光弾性実験と FEM シミュレーションによるフェイズドアレイ計測音場の可視化

Visualization of sound field of phased array using photoelasticity system and FEM

○学 鷲森翔 (富山大)

正 三原毅 (富山大)

正 田代発造 (富山大)

Sho Washimori, Tsuyoshi Mihara, Hatsuzo Tashiro

University of Toyama, Gofuku 3190, Toyama

Key Words: Ultrasonic wave, Phased array, Photoelasticity, Finite Element Method

1. はじめに

フェイズドアレイは、特に超音波探傷において、音場を自由に制御することで、広範囲の計測結果を迅速に画像化出来る技術であり、近年の発電機器の経年損傷評価の対策として、一気に実用化が進んできた。しかし、電子的に制御する音場が設計通りに実現されているかの検証や、目的とする計測対象毎に最適の探傷条件をどう決めるかが課題となってきた。本報告では、著者らが開発、研究してきた光弾性超音波伝搬可視化装置と、超音波伝搬に特化した大規模 FEM を用いて、フェイズドアレイの入力音場を解析、検証した。

2. フェイズドアレイ測定

フェイズドアレイとは超音波探傷法、すなわち超音波を用いて構造物の内部の傷を計測する方法の一種である。

超音波は圧電素子に電圧を印加し、振動させることで発生する。通常の超音波探傷では単一の素子を用いているが (Fig.1)、フェイズドアレイでは細かく分割した複数の素子を用いる。そして、それぞれの素子から発生した波の波面を描えることで、伝搬波を構成する (Fig.2(a))。

Fig.1 Normal Transducer

(a) Linear

(b) Steering

(c) Focusing

Fig.2 Phased Array Transducers

このように、フェイズドアレイでは複数の素子を用いることが特徴であり、素子を同時に駆動させれば垂直方向に (Fig.2(a))、片側から順次駆動させていけば、任意の角度に平面波を発生させることが出来る (Fig.2(b))。また、両端の素子から中央へ順に駆動していくと、超音波を集束させることが可能である (Fig.2(c))。

3. 光弾性超音波伝搬可視化装置による可視化

光弾性法とは応力解析法の一つであり、材料に応力を加えると複屈折を起こす現象を利用したものである。

超音波は弾性波であるため、光弾性法を用いることで、超音波伝搬の様子を可視化することが出来る⁽¹⁾。光弾性超音波伝搬可視化装置の構成を Fig.3 に示す。

Fig.3 Ultrasonic visualization system using photoelastic method

フェイズドアレイの光弾性法による可視化は、フェイズドアレイ探傷器から外部トリガーを光弾性可視化装置に同期させることで可能となった⁽²⁾。

また、遅延装置としてコンピュータ制御可能なデジタルタイミング・ジェネレータを導入したことで、与える遅延時間を数値で設定出来るようになり、定量性・再現性の確保が容易になった。

フェイズドアレイでは Fig.2(b)に示した通り、任意の角度 (ステアリング角) を設定できる。しかし、ステアリング角が大きくなるにつれて、実際に波が進行する角度とステアリング角とのずれが大きくなると報告されており⁽³⁾、その音場を確認する必要がある。

そこで、今回の実験では縦波を用いてステアリング角を設定し、ステアリング角を変化させた場合について可視化を行った。

ここでは撮影した可視化画像から代表例として、Fig.4 にステアリング角 70° で、ストロボの遅延時間を $33, 38, 46 \mu s$ の3種を重ねて示す。

Fig.4 Photoelastic visualization image

4. 大規模 FEM による可視化

FEM (Finite Element Method : 有限要素法) とは、領域を有限の要素に分割・離散化することで数値計算を行う手法であり、超音波の伝搬シミュレーションにおいては最も正確な解析を行うことができる。

本報告では超音波伝搬に特化した大規模 FEM を用いて、前述の光弾性可視化実験での条件において解析・可視化を行った。

フェイズドアレイ振動子の設定条件を Table1 に、試験片の設定条件を Table2 に示す⁽⁴⁾。また、素子を駆動する時間（遅延時間）の設定は、Azar らの論文による⁽⁵⁾。

Fig.5 にこれらの条件で大規模 FEM による解析を行って得られた変位の画像を、伝搬開始からの経過時刻が 2.08、8.82、16.35 μ s の 3 種を重ねて示す。

Table1 Phased array parameters

Element material	PZT
Element width	0.4[mm]
Element pitch	0.5[mm]
Number of Element	16
Frequency	4[MHz]

Table2 Test block properties

Test block material	Quartz glass
Longitudinal wave velocity	5570[m/s]
Shear wave velocity	3510[m/s]
Density	2.7×10^3 [kg/m ³]

Fig.5 FEM visualization image

5. 考察

本節では、3 節と 4 節で可視化した結果を比較し、フェイズドアレイの音場について検証する。

光弾性法による Fig.4 と大規模 FEM による Fig.5 を比較すると、超音波は同じ挙動を示して伝搬していくことが分かる。これは、大規模 FEM の妥当性も示している。

次に、フェイズドアレイの音場について検証する。Fig.4 を見ると、縦波の最も輝度の高い部分は、設定したステアリング角 70° よりも小さな角度に進行して行くことが分かる。これは Fig.5 でも同様である。

この原因としては、素子から発生する超音波の指向性によるものと考えられる。超音波は素子から放射状に発生しているが、大規模 FEM で見る限り、鉛直方向の伝搬強度が最も強く、水平方向にいくにつれて強度は弱くなっていく。

そして、70° などの水平方向に近い大きなステアリング角を設定すると、その方向には指向性の感度が低い。このため、目的のステアリング角へ向かう波は弱くなり、相対的にそれより小さい角度の方が強くなってしまふと考えられる。

その他に、Fig.4 では Head Wave が発生している。光弾性法では、0° から 45° 辺りまでは Head Wave が確認出来ず、46° 以降では徐々に輝度が上がって確認出来るようになる。

これに対して大規模 FEM では 0° から既に Head Wave が発生している。このことから、光弾性法でも 0° から Head Wave は発生しているものの、輝度が小さいために確認出来ないものと考えられる。Head Wave は表面を伝搬する縦波の横波へのモード変換波であり、ステアリング角が表面に近いほど、その強度は大きくなると考えられる。

6. 結論

本報告ではフェイズドアレイによる超音波伝搬を光弾性法と大規模 FEM、二つの方法を用いて可視化をし、それらの比較、検証を行った。

光弾性法は実用アレイによる実験が可能なので、実際の現象を直接観察できる。しかし、ダイナミックレンジには限界があり、輝度が弱い部分は確認しづらい。

これに対して大規模 FEM はあくまでシミュレーションであるため、設定条件による不整合も考えられる。しかし、解析結果は数値データによって定量的に表されるため、結果の検証は容易である。

以上より、光弾性法と大規模 FEM は互いに短所を補充しあえるため、フェイズドアレイの音場解析には有用である。

7. 参考文献

- (1) 日本非破壊検査協会「超音波探傷試験Ⅲ」, pp.192-196
- (2) 古川、古村：現行の規格に準拠したきざし検出への Phased array UT の適用、日本非破壊検査協会 平成 20 年度秋季大会講演概要集, pp.15-16
- (3) 藤原、木本、廣瀬：入射場の放射パターンを用いるリニアアレイ探触子の設計変数決定法、応用力学論文集, vol.6(2003), pp.1089-1096
- (4) 日本非破壊検査協会「超音波探傷試験Ⅲ」, p.256
- (5) L.Azar, Y.Shi, S.-C.Wooh: Beam focusing behavior of linear phased arrays, NDT&E International, vol.33(2000), pp.189-198