

吸気型ボールプローブの開発（第1報）*

- 基本的構成 -

高増 潔** 郭 志徹*** 鈴木昭洋†
 平木雅彦** 古谷涼秋†† 大園成夫**

Development of Pneumatic Ball Probe (1st Report)
 - Basic Construction -

Kiyoshi TAKAMASU, KUO Chih-Che, Akihiro SUZUKI,
 Masahiko HIRAKI, Ryoshu FURUTANI and Shigeo OZONO

The measurement of a diameter of a small hole with low measuring force and a high resolution is one of key issues for evaluating products in the industry of semiconductor and micro machining. However, there is no good sensing system to measure the diameter of a small hole by low measuring force. Therefore, we have developed a novel sensing system using a pneumatic system for measuring the diameter of a small hole. The sensor consists of a small ball, a thin pipe, a vacuum generator and a differential pressure gauge. In this sensor, the small ball is kept at the center of the thin pipe by the vacuum pressure. When the ball touches a wall of a small hole, the ball is shifted from the center of the pipe and it causes the airflow from outside to inside of the pipe. The differential pressure gauge detects the airflow, then the sensor finds the touching between the small ball and the wall of the small hole. A first prototype of the pneumatic ball probe is made and tested. From the theoretical analysis and the experimental tests, the probe is found to detect the touching and to measure the ball shift.

Key words: pneumatic sensor, ball probe, two-dimensional sensor

1. はじめに

半導体産業，小型光学部品やマイクロマシンの製造において，細かい幾何形状を測定する重要性は増加している．特に，小径穴（ドリル加工では普通 3.2 mm 径以下の穴をさす）などの寸法を表面の影響を受けずに測定するためには，接触方式で小型かつ低測定力のプロービングシステムが必要となる．

小径穴加工の対象物としては機械部品，プリント基板，各種ノズルなどがあり，加工方法としてはドリル加工，打抜き加工，放電加工，電子ビーム加工およびレーザ加工などが用いられている¹⁾．このような小穴を精密に加工するためには，穴の内径や形状を評価する必要がある．特に，穴の内径寸法を高精度で測定することは，小径穴加工の評価に不可欠である．小径穴の計測方法としては，従来，限界ゲージによる方法，テーパ針を利用する方法，機械式的内径測長機を使う方法，顕微鏡により測長する方法，機械式の接触子と光学的な検出を組み合わせた方法などが使われている²⁾．また，最近では増沢らにより振動子を接触子として使用する方法³⁾などが提案されている．

これらの方法の問題点の多くは，接触部分にあると考えられる．特に，穴の内径と穴の深さの比が大きい穴を測定するためには，非常に低い測定力がかつ小さい接触子を構成する必要がある．測定力の小さな測定方法としては，光学的な方法⁴⁾⁵⁾と空気圧を利用する方法が考えられる．光学的な方法は，対象となる材料や材料表面のテクスチャの影響を受けやすいこと，およびレンズ系などを小形化しにくいことより対応に限界がある．

一方，空気圧を利用する方法としては，空気マイクロメータを利用する方法が使われている^{6)~8)}．また，空気マイクロメータを接触子を介して使う，接触ニューマチック法なども使われている．本研究では，接触ニューマチック法をできるだけ小形で高感度にするための工夫として，パイプとボールで接触子を構成することを提案した．まず，空気圧を利用した新しいタイプのボールプローブ，吸気型ボールプローブの基本的な設計指針を検討し，さらに，プロトタイプを開発してその基本的な性能の確認を行った⁹⁾．

2. 基本的原理と目標仕様

吸気型ボールプローブの基本的な原理を図 1 に示す．真球度のよい小さな球を接触子（以下，ボール）として使い，接触子の軸としては細いパイプ（以下，パイプ）を用いる．ボールはパイプの内部を負圧にすることにより，パイプの中心に位置決めされている．図 1 の拡大図のように，ボールに横方向から小径穴の内壁が接触すると，ボールの位置が少し変化し，パイプに対して外部から空気が流入する．この空気の流入を検出することにより，吸気型ボールプローブは二次元的な接触プローブとして使用することができる．

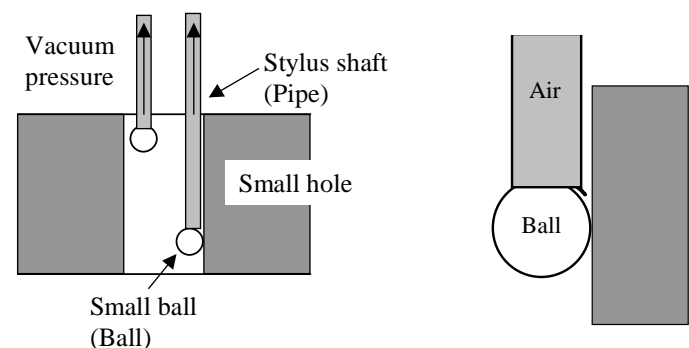


Fig. 1 Basic construction of the pneumatic ball probe

* 原稿受付 平成 10 年 2 月 20 日

** 正 会 員 東京大学工学系研究科（東京都文京区本郷 7-3-1）

*** 学生会員 東京大学大学院

† コニカ（株）（東京都八王子市石川町 2970）

†† 正 会 員 東京電機大学工学部（東京都千代田区神田錦町 2-2）

吸気型ボールプローブの目的は、前述したように微小な幾何形状の寸法などを測定することであるため、最終的には以下のような目標仕様を考えて、構成を検討することとした。まず、小径穴などを測定するために、接触子として使用するボールおよびパイプの直径を小さくする必要がある。また、小さいパイプを軸として使うことから、そのたわみを小さくするためには、測定力を十分小さくする必要がある。また、最終的にはサブミクロンの測定分解能を目指す。

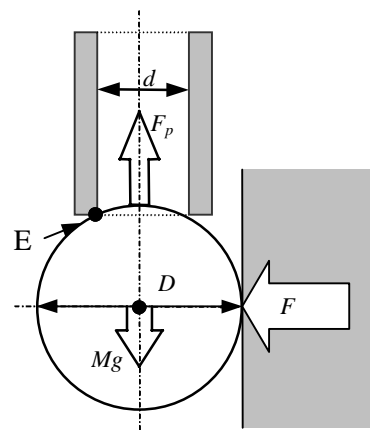


Fig. 2 Measuring force F of the pneumatic ball probe from the moment balance at point E

- (1) 接触子として使用するボールの直径を 0.1 mm から 1.0 mm とする。
- (2) 測定力を 0.001 N より小さくする。
- (3) 測定分解能を 1 μm より小さくする。
- (4) 測定分解能に対応して、ボールの真球度、パイプ端面の形状精度、表面粗さなどは 1 μm 以下とする。

3. 吸気型ボールプローブの基本的な解析

3.1 測定力の解析

前項の目標仕様を考慮して、吸気型ボールプローブの基本的な解析を行う。図 2 は、吸気型ボールプローブに横方向から小径穴の内壁などが接触した状態を示している。実際には、ボールには真横以外から接触する場合もあるが、角度が小さい場合には測定力はあまり変化しないので、真横の場合だけを考える。ここで、点 E におけるモーメントの釣合いを考えると、式 (1) が成り立ち、これを測定力 F について解くと式 (2) が成り立つ。

$$F_p \frac{d}{2} - Mg \frac{d}{2} - F \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{4}} = 0 \quad (1)$$

$$F = \frac{(F_p - Mg)d}{\sqrt{D^2 - d^2}} \quad (2)$$

ここで、 F_p はパイプの中の負圧により球にかかる力、 M は球の質量、 g は重力加速度、 D はボールの直径、 d はパイプの内径である。この解析ではボールと壁の間の摩擦は無視している。負圧による力 F_p と球の質量 M は式 (3) および (4) で表現できる。

$$F_p = \frac{1}{4} \pi d^2 P_v \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_s \quad (4)$$

ここで、 P_v はパイプ内の負圧、 ρ_s はボールの材質の密度である。これらの式をまとめると、測定力 F は式 (5) で表現できる。

$$F = \frac{\pi d}{\sqrt{D^2 - d^2}} \left(\frac{1}{4} d^2 P_v - \frac{1}{6} D^3 \rho_s g \right) \quad (5)$$

図 3 は、パイプ内の負圧 P_v を一定値 (10 kPa) にした場合の測定力 F とボールとパイプの直径比 D/d の関係を示している。ボールは鉄製で、密度 ρ_s は 7900 kg/m^3 である。この図より、目標仕様の測定力 0.001 N 以下を満たすためには、直径比が 1.1 以上の条件で、パイプの内径を 0.2 mm 以下にすればいいことが分かる。また、直径比を 2.0 とすればパイプの内径が 0.4 mm で条件を満足する。測定力が 0.001 N 以

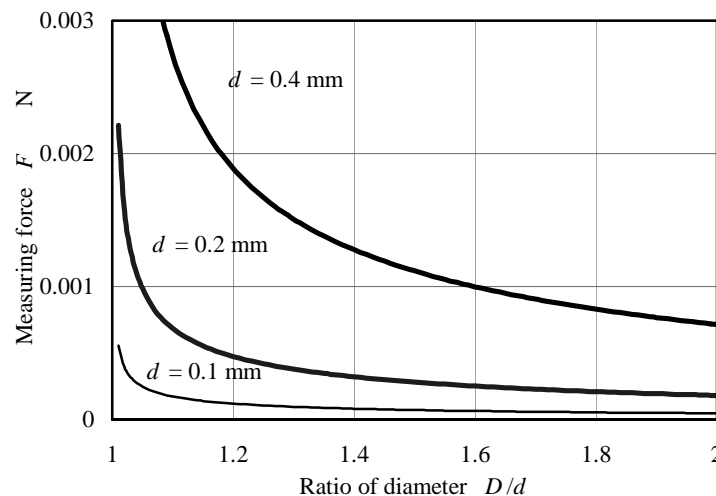


Fig. 3 Measuring force F versus diameter ratio D/d for the internal diameter d is 0.1 mm, 0.2 mm and 0.4 mm

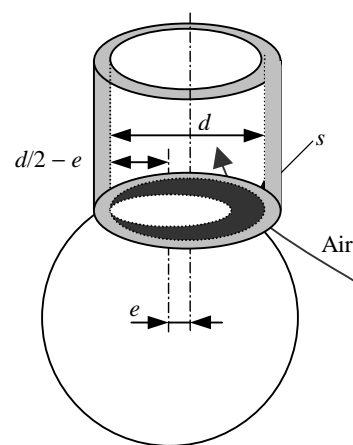


Fig. 4 Opening area s between the pipe and the ball

下の場合、4.1 項の条件では、測定力によるパイプのたわみは 1 μm 以下であり十分小さい。

式 (5) より分かるように、負圧による力をボールの重量を支えられる限界まで下げれば、測定力を小さくできる。現在の設定では、負圧による力はボールの重量の 100 倍以上になっている。しかし、負圧による力を小さくすると、ちょっとした外力でボールがパイプから離れてしまうため、プローブの安定性を考慮して最適な負圧を決定する必要がある。最適な負圧の決定は今後の課題と考えている。

3.2 プローブ内の圧力変化の解析

図 4 は、ボールが e だけパイプの中心からずれたとき、パイプとボールの間に開くすきま面積 s の算出方法を示している。厳密には、一番狭いすきま面積は、ボールとパイプを結ぶ円すい面の面積から計算できるが、計算結果はあまり変わらないので、すきま面積 s を図のようにパイプの入口で考えることとした。この場合は、ボールの直径 D は圧力変化と無

関係となる．すきま面積 s と球の移動量 e との間には，式(6)の関係がある．

$$s = \frac{1}{4}\pi d^2 - \pi\left(\frac{d}{2} - e\right)^2 = \pi(de - e^2) \quad (6)$$

次に，このすきまを通して流れる空気の流れる速度および圧力変化について考察する．図5は，プローブの中の空気の流れおよび圧力の変化をモデル化したものである．プローブの外側の大気圧を P_0 ，プローブ内部の検出部の圧力を P_A ，真空発生器の作る負圧を P_V とする．

ベルヌーイの定理，運動量保存の法則および連続の条件から，式(7),(8)および(9)を導くことができる¹⁰⁾¹¹⁾．

$$v_A^2 + hv_A^2 = \frac{2(P_0 - P_A)}{\rho_a} \quad (7)$$

$$\rho_a s v_A^2 - \rho_a a v_B^2 = (P_A - P_V)a \quad (8)$$

$$v_A s = v_B a \quad (9)$$

ここで ρ_a は空気の密度， h は開口部および管内などにおけるエネルギー損失の係数で管入口の流速 v_A の二乗に比例すると仮定した． h の値は管口における損失，管内の摩擦による損失，真空発生器の負荷特性などの影響を受けるため実験的に求めることとした．また， v_B は管内の圧力検出部における流速であり， a ($a = \pi d_a^2 / 4$) は圧力検出部分の管の面積を示す．

式(7),(8)および(9)を解いて， P_A を式(10)として，また， P_A と P_V の差圧 ΔP を s の関数として式(11)のように求めることができる．

$$P_A = \frac{a^2(1+h)P_V + 2asP_0 - 2s^2P_0}{a^2(1+h) + 2as - 2s^2} \quad (10)$$

$$\Delta P = P_A - P_V = \frac{2(a-s)s}{(1+h)a^2 + 2as - 2s^2} (P_0 - P_V) \quad (11)$$

図6は差圧 ΔP とボールの変位 e との関係を式(6)および式(11)からパイプの内径 $d = 0.4$ mm および $d = 1$ mm の条件で求めたものである．その他の条件は，検出部の内径 $d_a = 3$ mm，負圧の条件 $P_0 - P_V = 9.2$ kPa とした．エネルギー損失の係数 h は4節の実験結果と差圧の値を合わせるように5.0と設定した．この図から管の内径 d が小さくなると圧力変化が小さくなること，最大の圧力変化はボールの変位 e が $d/2$ と等しいときに生じることが分かる．

図7は，検出部の面積を変化させた場合の差圧とボールの変位の関係を示す．検出部の内径 $d_a = 0.8$ mm, 1 mm および 3 mm について表示した．その他の条件は図6と同じとした．この図から検出部の面積を小さくすることで圧力変化を大きくすることができることが分かる．

4. 吸気型ボールプローブの基礎実験

4.1 基礎実験の構成

図8に，吸気型ボールプローブの基礎実験のための実験装置を示す．真空発生装置 (Pisco, VGH10) に対して，コンプレッサで圧力(約 100 kPa)を供給することで負圧(約 -9 kPa)を作っている．プロトタイプのプローブの構造を図9に示す．

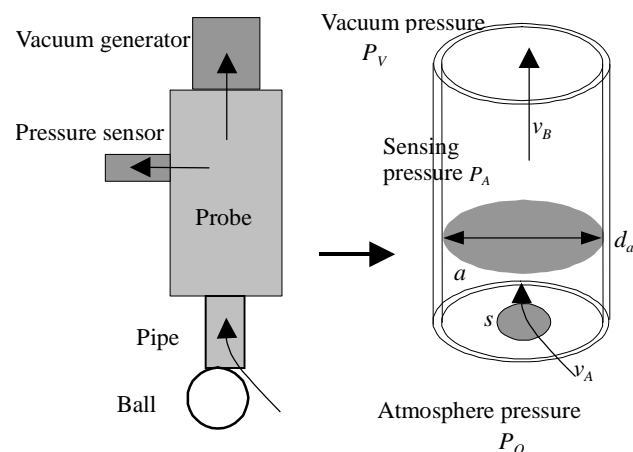


Fig. 5 Model of the airflow in the probe

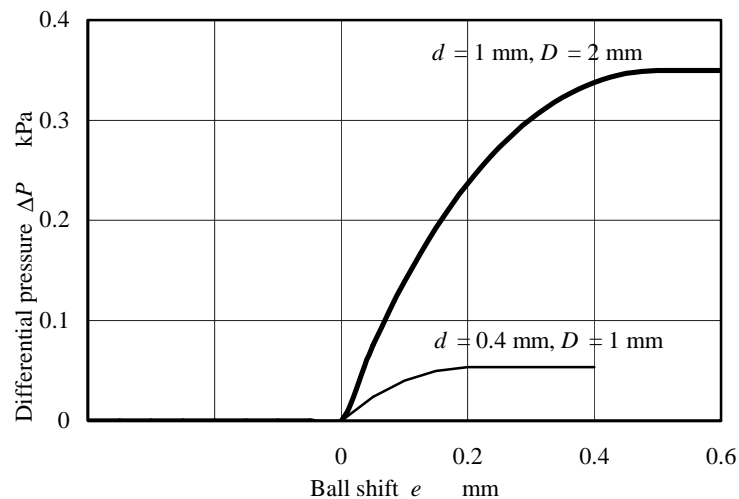


Fig. 6 Theoretical calculation of the differential pressure ΔP versus the ball shift e for the internal diameter of the probe

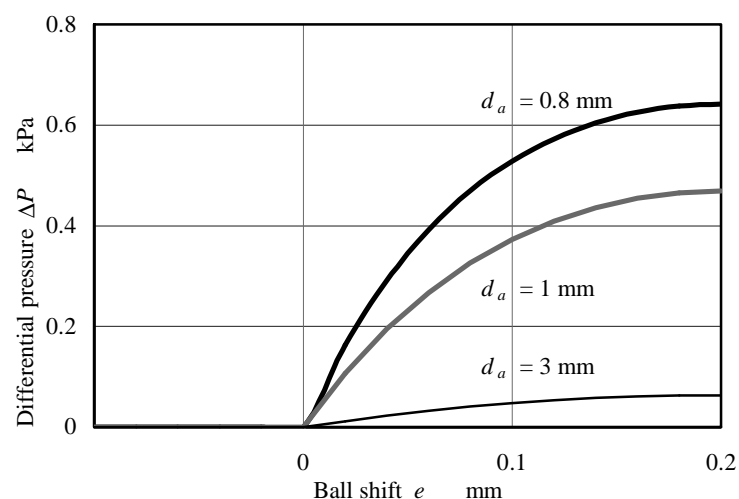


Fig. 7 Theoretical calculation of the differential pressure ΔP versus the ball shift e for diameter of sensing area

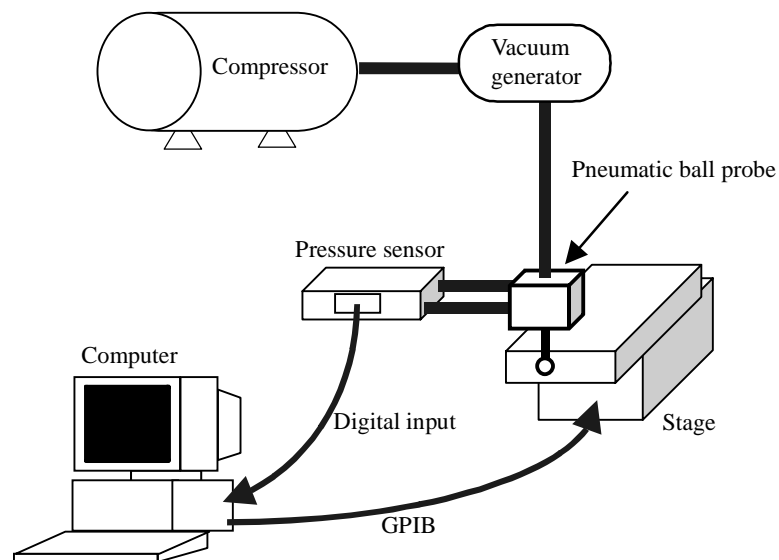


Fig. 8 Experimental setup for the pneumatic ball probe

プローブは、スチール製のボールの直径 D が 1 mm および 2 mm、銅製のパイプの内径 d が 0.4 mm および 1 mm、検出部の内径 d_a が 0.8 mm、1 mm および 3 mm のものを製作した。パイプの外径は 0.8 mm および 1.5 mm で、長さは 15 mm および 20 mm のものを用いた。ボールの小さい変位でボールの接触を検出するため、パイプの外径はボールの外径より 10~20 μm 程度以上大きければよい。圧力は検出部と負圧側との差圧 ΔP を差圧センサ（豊田工機，AA6000H200D，測定範囲：0 から 2.5 kPa）で測定した。

固定されたプローブに対して、電動ステージを移動させてステージがボールに接触することで、ボールに変位を与える。ステージは 1 μm の分解能を持ち計算機から GP-IB によって制御することができる。差圧センサの出力は計算機のデジタル入力に接続されているため、自動的にボールの変位と差圧の変化の関係を計測することができる。

4.2 ボールの変位と差圧の関係

図 10 は、直径 2 mm のボールを内径 0.4 mm のパイプで保持しているプローブのボールが変位しているようすを示した写真である。このように、ボールはかなり変位しても安定にパイプ内の負圧によって保持される。

図 11 は、図 6 と同一の条件で、ステージを移動した場合のステージの移動量 f と差圧 ΔP の変化の関係を示している。この結果は図 6 とよく一致していることが分かり、これにより理論式の有効性が確かめられた。横軸が一致していないのは、図 11 ではボールの変位でなくステージの移動量を使っているためである。また、差圧の変化の大きさはエネルギー損失係数 h を 5.0 とすることで、理論式と実験結果を合わせている。このため、理論式の定量的な有効性にはまだ問題があると考えられる。

図 11 の縦軸は、ボールの変位がない場合の検出部の平均圧力を原点としている。ボールの変位の大きい部分（ f が 0.6 mm 以上の領域）では空気の流量が大きくなり、差圧が不安定な変化を示す。ボールの変位の小さい部分（ f が 0.3 mm から 0.4 mm の付近）では、パイプの内径が 0.4 mm のほうが圧力変動が大きい。これは、実験装置の真空発生器や差圧センサなどが負荷の大きいところで不安定であるためと思われる。

4.3 検出部の内径と差圧の関係

プローブを小形化するにはボールの直径を小さくする必要がある。ボールの直径を小さくすれば、パイプの内径も小さくなり圧力変化も少なくなる。そこで、検出部の内径を小さくすることで、圧力変化を大きくすることを検討した。

図 12 に図 7 と同一条件としたときのステージの移動量と差圧の変化の関係を示す。これは、図 7 とよく一致して、やはり理論式の定性的な有効性を確認できた。図 12 は、図 11 で示した時間的な不安定さを減少させるために、時間的な平均（0.2 秒ごとに 5 回サンプリングして平均を取っている）を行っている。

しかし、パイプの内径および検出部の内径を小さくすると、流量が減るばかりでなく、管内の抵抗によるエネルギー損失が増加する。特に使用した真空発生装置は、負荷が増加すると流量が減少し、若干不安定になる。このような理由で、検出部の内径を小さくしていても圧力の増加には限界があると考えられる。

4.4 プローブの分解能の評価

このプローブではボールの変位がない場合の検出部の平均

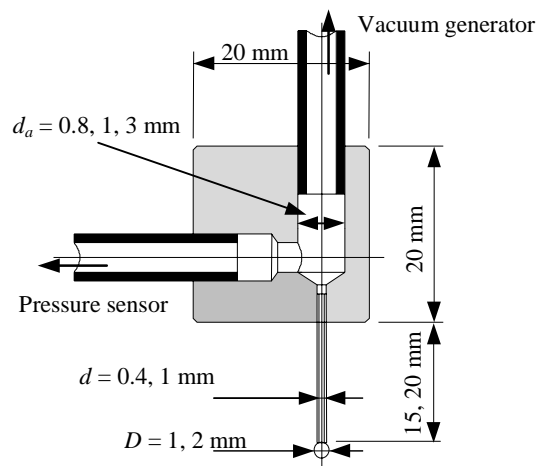


Fig. 9 Cross sectional drawing of the first prototype of the pneumatic ball probe

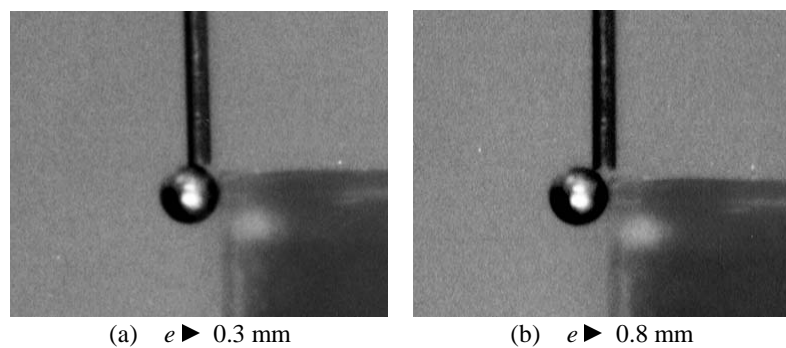


Fig. 10 Photograph of ball at the top of pipe for diameter of ball D is 2 mm and internal diameter of pipe d is 0.4 mm at ball shift e is 0.3 mm (a) and 0.8 mm (b)

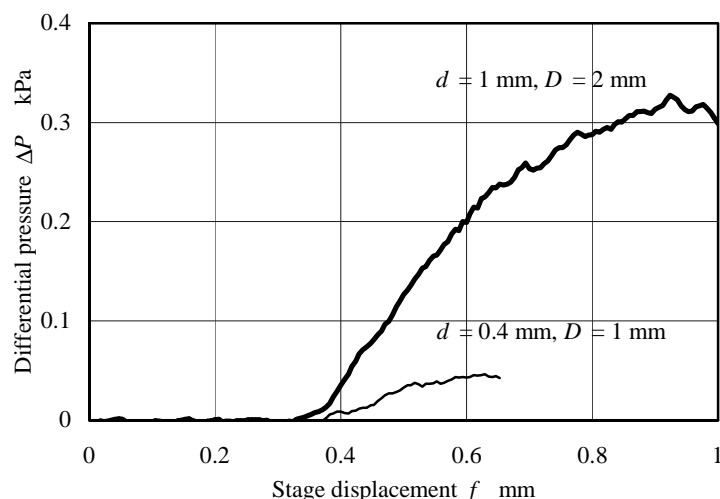


Fig. 11 Differential pressure ΔP versus the stage displacement f for the internal diameters of the pipe d is 0.4 mm and 1 mm

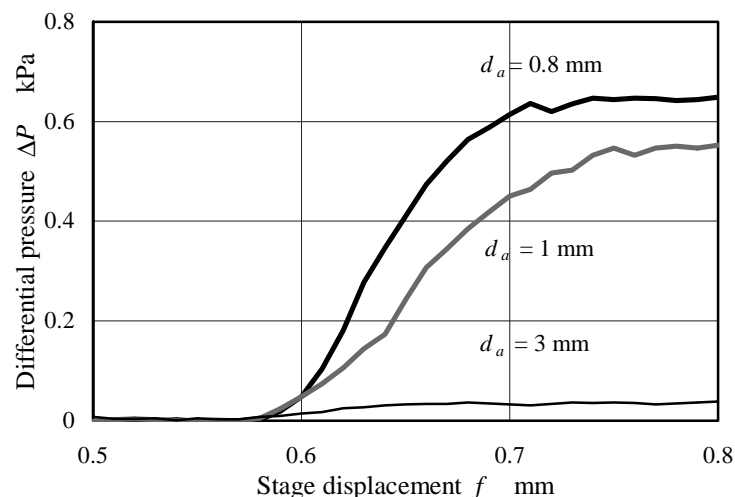


Fig. 12 Differential pressure ΔP versus the stage displacement f for diameter of sensing area d_a is 0.8 mm, 1 mm and 3 mm

検出圧力を基準として、設定した小さいしきい値より圧力が大きくなったところでボールの接触を検出している。この場合のプロトタイプのプロブの分解能を評価した。図13(a)は、システムの圧力の安定性を評価したもので、ボールの変位がない場合の30秒間の差圧の変動を表示している。細線は、サンプリング間隔0.1秒でサンプリングした差圧の変動を、太線は1秒間の時間平均を取った場合の差圧の変動を示している。それぞれの変動のばらつきは、標準偏差($\pm 2\sigma$)で ± 4.9 Pa および ± 1.4 Pa である。

図13(b)は、図12で $d_a = 0.8$ mm の場合の圧力変化のはじめの部分の拡大図である。この付近における差圧変化の傾きおよび圧力変動のばらつきからプロブの分解能を評価できる。表1は圧力変動の標準偏差の2倍に対応する変位を、図12の各条件における分解能として評価した結果である。

現時点での分解能は、まだ目標とする値やはじめに示した種々の測定方法による値に達していない。今後は圧力検出の方法を含めて分解能を高める方法を検討する必要がある。

5. おわりに

細かい幾何形状の寸法を小さい測定力で測定するための吸気型ボールプローブを提案し、その基礎的な解析および基礎実験を行った。この結果、3節で導いた理論式が実験結果と定性的によく一致することが分かった。理論的な検討および実験結果より以下のことが分かった。

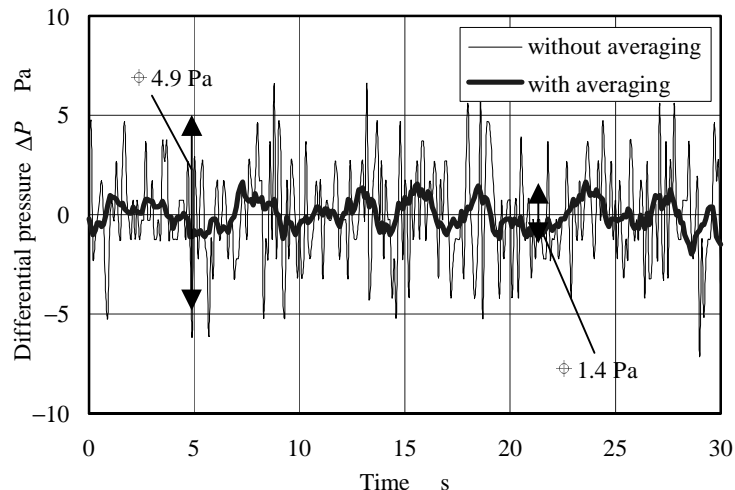
- (1) 吸気型ボールプローブの基本構成を示した。
- (2) パイプの内径を0.2 mm以下にする条件や直径比を2.0とする条件では、比較的容易に測定力を0.001 N以下にできることを示した。
- (3) ボールの変位と圧力の変化の関係を導く理論式を導出した。
- (4) 基礎的な実験を行い、理論式の定性的な有効性を確認した。

しかし、前節で示したように、プローブを小形化すると流れのエネルギー損失が大きくなり、圧力変化の量も小さくなる。このように低い圧力を安定に検出するのはかなり困難と考えられる。また、今回のシステムでは圧力の変動が大きく、目標とする分解能を達成することができなかった。

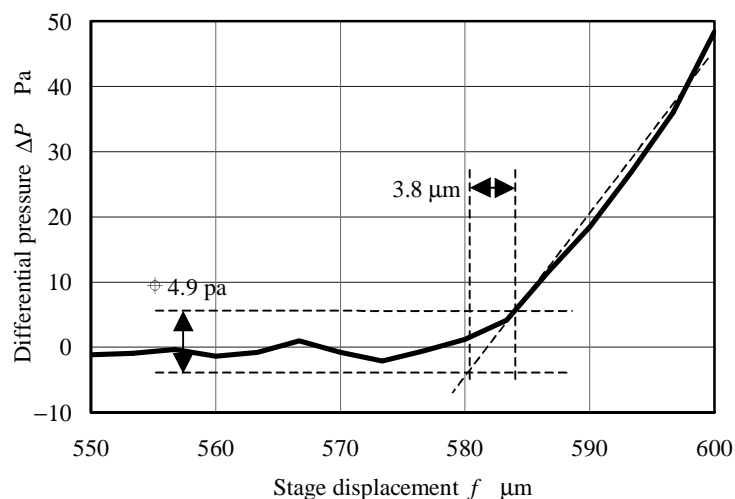
しかし、吸気型ボールプローブを接触プローブとして使うためには、圧力変化をアナログ的に検出できなくても、しきい値の圧力または流量を越えたかを検出できればよい。そこで、今後は、微小圧力変化または微小流量変化を検出するためのセンシング部分の開発を行い、目標とする吸気型ボールプローブを実現することを考えている。

参考文献

- 1) K. LaRoux: An Overview of Drilling Approaches for Holes Smaller Than One Millimeter, SME, MRR 79, 6 (1979) 1.
- 2) イー・アー・グリゴリエフ: 小孔測定, コロナ社, (1955).
- 3) T. Masuzawa, M. Hamasaki and M. Fujino: Vibroscanning Method for Nondestructive Measurement of Small Holes, Ann. CIRP, 42, 1 (1993) 589.
- 4) 丸山六男, 尾坂 一, 小野道彦, 賀勢晋司: 光学的方法に



(a) Fluctuation of differential pressure in 30 s with/without averaging



(b) Differential pressure at ball shift is small for internal diameter of sensing area is 0.8 mm

Fig. 13 Resolution of the pneumatic ball probe by the fluctuation of pressure and slope of displacement-pressure curve

Table 1 Resolution of the pneumatic ball probe relation to the averaging and internal diameter of sensing area

Internal diameter of sensing area d_a	0.8 mm	1 mm	3 mm
Without averaging	3.8 μ m	5.6 μ m	12.6 μ m
With averaging	1.1 μ m	1.6 μ m	3.6 μ m

よる小穴内径測定装置の開発, 精密工学会誌, 62, 1 (1996) 145.

- 5) 鬼鞍宏猷ほか: 光学式内径測定器の開発 - 光学的解析, 基礎実験, 試作および性能試験 -, 精密工学会誌, 61, 2 (1995) 248.
- 6) 井海健吾: 空気マイクロメータ, 日刊工業新聞社, (1962).
- 7) JIS B 7535-1982, 流量式空気マイクロメータ, (1982).
- 8) 青木保雄: 精密測定 (1), コロナ社, (1983) 177.
- 9) K. Takamasu, Kou Chi-Che, A. Suzuki, M. Hiraki, R. Furutani and S. Ozono: Development of Pneumatic Ball Probe for Measuring Small Hole, Proc. Int. Conf. Prec. Eng., Taipei, (1997) 767.
- 10) M. Frank: Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, (1986).
- 11) 谷田好通: 流体の力学, 朝倉書店, (1994).