円すいテーパ部品形状の最小領域法評価*

塚 田 忠 夫** 劉 書 桂*** 金 田 徹†

Verification of Minimum Zone Conical Taper Form

Tadao TSUKADA, Liu Shu Kui and Tohru KANADA

This paper proposed the new algorithm for the minimum zone evaluation of conical taper parts measured by means of radial deviation method. As the mathematical formulae to achieve the minimum zone evaluation were nonlinear and complex, the simplex method, one of nonlinear optimization techniques, was applied. In this algorithm, computing was iterated to get a solution, then the converging criterion was settled. Furthermore, the minimum zone values of conical taper part were compared with the least square values.

Key words: cone, conical taper, form error, minimum zone, simplex method, least square method

1. 緒 言

円すいテーパ部品の形状測定には、母線方向に大きく変化する半径（寸法）とそれに重畳している小さな形状偏差とを同時に測定しなければならない、という困難性が伴う。そのために、形状精度の定量的な測定は、ほとんど行われていない。従来から行われてきた母線の真直度と軸直角断面の真円度から評価する方法、テーパゲージ方式やサインバー方式、あるいは2つの断面の直径差から算出する方式などは、検査を主目的とするものである。したがって、円すい形状の一部分のみが対象となっていて、全体的な形状の定量的な把握がされないために、精度向上に資する情報を得ることは非常に難しい。

著者らは、すでに円すいテーパ部品の形状測定と最小自乗法による円すいのあてはめの手法について報告してきた¹⁾²⁾。本報は、これをもとに、円すい公差の具体的な検証法の一つとして³⁾、最小領域法による円すいテーパ形状の評価法を提案する。

2. 試料および測定装置

2.1 試 料

本研究で用いた試料の諸元の例を表1に示す。NC

旋削加工および研削加工による合計57本の円すいテーパ試料（材質：SK3）を用意した。試料の大径は6～60 mm、テーパは1/50～1/3、円すい長さは20～100 mmの範囲である。

2.2 測定装置

表1に示した試料の形状測定には、空気軸受式回転テーブル形円筒度測定機を用いた⁴⁾。この回転テーブルの回転精度（振れ）は、 $0.08\ \mu\text{m}$ 以内である。検出器には、デジタルマイクロメータ（ストローク10 mm、分解能 $0.1\ \mu\text{m}$ ）を用いた¹⁾。この検出器の回転軸方向の運動精度は、参照板によって保証されている。この参照板と回転軸の平行度は $0.5\ \mu\text{m}/200\ \text{mm}$ 以内、参照板の真直度は $0.1\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$ 以内となっている。また、検出器の軸方向位置は、送りねじに取り付けられたアブソリュートエンコーダによって、 $1\ \mu\text{m}$ の精度で検出できるようになっている。

以上の測定装置には、マイクロコンピュータが接続され、制御とデータサンプリングを行うようになっている⁵⁾。データのサンプリング間隔は、円筒形状測定において採用した条件を参考に⁶⁾、試料軸方向1.03～6

Table 1 A part of specimen dimensions

Specimen symbols	$2R_0$ mm	Cone length mm	Rate of taper
G 1	40	90	1/49.529 47
G 3	40	50	1/19.076 69
G 5	40	50	1/9.930 486
G 7	40	50	1/3.435 364
T 1	40	50	1/19.160 76
T 3	40	50	1/3.403 328

* 原稿受付 昭和62年4月9日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月27日）にて発表

** 正 会 員 東京工業大学工学部（東京都目黒区大岡山2-12-1）

*** 学生会員 東京工業大学工学部

† 正 会 員 関東学院大学工学部（横浜市金沢区六浦町4834）

Table 3 Initial condition of simplex vertexes

	Simplex vertex					
	1	2	3	4	5	6
Optimizing variables	$a - \Delta a$	$a + \Delta a$	a	a	a	a
	$b - \Delta b$	b	$b + \Delta b$	b	b	b
	$l_3 - \Delta l_3$	l_3	l_3	$l_3 + \Delta l_3$	l_3	l_3
	$m_3 - \Delta m_3$	m_3	m_3	m_3	$m_3 + \Delta m_3$	m_3
	$k - \Delta k$	k	k	k	k	$k + \Delta k$

法線方向半径差の最小値として定義する。すなわち、目的関数を f として内外接する同心の真円すい面の法線方向半径差を考えると、式 (1), (4) から、 f は a, b, l_3, m_3, k の関数として、

$$f(a, b, l_3, m_3, k) = (\max_{i,j} r'_{ij} - \min_{i,j} r'_{ij}) / \sqrt{1+k^2} \quad (5)$$

で与えられる。円すいテーパ形状の最小領域値は、目的関数 f を最少化する非線形最適化問題として次のように解くことができる。

$$C_{mz} = \min_{a, b, l_3, m_3, k} f \quad (6)$$

3.3 最適化技法の適用

目的関数を最少化する非線形最適化技法のうち、比較アルゴリズムが簡単で計算時間の短縮化が望めるシンプレックス法を、ここでは採用する⁹⁾。

式 (6) から分かるように、最適化を行う変数は a, b, l_3, m_3, k の5つである。したがって、5次元空間において6つの頂点を持つシンプレックスを考え、各頂点の目的関数を小さくなる方向へ移動させればよい⁸⁾。この際、探索開始の初期シンプレックスの設定（位置と大きさ）は表3のように与えることにした。最下部断面を添字 1、最上部断面を添字 N で表すと、表3の記号の内容は、

$$\begin{aligned} a &= a_1 = -\frac{2}{M} \sum_{i=1}^M S_{i1} \cos \theta_i \\ b &= b_1 = -\frac{2}{M} \sum_{i=1}^M S_{i1} \sin \theta_i \\ a_N &= -\frac{2}{M} \sum_{i=1}^M S_{iN} \cos \theta_i \\ b_N &= -\frac{2}{M} \sum_{i=1}^M S_{iN} \sin \theta_i \\ l_3 &= (a_N - a_1) / L \\ m_3 &= (b_N - b_1) / L \\ L &= \sqrt{(a_N - a_1)^2 + (b_N - b_1)^2 + (z_{MN} - z_{11})^2} \\ k &= \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M S_{iN} - \sum_{i=1}^M S_{i1} \right) / (z_{MN} - z_{11}) \end{aligned} \quad (7)$$

また、初期シンプレックスの大きさを決めるための基準として、本報では測定値 S_{ij} に最小自乗法であてはめた真円すい面からの形状偏差 r_{ij} の標準偏差 σ を用いることにした⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (r_{ij} - \bar{r})^2}{(MN)}} \\ \bar{r} &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}}{(MN)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

したがって、

$$\left. \begin{aligned} \Delta a &= \Delta b = \Delta a_N = \Delta b_N = \sigma \\ \Delta l_3 &= \Delta a_N / L, \quad \Delta m_3 = \Delta b_N / L \\ \Delta k &= \sigma / (z_{MN} - z_{11}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

4. 実験結果

4.1 繰返し計算の打ち切り条件

シンプレックス法は繰返し計算であるので、測定条件（分解能や保証精度）などに関連させた計算の打ち切り条件を設定しなければならない。一般に、シンプレックス法では、打ち切り条件を各頂点における目的関数の標準偏差で考える場合が多い。2変数程度のシンプレックス法では、各頂点のノルムの最大値あるいは最小値を採る方がよいこともある⁷⁾。本報の場合は、5変数6頂点の問題であるので、各頂点の目的関数 f_r ($r=1, \dots, 6$) の標準偏差 σ_f が、ある値 ε_f より小さくなったときに解が得られたものとする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f &\leq \varepsilon_f \\ \sigma_f &= \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^6 (f_r - \bar{f})^2}{6}} \\ \bar{f} &= \sum_{r=1}^6 f_r / 6 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

図2は、真円すい面 ($2k=0.1$, $R_0=20$ mm) にそれぞれ全振幅 $10 \mu\text{m}$ と $5 \mu\text{m}$ の正弦波を重畳させた2条件と、さらに、この真円すいに偏心 e と中心軸の倒れ γ を与えた条件との組合せにより、データを創成させて得たシミュレーション結果である。 C_{mzt} はシミュレーションで与えた真の解であり、 C_{mz} は上述のアルゴリズムを用いて求めた最小領域値である。計算の繰返しは図2の右上から左下に進行する。解の精度を $0.1 \mu\text{m}$ 程度で十分とすれば、 σ_f はほぼ $0.01 \mu\text{m}$ でよいことになる。したがって、

$$\varepsilon_f = 0.01 \mu\text{m} \quad (11)$$

また、図3は繰返し過程における σ_f の推移を示す。 $\sigma_f = 0.01 \mu\text{m}$ に達するのは、15~50回の繰返しであることが分かる。

実際の試料による繰返し計算の推移を図4に示す。 $f_{\min}$ は任意の繰返しで得られる最小の目的関数の値、

Fig. 2 Converging trend of minimum zone values based on the criterion σ_f . Units of σ_f , C_{mz} and C_{mzt} are in μm

Fig. 3 Progression of standard deviation σ_f . Symbols coincide with the data in Fig. 2

C_{mz} は $\epsilon_f = 0.01 \mu m$ として得られる最小領域値である。ほとんどのものが、40 回前後までで解が得られている。

4.2 最小領域値と最小自乗法による値との比較

測定データに最小自乗法によってあてはめた真円すい面を基準として得られる法線方向の形状偏差の幅を C_{LS} とおく。このとき、最小領域値 C_{mz} との関係は図 5 のようになる。簡易的な評価である C_{LS} は、最小領域値よりかなり大きく評価される例が多いことは注意しなければならない⁷⁾。

最小自乗法であてはめた真円すいのテーパ比 k_{LS} と最小領域法による内外接真円すいのテーパ比 k_{mz} との比較を図 6 に示す。その違いは、たかだか 0.1% 程

Fig. 4 Number of iteration achieving to the minimum zone value C_{mz}

Fig. 5 Comparison between least square and minimum zone values in taper cones

度であるが、円すい長さが長い部品では、無視できない値である。

5. 結 言

円すいテーパ部品の形状誤差を最小領域法によって評価する手段を提案した。ここで得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 最小領域法による円すいテーパ部品の形状評価を、非線形最適化技法の一つであるシンプレックス法で行えることを示した。
- (2) シンプレックス法における計算の打ち切り条件は、シンプレックスの各頂点の目的関数の標準偏差で考え、その値は $0.01 \mu m$ 以下で十分であるこ

Fig. 6 Difference of taper depending on least square and minimum zone methods

とを明らかにした。

- (3) 最小自乗法による形状評価値が、最小領域法による評価値より大きくなる度合を例によって示した。さらに、テーパ比についても両者の比較を行い、いずれも評価方法によって差があることを明

らかにした。

最後に、本研究にご協力頂いた柳和久助教授（長岡技術科学大学）並びに笹島和幸氏（東京工業大学）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 劉 書桂, 塚田忠夫, 金田 徹: 円すいテーパ部品の形状精度の一評価法, 設計製図, **21**, 5 (1986) 129.
- 2) 塚田忠夫, 劉 書桂, 笹島和幸, 金田 徹: 円すいテーパ部品の形状誤差評価法, 精密工学会誌, **53**, 5 (1987) 762.
- 3) JIS B 0614-1978, 円すい公差.
- 4) T. Tsukada, Y. Anno, K. Yanagi and M. Suzuki: An Evaluation of Form Errors of Cylindrical Machine Parts by Spiral Tracing Method, Proc. 18th Int. MTDR Conf., (1977) 529.
- 5) 塚田忠夫, 金田 徹, 劉 書桂: 円筒形状測定における試料姿勢制御システムの開発, 設計製図, **21**, 11 (1986) 450.
- 6) 金田 徹, 塚田忠夫: 円筒形状の離散測定におけるサンプリング間隔, 精密機械, **51**, 6 (1985) 1225.
- 7) 塚田忠夫, 金田 徹: 最適化技法による円筒度の最小領域評価, 精密機械, **50**, 4 (1984) 652.
- 8) J. A. Nelder and R. Mead: A Simplex Method for Function Minimization, Computer J., **7**, (1965) 308.

62 年版科学技術白書発表

科学技術庁では、このほど標記の白書を発表した。

今回の白書は副題が「わが国科学技術の国際化に向けて」とあるように、国際的な視点からわが国の科学技術の現状をとらえ、世界のトップランナーの仲間入りを果たした今日、国際交流や国際共同研究の推進など、これまでも増して国際性を重視した展開を求められるようになったと強調している。

大要、次のとおり。

第一部 わが国科学技術の国際化に向けて

第1章 国際社会の中で、新しい地歩を占めつつあるわが国の科学技術＝1955年におけるわが国の研究開発投資は、米国、ソ連など主要6か国の中では約1%を占めるに過ぎなかった。しかし、1985年では米国に次いで自由世界では第2位、6か国中のシェアも約16%を占めるまで向上した。

特に、わが国は民間の研究投資額が全体の8割と大きなウェートを占め、最近の円高に伴う売上高の減少にも

かわらず、研究投資の拡大傾向が続いている。中でも、ハイテク化を目指し、基礎的研究の段階から積極的に研究開発を行おうという姿勢がみられ、昭和30年代後半の中央研究所ブームに次いで、第二の研究所新設ブームが生じている。

第2章 世界の科学技術を巡る新しい潮流＝欧米との間で発生している貿易摩擦の問題は、急激な日本の国力の向上に伴うあつれきが背景にあり、基本的な技術開発への努力は、国際社会に対する貢献という観点と同時に、国際協調型産業構造への転換による摩擦の未然回避という観点からも要請されるようになってきた。

科学技術面では知的所有権、互恵主義（シンメトリカルアクセス）の問題が出てきており、これらに対する適切な対応が求められている。知的所有権については、それを巡るトラブルが増大しつつあり、今後も新たな対象が出てくる可能性が高く、継続的な取組みが必要である。

(p. 358 へ続く)