

総 説

弓部大動脈の外科治療

堤 浩二

防医大誌 (2025) 50 (4) : 133 – 138

要旨：弓部大動脈の外科治療は、心臓血管外科の中でも特に困難な領域として認識されていた。しかし、近年では脳保護法の発展やFrozen Elephant Trunk (FET) 法の導入により治療成績が向上した。その過程では日本発の技術や国産デバイスが果たした役割が大きい。我々は安全性を重視した手術戦略を採用し、良好な成績を示している。

索引用語： 弓部大動脈手術 / 全弓部置換術 / FET法 / 脳分離体外循環

緒 言

弓部大動脈は上行大動脈から下行大動脈への移行部であり、腕頭動脈、左総頸動脈、左鎖骨下動脈の3本が分岐し、心臓から送り出された血液を脳・全身へ振り分けるため、この部位に発生する疾患は生命に直結する「大動脈の要衝」である。弓部大動脈の外科治療は解剖学的複雑性と臓器保護（特に脳保護）の必要性から、心臓血管外科の中でも特に困難な領域として歴史的に認識され、近年では治療成績も向上し発展してきた。本論文では弓部大動脈の手術法の変遷について総説した後、現在当院で採用して

いる治療術式について述べる。

弓部大動脈の疾患と手術適応

代表的疾患は弓部大動脈瘤と大動脈解離であり、この2疾患が大部分を占める (Fig. 1)。弓部大動脈瘤は動脈硬化性変性によるものが多く、しばしば粥腫や壁血栓を伴う。瘤径が一定以上に拡大すると圧迫症状（左反回神経障害による嗄声が有名）や疼痛を生じ、破裂や解離に至ると致命的である。形態的に紡錘瘤（全周性に拡大する）と嚢状瘤（部分的に突出するように拡大する）に分類されるが、紡錘瘤は最大

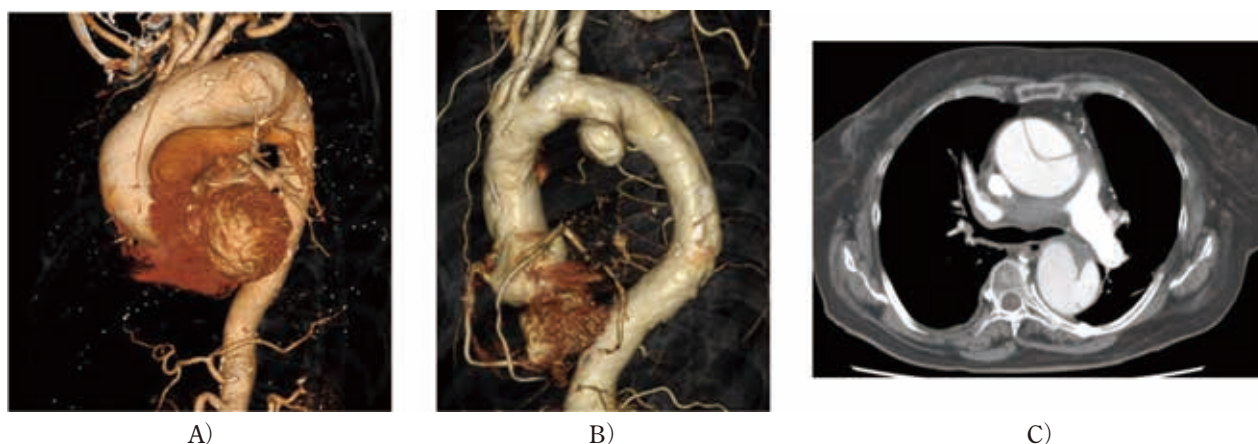


Fig. 1 弓部大動脈疾患のCT画像

A) 弓部大動脈瘤（紡錘瘤）、B) 弓部大動脈瘤（嚢状瘤）、C) 急性大動脈解離（Stanford A）

短径55 mm以上で手術適応とされ、嚢状瘤はその限りではなく拡大傾向にあれば手術適応とされるのが一般的である¹⁾。急性大動脈解離は上行大動脈に解離がある（Stanford A型）と緊急手術の適応となり、そのうち70%程度は弓部大動脈に解離病変が及ぶとされる²⁾。大動脈解離の慢性期に大動脈径が拡大し生じた解離性大動脈瘤も治療対象になり、最大短径55 mm以上で手術適応となる¹⁾。Marfan症候群、Ehlers-Danlos症候群といった遺伝性結合組織疾患を背景とした症例は若年発症することも留意すべきである。その他には、高エネルギー外傷による外傷性大動脈瘤、大動脈炎症候群（高安動脈炎）やBehcet病といった炎症性疾患に伴う大動脈瘤も比較的稀だが治療対象となる。一方、高齢者や重篤な合併症を有する患者が対象になることが多いが、手術リスクと自然予後のリスクを天秤にかけ、慎重に適応を検討することが求められる。

手術法の歴史的変遷

心臓血管外科手術の歴史はGibbon³⁾やLillehei⁴⁾らが開発した人工心肺装置が実用化された1950年代後半から大きく進展を始めた。大動脈瘤手術は1951年にDubost⁵⁾により腹部大動脈瘤に対して行われたが、当初は同種大動脈が用いられた。その後1959年に現在使われるものの原型となるダクロン製の人工血管が我が国で開発され、以降大動脈瘤に対する人工血管置換術が普及することになった⁶⁾。弓部大動脈の手術は脳への血流が一時的に途絶えることになるため、手技中の脳保護法が最重要事項である。南アフリカのBarnard（世界初の心臓移植を行ったことで有名）らは1963年に初めて超低体温循環停止（Deep Hypothermic Circulatory Arrest: DHCA）により弓部大動脈瘤の手術を成功させた⁷⁾。DHCAとは全身を15～20℃程度まで冷却し、全身の酸素需要量を低下させた上で数十分間体温循環を停止している間に手術操作を行う手術法である。その後、米国のGriepが1975年にDHCAを用いた弓部大動脈置換術のシリーズ症例を報告し、安全な脳保護法として確立させた⁸⁾。この技術により、それまで不可能であった弓部大動脈全域の置換手術（全弓部

置換術）が可能となり、この領域の手術治療が発展していくことになる。

脳保護法の発展

弓部大動脈手術における最大の課題はいかに脳を保護するかであり、手術成績を大きく左右した。初期には前述のようにDHCAのみで対処していたが、安全に行えるのはおおよそ30～40分程度であり、それ以上に延長すると脳神経障害のリスクが高まることが次第に明らかになってきた^{9, 10)}。そこで1980年代末から1990年代にかけて、DHCA下で補助手段として脳に血液を送る「脳灌流法」が開発された。まず1990年前後に登場したのが逆行性脳灌流法（Retrograde Cerebral Perfusion: RCP）である。これはDHCA下に酸素化し冷却した血液を上大静脈から逆行性（静脈側から動脈側の方向）に頭部へ送り込み、脳静脈系を通じて脳組織に酸素供給を図る方法で、上田らが1990年に報告した¹¹⁾。RCPは技術的に簡便で、DHCA時間の延長に有用と考えられた。実際、上田らの多施設研究（症例数249例）では、DHCA+RCP併用時の脳神経障害発生率は4%と良好で、循環停止時間が最長80分に及んだ症例でも救命しうることが報告された¹²⁾。一方で解析により、RCP時間が長時間になると死亡リスクが増加する傾向も示された。RCPでは脳静脈洞を経由して緩徐に酸素化血を供給されるため送血量が限られ脳保護効果は不完全であることから、「簡便だが過信は禁物」な補助手段と位置付けられた。次いで登場した順行性選択的脳分離灌流法（Selective Antegrade Cerebral Perfusion: SACP）は酸素化し冷却した血液を大動脈側から直接カニューレを留置して脳灌流を行う方法である。1990年に数井らは32症例で、DHCA下にSACP（腕頭動脈および左総頸動脈へそれぞれ灌流した）を用い、脳神経合併症ゼロという極めて良好な成績を報告した¹³⁾。RCPと比較しSACPはより生理的に脳循環を維持することができると考えられ、脳保護が担保されている状態であるからDHCAの時間的制約が緩和され弓部大動脈手術の安全域が大幅に拡大した。その後SACPは欧米始め世界的に浸透し、標準的な脳保護法として定着した^{14, 15)}。またSACPで十分な脳灌

流が確保できれば、体温はむしろ過度に下げない方が全身合併症を減らせるため、近年は循環停止をしている間の体温を超低体温(20℃未満)ではなく中等度(20~28℃)に留める戦略も一般化した¹⁶⁻¹⁸⁾。これら脳保護戦略の進歩に伴い、弓部大動脈手術の手術成績は大きく改善した。

日本胸部外科学会調査によると我が国で1996年に施行された弓部大動脈手術(緊急手術を除く)は903例で手術死亡率は21.6%であったが、2016年には手術件数2542例、手術死亡率5.0%と報告されている²⁾。これは筆者の実体験と一致しており、修業中の身であった2000年前後には弓部大動脈手術ともなると手術が夜通し終わらず、さらに手術後の管理にも忙殺された苦い記憶が残っているが、近年の手術と比較すると隔世の感を禁じ得ない。

FET (Frozen Elephant Trunk) 法と国内での展開

大動脈瘤が弓部だけに留まらず連続する下行大動脈にも進展する遠位弓部大動脈瘤の手術治療は、手術侵襲が大きく困難を伴う挑戦的なものであった。1983年にBorstらが考案したElephant Trunk (ET) 法は全弓部置換術の際に、その遠位端から下行大動脈内へ向かって人工血管が遊離するように(象の鼻を模して命名された)留置し、二期目の下行大動脈置換の際にその人工血管に中枢側吻合を行う方法であった¹⁹⁾。有用な手術法ではあったが、結局大きな手術侵襲を伴う左開胸による二期的手術を追加して行うことになるという限界があった。ステントグラフトとは人工血管に、自立して拡張する形状記憶合金製の骨格部分(ステント)を内蔵したもので、折りたたんだ状態で血管内経路に病変部分へと到達した後に拡張することで人工血管が血管内に圧着され固定し、病変部分を血流から遮蔽し治療を行う。1996年に加藤らは独自に開発したステントグラフトを用いて、DHCAとSACPを用いた全弓部置換術中に下行大動脈へのステントグラフト留置術を合わせて一期的に行った患者10症例の良好な成績を報告し、この日本発の術式をOpen Stent Grafting (OSG) と命名した²⁰⁾。その後、2003年になってKarkらが企業製のステントグラフトを用いた同様の術式を、Frozen Elephant Trunk (FET) (象の鼻が

凍結して固定されるイメージから命名された)の名称で報告して以降、各種商用デバイスの登場と併せて欧州を中心にFETの名称とともにこの手術法が広まり、定着した²¹⁾。このように日本人の手柄が欧州に奪われた格好の経緯があり、日本国内ではFETよりもOSGと呼ぶ方が通りが良い印象がある。

日本では2000年代、欧州製デバイスの治験使用などはあったものの長らく保険承認された製品がなく、本格的普及は遅れていた。転機となったのは国産FETデバイス「J Graft Frozenix」(ジャパンライフライン社)の開発であり、2014年に製品化・市販開始された²⁾。Frozenixは①ステントは一本のニチノール線を編んで管状に成形しており、拡張径が変化しても長さが変わらない、②ステントは全周が人工血管で覆われ露出していないため血管へのダメージを抑制する、③人工血管部分(ステント非搭載部分)は柔軟で弓部のカーブに沿いやすく、またデバイス全体の操作性も高い、④デバイスを挿入し位置決め後に外鞘を引くだけでステントが拡張し留置可能であり操作法が簡便、など開発上のこだわりが感じられる特徴がある。発売以降、日本におけるFET法は急速に普及し、2019年までの時点で12,000本以上ものFrozenixが国内で使用された(Fig. 2)。

FET法の利点として下行大動脈の追加手術を省略できる点が最大のメリットであるが、それ以外にも大動脈弓部遠位側の吻合操作が容易になる点が指摘される。通常的全弓部置換術では左鎖骨下動脈のさらに遠位側で吻合を行う必要があるが、大動脈が胸腔へと深く落ち込んで走行する部分であるため術野が深く手術操作が困難になりがちで、かつ食道や胸管の損傷リスクがあり外科医泣かせの手技であった。FETではステントグラフトが大動脈弓部遠位部をカバーさせるように左鎖骨下動脈手前から留置すれば、その吻合を左鎖骨下動脈手前で行うことが出来る。それにより手術時間の短縮や術後出血リスク低下のメリットに加え、従来の全弓部置換術に多く見られた左反回神経(左総頸動脈と左鎖骨下動脈間を走行する)の損傷による術後嘔声や嚥下障害といった合併症を回避することが出来る。一方、欠点として脊髄虚血(脊髄梗

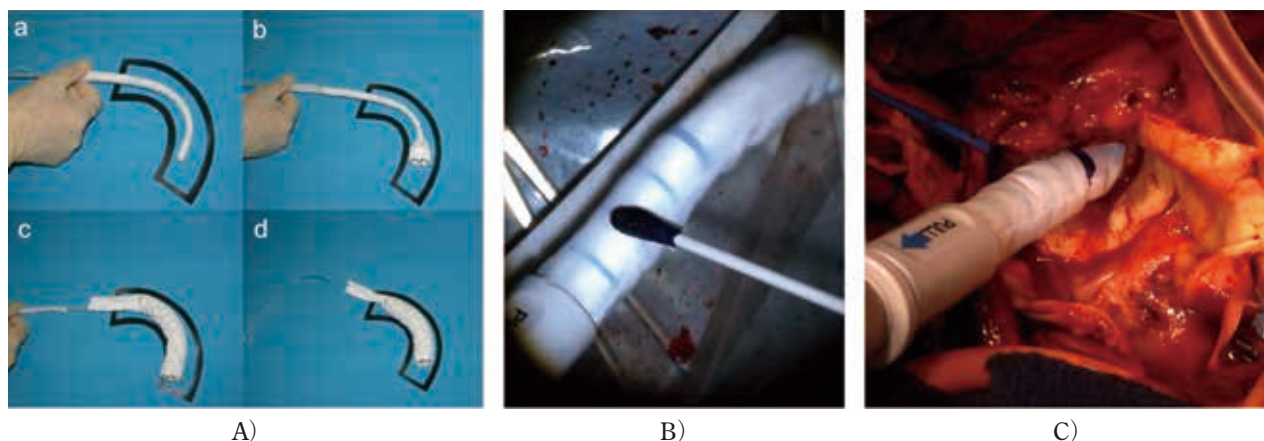


Fig. 2 J-Graft Frozenix

- A) 留置の手順を示す。a) 大動脈内に挿入，b) 末梢側から展開，c,d) 全て展開し留置する。
 B) 展開前の状態
 C) 下行大動脈に挿入した状態。この後，展開し留置する。

塞) のリスク増加が知られる。下行大動脈にステントグラフトを留置すると肋間動脈から分岐する前脊髄動脈の栄養枝を覆ってしまうため、国内多施設前向き研究 (J-ORCHESTRA) でもFET使用群は非使用群に比べ脊髄合併症がやや多く、発生率は1～5%程度との範囲が示された²⁾。これを抑えるためステントグラフト長を必要最小限にするなどの対策が推奨されている。FET法は弓部大動脈手術の強力な選択肢の一つとなり、日本においてはFET法 (Frozenix) の登場は、これまで救命困難であった重篤な大動脈疾患への外科的治療可能性を拡大し臨床的意義は大きいと思われる。

弓部大動脈の標準外科治療

全弓部置換術 (Total Arch Replacement: TAR) は弓部大動脈全体を人工血管に置換する標準術式である。胸骨正中切開でアプローチし人工心肺を確立し、全身を冷却し低体温循環停止 (DHCA) に到達した後、脳保護のため前述の順行性選択的脳灌流法 (SACP) を併用して上行大動脈から大動脈弓部、さらに場合により下行大動脈近位まで病変部を人工血管置換する。弓部から分岐する3本の脳・上肢への分枝動脈 (腕頭動脈、左総頸動脈、左鎖骨下動脈) は、それぞれ個別に人工血管に吻合し再建する方法 (分枝付き人工血管を用いた個別再建) が現在の主流である。遠位弓部動脈から下行大動脈へと進展した病変に対しては、前述のFET法を併

施する方法 (TAR+FET) が標準術式となっている。弓部大動脈手術はかつてより改善したものの、依然として高度な手術侵襲を伴う大手術であり、主な合併症としては、脳梗塞・一過性脳障害 (せん妄など) の中枢神経合併症、脊髄梗塞、腎不全、呼吸不全、出血・再開胸止血、感染症 (縦隔炎) などが挙げられる。国内多施設前向き研究 (J-ORCHESTRA) によれば、TAR+FETの院内死亡率2.4%、脳卒中5.4%、脊髄梗塞1.9%、重症合併症発生率 (脳神経障害、腎障害、呼吸障害、感染症などの複合リスク) は28.5%であった²⁾。

ステントグラフト治療の限界

前述のステントグラフトを血管内からカテーテルを介して留置する大動脈のステントグラフト治療は従来の開胸・開腹手術と比較して低侵襲性で圧倒的に優れているため、登場した2000年代中頃から大動脈治療を一変させた。胸部大動脈ステントグラフト留置術 (Thoracic Endovascular Aortic Repair: TEVAR) は、下行大動脈に対しては第一選択治療として定着した²²⁾。しかしながら、重要な分枝動脈が存在する弓部の治療は血行再建の複雑な手技を伴う治療となり、一筋縄ではいかない。

ハイブリッド手術とは、通常まず外科的に脳への血流路を確保するためのバイパス手術を (例えば、右鎖骨下動脈から左鎖骨下動脈へ) 行い、その後ステントグラフト留置術 (TEVAR)

で弓部大動脈を治療する二段階からなる方法である。これにより人工心肺やDHCAを伴う弓部大動脈手術が回避できる利点があるため、ハイブリッド手術は高齢・重症患者に対する低侵襲治療として期待され、2000年代後半以降に一部で導入された²³⁾。しかし実際にはバイパス手術自体の侵襲が大きいこと、カテーテル操作に伴う脳梗塞や血管損傷リスクが依然高いこと、エンドリークなどステントグラフト特有の問題で追加手術が必要になることが少なくないことから、全弓部置換術と比較して明確な優位性は示されておらず、真の低侵襲治療とは言えない現状である²⁴⁾。

TEVAR単独による弓部大動脈治療は、技術的ハードルの高さから限定的な実施に留まっている。近年、弓部の分枝動脈に合わせた形で分枝（ブランチ）を持つ、あるいは開窓部分があり分枝血流を担保して留置できる新世代ステントグラフトが開発され²⁵⁾、欧米や日本で臨床研究が行われていたり、一部国内で保険収載されたもの（カワスミNajuta胸部ステントグラフトシステム）もある²⁶⁾。しかし2025年現在でも汎用可能なデバイスは限られており、複雑な解剖学的構造をもつ例では手技も困難なため、弓部大動脈瘤に対する第一選択がTEVAR単独による経カテーテル治療となるケースは少ない。

今後、治療デバイス技術のさらなる発展により人工心肺を使わない弓部大動脈手術が一般化すれば大きなブレイクスルーとなるが、現時点では依然として開胸術による全弓部置換術が弓部大動脈疾患治療の中心である。

当院での弓部大動脈疾患の治療方針

防衛医科大学校病院心臓血管外科ではTAR+FETを基本術式としている。胸骨正中切開でアプローチし、人工心肺を確立後に25℃のDHCA下にSACPで脳保護を行う。左総頸動脈と左鎖骨下動脈間で左反回神経損傷を避けつつ大動脈を離断し、Frozenixを下行大動脈に向かって留置し分枝付き人工血管と吻合し、次いで弓部大動脈分枝を個別に再建した後に中枢側吻合を行う、安全性と確実性を重視した術式である。2015年1月から2022年12月までに37症例に同手術を施行した²⁷⁾。患者平均年齢77歳で、1年生

存率71%、5年生存率61%の手術成績で、周術期脳梗塞（オッズ比24.0）、急性腎不全の発症（オッズ比11.1）が危険因子であった。比較的高齢の患者群としては良好な結果であり、今後も手術技術の向上に努めていく所存である。

利益相反

この論文に関して利益相反（COI）はありません。

文 献

- 1) 日本循環器学会／日本心臓血管外科学会／日本血管外科学会 他. 大動脈瘤・大動脈解離診療ガイドライン（2020年改訂版）. *Circ J*. 87: 1410-1621, 2023.
- 2) Okita Y.: Frozen elephant trunk with Frozenix prosthesis. *Ann Cardiothorac Surg*. 9: 152-163, 2020.
- 3) Gibbon JH Jr.: Application of a mechanical heart and lung apparatus to cardiac surgery. *Minn Med*. 37: 171-185, passim. 1954.
- 4) Lillehei CW, Cohen M, Warden HE, et al.: The direct-vision intracardiac correction of congenital anomalies by controlled cross circulation; results in thirty-two patients with ventricular septal defects, tetralogy of Fallot, and atrioventricular communis defects. *Surgery*. 38: 11-29, 1955.
- 5) Dubost C, Allary M, Oeconomos N.: Resection of an aneurysm of the abdominal aorta: reestablishment of the continuity by a preserved human arterial graft, with result after five months. *AMA Arch Surg*. 64: 405-408, 1952.
- 6) The Japanese Society for Cardiovascular Surgery. The development of surgery of heart and great vessels in Japan; a history. Available at: <https://jscvs.or.jp/english-history/> (accessed 2025-10-10)
- 7) Rimmer L, Fok M, Bashir M.: The History of Deep Hypothermic Circulatory Arrest in Thoracic Aortic Surgery. *Aorta (Stamford)*. 2: 129-134, 2014.
- 8) Griepp RB, Stinson EB, Hollingworth JF, et al.: Prosthetic replacement of the aortic arch. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 70: 1051-1063, 1975.
- 9) Svensson LG, Crawford ES, Hess KR, et al.: Deep hypothermia with circulatory arrest. Determinants of stroke and early mortality in 656 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 106: 19-28, 1993.
- 10) Ziganshin BA, Elefteriades JA: Deep hypothermic circulatory arrest. *Ann Cardiothorac Surg*. 2: 303-315, 2013.
- 11) Ueda Y.: A reappraisal of retrograde cerebral perfusion. *Ann Cardiothorac Surg*. 2: 316-325, 2013.
- 12) Ueda Y, Okita Y, Aomi S, et al.: Retrograde cerebral perfusion for aortic arch surgery: analysis of risk factors. *Ann Thorac Surg*. 67: 1879-1882, 1999.
- 13) Kazui T, Inoue N, Yamada O, et al.: Selective cerebral perfusion during operation for aneurysms of the aortic arch: a reassessment. *Ann Thorac Surg*. 53: 109-114, 1992.
- 14) Svensson LG, Nadolny EM, Penney DL, et al.: Prospective randomized neurocognitive and S-100

- study of hypothermic circulatory arrest, retrograde brain perfusion, and antegrade brain perfusion for aortic arch operations. *Ann Thorac Surg.* 71: 1905-1912, 2001.
- 15) Hagl C, Ergin MA, Galla JD, et al.: Neurologic outcome after ascending aorta-aortic arch operations: effect of brain protection technique in high-risk patients. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 121: 1107-1121, 2001.
 - 16) Kazui T.: Total arch replacement with separated graft technique and selective antegrade cerebral perfusion. *Ann Cardiothorac Surg.* 2: 353-357, 2013.
 - 17) Kamiya H, Hagl C, Kropivnitskaya I, et al.: The safety of moderate hypothermic lower body circulatory arrest with selective cerebral perfusion: a propensity score analysis. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 133: 501-509, 2007.
 - 18) Tian DH, Wan B, Bannon PG, et al.: A meta-analysis of deep hypothermic circulatory arrest versus moderate hypothermic circulatory arrest with selective antegrade cerebral perfusion. *Ann Cardiothorac Surg.* 2: 148-158, 2013.
 - 19) Borst HG, Walterbusch G, Schaps D.: Extensive aortic replacement using "elephant trunk" prosthesis. *Thorac Cardiovasc Surg.* 31: 37-40, 1983.
 - 20) Kato M, Ohnishi K, Kaneko M, et al.: New graft-implanting method for thoracic aortic aneurysm or dissection with a stented graft. *Circulation.* 94: II188-193, 1996.
 - 21) Karck M, Kamiya H.: Progress of the treatment for extended aortic aneurysms; is the frozen elephant trunk technique the next standard in the treatment of complex aortic disease including the arch? *Eur J Cardiothorac Surg.* 33: 1007-1013, 2008.
 - 22) Hiratzka LF, Bakris G, Beckman JA, et al.: ACCF/AHA/AATS/ACR/ASA/SCA/SCAI/SIR/STS/SVM guidelines for the diagnosis and management of patients with thoracic aortic disease. *Circulation.* 121: e266-369, 2010.
 - 23) Bavaria J, Vallabhajosyula P, Moeller P, et al.: Hybrid approaches in the treatment of aortic arch aneurysms: postoperative and midterm outcomes. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 145: S85-S90, 2013.
 - 24) Riambau V, Bockler D, Brunkwall J, et al.: Management of Descending Thoracic Aorta Diseases: Clinical Practice Guidelines of the European Society for Vascular Surgery (ESVS). *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 53: 4-52, 2017.
 - 25) Haulon S, Greenberg RK, Spear R, et al.: Global experience with an inner branched arch endograft. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 148: 1709-1716, 2014.
 - 26) Sato H, Fujioka J, Tamiya Y, et al.: Long-term clinical outcomes of thoracic endovascular aortic repair for arch aneurysms with the Najuta thoracic stent-graft system. *Ann Vasc Dis.* 13: 384-389, 2020.
 - 27) Tsutsumi K, Ishida O, Yamanaka N, et al.: Total aortic arch replacement using the J-graft open stent graft for distal aortic arch aneurysm: report from two centres in Japan. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 33: 614-621, 2021.

Surgical treatment of the aortic arch

Koji TSUTSUMI

J. Natl. Def. Med. Coll. (2025) 50 (4) : 133 – 138

Abstract: Surgical treatment of the aortic arch is remains one of the most challenging areas of cardiovascular surgery. However, in recent years, advances in cerebral protection strategies and the introduction of the Frozen Elephant Trunk (FET) technique have significantly improved patient outcomes. Japanese technological innovations, including domestically developed devices have contributed substantially to these advancements. We have adopted a meticulous and safety-oriented surgical approach resulting in favorable clinical outcomes.

Key words: aortic arch surgery / total arch replacement / frozen elephant trunk / cerebral perfusion