

変形・電位場の連成を考慮した超音波探触子シミュレータの開発

Development of numerical simulator
by coupled electro-mechanical analysis of ultrasonic piezoelectric transducer

山田真幸*・宮腰寛之**・寺田賢二郎***

Masaki YAMADA, Hiroyuki MIYAKOSHI and Kenjiro TERADA

*正会員 博(工) 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

**正会員 修(工) 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

***Ph.D 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

An analytical method is developed to characterize the electro-mechanical coupling phenomena in an ultrasonic transducer, which consists of a piezoelectric element, an electrode and backing materials. A set of governing equations of wave motions and electric potentials were solved, applying the voxel finite element method. In the both cases of transmitter and receiver, the accuracy of solutions is confirmed. Then, the proposed method is applied to the simulator for the design of transducers.

Key Words : ultrasonic transducer, simulator, piezoelectric, coupled analysis, backing

1. はじめに

社会構造の変化に伴って土木構造物の延命化が要請される今日、損傷や破壊に繋がる劣化を検出し、深刻な状況を招く前に補修や交換などの判断を合理的に行うことは重要である。

構造物内部の劣化や損傷を探知する技術の一つに超音波を用いた非破壊検査があり一定の成果を挙げている^{1,2)}。例えば近年内部き裂上下端からの回折波より、き裂高さを推定する TOFD³⁾法が実用化されているが、そこでは回折波の検出において散乱波の位相情報が利用される。また、超音波を波動方程式に支配される固体・液体の運動として数学的に記述して構築した定量的な検査手法^{4,5)}では従来の散乱波形の強度、伝播時間、位相といった個別のパラメータではなく散乱体からの散乱波形そのものが推定式の入力として利用される。

圧電探触子を用いた超音波計測により得られる散乱波形には探触子の波動・電気信号相互の変換特性が不可避に含まれる。手法の高度化が進められている現在、超音波計測に用いられる圧電探触子には、従来の感度、周波数帯域といった観点以上の高い性能が要求されている。しかしながら探触子の設計は試作・実験により行われているのが現状であり、定量的な検査手法の検証に利用できる高性能な探触子は極めて少ない。また実験計測により検証されている高度な検査手法も見られるものの^{6,7)}これらデバイスの問題を考慮する必要のない、数値シミュレータの利用、構築が試みられており^{8,9)}、そこでは電気信号・波動の変換特性に実測値を用いる等、探触子の特性についてはブラックボックス的な扱いがされているのが現状である。

ここで超音波に関連して電気工学分野に視点を転じてみると1970年にはAllikらにより、変形場と電位場の連成を考慮した有限要素法の定式化¹⁰⁾が行われ、それをもとにしたソナー¹¹⁾や水浸探触子¹²⁾の二次元解析の研究が行われており、1990年代には圧電材料の三次元解析も行われた¹³⁾。またWojcikらのグループにより時間領域の有限要素法を用いた汎用圧電解析ソフトPZFlexが開発され、医療用の探触子の設計指針に関する研究等に用いられている^{14,15)}。このように圧電材料の解析ツールはすで確立しているものの、圧電素子のアクチュエータとしての動作のみを扱っているものが多く、非破壊検査手法の高精度化を意図して、圧電探触子による一連の電気信号―波動―電気信号の変換を扱った研究はない。

そこで本研究では、圧電素子における変形と電位場の連成現象を考慮できる動的有限要素法に基づいて、超音波計測用探触子の波動・電気信号相互変換シミュレータを構築する。まず、有限要素法による離散化方程式とあわせて探触子の数値モデルと数値解析ツールを構築し、異なるメッシュサイズや周波数帯域に関してその送信および受信の精度を検証する。そして、開発したシミュレータより、探触子の設計支援と定量的な非破壊検査への応用を意図した幾つかの数値解析を行い、その適用を例示する。

2. 探触子のモデル化と解析ツールの構築

鋼構造物等の超音波計測で用いられる垂直・直接接触用の縦波探触子の内部構造を例として図-1に示す。

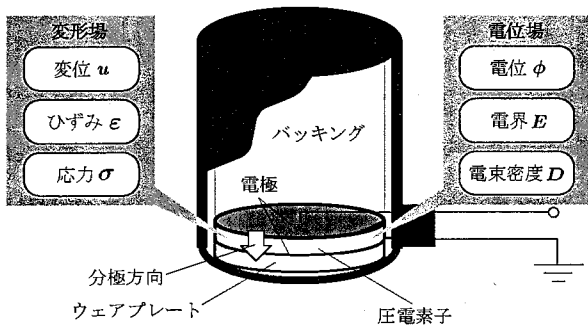


図-1 探触子の内部構造と関連する物理量

図-1 中の圧電素子が波動と電気信号との相互変換を行うものであり、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ると圧電素子に変形が生じ、超音波により圧電素子に変形が生じると電極間に電位が生じる。この圧電効果による波動と電気信号との相互変換では探触子の有する動的な変形特性がその変換特性を決定付ける。このことから圧電素子の振動モードを制御することは探触子の設計において重要である。

図-1 に示したタイプの探触子は円板の厚み振動が励起されることを期待して圧電素子の諸元が決定されており、これをパルス電圧により駆動した場合に出力される超音波は、圧電素子の厚み振動の周波数、挙動を有するものとなり、波動の入力により出力される電気信号もまた圧電素子の厚み振動に大きく影響される。

以上より探触子における波動・電気信号相互変換シミュレーションでは三次元で複雑な探触子の形状を実物に則してモデル化できることが望ましい。そこで本研究では探触子モデルの形状を生成するコストを削減する目的で、ボクセル有限要素法¹⁶⁾を用いる。ここでは汎用 CAD ソフトで解析モデルの形状を生成し、エンジニアリングソフト VOXELCON¹⁷⁾ によりボクセル有限要素に変換する。

2.1 圧電体における変形・電位場の連成

図-1 内に示した関連する物理量は次の圧電基本式¹⁸⁾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 , ϵ , e はそれぞれ弾性係数、誘電係数、圧電係数である。また圧電効果は一般に温度場も関係するが、MHz 帯域の現象を扱う本研究では断熱変化を仮定している。

本論文では変形場を動的問題として取り扱うが、弾性波の速度が電磁波の速度に比べて十分小さいため、電位場を静的に取り扱う近似が可能である。準静的な電位場の問題では電界の効果に比べて磁界の効果が十分小さいので、磁界の影響を無視できる。よって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

表-1 PZT-4 の材料定数

弾性係数 (Nm^{-2})		誘電係数 (-)	
c_{11}^E	1.39×10^{11}	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	730
c_{12}^E	0.778×10^{11}	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	635
c_{13}^E	0.743×10^{11}	圧電係数 (Cm^{-2})	
c_{33}^E	1.15×10^{11}	e_{33}	15.1
c_{44}^E	0.256×10^{11}	e_{15}	12.7
c_{66}^E	0.306×10^{11}	e_{31}	-5.2

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。

圧電素子の材料には多結晶の強誘電体に分極処理を施した圧電セラミックスが加工の容易さから広く用いられている。ここでは代表的な PZT-4 (チタン酸ジルコン酸鉛) を用いるとし、材料定数の値を文献¹⁹⁾を参考に表-1 のように与える。圧電セラミックは分極方向が回転対称軸となり、それと垂直な面内では等方性を示すような直交異方性材料であるが、本研究では分極方向を x_3 軸と一致させて、座標軸に沿って直交異方性を表現することとした。

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与えられる²⁰⁾。

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

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

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、2本の式 (3), (4) を変位 U と電位 Φ を同時に未知数とするマトリックス連成²¹⁾によって解く。

時間方向の離散化には、電位場が静的であり陽な時間発展の式が導けないことから陰解法であるニューマーク β 法を用いる。連立方程式は element-by-element 共役勾配法による並列計算によって解くこととした。

2.2 境界条件と超音波の送受信シミュレーション

圧電効果を利用した探触子では、変形・電位場の連成により両者が相互に変換されることから、探触子を電気的な変形センサ、およびアクチュエータの双方に使用できる。このことから計測では超音波の送受信を単一の探触子で行う一探触子パルスエコー法が多く用いられている。

図-2 に一探触子パルスエコー法における探触子と計測装置との接続の模式図を示す。探触子は図-2 のようにパルス電圧を発生するパルサに接続されるが、同時に分波器を介して電気信号を受信、増幅するレシーバに接続される。これは送受一体型のパルサレシーバを

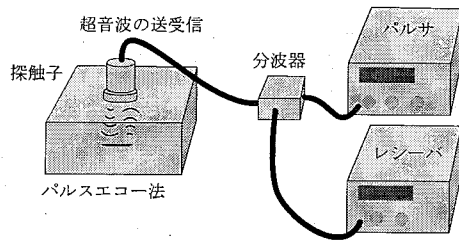


図-2 パルスエコー法時の探触子と計測機器との接続
用いた場合でも同様で、内蔵された分波器が用いられている。

ここでは一探触子パルスエコー法のシミュレーションを意図して圧電素子の電極に対応する要素の節点に、電位境界条件として電圧を与え、探触子の送信の動作をモデル化する。圧電素子の両面にスパッタ、蒸着等の方法で形成される電極は非常に薄いことから、その力学的作用は無視できるとして厚さをゼロとした。

探触子の受信動作は、探触子を駆動するパルス電圧が終了する時刻において電極面の節点を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ることでモデル化する。また受信される電気信号 V は電極上の節点電位 Φ を形状関数 N_ϕ を用いて次式によって算出した電極面における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。またここでは圧電素子の電極のうちウェアプレート側の電極を接地とし、電位を常にゼロとしている。

3. 変形・電位場の連成を考慮した探触子シミュレータの検証

超音波計測における圧電探触子の動作、諸元をモデル化した数値実験により、構築した波動・電気信号相互変換シミュレータの精度を検証する。

3.1 探触子の送信の精度検証

探触子の設計は意図した振動モード下で、所望の共振周波数を有する様に圧電素子の諸元を決定することで行う。圧電素子の厚み方向振動を利用する場合には、以下の式により共振周波数 f_r を有するように圧電素子の諸元が決定される²²⁾。

$$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

ここに t は圧電素子の厚さ、 c_{33}^E は電界一定における 33 方向の弾性係数、 ν はポアソン比、 ρ は密度であり、圧電素子の厚さ以外の形状は、探触子外形寸法等の周波数以外の要求により決定される。

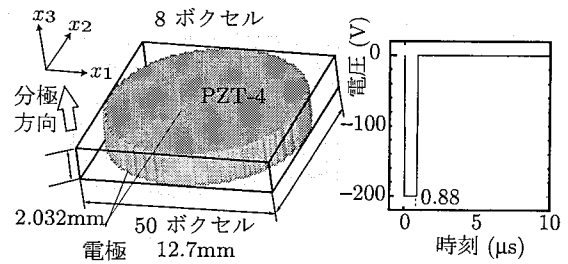


図-3 圧電円板モデル

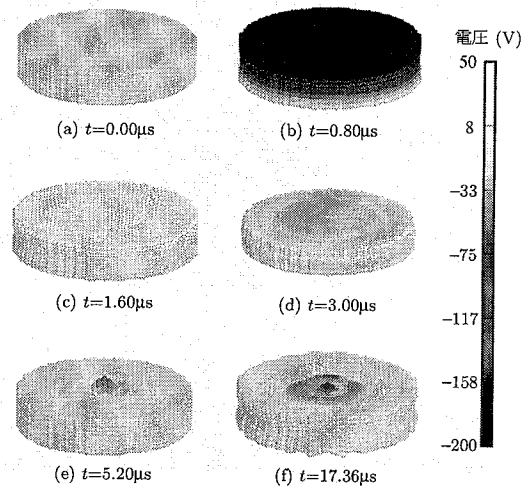


図-4 変形と電位分布の時間変化

ここでは図-3左に示す直径 12.7mm、厚さ 2.032mm の圧電素子モデルに、図-3右に示す継続時間 0.88μs、大きさ -200V のパルス電圧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い、その変形の時刻歴および圧電効果により生じる電気信号の時刻歴を得ることを試みた。得られた変形の時刻歴によるスナップショットの例を図-4に示す。ここでは可視化ソフト AVS-Express²³⁾ を用いて圧電素子表面の節点を粒子として表示して変形を示している。また電位分布は粒子の濃淡によって表示した。

初期状態図-4(a) の圧電素子は、パルス電圧により図-4(b) のように x_3 方向に上下対称に膨張する。このとき電位は x_3 方向について滑らかに分布しており、 x_1-x_2 平面内では一様である。パルス電圧による駆動が終わると図-4(c), (d) のように、圧電素子は膨張と収縮を繰り返す自由振動の挙動を示す。更には図-4(e) のように圧電素子の上下の面に波紋状のモードが現れ始め、顕著となる。図-4(f) によると、圧電素子中央では負の、端部では正の電位を持つなど同一平面内での電位の差が大きくなっていることがわかる。

上面の電極より得られた電位の時刻歴を図-5(a) に示す。電位境界条件から自然境界条件に切り替わった後は、ほぼ一定の周波数でゼロボルトを中心に振動す

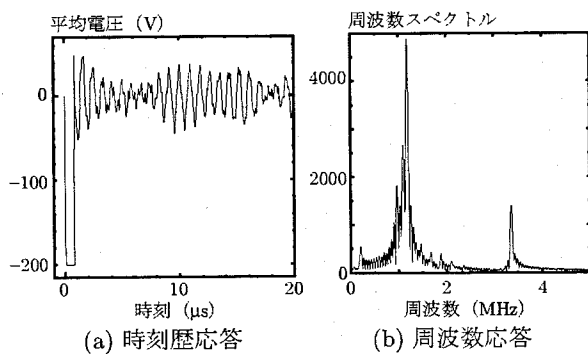


図-5 電極によって受信される電気信号

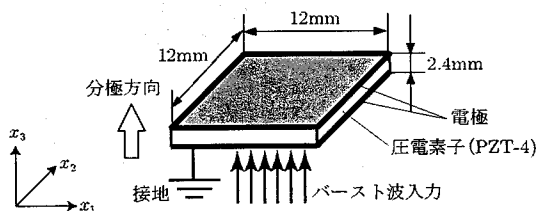


図-6 圧電矩形板の解析モデル

表-2 ボクセル分割

分割	1 辺の長さ	周波数の上限
$40 \times 40 \times 8$	0.3mm	1.52MHz
$60 \times 60 \times 12$	0.2mm	2.28MHz

る時刻歴が得られている。この電位の時刻歴をフーリエ変換したものを図-5(b)に示したが、1.171MHzに周波数のピークが現れており、これは式(6)によって算定した共振周波数1.178MHzと良い一致を示している。

3.2 探触子の受信の精度検証

波動解析では要素サイズにより表現可能な周波数に限界があることが知られている²⁴⁾。媒質中の波動を正確に表現するには1波長について10程度の要素分割が必要であるとされるが、超音波の受信に際して、圧電素子に励起される波動の波長は様々である。また計算コストからは大きなサイズのボクセルが使用できることが望ましい。ここでは要素分割に用いるボクセルのサイズを変化させて探触子の受信動作をシミュレートした数値解析を行い、結果を検討する。

図-6に示す矩形の圧電素子モデルに対して、前節と同程度の要素分割となる $60 \times 60 \times 12$ 分割の圧電素子モデルに加えて、 $40 \times 40 \times 8$ の粗な分割の圧電素子モデルを生成し両者を比較する。モデル内を伝播する縦波の1波長を10要素で表すときの両分割における表現可能な周波数の上限を表-2にまとめる。この両圧電素子モデル各々に対し、周波数1MHz、1.5MHz、2MHzの3種類のバースト波を下面より変位で入力した場合の挙動を本シミュレータにより得た。

得られた変形の時刻歴よりスナップショットの一例を図-7に示す。 $40 \times 40 \times 8$ の圧電素子モデルの結果

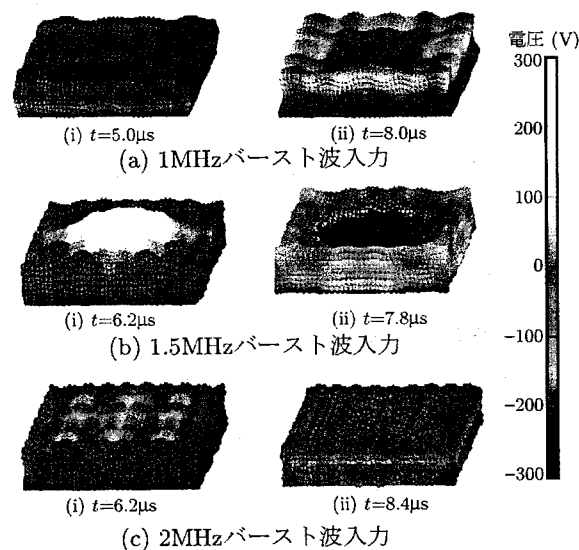


図-7 バースト波に対する変形・電位応答の可視化

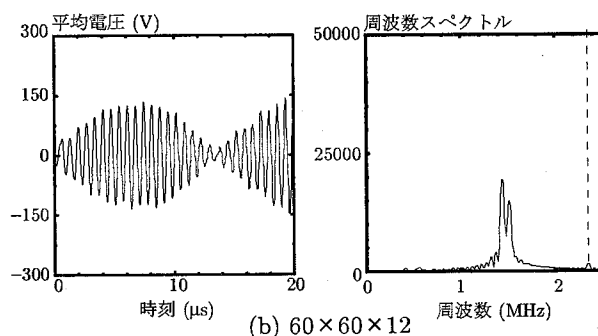
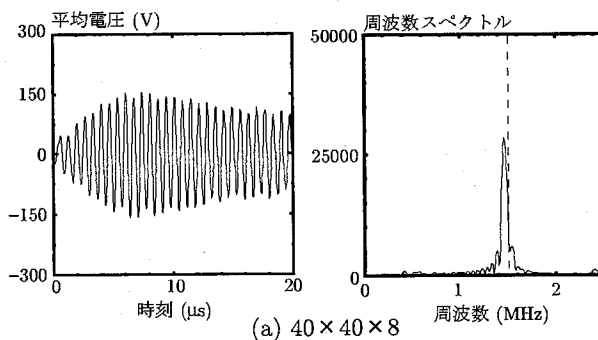
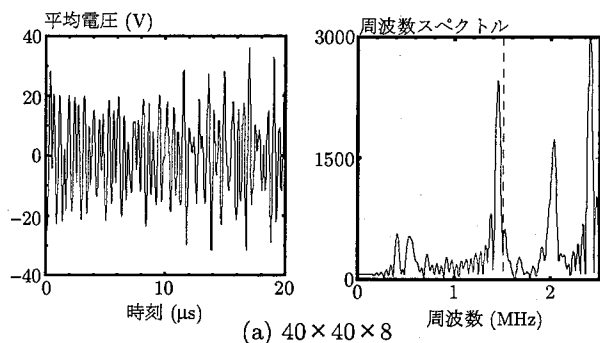


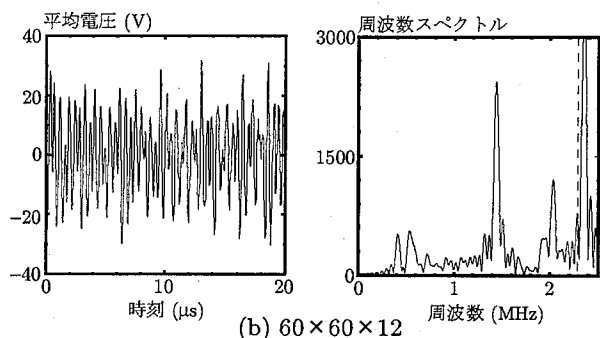
図-8 1.5MHz バースト波入力に対する応答

であり、ここでも電位分布を粒子の濃淡によって表示している。図中に表示した時間は任意であるが、これらに代表される挙動が一定の周期で繰り返される結果を、両モデルについて得た。図-7(b)の1.5MHzバースト波入力に対する応答が他のケースに比べて大きい、これは共振に近い挙動であり、1.5MHz付近に共振周波数が存在すると推察される。

図-8に両ボクセル分割における1.5MHzバースト波に対する応答を示す。 $40 \times 40 \times 8$ 分割の圧電素子モデルから得られた電位の時刻歴図-8(a)左は共振への過渡応答を示しているといえる。この電位の時刻歴の周波数スペクトルを示した図-8(a)右では、バースト波の



(a) 40×40×8



(b) 60×60×12

図-9 2MHz バースト波入力に対する応答

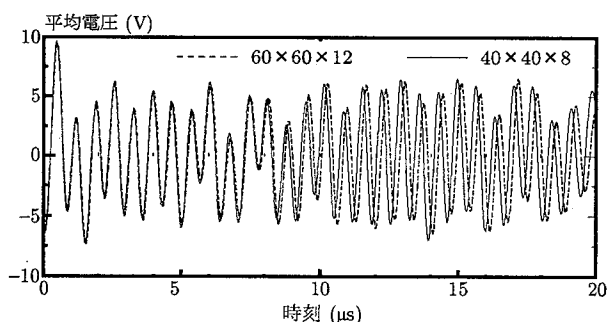


図-10 限界周波数以上をカットした時間域応答
(2MHz バースト波入力)

周波数である 1.5MHz にのみピークが見られる。またここでは表-2 中の周波数の上限を点線で示している。

60×60×12 分割のモデルで得られた電位の時刻歴図-8(b) 左は、近接した周波数による「うなり」を示していることがわかる。図-8(b) 右に周波数スペクトルを示したが、変位で入力されるバースト波の周波数 1.5MHz とそれよりやや小さい周波数の 2 つにピークが確認できる。ここではボクセル分割が細かいことで、近接する周波数の現象の分解能が向上し、入力波と共振による挙動が合成されたうなりが観測されたと考察する。

図-9 左に両ボクセル分割における 2MHz バースト波に対する電位の時刻歴を示す。ここでは両者に差が見られ一致しない。図-9 右の周波数スペクトルからは、先に示した 1.5MHz の共振が主な挙動であり、また入力されたバースト波の周波数である 2MHz にもピークがあることがわかるが、加えて 2.4MHz 付近に大きな

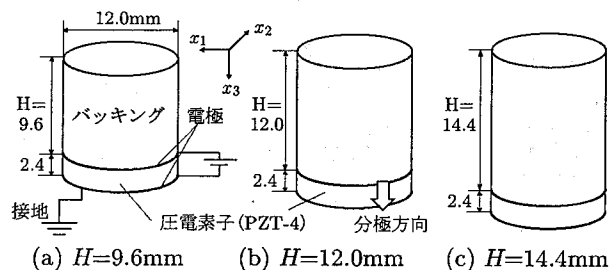


図-11 バックリングの長さが異なる探触子の解析モデル

ピークがあり、高次の振動が生じていることが考えられる。図-9 右の両周波数スペクトルから表-2 に示した周波数以上の成分をカットし、逆フーリエ変換すると、図-10 に示すように 10μs を越えた辺りで若干位相がずれるがほぼ同じ時間域波形が得られる。このことから両者の差異は主に 1.52MHz 以上 2.28MHz 以下の成分中にあるといえ、図-9(a) において 1.52MHz 以上の成分で解の精度が低下していることが考えられる。

以上より、探触子中の圧電素子をボクセル要素で分割する場合には、意図する振動モードの最高周波数の波長を 1 波長を 10 要素で程度で分割すれば、探触子の挙動として妥当な解が得られると考察する。

4. 解析ツールの適用例

4.1 探触子設計への適用の試み

圧電素子の後方に配されるバックリングは、圧電素子の後方に伝播する不要な超音波を吸収することを目的としているもので、タングステンの粉末とエポキシ樹脂を練り混ぜた比重の大きい高減衰の複合材料が用いられている。バックリングを大きくすることで、探触子の性能を向上させることが可能であるが、材料のタングステンが高価であることや探触子の重量が増すことを考えると、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本シミュレータを用いて評価することで、探触子の性能を向上させうることを例示する。

(1) バックリング容量の最適化への適用

図-11 にバックリングの長さを各々 9.6, 12.0, 14.4mm とした 3 種類の円形探触子の解析モデルを示す。バックリングの材料定数は材料の配合により変化することから、本研究では実測による探触子の質量と体積を参考に、ヤング率 $E = 6.86 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.176$ とした。またバックリング内を伝播する超音波の減衰にレイリー減衰 $C_{uu} = \alpha M_{uu} + \beta K_{uu}$ を仮定し、 $\alpha = 0$ 、 $\beta = 5.0 \times 10^{-8}$ とした。ただしこの値は以降の検討でバックリング背面からの反射波がわずかに受信できるよう便宜的に定めたものであり、物理的な意味は希薄である。

周波数 1.14MHz までの波を正確に表現しうるように

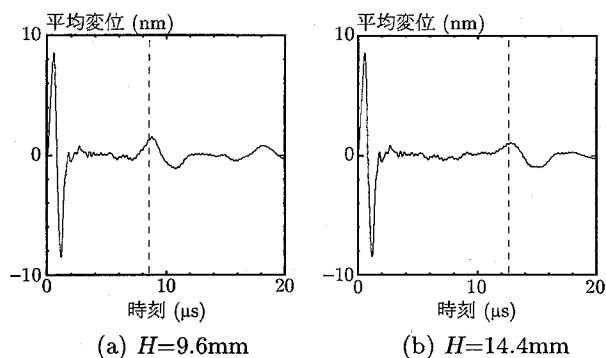


図-12 バックリング背面からの反射波の比較 (変位時刻歴)

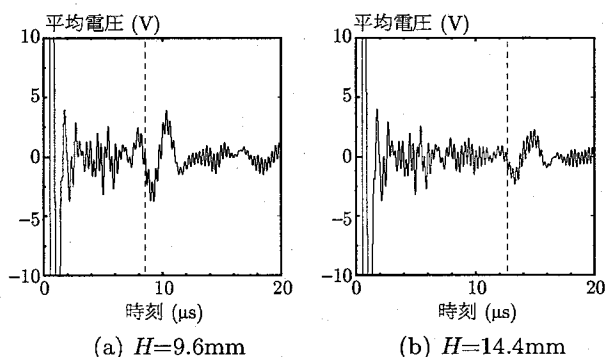


図-13 バックリング背面からの反射波の比較その2 (電圧時刻歴)

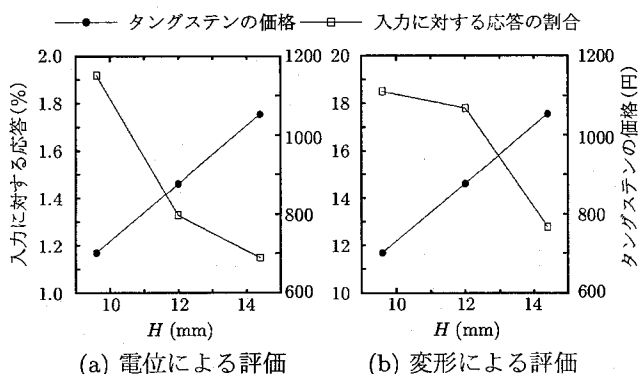


図-14 タングステンの価格と減衰の関係

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要素分割する。圧電素子の上の電極に継続時間 $0.5\mu\text{s}$ 、大きさ -200V のパルス電圧を印加した時の挙動、 $20\mu\text{s}$ を微小時間増分 $\Delta t = 0.1\mu\text{s}$ で求めた。

電極位置で得られた変位の時刻歴の例を図-12に示す。縦波波速より計算されるバックリング背面からの反射波が電極面に到達する時刻を点線で図中に示した。同様に圧電素子より得られた電位の時刻歴を図-13に示す。ここでは入力電圧 -200V に比較して、受信される電圧は極めて小さいことがわかる。変位、および電位の時刻歴両者を全波整流し、縦軸を二乗したグラフよりバックリングを伝播して受信された変位および電位の程度を得て、入力に対するパーセンテージで示した物を

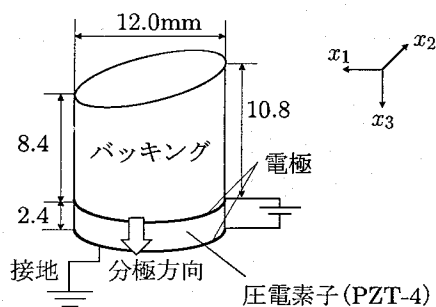


図-15 探触子の解析モデル

図-14に示す。図-14の横軸はバックリングの高さ H であり、縦軸にはタングステンの単価よりバックリングの作製に要するタングステンの価格を同時に示している。

両図よりバックリング長を大きくするに従ってバックリングからの反射波はより減衰していることがわかる。しかしながらここでは電圧で評価したものと変位で評価したものとではタングステンの価格上昇に対する応答の減少の傾向が異なる。現状の試作によるコストと減衰の最適化では、電位による評価で行われることが多いと考えるが、本シミュレータにより変位での評価が可能な場合には異なる最適値が得られる可能性がある。

(2) バックリング形状の制御への適用

実際に製作される探触子においてはバックリング端面を電極と平行とすることは少なく、様々な形状として不要な超音波の吸収性能の向上を図っているが、その形状の決定は試作・実験に拠っているのが現状である。ここでは図-15に示すバックリングの端面に角度を付けた探触子モデルを用いてバックリングによる不要な超音波を吸収の評価に本シミュレータの適用を試みる。

前節に同じ条件下で探触子の挙動を求め、得られた変位の時刻歴によるスナップショットを図-16に示す。ここでは変形のノルムを色の濃淡で表現している。

図-16(a)ではパルス電圧により圧電素子が収縮していることがわかる。図-16(b)では変形がバックリングに伝播しているが、波頭の下に圧電素子内部で生じた多重反射に起因する複数の波が確認できる。図-16(d)では、バックリング端面に達した超音波が相互に作用し、複雑な波動場が生成されていることがわかる。

図-17(a)に本モデルで得られた電位の時刻歴を示し、図-17(b)には電極面の x_3 方向変位の時刻歴の平均値を示したものを示す。ここでは先の検討に基づいて周波数1.14MHz以上のデータをカットするフィルタリングを行っている。また両図には比較として前節で用いた $H = 9.6\text{mm}$ のモデルによる結果を同時に示した。

図-17(a)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波(8~12μs付近)が小さいことがわかる。モデルの挙動の可視化から、バックリング背面に角度がある場合では波動がモード変換を伴って複雑に反射することでエネルギー

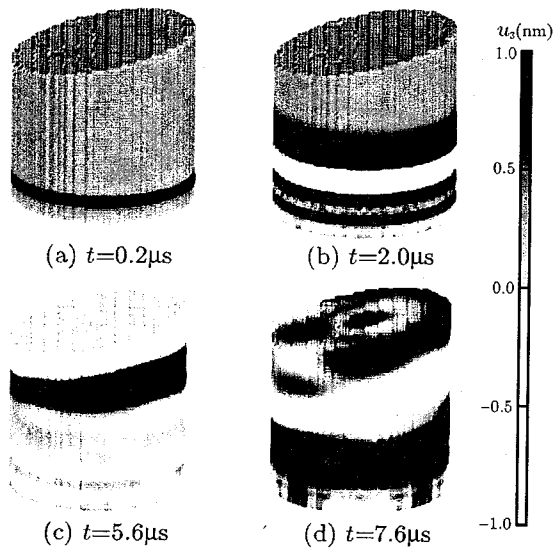


図-16 変形場の可視化結果

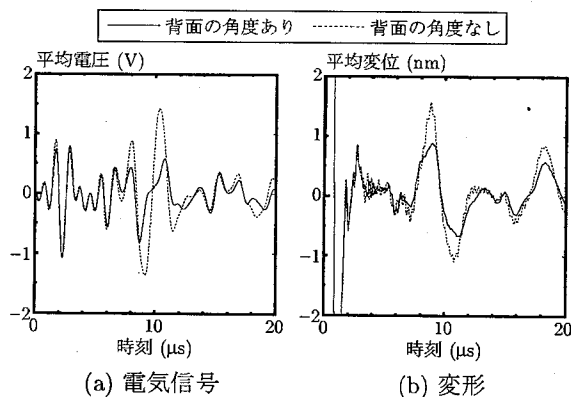


図-17 バックング背面からの反射波の比較

が分散されることが原因であると推察されるが、探触子の諸元に則して生じる波動場を視覚的に理解できることが本シミュレータを用いる大きな利点である。また、図-17(b)から通常計測される電位の時刻歴に加え、変形の時刻歴についても挙動の評価、予測が可能であり、本シミュレータを探触子の設計に用いることで探触子の性能向上に役に立つと考える。

5. 超音波伝播解析との結合

波動解析に基づいた高度な検査手法に圧電探触子を用いた超音波計測により得られたデータを適用する際には、得られたデータに探触子の波動・電気信号相互変換特性が不可避に混入することを考慮するべきである。また圧電探触子が超音波と電気信号とを相互に変換するに際しては、検査対象と音響的に結合して波動を圧電素子に作用させることが必要であることから、検査対象と探触子との結合による影響も得られたデータに含まれる。これらを包含した形で圧電探触子を用いた超音波計測をシミュレートできれば、超音波を用いた検査手法の高度化に貢献できるものと考えられる。

本シミュレータでは圧電性を示さない材料をモデル

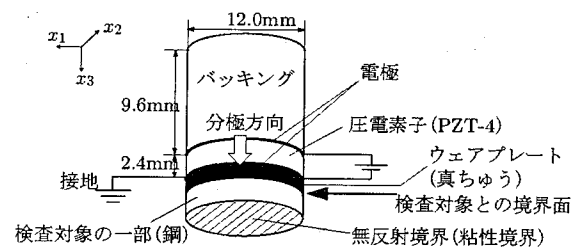


図-18 探触子と検査対象との境界を含む解析モデル

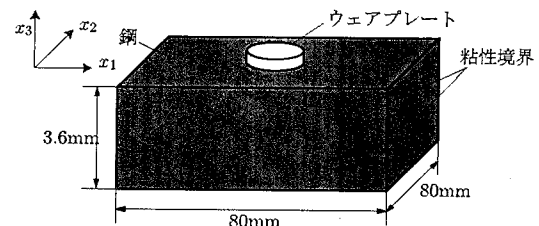


図-19 検査対象モデル

に含めることが可能であり、解析モデルに検査対象を含め、1つのマトリックス連成解析として解くことは可能である。しかしながら超音波探傷試験における検査対象は、探触子に比べてかなり大きいことが多く、ここで用いている陰解法は陽解法に比すると計算時間やメモリ容量の面で不利であることから、超音波探傷の一連のプロセスを一度に計算することは現状では困難である。

そこで本研究では陽解法を用いた有限要素法による超音波伝播解析に本シミュレータとを組み合わせ、任意の入力電圧、圧電探触子を任意の検査対象に適用して、探触子により変換された電気信号を得る一連のシミュレーションを試みる。

5.1 探触子における超音波の送信シミュレーション

始めに図-18に示した、ウェアプレートと検査対象の一部を含めた解析モデルにより任意の入力電圧により検査対象内で生じる変位の時刻歴を求める。ウェアプレートの材料には縦波音響インピーダンスがPZT-4と鋼とのほぼ中間にある真ちゅうを用いる⁸⁾。検査対象の一部をモデル化した要素の境界には粘性境界を超音波の反射を防止する目的で導入している。このモデルに対して継続時間 $0.5\mu\text{s}$ 、大きさ 200V の矩形パルス電圧を印加し、本研究で示したシミュレータにより変形・電位場の連成解析を、微小時間増分 $\Delta t = 0.025\mu\text{s}$ で100ステップ(全時間 $2.5\mu\text{s}$)で行い、ウェアプレートと検査対象との境界上の全節点で変位の時刻歴を求めた。

5.2 検査対象における波動伝播シミュレーション

図-19に示した検査対象モデルは探触子の一部であるウェアプレートを含み、 x_3 方向以外の表面は粘性境界としている。また一連のシミュレーションの評価を

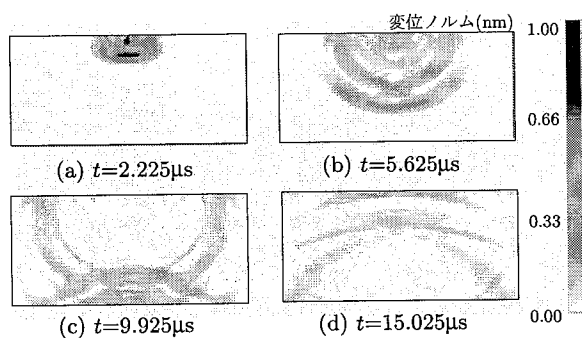


図-20 検査対象内の波動伝播

目的としていることから、ここでは検査対象内に欠陥等の散乱体を含まず、入射された超音波が底面で反射されることを期待している。

圧電探触子を用いた超音波計測においては、検査対象と探触子との境界に良好な音響結合を得ることを主たる目的としてグリセリン、あるいは専用の接触媒質を用いる。これをモデル化する目的で先の波動・電気信号相互変換シミュレータで得た境界上の変位のうち x_3 方向成分のみをウェアプレートと媒質との境界の節点に強制変位として用いる。ここでの超音波伝播解析は陽解法を用いた有限要素法により、微少時間増分量 $\Delta t = 0.025\mu\text{s}$ で 800 ステップ (全時間 $20\mu\text{s}$) で検査対象の挙動を求めた。

得られた変位の時刻歴の検査対象モデル中央断面におけるスナップショットを図-20 に示す。検査対象内を伝播した超音波が底面で反射し、再び検査対象表面に達することがわかる。

探触子の中心に位置する節点で得られた x_3 方向の変位の時刻歴を図-21 に示す。 $15\mu\text{s}$ 付近に底面で反射した波動による波形が得られている。

図中の点線は強制変位を与えていた基本境界条件を自然境界条件に切り替えた時刻である。ここで変位の不連続が生じているが、これは探触子の有する振動特性に合致しない継続時間のパルス電圧で駆動されたために生じたものとする。実際の圧電探触子による超音波計測でもこれに起因した波形の乱れは観測され、探触子の効率的な駆動、および受信波形のノイズを低減する目的で、このような不連続が生じないように探触子を駆動する機器を調節することが行われる。具体的には後に示す図-22 に相当する波形をレシーバの CRT 等の表示器で確認しながら探触子を駆動するパルス電圧の継続時間、あるいは探触子と並列に接続される電気抵抗 (ダンピング抵抗) の値が調節される。

5.3 探触子における超音波の受信シミュレーション

最後に前項の検査対象における波動伝播シミュレーションで得られたウェアプレートと検査対象との境界における x_3 方向変位を、先のウェアプレートと検査対

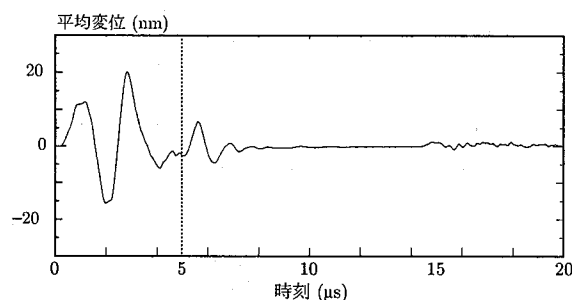


図-21 探触子接触面の中心節点で観測された x_3 方向変位成分の時刻歴

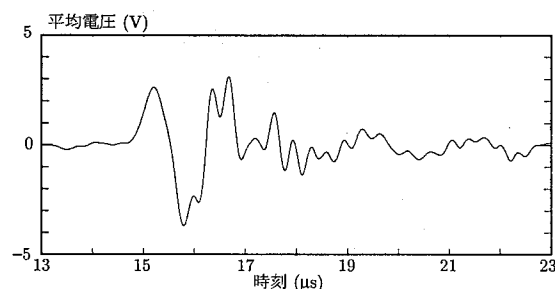


図-22 電極で観測された受信波形の電気信号の時刻歴

象の一部を含めた解析モデルによる変形・電位場の連成解析の入力として用いることで、ここで用いた諸元を有する圧電探触子で得られる受信信号を得る。

解析モデルは図-18 に示すものとほぼ同じであるが、送信のシミュレーションで含めた検査対象の一部はここでは解析モデルに含めない。微少時間増分量は $\Delta t = 0.1\mu\text{s}$ とし、 $13\mu\text{s}$ より 100 ステップ (全時間 $10\mu\text{s}$) で探触子の挙動を求めた。ここでは媒質からの変位の入力 は 70 ステップまでとし、以降は探触子のウェアプレート面の節点を固定として解析を行っている。

圧電素子で得られた電位の時刻歴を図-22 に示す。横軸の時刻は前項の検査対象内の波動伝播解析の時刻と対応させている。図-22 では図-21 中の検査対象に入力された変位の時刻歴と対応した波形が電位の時刻歴として受信されており、妥当な解であると考察する。反射波形の後半の、周期の短い乱れはウェアプレートと圧電素子の間の多重反射の影響と考えられる。

以上の手順で解析により得られた受信波形を実際の圧電探触子を用いた超音波計測の結果と比較、検討することも可能であるが、解析で用いる材料定数等を実物と整合させる必要があり、これは今後の課題である。

6. 結論

本研究では、探触子の設計支援に資するシミュレータの開発を目的とし、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。そして解析モデルの要素分割および送受信の精度を検証し、本シミュ

レータをバックキングの設計問題、圧電探触子を用いた超音波計測のシミュレーションに適用することで変形の可視化や電気信号による評価が可能な本解析シミュレータの特徴を示した。

謝辞：本研究の遂行にあたりジャパンプローブ株式会社 中田正明氏および関係各位に貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大田幸二, 深沢 誠：橋と鋼, 建設図書, 2000.
- 2) (財) 日本規格協会：JIS ハンドブック 非破壊検査, JIS Z3060 鋼溶接部の超音波探傷試験方法, 2005.
- 3) 三原毅：TOFD 法の原理と BS7706, 非破壊検査, Vol. 49, No. 12, pp. 802-805, 2000.
- 4) Thompson, R. B.: Quantitative ultrasonic nondestructive evaluation methods, *J. Appl. Mech.*, Vol.50, pp.1191-1201, 1983.
- 5) 廣瀬壮一：定量的超音波非破壊評価とその周辺技術, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 3-12, 2004.
- 6) Kitahara, M., Hirose, S. : Shape reconstruction of defects in an elastic solid, *The First US-Japan Symposium on Advances in NDT*, pp. 187-192, ASNT, 1996.
- 7) Nakahata, K., Kitahara, M. : Inversion of defects by linearized inverse scattering methods with measured waveforms, *Inverse Problems in Engineering Mechanics II*, pp. 219-228, 2000.
- 8) Schmerr, L.W.: *Fundamental of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.
- 9) Cinquin, S., Lonne, S., Chatillon, R., Raillon, S. Mahaut, and L. Le Ber.: Results of the 2005 UT modeling benchmark with CIVA at CEA, *Review of Progress in QNDE*, Vol.25, pp.1828-1834, American Institute of Physics, New York, 2006.
- 10) Allik, H., Hughes, T.: Finite element method for piezoelectric vibration, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 2, pp.151-157, 1970.
- 11) Allik, H., Webman, K., Hunt, J.: Vibrational response of sonar transducers using piezoelectric finite elements, *J. Acous. Soc. Am.*, Vol.56, pp.1782-1791, 1974.
- 12) Kagawa, Y., Yamabuchi, T.: Finite element simulation of a composite piezoelectric ultrasonic transducer, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol.SU-26, pp.81-88, 1979.
- 13) Lerch, R.: Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements, *IEEE Trans. Ferro. Freq. Contr.*, Vol.37. No.2, pp.233-247, 1990.
- 14) McKeighen, R. : Design guidelines for medical ultrasonic arrays, *SPIE Int. Symp. Medic. Imag.*, 1998.
- 15) Abboud, N., Wojcik, G. L., Vaughan, D. K., Mould, J., Powell, J. Nikodym, L.: Finite element model, *SPIE Int. Symp. Medic. Imag.*, 1998.
- 16) Hollister, S.J., Kikuchi, N.: Homogenization theory and digital imaging: a basis for the mechanics and design principles of bone tissue, *Biothech. Bioenginrg.*, Vol. 32, No.1, pp.27-62, 1994.
- 17) 株式会社くいんと, <http://www.quint.co.jp>
- 18) 池田拓郎：圧電材料学の基礎, オーム社, 1984.
- 19) 超音波便覧編集委員会：超音波便覧, 丸善, 1999.
- 20) Allik, H., Hughes, T.: Finite element method for piezoelectric vibration, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol.2, pp.151-157, 1970.
- 21) CAD/CAE 研究会編：ANSYS 工学解析入門, 理工学社, 2001.
- 22) 圧電セラミック テクニカルハンドブック：(株) 富士セラミックス, <http://www.fujicera.co.jp/>
- 23) 株式会社ケー・ジー・ティー, <http://www.kgt.co.jp>
- 24) Belytschko, T., Mullen, R. : On dispersive properties of finite element solutions, in Milkowitz et al. (ed.), *Modern Problems in Elastic Wave Propagation*, pp. 67-82, Wiley, 1978.

(2006 年 4 月 13 日 受付)