

Review

小児循環器専門医のための総説シリーズ 9

心臓カテーテル検査によって得られた結果を どう解釈するか

森 善樹

聖隷浜松病院小児循環器科

How to Interpret the Data Obtained during Cardiac Catheterization of Pediatric and Adult Congenital Heart Disease

Yoshiki Mori

Division of Pediatric Cardiology, Seirei Hamamatsu General Hospital, Shizuoka, Japan

As a result of advanced noninvasive imaging such as echocardiography, computed tomography, and magnetic resonance imaging, pediatric catheterization laboratories are now increasingly being used for therapeutic procedures. Diagnostic catheterization is no longer indicated during the routine preoperative evaluation of most congenital heart diseases. Indications for diagnostic catheterization are as follows: (1) when accurate physiological measurements are required including severity assessment of aortic or mitral stenosis or feasibility studies for a Fontan operation, (2) when the anatomic features are poorly visualized by noninvasive imaging, (3) when therapeutic procedures are planned, (4) when hemodynamic assessment is critical (to determine the presence of pulmonary vascular disease), or (5) when electrophysiological studies or biopsies are required. Thus, diagnostic catheterization still serves as the gold standard for anatomical and physiological assessment of patients with congenital heart disease, particularly for those with complex congenital heart diseases. This review will discuss the acquisition and interpretation of intravascular pressure, oxygen saturation, and angiographic images.

心エコー、CT、MRIなどの非侵襲的検査法の進歩に従い、心臓カテーテル造影検査はカテーテル治療の目的で施行されることが多くなり、多くの先天性心疾患（以下CHD）の術前のルーチンの検査として施行していた時代と比較してその適応は大きく変わった。現在の診断カテーテルの適応は、1) 大動脈弁、僧房弁狭窄の重症度やFontan型手術適応など、より正確な血行動態評価が必要な時、2) 心奇形の形態異常が非侵襲的検査法では十分に描出されず評価できない時、3) カテーテル治療を計画し、その前に施行する場合、4) 肺動脈閉塞性病変の有無を決定するなど、血行動態評価が治療方針の決めてとなる時、5) 電気生理学的検査、または生検が必要な時、などである。このように以前と診断カテーテルの適応は変わったが、未だCHDの、特に複雑心奇形の形態、血行動態を評価する“Gold Standard”な検査として施行されている。このReviewでは酸素飽和度、圧などから計算される血行動態の指標や造影所見などをいかに得て、どう解釈するかについて概説した。

Keywords: cardiac catheterization, pressure, shunt, vascular resistance, angiograms

はじめに

心臓カテーテル造影（以下心カテ）検査とは末梢血管から心臓内にカテーテルを挿入し、心臓、血管の各部位から血液を採取し、その酸素含有量を調べる血液

ガス分析、心臓、血管内の圧記録をして解析する心内圧解析、必要な部位で造影剤を注入する心臓血管造影の3つの柱からなる。日本小児循環器専門医修練目標の中で、心カテ検査に関するものとして“検査の適応とリスクを理解し、基本手技を習得し、血行動態、造

影所見を評価できる”とある。米国の小児循環器科医の Core training 期間に学ぶべきこととして 1) 心カテ検査の適応とリスク, 2) カテーテル治療の適応とリスク, 3) 圧波形の解釈, 4) 酸素飽和度のデータの解釈, 5) Fick の原理と短絡の計算, 6) 血管抵抗の計算, 7) 造影に関連し Angle-view を含めた基本技術, 解釈, 8) 放射線被曝の 8 つの項目を挙げている¹⁾。2) のカテーテル治療とリスクは総説シリーズの別項で扱われ, また 1) と 8) に関しては主題である“心臓カテーテル検査によって得られた結果をどう解釈するか”とは異なる。これら 3 つを除く 5 つの事項に焦点をあて解説する。5) の Fick の原理と短絡の計算, 6) 血管抵抗の計算に関しては“得られた結果をどう解釈”する前に, “どのようにしてその結果が得られたか, または得たか”という点で重要と考えたので, “データを得るうえでの注意点”についても記載した。

古くから行われている検査法がゆえに, 小児循環器関係の成書³⁻⁷⁾に必ずこの検査法の記載がある。1) の検査の適応, リスクは非常に重要な事項であり, 非侵修的画像診断法が進歩した現在の適応は以前とは異なる²⁾。リスクも含め成書³⁻⁵⁾などを参照してほしい。

1. 各部位の圧波形と異常波形の解釈

心, 血管内圧はその波形から A) 心室圧 (右室圧, 左室圧), B) 動脈圧 (肺動脈圧, 大動脈圧, 肺静脈楔入圧), C) 心房, 静脈圧 (右房圧, 左房圧, 上, 下静脈圧, 肺静脈圧, 肺動脈楔入圧, 冠状静脈圧) と 3 つに分かれる。これらの波形は心周期とともに特徴的波形を形成し, 呼吸とともに変動する。通常の呼吸では圧は呼気で高くなり, 吸気で低くなるが, 絶対値の読み取りは呼気終わり, 吸気開始前の高いところの圧 (陽圧呼吸下では呼気で低くなるため, 低いところの圧) をとる。正常値は成書⁴⁻⁸⁾を参照してほしい。年齢により差があり, 大動脈圧は年齢がすすむにつれその値は高くなる。

A) 心室圧

収縮期のピーク圧と拡張末期圧 (EDP) を読む。EDP は心室収縮開始の圧で, 同部での偏曲点か, 心房収縮時にみられる atrial kick と呼ばれる小さなピークと心室圧との谷の低い点をとる。決定困難な場合, 左室 EDP は同時記録された心電図の QRS の頂点か最下点での圧を, 右室 EDP はそれに引き続く上行脚か下行脚の midpoint における圧をとってもよい⁸⁾。また心室圧波形から Positive dp/dt, Negative dp/dt, Tau な

どの等容収縮期と等容拡張期の指標も得られるが, これらの指標はカテ先マンメータという特殊なカテーテルを用いて得られるノイズの少ない圧波形でないとは解析不可能と考えてよい。一般のカテ室で用いている “Fluid filled catheter” のシステムでの圧波形はノイズが多く, これらの指標は算出しないほうがよい。

心室の異常圧曲線として 1) 心室収縮期圧の上昇, 2) EDP の上昇がある。心室収縮期圧の上昇している時は, 原因として高血圧などの動脈圧上昇, 大動脈弁, 肺動脈弁狭窄などの狭窄によるもの, 大動脈閉鎖不全などの 1 回拍出量増加による病態を考える。EDP を含めた拡張期圧の上昇をみた場合は, 心不全, とくに拡張期障害を主体とした心不全, 半月弁閉鎖不全, 心筋症, 収縮性心膜炎, 心タンポナーゼを考える。心不全, 半月弁逆流による圧上昇は拡張期全体がだだだだ上昇するのに比較し, 収縮性心膜炎, 心タンポナーゼなどでは “Dip and plateau” という特徴的波形をとる。

B) 動脈圧

収縮期圧, 拡張期圧, 平均圧を読む。カテーテルを大動脈弁上から末梢に引いてくると半月弁閉鎖と同時にみられる重複切痕 (dicrotic notch) は消失し, 収縮期圧のピークは高くなり, 圧波形は sharp になり脈圧は広がる。これは反射波による影響といわれ, 撓骨動脈などの末梢動脈圧を中心血圧である大動脈圧の値に代用できないことを示している。

肺静脈楔入圧は肺動脈圧の代わりに用いることができるが, 平均圧で 18~20 mmHg 以下の肺高血圧がない症例に限る⁹⁾。また肺動脈圧の評価として平均圧 25 mmHg 以上あれば肺高血圧^{10, 11)}と診断する。後に述べる肺血管抵抗が種々の要因で変化するため, 麻酔下で圧測定することの多い小児では, PH, PaCO₂ が生理的な状態で測定する。鎮静下では呼吸抑制され, 肺泡低換気であることはしばしば経験する。必要があれば気管内挿管は躊躇しない。図に同一症例での PaCO₂ が 35 mmHg と 50 mmHg での平均肺動脈圧を示したが, 8 mmHg も変化することがわかる (Fig. 1)。この差が後述する肺血管抵抗 (Rp) の計算に大きく影響する。

C) 心房, 静脈圧

心房圧は心房収縮による a 波, 房室弁が閉鎖期間中に静脈系から心房への血液充盈による心房内圧が上昇することで形成される v 波の 2 つの陽性波と平均圧を読む。正常心では右房では a 波が v 波より高く, 左房

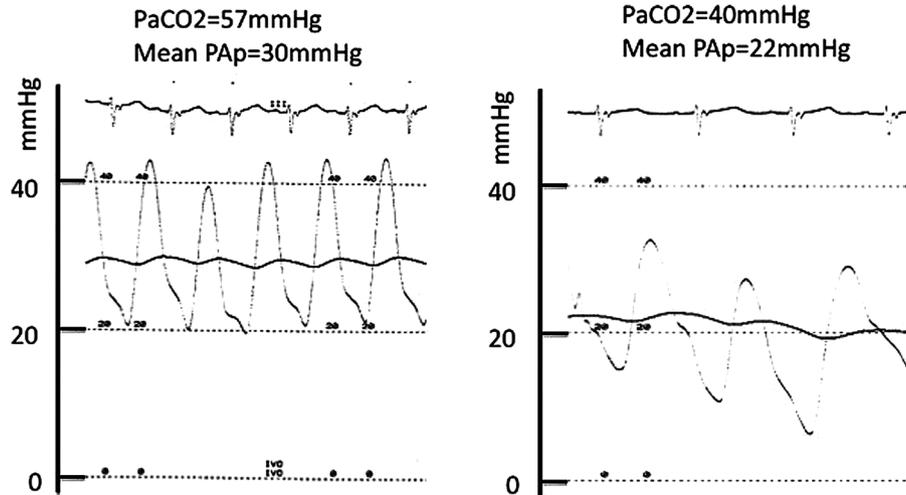


Fig. 1 Mean pulmonary artery pressure at different condition

Note that mean pulmonary pressure is decreased from 30 to 22mmHg when PaCO₂ returns to the normal range.

ではv波のほうがa波より高い。また平均圧は右房より左房が高い。

a波が消失している場合は心房収縮がない心房細動、洞停止や完全洞房ブロックを考え、同時記録した心電図をみる。逆にa波の増高がみられたときは、左房であれば僧房弁狭窄、閉鎖、右房であれば三尖弁狭窄、三尖弁閉鎖の存在を考える。特殊な例として完全房室ブロックでは心房収縮と房室弁閉鎖が重なると極端にa波が増高し、“巨大a波”と呼ばれる。また心房への流入が増加するとv波は増高するので、左房のv波が増高の場合は僧房弁閉鎖不全や心室中隔欠損、動脈管開存などの左-右短絡疾患を、右房のv波の増高ではEbstein奇形を代表とする三尖弁閉鎖不全、心房中隔欠損、総または部分肺静脈還流異常症などを考える。v波の増高は平均圧上昇も伴うが、慢性的な流入量の容量負荷は心房の拡大により代償され、しだいに正常化してくるので急性なものに比較してその変化は少なく目立たなくなってくる。逆に右房平均圧が1~2mmHg未満と低いときは“hypovolemia”を考える。

肺動脈楔入圧は肺静脈圧（肺静脈狭窄がなければ、左房圧）の代用に用いることができる。きちんと楔入されているかの確認のため、必ず採血し、肺動脈より高い酸素飽和度（肺静脈と同等かそれよりも高く、97~100%）であることを確認する。楔入されている条件は酸素飽和度以外に肺動脈圧より低いこと、波形が肺静脈または左房波形に似ることである。

D) 圧較差

血管の狭窄、弁狭窄（肺動脈弁狭窄、大動脈弁狭窄）では収縮期圧の差をもって表し、圧較差は狭窄の程度

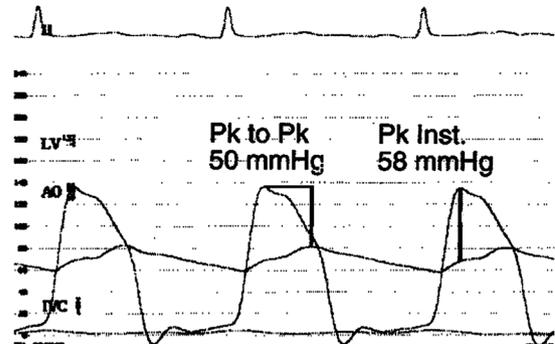


Fig. 2 The relationship between aortic and left ventricular pressure in the setting of aortic stenosis (From reference 12)

Catheterization measurements are recorded as peak to peak (Pk to Pk) pressure gradients. Doppler measurements are recorded as instantaneous (Pk inst) gradients.

（重症度）を表す。ただし、圧較差は心拍出量（狭窄部を通過する血流量）に依存しているので、重症度を表すのは正常心機能であることが前提である。左室駆出率が悪い新生児期発症の重症大動脈弁狭窄では圧較差が狭窄の程度（重症度）を反映しないのがよい例である。また正常でも肺動脈-右室間で5~10mmHgほどの圧較差がみられ、新生児、乳児期早期では左右肺動脈から主肺動脈間で約10~15mmHgまでの圧較差をみることがあるが、成長とともに改善するもので必ずしも病的とは考えない^{5,6)}。

また心エコーでも狭窄部の最大流速（v, m/秒）を測定し、簡易ベルヌイ（ $4xv^2$ ）式を用い圧較差は推定できる。しかしカテーテルで測定した圧較差とは根本

的に異なる。大動脈弁狭窄では、心エコーでの圧較差は狭窄部の Vena contracta の瞬時の圧較差であるが、カテーテルで測定して得られる圧較差は“Peak to Peak”の血圧差であり、また pressure recovery が生じた部位の上行大動脈の血圧になる¹²⁾ (Fig. 2), この大動脈弁狭窄を代表として、血管、弁狭窄の治療適応となっている圧較差はカテーテル検査で得られる“Peak to Peak”の圧較差であり、このことが心カテ検査適応^{2, 4, 5)}の一つとなっている。大動脈弁狭窄、僧房弁狭窄では同時圧（大動脈弁狭窄では左室と上行大動脈圧、僧房弁狭窄では左室と肺動脈楔入圧ないしは左房圧）を測定し、その圧較差部分の面積をプランメトリなどで計測して平均圧較差を求め、この部を通過する血流量から Gorlin の公式を用いて弁口面積を算出して評価する。大動脈弁狭窄では $0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以上（正常 $2\text{cm}^2/\text{m}^2$ ）が軽度、 $0.5\sim 0.8\text{cm}^2/\text{m}^2$ が中等度、 $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下が高度狭窄と判定、また僧房弁狭窄では $0.5\sim 0.7\text{cm}^2/\text{m}^2$ は重症例である。治療適応となる圧較差はそれぞれの病変によるので、成書を参考にしてほしい。

2. 酸素飽和度のデータの解釈

1) 基本的事項

正常心での大静脈の酸素飽和度は部位によって異なる。一般に上大静脈と下大静脈の酸素飽和度を比較すると上大静脈のほうが低い。また下大静脈でも腎静脈血の酸素飽和度は高く、肝静脈血の酸素飽和度は低いので、どのレベルで血液採取したかで異なる。右房では酸素飽和度の低い冠状静脈血が流入するので完全

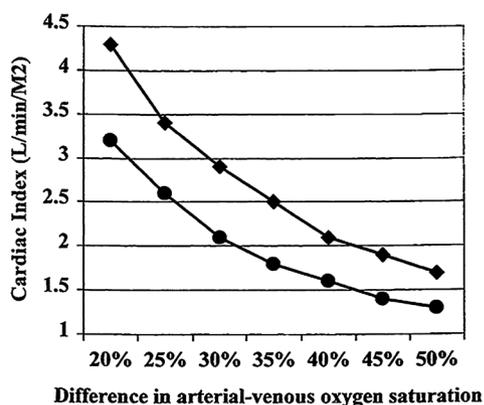


Fig. 3 The relationship between cardiac index and varying arteriovenous saturation (From reference 5)

Note the greater cardiac index with a hemoglobin of 12g/dl (squares) compared with 16g/dl. The assumed oxygen consumption is $140\text{ml}/\text{min}/\text{m}^2$.

にこれらの静脈血が混合する部屋 (Mixing chamber) にはなりえず、肺動脈に至って十分に混合された混合静脈血を得ることができる。また大動脈血酸素飽和度は呼吸機能が正常であれば、肺静脈、左房と同じ $96\sim 98\%$ である。この動静脈酸素飽和度較差は心拍出量のよい指標で、この値が大きいほど低心拍出量状態を示す。動静脈酸素飽和度較差は正常で $20\sim 25\%$ である。酸素消費量、ヘモグロビン値によって異なるが、この飽和度較差は心拍出量（心係数）が約 $3.5\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$ に相当する⁵⁾ (Fig. 3). 簡単に動脈血酸素飽和度が 97% の患者で混合静脈血の酸素飽和度が低い、例えば 65% 以下のときはかなりの低心拍出量状態で、 60% 以下であればカテ検査自体リスクが高く、中断を考慮する。

2) 左-右, 右-左短絡の酸素飽和度

体循環と肺循環で解剖学的欠損がある疾患では短絡の有無と部位、ならびに短絡方向は重要な問題である。最近では心エコー法などで、短絡部位、方向の情報はほぼ正確に得ることができるが、その確定診断と短絡量は心カテ検査の心臓各部位の酸素飽和度から診断する。

左-右短絡の存在と部位は体静脈から肺動脈への流れでどの部分から酸素飽和度の上昇 (O_2 step up) があるかをみることで診断する。これらの血液採取は患者の状態が変化しないうちに、迅速にすることが重要で、Grossman の成書³⁾には7分以内との記載がある。Table 1 に各部位での O_2 step up の診断基準を示す。心房中隔欠損 (ASD) を例にとると、有意な O_2 step up は平均値を用いた場合 7% 以上であり、それから検出できる左-右短絡の体肺血流量比 (Qp/Qs) は 1.5 以上である。これ未満のものは心エコーで左-右短絡があっても検出できないし、また有意でない左-右短絡と解釈する。ただしこの酸素飽和度を用いた有意な左-右短絡の Qp/Qs の検出は体血流量 (Qs) に依存し、 Qs が増加するほど混合静脈血酸素飽和度はあがり、その検出率はおちる¹³⁾。したがって Qs の数値をみて Qp/Qs を判定することが肝要となる。有意な左-右短絡の ASD (Qp/Qs が 1.5 以上) は、 $\text{Hb}=14.7\text{g}/\text{dL}$ 、酸素消費量が $125\text{-mL}/\text{min}/\text{m}^2$ と仮定した際は Qs が $3\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$ のときである。 Qs が $5\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$ では Qp/Qs が 2.5 以上の ASD のみが検出可能になる (Table 2)。

右-左短絡に関しては上述したように呼吸機能が正常であれば、大動脈血酸素飽和度は 96% 以上なので、 95% 以下であれば心内の右-左短絡の存在を考えるの

Table 1 Detection of left-to-right shunt by oxymetry (from reference 3)

Level of shunt	Criteria for significant Step-up		Approximate minimal Qp/Qs required for detection (Assuming SBFI=3L/min/m ²)	Possible Causes of Step-up
	Mean of distal chamber samples	Highest values in proximal chamber		
	O ₂ sat (%)	O ₂ sat (%)		
Atrial (SVC/IVC to RA)	≥7	≥11	1.5-1.9	ASD; PAPVR; Ruptured Sinus Valsalva; VSD with TR; coronary fistula to RA
Ventricular (RA to RV)	≥5	≥10	1.3-1.5	VSD; PDA with PR; Primum ASD; coronary fistula to RV
Great Vessel (RV to PA)	≥5	≥5	≥1.3	PDA; aorto-pulmonary window; aberrant coronary origin
Any level (SVC to PA)	≥7	≥8	≥1.5	All the above

*SVC and IVC: Superior and inferior vena cava, RA: Right atrium, RV: Right ventricle, PA: Pulmonary artery, ASD: Atrial septal defect VSD: Ventricular septal defect, TR: Tricuspid regurgitation, PDA: Patent ductus arteriosus, PR: Pulmonary regurgitation, SBFI: Systemic Blood Flow Index. Qp/QS: pulmonary to systemic flow ratio.

Table 2 Approximate minimal Qp/Qs ratios required for detection of left to right Shunts at various levels of systemic blood flow and oxygen saturation step-up* (from reference 13)

Level of SBFI (L/min/m ²)	Step-up in Oxygen Saturation		
	5%	7%	10%
1.5	1.1	1.2	1.3
2.0	1.2	1.3	1.5
2.5	1.3	1.3	1.7
3.0	1.3	1.5	1.9
3.5	1.4	1.6	2.2
4.0	1.4	1.7	2.6
4.5	1.5	2	3.5
5.0	1.8	2.5	6.3

*It is assumed that blood hemoglobin concentration is 14.7g/100-mL, systemic arterial and pulmonary venous oxygen saturation are equal at 98% and oxygen consumption is 125mL/min per m².

が一般である。しかし麻酔下の乳児では呼吸抑制のため、また成人先天性心疾患患者ではしばしば慢性呼吸器疾患を合併し、肺静脈血酸素飽和度が低下しており、このことがあてはまらない。例を挙げると、心室中隔欠損 (VSD)、肺高血圧症例を疑う乳児例で検査を施行し、右室圧が左室圧の70%で大動脈血の酸素飽和度が93%の値が得られたとする。これはVSDでの右-左短絡ではなく、麻酔による呼吸抑制により肺静脈血酸素飽和度が低下しているためと解釈すべきである (下記の体血流量: Qs の計算では大動脈血酸素飽和度は96%でなく、93%を用いる)。この鑑別は肺

静脈血から採血をして酸素飽和度を測定するか、簡便な方法として低濃度の酸素を吸入させ大動脈酸素飽和度が96%以上を示すことである。筆者らの施設ではこのような麻酔による大動脈酸素飽和度低下例を疑う症例で回復に時間を要しそうな患者では、FIO₂が0.3以下の低濃度酸素を使用しPO₂が100mmHg未滿を確認した後に、心臓各部位で血液採取し酸素飽和度を測定している。肺静脈血からの採血は心房中隔欠損があると容易であるが、ないときは心室から左房-肺静脈へと逆行にカテーテルをすすめることで可能である。この操作は練習を要するが3Fカテーテルを用いると比較的容易である。3Fカテーテルでは酸素飽和度の測定と圧は周波数特性の問題で平均圧のみが使用できる¹⁴⁾。

3. Fick法の原理と短絡の計算

1) Fick法の原理

Fickの原理¹⁵⁾とは“ある器官がある物質を摂取(あるいは供給)するとき、その器官へ流入する血液と流出する血液の物質の濃度差で、その器官が一定時間内に摂取(あるいは供給)する物質の量を除することで、その血流量を算出できる”というもので、ある物質が酸素で、肺血流量(Qp)の算出ではある器官は肺に相当する。Qp=酸素消費量/(肺静脈血酸素含有量-肺動脈血酸素含有量)で、Qs=酸素消費量/(大動脈血酸素含有量-混合静脈血酸素含有量)で算出される。短絡がなければ肺血流量(Qp)とQsは同じで、Fick法を用い心拍出量が得られる。酸素含有量(vol%=100mL中に含まれる量)は、ヘモグロビンの酸素運搬能の理論値である1.36(mLO₂/gHb)

にヘモグロビン濃度 (g/dL) と酸素飽和度を乗じて計算され、それに 0.003 mL/100 mL/mmHg (PO₂) で計算される血漿中に溶解している酸素量を加えたものである。通常的环境下では酸素分圧 (PO₂) は 100 mmHg 以下で溶解酸素量は無視できるので、酸素飽和度の測定のみで Q_s (Q_p) の計算が可能となる。心カテ検査での心拍出量の測定法には、Fick 法以外に、熱希釈法がよく用いられる。熱希釈法を用いて心拍出量測定するのにあたっての注意点としては 1 回目の値が高めに算出されることが多い (初回注入液がカテ内の暖かい液混入のため) ので、1 回冷水であらい、3~4 回の平均値を用いることである。また三尖弁、肺動脈弁逆流があると信頼性が低くなり⁸⁾、3.5 L/min 未満の低心拍出量のときは過大評価することを覚えて用いるべきである。特に 2.5 L/min 未満では平均 35% (18~71%) も Fick 法で計算された値より過大評価するとの報告¹⁶⁾がある。このような状態では短絡がなくとも Fick 法での算出を選択したほうがよい。

2) 酸素消費量

実測と推定して求める方法がある。推定する方法としては 3~40 歳を対象とした LaFarge-Miettinen の方法¹⁷⁾、0~27 歳での Lundell の方法¹⁸⁾、0~17 歳での Wessel の方法¹⁹⁾ など種々の推定式がある。頻用されているのは LaFarge-Miettinen の方法であり、男性は $138.1 - (11.19 \times \log \text{年齢}) + (0.378 \times \text{心拍数})$ 、女は $138.1 - (17.04 \times \log \text{年齢}) + (0.378 \times \text{心拍数})$ で計算され、表として成書^{4, 5, 8)}に記載されている。しかし、実測と LaFarge-Miettinen の推定方法の比較を行った研究で、平均年齢 52.2 歳の成人を対象としたものでは実測値を過小評価し、実測値との誤差が 25% 以上あった患者が 26% にみられたとの報告²⁰⁾、小児を対象としたものではこの推定法は実測値を過大評価^{21, 22)}し、特に 3 歳未満で気管内挿管している小児で誤差が 53% にもなり、使用できないとの報告²¹⁾があり、実測が薦められている。

3) 短絡量、短絡率の算出

短絡疾患での体血流量 (Q_s: 心拍出量に相当) と肺血流量 (Q_p) は上記の Fick 法を用いて求める。この比が肺体血流量比 (Q_p/Q_s) であり、1 を超える場合は肺血流量の増加を、1.0 未満は減少を意味する。また肺動脈酸素飽和度 (含有量) の誤差が同じ程度であっても、高肺血流量ほどその計算される肺血流量の誤差は大きくなる。そのことを考慮すると、Q_p/Q_s

の値がもし 3.5 と 5.5 となった場合、両者の比較はあまり意味がなく、Q_p/Q_s > 3.0 は同じ範疇の肺血流量増加の群と解釈すべきである⁵⁾。

また重要なことは Fick 法の原則は、酸素が完全混和する mixing chamber が存在する前提でのみ使用できるという点である。したがって肺動脈酸素飽和度が左右で異なっている状態 (肺動脈大動脈起始症、Original Glenn 術後など) では Q_p は計算できない。Q_s の計算で、ファロー四徴症のように両方の心室から血液をうける疾患の大動脈血酸素飽和度は上行大動脈でなく、完全に血液が混和した下行大動脈の酸素飽和度を使用する。心房中隔欠損症では左房から右房に短絡した血液が下大静脈にも流れるので、混合静脈血として上大静脈と下大静脈の酸素飽和度の平均値を用いることはできない。一般に上大静脈の酸素飽和度のみを使用する方法²³⁾か、上大静脈の酸素飽和度に 3 を乗じた値と下大静脈の酸素飽和度の値の和を 4 で除した (3×上大静脈酸素飽和度+下大静脈酸素飽和度/4) 値を用いる方法³⁾が用いられている。また両方向性を含め Glenn 術後では混合静脈血が存在せず、Q_s の計算は通常の計算式では求めることはできない。そこで両方向性 Glenn 術後では Q_s は Q_p と下大静脈血流量の和であることを利用し、 $Q_p/Q_s = (\text{大動脈血酸素飽和度} - \text{下大静脈血酸素飽和度}) / (\text{肺静脈血酸素飽和度} - \text{下大静脈血酸素飽和度})$ の式で Q_p/Q_s を計算し、そこから Q_s を算出する方法が報告²⁴⁾されている。しかし最近、MRI 法との比較で Fick 法を用いた両方向性 Glenn 術後の Q_p, Q_s の算出は限界があり、無視できない誤差が指摘²⁵⁾されており、Fick 法で算出した値の解釈には誤差が大きいことを認識しておく必要がある。

短絡の方向として複数の短絡部位、または同一短絡部位ですべてが一方向でなく、両方向短絡の場合は、実際に酸素化された血流量である有効肺血流量を酸素消費量 / (肺静脈血酸素飽和度 - 混合静脈血飽和度) の式で計算し、短絡率を算出する。短絡の程度をみるのに短絡血流量ではなく、短絡血流量が相対的に心拍出量の何%にあたるかで評価する。この短絡率は酸素飽和度のみの計算式で算出され、誤差の大きい酸素消費量の項目がなく有用である。

肺高血圧評価の負荷試験として高濃度酸素が使用¹¹⁾されることがあるが、その際は血漿中に溶解した酸素量も Q_p, Q_s の計算にいれる必要があり、各部分での血液の酸素飽和度のみでなく、PO₂ も測定する。もし麻酔による呼吸抑制などのために使用することがあれば、最低 5 分は Room Air にして、その影響をとっ

てから採血を再開する。

4. 血管抵抗の計算

流体力学の定常流での法則が参考になる。Poiseuille の法則から $Q = \pi(P_2 - P_1)r^4/8\eta l$ 、オームの法則から抵抗 R は $R = P_1 - P_2/Q = 8\eta l/\pi r^4$ で表される。 Q は流量、 $P_2 - P_1$ は圧較差、 r は管径、 η は液体粘性、 l は管の長さである。生体では血管は弾性を有し、拍動流で、血液は不均一液なので、必ずしもこの流体力学の法則を生体に当てはめることはできないが、この式から血管抵抗は血管床(r)と血液粘性(η)の変化に左右されることがよく理解される。つまり血管床(r)が大きければ血管抵抗は少なくなり、血液粘性が高いほど大きくなる。ヘマトクリットが43%から64%に増加すると R_p が約2倍増加したとの報告²⁶⁾がある。このことは Fontan 型手術適応²⁷⁾の一つの指標である R_p の算出に非常に重要なことで、ヘマトクリットが65%を超える場合は60%未満にして R_p を評価することが薦められている⁵⁾。

このように血管抵抗は圧較差を血流量で除したもので、肺血管抵抗 (R_p) は (肺動脈平均圧 - 肺静脈平均圧) / 肺血流量、体血管抵抗 (R_s) は (大動脈平均圧 - 混合静脈圧) / 体血流量で計算される。1980年代では全体血管抵抗と全肺血管抵抗 (それぞれ大動脈、肺動脈平均圧を血流量で除したもの) が用いられていたが、現在では使用されていない。単位は血流量が L/min、圧が mmHg なので mmHg/L/min で表され、Paul Wood により最初導入されたことから Wood 単位ともいわれる。別名、Hybrid unit と呼ばれ、成人領域で使用される metric unit の dyne-second-cm⁻⁵ は hybrid unit を 80 倍にすることで変換可能である。 Q_s 、 Q_p の計算式での酸素消費量は多くは体表面積 (BSA) 補正されている値を用いているので、血流量の単位は L/min/m² で、L/min でない。したがって R_p の値は圧較差 (mmHg) を心拍出量 (L/min) で除し、BSA 補正する時は、その値に BSA を“かけ算”した値で、“わり算”ではないことに注意をする。成書、論文に Wood unit/m²、Unit/m²、単位/m² などの記載があるが、BSA 補正しているという意味で、通常 Unit·m²、単位·m² と同じと解釈する。また R_p は Fontan 型手術適応の一つとして 3 unit·m² はハイリスク、4 unit·m² は禁忌²⁷⁾、また左-右短絡疾患におけるアイゼンメンゲル化に焦点をあてた手術適応の基準とし 8 unit·m² 以上が禁忌¹⁰⁾ とされ、肺高血圧の指標として用いられている。その解釈で重要なことは R_p の絶対値のみでなく、必ず R_s との関係 (R_p/R_s) をみ

てその値を評価することである。例を挙げると Fontan 型手術適応疾患で R_p が 4.0 unit·m² と計算されたとする。この値そのものからは手術適応からはずれるが、そのときの R_s が 28 unit·m² であれば、いわゆる“末梢血管が非常にしまった状態”でのカテーテル検査結果であり、実際の R_p はもっと低い可能性がある。また圧較差と血流量から算出されるものなので、それぞれの因子の誤差、例えば推定した酸素消費量の誤差、圧変動を考えた時の圧較差の誤差などを考慮すると、算出された R_p も少なくとも 20% 前後の誤差は生じている値と考えるべきである。 R_p の値が手術適応を決めるボーダライン値のときは、その 1 回の R_p 値で適応を決定すべきでなく、検査を繰り返したほうが無難である。

5. 造影に関連し Angle-view を含めた基本技術、解釈

撮影方向は正面、側面の 2 方向が下記の容積測定に必要なため基本となるが、観察したいものによって様々な Angle-view²⁸⁾ が考案されている。形態診断では造影されている部分以外、造影されない透亮像、ないしは欠損像をみることも必要となる。右室造影で、両大血管右室起始部の VSD の位置、右室二腔症の異常筋束はよい例である。また形態診断のみならず、右心室、左心室の容積、駆出率などの機能診断にも使用され、右室は Simpson 法に基づいた Graham 法²⁹⁾、左室は Area length 法³⁰⁾ を用いて正面、側面像の心室造影の縁をトレースするだけで心室容積、駆出率を算出するコンピュータソフトが市販されている³¹⁾。それぞれの容積が正常の何% (対正常%) にあたるかが算出されるので、それで心室の拡大、または低形成を評価する。筆者らの施設では Nakazawa らの式³⁰⁾ で容積が算出されるソフトを使用しているが、このソフトを使用した場合、日齢 1~16 歳の、BSA が多くは 1.4~1.6 以下の正常小児からの容積を用いて算出されているので、BSA がこれを超える、特に成人患者での容積の対正常%の解釈には注意を要する。

肺動脈造影で左右の肺動脈の第一分枝手前の径の測定で得られる Nakata Index³²⁾ はファロー四徴症、肺動脈閉鎖などの肺血流量減少疾患、Fontan 型手術適応疾患の肺血管床の評価に非常に有用な指標で、ファロー四徴症では 100 mm²/m² 以上あれば心内修復術は可能とされる。正常値は 330 ± 30 mm²/BSA であるが、対象が新生児では使用しないほうがよい。

おわりに

繰り返しになるが、日本小児循環器専門医修練目標の“検査の適応とリスクを理解し、基本手技を習得し、血行動態、造影所見を評価できる”の中で、この“血行動態、造影所見を評価できる”の部分が本稿の主題であるため、“検査の適応とリスクを理解し、基本手技を取得し”の部分は主に成書³⁻⁷⁾ 参照とした。心カテは侵襲的検査法なので、検査のメリット、デメリットを患者さんに十分に説明し、理解してもらった上で施行することはいうまでもない。基本手技とは、「時間、時間で状態が変化する患者さんで、いかに短時間で“安定”した状態での血行動態のデータを、いかに“安全”にとるかの技術、手技」を意味するとの解釈も可能である。そのためには最低限、施行する医師は心カテプランを術前に十分に練ることが要求される。

心カテ結果の解釈には“どのように心カテを行い、どのようにデータを得たか”によって、様々な要因でその結果に“誤差”を生じている可能性があることを常に念頭におくことが必要である。最後に本稿が小児循環器専門医を目指す医師にとって心カテ検査の理解の一助になれば幸いである。

引用文献

- 1) Beekman RH, Hellenbrand WE, Lloyd TR, et al: Task force 3: Training guideline for pediatric cardiac catheterization and interventional cardiology. *J Am Coll Cardiol* 2005; **46**: 1338-1390
- 2) Feltes TF, Bacha E, Beekman RH III, et al: Indications for cardiac catheterization and intervention in pediatric cardiac disease. A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2011; **123**: 2607-2652
- 3) Grossman W: Hemodynamic principles, in Baim DS, Grossman W. (eds): *Grossman's Cardiac Catheterization, Angiography and Intervention*. 7th edition, Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2006, pp 131-183
- 4) Lock JE: Cardiac catheterization, in Keane JF, Lock JE (eds): *Nadas' Pediatric Cardiology*. 2nd edition, Philadelphia, Saunders, 2006, pp 213-250
- 5) Grifka RG: Cardiac catheterization and angiography, in Allen HD, Driscoll DJ, Shaddy RE, et al (eds): *Moss and Adams Heart Diseases in Infants, Children, and Adolescents: Including the Fetus and Young Adult*. 7th edition, Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2008, pp 208-237
- 6) Rudolph AM: Functional assessment and oxygen uptake and delivery, in Rudolph A (eds): *Congenital Disease of the Heart: Clinical-Physiological Consideration*. 2nd edition, New York, Futura, 2001, pp 45-102
- 7) 門間和夫：心臓カテーテル検査法と心血管造影法。高良篤良，門間和夫，中沢 誠，ほか(編)：臨床発達心臓病学 改訂3版。東京，中外医学社，2005，pp 224-232
- 8) 木全心一，中沢 誠(編著)：心機能評価法，心機能の臨床。東京，中外医学社，1981，pp 3-179
- 9) Mori Y, Nakanishi T, Ishii T, et al: Relation of pulmonary venous wedge pressures to pulmonary artery pressures in patients with single ventricular physiology. *Am J Cardiol* 2003; **91**: 772-774
- 10) Dunbar D, Abman SH, Barst RJ, et al: Pediatric pulmonary hypertension. *J Am Coll Cardiol* 2013; **62** Suppl: D117-D126
- 11) 中西宣文，安藤太三，上田初江，ほか：循環器病の診断と診療に関するガイドライン(2011年度合同研究班報告) 肺高血圧治療ガイドライン(2012年改訂版) <http://www.j-circ.or.jp/guideline>
- 12) DeGroff CG: Doppler echocardiography, in Valdes-Cruz LM, Cayre RO (eds): *Echocardiographic Diagnosis of Congenital Heart Disease: An Embryologic and Anatomic Approach*. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 1999, pp 101-157
- 13) Antman EM, Marsh JD, Grossman W: Blood oxygen measurement in the assessment of intracardiac left to right shunts: A critical appraisal of methodology. *Am J Cardiol* 1980; **46**: 265-271
- 14) Mori Y, Nakanishi T, Satoh M, et al: Catheterization of the pulmonary artery using a 3 French catheter in patients with congenital heart disease. *Cathet Cardiovasc Diagn* 1998; **45**: 45-50
- 15) Visscher MB, Johnson JA: The Fick principle: Analysis of potential errors in its conventional application. *J Appl Physiol* 1953; **5**: 635-638
- 16) Van Dronelle A, Ditchey RV, Groves BM, et al: Thermodilution method overestimates low cardiac output in human. *Am J Physiol* 1983; **245**: H690-H692
- 17) LaFarge CG, Miettinen OS: The estimation of oxygen consumption. *Cardiovasc Res* 1970; **4**: 23-30
- 18) Lundell BP, Casas ML, Wallgren CG: Oxygen consumption in infants and children during heart catheterization. *Pediatr Cardiol* 1996; **17**: 207-213
- 19) Wessel Hu RD: Continuous determination of oxygen uptake in sedated infants and children during cardiac catheterization. *Am J Cardiol* 1969; **24**: 376-385
- 20) Wolf A, Pollman MJ, Trindade PT, et al: Use of assumed versus measured oxygen consumption for the determination of cardiac output using the Fick principle. *Cathet Cardiovasc Diagn* 1998; **43**: 372-380
- 21) Li J, Bush A, Schulze-Necick I, et al: Measured versus estimated oxygen consumption in ventilated patients with congenital heart disease. The validity of predictive equations. *Crit Care Med* 2003; **31**: 1235-1240
- 22) Rutledge J, Bush A, Shekerdeman L, et al: Validity of the Lafarge equation for estimation of oxygen consumption in ventilated children with congenital heart disease younger than 3 years: A revisit. *Am Heart J* 2010; **160**: 109-114
- 23) Gutgesell HP, Williams RL: Caval samples as indicators of mixed venous oxygen saturation: implications in atrial septal defect. *Cardiovasc Dis* 1974; **1**: 160-164
- 24) Salim MA, Case CL, Sade RM, et al: Pulmonary/systemic flow ratio in children after cavopulmonary anastomosis. *J Am Coll Cardiol* 1995; **25**: 735-1395
- 25) Downing TE, Whitehead KK, Dori Y, et al: Accuracy of conventional oximetry for flow estimation in patients with superior cavopulmonary connection. A comparison

- with passed-contrast cardiac MRI. *Circ Cardiovasc Imaging* 2013; **6**: 943-949
- 26) Nihill MR, MacNamara DG, Vick RL: The effects of increased blood viscosity on pulmonary vascular resistance. *Am Heart J* 1992; **92**: 65-72
- 27) 朴 仁三, 中澤 誠, 門間和男, ほか: フォンタン型手術適応の見直し: 肺血管床. *日小児循環器会誌* 1993; **8**: 501-508
- 28) Fellows FE, Kean JF, Freed MD: Angled views in cineangiography of congenital heart disease. *Circulation* 1977; **56**: 485-490
- 29) Graham TP Jr., Jarmakani JM, Atwood GF, et al: Right ventricular volume determination in children. Normal value and observations with volume or pressure overload. *Circulation* 1973; **47**: 144-153
- 30) Nakazawa M, Mark RA, Isabel Jones J, et al: Right and left ventricular volume characteristics in children with pulmonary stenosis and intact ventricular septum. *Circulation* 1976; **53**: 884-890
- 31) 青墳裕之, 池田弘之, 中島弘通, ほか: 心室造影より右室容積計算をおこなう4種のコンピューターソフトウェアについての比較検討. *日小児循環器会誌* 2004; **20**: 16-23
- 32) Nakata S, Imai Y, Takanashi Y, et al: A new method for the quantitative standardization of cross-sectional areas of the pulmonary arteries in congenital heart disease. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1984; **88**: 610-619