

第 8 章

結論

8.1 まとめ

組織弾性イメージングは、組織の硬さ分布を画像化するものであり、新しい組織性状診断として期待されている。特に癌などに対しては触診のように主観的な評価ではなく、客観的な評価ができるようになり診断力向上が見込まれることから、盛んに研究が行われており、本研究もその一部をなすものである。組織弾性特性の評価には、主に2通りあり、1つは機械的に低周波振動を加えて弾性に間接的に関係するその振動速度、すなわち横波の伝播速度を計測して評価するものであり、他方は体表に圧縮板やプローブなどにより静的な圧縮を与えて組織内部の変位量を計測し、弾性率を再構成するものである。本研究では力の制御のし易さから、後者の静的圧縮の下で弾性評価を行うものとした。

従来、組織弾性率分布を再構成するために提案されてきた手法としては、組織に与える圧縮量が微小であるとし、組織を線形かつ等方性を有する弾性体と仮定した上で、3次元的な構造をなす実際の組織を1次元あるいは2次元に近似して変位計測、またそれに基づき弾性率再構成を行うものがほとんどであった。そのため組織の真の弾性率分布を過小評価する危険性があったため、本研究ではそのような危険性を排除するために、組織の3次元構造を考慮した新しい弾性率分布再構成法についての検討を行った。

本研究においては、再構成の対象である弾性率はヤング率とし、そのヤング率分布再構成過程は2段階に分かれている。まず第1段階として圧縮により生じた組織内の3次元変位ベクトルを計測し、第2段階として、計測した変位ベクトルから変位-歪み関係式を用いて歪みテンソルを求め、これを基に、ヤング率分布を再構成する。

そこで、第4章において、第1段階の新しい組織内3次元変位ベクトル計測法として、WPGとCAの複合法について提案をした。この手法は、円形の2次元アレイプローブを使用し、開口面上の各素子で受信されたRF信号からCAにより求めた位相差を用いる。ビームが垂直入射の場合、ビーム軸方向の変位ベクトル成分は原点での位相差から直接求まり、またビーム軸に直交する方向の2成分は、得られた位相差に対して受信素子位置と計測点位置との距離の重みを掛けて平面を構成し、この勾配から求まる。位相差を求める際には、エイリアシングが生じない範囲で数回の圧縮を与え、従来のドプラ法を適用してそれらを累積するよりも、エイリアシングが生じるような波長以上の圧縮にも対応可能なCAを用いる方が、変位計測のSNRを向上させることができ、かつ圧縮も1回で済むため処理時間が短縮されるので、実用的である。また、WPGとCAはともに実時間性を考慮した計測法であるため、両者を複合させても実時間性を損なわないという利点もある。

それを受けて第 5 章においては、WPG と CA の複合法により計測された変位ベクトル 3 成分に基づき、第 2 段階としての新しいヤング率分布再構成法の提案を行った。この手法は、体積力を無視した 3 次元のつりあい式を用い、これに応力 - 歪み関係式を代入して、3 式からなる方程式が得られた後、未知数と代数方程式数を一致させるために、ポアソン比が組織内で一定であるとして、ヤング率のみを未知数とした 3 元連立 1 次方程式を解くものであった。この手法の利点は、再構成に必要な境界条件が積分開始点、すなわち体表におけるヤング率分布のみであることと、再構成時間が短いことにある。

第 4 章で提案された 3 次元変位ベクトル計測法と、第 5 章で提案されたヤング率分布再構成は、第 6 章におけるシミュレーションにより検討された。まず、本 3 次元変位ベクトル計測法において、円形 2 次元アレイプローブの開口直径、送信パルス比帯域、SNR をパラメータとして、これらに対する精度評価を行った。開口直径は 20mm から 70mm まで 10mm おきに、送信パルス比帯域は 7% から 29% まで 2% おきに、SNR は -10dB から 40dB まで 5dB おきに変化させた。また同時に数回の圧縮を与えて、従来のドブラ法を位相差検出に適用した場合についても精度評価が行われた。送信パルス比帯域及び開口直径に対する精度の依存性は、位相差検出に CA を用いた場合、開口直径が大きくなるほど、また比帯域が大きくなるほど、精度の向上が見られた。CA の場合は全体として誤差は 3.5% 以下であり、従来のドブラ法を用いた場合は全体として誤差が 11% 以下であることから、CA の有効性が確認された。SNR 及び開口直径に対する精度の依存性についての検討が CA についてだけ行われ、SNR が 10dB 以上であれば 5% 以下の精度で変位ベクトルが計測されることが示された。これらの検討に基づいて、開口直径を 70mm、比帯域を 29%、SNR を 20dB として変位ベクトル成分の分布及び歪みテンソル成分の分布に関する画像化を行った結果、真の画像と比較して、最大でも 5% 以下の誤差で推定されることが示され、このことから CA による位相差検出の有効性が確認された。提案するヤング率分布再構成法の妥当性及び有効性は、まず 3 次元有限要素法より得られた理想変位ベクトル、すなわち真の変位ベクトルを用いて正しく再構成されたこと及び 1 次元や 2 次元の再構成では真の分布よりも過小評価されていることから確認された。その後、WPG+CA により推定された歪みテンソル成分を用いた再構成を行った結果、真のヤング率に近いほぼ妥当な結果として得られたが、ノイズの影響によりその分布はやや歪んだ形となった。この原因としては、WPG+CA による変位ベクトル計測の精度がまだ不十分であることや、また再構成過程における 3 元連立 1 次方程式に含まれる le_{kk} 項 ($l = \nu / (1 - 2\nu)$, $\nu =$ ポアソン比) の存在などが挙げられる。これは、 le_{kk} 項全体としては安定であるが、再構成過程においては、軟組織を仮定しているために l が大きく、垂直歪み和 ε_{kk} の誤差が増幅されてしまうからである。更に別の問題点としては、ポアソン比が空間的に一定値であると仮定していることも挙げられる。このことに関してもシミュレーションにより検討し、真のポアソン比分布と再構成の際のポアソン比分布との差が大きい場合にはヤング率推定誤差は大きくなるが、真のポアソン比がより小さければ、その誤差は小さく抑えられることが明らかとなった。従って、生体ポアソン比がこの範囲であれば、本論文で提案する再構成法におけるポアソン比一定の仮定の妥当性も強まると思われる。

第 7 章においては、第 6 章におけるシミュレーションと同様、寒天とゼラチンを混合させたファントムを用いた実験が行われた。16 素子リングアレイを用いた送受信系を構成し、2 次元走査することにより各素子で得られた受信波を用いて、ファントム内部に発生した変位ベクトル計測を行い、これを用いてヤング率の再構成を実行した。その結果 3 次元変位ベクトルを用いた再構成により、内包部分のヤング率は別の機械的手法により計測されたヤング率に近い値となり、また 2 次元的な再構成結果は過小評価されたことから、実験においても本手法の有効性が示

された。また、ヤング率分布をしきい値処理した 3 次元表示によりファントム内部全体で再構成が妥当に実行されていることが確認された。実験においてシミュレーションにおける場合のような $l_{\varepsilon_{kk}}$ 項の影響が出現しなかったのは、 ε_{kk} が全体として 0 に近くなかったためであると考えられる。実験における問題点は、データ収集に要する時間である。現在のシステムでは信号取り込みのチャンネル切替え、送受信系の 2 次元走査を全てパルスモーターによる機械的な走査によって行っているため、3 次元ボリュームデータを得るのに数時間かかってしまう。従って、乳房など切除後に弾性的性質を含むあらゆる性質が変化してしまうような組織に対しては、直ちに本システムを適用することは不可能である。また患者に適用する際にも、拍動や呼吸の影響、かつ患者自身に長時間苦痛を与えることになってしまう。

しかし、これらの機械的走査を電子的に実行できれば、データ収集時間は格段に高速化され、臨床データによる検討も可能となることが期待される。

8.2 今後の課題

以上のように、シミュレーション及びファントム実験により本論文で提案する 3 次元変位ベクトル計測法及びヤング率分布再構成法の有効性が示された。しかし一方、ヤング率分布再構成に関しては、 $l_{\varepsilon_{kk}}$ 項が不安定となったり、ポアソン比が空間的に一定値であると仮定している問題点は残っている。今後はこれを改善するために、 $l_{\varepsilon_{kk}}$ 項の影響を除去したり、かつポアソン比分布も同時に再構成されるような弾性率再構成法について検討していきたい。その後、改善された手法の下で、ファントムを用いた弾性率再構成実験を行い、実データに対して本手法が有効であるかを検討する必要がある。また、実組織を用いた実験を行う場合、現在の実験システムでは 3 次元データ収集に数時間を要するため、ファントムとは異なり、計測対象の変質も生じる。今後はデータ収集時間の短縮についても検討していきたいと考える。

本論文で提案したヤング率分布再構成法は、組織を等方的な線形弾性体であると仮定している。微小であれば線形の仮定が妥当であることは、乳房組織に関して文献 [14] でも指摘されているが、この中で、腫瘍はその悪性度に応じて非線形性が増すと報告されている。また、このような組織の非線形性に着目した研究 [28, 89, 121] も行われ始めてきている。実際、組織は本質的には非線形であると考えられ、それゆえ最終的には非線形弾性率再構成法が必要になると思われる。本研究の場合、3 次元変位ベクトルを計測することができるため、少なくとも歪みテンソルに関しては、非線形な変位 - 歪み関係式である Lagrange の歪みテンソル表記を用いて算出することは可能である。さらに、非線形の応力 - 歪み関係式あるいはつりあい式を用いて、非線形弾性率再構成法に関する検討も将来的には行っていきたいと考えている。