

Review

〈スペシャリストシリーズ：11. 外科〉

軟化症および血管圧迫症候群による気道狭窄に対する 外科治療

安藤 誠

金沢医科大学小児心臓血管外科

Surgical Correction of Airway Malacia and Vascular Compression Syndrome

Makoto Ando

Pediatric Cardiovascular Surgery, Kanazawa Medical University, Ishikawa, Japan

Cartilaginous ring, tracheobronchomalacia (TBM), and vascular compression syndrome (VCS) may cause airway obstruction. Many TBM and VCS are considered to be left undiagnosed, and thus, proper treatment may not be delivered to a significant proportion of patients. Pediatric surgeons often provide surgical treatment for congenital TBM. Conversely, coexisting congenital cardiovascular anomalies or previous cardiovascular procedures may cause VCS. Therefore, cardiovascular surgeons may be the best provider of surgical treatment in this context. A significant overlap of surgical techniques for TBM and VCS was observed although sufficient knowledge and experience to treat TBM is mandatory, even for cardiovascular surgeons, in treating VCS. Herein, we discuss surgical options for TBM and VCS to expand the surgical repertoire of cardiovascular surgeons.

Keywords: tracheobronchomalacia, vascular compression syndrome, external stenting, tracheopexy, aortopexy

気道狭窄症は、完全気管軟骨輪による全周性狭窄、軟化症 (tracheobronchomalacia; TBM)、血管による圧迫 (vascular compression syndrome; VCS) に大別される。特に TBM, VCS は未診断率が高く、診断されていても的確な治療が行われていない症例が多数存在すると考えられている。TBM は単独 (先天性 TBM) と VCS による軟骨形成障害によるものがあり、さらに、VCS には軟骨変形を伴うことがほとんどであり、治療は各病態に応じて多様なオプションが存在する。このなかで、軟骨輪および先天性 TBM の外科治療は、小児心臓血管外科医が執刀する機会はまだである。小児心臓血管外科医の関与が必須であるのは、VCS の一部に限定されるが、先天性 TBM に対する手術手技は VCS に対するそれとオーバーラップする部分が多い。さらに言うなら、先天性 TBM に対する手術手技の習得なくして VCS の適切な治療はなし得ない。本稿では先天性を含む TBM と VCS の治療につき詳述する。

気道狭窄症は、完全気管軟骨輪による全周性狭窄¹⁾、軟化症 (tracheobronchomalacia; TBM)^{2,3)}、外部組織・主に血管による圧迫 (vascular compression syndrome; VCS) に大別される。特に TBM, VCS は未診断率が高く、診断されていても的確な治療が行われていない症例が多数存在すると考えられている。TBM は単独 (先天性 TBM)⁴⁾ と VCS による軟骨形成障害による

ものがあり、さらに、VCS には軟骨変形を伴うことがほとんどであり、治療は各病態に応じて多様なオプションが存在する。これらの病変には、さらに気管気管支などの分岐異常が併存することが多く、治療をさらに複雑化する。このなかで、軟骨輪の外科治療は病変部の切開 (cut and sew) を伴う形成術が必要であるが^{5,6)}、小児心臓血管外科医が執刀する機会はまだ

であるため、詳細は他稿に譲ることとする。また、先天性 TBM も本来は小児外科疾患と考えられており、小児心臓血管外科医の関与が必須であるのは、VCSの一部に限定される。しかし、先天性 TBM に対する手術手技は VCS に対するそれとオーバーラップする部分が多い。さらに言うなら、先天性 TBM に対する手術手技の習得なくして VCS の適切な治療はなし得ない。このような理由から、本稿では先天性を含む TBM と VCS の治療につき詳述することとする。

TBM に対する治療

保存的治療

本稿は外科治療を扱うものであり、内科的治療に詳しくは言及しない。概略として、TBM、VCS いずれの場合も経鼻カニューレや挿管チューブを使用した陽圧補助換気が基礎となる。さらに、状況に応じて気道内ステント治療を追加する^{7,8)}。気道狭窄症に対して成人例を中心に気道内ステント留置が行われることがある⁹⁾。しかし、粘膜反応性の強い小児例では、現段階においては肉芽形成により再狭窄が必発の治療である。一方、気管挿管・気管切開により気管内径を保持することは換気補助のみならず、気道狭窄を内部より強制的に予防するので、小児例における気道内ステント治療とは実質的にはこれを指す。ただし、この場合の気道内ステント治療は気管 TBM に対しては非常に有効であるのに対し、軟骨輪では施行不可能で、VCS においても状況によっては圧迫血管と気道チューブに挟まれて気道内膜が損傷されることがある (Fig. 1) ので注意が必要である。

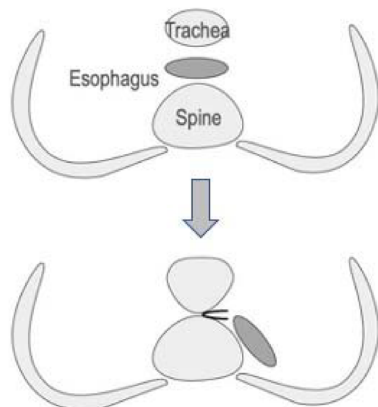


Fig. 2 Scheme of posterior tracheopexy (left). After mobilization of the esophagus, the trachea is fixed to the spine with sutures. CT scan (right) of the patient who had undergone repair of esophageal atresia (Gross type C) in the past. The esophagus was widely mobilized, in order to avoid compression.

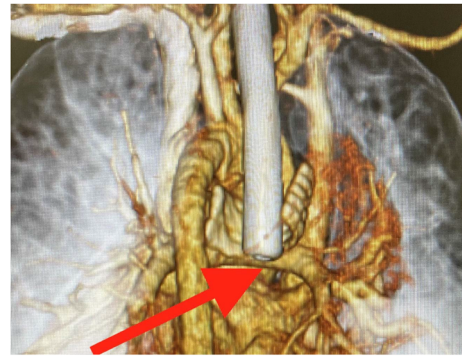
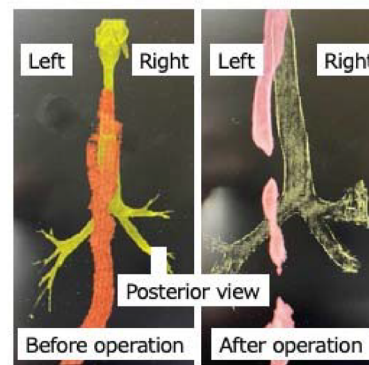


Fig. 1 CT scan of the patient with tracheal agenesis who had undergone external stenting in the past. The arrow indicates distal end of the endo-esophageal tube, positioned against the compressing pulmonary artery.

外科治療

狭窄部切除: TBM や VCS による気道狭窄に対する cut and sew technique の報告はあるものの^{10,11)}、小児の気道内膜の反応性の高さとそれによる吻合部狭窄、さらに高度な吻合部離断率を考慮すると、可及的に避けるべきであると考えられる。

気管後方牽引術: 気管軟化症に対して近年、欧米を中心に盛んに行われるようになった術式であり、気管膜様部を脊椎に縫合固定するものである。単独の気管軟化症^{12,13)}の他、食道閉鎖症に合併する気管軟化症¹⁴⁾の治療・予防としての報告が多い。気管後方牽引術は、食道閉鎖根治術に気管軟化症が遷延した症例に施行されることが多い。この場合、食道が気管の真後ろで進展されていることがあり、圧迫回避のためには食道と気管の間の広範な剥離を要することがあり



(Fig. 2), この際に迷走神経の損傷や, 気管栄養血管の損傷から内膜壊死を起こす可能性がある. また, 食道気管瘻を有する型 (Gross 分類 C など) などでは特に発生率が高く¹⁵⁾, そのために食道閉鎖の初回手術と同時に気管後方牽引を行う施設もある¹⁶⁾. 手術は内視鏡的に行う場合と, 側方開胸 (多くは右) で行う場合がある. 後方牽引術は, 現在気管軟化症に対する第一選択の術式と考えられているが, 自験例でも気管開通効果は後述する気管外ステント術と遜色ない印象があり, 食道閉鎖の有無を問わず採用していく方針である.

左気管支軟化症に対する大動脈後方牽引術: 後方に存在する主要組織が気管では食道であるのに対し, 左気管支では下行大動脈である. VCS による二次的なものが多く, 前方から肺動脈ないし左房, 後方から下行大動脈の圧排を受けて発生 (後に詳述) することが多い. この場合, 大動脈を剥離・転位して気管支を骨組織に固定するのは現実的ではなく, よって大動脈を椎骨または肋骨に固定することにより, 線維組織で連続した気管を受動的に後方牽引する大動脈牽引術 (Posterior aortopexy) が行われる¹⁷⁾. 肋骨に牽引する場合は食道を圧排することはないが, 牽引方向が気管支狭窄部と直角方向とならないために効果が低い. 一方, 椎骨に固定する場合, 大動脈の前方に針糸をかけて大動脈を反時計方向に回転させ, 左気管支の圧排部位を垂直後方方向に牽引するのが有効であると考えられる (Fig. 3). なお, この部位は肺内気管支直前にあたるために可動性が強く, Aortopexy により気管支全体が後方に牽引されるため, 狭窄部位のピンポイントでの拡張効果は低いと推測される. 筆者の個人的印象では, 外ステント術に比べて気管支の開通効果には劣る術式である. なお, 圧迫血管を気道と反対方向に牽引して骨組織などに固定する動脈吊り上げ術の場合, 対象動脈がほとんどの報告で大動脈であるため, 一般的に Aortopexy と総称されることが多いが, 後述するように, 吊り上げ対象血管が肺動脈や腕頭動脈などの場合もあるので Vascular-pxy と呼ぶのが妥当であると考えられる.

気管気管支外ステント術: 気管気管支外ステント術は, 外部の支持体に気道壁を牽引拡張するものであり, splinting とも呼称される¹⁸⁻²⁰⁾. 特にリング付き e-polytetrafluoroethylene (PTFE) 人工血管を支持体として使用する術式は, 1997年にドイツ (Hagl ら)^{21, 22)} と日本 (永瀬ら) のグループから発表されている²³⁾. Hagl らが成人・年長児の先天性 TBM 症例に限定されているのに対し, 日本での永瀬および筆者のグルー

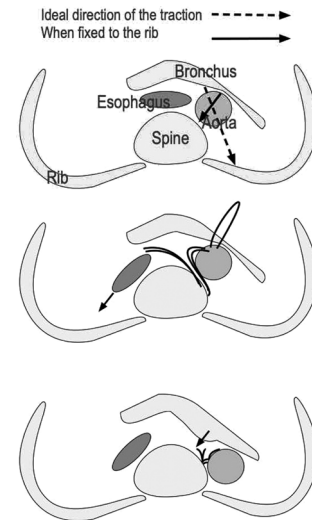


Fig. 3 Schemes of posterior aortopexy. When the aorta is fixed to the rib (upper), the obstructed bronchus is retracted posteriorly. When the aorta is fixed to the spine, the aorta should be rotated so that the obstructed bronchus is retracted towards the spine (middle and lower).

プでは乳児例を含む小児例を中心に TBM の他 VCS 症例にも症例を拡大しているのが大きな違いである. 外ステント手術は元来, 先天性 TBM にて臨死的な低酸素発作 (dying spell)²⁴⁾ の存在する症例を絶対的適応とし, 繰り返す肺炎と入院, 呼吸器・高圧換気補助の長期化などで考慮される. VCS での適応は, 大動脈圧迫の解除後に軟化症または軟骨部変形により気道狭窄が持続する症例である. 一方, 気道周囲に存在する重要組織である大動脈, 肺動脈, 食道との接触がある状態で, 無理に硬性で先端の鋭利なリング付き人工血管を挿入すると, これらの組織, あるいは気道自体に人工血管が穿破する可能性がある. なかでも血管と食道・気道に同時穿破した場合は, 食道・気道大量出血で発症することがあり, 注意を要する. そのため, 気道を周囲組織から十分に剥離した上で挿入した人工血管全体を 0.1 mm の e-PTFE シートで, あるいはリング先端を人工血管の一部で被覆することが望ましい. 逆にこのような予防処置を適切に行えば, 乳児期早期にも可能な術式である. また, Hagl らは人工血管を気道壁全周に縫着, すなわち気道の将来における成長を成人例ゆえに考慮していないが, 日本でのそれは人工血管を 2 ピースとして, 互いを縫着しないため²⁵⁾, 成長に伴い互いのピースが分離して成長を妨げないようにデザインされている (Fig. 4). この結果,

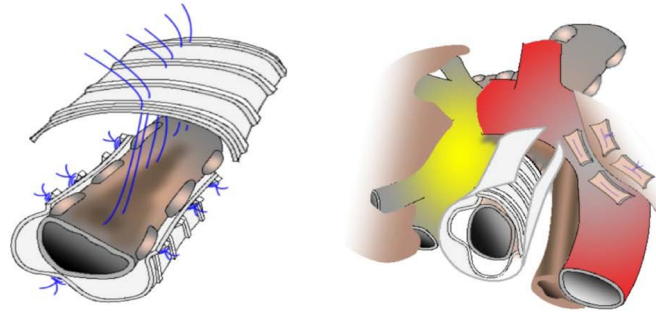


Fig. 4 Schemes of external stenting. A ringed polytetrafluoroethylene graft is cut into two pieces. The cartilaginous portion of the airway is fixed to one of these grafts. Then, the membranous portion is fixed to another piece (left). Finally, the graft is wrapped with a 0.1 mm polytetrafluoroethylene sheet, to avoid perforation of the graft into the neighboring structures (right).

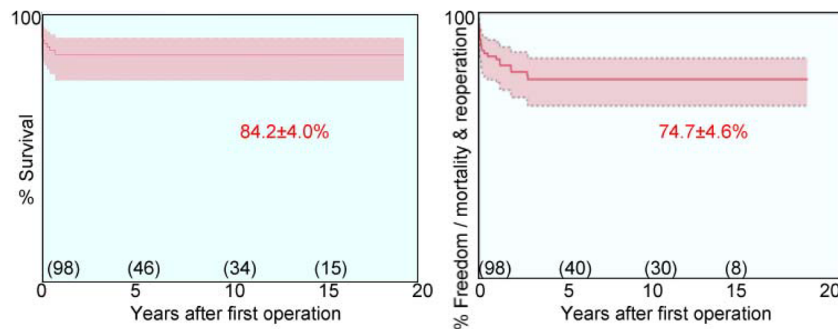


Fig. 5 Kaplan-Meier estimated survival (left) and freedom from reoperation (right) following external stenting.

遠隔期にステント留置部の狭窄を来して再手術を要した症例は経験していない。2017に発表した永瀬らのグループと筆者のグループで施行した気道外ステント術の遠隔期成績²⁶⁾では、20年生存率84%、再手術回避率90%であった (Fig. 5)。このように外ステント術は、TBMならびに軟骨変形による気道狭窄を解除する最も確実な手術である反面、低体重児では隣接する食道²⁷⁾・動脈、気道自身への穿孔が危惧されるという特徴を有する。

適応は、現時点では気管軟化症には後方牽引術を第一選択としている。左気管支軟化症に対しては乳児期後期以降、可能であれば1歳以上にて外ステントを第一選択、乳児期早期ではAortopexyの他、後述する他の手技を第一選択としているが、いずれも諸家の報告に乏しい術式であるため、今後も自験例・他験例を参考に、術式選択基準を適宜改定していく必要があると考えている。

VCSの外科治療

VCSの外科治療は、血管による圧排の除去と圧排除去後に残存したTBM、軟骨変形に対する治療を適

宜組み合わせで行う。元来VCSは肺動脈スリングや重複大動脈弓などの血管輪における気道圧排を指して使用されることが多かった^{28,29)}。近年では、大動脈および分枝の位置異常や、大動脈修復術の合併症で見られるものまで、幅広い圧排パターンが存在することが認識されるようになった³⁰⁾。なお、血管輪に対する治療は、他にも多数の文献が発表されているので、それらに譲ることとする。2017年の筆者の論文でVCSの形態を評価したところ、大別して4つのパターンを認めた：すなわち、上行大動脈・大動脈弓による片側圧排、下行大動脈および肺動脈・左房からの両側圧排、肺動脈片側圧排、鎖骨下動脈・腕頭動脈片側圧排である (Fig. 6)。以降はこれらの解剖について治療法を解説する。

上行大動脈による圧排

正常大動脈弓の場合、気管が左側から圧排を受けることがある。この場合、大動脈弓外側を胸骨または肋骨に向けて針糸にて牽引することにより、圧排が解除可能なことがある。ただし、大動脈弓を走行軸と直角方向に牽引しようとする、固定部位は肋骨となる。肋骨は可動性があるため、啼泣などに伴い糸が切断さ



	Ascending aorta or aortic arch	Descending aorta	Pulmonary artery	Innominate or subclavian artery
Trachea	11	0	2	3
Right bronchus	4	0	3	0
Left bronchus	2	24	2	0
Total	17	24	7	3

Fig. 6 Anatomical patterns of vascular compression syndrome. The bottom table indicates the number patients for each mode of compression depicted at the top. The red arrows indicate the site of compression.

れる可能性がある。また、胸骨または傍胸骨の肋骨に糸をかけた場合、糸の切断される可能性は少ないが、大動脈弓が走行軸直角方向よりも前方に牽引されるため、圧排を除去する効果は少ない (Fig. 7)。仮に効果が低い場合は、大動脈弓を広範囲に剥離して気管との距離を確保し、外ステント術を追加する。仮に圧迫が解除できない場合は、大動脈弓に補填材料を使用して延長する術式が考慮されるが、筆者の経験ではほとんどの症例で大動脈弓牽引に適宜外ステント術を併用することで症状の改善が得られる。一方、大動脈牽引や、大動脈延長にて対処困難なことが多いのが、完全大血管転位症に対する大動脈スイッチ術後の上行大動脈による気道圧迫である。完全大血管転位症の大動脈弓は正常解剖のそれと比べて前後方向に長く、上行大動脈の後方転位に伴って大動脈弓が脊椎方向へ屈曲する可能性がある。さらに上行大動脈は旧肺動脈弁から起始するため、正常解剖に比べてより脊椎に近接する傾向がある。さらに上行大動脈自身が拡大することも多く、脊椎との間に存在する気道を圧迫することが多い。この場合、上行大動脈を前方牽引すると、前方転位した肺動脈を自動的に圧排するため、肺動脈の拡大・延長を行った上で牽引を行う必要がある。不可能な術式ではないと考えるが、侵襲が高く、筆者自身も試みた経験はない。代わりにこれまで同症例に行ってきた術式は、リング付き人工血管を半切りにして気道を覆うように脊椎に固定し、その人工血管に気道を固定して開通を得るものである (Fig. 8)。この術式は人工血管の気道との反対側は大動脈を前に押し上げる状態であるので、血管穿孔が危惧される。筆者は大動脈との間に

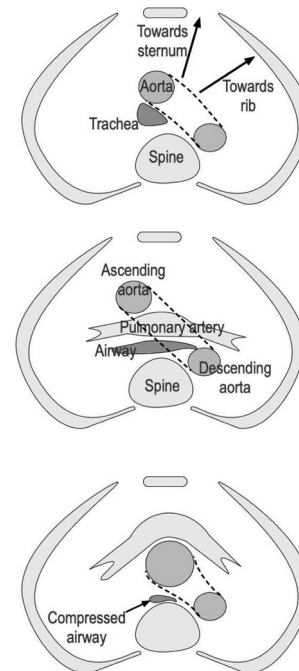


Fig. 7 Scheme of aortopexy of the aortic arch (upper). If retracted towards the sternum, the aortic arch is mobilized anteriorly. It is more ideal to retract towards rib, by which the arch is mobilized in the perpendicular direction. In the case of transposition of the great arteries after arterial switch operation, the ascending aorta is mobilized towards the spine. With simultaneous dilation of the aorta, the airway can be compressed against the spine (middle and lower).

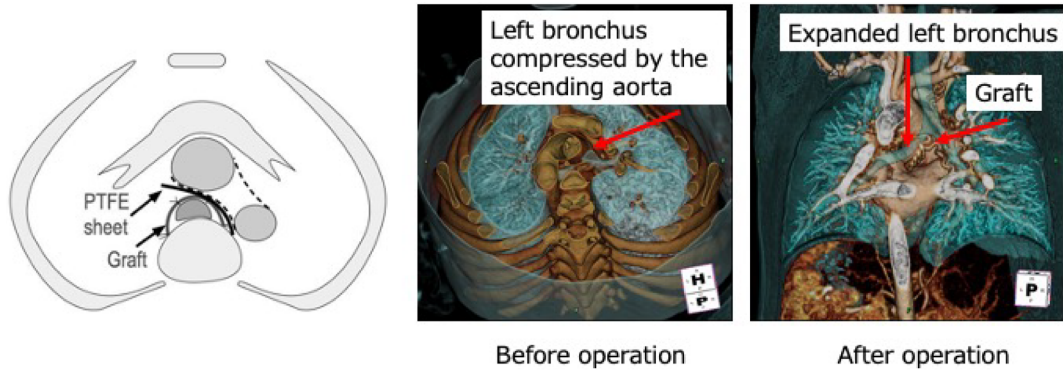


Fig. 8 Scheme (left) of the modified external stenting technique for transposition of the great arteries after arterial switch operation. The compressed left bronchus is suspended to the graft fixed to the spine. CT scans of the patient undergoing the same technique (middle and right). The left bronchus was widely expanded.

0.1mm ゴアテックスシートを介在させることにより、穿孔予防している。その結果、2例に行った同術式後の気道開存は良好であり、大動脈穿孔も認めていない。

下行大動脈と肺動脈の両側からの圧排ならびに肺動脈からの片側圧排

下行大動脈から左気管支の圧排症例では、ほとんどの症例で前方からの肺動脈（ほとんどの場合右肺動脈）あるいは左房の圧排が認められる。前方組織が肺動脈の場合は前側に位置する左気管支軟骨の変形または形成不全による軟化症が高度となる可能性が高い。本形態は、特に小児心臓外科手術の技術発展に伴い、大動脈縮窄・離断症や Norwood 手術などにおいて、人工心肺を使用して正中切開から行う拡大大動脈修復が増加したことにより、遭遇する機会が増加した^{31,32}。すなわち、側方開胸と比較して、下行大動脈の広範な剥離が困難であることと、下行大動脈をより前方へ転位する傾向にあることから本形態の VCS を多く認めるようになった。本解剖においては、Posterior aortopexy または気管支外ステント術が治療オプションとなることは既に述べた。一方、前方の肺動脈の圧排の解除を主眼として外科治療を行うことも可能である。一つは特に肺動脈弁欠損症の拡大肺動脈による気道圧排（この場合は肺動脈単独の圧排が多い）に行われることが多い、肺動脈縫縮術である。本術式は解剖学的に考えて、肺動脈後壁を上葉枝分岐部遠位まで広範に切除して縫合する必要がある。本術式はその困難さに比べて気道圧排の完全解除に至らない症例が多いという印象を筆者は持っており、過度に縫縮すると肺動脈狭窄を起こす。もう一つの外科治療オプションは肺動脈の前方転位術である。大動脈後方

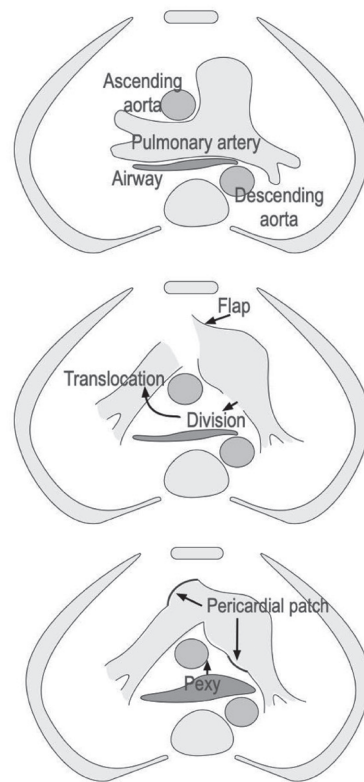


Fig. 9 Scheme of anterior translocation of the pulmonary artery. The right pulmonary artery is transected and translocated anterior to the aorta. The red arrow on the left panel indicates the site of bronchial compression. The red arrow on the right panel indicates the reimplemented right pulmonary artery.

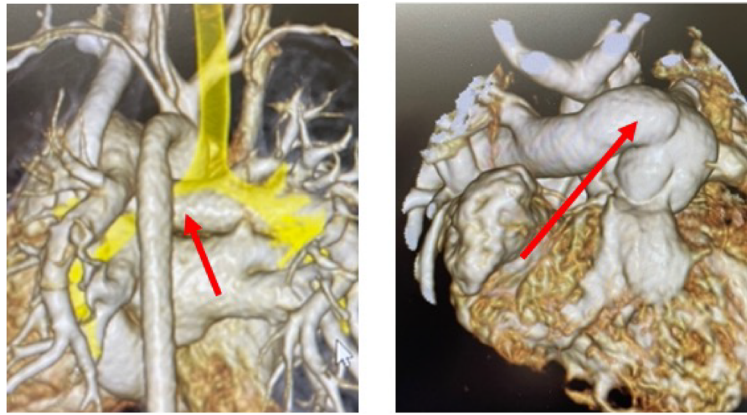


Fig. 10 CT scans before anterior translocation (left panel). The airway was widely compressed by an enlarged pulmonary artery. After the operation (right panel), the pulmonary artery was placed in front of the aorta.

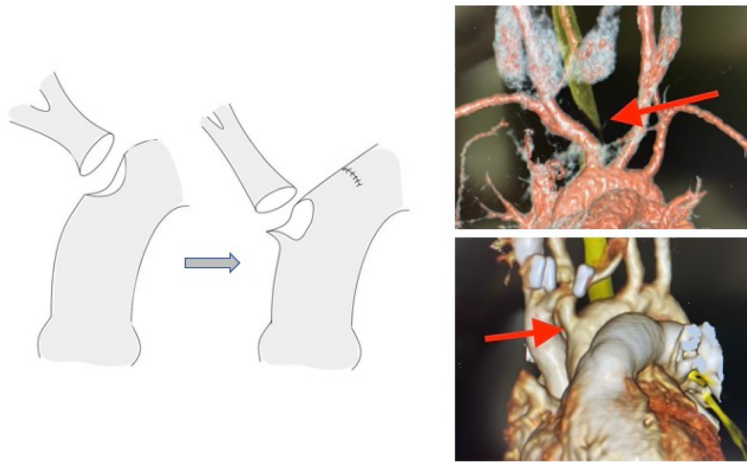


Fig. 11 Scheme (left) and CT scan (right) of the translocation of the anomalous innominate artery. The red arrow on the right upper panel indicates the site of tracheal obstruction. The red arrow on the right lower panel indicates the reimplanted innominate artery.

に肺動脈転位後の広大なスペースができるため、気道前方の繊維組織を上行大動脈に縫着することにより、気道を前方牽引して能動的に拡張させることも可能であり、肺動脈弁欠損症を含めて今後広く適応を考慮されるべき術式と考えている。さらに、前方転位のためには右肺動脈を切断する方法と、上行大動脈を一時切断して肺動脈を転位する方法が考えられるが、肺動脈拡大が著明でない症例に対しては、狭窄回避目的にて前者を選択するのが妥当と考えている。なお、右肺動脈を前方転位した場合、主肺動脈切開部に届かないことが多く、Fig. 9, 10 に示すように、主肺動脈をフラップ状に切開して自己心膜で適宜補填する、あるいは年長時では人工血管を介在させるなどの工夫が必要となる。

鎖骨下動脈・腕頭動脈による気管圧排

VCSの原因疾患として、血管輪とともに早くから認識されていた解剖形態である^{33,34)}。本解剖では責任動脈の牽引が最も簡易であるが、より確実な圧排解除を目的とするならば、腕頭動脈を上行大動脈近位部に転位するのが理想である。ただし、本法は人工心肺下に心停止を要する術式であり、腕頭動脈切断面が大動脈切開面と垂直とならないので、狭窄を回避するためには大動脈切開をフラップ状にするなどの工夫が必要である (Fig. 11)。よって、安全に行うためには熟練した技術が必要であり、適応には注意を要する。

以上、解剖をパターン化して手術手技を解説したが、VCSによる気道圧排は個々にその機序が微妙に異なっており、適切な術式選択を行うには経験を要す

る。また、気道は過度に栄養血管を犠牲にすると容易に内膜壊死を起こし、気管穿孔を起こすと致命的ともなりうるので、本外科治療を開始する際には十分な情報収集を行ってから行うことが望ましい。

最後に

心臓血管外科医である筆者が気道狭窄治療に深く携わるようになったのは、元松戸市民病院小児心臓血管外科部長・永瀬裕三先生と現東京女子医科大学東医療センター新生児科教授・長谷川久弥先生の指導の賜物である。先述したように、小児の気道狭窄病変は未診断症例が多く、ゆえに適切な治療が行き届いているとは言えない状況である。例えば TBM は、深鎮静下では確定診断し得ない。覚醒状態・啼泣状態での気管支鏡検査が必須である。また、例えば開胸にて気管支に対する手術を行う場合など、素早く正確にファイバー観察を行わないと容易に低酸素血症を来すために危険である。全ての患児が適切な診断を受けられる環境整備を望むとともに、上の特殊技術を有する次世代の小児呼吸器科医師の育成が急務であることを提言して本稿を終えることとする。

利益相反

本稿について申告すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) Berdon WE, Baker DH, Wung JT, et al: Complete cartilage-ring tracheal stenosis associated with anomalous left pulmonary artery: The ring-sling complex. *Radiology* 1984; **152**: 57-64
- 2) Kugler C, Stanzel F: Tracheomalacia. *Thorac Surg Clin* 2014; **24**: 51-58
- 3) Baxter JD, Dunbar JS: Tracheomalacia. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1963; **72**: 1013-1023
- 4) Cogbill TH, Moore FA, Accurso FJ, et al: Primary tracheomalacia. *Ann Thorac Surg* 1983; **35**: 538-541
- 5) Butler CR, Speggorin S, Rijnberg FM, et al: Outcomes of slide tracheoplasty in 101 children: A 17-year single-center experience. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; **147**: 1783-1789
- 6) Grillo HC, Wright C, Vlahakes G, et al: Management of congenital tracheal stenosis by means of slide tracheoplasty or resection and reconstruction, with long term follow-up of growth after slide tracheoplasty. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2002; **123**: 145-152
- 7) Antón-Pacheco JL, Cano I, García A, et al: Management of congenital tracheomalacia: A single institution experience. *Cir Pediatr* 2006; **19**: 55-60
- 8) Greenholz SK, Karrer FM, Lilly JR: Contemporary surgery of tracheomalacia. *J Pediatr Surg* 1986; **21**: 511-514
- 9) Valerie EP, Durrant AC, Forte V, et al: A decade of using intraluminal tracheal/bronchial stents in the management of tracheomalacia and/or bronchomalacia: Is it better than aortopexy? *J Pediatr Surg* 2005; **40**: 904-907
- 10) Nakayama D, Harrison MR, de Lorimier AA, et al: Reconstructive surgery for obstructing lesions of the intrathoracic trachea in infants and small children. *J Pediatr Surg* 1982; **17**: 854-868
- 11) Waldhausen JH, Richardson M, Hall DG: A new technique for surgical correction of bronchial stenosis. *J Pediatr Surg* 1994; **29**: 199-200
- 12) Shieh HF, Smithers CJ, Hamilton TE, et al: Posterior tracheopexy for severe tracheomalacia. *J Pediatr Surg* 2017; **52**: 951-955
- 13) Shieh HF, Smithers CJ, Hamilton TE, et al: Descending aortopexy and posterior tracheopexy for severe tracheomalacia and left mainstem bronchomalacia. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 2019; **31**: 479-485
- 14) Filler RM, Messineo A, Vinograd I: Severe tracheomalacia associated with esophageal atresia: Results of surgical treatment. *J Pediatr Surg* 1992; **27**: 1136-1140, discussion, 1140-1141
- 15) Conforti A, Valfrè L, Scuglia M, et al: Laryngotracheal abnormalities in esophageal atresia patients: A hidden entity. *Front Pediatr* 2018; **18**: 401-406
- 16) van Tuyll van Serooskerken ES, Tytgat SHAJ, Verweij JW, et al: Primary posterior tracheopexy in esophageal atresia decreases respiratory tract infections. *Front Pediatr* 2021; **9**: 720618
- 17) Abdel-Rahman U, Ahrens P, Fieguth HG, et al: Surgical treatment of tracheomalacia in bronchoscopic monitors aortopexy in infant and children. *Ann Thorac Surg* 2002; **74**: 315-319
- 18) Blair GK, Cohen R, Filler R: Treatment of tracheomalacia: Eight years' experience. *J Pediatr Surg* 1986; **21**: 781-785
- 19) Vinograd I, Filler RM, Bahoric A: Long-term functional results of prosthetic airway splinting in tracheomalacia and bronchomalacia. *J Pediatr Surg* 1987; **22**: 38-41
- 20) Antón-Pacheco JL, Cabezal D, Tejedor R, et al: The role of airway stenting in pediatric tracheobronchial obstruction. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; **33**: 1069-1075
- 21) Hagl S, Jakob H, Sebening C, et al: External stabilization of long-segment tracheobronchomalacia guided by intraoperative bronchoscopy. *Ann Thorac Surg* 1997; **64**: 1412-1420, discussion, 1421
- 22) Ley S, Loukanov T, Ley-Zaporozhan J, et al: Long-term outcome after external tracheal stabilization due to congenital tracheal instability. *Ann Thorac Surg* 2010; **89**: 918-925
- 23) 安藤 誠: 小児 Vascular compression syndrome および先天性気管気管支軟化症に対する外ステント術. *日小児呼吸器会誌* 2015; **26**: 88-90
- 24) Emery JL, Nanayakkara CF, Wailoo MP: Tracheomalacia: Lethal factor in a 17-month-old child. *Pediatr Pathol* 1984; **2**: 259-265
- 25) Takazawa S, Uchida H, Kawashima H, et al: External stabilization for severe tracheobronchomalacia using separated ring-reinforced ePTFE grafts is effective and safe on a long-term basis. *Pediatr Surg Int* 2013; **29**: 1165-1169
- 26) Ando M, Nagase Y, Hasegawa H, et al: External stenting:

- A reliable technique to relieve airway obstruction in small children. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2017; **153**: 1167–1177
- 27) Schweigert M, Santos Sousa H, Solymosi N, et al: Spotlight on esophageal perforation: A multinational study using the Pittsburgh esophageal perforation severity scoring system. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2016; **151**: 1002–1009
- 28) Lincoln JC, Deverall PB, Stark J, et al: Vascular anomalies compressing the oesophagus and trachea. *Thorax* 1969; **24**: 295–306
- 29) Sebening C, Jakob H, Tochtermann U, et al: Vascular tracheobronchial compression syndromes: Experience in surgical treatment and literature review. *Thorac Cardiovasc Surg* 2000; **48**: 164–174
- 30) Filler RM, Rossello P, Lebowitz RL: Life threatening anoxic spells caused by tracheal compression after repair of esophageal atresia: Correction by surgery. *J Pediatr Surg* 1976; **11**: 739–748
- 31) Schreiber C, Mazzitelli D, Haehnel JC, et al: The interrupted aortic arch: An overview after 20 years of surgical treatment. *Eur J Cardiothorac Surg* 1997; **12**: 466–469, discussion, 469–470
- 32) Corno A, Giamberti A, Giannico S, et al: Airway obstructions associated with congenital heart disease in infancy. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1990; **99**: 1091–1098
- 33) Koivikko A, Puhakka HJ, Vikki P: Innominate artery compression syndrome: Presentation of 16 cases. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1976; **38**: 187–192
- 34) Gross RE, Neuhauser EBD: Compression of the trachea by an anomalous innominate artery: An operation for its relief. *Am Dis Child* 1948; **75**: 570–574