

音響信号の位相遅れを利用したひずみ円形状の測定*
(第2報, 測定精度の向上に関する検討)相田 収 平*¹, 一宮 亮 一*²
山田 正直*³, 坂本 秀 一*²Measurement of Cylinder Configuration Using Sound Phase Delay
(2nd Report, Study on Improving the Accuracy of Measurement)Shuhei AIDA, Ryoichi ICHIMIYA,
Masanao YAMADA and Shuichi SAKAMOTO

In this paper, we discuss the development of a new noncontact method for determining cylinder configurations using sound phase delay. In order to improve the accuracy of the measurements, the effect of the cavity in which the cylinder is placed has been studied. When the cylinder is placed near a side wall of the cavity, the phase delay angle increases, particularly for cylinders with odd periodic deflection. Thus, by varying the gap between the cylinder and the side wall, it is possible to determine the cylinder configuration even if the deflections are small. We propose a new method, in which the influence of noise is avoided by measuring the noise interference using a pair of microphones in the cavity.

Key Words: Sound, Sensor, Shape Measurement, Phase Delay, Fast Fourier Transform, Non-contact Method, Cylinder Configuration

1. 結 言

近年、製造業においては、工程の効率化、省力化が急速に進んでおり、これに伴って、加工中および検査ラインにおける測定の自動化、無人化の要求が年々重要となってきている。また、材質の多様化および品質管理の点などから、非接触測定への要求も高まってきている。さて、円筒形状における非接触の測定法については、レーザビーム、うず電流を利用したものなど、これまでに種々の測定法が開発され実用化されているが、高価である、測定範囲が限定される、被測定物の材質が限定されるなどの問題点も内包している。そこで著者らは、上記の問題を解決すべく、安価で取り扱いの容易な音響信号の位相変化を利用した新しい測定法の開発を試みている。その測定法は、矩形空洞内に設置した円筒(ひずみ円)に対して音波を入射し、円筒の回転に伴って変化する音波の位相遅れ量の変化からその形状を求めるものである。これまでのところ、

回転によって変動する音波の位相遅れの周期とひずみ円の偏差の周期とは一致しており、さらに、ひずみ円の偏差の大きさと音波の位相遅れ量との間は比例関係にあることが確認されているが、特に偏差の周期が奇数であるひずみ円に対して、測定感度を向上させることが課題の一つとして残されている⁽¹⁾。本論文では、位相遅れ量に及ぼす空洞の影響について検討を行い、奇数周期のひずみ円に対する測定感度の向上を目指した。また、実用化を図るうえで、測定中に周囲の騒音が及ぼす影響について実験を行い、この影響を小さくする新しい測定方法についても提案を行う。以下にこれらについての実験を行った結果について報告する。

2. 位相変化の増大についての検討

2.1 実験装置および実験方法 図1に実験装置の概略図を示す。FFTアナライザ(株)アドバンテスト製R9211C)に内蔵されているシグナルジェネレータより出力される正弦波信号を平面スピーカおよびFFTアナライザのAチャンネルに入力する。スピーカに入力された正弦波信号は、空洞内に音波として入射された後、空洞内に設置されたマイクロホンにより受信され、精密騒音計を介してFFTアナライザのB

* 原稿受付 1996年6月28日。

¹ 正員, 新潟県工業技術総合研究所 (〒950 新潟市鑑西1-11-1)。² 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。³ 正員, (株)新潟鐵工所 (〒950 新潟市岡山1300)。

チャンネルに入力される。空洞内の円筒に対して音波を入射し、スピーカに入力された信号とマイクロホンにより受信された信号との伝達関数をFFTアナライザにより解析し、スピーカに入力された信号を基準として、円筒の回転に伴って変化する、音波の位相角の変化を算出した。なおマイクロホンの先端は空洞の壁面に面一となるように設置し、マイクロホンの体積が空洞内に影響を及ぼさないように配慮した。

空洞はスピーカ側が開口端となった一端開口他端閉口の空洞となっており、研削加工を施した鋼材を使用して製作した。一方円筒は、両端面を研削加工した厚さ10mmの鋼板を用いてワイヤ放電加工機により製作した。片方の壁面に面一となっている回転テーブル上にねじで締結された円筒は、両端面を空洞の壁面と接し、この状態で円筒の中心軸まわりに回転できる構造となっている。したがって円筒面について非接触となっており、本研究では円筒を二次元問題として取り扱っている。また、矩形空洞は縦方向の寸法を任意に設定できる構造とした。以下に実験装置の諸元および実験条件を示す。

- スピーカ：振動板直径192mm円形平面スピーカ
(松下電器産業(株)製EAS-25PL98S)
- マイクロホン：1/4インチコンデンサマイクロホン
(リオン(株)製UC-29)
- 空洞寸法：縦84~120mm(可変)×横400mm×奥行き10mm
- スピーカ振動面と円筒軸中心との距離：155mm
- マイクと円筒軸中心との距離：80mm

被測定物であるひずみ円の形状：本研究では偏差を有する円筒のモデルとして、周期的な偏差がその円筒面を形成している形状を考え、半径 r が式(1)で表されるひずみ円形状を数種類製作し実験に供した。

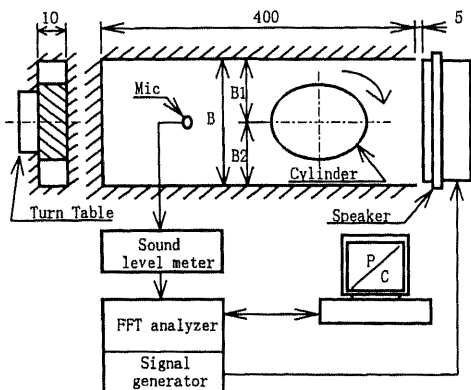


Fig.1 Outline of experimental setup

$$r = a(1 + \varepsilon \cdot \cos m\theta) \dots (1)$$

ここで θ はひずみ円の回転角を表す。また、 a は平均半径、 ε は偏差の振幅、 m は1周期あたりの山の数、すなわち偏差の周期を表し、それぞれ次に示す値とした。

- $a=40\text{mm}$
- $\varepsilon = 0.001, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03$
- $m=2, 3, 4, 5$

2.2 ひずみ円を空洞の中心線上に設置した場合

図2(a)には一例として、 $m=2, \varepsilon = 0.02$ (半径差 $\Delta r=1.6\text{mm}$)のひずみ円について、0~1kHzの周波数範囲における音圧の振幅の変化の様子を示す。ま

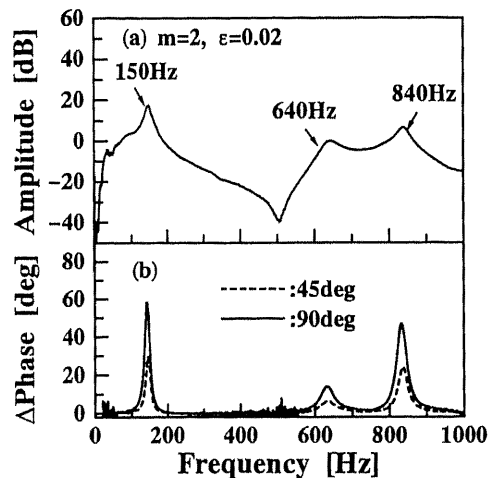


Fig.2 Example of frequency response

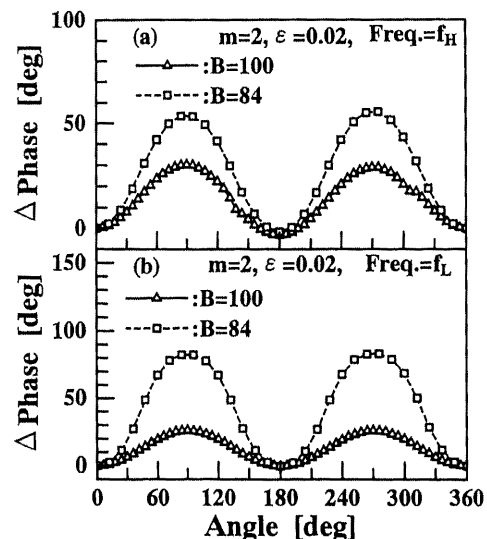


Fig.3 Result of shape measurement of cylinder ($m=2$)

た図2(b)は、ひずみ円にそれぞれ 45° 、 90° の回転角を与えたときの音波の相対位相変化、すなわち位相遅れ量を示す。音波の位相遅れ量は、空洞内の共鳴周波数の付近で大きな差が現れており、それ以外の周波数では、ひずみ円の回転による明瞭な位相遅れが現れていない。これら、明瞭な位相遅れが現れる周波数のうち、 150Hz 付近および 840Hz 付近において位相遅れが最大となる周波数を、それぞれ形状測定の低域周波数 f_L 、高域周波数 f_H として形状測定を行った。

これまでの実験によれば、ひずみ円の回転によって生じる、空洞の側壁との隙間の変化の大きさが、位相遅れ量の大きさに影響していると考えられる。そこで、

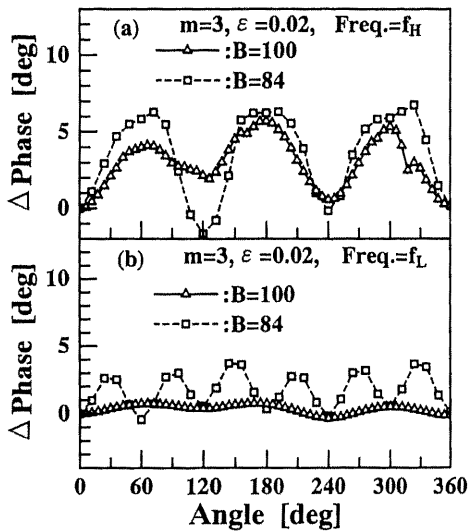


Fig.4 Result of shape measurement of cylinder ($m=3$)

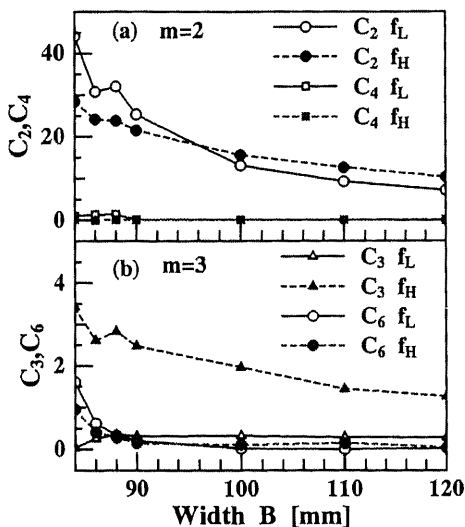
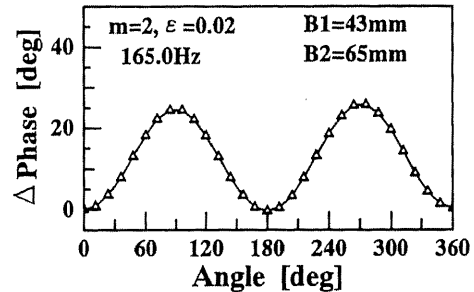


Fig.5 Relation between width of cavity and C_m

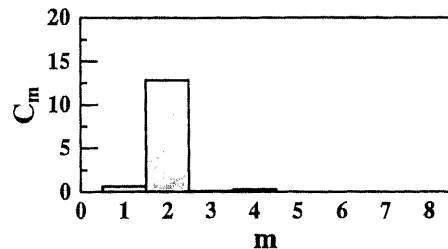
空洞幅 B を $120\text{mm} \sim 84\text{mm}$ の範囲で変化させて、形状測定を試みた。図3は、 $m=2$ 、 $\epsilon=0.02$ について、 $B=84\text{mm}$ および、 $B=100\text{mm}$ の測定結果を示し、図4には $m=3$ 、 $\epsilon=0.02$ のひずみ円についての測定結果を示す。図3および図4より、偏差の周期が偶数の場合には、空洞幅 B が狭くなると位相遅れ量も大きくなっているが、奇数周期の場合では、 B が極めて狭い条件では、位相遅れの変動曲線に偏差の周期の倍周期成分が現れる結果となった。

一方、図5には、両ひずみ円について、形状測定による位相遅れ量の変動曲線をフーリエ展開して得られた、偏差の周期およびその倍周期成分のフーリエ係数 C_m と空洞幅 B との関係を示す。 B が狭い領域で倍周期成分が現れるのは、この図からも明らかであり、奇数周期のひずみ円では、特に低域周波数 f_L において C_m の値の急激な増加が見られる。 $m=3$ のひずみ円を例にとりて、回転による空洞側壁との隙間の変化を考えた場合、一方の隙間が最小となる回転角 θ に対して、それより 60° 進んだ回転角 $\theta + 60^\circ$ では、他方の隙間が最小となり、このことと回転による位相遅れ量の変動の様子とはよく一致している。

一方、偶数周期のひずみ円について、空洞幅 B と C_2 の値との関係を見ると、 B が広い領域では、 f_H における C_2 の値が大きいのが、 B が狭い領域では f_L に



(a) Relation between cylinder rev. and phase delay



(b) Result of Fourier transform

Fig.6 Result of shape measurement of cylinder ($m=2$)

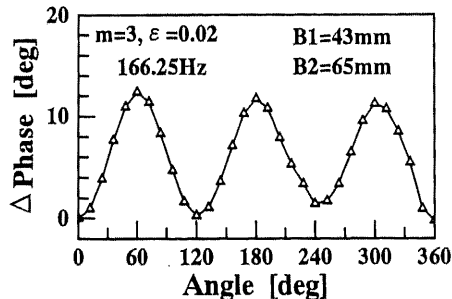
において現れる C_2 の値の方が大きくなっている。

これらの実験結果より、空洞幅 B がより小さな領域では、位相遅れ量はひずみ円の形状それ自体の変化に比べ、隙間の変化に対してより影響を受けることとなり、この傾向は特に低域周波数 f_L において顕著に現れることが明らかとなった。

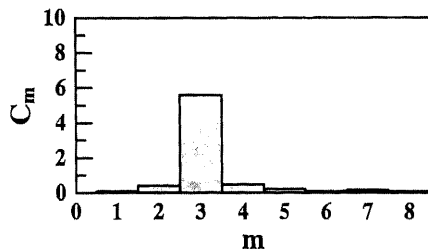
2.3 ひずみ円を空洞の片側に寄せて設置した場合

前節の実験結果において、空洞の隙間が極めて小さな領域では、音波の位相遅れ量が空洞隙間の変化の影響を強く受けることが明らかとなった。本節ではこの現象を積極的に利用し、ひずみ円を矩形空洞の中心線よりオフセットして設置し、片側の空洞隙間の変化による影響を、位相遅れ量に強く反映させることにより、特に奇数周期のひずみ円について測定精度の向上を図れるものと考えた。また、この傾向は特に低域周波数 f_L において顕著に現れることに考慮し、測定周波数は低域において位相遅れが最大となる周波数 f_L を用いて試みることにした。

形状測定の一例として図6には $m=2$, $\epsilon=0.02$ の測定例を、図7には $m=3$, $\epsilon=0.02$ についての測定例をそれぞれ示す。空洞幅は、一方の隙間を狭くし、他方の隙間を広くとることとし、ひずみ円の回転軸中心よりそれぞれ $B1=43\text{mm}$, $B2=65\text{mm}$ としている。ひずみ円を1回転させた場合の位相遅れ量は、それぞれ偏差の周期 m と一致する周期的な変動曲線を描い



(a) Relation between cylinder rev. and phase delay



(b) Result of Fourier transform

Fig.7 Result of shape measurement of cylinder($m=3$)

ており、奇数周期のひずみ円についても良好な測定結果が得られた。片側の隙間を狭くすることで、回転に伴う空洞隙間の変化が位相遅れ量の変化に強く影響している結果と考えられる。また図8には、 $m=2 \sim 5$, $\epsilon=0.01$ の各ひずみ円について、空洞幅 $B1$ を変化した場合の、フーリエ係数値 C_m の変化を示した。各形状とも、 $B1$ が狭くなるに従ってフーリエ係数値、すなわち位相遅れ量が大きく現れており、平均隙間 $B1-a$ の値が 2mm 以下になると、 C_m の値は急激に増大している。また、各形状によって現れる位相遅れ量の大きさには隔たりがあり、偏差の周期 m が大きくなるに従って C_m の値は小さくなっている。式(1)より、形状の最大半径 r_{max} と最小半径 r_{min} との差 Δr は、偏差の周期 m に関わりなく一定となる。円筒を回転して現れる位相遅れ量が、空洞側壁との隙間の変化のみによって現れているのであれば、図7における C_m の値は形状にかかわらず同じになると考えられる。しかし実験結果において明らかなように、 m が異なった場合、現れる位相遅れ量には差が生じており、隙間の変化のみではなく、形状の差異も、位相遅れ量に影響を及ぼしていると考えられる。また、 C_m の値の

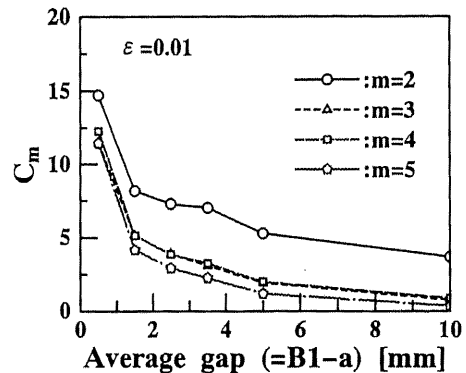


Fig.8 Relation between the gap and C_m

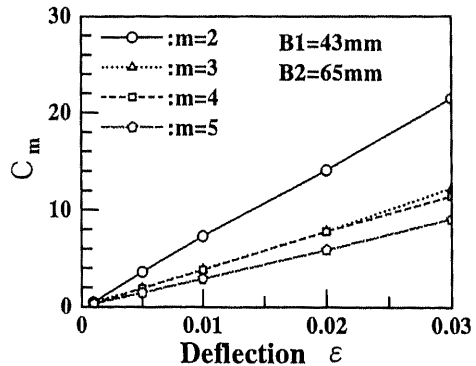


Fig.9 Relation between ϵ and C_m

差は、隙間が狭くなるに従って小さくなっており、隙間の変化が位相遅れ量により強く影響してくる傾向が見られる。

図9に、 $B_1=43\text{mm}$ 、 $B_2=65\text{mm}$ とした場合の、 $m=2\sim 5$ 、 $\varepsilon=0.001\sim 0.03$ (半径差 $\Delta r=0.08\text{mm}\sim 2.4\text{mm}$) の各ひずみ円の形状測定により得られた、各々の偏差の周期 m に対応したフーリエ係数値 C_m の変化を示す。偏差の周期 m が同じひずみ円の間では、偏差の振幅 ε とフーリエ係数値 C_m 、すなわち位相遅れ量との間には正比例関係が成り立っていることが確認された。また、本論文においては、平均半径 a が 40mm の場合について述べているが、 a が変化した場合には空洞幅 B_1 を a に見合った適切な値に設定することにより、様々な径の大きさのひずみ円に対する形状測定が可能であると考えられる。

3. 周囲の騒音の影響に対する検討

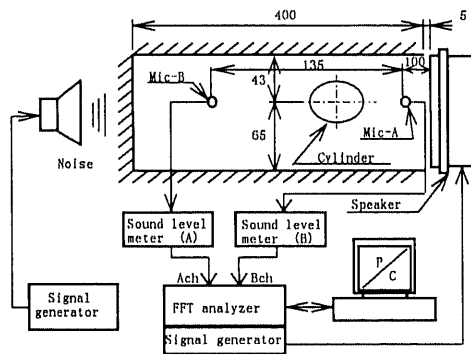


Fig.10 Outline of experimental setup

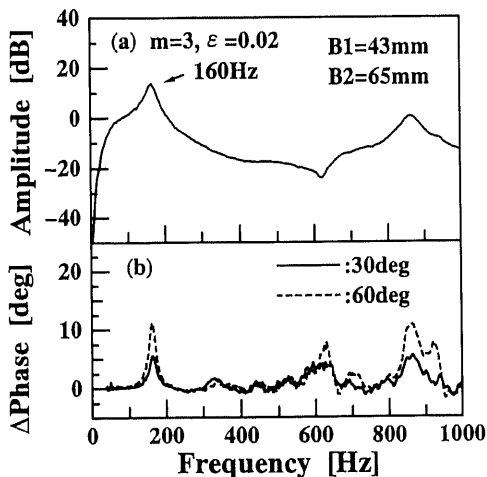


Fig.11 Example of frequency response (A)

3.1 はじめに 本研究で提案している測定方法は、センサとしてマイクを使用しており、周囲の騒音などのレベルが大きい場合には、測定信号と一緒にピックアップされてしまい、これが測定結果に影響を及ぼすと考えられる。本報では、測定精度の向上に関する一考察として、周囲の騒音が及ぼす影響とそれを排除する方法について検討を行った。著者らは、ひずみ円の回転によって空洞内の音響系の伝達関数に変化が生じると考え、2本のマイクを空洞内に設置し、マイク間の伝達関数における特定の周波数での位相変化に着目する新しい測定方法について実験を試みた⁽²⁾⁽³⁾。以下に、測定系に騒音が付加されている状況のもとでの、スピーカーマイク間の伝達関数の位相変化をとらえる、これまでの測定方法との比較検討を行った結果について報告する。

3.2 実験装置および実験方法 図10に実験装置の概略を示す。騒音源として、測定周波数を含む帯域のオクターブバンドのピンクノイズを、空洞外部に設置したスピーカより放射した。測定系は、以下に述べる(A)、(B)の二つの方法を試みた。

測定系 A：測定信号を発生するスピーカと空洞内のマイク間における伝達関数より、音波の位相を求める(図1に示した測定系)

測定系 B：空洞内のひずみ円を挟んだ前後2箇所マイクをそれぞれ設置し、2本のマイク間の伝達関数において、スピーカより入射された測定周波数の音波の位相を求める。なお2本のマイクロホンは体積が空洞内に影響を及ぼさないように、先端を空洞の壁面にそれぞれ面一となるように設置した。(図10に示す測定系)

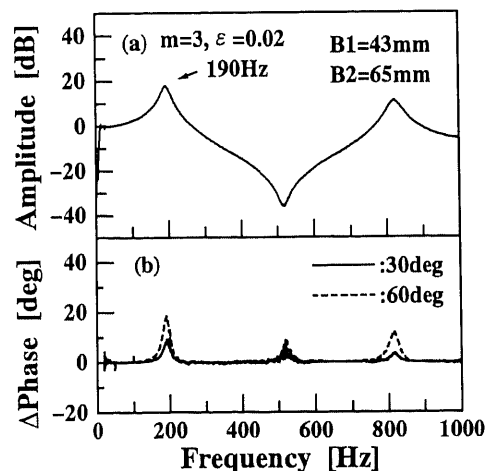
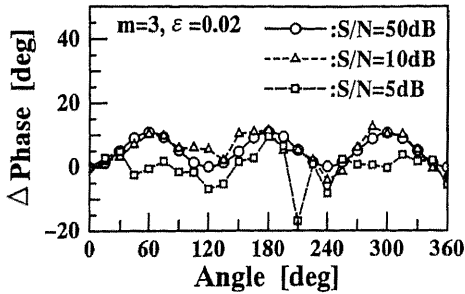


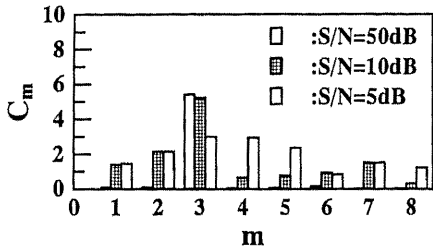
Fig.12 Example of frequency response (B)

これら二つの測定方法により、それぞれひずみ円の形状測定を行い、得られた結果を比較検討した。なお、空洞寸法は $B_1=43\text{mm}$, $B_2=65\text{mm}$ としている。

3.3 実験結果および考察 図 11(a)には測定系 A

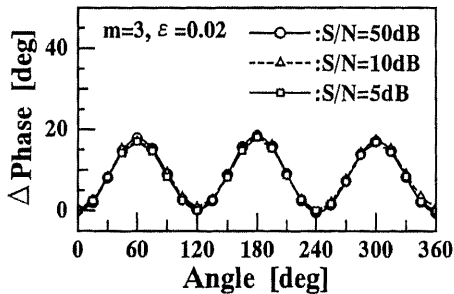


(a) Relation between cylinder rev. and phase delay

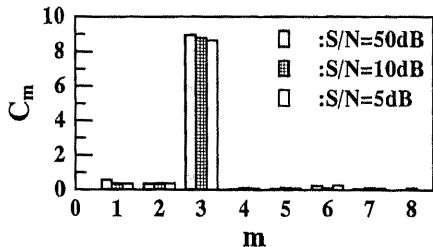


(b) Result of Fourier transform

Fig.13 Result of shape measurement of cylinder (A)



(a) Relation between cylinder rev. and phase delay



(b) Result of Fourier transform

Fig.14 Result of shape measurement of cylinder (B)

について、0～1kHzの周波数域における回転角 0° における音圧の振幅の変化の様子を示し、図 11(b)は、ひずみ円にそれぞれ 30° , 60° の回転角を与えたときの音波の相対位相変化、すなわち位相遅れ量を示す。一方、図 12(a), (b)には測定系 B について、それぞれ同様に音圧振幅および位相遅れ量を示す。どちらについても、音圧振幅がピークをとる近傍で明瞭な位相の変化が現れており、低域の周波数範囲では、測定系 A は 160Hz 付近で、測定系 B では 190Hz 付近で位相遅れが現れており、それぞれで位相遅れが最大となる周波数を形状測定の周波数とした。

図 13 は、測定系 A において、S/N 比を 5dB, 10dB, 50dB とした場合の形状測定結果の一例を示す。なお S/N=50dB はこの場合、周囲の騒音が無い場合と等価と考えている。また図 14 には、測定系 B における同条件での形状測定結果を示す。測定系 A において、騒音のレベルが大きい場合には、測定結果にその影響が認められ、形状を表すフーリエ係数値 C_m 以外の値が大きく現れている。これに対して測定系 B では、騒音のレベルに関係なく、安定した測定結果が得られている。

騒音が、常時ほぼ同じレベルで暴露されていると仮定すると、それぞれの回転角度における位相の測定回数を増やし、加算平均をすることで騒音の影響を低減できると考えられる。そこで、測定の平均回数 N と C_m 以外の係数値が、位相の変動曲線に占める割合を調べた結果を図 15 に示す。測定系 A では、 N を増すに従えばらつきが減少し、安定した測定値が得られる傾向が現れている。一方、測定系 B では、 N に関係なくほぼ一定の値となっており、測定回数 N がたとえ 1 回であっても、信頼できる測定結果が得られることがわかる。音波の位相における騒音の成分が、空洞内の 2 本のマイク間で相殺され、測定周波数の位相成

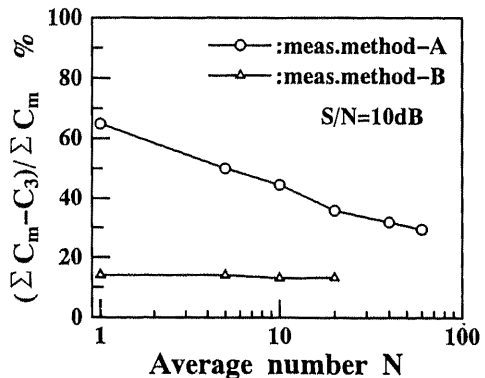


Fig.15 Effect of average on shape measurement

分のみが残るために、安定した測定結果が得られるものと考えられる。

測定時の平均回数を増やすことは、測定と計算に時間がかかり実用的ではない。ここで提案している2本のマイク間の伝達関数の変化を利用する測定方法を採用することにより、平均化処理を省略したリアルタイムの連続的な測定が可能となり、より実用化へ一歩近づけることができた。

4. 結 言

音響信号の位相遅れを利用した、ひずみ円形状の非接触測定について、位相遅れ量の増大および騒音の影響に対する検討を行い、以下に述べる結果を得た。

(1) ひずみ円を回転させた場合に生じる位相遅れ量は、空洞の寸法形状と密接な関係があり、特に空洞側壁の隙間との変化の影響を強く受ける。

(2) ひずみ円を空洞の中心線上に設置した場合、空洞幅が極めて小さいとき、偶数周期のひずみ円では位

相遅れ量の増大が認められる。

(3) 位相遅れ量が、ひずみ円と片側の空洞側壁との隙間の変化の影響を強く受ける現象を積極的に利用することで、特に奇数周期のひずみ円に対して位相遅れ量の増大が図れ、偏差の小さなひずみ円に対しても形状測定が可能となった。

(4) 測定中における周囲の騒音のレベルが大きい場合には、形状測定結果に影響を及ぼすが、空洞内にマイクを2本設置し、マイク間の伝達関数の位相を利用する新たな測定方法を採用することにより、周囲の騒音の影響を排除できる安定した測定が可能となり、実用化へさらに一歩近づけることができた。

文 献

- (1) 相田・一宮・山田・坂本・松村, 機論, 62-603, C (1996), 4250-4256.
- (2) J.Y.Chung and D.A.Blaser, J.Acoust.Soc.Am. 68(3), (1980), 907-921.
- (3) 坂本・一宮・坂井, 機論, No.957-1, (1995), 241-242.