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？？



アーチファクト (2)



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

-



目次

第４章 アーチファクト …… 3

6. 外側陰影とレンズ効果 …… 3
7. 音速の差によるアーチファクト …… 9
8. 残留エコー …… 10
9. リアルタイム超音波ガイド下穿刺のピットフォール …… 12

コラム：キラキラ輝くアーチファクトの正体は？ …… 16

外側陰影とレンズ効果

「外側陰影（がいそくいんえい）」について、日本超音波医学会の医用超音波用語集では、「腫瘤などの側面より後方に延びる音響陰影」と説明しています。これは、超音波の屈折と全反射により生じるアーチファクトです。

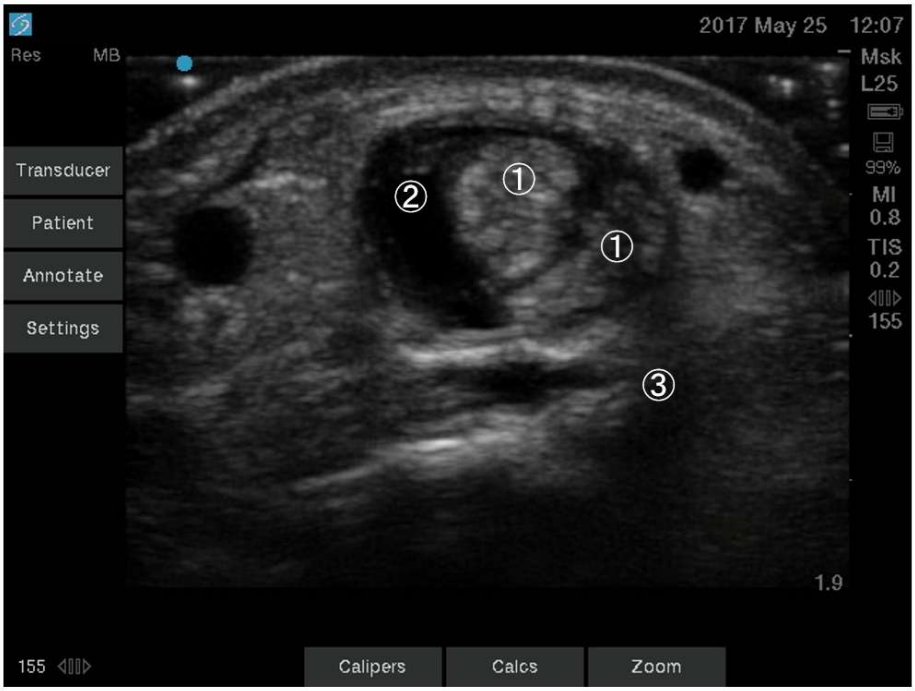


図１９：腱鞘炎（ドケルバン病）の超音波画像
① 腱、②腱鞘と滑液、③ 外側陰影。腱鞘の右側面から画面の下に向かって帯状に延びている外側陰影が観察される。

最近ではパソコンやスマートフォンの長時間の使用により手首の腱鞘炎に悩まされている人が増加していると聞きます。図１９は、手首の親指側に生じる腱鞘炎（ドケルバン病）の超音波画像です。

腱は筋肉が収縮して生み出した力を骨に伝えて関節を動かします。腱は手首で密集しているため、隣の腱や近くの骨と擦れないように腱鞘（けんしょう）と呼ばれるトンネルの中を通っています。腱鞘の中には滑液（かつえき）と呼ばれる液体が含まれています。正常な腱と腱鞘をエコーで観察すると腱は楕円形で腱鞘内の滑液はほとんど見られません。

腱鞘炎では腱が腫れて楕円形から円形に変わります。また腱鞘に炎症が起こり、滑液が溜まることで腱（①）の周囲が黒く映ります。

図１９の画像で著明に黒く抜けている部分が２か所あることにお気づきでしょうか？

１か所は、腱鞘に炎症が起こり、滑液が溜まっている部分（②）。エコーでは液体は黒く映ります。もう１か所は、腱鞘の右側面から画面の下に向かって帯状に延びている無エコーの部分（エコーフリースペース、③）です。これは、外側陰影（ラテラルシャドウ）とよばれるアーチファクトで超音波の屈折と全反射により生じる音響陰影です。

■ 外側陰影を出現させる実験

外側陰影を実験で出現させてみましょう（図２０）。

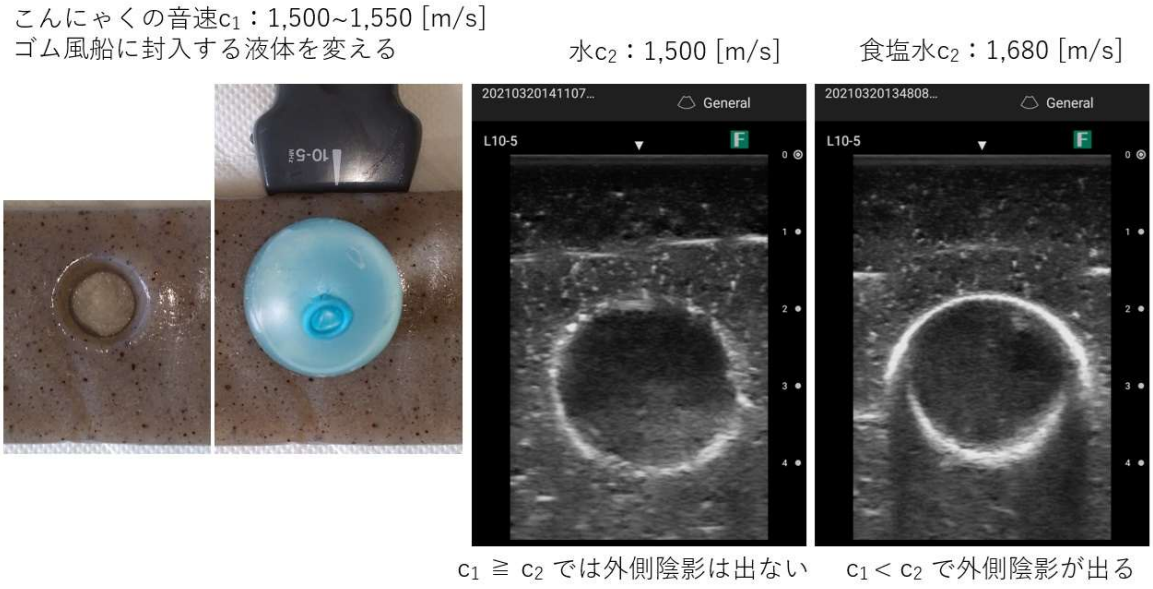


図２０：外側陰影を出現させる実験

こんにゃくに直径約 20 [mm]の穴をあけて、水を封入したゴム風船を穴に挿入します。こんにゃくの片辺にリニアプローブを当てて超音波画像を描出すると、皆さんが予想した通りの画像、まん丸いのう胞様（内部が低輝度エコー）の画像が描出されます。次に、ゴム風船に封入する液体を食塩水に変えます。この食塩水は、飽和水溶液状態（水に溶ける食塩の量を最大にした状態）にします。食塩水を入れたゴム風船で、同じように超音波画像を描出してみると、あら不思議！！

今度は、こんにゃくに開けた穴の両側面から後方に延びる音響陰影、外側陰影が出現しました。

外側陰影は、音速が異なる 2 つの媒質の境界面で超音波が屈折することによって生じるアーチファクトです。

この実験で使用したそれぞれの素材（媒質）の音速は実測していません。

複数の文献を参考にして音速を大まかに推定しました。

こんにゃく：　1,500~1,550 [m/s]

ゴム風船に封入した水（20 [℃]）：　1,500 [m/s]

ゴム風船に封入した食塩水（飽和水溶液、20 [℃]）：　1,680 [m/s]

こんにゃく（音速：c_1）を進んできた超音波が液体（音速：c_2）を封入したゴム風船に到達すると、スネルの法則に従って超音波が屈折してその先へと進んでいきます。このとき、$c_1 < c_2$ のときに限って外側陰影（ラテラルシャドウ）が出現する場合があります。$c_1 \geqq c_2$ の場合には何も起きません。

こんにゃくの音速 c_1 と水の音速 c_2 には、$c_1 \geqq c_2$ の関係があるため、まん丸いのう胞様の画像が描出されました。

水に食塩を溶かしていくと音速 c_2 は上昇していきます。飽和水溶液の状態では 1,680 [m/s]（推定）まで上昇し、著明に $c_1 < c_2$ の関係が成り立ち、期待通りの外側陰影が出現しました。

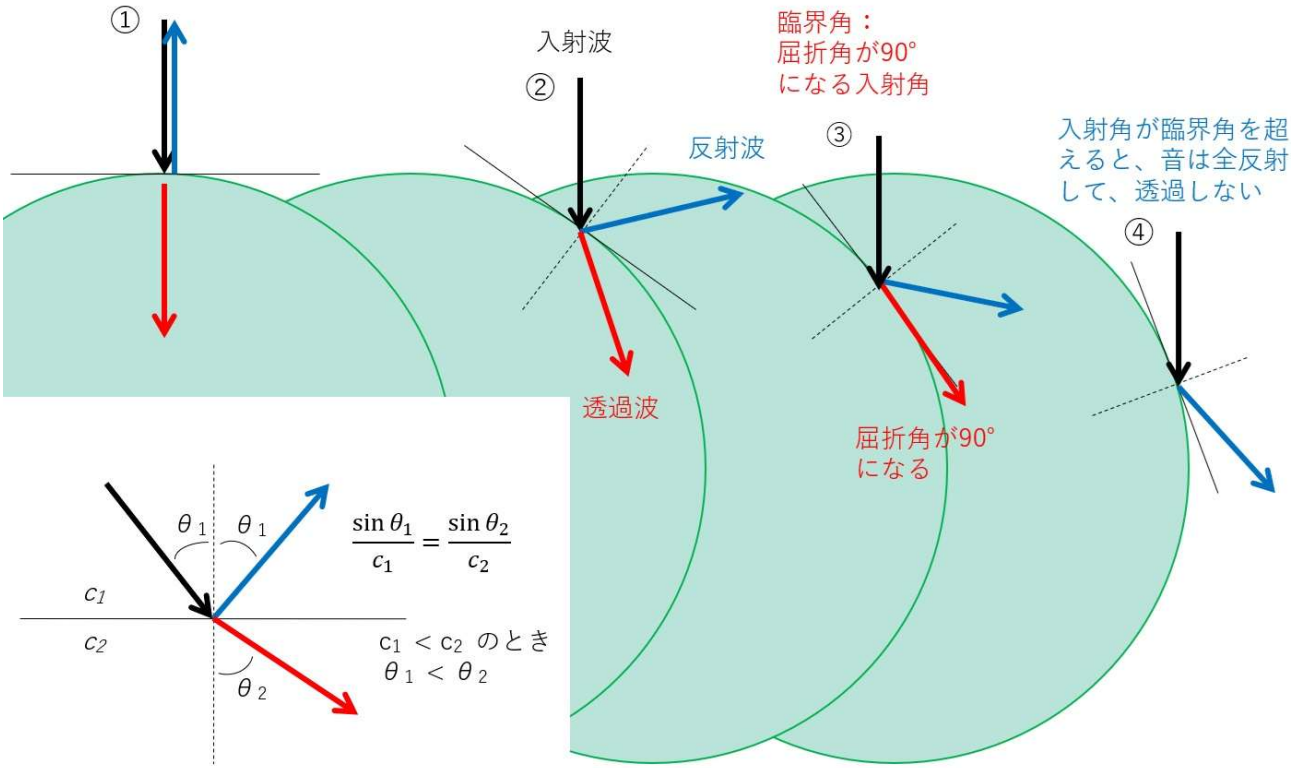


図２１：外側陰影が出現するメカニズム

次に、図２１（第２章の図４と同じ）を用いて外側陰影が出現するメカニズムを説明します。

$c_1 < c_2$のとき、入射角 θ_1 < 屈折角 θ_2になることがポイントです。

① 超音波が境界面に垂直に入射する場合には、反射波、透過波、どちらも入射波と同一の直線上を互いに逆方向に進むことになります（$\theta_1 = \theta_2 = 0$）。

② 超音波が境界面に斜めに入射した場合には、超音波の入射角 θ_1 と同じ角度で線対称の方向に反射波が進んでいき、透過波は θ_2の角度で屈折して先に進みます。このとき $\theta_1 < \theta_2$の関係になります（$c_1 < c_2$のため）。

③ 入射角 θ_1を大きくしていくと、あるところで屈折角 θ_2が 90 度になります。この状態は、媒質 2 に超音波が透過しなくなる限界で、透過波は境界面をすべるように境界面の接線方向に進んでいきます。屈折角 θ_2が 90 度になるときの入射角 θ_1を、「臨界角」と呼びます。

④ 入射角 θ_1が臨界角を超えると、超音波は境界面で全反射して、その先へと進んでいく（透過していく）超音波はゼロになります。つまり、それより後方に超音波ビームが到達しないために無エコーになります。これが B モード画像の上で外側陰影とよばれるアーチファクトになります。

$c_1 \geqq c_2$の場合には、$\theta_1 \geqq \theta_2$となり、θ_2が 90 度になることはなく、超音波が境界面で全反射する状態にはならないので外側陰影は出現しません。

また、$c_1 < c_2$であっても境界面が平滑で球体（円筒形）に近い物体（病変）でないと著明な外側陰影は出現しません。この実験では、ゴム風船が境界面を平滑にする役割を果たしています。

それでは、ここでもう一度臨床画像（図１９）を振り返ってみましょう。

腱鞘は円筒に近い形状をしていて境界面は平滑です。外側陰影が出やすい一つの条件はクリアしています。しかし、陰影が観察されるのは腱鞘の短軸の右側の側面のみで、左側の側面には陰影が観測されません。右側は腱鞘に腱が接触しています。この腱の音速が腱鞘の周囲の組織の音速より速いために外側陰影が出現します。一方、左側は腱鞘の内部にあるのは滑液で、滑液の音速は、腱鞘の周囲の組織の音速と同等か、組織の音速より遅いために外側陰影は出現しません。

■　乳房のクーパー靭帯後方の低エコー域

乳房超音波検査において、クーパー靭帯後方に低エコー域がしばしば観察されます。このクーパー靭帯による陰影は、不明瞭で狭いことが多いが、著しく低エコーで、悪性腫瘍を模倣するほど広いこともある、とされています。そして、クーパー靭帯が原因である場合、陰影は超音波プローブへの軽い圧力の増加や角度のわずかな変化で消失することが多い。ともいわれています。

クーパー靭帯後方に見られる低エコー域の発生原因の一つとして、クーパー靭帯での音波の屈折角がちょうど 90 度になって、音波がクーパー靭帯をなぞるように進むことによって生じる音響陰影の可能性があるのではないか、と私は考えています。

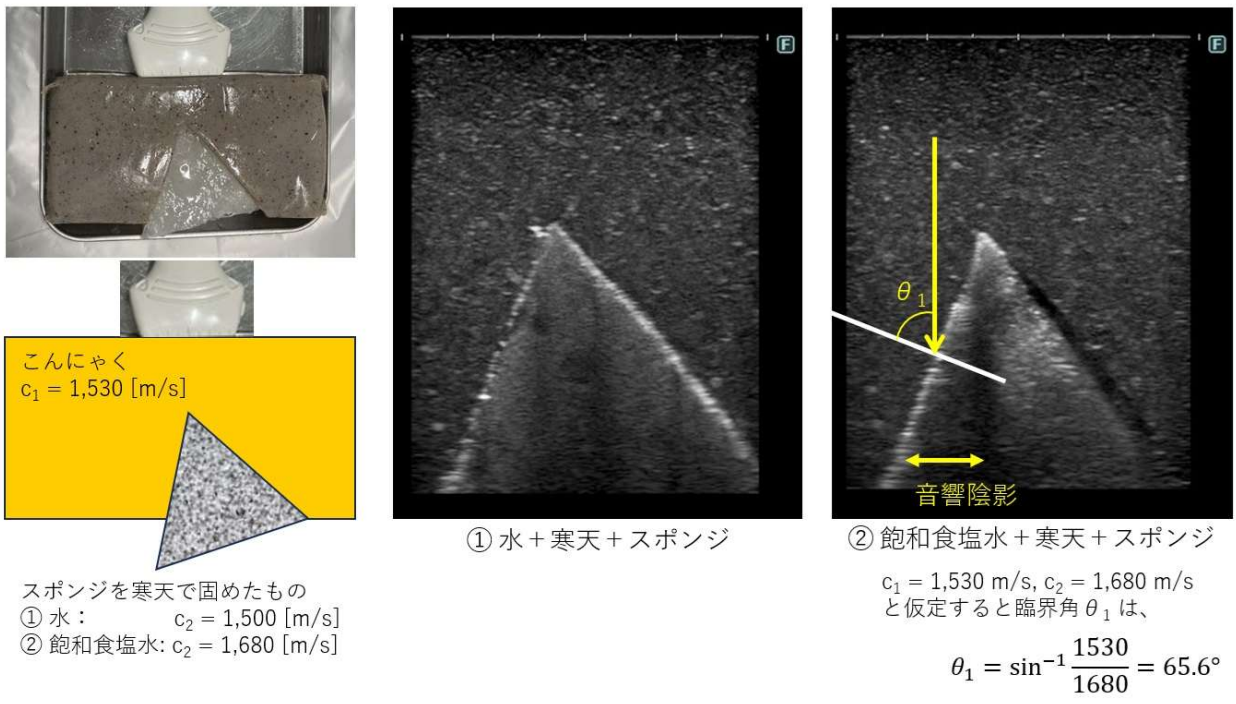


図２２：クーパー靭帯を模擬した境界の後方に陰影を出現させる実験

屈折角が 90 度になったときに音響陰影が出現するという仮説を検証する実験をしました（図２２）。

こんにゃくの一部を三角形に切り取って、そこに脱気スポンジを寒天で固めたものをはめ込みます。このとき、寒天を水で溶解させた場合と、飽和水溶液状態の食塩水で溶解させた場合とで比較しました。プローブ直下の三角形の 2 辺の境界は、クーパー靭帯を模擬していて、左側の境界面が右側に比べて、より超音波ビームと平行に近づくように、つまり入射角が 90° に近づくように、プローブの当て方を調整しました。

この実験で使用したそれぞれの素材（媒質）の音速は実測していません。音速の推定値は図２０で示し

た実験と同様ですが、ここでは、

こんにゃく：　1,530 [m/s]

水で溶解して固めた寒天：　1,500 m/s

飽和水溶液状態にした食塩水で固めた寒天：　1,680 m/s

とします。

結果の画像をご覧ください。右側の画像のように、飽和食塩水で溶解させたスポンジ入り寒天の音速 $c_2 = 1{,}680$ [m/s] が、こんにゃくの音速 $c_1 = 1{,}530$ m/s よりも速い場合で、超音波の入射角が臨界角に達した、三角形の 2 辺の左側の境界面の後方に陰影（低エコー域）が出現することを確認できました。

このときの臨界角 θ_1 は、c_1, c_2 の値が正しいと仮定すると、65.6° となります。

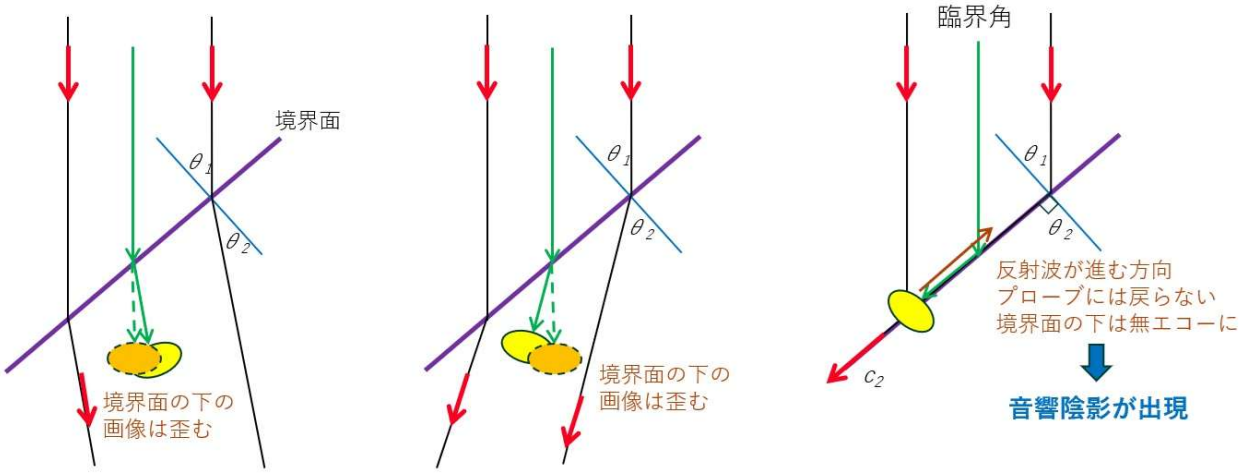


図２３：音波の「屈折」による画像の歪と音響陰影

図２３は、3 つのケースで、境界面で音波の進行方向が曲げられたときに、その先にある物体で反射して戻ってきた音波によって、境界面の後方の B モード画像がどうなるかを概念的に説明する図です。

左と中央のケースでは、境界面で屈折した音波による反射波は、来た道をたどってプローブに戻っていきます。装置は、想定している方向から戻ってきた反射波だと思って映像化するので、境界面の下の画像は歪んで表示されます。しかし、陰影になることはありません。

右の図は、屈折角が 90 度になった場合で、境界面に到達した音波は、境界面に沿って進んでいきます。その先にある物体で音波は反射しますが、反射波は境界面に沿って逆戻りしていくので、プローブに戻ってくることはありません。このため、境界面の下は無エコーになって、音響陰影が出現する、という理屈です。

以上をまとめますと、クーパー靭帯による音響陰影は、

- 境界面となる靭帯が滑らかで
- 手前の音速よりも後方の音速が速い場合に音波の屈折が起こり
- 入射角が臨界角に達した場合に

起きる可能性を示唆する実験結果を得ました。

クーパー靭帯の手前が脂肪で c_1 ＝ 1,450 m/s 、後方が乳腺で c_2 = 1,540 m/s と仮定すれば、

- 臨界角 θ_1 は、70.3° となる
- プローブの当て方（圧迫度合いや角度）を変えると音響陰影が消失するのは、入射角 θ_1 が臨界角より小さくなるためと考えられる

この実験で得られた事実が、実際の臨床で起きている現象と一致しているのか、検証はしていませんので注意してください。また、クーパー靭帯後方に低エコー域が出現する要因はほかにもあるということを忘れないでください。

■ レンズ効果

超音波の屈折によって出現するアーチファクトには、もう一つ、「レンズ効果」と呼ばれるものがあります。上腹部の正中で横断走査したときに、直下の組織や構造物が二重に見えることがあります。このアーチファクトは断面がくさび型をした 2 列の腹直筋と、間を埋める脂肪組織が、図２４のように配置されていると、腹直筋の音速が脂肪組織より速いために、超音波ビームを左右から正中線の中央方向に屈折させるために生じます。腹直筋と脂肪組織によって音響レンズが構成された形になるため、「レンズ効果」と名付けられました。腹部大動脈の短軸像が二重、三重に表示される例がよく引用されます。

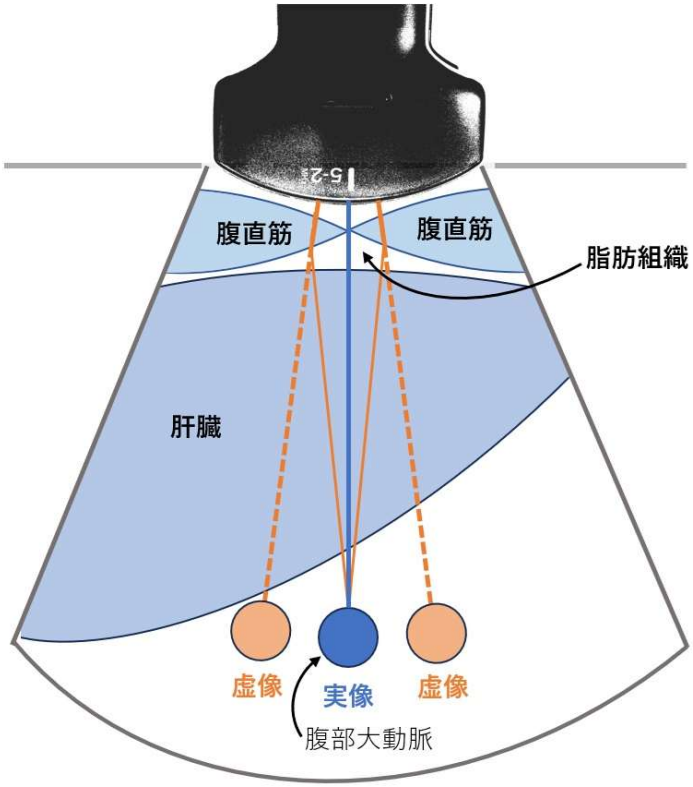


図２４：レンズ効果
腹直筋と脂肪組織によって音響レンズが構成され、超音波ビームが屈折することでアーチファクト（虚像）が出現する。

音速の差によるアーチファクト

一般的な超音波装置は、生体内の組織のすべてにおいて音速は一定である（通常は、1,540 [m/s]）との前提で画像を構築しています。

装置の設計段階で設定した音速（1,540 [m/s]）と、実際の組織との音速の差が大きくなって、その結果画像のひずみが顕著になって診断に影響するようになると、アーチファクトとみなされます（図２５）。

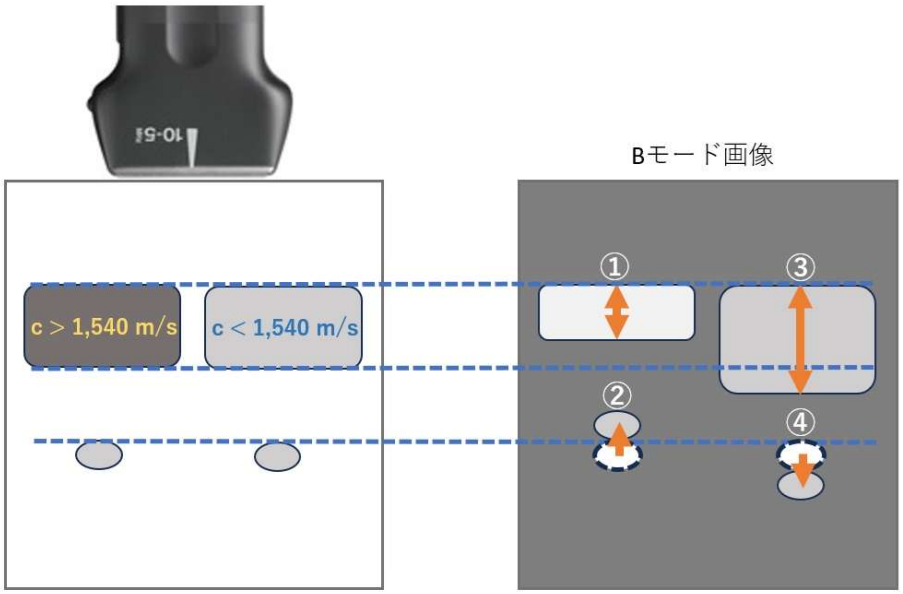


図２５：音速の差によるアーチファクト

図２５の例では、

① 音速が 1,540 [m/s] より速い組織は、実際より短く表示される

② 音速が 1,540 [m/s] より速い組織が浅部に存在すると、それより深部の組織は全体的に浅部方向に変位する

③ 音速が 1,540 [m/s] より遅い組織は、実際より長く表示される

④ 音速が 1,540 [m/s] より遅い組織が浅部に存在すると、それより深部の組織は全体的に深部方向に変位する

音速の差によるひずみは、距離方向にだけ起こります。超音波の走査線の間隔は、音速によって変わることはない（音速に影響されない）ので、方位方向のひずみ（伸び・縮み）が生じることはありません。

残留エコー

パルス反射法では、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。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、PRF（pulse repetition frequency；パルス繰り返し周波数）といいます。

パルス波の送信時間の間隔 PRT 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決められています。このとき、「次のパルスの送信までの時間内にすべての受信が終了する」ことを前提に画像が作られています。実際には、さらに遅れてもっと深いところからの反射波が返ってきていますが、これらは無視できるほど減衰しているため、通常は問題になりません。

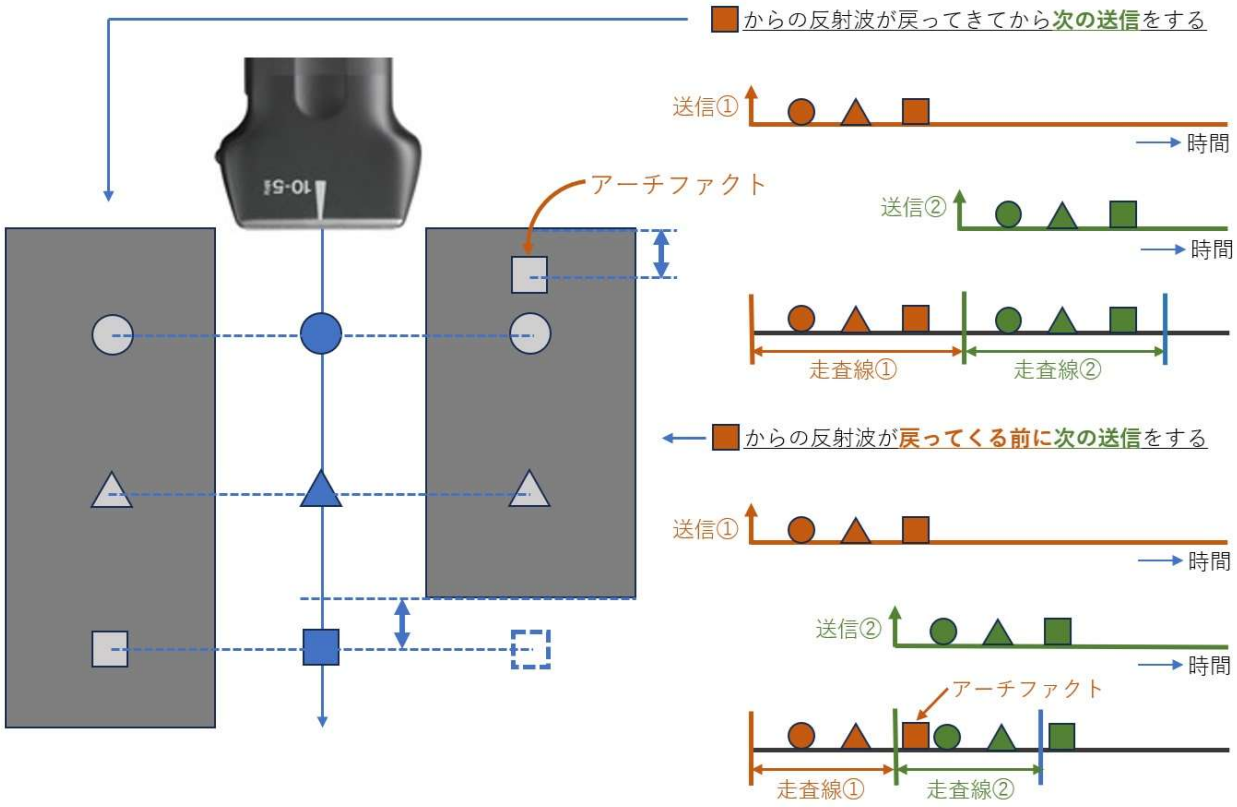


図２６：残留エコーによるアーチファクト

しかし、これは装置設計のポカ（のケースが多い）ですが、フレームレートを重視するあまり、”Depth”を浅くするのに連動させて、PRT をどんどん短くしていくと、”Depth”で設定した深度値より深いところから返ってきた減衰しきれていないエコー信号が、次のパルスの送信をしたあとにプローブに戻ってきて、画像化されてしまうことがあります（図２６）。

これを「残留エコー」と呼んでいます。

この図は、1 回目の送信（送信①）をして、■からの反射波が戻ってくる前に 2 回目の送信（送信②）をしてしまうと、送信①によって生成された■のエコーが、送信②に対応した走査線②の上にアーチファクトとなって表示されてしまうことを示しています。

装置設計のポカではなく、十分に長い PRT であっても、超音波が伝搬していく経路上に減衰がほとんどないのう胞などがあると、PRT で規定される最大表示深度より深いところからのエコー信号が減弱しきれずに残留エコーとして表示されることがあります。

この残留エコーは次の送信のタイミングからプローブに信号が戻ってくるまでの時間が距離に換算されて画像に表示されるため、B モード画像で残留エコーは、実際よりも浅い位置に表示され、アーチファクトになります。

このアーチファクトは、日本では「くも状エコー」と呼ばれてきましたが、英語では range-ambiguity（レンジ・アンビギュイティ）artifact（RAA）と名付けられています。

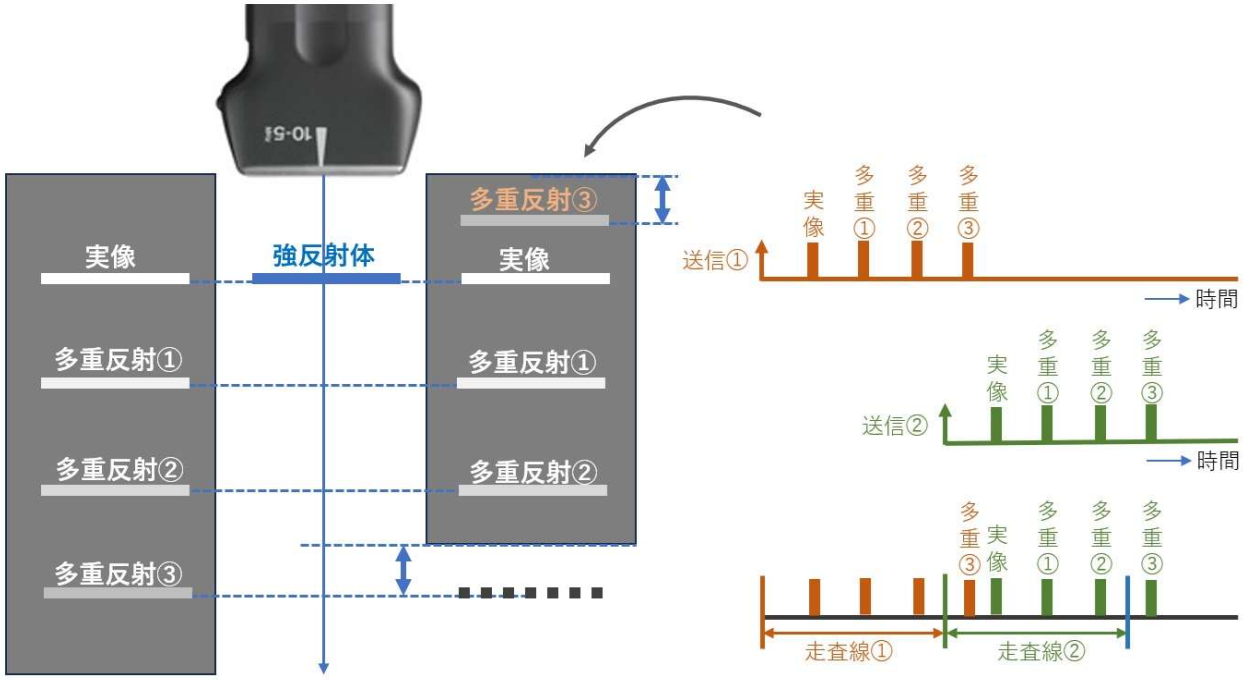


図２７：残留多重反射によるアーチファクト

残留エコーの発生源としては、このほかに、視野内に存在する強い反射体による多重反射である場合があります。多重反射のアーチファクトは、通常は強反射体の後方に生じますが、この場合は前方に生じるので注意しましょう（図２７）。

この図は、強反射体とプローブ表面との間で発生する多重反射を示しています。プローブ表面と反射体を 2 往復して多重反射①、 3 往復して多重反射②、 4 往復して多重反射③がアーチファクトとして表示されます。ここで、1 回目の送信（送信①）をして、プローブ表面と反射体を 4 往復した多重反射③の信号がプローブで受信される前に 2 回目の送信（送信②）をしてしまうと、送信①によって生成された多重反射③のアーチファクトが、送信②に対応した走査線②の上にアーチファクトとなって表示されてしまうことを示しています。

リアルタイム超音波ガイド下穿刺のピットフォール

中心静脈カテーテル挿入は、全身管理を目的に日常的に行われている医療行為ですが、リスクを伴う危険手技でもあります。超音波ガイド法は従来の方法（ランドマーク法）に比べて穿刺成功率が高く合併症の発生が低いとされているため、専門学会等が推奨している手技です。しかしながら、一般社団法人日本医療安全調査機構が、中心静脈穿刺合併症に係る死亡事例 10 例を分析したところ、超音波ガイド法で行った事例が 6 例あった事実を踏まえて、「医療事故の再発防止に向けた提言 第 1 号」を公表しました（2017 年 3 月）。

その提言の一つが、『リアルタイム超音波ガイド下穿刺は、超音波の特性とピットフォール（盲点）を理解した上で使用しなければ誤穿刺となり得る。術者はあらかじめシミュレーショントレーニングを受けることを推奨する。』です。

ここでは、特に超音波ガイド下で穿刺をする際に知っておいて欲しい、超音波の特性とピットフォールについて解説します。

■　スライス厚による「錯覚」

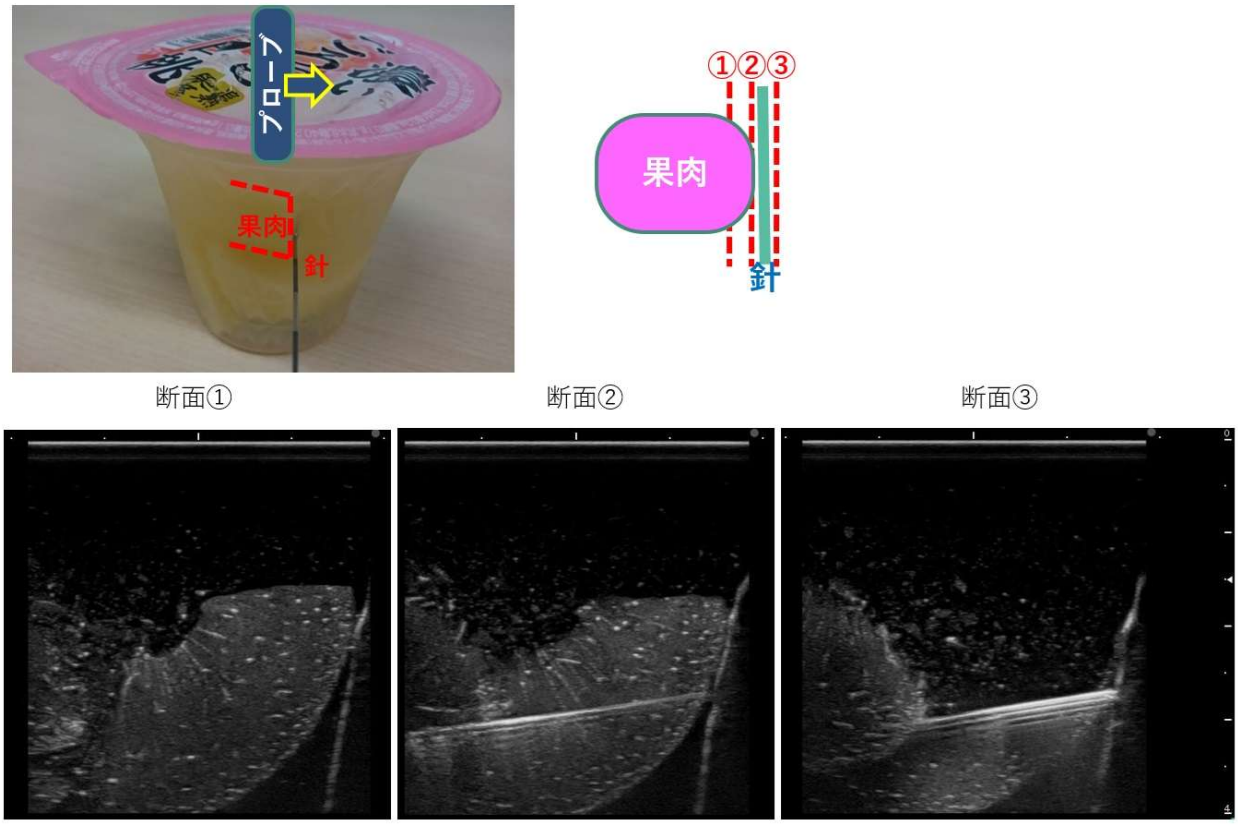


図２８：スライス厚をイメージするための実験
桃の果肉と、果肉の切断面に隣接して挿入した針とを超音波で映像化した。

超音波ビームは走査面の垂直方向（B モード断層像の奥行き方向）に厚みを持っていて、「スライス厚」と呼んでいます。

この「スライス厚」は深さ方向に均一ではなく、音響レンズによる集束効果によって形成される、超音波の走査面（断層面）に垂直な方向の超音波ビームの幅によって規定されます。

このことをイメージしていただくために簡単な実験をしました（図２８）。桃の果肉入りゼリーを使いました。ゼリーに埋まっている桃の果肉の一つを選んで、その果肉の切断面に隣接して、切断面と平行に、果肉を刺さないように針を挿入します。この果肉と針を超音波で観察します。

この図のように、超音波の断面を、①、②、③とずらして超音波画像を取得します。

断面①では果肉が、断面③では針が表示されています。ところが、果肉の切断面と、針が進入している面との間、②の位置に超音波断面を設定すると、果肉と針の両方が表示され、あたかも針が果肉に突き刺さっているように見えます。これが、スライス厚による影響です。

果肉を血管に置き換えて考えてみると、実際には針が血管の外側に位置していても、超音波画像上では、あたかも針が血管内に挿入しているように見えることが起こり得ます。これがスライス厚による「錯覚」です。

高周波リニアプローブのスライス厚は、概ね 2〜3 mm です。コンベックスプローブのスライス厚は、概ね 3〜4 mm です。これは深さによっても異なります。

超音波ガイド下で、安全かつ確実な穿刺を施行する際には、スライス厚にも考慮して超音波画像を読影する必要があります。

■　2 次元断層法ゆえの「錯覚」

超音波ガイド下で血管穿刺をする際には、針の皮膚刺入点から、穿刺を目標とする血管までの間にある構造物の位置関係を 3 次元で把握しなければなりません。しかしながら、超音波の 2 次元断層法では、観察断面から外れた部分は画像として表示されません。

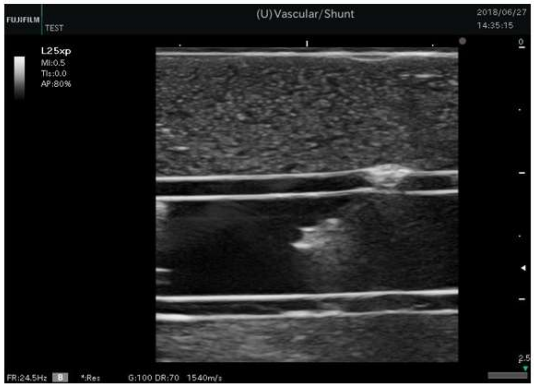
その一方で、スライス厚について解説したように、超音波断層像は奥行き方向に厚みをもっているため、超音波観察面（2 次元断層面）と平行法による穿刺針の面がずれていても、針のシャフトが線でつながって表示されることがあります。この場合には、実際の針の先端は画像上に表示されず、針が超音波観察面から突き抜けていても気づかない、という危険があります。

ファントムを使った実験を紹介します（図２９）。

使用したのは、（株)京都科学製の「超音波下穿刺トレーニングパッド（リアルベッセル)」で、擬似血管の中に、富士フイルム㈱製の経鼻内視鏡スコープを挿入して、血管と針の先端との位置関係を、超音波画像と内視鏡画像とで比較しました。

超音波観察面（断層面）と穿刺針の面が一致している場合

(a)





内視鏡画像

針の先端が血管の中央に位置していることが、超音波画像から確認できる

(b)





内視鏡画像

針の先端が血管の後壁を突き抜けようとしていることが、超音波画像から確認できる

超音波観察面（断層面）と穿刺針の面がずれている場合

(c)





内視鏡画像

針の先端が血管の後壁を突き抜けようとしているのに、超音波画像では針の先端が血管内に止まっているように見える

図２９：血管と針の先端との位置関係を超音波画像と内視鏡画像とで比較した実験

針の先端が血管の中央に位置していることを内視鏡画像で確認しました。

超音波観察面（断層面）と穿刺針の面が一致している場合には、超音波画像でも、確かに針の先端が血管の中央に位置していることが確認できます（図２８-(a)）。

次に、内視鏡で観察しながら針を先に押し進めて、針の先端が血管の後壁に当たって、突き抜ける寸前のところで止めました。超音波観察面（断層面）と穿刺針の面が一致している場合には、針の先端が血管の後壁を突き抜けようとしていることが、超音波画像からも確認できました（図２８-(b)）。

針の先端が血管の後壁に当たっているままの状態で、超音波観察面（断層面）を穿刺針の面からわざと

ずらしてみました。すると、針の先端が血管の後壁を突き抜けようとしているのに、超音波画像では針の先端が血管内に止まっているように見えています(図２８-(c))。これが、3 次元の位置関係にあるものを、2 次元の断層像で評価することによって起き得る「錯覚」（ピットフォール）です。

超音波ガイド下で穿刺をするときに注意するポイントについて解説しました。

① 超音波画像は奥行き方向に厚みを持っているため、実際には針が血管の外側に位置していても、超音波画像上では、あたかも針が血管内に挿入しているように見えることが起こり得ます。

② 超音波観察面（2 次元断層面）と平行法による穿刺針の面とがずれていると、針の先端の位置を見誤る可能性がありますので、十分に注意しましょう。

参考文献

1） 医療事故調査・支援センター事業．医療事故の再発防止に向けた提言．第 1 号 中心静脈穿刺合併症に係る死亡の分析―第 1 報―（2017 年 3 月）

コラム　キラキラ輝くアーチファクトの正体は？

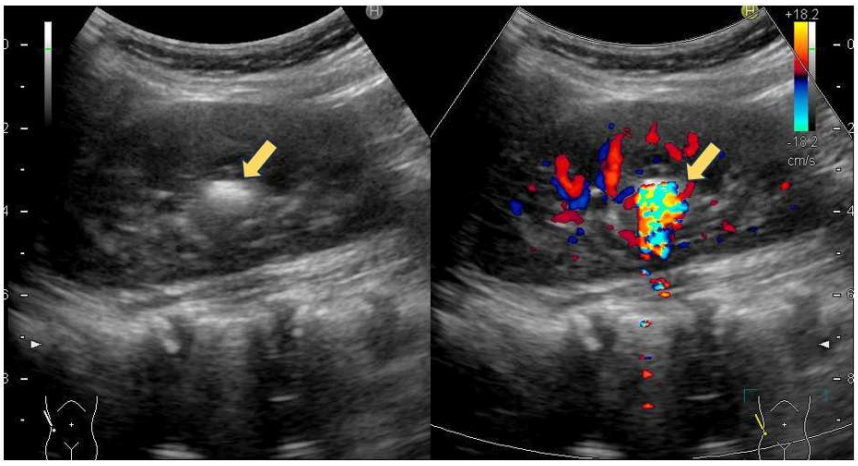


図３０：腎結石のTwinkling Artifact（TA）
文献（１）から引用。

図３０は、腎臓にできた結石の例です。結石は強い反射体ですので、B モード（図３０-左）では高輝度で（白く）表示され、その後方は、音響陰影が観察されます。そこにカラードプラを当てると、とても不思議な現象が観察されます（図３０-右）。結石の後方にモザイク状のカラフルなカラーの帯が表示されます。この現象は、”Twinkling Artifact（TA）”と呼ばれています。Twinkling とは、星がきらめいている、という意味です。

TA はカラードプラ法が臨床の場で普及してきた 1990 年代後半に広く認識されるようになったアーチファクトです。Rahmouni らが、腎結石で最初に報告し、TA を「瞬時に変化する赤青のカラーが混在するアーチファクト」と定義しました（Radiology 1996;199:269-71）。

結石は動いていない（速度ゼロ）のに、どうしてカラードプラで色が付くのでしょうか？　TA の出現機序については、これまで多くの検討がされてきました。代表的なものには、結石に典型的な粗い界面に関連する複数の反射体における超音波ビームのランダムな散乱の結果とする説、装置のドプラ信号検出回路の「位相ジッタ」による狭帯域の内部ノイズとする説、などが提唱されてきました。

このメカニズムはまだはっきりとは解明されていません。少なくとも日本でコンセンサスになっているのが、「結石の表面がギザギザしていて、そこに入射した超音波が四方八方に反射し、その超音波がまた別のギザギザにぶつかって、ということを繰り返すことによって生じたランダムな反射（多重反射）信号を装置がドプラ解析をした結果、“方向もドプラ偏移も定まらない”信号として認識してカラー表示したものが TA である」という説です。

私の中では、「本当かしら？」と疑問を残して有耶無耶にしたままでいました。

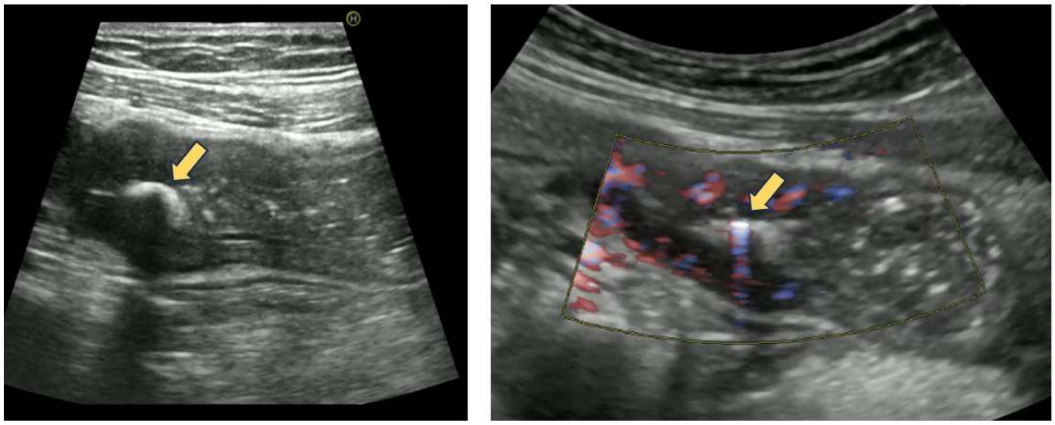


図３１：Twinkling Artifact（TA）を認めたクローン病の潰瘍狭窄病変
文献（１）から引用。

日本超音波医学会第 97 回学術集会（2024 年）で、徳島県立中央病院小児科の小野朱美先生とクローン病の潰瘍狭窄病変で認めた TA（図３１）について、その出現機序を検討し、共同発表する機会を得ました。この研究を通じて、私は改めて TA 出現の機序について検討し直して、これまで日本ではほとんど議論されてこなかった「気泡崩壊説」が本命であろうとの確信を得ました。私がこの結論に至るまでの検討の過程を紹介します。

■　ワシントン大学が発表した「気泡崩壊説」

私は、ワシントン大学の応用物理研究所（ワシントン州シアトル）から発表された 3 編の論文を見つけてレビューしました。彼らは、腎結石表面の間隙にトラップした微小な気泡が音圧によって崩壊することで TA を引き起こすという仮説をたて、インビトロおよびインビボの実験でその仮説が正しいことを証明しました。

ちなみに、ワシントン大学の応用物理研究所は、太平洋戦争の最中の 1943 年にアメリカ海軍が設立しました。その後、ソビエト連邦の崩壊で冷戦時代が終結する 1990 年代初頭まで、海軍がほぼ 100%資金提供をする研究施設でした。ここで研究開発された、潜水艦に搭載するアクティブソナーの技術が、超音波診断装置に応用されました。それ以来、この研究所は、世界で名だたる医用超音波工学の研究施設の一つに数えられています。

ワシントン大学から発表された 3 編の論文を簡単に紹介します。

最初の論文は、2013 年に発表されました。摘出した腎結石を水槽に入れて、TA の出現を確認したのち、静水圧を上昇させると TA が消失し、常圧に戻すと TA が再度出現することを確認しました。このことは、静圧を上昇させると気泡が収縮し、結石の表面の亀裂や裂け目で安定化して、音圧による崩壊が止まり、高静圧が解放されると元に戻る（再び音圧による気泡の崩壊が始まる）、つまり、気泡の重要な役割を示すエビデンスであるとしました。

どうして結石に気泡がトラップしているのか、と不思議に思いますが、この論文を私なりに解釈すると、尿路結石は尿の成分の一部が結晶化したもの、つまり結石の周りには尿（水分）がある。結石の表面

の一部にタンパク質などによって疎水領域（水分、つまり尿をはじいて寄せ付けない領域）ができる。この疎水領域が体内のガスを捕捉し、隙間の気泡を形成する、という理屈です。

この論文では、気泡の存在が直接観察されていないため、この仮説（気泡崩壊説）は、完全には世の中に受け入れられていません。

そこで、次の論文（2018 年）では、これも水槽実験ですが、間隙気泡仮説によって予測されるミクロンまたはサブミクロンサイズの気泡を、結石破砕装置から連続的に照射する音響希薄化パルスにさらすことによって主要組成が異なる 5 種類の腎臓結石で気泡が写真に写る大きさまで膨張させ、その様子を高速度写真と超音波画像によって同時に撮影しました。これにより、TA が出現する部位には、確かに間隙気泡が存在していることを証明しました。

しかし、この論文でも、結石は体外に取り出されて空気にさらされています。結石が患者の体内にある状態で間隙気泡が存在するのか、疑問が残ります。

2020 年に発表された 3 番目の論文では、腎結石を持つ被験者と超音波検査技師を気圧制御できる密閉空間に入れて、空気圧を最大で 4 気圧（ATA）まで上昇させていくと、有意に TA の出現が抑制されることを確認し、安定した微小気泡がヒトの腎結石に存在する可能性を初めて示しました。

私は、これら 3 編の論文をレビューして、TA の出現機序は「気泡崩壊説」が本命であろうとの確信を得ました。

■　TA を出現させる実験



実験サンプル：
ファインセラミックスを材料にした円柱状のもの
①　エアストーン A（Φ 10mm）
②　エアストーン B（Φ 12mm）
③　セラミックシャープナー（Φ 12mm）

①は、空孔長：250μm 以下、空孔率：約35%
②は、仕様不明



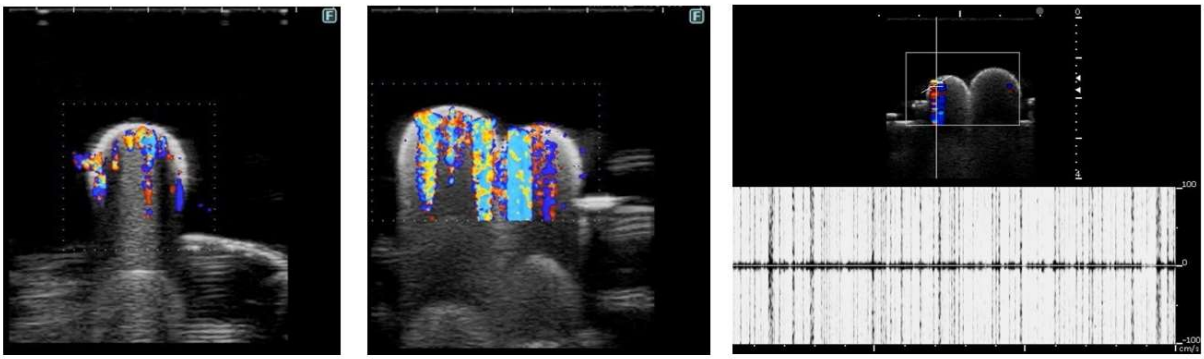


図３２：TAを出現させる実験セットアップ

気泡崩壊説を検証するための実験をしました。

実験サンプルとして、ファインセラミックスを材料にした円柱状のものを見つけてきました。水槽の中で泡をブクブクと出すエアストーンと、包丁の刃を研ぐセラミックシャープナーです。ファインセラミックスの原料は、無機質固体粉末で、融点よりも低い温度で加熱すると、焼成の過程で、粉末粒子同士が

融合し、粒子間のすき間が小さくなって焼き固まり、緻密で非常に硬い製品ができあがります。裏を返せば、ファインセラミックスの焼結体には極小さな空隙（微小気泡）がたくさん残っているということ。そこに超音波を当てたら気泡が崩壊して TA が出現するのでは、と予想しました（図３２）。



セラミックシャープナー　　エアストーン　　エアストーン（パルスドプラ）

図３３：TA発生実験の結果

実験の結果を図３３に示します。

セラミックシャープナーと 2 種類のエアストーン、合わせて 3 種類の円柱状の実験サンプルを水槽に入れて、短軸断面を出してカラードプラモードにすると、どのサンプルでも、期待した通りに TA が出現しました。また、カラードプラで TA が出現している場所に、パルスドプラのサンプルゲートを当てると、非常に強くて広帯域なドプラスペクトルが記録されました。これらは、微小気泡が崩壊する過程で発生したドプラ信号であると解釈することができます。

さらに、この実験で、TA のモザイクカラーの出方（色合い）は、カラードプラの速度スケールを変えてもほとんど変化しないこと、音響出力（MI 値）を上げれば TA の表示面積が増え、音響出力（MI 値）を下げていくと TA の面積が減り、消失することが確認できました。これも TA が気泡の崩壊によって出現することを前提に考えれば、納得がいく結果といえるでしょう。

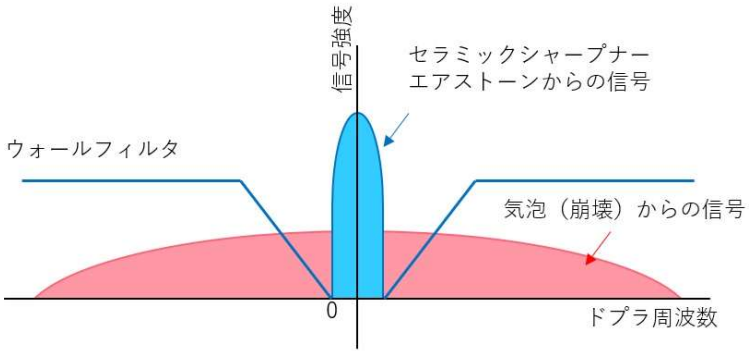


図３４：微小気泡が崩壊する過程で発生するドプラスペクトル

図３４を用いて解説します。ドプラ法では，数 kHz の繰り返し周波数で複数回同一方向に超音波を送信し，受信時のリファレンス信号に対する位相の変化(周波数遷移)により、ドプラ効果を検出します。高域通過型フィルタのウォールフィルタにより動きの遅い成分が除去されます。セラミックシャープナーやエアストーンは止まっていますので、そこからの受信信号はウォールフィルタで除去されてドプラ信

号として検出されることはありません。

一方、送信の超音波で微小な気泡が崩壊して消失する場合には、過渡的な時相で検出される信号の位相の変化は、動きのドプラ効果で期待される変化より大きく、非常に広帯域なドプラ信号となり、ウォールフィルタで除去されず検出されます。

■　超音波造影剤のハーモニック・パワードプラ法

1990 年代にはいり、静脈投与により左心系を染影できる超音波用造影剤が欧米にて製品化されたことから、㈱東芝の技術者（当時）であった私は、造影剤を映像化する技術の開発に関わっていました。

気泡の非線形な振動に着目したハーモニックイメージング法の研究の進展の過程で、通常の超音波検査に利用される音圧で、造影剤の微小気泡が崩壊して消失することがわかってきました。送信超音波に対する気泡の崩壊過程をドプラ法で観察すると、静止している気泡であっても、急峻な振幅や位相の変化が観察されることがわかって、この現象を利用した「ハーモニック・パワードプラ法」を開発しました。左室心筋を染影させて心筋灌流（パフュージョン）を評価することを目的に、パワードプラ法で映像化していましたが、カラードプラ法で映像化すれば、造影剤の微小気泡が崩壊することで非常に広帯域なドプラ信号が検出されて、赤と青のカラフルなカラーが混在する画像になることも確認していました。

最近では、造影エコーでハーモニック・パワードプラ法を目にすることはほとんどなくなりましたが、TA の出現機序は、この映像法とよく似ています。

■　こんな珍しい症例報告も

ハエ症は、生きたヒトや脊椎動物の組織にヒトヒフバエの幼虫が侵入する病気です。カナダの救急医療センターに、中南米に旅行してヒトヒフバエによるハエ症に感染した患者が来院して、皮下組織内に侵入したヒトヒフバエの幼虫にカラードプラを当てたら、TA が観察されました。

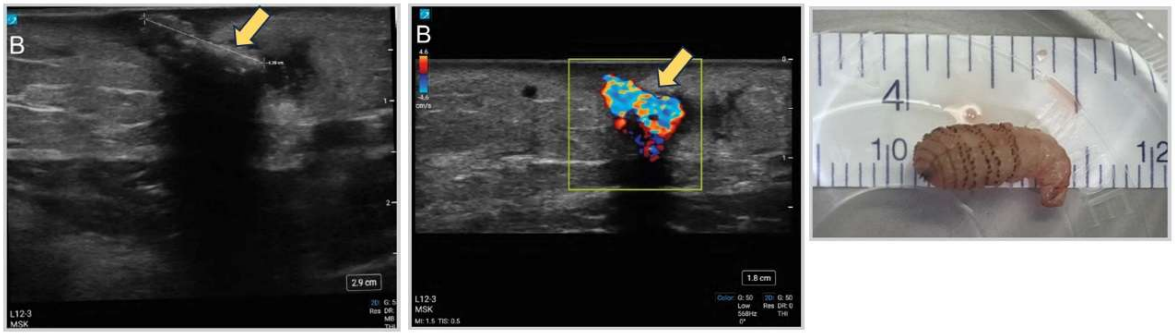


図３５：ヒトヒフバエによるハエ症に感染した症例
文献（５）から引用。

Ｂモードでは、皮下組織内に縦長のソーセージ状の音響陰影を伴う高エコーの構造物（8 x 12 mm）が確認されました（図３５左）。カラードプラによる病変部の観察では、血液の流れを示唆するドプラ信号を示さず、構造物とその深部はドプラ信号の色が常に交互に変化する TA と一致する所見が得られました（図３５中央）。この患者からヒトヒフバエの幼虫が摘出されました（図３５右）。

論文の著者は、「ハエ症の TA の原因は、硬く、不規則で棘のある幼虫の甲羅にあると推定される」としていますが、私は違うと思います。また、超音波検査をしていたら数分以内に幼虫は自然に宿主から外

に出てきた、という過去の別の症例報告について、「超音波検査中に塗布された超音波ゲルが閉塞性被膜として作用し、幼虫の退出を促したものと思われる」と考察していますが、私はこれも違うだろうと思います。

気泡崩壊説を前提に考えると、皮下組織内に侵入したハエの幼虫に超音波を照射したことで呼吸器官の中にある気泡が崩壊して TA が発生する、さらには、気泡の崩壊で呼吸器官がダメージを受けて、息苦しくなった幼虫が必死になって宿主からの脱出を試みた、と考えれば、すべての現象が腑に落ちるのではないでしょうか。

ハエの幼虫が皮膚に寄生する…　想像したくもありませんね。

■　おわりに

カラードプラ法で観察される twinkling artifact（TA）の出現機序や臨床的意義に関しては多視点から検討されてきましたが、まだ一定のコンセンサスが得られていません。私自身は、「気泡崩壊説」を支持していますが、この説に異論を唱える人が多数いることも事実です。これからも、この分野の研究の進展を注目してみていきましょう。

参考文献

1）小野朱美，森一博，山崎延夫，ほか．Twinkling Artifact を認めたクローン病の潰瘍狭窄病変．Jpn J Med Ultrasonics Vol. 51 Supplement（2024）．S210
2）Lu W, et al. Evidence for trapped surface bubbles as the cause for the twinkling artifact in ultrasound imaging. Ultrasound Med Biol. 2013 Jun;39(6):1026-38.
3）Simon JC, et al. The role of trapped bubbles in kidney stone detection with the color Doppler ultrasound twinkling artifact. Phys Med Biol. 2018 Jan 9;63(2):025011.
4）Simon JC, et al. Evidence of microbubbles on kidney stones in humans. Ultrasound Med Biol. 2020 July; 46(7): 1802–1807.
5）Jerome D, et al. Twinkle Artifact Observed During POCUS of a Human Myiasis Caused by the Dermatobia hominis Botfly. POCUS J. 2023 Nov 27;8(2):142-145.