

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710099

研究課題名(和文)新概念パルス中性子CT法による3D応力ひずみイメージング

研究課題名(英文)Three-dimensional stress-strain imaging by a new-type pulsed neutron tomography

研究代表者

佐藤 博隆 (Sato, Hirotaka)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30610779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ブラッグエッジイメージングで得られる結晶格子ひずみ情報を、CTを適用することにより、3次元空間に渡って広くイメージングすることが望まれている。しかし、ひずみは観測方向を変えると観測値が変わってしまうテンソル物理量に分類されるという課題があるため、新たなCT技術「テンソルCT法」の開発を行った。その結果、観測される値に含まれている複数のスカラー要素を個別にCT画像再構成すれば、テンソル物理量のCTは可能であることがわかった。実際にML-EM型テンソルCTアルゴリズムを開発した結果、「角度によって異なる重みをかけた逆投影」という過程が必須であることを明らかにすると共に、ひずみのCTを成功させた。

研究成果の概要(英文)：It is expected that three-dimensional imaging of strain information obtained by the neutron Bragg-edge imaging is achieved by the computed tomography (CT) technique. However, since the strain is the tensor physical quantity which is changed by the observing direction, strain tomography is impossible for traditional CT techniques. Therefore, a new CT image reconstruction technique, the tensor CT algorithm, was developed. As a result, it was found that the tensor CT is possible by individual reconstruction of each scalar component included in the observed tensor quantity. Furthermore, it was also found that an algorithm of back-projection of angle-dependent weight in ML-EM is important, and finally strain tomography was successfully carried out.

研究分野：中性子応用工学

キーワード：中性子 イメージング ブラッグエッジ ひずみ テンソルCT

1. 研究開始当初の背景

パルス中性子を利用したブラッグエッジイメージングは、構造材料や機能材料の微視的なバルク結晶組織構造情報を広範囲(人間スケール、数十 cm)に渡って非破壊的に定量評価できる新しい材料解析ツールである。解析できる情報は、結晶構造・結晶相・集合組織(結晶方位)・結晶子サイズ・結晶格子ひずみと多岐に渡り、工学材料回折法と同様な情報を「可視化」できることが特長である。

これまで、ブラッグエッジイメージングで得られる結晶組織構造情報の1つである結晶格子ひずみは、いわゆるレントゲン撮影(ラジオグラフィ)の測定体系で定量的イメージングが行われてきた。近年、この情報をCT(Computed Tomography; 計算機断層撮像法)を適用することにより、3次元空間に渡って広くイメージングすることが、材料インフォマティクスの観点から望まれるようになった。これにより、材料をより多面的・多角的に評価することが可能になるためである。しかし、ひずみは、これまでのCT技術で取り扱ってきた物質の「密度」や「屈折率」といった情報とは異なり、CTの適用は容易ではない。なぜならば、前者は観測方向を変えても観測値が変わらないスカラーの物理量であるのに対し、後者は観測方向を変えると観測値が変わってしまうベクトルあるいはテンソルの物理量に分類されるためである。そのため、従来のCT技術では結晶格子ひずみのCTを実現することはできないため、新たなCT技術「テンソルCT法」の開発が必要であると考えた。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、結晶格子ひずみのようなテンソルの物理量でもCT画像再構成が可能な「テンソルCT」アルゴリズムを開発することを目的として、アルゴリズムの構築ならびに、コンピュータプログラムの開発を行った。

3. 研究の方法

まず、テンソルCTアルゴリズムの開発に当たり、テンソルCTで考慮しなければならない点を、ひずみテンソルの考察によって明確化することを行った。図1に、ある軸から角度 ϕ ならびに ψ 傾いた方向に沿って観測されるひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ の概念図を示す。また、 $\varepsilon_{\phi\psi}$ は、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi\psi} = & \varepsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi \\ & + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi \sin^2 \psi \\ & + \varepsilon_{23} \sin \phi \sin 2\psi + \varepsilon_{31} \cos \phi \sin 2\psi \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで、 ε_{11} 、 ε_{22} ならびに ε_{33} は、それぞれ軸1、2、3に関する垂直ひずみ、 ε_{12} 、 ε_{23} ならびに ε_{31} は、それぞれ軸1から2、2から3、3から1に関するせん断ひずみである。

これら6つのスカラー要素が、 \sin や \cos で記述されている ϕ ならびに ψ の関数である角度依存係数によって線形結合されているため、ある位置のひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ は観測方向によって観測値が変わるのである。しかし、観測される値は複数のスカラー要素(ε_{11} 、 ε_{22} 、 ε_{33} 、 ε_{12} 、 ε_{23} ならびに ε_{31})から構成されているため、これらを個別にCT画像再構成すれば、テンソル物理量のCTは可能ということになる。

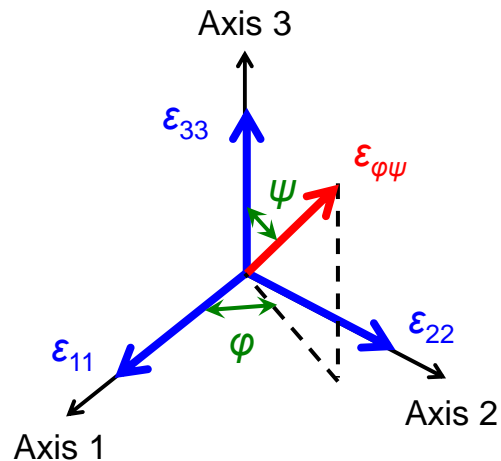


図1: ひずみテンソル $\varepsilon_{\phi\psi}$ のスカラー要素。

次に、具体的なアルゴリズムの構築を行ったので、その結果について述べる。この問題は非線形問題である。そのため、フーリエ変換やフィルター補正逆投影、重畳法といったいわゆる解析的手法をベースとしたCT画像再構成法では、この問題は解けないことが予想された。そのため、テンソルCT法の開発においては、逐次近似法をベースとしたアルゴリズム開発を行った。その結果、ML-EM(Maximum Likelihood - Expectation Maximization)法をベースとしたアルゴリズムを完成させたので、その概要について述べる。式(2)は、開発されたML-EMテンソルCTアルゴリズムの k 回目から $k+1$ 回目の逐次近似式を表す。また、図2は各パラメータの定義を表す。

$$\varepsilon_{ij}^{k+1} = \frac{\varepsilon_{ij}^k}{\sum_{d=1}^D C_{id} A_{ijd}^n} \sum_{d=1}^D \frac{p_d C_{id} A_{ijd}^n}{\sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^J \varepsilon_{i'j'}^k C_{id} A_{i'j'd}} \quad (2)$$

ε はテンソル量を表し、式(1)の6つのスカラー要素に一致する。 i はCT画像の断面の位置を表す(全部で I 個)、 j はテンソル量 ε_i の j 番目のスカラー要素を表す(全部で J 個)、 d は検出器画素を表す(全部で D 個)、 C_{id} は検出器 d によって観測される位置 i の幾何学的検出確率である。 A_{ijd} はテンソルCTにおいて最も重要なパラメータであり、検出器 d

により観測される位置 i の j 番目のテンソル要素の検出確率である。 A_{ijd} は式 (1) の \sin や \cos で表された角度依存係数である。 n は ML-EM の逆投影過程における A_{ijd} の重みを表現する。この「角度によって異なる重みをかけた逆投影」が、各テンソル要素を個別に CT 画像再構成する際に必須となる。 p_d はいわゆる投影データであり、実際のひずみ CT では、結晶格子面間隔と中性子透過パスの長さに乗じて、ひずみの投影データとしている。式 (2) を用いることによって、ひずみテンソルの 2 次元断面分布 (3 次元分布) の最尤推定を行う。

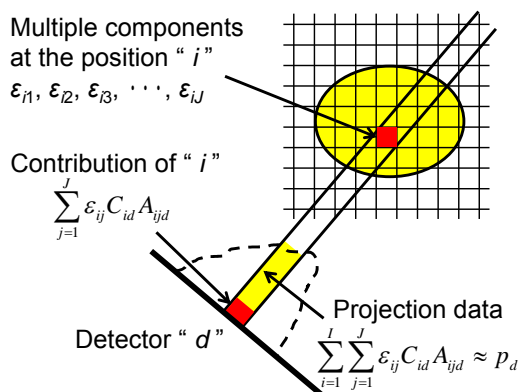


図 2: ML-EM テンソル CT 法のパラメータの定義。

この方法を用いて、中性子回折法を用いたひずみ解析のための国際標準試料「VAMAS」を例に、ひずみ CT の計算機シミュレーションを行った結果について述べる。VAMAS 試料は高さ 5 cm の円柱状試料で、直径 5 cm・肉厚 2.5 cm のリング (円筒) の中に、直径 2.5 cm のプラグ (円柱) を「冷やし詰め」したものである。VAMAS 試料は、図 3 に示すような表式で表される軸対称のひずみ分布を有している。この場合、式 (1) は以下のように書き直される。

$$\varepsilon_{\phi 90^\circ}(r, \theta) = \varepsilon_{\theta\theta}(r, \theta) \cos^2 \phi(r, \theta) + \varepsilon_{rr}(r, \theta) \sin^2 \phi(r, \theta). \quad (3)$$

3 つの主軸 (周方向 θ (図 1 の軸 1 に相当)、径方向 r (図 1 の軸 2 に相当)、軸方向 z (図 1 の軸 3 に相当)) があり、断面内の座標は (r, θ) で表されている。この時、断面内のひずみは、2 つの垂直ひずみ (周ひずみ $\varepsilon_{\theta\theta}$ と径ひずみ ε_{rr}) のみで記述することができ、それぞれが軸対称な分布を有していることが本試料のひずみ分布の特徴である。

この試料について、まずパルス中性子を利用したブラッグエッジイメージング実験で得られる結晶格子面間隔の 2 次元分布の径依存性を計算した。Al {111} の結晶格子面間隔に関する結果を図 4 に示す。

$$\varepsilon_{\phi 90^\circ}(r, \theta) = \varepsilon_{\theta\theta}(r, \theta) \cos^2 \phi(r, \theta) + \varepsilon_{rr}(r, \theta) \sin^2 \phi(r, \theta)$$

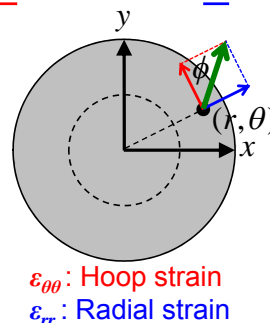


図 3: 軸対称ひずみ分布の表式。

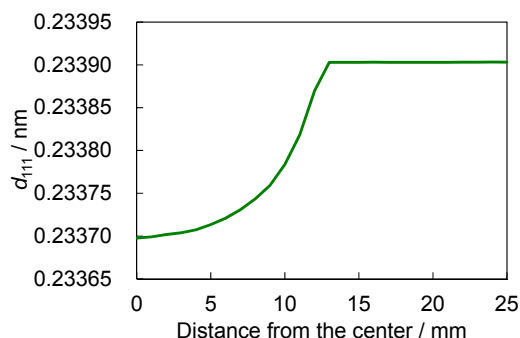


図 4: VAMAS 試料の Al {111} 結晶格子面間隔の径依存性。

このデータを ML-EM 型テンソル CT 法により CT 画像処理を行った。軸対称試料であるため、全ての方向に関して、ある 1 方向からのデータ (図 4) が同様に得られるものとして仮定し、16 方向からの投影データを作成し、CT 画像再構成を行った。ML-EM の逐次近似回数は 30 回とした。これは収束に十分な回数であることが、事前のファントム試験により明らかになっている。これにより得られた結晶格子面間隔 d の CT 画像を、 $\varepsilon = (d - d_0) / d_0$ (d_0 は無ひずみ状態の結晶格子面間隔) という式を用いて、ひずみの CT 画像へと最終的に変換した。これは、ML-EM アルゴリズムが、再構成値が負の値とならないようになっているための措置である (面間隔は常に正の値だが、ひずみは負の値も持ち得る)。

4. 研究成果

図 5 にひずみ分布の理論画像 (x 方向ひずみに換算)、図 6 にひずみ分布の CT 再構成画像 (x 方向ひずみに換算)、図 7 にそれぞれを周 (hoop) ひずみと径 (radial) ひずみに関して比較した結果を示す。この結果から、周ひずみは高確度・高精度な CT 画像再構成ができていたことがわかった。一方で径ひずみは一樣な分布を示すという、実際とは異なる結果を得た。非軸対称ひずみ分布の CT に関するシミュレーションベースの研究から、ML-EM 型テンソル CT においては、各テンソル要素の「方向」に、値が平均化されてしま

うという作用が、テンソル CT に必須な「角度によって異なる重みをかけた逆投影」により起こるということが明らかとなった。例えば、周ひずみは周方向に、径ひずみは径方向に平均化されてしまうのである。周ひずみは周方向に関して同じ値であるため、この平均化作用が働いて確度が高くなるのだが、径ひずみは径方向に平均化されてしまうと断層全体に渡って同じ値を示す。そのため図 7 のような結果を得たのである。しかし、この現象を引き起こす「角度によって異なる重みをかけた逆投影」が無ければテンソル CT は成立しないため、この逆投影過程の最適化が今後の発展にとって最も重要なポイントとなる。

以上のように、テンソル物理量の CT 画像再構成（テンソル CT）が可能であるということが本研究により明らかとなった。また、そのアルゴリズムの構築ならびにコンピュータプログラムの開発にも成功した。

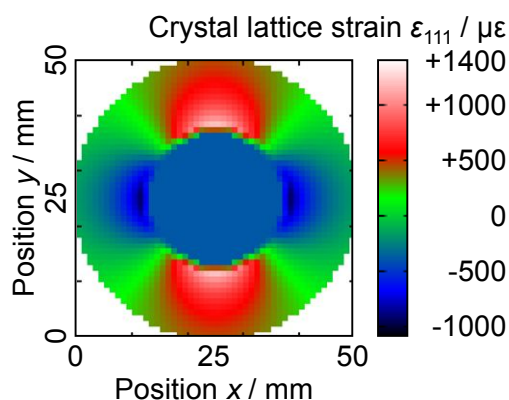


図 5 : x 方向ひずみの画像 (理論値)

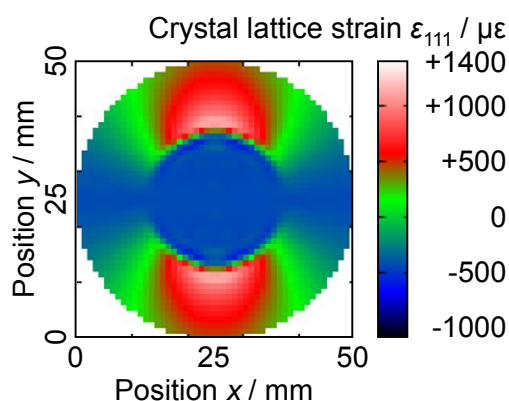


図 6 : x 方向ひずみの画像 (再構成値)

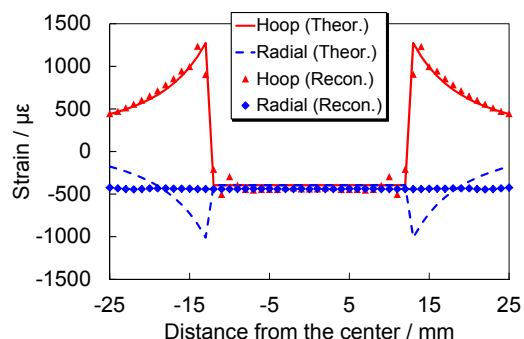


図 7 : 周ひずみ・径ひずみの断層分布の理論値と再構成値の比較。

本研究は、国際的には、中性子イメージングや材料工学の国際会議などで招待講演を行い、高い評価を受けている。特に、イメージングの国際会議では、新しい CT 画像再構成法ということから、ベクトル情報を取り扱う磁場イメージングへの応用に関して期待を受けた。国内においても、中性子科学・鉄鋼材料研究の学会において招待講演を行い、それぞれの分野から高い評価を受けたと言える。X 線イメージングの専門家からも、CT 技術の新しい考え方ということで、今後の発展に対し期待を受けた。このように、中性子科学・中性子イメージング・材料工学・画像工学など、多様な分野から高い評価を受けていると言える。

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 2 件)

H. Sato, Y. Shiota, Y. Todaka, T. Shinohara, T. Kamiyama, M. Ohnuma, M. Furusaka and Y. Kiyonagi, Radiographic and Tomographic Neutron Bragg Imaging for Quantitative Visualization of Wide Area Crystalline Structural Information, Materials Science Forum, Volumes 783-786, pp. 2109-2114, 2014(査読有), DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2109

佐藤博隆, 中性子透過ブラッグエッジ法による 2D/3D ひずみイメージング, 日本材料学会第 171 回 X 線材料強度部門委員会研究討論会資料, pp. 1-8, 2013 (査読無)

[学会発表](計 8 件)

佐藤博隆, 塩田佳徳, 篠原武尚, 加美山隆, 大沼正人, 古坂道弘, 鬼柳善明, ブラッグエッジひずみトモグラフィのためのテンソル CT 法の開発状況, 日本中性子科学会第 14 回年会, 北海道

立道民活動センター「かでの2・7」, 札幌, 2014年12月12日(口頭発表・依頼講演)

佐藤博隆, パルス中性子イメージングによる結晶組織解析の現状, 日本鉄鋼協会第168回秋季講演大会, 名古屋大学, 名古屋, 2014年9月26日(口頭発表・依頼講演)

H. Sato, T. Shinohara, T. Kamiyama, M. Ohnuma, M. Furusaka and Y. Kiyanagi, Radiographic and Tomographic Neutron Bragg Imaging for Quantitative Visualization of Wide Area Crystalline Structural Information, International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC '2013), Las Vegas, USA, 4th December, 2013 (口頭発表・招待講演)

佐藤博隆, 中性子透過ブラッグエッジ法による2D/3D ひずみイメージング, 日本材料学会第171回X線材料強度部門委員会, 北海道大学, 札幌, 2013年10月4日(口頭発表・招待講演)

H. Sato, Y. Shiota, H. Hasemi, S. Uno, T. Shinohara, T. Kamiyama, M. Furusaka and Y. Kiyanagi, Versatile Strain Tomography by Bragg-edge Neutron Transmission with the Tensor CT Method, International Conference on Neutron Scattering 2013 (ICNS2013), Edinburgh, UK, 10th July, 2013 (ポスター発表)

H. Sato, Y. Shiota, H. Hasemi, S. Uno, T. Shinohara, T. Kamiyama, M. Furusaka and Y. Kiyanagi, Versatile Strain Tomography by Bragg-Edge Neutron Transmission with the Tensor CT Method, 5th International Workshop on Neutron Wavelength Dependent Imaging (NEUWAVE-5), Lund, Sweden, 23rd April, 2013 (口頭発表)

佐藤博隆, パルス中性子透過法による結晶組織構造情報のイメージング, 日本学術会議シンポジウム「物性物理学・一般物理学の未来を語る」, 日本学術会議, 東京, 2013年1月15日(ポスター発表・依頼講演)

佐藤博隆, 塩田佳徳, 加美山隆, 鬼柳善明, 篠原武尚, パルス中性子トモグラフィのためのひずみテンソルCT法の開発, 日本中性子科学会第12回年会, 京都大学, 京都, 2012年12月10日(ポスター発表)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 博隆 (SATO, Hirotaka)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 30610779

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: