

TEE による周術期の右室機能評価

帝京大学市原病院麻酔科学教室

新見 能成, 森田 茂穂

要 旨：心臓手術の周術期には種々の原因による右室機能低下が認められる。周術期の右室機能測定法としては、経食道心エコーと応答の速いサーミスタにより熱希釈法を用いる肺動脈カテーテルが有用である。経食道心エコーでは音響定量化技術を用いた自動境界検出の利用が迅速性の点で優れている。熱希釈法との間には右室駆出率、右室拡張終期容積、右室収縮終期容積のそれぞれに 0.7 から 0.8 の相関が認められる。さらに TEE では中隔のシフト、三尖弁逆流、右室拡張などを視覚的にとらえることが可能であり、術中の右室機能のモニターとして今後の臨床応用が期待される。

はじめに

1940 年代に右室前壁を焼灼しても循環が保たれることが報告されて以来¹⁾、右室固有の収縮機能は意義が小さいものと考えられがちであった。しかし、この報告は右室機能の重要性を否定するものではなく、右室自由壁が収縮しなくても心室中隔が右室機能を代償しうることを示唆したものであった。左室の充満に重要な役割を果たす右室を単なる導管と考えるのは誤りであり、右室梗塞などの心筋虚血や成人呼吸促迫症候群、慢性閉塞性肺疾患などの右室圧負荷疾患では右室機能の低下が心不全を招来することはよく知られている。また、心臓手術の周術期にも右室機能を障害する多くの因子が存在し、右心機能の低下が循環不全の病因となる。従って、術後の循環不全に際しては左室機能だけではなく右室機能の評価が重要である。

右室機能測定法としては、心血管造影法、核医学的心臓血管造影法 (RNA)、心エコー図法、応答の速いサーミスタを使用した肺動脈カテーテルなどが用いられてきた。手術室や ICU では迅速に、かつ反復して測定が可能なら 2 者が有用である。特に心エコー図法では、手術野を妨げない経食道心エコー (TEE) の可能性が注目される。本稿では TEE を中心に周術期の右室機能評価について検討する。

1. 同術期の右室機能不全

心臓手術の術後急性期には、麻酔や手術に問題がなくても一過性に右心機能が低下する^{2,3)}。右心機能を低下させる要因としては、右室に対する手術操作、体外循環、不完全な心筋保護、再灌流障害、心筋保護液や低体温の効果の残存などがあげられ、特に tumor necrosis factor (TNF) などのサイトカインの活性比⁴⁾や補体、oxygen free radicals などの関与⁵⁾についても研究されている。右冠動脈病変の意義については見解が分かれる。Boldt ら⁶⁾はその重要性を報告しているが、Mangano²⁾は右冠動脈病変と術後の右室機能に関係の見いだせないことを報告している。順行性冠灌流では当然であるが、逆行性冠灌流を用いても右室については心筋保護液の分布が一様ではなく心筋保護が不十分となる可能性が指摘されている⁷⁾。しかし、warm blood cardioplegia の持続投与では、間欠的 cold cardioplegia よりも右室機能が保たれることも報告されている⁸⁾。さらに開心術では、冠動脈の空気塞栓もその解剖学的位置関係より右冠動脈に起こりやすい。この術後の右心機能障害は、術前より左室駆出率の低下した症例や左室壁運動異常を認める症例で高度であり、回復も遅い²⁾。

また、先天性心疾患術後の右室の圧負荷や容量負荷は周術期に右心機能を低下させる。特に右左シャントを伴うチアノーゼ性心疾患の根治術や右室筋の切開を伴う手術、単心室に対する中隔形成

表1 右心機能に対するLVADの効果

前負荷	1) 中隔のシフトによる右室拡張コンプライアンスの増大 2) 静脈灌流は増大に伴う右室拡張、右心不全
後負荷	1) 左房圧低下に伴う受動的な肺動脈圧の低下 2) 高い抵抗の肺血床においては、心拍出量増加による肺動脈圧の上昇
取替力	1) 冠灌流の増大 2) 左室unloadingによる右室駆出に対する心室中隔の関与の低下

表2 Comparison of PV function measurement with various methods

	methods			correlation coefficient			
	RNA	Thermo	2DE	Cine	EF or FAC	EDV or EDA	ESV or ESA
Watanabe 13)			Vol	Vol	0.94	0.84	
Starling 14)	Vol		Area		0.8	0.73	0.79
			Area		0.83	0.76	0.82
Kaul 15)	Vol		Area		0.81		
			TAPSE		0.92		
Jardin 16)		Vol	Area		0.74	0.7	0.78
Vincent 17)	Vol		Vol		0.67		
Urban 18)		Vol		Vol	0.83	0.71	

RNA:radionuclide angiography, Thermo:thermodilution, 2DE:2 dimensional echocardiography, Cine:cineangiography, EF:ejection fraction, FAC:fractional area change, EDV:end-diastolic volume, EDA:end-diastolic area, ESV:end-systolic volume, ESA:end-systolic area, Vol:volume, TAPSE: tricuspid annular plane systolic excursion

術の術後などでは右室機能の評価が極めて重要である。

2. LVAD と右室機能不全

循環不全の究極の治療として、最近本邦においても左心補助人工心臓 (LVAD) の植え込みが注目されているが、LVAD の臨床応用は同時に右心機能の重要性を強く再認識させる結果となった。LVAD は右室機能に対して両方向性に作用し (表1), LVAD 装着症例の35% の症例で右室機能の改善を認めるのに対し⁹⁾, 20~30% では右室補助人工心臓 (RVAD) の挿入が必要となる¹⁰⁾。すなわち、右室の後負荷の軽減や右冠動脈血流は右室機能の改善につながるが、心室中隔の左室側へのシフトと右室拡張、TR の増強は右室収縮機能の高度の低下を招く¹¹⁾。かかる症例では右心不全の迅速な診断とその後の適切な治療が予後を左右する。

- このほか、LVAD 装着時の TEE の役割として、
1. 大動脈弁閉鎖不全 (AR) の検出: AR が存在すると、いわゆる AR-LVAD circuit が形成され、重要臓器への血流が障害される。
 2. 卵円孔開存の検出: 卵円孔開存例では、右左シャントが形成される。

3. 気泡除去の確認
4. inflow cannula の位置や狭窄の確認: 特に軸流ポンプを使用した LVAD で重要
5. 血栓や疣贅の検出
6. 心タンポナーデの早期発見

などがあげられ、LVAD 装着時には TEE による観察が必要不可欠である。

3. 右心不全の治療

右心不全の臨床徴候としては、CVP の上昇、LVAD の流量の低下と低血圧、肺動脈圧の上昇 (右室の拍出量が低下するにつれて肺動脈圧も低下)、右房および右室の拡張 (術中の視診と TEE による観察) などがある。

右心不全の治療は、

1. 右室前負荷の至適化
2. 体動脈圧の維持 (右室灌流の維持)
: ノルエピネフリン, バゾプレシシンなど
3. 右室後負荷の軽減: 酸素
: NO, SNP, プロスタサイクリン, PGE1 など
4. 右室収縮力の増大: ドブタミン, ドーパミン, アムリノン, ジゴキシシンなど
5. 正常心拍数と心調律の維持
6. 右室補助人工心臓 (RVAD)

などである。重症度や病態によってこれらを使い分けると同時に、右室機能測定による治療効果の評価が必須である。

4. 右室の特性と右室機能測定法の問題点

右室は左室同様 Frank-Starling 機構に従い、静脈灌流の増大により右室内圧と容積が増大し拍出量が増大する。しかし、右室壁は左室壁に比べて薄くコンプライアンスが高いことより、1) 拡張期圧容積曲線の勾配は平坦で、静脈灌流の増大は圧をほとんど上げずに容積を増大させる。2) 拡張性は高く、心機能の評価では収縮機能が問題となる。3) 左室に比べて後負荷の影響を受けやすいなどの特徴を有する。従って、右室充満の指標として圧の情報は不十分であり、拡張終期の容積の情報を得る必要がある。これまで右室の容積および駆出率は、心血管造影法、核医学的心臓血管造影

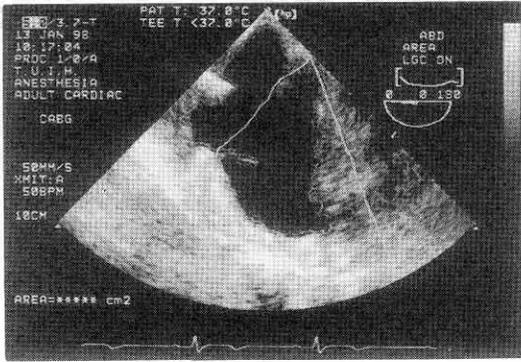


図1 AQ法による右室内腔面積の評価

法 (RNA), 心エコー図法, 応答の速いサーミスタを利用した熱希釈法などで評価されている。どの方法も固有の欠点を有しており真の gold standard は存在しない。

心血管造影法や心エコー図法のような二次元画像による評価では容積近似が最大の問題となる。左室と異なり右室の形状は複雑で内面も不規則であることより、左室容積計測時に用いる近似法では誤差が大きい。Simpson 法などが利用されているが、まだ満足のいく方法が存在しないのが実状である。心エコー図法では胸骨下アプローチの四腔像、もしくは心尖部アプローチの四腔像が用いられているが、胸骨下アプローチでは心尖部を含む右室全体の描出が困難である。

RNA では右房や肺動脈の重なりが問題となるが、容積近似の必要がなく、現在右室容積の測定に際しては最も受け入れられている方法であろう。熱希釈法も容積近似の必要はないが、三尖弁逆流の存在と冷水がどの程度均一に分布するかが問題となる。

Rafferty ら¹²⁾ は、熱希釈法で算出した駆出率とエコー上の面積駆出率および三尖弁逆流の三者を比較し、右房圧波形に変化がない程度の三尖弁逆流は熱希釈法による右室駆出率の測定に影響を与えないことを報告している。しかし、全く異なるものである熱希釈法と心エコーの駆出率を同一式上で取り扱うことに研究方法上の問題があること、熱希釈法の駆出率とエコー上の面積駆出率の相関係数は 0.7 から 0.8 程度であることなどよ

り、この両者の比較で三尖弁逆流の影響を判断するのは困難と考える。

上述の方法による右室駆出率や右室容積の測定値の関係についてこれまでいくつかの検討がなされている (表 2)。しかし、直接的に容積を求めることのできる測定法 (RNA, 熱希釈法) か、それとも二次元画像より容積近似をおこなったうえで容積を得る測定法 (心血管造影法, 心エコー図法) か、また、後者の場合には容積に直して評価するか面積のまま評価するかなどにかかわらず、どの二つの測定法間にも 0.7 から 0.8 前後の相関係数が得られていることは興味深い (表 1)。二次元画像による容積近似においては、多くは右室流出路を考慮にいれていない。しかし、たとえ流出路まで考慮して容積近似を行った場合でも、単に流入路の面積で評価した場合と比較して相関係数はほぼ等しい¹⁴⁾。すなわち、現行の容積近似法がはなはだ不十分であることより、駆出率は容積に直さず単に面積変化で評価してもあまり精度は変わらない。

このほか Kaul ら¹⁵⁾ は、心尖部四腔像で拡張終期にトランスジューサの位置から右室自由壁の三尖弁付着部に直線をひき、この直線が収縮終期に三尖弁と交差したときの三尖弁から右房側部分の長さ、いわゆる tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE) の有用性を検討した。TAPSE と、RNA で測定した右室駆出率との間には高い相関 ($r=0.92$) が認められたが、TAPSE の臨床での有用性はまだ検討されていない。また、TEE で Kaul らの報告した体表からの心エコーによる TAPSE と同質の情報が得られるか否かについても今後の検討課題であろう。

5. 周術期の右室機能評価における TEE の有用性

前述の右室機能測定法のうち、手術室や ICU において手軽にかつリアルタイムに反復して右室機能を計測できる方法は、TEE と熱希釈法である。

TEE は、例え二次元画像から容積を推定しても、その定量性が熱希釈法に優るとは考えにくい。しかし、周術期の臨床において熱希釈法では得ら

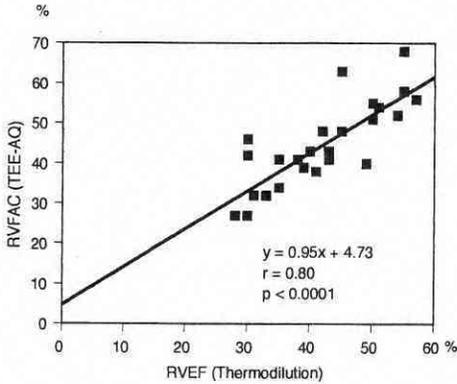


図 2

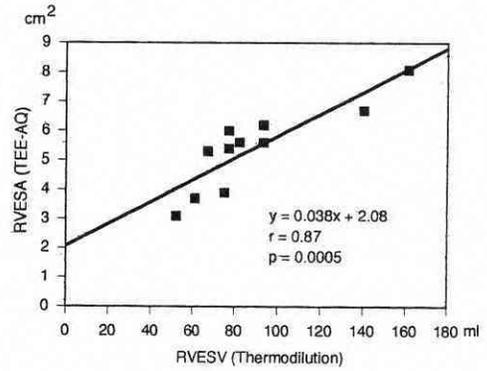


図 4

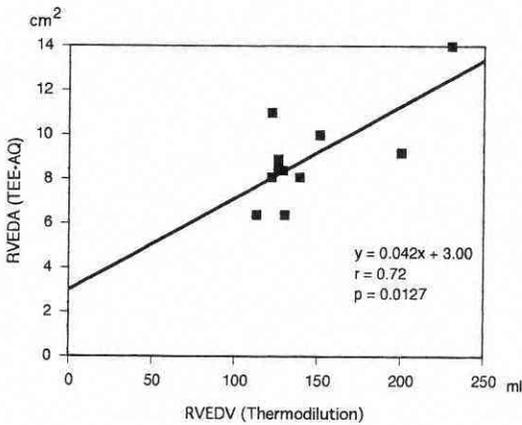


図 3

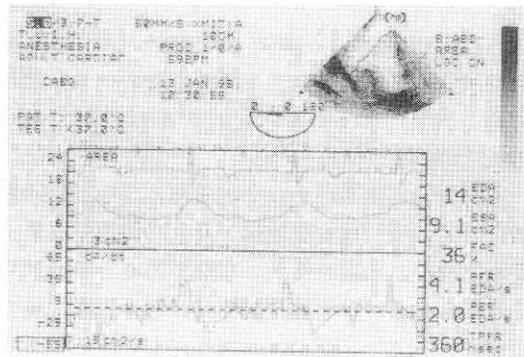


図 5 右室内腔面積変化の波形表示

れない数多くの情報を提供する。なわち TEE では、三尖弁逆流や右室の拡張、中隔のシフトなどを視覚的に半定量化して観察することが可能であり、両心室間相互作用について検討することができる。遺残シャントなど不満足な手術結果を検出することにより術後の右室機能障害の病因診断を行うこともでき、再手術の必要性があれば、これを手術室で決定することができる。また、カテーテルの留置が不可能な三尖弁置換症例や、感染防御の面よりカテーテルの留置を避けるべきである心臓移植など、TEE のみによる右室機能評価を余儀なくされる症例も存在する。

これまで体表からの心エコー図法による右室駆出率と容量の計測では、胸骨下アプローチの四腔像、もしくは心尖部アプローチの四腔像が用いら

れてきた。TEE で右室機能を測定する場合、われわれは transverse view の四腔像を得た後、シャフトを若干時計回転させて冠静脈洞が観察できる画像を描出する。この画像では、右室流入部の全体が三尖弁より長軸方向に心尖部まで観察可能である (図 1)。右室収縮のメカニズムでは、自由壁の中隔への接近に加えて、右室内の肉柱や乳頭筋が三尖弁を心尖部方向へ引き下げる長軸方向の短縮の役割が大きい。胸骨下のアプローチでは、心尖部を含む右室全体を描出することが困難であるが、中隔と自由壁を完全に観察できる TEE の画像は、右室収縮を観察するうえで体表からの画像に優るものと考えられる。

6. 音響定量化技術 (Acoustic Quantification) による右室機能評価

最近の心エコー図法の進歩の一つに音響定量化技術 (以下 AQ 法) を用いた自動的境界認識

(Automated boundary detection) システムがある。このシステムでは関心領域内の血液と心筋の境界を自動的に検出し、リアルタイムに心腔内面積や面積変化率を計測することができる。左室の内腔面積に関しては、用手的なトレースと AQ 法との間に高度の相関を認めることが報告されている^{19,20)}。

周術期の右室機能評価において最も重要な条件は迅速性であり、AQ 法の利用が可能であればその意義は大きい。心臓外科手術症例において、熱希釈法による右室駆出率、右室拡張終期容積、右室収縮終期容積と TEE を用いて AQ 法により求めた右室面積駆出率、右室拡張終期面積、右室収縮終期面積の関係を調べた結果、それぞれ 0.80, 0.72, 0.87 とこれまでの右室機能評価に関する報告と対比できるような相関係数が得られた (図 2, 3, 4)。関心領域の設定法などに今後の課題は残されているものの、AQ 法は手術室での右室機能評価に有力な方法であろう。

AQ 法で右室駆出率や容積を測定する場合、1) 呼吸を一時停止させて測定すること。2) 右室をできる限り最大面積で描出して測定すること。3) 三尖弁輪部、心室中隔、右室自由壁、心尖部を良好に描出すること。4) 面積変化率 dA/dt の波形が安定した状態 (図 5) で測定することなどが重要と考えている。

おわりに

周術期の右室機能障害と右室機能測定法について考察した。周術期には右室機能を障害する多くの因子が存在し、症例によっては右室機能の評価が予後を左右する鍵となる。容量や駆出率以外に、三尖弁逆流や中隔のシフトなどの情報を提供する TEE は有用な右室機能モニターである。特に、容量や駆出率の評価には迅速性の点で AQ 法の使用が注目される。右室駆出率測定用肺動脈カテーテルと併用することにより、より精度の高い右室機能評価が可能と考える。

文 献

1) Starr I, Jeffers WA, Mead RH: The absence of conspicuous increments of venous pressure

after severe damage to the right ventricle of the dog, with a discussion of the relation between clinical congestive failure and heart disease. *Am Heart J* 26: 291, 1943

- 2) Mangano DT: Biventricular function after myocardial revascularization in humans: deterioration and recovery patterns during the first 24 hours. *Anesthesiology* 62: 571, 1985
- 3) Stein KL, Breisblatt W, Wolfe C, et al: Depression and recovery of right ventricular function after cardiopulmonary bypass. *Crit Care Med* 18: 1197, 1990
- 4) Hauser GH, Casey W, Hannallah R, et al: Circulating endotoxin and tumor necrosis factor (TNF) during pediatric cardiac surgery. *Crit Care Med* 17: S129, 1989
- 5) Menasche P, Pasquier C, Belluci S, et al: Deferoxamine reduces neutrophil-mediated free radical production during cardiopulmonary bypass in man. *J Thorac Cardiovasc Surg* 96: 582, 1988
- 6) Boldt J, Kling D, Moosdorf R, et al: Influence of acute volume loading on right ventricular function after cardiopulmonary bypass. *Crit Care Med* 17: 518, 1989
- 7) Winkelmann J, Aronson S, Young CJ, et al: Retrograde-delivered cardioplegia is not distributed equally to the right ventricular free wall and septum. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 9: 135, 1995
- 8) Honkonen EL, Kaukinen L, Pehkonen Ej, et al: Right ventricle is protected better by warm continuous than cold intermittent retrograde blood cardioplegia in patients with obstructed right coronary artery. *Anesth Analg* 84: SCA 96, 1997
- 9) Kormos RL, Borovetz HS, Gasior T, et al: Experience with univentricular support in mortally ill cardiac transplant candidates. *Ann Thorac Surg* 49: 261, 1990
- 10) Kormos RL, Gasior TA, Kawai A, et al: Transplant candidate's clinical status rather than right ventricular function defines need

- for univentricular versus biventricular support. *J Thorac Cardiovasc Surg* 111: 773, 1996
- 11) Holman WL, Bourge RC, Fan P, et al: Influence of left ventricular assist on valvular regurgitation. *Circulation* 88 (part 2): 309, 1993
 - 12) Rafferty T, Durkin M, Hines R, et al: The relationship between "normal" transesophageal color-flow Doppler-defined tricuspid regurgitation and thermodilution right ventricular ejection fraction measurement. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 7: 167, 1993
 - 13) Watanabe T, Katsume H, Matsukubo H, et al: Estimation of right ventricular volume with two dimensional echocardiography. *Am J Cardiol* 49: 1946, 1982
 - 14) Starling MR, Crawford MH, Sorensen SG, et al: A new two-dimensional echocardiographic technique for evaluating right ventricular size and performance in patients with obstructive lung disease. *Circulation* 66: 612, 1982
 - 15) Kaul S, Tei C, Hopkins JM, et al: Assessment of right ventricular function using two-dimensional echocardiography. *Am Heart J* 107:526, 1984
 - 16) Jardin F, Gueret P, Dubourg O, et al: Right ventricular volumes by thermodilution in the adult respiratory distress syndrome. A comparative study using two-dimensional echocardiography as a reference method. *Chest* 88: 34, 1985
 - 17) Vincent JL, Thirion M, Brimiouille S, et al: The rmodilution measurement of right ventricular ejection fraction with a modified pulmonary artery catheter. *Crit Care Med* 12: 33, 1986
 - 18) Urban P, Scheidegger D, Gabathuler J, et al: Thermodilution determination of right ventricular volume and ejection fraction. A comparison with biplane angiography. *Crit Care Med* 15: 652, 1987
 - 19) Vandenberg BF, Rath LS, Stuhlmuller P, et al: Estimation of left ventricular cavity area with on-line, semi-automated echocardiographic edge detection system. *Circulation* 86: 159, 1992
 - 20) Perez JE, Waggoner AD, Barzilai B, et al: On-line assessment of ventricular function by automatic boundary detection and ultrasonic backscatter imaging. *J Am Coll Cardiol* 19: 313, 1992