

信州大学審査学位論文

音波利用による微細穴検査技術に関する研究

2019年3月

長洲 慶典

## 目次

<b>第 1 章 緒 言</b> .....	1
1. 1 研究背景.....	1
1. 2 微細穴部品の検査技術.....	5
1. 2. 1 画像処理技術.....	5
1. 2. 2 レーザプローブ式非接触三次元測定装置.....	6
1. 2. 3 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状測定技術.....	8
1. 2. 4 透過光検出による光学式内径検査技術.....	9
1. 2. 5 産業用 X 線 CT スキャナ.....	10
1. 2. 6 エアマイクロメータによる内径測定.....	11
1. 3 微細穴部品の穴検査事例.....	12
1. 4 音波利用検査技術.....	15
1. 5 本研究の目的.....	17
1. 6 本論文の構成と要旨.....	19
<b>第 2 章 反射波検出による微細穴検査技術</b> .....	22
2. 1 緒 言.....	22
2. 2 検査原理.....	22
2. 2. 1 不連続境界面に作用する音波の入射と反射.....	22
2. 2. 2 微細穴前後の反射率を考慮した合成波.....	27
2. 3 反射波検出による微細穴径検査実験.....	31
2. 3. 1 検査装置の構造.....	31
2. 3. 2 検査試料の作製.....	33
2. 3. 3 実験方法.....	36
2. 4 実験結果.....	36
2. 4. 1 単一の微細穴径の検査結果（信号振幅について）.....	36
2. 4. 2 単一の微細穴径の検査結果（信号位相差について）.....	38
2. 4. 3 表裏面穴径差の検査.....	41
2. 5 考 察.....	41
2. 6 結 言.....	48
<b>第 3 章 透過波検出による微細穴検査技術</b> .....	51
3. 1 緒 言.....	51
3. 2 検査原理.....	51
3. 3 穴径検査実験.....	55
3. 3. 1 検査試料.....	55
3. 3. 2 検査装置.....	57

3. 4	実験結果	59
3. 4. 1	測定波形	59
3. 4. 2	周波数変化による穴径の検出感度	61
3. 4. 3	検査時間	63
3. 4. 4	テーパの影響	70
3. 4. 5	穴深さの影響	71
3. 5	考 察	72
3. 6	結 言	75
<b>第 4 章</b>	<b>ヘルムホルツ共鳴利用による微細穴検査技術</b>	<b>78</b>
4. 1	緒 言	78
4. 2	検査原理	78
4. 2. 1	ヘルムホルツ共鳴周波数	78
4. 2. 2	ヘルムホルツ共鳴器の音波解析	81
4. 3	穴径検査実験	83
4. 3. 1	検査装置	83
4. 3. 2	検査試料	84
4. 4	実験結果	86
4. 4. 1	穴径 0.5 mm~2.0 mm の微細穴の検査実験	86
4. 4. 2	穴径 100 $\mu\text{m}$ 以下の微細穴の検査実験	91
4. 4. 3	スピーカ入力信号とマイクロホン計測信号の位相差	95
4. 5	考 察	97
4. 6	結 言	105
<b>第 5 章</b>	<b>結 論</b>	<b>108</b>
5. 1	まとめ	108
5. 2	今後の展望	110
	<b>参 考 文 献</b>	<b>113</b>

## 本論文における主要な記号の一覧

記号	単位	: 記号の説明
$A_s$	[mm <sup>2</sup> ]	: スピーカダイアフラムの面積
$A_h$	[mm <sup>2</sup> ]	: 微細穴の面積
$A_1$	[mm <sup>2</sup> ]	: 空間 1 の断面積
$A_2$	[mm <sup>2</sup> ]	: 空間 2 の断面積
$c$	[m/s]	: 音速
$c'$	[m/s]	: 湿度や気圧の変化を考慮した音速
$c_1$	[m/s]	: 空間 1 の音速
$c_2$	[m/s]	: 空間 2 の音速
$C_{\text{cap}}$	[F]	: 静電容量値
$D_{s1-2}$	-	: 空間 1 と空間 2 の不連続境界面
$D_{s2-3}$	-	: 空間 2 と空間 3 の不連続境界面
$d$	[mm]	: 微細穴の穴径
$d_{\text{avg}}$	[mm]	: 微細穴の表裏面の平均穴径
$d_b$	[mm]	: 微細穴の裏面穴径
$d_f$	[mm]	: 微細穴の表面穴径
$d_p$	[m]	: 平板間距離
$d_t$	[mm]	: 円筒管直径
$e$	[Pa]	: 水蒸気圧
$e_s$	[Pa]	: 飽和水蒸気圧
$f$	[Hz]	: 周波数
$f_s$	[Hz]	: スピーカの駆動周波数
$f_r$	[Hz]	: 共鳴周波数
$h_1$	[mm]	: 空間 1 の高さ
$H$	[Pa]	: 大気圧
$l_t$	[mm]	: 円筒管長さ
$l_s$	[mm]	: 開口端補正量
$P_1$	-	: 空間 1 の無次元圧力変化
$P_2$	-	: 空間 2 の無次元圧力変化
$P_2 - P_1$	-	: 空間 1, 2 の無次元圧力差
$P_a$	-	: 無次元圧力差の振幅
$p_a$	[Pa]	: 音圧
$p_i$	[Pa]	: 入射波の音圧
$p_r$	[Pa]	: 反射波の音圧

$p_t$	[Pa]	: 透過波の音圧
$p_0$	[Pa]	: 空間の初期圧力
$p_1$	[Pa]	: 空間 1 の圧力
$p_2$	[Pa]	: 空間 2 の圧力
$S$	[m <sup>2</sup> ]	: 平板電極面積
$T$	[s]	: 周期
$T_s$	[s]	: スピーカの駆動周期
$t$	[s]	: 時間
$t_\theta$	[°C]	: 気温
$u_i$	[m/s]	: 入射波の粒子速度
$u_r$	[m/s]	: 反射波の粒子速度
$u_t$	[m/s]	: 透過波の粒子速度
$V_m$	[V]	: マイクロホン計測電圧の最大値
$V_{rms}$	[V]	: マイクロホン計測電圧の実効値
$V_{avg}$	[V]	: 複数周期におけるマイクロホン計測電圧の平均値
$V_1$	[mm <sup>3</sup> ]	: 空間 1 の体積
$V_2$	[mm <sup>3</sup> ]	: 空間 2 の体積
$V_c$	[mm <sup>3</sup> ]	: 共鳴容器体積
$y_0$	[mm]	: スピーカダイアフラムの変位
$y(t)$	[mm]	: 時間 $t$ におけるスピーカダイアフラム変位
$y_i$	[mm]	: 入射波の変位
$y_r$	[mm]	: 反射波の変位
$y_t$	[mm]	: 透過波の変位
$y_c$	[mm]	: 入射波と反射波の合成波の変位
$W_a$	[mm]	: 振幅
$W_{ar}$	[mm]	: 反射波の振幅
$Z$	[Pa·s/m <sup>3</sup> ]	: 固有音響インピーダンス
$\alpha$	-	: 反射率
$\beta$	-	: 透過率
$\varepsilon$	[F/m]	: 誘電率
$\rho_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: 空間の初期密度
$\rho_1$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: 空間 1 の密度
$\rho_2$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: 空間 2 の密度
$\kappa$	-	: 定圧熱容量と定積熱容量の比熱比
$\gamma_w$	-	: 水蒸気の比熱比
$\gamma$	-	: 乾燥空気の比熱比

$\lambda$	[m]	: 波長
$\varphi$	[%]	: 相対湿度
$\theta_{1-2}$	-	: 空間 1, 2 の無次元圧力変化の位相差
$\theta$	[deg.]	: スピーカ入力電圧とマイクロホン計測電圧の位相差
$\theta_{\text{avg}}$	[deg.]	: 複数周期における位相差 $\theta$ の平均値
$\theta_{\text{dif}}$	[deg.]	: 位相差の平均値 $\theta_{\text{avg}}$ との差
$\sigma_v$	[V]	: マイクロホン計測電圧値の標準偏差

## 第 1 章

### 緒 言

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

金属板に微細穴や小穴が加工された部品は多様な工業製品に使われており、電気化学式ガスセンサ、燃料噴射用ノズルプレート、マイクロホン用フィルタ部品、流量制御用オリフィスプレート、水素ステーション用の水電解部品などが製品実例<sup>1)2)3)</sup>として挙げられる。主に気体や液体の流量制御部品として生産されており、穴の直径は100  $\mu\text{m}$  以下のものから1 mm 以上まで、穴数は1個から60万個まで機能に応じて様々な仕様の部品が存在する<sup>4)</sup> (Fig. 1-1).

ガソリンエンジンやディーゼルエンジンといった内燃機関を有する自動車にはインジェクタと呼ばれる燃料噴射用の装置が使われている<sup>5)6)7)</sup>。インジェクタには直径100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴が10個~20個加工されたノズルプレートが組み込まれている。プレート穴の直径が燃料の噴射量を決定し燃費を左右するため、内燃機関を有する自動車部

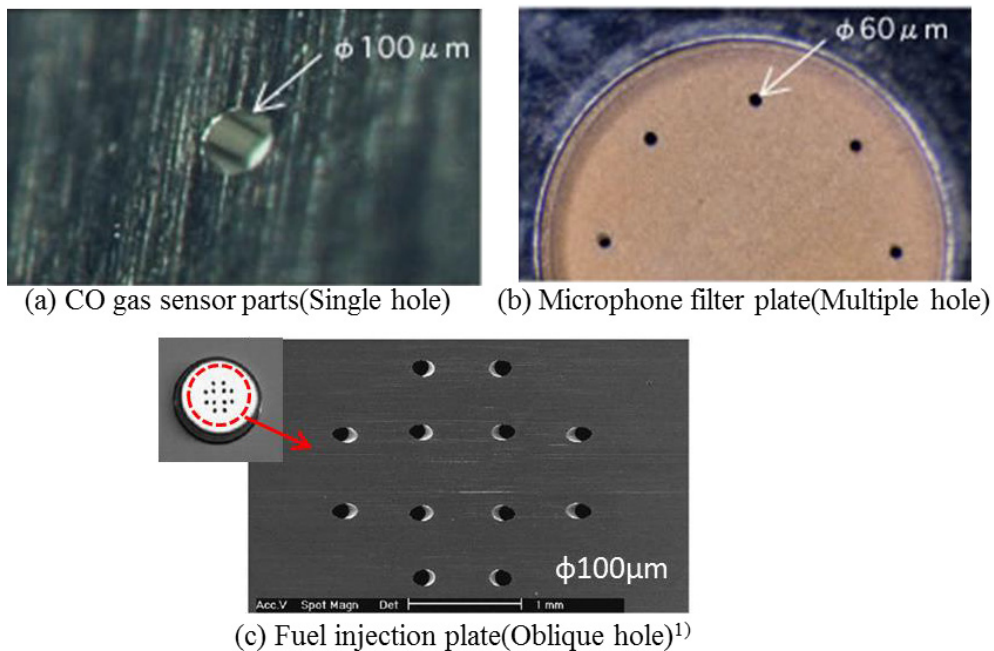


Fig. 1-1 Micro-hole for automotive parts. In any case, parts having mico-holes with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  or less on a metal thin plate.



品の中では重要部品に位置付けられる。また、自動車の排気ガス検知センサには CO ガスの検知精度を決定する直径 100  $\mu\text{m}$  の単穴部品<sup>8)</sup>、ナビゲーションシステムの音声入力用のマイクロホン<sup>9)10)</sup>には振動板の機械的保護を目的とした直径 70~100  $\mu\text{m}$  の多穴部品が組み込まれている。(一社)日本自動車部品工業会が公表している自動車部品出荷動向調査<sup>11)12)13)</sup>によれば、燃料噴射装置と自動車用電装品のセンサ類の出荷金額は平成 28 年度の金額ベースで 7,561 億円にのぼり、過去 5 年間で出荷額は 1,400 億円以上も増加している(Fig. 1-2)。自動車用電装品のセンサ類については、近年の自動車の電装化に伴い多種多様なセンサが搭載される傾向<sup>14)15)</sup>にあり、出荷金額は過去 3 年間で毎年約 200 億円ずつ増加している。

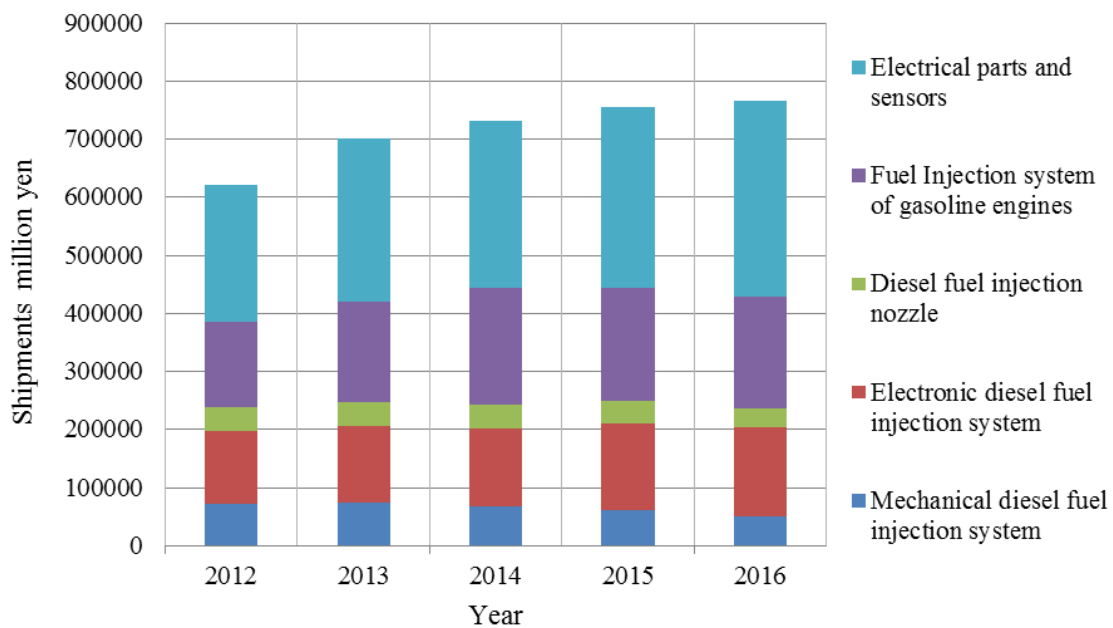


Fig. 1-2 Shipment value of automotive parts<sup>11)12)13)</sup>. Shipment value of fuel injection devices and sensors for automobile electrical components amounted to 756.1 billion yen in 2016 amount, shipment value increased by more than 140 billion yen in the past 5 years. With regard to sensors for automobile electrical components, since various sensors have been installed with the recent installation of automobiles, the shipment amount has increased by about 20 billion yen each year over the past three years.

微細穴部品は気体や液体の流量制御を目的に使用されることから、部品が組み込まれる製品の機能保証のための検査が実施される。例えば自動車用の燃料噴射ノズルプレートの検査には、シュリーレン法による噴射角度と噴射範囲の観察<sup>16)17)18)</sup>、ノズルプレートをインジェクタへ装着後に燃料噴射試験し流量計測によって部品性能を評価するなどの検査方法がある<sup>19)20)</sup>。一方で、微細穴部品の加工法はプレス加工<sup>1)21)</sup>、放電加工<sup>22)23)24)25)</sup>、ドリル加工<sup>26)27)28)29)</sup>、レーザ加工<sup>30)31)32)</sup>、ウェットエッチング法<sup>4)33)</sup>など多岐に亘るが、生産数量が多い部品は高速加工が可能で加工コストが低いプレス打ち抜き加工が選択される。プレス加工製品は短時間で大量に部品を生産できるが、微細穴部品が組み込まれる製品の機能保証のためには、穴径の全数保証が求められる。そのため、加工現場において微細穴部品の穴径を簡便且つ迅速に検査する手法が必要と考えられる。

直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴を有し、流量制御を目的として使用されている製品の一つに、電気化学式の CO ガス検知センサが挙げられる<sup>34)</sup>。CO ガス検知センサは家庭用・業務用問わず人命にかかわる重要な保安部品であり、ガスセンサには小型・長寿命・安定動作・高感度・量産性・低コストなどの性能が求められ、センサ内の各部品は厳しい加工精度が要求されている<sup>35)36)</sup>。また、近年では導入外気から CO ガスを検知し内気循環への自動切替えや、一酸化炭素事故防止などの重要な保安部品としてガス検知センサの自動車への搭載が進んでいる<sup>37)</sup>。

Fig. 1-3 に電気化学式 CO ガス検知センサの内部構造を示す。単三電池と同じサイズのセンサ内には CO ガス検知体や蒸留水、フィルタ用の活性炭が組み込まれている。ガス検知部には燃料電池にも使用される、固体電解質の MEA と呼ばれる膜-電極接合体が使われている。Fig. 1-4 に示すように、作用極がガスに触れると MEA 膜の中を水素イオンが移動し、濃度に応じた電流が発生することでガス検知を可能にしている。また、Fig. 1-3 に示す膜-電極接合体はセンサ内にある蒸留水を吸水することで CO ガスセンサとして機能するため、拡散制御板はセンサのガス検知体となる膜-電極接合体への

CO ガスの供給と、蒸留水の蒸発量制御の 2 つの目的で使用される。拡散制御板には厚さ 100  $\mu\text{m}$  のステンレス鋼板に、直径 100  $\mu\text{m}$  の穴がプレス加工されており、センサの感度を保証するため、穴径に対して $\pm 5\%$ 以内の公差に保つ必要がある。Fig. 1-5 に拡散制御板の微細穴の SEM による拡大画像を示す。拡散制御板は CO ガスの検知感度の確保と、蒸留水の蒸発量を制御しセンサ寿命を決定するための部品であるため、加工穴を公差内に収めつつ、穴を通過する流体の流量を保証することが求められる。また、CO ガスセンサ用の部品はプレス加工による量産加工が選択されており、迅速かつ正確に穴径を検査する必要がある。

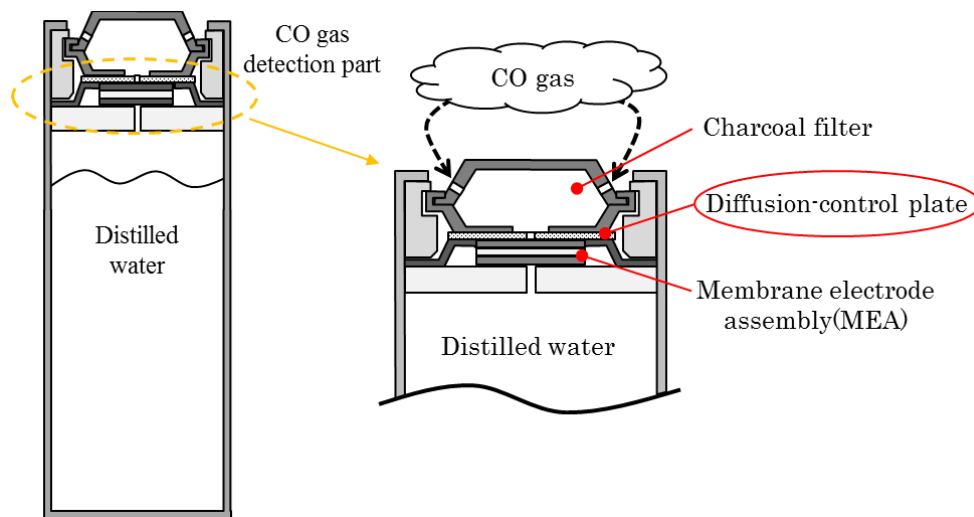


Fig. 1-3 Internal structure of electrochemical type CO gas sensor. A membrane-electrode assembly(MEA) used also for a fuel cell is used for a gas detection unit. The MEA functions as a CO gas sensor by absorbing distilled water in the sensor. The diffusion control plate is used for the purpose of supplying CO gas to the MEA as a gas detector of the sensor and controlling the evaporation amount of distilled water.

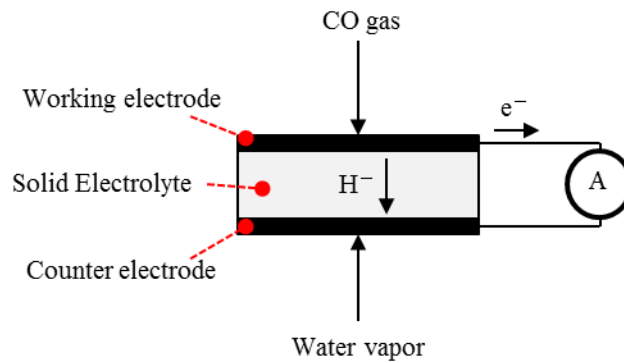


Fig. 1-4 Mechanism of gas detection in membrane-electrode assembly. When the working electrode touches the gas, hydrogen ions move in the MEA and a current corresponding to the concentration is generated, thereby enabling gas detection.

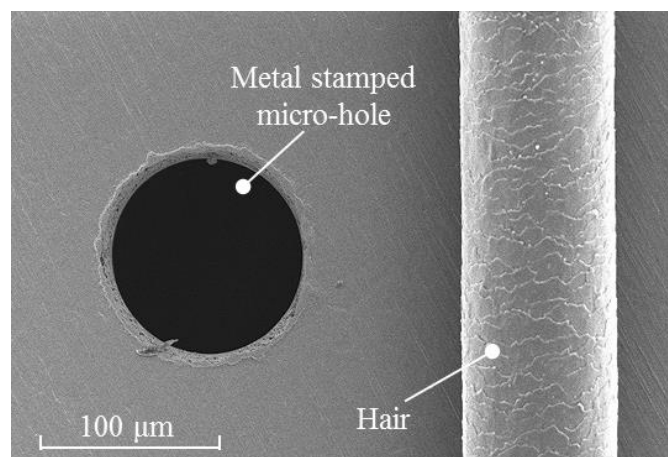


Fig. 1-5 Micro-hole for diffusion control plate. A hole with a diameter of 100 μm is stamped on a stainless steel plate.

## 1. 2 微細穴部品の検査技術

ここでは微細穴部品の穴径検査に関連する計測・評価技術とその特徴を示す。

### 1. 2. 1 画像処理技術

加工現場での微細穴部品の検査は、一般に工具顕微鏡などの光学式顕微鏡による抜き取り検査が行われているが、部品穴径の全数検査が求められる場合は、画像処理技術に

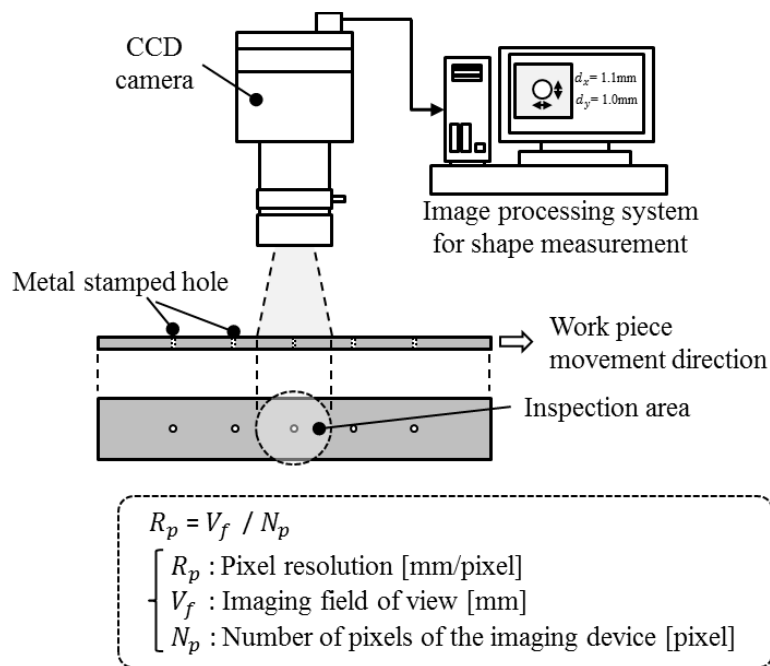


Fig. 1-6 Image processing and inspection system. By enlarging the surface of the inspection object with a lens and imaging with the CCD camera, shape information of the surface of the object is acquired at high speed.

よるインライン計測システムが加工ラインに適用される<sup>38)</sup>. Fig. 1-6 に示すように検査対象物の外観をレンズにより拡大し CCD カメラで撮像することで、対象物表面の形状情報を高速に取得する. 検査分解能は CCD カメラの画素分解能と視野サイズに依存し、200 万画素の CCD カメラとレンズを組み合わせると視野サイズ 1 mm とすると、検査分解能は 0.8  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、検査精度はおよそ 10  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  となる. ただし、画像処理技術は部品表面のみの検査であるため、穴内部の状態の検査は困難である.

### 1. 2. 2 レーザプローブ式非接触三次元測定装置

レーザプローブ式非接触三次元測定装置<sup>39)40)41)</sup>は Fig. 1-7 に示す構造を有し、レーザオートフォーカス技術と精密ステージの組み合わせにより、数 10 mm の測定範囲を nm レベルの分解能で測定する装置である. 三次元形状測定のほかに表面粗さ測定や寸法測

定機機能を有することから、光学部品の精密成形加工品や精密プレス金型と製品の形状比較などに用いられている。微細穴の測定では穴外周エッジ部をレーザ走査によって30～60点検出し、エッジのXY座標から内径を算出する。レーザのスポット先端径は0.4 μm、XY方向の測定分解能は0.01 μm、Z方向の分解能は0.1 μmであり、画像処理技術よりもさらに高精度な測定を実現できるが、加工穴1つに対する内径測定時間は数分を要する。

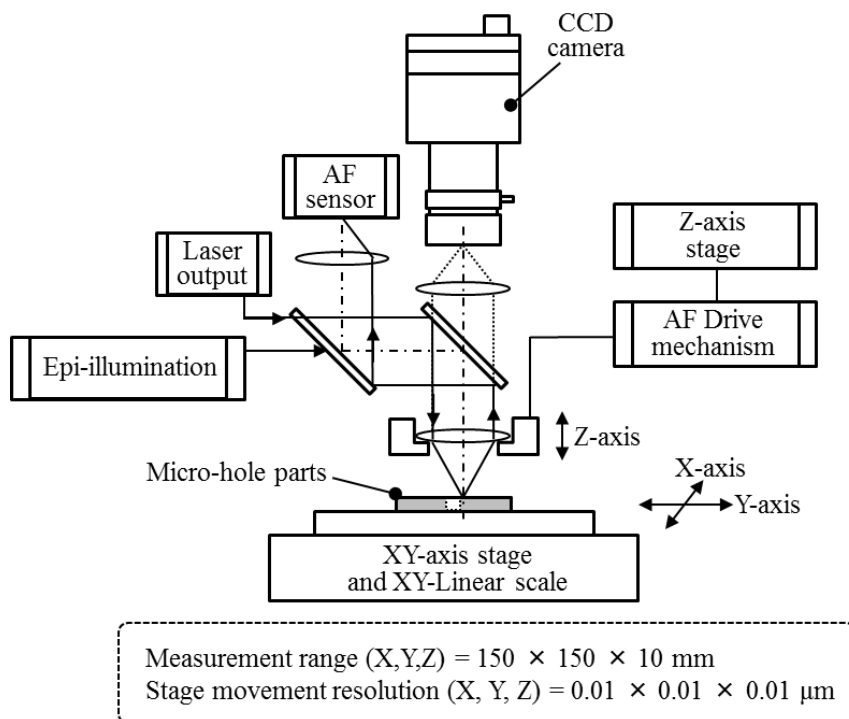


Fig. 1-7 Measurement principle of NH-3. Equipment that measures the measurement range of several 10 mm with nm resolution with combination of laser autofocus technology and precision stage. In the measurement of micro- holes, 30 to 60 points are detected by laser scanning on the outer circumferential edge of the hole, and the inner diameter is calculated from the XY coordinates of the edge.

### 1. 2. 3 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状測定技術

光ファイバプローブにレーザ光を照射し、プローブが穴内部に接触した際の透過光強度の変化により穴内部の形状を計測する方法が報告されている<sup>42)43)44)45)46)</sup>。Fig. 1-8 に光ファイバプローブ計測の概略図を示す。この方法は、直径が 30  $\mu\text{m}$  の光ファイバに直径 50  $\mu\text{m}$  のガラス製の接触子を付けたプローブを穴内面に接触させ、接触時の光ファイバの変位をレーザ光により検出するものである。直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴内壁の表面粗さや真円度、円筒度、穴径などの形状精度を高精度に測定可能な手法である。三次元測定機と同様の測定時間であるため、プレス加工される部品の全数検査には不向きではあるが、穴内部の形状を高精度に計測する場合には有効な検査技術である。

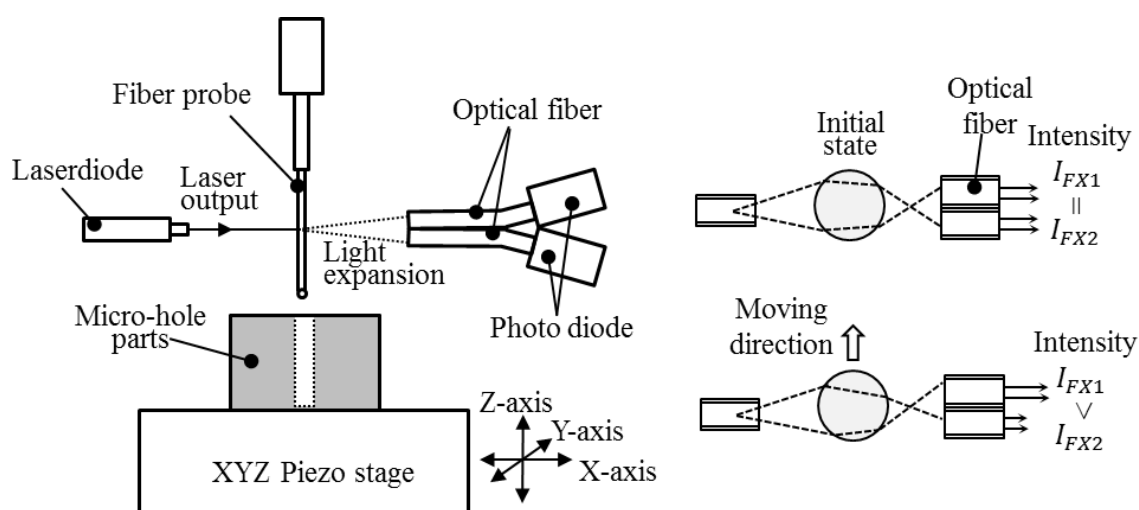


Fig. 1-8 Optical system and photograph of fiber probe<sup>14)</sup>. The optical fiber probe is irradiated with a laser beam, and the shape of the inside of the hole is measured by the change in the transmitted light intensity when the probe comes into contact with the inside of the hole. A method capable of highly accurately measuring the surface roughness, the roundness, the cylinder degree, the hole diameter, etc. of the inner wall of the micro-hole having a diameter of 100  $\mu\text{m}$  or less.

#### 1. 2. 4 透過光検出による光学式内径検査技術

微細穴の内径検査方法として、光を穴内部に反射させその反射光を穴出口で検出する方法が報告されている<sup>47)</sup>。Fig. 1-9 に光学的手法による小穴内径検査の概要を示す。微細穴内面に照射した光の正反射光を CCD カメラにより捕捉し、幾何学的な原理に基づく解析により穴径を推定するものである。穴径 125  $\mu\text{m}$ 、長さが 11 mm の高アスペクト比の貫通穴において、精度 $\pm 0.2 \mu\text{m}$  で内径測定が可能である。この検査技術は主に光コネクタに使用するフェルールなど、内面の仕上げ面が良好な検査試料を対象としているため、プレス加工穴のように穴内面に照射した光が正反射しない試料の測定には適さない。

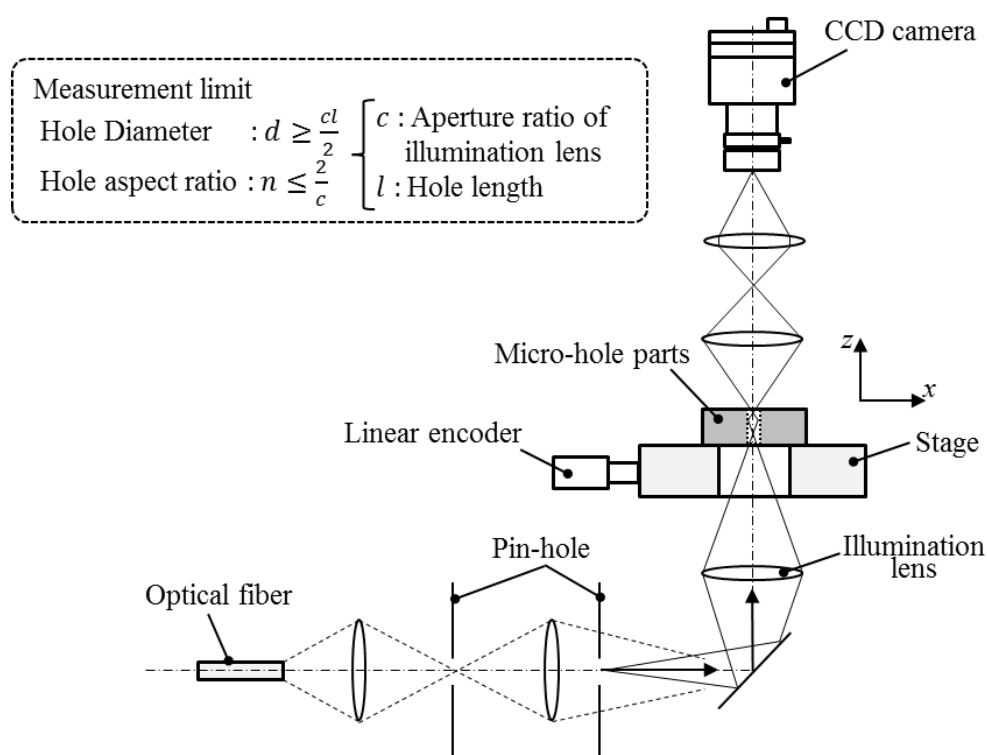


Fig. 1-9 Optical measuring equipment for hole diameter<sup>47)</sup>. Method of detecting reflected light from inside the hole at the hole exit. A high aspect ratio through hole with a hole diameter of 125  $\mu\text{m}$  and a length of 11 mm can be measured with an accuracy of  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ .



### 1. 2. 5 産業用 X 線 CT スキャナ

微細穴の内部形状を検査可能な方法として、産業用 X 線 CT スキャナによる穴内部の非破壊検査方法が挙げられる<sup>48)49)50)51)</sup>。X 線検査の最大の特徴は、目視できない物体の影や物体の内部を透視できることにある。Fig. 1-10 に X 線撮像系の概要を示す。X 線透視は、検査対象の物質構成材料によって X 線減衰量が異なることから、X 線が物質を透過する際、透過した物質の構成を示す多値画像を得ることができ、物質の内部検査が可能となる。例えば、X 線の線源にマイクロフォーカス式 X 線源を用いれば、対象物を 1,000 倍まで幾何学的に拡大して透視できる。マイクロフォーカス X 線源には、出力窓から焦点までの距離を 0.5 mm とした場合、最小分解能が 1 μm の内部検査可能な線源もある。複雑な内部構造を持つ対象の検査には適しているが、検査時間が長いことや専用の大型装置が必要であるため、加工現場での検査には適さない。

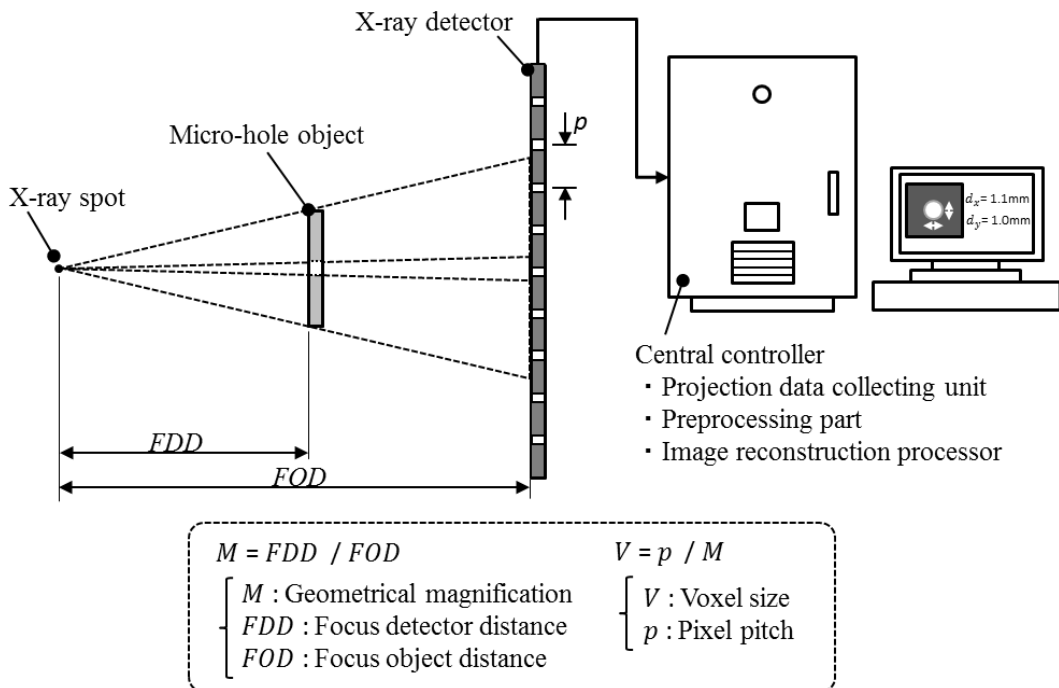


Fig. 1-10 Microfocus X-ray imaging system. Equipment that can be inspected through the inside of the object. It is suitable for inspection of objects with complicated internal structure.

### 1. 2. 6 エアマイクロメータによる内径測定

加工現場での穴内部の直径を測定する方法としてエアマイクロメータが挙げられる。エアマイクロメータは Fig. 1-11 に示すように、測定ノズルを穴に挿入し、そのノズルから圧縮空気を噴出させることでノズル部と被測定物の隙間によって変化する噴出流量変化によって穴径を測定する<sup>52)53)54)</sup>。内径測定用の空気マイクロメータヘッドには直径が 0.6 mm のものもあり、1 mm 以下の穴径測定にも対応する。ただし、直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴測定が可能な測定ヘッドが無いことや、穴へ測定ノズルを挿入するため、位置決め精度の維持が困難である。

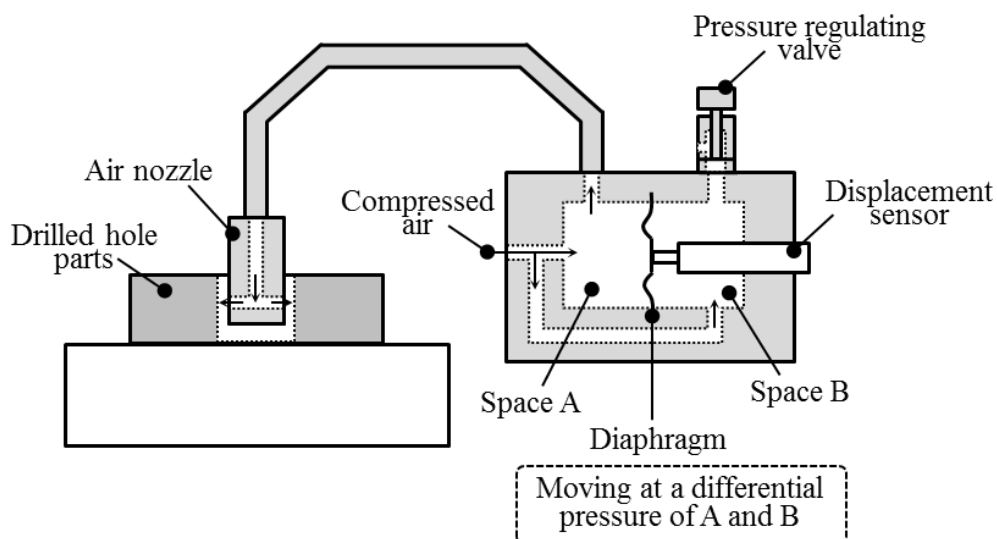


Fig. 1-11 Inside diameter measurement with the differential pressure-type air micro meter. Insert the measuring nozzle into the hole and let out compressed air from the nozzle. Measure the hole diameter by changing the ejection flow rate which varies depending on the nozzle and the target gap.

### 1. 3 微細穴部品の穴検査事例

微細穴部品の生産現場では穴形状の良否や加工傷の有無などの外観検査に工具顕微鏡や形状測定レーザ顕微鏡，デジタルマイクロスコープを利用している．ここでは微細穴部品の検査事例を示し，現状の検査方法の課題を確認する．

外観検査においては Fig. 1-12 に示すように，部品表面を拡大観察することで加工傷や，打痕の有無を確認するほかに穴径の検査も実施している．Fig. 1-12 に示す部品表面の拡大図は，形状測定レーザ顕微鏡(Fig. 1-13)を用いて撮像している．拡大画像から微細穴のエッジを判断し，丸形状の測定ラインをエッジにフィッティングさせて穴径を測定する方式であり，検査時間は2～3 min を要する．近年では XY 方向の表示分解能がサブミクロンレベルの顕微鏡もあり，部品表面の穴形状を正確に検査することも可能である．しかし，顕微鏡は穴内部の情報を取得することが難しいため，流量制御を目的とする微細穴製品に対し，機能保証を要求される検査には適さないことが課題として挙げられる．

また，高精度に穴径を検査する場合には，Fig. 1-7 にて説明したレーザプローブ式非接触三次元測定機が利用されている．Fig. 1-14 に装置外観と検査の様子を示す．この装置はレーザ反射光検出による加工穴のエッジ検出と，リニアスケールによる XY 方向の正確な移動量計測により高精度に穴径を測定することができる．Fig. 1-15 に示すように数十箇所以上の加工穴のエッジ検出結果から平均値を求めることで穴径を測定する．検査時間は検出するエッジ数に依存し，例えば 30 箇所のエッジ検出の場合は 1 穴あたりおよそ 5 min である．サブミクロンレベルで穴径を測定する装置であることから，製品の穴径保証が可能であるが，前述の顕微鏡と同様に穴内部の情報取得は難しい．

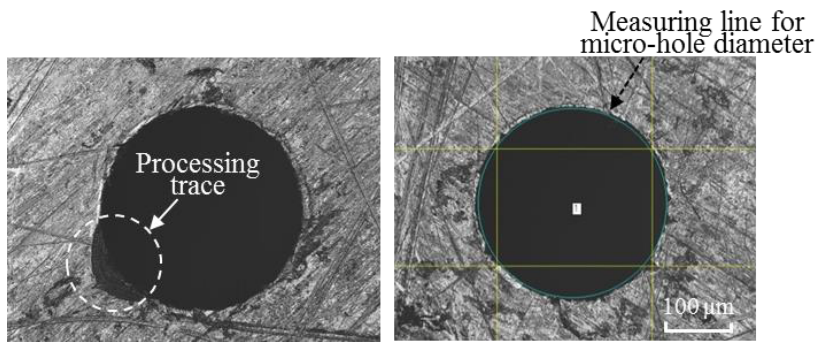


Fig. 1-12 Micro-hole inspection by the shape measuring laser microscope.

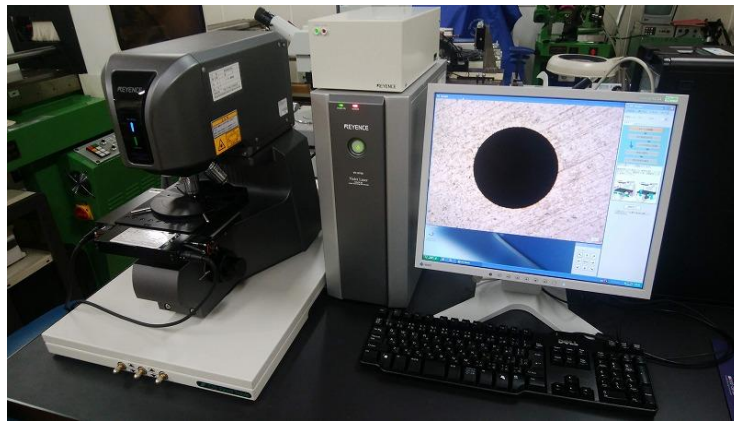


Fig. 1-13 Shape measuring laser microscope.

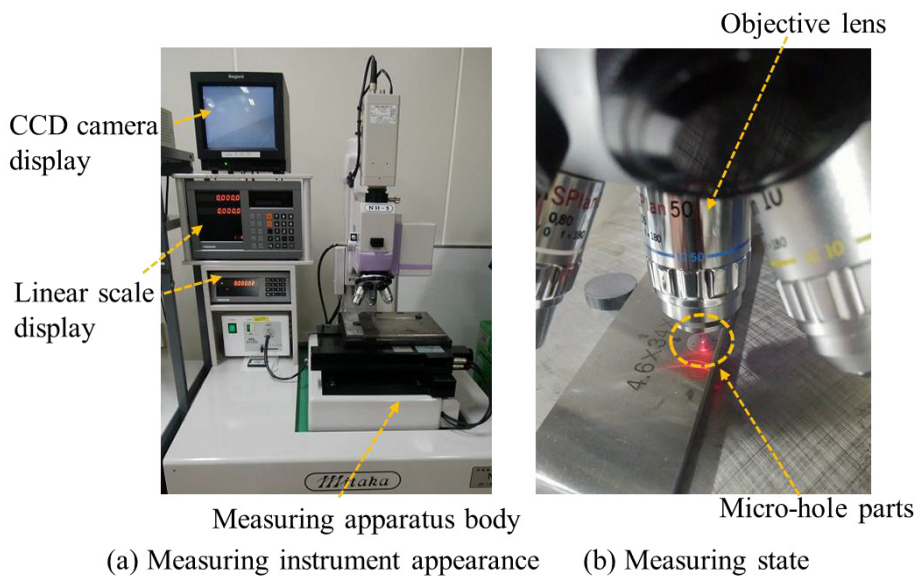


Fig. 1-14 3D measuring instrument by point autofocus probe.

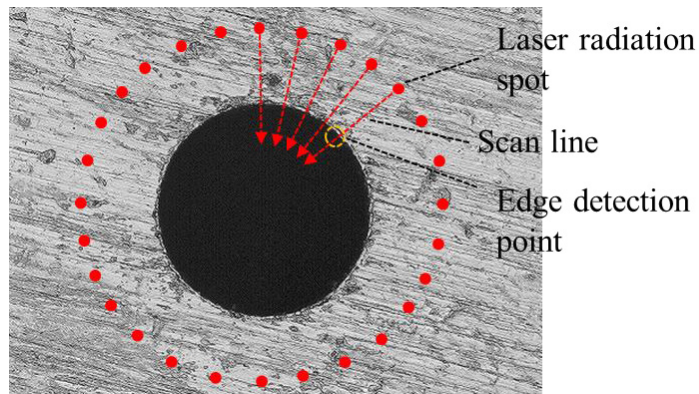


Fig. 1-15 Micro-hole edge detection method. Measure the hole diameter by obtaining the average value from the results of edge detection of multiple machined hole edges. Equipment that can measure hole diameter at submicron level. In case of 30 edge detection, inspection time of about 5 min is required per hole.

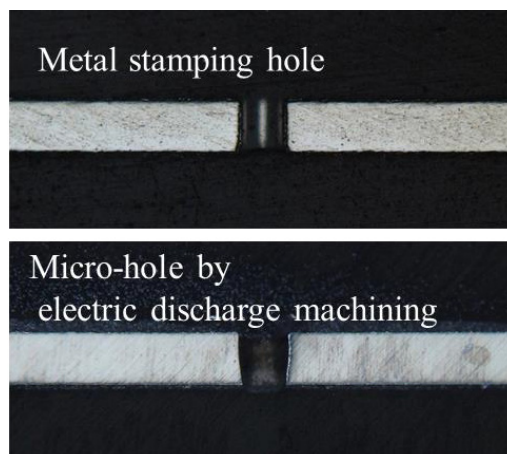


Fig. 1-16 Cross sectional sample of micro-hole. It can be confirmed that the hole shape is different depending on the processing method of metal stamping and electric discharge machining.

生産現場にて穴内部の情報を確認する際には、Fig. 1-16のように部品を切断し穴断面試料を作製し顕微鏡にて観察する。プレス加工や放電加工など、加工方法によって穴形状が異なることが確認できるほか、断面作成後の試料を鏡面研磨しエッチング処理することで、金属組織の状態やプレス加工による鍛流線、ドリル加工による加工硬化層などを検査することができる。断面作成により穴内部の状態を精密に確認することができる。

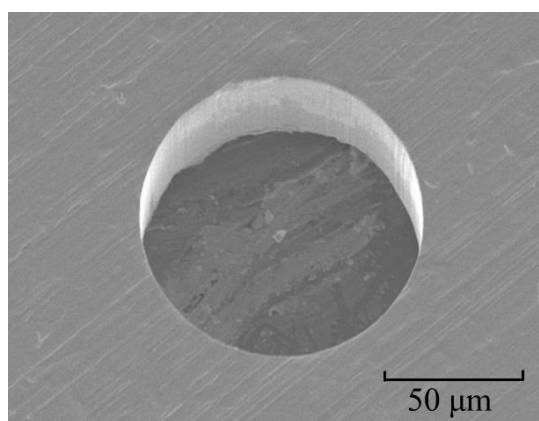


Fig. 1-17 Enlarged image by scanning electron microscope. The surface of the part can be observed at a higher magnification than the microscope. Since it can be tilted and observable, it is also possible to check the state of the interior of the micro-hole part processed into the thin plate.

が、破壊検査であるため製品の全数検査には適さない。

その他に、Fig. 1-17に示すように走査電子顕微鏡(SEM)を用い微細穴部品を検査する場合もある。SEMでは顕微鏡よりも高倍率に部品表面を観察できるほか、傾斜をつけて観察が可能であるため、薄板に加工された微細穴部品の内部の状態を確認することもできる。また、エネルギー分散型X線分析装置(EDS)を備えたSEMであれば成分分析が可能であるため、部品に付着した異物の特定もできる。SEM観察は機器の特性上の理由から、観察試料の雰囲気真空引きする必要がある。そのため、検査に時間を要することから、全数検査ではなく加工製品になんらかの異常があった際の確認のために用いられることが多い。

#### 1. 4 音波利用検査技術

一方、音波を利用した検査技術は、低周波から超音波領域までの広い周波数域にわたり様々な計測分野で応用され、超音波領域では超音波顕微鏡や医療用超音波診断装置などの検査装置が実用化されている。可聴帯域の音波利用についても物体の密度や体積な

どの物理的特性を高精度に計測する技術が報告されている<sup>55)56)57)</sup>。音響式容積計は Fig. 1-18 に示すような構造の計測機器であり、基準容積  $V_1$  と検査対象容積  $V_2$  との比による圧力変化の比をマイクロホンで計測するものである。この検査技術は、高速かつ簡便に対象の容積を計測できることから、自動車用エンジンの燃焼室容積計測などに用いられている。

また、低周波帯域を含む音波を利用することで、ガスパイプライン内の微小なリーク箇所を検出する技術も報告<sup>58)59)</sup>されているほか、農業分野においても音波の共鳴現象を応用し、一つ一つ異なる複雑形状を有する野菜や果物の体積を正確に計測する技術が提案されている<sup>60)61)62)63)64)</sup>。Fig. 1-19 に音響信号を利用したガスパイプライン内のリーク場所推定方法の模式図を示す。パイプラインの一端にスピーカにより雑音を与え、2点間の音圧をコンデンサマイクで計測した後に、時間応答関数  $g(t)$  を求めることでリークの程度と場所を推定することができる。

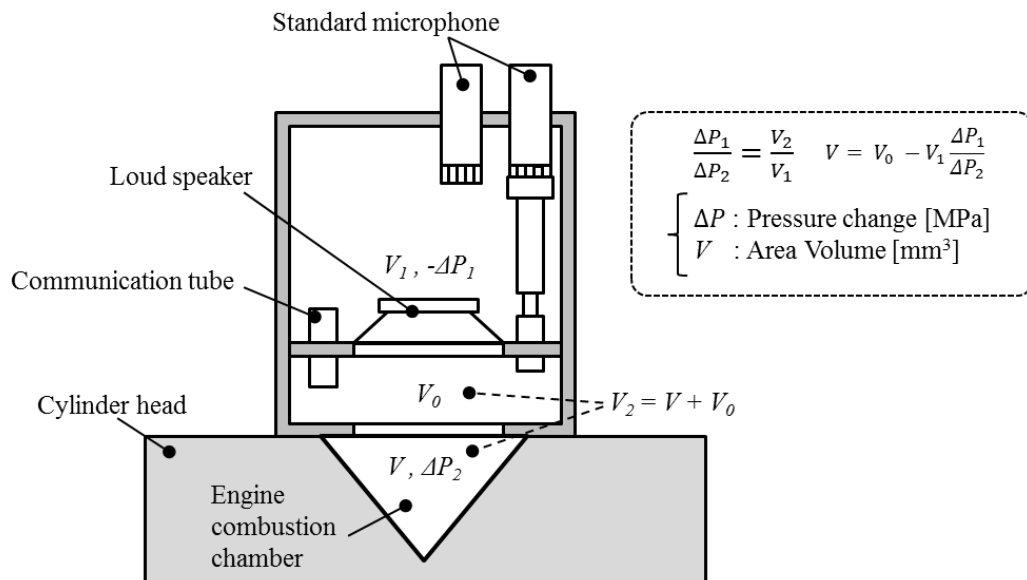


Fig. 1-18 Acoustic bridge volumeter. Measure the ratio of the pressure change by the ratio between the reference volume  $V_1$  and the test object volume  $V_2$  with a microphone<sup>55)</sup>.

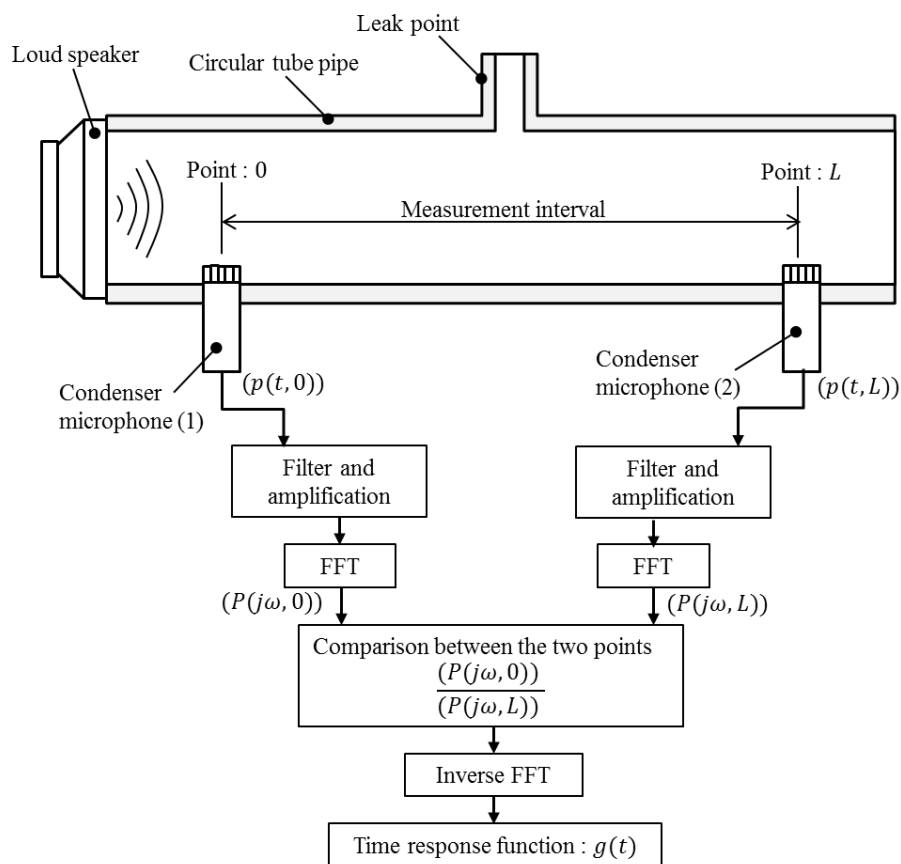


Fig. 1-19 Estimation method of leak location of the pipeline. Detect minute leak points in gas pipeline using sound waves including low frequency band<sup>59)</sup>.

これらの方法はいずれもスピーカから音波を発生し、検査対象に照射した音波の反射波やリーク量を、マイクロホンなどの音センサによって検出することで、音波の反射波やリーク量から形状検査や物理量を測定するものである。音波を利用した検査装置は、主にスピーカとマイクロホンによって構成されるため、検査装置の構造の単純化および小型化が容易であり、加工現場での部品検査に適した装置の開発が期待できる。

## 1. 5 本研究の目的

Table 1-1 に 1.2 節にて説明した従来の微細穴検査技術や装置における、検査分解能や検査速度、流量保証が可能かなどの機能比較一覧表を示す。本研究で対象とする CO ガ



センサ用の微細穴は穴径  $100\pm 5\ \mu\text{m}$  の穴径管理が求められており、穴径検査については従来の装置でも検査が可能である。しかし、CO ガスを通過させることでセンサとして機能を果たす製品であるため、流量保証が求められていることや、プレス加工によって量産される部品であるため迅速な検査が求められていることが課題として挙げられる。

本研究では微細穴部品の穴径を  $100\pm 5\ \mu\text{m}$  の公差で検査し、流量保証と高速検査が可能な検査技術の確立を目的とし、従来には無い音波利用による微細穴検査技術を提案する。これまで示した各種計測評価技術による微細穴検査の課題に対して、本研究ではプレス加工や放電加工など加工現場での実用を想定し、例えば、微細穴からの反射波や透過波を検出することによる微細穴検査や、ヘルムホルツ共鳴現象を利用した微細穴検査技術など、音波を利用した微細穴検査手法を提案する。

Table 1-1 Conventional micro-hole inspection technology and equipment.

	Inspection resolution $100\pm 5\ \mu\text{m}$	Guarantee of flow rate	Small instrument	Inspection speed 1 sample/s
Image processing system	○ (0.1 mm)	×	◎	◎
X-ray inspection system	△ (1 mm)	○	×	×
Optical apparatus for measuring	◎	△	×	△
Measuring system using an optical fiber probe	◎	△	×	×
Air micrometers	×	○	◎	△

## 1. 6 本論文の構成と要旨

第1章では、研究背景と現状の微細穴部品の形状検査に関連する計測・評価技術を説明し、本研究の目的を示した。

第2章は反射音を利用した微細穴検査技術を提案する。微細穴境界面での断面積変化による音波の反射率を推定し、穴径によって反射率が異なることから反射音を利用することで微細穴径を検査できると仮定した。実験により微細穴部品からの反射音を計測することで、直径 100  $\mu\text{m}$  の微細穴部品に対し $\pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検査できることを示す。反射音は検査装置に内蔵したダイナミック型マイクロホン<sup>65)</sup>で検出するため、穴部品を検査装置上部に設置するだけで検査可能である。そのため、装置を小型化できることや、加工現場での簡便な検査に対応した装置設計が可能である。

第3章はさらなる穴径の検査分解能の向上を目的とし、透過音を利用した微細穴検査技術を提案する。音圧校正された標準マイクロホンを用いて微細穴の透過音を検出することで、微細穴の高精度な穴径検査が可能であると仮定した。実験により直径 100  $\mu\text{m}$  の微細穴部品に対し、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$  の穴径差の検査性能を有することを示す。

第4章はヘルムホルツ共鳴現象を利用した小穴検査技術を提案する。ヘルムホルツ共鳴器は、開口部を有する容器の内部にある空気がばねとしての役割を果たし、共鳴することで音を発する装置であり、共鳴周波数は容器の容積と開口端の形状によって変化することが示されている<sup>66)67)</sup>。本研究では検査容器の開口部に微細穴部品を配置し、開口率の変化によってヘルムホルツ共鳴周波数が変わる現象を利用し、穴径を検査する手法について報告する。検査実験では検査容器内に配置したスピーカへ周波数掃引した電気信号を入力し、容器内に発生した音圧を標準マイクロホンにより計測することで共鳴周波数を求めた。微細穴部品の穴径差によって、共鳴周波数が異なることを確認し、穴径の検査が可能であることを示す。

第5章は本論文で提案する，微細穴に照射した音波の反射音を利用した検査技術，微細穴からの透過音を利用した検査技術，ヘルムホルツ共鳴現象を利用した検査技術によって実現した成果をまとめるとともに，今後の展望を述べる．

## 第 2 章

### 反射波検出による微細穴検査技術

## 第2章 反射波検出による微細穴検査技術

### 2.1 緒言

第1章では本研究の背景と目的, 現状の微細穴検査技術の特徴と課題について述べるとともに, 音波利用による検査技術の概要について述べた. 本章では薄板に加工された微細穴部品を対象とし, 微細穴境界面での断面積変化による反射率を推定し, 実験結果との比較により検証を行った結果を報告する. プレス加工製品の一つである CO ガスセンサ用の微細穴部品は, センサの性能を保つために直径 100  $\mu\text{m}$  の穴に対して, 穴径公差を $\pm 5 \mu\text{m}$  に管理する必要があることを第1章で述べた. 検査実験では検査装置に内蔵するダイナミック型マイクロホンを用いて反射音を検出し, 製作した検査試料について穴径の検査実験を行った結果から, 直径 100 $\pm$ 1  $\mu\text{m}$  の穴径差を検出できることを示す.

### 2.2 検査原理

#### 2.2.1 不連続境界面に作用する音波の入射と反射<sup>68)</sup>

本章で提案する検査技術は微細穴境界面での断面積変化による反射率の違いを利用するものである. はじめに, 微細穴境界面での断面積変化と反射率の関係を求めることで検査原理を確認する. Fig. 2-1 に示す断面積の異なる不連続境界面において, 空間 1 を伝ばする音波が境界面に入射すると, 一部は空間 2 に透過し残りは反射する<sup>69)</sup>.  $\rho_1$  および  $\rho_2$  は各空間における媒質の密度,  $c_1$  および  $c_2$  は各空間における音速を表す. また, 空間 1 の断面積を  $A_1$ , 空間 2 の断面積を  $A_2$  とする.

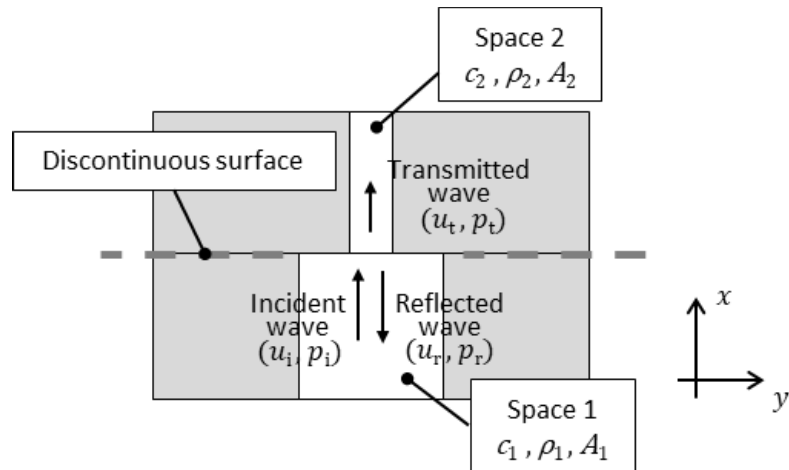


Fig. 2-1 Reflected wave in discontinuous surface. In the continuous boundary surface with different cross sectional area, when a sound wave propagating in the space 1 is incident on the boundary surface, a part of the sound wave transmits through the space 2 and the rest is reflected. The density of the medium in each space is denoted by  $\rho_1$  and  $\rho_2$ , and the speed of sound in each space by  $c_1$  and  $c_2$ .

媒質中の音の伝わりやすさを示す固有音響インピーダンス $Z$ は媒質ごとに固有の値を持ち、Eq. (2-1)に示すように音圧 $p_a$ と媒質の運動の速度を表す粒子速度 $u$ の比、または媒質の密度 $\rho$ と媒質中の音速 $c$ の積で表す。ここで、入射波、反射波、透過波の粒子速度を $u_i$ ,  $u_r$ ,  $u_t$ とし、それぞれの音圧を $p_i$ ,  $p_r$ ,  $p_t$ とすると、空間1、空間2での固有音響インピーダンス $Z_1$ ,  $Z_2$ はEq. (2-2)となる。なお、それぞれの波が進行する方向は一方向のみであり、一次元波理伝ば理論が適用できるものとする。なお、粒子とは音波の波長に比べて十分に小さい媒質の部分と定義されるが、例えば可聴域における音の変動の振幅は、水素や窒素の分子などと同じオーダーである<sup>70)</sup>。

$$Z = \frac{p_a}{u} = \rho c \quad (2-1)$$

$$Z_1 = \frac{p_i}{u_i} = \frac{p_r}{u_r} = \rho_1 c_1, \quad Z_2 = \frac{p_t}{u_t} = \rho_2 c_2 \quad (2-2)$$

不連続境界面では力のつり合いと粒子速度の連続性から Eq. (2-3)と Eq. (2-4)を満足する必要があり，入射波，反射波，透過波の粒子速度と音圧の関係は Eq. (2-5)および Eq. (2-6)となる．

$$(p_i + p_r)A_1 = p_t A_2 \quad (2-3)$$

$$u_i - u_r = u_t \quad (2-4)$$

$$u_i = \frac{1}{\rho_1 c_1} p_i, \quad u_r = \frac{1}{\rho_1 c_1} p_r, \quad u_t = \frac{1}{\rho_2 c_2} p_t \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{\rho_1 c_1} p_i - \frac{1}{\rho_1 c_1} p_r = \frac{1}{\rho_2 c_2} p_t \quad (2-6)$$

また，Eq. (2-3)と Eq. (2-6)を考慮することで，入射波と反射波の音圧  $p_i$ ， $p_r$  と，透過波の音圧  $p_t$  との関係を Eq. (2-7)と Eq. (2-8)のように求めることができる．

$$p_t = \frac{2A_1 \rho_2 c_2}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} p_i \quad (2-7)$$

$$p_r = \frac{A_2 \rho_2 c_2 - A_1 \rho_1 c_1}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} p_i \quad (2-8)$$

ここで，空間 1 および空間 2 における媒質気体を空気とすると，密度と音速は一定であるため，入射波の音圧と反射波の音圧との比を反射率 $\alpha$ ，入射波の音圧と透過波の音圧との比を透過率 $\beta$ とし Eq. (2-9)と Eq. (2-10)で表すことができる．これらの式から，Fig. 2-1 に示す断面積の異なる境界面において，媒質気体が同一である場合は反射率と透過率は境界面前後の断面積にのみ依存することとなる．

$$\alpha = \frac{p_r}{p_i} = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \quad (2-9)$$

$$\beta = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad (2-10)$$

本章で対象とする直径 50  $\mu\text{m}$ ~150  $\mu\text{m}$  の微細穴に音波が入射した際における, 反射率と透過率を Eq. (2-9)および Eq. (2-10)から求めた結果を Fig. 2-2 に示す. 空間 1 と空間 2 の微細穴境界面の断面積比が大きいため反射率は-1 に近く, ほとんどの波が逆相となって反射することがわかる. なお, Fig. 2-2 は後述する実験条件に合わせて, 空間 1 の直径を 4 mm として計算している.

次に, Fig. 2-3 に示す微細穴前後の境界面における音波の反射率と透過率を考える. 微細穴に音波が入射する空間 1 と空間 2 における不連続境界面 $D_{S1 \rightarrow 2}$ での反射率 $\alpha_{1 \rightarrow 2}$ と透過率 $\beta_{1 \rightarrow 2}$ は Eq. (2-9)および Eq. (2-10)である. また, 微細穴から音波が抜け出る空間 2 と空間 3 における不連続境界面 $D_{S2 \rightarrow 3}$ での反射率 $\alpha_{2 \rightarrow 3}$ と透過率 $\beta_{2 \rightarrow 3}$ は, Eq. (2-11)および Eq. (2-12)により表す.

$$\alpha_{2 \rightarrow 3} = \frac{A_3 - A_2}{A_2 + A_3} \quad (2-11)$$

$$\beta_{2 \rightarrow 3} = \frac{2A_2}{A_2 + A_3} \quad (2-12)$$



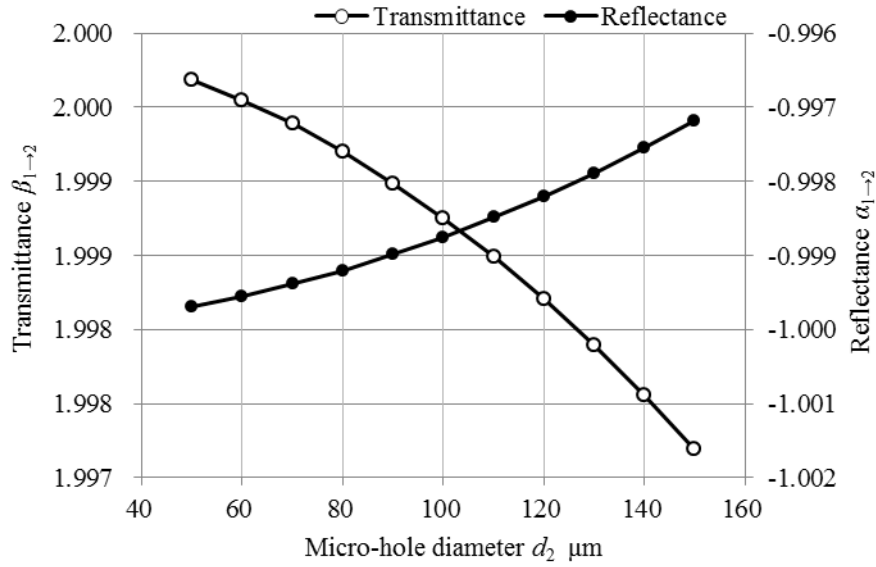


Fig. 2-2 Relationship between micro-hole diameter and reflectance or transmittance. It shows the result when sound wave is incident from space 1 to space 2. Most of the acoustic waves are reflected at the boundary surface before and after the micro-holes. As the hole diameter increases, the reflectance decreases and the transmittance increases.

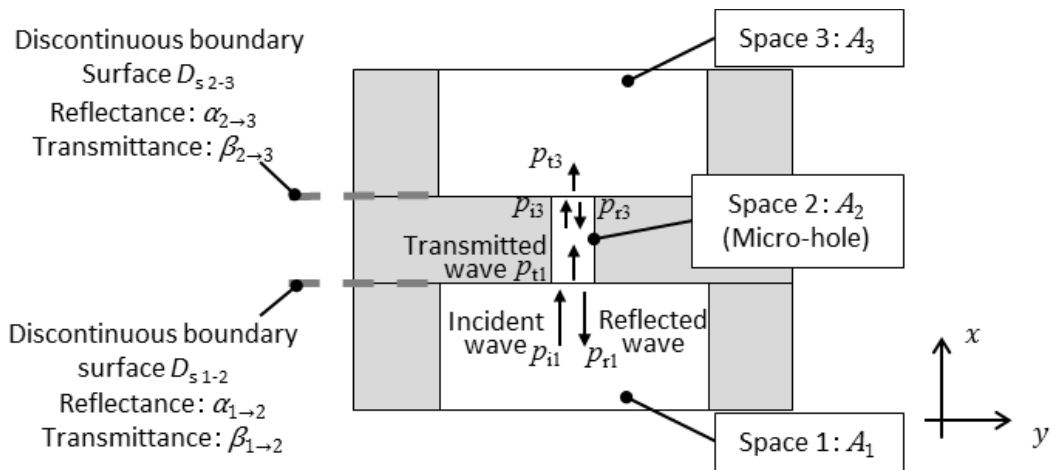


Fig. 2-3 Reflectance and transmittance of acoustic waves at boundary surface before and after micro-hole. The reflectance on the boundary surface in space 1 to space 2 is  $\alpha_{1 \rightarrow 2}$ . The reflectance on the boundary surface in the space 2 to the space 3 through which sound waves pass through micro-hole is  $\alpha_{2 \rightarrow 3}$ . The discontinuous boundary surface in the micro-hole is  $D_{s1-2}$  and  $D_{s2-3}$ .

## 2. 2. 2 微細穴前後の反射率を考慮した合成波

空間 1 の媒質が圧縮または膨張を繰り返すことで、Fig. 2-4 のように疎密波（縦波）が発生し音として伝播する。音は媒質気体のある面を変位させながら進むことから、空間 1 に作用する合成波の変位を求めることとする。なお、縦波は振動方向と波の進行方向が同じであるため図示が難しいことから、波の進行方向の変位を正とし、逆方向の変位を負として横波型で図示することとする。縦波の進行方向を  $x$  とし、進行方向の変位を  $y(x)$ 、逆方向の変位を  $-y(x)$  とした際の、縦波の変位が変化の様子を Fig. 2-5 に示す。  $x$  方向へ音速  $c$  で進む正弦波の変位  $y(x)$  は、波の振幅  $W_a$ 、角速度  $\omega$ 、時刻  $t$  とすると Eq. (2-13) で表すことができる。媒質が一回振動するのに要する時間を周期  $T$  とすると、 $\omega T = 2\pi$  であるため、Eq. (2-13) は Eq. (2-14) で表し、波が原点から距離  $x$  まで進むために要する時間は  $x/c$  であり、Eq. (2-14) は Eq. (2-15) となる。また、波長  $\lambda$  は波の周波数  $f$  と音速  $c$  の比  $c/f$  であるため、Eq. (2-15) は Eq. (2-16) となる。

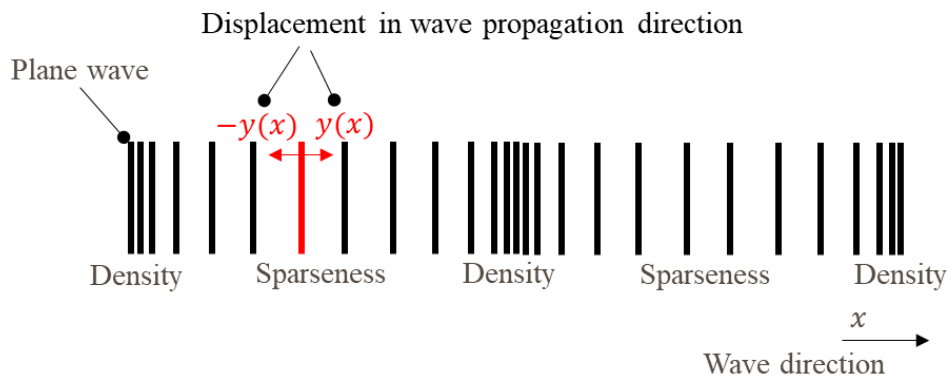


Fig. 2-4 Sparseness and density of plane wave. Compressed or expanding media repeatedly generates compressional waves and propagates as sound. The direction of the longitudinal wave is  $x$ . The displacement in the traveling direction is  $y(x)$ , the displacement in the reverse direction is  $-y(x)$ .

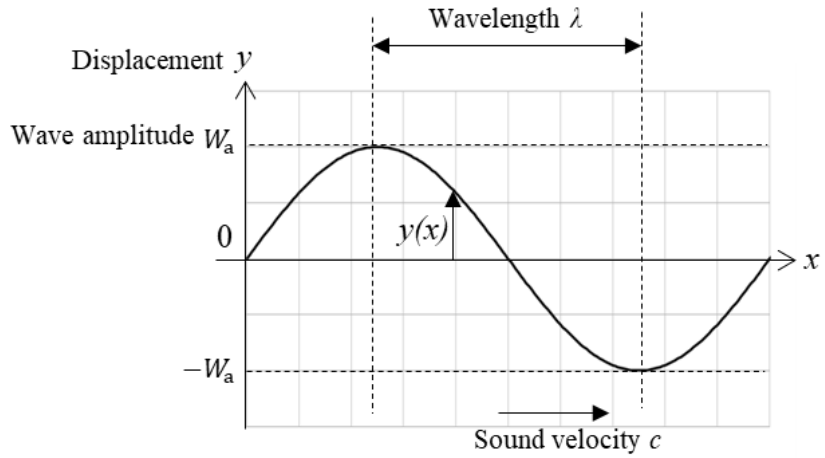


Fig. 2-5 The displacement  $y(x)$  of the sine wave goes forward in the  $x$  direction at the velocity  $v$ . The amplitude of the wave is  $W_a$ , the angular velocity is  $\omega$ , and the time is  $t$ .

$$y(x) = W_a * \sin \omega t \quad (2-13)$$

$$y(x) = W_a * \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (2-14)$$

$$y(x) = W_a * \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (2-15)$$

$$y(x) = W_a * \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \right) \quad (2-16)$$

空間 1 から空間 2 の微細穴へと  $x$  軸の正方向に進む入射波の変位  $y_i$  は, Eq. (2-16) に示した波の変位  $y(x)$  から Eq. (2-17) で表すことができる. ここで, Fig. 2-3 の空間 1 における反射波の変位は, 微細穴の境界面  $D_{s1-2}$  での反射波の変位  $y_{r1}$  と, 境界面  $D_{s1-2}$  を通過し, 境界面  $D_{s2-3}$  で反射して戻る波の変位  $y_{r2}$  を足し合わせたものとなる. そのため, 反射波の変位  $y_{r2}$  は, 境界面  $D_{s1-2}$  での透過率  $\beta_{1 \rightarrow 2}$  と, 境界面  $D_{s2-3}$  での反射率  $\alpha_{2 \rightarrow 3}$ , さらに境界面  $D_{s1-2}$

での透過率 $\beta_{2 \rightarrow 1}$ を考慮する必要がある。Eq. (2-18)と Eq. (2-19)に反射波の変位 $y_{r1}$ と $y_{r2}$ を、空間 1 における入射波と反射波の合成波の変位 $y_c$ を Eq. (2-20)で表す。

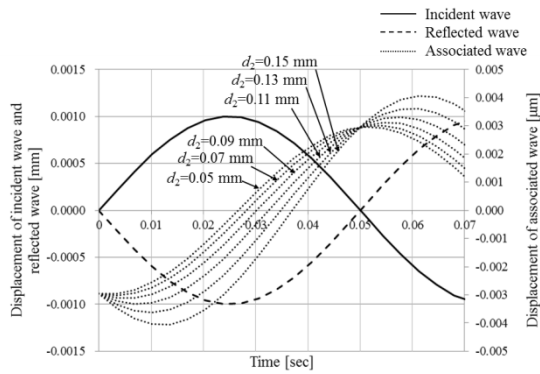
$$y_i = W_a * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x)\right) \quad (2-17)$$

$$y_{r1} = -W_a * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(ct + x)\right) * \alpha_{1 \rightarrow 2} \quad (2-18)$$

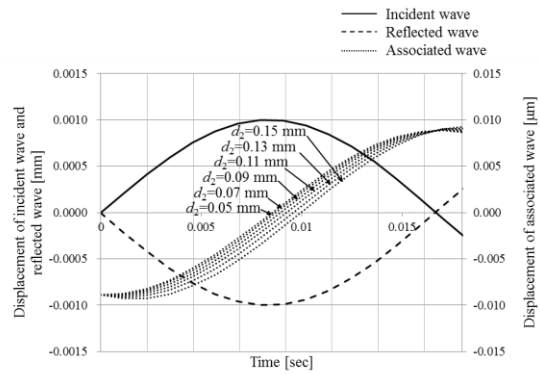
$$y_{r2} = -W_a * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(ct + x)\right) * \beta_{1 \rightarrow 2} * \alpha_{2 \rightarrow 3} * \beta_{2 \rightarrow 1} \quad (2-19)$$

$$y_c = y_i + y_{r1} + y_{r2} \quad (2-20)$$

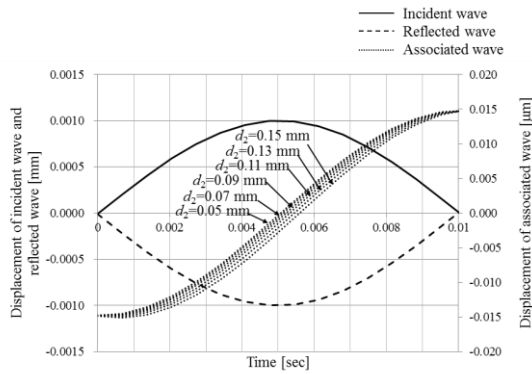
微細穴径を 50  $\mu\text{m}$ ~150  $\mu\text{m}$  とした場合において、空間 1 における入射波と反射波の合成波の変位 $y_c$ を Eq. (2-17)~Eq. (2-20)から求めた結果を Fig. 2-6 に示す。微細穴へ入射する音波の振幅  $W_a = 1 \text{ mm}$ ，音速を $c = 340 \text{ m/s}$ ，境界面からの距離  $x = 8 \text{ mm}$ ，周波数  $f = 10 \text{ Hz}$ ~ $f = 110 \text{ Hz}$  として計算した。境界面からの距離  $x = 8 \text{ mm}$  は後述する検査装置における、微細穴境界面とマイクロホンダイヤフラムとの距離である。Fig. 2-6 の結果から、微細穴の穴径が大きくなることで、合成波の変位 $y_c$ の最大値が大きくなる傾向を確認できる。また、微細穴境界面における、反射率と透過率を考慮した合成波の変位 $y_c$ の最大値と微細穴径の関係を Fig. 2-7 に示す。周波数変化による穴径検出感度の違いを予測するため、音波の周波数を $f = 10 \text{ Hz}$  から $f = 110 \text{ Hz}$  まで変えて合成波の変位の最大値を計算した。Fig. 2-7 の結果から、微細穴境界面の入射波と反射波を合わせた合成波を検出することで穴径の検査が可能で、周波数を低くすることで穴径差を検査しやすい傾向にあることがわかる。



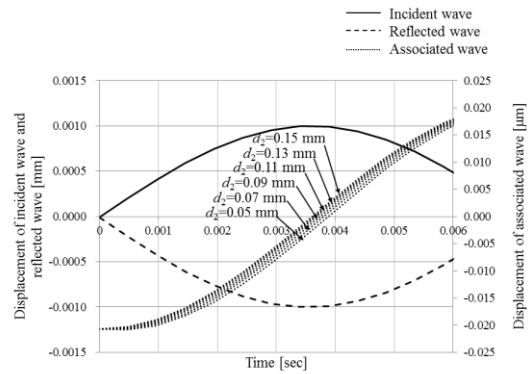
(a) Frequency  $f = 10$  Hz



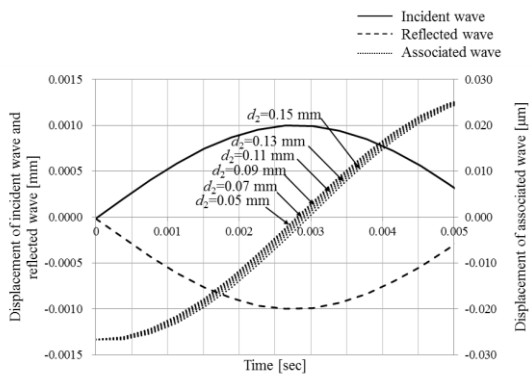
(b) Frequency  $f = 30$  Hz



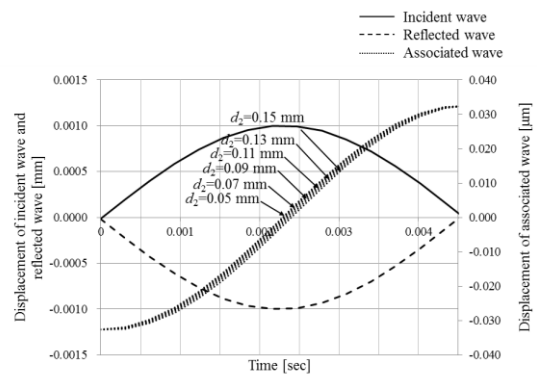
(c) Frequency  $f = 50$  Hz



(d) Frequency  $f = 70$  Hz



(e) Frequency  $f = 90$  Hz



(f) Frequency  $f = 110$  Hz

Fig. 2-6 Displacement of sine wave at micro-hole boundary surface. The micro-hole diameter is 0.05 mm to 0.15 mm. As the micro-hole diameter increases, the maximum value of the displacement of the associated wave increases. Calculated the amplitude of sound wave  $W_a = 1$  mm, sound velocity  $c = 340$  m / s, distance from boundary surface  $x = 8$  mm, frequency  $f = 10$  Hz to 110 Hz.

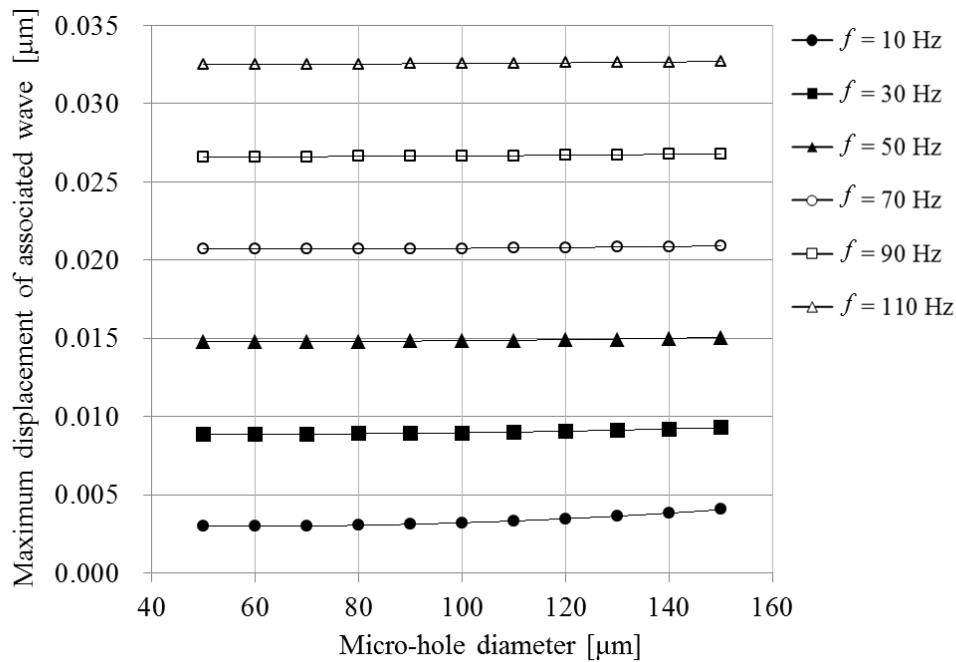


Fig. 2-7 Relationship between maximum value of displacement  $y_c$  of associated wave and diameter at micro-hole boundary surface. The maximum value of the displacement of the associated wave was calculated by changing the frequency of the sound wave from  $f = 10$  Hz to  $f = 110$  Hz. This results can be predicted that it is possible to inspect the hole diameter by detecting an associated wave combining an incident wave and a reflected wave at the micro-hole boundary surface.

## 2. 3 反射波検出による微細穴径検査実験

### 2. 3. 1 検査装置の構造

微細穴境界面における合成波を検出するため、Fig. 2-8 に示す構成の検査装置を用意した。検査容器の内部にスピーカとダイナミック型マイクロホンを内蔵し、マイクロホンの上部に検査試料となる微細穴部品が配置される。なお、微細穴部品の上部は大気開放されている。Fig. 2-8 中の A 部分の微細穴周辺の拡大図を Fig. 2-9 に示す。信号発生器(WF1946B, NF Co. Ltd)によりスピーカへ低周波の電気信号を入力すると、検査容器内の空間に音波が発生する。発生した音波はダイナミック型マイクロホンの背面から入射し、マイクロホン内部のダイアフラムを振動させる。ダイアフラムの振動によりマイク

ロホンと検査試料の間の空間 1 にわずかな音波が発生し、音波は空間 2 である検査試料の微細穴を通過して外部空間 3 に放出される。このとき、微細穴の穴径によって音波の反射率が異なることから、穴径によってマイクロホン内部のダイアフラムの振動による変位の大きさも変化することとなる。したがって、微細穴からの反射波を受けて振動するマイクロホンの信号出力を信号計測装置でモニタすることで、穴径の変化を検出することが可能となる。

信号計測装置には外来するノイズによる計測信号への影響を抑えるため、ロックインアンプ(5610B, NF Co. Ltd)を使用した。信号発生器からの出力をロックインアンプへ参照信号として入力することにより、スピーカに入力した電気信号に同期した信号のみ計測することができる。Fig. 2-10 は検査装置の外観を示す。検査容器の材質は真鍮であり、大きさは外径およそ 50 mm、高さおよそ 100 mm である。検査容器上部の蓋部品が取り外しできる構造となっており、検査対象の微細穴を蓋部品で動かないよう固定し検査する。

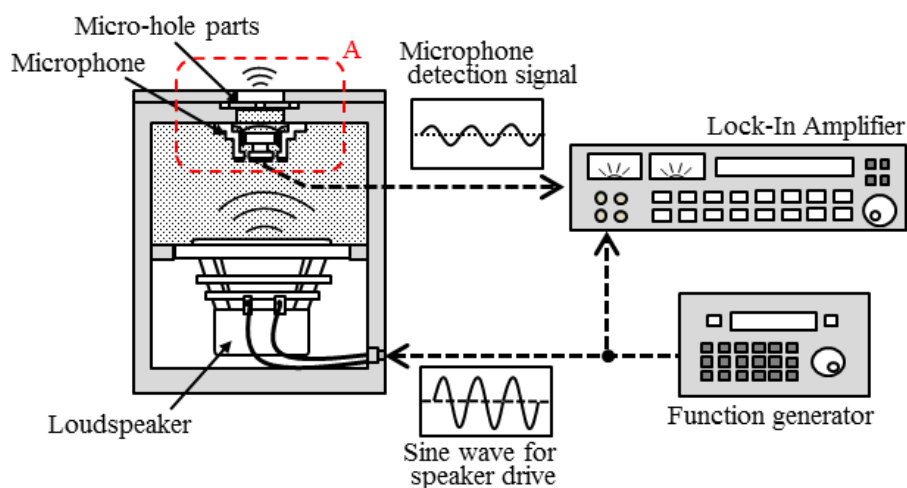


Fig. 2-8 Inspection system configuration. A speaker and a dynamic microphone are built in the inside of the inspection container. Place the micro-hole parts of the test sample on the microphone. The upper part of the micro-hole parts is open to the atmosphere.

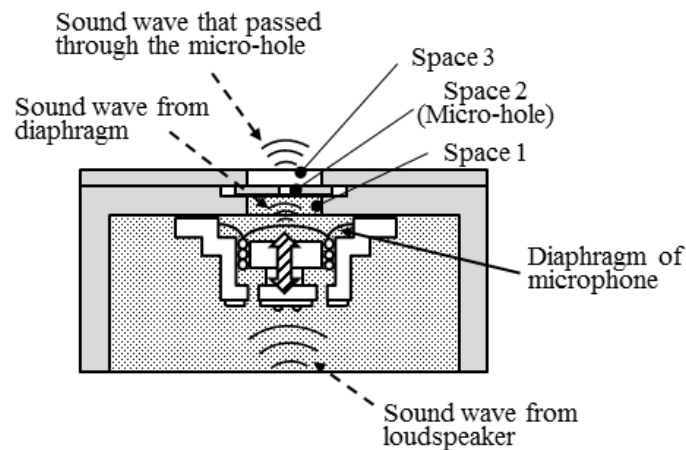


Fig. 2-9 Enlarged view around the microphone. The diaphragm of the microphone receives a reflected wave and vibrates. The vibration displacement of the diaphragm of the microphone also changes when the sound wave reflectance varies depending on the micro-hole diameter. Therefore, by monitoring the signal output of the microphone with the signal measuring device, it is possible to detect a change in the micro-hole diameter.

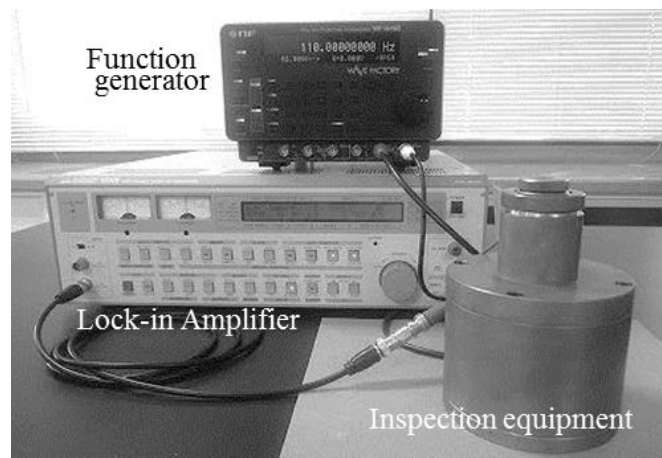


Fig. 2-10 Micro-hole inspection system using reflected wave. The system consists of a signal generator(WF1946B, NF Co. Ltd), an inspection container and a lock-in amplifier(5610B, NF Co. Ltd). A speaker and a dynamic microphone are built in the inspection container.

### 2. 3. 2 検査試料の作製

検査装置で微細穴の穴径を検査するため、放電加工により穴径の異なる検査試料を作



製した。Fig. 2-11 に示す超微細放電加工機(MG-ED71, Matsushita Electric Industrial Co. Ltd)を使用し, 厚さ 100  $\mu\text{m}$  のステンレス鋼 SUS304 の薄板に直径  $d_f=47.6 \mu\text{m}$  から 112.8  $\mu\text{m}$  まで穴径を変えた微細穴を加工した。Fig. 2-12 に検査試料の表裏面の顕微鏡画像を, Table 2-1 に検査試料の穴径を示す。穴径はレーザ式の三次元表面形状測定機にて測定した。検査試料は放電加工機により穴加工したことにより, 放電ギャップが発生し表裏面でわずかに穴径が異なっている。例えば No.5 の検査試料は表面の穴径  $d_f=94.6 \mu\text{m}$ , 裏面の穴径  $d_b=88.4 \mu\text{m}$  と表裏面で 6.2  $\mu\text{m}$  の穴径差がある。



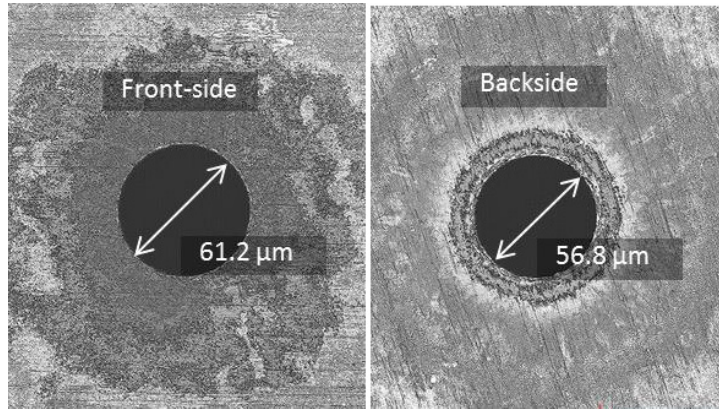
(a) Machine appearance

(b) State of the electrical discharge machining

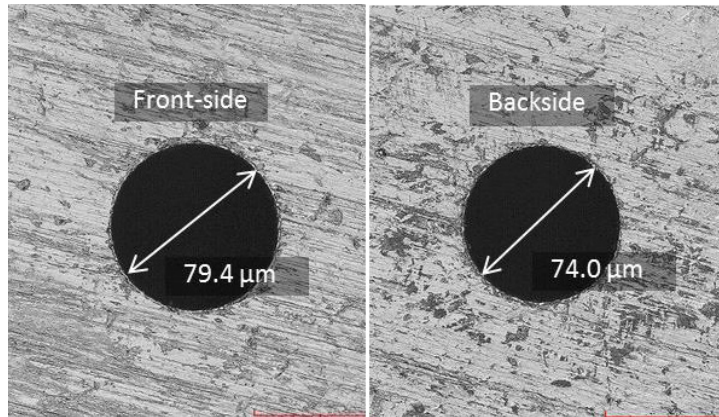
Fig. 2-11 Ultra-fine electrical discharge machine (MG-ED71, Matsushita Electric Industrial Co. Ltd).

Table 2-1 Diameter of the micro-hole.

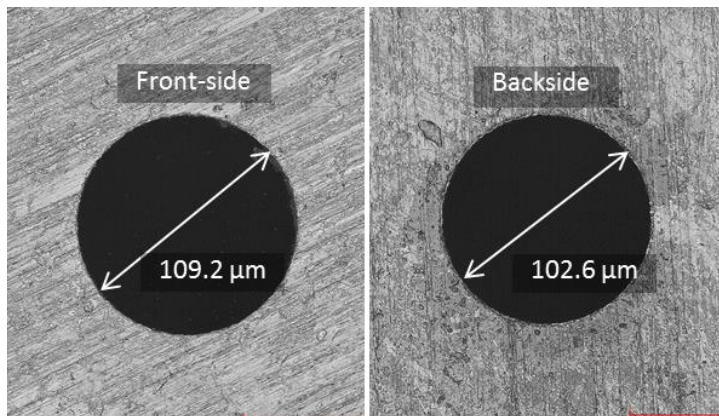
Sample No	Front side diameter $d_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	Backside diameter $d_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	Diameter difference [ $\mu\text{m}$ ]
1	47.6	44.2	3.4
2	61.2	56.8	4.4
3	72.8	68.4	4.4
4	79.4	74.0	5.4
5	94.6	88.4	6.2
6	98.0	92.4	5.6
7	105.8	100.2	5.6
8	109.2	102.6	6.5
9	112.8	107.6	5.2



(a) Backside diameter  $d_b = 56.8 \mu\text{m}$



(b) Backside diameter  $d_b = 74.0 \mu\text{m}$



(c) Backside diameter  $d_b = 102.6 \mu\text{m}$

Fig. 2-12 Micro-hole sample by electric discharge machining. Discharge gap is generated by drilling with the electric discharge machine, and the hole diameter is slightly different on the front side and backside. For example, the test specimen shown in (c) has a hole diameter difference of 6.5 μm on the front and back surfaces as the hole diameter on the front side is  $d_f = 109.2 \mu\text{m}$  and backside  $d_b = 102.6 \mu\text{m}$ .

### 2. 3. 3 実験方法

放電加工により作製した Table 2-1 に示す  $d_f=47.6\ \mu\text{m}\sim d_f=112.8\ \mu\text{m}$  の微細穴検査試料について、穴径差の検出実験を実施した。検査装置のスピーカに入力する電気信号の電圧を 5 V とし、周波数を  $f_s=10\ \text{Hz}, 30\ \text{Hz}, 50\ \text{Hz}, 70\ \text{Hz}, 90\ \text{Hz}, 110\ \text{Hz}$  に設定し、マイクロホンの信号出力をロックインアンプにより計測した。ロックインアンプはスピーカの周波数と同期した検出信号の、最大値や平均値などの代表値を表示する。実験は各検査試料において 6 回ずつ実施し、6 回分の検出信号電圧の最大値から平均値を記録した。

## 2. 4 実験結果

### 2. 4. 1 単一の微細穴径の検査結果（信号振幅について）

Fig. 2-13 は直径の異なる検査試料の表面を全て上向きに設置して検査した際の、各周波数における検出信号値を示している。6 回の実験結果による検出信号の最大値から平均値を計算した。なお、実験に用いたロックインアンプは、スピーカの出力信号の周波数に同期したマイクロホンの信号出力から、信号電圧の最大値を表示するため波形は記録していない。また、Fig. 2-13 はマイクロホンの検出信号から得られる電圧値を表示しているため、音圧値には変換していない。

この結果から、マイクロホンの信号出力値は検査試料の穴径に応じて変化することが示され、直径  $d_f=47.6\ \mu\text{m}\sim d_f=112.8\ \mu\text{m}$  の微細穴については穴径差を検出できることを確認した。また、検査に使用する周波数については、低周波であるほうが検査試料の穴径差を検出しやすいことを確認した。

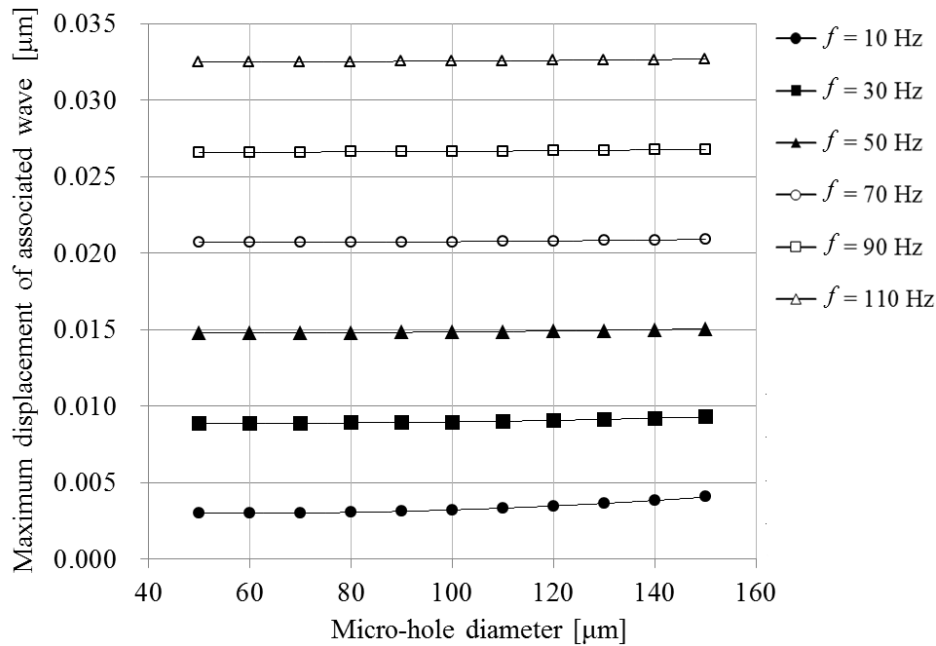


Fig. 2-13 Relationship between the frequency of speaker and microphone measured voltage. Indicating that the signal output of the microphone varies according to the hole diameter of the test sample. A hole diameter difference can be detected for micro-holes of about 50  $\mu\text{m}$  to 110  $\mu\text{m}$  in diameter.

Fig. 2-14は6回の検査実験におけるマイクロホンの信号出力値の標準偏差を示している。検査に使用する周波数が低いほど信号出力値の標準偏差が小さく、周波数が高いほど標準偏差が大きいことを確認した。Fig. 2-13の結果から、微細穴径が $d_f = 94.6 \mu\text{m}$ の場合の信号出力値は0.150 mV、微細穴径が $d_f = 105.8 \mu\text{m}$ の場合の信号出力値は0.183 mVとなり、信号出力値の差は0.033 mVであるが、周波数が $f_s = 10$  Hzでの標準偏差の最大値は0.002 mVであった。

この結果から、穴径 $100 \pm 5 \mu\text{m}$ の変化に対する検出信号の変化量は $\pm 0.015$  mVであり、穴径1  $\mu\text{m}$ あたり0.003 mVの変化量となった。また、6回の検査実験によりマイクロホンの検出信号のばらつきを示したFig. 2-14の結果から、周波数 $f_s = 10$  Hzにおいては0.002 mV以下であることから、0.67  $\mu\text{m}$ の穴径差を検出でき、少なくとも1  $\mu\text{m}$ の穴径差を検査できることが示された。

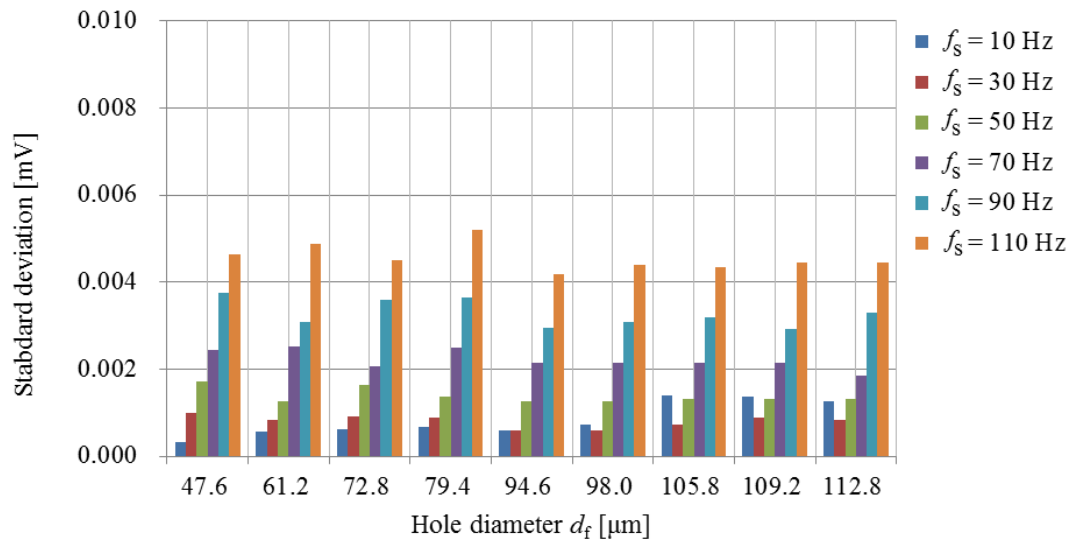
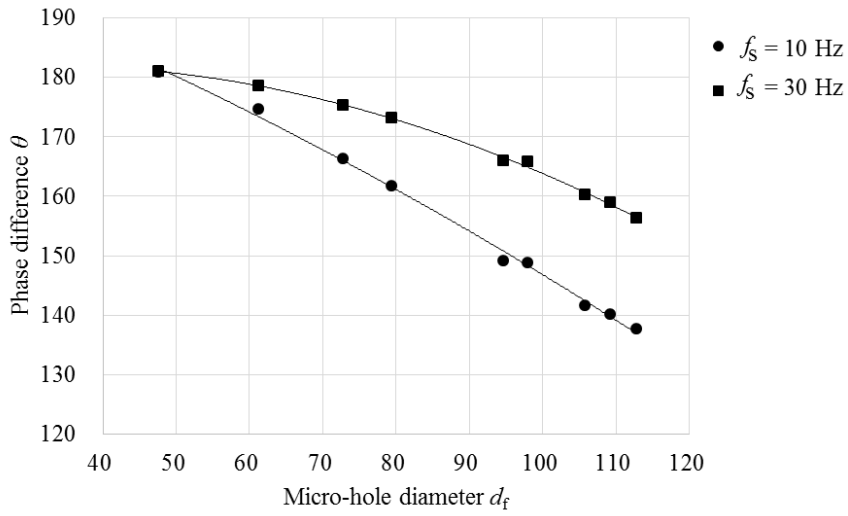


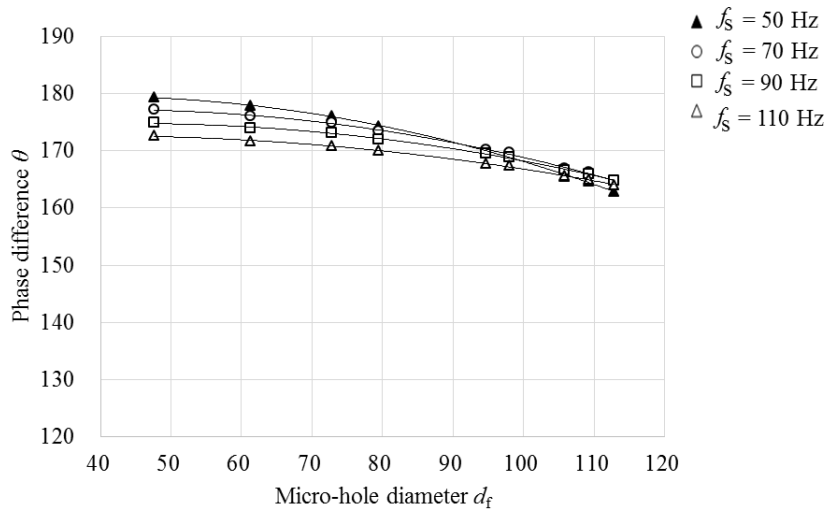
Fig. 2-14 Variation of microphone measured voltage. Variation in signal output value of microphone for six times test results. When the frequency used for inspection is low, the variation of the signal output value is small. The variation of the signal output value at the frequency of 10 Hz was 0.002 mV or less.

#### 2. 4. 2 単一の微細穴径の検査結果（信号位相差について）

Fig. 2-15 は直径の異なる検査試料の表面を全て上向きに設置して検査した際の、各周波数におけるマイクロホンの検出信号とスピーカへの入力信号の位相差を示している。この結果から、マイクロホンの検出信号とスピーカへの入力信号の2つの信号の位相差は検査試料の穴径に応じて変化することが示され、直径 $d_f = 47.6 \mu\text{m} \sim d_f = 112.8 \mu\text{m}$ の微細穴については、位相差から穴径差を検出できる可能性があることを確認した。また、検査に使用する周波数については、低周波であるほうが検査試料の穴径差を検出しやすいことを確認した。



(a) Speaker frequency  $f_s = 10$  Hz, 30 Hz.



(b) Speaker frequency  $f_s = 50$  Hz, 70 Hz, 90 Hz, 110 Hz.

Fig. 2-15 The phase difference between the detection signal of the microphone and the input signal to the speaker. It was shown that the phase difference between the two signals varies according to the hole diameter of the test sample. The lower the frequency, the larger the phase difference change due to the hole diameter.

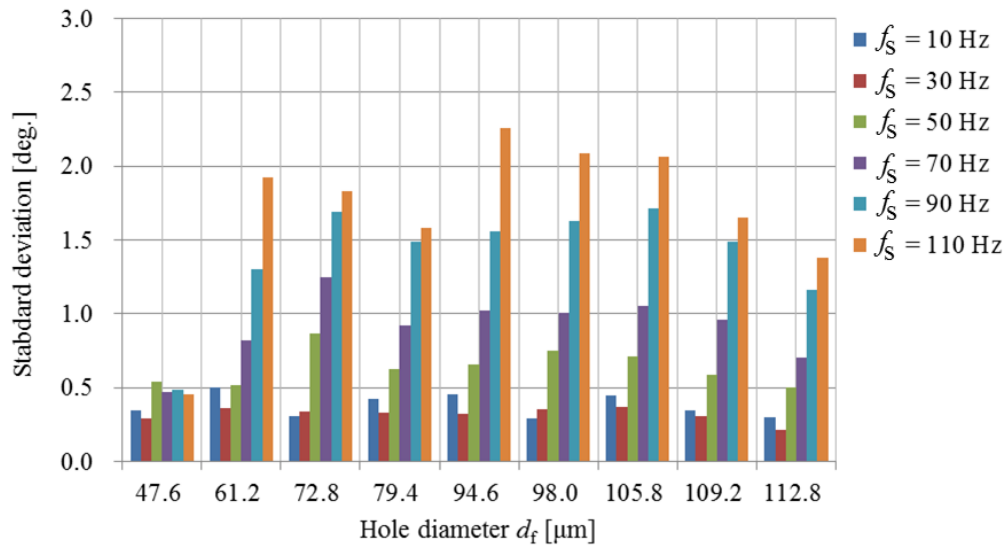


Fig. 2-16 Variation of phase difference between the detection signal of the microphone and the input signal to the speaker. Standard deviation of phase difference in six times test experiments. When the lower the frequency, the smaller the standard deviation of the phase difference. When the higher the frequency, the larger the standard deviation. The variation of the phase difference at the frequency of 10 Hz was 0.5 deg. or less.

Fig. 2-16 は位相差を求めた 6 回の検査実験における標準偏差を示している。検査に使用する周波数が低いほど位相差の標準偏差が小さく、周波数が高いほど標準偏差が大きいことを確認した。周波数が  $f_s = 10$  Hz での標準偏差の最大値は 0.5 deg. であった。また、周波数が 70 Hz 以上においては、標準偏差が大きいため 2 つの信号の位相差から穴径の差を求めることが難しいことがわかった。

Fig. 2-15 の結果から、周波数  $f_s = 10$  Hz においては、微細穴径が  $d_f = 94.6 \mu\text{m}$  の場合の位相差は 180.77 deg., 微細穴径が  $d_f = 105.8 \mu\text{m}$  の場合の信号出力値は 174.53 deg. となり、その差は 6.24 deg. であった。したがって、穴径  $1 \mu\text{m}$  あたり 0.56 deg. の位相差の変化を有することとなり、6 回の実験結果による標準偏差は 0.5 deg. 以下であることから、少なくとも  $1 \mu\text{m}$  の穴径差を検査できることが示された。

### 2. 4. 3 表裏面穴径差の検査

検査試料の穴径は放電加工の影響により表面と裏面で3~5  $\mu\text{m}$  程度異なっていることが Table 2-1 により示されていた。Table 2-2 は検査試料の設置面を、表裏で向きを変えた際における、マイクロホンの信号出力の差を示す。Table 2-2 の結果から、表裏面の信号出力の差は最大でも 0.001 mV であり、検査結果に差が無いことを確認した。

Table 2-2 Difference of the test result on the front side and backside.

Sample No	Voltage differences mV					
	$f_s = 10 \text{ Hz}$	$f_s = 30 \text{ Hz}$	$f_s = 50 \text{ Hz}$	$f_s = 70 \text{ Hz}$	$f_s = 90 \text{ Hz}$	$f_s = 110 \text{ Hz}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
2	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
4	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
5	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
7	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000
9	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

## 2. 5 考 察

プレス加工製品の一つである CO ガスセンサ用の微細穴部品は、センサの性能を保つため、直径 100  $\mu\text{m}$  の穴に対して穴径公差を $\pm 5 \mu\text{m}$  に管理する必要があると緒言にて述べた。本章で提案した検査技術は、検査容器に内蔵されるマイクロホンが微細穴からの反射音を検出し、穴径に応じたマイクロホンの検出信号の大小によって穴径を推測するものである。Fig.2-13 の検査実験結果と、6 回の実験からマイクロホン信号電圧値の標準偏差から、本章で提案した検査技術は 100 $\pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出可能であることが示された。したがって、CO ガスセンサ用の微細穴部品の検査要求である、直径 100  $\pm 5 \mu\text{m}$  の穴径検査に十分対応できるといえる。



### (1) 検査に使用する周波数

微細穴前後の境界面における音波の反射率 $\alpha_{1\rightarrow 2}$ および $\alpha_{2\rightarrow 3}$ と、透過率 $\beta_{1\rightarrow 2}$ および $\beta_{2\rightarrow 3}$ を Eq. (2-9)~Eq. (2-12)により求めた。また、微細穴境界面における入射波と反射波の合成波の変位 $y_c$ の最大値を Eq. (2-17)~Eq. (2-20)から求めた。周波数を $f=10$  Hz とした場合において、直径 50  $\mu\text{m}$  の微細穴の合成波の変位 $y_c$ の最大値は Fig. 2-7 から  $2.97\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  であり、直径 100  $\mu\text{m}$  の微細穴での変位の最大値は  $3.21\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  であることから、その差は  $0.24\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  となる。周波数を $f=50$  Hz とした場合では、直径 50  $\mu\text{m}$  の微細穴の合成波の変位 $y_c$ の最大値は  $14.78\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  であり、直径 100  $\mu\text{m}$  での変位の最大値は  $14.84\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  であることから、その差は  $0.06\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  である。したがって、微細穴前後の境界面における反射率と透過率を考慮した、合成波の変位を理論式から求めた結果、周波数 $f$ を低くすることで、微細穴境界面の反射率の変化を大きく検出でき、穴径差を検査しやすいと予測した。また、微細穴からの反射音の変位をマイクロホンで検出し、穴径差を計測した実験結果 (Fig. 2-13) においても、スピーカの周波数 $f_s=10$  Hz とすると、検査試料の穴径が直径 $d_f=47.6$   $\mu\text{m}$  における信号電圧は 0.110 mV、直径 $d_f=112.8$   $\mu\text{m}$  における信号電圧は 0.206 mV であり、その差は 0.096 mV であった。それに対し、スピーカの周波数 $f_s=110$  Hz とすると、検査試料の穴径が直径 $d_f=47.6$   $\mu\text{m}$  のときの信号電圧は 1.280 mV、直径 $d_f=112.8$   $\mu\text{m}$  のときの信号電圧は 1.303 mV であり、その差は 0.023 mV であった。したがって理論式と実験値とも、低周波であるほうが穴径の検査分解能が高いことが示された。このことから、周波数 $f$ を低くすることで、微細穴境界面の反射率の変化を大きく検出でき、穴径差を検査しやすいことがわかった。

### (2) テーパー形状の微細穴における検査

検査試料の表裏面の向きを変えた際の、マイクロホンの信号出力の差は Table 2-2 に示した通りの結果であり、表裏面での穴径差は検査結果に影響がなかった。検査試料は放電加工により作製しており、放電ギャップの影響により Fig. 2-17 に示すように表裏

面で穴径が異なっている。Table 2-1 の試料番号 7 の表面穴径は $d_f=105.8\mu\text{m}$ ，裏面穴径は $d_b=100.2\mu\text{m}$  であるため表裏面での穴径差は  $5.6\mu\text{m}$  であり，表裏面での穴径の違いはおよそ 5 %である。放電加工穴の断面形状は Fig. 2-17 に示すように，微細穴の上面から下面に向かって徐々に穴径が変化し，穴断面はテーパ形状となっている。穴径が徐々に変化する場合，断面積が異なる不連続境界面が複数存在すると考え，Fig. 2-18 に示すように反射率と透過率も徐々に変化することとなる。そこで，表面と裏面の穴径がテーパ状に 5 %変化したと仮定し，穴断面を穴深さ方向に対して 25 分割し，各断面における反射率と透過率を考慮した合成波の変位 $y_c$  の最大値と，微細穴径の関係を求めた結果を Fig. 2-19 に示す。この結果から，表面の穴径が大きい場合も，裏面の穴径が大きい場合も空間 1 における合成波の最大変位 $y_c$ は同じであり，テーパ状に表裏面の穴径差がある検査試料について，検査の際に設置する向きは検査結果に影響しないことがわかる。

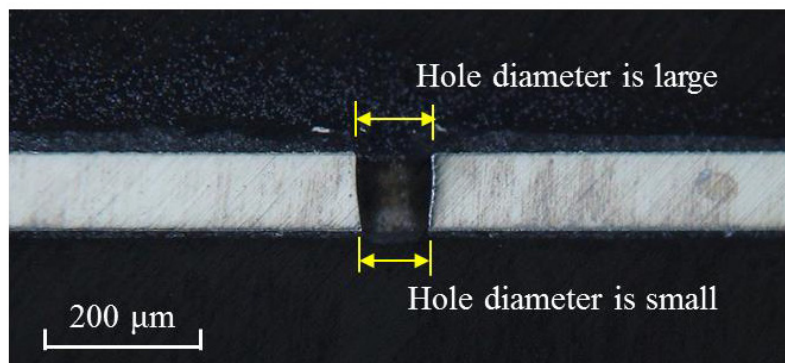


Fig. 2-17 Cross-sectional shape of electric discharge machined micro-hole.

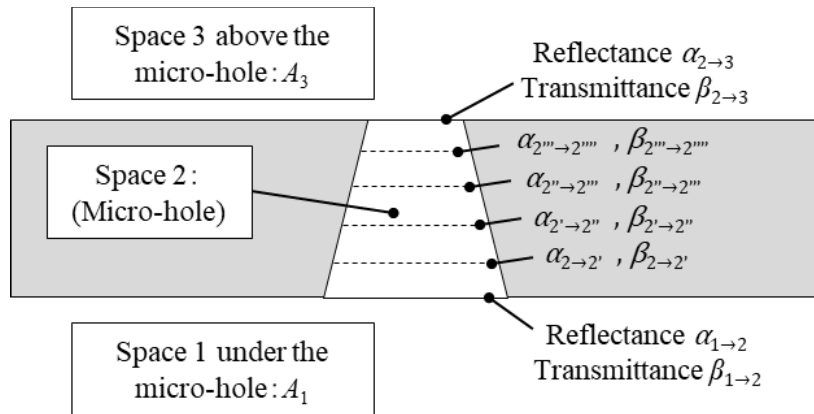


Fig. 2-18 Schematic diagram of cross section of taper hole. When the hole diameter gradually changes, there are a plurality of discontinuous boundary surfaces. Reflectance and transmittance are different for each boundary surface at the front and rear cross sectional areas.

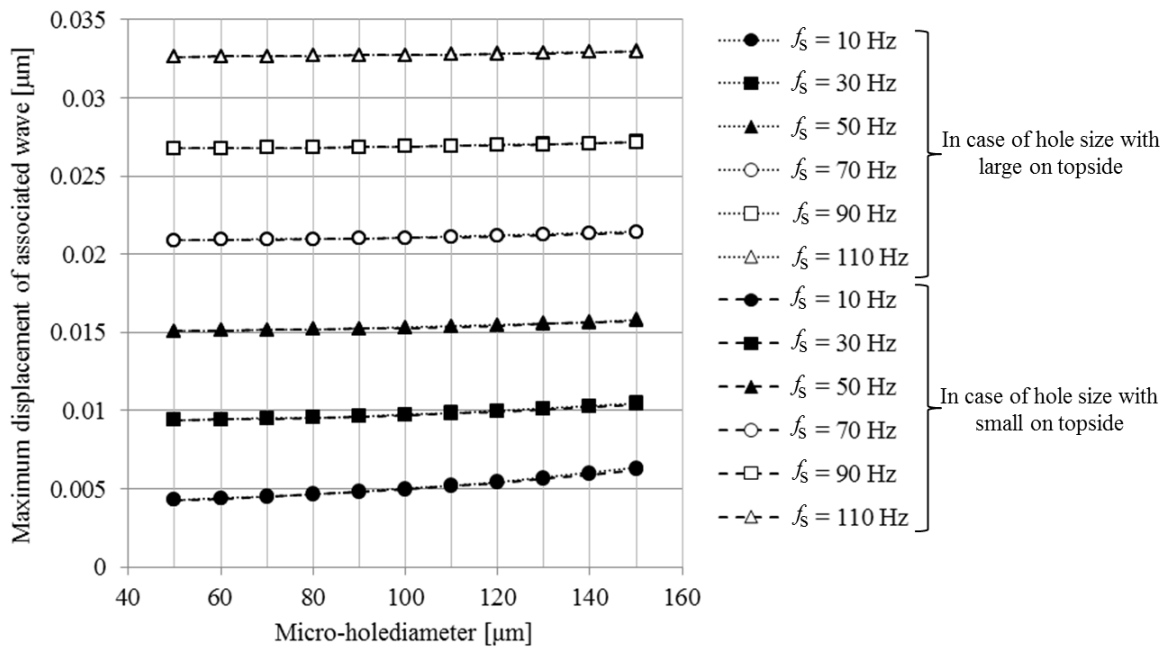


Fig. 2-19 Results of obtaining the relationship between the maximum displacement  $y_c$  of the associated wave and the micro-hole diameter considering the reflectance and the transmittance in each boundary surface. Even when the hole diameter on the front side is large or the hole diameter on the backside is large, the maximum displacement  $y_c$  of the associated wave in the space 1 is the same.

### (3) 環境温度変化による検査結果への影響

次に検査環境による影響を考える。微細穴境界面における入射波と反射波の合成波の変位 $y_c$ を求めた Eq. (2-17)~Eq. (2-20)は音速  $c$  を含んでいる。媒質が空気である場合における音速は、温度や湿度、気圧の影響により変化することが知られている<sup>71)</sup>。温度 $t_\theta$ と音速 $c$ の関係を表す近似式は Eq. (2-21)により与えられ、Fig. 2-20 に温度と音速の関係を示す。空気の温度が 10 °C から 20 °C に上昇した場合、音速は 1.78 % 大きくなる。  $f_s=10$  Hz にて直径 100  $\mu\text{m}$  の微細穴を検査する場合、音速が 1.78 % 大きくなると、合成波の変位 $y_c$  の最大値は Eq. (2-17)~Eq. (2-20)から穴径に換算して 0.01  $\mu\text{m}$  の変化と同等となる。

$$c = 331.5 + 0.6 t_\theta \quad (2-21)$$

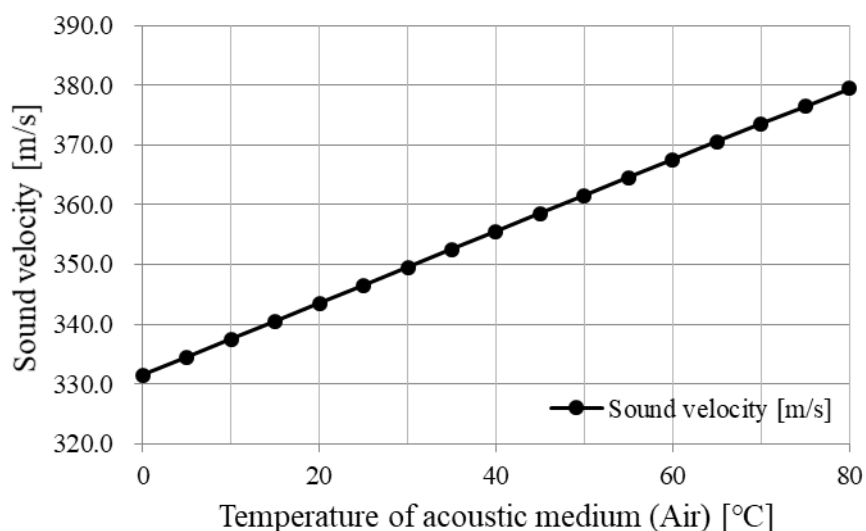


Fig. 2-20 Relationship between temperature of inspection environment and sound speed. When the temperature of the air rises from 10 °C to 20 °C, the sound velocity increases by 1.78%. When the sound speed decreases by 1.06%, in the case of  $f_s=10$  Hz, it changes by 0.006  $\mu\text{m}$  in terms of hole diameter.

#### (4) 環境湿度および気圧変化による検査結果への影響

また、湿度や気圧の変化を考慮した音速 $c'$ は Eq. (2-22)で表される。 $e$ は水蒸気圧、 $H$ は大気圧、 $\gamma_w$ は水蒸気の定圧比熱と定積比熱との比、 $\gamma$ は乾燥空気の比熱比である。温度 $t_\theta$ と飽和水蒸気圧 $e_s$ の関係は Eq. (2-23)によって近似し、水蒸気圧 $e$ と飽和水蒸気圧 $e_s$ の比である相対湿度 $\varphi$ は Eq. (2-24)により近似される<sup>72)</sup>。Eq. (2-22)~Eq. (2-24)により相対湿度 $\varphi$ と補正後の音速 $c'$ の関係を求めた結果を Fig. 2-21 に示す。ここで、空気の温度 $t_\theta=20$  °Cにおける音速は $c=343.5$  m/s とし、水蒸気の定圧比熱と定積比熱との比 $\gamma_w=1.41$ 、乾燥空気の比熱比 $\gamma=1.40$ 、気圧 $H=1013.25$  Pa で一定とした。この結果から、相対湿度が30~80%で変化した場合、音速は0.19%大きくなる。音速が0.19%大きくなると、 $f_s=10$  Hz の場合は穴径に換算して0.001  $\mu\text{m}$  の変化と同等となる。また、相対湿度が $\varphi=60$  %で一定である場合の気圧 $H$ と補正後の音速 $c'$ の関係を Fig. 2-22 に示す。気圧が200~2600 Pa で変化した場合、音速は1.06%小さくなる。音速が1.06%小さくなると、 $f_s=10$  Hz の場合は穴径に換算して0.006  $\mu\text{m}$  の変化と同等となる。

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{e}{H} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma} - 0.622 \right)}} \quad (2-22)$$

$$e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_\theta}{t_\theta+237.3}} \quad (2-23)$$

$$\varphi = \frac{e}{e_s} \times 100 \% \quad (2-24)$$

本章で提案する検査技術においては、検査環境の温度や湿度が変化するほど長い検査時間を要さないため、1 サンプルあたりの検査結果への影響は少ないが、長時間にわたり多数の試料の検査を実施する場合などには注意が必要である。よって、検査環境の温

度や湿度、気圧によって出力結果が変化することを把握した上で検査する他に、基準となる検査試料を用意しておき、基準サンプルでの検査結果に変化が無いかを確認することも必要である。

また、本検査技術は反射音を検出するマイクロホンを検査装置に内蔵していることから、試料を検査容器の上に設置するだけでよいため、検査工程の簡略化を図ることができる。特にプレス加工やドリル加工した微細穴部品を、加工現場にて簡易に検査可能な技術への応用が期待できる。

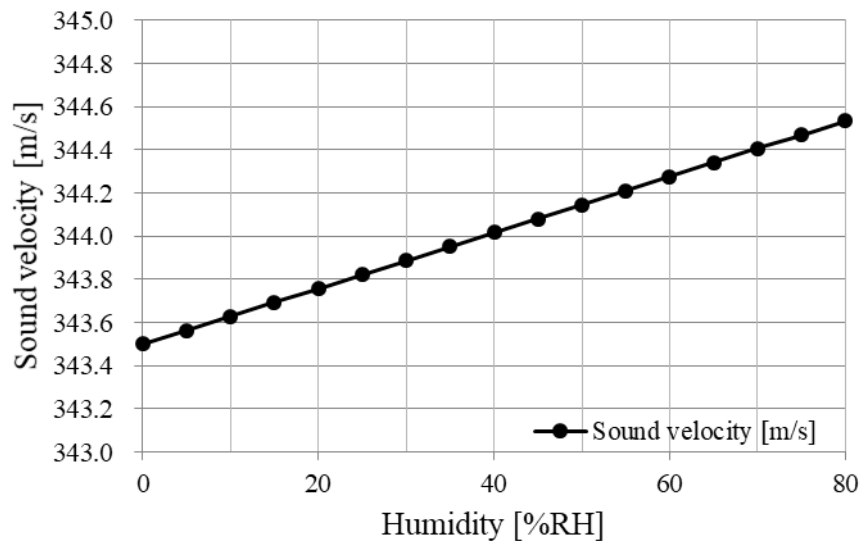


Fig. 2-21 Relationship between humidity of inspection environment and sound speed. When the relative humidity changes at 30 to 80%, the sound speed increases by 0.19%. When the sound speed increases by 0.19%, in the case of  $f_s = 10$  Hz, it changes by 0.001  $\mu\text{m}$  in terms of hole diameter.

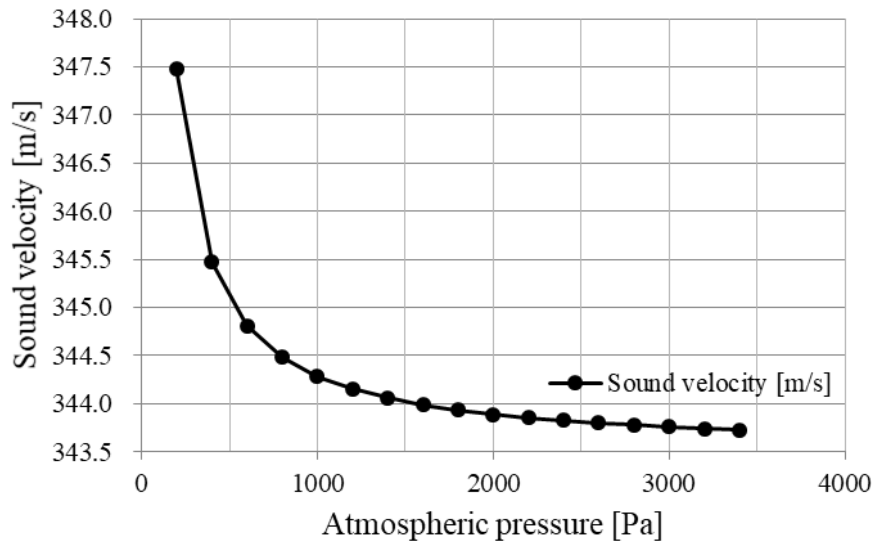


Fig. 2-22 Relationship between atmospheric pressure and sound speed. When the atmospheric pressure changes at 200 to 2,600 Pa, the sound speed decreases by 1.06%. When the sound speed decreases by 1.06%, in the case of  $f_s = 10$  Hz, it changes by 0.006  $\mu\text{m}$  in terms of hole diameter.

## 2. 6 結 言

本章では、反射波検出による微細穴検査技術を提案し、反射音を利用することでマイクロホンの出力信号と検査試料の穴径との関係を求めた。その結果によって、次に示す知見と成果を得た。

- 1) 微細穴境界面における音波の入射波および反射波の合成波の変位と、境界面での反射率と透過率を考慮した理論式により、微細穴からの反射音を計測することで微細穴径を検査できると推測した。
- 2) スピーカとマイクロホンを内蔵した検査装置によって微細穴からの反射音を検出し、薄板に加工された微細穴の穴径について、直径  $100 \pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検査できることがわかった。また、検査に使用する周波数を低くすることで検査分解能が高まることを理論式と実験結果から確認した。
- 3) スピーカ入力信号とマイクロホン計測信号の位相差からも、周波数を 10 Hz とする

ことで直径  $100 \pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検査できることがわかった。

- 4) 放電加工の影響により表面と裏面で穴径が  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  程度異なっている検査試料について、検査時の設置面を表裏で変えた場合は検査結果が変わらないことを確認した。
- 5) 微細穴境界面における合成波の変位は音速を含んでおり、音速は検査環境の温度や湿度、気圧によって変化するが、微細穴の穴径検査結果への影響は小さい。

また、本章で提案した反射波検出による微細穴検査技術は、微細穴径の検査分解能が直径  $100 \pm 1 \mu\text{m}$  であること、音波を微細穴に通過させて検査する手法であるため流体の通過流量の保証が可能なこと、マイクロホンとスピーカを検査容器に内蔵しているため、本論文で提案する検査技術の中で最も検査装置の小型化が可能なこと、高速検査が可能なことから Table 2-3 に示す特徴を有する。

Table 2-3 Performance of the inspection technology proposed in this chapter.

	Inspection resolution $100 \pm 5 \mu\text{m}$	Guarantee of flow rate	Small instrument	Inspection speed 1 sample/s
Inspection technology proposed in Chap. 2	○	○	◎	○



## 第 3 章

### 透過波検出による微細穴検査技術

## 第3章 透過波検出による微細穴検査技術

### 3.1 緒言

第1章では、プレス加工製品の一つであるガスセンサ用の微細穴部品は、センサの性能を保つために直径 100  $\mu\text{m}$  の穴に対して穴径公差を $\pm 5 \mu\text{m}$ にて管理していると述べ、第2章で提案した検査技術により直径  $100 \pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出できることを示した。この微細穴部品はガス検知体である膜-電極接合体への蒸留水を供給するために、蒸留水の蒸発量を制御する機能を有する。ガスセンサの製品寿命は蒸留水が蒸発して無くなるまでの時間となるため、製品の機能保証のためにさらに厳しい穴径公差の管理要求が生じると予測される。そこで、本章ではさらなる検査精度の向上を目的とし、透過波検出による微細穴検査技術を提案する。本章では標準マイクロホンを用いて透過音を検出し、製作した検査試料について穴径の検査を行い、直径  $100 \pm 0.1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出できることを示す。また、検査に適するスピーカの設定周波数と穴径の測定分解能との関係を明らかにするとともに、検査に要する最小時間を実験により求める。

### 3.2 検査原理

微細穴を通過する音波を検出し穴径を検査する方法として、Fig. 3-1 に示す検査方法を提案する。密閉された容器内にスピーカとマイクロホンを微細穴により隔てて配置したとき、微細穴の前後には空間1および空間2が存在する。容器内でスピーカを正弦波で駆動した場合、空間1の媒質気体が圧縮および膨張を繰り返す、音響振動である音波となり微細穴を通過する。また、微細穴を通過した音波は空間2の媒質気体を振動させてマイクロホンに伝わる。音波は微細穴を通過する際に減衰し、微細穴の穴径が変化するとマイクロホンが検出する音圧も僅かに変化する。したがって、微細穴を通過する音波をマイクロホンで検出することで、微細穴の穴径を検出することができる。本検査方法は微細穴を有する測定試料を検査容器に

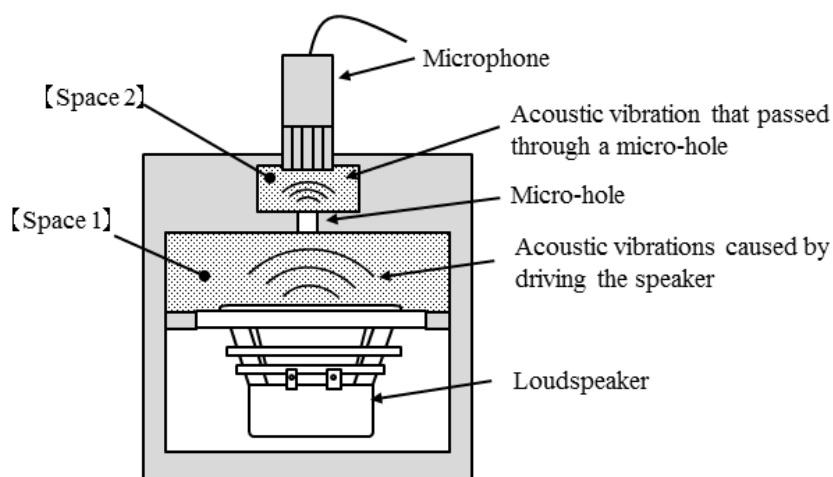


Fig. 3-1 Micro-hole inspection method.

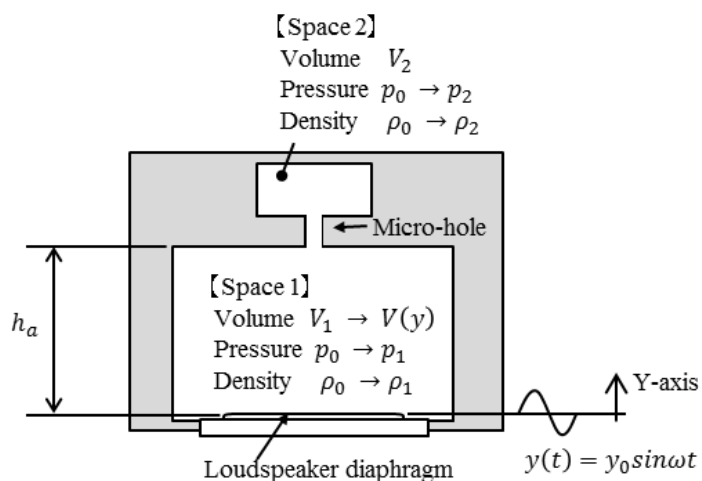


Fig. 3-2 Conceptual diagram of inspection technology.

設置し、スピーカを所定の周波数で駆動させることで、微細穴を通過する音響信号をマイクロホンにて検出し、穴径を推定するものである。

Fig. 3-2 に本検査装置における空間 1 および空間 2 の圧力変化の概念図を示す。2 つの空間を小さな絞りで結合した構造物としては空気ばねが挙げられる。空気ばねは流体の粘性を利用して重量物を支持するための減衰器であり、空気ばねの特性は絞り特性によって変化することが報告されている<sup>73)74)75)</sup>。本検査方法は空間 2 の圧力変化をマイクロホンで測定し、微細穴径によって生じる測定値差から穴径を推定する。Fig. 3-2 に示すとおり密閉された検査

容器内にスピーカが配置されており、マイクロホンと微細穴部品との間の空間 2 も密閉されている。スピーカが静止しているときの空間 1 および 2 の圧力と密度を、初期圧力 $p_0$ と初期密度 $\rho_0$ とする。この状態からスピーカを駆動し、スピーカのボイスコイルが $y(t) = y_0 \sin \omega t$ で正弦運動を始めるとき、空間 1 と空間 2 の圧力はそれぞれ $p_1$ と $p_2$ に、密度は $\rho_1$ と $\rho_2$ に変化する。2つの空間がいずれも断熱圧縮する場合、空気の状態方程式は以下のように表される。

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)^\kappa, \quad \frac{p_2}{p_0} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_0}\right)^\kappa \quad (3-1)$$

ここで、 $\kappa$  は比熱比を表し、空気の場合 $\kappa = 1.4$ である。また、空間 1 および 2 における圧力変化を $P_1$ および $P_2$ として Eq. (3-2)のように無次元化し、2つの空間内の空気の圧力がそれぞれ均一に分布すると仮定した場合、圧力差は正弦的に変化することから、Eq. (3-3)のように表現する。 $P_a$ は無次元圧力差の振幅、 $\theta_{1-2}$ は空間の圧力変化 $P_1$ および $P_2$ の位相差を表す。

$$P_1 = \frac{p_1 - p_0}{p_0}, \quad P_2 = \frac{p_2 - p_0}{p_0} \quad (3-2)$$

$$P_1 - P_2 = P_a \sin(\omega t + \theta_{1-2}) = P_a \sin \tau \quad (3-3)$$

$P_1$ および $P_2$ 、無次元圧力差 $P_1 - P_2$ は、浅見ら<sup>73)</sup>による空気ばねの特性に関する理論解析結果から、以下の式により求まる。

$$P_1 = \frac{\kappa R_1 Y_0}{N^2 + (R_1 + R_2)^2} \{NR_1 \cos 2\pi T + [N^2 + R_2(R_1 + R_2)] \sin 2\pi T\} \quad (3-4)$$

$$P_2 = \frac{\kappa R_1 R_2 Y_0}{N^2 + (R_1 + R_2)^2} \{-N \cos 2\pi T + (R_1 + R_2) \sin 2\pi T\} \quad (3-5)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\kappa N R_1 Y_0}{N^2 + (R_1 + R_2)^2} \sin(2\pi T + \theta_{1-2}) \quad (3-6)$$

ここで、スピーカのダイアフラムの面積を $A_s$ 、微細穴の面積を $A_h$ 、空間 1 の高さを $h_1$ 、2 つの空間の容積を $V_1$ および $V_2$ 、流量係数を $C_h$ とし、各空間の体積比 $R_1$  および $R_2$ 、スピーカのダイアフラムの変位 $y_0$ と空間 1 の高さ $h_1$ との比 $Y_0$ 、無次元時間 $T$ 、無次元振動数 $N_0$ による無次元量 $N$ を以下の Eq. (3-7)~Eq. (3-11)で定義する。 $b_1$  は Eq. (3-12)より計算される定数である。

$$R_1 = \frac{A_s h_1}{V_1} \quad , \quad R_2 = \frac{A_s h_1}{V_2} \quad (3-7)$$

$$Y_0 = \frac{y_0}{h_1} \quad (3-8)$$

$$T = \frac{\omega t}{2\pi} \quad (3-9)$$

$$N_0 = \frac{\omega A_s h_1}{\kappa C_h A_h} \sqrt{\frac{\rho_0}{2p_0}} \quad (3-10)$$

$$N = \frac{\sqrt{P_a}}{b_1} N_0 \quad (3-11)$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \sin \tau \sqrt{|\sin \tau|} d\tau = 1.113 \quad (3-12)$$

Eq. (3-6)から 2 つの空間内の圧力差 $P_1 - P_2$ はスピーカ駆動周波数と、微細穴の面積に

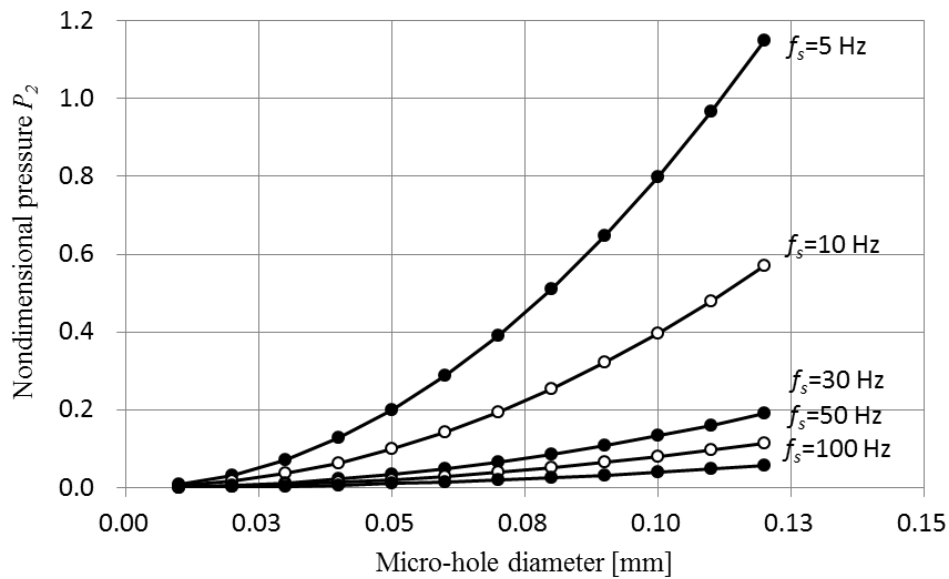


Fig. 3-3 Relationship between calculated pressure  $P_2$  and micro-hole diameter.  $P_2$  is the sound pressure change of the enclosed space on the microphone side. From this calculation result, it is possible to detect hole diameter difference by measuring sound pressure with a microphone. As the micro-hole diameter increases, the pressure change  $P_2$  also increases. When the speaker drive frequency is low, pressure change  $P_2$  is also increases.

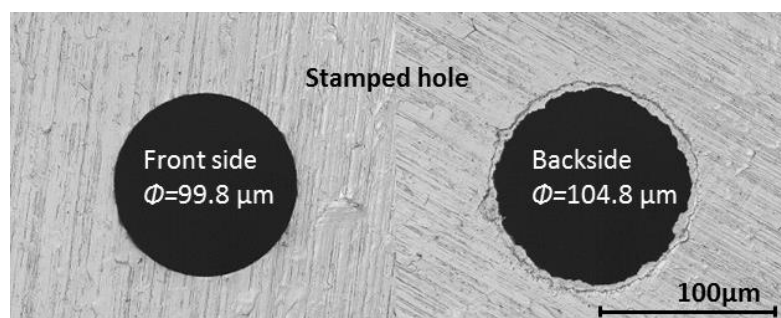
よって変化することが分かる。スピーカ駆動周波数 $f_s$ を変化させたときの、微細孔径と空間2の圧力 $P_2$  の関係を理論式Eq. (3-5)から計算し, Fig. 3-3 に示す. 各定数は  $A_s = 2200 \text{ mm}^2$ ,  $h_1 = 50 \text{ mm}$ ,  $C_h = 0.6$ ,  $V_1 = 17.5 \text{ ml}$ ,  $V_2 = 1.1 \text{ ml}$ , 微細穴の面積を $A_h$ とし, 実験で使用した検査装置の寸法と同じ値とした. Fig. 3-3 の結果から, スピーカ駆動周波数を低周波とした場合において, 空間2の圧力変化 $P_2$ が大きくなることがわかる. 後述する実験結果においても同様の傾向が得られている.

### 3. 3 穴径検査実験

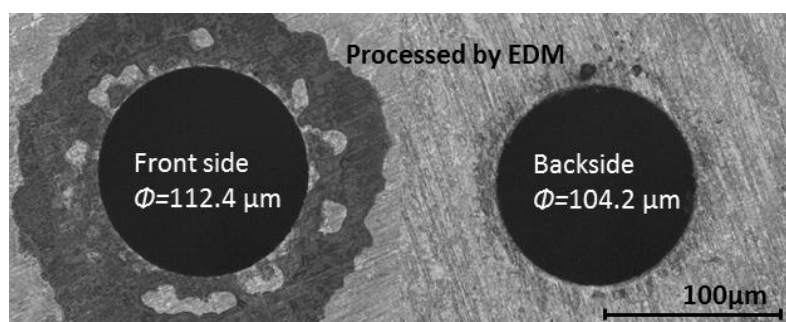
#### 3. 3. 1 検査試料

提案する検査方法の穴径検査性能を評価するため, 外径 8.5 mm, 厚さ 100  $\mu\text{m}$  のステンレス鋼板(SUS304)に, 直径およそ 50  $\mu\text{m}$  ~110  $\mu\text{m}$  の微細穴をプレス加工および超微細放電加

工機にて加工し測定試料とした。プレス加工および放電加工した微細穴の表裏面をレーザ顕微鏡で撮像した結果を Fig. 3-4 に示す。放電加工した微細穴は、その加工方法の特徴からいずれも表面が  $5\ \mu\text{m}$  程度大きく、プレス加工した微細穴は裏面が  $5\ \mu\text{m}$  程度大きい。プレス加工した微細穴断面形状は、ダレ・せん断面・破断面・バリと4層構造となり平滑にはならず、バリの影響から裏面の穴径が大きくなる傾向にある。放電加工した微細穴は加工中における加工電極の消耗などにより、プレス加工した試料とは反対にテーパ状に表面穴径が大きくなる。加工した穴径を非接触三次元測定装置(NH-3, Mitaka Kohki Co. Ltd)にて測定した。微細穴の最小二乗近似円により直径を測定した結果を Table 3-1 に示す。第2章の実験結果から、表裏面の穴径については計測結果に差が無かったことから、本章においてはいずれの測定試料においても、表裏面の平均穴径を試料穴径とした。



(a) Metal stamping hole



(b) Micro-hole processed by EDM

Fig. 3-4 Results of imaging the front side and backside surfaces of the micro-holes with a laser microscope. There is a difference in hole diameter between the front side and the backside caused by the processing method.

Table 3-1 Micro-hole test sample diameter.

Processing method	Front side diameter	Backside diameter	Average diameter
	$d_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{\text{avg}}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Metal stamping	99.8	104.8	102.3
	112.4	104.2	108.3
	104.8	100.6	102.7
	101.2	96.0	98.6
Electrical discharge machining	97.6	90.0	93.8
	94.2	88.4	91.3
	79.0	74.2	76.6
	72.4	67.8	70.1
	60.6	56.2	58.4
	48.2	45.6	46.9

### 3. 3. 2 検査装置

実験に使用した検査システムの外観写真を Fig. 3-5 に示す。検査システムは、円筒状の検査容器、信号分析器(SA-01A4, RION Co. Ltd), ファンクションジェネレータ(WF1946B, NF Co. Ltd)で構成される。検査容器にはスピーカと標準コンデンサマイクロホンが設置されている。円筒状の検査容器は卓上タイプであり、全高 150 mm 程度の大きさである。

微細穴検査システムの概要図を Fig. 3-6 に示す。検査容器内の底部にスピーカを配置し、容器上部に穴径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴部品を固定するとともに、微細穴部品の上部には標準マイクロホンを配置した。測定試料は標準マイクロホンと検査容器の間に設置する。

測定試料は音響信号が漏れないよう、微細穴の円周に沿って均一に荷重負荷する治具を介して固定する。また、スピーカと標準マイクロホンと微細穴の軸中心が一致するよう、測定試料は軸中心から $\pm 0.25\text{mm}$  以内に治具により位置決めされている。スピーカおよび標準マイクロホンの性能をそれぞれ Table 3-2 と Table 3-3 に示す。標準マイクロホンはピストンホンによって音圧レベルを校正し実験に使用した。標準マイクロホンが検出した信号をプリアン



プによって増幅し，信号分析器にて計測する．信号分析器はマイクロホンが検出した音響信号の音圧レベルを電圧信号として計測する．ファンクションジェネレータは正弦波の電圧信号をスピーカに入力し，スピーカは電圧信号を物理的な音響振動に変換する．スピーカへの入力信号の周波数 $f_s$ は，150 Hz 以下の低周波域を使用することとし， $f_s = 5 \sim 150$  Hz と変化させて実験した．そのため，容器内に配置したスピーカは極低周波からの出力が可能なサブウーファとした．また，スピーカへの入力信号の電圧は，スピーカや標準マイクロホンの入出力定格値を超えない範囲で設定する必要があるため，5 V とした．なお，実験中における測定室の温度は $21 \pm 3^\circ\text{C}$ であった．



Fig. 3-5 Micro-hole inspection system. The inspection system consists of a cylindrical inspection container, a signal analyzer(SA-01A4, RION Co. Ltd) and a function generator (WF1946B, NF Co. Ltd). Loud speaker is installed inside the metal inspection container. The cylindrical inspection container is about 150 mm in height.

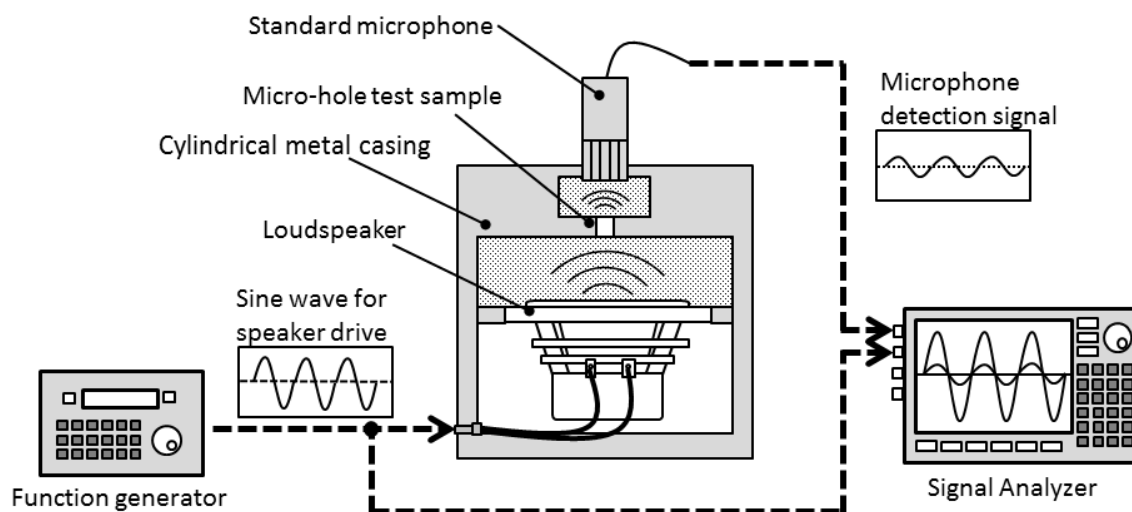


Fig. 3-6 Inspection system configuration. A signal detected by a standard microphone is amplified by a preamplifier and measured by a signal analyzer. The signal analyzer measures the sound pressure level of the acoustic signal detected by the microphone as a voltage signal.

Table 3-2 Loud speaker specifications.

Size	2-3/4 inch
Impedance	8 $\Omega$
Sensitivity(average SPL in range 400 - 1kHz)	79.5 dB
Frequency band	5 - 4k Hz
Power handling continuous	10 W

Table 3-3 Microphone specifications.

Size	1 inch
Frequency Response	Sound pressure
Sensitivity(dB re 1V/Pa at 1kHz)	-27 dB
Temperature coefficient	-0.008 dB/ $^{\circ}$ C
Frequency band	5 Hz - 9k Hz

### 3. 4 実験結果

#### 3. 4. 1 測定波形

微細穴を通過する音響信号により穴径を検出できるか確認するため、スピーカに入力した

電圧とマイクロホンが検出した電圧の2つの電圧波形を測定した。代表例として、スピーカに入力する交流電圧信号の周波数を $f_s = 10 \text{ Hz}$ とし、放電加工により加工された穴径 $d_{\text{avg}} = 46.9 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{avg}} = 70.1 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{avg}} = 93.8 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{avg}} = 108.3 \mu\text{m}$ の測定試料を検査した際の電圧波形をそれぞれ Fig. 3-7 (a)~(d)に示す。Fig. 3-7 (a)の穴径 $d_{\text{avg}} = 46.9 \mu\text{m}$ の試料を測定した結果と比較すると、Fig. 3-7(d)の $d_{\text{avg}} = 108.3 \mu\text{m}$ の試料を測定した結果は、マイクロホンが検出した最大電圧 $V_m$ がおよそ10倍であった。このことから、穴径が大きくなると穴を通過する流

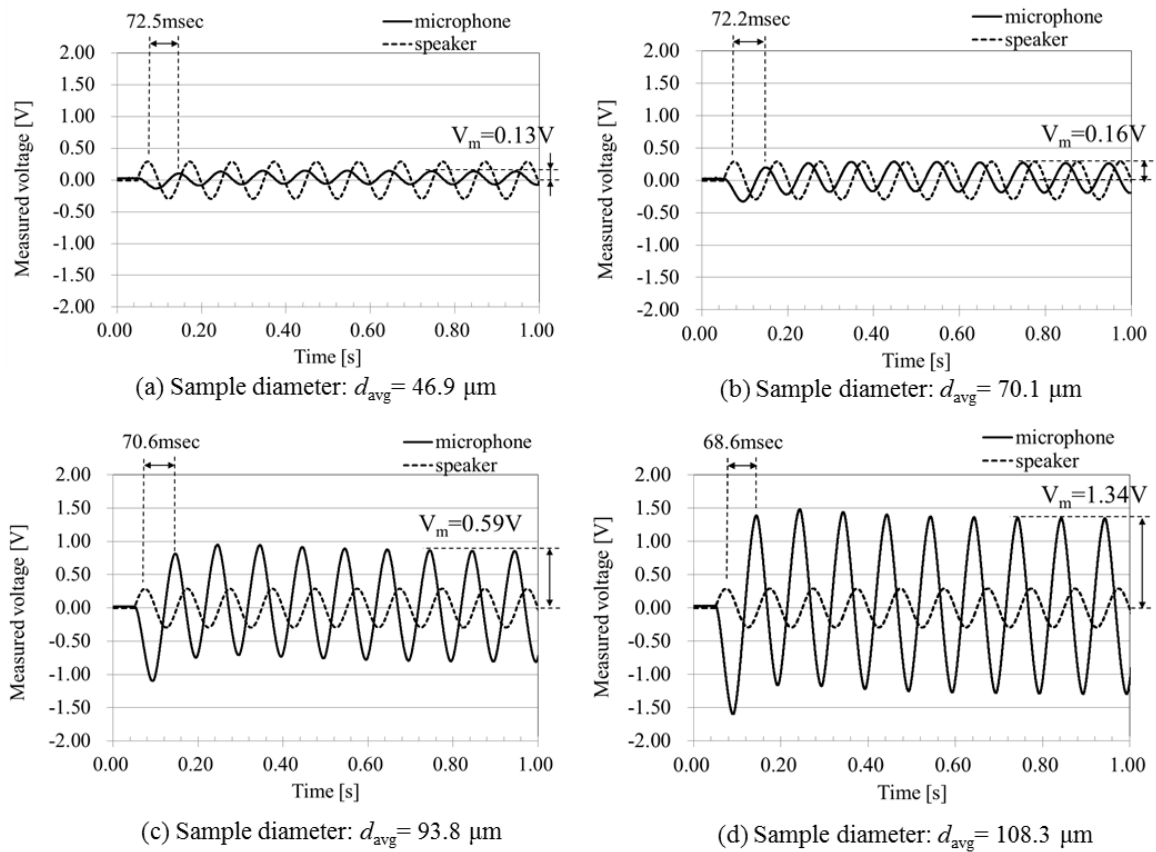


Fig. 3-7 Speaker input voltage and microphone detect voltage ( $f_s=10 \text{ Hz}$ ). Comparing the results of (a)  $d_{\text{avg}}=46.9 \mu\text{m}$  and (d)  $d_{\text{avg}}=108.3 \mu\text{m}$ , the maximum voltage  $V_m$  detected by the microphone was about 10 times. On the other hand, with respect to the time difference between the input waveform to the speaker and the detection waveform of the microphone, the time difference between the two signals become shorter as the hole diameter increases.

量が増えることから、マイクロホンが検出する音響信号の電圧  $V_m$  も大きくなることがわかる。一方で、スピーカへの入力波形とマイクロホンの検出波形の時間差は、穴径が大きくなるごとに、2つの波形の時間差が短くなることがわかった。次節にて電圧値や時間差についてまとめる。

### 3. 4. 2 周波数変化による穴径の検出感度

検査に使用する周波数  $f_s$  による穴径の検出感度への影響を確認するため、スピーカに入力する電圧信号を  $f_s = 5 \sim 150 \text{ Hz}$  と変化させた。マイクロホンが検出する電圧は交流信号であるが、実効値  $V_{\text{rms}}$  を求めることで直流電圧として扱うことができ、周波数  $f_s$  の違いによる結果を比較しやすくなる。電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  は最大電圧  $V_m$  から Eq. (3-13) により求めた。

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (3-13)$$

Fig. 3-8 は微細穴を通過した音響信号をマイクロホンにて検出したときの電圧信号の実効値  $V_{\text{rms}}$  を示す。Fig. 3-8 の縦軸は電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  を、横軸は測定試料の穴径  $d_{\text{avg}}$  を示す。いずれの周波数  $f_s$  とも試料穴径が大きくなると、マイクロホンが検出する電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  も増加するが、低周波である場合に実効値の変化量が多くなっている。測定試料の中で最小の穴径を持つ試料と、最大穴径の試料との実効値差は、 $f_s=150 \text{ Hz}$  においては  $V_{\text{rms}}=74 \text{ mV}$  であるが、 $f_s=5 \text{ Hz}$  では  $V_{\text{rms}}=1.44 \text{ V}$  であった。この結果から、検査に使用するスピーカの周波数  $f_s$  を低周波とすると、測定試料の穴径を検出する分解能が向上することがわかった。

また、スピーカへ入力した電圧波形と、マイクロホンが検出した電圧波形が、それぞれ最大電圧を記録する時間差  $\Delta t$  [s] から位相差  $\theta$  [deg.] を求めた結果を Fig. 3-9 に示す。Fig. 3-9 の縦軸は2つの波形の位相差  $\theta$  を、横軸は測定試料の穴径  $d_{\text{avg}}$  を示す。スピーカに入力する周波数  $f_s$  の周期を  $T_s$  とし Eq. (3-14) により位相差を求めた。

$$\theta = 360 \cdot \frac{\Delta t}{T_s} \quad (3-14)$$

Fig. 3-7(a)~(d)の結果から、測定試料の穴径が大きくなると2つの波形の時間差は短くなることが示されていたが、Fig. 3-9の結果から周波数 $f_s$ を低くした場合において位相差の変化量が大きくなることがわかった。 $f_s=150$  Hzとした場合は測定試料の穴径による位相差 $\theta$ の変化を取得できていないが、 $f_s=5$  Hzとした場合は、最小穴径と最大穴径の試料を測定した際の位相差 $\theta$ はおよそ 28 deg.となった。この結果からも、検査に使用する周波数 $f_s$ を低周波とすると、測定試料の穴径を検出する分解能が向上することがわかった。また、Fig. 3-8およびFig. 3-9に示すとおり、微細放電加工機により穴加工した測定試料と、プレス加工により微細穴を打ち抜いた測定試料は、穴断面形状は異なるが穴径が同じ試料においてはマイクロホンが検出した電圧の実効値 $V_{rms}$ と位相差 $\theta$ はともに良く一致している。

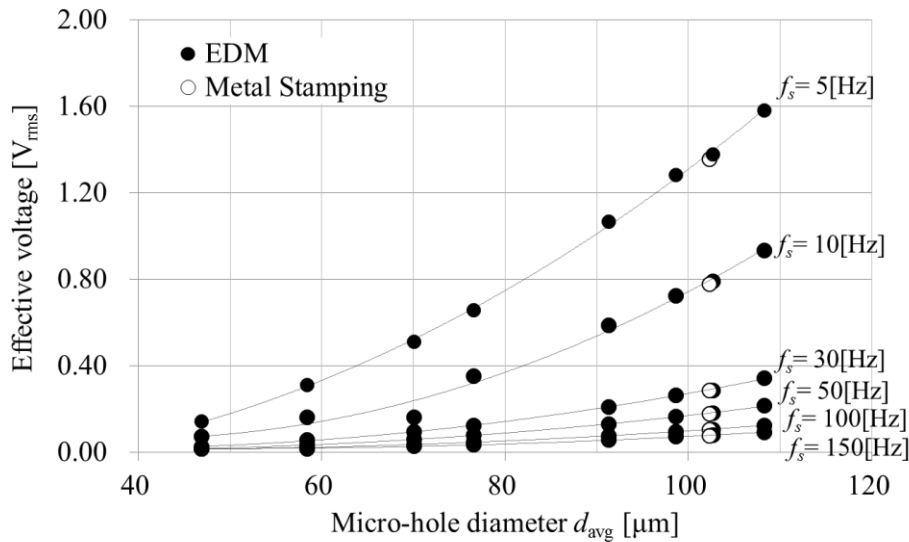


Fig. 3-8 Effective voltage of microphone detect voltage. The horizontal axis of the graph shows the micro-hole diameter, and the vertical axis shows the effective voltage  $V_{rms}$  measured by the microphone. When the sample hole diameter increases, also increases the effective voltage  $V_{rms}$ . In particular, when the frequency is low, the amount of change in the effective voltage increases. The measurement results of electric discharge machined hole and metal stamping hole are consistent.

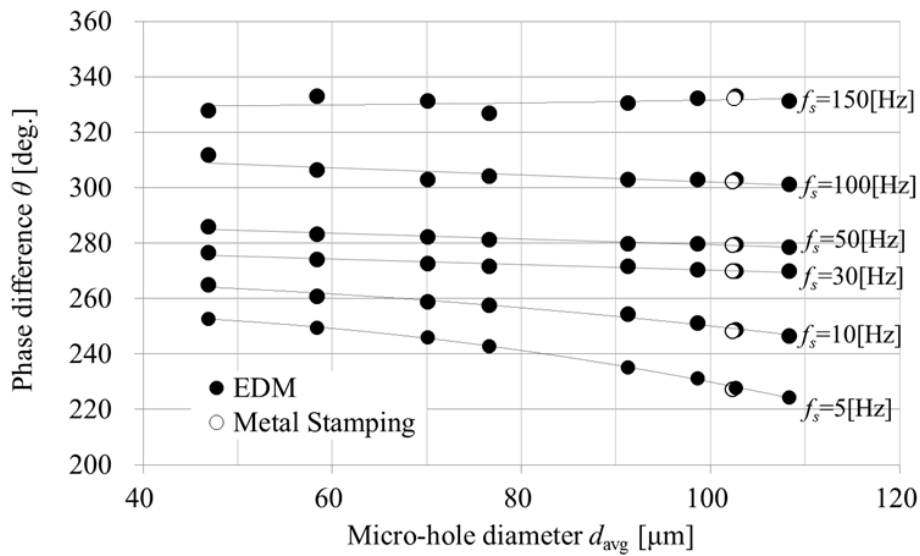


Fig. 3-9 This graph shows the phase difference between the voltage waveform input to the speaker and the voltage waveform detected by the microphone. It was shown that the phase difference decreases as the hole diameter of the sample increases.

### 3. 4. 3 検査時間

Fig. 3-7(a)~(d)におけるマイクロホンの検出電圧値は、測定開始から数周期が経過するまで安定しないことが示されている。そこで、マイクロホンが検出する電圧の実効値と位相差が安定するまでの測定周期  $T_s$  を求めた。検出電圧値と位相差が安定する測定周期  $T_s$  を求めることで、検査システムが微細穴を検査するために必要な最小時間を求めることができる。

マイクロホンが検出した 20 周期分の電圧実効値の平均値  $V_{avg}$  と、周期  $T_s$  ごとの電圧実効値  $V_{rms}$  との電圧差  $V_{dif} = V_{avg} - V_{rms}$  を Fig. 3-10(a)~(d)に示す。Fig. 3-10 の縦軸は電圧差  $V_{dif}$  を、横軸は測定周期  $T_s$  を示す。Fig. 3-10(a)に示す、穴径  $d_{avg} = 46.9 \mu\text{m}$  の測定試料では、 $T_s \leq 4$  においては電圧差  $V_{dif}$  が大きいですが、 $T_s \geq 5$  においてはいずれの周波数でも電圧差  $V_{dif}$  は  $\pm 50 \text{ mV}$  以内に低くなっている。Fig. 3-10(b)~(d)については、 $T_s \geq 4$  においては電圧差  $V_{dif}$  は  $\pm 10 \text{ mV}$  以内に低くなることがわかった。

また、スピーカへ入力した電圧波形と、マイクロホンが検出した電圧波形の 20 周期分の

位相差  $\theta_{\text{avg}}$  と、周期  $T_s$  ごとの位相差  $\theta$  との差  $\theta_{\text{dif}} = \theta_{\text{avg}} - \theta$  を Fig. 3-11 (a)~(d)に示す。Fig. 3-11 の縦軸は位相差  $\theta_{\text{dif}}$  を、横軸は測定周期  $T_s$  を示す。  $T_s \geq 5$  においてはいずれの穴径および周波数でも位相差  $\theta_{\text{dif}}$  は  $\pm 0.02 \text{ deg}$ . 内に低くなることから、測定周期  $T_s$  が  $T_s = 4 \sim 5$  以降にて安定した測定電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  および位相差  $\theta$  を測定できることが示された。

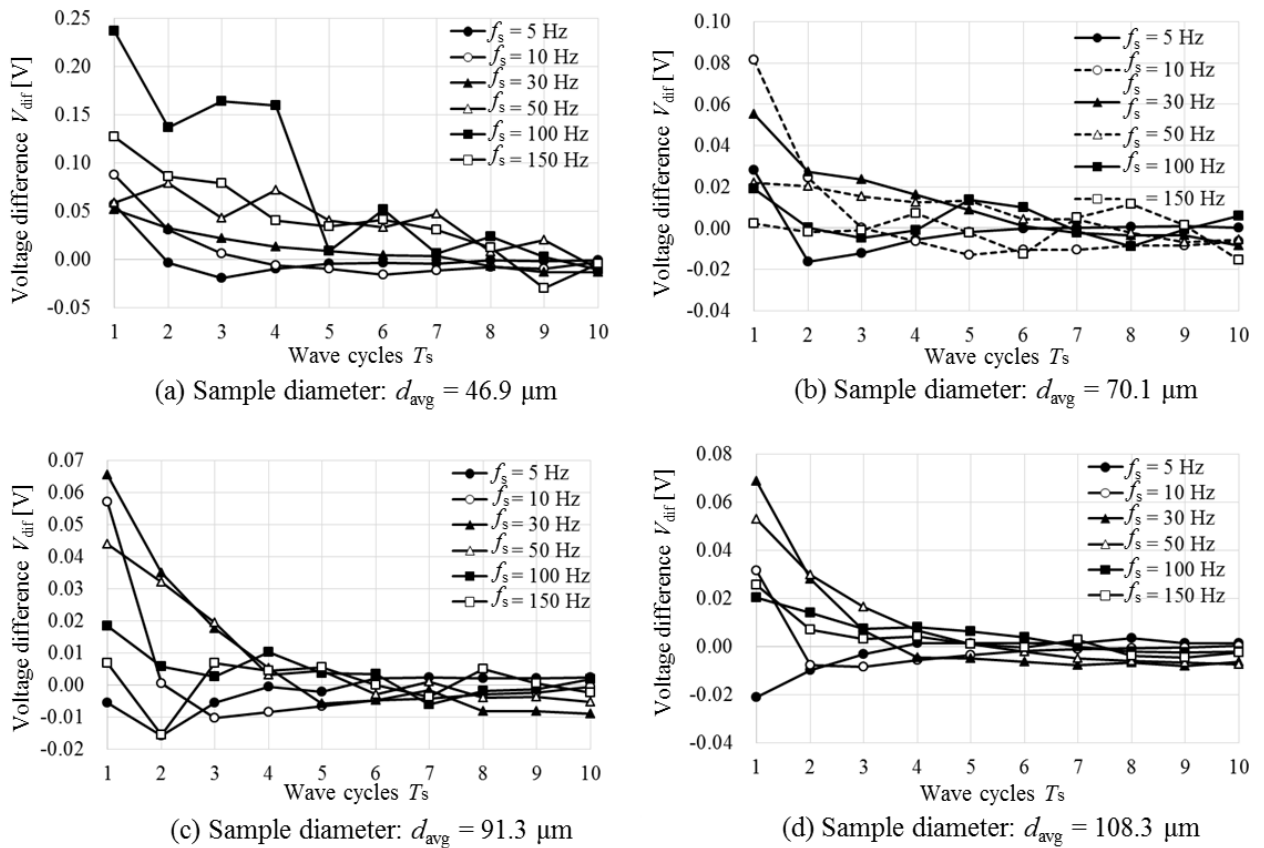


Fig. 3-10 Deviation of effective voltage from the average of 20 cycles. The vertical axis shows the voltage difference  $V_{\text{dif}}$  from the average value for 20 cycles, and the horizontal axis shows the measurement cycle  $T_s$ . Fig. 3-10 (a) shows the voltage difference  $V_{\text{dif}}$  falling within  $\pm 50 \text{ mV}$  at any frequency, if it is after  $T_s = 5$  cycles. The other results show that the voltage difference  $V_{\text{dif}}$  decreases to within  $\pm 10 \text{ mV}$  at  $T_s \geq 4$  cycles.

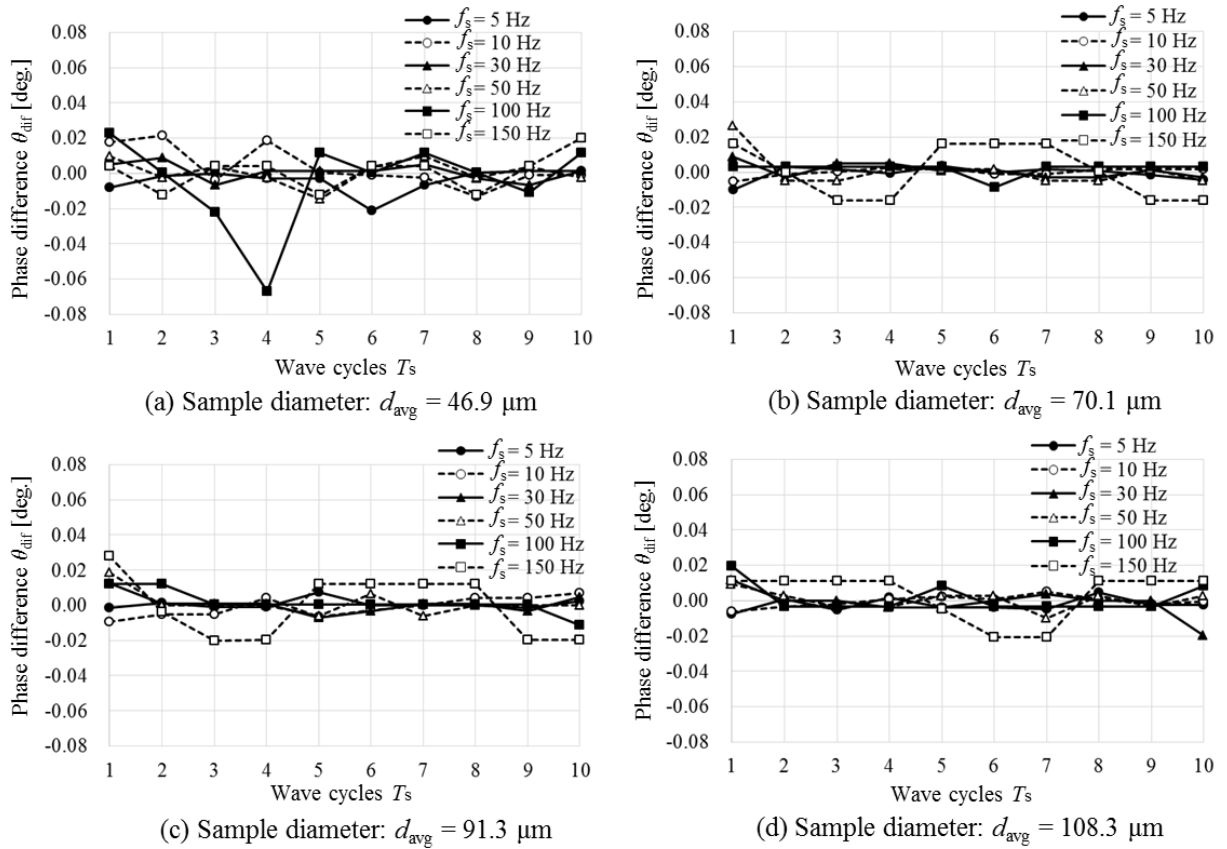


Fig. 3-11 Deviation of phase difference from the average of 20 cycles. The vertical axis shows the phase difference  $\theta_{dif}$  from the average value for 20 cycles, and the horizontal axis shows the measurement cycle  $T_s$ . Fig. 3-11 (a) shows the voltage difference  $V_{dif}$  falling within  $\pm 50$  mV at any frequency, if it is after  $T_s = 5$  cycles. The other results show that the phase difference  $\theta_{dif}$  decreases to within  $\pm 0.02$  deg. at  $T_s \geq 4$  cycles.

次に、全ての測定試料を検査した際の、20周期分の電圧実効値の標準偏差を Table 3-4 に示す。全ての周波数において電圧実効値は最大でおよそ 10 mV の標準偏差がある。Table 3-5 は  $T_s = 5 \sim 20$  周期までの 16 周期分の電圧実効値の標準偏差を示す。 $T_s = 1 \sim 4$  周期の電圧実効値を除くことで、標準偏差は最大でもおよそ 2 mV と小さくなることがわかった。

マイクロホンが計測する電圧実効値  $V_{rms}$  と穴径  $d_{avg}$  の関係を示した Fig. 3-8 の結果から、測定に使用する周波数を  $f_s = 5$  Hz とすると、直径  $d_{avg} = 102.7 \mu\text{m}$  の微細穴を検査した場合は電圧実効値  $V_{rms} = 1.38$  V、直径  $d_{avg} = 108.3 \mu\text{m}$  の微細穴を検査した結果は  $V_{rms} = 1.58$  V であり、



穴径  $1\ \mu\text{m}$  あたりの電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  変化量は  $36.6\ \text{mV}$  であった。計測した電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  の周期  $T_s$  ごとのばらつきを示した Table 3-5 の結果から、 $T_s=1\sim 4$  の電圧実効値を除くことで、標準偏差は最大でもおよそ  $2\ \text{mV}$  と少なくなることがわかった。そのため、5 周期以降の電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  を検査値として採用することで  $0.05\ \mu\text{m}$  の穴径差を検出できることが示されたことから、少なくとも  $0.1\ \mu\text{m}$  の穴径差を検出することができる。

また、1~20 周期分の電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  の標準偏差  $\sigma_v$  と平均値  $V_{\text{avg}}$  から Eq. (3-15) により求めた変動係数  $C.V.$  を Table 3-6 に、5~20 周期までの変動係数  $C.V.$  を Table 3-7 に示す。

$$C.V. = \frac{\sigma_v}{V_{\text{avg}}} \quad (3-15)$$

変動係数は標準偏差を平均値で割った値であるため、平均値に対するデータとばらつきの関係を相対的に評価する際に用いる。Fig. 3-8 の結果から、検査に使用する周波数によって検査分解能が変わることが示されていたが、周波数によって測定電圧の大きさも異なっている。したがって、検査結果のばらつきを評価するためには測定電圧の平均値を考慮する必要があるため変動係数を求めた。Table 3-6 および Table 3-7 の結果からも、1~4 周期の電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  を除くことで変動係数が小さくなることがわかった。また、使用する周波数  $f_s$  が低周波の場合に変動係数も小さくなる傾向が得られた。

Table 3-4 Standard deviation of effective voltages (1-20cycles).

Standard deviation mV		Speaker input frequency $f_s$ [Hz]					
		5	10	30	50	100	150
Sample diameter $d_{eng}$ $\mu\text{m}$	46.9	2.06	1.71	0.47	0.86	1.57	1.07
	58.4	3.68	3.41	1.00	0.49	0.36	0.26
	70.1	4.24	3.41	1.80	0.67	0.30	0.23
	76.6	4.29	6.36	2.82	1.24	0.71	1.32
	91.3	4.91	8.29	4.13	2.04	0.59	0.36
	98.6	6.46	8.49	5.02	2.65	0.67	0.44
	102.7	8.14	5.50	2.86	0.78	0.57	0.00
	108.3	9.45	7.58	6.39	3.53	0.99	0.67
<b>Maximum</b>		<b>9.45</b>	<b>8.49</b>	<b>6.39</b>	<b>3.53</b>	<b>1.57</b>	<b>1.32</b>

Table 3-5 Standard deviation of effective voltages (5-20cycles).

Standard deviation mV		Speaker input frequency $f_s$ [Hz]					
		5	10	30	50	100	150
Sample diameter $d_{eng}$ $\mu\text{m}$	46.9	0.29	0.24	0.19	0.73	0.86	0.71
	58.4	0.72	0.50	0.29	0.37	0.31	0.26
	70.1	0.38	0.50	0.77	0.42	0.28	0.25
	76.6	0.43	0.83	1.09	0.68	0.68	1.33
	91.3	1.21	0.92	0.52	0.64	0.45	0.29
	98.6	1.62	0.92	0.45	0.65	0.41	0.31
	102.7	1.83	0.38	0.73	0.44	0.32	0.00
	108.3	1.79	0.88	0.60	0.64	0.51	0.26
<b>Maximum</b>		<b>1.83</b>	<b>0.92</b>	<b>1.09</b>	<b>0.73</b>	<b>0.86</b>	<b>1.33</b>

Table 3-6 Coefficient of variation (1-20cycles).

$C.V.\times 10^{-3}$	Speaker input frequency $f_s$ [Hz]						
	5	10	30	50	100	150	
Sample diameter $d_{eng}$ $\mu\text{m}$	46.9	14.5	23.3	18.3	51.2	107.3	57.3
	58.4	11.8	21.1	17.9	13.8	16.4	15.5
	70.1	8.3	21.1	19.1	11.4	8.4	8.4
	76.6	6.5	18.1	22.7	15.9	15.1	38.8
	91.3	4.6	14.1	19.7	15.5	7.6	6.3
	98.6	5.0	11.7	19.2	16.2	7.0	6.2
	102.7	5.9	7.0	10.0	4.3	5.4	0.0
	108.3	6.0	8.1	18.6	16.5	7.9	7.2
<b>Average</b>	<b>7.8</b>	<b>15.6</b>	<b>18.2</b>	<b>18.1</b>	<b>21.9</b>	<b>17.5</b>	

Table 3-7 Coefficient of variation (5-20cycles).

$C.V.\times 10^{-3}$	Speaker input frequency $f_s$ [Hz]						
	5	10	30	50	100	150	
Sample diameter $d_{eng}$ $\mu\text{m}$	46.9	2.0	3.3	7.5	43.4	58.4	38.3
	58.4	2.3	3.1	5.2	10.5	14.4	15.3
	70.1	0.7	3.1	8.1	7.1	7.8	9.3
	76.6	0.7	2.4	8.8	8.7	14.6	38.9
	91.3	1.1	1.6	2.5	4.9	5.7	5.2
	98.6	1.3	1.3	1.7	4.0	4.2	4.3
	102.7	1.3	0.5	2.5	2.5	3.0	0.0
	108.3	1.1	0.9	1.8	3.0	4.1	2.7
<b>Average</b>	<b>1.3</b>	<b>2.0</b>	<b>4.8</b>	<b>10.5</b>	<b>14.0</b>	<b>14.2</b>	

同様に全ての測定試料を検査した際の、20周期分の位相差 $\theta$ の標準偏差を Table 3-8 に示す。最大でおよそ 6 deg.の標準偏差がある。Table 3-9 は  $T_s=5\sim 20$  周期までの 16 周期分の位相差の標準偏差を示す。電圧実効値での結果とは異なり、 $T_s=1\sim 4$  周期の位相差を除いても標準偏差の違いが無いことが示された。

Table 3-8 Standard deviation of phase differences (1-20cycles).

Standard deviation		Speaker input frequency $f_s$ [Hz]					
		5	10	30	50	100	150
Sample diameter $d_{avg}$ $\mu\text{m}$	deg.						
	46.9	1.70	3.04	1.36	2.30	3.49	3.33
	58.4	0.83	1.80	1.32	1.75	1.65	5.24
	70.1	0.98	0.64	1.11	2.68	1.12	4.98
	76.6	1.08	0.96	3.27	1.75	1.85	3.32
	91.3	0.63	1.46	1.41	2.00	1.99	5.99
	98.6	0.91	0.51	1.31	1.54	1.66	6.31
	102.7	0.89	1.93	1.12	1.62	3.08	4.85
108.3	0.84	0.79	2.11	1.48	2.45	4.48	
<b>Maximum</b>		<b>1.70</b>	<b>3.04</b>	<b>3.27</b>	<b>2.68</b>	<b>3.49</b>	<b>6.31</b>

Table 3-9 Standard deviation of phase differences (5-20cycles).

Standard deviation		Speaker input frequency $f_s$ [Hz]					
		5	10	30	50	100	150
Sample diameter $d_{avg}$ $\mu\text{m}$	deg.						
	46.9	2.42	1.38	1.20	1.76	2.94	3.71
	58.4	1.07	1.52	0.95	1.47	1.57	5.28
	70.1	0.56	0.39	0.58	0.96	1.58	5.28
	76.6	1.51	1.32	0.94	1.47	1.92	0.01
	91.3	0.31	0.98	0.88	1.25	1.58	5.78
	98.6	0.15	0.39	0.47	1.47	1.57	5.77
	102.7	1.03	1.62	0.00	1.48	1.58	4.71
108.3	0.84	0.66	2.52	1.57	1.57	5.78	
<b>Maximum</b>		<b>2.42</b>	<b>1.62</b>	<b>2.52</b>	<b>1.76</b>	<b>2.94</b>	<b>5.78</b>

スピーカへの入力信号とマイクロホンの計測信号の位相差  $\theta$  と穴径  $d_{avg}$  の関係を示した Fig. 3-9 の結果は、測定に使用する周波数を  $f_s = 5$  Hz とすると、直径  $d_{avg} = 102.7 \mu\text{m}$  の微細穴を検査した場合は  $\theta = 227.7$  deg. であり、直径  $d_{avg} = 108.3 \mu\text{m}$  の微細穴を検査した場合は  $\theta = 224.2$  deg. であることから、穴径  $1 \mu\text{m}$  あたりの位相差  $\theta$  の変化量は  $0.61$  deg. であった。計測した位相差  $\theta$  の周期  $T_s$  ごとのばらつきを示した Table 3-9 の結果から周波数  $f_s = 5 \sim 100$  Hz の範囲内における計測結果の標準偏差は  $3$  deg. であることから、穴径差  $d_{avg} = 5 \mu\text{m}$  に相当する

値となった。この結果から、位相差  $\theta$  よりも電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  を測定するほうが穴径検査の分解能が高いことがわかった。実用的な側面からも2つの信号の位相差を計測するよりも、マイクロホンの計測する電圧実効値のみ測定するほうが簡易な検査方法といえる。

### 3. 4. 4 テーパの影響

各測定試料は表裏面の穴径が異なっているが、それぞれ上向き・下向きに設置して測定した場合に、テーパの影響が測定値に現れるかを実験した。Fig. 3-12 はプレス加工した測定試料および放電加工した測定試料をそれぞれ上向き・下向きに設置して、周波数 10 Hz にて測定したときの電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  を示す。サンプルの穴断面形状は Fig. 3-4 や Table 3-1 が示す通り、放電加工品は表面が数  $\mu\text{m}$  大きく、プレス加工品は裏面が数  $\mu\text{m}$  大きい。したがって、上向き・下向きに設置した際に測定した電圧実効値に有意差は検出されなかった。

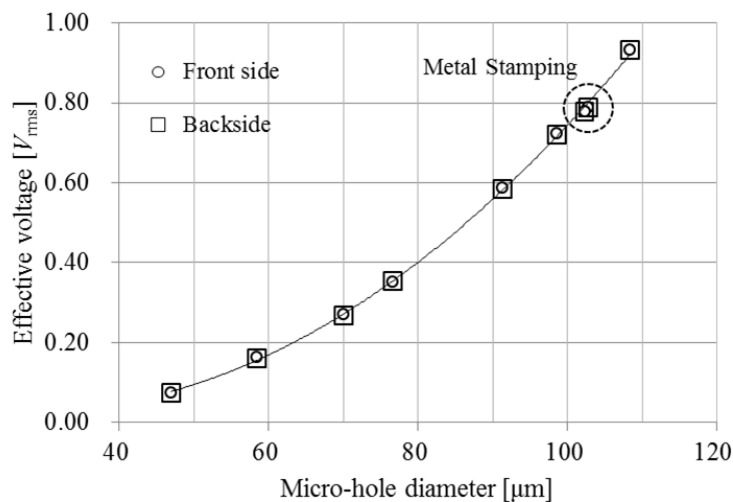


Fig. 3-12 This graph shows the results of measurements by placing samples with different hole diameters on the front side and backside faces upwards and downwards. ( $f_s = 10$  Hz) Electric discharge machined products are several micrometers larger on the surface, metal stamped hole are several micrometers larger on the back side. No significant difference was detected in the effective voltage when installed upward and downward.

薄板部品において表裏面の穴径差が数  $\mu\text{m}$  の範囲においては測定値に影響が無く，加工現場にて検査する際には，部品の表裏面管理は不要となることがわかった。

### 3. 4. 5 穴深さの影響

微細穴の穴深さが異なる場合に，測定値にどのように影響するかを実験した。測定試料として穴径が  $0.29\text{ mm}$  一定，穴深さが  $0.34\text{ mm}$  から  $1.56\text{ mm}$  まで異なる穴をドリル加工し用意した。穴径と穴深さのアスペクト比はおよそ 1 から 5 である。Fig. 3-13 に試料を測定した際の電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  と加工穴のアスペクト比の関係を示す。測定に使用したスピーカの周波数は  $10\text{ Hz}$  とした。アスペクト比が大きくなると測定電圧の実効値が低くなることから，本検査方法は穴径だけでなく穴深さに対しても測定値は影響を受けることがわかった。

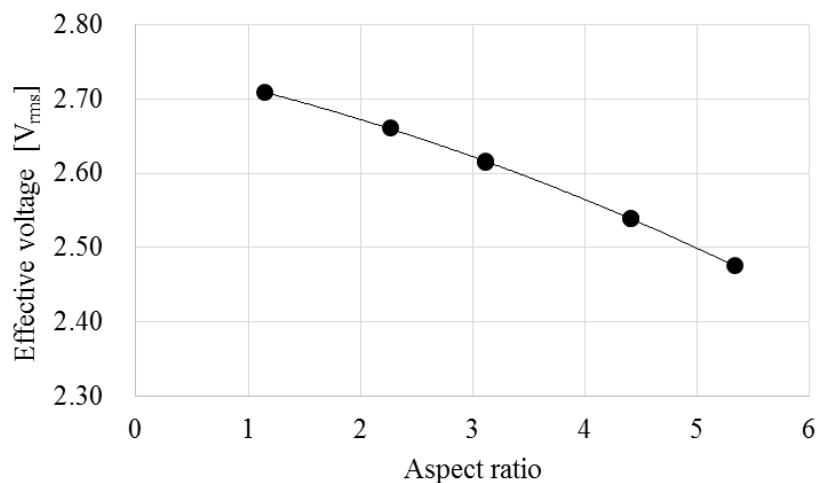


Fig. 3-13 Effects of micro-hole aspect ratio. The hole diameter of the test sample is constant at  $0.29\text{ mm}$ . The hole depth varies from  $0.34\text{ mm}$  to  $1.56\text{ mm}$ . The inspection frequency was  $10\text{ Hz}$ . The aspect ratio of hole diameter and hole depth is about 1 to 5. As the aspect ratio increases, the effective voltage decreases. In this inspection method, the measured value is affected not only for the hole diameter but also for the hole depth.

### 3.5 考察

本章で提案した検査技術は、微細穴からの透過音を標準マイクロホンによって検出し、穴径に応じたマイクロホンの検出信号の大小によって穴径を推測するものである。Fig. 3-8 の検査実験結果および、マイクロホン信号電圧値が安定化する検査周期を求め、 $T_s = 5$  周期以降の信号電圧値の標準偏差を示した Table 3-5 から、本章で提案した検査技術は  $100 \pm 0.1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出可能であることが示された。したがって、第2章で提案した微細穴検査技術の検査分解能を向上することができ、さらに CO ガスセンサ用の微細穴部品の検査要求精度が高まった場合にも、十分検査対応が可能である。

#### (1) 検査時間

検査時間については、電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  の周期  $T_s$  ごとのばらつきを示した Table 3-5 の結果から、 $T_s=5$  以上であれば安定した結果が得られるため、 $f_s=100 \text{ Hz}$  の場合においては、1 周期  $0.01 \text{ s}$  の検出波形を 5 周期分測定すれば良いことから、 $0.05 \text{ s}$  ごとの検査時間となる。 $f_s=5 \text{ Hz}$  の場合においては、1 周期  $0.2 \text{ s}$  であるため  $1.0 \text{ s}$  ごとの検査時間を要することとなる。マイクロホン計測電圧の実効値の周期ごとの標準偏差を示した Table 3-5 と、変動係数を示した Table 3-7 から、検査に使用する周波数域が低周波であるほど検査分解能が向上することが示されているが、安定した測定結果を得るためには、低周波ほど検査に時間を要する。直径  $100 \mu\text{m}$  の微細穴を検査した際における検査分解能は、 $f_s=5 \text{ Hz}$  の場合は  $100 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 、 $f_s=100 \text{ Hz}$  の場合は  $100 \pm 0.27 \mu\text{m}$  である。そのため、検査対象となる微細穴の穴径をどの程度の精度で保証する必要があるか、または要求される検査時間によって使用する周波数域を選択する必要がある。

#### (2) 穴深さの検出

検査対象部品の穴深さの影響を調べた Fig. 3-13 の結果から、直径  $0.29 \text{ mm}$  の測定試料においては、穴深さが大きくアスペクト比が高くなると、マイクロホンが検出する電圧値が低下することが示された。穴深さ  $0.34 \text{ mm}$  から  $1.56 \text{ mm}$  の範囲内においては、マイクロホンの

計測電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  は 233 mV 変化することから、穴深さ 1 mm あたりの変化量は 191 mV である。また、Table 3-1 に示した微細穴検査試料は圧延材を用いて加工しており、板厚は 100  $\mu\text{m}$  である。前述のマイクロホンが計測する電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  と穴径  $d_{\text{avg}}$  の関係を示した Fig. 3-8 の結果から、測定に使用する周波数を  $f_s=5$  Hz とし、直径  $d_{\text{avg}}=102.7\sim 108.3$   $\mu\text{m}$  の微細穴を検査した場合の穴径 1  $\mu\text{m}$  あたりの電圧実効値  $V_{\text{rms}}$  変化量はおよそ 16 mV であった。板厚が 1  $\mu\text{m}$  変化した際の計測電圧値の変化は 0.191 mV であるため、穴径では  $d_{\text{avg}}=0.012$   $\mu\text{m}$  に相当する変化量である。プレス加工に用いられる圧延材料は、板厚が大きく変化することは少ないが、例えば板厚が  $\pm 1$   $\mu\text{m}$  の範囲内で管理されている材料を使用した場合は、穴深さが  $\pm 1$   $\mu\text{m}$  変化することとなるため、穴径検査結果には  $d_{\text{avg}}=0.012$   $\mu\text{m}$  の誤差を含んでいることを把握しておく必要がある。

### (3) マイクロホンの温度特性による検査結果への影響

本章で提案する検査技術は、Fig. 3-1 に示すような微細穴前後の連結された 2 つの空間の圧力差から微細穴径を推測するものである。微細穴を通過した音を計測するマイクロホンは、仕様を示した Table 3-3 から、温度変化によって  $-0.008$  dB/ $^{\circ}\text{C}$  の感度変化がある。マイクロホンの検出波形を示した Fig. 3-7 の結果から、検査試料の穴径が  $d_{\text{avg}}=93.8$   $\mu\text{m}$  での計測電圧の最大値は  $V_m=0.59$  V、穴径が  $d_{\text{avg}}=108.3$   $\mu\text{m}$  での計測電圧の最大値は  $V_m=1.34$  V であった。このときの計測電圧の変化量を式(3-16)によりデシベル値  $L_A$  にすると  $L_A=3.56$  dB である。したがって、穴径 1  $\mu\text{m}$  あたりのデシベル変化は  $0.25$  dB/ $\mu\text{m}$  となる。

$$L_A = 10 \log_{10} \frac{V}{V_0} \quad (3-16)$$

穴径が  $d_{\text{avg}}=93.8$   $\mu\text{m} \sim d_{\text{avg}}=108.3$   $\mu\text{m}$  の範囲内における計測電圧のデシベル値  $L_A=3.56$  dB と、温度によるマイクロホンの感度変化  $-0.008$  dB/ $^{\circ}\text{C}$  から、気温が  $1$   $^{\circ}\text{C}$  変化した際におけるマイクロホンの出力値を、微細穴の穴径に換算すると  $0.033$   $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$  となる。本検査方法は



100±0.13 μm の穴径差の検出が可能との結果を得ているが、温度変化によって 0.033 μm/°C の影響を受けてしまうことは、検査結果の信頼性の面からも無視できる値ではない。このことから、検査対象の穴径を厳しく管理する必要がある場合には、測定環境の温度を一定に保つことや、測定環境の情報を検査システムへフィードバックするなどの工夫が必要となる。

#### (4) 本検査技術が適する検査環境

本検査技術は標準マイクロホンと検査容器との間に検査試料を挟み込む方式であるため、検査試料の交換時にはマイクロホンの上下動作が必要となる。標準マイクロホンは振動や衝撃などの物理的負荷を避けねばならない精密機器であるため慎重に検査を実施する必要がある。検査に要する時間は計測信号の安定化する時間から求めたが、マイクロホンの上下動の時間は含んでいない。そのため、プレス加工工程におけるインライン全数検査システムよりも、振動などの影響が少なく温度環境が整った検査室などでのオフライン検査運用に適していると考えられる。

#### (5) 穴形状の検査について

実験で使用したプレス加工穴は、Fig. 3-4 に示すとおりバリが発生していることや、放電加工穴についても Table 3-1 から表裏面で穴径が数 μm 異なるなど、微細穴が完全な円筒形状では無いことが示されている。しかし、Fig. 3-8 の結果から、プレス加工と放電加工した微細穴で、表裏の平均穴径がおおよそ  $d_{\text{avg}} = 102 \mu\text{m}$  で同じサンプルでは、いずれも測定値に大きな差異は確認できない。Eq. (3-6)からも、微細穴前後の圧力差は穴面積と相関関係にあるため、本検査方法は穴径の違いによって生じる通過流量の変化は検出できるが、穴形状の検査はできない。しかし、流量制御を目的とした微細穴部品を検査する際に、単純な表裏面の直径を検査するだけでなく、実際に音響信号を通過するのみで部品の良不良、特に穴内部の閉塞やリーク量など、部品の機能保障を実現できることは大きな利点がある検査方法といえる。

### 3.6 結 言

本章では、透過波検出による微細穴検査技術を提案し、検査に適するスピーカの設定周波数と、穴径の測定分解能との関係を求めた。また、検査に要する最小時間を実験により求めた。これらの結果によって、次に示す知見と成果を得た。

- 1) 透過波を検出および比較することによる微細穴検査方法を提案した。微細穴を通過した音響信号をマイクロホンで検出するシステムを構築することで、微細穴径の高精度且つ高速な非破壊検査が可能となった。
- 2) 実験結果から、マイクロホンが検出した測定電圧の実効値  $V_{\text{rms}}$  により、微細穴の穴径を推測できることがわかった。また、スピーカへの入力信号とマイクロホンの検出信号の 2 つの信号波形の時間差からも微細穴の穴径を推測できる可能性を示した。
- 3) 検査に使用する周波数域を可能な限り低周波とすることで検査分解能が向上し、測定値のばらつきも減少することがわかった。周波数を 5 Hz とした場合、穴径 100  $\mu\text{m}$  に対して 0.1  $\mu\text{m}$  の穴径差を検出できる。
- 4) マイクロホンが検出する電圧実効値が安定する周期を実験により明らかにした。周波数を 5 Hz に設定した場合、安定した検査結果を取得するために必要な時間は 1 s となる。

また、本章で提案した透過波検出による微細穴検査技術は、本論文で提案する検査技術の中で検査分解能が高く、微細穴径の検査分解能が直径  $100 \pm 0.1 \mu\text{m}$  であること、音波を微細穴に通過させて検査する手法であるため流体の通過流量の保証が可能なこと、高速検査が可能なことから Table 3-10 に示す特徴を有する。検査装置のサイズについては、低周波の音圧を精度良く計測するために、口径の大きな標準マイクロホンマイクロホンを使用していることから、本論文で提案する検査技術の中で最も装置サイズが大きい。

Table 3-10 Performance of the inspection technology proposed in this chapter.

	Inspection resolution $100 \pm 5 \mu\text{m}$	Guarantee of flow rate	Small instrument	Inspection speed 1 sample/s
Inspection technology proposed in Chap. 3	◎	○	△	○

## 第 4 章

### ヘルムホルツ共鳴利用による微細穴検査技術

## 第4章 ヘルムホルツ共鳴利用による微細穴検査技術

### 4.1 緒言

第2章で提案した微細穴からの反射音を利用した検査技術では、直径  $100 \pm 1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出できることを示し、第3章ではさらなる検査精度の向上を目的とし、直径  $100 \pm 0.1 \mu\text{m}$  の穴径差を検出可能な透過音を利用した検査技術を提案した。これらの2つの検査技術は、微細穴からの反射音や微細穴の透過音をマイクロホンのダイアフラムで受波する方式であるため、検査対象の微細穴部品とマイクロホンを同軸上に配置する必要がある。したがって装置構造が制限されることや、受波面であるマイクロホンのダイアフラムの外径より外側に配置される微細穴の検査は難しいことが予測される。

そこで、本章では検査容器の開口部に微細穴部品を配置することで、ヘルムホルツ共鳴周波数が変化する現象を利用し、マイクロホンを同軸上に配置せずとも穴径を検査する手法について提案する。ヘルムホルツ共鳴器は、開口部を有する容器の内部にある空気がばねとしての役割を果たし、共鳴することで音を発する装置であり、共鳴周波数は容器の容積と開口端の形状によって変化することが示されている<sup>76)77)78)79)</sup>。また、ヘルムホルツ共鳴を利用した物理量の計測手法として、体積計測や液量計測への応用が報告されている<sup>60)-64)</sup>。本章では微細穴部品を配置した容器内の音を標準マイクロホンにより計測し、共鳴周波数を求めることで穴径を検査できることを示す。

### 4.2 検査原理

#### 4.2.1 ヘルムホルツ共鳴周波数

ヘルムホルツ共鳴器は Fig. 4-1 に示すように開口部を有する容器であり、開口部から周波数掃引した音波を与えると、容器の容積や開口部の形状に応じた周波数にて共鳴を

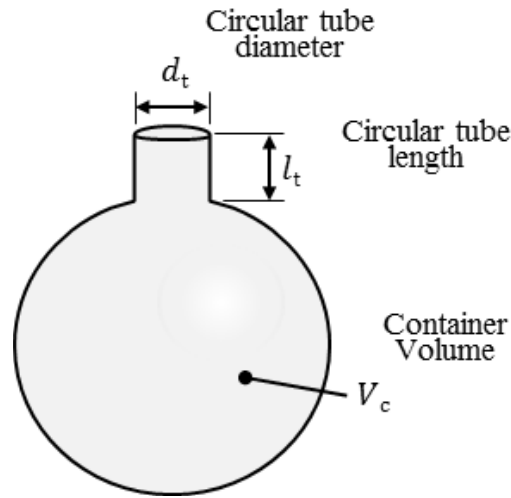


Fig. 4-1 Schematic diagram of the Helmholtz resonance container.

生じる。ヘルムホルツ共鳴は開口部で音波が激しく出入りすることで、音のエネルギーが熱のエネルギーに変換され消散するものであり、この特徴を利用して防音壁やファンモータの騒音抑制に応用した例が報告されている<sup>80)81)82)</sup>。

ヘルムホルツ容器の容積を  $V_c$  [mm<sup>3</sup>] , 円筒管の直径を  $d_t$  [mm] , 円筒管の長さを  $l_t$  [mm] , 開口部の形状に依存する開口端補正量を  $l_s$  [mm] , 音速を  $c$  [m/s] とすると共鳴周波数  $f_r$  [Hz] は Eq. (4-1) で表される。開口端補正量は円管端でのバッフルの有無などの状態に応じて多くの提案があるが<sup>83)</sup> , ここではバッフルがある円管端と仮定し, Eq. (4-2) にて補正する。

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d_t^2}{(l_t + l_s) V_c}} \quad (4-1)$$

$$l_s = 0.85 \times \frac{d_t}{2} \quad (4-2)$$

ヘルムホルツ共鳴器の容器を円筒形状とし、容器直径を 60.0 mm、容器高さを 65.0 mm、

音速を 340.3 m/s とすると，開口部の円筒管形状と共鳴周波数の関係は Eq. (4-1)から

Fig. 4-2 のようになる．

Fig. 4-2 は円筒管長さ $l_t$ を 0.5 mm 一定とし，円筒管内径 $d_t$ を 0.1 mm から 6.0 mm まで変えた場合と，円筒管内径 $d_t$ を 0.5 mm 一定とし，円筒管長さ $l_t$ を 0.1 mm から 6.0 mm まで変えた場合について共鳴周波数を計算した結果を示す．例えば，円筒管直径 $d_t$ が 3.0 mm，円筒管長さ $l_t$ が 0.5 mm の場合の共鳴周波数  $f_r$  は 216 Hz であった．

Fig. 4-2 より円筒管の直径と長さによって共鳴周波数が増加することが示されており，開口部の円筒管を微細穴部品に置き換えて共鳴周波数を求めることにより，微細穴部品の穴径や穴深さを検査できることが推測できる．

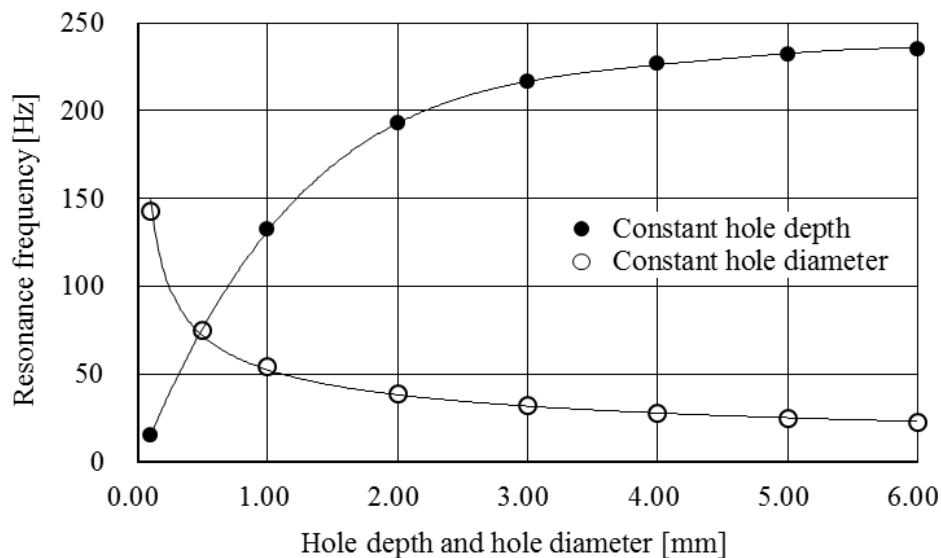


Fig. 4-2 Relationship between resonance frequency and hole depth or hole diameter. The resonance frequency was obtained from eq. (4-1) and eq. (4-2). From the theoretical formula, it can be predicted that the resonance frequency lowers as the hole diameter increases. Then, it can be predicted that the resonance frequency becomes higher as the hole depth increases.

#### 4. 2. 2 ヘルムホルツ共鳴器の音波解析

次に、有限要素解析ソフトウェア femtet を用いてヘルムホルツ共鳴器を音波解析し、共鳴器内部の音圧レベルの分布と共鳴周波数を確認した。Fig. 4-3 に示すような軸対称の円筒形状容器のモデルを解析ソフトウェア上に作成し、容器底面から 1 Hz ～10 kHz までの周波数掃引した音波を出力するよう設定した。容器内部の空間と開口部の空間、さらに開口部の上部空間を解析領域に設定し、音波が開口部を通過し大気解放する境界

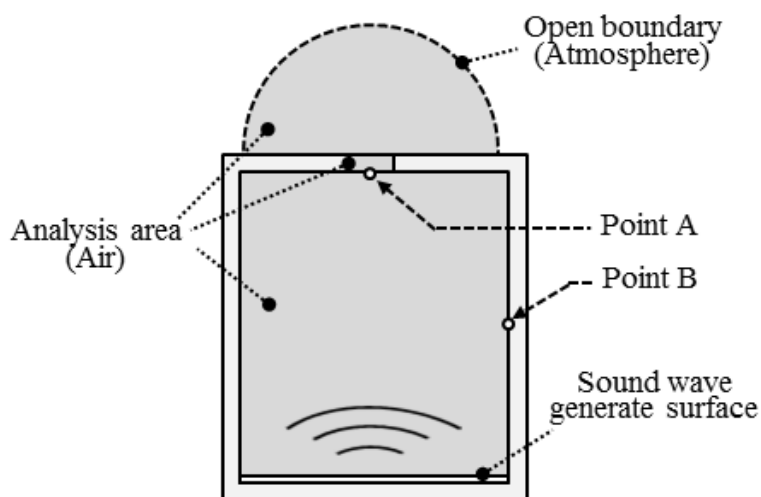


Fig. 4-3 Sound wave simulation model and evaluation points. Analysis point A was set near the micro- hole and analysis point B was set on the side of the test container.

Table 4-1 Analysis setting items.

Setting items	Setting value
Inner diameter of container	60.0 mm
Inner height of container	65.0 mm
Diameter of the opening	3.0 mm
Depth of the opening	0.5 mm
Sound velocity	340.3 m/s
Sweep frequency	1 – 10,000 Hz
Analysis step	400 steps
Number of elements	100,000
Element shapes	Delaunay triangulation
Element decomposition	Unequal division



条件を設定した。容器形状や開口部形状などの解析条件を Table 4-1 に示す。

音波解析にて容器内における音波の周波数と音圧レベルの最大値を求めた結果を Fig. 4-4 に示す。結果を数値出力するポイントを開口部付近の Point A および容器側面の Point B の 2 か所(Fig. 4-3)に設定し、音圧レベルの最大値をプロットした。周波数範囲 1 Hz ~ 10 kHz においてピーク周波数 $f_1 \sim f_4$ が確認でき、最も低い周波数 $f_1$ は Eq. (4-1)で求めた値 216 Hz に近い 210 Hz であり、4 つのピーク周波数は共鳴周波数であることと、解析結果が妥当であることを確認した。 $f_2 \sim f_4$ は $f_1$ の高次の共鳴周波数と推測される。

共鳴周波数 $f_1 \sim f_4$ における、ヘルムホルツ容器内の音圧レベルの分布を Fig. 4-5 に等値線図にて示す。等値線図は Fig. 4-3 に示した解析領域の右半分のみを表示しているが、音波解析の精度向上と計算負荷低減を目的として軸対称モデルで解析したためである。Fig. 4-4 と Fig. 4-5 の音波解析結果から、音波の計測点の違いによって共鳴周波数 $f_1 \sim f_4$ は影響されないが、数値出力ポイントの違いによって音圧レベルに差が生じることを確認した。

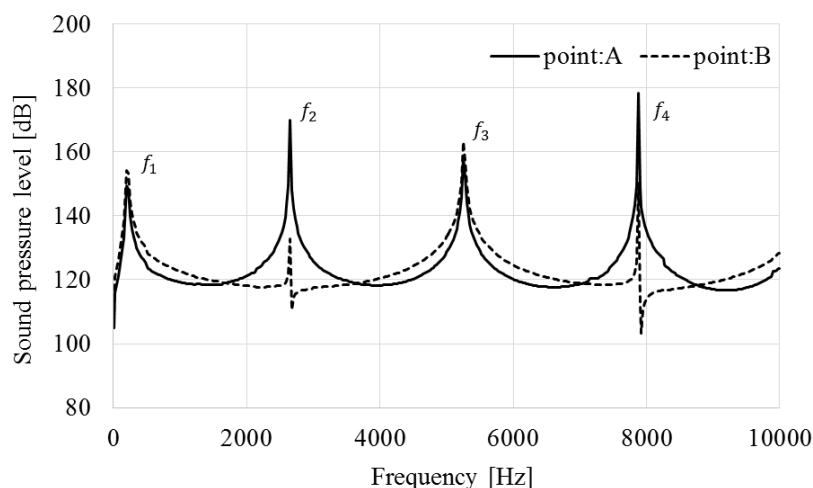


Fig. 4-4 Sound wave analysis results of the resonance frequency. Multiple peaks of resonance frequency are generated. The resonance frequency was the same between point A near the micro- hole and point B on the side of the test container. The resonance frequency  $f_1$  obtained by sound analysis is 216 Hz, roughly coinciding with the theoretical value of 210 Hz.

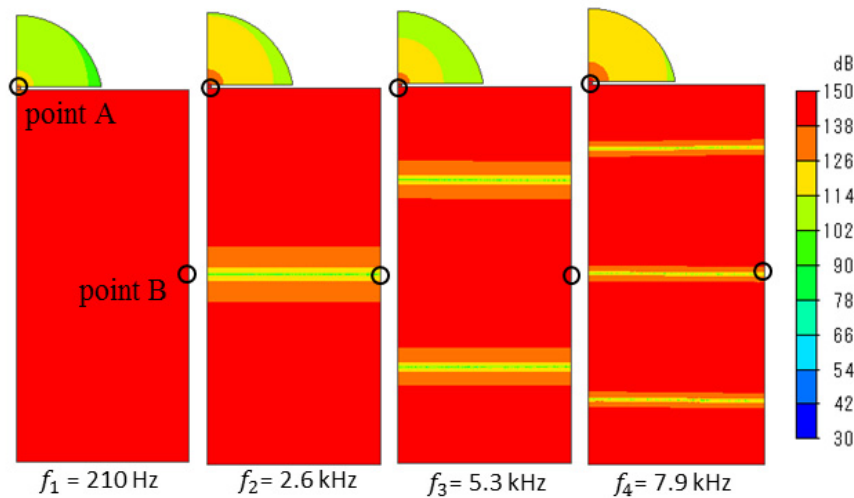


Fig. 4-5 Contour plot of sound pressure level. Since it was analyzed by the axisymmetric model, it displays only the right half range.

### 4. 3 穴径検査実験

#### 4. 3. 1 検査装置

ヘルムホルツ共鳴を利用した微小穴検査実験のための装置概要を Fig. 4-6 に示す。また、Fig. 4-7 に信号発生器や音響分析装置を含む、検査装置の外観を示す。検査容器の内部に低周波から 10 kHz までの出力に対応したスピーカを内蔵し、音波解析モデルの Point B と同じ場所である検査容器の側面にコンデンサ型標準マイクロホンを挿入した。微細穴を加工した検査試料は検査容器の上部に配置し、上蓋にて検査容器に密閉固定する。標準マイクロホンの外径は 30.0 mm、検査容器内部の高さはおおよそ 65.0 mm、検査容器の内径は 60.0 mm であり、Fig. 4-3 で示した音波解析領域と検査容器の容積を同一とした。信号発生器で 1 Hz ~ 10 kHz の周波数掃引した信号をスピーカに与えることで、検査容器内には掃引周波数に応じた音波が発生する。周波数掃引時間は 15 s とした。検査試料の穴径によって変化する音響信号を検査容器側面に配置した標準マイクロホンで検出し、検出信号を音響分析器にて高速フーリエ変換(FFT)することで共鳴周波数を求め、検査試料穴径の違いを確認した。

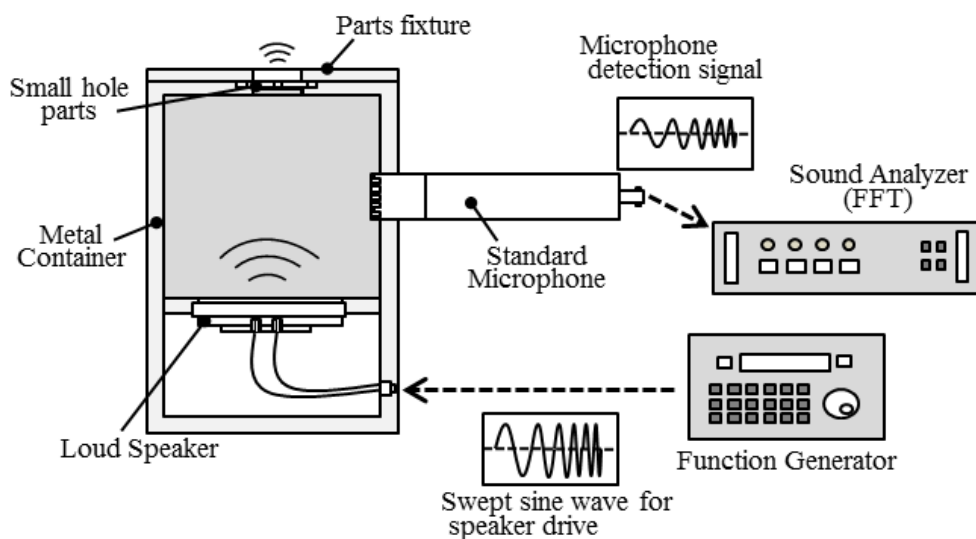


Fig. 4-6 Configuration of the inspection system and the structure of the inspection container.

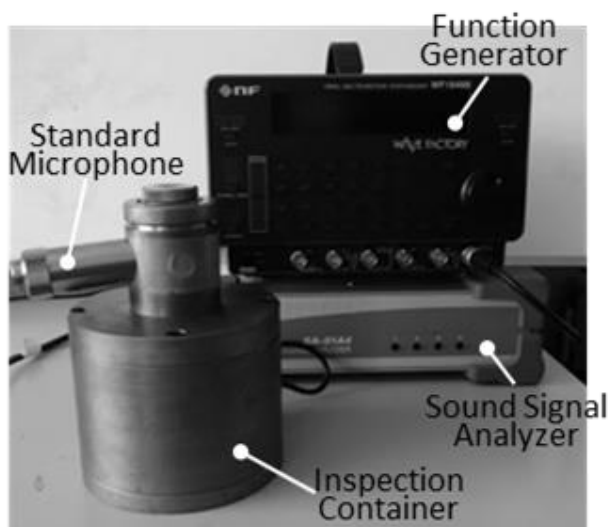
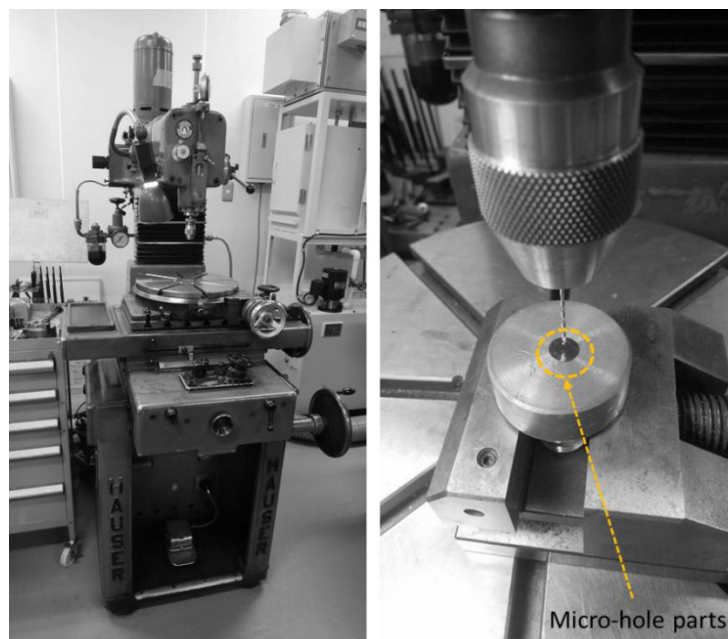


Fig. 4-7 Appearance of micro-hole inspection system using Helmholtz resonance.

#### 4. 3. 2 検査試料

検査装置で穴径を検査するため、Fig. 4-8 に示す治具ボーラや微細放電加工機を使用し、穴径  $d$  の異なる検査試料を作製した。治具ボーラによる精密なドリル加工では、直径およそ  $d = 0.5 \text{ mm}$  から  $d = 2.0 \text{ mm}$  まで穴径を変え、放電加工では直径およそ  $d = 50 \mu\text{m}$

から  $d = 110 \mu\text{m}$  まで穴径を変えた微細穴を加工した。検査試料の材料はいずれも厚さ  $100 \mu\text{m}$  の SUS304 金属板である。Fig. 4-9 に検査試料の表面の顕微鏡画像を、Table 4-2 に検査試料の穴径  $d$  を示す。治具ボーラによるドリル加工穴についてはデジタルマイクロスコープにて穴径  $d$  を測定し、放電加工穴についてはレーザ式の三次元表面形状測定機にて測定した。



(a) Machine appearance

(b) State of drilling

Fig. 4-8 Processing of micro-hole inspection sample by jig borer.

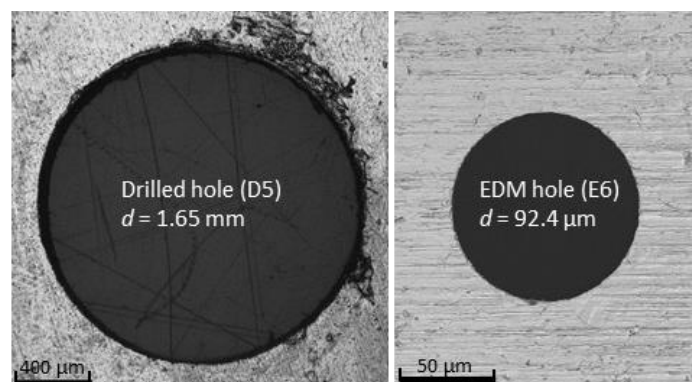


Fig. 4-9 Test sample of drilled hole and electric discharge hole.

Table 4-2 Hole diameter of inspection sample.

Sample No	Processing Method	Hole diameter $d$ [ $\mu\text{m}$ ]
E1	EDM	44.2
E2		56.8
E3		68.4
E4		74.0
E5		88.4
E6		92.4
E7		100.2
E8		107.6
D1	Drilling	507.0
D2		756.3
D3		994.1
D4		1354.6
D5		1651.6
D6		2009.6

#### 4. 4 実験結果

##### 4. 4. 1 穴径 0.5 mm～2.0 mm の微細穴の検査実験

治具ボーラにてドリル加工した微細穴検査試料  $d = 507.0 \mu\text{m} \sim 2009.6 \mu\text{m}$  を検査し共鳴周波数を実験により求めた. 検査試料 D1 ( $d=507.0 \mu\text{m}$ ) を検査し, 信号発生器で 1 Hz ～10 kHz の信号を 15 秒間で周波数掃引し, マイクロホンが計測した信号を Fig. 4-10 に示す. また, 共鳴周波数を求めるためマイクロホンが計測した信号を高速フーリエ変換 (FFT) し, 10 回の移動平均により平滑化した結果を Fig. 4-11 に示す. この結果から, 音波解析結果と同様に複数の共鳴周波数を生じることを確認した.

Fig. 4-12～Fig. 4-14 は各検査試料における共鳴周波数  $f_1 \sim f_3$  の FFT 結果を示している. 検査試料の穴径ごとに共鳴周波数が増加することで, FFT 分析波形が穴径に応じてシフトするように変化していることが確認できる. また, Fig. 4-15～Fig. 4-17 は各検査試料の共鳴周波数と検査試料の穴径との関係を示している. 検査試料の穴径と共鳴周波数との間に非線形の相関関係があることを確認した.

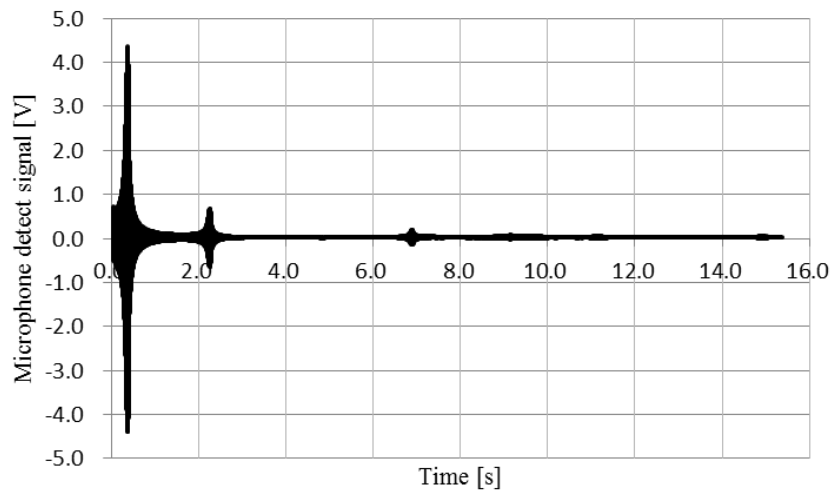


Fig. 4-10 Microphone detection signal by frequency sweep ( $d = 507.0 \mu\text{m}$ ).

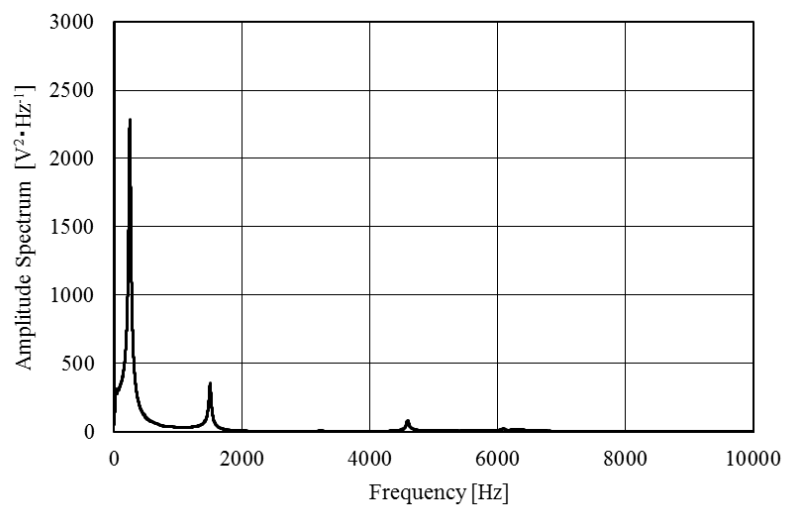


Fig. 4-11 Frequency analysis result of drilled hole ( $d = 507.0 \mu\text{m}$ ). Three peaks of the resonance frequency were confirmed.

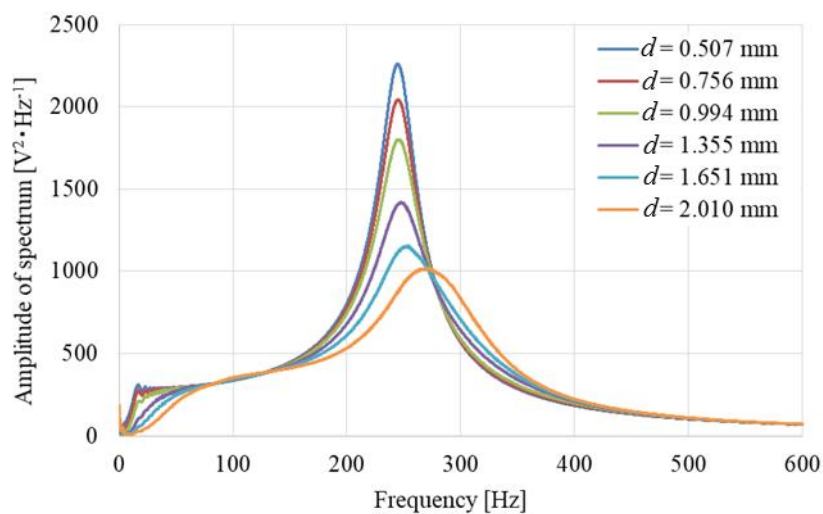


Fig. 4-12 Relationship between micro-hole diameter and amplitude of spectrum by FFT processing ( $f_1$ ).

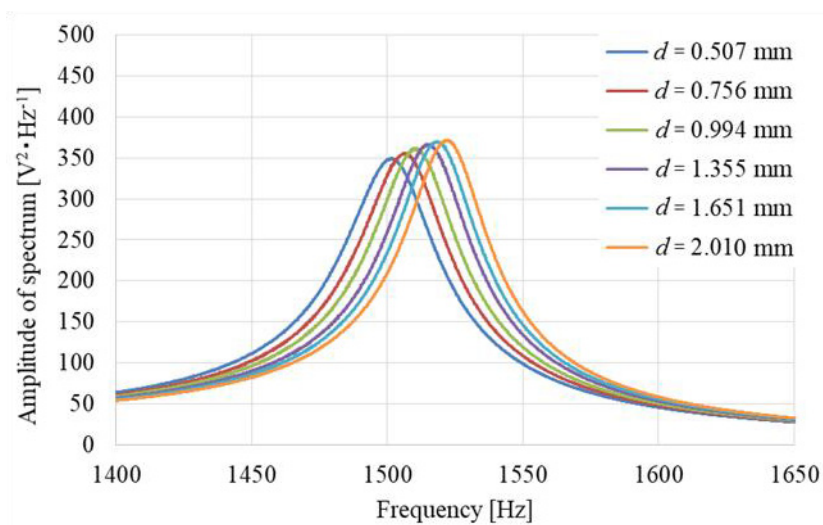


Fig. 4-13 Relationship between micro-hole diameter and amplitude of spectrum by FFT processing ( $f_2$ ).

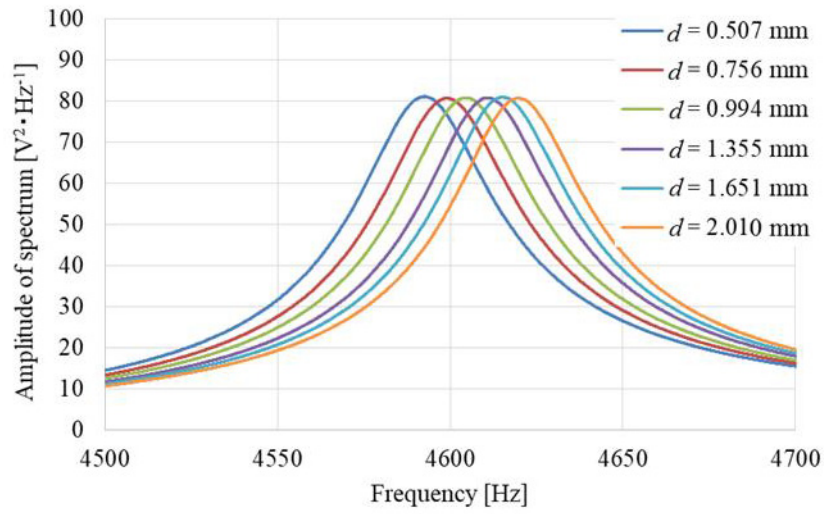


Fig. 4-14 Relationship between micro-hole diameter and amplitude of spectrum by FFT processing ( $f_3$ ).

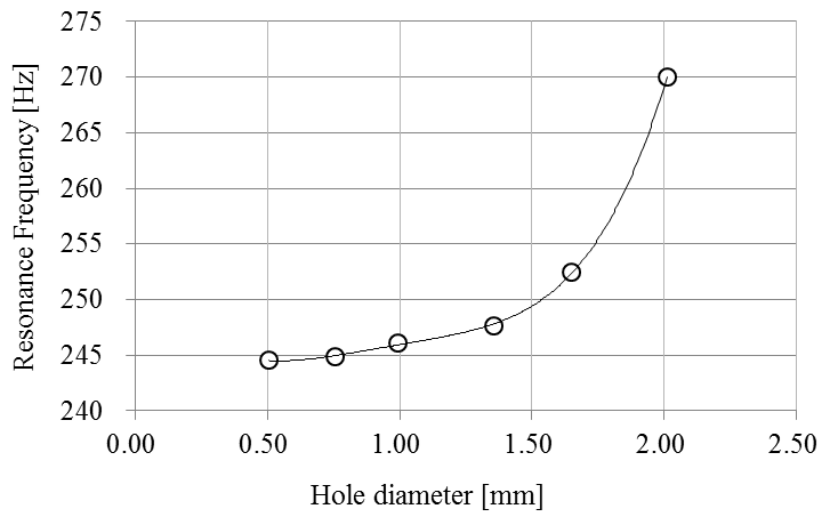


Fig. 4-15 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_1$ ).



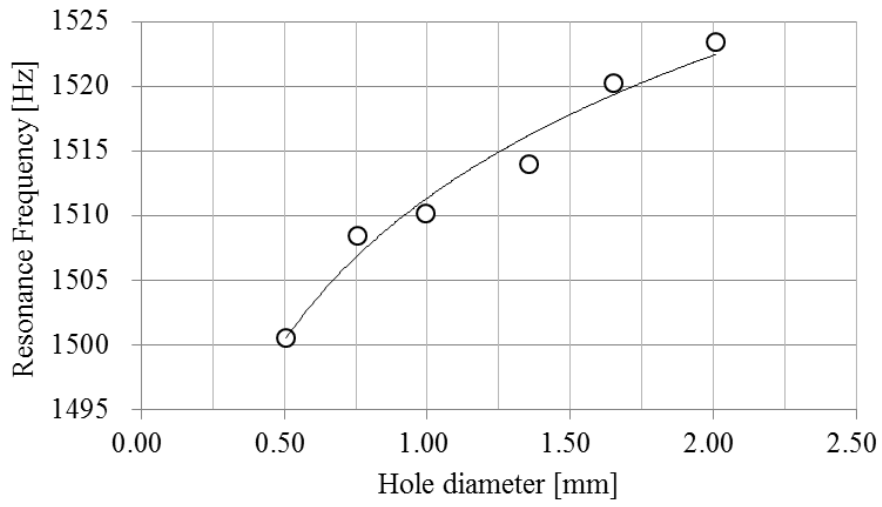


Fig. 4-16 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_2$ ).

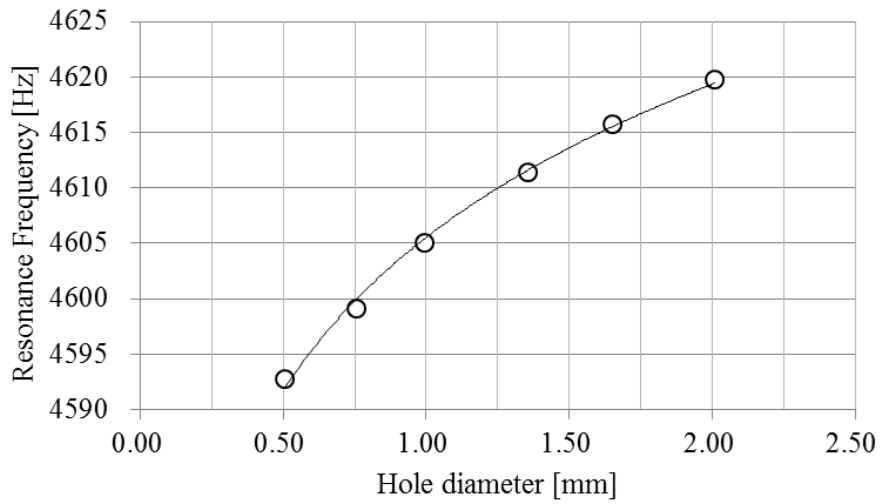


Fig. 4-17 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_3$ ).

#### 4. 4. 2 穴径 100 $\mu\text{m}$ 以下の微細穴の検査実験

穴径  $d = 100 \mu\text{m}$  以下の微細穴についても同様に検査実験を実施した。はじめに、放電加工した微細穴検査試料 E1 ( $d = 44.2 \mu\text{m}$ ) を検査し共鳴周波数を実験により求めた。信号発生器で 1 Hz ~ 10 kHz の信号を 15 秒間で周波数掃引し、マイクロホンが計測した信号を Fig. 4-18 に示す。次に、共鳴周波数を求めるためマイクロホンが計測した信号を高速フーリエ変換(FFT)し、10 回の移動平均により平滑化した結果を Fig. 4-19 に示す。穴径  $d = 0.5 \text{ mm}$  以上の検査試料と同様に、マイクロホン計測信号を FFT 分析することで 3 つの共鳴周波数が生じていることを確認した。Fig. 4-20~Fig. 4-22 は各検査試料における共鳴周波数  $f_1 \sim f_3$  の FFT 結果を示している。共鳴周波数  $f_2$  と  $f_3$  においては、FFT 分析波形が穴径に応じてシフトするように変化していることが確認できる。また、Fig. 4-23~Fig. 4-25 は各検査試料の共鳴周波数と検査試料の穴径との関係を示している。FFT 分析波形では穴径ごとに変化があることが確認できたが、検査試料の穴径と共鳴周波数との間に相関関係を確認することはできなかった。

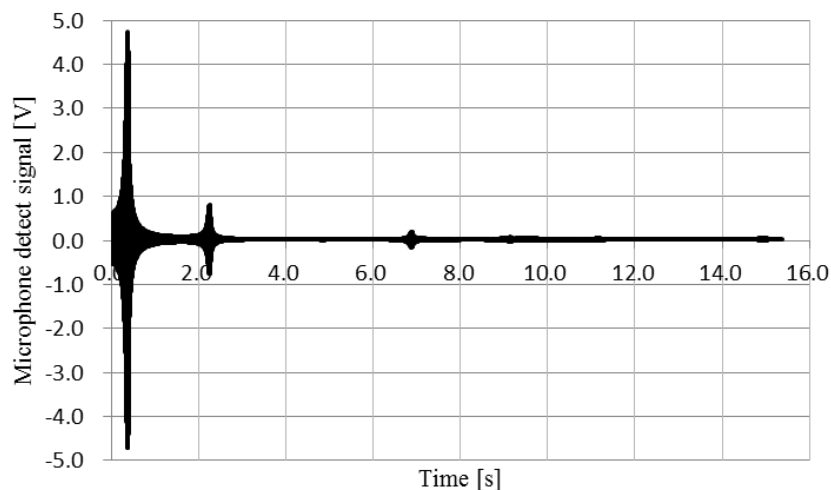


Fig. 4-18 Microphone detection signal by frequency sweep ( $d = 44.2 \mu\text{m}$ ).

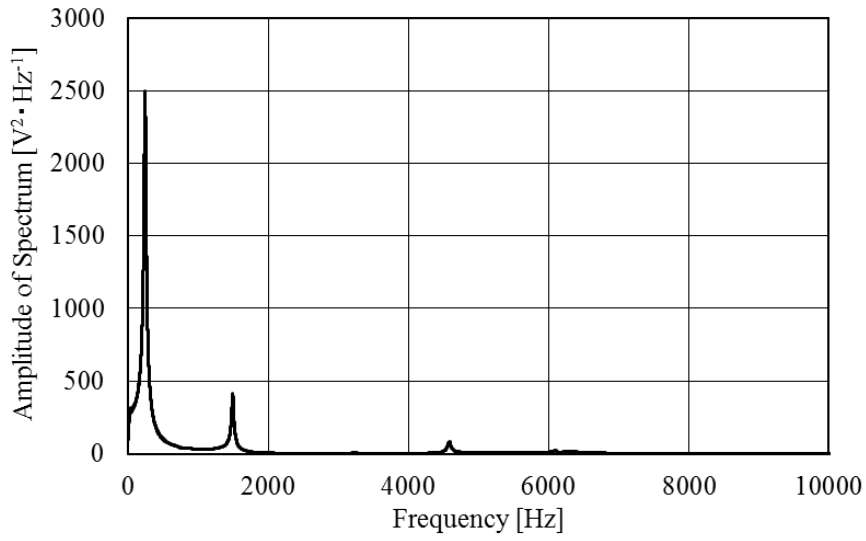


Fig. 4-19 Frequency analysis result of electric discharge machined hole ( $d = 44.2 \mu\text{m}$ ). Three peaks of the resonance frequency were confirmed.

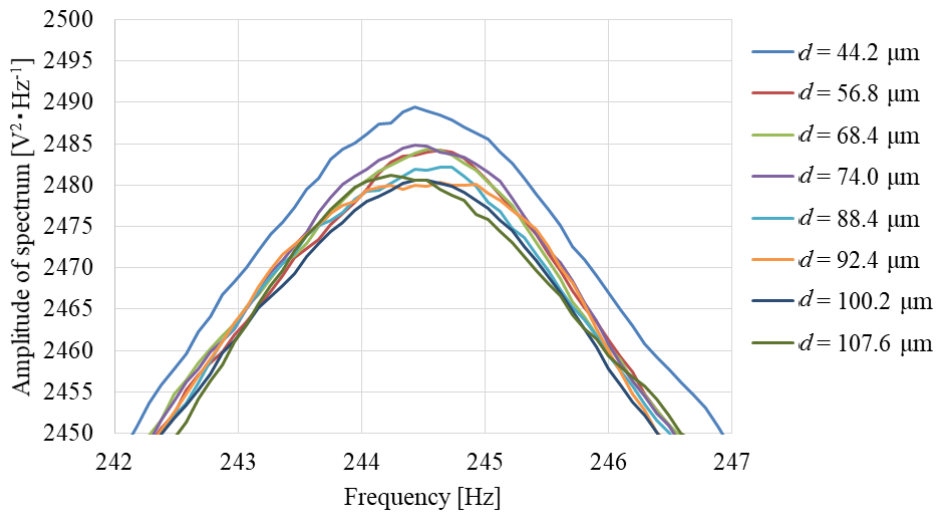


Fig. 4-20 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_1$ ). At the resonance frequency  $f_1$ , there is no correlation between the hole diameter and the FFT amplitude value.

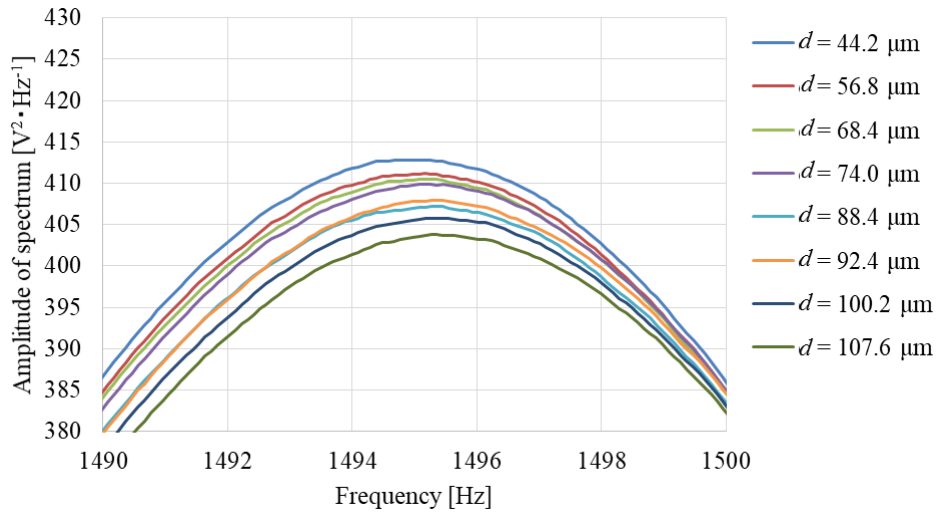


Fig. 4-21 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_2$ ). The FFT amplitude level changes by hole diameter.

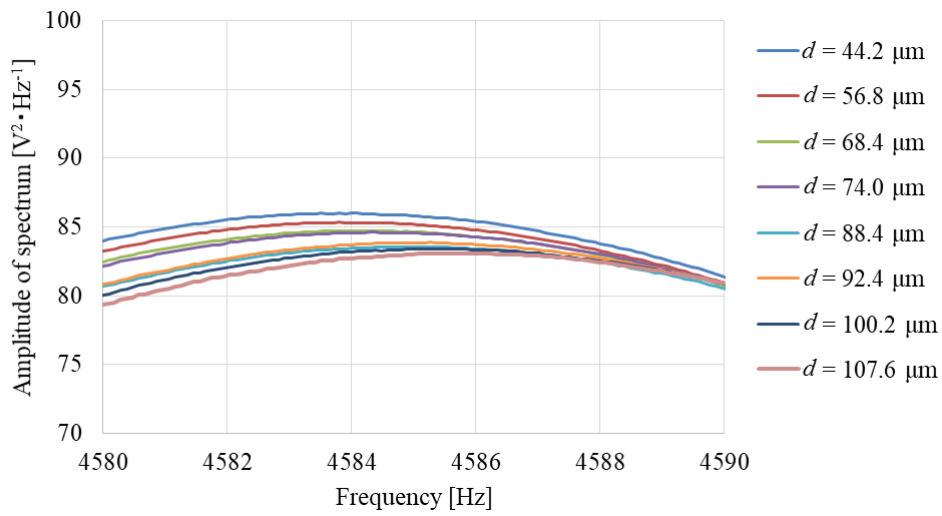


Fig. 4-22 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_3$ ). The FFT amplitude level changes by hole diameter.

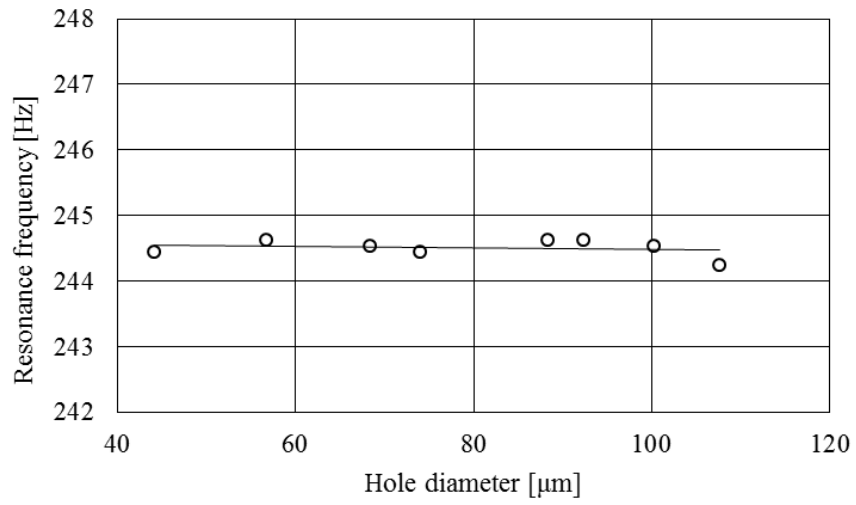


Fig. 4-23 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_1$ ).

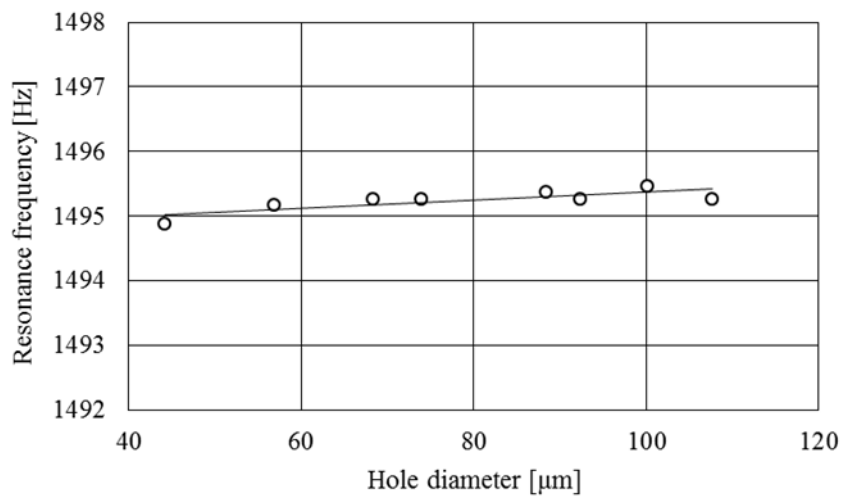


Fig. 4-24 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_2$ ).

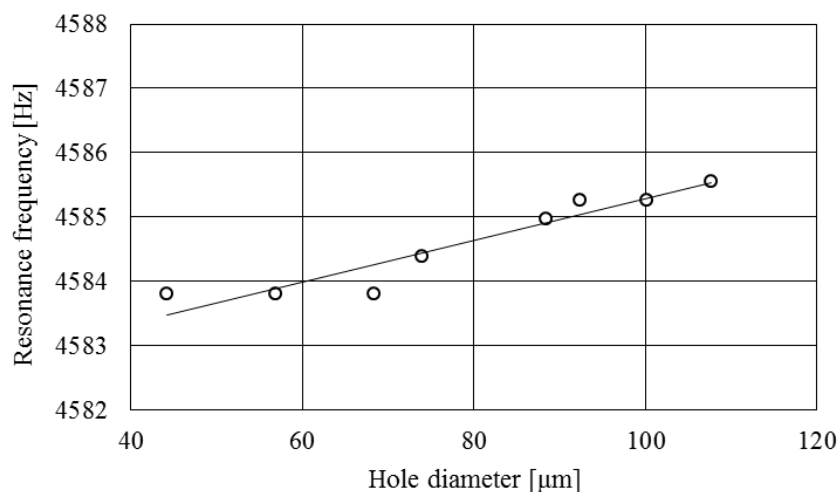


Fig. 4-25 Relationship between resonance frequency and micro-hole diameter ( $f_3$ ).

#### 4. 4. 3 スピーカ入力信号とマイクロホン計測信号の位相差

検査装置に内蔵するスピーカへの入力信号と、マイクロホンが計測した信号の2つの信号の位相差について、検査試料と周波数ごとの違いを求めた。スピーカへの入力信号を電圧1V、10 Hz~1 kHz まで周波数掃引した際における、検査試料の穴径ごとの2つの信号の位相差を Fig. 4-26 に示す。この結果から、1次の共鳴周波数 $f_1$ より低い周波数において、検査試料の穴径によって位相差が異なることがわかる。Fig. 4-27 はスピーカへの入力信号の周波数が100 Hz、200 Hz、250 Hz、500 Hzにおける検査試料の穴径と2つの信号の位相差の関係を示す。なお、Fig. 4-27 は3回の実験による平均値を示している。周波数が500 Hz では検査試料による違いは無いが、250 Hz 以下の周波数では検査試料の穴径と2つの信号の位相差との間に相関があることが確認できる。また、Fig. 4-28 は最も検査試料の穴径ごとの位相差の違いが大きかった周波数250 Hz での結果である。検査試料の穴径 $d = 0.507 \text{ mm}$  での位相差と、 $d = 2010 \text{ mm}$  での位相差の違いはおよそ25 deg.であるが、異なる穴径の検査試料においても同じ位相差である結果や、図中に示した穴径と位相差の関係を示す近似曲線から大きく外れる検査試料もあり、2つの信号の位相差から穴径を推測することは困難であるといえる。

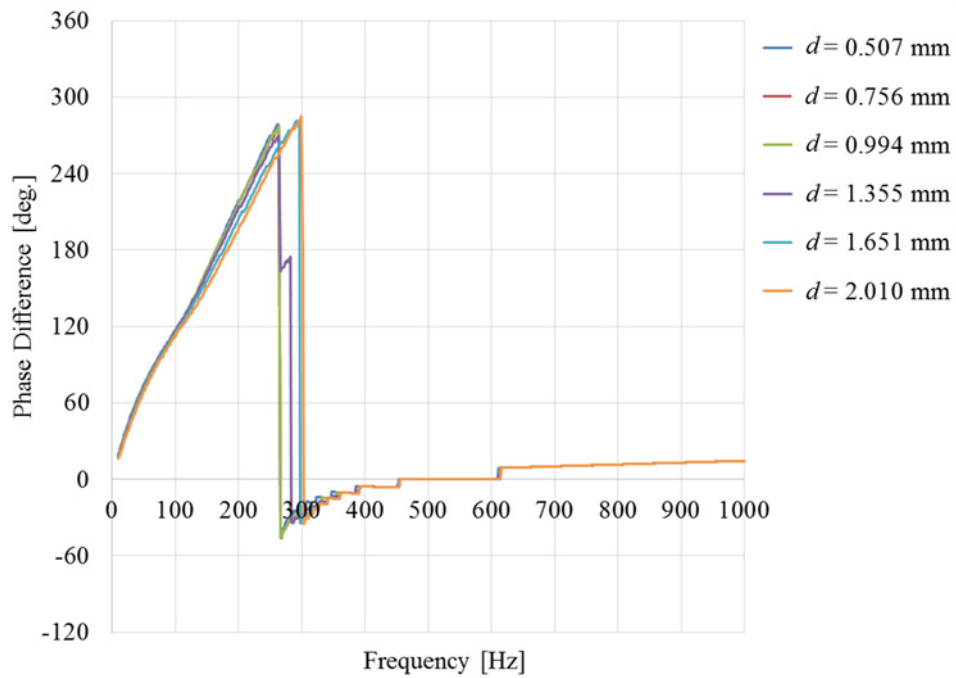


Fig. 4-26 The phase difference between the two signals for each hole diameter of the micro-hole inspection sample. At a frequency lower than the first resonance frequency  $f_1$ , the phase difference varies depending on the hole diameter of the test sample.

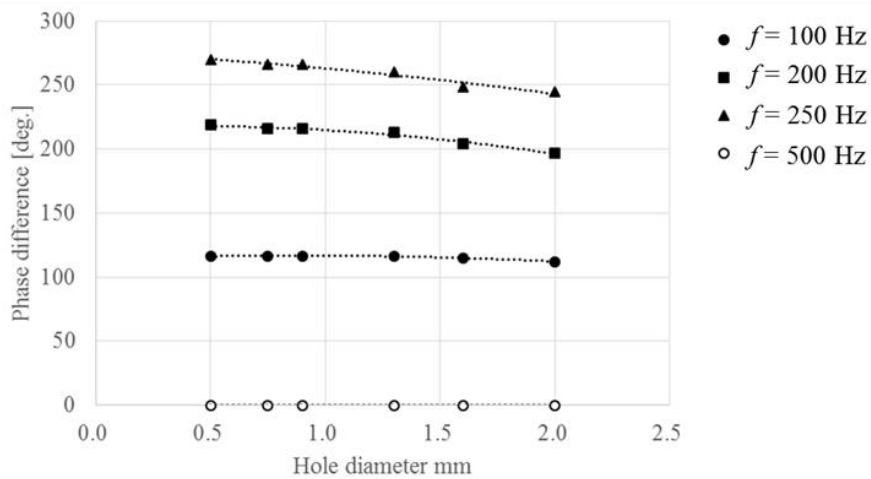


Fig. 4-27 Relationship between hole diameters of inspection samples and phase difference between two signals at frequencies of input signals to speakers at 100 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 500 Hz. At frequencies below 250 Hz there is a correlation between the hole diameter of the inspection sample and the phase difference between the two signals.

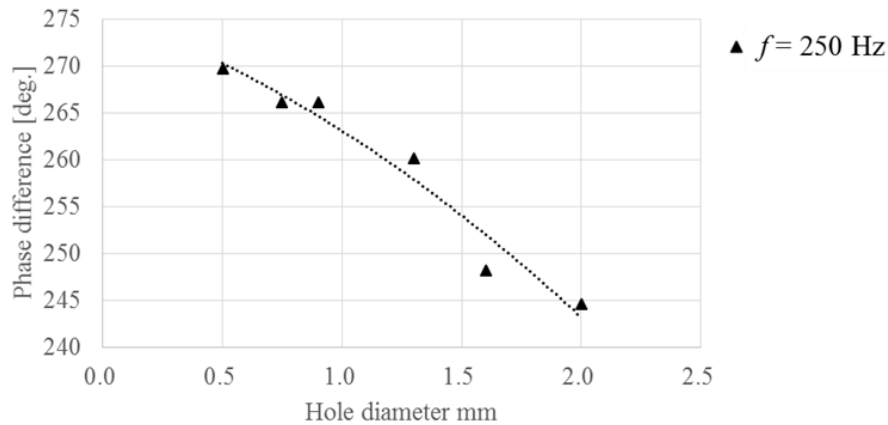


Fig. 4-28 Relationship between hole diameters of inspection samples and phase difference between two signals at frequency of input signals to speakers at 250 Hz.

#### 4. 5 考 察

##### (1) FFT 振幅値の比較による直径 100 $\mu\text{m}$ 以下の穴径検査

ヘルムホルツ共鳴現象はEq. (4-1)と Eq. (4-2)に示したように共鳴容器の容積と開口端の形状によって共鳴周波数に変化する. 検査試料の加工穴を開口端と見なして検査し共鳴周波数を算出することで, 穴径の差を検出できることを理論式と Fig. 4-2 から推測した. 実験では, 治具ボアラによりドリル加工した試料 D1( $d = 507.0 \mu\text{m}$ )~D6( $d = 2009.0 \mu\text{m}$ )を検査したところ, Fig. 4-15~Fig. 4-17 に示したように共鳴周波数と各検査試料の穴径との間に有意な相関を有している. 直径 100  $\mu\text{m}$  以下の放電加工した微細穴検査試料 E1( $d = 44.2 \mu\text{m}$ )~D8( $d = 107.6 \mu\text{m}$ )については, Fig. 4-23~Fig. 4-25 に示したように共鳴周波数と各検査試料の穴径との間に有意な相関は無かった.

これらの結果から, 本章で提案する検査方式においては直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴については, 単純に共鳴周波数を求めるだけでは穴径を検査することができないことが示された. しかし, Fig. 4-20~Fig. 4-22 では直径 100  $\mu\text{m}$  以下の検査試料についても, マイクロホンの計測信号の FFT 分析波形は穴径に応じて FFT 振幅値が変化する様子が確認できる. そこで, FFT 分析波形の変化をより明確に示すために, 共鳴周波数の変化では



なく微細穴径ごとの FFT 振幅値の変化に着目し、直径 100  $\mu\text{m}$  以下の穴径検査の可能性を考える。最小穴径を有する検査試料 E1( $d = 44.2 \mu\text{m}$ )の共鳴周波数は、Fig. 4-19 の結果から  $f_1 = 244.4 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 1494.9 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 4583.8 \text{ Hz}$  であり、この共鳴周波数における各検査試料 E1( $d = 44.2 \mu\text{m}$ )~E8( $d = 107.6 \mu\text{m}$ )の FFT 振幅値を求めた結果を Fig. 4-29~Fig. 4-31 に示す。

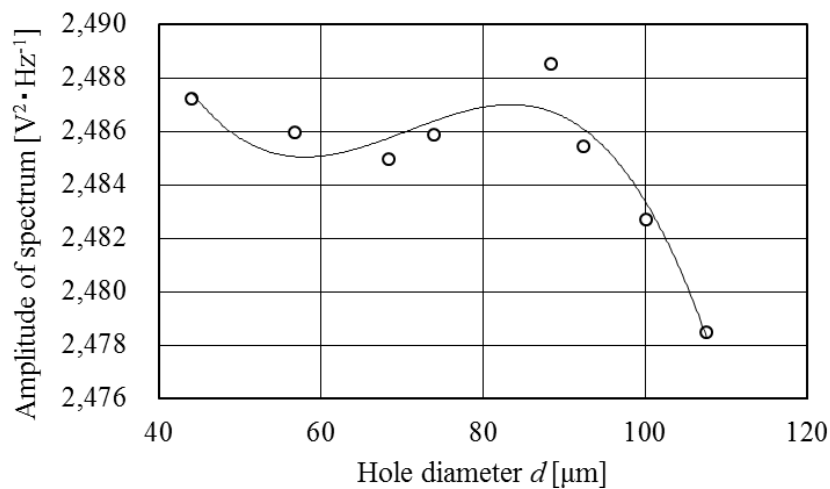


Fig. 4-29 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_1$ ). There is not correlation between hole diameter and resonance frequency.

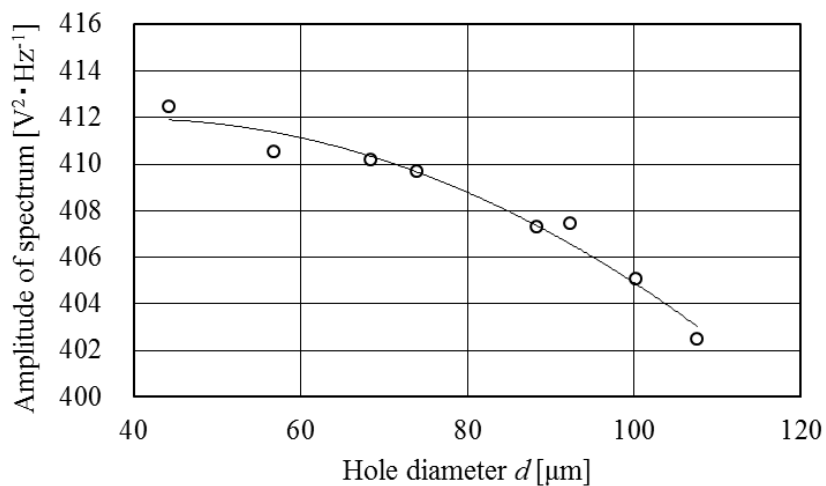


Fig. 4-30 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_2$ ). There is a correlation between hole diameter and resonance frequency.

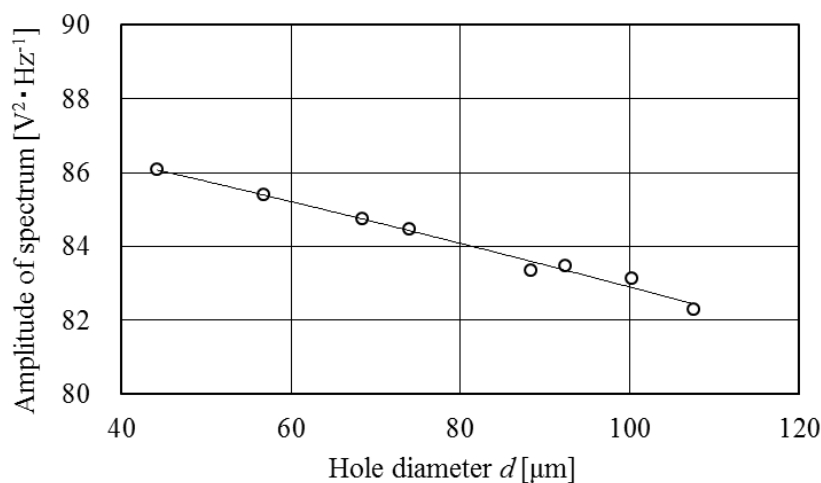


Fig. 4-31 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_3$ ). There is linear correlation between hole diameter and resonance frequency.

これらの結果から、共鳴周波数  $f_1$  での結果を除き共鳴周波数  $f_2$  および  $f_3$  においては、直径 100  $\mu\text{m}$  以下の検査試料についても、基準となる検査試料との FFT 振幅値の差を求めことで穴径を検査できることを示している。放電加工した微細穴検査試料は穴径がそれぞれおよそ 10  $\mu\text{m}$  の差があり、共鳴周波数  $f_2$  および  $f_3$  においては検査試料ごとの違いを確認できることから、本検査装置の穴径検査分解能は 10  $\mu\text{m}$  であることを実験により確認した。

#### (2) 検査に使用するマイクロホンの特性について

一方、共鳴周波数  $f_1$  では Fig. 4-29 の結果から、穴径と FFT 振幅の関係を求めることによる検査は難しいことがわかった。その理由として、本検査方法は検査容器内部の共鳴周波数計測にコンデンサ型の標準マイクロホンを使用しているためであると考えられる。コンデンサ型のマイクロホンは Fig. 4-32 に示すように、可動電極と固定電極の距離変化を、Eq. (4-3) による 2 電極間の静電容量値  $C_{\text{cap}}$  [F] の変化として捉える構造となっている<sup>84)</sup>。Eq. (4-3) において  $\epsilon$  [F/m] は誘電率、 $S$  [ $\text{m}^2$ ] は平板電極の面積、 $d_p$  [m] は 2 電極間の距離を表す。

$$C_{\text{cap}} = \frac{\epsilon S}{d_p} \quad (4-3)$$

標準マイクロホンは高精度に音圧レベルを測定するための検出器であるため、大きな音圧を与えると可動電極が大きく振動し、Fig. 4-20 示すように計測波形の乱れを生じる要因となる。直径 100  $\mu\text{m}$  以下の検査試料を検査する際には、検査容器は密閉された状態に近いことから検査容器内の共鳴エネルギーが高くなり、高い共鳴エネルギーによってマイクロホンの可動電極の振動も大きくなり、音圧変動の大きさにつながっていると推測される。マイクロホンの可動電極の剛性を高めることで Fig. 4-20 示すような計測波形の乱れは回避できる可能性があるが、その場合はマイクロホンの音圧計測の感度が低下してしまうため、小さな穴径差を検出することが難しくなる。したがって、マイクロホン剛性と感度はトレードオフの関係にあることから、本検査方法においては、共鳴周波数  $f_1$  を利用して直径 100  $\mu\text{m}$  以下の試料を検査することは難しいといえる。直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴については第 2 章で提案した反射波を利用した検査技術や、第 3 章で示した透過波を利用した検査技術が適しており、検査対象の穴径に応じて検査技術を選択する必要がある。

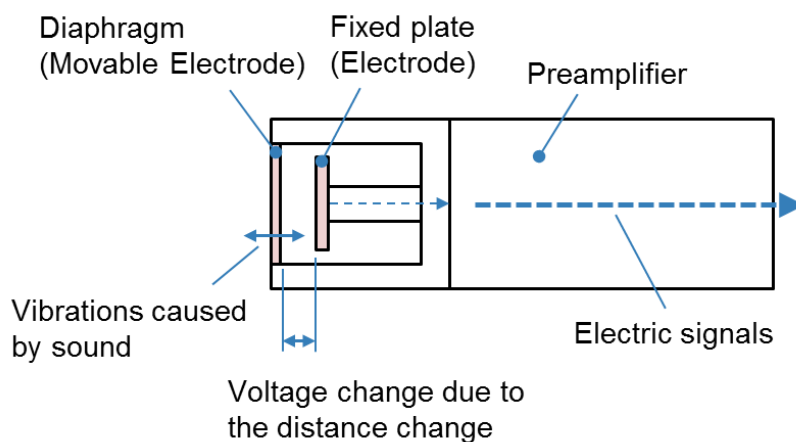


Fig. 4-32 Structure of condenser microphone.

(3) FFT 振幅値の比較による直径 0.5 mm 以上の穴径検査

次に、直径 D1( $d = 507.0 \mu\text{m}$ )~D6( $d = 2009.0 \mu\text{m}$ )の検査試料についても、基準検査試料の共鳴周波数における FFT 振幅値の差を求めた。検査試料 D1( $d = 0.507 \text{ mm}$ )の共鳴周波数は、Fig. 4-11 の結果から  $f_1 = 244.6 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 1500.0 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 4592.8 \text{ Hz}$  であり、この共鳴周波数における各検査試料 D1( $d = 0.507 \text{ mm}$ )~D6( $d = 2.010 \text{ mm}$ )の FFT 振幅値を求めた結果を Fig. 4-33~Fig. 4-35 に示す。

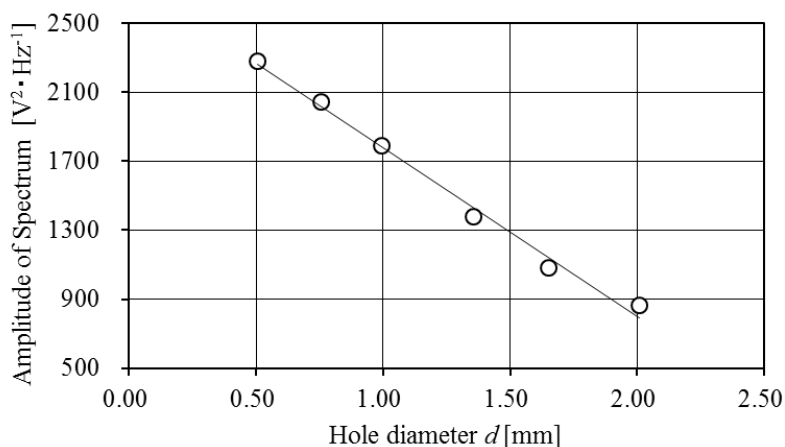


Fig. 4-33 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_1$ ). There is linear correlation between hole diameter and resonance frequency.

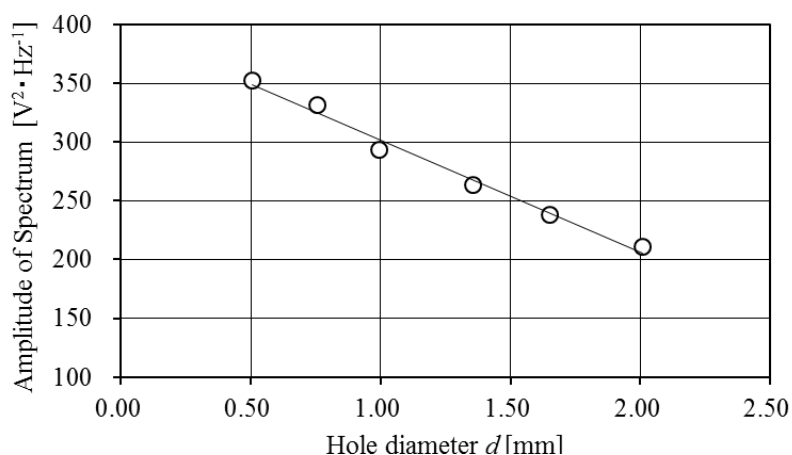


Fig. 4-34 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_2$ ). There is linear correlation between hole diameter and resonance frequency.

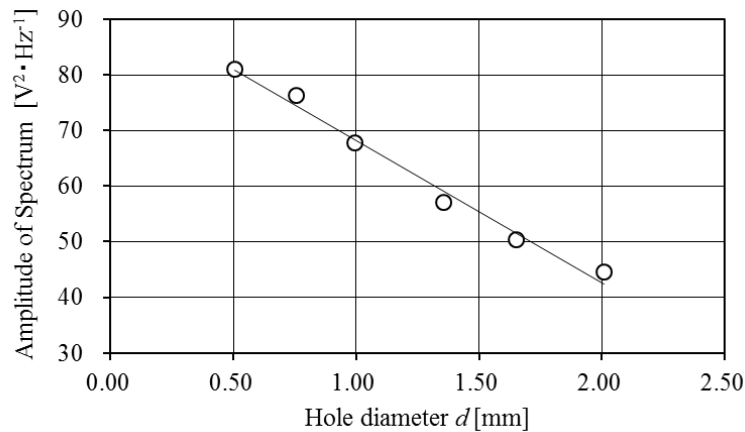


Fig. 4-35 Change of the FFT amplitude level by the difference in hole diameter ( $f_3$ ). There is linear correlation between hole diameter and resonance frequency.

これらの結果から、直径 0.5 mm 以上の検査試料については、穴径と FFT 振幅値の間に線形相関を有することを確認した。Fig. 4-15～Fig. 4-17 に示したように、穴径ごとの共鳴周波数を比較することでも穴径差を検出できるが、なだらかな FFT 波形からピーク値を算出するよりも、基準となる検査試料の共鳴周波数  $f_1 \sim f_3$  における FFT 振幅値を比較したほうが簡便に穴径差を検出できると考えられる。例えば、マスターサンプルの共鳴周波数を求めて基準周波数として設定し、その他の検査試料については基準周波数での音圧レベルを計測するのみで穴径差を検査する、などの簡易的な検査方法の適用が期待できる。

また、Fig. 4-36 は共鳴周波数  $f_1 = 244.4$  Hz,  $f_2 = 1494.9$  Hz,  $f_3 = 4583.8$  Hz における、直径 0.5 mm～2.0 mm のドリル加工穴 D1～D6 と、直径 100  $\mu$ m 以下の放電加工穴 E1～E8 の検査結果である FFT 振幅値を表示している。直径 100  $\mu$ m 以下の検査試料の共鳴周波数  $f_1$  の結果を除き、検査試料の穴径と FFT 振幅値が線形的に変化していることを確認した。この結果から、直径 0.5 mm 以上の穴を有する部品も検査できることが示され、幅広い検査対象に対応できるといえる。特に、本章で提案する検査技術は、検査容器内の共鳴周波数を求めるものであり、検査対象部品とマイクロホンとを同軸上に配置する必要が無

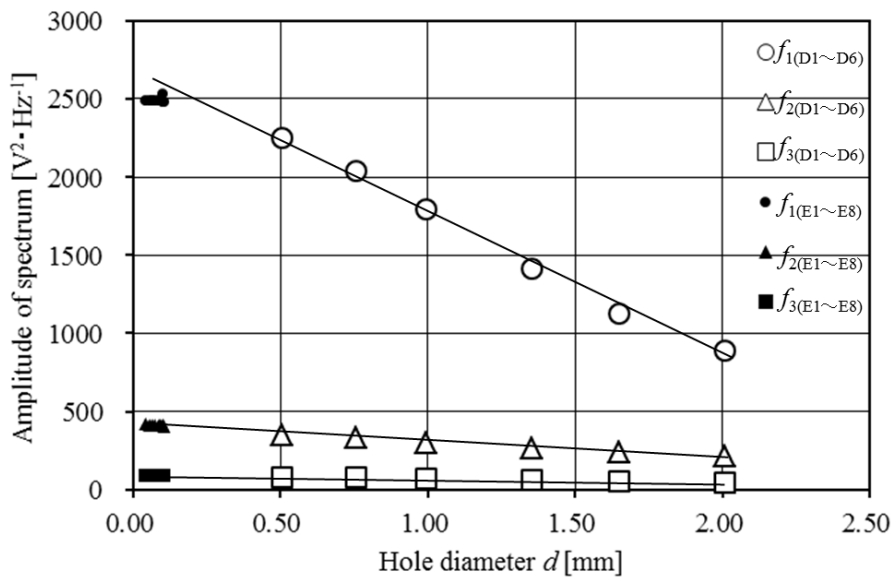


Fig. 4-36 Inspection results all test samples. FFT amplitude value at resonance frequency  $f_1=244.4$  Hz,  $f_2=1494.9$  Hz,  $f_3=4583.8$  Hz. For micro holes with a diameter of 5 mm or less, inspection can not be performed at the resonance frequency  $f_1$ . There is linear correlation between an FFT amplitude level and hole diameter about other samples.

いことから、検査装置の形状設計の際に自由度の高い構造であることがメリットとして挙げられる。

#### (4) 検査試料の材質

本章で提案する検査方法はヘルムホルツ共鳴現象を利用したものであり、検査原理は Eq. (4-1) および Eq. (4-2) に示すとおり容器形状と検査試料の穴径および穴深さに依存する。したがって検査試料の材質には影響を受けないと推測できるが、ダイアフラムのような薄板の場合は検査試料自身が共振してしまい、検査容器の体積  $V_c$  が変化することで開口部の検査に影響を及ぼすため、本検査方法には適さない。

#### (5) 検査容器の容積と検査分解能

検査装置には外径 30 mm の比較的大きな標準マイクロホンを使用しており、検査容器もマイクロホンの形状に合わせて内径 60 mm, 高さ 65 mm とした。Eq. (4-1) において、

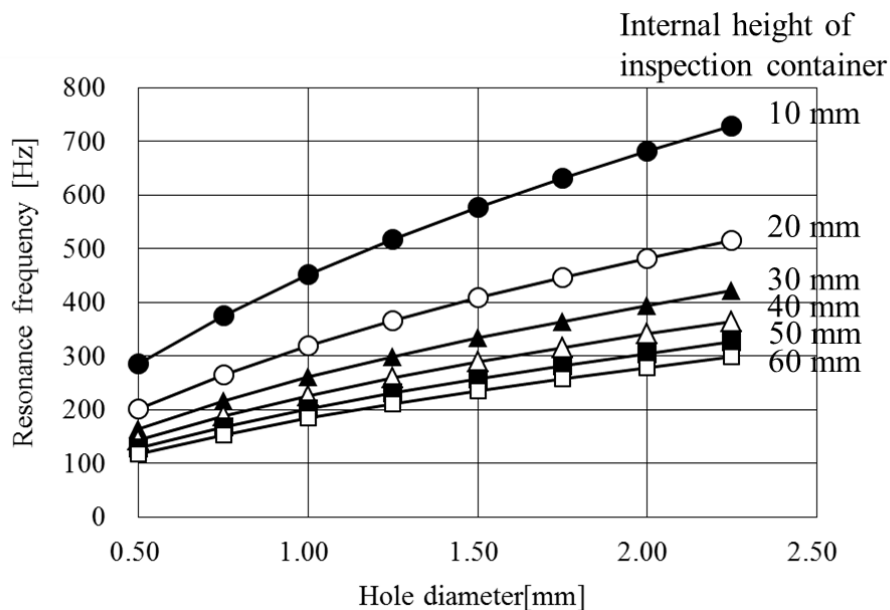


Fig. 4-37 Relationship between the hole diameter and the resonance frequency by internal height of inspection container. The smaller the internal height, the larger the change in the resonance frequency due to the hole diameter change. Therefore, by decreasing the volume of the inspection container, the hole diameter inspection resolution is improved.

直径 0.5 mm～2.0 mm，穴深さ 100  $\mu\text{m}$  の微細穴を検査する際に，検査容器内部の高さを 10 mm～60 mm まで変化させた際における，容器内の共鳴周波数の変化を Fig. 4-37 に示す．検査容器内部の高さを小さくすることで，検査対象の穴径  $d$  による共鳴周波数の差が大きくなることから，小型のマイクロホンを選定し共鳴容器の小型化が実現できれば，穴径の検査分解能が向上する可能性がある．

プレス加工やドリル加工した微細穴部品については，工具摩耗の進展により穴径不良を生じることがある．本検査方法は微細穴部品の穴径によって検査結果が異なることから，良品をマスターサンプルとして設定し，検査対象部品をマスターサンプルと比較することで不良品を検知することができる．また，プレス加工による破断面付近のバリや，ドリル加工時の切り屑が穴径不良を発生させた場合にも，同様の検査方法で不良品を検知することができる．加工現場において広く普及する画像処理による微細穴検査技術は，

高速検査が可能であるが、穴内部に発生した不良を検知することは困難である。本検査手法は音波を微細穴に通過させて検査することから、穴内部の穴径不良が生じた際にも不良品検出が可能であり、加工現場における簡易的な微細穴検査手法としての適用が期待される。

#### 4. 6 結 言

本章ではヘルムホルツ共鳴現象を利用し、共鳴器の開口部に微細穴部品を配置することで、穴径を検査する手法について提案した。また、提案した検査方法にて微細穴部品の穴径検査実験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) ヘルムホルツ共鳴現象を利用した検査装置について音波解析した結果、理論式の共鳴周波数と一致することを確認した。
- 2) ドリル加工および放電加工により微細穴検査試料を用意し、ヘルムホルツ共鳴現象を利用した装置にて検査した結果、1 Hz～10 kHz の範囲内において $f_1 \sim f_3$ の3つの共鳴周波数が現れることを確認した。
- 3) 検査試料の穴径が変わると共鳴周波数も変化することを利用し、マイクロホンが計測した信号を高速フーリエ変換して検査試料ごとの振幅値の違いを求めることで、直径およそ 50  $\mu\text{m}$ ～2.0 mm の微細穴の穴径差を 10  $\mu\text{m}$  の分解能で検出することができた。

また、本章で提案したヘルムホルツ共鳴利用による微細穴検査技術は、微細穴の穴径差を 10  $\mu\text{m}$  の分解能で検出できること、音波を微細穴に通過させて検査する手法であるため流体の通過流量の保証が可能なこと、マイクロホンとスピーカを検査容器に内蔵し、微細穴部品とマイクロホンを同軸上に配置する必要が無いことため装置設計の自由度が高いこと、15 s の周波数掃引した信号をスピーカに入力することから Table 4-3 に示す特徴を有する。



Table 4-3 Performance of the inspection technology proposed in this chapter.

	Inspection resolution $100 \pm 5 \mu\text{m}$	Guarantee of flow rate	Small instrument	Inspection speed 1 sample/s
Inspection technology proposed in Chap. 4	○	○	○	△

## 第 5 章

### 結 論

## 第5章 結論

### 5.1 まとめ

本研究では流量制御を目的とした微細穴部品の穴径検査について、加工現場での実用を想定した音波利用による微細穴検査手法を提案した。第1章では、研究背景と現状の微細穴部品の形状検査に関連する計測・評価技術を説明し、本研究の目的を示した。

第2章から第4章において提案した3つの検査手法は、いずれも音波を用いて微細穴を検査することから穴径と流量保証が可能であり、流量制御を目的とした微細穴部品の検査に適している。高速かつ簡便に検査できることや、非破壊検査であることも特徴として挙げることができる。また、検査対象の穴径やサンプルの大きさなどによって3つの検査手法を使い分けることで様々な微細穴部品の穴径検査が可能である。

Table 5-1 に従来の微細穴検査技術と本論文で提案した検査技術との比較一覧表を示す。本研究で検査対象としたCOガスセンサ用の微細穴は穴径 $100\pm 5\ \mu\text{m}$ の穴径管理と通過流量の保証、さらに迅速に検査することが求められていた。第2章で提案した反射音を利用した微細穴検査技術では、微細穴境界面での断面積変化による音波の反射率を推定し、穴径によって反射率が異なることを利用し微細穴径を検査できると仮定した。実験により微細穴部品からの反射音を計測することで、直径 $100\ \mu\text{m}$ の微細穴部品に対し $\pm 1\ \mu\text{m}$ の穴径差を検査できることを示した。反射音は検査装置に内蔵したダイナミック型マイクロホン<sup>85)</sup>で検出するため、穴部品を検査装置上部に設置するだけで検査可能である。そのため、装置を小型化できることや、加工現場での簡便な検査に対応した装置設計が可能である。また、検査に使用する周波数を低くすることで穴径差が検出しやすくなることや、穴径が大きい場合は合成波の振幅も大きくなるといった傾向は理論値と実験値とで一致することを確認した。これらの結果から、COガスセンサ部品の拡散制御板の検査に適した検査技術を提案することができた。

第3章では穴径の検査分解能の向上を目的とし、透過音を利用した微細穴検査技術を

提案した。音圧校正された標準マイクロホンを用いて微細穴の透過音を検出することで、微細穴の高精度な穴径検査が可能であると仮定し、実験により直径 100  $\mu\text{m}$  の微細穴部品に対し、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$  の穴径差を検査できる性能を有することを示した。また、マイクロホンが検出した電圧実効値が安定する周期を実験により明らかにした。周波数を 10 Hz に設定した場合、安定した検査結果を取得するために必要な時間は 0.5 s であった。これらの結果から、微細穴径の高精度且つ高速な非破壊検査が可能となった。CO ガスセンサに使用される微細穴部品は、ガス検知分解能の向上や長寿命化の観点から、微細穴径の小径化や穴径の要求公差が厳しくなる傾向にある。しかし、第 3 章で提案した検査技術は、振動を嫌う標準マイクロホンを用いているため加工現場での全数検査には適さないが、高精度に微細穴部品の検査が可能である。今後の CO ガスセンサ部品の高度化に対応する検査技術を提案することができた。

第 4 章ではヘルムホルツ共鳴現象を利用した小穴検査技術を提案した。ヘルムホルツ共鳴器は、開口部を有する容器の内部にある空気がばねとしての役割を果たし、共鳴することで音を発する装置であり、共鳴周波数は容器の容積と開口端の形状によって変化する。本研究では検査容器の開口部に小穴部品を配置し、開口率の変化によってヘルムホルツ共鳴周波数が変わる現象を利用し、穴径を検査する手法について提案した。検査実験では、検査試料の穴径が変わることで共鳴周波数が変化することを利用し、マイクロホンが計測した信号を高速フーリエ変換し、検査試料ごとの振幅値の違いを求めると穴径差を検出できることを確認した。穴径の検査分解能は第 2 章や第 3 章で提案した検査技術には劣るが、マイクロホンと微細穴部品を同軸上に配置する必要がないため、検査装置の設計の自由度が最も高く、様々な形状を有する微細穴部品の検査に対応できる検査技術を提案した。

Table 5-1 Comparison table of the inspection technology proposed in this paper and the conventional inspection technology.

	Inspection resolution 100±5 μm	Guarantee of flow rate	Small instrument	Inspection speed 1 sample/s
Image processing system	○ (0.1 mm)	×	◎	○
X-ray inspection system	△ (1 mm)	○	×	×
Optical apparatus for measuring	◎	△	×	△
Measuring system using an optical fiber probe	◎	△	×	×
Air micrometers	×	○	◎	△
Chap. 2 Reflected wave	○	○	◎	○
Chap. 3 Transmitted wave	◎	○	△	○
Chap.4 Helmholtz resonance	○	○	○	△

## 5. 2 今後の展望

第2章で提案した反射波検出型の微細穴検査手法は、簡便に微細穴の検査が可能であることから、既にプレス加工現場において複数の微細穴が加工された音響フィルタ部品の出荷前検査に活用されている。Fig. 5-1 は反射波検出型の微細穴検査技術を応用した検査システム外観を示す。第2章ではロックインアンプを使用して高精度にマイクロホン出力信号を計測していたが、この検査システムはFig. 5-2 に示すように、ロックインアンプの代わりに電子電圧計を利用し出力信号の実効値を調べるものである。基準となる検査試料の計測値を事前に記録しておき、検査対象を検査した際の計測値との差を管

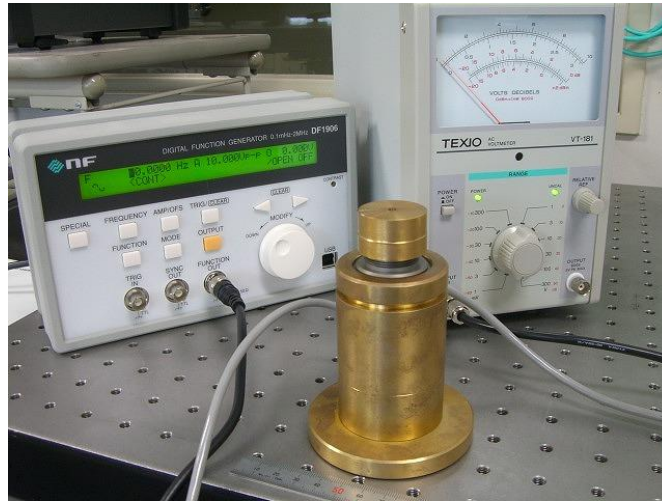


Fig. 5-1 Micro-hole inspection system for multiple-hole.

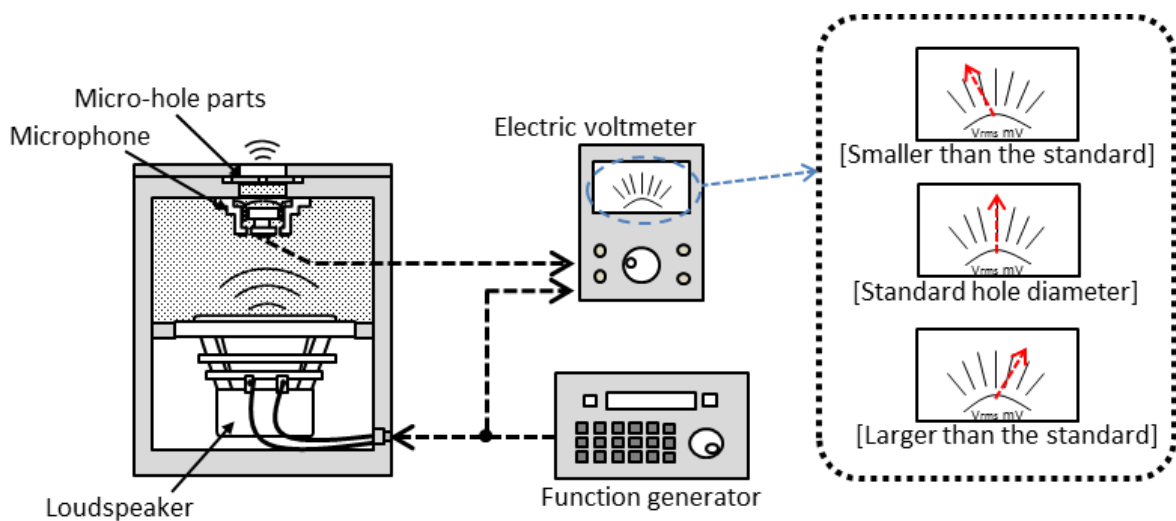


Fig. 5-2 Schematic diagram of multiple hole inspection system.

理することで、簡便に微細穴部品の良品と不良品との判定が可能である。

また、第4章で提案したヘルムホルツ共鳴利用型の検査手法は、装置構造により検査対象の大きさに制限が無いことから、水素ステーション用の水電解部品のように、サイズが大きく膨大な数の微細穴が加工されている部品への検査適用が期待できる。

一方で、本提案手法が普及するためには、より多くの微細穴部品に対して適用検証が必要である。例えば自動車用の燃料噴射ノズル板のように、直径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細穴

が複数加工された部品の検査への応用が考えられる。本論文では単一の微細穴について、穴径と流量保証の両方を可能とする検査技術を提案したが、複数の微細穴を一度に検査することができれば、従来の方法よりも高速な検査が可能になる。また、近年の積層型の金属 3D プリンタを用いた造形技術によれば、部品内部に複雑な形状の流路を形成が可能<sup>86)</sup>であることから、内部構造の検査への応用検討が考えられる。さらに、マイクロホンの出力信号の取扱についても、品質工学的手法の一つである MT システム<sup>87)88)</sup>などのデータ分析技術を利用することで、良品と不良品の判別精度が向上し、穴径の検査分解能が高まる可能性がある。今後の発展的な研究を期待する。

## 参考文献

- 1) 小松隆史, 小松 誠, 柳沢春登, 上原恒浩, 柳沢 保, 真鍋清一: 電子制御燃料噴射インジェクタ用オリフィスのプレス加工技術開発: 塑性と加工, 52, 611 (2011) 1281.
- 2) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構: 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発, 事後評価報告書.
- 3) 岡部昌規: ホンダにおけるスマート水素ステーションの取組み, 石油学会, 秋季大会講演要旨, 60, (2017)A10.
- 4) 増沢隆久, 高増潔: 微細穴加工と計測の最前線, 精密工学会誌, 78, 6(2012)443.
- 5) (公社)自動車技術会: ENGINE REVIEW, 6, 4(2016)
- 6) 松尾哲治, 沢田行雄, 富板幸生: ガソリンエンジン用インジェクタの微粒化開発, デンソーテクニカルレビュー, 11, 1(2006)67.
- 7) 足立尚史, 芹沢一史: ディーゼル燃料噴射装置の現状と将来, デンソーテクニカルレビュー, 22(2017)119.
- 8) 大戸亀久美, 中原 毅, 麻生 功: 自動車用内外気自動切り替えシステム, 電気学会論文誌.E, 118, 2(1998)68.
- 9) 岩見田均, 大和俊孝, 崎山和広, 北尾英樹, 高島淳行: 車載用音声認識技術, 富士通テン技報, 32, 2(1998)15.
- 10) 武田一哉: 自動車の中での音声認識, 情報処理, 45, 10(2004)1038.
- 11) (一社)日本自動車部品工業会: 平成 29 年度自動車部品出荷動向調査
- 12) (一社)日本自動車部品工業会: 平成 27 年度自動車部品出荷動向調査
- 13) (一社)日本自動車部品工業会: 平成 25 年度自動車部品出荷動向調査
- 14) 野村徹: 自動車用センサの技術動向, 表面技術, 67, 12(2016)628
- 15) (公財)ちゅうごく産業創造センター: センサを巡る市場・技術動向と今後の地域展開に関する調査, 報告書.
- 16) 北岡達朗, 宇山史彦, 名田讓, 木戸口善行: 過給条件における空気流動と多噴孔ノズルの噴霧形成と着火に関する研究, 日本機械学会中国四国支部講演会講演論文集, 50(2012)140801.
- 17) 井森恵太郎, 酒井雄大, 松村恵理子, 千田二郎: 直噴ガソリンエンジンを対象とした燃料加熱に関する基礎的研究, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 92(2017)M219.
- 18) 元廣孝徳, 石河雄太, アハマド ザイード ナザリ, 山田凌矢, 石野洋二郎, 齋木悠: 直噴エンジンモデルにおける燃料噴流と火炎核の瞬間三次元密度場の計測, 日本機械学会 環境総合光学シンポジウム講演論文集, 27(2017)313.
- 19) 宮木正彦, 中島樹志, 竹内克彦, 谷泰臣: 燃料噴射系製品のこれまでの歩みと将来の展望, 日本燃焼学会誌, 52, 161(2010)189.
- 20) 曾根清一郎: ディーゼル機関の燃料噴射装置の製造技術, 日本マリンエンジニアリング, 48, 1(2013)89.
- 21) 戸川和也, 金光伴積, 小倉一朗: 高精度微細ノズルによる高機能高付加価値紡糸の現状と将来, 精密工学会誌, 78, 6(2012)439.
- 22) 増沢隆久: マイクロ放電加工, 精密工学会誌, 68, 2(2002)180.
- 23) David M. Allen, Sue X. Huang: The Reduction of Tool Wear and Machining Time for the Micro-Electro-Discharge Machining of Micro-holes by Using Copper Vapour Laser Machining as a Roughing process, International Journal of Electrical Machining, 2, 1(1997)9.
- 24) 窪田真一郎, 宇野義幸, 栗林宏和, 横溝精一: YAG レーザを併用した超硬合金への微細深穴放電加工, 電気加工学会誌, 35, 78(2001)19.
- 25) 窪田真一郎, 宇野義幸, 栗林宏和, 横溝精一: YAG レーザを併用した超硬合金への微細深穴放電加工(続報), 電気加工学会誌, 36, 82(2002)18.



- 26) 藤澤政泰: 機械穴加工の極限, 精密工学会誌, 78, 6(2012)448.
- 27) B K Hinds, M Treanor: Drilling of printed circuit boards, Proc. Instn. Mech. Engrs.,214, Part B(2000)35.
- 28) 新井亮一, 森田昇, 西貴仁, 小口京吾, 武井持, 成田周介: カセンサ内蔵型スピンドルを持つ微細穴加工機の開発と応用, 砥粒加工学会誌, 56, 4(2012)238.
- 29) 新井亮一, 森田昇, 西貴仁, 長洲慶典, 小口京吾, 武井持, 中山司郎, 田中俊宏: 切削力検知機構を持つ微細穴加工用センサ・ビルトイン・スピンドルの開発, 精密工学会誌, 77, 10(2011)944.
- 30) 前田純也, 田平昌俊, 川崎亮: ナノ秒高輝度ファイバレーザーによる微細加工と応用, レーザー研究, 33, Supplement(2005)127.
- 31) 河野正道, 河内進司, 高田保之, 平澤誠一, 木塚優子, 松岡芳彦: ベッセルビームを用いたマイクロドリル加工におけるダメージの低減, レーザー研究, 35, 5(2007)339.
- 32) 松岡芳彦: ベッセルビームを用いたレーザーマイクロドリル加工, 伝熱, 43, 183(2004)10.
- 33) 安井学, 角嶋邦之, 平林康男, 三田信, 藤田博之: 円形状微細穴形成に対する犠牲層としての電着レジストの適用, 電気学会論文誌 E, 123, 11(2003)477.
- 34) 今井浩志, 岡村 圭, 中野信夫, 長島珍男, 鈴木嘉昭, 高橋勝緒: イオン注入による表面改質を行った多孔質フッ素樹脂膜を用いた電気化学式 CO ガスセンサの出力特性, 電気化学および工業物理学, 79, 3(2011) 140.
- 35) 松原義幸: 家庭用ガス警報器におけるガスセンシング技術, 計測と制御, 46, 8(2007) 644-649.
- 36) 二田穂積: ガスセンサとハイブリッド技術, HYBRIDS, 5, 1(1989)15.
- 37) 大戸亀久美, 中原 毅, 麻生 功: 自動車用内外気自動切り替えシステム, 電気学会論文誌, E, 118, 2(1998)68.
- 38) 池本和夫, 三浦志樹, 小澤弘明, 立花武徳, 藤原直人, 三牧和徳: ステアリング部品の傷および幅寸法の自動検査システムの開発, 日本機械学会, シンポジウム講演論文集, 12(2013)103.
- 39) 三鷹光器(株): レーザプローブ式非接触三次元測定装置, 日本機械学会誌, 110, 1064(2007)554.
- 40) 三浦勝弘, 松葉正, 塚本貴雄, 広瀬一, 古田島秀夫: ポイントフォーカス式超精密全周三次元測定装置(MLP-2SP) の開発と実用化, 精密工学会誌, 81,2(2015)113.
- 41) 三浦勝弘: レーザプローブ式非接触三次元測定装置(NH-3SP), 日本機械学会誌, 年次大会講演資料集, 8(2007)116
- 42) 村上洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生, 近藤英二: 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発(第1報), 精密工学会誌, 75, 12(2009)1476.
- 43) 村上洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生, 皮籠石紀雄, 近藤英二: 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発 (第2報), 精密工学会誌, 76, 8(2010)950.
- 44) 村上洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生: 微小径穴の内径の内壁・直径精密計測, 精密工学会誌, 78, 6(2012)465.
- 45) Jiwen Cui, Lei Li, Jiubin B. Tan: Fiber probe for micro-hole measurement based on detection of returning light energy, Sensors and Actuators A, 190(2013)13.
- 46) Jiwen Cui, Kunpeng Feng, Shengqi Zhu, Yue Zhang, Jiubin Tan: Subpixel edge location method proposed to improve the performance of optical fiber spherical coupling probe during dimensional measurement of micro-cavities with high aspect ratio, Measurement, 47(2014)707.
- 47) 秋山伸幸, 吉田弘昌, サムソール ビン チ サクリ, 宮原 健, 桑原和寿: ピンホール像投影方式2次元形状自動測定装置の開発, 精密工学会誌, 70, 5 (2004) 705.
- 48) 鈴木智之, 平野雅之, 古川光政, 中村勤: マイクロフォーカス X 線源と産業への応用, テレビジョン学会技術報告, 19, 15(1995)1.
- 49) 富澤雅美, 山本輝夫: 産業用 X 線 CT の技術の変遷, 電気学会誌, 136, 11(2016)755.

- 50) 深町哲昭: マイクロフォーカス X 線による内部検査技術, 回路実装学会誌, 11, 3(1996)181.
- 51) 藤井正司: 産業用 X 線 CT による検査技術, 鋳物, 65, 12(1993)916.
- 52) 井海健吾: 工場測定器講座(4) 空気マイクロメータ, 日刊工業新聞社, (1967)19.
- 53) 中山泰熹, 遠藤英男: ダイアフラム式空気マイクロメータ, 日本機学会論文集, 24, 145(1958)656.
- 54) 杉本達於: 特許からみた空気マイクロメータの進歩, 計測と制御, 1, 1(1962)3.
- 55) 鳥越一平, 石井泰: 音響ブリッジ式容積計, 計測自動制御学会論文集, 30 11 (1994) 1303.
- 56) 鳥越一平, 石井泰: 音を利用した表面積の測定, 計測自動制御学会論文集, 34, 3 (1998) 182.
- 57) 石井 泰, 鳥越一平: 低周波音を用いた音響応用計測, 日本音響学会誌, 53, 5 (1997) 399.
- 58) 渡辺嘉二郎, 小山 弘, 田野口 宏: 音響法によるガスパイプラインのピンホール場所の推定, 計測自動制御学会論文集, 27, 1 (1991) 5.
- 59) 渡辺嘉二郎, 小山 弘: パイプラインのリーク場所とその程度の推定, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, 110, 5 (1990) 310.
- 60) 西津貴久: 音響法による米の単粒体積計測に関する試み, 美味技術研究会誌, 2005, 6(2005)4.
- 61) 西津貴久, 池田善郎: 音響による体積測定, 農業機械学会誌, 59, 4(1997)109
- 62) 西津貴久, 池田善郎: 農産物の音響的体積測定法(1), 農業機械学会誌, 55, Supplement(1993)431.
- 63) 西津貴久, 池田善郎: 農産物の音響的体積測定法(2), 農業機械学会誌, 60, Supplement(2000)301.
- 64) 西津貴久, 池田善郎: 農産物の音響的体積測定法(2), 農業機械学会誌, 62, Supplement(2000)295.
- 65) 小野一穂, 杉本岳大, 濱崎公男: 放送で用いられるマイクロホン, 電子情報通信学会, 5, 4(2012)329.
- 66) Andreas. I. Wiryadi, 萩 三二: フランジおよび外管をもつ円管開口端での音波反射に関する実験的研究, 日本機械学会論文集(B 編), 54, 503(1988)1637.
- 67) 樫村秀男, 安信強, 青木俊之, 松尾一泰: 管内を伝ばする圧縮波の開口端からの放射, 日本機械学会論文集(B 編), 60, 569(1994)71.
- 68) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, 森北出版, (2008)131.
- 69) 中井賢治, 横山 隆: 丸棒の不連続部における縦弾性応力パルスの反射と透過, 実験力学, 17-3(2017), 237.
- 70) 尾本 章, 中原雅孝, 高島和博: 音の可視化技術, 映像情報メディア学会誌, 65, 4(2011)453.
- 71) 国立天文台: 理科年表 平成 22 年, 丸善出版, (2009), 420.
- 72) 菅原広史, 近藤純正: 飽和水蒸気圧の計算誤差, 水文・水資源学会誌, 7, 1(1994)440.
- 73) 浅見敏彦, 横田泰孝, 伊勢智彦, 本田逸郎, 坂本博哉: オリフィス付き空気ばねの非線形特性解析と実験による検証, 機械学会論文集(C 編), 777, 77 (2011) 1674.
- 74) 浅見敏彦, 横田泰孝, 伊勢智彦, 本田逸郎, 坂本博哉: 絞りに鉛管を用いた空気ばねの復元力と減衰力を計算する近似式の提案, 機械学会論文集(C 編), 794, 78 (2012) 3413.
- 75) 山本浩, 鄭穎, 奥本眞吾: 空気ばねの特性に絞り特性が及ぼす影響, 機械学会論文集(C 編), 794, 74 (2008) 521.
- 76) J.W.S Rayleigh: The Theory of Sound, Dover, (1965)183.
- 77) Harold Levine, Julian Schwinger: On the radiation of sound from an unflanged circular pipe, Phys, Rev, 73, (1948)383
- 78) Andreas. I. Wiryadi, 萩 三二: フランジおよび外管をもつ円管開口端での音波反射に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集(B 編), 54, 503(1988)1637.

- 79) 樫村秀男, 安信強, 青木俊之, 松尾一泰: 管内を伝ばする圧縮波の開口端からの放射, 日本機械学会論文集(B編), 60, 569(1994)71.
- 80) Satoshi Sugie, Junichi Yoshimura, Teruo Iwase: Effect of interesting a Helmholtz resonator on sound insulation in a double-leaf partition cavity, *Acoust. Sci. & Tech.* 30, 5(2009)317.
- 81) Hiraki Mukai, Shinichi Sakamoto, Hideaki Tachibana: Experimental study on the absorption characteristics of resonance-type brick/block walls, 20, 6(1999)433.
- 82) 田中章三: 掃除機の静音化, 日本造船学会, 761(1992)835.
- 83) 西津貴久: ヘルムホルツ共鳴現象を利用した体積計測, 農業機械学会誌, 63, 1(2001)10.
- 84) 山田一郎: 空気による音の吸収, 日本騒音制御学会, 14, 1(1990)23.
- 85) 小野一穂, 杉本岳大, 濱崎公男: 放送で用いられるマイクロホン, 電子情報通信学会, 5, 4(2012)329.
- 86) 池内秀樹: 金属 3D プリンタによる細孔や曲がり孔を有する製品の製造, 精密工学会, 2018 年度春季大会講演論文集, (2018)589.
- 87) Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yui Wu : *The Mahalanobis-Taguchi System*, McGraw-Hill Professional,(2001).
- 88) 浅井為生, 矢野耕也, 秋山幸示, 小玉圭一, 野上雅巳, 楠本剛史, 松岡久雄, 伊藤邦夫: MT システムの品質管理への適用, 品質工学, 16, 3(2008)86.

## 本論文に関する発表論文等

## 本論文に関する発表論文等

### 1 査読付発表論文

- (1) Yoshinori Nagasu, Kakumasa Eguchi, Kazunori Itoh, Makoto Otani, Noboru Nakayama: Micro-hole inspection using low-frequency sound, Journal of JSEM, Special Issue, 14 (2014), pp. 105-109.
- (2) 長洲慶典, 中山 昇, 伊東一典, 大谷 真, 江口稷正: 低周波音響信号利用による微細穴検査技術, 精密工学会誌, 80, 11(2014), pp. 1023-1030.
- (3) Yoshinori Nagasu, Noboru Nakayama, Kazunori Itoh, Makoto Otani, Keigo Oguchi and Kakumasa Eguchi: Micro-hole diameter inspection using audible sound, Key Engineering Materials, 656-657, (2015), pp. 755-760.
- (4) 長洲慶典, 中山 昇: ヘルムホルツ共鳴を利用した小穴検査技術, 日本塑性加工学会誌, (2019年5月号に掲載予定).

### 2 国際会議

- (1) Yoshinori Nagasu, Kakumasa Eguchi, Takeshi Kazama, Seiichi Kudo, Kazunori Itoh, Makoto Otani, Eimatsu Sakagami, Tsuyoshi Mukaiyama and Noboru Nakayama: Micro-hole inspection using sound signal, Laser sonic sans Advanced Sensing(LU2013), Yokohama, Japan (2013) .
- (2) Yoshinori Nagasu, Kazunori Itoh, Makoto Otani, Noboru Nakayama, and Kakumasa Eguchi, "Micro-hole inspection system using low-frequency sound," Proc. 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(ISEM8), Sendai, Japan (2013).
- (3) Yoshinori Nagasu, Noboru Nakayama, Kazunori Itoh, Makoto Otani, Keigo Oguchi and Kakumasa Eguchi: Micro-hole diameter inspection using audible sound, Proc. 2014 aching, Materials and Mechanical Technologies (IC3MT), Taipei, Taiwan(2014).

### 3 国内講演

- (1) 長洲慶典, 江口稷正, 風間 武, 工藤誠一, 伊東一典, 大谷 真, 坂上榮松, 向山 健: 音響信号を利用した微細穴検査技術に関する研究, 精密工学会講演論文集, (2012), B47.
- (2) 長洲慶典, 江口稷正, 風間 武, 工藤誠一, 伊東一典, 大谷 真, 坂上榮松, 向山 健: 音響信号利用による微細穴検査技術に関する研究, 日本音響学会講演論文集, (2012), 719-720.

## 謝 辞

本論文は信州大学大学院博士後期課程での研究成果をまとめたものです。信州大学 中山 昇 准教授には、主指導教員として研究に対する考え方や論文執筆の心構え、研究者としての基礎をご指導いただきました。ここに謹んで御礼申し上げます。信州大学 吉野正人教授、榊 和彦教授、高山潤也准教授、日本工業大学 神 雅彦教授にはご多忙の中、副査として本論文の査読をしていただき、貴重なご助言とご指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究は多くの方々のご指導、ご協力のおかげで成し遂げられたものです。信州大学 伊藤一典特任教授、京都大学 大谷 真准教授、長野県工業技術総合センター 江口 稜正氏には、音響工学の基礎から音波利用計測技術について、大変貴重なご助言とご指導を賜りました。武石洋征先生には、研究者としての心構えをご指導いただくほかに、本論文を作成するにあたり貴重なご助言とご指導を賜りました。坂上榮松氏には、研究テーマを与えていただくとともに、技術者としての心構えについて公私にわたり熱心なご指導を賜りました。株式会社ミスズ工業 土屋春幸氏、向山 健氏、内山 永氏、篠原俊一氏、戸澤澄枝氏には、研究遂行に必要な検査サンプル製作や、特許出願についてのご支援、プレス加工技術の基礎知識に関するアドバイスなど、格別なるご指導と便宜を図っていただき、多くの面で助けていただきました。ここに謹んで感謝申し上げます。

長野県工業技術総合センター 工藤誠一氏、小口京吾氏、河部 繁氏、風間 武氏、山岸 光氏、新井亮一氏、上条和之氏、児野武郎氏には多大なご指導とご助言を賜りました。特に社会人博士課程在籍者として、業務上の便宜を図っていただきご支援を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

太陽工業株式会社 小平裕也氏、長野工業高等学校の土屋善裕先生には、同じ生産技術研究室の社会人博士課程在籍者として、多くのご協力とご助言を賜りました。お二人の存在があり、苦しい状況の中でもお互いを高めながら研究を進めることができました。生産技術研究室の常前 洋氏をはじめとした研究室在籍の学生の皆様には、毎月の定例ミーティングにおきまして大変貴重なご協力とご助言を賜りました。皆様の今後のご活躍を祈念するとともに、この場を借りて心より感謝申し上げます。

最後になりますが，博士後期課程での研究遂行にあたり，多大なるご協力をいただきました職場の上司，先輩，同僚，そして7年もの長い間支えてくれた家族に，心より感謝いたします。

平成31年2月

長洲 慶典