Vブロック法を用いた円筒コロの断面形状測定*

(円筒コロ1200本の測定とその評価)

五 宝 健 治^{*1}, 桂 田 研^{*2}
三 井 公 之^{*3}, 林 亮^{*4}

Profile Measurement of Parallel Rollers based on a V-Block Method

(Mass Measurement and Evaluation of 1200 rollers)

Kenji GOHO, Ken KATSURADA,
KimiYuki MITSUI and Akira HAYASHI

Cross-section roundness profile measurement is generally considered a significant procedure in the processing of parallel rollers requiring the highest quality in dimensional accuracy. This becomes a difficult procedure due to the fact that such rollers show extremely small dimensional error, resulting in expensive and time consuming measuring methods or, in most cases, the ignorance of the procedure itself. This report deals with the development of a roundness measurement system for high-precision parallel rollers based on a V-block double enlargement device. Experimental results which support the validity of the device have been reported in our previous paper, and here we focus on results obtained from the mass measurement of approximately 1200 rollers. Distribution of roundness and average radius are closely investigated to construct a practical method for the classification of dimensional accuracy of such parallel rollers. Furthermore, straightness measurement results of a high precision linear guide accompanying 400 parallel rollers selected with this method are presented to demonstrate the validity of such classification procedures.

Key Words: Measurement, V-Block Method, Accuracy, Machine Element, Parallel Roller, Out of Roundness, Harmonic Analysis Method

1. は じ め に

超精密工作機械, 精密測定機器, 半導体製造装置などの直線転がり案内面に組込む円筒コロは, 同一規格の高精度円筒コロの中から測定を行って, 均一な直径でなおかつ真円度の高いものを選別するのが, 運動の真直度などを高める上で望ましいものと考えられる。

真円度測定の一手法であるVブロック法は被測定物のセッティングが容易であり, また, Vブロックの開き角によっては被測定物の半径方向の変位を拡大して求めることができるため, 使用する変位計の分解能を越えた測定が可能となる。本研究では, このような特徴をもつVブロック法を用いた真円度測定装置を提案し, 円筒コロの直径の相互差と真円度を評価することを試みている。Vブロック法の測定原理と測定装置の概要やその有効性についてはすでに報告してい

る⁽¹⁾。本報ではこの装置を用いた精密円筒コロの大量測定に焦点を置く。本文中では装置構成, 測定方法について簡単に説明した後に, 大量測定の際に必要な装置の校正や抜き取り試験について触れる。続いて測定された約1200本の精密円筒コロについての評価結果を示し, 真円度および平均半径の分布を調べる。また, この結果より半径値について選別された360本の円筒コロを実装した超精密直線転がり案内面の真直度測定結果を示し, コロの選別の効果について述べる。

2. 円筒コロ断面形状測定装置

本研究で使用した円筒コロの断面形状測定装置の概念図を図1に, 装置の具体的な構成を図2に示す。また, 装置の写真を図3に示す。本測定法ではVブロックによる拡大効果に加え, てこの原理による拡大機構を用いている。この二重の拡大効果により, 変位計の精度に制約されることなく, 極めて高い精度での測定を可能としている。

Vブロックは超硬合金製で, 開き角14°, コロを支える部分の長さは10mmである。Vブロックの長さ

* 原稿受付 1998年11月10日。

^{*1} 松下技研(株) (☎214-8501 川崎市多摩区東三田3-10-1)。

^{*2} 慶應義塾大学大学院 (☎223-0061 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*3} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

^{*4} (株)ナノ (☎146-0085 東京都大田区久が原5-12-5)。

E-mail: mitsui@mech.keio.ac.jp

Table 1 Number of inspected rollers

Group 1	230
Group 2	142
Group 3	410
Group 4	460
Total	1242

Fig. 1 Measuring principle of V-block device

Fig. 2 Configuration of measuring apparatus

Fig. 3 Experimental Apparatus

が 10 mm であることから、本測定法により求められる真円度は、この 10 mm の接触長さ内での平均的な断面形状を求めるものとなる。測定バーも同様に超硬合金製で、この部分での拡大率は 5 倍である。

変位測定センサには静電容量型微小変位計を使用し、測定バーの端点の変位を非接触で測定する。静電容量型微小変位計の分解能は約 10 nm であり、二重の拡大機構の拡大倍率を考慮した装置全体の分解能は 1

nm オーダとなっている。

コロの回転には減速ギア付の小形 DC モータを使用し、モータ軸とコロとを $\phi 0.7$ mm のピアノ線で作成したカップリングで連結した。モータにはロータリーエンコーダ (256 パルス/回転) を装着しており、減速ギアのギア比との関係で、コロの 1 回転当たり 249 600 パルスが出力される。このパルスを分周回路により処理し、コロの 1 回転当たり 256 パルスの信号を得て、FFT アナライザの外部クロック端子に入力し、コロの各回転位置ごとのデータをサンプルできるようにした。

3. 測定方法

3・1 測定対象 測定対象とした精密円筒コロは、JIS P1 級、呼び直径 5 mm、長さ 33 mm で、材質は SUJ 2 (軸受鋼) である。実験では全 1 242 本のコロについて断面形状および平均半径の測定を行い、その分布を調べた。コロは購入時期別に四つのグループに分類し、グループ間の比較も併せて行った。表 1 に測定したコロの本数をグループ別に示す。

3・2 断面形状測定 測定対象の円筒コロを V ブロックに設置し、ギア付きモータで回転させる。1 回の測定でコロ 2 回転分のデータ (512 点) を収録し、これを平均化することで測定誤差の低減を図った。次に得られた波形をフーリエ解析し、波形を形作る次数成分に分解した。この結果得られる各次数の係数を、対応する拡大倍率で除することでコロの断面形状を形作る級数の係数を得た。ただし、平均半径については後に述べる基準値からの偏差として求め、相対比較可能とした。また、級数の係数から断面形状を再現することで真円度および最大・最小直径差を計算した。

3・3 装置の校正方法 コロの平均半径は任意に設定した基準点に対する相対的な値として得られる。このため、複数のコロの平均半径を評価する際には一定の基準値を設定することが必要となる。また、長時間にわたる測定作業時には、環境の温度変化による誤差を考慮する必要があることから、定期的に静電容量変位計を校正することが必要である。

測定装置の校正基準として、円筒コロを 1 本選び、これを基準コロとした。初期設定の際には基準コロを装置で測定し、得られた 1 回転分の測定波形の最下点が 0 V となるように静電容量型変位計の零点を調整した。校正作業は 20 本のコロを測定するごとに行った。20 本のコロを測定するのに要する時間は約 20 分であった。

測定時における装置の温度ドリフトの状況を図 4 に

Fig. 4 Thermal drift and calibration of device

示す。図4の曲線は校正時に基準コロを測定した際に観測された温度ドリフトの大きさを積算していったものであり、図4には校正結果も併せて示している。定期的に校正作業を行うことで温度ドリフトによる基準点からのずれが低減されることが理解できる。また、温度ドリフトが解析された平均半径値に及ぼすずれは、装置の拡大倍率(平均半径に対しては46倍)を考慮すると最大で約11 nm、平均で約7 nmであることがこの結果から算出される。このことはコロの分類における階級のしきい値決定に考慮されるべき点である。また、温度ドリフトの影響は時間的に緩やかなものであり、各コロの測定に必要な時間は短いので、温度ドリフトが与える真円度測定への影響は無視し得るものと考えている。

校正の際に測定された基準コロの真円度および平均半径を求め、装置の測定再現性を評価した。この結果、50回の測定より得られた平均半径、および真円度の標準偏差はおおの11.4 nm、および8.8 nmであった。ただしこの値は校正前に測定されたデータより算出されたもので、装置の温度ドリフトが最大の状態での再現性を示す。ドリフトは前述のように平均半径に影響を及ぼすものであり、このため実際の測定の際にはこの値を上回る再現性が確保される。以上の結果から極めて高い再現性が得られることが示された。

3・4 抜き取り試験 多数のコロを測定し、その結果に基づいて選択したコロを精密ステージに組込むことを考えると、この測定作業はミスの許されないものであることがわかる。このため、各コロを複数回測定するのが理想ではあるが、測定時間を節約するためには各コロにつき1回の測定で済ませることが求められる。このため、測定の確度を調べるために、グループ1, 2のコロ372本につき、全数の測定終了後に、10本おきに選んだ計38本のコロの再測定を行う抜き取り試験を行った。図5, 6は平均半径および真円度に

Fig. 5 Base radius repeatability

Fig. 6 Roundness repeatability

ついて2回の測定結果を比較したものである。

平均半径についてはおのおののコロに対する2回の結果の差が最大でも10 nm以内に収まっており、高い測定精度が得られている。

真円度の比較では2回の測定で50 nm近い差が現れているものがある。特に真円度誤差が大きいコロにはこのような状況が顕著に現れている。これは真円度を支配している局所的な傷が2回の測定で慣らされるために生じる結果と考えられる。このようなコロは通常、選別の際に取除かれるため、本研究が目的とする実用面では特に問題はない。

4. 測定結果

4・1 規格適合性 図7は測定した1242本のコロにつき、測定データを解析して最大および最小直径を相対値として表示したものである。測定対象のJIS P1級精密円筒コロの規格は、直径値で $5^{+0}_{-0.001}$ mmである。すべてのコロの最大値および最小値の差は、およそ1.4 μmとなっており、公差の1 μmには入っていない。しかし、各グループごとについて見てみると、大体1 μmの公差の範囲に収まっているものと見てよい。また4・2節で述べるように、真円度の測定値には突出したものが数点見られることから、最大直径値はこの突出した真円度の値によるものと見ることができる。このため、すべてのコロは規格に適合しているものと考えられる。

Fig. 7 Maximum & minimum diameter of measured roller

Fig. 8 Distribution of roundness & base radius deviation

Fig. 9 Distribution of base radius deviation

Fig. 10 Distribution of roundness

4.2 真円度・平均半径の分布 図8に1242本のコロの真円度と平均半径値の分布図を、図9、10にはおのののについてのヒストグラムを示す。

図8の分布図より、平均半径と真円度についての相関は見られない。また、同規格の円筒コロでも真円度、

平均半径についておののの250 nm, 500 nm程度のばらつきがあることが読みとれる。図8において真円度が大きく突出したものが数点見られるが、これらはコロの表面の傷などの影響で真円度評価値が実際より大きく計算されたコロを表すものと思われる。

図9に示す平均半径の分布はすべてのグループにおいてほぼ正規分布をしており、これに対し図10では真円度についての分布が左右非対称な形状をなしている。これは真円度の性質上、零以下の値が存在し得ないこと、また理想値として零を目指して加工しているために生じる分布であると考えられる。

各グループの平均半径、真円度の平均値と標準偏差をまとめたものを表2に示す。表2よりどのグループにおいても平均半径が真円度に比べ約1.5倍から2.5倍ばらつくことがわかる。このことは円筒コロ精度を決定付ける要因として、平均半径のばらつきが、より大きな影響を及ぼしていることを示す根拠となる。また、平均半径は真円度に比べ、解析が容易であることから、高精度のコロの選別に際しては、平均半径のみについての選別が容易でかつ効果的であるものと考えられる。

グループ別に真円度・平均半径の分布を比較してみると、グループによって分布の中心が異なることがわかる。おのおののグループのコロは異なるロットで生産されており、加工条件のわずかな違いなどがこのようなグループ間の差違の原因と思われる。加工精度の揃ったコロを必要とする際には同一ロットのものを使用するのが一般的に望ましく、ここで示す結果はこの通念を裏付けるものといえる。

Table 2 Average & standard deviation of radius & roundness

	# of rollers	Ave. r	Ave. z	σ_r	σ_z
Group 1	230	-116	171	96	53
Group 2	142	14	222	90	63
Group 3	410	19	128	65	41
Group 4	460	-57	121	99	41
Total	1242	-35	144	95	57

*r: radius, z: roundness, σ : standard deviation, unit=nm

5. コロの選別と精密転がり 案内面への実装

1242本のコロの評価結果を基に選別・抽出を行い、精密直線転がり案内面への実装を試みた。

コロの抽出は平均半径のみについて、表3に示す度数分布表をもとに行った。選別の際の階級の幅については、3・3節の校正結果や、必要とするコロの本数を考慮し、50 nmとした。平均半径値 -50~50 nm に属するグループ3, 4のコロ 381本を抽出し、このうち360本を最大ストローク 110 mm の超精密直線ころがり案内面に組込んだ。(表3の太字部分)

真直度測定は案内面上に精度 1/10 λ の基準定規を置き、電気マイクロメータで鉛直および水平方向の変位を測定した。図11, 12に転がり案内面、および真直度測定結果を示す。図には2回の測定結果を重ねて表示してある。測定の結果、鉛直、水平方向でおのおの約 0.08 μm および 0.12 $\mu\text{m}/110\text{ mm}$ の真直度が得られた。

従来の精密転がり案内面の組立ての際には、目標精度を達成するためにコロの入れ替えなどの微調整が必要であった。このような作業は熟練技術を必要としており、また複数回に渡る装置の組立、測定を行うために多くの作業時間を必要とした。本研究で行ったコロの選別により、従来必要であった微調整やコロの入れ替えなどの作業が省略され、リードタイムの短縮を図ることができた。また、熟練技術に依存していた組立作業が、簡素化された。このことは定性的ではあるが、円筒コロを選別・抽出することの有効性を示すものである。一方、今後はより定量的なデータを得るために、コロの組込みの状態と精密転がり案内面の運動精度との関連について詳細な実験を行ってゆくことが必要と

Table 3 Frequency distribution chart for base radius deviation

Class (nm)	Class Mark (nm)	Frequency					Relative Frequency	Cumulative Frequency	Rel.Cum. Frequency
		All	Group1	Group2	Group3	Group4			
-450 to -400	-425	0	0	0	0	0	0.000	0	0.000
-400 to -350	-375	1	1	0	0	0	0.001	1	0.001
-350 to -300	-325	7	6	0	0	1	0.006	8	0.006
-300 to -250	-275	22	11	1	0	10	0.018	30	0.024
-250 to -200	-225	50	32	0	0	18	0.040	80	0.064
-200 to -150	-175	93	38	4	7	44	0.075	173	0.139
-150 to -100	-125	137	35	7	11	84	0.110	310	0.250
-100 to -50	-75	188	37	20	33	98	0.151	498	0.401
-50 to 0	-25	250	45	35	95	75	0.201	748	0.602
0 to 50	25	254	18	25	144	67	0.205	1002	0.807
50 to 100	75	153	7	25	84	37	0.123	1155	0.930
100 to 150	125	60	0	17	25	18	0.048	1215	0.978
150 to 200	175	19	0	6	7	6	0.015	1234	0.994
200 to 250	225	6	0	1	4	1	0.005	1240	0.998
250 to 300	275	1	0	1	0	0	0.001	1241	0.999
300 to 350	325	0	0	0	0	0	0.000	1241	0.999
350 to 400	375	0	0	0	0	0	0.000	1241	0.999
400 to 450	425	1	0	0	0	1	0.001	1242	1.000

Fig. 11 High-precision linear slide

考えている。

6. おわりに

以下に、本研究により得られた主な結論を述べる。

(1) Vブロック法を用いた断面形状測定装置による精密円筒コロの大量測定の可能性について検討した。

・基準コロを用いて装置校正を行うことで装置の温度ドリフトの影響を実用的なレベルまで低減することが可能であることを示した。

・大量測定の際に、抜き取り試験を行い、測定の再現性に問題がないことを確認した。

(2) 1242本の精密円筒コロを評価し、その平均半径および真円度の分布を調べた。

・コロの加工精度を決定付ける主たる要因は平均半径のばらつきであり、これについて評価、選別することが容易でかつ効果的であることを示した。

・真円度、平均半径のばらつき中心は生産されたバッチによって変化し、このため加工精度の均一なコロを必要とする際には同一バッチで生産されたコロを使用することが望ましいものと考えられる。

(3) 測定結果の半径値にもとずき選別されたコロを、精密ころがり案内面に実装し、その真直度を測定

Fig. 12 Straightness curve

した。また、選別の効果について検討した。

終わりに研究を進めるにあたりご協力頂いた(株)ナノの田村仁良部長、波多野雅也氏に深く感謝する。

文 献

- (1) 五宝健治・三井公之・林 亮, Vブロック法を用いた円筒コロ断面形状測定装置の開発, 機論, **64**-625, C(1998), 3644-3649.
- (2) 山田隆一・柳 和久・清水智之, 小径レーザを用いた精密研削シャフトのVブロック法真円度測定装置の開発, 設計工学, **30**-1(1995), 26-32.
- (3) 中田 孝・山本 晃, 円筒工作物の真円度測定法, 機誌, **53**-376(1950), 159-163.
- (4) 米津 栄, Vブロック式真円度測定法の拡張, 精密機械, **XIX**, 8(1953), 307-310.
- (5) 中田 孝, 工学解析, (1972), 109, オーム社.