歯学科 2 年生講義　放射線学総論・超音波診断

担当：林　孝文

超音波診断 Diagnostic ultrasound，超音波検査 Ultrasonography (US)

［概要］

- 人間の耳で聞くことのできる音の周波数（約 20～20, 000Hz）は可聴域といわれており、これより高い周波数の音波を超音波と呼んでいる（最近では「聞くことを目的としない音」という定義もある)。超音波を生体内に入射し、音響的に性質の異なる境界面から戻ってくる反射波（エコー）を受信して、解剖学的な生体の構造や組織の性状、動きや血流分布の状態を画像化する方法である。
- 超音波は均一な媒質中では直進し、媒質の音響インピーダンス（密度×音速）に差があると、一部は反射し残りは透過する。生体内に入射すると、透過した超音波は音響インピーダンスの異なる境界面で様々な反射を生じる。
- 超音波診断は CT や MRI と異なり、探触子（プローブ）を皮膚や粘膜などの生体表面に、超音波が透過しやすいように音響カップリング材などを介在させて情報を収集する。探触子内部には超音波振動子（圧電素子）が組み込まれており、超音波を発信するとともに、生体から戻ってきた超音波を受信している。
- 超音波診断装置では、パルス状の超音波を放射し、生体中の音速を水中の音速である約 1,500 ［m/s］ に近い 1,530［m/s］あるいは 1,540［m/s］として、（音速×反射波が戻ってくるまでの時間÷2）で反射体までの距離を計算している。
- 振幅波形で表示した A モード法、輝度の二次元像としてリアルタイムに表示する B モード法、B モード像のある部分の動きを波形として表示する M モード法がある。
- ドプラ法は、血流内の血球成分により引き起こされるドプラ効果（音源が観察者に近づいてくる場合は疎密波の疎密の間隔が密になり周波数が高く聞こえ、遠ざかる場合は疎になり周波数が低く聞こえる現象）を利用して、血流の速度や方向を測定する。
- 利点：電離放射線被ばくがなく、他の画像検査法と比較し装置が小型で検査料も安く経済的で簡便かつ非侵襲的であり、スクリーニング検査や頻回に行う経過観察に適する。また検査部位や目的に合わせて適切なプローブを選ぶことができ、特に表在領域での空間分解能は CT や MRI を凌駕する。リアルタイム性が高く、組織の動きの評価や穿刺術の際のガイドに有用である。
- 欠点：超音波は軟組織中を伝わるが、硬組織ではその表面で反射するため、硬組織内部の情報が得られない。また画像の自由度は高いが、検査中にリアルタイムに病態を理解する必要があるため、他の画像検査法と比較し術者の技量がそのまま検査精度に反映し、経験による診断能の差が大きい。

１．超音波の特性

（１）超音波の定義

超音波とは、人間の耳には聞こえない高い周波数の音波のことをいう。最近では「聞くことを目的としない音」という定義もある。

超音波は弾性波と呼ばれる波動であり、水、生体、空気や金属などの媒質中を伝搬するが、媒質のない真空中では伝わらない。

横波と縦波（疎密波）とがあり、縦波は音の進行方向と微小粒子の振動方向とが一致しており、空間座標を固定して時間経過を観察すると疎密状態が時間的に変化する。

（２）超音波の周波数

連続正弦波はひとつの周波数成分（基本周波数）で構成されているが、パルス波は基本周波数を中心とする多数の周波数スペクトルを持っており、周波数成分の中で一番大きなものを中心周波数と呼ぶ。

持続時間の短いパルス波ほど低い周波数から高い周波数までの広い成分を必要とする

基本周波数の整数倍の周波数成分をもつ音波を高調波という。

生体に放射され組織から返ってきた超音波の周波数成分には発信周波数の整数倍の高調波が含まれ、これを画像化したものをハーモニック法という。基本波（通常の周波数成分）を用いた場合と比較しアーチファクトが少ない鮮明な画像が得られる。

超音波診断装置で使われる超音波は 1～20MHz 程度であり、口腔領域や頸部では、7.5～18MHz 程度が利用されている。

（３）超音波の伝搬速度

疎密波が生体中を伝わる速さを音速または伝搬速度と呼ぶ

$c = \sqrt{E/\rho}$ ［m/sec］　ただし、E: 体積弾性率［kg/m^2］, ρ: 密度 ［kg/m^3］

音速は c=1,530［m/s］(JIS 規格，但し温度が 37℃の条件）あるいは 1,540［m/s］

（厳密には各臓器によっても音速に差があり、同じ物質でも温度により音速は変化する）

波長と周波数の関係：$\lambda = c/f$ ［m］ただし、f: 超音波の周波数［Hz］

10MHz での波長は、$\lambda = 1{,}530/10\times10^6 = 0.153\times10^{-3}$［m］＝0.153［mm］

（４）超音波の反射と透過、屈折

超音波は均一な媒質中では直進し、媒質の音響インピーダンス（密度×音速）に差があると、一部は反射し残りは透過する。超音波を生体内に入射すると、透過した超音波は音響インピーダンスの異なる境界面で様々な反射を生じる。超音波診断は、この境界面での音響インピーダンスの差を画像化する・

音響インピーダンス　$Z=\rho c$ ただし、ρ：密度，c：音速

境界面に垂直でない角度で超音波が入射した場合には、媒質の音速の比に応じて屈折する。

（5）パルスエコー法

観測点からある特定の方向にきわめて短い時間だけ超音波を放射し、放射時刻と反射波の検出時刻との差(Δt)を求め、波の伝搬速度(c)を介して観測点と反射体までの距離(L)を算出する。

$$L=\Delta t/2\times c\ [\mathrm{m}] \qquad \Delta t\ [\mathrm{sec}],\ c\ [\mathrm{m/sec}]$$

画面の深さ方向は超音波を放射してから反射波が戻ってくるまでの時間によって位置を求め、横方向は超音波のビームを走査（スキャン）させて位置を決めている。

（6）分解能

近接した 2 点を分離した 2 点として見分けられる限度を空間分解能といい、超音波診断装置の分解能には距離分解能、方位分解能、スライス分解能がある。

距離分解能は周波数が高く、パルスの持続時間が短いほど向上する。

方位分解能はビーム幅が狭いほど向上するため、電子フォーカスにより生体内でビームが収束するように工夫されている。

スライス分解能は断層面に直交する超音波ビームの厚みであり、プローブ先端を覆う音響レンズの特性で決まるが、通常、他の 2 つの分解能よりも劣っている。

２．超音波の発生・検出

（1）超音波探触子

超音波診断は、探触子（プローブ，トランスデューサ）を皮膚や粘膜などの生体表面に、超音波が透過しやすいように音響カップリング材などを介在させて情報収集する。

探触子内部には超音波振動子（圧電素子）が組み込まれており、超音波を発信するとともに、生体から戻ってきた超音波（反射波）を受信している。

（2）圧電効果 piezoelectric effect：

圧電素子は電圧を加えると変形し、逆に変形を加えると電圧が発生する。交流電圧を加えると振動し、逆に外から振動を与えると電圧が生じる。

３．表示モード

表示モードには、振幅波形（Amplitude）で表示した A モード法、輝度（Brightness）の二次元像として表示した B モード法、B モード画像のある部分の動き（Motion）を波形として表示する M モード法がある。

B モード法は超音波ビームの走査により得られた反射信号の強さを白黒の明るさ（輝度）に変換して、二次元画像に表現した画像であり、反射が強い場合は明るく、弱い場合は暗く、リアルタイムの動画として断面画像で表示されるため、臨床に最も広く利用されている。

B モード画像において、病変が周囲組織と比較し輝度が高い（白い）場合には高エコー

（hyperechoic)、輝度が低い（黒い）場合には低エコー（hypoechoic）という。
また、超音波の反射が全く認められない場合は無エコー（anechoic）といい、嚢胞性パターン（cystic pattern）とよぶことがある。
充実性パターン（solid pattern）は、様々なレベルの点状エコーを呈する場合で、病変が液体ではなく充実性成分から構成されていることを意味する。

４．アーチファクト
本来、生体に存在しないはずの構造が虚像として現れることを、アーチファクトという。
音響陰影は、著しく超音波を反射する構造が存在すると、その背後に真っ黒な帯状の無エコー域が出現することをいい、唾石などの石灰化物の診断に役立つ。
外側陰影は、辺縁平滑な類球形腫瘤性病変の外側縁に沿って背側に伸びる細長い音響陰影をいう。
後方エコー増強は、嚢胞性腫瘤の背側などに出現する高エコー領域をいう。
多重反射は、超音波がある間隔をもった 2 つの境界面で繰り返し反射することにより画面に反射面が何回も重なって表示される現象である。

５．ドプラ（Doppler）法
音源が観察者に近づいてくる場合に、疎密波の疎密の間隔が密になり周波数が高く聞こえ、遠ざかる場合には疎になり周波数が低く聞こえる現象を、ドプラ（Doppler）効果という。
ドプラ法は、血管中を流れている血球により生じるドプラ効果を利用して、血流の速度や方向などの情報を知る方法である。
カラー表示にして B モード画像にオーバーラップしたものをカラードプラ法といい、プローブに近づくものは赤色系、遠ざかるものは青色系で表示し、血流の大きさは輝度で表している。
パワードプラ法は低速血流の感度が高く超音波と血流の角度依存性が低い利点を有する。

６．エラストグラフィ（組織弾性映像法）
最近一般的に用いられるようになってきた技術として、組織弾性映像法（エラストグラフィ）がある。
組織の硬さを画像化したもので、探触子の操作に伴って組織に生じた歪みを色の違いとして表示する手法（ストレインエラストグラフィ；Strain elastography）と、診断とは別の音波を発生させてそれが伝わる速度で硬さを計測する手法（シェアウェーブエラストグラフィ；Shear wave elastography）とが実用化され、B モードでの診断に補助的に利用されている。
いずれもカラー化した硬さ情報を B モードの画像にオーバーラップさせて表示するのが一般的になりつつある。

（1）ストレインエラストグラフィ；Strain elastography

探触子の用手圧迫による加圧などの前後における画像フレームを比較することで、変形により生じた組織の各部位の変位分布を求める手法である。

探触子の接触面とほぼ垂直方向にごくわずかな加圧を行うと、超音波パルスの伝搬方向と平行な成分が大部分となる偏位が生じ、組織変形は一次元バネモデルで近似可能と判断される。

$$E=\sigma/\varepsilon$$

E: 弾性係数（ヤング率）　σ: 応力　ε：歪み

局所の歪みは変位を軸方向に微分することで得られ、生体内の応力分布を一様と仮定すれば、弾性係数が大きく硬い部分は歪みが小さくなることから、歪みは相対的な硬さを表すこととなる。

各部の変位分布を計測してその空間微分をとることで歪みの分布を得、歪みの平均値を算出して平均より大きい歪みを赤、平均的な歪みを緑、平均より小さい歪みを青でマッピングして B モード画像上に半透明化して重ねることで、リアルタイムのエラストグラフィ画像を得ている。

（2）シェアウェーブエラストグラフィ；Shear wave elastography

生体組織内にせん断弾性波を発生させ、その伝搬速度から弾性値を算出し、組織弾性を評価する手法である。通常の超音波診断に用いられる疎密波は縦波（進行方向と振動方向が平行）であり、生体内を 1,500［m/s］で伝搬するが、せん断弾性波は進行方向と振動方向が垂直な横波であり、生体内を 1～10［m/s］で伝搬する。

$$E=3\rho V_s^2$$

E：弾性係数［kPa］、ρ：組織密度［g/cm^3］、V_s：せん断弾性波伝搬速度［m/s］

生体内の組織密度を一定と仮定すると、弾性係数が大きく硬い部分は、せん断弾性波伝搬速度が大きくなる。

7．超音波診断装置と超音波探触子

超音波診断装置は、大型でキャスターを持つ据置型と、小型でポータブルな携帯型とに大別できる。据置型が高性能で多機能であるのに対し、携帯型はベッドサイドやチェアサイドの検査に適する。

探触子には、振動子を直線状に配列したリニア型、凸状に配列したコンベックス型などがあり、前者は唾液腺・甲状腺など浅部に適するのに対し、後者は腹部など深部の領域に適する。歯科口腔領域ではリニア型が多く使われ、表在用のもののほかホッケースティック型等の術中用小型探触子が口腔内走査に用いられている。

ハードウェアの小型化やバッテリー駆動の強化が進んだことにより、point-of-care（POC）という概念に基づいた超音波検査（POCUS）が広がっており、救急や訪問診療、災害現場などにおいて迅速で簡便に施行できる検査としてニーズが高まっている。

８．歯科領域において適応となる部位と疾患

探触子の走査法により、口腔外走査と口腔内走査に分けられる。

超音波診断は硬組織内部の画像化に適さないため、適応となる歯科疾患は顎顔面領域の軟組織に病的変化が生じるものに限定される。

超音波の減衰のため軟組織深部の描出にも限界があり、一般的な表在用の探触子を使用した場合、良好な画像が得られるのは数 cm 以内である。

口腔外走査では、適応部位として、大唾液腺、頸部リンパ節、顎関節、顔面・口底などがあげられる。

口腔内走査では、ホッケースティック型等の術中用小型探触子により、舌、口底、頬粘膜、口蓋、小唾液腺、歯肉・歯周組織を画像化できる。

	部位	疾患
口腔外走査	大唾液腺 頸部リンパ節 顎関節 顔面・口底	唾石症，唾液腺炎，唾液腺腫瘍 リンパ節炎，悪性リンパ腫，リンパ節転移 関節円板位置異常，顎関節炎 筋炎，蜂窩織炎，根尖病変，骨膜炎，膿瘍，腫瘍性病変
口腔内走査	舌 口底 頬粘膜 口蓋 小唾液腺 歯肉・歯周組織	炎症性・反応性病変，腫瘍性病変（良性・悪性）

９．超音波診断と CT，MRI との比較

	長所	短所
超音波診断	電離放射線被ばくがない 迅速・簡便で経済的 空間分解能・組織コントラストが高い	硬組織の内部は見えない 視野が限定される 経験による診断能の差が大きい
CT	撮影時間が短い 空間分解能が高い 硬組織の描出に優れる	電離放射線被ばくがある 組織コントラストが低い 金属アーチファクトがある
MRI	電離放射線被ばくがない 組織コントラストが高い 骨内部（骨髄）の評価が可能	検査コストが高い 金属アーチファクトがある 動きのアーチファクトがある

2024.11.5 版