

第 6 章

シミュレーションによる検討

4章と5章で提案した3次元変位ベクトル計測法と弾性率分布再構成法をシミュレーションにより評価した。6.1節でシミュレーション方法、6.2節で提案する3次元変位計測の精度評価と画像化、6.3節では提案する弾性率分布再構成法の評価について述べる。

6.1 シミュレーション方法

まず、図6.1に示すような有限要素組織モデルを構築した。このモデルは一辺が80mmの立方体形をなすものであり、その中央内部に硬い内包物を含ませたものである。内包としては、そのヤング率分布が立方体中央をピークとするガウス分布となるようにし、中心部で100kPa、中心から10mmの距離で50kPa、周囲で10kPaに収束するように設定する。また等方的な線形弾性体を仮定した場合のもう一方の弾性定数であるポアソン比はモデル全体で一様であるとし、0.495に設定した。実際の生体組織のポアソン比の実測例は希薄であるが、完全に0.5かまたこれに近い数値がよく用いられ、0.495もその1つである[125]。

モデル全体は一辺が2mmの立方体形の有限要素に分割され、さらにこの立方体要素は5個の四面体に分割された(四面体要素)。このようなモデルの上面に対し、100Paの圧力を全面に加えたときの内部変位応答を3次元有限要素法を用いて求めた。

このような順問題を解く際の境界条件として、側面では応力0、上面では外力ベクトル $(F_x, F_y, F_z) = (0, 100\text{Pa}, 0)$ かつ横方向に固定で $u_x = u_z = 0$ 、底面は固定で $u_x = u_y = u_z = 0$ を与えた。ただし、このモデルは y 軸に関して対称であるので、実際の計算ではこの4分の1のみを切り出し、切断面の境界条件を適切に設定して、これを3次元有限要素法で解いた。このときの節点数は18081、要素数80000であった。

図4.2における送受信系として図6.2に示すようなアレイをモデル底面に配置した。図6.2に示すアレイは、中央に送受信用の素子を1個、周囲に受信専用の素子を20個配置した、直径70mmで素子数21のアレイであるが、これ以後述べる精度評価では、この直径を変化させて計測値を評価する。ただし4章4.4節で述べたように、送受信系における送信ビーム方向は圧縮方向に対して垂直であるとする。この送受信系を用いて各受信素子で取得されるエコーデータをシミュレートするために、まずモデル内部に散乱体を一様に分布させた(モデル全体で180000個)。この散乱体密度は周囲及び内包に無関係に一様であり、また散乱係数の分布は正規分布をなすように設定した。

送信として中心周波数3.75MHzのパルスを用いた。パルスの比帯域はこれ以後に述べる精度評価の結果を基に決定するものとした。受信素子 $Q(x, 0, z)$ で i 番目に得られるエコーを

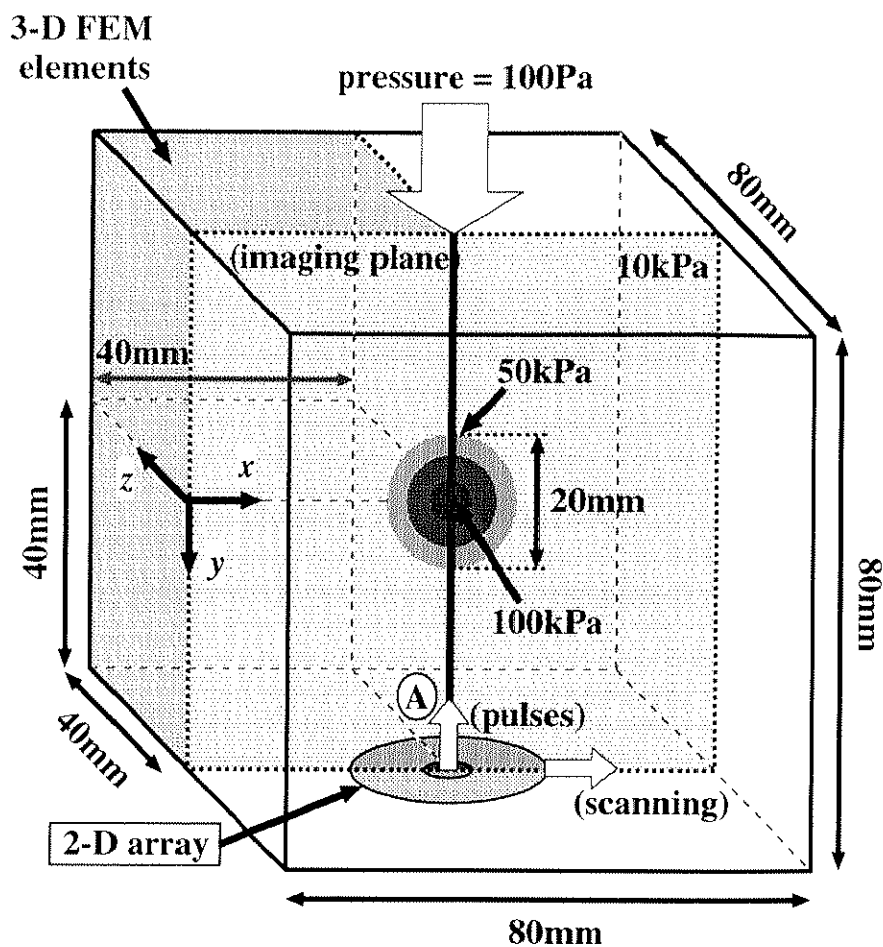


図 6.1: 3次元有限要素組織モデル

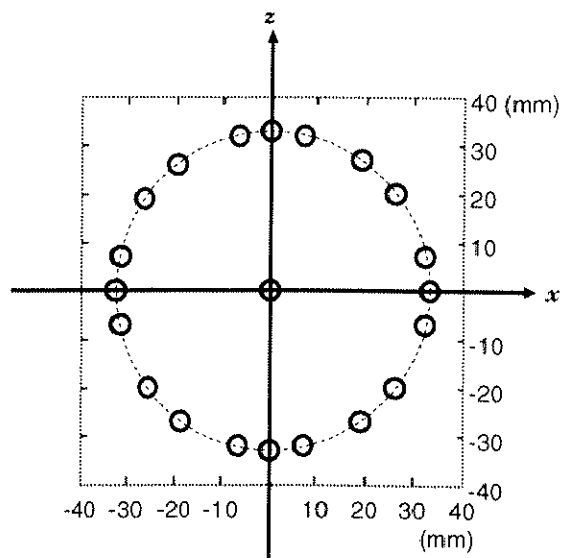


図 6.2: シミュレーションに用いた送受信系の一例

$s_i(x, 0, z, t)$ としたとき、これは次のように計算した。まず組織内の微小サンプルボリューム dV の重心の位置ベクトルを \vec{r} とすると、送信開口面 S_T 上での微小素子 dS_T が全て同位相で振動したときの \vec{r} での音圧 p_T は、

$$p_T(\vec{r}, t) = \int_{S_T} \frac{1}{|\vec{r}|} h(t - \frac{|\vec{r}|}{c}) dS_T \quad (6.1)$$

ここで h はトランスデューサのインパルス応答であり、図 6.3 のようなものを用いた。

\vec{r} での散乱は等方的であるとし、この位置での散乱係数を $\Gamma(\vec{r})$ とすると、サンプルボリューム V からの散乱波の音圧 $p_S(\vec{r}, t)$ は、

$$p_S(\vec{r}, t) = \int_V \Gamma(\vec{r}) p_T(\vec{r}, t) dV \quad (6.2)$$

受信素子 $Q(x, 0, z)$ の位置ベクトルを \vec{r}' とすると、受信波は以下のように記述される。

$$s_i(x, 0, z, t) = \int_{S_R} \frac{1}{|\vec{r}' - \vec{r}|} p_S(\vec{r}, t - \frac{|\vec{r}' - \vec{r}|}{c}) * h(t) dS_R \quad (6.3)$$

式 (6.3) はこのまま計算すると計算時間が膨大になってしまうため、計算負荷を減らすために予め送信音場を計算しておき、散乱体位置での音圧と散乱係数を乗算して、受信素子と散乱体との距離に応じた遅延を与えてパルスを重ね合わせた。このようにして作成した rf エコーとスペクトルは図 6.4 のようなものである。また計算された送信音場は図 6.5 のようなものであり、開口直径 6mm、ピッチ 0.5mm としたときのものである。エコー計算時にもこのパラメータを用いた。

圧縮による散乱体移動は、3次元有限要素法から求められた変位応答に基づいてなされた。送受信系をモデル底面で2次元走査してエコーデータを収集し、圧縮を加えた後同様の走査を繰り返して、圧縮前後の rf エコーデータが収集された。エコーデータ作成後、本研究で提案する3次元変位ベクトル計測法が適用された。

計測に関するパラメータを表 6.1 にまとめる。比帯域が 7.0% ~ 29.0%、受信開口直径が 20mm ~ 70mm の範囲として示してあるのは、次節の精度評価において、この値の範囲で最適値を見出すことを意味している。また、ノイズも -10dB ~ 40dB の範囲で与え、ノイズに対する変位ベクトル計測の頑健性についても検討した。

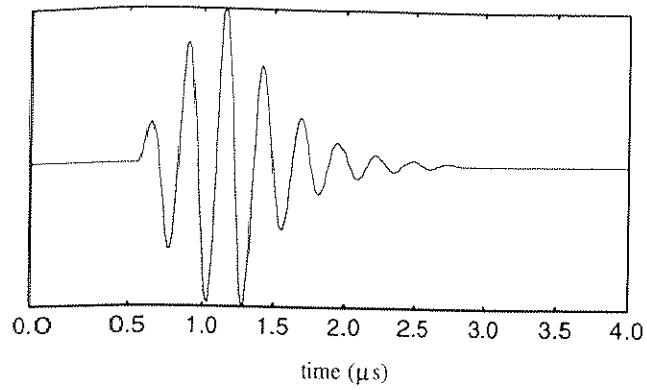
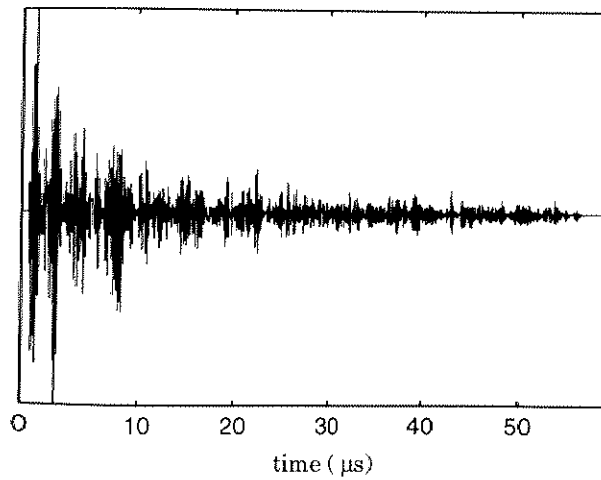
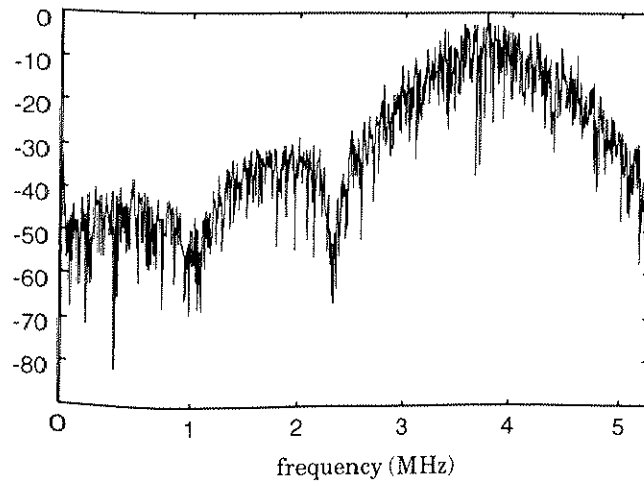


図 6.3: シミュレーションに用いたトランスデューサのインパルス応答

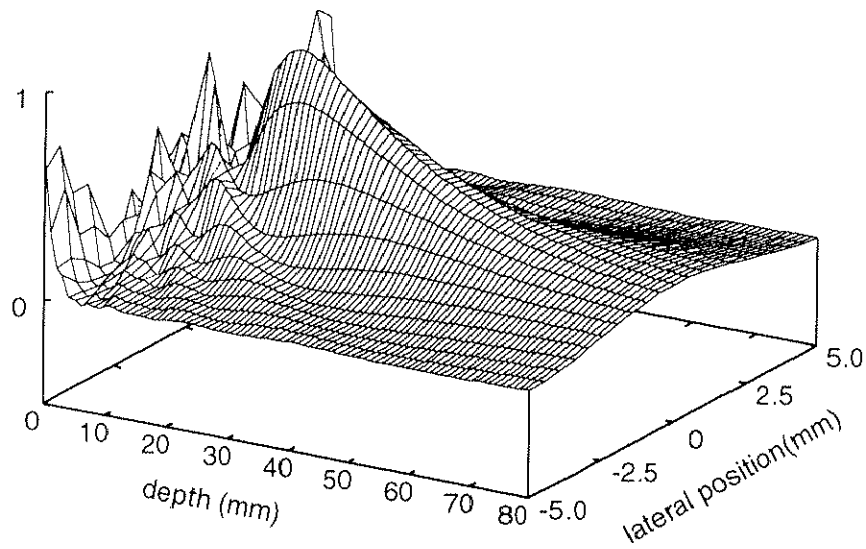


(a) rf echo

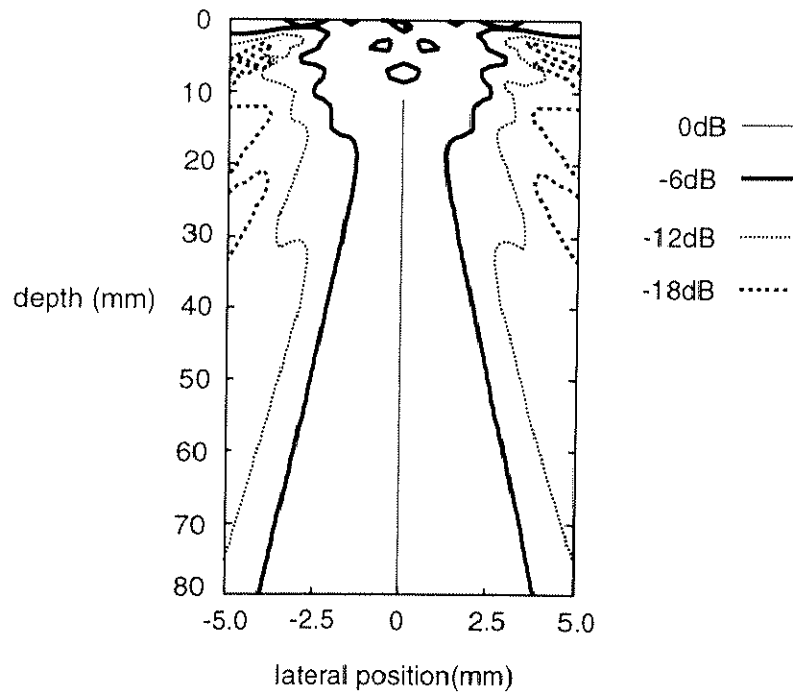


(b) spectrum

図 6.4: 受信素子で得られた rf エコーとそのスペクトル



(a)



(b)

図 6.5: シミュレーションで用いた送信音場

表 6.1: 計測に関するパラメータ

● 送信パルス	
中心周波数	: 3.75MHz
比帯域	: <u>7.0% ~ 29.0%</u>
● 送信開口直径	: 6mm (ピッチ 0.5mm)
● 受信開口直径	: <u>20mm ~ 70mm</u>
内円環直径	: 10mm ~ 60mm
ピッチ	: 2.6mm ~ 6.0mm
● 圧縮回数	: 1 または 10
● サンプル周波数	: 10.5MHz
● SNR	: <u>-10dB ~ 40dB</u>

(*) 受信開口直径と内円環直径の差は 10mm とし、受信素子数が受信開口直径に依らずなるべく一定となるようにピッチを調整する。

6.2 3次元変位ベクトル計測法の評価

まず、図6.1に示されている点Aの1ラインにおいて、送信パルス比帯域や受信開口直径、SNRをそれぞれ変化させて計算したエコーデータを用い、提案手法により3次元変位ベクトル計測を行った。

精度評価としては、 y 軸上1ラインで推定された変位ベクトル各成分の全 N 点プロフィールに対して、 i 番目のサンプル点の計測値 $\tilde{\delta}(i)$ と真値 $\delta_{true}(i)$ の偏差の絶対値 $d(i)$ をとり、その平均値 \bar{d} と標準偏差 σ_d を変位絶対値の最大値 δ_{max} で正規化した $accuracy$ と $precision$ を用いるものとした。

$$d(i) = |\tilde{\delta}(i) - \delta_{true}(i)|$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d(i)$$

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{d(i) - \bar{d}\}^2$$

$$accuracy = \frac{\bar{d}}{\delta_{max}} \times 100(\%) \quad (6.4)$$

$$precision = \frac{\sigma_d}{\delta_{max}} \times 100(\%) \quad (6.5)$$

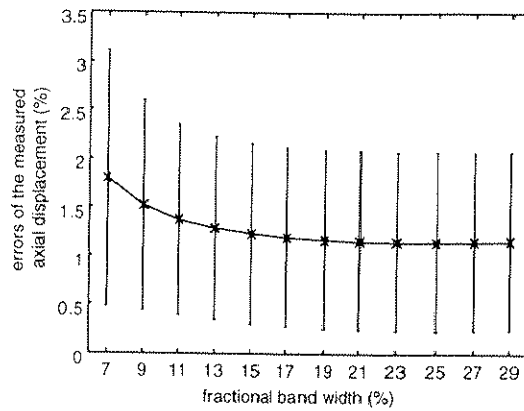
以下では、送信パルス比帯域と受信開口直径及びSNRと受信開口直径に関する計測精度の特性について検討し、変位ベクトル成分と歪みテンソル成分の分布の画像化を行う。

6.2.1 送信パルス比帯域及び受信開口直径特性への依存性

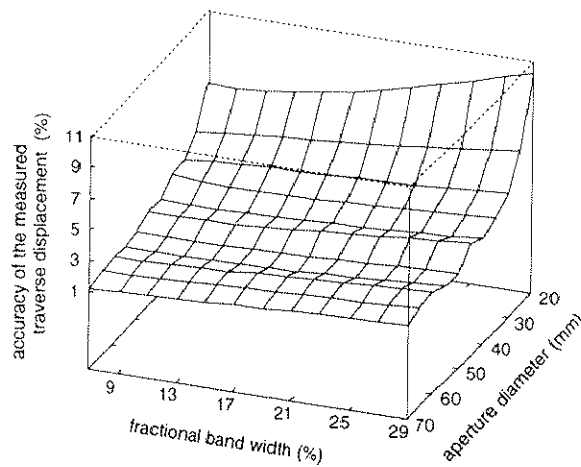
ここでは、送信パルス比帯域と受信開口直径をそれぞれ変化させて検討を行った。変位推定には、CAにより位相差を検出するWPG（以下この処理を'CA'と呼ぶ）と、ドブラ法（自己相関法）のみにより位相差を検出するWPG（以下'ordinary'と呼ぶ）の2通りを用いて比較した。圧縮レベルはこの2通りで同一とし、CAの場合、100Paの表面圧力を与えて1回の圧縮下でデータを作成し、またordinaryの場合は、10Paの表面圧力を10回に分けて加えた下でデータを作成した。ここで用いているモデルは線形であるので、100Pa与えたときの有限要素法による解を10分の1にすれば10Paのときの変位が得られることになる。またこの評価の際には受信波にノイズを加えていない。このように2通りを比較するのは、O'Donnellらが提案した複数回の圧縮による変位をドブラ法を用いて累積した後算出する方法[74, 75, 78]と比較するためである。圧縮回数を少なくする利点は、データ量と演算量を減少させることができる点にある。

送信パルス比帯域は、7.0% ~ 29.0%の範囲で2%おきに変化させ、また受信開口直径は、20mm ~ 70mmの範囲で5mmおきに変化させた。このように変化させて推定された変位ベクトル3成分の $accuracy$ と $precision$ を式(6.4)、式(6.5)により算出した。

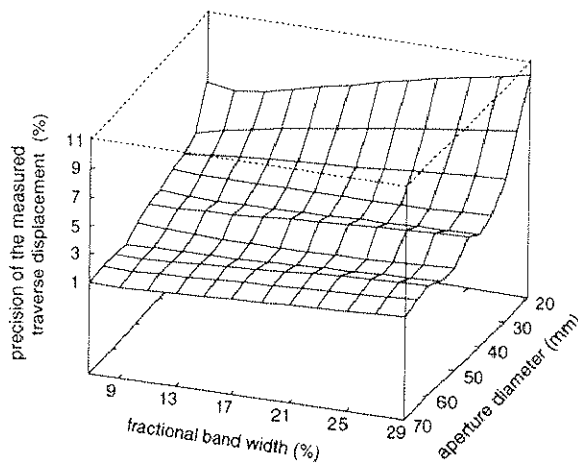
図6.6と図6.7にordinary及びCAの結果を示す。各図の(a)、(b)、(c)はそれぞれ、軸方向変位推定精度の比帯域依存性、及び比帯域及び受信開口直径の関数としての方位方向変位推定の $accuracy$ と $precision$ を示している。軸方向変位推定精度は、ここで考慮している受信開口直径の影響を受けないため、比帯域のみの関数としてエラーバー表示されている。方位方向変位



(a) 軸方向変位 (u_y) 推定精度の比帯域依存性

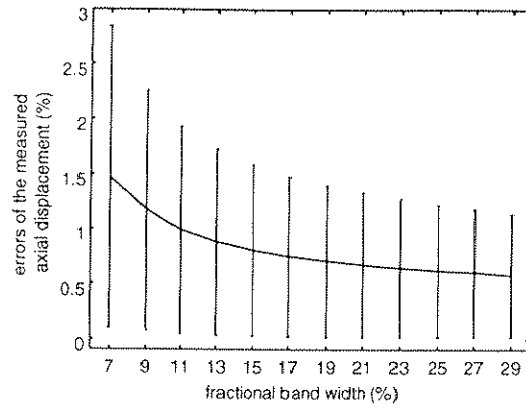


(b) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 accuracy

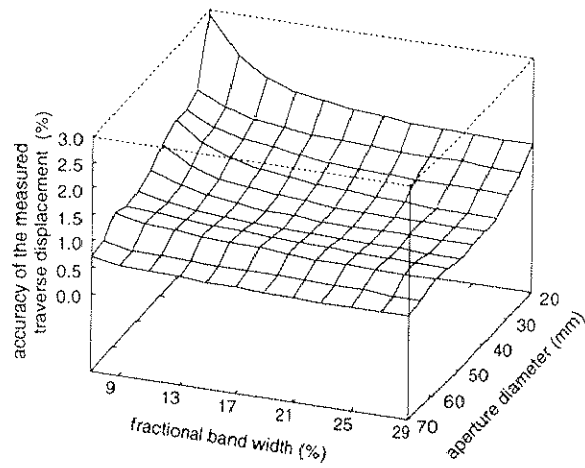


(c) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 precision

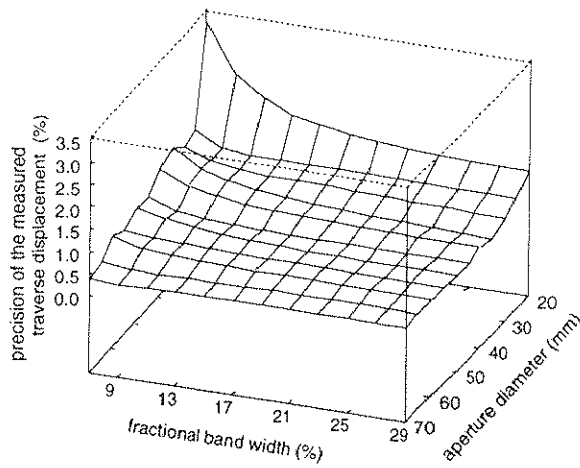
図 6.6: ordinary の場合の推定精度の送信パルス比帯域及び受信開口直径への依存性



(a) 軸方向変位 (u_y) 推定精度の比帯域依存性



(b) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 accuracy



(c) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 precision

図 6.7: CA の場合の推定精度の送信パルス比帯域及び受信開口直径への依存性

とは、軸方向変位成分を除いた方位方向成分のみを含む変位ベクトル $(u_x, 0, u_z)$ の絶対値のことを指す。すなわち、ここでは $\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$ を方位方向変位 (traverse displacement) と呼ぶ。

また、ordinary で推定した変位プロファイルを図 6.8(a)~(d) に、また、CA で推定した変位プロファイルを図 6.9(a)~(d) に示す。各々、図 6.6 及び図 6.7 の (b)(c) 図の 4 隅でのもので、

- (a)： 受信開口直径 20mm・比帯域 29%
- (b)： 受信開口直径 20mm・比帯域 7%
- (c)： 受信開口直径 70mm・比帯域 29%
- (d)： 受信開口直径 70mm・比帯域 7%

におけるプロファイルを示している。

方位方向変位推定結果に着目すると、ordinary の場合は図 6.6(b) 及び図 6.6(c) に示すように、受信開口が大きいほど、また比帯域が小さいほど推定精度が向上していることが分かる。一方、CA の場合は図 6.7(b) 及び図 6.7(c) に示すように、全体の誤差は 3.5% 以下であり、受信開口が小さくても ordinary と比較してそれほど大きな誤差を生じず、また比帯域が小さいほど推定精度が低下するという、ordinary の場合と逆の傾向が得られている。

これらの結果は、得られた変位プロファイルによく表れている。図 6.8 の ordinary の場合、受信開口直径が 20mm で比帯域が 29% のときに得られたプロファイルが最も不安定であり、特に方位方向変位成分のばらつきが非常に大きい。受信開口直径が 70mm で比帯域が 7% のときにはかなりばらつきが抑えられ、安定した結果が得られている。また図 6.9 の CA の場合、受信開口直径 20mm で比帯域 7% のときに得られたプロファイルが最も不安定であり、受信開口直径 70mm で比帯域 29% のときに得られたプロファイルが最も安定している。ordinary と CA を全体的に比較しても CA で得られたプロファイルは安定して得られていることが分かる。

ordinary と CA において比帯域に関して逆の特性を示した原因として、CA は ordinary の手法に相関係数を組み入れた手法であるためと考えられる。これを確認するために、CA において各素子ごとの最終的な位相差プロファイルを得る過程の中で、圧縮後波形を半波長ずつシフトさせた各ステップごとの最大相関係数に基づいて選択された位相差をみると、比帯域が小さいものほど、最大相関係数となる位置が多く誤っていた。これは、比帯域を小さく、すなわちパルスを長くしたためにエコーの包絡線パターンに特徴がなくなり、相関係数が最大となる位置を誤り易くなったためであると考えられる。相関演算の誤差源はスペckルや電氣的ノイズによる誤ピーク (false peak) とピークまわりのジッタ (jitter) である。ジッタに関する相関解析では、包絡線による相関演算の誤差は、RF による相関演算よりも 5 倍大きいという報告がある [50]。しかし CA においては相関ラグはデータ収集時のサンプリング時間間隔ではなく、半周期に相当する時間であるから、ジッタの影響は小さいと考えられ、この場合の主な誤差源は誤ピークということになる。この誤ピークが出現すると得られる位相差のプロファイルは不連続分布となるが、この誤差は除去することができる。これに関しては 7 章の実験結果で具体的に示される。

変位分布画像化

図 6.1 の中央断面を境に $\pm 6\text{mm}$ 厚さ (2mm ステップ) をもつ 3 次元領域で、比帯域 20%、受信開口直径 70mm に設定した送受信系を 2 次元スキャンし、エコーデータを作成した。エコーデータは 1 断面につき 41 ライン、7 断面分を計算した。作成されたエコーの 3 次元データに対

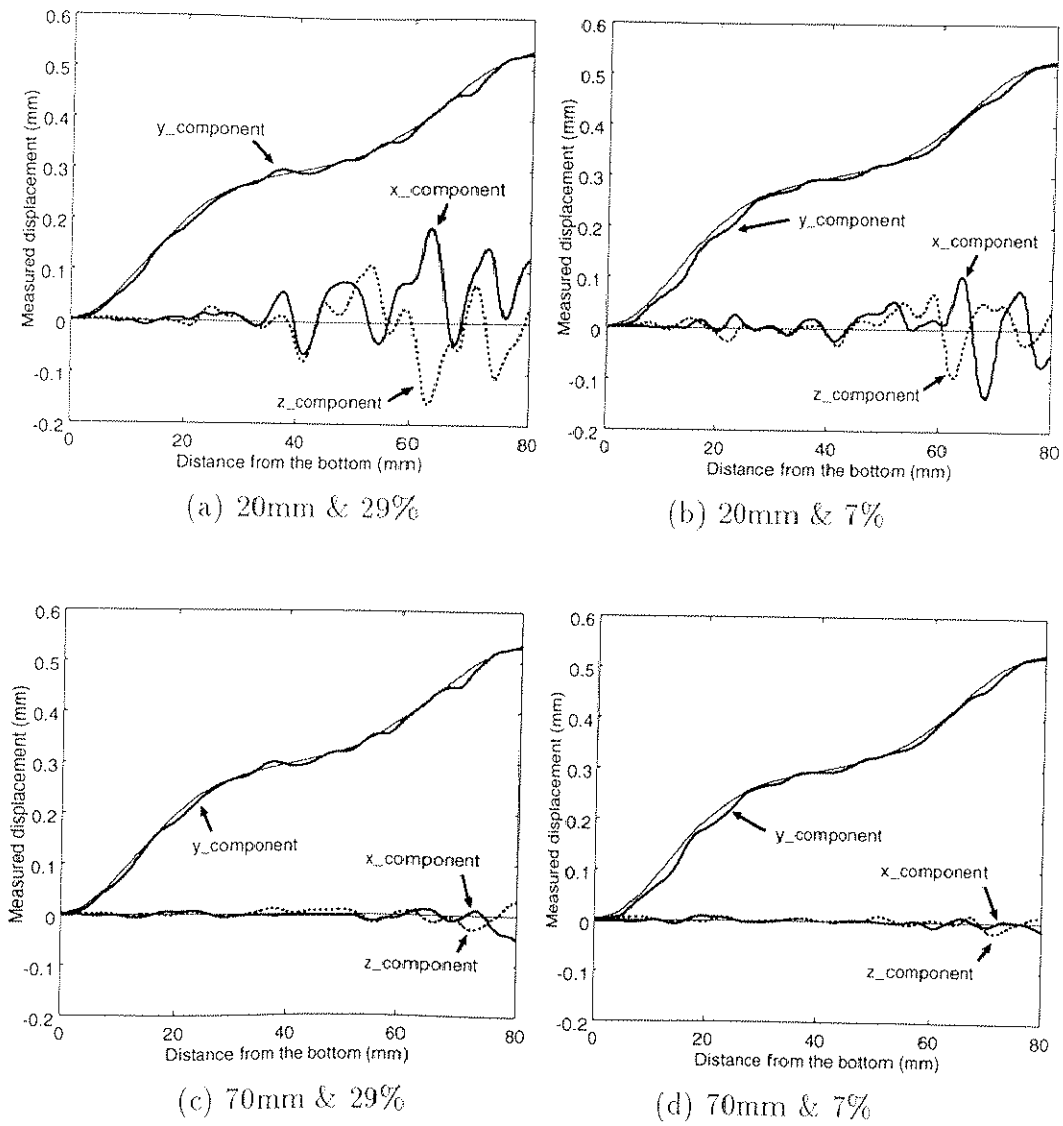


図 6.8: ordinary で推定された変位プロファイル

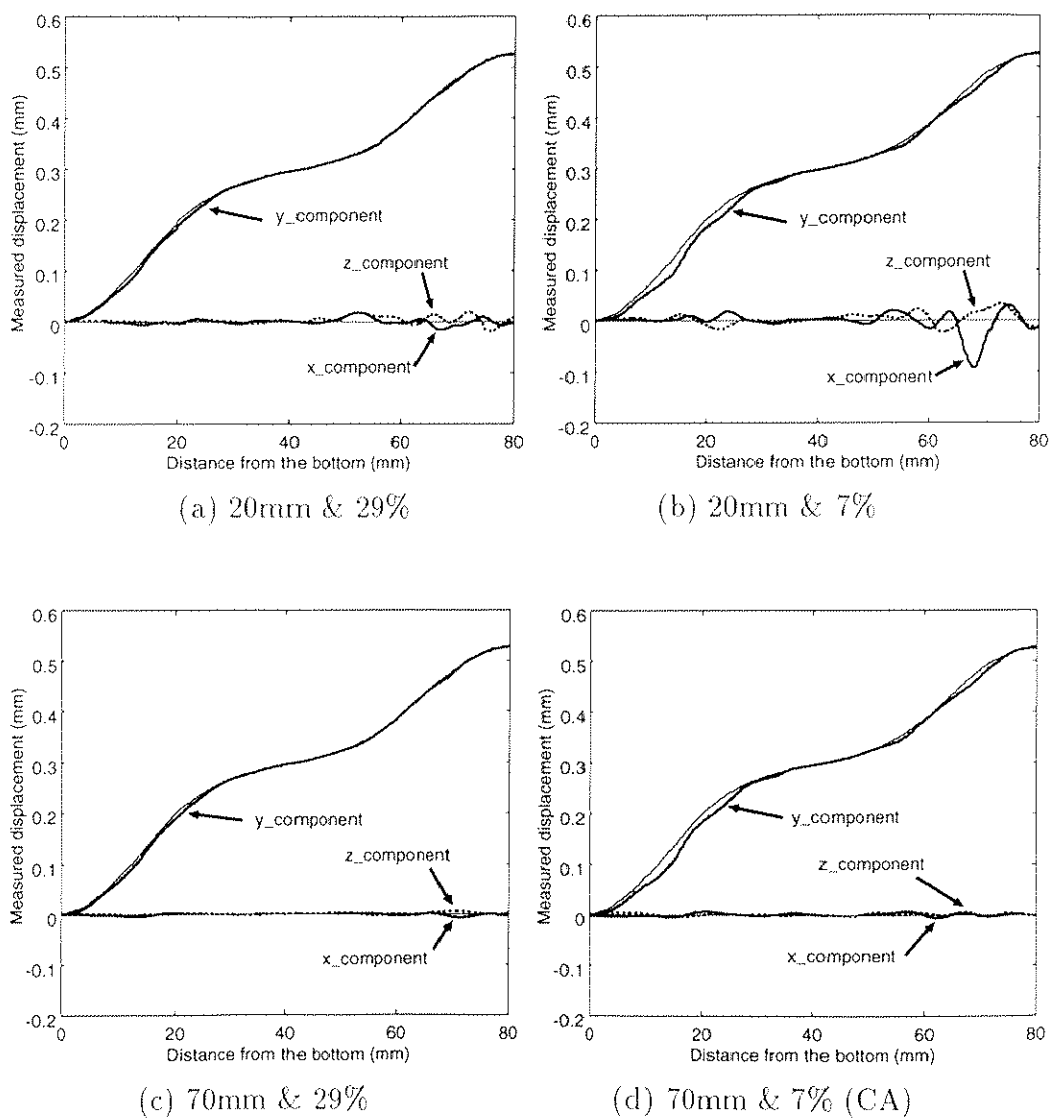


図 6.9: CA で推定された変位プロファイル

して、ordinary 及び CA による処理を行い、変位ベクトル空間分布を推定した。比帯域として 20% を選択したのは、比帯域に関する ordinary と CA のパフォーマンスを同等とするためであり、また受信開口直径については、検討した範囲 20mm~70mm では、ordinary 及び CA とも 70mm で最良の精度となったため、この値に設定した。画像化の際は、図 6.1 の中央断面 (imaging plane) 上における変位ベクトル 3 成分である x 軸方向成分、 y 軸方向成分、 z 軸方向成分を表示した。ここで座標系は図 6.1 に準じている。

図 6.10~図 6.12 それぞれの (a)~(c) において、(a) は真の分布、(b) は ordinary で求めた分布、(c) は CA で求めた分布を示している。また表示のダイナミックレンジは各成分ごとに統一されている。

表 6.2 は、ordinary と CA で変位推定した際の真の分布との誤差を計算したものである。各欄の上段が *accuracy*、下段が *precision* を示し、この計算は式 (6.4) 及び式 (6.5) に準じている。

この表から分かるように、ordinary と CA との差はほとんど見られない。

表 6.2: 推定変位分布の精度 (70mm & 20%)

	x 成分	y 成分	z 成分
ordinary	: 0.996%	0.786%	0.279%
	1.060%	0.430%	0.343%
CA	: 0.968%	0.728%	0.113%
	0.956%	0.315%	0.110%

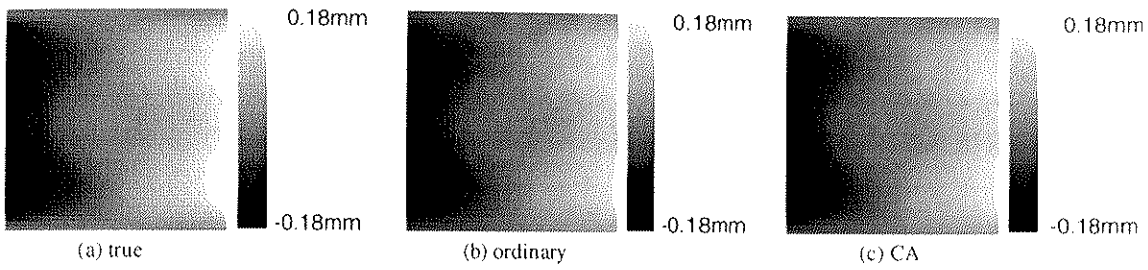


図 6.10: ordinary 及び CA で推定された変位 x 成分 (70mm & 20%)

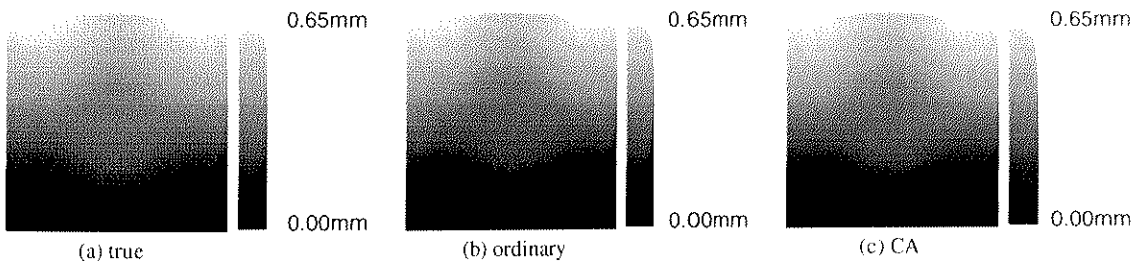


図 6.11: ordinary 及び CA で推定された変位 y 成分 (70mm & 20%)

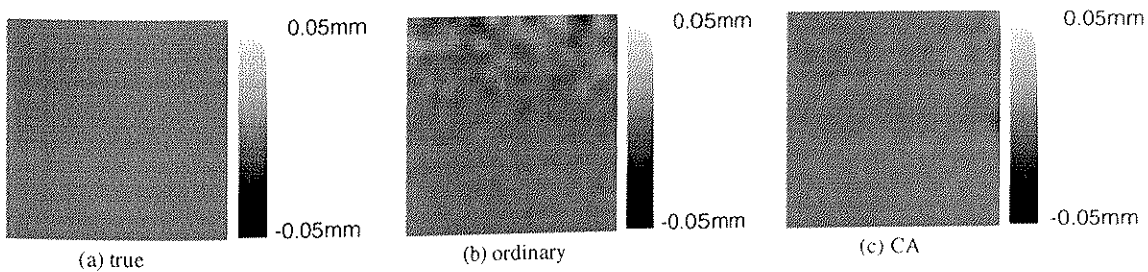


図 6.12: ordinary 及び CA で推定された変位 z 成分 (70mm & 20%)

歪み分布画像化

得られた変位ベクトル分布に対し、式 (5.30a)~式 (5.30f) を用いて歪みテンソルを計算し、その分布を画像化した。

図 6.13~ 図 6.15 に推定された歪みテンソル垂直成分の分布を、図 6.16~ 図 6.18 に推定された歪みテンソルせん断成分の分布を示す。また、図 6.19(a)~(c) には垂直成分の中心軸上でのプロファイルを、図 6.20(a)~(c) にはせん断成分の中心軸上でのプロファイルを示す。

表 6.3 は、ordinary と CA を基に推定した歪み分布と真の分布との間の誤差を計算したものである。変位分布の段階では、ordinary と CA との間には明確な精度の違いが見られなかったが、歪み分布として求めると CA の精度の方が ordinary より優れていることが分かる。これは、歪みの計算では変位の差分に基づいた計算を行うため、ordinary のわずかな誤差でも差分によって増幅されてしまうからである。

以上から ordinary と CA を比較すると、CA の方が精度が優れており、良好な結果を与えることが示された。

表 6.3: 推定歪み分布の精度 (70mm & 20%)

	xx 成分	yy 成分	zz 成分	xy 成分	yz 成分	zx 成分
ordinary	5.100%	3.178%	3.798%	4.003%	1.690%	2.001%
	5.022%	2.698%	3.724%	5.347%	1.907%	2.514%
CA	3.933%	1.826%	2.188%	2.910%	0.508%	0.886%
	4.143%	1.686%	1.682%	4.240%	0.418%	1.171%

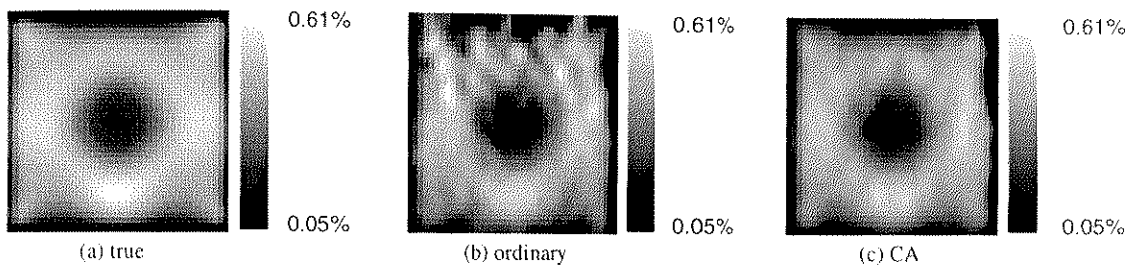


図 6.13: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル xx 成分 (70mm & 20%)

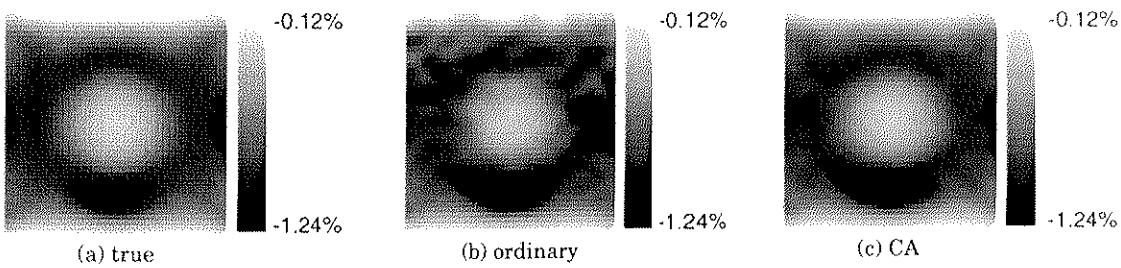


図 6.14: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル yy 成分 (70mm & 20%)

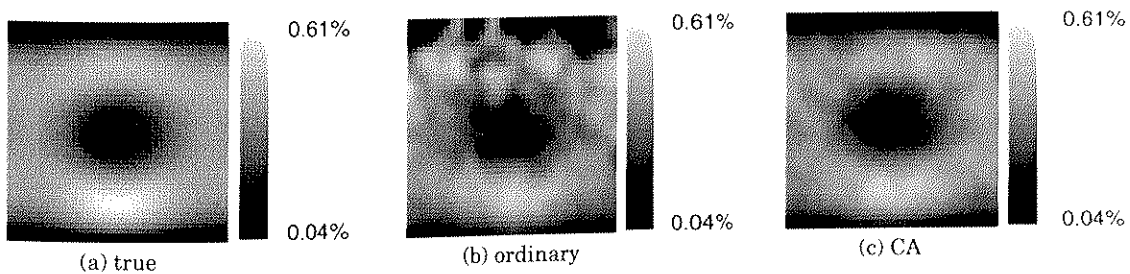


図 6.15: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル zz 成分 (70mm & 20%)

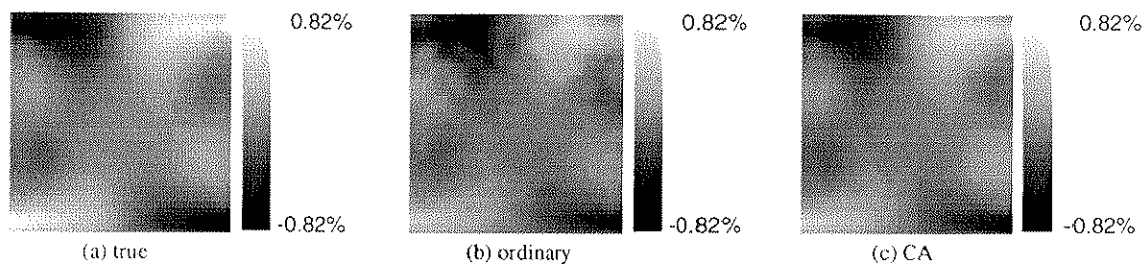


図 6.16: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル xy 成分 (70mm & 20%)

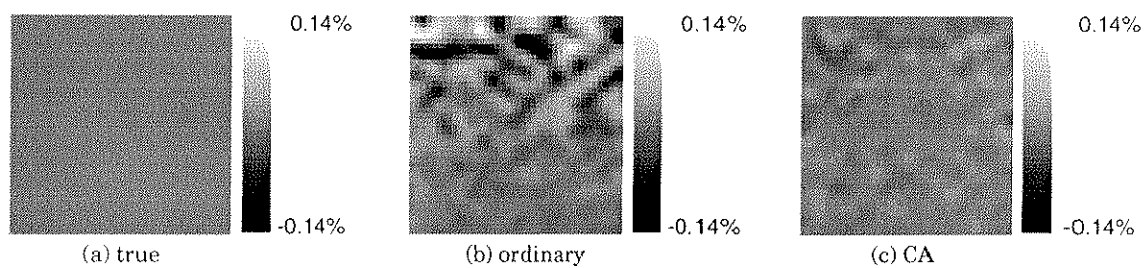


図 6.17: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル yz 成分 (70mm & 20%)

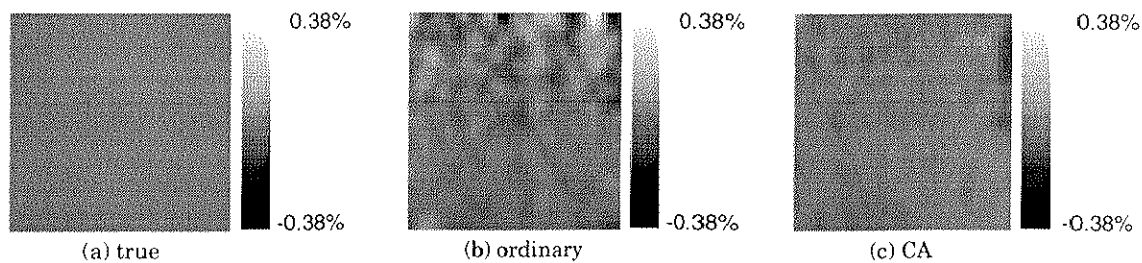
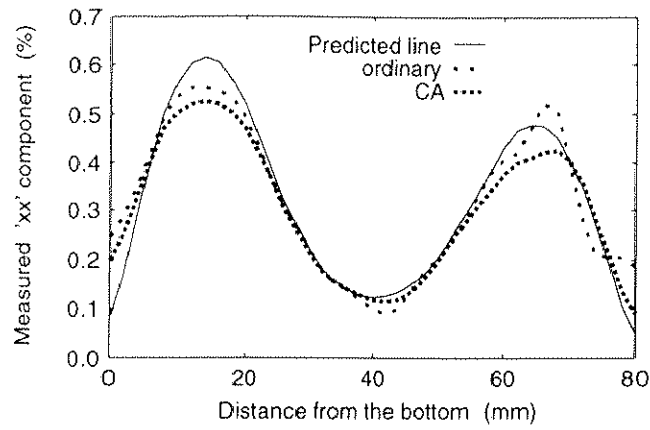
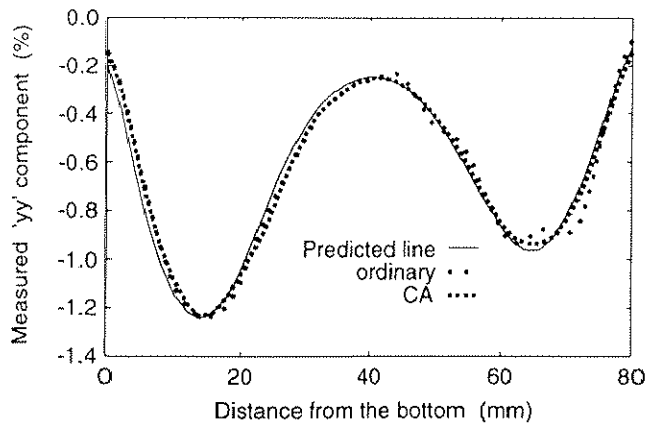


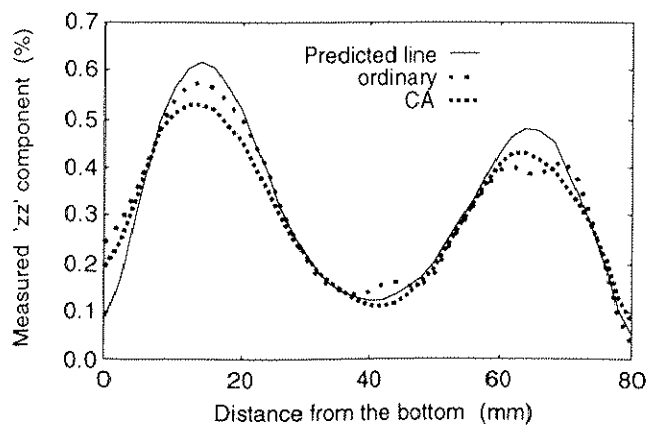
図 6.18: ordinary 及び CA で推定された歪みテンソル zx 成分 (70mm & 20%)



(a) xx 成分

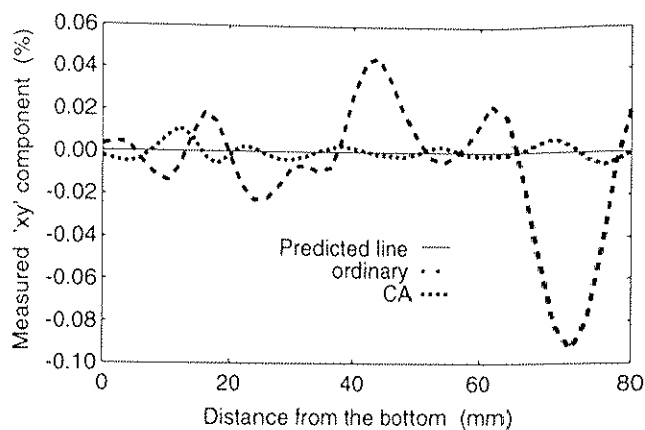


(b) yy 成分

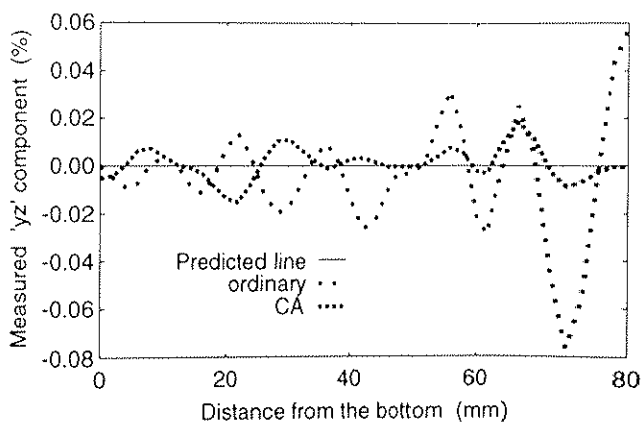


(c) zz 成分

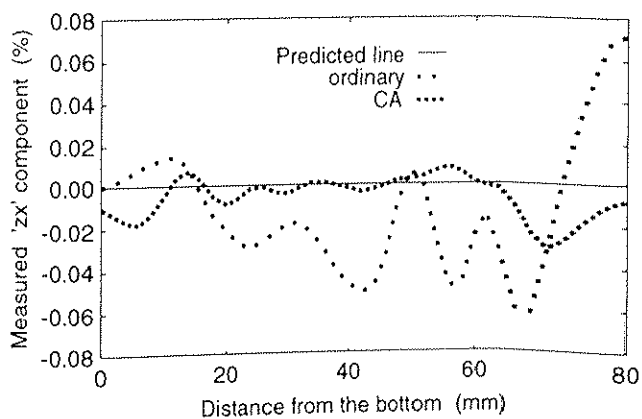
図 6.19: ordinary 及び CA で推定された垂直歪みテンソルの中心軸上のプロファイル



(d) xy 成分



(e) yz 成分



(f) zx 成分

図 6.20: ordinary 及び CA で推定されたせん断歪みテンソルの中心軸上のプロファイル

6.2.2 SNR 及び受信開口直径特性への依存性

次に、受信開口直径と SNR を変化させた際の精度を評価した。受信開口直径は、20mm ~ 70mm の範囲で 5mm おきに変化させ、SNR は -10dB ~ 40dB の範囲で 5dB おきに変化させた。このように変化させて推定された変位ベクトル 3 成分の *accuracy* と *precision* を前解析と同様に計算した。

また前節より ordinary よりも CA の方が高精度であることが判明したことから、ここでは CA による評価しか行っていない。CA による結果を図 6.21 に示す。各図の (a)、(b)、(c) はそれぞれ、軸方向変位推定精度の SNR 依存性、及び SNR 及び受信開口直径の関数としての方位方向変位推定の *accuracy* と *precision* を示している。軸方向変位推定精度は、ここで考慮している受信開口直径の影響を受けないため、SNR のみの関数としてエラーバー表示されている。

また、CA で推定した変位プロファイルを図 6.22(a)~(d) に示す。これらは図 6.21(b)(c) の 4 隅でのもので、

(a) : 受信開口直径 20mm · SNR -10dB

(b) : 受信開口直径 20mm · SNR 40dB

(c) : 受信開口直径 70mm · SNR -10dB

(d) : 受信開口直径 70mm · SNR 40dB

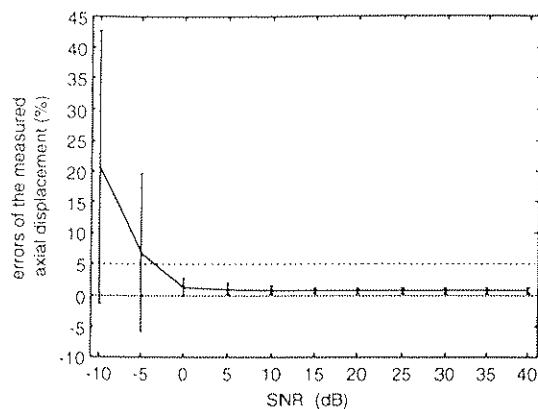
と設定した下でのプロファイルを示している。

図 6.21(a) は、SNR が 0dB であっても 5% 以下の精度で軸方向の変位が可能であることを示している。また、図 6.21(b)(c) の斜線部は誤差が 5% 以下となる領域を示しているが、10dB 以上の SNR があればここで検討した全ての受信開口直径で、誤差が 5% 以下となることが示されている。ただし、同一の SNR に対して受信開口直径が大きくなるに従い精度が向上するという性質は維持されていることを確認した。

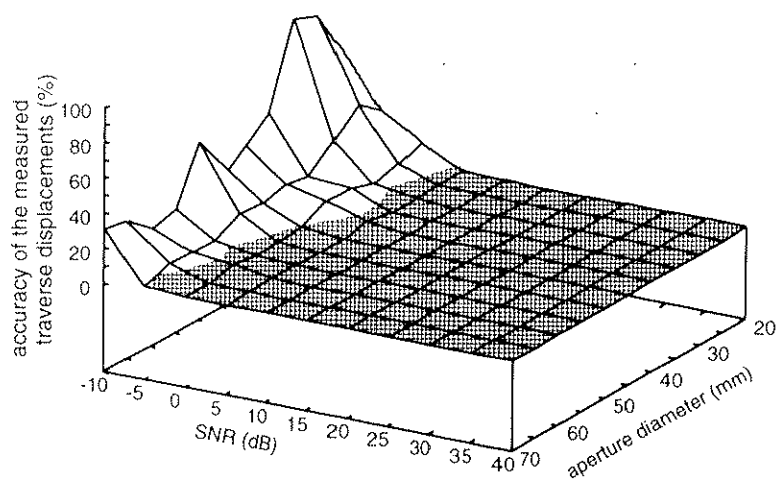
SNR を -10dB まで下げて評価したのは、3次元変位ベクトル推定を受信開口面上の各 1 素子で得られたエコーから行うことを前提としており、SNR がかなり低くなることが予想されるためである。通常超音波診断装置に用いられるリニアアレイプローブなどは、個々の素子からのエコーを開口合成することによって、ビームフォームと同時に SNR 向上を図っているが、本手法ではこの開口合成前の生波形に対して処理を行うため、SNR は低いと予想される。図 6.21 や図 6.22 の検討結果から分かるように、SNR が -10dB レベル付近に達すると、推定精度は極端に悪化してしまう。SNR が低い場合の対処法としては、処理の対象としている受信素子の周囲の素子で得られたエコーを用いて局所的に開口合成することが考えられる。エコーを合成する際の受信素子数を例えば N とすると、この合成によって SNR は \sqrt{N} 倍に向上する。局所的な合成によって SNR を図 6.21(b)(c) の斜線部レベルまで向上させ、その後変位ベクトル推定を行えば、図 6.22(b) や (d) に近いプロファイルが得られることが期待できる。

変位分布画像化

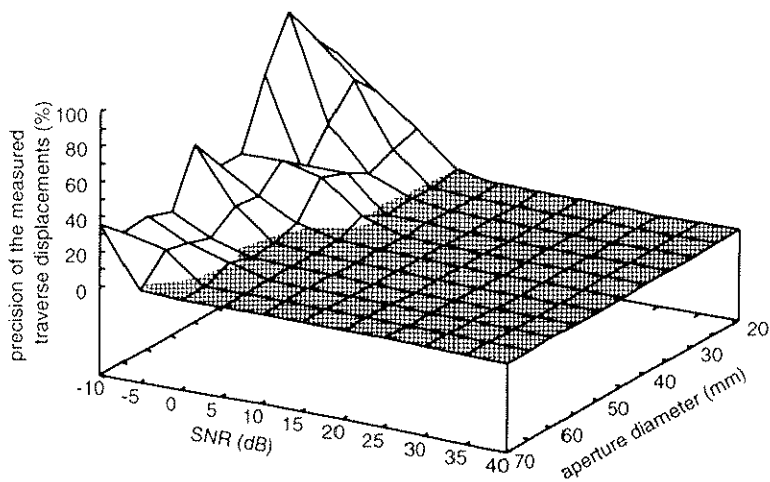
図 6.1 の中央断面を境に ±14mm 厚さ (2mm ステップ) をもつ 3次元領域で、比帯域 29%、受信開口直径 70mm に設定した送受信系を 2次元スキャンして作成したエコーデータに SNR 20 dB の白色雑音を付加した。比帯域を 29% としたのは、ここでは ordinary との兼ね合いを考慮



(a) 軸方向変位 (u_y) 推定精度の SNR 依存性



(b) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 accuracy



(c) 方位方向変位 ($\sqrt{u_x^2 + u_z^2}$) 推定 precision

図 6.21: CA の場合の推定精度の SNR 及び受信開口直径への依存性

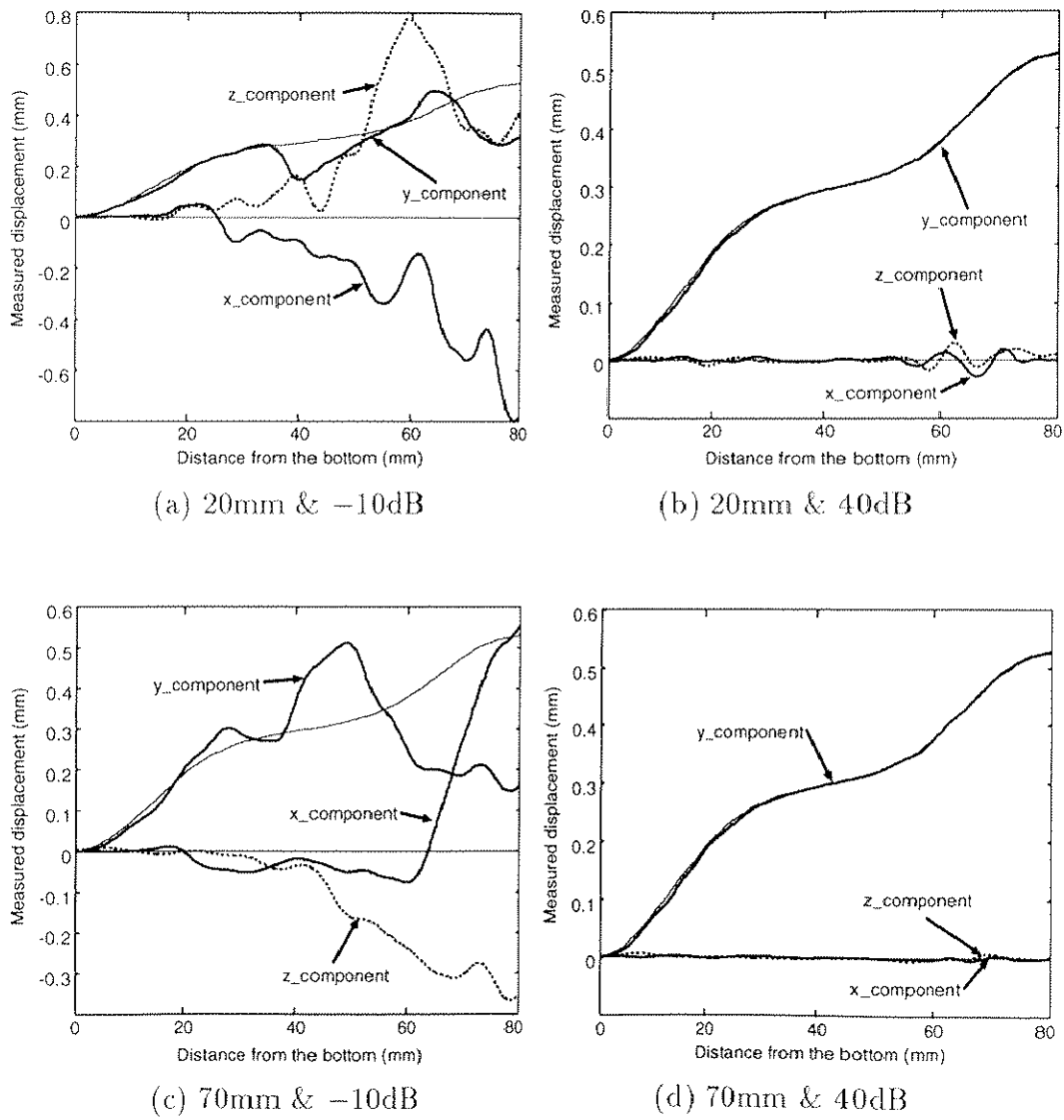


図 6.22: CA で推定された変位プロファイル

する必要がなく、図 6.7(a) を参照して最良の値として採用した。受信開口直径 70mm も図 6.7(b) (c) を参照して決定した。SNR 20dB は、前節で述べた局所開口合成を行った場合の値として採用した。エコーデータは 1 断面につき 41 ライン、15 断面分を計算した。作成されたエコーの 3 次元データに対して、CA による処理を行い、変位ベクトル空間分布を推定した。画像化の際は、前節と図 6.1 の中央断面 (imaging plane) 上における変位ベクトル 3 成分である x 軸方向成分、 y 軸方向成分、 z 軸方向成分を表示した。ここでまた、座標系は図 6.1 に準じている。

変位 x 成分分布の推定結果を図 6.23、 y 成分の結果を図 6.24、 z 成分の結果を図 6.25 に示す。各図における (a) は真の分布、(b) は CA で求めた分布を示している。また表示のダイナミックレンジは各成分ごとに統一されている。ただし、 z 方向成分の画像はノイズが強調されているように見えるが、これはダイナミックレンジが他成分と比較して 1 桁小さいためである。

表 6.4 は、CA で変位推定した際の真の分布との誤差を計算したものである。上段が *accuracy*、下段が *precision* を示し、この計算は式 (6.4) 及び式 (6.5) に準じている。

方位方向の x 成分と z 成分は雑音無しの場合 (表 6.2) と比較して精度が低下しているが、軸方向の精度は雑音にほとんど無関係である。図 6.21(a) を参照してもこのことが分かる。

表 6.4: 推定変位分布の精度 (70mm & 29% & 20dB)

	x 成分	y 成分	z 成分
CA : <i>accuracy</i>	3.345%	0.648%	1.430%
<i>precision</i>	2.889%	0.374%	1.354%

歪み分布画像化

式 (5.30a)~式 (5.30f) を用いて得られた歪みテンソル成分の分布を画像化した。

図 6.26~図 6.28 に推定された歪みテンソル垂直成分の分布を、図 6.29~図 6.31 に推定された歪みテンソルせん断成分の分布を示す。また、図 6.32(a)~(c) には垂直成分の中心軸上でのプロファイルを、図 6.33(a)~(c) にはせん断成分の中心軸上でのプロファイルを示す。

表 6.3 は、推定した歪み分布と真の分布との間の誤差を計算したものである。ここでも、変位分布の誤差が差分によって増幅されていることが分かる。

表 6.5: 推定歪み分布の精度 (70mm & 29% & 20dB)

	xx 成分	yy 成分	zz 成分	xy 成分	yz 成分	zx 成分
CA : <i>accuracy</i>	8.036%	1.671%	4.346%	4.429%	5.658%	8.328%
<i>precision</i>	9.063%	1.606%	3.162%	6.846%	4.862%	7.179%

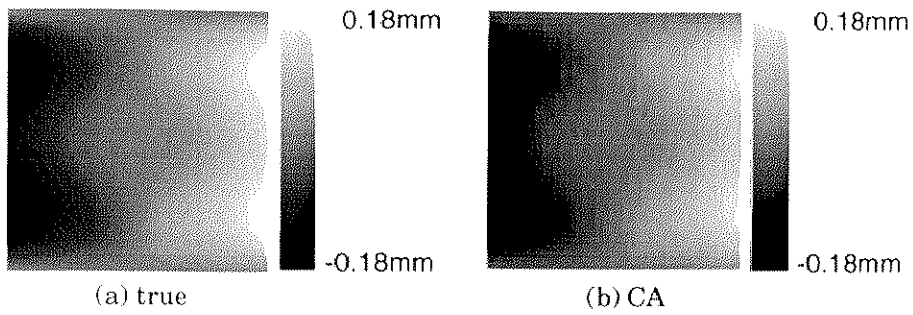


図 6.23: CA で推定された変位 x 成分分布 (70mm & 29% & 20dB)

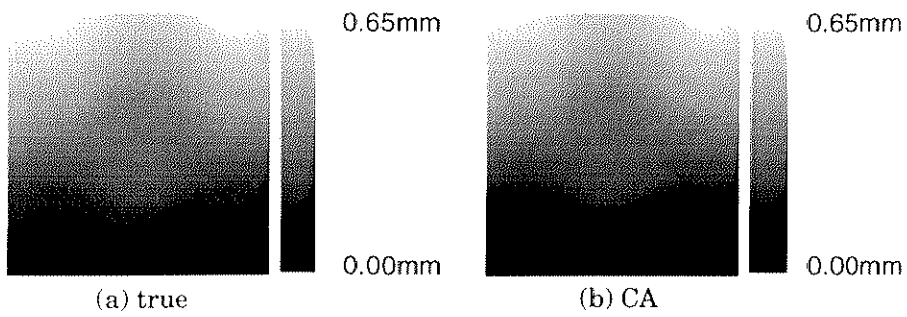


図 6.24: CA で推定された変位 y 成分分布 (70mm & 29% & 20dB)

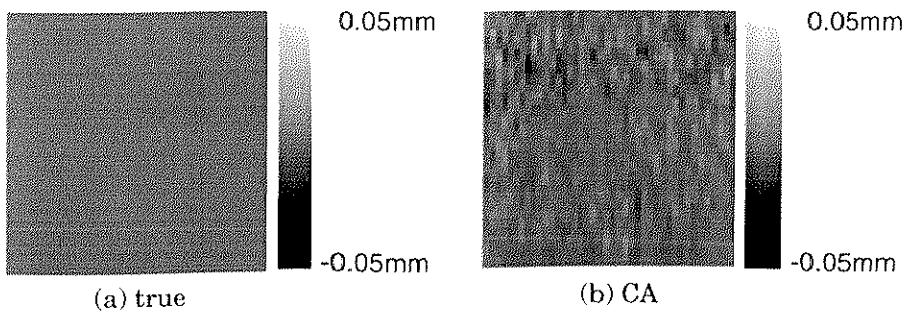


図 6.25: CA で推定された変位 z 成分分布 (70mm & 29% & 20dB)

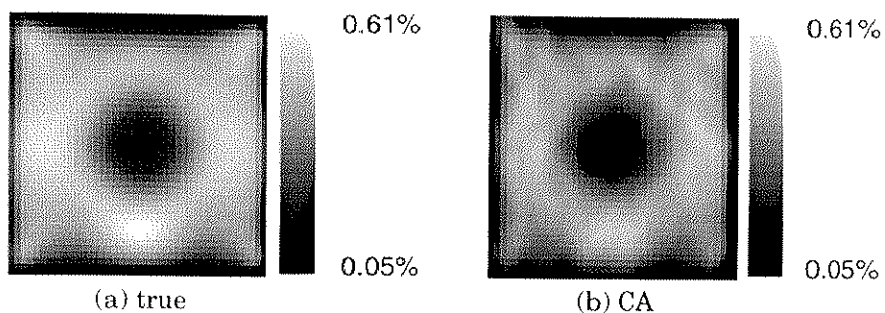


図 6.26: CA で推定された歪みテンソル xx 成分 (70mm & 29% & 20dB)

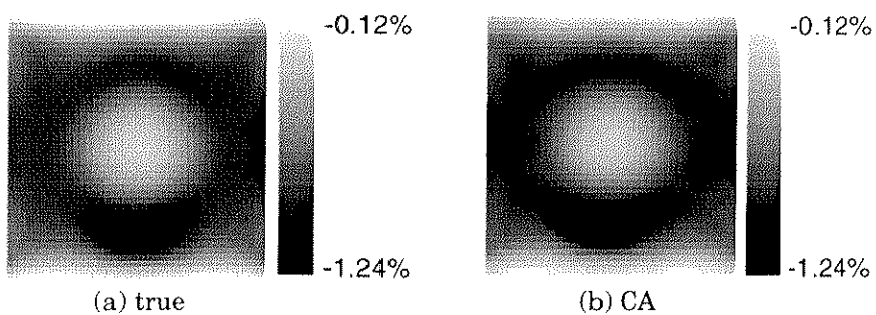


図 6.27: CA で推定された歪みテンソル yy 成分 (70mm & 29% & 20dB)

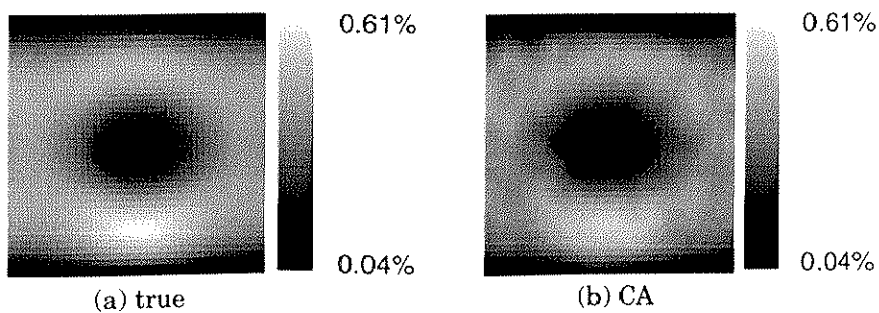


図 6.28: CA で推定された歪みテンソル zz 成分 (70mm & 29% & 20dB)

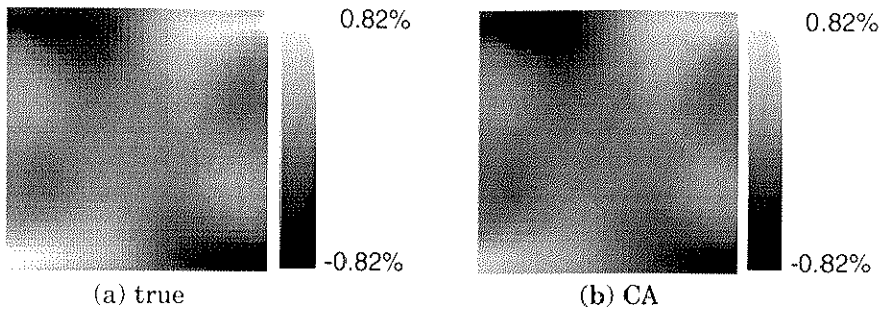


図 6.29: CA で推定された歪みテンソル xy 成分 (70mm & 29% & 20dB)

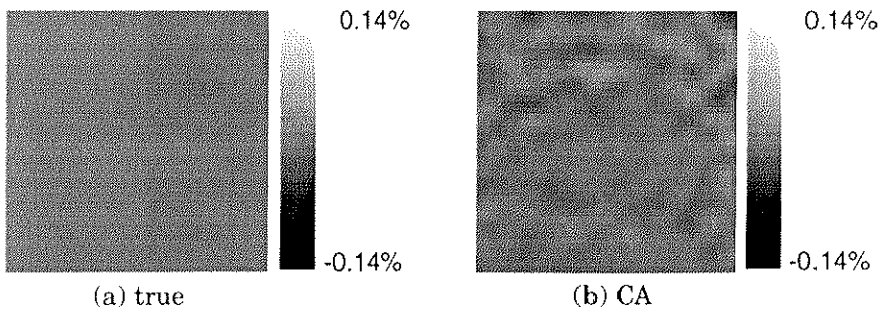


図 6.30: CA で推定された歪みテンソル yz 成分 (70mm & 29% & 20dB)

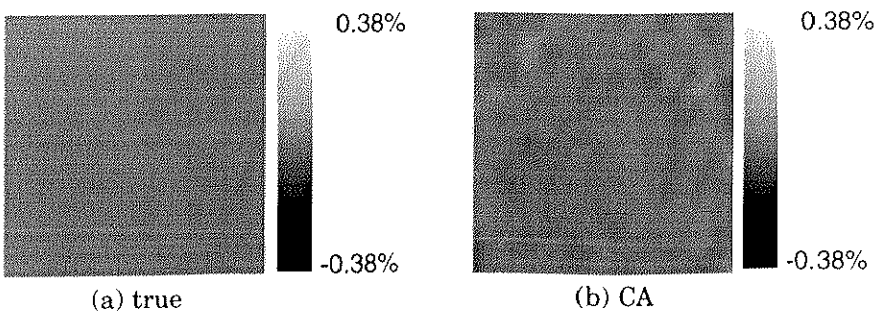
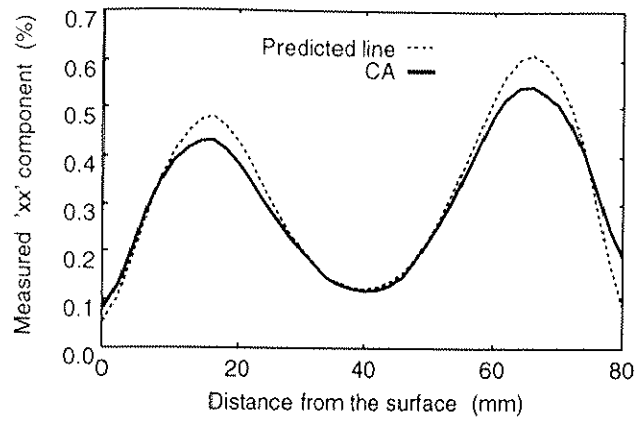
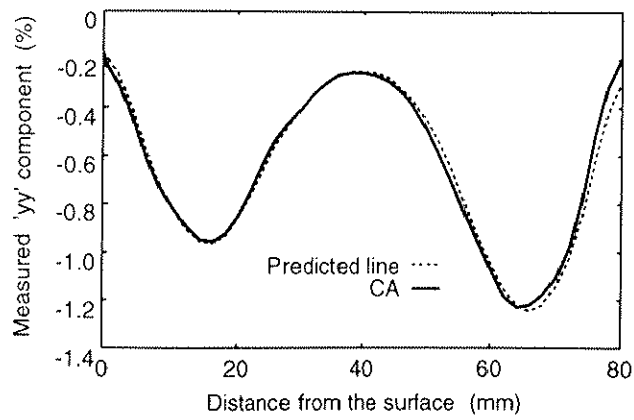


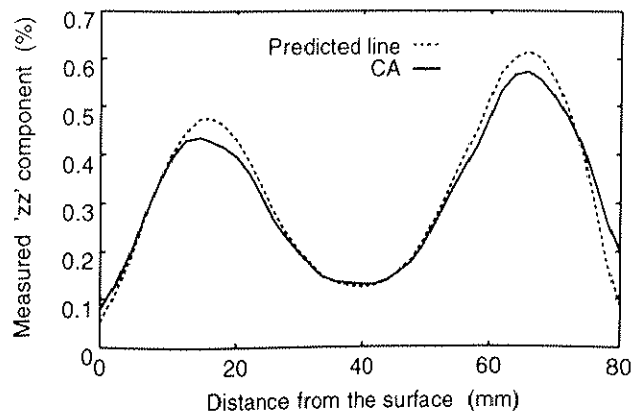
図 6.31: CA で推定された歪みテンソル zx 成分 (70mm & 29% & 20dB)



(a) xx 成分

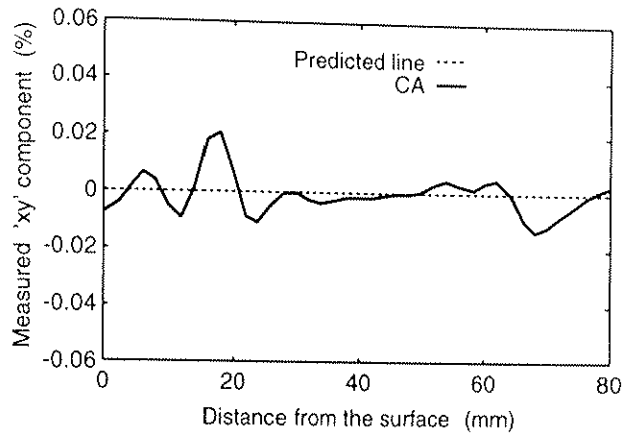


(b) yy 成分

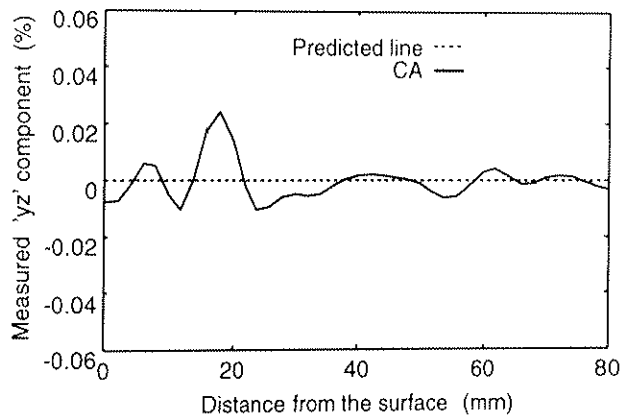


(c) zz 成分

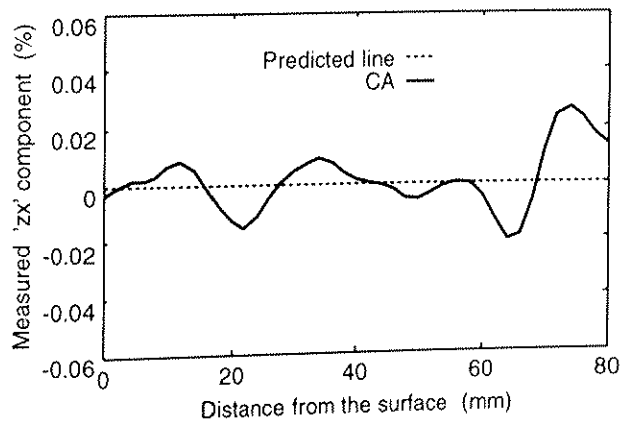
図 6.32: CA で推定された垂直歪みテンソルの中心軸上のプロファイル



(d) xy 成分



(e) yz 成分



(f) zx 成分

図 6.33: CA で推定されたせん断歪みテンソルの中心軸上のプロファイル

6.3 弾性率分布再構成法の評価

6.3.1 理想変位を用いた再構成

5章で提案したヤング率分布再構成法の特性を評価するため、まず3-D有限要素法から直接得られた変位を用いて再構成を試みた。ここで理想変位とは、前節までに真の分布として示された変位分布を指す。

まず理想変位ベクトル3成分の分布から歪みテンソル全6成分の分布を求め、さらに各々の歪み成分を x 方向、 y 方向、 z 方向に微分した分布を求める。これにより、式(5.32)の連立方程式を解くための係数部分が全て求まることになる。歪みテンソル微分の分布は図6.34のように得られる。ただし表示しているのは、図6.1における中央断面の分布である。

3次元空間内の全ての点について式(5.32)の連立方程式を解き、解ベクトル $(E_x/E, E_y/E, E_z/E)$ の空間分布を求める。このとき、式(5.32)左辺の係数行列が正則でない場合、ここでは係数行列の行列式の値が10の -20 乗以下となるときの解ベクトルを零ベクトルとした。それでもなお、解ベクトル各成分の空間分布は滑らかにならず、突発的なエラーが出現するものとなる。これは局所的に係数行列の条件数が大きくなっていることから分かるが、ここではそのようなエラーをメディアンフィルタにより除去することとした。このように得られた解ベクトル各成分の分布は図6.35に示すようなものになる。(a)が E_x/E 、(b)が E_y/E 、(c)が E_z/E の分布を示している。

次に、得られた解ベクトル分布を式(5.34a)、式(5.34b)、式(5.34c)に基づいて積分し、ヤング率分布の再構成を行う。このときの積分は台形公式を用いて実行された。この結果を図6.36に示す。図6.36(b)は式(5.34a)の実行結果、図6.36(c)は式(5.34b)の実行結果、図6.36(d)は式(5.34c)の実行結果を示す。ただし結果では積分開始点のヤング率が既知であるとして、積分開始点としては各軸方向ともモデルの側面付近の点を用いている。周囲のヤング率は3つの積分開始点とも同一の10kPaであるため、理論的には全て同一の分布として再構成されるはずであるが、圧縮方向である y 軸方向に積分した結果のみ妥当に得られており、残りの x 軸及び z 軸方向の積分に関しては正しい結果が得られていない。同様の現象は文献[116]でも指摘されている。従って、以降のヤング率再構成においては、 y 軸方向、すなわち圧縮方向に積分を行って再構成することにする。圧縮方向に積分するという事は、例えば体表にヤング率が既知の物体をはさんで圧縮を与え、この物体を積分開始位置として再構成すれば、絶対値としての組織内ヤング率分布が得られ易い利点があることを示唆している。

再構成が成功した図6.36(c)を3-Dプロットした結果は図6.37(b)のように示される。また図6.37(a)が真の分布、図6.37(c)はモデルの中央断面上の中心軸上でのプロファイルをプロットした結果である。これらの結果から圧縮方向の積分によって妥当な再構成結果が得られていることが確認できる。なお、真の分布と再構成された分布との *accuracy* は2.91%、*precision* は2.47%であった。

1次元及び2次元再構成との比較

ここでは、1次元及び2次元の歪み分布に基づく再構成法と3次元の歪み分布に基づく再構成法を比較し、3次元再構成法の有効性について検討する。

3次元再構成法は、式(5.32)の連立方程式に基づく方法であるが、1次元及び2次元の場合は次のようになる。

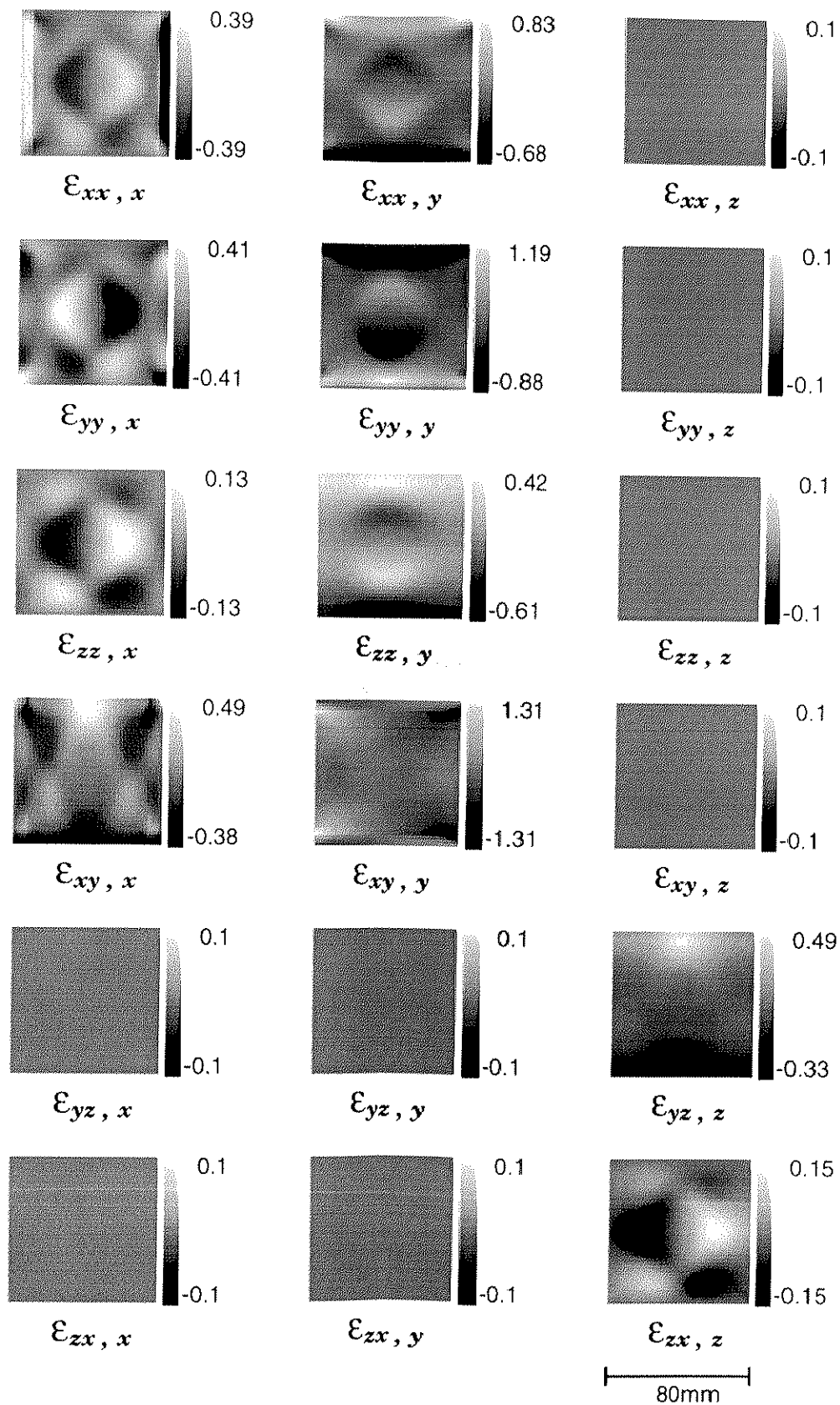


図 6.34: 歪みテンソル成分を x 、 y 、 z 方向各々に微分した分布

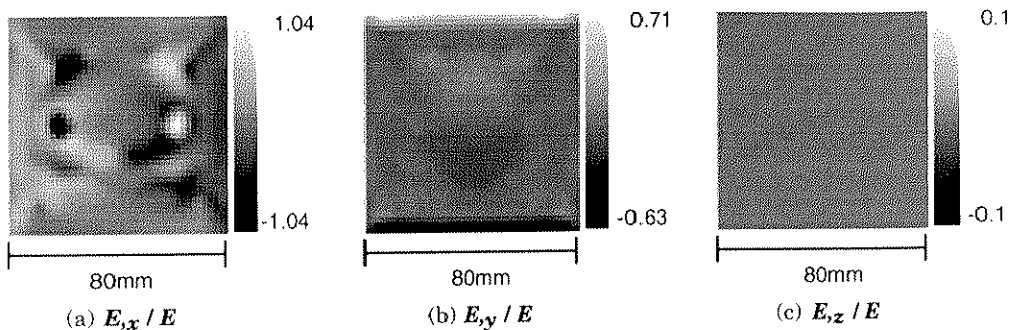


図 6.35: 解ベクトルの分布

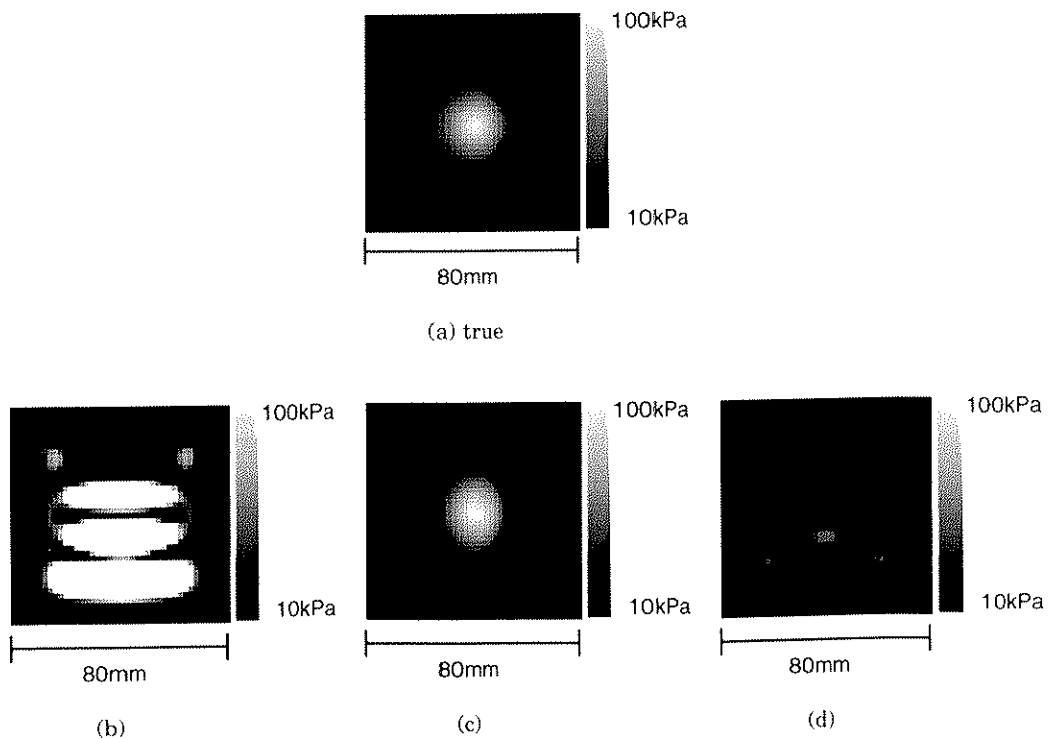
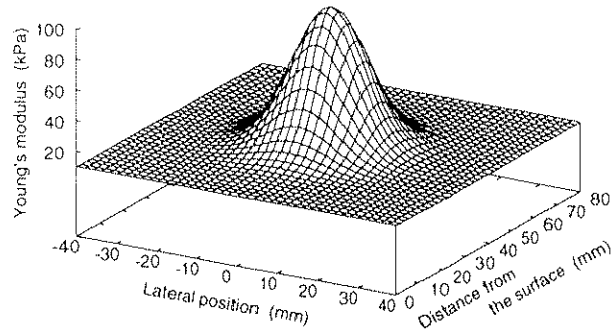
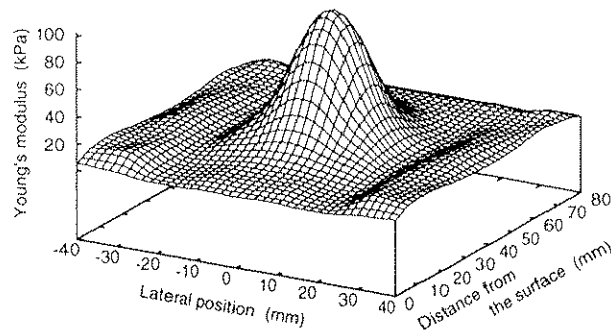


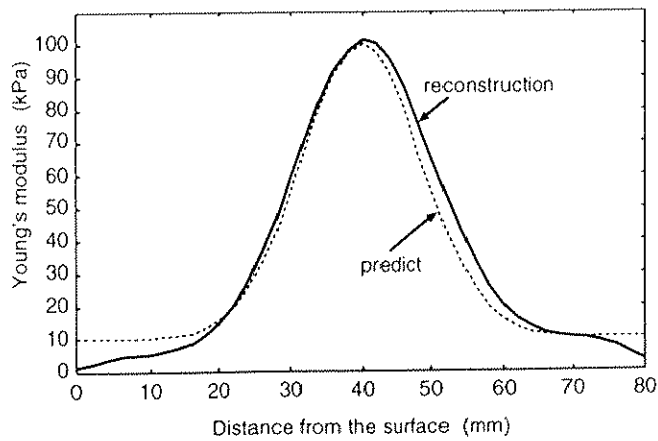
図 6.36: 理想変位を用いたヤング率分布再構成結果



(a) 真の弾性率（ヤング率）分布（図 6.36(a) の 3-D プロット）



(b) 弾性率（ヤング率）分布再構成結果（図 6.36(c) の 3-D プロット）



(c) 中心軸上プロファイル

図 6.37: 理想変位を用いた弾性率（ヤング率）率再構成結果の 3-D プロットと中心軸上プロファイル

1次元の場合は、圧縮方向、すなわち y 軸方向に関する応力成分は全て 0 として扱われる [116]。よって、定式化すると以下ようになる。

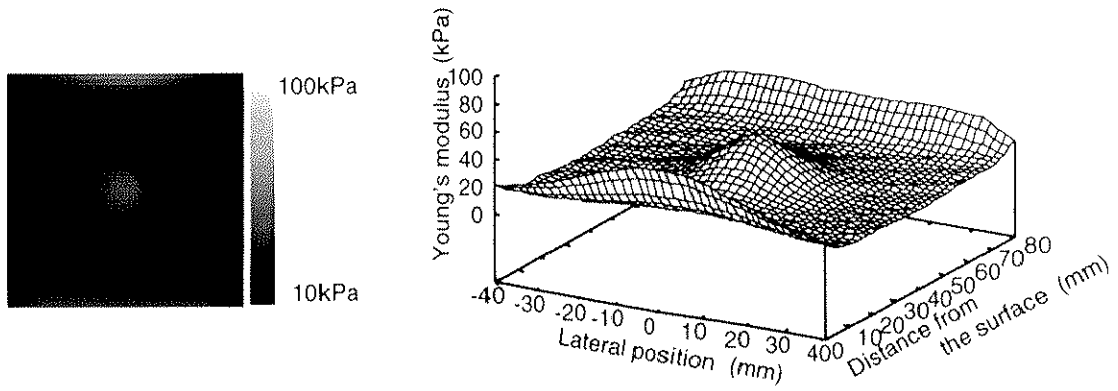
$$\frac{E_{,y}}{E} = \frac{\varepsilon_{yy,y}}{\varepsilon_{yy}} \quad (6.6)$$

2次元の場合は、平面外方向の応力及び歪みが発生しない平面歪み状態を仮定する。平面として x - y 平面をとると、 z 軸方向に関する歪み成分は全て 0 となることから、以下のように定式化される。

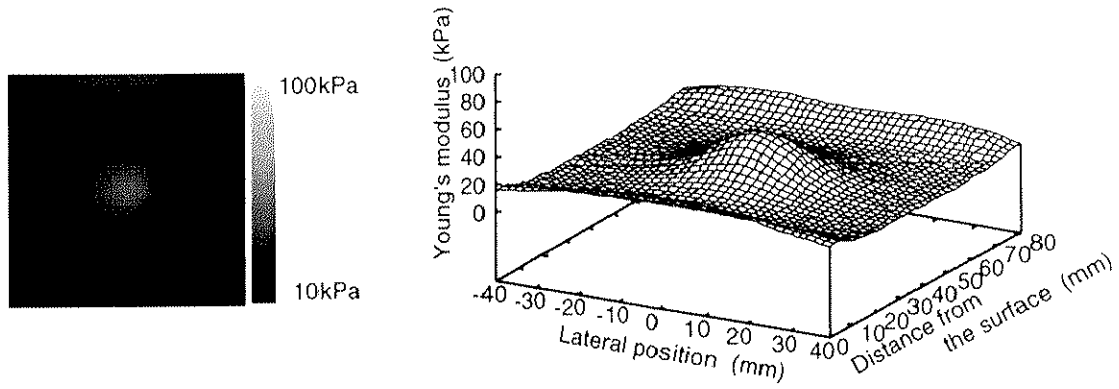
$$\begin{pmatrix} l\varepsilon_{kk'} + \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & l\varepsilon_{kk'} + \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{,x}/E \\ E_{,y}/E \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} l\varepsilon_{kk,x'} + \varepsilon_{xx,x} + \varepsilon_{xy,y} \\ l\varepsilon_{kk,y'} + \varepsilon_{yx,x} + \varepsilon_{yy,y} \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

ここで、 l としては3次元の再構成と同一の一定値を用いることとした。また、 $\varepsilon_{kk'} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$ である。

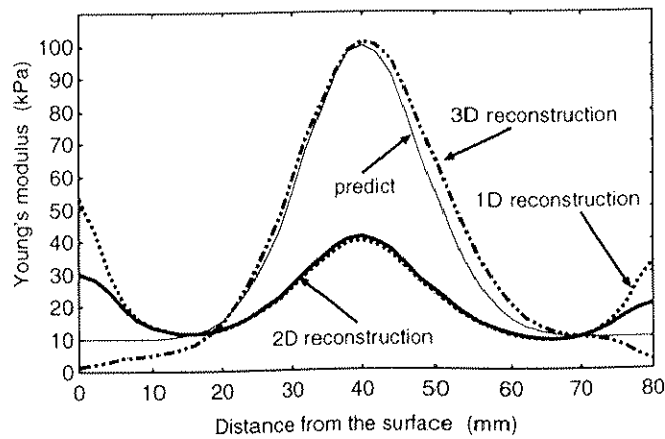
1次元の推定結果を図 6.38(a) に、2次元の推定結果を図 6.38(b) に示す。画像のダイナミックレンジは、白 = 100kPa ~ 黒 = 10kPa に設定されている。また、中央断面における中心軸上のプロファイルの比較を図 6.38(c) に示す。これらから分かるように、1次元及び2次元の再構成結果は、真の分布よりもかなり過小評価されていることが分かる。一方、3次元の再構成結果は真の分布と近い分布として得られていることから、真のヤング率分布の再構成のためには、3次元的な歪み情報を用いる必要があることが示された。



(a) 1次元の推定結果



(b) 2次元の推定結果



(c) 中心軸上のヤング率プロファイルの比較

図 6.38: 1次元及び2次元の歪み情報に基づいた弾性率再構成結果

6.3.2 推定変位を用いた再構成

理想変位を用いたヤング率分布再構成法の検討により、本手法の妥当性が確認できたことから、次にエコーデータから推定した変位ベクトル分布を用いて同様に再構成を試みた。

6.2.1節と 6.2.2節で検討した、ordinary と CA で得られた歪み分布を用いたヤング率分布の再構成を行った。ただし、6.2.1節で示したノイズを付加しない場合の CA と、6.2.2節で示した 20dB ノイズを付加した場合の CA は、ほぼ同一の結果となっているため、より厳しい条件を与えた、20dB ノイズを付加した場合の CA の結果を用いて再構成を行うこととした。

ordinary の結果を用いた再構成を図 6.39 に、20dB ノイズを加えた場合の CA の結果を用いた再構成を図 6.40 に示す。各図とも、(a) と (c) が真のヤング率分布、(b) と (d) が推定変位を用いて再構成されたヤング率分布を示している。また (e) は中心軸上のヤング率プロファイルである。

図から明らかなように、ordinary の再構成結果は真の分布と比べて忠実度が低い。一方、CA の再構成結果はノイズの影響から若干のばらつきを含むものであるが、ordinary の場合と比べて忠実度は高い。実際、*accuracy* は 6.4%、*precision* は 7.3% であり、ordinary の結果よりも良好である。

ordinary による歪み推定精度は、CA の場合と比較して劣っており、この違いが再構成結果に表れている。本研究で提案するヤング率分布再構成法は、理想変位、すなわち $\text{SNR}=\infty$ の場合は正しく再構成されるが、SNR が低い場合にはノイズの影響を受けやすく、ノイズに対して敏感であることが以上の結果から分かる。この理由としては、6.2.1節の精度評価で示した結果のように、方位方向の変位計測精度は、圧縮方向（ビーム照射方向）の変位計測精度と比べて劣っているということがまず考えられる。そのため、変位ベクトル成分間で誤差の較差が生じ、しかも歪み推定の段階で変位の差分を計算するために誤差が増幅してしまい、再構成に悪影響を与えていると思われる。

一般に、変位ベクトル成分間の精度には次のような関係がある。

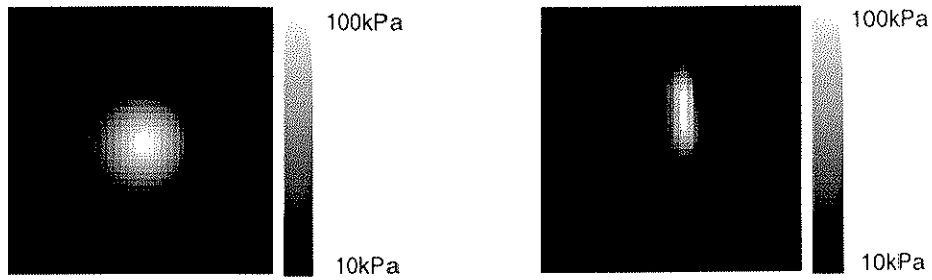
$$\hat{u}_y < \hat{u}_x = \hat{u}_z \quad (6.8)$$

ここで、 \hat{u}_x 、 \hat{u}_y 、 \hat{u}_z は、図 6.1 の座標系における変位ベクトル成分の誤差を表しており、この式は、ビーム照射軸方向変位成分 u_y の精度が最も高いことを示している。このことから、歪みテンソル成分の精度について、同様な表現により、次のように類推される。

$$\hat{\varepsilon}_{yy} < \hat{\varepsilon}_{xy} = \hat{\varepsilon}_{yz} < \hat{\varepsilon}_{xx} = \hat{\varepsilon}_{zx} = \hat{\varepsilon}_{zz} \quad (6.9)$$

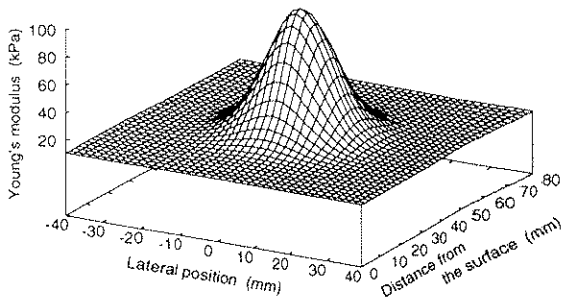
提案する本再構成法は、このような変位ベクトル計測及び歪みテンソル成分の推定結果の精度的な違いを考慮していない。この違いを考慮した再構成法を用いれば、さらに正確なヤング率分布が再構成されると思われる。

しかしながら、ヤング率分布の再構成精度に関する原因は、変位ベクトル計測精度のみならず、再構成法自体にも含まれている。すなわち、ポアソン比の分布として、一定値を与えていることである。これについては次節で検討する。

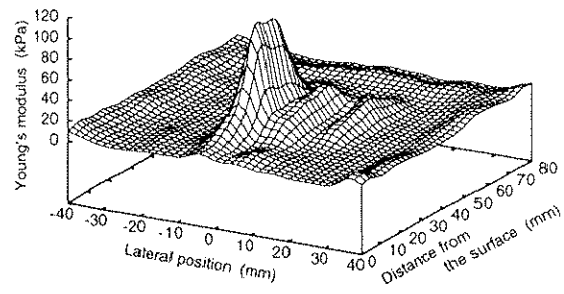


(a) 真の弾性率分布

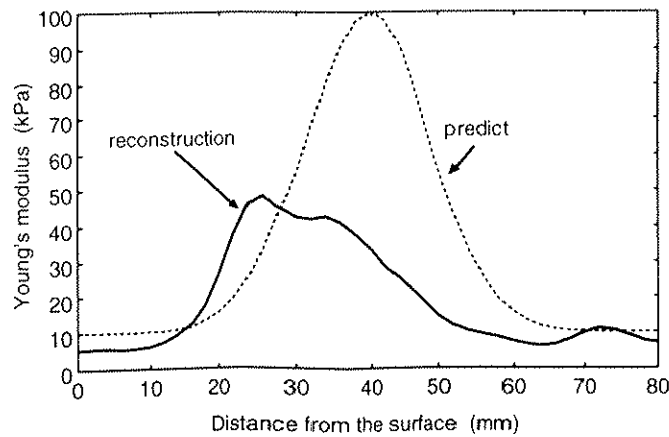
(b) 推定変位より再構成された弾性率分布



(c) (a) の 3-D プロット

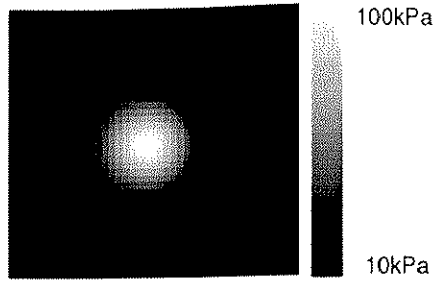


(d) (b) の 3-D プロット

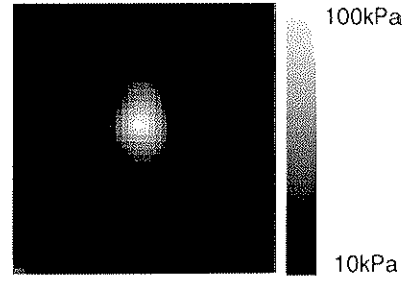


(e) 中心軸上プロファイル

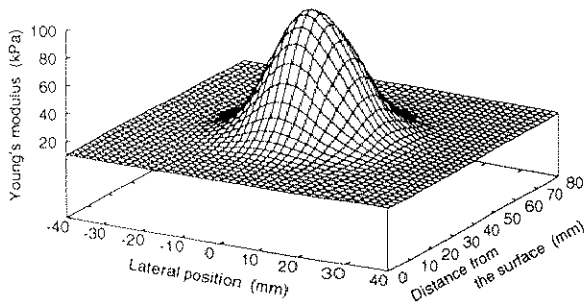
図 6.39: ordinary の推定変位を用いた弾性率再構成



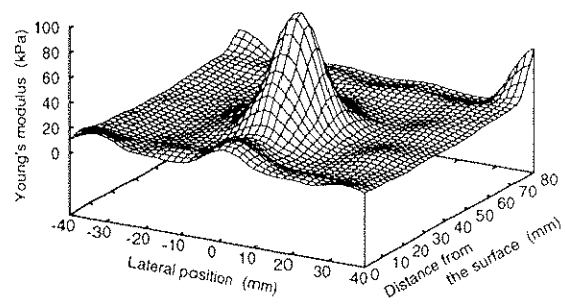
(a) 真の弾性率分布



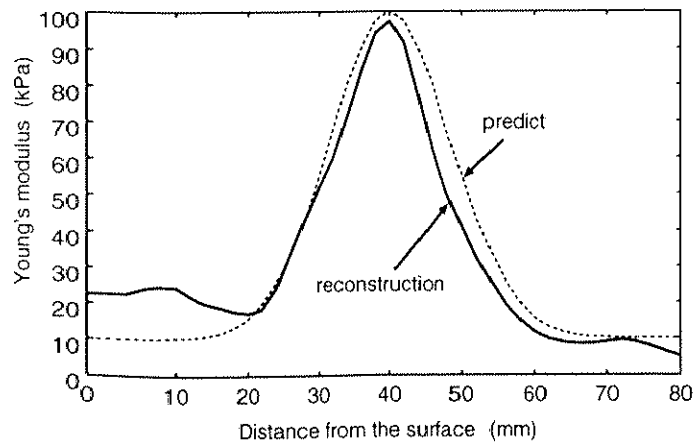
(b) 推定変位より再構成された弾性率分布



(c) (a) の3-D プロット



(d) (b) の3-D プロット



(e) 中心軸上プロファイル

図 6.40: CA (20dB) の推定変位を用いた弾性率再構成

6.4 考察

6.2節及び6.3節より、3次元変位ベクトル計測法として提案したWPG+CA法を用いて、高い精度で変位ベクトル及び歪みテンソルの各成分の推定が行われることが示された。またその3次元情報を用いたヤング率再構成法は、ノイズに対して影響を受け易いが、従来多く行われてきた1次元及び2次元歪み情報を用いた再構成と比較して、真の分布に近い再構成が可能であることが示された。

ヤング率再構成の精度は、前節終りで述べたような変位計測誤差に加え、生体組織が非圧縮性に近いと仮定していることにも影響している。既に述べたように、非圧縮性に近いとはポアソン比が0.5に近いということである。また、ポアソン比 ν が0.5に近づくと、歪みテンソルの垂直成分の和 ε_{kk} が0に近づくとすることは構成方程式から導かれる以下の式から理解される。

$$(1 - 2\nu)\sigma_{kk} = E\varepsilon_{kk} \quad (6.10)$$

ここで、 $\sigma_{kk} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$ である。このことから、式(5.32)中に現れる $l\varepsilon_{kk}$ 項について、 $l = \nu/(1 + \nu)(1 - 2\nu)$ から $\nu \rightarrow 0.5$ より $l \rightarrow \infty$ となり、かつ $\varepsilon_{kk} \rightarrow 0$ となることが分かる。 $l\varepsilon_{kk}$ 自体は安定な項であるが、本再構成法では、 l を一様分布として一定値を与えているため、その安定性は ε_{kk} の精度に大きく依存している。 l をポアソン比 ν についてプロットすると、図6.41のようになる。生体組織のポアソン比と考えられている領域は図の影部分であるが、これはわずかなポアソン比の変化に対しても l は非常に大きく変化してしまうことを意味している。従って、 ε_{kk} の誤差が l によって増幅され、再構成の精度に大きな影響を与えていることが考えられる。

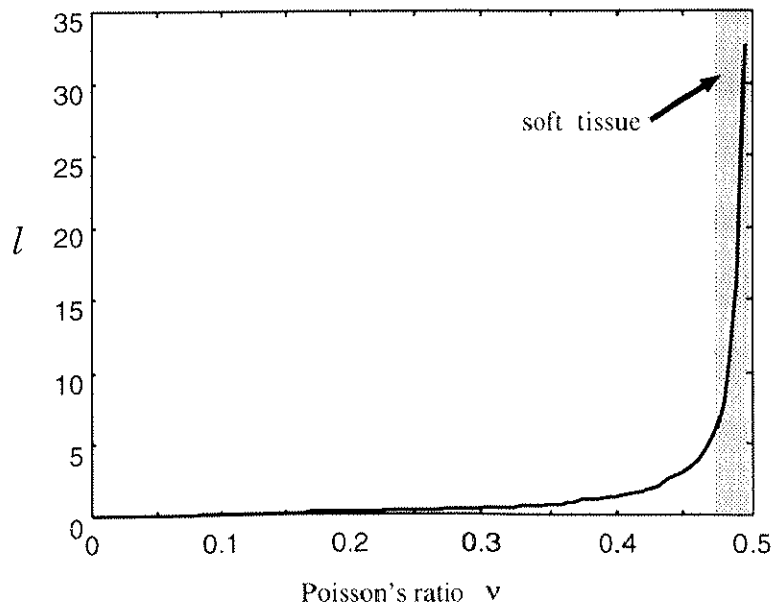


図 6.41: l とポアソン比 ν との関係

6.4.1 ポアソン比が再構成に与える影響

今までの再構成に関する検討は、有限要素モデルに与えたポアソン比と同一値を用いて再構成を行っていたため、妥当な結果を得ることができた。本論で提案する弾性率分布再構成法では、ポアソン比を空間的な一定値として事前に与えなければならない。ここでは、真のポアソン比と再構成時に設定したポアソン比が異なる場合、ヤング率推定結果への影響について考える。

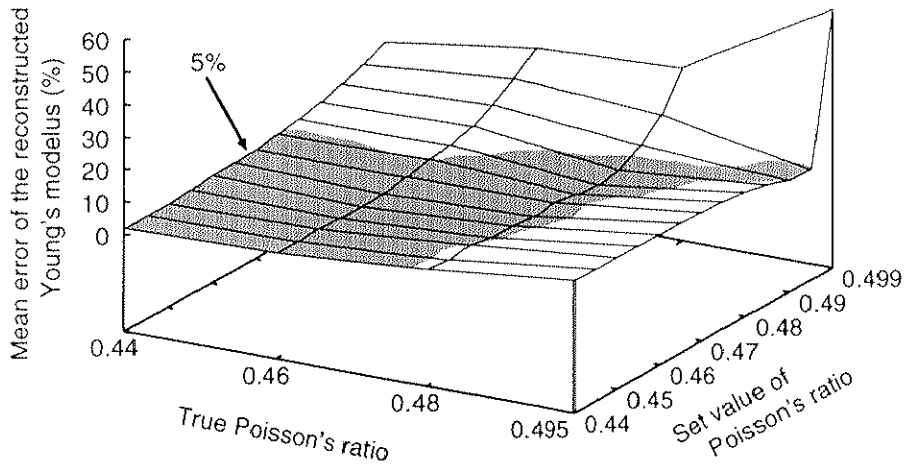
ポアソン比として、0.44、0.46、0.48、0.495の4パターンを与えた場合の変位データを作成した。ポアソン比以外のヤング率などのパラメータについては、図6.1と全て同一とし、ポアソン比のみを変えて変位データが作成された。ただし設定したポアソン比は、内包及び周囲で同一値をとるものとした。ここで設定されたポアソン比が以下真の値として参照される。

4パターン各々で作成された変位データを用いて再構成する際、各パターンにつき0.44~0.499まで0.005刻みでポアソン比を設定し、ヤング率分布の再構成を行い、その誤差を評価した。

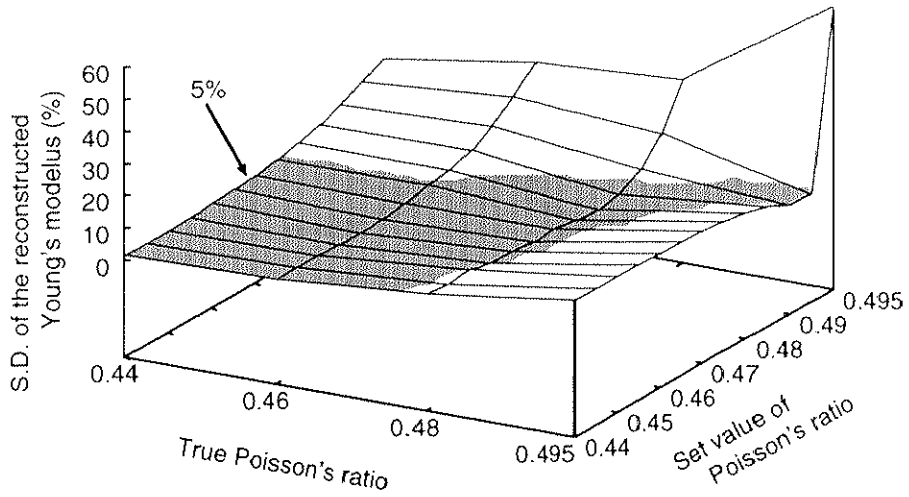
その結果を図6.42に示す。図6.42(a)は推定ヤング率の平均誤差、図6.42(b)は推定ヤング率の標準偏差を表している。また斜線部は誤差5%以下の領域を示している。真のポアソン比と再構成の際設定されたポアソン比が一致していれば誤差は最小となるため、図6.42の特性は対角線で谷折りしたような分布となる。ただし真のポアソン比よりも小さいポアソン比を用いた場合の再構成は過小評価する結果を与え、逆の場合は過大評価する結果を与えている。この様子を示した結果を図6.43に示す。この図はモデル中央断面での中心軸上で再構成されたヤング率のプロファイルを表している。例えば図6.43(c)について見れば、真のポアソン比0.48よりも小さい0.44などは過小評価した結果を与え、0.48より大きい0.495などは過大評価傾向を示していることが分かる。また図6.42から分かるように、ポアソン比が0.5に近づくに従い、対角線に沿って斜線部の幅が細くなっていくことがわかる。ある真のポアソン比に対するこの斜線部の幅の広さは、ヤング率推定におけるポアソン比の影響の程度を表しており、幅が広ければ再構成の際に不適切なポアソン比が設定されてもヤング率推定には大きく影響しないことを意味している。図6.42では、真のポアソン比が0.44や0.46付近では斜線領域が広く、また過大及び過小評価の程度も急激にヤング率に変化する傾向にはない。一方、0.495付近での斜線部は設定値が0.495付近に限定され、この領域を外れると、特に0.499では急激に推定ヤング率値が上昇し、かなり過大評価した結果を与えている。このことは図6.43(d)を図6.43(a)(b)などと比較しても分かる。また図6.43(d)の中央断面の3次元プロットの結果は図6.44に示される。図6.44(a)がポアソン比 $\nu=0.490$ 、図6.44(b)が $\nu=0.495$ 、図6.44(c)が $\nu=0.499$ のときの再構成分布を示している。分布形状としては(a)(b)(c)とも類似しているが、値としては0.499に設定された場合はかなり大きく過大評価されていることが分かる。 $\nu=0.495$ の場合は、作成したデータと同一であるので正しく再構成されるが、 $\nu=0.490$ の場合は、 $\nu=0.499$ の場合と比較して、真の分布より極端に過小評価するということにはならず、これは、図6.41の1の特性に応じた結果を示している。

このような評価は、生体組織のポアソン比がどの程度であるかが分かった場合に役立つ。すなわち、再構成の誤差を見積もることが可能となる。しかし、生体組織のポアソン比に関して明確な数値を示した文献はほとんどない。

しかし、上記の検討によりポアソン比がヤング率再構成に少なからず影響を与えることが明らかとなった。生体のポアソン比を計測できれば、既に述べたようにヤング率再構成の誤差を見積もることができ、またこの値を用いた再構成が可能になると思われる。更にヤング率再構成におけるポアソン比の影響を取り除くには、ポアソン比を推定するか、また ϵ_{kk} 項自体を消去するような再構成法について検討する必要がある。これに関しては今後の課題である。

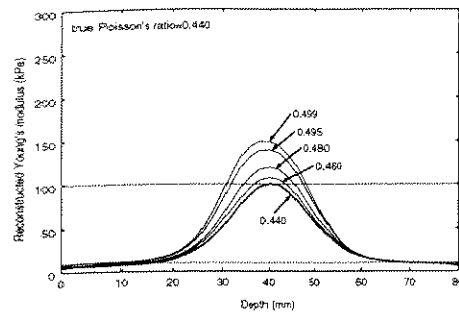


(a) 平均誤差

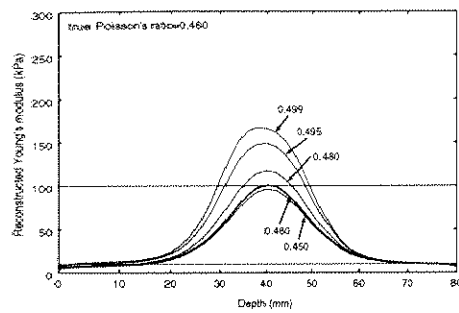


(b) 標準偏差

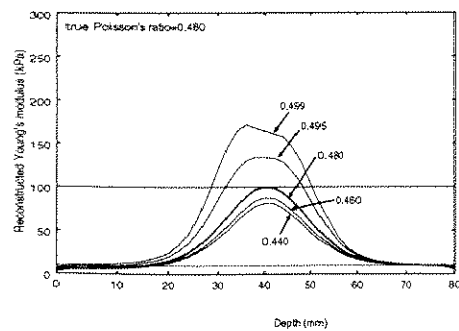
図 6.42: ポアソン比の真値と設定値との差に応じた推定ヤング率の誤差



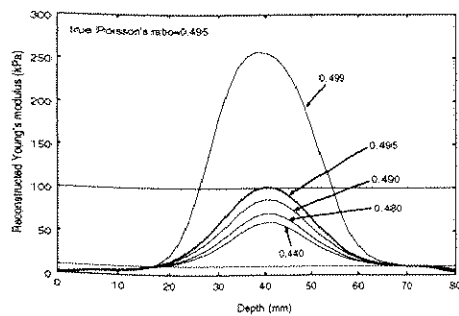
(a) 真のポアソン比が0.44の場合。



(b) 真のポアソン比が0.46の場合。

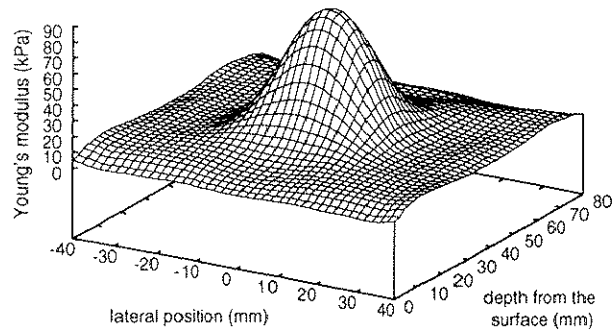


(c) 真のポアソン比が0.48の場合。

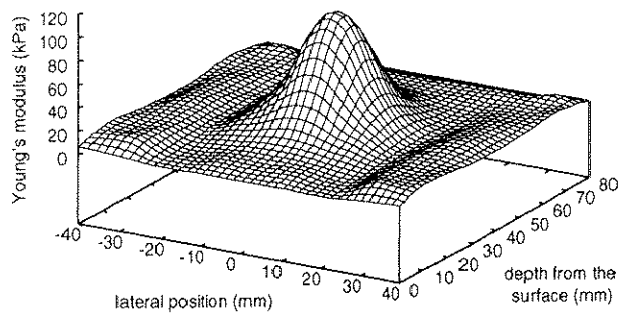


(d) 真のポアソン比が0.495の場合。

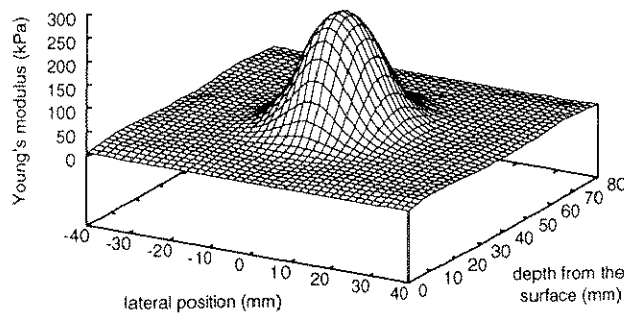
図 6.43: ポアソン比各設定値において中心軸上で再構成されたヤング率プロファイル



(a) $\nu=0.490$ のとき



(b) $\nu=0.495$ のとき



(c) $\nu=0.499$ のとき

図 6.44: ポアソン比 ν による再構成結果の違い