

2018 年度より胸腔鏡下弁膜症手術が新たに保険収載された¹⁾。これによって今後さらに胸骨を温存する右小開胸心臓手術 (minimally invasive cardiac surgery: MICS) の症例数が増加していくことが予想される。しかしながら、技術的に高度な操作が要求され手術チームの体制を整える必要があるため、MICS を標準手術とするには決してハードルが低いとは言えない。今後さらに安全に広く行われるには、外科医の技量のみならず、麻酔科医や我々パーフュージヨニストを含めた手術チーム全体の底上げが必要である。

MICS には小切開がもたらす整容面だけでなく、早期回復や輸血量減少などの利点があることが知られているが、一方でピットフォールもあり、その多くは特殊な環境や条件下での体外循環に関連している²⁾。その一例として、MICS では大腿動静脈を用いて体外循環を行うなど、開胸手術と体外循環法も異なり注意が必要である。JaSECT では、新規に MICS に従事するパーフュージヨニストに対して、MICS に対する体外循環法について注意喚起を行う。なお、本ステートメントは既に安全な体外循環を行っている施設を対象とするものではなく、新規に開始する施設や体外循環に関する指導が十分に受けられないパーフュージヨニスト、本ステートメント発出を機会に自施設の体外循環法を見直したいパーフュージヨニストを対象とする。

1. 送血について

通常、MICS においては末梢血管カニューレーションとなるため、20 Fr 以下の送血カニューレを用いることが多い。このため、送血圧は 250 mmHg を超え、人工肺前圧も 350 mmHg を超える場合がある。人工心肺を用いた心臓血管外科手術中の人工肺内圧上昇に関する報告書では、「人工肺圧力上昇の異常値は、臨床的人工肺送血抵抗を基準値とし、その 2 倍を目安に判断し、人工肺前圧の絶対値のみで人工肺前圧の異常上昇を判断せざるを得ない場合には、回路の接続が適切に行われていれば 400 mmHg 以上を目安とするのが妥当と思われる。」³⁾ としている。このため、人工肺圧力上昇をモニタリングするために、送血圧力計は送血ポンプと人工肺の間に設置し常時モニターする⁴⁾ ことを強く推奨し、通常圧の 2 倍以上を異常圧力上昇とする。

また、大腿動脈の血管径が細く、送血カニューレのサイズダウンが必要な場合には、十分な灌流量の確保が困難となる可能性があるため、手術チームで検討の上、送血カニューレの追加を行い、NIRS など下肢虚血に対するモニタリングを行うことを推奨する^{5,6)}。下肢虚血の兆候を認めた場合は送血側末梢への遠位側灌流も考慮する⁷⁾。大腿動脈からの逆行性送血は順行性送血と比較し、脳梗塞リスクが上昇することが報告されている⁸⁾。術前に血管性

状を確認し性状不良の場合は、腋窩あるいは鎖骨下動脈送血などの順行性送血もチームで検討する。

2. 脱血について

MICS で使用される脱血カニューレは、大腿静脈からの一本脱血（デュアルステージカニューレ含む）もしくは内頸静脈などを用いた二本脱血が選択される。28 Fr 以下でカニューレ長も細くかつ長くなるため、カニューレによる圧力損失が比較的大きい。このため、遠心ポンプやローラーポンプを用いて直接脱血する方法や、陰圧補助脱血（VAVD：Vacuum Assisted Venous Drainage）を使用することが多い。本ステートメント作成協力施設では、カニューレシオンは X 線透視や経食道エコーにてカニューレが適切な位置に留置されるように確認しながら挿入している^{9,10)}。

1) VAVD の場合

VAVD を使用する場合、リザーバー内圧が -60 mmHg を超えるような高い陰圧で行う場合がある。VAVD 使用下にて十分な脱血量を確保できない（カニューレのサッキングを認める）場合は¹¹⁾、カニューレ留置位置が不適切な可能性があるため術者にその旨を伝える。また、使用するリザーバーは -100 mmHg 以上の陰圧に耐えられることを必須とし、可能であれば安全係数 2 倍以上の -200 mmHg 以上の陰圧に耐えられることを推奨する。メーカーによる規定がない場合には、事前に確認することを必須とする。本ステートメント作成協力施設では、VAVD の開始を落差脱血により十分な脱血を確保できなくなってから開始する施設や、吸引圧と脱血量が相関するまでを上限圧に設定するなどの工夫や安全対策を行っている。

尚、VAVD 施行に当たっては、JaSECT、日本臨床工学技士会、日本胸部外科学会、日本心臓血管外科学会、日本人工臓器学会より使用上の注意点などの注意喚起を遵守し、MICS に対する体外循環を行うパーフェュージョニストは、VAVD の操作に十分に対応できることを必須とする。また、医療ガス吸引設備等のトラブルが発生した場合の代替法について検討し、バックアップ吸引装置¹²⁾ や自己血回収装置、ローラーポンプによる吸引などの対策を行うことを強く推奨する。本ステートメント作成協力施設では、落差による脱血量（送血量）を確認してから VAVD を開始するなどを行っている。

2) 閉鎖式システム、ミニサーキット等ポンプ脱血の場合

ローラーポンプにて脱血を行う場合には、過度の陰圧によるトラブルを回避するため、脱血回路内圧のモニタリングなど脱血状況確認を強く推奨する。遠心ポンプにより脱血を行う場合には、脱血の状況をモニタリングするために脱血回路内圧のモニタリングを推奨する。気泡対策のために、脱血側のバブルトラップなども考慮する。

3. 遠心ポンプについて

体外循環に使用される遠心ポンプは通常 7 L/min 以上の血流量を確保し、500 mmHg 以上の吐出圧を発生できるよう設計されている。MICS での体外循環では、VAVD による陰圧と高い送血圧から、通常より比較的高い吐出圧を必要とする場合が多い。このため、遠心ポンプ回転数の上限に注意し、体外循環計画の際に使用する遠心ポンプの吐出圧－流量グラフを確認し¹³⁾、目標灌流量と回転数を事前に確認することを推奨とする。特に、同じ回転数を維持しても血液流量が上がると吐出圧が低下する遠心ポンプもあるため、使用する遠心ポンプの特性を理解して使用する。VAVD の吸引圧を変更した場合は血液流量が変動している可能性があるため注意が必要である。また、人工心肺スタート時に VAVD を開始する場合には、リザーバー内圧と血圧を考慮して遠心ポンプの回転数をあらかじめ上げてから、鉗子やオクルーダーを開放する。

4. 血液浄化、限外ろ過について

通常、人工心肺に使用する医療部材の耐圧は 1,000 mmHg や 760 mmHg (1 気圧) となっている。一方、血液浄化回路や透析膜、ろ過器の多くは耐圧が 500 mmHg となっている。MICS に対する体外循環では、送血圧が 400 mmHg を超える場合も想定されるため、血液浄化、ろ過装置などの耐圧を確認の上、人工心肺装置に組み入れて体外循環を行う場合にはその装着場所に注意する。また、VAVD を使用する場合には、リザーバー内圧も大きな陰圧がかかっているため、回路構成および限外ろ過回路内圧、膜間圧力差低下による除水効率低下に注意する¹⁴⁾。本ステートメント作成協力施設では、中空糸膜外（廃液側）から中空糸膜内（血液側）への廃液の引き込み予防に、廃液ラインに一方向弁を組み込んでいる。

5. シヤント回路、採血回路について

リザーバーに返血されるエア抜き用シヤント回路や血液ガスや凝固能評価用のサンプリングルート、心筋保護用採血回路は、大きな陰圧がリザーバーにかかっている可能性があるため、鉗子やクレンメの開放時には人工肺や心筋保護回路内への空気の引き込みに注意する。特に、人工肺はリザーバー内圧による陰圧が原因となり、人工肺の中空糸膜から空気を引き込む可能性がある¹⁵⁾。そのため、人工肺の回路内圧は常に陽圧になるように管理し、送血圧が十分にかかっていない場合には絶対に開放しないこと。また、体外循環開始直後や離脱中の人工心肺回路からの採血は、採血操作を十分に習得した者が実施することを推奨する。

6. 心筋保護について

MICS では肋間からの狭い視野による大動脈遮断となる。そのため、不十分な大動脈遮断とならないように留意する。一つの解決策として、心筋保護液注入時に大動脈基部圧（ルート圧）をモニタリングする¹⁶⁾。大動脈遮断後に橈骨動脈などの動脈圧とルート圧が乖離

していることを確認する。同圧であれば大動脈の不完全遮断が考えられるため術者に報告する。僧帽弁手術の場合は視野確保のための、左房鉤による大動脈逆流出現にも注意が必要である¹⁶⁾。大動脈遮断が不十分で送血が冠動脈に流入することで心筋保護液が希釈されるなどの危険性があるため、大動脈遮断後は心拍動の脈動が体血圧へ伝搬していないことを血圧モニターで確認する。また、大動脈弁閉鎖不全症に対する心筋保護液注入時は、心停止や再拍動を心電図モニターにより確認する。

近年、del Nido を使用した単回投与あるいは 60 分程度に間歇時間を延長させた心筋保護法の有用性が報告されている¹⁶⁻²⁴⁾。これらの報告の多くは 90-120 分程度と短い遮断時間におけるスタディであることを考慮する。通常、MICS では正中切開と比較して人工心肺時間や大動脈遮断時間が長い傾向となることが報告されている²⁵⁾。さらに手技習得までのラーニングカーブによっても大動脈遮断時間が長くなる傾向となる^{26,27)}。実際に MICS において、心筋保護投与間隔が長くなったことが影響したと考えられる事故が報告されている²⁸⁾。

術野の制限から、心筋保護投与用ルートを経路を延長される場合がある。視野が制限される MICS では、心筋保護投与用ルートが十分にプライミングされていなかったり、延長部分の接続が緩く漏れが生じたり、気泡が混入していても術者が気づかないケースがある。心筋保護液投与時は、気泡の混入に十分に注意する。また、開胸時に使用する回路に延長チューブを接続して使用する場合には、ルート内の気泡を確認するとともに接続部の気泡残留に注意する。さらに、遮断解除前に直接心臓を触っての空気抜きができないので、心内残存空気にも注意が必要である。

MICS を新たに開始する際に心筋保護を変更する場合は、教科書や過去の文献、今後発表される予定の心筋保護に関するガイドライン等を参考に、手術前に投与方法、心筋保護液の組成、投与間隔とその上限を医療チームで検討する。

7. サクション、ベントについて

MICS では、サクションやベントのルートが限られ、特にロボット手術ではサクションの本数も少なくなる傾向にある。通常、内径 1/4 インチチューブを使用したローラーポンプによるサクションでは最大回転数でも 1.5 L/min であるため、全身の循環をサクション回路 1 本で賄うことはできない。また、吸引嘴管やカニューレによってはサクション回路内の陰圧も過度になる場合がある。出血などにより開胸手術へとコンバージョンする場合、サクションで十分に対応できない状況が発生することもあるため、体循環の維持や視野確保のためのサクションやベントの使用について術前に手術チームで考慮しておく。

サクション血は必ず色を観察し動脈血の場合には出血による影響を検討し、送血量を一時的に上げる、循環停止を行って止血を優先するなどの対処を医療チームで情報共有して行うことを推奨する。

8. MICS 特有の合併症について

MICS では特有の合併症をチームで共有することが重要である。右小開胸であるため、右肺の癒着による肺損傷、末梢カニューレーションに伴うトラブル、大動脈解離、大量出血、脱血不良による視野不良などによって正中切開への移行が必要であったと報告されている²⁹⁾。そのため、人工心肺側では正中切開への移行や緊急的に使用する脳分離体外循環などを想定した準備が必要である。さらに、人工心肺時間の延長や慢性呼吸器疾患、肺高血圧および右心室の機能不全を有する症例では再膨張性肺水腫のリスクが高くなることが報告されている^{30,31)}。本ステートメント作成協力施設では、再膨張性肺水腫予防のため、体温を 32°C 程度にコントロールしている。

9. 目標灌流量について

近年、目標指向型体外循環管理 (GDP: Goal directed perfusion) が提唱されている³²⁾が、前述の制約から、開胸手術に比して目標灌流量を下げて行う場合がある。目標の供給酸素量を維持するとともに、低下する場合には低体温などを検討することを推奨する。低体温による循環量維持の場合には、復温時の酸素の需要供給バランスを検討することを推奨する。

10. PaCO₂ の管理について

空気塞栓の予防のため、心臓手術や腹腔鏡手術において術野に二酸化炭素が使用されている³³⁾。MICS においても空気塞栓の予防のため、術野に二酸化炭素の送気を行うが、胸腔内が高二酸化炭素となり、この二酸化炭素をサクションによって吸引することで高二酸化炭素血症となることをしばしば経験する。そのため、動脈血二酸化炭素分圧の経時的なモニタリングもしくは血液ガス分析を通常よりも頻回に実施することと必要以上にサクションの回転数を上げないことが重要である。

11. 人工心肺のレイアウトについて

MICS に対する体外循環では、内視鏡装置やロボットの配置によって、人工心肺装置の配置を再考する必要がある。通常、術者の正面となる患者の頭側に内視鏡モニターやロボットのペイシェントカートが配置されるため、事前に手術チームでシミュレーション等を実施して、手術室の広さと機器の配置、電源や医療ガス端末の位置、人工心肺回路や心筋保護回路のチューブの長さ、術者の移動ルート等を確認する。本ステートメント作成協力施設では、開胸時は患者の左側頭側に人工心肺を設置するが、MICS では頭側に大型モニターが設置されるため、人工心肺は足側に設置している。また、手術野はモニターを通して術者と同じ術野を共有することができるため、パーフェュージョニストが見える位置にも術野モニターを設置することを推奨する。

10. 体外循環技術の習得について

MICS に対する体外循環を初めて実施する場合には、事前に実施している施設での見学や

体外循環法のコンサルトを受けることを推奨する。また、初症例の時には、他施設の MICS の体外循環に慣れたパーフェュージョニストの立ち合いを考慮する。MICS が自施設での標準術式となるまでは、パーフェュージョニストの教育目的の初症例を MICS の体外循環としないことを推奨する。また狭い視野で手術手技を行っているため、術野全体の把握が難しくなる可能性があり、回路トラブルなどを未然に防ぐよう術野とのコミュニケーションを良好に取る必要がある。

11. 結語

今後も MICS のニーズはさらに大きくなっていくことが予想されるが、その危険性を熟知し、適切な体外循環法の習得と確実な安全対策を行わなければならない。

MICS では各職種の連携やチームアプローチが非常に重要である。手術手技の向上により、我々パーフェュージョニストも体外循環技術向上に努める必要がある。術野が小さくモニターに集中して高度な技術で手術を行う心臓外科医に対して、体外循環に発生するトラブルなどを術野に伝えることははばかられることも少なくない。日ごろから、手術チームで情報共有を行い、パーフェュージョニストも術中の疑問点や問題点は手術チームに伝えることを心がけるとともに、2 チャレンジルールなどで、患者の安全性確保に貢献することを期待する。

参考文献)

- 1) 小野 章：診療報酬早見表. 初版, 東京, 医学通信社, 2018. 711.
- 2) Tabata M, Fukui T, Takanashi S, et al. : Do minimally invasive approaches improve outcomes of heart valve surgery?. *Circulation Journal*, 77(9): 2232-2239, 2013.
- 3) 日本心臓血管外科学会 人工肺内圧上昇ワーキンググループ, 人工心肺を用いた心臓血管外科手術中の人工肺内圧上昇に関する報告書, 2013年8月, <https://jscvs.or.jp/wp-content/themes/amnk/pdf/jinkouhaisaisyuuhoukoku161020.pdf>, Accessed 08 Aug 2023.
- 4) 日本体外循環技術医学会, 人工心肺における安全装置設置基準 (第6版) に関する勧告, 2020年11月27日, https://jasect.org/wp/wp-content/uploads/2020/12/cpb_safety_recommendation_2020.pdf, Accessed 08 Aug 2023.
- 5) 田端実, 長嶋耕平: 心臓血管外科基本手技. 初版, 東京, 2022. 99-109.
- 6) Toya T, Fujita T, Kobayashi J, et al. : Efficacy of regional saturation of oxygen monitor using near infrared spectroscopy for lower limb ischemia during minimally invasive cardiac surgery. *Artificial Organs*, 21(4); 420-426, 2018.

- 7) Shikata F, Nakamura Y, Yamauchi N, et al. : Regional oxygen saturation change rate for detection of leg ischemia in minimally invasive cardiac surgery. *Perfusion*, 36(4); 382-387, 2021.
- 8) Murzi M, Cerillo AG, Glauber M, et al. : Antegrade and retrograde arterial perfusion strategy in minimally invasive mitral-valve surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 43(6): 167-72, 2013.
- 9) Banfi C, Pozzi M, Giraud R, et al. : Veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation: an overview of different cannulation techniques. *Journal of Thoracic Disease*, 8(9) : 875-885, 2016.
- 10) 新見能成 監訳：人工心肺その原理と実際. 3 版. 東京, メディカルサイエンスインターナショナル. 2010. 137-149.
- 11) Walker JL, Young HA, Lawson DS, et al. : Optimizing venous drainage using an ultrasonic flow probe on the venous line. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*, 43(3) ; 157-161, 2011.
- 12) 大島弘之, 宮地鑑, ほか：陰圧吸引補助脱血使用時のトラブル対応に対する吸引アウトレット付きポータブル吸引源を使用した緊急対応に関する実験的検討. *体外循環技術*, 48(1) : 1-11, 2021.
- 13) 新見能成 監訳：人工心肺その原理と実際. 3 版. 東京, メディカルサイエンスインターナショナル. 2010. 35-45.
- 14) 新見能成 監訳：人工心肺その原理と実際. 3 版. 東京, メディカルサイエンスインターナショナル. 2010. 113-125 .
- 15) 新見能成 監訳：人工心肺その原理と実際. 3 版. 東京, メディカルサイエンスインターナショナル. 2010. 596-600 .
- 16) 岡本一真：心臓血管外科基本手技. 初版. 東京, 2022. 110-114
- 17) Gambardella I, Gaudino MFL, Girardi LN, et al. : Single- versus multidose cardioplegia in adult cardiac surgery patients: A meta-analysis. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 160(5) : 1195-1202, 2020.
- 18) Hiraoka A, Nakajima K, Kuinose M, et al. : Initial large-dose administration of modified St. Thomas' solution. *Asian Cardiovascular and Thoracic Annals*. 22(3) : 267-271, 2014.
- 19) Nagashima K, Inoue T, Tabata M, et al. : Impact of the Cardioplegia Interval on Myocardial Protection Using the Modified St. Thomas Solution in Minimally Invasive Mitral Valve Surgery: A Double-Center Study. *The Journal of ExtraCorporeal Technology*, 54(2) : 135-141, 2022.
- 20) Mick SL, Robich MP, Houghtaling PL, et al. : del Nido versus Buckberg cardioplegia in adult isolated valve surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 149 : 626-34, 2015.

- 21) Lenoir M, Bouhout I, Jelassi A, et al. : Del Nido cardioplegia versus blood cardioplegia in adult aortic root surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 162 : 514–522, 2021.
- 22) Lee CH, Kwon Y, Kim JB, et al. : Comparison of del Nido and histidine-tryptophan-ketoglutarate cardioplegic solutions in minimally invasive cardiac surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 164(4) ; 161-171, 2022.
- 23) Gerber W, Sanetra K, Bochenek A, et al. : One-shot cardioplegia for minimally invasive mitral valve repair-a comparison of del Nido and Bretschneider Histidine-Tryptophan-Ketoglutarate solutions. *Perfusion*, 38(49) ; 763-770,2023.
- 24) Chan J, Oo Butt S, Vohra HA, et al. : Comparison of del Nido and histidine-tryptophan-ketoglutarate cardioplegic solutions in minimally invasive cardiac surgery. *Perfusion*, 38(3) ; 464-472, 2023.
- 25) Sá MPBO, Eynde JVD, Dreyfus G, et al. : Mitral valve repair with minimally invasive approaches vs sternotomy: A meta-analysis of early and late results in randomized and matched observational studies. *Journal of Cardiac Surgery*, 35(9) ; 2307-2323,2020.
- 26) Vo AT, Nguyen DH, Truong BQ, et al. : Learning curve in minimally invasive mitral valve surgery: a single-center experience. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 14(1) ; 213, 2019.
- 27) Wu X, Wei W, Qi F, et al. : Analysis of the Learning Curve in Mitral Valve Replacement Through the Right Anterolateral Minithoracotomy Approach: A Surgeon's Experience with the First 100 Patients. *Heart, Lung and Circulation*, 28(3) ; 471-476, 2019.
- 28) 高本眞一 : 患者中心の医療を病院でいかに行うか 医療事故の判断. *日本心臓血管外科学会雑誌*, 51(5) ; 259-264, 2022.
- 29) Merwe JVD, Praet FV, Casselman, et al. : Reasons for conversion and adverse intraoperative events in Endoscopic Port Access™ atrioventricular valve surgery and minimally invasive aortic valve surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 54(2) ; 288-293, 2018.
- 30) Tutschka MP, Bainbridge D, Jones PM, et al. : Unilateral postoperative pulmonary edema after minimally invasive cardiac surgical procedures: a case-control study. *The Annals of Thoracic Surgery*, 99(1) ; 115-122, 2015.
- 31) Irisawa Y, Hiraoka A, Sakaguchi, et al. : Re-expansion pulmonary oedema after minimally invasive cardiac surgery with right mini-thoracotomy. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 49(2) ; 500-505, 2016.

- 32) Filip de Somer, John W Mulholland, Marco Ranucci, et al. : O₂ delivery and CO₂ production during cardiopulmonary bypass as determinants of acute kidney injury: time for a goal-directed perfusion management?. *Crit Care*, 10;15(4): R192, 2011.
- 33) 釘宮豊城, : 診療の場における二酸化炭素（炭酸ガス）について. *Medical Gases*, 17(1); 51-54, 2015.

監修

一般社団法人 日本体外循環技術医学会

理事長 安野 誠 (群馬県立心臓血管センター)

ガイドライン策定委員長 東條 圭一 (北里大学病院)

学会活性化委員長 (CVSAP 担当) 荒木 康幸 (済生会熊本病院)

安全対策委員長 藺田 誠

(日本赤十字社愛知医療センター名古屋第二病院)

編集委員長 開 正宏

(日本赤十字社愛知医療センター名古屋第一病院)

学術委員長 後藤 武 (弘前大学医学部附属病院)

制作

東條 圭一 (北里大学病院)

長嶋 耕平 (国家公務員共済組合連合会 虎の門病院)

定 亮志 (大阪公立大学医学部附属病院)

田辺 克也 (榊原記念病院)

笠野 靖代 (済生会熊本病院)

大島 弘之 (北里大学病院)

協力

今田 英利 (札幌東徳洲会病院)

本間 将平 (札幌心臓血管クリニック)

泉田 拓也 (岩手医科大学附属病院)

門馬 竜一郎 (仙台厚生病院)

渡辺 竜徳 (聖路加国際病院)

大下 智也 (心臓病センター榊原病院)

坂東 直紀 (徳島大学病院)

伴野 誠幸 (愛媛大学医学部附属病院)

金谷 太嗣 (小倉記念病院)

定松 慎矢 (九州大学病院)