

製品の破損等に対する非接触ナノメータ計測装置の開発

- マイクロスコープ型DESPI装置の開発 -

白石知久* 森田俊英* 大木健司* 齋藤隆行**¹ 孫萍**¹ 木村壮作**²

Development of the Non-contacting Nanometer Measurement Equipment for Breakage of a Product

- Development of microscope type DESPI device -

SHIRAISHI Tomohisa* , MORITA Toshihide* , OKI kenji*

SAITO Takayuki**¹ , SUN Ping**¹ , KIMURA Sousaku**²

抄録

動的電子スペckル干渉法を利用し、微小対象物の変形量を非接触で計測するためのマイクロスコープ型の装置を開発した。またこの装置を用いて、実際に動的に変形している対象物について計測・解析を行い、材料試験用 DESPI 装置の解析結果と比較した。その結果、マイクロスコープ型の DESPI 装置と材料試験用 DESPI 装置との解析結果が一致し、開発装置の有用性が確認された。

キーワード：動的電子スペckル干渉法 (DESPI), 位相解析, マイクロスコープ

1 はじめに

物体の変形から破壊に至る過程についての研究では、歪みの分布や量の変化を測定し、定量的に解析することが必要である。

近年半導体プロセスを援用したマイクロマシンの研究が盛んに行われるようになっており、マイクロミラーなど一部はすでに実用化の段階に入っている。これらは一般に電気制御によるミクロンスケールの可動部を持つもので MEMS (Micro Electro-Mechanical System) と呼ばれている。この分野では、その製造プロセスの研究と並んで、動的解析法の研究が急務である。現状での部品評価

は SEM による形状計測が主で、動的機構の評価には至っていない。

スペckル干渉法は歪みの二次元的な分布を光波長をものさしにして全視野的に高精度で計測できる有効な方法である。我々は、このスペckル干渉法に、時間経過とともに動的に変形する対象物について高速に測定し解析する機能を付加した動的電子スペckル干渉法について、材料試験過程の計測を行うなど研究・検証を行ってきた¹⁾。

本研究では、この動的電子スペckル干渉法を用いて、微小な対象物に対する動的機構の評価システムの確立と、評価装置の試作を行った。また実際に計測・解析を行い、昨年度試作した材料試験用 DESPI 装置との比較も行った。

* 電子情報技術部

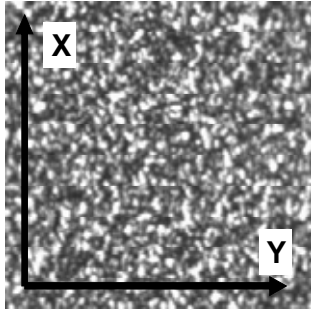
**¹ フジノン株式会社 光学機器部

**² ヒーハイスト精工株式会社

2 開発装置の原理

2.1 スペックルパターンを用いた物体の変形計測

レーザー光を2方向から粗面をもった対象物に照射すると図1のような斑点模様ができる。これをスペックル(斑点)パターンと呼んでいる。この



スペックルパターンは物体が変形することによって1個1個の斑点の光の強度(濃淡)が変化する。ここで、被観察物体の面上に図のように xy

図1 スペックルパターン 座標をとる。

1個のスペックル(位置(x,y))について着目し、そのスペックルの強度を I(x,y)、平均強度を I₀(x,y)、ランダムなスペックル位相を φ(x,y)、物体の変形に伴う位相変化を Δφ(x,y)とし、x方向の変位を u とする。変形に伴う位相変化 Δφ(x,y)は、レーザー光の入射角を θ、波長を λ とすると

$$\Delta\phi(x,y) = 2\pi \cdot 2u \cdot \sin \theta / \lambda \quad (1)$$

と書ける。

平均強度 I₀(x,y)は、2方向からレーザー光を照射した時、それぞれの光源から発せられる光の強度 I₁、I₂の平均である。スペックル強度 I(x,y)は

$$I(x,y) = I_0(x,y) [1 + \cos(\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y))] \quad (2)$$

と表せる。

ここで、物体変形に伴う位相 Δφ を求めれば、物体の変形量を算出することができる。

スペックルパターンは空間的にはノイズの非常に大きいランダムな強度分布を示しているが、ある1点の時間経過の中で強度パターンを観察すると、ノイズの少ない良好な信号が得られる。そこで時間領域で位相解析を行うことを考える。上述した式(2)に時間項を導入すれば、式(2)は

$$I(x,y,t) = I_0(x,y,t) [1 + \cos(\phi(x,y,t) + \Delta\phi(x,y,t))] \dots (3)$$

と書ける。

平均強度 I₀(x,y,t)をあらかじめ差し引いた強度

を I_c(x,y,t)とすると、I_c(x,y,t)は次式で表せる。

$$I_c(x,y,t) = I(x,y,t) - I_0(x,y,t) \\ = I_0(x,y,t) \cos(\phi(x,y,t) + \Delta\phi(x,y,t)) \dots (4)$$

これに対してヒルベルト変換法を用いると I_c(x,y,t)と同じ形の sin 関数 I_s(x,y,t)が求まる。

$$HT[\cos(\phi(x,y,t) + \Delta\phi(x,y,t))] = \sin(\phi(x,y,t) + \Delta\phi(x,y,t)) \\ (\text{ここで HT はヒルベルト変換を表す}) \dots (5)$$

よって I_s(x,y,t)は

$$I_s(x,y,t) = I_0(x,y,t) \sin(\phi(x,y,t) + \Delta\phi(x,y,t)) \quad (6)$$

これら(4)(6)式から

$$\Delta\phi(x,y,t) + \phi(x,y,t) = \tan^{-1}[I_s(x,y,t)/I_c(x,y,t)] \quad (7)$$

となる。

よって、変形に伴う位相変化は

$$\Delta\phi(x,y,t) = \tan^{-1}[I_s(x,y,t)/I_c(x,y,t)] - \phi(x,y,t) \quad (8)$$

で表される。

ここでランダムなスペックル位相 φ(x,y,t)は、物体位相の変化に比べて遅いので

$$\phi(x,y,t) \approx \phi(x,y,0)$$

と近似でき、

$$\Delta\phi(x,y,t) = \tan^{-1}[I_s(x,y,t)/I_c(x,y,t)] - \phi(x,y,0) \quad (9)$$

となり、物体の変形に伴う位相変化を求めることができる。これにより(1)式から、x軸方向の変形量 u が求まる。

y軸方向の変形量 v についても同様の解析を施すことによって算出が可能である。

2.2 変形量の符号決定について

ところで、上述した原理の説明においては位相項の符号に不確定性が生じる。この不確定性を取り除くためには、位相項に意図的に既知の位相成分 φ₀ を導入する。

つまり強度分布式において位相項である φ(x,y,t) + φ₀ が単調増加あるいは単調減少となるように決定された位相成分 φ₀ を、いわゆる時間キャリア成分として導入する。すると、スペックルパターンの強度分布は

$$I(x,t) = I_0(x,t) [1 + \cos(\phi(x,t) + \phi_0 + \Delta\phi(x,t) + \phi_0)]$$

と書き表せる。

具体的には、図中ミラーを圧電素子(PZT)によって移動させることにより光路長を変化させる方

法等の種々の手法によって行うことができる。

3 開発装置の概要

3.1 開発装置の光学系

図2のような光学系を組み、測定対象物に対して2方向から拡散したレーザー光を照射させスペckルパターンを生成する機構を設計した。

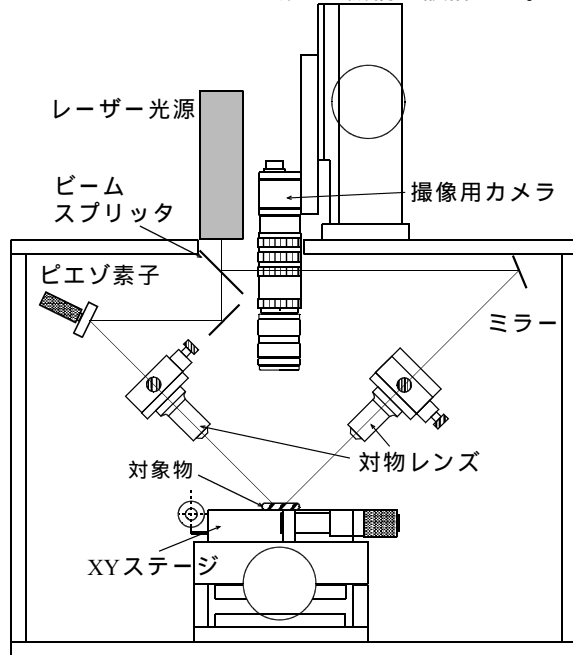


図2 開発装置の概略図

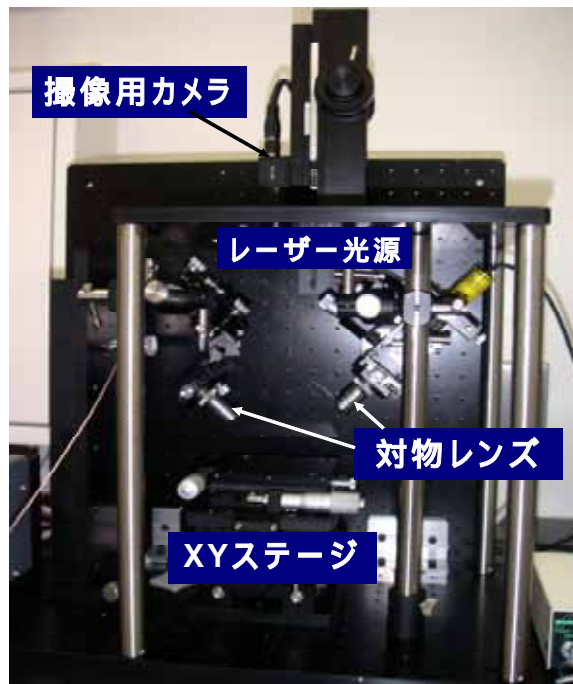


図3 開発装置の概観

いくつかの方法を検討した結果、ミラーなどを設

置ることによるレーザー分割手法を検討し、実行した。

観察視野は 10.64 × 7.98mm 程度であるため、観察対象物もそれと同程度の大きさのものを想定した。カメラレンズは SONY 製の XC56 を使用した。

3.2 ソフトについて

3.2.1 解析ソフトの概要

顕微鏡型 DESPI 装置の開発のため、新たに位相解析ソフトを作成した。プログラムソフトには MATLAB7.01 を使用した。

3.2.2 解析ソフトのフローチャート

図4のようなフローチャートを元にソフトを開発した。

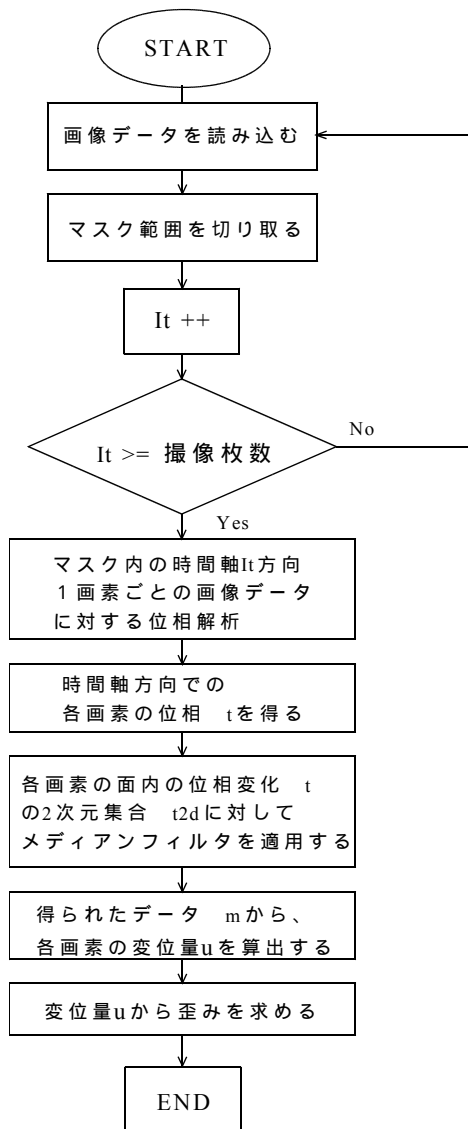


図4 位相解析フローチャート

4 開発装置を用いた実験

4.1 試験対象物について

図5のような形状の試験対象物(材質はステンレス鋼 SUS304)を作成した。通常の疲労・引張試験用の試験片中央部に、左右2方向から長さ4mm程度の直線状の切欠を入れた。この切欠を入れた部分について、開発した装置で計測を行った。また、この試験対象物全体の計測を昨年度開発した材料試験用 DESPI 装置を用いて行った。

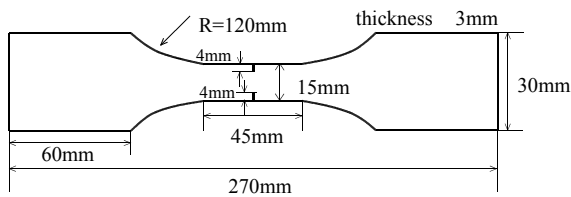


図5 直線状切欠入り試験片

4.2 実験条件について

実験条件としては、試験片の一端を固定し、他端を毎秒3μmで10秒間引張るといった静的な引張荷重を与えることとした。

4.3 結果

以下の図に示すのが、上述条件で引張試験を行った時に得られた干渉縞の計測結果である。

図の左右両端に見えるのが切欠の一部であり、主に切欠間での干渉縞の様子が得られた。

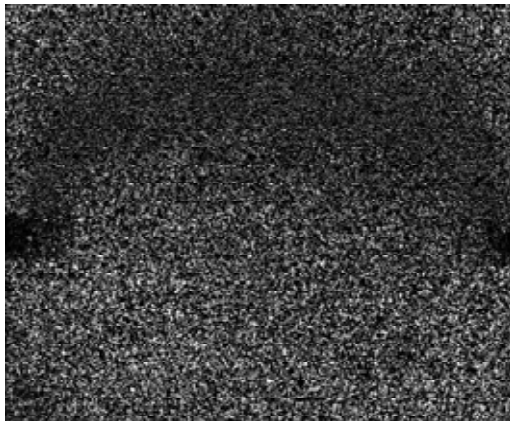


図6-1 微小領域での干渉縞

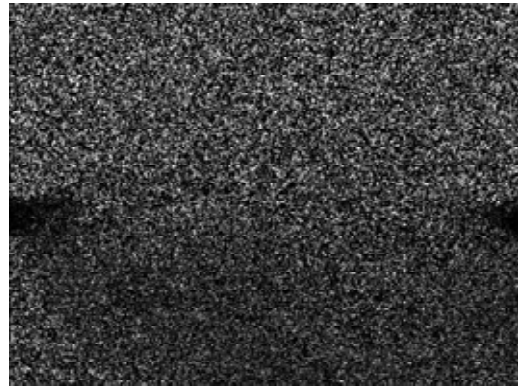


図6-2 微小領域での干渉縞

この微小領域の観察を行ったときと全く同じ負荷条件を試験片に与えながら、その様子を昨年度開発した材料試験用 DESPI 装置で計測した。

その結果、以下の図7に示すような干渉縞が得られた。図7の試験片中央部の切欠部分で発生して

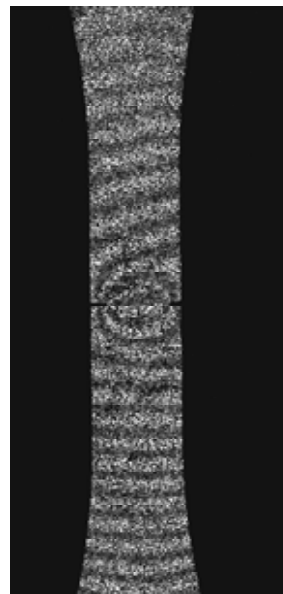


図7 材料試験用DESPI

で計測を行った結果

4.4 位相解析による変位量

最後にマイクロSCOPE型装置で観察し、計測した微小領域について位相解析を行い、変位量を算出した結果を以下の図8に示す。

変位量は縞の形状と同形状の等高線を描いており、干渉縞が変位の等高線を示している様子が見てとれる。

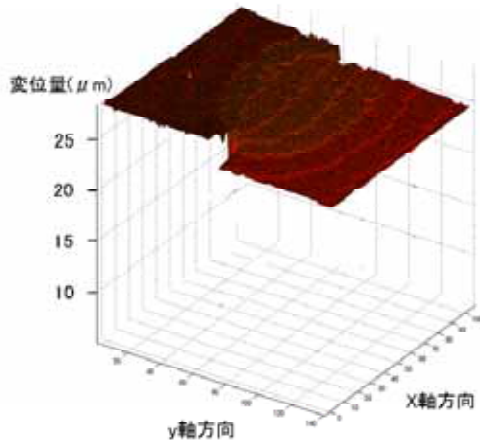


図8 位相解析による変形量算出結果

5 まとめ

本研究では、動的電子スペックル干渉法を利用し微小対象物の変形量を計測するためのマイクロSCOPE型の装置の開発を行ったが、以下のことが可能、または明らかとなった。

- (1)開発した装置を用い、実際に動的に変形している対象物について計測・解析が可能になった。
- (2)材料試験用 DESPI 装置の解析結果との比較を行った。その結果、マイクロSCOPE型の DESPI 装置と材料試験用 DESPI 装置との解析結果が一致し、開発装置の有用性が確認された。
- (3)材料試験用 DESPI 装置では、対象物をそのままの大きさを計測し、表示していたが、本研究で開発したマイクロSCOPE型装置では、30倍ほど拡大することが可能 となった。

参考文献

- 1) 白石知久, 新井尚機, 斎藤隆行, 松田信一他 : 製品の破損等に対する非接触ナノメータ計測装置の開発, 埼玉県産業技術総合センター研究報告 2, (2004) 146
- 2) 豊岡了, 門野博史 : 電子スペックルパターン干渉法による全視野計測, 日本実験力学学会講演論文集, (2003)

3) R.S.Shirohi : Speckle Methods in Experimental Mechanics, (Marcel Dekker, Inc.) (1993)

4) 富永学, 豊岡了 : DSPI によるステンレス鋼 SUS304 での不均一変形の時空間観察, 第 32 回応力・ひずみ測定シンポジウム講演論文集, (2001), p63-68

5) 横堀武夫 : 材料強度学, 岩波全書, (1996)