

I テーマ別超音波診断の最新トピックス

2. 剪断波の可視化を目的とした 新たなエラストグラフィ

山越 芳樹 群馬大学大学院理工学府
中島 崇仁 群馬大学大学院医学系研究科

組織の弾性の画像化法として、剪断波エラストグラフィ (shear wave elastography) が注目を集めている。この方法は、生体組織内に弾性振動の一種である剪断波を伝播させて、剪断波の伝播速度を超音波で測定することで組織弾性を画像化する。剪断波の発生方法、画像化法の違いで、いくつかの方法が提案されているが、現在、広く使われている方法は acoustic radiation force impulse (以下、ARFI) 法である。この方法は、組織内に比較的強力な超音波を集束させた時に音響放射圧で生じるインパルス的な剪断波を用いて、剪断波が横方向に伝播すると仮定した時の伝播速度を超音波で測定する。しかし、剪断波は弾性率が異なる境界で大きく屈折するので、剪断波が横方向に伝播するという仮定は満たされない場合も多い。もし、組織内を伝播する剪断波の様子が可視化できれば、伝播速度推定の精度向上が期待できるだけでなく、硬い組織での剪断波の屈折や反射など、特徴的な伝播が組織の硬さの違いを見る指標になる。本稿では、生体表面からの加振により、剪断波を組織内に発生させた時に、組織内を伝播する剪断波の様子を可視化する、われわれが開発した新たな画像化法 (Color Doppler Shear Wave Imaging : CD SWI)^{1), 2)} について、原理、従来法との比較、乳腺への適応例を示す。

組織中を伝播する 剪断波

剪断波の伝播速度は組織の硬さにより変わり、例えば、正常乳腺の伝播速度がほぼ2~3m/sであるのに対して、がん組織では4m/s以上にもなり、その比は2倍近くにも達する。この伝播速度の違いを測定して組織の硬さを画像化しようとする方法が、剪断波エラストグラフィである。剪断波エラストグラフィで画像化する組織の硬さは、ずり弾性率あるいは剛性率と呼ばれる量で、これは組織に圧力を加えた時に、横へのずり変形を許す条件下で測定される硬さであり、簡単に言えば、外力に対する組織の変形のしにくさ、しやすさを表す組織の剛性であることに注意する必要がある。組織の剛性を測定しているのとらえると、エラストグラフィで得られた画像の理解が容易になる場合が多い。例えば、組織が周囲からの圧迫を受けると変形しにくくなるが、この時、組織の剛性は高まり、その結果、剪断波の伝播速度は速くなる。剪断波の伝播速度が組織で大きく変わることは、剪断波エラストグラフィを利用する上での最大のメリットになるが、伝播速度が異なることは、光で言えば屈折率が異なることと等価であり、このため、剪断波が組織境界面で大きく屈折したり反射するようになる。剪断波が屈折すると伝播方向が変わり、反射波があると境界面付近で剪断波の定在波が発生す

る。図1は、内部に構造を有する媒質中を伝播する剪断波のシミュレーション結果である。伝播速度が1.5m/sの比較的軟らかい媒質内に、伝播速度3m/sで厚み4mmの比較的硬い層状の媒質がある時に、図の左上から剪断波が伝播した時の時間経過であるが、境界面で大きな反射が生じること、境界面の屈折により層状媒質中では伝播方向が大きく変化する様子が見て取れる。この図は、まさに物理の教科書でよく見かける反射・屈折の説明図そのものであり、例えば、X線や超音波のようにほぼ直進する波として剪断波をイメージすると、測定で誤差やバラツキを生じたり、画像の解釈で誤解を生む原因になる。

これ以外にも、剪断波は媒質の弾性特性の非線形性、異方性³⁾、分散性⁴⁾の影響を大きく受ける。例えば、非線形性により超音波プローブで組織を圧迫すると、剪断波の伝播速度は一般に速くなり、乳腺ではBモードを観察する程度の圧迫で、伝播速度は1m/s程度速くなるという報告がある⁵⁾。正常乳腺の伝播速度は、ほぼ2~3m/sであるので、これは無視できない値である。また、筋組織のような線維組織では、線維方向と、それと直交する方向で剪断波の伝播速度が異なる異方性がある。線維方向と、それと直交する方向で剛性に違いがあるためと推察されるが、まだその原因は十分に解明されているとは言い難い。分散性は、剪断波の周波数により伝播速度が変わる現象であり、理論的には媒質に