

琉球大学学術リポジトリ

金属多結晶の組織観察画像処理によるひずみ計算プログラムの構築

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-05-13 キーワード (Ja): キーワード (En): Plasticity, Image Processing, Thinning Processing, Non-uniform Deformation of Polycrystalline 作成者: 仲村, 力也, 近藤, 了嗣 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/16688

金属多結晶の組織観察画像処理による ひずみ計算プログラムの構築

仲村 力也* 近藤了嗣**

Produce of Strain Calculation Program of Polycrystalline Material
by using Observation Image Processing

Rikiya NAKAMURA* and Ryouji KONDOU**

Abstract

The thinning processing of crystal grain boundary lines and calculation of strain of crystal grains are programmed for estimation of the non-uniform deformation behavior of crystal grains in polycrystalline material. The thinning processing of crystal grain boundary line is calculated by image processing based on Hilditch method. Logarithmic strains are calculated by measuring maximum distances of grain boundaries of respective grains at every degree interval from the loading direction. The strain distribution in all direction for a grain is approximated with an ellipse using the method of least squares and the principal strain are obtained as the long and the short axes of the ellipse. The calculation accuracy of these programs is examined in detailed.

Key Word : Plasticity, Image Processing, Thinning Processing, Non-uniform Deformation of Polycrystalline.

1 緒 言

金属多結晶の弾塑性変形は、構成要素である個々の結晶粒に生じる不均一変形の組み合わせにより生じている。個々の結晶粒内部の不均一変形は、結晶粒界に堆積する転位列が形成する内部応力場⁽¹⁾や弾性不適合応力⁽²⁾、塑性ひずみの非適合性⁽³⁾の効果などが重畳して生じている。このため、従来、金属多結晶の不均一変形の支配的原因は、隣接結晶粒間で結晶粒界を通して働く変形拘束の相互作用と考えられてきた。

しかしながら、金属多結晶の不均一変形を結晶粒の集団挙動として観察した場合、必ずしも隣接結晶粒間で粒界を通して働く変形拘束の相互作用だけでは説明できない現象も確認されている。例えば、巨視的には塑性域の外部負荷の境界条件が課されているにも関わらず、全くすべり変形が生じない結晶粒が確認されている。逆に外部負荷の境界条件と比較して、明らかに過大な形状変化が生じている結晶粒も確認されている。このような外部負荷の境界条件と整合しない結晶粒の過小変形や過大変形は、通常、その結晶粒の周囲に存在する結晶粒の変形状態と比較して特異であるが、必ずしも特異な場合ばかりとは限らず、周囲・遠方の結晶粒と群を形成して集団挙動を呈している場合がある。このような金属多結晶の変形挙動を論じるためには、隣接結晶粒

間の力学的相互作用だけではなく、周囲・遠方の結晶粒間の力学的相互作用も詳細に検討する必要があると考えられる。

数値解析的には、金属多結晶の集団挙動には結晶粒の周囲遠方に存在する結晶粒に生じた不均一変形の『遠隔効果』(Remote effect)や『影響範囲』(Affected zone)⁽⁴⁾⁽⁵⁾、結晶粒間に働く『多体相互作用』(Multi-body interaction)⁽⁶⁾⁽⁷⁾の効果の検討の重要性が報告されている。また、結晶粒の遠隔効果の影響範囲は半径約 10 結晶粒程度で、測定・観察範囲内に約 400 個以上の結晶粒が含まれていれば、多結晶の変形挙動を適切に評価できると報告されている。

これらの報告結果から従来の測定・観察範囲を局所に限定する実験観察方法では、(例えば、結晶粒が 400 個以下の場合、)多結晶の変形挙動を厳密に評価できていないことが懸念される。また、実際に金属多結晶内部の不均一変形を集団挙動として評価するためには、どの程度の測定・観察範囲が必要になるのか(例えば、400 個以上あれば十分か)実証試験を行う必要があると考えられる。すなわち、最初に遠隔効果や影響範囲の効果を検討する必要があると考えられるが、実験観察手法で遠隔効果や影響範囲の効果を検討した事例は、著者らが知る限り報じられていない。そもそも、遠隔効果や影響範囲の効果を検討するためにも必要となる広範囲の実験観察領域で金属多結晶の不均一変形挙動を検討した事例も著者等が知る限り報じられていない。この支配的原因は広範囲の実験観察領域における結晶粒のひずみ測定が時間的・労力的に極めて困難だからと考えられる。

原稿受付 2009年5月14日。

*大学院理工学研究科機械システム工学専攻
(Graduate Student, Dept. of Mechanical Systems
Eng. Fac. of Eng.)

**機械システム工学科

(Dept. of Mechanical Systems Eng. Fac. of Eng.)

そこで、本研究では金属多結晶の不均一変形を結晶粒の集団挙動として評価、検討するための準備段階として、広範囲の組織観察結果から画像処理により各結晶粒のひずみを自動的に計算するために必要なプログラムを構築すると共に、その計算精度に関して、既知の結晶粒モデルのひずみ計算結果から検討した結果を述べる。

2 理 論

本組織観察画像処理による結晶粒のひずみ計算プログラムは、結晶粒境界線の細線化処理段階、結晶粒の全方向のひずみ測定段階、楕円近似法による主ひずみ量、主ひずみ方向の計算の三段階で構成される。以下、詳細を述べる。

2.1 細線化処理 本ひずみ計算プログラムは変形前後における結晶粒境界線図から各結晶粒のひずみを計算する構成となっている。そこで、最初に基準となる結晶粒境界線図から線幅に起因する計算誤差を除去するため、結晶粒境界線図の細線化処理を行う。なお、細線化処理は結晶粒境界線図の二値画像に適用するものとして、Hilditch⁽⁸⁾の逐次削除(画素の値を1から0に置き換える)により線幅が1の連結線図形を作成する。ここでは、逐次削除条件として、図形画素の境界点、端点、孤立点、連結性の保障に関する6条件を設定した。以下、詳細を述べる。

条件1. 図形画素である。

図1に8近傍画素を示す。図1中 p_0 が対象物領域の図形画素である場合、削除する。

条件2. 境界点ではない。

p_0 の近傍画素 p_1, p_3, p_5, p_7 のうち少なくとも一つの画素の値が0でなければならない。すなわち、画素の連結性を8連結としているため、近傍画素の内一つが0であれば p_0 は境界画素となる。

条件3. 端点ではない。

図2に示すような端点 p_4 を保存するための条件である。なお、この条件がないと線は細線化の過程で短縮する。

条件4. 孤立点ではない。

この条件は逐次削除の方式で直前の処理結果を用いて評価する。 p_0 の8近傍画素の内、少なくとも一つの画素の値が1のとき p_0 は孤立点ではない。

条件5. 連結性を保障する。

この条件は画素 p_0 に連結する成分の値が1でなければならないことを保障する。画素 p_0 を削除しても近傍画素の値は同じく1であり連結性が損なわれることはない。ここでは、図3に示す4種類の何れかに該当する場合、削除候補とする。

条件6. 線幅2の場合是一方を削除する。

この条件は、 p_0 の8近傍の画素と p_0 を同時に削除しても連結成分が1であることを保障する。

以上、述べた6条件を基準に逐次削除が自動的に行えるように反復計算プログラムを作成した。

2.2 結晶粒のひずみ計算 結晶粒のひずみ測定法の概略を図4に示す。最初に変形前後における結晶粒の重心 G を求める。次に変形前後における結

晶粒の重心 G を基準位置、測定方向の寸法を $l_1(\theta)$, $l_2(\theta)$ として、ひずみ $e(\theta)$ を測定する。なお、 θ は測定方向と基準軸方向(x 軸方向)と成す角度である。

$$e(\theta) = \frac{l_2(\theta) - l_1(\theta)}{l_1(\theta)} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、変形前後の結晶粒の寸法や重心の位置(座標値)は細線化処理された結晶粒境界線の位置を基準に計算する。結晶粒境界線図上における結晶粒境界線の座標は細線化処理過程で割り当てた画素の値(1:粒境界線領域, 0:その他の領域)で判別する。結晶粒の領域は粒境界線で閉じられた領域で、結晶粒寸法は結晶粒の領域上の画素数から定義される。このため、ひずみの計算精度は結晶粒境界線図(組織観察画像)の解像度に依存することに注意を要する。以上、述べた結晶粒のひずみを全方向 5° 間隔で

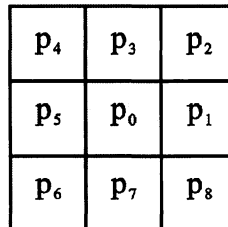


図1 8近傍画素

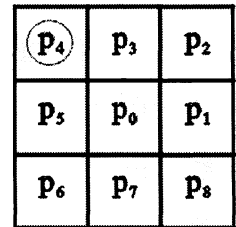


図2 線の端点

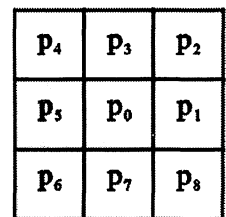
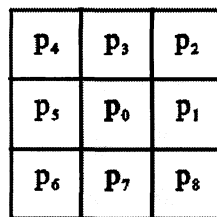
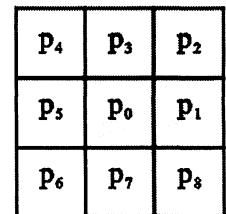
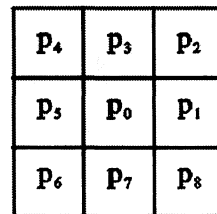


図3 連結性の保存と消去条件

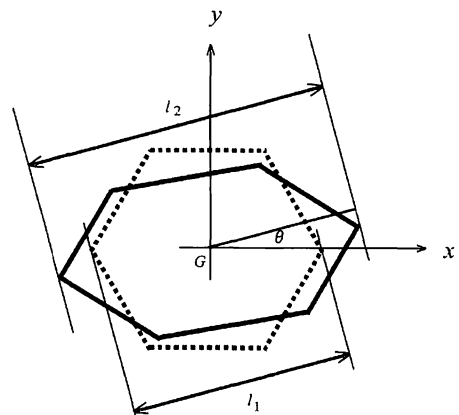


図4 結晶粒のひずみ測定

自動計算するプログラムを作成した。

2.3 楕円近似法による主ひずみ量, 主ひずみ方向の計算 各結晶粒に関して図 5 に示すように結晶粒の全方向 θ のひずみ量 $e(\theta)$ を求める。このひずみ分布に対して最小二乗法により近似楕円を求める。その長軸および短軸長さから得られたひずみを公称ひずみで表した最大主ひずみ $e_1(\theta)$, 最小主ひずみ $e_2(\theta)$ とする。なお, 最小二乗法において楕円係数を決定する際, 非線形連立方程式を解く必要がある。ここでは, 解を収束させるため, ひずみ量 $e(\theta)$ に 1.0 を加算し, 図 6 に示すような近似楕円の楕円係数を求め, ひずみ計算した後, 再び 1.0 を差し引く方法⁹⁾を採用した。この後, 公称ひずみで表した $e_1(\theta)$, $e_2(\theta)$ を次式で表す対数ひずみ $\varepsilon_1(\theta)$, $\varepsilon_2(\theta)$ に換算した。

$$\varepsilon_i(\theta) = \ln(1 + e_i(\theta)) \dots\dots\dots (2)$$

以上, 述べた楕円近似法による近似解を自動的に得るため, 反復計算プログラムを作成した。

なお, 各プログラム作成過程において, 細線化処理やひずみ計算の過程を確認できるように, 全処理過程に可視化処理過程を組み込んだ。この結果, 細線化処理では, 結晶粒界の細線化後の形状・寸法等を確認することができる。ひずみ計算過程では変形前後での形状変化を定性的に確認できると共に, 測定方向や寸法の計算過程を確認できるようにした。

3. 計算精度の検討

本研究では, 実際に金属多結晶の不均一変形を結晶粒の集団挙動として評価, 検討するための準備段階として, 別途, 形状, 寸法, 結晶粒界線の太さ, 引張りひずみ量, 引張り方向が既知の結晶粒モデルを作成すると共に, 先に述べた細線化処理とひずみ計算を行い, その計算精度に関して検討を行った。以下, 詳細を述べる。

結晶粒モデルの形状に関しては, 図 7 に示すように円形, 楕円形, 正方形, 六角形とした。なお, 本ひずみ計算プログラムでは結晶粒の最大寸法の変化を画素数の変化から求めているため, 測定方向に依存して画素数の計算誤差が生じないか円形モデ

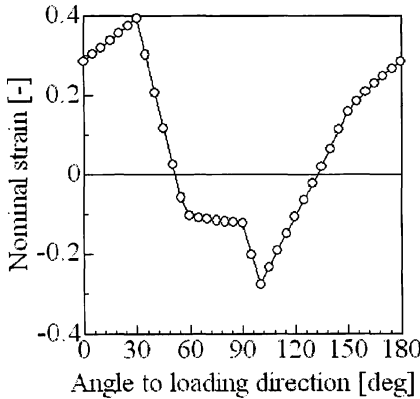


図 5 図 4 に示す結晶粒のひずみ計算結果

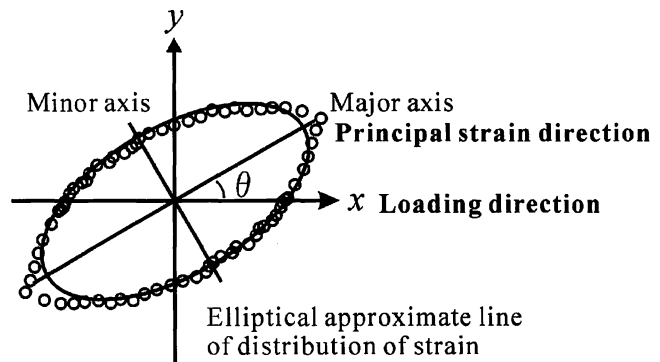


図 6 楕円近似法による主ひずみ方向と主ひずみ量の計算

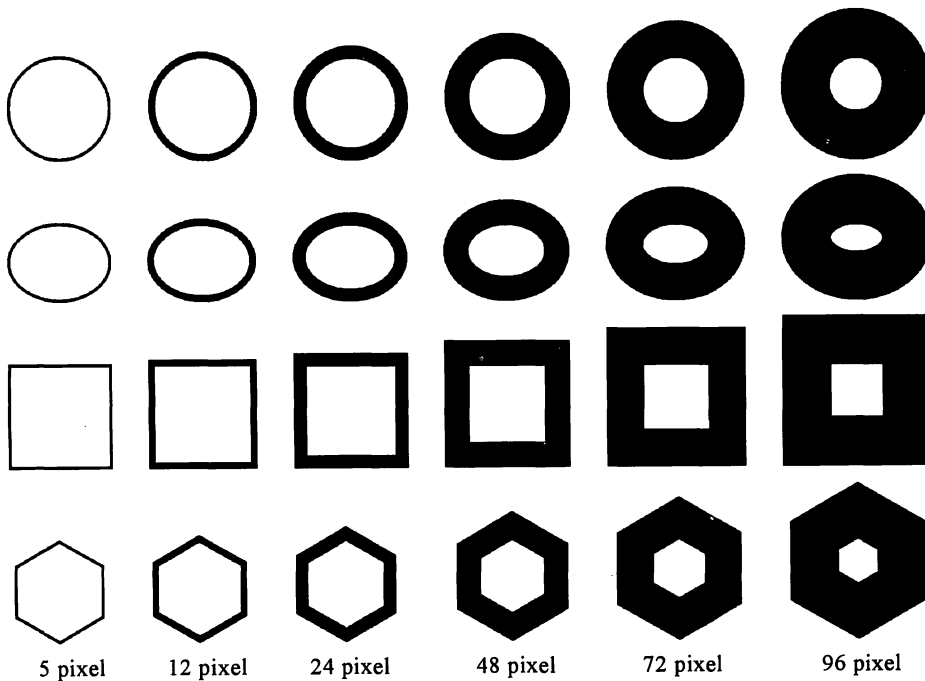


図 7 結晶粒モデルの初期形状

ルを用いて検討する。この円形モデルに対して、楕円形モデルは円形モデルの初期状態から一方向にひずみが生じている場合で、結晶粒の初期形状が歪な場合を想定している。四角形モデルと六角形モデルは、結晶粒に突部や角部を持つ場合を想定しており、これら結晶粒形状に起因する計算誤差が生じないか検討する。

各結晶粒モデルの粒界線幅に関しては、逐次削除計算プログラムの適用範囲を検討するため、極端に線幅が細い場合から逆に極端に線幅が太い場合を想定して、5, 12, 24, 48, 72, 96画素の6種類とした。なお、図7では紙面の都合上、図を縮小している事に注意を要する。これらの結晶粒モデルに引張り公称ひずみ $\bar{\epsilon}$ は5%, 10%, 15%, 20%の4種類とした。また、引張り方向に関しては、結晶粒モデルの基準座標軸に対して 0° , 15° , 30° , 45° の4種類とした。これらの計算を通して外部負荷の境界条件に依存する結晶粒の形状変化の追従性を確認すると共に組織観察画像の空間分解能や結晶粒の形状変化に関して、本計算プログラムの適用可能範囲の検討を行う。

図8に円形モデルの 0° 方向に引張りひずみを与えた場合の全方向ひずみ分布を示す。なお、ここで、縦軸の値は測定方向の公称ひずみの値であり、横軸の値は測定方向と基準軸が成す角度である。

円形モデルの 0° 方向引張りの場合、モデルの粒界線幅や測定方向、公称ひずみ量に依存せず、高精度なひずみ計算が実現されている。測定方向(角度)

によるひずみ量の変化も滑らかで、特異な結果を示すような方向は見られない。

図9に円形モデルの 45° 方向に引張りひずみを与えた場合の全方向ひずみ分布を示す。紙面の都合上、 15° 方向と 30° 方向に引張りひずみを与えた場合の結果は省略するが、何れの場合も 0° 方向に引張りひずみを与えた場合の結果と 0° 方向以外の方向に引張りひずみを与えた場合の相違は、基準座標軸から見て、円形モデルの形状変化にせん断変形が加味されることである。なお、このせん断変形は基準軸と成す角度と公称ひずみ量の増加に伴い顕著に表れる。すなわち、図9に示す 45° 方向に引張りひずみを与えた場合、顕著になる。

0° 方向に引張りひずみを与えた場合と同様、測定方向によるひずみ量の変化は滑らかであり、特異な結果を示す方向は見られない。また、引張り方向の 45° と 135° 方向のひずみ量も、高精度に測定されている。しかしながら、引張りの公称ひずみ量を増加させた場合、線幅が極端に太い場合、若干、真の値より低い値になっている。これらの結果から線幅が極端に太い場合、せん断変形後の結晶粒形状が細線化処理段階で損なわれることが懸念される。この原因に関しては、今後、検討の余地が残される。

引張り方向 0° , 15° , 30° , 45° のそれぞれの全方向ひずみ計算結果から楕円近似法により、主ひずみ量、主ひずみ方向を求めた結果を図10に示す。ここで、縦軸の値は境界条件に課した引張り方向における結晶粒の公称ひずみであり、この値が楕円近

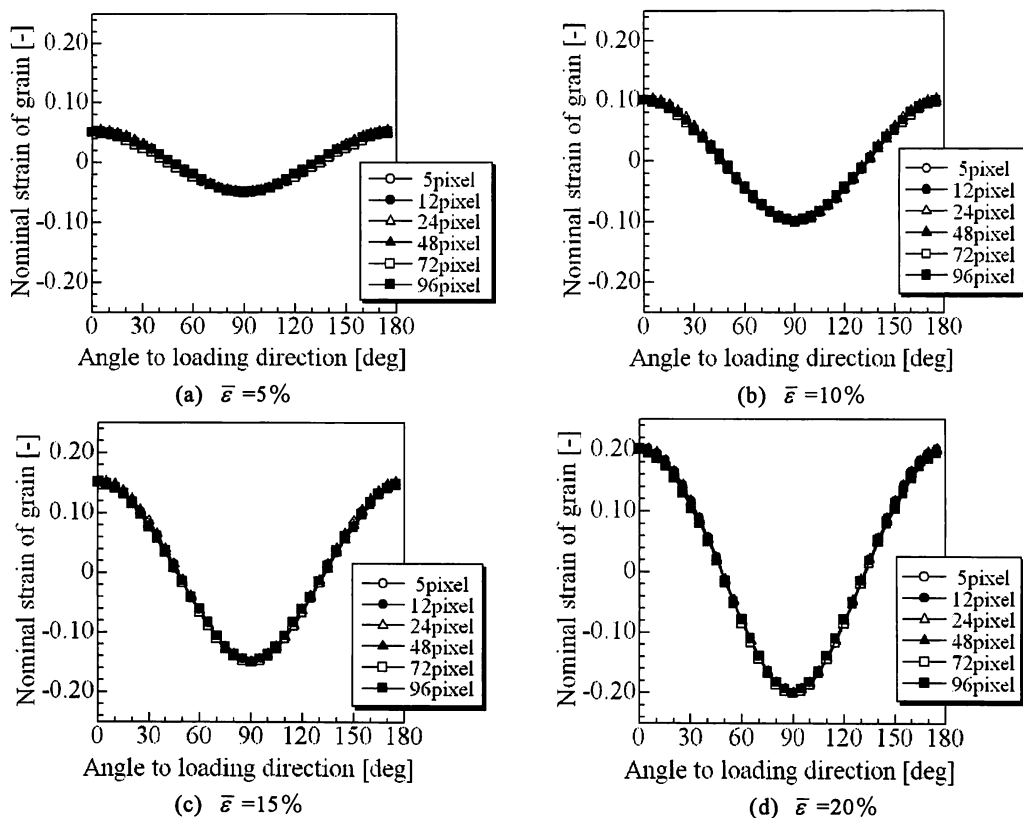


図8 円形モデルの 0° 方向引張りの結果

似法により求められた主ひずみ量の値である。横軸の値は境界条件に課した引張りひずみ量である。
全方向ひずみ測定結果の測定精度が保障されて

いる結果に関しては、公称ひずみと各結晶粒に生じる主ひずみの値は、ほぼ等しく、公称ひずみの増加に伴い、ほぼ線形的に増加していることがわかる

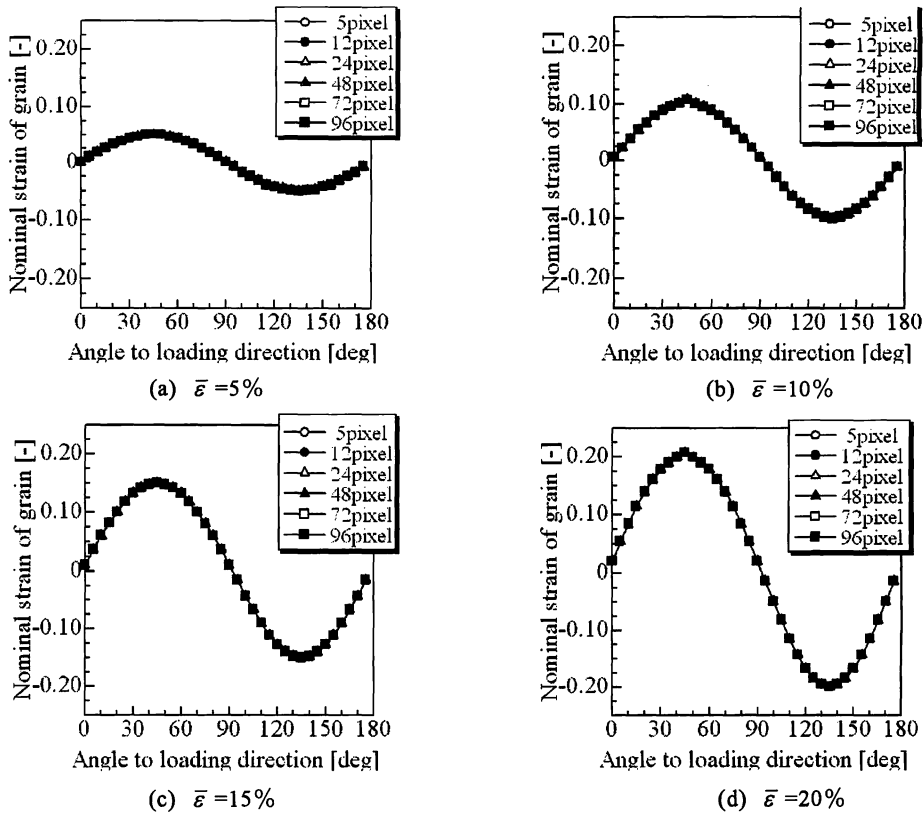


図9 円形モデルの45°方向引張りの結果

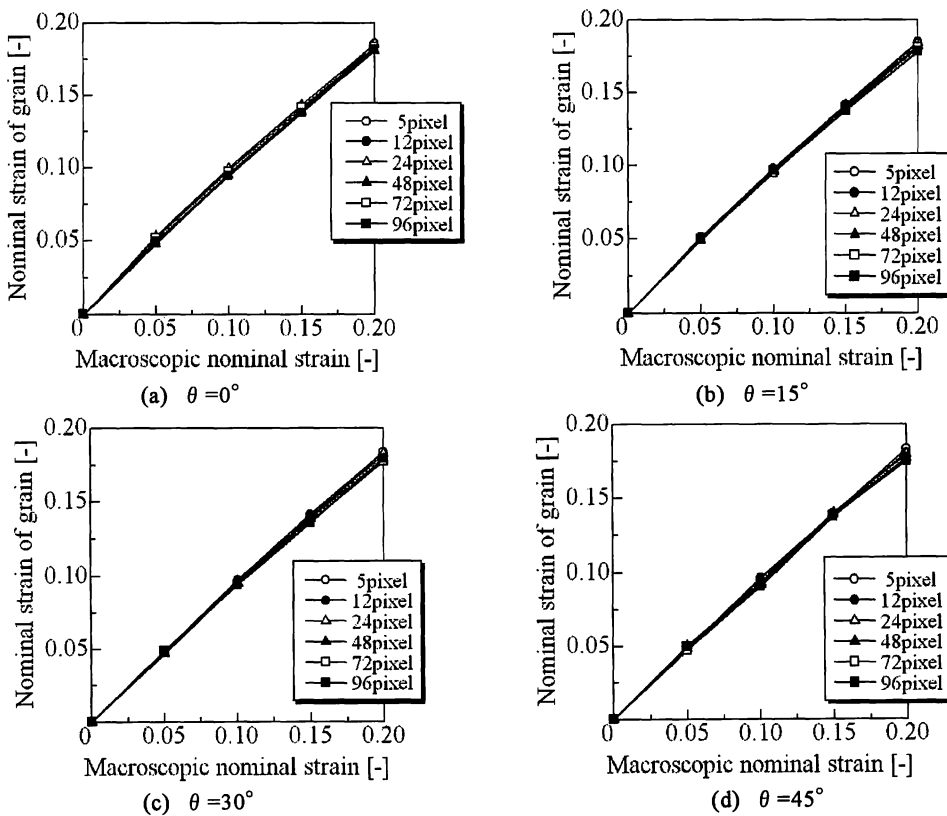


図10 円形モデルの楕円近似法による主ひずみ量の計算結果

すなわち、楕円近似法による主ひずみ量と主ひずみ方向の測定精度は保障された。

図 11 に楕円形モデルの 0° 方向に引張りを与えた場合の全方向ひずみ分布を示す。円形モデルと同様、測定方向によるひずみ量の変化は滑らかであり、特異な結果を示す方向は見られない。しかしながら、線幅の増加と公称ひずみ量の増加に従って、境界条件に課した引張りひずみよりも値が小さくなる結果が表れている。この方向は楕円の長軸方向に一致しており、短軸方向のひずみ測定結果には表れていない。このことから、細線化処理過程で長軸方向の凸部が過度に削除されたことが懸念される。このことから、本プログラムの適用範囲は線幅が概ね 24 画素程度までに限定されることに注意を要する。

図 12 に正方形モデルの 0° 方向に引張りを与えた場合の全方向ひずみ分布を示す。ひずみ分布は引張方向の 0° 、 180° 方向をピークに引張方向と直交する 90° 方向に傾くに従って線形的に減少している。このことは、全方向ひずみ測定方法が、その方向の最大寸法変化から計算しているため、正方形モデルの角部の形状変化が計算結果に支配的に寄与することに起因する。また、線幅が極端に太い場合、角部や凸部が細線化処理の際、損なわれるため、線幅の増加に従い、ひずみ測定結果の減少傾向が非線形になる。これらのひずみ分布の傾向から公称ひずみが概ね 10% 前後の段階までの測定精度は保障できると考えられる。

図 13 に六角形モデルの 0° 方向に引張りを与えた

場合の全方向ひずみ分布を示す。ひずみ分布は正方形モデルと同様に測定方向が引張方向と直交する 90° 方向に傾斜するに従って減少している。また、 60° 方向で急激な減少して 60° 方向から 90° (実際は 120°) までは、同じ値を示している。

六角形モデルでは、正方形モデルの角部(成す角度 90°)より鈍角な方向が引張り方向から 60° 方向と 120° 方向に存在するため、測定方向が 0° から 60° までは 60° 方向の寸法変化がひずみ測定結果に支配的に寄与し、 60° から 90° までは引張方向と直交する 90° 方向の寸法変化が測定結果に支配的に寄与する。すなわち、ひずみの測定結果が測定方向に依存して急激に変化する原因は正方形モデルと同様、角部が過度に評価されていることに起因する。このため、線幅が極端に太く、角部が細線化処理の際に損なわれた場合、精度が極端に劣化する。この点に関しては、検討の余地が残されるが、公称ひずみが概ね 10% 前後の段階まで、線幅が 24 画素程度までに関しては、測定精度が保障されることがわかった。

楕円形モデル、正方形モデル、六角形モデルの全方向ひずみ測定結果から結晶粒界の線幅や外部負荷の境界条件に関して、本プログラムの適用範囲が制限されることが明らかになった。これらのひずみ測定結果から楕円近似法により求めた主ひずみ量、主ひずみ方向の結果は、ひずみ測定結果の誤差を再現するだけに過ぎないので、紙面の都合上、省略する。

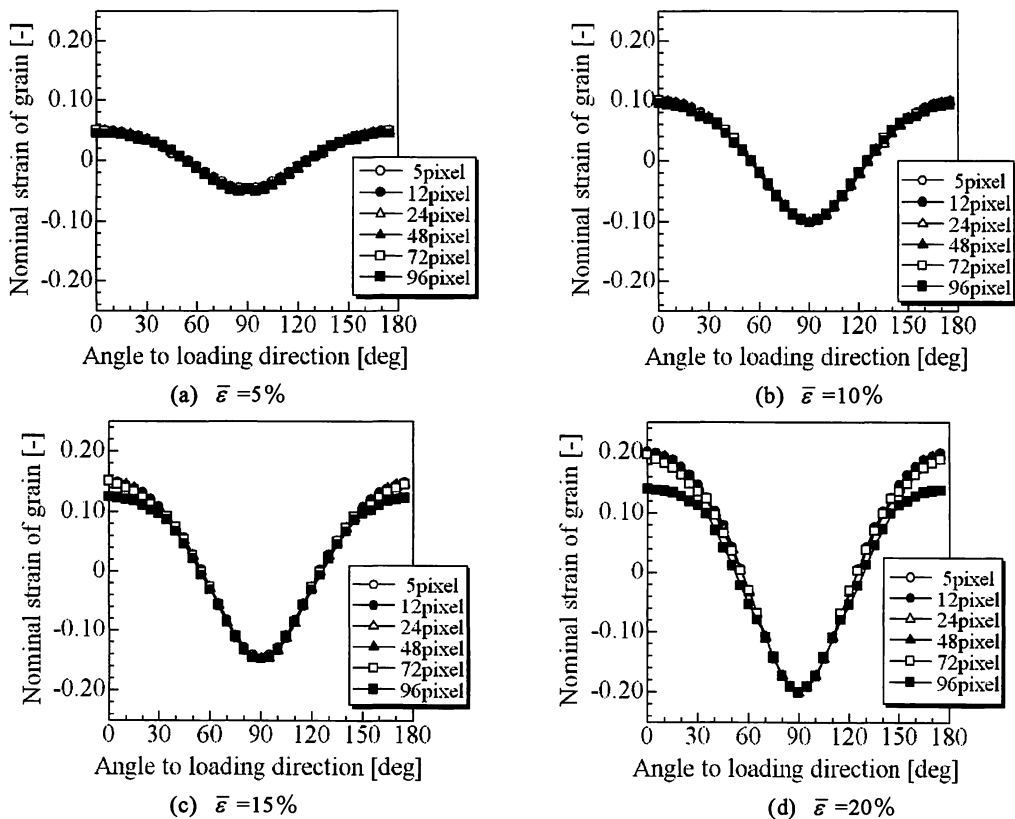


図 11 楕円形モデルの 0° 方向引張りの結果

以上の結果から材料に過大荷重や過大な強制変位が作用することで、結晶粒に局所的に過大な形状変形が生じる場合や湾曲や回転が生じる場合、計算

精度が保障できないため、本プログラムの適用範囲は公称ひずみが概ね 10%程度までに制限されることが明らかになった。また、細線化処理の段階で凸

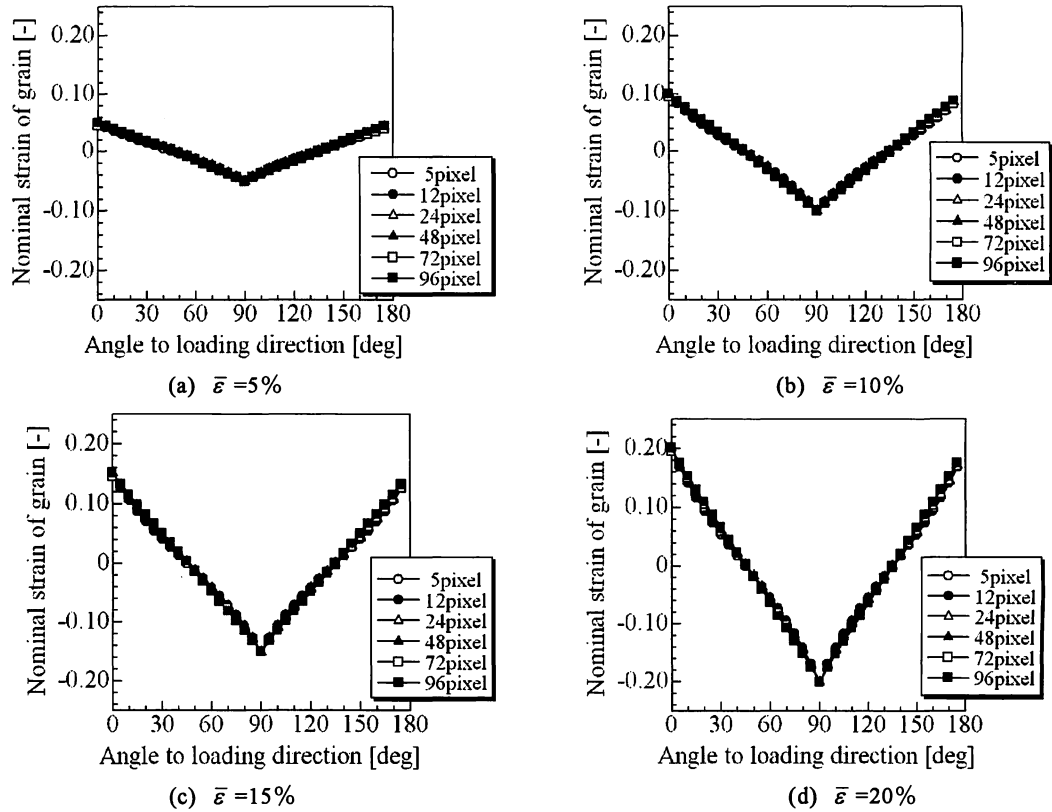


図 12 正方形モデルの 0° 方向引張りの結果

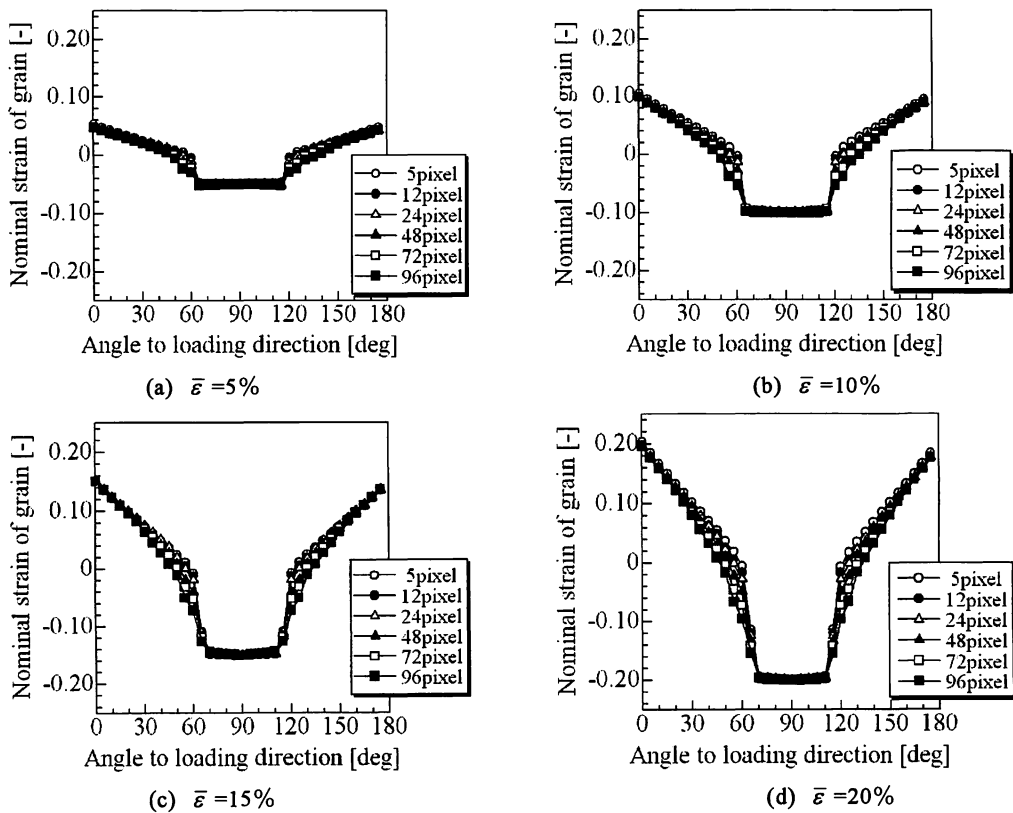


図 13 六角形モデルの 0° 方向引張りの結果

部や角部が過度に削除され、本来の結晶粒形状、及び、形状変化を追従できない場合が生じる。このため、本プログラムの適用範囲は、概ね粒界線幅が24画素程度までに制限されることが明らかになった。

しかしながら、公称ひずみの値が10%前後の段階まで評価できれば、多結晶の不均一変形を集団挙動として検討する分には十分と考えられる。また、通常、組織観察画像から結晶粒界線図を作成する場合、結晶粒の面積に対して結晶粒界は細いため、通常は24画素も必要としない。例え、粒界すべりや表面あれ(すなわち、三次元的な局所変形)が生じ、結晶粒界領域に斜影が生じていても、24画素もあれば、十分に結晶粒界の領域を補完できると共に結晶粒形状を再現できる。

すなわち、本研究により金属多結晶の組織観察画像から各結晶粒に生じるひずみ計算を自動的に行い、金属多結晶の不均一変形を集団挙動として評価する準備が成されたと考えられる。

4. 結 言

金属多結晶の組織観察結果の画像処理により結晶粒に生じるひずみ計算プログラムの構築を行うと共に、その解析精度に関して検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 結晶粒界の細線化処理プログラムは、モデル形状や線幅に依存せず、線幅1画素の結晶粒界線図を作成できることを確認した。しかしながら、線幅が極端に太い場合、結晶粒モデルの凸部や角部が損なわれるため、原形の再現性が要求される場合、本プログラムの適用範囲は、概ね線幅24画素程度までに制限されることが明らかになった。

(2) 結晶粒のひずみ測定プログラムは、モデル形状・寸法に依存せず、任意の方向の画素数を自動計算し、ひずみを測定できることを確認した。しかしながら、本測定方法の場合、モデル角部や面内のせん断変形が過度に評価される場合があることがわかった。このため、大変形や過度なせん断変形や捻れ変形には適用できず、適用範囲は公称ひずみが10%程度までに制限されることが明らかになった。

(3) 楕円近似法による主ひずみ量、主ひずみ方向の計算プログラムでは、全方向ひずみ測定プログラム結果における誤差の影響を受けるため、適用範囲は全方向ひずみ測定プログラムの適用範囲に留まるが、条件を満たせば、主ひずみ量、主ひずみ方向を自動計算できること、その精度が保障されることを確認した。

謝 辞

最後に本研究の一部は高橋産業経済財団の助成金のもとに行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Livingston, J. D. and Chalmers, B., Multi Slip in Bicrystal Deformation, *Acta Metall.*, Vol. 5, No. 6 (1957) pp. 322-327
- 2) Hirth, J. P., The influence of grain boundaries on mechanical properties, *Metall. Trans.*, Vol. 3 (1972) pp. 3047-3067
- 3) Hook, R. E. and Hirth, J. P., The Deformation Behavior of Isoaxial Bicrystals of Fe-3% Si, *Acta Metall.*, Vol. 15 (1967) pp. 535-551
- 4) Higa Y., et al., Collective Behavior of Grains on Deformation of Single-Phase Polycrystalline Metals, *Trans. JSME, A*, Vol. 71, No. 710 (in Japanese) (2005) 1292-1298
- 5) Higa Y., et al., Computational Simulation of Characteristic Length Dependent Deformation Behavior of Polycrystalline Metals, *Trans. JSME, A*, Vol. 69, No. 679 (in Japanese) (2003) 523-529
- 6) Kondou, R. and Ohashi, T., High Density Bands of GN Dislocations Formed by Multi Body Interaction in Compatible Type Multi Crystal Models, *Key Engineering Materials, Engineering Plasticity and Its Application from Nanoscale to Macroscale*, Vols. 340-341, (2007) pp. 187-192
- 7) Kondou, R. and Ohashi, T., Multi-Body Interaction of Crystal Grains in Compatible-type Tricrystals under Tensile Loading and Formation of Disclination-type Displacement Field, *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 3, No. 2 (2008), pp. 295-306
- 8) C.J.Hilditch, "Linear skeletons from square cupboards", in *Machine Intelligence 4*, B.Meltzer and D.Michie (Eds.), American Elsevier, New York, pp. 403-420(1969)
- 9) Shimizu, I. and Abe, T., "Surface Roughening and Deformation of Grain during Compressive Plastic Deformation of Polycrystalline Iron, *Trans. JSME, A*, Vol. 60, No. 578 (in Japanese) (1994) pp. 2369-2376