計算数理工学論文集 Vol. 7, No.2 (2008 年 3 月)，論文 No. 17-080317 JASCOME

動弾性有限積分法を用いた波動伝搬解析のための イメージベースモデリング

IMAGE BASED MODELING FOR SIMULATION OF ELASTIC WAVE PROPAGATION USING ELASTODYNAMIC FINITE INTEGRATION TECHNIQUE

中畑　和之 [1)]，木本　和志 [2)]，廣瀬　壮一 [3)]

Kazuyuki NAKAHATA, Kazushi KIMOTO and Sohichi HIROSE

1) 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp)
2) 東京工業大学大学院情報理工学研究科 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: kimoto@cv.titech.ac.jp)
3) 東京工業大学大学院情報理工学研究科 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: shirose@cv.titech.ac.jp)

A time domain simulation tool for the elastic wave propagation in materials with complex outer surface or various inclusions is developed using a combined method of elastodynamic finite integration technique (EFIT) and digital image processing. The EFIT is a grid-based time domain differential technique and easily treat the different boundary conditions which are essential to model elastic wave propagation in concrete. In this study, formulations of the EFIT and treatment of the different boundary conditions are briefly explained and adequate conditions for grid size and time interval are investigated. Here, the geometries of concrete are determined by scanned digital images of concrete and the processed RGB images are fed into the SH wave simulation with the EFIT. The concrete material is modeled as a three-phase model composed by aggregates, entrained air and cement paste in our model.

Key Words: Elastodynamic Finite Integration Technique, Image Based Modeling, Elastic Wave Propagation, Inhomogeneous Material

1. はじめに

弾性波の伝搬をシミュレーションするために，有限要素法 (FEM)，境界要素法 (BEM)，有限差分法 (FDM) 等，種々の数値解析手法が提案されている．その中で，FDM は波動方程式を時間領域と空間領域で差分化し，その差分式を時間ステップごとに逐次計算することで対象領域内の波動場を時間域で求める方法であり，例えば非破壊試験で用いられる周波数帯域の弾性波の伝搬をシミュレーションした例として，松本ら [(1)] や羽田野ら [(2)] の研究がある．本研究では，FDM の一種である動弾性有限積分法 (EFIT：Elastodynamic Finite Integration Technique[(3, 4)]) に着目し，これに写真等のデジタル画像を元に作成した入力データを適用させることによって，対象とする材料の外形・介在物の分布形態を考慮した波動伝搬解析を行う．動的解析ではないが，計算モデルをデジタル画像から作成し数値解析を実行する試みは，永井ら [(5)] によって行われており，イメージベースモデリングと呼ばれている．本イメージベースモデリングではデジタル画像の 1 画素 (ピクセル) を EFIT の 1 セルと整合させるため，解析対象の画像さえ得ることができれば，数値モデルの作成を画像処理により行うことができる．

EFIT は異種材料の境界条件を容易に扱うことができるため，コンクリート中を伝搬する波動の解析に試みられている [(6, 7)]．しかし，これらの計算モデルでは，コンクリートを構成する材料 (骨材・気泡) を人工的かつランダムに配置しており，EFIT を用いて本論文のようなイメージベースモデリングの適用例は無いようである．コンクリート等の非均質材料のモデル化に限らず，本手法は対象材料の外形も画像処理によって設定できるため，タービン等の非破壊検査で問題となる複雑形状部のシミュレーションも可能である．また，EFIT は陽解法であるために，並列計算による計算効率が高いのがメリットである [(8)]．本論文では，2 次元面外波動場 (SH 波) を対象として EFIT の定式化を述べ，簡単な数値計算による EFIT のセル長および時間ステップを決定する手順を示す．続いて，コンクリートを対象としたイメージベー

2008 年 1 月 10 日受付，2008 年 2 月 12 日受理

スモデリングの流れを示し，並列計算による波動伝搬シミュレーションを行う．

2. EFIT の定式化

本論文では，弾性波が伝搬する材料は等方性であるとし，簡単のため SH 波動場を考える．x_3 軸を面外方向とし，SH 波は (x_1,x_2) を伝搬するものとする．x_3 軸方向の粒子速度を v_3，せん断応力を τ_{31}，τ_{32} とおいたとき，SH 波の伝搬を支配する波動方程式および構成式は以下のようになる．

$$\rho(\boldsymbol{x})\dot{v}_3(\boldsymbol{x},t)=\frac{\partial\tau_{31}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_1}+\frac{\partial\tau_{32}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_2} \tag{1}$$

$$\frac{\dot{\tau}_{31}(\boldsymbol{x},t)}{\mu(\boldsymbol{x})}=\frac{\partial v_3(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_1} \tag{2}$$

$$\frac{\dot{\tau}_{32}(\boldsymbol{x},t)}{\mu(\boldsymbol{x})}=\frac{\partial v_3(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_2} \tag{3}$$

ここで，$\dot{()}$ は時間 t に関する偏微分 $(\partial/\partial t)$ を表す．上式で，ρ は材料の密度，μ はせん断弾性係数を表し，等方性材料の場合には横波音速との関係式 $c_T=\sqrt{\mu/\rho}$ が成立する．

EFIT のキーとなるポイントは，式 (1)〜(3) を適当な大きさの四角形領域で積分し，これを離散化することである．まず，式 (1) を微小領域 V で積分し，ガウスの発散定理を適用すると次式となる．

$$\int_V \rho(\boldsymbol{x})\dot{v}_3(\boldsymbol{x},t)dV(\boldsymbol{x})=\int_{\partial V}\tau_{3\beta}(\boldsymbol{x},t)n_\beta dc(\boldsymbol{x}) \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{n}$ は V から外へ向く法線ベクトルである．また，上式では β について総和規約を適用している．Fig.1 の灰色で塗りつぶした領域のように，v_3 の積分を実行する領域を v_3–セルと呼ぶ．v_3–セルの左右に τ_{31}，上下に τ_{32} の節点を配置

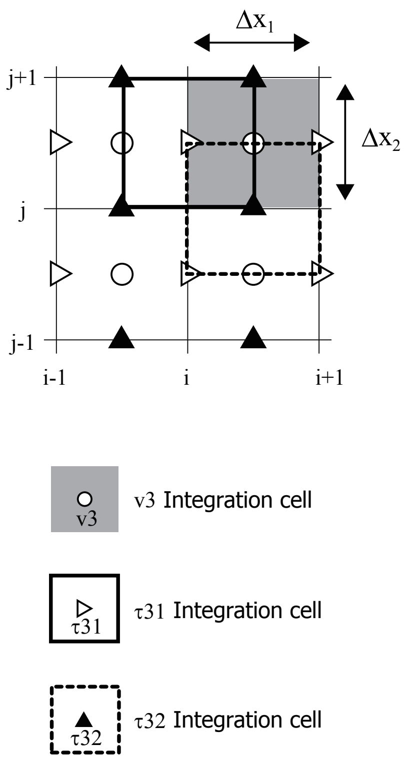

Fig. 1 Staggered spatial grids for v_3, τ_{31} and τ_{32}.

する．v_3 は領域内で一定値，τ_{31} と τ_{32} は境界上で一定値とし，式 (4) の積分を実行すると，

$$\begin{aligned}\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}(\dot{v}_3)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\Delta x_1\Delta x_2=&\\ &\left\{(\tau_{31})_{i+1,j+\frac{1}{2}}-(\tau_{31})_{i,j+\frac{1}{2}}\right\}\Delta x_2\\ &+\left\{(\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j+1}-(\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j}\right\}\Delta x_1\end{aligned} \tag{5}$$

を得る．上式で Δx_1 と Δx_2 はそれぞれ x_1 と x_2 方向のセル長である．各物理量の添字 (i,j) はそれぞれ x_1 方向と x_2 方向の配置番号を表している (Fig.1 参照)．EFIT では，材料定数は v_3–セルで定義されるものとし，式 (5) の時間 t に対して中心差分近似を行うと次式を得る．

$$\begin{aligned}(v_3)^{k+1}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}=(v_3)^{k}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}&+\Delta t\frac{(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i+1,j+\frac{1}{2}}-(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\Delta x_1}\\ &+\Delta t\frac{(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1}-(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\Delta x_2}\end{aligned} \tag{6}$$

ここで，k は時間ステップの番号，Δt は時間ステップ幅である．

次に，同様な手順で τ_{31} と τ_{32} について離散化を行う．式 (2) と (3) の領域積分を考える．

$$\int_V\frac{\dot{\tau}_{3\alpha}(\boldsymbol{x},t)}{\mu(\boldsymbol{x})}dV(\boldsymbol{x})=\int_{\partial V}v_3(\boldsymbol{x},t)n_\alpha dc(\boldsymbol{x}),\quad(\alpha=1,2) \tag{7}$$

このときの積分領域は，Fig.1 に示すような τ_{31}–セルと τ_{32}–セルで定義される領域である．式 (7) の積分および離散化を考えるときに問題となるのは，μ の取り扱いである．上述のように，材料定数は v_3–セルで定義されるため，τ_{31} および τ_{32}–セルのように v_3–セルをまたぐ場合には，適当な処置が必要である．いま，領域内で μ は異なる 2 つの値を有するとして積分を実行すれば，

$$\begin{aligned}(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}=&(\tau_{31})^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}\\ &+\frac{\bar{\mu}_{i,j+\frac{1}{2}}\Delta t}{\Delta x_1}\left\{(v_3)^k_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}-(v_3)^k_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\right\}\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}=&(\tau_{32})^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}\\ &+\frac{\bar{\mu}_{i+\frac{1}{2},j}\Delta t}{\Delta x_2}\left\{(v_3)^k_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}-(v_3)^k_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}\right\}\end{aligned} \tag{9}$$

を得る．ここで，

$$\begin{aligned}\frac{1}{\bar{\mu}_{i,j+\frac{1}{2}}}&=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}+\frac{1}{\mu_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}\right)\\ \frac{1}{\bar{\mu}_{i+\frac{1}{2},j}}&=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}+\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}\right)\end{aligned} \tag{10}$$

である．式 (6),(8),(9) からわかるように，ある整数次の時間ステップ k で求まった v_3 を用いて半整数次の時間ステップ $k+\frac{1}{2}$ における $\tau_{3\alpha}$ が求まることになり，この過程を交互に実行することで順次に解が求まる．結局，EFIT では Staggered-grid で節点を配置し，Leap-frog scheme で解を求めていくが，こ

れはFDTD法[9]の原理と同じである．しかしながら，EFITでは波動方程式を領域積分することによって節点の配置が決定され，材料定数を設定するセルが明確に定義される．これによって，デジタル画像データから計算モデルを作成しようとするときに，材料定数を定義するセルとデジタル画像のピクセルを一対一に対応させることができ，現実の形状を正確に模擬したモデルが作成できる．一方，FDTD法に限らず従来のFDMでは，異種界面を取り扱う場合に様々な境界値の設定法が提案されており (例えば文献[10])，時に煩雑となる場合があるが，EFITでは2次元面内波動場や3次元波動場，あるいは音響異方性がある材料に適用したとしても，上述のような一貫したコンセプトで異種界面を取り扱うことができることがメリットである．

EFITは陽的解法であるために，並列計算法による計算効率が非常に良い[8]．例えば，OpenMP[11]を援用して式(8)と(9)を実行するとき，メモリにストレージされているv_3は，参照のみで書き換えることはないので，これらは異なるスレッドで同時に実行することができる．また，式(8)はiとjの繰り返し計算になるが，iとjの範囲を区切り，これを異なるスレッドに割り当てることによって，並列に計算することができる．

3. 計算安定化の条件と精度保証のためのセル長の検証

数値的に安定して解析を実行するために，一般的なFDMと同様に，時間間隔Δtは次のようなCFL条件 (Courant-Friedrichs-Lewy Condition) を満足する必要がある．

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_{T\max}}\sqrt{\frac{1}{(1/\Delta x_1)^2+(1/\Delta x_2)^2}} \tag{11}$$

ここで，$c_{T\max}$は非均質材料の音速のうち，最も速い音速である．

次にセル長Δx_1とΔx_2であるが，EFITは直交格子なので散乱体あるいは外側境界が曲線形状をしている場合でも階段状にしか近似できないという欠点があるため，できるだけセル長を小さく設定することでこの問題を回避しなければならない．しかし，むやみに小さく設定すれば計算機のメモリが不足してしまうし，大きすぎれば散乱体の形状を正確に模擬できないだけでなく，弾性波の伝搬を表現できないといった問題が生じる．以下では，簡単な数値実験によって，必要なセル長（ここでは，Δx_1=Δx_2=Δxとする）について検討を行う．Fig.2に示すように，c_T=3200m/s，ρ=7850kg/m^{3}のステンレス鋼中に直径10mmの円形空洞がある．空洞の30mm上方に置かれた長さ20mmの探触子（超音波を発振するセンサー）からSH波が発振されるものとする．このときの入射SH波の時刻歴波形とそのフーリエスペクトルをFig.3に示す．散乱が顕著になるのは，入射波の波長に対して散乱体が大きい場合であるので，入射波の中心周波数を1MHzとして，空洞径に対して短い波長 (λ=3.2mm) の弾性波 (以下では超音波と呼ぶ) を送信する．この入射波形は探触子上の節点のせん断応力τ_{32}の変動分として与えられる．なお，Fig.3の下図より，入射波はおよそ$f_{\max}$=3MHzまでの周波数帯域を有するものとすれば，スペクトルとして考えた場合の最小波長$\lambda_{\min}$は約1.0mmである．

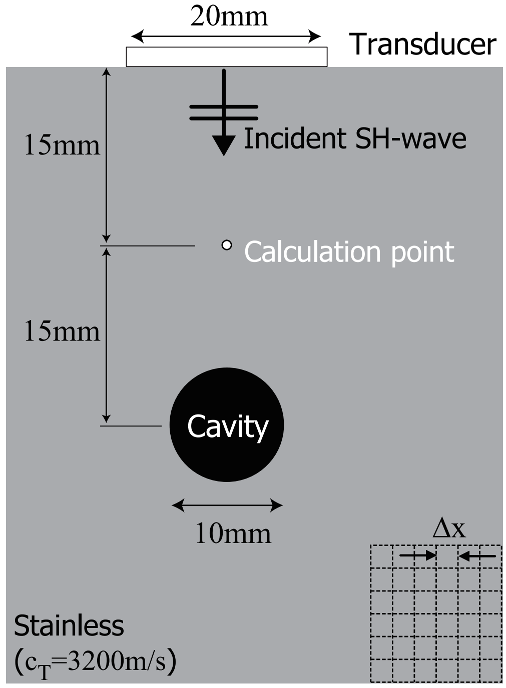

Fig. 2　Numerical model for investigation to decide an adequate length of spatial cell Δx.

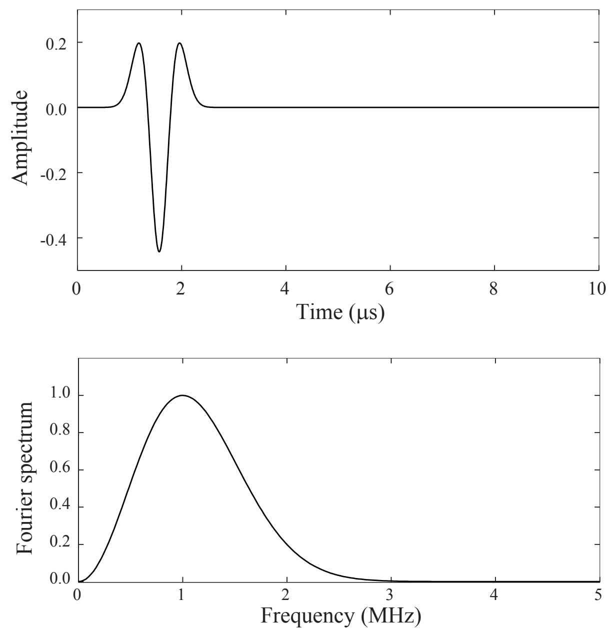

Fig. 3　Excited pulse wave and its Fourier transform.

Fig.2に示すように，探触子と空洞の中間位置における面外変位$u_3(=\int v_3 dt)$をEFITを用いて計算する．Δx=0.2, 0.1, 0.08, 0.05mmと変化させて計算を行った場合に，出力点において得られた波形をFig.4の上側の図に示す．このときの空洞の境界条件は$\tau_{31}=\tau_{32}=0$とし，時間間隔はすべてΔt=0.01μsとした．また，境界要素法 (BEM) で同じ形状モデルの計算を行った場合に得られた波形をFig.4の下側に示す．ここでは，面外波動の基本解を用いた周波数領域のBEM

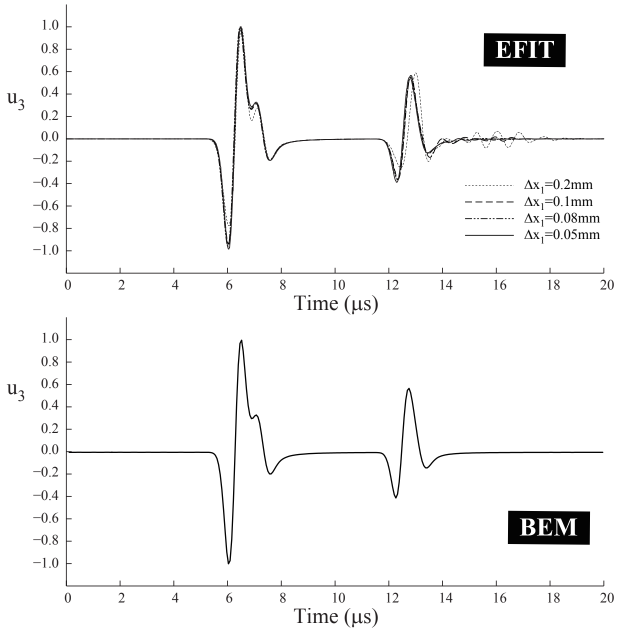

Fig. 4　Calculated waveforms in the case of different cell length Δx.

で定常解を計算し，これをフーリエ変換することで非定常解を求めている．BEM において，空洞および探触子表面の境界は，それぞれ 640 と 400 の一定要素で分割した．Fig.4 に示す第 1 波目は入射波が通過したときの波形であり，第 2 波目は空洞によって散乱された波動が探触子に向かって伝搬するときの波形である．Δx=0.2mm のときには，BEM の結果に比べて第 2 波の位相がずれており，後続の振動もみられる．Δx=0.1mm の場合も，顕著ではないが波形に微振動が発生する．BEM の解とほぼ一致するのは Δx=0.08mm 以下に設定した場合である．以上の検討により，$\lambda_{\min}$=1.0mm が入射する場合の Δx を 0.08mm 以下にすれば，BEM と同程度の精度で EFIT の解析が可能であることがわかる．これは，下記のような関係式で表すことができる．

$$\Delta x \leq \frac{1}{12}\lambda_{\min} = \frac{1}{12}\frac{c_{T\min}}{f_{\max}} \tag{12}$$

ここで，$c_{T\min}$ は非均質材料の音速のうち，最も遅い音速である．文献 [7] では，式 (12) よりも緩い条件 ($\Delta x \leq \frac{1}{8}\lambda_{\min}$) が提示されているが，この条件を最小限満足するように解析を行えば，Fig.4 に示したような数値振動が現れた．

以上まとめると，送信する超音波の最小波長を基に式 (12) によってセル長 Δx 決定し，この Δx を用いて式 (11) の時間ステップ幅 Δt を決定すれば，解析を精度良く安定して実行できる．なお，式 (11) は EFIT に必要な条件であるが，式 (12) は解析の精度を保証するための推奨される条件である．

4. コンクリート中を伝搬する超音波のシミュレーション

本論文では，コンクリート供試体の断面写真をスキャンし，これを画像処理することによって入力データを作成する．前述のように，EFIT は格子状にセルを配置するため，デジタル画像を構成するピクセルサイズと EFIT のセル長を等しくすることによって，容易に入力データを EFIT に取り込むことができる．ここでは，コンクリートを例にとって入力データの作成方法について述べる．Fig.5 の上側の図は，実際に作成したコンクリート供試体をスライスした断面写真である．このコンクリートの骨材の体積率 (Volume Fraction: V.F.) は 30%，骨材の最大粒径は 10mm であり，断面は幅 100mm，高さ 80mm である．この写真をスキャナで読み込み，ビットマップ画像に変化した後，デジタルイメージ編集ソフト等を用いて，セメントペースト，気泡，骨材の 3 種類に識別する．ここでは，セメントペーストは黒色，気泡は緑色，骨材は青色とする．これを，24bpp（ピクセル当たり 8×3=24 ビット）でエンコードされた RGB カラーモデルで表すと，黒は (R,G,B)=(0, 0, 0)，緑は (0, 255, 0)，青は (0, 0, 255) となる．本研究ではコンクリートを 3 つの異なる材料でモデル化したが，この三つの原色を混ぜれば幅広い色が再現できる．RGB 明度は，赤・緑・青の輝度を示す三つの 8 ビット符号無し整数（0 から 255 まで）で表せるため，本イメージベースモデルは最大 256^3 の異なる材料定数が設定できることになる．このように色分けされたピクセルのサイズと，EFIT の材料定数を

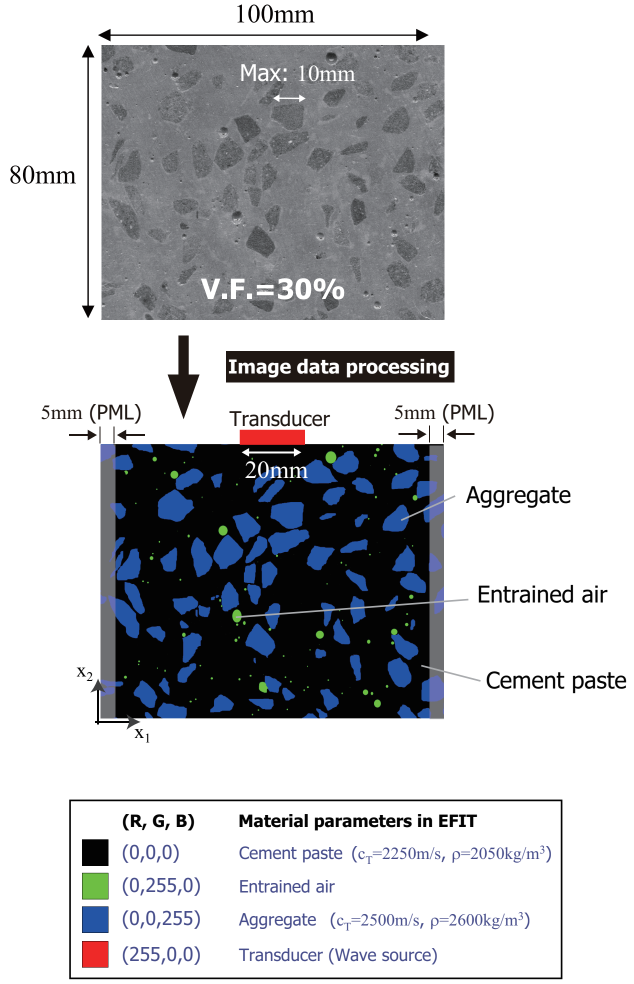

Fig. 5　Scanned picture of concrete cross-section and processed images for input data of EFIT.

定義するセル (v_3–セル) 長を等しくし，色ごとに材料定数を定義して，入力データを作成する．本解析の材料定数であるが，セメントペーストは c_T=2250m/s，ρ=2050kg/m^3 とし，骨材は c_T=2500m/s，ρ=2600kg/m^3 とした．また，探触子を赤色に設定することで，イメージ中の任意の位置から超音波を発振できるようにした．本解析では，Fig.5 に示すようにコンクリートの上部境界に長さ 20mm の探触子を設置した．後に示すように，探触子からは中心周波数 200KHz($f_{\max}$=600KHz) と 500KHz($f_{\max}$=1.5MHz) の 2 種類の超音波が送信されるものとする．本来は，式 (12) を満足するように必要十分なセル長を設定すれば良いが，ここでは少々過剰であるがセル長 Δx_1=Δx_2=0.025mm としたため，v_3–セルの総数（材料定数が与えられるセルの数）は 1,280 万となった．また，時間間隔 Δt は CFL 条件を考慮して，0.005μs とした．なお，Fig.5 に示すように，解析モデルの左右両端に幅 5mm の吸収境界 (PML[12]) を設けている．

中心周波数 200KHz の SH 波が放射されたときのコンクリート中の波動場 u_3 のスナップショットを Fig.6 に示す．Fig.6 では，15000 ステップ (75μs 後まで) の時間領域を計算している．超音波がコンクリート中を伝搬すると，波面が通過した後に骨材同士の多重散乱によって超音波が拡散しているのがわかる（Fig.6(a),(b)）．Fig.6(c) では，底面で反射した波動が上方に伝搬していくが，(d) では骨材分布の粗密に依存して波面自体も局所的に崩れていく．また，コンクリート中を伝搬する超音波は，骨材よりも気泡による散乱波が強く現れている．なお，解析時間は，京都大学学術情報メディアセンター [13]HPC2500 の 1 ノード 64CPU を並列に実行して 2.5 時間程であった．

次に，V.F.=10%と 30%の 2 種類のコンクリートを用意し，Fig.6 と同様の探触子配置で中心周波数 500KHz の超音波を入射したときに探触子で受信される波形 $v^{\mathrm{out}}(t)$ を Fig.7 に示す．ここでは，探触子面上 (x_2=80mm) の個々のセルで得られる u_3 の時刻歴応答を探触子区間 ΔL=20mm で合成 ($v^{\mathrm{out}}(t) = \int_{\Delta L} u_3(x_1, x_2 = 80\mathrm{mm}, t)dx_1$) することによって，受信波形としている．Fig.7 では，21000 ステップ (105μs 後まで) の時間領域を計算している．5μs 付近に現れている振幅の大きな波形は入射波であり，75μs 付近に現れる波動が底面からの反射波である．Fig.7 より，骨材・気泡による超音波の散乱減衰のために，V.F. が大きくなると反射波の振幅が小さくなるのがわかる．また，V.F.=30%のコンクリートにおける反射波の到達時間は，V.F.=10%よりも 1 波長分早くなっているのが観察できる．これは音速の速い骨材が多く分布するコンクリート中を超音波が伝搬しているためであると考えられる．

5．結言

本論文では，スキャンした写真等のデジタル画像を用い，これを画像処理した後に EFIT に入力することによって，超音波の伝搬シミュレーションを行った．EFIT の材料定数を設定するセルの長さと，デジタルデータのピクセル長を揃

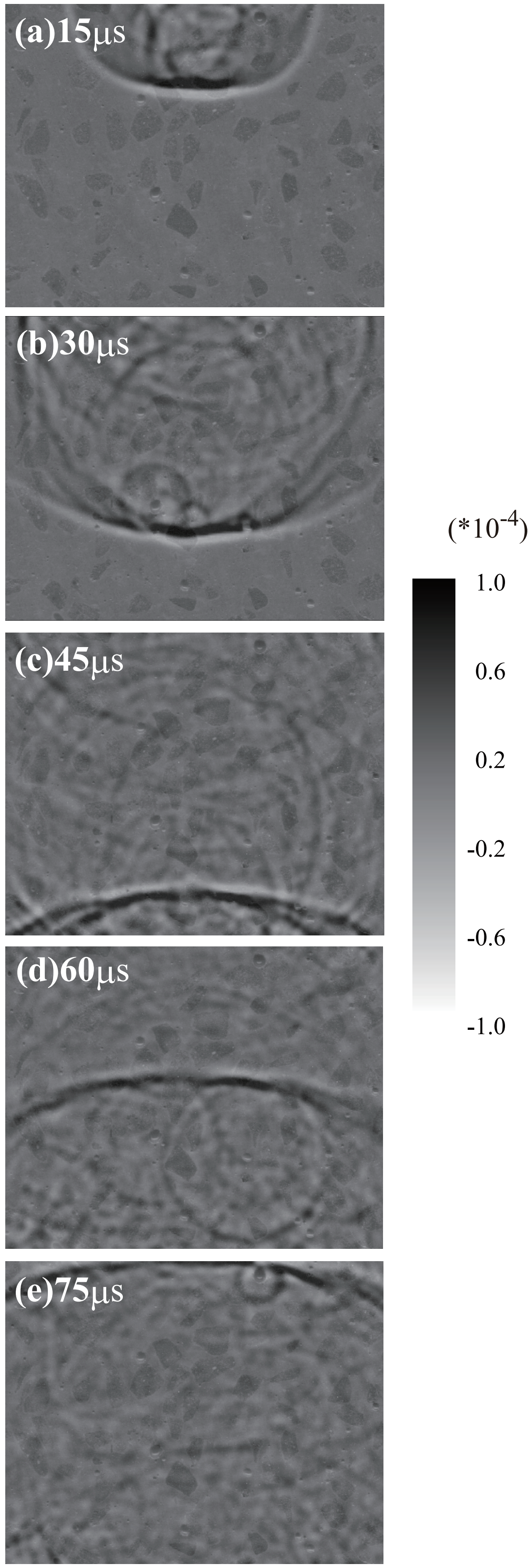

Fig. 6　Time snapshots of SH wave propagation in concrete with 30% volume fraction.

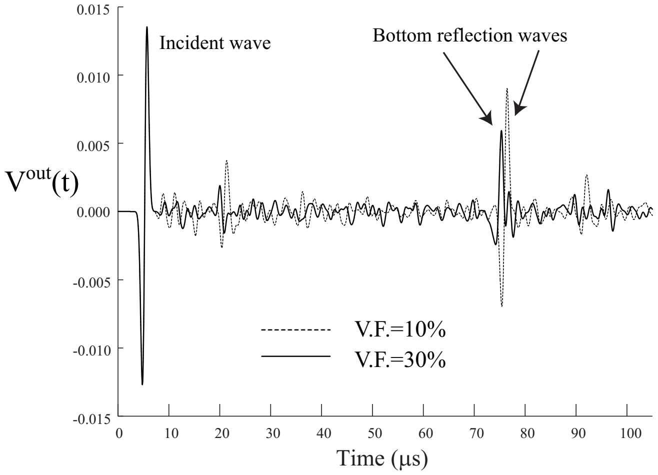

Fig. 7　Waveforms at transducer position located on the upper surface of concrete of V.F.=10% and 30%.

え，これらを一対一に対応させることによって，対象とする材料の外形・非均質性をできるだけ忠実に EFIT に取り込むことが可能となった．EFIT は直交格子であるために，曲線形状などをモデル化する場合にはセル長を適切に設定する必要があるが，本論文では簡単な数値実験を行い，送信する超音波の波長とセル長の関係について検討を行った．今回は円形空洞を用いたが，円が扁平した場合に提示した関係式がどこまで適用可能かについては，検討を行う必要がある．解析例として，コンクリート中を伝搬する超音波のシミュレーションを示した．非均質材料中を伝搬する波動の特徴である散乱減衰，音速の変化について再現することができた．今後は，本イメージベースモデリングを用いて，コンクリート自身の材料減衰を考慮した場合の波動の伝搬特性 (分散性，減衰等) の検討を行いたいと考えている．また，ボクセルデータを用いて，3 次元波動場のシミュレーションも行いたいと考えている．

謝辞

本研究は，科学研究費補助金 (基盤研究Ｂ　課題番号 18360213，代表：廣瀬壮一) の補助を受けて行われました．ここに記して，謝意を表します．

参考文献

(1) 松本善博，常松睦生，荒木久雄，森　勇藏: 差分法を用いた三次元弾性波解析による超音波探傷法のシミュレーション，非破壊検査，**49(10)**(1999), pp. 705-709.

(2) 羽田野 甫，吉島 一平，藤原 充，真名志 剛，山下 玄人：音響異方性を有する圧延鋼板における超音波探傷の差分法シミュレーション, 日本音響学会誌，**63(3)**(2007), pp. 139-146.

(3) P. Fellinger, R. Marklein, K.J. Langenberg and S. Klaholz: Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT –elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, **21**(1995), pp. 47-66.

(4) F. Schubert: Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques –theory and applications, *Ultrasonics*, **42**(2004), pp. 221-229.

(5) 永井学志，山田貴博，渡邊勝彦：不連続要素と等値面の再構成手法を用いた粒子分散型 2 相材料の 3 次元イメージベース有限要素モデリング, 日本機械学会論文集（A 編），**70**(2004), pp. 84-91.

(6) R. Marklein, K.J. Langenberg, R. Bärmann and M. Brandfass: “Ultrasonic and electromagnetic wave propagation and inverse scattering applied to concrete” *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **15B**(1996), pp. 1939-1846.

(7) F. Schubert and B. Koehler: Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity, *Journal of Computational Acoustics*, **9(4)**(2001), pp. 1543-1560.

(8) K. Nakahata, J. Tokunaga, K. Kimoto and S. Hirose: A large scale analysis for ultrasonic wave propagation using parallelized FDTD method, *in Review of Progress in QNDE*, **27**(2008), AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, in press.

(9) J. Virieux: SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity–stress finite–difference method, *Geophysics*, **49(11)**(1984), pp. 1933-1957.

(10) A. P. Cherukuri and T. G. Shawki: A finite-difference scheme for elastic wave propagation in a circular disk, *Journal of Acoustical Society of America*, **100**(1996), pp. 2139-2155.

(11) http://www.openmp.org

(12) F. Collino and C. Tsogka: Application of the PML absorbing layer model to the linear elastodynamic problem in anisotropic heterogeneous media, *Rapport de Recherche*, INRIA, N3471 (1998).

(13) https://web.kudpc.kyoto-u.ac.jp/