

Review

【特集：日本小児循環器学会第 12 回教育セミナー】

3D 心エコー：どうやって使えば手術に役立てられるか？ 解剖学的評価を中心に

瀧間 浩宏

長野県立こども病院循環器小児科

How to Use 3-dimensional (3D) Echocardiography for the Anatomical Assessment of Surgical Repair of Congenital Heart Diseases

Kiyohiro Takigiku

Nagano Children's Hospital Department of Pediatric Cardiology, Nagano, Japan

Recently, revolutionary advancements regarding the ultrasonic apparatus, three-dimensional (3D) echo probe, and PC analysis workstations have been achieved, and these have drastically improved the quality of 3D imaging. Additionally, 3D echocardiography has become one of the most useful diagnostic and therapeutic tools for congenital heart disease. One of the most effective applications is to provide critical information of complicated intracardiac 3D structures of the heart for planning cardiac surgery. This includes the creation of an intracardiac route via the ventricular septal defect in patients with a double outlet right ventricle, valvuloplasty for complicated atrioventricular valve regurgitation, or the repair of intracardiac stenotic lesions (e.g., pulmonary venous obstruction). The digitally acquired 3D volume data is reconstructed by “cropping” and then complex intracardiac structures can be observed from the surgeon’s standing point (i.e., surgeon’s viewpoint). Therefore, this technology can serve as the basis of profound communication between cardiologists and cardiac surgeons. In this chapter, I would like to address how to use 3D echocardiography as a guide for surgical repair in actual clinical practice and explain the process in detail for the pediatric cardiology trainees to understand with ease.

Keywords: congenital heart disease, 3-dimensional echocardiography, transpericardial 3D echocardiography

超音波装置、探触子および解析ソフトウェア等における著しい技術の進歩により、3D 心エコー法により得られた画像のクオリティは飛躍的に向上した。現在では、先天性心疾患に対する診断や治療にも有用なツールであるといつても過言ではない。実臨床で有用な活用法の 1 つは、複雑な心内形態を 3D 表示し、それに基づいて修復術のプランニングやガイドを行うことである。例えば、両大血管右室起始症における心室中隔欠損を用いた心内ルート作成、複雑な房室弁閉鎖不全の形成、肺静脈還流の異常や狭窄の修復などが挙げられる。これら疾患に対して、収集した 3D データをクロッピングという再構築を行い、複雑な心内構造を外科医からの視点 (Surgeon's view) で観察する。これにより、病態と手術法について、外科医と循環器医でより深い discussion を行うことが可能となる。本稿では、心内の 3 次元的な解剖学的評価を基にした外科的修復術のガイドの方法について小児の心エコー初心者にも理解できるように概説したい。

はじめに

近年のリアルタイム3D心エコー法は、マトリックスアレイトランステューサーの開発と発展、超音波装置に内蔵されるハードの演算能力の向上、加えて3D解析ソフトウェアの進歩により、3D探触子でvolume dataを短時間に収集、再構築することができるようになった。心拍の速い小児で壁となっていた3D画像の時間分解能や距離分解能の低さは、飛躍的に改善されつつある¹⁾。

先天性心疾患の外科修復におけるプランニングやガイドに対する3D心エコーの実臨床応用としては、心房中隔欠損や心室中隔欠損の形態評価により、両大血管右室起始症における心室中隔欠損を用いた心内ルート作成に、先天性心疾患の房室弁評価により、複雑な弁形成に、心内の複雑な構造や狭窄病変に対する形態評価により、術後心内狭窄病変の解除、総肺静脈還流異常症の心内ルート作成に用いるのが特によいと考えられる。複雑な心内構造を外科医からの視点(Surgeon's view)で観察し、解剖学的と手術法について、外科医と循環器医でより深いdiscussionを行うことができる^{2,3)}。

I. クロッピング

1. 画像の収集について

よいクオリティの3D画像を得るために、volume dataの収集がもっとも重要なkeyとなる。小児とくに10kg以下の症例ではできるかぎり高周波の3Dプローブを用いる(7MHz以上)。Volume rate(Frame rate)は心拍100bpm以上の小児では少なくとも40Hz前後は必要であろう。

収集に用いる基本断面(中心断面)は、典型的な四腔断面、長軸断面、短軸断面などではない。例えば、乳幼児の心室中隔欠損では肋骨下からの断面が最も適しており、一方で房室弁では傍胸骨でやや心尖部よりも短軸断面が多い。

まず、目標部位が中心となって、周囲構造が最もよく描出されている断面であることを2D画像で確認する。3DのX-planeなど複数断面が同時に観察されるモードを使用して、目標物がすべてvolume dataに入っていること、VSDなどでは周辺の構造物がvolume dataの中に入っているかを確認して広角に取り込む方がよい。このときvolume rateが30Hz前後と低いシングルビートでの収集より、心電図を同期させた4~6スライス(心拍)を統合したフルボリューム

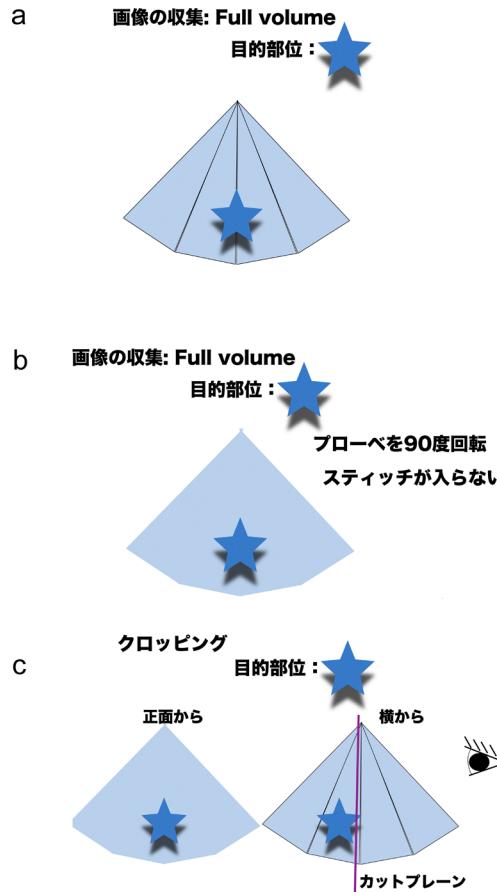


図1 画像収集とクロッピングの方法

図1aのようにスティッ칭がはいらないように、プローブを90度回転させ、図1bのように奥行き方向にスライスが重なるようにfull volume dataを収集する。図1cクロッピングのためのカットプレーンは、正面から奥行き方向にカットしてゆく。

モードでなるべく高い40~50Hz以上の設定で取り込む方がきれいな3D画像を収集することが可能である。しかし、マルチスライスだとモーションスティッチがどうしても入ってしまうので、2D画像で3D画像の中心をどこに置くかを見定めたのち、最終的にクロッピングする断面がプローブの断面と平行になるように、目標部位を短軸のフルボリュームで収集する。すると目的とする構造物の中心が1つのスライスの中に入りやすくなる(図1a~c)。

例えば図2では、肋骨下のwindowから心室中隔欠損を描出した両大血管右室起始症の画像である。バイプレーンモードや実際に探触子をその場所で傾けて目標部位:心室中隔欠損と周囲構造物:三尖弁、肺動脈弁、大動脈弁のすべてがよく描出できているのを確認する。さらに2D画像上でfocus, gain, dynamic rangeなどの調整を行う。このとき心室中隔欠損を正

面からみた 2D 画像 (en face view) を基本に 3D 画像をフルボリュームモードで取り込む。このように収集前に 2D 画像でよく確認することが非常に大切である。

房室弁ではさらに画像収集方法に工夫が必要である。図 3 は、乳児の先天性僧帽弁閉鎖不全の症例である。やや心尖部からとった傍胸骨長軸断面の 2D 画像でよく僧帽弁が描出されている window を確認す

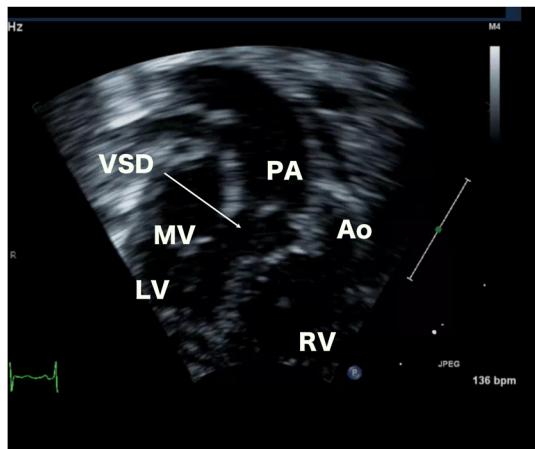


図 2 両大血管右室起始症の肋骨下断面像

VSD を中心においてなるべくすべての構造物が鮮明に描出されている window をみつけ、収集の基本 window とする。
VSD: 心室中隔欠損, RV: 右室, LV: 左室, MV: 僧帽弁,
PA: 肺動脈弁, Ao: 大動脈弁

る。小児の房室弁は弁葉が薄いため、クロッピングの際に gain を下げてノイズリダクションすると 3D 画像ではさらに弁葉の輝度が低下して弁葉の画像がとんでもないまるで孔があいているように見えてしまう。したがって弁葉の輝度が最もはっきり見える window を見つけることが必要である。また、心尖四腔断面像を基に 3D を収集すると房室弁からプローブが目標物から遠くなるので、避けた方がよい。経胸壁ではこのやや心尖よりからの window での収集を奨める。この window のままプローブを 90 度回転し、再度 X-plane や biplane mode で表示される長軸断面で弁葉の輝度を確認して短軸像を基に 3D volume data を収集する。するとクロッピングしたときにマルチスライスによるスティッチが入らない。

2. クロッピングをする前の準備

やみくもに volume data のクロッピングを行ってもよい 3D 画像はできない。外科的修復術のガイドとして先天性心疾患の 3D 次元表示をする場合、もっとも重要なのは、どのように外科医に見せるかを考えることにある。前もってその疾患の一般的な解剖学的特徴と術式を知っておき、具体的にどのようにクロッピングすべきかを予想をすることで微妙なクロッピング面の角度の調整が可能となる。

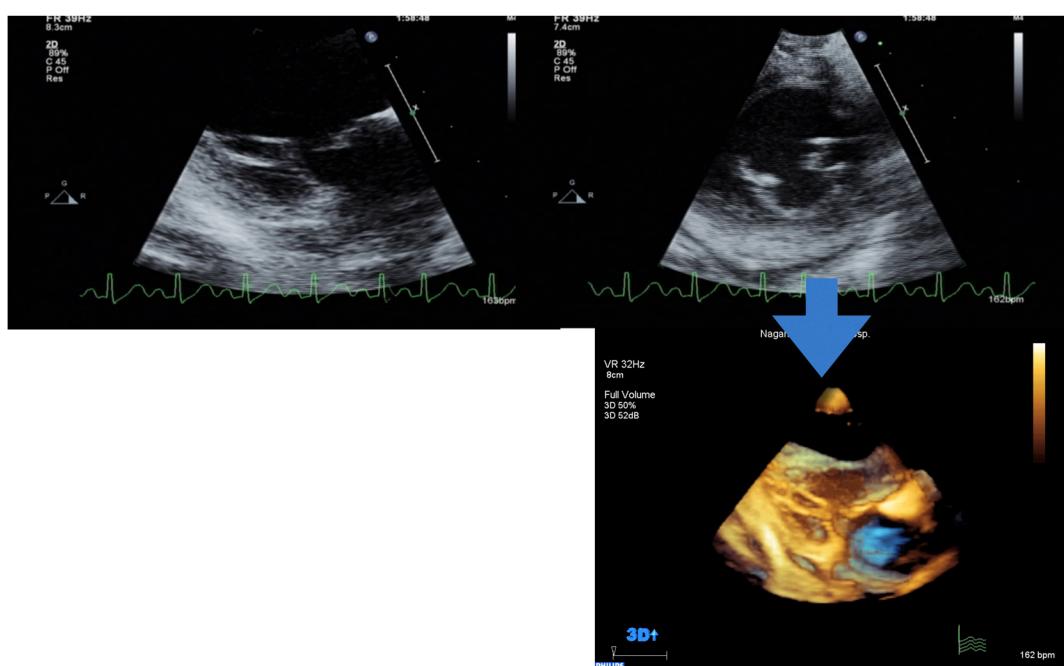


図 3 先天性僧帽弁閉鎖不全における echo window

左室長軸断面をやや心尖部よりからの window より 2D 画像を撮像し、そこを基本の window として full volume data を収集する。

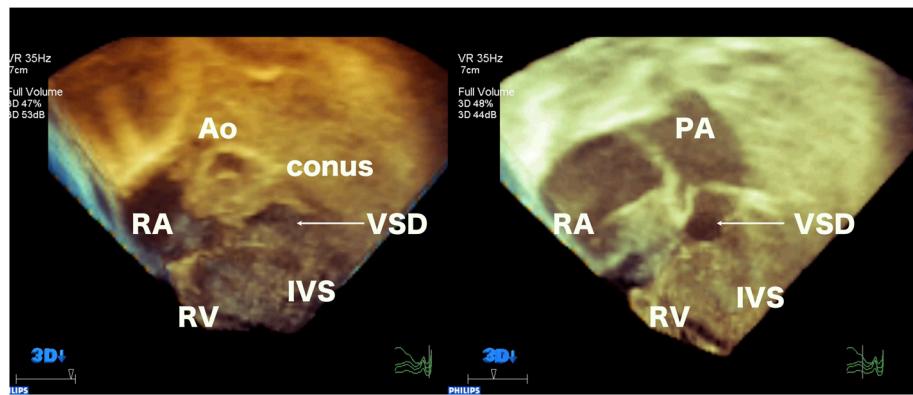


図4 両大血管右室起始症の3D画像

左図は右室前面をカットした3D画像で、右図はさらに奥行き方向にカットを進めた画像。Conusの後方に肺動脈そして肺動脈弁下VSDがある。

Ao: 大動脈, RA: 右房, RV: 右室, LV: 左室, VSD: 心室中隔欠損, IVS: 心室中隔

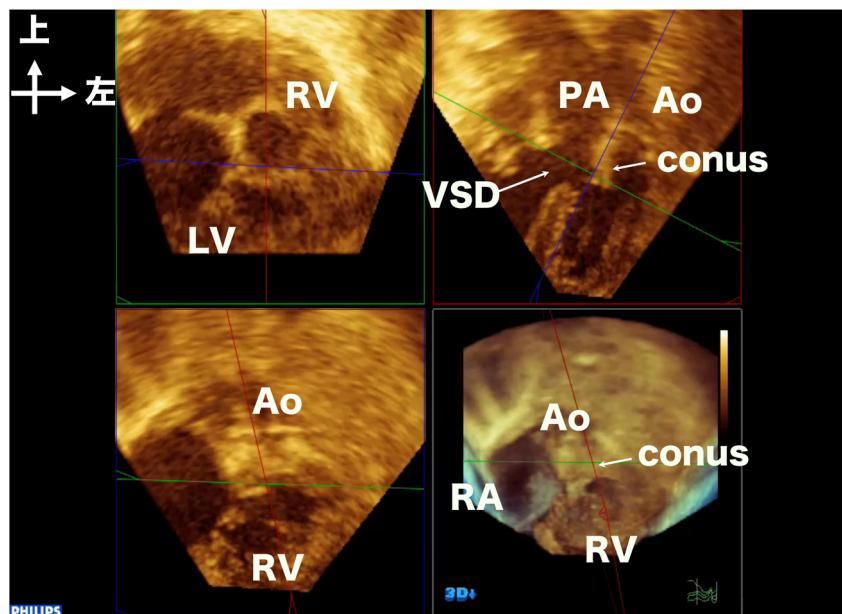


図5 両大血管右室起始症の3D画像と任意の矢状断面像

Full volume data を任意断面ここでは AoからVSDに向けて矢状方向にカットした。構造物の前後関係がよくわかる。

Ao: 大動脈, RA: 右房, RV: 右室, LV: 左室, VSD: 心室中隔欠損, IVS: 心室中隔

3. クロッピング

両大血管右室起始症例で実際のクロッピングをしてみる。図4左はvolume dataの右室前面をカット：クロッピングした3D画像である。大動脈弁の下の広い範囲でconus：漏斗部中隔が見える。その向こうに心室中隔欠損が確認できる。図4右は断面をさらに奥に進めると肺動脈弁とその下の大きな心室中隔欠損が確認できた。図5右上のように、心室中隔欠損を中心とした矢状断面でもカットすることで前から大動脈、肺動脈、心室中隔欠損の順に並び、この画像からJatene

手術をすれば左室から大動脈に狭窄なくルートがとれることがわかる。

次に前述の僧帽弁閉鎖不全の症例をクロッピングしてみる。まず、左室長軸断面となるような平面でボリュームデータをカットする（図6a）。次にもう1面の任意のカットプレーンで左房をカットしていくが、このとき平面ができるかぎり弁輪と平行になるように調整して弁輪に近づけ、ノイズリダクションを行う（図6b）。長軸方向にカットした平面をもとに戻して、左房側からみるとSurgen's viewの僧帽弁画像が

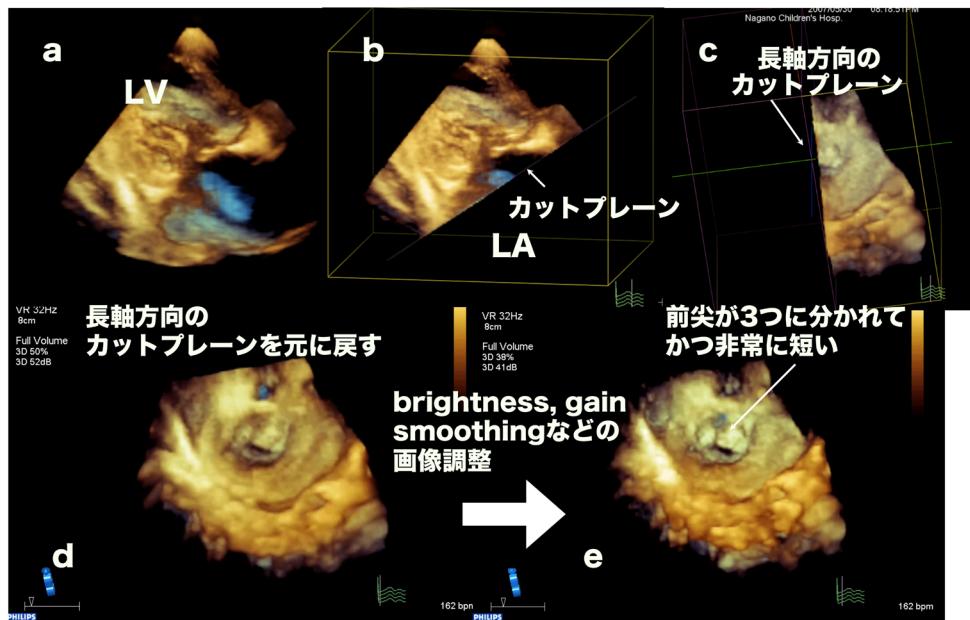


図 6 先天性僧帽弁閉鎖不全のクロッピング

a. volume data を左室長軸断面にカットする。b. 左房のノイズをとるため弁輪の際までカットプレーンを近づける。c. 左房からの方向に回転。d. 長軸のカットプレーンを元に戻す。e. brightness, gain, smoothing などの画像調整を行う。前尖が 3 つに分かれてかつ非常に短いのがわかる。

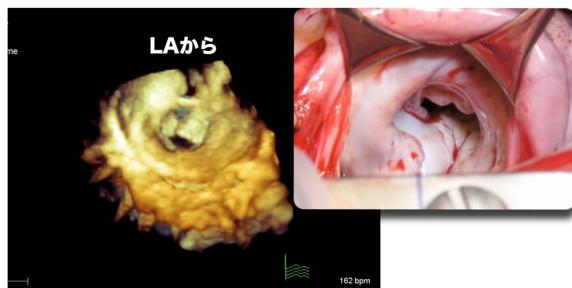


図 7 先天性僧帽弁閉鎖不全の術中所見

右の術中所見では左房からみた 3D エコーと一致して、僧帽弁前尖の低形成が確認できた。

得られる（図 6c, d）。この症例は、前尖が短く三つに分かれ、後尖との間に大きな間隙ができている。この間隙から閉鎖不全が生じていた。この前尖には全く腱索が付着しておらず、低形成な前尖であることがわかる。さらに後尖は tethering して持ち上がってない（図 6e）。弁輪縫縮を加えても弁形成が不可能と判断し、かつ術中所見も一致したため（図 7），人工弁置換術を施行した。

II. 経心膜 3D エコー

我々は先天性心疾患の術中に経心膜 3D エコーを行い、経胸壁心エコーより詳細な心内構造の所見を得て



図 8 経心膜 3D 心エコーの実際

右図のように両手を使い、片方の手で心臓にあて、もう片方の手でプローブをコントロールすると心拍に合わせてソフトに密着させながら、繊細にプローブを動かせる。

いる。手術を受ける小児例の多くは 15kg 以下で、経食道 3D 心エコーのプローブを挿入、使用することはできない。経心膜 3D 心エコーは直接心臓にあてるために画像は非常によいのはもちろんである。したがって画像収集をうまく行えば精度の高い 3D 心エコー法が可能となる。全身麻酔下で開胸後に、心膜もしくは心臓の上から高周波 3D 用プローブをあてて、必要な一時的に人工呼吸を停止させ、フルボリュームモードを撮像する。解像度、S/N 比とも良好で鮮明な画像が得られる。

画像収集方法は、前述の経胸壁アプローチと変わりないが画角が十分に取れないため、目的の構造物が画角の中に入っているかどうかに十分に注意を払う必要

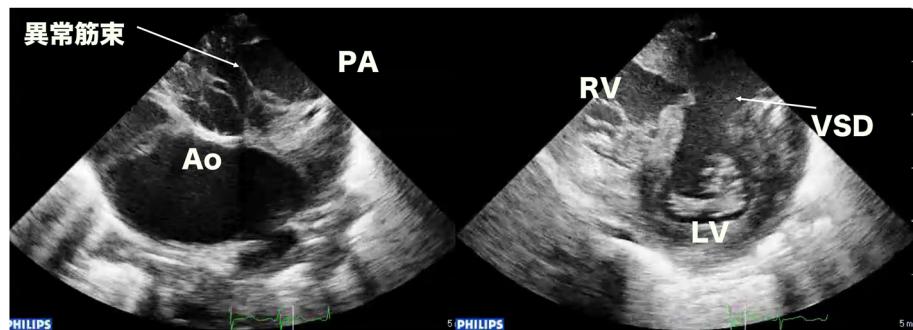


図9 両大血管右室起始症の経心膜2D心エコー

日齢8の両大血管右室起始症の児でCoA合併し、このとき一期的修復を目指し手術を施行。VSDは肺動脈弁下である。
VSD:心室中隔欠損, RV:右室, LV:左室, MV:僧帽弁, PA:肺動脈弁, Ao:大動脈弁, CoA:大動脈縮窄

がある。画像収集時のこつは、心臓を無理に押さえつけないように、血圧に注意しながらプローブを心拍に同期させるようにソフトに密着させることである。両手を使い、片方の手で心臓にあて、もう片方の手でプローブをコントロールするとよい(図8右)。

1. 症例1

図9に両大血管右室起始症の症例を示す。経心膜2Dエコーでこの心室中隔欠損は大きく肺動脈弁下にあいている。しかし、心室中隔欠損の右縁あたりから異常な筋束が右室自由壁にわたっているのが見える。この筋束と心室中隔欠損の関係について、右室自由壁側をクロッピングして3次元的に描出したのが、図10である。大きな心室中隔欠損を左右に分けるかのように太い異常な筋束が心室中隔欠損の間から右室自由壁までわたっている。つまり、診断は肺動脈弁下型および大動脈弁下型の多孔性の心室中隔欠損となる。図11は肺動脈側から心室中隔欠損を見た画像であるが、肺動脈側から向こう側の大動脈弁下の心室中隔欠損は異常筋束によって確認できない。実際の術中所見でも肺動脈からは弁下のVSDしか見えなかった(図12)。よって、大動脈弁下の心室中隔欠損は三尖弁側から、肺動脈弁下の心室中隔欠損は肺動脈弁側から別々にパッチ閉鎖する必要があった。

2. 症例2

図13の経心膜3D心エコーは、無脾症候群、右室性単心室、重症共通房室弁閉鎖不全の症例である。心房側から見ると、共通房室弁は4葉あり、収縮期と拡張期で見ると左側葉が小さく可動が非常に悪いのがわかる。図14左は左側葉にあわせてvolumeデータを水平面でカットしたもののだが、収縮期にcoaptationしていないのがわかる。図15は共通房室弁を心室側

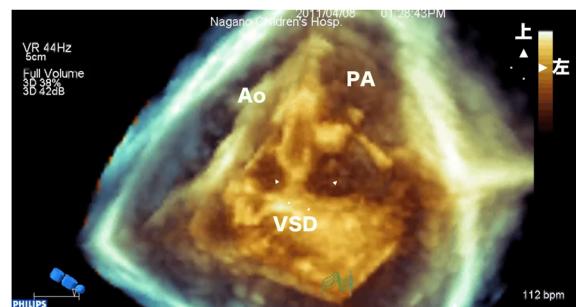


図10 経心膜3D心エコー 右室自由壁からの断面

Ao:大動脈弁, PA:肺動脈弁, VSD:心室中隔欠損

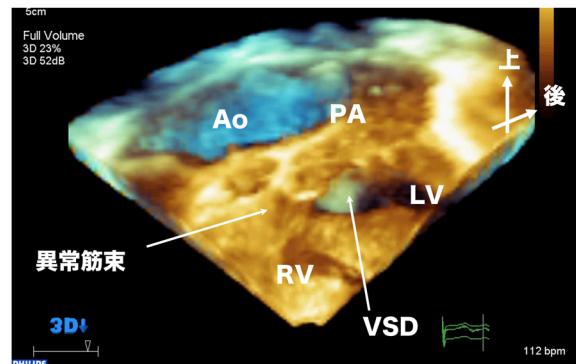


図11 肺動脈からVSDを観察したSurgeon's viewの断面

VSD:心室中隔欠損, RV:右室, LV:左室, PA:肺動脈弁, Ao:大動脈弁

から見たカラー3D表示で心室側からの吸い込み血流によるaliasingが生じている。閉鎖不全は同部位で生じていることを確認できた。この症例は2歳、10kgの症例で、リングによる弁輪縫縮ができないため、この左側葉をKai-Lead法という方法でつぶして弁形成を行った。

このように、共通房室弁や三尖弁は3~5葉の弁であり、閉鎖不全のメカニズムの正確な詳細診断は2D

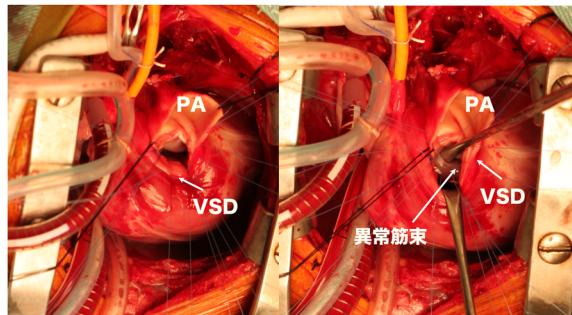


図 12 兩大血管右室起始症の術中所見
肺動脈弁下型および大動脈弁下型の多孔性 VSD.
VSD: 心室中隔欠損, PA: 肺動脈弁

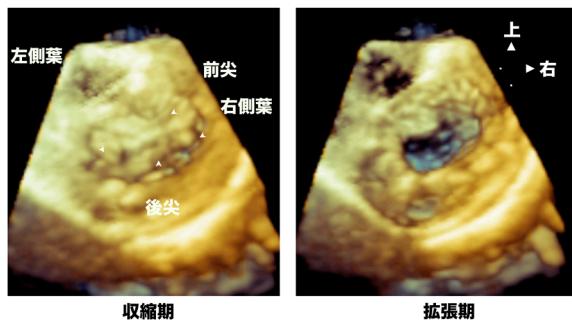


図 13 無脾症候群, 右室性単心室, 重症共通房室弁閉鎖不全の経心膜 3D 心エコー
収縮期と拡張期の心房側から見た共通房室弁で左側葉の動きが悪い。

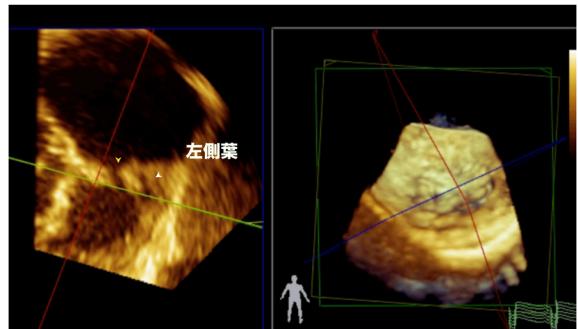


図 14 経心膜 3D volume data の水平方向の任意断面
左側葉は tethering し, coaptation していない。

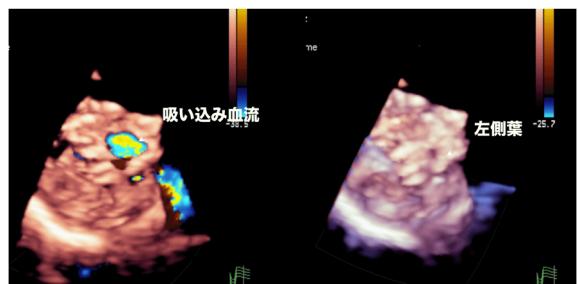


図 15 無脾症候群, 右室性単心室, 重症共通房室弁閉鎖不全のカラー経心膜 3D 心エコー
心室側からの吸い込み血流による aliasing が生じている。
閉鎖不全は同部位で, 生じていることを確認できた。

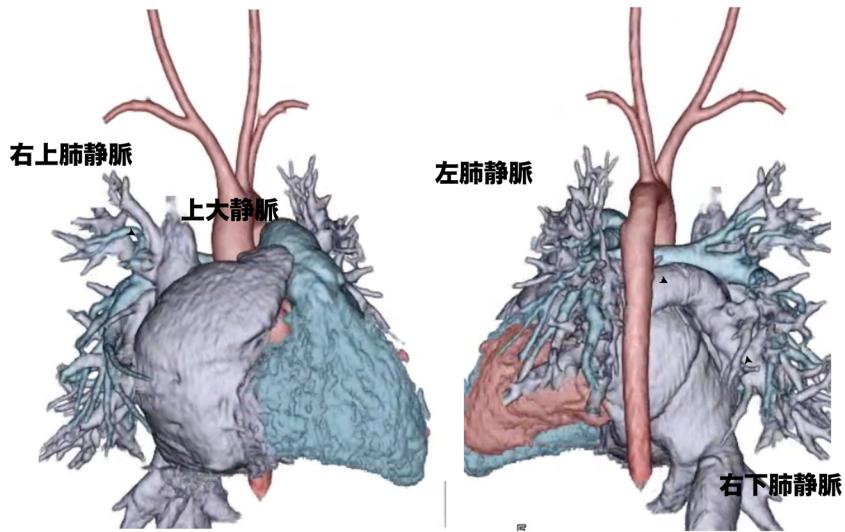


図 16 総肺静脈還流異常症 IB+IIB の 3DCT

ではまず困難と考えてよい。3D 心エコーとくに経心膜で, 弁葉の逸脱, テザリング, 異常構造の範囲, 人工腱索の必要性を見て弁形成や人工弁置換の適応などを判断する。

3. 症例 3

図 16 は総肺静脈還流異常症の IB と IIB の新生児症例の 3DCT 画像である。右上の肺静脈は上大静脈に還流, その他の肺静脈は右房に還流していた。3DCT

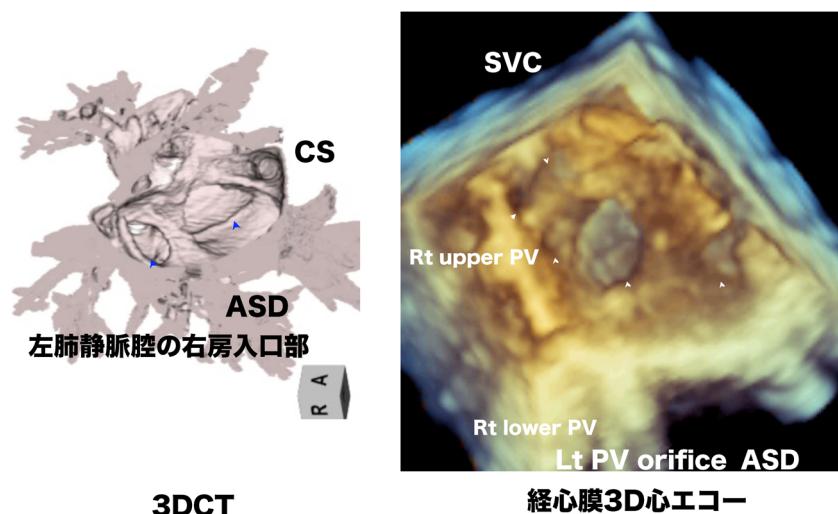


図 17 右房からみた 3DCT と経心膜 3D 心エコーの比較

右房からの 3DCT では左肺静脈の開口のとなりに大きな心房中隔欠損が見えるが、経心膜 3D 心エコーによる右房からの Surgeon's view では、右上下の肺静脈の還流と左肺静脈の還流部位が近傍にあるのが見え、さらに CT と異なって小さな心房中隔欠損が確認できる。ASD: 心房中隔欠損, CS: 冠静脈洞, SVC: 上大静脈, PV: 肺静脈

を右房から見てみると左肺静脈の開口のとなりに大きな心房中隔欠損が見える（図 17 左）。しかし、経心膜 3D 心エコーでは、右房を開けた Surgeon's view で見てみると、右上下の肺静脈の還流と左肺静脈の還流部位がよく見え、さらに CT と異なって小さな心房中隔欠損が確認できる（図 17）。新生児症例で心内の CT 画像構築が難しくても 3D 心エコーでは鮮明に観察することが可能であった。この症例では、肺静脈から左房への心内のルート作成のガイドに非常に有用であった。

まとめ

先天性心疾患における 3D 心エコーのもっとも有用な活用法の 1 つとして、外科医の視点 (Surgeon's view) を中心に volume データを再構築、心内 3D 画像表示する方法を述べた。是非この方法論を活用し、さらに個々で工夫を重ねていただき、リアルな画像を

作成してほしい。それにより外科医との間で手術方法を大いに discussion し、日々の診療に役立てほしい。

付 記

この論文の電子版にて動画を配信している。

引用文献

- 1) Kajimura I, Satomi G, Yasukochi S et al: Pericardial three-dimensional echocardiography. J Echocardiogr 2008; **6**: 39–45
- 2) 里見元義: 小児領域の 3 次元心エコー. 心エコー 2007; **7**: 320–327
- 3) Takigiku K, Senzaki H, Yasukochi S: Real-time three-dimensional (3D) echocardiography for diagnosis and treatment of congenital heart diseases in practice medicine: Transpericardial and transesophageal approach. Congenital heart disease morphological and functional assessment. Springer, 2015, pp 3–20