

インプロセス計測の研究

—空気マイクロメータによる工作物寸法測定—

藤沼 良夫* 後藤 文夫**

上林 広洋***

1. はじめに

空気マイクロメータは構造が簡単で安価なこと、取扱が容易なうえ高倍率が得られること、非接触測定なので工作物を傷つけないこと、空気の噴出によって切り屑や切削液を吹き飛ばすため外乱の影響を受けにくいことなど、優れた特徴を持っている。しかし、中小企業の生産現場を見るにつけ、空気マイクロメータを使用している例は極めて少ない。かろうじてオフラインでの検査などに、直径法が使用されているに過ぎない。

空気マイクロメータによる工作物の寸法測定では、円筒形状の外径、内径、厚みの測定が主である。外径の測定では直径法と半径法がある。直径法は工作機械などの運動誤差と無関係に測定できるため信頼性が高い。一方、半径法は工作物のたわみや工作機械の運動誤差の影響が直接測定結果に入ってくる可能性があるため、従来からあまり使用されていない。しかし、半径法は装置が簡単でフレキシビリティに富んでおり、工作物の寸法検査や監視などの単純な測定では、空気マイクロメータの優れた特徴を十分に発揮できる。

しかし、実際に自社の工作物に適用しようとする、空気マイクロメータ設計の指針となる文献が見あたらない。

そこで筆者らは、空気マイクロメータを広く生産現場に普及すべく、半径法による工作物の寸法測定を目的に、空気マイクロメータ設計法について考察し実験を行ったので報告する。

2. 空気マイクロメータの特性

空気マイクロメータの原理は図1に示すように、 P_s という一定圧力の空気が供給されると、空気は入口絞り1から背圧室を通り大気圧 P_a に通じるようになっている。背圧 P_n は出口絞り2と被測定物の位置（変位 Z ）によって、 P_s P_n P_a の範囲で変化する。従って、背圧 P_n を検出すれば変位 Z を測定できる。

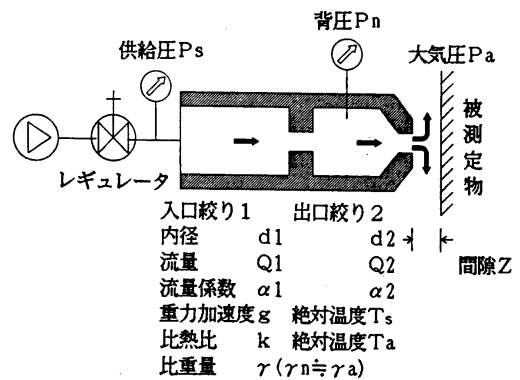


図1 空気マイクロメータの原理

* 新技術応用部 **光商工(株) ***東洋製鋼(株)

入口絞りと出口絞りの空気の流れの状態は絞り前後の圧力差に応じて、粘性流または断熱膨張流となる1) 筆者らは、入口絞り径0.020cmから0.120cmまで、出口絞り径0.018cmから0.201cmまで各々7種類の流れの状態を確認した。その結果、出口絞り径0.062cm以下、圧力差0.2kg/cm²の一部の範囲において粘性流が認められた。また筆者らが対象としている半径法では、供給圧力は0.5kg/cm²以上の中圧である。これらのことから判断して、断熱膨張流として扱うことにした。

$$Q_1 = \frac{\alpha_1 \pi d_1^2 P_s}{4 \gamma n \sqrt{R T_s}} \left[\frac{2 g k}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_n}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_n}{P_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_2 = \frac{\alpha_2 \pi d_2 Z P_n}{\gamma a \sqrt{R T_n}} \left[\frac{2 g k}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_a}{P_n} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_a}{P_n} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

入口絞りと出口絞りの流量を各々Q1, Q2とすると、次式の関係が成立する。

連続の式からQ1=Q2とおき、入口絞り径d1, 出口絞り径d2, 供給圧力Psを与えて間隙Zに対する背圧Pnを数値計算すると、特性曲線や検出感度Knが求められる。

式(1)と(2)の計算に際し、入口絞りと出口絞りの流量係数1, 2を実験的に求める必要がある。そこで、各々の絞りに圧力差を与えて流量を実測し、式(1)と(2)の理論流量との比をとり、流量係数を求めた。その結果、流量係数1は圧力差には依存せず、ほぼ0.70と一定であった。流量係数2は0.4kg/cm²以下の領域でややばらつくが、平均すると0.72であった。

図2に平板を測定したときの特性曲線を示す。波線は1=0.70, 2=0.72として式(1)と(2)から求めた理論値であり、実線は実験値である。各々理論値と概ね一致しており、1=0.70, 2=0.72が十分使えることがわかる。

3. 工作物の寸法測定法

3.1 工作物の与条件

一般に円筒型工作物の寸法は、基準寸法Dsと公差0で表示されている。従って、空気マイクロメータで工作物の寸法検査や監視などの比較的単純な測定をしようとする場

背圧Pn (kg/cm²)

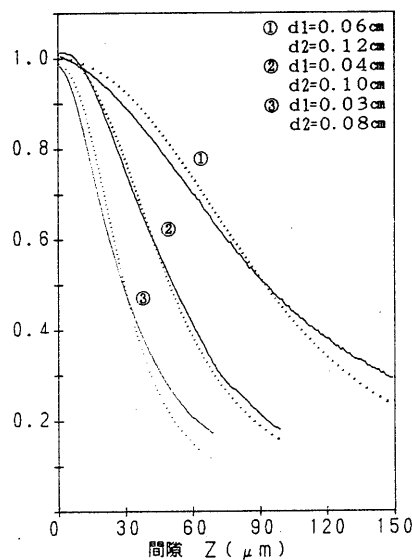


図2 平板測定時の静特性曲線

合、測定のと条件は基準寸法 D_s と公差 σ と考えてよい。

一方、製造者は基準寸法 D_s と公差 σ を与えられると自社の工程能力を検討し、一般に公差 σ の75%に入るように製造する。従って、工作物の寸法検査や監視を行うおうとする場合、図3に示すように検出器の最少測定範囲は n となり、検出器の感度の中心は o の1/2に合わせ、その75%を分解能とする必要がある。よって、検出器の分解能 ϵ_o には次式が成立する。

$$\epsilon_o = 0.75 \sigma / 2 \quad (3)$$

また、出口絞りの先端と工作物の最大公差のときの間隙を Z_{min} とすると、検出器の最大感度の間隙 Z には次式が成立する。

$$Z = Z_{min} + \sigma / 2 \quad (4)$$

ただし、 $Z < d_2 / 4$ である。

3.2 最適出口絞り径の算出

空気マイクロメータの出口絞り と円筒型工作物を密着させた場合、平板と違って工作物は曲率を持っているため隙間が生じて空気は漏れる。その結果、理論流量より多く流れ特性曲線の線形な隙間 Z と測定範囲が狭くなる。

そこで、平板を測定したときの線形な測定範囲に対して、工作物の基準寸法 D_s が変わると測定範囲がどのくらい狭くなるかの実験を行った。その結果を図4に示す。

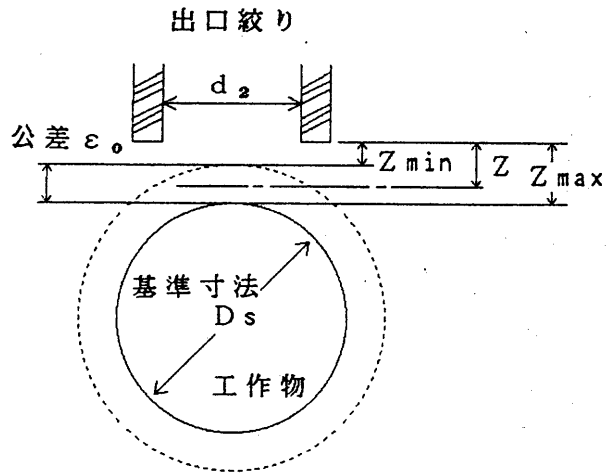


図3 工作物と出口絞りとの間隙

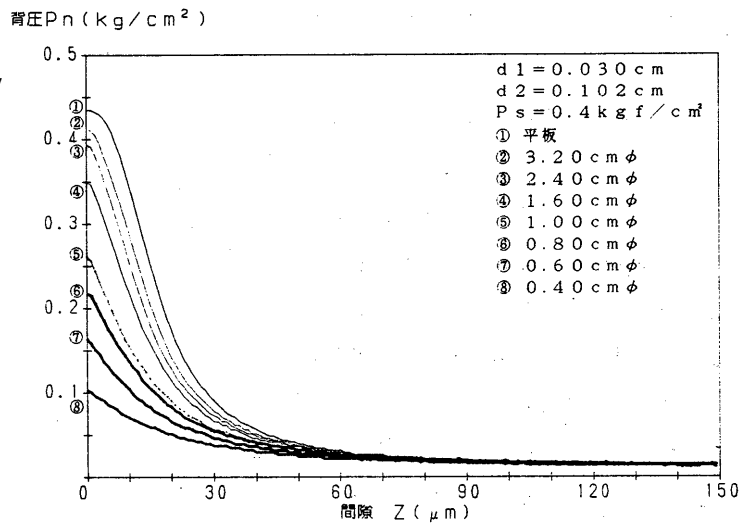


図4 円筒型工作物の外径の違いによる背圧変化

基準寸法 D_s が小なり，線形な測定範囲が狭くなっている。

そこで，縦軸に平板に対する工作物の線形な測定範囲の比 K をとり，横軸に工作物の基準寸法 D_s と出口絞り径 d_2 との比 D_s/d_2 をとり，最適出口絞り径を算出しようとしたのが図5である。図5からは空気マイクロメータで工作物を測定する場合，平板の線形な測定範囲の70%以上を満足させるには， d バ丈次式を満足する必要がある。

$$d_2 < D_s / 20 \quad (5)$$

さて，測定対象が平板のときは流量係数 2 を 0.72 としたが，工作物を測定するときは空気が漏れているために流量係数 2 を補正する必要がある。筆者らの実験では補正值を 0.05 として流量係数 2 を 0.77 とすると，概ね理論値と実験値が一致する。その例を図6に示す。波線は $1-0.70$ ， $1-0.77$ として式(1)と(2)から求めた特性曲線である。各々理論値と概ね一致しており，工作物を測定するときには $1=0.70$ ， $2=1.0$ が十分使えることがわかる。

3.3 供給圧力と最大検出感度 t

図7は式(1)と(2)より，縦軸に検出感度 $K_n (=dP_n/dZ)$ をとり，横軸には入口絞りの面積と出口絞りで形成される面積比 $s (=小Zd_2/d_1)$ をとったものである。絶対圧で P_n/P_s が 0.527 以下では，最大検出感度 K_n を示す面積比 s は供給圧力 P_s によって 0.577 から 1.24 と変化する²⁾。半径法による中圧式空気マイクロメータでは，一般に供給圧力 P_s は 1.0 kg/cm^2 近辺が使用されてい

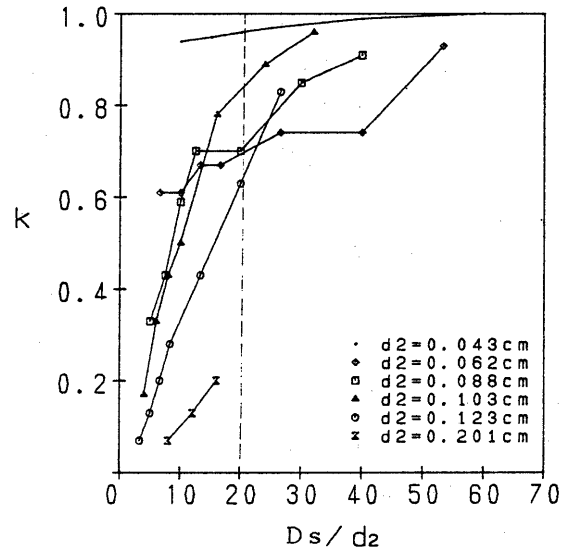


図5 最適出口絞りの算出

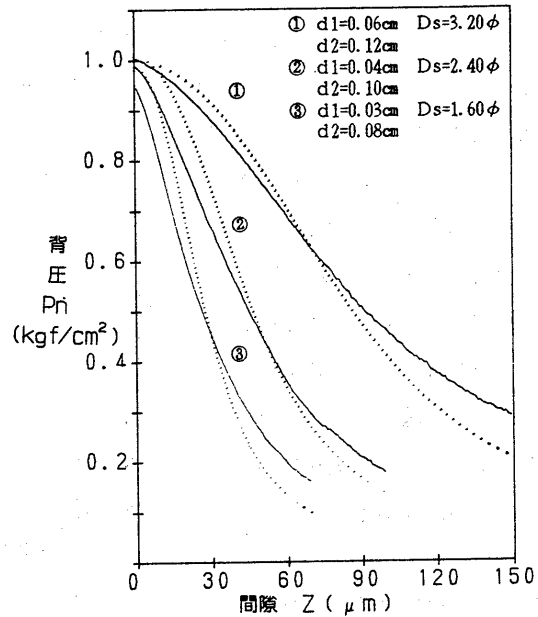


図6 工作物測定時の静特性曲線

る。図7より供給圧力 $P_s = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ では、面積比 $s = 0.9$ である。従って、最大検出感度が得られる入口絞り径 d_1 は、間隙 Z と出口絞り径 d_2 及び無次元面積比 s が与えられれば次式で求めることができる。

$$d_1 = (4Zd_2 / s)^{1/2} \quad (6)$$

3.4 圧力変換器と最大検出感度

背圧を検出し電気出力に変換する圧力変換器の直線性とヒステリシス及び繰り返し精度などを総合した繰り返し誤差は、ルスケールの何%と与えられる。いま、繰り返し誤差の圧力変換器を用いて、分解能の空気マイクロメータを設計しようとする、最小検出感度 K_{ns} は次式で表せる。

$$K_{ns} = \dots / \dots \quad (7)$$

従って、いま設計しようとしている空気マイクロメータの供給圧力 P_s と入口絞り径 d_1 及び出口絞り径 d_2 を与えれば、式(1)と(2)より図7の最大感度 K_n 曲線が描ける。この最大感度 K_n と K_{ns} とを比較することにより、この空気マイクロメータは当初計画の性能を満足するかどうかをチェックできる。

図8に空気マイクロメータによる工作物の測定法のフローチャート示す。

4. 実験結果と考察

図8に基づき、基準寸法 24.000 cm 、公差 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ を測定する空気マイクロメータを設計した。実験は旋盤上に工作物を両センターで支持し、バイト送り台に分解能 $0.5 \mu\text{m}$ のZステージを固定し、その上に空気マイクロメータをセットした。まず、静特性曲線を求めた。次に、

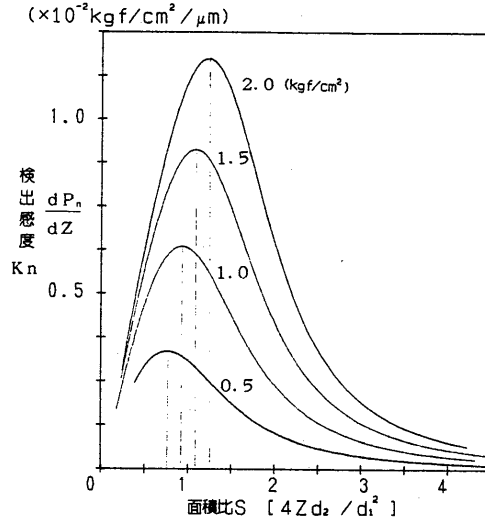


図7 最大検出感度と面積比

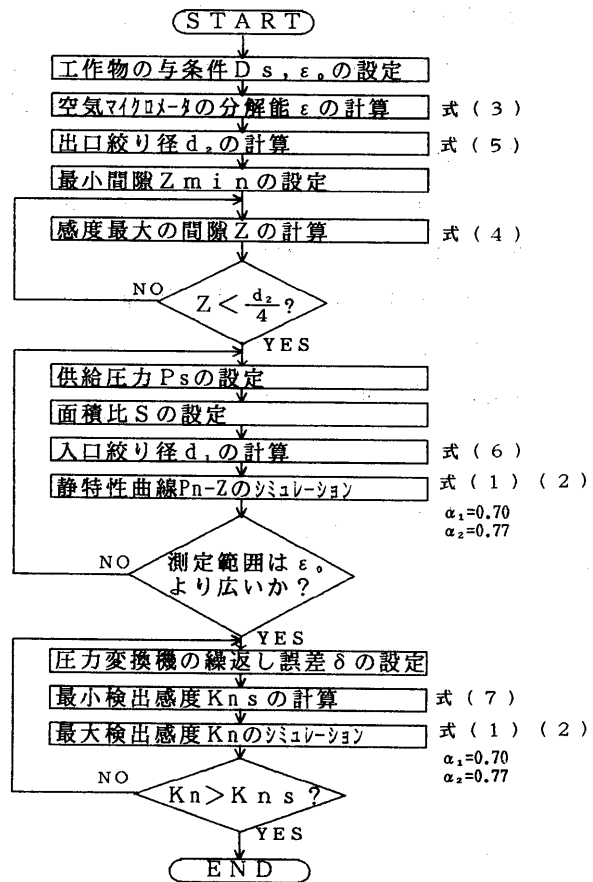


図8 空気マイクロメータ設計フローチャート

工作物と空気マイクロメータの間隙を Z_{min} - $20\mu\text{m}$, $Z_{max} = 40\mu\text{m}$, 中心 $Z = 30\mu\text{m}$ にして, 3点の背圧を検出した。

図9に, その結果を示す。設計値どおり間隙 $30\mu\text{m}$ を中し, に $\pm 10\mu\text{m}$ を精度よく検出している。

以上, 半径法により工作物寸法を測定するために, 空気マイクロメータの設計法について検討し, 実験を行ったところ概ね良好な特性が得られた。

今後は, 工作物の表面粗さと切削油や切り屑などによる汚れ具合が, 空気マイクロメータの精度にどのような影響を与えるかについて, 考察する予定である。

本考察を遂行するにあたり, 有益な助言をいただいた茨城大学工学部教授白石昌武氏, 日立製作所中央研究所河村善雄氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河村善雄ほか: 「縮小投影露光装置の出口型の大きいエアマイクロ式位置保持機構の開発」, 精密工学会誌, 55, 1 (1989) 81.
- 2) 工業計測技術体系編集委員: 変位厚さ測定, 日刊工業新聞社, (1965) 295.
- 3) 藤沼良夫ほか: 「空気マイクロメータによる工作物寸法測定に関する考察」, 1991年度精密工学会春季学術講演会講演論文集

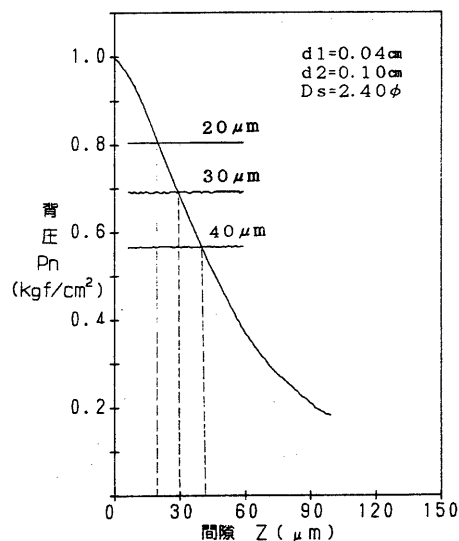


図9 工作物寸法測定結果