

I-15 超音波探触子における変形・電位場の連成解析

○東北大学大学院 学生員 宮腰寛之
東北大学大学院 正 員 山田真幸
東北大学大学院 正 員 寺田賢二郎

1. はじめに

1980年代から始まった超音波非破壊評価の高精度化・定量化の動きに合わせて、探触子にも高性能化が要求されている。しかし、探触子の設計は試作・実験を繰り返して行われているのが現状で、探触子内部の力学的な挙動を電気信号に変換する過程はブラックボックスとして扱われている。そこで本研究では、探触子の設計支援に資するシステムの開発を目的とし、探触子における変形・電位場の連成を考慮した解析ツールを提案し、検証を行う。

2. 圧電素子における変形・電位場の連成

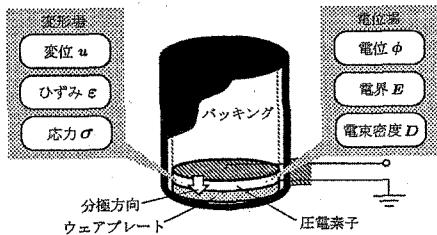


図-1 探触子の内部構造と関連する物理量

垂直・直接接触用の縦波探触子の内部構造を図-1に示す。探触子において超音波と電気信号の相互変換を行うのが圧電素子である。圧電素子の両面に取り付けられた電極に電位が与えられて圧電素子に変形が生じる。超音波の受信時には逆の現象によって電気信号を得ている。以上の変形・電位場の連成現象は圧電効果と呼ばれ、図-1内に示した関連する物理量は次の圧電基本式¹⁾で関係付けられる。

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = e_{ikl} \epsilon_{kl} + \epsilon_{ik} E_k \quad (2)$$

ここにテンソル量 c , e , ϵ はそれぞれ弾性係数、誘電係数、圧電係数である。

変形場は運動方程式、電位場は静電場におけるガウスの法則によって支配され、それぞれの構成則に圧電基本式(1), (2)を用いるとする。このとき有限要素法によって離散化された支配方程式は次のように書ける²⁾。

$$M_{uu} \ddot{U} + C_{uu} \dot{U} + K_{uu} U + K_{u\phi} \Phi = F_u \quad (3)$$

$$K_{\phi\phi}^T U - K_{\phi\phi} \Phi = Q_\phi \quad (4)$$

ここに M_{uu} , C_{uu} , K_{uu} , $K_{\phi\phi}$ はそれぞれ質量行列、減衰行列、剛性行列、誘電行列、 $K_{u\phi}$ は変形・電位場の連成効果を表す相互行列である。また、 U , $\dot{U}$, $\ddot{U}$, Φ はそれぞれ節点における変位、速度、加速度、電位からなるベク

トル、 F_u と Q_ϕ は外力と外部電荷である。本研究では、二本の式(3), (4)をマトリックス連成³⁾によって解く。

3. 探触子のモデル化

探触子の内部の変形および電位場に影響し、設計の対象となる部材として、前節で述べた圧電素子のほかにバックリングや電極が挙げられる。

バックリングは圧電素子の後方に伝播した超音波を吸収する役割を果たす比重の大きい高減衰の部材である。材料はタングステンの粉末とエポキシ樹脂を練り混ぜた複合材料が一般的に用いられている。材料の配合により物性が変化するので、本研究では体積比に応じた平均的な材料定数を均質化法⁴⁾によって求める。バックリング内部における超音波の減衰はレイリー減衰 $C_{uu} = \alpha M_{uu} + \beta K_{uu}$ を仮定する。

電極は非常に薄くその力学的作用は無視できるので厚さはゼロと仮定する。電極における電気パルスの印加は圧電素子の上下面に存在する節点に電位境界条件として与え、送信の動作をモデル化する。電気パルス印加後、上の電極は圧電素子の変形に起因する電気信号を受信する役割があるので、電気パルスの継続時間が終了する時刻において電位境界条件から外部電荷フリーの境界条件に切り替えて受信の動作のモデル化とする。受信される電気信号 V は電極上の節点電位 Φ と形状関数 N_ϕ を用いて次式によって算出した面積平均によって評価する。

$$V = \frac{1}{A} \int_A N_\phi \Phi dA \quad (5)$$

ここで A は電極の面積である。

直径0.5インチ(12.7mm)の圧電素子に電気パルスを印加して自由振動を励起させるシミュレーションを行った結果、得られた電気信号が図-2である。電気パルスの印加後、圧電素子の自由振動が電気信号によって評価できており、電極のモデル化の正当性が確かめられた。

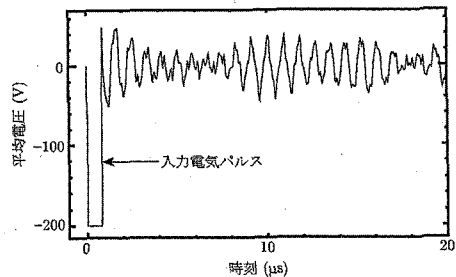


図-2 電極によって受信される電気信号

4. 数値解析例

バックリングを大きくすることで、バックリング背面からの不要な反射波が電極で受信されるのを防ぎ、探触子の性能を向上させることが可能である。しかし、材料として用いるタングステンが高価であることや探触子が重くなることが考えると、バックリングは限られた大きさに留めることが望ましい。そこで、以下ではバックリングの形状を工夫することで探触子の性能を向上させうることを例示するとともに、変形・電位場の連成と探触子のモデル化の有効性を確かめる。

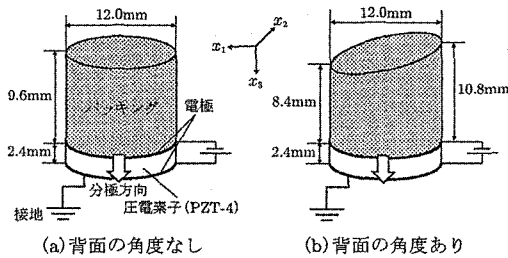


図-3 探触子の解析モデル

図-3に示すバックリング背面の角度が異なった2種類の円形探触子において変形・電位場の連成解析を行い、バックリング背面で生じる不要な反射波の減衰を比較する。両モデルにおいてバックリングの体積は同じである。両モデルは1辺の長さが0.4mmであるボクセルメッシュを用いて分割した。波動解析において波を正確に表現するには1縦波波長を10要素程度で表す必要があるが、先のボクセル分割においては周波数1.14MHzまでの波を正確に表現しうる。圧電素子の上の電極に継続時間0.5 μ s、大きさ200Vの電気パルスを印加して、20 μ sを微少時間増分量 $\Delta t = 0.1\mu$ sで解析を行った。

図-4に、図-3(b)のモデルにおいて得られた変位の時刻歴応答を可視化したスナップショットとして示す。図-4(a)では、負の電気パルスが印加された圧電素子が収縮を始めている。図-4(b)では、時間が進むにしたがって変形がバックリングに伝えられ、最初に発生した波の下に圧電素子内部での多重反射に起因する複数の波が確認できる。図-4(c)では、バックリング背面に到達した超音波が斜めのバックリング背面の境界によって反射している。このときモード変換が生じ、スネルの法則に基づく角度で縦波と横波が同時に発生する。角度をもって発生した波は探触子の円筒壁面においても反射を繰り返す、その後のバックリング内の波動場は図-4(d)のように極めて複雑なものとなる。

図-5に両モデルにおいて電極で得られた電気信号を示し、バックリングにおける反射波の減衰について比較を行う。このとき、1波長10要素で表現できない超音波は物理的な正当性が保証されないものとし、1.14MHz以上の周波数データをカットした。図-5より、バックリング背面に角度がある場合にはない場合と比べてバックリング背面からの反射

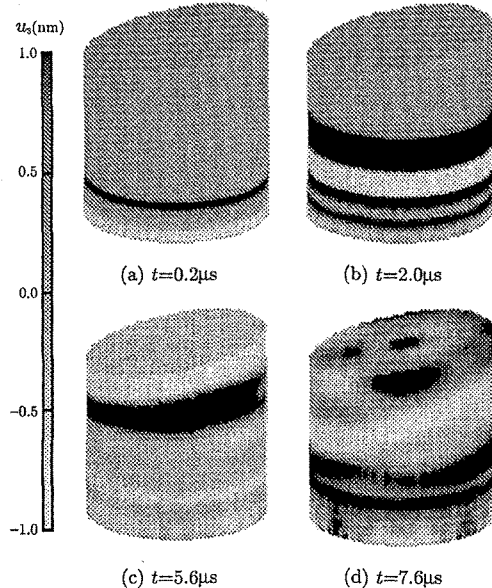


図-4 変形場の可視化結果 (図-3(b)のモデル)

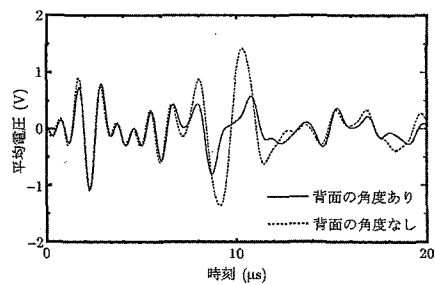


図-5 バックリング背面からの反射波の比較

波 (8~12 μ s 付近) が小さいことがわかる。これは角度がある場合はモード変換を繰り返して波が複数に分かれるので、それぞれの波にエネルギーが分散されることが原因であると推察される。このように、バックリングの形状を工夫することで探触子の性能を向上されることが本解析によって明らかになった。

5. 結論

本研究では、探触子の設計支援に資するシステムの開発を目的とし、探触子における変形・電位場の連成を考慮した解析ツールを提案した。バックリングの設計問題を例に、変形の可視化や電気信号による評価が可能な本解析システムの有用性を示した。

参考文献

- 1) 池田拓郎：圧電材料科学の基礎，オーム社，1984。
- 2) Allik, H., Hughes, T.: Finite element method for piezoelectric vibration, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 2, pp. 151-157, 1970.
- 3) CAD/CAE研究会編: ANSYS 工学解析入門，理工学社，2001。
- 4) 寺田賢二郎，菊池昇：均質化法入門，丸善，2003。