

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17988

研究課題名(和文) Development of high-accuracy and large-view-field deformation measurement technique to investigate micro-nano-scale deformation distributions around interfaces

研究課題名(英文) Development of high-accuracy and large-view-field deformation measurement technique to investigate micro-nano-scale deformation distributions around interfaces

研究代表者

王 慶華 (Wang, Qinghua)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：20726856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロナノスケールで高精度・広視野な変形測定を実現するために、新たに2段モアレ法と倍増モアレ法を開発した。広い視野で高感度なひずみ計測が可能で、かつ試験片又は走査方向を回転させることなく2次元ひずみ分布の高精度計測が可能になった。レーザー顕微鏡で3点曲げ試験におけるCFRP積層試験片のマイクロスケールひずみ分布を測定した。界面近傍に現れたせん断ひずみ集中を用いてCFRPの層間せん断変形の挙動を評価し、引張ひずみ集中による荷重方向に沿った微小き裂の位置を特定した。本研究成果により複合材料の破壊メカニズムの解明と最適化設計に重要な変形情報を提供することができる。

研究成果の概要(英文)：To achieve high-accuracy and large-view-field deformation measurement, the second-order moire method and the reconstructed multiplication moire method have been developed. Two-dimensional strain distributions at the micron and nano scales in a large field of view are able to be accurately measured with high sensitivity without rotating the specimen stage or the scanning direction. The microscale strain distributions of laminated CFRP specimens have been investigated under 3-point bending tests. The shear strain concentrations emerged around the interfaces have been used to evaluate the interlaminar shear behaviors, and the tensile strain concentrations along the loading direction have pointed out the micro crack locations of CFRP. This research is able to provide important deformation information for understanding the failure mechanisms and facilitating optimization design of composite materials.

研究分野：工学

キーワード：ナノマイクロ材料力学 非破壊計測 表面、界面 変形評価 ひずみ分布 光学手法 画像処理

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙、自動車、半導体などの分野において、破壊モードの1つである複合材料の界面での損傷は問題視されている。界面周辺の微小変形は、亀裂伝播および不安定性挙動を評価するために非常に重要である。材料の高強度化を図るうえでは、マイクロナノスケールで界面近傍の全視野変形を測定する必要がある。

構造物の微小変形計測に一般的に使用される光学的全視野計測法として、デジタル画像相関法、幾何学的位相分析、縞画像の位相解析方法(例えば、フーリエ変換法、位相シフト法、時空位相シフト法等)、とモアレ法がある。

デジタル画像相関法は、高い測定精度を有する反面測定中外乱ノイズの影響を受けやすいのが欠点である。幾何学的位相分析とフーリエ変換法は、使用する格子を直接観察することから視野が狭い(視野の幅は格子ピッチの通常100倍未満)。位相シフト法と時空位相シフト法は複数枚の縞画像を撮影する必要があり、動的計測への適用ができず、高価なシフト装置が必要である。

モアレ法は、変形の前後のモアレ縞の変化から変形分布を非破壊的測定する有効的な方法である。顕微鏡走査モアレ法とサンプリングモアレ法を含む従来のモアレ法では、視野と測定精度のバランスをとることは困難である。走査モアレ法は、格子ピッチの500~2000倍の大きさの視野を有するが、2次元測定に2回の走査が必要となり、変形の測定精度は高くない。サンプリングモアレ法では、空間位相シフト法を利用して変形測定精度を向上できるが、解析領域は走査モアレ法より狭く、高精度と広視野を同時に実現できない。このことから、高い変形計測精度と広視野を同時に達成すること方法が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロナノスケール変形測定のための新たな高精度広視野変形計測技術を提案し、界面周辺の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の変形分布を測定する。

1) 変形測定のための新たな2段モアレ法を提案する。この考え方は、走査モアレ法とサンプリングモアレ法を組み合わせることで2段モアレ縞を生成することである。マイクロナノスケール変形測定を目的に、高精度、広視野、全視野、非接触の利点を有する。

2) 試料ステージや顕微鏡の走査方向を90度で回転することなく、一つの走査モアレパターンを使用して、2次元の高感度な変位とひずみ分布を同時に測定することができる技術を開発する。

3) 機械的3点曲げ負荷におけるCFRP試料の界面周辺のマイクロスケールでのひずみ分布を測定する。全視野変形の特徴から界面剝離挙動を評価する。

3. 研究の方法

変形キャリアとしての役割を果たす微小格子の作製について、自動研磨機で研磨した試料表面に、紫外線ナノインプリントレジストによる格子を作製した(図1)。ここでは使用したナノインプリントレジストはPAK01である。格子表面に顕微鏡観察を容易にするため白金蒸着を行った。

高精度・広視野な微小変形測定方法の開発について、レーザー走査顕微鏡と走査電子顕微鏡で格子画像又は走査モアレ縞を記録し、走査とサンプリングモアレ技術に基づいて新たなモアレ技術を開発した。開発した2段モアレ法(高精度・広視野)の精度検証のために、数値シミュレーションおよびレーザー走査顕微鏡でアルミニウム(Al)試料の引張実験を行った。開発した倍増モアレ法(高感度・広視野)の検証のために、シリコン(Si)試料の表面に倍増モアレとレーザー走査モアレパターンを比較し、ひずみ測定感度を向上されることに関する理論計算を行った。

CFRP試料の変形分布測定について、レーザー走査顕微鏡で三点曲げ試験と三点曲げ疲労試験を行い、試料表面の格子画像とモアレ縞による微小ひずみ分布を測定した。CFRPの異なる層間の界面周辺のひずみ集中から、層間剝離挙動を評価した。

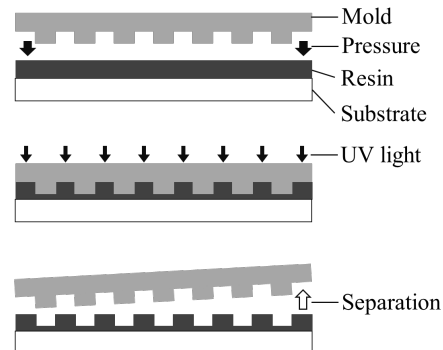


Fig. 1 Micro/nano-scale grid fabrication process by ultraviolet (UV) Nanoimprint lithography.

4. 研究成果

高精度広視野微小変形計測のための2段モアレ技術と倍増モアレ技術をそれぞれ開発し、CFRP試料の微小ひずみ分布を測定した。各成果の詳細説明を以下詳しく述べる。

(1) 2段モアレ法の開発(高精度広視野)

従来のモアレ法では視野と精度を両立させた変位・ひずみ計測は困難であった。そこでモアレ縞を新たなモアレ縞(2段モアレ法)を生成するための格子として扱うことで、従来と比較して10~100倍の視野で物体の変位・ひずみ分布を評価できる外乱に強い計測技術を開発した。

2段モアレ縞の形成原理は図2に示す。顕微鏡の走査線、またはカメラのピクセル配列、または仮想格子(ダウンサンプリングピクセル配列)、またはデジタル格子は、参照格

子とすることができる。試料の格子と参照格子間のわずかな不一致またはずれがある場合、従来のモアレ縞が試料の格子と参照格子との干渉から見れる(図 2(a))。従来のモアレ縞には、顕微鏡モアレ縞, CCD モアレ縞, サンプルモアレ縞またはデジタルモアレ縞が含まれている。これら従来のモアレ縞を格子として扱う。従来のモアレ縞の間隔 P_m に近いピッチ $T^{(2)}$ でダウンサンプリング処理を行い、ダウンサンプリングの開始点を 1 ピクセルずつ ($T^{(2)}-1$) 回ずらして、それぞれのダウンサンプリング画像に対して輝度補間を行えば、図 2(b) のように $T^{(2)}$ ステップの位相がシフトされた 2 段モアレ縞を得ることができる。このように、従来のモアレ縞を格子とみなし、空間的位相解析方法であるサンプリングモアレ法を適用することで、本来の広視野という特徴に加えて、高精度な解析も同時にできるようになる。

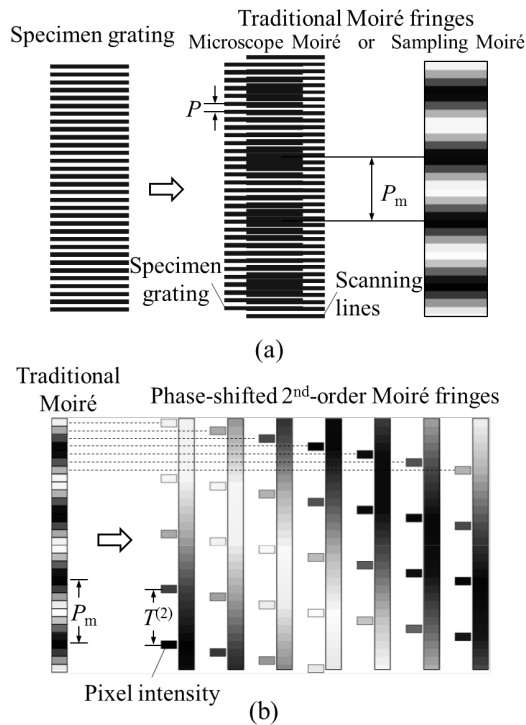


Fig. 2 Generation principle of 2nd-order Moiré: (a) formation of traditional 1st-order Moiré fringes; (b) generation of 2nd-order Moiré fringes.

変形計測のための 2 段モアレ法の妥当性と正確性をシミュレーションと実験により示す(図 3)。シミュレーションで 100μ ひずみを規則格子に与えたところ、2 段モアレ法による平均的ひずみ 101μ が得られた(図 3(a))。理論的ひずみ 100μ に比較すると計測誤差は僅か 1μ であり、本測定方法の正確性が確認できた。Al 試料の引張実験における、 $3 \mu\text{m}$ ピッチ格子からレーザー走査モアレ縞を記録し、2 段モアレ法によるひずみ分布を測定した。評価された平均的ひずみとひずみゲージから得られたひずみ値と良く一致し(図 3(b))、提案手法の妥当性と測定精

度を検証することができた。本成果によって、国内特許および海外 PCT を出願した(特願 2016-188217 と PCT/JP2017/20435)。

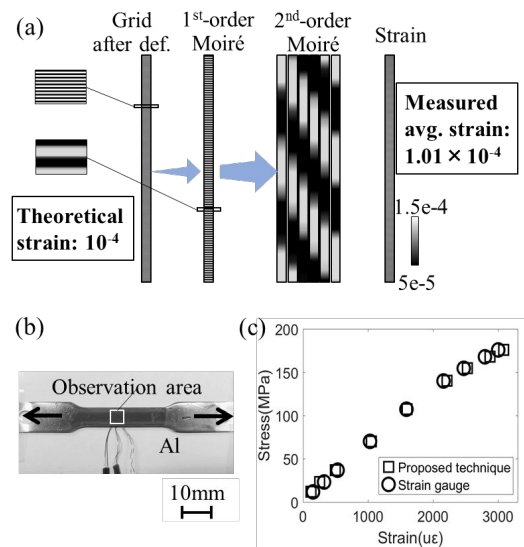


Fig. 3 Verification of the 2nd-order Moiré method for strain measurement: (a) simulation verification; (b) and (c) experimental verification from an aluminum tensile specimen under a laser scanning microscope.

(2) 倍増モアレ法の開発 (高感度広視野)

顕微鏡の倍率を連続的に変化させることは出来ないため、走査モアレ縞を得ることができないことがある。また 2 次元ひずみ分布を得るためには試料又は走査方向を 90° 回転させる必要があるし、回転誤差が生じ、高い精度でひずみ分布を計測することが難しいといった問題がある。そこで、格子画像から 2 画素サンプリングモアレの生成と合成による、ひずみ感度を向上させる倍増モアレ法を提案した(図 4)。この倍増モアレ法は走査モアレ法と比較して、同じ広い視野で 2 倍の感度を有するひずみ計測が可能で、かつ試験片を回転させることなく 2 次元ひずみ分布の計測が可能である。従来のサンプリングモアレ法と比較して、格子ピッチを 3 画素より大きくする必要はないため、より広い視野での変形特徴を把握することができる。

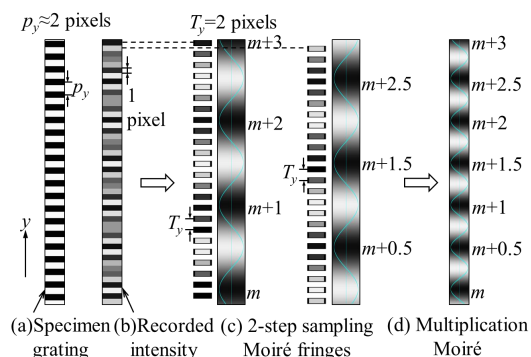


Fig.4 Generation principle of reconstructed multiplication Moiré pattern.

倍増モアレ法の有効性を実験と理論的導出より検証を行った。レーザー顕微鏡で Si 試料表面に $0.8\mu\text{m}$ ピッチ格子から生成した 2 ステップの 2 画素サンプリングモアレ縞の一つと走査モアレ縞は同じであることが証明された。走査モアレ法と比較して、2 ステップの 2 画素サンプリングモアレ縞の合成から生成した倍増モアレ縞は、ひずみ測定感度が 2 倍にすることが理論計算から証明された。

本技術による三点曲げ試験における CFRP 試料 ($1 \times 4 \times 22\text{mm}^3$) の微小ひずみ分布を測定した。三点曲げ試験の支点間距離は 16mm であった (図 5)。 $1 \times 22\text{mm}^2$ の面に $3\mu\text{m}$ ピッチ格子のレーザー顕微鏡画像から、2 ステップの 2 画素サンプリングモアレ縞を生成し、倍増モアレ縞を合成し、2 次元ひずみ分布を測定した。参照ひずみを得るため曲げ試験片底部の大きさ $4 \times 22\text{mm}^2$ の面にひずみゲージを貼り付けた。異なる負荷でひずみ分布を可視化し、CFRP 試料の変形特徴を分析した。

図 5(c)-(d) にひずみゲージが計測するひずみ値が 5330μ の時に、倍増モアレ縞と評価されたひずみ分布を示す。ひずみについては試験片上部で x 方向に圧縮ひずみが、 y 方向は引張ひずみが発生し、試験片下部では x 方向に引張ひずみが、 y 方向に圧縮ひずみが発生している。せん断ひずみに関しては左右で符号が反転する挙動を示し、軸方向ひずみと比較してせん断ひずみの値は大きいことがわかる。

これらの研究成果が国際雑誌 Applied Optics(2016) と Journal of Visualized Experiments(2017) にそれぞれ掲載された。

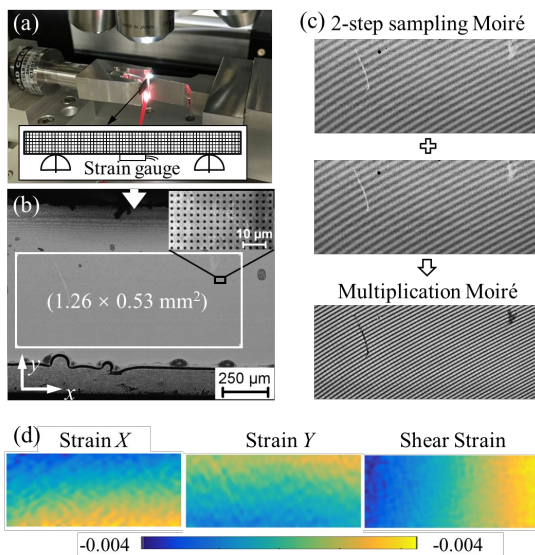


Fig. 5 Deformation measurement results of CFRP: (a) experimental setup of the three-point bending test under a laser microscope; (b) the observed surface with a micro grid; (c) multiplication Moiré pattern when the strain gauge value was 0.00533; (d) the measured strain distributions.

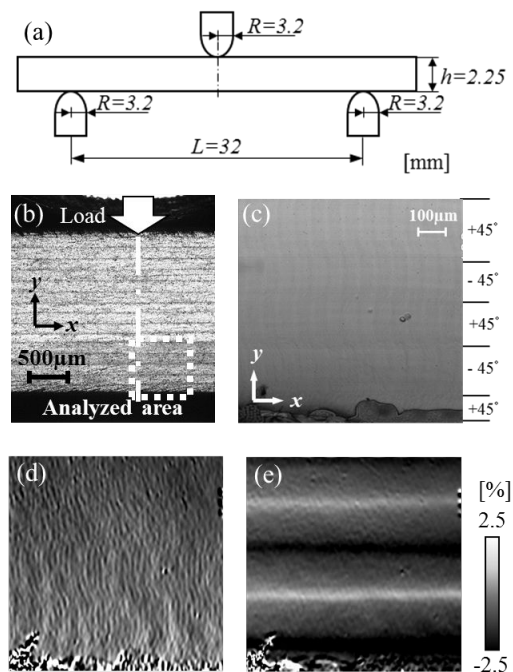


Fig. 6 Deformation measurement results of laminated CFRP: (a) experimental setup under a laser scanning microscope; (b) the observed specimen surface; (c) grid image; (d) x -direction strain and (e) shear strain distributions when the maximum bending stress was 199 MPa.

(3) CFRP 層間剥離挙動の評価

モアレ技術を用いて、三点曲げ試験と三点曲げ疲労試験における CFRP 積層試験片の異なる層間の界面周辺のマイクロスケールでのひずみ分布を測定した。CFRP の層間剥離挙動を定量的に評価した。

三点曲げ試験では、寸法を幅 $11.6 \times$ 長さ $52.4 \times$ 板厚 2.25mm^3 、積層構成 $[\pm 45^\circ]_{4S}$ 、層厚約 0.14mm としたアングルプライ CFRP 積層板を用いた。試験片端面に $3\mu\text{m}$ ピッチの微細規則格子を付与した。レーザー顕微鏡で三点曲げ試験の支点間距離は 32mm であり、試験概略図及び試験の様子を図 6(a)-(b) に示す。

試験片の引張応力面である下端中央部の約 $640 \times 640\mu\text{m}^2$ におけるひずみ分布を計測した。図 6(c)-(e) に試料の最大曲げ応力が 199MPa の時の格子画像、試験片長手方向 (x) のひずみ分布とせん断ひずみ分布の結果を示す。

長手方向 (x) のひずみ分布は最下層側から不均一なひずみが発生した。ひずみ集中の位置を起点としてマイクロき裂が発生しやすいことを確認できた。せん断ひずみ分布に注目すると、層間上に線状の分布が発生していることが分かる。これは層間においてせん断応力が作用し、層間剥離の駆動力となることを示している。これらのひずみ分布は界面破壊メカニズムを理解するのに有用である。

本研究成果が評価され、日本実験力学会 2017 年度年次講演会優秀講演賞を受賞した。

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 6 件)

¹ Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Koyama, K. Tsuzaki, Two-dimensional Moiré Phase Analysis for Accurate Strain Distribution Measurement and Application in Crack Prediction, *Optics Express*, Vol. 25(12), pp. 13465-13480, 2017 (査読有). DOI: 10.1364/OE.25.013465

² Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Micro/Nano-scale Strain Distribution Measurement from Sampling Moiré Fringes, *Journal of Visualized Experiments*, Iss. 123, pp. e55739: 1-10, 2017 (査読有). DOI: 10.3791/55739

³ Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Kodaera, K. Suguro and N. Miyashita, Visualization and Automatic Detection of Defect Distribution in GaN Atomic Structure from Sampling moiré Phase, *Nanotechnology*, Vol. 28(45), pp. 455704: 1-7, 2017 (査読有).

DOI: 10.1088/1361-6528/aa8d83

⁴ Q. Wang, Y. Takashita, S. Ri, H. Tsuda, R. Kitamura, S. Ogihara, Influence of Working Distance on Microscale Strain Measurement under Laser Scanning Microscope from Moiré Fringes, *Proc. SPIE (icOPEN2016)*, Vol. 10250, pp. 102501N (5 pp), 2017 (査読有).

DOI: 10.1117/12.2266697

⁵ Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Digital Sampling Moiré as a Substitute for Microscope Scanning Moiré for High-sensitivity and Full-field Deformation Measurement at Micron/nano Scales, *Applied Optics*, Vol. 55(25), pp. 6858-6865, 2016 (査読有).

DOI: 10.1364/AO.55.006858

〔学会発表〕(計 12 件)

¹ Q. Wang, S. Ri, Y. Tanaka, M. Koyama, Visualization of Strain Concentrations in Composites Using Advanced Image Processing Techniques, *The 21st International Conference on Composites Materials (ICCM-21)*, Xi'an, China, Aug. 20-25, 2017.

² Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Advanced Moiré Techniques for Crack and Structural Health Monitoring, *International Conference on Optical and Photonics Engineering (icOPEN2016)*, Chengdu, China, Sep. 26-30, 2016.

³ 王慶華, 高下 陽右, 李志遠, 津田 浩, 喜多村 竜太, 荻原 慎二, 3 点曲げ試験における CFRP の層間せん断変形と微小き裂の評価, 日本実験力学会 2017 年度年次講演会, 岡山理科大学, 2017 年 8 月 28 日-30 日.

⁴ 王慶華, 李志遠, 津田 浩, モアレ縞による高感度広視野変位・ひずみ分布計測法, 日本実験力学会 2016 年度年次講演会, 近畿大学, 2016 年 9 月 1 日-3 日.

〔図書〕(計 1 件)

¹ Q. Wang, S. Ri, Y. Takashita, S. Orighara, Full-Field Measurements of Principal Strains and Orientations Using Moiré Fringes, *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, Vol. 3, Chapter 33, pp 251-259.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: 周期模様を利用した三次元形状・変位・ひずみ測定装置, 方法及びそのプログラム

発明者: 王慶華, 李志遠, 津田浩

権利者: (国) 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: PCT/JP2017/20435 (W02018/061321)

出願年月日: 2017 年 6 月 1 日

国内外の別: 国際

名称: モアレによる材料の欠陥分布の可視化方法およびその自動検出方法

発明者: 王慶華, 李志遠, 津田浩

権利者: (国) 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2017-001005

出願年月日: 2017 年 1 月 6 日

国内外の別: 国内

名称: 周期模様を利用した三次元形状・変位・ひずみ測定装置, 方法及びそのプログラム

発明者: 王慶華, 李志遠, 津田浩

権利者: (国) 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-188217

出願年月日: 2016 年 9 月 27 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

受賞歴 (計 2 件)

賞名: 第 27 回つくば奨励賞(実用化研究部門)

受賞日: 2017 年 11 月 21 日

受賞研究: モアレを利用したマルチスケール変位・ひずみ分布計測技術の開発

賞名: 日本実験力学会優秀講演賞

受賞日: 2017 年 9 月 20 日

受賞研究: 3 点曲げ試験における CFRP の層間せん断変形と微小き裂の評価

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王慶華 (WANG QINGHUA)

産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号: 20726856