干渉計の参照平面誤差補正による高精度な平面度評価の一手法

伊藤俊治＊1　山本昌治＊1

A Method of Flatness Evaluation by Interferometer using Compensation of Reference Flatness Error

Shunji ITO and Masaharu YAMAMOTO

干渉計の参照平面誤差を補正することによって、干渉計を用いた平面度測定の不確かさを向上させる一手法を提案した。本手法は、光軸と垂直な平面内において、直交する２方向に試料平面をシフトさせ、シフト前後の合計３つの干渉計測定データ（以下、測定領域内のCCD画素位置における高さ座標値群を呼ぶ。）から、参照平面誤差を除去した。評価の拡張不確かさはシミュレーションによって検討され、さらに試料としてオプチカルフラットを選択した測定実験において、タイプＡの不確かさが求められた。その結果、シミュレーションでは、評価の拡張不確かさは、試料平面の想定された形状偏差によって異なるが、段差などの特殊な形状を除けば5nm（k＝2）以下であった。また、測定実験におけるタイプＡの不確かさは干渉計本体の値（3nm（2σ））に匹敵した。

１．はじめに

位相シフト法を用いたフィゾー干渉計による平面度測定において、振動や大気の揺らぎを十分に管理した条件下では、測定の不確かさは参照平面誤差を主とする。通常の参照平面誤差は30nm以下であり、これと同等の平面度を評価するには、参照平面誤差を除去する必要がある。

このための手段として、従来、参照平面のみを取りはずし、参照平面誤差を3面合わせ法に準ずる方法で決定した後に、干渉計に取り付ける方法[1]が知られていた。しかし、この方法は他の二つの面を用いて、各2面同士を向かい合わせて測定する必要があるので、参照平面の取り付け位置の正確さが要求され、姿勢の設定に手間がかかるなどの問題があった。

一方、試料を光軸と垂直な平面内でシフトさせる方法が、最近報告されている。筆者らは、光軸と垂直な平面内において試料を微小角だけ回転させる方法と、一方向にシフトさせる方法を併用する手段を提示した[2]。また、３方向にシフトさせた合計四つの測定から参照平面誤差を補正する方法[3][4]も提案されている。しかし、これらの方法は、シフトに伴うヨーイングやローリングの影響を考慮していないか、考慮はしても取り除くには至っていない。

本稿では、完全にはこれらの影響を除去しきれないが、実質上ほとんど無視でき、かつ測定数が従来法より少ない手法を提案する。そして、その拡張不確かさとタイプＡの不確かさを、それぞれシミュレーションと実験によって求めたので報告する。

*1　機械電子部

２．原理

本手法は、シフトに伴うヨーイングやローリングの影響を除去する目的で、干渉計測定データの全体的な傾きとリフトを最小2乗解として求めた後、前処理で除去することを前提とする。また、基本的な測定法は、光軸に垂直な平面内で直交する2方向に試料をシフトし、その前後で通常の測定を合計3回行う。そして、これらの干渉計測定データを前処理した後、参照平面誤差を除去するものである。

２．１　干渉計測定データの傾きとリフトの求め方

図１に、干渉計測定データの全体的な傾きとリフトを最小2乗解として求める方法を示す。図中、光軸はｚであり、シフトする方向の軸はｘ及びｙである。同図において、任意の平面を下式で表す。

$$z = Ax + By + C \qquad (1)$$

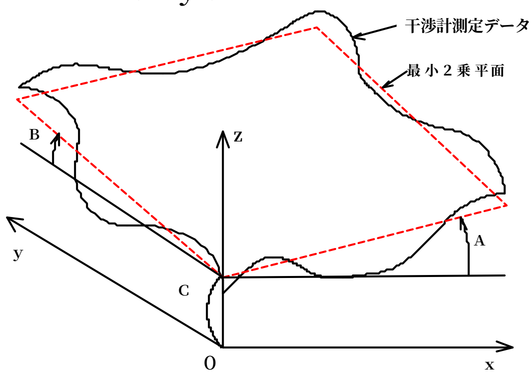


図１　最小２乗平面

干渉計測定データZ（x，y）と任意の平面との差の2乗をεとすると、下式が成り立つ。

$$\varepsilon = \{Z(x, y) - Ax - By - C\}^2 \qquad (2)$$

そして、この平面がZ（x，y）の最小２乗平面であるためには次を満足すればよい。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial A} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial B} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial C} = 0 \qquad (3)$$

上記の条件から、次の方程式（データ点数3行2列の例）が成立する。

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 & x_1 & 1 \\ y_1 & x_2 & 1 \\ y_2 & x_1 & 1 \\ y_2 & x_2 & 1 \\ y_3 & x_1 & 1 \\ y_3 & x_2 & 1 \end{pmatrix}}_{\sim D} \begin{pmatrix} B \\ A \\ C \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} z_{11} \\ z_{12} \\ z_{21} \\ z_{22} \\ z_{31} \\ z_{32} \end{pmatrix}}_{\sim F} \qquad (4)$$

ここで、x_jはｊ番目のｘ座標値、y_iはｉ番目のy座標値、z_{ij}は（x_j，y_i）における干渉計測定データのｚ座標値である。従って、未知数A，B，Cの最小2乗解は次の行列演算から求まる。

$$\begin{pmatrix} B \\ A \\ C \end{pmatrix} = (D^T D)^{-1} D^T F \qquad (5)$$

ここでTは転置を表す。さらに、この傾きとリフトを除去した干渉計測定データZ'（x，y）は下式として定まる。

$$Z'(x, y) = Z(x, y) - Ax - By - C \qquad (6)$$

２．２　基本原理

図2は参照平面誤差を分離する基本原理図である。図２（a）はx方向シフト前のｘ－ｚ断面を示す。図中、S（x）は試料平面の真の断面曲線であり、Sr（x）とS_1（x）は、それぞれ参照平面の断面曲線と干渉計測定データの断面曲線を表す。ここでは、下式が成立する。

$$S_1(x) = S(x) - Sr(x) \qquad (7)$$

図２（b）は試料をｘ負方向にΔだけシフトした様子を示す。同図において干渉計測定データの断面曲線S_2（x）を下式で定義する。

$$S_2(x) = S(x+\Delta) - Sr(x) \qquad (8)$$

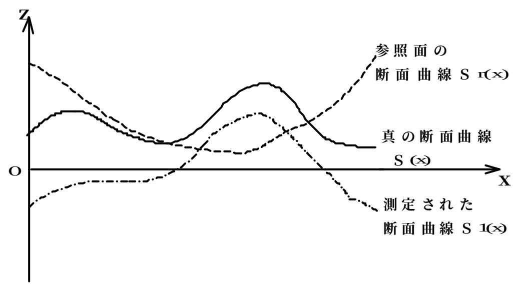
また、式（７）、（８）から、下式が成り立つ。

$$S_2(x) - S_1(x) = S(x+\Delta) - S(x) \qquad (9)$$

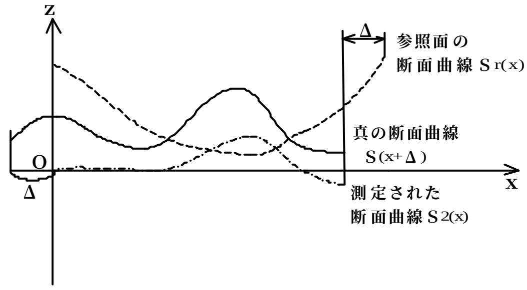
今、試料平面の真の断面曲線を簡単のため４次の多項式で下式のように近似できると仮定する。

$$S(x) = g_1 x^4 + g_2 x^3 + g_3 x^2 + g_4 x + g_5 \qquad (10)$$

式（１０）を式（９）へ代入することによって次式を得る。



（a）シフト前



（b）シフト後

図２　基本原理

$$\begin{aligned} S_2(x) - S_1(x) &= g_1(4x^3\Delta + 6x^2\Delta^2 + 4x\Delta^3 + \Delta^4) \\ &+ g_2(3x^2\Delta + 3x\Delta^2 + \Delta^3) \\ &+ g_3(2x\Delta + \Delta^2) \\ &+ g_4\Delta \end{aligned} \qquad (11)$$

ここで、λを次式で定義する。

$$\lambda_1(\Delta, x) = 4x^3\Delta + 6x^2\Delta^2 + 4x\Delta^3 + \Delta^4$$
$$\lambda_2(\Delta, x) = 3x^2\Delta + 3x\Delta^2 + \Delta^3$$
$$\lambda_3(\Delta, x) = 2x\Delta + \Delta^2$$
$$\lambda_4(\Delta, x) = \Delta$$

またLを評価長さとし、行列Hを以下のように定める。

$$H = \begin{pmatrix} \lambda_1(\Delta, 0) & \lambda_2(\Delta, 0) & \lambda_3(\Delta, 0) & \lambda_4(\Delta, 0) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_1(\Delta, x) & \lambda_2(\Delta, x) & \lambda_3(\Delta, x) & \lambda_4(\Delta, x) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_1(\Delta, L) & \lambda_2(\Delta, L) & \lambda_3(\Delta, L) & \lambda_4(\Delta, L) \end{pmatrix}$$

以上の関係から、多項式の係数は次の行列演算による最小2乗法から求まる。

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T \begin{pmatrix} S_2(0) - S_1(0) \\ S_2(x) - S_1(x) \\ \cdots\cdots \\ S_2(L) - S_1(L) \end{pmatrix} \qquad (12)$$

ここでは4次の例を示したが、2項定理を用いてｎ次の多項式に拡張することは容易である。次に、多項式の最適な次数の決定方法について述べる。今、測定断面曲線$S_1(x)$、$S_2(x)$には、偶然誤差ε_1、ε_2が混入しているから、次式が成り立つ。

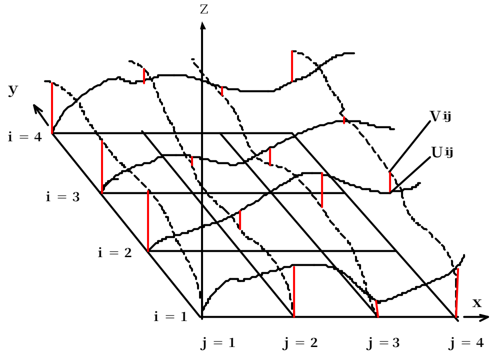


図３　定数の求め方

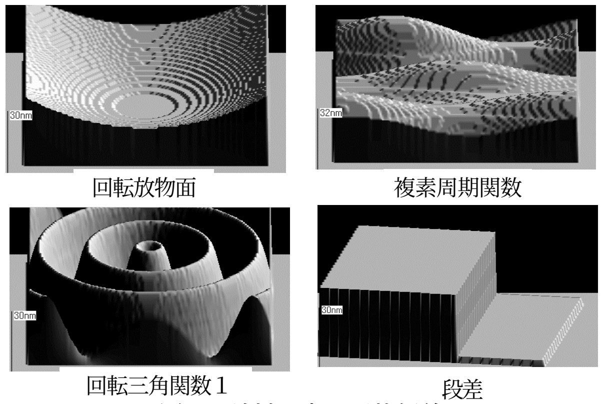


図４　試料の真の形状偏差

$$S_1(x) = S(x) - Sr(x) + \varepsilon_1$$
$$S_2(x) = S(x+\Delta) - Sr(x) + \varepsilon_2$$

従って、次式の左辺を最小化するように多項式の次数を決定するものである。

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = S_2(x) - S_1(x)$$
$$\qquad - S(x+\Delta) + S(x)$$

具体的には、評価関数Ｅを下式のように定め、Ｅを最小化する次数を求める。

$$E = \{\Sigma\Sigma(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2 / L^2\}^{0.5} \tag{13}$$

同様の計算をｙ方向の断面曲線群にも適用し、多項式Ｓ（ｙ）群を求める。ちなみに、ｘ、ｙ方向の真の断面曲線群の次数は、それぞれの方向ごとで共通とした。

２．３　定数の決定

式（１１）の計算過程で多項式の定数g_5は消去されるので、g_5を求める目的で、次の操作を演算で行う。すなわち、測定領域内のすべての画素位置において、ｘ、ｙ方向の断面曲線ついてｚ座標値の差を求め、その2乗和が最小になるように各々の断面曲線のｚ切片を求める。このｚ切片が多項式の定数項g_{i5}、g'_{j5}になる。この概念図を図3に示す。図において記号は以下のとおりである。

ｉ：画素のｙ方向配列番号

ｊ：画素のｘ方向配列番号

U_{ij}: ｘ方向断面曲線のｉｊ画素におけるｚ座標値

V_{ij}: ｙ方向断面曲線のｉｊ画素におけるｚ座標値

定数の数学的な求め方を以下に記述する。まず、各画素におけるｚ方向の合致誤差ε_{ij}は下式となる。

$$\varepsilon_{ij} = U_{ij} - V_{ij} + g_{i5} - g'_{j5}$$

この誤差の２乗和をWとすると、Wを最小にする条件は下式となる。

$$\frac{\partial W}{\partial g_{i5}} = \frac{\partial W}{\partial g'_{j5}} = 0$$

上の条件から、次式（データ点数3行3列の例）が導かれる。

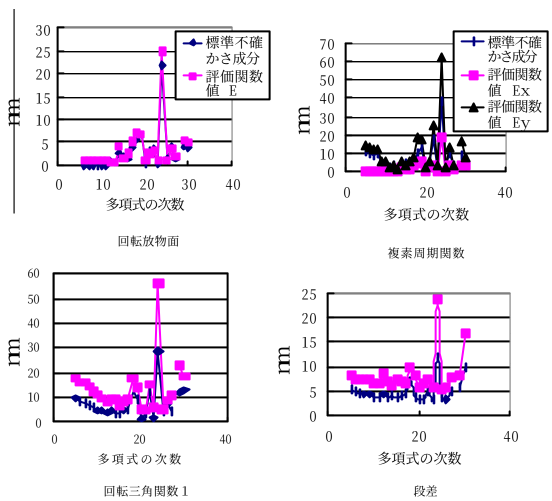


図５　多項式の次数と近似不確かさ成分の関係

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_{15} \\ g_{25} \\ g_{35} \\ g'_{15} \\ g'_{25} \\ g'_{35} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11}-U_{11} \\ V_{12}-U_{12} \\ V_{13}-U_{13} \\ V_{21}-U_{21} \\ V_{22}-U_{22} \\ V_{23}-U_{23} \\ V_{31}-U_{31} \\ V_{32}-U_{32} \\ V_{33}-U_{33} \end{pmatrix}$$

式(12)と同様の行列演算から多項式の定数g_{i5}、g'_{j5}が求まる。

３．シミュレーション

本手法による評価の拡張不確かさを検討する目的で、以下のシミュレーションを行った。

３．１多項式の次数と近似標準不確かさ成分の関係

試料平面の真の形状偏差を図４とし、形状偏差のＰＶ値をそれぞれ30nmと定める一方、参照平面誤差を幾何学的な平面と仮定する。このときシフト量を測定領域辺長さの10％としたうえで，本手法の適用をシミュレーションした。そしてもともとの真の形状偏差と計算結果との合致度を標準不確かさ成分として求めた。

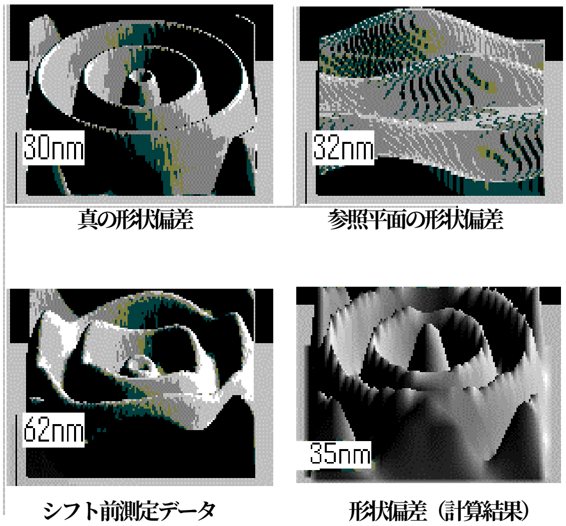


図6　シミュレーション結果

多項式の次数とこの標準不確かさ成分との関係を図５に示す。図中には、式(13)で求まる評価関数値Ｅも併記しており、両者には強い相関があることが分かる。従って、Ｅを最小とする次数が、最も真の形状偏差をよく近似できることが示され、次数決定の方法が妥当であることが明らかになった。同図において、例えば24次で標準不確かさ成分が大きいのは、行列Ｈの正則性が脅かされ、逆行列の計算時に零に近い値による除算が生じた結果と考えられる。

また、試料平面の真の形状偏差として図４の回転三角関数１を選択し、参照平面誤差として複素周期関数を選んだ場合のシミュレーション結果を図６に示す。同図において左下の数値はＰＶ値を示しており、良好に参照平面誤差が除去されていることが分かる。

３．２　シフト時のヨーイングとローリングに伴う標準不確かさ成分

本手法では、干渉計測定データを前処理することによって、試料をシフトする際に生ずるヨーイングとローリングの影響を除去している。仮に、生の干渉計測定データに傾きとリフト量が混入しており、前処理を施さなかった場合に、どの程度の標準不確かさ成分が生ずるかを図７に示す。ちなみにシフト量は測定領域辺長さの10%である。同図から、傾きあるいはリフトの影響は大変大きいことが分かる。また、同図には示さなかったが、干渉計測定データに傾きがある場合、本測定結果には２次成分（放物面）が現れ、シフト前後で干渉計測定データがリフトする場合には１次成分（傾き）が生ずることが明らかになった。干渉計測定データに２．１節の前処理を施し、これらの影響を除去すると、図７に示すように標準不確かさ成分は大幅に低減することが分かる。

３．３　シフト量の違いに伴う標準不確かさ成分

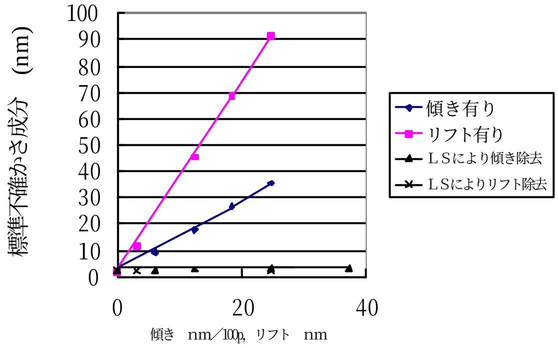


図7　傾きとリフトの影響

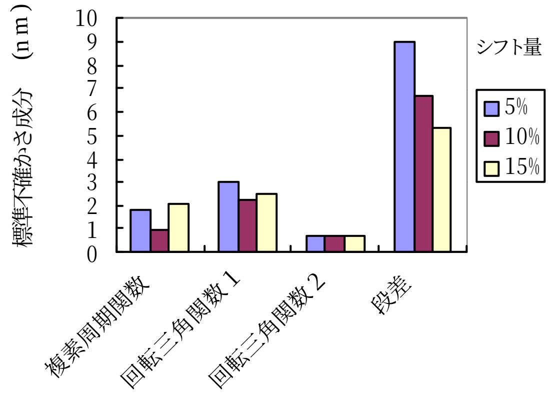


図8　シフト量の影響

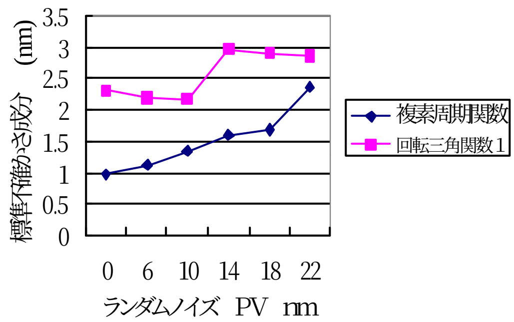


図9　ランダムノイズの影響

シフト量を測定領域辺長さの5，10，15％としたときの標準不確かさ成分を図８に示す。図中、回転三角関数2は1山の正弦波を原点中心に回転させた形状偏差である。同図から、試料平面の真の形状偏差が異なると最適なシフト量も相違するが、これらの範囲では大差ないことが分かる。

3．4　ランダムノイズに伴う標準不確かさ成分

シフト量を測定領域辺長さの10%とし、ランダムノイズを三つの干渉計測定データに混入させた場合の標準不確かさ成分を図9に示す。同図から、ランダムノイズのPV値が大きいほど、標準不確かさ成分は劣化することが分かる。ただし、実際の干渉計のランダムノイズ（６nmPV）では、式（12）の最小2乗法の効果から、その影響は0.2nm程度と小さいことが示された。

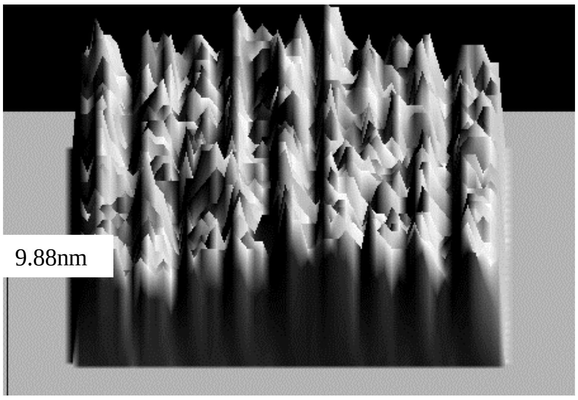
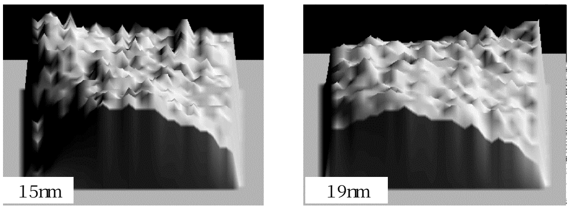


図10　干渉縞の影響



（a）０度設置　（b）９０度設置

図11　実験で求めた参照平面誤差

3．5　干渉縞濃淡に伴う標準不確かさ成分

図10に、故意に試料を傾けて設置し、干渉縞を4本発生させた状態で獲得した干渉計測定データを示す。同図から、干渉縞の濃淡による測定誤差が干渉縞１本につき、二つの筋（深さ3nm程度）として、干渉計測定データに生ずることが分かる。これから、もし干渉縞を0.5本以内に傾き調節すればＰＶ値3nm程度の放物面が干渉計測定データに現れることが予想される。本稿では示さないが、この干渉縞の濃淡の影響は、シフト量10%の本手法による評価結果に、ＰＶ値4nm程度の3次成分として現れることがシミュレーションにより確かめられた。

3．6　拡張不確かさ

3.1節から3.5節においてシフト量を測定領域辺長さの10%としてシミュレーションすると、多項式による近似、シフト時の運動誤差(零から20nm,20nm/100pまでの増分値)、ランダムノイズ（零から6nmＰＶまでの増分値）、干渉縞の濃淡（4nmＰＶ）に関する標準不確かさ成分は、それぞれ2.3、0.3、0.2、1nmと見積もられるから誤差伝搬の法則で求まる総合的な合成標準不確かさは次式から2.5nmと定まる。

$$(2.3^2+0.3^2+0.2^2+1^2)^{0.5}=2.5 \quad (\mathrm{nm})$$

ただし、試料平面の真の形状偏差として、段差などの特殊な形状は除いた。また、k＝２としたときの拡張不確かさは２×2.5nm＝５nmになった。参照平面誤差の大きさを30nm程度と考えれば、この値はかなり良好であるといえる。

４．実験

試料として、オプチカルフラットを選択して、シフト量を測定領域辺長さ（30㎜）の10％とした実験を行った。光軸に対して垂直な面内で、同一試料の０，90度設置の２種類をそれぞれ５回ずつ繰り返し測定した。本手法で求めた試料平面の形状偏差（画素数60×60）を干渉計測定データから減算することによって参照平面誤差を求め、図11に示す。同図(a)は０度設置であり、同図(b)は90度設置の場合である。使用した参照平面は同じだから、(a)、(b）の結果が合致するほど不確かさが少ないといえる。図11において、両者はよく合致している。

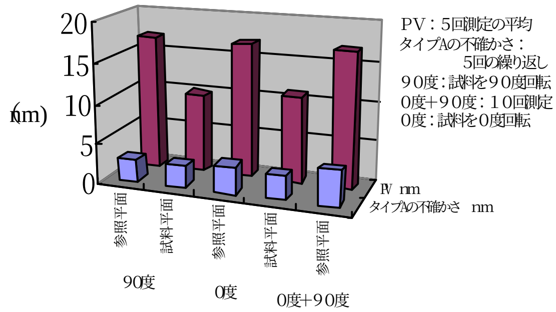


図12　ＰＶ値とタイプＡの不確かさ

図12に本手法で分離された試料平面と参照平面のＰＶ値とタイプＡの不確かさを示す。同図から、本手法の繰り返し実験におけるタイプＡの不確かさは3nm程度であり、干渉計本体の値に匹敵することが分かった。また、設置方位によって試料の測定領域が異なるので、0度と90度設置の繰り返し測定では、タイプＢの近似不確かさが相違する。従って、両者を合計した10回の繰り返し測定から統計的処理で求めた不確かさは、純粋にタイプＡの不確かさではなく、やや大きめの5nmになった。

５．結び

本手法は、３回の干渉計測定データから参照平面誤差を除去し、多項式で真の形状偏差を近似する方法である。この方法を、そのまま適用すると、試料のシフトに伴うヨーイングとローリングによって、評価の不確かさが大変大きくなるという欠点がある。しかし干渉計測定データから、最小2乗解としての傾きとリフトを前処理で除去することによって、評価の拡張不確かさを5nm（k＝2）まで低減でき、参照平面誤差を良好に除去できるという事実がシミュレーションから明らかになった。

参考文献

1) G.Schulz and J.Schwider：Appl.Opt,**6**(6),1077 (1967).
2) 伊藤、日名地、堀内、成清：精密工学会誌,**58**(5)、883(1992).
3) 清野、孫、高：精密工学会誌,**64**(8)、1137(1998).
4) 清野、孫、強、高：1999度精密工学会秋期論文集、457(1999).