

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420024

研究課題名(和文)画像相関法を用いたひずみ測定による弾塑性材料の力学特性分布評価法の開発

研究課題名(英文)Identifying elasto-plastic material properties by strain measurement with digital image correlation

研究代表者

米山 聡 (Yoneyama, Satoru)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：90306499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、グローバルDICにより得られた変位分布からバーチャルフィールド法により弾塑性材料特性を同定する方法を提案した。構成式は測定誤差の蓄積を避けるため全ひずみ理論を用いた。逆解析の計算の際には有限要素メッシュを利用したピースワイズ・バーチャルフィールド法を用いた。引張負荷を受けるアルミニウム合金試験片の材料特性の同定を行った。その結果、変位分布の履歴を必要とせず、塑性変形後の1種類の荷重に対する1組の変位分布から塑性材料特性の同定が可能であることがわかった。ただし、複数の荷重に対する複数の変位場を利用して同定した方が高精度であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A method for inversely identifying elasto-plastic material properties from displacement fields measured by global digital image correlation. In order to avoid the accumulation of measurement errors, total strain theory is used as a constitutive equation. A piecewise virtual fields method with a finite element mesh is used for the implementation of the inverse analysis. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by identifying the material properties of a pure aluminum specimen from the displacement fields. Results show that the stress-strain relation after yielding can be evaluated from a single set of displacement fields under a single load but better results are obtained when multiple displacement fields under various loads are used as input data.

研究分野：材料力学, 実験力学

キーワード：逆問題 材料特性 弾塑性 画像相関法 ひずみ測定

### 1. 研究開始当初の背景

各種機器・構造物の健全性評価や強度評価のためには応力・ひずみ解析が不可欠であるが、そのためにはそれらを構成する材料の特性を知ることが重要である。一般的に材料特性は単軸引張試験などにより得られる応力とひずみの測定データから求めることができる。一方、機器・構造物、例えば電子部品などの小型化や複雑化が進んだことから、界面近傍における組織の変化や加工の際の熱や加工硬化などの影響により、材料特性が引張試験により得られた結果と異なる場合があることが問題となっている。したがって、応力やひずみを正確に評価するためには実際の構造物を構成している材料特性を知る必要がある。そのためには、実際の機器・構造物に荷を与え、その応答として発生するひずみの測定結果を入力として材料特性を逆問題解析により同定する必要がある。

ところで、変位やひずみを測定する手法として、最近では画像関連法などの光計測法により分布として測定する手法が広く用いられている。変位やひずみを分布として多くの点でのデータを得ることができれば、逆問題解析を行う上で有効であると考えられる。そのため、これまでに光計測法等で得られた変位場から材料特性を同定する方法が提案されてきた。それらは、例えば応力関数を用いた逆解析法や有限要素モデル更新を用いた逆解析法などである。それらの中でも、仮想変位場を利用した逆問題解析法であるバーチャルフィールド法が盛んに研究されている弾塑性材料特性の同定も既に行われているが、従来の研究では弾塑性応力-ひずみ関係にひずみ増分理論を用い、種々の負荷段階におけるひずみ分布の測定データを入力とすることで弾塑性材料特性を同定している。一方、弾塑性応力-ひずみ関係に全ひずみ理論を用い、原理的には多くの測定データを必要とせずに材料特性の同定が可能であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、複数の変位分布の測定値からバーチャルフィールド法に基づいて弾塑性材料特性を同定する方法を確立する。

### 3. 研究の方法

応力-ひずみ関係のモデルとして Ramberg-Osgood の関係式を用いる。また、構成式は全ひずみ理論を用いる。逆解析の計算の際には有限要素メッシュを利用したピースワイズ・バーチャルフィールド法を用いる。そのため、変位場測定には、逆解析の際に利用する有限要素メッシュとおなじメッシュを利用したグローバル DIC (Digital Image Correlation) (メッシュ DIC) を用いる。この方法の有効性を検証するために、引張荷を受けるアルミニウム合金試験片の材料特性の同定を行い、その有効性を示す。

### 4. 研究成果

本研究で開発した逆解析手法の有効性を検証する試験を行った。試験片の材質は純アルミニウム A1050 の焼きなまし材である。単軸試験片を用いた引張試験により応力-ひずみ関係を測定し、バーチャルフィールド法による材料特性の同定結果の検証を行うための基準値とした。バーチャルフィールド法による材料特性の同定においては、ひずみが非一様な分布となるように平行部が無い試験片を用いた。画像関連法による変位場の測定を行うため、この試験片の表面には白黒スプレー塗料によるランダム模様を塗布した。引張試験機を用いてこの試験片に種々の荷を与え、各負荷における試験片表面をモノクロ CCD カメラ用いて撮影した。得られた画像から変位分布を算出する際には有限要素メッシュを利用した画像関連法であるグローバル DIC を用いた。この方法では節点位置で変位の値が得られるため、同じメッシュを用いて逆解析を行うことで逆解析への測定データの入力が容易になる。

逆解析法に含まれる領域積分および境界積分の計算は、変位の測定と同じ有限要素モデルを利用して実行した。各節点の変位の値および仮想変位の値から、各要素の積分点におけるひずみおよび仮想ひずみの値を算出し、材料特性の同定を行った。

図 1 は引張試験により得られた真応力-真ひずみ線図である。Ramberg-Osgood の関係式により近似した結果も同時に示している。本研究においては、前節で述べた逆解析法により Ramberg-Osgood の関係式における各パラメータ同定を行い、図 1 に示すような応力ひずみ線図の近似曲線を同定することを目指した。

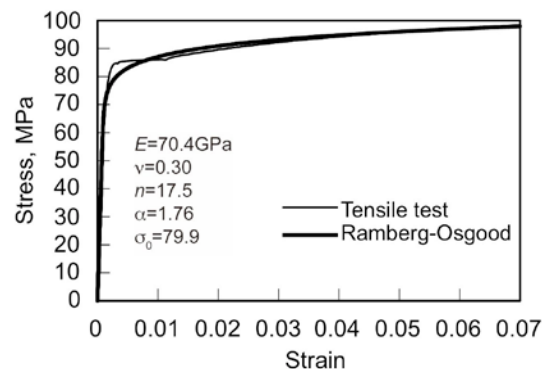


図 1 引張試験により得られた応力-ひずみ線図

図 2 は負荷前と  $P = 3600 \text{ N}$  の際に得られた試験片表面の画像の例である。白黒スプレー塗料によるランダム模様を確認できる。この画像に対してグローバル DIC を適用し、変位分布を評価した。さらにその変位分布を微分することでひずみ分布を評価した。その結果の例を図 3 および 4 に示す。この試験片には平行部はないものの、図 3(a)に示すように材

料が降伏する前にはなだらかな変位分布が得られている。一方、塑性変形開始後の図 3(b)の分布では、試験片中央部に等変位線が集中している。それらの変位分布を反映し、図 4(a)においてはほぼ一様ひずみ分布が得られているが、図 4(b)においては、試験片中央部において局所的な塑性変形が生じて極端に高いひずみを得られている。

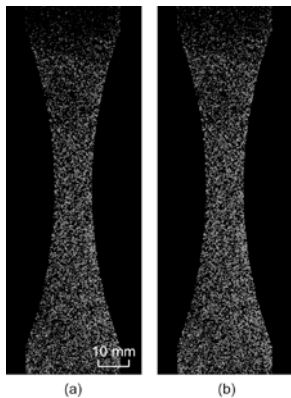


図 2 試料表面のダンダムパターン: (a)負荷前; (b)負荷後

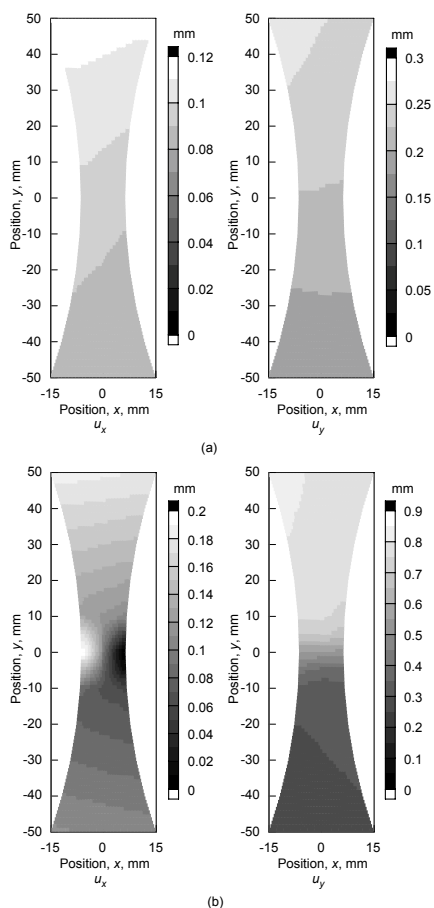


図 3 グローバル DIC により得られた変位分布: (a)  $P = 3600$  N; (b)  $P = 5000$  N

種々の荷重下で得られた変位分布に対して、まずは弾性体を仮定して縦弾性係数とポアソン比の同定を行った。バーチャルフィールド法を用いて弾性体の材料特性を同定する場合、

測定誤差の影響を低減する適切な仮想変位場を自動的に決定することが可能である。本研究ではその方法を用いて 2 種類の仮想変位場を自動的に決定し、縦弾性係数とポアソン比を同定した。各荷重に対して得られた変位分布からそれらを同定した結果を図 5 に示す。おおむね  $P = 4000$  N 以下の荷重に対しては、縦弾性係数  $E$  の値が約 68 GPa、ポアソン比  $\nu$  の値が 0.28 程度であり、アルミニウムとして妥当な値が得られている。一方、荷重が大きくなると同定した縦弾性係数の値は低下した。これは、材料が降伏し変形が大きくなった一方で、弾性体を仮定して材料特性を同定したため、見かけの縦弾性係数が低下したためである。したがって、荷重  $P = 4000$  N 程度で材料が降伏したと考えられる。

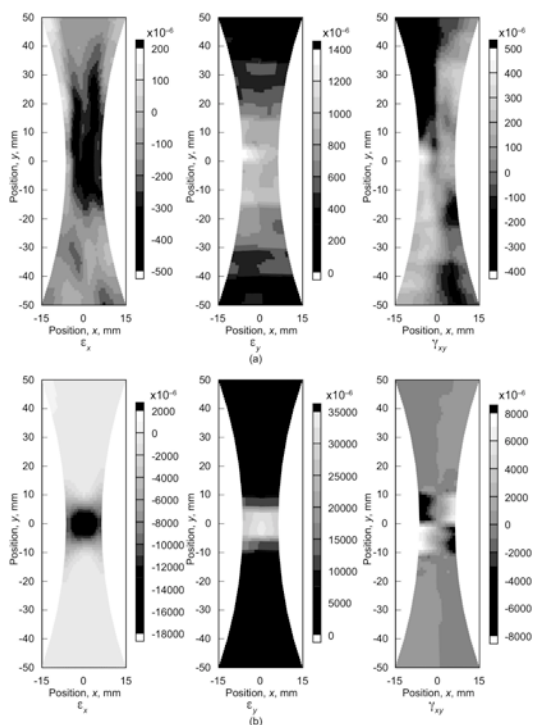


図 4 ひずみ分布: (a)  $P = 3600$  N; (b)  $P = 5000$  N

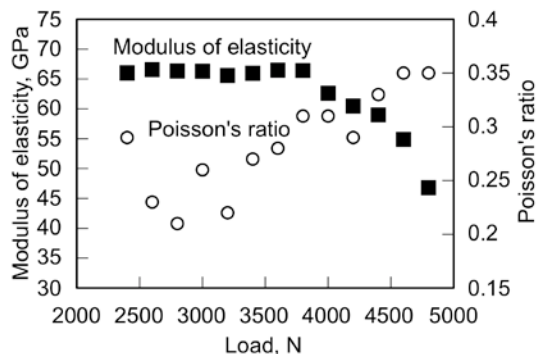


図 5 弾性係数およびポアソン比の同定結果

次に弾塑性材料特性の同定を行った。この場合、弾性体の場合と異なり、未知材料特性とその他の値とを関係付ける方程式が非線形

となるため、適切な仮想変位場を自動的に決定する方法はまだ確立されていない。そこで、ここでは仮想変位場を手動で設定した。その際の縦弾性係数は弾性材料特性の同定で得られた  $E = 68 \text{ GPa}$ 、ポアソン比は  $\nu = 0.28$  を用いた。

荷重  $P = 4900 \text{ N}$  の際に得られた変位場から仮想変位場の数 2, 3, 4 として得られた応力-ひずみ線図を図 6 に示す。仮想変位場の数を増やして最小二乗法を用いても、一つの荷重に対する変位分布測定結果だけを用いた場合では適切な材料特性値を得ることが困難であることがわかる。

次に、測定データの数を複数とした場合の結果を図 7 に示す。変位測定データの数を増やすことで材料特性値の同定精度が向上していることがわかる。今回の結果の中では、測定変位場の数を最大の 4 とした場合に、同定した応力-ひずみ線図は引張試験の結果にさらに近づく結果が得られた。

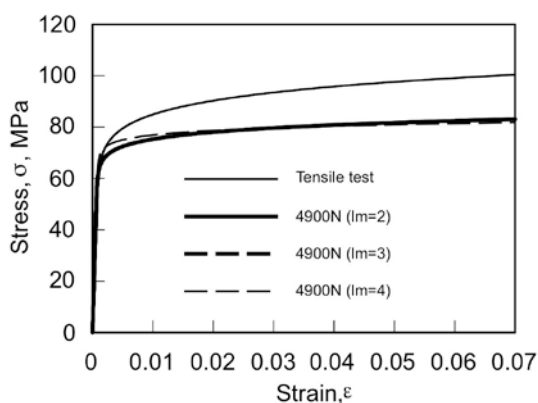


図 6 1 つの変位場から同定した応力ひずみ線図

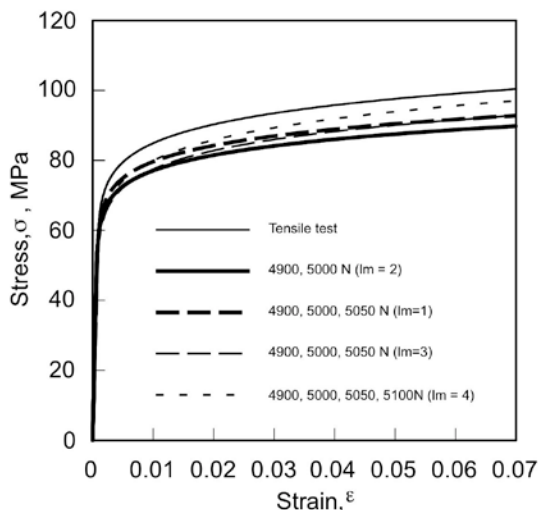


図 7 複数の変位場から同定した応力ひずみ線図 (lm は仮想変位場の数)

前節で示したように、バーチャルフィールド法により弾塑性材料特性の同定が可能である。ここでは、この方法により実際の構造物や機器を構成している材料の特性を同定する方法について考える。

この方法では、引張試験片や曲げ試験片を使用することなく、任意形状の試料に荷を与え変位分布を測定することで材料特性を決定することができる。したがって、引張試験片を切り出すことができないような構造物・機器の材料特性の同定が可能になると考えられる。この方法では、二次元応力状態を前提とし、表面の変位測定を行う必要がある。そのため、対象となる物体の形状が三次元的な場合は、まず、材料特性を同定しようとする部材を薄く切り出し、二次元応力状態を作り出せるような試料を作製する必要がある。その試料に面内荷重を与え、表面の変位分布を測定する。この変位分布測定には、画像相関法他、モアレ干渉法やスペックル干渉法などが利用できる。画像相関法を利用するには試料にランダム模様を塗布する必要があるが、電子部品のように測定対象の寸法が小さい場合は、その寸法に合わせた微細な模様を塗布し、顕微鏡を用いて測定する必要がある。

試料に与えた荷重はロードセルにより測定する。その際、得られる値は合力であるが、荷重を与える境界の仮想変位を一樣にすることにより、分布力を測定することなく同定を実行することが可能である。

バーチャルフィールド法を実行する際には、対象となる材料の部分のみの有限要素モデルを構築し、ピースワイズ・バーチャルフィールド法により単一の材料について同定を行う。ただし、二種類以上の材料特性を同時に同定することも技術的に可能である。したがって、複雑な構造にも本方法が適用可能だと考えられる。

本論文では純アルミニウムを対象材料としたため、応力-ひずみ関係に Ramberg-Osgood の式を利用した。実際に材料特性の同定を行う際には、その材料の特性に合わせた応力ひずみ関係のモデルを使用する。

以上のような手順により、実構造物・機器においても荷重に対する変位場を測定することで材料特性の同定が可能となると期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Jinnō, K., Arikawa, S., Yoneyama, S., Watanabe, Y., Asai, T., Shiokawa, K. and Yamashita, M., Identification of Elasto-plastic Material Properties with Full-field Surface Displacement Measurements, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 14(s), s147-s152 (2014). 査読有. DOI: 10.11395/jjsem.14.s147
- (2) 福田明紘, 濱田 惇, 有川秀一, 米山 聡, 画像相関法による変位場測定とバーチャルフィールド法を用いた弾塑性材料特性

の同定, 実験力学, 16(3), 234-242 (2016).  
査読有. 10.11395/jjsem.16.234

- (3) Hamada, S., Jinno, K., Arikawa, S., and Yoneyama, S., Identification of Plastic Stress-strain Parameters by Global Digital Image Correlation, the Virtual Fields Method and the Total Strain Theory, Bulletin of JSME, Mechanical Engineering Journal, 3(6), #16-00106 (2016). 査読有. DOI: 10.1299/mej.16-00106

[学会発表] (計 3 件)

- (1) 濱田 惇, 有川秀一, 米山 聡, 画像相関法を用いた変位場測定と弾塑性材料特性の逆解析, 日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会, 2015 年 3 月 14 日, 中部大学 (愛知県春日井市).
- (2) 福田明紘, 米山 聡, 逆問題解析による弾塑性材料特性の同定, 第 47 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2016 年 1 月 9 日, 機械振興会館 (東京都港区).
- (3) Hamada, S., Jinno, K., Arikawa, S. and Yoneyama, S., Identification of Elasto-plastic Material Properties from Measured Displacement Fields Using the Virtual Fields Method with Total Strain Theory, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, October 7, 2015, Loisir Hotel (Toyohashi, Aichi).
- (4) 福田明紘, 濱田 惇, 有川秀一, 米山 聡, 逆問題解析による弾塑性材料特性の同定方法の確立, 日本実験力学学会 2016 年度年次講演会, 2016 年 9 月 1 日, 近畿大学 (大阪府東大阪市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

米山 聡 (YONEYAMA, Satoru)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号: 90306499