

## Review

〈スペシャリストシリーズ：3. 胎児心機能評価〉

## 最新の胎児心機能評価

武井 黄太

長野県立こども病院 循環器小児科

## Latest Assessment of the Fetal Cardiac Function

Kohta Takei

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

Prenatal diagnosis of fetal heart disease by fetal echocardiography has so far focused on morphological assessment. However, more knowledge on fetal cardiac function has been accumulated recently, and the guidelines for fetal echocardiography now describe the assessment of fetal cardiac function. Conversely, the assessment of fetal cardiac function, such as that used in transthoracic echocardiography, is not always possible for the following reasons: the fetal circulation differs from the neonate's circulation after birth; the small fetal heart must be observed through the maternal abdominal wall, which limits the image quality; the fetal position is not constant; a constant cross-sectional view cannot always be obtained; and electrocardiograms cannot usually be used on fetuses. The present review article outlines the fetal cardiac functional assessment currently used in fetal echocardiography, including the assessment of central venous pressure, ventricular contractility, ventricular diastolic and integrated ventricular functions, prognostic value of fetal heart failure, and cardiac functional assessment using new techniques, such as speckle tracking echocardiography and three-dimensional echocardiography.

**Keywords:** fetus, cardiac function, fetal echocardiography

胎児心エコーによる胎児心疾患の出生前診断は、これまで形態診断を中心に行われてきたが、近年胎児の心機能評価についての知見も集積されてきており、国内外のガイドラインでも胎児心機能評価についての記載がなされている。一方で、胎児の心機能評価においては、出生後とは異なる胎児循環であること、小さい胎児を母体の腹壁を通して観察しなくてはならず超音波診断装置が進歩した現在でも画質に限界があること、胎位が一定ではなく常に一定の断面が得られるわけではないこと、心電図が利用できないことなどの制約あり、必ずしも出生後と同様の方法を用いて評価することができるわけではない。本稿では、現在胎児心エコーにおいて用いられている胎児心機能評価法について、中心静脈圧上昇の評価、心室収縮機能評価、心室拡張機能評価、心室の統合機能評価、胎児心不全の予後評価、新しい技術を使用した心機能評価の各項目に分けて、簡単な原理もふまえて概説する。

## はじめに

胎児心エコーによる胎児心臓評価の普及と超音波診断装置の進歩や新しい診断技術の開発により、形態診断が中心であった胎児心エコー検査も、日本小児循環器学会の「胎児心エコー検査ガイドライン（第2版）」

では「胎児心機能評価」の項が追加されるなど、近年胎児の心機能評価についても知見が集積されている<sup>1)</sup>。一方で、胎児では心機能評価についても検査法はほぼ心エコーに限られ、出生後とは異なる胎児循環であること、小さい胎児を母体の腹壁を通して観察しなくてはならず超音波診断装置が進歩した現在でも画

著者連絡先：武井黄太（E-mail: takeiko@d2.dion.ne.jp）

〒399-8288 長野県安曇野市豊科 3100 長野県立こども病院 循環器小児科

doi: 10.9794/jspccs.41.11

質に限界があること、胎位が一定ではなく常に一定の断面が得られるわけではないこと、心電図が利用できないことなどの様々な制約により、出生後と同等の評価はできない側面がある。本稿では最新の胎児心機能評価の現状について解説する。

## 胎児循環と胎児心機能

胎児の心機能を考えるにあたっては、胎児循環を理解しておく必要がある。胎児循環では肺は酸素化に寄与せず、胎盤が静脈血の酸素化を担う。胎盤からの酸素化血は臍帯静脈-臍静脈から静脈管を経て下大静脈へ還流する。静脈弁（Eustachian 弁）の働きで下大静脈からの酸素化血は主に卵円孔を経由して左房へ、上半身からの静脈血は上大静脈から主に右室へ流入する。左房へ流入した酸素化血は左室から上行大動脈を経由して主に上半身へ送られ、右室の静脈血は肺動脈へ流れるが、左右肺動脈は血管抵抗が高く、出生後の2割程度の血流しか流れないため、そのほとんどは動脈管を経由して下行大動脈へ流れ、多くは臍帯動脈を経て再び胎盤で酸素化を受ける。

胎児循環の大きな特徴のひとつとして、動脈管による短絡があるために両心室は並列循環になっていることが挙げられる。このため、一方の心室の機能が障害された場合でも、他方の心室が両心室の機能を担うことで循環が維持される。しかし、出生後に左室が体循環、右室が肺循環をそれぞれ担う直列循環に移行すると、一方の心室の大きさや機能が障害されていると循環が成立せず、その場合には動脈管の開存を維持して並列循環を保つ必要がある。

また、胎児循環では卵円孔が開存しているために、どちらの心室の障害による心房圧の上昇も最終的には右房圧（中心静脈圧）上昇につながる。胎児では心不全の最終的な状態として胎児水腫に至るが、これは、胎児では細胞外液が多く、血管透過性が高いために容易に末梢のリンパ流が低下して浮腫を生じやすく、中心静脈圧の上昇が胎児水腫を引き起こす。

羊での実験から、羊胎仔では、羊成体と比較して心筋の長さを一定にして刺激を与えた時に生じる張力（活動張力）は低い一方で、弛緩している筋肉を引き伸ばした時に抵抗して元に戻そうとする張力（静止張力）は羊胎仔のほうが強い<sup>2)</sup>。また、胎児心筋細胞ではサルコメアやT管などの収縮成分が少なく未熟で心筋細胞の錯綜配列がみられる。このため、胎児心筋細胞は収縮力が弱く、後負荷の増加で収縮力が著しく低下する一方で、前負荷の増加による収縮力の増加は

限定的で早期にプラトーに達する。

胎児心臓は身体の成長に伴って発育する。しかし、左心低形成症候群でみられるように、大動脈弁狭窄などの後負荷によって収縮力が高度に低下すると左室はいったん拡大するが、左房圧の上昇によって流入血流が減少し、その結果左室の成長が阻害されて低形成となっていく。このように一部の先天性心疾患では心室のサイズも心機能を反映していることになる。

## 胎児心機能の評価

母体の胎内にいて体格が小さく、心拍数の速い胎児では、他のモダリティでの検査が難しいこともあり、心機能の評価は胎児心エコー検査が中心となる。ガイドライン<sup>1)</sup>では、胎児心機能評価として、中心静脈圧評価、心室の統合機能評価、心室収縮機能評価、心室拡張機能評価、胎児心不全の予後評価などの項目が記載されている。

### 1. 中心静脈圧上昇の評価

先に述べたように、胎児循環では左右どちらの心機能が低下した場合でも中心静脈圧の上昇を来す。心室に拡張障害を来した場合、心房機能が保持されている間は心房収縮が亢進して心室への流入を補うため、心房収縮時の心房圧（中心静脈圧）が上昇する。成人において左室拡張障害時に肺静脈血流波形のA波が増高して持続時間が延長するのと同様に、胎児でも中心静脈圧の上昇を反映して静脈系の血流パターンに変化が起きる（Fig. 1）。主に計測されるのは心房に近い部位から、下大静脈、静脈管、臍帯静脈の血流で、心房からの距離が遠い部位に行くほど重症になってから波形に影響がでる。

下大静脈血流は Preload Index (PLI) によって評価される。下大静脈では正常でも逆行性血流を認め、血流波形は収縮期順行性血流のS波、拡張期順行性血流のD波、拡張期逆行性血流のa波と呼称されるが、PLIはa/S比として算出される<sup>3)</sup>（Fig. 2）。中心静脈圧が上昇するとa波の流速が速くなり、PLIは中心静脈圧の上昇を反映して上昇する。正常値は在胎週数が進むに従って低下するが、妊娠後期では0.5以上は異常と考えられる<sup>1,4)</sup>。

静脈管と臍帯静脈の血流は後述する胎児心不全の予後評価の指標となる Cardiovascular Profile Score (CVPS) に示されているように、心臓に近い静脈管血流のほうがより早期に影響を受けて逆行性血流を認めるようになり、本来定常流で心房収縮の影響は受け

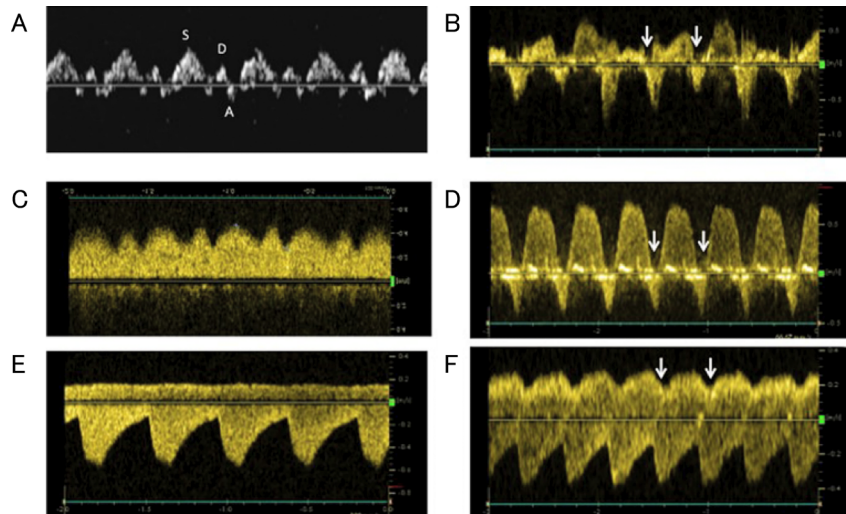


Fig. 1 ドブラ波形を用いた中心静脈圧上昇の評価

A・Bは下大静脈，C・Dは静脈管，E・Fは臍線上が臍帯静脈（臍線下は臍帯動脈）のドブラ波形．A・C・Eは正常胎児のドブラ波形パターン，B・D・Fは中心静脈圧上昇が疑われる三尖弁閉鎖症の胎児のドブラ波形．文献 21) より引用．

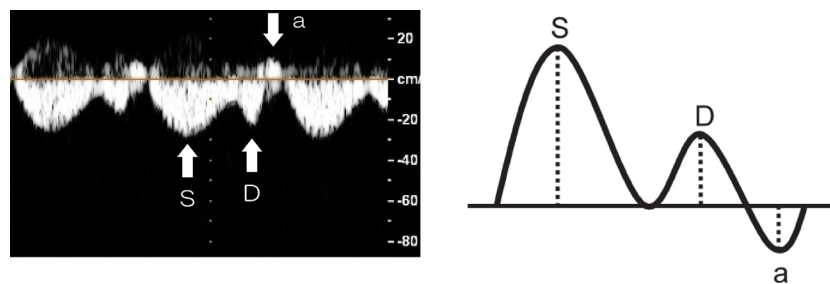


Fig. 2 下大静脈のドブラ血流波形の計測による Preload Index の算出

文献 1) より引用．

ない臍帯静脈血流は重症になると拍動を認めるようになる (Fig. 3)．

なお，静脈血流パターンによる評価は洞調律時のみ行うことができる．

## 2. 心室収縮機能評価

心機能の評価として最も直接的と考えられるのが心室収縮機能の評価であるが，胎児では胎位によって常に一定の角度で心臓の断面を描出できるわけではないこと，胎児の心電図が通常の方法では得られないことから，心室収縮機能の評価に用いることのできる方法は出生後と比較して限定される．現在用いられるのは心室内径短縮率 (Fractional Shortening; FS) / 心室駆出率 (Ejection Fraction; EF) と  $dP/dt$ ，収縮期僧帽弁 / 三尖弁輪移動距離 (Mitral/Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion; MAPSE/TAPSE)，心室の統合機能評価として後述する Myocardial Performance Index (MPI) があげられる<sup>1,5)</sup>．

### 2.1 FS/EF

経胸壁心エコーでも古くから用いられている FS が心室収縮機能評価の指標の一つとして用いられており，最新の米国心エコー図学会の胎児心エコーガイドラインにも記載されている<sup>5)</sup>．2D エコーの四腔断面像もしくは短軸像，あるいは M モード法により計測される．ガイドライン<sup>1)</sup>では M モード法での計測が示されている (Fig. 4A)．いずれの計測法でも

$$FS = \frac{\text{心室拡張末期径} - \text{心室収縮末期径}}{\text{心室拡張末期径}}$$

によって計算される．正常値は週数によらず一定で 0.28～0.40 とされる<sup>1)</sup>．

ただし，FS は立体的な構造をしている心室の一方の機能しか評価できず，胎児では左室圧と右室圧が等圧で短軸像の心室中隔が扁平であること，右室は更に複雑な形態をしていることからより不正確と考えられることに注意が必要である．FS は現在の日本循環

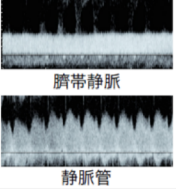
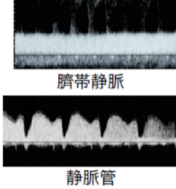
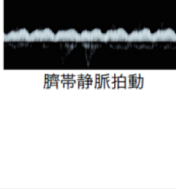
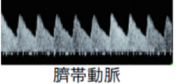
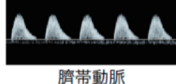
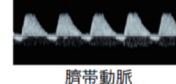
	正常,2ポイント	-1ポイント	-2ポイント
胎児水腫	なし	腹水 or 胸水 or 心嚢水	皮下浮腫
静脈ドプラ (臍帯静脈、静脈管)	 臍帯静脈 静脈管	 臍帯静脈 静脈管	 臍帯静脈拍動
心臓サイズ(CTAR)	>0.2かつ≤0.35	0.35~0.50	>0.50または<0.2
心機能	正常三尖弁逆, 僧帽弁 左室/右室 FS>0.28 二相性充満波	汎収縮期三尖弁逆流 or 左室/右室 FS<0.28	汎収縮期僧帽弁逆流 or 三尖弁逆流 dP/dT <400 or 単相性充満波
動脈ドプラ (臍帯動脈)	 臍帯動脈	 臍帯動脈 (拡張末期血流の消失)	 臍帯動脈 (逆行性拡張末期血流)

Fig. 3 Cardiovascular Profile Score の算出

文献 1) より引用.

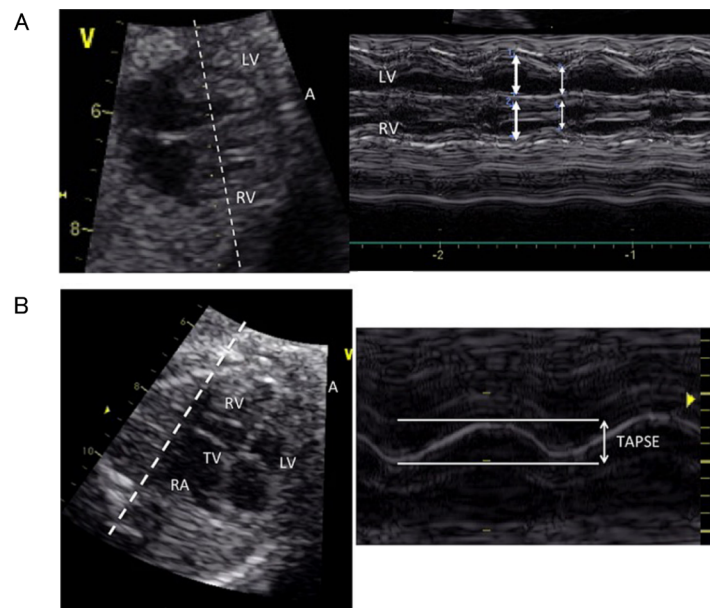


Fig. 4 Mモード心エコー法を用いた両心室のFractional Shortening (FS) の計測(A)と三尖弁輪収縮期移動距離 (TAPSE) (B)の計測

文献 21) より引用.

器学会の「循環器超音波検査の適応と判読ガイドライン」では左室収縮能の評価項目に記載されていない<sup>6)</sup>.

なお、米国心エコー図学会の胎児心エコーガイドラインでは胎児の左室機能評価として Bullet (弾丸) 法や modified Simpson 法などの方法による EF にも言及されている<sup>2)</sup>. ただし、胎児心エコーでは胎位に

よって描出できる断面の向きが一定ではないため常に計測に必要な断面を描出できるわけではない. EF は

$$EF(\%) = \frac{\text{心室拡張末期容積} - \text{心室収縮末期容積}}{\text{心室拡張末期容積}} \times 100$$

によって計算される.

なお、Bullet 法は弾丸形態の体積を、短軸像におけ



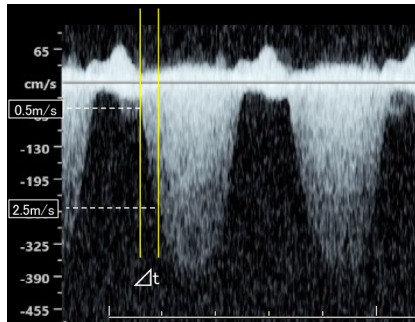


Fig. 5 房室弁逆流のドプラ血流波形を用いた dP/dt の計測  
文献 1) より引用.

る左室面積と四腔断面像における左室長から、

$$\text{左室容積} = \frac{5}{6} \times \text{左室面積} \times \text{左室長}$$

として近似的に求める方法である<sup>7)</sup>。この方法の使用にあたっては、胎児では右室圧と左室圧が等圧で心室中隔が扁平になっており、幾何学的推定が不正確であることに注意が必要である。

## 2.2 MAPSE/TAPSE

左室・右室の長軸方向の収縮機能指標で、僧帽弁輪自由壁側／三尖弁輪自由壁側の長軸方向の移動距離がそれぞれ MAPSE/TAPSE である。心尖が 12 時もしくは 6 時方向になるように四腔断面像を描出し、カーソルを心室中隔と平行になるように置いて M-mode 法を用いて計測して算出される (Fig. 4B)。これまでに複数の正常値 (Z 値) が報告されているほか、双胎間輸血症候群、胎児心不全、母体糖尿病などで検討されている<sup>8)</sup>。

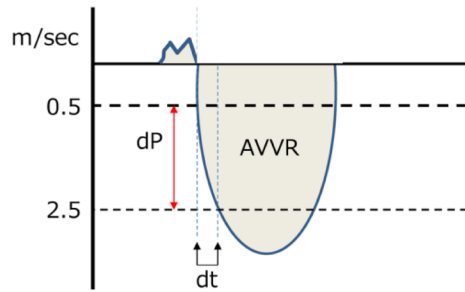
正常単胎の胎児では MAPSE と TAPSE は在胎週数と共に大きくなり、MAPSE のほうが TAPSE より小さい。

なお、出生後の心エコーでは TAPSE はセクタプローブを使用して心尖部四腔断面において三尖弁輪にカーソルを置いて計測するため、心室中隔には平行ではなく厳密には計測の方向が異なっている。

長軸方向の収縮機能指標としては組織ドプラ法による S' (収縮期房室弁輪最大移動速度) を用いた評価についても報告されている。

## 2.3 dP/dt

dP/dt は、心室内圧の時間変化曲線の一次微分関数 (傾き) で、その最大値 max dP/dt は通常は等容収縮期に得られ、後負荷の影響を受けにくい心室収縮機能の指標となる<sup>9)</sup>。心室収縮機能が良好であれば心室圧は急速に上昇するため高値となる。心エコーでは、こ



れを房室弁逆流の連続波ドプラ波形の立ち上がり速度の時間変化から簡易ベルヌーイ式を基に算出し、収縮機能の指標の一つとしている。出生後の心エコーでは房室弁逆流血流速度が 1→3 m/s まで上昇するのにかかる時間から算出されるが、胎児心エコーでは、房室弁逆流血流速度が 0.5→2.5 m/s まで上昇するのにかかる時間を dt とし、dP は簡易ベルヌーイ式を用いて  $(2.5)^2 \times 4 - (0.5)^2 \times 4 = 24 \text{ mmHg}$  であるので、そこから dP/dt を算出する (Fig. 5)。800 mmHg/sec 以下は低値で、400 mmHg/sec 以下は重度の収縮機能低下と考えられる<sup>5)</sup>。なお、dP/dt は最大値が心室収縮機能の指標となるが、胎児では心室圧が低いため、2.5 m/s でも血流波形のピークに近く、流速の増加率が低下している部分にあたる場合には正確な収縮機能を反映しない結果が算出されてしまうため、1→2 m/s で計測するなどの工夫が必要であるが、計測の誤差が大きくなる可能性がある。

## 3. 心室拡張機能評価

心室拡張機能の指標としては、房室弁流入波形とその拡張期充満時間 (Diastolic Filling Time; DFT), MPI などがあげられている<sup>1,5)</sup>。もちろん、中心静脈圧上昇が心室拡張機能の障害を反映している場合が多いことから、前述した中心静脈圧上昇を反映する指標は心室拡張機能の指標の一部となる。

### 3.1 房室弁流入波形と DFT

胎児においても房室弁流入波形は心室拡張に伴う拡張早期の E 波と、心房収縮に伴う拡張後期の A 波の 2 峰性である。正常の小児から成人では E 波 > A 波であるが、胎児では E 波 < A 波である。E 波、A 波の流速はともに経時的に増加するが E 波の流速の増加のほうが大きく E/A は経時的に上昇し妊娠初期で約 0.5、中期で約 0.8 と報告されており、出生直前には新生児の正常値に近づく<sup>1)</sup>。これは胎児心室の拡張機

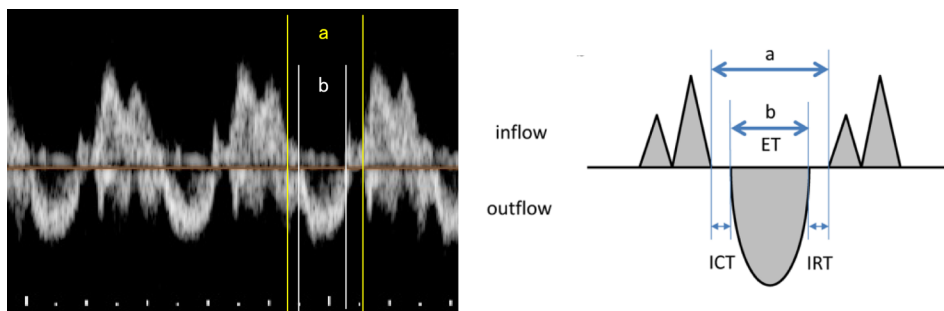


Fig. 6 左室流入・流出血流ドプラ波形を用いた Myocardial Performance Index (MPI) の計測  
文献 1) より引用.

能が経時的に改善することを反映していると考えられている。

房室弁流入波形の計測は、血流方向（心室中隔）が超音波ビームとなるべく平行になるように四腔断面像を描出し、サンプルボリュームは房室弁の直下（房室弁開放時の弁尖の高さ）に置いて血流波形を記録して行う。

DFT は房室弁流入血流の持続時間として房室弁流入波形から計測され、1 心周期の時間で除した corrected DFT (DFTc) で評価される。心室拡張機能が悪化すると DFTc は低下し、房室弁流入波形は 1 峰性となる。

大動脈弁狭窄による重症心不全、双胎間輸血症候群受血児のうっ血性心不全、胎児発育不全の予後不良例などでこうした変化が報告されている<sup>1)</sup>。また、房室弁流入波形の 1 峰性化は予後不良の所見として CVPS にも取り入れられている<sup>10)</sup>。ただし、正常心機能の場合でも胎動などで心拍数が増加している時には 1 峰性となることがあるので慎重に判断する必要がある。

#### 4. 心室の統合機能評価

##### 4.1 Myocardial Performance Index (MPI) (=Tei index)

心周期における房室弁閉鎖から半月弁開放までの等容収縮時間 (Isovolumetric Contraction Time; ICT), 半月弁閉鎖から房室弁開放までの等容弛緩時間 (Isovolumetric Relaxation Time; IRT) はそれぞれ収縮障害、拡張障害により延長する。MPI は心室流入終了から開始までの時間 (a) と心室駆出時間 (b) より、 $MPI = (a - b) / b$  として算出されるが、これは  $(ICT + IRT) / b$  と同義である (Fig. 6)。このため心室の収縮機能・拡張機能いずれの低下でも MPI は増大し、心室収縮機能と拡張機能の統合指標とされる。胎児での正常値はこれまでにさまざまな報告がされているが、Ghawi らの報告によると左室  $0.464 \pm 0.08$ 、右室

$0.466 \pm 0.09$  とされている<sup>11)</sup>。週数による変化は報告によって異なり一定の見解はない<sup>12)</sup>。

胎児の左室においては、左室内でサンプルボリュームを広くして血流を計測することによって左室流入血流・流出血流を同時に記録することができるため、この波形により計測する。一方、右室では三尖弁と肺動脈弁が離れているため通常は同時記録ができず、それぞれの血流波形を別時相で記録して計測しなくてはならず、胎児心拍数の変動が少ないタイミングで記録する必要がある。Dual Doppler 機能を備える心エコー装置であれば同時記録ができる。また、弁のクリックを用いて ICT, IRT, 心室駆出時間をそれぞれ計測する方法 (modified MPI と呼ばれる) も提唱されている<sup>13)</sup>。

MPI は子宮内発育遅延や双胎間輸血症候群の症例で検討されているほか、Inamura らは重症 Ebstein 病／三尖弁異形成において左室の MPI と生命予後が関係すると報告している<sup>12, 14)</sup>。

##### 4.2 心拍出量

弁輪径から計算した大動脈・肺動脈の断面積と、大動脈・肺動脈弁上の血流波形をトレースした速度時間積分値 (Velocity Time Integral; VTI) との積が 1 回拍出量で、左室・右室の心拍出量は 1 回拍出量と心拍数の積として、

$$\text{心拍出量} = \pi \times \left( \frac{\text{大動脈・肺動脈弁輪径}}{2} \right)^2 \times \text{大動脈・肺動脈 VTI} \times \text{心拍数}$$

と計算される。胎児循環では左室・右室から拍出された血液は 8 割以上が体循環へ灌流しており、左室と右室の心拍出量の合計である複合心拍出量 (combined cardiac output) の胎児における正常値は週数によらず  $425 \text{ mL/min/kg}$  とされている<sup>15)</sup>。

血流計測において注意すべき点は、血流と超音波ビームがなるべく平行になるように計測することで、

Table 1 ドブラ入射角と計測誤差

角度	cos	誤差
0°	1.00	0%
10°	0.98	2%
20°	0.93	7%
30°	0.86	14%
45°	0.70	30%
60°	0.50	50%

文献 16) より引用・改変.

角度が 20 度を超えないようにする. 血流と超音波ビームのなす角度を $\theta$ とすると理論上  $\cos \theta$  だけ過小評価することになり, 角度が大きくなるにしたがって誤差が大きくなる. 20 度では 7% の誤差であるが, 30 度では 14% の誤差となる (Table 1)<sup>16)</sup>.

なお, 出生後の心エコーにおいては VTI の計測は血管径を計測した弁輪部で血流波形を記録して行われるのに対して, 前述の複合心拍出量に関する胎児心エコーの報告では大動脈弁直上部で計測されており, 前述の正常値を用いる場合には計測部位に注意する必要がある. 新生児において, 弁上部での計測では弁輪部での計測と比較して VTI が大きくなることが報告されている<sup>17)</sup>.

## 5. 胎児心不全の予後評価

### 5.1 CVPS

CVPS は心機能・循環不全の指標 5 項目 (胎児水腫の有無, 臍帯静脈・静脈管のドブラ波形, CTAR, 心機能 (FS, 房室弁流入波形パターン), 臍帯動脈ドブラ波形) を合わせてスコア化したもので, 合計 10 点から各項目それぞれ 0~2 点を減点してスコアを算出する (Fig. 3).

これまでに胎児水腫, 先天性心疾患, 胎児発育遅延, 高心拍出性疾患, 双胎間輸血症候群などで CVPS と胎児循環不全との関係が検討されている<sup>1,5)</sup>.

## 6. 新しい技術を使用した心機能評価

心エコー機器の技術的進歩により, Speckle tracking 法を用いたストレイン計測や 3D 心エコーなどの新しい技術を用い, 胎児でも心機能評価をより正確に行える可能性がある. ここではいずれも心電図を取得しなくても計測できる, Speckle tracking 法による左右心室のストレイン計測と Spatio-Temporal Imaging Correlation (STIC) 法により取得した 4D 画像を用いた EF の計測について示す.

### 6.1 Speckle tracking 法による心室のストレイン計測

ストレインは初期長からの長さの変化率を示す指標で, 初期長を  $L$ , 初期長からの長さの変化を  $\Delta L$  とすると,  $\text{ストレイン} = \Delta L / L (\%)$  と表される. Speckle tracking 法は, エコー画像上の小斑点 (スペックル) をフレームごとにパターンマッチングして追跡することによって 2 点間のストレインを計測する方法である. Speckle tracking 法によるストレインは画像の角度に依存せずに計測できる. ストレインは四腔断面像から計測される長軸方向の Longitudinal strain, 短軸像から計測される円周方向の Circumferential strain と短軸方向の Radial strain の 3 方向の成分に分けて解析されるが, 胎児では主に Longitudinal strain が計測されている.

ストレインは四腔断面像もしくは短軸像の画像を記録し, それをオフラインで解析して計測する. ストレイン解析を行う際には, 記録した画像の画質が良好であることに加えて, 胎児心拍数は 140bpm 前後と速いために画像のフレームレートが十分に高いことが重要で, フレームレートが低いとストレイン値が不正確になる可能性がある. 本来は心電図を基に 1 心周期を判定して計測されるが, 胎児では心室壁の動きから 1 心周期を設定して解析が行われる. 現在複数のメーカーの心エコー装置で胎児のストレイン計測が可能である (Fig. 7). ただし心エコー装置・解析ソフトウェアによって解析アルゴリズムが異なるため算出されるストレイン値も異なることに注意が必要である<sup>18)</sup>. これまでに各メーカーの装置により計測された胎児心室のストレイン値が多数報告されているが, 値や在胎週数による変化は報告により一定しない. 本邦からも多施設共同研究による多数例の日本人正常胎児のストレイン値が報告されており, 左室, 右室の Global Longitudinal Strain; GLS (心室全体の長軸方向ストレイン) はそれぞれ  $-24.3 \pm 3.5\%$ ,  $-23.5 \pm 3.7\%$  で, 在胎週数が進むにつれて増加 (絶対値は低下) するとされている<sup>19)</sup>.

### 6.2 STIC 法による 4D 画像を用いた EF の計測

通常, 高画質でフレームレートが高い 4D エコー画像を取得するためには, 複数の心拍の画像を組み合わせるために心電図同期が必要であるが, 胎児は心電図を取得することができない. STIC 法は心電図同期を必要とせず, 画像上の心臓の周期的な変化を読み取ることで胎児の心拍数・心周期を検出し, 心臓全体をスキャンして取り込んだ画像データを, 胎児の心周期に合わせてそれぞれ 3D 画像として合成して 1 心拍分の心臓全体の動画像を構築する 4D 超音波技術であ



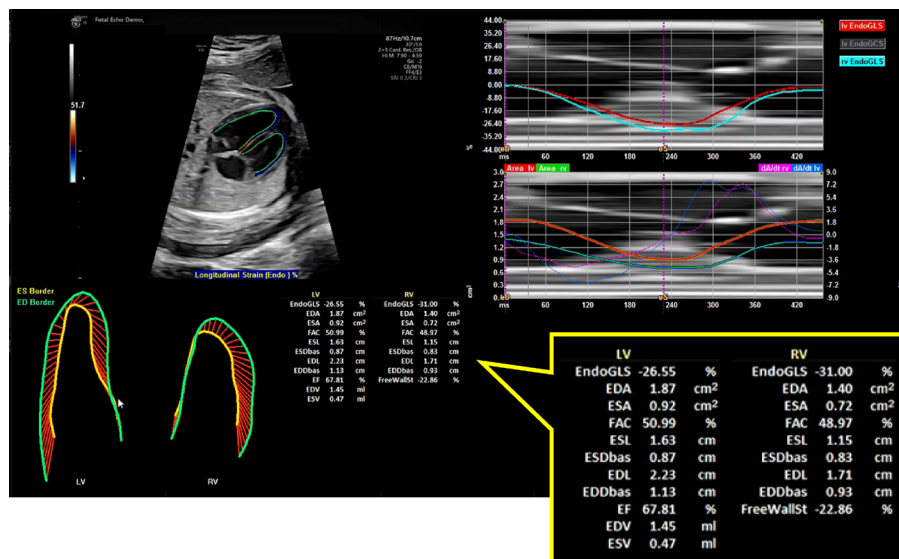


Fig. 7 Speckle tracking 法を用いた胎児左室・右室のストレイン解析結果画面  
データを拡大して示す。

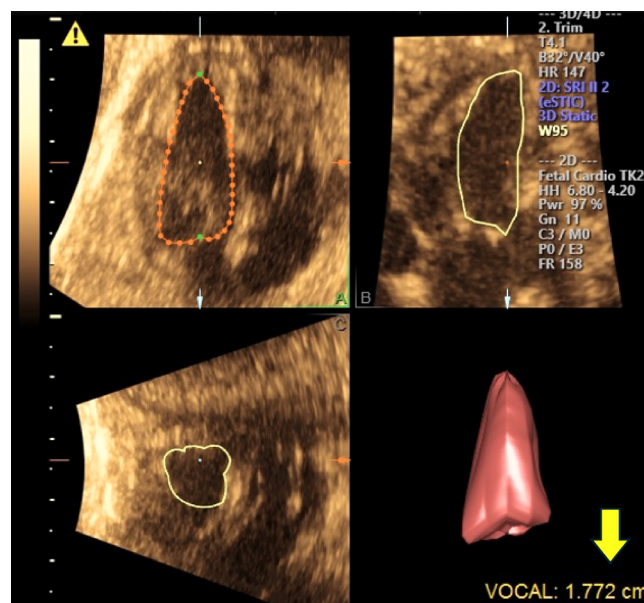


Fig. 8 Spatio-Temporal Imaging Correlation (STIC) 法によって取得した 3D データを Virtual Organ Computer-aided Analysis (VOCAL) を用いて解析して心室容積を算出した計測結果画面  
矢印が容積の計測結果。

る。画像の取得には専用の超音波診断装置とプローブを必要とする。

STIC 法を用いて取得した 4D 画像データを, Virtual Organ Computer-aided Analysis (VOCAL) を用いて解析することで心室容積を算出することができる (Fig. 8)。この方法を用いて計測した正常胎児の在胎週数と推定体重による心室容積の標準曲線が報告されている<sup>20)</sup>。EF は在胎週数によらず一定とされ, 左

室, 右室の EF の平均値はそれぞれ 45%, 46% と報告されている。

## おわりに

胎児心機能評価について, 現在一般的に用いられる評価法と新しい技術を使用した評価法について概説した。胎児循環の特異性と胎児心エコーによる評価の限



界を理解し、正しい評価を行う一助になれば幸いである。また、今後新しい技術の汎用性が高まって広く利用されることにより、より正確な胎児心機能評価が行われることが期待される。

## 利益相反

本論文に関して申告すべき COI はありません。

## 引用文献

- 1) 日本小児循環器学会：胎児心エコー検査ガイドライン (第2版)。日小児循環器会誌 2021; 37: S1.1–S1.57
- 2) Inamura N: Physiology of fetal circulation. *Nihon Shoni Junkanki Gakkai Zasshi* 2016; 32: 451–461
- 3) Kanazaki T, Chiba Y: Evaluation of the preload condition of the fetus by inferior vena caval blood flow pattern. *Fetal Diagn Ther* 1990; 5: 168–174
- 4) Rizzo G, Capponi A, Arduini D: 36 Fetal cardiac function in normal and growth-restricted fetuses, in Yagel S, Silverman NH, Gembruch U (eds): *Fetal Cardiology* 2nd edition. New York, Informa Healthcare, 2009, pp531–546
- 5) Moon-Grady AJ, Donofrio MT, Gelehrter S, et al: Guidelines and recommendations for performance of the fetal echocardiogram: An update from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2023; 36: 679–723
- 6) 日本循環器学会：2021年改訂版 循環器超音波検査の適応と判読ガイドライン。 [https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/JCS2021\\_Ohte.pdf](https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/JCS2021_Ohte.pdf)
- 7) Eidem B, O'Leary P: 3 quantitative methods in echocardiography-basic techniques, in Eidem BW, O'Leary PW, Cetta F (eds): *Echocardiography in Pediatric and Adult Congenital Heart Disease* 2nd ed. Philadelphia, Wolters Kluwer, 2015, pp38–61
- 8) Gardiner HM, Pasquini L, Wolfenden J, et al: Myocardial tissue Doppler and long axis function in the fetal heart. *Int J Cardiol* 2006; 113: 39–47
- 9) 渡辺 淳：III. 観血的検査法による心機能の評価 2. 左室内圧曲線から何がわかるか？, 松崎益徳, 本郷 実編：新・心臓病診療プラクティス 3. 心機能を識る。東京, 文光堂, 2004, pp176–184
- 10) Mäkilä K, Räsänen J, Mäkilä T, et al: Human fetal cardiovascular profile score and neonatal outcome in intrauterine growth restriction. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2008; 31: 48–54
- 11) Ghawi H, Gendi S, Mallula K, et al: Fetal left and right ventricle myocardial performance index: Defining normal values for the second and third trimesters-single tertiary center experience. *Pediatr Cardiol* 2013; 34: 1808–1815
- 12) Hernandez-Andrade E, Benavides-Serralde JA, Cruz-Martinez R, et al: Evaluation of conventional doppler fetal cardiac function parameters: E/A ratios, outflow tracts, and myocardial performance index. *Fetal Diagn Ther* 2012; 32: 22–29
- 13) Oliveira M, Dias JP, Guedes-Martins L: Fetal cardiac function: Myocardial Performance Index. *Curr Cardiol Rev* 2022; 18: e271221199505
- 14) Inamura N, Taketazu M, Smallhorn JE, et al: Left ventricular myocardial performance in the fetus with severe tricuspid valve disease and tricuspid insufficiency. *Am J Perinatol* 2005; 22: 91–97
- 15) Kenny JF, Plappert T, Doubilet P, et al: Changes in intracardiac blood flow velocities and right and left ventricular stroke volumes with gestational age in the normal human fetus: A prospective Doppler echocardiographic study. *Circulation* 1986; 74: 1208–1216
- 16) 田中 篤, ほか：第1章 超音波診断法の基礎と臨床応用における基本的事項, 吉川純一編：臨床心エコー図学 第3版。東京, 文光堂, 2008, pp2–55
- 17) Huang J, Singh Y, Adie M, et al: Effect of assessing velocity time integral at different locations across ventricular outflow tracts when calculating cardiac output in neonates. *Eur J Pediatr* 2023; 182: 4433–4441
- 18) Köster HA, Hammer K, Braun J, et al: Comparison of strain and dyssynchrony measurements in fetal two-dimensional speckle tracking echocardiography using Philips and TomTec. *J Perinat Med* 2020; 48: 266–273
- 19) Akazawa Y, Yasukochi S, Takei K, et al: Fetal HQ Study Group: Normal values and distribution of ventricular global longitudinal strain in 513 healthy fetuses measured by two-dimensional speckle-tracking echocardiography: A multi-institutional cohort study. *Heart Vessels* 2024; 40: 414–425
- 20) Uittenbogaard LB, Haak MC, Spreeuwenberg MD, et al: Fetal cardiac function assessed with four-dimensional ultrasound imaging using spatiotemporal image correlation. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2009; 33: 272–281
- 21) 石井徹子：胎児心機能の評価。日小児循環器会誌 2016; 32: 379–386