

頸動脈内膜剥離術における術中モニタリング波形と頭部 MRA 所見の関係

橋本 光弘¹⁾ 近藤 規明¹⁾ 井澤 和美¹⁾ 柴田 一泰¹⁾
高須俊太郎²⁾

1) 日本赤十字社愛知医療センター名古屋第二病院臨床検査科 (〒466-8650 愛知県名古屋市昭和区妙見町2-9)
2) 独立行政法人地域医療機能推進機構中京病院脳神経外科

要旨

頸動脈内膜剥離術 (CEA) 中の頸動脈血流遮断時には脳虚血による合併症を生じるリスクが避けられない。術側の内頸動脈血流遮断時の脳虚血の程度は、非術側の血管系からの血流供給の程度に依存すると考えられている。本研究では、頭部磁気共鳴血管撮影 (MRA) で描出される Willis 動脈輪前方の画像所見と術中モニタリングとして実施された体性感覚誘発電位 (SEP) および運動誘発電位 (MEP) の波形との関連について検討した。対象は、CEA の際に SEP および MEP 術中モニタリングを行った患者 205 例とした。対象者を MRA での前大脳動脈起始部 (A1) と前交通動脈 (A-com) の描出パターンで分類し、術中での内頸動脈血流遮断後の SEP あるいは MEP モニタリング波形の振幅が、遮断前と比較して 50%以上低下した症例の割合を群間比較した。モニタリング波形の振幅が低下した症例の割合は、MRA 上で両側の A1 が描出された群で 6.1%、非術側の A1 だけが描出不良の群では 21.1%、術側の A1 だけが描出された群で 50.0%、両側の A1 は描出されるが A-com が描出不良の群で 100%であった。Willis 動脈輪前方における非術側から術側への血流供給の有無が、内頸動脈血流遮断時の脳虚血の要因の一つであると考えられた。非術側の A1 あるいは A-com の低形成や欠損が存在すると、内頸動脈血流遮断による術側大脳半球の脳虚血が生じるリスクが高くなることが示唆された。

キーワード 術中モニタリング, 頸動脈内膜剥離術, Willis 動脈輪, 運動誘発電位, 体性感覚誘発電位

I はじめに

頸動脈内膜剥離術 (carotid endarterectomy; CEA) は頸部内頸動脈狭窄症に対する脳神経外科領域の外科的治療の1つである^{1),2)}。CEA は術中に術側の内頸動脈の血流を一時的に遮断する必要があり、周術期に発生する血行力学的脳梗塞症の原因となる^{1),3),4)}。内頸動脈血流遮断時の脳虚血の程度は、非術側の血管系からの血流供給の程度に依存し、特に前交通動脈 (anterior communicating artery; A-com) を介する対側からの血流の有無が脳虚血発生に関係があると考えられている^{3),5)}。A-com および前大脳動脈

起始部 (A1) によって形成される Willis 動脈輪前方の血管分岐と血流には正常バリエーションが存在し、A-com や A1、あるいはそれらの一部が欠損する場合もある^{5),6)}。

一方、頭頸部、脊髄、大血管などの手術では、虚血を含めた術中および術後の合併症を防ぐために神経生理学的な術中モニタリングが行われている⁷⁻⁹⁾。所属施設では、CEA の術中モニタリングとして体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential; SEP) および運動誘発電位 (motor evoked potential; MEP) を行っている。術中モニタリングとしての SEP および MEP 波形の振幅は脳虚血を反映するとされてい

(2022年7月25日受付・2022年11月18日受理)

© 2023 Japanese Association of Medical Technologists

ることから^{1),3),4),7),10)}, Willis 動脈輪前方の血流供給と術中モニタリング波形の変化には関連性があると推測される。本研究では, Willis 動脈輪前方の血管分岐パターンについて頭部磁気共鳴血管撮影 (magnetic resonance angiography; MRA) を用いて分類し, 術中モニタリング波形の変化との関連を検討した。

II 対象と方法

1. 対象

所属施設において 2003 年 6 月から 2022 年 3 月までの期間に行った CEA のうち, 内頸動脈遮断前および遮断後の経時的な術中モニタリングが可能であった 205 例を対象とした。平均年齢は 71.8 ± 7.12 歳 (年齢範囲: 51~85 歳), 男性 178 例, 女性 27 例であった。

2. 術中モニタリング

術中モニタリングとして上肢 SEP および上下肢導出の MEP の測定を行った。SEP は全対象例に, MEP は 2016 年 2 月以降の対象 80 例に実施した。使用機器は MEB-5508 (ニューロパック Σ, 日本光電), MEB-2306 (ニューロパック X1, 日本光電), SEN-4100 (日本光電) を用いた。

上肢 SEP は手術対側の手関節部での正中神経刺激により導出した。導出電極 (-) は Cz (国際 10-20 法) から後方 2 cm の位置より手術同側半球側へ 7 cm 外側の頭皮上に (体性感覚野における手の領域), 基準電極 (+) は Fz (国際 10-20 法) に, 針電極を設置した。記録条件は, 低域遮断フィルタ 20 Hz, 高域遮断フィルタ 3 kHz に設定した。刺激電極は手関節部の正中神経の走行に沿ってシール電極を設置し, 中枢側を陰極, 末梢側を陽極とした。刺激条件は持続時間 0.2 msec の矩形波を用い, 刺激頻度 5 Hz, 加算 100 回で, N20 の振幅が最大になる刺激強度に設定し, N20 の振幅を計測した。N20 の振幅は N20 成分立ち上がりから頂点までの電位を振幅とした。

MEP は経頭蓋運動野刺激にて導出した。導出電極 (-) は左右の短母指外転筋もしくは小指外転筋, 左右の母趾外転筋の筋腹に, 基準電極 (+) はそれぞれの筋の腱側に針電極を設置した。記録条件は, 低域遮断フィルタ 50 Hz, 高域遮断フィルタ 1.5 kHz に

設定した。刺激電極は Cz から前方 2 cm よりそれぞれ左右 5 cm 外側の頭皮上にコークスクリュー電極を設置し, 刺激側を陽極, 対側を陰極とした。電気刺激は, 定電圧刺激を monophasic モードで行った。刺激条件は持続時間 0.05 msec の矩形波を用い, ISI は 2.0 ms, train は 5-8 回で, 閾値上刺激 (MEP 波形が 30-50 μ V 以上の振幅が得られる刺激強度の 20%程度強い強度) の刺激強度に設定し, MEP の振幅を計測した。MEP の振幅は最大陽性成分と最小陰性成分の振幅差とした。

内頸動脈血流遮断直前での SEP と MEP をコントロールとし, 内頸動脈血流遮断後, 経時的に術中モニタリング波形の振幅を計測した。

3. Willis 動脈輪前方の血管分岐パターンの評価と分類

術前に施行した頭部 MRA において A1 と A-com の描出の有無により 4 群に分類した (Figure 1): Group A; 両側の A1 および A-com が描出されるもの, Group B; 手術側の A1 が描出不良で, 対側の A1 が描出されるもの, Group C; 手術側の A1 が描出され, 対側の A1 が描出不良のもの, Group D; 両側の A1 は描出されるが A-com が描出不良のもの, とした。内訳は Group A (163 例), Group B (19 例), Group C (20 例) および Group D (3 例) であった。

4. 統計的比較

内頸動脈血流遮断後の経時的モニタリング中に, コントロール波形と比較し, SEP または MEP モニタリング波形のいずれかで 50%以上の振幅低下を示した症例を陽性と判定した。陽性割合を血管分岐パターンによる 4 群間で Fisher の確率検定により比較した。有意水準は $p < 0.05$ とした。

III 結果

内頸動脈血流遮断後, 術中モニタリング波形変化を陽性と判定した件数と割合は Group A が 163 例中 10 例で 6.1%, Group B が 19 例中 4 例で 21.1%, Group C が 20 例中 10 例で 50.0%, Group D が 3 例中 3 例で 100%であった (Table 1)。Group A とその他のグループを比較した統計学的解析結果から, Group C と Group D は術中モニタリング波形の陽性率に有意差を認められた (Table 1)。また Group B は陽性率に

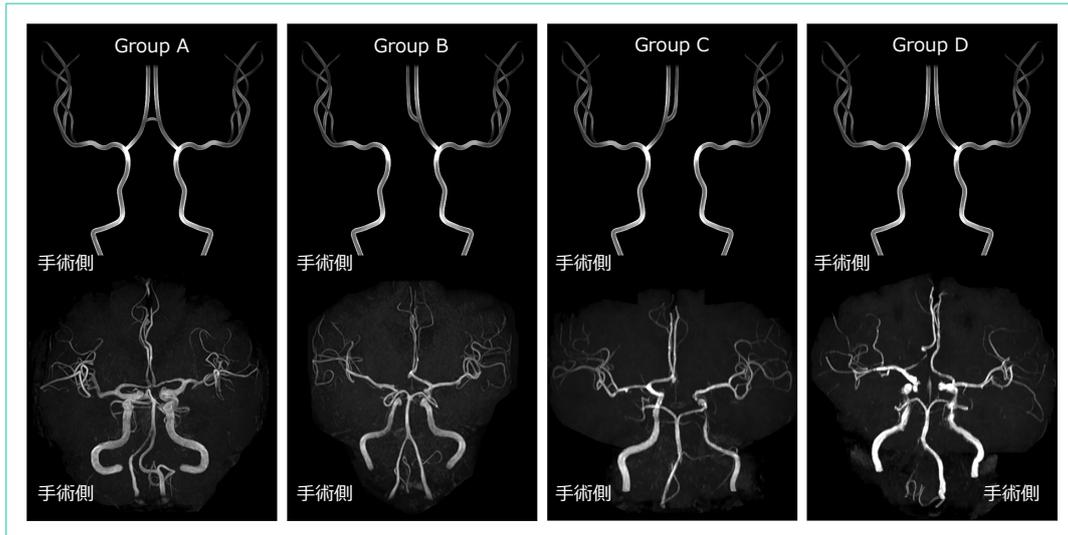


Figure 1 Willis 動脈輪前方の血管分岐のパターン分類と各グループでの代表症例の MRA

手術側を基準にしてグループ分けをした。

Group A：両側の A1 および A-com が描出されるもの；Group B：手術側の A1 が描出不良で、対側の A1 が描出されるもの；Group C：手術側の A1 が描出され対側の A1 が描出不良のもの；Group D：両側の A1 は描出されるが A-com が描出不良のもの

Table 1 術中モニタリング波形変化の陽性率と血管分岐パターンとの関係

| | | Group A | Group B | Group C | Group D |
|------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| 症例数 | | 163 | 19 | 20 | 3 |
| 陽性数/症例数 | SEP のみで判定 | 8/95 | 3/13 | 8/17 | 0/0 |
| | *SEP と MEP で判定 | 2/68 | 1/6 | 2/3 | 3/3 |
| 全体の陽性率 (%) | | 6.1 | 21.1 | **50.0 | **100 |

陽性：内頸動脈血流遮断前のコントロール波形と比較し同動脈血流遮断後に SEP あるいは MEP 波形の振幅が 50% 以上低下を示した症例

* 2016 年 2 月以降は判定に SEP と MEP を併用し、どちらか一方の振幅低下を陽性とした

** Group A と比較し、有意な差を認めたもの (Fisher の正確確率, $p < 0.05$)

差はあったものの、統計学的有意差はなかった。

IV 代表症例

1. Group A

72 歳男性, 右 CEA。

術前に行った頭部 MRA にて両側の A1 および A-com が描出された (Figure 1)。内頸動脈血流遮断中にモニタリング波形の陽性変化を認めなかった (Figure 2)。血流遮断中, SEP, MEP ともに陽性変化がなかったため, 内シャントは使用しなかった。

2. Group B

74 歳女性, 右 CEA。

術前に行った頭部 MRA にて手術同側の A1 が描出不良であった (Figure 1)。内頸動脈血流遮断中にモニタリング波形の陽性変化を認めなかった

(Figure 2)。血流遮断中, SEP, MEP ともに陽性変化がなかったため, 内シャントは使用しなかった。

3. Group C

63 歳男性, 右 CEA。

術前に行った頭部 MRA にて手術対側の A1 が描出不良であった (Figure 1)。内頸動脈血流遮断後 2 分で左上肢 MEP に陽性変化を認めたため (Figure 2), 術者へ警告し, 直ちに内シャントを挿入した。

4. Group D

74 歳男性, 左 CEA。

術前に行った頭部 MRA にて A-com が描出不良であった (Figure 1)。内頸動脈血流遮断後 10 分で右下肢 MEP に陽性変化を認めたため (Figure 2), 術

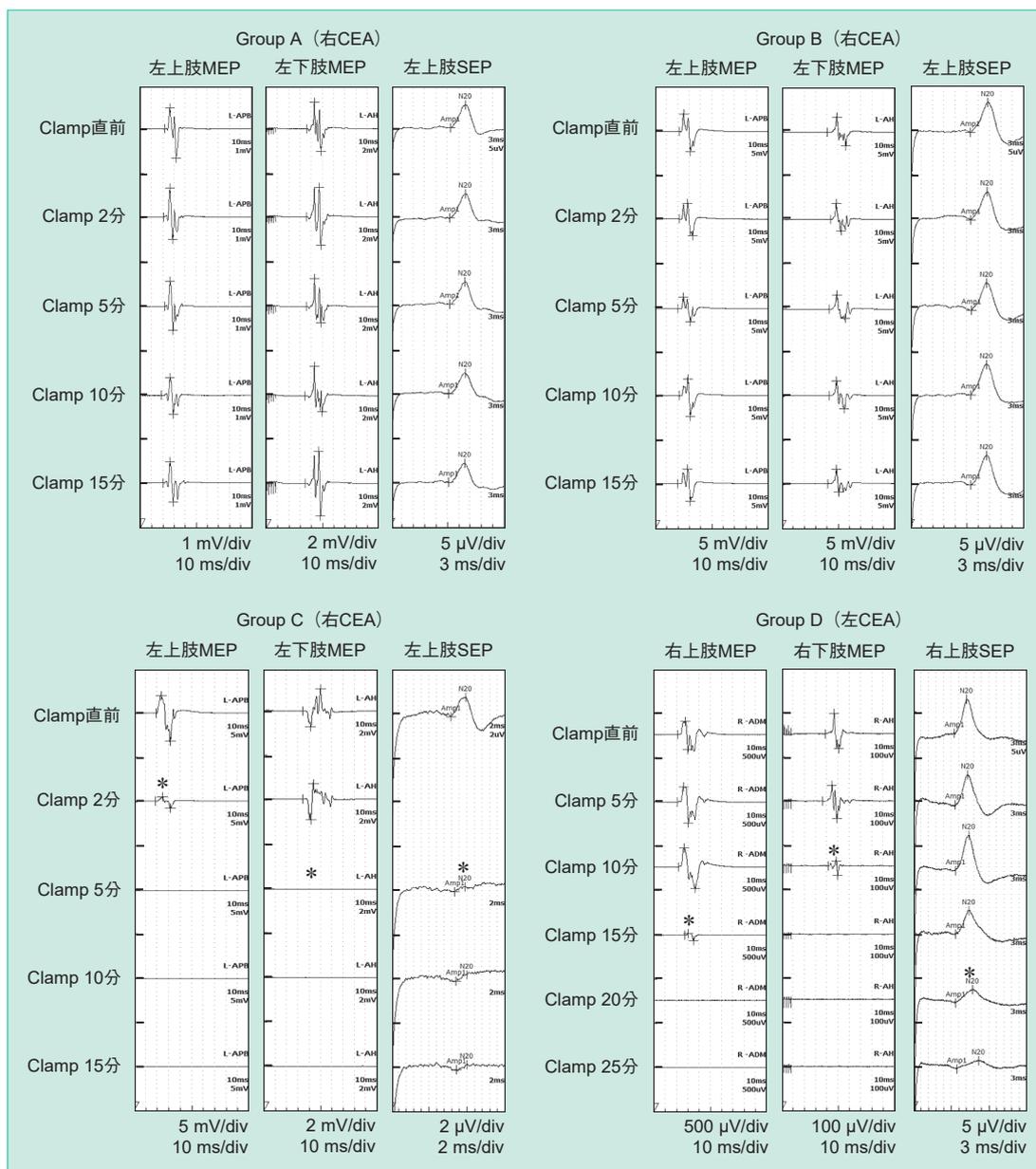


Figure 2 各グループにおける術中モニタリング波形の記録例
 Group A および B の症例は術中を通して術中モニタリング波形の振幅に変化は認めなかった。
 Group C および D の症例では、血流遮断後に術中モニタリング波形の振幅の低下を認めた (*)。

者へ警告し、直ちに内シャントを挿入した。

V 考察

CEA において SEP および MEP の変化は術中の脳虚血を検知するために用いられており、内頸動脈血流遮断時の脳虚血の発生と関わりがあるとされている^{1),3),4),7),10)}。内頸動脈血流遮断時の脳虚血の程度は、血管分岐の状態に依存し、A-com を介する対側からの血流の有無が脳虚血と関わりがあると考えられている^{3),5)}、Willis 動脈輪を形成する血管分岐パ

ターンにはいくつかのバリエーションがあり、血管の一部が欠損する場合もある^{5),6)}。今回の検討では Willis 動脈輪前方を形成する血管分岐の違いで、術中内頸動脈血流遮断時における SEP および MEP モニタリング波形の振幅低下出現率に有意差を認めた血管分岐のバリエーションのうち、Group C では半数に Group D では全例に振幅の低下を認め、脳虚血が生じたと判断された。Willis 動脈輪前方を形成する血管分岐パターンは、CEA における術中内頸動脈血流遮断時の脳虚血の要因の一つであり、手術対側

の A1 あるいは A-com の低形成および欠損があると、脳虚血が生じやすくなると考えられた。

Group D の症例数は少なかったものの SEP および MEP 振幅の低下を全例で認めた。MRA 上での A-com 描出については判断が難しい例があることは指摘されているが¹¹⁾、A-com の欠損や低形成が疑われる場合には、内頸動脈血流遮断時の脳虚血が生じやすい血管分岐パターンとして注意を要する。

A1 の描出不良例で、術中モニタリング波形変化が起こらなかった要因として、MRA で血流の同定が困難であっても実際の血流が存在する可能性があることや¹¹⁾、後交通動脈 (P-com) など A-com 以外の血管から血流が補われている可能性は考えられた。本報告の Group C には P-com からの血流により脳虚血から免れたと考えられた症例が認められた。

Group B は Group A と比較して、統計学的有意差はないものの術中モニタリング波形の振幅低下出現率に差を認めたが、Group C や Group D よりも低率であった。内頸動脈血流遮断時の脳内血流動態は Willis 動脈輪を構成する血管によるものだけではなく、軟髄膜吻合 (leptomeningeal anastomosis) が皮質の血流の保持に関与していると考えられている³⁾。Group C や Group D で対側の A1 や A-com が欠損もしくは低形成がある場合、対側から手術側の前大脳動脈末梢 (A2) へ血流が補われないため、A2 を介した leptomeningeal anastomosis が期待できず、手術側の脳半球が虚血状態に陥る可能性が高いと考えられた。一方 Group B の場合、手術側の A1 からの血行がなくても、対側から A-com を介して手術側の A2 への血行は保たれ、手術側の A2 からの leptomeningeal anastomosis により、中大脈領域への血流が補われ、脳虚血が生じにくかったと考えられた。

Group A で虚血が生じる割合は低かったが、10 例 (6.1%) で MEP あるいは SEP の振幅低下を認めた。A1 や A-com が描出され血行が保たれていても、対側の内頸動脈の狭窄などが影響していた可能性が考えられた。また、MRA では A-com の描出の有無の判断がつきにくいいため、実際は A-com が存在していなかった可能性も考えられた。術前の頭部 MRA で Group A と評価されても、術中の内頸動脈血流遮断時に脳虚血が生じる可能性は一定の割合で存在することを想定して術中モニタリングに臨むことは必要

である。

術中モニタリングを実施する検査技師による SEP や MEP の波形観察において、振幅の低下を認めた際の術者への迅速な注意喚起は、手術による合併症を予防するための重要な情報となる。術中での内頸動脈血流遮断時の脳虚血には内頸動脈血流遮断部を迂回する内シヤントを挿入して対応がなされるが、内シヤントによる合併症 (塞栓性脳梗塞や血管解離など) のリスクもあるため、本報告実施施設では術中の SEP および MEP モニタリング波形に振幅の低下を認めた時のみ内シヤントを行っている。このため、術中モニタリングは内シヤント適用決定の重要な指標となっている。本報告対象者の内シヤントを適用した症例で、術後麻痺が残存した例は現在のところ認めていない。

術中での SEP および MEP モニタリング波形は術中の脳虚血以外にも、麻酔薬、fade 現象、筋虚血、体温低下、アーチファクトの混入あるいはテクニカルエラーなど、様々な要因で変化する可能性がある^{8),12)}。術中 SEP あるいは MEP モニタリングを実施する技師にとっては波形変化の判断が困難となる場合もある。術前に頭部 MRA で A1 や A-com などの血管の分岐や血流状態を把握しておくことは、内頸動脈血流遮断時の脳虚血の可能性をある程度予測することを可能とし、波形変化の観察と術者への迅速な報告の一助となると考える。

VI 結語

臨床検査技師が術前に頭部 MRA で Willis 動脈輪前方の血流所見を把握し、内頸動脈血流遮断による脳血流低下の可能性を考慮して術中モニタリングに臨むことは重要である。

本論文の要旨は、第 70 回医学検査学会 (Web, 2021 年) で発表した。

倫理委員会 審査番号 1546

文献

- 1) 小山 新弥, 他: 局所酸素飽和度, 運動誘発電位, 体性感覚誘発電位を用いた頸動脈内膜剝離術の術中モニタリング—内シヤントの必要性に関連して—. 脳卒中の外科, 2014; 42: 340-346.
- 2) 西村 中, 飯原 弘二: 脳梗塞予防の外科治療—CEA の基本手技とヴァリエーション—. 脳外誌面, 2017; 26: 738-744.

- 3) 高須 俊太郎, 他: 頸動脈内膜剥離術における危険因子—術前の Willis 動脈輪前方の形態学的評価と術中 SEP の変化—. 脳卒中の外科, 2008; 36: 95–99.
- 4) 中嶋 千也, 他: 内シヤントを用いずに施行した CEA 連続 400 症例における周術期脳梗塞の検討—術中モニタリングおよび術後の DWI の結果より—. 脳卒中の外科, 2012; 40: 94–99.
- 5) 住田 寛, 瀧村 洋子: 左右非対称性大脳動脈輪の 1 例. 形態・機能, 2003; 2: 21–26.
- 6) 池田 美晴, 他: Willis 輪の解剖学的多様性—MR アンギオグラフィによる検討—. 東保学誌, 2003; 6: 137–145.
- 7) 高嶋 浩一, 他: 体性感覚誘発電位 (SEP) による術中モニタリング. 埼臨技会誌, 2011; 58: 80–85.
- 8) 田中 聡, 川真田 樹人: 運動誘発電位の麻酔: 静脈麻酔の有効性と問題点. 臨床神経生理学, 2016; 44: 473–477.
- 9) 佐々木 達也, 他: 脳神経外科手術における電気生理学的モニタリングの要点とピットフォール. 脳外誌, 2010; 19: 14–23.
- 10) 堀口 聡士, 他: 内頸動脈遮断早期に MEP 巨大波形が出現した 2 例. 脳卒中の外科, 2014; 42: 47–50.
- 11) 星野 晴彦, 他: 3 次元 Time of Flight MR アンギオによる Willis 動脈輪の検討—variation と加齢による変化—. 脳卒中, 1996; 18: 19–24.
- 12) 福岡 尚和, 他: 基礎から始める運動誘発電位モニタリング—脳外科, 脊椎・脊髄外科手術—. 日輪麻会誌, 2014; 34: 875–884.

本論文に関連し、開示すべき COI 状態にある企業等はありません。

Original Article

Evaluation of preoperative head MRA and changes in intraoperative monitoring waveform

Mitsuhiro HASHIMOTO¹⁾ Noriaki KONDO¹⁾ Kazumi IZAWA¹⁾ Kazuyasu SHIBATA¹⁾
Syuntaro TAKASU²⁾

- 1) Department of Physiological Laboratory, Japanese Red Cross Society Aichi Medical Center Nagoya Daini Hospital (2-9, Myoken-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8650, Japan)
- 2) Department of Neurosurgery, Chukyo Hospital

Summary

One of the complications of carotid endarterectomy (CEA) is cerebral ischemia caused by the clumping of the internal carotid artery. The incidence of cerebral ischemia depends more on the blood supply from other arteries than on the operated internal carotid artery. We investigated the relationship between the structure of the Willis artery circle on magnetic resonance angiography (MRA) images and the attenuation of the amplitudes of somatosensory (SEP)- and motor (MEP)-evoked potentials during the clumping of the internal carotid artery. The subjects were 205 patients who underwent SEP and MEP intraoperative monitoring during CEA. They were classified into four groups according to the MRA pattern of the anterior part of the Willis artery circle, i.e., the cerebral artery origin (A1) and the anterior communicating artery (A-com). During the clumping of the internal carotid artery, the SEP and MEP amplitudes decreased by 50% or more, in comparison with those before clumping. The incidence of SEP/MEP reduction of more than 50% was 6.1% in the group with bilateral A1 and A-com on MRA, 21.1% in the group with no A1 on the operated side, 50.0% in the group with no A1 on the non-operated side, and 100% in the group with no A-com. The presence or absence of blood supply from the non-operated to the operated side was one of the factors related to cerebral ischemia during the clumping of the internal carotid artery. The absence of A1 or A-com on MRA on the non-operated side indicates a high risk of cerebral ischemia during the clumping of the internal carotid artery in CEA.

Key words: intraoperative monitoring, carotid endarterectomy, Willis artery circle, motor evoked potential, somatosensory evoked potential

(Received: July 25, 2022; Accepted: November 18, 2022)