

白色干渉法を利用した最新の表面形状評価技術

佐藤 敦*

*キャノン・マーケティング・ジャパン(株)(〒108-8011 東京都港区港南 2-16-2)

Advanced Metrology of Surface Texture by Scanning White Light Interferometry

Atsushi SATO*

*Canon Marketing Japan Inc. (16-2, Konan 2-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8011)

Keywords : Scanning White Light Interferometry, FDA (Frequency Domain Analysis)

1. はじめに

非接触式の表面プロファイラーの利点は、当然ながら試料表面を傷つけないことにあり、SEM(電子顕微鏡)のように蒸着膜の準備が不要であることにある。なかでも光干渉を利用した計測は、一般に精度が高く光学部品などの精密加工面の形状精度評価には欠かせない技術となっている。また、面領域データを得るための水平方向の機械的走査が不要であるために、測定時間が非常に短く、測定の生産性が高いことが大きな優位点である。

微細形状の測定のための顕微鏡タイプの干渉計が製品化されたのは1980年代中頃であるが、当時はHe-Neレーザーなどの単色光源を利用した位相シフト方式が中心であった。近年では、表面凹凸の測定ダイナミックレンジを拡大するために白色光源を利用した干渉技術が開発され、数多くの白色干渉計が表面形状評価を目的に製品化されている。

ここでは、米国Zygo社が製品化している走査型白色干渉法を、他の光学式表面プロファイラーと比較しながら解説す

る。Zygo NewView6000シリーズは、Zygo社が独自開発したFDA(周波数領域解析)技術を用いた走査型白色干渉計であり、その計測用途は、光学部品/液晶ディスプレイ/半導体/データストレージ/自動車部品などの産業界で急速に拡大している。それらの測定アプリケーションとしての実例を挙げながら、表面形状の評価方法の紹介を行う。

2. 一般の表面プロファイラーとの機能比較

一般に、表面形状/表面性状の評価計測には、光学顕微鏡、SEM(電子顕微鏡)、AFM(原子間力顕微鏡)、Stylus(接触式粗さ計)、LSM(レーザー顕微鏡)などが広く知られている。それぞれに、特徴があり評価目的にあったものがさまざまな工業界で使用されているが、一台の計測機ですべての評価ニーズを満足させるのは困難である。表1に、代表的な表面プロファイラー(計測方式)の機能比較をまとめる。白色干渉方式の特徴も明確であり、なかでもZygo手法の垂直分解能の優位性が特出すべき点となる。

表1 表面プロファイラー機能比較

	触針式 プロファイラー	原子間力顕 微鏡 (AFM/SPM)	走査型電子 顕微鏡 (SEM)	共焦点顕微鏡 (LSM)	白色干渉 (SMLI)	白色干渉計 (SMLI) FDA 解析
非接触/非破壊	No	No	No	Yes	Yes	
定量的3次元エリア 計測 (x, y, z)	No	Yes	No	Yes	Yes	
最大計測エリア (1回の測定領域)	~25 mm (Line trace)	~100 μ m	1 mm	~0.5 mm	10 mm (Larger with stitching)	
最大測定高さ(z) レンジ; ステップハイト	~5000 μ m	5-10 μ m	N/A	<5000 μ m	<=5000 μ m	
垂直分解能(z) (Out-of-plane)	0.1-50 nm	0.05 nm	N/A	0.6 μ m	2~3 nm	~0.1 nm
水平分解能(x, y) (In-plane)	~300 nm	~15 nm	2 nm	~500 nm	~500 nm	
測定スピード	Medium	Low	Medium	Medium	High	

3. 走査型白色干渉法の原理

走査型白色干渉法は可干渉性の少ない白色光源を利用し、ミラウ干渉計やマイケルソン干渉計といった等光路干渉計を利用することを基本にしている。ここで生じた干渉縞を測定面に相当する CCD の各番地における等光路位置を参照鏡の垂直移動により見つける手法である。図 1 に NewView6000 の光学系レイアウト、等光路干渉計光路図を示す。

顕微鏡対物レンズそのものが干渉計になっており、等光路干渉計光路図からハーフミラーで分岐され被測定面、内部参照鏡で反射し再びハーフミラー上で結合する光路差が等しい時に干渉を生じる干渉計である。光源に可干渉性の少ない白色光を利用することで干渉縞の発生する範囲を狭くでき、その干渉強度の収集により正確に干渉縞のゼロ位置を導くことができるのである。

干渉縞(干渉強度)の収集は干渉計を光軸(高さ)方向に垂直駆動することで行う。つまり、白色光の干渉深度は $2\mu\text{m}$ 程度と狭いため、凹凸のある面を下から上に一定速度走査することで干渉縞の発生にタイムラグが発生する。これを、測定面の高さ情報の検出に利用するわけである。

図 2 の場合、干渉対物レンズの上昇(走査)にしたがい、左の A 点の干渉縞が、B 点より先に検出され、その時間差から凹凸量が算出される。焦点合致位置で高さ検出する LSM (レーザー顕微鏡)の焦点深度が、対物レンズの倍率(NA)に依存するのに対し、可干渉深度は光源に依存するため、低倍率の対物レンズでも測定感度が落ちないというメリットがある。

走査型白色干渉計は、白色干渉による光強度のピーク位置を求めることが基本原理であるが、単純に干渉強度の変動波形からのピークを探す方法がコントラスト法である。このコントラスト法は、光源のノイズの影響を受けやすく、測定感

度も 10nm 程度が限界であった。NewView6000 では、干渉強度のデータ処理プロセスである FDA (Frequency Domain Analysis; 周波数領域解析) を走査型白色干渉計に採用し、粗面や段差面の測定だけでなく、超精密加工面の測定にも適した高さ分解能を実現した低ノイズなシステムとなっている。

4. Zygo 社の独自開発の FDA 方式

被測定面(干渉計の両光路長の等しい位置)を高分解能かつ正確に求めるために、本システムでは干渉縞の光強度データの解析手法に、FDA(周波数領域解析)を採用した。FDA とは干渉計の強度変化から、位相および空間周波数を算出する数学的手法(Zygo 社の特許技術)である。図 3 に FDA の解析フローを示す。

ここでは、単色光を用いた位相測定干渉計と比較し FDA の手法を説明する。位相測定干渉計では、干渉縞の強度変化が光源波長に比例した周期を持つことを前提に、N バケッ

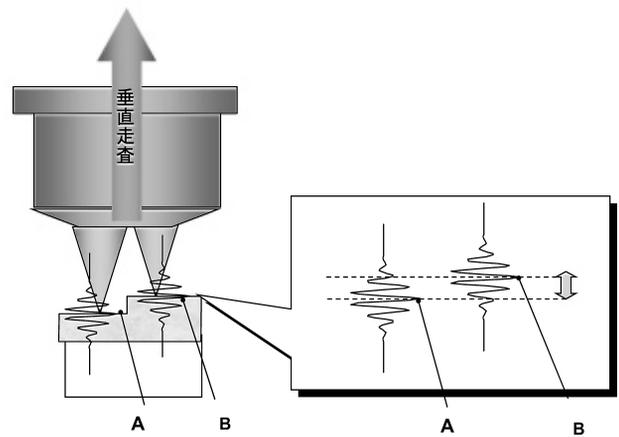


図 2 干渉縞(干渉強度)の走査

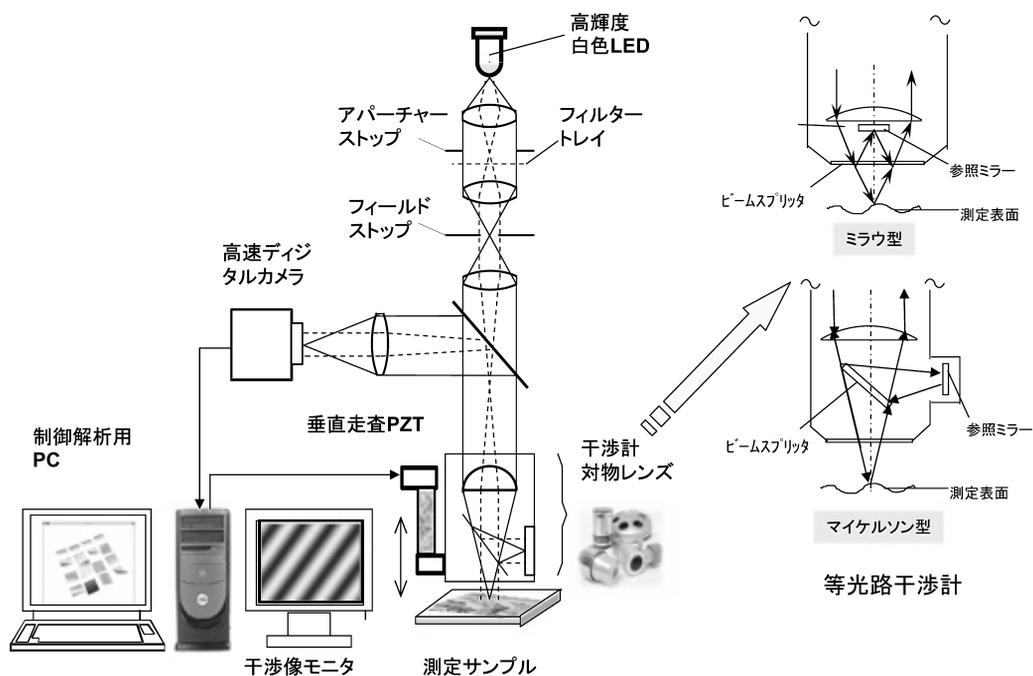


図 1 NewView6000 光学系レイアウト

ト法などの演算処理により位相データに変換している。この手法は、各データポイントのわずかな位相差を算出できるという優位性を持つが、その反面位相差が 2π 以上になると実際の位相差が不明となり、波長オーダを超える段差の測定ができなくなる。

図4には、白色光の各波長から位相を求めるための周波数領域グラフの概念図を示す。ここで、 ϕ は位相、 L は光路長差、 k は光源の空間周波数に相当する値である。単色光でこのグラフを考えると、ひとつの k 値に対して、 $2\pi n$ (n :整数)分の位相差が不明であり、複数の直線(スロープ)が引かれることになる。これに対して、白色光はいわゆるブロードバンドスペクトラムであり、連続的な色(波長)を持っている。つまり、白色光による干渉縞は複数の波長における位相情報を含んでいる。FDAはこの考えに基づくものであり、干渉に寄与するこの k 値に対する位相 ϕ を求め、スロープ L を算出するものである。 k 値に対する位相 ϕ に算出は、計算上効率的な高速フーリエ変換(FFT)が用いられ、結果をグラフにプロットすることが解析のステップとなる。

最終的には、被測定面の凹凸に関する位相差を求めることにあり、それは周波数領域グラフから正確なスロープ L を導くことにある。スロープ L が位相差となる理論式は省略するが、白色光の周波数領域グラフでは k 値に対するス

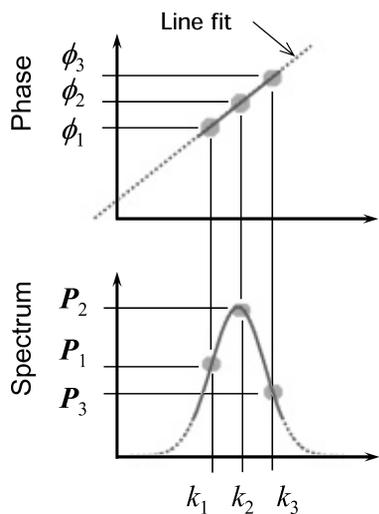


図4 周波数領域(Frequency Domain)グラフ

ロープ L が1つ決定される。本システムでは、高輝度白色LED光源からのブロードバンド波長を使用し、信頼性の高い位相 ϕ データによる一次回帰直線の算出から、スロープ L を決定している。この原理が、垂直方向分解能0.1nmの高分解能かつ高精度な3次元表面構造解析を可能としている。

図5にNewView6000システムの外観写真を示す。

5. 表面解析アプリケーションの実例

これまでの顕微鏡をベースとした表面形状の測定機では困難であった、垂直感度と垂直測定レンジの両立により、各種機械加工部品、樹脂、セラミックス、フィルム、紙などその測定対象は限りない。また被測定表面の状態を計測し定量化するには、一般的にJIS規格に基づいた $Rmax$, Ra など2次元での表面粗さ測定が非常に良く知られている。ここでは、本システムは被測定表面を3次元で解析できる優位性をもとにさまざまな観点から表面状態を解析し定量化を行う手法を紹介する。

5.1 切削加工によるレンズ金型の表面性状

ガラスモールドによるレンズ製造は、射出成形に比べて成形時間が長く高コストであるが、耐久性と設計自由度で優れるため付加価値が高い。光ディスクのピックアップ光学系用対物レンズは各種光学デバイスの中でも高精度が要求される部品である。その金型は有効口径も小さくその形状精度も厳しいため、顕微鏡視野での表面仕上げの確認が重要になる。図6は、DVD用対物レンズの金型を約250 μ m四方の観察



図5 NewView6000システム外観

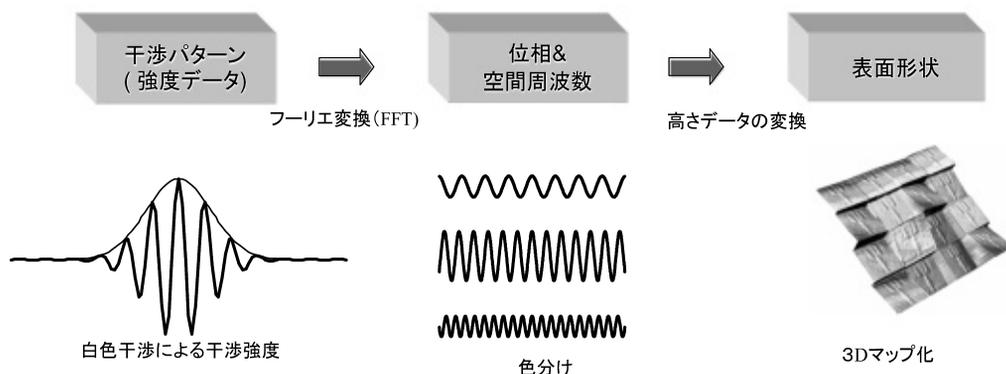


図3 FDA(周波数領域解析)の演算フロー

視野を計測したデータである。加工時のツールマークをクローズアップさせるために、FFT 処理によるハイパス・フィルタを使用して金型の形状成分を除去している。これらの周期的凹凸形状が、実際のレンズの透過面収差、特に高次の収差に影響するという報告もあり、金型の表面性状の管理も重要となる。また、最近の光ディスク用対物レンズでは光の回折効果を利用して規格の異なるディスクを使い分けるハイブリッドなレンズも製品化されている。その金型には、設計値通りの回折格子の段差/形状を正確に創造する必要があり、NewView による形状測定が有効活用されている。

5. 2 超平滑面の粗さ測定

FDA の高分解能と走査型干渉の強みを生かし、次世代リソグラフィ用の光学部品などの超平滑面の表面性状の定量化にも応用が開始されている。実績ベースでは、EUV リソグラフィで求められる 中間周波数帯(1mm^{-1} から $1\mu\text{m}^{-1}$)での Rq 値で、 0.1nm 以下の平滑面が作製されている。この測定に十分な垂直分解能を示す指標として、超精密研磨された鏡面を連続して 2 回測定したデータの面差分データを、システムノイズとして定義している。一般的な測定環境下で、16 回の位相平均化を行ったシステムノイズの事例データが、図 7 であり、この場合、 0.056nm rms(Rq) の数値が得られて

いる。この成分は、ナノメートルオーダーの表面性状評価のために十分に小さいノイズレベルであることがわかる。

5. 3 フィルム・アプリケーション

これまでの走査型白色干渉法では、透過膜の表面形状を測定しようとする際、CCD の 1 画素に対してスキャン中に複数の干渉縞が発生し、測定できないケースが 30~50%程度は存在していた。それは干渉強度の抽出アルゴリズムが、1 画素に対して 1 つの変調しか想定されていないからである。図 8 が、透明膜測定での概念図である。フィルム・アプリケーション “Zygo Film Application” は、このような課題を解決するソフトウェアであり、Zygo 独自の FDA を応用した独

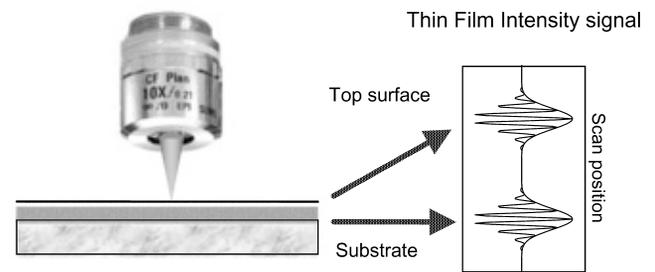


図 8 透明膜測定のご概念

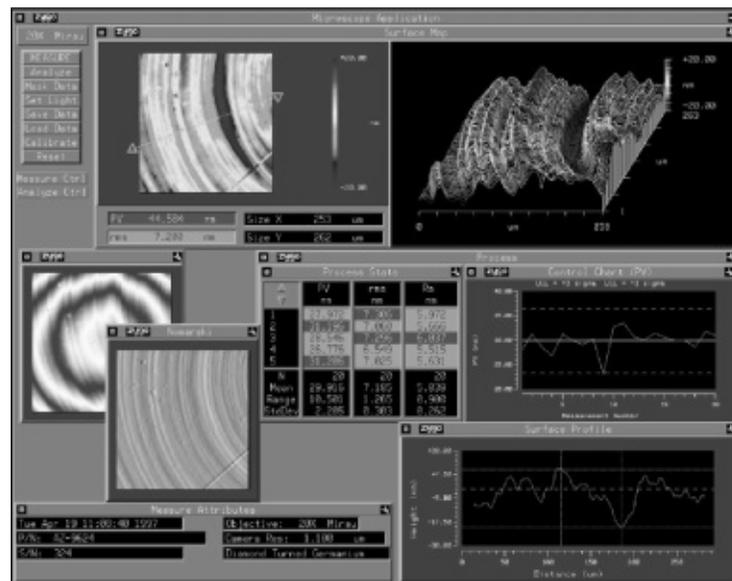


図 6 測定事例：モールドレンズ金型

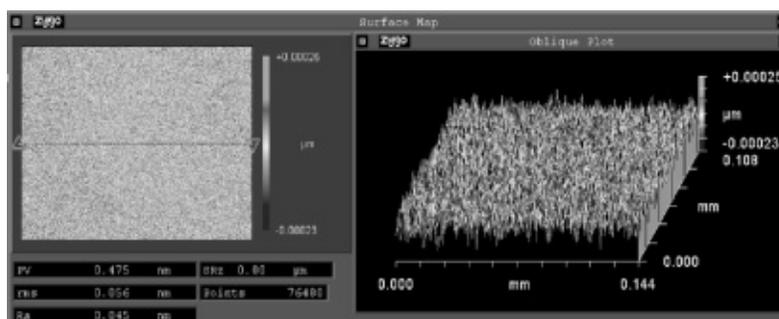


図 7 測定事例：システムノイズ

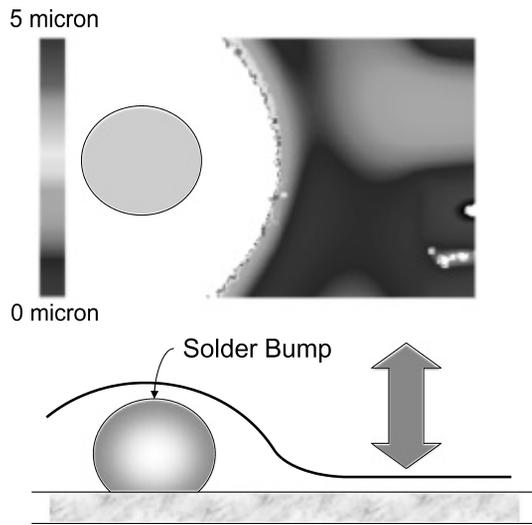


図9 はんだバンプ近傍のフィルム厚さ分布

自の干渉縞分離アルゴリズムにより厚さ $1\mu\text{m}$ 以上 ($50\mu\text{m}$ 未満)の透過フィルムの各種測定が可能となっている。また、高輝度LED(コントラスト向上)・高速デジタルカメラ(密な干渉強度データを収集)の光学系の高品位化も測定可能膜厚 $1\mu\text{m}$ 以上の実現に貢献している。

フィルム・アプリケーションでは、垂直走査型干渉方式で得られるすべての光強度信号から、表面および界面のデータを分離、抽出し以下の3項目の測定が可能である。

- a) 透過フィルム表面性状測定(Top Surface)
- b) 単層フィルム表面・界面性状測定(Film Top Surface)

- c) 単層フィルム膜厚測定(Film Thickness)

図9にフィルム・アプリケーションを用いた、はんだバンプの測定事例を示す。試料は単層の透過フィルムが塗布された構造であり、Film Thicknessの解析により、透明膜の蒸着状態が計測可能となっている。

6. まとめ

今後、さまざまな工業製品の表面機能が多様化するにつれ、単純な数値評価だけでは表面形状の定量化が困難になると考えられる。重要なのは、ISOでも定義化されている表面性状(Surface Texture)という用語にもあるように、表面状態をより顕著に特徴づけることのできる測定/解析方法の確立であると言える。ここに紹介したNewView6000は、高分解能(垂直方向分解能 0.1nm)を保ちながら広いダイナミックレンジ($1\text{nm}\sim 5\text{mm}$)で計測できる表面形状測定機であり、この点で実用性が高く、測定の生産性にも優れるため、製品の品質管理と機能の改善に貢献できるものと確信する。

(2006-6-8 受理)

文献

- 1) P. Groot and L. Deck ; *Optics*, 42, 389 (1995)
- 2) NewView6200/6300 Operation Manual OMP-0503A, Zygo Corporation (2005)
- 3) 佐藤 敦; 画像応用技術, 12, (3)
- 4) 佐藤 敦; 非接触式による微細形状の測定技術, ABTEC'99 チュートリアル