

# 吸気型ボールプローブの開発（第2報）\*

- 空気トリガセンサ式プローブの評価実験 -

郭 志徹\*\* 高増 潔\*\*\* 平木雅彦\*\*\* 古谷涼秋† 大園成夫\*\*\*

Development of Pneumatic Ball Probe (2nd Report)

- Evaluative Experiments of Flux Trigger Sensor Type Probe -

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

In this paper, a novel touch trigger probe which has a totally different construction concept, namely, a pneumatic ball probe has been developed. This touch trigger type pneumatic ball probe consists of a small probe ball, a thin pipe, a pneumatic trigger sensor and a vacuum pump. The fundamental concepts and theoretical analysis of the pneumatic ball probe are described. A prototype of the probe is made and tested. From the experimental tests, the measuring force is reduced to a great extent by using this structure of separating the probe ball from the stylus. The fundamental analysis and the experiment show that it is possible to measure the distance between two walls such as a groove or a drilled hole without restriction of material for two dimension measurement. Using this pneumatic ball probe, it is found that the width between gauge blocks could be measured within a standard deviation of 1.1 $\mu$ m as well as it is influenced by the vacuum of probe and the inclination of the measurement.

**Key words:** pneumatic sensor, touch trigger probe, two-dimensional measurement, measuring force, hole diameter

## 1. 緒 言

小型な三次元形状を製作する半導体産業，光学部品やマイクロマシンの製造業者は，よりよい製品のために品質管理を一層強める必要がでていいる。これは，三次元測定においても，低い測定力で柔らかい測定物を測定するための，小型でシンプルなプロービングシステムの必要性を高めている。

種々のプロービングシステム<sup>1)</sup>および光学的な測定<sup>2)3)</sup>の中で，タッチトリガ式のプローブはその簡単さのために広く使われている。しかし，一般のタッチトリガ式プローブは，測定力が大きく，方向性を持っていることが知られている<sup>4)</sup>。そこで，我々は空気の流体原理を使って新たなタッチトリガ式プローブを開発した<sup>5)6)</sup>。このタッチトリガ式の吸気型ボールプローブは，低い測定力で測定でき単純な構造を持っていることと方向性に影響されないことが特徴で高精度な測定ができる。前報では，吸気型ボールプローブの理論的な分析およびプロトタイプ吸気型ボールプローブの試作から，上記の特徴を確認した。

本報では，吸気型ボールプローブの検出機構の改善を行い，新しい空気トリガセンサ式の吸気型ボールプローブを開発した。新しいプローブシステムの評価実験を行い，以下について述べる。

- (1) 測定力についての理論的な解析
- (2) 空気の流れの検出方法
- (3) 空気トリガセンサを利用したタッチトリガ式吸気型ボールプローブの構造
- (4) 測定力の評価実験
- (5) 測定精度の評価実験

\* 原稿受付 平成 11 年 9 月 1 日  
 \*\* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科（東京都文京区本郷 7-3-1）  
 \*\*\* 正 会 員 東京大学工学系研究科  
 † 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）

## 2. 基本構成および目標仕様

図 1 に，吸気型ボールプローブの基本的な原理を示す。真球度のよい小さい球（以下，ボール）を接触子として使い，接触子の軸としては細いパイプ（以下，パイプ）を用いる。ボールは真空圧力によってパイプ端面の中心に保持される。ボールが測定物（例えば小穴の壁）に十分ゆっくりと触れるときに，小さい接触力によって，ボールの位置が変えられ，ボールの移動により，外部からプローブの内側までの空気の流れが起きる。

空気の流れを起こすことで，プローブの内側の流体的な状態が変化し，圧力センサを使ってこの流れを検出することによって接触を検出することができる。小穴，光学部品および柔らかい測定物の測定のために，以下のスペックを吸気型ボールプローブの目標仕様とする。

- (1) 接触子として使うボールの直径は 0.1 mm から 2 mm くらいまでの小さいものを使う。
- (2) 接触子の軸として使うパイプの長さは 5 mm より長いものを使う。
- (3) ボールおよびパイプの加工精度は十分よいものを用い

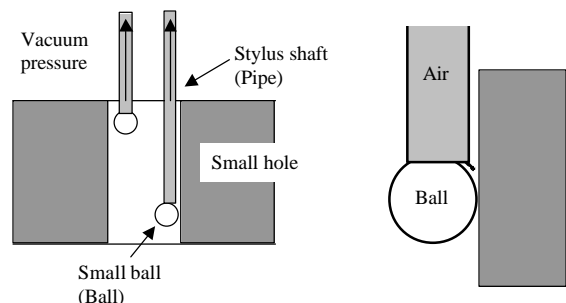


Fig. 1 Fundamental concept of pneumatic ball probe

る。

(4) 測定力は 1 mN より小さい。

(5) 測定の分解能は 1 μm を目標とする。

### 3. 測定力の解析

前報では、測定力の簡単な定量的な解析を行った。本報では、接触角を含めた測定力の影響について検討した。図2は、吸気型ボールプローブが穴の内壁などに接触した状態を示している。測定力の大きさは、点A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。

$$F_p \frac{d}{2} - Mg \frac{d}{2} - F \frac{D \cos(b-a)}{2} + mF \frac{D(1+\sin(f-a))}{2} \leq 0 \quad (1)$$

$$F \geq \frac{d}{D} \cdot \frac{F_p - Mg}{\cos(b-a) - m(1+\sin(b-a))} \quad (2)$$

ここで、 $F_p$ はパイプの中の真空圧力によりボールを支える力、 $M$ は先端球の質量、 $g$ は重力定数、 $D$ はボールの直径、 $d$ はパイプの内径、 $a$ は接触力と水平面との角度（以下、接触角）、 $b$ はパイプの垂直軸とOAとの角度、 $m$ は摩擦係数である。

真空圧力による力  $F_p$  と球の質量  $M$  は式(3)および式(4)で表現できる。

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

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

ここで、 $P$ はパイプ内の負圧、 $r$ はボールの密度である。式(3)と式(4)を式(2)にまとめて整理すれば、測定力  $F$  を得られる。

前報では、摩擦がなくボールが測定物に垂直に接触する場合の検討を行い、パイプ内径が小さい場合には比較的簡単に測定力を 1 mN 以下にできることを示した。図3は、パイプ内径  $d$  とボールの直径  $D$  のいくつかの条件に対して、測定力  $F$  と接触角  $a$  の関係を示している。条件としてその他の設定仕様は、真空圧力  $P$  は 10 kPa、ボールの密度  $r$  は 7900 kg/m<sup>3</sup>、摩擦係数  $m$  は 0.2 である。

この図よりボール径が小さい場合には接触角の影響をあまり受けないことが分かった。また、前報と同様にこの条件で、1 mN 以下の測定力が達成できることが確認できた。

### 4. プロトタイププローブの試作

前報で示した吸気型ボールプローブのプロトタイプにおいては、ボールの変位をプローブ内に配置した圧力センサによって検出していた。本報では、新しいプロトタイプを製作するために、3つの検出方法の比較を行った。

3つの検出方法として、圧力センサ、空気トリガセンサおよび導電式センサを組み込んだ。それぞれのセンサの詳細を以下に示す。

#### (1) 圧力センサ (Pneumatic pressure sensor)

前報で使用した方式。ボールの変位によって生じたすきまから流入する空気は、プローブの内部を伝わり管内部

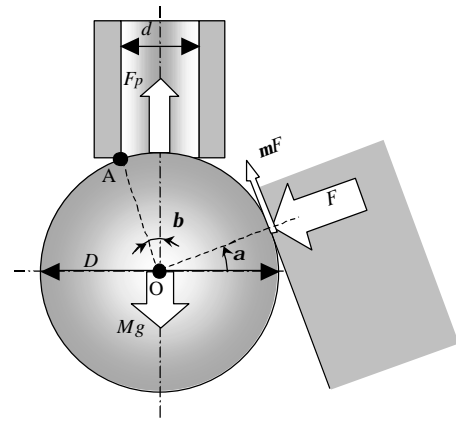


Fig. 2 Measuring Force  $F$  of the pneumatic ball probe from the moment balance at point A

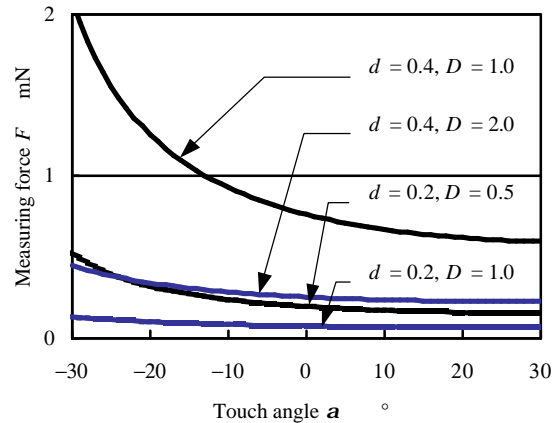


Fig. 3 Theoretical calculation of measuring force  $F$  versus touch angle  $a$  for some combinations of  $d$  and  $D$

に圧力変化を起こす。この圧力変化量を圧力センサで検出する。

#### (2) 空気トリガセンサ (Flux trigger sensor)

ボールの変位によって生じた隙間から流入する空気は、管内の指標球を上押し、この動きを遮光センサを利用して検出する。指標球が上がる時、出力の電気信号は Low から High になる。

#### (3) 導電式センサ (Electric conduction sensor)

スタイラスを +5V に、移動ステージは抵抗を介して 0V につながっている。ボールと移動ステージは導電性があるので、球と移動ステージが接触する瞬間、出力の電気信号は Low から High になる。

図4は、検出方法の比較実験のためのシステムを示す。移動ステージをゆっくりとステップごと（1ステップが 1 μm）動かして、移動ステージの各位置において3つのセンサの出力信号を記録した。

図5はその出力例である。導電式センサが接触を最も早く検出したが、空気の流れによって起こされたボールの振動のために不安定であった。また、圧力センサも少し不安定で、検出感度は圧力センサの精度に依存する。さらに、圧力センサを配置するために大きいスペースが必要となる。

空気トリガセンサでは、反応自体は遅いが最も安定していた。反応距離は、測定速度がゆっくりで一定の場合には、校正測定によって補正ボール直径として補正することができる。また、検出方法の安定性やプローブの小型化から考えると、空気トリガセンサが、吸気型ボールプローブの検出方法として最も適していると考えた。

図6および図7は新しく製作したプロトタイププローブの構造を示す。このプロトタイププローブは主に3つの部分で構成されている。流量弁はプローブの最上部にあり、真空ポンプと接続して空気の流量を調整する。プローブ本体には、空気トリガセンサが組み込まれている。一番下にスタイラスとしてパイプとボールがある。プローブの本体は、センサなどを組み立てるためにいくつかの部分に切り離して、アクリルで製作した。

プロトタイププローブの主要な寸法を図6に示す。ボールはスチール製で、直径が1mmあるいは2mmである。パイプは真ちゅう製で、内径が0.4mm、外径が0.6mmである。

### 5. プロトタイプの評価実験

吸気型ボールプローブのプロトタイプを評価するために、測定力の評価および精度の評価の実験を行った。

#### 5.1 測定力の評価

3章で検討したように 吸気型ボールプローブの測定力は、1 mN オーダであり、非常に小さい。そこで、この測定力を評価するために、微小測定力評価装置を作った。微小測定力評価装置は、図8に示すように、短冊形の薄板ばね（材質：焼入りボン、寸法：6 mm × 100 mm、厚さ：0.1mm）を横にして、固定端から 15 ~ 20mm の間に軽量ミラーを貼り付けて、そこに非接触光変位センサ（SUNTECHNO 社、OPTOMETRIC-10）を配置した。プローブとの接触による薄板ばねの水平変位量を、非接触光変位センサで測定することで、測定力が評価できる。

測定力の測定実験結果の一例を図9に示す。ボールに加え

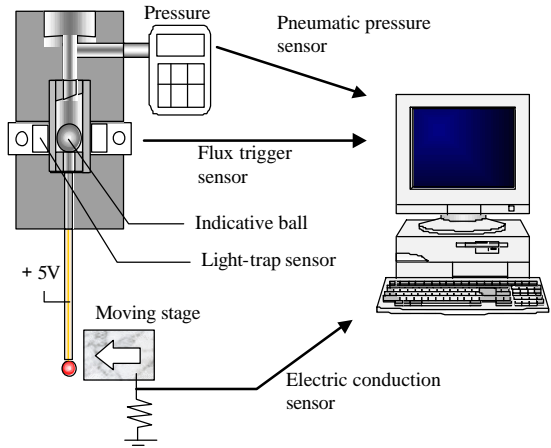


Fig. 4 Experimental setup for evaluation of sensing system

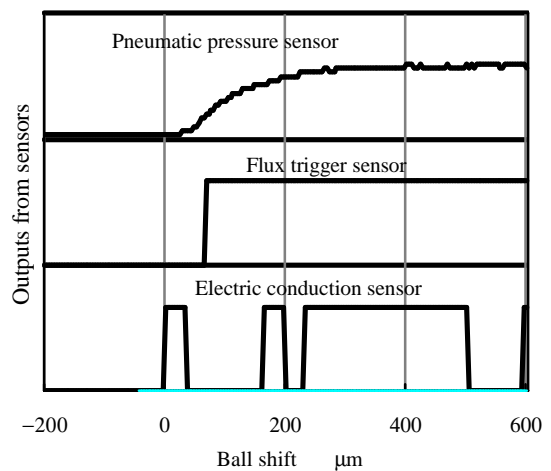


Fig. 5 Experimental result of the evaluation of sensing methods

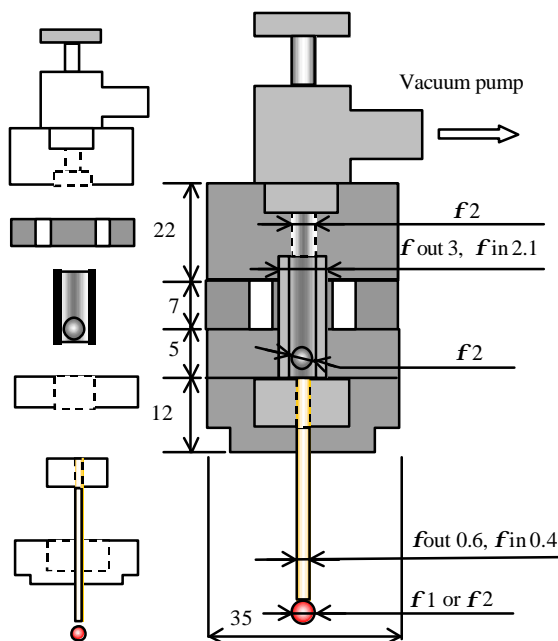


Fig. 6 Block diagram of prototype probe

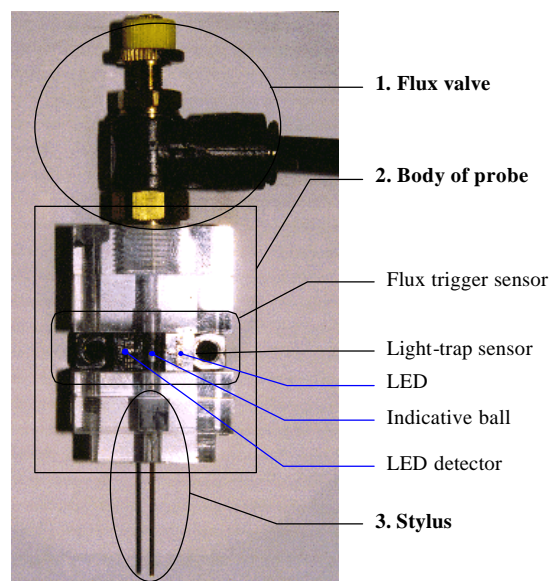


Fig. 7 Prototype of pneumatic ball probe

る変位を徐々に大きくすると、ある臨界値を超えると急に測定力が小さくなってしまふ。その部分は、ボールが移動することで空気が流れはじめる時点である。その臨界値を、吸気型ボールプローブの測定力として評価した。検出した力は臨界値を超えると、急に小さくなってしまふ。その原因は、先端球が管口にずれる瞬間、空気が大量に流れ込むため、先端球を吸い付ける圧力差による力も、小さくなってしまふと考えられる。

測定力を小さくするためには、ボールを保持する負圧を弱くすればよい。負圧を弱くすると図9のピークが低くなり、測定力が小さくなる。しかし、あまり負圧を小さくするとボールが不安定になる。直径1 mmと2 mmのボールを使って、ボールが安定している範囲で負圧を弱くして、測定力を評価した。負圧が4.6 kPaの場合の測定力は、それぞれ0.193 mNと0.096 mNであった。

接触角度による測定力の影響を図10に示す。これらの結果は、理論的な解析とよく一致しており、3章での解析結果が正しいことを示す。また、今回試作したプロトタイププローブは、負圧を適当に設定することで、1 mN以下の非常に小さい測定力を持つことを実証した。

### 5.2 精度の評価

図11にプロトタイププローブの精度の評価に利用したブロックゲージの配置を示す。このグローブゲージ (groove gauge) は3つのブロックゲージを溝を作るように組み込んでいる。グローブゲージを使って、繰返し精度および補正ボール直径を求めた。

プローブを対象物に接触するように動かし、検出センサがトリガするときの位置を記録し、プローブを再び原点に戻す。直径1 mmと2 mmのボールを使って、前述の手順を10回繰り返してトリガする点の繰返し精度を評価した。直径1 mmおよび2 mmのボールに対する繰返しの標準偏差はそれぞれ、1.1 μmおよび1.8 μmであった。

次に、移動距離  $l$  とブロックゲージの長さ  $L$  を比較することで補正ボール直径を求めた。直径1 mmおよび2 mmのボールに対する補正ボール直径の平均はそれぞれ、0.9666 mmおよび1.9400 mmであった。センサの不感量は、ボール直径から補正ボール直径を引いた値の1/2であるので、この場合のセンサの不感量は、それぞれ、0.0167 mmおよび0.0300 mm

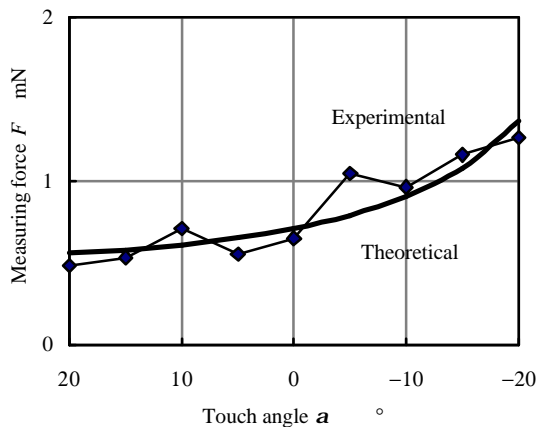


Fig. 10 Experimental and theoretical measuring force versus touch angle at a probe ball of  $\phi 2$  mm and a pipe inner diameter of 0.4 mm

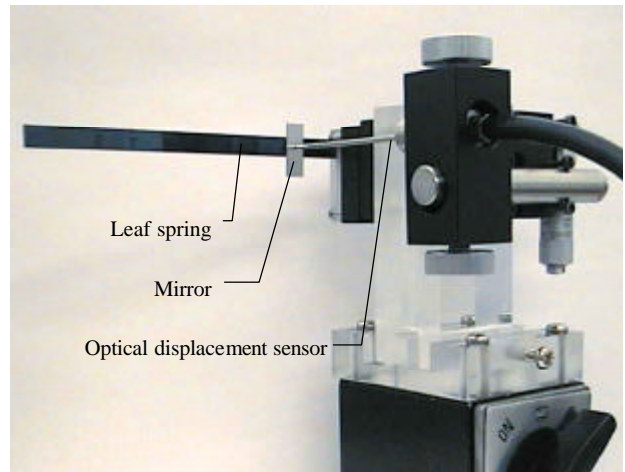


Fig. 8 Micro measuring force equipment consists of a leaf spring (6 mm  $\times$  100 mm  $\times$  0.1 mm), an optical displacement sensor (Optometric-10II) and a mirror

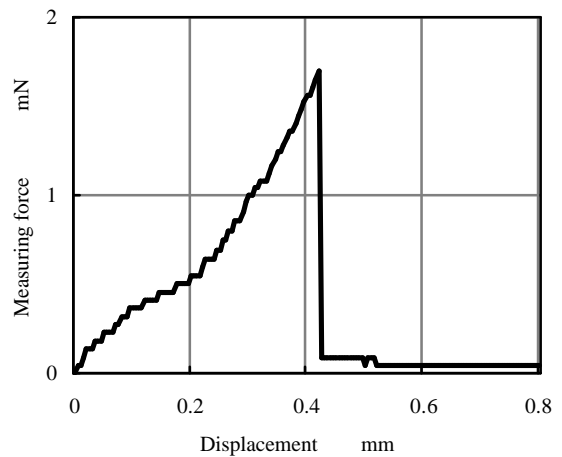


Fig. 9 An example of the change of touch-force in the process of probing

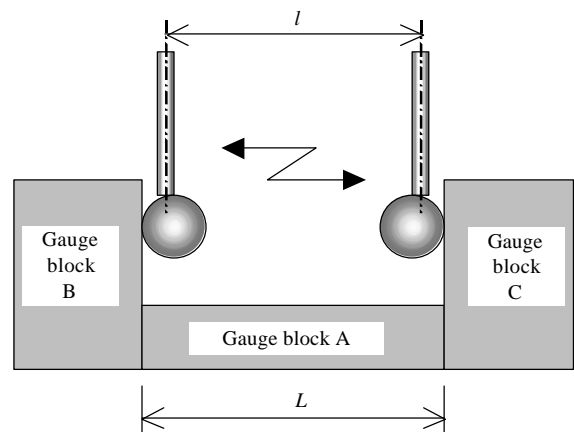


Fig. 11 Structure of groove gauge

であった。

以上の精度評価および前報で示した理論的解析より、ボール径を大きくしたほうが同じパイプ径に対しては、測定力が小さくなるが、測定精度および不感量が大きくなることが分かった。今後の小型化を考えると、ボール径を小さくして、対応するパイプ径も小さくすることで、測定力を小さくかつ測定精度を高くすることができると考えられる。

## 6. 結 論

前報で提案した吸気型ボールプローブに対して、その測定力の解析およびセンシング方法決定のための基礎実験を行った。この結果、新しく提案した空気トリガセンサが、吸気型ボールプローブの検出方法として優れていることが確認できた。さらに、測定力および測定精度の評価実験を行い、以下のことが分かった。

- (1) 試験した3つの検出方法の中で、空気トリガセンサが最も安定で、小型化が可能なセンサであることを示した。
- (2) いくつかの、ボール直径およびパイプ内径の条件では、比較的容易に測定力を1 mN以下にできることを理論的に示した。
- (3) 測定力の評価実験を行い、測定力が1 mN以下であること、理論的に求めた値と一致することを示した。

- (4) 測定精度の評価実験を行い、プロトタイプが2 μm以下の繰り返し精度であることを示した。

プローブをより一層小形化することで、目標とする吸気型ボールプローブを実現することを目指している。

## 謝 辞

本研究は、平成9年度天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成金（AF-96002）の援助を受けて行われたことを付記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) T. Masuzawa, M. Hamasaki and M. Fujino: Vibroscanning Method for Nondestructive Measurement of Small Holes, *Ann. CIRP*, **42**, 1 (1993) 589.
- 2) 丸山六男, 尾坂 一, 小野道彦, 賀勢晋司: 光学的方法による小穴内径測定装置の開発, *精密工学会誌*, **62**, 1 (1996) 145.
- 3) 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.
- 4) Q. Yang, C. Butler and P. Baird: Error Compensation of Touch Trigger Probes, *Measurement*, **64**, 8 (1996) 47.
- 5) 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.
- 6) 高増 潔, 郭 志徹, 鈴木昭洋, 平木雅彦, 古谷涼秋, 大園成夫: 吸気型ボールプローブの開発(第1報) - 基本構成 - , **64**, 8 (1998) 1153.