

プラスチック製低剛性製品の精密測定技術の構築*

和合 健**、熊谷 和彦***、小野寺 学****

プラスチック材を高精度に寸法測定するために補正による形状誤差低減を試みた。プラスチック材の物性値による理論値と実験値を比較して再現性を検証した。その結果、測定力 0.1N、スタイラスチップ $\phi 2\text{mm}$ での押し込み量は塩化ビニルの $0.58\mu\text{m}$ が最大値となり、測定力 0.1N で測定することにより押し込み量を無視できるので補正を行う必要は無い。たわみ量については実験値と理論値の差の平均値（測定位置 P2、測定力 0.4N の場合）が最大で $8.5\mu\text{m}$ となり再現しない。補正の実現には誤差が大きくなった原因の解明が必要である。

キーワード：補正、押し込み量、たわみ量、測定力、プラスチック

Development of the precision measurement technology for plastic's item characterized low rigidity

WAGO Takeshi, KUMAGAI Kazuhiko and ONODERA Manabu

Experiment as measuring error of form to reduce was tried in order to accomplished high precision measurement for plastic's item. It was verified to compare between the theoretical values and the experimental values caused by physical properties of plastic material. As a results, there is no necessity to compensate for indentation caused probing force as 0.1N, because of indentation is $0.58\mu\text{m}$ as maximum value in case of probing force as 0.1N, stylus tip as $\phi 2\text{mm}$ and plastic material as VCM/PVC, therefore indentation can be ignored. A compensation is not realized, because of mean of difference from experimental values and theoretical values is $8.5\mu\text{m}$ (in case of measurement position P2 and probing force 0.4N) as maximum so large characteristic of elastic deflection. It is required to clear error caused.

key words : compensation, indentation, elastic deflection, probing force, plastic

1 緒 言

スタイラスを測定物に接触し測定する方法は、測定長さの起点を明確に定義できるため高精度な長さ測定を行うことができる。しかし、プラスチック製品は鋼製品と異なり低剛性材であるためスタイラスの測定力により測定物の変形が生じ、測定長さの起点を明確に定義することが難しい。測定力に対する測定物の変形はヤング率、硬さによる材質固有の物性値に影響されると予想した。

プラスチック材料の変形量が物性値を係数とした理論値と整合性がとれ、繰り返し性が有れば補正により変形誤差を取り除くことができる。ここでは、10 種類のプラスチック材種を取り上げ、材種毎の測定力に対する変形量の関係を求め補正による誤差低減を図った。

2 プラスチック材種及び特性

プラスチック材は金型パーツカタログ¹⁾で使用されている以下に示す 10 種類を取り上げた。プラスチック材の本報告での呼び名はカッコ内のとおりとした。試験片は

射出成形後の切削加工により寸法が整えられており、個々の材種の特徴を以下に示す。

- (1) ポリアセタール (JW) : 機械的強度に優れる。
- (2) MC ナイロン (MC) : ポリアセタールに比べて耐摩耗性に優れる。
- (3) 超高分子量ポリエチレン (PW) : 低温下においても優れた耐衝撃性を示す。
- (4) ABS 樹脂 (AB) : 大きな欠点無く、機能品から装飾品まで幅広く使用。
- (5) ベークライト (紙系) (BY) : 優れた電気絶縁性、耐熱性を持つ。
- (6) ベークライト (布系) (BH) : 布系タイプは紙系タイプよりも強度が高い。
- (7) エポキシガラス (EP) : ガラス繊維をエポキシ樹脂で含浸し積層した材料。
- (8) アクリル (AP) : 透明性、耐候性、加工性に優れ、産業機械カバー等で使用。
- (9) 塩化ビニル (EN) : 耐薬品性。耐燃性、耐候性に優

* 地域新生コンソーシアム研究開発事業

**** 株式会社いわて金型技研

** 電子機械技術部

*** 株式会社東北パワープロジェクト

れる。

(10) ポリカーボネイト(PC): 透明性樹脂材料の中では最高クラスの衝撃強度。

3 プラスチック材の物性値測定

3-1 目的

測定力による測定物の変形量は測定物材質に固有な物性値となるヤング率や硬さに依存すると予想した。プラスチック材は密度や配合から個々に物性値が異なり、理科年表では材種毎に幅を持つ値が示されている。ここでは、試験片固有のヤング率と硬さを測定して検定した。

3-2 ヤング率算出のための実験装置

プラスチック材のヤング率を測定する装置は、マシニングセンター（三井精機製VS3A）と工具動力計（KISTLER製 9257B）を使用した。マシニングセンターは主軸片持ち支持型でZ軸は主軸側が可動し、X、Y軸はテーブル側が可動する。マシニングセンターの位置決め分解能は1μmで行うことができる。工具動力計は水晶圧電式3成分型で感度が $F_y: -7.5\text{pC/N}$ 、固有振動数が3.5kHzとなる高感度型を使用した。工具動力計の出力はメモリハイコーダの表示部に表示されたデジタル数値により取得した。

3-3 ヤング率算出のための実験方法

図1にヤング率算出のための応力-ひずみ測定方法を示す。試験片の突き出し長さの全長は83mmとして、先端から10mm上がった突き出し長さ73mmの位置で点接触により工具動力計に当てる。マシニングセンターのY軸送りにより1μmピッチで工具動力計を移動し、試験片に応力を与える。マシニングセンターの送り量に対する工具動力計からの力量を取得して試験片のヤング率を算出する。図2にポリアセタール(JW)の力-たわみ曲線を示す。ヤング率は式(1)から算出した。

$$E = P l^3 / (3 I_z \cdot v_B) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $I_z (\text{m}^4)$ は断面二次モーメントで $I_z = (1/12) \cdot b h^3$ で表し、 b は断面の横方向長さ(m)、 h は断面の縦方向長さ(m)となる。 E はヤング率(N/m^2)、 P は加えた力(N)、 l は梁の長さ(m)、 v_B は変位量(m)となる。

3-4 ヤング率を算出した結果

各試験片において算出したヤング率を図3に示す。ヤング率はエポキシガラスが最も大きく $0.613 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ となり、2番目にヤング率が大きい材種はベークライト(紙系)の $0.473 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ となった。本事業でMiniSDカードの材料にはABS樹脂を使用し、この試験片でのABS樹脂のヤング率は $0.137 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、歯車にはポリアセタールを使用し、この試験片でのポリアセタールのヤング率は $0.148 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ となった。

3-5 硬さの測定方法

プラスチック材の硬さ測定方法は、JIS K 7202-2:2001（プラスチック硬さの求め方、第2部：ロックウェル硬さ）と、JIS K 7215:1986（プラスチックのデュロメー

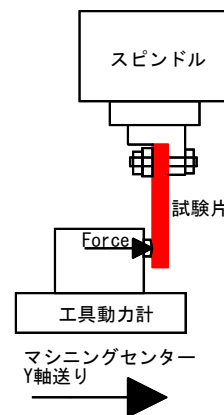


図1 ヤング率の測定方法

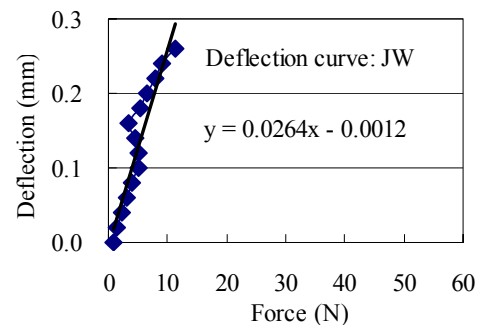


図2 ポリアセタール(JW)の応力-たわみ曲線

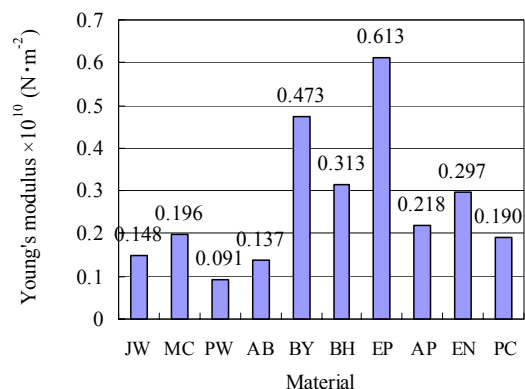


図3 ヤング率の測定結果

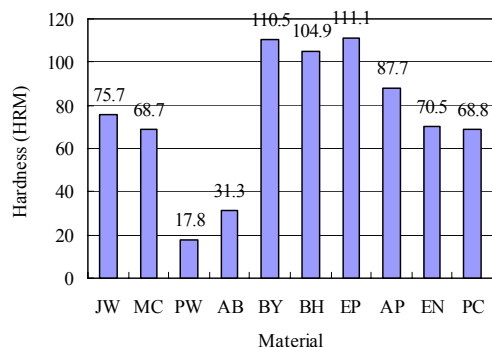


図4 硬さ(HRM)の測定結果

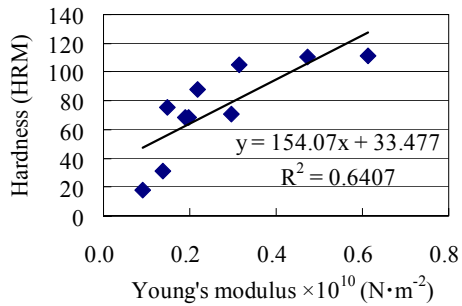


図5 ヤング率と硬さの検定

タ硬さ試験方法) の二つが規定されている。デュロメータ法は円錐状の測定子を測定物に一定の力で押し込んだ場合の押し込み深さで硬さを推定し、簡易的なプラスチック材の品質管理で使用される。本報告では硬さ測定値の正確さが高いロックウェル法により測定を行った。ロックウェルスケールは M として、鋼球圧子直径 6.35±0.015mm により基準荷重 98.07N、試験荷重 980.7N により試験片に対して荷重を与え押し込み量から硬さを算出した。硬さ測定の結果を図 4 に示す。ロックウェル(HRM)による硬さ試験の結果、ヤング率と同様にエポキシガラスが最も硬さが大きく HRM111.1 となり、次はペークライト(紙系)が HRM110.5 となった。コンソーシアム事業での標準成形材料として使用した ABS 樹脂は HRM31.3、ポリアセタールは HRM75.7 となった。

3-6 ヤング率と硬さの検定

ヤング率と硬さの検定を行った結果を図 5 に示す。相関係数は 0.80 となりプラスチック材の機械的強さの指標となるヤング率と表面硬度は相関が高いことがわかった。このことから、比較的容易に行える硬さ測定により材料の機械的強さも同時に推測することができる。

4 プラスチック材の押し込み量測定

4-1 目的

図 6 に概念を示す、測定力によるプラスチック材種毎の押し込み量の大きさについて検証した。非接触式測定法となるレーザ変位式により試験片の厚さを測定し、その測定値を参照値として CMM による測定結果と比較した。

試験片は金型パーツカタログ品となる 60×60×40mm の大きさのプラスチック材、10 種類とした。

4-2 レーザ変位式による標準値の値付け方法

レーザ変位式測定機の指示誤差は機械的な位置決め誤差が大きく影響し、Z 軸では $2\sigma = 0.1 + 0.3L/10\mu\text{m}$ (L は測定長さ mm) となる。図 7 に測定方法を示す。測定機の測定テーブル上に表示値 6.5mm のブロックゲージを置き、その上に試験片を自由状態で置いた。試験片の凹型及び凸型の形状により設置面との隙間が測定誤差になるため予めポイントレーザ方式の別の非接触式測定機で試験片の平面形状を測定した。試験片の厚さ測定方法は、ブロックゲージ上面を測定機の自動焦点機能により Z 座標の

ゼロ点とし、その後ブロックゲージ上に試験片を乗せ試験片上面高さを測定した。測定位置は試験片の中央として測定の繰り返しは 3 回とした。測定時の温度は 19.8℃、湿度は 27% である。

4-3 レーザ変位式による実験結果

ブロックゲージ上面を Z 軸のゼロ点としたためブロックゲージと試験片の密着度や反復(時間間隔が大きく、測定物を取り外し再度置いた場合)では試験片上面の測定位置が変わり微妙な表面状態の変化により測定値のばらつきが大きくなった。繰り返し 3 回の測定において設置面に対し試験片を強く押しつけた 2 回目の値が 1 回目と 3 回目より小さく測定された。ブロックゲージと試験片の隙間が除かれている 2 回目の測定値を採用した。

4-4 CMM による試験片の厚さ測定方法

CMM により試験片の厚さ測定をした。CMM の指示誤差は一軸の場合で $U_1 = 0.5 + L/900\mu\text{m}$ (L は測定長さ mm) となり、1μm 未満の測定誤差となる。Z 座標のゼロ点は表示値が 13.5mm のブロックゲージの上面として、2 個の φ25mm の円筒型マグネットによりブロックゲージを固定した。試験片の厚さ測定は、CMM の φ2mm のスタイラスチップで測定力が 0.1N、0.2N、0.4N、1.0N の 4 水準として測定の繰り返しは 2 回とした。測定面はレーザ変位式と接触式では同一とし、測定時の温度は 20.0℃、湿度は 28% であった。接触式では測定力による押し込み量が生じる

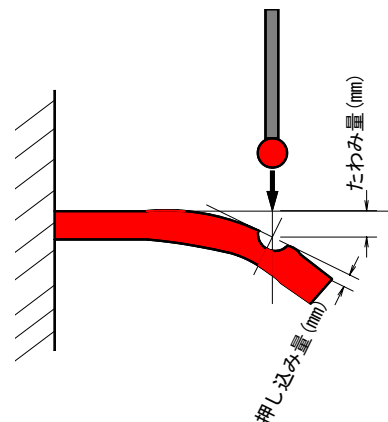


図6 押し込み量とたわみ量の定義

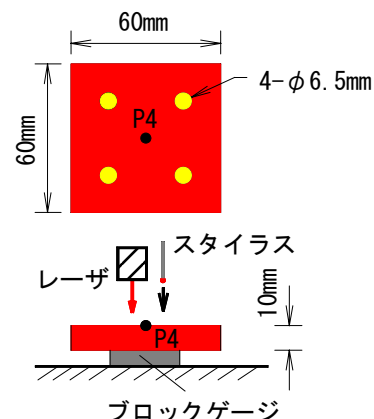


図7 押し込み量の測定方法

表1 レーザ変位式と接触式の試験片厚さの結果

(Unit:mm)			
Material	CMM	Leazer	Difference (μm)
JW	10.7937	10.7925	1.2
MC	10.6341	10.6445	-10.3
PW	10.0805	10.0856	-5.1
AB	10.5276	10.5211	6.5
BY	10.2864	10.2832	3.1
BH	10.5205	10.5181	2.4
EP	10.3555	10.3411	14.4
AP	10.0366	10.0324	4.2
EN	10.3061	10.2913	14.7
PC	9.8991	9.8973	1.8
Mean:			6.4

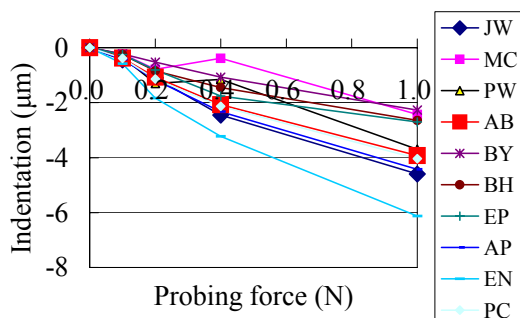


図8 全材種の押し込み量

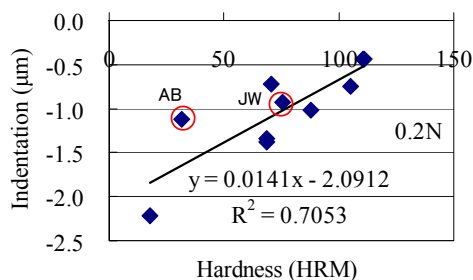


図9 硬さと押し込み量の検定

ためゼロ点決定が難しいため、4段階の測定力による押し込み量から一次式を近似し、その式を関数としてゼロ点を推測した。以上の算出方法で求めた結果を図8に示す。

4-5 レーザ変位式と接触式の比較及び考察

レーザ変位式と押し込み量補正の接触式を比較した結果を表1に示す。差の最大値はエポキシガラスの14.4μmとなり、最小値はポリアセタールの1.2μm、差の平均値は6.3μmとなった。レーザ変位式では試験片をブロックゲージへの置き方でZ軸座標が大きくばらつき、2回目を基準にして1回目と3回目の差の平均値は6.2μmでありレーザ変位式と押し込み量補正の接触式との差が包含される。

接触式で測定力が0.1Nと押し込み量補正の接触式とのZ軸座標を比較した結果、差の平均値は0.35μmとなった。最大値は塩化ビニルが0.6μm、ABS樹脂は0.4μm

となった。この結果から0.1Nの測定力では押し込み量が最大で0.6μmと小さいことからCMMによるプラスチック材の測定では0.1Nでプロービングすることで押し込み量は0.6μmとなり無視できる。ただし、通常のタッチトリガ方式のプローブでは測定力は0.7Nとなり単純計算で4.2μmの押し込み量が生じることから高精度測定では大きな誤差となる。

4-6 押し込み量と硬さの検定

押し込み量と硬さの検定を行った結果を図9に示す。4つの測定力の平均値は0.83となり相関が認められる。

このことから硬さの小さい超高分子量ポリエチレンやABS樹脂で測定力が大きな接触式測定では押し込み量が測定誤差に大きく影響するので注意が必要である。押し込み量の大きさは測定力が0.2N時、ポリアセタールで0.9μm、ABS樹脂で1.1μmを算出した。

5 プラスチック材のたわみ量測定

5-1 目的

測定力が可変できるCMMを使用して、図6に示す方法でプラスチック材のたわみ量を実測した。実験で算出したヤング率と測定力設定値から片持ち梁支持のたわみ量の理論値を算出し、実測値と比較した。

5-2 実験装置及び方法

たわみ量の試験片はヤング率を測定した試験片と同一梱包された別の試験片であり、同一形状である。

図10に示す固定方法でCMMの測定テーブル上にクランプで固定した。測定力を加える位置は片持ち梁支持において固定位置端面からの長さが73mm、48mm、23mmの3水準とした。試験片の厚さは水平方向が40mm、垂直方向が10mmとして、測定力はCMMのスタイラスチップφ2mmにより垂直下向き方向に0.1N、0.2N、0.4N、1.0Nの4水準とし、繰り返し3回の測定を行った。

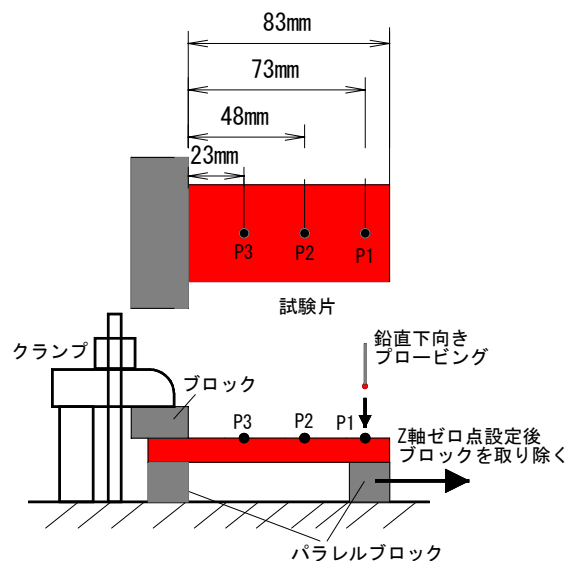


図10 たわみ量の測定方法

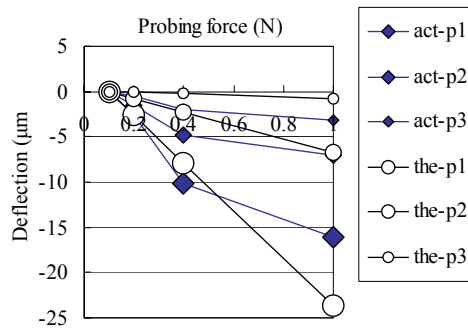


図 11 ポリアセタール(JW)のたわみ量の理論値と実験値の比較（押し込み量を含む）

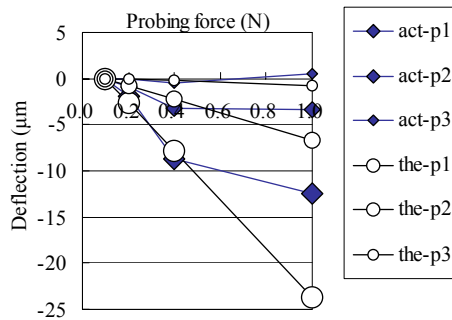


図 12 ポリアセタール(JW)のたわみ量の理論値と実験値の比較（押し込み量を除く）

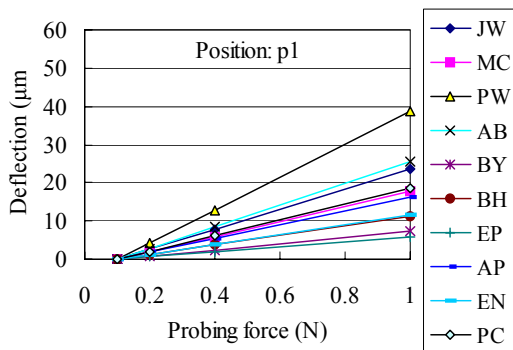


図 13 たわみ量の理論値

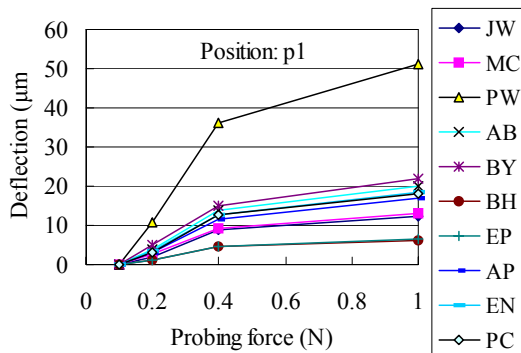


図 14 たわみ量の実験値（押し込み量を除く）

5-3 実験結果及び考察

実験で得たヤング率を使用し算出したたわみ量の理論値とCMMのプロビング力を可変して実験で求めたたわみ量を比較した。梁の長さが短いP3ではたわみ量が小さいため押し込み量の影響が顕著になり押し込み量を補正する必要がある。図11、図12にポリアセタール(JW)のたわみ量の理論値と実験値の比較を示し、図11は押し込み量を含む場合で図12は押し込み量を除いた場合である。図12に示す押し込み量を除いた場合でたわみ量が理論値に近い結果となった。プラスチック材種10種類の平均値では押し込み量を除いた場合で理論値からの差は $4.9\mu\text{m}$ （図10に示した測定位置P1、測定力0.2N、0.4N、1.0Nの3水準）、押し込み量を含んだ場合は $5.9\mu\text{m}$ となり押し込み量補正の効果が表れた。

図13、図14に10種類の結果を示す。図13はたわみ量の理論値、図14は実験値である。理論値と実験値の差は測定位置P2時の0.4Nが $8.5\mu\text{m}$ となり最も大きい。

実験値が二次曲線状の分布を示した原因は、プラスチック材料の塑性変形、プラスチック材料の組織不均一性、動的なプローブ機構に起因する測定誤差による3つの原因を推測した。補正を実現するためには二次曲線状の分布となる原因の詳細な解明が必要である。

6 結 言

プラスチック材を高精度に寸法測定する方法について調べた。補正による形状誤差低減を図るために、プラスチック材の物性値による理論値と実験値を比較して再現性を検証した。

- (1) 10種類のプラスチック材において、ヤング率と硬さの相関係数が0.80となり相関があり、比較的容易に行える硬さ測定から材料の機械的強さを推測することができる。
- (2) レーザ変位方式と接触式で同一のプラスチック材の厚さを比較した結果、二つの方式の差の平均値は $6.3\mu\text{m}$ となった。レーザ変位方式は反復によりばらつく幅が $6.2\mu\text{m}$ と大きく必ずしも測定力が小さい非接触式が正しいとは限らない。今後、異なる測定原理による正確な値付けが必要である。
- (3) 測定力0.1N、スタイラスチップ $\phi 2\text{mm}$ での押し込み量は塩化ビニル $0.58\mu\text{m}$ が最大値となり、測定力0.1Nで測定することにより押し込み量を無視できる。
- (4) 硬さと押し込み量を検定した結果、相関係数は0.83と算出され相関が認められる。
- (5) たわみ量の理論値と実験値を比較した結果、押し込み量を除いた場合で理論値からの差は $4.9\mu\text{m}$ （測定位置P1、測定力0.2N、0.4N、1.0Nの3水準）、押し込み量を含んだ場合は $5.9\mu\text{m}$ となり押し込み量補正の効果が表れた。
- (6) たわみ量の理論値と実験値の差は、測定位置P2時の

0.4N が $8.5\mu\text{m}$ となり最も大きい。たわみ量の実験値が二次曲線状の分布を示した原因は、プラスチック材料の塑性変形、プラスチック材料の組織不均一性、動的なプローブ機構に起因する測定誤差プラスチック材料の塑性変形などが原因を推測した。補正を実現するためには二次曲線状の分布となる原因の詳細な説明が必要である。

最後に、データ面を正確に規定できないプラスチック材は測定原理により異なる結果で測定されるため、どの測定方法による結果が正しいか特定できない。これはプラスチックの表面性状、形状、機械的強さ、硬さ、色などの特性によりそれぞれの測定原理で異なる誤差が生じるためである。

このことからプラスチックの寸法測定では、プラスチック材種の個々の特性を考慮してその特性を把握して適する測定原理による測定を行い、最終的には多数回測定の平均値や標準偏差による統計的管理により分布から推測する方法が妥当と思われる。

文 献

- 1) MISUMI メカニカル加工部品 2005 : 株式会社ミスミ, pp. 115-116 (2005)