

第 7 章

実験による検討

7.1 実験方法

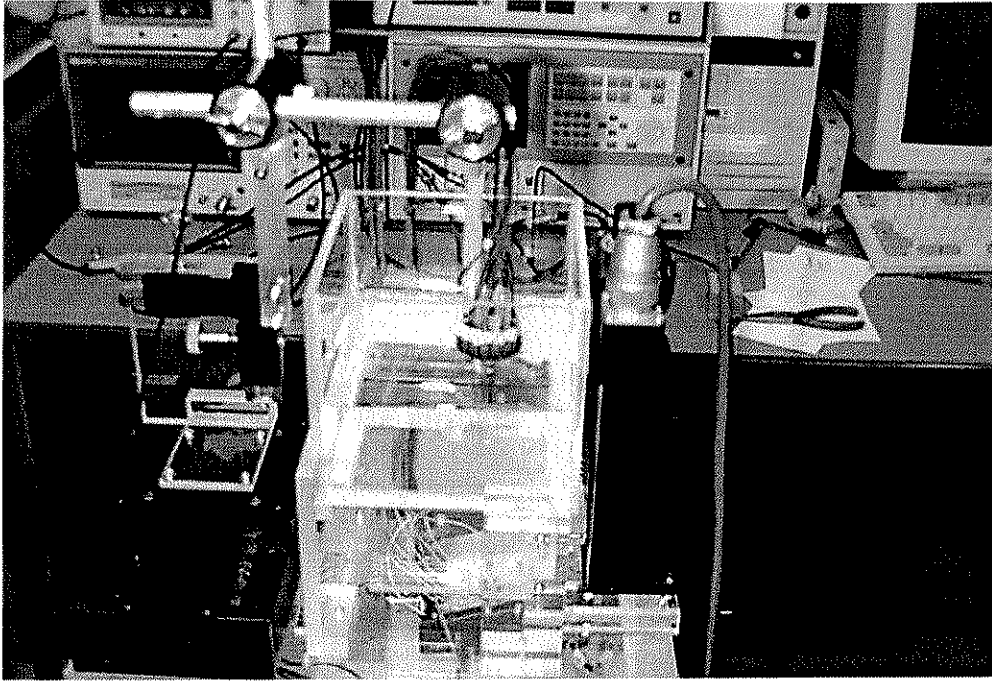
7.1.1 セットアップ

提案する 3 次元変位ベクトル計測法及びヤング率分布再構成法について、実データに対する適用可能性を検討するために、ファントムを用いた基礎実験を行った。そのためにまず、図 7.1 のような 2 次元アレイを用いたシステムを模擬した簡便な実験システムを構成した [127]。図 7.2 はこれを模式図として示したものである。

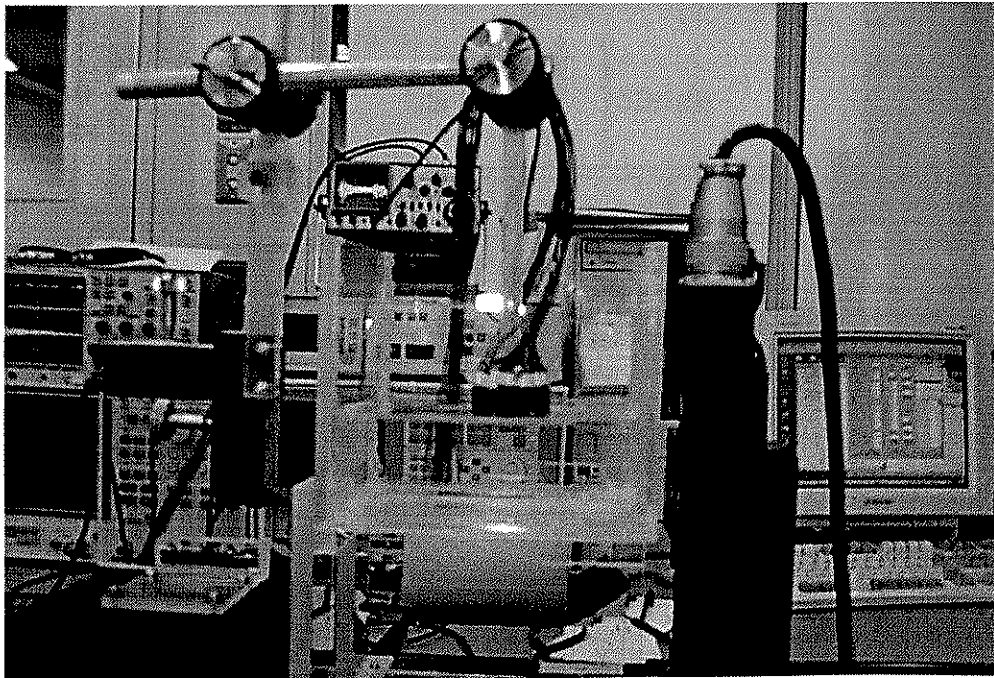
実験システムの中央には、幅 150mm×奥行き 150mm×高さ 120mm のアクリル板製水槽が設置されており、この底には厚さ 0.2mm のプラスチック板が張り付けてある。この水槽の上には、図 7.1 のように支柱に取り付けられたリングアレイの送受信系が設置されている。この支柱は、図 7.2 における x 軸方向（紙面垂直方向）及び z 軸方向に 2 次元走査可能なステージ上に固定されている。リングアレイの 2 次元走査は、 x 軸方向の走査としてパルスモーターを用い、 z 軸方向の走査として図 7.1 に見られるような精密な平行移動が可能な手動のスライドテーブルを用いて行われる。

送受信系としては本来 2 次元アレイプローブを用いることが望ましいが、リングアレイがその代用として用いられている。リングアレイは図 7.3(a)(b) に示すようなセラミック製 16 受信素子からなる直径 34mm のもので、この中央には、直径 8mm、中心周波数 3.5MHz のノンフォーカス型プローブが送信用として取り付けられている。送信の中心周波数 3.5MHz は、シミュレーションで用いた 3.75MHz に近い値として採用している。各素子で受信される RF 信号は、図 7.3 (c) のようなチャンネル切替え装置を用いてそれぞれ取得した。この切替え装置は、各素子から配線されているチャンネル数分のアルミ板を台座の円周上に張り付け、これを回転式パルスモーターによりスイッチングしながら RF 信号を切替えて A/D コンバーターに取り込む仕組みになっている。

計測対象として作成したファントムを図 7.4(a) に示す。組織弾性評価用のファントムについてはいくつかの研究がなされているが [128, 129, 130, 131]、本実験では文献 [130] を参考に寒天とゼラチンを混合して作成することとした。しかしその際、計測時間がかかりかかることを考慮して、寒天の分量をゼラチンよりも多くするものとした。ゼラチンは常温においてその弾性が変化し、次第に液化するが、寒天の場合は一旦固まると液化することはない。また寒天とゼラチンを混合させたのは、本来、生体の組成は寒天よりもゼラチンの方に近く、少しでもファントムを生体疑似に近づけるためである。このファントムのサイズは、幅 80mm×奥行き 80mm×



(a) 上から見た図



(b) 横から見た図

図 7.1: 実験システム

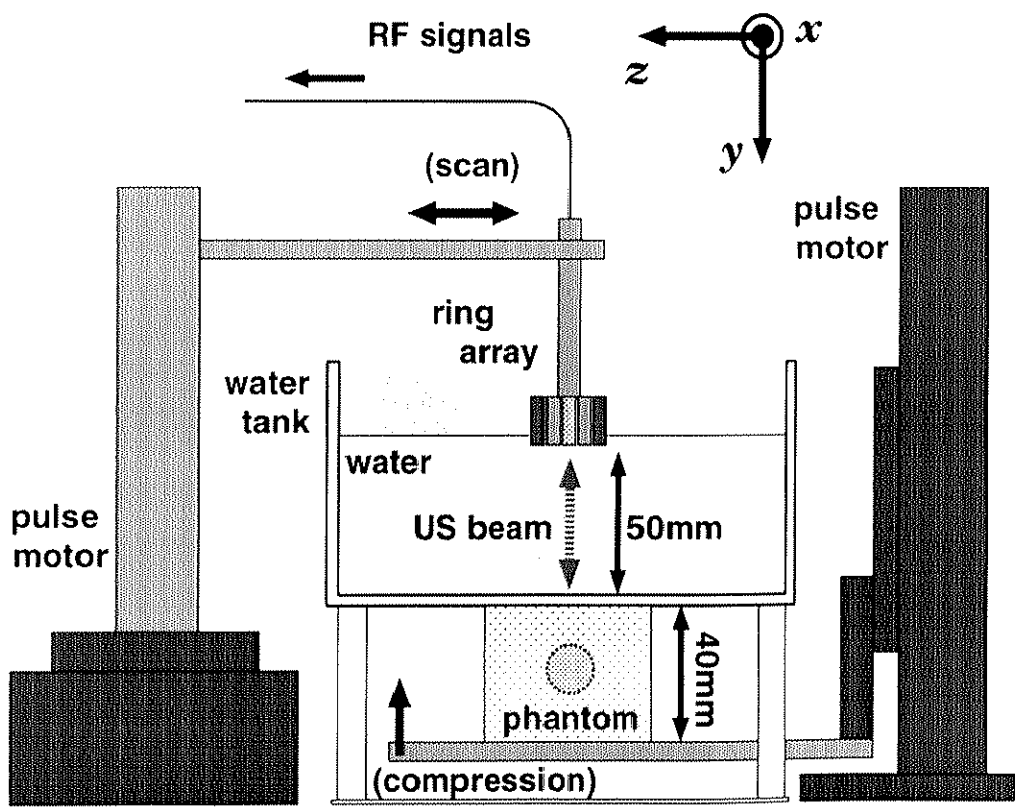
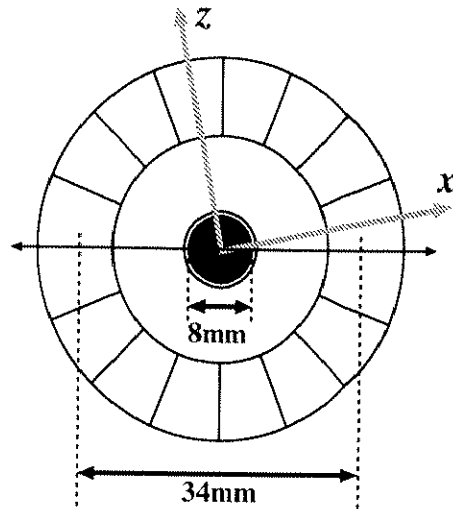
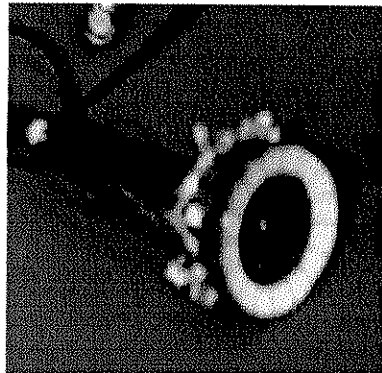


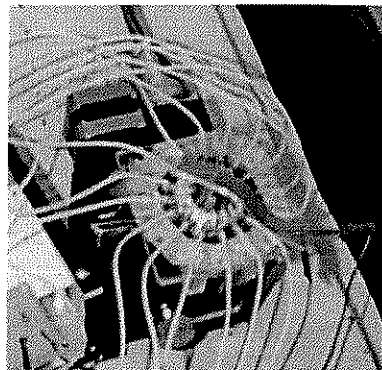
図 7.2: 実験システム



(a) 16素子セラミック製リングアレイプローブ

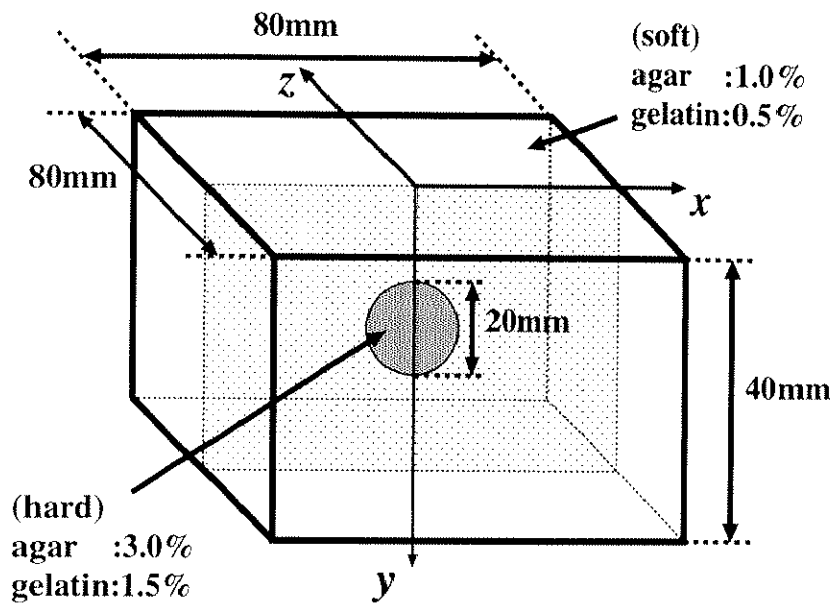


(b) リングアレイ

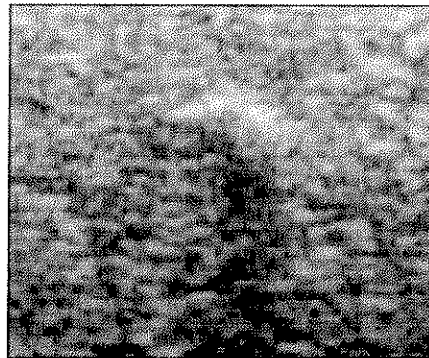


(c) チャンネル切替え用ロータリースイッチ

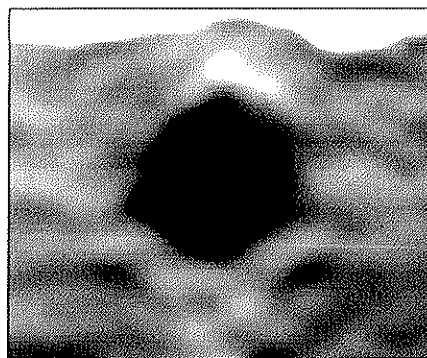
図 7.3: リングアレイプローブとチャンネル切替え装置



(a) ファントム概観図



(b) ファントム中央断面 B モード像 (3.75MHz)



(c) ファントム中央断面歪み像 (CA による)

図 7.4: 作成したファントム

高さ40mmの直方体形であり、その中心には直径20mmの硬内包球が埋め込まれている。寒天とゼラチンの割合は、硬内包の場合で3%及び1.5%、軟周囲の場合で1%及び0.5%とした。散乱体としてポリエチレン粉末を内包及び周囲で0.3%の同一分量で均一に混ぜた。

図7.4(b)は、作成したファントムの中央断面の3.75MHz、Bモード像である。使用した超音波診断装置は、東芝メディカル社製SSA-270である。画像の中央部に内包が存在している。内包の上部で輝度が高くなっているが、この像では内包が含まれていることは判断できない。図7.4(c)は、圧縮前後に取得したRF信号に対し、第4章で提案したCAを用いて変位分布を求め、それを歪み分布に変換した画像である。ただし、ここでの変位はビーム軸方向のみしか計測できないため、歪みに関してもビーム軸方向の成分しか表示されない。この歪み像より内包部分が明瞭に表示されており、正しくファントムが作成されていることが分かる。

ファントムに対して圧縮を加える場合は、送受信系として開口面が平坦な2次元アレイプローブを用いればそれを直接ファントム表面に押し当てて圧縮を与えることができる。しかしながら本実験において2次元アレイプローブとして代用されるリングアレイ送受信系の開口面は平坦ではなく、これによる圧縮は望ましくないため、図7.1や図7.2のように送受信系とファントムとの間は、水槽内の水で媒介させるようにしている。このとき、水槽底のプラスチック板による多重反射と散乱エコーが重複するのを避けるため、リングアレイ送受信系を水槽底から50mm離して設置した。また圧縮を与える場合は、圧縮用パルスモーターにアクリル板製の台座を設置し、図7.2のように台座上にファントムを載せ、この上部にはゼリーを塗布して水槽底に張られたプラスチック板に密着させるようにした。ファントムとプラスチック板の間の密着度を強くするために、計測前には、ある程度初期圧縮を与えるようにした。またファントムと台座との間には、スリップが生じないようにゴムシートが敷かれた。

7.1.2 データ収集

以上のセットアップ終了後、図7.5に示すような手順でファントム内からの散乱波データを収集した。まず、リングアレイ送受信系の中央の送信プローブから、中心周波数3.5MHz、パルス数5のパルスを送直下方に照射し、リングアレイ周囲16素子での受信波を、図7.3(c)に示すチャンネル切替え用ロータリースイッチを用いて取得し、これを1走査線とする。サンプリング周波数は20MHzとした。リングアレイのある受信素子で得られたRF波形とそのスペクトルは、図7.6に示すようなものになる。図7.6(a)に示すように、ファントム深さ方向全域に渡ってエコーが得られていることが分かる。リングアレイを図7.2における x 軸方向に、2mmごとに走査し、23走査線分取得してこれを1断面データとする。1断面取り込み終了後は、図7.2における z 軸方向に、2mmごとに走査し、全21断面データを取得して、3次元RFデータを取り込みを終了する。このように圧縮前データを取得後、圧縮用パルスモーターによりファントムに0.5mmの圧縮を与え、同様の手順で圧縮後の3次元RFデータを取り込む。以上の圧縮前後の3次元RFデータの取り込みプロセスはGPIB通信制御により、全て自動化されている。しかし、全てを機械的な走査で行うため、全データ取得終了までには数時間を要する。

7.1.3 ファントムヤング率の計測

ヤング率再構成を行う前に、機械的な計測によりヤング率を求めた。図7.4のように作成したファントムの硬内包のヤング率と軟周囲のヤング率をそれぞれ計測した。寒天、ゼラチン、ポリエチレン粉末が、硬軟それぞれについて同一分量となる、直径29mm、高さ10mmのサンプル

ルを用意し、これを電子天秤上に載せて上部よりパルスモーターで0.25mmの圧縮を与える。このときの電子天秤の目盛がサンプル上部に加えられた応力であるとする。このサンプルは円筒形であるので、側面に対して応力は加わらず、1次元弾性体と近似することができる。すなわち式(5.5)からヤング率を決定できる。このようにして求めた表面応力は、硬サンプルの場合1933.23 Pa、軟サンプルの場合597.92 Paとなり、従ってヤング率は以下のように得られた。

軟サンプルの場合 : 23.9 kPa
 硬サンプルの場合 : 77.3 kPa

ただし、圧縮した際の電子天秤の歪みは十分に小さいため、無視している。

また、データ収集には数時間を要するため、ファントムヤング率の時間的な変化も同時に調べた。その結果は付録Aに示されている。図A.1より、3次元RFデータ収集時間の範囲では、硬軟ともヤング率がほとんど変化しないことが確認された。

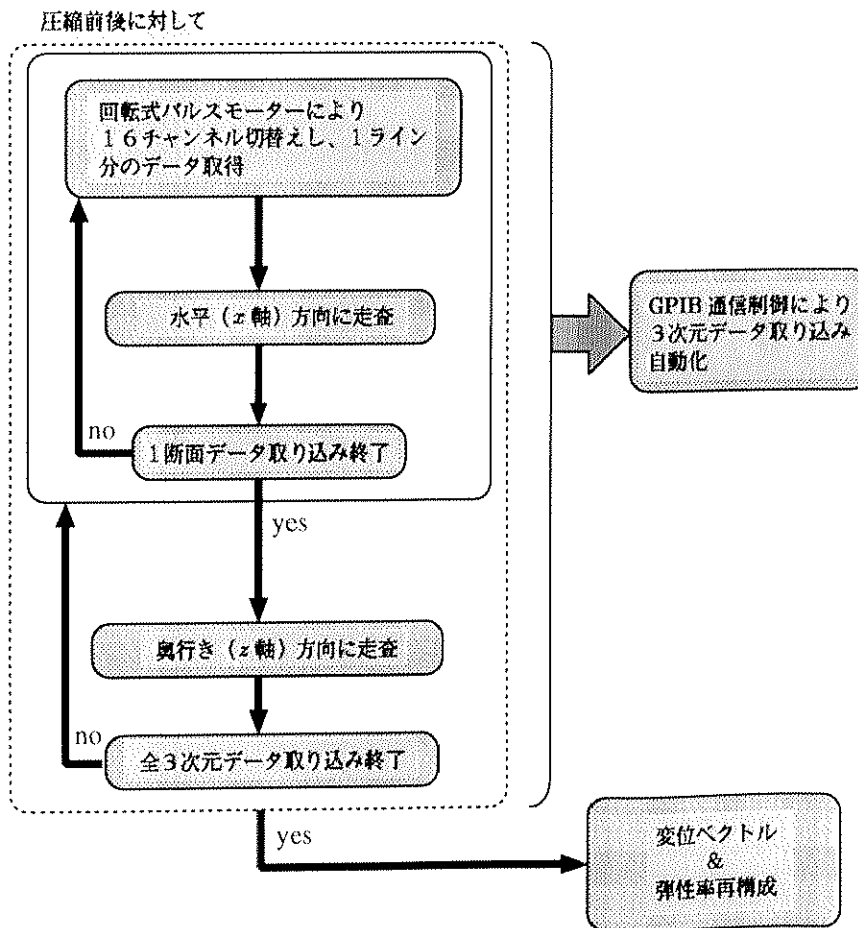


図 7.5: 3次元データ収集プロセス

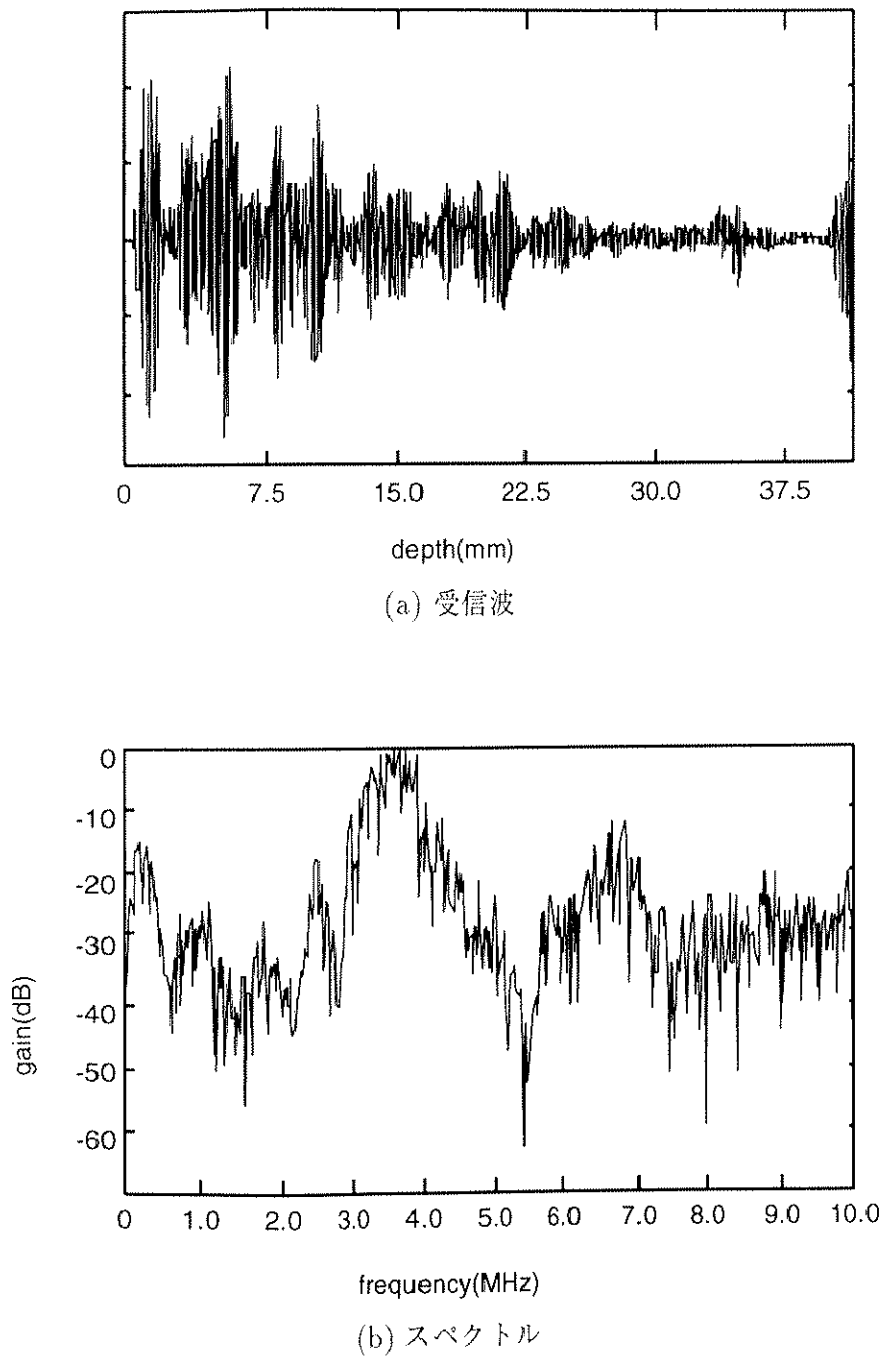


図 7.6: ある受信素子における (a) 受信波と (b) スペクトル

7.2 変位分布推定結果

得られた3次元RFデータに対し、CAを位相差検出に用いたWPGを用いて、3次元変位ベクトルの計測を行った。CAによる位相差検出の際はシミュレーションにおける検出結果とは異なり、ノイズの影響による相関係数のピークホッピングにより、得られた位相差の深さ方向のプロファイルは、不連続な段差を多く含む結果となってしまう。この様子を示したのが図7.7である。図7.7(a)~(d)は、圧縮後波形を半周期ずつシフトさせた各ステップにおいて検出された位相差を示している。この各ステップでは同時に相関係数計算されているが、各深さ位置について、この相関係数が最大となるステップを選択して連結させたものが図7.7(e)である。明らかにピークホッピングによって不連続点が生じていることが分かる。この位相差は滑らかに連結されなければ、変位を滑らかに得ることが困難になるため、これを補正することを考える。

CAにより、ある受信点 $Q(x, 0, z)$ で得られた1番目の散乱波と2番目の散乱波との位相差プロファイルは式(4.48)より $\Delta\phi(x, 0, z, t)$ であるから、これを $\Delta\phi(x, 0, z, j\Delta t) = \Delta\phi_j$ とおく。 $\Delta\phi_j$ は、深さ方向の j 番目のサンプル点を表している。このようなプロファイルに対して、

$$|\Delta\phi_j - \Delta\phi_{j-1}| > \epsilon \cdot \pi \quad (7.1)$$

となる部位に対して、式(4.39)の $\Delta\psi(x, 0, z, j\Delta t; n) = \Delta\psi_{j,n}$ を再度参照し、 $|\Delta\psi_{j,n} + n\pi - \Delta\phi_j|$ が最小となる $n = k$ を選択して、 $\Delta\psi_{j,k} + k\pi$ を修正後の位相差とする。ここでは ϵ を0.8として処理を行った。このように修正した結果を示したものが図7.7(f)である。図7.7(e)の不連続点が解消され、滑らかにプロファイルが連結しているのが分かる。

以上のような位相差プロファイルの補正処理を行った後、更に、リングアレイ特性が狭帯域であることや、深部の信号レベルの低さに起因する雑音の影響などといった、位相差推定値に付随する変動を2次元の平滑化フィルタを用いて除去した後、WPGによる変位ベクトル検出を行った。結果を図7.8に示す。図7.8(a)が変位ベクトル x 成分、図7.8(b)が変位ベクトル y 成分、図7.8(c)が変位ベクトル z 成分を示す。座標系は、図7.2及び図7.4(a)に基づいており、ファントム中央断面を表示している。

ここで本来、変位ベクトル y 成分(u_y)は原点に配置した送信用のプロープで受信したエコーから得られる位相差に基づいて算出すべきであるが、SNR向上のために、周囲16素子で得られた位相差を用いて得るものとした。この演算の妥当性は以下のように示される。リングアレイの各素子が円周上に対称配置されているので、受信素子と計測点との距離 R はどの素子でも等しくなり、式(4.27)において $i = 1$ 、 $m = 1$ とした p 番目の素子を $\Delta\phi_{1,1}(x_p, 0, z_p, t) = \Delta\phi^p(t)$ のように表し、これらを全て加算すると、 u_x 及び u_z に関する項が消去されて以下式のように u_y が得られることになる。

$$u_y = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{R}{8(R+L)} \sum_{p=1}^{16} \Delta\phi^p(t) \quad (7.2)$$

図7.8(b)の変位ベクトル y 成分は、他の成分と比較すると、最も安定して得られていることが分かる。もともと、ビーム軸方向の変位計測精度は、方位方向の変位計測精度よりも高く、ここで示した結果も同様の傾向を示している。

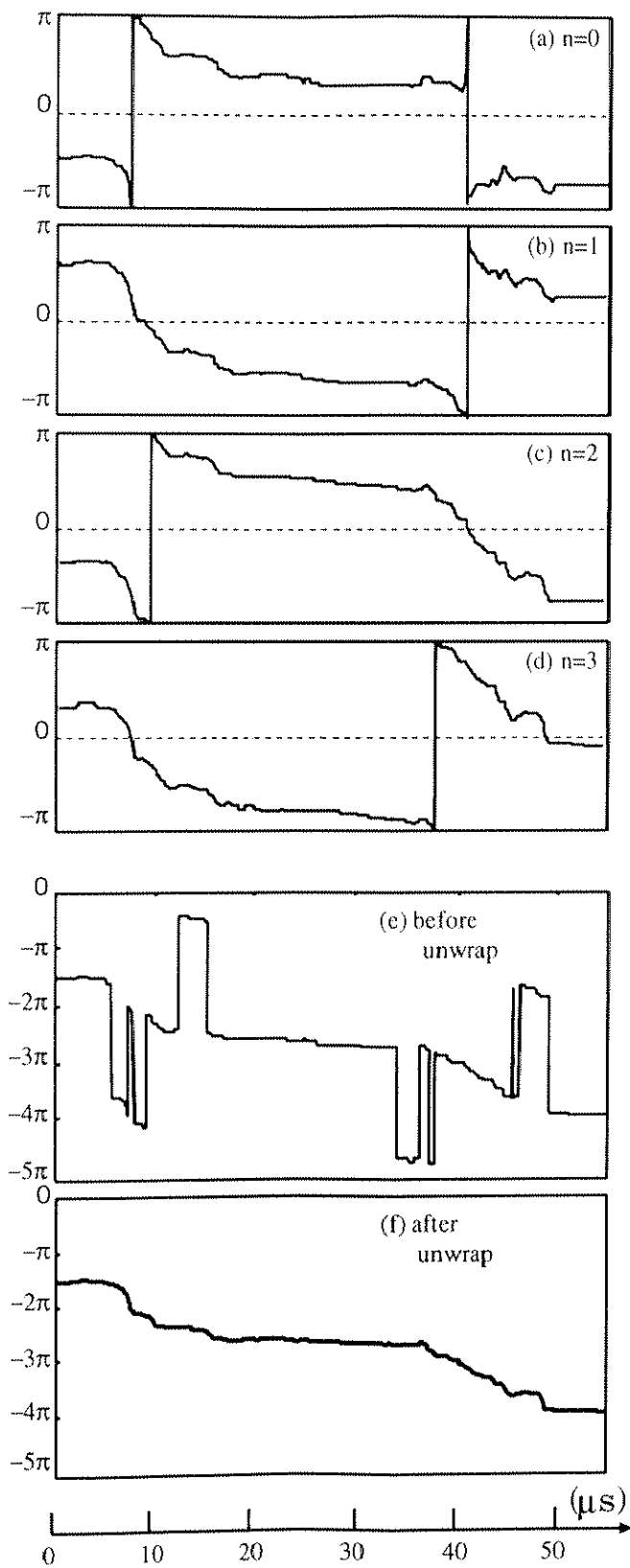


図 7.7: ある受信素子における位相差プロファイル検出

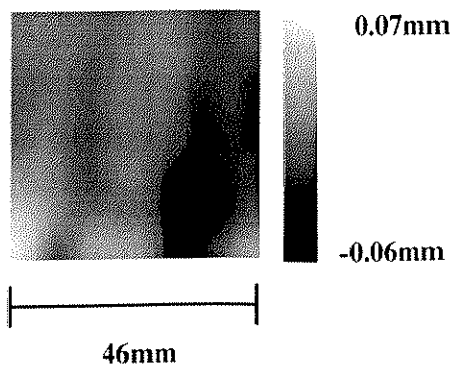
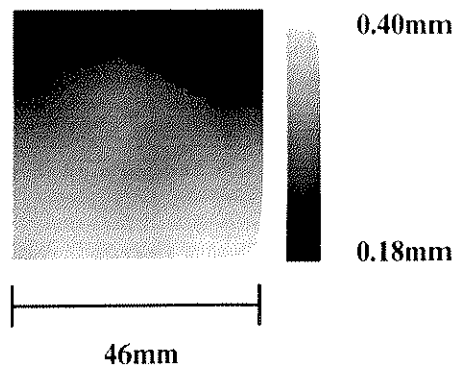
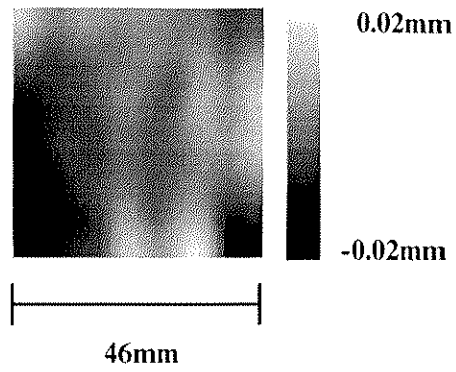


図 7.8: 中央断面上で推定された変位ベクトル成分の分布

7.3 歪み分布推定結果

7.2節で求められた変位ベクトルを用いて、式(5.30a)～式(5.30f)に基づき得られた歪みテンソル成分のうち、垂直成分を図7.9に、せん断成分を図7.10に示す。この場合の座標系も図7.2及び図7.4(a)に基づいており、ファントム中央断面が表示されている。最も内包部分が明瞭に表示されているのは、図7.9(b)の歪み yy 成分である。図7.9(a)の xx 成分については、シミュレーションのように内包の存在が明瞭に表示されていないが、中央部は周囲と比べて歪みが小さく、やや黒く表示されていることが分かる。また図7.9(c)の zz 成分については、内包部分が歪みが小さいものとして表示され、その下には、シミュレーションでも見られたような応力集中が生じていると思われる結果も得られた。

7.4 ヤング率分布推定結果

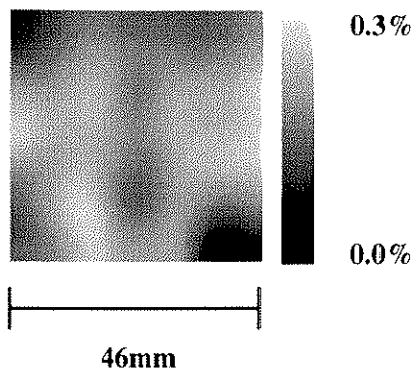
前節から得られた歪みテンソル全成分に基づき、ヤング率分布再構成を行った。ただし、実験では内包と周囲のヤング率分布はその境界で不連続であるため、歪みテンソルに平滑化窓を掛けて、ヤング率分布の連続性を保証してから再構成を実行した。

その結果を図7.11(a)に示す。図7.11(b)には比較のために2次元の再構成、すなわち、式(6.7)に基づいた再構成を行った結果を示す。図7.11(c)は、3次元再構成結果と2次元再構成結果の中央断面の中心軸上のプロファイルを示したものであり、3次元の結果は実線、2次元の結果は破線、また7.1.3節で計測された硬軟部分のヤング率が真の値として2点鎖線で表示されている。

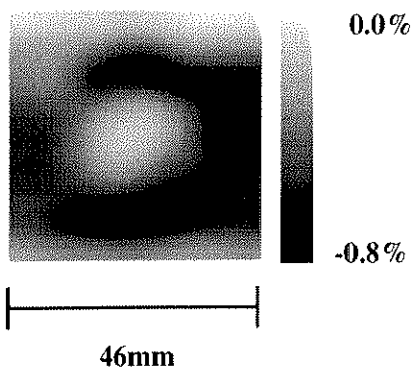
図7.11(a)(b)の再構成を行う際、積分開始点のヤング率としては、7.1.3節で計測された周囲のヤング率23.9kPaを用いた。この値を基準として、内包部分のヤング率が7.1.3節で計測された77.3kPaとなれば再構成は妥当であるということになる。

図7.11(a)(b)においては、内包部分が周囲よりも硬い部分として妥当に再構成されていることが分かる。これらの結果を中心軸上のプロファイルとして表示した図7.11(c)から比較すると、3次元再構成結果における内包部分のピーク値は71.9kPa、一方、2次元再構成結果における内包部分のピーク値は63.6kPaであり、3次元再構成の方がより真の分布に近く求められていることが分かる。なお3次元と2次元においては平滑化などの演算に関するパラメータは全て統一して行われている。しかし、3次元の場合でも電子天秤による計測値と比較すると過小評価されており、この原因としては、変位ベクトル計測時の平滑化や、再構成の際のヤング率分布の連続性保証のための平滑化によるものと考えられる。この平滑化窓のサイズを最小限に抑えられれば、真の値に近づくものと期待される。

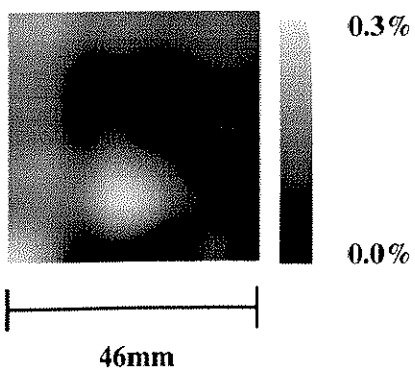
図7.11(a)(b)の再構成結果では、画像上部と右下部の境界部分でアーチファクトが見られる。右下部のアーチファクトは歪みによる境界効果を除去出来なかったために生じたと考えられるが、画像上部のアーチファクトは、実験システムにおいて、水槽の底の張り付けたプラスチック板内部の多重反射である可能性が高いと思われる。プラスチック板内部の多重反射は、送受信系のプローブ面とプラスチック板との多重反射とは明らかに異なり、その除去は困難である。多重反射エコーは、圧縮前後の波形において不動のエコーとして作用するため、変位計測後に歪みに変換すると、その値は非常に小さくなり、ヤング率再構成においては、非常に硬い部分として認識されてしまう。このようなアーチファクトは、実験システムをさらに改善することで除去できると思われる。



(a) 歪み xx 成分

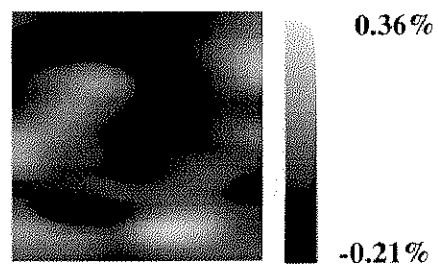


(b) 歪み yy 成分



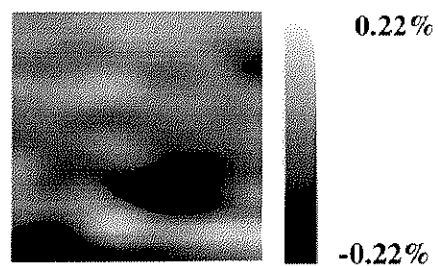
(c) 歪み zz 成分

図 7.9: 中央断面上で推定された歪みテンソル垂直成分の分布



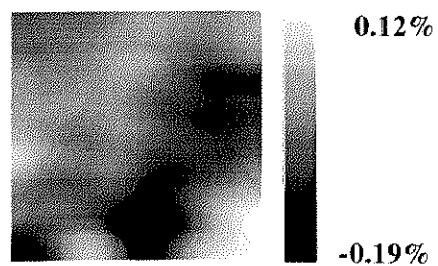
46mm

(a) 歪み xy 成分



46mm

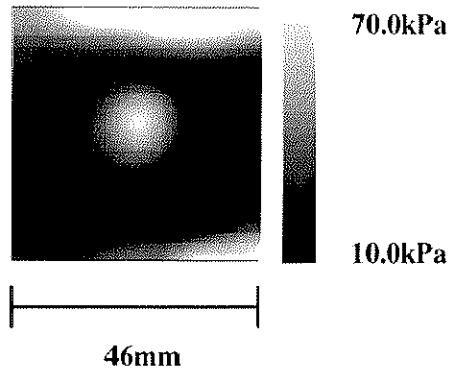
(b) 歪み yz 成分



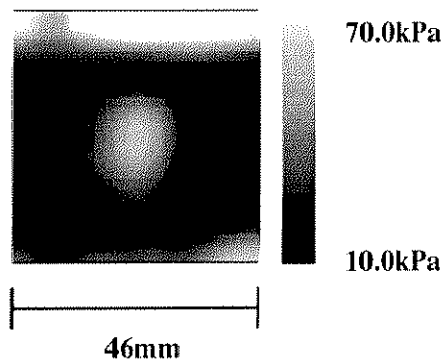
46mm

(c) 歪み zx 成分

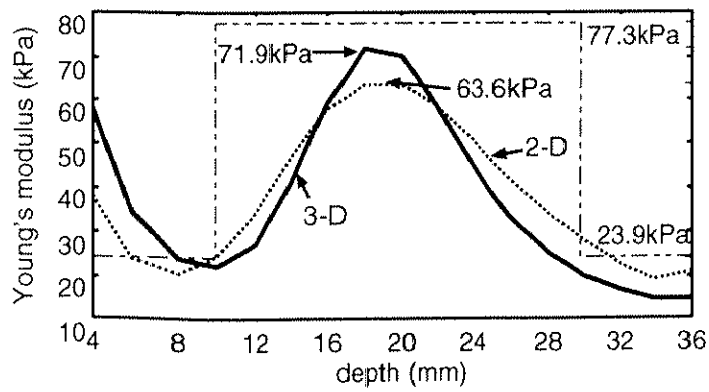
図 7.10: 中央断面上で推定された歪みテンソルせん断成分の分布



(a) 3次元再構成結果



(b) 2次元再構成結果



(c) 中心軸上のヤング率プロファイル

図 7.11: ヤング率分布再構成結果

7.5 ヤング率分布の3次元表示

ヤング率分布は、1断面23ライン、全21断面の3次元データを用いて再構成されたので、この分布を3次元表示した。以下に示す。

7.5.1 しきい値処理

3次元データをしきい値処理して3次元表示した結果を図7.12に示す。この表示法は、50kPaをしきい値として、それ以上のヤング率を持つ部分を全て表示させている。また視点から各ボクセルまでの距離に応じて画像の濃淡付けを行っている。従って、グレースケールには定量性を持たせておらず、領域抽出を行っていることになる。表示されている4枚の画像は、(a) 0 (deg)を基準として、(b)(c)(d)の順に回転表示させたものを示している。これらの画像から、ファントム上部のアーチファクトはほぼ全面に広がっており、また側面境界にはアーチファクトが出現しているが、硬い球内包が明瞭に領域抽出されていることが分かる。

7.5.2 内部断面表示

ヤング率データに基づいて濃淡付けを行い、ファントム中心を通る内部断面を表示させた結果を図7.13に示す。ダイナミックレンジは、白領域で70kPa、黒領域で10kPaとしている。またしきい値処理の場合と同様、回転表示の途中経過を表示させている。この画像からも内包部分のヤング率が周囲のヤング率と比較して高く、3次元的な内包球の位置関係が明瞭に描出されていることが分かる。

以上のように、再構成されたヤング率分布を3次元表示することによって、その空間的な位置関係等を視覚的に把握することができ、このような表示法が臨床の場で用いられるようになれば、有益な情報を多く提供できることが期待される。

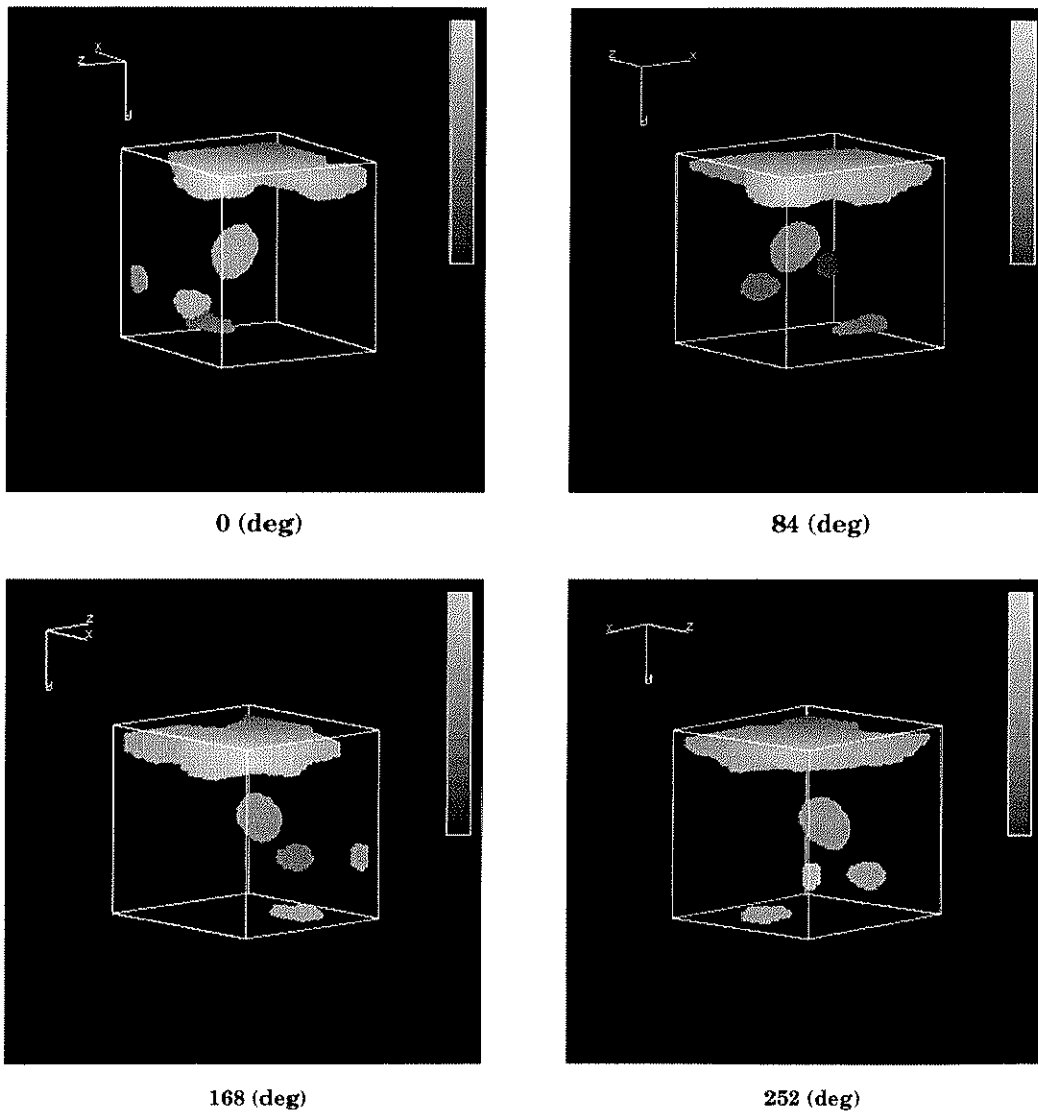


図 7.12: ヤング率分布の 3 次元表示 (しきい値処理)

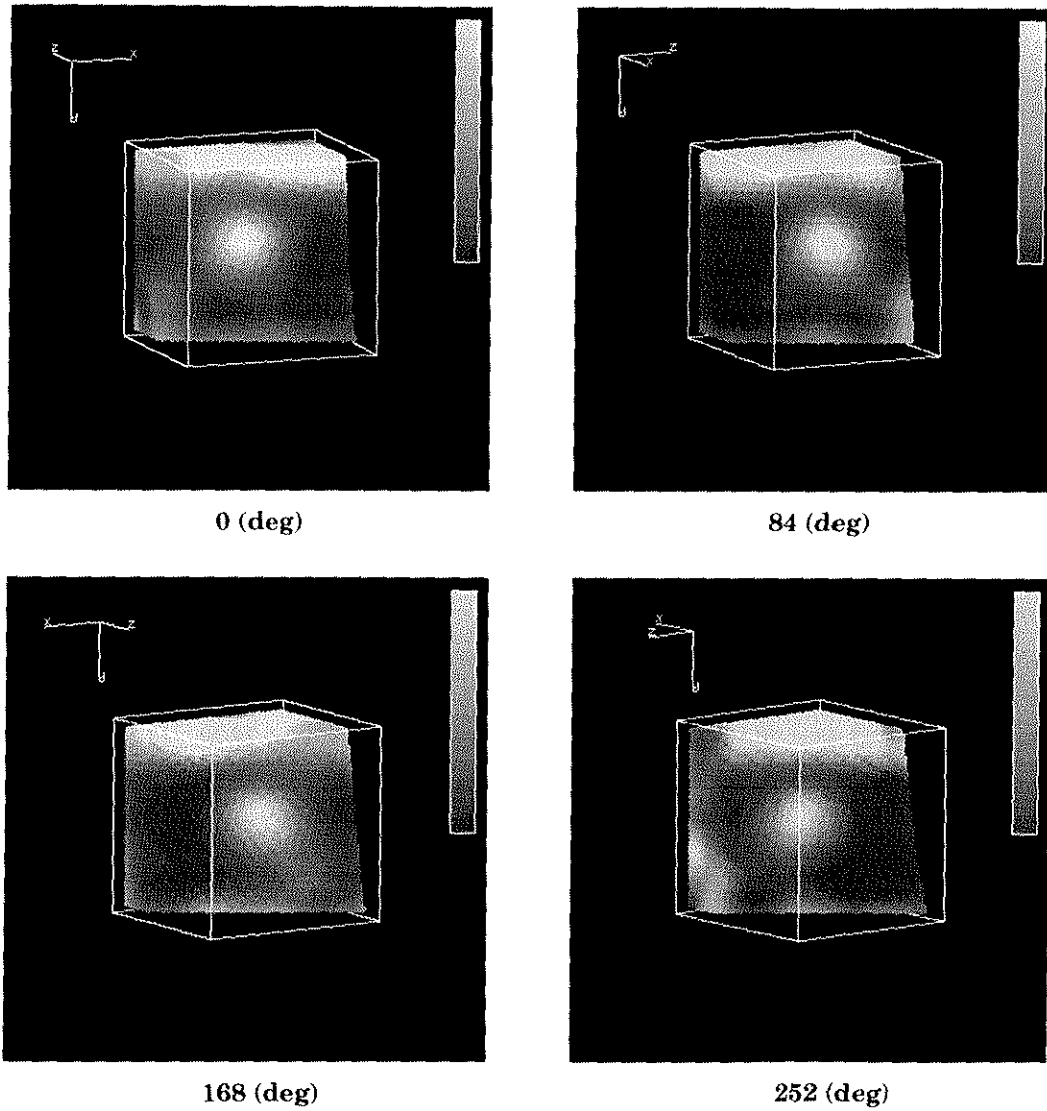


図 7.13: ヤング率分布の3次元表示 (内部断面表示)