

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特 許 公 報(B2)

(11)特許番号

特許第7253284号
(P7253284)

(45)発行日 令和5年4月6日(2023. 4. 6)

(24)登録日 令和5年3月29日(2023. 3. 29)

(51)Int. Cl.

G 0 1 L 5/00 (2006. 01)
G 0 1 L 1/00 (2006. 01)

F I

G 0 1 L 5/00 1 0 1 Z
G 0 1 L 1/00 B
G 0 1 L 1/00 G

請求項の数 9 (全 16 頁)

(21)出願番号 特願2021-528233(P2021-528233)
(86)(22)出願日 令和2年6月15日(2020. 6. 15)
(86)国際出願番号 PCT/JP2020/023458
(87)国際公開番号 W02020/262087
(87)国際公開日 令和2年12月30日(2020. 12. 30)
審査請求日 令和3年12月3日(2021. 12. 3)
(31)優先権主張番号 特願2019-118848(P2019-118848)
(32)優先日 令和1年6月26日(2019. 6. 26)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)

特許法第30条第2項適用 平成30年9月7日に開催
された高温変形の組織ダイナミクス研究会「平成30年
度 夏の学校」にて口頭発表

(73)特許権者 503360115
国立研究開発法人科学技術振興機構
埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(74)代理人 100105924
弁理士 森下 賢樹
(72)発明者 朴 明駿
京都府京都市左京区吉田本町 京都大学
学際融合教育研究推進センター 構造材料
元素戦略研究拠点ユニット内

審査官 岡田 卓弥

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 応力およびひずみ量分布表示方法、装置およびプログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する方法であって、
負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、
負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第1のひずみ量を計測するステップと、
負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第2のひずみ量を計測するステップと、
前記第1のひずみ量と前記第2のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出するステップと、
算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップと
を備える方法。

【請求項2】

前回の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出するステップと、
前記差分が所定の閾値以上である画素位置を表示するステップと
をさらに備える請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前回の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出するステップと、

前記応力同士の差分を、画素位置ごとに所定の応力値の範囲別に度数分布表示するステップと

をさらに備える請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前回の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、材料全体の応力同士の差分を算出するステップと、

前記材料全体の応力同士の差分を、除荷ごとに度数分布表示するステップと

をさらに備える請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 5】

前記第 2 のひずみ量を計測するステップにおいて、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素を検出し、当該検出した画素の位置を表示するステップをさらに備える請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の方法。

10

【請求項 6】

前記試料は多結晶金属材料であり、前記撮影するステップは顕微鏡カメラを用いて実行され、

前記試料の金属結晶の方位を検出するステップと、当該検出した金属結晶の方位を金属結晶ごとに表示するステップとをさらに備える請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の方法。

【請求項 7】

前記試料は弾性域にある請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の方法。

【請求項 8】

20

試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する装置であって、

負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影する撮影部と、

負荷前と除荷後の画像間の相関に基づき画素位置ごとの第 1 のひずみ量を計測し、負荷前と負荷時の画像間の相関に基づき画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測するひずみ量計測部と、

前記第 1 のひずみ量と前記第 2 のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出する応力算出部と、

算出された応力の分布を各画素位置に表示する表示部とを備える装置。

【請求項 9】

30

試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示するプログラムであって、

負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、

負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第 1 のひずみ量を計測するステップと、

負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測するステップと、

前記第 1 のひずみ量と前記第 2 のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出するステップと、

算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップとをコンピュータに実行させるプログラム。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、応力およびひずみ量の分布を表示する方法、装置およびプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

材料表面の変形によるひずみ量分布を測定する手法として、デジタルイメージ相関法 (Digital Image Correlation、以下「DIC」と呼ぶ) がある

(例えば特許文献１)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００３】

【特許文献１】国際公開番号ＷＯ２０１５／００８４０４

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００４】

従来、金属などの材料に外力（負荷）を与えて変形させても、負荷が十分小さければ、負荷を０にすれば（除荷すれば）当該金属材料は元の状態に戻ると考えられてきた。すなわち、この場合の変形は可逆的であり、このとき材料は全体が弾性領域内にあるとされている。しかしながら、たとえ負荷が小さい弾性領域内であっても、負荷と除荷が繰り返されることにより材料内部に局所的な塑性変形が発生する場合があります。こうした局所的な塑性変形から金属結晶格子の転位や局所的な微小亀裂が発生し、それらが蓄積することにより、最終的に材料の疲労破壊に至るとも考えられている。従って、疲労破壊の原因解明には、局所的な塑性変形の測定が重要である。しかしながら、こうした局所的な塑性変形を通常のＤＩＣ等の方法を用いて測定することは困難であった。

10

【０００５】

本発明は、こうした課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、材料に負荷と除荷を繰り返すことにより発生する局所的な応力やひずみ量の分布を表示する方法を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【０００６】

上記課題を解決するために、本発明のある態様の方法は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面のひずみ量分布を表示する方法であって、負荷前および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとのひずみ量を計測するステップと、計測されたひずみ量の分布を各画素位置に表示するステップとを備える。

【０００７】

本発明の別の態様もまた、方法である。この方法は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する方法であって、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第１のひずみ量を計測するステップと、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第２のひずみ量を計測するステップと、第１のひずみ量と第２のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出するステップと、算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップとを備える。

30

【０００８】

本発明のさらに別の態様は、装置である。この装置は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する装置であって、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影する撮影部と、負荷前と除荷後の画像間の相関に基づき画素位置ごとの第１のひずみ量を計測し、負荷前と負荷時の画像間の相関に基づき画素位置ごとの第２のひずみ量を計測するひずみ量計測部と、第１のひずみ量と第２のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出する応力算出部と、算出された応力の分布を各画素位置に表示する表示部とを備える。

40

【０００９】

本発明のさらに別の態様は、プログラムである。このプログラムは、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示するプログラムであって、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第１のひずみ量を計測するステップと、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第２のひずみ量を計測するステップと、

50

第 1 のひずみ量と第 2 のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出するステップと、算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップとをコンピュータに実行させる。

【 0 0 1 0 】

なお、以上の構成要素の任意の組合せ、本発明の表現を装置、方法、システム、記録媒体、コンピュータプログラムなどの間で変換したものもまた、本発明の態様として有効である。

【発明の効果】

【 0 0 1 1 】

本発明によれば、材料に負荷と除荷を繰り返すことにより発生する局所的な応力やひずみ量の分布を表示することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 2 】

【図 1】材料に応力を与えたときの、ひずみと応力との関係を示すグラフである。

【図 2】全ひずみから応力を第 1 実施形態に係る応力測定方法を実施したときの、ひずみと応力との関係を示すグラフである。

【図 3】第 1 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 4】第 2 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 5】第 3 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 6】第 4 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 7】第 5 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 8】第 6 実施形態に係る方法のフロー図である。

【図 9】第 7 実施形態に係る装置のブロック図である。

【図 10】第 4 実施形態に係る方法による応力の差分の度数分布表示である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 3 】

以下、本発明を好適な実施の形態をもとに各図面を参照しながら説明する。実施の形態および変形例では、同一または同等の構成要素、ステップ、部材には同一の符号を付するものとし、適宜重複した説明は省略する。また、各図面における部材の寸法は、理解を容易にするために適宜拡大、縮小して示す。また、各図面において実施の形態を説明する上で重要でない部材の一部は省略して表示する。また、第 1、第 2 などの序数を含む用語が多様な構成要素を説明するために用いられるが、こうした用語は一つの構成要素を他の構成要素から区別する目的でのみ用いられ、この用語によって構成要素が限定されるものではない。

【 0 0 1 4 】

機械部品の破損の約 90% は、金属疲労が原因であるといわれている。材料の疲労破壊を調べるために疲労試験が行われ、そこでは試験片に応力や変位が繰り返し与えられ、破断の有無や、破断に至るまでの繰り返し数が測定される。金属疲労破壊のメカニズムとして、材料が弾性領域内で負荷と除荷を繰り返し受けることにより、材料内部に局所的な塑性変形が発生する。この局所的な塑性変形から金属結晶格子の転位や局所的な微小亀裂が発生し、それらが蓄積することにより材料の破断に至ることが考えられている。

【 0 0 1 5 】

上記のような塑性変形の局所的な発生の主な原因は、材料形状の複雑さや材料自体の不均一性に伴う、局所的な応力集中であると考えられる。従って、局所的な塑性変形の発生を観測するあるいは予測するためには、応力の局所的な分布を測定して表示できることが望ましい。しかしながら従来の DIC は、変形によるひずみ量の分布を測定することはできるが、材料に生じる応力の分布を直接測定することはできない。特に材料の塑性領域で観測されるひずみは、弾性ひずみと塑性ひずみの両方を含むため、ひずみから応力を直接計算することは困難である。そこで本発明者は、塑性領域で観測される全ひずみから弾性ひずみだけを取り出すことにより、応力を求める方法を考案した。具体的な実施形態を説

明する前に、まず図 1 および図 2 を参照して、全ひずみが弾性ひずみと塑性ひずみの両方を含む場合に、弾性ひずみだけを取り出して応力を求める方法について説明する。

【 0 0 1 6 】

図 1 は、金属などの材料に応力を与えたときの、ひずみと応力との関係を示す。横軸と縦軸はそれぞれ、ひずみと応力を表す。

【 0 0 1 7 】

材料に σ_y 以下の応力を与えると、材料は弾性変形する。このとき、ひずみは応力に比例する。すなわち材料の状態は、直線 O A (負荷線) に沿って、点 O から点 D に変化する。この状態から応力を 0 にする (除荷する) と、材料の状態は点 O に戻り、ひずみも 0 となる。点 O ~ 点 A の領域は一般に弾性領域と呼ばれ、弾性領域で発生するひずみは弾性ひずみと呼ばれる。また弾性領域における応力の最大値 σ_y は、弾性限度と呼ばれる。

10

【 0 0 1 8 】

一方、材料に弾性限度 σ_y を超える応力を与えると、材料は塑性領域 (点 A ~ 点 B の領域) に入る。材料の状態が弾性領域から塑性領域に変化する点 A は、降伏点と呼ばれる。後述のように塑性領域でのひずみは弾性ひずみに塑性ひずみが加わるため、塑性領域におけるひずみに対する応力の傾きは、弾性領域でのものと比べて緩やかなものとなる。また塑性領域で応力を除荷すると、材料の状態は、矢印 B C で示される除荷線に沿って点 C に戻る。この除荷線の傾きは、弾性領域における負荷線の傾き (すなわちヤング率 E) に等しい。除荷が完了すると、弾性ひずみ e が弾性回復し、塑性ひずみ ε^* が残る。塑性領域で発生するひずみ ε は、弾性ひずみと塑性ひずみとの和である。

20

【 0 0 1 9 】

以下、材料は等方・均質の弾性体であると仮定する。(1) は 1 次元における弾性ひずみと応力との関係を示し、(2) および (3) は、2 次元における弾性ひずみと応力との関係を示す。

【 数 1 】

$$\sigma = E e \quad \cdots (1)$$

【 数 2 】

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1 - \nu^2} (e_{11} + \nu e_{22}) \quad \cdots (2)$$

【数 3】

$$\sigma_{22} = \frac{E}{1 - \nu^2} (e_{22} + \nu e_{11}) \quad \cdots(3)$$

ここで E はヤング率、 ν はポアソン比、 σ は長さ方向の応力、 e は長さ方向の弾性ひずみ、 σ_{11} は第 1 方向の応力、 e_{11} は第 1 方向の弾性ひずみ、 σ_{22} は第 2 方向の応力、 e_{22} は第 2 方向の弾性ひずみを表す。

10

【0020】

前述の通り、式(1)～(3)は、いずれも応力と弾性ひずみとの間の関係を示す。従って、これらの式に基づいて塑性領域におけるひずみから応力を求めるためには、観測される全ひずみから塑性ひずみを除去して、弾性ひずみだけを取り出す必要がある。

【0021】

図 2 は、全ひずみから応力を測定するときの、ひずみと応力との関係を示すグラフである。点線は材料力学で定められるヤング率に基づく理論直線を表し、実線は実測値を表す。

20

【0022】

最初に、ひずみがゼロの状態にある材料に、弾性限度より大きい応力を与えて、材料を塑性領域にある状態 B (以下、第 1 の状態と呼ぶ) にする。図示される通り、材料に与える応力を増加させていくと、材料の状態は、点 o から、降伏点 A を経由して、第 1 の状態 B になる。この例では、弾性限度は $\sigma_y = 496 \text{ MPa}$ (メガパスカル) であり、第 1 の状態 B における応力は $\sigma = 1000 \text{ MPa}$ である。

【0023】

次に、材料上に定めた複数の測定点で、第 1 の状態 B におけるひずみ量 ε を測定する。この例では、ひずみ量 $\varepsilon = 0.0083$ が得られる。前述の通り、ここで測定されるひずみ量 ε は、弾性ひずみ量と塑性ひずみ量との和である。

30

【0024】

次に、第 1 の状態 B にある材料に与えられた応力を徐々に減少させながら、ゼロまで除荷する。これにより材料の状態は、直線 BC に沿って変化し、点 B から点 C (以下、第 2 の状態と呼ぶ) になる。図示されるように、実線矢印 BC で示される除荷線は、点線で示される理論直線とよく一致している。

【0025】

次に、前述の複数の測定点で、第 2 の状態 C におけるひずみ量 ε^* を測定する。この例では、ひずみ量 $\varepsilon^* = 0.0033$ が得られる。前述の通り、ここで測定されるひずみ量 ε^* は、塑性ひずみ量 ε^* である。

【0026】

最後に、第 1 の状態 B におけるひずみ量 ε と第 2 の状態 C における塑性ひずみ量 ε^* との差から、前述の複数の測定点での弾性ひずみ量 e を算出する。この例では、弾性ひずみ量 $e = \varepsilon - \varepsilon^* = 0.0083 - 0.0033 = 0.0050$ が得られる。

40

【0027】

このようにして、各測定点において、塑性領域で観測される全ひずみから塑性ひずみを除去して、弾性ひずみだけを取り出すことができる。これにより、例えば DIC によりひずみ量分布が得られれば、既知のヤング率やポアソン比を式(1)(1次元の場合)や式(2)(3)(2次元の場合)に適用することにより、応力分布を得ることができる。

【0028】

本発明者は、本実施形態で得られた測定の正当性を確認するため、材料を第 2 の状態 C

50

にした後、再度応力を与えて材料の状態を点Eにする実験を行った。その結果、図示されるように、点Cから点Eまでの負荷線は、点Bから点Cまでの除荷線と高い精度で一致し、状態Cになった材料が正常な弾性特性を示すことが分かった。

【0029】

前述のように、従来弾性領域とされた領域であっても、負荷と除荷を繰り返すことにより局所的な塑性変形が発生し、それらが材料内部に含まれる場合があると考えられる。そこで本明細書では、降伏点以下であるひずみ領域をまとめて「弾性域」と呼ぶ。すなわち弾性域とは、(1)材料全体が弾性変形するときのひずみ領域、(2)弾性変形する部分と局所的に塑性変形する部分とが材料内部に混在するときのひずみ領域、を総称するものである。なお、軟鋼などの一部の金属材料は明確な降伏点を示すが、その他の金属では降伏点が明確に観測できないことがある。そこで降伏点が明確でない場合は、応力ひずみ曲線において、0.2%の永久ひずみが表れる点(0.2%耐力)を降伏点とみなすこととする。

10

【0030】

[第1実施形態]

図3は、第1実施形態に係る方法のフロー図である。この方法は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面のひずみ量分布を表示する方法であって、ステップS1と、ステップS2と、ステップS3とを備える。

【0031】

ステップS1で本方法は、負荷前および除荷後の試料表面の画像を撮影する。撮影のための機器や手段は特に限定されないが、例えば、一般的なデジタルカメラ、顕微鏡カメラ、高速度カメラなどを用いてよい。また、1台のカメラを用いて1つの方向から撮影してもよいし、複数のカメラを用いて異なる方向から撮影してもよい。撮影された画像は、画素位置ごとに記憶される。

20

【0032】

ステップS2で本方法は、ステップS1で撮影された負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとのひずみ量を計測する。ひずみ量の具体的な計測の手段は特に限定されないが、例えば、負荷前と除荷後の画像を比較し、負荷前の試料表面の点が除荷後に移動した場所を探し出すことで変位を求めてもよい。ひずみ量は、すべての負荷前と除荷後の画像について計測されてもよいし、負荷前と除荷後の画像の組がいくつか選

30

【0033】

ステップS3で本方法は、ステップS2で計測されたひずみ量の分布を各画素位置に表示する。表示の方法は特に限定されないが、ひずみの大きさを画素位置ごとに、色、濃淡、等高線、3次元表示などにより表示してよい。ステップS3を実行することにより、負荷と除荷を繰り返す過程で試料表面に発生するひずみが、画素位置ごとに時系列に視覚化される。

【0034】

本実施形態によれば、負荷と除荷を繰り返した試料のひずみ量の分布を各画素位置に表示できるので、材料内部に発生した局所的な塑性変形を測定して、ひずみ量分布として視覚化することができる。

40

【0035】

[第2実施形態]

図4は、第2実施形態に係る方法のフロー図である。この方法は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する方法であって、ステップS4と、ステップS5と、ステップS6と、ステップS7と、ステップS8と、を備える。

【0036】

ステップS4で本方法は、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影する。すなわちステップS4では、第1実施形態のステップS1に加えて、負荷時(負荷を与え

50

ているとき)の試料表面の画像も撮影する。

【0037】

ステップS5で本方法は、ステップS4で撮影された負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第1のひずみ量を計測する。第1のひずみ量は、(塑性ひずみが存在した場合の)塑性ひずみである。

【0038】

ステップS6で本方法は、ステップS4で撮影された負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第2のひずみ量を計測する。第2のひずみ量は、弾性ひずみと(塑性ひずみが存在した場合の)塑性ひずみの和(全ひずみ)である。

【0039】

ステップS7で本方法は、ステップS5で計測された第1のひずみ量とステップS6で計測された第2のひずみ量との差分に基づき、画素位置ごとの応力を算出する。ステップS7を実行することにより、前述の方法に従い、第2のひずみ量(全ひずみ)と第1のひずみ量(塑性ひずみ)との差分を画素位置ごとに計算することにより、各画素位置の弾性ひずみだけを取り出して、画素位置ごとの応力を算出することができる。

【0040】

ステップS8で本方法は、ステップS7で算出された応力の分布を各画素位置に表示する。ステップS8を実行することにより、負荷と除荷を繰り返す過程で試料表面に作用する応力の分布が、画素位置ごとに時系列に視覚化される。

【0041】

本実施形態によれば、負荷と除荷を繰り返した試料の応力の分布を各画素位置に表示できるので、材料内部に発生する局所的な塑性変形等の原因となる局所的な応力を測定して、応力分布として視覚化することができる。

【0042】

特に、本方法の実行中に試料は弾性域にあってよい。この形態によれば、試料に対する負荷と除荷は、一般に弾性領域とされる範囲内で繰り返される。このとき、材料全体が弾性領域内にあり、材料の変形が可逆的であった場合は、ステップS4で撮影された負荷前と負荷後の画像と間には差分がないはずである。一方、負荷と除荷が繰り返されることにより材料内部に局所的な塑性変形が発生した場合は、ステップS4で撮影された負荷前と負荷後の画像のいずれかの間で差分の存在する画素位置があるはずである。すなわちこの実施の形態によれば、小さい負荷(通常弾性領域とされる範囲内で与えられる負荷)により発生する局所的な塑性変形を測定して、応力分布として視覚化することができる。これは、従来の破断に至るまで負荷と除荷を繰り返すタイプの疲労試験では得ることのできない、試料の局所的な構造に関する知見を与えることができる。

【0043】

[第3実施形態]

図5は、第3実施形態に係る方法のフロー図である。第3実施形態は、第2実施形態に対して、ステップS9と、ステップS10とをさらに備える。

【0044】

ステップS9で本方法は、前回(n-1回目とする)の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回(n回目とする)の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出する。

【0045】

ステップS10で本方法は、ステップS9で算出した差分が所定の閾値以上である画素の位置を表示する。すなわち、n-1回目の除荷後の応力分布と、n回目の除去後の応力分布とを比較し、応力の差分が所定の閾値以上である画素があった場合に、その画素位置を表示する。このとき、当該画素位置の応力が大きく変化したことから、試料は、n回目の負荷および除荷の過程で、当該画素位置に相当する部分に局所的な塑性変形等が発生した可能性が高いと考えられる。すなわち当該画素位置に局所な塑性変形等が発生したタイミングは、試料に負荷と除荷を繰り返した結果、n回目の負荷および除荷の過程であると

10

20

30

40

50

推定することができる。

【 0 0 4 6 】

以上説明したように、本実施形態によれば、試料に負荷と除荷を繰り返したときに、試料内部に局所的な塑性変形等が発生するタイミングと位置を推定し、表示することができる。

【 0 0 4 7 】

[第 4 実施形態]

図 6 は、第 4 実施形態に係る方法のフロー図である。第 4 実施形態は、第 3 実施形態に対して、ステップ S 1 0 に代えてステップ S 1 1 0 を備える。

【 0 0 4 8 】

ステップ S 9 で本方法は、前回 ($n - 1$ 回目とする) の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回 (n 回目とする) の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出する。

【 0 0 4 9 】

ステップ S 1 1 0 で本方法は、ステップ S 9 で算出した差分を、画素位置ごとに所定の応力値の範囲別に度数分布表示する。所定の応力値の範囲は任意に決めてよいが、以下、
- 2 0 0 M P a ~ - 1 0 0 M P a、- 1 0 0 M P a ~ 0 M P a、0 M P a ~ 1 0 0 M P a、
1 0 0 M P a ~ 2 0 0 M P a、2 0 0 M P a ~ 3 0 0 M P a、3 0 0 M P a ~ 4 0 0 M P a、
4 0 0 M P a ~ 5 0 0 M P a、5 0 0 M P a ~ 6 0 0 M P a、6 0 0 M P a ~ 7 0 0 M P a、
7 0 0 M P a ~ 8 0 0 M P a、8 0 0 M P a ~ 9 0 0 M P a、9 0 0 M P a ~ 1 0 0 0 M P a、
の 1 2 個で定めた例を説明する。

【 0 0 5 0 】

図 1 0 は、ステップ S 1 1 0 で表示された、ある画素位置における応力差分の度数分布である。この例では、(a) $T = t_0$ 、(b) $T = t_0 + t_1$ 、(c) $T = t_0 + t_1 + \Delta t$ 、(d) $T = t_0 + t_1 + 2 \Delta t$ の 4 つのタイミングにおける応力差分が度数分布表示されている。ここで T は時刻を表す。

【 0 0 5 1 】

(a) の $T = t_0$ では、応力の値が大きければ大きいほど、応力の差分も大きい状態が実現されていることが分かる。この時点での残留応力の発生状況は、図 1 0 (a) によって表現される。その後負荷と除荷とが繰り返されると、各応力値範囲での応力差分は 0 となり、度数分布はフラットになる。このフラットな状態は (b) の $T = t_0 + t_1$ まで継続する。(b) の次のタイミング (すなわち (b) の後、1 回の負荷と除荷が実行されたタイミング) $T = t_0 + t_1 + \Delta t$ で度数分布表示が変化し、フラットでなくなる。ここで 1 回の負荷および除荷に要する時間を Δt で表す。この度数分布は、材料に新たな変形機構が発現したことを示唆するものと考えられる。これにより、残留応力の発生状況がそれまでと大きく変化したことが示される。さらに次のタイミング $T = t_0 + t_1 + 2 \Delta t$ では、度数分布はさらに別の形に変化する ((d))。すなわち、この段階で材料の変形機構が急速に時間発展し、残留応力が大きく変化していることが示唆される。

【 0 0 5 2 】

このように、得られた応力差分を、画素位置ごとに所定の応力値の範囲別に度数分布表示することにより、応力の時間微分に相当する情報が得られる。これにより、材料の各点における残留応力の発生状況を時間的に追跡することができる。

【 0 0 5 3 】

以上説明したように、本実施形態によれば、試料に負荷と除荷を繰り返したときに、試料内部に局所的な塑性変形等が発生するタイミングと位置を推定し、表示することができる。

【 0 0 5 4 】

ある実施の形態では、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出し、画素位置ごとに応力差分の度数分布表示をすることに代えて、材料全体の応力同士の差分を算出し、この材料全体の応力同士の差分を、除荷ごとに度数分布表示してもよい。この実施の形態

10

20

30

40

50

によれば、画素位置ごとに多数の負荷と除荷を繰り返して応力差分の度数分布表示を行うことなく、除荷ごとに材料全体の変形機構の変化を評価することができる。

【 0 0 5 5 】

[第 5 実施形態]

図 7 は、第 5 実施形態に係る方法のフロー図である。第 5 実施形態は、第 2 実施形態に対して、ステップ S 6 に代えてステップ S 1 1 を備え、ステップ S 1 2 をさらに備える。

【 0 0 5 6 】

ステップ S 1 1 で本方法は、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測するとともに、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素を検出する。負荷と除荷を繰り返す過程で試料に破断等が発生していなければ、負荷前の画像と負荷後の画像の間には一定の相関があると考えられる。すなわち、試料に負荷を加えると試料の各位置は変位するが、破断等が発生しない限り、各位置の変位は一定の範囲内にあると考えられる。すなわちこの場合、試料の負荷前の画像と負荷時の画像との間に相関があると考えられる。しかしながら、負荷後に試料の一部に破断等が発生すると、当該部分周辺が負荷前から大きく変位する結果、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関が失われる。このように、ステップ S 1 1 を実行することにより、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素を検出されるので、当該画素に相当する部分で局所的な破断等が発生したことを推定することができる。

【 0 0 5 7 】

ステップ S 1 2 で本方法は、ステップ S 1 1 で検出した負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素の位置を表示する。ステップ S 1 2 を実行することにより、局所的な破断等が発生したことが推定される位置が可視化される。

【 0 0 5 8 】

本実施形態によれば、試料に負荷と除荷を繰り返したときに、局所的な破断等が発生したことを推定し、その位置を表示することができる。

【 0 0 5 9 】

[第 6 実施形態]

図 8 は、第 6 実施形態に係る方法のフロー図である。第 6 実施形態は、第 2 実施形態に対して、ステップ S 4 に代えてステップ S 1 3 を備え、ステップ S 1 4 と、ステップ S 1 5 とをさらに備える。

【 0 0 6 0 】

ステップ S 1 3 で本方法は、負荷前、負荷時および除荷後の多結晶金属材料試料表面の画像を顕微鏡カメラを用いて撮影する。顕微鏡カメラに使われる顕微鏡は特に限定されないが、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡などであってよい。多結晶金属材料試料表面の画像を顕微鏡カメラを用いて撮影することにより、試料表面の結晶粒、結晶粒界、線状組織などの結晶構造に関する情報を得ることができる。

【 0 0 6 1 】

ステップ S 1 4 で本方法は、ステップ S 1 3 で撮影した試料の金属結晶の方位を検出する。

【 0 0 6 2 】

ステップ S 1 5 で本方法は、ステップ S 1 4 で検出した金属結晶の方位を金属結晶ごとに表示する。ステップ S 8 とステップ S 1 5 を実行することにより、試料の応力分布と金属結晶の方位を合わせて視覚化することができる。これにより、例えば結晶粒界に応力が集中する様子を観察することができる。また、結晶方位の差の小さな結晶同士や、差の大きな結晶同士の境界における応力分布の相違を比較することができる。

【 0 0 6 3 】

本実施形態によれば、結晶粒界と局所的に発生する塑性変形との関係を知ることができる。

【 0 0 6 4 】

10

20

30

40

50

[第 7 実施形態]

図 9 は、第 7 実施形態に係る応力表示装置 1 のブロック図である。応力表示装置 1 は、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示する装置であって、撮影部 10 と、ひずみ量計測部 20 と、応力算出部 30 と、表示部 40 とを備える。

【 0065 】

撮影部 10 は、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影し、撮影した画像を歪み量計測部 20 に送信する。歪み量計測部 20 は、撮影部 10 から受信した負荷前と除荷後の画像間の相関に基づき、画素位置ごとの第 1 のひずみ量を計測する。歪み量計測部 20 はまた、撮影部 10 から受信した負荷前と負荷時の画像間の相関に基づき、画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測する。ひずみ量計測部 20 は、計測した第 1 のひずみ量と第 2 のひずみ量とを応力算出部 30 に送信する。応力算出部 30 は、ひずみ量計測部 20 から受信した第 1 のひずみ量と第 2 のひずみ量との差分に基づき、画素位置ごとの応力を算出する。応力算出部 30 は、算出した画素位置ごとの応力を表示部 40 に送信する。表示部 40 は、応力算出部 30 から受信した応力の分布を各画素位置に表示する。

【 0066 】

本実施形態によれば、材料内部に発生する局所的な塑性変形等の原因となる局所的な応力を測定して、応力分布として視覚化する装置を実現することができる。

【 0067 】

[第 8 実施形態]

第 8 実施形態に係るプログラムは、試料に負荷と除荷を繰り返しながら試料表面の応力分布を表示するプログラムである。このプログラムは、負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップと、負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第 1 のひずみ量を計測するステップと、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測するステップと、第 1 のひずみ量と第 2 のひずみ量との差分に基づき画素位置ごとの応力を算出するステップと、算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップとをコンピュータに実行させる。

【 0068 】

本実施形態によれば、材料内部に発生する局所的な塑性変形等の原因となる局所的な応力を測定して、応力分布として視覚化する処理をコンピュータで実現することができる。

【 0069 】

以上、本発明を実施形態を基に説明した。これらの実施形態は例示であり、それらの各構成要素や各処理プロセスの組合せにいろいろな変形例が可能なこと、またそうした変形例も本発明の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

【 0070 】

例えば、断層撮影を行うことにより、深さの異なる面ごとにひずみ量や応力の分布を取得してもよい。本変形例によれば、3 次元材料の内部のひずみ量や応力分布を得ることができる。

【 0071 】

これらの各変形例は実施の形態と同様の作用、効果を奏する。

【 0072 】

上述した各実施形態と変形例の任意の組み合わせもまた本発明の実施形態として有用である。組み合わせによって生じる新たな実施形態は、組み合わせられる各実施形態および変形例それぞれの効果をあわせもつ。

【 0073 】

本発明による手法は様々な材料に低コストで適用が可能であり、材料の評価、製法選定、材料性能向上などに資することができるので、産業上の利用性が極めて高い。

【 産業上の利用可能性 】

【 0074 】

本発明は、応力およびひずみ量の分布を表示する方法、装置およびプログラムに利用可能である。

10

20

30

40

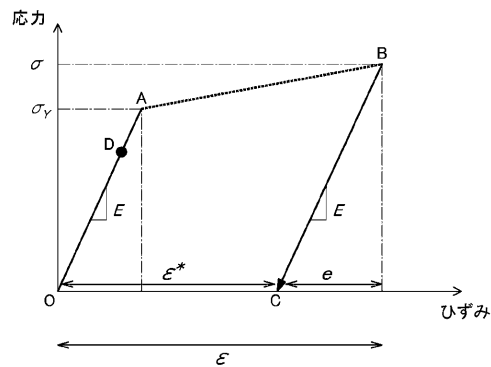
50

【符号の説明】

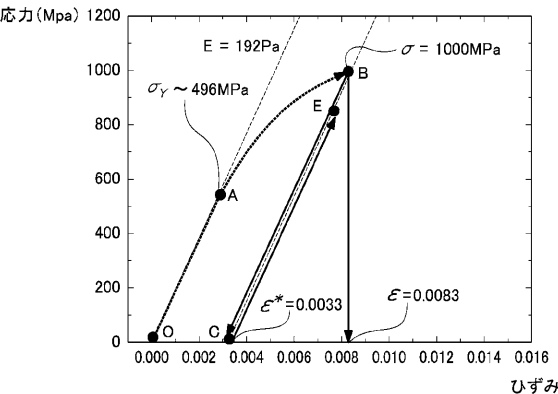
【 0 0 7 5 】

- S 1 . . . 負荷前および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップ、
- S 2 . . . 負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとのひずみ量を計測するステップ、
- S 3 . . . 計測されたひずみ量の分布を各画素位置に表示するステップ、
- S 4 . . . 負荷前、負荷時および除荷後の試料表面の画像を撮影するステップ、
- S 5 . . . 負荷前の画像と除荷後の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第 1 のひずみ量を計測するステップ、
- S 6 . . . 負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測するステップ、 10
- S 7 . . . 第 1 のひずみ量と第 2 のひずみ量との差分に基づき、画素位置ごとの応力を算出するステップ、
- S 8 . . . 算出された応力の分布を各画素位置に表示するステップ、
- S 9 . . . 前回の負荷および除荷で得られた応力分布と、今回の負荷および除荷で得られた応力分布との間で、同じ画素位置に表示された応力同士の差分を算出するステップ、
- S 1 0 . . . 差分が所定の閾値以上である画素の位置を表示するステップ、
- S 1 1 0 . . . 差分を、画素位置ごとに所定の応力値の範囲別に度数分布表示するステップ、
- S 1 1 . . . 負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関に基づき、画素位置ごとの第 2 のひずみ量を計測し、負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素を検出するステップ、 20
- S 1 2 . . . 負荷前の画像と負荷時の画像との間の相関の最大値が所定の閾値以下となる画素の位置を表示するステップ、
- S 1 3 . . . 負荷前、負荷時および除荷後の多結晶金属材料試料表面の画像を顕微鏡カメラを用いて撮影するステップ、
- S 1 4 . . . 試料の金属結晶の方位を検出するステップ、
- S 1 5 . . . 検出した金属結晶の方位を金属結晶ごとに表示するステップ、
- 1 . . . 応力表示装置、
- 1 0 . . . 撮影部、 30
- 2 0 . . . ひずみ量計測部、
- 3 0 . . . 応力算出部、
- 4 0 . . . 表示部

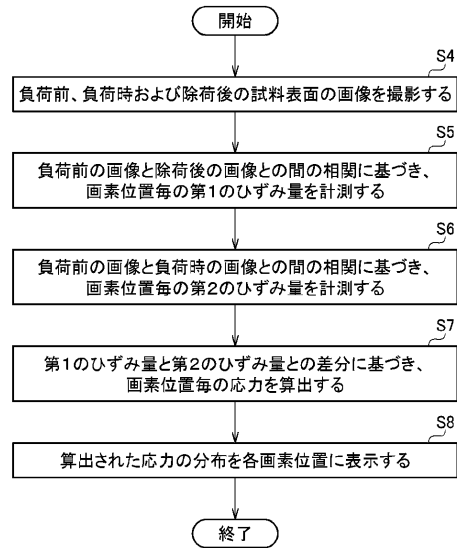
【 図 1 】



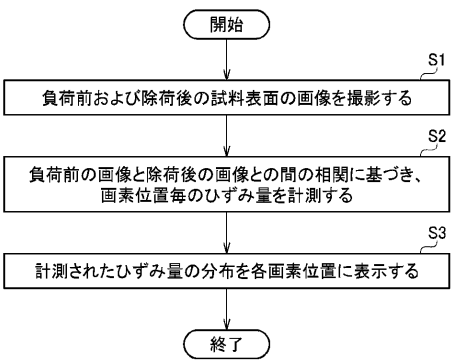
【 図 2 】



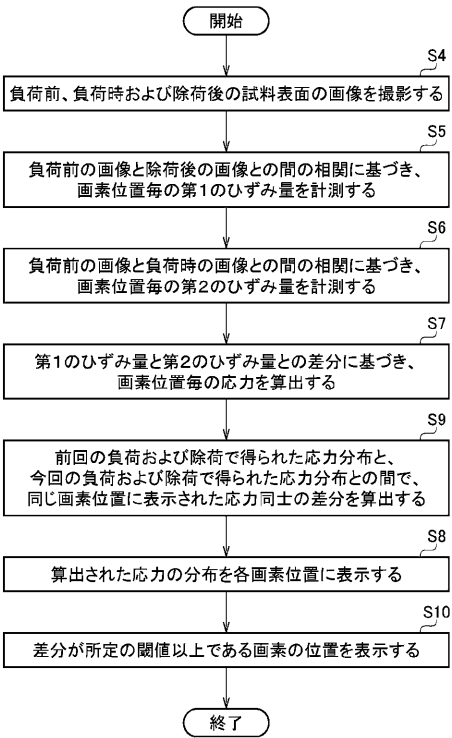
【 図 4 】



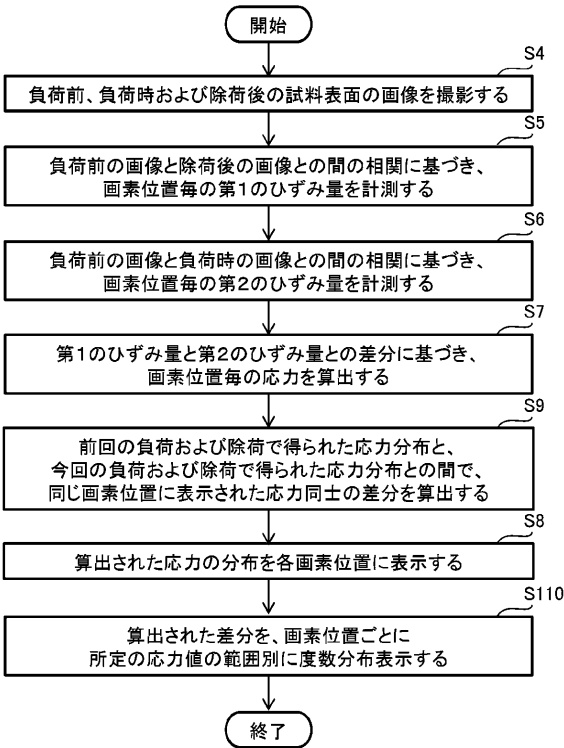
【 図 3 】



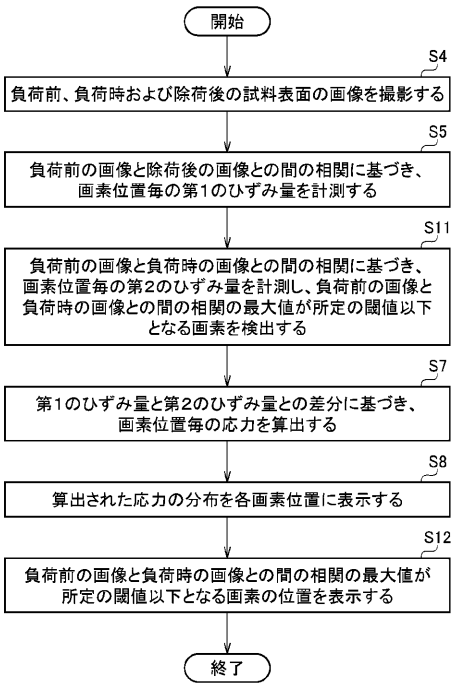
【 図 5 】



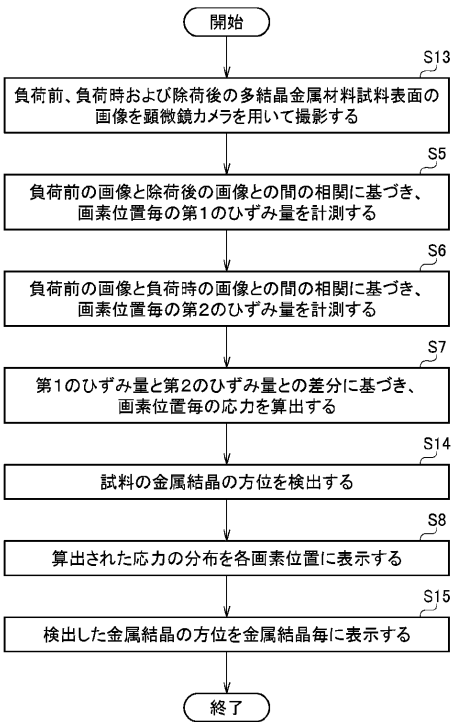
【図 6】



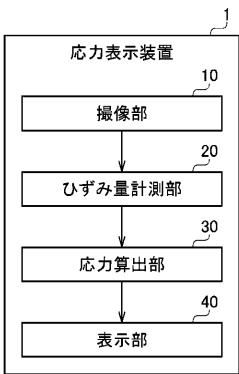
【図 7】



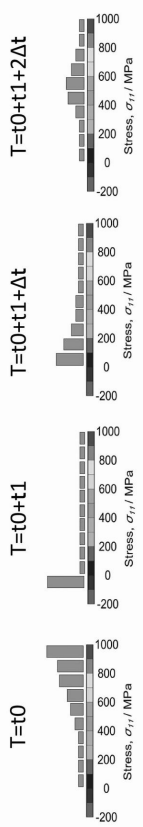
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 4 - 1 1 5 2 8 1 (J P , A)
特開 2 0 1 6 - 2 0 6 1 0 4 (J P , A)
特開 2 0 1 6 - 8 5 1 5 3 (J P , A)
中国特許出願公開第 1 0 6 3 7 0 3 3 4 (C N , A)
米国特許第 4 5 9 1 9 9 6 (U S , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
G 0 1 L 5 / 0 0 - 5 / 2 8
G 0 1 L 1 / 0 0 - 1 / 2 6
G 0 1 N 3 / 0 0 - 3 / 6 2