

令和元年6月11日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05996

研究課題名(和文) 光学的マルチスケールひずみ分布計測法の開発と損傷メカニズムの実験的解明

研究課題名(英文) Development of optical multi-scale strain distribution measurement method and experimental elucidation of damage mechanism

研究代表者

李志遠 (Ri, Shien)

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・主任研究員

研究者番号：70509710

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)：本研究は、モアレ現象及び縞画像の位相解析技術を利用した光学的マルチスケール変位・ひずみ計測手法を開発し、CFRP複合材料および異種構造材料での損傷を実験的アプローチによりそのメカニズムを解明しようとするものである。マルチスケール計測を行うために、750nmピッチの小格子と15マイクロンピッチの大格子を混在したマルチスケール格子のモールドを作製した。より広視野で変形計測が行える2画素サンプリングモアレ法、高精度なひずみ測定が可能な2次元格子の2方向同時解析法をそれぞれ開発した。これらの手法をCFRP複合材の3点曲げ試験に適用し、高精度な垂直ひずみとせん断ひずみ分布の計測を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機や自動車などで使われる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は金属材料と異なり、炭素繊維と樹脂の複合材料であるゆえに複雑な変形挙動と破壊モードを示す。そのためミクロからマクロまでの一連の変形挙動を把握する必要がある。本研究は全視野かつ異なるスケールで同時に評価可能なマルチスケールひずみ分布を測定できる光学的手法を開発した。本開発技術はCFRP複合材や半導体チップ等の異種材料間での損傷メカニズムの解明に役立つ計測技術である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we develop an optical multi-scale displacement/strain measurement method using phase analysis technology of moire phenomenon and fringe image and try to clarify the mechanism of damage in CFRP composite materials and dissimilar structural materials by an experimental approach. In order to perform the multi-scale measurement, a multi-scale grating mold was fabricated, in which a small grating of 750 nm pitch and a large grating of 15-micron pitch were mixed. We have developed a two-pixel sampling moire method that can measure deformation with a wider field of view and a two-way simultaneous analysis method of a two-dimensional grid that can measure strain with high accuracy. By applying these methods to the 3-point bending test of CFRP composites, we could realize the measurement of normal and shear strain distributions with high accuracy.

研究分野：実験力学

キーワード：光学的手法 モアレ計測 マルチスケール ひずみ分布 サンプリングモアレ 位相解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) は軽量でありながら高い剛性・高強度の特性を持つため、近年航空機や自動車分野を中心に積極的に利用されるようになった。すでに実用されているボーイング787機においては、実に50%が複合材料である。しかしながら、CFRPは金属材料と異なり、炭素繊維と樹脂の複合材料であるゆえに複雑な変形挙動と破壊モードを示すことから、詳細な損傷メカニズムに関しては未だに明らかにされていないのが現状である。また航空機や車に使われている電子デバイスは、バンプ/チップ/アンダーフィルの異種材料の接合体であり、主に接合界面での損傷や亀裂の発生による動作不良が問題視されている。これらの損傷メカニズムを明らかにするためには、ミクロからマクロまでの一連の変形挙動を把握する必要があるが、従来よく用いられている変位センサやひずみゲージでは適用できず、全視野かつ異なるスケールで同時に評価可能なマルチスケールひずみ分布を測定できる光学的手法の導入が必要不可欠であり、その早期開発が急務となっている。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえて、本研究では、モアレ現象及び縞画像の位相解析技術を利用した光学的マルチスケール変位・ひずみ計測手法を開発し、CFRP複合材料および異種構造材料での損傷を実験的アプローチによりそのメカニズムを解明しようとするものである。3年継続より、()マルチスケール変位・ひずみ分布計測法の開発、()2次元格子の4方向解析による最大・最小主ひずみ決定法の考案、()高次元時空画像を活用したひずみ計測精度の向上、()3点曲げ試験によるCFRP複合材の損傷評価、()フリップチップのアンダーフィル材とバンプの熱ひずみ分布評価、()異種材料の損傷破壊のメカニズム解明、なる6項目の研究を推進し、複雑変形挙動を示す異種・複合材料のマルチスケール変位・ひずみ計測技術手法を確立すると共に複合材及び異種材料の損傷メカニズムを実験的に解明し、高性能・高信頼性のデバイス開発に役立つ設計指提供を目指す。

3. 研究の方法

構造材料表面に異なるピッチを有するマルチスケール格子を付与し、レーザー顕微鏡の低倍率レンズより広視野で試料全体のひずみ集中部を特定する。その後高倍率レンズより損傷部での高精度・高分解能なひずみ分布を解析できる一連の計測手法を開発する。初年度に基礎となる全視野マルチスケール解析法、時空画像によるひずみ精度の向上、最大・最小主ひずみの決定法なる3つのコア計測技術を開発した。次年度に異種・複合材であるCFRPの3点曲げ損傷評価実験、およびフリップチップの熱ひずみ分布評価実験を行い、最終年度に実験結果より損傷破壊のメカニズムの解明を試みた。3カ年の研究期間中、研究代表者と研究分担者に加えて、東京理科大学の学生2名が研究協力として参加し、計測原理開発及び材料評価実験を行った。

4. 研究成果

(1) マルチスケール格子の作製とマルチスケール変形測定

異なる空間周波数を有するマルチスケール格子を新たに設計し、大視野と小視野両方を最適なモアレ観察できるように、750nmピッチの小格子と15ミクロンピッチの大格子を混在したマルチスケール格子のモールドを作製した(図1)。作製したモールドを試料表面にマルチスケール格子を付与し、同一レーザー顕微鏡で異なる倍率観察を行った。その結果、それぞれの観察倍率で2方向のモアレ縞画像をサンプリングモアレ法より生成できることを確認できた。小視野での微細格子からきれいなモアレ縞画像を生成するために、フーリエ格子変換法を導入した。これにより、材料全体のひずみ集中部と界面での高分解能のひずみ分布を同時に評価できるようになった。

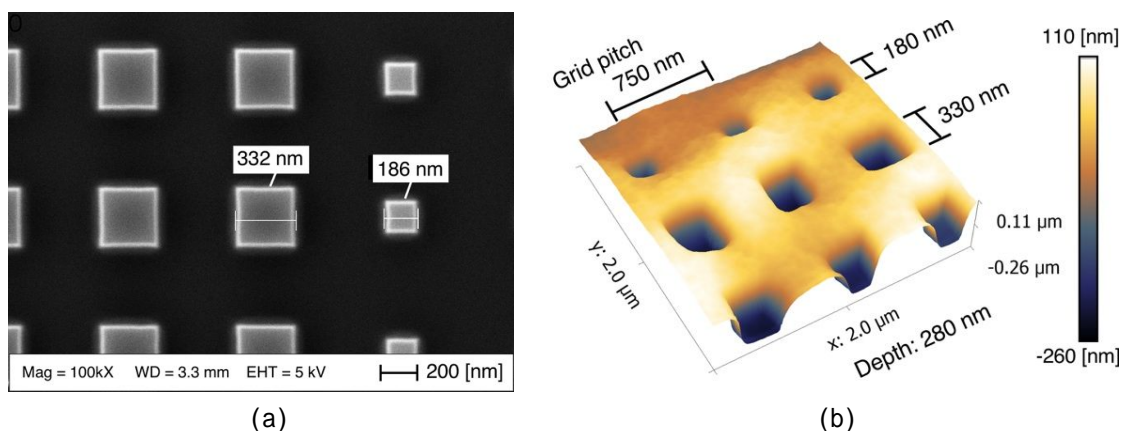


図1 作製したマルチスケール格子 : (a) マスターモールドのSEM像、(b) 作製格子のAFM像

(2) 広視野変形計測を実現する2画素サンプリングモアレ法の開発

モアレ法による変形計測では、格子ピッチの画素数と一度に計測できる視野はトレードオフの関係にあり、これまでのサンプリングモアレ法では、撮影された格子画像のピッチは3画素以上である必要があった。より広い視野でのひずみ分布計測を行えるように、本研究では新たに2画素サンプリングモアレ法を開発した。図2に2画素サンプリングモアレ法の原理を示す。試料表面に付与された微小格子を顕微鏡で約2画素となるような倍率で撮影し、2画素ごとに間引き処理により得られる2枚のモアレ縞から生成される新しい積モアレ縞から倍の感度でひずみを計測できた。同手法をSEM顕微鏡観察下のCFRPの3点曲げ試験へ適用し、図3に示す通りにx方向とy方向の垂直ひずみ分布が得られることを確認できた。

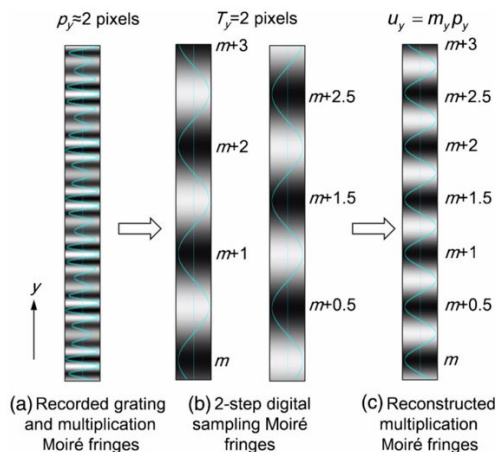


図2 2画素サンプリングモアレ法の原理

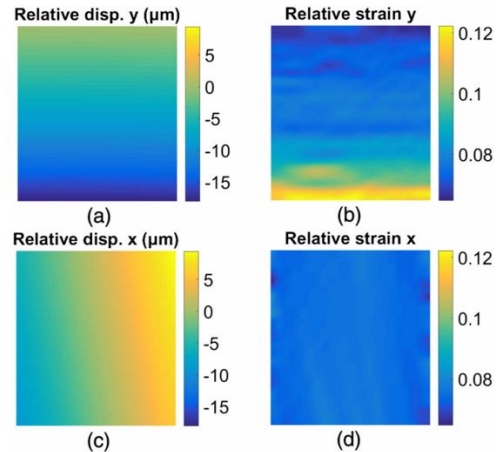


図3 CFRP試験片の広視野ひずみ測定結果

(3) 2次元格子の2方向同時解析法によるひずみ測定の上

材料表面の損傷評価を行ううえで重要となる最大・最小主ひずみ分布をより高精度で測定するため、新たに2次元格子の2方向同時解析によるせん断ひずみ分布測定法(特願2017-032645)を開発した。本開発手法は、2次元直交格子を用いて顕微鏡と試験片表面に貼り付けた格子の角度に依存しない高精度なひずみ分布算出法であり、従来評価困難だった複雑な変形挙動を示すCFRP複合材及び半導体チップ等の異種材料間での損傷メカニズムを実験的アプローチにより明らかにするうえで極めて重要である。

本技術をCFRP複合材の3点曲げ試験へ適用し、CFRPの損傷破壊の際にマトリックスクラック・層間剥離・繊維破断の3つに着目し、荷重の違いに伴う異なる撮像倍率での格子画像を取得した。異なるスケールでのひずみ分布をサンプリングモアレ法より測定し、曲げ応力による引張りひずみ分布と層間におけるせん断ひずみ分布を観察視野内で得ることができた(図4)。

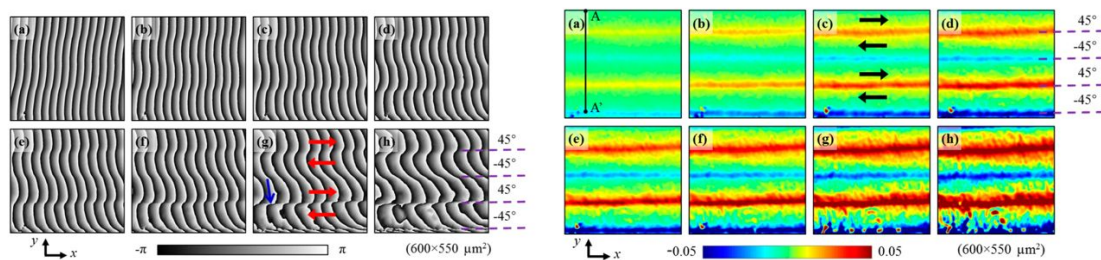


図4 CFRPの3点曲げ試験の変形測定結果：(左)モアレ縞の位相分布、(右)せん断ひずみ分布

(4) 広測定レンジの変位計測法の開発と斜め格子の活用

モアレ法を用いて構造物の大きな変位を測定する場合、格子ピッチの半分以上を超えると正しく変位量を測定できない問題点に対して、異なる2種類の格子ピッチを有するカラー格子による広レンジの変位測定方法(特願2017-159491)を考案した。加えて、細長いような試験片や構造物の変位を測定できるように、新たに斜め格子を用いた変形計測方法(特願2017-205147)を考案した。これらの計測方法の活用により、今後細長い形状を示す構造物における大変形の計測ができる可能性を見出した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Digital sampling moire as a substitute for microscope scanning Moire for high-sensitivity and full-field deformation measurement at micron/nano scales, *Applied Optics*, 査読有, 55 (2016), 6858-6865.

DOI: 10.1364/AO.55.006858

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Koyama, K. Tsuzaki, Two-dimensional Moire phase analysis for accurate strain distribution measurement and application in crack prediction, *Optics Express*, 査読有, 25 (2017) 13465-13480.

DOI: 10.1364/OE.25.013465

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Koyama, K. Suguro, N. Miyashita, Visualization and automatic detection of defect distribution in GaN atomic structure from sampling Moire phase, *Nanotechnology*, 査読有, 28 (2017) 455704 (7pp).

DOI: 10.1088/1361-6528/aa8d83

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, M. Koyama, Optical full-field strain measurement method from wrapped sampling Moire phase to minimize the influence of defects and its applications, *Optics and Lasers in Engineering*, 査読有, 110 (2018), 155-162.

DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.05.020

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Y. Takashita, R. Kitamura, S. Ogihara, Interlaminar shear behavior of laminated carbon fiber reinforced plastic from microscale strain distributions measured by sampling moire technique, *Materials*, 査読有, 11 (2018), 1684 (15pp).

DOI: 10.3390/ma11091684

Q. Kema, N. Agarwal, S. Ri, Q. Wang, Sampling moire as a special windowed Fourier ridges algorithm in demodulation of single fringe patterns, *Optical Engineering*, 査読有, 57 (2018), 100503 (4pp).

DOI: 10.1117/1.OE.57.10.100503

S. Ri, N. Agarwal, Q. Wang, Q. Kema, Comparative study of sampling moire and windowed Fourier transform techniques for demodulation of a single-fringe pattern, *Applied Optics*, 査読有, 57 (2018), 10402-10411.

DOI: 10.1364/AO.57.010402

〔学会発表〕(計43件)

Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, Advanced Moire Techniques for Crack and Structural Health Monitoring, icOPEN2016, 成都, 2016 (招待講演)

S. Ri, Q. Wang, H. Tsuda, Full-field Strain Measurement of Composite Materials by the Sampling Moire Method, ICCM-21, 西安, 2017 (招待講演)

S. Ri, Q. Wang, H. Tsuda, Sampling Moire Method for Fast and Accurate Full-field Deformation Measurement and Its Application From Atom to Meter Scales, ISOT 2017, 台湾, 2017 (招待講演)

李志遠、王慶華、夏鵬、津田浩, サンプリングモアレ法を用いたマルチスケール変形計測、レーザー学会学術講演会第39回年次大会、東京、2019 (招待講演)

〔図書〕(計2件)

S. Ri, Y. Fukami, Q. Wang, S. Ogihara, Accurate Strain Distribution Measurement Based on the Sampling Moire Method, *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics (Chapter 32)*, Springer, 7pp (2016).

Q. Wang, S. Ri, Y. Takashita, S. Ogihara, Full-field Measurements of Principal Strains and Orientations Using Moire Fringes, *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics (Chapter 33)*, Springer, 9pp (2016).

〔産業財産権〕

出願状況 (計5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：産業技術総合研究所

種類：特許権

番号：特願 2016-188217

出願年：2016年

国内外の別：国内

名称：変形測定方法、変形測定装置、及びそのプログラム
発明者：王 慶華、李 志遠、津田 浩
権利者：産業技術総合研究所
種類：特許権
番号：特願 2017-032645
出願年：2017 年
国内外の別： 国内

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、プログラム、装置
発明者：王 慶華、李 志遠、津田 浩
権利者：産業技術総合研究所
種類：特許権
番号：特願 2017-001005
出願年：2017 年
国内外の別： 国内

名称：斜め格子による物体の変位・振動測定方法、装置、及びそのプログラム
発明者：李 志遠、王 慶華、津田 浩
権利者：産業技術総合研究所
種類：特許権
番号：特願 2017-205147
出願年：2017 年
国内外の別： 国内

名称：広測定レンジの変形測定方法、装置、およびそのプログラム
発明者：李 志遠、王 慶華、津田 浩
権利者：産業技術総合研究所
種類：特許権
番号：特願 2017-159491
出願年：2017 年
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<https://staff.aist.go.jp/ri-shien/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：王 慶華
ローマ字氏名：WANG Qinghua
所属研究機関名：産業技術総合研究所
部局名：分析計測標準研究部門
職名：主任研究員
研究者番号（8 桁）：20726856

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。