

Review

【特集：第 18 回教育セミナー 〈カテーテル治療〉】

経皮的バルーン血管形成術の基本：肺動脈狭窄

宗内 淳

独立行政法人地域医療機能推進機構九州病院小児科

Basis of Transcatheter Balloon Angioplasty for Pulmonary Stenosis

Jun Muneuchi

Department of Pediatrics, Kyushu Hospital, Japan Community Healthcare Organization, Fukuoka, Japan

Transcatheter balloon angioplasty aims to promote vascular remodeling through temporary dissection in the vascular wall and approach the larger diameter of the targeted vessel. Transcatheter balloon angioplasty is indicated for postoperative vascular stenosis associated with congenital heart diseases, and the identification of the stenotic lesion depends upon the pressure gradient and anatomy. Stenotic lesions involved thickened, atrophic, hypoplastic, compressed, and stiff lesions, and balloon angioplasty is the most effective for thickened lesions. Stent implantation or surgical repair rather than balloon angioplasty is expected to be effective in other types of stenotic lesions. High-pressure balloons are basically used for balloon angioplasty, and ultrahigh-pressure balloons may be chosen to treat the stiff stenotic lesions. The optimal balloon diameter is determined according to the narrowest and adjusted vessel diameters. Then, the sizes of the sheath, guiding catheter, and guide wire are determined according to the balloon catheter and body size. The risks for transcatheter balloon angioplasty are stratified according to the duration after the last surgical intervention, presence of artificial material, interference to the surrounding tissue, and influence on hemodynamic alteration during the procedure. Additional procedures are performed stepwise, including the introduction of the guidewire, delivery of a balloon catheter, inflation of the balloon at the stenotic lesion, and assessments of hemodynamic and anatomical results. Placing a guidewire at the appropriate position is important for a successful procedure. When the procedure is performed through right heart structures, maintaining stable hemodynamics during the procedure is critical. The disappearance of the balloon waist is the criterion for the completion of treatment. Hemodynamic and anatomical alterations across the target lesion are assessed after the withdrawal of the balloon catheter. As transcatheter balloon angioplasty for congenital heart disease targets various lesions, individual planning and experience for procedures are necessary.

Keywords: congenital heart disease, catheter intervention, pulmonary arterial stenosis, noninvasive therapy

経皮的バルーン血管形成術は、狭窄血管を内腔より拡張し内膜から中膜にかけて一時的な亀裂・解離を生じさせ、より大きな内径へ血管リモデリングを促し血行再建することを目的とする治療である。術後遺残狭窄病変を対象に広く行われ圧較差・形態を主眼に対象病変を抽出する。狭窄病変は肥厚・萎縮・低形成・圧迫・硬化など多様性を包含し、基本的に経皮的バルーン血管形成術は肥厚病変に対して最も効果的であり、萎縮・圧迫・低形成病変に対してはバルーン治療の効果は期待できずステント治療・外科治療なども考慮される。血管形成用バルーンは高耐圧バルーンを基本とし、硬化病変に対して超高耐圧バルーンを選択する。狭窄部最小径と周辺の参照血管径から至適バルーン径を決定し、体格を加味してアクセスのためのシース・親カテーテル・ガイドワイヤーを決定してゆく。リスク評価として術後経過時間、人工物介在の有無、バルーン拡張時の周辺への干渉や血行動態に及ぼす影響

を事前に評価した後、狭窄病変へのガイドワイヤーの導入、バルーンカテーテルのデリバリーと拡張、効果判定の各段階を経て実行される。適切で効果的なガイドワイヤーの留置が成功への鍵となり、治療システムが心内を通過する場合には治療中の血行動態変動に常に留意し治療システム全体の安定に努める。バルーンウエストの消失を治療完遂基準として数回の加圧を行い、バルーンカテーテル抜去後の血行動態測定と血管造影により最終的効果判定を行う。先天性心疾患における経皮的バルーン血管形成術は個々の多様な病変を対象とするため、その治療計画は個別に立案されるべきで経験の積み重ねが必要である。

緒　　言

経皮的バルーン血管形成術は、血管狭窄病変を内腔より拡張し、内膜から中膜にかけて一時的な亀裂・解離を生じさせることで、より大きな血管内径へのリモデリングを促し血行再建することを目的とする治療である (Fig. 1)¹⁾。日本先天性心疾患カテーテル治療学会 (JCIC) データベースによると、本邦で実施される先天性心疾患カテーテル治療年間約 4,500 例のうち、経皮的バルーン血管形成術は約 1,600 例 (36%) を占める²⁾。新生児から成人まで幅広い年齢・体格を対象とするとともに、難易度の高いカテーテル治療手技へ向けた基本となるため、先天性心疾患カテーテル治療医を目指す医師にとって習熟すべき手技である。本稿では最も一般的に行われる肺動脈狭窄症に焦点を当て解説する。

対象病変と適応

小児科と心臓血管外科に加え新生児科、集中治療科、麻酔科、看護師、臨床工学技士などの小児循環器診療に携わる医療者でハートチームを構成し、個々の治療計画を立案することが望ましい¹⁾。対象病変は多様で外科的介入のない本態性狭窄病変と術後狭窄病変に分けられる (Table 1)。各症例の解剖に即した効果的かつ安全なアクセス路の選択が必要となる。術後病変では外科的形成後の狭窄病変が主な対象病変であり、人工導管を使用した体肺動脈短絡や右室流出路人工導管も対象となる^{3,4)}。Jatene 術後の肺動脈狭窄への経皮的バルーン治療では肺動脈と大動脈との間に瘻孔を形成してしまうことがあるため過拡張は避け、学童期以降はステント治療が勧められる^{5,6)}。また主要体肺動脈側副血管の統合術 (unifocalization) 後の吻合部狭窄や Fontan・Glenn 術などの右心バイパス経路の狭窄なども含まれるため、多様なアクセスからの手技が要求される (Fig. 2)。肺動脈絞扼術後の肺血

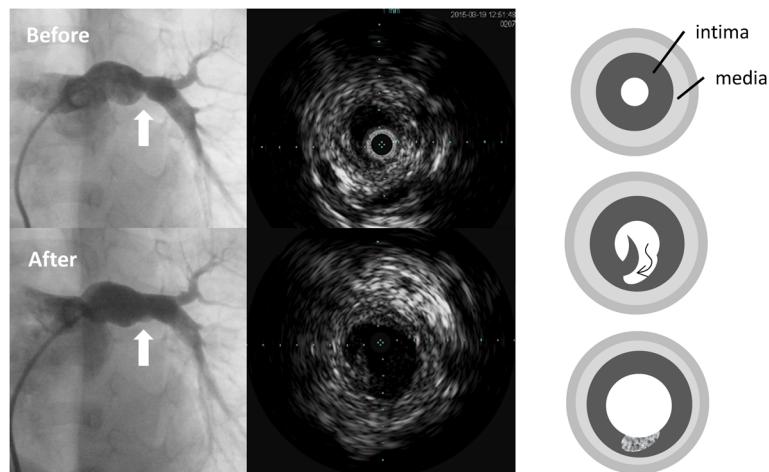


Fig. 1 Upper and lower panels show angiographic and intravascular ultrasound findings before and after transcatheter balloon angioplasty, respectively. Intravascular ultrasound shows that a laceration of the intima follows a dissection between the intimal and medial layers, which promote vascular remodeling and achieve a larger diameter of the vessel. Schemes of the vascular remodeling show the pathophysiology of vascular remodeling (the right side).

Table 1 Pulmonary stenotic lesions indicated for transcatheter balloon angioplasty

Postoperative pulmonary arterial stenosis

- Pulmonary branch stenosis followed by surgical anastomosis
- RV-PA graft stenosis, including the Norwood and Rastelli procedures
- Pulmonary branch stenosis after the Jatene procedure
- Aortopulmonary shunt
- Cavopulmonary shunt (Glenn procedure, Fontan procedure)
- Multiple and complex pulmonary arterial stenosis after unifocalization of MAPCAs
- Augmentation of pulmonary blood flow after pulmonary arterial banding

Native pulmonary arterial stenosis

- Multiple pulmonary stenosis associated with Williams syndrome and Alagille syndrome
- Stenosis of native MAPCAs beyond the hilar

MAPCA, major aortopulmonary collateral artery; RV-PA, right ventricle-pulmonary artery

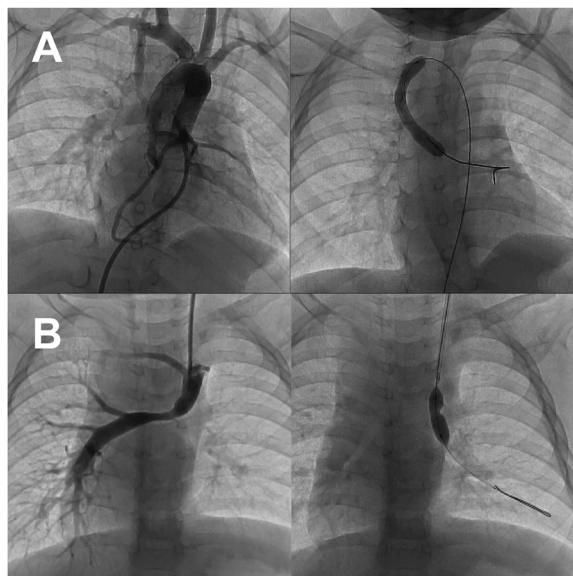


Fig. 2 Different accesses to stenotic lesion for transcatheter balloon angioplasty are shown. Upper panels (A) show balloon angioplasty for a narrowing shunt via the antegrade approach in a patient with tetralogy of Fallot having an aortopulmonary shunt. The catheter is placed from the femoral vein, via the right ventricle, the aorta, and an aortopulmonary shunt, to the left pulmonary artery. Lower panels (B) show balloon angioplasty for the occluded left pulmonary artery in a patient after the bidirectional Glenn procedure. The catheter is placed from the left jugular vein to the left pulmonary artery.

流調節のため経皮的バルーン血管形成術も行われることがあるが経験が必要である⁷⁾。本態性病変としてはWilliams症候群やAlagille症候群に合併した末梢性

肺動脈狭窄が知られるが、経皮的バルーン血管形成術の効果は限定的であるとの意見もあり適応には熟慮を要する。カッティングバルーンなどの有効性も報告されている⁸⁻¹⁰⁾。

適応決定は圧較差と形態に主眼を置き、肺動脈狭窄では右心減圧あるいは肺血流左右不均衡の是正が目的となる^{1,11)}。先天性心疾患、心臓大血管の構造的疾患に対するカテーテル治療ガイドラインに準じ、有意な末梢性肺動脈狭窄や一次治療としてステント留置が選択できない体格の小さい患者の肺動脈狭窄に対して適応とし(推奨クラスI, エビデンスレベルB), (1)肺動脈主幹部で右室収縮期圧/左室収縮期圧 $\geq 2/3$, (2)圧較差 15~20 mmHg以上, (3)造影による形態的狭窄、を治療適応とする¹⁾。ただし、(2)の圧較差を指標とする場合、片側末梢性肺動脈狭窄では健側肺が代償するため圧較差が病状を正確には示さない可能性もあることを考慮し、造影による形態的狭窄率を加味して適応判断するが基準はない。Fontan・Glenn術後等の右心バイパスでは肺循環改善を目的とするため前述ガイドラインによらない積極的な経皮的バルーン血管形成術を推奨する意見もある¹²⁻¹⁴⁾。

狭窄病変と言ってもその性状は多様性に富む。私たちは病変の性状を便宜的に以下の5つに分類する(Table 2)。(1)外科的吻合等により血管壁の部分的肥厚が狭窄の主体となっている病変(肥厚病変)、(2)血管壁の萎縮が主体となり血管壁はゴムのように伸縮する性状(recoil)となっている病変(萎縮病変)、(3)狭窄部以降の血管自体が低形成である病変(低形成病変)、(4)血管周囲の構造物から圧迫をうけて狭窄している病変(圧迫病変)、(5)血管壁の硬化・変性が進行した病変(硬化病変)である。バルーン形成術は肥厚病変に最も効果的と考えられ、萎縮病変・低形成病変・圧迫病変に対する効果は限定的でステント留置術などを考慮する。硬化病変は超高耐圧バルーン

Table 2 Different characteristics of stenotic vascular lesions

Classification	Characteristics	Efficacy of balloon angioplasty
Thickened lesion	Narrowing due to thickened vascular wall after surgical anastomosis	Effective
Recoil lesion	Narrowing due to atrophy of vascular wall Vascular wall is distensible	Not effective Indication for stent implantation
Hypoplastic lesion	Narrowing due to hypoplasia of the vessels Unable to be expanded	Probably not effective
Compressed lesion	Narrowing due to the compression by extrinsic structures	Not effective Indication for stent implantation
Stiff lesion	Narrowing due to stiff and degenerative vascular wall after surgical anastomosis	Partially effective Indication for cutting balloon angioplasty

の登場により積極的治療対象として治療を試みてもよい。ただしこれらの病変分類は実際の治療効果を勘案して判断することが多い。

術前の評価—リスク・血行動態・血管造影—

先天性心疾患における形態的多様性はカテーテル治療手技自体の多様性に反映され、治療リスクは個別に評価されるべきである。JCIC レジストリーによると先天性心疾患カテーテル治療における有害事象発生率 3%，死亡率 0.03% であり欧米の報告にはほぼ等しい^{2, 15, 16)}。また経皮的血管形成術においては有害事象発生率 6.6%，死亡率 0.3% で、肺動脈病変に限ると有害事象発生率 6.2%，死亡率 0.1% であった²⁾。

カテーテル治療術前に、呼吸循環の安定性、不整脈、出血傾向、他の臓器病変や染色体異常の合併などを含めた標準的リスク評価を行うのは当然ながら、病変の性状や血行動態に応じたリスク評価も併せて行う必要がある。例えば、術後病変かどうかは周辺組織の癒着の有無に関連し、癒着がなければ血管解離・損傷は危機的状態へ直結する可能性がある。対象病変の血圧も重要で、肺動脈狭窄であっても肺動脈狭窄中枢側が高圧となっている場合や肺高血圧合併例などは注意すべきである。また術後病変であれば血管形成方法（直接吻合・自己心膜パッチまたは伸展加工ポリテトラフルオロエチレンパッチによる形成）は病変硬度や石灰化に関係し、後述するバルーンの種類・サイズ選択への影響のみならずバルーン破裂のリスクを孕む。術後経過時間も考慮すべきで、縫合部安定の観点から術後 6 週間以上の間隔をおいてカテーテル治療することが一般的であり、私たちも術後 3 か月以降で治療することを基本とする。生命危機的状況の脱却や補助循環からの離脱を目的とすれば術後超早期介入も許容されるが、バルーン径は狭窄部に対して 200% 未満に抑

え加圧も控えめにするなど手加減が必要であり、その判断は熟練者のみ許されるだろう¹⁷⁻¹⁹⁾。

術前血行動態評価においては狭窄病変の重症度とバルーン拡張中の血行動態変化の予測が必要となる。連続した引抜き圧測定による狭窄部位特定が基本となり、側面孔カテーテル使用時は側面孔が狭窄病変を通過する際 Venturi 効果により陰圧となる現象が観察されることがあり病変の場所・範囲の特定に際し参考となる。先端孔と側面孔を併せ持つカテーテル使用時は予め留置したワンサイズ細いガイドワイヤーに沿わせると明瞭な引抜き圧を得ることが可能となり治療効果判定の圧測定で応用したい。

バルーン拡張中は病変より末梢への血流が途絶・減少するため、患者個々の血行動態への影響をあらかじめ想起しなければならない。例えば片側肺動脈狭窄に対して経皮的バルーン血管形成術を行う場合、バルーン拡張中は右室からの全拍出量が対側肺へ流れゆくため、もし対側肺の循環許容量が減少していれば（対側肺血管の狭窄病変や肺高血圧など）肺循環の破綻を生じ治療中に憂慮すべき血行動態の変化を生じる。そのため両側の肺動脈狭窄を治療する際には重症側より治療することが必要である。またバルーン拡張中の周辺部（気管支や冠動脈）へ干渉の有無は常に配慮する必要がある。

バルーンサイズ選択は血管造影に基づくため、事前の血管造影は参照画像として重要である。バイプレーンアンギオ装置を使用して狭窄部描出が最良となるよう個別に撮像角度を調整する。例えば左肺動脈狭窄や右肺動脈狭窄においては正面カメラをそれぞれ左斜位や右斜位とするとともに頭側・尾側へ調整して撮像することでも狭窄部を的確に描出することができる（Fig. 3）。血管造影により撮像された画像から最狭窄部とその前後の（狭窄していない）参照血管径の 3 か所を計測する（Fig. 4）。肺動脈狭窄においては経胸壁心

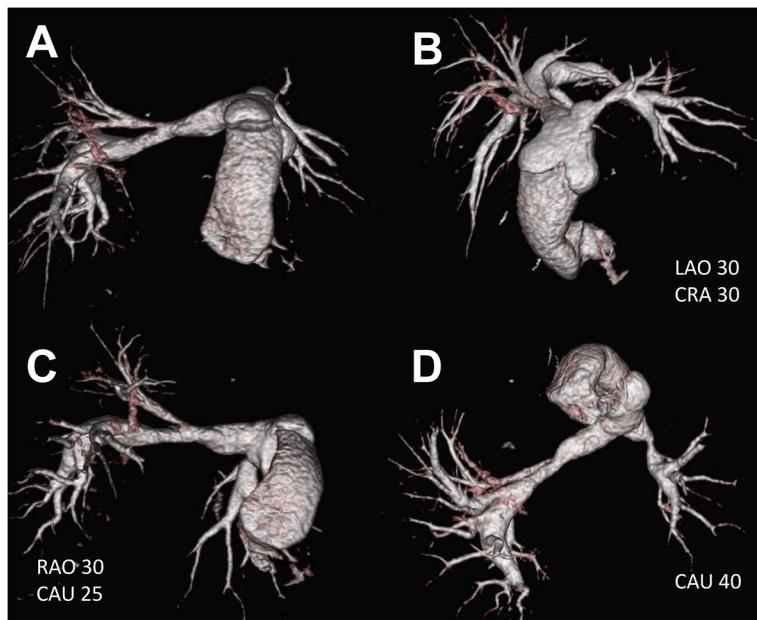


Fig. 3 Volume rendering computed tomography images are shown in the different angles. Although the stenotic lesions are not clearly depicted in the antero-posterior view (A), the left and right pulmonary arterial stenoses are clearly demonstrated in the left oblique view (B) and right oblique view (C). The laid-back view is also useful to show branch pulmonary arterial stenosis (D).

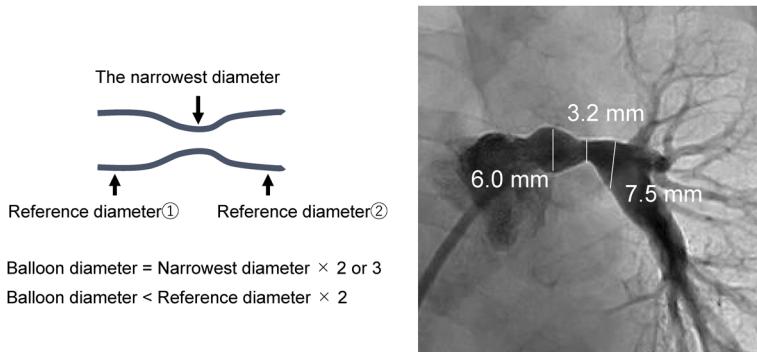


Fig. 4 The size of a balloon is determined according to the narrowest diameter and adjacent reference diameters. The balloon diameter is as two or three times as the narrowest diameter, but within two times of reference diameters. An angiogram shows the left pulmonary arterial stenosis in a 7-month-old patient with persistent truncus arteriosus and interrupted aortic arch. The narrowest and adjacent reference diameters are 3.2mm, 6.0mm, and 7.5mm, respectively. Then, balloon angioplasty is performed using a 10-mm high-pressure balloon catheter.

エコー図での詳細な描出は困難なことも多いため病変の特定や形態は血管造影に委ねられる。経皮的血管形成術における放射線面積量積は約 $1,500 \mu\text{Gym}^2$ と報告され心房中隔欠損や動脈管閉鎖等の他の先天性心疾患カテーテル治療と比較して有意に多い²⁰⁾。そのため「as low as reasonably achievable の原則」により放射線被ばく低減のための努力が必要であり、手技中の撮像範囲の制限、フレームレート低減または低線量撮像後

のコンピュータ画像処理による工夫が推奨される。被ばくを伴わない血管内超音波検査は血管断面から血管径測定や血管壁構造の観察を可能とし²¹⁾、心臓MRI検査も有力な画像診断方法として期待される²²⁾。

バルーンカテーテルの種類

各バルーンカテーテルの特徴は、素材形状 (pro-

file), 追従性 (trackability), 操作性 (pushability), 通過性 (crossability), 弾性 (compliance) の 5 要素に集約され製品カタログ・添付文書等で各製品特性を確認して欲しい²³⁾。血管形成用バルーンカーテルの多くは狭窄病変へ到達性・通過性改善を目的にバルーン表面に親水性ポリマーのコーティングが施され浸水したバルーン表面はツルツルした触感である。一方で Conquest バルーン™ は Kevlar™ 素材で編込み加工されておりザラザラした触感が特徴で通過性にやや劣るものの素材強度から 30 気圧に及ぶ超高耐圧を実現し、ダブルバルーン法でバルーン同士がスリップしにくい利点もある。またバルーンには通常 2 つの X 線不透過視認マーカーがついており、その 2 つのマーカーから実際のバルーン端まで (ショルダー) の長さも各製品により異なるので把握する必要がある。バルーン先端を含めたシャフトの硬度は追従性・操作性・通過性に関わり実際に触ってみて感触を確かめておく必要があり、新生児・乳児や屈曲・蛇行が強い病変の症例では硬いシャフトのバルーンカーテルは避けたほうがよい。バルーンの弾性は重要な要素で加圧に応じた内径変化仕様から、バルーン内圧によって径が変化するコンプライアントバルーン、バルーン加圧によってもその径が変化しないノンコンプライアントバルーン、およびその中のセミコンプライアントバルーンに分類される^{1,23)}。血管形成にコンプライアントバルーンが使用されることではなく（経皮的心房中隔欠損カーテル閉鎖治療時の欠損孔計測に使用されるサイジングバルーンくらいであろう）バルーン血管形成術ではセミコンプライアントまたはノンコンプライアントバルーンが使用され、前者は一般に高耐圧バルーン、後者は超高耐圧バルーンと呼ばれる。同じバルーン内圧では内径が大きいほど表面張力が大きいため (Laplace 法則) 素材耐久性においてバルーン径が大きくなるほど最大耐圧が低くなる。したがって一般に血管径の大きな病変に対して使用可能なバルーン最大耐圧は限られる。近年は大口径・高耐圧バルーンも市販されており製品ラインナップを隨時アップデートしたい。セミコンプライアントバルーンは加圧により径が変化するので、その径に到達する規定圧 (nominal pressure) と最大耐圧 (rated burst pressure) を事前に確認しておく必要がある。セミコンプライアントあるいはノンコンプライアントバルーンのいずれも最大耐圧以上の加圧は破裂する可能性があり避けるべきである。

ガイドワイヤー通過様式により、バルーン先端から尾部まで全長にわたりガイドワイヤーが通るもの (over the wire: OTW 型) とバルーン先端から数セン

チのところまでガイドワイヤーが通るもの (rapid exchange: RX 型または monorail 型) とがある^{1,23)}。OTW 型は手元の力が先端へ伝わりやすく操作性は高まる一方、システム全体の操作抵抗が高くなるため全体の経路が屈曲している病変へ導入する際の追従性が低下する。この点、RX 型はガイドワイヤーが通る部分が短いのでシステム全体の操作抵抗が少なく追従性が高くなるが手元の力が先端に伝わりにくく操作性は低下しロングシーズ・ガイディングカーテルを併用することも考慮される。

基本的には各バルーンカーテルに適合したガイドワイヤーを選択しバルーンカーテル選択に際して必ず使用ガイドワイヤーも一緒に考慮する必要がある。バルーンカーテルを追随させるためには十分支持力の高いガイドワイヤーを使用する必要がある。やむを得ず不適合ガイドワイヤーを選択する時はその先端ギャップを認識する必要があり、バルーンカーテルをガイドワイヤーに沿わせて導入する際に心内の弁膜や腱索あるいは血管などを傷つけないように細心の注意を払うことと、OTW 型の場合はバルーンカーテル尾側より出血してくることを認識する必要がある。

バルーンカーテルの償還分類には弁拡張用バルーン、血管拡張用バルーンおよび冠動脈形成用バルーンがあり、償還価格はそれぞれ 50,000 円、35,300 円および 32,000 円 (2022 年 4 月現在) と価格の違いがあることに留意しておく必要がある²⁴⁾。弁拡張用バルーンや冠動脈形成用バルーンを肺動脈や大動脈などの血管形成に使用することは避けるべきである。しかし症例によっては非常に細い狭窄血管を対象とすることもあるため、適応外ではあるがやむを得ず冠動脈形成用バルーンカーテルを使用する場合もある。また同じ製品でも冠動脈形成用と末梢血管拡張用と 2 つの償還分類で採用されていることがあり末梢血管拡張用を選択する。新生児・乳児の先天性心疾患カーテル治療ではそれぞれの病変に応じた製品がないため、我々小児科医は積極的に企業との協力のもと製品の導入・普及に尽力してゆく必要がある。

バルーンサイズの選択

先述した事前の血管造影に基づき、最狭窄部の 300 ~350% 未満、参照血管径の 150~200% 未満のバルーン径を選択する²⁵⁻²⁷⁾。通常は最狭窄部径の 200~300% 径から選択することが妥当であるが、狭窄率が大きくなれば必然的に最狭窄部径に対するバルーン径は大きいものを選択する傾向にある。バルーンサイズ

決定における意思決定プロセスを実例に則して具現化してみる (Fig. 4). 最狭窄部 3.2 mm, 近位部参照血管径 6.0 mm, 遠位部参照血管径 7.5 mm である場合, $3.2 \times 2 - 3 = 6.4 \sim 9.6$ mm のバルーン径かつ参照血管径から小さい値を採用すると $6.0 \times 2 = 12.0$ mm 以下のバルーン径を選択することとなる。したがって 8 mm あるいは 10 mm のバルーン径を選択することになる。更に Table 3 に列挙した点も考慮する。術後経過日数は縫合部安定と組織硬化・癒着の担保となる。前述した病変の性状も重要であり人工物介在のない肥厚病変であればバルーン血管形成術が最も効果を発揮するところであるが萎縮病変や低形成病変への効果は期待できない。体格やアクセス路はシステム決定の主要因子であるのは勿論のこと、より安価なシステムで治療を完遂させる医療経済的観念は常時念頭におく必要がある。以上を勘案すればセミコンプライアントバルーン 10 mm の妥当性が見えてくる。バルーン長も重要な要素となり、2 cm 長と 4 cm 長のラインアップが揃えてある製品が多いが、体格が小さいからといって安易に 2 cm バルーンを選択してしまうと拡張した時にス

リップやミルキングされ安定した拡張を達成できないこともあり、実際に 2 cm と 4 cm を画像上に示し具体的な位置を想定してから決定する。当然ながら各施設において常時保有する血管形成用バルーンカテーテルの種類やサイズによって代替案は許容される。

手技の実際

基本手技は、(1)狭窄病変へのガイドワイヤー導入、(2)バルーンカテーテルのデリバリー、(3)バルーンの拡張、(4)結果の評価、の各段階に集約される (Table 4)。狭窄病変へガイドワイヤーを導入するためには親カテーテルの導入が第一段階となる。肺動脈狭窄の場合は三尖弁腱索が複雑に張り巡らされた右室内腔構造の損傷を回避するため、原則として先端バルーン付カテーテルを使用して右房、右室から肺動脈へと親カテーテルを導入し、治療用バルーンカテーテルの経路確保を心掛けたい²⁵⁻²⁷⁾。事前に使用するガイドワイヤーサイズを考慮し親カテーテルを選択する必要があり、例えば 5Fr 先端孔バルーンアンギオカ

Table 3 Points to note when determining a balloon diameter

Safety	What is the impact on hemodynamics? How long after the last surgery?
Efficacy	Which type of stenotic vascular lesions?
Recurrence	How many times have the previous procedures been done?
Accessibility	Which size of the sheath? Which approach?
Cost effectiveness	How much is the cost of equipment?

Table 4 Stepwise approaches for successful transcatheter balloon angioplasty

Preprocedural assessments
• Assess the stenotic lesion hemodynamically and anatomically
• Assess the risks for the procedure individually
• Determine equipment, including the size and type of a balloon catheter and an appropriate guidewire according to angiographic findings
Introduction of a catheter and a guidewire
• Use a tip-balloon catheter to avoid injury of tricuspid valve and chordae
• Place a guidewire as far as possible beyond the stenotic lesion, which is the key for successful procedure
• Use a microcatheter and a pre-shaped guidewire to pass though the severely stenotic lesion
• Fix the position of a guidewire while withdrawing a catheter
Delivery of a balloon catheter
• Push a balloon catheter while slightly pulling a guidewire
• Be careful to compress the tricuspid valve or the right ventricular outflow, which can cause hemodynamic instability during the procedure
• Optional use of a long sheath to achieve the stability of the procedure
Inflation of a balloon catheter
• Inflate a balloon up to the rated burst pressure until the waist of a balloon disappear
• Watch blood pressure, heart rate, and respiration during inflation of a balloon catheter
Postprocedural assessments
• Obtain pressure measurements and angiography across the treated lesion
• Watch vital signs after the procedure on ward and recognize clinical improvements

テーテルを親カテーテルとして使用する場合は 0.018 インチのガイドワイヤーの導入は可能だが 0.035 インチのガイドワイヤーの導入はできない。狭窄が強い病変にガイドワイヤーを通過させるためには、トルク性の高い親カテーテルによるカテーテル操作または支持性のある交換用ガイドワイヤー (Radifocus™ など) のサポートで通過させる方法や、子カテーテルとしてマイクロカテーテルを使用して通過させる方法がある。マイクロカテーテルが通過したとしても血管拡張用バルーンカテーテル導入のための支持力のあるガイドワイヤーが必ずしも通過するとは限らないので、マイクロカテーテルを支持に更に親カテーテルを可及的遠位部へ挿入するか、ガイドワイヤーをあらかじめ病変の屈曲に応じて軽く曲げて形成し通過しやすくするなど工夫も必要となる。ガイドワイヤーはその後の血管拡張用バルーンカテーテルのデリバリーに重要な道筋となるため、ガイドワイヤー先端は事前に用手的に曲げて J 型にループさせて先端フロッピー部分は十分に狭窄部を超えて可及的に末梢に挿入する。J 型にループさせないで肺血管末梢にガイドワイヤーを不用意に挿入すると肺出血を起こすことがあり、特に主要体肺動脈側副血管に関連した治療の際は要注意である。適切なガイドワイヤー挿入は治療成功のための鍵となり十分時間をかけて行うことが肝要である²⁵⁾。

ガイドワイヤー挿入後、親カテーテルを抜去する際にはガイドワイヤー先端が抜けないよう透視下で位置を確認しながらガイドワイヤーを保持して（少し挿入するような感覚で）親カテーテルのみ抜去することが基本手技となる。この際には体外のカテーテルやガイドワイヤーがたわまず直線的になるよう心掛ける。不用意な「たわみ」はガイドワイヤーやカテーテル先端に抜けてくる力が加わるからである。バルーンカテーテルに交換する際はガイドワイヤーをよく濡れたガゼで湿らせ滑りをよくするとともに血栓等を除去しながら挿入してゆく。この際、バルーンカテーテルとガイドワイヤーの「取り引き」が必要である。主術者一人で操作する時は、左手でバルーンカテーテルのシース側を把持し、右手の人差し指と親指でバルーンカテーテルの尾部を、薬指と小指でガイドワイヤーを把持してガイドワイヤーを少し引き抜く感じで左手と右手でカテーテルを挿入してゆくとよい。助手と協働で行う時は、主術者がバルーンカテーテルを挿入してゆく際、助手はバルーンカテーテルの尾部を左手で、ガイドワイヤーを右手で把持しながら右手のガイドワイヤーを固定してカテーテル尾部を送ってゆくように心がける。この際にも体外のカテーテルとワイヤーが

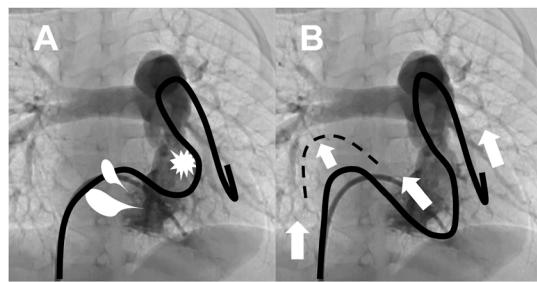


Fig. 5 Pushing a catheter or a guidewire causes tensions to the tricuspid valve and the right ventricular outflow tract, which can elicit hemodynamic incompetence (A). Excessive pushing a guidewire may result in pulling a tip of guidewire (B). Be careful to place a catheter and a guidewire in the neutral position during the procedure.

直線状になるよう心掛ける。ガイドワイヤーの挿入が浅かったりシステム全体の支持力が弱いと、屈曲した病変へバルーンカテーテルを挿入する際にガイドワイヤーが抜けてしまうことがあるので、前述のようにガイドワイヤーは病変を超えて十分深く挿入することが重要であるとともに、バルーンカテーテルをあらかじめ体外で「抜いておく」と通過しやすくなる。またバルーンカテーテルのデリバリーに際しシステム全体への過度のテンションは三尖弁や右室流出路の圧迫による血行動態破綻を招くこともあるためガイドワイヤー・カテーテルが自然な位置となるよう常時調節する。また強いテンションのためガイドワイヤーやカテーテルが右房内で S 字状となった場合に先端が抜けてくることがあり、焦ってシステムを押すと更に先端が抜けてしまう (Fig. 5)。そのため助手は不用意にガイドワイヤーを押し込まないよう注意が必要である。逆にシステムを少し引くことで修正される。症例によっては意図的にループを形成することによりデリバリーシステム全体が安定することもあるので症例ごとにデリバリー方法を工夫することも必要となる。

事前に撮影した参照血管造影をもとに狭窄部全体をバルーンがカバーするようバルーンの位置を調整する。バルーンの X 線不透過マーカーの中央部に最狭窄部が位置することが理想ながら、正常組織への干渉具合を加味して位置を微調整する。適切な位置であることを確認した後にインデフレーターを使用して透視下で確認しながら加圧してゆく。加圧速度に決まりはないがバルーンに生じるウエストを視認し、ウエスト消失まで 10 秒程度で最大耐圧まで加圧する。この際

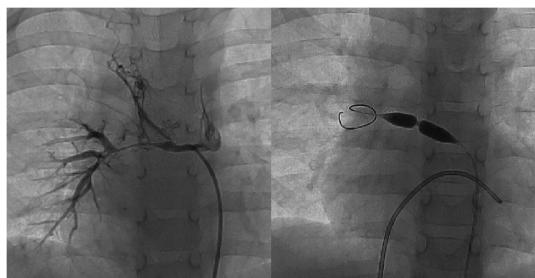


Fig. 6 Angiograms show the left pulmonary arterial stenosis in a 5-year-old patient after corrective surgery of tetralogy of Fallot. The narrowest and adjacent reference diameters are 4.7mm, 5.8mm, and 8.8mm, respectively. We perform double balloon angioplasty using 8-mm high-pressure balloon catheters. The estimated effective balloon diameter accounts for 13.1mm according to the described formula.

には患者のバイタルサイン（特に血圧）に細心の注意を払い悪い兆候があれば加圧を中止しデフレーションする。ウエストが形成されない場合は選択したバルーン径が過小であるか、その病変が萎縮病変あるいは圧迫病変であった可能性が高く、前者であればより大口径バルーンへ交換し、後者であればステントなどの追加治療を検討する。数回の拡張によってもウエストが残る場合は超高耐圧バルーンに交換することも考慮される。しかしバルーン径の半分以下しか拡張されないような強固な硬化病変に遭遇した場合、その病変を高圧で拡張すると頻繁に血管損傷を生じる可能性があるため初回治療ではそれ以上加圧しないことが勧められる（Fig. 6）²⁷⁾。

ガイドワイヤーが浅かったり、経路が複雑でバルーンカテーテルのデリバリーが困難な場合、また広いスペースから急に狭くなるような病変の場合にはロングシースを使用してシステム全体の安定を高める工夫が必要となる。また狭窄部よりも遠位部がびまん性に狭窄した低形成病変においてバルーン拡張中にバルーンが手前に押し出されてくる現象（ミルキング）を防止するためロングシースでバルーンを支えることも可能である。ただしこの際にはバルーンがロングシースの外に出ていることをよく確認する必要がある。更にロングシースを使用することで次のステップへの対応、つまりカッティングバルーンやステント治療も可能となる利点がある。

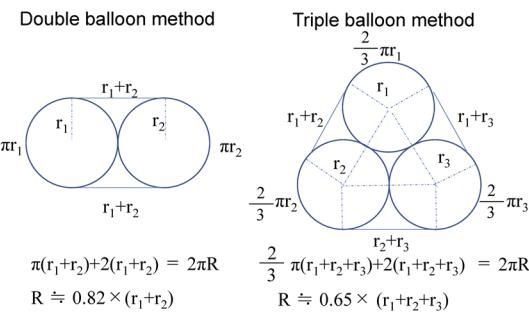


Fig. 7 The formulas are shown to determine the balloon size for double and triple balloon angioplasty. The estimated circumference is equivalent to the aggregate of merged balloon circumferences.

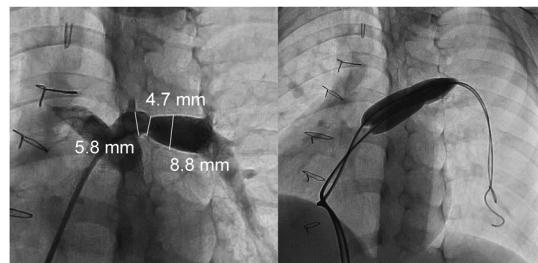


Fig. 8 Angiograms show an occluded major aortopulmonary collateral in a 2-year-old patient with pulmonary atresia and ventricular septal defect. If there appears to be a resistant waist in the balloon that is less than a half of the balloon diameter, it is recommended against full inflation under high pressure initially.

シングルバルーン法による拡張では不十分で更に大口径バルーンが必要と判断した場合、ダブルバルーン法あるいはトリプルバルーン法も有効な方法である²⁵⁻²⁸⁾。ダブルバルーン法では2つのバルーン径（ r_1 と r_2 ）から血管周囲長を計算しそれに見合う血管径が最狭窄部血管径に対してどのくらいの比率になるかによって2つのバルーン径を決定する。シングルバルーンに換算したバルーン径= $0.82 \times (r_1+r_2)$ として算出される。トリプルバルーン法の算出方法も是非参考にされたい（Fig. 7）。ここでFig. 8を供覧する。最狭窄部4.7mm、近位参照血管径5.8mm、遠位参照血管径8.8mmであるため前述の理論から選択されるバルーン径は12mmあるいは14mmが妥当である。12mm径あるいは14mm径のシングルバルーンであると7Fr相当のシースが必要となるが、アクセスが1本

増えるデメリットがあるものの、8mm径のダブルバルーン法であれば5Fr相当のシースで治療が完遂できることになる。前述のように小口径バルーンの方が高耐圧を実現できることもあり症例に応じた道具選択が必要である。

バルーン加圧時間に決まりはないがウエスト消失を有効として拡張を終了してよい。ただし硬化病変においてウエストが残存する場合、血行動態の破綻がなければ1~3分間の加圧をすることもあり、緩徐なウエスト消失がみられることがある²⁾。2~3回繰り返して加圧することで治療効果を確認する。この際、拡張後デフレーションしてリラップしたバルーンをその場に留めず、狭窄部より遠位部へ移動させることが勧められる。透視画像上はバルーンがリラップしているように見えても実際はデフレーションしたバルーンはインフレーションする前の状態には戻らずクシャクシャとなっており狭窄部を閉塞してしまう可能性があるためである。またデフレーションしたバルーンを近位部へ移動させてしまうと狭窄部が十分拡張されなかつた場合にリラップしたバルーンが再度病変を通過しない可能性もあるため遠位部へ移動させることが勧められる。バルーン拡張終了後に抜去してくる際もガイドワイヤーを必ず保持しリラップしたバルーンで三尖弁やその腱索を損傷しないよう注意しながら抜去する。拡張中にバルーンが破裂してしまった場合、デフレーションしても血液が引けてくるのみで十分にリラップできなくなる。バルーンは長軸方向に割裂することが多い。破裂したバルーンは抜去せざるを得ないが、最も注意すべきは右室内から三尖弁を通過させて右房に抜去してくる時で、リラップできないバルーンで三尖弁やその腱索を損傷しないようにゆっくりと慎重な操作が望まれる。またシース内へ引き込む際も注意が必要でありシース内に完全に収納できないこともあり力任せに引き込もうとするとシース先端がめくれたり、カテーテルが断裂してしまうこともある。この際、バルーンがシース内に完全に収納できないまま一塊として抜去せざるを得ない。このように破裂したバルーンを抜去する際に必ずガイドワイヤーを保持しておくことが必要である。これは無理なバルーン抜去時にバルーン断裂などを生じた場合にガイドワイヤーを残しておくことで回収できるからである。

バルーン抜去後の効果判定を行う際は、先端孔と側面孔のあるエンドホールアンギオバルーンの利便性は高く、ガイドワイヤー越しにカテーテルを挿入しY字コネクターを使用して引き抜き圧測定および造影を行うことができる。最狭窄部径の50%以上の拡張、

圧較差の50%以上の低減を成功とすることが一般的である^{1,23)}。他に患側肺への20%以上の血流増加や右室収縮期圧/大動脈収縮期圧比の20%以上の減少を成功とすることもある²⁹⁾。バルーン血管形成術後の病変は血管内膜に亀裂・解離を生じているため原則として治療後にガイドワイヤーやカテーテルを通すことを避ける。圧測定と造影により有効な拡張が得られたことを確認したら手技を終了とする。治療後の造影で血管解離・小動脈瘤が認められたとしても、術後病変であれば周辺の癒着があることや、低圧の右心系であるため動脈瘤の進行性増大がみられるることは少ない。狭窄部の肺血管拡張により急激な血流量増加に伴う再灌流障害・肺水腫・肺出血の報告もある³⁰⁾。

病棟帰室後もバイタルサインの変化に目を配り、視診・触診・聴診を怠らず状態変化の観察を継続する。治療後に胸部X線・心電図・心エコー図による確認検査を実施することが望ましい。肺血流不均衡は正を目的とした場合は肺血流シンチグラフィーやMRI検査位相差コントラスト法による血流測定で左右の肺血流量を定量することも可能である。

まとめ

経皮的バルーン血管形成術の要点を主に肺動脈狭窄への治療として解説した。経皮的バルーン血管形成術を安全に成功させるための要点は「方法の決定」と「手技の習得」に集約される。方法の決定は入手された解剖学的および血行動態的情報から具体的な方法をいくつかの選択肢から決定し、手技の習得は狭窄病変へのガイドワイヤー導入、バルーンカテーテルのデリバリー、バルーンの拡張および結果の評価という各段階を確実に完遂してゆくことで、日々の鍛錬が必要である。一朝一夕に習得できるものではなく感覚を研ぎ澄まして周囲の人が行っていることをつぶさに観察してみることが重要だろう。

利益相反

本稿について申告すべき利益相反はありません。

引用文献

- 1) 河村郎夫, 坂本喜三郎, 赤木禎治, ほか; 日本循環器学会: 循環器病の診断と治療に関するガイドライン(2012-2013年度合同研究班報告): 先天性心疾患, 心臓大血管の構造的疾患(structural heart disease)に対するカテーテル治療のガイドライン(2014年版). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2014_nakanishi_h.pdf

(2022年4月6日閲覧)

- 2) 金成海, 松井彦郎, 犬塚亮, ほか: 2018年における先天性心疾患、川崎病および頻拍性不整脈に対するカテーテルインターベンション・アブレーション全国集計: 日本先天性心疾患インターベンション学会レジストリー (JCIC-Registry) (旧日本 Pediatric Interventional Cardiology 学会データベース (JPIC-DB)) からの年次報告. *J JCIC* 2019; **4**: 24–38
- 3) Sanatani S, Potts JE, Human DG, et al: Balloon angioplasty of right ventricular outflow tract conduits. *Pediatr Cardiol* 2001; **22**: 228–232
- 4) Fujimoto K, Sugiyama H, Yazaki S: Use of triple ultra-high-pressure balloons for obstructed right ventricular outflow conduits in adults can be safe and effective. *Cardiol Young* 2015; **25**: 731–736
- 5) Nakanishi T, Matsumoto Y, Seguchi M, et al: Balloon angioplasty for postoperative pulmonary artery stenosis in transposition of the great arteries. *J Am Coll Cardiol* 1993; **22**: 859–866
- 6) Takayama H, Sekiguchi A, Chikada M, et al: Aortopulmonary window due to balloon angioplasty after arterial switch operation. *Ann Thorac Surg* 2002; **73**: 659–661
- 7) Hoshino S, Kitano M, Abe T, et al: Efficacy and safety of percutaneous transluminal balloon dilation to prevent progression of banding site stenosis after bilateral pulmonary artery banding. *Catheter Cardiovasc Interv* 2015; **85**: E197–E202
- 8) Geggel RL, Gauvreau K, Lock JE: Balloon dilation angioplasty of peripheral pulmonary stenosis associated with Williams syndrome. *Circulation* 2001; **103**: 2165–2170
- 9) Cobb H, Spray B, Daily J, et al: Cutting balloon angioplasty on branch pulmonary artery stenosis in pediatric patients. *Catheter Cardiovasc Interv* 2021; **98**: 526–532
- 10) Zussman M, Hirsch R, Beekman RH 3rd, et al: Impact of percutaneous interventions for pulmonary artery stenosis in alagille syndrome. *Congenit Heart Dis* 2015; **10**: 310–316
- 11) 富田英, 小林俊樹, 矢崎論, ほか: 日本小児循環器学会; 日本 Pediatric Interventional Cardiology 学会; 先天性および小児期発症心疾患に対するカテーテル治療の適応ガイドライン. http://www.jpic-meeting.org/pdf/guideline_catheter.pdf (2022年4月6日閲覧)
- 12) Hansen JH, Runge U, Uebing A, et al: Cardiac catheterization and interventional procedures as part of staged surgical palliation for hypoplastic left heart syndrome. *Congenit Heart Dis* 2012; **7**: 565–574
- 13) Matoq A, Radtke W: Balloon angioplasty of bidirectional Glenn anastomosis. *Cardiol Young* 2020; **30**: 1452–1457
- 14) Bhole V, Wright JG, De Giovanni JV, et al: Transcatheter interventions in the early postoperative period after the Fontan procedure. *Catheter Cardiovasc Interv* 2011; **77**: 92–98
- 15) Mehta R, Lee KJ, Chaturvedi R, et al: Complications of pediatric cardiac catheterization: A review in the current era. *Catheter Cardiovasc Interv* 2008; **72**: 278–285
- 16) Jayaram N, Spertus JA, Kennedy KF, et al: Modeling major adverse outcomes of pediatric and adult patients with congenital heart disease undergoing cardiac catheterization: Observations from the NCDR IMPACT registry (National cardiovascular data registry improving pediatric and adult congenital treatment). *Circulation* 2017; **136**: 2009–2019
- 17) Zahn EM, Dobrolet NC, Nykanen DG, et al: Interventional catheterization performed in the early postoperative period after congenital heart surgery in children. *J Am Coll Cardiol* 2004; **43**: 1264–1269
- 18) Nicholson GT, Kim DW, Vincent RN, et al: Cardiac catheterization in the early post-operative period after congenital cardiac surgery. *JACC Cardiovasc Interv* 2014; **7**: 1437–1443
- 19) Kojima T, Imamura T, Osada Y, et al: Efficacy of catheter interventions in the early and very early postoperative period after CHD operation. *Cardiol Young* 2018; **28**: 1426–1430
- 20) 真田和哉, 金成海, 石垣瑞彦, ほか: 小児心臓カテーテルにおける年代と技術の変遷に伴う被ばく低減の取り組みと効果—面積線量積/体重比によるモニタリングの有用性—. *日小児循環器会誌* 2021; **37**: 18–26
- 21) Nakanishi T, Tobita K, Sasaki M, et al: Intravascular ultrasound imaging before and after balloon angioplasty for pulmonary artery stenosis. *Catheter Cardiovasc Interv* 1999; **46**: 68–78
- 22) Krueger JJ, Ewet P, Yilmaz S, et al: Magnetic resonance imaging-guided balloon angioplasty of coarctation of the aorta: a pilot study. *Circulation* 2006; **113**: 1093–1100
- 23) 片岡功一: バルーン肺動脈弁形成術/バルーン肺動脈形成術. *JJPIC* 2016; **1**: 43–52
- 24) 医療機器の保険適用について. <https://www.mhlw.go.jp/content/12400000/000746288.pdf> (2022年4月6日閲覧)
- 25) Mullins CE: Balloon dilatation procedures: General, in Mullins CE (ed): *Cardiac Catheterization in Congenital Heart Disease, Pediatric and Adult*. Massachusetts, Blackwell Publishing, 2006, pp410–429
- 26) Moore P, Lock JE: Catheter Intervention: Balloon angioplasty: Experimental studies technology and methodology in pulmonary artery stenosis, coarctation, obstructed conduit, stenotic pulmonary veins and superior vena cavae, collaterals, others, in Lock JE, Keane JF, Perry SB (eds): *Diagnosis and Interventional Catheterization in Congenital Heart Disease*, 2nd ed. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp119–150
- 27) Latson L: Pulmonary artery stenosis, in Sievert S, Qureshi SA, Wilson N, et al (eds): *Percutaneous Interventions for Congenital Heart Disease*. London, Informa Healthcare, 2007, pp447–454
- 28) Sreeram N, Hutter P, Silove E: Sustained high pressure double balloon angioplasty of calcified conduits. *Heart* 1999; **81**: 162–165
- 29) Rothman A, Perry SB, Keane JF, et al: Early results and follow-up of balloon angioplasty for branch pulmonary artery stenoses. *J Am Coll Cardiol* 1990; **15**: 1109–1117
- 30) Yacoub S, Meador M, Mossad E: Lung reperfusion injury in patients after balloon angioplasty for pulmonary artery stenosis. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2014; **28**: 502–505