

# 心臓血管麻酔における 近赤外線脳酸素モニターの使用指針

— 日本心臓血管麻酔学会 学術委員会脳脊髄部門報告 —

2017年5月31日 改訂版

2026年4月30日 増補版



# 心臓血管麻酔における 近赤外線脳酸素モニターの使用指針

— 日本心臓血管麻酔学会 学術委員会脳脊髄部門報告 —

2017年5月31日 改訂版

2026年4月30日 増補版

## <使用指針増補版作成委員会>

WG : 吉谷 健司, 石田 和慶, 加藤 純悟, 釜田 峰都, 川口 昌彦, 末盛 智彦,  
副島 崇旨, 田中 暢洋, 月永 晶人, 林 浩伸, 林田 眞和, 平井 直樹,  
前川 謙悟, 米倉 寛, 三宅 友彬, 金澤 伴幸

学術委員会 委員長: 小川 覚

保険委員会 委員長: 山本 俊介

事務局: 能見 俊浩

理事 長: 岡本 浩嗣

## <使用指針作成委員会>

脳脊髄部門: 川口 昌彦, 吉谷 健司, 石田 和慶, 前川 謙悟, 宮脇 宏, 田中 聡,  
内野 博之, 垣花 学 (部門長)

学術委員会 委員長: 小出 康弘

保険委員会 委員長: 横田 美幸

事務局: 山田 達也, 岡本 浩嗣

理事 長: 野村 実

## (略語一覧)

近赤外線分光法を用いた脳酸素モニター (近赤外線脳酸素モニター)

近赤外線分光法 (near infrared spectroscopy、NIRS)

Modified Beer Lambert 法 (MBL 法)

局所脳酸素飽和度 (regional cerebral oxygen saturation、rSO<sub>2</sub>)

組織酸素化指標 (tissue oxygenation index、TOI)

頸動脈内膜剥離術 (carotid endarterectomy、CEA)

冠動脈バイパス術 (coronary artery bypass grafting、CABG)

術後高次脳機能障害 (postoperative cognitive dysfunction、POCD)

過灌流症候群 (cerebral hyperperfusion syndrome、CHS)

超低体温循環停止 (deep hypothermic circulatory arrest、DHCA)

順行性脳灌流 (antegrade cerebral perfusion、ACP)

逆行性脳灌流 (retrograde cerebral perfusion、RCP)

経頭蓋超音波ドプラー法 (transcranial doppler、TCD)

体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potentials、SEP)

頸動脈ステント留置術 (carotid artery stenting、CAS)

# 目 次

はじめに

1. 成人の心臓血管手術における周術期脳障害	1
1) 周術期脳障害の発生率	
2) 周術期脳障害発生の社会的影響	
3) 周術期脳障害の発生機序と予防策	
2. 小児心臓血管手術における脳障害	9
1) 遺伝子異常に伴う先天性心血管疾患と脳障害	
2) 先天性心血管疾患と合併する脳障害	
3) 小児心臓血管手術に伴う脳障害とその危険因子	
3. 近赤外線脳酸素モニターの基本	11
1) 測定原理	
2) 適切な測定方法	
3) 使用上の注意点	
4. 心臓血管手術における近赤外線脳酸素モニターの適応	17
1) 頸動脈内膜剥離術, 頸動脈ステント留置術と近赤外線脳酸素モニター	
2) 心臓・大血管手術, 胸部大動脈ステントグラフト内挿術 (TEVAR) と近赤外線脳酸素モニター	
3) 小児心臓手術と近赤外線脳酸素モニター	
5. 成人心臓血管手術での使用報告と対応法	22
1) 頸動脈内膜剥離術, 頸動脈ステント留置術	
2) 大血管手術, 胸部大動脈ステントグラフト内挿術 (TEVAR)	
3) 心臓手術	
6. 小児心臓血管手術での近赤外線脳酸素モニター	34
1) 小児症例での留意点	
2) 小児症例での使用報告とアラームポイント	
7. 本邦の心臓血管手術における近赤外線脳酸素モニターの使用状況	36
最後に	36

## はじめに（増補版）

脳梗塞や術後神経認知障害（perioperative neurocognitive disorder、PND）などの周術期脳障害は、入院期間の延長、死亡率の増加、機能的予後の悪化のみならず、家族への負担や医療経済にも重大な影響を及ぼす合併症である。とりわけ高齢化の進展に伴い心臓血管手術や大血管治療は増加しており、周術期脳障害の予防と早期対応はますます重要となっている。

周術期脳障害の発生機序は多因子的であり、呼吸・循環管理、体温管理、神経保護戦略、薬剤管理などを含めた包括的な周術期管理が求められる。その中で、近赤外線分光法（near infrared spectroscopy、NIRS）を用いた脳酸素モニター（以下、近赤外線脳酸素モニター）は、非侵襲的かつ連続的に脳内酸素需給バランスの変化を把握できるモダリティとして広く用いられてきた。脳低灌流や塞栓性イベントなどを早期に察知し、迅速な対応を行うことで予防可能な脳障害（preventable cerebral injury）の軽減に寄与することが期待されている。

これまで日本心臓血管麻酔学会は、心臓血管手術における近赤外線脳酸素モニターの適正使用に関する指針を作成し、エビデンスの整理と臨床応用の標準化を図ってきた。その後、頸動脈ステント留置術および胸部大動脈ステントグラフト内挿術を含む血管内治療において、本モニターの保険適用が拡大されたことを受け、対象術式の明確化と実臨床での活用方法の整理が求められるようになった。

本増補版では、これらの新たに適応拡大となった術式を中心に、頸動脈内膜剥離術、頸動脈ステント留置術、胸部大動脈ステントグラフト内挿術における近赤外線脳酸素モニターの適応と使用報告を整理し、臨床現場での具体的な対応法について改めて検討した。最新の知見とこれまでに蓄積されたエビデンスを踏まえ、本モニターの適正使用をより明確化することを目的としている。

本増補版が、心臓血管手術および関連血管内治療における周術期脳障害の軽減と安全性向上に寄与し、適切なモニタリング戦略の普及に資することを期待する。



# 1. 成人の心臓血管手術における周術期脳障害

## 1) 周術期脳障害の発生率

### <Summary statement>

- 周術期脳障害は、主なものとして脳梗塞、脳症、術後高次脳機能障害（postoperative cognitive dysfunction: POCD）に大別されるが、軽度の局所神経症状や低酸素脳症による昏睡を呈する重篤なものまで、その病態は多種多様である。
- 周術期脳障害のうち脳梗塞の発生率は、非心臓手術において0.1%であるのに対し、頸動脈手術では0.25-3.0%、冠動脈バイパス術（coronary bypass grafting: CABG）0.8-3.2%、大血管手術4.7-11.2%と、これらの手術での発生率は極めて高い。
- 心臓血管手術における術後せん妄の発生率は25-45%で非心臓手術と比べ高く、POCDの発生率は、退院時に30-80%で6か月から1年後では20-40%に認められる。

### <解説>

周術期脳障害は、軽度の局所神経症状や記憶障害、低酸素脳症による昏睡や失外套症候群を呈する重篤なものまで、その病態は多種多様である。臨床的に周術期脳障害は脳梗塞、せん妄を含む脳症、POCDに大別される。

周術期脳障害のうち術後脳梗塞の発生率は非心臓手術において0.1%であるのに対し、頸動脈手術では0.25-3.0%、CABGで0.8-3.2%、人工心肺を用いる大血管手術では4.7-11.2%、胸部大動脈瘤に対するステントグラフト内挿術（thoracic endovascular aortic repair: TEVAR）においてステントグラフトのランディングゾーンが弓部分枝に近い場合には3.9-6.3%、経カテーテル大動脈弁置換術（transcatheter aortic valve replacement: TAVR）では2.0-4.0%と報告されており、これらの手術での術後脳梗塞の発生率はきわめて高い（表1）。

脳障害はタイプI（脳卒中または低酸素脳症）、タイプII（新たな知的機能低下、錯乱、興奮、見当識障害、記憶低下、局所神経症状を伴わない痙攣）に分類されることがあるが、タイプIおよびタイプIIの発生率はそれぞれ3.1%、3.0%、死亡率は21%、10%と高いことが報告されている<sup>16)</sup>。また、高齢になればなるほどタイプIおよびタイプIIの脳障害が増加する。

術後せん妄の発生は、死亡率の増加<sup>17,18)</sup>や、POCDに関連するとされている<sup>19)</sup>。術後せん妄の発生率も心臓血管手術で25-45%<sup>20,21)</sup>と高いと報告されている（表2）。

表1 手術の種類と周術期脳梗塞の発生率

手術	発生率 (%)
非心臓手術/非神経外科手術 <sup>1)</sup>	0.1
頸動脈手術 <sup>2-4)</sup>	0.25-3.0
人工心肺を用いない冠動脈バイパス術 <sup>5)</sup>	0.8
冠動脈バイパス術 <sup>6,7)</sup>	1.6-3.2
冠動脈バイパス術+大動脈弁置換術 <sup>8)</sup>	2.7
冠動脈バイパス術+僧房弁置換術 <sup>8)</sup>	3.7
冠動脈バイパス術+僧房弁形成術 <sup>8)</sup>	3.1
大動脈弁置換術 <sup>9)</sup>	3.2
僧房弁置換術 <sup>9)</sup>	5.7
僧房弁形成術 <sup>9)</sup>	1.6
大血管手術 <sup>10,11)</sup>	4.7-11.2
胸部大動脈瘤に対するステントグラフト内挿術 <sup>12-14)</sup>	3.9-6.3
経カテーテル大動脈弁置換術 <sup>15)</sup>	2.0-4.0

表2 手術の種類と術後せん妄の発生率

手術	発生率 (%)
白内障手術 <sup>22)</sup>	4.4
腹部手術 <sup>23,24)</sup>	17-25
整形外科手術 <sup>25)</sup>	17
頭頸部手術 <sup>26)</sup>	17
冠動脈バイパス術 <sup>20,21)</sup>	25-45
腹部大動脈瘤手術 <sup>27-30)</sup>	33-54
末梢血管手術 <sup>28,29)</sup>	30-48

また、POCDは神経心理学検査を用いて診断され、言語や記憶、注意、集中、遂行機能など大脳皮質機能の全般的な障害と定義されている。POCDは非心臓手術においても発生し、その発生率は6.8–41.4%であるが<sup>31,32)</sup>、心臓血管手術では退院時で30–80%、6か月から1年後では20–40%に認められると報告されている<sup>33,34)</sup>。ただし、POCDは国際的に統一された診断基準がないため、用いる検査法や評価基準により発症頻度が異なるなどの問題点に留意する必要がある<sup>35,36)</sup>。

## 2) 周術期脳障害発生の社会的影響

### <Summary statement>

- 心臓血管手術後に脳梗塞を発症すると周術期死亡率は6–8倍に増加し、10年間の長期経過においても死亡のリスクが3倍に高まる。
- 術後せん妄の発生は、心臓血管手術後の死亡率の増加に関与する。
- POCDを認めた患者では、退院した後も健康状態は悪く、就労が困難である割合が高い。
- 周術期脳障害を発症すると日常生活の質を低下させ、社会的、経済的損失をもたらす。これらは周術期脳障害に対する適正な評価および医療の介入が重要であることを示唆している。

### <解説>

心臓血管手術後に脳梗塞を発症すると周術期死亡率は6–8倍に増加し<sup>37,38)</sup>、また長期予後にも影響を及ぼす。CABGを行った35,733例を対象に、周術期に脳梗塞が生じた575例(1.6%)と脳梗塞を起こさなかった症例で生存率を比較すると、1年後ではそれぞれ83% vs. 94.1%、5年後で58.7% vs. 83.3%、10年後では26.9% vs. 61.9%であり、周術期に脳梗塞が生じると10年間の長期経過においても脳梗塞が生じなかった症例と比べ、死亡のリスクが3倍に高まる<sup>39)</sup>。また、周術期に脳梗塞が生じた症例の半数以上の患者では、リハビリが必要となり日常生活に制限が生じる<sup>40)</sup>。

術後脳梗塞と同様に術後せん妄も心臓血管手術後の死亡率の増加に関与する。CABGを行った5,034例を対象に10年の追跡調査を行った結果、周術期にせん妄を生じた症例(304例, 6%)では、死亡に関するハザード比が1.69(95%信頼区間1.38–1.97)と高いことが報告されている<sup>18)</sup>。また、術後せん妄はPOCDに関連し、術後6ヵ月に術前のMini-Mental State Examinationのレベルまで回復しなかった患者の割合が、せん妄を発症した患者に有意に多い<sup>19)</sup>。POCDを生じると、退院後の日常生活に支障をきたし生活の質を低下させる。人工心肺を用いた心臓手術を受けた261例で、術後5年間の認知機能の推移を追跡した結果、POCDを認めた患者では、健康状態は悪く、就労が困難である割合が高いことが示されている<sup>41)</sup>。一旦、術後脳障害を発症すると高い死亡率に関連し、退院後は生活の質が低下し、社会的、経済的損失も大きい。これらは周術期における脳障害に対する適正な評価および医療の介入が重要であることを示唆している。

## 3) 周術期脳障害の発生機序と予防策

脳の重量は体重の2%であるが、脳血流量は、心拍出量の15%に相当し、酸素消費量は全酸素消費量の20%、グルコース消費量は全身の25%とその重量と比較して高い割合を占める。安静時の脳血流量は50 ml/100 g/minで、脳100 g当たり3–4 mlの酸素と6 mgのグルコースを供給する。脳にはエネルギー基質の蓄積はないため虚血に弱い臓器であり、適切な脳血流が必要である。

### (1) 頸動脈手術

#### <Summary statement>

- 頸動脈内膜剥離術(carotid endarterectomy: CEA)は頸動脈狭窄に対する外科治療として確立した治療法であるが、術中に頸動脈の一時的な遮断を要することから、脳虚血を合併する可能性がある。
- 頸動脈遮断時の脳虚血は複数のモニターで評価する。
- 術中脳虚血の予防策として、頸動脈遮断中の脳血流の維持にシャント留置が用いられる。
- CEA後の重篤な脳障害に過灌流症候群(cerebral hyperperfusion syndrome: CHS)があり、その発生率は1.9%で、脳出血を来すと死亡率は26%、救命できても80%に何らかの後遺症を認める。

## <解説>

CEAは頸動脈狭窄に対する外科治療として確立した治療法であり、狭窄率で高度(>70%)・中等度(>50%)の症候性頸動脈狭窄に対して、内科治療にCEAを加えた方が脳梗塞予防効果が優れていることが明らかとなっている<sup>42-49)</sup>。本邦におけるガイドライン(脳卒中治療ガイドライン2015)においても抗血小板療法と脂質異常症改善薬を含む内科治療に加えCEAを行うことを推奨している<sup>50)</sup>。しかし、本法では頸動脈の一時的な遮断を要することから、術中に脳虚血を合併する可能性が存在する。

### a. CEA術中の脳虚血

CEA術中の脳虚血の原因として、頸動脈遮断に伴う脳低灌流、機械的操作によるプラーク剥離や頸動脈血流再開などで生じる塞栓症が挙げられる。術中脳虚血の予防策として、頸動脈遮断中の脳血流の維持にシャント留置を用いることがある。シャント留置は高齢、女性、高血圧、対側の頸動脈閉塞、対側の頸動脈にCEAを施行した既往があるとその必要性が増加すると報告されているが<sup>51)</sup>、シャント留置操作によっても塞栓症や頸動脈解離による脳虚血の危険があるため、その使用については種々の議論が存在する。脳梗塞の発生率は、CEA術中にルーチンにシャント留置を行う施設では1.4%、シャント留置を全く行わない施設で2.0%、選択的にシャント留置を行う施設で留置の基準として脳波を参考にした場合1.6%、経頭蓋超音波ドプラー法(transcranial Doppler: TCD)で4.8%、内頸動脈断端圧(stump pressure)で1.6%、体性感覚誘発電位(somatosensory evoked potentials: SEP)で1.8%と報告されている<sup>52)</sup>。現状ではシャント留置は、患者因子や施設の方針、脳波、stump pressure、SEP、TCD、運動誘発電位、近赤外線脳酸素モニターなど複数のモニタリング結果を勘案し行われる。

### b. CHS

CEA後における重篤な周術期脳障害に頭痛、痙攣、局所神経症状などを呈するCHSが挙げられる。CHSは慢性脳虚血による脳血管の自動調節能障害に、脳虚血や再灌流による急性調節障害が加わることで術後過灌流が引き起こされると考えられている。CEAではCHSの発症のピークは術後6日目で、発生率は1.9%、脳内出血は0.4%に発症し、脳出血を来すと死亡率は26%、救命できても80%に何らかの後遺症を認めたと報告されている<sup>53)</sup>。

## (2) 大血管手術

### <Summary statement>

- 大血管手術なかでも大動脈弓部手術では、弓部分枝血管再建中に脳低灌流をきたす危険性が高い。
- 術中脳虚血の予防策として、超低体温循環停止、順行性脳灌流、逆行性脳灌流などの脳保護法が用いられる。
- 弓部分枝へ選択的に送血カニューレを挿入し脳灌流を行う順行性脳灌流では、送血カニューレ挿入操作による塞栓症や、送血カニューレの位置異常による脳虚血の危険がある。
- 急性大動脈解離では偽腔の拡大による弓部分枝血管の狭窄や閉塞など、その病態自体に脳虚血をきたす原因がある。

## <解説>

大血管手術なかでも大動脈弓部手術では、手術部位の特徴として腕頭動脈、左総頸動脈、左鎖骨下動脈を切り離し、その再建が必要となる。この3本の動脈はいずれも脳へ血流を供給する血管(鎖骨下動脈は椎骨動脈を分岐し脳へ至る)であり、その再建中に脳虚血をいかに防ぐかが重要である。

脳虚血の主な原因として、弓部分枝血管再建中に十分な酸素供給を得られずに発生する広範な低酸素脳症(脳低灌流)や動脈硬化の著しい血管壁の粥腫の剥離によって生じる塞栓症が挙げられる。術中脳虚血の予防策として、超低体温循環停止(deep hypothermic circulatory arrest: DHCA)や順行性脳灌流(antegrade cerebral perfusion: ACP)、逆行性脳灌流(retrograde cerebral perfusion: RCP)が、患者背景や施設の方針により選択し、脳保護法として用いられている。DHCAは低体温により一定時間の脳細胞の虚血耐性を得る

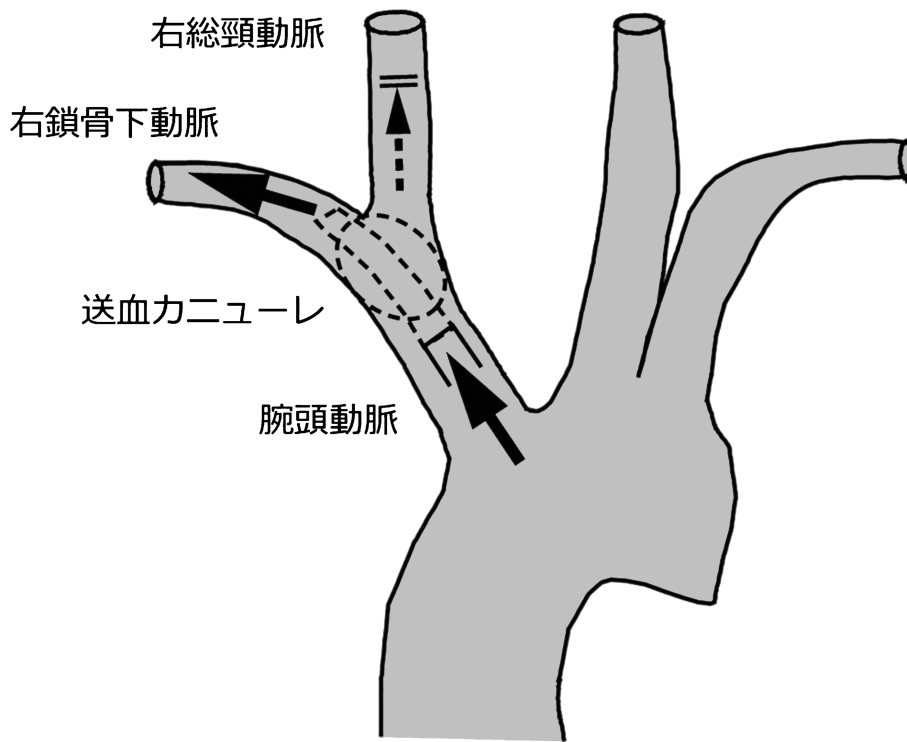


図 1

胸部大動脈瘤弓部全置換術の連続患者 35 例において、送血カニューレの位置異常を 4 例 (11.4%) 認めたと報告されている。送血カニューレの位置異常により右総頸動脈への血流を阻害する可能性がある。(文献 56 より引用)

脳保護の目的で行われるが、咽頭温 14-20℃ の超低体温においても虚血許容時間は 20-30 分程度と<sup>54,55)</sup>、手術操作が長時間に及ぶ場合には、DHCA 単独では脳保護は困難である。そのため、弓部分枝へ選択的に送血カニューレを挿入し脳灌流を行う ACP が行われるが、送血カニューレ挿入操作による血管壁の剥離による塞栓症や、送血カニューレの位置異常 (malposition) による脳虚血の危険がある<sup>56)</sup> (図 1)。また通常の脳循環に対して逆行する静脈側から灌流を行う RCP は、脳梗塞の発生率を DHCA と比較すると循環停止時間が 40 分超えた症例で RCP を用いた症例では 1.7%、DHCA 単独の症例で 30% と、RCP により虚血許容時間が延長することが示されている<sup>57)</sup>。一方で、脳循環に対する非生理的な灌流は、脳浮腫きたす可能性があるため<sup>58)</sup>、上大静脈からの灌流量は 400 ml/min を越えず、灌流圧を 15-25 mmHg で維持するが多い<sup>59)</sup>。

本邦における ACP と RCP の比較では、大動脈解離や胸部大動脈瘤破裂を除いた弓部全置換術で、術後脳梗塞の発生率は ACP 7.0%、RCP 8.5% で差を認めていない<sup>60)</sup>。また、Stanford A 型急性大動脈解離手術を対象にした場合、術後脳梗塞の発生率は ACP 11.2%、RCP 9.7%、その他の中枢神経障害 (一過性の脳障害や昏睡、対麻痺) を含めると ACP 18.6%、RCP 18.2% であり、いずれの脳保護法でも差がなかったものの、脳障害の発生率自体は高率であった<sup>11)</sup>。

脳虚血を来しやすい病態として、急性大動脈解離や胸部大動脈瘤破裂がある。2013 年の本邦における Stanford A 型急性大動脈解離手術における在院死亡率は 9.1%、胸部大動脈瘤破裂では 22.2% と依然高率であり<sup>61)</sup>、その原因に偽腔の拡大による弓部分枝血管の狭窄や閉塞、心タンポナーデや心筋虚血および大量出血による循環不全に伴う脳虚血が挙げられる<sup>62)</sup> (図 2)。特に大動脈解離では、脳低灌流により術前から脳神経症状を呈する場合があります。そのような患者の 45% では、術後に完全な神経学的回復は得られないとの報告がある<sup>63)</sup>。

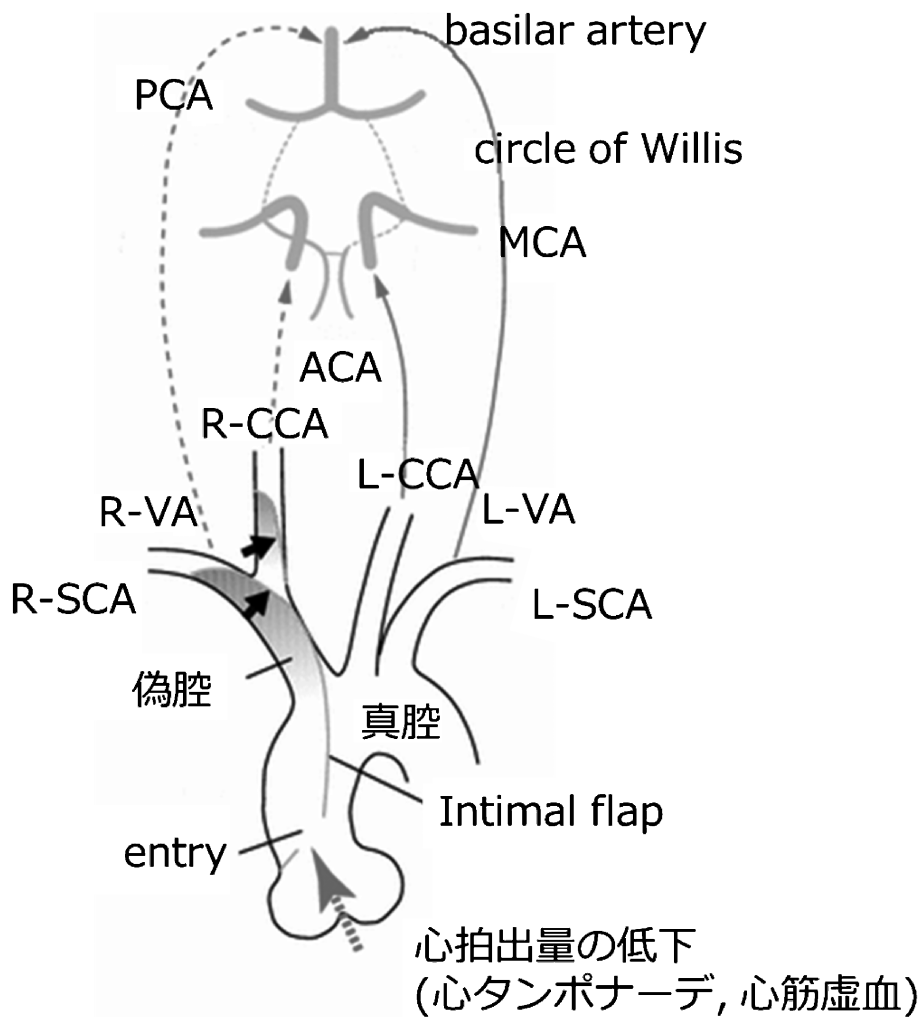


図2 Stanford A型急性大動脈解離における脳灌流異常 (cerebral malperfusion) の発生機序

腕頭動脈へ偽腔が拡大・進展し内腔を閉塞することで、右総頸動脈、右鎖骨下動脈（右椎骨動脈）への血流が途絶する。また心タンポナーデや心筋虚血による心拍出量の低下がさらに右大脳半球の脳虚血を助長する。（文献 62 より引用）

PCA = posterior cerebral artery, MCA = middle cerebral artery, CCA = common carotid artery, SCA = subclavian artery, VA = vertebral artery

### (3) 心臓手術

#### <Summary statement>

- 人工心肺下心臓手術において、送血管の挿入操作や大動脈遮断や解除など機械的操作により動脈解離や塞栓症が生じた場合には、脳虚血の原因となる。
- 塞栓症は、低血圧や心拍出量の低下で脳低灌流を伴うと、脳障害が重篤化する恐れがある。

#### <解説>

心臓手術で人工心肺を用いる場合は、送血管の挿入や大動脈遮断や解除などの機械的操作が必要であるが、これらが術中脳虚血の原因に関与する。送血管の挿入操作により、動脈解離を生じることがある。その頻度は、0.23%であり、まれな合併症であるが、一旦生じると在院死亡率は43%と上昇する<sup>64)</sup>。また、人工心肺、大動脈遮断や解除などの機械的操作に伴って、空気や粥状硬化片、脂肪、血小板凝集などの栓子の一部が脳循環に入る塞栓症が生じる<sup>65,66)</sup>。さらに術中の低血圧や心拍出量の低下で生じる脳低灌流により、虚血に弱いとされる watershed area (分水嶺領域) の微小塞栓を washout できないことが脳虚血の発生機序において重要と考えられている<sup>67,68)</sup>。通常、人工心肺中の灌流圧は、脳血流の自動調節能が 50 mmHg 以上で保たれることに基づき平均動脈圧 50-70 mmHg で維持されるが、CABG 患者 248 例において人工心肺中の灌流圧

を 50–60 mmHg で維持した 124 例と 80–100 mmHg と高く維持した 124 例を比較した報告では、6 ヶ月後の死亡率はそれぞれ 4.0% vs. 1.6%, 脳梗塞では 7.2% vs. 2.4% と人工心肺中の灌流圧を高く維持した症例で良好であった<sup>69)</sup>。一方で、人工心肺中の高い灌流圧は、栓子の数を増加させ<sup>70)</sup>、脳浮腫や脳出血の危険性も指摘される<sup>71)</sup>。また、高齢患者や高血圧、糖尿病など合併するハイリスク患者における自動調節能の下限については患者個々のばらつきも大きいことも報告されており<sup>72)</sup>、人工心肺中の至適灌流圧については未だ明確ではない。

## 参考文献

- 1) Mashour GA, Shanks AM, Kheterpal S. Perioperative stroke and associated mortality after noncardiac, nonneurologic surgery. *Anesthesiology*. 2011; 114: 1289–96.
- 2) Hill MD, Brooks W, Mackey A, Clark WM, Meschia JF, Morrish WF, Mohr JP, Rhodes JD, Popma JJ, Lal BK, Longbottom ME, Voeks JH, Howard G, Brott TG; CREST Investigators. Stroke after carotid stenting and endarterectomy in the Carotid Revascularization Endarterectomy versus Stenting Trial (CREST). *Circulation*. 2012; 126: 3054–61.
- 3) Heyer EJ, Mergeche JL, Bruce SS, Ward JT, Stern Y, Anastasian ZH, Quest DO, Solomon RA, Todd GJ, Benvenisty AI, McKinsey JF, Nowygrod R, Morrissey NJ, Connolly ES. Statins reduce neurologic injury in asymptomatic carotid endarterectomy patients. *Stroke*. 2013; 44: 1150–2.
- 4) Barbeta I, Carmo M, Mercandalli G, Lattuada P, Mazzaccaro D, Settembrini AM, Dallatana R, Settembrini PG. Outcomes of urgent carotid endarterectomy for stable and unstable acute neurologic deficits. *J Vasc Surg*. 2014; 59: 440–6.
- 5) 高瀬信弥, 横山 齊. CABG の今後の役割と目指すべき方向性～ SYNTAX 試験, 欧米のガイドライン, 日本循環器ガイドラインなどの考察を含めて～. *冠疾患誌*. 2013; 19: 301–305.
- 6) Tarakji KG, Sabik JF 3rd, Bhudia SK, Batizy LH, Blackstone EH. Temporal onset, risk factors, and outcomes associated with stroke after coronary artery bypass grafting. *JAMA*. 2011; 305: 381–90.
- 7) Mérie C, Køber L, Olsen PS, Andersson C, Jensen JS, Torp-Pedersen C. Risk of stroke after coronary artery bypass grafting: effect of age and comorbidities. *Stroke*. 2012; 43: 38–43.
- 8) Shahian DM, O'Brien SM, Filardo G, Ferraris VA, Haan CK, Rich JB, Normand SL, DeLong ER, Shewan CM, Dokholyan RS, Peterson ED, Edwards FH, Anderson RP; Society of Thoracic Surgeons Quality Measurement Task Force. The Society of Thoracic Surgeons 2008 cardiac surgery risk models: part 3—valve plus coronary artery bypass grafting surgery. *Ann Thorac Surg*. 2009; 88: S43–62.
- 9) O'Brien SM, Shahian DM, Filardo G, Ferraris VA, Haan CK, Rich JB, Normand SL, DeLong ER, Shewan CM, Dokholyan RS, Peterson ED, Edwards FH, Anderson RP; Society of Thoracic Surgeons Quality Measurement Task Force. The Society of Thoracic Surgeons 2008 cardiac surgery risk models: part 2—isolated valve surgery. *Ann Thorac Surg*. 2009; 88: S23–42.
- 10) Hu Z, Wang Z, Ren Z, Wu H, Zhang M, Zhang H, Hu X. Similar cerebral protective effectiveness of antegrade and retrograde cerebral perfusion combined with deep hypothermia circulatory arrest in aortic arch surgery: a meta-analysis and systematic review of 5060 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2014; 148: 544–60.
- 11) Tokuda Y, Miyata H, Motomura N, Oshima H, Usui A, Takamoto S; Japan Adult Cardiovascular Database Organization. Brain protection during ascending aortic repair for Stanford type A acute aortic dissection surgery. Nationwide analysis in Japan. *Circ J*. 2014; 78: 2431–8.
- 12) Knowles M, Murphy EH, Dimaio JM, Modrall JG, Timaran CH, Jessen ME, Arko FR 3rd. The effects of operative indication and urgency of intervention on patient outcomes after thoracic aortic endografting. *J Vasc Surg*. 2011; 53: 926–34.
- 13) Patterson BO, Holt PJ, Nienaber C, Fairman RM, Heijmen RH, Thompson MM. Management of the left subclavian artery and neurologic complications after thoracic endovascular aortic repair. *J Vasc Surg*. 2014; 60: 1491–7.
- 14) Zahn R, Erbel R, Nienaber CA, Neumann FJ, Nef H, Eggebrecht H, Senges J. Endovascular aortic repair of thoracic aortic disease: early and 1-year results from a German multicenter registry. *J Endovasc Ther*. 2013; 20: 265–72.
- 15) Daneault B, Kirtane AJ, Kodali SK, Williams MR, Genereux P, Reiss GR, Smith CR, Moses JW, Leon MB. Stroke associated with surgical and transcatheter treatment of aortic stenosis: a comprehensive review. *J Am Coll Cardiol*. 2011; 58: 2143–50.
- 16) Roach GW, Kanchuger M, Mangano CM, Newman M, Nussmeier N, Wolman R, Aggarwal A, Marschall K, Graham SH, Ley C. Adverse cerebral outcomes after coronary bypass surgery. Multicenter Study of Perioperative Ischemia Research Group and the Ischemia Research and Education Foundation Investigators. *N Engl J Med*. 1996; 335: 1857–63.
- 17) Martin BJ, Buth KJ, Arora RC, Baskett RJ. Delirium: a cause for concern beyond the immediate postoperative period. *Ann Thorac Surg*. 2012; 93: 1114–20.
- 18) Gottesman RF, Grega MA, Bailey MM, Pham LD, Zeger SL, Baumgartner WA, Selnes OA, McKhann GM. Delirium after coronary artery bypass graft surgery and late mortality. *Ann Neurol*. 2010; 67: 338–44.
- 19) Saczynski JS, Marcantonio ER, Quach L, Fong TG, Gross A, Inouye SK, Jones RN. Cognitive trajectories after postoperative delirium. *N Engl J Med*. 2012; 367: 30–9.
- 20) Kazmierski J, Kowman M, Banach M, Fendler W, Okonski P, Banys A, Jaszewski R, Rysz J, Mikhailidis DP, Sobow T, Kłoszewska I; IPDACS Study. Incidence and predictors of delirium after cardiac surgery: Results from The IPDACS Study. *J*

- Psychosom Res. 2010; 69: 179–85.
- 21) Rudolph JL, Inouye SK, Jones RN, Yang FM, Fong TG, Levkoff SE, Marcantonio ER. Delirium: an independent predictor of functional decline after cardiac surgery. *J Am Geriatr Soc.* 2010; 58: 643–9.
  - 22) Milstein A, Pollack A, Kleinman G, Barak Y. Confusion/delirium following cataract surgery: an incidence study of 1-year duration. *Int Psychogeriatr.* 2002; 14: 301–6.
  - 23) Mann C, Pouzeratte Y, Boccarda G, Peccoux C, Vergne C, Brunat G, Domergue J, Millat B, Colson P. Comparison of intravenous or epidural patient-controlled analgesia in the elderly after major abdominal surgery. *Anesthesiology.* 2000; 92: 433–41.
  - 24) Kaneko T, Takahashi S, Naka T, Hirooka Y, Inoue Y, Kaibara N. Postoperative delirium following gastrointestinal surgery in elderly patients. *Surg Today.* 1997; 27: 107–11.
  - 25) Fisher BW, Flowerdew G. A simple model for predicting postoperative delirium in older patients undergoing elective orthopedic surgery. *J Am Geriatr Soc.* 1995; 43: 175–8.
  - 26) Weed HG, Lutman CV, Young DC, Schuller DE. Preoperative identification of patients at risk for delirium after major head and neck cancer surgery. *Laryngoscope.* 1995; 105: 1066–8.
  - 27) Marcantonio ER, Goldman L, Mangione CM, Ludwig LE, Muraca B, Haslauer CM, Donaldson MC, Whittemore AD, Sugarbaker DJ, Poss R, Haas S, Cook EF, Orav EJ, Lee TH. A clinical prediction rule for delirium after elective noncardiac surgery. *JAMA.* 1994; 271: 134–9.
  - 28) Schneider F, Böhner H, Habel U, Salloum JB, Stierstorfer A, Hummel TC, Miller C, Friedrichs R, Müller EE, Sandmann W. Risk factors for postoperative delirium in vascular surgery. *Gen Hosp Psychiatry.* 2002; 24: 28–34.
  - 29) Böhner H, Hummel TC, Habel U, Miller C, Reinbott S, Yang Q, Gabriel A, Friedrichs R, Müller EE, Ohmann C, Sandmann W, Schneider F. Predicting delirium after vascular surgery: a model based on pre- and intraoperative data. *Ann Surg.* 2003; 238: 149–56.
  - 30) Benoit AG, Campbell BI, Tanner JR, Staley JD, Wallbridge HR, Biehl DR, Bradley BD, Louridas G, Guzman RP, Fromm RA. Risk factors and prevalence of perioperative cognitive dysfunction in abdominal aneurysm patients. *J Vasc Surg.* 2005; 42: 884–90.
  - 31) Johnson T, Monk T, Rasmussen LS, Abildstrom H, Houx P, Korttila K, Kuipers HM, Hanning CD, Siersma VD, Kristensen D, Canet J, Ibañez MT, Moller JT; ISPOCD2 Investigators. Postoperative cognitive dysfunction in middle-aged patients. *Anesthesiology.* 2002; 96: 1351–7.
  - 32) Canet J, Raeder J, Rasmussen LS, Enlund M, Kuipers HM, Hanning CD, Jolles J, Korttila K, Siersma VD, Dodds C, Abildstrom H, Sneyd JR, Vila P, Johnson T, Muñoz Corsini L, Silverstein JH, Nielsen IK, Moller JT; ISPOCD2 investigators. Cognitive dysfunction after minor surgery in the elderly. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2003; 47: 1204–10.
  - 33) van Dijk D, Keizer AM, Diephuis JC, Durand C, Vos LJ, Hijman R. Neurocognitive dysfunction after coronary artery bypass surgery: a systematic review. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2000; 120: 632–9.
  - 34) Newman MF, Kirchner JL, Phillips-Bute B, Gaver V, Grocott H, Jones RH, Mark DB, Reves JG, Blumenthal JA; Neurological Outcome Research Group and the Cardiothoracic Anesthesiology Research Endeavors Investigators. Longitudinal assessment of neurocognitive function after coronary-artery bypass surgery. *N Engl J Med.* 2001; 344: 395–402.
  - 35) Rasmussen LS, Larsen K, Houx P, Skovgaard LT, Hanning CD, Moller JT; ISPOCD group. The International Study of Postoperative Cognitive Dysfunction. The assessment of postoperative cognitive function. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2001; 45: 275–89.
  - 36) Rudolph JL, Schreiber KA, Culley DJ, McGlinchey RE, Crosby G, Levitsky S, Marcantonio ER. Measurement of postoperative cognitive dysfunction after cardiac surgery: a systematic review. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2010; 54: 663–77.
  - 37) Bucerius J, Gummert JF, Borger MA, Walther T, Doll N, Onnasch JF, Metz S, Falk V, Mohr FW. Stroke after cardiac surgery: a risk factor analysis of 16,184 consecutive adult patients. *Ann Thorac Surg.* 2003; 75: 472–8.
  - 38) Anyanwu AC, Filsoufi F, Salzberg SP, Bronster DJ, Adams DH. Epidemiology of stroke after cardiac surgery in the current era. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2007; 134: 1121–7.
  - 39) Dacey LJ, Likosky DS, Leavitt BJ, Lahey SJ, Quinn RD, Hernandez F Jr, Quinton HB, Desimone JP, Ross CS, O'Connor GT; Northern New England Cardiovascular Disease Study Group. Perioperative stroke and long-term survival after coronary bypass graft surgery. *Ann Thorac Surg.* 2005; 79: 532–6.
  - 40) McKhann GM, Grega MA, Borowicz LM Jr, Baumgartner WA, Selnes OA. Stroke and encephalopathy after cardiac surgery: an update. *Stroke.* 2006; 37: 562–71.
  - 41) Newman MF, Grocott HP, Mathew JP, White WD, Landolfo K, Reves JG, Laskowitz DT, Mark DB, Blumenthal JA; Neurologic Outcome Research Group and the Cardiothoracic Anesthesia Research Endeavors (CARE) Investigators of the Duke Heart Center. Report of the substudy assessing the impact of neurocognitive function on quality of life 5 years after cardiac surgery. *Stroke.* 2001; 32: 2874–81.
  - 42) Barnett HJ, Taylor DW, Eliasziw M, Fox AJ, Ferguson GG, Haynes RB, Rankin RN, Clagett GP, Hachinski VC, Sackett DL, Thorpe KE, Meldrum HE, Spence JD. Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators. *N Engl J Med.* 1998; 339: 1415–25.
  - 43) Risk of stroke in the distribution of an asymptomatic carotid artery. The European Carotid Surgery Trialists Collaborative Group. *Lancet.* 1995; 345: 209–12.
  - 44) Randomised trial of endarterectomy for recently symptomatic carotid stenosis: final results of the MRC European Carotid Surgery Trial (ECST). *Lancet.* 1998; 351: 1379–87.

- 45) Endarterectomy for asymptomatic carotid artery stenosis. Executive Committee for the Asymptomatic Carotid Atherosclerosis Study. *JAMA*. 1995; 273: 1421–8.
- 46) Hobson RW 2nd, Weiss DG, Fields WS, Goldstone J, Moore WS, Towne JB, Wright CB. Efficacy of carotid endarterectomy for asymptomatic carotid stenosis. The Veterans Affairs Cooperative Study Group. *N Engl J Med*. 1993; 328: 221–7.
- 47) Mayberg MR, Wilson SE, Yatsu F, Weiss DG, Messina L, Hershey LA, Colling C, Eskridge J, Deykin D, Winn HR. Carotid endarterectomy and prevention of cerebral ischemia in symptomatic carotid stenosis. Veterans Affairs Cooperative Studies Program 309 Trialist Group. *JAMA*. 1991; 266: 3289–94.
- 48) Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators. *N Engl J Med*. 1991; 325: 445–53.
- 49) Rothwell PM, Gibson RJ, Slattery J, Sellar RJ, Warlow CP. Prognostic value and reproducibility of measurements of carotid stenosis. A comparison of three methods on 1001 angiograms. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke*. 1994; 25: 2440–4.
- 50) 日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会：脳卒中治療ガイドライン 2015. 第1版. 協和企画, 2015.
- 51) Kretz B, Abello N, Bouchot O, Kazandjian C, Beaumont M, Terriat B, Bernard A, Brenot R, Steinmetz E. Risk index for predicting shunt in carotid endarterectomy. *Ann Vasc Surg*. 2014; 28: 1204–12.
- 52) Aburahma AF, Mousa AY, Stone PA. Shunting during carotid endarterectomy. *J Vasc Surg*. 2011; 54: 1502–10.
- 53) Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, Hosoda K, Iihara K, Toyoda K, Sakai C, Nagata I, Ogawa A; Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study Group. Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg*. 2007; 107: 1130–6.
- 54) Stecker MM, Cheung AT, Pochettino A, Kent GP, Patterson T, Weiss SJ, Bavaria JE. Deep hypothermic circulatory arrest: I. Effects of cooling on electroencephalogram and evoked potentials. *Ann Thorac Surg*. 2001; 71: 14–21.
- 55) James ML, Andersen ND, Swaminathan M, Phillips–Bute B, Hanna JM, Smigla GR, Barfield ME, Bhattacharya SD, Williams JB, Gaca JG, Husain AM, Hughes GC. Predictors of electrocerebral inactivity with deep hypothermia. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2014; 147: 1002–7.
- 56) Orihashi K, Sueda T, Okada K, Imai K. Malposition of selective cerebral perfusion catheter is not a rare event. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2005; 27: 644–8.
- 57) Safi HJ, Miller CC 3rd, Lee TY, Estrera AL. Repair of ascending and transverse aortic arch. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2011; 142: 630–3.
- 58) Harris DN, Bailey SM, Smith PL, Taylor KM, Oatridge A, Bydder GM. Brain swelling in first hour after coronary artery bypass surgery. *Lancet*. 1993; 342: 586–7.
- 59) Usui A, Oohara K, Liu TL, Murase M, Tanaka M, Takeuchi E, Abe T. Determination of optimum retrograde cerebral perfusion conditions. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1994; 107: 300–8.
- 60) Okita Y, Miyata H, Motomura N, Takamoto S; Japan Cardiovascular Surgery Database Organization. A study of brain protection during total arch replacement comparing antegrade cerebral perfusion versus hypothermic circulatory arrest, with or without retrograde cerebral perfusion: analysis based on the Japan Adult Cardiovascular Surgery Database. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2015 ; 149: S65–73.
- 61) Committee for Scientific Affairs, The Japanese Association for Thoracic Surgery, Masuda M, Kuwano H, Okumura M, Arai H, Endo S, Doki Y, Kobayashi J, Motomura N, Nishida H, Saiki Y, Tanaka F, Tanemoto K, Toh Y, Yokomise H. Thoracic and cardiovascular surgery in Japan during 2013: Annual report by The Japanese Association for Thoracic Surgery. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*. 2015 ; 63: 670–701.
- 62) Orihashi K. Cerebral malperfusion in acute aortic dissection. *Surg Today*. 2016 (in press).
- 63) Most H, Reinhard B, Gahl B, Englberger L, Kadner A, Weber A, Schmidli J, Carrel TP, Huber C. Is surgery in acute aortic dissection type A still contraindicated in the presence of preoperative neurological symptoms? *Eur J Cardiothorac Surg*. 2015; 48: 945–50.
- 64) Fleck T, Ehrlich M, Czerny M, Wolner E, Grabenwoger M, Grimm M. Intraoperative iatrogenic type A aortic dissection and perioperative outcome. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2006; 5: 11–4.
- 65) Ura M, Sakata R, Nakayama Y, Goto T. Ultrasonographic demonstration of manipulation–related aortic injuries after cardiac surgery. *J Am Coll Cardiol*. 2000; 35: 1303–10.
- 66) Kapetanakis EI, Stamou SC, Dullum MK, Hill PC, Haile E, Boyce SW, Bafi AS, Petro KR, Corso PJ. The impact of aortic manipulation on neurologic outcomes after coronary artery bypass surgery: a risk–adjusted study. *Ann Thorac Surg*. 2004; 78: 1564–71.
- 67) Caplan LR, Hennerici M. Impaired clearance of emboli (washout) is an important link between hypoperfusion, embolism, and ischemic stroke. *Arch Neurol*. 1998; 55: 1475–82.
- 68) Gottesman RF, Sherman PM, Grega MA, Yousem DM, Borowicz LM Jr, Selnes OA, Baumgartner WA, McKhann GM. Watershed strokes after cardiac surgery: diagnosis, etiology, and outcome. *Stroke*. 2006; 37: 2306–11.
- 69) Gold JP, Charlson ME, Williams–Russo P, Sztatowski TP, Peterson JC, Pirraglia PA, Hartman GS, Yao FS, Hollenberg JP, Barbut D, et al. Improvement of outcomes after coronary artery bypass. A randomized trial comparing intraoperative high versus low mean arterial pressure. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1995; 110: 1302–11.
- 70) Hogue CW Jr, Palin CA, Arrowsmith JE. Cardiopulmonary bypass management and neurologic outcomes: an evidence–based appraisal of current practices. *Anesth Analg*. 2006; 103: 21–37.

- 71) Laffey JG, Boylan JF, Cheng DC. The systemic inflammatory response to cardiac surgery: implications for the anesthesiologist. *Anesthesiology*. 2002; 97: 215–52.
- 72) Brady K, Joshi B, Zweifel C, Smielewski P, Czosnyka M, Easley RB, Hogue CW Jr. Real-time continuous monitoring of cerebral blood flow autoregulation using near-infrared spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass. *Stroke*. 2010; 41: 1951–6.

## 2. 小児心臓手術における脳障害

### 1) 遺伝子異常に伴う先天性心血管疾患と脳障害

#### <Summary statement>

- 小児の心臓手術症例では遺伝子異常から脳の発達障害（器質的障害と機能的障害）を伴っている症例が含まれる。
- 器質的障害を伴う疾患として脳梁發育不全， Dandy-Walker 症候群， 中脳水道狭窄 22q11.2 欠失症候群などがあり， 機能的障害（精神発達遅滞）を伴う疾患として 21 トリソミーや 18 トリソミーがある。
- これらの症例の発達障害が， 心臓手術を行うことによってより増悪するかどうかは明確にされていない。

#### <解説>

小児の心臓手術での特徴は，成人と異なり遺伝子の異常からあらかじめ脳の発達障害（器質的障害と機能的障害）を伴っている症例が含まれることである。器質的障害を伴う疾患として脳梁發育不全， Dandy-Walker 症候群（第 4 脳室と連続した後頭蓋窩正中の嚢胞と小脳虫部の完全あるいは部分欠損を認める先天的病変），中脳水道狭窄<sup>1)</sup>や 22q11.2 欠失症候群（第 22 番染色体長腕 q11.2 領域の微細欠失， DiGeorge 症候群も含まれる）は小児心臓疾患の 5–10% に合併していると考えられている<sup>2)</sup>。とくに 22q11.2 欠失症候群は様々な脳の異常（脳皮質形成不全，白質嚢胞性病変，前弁蓋部の閉鎖不全，脊髄髄膜瘤合併）と様々な心疾患（ファロー四徴症，心室中隔欠損，大動脈離断症，総動脈管症）を合併する。また，脳の機能的障害（精神発達遅滞）を伴う 21 トリソミーのうち 40% は心室中隔欠損と共通房室弁口などを合併する。同様に 18 トリソミーも心室中隔欠損，心房中隔欠損，動脈管開存などの単純な左右短絡疾患や大動脈狭窄，両大血管右室起始などの複雑型心疾患を合併する。これらの症例は心臓の手術施行の有無にかかわらず発達障害を併発するが，術前から明確な診断が行われていない場合は心臓手術後の脳障害との鑑別が困難な場合がある。しかし，心臓手術を行うことによって脳の発達障害のさらなる増悪が起こるかどうかは十分検討されていない。

### 2) 先天性心臓血管疾患と合併する脳障害

#### <Summary statement>

- 遺伝子異常がなくても新生児は早産による未熟脳や出生後の低酸素低心拍出量と低血圧による脳障害を合併している場合がある。
- 左心低形成や大動脈縮窄症，及び大血管転位症で脳の異常を合併していることが多い。
- 術前からの脳の異常所見と心臓血管手術後の新たな異常所見は関連するという報告としないという報告があり見解は一致していない。

#### <解説>

遺伝子異常がなくても新生児には 2 つの理由によりあらかじめ術前から脳の障害を起こしやすい生理的／解剖学的環境にある。一つは新生児が早産（多くは 35 週未満）の場合の未熟脳であり，もう一つは出生後の合併する心臓血管疾患に伴う低酸素低心拍出量と低血圧で起こる。

67 人の先天性心疾患合併心臓予定手術症例において新生児の脳を出生後術前の magnetic resonance imaging (MRI) からその未熟性を評価（髄鞘形成の有無，cortical infolding の有無，胚芽層の形成状態，グリア

細胞の移動相の形成状態)し、さらに術前のMRIで評価された脳の9カテゴリーの異常(白質障害,脳梗塞,脳実質内の出血あるいは出血性梗塞,点状病変,乳酸上昇領域,硬膜下出血,硬膜静脈洞内血栓,脳室内出血,先天異常)を検討すると脳の未熟性と脳の異常所見は強い関連がある(特に白質障害)。さらにこれらの症例の心臓血管手術後24人(36%)に新たな白質障害,出血,梗塞が起こり,予後を含めて術前の未熟性との関連が示されている<sup>3)</sup>。また早産児の側脳室周囲には脳室上衣下胚芽層が厚く存在し,ここに循環の変動が加わって上衣下出血が起こりやすく,脳室内出血となることが多い<sup>4)</sup>。

出生後の脳超音波検査では遺伝子異常のない症例かつほぼ満期で生まれた新生児症例のうち先天性心疾患を合併した症例の42%に脳の異常が検出されている<sup>5)</sup>。とくに左心低形成には30%の脳の異常が合併する。また大動脈縮窄症にも脳合併症が多い。多くは出生後に心機能低下や心内シャントによる中心静脈圧の上昇,チアノーゼが加わって脳への低酸素や低灌流が起こり脳障害をきたすとされている。出生前から心臓血管奇形による出生後の低酸素や低灌流が予測されないと出生後に酸素投与の遅れなどから脳障害は増悪する可能性がある。また出生時のアプガースコアも脳障害と関連すると考えられている<sup>6)</sup>。

脳低灌流に脆弱なwatershed areaは通常的新生児では傍矢状部の大脳皮質であるが,早産児では脳室周囲の白質となる。そのため左心低形成を含んだ24例の新生児のMRI検査では術前から脳室周囲の白質異常が16%,同部位の梗塞が8%,術後は前者が48%,新たな梗塞が19%,脳実質の出血が33%に起こり全体として67%の新生児に術後新たな病変が見つかった<sup>7)</sup>。別の62例の研究では術前に11例(18%)に白質病変が検出され術後は26%に増加し中大脳動脈領域の梗塞も検出されている<sup>8)</sup>。左心低形成に対してNorwood手術をした22例に限定すると術前は5例23%でMRI上の異常所見(広範囲の脳室周囲所見,左右前頭葉梗塞,脳出血)があり,術後73%で新たにMRIで異常所見(脳室周囲の白質異常,局所の虚血,出血性梗塞症例)が検出されている。大血管転位症も脳障害が多く術後の皮質層状壊死,脳室周囲白質障害,白質障害,小脳や基底核の障害が報告されている。この疾患はあらかじめballoon atrial septostomy(心房間交通を増やすことによって,心房レベルでの血液混合を増加させたり,肺血流を増加させるために行なわれる手技で重篤な脳低酸素があらかじめ合併していることを意味する)が行われた症例ほど術前からの脳障害が強い<sup>8)</sup>。

しかし,術前から存在する脳の異常所見と心臓血管手術後新たに検出される異常所見に関しては関連するという報告<sup>8)</sup>としないという報告<sup>9)</sup>があり見解は一致していない。

### 3) 小児心臓血管手術に伴う脳障害とその危険因子

#### <Summary statement>

- 小児心臓手術後の脳障害は2-25%である。
- 超低体温循環停止が40分を超えると脳障害が増悪する。
- Regional low-flow cerebral perfusion や pH-stat の併用は脳障害を軽減させる。
- 術後の低血圧,低心拍出量や低酸素も脳障害の原因となる。

#### <解説>

小児心臓手術での有症候性の脳障害の発生は2-25%と報告されている<sup>1)</sup>。小児では複雑心奇形に対する手術中の無血野を得るためDHCAがしばしば用いられる。しかしDHCAが40分を超えると,脳室周囲白質軟化症や脳梗塞が増加する。そのため腕頭動脈から片側的に脳循環をする方法(regionally low-flow cerebral perfusion)が行われDHCAより神経学的合併症が少ないことが示されている<sup>10)</sup>。小児では人工心肺にはpH-statが用いられpH-statによる脳血管拡張による冷却効果から脳障害の軽減が報告されている<sup>11)</sup>。また,小児では循環血液量に対して人工心肺の回路に暴露される血液量が多くなるため炎症反応や活性酸素がより産生されやすく新生児の脳に障害を与えている可能性がある。

さらに,小児の場合は術前だけでなく術後の循環の不安定性(低血圧低心拍出量)や低酸素が原因で白質病変を合併することが報告されている<sup>8)</sup>。

## 参考文献

- 1) du Plessis AJ: Mechanisms of brain injury during infant cardiac surgery. *Semin Pediatr Neurol* 1999; 6: 32-47.
- 2) Strauss AW, Johnson MC: The genetic basis of pediatric cardiovascular disease. *Semin Perinatol* 1996; 20: 564-76.
- 3) Andropoulos DB, Hunter JV, Nelson DP, Stayer SA, Stark AR, McKenzie ED, Heinle JS, Graves DE, Fraser CD, Jr.: Brain-immaturity is associated with brain injury before and after neonatal cardiac surgery with high-flow bypass and cerebral oxygenation monitoring. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010; 139: 543-56.
- 4) Papile LA, Burstein J, Burstein R, Koffler H: Incidence and evolution of subependymal and intraventricular hemorrhage: a study of infants with birth weight less than 1,500 gm. *J Pediatr* 1978; 92: 529-534.
- 5) Te Pas AB, van Wezel-Meijler G, Bokenkamp-Gramann R, Walther FJ: Preoperative cranial ultrasound findings in infants with major congenital heart disease. *Acta Paediatr* 2005; 94: 1597-603.
- 6) Laptook AR, Shankaran S, Ambalavanan N, Carlo WA, McDonald SA, Higgins RD, Das A, the Hypothermia Subcommittee of the NICD Neonatal Research Network: Outcome of Term Infants Using Apgar Scores at 10 Minutes Following Hypoxic-Ischemic Encephalopathy. *Pediatrics* 2009; 124: 1619.
- 7) Mahle WT, Tavani F, Zimmerman RA, Nicolson SC, Galli KK, Gaynor JW, Clancy RR, Montenegro LM, Spray TL, Chiavacci RM, Wernovsky G, Kurth CD: An MRI study of neurological injury before and after congenital heart surgery. *Circulation* 2002; 106: 1109-14.
- 8) McQuillen PS, Barkovich AJ, Hamrick SE, Perez M, Ward P, Glidden DV, Azakie A, Karl T, Miller SP: Temporal and anatomic risk profile of brain injury with neonatal repair of congenital heart defects. *Stroke* 2007; 38: 736-41.
- 9) Dent CL, Spaeth JP, Jones BV, Schwartz SM, Glauser TA, Hallinan B, Pearl JM, Khoury PR, Kurth CD: Brain magnetic resonance imaging abnormalities after the Norwood procedure using regional cerebral perfusion. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 190-7.
- 10) Andropoulos DB, Diaz LK, Fraser CD, Jr., McKenzie ED, Stayer SA: Is bilateral monitoring of cerebral oxygen saturation necessary during neonatal aortic arch reconstruction? *Anesth Analg* 2004; 98: 1267-72, table of contents.
- 11) Abdul Aziz KA, Meduoye A: Is pH-stat or alpha-stat the best technique to follow in patients undergoing deep hypothermic circulatory arrest? *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010; 10: 271-82.

## 3. 近赤外線脳酸素モニターの基本

### 1) 測定原理

#### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターは、近赤外光の特徴である高い組織透過性を利用している。
- 組織内へ入射した近赤外光は酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンに吸収されるが2種類のヘモグロビンの近赤外光に対する吸光特性は異なりその違いを利用して組織の酸素飽和度を測定している。
- 測定原理には modified Beer Lambert 法 (MBL 法), 空間分解分光法, 時間分解分光法がある。

#### <解説>

##### (1) ヘモグロビンの吸光スペクトルおよび測定機種

近赤外線脳酸素モニターの測定原理は、近赤外光の特徴である高い組織透過性を利用している。すなわち、近赤外光は波長が約 700-1000 nm の光で、可視光 (約 350-700 nm) より生体透過性が高い。組織内へ入射した近赤外光は酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンに吸収されるが2種類のヘモグロビンの近赤外光に対する吸光特性は異なり、その違いを利用して組織の酸素飽和度を測定している。

近赤外線脳酸素モニターによって測定された組織の酸素飽和度はパルスオキシメーターのような動脈血だけの成分を取り出して測定しているわけではなく、組織の静脈血も併せて測定し計算している。

表に現在使用可能な主な近赤外線脳酸素モニターの最新機種を掲載する。

表 各種近赤外線脳酸素モニター

機種名	INVOS™	NIRO®	FORE-SIGHT	TOS	SenSmart™	Regional Oximetry
最新バージョン	5100C	200NX	ELITE™	OR	X-100	03™
製造メーカー	Covidien (Medtronic)	浜松ホトニクス	CAS Medical System	フジタ医科器械	テルモ	Masimo
測定原理	rSO <sub>2</sub> に関しては非公開	TOI(空間分解分光法)	MBL 法	MBL 法	MBL 法	MBL 法
測定プローブ	デイスポ	DP はデイスポタイプ	デイスポ		デイスポ	デイスポ
近赤外光 (nm)	730, 810	735, 810, 850	690, 730, 770, 810, 870	770, 805, 870	730, 760, 810, 880	未公開
波長数	2	3	5	3	4	4
頭皮及び浅層部血流除外方法	30 mm 間の発光-受光器の情報から 40 mm 間の情報から差し引く	光路長を相殺	光路長を相殺	受光した信号の遅い成分を解析	発光部受光部を二つ	30 mm 間の発光-受光器の情報から 40 mm 間の情報から差し引く
特徴		MBL 法 (酸素化, 脱酸素化, 総ヘモグロビン)		長時間使用が可能	経皮的酸素飽和度が測定可能	既存の装置 (Root®) に装着可
対象年齢 (または体格)	成人, 小児, 新生児	成人, 小児	成人, 小児	成人, 小児, 新生児	40 kg 以上	40 kg 以上

## (2) 測定原理・方法

### a. Beer Lambert の法則

近赤外線脳酸素モニターによる脳組織の酸素飽和度測定の原理は Beer Lambert の法則が基本である。波長  $\lambda$  の吸光度 OD と入射光量 ( $I_0$ ) と透過光量 ( $I$ ) の関係は、 $\xi$  をモル吸光係数、 $c$  を吸光物質の濃度、 $d$  を光路長とすると

$$OD(\lambda) = \text{Lo} (g I_0/I) = (\xi \lambda) \cdot c \cdot d$$

となり、 $d$  がわかれば  $c$  の Hb 濃度を測定できる。しかし、生体組織では光は散乱するため MBL 法を用いる。

$$OD(\lambda) = \text{Lo} (g I_0/I) = (\xi \lambda) \cdot c \cdot d \cdot B + OD(\lambda)R$$

$B$  は散乱による光路長の延長を示す係数で  $OD(\lambda)R$  は光散乱のため失われる光量を示す。通常は  $d \cdot B$  の値は平均光路長として一定値で処理される。

### b. プローブ間距離, 頭皮血流の除外と光路長

一般に近赤外線脳酸素モニターの発光器と受光器は 30-50 mm の間隔をおいて留置されている。これは内頸動脈と外頸動脈にそれぞれ ICG (803 nm に吸光度を持つ) を注入した際発光器と受光器の間隔を変えて ICG の近赤外線脳酸素モニター値への影響を検討したところ、外頸動脈に注入した場合は測定プローブ間隔を 10 mm から 40 mm の間で広げても影響は同じで変化せず (この距離では同程度の外頸動脈の影響を受けることを意味する)、内頸動脈に注入した場合は 10 mm からプローブ間隔を広げるとその影響は大きくなり 40 mm でプラトーに達する (40 mm までは光は深達し脳内の血流をより反映することを意味する)。したがって成人では発光受光距離 40 mm が好ましい。

近赤外線脳酸素モニターから照射された近赤外光は頭皮や頭蓋骨を通過するため、そのままではこれらの組織の血流の影響を受けてしまう。したがって、これらの組織の影響を受けないような工夫がされている。INVOS™ 5100C や 03™ Regional Oximetry などは受光器を 2 つ設置し、40 mm の間隔に置かれた発光器受光器の情報から 30 mm 間隔間での情報を差し引いて rSO<sub>2</sub> が計算されている。TOS-OR は受光される光の早い成分は除外し遅い成分を利用して浅層からの影響を除外している。SenSmart™ X-100 は、発光器受光器を 2 つにして浅層の影響を除外している。

しかし受光器と発光器の間隔が 40 mm だからといって光路長は 40 mm でない。脳内に照射された光は 1.1 ns 後に 40 mm の距離での受光器から最も強く光を受け取ることから光路長は 24 cm と計算される<sup>2)</sup>。

### c. MBL 法を用いた近赤外線脳酸素モニター

ほとんどの機種が、MBL 法を用いて局所脳酸素飽和度 (regional cerebral oxygen saturation: rSO<sub>2</sub>) の測定

を行っている。浜松ホトニクス社 NIRO<sup>®</sup>-200NX は 3 波長の近赤外光から MBL 法を用い酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビン、総ヘモグロビン濃度の測定を行っている。CAS Medical System 社の FORE-SIGHT ELITE<sup>™</sup> はこの MBL の法則を発展させ、5 波長の近赤外光を用いて 5 つの計算式を用いることにより光路長を相殺している。したがって、FORE-SIGHT ELITE<sup>™</sup> で測定された rSO<sub>2</sub> は絶対値に近い値を測定していると推測されている (表)。

#### d. 空間分解分光法

ある点からの入射光に対して、距離の異なる複数の点で散乱反射光を測定する方法である (図 1)。この光の減衰率を測定することにより、光路長の因子を考慮することなく、酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビンの濃度を次式により測定することができる<sup>3)</sup>。

$$k \cdot c = \frac{1}{3\varepsilon(\lambda)} \cdot \left( \ln 10 \cdot \frac{\partial OD(\lambda)}{\partial \rho} - \frac{2}{\rho} \right)^2$$

この空間分解分光法を用いて NIRO<sup>®</sup>-200NX では組織酸素化指標 (tissue oxygenation index: TOI) が測定されている。

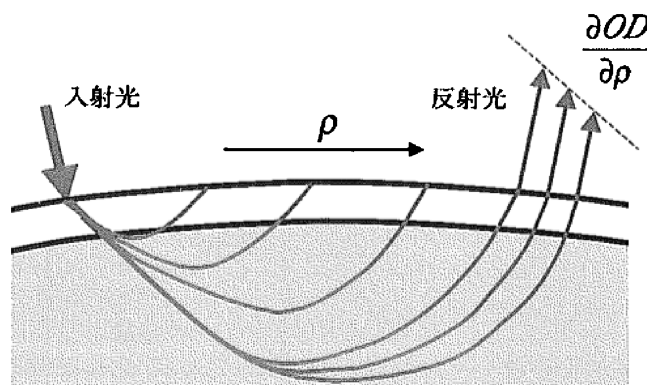


図 1 空間分解分光法 (SRS 法) での測定  
(文献 3 より引用)

#### e. その他の測定法

その他の NIRS の測定法としては時間分解分光法がある。時間分解分光法は短パルス光 (数百億分の 1 秒) の光を発射し受光器への光の時間応答から (光の速度は決まっているため) 測定対象の光路長が明確に算出できる。浜松ホトニクス社製の TRS-20<sup>2)</sup> および tNIRS-1 により測定が可能である。この方法は光路長が明確であるため測定される組織の酸素飽和度は絶対値に近い。

## 2) 適切な測定方法

### <Summary statement>

- ディスポザブルプローブは一回使用にとどめる。
- 測定中は遮光を行うことにより測定精度が増す。
- センサーはテープ、ヘッドバンド、圧迫帯などで固定しない。
- 近赤外線脳酸素モニターの測定は麻酔開始前の、酸素を投与する前から開始し、それを基準値とするのが良い。
- 測定の終了は手術終了時点とするが、成人の心臓手術での脳障害の 60% は術後に起こり、小児の心臓手術においても術後の rSO<sub>2</sub> と脳障害や合併症との関連が示されている。したがって、術後も継続してモニターすることを考慮する。

## <解説>

近赤外線脳酸素モニターの測定用のプローブはTOS-ORを除きディスプレイのものを用意されている。そのため原則として一回使用にとどめるのがよい。長期使用や頻回使用を行うとプローブの貼付不良や発光ダイオードの劣化の原因となり正確性を欠く。また、蛍光灯などの外からの光の影響を受けるため、プローブ装着後は外光を遮断するような措置をするのが良い。

近赤外線脳酸素モニターは基本的には無侵襲であるが、まれに使用部位に一時的な発赤が起こる。そのため、センサーはテープ、ヘッドバンド、圧迫帯などで固定しないことが推奨される。また、創傷部または治癒していない皮膚や浮腫の強い皮膚の上にセンサーは留置しない。

近赤外線脳酸素モニターの測定値は麻酔の開始前、酸素を投与する前を基準値とするのが良い。測定の終了は手術終了時点とするが、成人の心臓手術での脳障害の60%は術後に起こることが報告されている<sup>5)</sup>。また、小児の心臓手術においても術後の $rSO_2$ と脳障害や合併症との関連が示されている<sup>6,7)</sup>。これらのことから術後も継続してモニターすることを考慮すると脳障害の検出率は高くなる可能性がある。TOS-ORは3週間程度の長時間使用を行ってもプローブによる障害が起こらないことが示されている。しかし、ほかの機種では26時間の使用による皮膚障害の報告もある<sup>8)</sup>ため注意する必要がある。

近赤外線脳酸素モニターのプローブは基本前額部に貼付するが、母斑や副鼻腔、上矢静脈洞、硬膜下血腫、硬膜外血腫や動脈脈奇形の上にセンサーを留置すると測定値に影響を与えるため注意が必要である。

INVOS<sup>TM</sup> 5100C や NIRO<sup>®</sup> -200NX, FORE-SIGHT ELITE<sup>TM</sup> (オプション機能) は4プローブまで装着可能である。その場合後頭部への貼付は脳組織の酸素飽和度を測定できる範囲を拡大できる可能性を秘めているが、頭髪の問題や後頭部の骨の厚みの問題からその評価には注意を要する。また、 $rSO_2$ は頭部の貼付される部位によっても影響を受ける。すなわち、 $rSO_2$ は正中で両プローブが接するように測定した場合(左/右 $61 \pm 11/61 \pm 10\%$ )よりもプローブを外側に1cm離れた方が測定値は低く( $59 \pm 10/58 \pm 11\%$ )、前額正中を挟んで測定すると $64 \pm 12\%$ と高くなる<sup>9)</sup>。同様に前額の上と下では上側が下よりもその値が低値となる(平均 $60\%/66\%$ )<sup>10)</sup>。センサーの位置により頭蓋や頭蓋下の構造物、脳血流などが異なり、測定値に反映されると推測される。

## 3) 使用上の注意点

### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターの測定アルゴリズムは機種により異なるため、測定値や各要因の影響も異なる点を留意すべきである。
- 近赤外線脳酸素モニターの測定値は、貧血、頭蓋骨の厚み、脳脊髄液層、頭蓋外血流の影響、体位などによる影響を受ける。

## <解説>

近赤外線脳酸素モニターを使用するに当たり注意すべき点はいくつかある。測定されるのが $rSO_2$ すなわち局所脳酸素飽和度であるため、動脈血酸素飽和度を測定するパルスオキシメーターと同等の測定精度を持つと想定しがちだが、全く別物と考える必要がある。パルスオキシメーターは絶対値としての信頼性を持ち、90%以下に低下すると低酸素血症を考慮する必要がある。しかし、近赤外線脳酸素モニターは絶対値に信頼性がなく、基準値から20-30%低下すると虚血の可能性が示唆されるという程度にとどまる。

その原因は $rSO_2$ が様々な因子により影響を受け真の酸素飽和度から値がずれることにある。以下、それらの因子について説明する。測定値に影響する因子を十分に理解したうえで $rSO_2$ の測定値を解釈する必要がある。

### (1) 測定アルゴリズムの違い

近赤外線脳酸素モニターによる $rSO_2$ 測定では、基本的にMBL法を用いて吸光度の差から濃度を推定する方法を用いる。現在、数機種で $rSO_2$ の測定が可能であるが、機種によって用いるアルゴリズムも異なっている。MBL法を用いていても2波長で測定する機種から5波長で測定して精度を上げている機種、また、

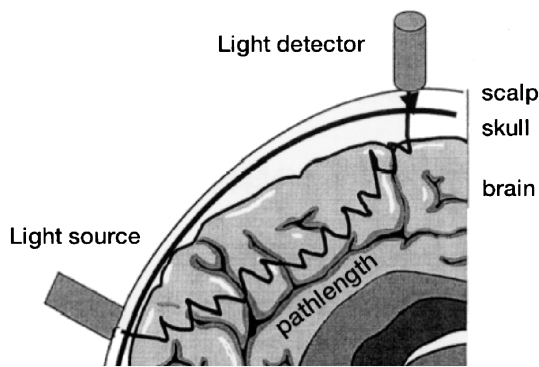


図2 近赤外線脳酸素モニターにおける光路長 (pathlength)

(文献 19 より引用)

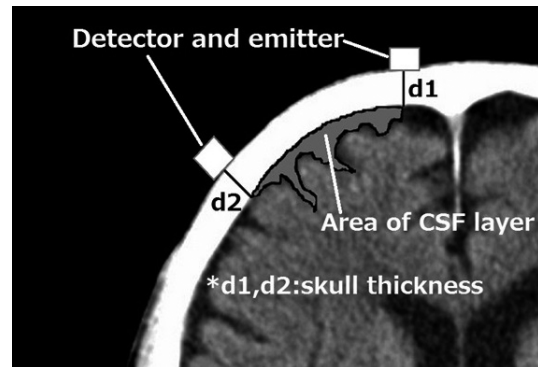


図3 近赤外線脳酸素モニター使用における頭蓋骨の厚みと脳脊髄液層の関係

(文献 11 より引用)

空間分解分光法という全く異なるアルゴリズムを用いている機種、さらに時間分解分光法という精度の高いアルゴリズムを用いている機種もある。その結果、機種が異なれば  $rSO_2$  の値は異なると考えておく必要がある。

## (2) 平均光路長について

$rSO_2$  は計算する際に MBL 法を用いている場合は平均光路長をアルゴリズムに含んでいる。細かい計算式は測定原理に記載されているが、平均光路長という近赤外線の発光器から受光器まで光の進む距離が測定値に影響を与える。平均光路長は、測定条件によって変化するが、計算式には一定値として組み込まれている。平均光路長が変化すると  $rSO_2$  値を過大評価、過小評価する可能性がある。測定機種により平均光路長を計算式に含んでいるかどうかを知っておく必要がある。平均光路長に影響を与える因子としては以下のものが重要である。

### a. 貧血

貧血ではヘモグロビン濃度が低下する。 $rSO_2$  を測定する近赤外線はヘモグロビンに特異的に吸収される。したがって、ヘモグロビン濃度が低下すると、光量としては吸収されずに遠くまで届く光の量が多くなり平均光路長は延長することになる。貧血の状態で平均光路長を測定した研究では 1.3 倍程度延長しており、実際の測定値より過大評価される<sup>11)</sup>。

### b. 頭蓋骨の厚み、脳脊髄液層

頭蓋骨は人により厚みが異なる。骨は厚みが増加すると光路長は延長する傾向がある。また、髄液層は頭部 CT スキャン画像では脳実質と頭蓋骨の間の空間に相当するが、この容積が大きいと脳実質に達する光量は少なくなり  $rSO_2$  は過小評価されることになる<sup>12)</sup> (図 3)。

$rSO_2$  を測定できる機種で MBL 法を用いている機種では平均光路長に影響を与える因子により値が変化することを理解しなければならない。

## (3) 頭蓋外血流の影響

$rSO_2$  を測定する際は前額部にセンサーを貼り付けるが、センサーの直下にある頭皮の血流も反映する可能性がある。Davie ら<sup>13)</sup> は 3 機種間で頭蓋外血流が  $rSO_2$  に影響を与えるか検討しているが、機種によって 6% から 15% 程度値が頭蓋外血流の影響を受けることを指摘している。また、フェニレフリンなどの血管収縮薬を投与すると  $rSO_2$  の値が低下するが、エフェドリンなどの  $\beta_1$  受容体への効果を含む作動薬では  $rSO_2$  は変化しないという報告がある。血管収縮薬は脳血流に与える影響は少ないため頭蓋外の血管収縮により  $rSO_2$  が低下すると考えられている<sup>14)</sup>。

#### (4) 体位の影響

非麻酔下の健常人において90度の頭高位により $rSO_2$ は低下することが示されている<sup>15)</sup>。全身麻酔中の報告では $rSO_2$ は坐位手術で低下することが指摘されている<sup>16)</sup>。さらに、近年、泌尿器科領域や産婦人科領域でのロボット手術や腹腔鏡手術で頭低位になる際には $rSO_2$ が増加するという報告と低下するという報告がある<sup>17-20)</sup>。しかし、術中の $rSO_2$ の低下と術後脳障害の因果関係は明らかでない。心臓血管外科領域で体位変化が必要とされるのはオフポンプ冠動脈バイパス手術の頭低位があるが、この際の $rSO_2$ の変化の検討はなされていない。

以上、 $rSO_2$ の値に影響を与える因子について概観したが、機種ごとに測定アルゴリズムが異なりそれにより影響の程度も異なる。機器の欠点、利点を十分理解したうえで使用することが望ましい。

#### 参考文献

- 1) Hongo K, Kobayashi S, Okudera H, Hokama M, Nakagawa F: Noninvasive cerebral optical spectroscopy: depth-resolved measurements of cerebral haemodynamics using indocyanine green. *Neurol Res* 1995; 17: 89-93.
- 2) 山下豊：時間分解スペクトロスコピーの測定原理 NIRS—基礎と臨床—。Edited by 酒谷薫。東京, 新興医学出版社, 2012, pp 19-22.
- 3) 酒谷薫：基礎原理 Q & A 臨床医のための近赤外分光法。Edited by 日本脳代謝モニタリング研究会。東京, 新興医学出版, 2002, pp 1-9.
- 4) Bickler PE, Feiner JR, Rollins MD: Factors affecting the performance of 5 cerebral oximeters during hypoxia in healthy volunteers. *Anesth Analg* 2013; 117: 813-23.
- 5) Tarakji KG, Sabik JF, 3rd, Bhudia SK, Batizy LH, Blackstone EH: Temporal onset, risk factors, and outcomes associated with stroke after coronary artery bypass grafting. *JAMA* 2011; 305: 381-90.
- 6) Dent CL, Spaeth JP, Jones BV, Schwartz SM, Glauser TA, Hallinan B, Pearl JM, Khoury PR, Kurth CD: Brain magnetic resonance imaging abnormalities after the Norwood procedure using regional cerebral perfusion. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 190-7.
- 7) Phelps HM, Mahle WT, Kim D, Simsic JM, Kirshbom PM, Kanter KR, Maher KO: Postoperative cerebral oxygenation in hypoplastic left heart syndrome after the Norwood procedure. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 1490-4.
- 8) 白石 義人, 横山 順一郎, 渥美 和, 佐藤 直史, 百瀬 和子, 山口 尚子：長時間装着した近赤外脳内酸素飽和度モニタ (INVOS 3100A) のセンサープローブによる皮膚障害. *日本臨床麻酔学会誌* 2001; 21: 430-433.
- 9) Kishi K, Kawaguchi M, Yoshitani K, Nagahata T, Furuya H: Influence of patient variables and sensor location on regional cerebral oxygen saturation measured by INVOS 4100 near-infrared spectrophotometers. *J Neurosurg Anesthesiol* 2003; 15: 302-6.
- 10) Cho AR, Kwon JY, Kim C, Hong JM, Kang C : Effect of sensor location on regional cerebral oxygen saturation measured by INVOS 5100 in on-pump cardiac surgery. *J Anesth.* 2017; 31: 178-184.
- 11) Yoshitani K, Kawaguchi M, Okuno T, Kanda T, Ohnishi Y, Kuro M, Nishizawa M. Measurements of optical pathlength using phase-resolved spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass. *Anesth Analg* 2007; 104: 341-6.
- 12) Yoshitani K, Kawaguchi M, Miura N, Okuno T, Kanda T, Ohnishi Y, Kuro M. Effects of hemoglobin concentration, skull thickness, and the area of the cerebrospinal fluid layer on near-infrared spectroscopy measurements. *Anesthesiology.* 2007; 106: 458-62.
- 13) Davie SN, Grocott HP. Impact of extracranial contamination on regional cerebral oxygen saturation: a comparison of three cerebral oximetry technologies. *Anesthesiology.* 2012; 116: 834-40.
- 14) Ogoh S, Sato K, Okazaki K, Miyamoto T, Secher F, Sørensen H, Rasmussen P, Secher NH. et al. A decrease in spatially resolved near-infrared spectroscopy-determined frontal lobe tissue oxygenation by phenylephrine reflects reduced skin blood flow. *Anesth Analg.* 2014; 118: 823-9.
- 15) Kato S, Yoshitani K, Kubota Y, Inatomi Y, Ohnishi Y. Effect of posture and extracranial contamination on results of cerebral oximetry by near-infrared spectroscopy. *J Anesth.* 2017; 31: 103-110.
- 16) Closhen D, Berres M, Werner C, Engelhard K, Schramm P. Influence of beach chair position on cerebral oxygen saturation: a comparison of INVOS and FORE-SIGHT cerebral oximeter. *J Neurosurg Anesthesiol.* 2013; 25: 414-9.
- 17) Lee JR, Lee PB, Do SH, Jeon YT, Lee JM, Hwang JY, Han SH. The effect of gynaecological laparoscopic surgery on cerebral oxygenation. *J Int Med Res.* 2006; 34: 531-6.
- 18) Park EY, Koo BN, Min KT, Nam SH. The effect of pneumoperitoneum in the steep Trendelenburg position on cerebral oxygenation. *Acta Anaesthesiol Scand* 2009; 53: 895-9.
- 19) Kalmar AF, Foubert L, Hendrickx JF, Mottrie A, Absalom A, Mortier EP, Struys MM. Influence of steep Trendelenburg position and CO2 pneumoperitoneum on cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory homeostasis during robotic prostatectomy. *Br J Anaesth.* 2010; 104: 433-9.
- 20) Closhen D, Treiber AH, Berres M, Sebastiani A, Werner C, Engelhard K, Schramm P. Robotic assisted prostatic surgery in the Trendelenburg position does not impair cerebral oxygenation measured using two different monitors: A clinical observational study. *Eur J Anaesthesiol* 2014; 31: 104-9.

## 4. 心臓血管手術における近赤外線脳酸素モニターの適応

### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターは、センサー下の脳での低血流や無血流による虚血の可能性のある状態に適応される。
- 近赤外線脳酸素モニターは、従来の脳循環代謝機能モニター（SEP、脳波、TCD など）に比較し容易に施行できる。
- 近赤外線脳酸素モニターは、CEA、大血管手術や心臓手術において周術期における脳循環異常を迅速に検出でき、対応が可能となる。
- 体重 2.5 kg 以上の新生児、小児においても使用可能である。

### <解説>

近赤外線脳酸素モニターは、周術期にセンサー下の脳での低血流や無血流による虚血の可能性のある症例が対象となる。臨床で使用頻度の高いのは、頸動脈を一過性に遮断しなければならない CEA や人工心肺を用いる大血管手術や心臓手術である。

### 1) 頸動脈内膜剥離術、頸動脈ステント留置術と近赤外線脳酸素モニター

#### (1) 頸動脈内膜剥離術と近赤外線脳酸素モニター

CEA における術後脳合併症の主な要因は、頸動脈血流の遮断による一過性脳血流低下、術中操作による脳への塞栓の飛散ならびに遮断解除後の脳血流増加による CHS である<sup>1)</sup>。これまでは、CEA 中の術中モニタリングとして SEP や脳波、TCD による脳循環代謝モニターを行っていたが、その技術的要因や患者要因により全ての症例で使用することはできない。一方、近赤外線脳酸素モニターは前額部にセンサーを装着することにより測定でき広く臨床で用いられるようになってきた。

CEA 中の頸動脈遮断による TCD での中大脳動脈血流速度の変化と  $rSO_2$  の変化には有意な相関が認められている<sup>2-5)</sup>。CEA では 10% の症例で TCD モニターができなかったと報告<sup>2,4)</sup>されており、CEA 中の近赤外線脳酸素モニターは意義あるものと考えられる。

CEA 中の脳虚血検出について脳波と近赤外線脳酸素モニターの関連が示されている<sup>6-8)</sup>。全身麻酔下 CEA 手術中に虚血により脳波の周波数は 2.9 Hz から 1.6 Hz に徐波化し、 $rSO_2$  の変化（61% から 49.5% に低下）と関連している<sup>8)</sup>。脳波に比較しても近赤外線脳酸素モニターは脳虚血に関して同等の検出力があると考えられる。

近赤外線脳酸素モニターと CEA 後の CHS に関しては、Komoribayashi ら<sup>9)</sup>と Ogasawara ら<sup>10)</sup>により報告されている。それによれば、single photon emission computed tomography (SPECT) や TCD により CHS が疑われた症例は 11~12% であった（術後 CHS の症状を発症したのは 1.4%）が、その全ての症例において近赤外線脳酸素モニターによる  $rSO_2$  値は、頸動脈遮断前の値を 10% 以上を超えていた。これらのことから、術中近赤外線脳酸素モニターを用いることで、従来の脳血流モニターと同等の精度で CHS を検出することが可能であると示唆された。

#### (2) 頸動脈ステント留置術と近赤外線脳酸素モニター

### <Summary statement>

- 頸動脈ステント留置術（carotid artery stenting、CAS）における近赤外線脳酸素モニターは CEA と同様、術中の脳虚血の検出目的に使用される。

CAS は症候性内頸動脈高度狭窄において、CEA の治療成績を不良にする因子を持つ症例に対して行うことは妥当とされ<sup>11)</sup>、現在、CAS は CEA を越える症例数に施行されている<sup>12)</sup>。CAS における脳障害発生の大きな要因に、手技中に破綻したプラークから血管内へと遊離した debris の飛散による脳への塞栓症があっ

たが、遠位塞栓防止デバイス（embolic protection device、EPD）の使用により治療成績が改善し、近年のRCTではCEAに対する非劣性が示されている<sup>13)</sup>。EPDはdistal protectionとproximal protectionに分類され、distal protectionにはfilterとballoonの2つのタイプがある。filter typeは狭窄部より遠位側に位置するfilterでdebrisのみを回収する方法で、頸動脈血流を遮断することがない。balloon typeは一時的に内頸動脈を閉塞し、手技後にballoonよりも中枢側に溜まったdebrisを血液ごと回収する方法である。一方でproximal protectionは、総頸動脈と外頸動脈をballoonで閉塞することで、内頸動脈の血流を逆転させてdebrisによる遠位塞栓を防ぐシステムであり、最近、北米では近位型EPD機能を有する経頸動脈ステントシステム（transcarotid artery revascularization、TCAR）が急速に普及してきている<sup>14)</sup>。また、CASに用いられるステントは自己拡張型であるが、柔軟性が高くアテローム病変を押し広げるほどの拡張力はない。EPDの留置後は、バルーンカテーテルによる前拡張、ステント留置バルーンカテーテルによる後拡張がその基本手技となり、頸動脈血流の一時的な遮断を要する。これらのことからCASの手技中において血流遮断による虚血性神経症状の出現の可能性があるため、CEAにおける頸動脈クランプ時と同様に術中の脳虚血の検出目的に近赤外線脳酸素モニターの使用が考慮される<sup>15)</sup>。

術後はCASもCEAと同じくCHSの発生リスクが存在するが、その特徴は異なる。CAS後のCHSの頻度は1.1%程度で、CEAでは脳内出血が多いが、CASは脳内出血だけでなく、くも膜下出血も生じると報告されている<sup>16)</sup>。特にCASは2剤併用抗血小板療法のまま施行されるため、出血が起こると重症になる場合が多い。また、CEAが術後6日後にCHS発生のピークがあるのに対し、CASは術後12時間以内にピークがあるため<sup>16)</sup>、CASではCHS発生の高リスク患者をより早期に予測することが必要となる。CHSの予測や検出に脳血流シンチグラム、single photon emission computed tomography（SPECT）が用いられるが<sup>17)</sup>、SPECTスキャンは時間がかかり費用も高く、CAS後12時間までには実施が困難な場合がある。そのため簡便に使用できる近赤外線脳酸素モニターでCHSの発生を予測する試みが報告されている<sup>18,19)</sup>。

## 2) 心臓・大血管手術、胸部大動脈ステントグラフト内挿術（TEVAR）と近赤外線脳酸素モニター

### (1) 心臓・大血管手術と近赤外線脳酸素モニター

心臓・大血管手術の予後は時代とともに改善しているが、周術期中枢神経の合併症は未だに解決できていない。心臓・大血管手術における中枢神経障害は、塞栓と低灌流がその主要因であるとされている<sup>20)</sup>。特に、低灌流を避けることは脳障害を有意に減少させると考えられている<sup>21)</sup>。心臓・大血管手術における脳循環・神経機能モニターとして、先述したSEPや脳波、TCDが挙げられるが、これらのモニターは麻酔薬や低体温の影響をうけかつ、技術的要因や患者要因としての測定の高難しさを含む。最近では、心臓・大血管手術における近赤外線脳酸素モニターの使用ならびに有用性が報告されてきている。

心臓・大血管手術における近赤外線脳酸素モニターの有用性として、人工心肺の送血管の位置異常、特にACPの際の送血管の異常を検出した症例報告<sup>22)</sup>や人工心肺による脳循環異常を早期に発見した報告<sup>23)</sup>などがある。さらに、Harrerら<sup>24)</sup>の観察研究では、弓部大動脈手術において片側順行性脳灌流から両側順行性脳灌流へ変更する判断に近赤外線脳酸素モニターが有用であることが示された。またGoldmanら<sup>25)</sup>は、近赤外線脳酸素モニターを用いることで術後脳卒中の発生頻度が有意に減少したことを報告している。Murkinら<sup>26)</sup>の行った前向き無作為試験によって、近赤外線脳酸素モニターによりrSO<sub>2</sub>を検出しさらにそれに対して治療を行うことにより集中治療室滞在日数が減少し、臓器障害や死亡率が減少することが示された。De-naultら<sup>27)</sup>は、心臓手術での近赤外線脳酸素モニターの値が異常を示した場合の対処について8ステップのアルゴリズムを提唱し、近赤外線脳酸素モニターによるモニタリング時の異常値の解釈とそれに対する適切な対応を示した。

上記のように、人工心肺を用いる大血管手術や心臓手術における近赤外線脳酸素モニターによる脳代謝循環モニタリングは、脳障害の予防の観点で重要である。

## (2) 胸部大動脈ステントグラフト内挿術(TEVAR)と近赤外線脳酸素モニター

### <Summary statement>

- 胸部大動脈ステントグラフト内挿術はその近位端が上行弓部に留置される場合は近位端留置部位（ランディングゾーン）のゾーン分類に基づいた周術期管理が重要である。
- ランディングゾーンが0から2をターゲットとするステントグラフト内挿術は弓部分枝血管の血流遮断を伴うため、デブランチ法を含め頸部3分枝への血流再開、灌流維持を行う必要がある。
- 脳梗塞発生率はゾーン0, 1, 2の順に、また再建を要する分枝数（デブランチの本数）が多いほど高率であるとの報告がある。
- したがって、ランディングゾーン0から2のTEVARにおいては脳灌流障害及び側副血行路の不全の検出に近赤外線脳酸素モニターが推奨される。

### <解説>

#### a. 大動脈ゾーン分類と手術

上行から弓部にかけての大動脈瘤の手術は、本来なら胸骨切開下人工心肺を用いて人工血管置換術を行うことが望ましい<sup>28)</sup>。しかしステントグラフトを用いた低侵襲手術の適応が拡大し、開胸人工血管置換術を行うことが困難（再開胸手術や低呼吸機能、超高齢）症例には上行弓部の大動脈瘤に対してもTEVARも検討される<sup>28)</sup>。したがって、弓部分枝血管を含んだ本症例での脳障害の予測とその防止が課題となる。

上行弓部大動脈へのステントグラフト内挿術では中枢側ステントの近位端の留置部位が重要で、Ishimaruのゾーン分類(0-4)が用いられる<sup>29)</sup>。すなわちゾーン0は腕頭動脈の中枢側、1は腕頭動脈と左総頸動脈の間、ゾーン2は左総頸動脈と左鎖骨下動脈の間、ゾーン3は左鎖骨下動脈遠位でありゾーン4は下行大動脈となる(図1)。

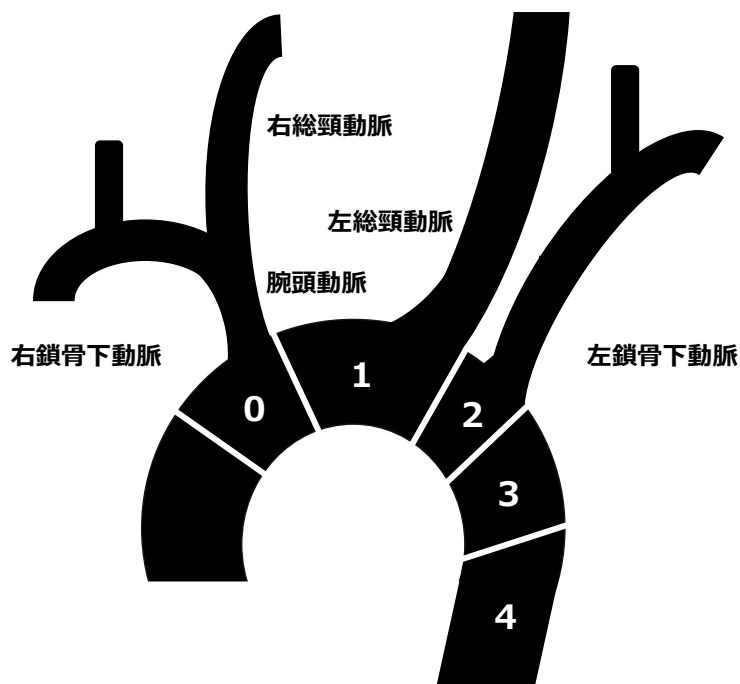


図1

(文献29より作成)

#### b. 上行弓部へのTEVARにおける大脳血流確保

ゾーン0から2まではTEVARに伴いいずれかの弓部分枝血管を閉塞するためその血管への血流確保が必要となる。血流確保にはいくつかの方法がある。

##### • デブランチ法

いわゆるTEVARと弓部3分枝血管の血流確保を目的とした人工血管吻合術（ハイブリッド手術）を行う。ゾーン2にTEVARを行う場合は、左鎖骨下動脈を閉塞してしまう場合もあるが、同血管が優位に脳底動

脈を灌流している症例や右椎骨動脈が優位であっても左後下小脳動脈が閉塞している症例は延髄外側症候群をきたすので血流は残すべきである<sup>30)</sup>。その場合は右の腋窩あるいは鎖骨下動脈か左総頸動脈からの人工血管吻合を行う。解剖学的に容易もしくは若年者であれば中枢で左鎖骨下動脈を離断して遠隔期開存率が良好な鎖骨下動脈 translocation を行うこともある<sup>31)</sup>。また、2025年9月より胸部大動脈ブランチ型デバイス「ゴア®TAG® 胸部大動脈ブランチ型ステントグラフトシステム (TBE)」が保険償還され、デブランチ法を用いることなく手術を行うことが可能となった<sup>32)</sup>。

ゾーン1では本邦では右鎖骨下動脈から左鎖骨下動脈バイパス、さらに左総頸動脈へバイパスすることが多いが、欧米では食道後経路で右総頸動脈から左総頸動脈-左鎖骨下動脈へバイパスが行われる。

ゾーン0, 1, 2のデブランチハイブリッドTEVARの有用性についてはClass IIa-IIIbの推奨でありエビデンスレベルはLevel Bとされる<sup>33)</sup>。

- Chimney (parallel graft) 法

主ステントグラフトの外側に、分枝血管用ステントを煙突 (chimney) 状に並走させ先端をメインステントのより近位端あるいは遠位端に近い位置に留置する方法である。この方法は脳血流確保のための一過性の補助循環や人工血管吻合が不要で低侵襲である。ただしエンドリークの可能性は高く (報告では7%程度<sup>34)</sup>) 多分枝には行いにくい。

- In-situ fenestration

主ステントグラフトを留置した後、その場で弓部分枝血管側からステントを穿孔 (開窓) し、分枝血管へブリッジステントを通す方法である。ステントグラフトのずれを抑制するためスネア鉗子などでステントグラフトをつかみながら行うことが多い。理論上多分枝血管に行えるが、開窓までの間脳血流は障害されるため、ゾーン0への留置は両腋窩や左総頸へ補助循環を用いた送血が必須となる<sup>35)</sup>。エンドリークは少なく分枝位置のずれは少ない。ただしステントを開窓させる難易度は高い。

- その他

その他の弓部の分枝血管の血流を確保する方法として、Najuta® Thoracic Stent Graft (川澄化学工業社製品) を用いる方法がある。これは患者ごとのCT所見から弓部分枝血管の起始位置に一致する開窓を事前設計し、留置後に開窓部から分枝血管へ直接血流が流入することを期待する。オーダーメイドにて作成に時間がかかるため緊急手術には適さない。開窓部と動脈瘤が近いとリークの原因となる<sup>36)</sup>。

その他枝付きステントグラフトが開発されている<sup>37)</sup>。

### c. 上行弓部へのTEVARでの脳合併症

我が国の解離性を除く上行弓部大動脈瘤へのTEVAR 14,235件を解析した報告では、脳梗塞の発生率はゾーン0で17.5%、1で9.2%、2で6.4%、3以遠で1.9%であり、ゾーン2までの留置では開心術よりも脳梗塞の発生は高くなる可能性がある。またデブランチ枝数別では2本で12.7%、1本で7.3%、デブランチを行わなくても2.3%の脳梗塞の発生率となっている<sup>38)</sup>。したがって、ゾーン0-2とデブランチ1-2本症例では脳障害への予防対策は必須である。

### d. TEVARと近赤外線脳酸素モニター

弓部分枝血管の血流障害とその血流確保を必要とするTEVARでは近赤外線脳酸素モニターによる脳血流障害の検出は重要と考えられ、特にゾーン0-2までのTEVAR症例および1本以上のデブランチを行うTEVAR症例では同モニターが必要と考えられる。

## 3) 小児心臓手術と近赤外線脳酸素モニター

2.5 kg以上の体重があれば新生児、小児においても近赤外線脳酸素モニターが装着可能である。小児の心臓手術において近赤外線脳酸素モニターはrSO<sub>2</sub>値の低下によるDHCAの限界時間や<sup>39)</sup> regional low-flow cerebral perfusionにより直接灌流されない左側脳の灌流低下の検出に使用されている<sup>40)</sup>。また、周術期の近赤外線脳酸素モニターの値の低下とそれに対する介入によって術後神経合併症の軽減を行えた報告がある<sup>41)</sup>。

## 参考文献

- 1) Riles TS, Imparato AM, Jacobowitz GR, et al. The cause of perioperative stroke after carotid endarterectomy. *J Vasc Surg* 1994; 19: 206–14
- 2) Vets P, ten BP, Adriaensen H, et al. Cerebral oximetry in patients undergoing carotid endarterectomy: preliminary results. *Acta Anaesthesiol Belg* 2004; 55: 215–20
- 3) Al-Rawi PG, Kirkpatrick PJ. Tissue oxygen index: thresholds for cerebral ischemia using near-infrared spectroscopy. *Stroke* 2006; 37: 2720–5
- 4) Grubhofer G, Plöchl W, Skolka M, et al. Comparing Doppler ultrasonography and cerebral oximetry as indicators for shunting in carotid endarterectomy. *Anesth Analg* 2000; 91: 1339–44
- 5) Kirkpatrick PJ, Lam J, Al-Rawi P, et al. Defining thresholds for critical ischemia by using near-infrared spectroscopy in the adult brain. *J Neurosurg* 1998; 89: 389–94
- 6) Rigamonti A, Scandroglio M, Minicucci F, et al. A clinical evaluation of near-infrared cerebral oximetry in the awake patient to monitor cerebral perfusion during carotid endarterectomy. *J Clin Anesth* 2005; 17: 426–30
- 7) de Letter JA, Sie HT, Thomas BM, et al. Near-infrared reflected spectroscopy and electroencephalography during carotid endarterectomy in search of a new shunt criterion. *Neurol Res* 1998; 20 (Suppl. 1): S23–7
- 8) Hirofumi O, Otone E, Hiroshi I, et al. The effectiveness of regional cerebral oxygen saturation monitoring using near-infrared spectroscopy in carotid endarterectomy. *J Clin Neurosci* 2003; 10: 79–83
- 9) Komoribayashi N, Ogasawara K, Kobayashi M, et al. Cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy is associated with preoperative hemodynamic impairment and intraoperative cerebral ischemia. *J Cereb Blood Flow Metab* 2006; 26: 878–84
- 10) Ogawasawa K, Konno H, Yukawa H, et al. Transcranial regional cerebral oxygen saturation monitoring during carotid endarterectomy as a predictor of postoperative hyperperfusion. *Neurosurgery* 2003; 53: 309–14
- 11) 日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会：脳卒中治療ガイドライン 2021. 第1版協和企画, 2021
- 12) 宮地 茂：脳卒中に対する最新の脳血管内治療. 2019; 明日の臨床 31: 1–11
- 13) Sardar P, Chatterjee S, Aronow HD, et al. Carotid Artery Stenting Versus Endarterectomy for Stroke Prevention: A Meta-Analysis of Clinical Trials. *J Am Coll Cardiol*. 2017; 69: 2266–75
- 14) Schermerhorn ML, Liang P, Eldrup-Jorgensen J, et al. Association of Transcarotid Artery Revascularization vs Transfemoral Carotid Artery Stenting With Stroke or Death Among Patients With Carotid Artery Stenosis. *JAMA*. 2019; 322: 2313–22
- 15) Kakumoto K, Harada K, Sankoda Y, et al. Near-infrared spectroscopy cerebral oximetry as a predictor of neurological intolerance during carotid artery stenting with proximal protection. *J Clin Neurosci*. 2018; 58: 89–93
- 16) Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, et al. Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study Group. Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg*. 2007; 107: 1130–6
- 17) Iwata T, Mori T, Tajiri H, et al. Predictors of hyperperfusion syndrome before and immediately after carotid artery stenting in single-photon emission computed tomography and transcranial color-coded real-time sonography studies. *Neurosurgery*. 2011; 68: 649–55
- 18) Matsumoto S, Nakahara I, Higashi T, et al. Near-infrared spectroscopy in carotid artery stenting predicts cerebral hyperperfusion syndrome. *Neurology*. 2009; 72: 1512–8
- 19) Terakado T, Marushima A, Koyama Y, et al. Effectiveness of Near-Infrared Spectroscopy (NIRO-200NX, Pulse Mode) for Risk Management in Carotid Artery Stenting. *World Neurosurg*. 2019; 131: e425–e432
- 20) Caplan LR, Hennerici M. Impaired clearance of emboli (washout) is an important link between hypoperfusion, embolism and ischemic stroke. *Arch Neurol* 1998; 55: 1475–82
- 21) Murkin JM. Is it better to shine a light, or rather to curse the darkness? Cerebral near-infrared spectroscopy and cardiac surgery. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2013; 43: 1081–3
- 22) Urbanski PP, Babin-Ebell J, Fröhner S, et al. Insufficient unilateral cerebral perfusion during emergent aortic arch surgery. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2012; 14: 122–4
- 23) Prabhune A, Sehic A, Spence FA, et al. Cerebral oximetry provides early warning of exogen delivery failure during cardiopulmonary bypass. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2002; 16: 204–6
- 24) Harrer M, Waldenberger PR, Weiss G, et al. Aortic arch surgery using bilateral antegrade selective cerebral perfusion in combination with near-infrared spectroscopy. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2010; 38: 561–7
- 25) Goldman S, Sulter F, Ferdinand F, et al. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using noninvasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients. *Heart Surg forum* 2004; 7: E376–81
- 26) Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51–8
- 27) Denault A, Deschamps A, Murkin JM. A proposed algorithm for the intraoperative use of cerebral near-infrared spectroscopy. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 11: 274–81
- 28) Sakamoto K, Shimamoto T, Esaki J, et al. Comparison of open and hybrid endovascular repair for aortic arch: a multi-centre study of 1052 adult patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 2024; 66: ezae377
- 29) Ishimaru S. Endografting of the aortic arch. *Journal of endovascular therapy* 2004, 11 (6\_suppl): II-62-II-71

- 30) Ohkura K, Shiiya N, Washiyama N, et al. Vertebral artery variations in thoracic aortic patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 2014; 46: 27–31
- 31) Canaud L, Ziza V, Ozdemir BA, et al. Outcomes of left subclavian artery transposition for hybrid aortic arch debranching. *Annals of Vascular Surgery* 2017; 40: 94–7
- 32) Dake MD, Brinkman WT, Han SM, et al. Outcomes of endovascular repair of aortic aneurysms with the GORE® Thoracic Branch Endoprosthesis for left subclavian artery preservation. *J Vascular Surg* 2022; 76: 1141–9
- 33) Wanhainen A, Verzini F, Van Herzele I, et al. Editor's Choice – European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2019 Clinical Practice Guidelines on the Management of Abdominal Aorto-iliac Artery Aneurysms. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2019; 57: 8–93
- 34) Pecoraro F, Lachat M, Cayne NS, et al. Mid-term Results of Chimney and Periscope Grafts in Supra-aortic Branches in High Risk Patients. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2017; 54: 295–302
- 35) Katada Y, Kondo S, Tsuboi E, et al. Endovascular Total Arch Repair Using In Situ Fenestration for Arch Aneurysm and Chronic Type A Dissection. *Ann Thorac Surg* 2016; 101: 625–30
- 36) Kurimoto Y, Maruyama R, Ujihira K, et al. Thoracic endovascular aortic repair for challenging aortic arch diseases using fenestrated stent grafts from zone 0. *The Annals of thoracic surgery* 2015; 100: 24–33
- 37) Glousman BN, Kang J, Fatima J. Arch Branch Devices and Clinical Trials in Treatment of Aortic Arch Pathology. *JVS-Vascular Insights* 2025; 3: 100164
- 38) Hoshina K, Kato M, Ishimaru S, et al. Effect of the urgency and landing zone on rates of in-hospital death, stroke, and paraplegia after thoracic endovascular aortic repair in Japan. *Journal of Vascular Surgery* 2021; 74: 556–68. e2
- 39) Kussman BD, Wypij D, DiNardo JA, et al. Cerebral oximetry during infant cardiac surgery: evaluation and relationship to early postoperative outcome. *Anesth Analg* 2009; 108: 1122–31
- 40) Andropoulos DB, Diaz LK, Fraser CD, Jr., et al. Is bilateral monitoring of cerebral oxygen saturation necessary during neonatal aortic arch reconstruction? *Anesth Analg* 2004; 98: 1267–72, table of contents
- 41) Austin EH, 3rd, Edmonds HL, Jr., Auden SM, et al. Benefit of neurophysiologic monitoring for pediatric cardiac surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1997; 114: 707–17

## 5. 成人心臓血管手術での使用報告と対応法

### 1) 頸動脈内膜剥離術，頸動脈ステント留置術

#### (1) 頸動脈内膜剥離術

##### a. 近赤外線脳酸素モニターの使用報告

##### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターの有効性は CEA で示されている。
- CEA 術中の低灌流の評価に用いられた報告が多いが，CHS の評価にも有用である。
- CEA 中の低灌流の近赤外線脳酸素モニターでのアラームポイントを決定するにあたり，局所麻酔であれば神経学的症状の出現との関連を，全身麻酔であれば SEP や脳波，TCD などに危険値をあらかじめ設定し，術中の近赤外線脳酸素モニター測定値との関連を評価している。
- CHS は術後の症状の出現，TCD や SPECT による血流の増加で評価され，術中の近赤外線脳酸素モニターの値にさかのぼってその値の変化との関連が調べられている。

##### <解説>

近赤外線脳酸素モニターは CEA 患者に装着されて術中の内頸動脈遮断中の脳低灌流の検出と，術後の CHS の検出の評価のために使用されている<sup>1)</sup>。ほとんどは術中低灌流の検出に使用評価されているが，CHS の検出に関する有用性も示されている。近赤外線脳酸素モニターのアラームポイントを定めるにあたっては局所麻酔での手術では術中患者の神経学的症状が出現した時点の近赤外線脳酸素モニターの値をアラームポイントにするのが良いと考えられる。全身麻酔で行った場合は，術後の神経学的合併症を発症した症例と術中の頸動脈遮断中の近赤外線脳酸素モニター最低値との関連，術中 SEP や脳波の変化，TCD の異常，stump pressure の低下とその時の近赤外線脳酸素モニター値の関連で評価される場合が多い。CHS の判定は手術終了後の症状出現やその時期の TCD による血流速度の増加，SPECT での脳血流変化などを基準として判定され，術中の近赤外線脳酸素モニターの値にさかのぼって関連が調べられている。

表 1 CEA による低灌流と過灌流の検出と近赤外線脳酸素モニター

著者 雑誌	報告年 号:頁	症例数	病態 評価	麻酔	異常の診断	機種	異常症例	rSO <sub>2</sub> , TOI, 異常実測値 (基準値からの低下)
Carlin et al <sup>2)</sup> J Clin Anesth	1998 10:109	16	低灌流	局所 + 静脈	臨床症状	INVOS <sup>TM</sup> 3100	2(13%)	異常 68 → 48% (36%) 正常 69 → 64% (6%)
Kirkpatrick <sup>3)</sup> J Neurosurg	1998 89:389	76	低灌流	全身	TCD60%の低下	NIRO <sup>®</sup> 500	16(21%)	異常:酸素化+脱酸素化Hb変化≥6.8 μmol/L 正常≤5 μmol/L
Beese et al <sup>4)</sup> Stroke	1998 29:2032	317	低灌流	全身	SEP 消失	INVOS <sup>TM</sup> 3100A	30(9.5%) 9.50%	異常 66 → 56% (15%) 正常 65 → 61% (6%)
Cho et al <sup>5)</sup> J Neurosurg	1998 89:538	29	低灌流	全身	SSEP 振幅低下	NIRO 500 20 人 INVOS 3100A 9 人	12(60%) 2(22%)	酸素化 Hb-13 μM 50%以下(10%) が異常
Samra et al <sup>6)</sup> Anesthesiology	2000 93:964	100	低灌流	局所	臨床症状	INVOS <sup>TM</sup> 3100	10(10%)	基準値から(20%)の低下
Hirofumi et al <sup>7)</sup> J Clin Neurosci	2003 10:79	21	低灌流	全身	術後神経合併症	INVOS <sup>TM</sup> 4100	10(48%)	54-56.1%, 15.6-18.2%の低下 25%の左右差
Mille et al <sup>8)</sup> Eur J Vasc Endovasc Surg	2004 27:646	594	低灌流	全身	術後神経合併症	INVOS <sup>TM</sup> 3100A INVOS <sup>TM</sup> 4100SSA	20(3.4%)	11.70% (20%)
Yamamoto et al <sup>9)</sup> Int Angiol	2007 26:262	43	低灌流	全身	stump pressure <40 mmHg	OM-220		5%の低下
Moritz et al <sup>10)</sup> Anesthesiology	2007 107:563	48	低灌流	局所	臨床症状	INVOS <sup>TM</sup> 3100	12(25%)	感度特異度ともに最良となる rSO <sub>2</sub> の低下は基準値の20% 絶対値 11-13%の低下 5-25%の低下
Pennekamp et al <sup>11)</sup> Eur J Vasc Endovasc Surg	2009 38:385	Review3 2 研究	低灌流	局所	TCD 50-80%低下 脳波非対称性			>5-10%の増加
Pennekamp et al <sup>12)</sup> Cerebrovasc Dis	2012	151	過灌流	全身	臨床症状と TCD 100%増加	INVOS <sup>TM</sup>	7(4.6%)	1 時間後過灌流症例 7%増加 1 時間後非過灌流症例 1%増加

## b. アラームポイントと異常時の対応

### <Summary statement>

- CEA では頸動脈遮断により rSO<sub>2</sub> 値が基準値から 20%以上低下, あるいは実測値が 50%以下となる場合, シャントの挿入などの対応策を考慮すべきである.
- CEA では手術後に基準値から実測値が rSO<sub>2</sub> の 5-10%以上の増加を認めた症例と CHS の関連性が報告されている.
- 近赤外線脳酸素モニターによる CHS リスク症例の早期予測が可能であれば術後の血圧管理などの CHS 発症防止対策につながる.

### <解説>

CEA 術中の低灌流あるいは術後の CHS 発症と近赤外線脳酸素モニターの関連を評価した代表論文を表 1 に示す<sup>2-12)</sup>. 多くは術中低灌流の検出として近赤外線脳酸素モニターが使用されている.

術中低灌流の評価は局所麻酔であれば症状の出現, 全身麻酔であれば TCD での中大脳動脈血流低下, 脳波や SEP の変化, 術後神経合併症と手術操作中の手術側の近赤外線脳酸素モニターの最低値との関連で検討される. ほとんどの報告が INVOS<sup>TM</sup> を用いて rSO<sub>2</sub> を評価しているが INVOS<sup>TM</sup> 以外の機種での評価も行われており (OM-220: 島津製作所, NIRO<sup>®</sup>500: 浜松ホトニクス社製), 酸素化ヘモグロビンの低下も異常値として評価されている<sup>5)</sup>.

局所麻酔下の症状出現を低灌流とした場合, 感度, 特異度がそれぞれ最大 (83%) となる rSO<sub>2</sub> の変化は基準値から相対的に 20%の低下であると報告されている<sup>10)</sup>. 一方, 実測値の最低値が感度特異度ともに最大となる値は 59%であった. 他の報告も INVOS<sup>TM</sup> での rSO<sub>2</sub> の値が基準値より相対的に 20%以上低下をカットオフラインとするとその多くの症例の症状出現と合致する<sup>6)</sup>. 術後に神経学的合併症の有無との関連で検討した場合 rSO<sub>2</sub> の実測値が 54-56%<sup>7)</sup>や基準値からの実測値の 11.7-18%の低下<sup>7,8)</sup>, 基準値の 20%以上の低下がアラームポイントとして報告されている<sup>8)</sup>. 他のモニターとの関連で評価した報告では SEP の振幅の低下や消失, 脳波の左右差, TCD で評価した中大脳動脈の血流の基準値からの 50-80%の低下, stump pressure<40 mmHg を低灌流として rSO<sub>2</sub> との関連が評価されている. その場合のアラームポイントは rSO<sub>2</sub> の実測値が 50-56%<sup>4,5)</sup>, 実測値として基準値から 5-25%の低下<sup>9,11)</sup>, 基準値から相対的に 10-15%の低下とされる<sup>4,5)</sup>. これらの報告から CEA, 頸動脈ステント留置術における低灌流の評価は大まかに実測値を 50%以下, 基準値からの相対的低下を 20%以上とするとほとんどの報告のアラームポイントを網羅していると

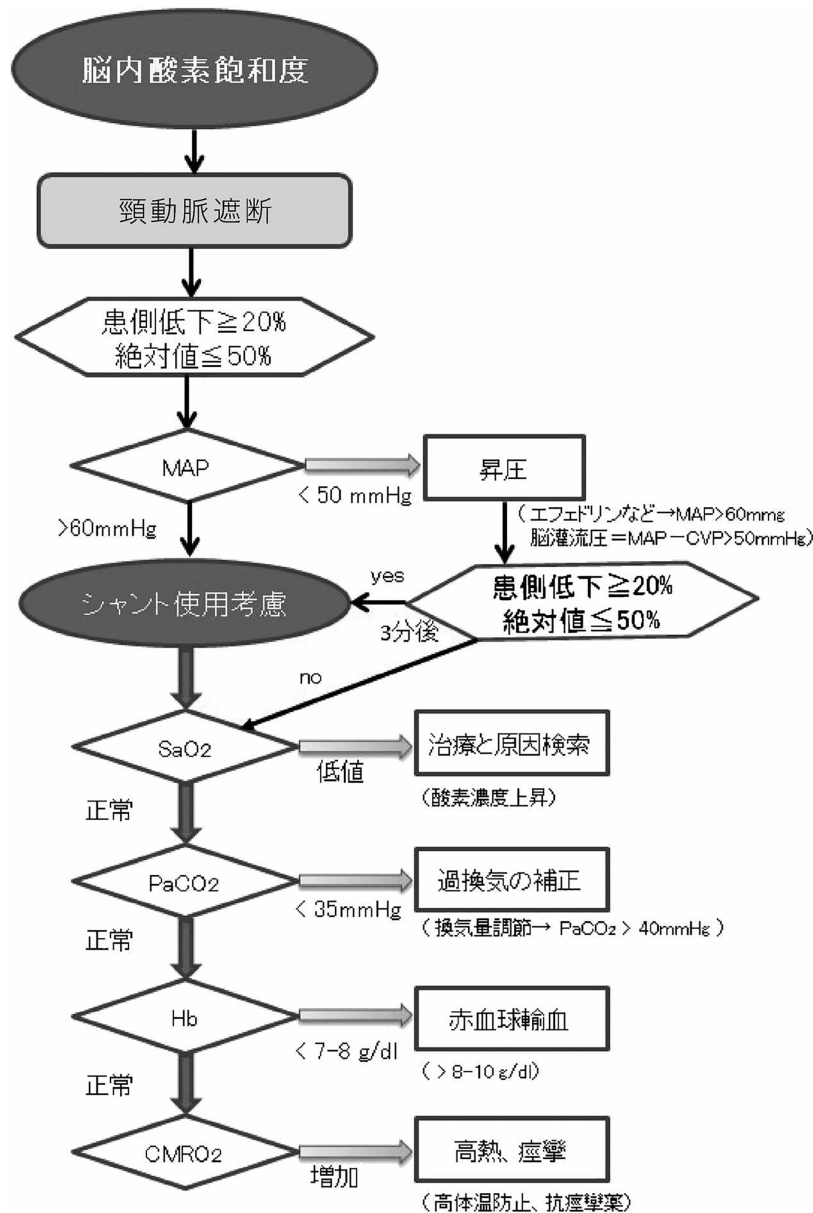


図1 CEA手術におけるアラームポイントと異常時の対応  
(文献13を一部改変)

MAP：平均血圧，CVP：中心静脈圧，SaO<sub>2</sub>：動脈血酸素飽和度，PaCO<sub>2</sub>：動脈血二酸化炭素分圧，Hb：ヘモグロビン，CMRO<sub>2</sub>：脳酸素消費量

考えられる。

低灌流に対する対策は酸素吸入やエフェドリンの投与による血圧の上昇が報告されているが一番効率的な対策はシャントの挿入とされている。Zogogiannisら<sup>13)</sup>の使用したアルゴリズムを一部改変したCEA手術時のアラームポイントと異常時の対応方法を示す(図1)。基準値から20%以上の低下または実測値50%以下の場合に、血圧を上昇させても3分以内に20%以内の低下にならない場合シャントを考慮する。

CHSの早期発見にも近赤外線脳酸素モニターは利用されている。日本頸部脳血管治療学会からの報告では、CHSはCEAで1596例中30例(1.9%)に発症し、そのピークはCEAでは3-6日目であった<sup>14)</sup>。CHSの判定は術後の症状出現や術後のTCDでの血流増加(100%以上の増加を見る場合が多い)やSPECTでの評価で行われている。ほとんどの報告は術後のCHSの発症を術中の頸動脈血流再開後の近赤外線脳酸素モニターの値の増加にさかのぼってその関連が評価されており、実際にCHSを発症した時点での近赤外線脳酸素モニター値を用いた評価はなされていない。これはCEA手術後CHSが発症する3-6日まで近赤外線脳酸素モニターを継続装着していないためであり、そこまで長期にモニターするのは現実的でない。しかし、

術後 ICU 退室時までにはモニターすることを検討してもいいかもしれない。

局所麻酔で CEA を行った報告では頸動脈血流再開後に rSO<sub>2</sub> の実測値が基準値に比べ 5-10% 高くなると術後の CHS 発症のリスクが高いと報告されている<sup>11)</sup>。全身麻酔下で 151 例の CEA を行った患者では、CHS が 7 例 4.6% に発症し、発症しなかった群では rSO<sub>2</sub> 値はほとんど変化しなかったのに対し、CHS 症例では術前値に比し術後一時間後の rSO<sub>2</sub> が実測値としてベースラインより 7% 増加していた<sup>12)</sup>。

これらの報告から、CEA では手術後に rSO<sub>2</sub> の実測値として 5-10% 以上の増加を認めた症例では、CHS の致死的な合併症である脳出血を防止するための厳密な降圧療法を考慮する必要がある。正常血圧の管理が基本となるが、症候性となった場合にはさらに降圧療法を強化するとともに脳代謝抑制のためにプロポフォールなどの鎮静剤の投与も検討すべきである。また、頸動脈解除直前にエタラポンを投与することで、過灌流を減弱できるという報告もあり<sup>15)</sup>、近赤外線脳酸素モニターの値から CHS ハイリスク症例を予測し薬剤投与症例を選出できる可能性がある。

## (2) 頸動脈ステント留置術 (carotid artery stenting, CAS)

### a. 近赤外線脳酸素モニターの使用報告

#### <Summary Statement>

- CAS における近赤外線脳酸素モニターは、手技に伴う脳の血行動態変化の監視に有用である
- 術直後から継続的にモニタリングができる利点がある

#### <解説>

通常手技として大腿動脈穿刺で実施される CAS の大部分は局所/区域麻酔下で施行されている<sup>16)</sup>。その主な利点は手技中の脳虚血を検出するために、覚醒した患者と会話し対側の手で基本的な動作を実行するだけで、神経機能を継続的にモニタリングができる点にある<sup>17)</sup>。一方で、CAS は、術中のバルーンによる血管拡張や自己拡張型ステント留置により頸動脈洞の圧受容体が刺激され、迷走神経の過剰な反射により徐脈や低血圧が生じる場合がある<sup>18)</sup>。Kamii らは、CAS を受けた 46 例において、術中に rSO<sub>2</sub> を連続記録した。手技中の徐脈 (心拍数 < 50 bpm) は 21 例 (46%) に発生し、うち 1 例は一過性心停止を伴った。手技中の低血圧 (収縮期血圧 < 80 mmHg) は 18 例 (39%) に発生し、うち 16 例は持続性低血圧を示した。CAS 中の徐脈/低血圧を呈した患者の rSO<sub>2</sub> 値は、それらを呈しなかった患者と比較して有意に低値であったと報告している<sup>19)</sup>。また、Padhy らは<sup>20)</sup> CAS 術中のカテーテル操作などの血管内腔の機械的刺激に起因する脳血管攣縮を、rSO<sub>2</sub> 値の低下から虚血性神経症状の出現前に検出できたことで、早期介入につながったと述べている。CAS 術中の近赤外線脳酸素モニターによる連続的なモニタリングは、カテーテル操作やバルーン拡張など手技に伴う脳の血行動態変調の監視とともに脳虚血の予防のための介入を促進する可能性がある。CAS 術後の CHS の検出に関しては、近赤外線脳酸素モニターを使用した研究がいくつか報告されており、rSO<sub>2</sub> の値の変化と虚血性神経症状および脳血流シンチグラフィ、SPECT で検出された CHS に有意な相関を認めたと報告されている<sup>21)</sup>。特に、近赤外線脳酸素モニターは、CAS の術直後から継続的にモニタリングが可能で、さらにベッドサイドで行える簡便さと低侵襲性、即時性の面からも脳過灌流の評価において有用性が高い。

### b. アラームポイントと異常時の対応

#### <Summary Statement>

- 局所/区域麻酔下で行われた頸動脈内膜剥離術、CEA の研究から、近赤外線脳酸素モニターの脳虚血の検出のアラームポイントは、rSO<sub>2</sub> 値の基準値より 10% 以上の低下が妥当とする報告が多い。
- 再灌流直後の rSO<sub>2</sub> 値がベースライン値より 10% 以上上昇した患者で、CAS 後の CHS 発生リスクとの関連性が報告されている。
- 近赤外線脳酸素モニターによる CAS 後の CHS の早期予測が可能になれば、CHS の発生防止に役立つ可能性がある。

## <解説>

近赤外線脳酸素モニターにおける脳虚血の検出について、CEAでは脳虚血と $rSO_2$ 値の変化に関する報告が多数存在するものの、CASでは少ない。そのためCASにおける脳虚血の検出のためのアラームポイントについては、CASの大部分が局所/区域麻酔下で施行されていることから、局所/区域麻酔下で行われたCEAを対象にした研究が参考になる。特にCASの脳虚血のリスクが最も高まる時期は、頸動脈血流の一時的な遮断が生じるバルーン拡張時であることから、CEAの頸動脈クランプ時の知見が重要である。Inciuraらは、局所麻酔下でCEAを受けた106例の患者において、25例(23%)の患者で頸動脈クランプ中に神経学的変化(運動機能障害または意識障害、四肢の筋力低下、認知機能低下)が生じた。クランプ中の虚血性神経症状を予測において、基準値より10%以上の $rSO_2$ 値の低下に対する感度は90%、特異度は70%であった<sup>22)</sup>。さらにHejčíらは、同じく局所麻酔下でCEAを受けた125例中、20例(16%)に術中に虚血性神経症状が出現し、臨床的に安定していた患者の頸動脈クランプ後の $rSO_2$ 値の平均低下率は6%であったのに対し、虚血性神経症状が出現した患者では $rSO_2$ 値が14.5%減少した。 $rSO_2$ 値の基準値より10%低下をカットオフ値とした場合、感度は100%、特異度は83.0%であった<sup>23)</sup>。またメタ解析では、局所麻酔下におけるCEAで頸動脈クランプ時の $rSO_2$ 値が基準値より20%低下をカットオフとすると、脳虚血を予測する感度と特異はそれぞれ70.5%および92.4%であった<sup>24)</sup>。これらの報告では、近赤外線脳酸素モニターにおける脳虚血の検出のアラームポイントについて、 $rSO_2$ 値の基準値より10%以上の低下とすることが妥当ではないかと述べている。またCASの術中の $rSO_2$ 値の低下に対する対応として、バルーン拡張中は、CEAにおける頸動脈クランプ時の管理と同様に、側副脳血流を最適化するため、収縮期血圧を患者の基準血圧から20%昇圧し、バルーン収縮後は血圧を基準値まで回復させることを考慮する<sup>25)</sup>としている。

CAS後の重篤な合併症であるCHSは1.1%で発症し、脳内出血を来すものは0.7%(CHSが生じた症例の約68%)に上るとされる<sup>26)</sup>。近赤外線脳酸素モニターは、CAS後のCHS発症のピークが術後12時間以内とCEA術後に比べて早期に発症することから、術直後から継続的にモニタリングが可能のため、脳過灌流評価においてその有用性は高い。Horieらは、 $rSO_2$ 値の上昇は術後SPECTで確認された脳過灌流と有意な相関を示した。さらに、 $rSO_2$ 値の変化パターンは、術前SPECTで検査した脳血管反応性と有意な相関を示した<sup>21)</sup>。Matsumotoらは再灌流後3分時点の $rSO_2$ 値が基準値より10%以上上昇した患者で、CAS後のCHS発生リスクが高いと述べている<sup>27)</sup>。Terakadoらは、脳過灌流を呈した症例において、再灌流5分後のTOI(tissue oxygenation index)(注:浜松ホトニクス社のNIROモニターの $rSO_2$ )は基準値から109%増加したことを報告している<sup>28)</sup>。CEA後のCHSにおいて脳内出血の発生にかかわる有意な因子は術直後からの厳密な血圧コントロール施行の有無であるが、CAS後については、降圧しても発症を防げないとの報告もみられ<sup>26)</sup>、また出血までの時間も短いことから有効な治療法は確立されていない。術前の脳循環検査でCHS発症のハイリスクと予測された場合には、CEAを選択することも考慮すべきとされる。

## 2) 大血管手術、胸部大動脈ステントグラフト内挿術(TEVAR)

### (1) 大血管手術

#### a. 近赤外線脳酸素モニターの使用報告

##### <Summary statement>

- 大血管手術では他の心臓手術に比べ脳梗塞の頻度が高く、重篤なものが多い。
- 大血管手術において近赤外線脳酸素モニターは脳灌流の異常を検出するために有用と考えられる。
- 近赤外線脳酸素モニターは大血管手術中の片側の灌流障害の検出にも有用である。

## <解説>

大血管手術の脳梗塞の発生率は4.7-11.2%と他の心臓手術に比べて高く、重篤なものが多い<sup>29)</sup>。弓部に手術操作が加わる手術や人工血管遠位側の吻合をopen-distal法で行う場合は脳を保護するための低体温と、頭以外の循環停止が必要で、加えてRCPやACPを用いて脳の血流を維持する必要が生じる。したがって同手術における脳保護は重要であり、近赤外線脳酸素モニターを用いた評価が応用できる術式の一つである。これまでに近赤外線脳酸素モニター値と大血管手術での脳障害との関連が示されている<sup>30-32)</sup>。また、大血管

表2 大血管手術における脳障害と近赤外線脳酸素モニター

著者雑誌	報告年号：頁	症例数	手術	脳卒中との関連	機種	rSO <sub>2</sub> 異常値実測値 (基準値からの低下)
Orihashi et al <sup>17)</sup> Eur J Cardiothorac Surg	2004 26 : 907	59	大血管 SCP	タイプ I + II が 27% タイプ I が 10%	TOS-96	<60%または 55%の時間
Olsson et al <sup>18)</sup> J Thorac Cardiovasc Surg.	2006 13 : 371	46	大血管 SCP	タイプ I 13%	INVOS™ 4100	(65-80%)
Fishcer et al <sup>19)</sup> J Thorac Cardiovasc Surg.	2011 141 : 815	30	大血管 DHCA ± ACP	重大合併症と rSO <sub>2</sub> 低下と関連あり	FORE-SIGHT ELITE™	<60%の area under threshold

手術中 ACP 用の腕頭動脈カニューレの右鎖骨下動脈への迷入による右内頸動脈領域の血流障害<sup>33)</sup>や大動脈解離の頸部動脈への解離の伸展に伴う血流障害<sup>21)</sup>などを rSO<sub>2</sub> 値の左右差の出現により検出できた報告がある。

## b. アラームポイントと異常時の対応

### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターの実測値が 60%あるいは 55%へ低下した時間および基準値の 64-80%への低下と脳障害との関連性が示されている。
- 大血管手術中の rSO<sub>2</sub> 値の左右差の新たな出現は脳の片側の灌流障害の可能性が高いため、その値をもとに早期介入が可能である。
- 弓部大動脈手術において片側 ACP から両側 ACP へ変更する判断に近赤外線脳酸素モニターが有用である。

### <解説>

表2に大血管手術での脳梗塞の発生と rSO<sub>2</sub> の値を検討した報告を示す<sup>30-32)</sup>。Orihashi らは 25℃での ACP を用いて大血管手術を行った 59 例に近赤外線脳酸素モニターを装着し (TOS-96 トステック社製)、16 例 (27.1%) にタイプ I と II の脳障害が発生した (16 例中 6 例でタイプ I 脳障害が発生)。この 16 症例では近赤外線脳酸素モニター実測値が 60%あるいは 55%未満に低下した時間が長かった<sup>30)</sup>。脳梗塞を起こした 6 例では頸動脈や脳底動脈領域の広範囲の灌流障害が起きた症例で特に近赤外線脳酸素モニターの低値の時間が長い<sup>30)</sup>。同様に 46 例の ACP を用いた大血管手術での報告では、6 例 (13%) にタイプ I の脳障害が起これり、これらの症例は rSO<sub>2</sub> は初期値の 65-80%に低下している (非梗塞症例は変化なし)<sup>31)</sup>。特にこの報告は rSO<sub>2</sub> の左右差が障害の検出に役立っている。Fishcer の FORE-SIGHT ELITE™ を用いた検討では<sup>32)</sup>脳障害に限定しないが rSO<sub>2</sub> の 60%未満の area under threshold と術後の脳を含めた重要臓器の合併症との関連が示されており、この値を下回らない管理が重要であると述べている。

これらの報告から近赤外線脳酸素モニターは大血管手術において脳障害の検出に有効であると考えられる。近赤外線脳酸素モニター値が基準値の 65-80%に低下した場合や左右差の出現時はその原因を検討し、改善する必要がある。少なくとも送血管の位置異常、至適灌流量、至適体温などを再確認する必要がある。

大血管手術中に rSO<sub>2</sub> 値の左右差の出現により脳への片側の灌流障害を検出できた報告がある。具体的には、ACP 用の腕頭動脈カニューレの右鎖骨下動脈への迷入による右内頸動脈領域の血流障害<sup>33)</sup>、急性大動脈解離症例での頸部動脈への解離の伸展に伴う血流障害<sup>34)</sup>などが検出されたが、いずれもカニューレの位置調整などの迅速な介入により脳障害を回避できている。

さらに、Harrer ら<sup>35)</sup>の研究では、弓部大動脈手術において片側 ACP から両側 ACP へ変更する判断に近赤外線脳酸素飽和度モニターが有用であることが示されている。つまり、右腋窩動脈から右頸動脈への ACP を開始し、左右の rSO<sub>2</sub> が保たれれば片側 ACP のみで脳灌流を行い、左の rSO<sub>2</sub> が低下した場合 (rSO<sub>2</sub> < 50%, TOI の測定値の低下が 15-20%) には左頸動脈への ACP を追加して脳灌流を維持している。Harrer らはほとんどの症例で両側 ACP の必要があったと述べている<sup>35)</sup>。

## (2) 胸部大動脈ステントグラフト内挿術(TEVAR)

### <Summary statement>

#### <解説>

- 胸部大動脈ステントグラフト内挿術での近赤外線脳酸素モニターの有用性については症例報告と 10-20 例の症例をまとめた検討がなされている。
- rSO<sub>2</sub> モニター下に行ったデブランチ TEVAR 症例では、弓部分枝血管の遮断中に血圧管理を行うことで rSO<sub>2</sub> 値の下を回避し、また補助循環を併用することによりその値を回復させ脳障害を回避できた報告がある。
- 右腕頭動脈へ補助循環下に in situ fenestration を併用した症例では、ステントグラフト展開による rSO<sub>2</sub> の低下及びステント開窓によるその値の回復が評価されている。アラームポイントを設定した管理により脳障害を回避できている。
- デブランチを行う際の左総頸動脈遮断時の rSO<sub>2</sub> の低下とその回復は、Willis 動脈輪を介した側副血行路の発達度により異なる。
- アラームポイントは初期値の 10-20% 以上の低下あるいは絶対値 40-50% 以下とした報告が多い。

#### a. TEVAR

この術式での近赤外線脳酸素モニターについては症例報告が、10-20 例前後の症例をまとめたの検討がなされており、その有用性が示されている。以下にそれらの報告を述べる。

弓部大動脈瘤症例において胸骨切開下上行大動脈から弓部 3 分枝血管へデブランチを行ったが、デブランチの際の平均血圧 90 mmHg を維持して rSO<sub>2</sub> (近赤外線脳酸素モニター機種に記載なし) 低下を初期値の 10% 以下に防ぎ脳障害を回避できた報告がある<sup>36)</sup>。また、解離性大動脈に対する上行大動脈人工血管置換後の弓部大動脈の再解離性動脈瘤に対して (縦隔炎に対して腹直筋皮弁を用いた既往があるため) 弓部 3 分枝血管へのデブランチを右大腿から右腋窩に、左大腿から左腋窩、左総頸に行った (左右の脳動脈の交通は良好) 後ステントグラフトを弓部に内挿した。この症例では、各デブランチの際 rSO<sub>2</sub> (FORE-SIGHT ELITE™) の変化は乏しく、準備した脳循環用補助循環は必要とせず脳合併症も回避できている<sup>37)</sup>。

スタンフォード B 型解離 (エントリ左鎖骨下直下) 症例に対してランディングゾーンを考慮してゾーン 1 以下にステントグラフ内挿入と右腋窩から左総頸と左鎖骨下へデブランチを行った症例において、術前の MRA で左右の脳血流の交通は十分であったが左総頸の遮断により rSO<sub>2</sub> (INVOS™ 5100C) は 67% から 50% に低下した。左大腿動脈から流量 200 ml/分 で左総頸動脈へ補助循環 (11 分) を行い、rSO<sub>2</sub> 値改善下に手術を行い脳障害を起こさず手術を完結した報告がある<sup>38)</sup>。

ゾーン 0 へのステントグラフト内挿入と in situ fenestration を rSO<sub>2</sub> モニ多下 (機種に記載なし) に行った 14 例の検討では<sup>39)</sup> (MRA での左右脳動脈交通の確認無し)、右の大腿から右の腋窩に補助循環 (15-20 ml/kg 32℃) を確立し、ステントグラフト内挿中は血圧を基準値の 20% 以上高くし、ヘマトクリットは 30% を維持。rSO<sub>2</sub> の危険値を、20% を超える基準値からの低下あるいは 50% 未満への絶対値の低下として管理している。

ステントの展開に伴い両側の rSO<sub>2</sub> は麻酔導入前の基準値より低下したが、補助循環のために右側の低下が少なく、左総頸および腕頭動脈の開窓によりその値は改善している (図 2)。7 例が rSO<sub>2</sub> の基準値を下回りそのうち 5 例が血圧上昇により改善した。1 例が術後出血にて死亡、1 例が腸管虚血により ICU 滞在が長期化した。それ以外の症例の経過は良好で脳障害を認めていない<sup>39)</sup>。

28 名のデブランチハイブリッド TEVAR を行った症例を MRA により左右の脳血流交通の有無で 2 群に分けて (11 名がウイリス動脈不完全) 左総頸動脈遮断に伴う rSO<sub>2</sub> (INVOS™ 5100C) の変化が検討されている。アラームポイントは基準値の 10-20% の低下とし、絶対値が 40% 以下か 20% 以上の低下の場合酸素濃度を上げ、収縮期血圧 100 mmHg 以上、PaCO<sub>2</sub> を 40 mmHg 近傍にし、ヘマトを 30% 以上としこれらでも改善しない場合は大体からの補助循環を準備した。ウイリスの動脈輪不完全の患者では左総頸動脈遮断中の rSO<sub>2</sub> は完全群と比べ低下傾向で、デブランチ後はむしろ遮断中より高くなっている (図 3)。アラームポイント以下への rSO<sub>2</sub> の低下はすべて介入で改善し補助循環は必要としなかった<sup>40)</sup>。

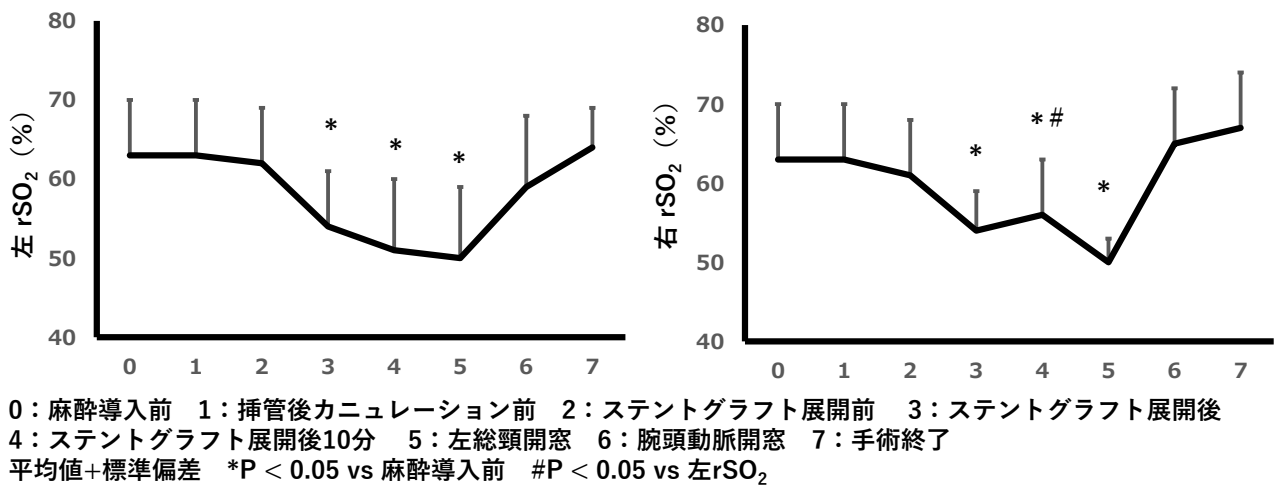


図 2

(文献 39 より作成)

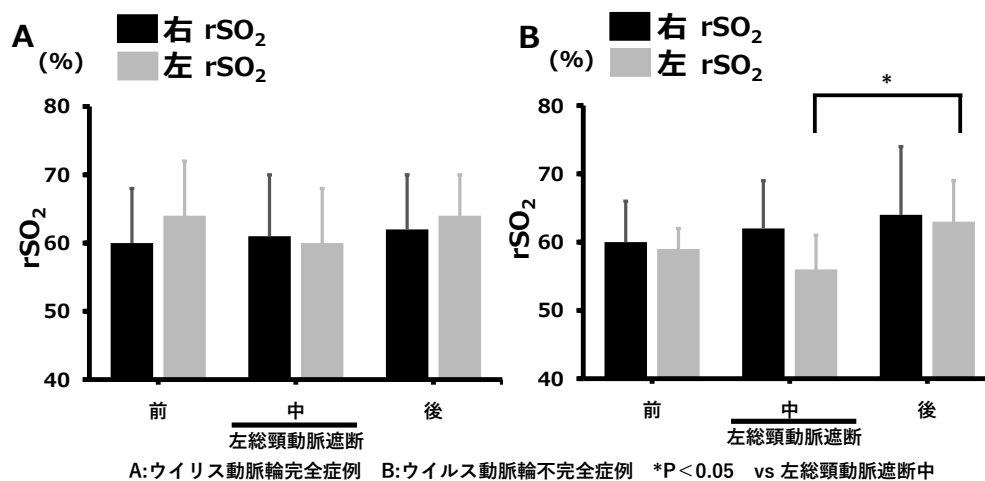


図 3

(文献 40 より作成)

以上の報告から比較的広範囲の脳灌血流障害が起こるゾーン 0 から 2 までの TEVAR では rSO<sub>2</sub> モニターの有用性は高いと考えられる。

### 3) 心臓手術

#### (1) 近赤外線脳酸素モニターの使用報告

##### <Summary statement>

- 人工心肺を用いた心臓手術において近赤外線脳酸素モニターによる術中ガイドでタイプ I, II の脳障害を軽減できるとされている。
- 人工心肺を用いた心臓手術中の近赤外線脳酸素モニターの低下は術後高次脳機能障害 POCD やせん妄発症と関連がある。

##### <解説>

心臓手術中に近赤外線脳酸素モニターを使用し管理することによりタイプ I, II の障害発生を軽減できるとされている<sup>41,42)</sup>。また近赤外線脳酸素モニターを装着しその値の術中低下は心臓手術後の POCD やせん妄の発症と関連する<sup>43-52)</sup>。この結果を踏まえ近年では近赤外線脳酸素モニターを指標とし、その低下を防止す

表3 心臓手術における脳梗塞と近赤外線脳酸素モニター

著者雑誌	報告年号:頁	症例数	手術	脳卒中との関連	機種	rSO <sub>2</sub> 異常値実測値 (基準値からの低下)
Goldman et al. <sup>23)</sup> Heart Surg Forum	2004 7: E375	1245 と 1034	CABG 弁	タイプ I 2.0% rSO <sub>2</sub> モニターで 0.97% に減	INVOS™ 5100	明確でない
Edmonds. <sup>24)</sup> Ann N Y AcadSci	2005 1053:12	286 332	CABG	タイプ II 3% rSO <sub>2</sub> モニターで II 0.3% に減	INVOS™ 4100	44% (障害症例の平均値) (20%)

表4 心臓手術における POCD, せん妄と近赤外線脳酸素モニター

著者雑誌	報告年 (号:頁)	症例数	手術	機種	rSO <sub>2</sub> , TOI, 異常値実測値 (基準値からの低下)	障害の検出	POCD, せん妄との関連
Reents et al. <sup>25)</sup> Ann Thorac Surg.	2002 74: 109	47	CABG	INVOS™ 4100	<40% (≤75%)	POCD	×
Yao et al. <sup>26)</sup> J Cardiothorac Vasc Anesth.	2004 18: 552	101	心臓手術	INVOS™ 4100	<35% <40% 10分	POCD	○
Hong et al. <sup>27)</sup> Eur J Cardiothorac Surg.	2008 33: 560	100	弁手術	INVOS™ 5100	<50% (≤80%)	POCD	×
Slater et al. <sup>28)</sup> Ann Thorac Surg.	2009 87: 36	240	CABG	INVOS™ 5100	<50% AUC	POCD	POCD 検出○ 積極管理による改善×
Shoen et al. <sup>29)</sup> Br J Anaesth.	2011 106: 840	128	心臓手術	INVOS™ 5100	<50%	POCD	○
Fudickar et al. <sup>30)</sup> BMC Anesthesiol.	2011 11: 7	35	心臓手術	NIRO® 300	<65%	POCD	○
de Tournay-Jette et al. <sup>31)</sup> J Cardiothorac Vasc Anesth.	2011 25: 95	48	CABG	INVOS™ 4100	<50% (≤70%)	POCD	○
Schoen et al. <sup>32)</sup> Crit Care.	2011 15: R218	231	心臓手術	INVOS™ 5100	<50%	せん妄	○
Palmbergen et al. <sup>33)</sup> Interact Cardiovasc Thorac Surg	2012 15: 71	642	CABG		>80%を維持	せん妄	積極管理による改善○ 13.3%→7.3%
Mohandas et al. <sup>34)</sup> Ann Card Anaesth.	2013 16: 102	1000	心臓手術	Equanox	>85%維持する 積極管理	神経心理学 スコアの改善	積極管理による改善○

AUC : area under the curve

る積極的な管理が術後の脳を含めた重要臓器の合併症や術後の神経心理学スコアを改善することが示されている<sup>51,52)</sup>。

## (2) アラームポイントと異常時の対応

### <Summary statement>

- 近赤外線脳酸素モニターのアラームポイントを基準値からの20%として管理すると心臓手術後のタイプIIの脳障害が軽減できる可能性がある。
- 心臓手術とPOCD, 術後せん妄発生と近赤外線脳酸素モニターのアラームポイントは基準値から20-30%以上に低下した場合や実測値が35-65%より低下した場合と報告されている。またそれらの値以下に低下したarea under the curveも評価に使用されている。
- rSO<sub>2</sub>の基準値からの20-30%低下や実測値50%をアラームポイントとし、それらを介入により改善させるアルゴリズムが提唱されている。
- rSO<sub>2</sub>の異常時には、送脱血部位、頭部の位置、動脈血二酸化炭素分圧、平均動脈圧、中心静脈圧、心係数、混合静脈血酸素飽和度、ヘモグロビン濃度などを確認することで脳を含めた重要臓器の合併症を軽減できる可能性がある。

### <解説>

これまで心臓手術において近赤外線脳酸素モニター装着によりタイプIとタイプIIの脳障害の発生を軽減できた報告がある。GoldmanらはrSO<sub>2</sub>を非モニター下におこなった1245例でのCABGと弁手術でのタイプIの脳障害発生は25例(2.01%)であったのに対してrSO<sub>2</sub>モニター下に術前値を維持するように管理した同手術1034例でのそれは10例(0.97%)でありrSO<sub>2</sub>モニターが有効であったと報告している<sup>41)</sup>。Edmondsは<sup>42)</sup>rSO<sub>2</sub>モニターに脳波、TCDを組み合わせて管理した332例のCABG症例のタイプIとタイプIIの脳症障害をそれ以前のモニターを行っていない286例と比較している。rSO<sub>2</sub>の異常値を初期値からの

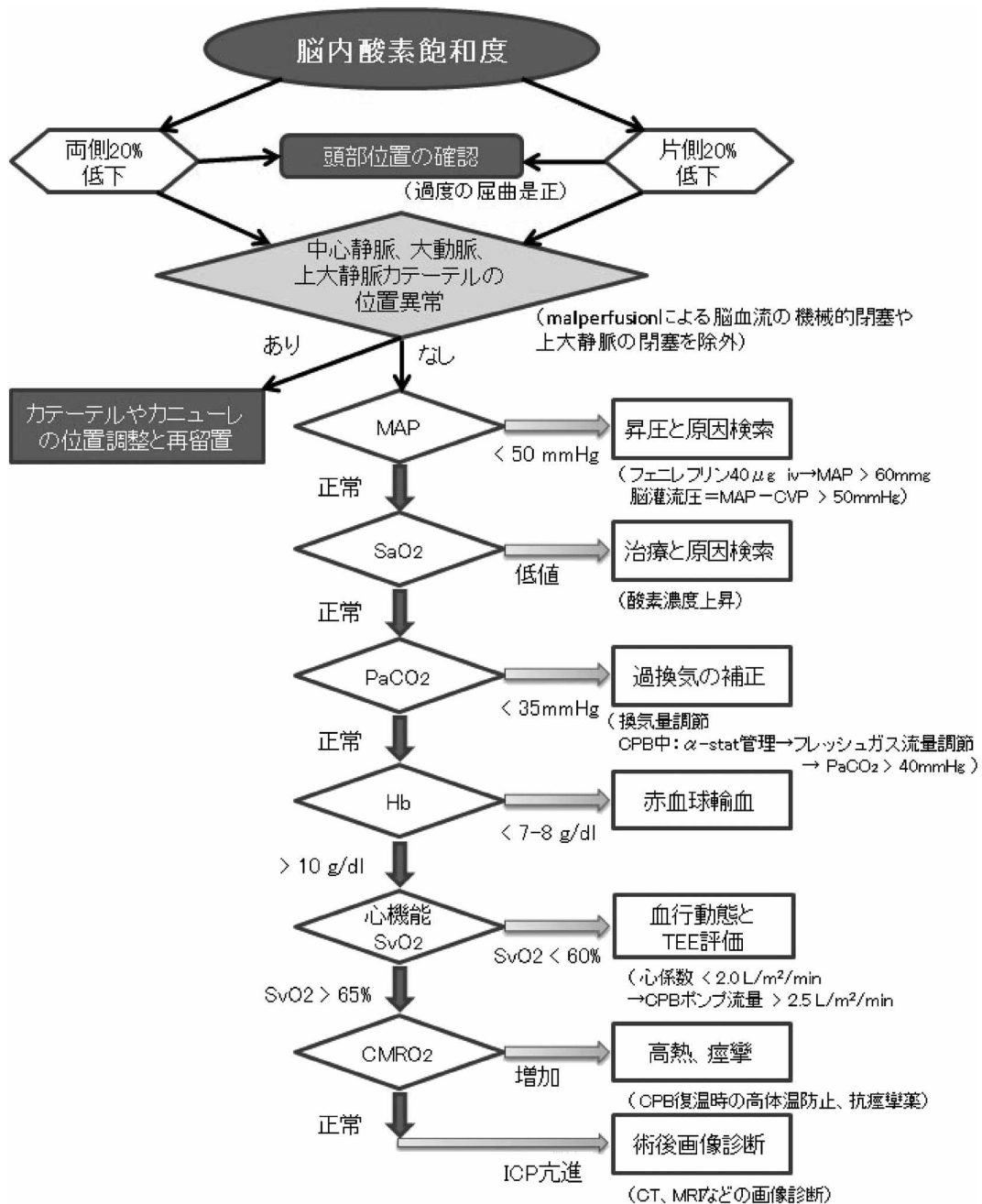


図4 人工心臓使用心臓手術におけるアラームポイントと異常時の対応

(文献 52,53 を一部改変)

MAP：平均血圧，CVP：中心静脈圧，SaO<sub>2</sub>：動脈血酸素飽和度，PaCO<sub>2</sub>：動脈血二酸化炭素分圧，Hb：ヘモグロビン，SvO<sub>2</sub>：混合静脈血酸素飽和度，TEE：経食道心エコー検査，CPB：人工心臓，CMRO<sub>2</sub>：脳酸素消費量，ICP：頭蓋内圧

20%以上の低下とし、術中 PaCO<sub>2</sub> の正常値の維持、灌流圧を高くする、ポンプ流量をあげるなどの対応を行って可能な限り低下しないように管理を行っている。この報告ではモニター管理によってタイプIIの脳障害は3%から0.3%に軽減している。

近赤外線脳酸素モニターの装着とその異常値の検出により POCD や術後せん妄の予測と改善に効果があるかを検討した報告は多く見られる<sup>43-52)</sup>(表4)。使用機種は INVOS™ や NIRO® を用いた報告がほとんどで rSO<sub>2</sub> や TOI 値で評価されていることが多い。rSO<sub>2</sub> や TOI の危険値は実測値が 35-65% より低下した場合または、基準値の 20-30% 以上に低下した場合 (あるいはそれらの area under the curve) としている。これまで 5 つの報告で rSO<sub>2</sub> の値と POCD の関連性が示され<sup>44,46-49)</sup>、2 つの報告で関連性がない<sup>43,45)</sup>とされている。異なる結果が出る理由は定かではないが、用いられる神経心理学検査や POCD の判定基準、判定時期が影

響している可能性がある。また、せん妄と  $rSO_2$  低下との関連性も示されている<sup>50)</sup>。これらから、近赤外線脳酸素モニターの値の低下と POCD やせん妄の発生は関連がありそれらの予測に近赤外線脳酸素モニターは有効である可能性がある。さらに近赤外線脳酸素モニターを指標にした積極管理（基準値の 80–85% を維持）を行うことにより術後のせん妄の発生<sup>51)</sup>や、神経心理学スコアの改善<sup>52)</sup>が得られることが示されている。

脳障害に限定しないが、Murkin ら<sup>53)</sup>は CABG を対象として前向き研究を行い、術中に生じた  $rSO_2$  低下への対応は、対応しない場合と比べて、重大な臓器障害（48 時間以上の人工呼吸、脳卒中、心筋梗塞など）が少なく、集中治療室の在室期間が短かったと報告している。本研究では、 $rSO_2$  が基準値から 30% 低下した場合に介入を行っている。 $rSO_2$  の 30% 低下が 1 分以上続いた場合を酸素飽和度低下とするが、実際には 15 秒低下すれば処置を開始している。Denault ら<sup>54)</sup>は、 $rSO_2$  の基準値の 20% 低下と実測値 50% をアラームポイントとして、8 つのステップからなるアルゴリズムを提唱している。Murkin らと Denault らのアルゴリズムを一部改変した人工心肺使用心臓手術におけるアラームポイントと異常時の対応方法を示す（図 4）。

$rSO_2$  異常時（基準値の 20–30% 低下）には、送脱血部位、頭部の位置、動脈血二酸化炭素分圧、平均動脈圧、中心静脈圧、心係数、混合静脈血酸素飽和度、ヘモグロビン濃度などを確認し、早急に対応することで脳を含めた重要臓器の合併症を軽減できる可能性がある。

最近では血圧の自発変動と近赤外線脳酸素モニターの値の変化を利用して脳血流の自己調節能を検出する方法が行われている。血圧が脳血流の自己調節能が保たれる範囲にあると血圧の変動（揺らぎ）に対して近赤外線脳酸素モニターの値は血圧に対して相関関係が弱くなる（自己調節能の下限を切ると相関は強くなる）。この方法で評価すると人工心肺中の灌流圧の下限は 50 mmHg と考えられる<sup>55)</sup>。しかし、個々の症例の下限は 40 mmHg から 90 mmHg の範囲で大きくばらついていることも示されている<sup>56)</sup>。

## 参考文献

- 1) Nielsen HB: Systematic review of near-infrared spectroscopy determined cerebral oxygenation during non-cardiac surgery. *Front Physiol* 2014; 5: 93
- 2) Carlin RE, McGraw DJ, Calimlim JR, et al. The use of near-infrared cerebral oximetry in awake carotid endarterectomy. *J Clin Anesth* 1998; 10: 109–13
- 3) Kirkpatrick PJ, Lam J, Al-Rawi P, et al. Defining thresholds for critical ischemia by using near-infrared spectroscopy in the adult brain. *J Neurosurg* 1998; 89: 389–94
- 4) Beese U, Langer H, Lang W, et al. Comparison of near-infrared spectroscopy and somatosensory evoked potentials for the detection of cerebral ischemia during carotid endarterectomy. *Stroke* 1998; 29: 2032–7
- 5) Cho H, Nemoto EM, Yonas H, et al. Cerebral monitoring by means of oximetry and somatosensory evoked potentials during carotid endarterectomy. *J Neurosurg* 1998; 89: 533–8
- 6) Samra SK, Dy EA, Welch K, et al. Evaluation of a cerebral oximeter as a monitor of cerebral ischemia during carotid endarterectomy. *Anesthesiology* 2000; 93: 964–70
- 7) Hirofumi O, Otone E, Hiroshi I, et al. The effectiveness of regional cerebral oxygen saturation monitoring using near-infrared spectroscopy in carotid endarterectomy. *J Clin Neurosci* 2003; 10: 79–83
- 8) Mille T, Tachimiri ME, Klersy C, et al. Near infrared spectroscopy monitoring during carotid endarterectomy: which threshold value is critical? *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2004; 27: 646–50
- 9) Yamamoto K, Miyata T, Nagawa H. Good correlation between cerebral oxygenation measured using near infrared spectroscopy and stump pressure during carotid clamping. *Int Angiol* 2007; 26: 262–5
- 10) Moritz S, Kasprzak P, Arlt M, et al. Accuracy of cerebral monitoring in detecting cerebral ischemia during carotid endarterectomy: a comparison of transcranial Doppler sonography, near-infrared spectroscopy, stump pressure, and somatosensory evoked potentials. *Anesthesiology* 2007; 107: 563–9
- 11) Pennekamp CW, Bots ML, Kappelle LJ, et al. The value of near-infrared spectroscopy measured cerebral oximetry during carotid endarterectomy in perioperative stroke prevention. A review. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2009; 38: 539–45
- 12) Pennekamp CW, Immink RV, den Ruijter HM, et al. Nearinfrared spectroscopy can predict the onset of cerebral hyperperfusion syndrome after carotid endarterectomy. *Cerebrovasc Dis* 2012; 34: 314–21
- 13) Zogogiannis ID, Iatrou CA, Lazarides MK, et al. Evaluation of an intraoperative algorithm based on near-infrared refracted spectroscopy monitoring, in the intraoperative decision for shunt placement, in patients undergoing carotid endarterectomy. *Middle East J Anaesthesiol* 2011; 21: 367–73
- 14) Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, et al. Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study G: Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg* 2007; 107: 1130–6
- 15) Ogasawara K, Inoue T, Kobayashi M, et al. Pretreatment with the free radical scavenger edaravone prevents cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy. *Neurosurgery* 2004; 55: 1060–7

- 16) Malas MB, Dakour-Aridi H, Wang GJ, et al. Transcarotid artery revascularization versus transfemoral carotid artery stenting in the Society for Vascular Surgery Vascular Quality Initiative. *J Vasc Surg*. 2019; 69: 92–103
- 17) Allain R, Marone LK, Meltzer J, et al. Carotid endarterectomy. *Int Anesthesiol Clin*. 2005; 43: 15–38
- 18) Mangin L, Medigue C, Merle JC, et al. Cardiac autonomic control during balloon carotid angioplasty and stenting. *Can J Physiol Pharmacol*. 2003; 81: 944–51
- 19) Kamii H, Sato K, Matsumoto Y, et al. Periprocedural monitoring with regional cerebral oxygen saturation in carotid artery stenting. *Interv Neuroradiol*. 2007; 13: 53–7
- 20) Padhy SK, Ajayan N, Hrishi AP, et al. Novel application of near-infrared spectroscopy in detecting iatrogenic vasospasm during interventional neuroradiological procedures. *Brain Circ*. 2019; 5: 90–3
- 21) Horie N, Kitagawa N, Morikawa M, et al. Monitoring of regional cerebral oxygenation by near-infrared spectroscopy in carotid arterial stenting: Preliminary study. *Neuroradiology*. 2005; 47: 375–9
- 22) Inčiūra D, Antuševas A, Aladaitis A, et al. Near-infrared spectroscopy as a predictor of cerebral ischaemia during carotid endarterectomy in awake patients. *Vascular*. 2020; 28: 301–8
- 23) Hejčl A, Jiráňková K, Malucelli A, et al. Selective internal carotid artery cross-clamping increases the specificity of cerebral oximetry for indication of shunting during carotid endarterectomy. *Acta Neurochir (Wien)*. 2021; 163: 1807–17
- 24) Khan JM, McInnis CL, Ross-White A, et al. Overview and Diagnostic Accuracy of Near Infrared Spectroscopy in Carotid Endarterectomy: A Systematic Review and Meta-analysis. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2021; 62: 695–704
- 25) Yastrebov K. Intraoperative management: carotid endarterectomies. *Anesthesiol Clin North Am*. 2004; 22: 265–87, vi–vii
- 26) Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, et al. Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study Group. Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg*. 2007; 107: 1130–6
- 27) Matsumoto S, Nakahara I, Higashi T, et al. Near-infrared spectroscopy in carotid artery stenting predicts cerebral hyperperfusion syndrome. *Neurology*. 2009; 72: 1512–8
- 28) Terakado T, Marushima A, Koyama Y, et al. Effectiveness of Near-Infrared Spectroscopy (NIRO-200NX, Pulse Mode) for Risk Management in Carotid Artery Stenting. *World Neurosurg*. 2019; 131: e425–e432
- 29) Hu Z, Wang Z, Ren Z, et al. Similar cerebral protective effectiveness of antegrade and retro grade cerebral perfusion combined with deep hypothermia circulatory arrest in aortic arch surgery: a meta-analysis and systematic review of 5060 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; 148: 544–60
- 30) Orihashi K, Sueda T, Okada K, et al. Near-infrared spectroscopy for monitoring cerebral ischemia during selective cerebral perfusion. *Eur J Cardiothorac Surg* 2004; 26: 907–11
- 31) Olsson C, Thelin S. Regional cerebral saturation monitoring with near-infrared spectroscopy during selective antegrade cerebral perfusion: diagnostic performance and relationship to postoperative stroke. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 371–9
- 32) Fischer GW, Lin HM, Krol M, et al. Noninvasive cerebral oxygenation may predict outcome in patients undergoing aortic arch surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2011; 141: 815–21
- 33) Orihashi K, Sueda T, Okada K, et al. Malposition of selective cerebral perfusion catheter is not a rare event. *Eur J Cardiothorac Surg* 2005; 27: 644–8
- 34) Sakaguchi G, Komiya T, Tamura N, et al. Cerebral malperfusion in acute type A dissection: direct innominate artery cannulation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005; 129: 1190–1
- 35) Harrer M, Waldenberger FR, Weiss G, et al. Aortic arch surgery using bilateral antegrade selective cerebral perfusion in combination with near-infrared spectroscopy. *Eur J Cardiothorac Surg* 2010; 38: 561–7
- 36) Uchida N, Katayama K, Takahashi S, et al. Total arch repair using supra-aortic debranching technique with banding of the ascending aorta for endovascular stent graft fixation. *Annals of Vascular Surgery* 2013; 27: 354. e355–354. e358
- 37) Marumoto A, Yoneda K, Tanaka K, et al. Hybrid Repair with Reversed Sequence Supra-aortic Debranching in Ruptured Arch Aneurysm. *International Journal of Angiology* 2022; 31: 56–60
- 38) Sakakibara S, Yamauchi T. Selective cerebral perfusion for reduced cerebral blood flow during debranching thoracic endovascular aortic repair. *Journal of Vascular Surgery Cases, Innovations and Techniques* 2025; 11: 101707
- 39) Wang K-R, Gao M, Wen X-H, et al. Anaesthetic management in endovascular total aortic arch repair via needle-based in situ fenestration: a case series of 14 patients. *Journal of International Medical Research* 2020; 48: 0300060519893517
- 40) Takahashi Y, Murakami T, Sasaki Y, et al. Safety of perioperative cerebral oxygen saturation during debranching in patients with incomplete circle of Willis. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery* 2018; 26: 965–71
- 41) Goldman S, Sutter F, Ferdinand F, et al. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using noninvasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients. *Heart Surg Forum* 2004; 7: E376–81
- 42) Edmonds HL, Jr. Protective effect of neuromonitoring during cardiac surgery. *Ann N Y Acad Sci* 2005; 1053: 12–9
- 43) Reents W, Muellges W, Franke D, et al. Cerebral oxygen saturation assessed by near-infrared spectroscopy during coronary artery bypass grafting and early postoperative cognitive function. *Ann Thorac Surg* 2002; 74: 109–14
- 44) Yao FS, Tseng CC, Ho CY, et al. Cerebral oxygen desaturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patients undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552–8
- 45) Hong SW, Shim JK, Choi YS, et al. Prediction of cognitive dysfunction and patients' outcome following valvular heart surgery and the role of cerebral oximetry. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; 33: 560–5
- 46) Slater JP, Guarino T, Stack J, et al. Cerebral oxygen desaturation predicts cognitive decline and longer hospital stay after

- cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 36–44; discussion 44–5
- 47) Schoen J, Husemann L, Tiemeyer C, et al. Cognitive function after sevoflurane- vs propofol-based anaesthesia for on-pump cardiac surgery: a randomized controlled trial. *Br J Anaesth* 2011; 106: 840–50
  - 48) Fudickar A, Peters S, Stapelfeldt C, et al. Postoperative cognitive deficit after cardiopulmonary bypass with preserved cerebral oxygenation: a prospective observational pilot study. *BMC Anesthesiol* 2011; 11: 7
  - 49) de Tournay-Jette E, Dupuis G, Bherer L, et al. The relationship between cerebral oxygen saturation changes and postoperative cognitive dysfunction in elderly patients after coronary artery bypass graft surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2011; 25: 95–104
  - 50) Schoen J, Meyerrose J, Paarmann H, et al. Preoperative regional cerebral oxygen saturation is a predictor of postoperative delirium in on-pump cardiac surgery patients: a prospective observational trial. *Crit Care* 2011; 15: R218
  - 51) Palmbergen WA, van Sonderen A, Keyhan-Falsafi AM, et al. Improved perioperative neurological monitoring of coronary artery bypass graft patients reduces the incidence of postoperative delirium: the Haga Brain Care Strategy. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2012; 15: 671–7
  - 52) Mohandas BS, Jagadeesh AM, Vikram SB. Impact of monitoring cerebral oxygen saturation on the outcome of patients undergoing open heart surgery. *Ann Card Anaesth* 2013; 16: 102–6
  - 53) Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51–8.
  - 54) Denault A, Deschamps A, Murkin JM. A proposed algorithm for the intraoperative use of cerebral near-infrared spectroscopy. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 11: 274–81
  - 55) Brady K, Joshi B, Zweifel C, et al. Real-time continuous monitoring of cerebral blood flow autoregulation using near-infrared spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass. *Stroke* 2010; 41: 1951–6
  - 56) Joshi B, Ono M, Brown C, et al. Predicting the limits of cerebral autoregulation during cardiopulmonary bypass. *Anesth Analg* 2012; 114: 503–10

## 6. 小児心臓血管手術での近赤外線脳酸素モニター

### 1) 小児症例での留意点

#### <Summary statement>

- 小児の近赤外線脳酸素モニターによる  $rSO_2$  の測定値は心疾患によって著しく異なる。

#### <解説>

小児と成人では近赤外線脳酸素モニターによって測定される脳酸素飽和度の条件が異なる。すなわち、小児では頭皮や頭蓋骨が薄く未発達である。しかしこれは逆に頭蓋外の血流の影響を近赤外線脳酸素モニターが受けにくい状態であるとも考えられる。また、小児の近赤外線脳酸素モニターによる  $rSO_2$  の測定値は心疾患によって著しく異なる<sup>1)</sup>。麻酔導入前の非チアノーゼ性疾患で大きな左右シャントがない症例の  $rSO_2$  は約 70%，チアノーゼ性疾患は 40–60% である。麻酔導入後の  $rSO_2$  値は大血管転位症で  $61 \pm 11\%$ ，フォロー四徴症で  $71 \pm 14\%$ ，心室中隔欠損症で  $62 \pm 9\%$ <sup>2)</sup>，左心低形成で  $60 \pm 11\%$  となっている<sup>3)</sup>。

### 2) 小児症例での使用報告とアラームポイント

#### <Summary statement>

- 小児の心臓手術において近赤外線脳酸素モニターは  $rSO_2$  の低下から評価した DHCA の限界時間や、regional low-flow cerebral perfusion 中の左右差から直接灌流されていない左側の灌流低下の検出に使用されている。
- 周術期の近赤外線脳酸素モニターの値の低下と術後神経合併症および術後の合併症の関連が示されている。

#### <解説>

小児の心臓手術において近赤外線脳酸素モニターは DHCA 中の  $rSO_2$  の低下による DHCA の限界時間の評価や、regional low-flow cerebral perfusion 中の左右差から直接灌流されていない左側の灌流低下の検出に

使用されている。DHCA の時間により rSO<sub>2</sub> は経時的に低下し相対的にベースラインよりも 60-70% の値に低下するが 20-40 分でその値は最低となることが示されている<sup>2)</sup>。また DHCA 中の rSO<sub>2</sub> の低下時間は新生児、乳児、幼児の順に時間を要し新生児の酸素消費量がより少ないと推定されている<sup>4)</sup>。腕頭動脈から施行される regional low-flow cerebral perfusion では平均 6.3% の rSO<sub>2</sub> の左右差が起こり左が低値となるが、10% 以上の差になることもある<sup>5)</sup>。しかしこの左右差の程度と術後の神経合併症の関連は検討されていない。

小児の心臓手術において近赤外線脳酸素モニターと術後の予後あるいは神経合併症との関連を示した報告を提示する (表)。

表 小児の NIRS と神経障害、予後

著者雑誌	報告年 (号:頁)	症例数	手術	対照症例	機種	rSO <sub>2</sub> , TOI, 異常値実測値 (基準値からの低下)	障害検出	神経学的障害
Kurth et al. <sup>4)</sup> Anesthesiology.	1995 82: 74	26	VSD, SV, Fallot, TGA	新生児, 乳児, 幼児	NIM		3 例	障害症例は DHCA 移行までの時間が短く直前の rSO <sub>2</sub> 低い
Austin et al. <sup>6)</sup> J Thorac Cardiovasc Surg	1997 114: 707	250	Congenital	新生児, 乳児, 幼児	INVOS™ 3100	(≤80%)	TCD と相補的診断	モニター介入で神経学的異常 (24% から 6%) 入院期間を短縮.
Dent et al. <sup>7)</sup> J Thorac Cardiovasc Surg	2006 131: 190	22	HLHS	新生児	INVOS™ 5100	<45% 180 分	73% MRI で異常	rSO <sub>2</sub> 低下と関連
McQuillen et al. <sup>8)</sup> Stroke	2007 38: 736	16 (52)	HLHS TGA	新生児	NIRO® 300		MIR 異常 6 例	大動脈遮断時 rSO <sub>2</sub> 低値と異常所見の関連
Phelps et al. <sup>9)</sup> Ann Thorac Surg	2009 87: 1490	50	HLHS	新生児	INVOS™	合併症 18 53.8% 合併症 32 60.8%	術後合併症	rSO <sub>2</sub> 低下と関連
Andropoulos et al. <sup>10)</sup> J Thorac Cardiovasc Surg	2010 139: 543	68	VSD, SV, TGA, HLHS	新生児	INVOS™ 5100A	<45%	術後 MRI での異常所見	rSO <sub>2</sub> 低下と関連無し

VSD: 心室中隔欠損症, SV: 単心室, Fallot: ファロー四徴症, TGA: 大血管転位, HLHS: 左心低形成

Kurth らの報告では DHCA 下に 26 例の心臓手術を施行した症例中 3 例の術後脳障害が起きたが、この 3 例は DHCA に移行するまでの時間が短く、DHCA までの体温冷却低によって上昇するはずの rSO<sub>2</sub> の十分な増加がみられていない<sup>4)</sup>。DHCA に移行するまでの脳の冷却不足を rSO<sub>2</sub> が示唆していた可能性が示されている<sup>4)</sup>。Austin らは先天性心疾患患者 250 症例において TCD と rSO<sub>2</sub> を相補的に使用し TCD の血流速度が 50% 以下あるいは rSO<sub>2</sub> がベースラインの 80% 未満に低下した場合を危険として介入を行うと脳障害の軽減が可能であったと報告している<sup>6)</sup>。また Norwood の手術を施行した 22 例において術後の rSO<sub>2</sub> の 45% 以下の 3 時間の低下と MRI での異常所見との関連が示されている<sup>7)</sup>。16 症例 (大血管転位症 11 例, 左心低形成 4 例, 大動脈縮窄症 1 例) の先天性心疾患のうち 6 例で術後に MRI 上新たな神経障害を生じた報告では障害群で大動脈遮断時の rSO<sub>2</sub> が低値であったことが提示されている<sup>8)</sup>。左心低形成 50 症例の内 18 例で術後循環不全を含めた合併症を生じたが、合併症を起こした 18 例の術後 48 時間の rSO<sub>2</sub> 値は生じなかった症例よりも低値を示した<sup>9)</sup>。ただし、周術期の rSO<sub>2</sub> の低下 (絶対値で 45% 未満) と術後の MRI の異常所見は関連がないとする報告もある<sup>10)</sup>。

## 参考文献

- 1) Fenton KN, Lessman K, Glogowski K, Fogg S, Duncan KF: Cerebral oxygen saturation does not normalize until after stage 2 single ventricle palliation. *Ann Thorac Surg* 2007; 83: 1431-6.
- 2) Kussman BD, Wypij D, DiNardo JA, Newburger JW, Mayer JE, Jr, del Nido PJ, Bacha EA, Pigula F, McGrath E, Laussen PC: Cerebral oximetry during infant cardiac surgery: evaluation and relationship to early postoperative outcome. *Anesth Analg* 2009; 108: 1122-31.
- 3) Andropoulos DB, Stayer SA, McKenzie ED, Fraser CD, Jr.: Novel cerebral physiologic monitoring to guide low-flow cerebral perfusion during neonatal aortic arch reconstruction. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2003; 125: 491-9.
- 4) Kurth CD, Steven JM, Nicolson SC: Cerebral oxygenation during pediatric cardiac surgery using deep hypothermic circulatory arrest. *Anesthesiology* 1995; 82: 74-82.
- 5) Andropoulos DB, Diaz LK, Fraser CD, Jr., McKenzie ED, Stayer SA: Is bilateral monitoring of cerebral oxygen saturation necessary during neonatal aortic arch reconstruction? *Anesth Analg* 2004; 98: 1267-72, table of contents.
- 6) Austin EH, 3rd, Edmonds HL, Jr., Auden SM, Seremet V, Niznik G, Sehic A, Sowell MK, Cheppo CD, Corlett KM: Benefit of neurophysiologic monitoring for pediatric cardiac surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1997; 114: 707-15, 717; discussion 715-6.
- 7) Dent CL, Spaeth JP, Jones BV, Schwartz SM, Glauser TA, Hallinan B, Pearl JM, Khoury PR, Kurth CD: Brain magnetic resonance imaging abnormalities after the Norwood procedure using regional cerebral perfusion. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 190-7.

- 8) McQuillen PS, Barkovich AJ, Hamrick SE, Perez M, Ward P, Glidden DV, Azakie A, Karl T, Miller SP: Temporal and anatomic risk profile of brain injury with neonatal repair of congenital heart defects. *Stroke* 2007; 38: 736–41.
- 9) Phelps HM, Mahle WT, Kim D, Simsic JM, Kirshbom PM, Kanter KR, Maher KO: Postoperative cerebral oxygenation in hypoplastic left heart syndrome after the Norwood procedure. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 1490–4.
- 10) Andropoulos DB, Hunter JV, Nelson DP, Stayer SA, Stark AR, McKenzie ED, Heinle JS, Graves DE, Fraser CD, Jr.: Brain-immaturity is associated with brain injury before and after neonatal cardiac surgery with high-flow bypass and cerebral oxygenation monitoring. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010; 139: 543–56.

## 7. 本邦の心臓血管手術における近赤外線脳酸素モニターの使用状況

### < Summary statement >

- 本邦の心臓および大血管手術において、近赤外線脳酸素モニターは84%の施設で使用されており、その90%以上が有用と評価している。
- 本邦の頸動脈手術において、近赤外線脳酸素モニターは64%の施設で使用されており、使用施設の大部分が有用と評価している。

### < 解 説 >

日本心臓血管麻酔学会では、全国の麻酔科関連施設等、487施設を対象に心臓血管麻酔における近赤外線脳酸素モニターの使用状況のアンケート調査を実施し、185施設（回収率38%）より回答が得られた<sup>1)</sup>。心臓および大血管手術についての回答があった184施設中155施設（84%）で使用されており、心臓血管手術の全例での使用は70施設（38%）であった。29施設（16%）では近赤外線脳酸素モニターを使用していなかった。近赤外線脳酸素モニターを使用しない理由として、コストの問題、保険適応がない、所有していない、など病院の経済的な事項がみられた。使用施設の90%以上で、心臓手術中や人工心肺中の脳循環の管理に有用であると回答した。頸動脈内膜剥離術では、回答のあった施設の47%の施設で全例使用していたが、36%の施設では使用していなかった。頸動脈内膜剥離術での近赤外線脳酸素モニター使用施設の大部分で、脳低灌流の検知や過灌流の管理に有用であったと回答している。心臓および大血管手術、頸動脈手術以外で近赤外線脳酸素モニターを使用する症例として、脳梗塞の既往、頸動脈狭窄症、もやもや病、血行再建を伴う脳動脈瘤などが報告されており、58施設では頸動脈狭窄を有する患者を使用対象としていた。

### 参考文献

- 1) 川口昌彦, 吉谷健司, 石田和慶, 横田美幸, 上園晶一, 野村 実. 本邦における周術期の近赤外線脳酸素モニター使用の現状. *日本臨床麻酔学会誌* 2015; 35(5): 651–659.

## 最後に

心臓血管手術における周術期脳障害発生の状況とそのメカニズム、脳障害予防の一手段としての近赤外線脳酸素モニターの原理、適応、使用上の注意点、異常時の対応法などを概説した。近赤外線脳酸素モニターの使用が周術期脳障害の発生を軽減するというエビデンスは未だ十分とは言えないが、非侵襲的かつ連続的に使用可能な近赤外線脳酸素モニターの使用により術中に発生する脳循環代謝の異常を早期に発見できることが示されている。近赤外線脳酸素モニター使用のアウトカムへの効果については、更なる検討が必要である。特に、市販されている各機種精度についても更なる検討が必要と考えられる。近赤外線脳酸素モニター（大脳皮質代謝等測定）の適正な使用と異常時の対応により、心臓血管手術後の機能的予後改善に寄与できればと考える。ただし、適正な近赤外線脳酸素モニターの使用のためには、診療報酬点数などの獲得が必要であり、日本心臓血管麻酔学会として取り組んでいく必要がある。



心臓血管麻酔における近赤外線脳酸素モニターの使用指針

---

2026年4月30日 発行

発行者 一般社団法人 日本心臓血管麻酔学会 岡本 浩嗣  
事務局 東京都文京区本郷二丁目40番17号

---

制作/小宮山印刷工業株式会社 東京都新宿区天神町78