

ことができる。

多孔質膜型人工肺では、陽圧がかかると回路内のガスが微小な孔を通して押し出されるため（ポリメチルペンテン膜表面であっても）、速やかに充填される。回路は使用時または使用の数日前に充填できる。施設により異なるが、一般的には一度充填してから 30 日までは回路が保持されている⁵⁰。

患者に接続する前に熱交換器を介して温水が循環することで、回路内は 37°C に加温される。晶質液による充填でも補助はできるが、多くの施設ではヒト由来のアルブミン製剤（12.5 g）を合成樹脂表面に“コーティング”する目的で加えたり、浸透圧成分を加えたりしている。成人に対しては晶質液充填が実用的であり、安全である。これは体格の大きい小児でも同様ではあるが、幼児では血液による回路充填が必要とされる。幼児では、赤血球濃縮製剤をヘマトクリット 35~40% にすることを目的に添加する。充填液に血液が加えられるとき、抗凝固剤としてヘパリンも加えられる（1 単位/cc）。カルシウムは輸血製剤内のクエン酸に結合するため、カルシウムの補充が必要である。時間に余裕がある場合は、回路内の電解質組成やイオン化カルシウム濃度を確認することが有用である。緊急時の使用や ECPR の際には、血液希釈作用のある晶質液で充填して補助を開始し、そのちに利尿薬、血液濃縮や輸血により補正することができる。

温度管理

ECLS 中は患者の血液は回路を循環するため、周囲の環境の温度に持続的にさらされる。膜に吹き下ろすスウィープガスは冷温であり、膜を介した気化によっても熱が放散する。一般に ECLS 中の患者は正常な体温を維持する目的で、積極的に加温する必要がある。これは、ほとんどの新生児症例で常に行われている。小さい患者では、流入するガスを加温することや局所的な加温法を用いることも有効である。より大きな患者には、ECLS 回路での直接的な血液加温が必要となる。

血液と患者体温の調整には、回路内の熱交換器

が必要となる。これは一般的には加温のために用いられるが、熱交換器は冷却にも使える。低体温療法はしばしば神経保護や患者の代謝を抑制する目的で用いられる⁵²。熱交換器は外部環流式の冷温水槽を必要とする。血液槽内のコイルや繊維の束の中を水が循環している。コイルまたは繊維の束はガス交換部の外装と一体化されている。還流式水槽の温度は、患者や通過する血液の温度を管理するために調節される。一般的には正常体温を得るために水槽の温度は 38.5°C 以下に維持される。循環水と血液が直接接触することは稀だが、循環水に血液や蛋白質を認めた場合、または説明のつかない溶血が発生した場合には、熱交換器の亀裂を疑うべきである。水槽内の水は滅菌されていないので、回路内は汚染されることが予測される。使用していないときは水槽を洗浄し、消毒薬で消毒すべきである⁵¹。

回路のモニタリング

回路には各種モニターが備え付けられ、安全域の表示や回路機能の監視、医療従事者による異常事態の検知が可能である。回路では以下の項目を測定することができる⁵³。

血流計

体外循環している血流量は、一般的には超音波流量計により測定されている。流量計は外部接続型や血液ポンプとの一体型がある。新しい世代の遠心ポンプでは一体型流量計が一般的である。ローラーポンプを使用している場合は、一般的にポンプの容量と 1 分あたりの回転数から血流量を計算できる。さまざまな範囲の血流量を設定するために、標準化されたチューブサイズが規定されている。

回路内圧

回路内圧は、一般に人工肺の圧勾配や静脈脱血ラインのサイフォン効果（陰圧）を計測する目的で測定されている。人工肺の圧勾配の上昇は、回路チューブの折れ曲がりや人工肺の血栓を示している可能性がある。人工肺後の圧測定は、人工肺の圧力勾配や返血圧の測定に必要となる。これら

の圧力測定値に基づいて、アラームとの連動（入口圧の下限や出口圧の上限の許容範囲）や回路自動制御のための数値設定が可能である。

人工肺やポンプの入口圧・出口圧が、一般的な測定ポイントである。遠心ポンプは極端な陰圧をつくる可能性があり、ポンプの入口圧の測定は溶血につながるキャビテーション発生リスクの軽減に有用である。キャビテーションは局所的な陰圧空間をつくり出す原因となり、その中にある赤血球は -750mmHg を下回る極端な陰圧にさらされる可能性がある。溶液から発生したガスは赤血球細胞膜を破壊する原因となる。このガスは再び溶解するが、遊離ヘモグロビンは残ってしまう。人工心肺中の吸引回路のように血流と空気が常時接していなければ、一般的には -600mmHg までの陰圧ではキャビテーションや溶血は起こらない⁵⁵。

現在の遠心ポンプが使用される以前は、ローラーポンプがECLSで最も使用されていた。ローラーポンプへの静脈脱血は、重力によるサイフォン効果で血液をローラーポンプに引き込む。サイフォン効果を得るためには、患者に対してポンプの位置を低くする必要があり、この落差は $100\sim 150\text{cm}$ が一般的である。サイフォン効果による吸引圧でキャビテーションを引き起こさないよう、多くの施設では自動制御式のローラーポンプを使用している。多くの状況で、遠心ポンプは同程度の吸引圧をつくり出すが、キャビテーションや溶血は引き起こさない。遠心ポンプが高速回転で使用される状況では（一般的には $3,000\text{RPM}$ 以上）、ポンプヘッド内でつくり出される陰圧は -700mmHg を超え、静脈ラインがカタカタと音を立て瞬間的に血流が遮断されることにより、ポンプヘッド内部でキャビテーションや溶血が起こるかもしれない。ローターが高速回転中に静脈ラインが閉塞すると、ポンプヘッド内の血液は駆出されるが血液充満は起こらない。これによりポンプヘッド内に瞬間的に陰圧が発生し、キャビテーションが起こり、ポンプヘッド内の血液は溶血する。血流が再開するとその溶血した血液は患者の中へと流れていく。

“カタカタという異音”が静脈ライン内で発生するとき（循環血液量減少、患者体位の変更、カテー

テル位置の変更、咳による胸腔内圧の変化などにより引き起こされる）、通常、血流量は減少する。よくある対応にポンプの回転数を上げて血流量の増加を試みる方法があるが、これは単純に問題を悪化させる。高速回転中は脱血が遮断されるたびにキャビテーションを起こしうる。ここでの正しい対応は、回転数を下げ、閉塞による遮断の原因を突き止め、解決策を講じることである。静脈ラインに閉塞がない場合、静脈ラインが閉塞するまでは高い回転数でもしばらくの間は溶血することなく補助を継続することができる。このため、溶血という事象は不可解で不規則に起こっているようにみえるだろう。理想的な遠心ポンプは混合静脈血酸素飽和度と同様に、静脈圧により自動制御される。このような技術が可能となるまでは、静脈コンプライアンスチャンバーを組み合わせて静脈入口圧のモニタリングを行うことで、陰圧に関連したキャビテーション発生の危険性を最小限にできるだろう²⁵。遠心ポンプの断続的遮断で潜在的に引き起こされる溶血を避けるために、静脈ラインのコンプライアンスとポンプ入口圧の2つの関係性を考慮し、明確に理解すべきである。このような状況では、過剰陰圧の閾値をつくるために静脈脱血圧の測定や監視が行われる⁵⁶。

酸素飽和度

回路内にある血液の酸素飽和度は特殊な光学式コネクタを通した留置カテーテルを挿入するか、または回路の周囲を囲む形のセンサーを利用することで計測することができる。人工肺脱血側の酸素飽和度が最も有用である。VA-ECLSの場合、静脈から脱血された血液の酸素飽和度は混合静脈血酸素飽和度に近似し、これは全身の代謝や補助の適切さを反映するために一般的に用いられる。VV ECLSの場合、酸素化された静脈血のリサーキュレーションにより静脈血酸素飽和度は偽性に上昇し、静脈血酸素飽和度は代謝や補助の状態を適切に示さなくなる。回路出口の動脈血化された血液の酸素飽和度を測定することで、人工肺の効率を知ることができる。連続モニタリングまたは定点サンプリングのどちらでも人工肺前後の血液ガス

を測定できる。血液ガス測定の意義は、酸塩基の状態、CO₂ 代謝や膜性能についての情報を得ることである。

回路アクセス部位

ほとんどの回路には回路内に血液アクセス部位がある。アクセス部位の数はできるだけ少なくすべきであるが、少なくとも通常人工肺前後の2か所には含まれている。血液アクセス部位は空気混入の危険性があるため、患者とポンプ入口の間は避けるべきである。採血や輸液に回路を使用することはできるが、輸液、輸血や採血のためのラインを患者から直接確保してもよいかもしれない。

アラーム

あらかじめ定めた圧力や指標が安全域を超えた場合には、警報音によるアラームで検知すべきである。アラームは人工肺の圧較差や回路内の陽・陰圧、過度なガス供給圧や停電などを反映することができる。血栓や回路内凝固は人工肺の圧勾配の増加や血流量の低下によって示唆される。ポンプ回転数は定められた流量の上限や下限に基づき、医療従事者への警告とともに調整される。遠心ポンプの入口圧を測定し調整することで、極端に強い陰圧発生を防ぎ、キャビテーションや溶血のリスクを最小限にできるだろう。気泡検知器もまた、微小血栓や深刻な空気血栓から患者を守るために返血ラインで使われる。圧アラームや気泡検知器アラームは回路クランプや血流量の調整に使われるが、検知された気泡はすべて手動で回路から除去しなくてはならない。

緊急用回路

緊急用回路は、必要時には数分以内に使用可能となるよう晶質液で充填されるべきであり、緊急補助用に患者にカニューレを入れてから、できるかぎり早く接続できるよう準備すべきである。緊急カニューレと回路装着までの間のエラーを避けるため、これらの回路には、送血側の過剰陽圧と脱血側の過剰陰圧を防ぐための安全機構も含めるべきである。緊急用回路には単純な多孔質

膜型人工肺と遠心ポンプを使用してもよい。

精巧な回路デザイン： シンプルで一体化したシステム

ECLS 回路を小さなカートや点滴台に設置できるような簡易化が、今後可能かどうか提起されている。介助者が1人しかいない状況で、安全かつ実用的に回路を適合させることができるだろうか。ECLS は適応基準の拡大でより多くの患者に使用されるため、回路デザインはシンプルかつ自動制御であることが要求される。理想をいえば、回路は手動メンテナンスが少ないデザインであるべきである。医療産業では長期使用を目指し、高機能技術の導入などに取り組んでいる⁵⁷。これはベッドサイドでの介入が最小限で、病院外で数年間の使用が可能となった左心補助装置の進化をみれば、明らかである。ECLS 回路もおそらくこの傾向にある。

今後の ECLS システムにはシンプルで比較的小さな設置面積の足回りのものを考案するのが現状に即している。構成パーツはより小さくなっていくだろう。システムは統合型フィードバック制御を搭載し、安全性を備えたより精巧な自動制御となるだろう。コンパクトなシステムは、小さな車輪の付いたカートや点滴ボールに収納（設置）され、容易に携帯できるだろう。これらの特徴をもつシステムが現在商品化され入手可能で、今後も技術と患者ケアのニーズに応じて、進化し続けるだろう。

Maquet Sprinter カートは、遠心ポンプ、ガス交換装置、体温維持のための熱交換器を搭載したシンプルな搬送用カートである（図 8.21）。このようなシステムは、ベッドの両サイドに配置することができ、日常ケア時や院内搬送に使用される。Levitronix 社も同様に、人工肺やその補助機器類に容易に取り付けられる心室補助カートを製造している。

ECLS システムは複数のコンポーネントを統合することで、よりコンパクト化できる。このデザインコンセプトの例として、Sorin Synergy を用

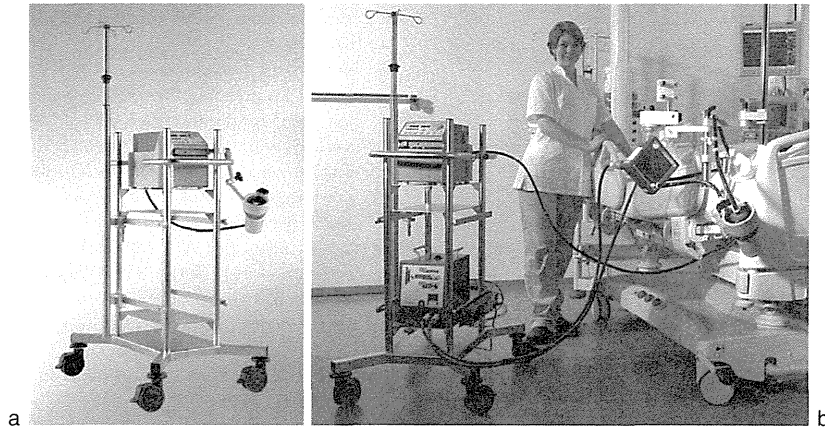


図 8.21 Maquet Sprinter カートシステム

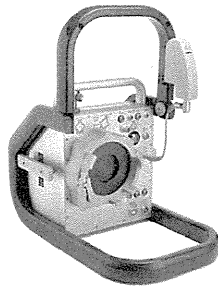


図 8.22 Maquet Cardiohelp システム (背面)
統合されたコンポーネントを装置背面に固定する。

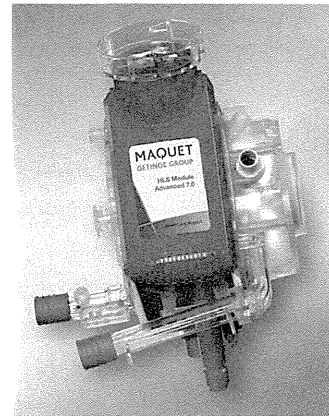


図 8.23 Maquet CardioHelp の
ディスポーザブル製品

いた心肺バイパスがある。このデバイスには、動脈フィルタ、熱交換器、遠心ポンプ、動静脈バブルトラップが1つのハウジング内に統合されている。Maquet の CardioHelp システムは、3つの主要なコンポーネント（人工肺、ポンプ、熱交換器）が1つの製品の中に統合している（図 8.22～8.24）。理論的には、このようなシステムは、ベッドの上もしくは下に配置され、最小限の操作で稼働できる。また、より容易な患者輸送を実現し、セットアップや開始もより簡易になるだろう。このようなシステムは、ECPR の使用を単純化するだけでなく、すべての患者サポートにも重要な価値をもたらす。繰り返しになるが、ベッドサイドの担当者が正しくトラブルシューティングするためには、システムの訓練と習熟が必要不可欠である。一部の構成部品の故障により、システム全体の総交換をする

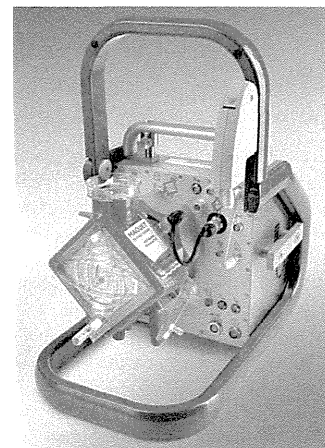


図 8.24 組み立てられた Maquet CardioHelp

ことになってしまうのは難点だが、このようなシステムは重要なパラメータ（すなわち入口圧）をフィードバック自動制御するのに有用である。

まとめ：回路

回路は連続して数日、数週間、もしくは時に数か月間でさえ、患者に機械的サポートに完全に提供するように耐久設計されている。回路は、個々の患者、大きさ、診断内容、想定される使用期間によって、さまざまに異なる。回路は心臓および呼吸補助を機械的に行う人工臓器につながっている。同様に、回路はすべての血管アクセス経路に適応可能でなければならない。理想的には、回路は患者補助の操作に必要な最低限の基本的なアクセスサイトのみで、シンプルな構造であるべきである。ECMO 装着により、抜管して ICU 外で治療を継続するよい適応になる患者もいる。したがって、システムの合理化はこれからも続き、リハビリテーションの内容は、植え込み型心室補助装置を装着した患者と同じようになるかもしれない。しかしながら、回路の機械的性質上、トラブルシューティング、診断、回路交換の実施に即座に対応できる十分に訓練された担当者が常に配備されていないことに留意されたい。新しく、より耐久性のある構成要素は、よりポータブルなシステムと同様に、一体化されるかもしれない。こうした一体化回路を継続的に使用し修正を続けることで、最適な治療パラメータが明確になるであろう。

文献

- Hirschl RB. Devices, Chapter 10. In: Zwischenberger JB and Bartlett RH, eds. ECMO Extracorporeal Cardiopulmonary Support in Critical Care. Ann Arbor, Extracorporeal life Support Organization 1995; 159-184.
- Hirschl RB. Devices, Chapter 12. In: Zwischenberger JB, Steinhorn RH, Bartlett RH, eds. ECMO Extracorporeal Cardiopulmonary Support in Critical Care 2nd ed. Ann Arbor, Extracorporeal life Support Organization 2000; 199-224.
- Hansell DR. ECLS Equipment and Devices, Chapter 6. In: Van Meurs K, Lally KP, Peek G, Zwischenberger JB, eds. ECMO Extracorporeal Cardiopulmonary Support in Critical Care 3rd ed. Ann Arbor, Extracorporeal life Support Organization 2005; 107-119.
- Kolobow T, Bowman RL. Construction and evaluation of an alveolar membrane heart lung. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 1963; 9:238-245.
- Kern F, Schulman SR, Lawson DS, Darling EM. Extracorporeal Circulation and Circulatory Assist Devices in the Pediatric Patient. In: *Pediatric Cardiac Anesthesia*, 3rd ed., Ed. Lake C, Appleton and Lange, Stamford, CT 1998; 219-257.
- Toomasian JM, Kerby KA, Chapman RA, Heiss KF, Hirschl RB, Bartlett RH. Performance of a rupture-resistant polyvinylchloride tubing. *Proc Amer Acad Cardiovasc Perf* 1987; 8:56-59.
- Snyder E, McElwee D, Harb H, et al. Investigation of Fatigue Failure of S-65-HL "Super Tygon" Roller Pump Tubing. *J Extracorp Tech* 1996; 28:79-87.
- Peek GJ, Wong K, Morrison C, Killer HM and Firmin RK. Tubing failure during prolonged roller pump use: a laboratory study. *Perfusion* 1999; 14:443-452.
- McDonald JV, Green TP, Steinhorn RH. The role of the centrifugal pump in hemolysis during neonatal extracorporeal support. *ASAIO J* 1997; 43(1):35-8.
- Kawahito K, Nose Y. Hemolysis in different centrifugal pumps. *Artificial Organs* 1997; 21(4):323-6.
- Augustin S, Horton A, Butt W, Bennett M, Horton S. Centrifugal pump inlet pressure site affects measurement. *Perfusion* 2010; 25(5):313-320.
- Peek GJ, Firmin RK. The inflammatory and coagulative response to prolonged extra-corporeal membrane oxygenation. *ASAIO J* 1999; 45(4): 250-63.
- Ranucci M, Pazzaglia A, Isgro G, Gazzaniga A, et al. Closed, phosphorylcholine-coated circuit and reduction of systemic heparinization for cardiopulmonary bypass: the intraoperative ECMO concept. *Int J Artif Org* 2002; 25(9):875-81.
- Bahaaldin B, Shen I, Karamlou T, et al. Extracorporeal Life Support in Neonates, Infants, and Children after repair of Congenital Heart Disease: Modern Era Results in a Single Institution. *Ann Thorac Surg* 2005; 80:15-20.
- ELSO Guidelines Version 1.1 April 2009; Page 5.
- Reed CC and Stafford TB. Circuits. In: Reed and Stafford, ed. *Texas Medical Press*, 2nd ed; *Cardiopulmonary Bypass* 1985; 263-271.
- Public Health Notification: PVC Devices Containing the Plasticizer DEHP. www.fda.gov/cdrh/ost/dehp-pvc.pdf 2002.
- Center for Devices and Radiological Health. US Food and Drug Administration: safety assessment of di(2-ethylhexyl)phthalate released from PVC medical devices. <http://www.fda.gov/cdrh/ost/dehp-pvc.pdf> 2001.
- Burkhart HM, Joyner N, Niles S, Ploessl J, et al. Presence of Plasticizer Di-2(ethylhexyl) phthalate in Primed Extracorporeal Circulation Circuits. *ASAIO J* 2007; 53(3):365-367.
- De Mol AC, Van Heijst AF, Van der Staak FH, Liem KD. Disturbed cerebral circulation during opening of the venoarterial bypass bridge in extracorporeal membrane oxygenation. *Int J Artif Organs* 2008; 31(3):266-71.

21. Van Heijst A, Liem D, Van Der Staak F, Klaessens J, Festen C, De Haan T, Geven W, Van De Bor M. Hemodynamic changes during opening of the bridge in venoarterial extracorporeal membrane oxygenation. *Pediatr Crit Care Med* 2001; 2(3):265-270.
22. Liem KD, Kollée LA, Klaessens JH, Geven WB, Festen C, De Haan AF, Oeseburg B. Disturbance of cerebral oxygenation and hemodynamics related to the opening of the bypass bridge during veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation. *Pediatr Res* 1995; 38(1):124-9.
23. Chambers SD, Ceccio SL, Annich GA, Bartlett RH. Extreme negative pressure does not cause erythrocyte damage in flowing blood. *ASAIO J* 1999; 45:431-5.
24. Pedersen TH, Videm V, Svennevig JL et al. Extracorporeal membrane oxygenation using a centrifugal pump and a servo regulator to prevent negative inlet pressure. *Ann Thorac Surg* 1997; 63(5):1333-39.
25. Tamari Y, Lee-Sensiba K, King S, and Hall MH: An Improved Bladder for Pump Control during ECMO. *J Extracorp Technol* 1999; 31: 84-90.
26. ELSO Guidelines Version 1.1 April 2009; Page 6.
27. Leaf JD, Dyson C, Emerson R. Comparison Study of Connector and Tubing Blow-Off Line Pressures. *J Extracorp Tech*. 1982; 14(3):385-390.
28. Steinhorn RH, Isham-Schopf B, Smith C, et al. Hemolysis during long-term extracorporeal membrane oxygenation. *J Pediatr* 1989; 115:625-630.
29. McDonald JV, Green TP, Steinhorn RH. The role of the centrifugal pump in hemolysis during neonatal extracorporeal support. *ASAIO J* 1997; 43(1):35-8.
30. Tamari Y, Lee-Sensiba K, Leonard EF, Parnell V, and Torolani AJ. The Effects of pressure and flow on hemolysis caused by Bio-Medicus centrifugal pumps and roller pumps: Guidelines for choosing a blood pump. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1993; 106(6): 997-1007.
31. Lawson DS, Lawson AF, Walczak R, et al. North American Neonatal Extracorporeal Membrane Oxygenation (ECMO) Devices and Team Roles: 2008 Survey Results of Extracorporeal Life Support Organization (ELSO) Centers. *J Extracorp Technol* 2008; 40:166-174.
32. Khan NU, Al-Aloul M, Shah R, Yonan N. Early experience with the Levitronix Centrimag[®] device for extra-corporeal membrane oxygenation following lung transplantation. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; 34:1262-1264.
33. Mendler N, Podechtl F, Feil G, Hiltmann P and Sebening F. Seal-less Centrifugal Blood Pump with Magnetically Suspended Rotor: Rot-a-Flow. *Artificial Organs* 1995; 19(7):620-624.
34. Lawson DS, Ing R, Cheifetz IM, et al. Hemolytic characteristics of three commercially available centrifugal blood pumps. *Pediatr Crit Care Med* 2005; 6:573-577.
35. Schaadt J. Fiber Manufacturing, Membrane Classification, and Winding Technologies Associated with Membrane Oxygenators. *J Extracorp Technol* 1998; 30:30-34.
36. Thiara APS, Hoel TN, Kristiansen F, et al. Evaluation of oxygenators and centrifugal pumps for long-term pediatric extracorporeal membrane oxygenation. *Perfusion* 2007; 22:323-326.
37. Eash HJ, Jones HM, Hattler BG, Federspiel WJ. Evaluation of plasma resistant hollow fiber membranes for artificial lungs. *ASAIO J* 2004; 50:491-97.
38. Montoya JP, Shanley CJ, Merz SI, et al: Plasma leakage through microporous membranes. Role of phospholipids. *ASAIO J* 1992; 38:M399-405.
39. Peek GJ, Killer HM, Reeves R, Sosnowski AW, Firmin RK. Early experience with a polymethyl pentene oxygenator for adult extracorporeal life support. *ASAIO J* 2002; September; 48(5):480-2.
40. Horton S, Thuys C, Bennett M, Augustin S, Rosenberg M, Brizard C. Experience with the Jostra Rotaflow and QuadroxD oxygenator for ECMO. *Perfusion* 2004; January; 19(1):17-23.
41. Eash HJ, Jones HM, Hattler BG, Federspiel WJ. Evaluation of plasma resistant hollow fiber membranes for artificial lungs. *ASAIO J* 2004; 50:491-97.
42. ELSO Guidelines Version 1.1 April 2009; Page 7.
43. Elliot SC, Paramasivam K, Oram J, Bodenham AR, Howell SJ, Mallick A. Pumpless extracorporeal carbon dioxide removal for life-threatening asthma. *Crit Care Med* 2007; 35:945-8.
44. Zimmermann M, Bein T, Arlt M, Philipp A, Rupperecht L, Mueller T, Lubnow M, Graf BM, Schlitt HJ. Pumpless extracorporeal interventional lung assist in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective pilot study. *Critical Care* 2009; 13:R10.
45. Weber-Carstens S, Bercker S, Hommel M, Deja M, MacGuill M, Dreykluft C, Kaisers U. Hypercapnia in late-phase ALI/ARDS: providing spontaneous breathing using pumpless extracorporeal lung assist. *Intensive Care Med*. DOI 10.1007/s00134-0091426-3, 2009.
46. Taylor K, Holtby H. Emergency Interventional Lung Assist for Pulmonary Hypertension. *Anesth Analg* 2009; 109:382-5.
47. Fischer S, Hoepfer MM, Tomaszek S, Simon A, Gottlieb J, Welte T, Haverich A, Strueber M. Bridge to lung transplantation with the extracorporeal membrane ventilator Novalung in the veno-venous mode: the initial Hannover experience. *ASAIO J* 2007; Mar-Apr; 53(2):168-70
48. Fischer S, Simon AR, Welte T, et al., Bridge to lung transplantation with the novel pumpless interventional lung assist device NovaLung. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131(3):719-23.
49. Strueber M, Hoepfer MM, Fischer S, Cypel M, Warnecke G, Gottlieb J, Pierre C, Welte T, Haverich A, Simon AR, Keshavjee S. Bridge to thoracic organ transplantation in patients with pulmonary arterial hypertension using a pumpless lung assist device. *Am JTransplant* 2009; 9:853-857.
50. Walczak R, Lawson DS, Kaemmer D, et al. Evaluation of a pre-primed microporous hollow fiber membrane for rapid response neonatal ECMO. *Perfusion* 2005; 20:269-275.
51. Stovall SH, Wisdom C, McKamie W, Ware W, Dedman H, Fiser RT. Nosocomial transmission of *Cupriavidus pauculus* during extracorporeal membrane oxygenation. *ASAIO J* 2010; 56(5):486-7.

第 II 部 一般的管理と成果

52. Amberman K and Shen I. Minimizing reperfusion injuries: successful resuscitation using eCPR after cardiac arrest on a post-operative Norwood patient. *J Extra Corpor Technol* 2010; 42(3):238-41.
53. ELSO Guidelines Version 1.1 April 2009; Page 8.
54. Pohlmann JR, Toomasian JM, Hampton CE, Cook KE, Annich GM, Bartlett RH. The synergistic effect of subatmospheric pressure and the air-blood interface on hemolysis. *ASAIO J* 2009; 55:469-73.
55. Chambers SD, Ceccio SL, Annich GA, Bartlett RH. Extreme negative pressure does not cause erythrocyte damage in flowing blood. *ASAIO J* 1999; 45:431-5.
56. Tamari Y, Lee-Sensiba K, Ganju R, Chan R, Hall MH: A new bladder allows kinetic venous augmentation with a roller pump. *Perfusion* 1999; 14:453-459.
57. Palanzo D, Qiu F, Baer L, Clark JB, Myers JL and Undar A. Evolution of the Extra-corporeal Life Support Circuitry. *Artif Org* 2010; 34(11):869-873.

はじめに

適切に血管アクセスを確立し維持することは、extracorporeal life support (ECLS) に必要不可欠である。カニューレーションの方法は、必要とするサポートの種類や、年齢、体格、臨床所見によりさまざまである。本章では、適切な血管アクセスを行うために必要な一般的な原則について述べるとともに、われわれが普段遭遇するいくつかの状況を取り上げて詳述する。

原則

ECLS 導入前の患者管理

ECLS 導入前の重症患者管理は、困難なものとなりうる。カニューレーションを行う場所（たとえば、ICU、手術室、救急外来など）は、熟考して決定する必要がある。カニューレーションには適切な患者モニタリングとナーシングケアが必須である。また、呼吸ならびに循環を適切に管理しながら、患者を安全に搬送できるか考えておくべきである。必要物品（カニューレ、手術器材、回路とその周辺物品）や適切な人員（外科処置を担当するスタッフと ECLS を行うスタッフ）を必ず確保しなければならない。

手技に関して、家族に説明したうえで同意を得るべきである。その一方で、血液センターから赤血球や血小板などの血液製剤を取り寄せる必要がある。カニューレーションは ICU や手術室、その他の適切な場所で行われることが多い。安全にカニューレーションを行うため、不安や不快感を軽減させ、空気塞栓のリスクを最小限にするために、患者には適切な鎮静または麻酔を施されるべきであ

る。麻酔薬や鎮静薬を使用する際には、これらの薬物の血行動態への影響も考慮しなければならない。通常われわれは、小児の場合フェンタニルとロクロニウムを併用し、成人の場合適応があればこれにベンゾジアゼピンを加えて鎮静する。血管を外科的に露出したのち、または経皮的アプローチで血管内にガイドワイヤーを留置したのち、100 単位/kg のヘパリンを投与し、その後、カニューレーションの緊急度に応じて 30 秒から 3 分待つことで、カニューレを血管内に留置する前に適切な抗凝固状態を得る。

サポートの種類

ECLS には基本的に 2 つの方法がある。呼吸のサポートに優れた venovenous (VV) ECMO と、呼吸と循環の双方をサポートする venoarterial (VA) ECMO である。以下に述べるように、VV-ECMO にはさまざまな利点があるため、呼吸のサポートでは VV-ECMO が好ましい。VV-ECMO と VA-ECMO の比較を表 9.1 に示す。

VA-ECMO では、通常右内頸静脈または大腿静脈からカテーテルを穿刺し右房脱血が行われ、右総頸動脈からの血管アクセスから弓部大動脈に向けて行われるか、あるいは大腿動脈から腹部大動脈に向けて送血する。VV-ECMO では、頸静脈から右房に留置されたダブルルーメンカテーテルにより脱送血が行われるか、大腿静脈に留置されたカテーテル（脱血カテーテル）と右内頸静脈に留置されたカテーテル（送血カテーテル）の 2 本のカテーテルで脱送血が行われる。VV-ECMO は VA-ECMO と比べて、以下の利点がある。

- ①動脈カニューレーションが不要で、動脈塞栓や四肢末梢の虚血、脳卒中が発生しない。
- ②ECMO 離脱時の動脈の結紮や修復が不要である。

表 9.1 VV バイパスと VA バイパスの比較

	Venoarterial (VA)	Venovenous (VV)
Cannulation Site	V: IJ, FV, RA A: RCCA, Ax, Fem, Ao	IJ, FV, saphenous v., RA
PaO ₂	60-150 mmHg	45-80 mmHg
Indicator of O ₂ adequacy	SvO ₂ , PvO ₂	PaO ₂ , cerebral SvO ₂ , transmembrane DavO ₂
Cardiac Effects	↓ preload, ↑ afterload, ↓ pulse pressure, LV blood → coronary O ₂	negligible
O ₂ delivery capacity	High	moderate
Circulatory support	Partial to complete	No <u>direct</u> effect
Pulmonary circulation		
R → L shunt	↓ SaO ₂ in aorta	↑ SaO ₂ in aorta
L → R shunt	May cause pulmonary congestion and systemic hypoperfusion	May cause pulmonary congestion and systemic hypoperfusion

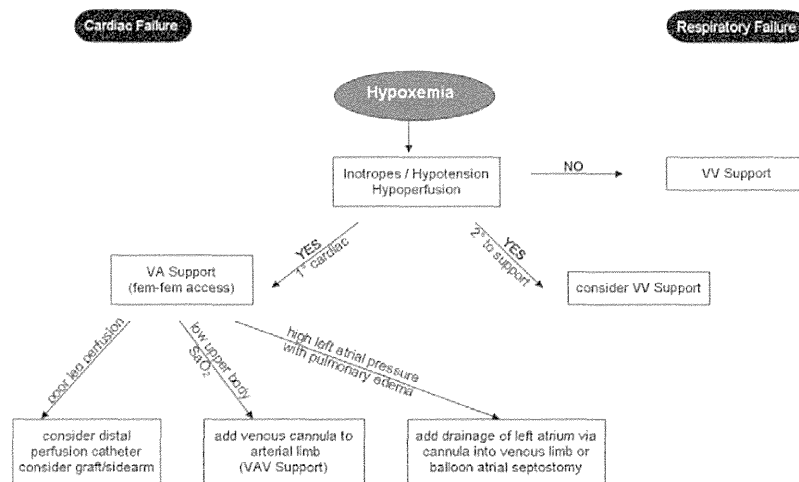


図 9.1 カニューレーションのアルゴリズム

- ③十分に酸素化された血液による肺循環の維持と、それにより血管の拡張効果が得られる。
- ④生理的な拍動性の動脈血流が保たれる。
- ⑤VA-ECMO でみられるような後負荷の増大など血行動態への悪影響がない。

患者の臨床所見により、これらの方法を選択する (図 9.1)。重度の低酸素血症のため ECLS が検討されている患者では、通常ある程度の心不全を合併している。しばしば患者は、強心剤や血管収縮薬のサポート下であり、低血圧や循環不全を呈している。敗血症や炎症反応のため本当に心機

能が障害されていることもあるが、たいていは著しい低血圧の理由は、肺の病態、肺血管抵抗の増大、非常に高い換気圧である。この結果、右心系が高圧にもかかわらず左心系の前負荷が不足し、右心機能低下や右心不全を呈することさえありうる。患者の心機能が正常であれば、VV-ECMO は間違いなくよい適応である。しかし、心機能低下が認められる場合には、心機能低下の程度に応じて、また心機能の低下が心原性なのか、高度な呼吸サポート (高気道内圧・高 PEEP) によって生じた二次的なのかによって判断するべきである。

心臓超音波検査で真の右心不全がない場合や、左室の収縮が保たれているものの充満が不足している場合には、VV-ECMOを積極的に考慮する。これによりたいいていの場合十分なガス交換が得られるとともに、左室充満が劇的に改善し、呼吸器設定を“lung rest”の条件まで圧を下げることで右室の後負荷を軽減できる。ARDS（急性呼吸促進症候群）や他の呼吸不全を呈した患者の大部分はVV-ECMOにより十分にサポートされ、強心薬や血管収縮薬を比較的すぐに減量することができる。VV-ECMOを導入しても改善しない場合は、速やかに心臓超音波検査による心機能の再評価が必要である。

心原性心不全の場合、VA-ECMOが必要である。乳児や小児の場合、カットダウンによる右内頸静脈と総頸動脈の確保が好まれる。成人の場合、さまざまなカニューレの組み合わせによりVAサポートが行われる。内頸静脈脱血と頸動脈送血は乳児でよく行われる方法であるが、優れた血行動態のサポートが可能であり、特に心臓、肺が両方とも機能不全を呈している場合に有効である。この方法はすべての大動脈分枝と下行大動脈に十分な血流を供給するが、左室の後負荷を増大させる。また、頸動脈の結紮後に最大15%の成人が虚血性脳傷害を発生することに注意しなければならない。特に、低酸素血症と低血圧の合併患者で、その頻度は高くなる。内頸静脈（または大腿静脈）脱血と大腿動脈送血では遠位の大動脈への血流は十分に供給されるが、もしも患者自身の心機能が保たれていて患者由来の心拍出が残存する場合には、ECMO由来の血流が大動脈弓部分枝に十分に供給されない可能性がある。呼吸不全を合併した患者では、十分に酸素化されていない血液が左室から冠動脈や大動脈分枝（つまりは脳）へ供給されることになり、十分に酸素化されたポンプ血は供給されない。この問題は、ECMO回路の分枝から右内頸静脈へ送血カニューレを追加することで（venoarterial-venous ECMO: VA-V ECMO）解決可能である¹。これによりVA-ECMOで循環サポートを行っている場合でも、VV-ECMOと同様に右室の血液酸素飽和度が増大する。VA-ECMO

により増大した後負荷が、左室の心拍出を妨げ、左房圧の上昇による肺うっ血をきたすかもしれない。この問題は左房のベントにより解決可能である。なお左房ベントには、左房への直接もしくは左開胸下で心尖部からカニューレーションすることによって静脈側に血流をドレナージする方法や、バルーンカテーテルによる心房中隔開窓術で左心系から右心系に血流をドレナージする方法がある。

大腿動脈へのカニューレーションは、経皮的もしくはカットダウンで行う。どちらの手技でも、カニューレのサイズによって、末梢側の虚血が生じる可能性がある。この問題の対処法として、いくつか紹介されている。1つは、送血部位より末梢側の大腿動脈に送血カテーテルを留置し、ECMOの送血回路の分枝からそのカテーテルに血流を供給する方法である。もう1つは、PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）人工血管を総大腿動脈に端側吻合し、この人工血管に直接カニューレーションして中枢側と末梢側の双方に送血を行う方法である²。本来この方法は、小児や体格の小さな女性など大腿動脈が細いことが判明した際に下肢虚血を回避する場合や、すでに下肢虚血を発症した場合の治療として選択される。この場合、通常、人工血管は虚血側と反対側の動脈に吻合され、血流が確立されれば最初に入れたカニューレは抜去し動脈を修復する。経皮的にカテーテルを留置したあとで下肢の虚血が出現した場合は、カットダウンにより足背動脈もしくは後脛骨動脈にカテーテルを留置し、末梢側の血圧をモニタリングする。その血圧が50 mmHg以下であった場合、ECMO送血回路の分枝から送血を行う³。

カニューレの選択

ECLSでは、可能なかぎりたくて短い脱血カテーテルを選択することが大切である。特にローラーポンプでは重力によって脱血されるため、このことは重要である。このシステムでは前負荷が十分であれば、最大血流量を決定する因子はカニューレの抵抗であり、これはカニューレの長さに比例し、半径の4乗に反比例する。この一見シンプルな関係は、実際は回路の形状が一様でないため、複

第 II 部 一般的管理と成果

雑となっている。カニューレのサイズは基本的には外径で表示されている。同じ外径のカニューレでも、使用する器材によっては、カニューレの薄さにより内径が異なるだろう。カニューレの圧/流量の関係を簡単に表す方法が知られている。カテーテルに固有の圧/流量の関係を実測し決定された“M”ナンバーである。M ナンバーは、特定の圧をかけた際に予測される流量を概算するための抵抗因子を表したものである^{4,5}。100 cmH₂O の落差による圧較差を用いて標準的な ECLS を行った際の M ナンバーを表 9.2 に表した。

静脈脱血カニューレは一般的に、先端が閉塞しても脱血できるように、先端と側面の両方に孔がある。動脈送血カニューレは、乱流の発生を最小限に抑えるため一般的には先端にのみ孔があるが、複数の孔をもつ例外的な製品もある。カニューレは折れ曲がりにくくなければならないが、一方で、できるだけ抵抗を減らすため柔軟かつ壁が薄くなければならない。壁の薄いダブルルーメンカテーテルは折れ曲がりやすいが、ワイヤー補強の施してあるカニューレ（たとえば、Biomedicus, Avalon）は弾力性があり折れ曲がりにくい。

新生児における血管アクセスは、血管が細いため非常に困難である。血管アクセスの方法は選択する ECLS の方法によって決まる。VA-ECMO は心機能補助が適応だが、新生児で血管が細すぎて最も細いダブルルーメンカテーテル（12 Fr）が挿入できない場合、呼吸機能サポートが目的でも、VA-ECMO が選択されることがある。

VA-ECMO では、右内頸静脈アプローチによる右房脱血、右頸動脈アプローチによる大動脈弓送血が好まれる。内頸静脈や頸動脈は、新生児の体格からすると比較的太く、カニューレーションが通常容易である。VV-ECMO では、ダブルルーメンカテーテルを右内頸静脈から右房に留置し、送血を三尖弁に向けることで、ECMO 回路へのリサーキュレーションを最小にできる。

挿入手技の選択

VA-ECMO で頸動脈をカットダウンする場合、カニューレ挿入部の出血を防ぎ、カニューレ内を

流れずに通過した血流が末梢で塞栓を生じる可能性を回避するために、頸動脈の結紮が必要である。乳児や小児では、頸動脈を結紮しても後遺症はなく、通常、安全である⁶。UK Collaborative ECMO Trial では、ECMO を導入されて生存した児の頸動脈結紮後の神経学的障害は、従来治療群と比較しても、同程度であった⁷。Schumacher ら⁸は、頸動脈を結紮後に脳損傷を認めた際、その損傷が右側に多いことを報告したが、他の 74 人の乳児を対象とした研究⁹では、“右”総頸動脈結紮と“右”脳損傷の関連性を認めなかった。VV-ECMO でのカニューレーションは、血管結紮をする方法もしない手法もどちらも用いられる。血管結紮をしない場合は経皮的または semi-open 法が選択される。内頸静脈結紮は通常問題を生じないが、静脈圧が上昇することにより脳虚血が悪化するかもしれないとのエビデンスがある¹⁰。経皮的な血管アクセスとして Seldinger 法が用いられるが、カニューレサイズと血管径との関係がわからないため、血管断裂の危険性がある。そのため乳児では、われわれは semi-open 法を好んで選択する¹¹。このテクニックは小切開をおいて血管径を目視し、適切なカニューレのサイズを選択する方法である（通常新生児は、12 Fr または 15 Fr）。カニューレを小切開部の末梢側から経皮的に挿入すれば、必要に応じてカニューレ挿入部を小切開部から目視することが可能である。このテクニックでは、血管結紮が不要である。この手法は以下のいくつかの利点がある。第 1 に、頭蓋内血流がカニューレから取り込まれることで、回路に入る還元された血液量が増加すること。第 2 に、カニューレを抜去したのちでも血管の血流が保持され、必要があれば再度カニューレーションが可能であること。最後に、カニューレの折れ曲がり起こる支点となりうるカニューレと血管の結紮点が存在しないので折れ曲がる確率が減少することである。また、この手技ではカニューレの深さの調節が容易である。

表 9.2 一般的に ECLS で使われるカニューレ

Manufacturer	Size (Fr)	Length (cm)	M#	Flow@100cmH ₂ O	
Venous Cannulae (Single Lumen)					
Biomedicus	8	25	4.35	0.5	
	10	25	3.9	0.9	
	12	25	3.55	1.5	
	14	25	3.35	2	
	15	50	3.65	1.3	
	17	50	3.4	1.9	
	19	50	3.15	2.6	
	21	21	50	2.9	3.2
	23	50	2.65	5	
	25	50	2.55	6	
DLP	27	50	2.4	6.5	
	29	50	2.3	8	
	17	53	3.3	2.2	
	21	53	3.05	3	
RMI	28	65	2.5	5.5	
	18	52	3.2	2.5	
	20	52	3	3	
	28	52	2.3	8	
Venous Cannulae (Double Lumen)					
Origen	12	6	3.9V 4.7A	0.9	
	15	8	3.5V 4.3A	1.6	
	18	15	3.4V 3.8A	1.9	
Jostra	12		4.1V 4.6A	0.8	
	15		3.6V 4.6A	1.4	
Covidien	14	10	3.5V 5.1A	1.6	
Avalon	16	13	3.6V 4.2A	1.7	
	19	20	3.3V 3.8A	2	
	20	29	3.4V 3.7A	1.8	
	23	29	3.1V 3.4A	2.6	
	27	29	2.7V 3.1A	4.4	
	31	29	2.5V 2.8A	6	
Arterial Cannulae					
Biomedicus	8	25	4.4	0.5	
	10	25	4	0.9	
	12	25	3.55	1.5	
	14	25	3.25	2.4	
	15	37	3.3	2.2	
	17	37	3.05	3	
	19	37	2.8	3.8	
	21	37	2.6	5	
	23	38	2.4	6.5	
	DLP	8	23	4.5	0.4
14		23	3.3	2.2	
16		23	3	3	
17		17	2.95	3.2	
21		17	2.65	5	
RMI	18	15	3	3	
	20	25	3	3	
	20	15	2.8	3.8	
	22	25	3.1	2.9	

新生児 ECLS でのカニューレ挿入

VV/VA カニューレション——open 法¹²

処置前

血管カニューレションと抜去は、通常新生児・小児集中治療室で十分な鎮静と筋弛緩下で行う。筋弛緩は、特に静脈カニューレション中の空気塞栓といった致命的な合併症の可能性を防ぐために重要である。使用する器具や無菌操作は手術室と同様に行う。ヘパリンナトリウム（100 単位/kg）はカニューレション後の管理のため準備しておく。局所麻酔は 1%リドカインの浸潤麻酔で行う。

処置

患者の体位：頭部を左方に向け、仰臥位とする。両肩の下を横断するように肩枕を挿入する。処置中には清潔覆布の下で挿管チューブがねじれないように、チューブの位置調整に特に注意を払う。吸引チューブを縦に裂いたものをコネクターで装着することで、ねじれを予防することができる。手術室と異なり、麻酔科医や集中治療医が患者に接触することが制限されるため、挿管チューブがねじれていないことを確認するには ET_{CO2}（呼気終末二酸化炭素濃度）モニターも有用である。胸部、頸部、顔面右半分は無菌操作で覆布をかける。

切開（図 9.2）：右鎖骨上で右胸鎖乳突筋が 2 つに分離している部位で、頸部の横方向に 2~3 cm の長さに切開を加え、1 横指の広さに広げる。

頸動脈鞘の露出（図 9.3）：広頸筋と皮下組織を電

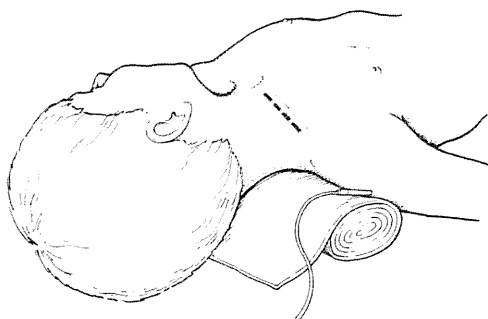


図 9.2 患者の位置

気メスで剥離し、胸鎖乳突筋を露出する。胸鎖乳突筋の胸骨頭と鎖骨頭の鈍的剥離を継続する。すると肩甲舌骨筋が露出される。肩甲舌骨筋腱の同定は頸動脈鞘の露出に必要である。開創器を 2 つ使用する。

血管の剥離（図 9.4）：頸動脈鞘を開放し、内頸静

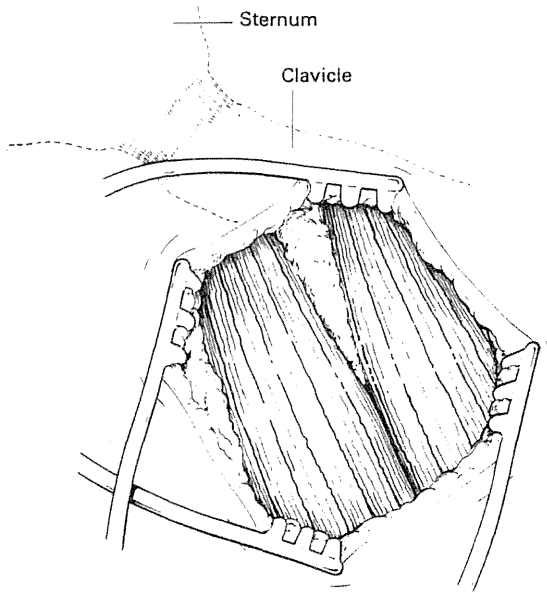


図 9.3 表皮の切開

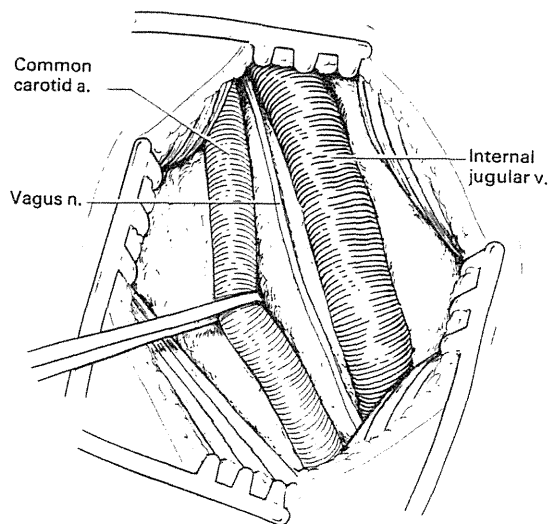


図 9.4 深部を剥離し、内頸静脈、総頸動脈、迷走神経を露出

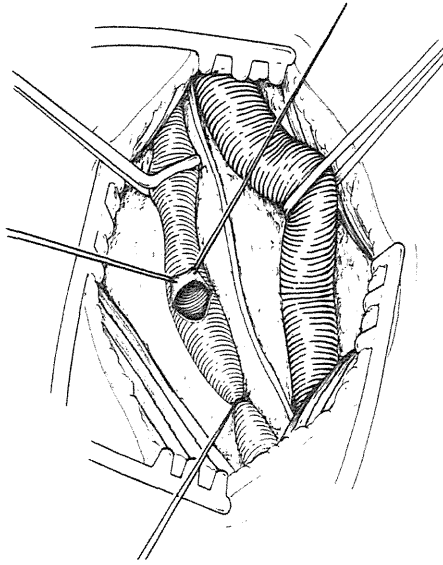


図 9.5 総頸動脈の遠位の結紮と近位の動脈切開

脈，総頸動脈，迷走神経を同定し，遊離する。剥離は近位側や遠位側から血管に沿って進め，まず静脈から剥離する。静脈を剥離する際には攣縮を誘発しないように特に注意を払うべきである。なぜなら，その後の静脈カニューレーションが困難になるからである。そのため，静脈の操作は最小限にすべきである。内頸静脈内側部に分枝が確認できることがあるが，それは結紮すべきである。内頸静脈の周囲・近位と遠位に結紮用の 2-0 絹糸をかける。総頸動脈は内側で後方に位置し分枝がないため，剥離が容易である。総頸動脈にも結紮用 2-0 絹糸をかける。迷走神経は同定しておくべきである。

血管の剥離が完了すれば，ヘパリン（100 単位/kg）を静注する。血管攣縮の改善目的でパパペリンもしくはリドカインを創部に注射してもよい。

動脈切開・静脈切開（図 9.5）：VA-ECMO の場合は，まず動脈のカニューレ（通常，8Fr もしくは 10Fr）を選ぶ。そして，腕頭動脈の入口部にカニューレの先端が来るような部位（おおよそ 2.5 cm）でカニューレを 2-0 絹糸でくくり，マーキングを行う。その糸は切らないでおく。静脈カニューレ（通常，10～14Fr）も同様に右房から静脈切開部位まで（おおよそ 6 cm）の部位にマーキングを行

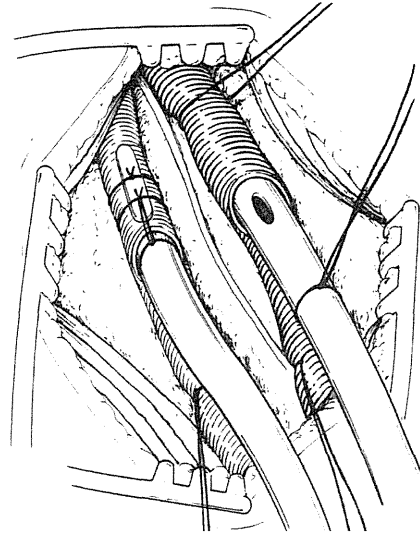


図 9.6 動脈カニューレの固定
静脈カニューレを挿入中

う。カニューレを静脈内に抵抗なく挿入するガイドとして，かつカニューレを血管内に挿入する際に側孔からの大量の出血を予防するため，なめらかで，先端が丸くなっているオプチュレーターをカテーテル内に挿入しておく。総頸動脈は遠位側で結紮しておく。近位側のコントロールには，角度のついた血管鉗子を使用する。動脈の横切開は，遠位の結紮部付近で行う。カニューレ挿入時の内膜解離の予防に，6-0 ポリプロピレン糸による全層での支持縫合を動脈の近位端に置くとよい。動脈カニューレーションに続き，静脈切開を同様に行う。末梢側の静脈の結紮糸を愛護的に引き上げ，血流をコントロールすることで，静脈切開や静脈カニューレーション時に静脈をクランプする必要がなくなる。静脈カニューレーションでは支持縫合は必ずしも必要ではない。

カニューレ挿入（図 9.6）：カニューレを動脈，静脈に慎重に挿入し，2-0 絹糸で血管を 2 周し確実に固定する。固定が強いと，カニューレ除去時に血管損傷が起こるため，血管を保護する目的でシリコン血管テープを絹糸とともに固定してもよい。マーキング目的の糸は，安全補強のため最も末梢側にある固定糸と結んでおく。損傷した血管の長さをできるだけ短縮できるように動脈切開の近傍

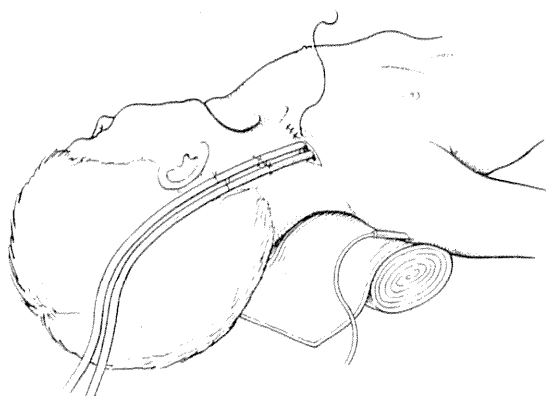


図 9.7 カニューレを皮膚へ固定
創の閉鎖

で慎重に固定することで、ECMO 期間が短期間であった場合、カニューレ抜去時に頸動脈を直接縫合できる可能性がある。各カニューレがしっかり固定されれば、カニューレから血液を吸引して慎重に空気を抜き、ヘパリン加生食で満たす。VV-ECMO ではダブルルーメンのカニューレを静脈切開部から挿入し、先端を右房の中心まで進める。リサーキュレーションを最小限にするような向きで確実にカニューレを留置するために、動脈血送血ポート（赤色）を前方にしておくことが重要である。

創閉鎖（図 9.7）：創部を生理食塩水で洗浄し、止血を確認する。開創でカニューレしたならば、カニューレの周囲をモノフィラメントの縫合糸で連続縫合にて閉鎖する。創はガーゼで保護する。2-0 絹糸を使用してカニューレを皮膚に縫合する。カニューレが皮膚にしっかり固定されていることに特に注意を払うべきである。

カニューレ抜去：心機能・呼吸機能の改善に伴い、ECMO からの離脱が成功すれば、カニューレ抜去を行う。ECMO 期間が短ければ、術者の好みもしくは頸動脈再建の可能性を考えて、ICU のベッドサイドで行ってもよいし、手術室で行ってもよい。細かい操作ができるよう、チューブとカニューレの長さの分を十分にとり、清潔操作で創部に対する準備を行う。創部を開放し、結紮部を露出する。追加の結紮を挿入部より近位でカニューレと静脈

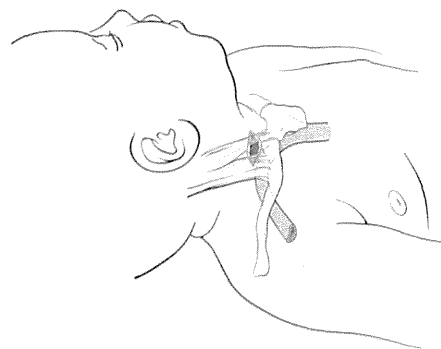


図 9.8 表層を剥離し、内頸静脈の前表面を露出

の周囲に置き、カニューレをクランプ、抜去し、確実に結紮を行う。血管鉗子も使うことができるが通常必要ない。静脈の修復は試みられてきたが、おそらく必要ないであろうし、修復してもたいてい閉塞してしまう。ECMO が短期間であれば（5～7 日未満）、動脈の修復を考慮してもよい。動脈を修復することの有用性は理論的であっても証明されていない。しかし、多くの外科医は動脈の見た目が問題なく、内膜が修復部の近位・遠位側で損傷されていないかぎり動脈の修復が有用であると思っている。近位と遠位の血管に絹糸を全周性にかけてクランプすることで出血のコントロールが可能になれば、動脈カニューレをクランプし、抜去する。そして、血管のクランプを終了する。動脈切開部を切除し、動脈の近位と遠位をしっかりと観察する。内膜に問題がなければ動脈を通常の血管吻合手技（端-端吻合）で再建できる。内膜のダメージ、薄い血餅、内膜の挫傷等を認めた場合、血餅、血栓のリスクがあるため、動脈再建は禁忌となりうる。この場合、血管を両端で結紮し、創部を洗浄し閉鎖する。ECMO が長期間であった場合、内頸動脈の再建は通常、推奨されず、カニューレ抜去時に動脈を結紮する。結紮部位どうしを比較的近接させておけば、稀ではあるが ECMO 再施行時の再カニューレーションに有用かもしれない。

VV カニューレーション——部分開創手技¹³

切開と静脈露出（図 9.8）：頸部の横切開を右鎖骨の 2 cm 頭側、胸鎖乳突筋の鎖骨頭と胸骨頭の

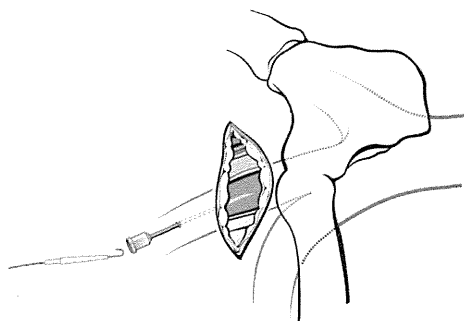


図 9.9 穿刺針を表皮のフラップから静脈へ挿入

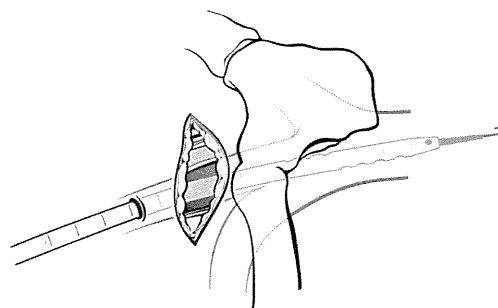


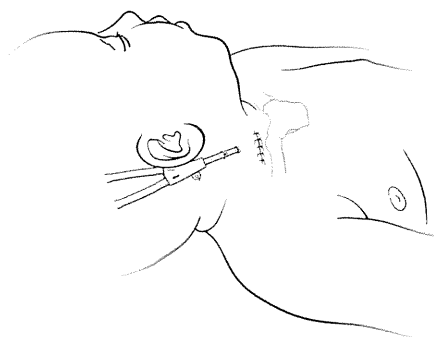
図 9.10 カニューレ、ダイレーター、ガイドワイヤーを直視下に静脈へ挿入

間、おおよそ 1.5~2 cm の長さで行う。広頸筋は電気メスで剥離し、最低限の剥離で内頸静脈の前面を露出する。血管を確認し、適切な外径の VV-ECMO カニューレを選択する〔12 Fr, 15 Fr:Origen Biomedical Inc, Austin, Texas, USA, 14 Fr:Covidien (旧 Kendall, Mansfield MA, USA)〕。

ガイドワイヤー挿入 (図 9.9): 皮膚からカニューレを穿刺する部位は、頭部が正中位の状態で、カニューレが右耳の後部に位置するように選択する。穿刺針あるいはカテーテルを経皮的に切開部から 2 cm 頭側で内頸静脈に挿入されるようにする。理想的には、静脈の挿入部が完全に皮下組織で覆われるような部位が望ましい。直径 0.035 インチのガイドワイヤーを挿入して、穿刺針またはカテーテルを抜去する。テフロン製のオブチュレーターをガイドワイヤーを通して血管と右房まで挿入する。皮膚の刺入部はメスで軽度拡張しておく。カニューレ周囲の出血の問題が起こりうるため、皮膚は拡張しすぎないようにする。

カニューレ挿入 (図 9.10): 十分なヘパリン化を行ったのち、選択したカニューレをテフロン・オブチュレーターを通して、静脈に確実に挿入されていることを直視下に確認する。カニューレの動脈ポート (赤) を前方に向ける。これにより酸素化された血液が三尖弁に向かい、リサーキュレーションが最小限になる。カニューレの先端が皮膚から 6~9 cm 先に位置するように調整する。

創閉鎖とカニューレ固定 (図 9.11): 静脈切開周辺を結紮しなくても、静脈圧は比較的低いため、十分な止血が得られる。静脈の結紮を行うと壁の薄

図 9.11 カニューレを皮膚へ固定
創の閉鎖

いカニューレではキックを生じることがあるが、結紮を行わないことで、これを予防できる。カニューレを位置調整するために必要なことは、皮膚に固定した糸を取り、カニューレの位置を調整し、再度皮膚に固定し直すだけである。カニューレは 2-0 絹糸で何箇所か皮膚に縫合し固定する。切開部はモノフィラメントの縫合糸で閉鎖する。もしくはは吸収糸を使用してもよいかもしれない。

カニューレ抜去: 体外補助循環が不要となり、人工呼吸器で十分に管理できるほど呼吸不全が改善すれば、カニューレを抜去する。皮膚縫合の抜糸後にカニューレを抜去し、カテーテルの刺入部を 5 分または止血が得られるまで圧迫する。カニューレの先端がまだ血管内にあるときに側孔からの空気の血管内への迷入を防ぐため、素早くカニューレを抜去するよう注意が必要である。

小児 ECLS でのカニューレ挿入

幼児より大きい小児では、成人と同様いくつかのアクセス方法がある。血管が太いため、いろいろな選択肢がある。VV-ECMO は、呼吸サポートとして優先的に用いられる。VA-ECMO は、心臓手術後の人工心肺 (CPB) からの離脱に失敗した術後を含め、心臓補助が必要な患者に用いられる。まだ歩行できない年齢の小児は大腿の血管が細く、ECMO のアクセスには不適切かもしれない。これらの群 (10 kg 未満) では頸静脈にダブルルーメンカニューレを挿入して VV バイパスを行うか、頸静脈と頸動脈にシングルルーメンカニューレを挿入して VA-ECMO を行う。稀ではあるが、呼吸不全に陥った小さい小児で VV バイパスで適切な流量を得るための十分な太さのダブルルーメンカニューレに対して頸静脈が細すぎるときには、VA-ECMO を選択しなければならない。

VV-ECMO

前述のとおり、小さい小児の VV バイパスは、静脈の太さがカニューレサイズに合うのであれば、Seldinger 変法や経皮的にダブルルーメンカニューレを留置すれば施行できる。10 kg より大きい小児は、通常血管が太いので大腿静脈と頸静脈に 2 本のカニューレを留置できる¹⁴。繰り返しになるが、カニューレ選択は 2 つの基準に基づいている。

- ① 外科的に血管を露出し挿入可能と判断された最大径のカニューレ
- ② M ナンバーで推定される十分な流量 (100 cc/kg/mL) が得られる大きさの脱血カニューレ

脱血と送血にどのカニューレ (血管) を使用するかについては、2 つの重要な解決策がある。頸静脈カニューレは多量の脱血が可能であることが多い。このカニューレの先端が心房にあり前負荷が十分であるならば、心房が虚脱しポンプ流量が自動調節機能により中断されるまで脱血が可能になる。心房の形状が球状であるのに対し、大腿・腸骨静脈は円筒形であるため、この状況では心房のほうが流量が増加すると考えられている。しかし、

ポンプの血液が大腿静脈カニューレへ流れることで、リサーキュレーションがしばしば問題となる。これは下大静脈から右房に向かう血液が右房で混ざり合う前に、内頸静脈のカニューレから脱血されるからである。Rich らは、大腿静脈脱血と頸静脈送血では、リサーキュレーション率が減少するため、たとえ総流量が少なくなってもより高い動脈血酸素飽和度 (酸素運搬など) を達成できると報告している¹⁵。われわれはこの方法を好んでおり、虚脱が起こらない太い肝内下大静脈に届くような大腿カニューレを使用するよう心がけている。

VA-ECMO

心不全に対し、多くの小児ではカットダウンにより頸静脈と頸動脈にカニューレーションが行われる。心臓手術後の場合、CPB として使用された胸部のカニューレーションが用いられる。

成人 ECLS でのカニューレ挿入

VV-ECMO

成人の VV-ECMO では、2 種類のカニューレ挿入法がある。1 つは、頸静脈と大腿静脈に 2 本のカニューレを留置する方法である。これらのカニューレは安全に経皮的に留置することが可能である¹⁶。太いカニューレ (23~29 Fr) は脱血用に、いくぶん細いカニューレ (21~23 Fr) は送血用に用いられる。静脈カニューレに側孔があることは特に重要であり、これにより仮に先端の孔が閉塞しても高流量の脱血と還流が可能となる。初期の成人に対する ECMO では、内頸静脈から右房脱血し大腿静脈から下大静脈へ送血していたが、この方法では時に重大なリサーキュレーションを認めていた。長く、太く、薄く、そしてワイヤーで補強されたカニューレが開発されたことにより、大腿静脈カニューレで下大静脈脱血を行い、右頸静脈から送血することが好まれるようになった。この方法ではリサーキュレーションが少なく、高流量を見込むことができる。腹腔内にある下大静脈は柔らかくカニューレ周囲の静脈虚脱がしばしば生じるため、これを回避するために下大静脈カニューレ

を肝内下大静脈に留置することが重要である。他の大腿静脈から2本目のカニューレを挿入する必要がしばしばあるが、十分なサイズのカニューレが高位下大静脈（肝内）に適切に留置されていればまず不要である。下大静脈フィルターが挿入されている患者でVV-ECMOが必要になった場合は、以前からの手法である右房脱血とフィルターよりも末梢の大腿静脈から送血することでECMOが可能である。内頸静脈が閉塞した患者や使用できない患者では、鎖骨下静脈に送血カニューレを挿入しVV-ECMOを行う。2つ目の方法として、カニューレ1本でVV-ECMOが施行できる新しいダブルルーメンカニューレが利用できるようになった。このカニューレは、Avalon Elite™ [Avalon Laboratories, LLC., Rancho Dominguez, CA, USA] であるが、これは上大静脈と下大静脈の双方からの脱血と三尖弁方向への1本のカニューレで可能になった新しいデザインの機材である。この構造によりリサーキュレーションが制限できるという特徴がある。リサーキュレーションは小児のカニューレ挿入の項で述べたとおり、解決できる問題である。さらに、このカテーテルは、ねじれないようにワイヤーで補強されている。Avalon Elite™ は13~31 Frまで、さまざまなサイズがあり小児から成人まで使用できる。いくつかの施設における予備試験では良好な結果が示されている¹⁷。このカニューレは上大静脈と下大静脈の両方から脱血するようにつくられているので、先端を右房ではなく下大静脈に留置させることが必要である。カニューレの留置を透視もしくは心臓超音波の補助下で行う。特に透視下であればカニューレ留置を正確に行うことができる。ガイドワイヤーが右房を通過し下大静脈に入るところを確認できれば、確実に挿入することができる。さらにカニューレをガイドワイヤーに通して進める際に、透視でガイドワイヤーが折れ曲がることなく、カニューレの先端が下大静脈内に進んでいくことを直接確認できる。カニューレを進めているときにガイドワイヤーが右房内に折れ曲がることもあるが、その場合はカニューレをさらに先に進める前にガイドワイヤーを下大静脈に戻すよう位置調整する必要がある。

ある。透視と異なり心臓超音波は、カニューレの先端が下大静脈の最良な位置に留置されていることの確認、リサーキュレーションが最小となるように送血部からの血流が三尖弁へ向いているか評価できる点において有用である。しかし、心臓超音波単独ではカニューレとガイドワイヤー全体を視認することができない。経験がまだ十分ではないが、このようなどとも大きなカニューレを安全に留置する際にこの2つの技法は有用と思われる。

VA-ECMO

成人のVA-ECMOのカニューレーション法は、動脈へのアクセスに関して、いくつかの例外はあるものの、基本的に小児で用いられる手法と同様である。小児と異なる点は、成人患者では側副血行路が少なく、かなり不安定な動脈循環を呈することがあるため、細い動脈カニューレを用いたとしても遠位の虚血を引き起こすことがある。成人では小児に比べ頸動脈へのカニューレ挿入が難しく、またそれ以外にも成人では、特に高齢者では、下肢虚血は重大な問題であるため早期に認識し対応しなければならない。いくつかの施設では大腿へカニューレを挿入している間、下肢の虚血を防ぐために遠位部を還流するための新たなカテーテルをルーチンに挿入している。

一般的には重度の末梢血管病変の疑いや既往がなければ、成人の大腿の血管は還流用カテーテルを経皮的に留置するのに十分な太さを有する。緊急度にもよるが可能であれば、透視下で造影剤を用いる方法はとても有用である。さらに緊急な場合、外科的に動脈を露出し適切な挿入部を触診することで、カニューレーションが容易となり、出血や局所ならびに逆行性の大動脈解離といった合併症の予防に有用である。特に肥満の患者では経皮的に動脈の位置が同定できないことがあるため、外科的にカニューレーションすることが必要となる。しっかり拍動する脈があることは経皮的カニューレーションのよい指標であるが、一方で、心血管系疾患に対してVA-ECMOが必要な患者の大多数で脈がよく触れることは少ない。しかし例外として、蘇生中に昇圧薬が使用され一過性の高血圧を呈すれば、

脈が触知できることでカニューレに役立つかもしれないし、また重度の末梢血管疾患がないという確認ができるかもしれない。さらに、心臓マッサージ中に脈が触知できれば経皮的に動脈へカニューレにできるよい指標となりうる。

重度の末梢血管疾患がある成人症例や大腿へのカニューレが他の理由で禁忌である複雑な症例（たとえば、熱傷、開放創、Dacron graft など）では、動脈へのアクセスとして他部位からのカニューレが用いられる。ヨーロッパの一部の施設では頸動脈も使用されるが、米国では代替法として腋窩動脈が用いられる。腋窩動脈は左右どちらでも利用可能であるが皮膚切開が必要である。腋窩動脈にカニューレを直接挿入することは可能だが、腕の虚血や出血のため、安全に長期使用することが困難である。よって、多くの術者が Dacron もしくは PTFE の side graft を腋窩動脈に縫合し、別の皮切部から皮下トンネルを通すことで最初の皮切部を閉鎖する。これらの手技に加えて創部の管理やカニューレの安全や安定させるための管理がさらに必要である。

切開して挿入する手法は、カニューレ挿入が容易で動脈損傷の危険性が軽減する一方、カニューレ周囲からの出血や創感染の危険性が増加し、かつ時間が余計にかかり器具も必要となるため、術者が熟考し選択するべきである。

患者が VA-ECMO を必要としなくなった場合、前述した方法で静脈のカニューレを抜去する（経皮的挿入した場合は直接圧迫し、切開して挿入した場合は頸静脈を結紮する）。動脈のカニューレ抜去は、さらに複雑である。カニューレ抜去後に直接縫合し修復することを好む術者もいる。一方、経皮的に挿入された動脈カニューレは圧迫で十分だという意見もある。カニューレが動脈に対して太いほど仮性動脈瘤や動脈の狭窄が起こりやすくなる。代替の方法として血管パッチによる形成が挙げられる。この手法はカットダウンで留置されたカニューレを抜去する際に用いられる。血管をクランプしカニューレを抜去したのちに、ダイアモンド型をした血管パッチを欠損部に縫い付け、穴をふさぐことで修復部の狭窄を防ぐ。

経胸壁のカニューレ

VA-ECMO で頸部もしくは大腿からのアクセスが不可能もしくは実用的でないときもあるが、これは特に CPB からの離脱に失敗した患者や、胸骨切開後に蘇生を受けた患者である。このような状況では、CPB と同様、動脈系と静脈系に直接カニューレにされる。動脈側ではカニューレ周囲からの出血を防ぐ目的で、また静脈側では空気混入を防ぐ目的で、カニューレを挿入してある上行大動脈と右房に対してタバコ縫合を行い、カニューレ周囲を固定する。手術室では、カニューレはドレープに軽く固定されたり術野に置かれたりしている。しかし、長期の体外補助を行う場合、特に移動中の安全確保のため、長期間安定する方法でカニューレを固定することが重要である。一般的にはカニューレを胸壁に何点か縫い付けて固定し、プラスチックやエラストックでできた被覆材で、カニューレとともに傷を覆う。患者の鎮静が浅く、体動ならびに呼吸や咳によって、胸骨縁が分離することでカニューレに力がかかり、ずれてしまう危険があることに注意する。これは胸骨縁を固定するためにしっかりした縫合を 1~2 本行うか、ワイヤーを用いて固定することで十分に予防できる。われわれは、この方法が固定器具を用いるよりも安定性が得られることから、重大な後遺症を生じる可能性がある筋弛緩薬の持続投与よりも、この方法を選択している。

カニューレの合併症

ECMO のためのカニューレはかなり難易度が高く、しばしば問題が生じる。十分に準備することで、通常、重大な合併症を防ぐことができる。適切なトレーニングと外科医の介助があれば、これらの問題はたいてい解決できる。

静脈へのカニューレ挿入が困難

この問題は静脈が細すぎる場合や、カテーテルが太すぎる場合、無名静脈が欠損した左側上大静

脈の場合に発生する。また、患者の頭部が過伸展したり回転しすぎたりすると鎖骨や第1肋骨が閉塞機転となりうる。この場合は、頭の位置を再調整する。横隔膜ヘルニア、気胸や胸水に併発する重度の縦隔偏位をきたす疾患の場合も、静脈へのカニューレ挿入が困難になることがある。

頸静脈の完全断裂

特に小さな新生児では、静脈カニューレの挿入が困難で、挿入を試みている間に静脈が断裂してしまうことがある。この問題が発生するとカニューレ挿入はさらに困難となる。このような場合にはまず、血管のコントロールが第一の目標となる。血管をクランプすることが第一であり、これが可能であれば次にガイドワイヤーを留置することで、カニューレを再挿入するのに有用である。またカニューレ留置時、牽引するための糸を留置しておく役立つ。カニューレを固定するためにカニューレと静脈周囲を結紮するべきである。カニューレ抜去時には出血をコントロールする目的で、タバコ縫合を用いる。

縦隔内での近位静脈の喪失

カニューレが簡単に進まずに挿入が困難なとき、突然の抵抗の消失は、血管の断裂により血管が縦隔内に落ちたことを示唆するかもしれない。指で圧迫することで出血はコントロールできる。血管の断端を鉗子でつかめたなら、断端からカニューレションができるかもしれない。しかしこれが困難で、かつアクセス可能な他の血管がない場合、胸骨正中切開を行い経胸壁でのアプローチが必要になる。他のアクセスが使用できれば、血管を見失った場所で血管の穴をふさぐように筋膜を閉鎖し、直接圧迫することで、出血はほぼコントロール可能である。

カテーテル留置後、血流がない場合

カニューレ留置後に血流がない場合、カニューレや回路にキックがないか調べるべきである。胸部X線や透視を用いることで、静脈カニューレの位置確認や調整を行い、必要があれば、再留置す

るべきである。

胸腔内への穿破

不安定な血行動態を伴う血流の突然の停止は、胸腔内の血管や右房の穿破による影響かもしれない。この状況では、迅速に胸骨正中切開と血管修復を行い、直接経胸壁的にカニューレションを行う。

文献

1. Miskulin J, Annich G, Grams R, Boules T, McGillicuddy J, Hirschl R, Bartlett R. Venous-arteriovenous cannulation for adult ECMO patients with cardiogenic shock. 14th Annual ELSO Conference, September 10–12, 2004, Chicago, IL
2. Vaders Salm TJ. Prevention of lower extremity ischemia during cardiopulmonary bypass via femoral cannulation. *Ann Thorac Surg* 1997; 63:251–2.
3. Bartlett RH, personal communication.
4. Montoya JP, Merz SI, Bartlett RH. A standardized system for describing flow/pressure relationships in vascular access devices. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 1991; 37:4–8.
5. Sinard JM, Merz SI, Hatcher MD, et al. Evaluation of extracorporeal perfusion catheters using a standardized measurement technique—The M-number. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 1991; 37:60–4.
6. Streltz LJ, Bej MD, Graziani LJ, et al. Utility of serial EEGs in neonates during extracorporeal membrane oxygenation. *Pediatric Neurology* 1992; 8:190–6.
7. UK collaborative randomized trial of neonatal extracorporeal membrane oxygenation. UK Collaborative ECMO Trial Group. *Lancet* 1996; 348:75–82.
8. Schumacher RE, Barks JD, Johnston MV, et al. Right-sided brain lesions in infants following extracorporeal membrane oxygenation. *Pediatrics* 1988; 82:155–61.
9. Lazar EL, Abramson SJ, Weinstein S, et al. Neuroimaging of brain injury in neonates treated with extracorporeal membrane oxygenation: Lessons learned from serial examinations. *J Pediatr Surgery* 1994; 29:186–91.
10. Walker LK, Short BL, Traystman RJ. Impairment of cerebral autoregulation during venovenous extracorporeal membrane oxygenation in the newborn lamb. *Critical Care Med* 1996; 24:2001–6.
11. Peek GJ, Firmin RK, Moore HM, et al. Cannulation of neonates for venovenous extracorporeal life support. *Annals of Thoracic Surgery* 1996; 61:1291–2.
12. Pranikoff T, Hirschl RB. Neonatal extracorporeal membrane oxygenation. In: Carter DC, Russell RCG, eds. *Rob and Smith's Operative Surgery*, 5th edition, London: Butterworth-Heinemann. 1995. Reprinted with permission of the authors and Edward Arnold.
13. Pranikoff T, Hirschl RB. Neonatal extracorporeal membrane oxygenation. In: Carter DC, Russell RCG, eds. *Rob and Smith's Operative Surgery*,