

音響放射圧によって生じる加振変位の測定を目指した ネットワークアナライザを用いた変位推定法の検討*

○小松祐也¹, 森翔平¹, 荒川元孝^{2,1}, 金井浩^{1,2} (¹東北大院・工, ²東北大院・医工)

1 はじめに

本研究グループでは, 対象物に超音波を照射して局所的に加振し, その粘弾性特性を求める方法を検討してきた^[1]. 本手法においては, 超音波加振によって生じる対象物の変位を測定する必要があるが, 発生変位は数 μm と微小であるため μm オーダーで変位を測定しなければならない. 本報では, ネットワークアナライザ(NA)を用いた反射特性測定による μm オーダーの微小変位の測定方法を検討した.

2 原理

2.1 反射特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ の位相 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ による変位推定

Fig. 1 のように, 送受信超音波トランスデューサから対象物に超音波を照射すると, 対象物表面で超音波が反射される. このとき, 受信される反射波の周波数特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ の位相 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ には, 式(1)のような関係が成り立つ.

$$\angle S_{11}^{(1)}(f) = -\frac{2L}{c} \times f \quad (1)$$

ここで, c は音速, L は超音波の経路長, f は超音波周波数である. ここで, Fig. 1(b)のように対象物が $+z$ 方向に ΔL だけ変位した場合, 超音波トランスデューサと対象物との経路長は $L - \Delta L$ に変化する. このとき, 反射波の周波数特性の位相 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ が変化し, 変位発生前に対する発生後の位相差の周波数特性 $\Delta \angle S_{11}(f)$ には, 式(2)の関係が成り立つ.

$$\Delta \angle S_{11}^{(1)}(f) = \frac{2\Delta L}{c} \times f \quad (2)$$

ここで, ΔL は対象物の $+z$ 方向変位である. したがって, (2)式より位相差の周波数特性の傾きは変位と比例関係にあり, この傾きから

変位を推定することができる.

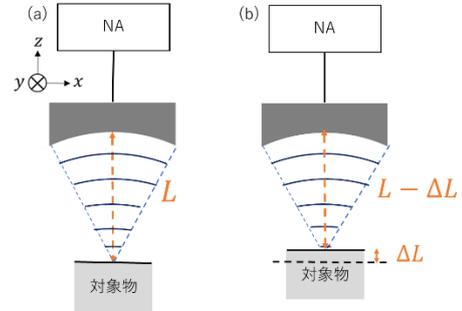


Fig. 1 反射特性測定の様式図

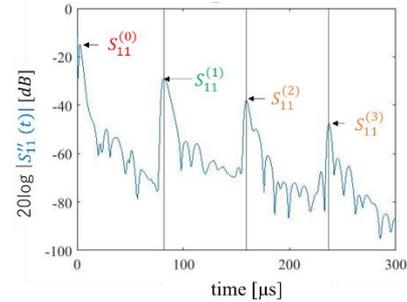


Fig. 2 時間領域における反射信号

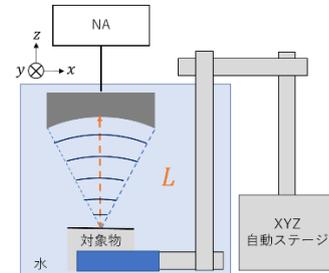


Fig. 3 変位推定実験の様式図

3 実験方法

3.1 超音波反射の位相周波数特性 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ の測定方法

ネットワークアナライザとSパラメータテスト・セットを用いて反射特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ を測定した. 実際に測定される反射特性は, 入力信号が超音波トランスデューサで超音波に変換されて対象物表面で反射されて戻ってくる信号とその多重反射信号 $S_{11}^{(2)}(f)$, $S_{11}^{(3)}(f)$, およ

*Displacement estimation method using network analyzer for measuring excitation displacement by acoustic radiation pressure, by KOMATSU, Yuya¹, MORI, Shohei¹, ARAKAWA, Mototaka^{2,1} and KANAI, Hiroshi^{1,2}(¹Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. ²Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ.).

び超音波に変換されずに戻ってくる電気信号 $S_{11}^{(0)}(f)$ との干渉信号の周波数特性 $S_{11}''(f)$ である。しかし、本測定では対象物からの1回目の超音波の反射特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ のみを測定する必要がある。そこでまず、測定した干渉信号の周波数特性 $S_{11}''(f)$ を逆フーリエ変換することで、時間領域における反射特性を求める (Fig. 2)。次に、1回目の超音波の反射信号のみを抽出するようにゲート処理を行い、これをフーリエ変換することで、1回目の超音波反射の周波数特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ の位相 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ を求める。

なお、送受信点集束トランスデューサは、中心周波数 970 kHz、開口半角 24.6°、有効開口幅 50 mm、焦点距離 60 mm である。

3.2 変位推定

Fig. 3 のように自動ステージを用いて z 方向に +2 μm , +5 μm , +10 μm と対象物を動かし、それぞれの周波数特性の位相 $\angle S_{11}^{(1)}(f)$ を測定した。さらに、 $\Delta \angle S_{11}^{(1)}(f)$ を求め、変位推定を行った。また、+5 μm の変位において3回連続で測定し、再現性を確認した。

4 結果

Fig. 4 に各変位における位相差の周波数特性 $\Delta \angle S_{11}^{(1)}(f)$ を示す。いずれも、線形的な周波数依存性が見られた。

Table 1 に変位の推定結果を示す。推定変位の誤差はすべて 1 μm 以下であった。また、Fig. 4(b) の3回連続測定結果および Table 1 の推定値より、再現性を確認できた。

5 考察

Fig. 4 より、すべての位相差の周波数特性において、おおよそ理論どおりの周波数依存性が見られた。また、変位推定の結果も Table 1 に示すように、誤差 1 μm 以内に収まった。これらの結果は、本測定法が μm オーダーの変位を推定できることを示唆している。しかし、Fig. 4 の位相差の周波数特性には、わずかな非線形性がみられる。これは、複数の干渉反射信号から超音波の反射信号を抽出する際のゲート処理などが起因している可能性があるため、今後適切な処理方法を検討する必要がある。また、今回は中心周波数が 970 kHz の超音波トランスデューサを使用しているが、今後より高い周数帯の超音波トランスデュー

サを使用することで、距離分解能を高くし、より高い精度の変位推定が可能になると考える。

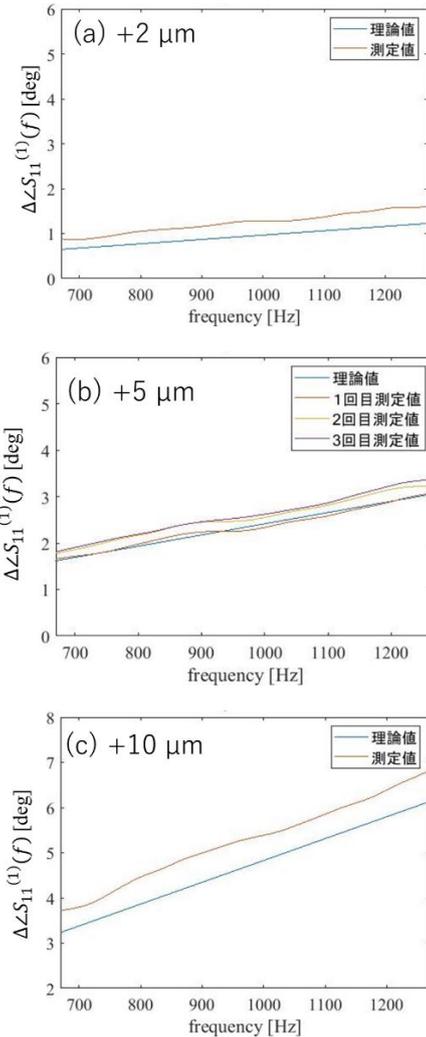


Fig. 4 変位の位相差の周波数特性 $\Delta \angle S_{11}^{(1)}(f)$

Table 1 変位 ΔL の推定結果 (単位: μm)

変位量	2.0	5.0	10.0
推定変位量	2.8	5.0	10.9
		5.3	
		5.5	

6 結論

本報では、ネットワークアナライザを用いて、反射特性 $S_{11}^{(1)}(f)$ の位相差の周波数特性 $\Delta S_{11}^{(1)}(f)$ から対象物の変位を推定した。その結果、本測定法で μm オーダーの変位を推定できることが示唆された。今後は、動的な変位の測定方法や、理論値との誤差について検討する予定である。

参考文献

- [1] H. Kawamura, et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 59, SKKE24 (2020).