

序 文

麻酔科医，循環器内科医，心臓血管外科医などの経食道心エコー（TEE）に携わる医療従事者が JB-POT（周術期経食道心エコー）認定試験や心エコー図専門医試験などに挑戦する際に，TEE 試験対策に役立つ問題集を作る目的で企画した本書がようやく出版される運びとなった。

まずは，依然 COVID19 が猛威を振るう中，忙しい診療の合間を縫って執筆にご協力いただいた全ての先生やご関係の皆様様に感謝を申し上げる。

教科書的な知識だけでは太刀打ちできない難しい試験である JB-POT や心エコー図専門医試験のために動画を含めた解説を数多く加えたほか，合格後も実際の臨床現場で生きる知識を得られるように編者から伝えて各章をまとめていただいた。

改めて本書の内容を見ると，TEE 試験の最初の壁である原理について 2 章に分けて詳説してあるのは試験対策として実に役立つと思われる。心臓の解剖学的理解が深まるようにと配慮された解説が満載の章に続いて，心臓の収縮と拡張という基本的な生理学的理解が深まるような章立てとした。心腔内構造物としての房室弁や半月弁の病態評価と，腫瘍等の心腔内病変の評価の章は，試験対策としてだけではなく実臨床でも非常に役立つものとなっている。大血管，先天性心疾患症例の豊富な解説に続いたアーチファクトやピットフォールの解説や臨床診断の章は TEE の有用性を活かすための工夫や知識が述べられている。また構造的な心疾患（SHD）に対する経カテーテルインターベンションの際の TEE の使用法や 3D TEE 検査法の章は TEE 試験対策としてはもちろん最新の心血管治療に必須である。

結びに，本書が心血管治療におけるより安全な TEE の使用に少しでも役立ち，かつ TEE 試験対策本としても親しまれることを切に願う。

2022 年初秋

岡 本 浩 嗣

ch. 1-3 超音波の原理と画像

(3) 画像設定

KEY POINTS

- 超音波診断装置では、良好な画像を得るために適切な装置設定が必要になる。
- しかし、ある設定で一方の条件が改善することで、別の条件が犠牲になることがある。
- 超音波診断装置の装置設定は、トレードオフの関係にあるものがあり、すべての設定を良好にして、最高の画質を得ることは実際には困難である。
- 観察したい項目を優先する設定に調整して正確に評価する。

1 対数圧縮

送信した超音波は、生体内を伝搬する際に減衰するので、反射波の信号の大きさはさまざまである。浅い部位からの反射波は、減衰が小さいので強い反射波が得られ、遠い部位からの反射波は減衰が大きいため、反射波の強さは弱くなる。超音波診断装置で、反射波は圧電効果によって電圧に変換されるが、反射波の信号の強さによって、1V から 0.1mV 程度までの約 1 万倍の電圧の差がある。

電圧を整数軸にプロットしたとき、整数軸の一目盛りを大きく設定すると、弱い信号の変化の区別が困難になる。対数表示することにより、振幅や音の強さ、電圧の変化が区別しやすいように表示することができる。

2 TGC

超音波は生体内を伝搬するにつれて減衰する。そのため、反射強度の等しい構造物が異なる深さに位置する場合、プローブに近い構造物からの反射波の信号の強さは大きく、遠い構造物からの反射波の信号の強さは小さくなる。これらをそのまま輝度変換すると、プローブから近い部位の反射波は、白く表示されて、遠い部位からの反射波は黒く表示されてしまう。しかし、反射強度の等しい構造物は、深さに依らず、均質な画質が得られることが望ましい。

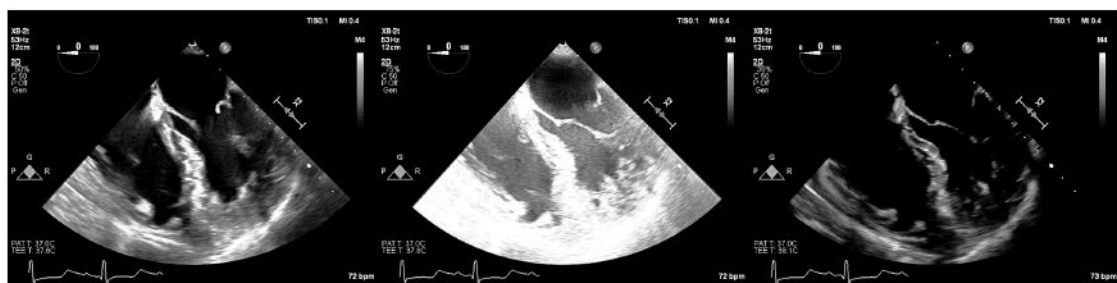
そのため深さや反射波を受信する時間に応じて、超音波診断装置は減衰を考慮して、ゲインを変化させ、深さによらず均質な画質が得られるように補正している。これを TGC (time gain compensation もしくは time gain control) という。TGC は、スライド・コントロールが中央に位置していても均質な画像が得られるようになっているが、適宜検者が微調整する (図 20)。



広いダイナミックレンジ

狭いダイナミックレンジ

図 22 ダイナミックレンジによる TEE 画面表示の違い



最適なゲイン

ゲインが高い

ゲインが低い

図 23 ゲインによる TEE 画面表示の違い

4 ゲイン

ゲインは反射波の信号を増幅する設定である。ゲインを上げると、弱い信号が増幅され、元の設定で黒く表示していた信号はより白く表示される。強い信号も増幅されるため、ゲインを過度に上げると、元の設定で白く表示されていた信号は白色が飽和して表示される。

ゲインを下げると、強い信号が減衰し、黒く表示されるようになるが、弱い信号も減衰して黒くなり、画面に表示されなくなる。ゲインを上げると必要な信号とともに、ノイズも増幅されるので、ノイズが表示されない程度に設定する (図 23)。

5 送信出力

ゲインと送信出力は増加させることで、ともに画像をより明るく表示することができる。

ゲインが反射波の信号を増幅して、反射波の信号の強さを上げるのに対して、送信出力はトランスデューサから生体に送信される超音波の出力を上げることで、反射波の信号の強さを上げている。送信出力を上げてノイズのレベルは変化しない。送信出力の増加によって、生体への影響も強くなるので、必要以上の出力増加は慎む。

✓ 文章問題

- (1) 以下の選択肢から正しいものを選び。
- a. 横波は粗密波ともよばれる。
 - b. 広帯域のパルス波は距離分解能が低い。
 - c. 固有音響インピーダンスがほぼ同じ 2 つの媒質が接しているとき、その境界面での反射強度は大きい。
 - d. 全反射は、音速の速い媒質から遅い媒質に超音波が斜めに入射するときしか起こりえない。
 - e. 探触子の直径が大きいほど、超音波はより遠くで拡がる。
- (2) 視野深度 12 cm、走査線本数 120 本のとき、断層像のフレームレートとして正しいものはどれか。超音波診断装置の基準音速を 1540 m/s とする。
- a. 26
 - b. 53
 - c. 80
 - d. 106
 - e. 132
- (3) 以下の選択肢から正しいものを選び。
- a. 反射波の信号は、超音波診断装置内で対数変換されている。
 - b. ダイナミックレンジを広くすると、画像の濃淡差が大きくなる。
 - c. ゲインを上げると、弱い信号が白く表示されるが、強い信号の表示に変化はない。
 - d. 送信出力を増加すると、ノイズのレベルも増加する。
 - e. TEE の中部食道四腔像で左室心尖部を観察する場合、送信周波数を上げる。
- (4) 以下の選択肢から正しいものを選び。
- a. I_{SPTA} は、焦点の中心におけるパルス幅が持続する超音波の強さの時間平均値である。
 - b. 連続波ドプラ法、パルスドプラ法、カラードプラ法、断層像のうち、 I_{SPTA} は連続波ドプラ法で最も小さい。
 - c. 負の音圧が大きく、周波数が低いほど、キャビテーションが生じやすい。
 - d. 血液が多く灌流する臓器や組織では、超音波照射による温度上昇が大きい。
 - e. 良好な画像を得るためには、最大の出力で長時間の超音波検査が望ましい。
- (5) 以下の選択肢から正しいものを選び。
- a. TEE は Spaulding の分類において、クリティカルアイテムに相当する。

- b. オルソフタルアルデヒドは中水準消毒薬である。
- c. セミクリティカルアイテムは高水準消毒薬で消毒する。
- d. 有機物が付着している場合でも、TEE プローブは、洗浄なしで消毒してよい。
- e. TEE プローブは、携帯用のケースに入れて保管する。

解答と解説

(1) 答え e

- a. 超音波は縦波であり、媒質粒子を超音波の進行方向と平行に振動させて、密な部分と疎な部分が生じる。ゆえに縦波は粗密波とよばれる。
- b. パルス波の短い超音波を周波数解析して、スペクトル図に表示すると、広い帯域幅を呈する。広帯域の波は、パルス波が短く、距離分解能が高い。
- c. 反射強度は次の式で表される。

$$(\text{反射強度: Ri}) = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

すなわち、固有音響インピーダンスの似通っている2つの媒質が接しているとき、反射強度は小さく、入射した超音波の大部分が次の媒質中を進行する。

- d. 超音波が音速の異なる媒質に斜めに入射するとき、屈折が起きる。
入射角がある程度以上に大きくなると、屈折角が90度になる。これを全反射という。全反射が起きると、送信した超音波が探触子に跳ね返ってこないため、画像が表示されない。Snellの法則から、音速の遅い媒質から音速の速い媒質に超音波が斜めに入射するときには全反射は起こらない。
- e. ホイヘンスの原理から、各振動子から発信された球面波の包絡線が平面波を形成する。ゆえに探触子の直径が大きいほど、平面波の領域は大きくなり、より遠くで超音波は広がる。近距離音場の長さは $d = \frac{D^2}{4\lambda}$ であり、この公式から探触子の直径が大きいほど、近距離音場の長さが長くなる。

(2) 答え b

視野深度が d (cm)、走査線本数が n 本のとき、1つの走査線を作るのに要する時間、1枚の画像を作るのに要する時間は次の式のとおりである。

$$(\text{1つの走査線を作るのに要する時間}) = \frac{2d \text{ (cm)}}{1540 \times 10^2}$$

$$(\text{1枚の画像を作るのに要する時間}) = \frac{2d}{1540 \times 10^2} \times n$$

フレームレートは、1秒間に構築される画像枚数であるから、1秒を1枚の画像を作るのに要する時間で割ることで求められる。

本問題では、視野深度12cm、走査線本数120本であるから、

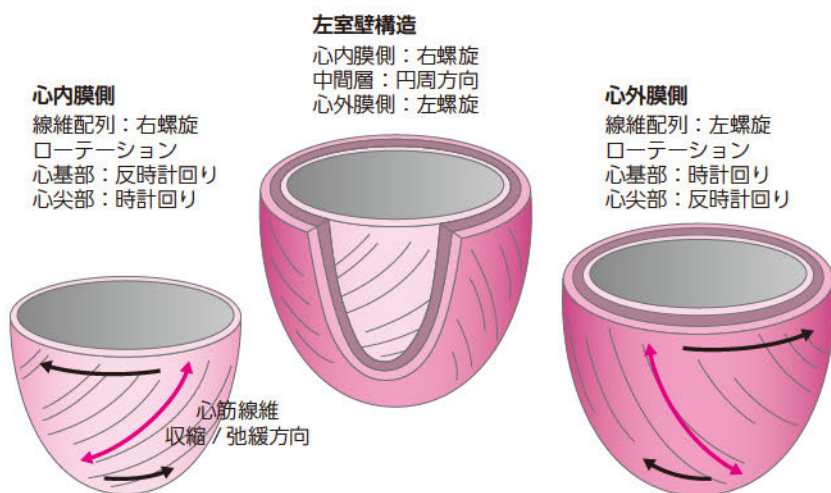


図 4 左室壁構造および線維配列と収縮様式

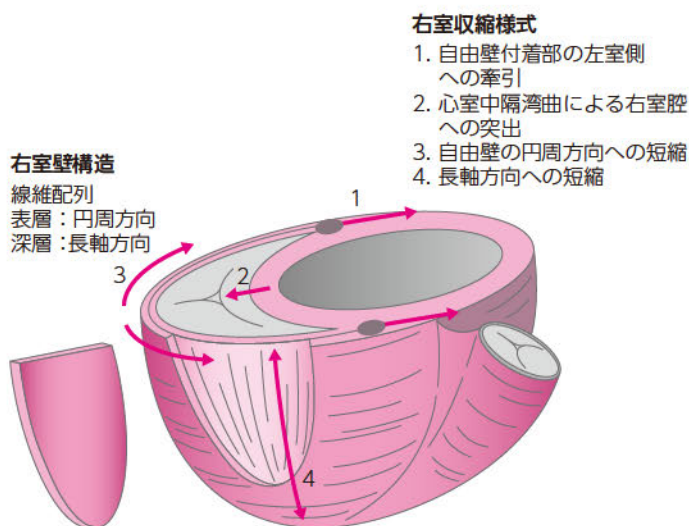
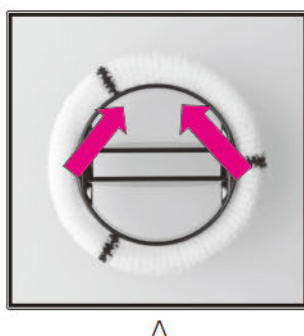
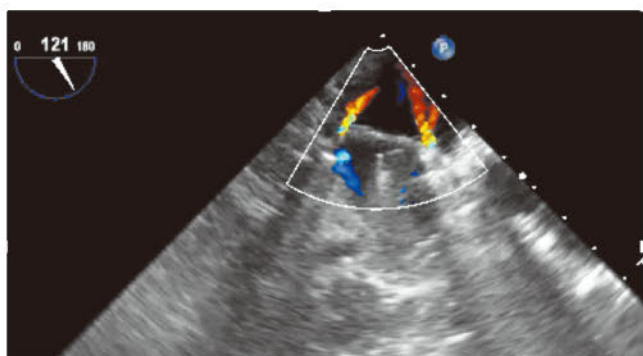


図 5 右室壁構造および線維配列と収縮様式

15%にすぎず，これを円周方向に配列しても駆出率 30%に該当するにすぎない．正常駆出率 (>50%) を達成するためには，上記の斜めに交差する線維配列に起因するローテーションやツイストを伴う左室特有の収縮様式が必須になる．

2 右室収縮

右室を構成する心室中隔は左室の一部でもあり，その壁構造は左室特有の 3 層構造からなる．一方，右室自由壁は心外膜側の円周性線維配列と心内膜側の長軸方向の線維配列の 2 層構造である (図 5)¹⁰⁾．右室自由壁の収縮は等容収縮期に一致する¹¹⁾．右室の血液駆出に寄与するのは主に心室中隔の収縮であり，自由壁の収縮が障害されても右室からの駆出は維持できるとされる．



弁の開放に対して平行となる角度にした場合，両端に位置するヒンジから内側に向かう逆V字方向の生理的逆流を認める。

図 21b 僧帽弁位：機械弁の生理的逆流 transvalvular leak

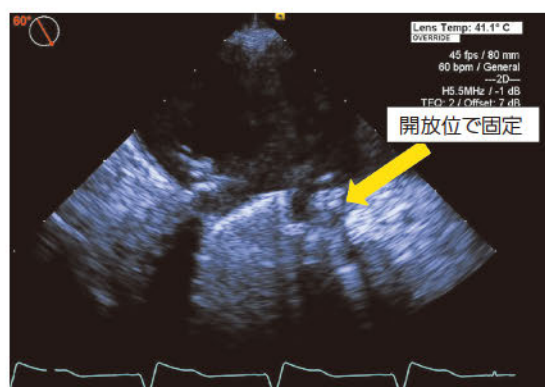
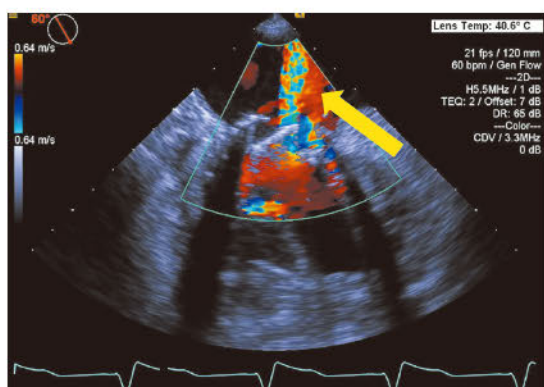


図 22 機械弁の stuck valve による異常な弁輪内逆流

写真右側の弁葉が開放位で固定され，収縮期に高度な弁輪内逆流を認めた。

TEE で原因は温存した僧帽弁の弁下組織が弁葉と弁座の間に挟まったためと診断した。

(ii) 機械弁

弁が閉鎖した後にヒンジの内部で血栓ができるのを防ぐための生理的逆流ジェットがヒンジ点で認められる(図 21a, b)。この生理的逆流ジェットは，層流で，幅が細く，対称性で逆流持続時間が短いのが特徴である。開放位での stuck valve では，乱流で，幅が広く，非対称性で逆流持続時間が長い異常な弁輪内逆流を認める(図 22)。機械弁では生理的逆流と異常な逆流の鑑別が重要である。

c) 人工弁-患者不適合 patient prosthetic mismatch: PPM

PPM は体格に見合った人工弁有効弁口面積 (effective orifice area: EOA) を得られない小さい人工弁が移植された際に診断される。術中 TEE で連続波ドプラ法により人工弁の経弁流速を測定し，大動脈弁位で 3 m/sec 以上，僧帽弁位で 1.9 m/sec 以上の速い流速を認めた場合には PPM を疑う。患者の PPM の重症度は，人工弁の有効弁口面積を体表面積で補正して得られる人工弁の EOA index で評価され，大動脈弁位であれば EOA index が $0.85 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 以上で人工弁間圧較差が 10 mmHg 以下あることから，臨床上是問題なしとされる(表 6)。重度の PPM は術後早期死亡率リスクを高めるとの報告もあるが，中等度 PPM は臨床ではたびたび遭遇し，