が用いられている。こうした多結晶金属は、巨視的には均一な応力が付与された際も、結晶方位の相違などの影響を受けて結晶粒レベルで微視的には不均一な変形挙動を示すことが知られている。こうした不均一性は割れの発生・進展とも大きく関わっており、応力を受けた多結晶金属変形挙動を詳細に把握することは構造物の安全性をはかるうえで極めて重要といえる。

こうした変形挙動を詳細に把握する試みは広く行われており、微視的な結晶方位差から塑性ひずみを推定する研究^[1]や、菊池パターンと呼ばれる電子線回折像を詳細に解析することで弾性ひずみを推定する研究^[2]、放射光回折を用いた研究^[3]など広く研究がなされている。しかし、今日においても測定手法は十分確立されたとはいえず、難しい。

ここで、変形前後の表面画像をデジタル画像相関 (DIC : Digital Image Correlation) 法^[4]により解析することで表面のひずみ分布を測定する研究は広く行われており、面内ひずみを非常に精度よく算出できることが知られている。しかし、DIC を結晶粒レベルでの微視的な測定に適用した場合、測定できるひずみは面内ひずみのみに留まる。多結晶金属の変形挙動は三次元的に生じるものであることから、より詳細なひずみ推定法が望まれる。

そこで著者ら^[5]は、多結晶金属に巨視的に数%程度のひずみを付与した状態を対象に、単一すべりによる変形が支配的となるという仮定のもとで、近藤らの研究^[6]などを参考に、DIC と結晶方位解析を併用させることによる、より詳細なひずみ推定を行った。しかし、多結晶金属の変形は複数のすべり系における多重すべりが生じている場合もあると考えられ、こうした影響を考慮に入れる必要があると考えられる。

本研究では、これらの考察を踏まえ、DIC による、より高精度な変位測定・ひずみ算出を行うとともに、多重すべりを考慮した三次元ひずみ算出手法の提案を行った。

連絡先：小田和生
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
E-mail: oda@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

2. デジタル画像相関法による

変位測定・ひずみ算出

2.1 デジタル画像相関法の原理

DIC の原理を以下に示す. Fig. 1 に示す通り, 変形前の任意の点 (x, y) について, (x, y) を中心とする $\delta x \times \delta y$ のサブセットと呼ばれる微小四角形を考える. 次に比較対象となる変形後の画像においても, 任意の点 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ を中心としたサブセットを考える. 続いて $(\Delta x, \Delta y)$ を1画素ずつずらしながらそれぞれの点で変形前の点 (x, y) を中心としたサブセットとの輝度相関値 $R(x, y, \Delta x, \Delta y)$ を式(2.1)により求める. $b(x, y), a(x, y)$ はそれぞれ変形前, 変形後の輝度値, b^*, a^* はそれぞれサブセットの輝度平均, m, n はそれぞれ $2m+1=\delta x$, $2n+1=\delta y$ を満たす値である. 輝度相関性の最も高い $(\Delta x, \Delta y)$ が特定されれば, (x, y) における変位 $u(x, y), v(x, y)$ は $u(x, y) = \Delta x, v(x, y) = \Delta y$ となる. この操作を任意の点 (x, y) で繰り返すことで, 変位分布が測定できる.

$$R(x, y, \Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{a(x'+s, y'+t) - a^*\} \{b(x+s, y+t) - b^*\}}{\sqrt{\sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{a(x'+s, y'+t) - a^*\}^2 \sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{b(x+s, y+t) - b^*\}^2}} \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \end{pmatrix}$$

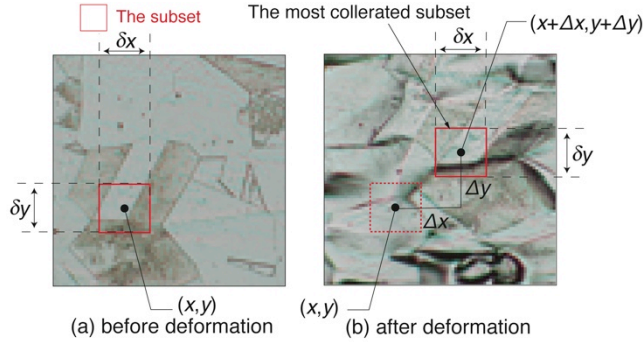


Fig. 1 Principle of DIC.

また, 式(2.1)により算出される輝度相関値の分解能はピクセルオーダに留まるが, 輝度相関値分布をもとに, 以下の手法を用いることで, サブピクセルオーダの変位測定が可能になる. サブピクセル変位測定には, 式(2.2)に示す最小自乗曲面 $g(x, y, u, v)$ を考える.

$$g(x, y, u, v) = a_1 u + a_2 u^2 + a_3 v + a_4 v^2 + a_5 uv + a_6 \quad (2.2)$$

6個の係数 $a_k (k=1-6)$ は式(2.1)により算出したピクセル解 u_p, v_p から d ピクセル以内において, 式(2.3)に示

す輝度相関値との誤差の自乗和 M が最小になるように決定され, 具体的には式(2.4)を解くことで算出できる. このときの最小自乗曲面 g のピークがサブピクセルオーダの変位 u_{sub}, v_{sub} となり, 式(2.5)を解くことで求められる.

$$M = \sum_{\substack{u_p - d \leq u \leq u_p + d \\ v_p - d \leq v \leq v_p + d}} \{g(x, y, u', v') - R(x, y, u', v')\}^2 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial a_k} = 0 \quad (k=1-6) \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{\partial g(x, y, u, v)}{\partial u} \right) \bigg|_{\substack{u=u_{sub} \\ v=v_{sub}}} = \left(\frac{\partial g(x, y, u, v)}{\partial v} \right) \bigg|_{\substack{u=u_{sub} \\ v=v_{sub}}} = 0 \quad (2.5)$$

2.2 ニュートン・ラフソン法, 移動最小自乗法による高精度変位測定・ひずみ算出

前節で基本的な変位測定手法を示したが, ひずみ量の異なる2個の画像解析を行うと, サブセット内の輝度分布も変化することが予想される. こうした影響を考慮してより高精度に変位を測定する研究に, Newton-Raphson法, 移動最小自乗法というものがある. 今回, 変位測定精度の向上を目的とし, Fig. 2 に示すフローに従って変位測定・ひずみ算出を行った. この手法は Fig. 2 に示すとおり, DIC を何度も繰り返すことで高精度な変位測定を行うものであり, 便宜上, i 回目の DIC の変位測定結果を (u_i, v_i) とする.

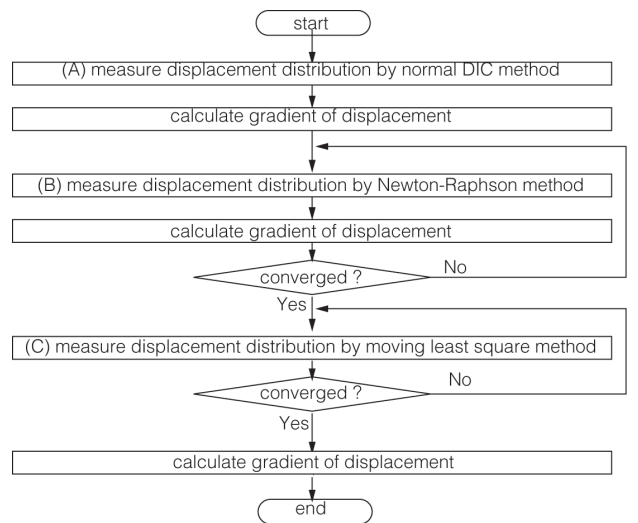


Fig. 2 Flow of strain calculation by Newton-Raphson method and moving least square method.

なお、この計算を行うには、測定範囲内において、整数でない実数 (x_{real}, y_{real}) における輝度値が必要となるが、 (x_{real}, y_{real}) のまわりの4点の輝度値から線形補間を行い、式(2.6)により推定した。なお、添字の int, dec はそれぞれ整数部、小数部を表し、式(2.7)を満たす。

$$b(x_{real}, y_{real}) = x_{dec} y_{dec} b(x_{int}+1, y_{int}+1) + (1-x_{dec}) y_{dec} b(x_{int}, y_{int}+1) + x_{dec} (1-y_{dec}) b(x_{int}+1, y_{int}) + (1-x_{dec})(1-y_{dec}) b(x_{int}, y_{int}) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} x_{real} &= x_{int} + x_{dec} \\ y_{real} &= y_{int} + y_{dec} \end{aligned} \quad (2.7)$$

(A)まず、式(2.1)により、おおよその変位分布 (u_l, v_l) を推定し、各測定点における変位勾配 $\partial u_l / \partial x, \partial u_l / \partial y, \partial v_l / \partial x, \partial v_l / \partial y$ を算出する。

(B)次に、推定した変位勾配をもとに、式(2.8)、式(2.9)によりサブセット内のひずみを考慮した推定を行う。同様の計算を解が収束したと判断されるまで繰り返す。これは Newton-Raphson 法と呼ばれる手法である。

(C)Newton-Raphson 法では、サブセット内のひずみ分布は一様であると仮定しているが、サブセット内でのひずみの不均一性を考慮したものに、移動最小自乗法がある。Newton-Raphson 法で推定した変位分布をもとに、式(2.8)、式(2.10)により変位分布を測定する。

$$R(x, y, \Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{a(x'+s, y'+t) - a^*\} \{b(x+s', y+t') - b^*\}}{\sqrt{\sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{a(x'+s, y'+t) - a^*\}^2 \sum_{s=-m}^m \sum_{t=-n}^n \{b(x+s', y+t') - b^*\}^2}} \quad (2.8)$$

$$\begin{pmatrix} x' = x + \Delta x \\ y' = y + \Delta y \end{pmatrix}$$

$$s' = s + \frac{\partial u_{i-1}}{\partial x} s + \frac{\partial u_{i-1}}{\partial y} t \quad (2.9)$$

$$t' = t + \frac{\partial v_{i-1}}{\partial x} s + \frac{\partial v_{i-1}}{\partial y} t$$

$$\begin{aligned} s' &= s + u_{i-1}(x+s, y+t) - u_{i-1}(x, y) \\ t' &= t + v_{i-1}(x+s, y+t) - v_{i-1}(x, y) \end{aligned} \quad (2.10)$$

以上の手法により、画像解析から面内変位分布を測定することができる。ここで、最終的な変位勾配については、測定点から m_p pixel (今回は $m_p = 5$ pixel = 1.7 μm) 以内の測定点について、式(2.11)に示す最小自乗平面を考えることで算出した。式(2.11)の係数は式(2.12)を解く事で算出できる。

$$\begin{aligned} u'(x, y) &= a_1 x + a_2 y + a_3 \\ v'(x, y) &= a_4 x + a_5 y + a_6 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \left[\sum_{\substack{-m_p \leq \Delta x \leq m_p \\ -m_p \leq \Delta y \leq m_p}} \{u'(x+\Delta x, y+\Delta y) - u(x+\Delta x, y+\Delta y)\}^2 \right] = 0 \quad (k=1-3) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \left[\sum_{\substack{-m_p \leq \Delta x \leq m_p \\ -m_p \leq \Delta y \leq m_p}} \{v'(x+\Delta x, y+\Delta y) - v(x+\Delta x, y+\Delta y)\}^2 \right] = 0 \quad (k=4-6)$$

この際、変位勾配は式(2.13)により算出され、面内ひずみ3成分については、式(2.14)により求まる。ここで、多結晶金属の変形に占める弾性変形の割合は十分小さいと考えられること、塑性変形に代表されるすべり変形は体積変化を伴うものではないことから、式(2.15)に示す体積一定の式から深さ方向垂直ひずみが求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} &\approx \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)_{(\Delta x, \Delta y)=(0,0)} = a_1 \\ \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} &\approx \left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)_{(\Delta x, \Delta y)=(0,0)} = a_2 \\ \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} &\approx \left(\frac{\partial v'}{\partial x} \right)_{(\Delta x, \Delta y)=(0,0)} = a_4 \\ \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} &\approx \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)_{(\Delta x, \Delta y)=(0,0)} = a_5 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \partial u / \partial x = a_1 \\ \varepsilon_y &= \partial v / \partial y = a_5 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x = a_2 + a_4$$

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (2.15)$$

2.3 変位測定・ひずみ算出結果とその考察

以上の手法により算出した面内ひずみ、面外垂直ひずみを Fig. 3 に示す. ここで、これらの値が定量的に妥当なものであるかを評価するために、Fig. 4 に白丸で示す 8 カ所の特徴的な三重点 (A-H) について、これらの画像上での位置をピクセル単位で特定し、それらの間隔変化を計算した. その結果、各粒界三重点の座標について Table 1 に、それらの間隔の変化から推定されるひずみについて、Table 2 に示す結果がそれぞれ得られた. Fig. 5 に、面内垂直ひずみのヒストグラムと、Table 2 に示す面内ひずみの推定値をそれぞれ示す. 図中 AC, AF などの記号は、それぞれ d_{AC} , d_{AF} などの距離を測定することで算出したことを表している. いずれの値もヒストグラムのピークに近いものとなっており、DIC による面内ひずみは良好に算出されたと考えられる.

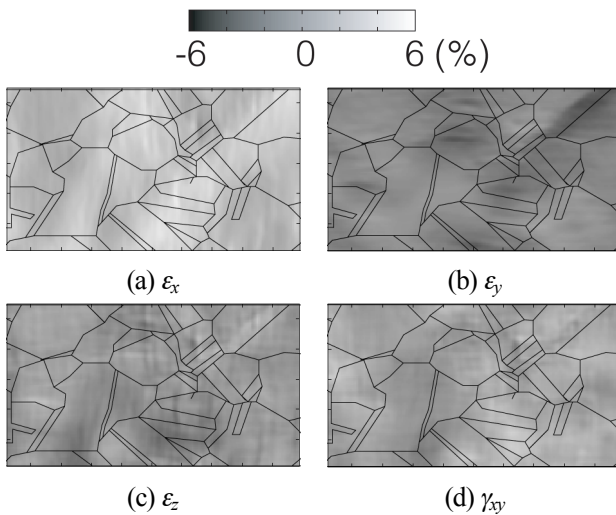
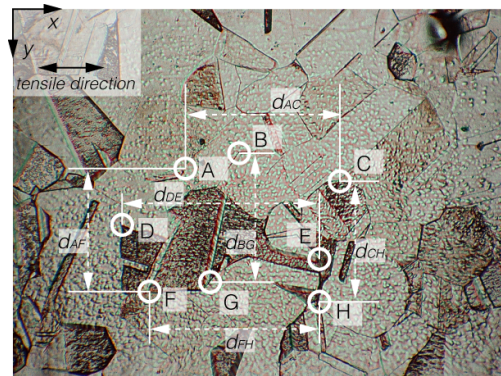


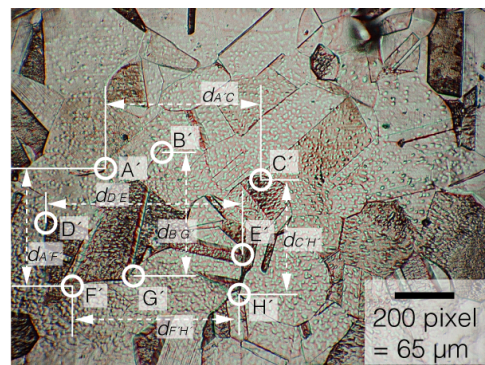
Fig. 3 Plane strain and normal strain in depth direction.

Table 1 Coordinates of distinguishing crystal boundary triple junctions (unit : pixel).

before deformation			after deformation		
	x	y		x	y
A	565	524	A'	322	540
B	739	473	B'	509	487
C	1070	563	C'	841	578
D	356	706	D'	119	722
E	1002	819	E'	783	832
F	445	923	F'	208	935
G	645	893	G'	414	902
H	1002	954	H'	770	962



(a) before deformation

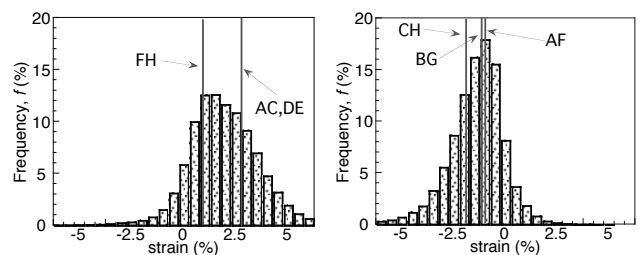


(b) after deformation

Fig. 4 Selected points for evaluation of normal strain.

Table 2 Normal strain calculated by observing the distance of triple junctions (unit : %).

ϵ_x	$100 \times (d_{A'C'} - d_{AC}) / d_{AC}$	2.77
	$100 \times (d_{D'E'} - d_{DE}) / d_{DE}$	2.79
	$100 \times (d_{F'H'} - d_{FH}) / d_{FH}$	0.90
	average	2.15
ϵ_y	$100 \times (d_{A'F'} - d_{AF}) / d_{AF}$	-1.01
	$100 \times (d_{B'G'} - d_{BG}) / d_{BG}$	-1.21
	$100 \times (d_{C'H'} - d_{CH}) / d_{CH}$	-1.82
	average	-1.34



(a) ϵ_x

(b) ϵ_y

Fig. 5 Histogram of normal strain.

3. 多重すべりを考慮した面外ひずみ推定

3.1 算出原理

著者ら^[5]は、多結晶金属の変形は概ね単一すべりのみにより生じるとみなしてよいと仮定して計算を行っていたが、引張後の SEM 画像からは結晶粒によっては複数の方向のすべり線が確認されており、2%程度の引張変形であっても、単一すべりの仮定が成り立たない可能性が考えられる。そこで、多重すべりを考慮した面外ひずみの計算を試みた。

面心立方格子における 12 個のすべり系のうち、 i 番目にシュミット因子の高いすべり系のすべり面の法線ベクトル、すべり方向ベクトル、せん断ひずみをそれぞれ $\mathbf{n}^{(i)}=(n_x^{(i)}, n_y^{(i)}, n_z^{(i)})$, $\mathbf{m}^{(i)}=(m_x^{(i)}, m_y^{(i)}, m_z^{(i)})$, $\Gamma^{(i)}$ とする。この際、任意の点 \mathbf{X} における変位を $\mathbf{U}(\mathbf{X})=(u, v, w)$ とすると、Fig. 6 に模式的に示した通り、 $\mathbf{U}(\mathbf{X})$ と、 \mathbf{X} から微小量 $\Delta\mathbf{X}=(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ だけ離れた点における変位 $\mathbf{U}(\mathbf{X}+\Delta\mathbf{X})$ との差 $\Delta\mathbf{U}=(\Delta u, \Delta v, \Delta w)$ は式(3.1)を満たす。

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{U} &= \mathbf{U}(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) - \mathbf{U}(\mathbf{X}) \\ &= \sum_{i=1}^{12} \left\{ (\Delta\mathbf{X} \cdot \mathbf{n}^{(i)}) \Gamma^{(i)} \mathbf{m}^{(i)} \right\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

さらに、式(3.1)より式(3.2)が導かれる

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u(\Delta x, 0, 0)}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{12} \left\{ (n_x^{(i)} \Delta x) \Gamma^{(i)} m_x^{(i)} \right\}}{\Delta x} \\ &= \sum_{i=1}^{12} \left\{ n_x^{(i)} m_x^{(i)} \Gamma^{(i)} \right\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

多結晶金属の変形が高々 2 通りのすべり系により生じると仮定すると、 $i \geq 3$ において $\Gamma^{(i)}=0$ となり、式(3.2)と同様の計算により、式(3.3)が導かれる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x^{(1)} m_x^{(1)} & n_x^{(2)} m_x^{(2)} \\ n_y^{(1)} m_y^{(1)} & n_y^{(2)} m_y^{(2)} \\ n_z^{(1)} m_z^{(1)} & n_z^{(2)} m_z^{(2)} \\ n_x^{(1)} m_y^{(1)} + n_y^{(1)} m_x^{(1)} & n_x^{(2)} m_y^{(2)} + n_y^{(2)} m_x^{(2)} \\ n_y^{(1)} m_z^{(1)} + n_z^{(1)} m_y^{(1)} & n_y^{(2)} m_z^{(2)} + n_z^{(2)} m_y^{(2)} \\ n_x^{(1)} m_z^{(1)} + n_z^{(1)} m_x^{(1)} & n_x^{(2)} m_z^{(2)} + n_z^{(2)} m_x^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma^{(1)} \\ \Gamma^{(2)} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

式(3.3)より、DIC により算出されたひずみが塑性ひずみのみによるものであると仮定すると、式 (3.4) より、各すべり系におけるひずみ量が算出できる。

$$\begin{pmatrix} \Gamma^{(1)} \\ \Gamma^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x^{(1)} m_x^{(1)} & n_x^{(2)} m_x^{(2)} \\ n_y^{(1)} m_y^{(1)} & n_y^{(2)} m_y^{(2)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

さらに、上式から推定した各すべり系におけるせん断ひずみを再度式(3.3)に代入することで、面外せん断ひずみが算出できる。

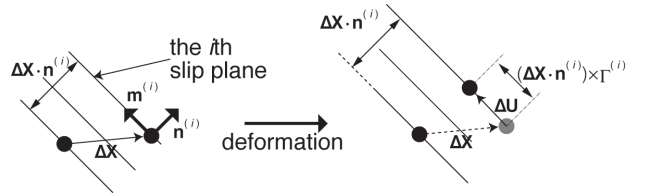


Fig. 6 Schematic view of deformation by i th slip system.

3.2 算出結果と考察

引張試験後に測定した結晶方位情報を Fig. 7 に示す。引張変形に起因した結晶方位の変化は十分小さいと仮定して、得られた結晶方位情報と、2.3 節における面内ひずみ結果をもとに算出した面外せん断ひずみを Fig. 8 に示す。結晶粒によっては概ね良好と思えるひずみが算出されているものの、高々2%程度のひずみしか与えていないのにも関わらず、10%を超えるせん断ひずみが算出されている。

これについては、変形前後における結晶方位の微細な変化に伴い、すべり面方向やすべり方向が変化したことや、転位の蓄積や双晶変形など、すべり変形以外の影響を大きく受けた可能性などが考えられる。

今後、今回の計算手法における誤差の影響を評価し、より詳細な応力ひずみ挙動の把握を試みていきたい。

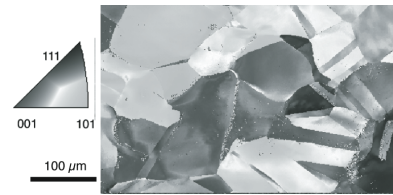


Fig. 7 IPF (Inverse Pole Figure) map after deformation.

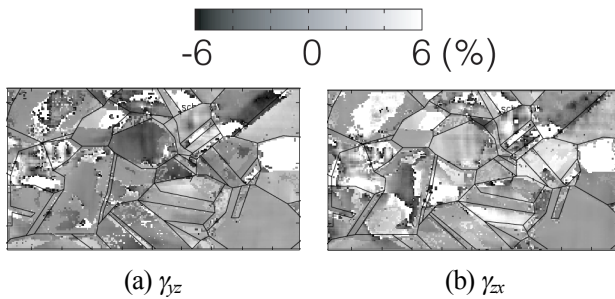


Fig. 8 Out-of-plane shearing strain.

4. 結論

本論文では、デジタル画像相関法と、結晶方位解析を併用させることにより、多結晶金属の多重すべりを考慮した結晶粒の微視的ひずみ6成分算出手法の提案を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 多結晶金属に生じるひずみの影響を考慮したDICによる画像解析により、結晶粒レベルの面内ひずみを把握することができた。
- (2) DICによりこうして得られたひずみは、特徴的な粒界三重点の変位を測定することで推定されるひずみともよい一致を示し、定量的に妥当な値であることが分かった。
- (3) シュミット因子の高いすべり系において、すべり系ごとの変形量の加算則を適用させることで、DICと組み合わせることによる詳細なひずみ挙動が把握できることが示唆された。
- (4) 多重すべりを考慮して面外せん断ひずみを計算した結果、概ね良好と思われる値が算出された領域もあるものの、非常に大きな値が算出されてしまった領域も存在するものの、概ね良好と考えられる結果となった。

5. 謝辞

DICによる画像解析を行うにあたり、大阪府立大学大学院海洋システム工学科航空宇宙海洋工学専攻海洋システム工学分野准教授柴原正和博士、同特任准教授伊藤真介博士に御指導頂きました。また、本研究の一部はJSPS 科研費 24760077 の支援を受けて遂行させて頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 佐々木孔英, 釜谷昌幸, 三浦照光, 福谷耕司, ”微視的な塑性ひずみ分布と結晶方位差の関係”, 日本金属学会誌 第 74 卷 第 7 号(2010), pp.467-474.
- [2] T.B. Britton n, A.J. Wilkinson, “Measurement of residual elastic strain and lattice rotations with high resolution electron backscatter diffraction”, Ultramicroscopy, No.111 (2011), pp.1395-1404.
- [3] A. Evans, A. King, T. Pirling, P. Peyre, P. Withers, “Characterisation of Residual Stresses Generated by Laser Shock Peening by Neutron and Synchrotron Diffraction”, Engineering Against Fracture, No. 9 (2009), pp. 383-398.
- [4] 柴原正和, 山口晃司, 恩田尚弘, 伊藤真介, 正岡孝治 “デジタルカメラを用いた溶接 面内変形の全視野計測” 溶接学会論文集, Vol.27, No. 2(2009), pp.154-161.
- [5] 小田和生, 三上欣希, 望月正人, ”デジタル画像相関法と結晶方位解析を併用した微視的三次元ひずみ算出手法の構築” 溶接学会全国大会講演概要 No. 91(2012), pp.286-287.
- [6] 近藤了嗣, 阿部武治, 多田直哉, “EBSD 法と画像処理を併用した多結晶銅の引張りに おける結晶粒の 3 次元的塑性ひずみの評価” ,日本機械学会論文 A 編, Vol. 69, No. 682 (2003), pp.972-979.

(平成 25 年 6 月 20 日)