

聴こえない音が視えてくる！

音で診るエコー装置の
なぜ？ どうして??



超音波の原理



山崎延夫

公益社団法人日本超音波医学会認定
超音波工学フェロー



超音波は、音なのに人の耳では聞くことができません。でも、超音波は、音なのに人の体の中を可視化させることができます。この「不思議な音」のお話です。本書のタイトルは、『聴こえない音が視えてくる！ 音で診るエコー装置の「なぜ？ どうして？？」』としました。

画像検査（診断）とは、身体の外から見ただけではわからない体内の病気や形態上の変化を画像化して、検査（診断）することです。

代表的な検査法として、超音波検査、CT 検査、MRI 検査がありますが、これらの検査はどれも体内の断面を白黒の濃淡（グレースケール）で画像化しています。

しかし、体内の同じ断面を画像化しても、検査法によって白く映る部分と黒く映る部分が異なります。

- ① 心臓の超音波検査では心臓の内腔は黒く抜けて見えますが、MRI 画像では心内腔は白く映ります。
- ② 腹部の超音波検査では横隔膜が強い白色（高輝度エコー）で描出されることをしばしば経験しますが、CT 画像では横隔膜が特段に目立って描出されることはありません。
- ③ CT 検査、MRI 検査では、患者さんを寝台に横たわらせて大きな輪（ガントリ）をくぐらせると体内を画像化することができますが、超音波検査では、超音波プローブを患者さんの身体に直接接触させないと体内を画像化することができません。しかも超音波検査にはエコーゼリーが欠かせません。
- ④ 一方で、超音波検査では体内の臓器の動きや血液が流れる様子をリアルタイムに観察することができます。CT 検査、MRI 検査では到底できない芸当です。

この①～④について、あなたは「どうしてだろう？」と疑問に思ったことはありませんか？ あなたは後輩から「どうしてですか？」と質問されたら、簡単明瞭に答えることができますか？

読者の皆さんには、このなぞ解きを楽しみながら医用超音波の原理や装置の仕組みを学んでいただきます。

医用超音波の原理や装置について疑問を抱いてはいるが、今さら恥ずかしくて周りの人に聞くことができない「あなた」、勇気を出して先輩に質問してみたけれど、嫌な顔をされて明快な答えを得ることができなかった「あなた」、そんな「あなた」の悶々とした気持ちを晴らしてくれるのが本書であってほしいと私は願っています。

そのために、本書では超音波の物理や数式をできるだけ使うことなく、比喻（例え）やイラストを多用しています。

あなたには医用超音波の基礎をイメージとして理解していただけるように工夫したつもりです。

21 世紀に入ってからこの四半世紀に超音波診断装置（エコー装置）の小型化が急速に進み、今ではエコー装置を携帯して病院内はもちろん病院の外のどこへでも持ち運ぶことができる時代になりました。

超音波検査がどこでもできるようになった今、誰もが超音波検査をできるようになることが望まれています。

超音波検査（診断）に携わる人の数が増え、携わる人の職種が拡大しています。

ベテランの病棟看護師が初めて超音波プローブを握り、在宅医が往診カバンに小型のエコー装置を忍ばせる時代になりました。

その道のプロであることを自負してもエコーでは初心者という人、超音波検査を本業としない人がエコーに携わるケースが増え続けています。

私は、そういう「エコーでは初心者」という人たちを頭に思い浮かべながら本書を執筆しました。

本書は、超音波検査士の認定試験を受ける人が一夜漬けのために手に取っていただく「試験に出る○○」的な参考書ではありません。

しかし、超音波検査士の認定試験を目指す人が、本書を読んで、「なるほどね」と納得する項目を一つ一つ増やしていけば、それがすなわち認定試験の受験対策になるはずです。

さあ皆さん、「音で診る」医用超音波の世界へようこそ！

2026 年 3 月

山崎延夫



はじめに

第1章 超音波の原理	 5
1. 超音波を一言でいうと？	 5
2. 「波」を理解できれば音が見える	 7
3. パルス反射法	 14
4. パルス幅と距離分解能	 17
5. 単位について	 25
コラム：限界を知ることが次の一手につながる	 28



超音波の原理



超音波を一言でいうと？

まずは、医用超音波の世界における「超音波」の定義について

■ 人に聞こえる音、聞こえない音

一般に人に聞こえる周波数の範囲（可聴域）は、低い音で 20 [Hz]、高い音で 20 [kHz] くらいまでの範囲とされています。ほとんどの人の聴こえ（可聴域）はこの範囲より狭く、年齢を重ねるにつれて上限と下限が狭まる傾向があります。こうした人に聞こえる音を「可聴音」と呼び、人の耳に聞こえないほど高い音を「超音波（ultrasound）」、人の耳に聞こえないほど低い音を「超低周波音（infrasound）」といいます。

■ 学会による「超音波」の定義

日本超音波医学会が編集した医用超音波用語集では、「超音波」について、

「人間の可聴上限周波数以上の音。通常、周波数が 20 [kHz] 以上の音波を指す。広い意味では、計測利用の音波など、耳で聞くことを目的としない音を指し、20 [kHz] 以下の音波でも超音波として扱う場合もある。」

と説明しています。

後半の「耳で聞くことを目的としない音」という定義（？）は曖昧で、これでは可聴周波数域の騒音が超音波になり、人によっては虫の鳴き声も聞きたくない音、超音波なのか、ということになります。

このような屁理屈をいうのは私だけにしておいたほうが無難です。

一般的な超音波検査で使われている音の周波数は、概ね 1 [MHz]（1,000 kHz）以上ですので、ここでは、「超音波とは人間の可聴上限周波数以上の音」と憶えておけば十分です。

■ イルカにとっての「超音波」とは？

イルカは人間の 7 倍以上（～150 [kHz]）も高い音を聞くことができ、音波を発することで、餌を探したり仲間とコミュニケーションをとったりしていることが知られています。もし、イルカにとっての超音波（可聴上限周波数以上の音）を定義するとしたら、周波数が概ね 200 [kHz] 以上の音波を指す、となるのかもしれませんが。動物用の超音波診断装置で使われている音の周波数も 1 [MHz] 以上で、イルカの耳でも聞こえない音です。水族館のイルカが超音波検査を受けても、超音波プローブから発射される音でイルカが不快に感じることはありません（図 1）。

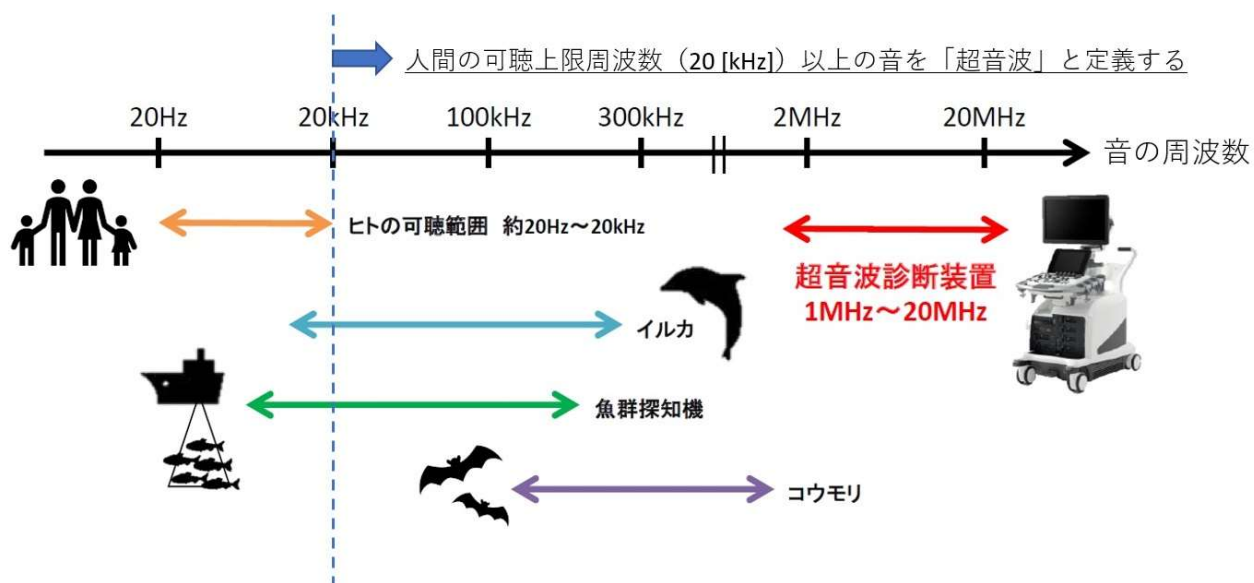


図1：超音波（人間の可聴上限周波数以上の音）を利用している例

自然界ではイルカ、コウモリ、産業や医療の分野では魚群探知機、超音波診断装置などがある。



「波」を理解できれば音が見える

■ 音は「波」である

音は光とともにとても身近な現象です。音と光の共通点は何でしょうか。それはどちらも「波」の一種だということです。

音をよく知るためには、まず波について基本的な性質を理解する必要があります。

残念ながら波の概念はわかりにくいことで有名です。なぜなら、波の運動を正しくイメージすることがとても難しいからです。空間に広がった波が時間とともにどう変化していくかを思い描くことは、そう簡単ではありません。

ここでは、波の運動を正しくイメージできるようになることを目指します。それができれば波の本質は理解できたも同然といえます。

■ 波をイメージしよう

波といわれてまず思い浮かぶのは、池などの水面に広がる波紋ではないでしょうか。池に木の葉が浮かんでいるところを想像してみてください。そこに雨粒が落ちてくると同心円状に「波紋」が広がっていきますよね。でも、浮かんでいる木の葉は上下にわずかに揺れ動いてはいるものの、その場所にとどまっています（図2）。

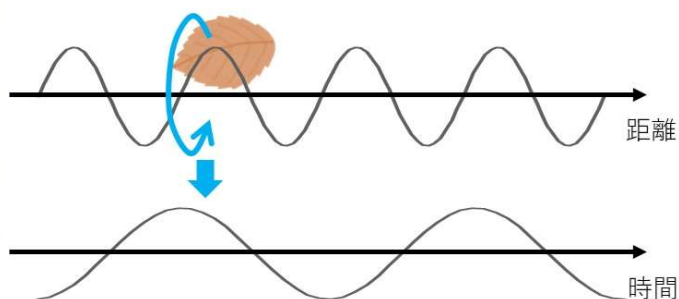
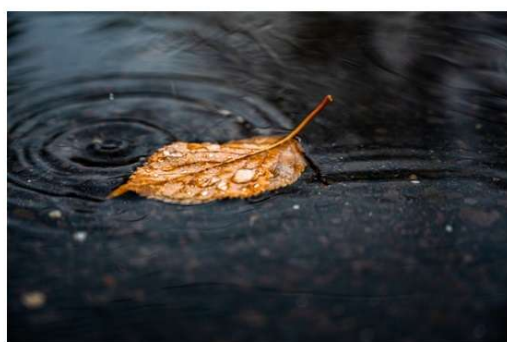


図2：波紋の広がり

上：水面を横から見たとするとこのようになり、木の葉は上下に揺れているが、その場所はほとんど変わらない。
下：この木の葉の上下の変化が時間と共にどのようなになっているかをグラフにした場合。

この波紋が伝わっていく様子から、水面を波紋（山または谷）が進んでいく速さと、水面のある1点の高さが上下する速さは、互いに独立した関係にあることがわかります。波紋が伝わっていく現象は、水面が移動していくのではなく、その場での水の振動が隣の水を動かし、その水の振動がさらに隣を、という具合に影響を伝えていくことから生じます。

振動が物質を伝わっていく現象を「波動」といいます。そして、波動を伝える物質を「媒質」といいます。

■「縦波」と「横波」

波には、「横波」と「縦波」の2種類があります。

ロープの一端を壁に固定して、もう一端をハカセが持っています（図3）。

ハカセがロープを上下に1回揺らすと、ロープが山と谷のような形になり、この山と谷は、時間とともに、横へ、横へと伝わっていきます。つまり「ハカセが端っこで作った揺れが、ロープの上を伝わっていく」という現象が起きていることになりますね。振動や変化が、周りに次々と伝わっていく現象が「波」です。

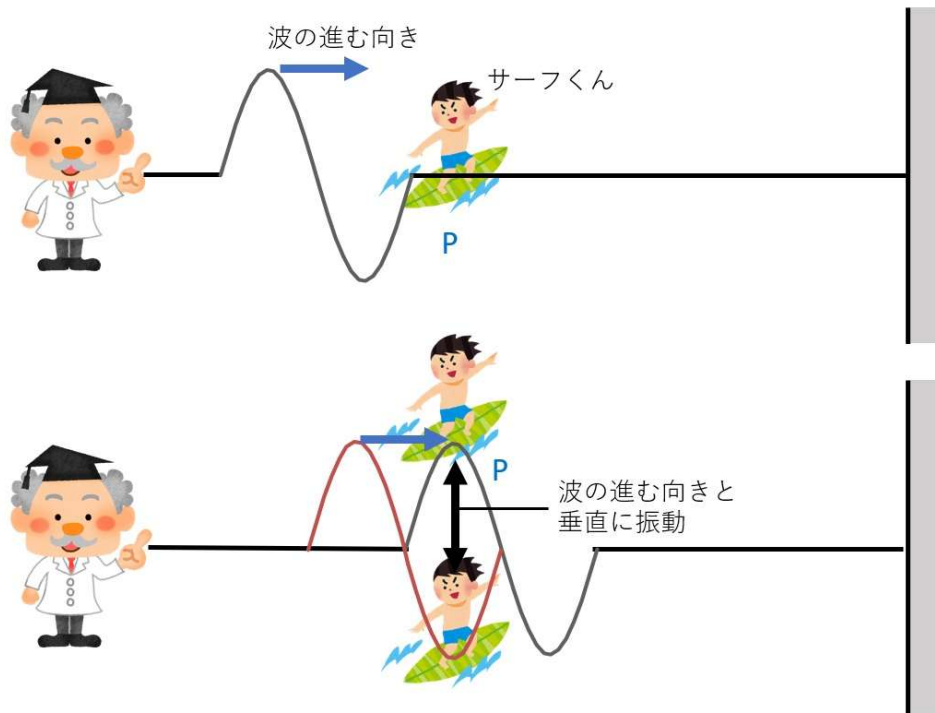


図3：横波

波の進行方向と垂直に媒質（サーフくん）が振動する波。

では今度は、ロープのある1点だけに注目してみましょう。

ロープの上の点Pの位置にハカセの助手のサーフくんが乗っています。波が点Pを通過すると、それに合わせて点Pの上のサーフくんは上下に振動しますね。つまり、ロープの1点だけを見れば、その点は振動しているだけということです。

ハカセがロープをゆらすと、波は右に進みますが、サーフくんは上下に振動しています。つまり、この波は、進行方向と垂直に振動しているといえます。

このような、波の進行方向と垂直に媒質が振動する波を「横波」といいます。横波の例としては、地震のS波、電波、光波などがあります。

今度は、たくさんのバネをジョイントでつないで長くします（図4）。つながったバネの一端を壁に固定して、もう一端をハカセが持っています。そして、1つのジョイントの上にサーフくんが乗っています。

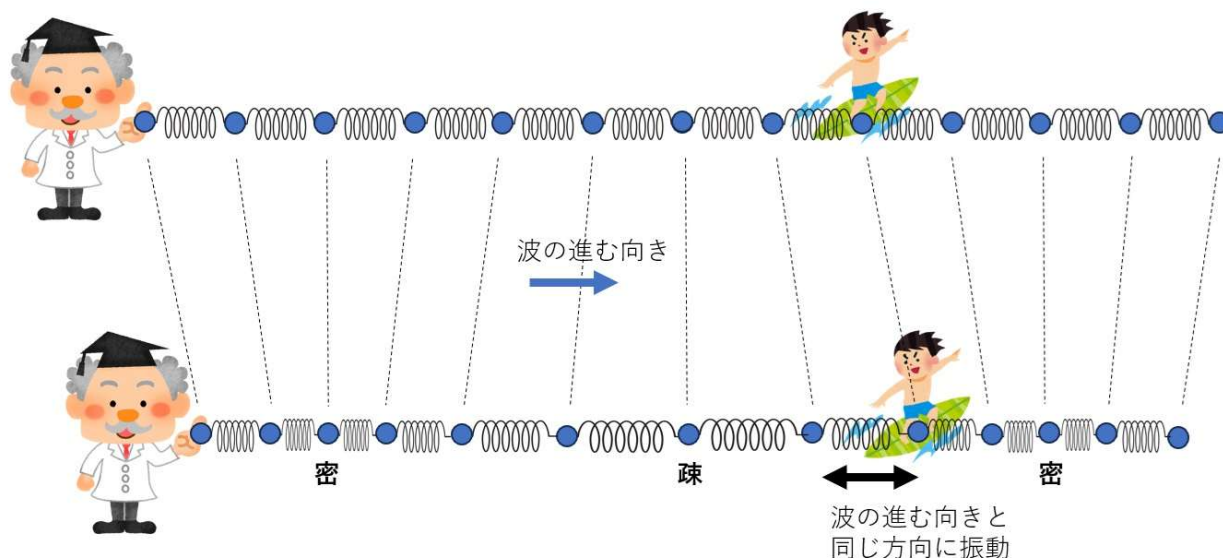


図4：縦波

波の進行方向と同じ方向に媒質（サーフくん）が振動する波。

ハカセが端っここのバネを横から押したり引いたりすると、バネは密集したり、広がったりを繰り返しながら、右に伝わっていきます。このとき、サーフくん（媒質）は、左右に揺れていますね。このような、波の進行方向と同じ方向に媒質が振動する波を「縦波」といいます。縦波は、媒質が引き伸ばされて「疎」になっている部分と押し縮められて「密」になった部分が波として伝わっていくことから、「疎密波」とも呼ばれます。音波は縦波です。縦波には、そのほかに地震のP波があります。

波には、「横波」と「縦波」があって、「音波は縦波」だということですね。

■ 波の動きを表す2つのグラフ

波を表す2種類のグラフを理解しましょう。

波の動きを簡潔に表すものとして、グラフが用いられます。

波を表すグラフには、「位置と変位」の関係を表すグラフと「時間と変位」の関係を表すグラフの2種類があります。この2種類のグラフの違いを理解することが、「波動」をイメージするのに重要なポイントです。

■ 「位置－変位」グラフ

ここからは連続した波（横波）を考えていきましょう。

ハカセがロープを繰り返して上下にゆらして、ロープの1点に乗ったサーフくんは連続した波に揺らされています。この波を正弦波と仮定します。まず、正弦波の「位置－変位」グラフ（図5）を見てみましょう。

波をつくる媒質は時々刻々動いていますが、「ある時刻で波がどのような形をしているか」を表すのが「位置 (x)－変位 (y)」グラフです。時間 (t) を固定したグラフで、波を写真で撮ったようなものです。

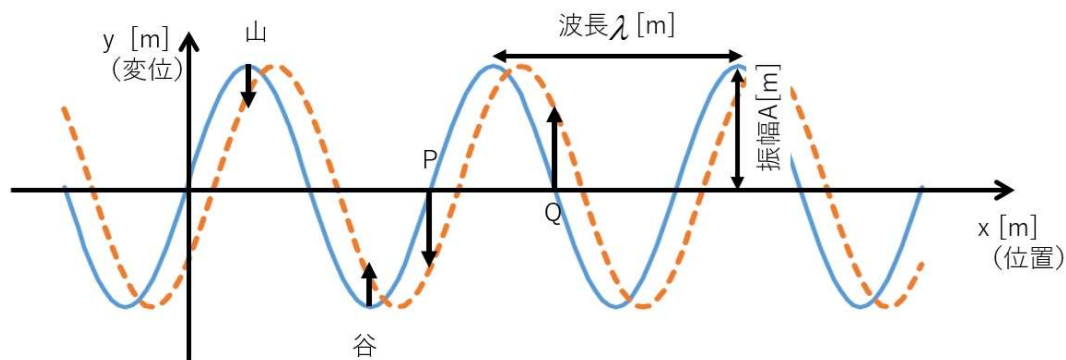


図5：「位置 (x) - 変位 (y)」グラフ

「ある時刻で、波がどのような形をしているか」を表すグラフ。「振幅」と「波長」を読み取ることができる。

このグラフで、波の高さのことを「振幅」と呼びます。また、波の1つのカタマリの長さを「波長」といいます。「位置-変位」グラフからは、「振幅」と「波長」を読み取ることができます。

図5の実線と破線の正弦波は、ある瞬間 ($t = 0$ とします) の波 (実線) と、それから少し時間が経ったときの波 (破線) の「位置-変位」グラフを表しています。波は前に向かって進んだように見えますが、水平に押された物体のように、波全体が水平に進むと考えてはいけません。

実際には、媒質の x 軸上の各点は、 y 軸方向に動くのです (ロープの上のサーフクンの動きを思い出しましょう)。例えば、図の点 P は下方へ、点 Q は上方に動いているのです。山は下方へ谷は上方に動くこともわかります。

■ 「時間-変位」グラフ

ある1点での振動の時間変化を表すのが「時間 (t) - 変位 (y)」グラフです。

点 P の「時間-変位」グラフは図6のようになります。媒質 (ロープ) の1点が1回振動するのにかかる時間を「周期」といいます。「時間-変位」グラフからは、「振幅」と「周期」を読み取ることができます。

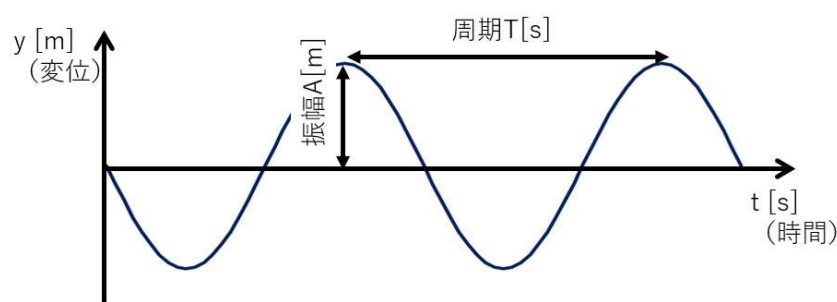


図6：「時間 (t) - 変位 (y)」グラフ

「ある1点での振動の時間変化」を表すグラフ。「振幅」と「周期」を読み取ることができる。

■ 周波数 (振動数) と周期

「ロープの上に乗ったサーフくんが1秒間に何回振動したか」を表す回数が、「振動数」です。単位は [Hz] (ヘルツ) です。高校の物理では振動数と習いましたが、超音波診断装置では、振動数のことを「周

波数」と呼ぶのが一般的です。この本でも「周波数」を使います。

例えば、1秒間にサーフくんが3回振動したら、その波の周波数は3 [Hz]です。逆に、周波数が3 [Hz] だったら、その波の上に乗ったサーフくんは、1秒間に3回振動するんだな、と考えることができます。

「ロープの上に乗ったサーフくんが1回振動するのにかかる時間」を「周期」といいます。1秒間で2回振動したら、1回振動するには $1 \div 2 = 0.5$ [s] かかるので、周期は 0.5 [s]です。

周波数を f 、周期を T とすると、

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{もしくは} \quad f = \frac{1}{T}$$

という関係が成り立ちます。

この関係式はとても重要ですので、ぜひ頭に入れておいてください。周期 [s]の逆数が周波数 [Hz]、周波数 [Hz]の逆数が周期 [s]ということです。

■ 波長と波の速さと周波数

正弦波の「位置 (x) - 変位 (y)」グラフ (図5) を見ると、山と谷が1つずつある部分を1つの単位として、それが連続して波ができていくことがわかりますね。この1つの波のカタマリの長さを「波長」と呼び、 λ (ラムダ) を用いて表します。連続した波を考えると、「波長」は、隣り合う山と山 (谷と谷) の間の距離と同じです。

次に、媒質の振動と波の移動距離についてイメージしてみましょう (図7)。

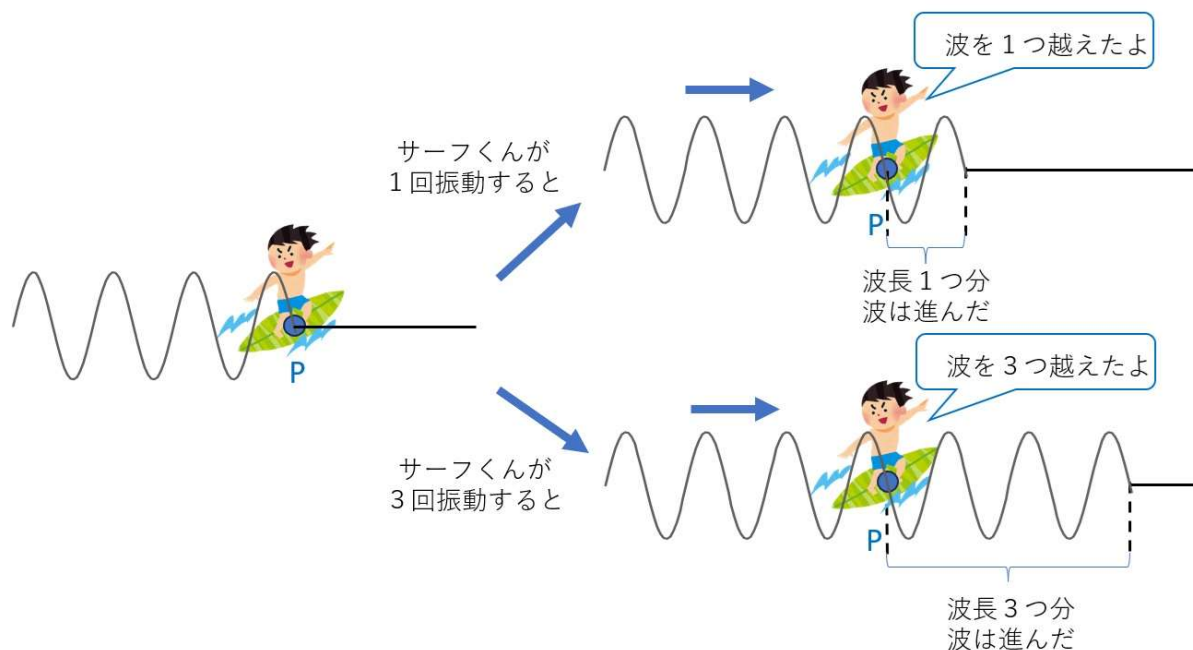


図7：媒質の振動と波の移動距離

「ある点が1回振動した」＝「波全体は1波長進んだ」ということ。

サーフくんがロープの点 P にいて、連続した波の先頭がサーフくんのもとに届いたとします。サーフくんが1回上下に振動する(1つの波を越える)と、1つの波のカタマリがサーフくんの後ろにいきます。つまり、波は1波長分(λ)だけ進んだということです。サーフくんが2回振動すると、波は2波長分(2λ)進み、3回振動すると、3波長分(3λ)進むというわけです。

媒質の振動と波長の関係をさらに掘り下げます。速さ c [m/s] で進む、周波数 f [Hz]、波長 λ [m] の連続する波がサーフくんに届いたとします。ここから1秒間に起きるできごとを想像してみましょう。

周波数が f なのですから、サーフくんは1秒間に f 回振動します。サーフくんが f 回振動すると、 f 個の波のカタマリを越えたことになりますから、 f 個の波がサーフくんの後ろにいきます。つまり、波は $f \times \lambda$ だけ進んだということです。これは1秒間のできごとなので、波は1秒間に $f \times \lambda$ [m] だけ進むということです。

1秒間に進む距離、というのは波の速さ、音波の場合には音速 c [m/s] のことですから、

$$c = f \times \lambda$$

という関係が成立するのです。この関係式は、暗記していつでも使えるようにしましょう。

■ 縦波の横波表示

これから勉強していく音波は縦波です。縦波(疎密波)は、「波の進行方向」と「媒質の振動」の2つが同方向で、様子がわかりにくいため、「波の進行方向」と「媒質の振動」を分けて横波のように表示しています(図8)。

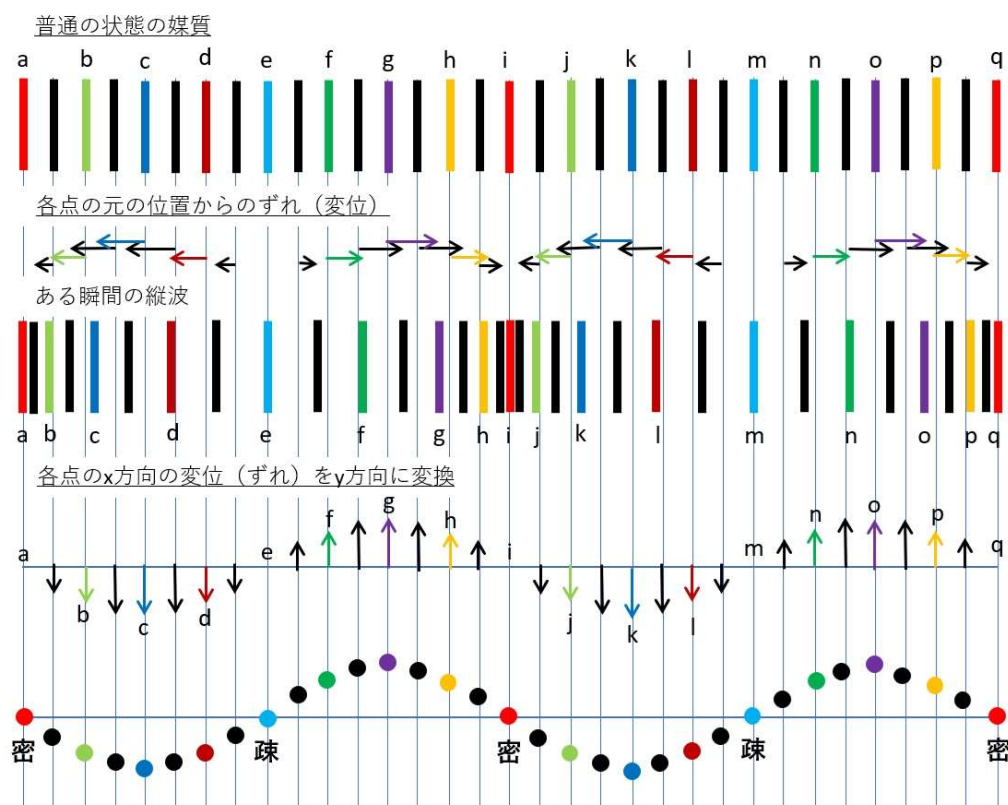


図8：縦波の横波表示

縦波のx方向への変位を、横波のy方向への変位に変換する。

縦波を横波表示で表す際には、縦波の x 方向への変位を、横波の y 方向への変位に変換して表します。

■ 「連続波」と「パルス波」

一定の振幅、一定の周波数で継続する正弦波などの波を「連続波」といいます。

定常状態から振幅が急激に変化して再び元の状態に戻る形をパルスといい、その波形の波を「パルス波」といいます。

また、連続した正弦波の 1 部分を数波以上切り取って発生させる比較的短時間継続する信号を「バースト波」といいます。

連続波とパルス波には大きな違いがあります。特に、連続波ドプラ法とパルスドプラ法の違いについては、後ほどしっかり勉強しましょう。バースト波は、パルス波の一種だと理解してもらって差し支えありません。



パルス反射法

登山やハイキングなどで、遠くの高い山や谷に向かって、大きな声で「ヤッホー！」と叫んだ経験はありませんか？ この自分の叫んだ声が返ってくることを、「やまびこ」といいます。「やまびこ」は、空气中を1秒間に約340[m]進み、音波の反射によって聞こえるのです。

正面にある大きな岩に向かって、自分の叫んだ声が2秒後に「やまびこ」として返ってきたとしたら、自分の叫んだ声が岩に到達するまでに1秒、岩で反射してから自分の耳に「やまびこ」が到達するまでに1秒かかったことになり、音波が1秒で進む距離、340[m]が大きな岩までの距離となります。

超音波診断装置の原理を理解するために、魚群探知機をイメージしてみましょう。

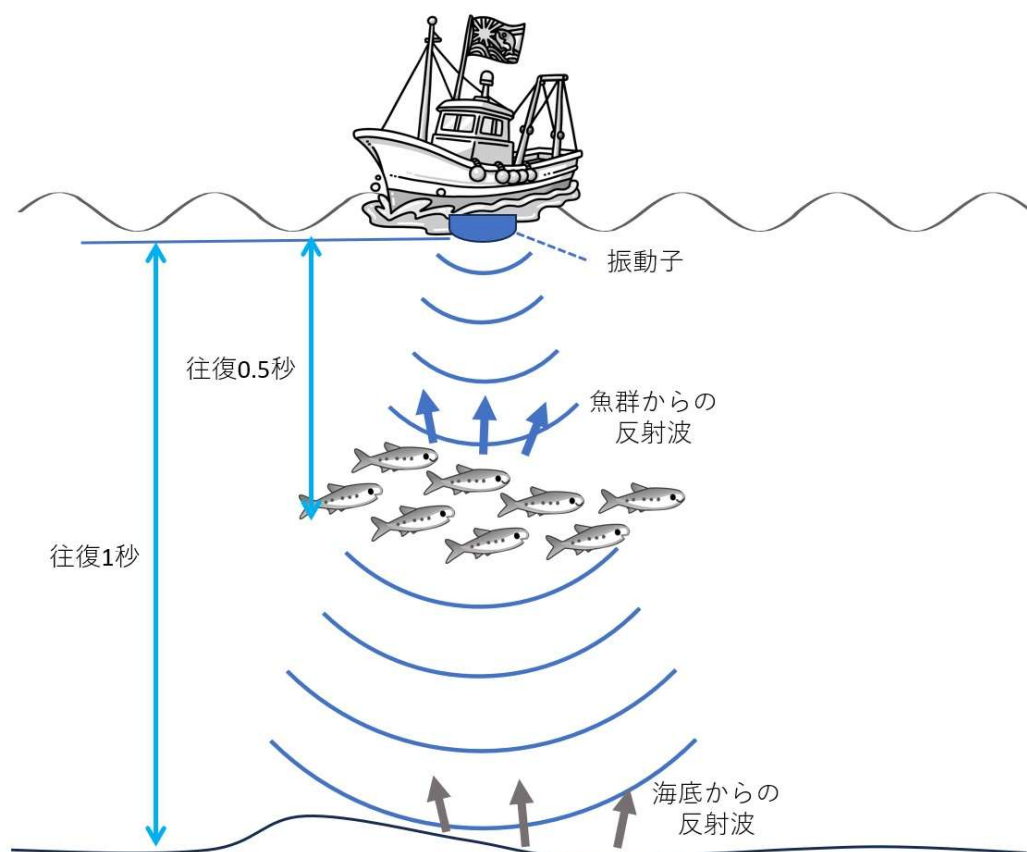


図9：魚群探知機の原理

反射波を受信するのにかかった時間と音速から魚の群れまでの距離がわかる。

■ 魚群探知機の原理

魚群探知機（魚探機）の基本的なしくみは、まず船底に設置した振動子から特定の周波数の時間幅（持続時間）の短いパルス状の音波を船の真下に向けて送信します（図9）。振動子から送信された音波は、水中の魚群や海底で反射され、再び振動子で受信されます。魚探機は、この音波の送信から受信までの往復時間を距離に換算して、深度として表示します。この方式は、「パルス反射法」と呼ばれています。

音波は水中では 1 秒間に 1,500 [m]の速さで進みます。反射波が振動子に戻ってくるまでの時間は、浅い場所では早く、深い場所では遅くなります。例えば、真下に向けて音波を送信し、戻ってくるまでの時間が 1 秒かかったとすると、海底へ届くまでに 0.5 秒、海底から戻ってくるのに 0.5 秒かかったことになり、音波が 0.5 秒で進む距離、750 [m]が水深となります。

船の真下に魚の群れを捉えた場合には、海底からの反射波を受信する前に、魚群からの反射波を受信します。例えば、音波を送信してから 0.5 秒後に魚群からの反射波を受信したとすると、魚群までの音波の往復時間が 0.5 秒ですので、音波が 0.25 秒で進む距離、船の真下から 375 [m]の深さに魚の群れがいることがわかります。

また反射波の強弱により、魚群の大きさや密度、あるいは海底の形状や底質を画像に表示します。

魚探機の原理をまとめると、

- ① 船底からパルス状の音波を海底に向かって送信する
- ② その音波が魚に当たると、海底に当たるよりも早く反射して戻ってくる
- ③ 反射波を受信するのにかかった時間と音速から魚の群れまでの距離がわかり、受信波の強弱でどのくらい魚がいるかを判断する

一方、超音波診断装置は、

- ① 体表からパルス状の音波を生体内に向けて送信する
 - ② その音波が生体内にある臓器や病変に当たると、反射して戻ってくる
 - ③ 反射波を受信するのにかかった時間と音速から臓器や病変までの距離がわかり、受信波の強弱で病気を診断する
- ということになります。

超音波診断装置は、魚群探知機と同じ「パルス反射法」を基本原理としているということです。

■ PRT と PRF

魚群探知機で水中の魚の群れを探索する場合も、超音波診断装置で生体内の臓器や病変を観察する場合も、パルス状の音波の送信と、その反射波の受信とを、一定の時間間隔で繰り返します（図 1 0）。このパルス間隔、すなわちパルス波の始まりから次のパルス波の始まりまでの時間 [s]を PRT（pulse repetition time；パルス繰り返し周期）といいます。

PRT の逆数は、繰り返し送信されるパルス波の毎秒当たりの数 [Hz]に相当し、PRF（pulse repetition frequency；パルス繰り返し周波数）といいます。



図 1 0：パルス繰返し周期（PRT）

パルス波の始まりから次のパルス波の始まりまでの時間がPRT、その逆数がPRFになる。

パルス波の送信時間の間隔は、超音波診断装置でモニタに表示したい生体内の最深部（通常は”Depth”で設定する）まで超音波が往復するのにかかる時間を考慮して、その時間以上の間隔をとらなければなりません。

視野深度を D [m]、音速を c [m/s] とすると、PRT [s]、PRF [Hz] は以下の式で規定されます。

$$PRT = \frac{2D}{c}$$

$$PRF = \frac{1}{PRT} = \frac{c}{2D}$$



パルス幅と距離分解能

超音波ビーム方向に並んだ2点の反射源からの反射エコーを2つと識別可能な最小距離を「距離分解能」といいます（図11）。距離分解能を決めるのは「パルス幅」です。

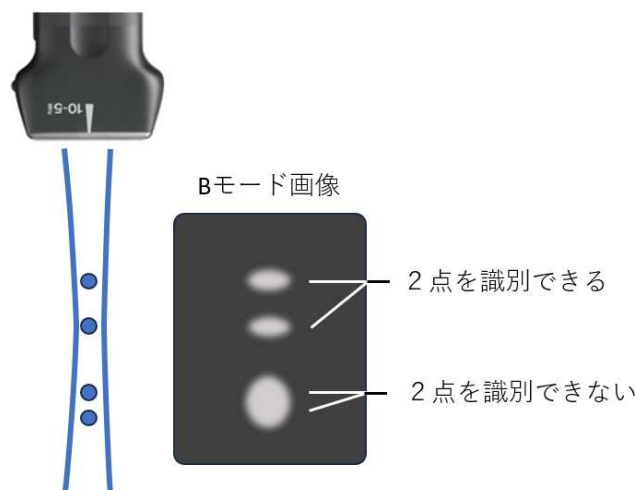


図11：距離分解能の概念

距離分解能：超音波ビーム方向に並んだ2点の反射源からの反射エコーを2つと識別可能な最小距離。

■ 波の干渉

波と波が衝突すると、それぞれの波の高さ（振幅）を足し合わせた高さ（振幅）の波になります。3つ以上の波がぶつかる場合も同じです。これを「重ね合わせの原理」と呼びます。波の重ね合わせの原理に従って、2つの波が強め合ったり弱め合ったりする現象を「干渉」といいます。

観測する点に届いた2つの波が、「山と山」、「谷と谷」のように同じ状態（同位相）だと強めあい、「山と谷」のように逆の状態（逆位相）だと弱めあいます。

音源となる振動子から発射された有限の幅を持つ音波が、進行方向に直線状に並んでいる2つの反射体でそれぞれ反射して、振動子に戻ってくる音波について考えてみましょう（図12）。

ここでは、山と谷が4回繰り返す音波について考えます。

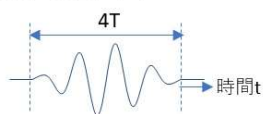
この音波の波形を、①時間－変位グラフで表すと、音波は4周期（4T）に相当する時間だけ発射されることになります。②位置－変位グラフで表すと、音波が持続する長さは4波長（4λ）になります。

音波の周期 T、周波数 f、波長 λ の間には、以下の関係式が成り立つことを思い出してください。

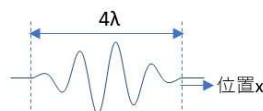
$$\lambda = \frac{c}{f} = cT$$

振動子から発射される音波の波形

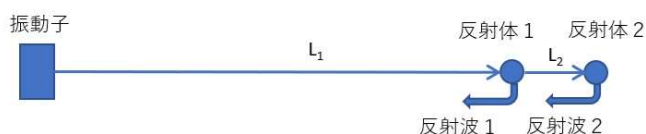
①時間-変位グラフ



②位置-変位グラフ

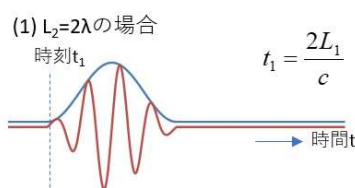


$$\lambda = \frac{c}{f} = cT$$

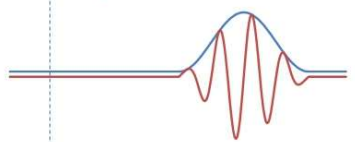


振動子で受信される音波の波形（時間-変位グラフ）

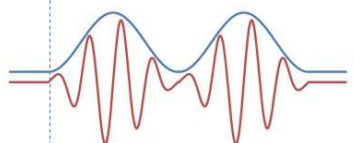
①反射体1から戻ってくる音波



②反射体2から戻ってくる音波



③振動子で実際に受信される音波



④Bモード画像

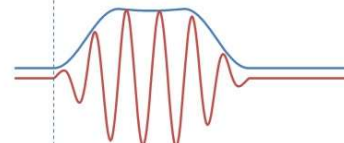
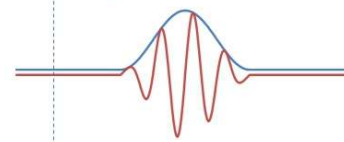
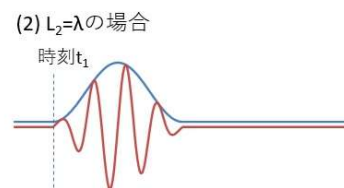


図12：音波の干渉の例

音源となる振動子から発射された音波が2つの反射体で反射して振動子に戻ってくる場合。

反射体1は振動子からの距離 L_1 のところに位置していて、反射体2はそこから少しだけ離れたところ (L_2) に位置しています。振動子から発射された音波は、まずは反射体1に到達して、音波の一部が反射してもと来た経路を逆方向に進んで振動子に戻っていきます。

残りの音波は反射体1を通過して反射体2へと進んでいき、反射体2に到達した音波の一部が反射して、やはりもと来た経路を逆方向に振動子に戻っていきます。

ここで反射体1と反射体2の距離 L_2 について、2つのケースを考えてみましょう。(1)は、 $L_2 = 2\lambda$ の場合です。振動子で受信される音波の時間-変位グラフを見てみましょう。音波を発射し始めた時刻を起点 ($t=0$) にして、反射体1で反射した音波が振動子に戻り始める時刻 t_1 は、

$$t_1 = \frac{2L_1}{c}$$

で計算できます。

音波が反射体1までを往復してきますので、総伝搬距離は L_1 の2倍の $2L_1$ になります。この距離を音速 c で割り算して t_1 が求まります。

反射体 1 から戻ってきた音波は、ここから時間にして $4T$ の期間続きます。これを表しているのが(1)－①です。

一方、 $L_2=2\lambda$ ということは、反射体 1 を通過した音波は、時間にして $2T$ 後に反射体 2 に到達します。そこで反射した音波は、 $L_2=2\lambda$ の距離を戻ってくると反射体 1 までたどり着きます。これに要する時間は、やはり $2T$ です。

その後は、反射体 1 で反射した音波と同じ経路をたどって振動子に到達します。

つまり、反射体 2 で反射した音波が振動子に到達し始める時刻は、 $L_2=2\lambda$ の距離を往復するのにかかる時間 $4T$ だけ、 t_1 から遅れることになります。反射体 2 から戻ってきた音波は、ここから時間にして $4T$ の期間続きます。これを表しているのが(1)－②です。

(1)－①と、(1)－②を比べてみると、反射体 1 からの反射波が時間にして $4T$ の期間続いた直後に、反射体 2 からの反射波が始まって、やはり $4T$ の期間続いています。

振動子で実際に受信される音波は、この 2 つの音波が独立しているのではなくて、波の「重ね合わせの原理」に従って、①と②を足し合わせた、③になります。

超音波診断装置では、受信信号の山のとっぺんを線でつないでいった包絡線を検出して、この包絡線の振幅をモニタの輝度に変換して B モード画像を作っています（のちに詳しく解説します）。

③の包絡線を見ると、この例では、反射体 1 から反射して戻ってきた音波の包絡線の山と、反射体 2 から包絡線の山とが、2 つ分離していることがわかります。これを B モードにすると、白い輝点が 2 つ分離して表示されますので、検査する人は反射体が 2 つあることを認識できるわけです。

次に、(2) は、 $L_2=\lambda$ の場合です。

(1) に比べて、2 つの反射体の間の距離 L_2 が半分に近づきました。反射体 1 から戻ってきた音波は(2)－①ですが、これは(1)－①と同じですね。

一方、 $L_2=\lambda$ ということは、反射体 1 を通過した音波は、時間にして T 後に反射体 2 に到達します。そこで反射した音波は、 $L_2=\lambda$ の距離を戻ってくると反射体 1 までたどり着きます。これに要する時間は、やはり T です。その後は、反射体 1 で反射した音波と同じ経路をたどって振動子に到達します。

つまり、反射体 2 で反射した音波が振動子に到達し始める時刻は、 $L_2=\lambda$ の距離を往復するのにかかる時間 $2T$ だけ、 t_1 から遅れることになります。反射体 2 から戻ってきた音波は、ここから時間にして $4T$ の期間続きます。これを表しているのが(2)－②です。

(2)－①と、(2)－②を比べてみると、反射体 1 からの反射波が時間にして $4T$ の期間続いている途中から、この場合は $2T$ 経ったところから、反射体 2 からの反射波が始まって、やはり $4T$ の期間続いています。振動子で実際に受信される音波は、この 2 つの音波が独立しているのではなくて、波の「重ね合わせの原理」に従って、①と②を足し合わせた、③になります。

この 2 つの反射波の干渉によってできた波形の山のとっぺんを線でつないでいった包絡線を見て下さい。包絡線の山は 1 つしかありませんよね。これを B モード画像 (④) にすると、白い輝点が間延びしたものが 1 つしか表示されませんので、検査する人は反射体が 2 つあることを認識することができません。

このように、2 つの反射体が近接して存在する場合には、それぞれの反射体で反射して振動子に戻ってくる音波は干渉しあって、B モード画像にした場合に、検査する人が 2 つの反射体が存在することを認識できる場合と認識できない場合が出てきます。これは、超音波画像の「距離分解能」の考え方にほかなりません。

■ 距離分解能

超音波プローブから「パルス波」を入射して、体内で反射して戻ってきた受信信号の持続時間を「パルス幅」といいます。受信波形の継続周期（波の数、波数）を n 周期（ n 波）として、周波数を f [Hz] とすると、パルス幅は $\frac{n}{f}$ [s] で表されます。

超音波ビームの方向に沿って 2 つの反射体が隣接して存在すると仮定します。手前の反射体 1 で反射して戻ってきた音波は、その先にある反射体 2 からの反射音波よりも早い時刻に超音波プローブで受信されます。その後、反射体 1 からの反射音波の受信は、時間にして $\frac{n}{f}$ [s] 続きます。

一方、反射体 1 を通過（透過）した音波が、時間にして $\frac{n}{f}$ [s] の期間に進む距離 [m] は、音速を c [m/s] として、

$$\frac{nc}{f} = n\lambda$$

となります。

ここで、反射体 2 がこの距離の 1/2、すなわち、 $\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ [m] の距離だけ反射体 1 の後方に位置していると仮定します。

このとき、反射体 1 を通過（透過）した音波が反射体 2 で反射して、反射体 1 まで戻ってくるのにかかる時間は、 $\frac{nc}{f} = n\lambda$ [m] の距離を音波が伝搬するのにかかる時間ですから、 $\frac{n}{f}$ [s] ということになります。

超音波プローブで受信する音波を時系列でみていくと、まず、反射体 1 からの反射音波が時間にして $\frac{n}{f}$ [s] 続いた直後に、反射体 2 からの反射音波の受信が始まって、やはり時間にして $\frac{n}{f}$ [s] 続きますということになります。

このときの、反射体 1 と 2 との距離 $\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ [m] が、超音波プローブで受信する音波で、反射体 1 からの反射波と反射体 2 からの反射波を分離できる限界の距離となり、これが「距離分解能」となります。

反射体 1 と 2 との距離がこれ以上短くなる（接近する）と、超音波プローブでは、反射体 1 からの反射音波の受信が継続している途中から反射体 2 からの反射音波がかぶさってきてしまって、B モード画

像で反射体 1 と 2 を識別することが困難になります。

受信波形の波数（継続周期） n が 4 の場合を例に、反射体 1 と 2 との距離を近づけていった場合に、超音波プローブで受信される波形がどのように変化していくか見てみましょう（図 1 3）

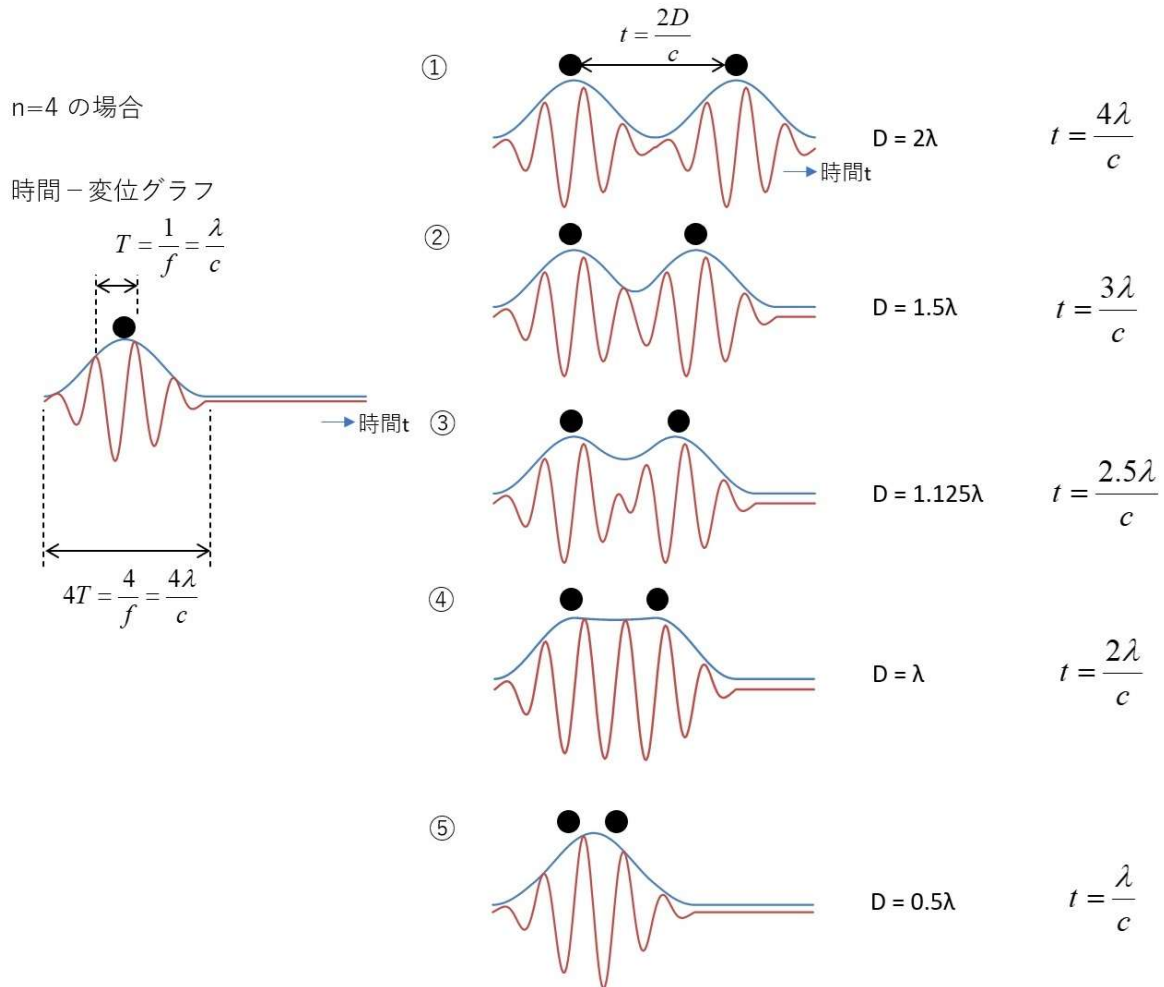


図 1 3：反射体 1 と 2 との距離を変えたときの超音波プローブで受信される波形の変化
これは「時間－変位グラフ」で、「位置－変位グラフ」と混同しないように注意。

ここで示した受信波形のグラフは、「時間－変位グラフ」です。「位置－変位グラフ」と混同しないように注意しましょう。

$\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ に、 $n=4$ を代入すると、距離分解能は 2λ ということになります。

①は、反射体 1 と 2 の距離 D が 2λ のときの受信波の「時間－変位グラフ」です。

超音波診断装置では、受信信号の山のでっぺんを線でつないでいった「包絡線」を検出して、この包絡線の振幅をモニタの輝度に変換して B モード画像を作っています。この条件では、反射体 1 からの反射波と反射体 2 からの反射波が重なることはなく、包絡線の山は完全に 2 つに分離しています。

②から⑤にかけて、反射体 2 の位置を少しずつ反射体 1 に近づけていきます。

D はその距離 [m]、t は距離 D を音波が往復するのにかかる時間 [s] です。D を距離分解能である 2λ よりも近づけていく ($D < 2\lambda$) と、波の「重ね合わせの原理」に従って合成された受信波形の包絡線から 2 つの山があること（反射体が 2 つあること）を識別することは困難になることがわかりいただけるでしょう。

$\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ で定義される距離分解能 Δx が、具体的にどれほどの値になるのか、図 1 4 で確認してみてください。

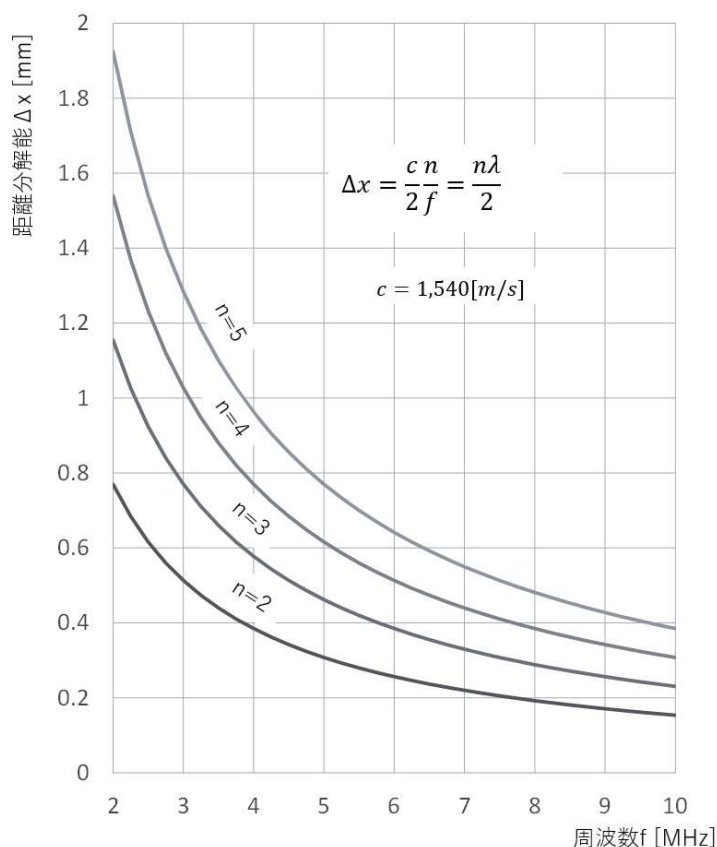


図 1 4：距離分解能 Δx [mm] と周波数 f [MHz]、波数 n との関係

①周波数 f を上げる、②波数 n を減らすと、距離分解能 Δx が短くなる。

距離分解能を上げる ($\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ [m] を短くする) には、パルス幅 $\frac{n}{f}$ [s] を短くすればよく、①周波数 f を上げる（高くする）か、②波数（継続周期） n を減らせばよいということになります。

■ 周波数を上げる

多くの超音波診断装置では、B モード画像を表示するときの送信周波数を変えることができます。図 1 5 はその一例で、THI モードで送信周波数を 2.0 [MHz]（左）、2.6 [MHz]（右）に切り換えたときの比較画像です。

微妙な差ではありますが、送信周波数を上げた右側（2.6 [MHz]）の画像のほうが肝臓の実質がより緻密に描出されていて、左側（2.0 [MHz]）の画像よりも距離分解能がよいことがわかります。

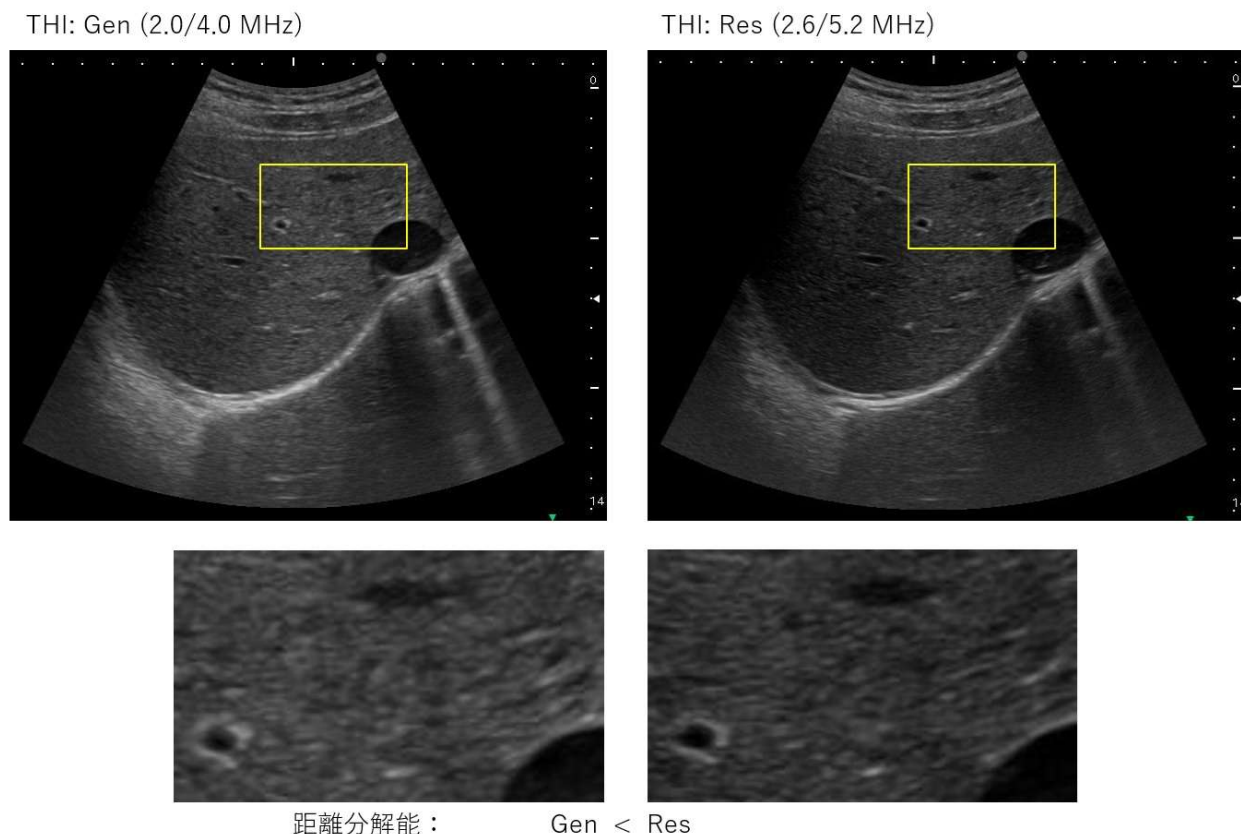


図 1 5：送信周波数と距離分解能

2.6 [MHz]送信の画像（右）のほうが2.0 [MHz]送信の画像（左）よりも距離分解能がよい。

■ 波数を減らす

超音波プローブには、無理なく送信、受信することができる音波の周波数に上限値と下限値があります。この上限と下限の周波数の差を「周波数帯域」または「帯域幅」といいます。この周波数帯域は、超音波プローブを設計して製造する過程で決まってしまう。出来上がってしまったものを後から変えることはできません。

「波数を減らす」ということは、超音波プローブの「周波数帯域を広げる」とことと同義です。この関係を理解するには、「フーリエ変換」について知る必要があります。

「フーリエ変換」と呼ばれる数学的手法を用いると、任意の時間信号波形を、周波数の異なる数多くの正弦波の重ね合わせとして表すことができます。各周波数に対する正弦波成分の大きさの分布を「周波数スペクトル」と呼びます。時間信号とスペクトルは、1つの信号の表裏の関係をなしていて、場合に依って見やすい（理解しやすい）領域で信号処理理論が展開されています。

細かい説明は省略しますが、図 1 6 に注目してください。①周波数 f_c の連続波（正弦波）をフーリエ変換して周波数スペクトルで表すと、 f_c のところにだけ、1本のスペクトルが立ちます。②一方、バースト波と呼ばれる、連続した正弦波（周波数 f_c ）の1部分を数波以上切り取って発生させた時間信号波形をフーリエ変換すると、 f_c を中心に帯域幅を持つスペクトルになります。ポイントは、波数が多いほど帯域幅は狭く、「波数が少ないほど帯域幅が広くなる」ということです。

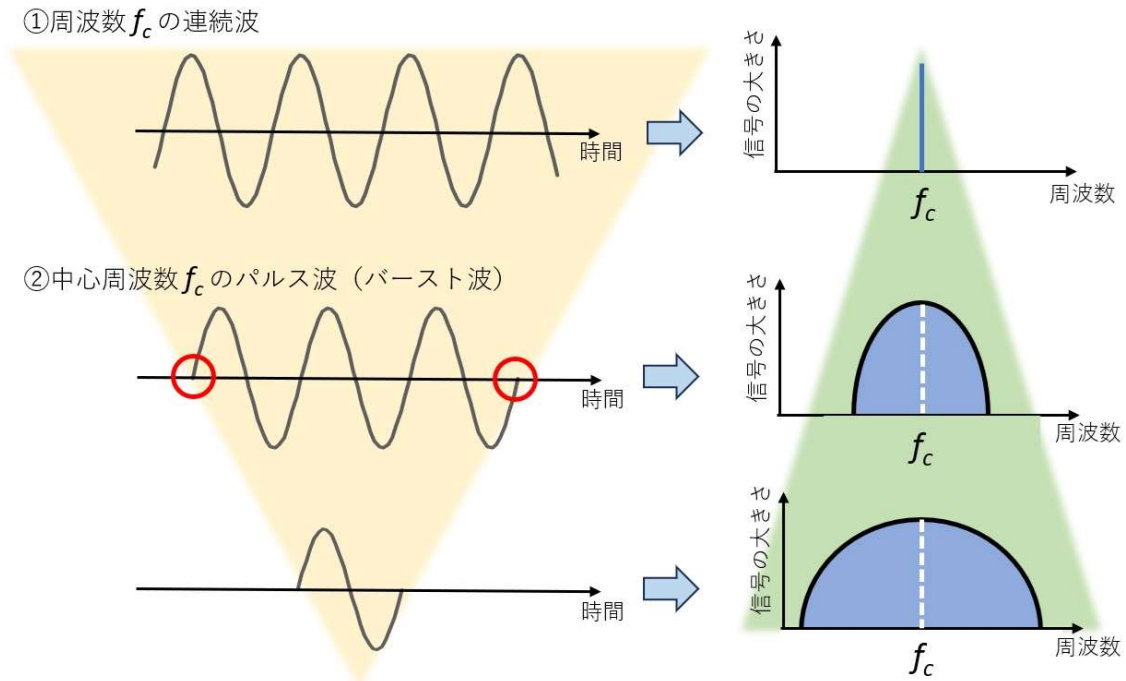


図 16：波の時間信号波形と周波数スペクトルの関係

波形が存在する時間幅と周波数スペクトルの帯域幅は「反比例」する。

超音波プローブの性能を評価するとき、パルスエコー特性を測定します（詳細は割愛します）。このとき、エコーの時間信号波形を周波数スペクトルに変換して、最大応答の $1/\sqrt{2}$ （スペクトルのピークの -3dB ）になる低域側周波数 f_L [Hz]、高域側周波数 f_H [Hz] を測定します。

ここから、

$$\text{中心周波数 } f_c \text{ [Hz] は、 } f_c = \frac{f_H + f_L}{2}$$

$$\text{帯域幅 } \Delta f \text{ [Hz] は、 } \Delta f = f_H - f_L$$

$$\text{比帯域 FBW [\%] は、 } FBW = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100$$

で定義されます。

超音波メーカー各社は、できるだけ広い周波数帯域のプローブを実現しようと、技術開発にしのぎを削っています。その大きな目的の一つが、プローブで送受信されるパルス波（バースト波）の波数を減らして、距離分解能を上げるためなのです。



単位について

物理量を示す単位 (unit) は、基本的に人間が決めるものですが、国によって異なった単位を使ったりすると、比べるときに不便です。例えば、アメリカでは重さを表す単位はポンド (pound / lb)、身長を表す単位はフィート (feet / ft) とインチ (inch / in)、長距離を表すにはマイル (mile)、短い距離だとヤード (yard) など、日本ではあまり使わない単位を使用します。

SI 単位系 (フランス語で「国際単位系」の意味) は、現在国際的に使用されている単位系で、科学技術の進展とともに進化してきた、合理的かつ実用的な単位系です。これは、7つの基本単位を起点とする単位系に体系化されています。医用超音波の基礎を理解するにあたって、絶対に押さえておくべき SI 単位系は、「基本単位」として、

長さ (距離) : メートル (m)

時間 : 秒 (s)

質量 : キログラム (kg)

基本単位を掛けたり割ったりしてつくられる単位は「組立単位」と呼ばれ、

周波数 (振動数) : ヘルツ (Hz) $-1/s$

圧力 (音圧) : パスカル (Pa) $-kg/m/s^2$

■ 倍数を表す記号と名称

k (キロ)、M (メガ)、G (ギガ)、m (ミリ)、 μ (マイクロ)、n (ナノ) など、大きな量あるいは小さな量を端的に記述するために、10 のべき乗を表し、SI 単位とともに用いられるものを SI 接頭語と呼びます。代表的なものを表 1 にまとめて示しておきます。

表 1 : 倍数を表すおもな記号

倍数	名称	記号
10億倍 (10^9)	ギガ	G
100万倍 (10^6)	メガ	M
1000倍 (10^3)	キロ	k
100倍 (10^2)	ヘクト	h
10倍 (10)	デカ	da
10分の1 (10^{-1})	デシ	d
100分の1 (10^{-2})	センチ	c
1000分の1 (10^{-3})	ミリ	m
100万分の1 (10^{-6})	マイクロ	μ
10億分の1 (10^{-9})	ナノ	n

■ デシベル

デシベルは、電圧や電力、音の大きさ（音圧）などの物理量のレベル（相対値）を表す単位です。聞いたことはあるがよくわかっていないという人は意外に多いようです。

超音波診断装置ではデシベル[dB]という単位が頻繁に使われています。ここでデシベルに対する理解を深めておきましょう。

デシベルの表現は、基準レベルを 0 [dB]（ゼロデシベル）とし、その基準値に対してどれほど大きい、または小さいかを表現したものです。デシベルは、電気系において電力伝送減衰の度合い（すなわち比率）を表すのに最初に用いられました。電話の発明者グラハム・ベルにちなんで名づけられた単位である[B]（ベル）の 10 倍と定義したのでデシ・ベル（記号は[dB]）です。

電圧を扱う場合と、電力を扱う場合とで計算式が違って、電圧を扱う場合のデシベル L は、2 点間 (V_1 、 V_2) の電圧比の常用対数の 20 倍と定義されます。

$$L = 20 \log \frac{V_2}{V_1}$$

音の大きさも「デシベル、dB」という単位で表現されることがあります。上式で、電圧の比を音圧の比に替えて計算します。

皆さんが日ごろよく耳にするデシベルは、騒音の大きさを表現するときですよね。人間の耳は極めて性能の良い音の「検出器」で、聞こえる範囲の音波による空気の圧力変動（音圧）は、 $10^{-5} \sim 10^1$ Pa 位と、たいへん幅が広がっています。音の大きさに対する感覚は、音圧にも音の強さにも比例しておらず、その対数に比例しているように感じることをわかっています。

このため、日常生活での音の大きさは、「デシベル、dB」で表現されています（表 2）。基準となる、聞こえる最小の音圧（数 m 離れたところを飛ぶ蚊からの音圧くらい）は、 20×10^{-6} Pa に相当します。

表 2：日常生活での音の大きさとデシベル[dB]の関係（概要）

デシベル [dB]	0 [dB]	20 [dB]	40 [dB]	60 [dB]	80 [dB]
感じる音の目安	基準レベル	きわめて静か	静か	普通	うるさい
音の具体例	人間の聴力限界	小さな寝息	図書館内	普通の会話	電車内

基準値の比率と[dB]の関係を表 3 にまとめました。20 [dB]ごとに 10 倍大きさが変わります。こう見るとわかりやすいですが、[dB]とは基準値比の桁数を表しています。[dB]を 20 で割った値が、基準値比である 10 倍や 100 倍などの 0 の数になっています。

基準値に対して小さくなる場合には、[dB]は－（マイナス）で表現され、－20 [dB]ごとに 1/10 倍に大きさが変わる（小さくなる）ことになります。プラスのときと同様に[dB]を 20 で割った値が 0 の数になっています。

表 3：基準値の比率と[dB]の関係

基準値比（倍率）	1 倍	10 倍	100 倍	1000 倍	10000 倍
デシベル [dB]	0 [dB]	20 [dB]	40 [dB]	60 [dB]	80 [dB]

基準値比（倍率）	1 倍	0.1 倍	0.01 倍	0.001 倍	0.0001 倍
デシベル [dB]	0 [dB]	-20 [dB]	-40 [dB]	-60 [dB]	-80 [dB]

ここで、生体内における超音波の減衰について、考察してみます。

10 [MHz]の超音波が生体内を 2 [cm]伝搬する毎に音圧振幅が 1/10、すなわち 0.1 倍になると仮定します。

このとき、体表 0 [cm]で入射した音波の振幅を 1 とすると、

深さ 2 [cm]で、0.1

深さ 4 [cm]で、 $0.1 \times 0.1 = 0.01$

深さ 6 [cm]で、 $0.1 \times 0.1 \times 0.1 = 0.001$

と減衰を計算することができますが、伝搬距離が 2 [cm]増す毎に数値の桁数が 1 桁増えていって数字の扱いが大変になります。

これをデシベルで表現すると、0.1 倍は -20 [dB]になります。

しかも、伝搬距離が増していったときの減衰の計算は、掛け算が足し算になって、

深さ 2 [cm]で、-20 [dB]

深さ 4 [cm]で、 $(-20) + (-20) = -40$ [dB]

深さ 6 [cm]で、 $(-20) + (-20) + (-20) = -60$ [dB]

と表現され、桁数が大きく変わることがなく、扱いやすい数字になります。

このように一見すると意味が理解しがたいデシベルですが、便利な計算と表現のために生み出された便利なツールであることがわかります。

10 [MHz]の超音波が生体内を 2 [cm]伝搬する毎に音圧振幅が 20 [dB]減衰しますね。これは、すなわち減衰係数が 1.0 [dB/cm/MHz]であるということですね。減衰係数については、後ほどしっかり勉強していただきます。



限界を知ることが次の一手につながる

この超音波画像をどう解釈したらいいのか。

この画像から、この計測値から診断を確定していいのだろうか。

超音波画像の「限界」を知ると、超音波検査のクオリティを高めることにつながります。

限界を決めるのは、「超音波画像の分解能」と「計測の精度」といえます。分解能と精度を混同しないようにしましょう。

超音波画像の分解能、計測の精度が何で決まるのかを正しく理解していれば、検査を進めていく上での「次の一手」を迷わずに打つことができます。

■ モニタの「解像度」

画像を表示するモニタ（液晶ディスプレイ）の画面は、超微細なドット（画素）が整然と敷き詰められていて、各ドットがそれぞれ発色することによって、画像を描画する方式（ドットマトリクス方式）が用いられています。画面内にいくつドットが敷き詰められているかを「横×縦」のドット数で数値として示したものを「解像度」と呼んでいます。1920×1080 ドットの解像度は通称「フル HD」と呼ばれ、約4000×2000 ドットの解像度は「4K」と呼ばれています。

一般には表示装置の解像度が高ければ高いほど、より精細で美しい画像が表示できることになります。それでは、モニタの解像度を上げれば上げただけ、Bモード画像はより精細になり、より小さな病変まで検出することができるのでしょうか？

超音波診断装置にも SXGA（1280×1024）やフル HD（1920×1080）仕様のモニタが標準的に使われるようになった昨今では、この疑問の答えは、「ノー」です。

■ 超音波画像の「分解能」

超音波画像（Bモード画像）の「分解能」は、「接近した対象（空間、輝度、時間）を分離して表示し得る能力」と定義され、以下の4つの「分解能」があります。

- ① 距離分解能： 超音波ビーム方向の分解能
- ② 方位分解能： 超音波ビームと直交する平面上の分解能
- ③ コントラスト分解能： エコー強度の差を画像上で識別する性能
- ④ 時間分解能： 時間的に変化するものを観測する場合に、どれだけ短い時間差まで識別できるかを表す性能

この章では、距離分解能について解説しましたが、その他の分解能についても、本書で詳しく解説しています。

距離分解能はパルス幅、 $\frac{n}{f}$ で規定され、 $\Delta x = \frac{n\lambda}{2}$ で定義される距離分解能 Δx が、具体的にどれほどの値になるのか、図 1 4 に示しました。この図でおわかりのように、中心周波数が 10 [MHz] の高周波プローブを使っても、距離分解能は、0.2 [mm] 程度です。

一方、装置のモニタに、SXGA (1280×1024) やフル HD (1920×1080) が使用されている場合、超音波画像の表示に使われるドット数 (ピクセル、px) は、深さ方向に 800 px 程度になっています。モニタで画像を構成しているドット (画素) の 1 辺の長さを「画素分解能」(単位は、mm/px) といいます。

深度 (Depth) 4.0 [cm] を 800 px で表示した場合に、画素分解能は、40/800 = 0.05 [mm/px] になります。これは、超音波画像の距離分解能 0.2 [mm] に比べて、4 倍高い分解能を持っているということになります。

この画素分解能は、超音波画像の距離分解能に比べたらオーバースペックだ、とっていいのでしょうか？ この疑問の答えは、「ノー」です。

■ 超音波計測の「精度」

この画素分解能は、超音波画像に対する「計測の精度」に関わっています。頸動脈の内中膜厚 (IMT) 計測を例に解説します。

体表超音波装置による総頸動脈内中膜厚 (intima-media thickness、IMT) は、代表的な早期動脈硬化臨床指標として確立されています。30 から 70 歳代の健常者の総頸動脈 IMT カットオフ値 [mm] はおよそ $0.1 \times (10 \text{ 歳ごとの年齢}) + 0.2$ です。このカットオフ値を担保するには、IMT 計測において 0.1 [mm] 単位の精度が求められています。

超音波画像の距離分解能が 0.2 [mm] 程度なのに、0.1 [mm] 単位の計測精度が得られるのでしょうか？

頸動脈の超音波像 (図 1 7) は層構造を示しますが、内膜と中膜、外膜と周囲組織との分離は超音波検査では困難で、内膜と中膜を合わせた厚みは病理組織像と一致すると報告されています。そのため頸動脈の壁厚を評価する際は「内膜と中膜の複合体の厚み」が用いられています。

頸動脈の超音波画像で、内膜側 (血管内腔側) の高エコー層、およびその外層の高エコー層には、それぞれ上縁 (leading edge: LE) と下縁 (trailing edge: TE) が表示されます。IMT は 頸動脈長軸像における内膜側 (血管内腔側) の高エコー層 (LE) とその外層の高エコー層 (LE) の間の距離と定義されています。

遠位壁 (far wall) では内腔と内膜との境界が高エコー層の上縁 (LE) に、中膜と外膜との境界が外側の高エコー層の上縁 (LE) に一致します。一方、近位壁 (near wall) では、内膜と内腔との境界が高エコー層の上縁 (LE) に一致しますが、外側の高エコー層の上縁は不明瞭で、中膜と外膜との境界を同定す

ることができません。したがって、遠位壁（far wall）においてのみ「組織学的構造に一致した IMT」計測が可能となります。

ただし、近位壁（near wall）でのプラーク評価（max IMT 計測）などのときには、内膜と血管内腔とで生じた高エコー層の下縁（TE）と、外膜と中膜間で生じた高エコー層の下縁（TE）間（図 17：△部位）との計測で代用することが可能とされています。

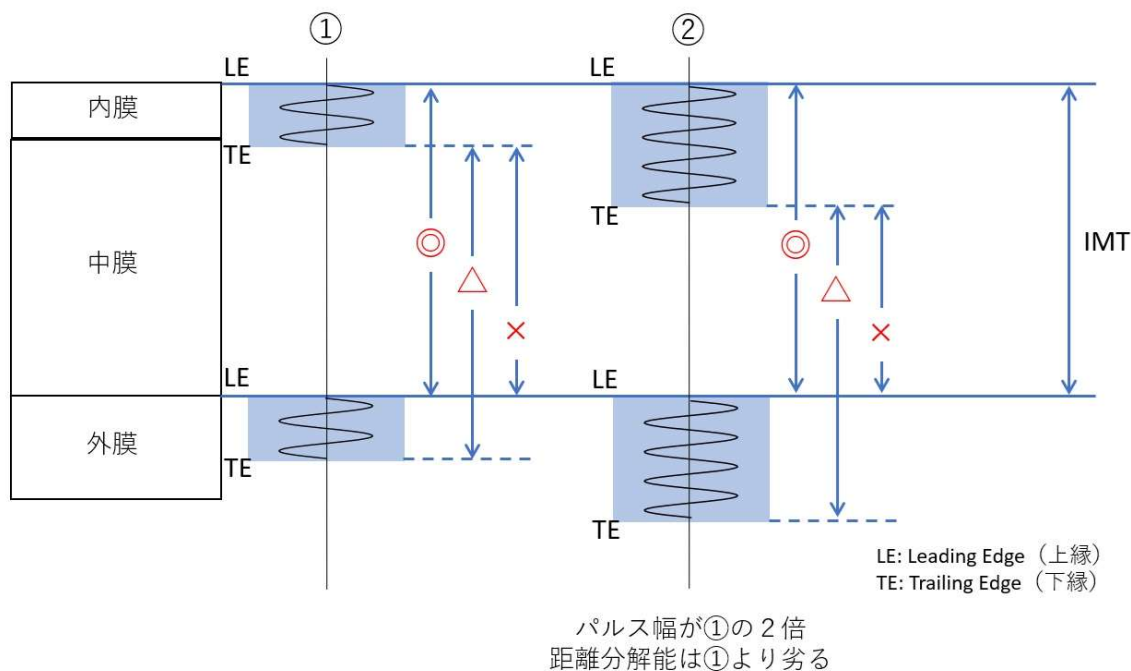


図 17：IMT計測の定義とパルス幅の影響

内膜側（血管内腔側）の高エコー層（LE）とその外層の高エコー層（LE）の間の距離（◎印）を計測する。

図 17 には、この IMT をパルス幅の異なる 2 種類の送受信条件で得られたそれぞれの画像で IMT を計測する場合を比較しています。②は、①に比べてパルス幅を 2 倍にしています。パルス幅が伸びたことで、血管内腔と内膜との境界線、および中膜と外膜との境界線のエコー像（LE-TE 間）が肥厚して表示されることとなります。これが、距離分解能の劣化につながります。

しかし、IMT の定義に従って内膜側（血管内腔側）の上縁（LE）から外層の上縁（LE）までの距離を正しく計測してやれば、①と②は同じ結果が得られることとなります。

上縁（LE）の表示位置はパルス幅の影響を受けませんが、下縁（TE）の表示位置はパルス幅に依存します。この場合でも、内膜側（血管内腔側）の下縁（TE）から外層の下縁（TE）までの距離を計測してやれば、①と②は同じ結果が得られることとなりますが、TE から TE までの計測は、あくまでも「代用」扱いになっています。

IMT 計測において、境界線の上縁（LE）と下縁（TE）の意味を正しく理解した上で、正しい場所を計測すれば、計測の精度は距離分解能に依存しないことがわかりですね。

それでは、0.1 [mm] 単位の計測精度を得るために重要なことは何か？ これが、モニタの「画素分解

能」になります。深度 (Depth) 4.0 [cm] を 800 px で表示した場合に、画素分解能は、0.05 [mm/px] になります。これであれば、0.1 [mm] 単位の計測精度を得ることができます。ただし、計測精度に影響を与えるのは、これだけではありませんが。

石津らは、生体に近い信号となる IMT ファントムを作成して、国内市販超音波診断装置全 8 社のエコー画像を取得して、IMT 計測の装置間差を検証し、装置間最大差は 0.08 [mm] であったと報告しています。この実験では、深度を 3.0 [cm] に固定して画像を取得し、画素分解能の装置間平均は、0.052 [mm/px] でした。

参考文献：

- 1) 日本超音波医学会／日本脳神経超音波学会「超音波による頸動脈病変の標準的評価法 2017」
- 2) 石津智子, ほか. 頸動脈内中膜厚計測の装置間差：新しい内中膜厚ファントムを用いた精度検証. Jpn J Med Ultrasonics 2021; 48 : 81-90