

総 説

脊髄虚血障害と Adamkiewicz 動脈
—— 脊髄保護における基本概念とその変遷 ——

Relationship between spinal cord ischemia and Adamkiewicz artery.

—— Basic concept of the spinal cord protection and transition of the concept ——

赤 坂 純 逸

Junetsu AKASAKA

東京医科大学八王子医療センター心臓血管外科

Department of Cardiovascular Surgery, Tokyo Medical University Hachioji Medical Center

はじめに

胸部下行大動脈瘤および胸腹部大動脈瘤に対する手術治療は、広範囲におよぶ大動脈人工血管置換に加え、腹部分枝や肋間動脈および腰動脈の再建を要し、周術期死亡率および術後合併症発生率も高い。中でも術後脊髄虚血障害（対麻痺）は、患者の生活の質や予後に大きな影響を与える重篤な術後合併症の1つである。術後脊髄虚血障害の発生原因は多くの因子が関わっていると考えられており、その予防のために大動脈遮断時間の短縮、遠位側大動脈灌流（distal aortic perfusion : DAP）や選択的肋間動脈灌流、肋間動脈の再建、脳脊髄液ドレナージ（cerebrospinal fluid drainage : CSFD）、盗血現象の防止に加えて小範囲分節遮断法、低体温法による虚血許容時間延長など様々な手技が用いられているが、未だ確実な予防法は確立していない。基本的には脊髄循環の維持と脊髄保護が重要であり、脊髄循環の維持のためには脊髄の栄養血管である前脊髄動脈に連続する Adamkiewicz 動脈が重要である¹⁾。Multidetector computed tomography (MDCT) を用いて本動脈の同定を行うことで、肋間動脈の再建レベルを含めた手

術手順を綿密に計画することが可能となり、手術成績の向上に寄与している。

近年、胸部大動脈瘤に対する低侵襲治療としてステントグラフト内挿術（thoracic endovascular aneurysm repair : TEVAR）による手術数が増加している。本法は Adamkiewicz 動脈を再建できないにも関わらず、重篤な脊髄虚血障害の発生が少ないと報告された。脊髄には豊富な側副血行路が存在するため、血流が1本の動脈のみに依存しないことが明らかとなり、その根拠とされた。また、通常の人工血管置換術においても側副血行路からの血流を維持することで術後脊髄虚血障害の予防が可能であることが報告された。本稿では術後脊髄虚血障害の予防に関する Adamkiewicz 動脈の重要性について概説し、脊髄保護に対する考え方の変遷について述べたい。

脊髄の動脈支配—発生と解剖—

脊髄は前正中裂を上下方向に縦走する1本の前脊髄動脈と2本の後脊髄動脈により栄養される。前脊髄動脈は脊髄の前2/3にあたる灰白質と前側索を栄養する。後脊髄動脈は後角の一部と脊髄後索を栄養する。両者の交通は脊髄末端部の円錐部のみで認め

令和4年1月28日受付、令和4年4月27日受理

キーワード：胸腹部大動脈瘤、脊髄虚血、Adamkiewicz 動脈、ステントグラフト治療

（連絡先：〒193-0998 東京都八王子市館町1163番地 東京医科大学八王子医療センター心臓血管外科）

TEL : 042-665-5611

られ、他の部位ではほとんど認められない。

発生初期は背側大動脈より体節数と同数の左右31対の分節動脈（計62本）が分枝する。脊髄の各分節は分節動脈から分枝する前根髄動脈と後根髄動脈から栄養される。発生の進行とともに頭尾側の前根髄動脈は融合し、1対の腹側縦走神経動脈を形成する。その後、腹側縦走神経動脈は正中で融合し、1本の前脊髄動脈となる。前脊髄動脈完成後はほとんどの前根髄動脈は退縮し、成人では平均6-8本程度となる。

下部胸髄と上部腰髄レベルに存在する最も太い前根髄動脈を Adamkiewicz 動脈といい²⁾、脊髄の重要な栄養血管と考えられている。Koshino らは102体の剖検例を詳細に観察し、Adamkiewicz 動脈は第8肋間動脈（Th8）から第1腰動脈（L1）の分枝レベル間に91%の確率で存在し、72%は左側に存在すると報告した。また、12%で Adamkiewicz 動脈が同定できなかったと報告した³⁾。Adamkiewicz 動脈は特徴的な hairpin curve を示すが、その理由は、脊椎骨と脊髄では成長の度合いが異なり、成長に従って脊柱管内に入る動脈の部位が脊髄に入る部位より尾側にずれるためである。前脊髄動脈は、Adamkiewicz 動脈の頭側で細径化し、脊髄尾側への血液供給が主となる。また、胸椎は他の部位と比較して成長度合いが大きいことから、中心溝動脈の密度が低

下する（critical zone）。そのため、胸髄は術中に容易に虚血をきたし、第4肋間動脈レベル付近からの対麻痺が術後に発生する原因となる（図1）。

Adamkiewicz 動脈の同定

古くは選択的血管造影が行われたが、Adamkiewicz 動脈の同定率は43~65.9%と低率であった⁴⁾⁶⁾。また、Kieffer らは、480例で選択的血管造影を行い、6例で検査に関連する主要な合併症である脊髄障害、腎機能障害および脳梗塞が発生したことを報告した。また、検査後3日以内に大動脈瘤破裂が2例で発生し、結果的に本検査を原因として2例が死亡したと報告した⁵⁾。以上より本検査では重篤な合併症の発生が少なくないことが示された。また、慢性大動脈解離では肋間動脈や腰動脈の造影自体がほぼ不可能であり、本検査は現在ではほとんど行われなくなった。その後、体性感覚誘発電位（somatosensory evoked potential：SSEP）⁷⁾ や脊髄誘発電位（evoked spinal cord potential：ESCP）⁸⁾ 等の術中の電気生理学的モニタリングにより Adamkiewicz 動脈の同定が試みられた。術中に肋間動脈、腰動脈を順次遮断してモニタリングを行い、誘発電位の低下がみられた肋間動脈および腰動脈を脊髄の重要な栄養動脈と同定し再建を行う方法である。しかし、2000年代に入り、MRA⁹⁾ や MDCT¹⁰⁾ を用いた Adamkiewicz 動

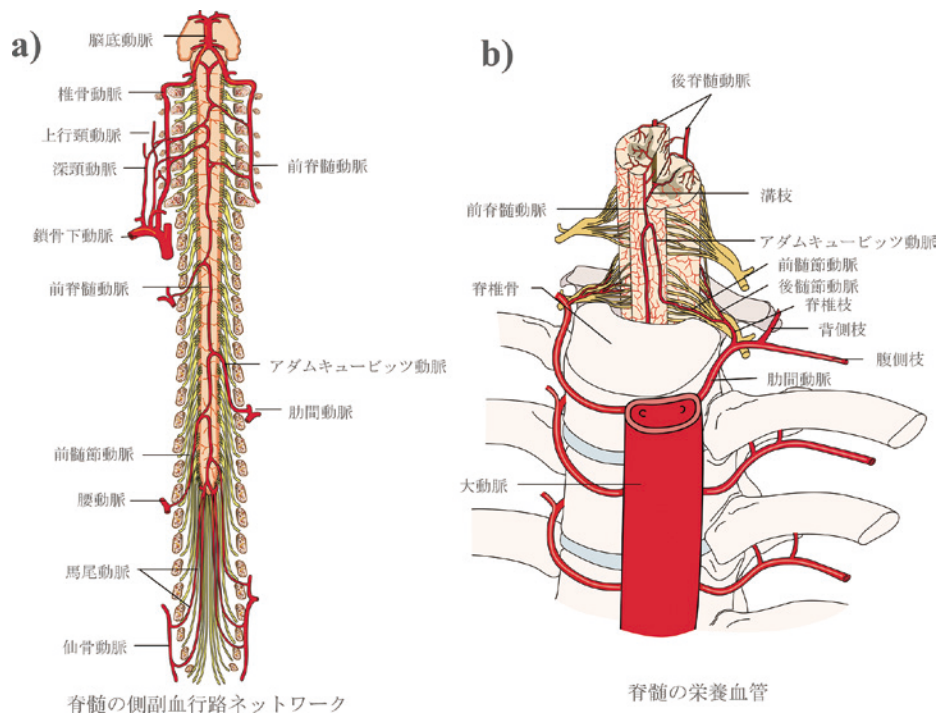


図1 a) 脊髄の側副血行路ネットワーク b) 脊髄の栄養血管（文献1より引用改変）

脈の同定が可能となり、侵襲が少ないことも相まって急速に普及することとなった。

当初、我々が行っていた MDCT の撮影方法は、16 列 MDCT を用いて、370 mgI/dL の造影剤を注入速度 3.5~4.5 mL/sec で体重に応じて 100-120 mL 注入し、生理食塩水による 30 ml の後押しを加えるものである。MDCT の多列化に伴い呼吸停止時間が短くなった半面、スキヤンタイミングを合わせる事がより重要となり、下行大動脈の頭側より Region of Interest (ROI) を設定して、血管内の CT 値が 150HU 程度でスキヤンを開始するように設定した。スキヤン持続時間は 20 秒程度とし、機種のも最も細かいコリメーション (1 mm 以下) を用いて電流を 350 mA 程度と高く設定した。スキヤン範囲は肺尖部から坐骨結節までの範囲とした。大動脈解離症例で Adamkiewicz 動脈が偽腔より起始する場合にはやや遅いタイミングでの撮影が適しているため、造影早期相撮影後 1 回息継ぎ後に再撮影を加えた。Adamkiewicz 動脈は hairpin curve を形成して前脊髄動脈に連続するため、この構造を目安として同定を行った。前脊髄静脈および前根髄静脈も似た形態を示すため、形態のみからの鑑別は不確実であり、最も確実な方法は曲面展開画像 (Curved Planar Reformat: CPR) を用いて大動脈から肋間動脈、Adamkiewicz 動脈、前脊髄動脈に沿った連続性を描出することである。本法で Adamkiewicz 動脈の描出率は 90% 程度であった。また、連続性を描出できたものは 90% であった。最近では 64 列、124 列

と CT 機器の多列化が進み、造影法、再構成プロトコル関数、動脈内造影剤注入法等の様々な進歩により Adamkiewicz 動脈検出率は向上している¹¹⁾。

Adamkiewicz 動脈を術前同定することの有用性

術前に MDCT を用いて Adamkiewicz 動脈を同定することで、肋間動脈の再建部位および再建本数を術前に検討し、決定することが可能となった。実際に、術前に Adamkiewicz 動脈を同定し、その起始レベルの肋間動脈および腰動脈のみを再建した群と、術前に同定できなかったために可及的に数多くの肋間動脈を再建した群を比較し、術前同定群が術後脊髄虚血障害の発生を優位に抑制したことが報告された¹²⁾。また、術中大動脈遮断時間を短縮できることも報告された¹³⁾。Adamkiewicz 動脈が大動脈置換範囲外に存在することが事前に判明すれば、肋間動脈の再建を省略することも可能であると報告された¹⁴⁾。

ステントグラフト治療

TEVAR では、分節動脈再建は不可能であるにも関わらず、脊髄虚血障害発生は少ないと考えられ、脊髄血流が 1 本の動脈に依存しないことの裏付けとなった。筆者らは Adamkiewicz 動脈がステントグラフト治療範囲内に存在する胸部下行大動脈瘤に対して TEVAR を施行した。術後に施行した MDCT では、Adamkiewicz 動脈起始部はステントグラフトにより閉塞されていたが、側副血行路を介して良好に造影されていた¹⁵⁾ (図 2)。

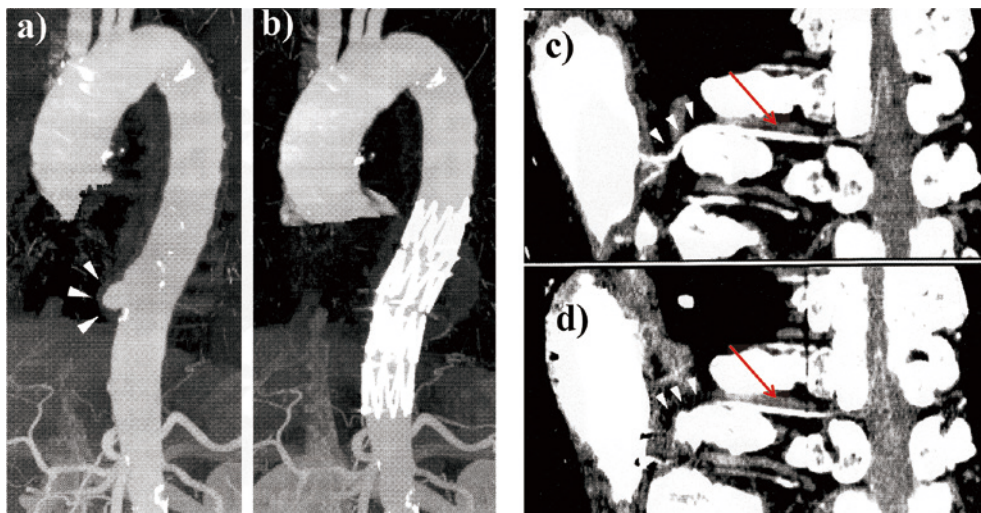


図 2 a) 術前 MDCT 画像。胸部下行大動脈に ulcer like projection を認める (white arrow-head)。c) 術前 MDCT 画像。第 9 肋間動脈から連続する Adamkiewicz 動脈 (red arrow)。b) d) TEVAR 後 MDCT 画像。ステントグラフトによって第 9 肋間動脈起始部は閉塞しているが、第 9 肋間動脈に連続する Adamkiewicz 動脈は良好に造影されている。

TEVAR は治療範囲が限定されることから、単純に人工血管置換術と比較することはできないが、遠位側大動脈に拍動流が維持される点、盗血現象がない点が分節動脈非再建人工血管置換術より TEVAR が有利であると考えられる。しかし、分節動脈非再建に伴う遅発性脊髄虚血障害のリスクは通常の人工血管置換術と変わらない。また、shaggy aorta 症例での塞栓による脊髄虚血障害を予防することは不可能である。

脊髄血流の側副血行路

以上のように Adamkiewicz 動脈を同定して再建することが、脊髄保護の定石とされてきた。しかし、分節動脈が脊柱管内外で、上下・左右で吻合し、豊富な側副血行路ネットワークを形成し、脊髄血流維持に寄与していることが明らかとなってきた。

側副血行路には、以下の4つの経路が認められる。

① 前脊髄動脈を介する側副血行路

前脊髄動脈は Adamkiewicz 動脈の頭側で細径化するため、脊髄尾側から頭側への血流は期待できない。そのため、DAP のみでは脊髄虚血障害を完全に予防することはできない¹⁶⁾。一方、Adamkiewicz 動脈より尾側の腰仙部には hairpin curve の形態をとらない分節動脈由来の前根髄動脈が4割程度で存在することが報告された^{17,18)}。本前根髄動脈は、前脊髄動脈に脊髄尾側から合流して Adamkiewicz 動脈領域へ到達するため、DAP と肋間動脈および腰動脈からの盗血現象を防止することで脊髄虚血障害を予防できることが示された¹⁸⁾。

② 脊柱管内の epidural arcade を介する側副血行路

分節動脈間を上下および左右に交通する epidural arcade を介する側副血行路である。小範囲分節遮断法は、一度に遮断する肋間動脈の分節数を2対以下とし、Adamkiewicz 動脈への灌流を DAP で維持しつつ、中枢側吻合および Adamkiewicz 動脈に近接する数対の肋間動脈を再建する方法である。本法では Adamkiewicz 動脈が再建されるまでは、先に再建された肋間動脈から epidural arcade を介して脊髄血流が維持される。

③ 脊柱管外の paraspinous network を介する側副血行路

Paraspinous network は、細動脈の吻合によるネットワークを介した側副血行路である。そのため、術

後の脊髄への十分な血流量を供給できる太さに発達するまでには時間を要する¹⁹⁾。従って、主な分節動脈が閉塞された直後からの十分な血流は期待できない。また、本側副血行路の供給血流を拍動流から定常流にすると末梢肋間動脈圧が低下することが観察された²⁰⁾。DAP は低圧定常流灌流であることから、本側副血行路への血流供給は不十分となることが指摘されている。

④ 大動脈解離等による分節動脈の閉塞や既往手術による修飾の結果、extrathoracic collateral が発達するもの

Extrathoracic collateral も paraspinous network と同様に分節動脈閉塞直後からの効果が期待できる側副血行路ではなく、十分な血流量を供給できるまでには時間を要する。Griep らは実験的に、分節動脈閉塞5日後に paraspinous network と extrathoracic collateral が増加していることを報告している²¹⁾。下行大動脈人工血管置換術後の患者では置換部位の分節動脈は殆ど閉塞されるため、paraspinous network と extrathoracic collateral が側副血行路として脊髄の血流を維持していると考えられる。従って、staged repair では側副血行路発達のためのプレコンディショニング効果により脊髄虚血が予防されると考えられる。Etz らは、staged repair では、1期手術より広範囲の分節動脈を閉塞した場合でも、脊髄障害発生率は優位に減少したと報告している²²⁾。

Collateral network concept とその限界

「脊髄への血流は Adamkiewicz 動脈のみならず、脊柱管内の豊富な側副血行路ネットワークに加え、脊柱管外にも鎖骨下動脈、椎骨動脈、内胸動脈、下甲状腺動脈、肋間動脈、腰動脈、内腸骨動脈などの側副血行路からも灌流されているという解剖学的事実から、脊髄灌流圧を高く維持することで分節動脈を閉塞しても脊髄血流は保たれる。」という collateral network concept が一般的となっている。

その礎となったのは、1996年の Griep らの報告である。SSEP の術中モニタリング下に分節動脈を順次結紮し、誘発電位の低下が認められる分節動脈を再建する方針で手術を進めた。その結果として治療範囲の全分節動脈を閉塞しても SSEP に変化が見られたものは1例もなく、術後脊髄虚血障害は2%と低率であったと報告した。しかし、10対以上の分節動脈を結紮した21例中2例(9.5%)で対麻痺

が発生し、良好な結果が得られなかったことを報告した²³⁾。次いで、2006年に Ets らは、100例の胸部下行大動脈瘤手術例で、術中血圧を高めに設定し、CSFDを併用して側副血流を維持し、平均 8 ± 2.6 対の分節動脈を閉塞し、その成績を報告した。術後脊髄虚血障害は2%、手術死亡は6%と良好な成績であった²⁴⁾。これらの一連の研究の結果から collateral network concept が提唱されることとなった²⁵⁾。

しかし、大動脈の置換範囲が広範囲になり、閉塞される肋間動脈が増加すれば側副血行路からの血流も減少することになり、分節動脈の再建が必要ない

と結論することはできない。Zoli らは胸部下行および胸腹部大動脈瘤に対して手術を行った609例を分節動脈の閉塞数によって4群に分類し、術後対麻痺の発生率について検討を行った。8対の分節動脈を処理した群では対麻痺の発生は1.2%であったのに対し、13対以上の分節動脈を処理した群では12.5%であったと報告した²⁶⁾。このことは、Crawford II型のような広範囲大動脈置換が必要な症例では Adamkiewicz 動脈を含めた複数の分節動脈の再建が重要であることを再認識させるものであった。

TEVAR においても治療長が広範囲であればある

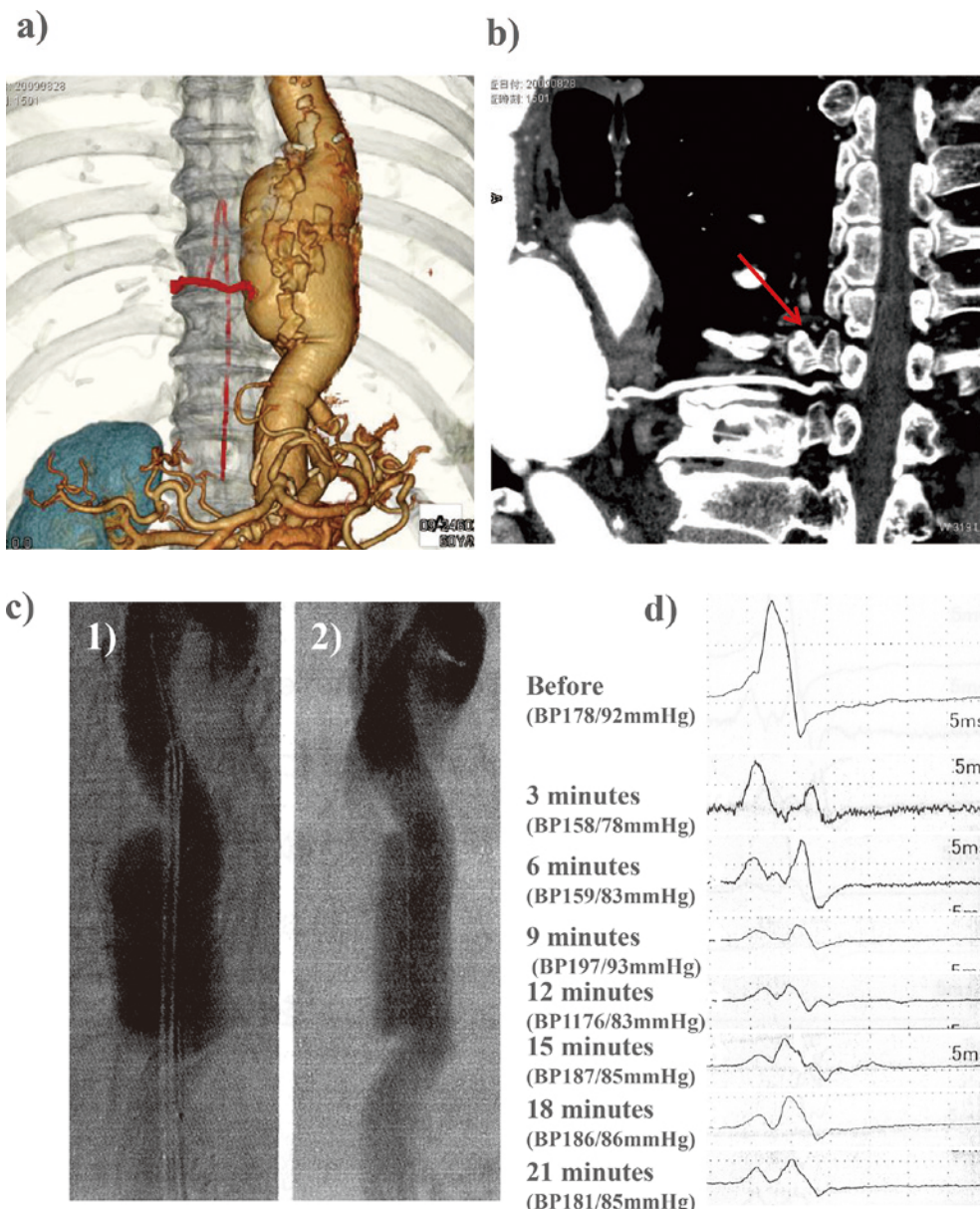


図3 a) b) 術前 MDCT 画像。胸腹部大動脈瘤術後であり、肋間動脈は島状に再建されていた。島状再建部が拡大し動脈瘤を形成している。島状再建部から起始した第10肋間動脈から連続する Adamkiewicz 動脈を認めた (red arrow)。c) Digital subtraction aortography 1) retrievable stent graft 留置前 2) retrievable stent graft 留置後。d) retrievable stent graft 留置前および留置後3分毎の MEP 記録。誘発電位が著明に低下しており、脊髄虚血が疑われた。

ほど脊髄虚血障害のリスクは高くなる。Matsuda らは、TEVAR で治療を行った胸部下行大動脈瘤 50 例について検討を行い、全胸部下行大動脈にステントグラフトを挿入した症例では術後脊髄虚血障害の発生が 6% で、特に Adamkiewicz 動脈を閉塞したものでは 12.5% であったと報告した。また、治療長が 300 mm を超える TEVAR では術後脊髄虚血障害のリスクが高くなると報告している²⁷⁾。筆者らは、胸腹部大動脈瘤術後の肋間動脈島状再建部の動脈瘤に対し retrievable stent graft を挿入して再建肋間動脈を閉塞し、運動誘発電位 (motor-evoked potential : MEP) を計測することで脊髄虚血の有無について評価を行った。術前 MDCT では島状再建部動脈瘤から起始する第 10 肋間動脈より Adamkiewicz 動脈が連続しており、retrievable stent graft による肋間動脈閉塞後に誘発電位は低下を示した。retrievable stent graft を回収し、TEVAR は中止とした。その後肋間動脈再建を伴う人工血管置換術を行い、対麻痺の発生は予防できた²⁸⁾ (図 3)。

最 後 に

胸部下行大動脈瘤および胸腹部大動脈瘤に対する手術治療においては、術後脊髄虚血障害の予防が重要である。しかし、その発生原因は多くの因子が関わっていると考えられており、様々な予防法が試みられているが確実な予防方法は、未だ確立していない。筆者らのグループでは、胸部下行および胸腹部大動脈瘤 102 例に対して人工血管置換術を施工し、術後対麻痺の発生は 3.9%、在院死亡は 5.9% の成績であった²⁹⁾。TEVAR の出現により手術の低侵襲化が図られているが、分枝再建やエンドリーク等の解決すべき問題も多い。術後脊髄虚血障害の予防については、脊髄の解剖および生理機能の理解を深め、手術法、循環補助法、脊髄保護などの更なる技術的進歩が必要であると考えられる。

著者の COI 開示：本論文発表内容に関連して特に申告ありません。

文 献

- 1) Amato ACM, Stolf NAG : Preoperative Assessment of the Spinal Cord Vasculature. *Visceral Vessels and Aortic Repair* (Springer). pp. 285-295, 2019
- 2) Skalski JH, Zembala M. Albert Wojciech

- Adamkiewicz : the discoverer of the variable vascularity of the spinal cord. *Ann Thorac Surg* **80** : 1971-1975, 2005
- 3) Koshino T, Murakami G, Morishita K, Mawatari T, Abe T : Does the Adamkiewicz artery originate from the larger segmental arteries? *J Thorac Cardiovasc Surg* **117** : 898-905, 1999
 - 4) Minatoya K, Karck M, Hagl C, et al. : The impact of spinal angiography on the neurological outcome after surgery on the descending thoracic and thoracoabdominal aorta. *Ann Thorac Surg* **74** : 1870-1872, 2002
 - 5) Kieffer E, Fukui S, Godet G, et al. : Spinal cord arteriography : a safe adjunct before descending thoracic or thoracoabdominal aortic aneurysmectomy. *J Vasc Surg* **25** : 262-268, 2002
 - 6) Williams GM, Roseborough GS, Webb TH, et al. : Preoperative selective intercostal angiography in patients undergoing thoracoabdominal aneurysm repair. *J Vasc Surg* **39** : 314-321, 2004
 - 7) Laschinger JC, Cunningham JN, Aumann FG, et al. : Monitoring of somatosensory evoked potentials during surgical procedures on the thoracoabdominal aorta. III. Intraoperative identification of vessels critical to spinal cord blood supply. *J Thorac Cardiovasc Surg* **94** : 271-274, 1987
 - 8) Shiiya N, Yasuda K, Matsui Y, et al. : Spinal cord protection during thoracoabdominal aortic aneurysm repair : results of selective reconstruction of the critical segmental arteries guided by evoked spinal cord potential monitoring. *J Vasc Surg* **21** : 970-975, 1995
 - 9) Yamada N, Okita Y, Minatoya K, et al. : Preoperative demonstration of the Adamkiewicz artery by magnetic resonance angiography in patients with descending or thoracoabdominal aortic aneurysms. *Eur J Cardiothorac Surg* **18** : 104-111, 2000
 - 10) Takase K, Sawamura Y, Igarashi K, et al. : Demonstration of the artery of Adamkiewicz at. multidetector row helical CT. *Radiology* **223** : 39-45, 2002
 - 11) Takase K, Akasaka J, Sawamura Y, et al. : Preoperative MDCT evaluation of the artery of Adamkiewicz and its origin. *J Comput Assist Tomogr* **30** : 716-722, 2006
 - 12) Kawaharada N, Morishita K, Fukada J, et al. : Thoracoabdominal or descending aortic aneurysm repair after preoperative demonstration of the Adamkiewicz artery by magnetic resonance angiography. *Eur J Cardiothorac Surg* **21** : 970-974, 2002
 - 13) Fukada J, Morishita K, Kawaharada N, et al. : Less-invasive thoracic aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Surg* **74** : 1244-1246, 2002
 - 14) Fukada J, Morishita K, Hyodoh H, et al. : Descending or thoracoabdominal aortic aneurysm repair without intercostal vessel reconstruction using contrast mag-

- netic resonance angiography : report of two cases. *Surg Today* **32** : 163-166, 2002
- 15) Akasaka J, Sakurai M, Takase K, et al. : Another blood supply to Adamkiewicz's artery. *Jpn J Thorac Cardiovasc Surg* **52** : 432-434, 2004
 - 16) Svensson LG, Richards E, Coull A, et al. : Relationship of spinal cord blood flow to vascular anatomy during thoracic aortic cross-clamping and shunting. *J Thorac Cardiovasc Surg* **91** : 71-76, 1986
 - 17) Nojiri J, Matsumoto K, Kato A, et al. : The Adamkiewicz artery ; demonstration by intra-arterial computed tomographic angiography. *Eur J Cardiothoracic Surg* **31** : 249-255, 2007
 - 18) Shiiya N, Wakasa S, Matsui K, et al. : Anatomical pattern of feeding artery and mechanism of intraoperative spinal cord ischemia. *Ann Thorac Surg* **88** : 768-771 ; discussion 72, 2009
 - 19) Meffert P, Bischoff MS, Brenner R, et al. : Significance and function of different spinal collateral compartments following thoracic aortic surgery ; immediate versus long-term flow compensation. *Eur J Cardiothorac Surg* **45** : 799-804, 2014
 - 20) Etz CD, Di Luozzo G, Zoli S, et al. : Direct spinal cord perfusion pressure monitoring in extensive distal aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Surg* **87** : 1764-731, 2009
 - 21) Griep RB, Griep EB : Spinal cord protection in surgical and endovascular repair of thoracoabdominal aortic disease. *J Thorac Cardiovasc Surg* **149** : S86-90, 2015
 - 22) Etz CD, Zoli S, Mueller CS, et al. : Staged repair significantly reduces paraplegia rate after extensive thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Thorac Cardiovasc Surg* **139** : 1464-1472, 2010
 - 23) Griep RB, Ergin MA, Galta JD, et al. : Looking for the artery of Adamkiewicz ; a quest to minimize paraplegia after operation for aneurysms of the descending thoracic and thoracoabdominal aorta. *J Thorac Cardiovasc Surg* **112** : 1202-1213 : discussion 13-58, 1996
 - 24) Etz CD, Halstead JC, Spielvogel D, et al. : Thoracic and thoracoabdominal aneurysm repair ; is reimplantation of spinal cord arteries a waste of time? *Ann Thorac Surg* **82** : 1670-1677, 2006
 - 25) Griep RB, Griep EB : Spinal cord perfusion and protection during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery : the collateral network concept. *Ann Thorac Surg* **83** : S865-S869, 2007
 - 26) Zoli S, Roder F, Etz CD et al. : Predicting the risk of paraplegia after thoracic and thoracoabdominal aneurysm repair. *Ann Thorac Surg* **90** : 1237-1244, 2010
 - 27) Matsuda H, Fukuda T, Iritani O, et al. : Spinal cord injury is not negligible after TEVAR for lower descending aorta. *Eur J Vasc Endovasc Surg* **39** : 179-186, 2010
 - 28) Akasaka J, Takase K, Tabayashi K : Evaluation of spinal cord ischemia with a retrievable stent graft is useful for determining the type of repair for a case of patch aneurysm. *Ann Vasc Surg* **28** : 1313-1316, 2014
 - 29) Tabayashi K, Saiki Y, Kokubo H, et al. : Protection from postischemic spinal cord injury by perfusion cooling of the epidural space during most or all of a descending thoracic or thoracoabdominal aneurysm repair. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* **58** : 228-234, 2010