

肺動脈遮断試験による 2 点測定法に基づく肺血管抵抗測定の変法

瀬尾 和宏, 澤渡 和男, 別府 俊幸

東京女子医科大学附属日本心臓血圧研究所循環器小児外科

Key words :

Fontan手術, 肺血管抵抗, 肺動脈遮断試験, 動的抵抗, distensible tube model

Reliable Assessment of Pulmonary Vascular Resistance
Using Two-point Measurement

Kazuhiro Seo, Kazuo Sawatari, Toshiyuki Beppu

The Heart Institute of Japan, Tokyo Women's Medical University, Tokyo, Japan

Background: Pulmonary vascular resistance (Rp) is one of the most important preoperative indices for the Fontan procedure. We examined the correlation between preoperative and postoperative Rp in 94 cases of cardiac catheterization before and after the Fontan procedure and found no significant correlation between them. Rp is usually calculated using a linear equation and could be inaccurate. We therefore developed a new, more reliable method for calculating Rp that is based on two points of measurement on the pressure-flow curve for pulmonary circulation.

Methods: We obtained intraoperative measurements of pulmonary arterial pressure (PAP), left atrial pressure (LAP), and pulmonary arterial blood flow (Qp) directly using an electromagnetic flow meter in 12 cases. Initially, A, a point representing the total pulmonary vascular bed (PAP-LAP, Qp), was plotted on a pressure-flow curve; then B, a point where right and left pulmonary arterial blood flows were assumed to be equal (PAP-LAP, 1/2Qp), was plotted. Next, points C and D were measured using the pulmonary artery clamping test (PACT) on the right and left pulmonary arteries, respectively. Finally, B-C and B-D were joined by straight lines, and their slopes were measured. Corrected Rp was calculated using the following formula: corrected PACT Rp = (slope of B-C × slope of B-D) / (slope of B-C + slope of B-D).

Results: In contrast to the complete absence of significant correlation between conventionally calculated Rp and postoperative Rp (preop. Rp vs. postop. Rp, intraop. Rp vs. postop. Rp, PACT Rp vs. postop. Rp, n=12), the correlation between corrected Rp (calculated using two-point measurement) and postoperative Rp was significant ($y=0.846 + 0.63x$, Std. Coeff.: 0.734, $p<0.05$, n=12).

Conclusion: We conclude that our two-point method of measurement may be useful for the prediction of Rp after the Fontan procedure.

要 旨

背 景 : Fontan手術において肺血管抵抗 (以下Rp) は術前因子のうちで最も重要な因子の一つである。Rpの算出法自体肺循環圧 - 流量関係における $Y = aX$ なる 1 次曲線との仮定のもとに成立しているためか、一般的には静的抵抗との認識が周知のごとくであり、このため曖昧な因子となりうる危険性を内在している。われわれは従来より肺循環においてはRpは線形抵抗ではなく、動的抵抗であるとの理論に基づき、術中に肺血流負荷時のRpを算出する目的で肺動脈遮断試験 (pulmonary artery clamping test : PACT) を施行してきた (PACT Rp)。

目 的 : 術前高肺血流群のFontan予備軍に対する術前Rpの測定方法として、肺循環モデル上、より理論的と思われる 2 点測定法に基づくRp評価法 (以下Corrected PACT法) を考案した。そのRp (Corrected PACT Rp) の妥当性について検討した。

方 法 : 術中直接測定した肺循環圧 - 流量曲線上のA点 (PAPa-LAPa, Qpa) から、左右肺動脈血流は等しいと仮定し 1/2A点なるB点 (PAPa-LAPa, 1/2Qpa) を求める。次いで左右PACTから得られた左右肺動脈圧 - 流量曲線上の点、C・D点から、B-C、B-D直線を描き、傾きB-C、B-D直線を求める。これらからCorrected PACT Rpを以下より算出した。

$$\text{Corrected PACT Rp} = (\text{傾きB-C} \times \text{傾きB-D}) / (\text{傾きB-C} + \text{傾きB-D})$$

平成13年10月9日受付

平成14年6月3日受理

結 果：術前高肺血流群12症例において，術前カテーテル時Rp，術中Rp，PACT Rp，Corrected PACT Rp，Fontan術後カテーテル時Rpのそれぞれに関して相関性を検討した．Fontan術後カテーテル時Rpとの相関は，術前カテーテル時Rp，術中Rp，PACT Rpにおいては認められず，唯一2点測定法であるCorrected PACT Rpのみ認められた($y = 0.846 + 0.63x$ ，Std. Coeff. : 0.734， $p < 0.05$)．

結 論：2点測定法に基づくCorrected PACT法は，特に術前高肺血流群の明らかな左右肺動脈の左右差のない症例においては，術前データからは正確な評価判定に苦慮するような場合に有効な評価法となりうる．

目 的

Fontan手術は現在その適応疾患が拡大されて今日に至っている¹⁻⁴．Choussat，Fontanら⁵が提唱した10項目に及ぶ適応基準は，いくつかが改変されたが，なお基本とされている．なかでも肺血管床に関する基準は重要であり，Rpは術前因子のうちで最も重要な因子の一つである．われわれは従来より術前Rpは術後Rpと関連しないことを指摘してきた．そのため術中に肺血流負荷時のRpを算出する目的でPACTを施行してきた^{6,7}．しかし最近のFontan手術適応が拡大されたことに乗じて，術前肺血流増加疾患におけるFontan手術症例の経験から，本来肺血流量で変化する動的抵抗であるRpの観点からもより理論的な2点測定法に基づいたRpの算出法(Corrected PACT法)を考案した．

本稿では，1996年までにFontan術前後に心臓カテーテル検査を施行しえた94例の検討を行うとともに，術中肺動脈血流量の直接測定を施行した12症例において若干の知見が得られたので報告する．

対象および方法

1. 術前後のRp値の相関性を検討

1980年より1996年までにFontan手術を施行されたうち，術前診断にて肺動脈狭窄がなく，かつ，術後心内短絡を認めない術前後に心臓カテーテル検査を施行し得た94例の検討を行った．

疾患の内訳は，三尖弁閉鎖(以下TA)29例，両大血管右室起始(以下DORV)18例，大血管転位(以下TGA)8例，右室性単心室(以下SRV)18例，左室性単心室(以下SLV)13例，その他8例であった．

術前Rp($\text{unit} \cdot \text{m}^2$)の測定は，術前心臓カテーテル検査時に肺動脈平均圧(以下PAP， mmHg)，左房平均圧(以下LAP， mmHg)，Fick法で肺血流量係数(以下Qp， $\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$)を測定し，術前Rp = (PAP - LAP) Qpを算出した．なお酸素消費量は，実測が不可能な場合はLafargeおよびMettienenらの方法に従って推定値を用いた．Fontan手術後のRpは，約1.4カ月後に心臓カテーテル検査を施行した．そしてPAP，LAP，Swan Ganzカテーテルにより熱希釈法で求めた心係数(以下CI， $\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$)

を用いて，術後Rp = (PAP - LAP) CIを算出した．なおTCPC法やfenestrated Fontan法ではFick法によってCIを算出した．またLAPが測定不能な症例では肺動脈換入部圧をもってLAPとした．術前Rp，術前PA index，術後Rp，術後CIをそれぞれ単回帰分析を行った．

2. 術中PACT施行例12例の検討 (Table 1, 2)

1987年8月～1994年6月までに東京女子医科大学循環器小児外科でFontan手術の際に14例に対しPACTを施行した．そのうちSLV，DORVの2症例は術中PACTにて片側肺動脈への負荷が不十分であったため(両肺Qp > 片側肺負荷時Qp，または，Qp < 0.5)除外した．12例全例にFontan手術を施行した．術式は9例にFontan法，2例にTCPC法を用いた．単心房あるいは両側房室弁開存の症例では心房中隔の形成を行ったが，心房中隔形成にあたっては，冠状静脈洞を左房側に開口させ，また右房および左房容積を調整する目的でoblique partitionを行った．また房室弁逆流に対しては亜全周性弁輪縫縮法を用いた．

手術時年齢は2～22歳(平均7.9歳)であり，性別は男性11名，女性1名であった．疾患の内訳(Table 1)は，TA 4例，他の複雑心奇形8例であった．TAはEdward & Burchell分類上，Ic 1例，IIb 2例，IIc 1例であった．他の複雑心奇形の主診断は，SRV 4例，SLV 3例，DORVに左室低形成を合併したものが1例である．全例，術前最終診断の段階では，解剖学的修復術は不可能であり，機能的根治術としてFontan手術を適応せざるを得ない心臓形態と考えられた．先行手術としては，Blalock-Taussig shuntを2例，肺動脈絞扼術2例，infundibular muscle resectionを1例に施行した．このうちinfundibular muscle resectionを施行された症例9は，初回術前カテーテル検査ではRp 1.6 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ でありFontan手術予定で手術に臨んだが，術中測定にてRp 7.8 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ と高値であったためFontan手術を断念しinfundibular muscle resectionを施行された．その約1年後に再度カテーテル検査を行った結果，Rp 1.8 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ であったため再手術にてFontan手術を施行された．再手術時術中直接測定ではRp 10.8 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ ，PACT Rp 7.2 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ ，Corrected PACT Rp 2.7 $\text{unit} \cdot \text{m}^2$ であった．本症例はFontan術後Rpは

Table 1 Clinical features of patients and preoperative parameters

Patients	Sex	Diagnosis	Previous op	Pre-op catheterization					Fontan					
				PAP (m)	Qp _i	Qp/Qs	Rp	PAI	Age (yrs)	Procedure	PAP (m)	Qp _i	Qp/Qs	Intra-op Rp
				mmHg	L/min.-m ²		unit.-m ²				mmHg	L/min.-m ²		unit.-m ²
1	M	SLV, MA, PSf		11	4.4	3.1	0.68	616	22		10	2.8	0.62	2.5
2	M	TA(IIb), PS		24	26	3.4	2.3	480	5.5		13	17.5	10	0.57
3	M	SLV, PS		18	3.14	1.24	2.3	287	12		13	2.9	0.78	2.07
4	M	SRV, PS, LAVVR(II)		13	5.2	1.7	0.8	366	9	LAVV plasty	13	2.5	0.79	1
5	M	SRV, PS, LAVVR(I) Lt-PA stenosis	LAVVR plasty(3 y)	21	9.4	2	1.4	286	2	Fenestrated F LPA plasty	14	3.9	2.3	1
6	F	TA(IIb)JAA		15	6.2	1.5	1.3	388	4		12	3.55	1.22	1.13
7	M	SRV, PS, Lt-PA stenosis	Lt BT(2 mo)	16	4.6	0.94	2.2	360	5	Lt PA plasty	8	1.9	0.35	2.1
8	M	Asplenia, SRV, PS		15	3.7	0.94	2.2	331	5		15	1.94	0.92	3.1
9	M	SLV, PS	Rt BT(2 mo) Infund. resection(7 y)	13	3.3	1.1	1.8	381	8		9	0.65	0.18	10.8
10	M	TA(IIc), straddlig MV, Mr	PAB	17	4.3	1.5	3.2	660	11		16	4.42	1.67	2.71
11	M	Polysplenia, DORV, SRV, PS, PAPVR, TR(II)		19	6.3	1.2	1.3	763	7	TCPC	13	4.6	2.4	0.9
12	M	TA(Ic), Lt-PA stenosis	PAB	14	2.2	0.56	3.6		4	TCPC, LPA plasty	14	2.9	0.59	1.8
Average				16.33	6.56	1.6	1.92	447	7.88		12.5	4.13	1.82	2.47
STDEV				3.7	6.4	0.86	0.89	162	5.35		2.39	4.36	2.67	2.74

SLV: single left ventricle, SRV: single right ventricle, PS: pulmonary valve stenosis, AVVR: atrioventricular valve regurgitation, TA: tricuspid atresia, DORV: double outlet right ventricle

1.4unit.-m²であった。

12症例の術前検査は、PAP 16.33 ± 3.7mmHg、Qp/Qs (肺血流量係数 / 大動脈血流量係数) 1.6 ± 0.86、術前Rp 1.92 ± 0.89unit.-m²、PA index 447 ± 162であった。

これらの症例をChoussat、Fontanらの適応基準に対応させて検討すると、手術時年齢では2歳以下が1例、15歳以上が1例、房室弁逆流4例、両側上大静脈1例、末梢性肺動脈狭窄2例、部分肺静脈還流異常1例で、PAP > 15mmHgが6例、Rp > 3unit.-m²が2例であった。

術前Rpの測定は、術前心臓カテーテル検査により行い、その方法は前述した。

3. 術中直接Rp測定症例の検討

術中に電磁流量計にて直接Qpを測定し得た12例において以下の検討を行った。

- 1) 術前カテ時Rpと術後Rpの相関性
- 2) 術中直接測定Rp(以下術中Rp)と術後Rpの相関性
- 3) PACT Rpとの検討

PACT(Fig. 1a): 理論および測定法は澤渡らが以前報

告した方法に準じて行った。測定中は麻酔状態および循環状態を一定に維持することに努めた。麻酔法はfentanyl(10μg/kg)のみを原則とし、また吸入酸素濃度は50%に統一してRpに影響を及ぼす外的因子をできる限り統一するように努めた。胸骨正中切開の後、肺動脈幹および左房に圧力測定ラインを挿入して、肺動脈、左房圧を連続記録した。また大動脈基部、肺動脈基部に電磁流量計を装着して、それぞれQsとQpを測定した。

Blalock-Taussig shuntを施行している症例では、これを閉塞した状態でPACTを施行した。そしてQpが0.5L/min.-m²以上であること、およびPACT施行中にQsが大きく変動することなく、全身循環動態が安定しており、各種測定状態も安定して信頼しうることをPACTの条件とし、この条件に合致しない場合は試験を中止した。測定値が安定したあと、このままの状態で術中PAP(PAP-op)、術中LAR(LAR-op)、術中Qp(Qp-op)を測定した。そして、術中Rp = (PAP-op - LAR-op) / Qp-opを算出した。次に左肺動脈を遮断して全肺血流(rt-Qp)を右

Table 2 Intraoperative and postoperative parameters

Patient	PA clamping test				PA clamping test				Post-op			
	Lt-PA clamping test				Rt-PA clamping test							
	Rt-PAP syst	Rt-PAP (mean)	Rt-Qpi	Rt-Rp	Lt-PAP syst	Lt-PAP (mean)	Lt-Qpi	Lt-Rp	PACT Rp	CorrectPACTRp	Rp	
	mmHg	mmHg	L/min.-m ²	unit.-m ²	mmHg	mmHg	L/min.-m ²	unit.-m ²	unit.-m ²	unit.-m ²	unit.-m ²	unit.-m ²
1	36	19	2.1	7.1	22	15	3.1	3.9	2.5	2.32	2.2	
2	36	22	16.1	1.3	51	28	11.9	2.1	0.8	1.05	2.9	
3	38	15	3.2	2.5	46	27	3.4	5.6	1.73	1.45	1.7	
4	22	14	3.1	1.16	69	36	2.25	11.7	1.04	0.61	2.1	
5	44	28	3.77	4.8	85	50	2.26	17.7	3.78	5.5	5.2	
6	20	16	3.5	2.29	28	20	2.7	4.4	1.51	1.8	1.6	
7	12	10	1.9	3.2	24	19	2	6.5	2.2	1.6	0.94	
8	28	18	1.61	6.5	28	20	2.1	4.8	2.74	2.3	1.6	
9	20	9	0.65	10.8	34	16	0.65	21.5	7.2	1.65	1.4	
10	42	25	4.84	4.34	37	25	2.74	6.93	2.67	2.7	2	
11	36	24	4.5	3.4	36	21	4.6	2.5	1.44	2	1.6	
12		9	1.9	1.6		16	2.3	4.3	1.4	0.84	1.9	
Average	30.36	17.42	3.93	4.08	41.82	24.42	3.33	7.66	2.42	1.99	2.1	
STDEV	10.5	6.42	4.03	2.86	19.79	10.09	2.86	6.15	1.73	1.27	1.09	

PACT Rp: pulmonary artery clamping test Rp, Corrected PACT Rp: two-point measurement PACT Rp

肺に流した状態で一分間経過観察したのち、rt-Rp(右肺血管抵抗)を算出した[$rt-Rp = (rt-PAP - LAP) / rt-Qp$]。同様に右肺動脈を遮断して全肺血流(Lt-Qp)を左肺に流した状態で一分間経過観察し、Lt-Rp(左肺血管抵抗)を算出した[$Lt-Rp = (Lt-PAP - LAP) / Lt-Qp$]。そして並列抵抗式 $1/PACT\ Rp = 1/rt-Rp + 1/Lt-Rp$ を近似式として算出した等価抵抗PACT Rpを肺血流($rt-Qp + Lt-Qp$)負荷時の予備Rpとした。

4) 2点測定法によるRp値の検討 (Fig. 1b)

術中直接測定した肺循環圧 - 流量曲線上のA点(PAPa-LAPa, Qpa)から、左右肺動脈血流は等しいと仮定し1/2A点なるB点(PAPa-LAPa, 1/2Qpa)を求める。次いで左右PACTから得られた左右肺動脈圧 - 流量曲線上の点、C・D点から、B-C、B-D直線を描き、傾きB-C、B-D直線を求める。これらからCorrected PACT Rpを以下より算出した。

$$\text{Corrected PACT Rp} =$$

$$(\text{傾きB-C}) \times (\text{傾きB-D}) / (\text{傾きB-C}) \times (\text{傾きB-D})$$

しかし2点測定法によるRp値においても、基本的にはPACTによるRp算出と同様なpitfallは存在する。術中BT shuntを閉塞して計測しなければならず、さらに片側肺動脈を遮断中にもかかわらず血行動態が不変で、か

つ遮断にて十分なQpの増加を認めることが必須条件となる。十分なる血流負荷を得られない場合は解剖学的な問題点を有するか、非遮断側の肺動脈狭窄が存在するなどの原因が考えられ、いずれにしても評価に値しない。これは負荷不十分である場合は当然傾き勾配が低下し見かけ上の低いRpに結び付く。このため14症例にPACTを術中施行したが、遮断前のQpより低下したため不適当症例と判断し2例を除外した。12例に関しての術前Rp、術中Rp、PACT Rp、Corrected PACT RpとそれぞれFontan術後約1.4カ月後に施行されたカテーテル検査より得られた術後Rpとの単回帰分析を行った。

結 果

1. 術前Rp値、術後Rp値の相関性の検討

(94症例の検討)

術前、術後カテーテル検査を施行された94例の詳細はPAP 15 ± 4.2 mmHg, Qp/Qs 1.3 ± 0.7 , 術前Rp 1.8 ± 0.7 unit.-m², PA index 380 ± 135.4 であり、Fontan手術を平均8歳時に施行され、術後約1.4カ月後に術後カテーテル検査を施行された。術後PAP 13 ± 3 mmHg, 術後Rp 2.2 ± 0.83 unit.-m², CI 2.7 ± 0.6 L/min.-m², 動脈血酸素飽和度95%であった。

術前Rp、術前PA index、術後Rp、術後CIをそれぞれ

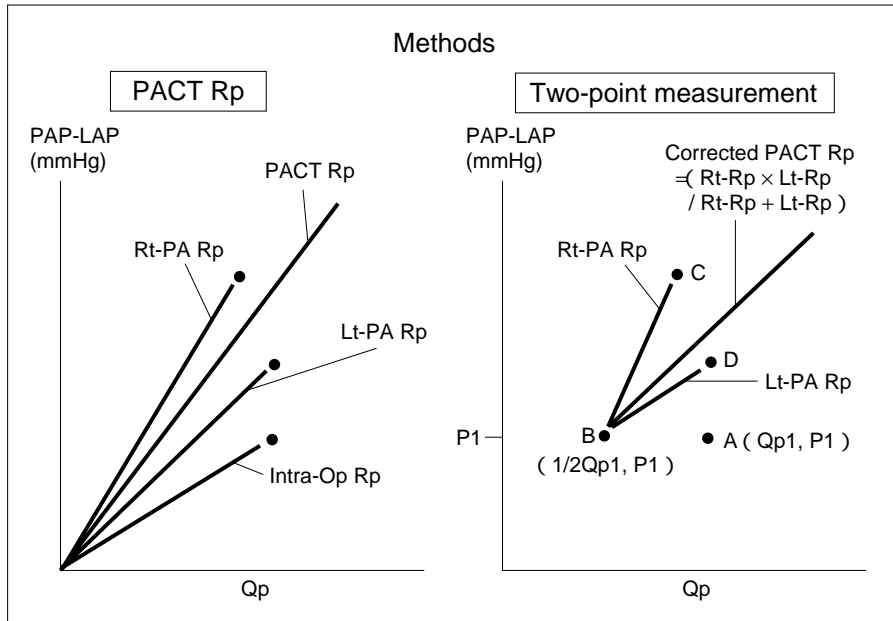


Fig. 1 Methods of calculating pulmonary vascular resistance using the pulmonary artery clamping test (PACT Rp) and two-point measurement (corrected PACT Rp).

単回帰分析を行った。

Fig. 2 に示すように、術後Rpに対して、術前Rp、および術前PA indexは相関を認めなかった。術後CIに関しては術後Rpと有意な逆相関を認めた($y = 4.3 - 0.77x$, Std. Coeff.: -0.54 , $p < 0.05$) (Fig. 3)。つまりFontan手術の術後規定因子として、いかに術前データから術後Rpをより正確に予想されるかが重要と思われた。

2. 術中PACT施行例12例の検討

1) 術前測定値と術中測定値の比較

術前PAPは 16.3 ± 3.7 mmHgから術中PAPは 12.5 ± 2.4 mmHgへ低下し、またLAPは 7.9 ± 2.2 mmHgからLAP-op 6.5 ± 3.1 mmHgへと低下した。PAP、LAPともに術中測定値が術前測定値よりも低値を示した。Rpは術前 1.9 ± 0.9 unit. $^{-2}$ から術中Rpは 2.5 ± 2.7 unit. $^{-2}$ となり、逆に術中値が高値を示した。

2) PACT

PACT中、QpおよびLAPには有意な変化を認めなかった。rt-PAPは 17.4 ± 6.4 mmHg、lt-PAPは 24.4 ± 10.09 mmHgで、lt-PAPがrt-PAPよりも有意に上昇し($p < 0.05$)、lt-PAP/rt-PAPは1.4であった。またrt-Rpは 4.08 ± 2.86 unit. $^{-2}$ 、lt-Rpは 7.66 ± 6.15 unit. $^{-2}$ で、lt-Rpがrt-Rpよりも高値を示し、lt-Rp/rt-Rp = 1.9であった (Table 2)。

並列抵抗式で算出したPACT Rpは 2.4 ± 1.5 unit. $^{-2}$ であった。

3) Fontan手術適応の選択

Fontan手術適応逸脱基準としたRp < 3 unit. $^{-2}$ 以上の症

例は、術前データからは2例であり、術中測定およびPACTからは2例が逸脱し、Corrected PACTからは1例が逸脱した。

4) Fontan手術の成績と術後循環動態

手術死はなく、現在まで全例良好な遠隔期経過を示している。術中PACTにてCorrected PACT RpがFontan手術適応基準を逸脱した唯一の症例5は、術前Rp 1.4unit. $^{-2}$ 、術中Rp 1.0unit. $^{-2}$ であったが、PACT Rp 3.78unit. $^{-2}$ 、Corrected PACT Rp 5.5unit. $^{-2}$ であったため、fenestrated Fontan法を施行した。本症例は術後Rpは5.2unit. $^{-2}$ であった。12例の術後心臓カテーテル検査では、PAPは 12.7 ± 3.9 mmHg、LAPは 7 ± 2.7 mmHg、CIは 3.0 ± 1.14 L/min. $^{-2}$ であり、Rpは 2.1 ± 1.1 unit. $^{-2}$ であった。

5) 術後Rpと術前Rp、術中Rp、PACT Rp、Corrected PACT Rpとの相関性

術前Rp、術中Rp、PACT Rp、Corrected PACT Rpと術後Rpとの検討では、術前Rp、術中Rp、PACT Rpにおいては相関を認めず (Fig. 4)、唯一Corrected PACT Rpのみ相関を認めた($y = 0.846 + 0.63x$, Std. Coeff.: 0.734 , $p < 0.05$) (Fig. 5)。

考 案

本来術前後において再現性のある因子として存在すべき因子であるRpであるが、われわれの94例の検討からも、決して術後Rpは術前Rpと相関を認めず、この点からも、術前Rpは曖昧な因子と言わざるを得ない。術後Rpと術後心拍出量は逆相関を認めることから、術

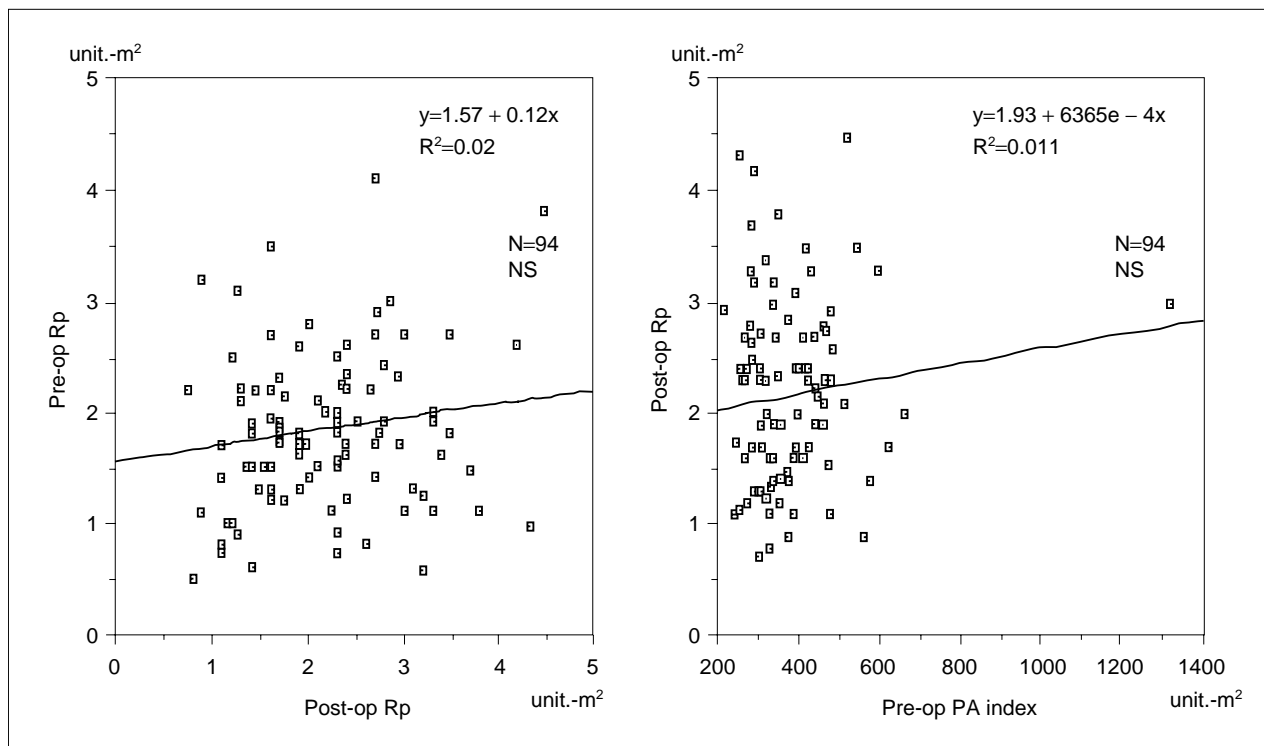


Fig. 2 Comparison of postoperative Rp, preoperative Rp, and preoperative PA index (94 cases).

後Rpの術前からの測定予測がより正確となれば、さらにFontan手術の適応選択においてより信頼性のある因子となりうる。なぜ術前Rpは曖昧な因子なのか。われわれは従来よりRpは基本的にいくつかの問題点を内在している点を指摘してきた⁷⁾。つまり第一に、測定誤差と測定条件が測定値に影響を及ぼし、第二に側副血行路由来の肺血流の存在、第三にFontan術後は拍動流から定常流(非拍動流)になり圧-流量曲線が全く別の曲線に変わりRpは術後上昇する⁸⁾。しかしながらこの点に関してはFig. 2に示すようにわれわれの94例の検討からは、術後Rpは一概に上昇を来すとは言いがたく、また仮に術後に非拍動流の圧-流量曲線に変化するのであれば、あるk値で術前曲線と数学的近似値を示す可能性が考えられるが、そのような指摘は現在までのところ報告されていない。

第四に重要なことは肺循環システムでは圧-流量特性は線形ではないため、肺血管抵抗は静的抵抗ではなく流量により変動する動的抵抗であることであり、われわれは術前肺循環圧-流量曲線は1次曲線を描かないことが術前Rpの評価を難しくしている最大の因子と考えている。

肺循環流体力学におけるシミュレーションモデルにおいては、rigid tube modelと、より生理的に生体に近い

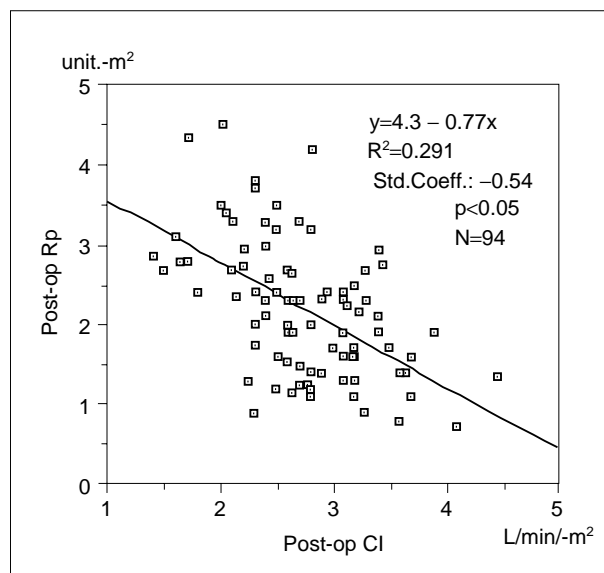


Fig. 3 Comparison of postoperative Qs and preoperative Rp (94 cases)

とされるdistensible tube modelがある^{9,10)}。Fig. 6に示すように $Rp = (PAP - LAP) / Qp$ で、言い換えれば $Y = aX$ なる1次曲線である線形抵抗と代用されている。つまりRpにおけるオームの法則は、肺循環におけるrigid tube modelの近似モデルであるといえる。そこでFig. 6に示

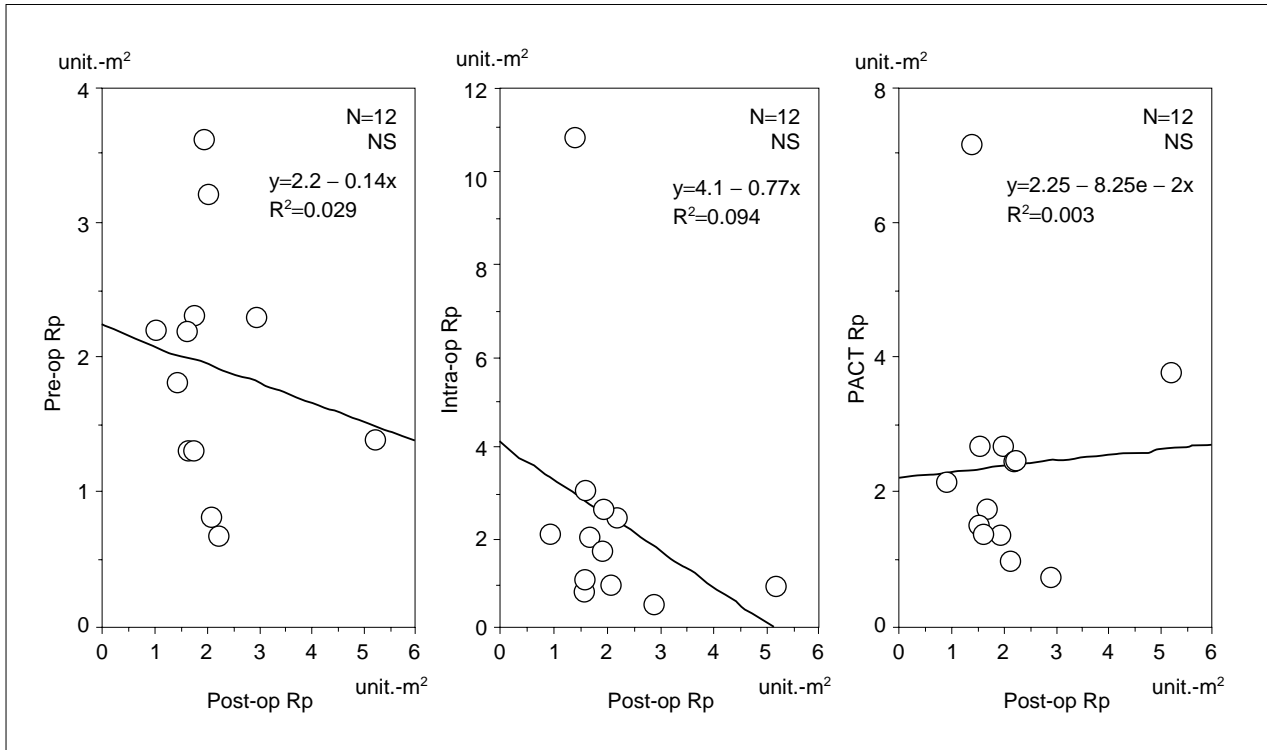


Fig. 4 Correlation between intraoperative measurements made in 12 cases. Pre-op Rp: Rp measured preoperatively, Intra-op Rp: Rp measured intraoperatively, PACT Rp: Rp calculated using the pulmonary artery clamping test, Post-op Rp: postoperative Rp after the Fontan procedure

すように distensible tube model に近似した動的抵抗である場合は、 Q_p の値の変動にて R_p は当然変化を来すため、従来より行われている 1 点による測定法では、おのずと術前後においては Q_p の変化を来すため曖昧なる因子となるのは当然の帰結といえる。つまり Fontan 術後の Q_p 点付近の勾配を測定することが理想的といえる。この点に関しては、Planche ら^{11,12} は、術中に術後 Q_p を人工心肺下において負荷し R_p の術前評価をしている。しかし人工心肺下での評価法は非侵襲的方法とは言い難く、問題があると考えられる。

Fig. 1 は従来の PACT 法である。当初は Fontan 手術は低肺血流疾患を主な手術適応としたため、術前の低肺血流での R_p でなく術後に増加すると推定される肺血流での R_p 算出を目的として肺動脈遮断試験を施行した。しかるに本法の問題点は 0 点に終息する線形抵抗とした点であろう。さらに PACT により容量負荷をした場合、 Q_p 増加により R_p 上昇を来し、結果として Fontan 手術を断念した症例が存在し、これらの症例には術前高肺血流例が多く、従来の PACT での逸脱傾向を認めた。従来の PACT は低 Q_p 症例における肺血流負荷試験であり、低 Q_p 症例においては術後予測 Q_p 下での肺循環動態評価法として意味をなすものであった。しかしながら高 Q_p 症

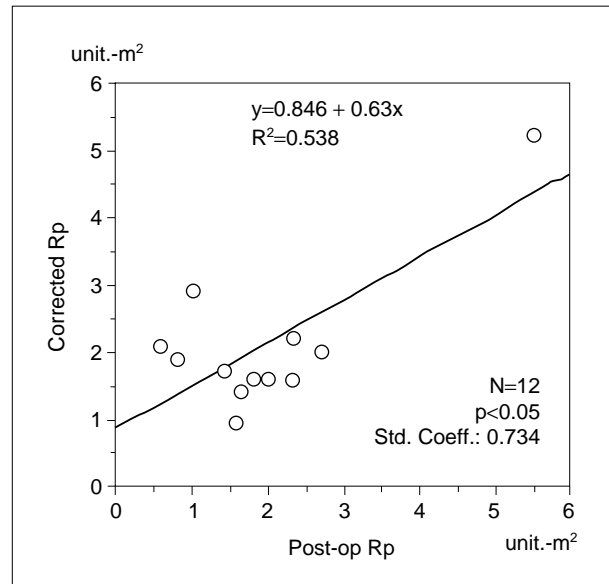


Fig. 5 Correlation between R_p measured preoperatively using two-point measurement and postoperative R_p after the Fontan procedure (12 cases). The correlation between corrected R_p (calculated using two-point measurement) and postoperative R_p was statistically significant.

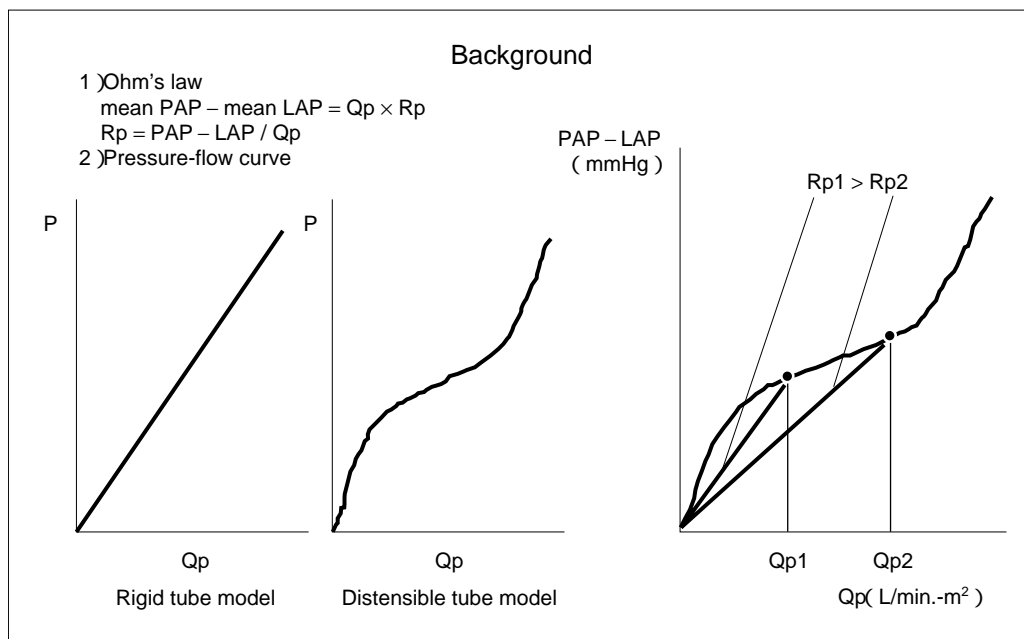


Fig. 6 Pressure-flow relationship in pulmonary circulation.

例においては、術後予測 Q_p をはるかに増加させた条件下での評価法となるために逸脱例の発生をみたものと考えられ、ゆえにわれわれは新たに肺循環のS状曲線ののった2点測定法を考案した。傾き自体を測定する同法は、S状曲線Max付近での評価において従来のPACTがもつ限界点に補正を加えたより正確な測定法であると考えられる。術前高 Q_p 例における R_p 評価法としては、術後予測 Q_p における R_p 評価目的として、IVCテープを調節することで術前 Q_p を調整して R_p 評価を試みた数例の経験がある。しかしながらこれらの症例の中には低 PaO_2 を来し循環動態の変動を認めため中止せざるを得ない症例が存在した。ただし術前高 Q_p 例では、 Q_p を減少させることで予測 Q_p での R_p 評価を試みるべきと考え、今後の検討課題と考える。

今回われわれが行った方法では、Fontan術後を想定した Q_p の変動範囲の2点測定を行うため、まず主肺動脈にて得られた肺循環圧 - 流量関係におけるA点(Q_{p1} , P_1)から左右肺動脈血流が1:1と仮定して算出したB点($1/2Q_{p1}$, P_1)を求める。次いで左右PACTにて得られたC・D点から、B-C、B-D線を描きそれぞれの傾きB-C、B-Dから $rt-R_p$ 、 $lt-R_p$ を求め、並列抵抗式から求めたtotal lung R_p をtwo-point measured R_p とした。つまり $Y = aX + B$ なる近似式より傾きを求めた。術前状態における0点に終息しないことの仮定の妥当性は、理論的にも肺循環動態に関する実験モデルでは、正常酸素投与と下における測定ではほぼ0点に終息する線形曲線を描くが、 PaO_2 を低下させたhypoxic modelやhypercapniaでは、肺

循環圧 - 流量曲線上において左房圧 - 肺動脈平均圧較差を生じさせ、すなわち $Y = aX + B$ なる近似曲線を描く。これはhypoxiaやhypercapniaの影響でprecapillary vasoconstrictionを来すものとされている¹³⁻¹⁶。このhypoxia, hypercapniaによる R_p の上昇は、すでに臨床上低形成左室症候群に対する術前肺血流量の調節を目的として行われている¹⁷⁻¹⁹、Fontan手術前における低酸素状態は、心臓カテーテル検査時の呼吸状態により左右され²⁰肺循環圧 - 流量曲線上においてprecapillary vasoconstrictionを来し、あたかも $Y = aX + B$ なる近似曲線を描いているような可能性がある。われわれのPACTの経験からも術前高肺血流量群 (high Q_p/Q_s) に対するFontan手術において、特にこの傾向が認められたためか、PACT R_p のpitfallとして経験した。このため術後低酸素血症の改善を来す本症では当然術前後の肺循環圧 - 流量曲線は同一ではなく、また特に術前高肺血流量群に対してもFontan手術適応の拡大を余儀なくされている今日、この点からも2点測定法はより理論的であると言える。

従来用いられている肺血管床に関する適応条件は、肺動脈圧、 R_p および肺血管容量であるが、临床上ではこれらの相互関係にある三条件が相反する条件にあることも多い。このような場合、どの因子を優先して手術適応を決定するかが重要で、かつ困難な課題となる。PACTにより肺血流を第四の要素として導入することにより R_p の絶対値とともに血流負荷に対する予備能力を同時に観察し得ることは、数値上で適応限界をわ

ずかに超えている症例の対処などに際して、より安全で的確な判断をする上で有利であり、手術適応を厳格にすべきFontan手術においては安全な情報を提供し得る診断法であろう。術後のQuality of Lifeをより向上させるために、より正確な診断法を持つことで適応基準を再検討して整理することが肝要であると考え。

結 論

- 1980年より1996年までにFontan手術を施行されたうち、術前診断にて肺動脈狭窄が無く、かつ、術後心内短絡を認めない術前後に心臓カテーテル検査を施行しえた94例の検討により術前後Rpの相関性は認められなかった。Fontan術後の心拍出量に関しては術後Rpと有意な逆相関を認めた($p < 0.05$)。つまり術後心機能を規定する上で、いかに術前のデータから術後Rpをより正確に予想することが重要と思われた。
- 術中Rp測定症例の検討からは、術後Rpとの相関性は術中Rp、PACT Rpともなく、唯一2点測定法であるCorrected PACT Rpのみ相関を認めた。
以上より肺循環上理論的な2点測定法(Corrected PACT Rp)によるRp測定法は術後Rpと強い相関を認め、術後Rpの予測評価法として有用と思われた。

【参考文献】

- Fontan F, Baudet E: Surgical repair of tricuspid atresia. *Thorax* 1971; 26: 240-248
- Fontan F, Deville C, Quaegebeur J, et al: Repair of Tricuspid atresia in 100 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1983; 85: 647-660
- Laks H, Milliken JC, Perloff JK, et al: Experience with the Fontan procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1984; 88: 939-951
- Mayer JE, Helgason H, Jonas RA, et al: Extending the limits for modified Fontan procedures. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1986; 92: 1021-1028
- Choussat A, Fontan F, Besse P, et al: Selection criteria for Fontan's procedure, in Anderson RH, Shinebourne EA(eds): *Pediatric Cardiology* 1977, Edinburgh, Churchill Livingstone, 1978, pp 559-566
- Brofman BL, Charms BL, Cohn PM, et al: Unilateral pulmonary artery occlusion in man. control studies. *J Thorac Surg* 1957; 34: 206-227
- 澤渡和男, 今井康晴, 黒澤博身, ほか: Fontan手術の新しい手術適応評価法 肺動脈遮断試験による肺血流負荷時の肺血管抵抗. *日胸外会誌* 1989; 37: 208-217
- Johnson EH, Bennett SH, Goetzman BW: The influence of pulsatile perfusion on the vascular properties of the newborn lamb lung. *Pediatr Res* 1992; 31: 349-353
- Mitzner W: Resistance of the pulmonary circulation. *Clin Chest Med* 1983; 4: 127-137
- Harris P, Heath D: *The human pulmonary circulation*. Third edition. Churchill Livingstone, 1986, pp122-135
- Serraf A, Houyel L, Nicolas F, et al: Pulmonary circulation evaluation before cavopulmonary connections: The cavopulmonary bypass. *Ann Thorac Surg* 1994; 58: 1096-1102
- Planche C, Serraf A, Bruniaux J, et al: Peroperative evaluation of pulmonary vascular resistance by cavo-pulmonary bypass. Value of atrio- and cavo-pulmonary diversions. *Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux* 1992; 85: 577-581
- Rudolph AM, Yuan S: Response of the pulmonary vasculature to hypoxia and H⁺ ion concentration changes. *J Clin Invest* 1966; 45: 399-411
- Parker RE, Granger DN, Taylor AE: Estimates of isogravimetric capillary pressures during alveolar hypoxia. *Am J Physiol* 1981; 241: H732-739
- Kato M, Staub NC: Response of small pulmonary arteries to unilobar hypoxia and hypercapnia. *Circ Res* 1966; 19: 426-439
- Hyman AL, Kadowitz PJ: Effect of alveolar and perfusion hypoxia and hypercapnia on pulmonary vascular resistance in the lamb. *Am J Physiology* 1975; 228: 397-403
- 八代健太, 松下 享, 竹内 真, ほか: 窒素ガス吸入による術前管理が有用であった左心低形成症候群の1例. *日小循環誌* 1996; 12: 48-53
- Jobes DR, Nicolson SC, Steven JM, et al: Carbon dioxide prevents pulmonary overcirculation in hypoplastic left heart syndrome. *Ann Thorac Surg* 1992; 54: 150-151
- Emery JR: Strategies for prolonged survival before heart transplantation in the neonatal intensive care unit. *J Heart Lung Transplant* 1993; 12: S161-163
- Whittenberger JL, McGregor M, Berglund E, et al: Influence of state of inflation of the lung on pulmonary vascular resistance. *J Appl Physiol* 1960; 15: 878-882