



座長 明石 定子先生
昭和大学乳腺外科

乳腺腫瘍を3次元 SWEで観る ～基礎と臨床～



3次元ShearWave™ Elastographyは、Supersonic Imagine社が有する技術が実現するAixplorerだけの機能である。3次元ShearWave™ Elastographyを可能としている、「マニュアルブッシュの不要なElastography」、「マッハコーンせん断波による高感度かつ安定なSWEイメージング」

「UltraFast™ Imaging」について述べる。

小笠原正文氏 コニカミノルタ株式会社
ヘルスケア事業本部超音波開発部

はじめに

当社は、2014年、パナソニック ヘルスケアより超音波診断機器事業を買収し、超音波診断装置の開発を本格化させた。当社が超音波装置の開発に注力している理由は、「見えなかったものの見える化」で医療に貢献するためである。超音波装置の本体技術はコモディティ化しており差別化が難しいが、探触子はアナログ素子であり、画質性能に大きく寄与する部分でもある。ここに当社がフィルム技術で培ってきた様々な技術に応用できるのではないかと考えて、開発を進めた結果、超広帯域・高感度プローブで高画質化を実現することができた。現在、製品化している高周波のリニアプローブは、PZTの材質としては世界で初めて比帯域100%を超え、加えて超高感度なプローブとなっている。

当社の超音波事業への挑戦について述べる。2009年にSONIMAGE 513、2013年にポケットタイプのSONIMAGE P3、その後、2014年に自社開発したSONIMAGE HS1、2015年にはハイエンド装置のAixplorer (Supersonic Imagine社提携) を市場導入して、POCからハイエンド領域までをカバーしている。

超高速画像生成エンジン「UltraFast™ Imaging」

Supersonic Imagine社はフランス南部プロバンス地方(マルセイユから20～25kmほど北上した所)に立地している。同社は超音波エラストグラフィーに関する著名な研究者をボードメンバーとして迎えており、エラストグラフィー技術に関しては優位性を持っていると考えている。

Aixplorerは、ヨーロッパ、南北アメリカ、日本を含むアジアなど50カ国以上に市場展開されている。本装置はビームフォーマをハードウェアではなくソフトウェアで行い、ソフトウェアベースの超高速演算エンジン (GPGPU) を搭載している点が他社の装置と大きく異なる特徴である (図1)。さらに、このコアテクノロジーをベースとしてユニークな機能がインプリメントされている。その1つが、超高速画像生成エンジン「UltraFast™ Imaging」であり、本稿のキーワードの1つでもある。このエンジンにより、TriVu Imagingや、Angio PL.U.S.™などの機能で微細血管の描出などを実現している (図2)。

従来のFocused Imagingは、1音線ずつ信号を送受信し、送受で

フォーカスしてビーム形成することで、より高い空間分解能が得られていた。しかしフレームレートは数10～数100Hzであり、時間分解能の観点では限界があった。それに対して、「UltraFast™ Imaging」は無限遠フォーカスの平面波を送波し、受信時のみフォーカスしてビーム形成処理を行う。これにより極端に言えば、1度の送信で1枚の画像が得られるということになる。しかし、1度の送信で画像を生成すると、SN比が低下するため、実際は何回かに分けて領域ごとに送信し、1枚の画像を生成している。その結果、数1,000f/sのフレームレートが可能となり、非常に高い時間分解能を実現した。この非常に高いフレームレートがSupersonic Imagine社のキーとなる技術のひとつである「UltraFast™ Imaging」であり、これをコア技術として様々な差別化機能を実現している。

マッハコーンせん断波とShearWave™ Elastography

波には、疎密波とせん断波の2種類が存在する。超音波は疎密波であり、進行方向に沿って疎と密の部分が伝搬していく。それに対してせん断波は、ひずみが伝わる波、つまり弾性波であり、両者の大きく異なる点である。

もう1つの疎密波とせん断波の違いは、生体内を伝搬する速度である。疎密波は約1,500m/s、せん断波は、数m/s～数10m/sの速度で伝搬する。両者を比較するとせん断波は速度が遅いように思えるが、その伝搬を検出する観点からは十分速い速度であり、その伝搬をリアルタイムにトラッキングするのに「UltraFast™ Imaging」が核となる技術となっている。

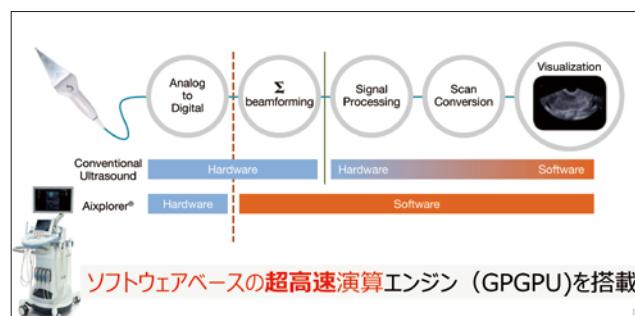


図1 革新のシステムアーキテクチャ



図2 コアテクノロジーをベースとしたユニークな機能

せん断波の発生について、直感的に非常に理解し易い画像を呈示する（図3）。水の波は表面波であり、横波や縦波とも異なるため、厳密な物理的意味とは少々違う点もあるが、図3はせん断波を理解しやすい画像である。落ちてくる水滴を、生体内に発生せられたpush pulseであると考え、push pulseが生体内を伝搬すると、組織にひずみが生じ、そのひずみが横方向に広がっていく。これがせん断波発生直観的理解である。

せん断波の伝搬と硬さの関係について述べる。せん断波の伝搬速度は伝搬媒質の硬さに依存して変化し、媒質が硬い場合はせん断波の伝搬が速く、軟らかい場合はせん断波の伝搬が遅くなる。図4に弾性率とせん断波速度の関係式を表す。この式より、 ρ （物質の密度）を約1とし、伝搬媒質を完全弾性体とすると、弾性率は、 v （速度）の二乗を3倍することで求めることができる。

もう1つのせん断波に関するキーワードはマッハコーンせん断波である。push pulseをフォーカス点を変えて高い繰り返しで送信するAixplorerの技術であり、この技術により円筒状のせん断波を発生させることができる。円筒状のせん断波の有意性は減衰が少ない点であり、フォーカス点を1点に絞ってせん断波を発生させるとせん断波は球状に広がり、距離の3乗で拡散していくが、円筒状にせん断波が広がると距離の2乗で拡散していくため、伝搬距離に対して1乗分、減衰が少なくなる。このマッハコーンせん断波が、Aixplorerのエラストグラフィの安定性と高感度の両立を実現させている大きな要因である。

せん断波の検出は波が通過した際に起こる組織の変位をカラープラに似た処理を用いて検出し、速度に変換している。その際、前述のように「UltraFast™ Imaging」が大変有効に作用する。超高フレームレートイメージングにより、せん断波の伝搬を正確にトラッキングすることができ、最大16.3m/s（800kPa相当）の速度まで検出可能としている。また、2フレーム/sのリアルタイムSWEを実現している。

SWEの表示例を示す（図5）。組織弾性を色に変換し、軟らかい部分を青、硬い部分を赤で表示している。カラーコーディング

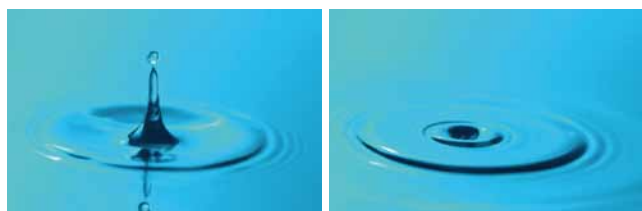


図3 せん断波の発生

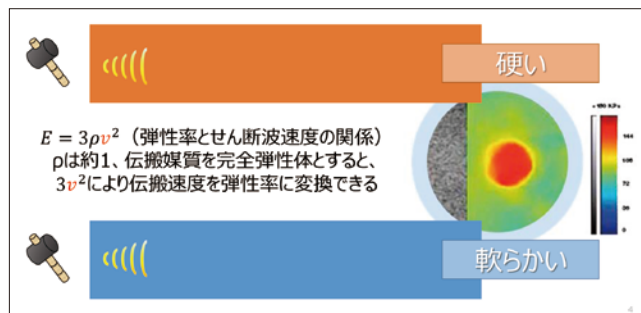


図4 せん断波の伝搬と硬さの関係

を変更することにより、硬い部分を青、軟らかい部分が赤になるように表示することも可能である。特定の部位にROIを設定することで、ROI内の弾性値の平均や分散などを表示することもできる。

3次元ShearWave™ Elastography

Strain Elastographyで、3Dプローブを用いてボリュームスキャンする場合、スキャンの間、手動的に安定して押し続けなければならないため、押圧むらは避けられず、実用的な画像を得ることは難しい。push pulseを使用したShearWave™ Elastographyであれば、押圧フリーならでは安定した3次元画像の構築が可能である。しかしながら、ワンショットのElastographyしか得られないシステムではボリュームデータを得るには数分以上の時間を要し、安定した精度のよい3次元画像を撮像できない。しかし、Aixplorerは高いフレームレートを有しているため、安定した3次元ShearWave™ Elastographyを得ることができる。このリアルタイム性と、手によらないpush pulseを用いた方式であることが3次元ShearWave™ Elastographyを可能としており、現時点ではAixplorerのみが実現可能な機能である。

また、3次元ShearWave™ Elastographyは任意の3断面だけでなく、隣接した複数の平行断面の表示も可能である（図6）。このような表示により、立体的な組織の硬さを視覚化できる。

ShearWave™ Elastographyは、マニュアルプッシュの不要なElastographyであり、マッハコーンせん断波により、高感度かつ安定なSWEイメージングを得られる。さらに、UltraFast™ Imagingは、リアルタイムSWEイメージングを可能としており、これらの技術の集積により3次元ShearWave™ Elastographyが実現された。

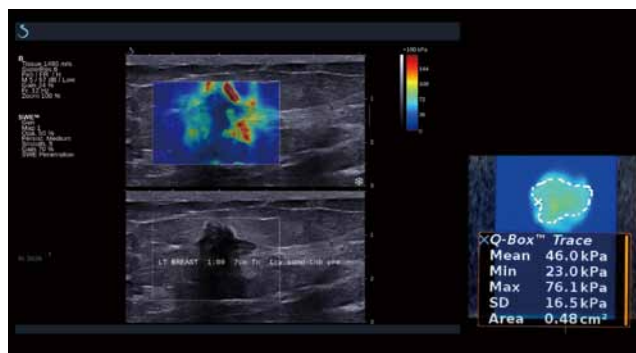


図5 SWEの表示例

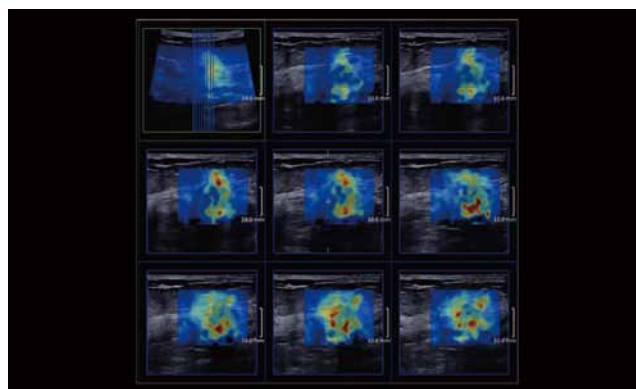


図6 平行多断面表示

乳腺腫瘍を3次元 SWE (シアウェーブエラストグラフィ)で観る ～基礎と臨床～



Aixplorerは簡単な操作でBモードの3D画像や、シアウェーブの3D画像が表示できる。2DのBモード画像やカラードプラ画像のみでは診断が困難な症例でも、3D画像から、さらに診断に有用な情報を得られる。実際に症例を呈示しながら、3D-SWE dataの有意性を述べる。

尾本きよか氏 自治医科大学附属さいたま医療センター

AixplorerのTriVu機能と高い操作性

Aixplorerはリニア型プローブを用い、Bモード画像に加え、シアウェーブ、パワードプラを同時表示できるTriVu機能を搭載していることが特徴である。また、3Dデータを得るためのスキャナー「SLV16-5」は広帯域リニアプローブで有効周波数帯域は5~16MHzであり、このプローブによりどのような画像を得られるかを解説する。

操作は至って簡単で、タッチパネルでの操作が可能(図1)。3方向の画像を1画面に表示したり、ある方向のスライス順番に表示していくことも、スイッチを押すだけでできる。ボタンを押すのみで、見たいスライスや表示モードに簡単に切り替えられるため、一目でわかりやすい画面を表示できる。その具体例を呈示する。

症例1

70歳代男性。左乳房のしこりを自覚し近医を受診した。精査が必要と診断され、当院に紹介された。Bモード画像では腫瘍が確認でき、石灰化の存在も疑われるが、この画像のみでは診断は困難である。乳頭直下のしこりで、比較的境界明瞭な腫瘍であり鑑別はいくつか挙がるものの悪性は否定できないのではないかとされた(図2)。

実際の臨床ではプローブを滑らかに病変の前後を往復するように走査して観察し、それら多数の2次元画像を頭の中で重ね合わせ3次元化して考えているだけであり客観性に乏しい。しかしながら、本装置を使用すればワンタッチで3Dデータを取得することが可能である。X軸方向、Y軸方向のほか、体表に

水平なZ軸方向の断面像(Cモード)も表示可能で、またこれらX、Y、Z方向を同時に表示することも可能である。一目で病変の立体構造を認識できることがこのスキャナーの特徴である。

さらにシアウェーブエラストグラフィSWEで表示し、観察する。速度の上限を約5m/sに、下限を約2.2m/sに設定し、プローブをゆっくり走査し、様々な方向から観察すると、腫瘍周囲の辺りが部分的に赤く表示されていることが確認でき、その部分が硬いことがわかる(図3)。Bモード画像だけでなく、このSWEからも悪性であることが疑われる。ただこれはカラー表示による定性的な評価である。一方本装置の特徴はこの3D-SWEにおける任意の点におけるシアウェーブの速度を測定できることにある。この定量的計測は、3D-SWE dataを取得後にX、Y、Z軸のどの方向からでも任意の断層像における関心領域を設定し、計測が可能である。

通常乳腺組織のシアウェーブ速度は1.5~2.5m/sであり、本症例の腫瘍の速度は約3.1m/sであり、やや硬いことがわかる。シアウェーブ速度は、各社装置間でその定量値が多少異なる傾向にあるため、脂肪組織と乳腺組織の速度の差や比を用いて診断に役立てるようにしている。

またこの取得した3D-SWE dataは、後で再処理することが可能であり、観察したい断面を抽出し、その中の任意の部分でのシアウェーブ速度を再計測することもできる。

本症例は男性ではあるが、病理学的に浸潤性乳管癌(乳頭腺管癌)と診断された。

症例2

80歳代女性。自覚症状はないが、近医の超音波検査で異常を指摘されて精査目的で当院に紹介となった。Bモード画像では縦横比が大きい腫瘍で、乳管内進展が疑われる所見を認めた。内部に点状高エコーを認めるが、前方境界線の断裂はない。悪性が疑われるが、浸潤性かどうかをこの1枚の静止画で判断するのは困難である。またカラードプラでは、辺縁にわずかに血流がみられるのみである。垂直方向の走行や蛇行する血流が確認できれば悪性がさらに疑われるが、辺縁のみのわずかな血流だけではその判断が難しい。

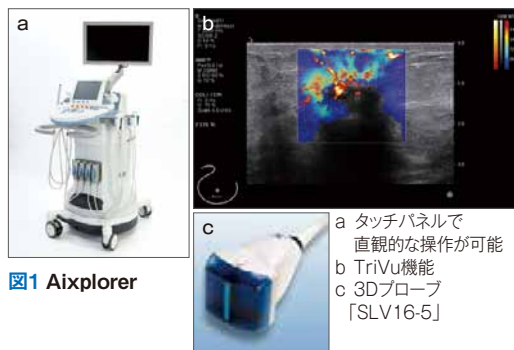


図1 Aixplorer

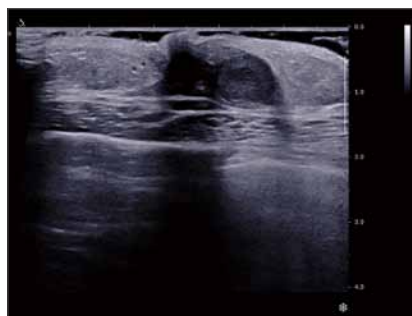


図2 70歳代男性 Bモード画像

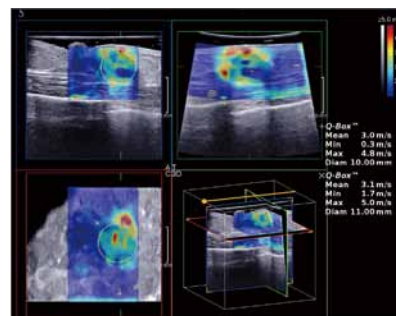


図3 70歳代男性 3D-SWE

本装置を用いれば、Bモードの3Dデータを取得することが可能である。X軸方向からの画像をみると前方境界線の断裂はなく、Z軸方向からの画像ではスピキュラなどの所見は確認できない。しかしながら、Y軸方向の断面では、乳管内進展が疑われる所見を認める。以上より鑑別としてDCISなどの非浸潤癌が疑われるが、80歳という年齢も考慮すると良性の可能性は低いと思われる。

一方3D-SWE dataを用いて観察すると、赤色に表示される硬い部分があるかどうか、すなわち悪性が疑われる所見があるかないかを一目で確認できる(図4)。この症例ではそのような所見がないため定性的ではあるが、悪性所見はないと判断した。そこで腫瘍内部のシアウェーブ速度を実測すると1.6~1.8m/sと正常の乳腺組織と同程度の値であり、定量的には良性に近いことがわかった。ただし年齢的に80歳と高齢であり、Bモード所見からも悪性が否定できないため生検を施行した。その結果breast tissue with fibrous stromaと診断された。病理標本と超音波画像の正確な比較はできていないが、最終的には悪性所見はなく良性と診断された症例である。

症例3

60歳代女性。定期検診のマンモグラフィで異常を指摘され、当センターで超音波検査を施行した。Bモード画像1枚だけでの正確な所見の読影は難しいが、不整な形状を認め、粗大な石灰化は確認できる。より詳しい情報を得るためには、多方向からのスキャンが必要であると判断し、Bモードの3Dデータを取得し、立体的に観察した。

X軸方向からの観察では縦横比はさほど大きくなく、悪性を強く疑う所見は認めない。Z軸方向からの観察でもスピキュラなどの異常所見はみられない。Y軸方向からの観察では病変が深部にあるため詳細な評価は困難である。60歳という年齢を考慮しつつも、これらの所見からでは、悪性所見は明らかではなく良性の可能性もある。

図5に3D-SWE dataを呈示する。病変の所々に赤く表示される硬い部分が観察され、悪性が疑われる。通常の乳腺組織の部分が2.6m/sであるのに対して、この部分を実測すると3.4m/sと高い値が得られ、悪性病変が疑われた。この3D-SWE dataだけから判断すると悪性腫瘍が示唆される症例である。

超音波画像を用いて乳腺腫瘍を評価するにはBモードの1断面だけでなく、多くの断面で観察することも大切である。また

本装置を用いれば、3Dデータを用いて3方向から観察したり、3D-SWE dataを取得した後にカラー表示による定性的評価やシアウェーブの速度計測による定性的評価が任意の部位で可能であり、他社にはない本機特有の有効な評価方法と言える。

本症例の最終的な病理診断は浸潤性乳管癌(乳頭腺癌)であり、通常のBモード画像だけでは良悪性の診断は困難であったが、本機の3D-SWE dataを用いることで悪性を疑う所見が得られ、さらには生検部位を決定する際のメルクマールとして活用でき、臨床的にも大変有用であった症例である。

症例4

70歳代女性。前医で2年前より右乳房D領域に異常を指摘され、精査のため紹介となった。Bモード画像では形状は扁平で、嚢胞性の部分も示唆されたが、カラードプラでは小さな病変にもかかわらず血流シグナルが確認され、悪性が完全には否定できなかった。それゆえこの病変は精査の対象と考えられ、穿刺細胞診や生検を予定した。その前に本装置でBモードの3Dデータを取得し、3方向からの立体的な病変部位の観察を行った。そこでX軸、Y軸の2方向から病変を確認したが、同様に扁平な形状であることがわかった。したがってこのBモードの3D画像だけでは浸潤癌などを積極的に疑う所見はないが、カラードプラでの血流情報も加味するとDCISなどの悪性病変も否定できなかった。

次に3D-SWE dataで観察すると、やや黄色がかっている箇所や赤く表示される部分も認められ、定性的には悪性病変が疑われる所見を認めた。それらの断面におけるシアウェーブ速度を計測すると2.5~2.8m/sと通常の乳腺組織よりも高い値が得られ、悪性が否定できなかった。またさらに再度3D-SWE dataを用いて、3方向を詳細に観察すると、黄色~赤色で表示される硬い部位がみられ、その部位に関心領域を設定し速度を計測すると2.8m/sであり先の測定結果と比較して大きな差はなかった。年齢も考慮しつつこれらの結果を総合的に判断し、浸潤癌ではなくDCISなどの悪性病変を疑った。生検の結果、DCISと診断された。Bモード画像だけでなく、3Dデータによる立体的評価、さらには3D-SWEのカラー表示による定性的評価、シアウェーブ速度計測による定量的評価など多角的に検査を進めることで精度の高い診断が可能になった。あらためて本装置の臨床的有用性を実感できた症例である。

容易な操作で診断に有用な情報を得られる

Aixplorerは何ととっても操作性が簡単である。ボタンがシンプルで、押すだけで3D画像を表示できる。まずBモードの3D画像が表示でき、もう1つボタンを加えれば、シアウェーブの3D画像も観察できる。3方向でシアウェーブ画像が立体的に観察でき、任意の方向から、任意の断面像での速度測定も可能である。また、事前に3Dデータを取得していれば、検査後でも任意の部位での測定、評価ができる点が最大の特徴である。操作も簡便で臨床的にも有用であり、今後新たなモデルティとしての活用が大いに期待されよう。

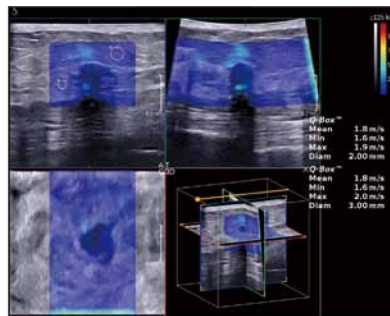


図4 80歳代女性 3D-SWE

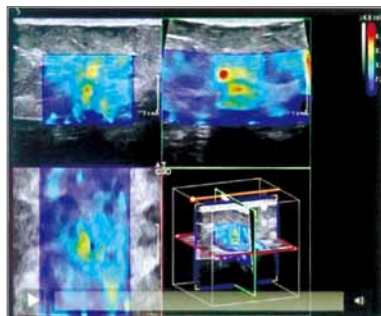


図5 60歳代女性 3D-SWE