

## 音響信号の位相遅れを利用したひずみ円形状の測定\*

相田 収平\*<sup>1</sup>, 一宮 亮一\*<sup>2</sup>, 山田 正直\*<sup>3</sup>  
坂本 秀一\*<sup>2</sup>, 松村 成生\*<sup>4</sup>

## Measurement of Cylinder Configuration Using Sound Phase Delay

Shuhei AIDA, Ryoichi ICHIMIYA, Masanao YAMADA,  
Shuichi SAKAMOTO and Shigeo MATSUMURA

Recently, noncontact method for measuring cylinder configurations are required in industry. This paper reports the development of a new method for measuring cylinder configurations, using sound signal without contacting the contour surface. This method is based on the fact that the phases of sound waves scattered by a cylinder are delayed according to the diameter of the cylinder. Experiments were performed for various cylinder configurations formed by single and plural periodical deflection, using a loudspeaker, microphone and FFT-analyzer. It was found that the phase delays of sound waves were periodically changed according to the revolution of the cylinder, and the period between the phase delay and cylinder deflection was in good agreement. In addition, the angle of phase delay was linearly proportional to the magnitude of deflection.

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

## 1. 緒 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い。

さて、円筒形状に対する測定の現状を見ると、生産現場では、円形部分を平行な二直線ではさんだ直径法やVブロックとダイヤルゲージを用いた三点法などの接触式が一般的であり、また、精密測定における真円度測定機についても、その多くが接触式による測定である。接触式による測定の場合、被測定物が軟質なものの、表面の汚染を嫌うものなどへの適用は不可能である。また、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。そこで本研究では、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利用を試みた。音響信号を利用した測定法としては、山田らが音波の位相遅れから円筒の軸径を求める方法を試みており<sup>(1)(2)</sup>、音波の位相遅れと円筒軸径の間には比例関係が成り立ち、非接触センサーとして、音波の位相が有用であることが報告されている。そこで、軸線に垂直な方向、すなわち半径方向に偏差を有する円筒と音波の位相との間においても密接な相関があるものと予測し、円筒形状の非接触測定の可能性を検討した。本報告は、円筒の半径方向に周期的な偏差を有し、軸方向に対しては一樣である円筒(ひずみ円)をその中心軸まわりに回転させたときの音波の位相遅れ量の変化からその形状を求める、新しい測定法を実験的に試みたものである。

## 2. 実験方法および実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。FFTアナライザ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、被測定物である円筒の後方に配置されたマイクロホンに

\* 原稿受付 1996年1月16日。

\*<sup>1</sup> 正員、新潟県工業技術総合研究所(☎950 新潟市鏡西1-11-1)。\*<sup>2</sup> 正員、新潟大学工学部(☎950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。\*<sup>3</sup> 正員、(株)新潟鐵工所(☎950 新潟市岡山1300)。\*<sup>4</sup> 学生員、新潟大学大学院。

より受信され、精密騒音計を介してFFTアナライザのBチャンネルに入力される。空洞内の大きさは、ひずみ円が回転した場合に空洞内部で音場に変化が生じ、かつ測定周波数範囲(0~1kHz)において、音波が平面波と見なせるサイズを考慮し、図1に示す大きさとした。なお、この空洞部分は、研削加工を施した鋼材を使用している。一方円筒は、両端面を研削加工し、厚さを10mmとした鋼板を用いてワイヤ放電加工機により製作した。図1に示すように、空洞内において円筒は両端面を空洞の壁面と接し、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、円筒面について非接触の状態となっており、円筒の中心軸まわりに回転できる構造となっている。

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クロススペクトルを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、音圧の振幅および位相角の変化を算出した。空洞内における円筒およびマイクの位置は、それぞれ測定に影響をおよぼすパラメータになるが、また逆にこれらの位置によって、適切な音波の周波数も選択されるであろう。したがって、本実験で採用したそれらの位置に対して適切な周波数を用いれば、良好な測定結果が得られるものと考え、図1に示す位置とした。また、スピーカ、マイクロホンおよび、ひずみ円の仕様を以下に示す。

- スピーカ：直径192mm円形平面スピーカ
- マイクロホン：1/4インチコンデンサマイクロホン

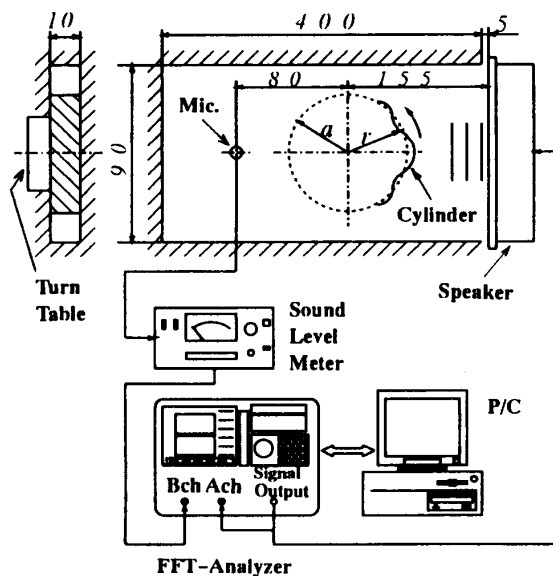


Fig.1 Outline of experimental setup

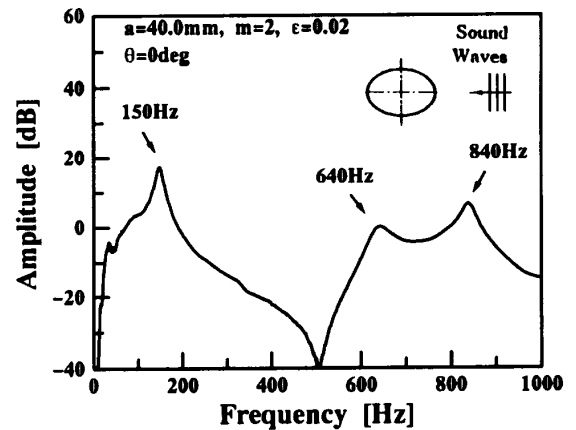
被測定物であるひずみ円の形状：本研究では偏差を有する円筒のモデルとして、周期的な偏差が一つあるいは複数個重なり合ってその円筒面を形成している形状を考え、半径rが式(1)で表されるひずみ円形状を数種類製作し実験に供した。

$$r = a \left( 1 + \sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot \cos m_i \theta \right) \dots \dots (1)$$

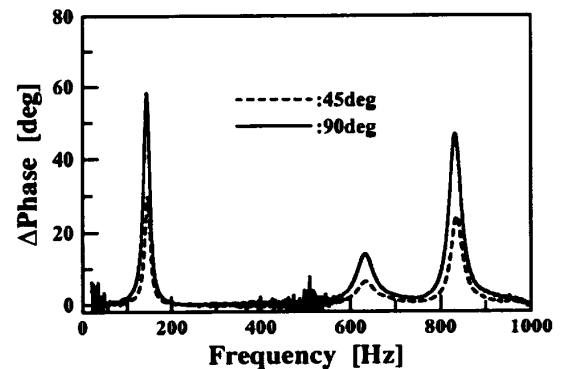
ここで、aは平均半径、 $\epsilon_i$ は偏差の振幅、 $m_i$ は1周期あたりの山の数、すなわち偏差の周期を表し、それぞれ表1に示す値とした。

Table 1 Parameters of cylindrical configuration

n	1	2	3
a(mm)	40		
$\epsilon_i$	0.001, 0.005 0.01, 0.02, 0.03	0.02	
	2, 3, 4, 5	$m_1=2$ $m_2=3$	$m_1=2$ $m_2=4$ $m_3=6$



(a) Amplitude of sound pressure



(b) Relation between frequency and phase delay

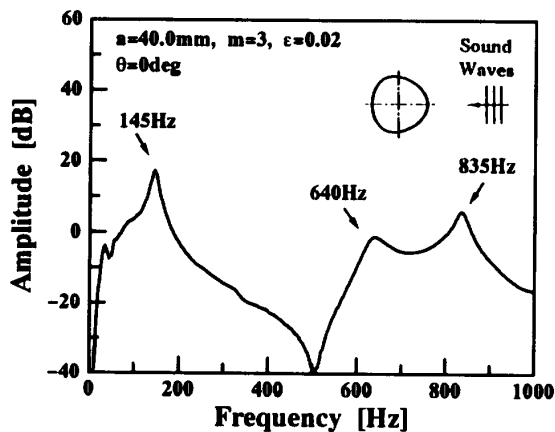
Fig.2 Relation between sound pressure and phase delay (m=2)

### 3. 実験結果および考察

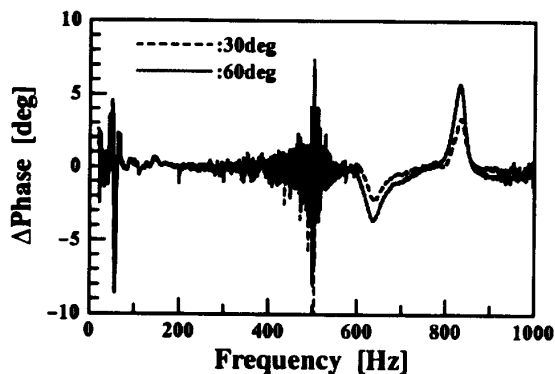
**3.1 ひずみ円の回転による位相遅れ現象と入力周波数の選定** 式(1)において  $i=1$  としたとき,  $m=0$  は真円を表し,  $m=1$  は真円でかつ軸心が偏心している場合を表すことになる. 図2(a)に  $m=2$ ,  $\epsilon=0.02$  (半径差  $\Delta r=1.6\text{mm}$ ) のひずみ円に対して,  $0\sim 1\text{kHz}$  の正弦波スイープ信号を入射した場合の, 回転角  $0^\circ$  における音圧の振幅の変化の様子を示す. また図2(b)は, ひずみ円にそれぞれ  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  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. なお回転角は, 図2(a)中に示した位置を  $0^\circ$  とし,  $0^\circ$  の位置における音波の位相角を基準とし, これに対して, それぞれの回転角における音波の位相角が遅れている場合を正の位相遅れ量として表している.

音圧は, 空洞の共鳴周波数と思われる付近にそれぞれピークが現れており  $150\text{Hz}$ ,  $840\text{Hz}$ ,  $640\text{Hz}$  の順に大きな振幅をとっている.

一方, 位相遅れ量は, これら共鳴周波数の付近で大きな差が現れており, その変化量の大きさは, 音圧の



(a) Amplitude of sound pressure



(b) Relation between frequency and phase delay

Fig.3 Relation between sound pressure and phase delay ( $m=3$ )

大きさと同様の順になっている. また, それ以外の周波数では, 回転による明瞭な位相遅れが現れていない. 図3(a), (b)には  $m=3$ ,  $\epsilon=0.02$  のひずみ円について同様の実験を行った結果を示す. なお回転角度は,  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  とし, 図3(a)中に示すような, 音波進行方向に対してひずみ円が対称となる位置を  $0^\circ$  とした. ひずみ円の形状が異なっても, 空洞の共鳴はほぼ同じ周波数に現れている. しかし, 位相遅れが明瞭に現れる周波数は  $m=2$  の場合とは異なり,  $640\text{Hz}$ ,  $840\text{Hz}$  付近には位相遅れが認められるが,  $150\text{Hz}$  付近には明瞭な位相遅れが現れていない. 一方,  $640\text{Hz}$  付近に現れる位相遅れは,  $840\text{Hz}$  付近に現れる位相遅れとは逆の負の方向に, すなわち基準に対して位相が進んでいる結果となって現れている. このように偏差を有する円筒が, その円筒軸を中心に回転したとき, 音圧のピークが現れる付近, すなわち共鳴周波数の付近で大きな位相遅れが現れている. さらに, 位相遅れ量はひずみ円の回転角によって異なり, ひずみ円の回転によって現れる位相遅れ現象がその円筒形状と密接な相関があるものと推測される. ここでは, 平均半径  $a$  を  $40\text{mm}$  と一定にした場合に得られた結果について述べているが, ひずみ円の平均半径が変化すると, 共鳴周波数および回転によって生ずる位相遅れ量の値は異なるが, ひずみ円の回転によって共鳴周波数付近には同様に, 明瞭な位相遅れが現れるものと考えられる.

$m=3$  のひずみ円において,  $150\text{Hz}$  付近の位相遅れが顕著に現れないのは, ここに現れる位相遅れがひずみ円と空洞側壁との間の回転による隙間の変化の影響を強く受けているためと考えられる. すなわち, 偏差の周期  $m$  が偶数であるひずみ円では, 式(1)から明らかのように, 音波進行と直交する方向の円筒軸径が回転に伴って周期的に  $4a\epsilon$  の振幅で変化し, 一周あたりの変化の周期は, ひずみ円の偏差の周期  $m$  と一致する. 換言すると, 回転によって, 音波進行と直交する方向のひずみ円と空洞側壁の間の隙間は, 空洞側壁の両側で  $4a\epsilon$  の振幅で周期的に変化することになる. これに対して,  $m$  が奇数であるひずみ円では, 中心を通る軸径は常に  $2a$  と一定であり, また回転によって生じる側壁との隙間の変化も極めて小さい. 一例をあげれば, 偏差  $\epsilon=0.02$  の場合,  $m=2$  では最大で  $3.2\text{mm}$  の隙間変化が生じるのに対して,  $m=3$  では僅か  $0.14\text{mm}$  に過ぎない.

偏差の周期を問わず, 回転による位相遅れが現れる周波数は,  $640\text{Hz}$  および  $840\text{Hz}$  付近であるが, 位相遅れは,  $840\text{Hz}$  付近の方がより大きく現れており, また音圧も  $840\text{Hz}$  付近の方が高くなっており, 音響

信号の S/N 比を考慮すると、840Hz 付近の周波数の方がより精度の高い測定が期待できる。

以上の知見より、ひずみ円形状の測定に適する周波数は 840Hz 付近に現れる位相遅れ量の変化を捉えることが適当であると考え、この付近で位相遅れ量が最大となる周波数を形状測定の入力周波数とした。

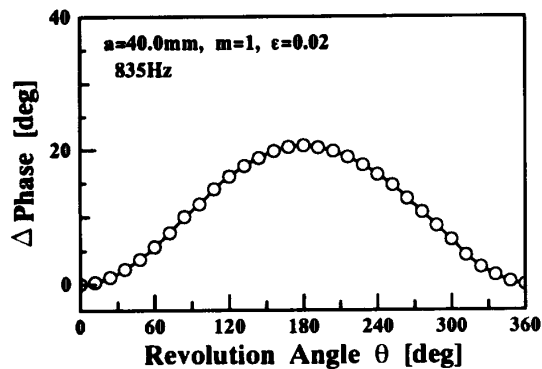
3.2 偏差の周期が単一であるひずみ円形状の測定

前節の結果に基づいて、偏差の周期  $m$  を 1 種類のみ有する (例えば、 $m=3$  のみ) ひずみ円について形状測定を試みた。入力周波数は前述のとおり、840Hz 付近に現れる位相遅れ量が最大となる単一周波数 (純音) とした。測定結果は、回転角  $0^\circ$  における音波の位相角の値を基準にとり、与えた回転角  $\theta$  における音波の位相角との差を、位相遅れ量  $\Delta \text{Phase}$  として表した。なお、位相遅れ量は、基準に対して位相が遅れた場合を正とした。また、得られたデータについてフーリエ展開し、円筒形状の調和解析を行った。

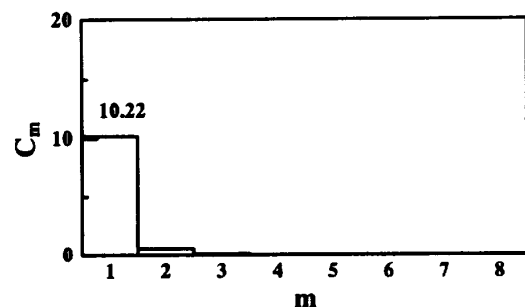
図 4 ~ 図 8 にそれぞれ  $m=1 \sim 5$ 、 $\epsilon = 0.02$  のひずみ円について、回転角  $\theta$  に対する位相遅れ量  $\Delta \text{Phase}$  の変化と、その変化量を調和解析した結果を示す。

軸を 1 回転させて現れる位相遅れ量は、周期曲線を描き、その周期はそれぞれ偏差の周期  $m$  と一致している。このことは調和解析の結果からも明らかであり、偏差の周期に対応した  $m$  次のフーリエ係数値  $C_m$  が、

突出して現れている。図 4 に示した  $m=1$ 、すなわち軸が偏心している真円筒の結果からも明らかなように、各測定結果に現れる係数値  $C_m$  は、主に回転テーブル

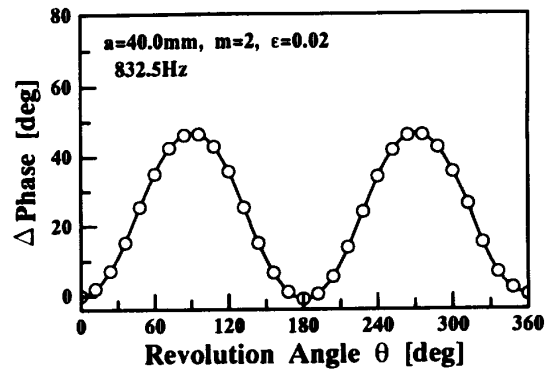


(a) Relation between cylinder revolution and phase delay

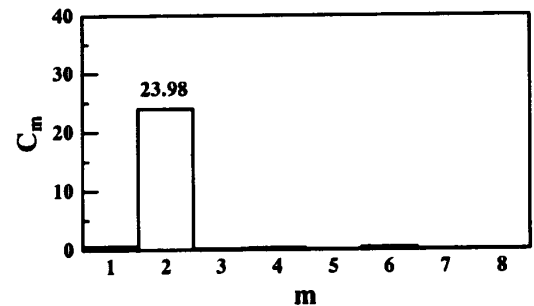


(b) Result of Fourier transform

Fig.4 Result of shape measurement of cylinder ( $m=1$ )

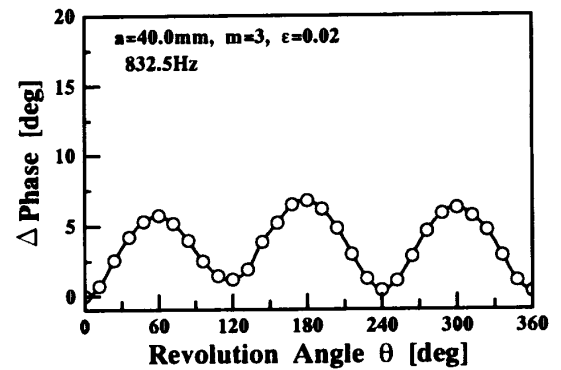


(a) Relation between cylinder revolution and phase delay

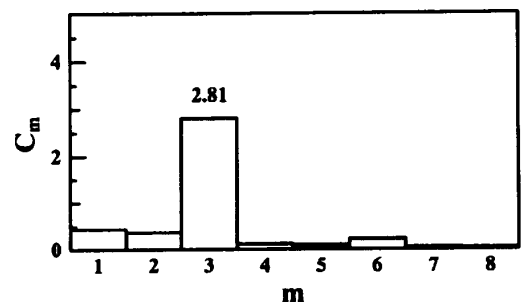


(b) Result of Fourier transform

Fig.5 Result of shape measurement of cylinder ( $m=2$ )



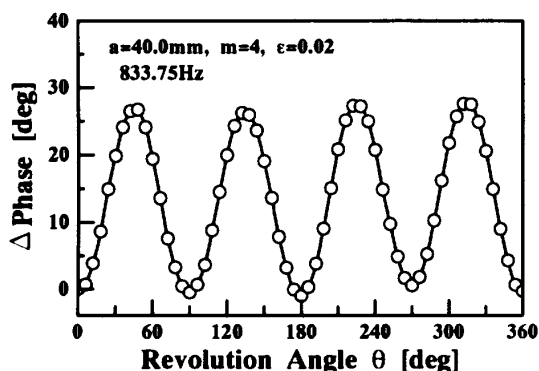
(a) Relation between cylinder revolution and phase delay



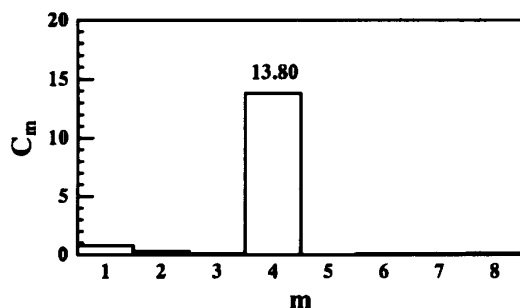
(b) Result of Fourier transform

Fig.6 Result of shape measurement of cylinder ( $m=3$ )

の回転軸中心と被測定物であるひずみ円の軸心との偏心によって生じたものである。それ以外の係数値はノイズ、空気のゆらぎおよび測定機器の精度などに起因

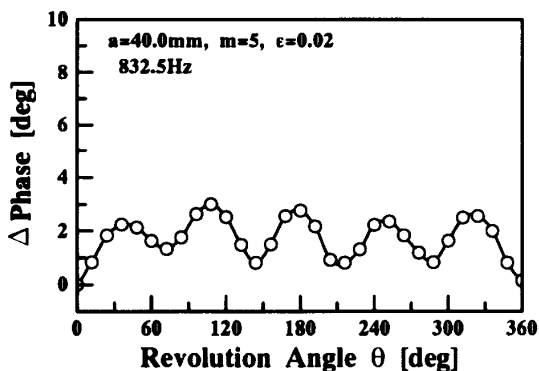


(a) Relation between cylinder revolution and phase delay

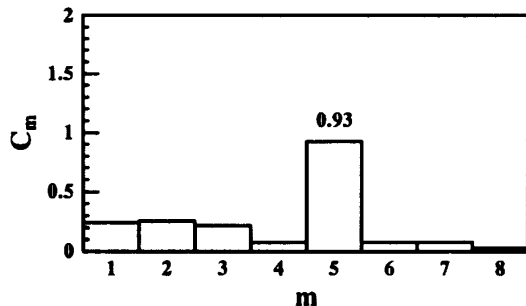


(b) Result of Fourier transform

Fig.7 Result of shape measurement of cylinder ( $m=4$ )



(a) Relation between cylinder revolution and phase delay



(b) Result of Fourier transform

Fig.8 Result of shape measurement of cylinder ( $m=5$ )

して現れていると考えられる。

図9には、 $m=2\sim 5$ 、 $\varepsilon=0.001\sim 0.03$ （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  $\varepsilon$  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。また、 $\varepsilon$  が同じであっても、 $m$  の値によって  $C_m$  は異なっており、特に  $m$  が偶数と奇数のひずみ円の間では、位相遅れ量に大きな差がある。

共鳴周波数の付近では位相の変化が急峻であり、空洞内の音場の変化による共鳴周波数の僅かな遷移が、位相変化となって現れると考えられる。本実験における空洞とひずみ円の間を考えると、偶数山のひずみ円では、回転による空洞側壁との隙間の変化の周期とひずみ円の凸部あるいは凹部の移動の周期とが一致し、音場の変化に対して両者が相乗的に影響する。これに対して奇数山のひずみ円では、空洞内の音場の変化は、回転によって凸部または凹部が移動することによって生じるものが支配的であり、回転による空洞側壁との隙間の変化が極めて小さく、音場の変化は偶数山に比べて小さいと考えられる。このため、奇数山のひずみ円では、偏差の振幅  $\varepsilon$  が  $0.01$ （半径差 $\Delta r=0.8\text{mm}$ ）より小さな場合には、ノイズおよび測定誤差などに埋もれてしまい、形状に対する位相遅れ量が明瞭に現れなかった。偏差の周期が奇数であるひずみ円形状に対する測定感度の向上が今後の課題として挙げられる。また、偶数山あるいは奇数山のひずみ円どうしであっても、 $m$  が大きくなるにつれて、その形状はより真円に近づくために、同じ偏差の振幅であっても位相遅れ量は小さくなっている。

3.3 偏差の周期を複数個有するひずみ円形状の測定  
偏差を有する円筒形状の多くは、単一な偏差だ

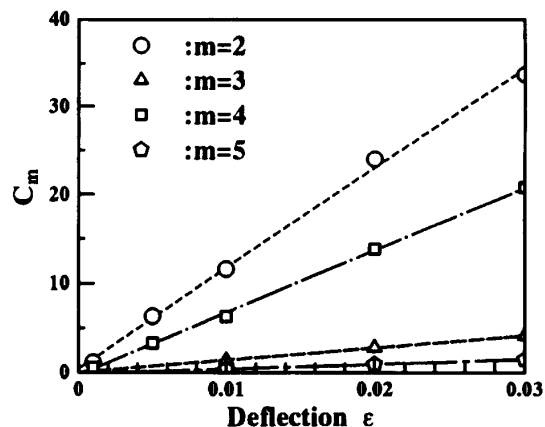
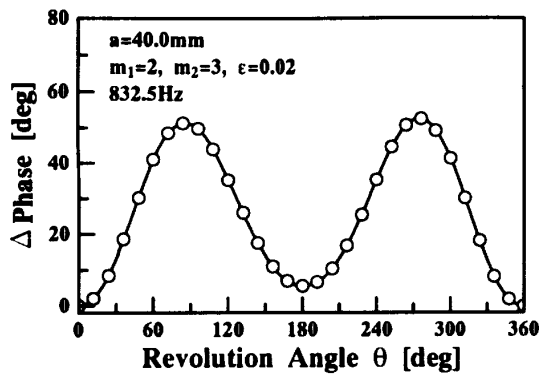
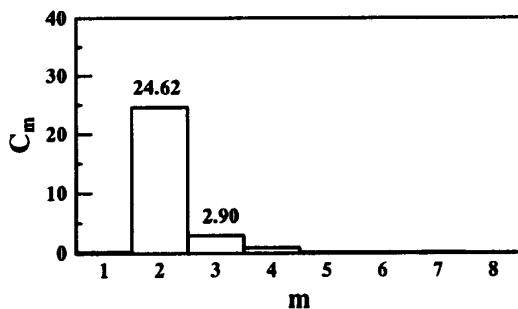


Fig.9 Relation between  $\varepsilon$  and  $C_m$

けを有する形状ではなく、様々な偏差や周期の成分が重なり合って形成されている。そこで、さらに複数個

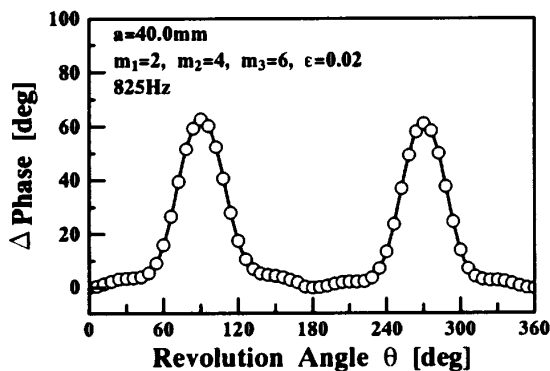


(a) Relation between cylinder revolution and phase delay

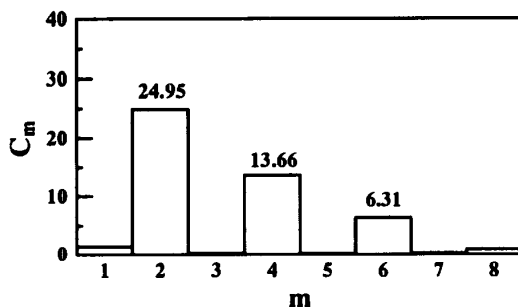


(b) Result of Fourier transform

Fig.10 Result of shape measurement of cylinder ( $m_1 = 2, m_2 = 3$ )



(a) Relation between cylinder revolution and phase delay



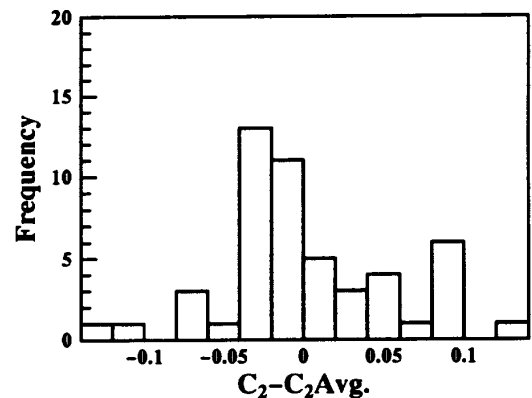
(b) Result of Fourier transform

Fig.11 Result of shape measurement of cylinder ( $m_1 = 2, m_2 = 4, m_3 = 6$ )

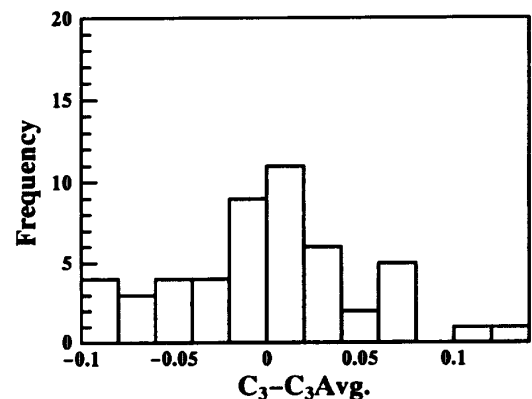
の偏差の周期を持ったひずみ円について、前節と同様の実験を行い、本測定法の有用性を検討した。測定結果を図10～図11に示す。

回転角に対する位相遅れ量の周期曲線について調和解析を行った結果、それぞれのひずみ円形状が有する偏差の周期  $m_i$  に対応する次数にフーリエ係数値が現れ、また、その大きさは、前節で示した偏差の周期が単一なひずみ円における値とほぼ一致しており、偏差の周期が単一なひずみ円を重ね合わせた結果となって現れている。このように、複数個の偏差の周期を有するひずみ円の形状測定についても、位相遅れ量は回転による凹凸位置の変化とよく対応しており、位相遅れ量の変動を調和解析することにより、その円筒形状が有している各々の偏差の周期と振幅の大きさに分解することが可能である。ゆえに、周期的な偏差を有する任意のひずみ円形状について、本測定方法が適用できると考えられる。

3.4 測定精度の検討 ここで提案した測定方法について、その測定精度を確認するために、同一のひずみ円について連続した測定実験を行い、測定データのばらつきを調べた。図12の(a)、(b)に、それぞれ



(a)  $m=2, \epsilon = 0.02$



(b)  $m=3, \epsilon = 0.02$

Fig.12 Distribution of measurement data

$m=2$ ,  $\varepsilon = 0.02$  および  $m=3$ ,  $\varepsilon = 0.02$  について偏差の周期 2, 3 に対応したフーリエ係数値  $C_2$ , および  $C_3$  の分布を示す. 図の横軸  $C_2 - C_2 \text{ Avg.}$ , および  $C_3 - C_3 \text{ Avg.}$  はそれぞれ, 連続測定実験により得られたフーリエ係数値の平均値に対する個々の係数値のばらつきを表しており, 縦軸は頻度を表す.

$C_2$  におけるばらつきの幅は 0.26 であり, この値は  $C_2$  の値に対して約 1% の誤差に相当するにすぎず, 安定した測定値が得られると考えられる. これに対して,  $C_3$  のばらつきの幅は 0.22 となり, ばらつきの幅の絶対値は  $C_2$  の場合より小さいが,  $C_3$  の値に対しては約 7.8% 程度の誤差となる. 測定誤差のばらつきを小さくして測定精度を向上させるために, ノイズの遮断や測定分解能の向上なども考慮する必要があると考えるが, 3.2 節でも検討しているとおり, 特に偏差の周期が奇数であるひずみ円に対する測定感度を上げることにより, 測定精度の向上を図ることが重要であると考える.

#### 4. 結 言

音響信号の位相遅れ量を利用した, 周期的な偏差を

有するひずみ円形状の非接触測定を実験的に試み, 以下に述べる結果を得た.

(1) 周期的な偏差を有するひずみ円に音波を入射した場合, ひずみ円の回転角によって音波の位相遅れ量は周期的な変動を示し, その周期はひずみ円形状の偏差の周期と一致している.

(2) ひずみ円が有する偏差の振幅と音波の位相遅れ量とは, ほぼ比例関係にある.

(3) 複数個の偏差の周期を有するひずみ円形状に対しても本測定法は有効であり, 位相遅れ量の周期曲線を調和解析することにより, その形状を構成している偏差の周期と振幅の大きさを算出できる.

(4) 偏差の周期が奇数であるひずみ円において生じる位相遅れ量は, 偶数の周期であるひずみ円におけるそれと比較して小さいため, これらに対する測定感度の向上が今後の課題として挙げられる.

#### 文 献

- (1) 山田・一宮, 機論, 58-554, C (1992), 3024-3028.
- (2) 山田・一宮・丸山, 機論, 58-553, C (1992), 2680-2685.