

SvO₂ による心機能の評価と閉鎖回路による 安定した補助循環

百瀬直樹*, 中嶋逸郎*, 唐沢あや子*, 安藤勝信*
又吉盛博*, 北村麻未*, 山越理恵*

要 旨

人工心肺からの離脱が難しい症例に対しては、的確な心機能の評価と離脱までの安定した循環補助が重要である。著者らは体外循環中の心機能の評価のために静脈血酸素飽和度(SvO₂)の変動に注目した。1092例にSvO₂をモニタリングした結果、離脱時に人工心肺より生体心臓へ前負荷を増してもSvO₂が上昇しない症例では、体外循環からの離脱が困難であることが分かった。SvO₂は心拍出量により変化するため、常にSvO₂をモニタリングしているperfusionistにとって心機能の評価する上で良い指標となる。また、安定した体外循環のために、従来のように貯血槽を脱血回路の途中に置かない完全閉鎖回路を779例に使用した。この結果、完全閉鎖回路を用いた人工心肺は貯血量の変化や中心静脈圧の推移から、体外循環の灌流量を変化させても生体心臓への前負荷が変化しにくいことが分かった。このことは生体心臓への負荷を安定させ、体外循環からの離脱を助けるものと考えられる。SvO₂のモニタリングによる体外循環中の心機能の評価と、安定した体外循環のための完全閉鎖回路は、離脱困難に対する戦略として有用である。

緒 言

術後心機能の回復が思わしくなく、人工心肺からの離脱が難しい症例を経験することがある。このような症例に対して、著者らperfusionistは体

外循環中の的確な心機能の評価と離脱までの安定した循環補助を戦略のポイントと考えている。

人工心肺からの離脱の場面では、容易に離脱できるのか・慎重な離脱操作が必要なのか・しばらく補助循環を続けるのか・さらには経皮的心肺補助(PCPS)など新たな補助循環の装置に切り替える必要があるのかを判断するために、心機能を的確に評価する必要がある。しかし、体外循環中は一般的に行われている熱希釈式心拍出量測定は困難であるほか、血圧も必ずしも心機能を反映する指標とはならない。また、経食道心エコー法(TEE)による心機能の評価にも問題点もある。そこで著者らは、体外循環の安全管理のためにモニタリングされている静脈血酸素飽和度(SvO₂)により体外循環中の心機能の評価してきた。

心機能の回復が不十分な状態での人工心肺からの離脱には、安定した体外循環のtaperingが必要であり、またそのまま人工心肺を用いて循環補助を行う際にも安定した体外循環が重要となる¹⁾。しかしながら、広く一般に用いられている開放型人工心肺回路においては、体外循環流量を変化させる離脱時には貯血量が変動しやすく特に心臓への前負荷は不安定となる²⁾。これに対して我々は、貯血量を安定させることが容易な完全閉鎖人工心肺回路を考案し³⁾体外循環に用いてきた。

今回、離脱困難症例に対する戦略として、SvO₂による体外循環中の心機能の評価と、完全閉鎖人工心肺回路による安定した体外循環の有用性について報告する。

*自治医科大学大宮医療センター臨床工学部

方法

1. 心機能の評価

人工心肺の脱血回路にセンサを取り付けSTATSAT™ (GISH™ BIOMEDICAL INC. CA U.S. A.) で体外循環中のSvO₂をモニタリングした。このSTATSATモニターは赤色レーザー光の反射光により、センサ内を流れる血液の酸素飽和度(SaO₂)の値を簡単に測定することができる。また、測定した値をトレンドグラフで経時変化として表示できることが特徴である。

体外循環からの離脱時において、SvO₂が60%より低い場合や、体外循環流量を適正灌流量の1/2 (Perfusion Index で1.2 l/min/m²) 程度まで低下させた時にSvO₂が低下する場合には、人工心肺

の貯血レベルを下げ、生体心臓への前負荷を増してSvO₂の変化を記録した。心機能を積極的に評価する場合は、復温が完了していることを確認してから体温を一定に保ち、人工呼吸器と人工肺の換気条件を変えずに行った。

SvO₂のトレンドモニターは1092例(1997年4月から2000年8月)の人工心肺使用症例に行った。

2. 体外循環離脱操作

従来の開放回路(図1)は脱血回路の途中に貯血槽を置き、血液はflow control pumpにより人工肺を介して生体に送血される。体外循環の離脱に伴う灌流量の調節はflow control pumpの流量ツマミの操作とoccluderまたは脱血回路への鉗子操作による脱血回路の流量調節で行う。貯血量の調節もflow control pumpの流量ツマミまたは脱血回路

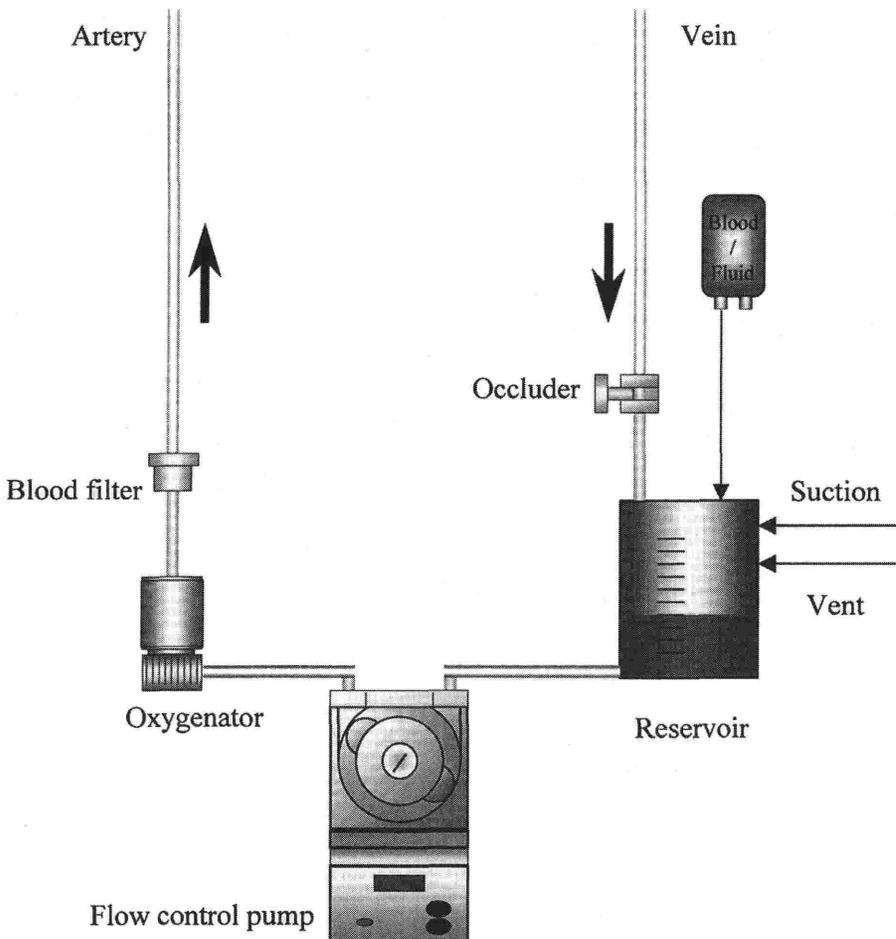


図1 従来の開放型人工心肺回路

の流量調節で行う。

完全閉鎖人工心肺回路（図2）は、貯血槽を脱血回路上に置かず、脱血回路は直接送血用ローラーポンプ（flow control pump）に接続される。貯血槽は脱血回路から分岐する回路の先端に位置する。脱血回路と貯血槽の間には貯血量を調整するためのローラーポンプ（volume control pump）がある。体外循環の灌流量の調節は flow control pump の流量ツマミの操作のみで行う。貯血量の調節は volume control pump の流量ツマミの操作のみで行う。

従来の開放型回路は計1519例（1989年12月から1997年4月までの全例に、1997年4月から2000年8月までは ASD, MVR など心房に切開を加える症例）に使用した。完全閉鎖回路は779例（1997年4月から2000年8月までの CABG, AVR, 心室瘤, 大動脈瘤などの症例）に使用した。

双方の体外循環方法における離脱時の体外循環操作の簡便さと、生体心臓への前負荷の変動を患者の中心静脈圧（CVP）の変化により比較した。

結 果

1. 心機能の評価

人工心肺からの離脱時に、 $S\bar{v}O_2$ が60%以下の状態で体外循環から離脱できた症例は無かった。また、体外循環中に60%以上であっても貯血量を減らし生体心臓への前負荷を増した時に $S\bar{v}O_2$ が低下した症例では例えば離脱しても短時間で循環動態が悪化し、補助循環を再開する必要があった。このように体外循環から離脱できなかった症例は術前から PCPS を導入していた症例を含め19例であった。離脱できなかった一症例の循環動態と $S\bar{v}O_2$ の変動を図3に示す。症例は AMI により日本語（LOS）となり体外循環下で CABG と左室

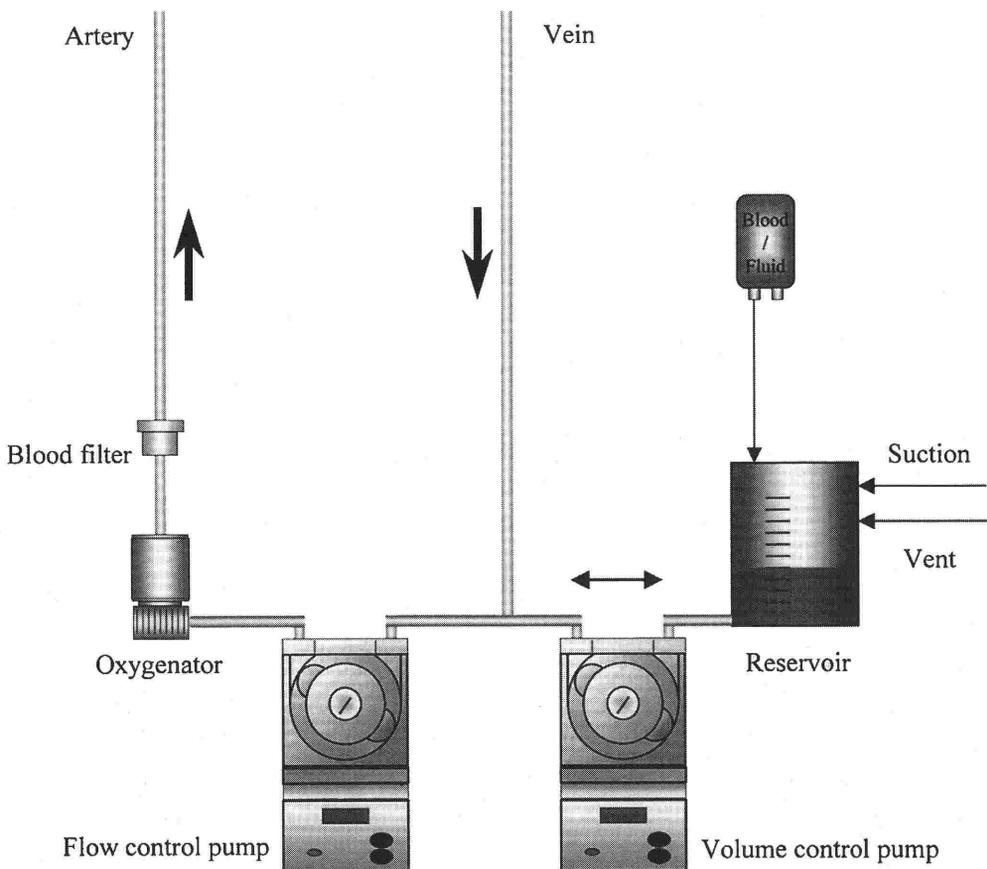


図2 完全閉鎖人工心肺回路

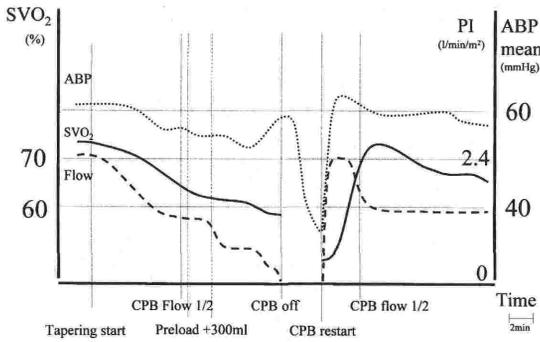


図3 離脱不成功症例のSvO₂の推移

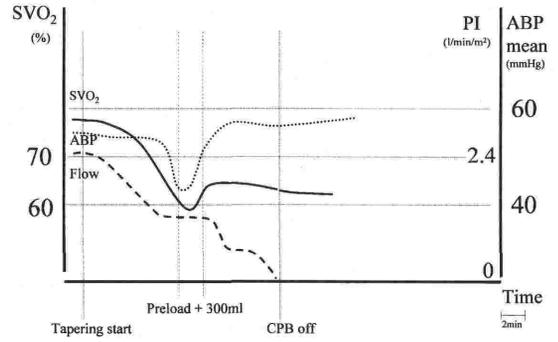


図4 離脱成功症例のSvO₂の推移

瘤切除術を施行，離脱時ドパミン，ドブタミン10 μg/kgに加えノルアドレナリンを0.1 μg/kg使用していた。体外循環流量を1/2程度まで減らすとSvO₂も低下したため，生体心臓への前負荷を300 ml増したが，SvO₂の上昇は認められず50%程度であった。さらに前負荷を増したがSvO₂の上昇は認められなかったもの，最高血圧は90 mmHgに達していたため離脱を試み体外循環を停止させた。離脱後2分程度で血圧は急激に低下し循環不全状態となり，直ちに体外循環を再開した。30分後再び体外循環からの離脱を試みたが同様に離脱できず，経皮的心肺補助装置（PCPS）を装着した。

一方，術前より体外循環からの離脱困難が予想される症例であっても，体外循環流量を減らしながら前負荷を増加させた時に，SvO₂が上昇し60%以上を維持できた症例はすべて離脱が可能であった。離脱が難しくも離脱できた一症例の循環動態とSvO₂の変動を図4に示す。この症例はAMIによりLOSとなり体外循環下でCABGと穿孔した心室中隔の再建を施行，離脱時ドパミン，ドブタミン10 μg/kgに加えノルアドレナリンを0.1 μg/kg使用していた。体外循環流量を減らすとSvO₂が60%以下まで低下した。このため前負荷を300 ml増したところSvO₂の上昇が認められ60%を超えた。しかし，CVPが15 mmHgを超えたためそれ以上前負荷は増やさなかった。最高血圧も徐々に上昇し90 mmHgに達し，さらに体外循環流量を減らしてもSvO₂が低下しないため離脱を試み体外循環を停止させた。そのまま循環動態は安定し離脱から2時間後ICUに入室した。

離脱できた症例の中でICU入室4時間後に循

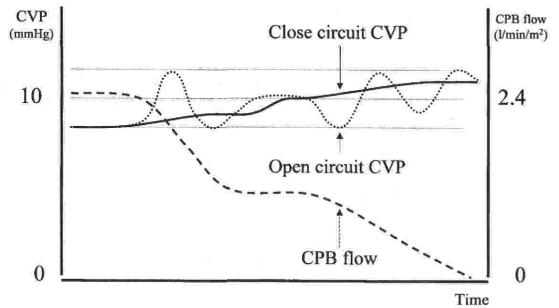


図5 離脱時のCVPの変化

環動態が悪化し，PCPSを挿入したケースが1例あった。その他，SvO₂の値は良好で離脱したものの，難治性の不整脈の発生や出血のコントロールが困難で体外循環を再開した症例があった。

2. 安定した体外循環

開放回路使用時と完全閉鎖回路使用時の体外循環からの離脱時におけるCVP推移の一例を図5に示す。従来の開放型人工心肺回路を用いた症例では，体外循環の離脱時などに体外循環流量を変化させると，貯血量が不安定になり一定のCVPを維持することは難しかった。これに対し完全閉鎖回路では，体外循環流量を変化させても貯血量は一定に保たれ，CVPを安定させたままで離脱を行うことが可能であった。さらに，体外循環操作も容易であった。また，離脱が困難で一時的に人工心肺で補助循環を続けた症例でも，容易に安定した補助循環を維持することが可能であった。

離脱困難によりPCPSを装着した症例22例（1997年4月から2000年8月まで）のうち，開放型回路使用症例は4例（CABG+MVR 2例，

MVP 1 例, DVR 1 例) で, 完全閉鎖回路使用例は18例 (VSP+CABG 4 例, CABG 5 例, 左室破裂修復 4 例, 大動脈人工血管置換 5 例) であった。

S $\bar{v}O_2$ により心機能を評価する場合, 体外循環条件を安定させる必要がある。この点においても完全閉鎖回路は安定した体外循環が得られ評価しやすかった。

考 察

1. 体外循環中の的確な心機能の評価

心拍出量は心機能を評価する最も良い指標となるため, 肺動脈カテーテルを挿入し熱希釈法により測定される。しかし, 体外循環中は熱希釈水が体外循環に分流してしまうため, 熱希釈法では心拍出量を測定することはできない。また, 血圧は末梢血管抵抗などによっても左右されるため, 必ずしも心機能を反映しない。さらに, TEE による心室壁運動の評価は非常に有用であるが, 定量化が難しいなどの問題点もある。

従来から人工心肺装置には血液回路に血液ガスのモニターが取り付けられることが多く, 比較的安価で簡便に取り付けられる酸素飽和度 (S aO_2) モニターが広く用いられている。このようなガスモニターの本来の目的は, 体外循環中の人工肺のトラブルや体外循環の灌流量の不足を察知する安全対策として用いられているが, 一定の条件下においては体外循環中の心機能を評価する手段となる。

体外循環中の S $\bar{v}O_2$ は図 6 に示すように, 体外循環開始から血液希釈, 冷却, 心停止, 復温, 心拍再開, 体外循環離脱と大きく変化する。このよ

うに S $\bar{v}O_2$ を変化させる因子は人工呼吸器による換気量と心拍出量・人工肺による換気量と体外循環流量, そして生体での代謝 (体温) である。体外循環の離脱時においては, 復温が完了して体温は一定であり, さらに人工呼吸器の換気条件も一定にできる。そして, perfusionist が体外循環の条件を把握していれば, S $\bar{v}O_2$ により心拍出量を評価する環境ができる。

体外循環の特殊性として次の点があげられる。

①心停止あるいは心機能を著しく低下させても生命維持が可能である。②体外循環の灌流量を変化させることで, ある程度の生体心臓への後負荷と前負荷を調節することができる。③貯血量により生体心臓への前負荷を容易に増減させることが可能である。つまり, 体外循環中はその特殊性によって心臓に対する負荷を増減させながら心機能を評価することができるのである。

体外循環からの離脱に際して, 体外循環の灌流量を減らした時には, 減らした脱血流量に相当する血流が右心房に流れ込み, これに伴い心拍出量が増加するため生体を灌流する血液流量は大きく変化せず S $\bar{v}O_2$ も下がらないはずである。もし, 体外循環の灌流量を減らした時 S $\bar{v}O_2$ が低下する場合には, 前負荷の不足か, あるいは前負荷に対応できない心不全の状態と考えられる。さらに, この区別は前負荷を増してやることにより S $\bar{v}O_2$ が上昇するか, しないかで判断できる。前負荷を増しても S $\bar{v}O_2$ が上昇しなければ心機能が回復できていないと考えられる。

実際に離脱に際して体外循環の灌流量を下げた時に S $\bar{v}O_2$ が低下する症例は多い。しかしながら, ほとんどの症例では貯血量を減らし心臓への前負荷を増加させると S $\bar{v}O_2$ は上昇して 60% を超え, その後体外循環から離脱させることができていた。ところが, S $\bar{v}O_2$ が上昇しなかった 19 例においては離脱させることが困難であった。つまり, 前者は前負荷の不足, 後者は心不全であったと考察できる。後者の心臓では S $\bar{v}O_2$ を 60% 以上に保つだけの揚程で拍出量を維持することはできず, 何らかな循環補助が必要となったと考えられる。

体外循環中の心機能を評価する上でも, S $\bar{v}O_2$ の変化をモニタリングすることは有用と考える。

2. 離脱時の安定した体外循環

人工心肺からの離脱が難しい症例においては,

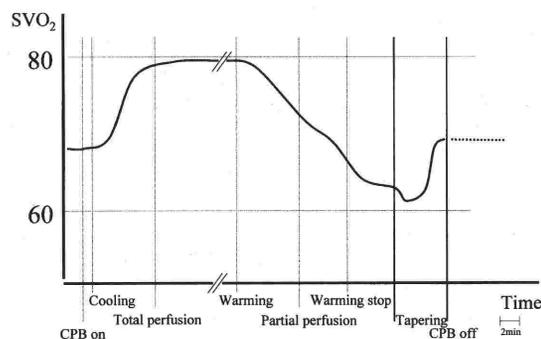


図 6 体外循環中の S $\bar{v}O_2$ の推移

体外循環により心臓への前負荷や後負荷を大きく変化させることは、過負荷による心筋の障害を避ける上で慎重に行う必要がある。

広く一般的に用いられている従来の体外循環回路(図1)では、貯血量を脱血流量と送血流量のバランスで調節している。このため、どちらか一方の流量が変化するとこのバランスは崩れ貯血量は大きく変化してしまう。そして、送血流量はポンプの回転ツマミで容易に調節できるが、脱血流量の調節は回路を圧閉して抵抗を変化させる鉗子操作や特殊な occluder によって行われ、その適切な操作には高度な技術が必要である。さらに、脱血流量は手術台の上下によっても変化してしまうため、貯血量を一定に保つことは難しい。また、柔軟性のある塩化ビニール製の貯血槽を用いた回路は、貯血槽が密閉されているため閉鎖回路と呼ばれるが、出血を回収する心内貯血槽 (cardiotomy reservoir) が大気に開放されているために、完全な閉鎖回路とならならない。

当科で考案した完全閉鎖人工心肺回路(図2)は、貯血槽は大気に開放されているが、volume control pump により体外循環回路は大気と隔絶され、完全な閉鎖回路となる。この回路の特徴は、体外循環流量の調節は flow control pump, 貯血量の調節は volume control pump で行い、それぞれが独立しており、操作もポンプのツマミだけで簡単に行える点にある。そして、貯血量は安定しており手術台の上下などで変化してしまうことはない。

従来の開放式回路では先に述べた理由から、離脱時など体外循環流量を変化させる場合には、送血流量と脱血流量のバランスが崩れるために、貯血量を安定させることは難しく、結果(図5)にあるように CVP は細かく変動する。一方、完全

閉鎖式回路では、体外循環流量の変化が貯血量に干渉しないため CVP は安定している。心臓への余計な負荷を減らすためにも前負荷を安定させたまま、循環補助や離脱操作を行う必要があり、完全閉鎖回路はこのような症例に有用と考える。ただし、開放回路なら離脱困難な症例が、完全閉鎖回路により離脱が可能になるのかという点を明らかにすることはできなかった。

結果を見ると、離脱困難により PCPS を装着した症例のうち開放型回路使用症例が4例に対し、完全閉鎖回路使用例は15例であった。これは、重症例に積極的に完全閉鎖回路を用いた結果であると考えている。

結 語

離脱困難症への戦略として $S\bar{v}O_2$ の連続モニタリングによる心機能の評価と、閉鎖型人工心肺による安定した補助循環を行ってきた。離脱時の $S\bar{v}O_2$ は、心拍出量をよく反映しており、適切な前負荷を負荷しても60%以上に上昇しない症例では離脱は困難であった。完全閉鎖人工心肺回路を用いた症例では、従来の開放型人工心肺回路を比べて体外循環操作が容易であり、離脱時に CVP を安定させることも容易であった。これらの戦略は離脱困難の場面において有用であった。

文 献

- 1) Charles C. Reed, Trudi B. Stafford: Cardiopulmonary Bypass Second Edition, Conduct of Perfusion, TMP The Woodlands, Texas, 1989, pp.400-414
- 2) 百瀬直樹: 最新体外循環, 人工心肺回路と周辺機器-体外循環操作の実際-(井野隆史, 安達秀雄編) 金原出版, 東京, 1997, pp76-114
- 3) 百瀬直樹, 又吉盛博, 北村麻未ら: 循環血液流量と循環血液量の調整を独立させた人工心肺, 人工臓器 26 (23): 605-609, 1997