適切なツールの選択：フリーフォーム光学部品製造のための計測手法

トッド・ブラロック

フリーフォーム（自由曲面）光学部品を測定するための計測ツールとして、三次元測定機（CMM：Coordinate Measurement Machine）、高精度表面形状測定装置、そしてフリンジ反射デフレクトメトリ（fringe reflection deflectometry）という非接触型の光学手法の３つを比較する。

フリーフォームの光学面は、複雑な光学システム設計の問題を解決するための方法として、レンズの設計者や光学システムのインテグレーターの間で人気が高まっている。幸い、光学部品製造の進歩によって、そうした複雑な面の作製を実現する可能性が切り拓かれている。しかし、製造手法の向上とともに、そうした部品を測定するための計測手法も向上する必要がある。

製造と計測の要件

「測定できないものは製造できない」という格言があるように、適切な計測手法なくして、フリーフォームの光学部品を製造することはできない。フリーフォーム部品の計測要件は、フリーフォーム面そのものと同程度にまちまちである可能性がある。フリーフォーム計測の基本要件としては、次のようなものが挙げられる。

面の不規則性の測定：これは、表面形状の標準的な低次誤差で、ゼルニケ（Zernike）多項式による近似で一般的に表される。

面の位置の測定：フリーフォーム部品は回転対称性をもたないため、別の面や基準形状からの相対位置として面を測定しなければならない場合がある。

中空間周波数誤差の測定：この誤差は、製造プロセスに用いられるサブアパーチャ加工によって生じる可能性がある。

高精度測定：フリーフォーム光学部品の表面仕様の許容範囲によっては、高精度測定が必要になる場合がある。

測定値の高速取得：製造の時間とコストをできるだけ低く抑えるには、計測をできるだけすばやく行う必要がある。

フリーフォーム光学部品を製造するための計測要件には、上記の一部またはすべてが含まれる可能性がある。どの1つの計測機器またはプロセスも、フリーフォーム計測の課題に対する万能な解決策とはならない。フリーフォーム光学部品のメーカーは、さまざまな測定ツールを手元に用意する必要があるが、以下ではそのうちのいくつかを紹介する。

三次元測定機（CMM）

フリーフォーム光学部品の測定に最もよく使われるツールは、三次元測定機（CMM）である。CMMには接触型プローブがあり、一般的にはスキャンヘッドに取り付けられたルビー製の球体となっている。このようなシステムの一般的な精度は約±1.0μmである。CMMのメリットは、部品のデータム形状を基準として面を測定できることにある。データム形状（基準）は、製造に向けてフリーフォーム光学部品を定義するために重要なものである。従来の光学パラメータ（ウェッジや中央の厚さなど）は、対称性がほとんどまたはまったくない光学部品に適用するのが難しいためである[1]。これらの基準が

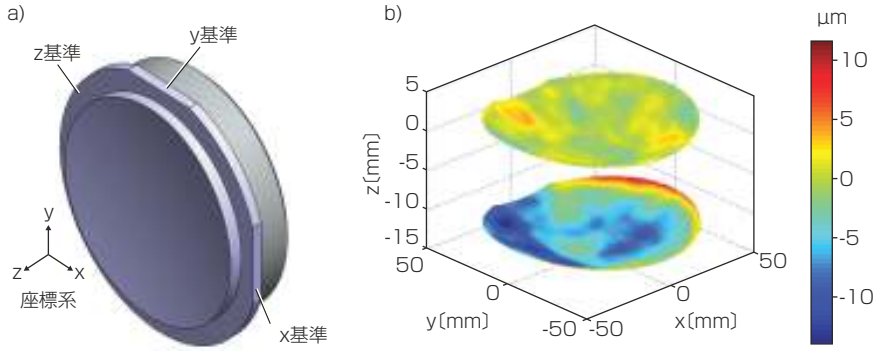

図１　計測目的の基準を、フリーフォーム光学部品の製造時に設けておくことができる。（a）は、部品の設計時にX、Y、Z軸の基準が設けられたフリーフォーム光学部品のモデル。光学部品の各面に求められる絶対位置が、基準からの位置として示される。（b）は、各光学面の不規則性マップ。

CMMによって測定可能な局所座標系となり、フリーフォーム面の位置と向きに関する情報を提供する（**図1**）。CMMは、これらの基準に基づいてフリーフォーム面を測定し、S2SR（surface-to-surface registration）を行うとともに、不規則性マップを生成することができる。CMMは柔軟性が高いことから、フリーフォーム計測に多用されるようになっている。

CMMはフリーフォーム計測に最もよく使われる計測ツールだが、欠点がないというわけではない。接触型プローブを持つセンサであるため、光学部品を傷つけてしまう恐れがある。傷つけるリスクを最小限に抑えるために、測定は、プローブのドラッグによる連続パターンではなく、ポイントごとのパターンで行われる。このようなスキャンは時間のかかる処理であり、スキャンはポイントにつき2～3秒を要するほど遅い場合がある。中空間周波数誤差を取得するための高密度スキャンは、最大で8時間かかる可能性がある。

CMMのもう1つの欠点が精度である。前述のとおり、CMMの一般的な精度限界は約±1.0μmである。しかし、フリーフォーム部品に対して、CMMの能力を上回る精度が求められる場合がある。高精度の測定が求められる場合は、高精度表面形状測定装置を用いることができる。

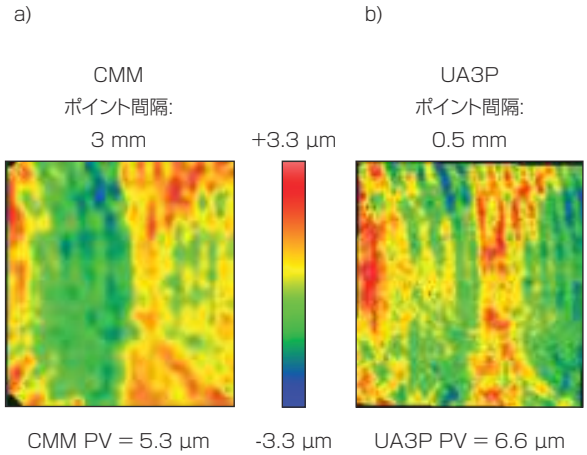

図2　CMM（a）とUA3P（b）によるフリーフォーム光学部品の測定結果を比較した様子。データは、フリーフォーム光学部品の80×80mmのアパーチャを示したもので、カラーバーは公称値からのずれを表している。UA3Pの方が密度と精度が高いため、中空間周波数誤差が適切に定量化される。

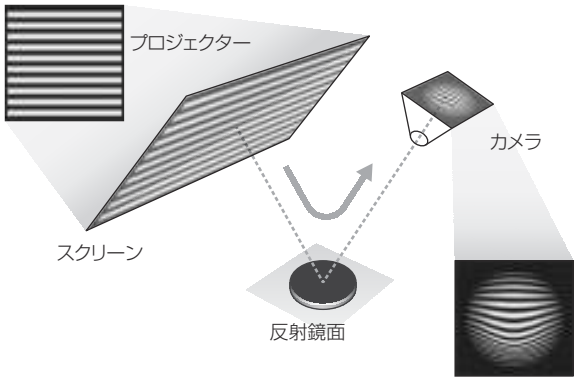

図3　デフレクトメトリの原理を示した図。液晶モニターからのフリンジを、試験対象面で反射させたものを、カメラで撮影する。投影フリンジの偏光から、表面傾斜のマップを取得する。表面傾斜を積分することによって、表面形状が得られる[3]。

高精度表面形状測定装置

パナソニックの高精度表面形状測定装置「UA3P」は、原子間力測定プローブを用いて、変位干渉法によって位置測定を行う超高精度三次元測定機である[2]。この計測ツールは、面の傾斜角が30°未満の場合で約50nm精度のデータを生成することができる。CMMによる高密度測定と比べて、UA3Pを使用すれば測定時間が1日から数時間にまで短縮される。

フリーフォーム部品の高精度表面測定が重要であることは、光学部品サンプルの中空間周波数誤差を測定する場合に顕著となる（**図2**）。取得時間をどちらも40分間として測定を行った結果、UA3PはCMMの36倍のデータポイントを取得することができた。CMMとUA3Pでデータは十分に一致しているが、UA3Pのデータの方が精度と密度が高く、中空間周波数誤差をより詳しく測定することができる。

精度が高く、測定時間が短いことが、UA3Pのメリットである。UA3Pは、CMMとそれよりも高分解能のツールの間の隔たりを埋める計測手法である。高分解能のツールとしては、計算機合成ホログラム（CGH：Computer Generated Hologram）を利用するものなどがあるが、CGHにはコストが高くアライメントが難しいといった課題があり、製造用の実用的なフリーフォーム計測手法としては、独自の問題がある。ただし、UA3PはCMMとは異なり、一般的には基準との相対位置として面を測定しない。また、一般的にUA3PはCMMよりも測定量が小さいため、測定対象は小さなフリーフォーム光学部品に限定される。

フリンジ反射デフレクトメトリ

高速で非接触型のフリーフォーム計測手法の必要性に応えるために、米オプティマックス・システムズ社（Optimax Systems）はフリンジ反射測定装置を開発した。フリンジ反射（デフレクトメトリとも呼ばれる）は、光学面の局所的

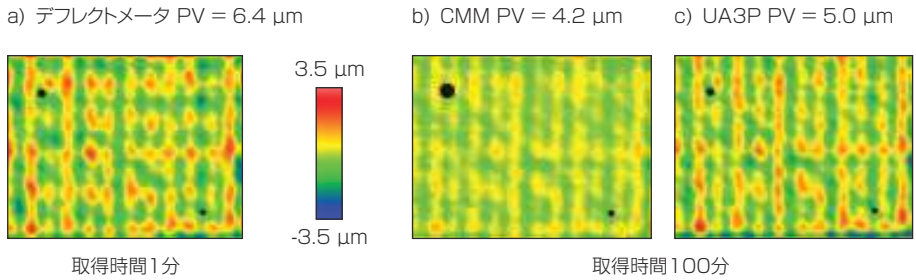

図4 フリーフォーム鏡面を、デフレクトメータ(a)、CMM(b)、UA3P(c)で測定した結果。データがない黒色領域は、画像登録用に作成されたマークである。

な傾斜を測定する手法である(**図3**)[3]。液晶モニターからのフリンジを、試験対象面で反射させたものを、カメラで撮影する。投影フリンジの偏光から、表面傾斜のマップが取得できる。表面傾斜を積分することによって、表面形状が得られる。

このデフレクトメトリ手法には、CMMや表面形状測定装置であるUA3Pに勝るメリットがある。まず、このデフレクトメトリシステムは非接触型であるため、光学部品を接触プローブによって傷つける心配がない。また、デフレクトメトリは、CCDカメラビジョンシステムをベースとしているので、CMMやUA3Pで数時間を要するデータが数秒間で取得でき、両者に匹敵する空間分解能が得られる。**図4**は、フリーフォーム鏡面の測定サンプルを、CMMとUA3Pによる測定結果と並べて示したものである。データは、公称値とのずれを示している。

図4に示した非接触型デフレクトメトリ手法によるデータは、CMMとUA3Pによるデータとよく相関しており、同じ中空間周波数誤差の様子を示している。デフレクトメトリ手法によるデータは、約1分で取得して解析できたのに対し、CMMとUA3Pでは約100分を要した。研磨が繰り返し行われる光学部品の製造環境においては、計測が高速であれば部品の製造時間は短縮される。

このデフレクトメトリシステムのもう1つのメリットは、その柔軟性である。一例として現在、このデフレクトメトリシステムをロボットプラットフォームに組み込む研究プロジェクトを実施している。ロボットに搭載したこのデフレクトメトリシステム(**図5**)の用途としては、単一のカメラ位置では試験対象面全体を捉えることができないほど、大きなフリーフォーム光学部品や、険しく湾曲しているフリーフォーム部品の測定が挙げられる。このデフレクトメトリシステムは、ロボットアームによってフリーフォーム部品の周囲で動かすことができるので、部品を任意の方向から撮影することができる。その後、複数のサブアパーチャ画像をつなぎ合わせることによって、フルアパーチャデータを取得することができる。

フリーフォーム光学部品を測定するための3つの計測ツールであるCMM、UA3P表面形状測定装置、フリンジ反射デフレクトメトリシステムにはそれぞれ、フリーフォーム計測の特定用途に対する独自のメリットがある。フリーフォーム光学部品の製造がさらに進化し続けるにつれて、メーカー向けの計測ツールも進化していくことだろう。

図5 デフレクトメトリシステムをロボットアームに搭載して、大型で曲率の高いフリーフォーム面を測定できるようにした。

参考文献

(1) M. Brunelle et al., "Importance of fiducials on freeform optics," Proc. SPIE, 9633, 963318 (Oct. 11, 2015).

(2) See https://goo.gl/NyNTN7.

(3) M. C. Knauer et al., "Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces," Proc. SPIE, 5457, 366 (Sep. 10, 2004); doi:10.1117/12.545704.

著者紹介

トッド・ブラロック(Todd Blalock)は、米オプティマックス・システムズ社(Optimax Systems)の研究開発エンジニア。e-mail: tblalock@optimaxsi.com URL: www.optimaxsi.com

LFWJ