

Review

<スペシャリストシリーズ：3. 胎児心機能評価>

胎児心機能評価

加地 剛

徳島大学病院 産科婦人科

Assessment of Fetal Cardiac Function

Takashi Kaji

Department of Obstetrics and Gynecology, Institute of Biomedical Sciences, Tokushima University Graduate School,
Tokushima, Japan

Fetal cardiac function is assessed using ultrasonography with both fetal-specific and pediatric/adult echocardiographic parameters. Recently, the cardiovascular profile score, a composite index of these parameters, has been introduced for comprehensive assessment. Recent evidence also indicates that various conditions, including fetal growth restriction and gestational diabetes, influence fetal cardiac function. Alterations in fetal cardiac function are linked to the Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) hypothesis.

Keywords: fetus, cardiac function, cardiovascular profile score, cardiothoracic ratio

胎児における心機能評価は超音波検査により行われる。その評価は、成人・小児領域で用いられる評価法に加え、静脈管や臍帯動脈の血流評価など胎児特有の評価法が用いられる。最近はこの評価項目を統合してスコア化した Cardiovascular Profile Score (CVPS) が用いられることも多い。胎児における心機能評価の目的は、主に児の重症度評価や娩出時期の決定である。また近年、胎児発育不全や糖代謝異常合併妊娠は、胎児期から軽度の胎児心機能の変化を起こすことがわかってきており、胎児心機能評価は将来的な疾患発症（Developmental Origins of Health and Disease: DOHaD）の観点からも注目されている。

はじめに

胎児における心機能評価は、心疾患および心外疾患（双胎間輸血症候群やガレン静脈瘤など）において、重症度評価や娩出時期の決定などに主に用いられる。また近年、胎児発育不全や糖代謝異常合併妊娠では軽度の胎児心機能の変化（リモデリング）を起こすことがわかってきており、胎児心機能は将来的な疾患の発症（Developmental Origins of Health and Disease: DOHaD）の観点からも注目されている^{1,2)}。

本稿では胎児循環の概要を解説し、超音波による胎児心機能評価法のうち、現在、臨床に使われている方

法について、その実際を中心に説明する。詳細については日本胎児心臓病学会やアメリカ心エコー図学会のガイドライン、稲村、石井らの胎児循環および心機能評価の解説を是非参照していただきたい³⁻⁶⁾。

胎児循環

出生後は右心室と左心室は直列循環であり、右心室は肺循環、左心室は体循環をそれぞれ担っている。一方、胎児では右心室と左心室は並列循環をなし、右心室の拍出量が左心室の約 1.4 倍あり右心室優位である^{7,8)} (Fig. 1)。胎児循環の血流配分については報

著者連絡先：加地 剛 (E-mail: tkaji@tokushima-u.ac.jp)

〒770-8503 徳島県徳島市蔵本町 3-8-15 徳島大学病院 産科婦人科

doi: 10.9794/jspccs.40.250

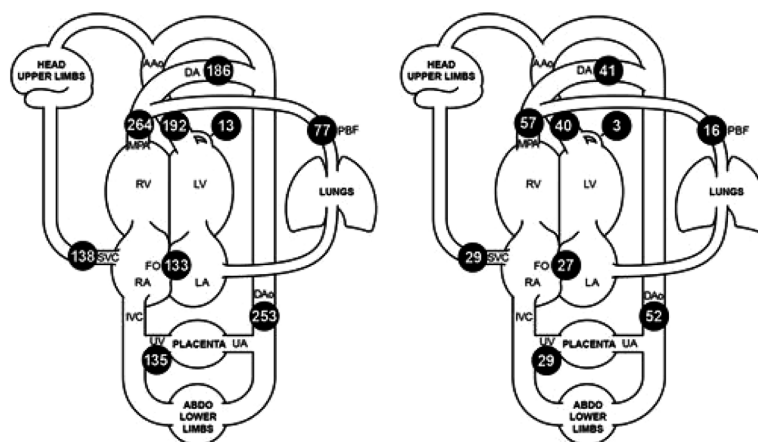


Fig. 1 Distribution of the normal human fetal circulation measured by phase-contrast MRI in 40 late-gestation fetuses expressed as mean flows (left) and converted to modeled mean percentages of the combined ventricular output (right). Coronary blood flow estimated based on fetal lamb findings, FO flow calculated as the difference between LV output and PBF.

AAo, ascending aorta; DA, ductus arteriosus; DAo, descending aorta; FO, foramen ovale; LA, left atrium; LV, left ventricle; MPA, main pulmonary artery; PBF, pulmonary blood flow; RA, right atrium; RV, right ventricle; SVC, superior vena cava; UA, umbilical artery; UV, umbilical vein. Reprinted with permission from reference 7).

告により若干異なり、Fig. 1 は妊娠後期のヒト胎児において MRI から算出した報告である⁷⁾。左心室から拍出された血液の約 70% は上半身に向かい、残りの約 30% が大動脈狭部を通り下半身に向かう。一方右心室から拍出された血液の約 30% が肺に向かい、残りの約 70% は動脈管を通り下半身・胎盤に向かう。下半身に向かう血流の約 80% は右心室から拍出されたものである。すなわち、左心室は上半身の循環、右心室は胎盤を含んだ下半身の循環を主に担っている。なお下半身に向かう血流の約 60% (総心拍出量の約 30%) は胎盤に流れており、胎盤の血管抵抗の上昇は後負荷の上昇として心臓に影響を与える。心室の圧については心時相により若干の差はあるものの、右心室と左心室はほぼ等しい。

胎児心機能評価

胎児における心機能評価は超音波検査により行われる。その評価は、成人・小児領域で用いられる収縮能や拡張能の評価方法に加え、静脈管や臍帯動脈の血流評価など胎児特有の循環評価が用いられる。最近ではこれらの評価項目を統合してスコア化した Cardiovascular Profile Score (CVPS) が用いられることも多い⁹⁾ (Fig. 2)。通常、心機能の低下は、拡張能の低下が先に起こり、収縮能の低下が明らかになるのは心機能低下の末期とされる。

胎児の心臓超音波検査

現在、主に B mode 法、M mode 法、カラードプラ、パルスドプラ法が用いられる。胎児超音波では、妊娠週数、母体の体格、羊水量などさまざまな影響を受ける。また胎位・胎向がさまざまであり、常に一定の位置や方向からアプローチすることが困難である。胎児が適切な胎位・胎向でない場合、母体を側臥位にしたり、胎児が動くのを待つことも必要となる。また胎児の呼吸様運動はパルスドプラ法での計測に影響を与えるため、呼吸様運動のないときに計測する。静脈では特にその影響が強い。

胎児心機能評価項目

1. Cardiovascular Profile Score (CVPS)

5つの評価項目から、心機能を総合的に評価するのである。評価項目は、胎児水腫の有無、静脈血流波形 (静脈管と臍帯静脈)、心胸郭断面積比 (cardiothoracic area ratio: CTAR)、心機能 (右心室・左心室の短縮率と房室弁血流パターン)、臍帯動脈の血流波形の5つである (Fig. 2)。各項目2点満点、合計10点満点で採点する。CVPSは胎児水腫、先天性心疾患、胎児発育不全など様々な病態で胎児予後との関係が示されている¹⁰⁻¹²⁾。CVPSは総合的な心機能の指標として使いやすいだけでなく、測定すべき項目およびその重症度が明示され、概念的であるものの評価項目間の重症度もわかるため、心機能評価の全体像を理解し









	2 points	1 point	0 point
Hydrops	None	Ascites or pleural effusion or pericardial effusion	Skin edema
Venous Doppler			
UV			atrial pulsation 
DV		atrial reversal 	
Heart size			
CTAR	0.20-0.35	0.35-0.50	>0.50 or <0.20
Cardiac function			
TR/MR	Non holosystolic TR/MR	Holosystolic TR or	Holosystolic MR or TR dP/dT <400 or
RV/LV FS	>0.28	<0.28	
TV/MV inflow	Biphasic		Monophasic
Arterial Doppler			
UA			
		Absent end-diastolic flow	Reversed end-diastolic flow

Fig. 2 Cardiovascular Profile Scores (CVPS)

各項目 2 点満点, 合計 10 点満点で採点する。

CTAR, cardiothoracic area ratio; DV, ductus venosus; FS, fractional shortening; LV, left ventricle; MR, mitral regurgitation; MV, mitral valve; RV, right ventricle; TR, tricuspid regurgitation; TV, tricuspid valve; UA, umbilical artery; UV, umbilical vein.

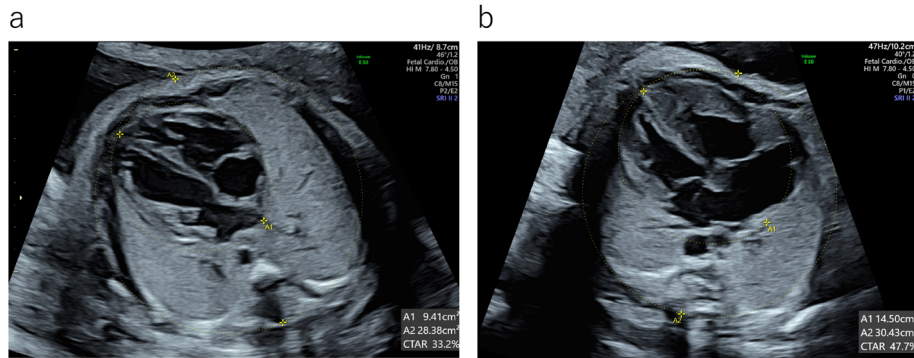


Fig. 3 心胸郭断面積比 (CTAR)

a : 正常 (CTAR: 33%). b : 心拡大 (CTAR: 47%): 胎児発育不全児に認められたもの。CTAR, cardiothoracic area ratio.

やすい。以下 CVPS の項目を中心に述べる。

2. 心胸郭断面積比 (cardiothoracic area ratio: CTAR)

心臓の面積を胸郭の面積で割った値を%で表したものである。四腔断面を描出し、それぞれの面積を ellipse 法 (楕円で近似) で計測する^{3, 13)} (Fig. 3)。心臓は心膜の外側までとし、胸郭は皮膚や筋肉を除いた肋骨・脊柱を含む胸郭の外側までとする³⁾。なお胸郭の計測については日本胎児心臓病学会のガイドラインを含め胸郭の外側とするものが多いが、アメリカ心エコー図学会のガイドラインでは胸郭の内側 (肋骨の内側) としている^{3, 4, 14, 15)}。正常値は 20~35% である (Fig. 3a)。35% 以上であれば心拡大と判定さ

れる (Fig. 3b)。心時相により心臓の面積が若干変動するため、当院では測定する時相を拡張期末期 (房室弁が閉鎖したとき) としている¹⁴⁾。胎児発育不全では CTAR は大きくなるが、特に横径が大きくなり globular と表現される¹⁾ (Fig. 3b)。

$$\text{CTAR}(\%) = \frac{\text{胸郭の断面積}}{\text{心臓の断面積}} \times 100$$

3. 房室弁逆流

三尖弁逆流は軽度のものは正常胎児でしばしば認められるが、汎収縮期に認められれば異常である。一方、僧帽弁逆流は正常では通常認めないため、認めた

ときは異常が疑われる。汎収縮期に認められれば高度の心機能異常が示唆される。

4. dP/dt

房室弁逆流速度の立ち上がりの傾きから収縮能を評価するものである。心収縮能が保たれていれば、心内圧は収縮早期に急峻に上昇するため、房室弁逆流速度の立ち上がりの傾きも急峻となる。一方、収縮能が低下すると圧の立ち上がりが鈍化するため房室弁逆流速度の立ち上がりも緩やかとなる。連続波ドプラもしくはパルスドプラ法にて房室弁逆流波形を記録し、逆流速度が0.5m/sから2.5m/sまで上昇するのにかかる時間 (ΔT) を計測する。簡易ベルヌーイ式

を用いるとこの間に心室圧は24mmHg上昇したと考えられ、 $dP/dt=24/\Delta T$ mmHg/sec として求められる (Fig. 4)。房室弁逆流が2.5m/s以下のときは、参考として ΔT を0.5m/sから2.0m/s ($dP/dt=15/\Delta T$) もしくは0.5m/sから1.5m/s ($dP/dt=8/\Delta T$) として求めることも行われる。800mmHg/sec以下は低値とされ、400mmHg/sec以下は重度の収縮能低下と考えられている⁹⁾。

$$dP/dt = 24/\Delta T \text{ mmHg/sec}$$

5. 心室内径短縮率 (fractional shortening; FS)

収縮能の指標として用いられる。各心室のFSはM

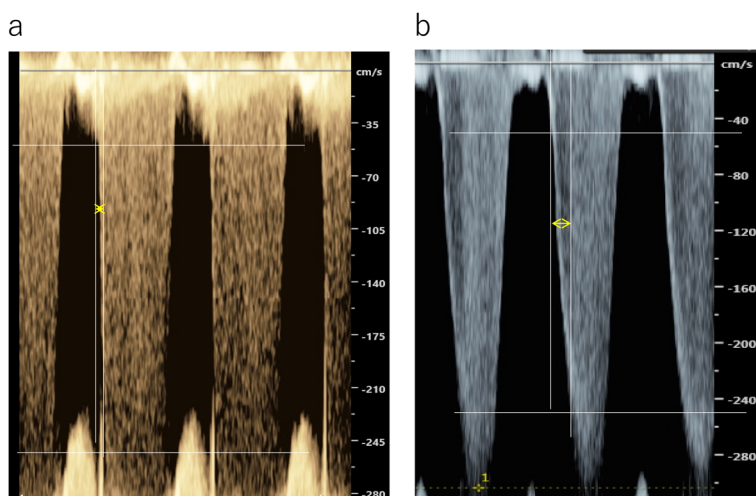


Fig. 4 dP/dt

三尖弁逆流から計測したもの。a：正常 ($dP/dt=24/0.022=1090$)。b：三尖弁逆流の立ち上がりが緩やかで dP/dT は低値 ($dP/dT=24/0.073=328$) である。

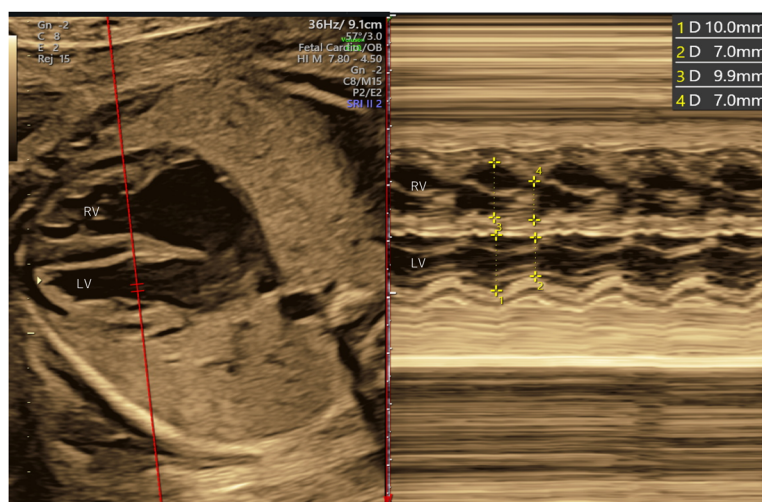


Fig. 5 心室内径短縮率 (FS)

正常胎児におけるFSの計測。左室 (LV) $FS=(10.0-7.0)/10.0=0.30$ 。右室 (RV) $FS=(9.9-7.0)/9.9=0.29$ 。FS, fractional shortening.

モード法を用いて計測した拡張期と収縮期の心室径から計算する。四腔断面で、カーソルを心室中隔に対してほぼ垂直になるように房室弁直下に設定し、各心室の拡張末期径と収縮末期径を計測する (Fig. 5)。拡張末期径と収縮末期径の差を拡張末期径で除することで算出される。右心室・左心室ともに正常値は週数によらず一定で 0.28~0.40 前後とされる¹⁶⁾。ただしカーソルの位置や角度などが少し変わると値が大きく変動してしまう¹⁶⁾。真の FS 低下は心不全がかなり進行した状態である。

$$FS = \frac{\text{拡張末期内径} - \text{収縮末期内径}}{\text{拡張末期内径}}$$

6. 房室弁流入波形 (E/A 比)

拡張能の指標として用いられる。心室流入血流波形である E 波 (拡張早期波: 心室弛緩に伴う受動血流) と A 波 (心房収縮波: 心房収縮に伴う拡張後期の血流) の比である。成人では、E 波が A 波よりも高い

が、胎児では E 波よりも A 波のほうが高い。これは胎児では拡張能が低い (弛緩能が低く、コンプライアンスも低い) ことによるとされ、流入血流における心房収縮の役割がより大きいことを示す。妊娠週数に伴い E/A 比も増加していく (Fig. 6)。胎児の E/A 比は妊娠初期で約 0.5, 中期で約 0.8 と増加する¹⁶⁻²⁰⁾。重度の心不全では E 波と A 波は融合し単峰性となるとされる^{9, 21)}。なお頻脈でも E 波と A 波を区別しにくくなる。

7. 静脈血流評価

中心静脈圧を推察する指標として、静脈の血流波形が用いられる。拡張期の後期である心房収縮期の血流波形 (心房収縮波 A 波) により評価する。パルスドプラによる血流計測は胎児の呼吸様運動の影響を受けるが、静脈血流では特に影響が大きい。呼吸様運動のないときに計測する。三尖弁閉鎖症や右室の閉塞性疾患などでは心不全の有無を反映せず、逆行性血流が認められるので注意する^{22, 23)}。

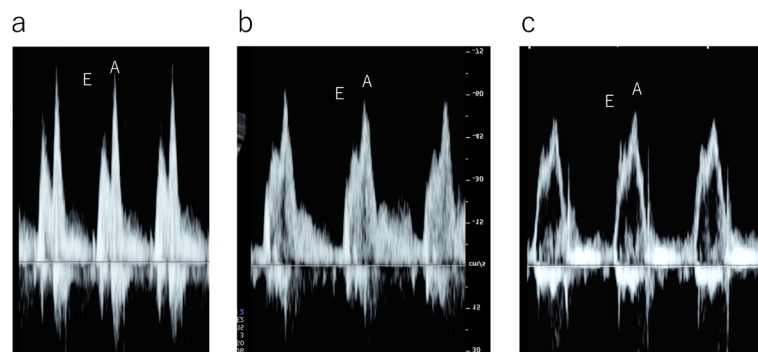


Fig. 6 右室流入血流波形 (E/A 比)

E/A 比は胎児では <1 であるが、妊娠週数に伴い増加していく。

a: 妊娠 19 週 E/A : 0.63. b: 妊娠 28 週 E/A : 0.71. c: 妊娠 34 週 E/A : 0.77.

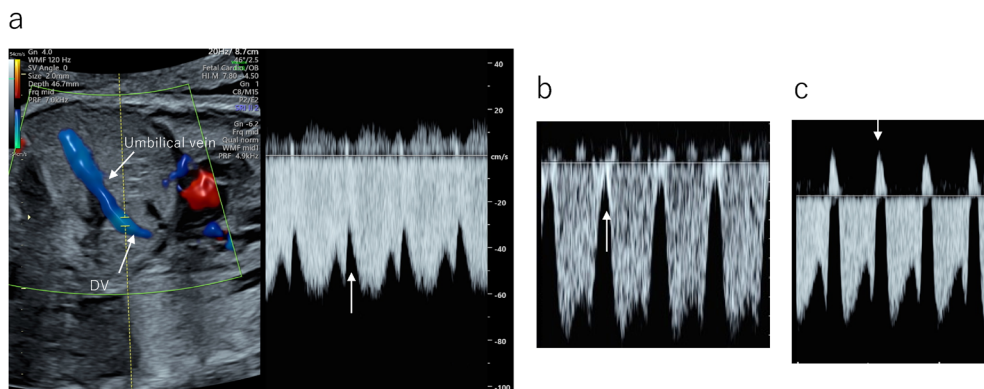


Fig. 7 静脈管血流波形

a: 正常 矢状断にて門脈から分岐する静脈管 (DV) の血流を計測 (矢印) が途絶。c: 心房収縮期の血流 (矢印) が逆流。

心房収縮期の血流 (矢印) も順行性である。b: 心房収縮期の血流 (矢印) が途絶。

・ 静脈管

静脈系の評価項目として最も使用されている。静脈管は肝循環をバイパスし門脈と下大静脈をつなぐ。腹部の正中矢状断もしくは横断像で描出する。血流が速いためカラードプラでエイリアシングにより容易に描出できる。心房収縮期も順行性の血流で notch として認められる (Fig. 7a)。中心静脈圧の上昇により、心房収縮期の血流が低下し Pulsatility Index (PI) は上昇する。心房収縮期血流の途絶や逆流は中心静脈圧の高度の上昇を示唆する所見として重要である^{12, 24)} (Fig. 7b, c)。

$$PI = \frac{\text{収縮期最高血流速度} - \text{拡張末期血流速度}}{\text{平均血流速度}}$$

・ 下大静脈・臍帯静脈

下大静脈（右心房への流入部）では、心房収縮期の血流（A波）は逆流波となる。心房収縮期の逆流速度と心室収縮期の流入速度の比である Preload Index

(PLI) が用いられる (Fig. 8)。0.5 以上は異常と考える^{25, 26)}。一方、臍帯静脈は正常では定常流であるが (Fig. 9a)、静脈圧の上昇に伴い pulsation (波動) を認めるようになる (Fig. 9b)。Pulsation の周期は心周期と一致しており心房収縮期に谷となる⁹⁾。胎児の呼吸様運動でも pulsation 様に描出されるが、心周期と一致せずに周期が長いことから区別される (Fig. 9c)。

$$PLI = \frac{\text{心房収縮期の逆流速度(A波)}}{\text{心室収縮期の流入速度(S波)}}$$

8. 動脈血流評価

各臓器の血管抵抗や循環状態を推察する指標として動脈の血流波形が用いられる。臍帯動脈は胎盤、中大脳動脈は脳の評価として用いられる。収縮期最高血流速度と拡張末期血流速度の差を、収縮期最高血流速度で除した Resistance Index (RI)、平均血流速度で除した Pulsatility Index (PI) で評価する。

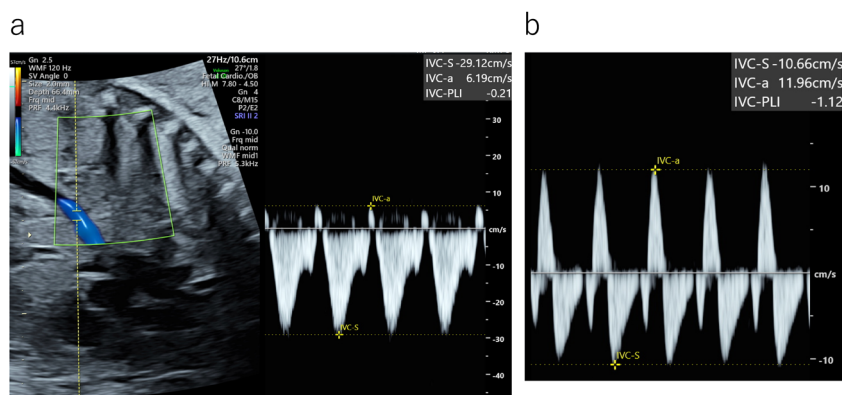


Fig. 8 下大静脈血流波形

a : 正常 矢状断にて右心房への流入部付近で計測。下大静脈では正常でも心房収縮により逆流波となる。Preload index (PLI) = 6.19/29.12=0.21。b : 心房収縮により逆流波が増高し PLI は顕著に上昇している。PLI=11.96/10.66=1.12。

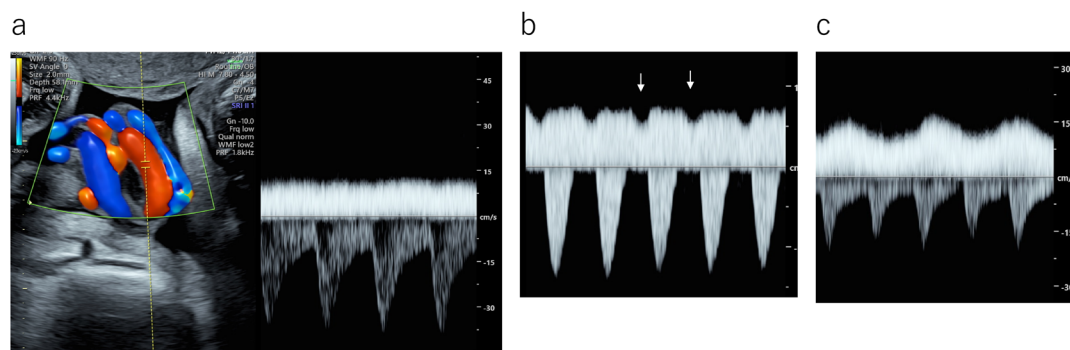


Fig. 9 臍帯静脈

a~c のパルスドプラ波形の上側が臍帯静脈血流、下側が臍帯動脈血流。a : 正常 定常流。b : 波動 心房収縮期に谷となっている。c : 胎児呼吸様運動による臍帯静脈血流の変動。変動の周期が長く、臍帯動脈の周期と一致しておらず波動ではない。

$$RI = \frac{\text{収縮期最高血流速度} - \text{拡張末期血流速度}}{\text{収縮期最高血流速度}}$$

$$PI = \frac{\text{収縮期最高血流速度} - \text{拡張末期血流速度}}{\text{平均血流速度}}$$

・臍帯動脈

free loop (胎盤の臍帯付着部, 胎児の臍部の双方から離れた部位) で計測する. 正常では胎盤の血管抵抗は非常に低いため, 拡張期も血流速度は速い (Fig. 10a). 胎児が低酸素状態やアシドーシスになると拡張期血流は低下し, RI や PI は上昇する. 臍帯動脈の途絶や逆流は胎児機能不全を示唆する所見である¹⁶⁾ (Fig. 10b, c). 胎児心エコー用のプリセットはパルスドプラ法のフィルタが高いため, 途絶は過剰診断となりやすく, 逆流は見逃されやすい. 途絶や逆流の判定は通常の胎児超音波の設定で行うかフィルタを下げる.

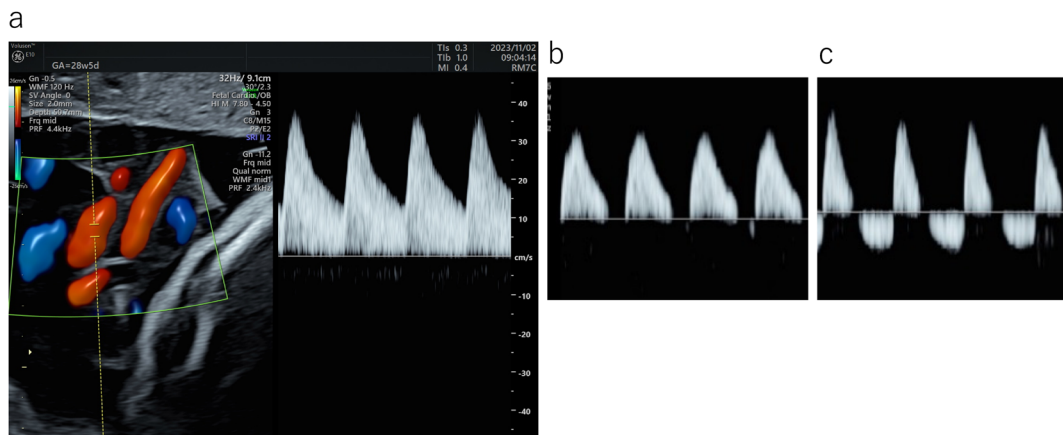


Fig. 10 臍帯動脈

a : 正常 胎盤の血管抵抗は低いため拡張末期も順行性の血流速度が速い. b : 拡張期血流途絶. c : 拡張期血流逆流.

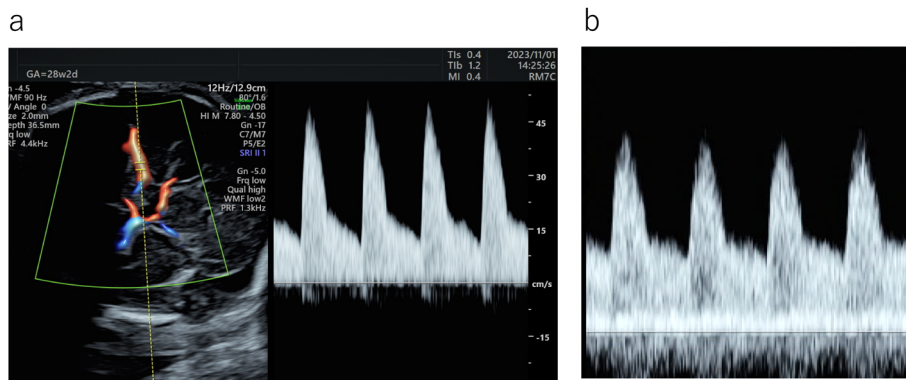


Fig. 11 中大脳動脈

a : 正常 中大脳動脈の基部で測定する. 正常では脳の血管抵抗は胎盤より高いため, 中大脳動脈の血流は臍帯動脈と比較し, 拡張期血流速度は遅く, RI や PI は高い. b : 拡張期血流速度が上昇している.

・中大脳動脈

中大脳動脈の基部で測定する. 正常では脳の血管抵抗は胎盤より高いため, 拡張期血流速度は遅く RI や PI は高い (Fig. 11a). 胎児が低酸素状態やアシドーシスになると脳への優先的な血流再分配 (brain sparing effect) が起こり, 中大脳動脈の拡張期血流は増加し RI や PI は低下する^{27, 28)} (Fig. 11b). 一方, HLHS など左心系の流出路障害がある心疾患において, MCA-RI が低値を示し, 神経学的予後との関連などが示唆されている²⁹⁾.

9. Tei index (myocardial performance index; MPI)

Tei index は, 収縮能の指標である等容性収縮時間 (ICT) と拡張能の指標である等容性弛緩時間 (IRT) の和を駆出時間 (ET) で除したものである. 収縮能, 拡張能いずれの低下でも Tei index は増加するため, 統合的な心機能を表す指標とされる³⁰⁾. パルスドプラ法で心室流入および流出血流波形を記録し, 心室

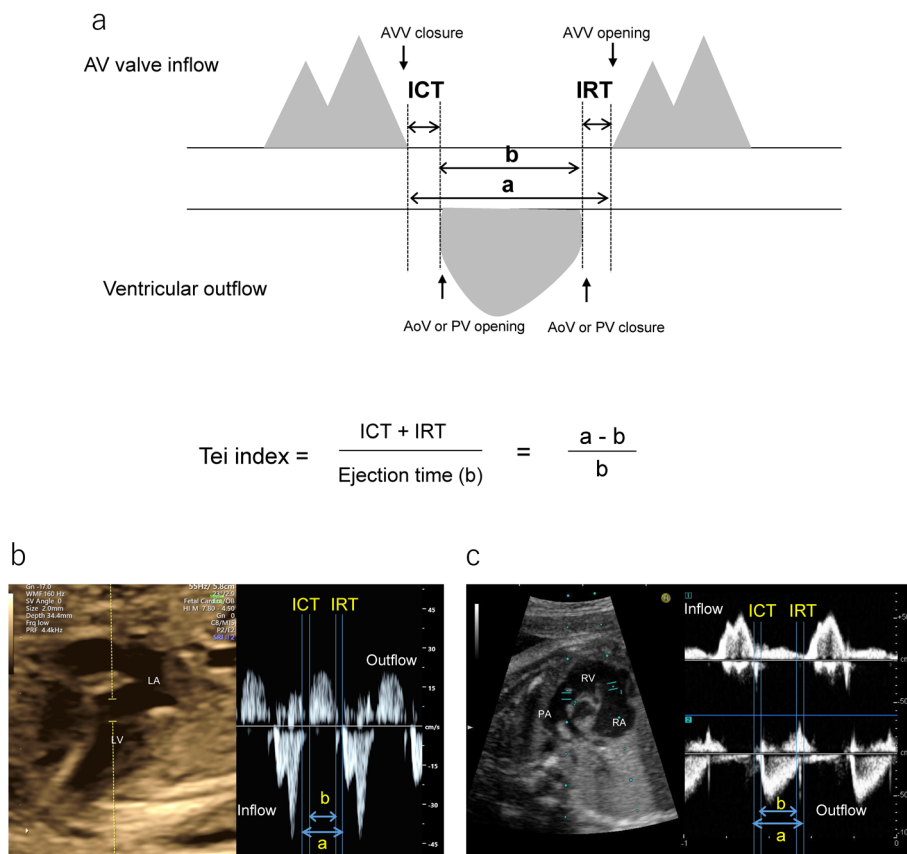


Fig. 12 Tei index (myocardial performance index; MPI)

a : 計測. b : 左心室. c : 右心室 : dual gate Doppler を使った計測.

AoV : 大動脈弁, PV : 肺動脈弁, ICT: isovolumic contraction time, IRT : isovolumic relaxation time, AVV : 房室弁.

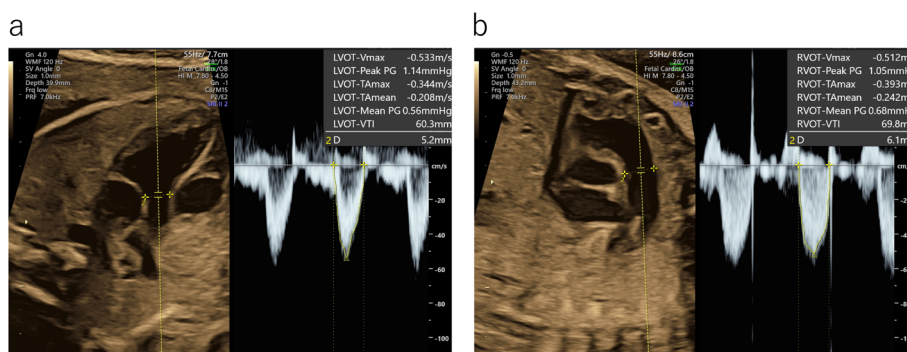


Fig. 13 総心拍出量 (combined cardiac output; CCO)

a : 左心室 CO $(0.52^2/4) \times 3.14 \times 6.03 \times 133$ (心拍数) = 170 mL/min. b : 右心室 CO $(0.61^2/4) \times 3.14 \times 6.98 \times 133 = 271$ mL/min.
CCO : 170 + 271 = 441 mL/min 推定体重は 0.956 kg であり体重当りの CCO は 461 mL/min/kg.

流入の終了から再開始までの時間(a)と駆出時間(b)を計測し $(a-b)/b$ として算出することが可能である (Fig. 12a). 左心室ではサンプルゲートを大きめにすることで流入および流出血流を同時に記録することが可能である (Fig. 12b). 右心室では流入路と流出路が離れているため双方の血流を同時に記録することは

困難であるため、別々に描出し計測する. 二つのサンプルゲートを持つ Dual gate Doppler を使うと右心室も同時に記録することが可能である (Fig. 12c). Tei index の正常値は報告により異なるが右心室 : 0.466 ± 0.09 , 左心室 : 0.464 ± 0.08 との報告があり, また妊娠週数により変化しないという報告と軽度増加すると

いう報告がある³¹⁾。

$$\text{Tei index} = \frac{\text{ICT} + \text{IRT}}{b} = \frac{a - b}{b}$$

10. 総心拍出量 (combined cardiac output: CCO)

CCOは左右心室の心拍出量の合計である。体重当りで評価され、正常では週数によらず425~465 mL/min/kg程とされる^{7,8)}。各心室の拍出量(CO)は、半月弁の弁輪部(大動脈弁と肺動脈弁)の断面積、同部位のドプラ波形をトレースしたvelocity time integral (VTI)、心拍数の積をもって算出する。CO (mL/min)=半月弁輪径 (cm)²/4×3.14×VTI (cm)×HR (/min) (ドプラ入射角度<20°)で求める (Fig. 13)。正常では右室拍出量は左室の約1.4倍とされ、右室優位である^{7,8)}。半月弁の弁輪径、ドプラの入射角度、サンプルゲートの位置などの少しの違いによりCOの値は大きく変わるため胎児では使いにくい面がある。

$$\text{CO (mL/min)} = \frac{\text{半月弁輪径 (cm)}^2}{4} \times 3.14 \times \text{VTI (cm)} \times \text{HR (/min)}$$

$$\text{CCO (mL/min/kg)} = \frac{\text{右心室CO} + \text{左心室CO}}{\text{推定体重 (kg)}}$$

まとめ

胎児心機能を一つの指標で評価するのは困難であり、CVPSの項目を中心に複数の指標から総合的に判断するようになる。また時間的変化を見ることも重要である。娩出時期の決定に際しては、胎児心機能だけでなく、妊娠週数、推定体重、well-being、心外異常などの評価も重要となる。

利益相反

本稿について、申告すべき利益相反 (COI) はない。

引用文献

- Rodríguez-López M, Cruz-Lemini M, Valenzuela-Alcaraz B, et al: Descriptive analysis of different phenotypes of cardiac remodeling in fetal growth restriction. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2017; **50**: 207-214
- Depla AL, De Wit L, Steenhuis TJ, et al: Effect of maternal diabetes on fetal heart function on echocardiography: Systematic review and meta-analysis. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2021; **57**: 539-550
- 日本胎児心臓病学会編：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
- Moon-Grady AJ, Donofrio MT, Gelehrter S, et al: Guide-

- lines and Recommendations for Performance of the Fetal Echocardiogram: An update from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2023; **36**: 679-723
- 稲村 昇：胎児循環生理。日小児循環器会誌 2016; **32**: 451-461
- 石井徹子：胎児心機能の評価。日小児循環器会誌 2016; **32**: 379-386
- Prsa M, Sun L, van Amerom J, et al: Reference ranges of blood flow in the major vessels of the normal human fetal circulation at term by phase-contrast magnetic resonance imaging. *Circ Cardiovasc Imaging* 2014; **7**: 663-670
- Mielke G, Benda N: Cardiac output and central distribution of blood flow in the human fetus. *Circulation* 2001; **103**: 1662-1668
- Huhta JC: Guidelines for the evaluation of heart failure in the fetus with or without hydrops. *Pediatr Cardiol* 2004; **25**: 274-286
- Hofstaetter C, Hansmann M, Eik-Nes SH, et al: A cardiovascular profile score in the surveillance of fetal hydrops. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2006; **19**: 407-413
- Wieczorek A, Hernandez-Robles J, Ewing L, et al: Prediction of outcome of fetal congenital heart disease using a cardiovascular profile score. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2008; **31**: 284-288
- Seravalli V, Miller JL, Block-Abraham D, et al: Ductus venosus Doppler in the assessment of fetal cardiovascular health: an updated practical approach. *Acta Obstet Gynecol Scand* 2016; **95**: 635-644
- Tongsong T, Tatiyapornkul T: Cardiothoracic ratio in the first half of pregnancy. *J Clin Ultrasound* 2004; **32**: 186-189
- García-Otero L, Soveral I, Sepúlveda-Martínez Á, et al: Reference ranges for fetal cardiac, ventricular and atrial relative size, sphericity, ventricular dominance, wall asymmetry and relative wall thickness from 18 to 41 gestational weeks. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2021; **58**: 388-397
- Awadh AM, Prefumo F, Bland JM, et al: Assessment of the intraobserver variability in the measurement of fetal cardiothoracic ratio using ellipse and diameter methods. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2006; **28**: 53-56
- DeVore GR: Assessing fetal cardiac ventricular function. *Semin Fetal Neonatal Med* 2005; **10**: 515-541
- Reed KL, Sahn DJ, Scagnelli S, et al: Doppler echocardiographic studies of diastolic function in the human fetal heart: Changes during gestation. *J Am Coll Cardiol* 1986; **8**: 391-395
- Godfrey ME, Messing B, Cohen SM, et al: Functional assessment of the fetal heart: A review. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2012; **39**: 131-144
- Van Splunder P, Stijnen T, Wladimiroff JW: Fetal atrio-ventricular flow-velocity waveforms and their relation to arterial and venous flow-velocity waveforms at 8 to 20 weeks of gestation. *Circulation* 1996; **94**: 1372-1378
- Tulzer G, Khowasathit P, Gudmundsson S, et al: Diastolic function of the fetal heart during second and third trimester: A prospective longitudinal Doppler echocardiographic study. *Eur J Pediatr* 1994; **153**: 151-154
- Mäkikallio K, Räsänen J, Mäkikallio T, et al: Human fetal cardiovascular profile score and neonatal outcome in intrauterine growth restriction. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2008; **31**: 48-54

- 22) Berg C, Kremer C, Geipel A, et al: Ductus venosus blood flow alterations in fetuses with obstructive lesions of the right heart. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2006; **28**: 137–142
- 23) Arya B, Krishnan A, Donofrio MT: Clinical utility of ductus venosus flow in fetuses with right-sided congenital heart disease. *J Ultrasound Med* 2014; **33**: 1563–1571
- 24) Sanapo L, Turan OM, Turan S, et al: Correlation analysis of ductus venosus velocity indices and fetal cardiac function. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2014; **43**: 515–519
- 25) Kanzaki T, Chiba Y: Evaluation of the preload condition of the fetus by inferior vena cava blood flow pattern. *Fetal Diagn Ther* 1990; **5**: 168–174
- 26) 廣岡芳樹, 村越 毅, 赤松信雄, ほか, 日本超音波医学会用語・診断基準委員会, 胎児静脈系血流の標準値検討小委員会: 胎児静脈血流波形基準値 (2013) 胎児静脈管 (ductus venosus: DV) PI, a/S および胎児下大静脈 (inferior vena cava: IVC) PLI (preload index), a/S の計測法と週数毎の基準値. *超音波医学* 2013; **40**: 597–600
- 27) Wladimiroff JW, vd Wijngaard JA, Degani S, et al: Cerebral and umbilical arterial blood flow velocity waveforms in normal and growth-retarded pregnancies. *Obstet Gynecol* 1987; **69**: 705–709
- 28) Dubiel M, Gudmundsson S, Gunnarsson G, et al: Middle cerebral artery velocimetry as a predictor of hypoxemia in fetuses with increased resistance to blood flow in the umbilical artery. *Early Hum Dev* 1997; **47**: 177–184
- 29) Berg C, Gembruch O, Gembruch U, et al: Doppler indices of the middle cerebral artery in fetuses with cardiac defects theoretically associated with impaired cerebral oxygen delivery in utero: Is there a brain-sparing effect? *Ultrasound Obstet Gynecol* 2009; **34**: 666–672
- 30) Tei C, Ling LH, Hodge DO, et al: New index of combined systolic and diastolic myocardial performance: A simple and reproducible measure of cardiac function—a study in normals and dilated cardiomyopathy. *J Cardiol* 1995; **26**: 357–366
- 31) 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