

## 凹面型圧電振動子による 2 次高調波超音波の音場分布測定

### Sound Field of Second Harmonic Ultrasonic Waves Using Concave Piezoelectric Transducer

○山形大\*, 福田誠\*, 今野和彦\*

○Tai Yamagata\*, Makoto Fukuda\*, Kazuhiko Imano\*

\*秋田大学 大学院工学資源学研究科

\*Graduate School of Engineering Resource Science, Akita University

キーワード：凹面型圧電振動子(Concave Piezoelectric Transducer), 音場(Sound Field),

非線形効果(Nonlinear Effect), 2 次高調波(Second Harmonic)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学研究科 電気電子工学専攻

福田誠, Tel : 018-889-2484, Fax : 018-837-0406, E-mail : mfukuda@gipc.akita-u.ac.jp

#### 1. はじめに

超音波は超音波探傷試験や超音波医療診断などの非破壊検査に広く応用されている。近年、有限振幅超音波を送波したときに音場媒質の弾性的非線形効果によって生じる高調波成分を用いた非破壊検査に注目されている<sup>1-3)</sup>。

高調波の発生には媒質伝搬過程によるものがある。音響媒質中に有限振幅超音波を送波したとき、媒質の密度が大きく変化し、音波の伝搬速度が変化する。伝搬速度が変化することにより波形がひずみ、高調波成分が発生することが知られている。高調波を感度良く発生させる圧電振動子として凹面型圧電振動子がある。

凹面型圧電振動子は、音響パワーを上げるために平面圧電振動子を凹面状に加工して、音波のエネルギーを一点に集めることができる。凹面型圧電振動子から放射された音波は焦点に向かうにつれ音圧が増大して、媒質の

非線形性のために波形ひずみを発生するため、2 次高調波成分を容易に発生させることができる<sup>4)</sup>。非破壊検査等では検出が容易な 2 次高調波に着目されており、探傷試験や画像化での応用において、基本波を含め音場分布の解釈が重要である。しかし、過去の研究において凹面型圧電振動子の基本波、2 次高調波成分の音場分布を同時に着目した報告は少ない<sup>4-6)</sup>。

本報告では、従来の時間波形の振幅値から音場分布を測定するのではなく、時間波形の周波数スペクトルに着目し、凹面型振動子による基本波成分と 2 次高調波成分の音場分布を同時に測定する方法について述べる。

#### 2. 媒質伝搬過程における高調波成分の発生

通常、超音波伝搬が線形として扱われる超音波は、超音波の振幅が十分に小さく、弾性的に線形の範囲であるため、無限小振幅超音

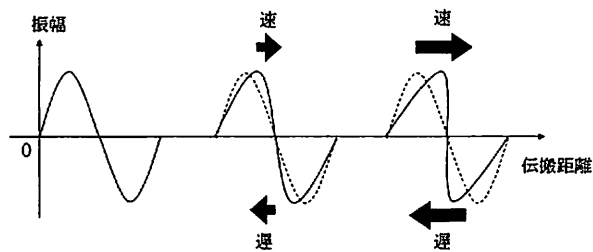


Fig. 1 伝搬過程における高調波成分の発生原理

波として扱える。一方，超音波の音圧を無限小と近似できないような，大きな音圧を有する超音波の場合は，有限振幅超音波とよばれ，式(1)のように示され，伝搬速度  $c$  の振幅依存性を有する。

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)} \quad (1)$$

ここで， $c$  は媒質中の音速， $P$  は音圧， $\rho$  は媒質の密度である。式(1)より，超音波を媒質中に送波した場合，音波の伝搬速度が音圧により変化することがわかる。音圧が大きい部分では音速が速くなり，音圧が小さい部分では音速が遅くなる。このため，超音波が伝搬距離に伴って Fig. 1 のような波形がひずんだ状態になる。

この波形ひずみにより，送波した基本波成分の整数倍にあたる高調波成分が発生する。基本波成分の音圧が大きいと波形ひずみも大きくなり，高調波成分の音圧も大きくなる。

### 3. 凹面型圧電振動子の音場分布測定

#### 3.1 使用する凹面型圧電振動子

本研究で使用する凹面型圧電振動子の直径 20 mm，厚さ 1.1 mm の円形のチタン酸鉛系磁器である。共振周波数 2 MHz，焦点距離 40 mm のものを使用する。

#### 3.2 測定システム

本研究で用いる測定システムを Fig. 2 に示

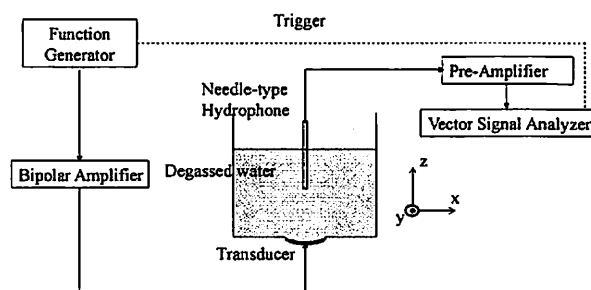


Fig. 2 測定システム

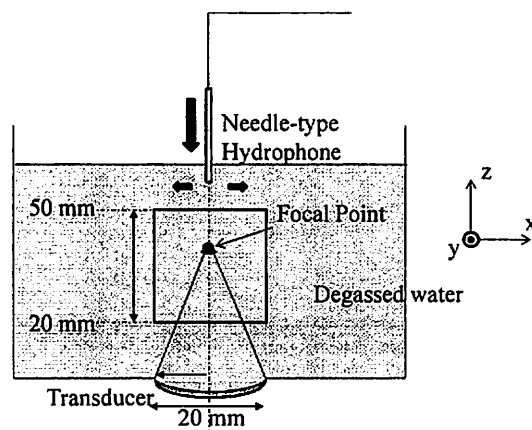


Fig. 3 測定範囲

す。発振器(Agilent 33250A)から 2.0 MHz のバースト正弦波 10 波を発振し，バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により 10 V<sub>p-p</sub> に増幅してその信号を凹面型圧電振動子に印加する。伝搬媒質として脱気水を用いる。伝搬した超音波を広帯域(0.1 ~ 20 MHz)のニードル型ハイドロフォン(Imotec Messtechnik Type80-0.5-4.0)で受波する。ニードル型ハイドロフォンで受波した超音波はハイドロフォン用増幅器(東レ AK85)で 20 dB の増幅後，ベクトルシグナルアナライザ(Agilent 89441A)を用いて時間波形とそのスペクトルを観測し，基本波と 2 次高調波のスペクトル振幅を同時に取得するようになっている。この測定システムにより媒質伝搬過程の非線形効果で発生する 2 次高調波成分を検出する。

#### 3.3 測定範囲

測定範囲を Fig. 3 に示す。ニードル型ハイドロフォンを振動子表面から  $z$  方向に 20~50

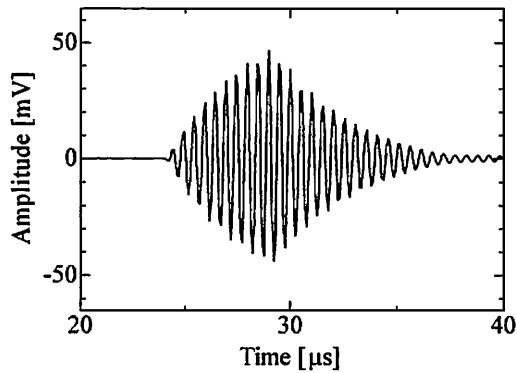


Fig. 4 受波波形( $x = 0$ ,  $z = 36$  mm)

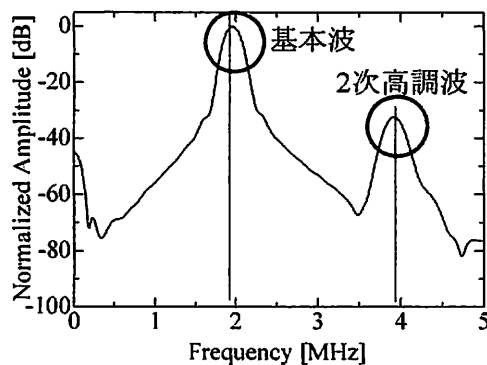


Fig. 5 Fig. 4 の周波数スペクトル

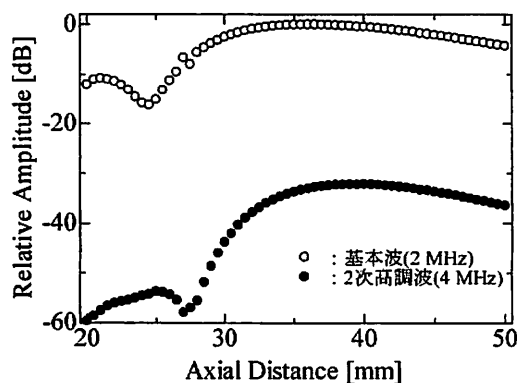
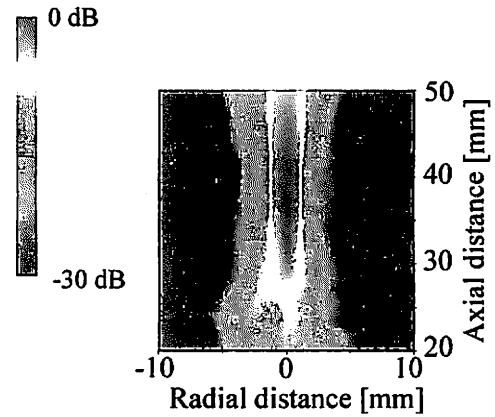
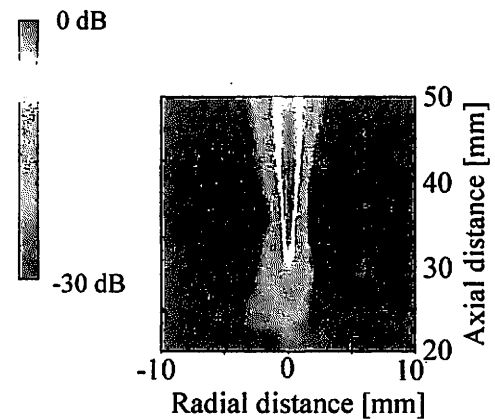


Fig. 6 周波数スペクトルからの振動子中心軸上での基本波, 2次高調波の音場分布

mm,  $x$  方向には振動子中心軸上を 0 mm として左右に -10~10 mm の焦点付近の音場分布を測定する。



(a) 基本波(2 MHz)



(b) 2次高調波(4 MHz)

Fig. 7 音場分布実験結果

### 3.4 周波数スペクトルからの測定結果と考察

Fig. 4 に受波波形( $x = 0$ ,  $z = 36$  mm)の一例を示す。従来は Fig. 4 の時間波形の振幅値から音場分布を観測していた。しかし, Fig. 4 の時間波形からでは 2 次高調波成分の発生が観測できない。そこで, 本報告では時間波形の周波数スペクトルに着目して基本波, 2 次高調波の音場分布を同時に測定する。

Fig. 5 に Fig. 4 の周波数スペクトルを示す。正規化は Fig. 5 の基本波成分を基準としている。Fig. 6 に Fig. 5 の周波数スペクトルから基本波と 2 次高調波のピークを観測した振動子中心軸上での音場分布を示す。また, Fig. 7(a), (b)に基本波, 2 次高調波の音場分布の実験結果を示す。

Fig. 6 の測定結果から基本波と 2 次高調波が

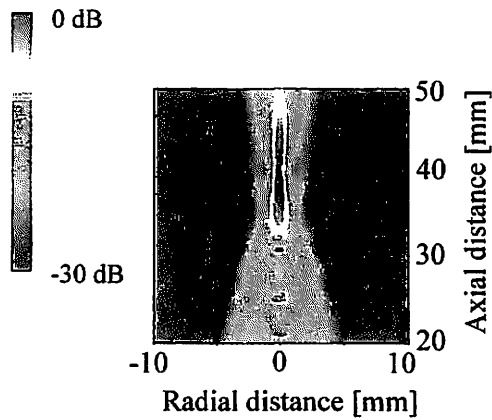


Fig. 8 4 MHz の基本波の音場分布計算結果

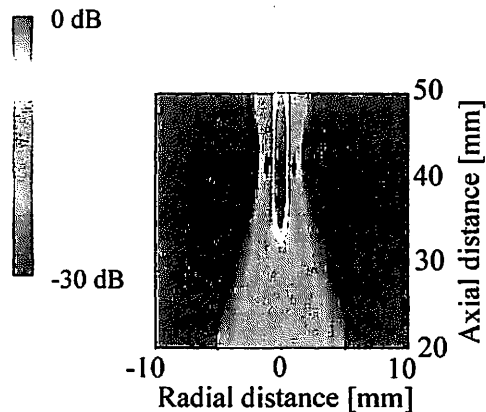


Fig. 9 2 次高調波(4 MHz)の音場分布計算結果

同時に測定できている。また、Fig. 7(a), (b) からの実験結果からは 2 次高調波の音場分布は基本波の音場分布と比較してビーム幅が狭いことがわかり、方位分解能が良いと考えられる。2 次高調波の特徴が現れており、このことから基本波と 2 次高調波の音場分布を同時に観測できていることがわかる。

#### 4. 音場分布測定結果と計算結果との比較

Fig. 8 に 4 MHz の基本波の音場分布の計算結果を示す。また、Fig. 9 に 2 次高調波での音場分布計算結果を示す。

Fig. 8 と Fig. 7(b)の音場分布を比較すると単純に 2 倍の周波数とした基本波の音場分布と測定した 2 次高調波の音場分布が異なることがわかる。これは伝搬距離による 2 次高調波の影響によるものであると考えられる。振動

子に近い領域(20~25 mm)では伝搬距離が短いため波形のひずみが小さく、2 次高調波の発生量は少ない。逆に振動子から遠い領域(45~50 mm)では伝搬距離が長いので、波形のひずみが大きくなり、2 次高調波の発生量が多い。よって、基本波での計算結果は伝搬過程での 2 次高調波の発生を考慮していないため、異なることが考えられる。そこで、伝搬過程での 2 次高調波の発生を考慮した音場分布が Fig. 9 の計算結果である。Fig. 8 の基本波で計算した音場分布とは異なり、Fig. 7(b)とほぼ一致した結果が得られていることがわかる。

#### 5. おわりに

本研究では従来の受波波形の振幅値から音場分布を測定するのではなく、受波波形を周波数スペクトルに変換することで基本波と 2 次高調波の音場分布を同時に測定した。凹面型圧電振動子による基本波、2 次高調波の音場分布を示した。

今後は共振周波数の異なる凹面型圧電振動子を用いて基本波、2 次高調波成分の音場分布を測定し、検討する。また、解析により測定結果と比較する予定である。

#### 参考文献

- 1) 秋山いわき：日本音響学会誌，第 54 巻，第 10 号，pp. 739-743 (1998)
- 2) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano : Electron. Lett., Vol. 43, No. 22, pp. 1237-1239 (2007)
- 3) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano : Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 5B, pp. 4556-4559 (2006)
- 4) 斎藤繁実：電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 91, No. 12, pp. 1108-1115 (2008)
- 5) S. Saito, B. C. Kim and T. G. Muir : J. Acoust. Soc. Am, Vol. 82, pp. 621-628 (1987)
- 6) S. Saito, B. C. Kim : J. Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol. 8, pp. 165-175 (1987)