超精密直径測定機の開発*

萩原誠一** 眞分幸雄*** 境 久嘉† 茂呂澤孝浩*** 山本英樹†† 神永哲也***

Development of a New Sphere Diameter Measuring Machine

Seiichi HAGIWARA, Yukio MAWAKE, Hisayoshi SAKAI, Takahiro MOROSAWA,
Hideki YAMAMOTO and Tetsuya KAMINAGA

A new laser interferometric measuring machine for the sphere diameter has been developed. In the measuring machine, a 633 nm commercial stabilized He-Ne laser and a variable length vacuum cell made of metal bellows are employed. It became possible to make a vacuum on the laser beam path, so the air turbulences are excluded and the effect of refractive index of the air is eliminated. The Abbe's principle on the alignment of the workpiece with the measurement laser beam is satisfied. Moreover, a control mechanism for measurement contact force, which is coincided with the axis of the measurement laser beam, is developed and applied to the measuring machine. As a result concerning the measuring machine, 10.4 nm (σ) of the measurement reproducibility is confirmed and 74 nm ($k=2$) of expanded uncertainty is estimated.

Key words : sphere diameter measuring machine, laser interferometer, variable length vacuum cell, measurement uncertainty

1. 緒 言

近年のものづくり産業の高度化に伴い、寸法・形状計測への精度要求はマイクロメートルオーダーからナノメートルオーダーへと推移しつつある。^{1)~4)} 精密測定における省力化の旗手として広く普及してきた三次元測定機（以下 CMM）にもサブマイクロメートルの精度の要求が増えてきている。CMM の多くは三軸直交座標系からなる測定空間とその空間内を走査可能な計測プローブを有している。計測プローブのうち、接触式の多くは、先端に球を有する測定子を備え、ワークとの接触を検出しトリガ信号を発生する。この信号を受けて CMM はプローブ位置を三次元座標値として出力する。しかし、ここでのプローブ位置は、先端球とワーク表面の接触位置ではなく、先端球の半径長と接触時の測定力に起因する測定子のたわみ量が複合された補正されるべき偏差を含んでいる。そこで、この偏差を求めるために、真球度および直径が値付けされた校正球を基準として図 1 に示すような CMM によるプロービングにより偏差の測定が行われる。図 2 に校正球によるプロービングの偏差補正の様子を示す。しかし、昨今の計測技術の進展に伴う CMM の測定不確かさのオーダーは、従来の校正球の直径の測定不確かさに迫りつつある。

そこで筆者らは、さらなる CMM の測定不確かさ低減の一環として、前述のプローブ偏差の測定に用いる校正球の測定不確かさの低減に取組み、独自に超精密直径測定機を開発した。本測定機では、真空中のレーザ波長を長さ基準と

するため、伸縮可能な真空レーザ光路を構築し、時間的、空間的に変動する大気の屈折率の影響を排除可能なレーザ干渉測長を実現している。また、アッペの原理を厳守し徹底した熱源の排除および測定力の安定化に努めた。本測定機による長期間の再現性は 10.4 nm (σ : 標準偏差)、校正球の直径測定の不確かさは 74 nm ($k=2$) であった。この結果は、目標とする測定不確かさ 100 nm ($k=2$) を満たし、各国の国立標準研究機関に優る結果を得ている。

以下に本測定機の概要、測定方法および測定不確かさについて述べる。

Fig.1 Reference sphere on CMM

Fig.2 Compensation diameter of probing system

* 原稿受付 平成 17 年 12 月 21 日

** 正 会 員 (株)ミットヨ (栃木県宇都宮市下栗 2200)

*** (株)ミットヨ (栃木県宇都宮市下栗 2200)

† 正 会 員 (株)ミットヨ (茨城県つくば市上横場 430-1)

†† (株)ミットヨ (栃木県宇都宮市清原工業団地 24)

Fig. 3 The sphere diameter measuring machine

Fig. 5 The structural drawing of the measuring part

Fig. 4 Schematic drawing of the sphere diameter measuring machine

BS:beam splitter, HWP:half wave plate, QWP:quarter wave plat, P:polarizer, PBS:polarizing beam splitter, PD:photodetector

Table 1 Basic specification of the diameter measuring machine

① Measuring range	45 mm
② Laser light source	633 nm Commercial stabilized He-Ne Laser
③ Interferometer system	Single-pass Michelson-interferometer
④ Variable length vacuum cell	Metallic Bellows (internal pressure 10^{-4} Pa)
⑤ Resolution of position detector	1.6 nm
⑥ Guide mechanism for the slider	Air bearing collecting exhaust
⑦ Drive mechanism for the slider	Compressed air drive
⑧ Measuring force	Default 0.7 N (variable measuring force system)

2. 測定機概要

2.1 測定機構成

図 3 に測定機の全体写真を、図 4 にシステム構成を示す。本測定機はレーザ干渉計部、測定部、電装部及びセンサ部から成立っている。また、表 1 に測定機の主な仕様を示す。測定範囲は 45 mm である。レーザ干渉計の光源は、ミツトヨ製実用安定化 He-Ne レーザ LIS-633 である。温度環境への影響を配慮して測定機のブース外にレーザ光源を設置し、レーザ光は光ファイバーによりレーザ干渉計部に接続される。レーザ干渉計部は、シングルパスマイケルソンのレーザ干渉計であり、デッドパス部を含む測定光路を可変長な真空セル構造とした。真空セル内はロータリポンプとターボ分子ポンプから構成した真空排気システム（真空ポンプ）により排気し、その真空度は電離真空計で測定し 10^{-4} Pa を維持している。した

Fig. 6 Motion accuracy of the measuring surface

がって、空気の屈折率の補正を必要としないため、屈折率補正に関する不確かさを排除することができる。干渉計からのビームを、0, 90, 180, 270 度に位相分割しフォトダイオード (PD) により光電変換する。電装部のプリアンプを通過した信号は、2 相方形波に変換し、カウンタ部で計数する。本干渉計の分解能は、1.6 nm である。データ処理部は、測定子が被測定物に接触後レーザ干渉計からの信号を監視し、10 nm 以内に 3 秒間安定したときに 500 個のデータを取り込み、平均化し、直径値として計算する。

直径測定は球を静圧ステージと回転ステージから構成した治具上にセットして行う。

2.2 測定部構造

図 5 に測定部の構造を示す。測定部は、アッペの原理を厳守し、レーザ光軸、スライダ、測定子中心、被測定物（球中心）および測定力の発生機構を一直線上に配置した。測定部を搭載している本体ベース①は、低膨張鋳物 ($\alpha: 1 \times 10^{-6} / K$) で製作し、熱による変形を極小小さくした。スライダ②は、静圧軸受③により支持し非接触に直線運動する。静圧軸受③から排気される大部分の空気は、排気空気回収機構部④により回収し、測定機本体のブース外に排出する。これは静圧軸受から排出される空気による測定子周辺部の温度変化の影響と、空気のゆらぎによる微小な塵の飛散の影響の両方を抑えるためである。スライダ②内部には固定ピストン⑤を設定している。スライダ②内周と固定ピストン⑤の先端部には、わずかな隙間が存在し、左右

Fig. 7 Profile of the measuring surface

に二つの圧力室⑥を形成した。測定力はこの圧力室⑥の圧力を制御して発生する(2.4 節参照)。スライダ②の右端には、精密な平面にラップ加工した測定子⑨を取付けた。この測定子は、本体ベース①に固定した基準用測定子⑩と平行に調整した。この二つの測定子で校正球を挟込み直径の測定を行う。測定子⑨の裏側には、反射鏡⑪を取付けた。レーザ干渉計本体からのレーザ光⑫は、固定ピストン⑤左端の窓⑬より導入し反射鏡⑪で反射して再び干渉計へ戻す。図 6 は、スライダの運動精度を測定した結果である。運動精度は、ピッチング方向で $0.15 \mu\text{rad/mm}$ 、ヨーイング方向で $0.04 \mu\text{rad/mm}$ であった。この測定軸の傾きによる測定誤差は 20 mm の球を測定したとき 3.5 nm となる。

2.3 測定子

測定子は直径 35 mm のジルコニアセラミック材で製作し、測定面全体を中凸傾向にラップ仕上した。図 7 に本測定機の測定子の外観およびフィゾー型平面干渉計で測定子の平面度を測定した結果を示す。被測定物と接触する中心部(直径 14 mm の領域)の平面度は、20 nm 以内にラップ加工した。この測定子は、平行調整作業を行いながら本測定機に取付た。

2.4 測定力発生機構

図 8 に測定力発生機構のシステムブロック図を示す。測定力は圧縮空気を利用して発生させる。パソコンに測定力を入力するとプログラマブル DC 電源より測定力に比例した電圧が電圧レギュレータに出力される。電圧レギュレータは、出力電圧に比例した供給圧力 P_s の圧縮空気を発生させ、エアー配管を通じてスライダ内の圧力室へと供給する。このとき測定力 F と供給圧力 P_s との関係は式 (1) となり測定力 F は、供給圧力 P_s を制御して発生させる。

$$F = C_1 \cdot P_s + C_2 \cdot L + C_3 \cdot P_0 \quad (1)$$

ここで、 F : 測定力、 P_s : 供給圧力、 L : 位置、 P_0 : 大気圧、 $C_1 \sim C_3$: 定数 である。

測定力の校正は、定期的に校正したロードセルを測定部に取付けて行う。測定力の校正後、直径の測定を行う。測定力を一定に維持するため、本測定機には大気圧補正システムを搭載している。これは定期的に校正(校正の不確かさ $U = 0.01 \text{ kPa}$ $k=2$)した大気圧計にて大気圧を測定し、大気圧の変化に対し常に一定の測定力が発生するように供給圧力

Fig. 8 The system of generating constant measuring force by atmospheric pressure compensation

Fig. 9 Result of the system of constant measurement force by atmospheric pressure compensation

P_s を制御するシステムである。式 (1) にあるように、測定力 F は、供給圧力 P_s 、スライダに内蔵した金属ベローズのバネ定数に起因するスライダの移動量 L 、および大気圧 P_0 により決定する。図 9 に大気圧補正システムの効果を確認するために行った実験結果を示す。図 9 のように大気圧が 997.5 hPa から 1014 hPa に増加すると、大気圧補正システム無しの場合、測定力が 0.8 N 変化しているが、大気圧補正システム有りの場合、測定力の変化は 0.13 N に抑えられている。たとえば測定時間 15 分間の大気圧変化を 50 Pa と仮定した場合、測定力の変化は、補正システムが働き直径測定誤差は、3.4 nm となる。

2.5 測定環境

本測定機は、温度管理された測定室に設置した。測定機本体は、図 10 に示すように 2 重構造のブースで断熱を行い、外側はアルミ製板(厚さ 1 mm)、内側に断熱材(厚さ 75 mm)でブースを製作した。また熱源(レーザ光源、電装部)をブース外に配置した。本測定機に使用する圧縮空気供給源は、エアーサーバ(圧縮空気温度制御装置)により $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ に温度制御している。測定部に導かれる圧縮空気は、ミストセパレータ(捕集粒径 $0.01 \mu\text{m}$)を経由して供給する。測定機本体は、空気バネ式の精密除振台に搭載している。環境モニターとして、定期的に校正した気温計(測定部周辺に 1 ケ所)、白金抵抗温度計(ベース: 1 箇所、測定

Fig.10 Structure of booth

Fig.11 Traceability of diameter measurement

子：2ヶ所，球：1ヶ所の合計4ヶ所に設置），湿度計（測定部周辺に1ヶ所）を装備している．白金抵抗温度計は，測定時の被測定物の温度補正（標準温度20℃における長さ補正）に利用する．

2.6 トレーサビリティ体系

図11に本測定機のトレーサビリティ体系を示す．本測定機の長さ基準としてレーザ波長を用いることにより，トレーサビリティ連鎖の短縮による高精度化を実現している．なお，レーザ光源の波長は，JCSS（Japan Calibration Service System）認定事業者であるミットヨテクノサービス事業本部計量標準キャリブレーションセンタで定期的な校正を行い維持管理している．

3. 測定方法

球の直径を算出するためには，標準温度20℃における直径値とするための物体温度補正と測定力による球と測定子の弾性変形を補正する必要がある．球の直径 D は，式(2)で求める．測定力 F による球と測定子の弾性変形量 C の算出は，式(3)のヘルツの公式⁵⁾⁶⁾で行う．

測定力は，測定前に校正を行う．測定時の測定力を0.7Nと設定する．本測定機によりセラミック球を測定した時の弾性変形量 C は，109 nmである．

次に測定手順を図12に示す．直径測定を行う前に，①球をブース内の測定機の回転ステージ近くの仮のセット場所に設置し，十分な温度ならしを行う．②測定軸側の測定子と基準側の測定子を合わせてゼロ点セットを行う．③球

Fig.12 Diameter measurement method of the reference sphere

を仮のセット場所から回転ステージ上に設置し測定を行う．④再度，測定子を合わせてゼロ点の確認を行う．そして，⑤温度補正計算，⑥弾性変形量補正計算を行い，⑦球の測定値を得る．

$$D = D_0 \cdot \left[1 - \alpha \cdot (T - 20) \right] + 2C \quad (2)$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \frac{F^2}{E_a} \left(\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^2 \frac{1}{R_b}} \quad (3)$$

ここで， D ：直径(mm)， D_0 ：測定データ(mm)， T ：被測定物の温度(℃)， α ：被測定物の熱膨張係数(1/℃)， C ：弾性変形量(mm)， F ：測定力(N)， R_b ：球の半径(mm)， ν_a ：測定子のポアソン比， ν_b ：被測定物のポアソン比， E_a ：測定子のヤング率(Pa)， E_b ：被測定物のヤング率(Pa)である

4. 不確かさ

表2にセラミック製球（直径20mm）を測定した場合の不確かさの算出結果を示す．ここでは，最も大きな要因となっている測定子の形状について述べる．

球測定時における測定子の平行度誤差の影響による不確かさ u_4 (No.4)は，測定子の平行度による不確かさ $u_a(\delta_a)$ および基準側測定子の平面度による不確かさ $u_b(\delta_b)$ ，測定軸側測定子の平面度による不確かさ $u_c(\delta_c)$ をそれぞれ求めて式(4)から算出した．

$$u_4 = \sqrt{u_a^2(\delta_a) + u_b^2(\delta_b) + u_c^2(\delta_c)} \quad (4)$$

あらかじめ，測定対象であるセラミック製球の直径部分の真円度を真円度測定機で測定し選別を行った．これにより最も良好な結果を得た真円度20nmのセラミック球を基準球とした．この基準球を測定位置を変えて直径測定し，その最大差を δ_a とし， $\delta_a/2$ が正負に矩形分布するとして不確かさを求めた．測定子の精度保証範囲内(Φ14mm)で， $\delta_a=40$ nm，実際の測定は，測定子の中心Φ3mm以内の中心領域で測定するので， $\delta_a'=8.57$ nmと算出し， $u_a(\delta_a)=\delta_a'/\sqrt{3}$ より $u_a(\delta_a)=4.95$ nmである．また，基準側測定子の平面度による成分 $u_b(\delta_b)$ は，中凸傾向で $\delta_b=20$ nm/Φ14mmであるから， $\delta_b'=4.28$ nm/Φ3mmと算出し，

Table 2 Uncertainty of diameter measurement

Uncertainty Factor	No	Estimation Condition	Uncertainty nm
Laser wave length	1	633nm commercial stabilized He-Ne laser $1.2 \times 10^{-8} \times L$ ($L=20$)	0.2
Kinematics accuracy of mirror's posture angular error	2	Sine error (Pitching direction) $0.15 \mu\text{rad/mm}$	3.5
	3	Sine error (Yawing direction) $0.04 \mu\text{rad/mm}$	0.8
Form of measuring surface	4	40nm/ Φ 14mm Parallel of measuring point	6.1
	5	40nm/ Φ 14mm Zero point adjustment	23.1
Thermal change of measurement part and base(0.01K/15min)	6	Measuring surface material :zirconium ceramic	5.0
	7	Base material :Low thermal expansive cast	5.0
	8	Temperature change of work during measurement (0.01K)	1.0
Measuring force (50Pa/15min)	9	Dispersion of Measuring force calibration ($\pm 0.05\text{N}$)	20.0
	10	Atmospheric pressure system ON	3.4
Correction of the elastic deformation	11	Hertz formula	7.0
Compensation to the reference temperature	12	Uncertainty of a thermometer (10mK)	1.0
	13	Thermal expansion coefficient	1.0
	14	Thermal distribution (0.1K)	10.0
Resolution	15	Resolution 1.6nm	0.7
Repeatability	16	Repeatability	2.5
	17	Reproducibility	12.0
Combined standard uncertainty of calibration ($k=1$)			36.7
Expanded uncertainty of calibration ($k=2$)			73.4

$u_b(\delta_b) = \delta_b / \sqrt{3}$ から $u_b(\delta_b) = 2.48 \text{ nm}$ である。さらに測定軸側測定子の平面度による不確かさ $u_c(\delta_c)$ は同様に算出し、 $u_c(\delta_c) = 2.48 \text{ nm}$ である。式(4)より、球測定時における測定子の平行度誤差の影響による不確かさ $u_4(\text{No. 4})$ は、 $u_4 = 6.1 \text{ nm}$ となる。

原点ゼロセット時における測定子の平行度による不確かさ $u_5(\text{No. 5})$ は、同様に基準球で測定位置を変えて直径測定し、その最大差を δ_a とし、 $\delta_a/2$ が正負に矩形分布するとして不確かさを求めた。不確かさ $u_5(\text{No. 5})$ は、 $\delta_a = 40 \text{ nm}$ 、 $u_5 = \delta_a / \sqrt{3}$ より $u_5 = 23.1 \text{ nm}$ となる。

このようにしてすべての不確かさ要因について検討を行い、本測定機の不確かさを 74 nm ($k=2$ 、ただし測定対象である球の形状に起因する不確かさを除く) と算出した。

5. 測定結果事例

図13に繰り返し測定結果を示す。直径 20 mm のセラミック製球を本測定機にセットし、30回連続して測定を行った。このとき1回の測定に費やされる時間は、40秒である。繰り返しは $1.7 \text{ nm}(\sigma)$ という結果を得た。

図14に反復性の評価結果を示す。1日に10回、毎回測定機に球をセットして測定し、更に日を変えて10日間、合計100回、同一の直径 20 mm の球を測定した結果である。反復性(短期間の再現性)は、 $12 \text{ nm}(\sigma)$ という結果を得た。

図15に比較測定による長期間の再現性の評価結果を示す。ここで比較測定とは、図12で説明した測定方法とは異なり、本測定機で直径を値付けした球(直径 $\Phi 20 \text{ mm}$) を基準として測定する方法である。測定機が完成してから1日に1回測定機に球をセットし、日を変えて約36ヶ月間、直径 20 mm の球の直径測定を行った。図15より、比較測定による長期間の再現性は、 $10.4 \text{ nm}(\sigma)$ という結果を得た。

Fig.13 Repeatability of the measuring machine

Fig.14 Day different repeatability of the measuring machine

Fig.15 Reproducibility of the measuring machine

表3にセラミック製球4種類(直径 $\Phi 15 \text{ mm}$ 、 $\Phi 20 \text{ mm}$ 、 $\Phi 25.4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 30 \text{ mm}$)を本測定機で測定した結果と、METAS(スイス連邦計量認定局)で測定した結果との比較を示す。本測定機で測定した結果は、METAS測定値と比較すると全ての測定値でEn値は1以下であり、両者の測定値は不確かさの範囲内でほぼ一致した。

Table 3 The comparison of our diameter measuring machine with the result of METAS

	Task	Φ15	Φ20	Φ25.4	Φ30
Mitutoyo Measuring machine	Diameter (mm)	15.000873	19.987479	25.390503	29.993396
	Uncertainty (k=2)	0.074	0.074	0.074	0.074
METAS	Diameter (mm)	15.00086	19.98745	25.39050	29.99345
	Uncertainty (k=2)	0.15	0.15	0.15	0.15
Difference of diameter (nm)		13	29	3	-54
En number		0.08	0.17	0.02	0.32

6. 結 言

本論文では、CMM用校正球の直径測定へ適用するため開発した超精密直径測定機の構成および構造、測定方法、不確かさ、測定結果事例について述べた。本研究により以下のことが明らかになった。

- (1) 真空レーザ光路型干渉計を搭載し、トレーサビリティ連鎖の短縮を意図した独自の超精密直径測定機を開発した。加えて、本測定機では、アップの原理の厳守と徹底した熱源の排除を考慮した測定部構造、および大気圧補正システムによる測定力の安定化により、実用的な校正球の直径測定においては、各国の国立標準研究機関に優る測定不確かさを実現した。

- (2) 本測定機の不確かさは、74 nm ($k=2$ 、ただし測定対象である校正球の形状に起因する不確かさを除く) という結果を得た。また、比較測定による長期間の再現性は 10.4 nm (σ) という結果を得た。

- (3) 本測定機で直径を測定した結果は、METAS(スイス連邦計量認定局)で測定した結果と比較すると、En 値で 1 を下まわり両者の測定値は、不確かさの範囲内ではば一致した。

今後、ピンゲージ・ころ・ニードルなどの円柱形状を有する機械要素の直径測定への応用を展開する予定である。

参 考 文 献

- 1) H. Masuda, Y. Kuriyama, H. Sakai, M. Ueda : DEVELOPMENT OF A CALIBRATION EQUIPMENT USING LASER INTERFEROMETER COMBINING A VARIABLE LENGTH VACUUM CELL ,Proceedings of 10th International Conference on Precision Engineering, (2001), 739.
- 2) 上田守正：長さの精密測定（ナノメートルへの挑戦），日本機械学会誌，**105**, 1006, (2002) 22.
- 3) 前田，猿木，境，青柳，久保：真空レーザ干渉計搭載 1.6m超高精度測長機の開発，精密工学会誌，**69**, 6, (2003) 768.
- 4) 大関，荻原，境，栗山，増田：レーザ干渉計の二相正弦波信号による内挿位置の不確かさ低減手法に関する研究，精密工学会誌，**69**, 9, (2003) 1296.
- 5) 中原一郎：材料力学（下巻），養賢堂(2000) 27 版。
- 6) ティモシェンコ，グーディア：弾性論 THIRD EDITION，コロナ社(1999) 10 版。