

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289066

研究課題名(和文) 測定対象の構成元素と三次元微細形状計測の同時検出システムの開発

研究課題名(英文) Evaluation of micro structure by fusion of three dimensional shape measurement and ultimate analysis using SEM

研究代表者

新井 泰彦 (Arai, Yasuhiko)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80131415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：光学技術として培われた縞解析技術を基礎に、光を電子線に置き換えることによって、微小三次元構造物の非接触形状計測が10 μ m以下の分解能をもって実現されている。ところが、測定対象表面の傷の形状等は、三次元形状計測で観測可能であるものの、表面の酸化、異物混入等による摩耗面の劣化、あるいは半導体素子では、ドーパの状況等による材料の局所的な物性値の変化に伴う問題を観察することはできない。

本研究では、微小構造物を容易にnmオーダーで三次元形状計測ができるとともに、その測定対象がどのような元素で構成されているのかを同時に計測可能な検出装置を開発する。

研究成果の概要(英文)：The 3-D measurement method by SEM has already been proposed by using the principle of projection moire. In this method, by the mechanism of producing some shadows of grid on the surface of the object by back scattering electron beam, a micro-size object can be measured in high resolution. However, in the case of measurement of industrial elements, not only 3-D shape measurement, but also the physical properties of material is sometimes required to check strongly for practical uses.

In this paper, the realization of such inspection technology by combining the ultimate analysis and 3-D measurement method by SEM is discussed. The new measurement technology by fusion of 3-D shape measurement and ultimate analysis is proposed. In experimental results, the 3-D shape measurement of the micro object made of alloy material is measured. From measured results, the validity of the new method is discussed.

研究分野：光応用計測

キーワード：ナノマイクロメカトロニクス 三次元形状計測 元素分析

1. 研究開始当初の背景

光学技術として培われた縞解析技術を基礎に、研究開始当初には光を電子線に置き換えることによって、MEMS等の微小三次元構造物の非接触形状計測が $10\mu\text{m}$ 以下の分解能をもって実現されていた。この電子線を用いた三次元計測技術はPZT高精度位置決め機構を用いることによって、光学技術としての縞走査を電子線に適用することで、誰もが容易にnmオーダー三次元形状計測の実施を可能とするものであった。

このような三次元形状計測には、本手法以外にもAFM、段差計を用いた接触計測法、さらにSEMを用いた微小構造物の計測法としての二次電子の放出特性を利用した二次元電子信号積分法などが一般に利用されている。しかしながら、動特性を考慮した三次元構造物を評価するためには、複雑かつ微細な構造を測定できる高分解能計測システムが必要であるなどの課題があることも一般には認識されている。既存の計測技術は、粗さ測定などの表面形状測定は実施できるものの、動特性を考慮した構造物の三次元微細形状計測には、一般に適していない。さらに、測定対象表面の傷の形状等は、三次元形状計測で観測可能であるものの、表面の酸化、異物混入等による摩耗面の劣化、あるいは半導体素子では、ドーピング状況等による材料の局所的な物性値の変化に伴う問題を観察することはできなかった。

2. 研究の目的

本研究では、電子線を三次元計測に用いる有意性・利点を生かし、電子線を測定対象に照射した際に発生する特性X線を用いて、測定対象の元素分析を三次元計測と同時計測することによって、三次元高分解能形状計測に加え、微細構造物を形状のみならず、その物性をも加味した計測が可能な測定システムを構築することを目的としている。

本研究では、金属材料の破断面の形状と、その部分における元素分布より破壊に至った過程等を解析することが同時にかつ同一箇所に対して実施可能な計測技術の確立を目指している。

例えば、図1に示すベアリング表面の大小の黒斑として確認することのできる構造は、表面にベアリング製作時に残存する何らかの物質の残存物であり、形状に関する瑕疵ではない。このような物質についても、形状と元素分析結果とを一つの画面内で、観察することによって、ベアリング表面加工の問題を

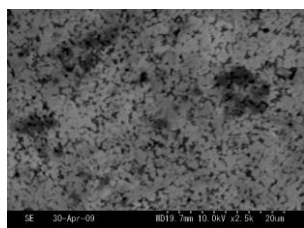


図1 ベアリング球表面

検討することを可能とするものであり、微小構造における材料の変質等の解析も可能とするものである。

3. 研究の方法

本研究では、電子線を用いた三次元形状計測と特性X線を用いた元素分析を以下に示す原理に従って実施し、さらにその結果を一つの画面にカラー表示をすることによって表示するシステムを構築している。

(1) 三次元形状計測の測定原理

SEMチャンパー内の光学系において、図2(a)に示す座標系を考える。ここで、電子銃の位置と検出器の位置、ならびに格子の位置は既知である。

図2(b)に示すように縞画像において、検出器と電子銃とを結ぶ直線上だけで考えるのではなく、図2(a)に示すように縞画像上の測定点 P_0 ならびに電子銃、検出器を含む平面-1を想定することによって、測定点の三次元座標を求める。すなわち、電子銃から放出された電子は、図2(a)に示すように測定対象上の点 P_1 で反射電子となり、そのうちの一部分が格子を通過して、検出器に到達することになる。

その場合に得られる縞画像における測定対象上の測定点は、SEMの座標系を考えると測定座標の底面に当たる平面-0上の点 P_0 の座標として検出される。このことより、点 P_0 、点D(検出器)、ならびに点G(電子銃)の3点より構成される図2(a)に示す平面-1を確定し、その平面上で電子の軌跡を求めればよいことになる。ここで、線分 GP_0 は点Gと点 P_0 の座標より定義することができる。

さらに、縞画像上の点 P_0 における位相を求め、それが $\text{Phase}(P_0)$ と検出することができたとすると、前報にも示したように、 $\text{Phase}(P_0)$ の位相に相当する格子の位置を電子は通過したことになる。格子を示す平面はあらかじめ平面-3として定義されているので、平面-3上の位相が $\text{Phase}(P_0)$ である地点を点 P_2 として定義することができる。この場合、点 P_2 は平面-1上に存在している。そこで、平面-1上で線分 DP_2 を定義し、線分 DP_2 と線分 GP_0 との交点を平面-1上で求めると、測定点 P_1 の座標を求めることができる。

以上の演算を縞画像内のすべての点で行うと、測定対象の三次元形状計測を行うことができる。

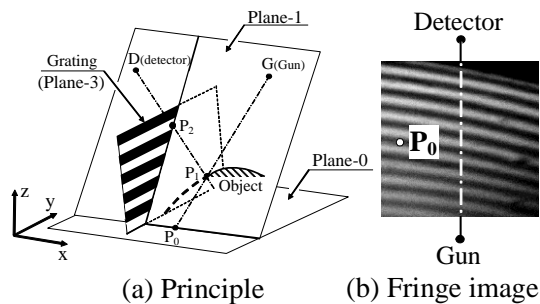


図2 三次元座標の検出原理

(2) 元素分析の測定原理

元素解析として本研究では、特性 X 線マイクロ解析システム (EMAX Evolution/EMAX ENERGY 堀場製作所) が元素分析過程で用いられている。本システムでは、図 3 に示すように、SEM の電子銃から打ち出された電子が原子に高い速度で衝突すると、内側の原子核と外側の原子核との電子が持つエネルギー差に相当する特性 X 線を発生する。この際の特徴 X 線のエネルギー差を用いて、対象とする原子を特定するものである。

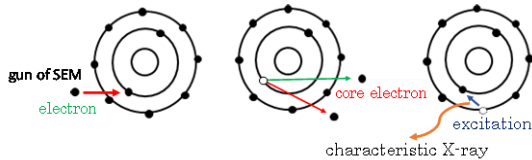


図 3 特性 X 線による元素分析

(3) 測定システム

本研究で構築した測定システムと測定に利用した格子並びに測定対象を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。図 5 に示す格子はピッチが 40 μm のシリコン酸化膜製のものであり、本研究では、2 μm 、8 μm のピッチの格子も高分解能計測のために内製化されたシリコンプロセスによって作製した。

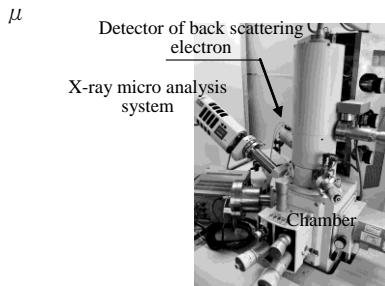


図 4 測定システム概要

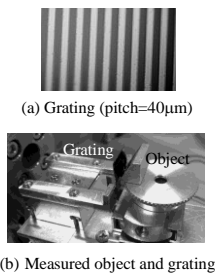


図 5 格子と測定対象

4. 研究成果

本研究では、はじめに三次元形状計測技術の確立をはかり、その正当性を確認した後に、Al, Ag, Cu, Sn により構成されたサンプルを用いて元素分析と三次元形状計測結果の融合がなされるのかについて検討した。さらに、Cu と Zn との合金による平面の測定を行い、本研究で開発したシステムの有効性を検討した。

また、2015 年度より speckle 干渉計測を用

いた新たな測定手法を導入し、動的物体の計測を視野に入れた、より高精度な三次元計測の実現を目指した取組も実施した。

(1) SEM を用いた電子線による三次元計測
図 6 に三次元形状計測時の器具を示す。格子を上下にシフトすることで、発生する縞の位相を図 7 に示すようにシフトさせ、図 8 に示す形状計測が実施可能であると示した。

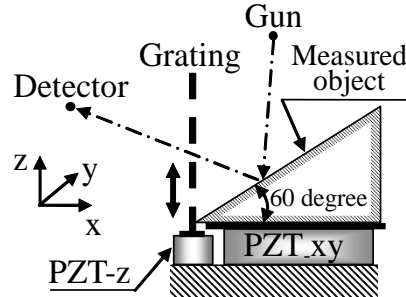


図 6 三次元形状計測時の器具

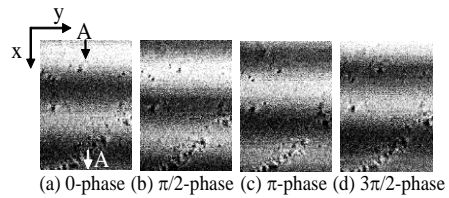


図 7 位相シフト時の縞画像

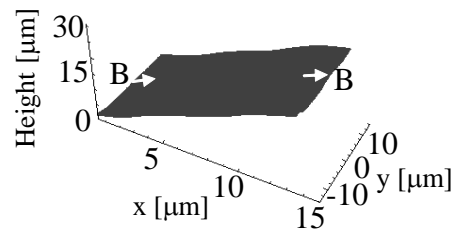


図 8 平面の三次元形状計測結果

(2) Al, Ag, Cu, Sn のサンプルの元素分析と三次元形状計測融合結果

次に、Al, Ag, Cu, Sn により構成されたサンプルを用いて元素分析と三次元形状計測の融合についての成果を示す。図 9 にサンプルの元素分析結果をカラー表示した結果を示し、図 10 に平板の三次元形状計測結果を示す。図 9 と図 10 との融合により、図 11 に示す構成元素を明示した三次元形状計測結果が得られる。



図 9 元素分析結果

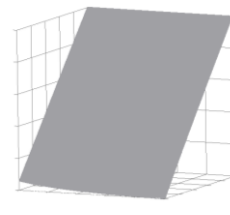


図 10 三次元形状計測結果

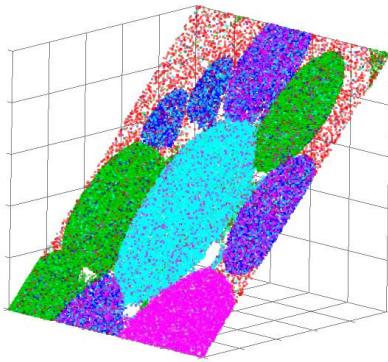


図 11 本研究により構築された構成元素を明示した三次元形状計測結果

(3) Cu と Zn の合金による平面の測定

合金として、存在する元素についての本手法の有効性を次に検証した. 図 12 に Cu と Zn の合金の平面の三次元形状結果を示す. また、図 13 にその際の元素分析結果を示す. さらに、図 14 に三次元形状測定結果と元素分析結果とを融合させた結果を示す.

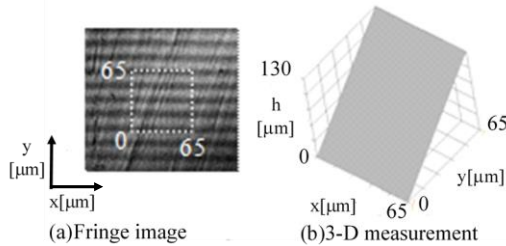


図 12 Cu と Zn の合金の平面の三次元形状結果

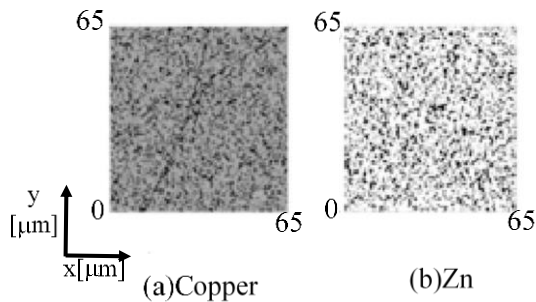


図 13 Cu と Zn の合金の平面の元素分析結果

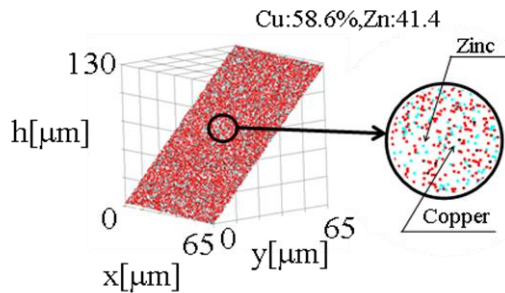


図 14 Cu,Zn の合金の平面の本研究により構築された構成元素を明示した測定結果

本研究では、申請書に示した研究計画に基づいて、当初の計画通りに元素分析と三次元形状計測結果の融合がなされた測定が可能なシステムを開発し、いくつかのモデルを用いてその有効性を示し、その成果を国際会議を通して公表した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 9 件)

① Y. Arai, measurement of buckling deformation using speckle interferometry with same sensitivity in three dimensions, *Optical Engineering* 査読有 Vol.56, 2017, DOI:10.1117/1.OE.56.4.044102

② 新井泰彦, 座屈解析へのスペックル干渉変形計測技術の適用, *機械の研究* 査読有, Vol.91, 2017, 印刷中

③ Y. Arai, Influence of error sources in speckle interferometry using only two speckle patterns, *Optical Engineering* 査読有, Vol.55, 2016, DOI: 10.1117/1.OE.55.12.124101

④ Y. Arai Simultaneous in-plane and out-of-plane deformation measurement by speckle multi-recording method, *Measurement* 査読有, Vol.91, 2016, 582-589

DOI: 10.1016/j.measurement .2016.05.037

⑤ 新井泰彦, 高分解能なスペックル干渉計測法を用いた板座屈における面外・面内変形計測の可能性, *精密工学会誌* 査読有, Vol. 82, 2016, 888-893

⑥ Y. Arai Evaluation of micro structure by fusion of three dimensional shape measurement and ultimate analysis using SEM *International Symposium of Optomechtronics technology*, 査読有, Vol, 32, 2015, 5002 , DOI: 10.1051/mateconf/20153205002

⑦ Y. Arai Improvement of measuring accuracy of spatial fringe analysis method using only two speckle patterns in electronic speckle interferometry, *Optical Engineering* 査読有, Vol.53, 2014, DOI: 10.1117/1.OE.53.3.034106

⑧ 新井泰彦 電子スペックル監視用計測による面内・面外同時変形計測, *光学* 査読有, Vol. 43, 2014, 570-576

⑨ Y. Arai Electronic speckle pattern interferometry based on speckle information using only two sheets of speckle patterns *Modern Optics*, 査読有, Vol.61, 2014, 297-306 DOI: 10.1080/09500340.2014.884651

〔学会発表〕 (計 21 件)

① 新井泰彦, 東田善行, 電子線パイプリズムを用いた三次元慶事用計測法の開発, 2016 精密工学会秋季学術講演会, 2016.9.6-8, 茨城

大学(茨城県)

② Y. Arai, Deformation measurement of buckling phenomena using 3D-speckle interferometry, ISOT, 2017.11.7-9, 板橋区立文化会館, Tokyo

③ Y. Arai, Two dimensional deformation vector analysis using speckle interferometry with same sensitivity in three directions, SPIE Optics+Photonics Interferometry XVIII 2016.8.6, San Diego USA

④ Y. Arai, Development of three-dimensional speckle deformation measurement method with same sensitivities in three directions, SPIE Optics+Photonics 2015.8. 9-13, San Diego USA

⑤ Y. Arai, Influence of error sources in speckle interferometry using only two speckle patterns SPIE Optical Metrology 2015.6.21-25, Munich Germany

⑥ Y. Arai, Evaluation of micro structure by fusion of three dimensional shape measurement and ultimate analysis using SEM, International , Symposium of Optomechtronics technology, 2015.10.14-16, Neuchatel Switzerland.

⑦ Y. Arai, Development of in-plane and out-of-plane deformation simultaneous measurement method for the analysis of buckling, SPIE Interferometry 17, 2014.8.17, San Diego USA

⑧ 新井泰彦, 1台のカメラによるスペックル干渉計測における多重記録法を用いた面内・面外同時変形計測, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015.3.17 東洋大学(東京都)

⑨ 新井泰彦, 2枚のスペックルパターンのみを用いた面外変形計測法(より簡易なスペックル干渉法の開発), 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014.9.17, 鳥取大学(鳥取県)

⑩ 新井泰彦, 2枚のスペックルパターンのみを用いた面外変形計測, 光計測シンポジウム, 2013 2013.9.27, 東京ビックサイト(東京都)

⑪ Y. Arai, Spatial fringe analysis based on FFT using only two speckle pattern in ESPI, Optical Engineering+Applications SPIE, 2013.8.25-29, San Diego US

⑫ Y. Arai, ESPI based on spetial fringe analysis method using only two sheets speckle patterns, Optical Metrology SPIE 2013.5.13-16, Munich Germany

他 11 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 泰彦 (Arai Yasuhiko)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 80131415

(2) 研究分担者

青柳 誠司 (Aoyagi Seiji)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 30202493

多川 則男 (Tagawa Norio)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 50298840