

原 著

先天性心疾患における 3DRA の有用性

石垣 瑞彦¹⁾, 金 成海¹⁾, 松尾 久実代¹⁾, 鬼頭 真知子¹⁾, 藤岡 泰生¹⁾,
 櫛木 大祐²⁾, 濱本 奈央²⁾, 佐藤 慶介¹⁾, 芳本 潤¹⁾, 満下 紀恵¹⁾,
 新居 正基¹⁾, 田中 靖彦¹⁾, 坂本 喜三郎³⁾, 小野 安生¹⁾

¹⁾ 静岡県立こども病院循環器科

²⁾ 静岡県立こども病院循環器集中治療科

³⁾ 静岡県立こども病院心臓血管外科

Efficacy of Three-Dimensional Rotational Angiography as a Diagnostic and Interventional Modality for Congenital Heart Disease

Mizuhiko Ishigaki¹⁾, Sung-Hae Kim¹⁾, Kumiyo Matsuo¹⁾, Machiko Kito¹⁾, Tao Fujioka¹⁾,
 Daisuke Hazeki²⁾, Nao Hamamoto²⁾, Keisuke Sato¹⁾, Jun Yoshimoto¹⁾, Norie Mitsushita¹⁾,
 Masaki Nii¹⁾, Yasuhiko Tanaka¹⁾, Kisaburo Sakamoto³⁾, and Yasuo Ono¹⁾

¹⁾ Department of Cardiology, Shizuoka Children's Hospital, Japan

²⁾ Department of Cardiac Intensive Care Unit, Shizuoka Children's Hospital, Japan

³⁾ Department of Cardiovascular surgery, Shizuoka Children's Hospital, Japan

Background: Lesions of congenital heart disease require stereoscopic understanding, which can be enhanced by three dimensional imaging. In Shizuoka Children's Hospital, three-dimensional rotational angiography (3DRA) is in use since 2013.

Purpose: To report the efficacy of 3DRA in congenital heart disease.

Objective and Methods: We evaluated the advantage of 3DRA in 24 patients. Secondly, we reviewed 15 patients who had a single target lesion in the pulmonary artery after Rastelli procedure, visualized on 3DRA (n=5) or CT (n=10) at the time of intervention, between 2010 and 2016. Procedural parameters were compared between the two groups.

Results: All reconstructed 3DRA images provided adequate diagnostic quality and by Likert scale, classified as either "essential" or "very useful" for pre-operative or interventional planning in 75% of patients, especially in complex vascular lesions. No complications occurred. There was no significant difference with respect to procedure time, fluoroscopy time, radiation dose of angiography between 3DRA and CT. Total contrast media used in 3DRA group (3.9mL/kg) was significantly lower than that in the CT group (5.9mL/kg; $p=0.003$).

Conclusions: 3DRA is a safe and effective modality in pediatric cardiovascular area. Wide-angled, stereoscopic image reconstruction allows for a more objective evaluation. Use of 3DRA was comparable to that of CT with respect to procedure time, fluoroscopy time, and radiation dose. Total contrast media used was significantly less in the former.

Keywords: three-dimensional rotational angiography, three-dimensional radiological image, intervention, congenital heart disease

2015 年 8 月 26 日受付, 2016 年 11 月 2 日受理

著者連絡先: 〒420-8660 静岡県静岡市葵区漆山 860 静岡県立こども病院 循環器科 石垣瑞彦

doi: 10.9794/jspccs.32.498

背景：立体的な病変の把握が大切な先天性心疾患において、三次元撮影はその精度を大きく向上させるツールである。当院では、2013年より3D Rotational Angiography (3DRA)を導入し、病変の立体的な把握および Intervention に利用している。

目的：3DRAの小児循環器領域での有用性を報告する。

方法：はじめに当院で3DRAを施行した24症例を対象として、小児循環器領域での有用性を後方視的に検討した。次に2010年1月～2016年6月に当院でRastelli術後の肺動脈狭窄に対して経皮的バルーン血管形成術を施行した46例から、3DRAもしくはCTを併用しかつ治療対象が一病変であった15例を抽出(3DRA群5例、CT群10例)し手技時間、透視時間、造影剤使用量、被曝線量を比較検討した。

結果：3DRAの対象血管は肺動脈22例/大動脈2例で、全例評価可能であった。画像評価として従来法を上回る‘essential/very useful’は全体の75%で、特に複雑な形態の血管の描出に優れていた。被曝線量は、対象血管が肺動脈の場合、3DRA1回は二方向性血管撮影2.8回に相当した。血管拡張術は13例(バルーン血管形成術11例、ステント留置2例)で、うち5例では、3DRA画像をもとに全セッション single plane 使用であった。CT群との比較では、手技時間、透視時間、CTを除く造影剤使用量、被曝線量は同等であった一方で、総造影剤使用量は3DRA群3.9mL/kg: CT群5.9mL/kg ($p=0.003$)であった。

結論：3DRAは、小児循環器領域でも安全に施行可能で従来法にはない広角的、立体的な画像構築により、より客観的な診断、評価に寄与する可能性が示唆された。さらにインターベンションにおいては、手技時間、透視時間、造影剤使用量、被曝線量などの面で従来法と比べ遜色なく、CT併用群に比し総造影剤使用低減が可能であった。

背 景

3D Rotational Angiography (3DRA)は、回転するフラットパネル・ディテクター(FPD)を用いた血管撮影法で、2006年頃より主に脳神経外科領域で脳動脈瘤の形態診断や空間的位置関係の把握、治療に応用されている。その後、腹部血管造影、冠動脈造影やカテーテルアブレーション、近年では、構造的心疾患(structural heart disease)へと適応が拡大され、画像診断、特にインターベンションのツールとして利用されている¹⁻⁸⁾。先天性心疾患の領域では、2010年以降、従来の二次元的画像では観察困難な病変の描出に優れ、形態診断やインターベンションに新たな恩恵をもたらすと報告されている^{9,10)}。読影者の経験に基づく想像、CTや心エコー図といった他のモダリティからの類推に代わる三次元画像ツールとして、当科では2013年より3DRAを導入している。

目 的

3DRAの撮影方法、使用状況の実際を紹介し、小児循環器領域での有用性を報告する。

方 法

はじめに2013年6月から2016年6月に当院で

3DRAを施行した24症例を対象として、3DRAの特徴、使用方法、描出可能な病変等、小児循環器領域での使用経験および有用性を後方視的に検討した。画像評価としては、Table 1に示すEllisら¹¹⁾の報告した5段階のLikert scaleを用いて小児循環器専門医2名で従来の二方向性血管造影と比較し後方視的に検討した。被曝線量に関しては、対象血管に二方向性血管造影と3DRAが同時に施行された症例から比較検討した。

次に、2010年1月から2016年6月に当院でRastelli術後の肺動脈に対して経皮的バルーン血管形成術(balloon angioplasty: BAP)を施行した46例から、3DRAもしくはCTを併用しかつ治療対象が一病変であった15例を抽出した。この15例(3DRA群5例、CT群10例)で、手技時間、透視時間、造影剤使用量、被曝線量を比較検討した。被曝線量は、実効線量への換算式がモダリティごとに異なり仮定等も含まれ正確な合算値を得ることは難しいため、両者の血管造影での数値を比較した。なお画像撮影として、2013年以降は3DRAを基本とし、直近のconduit交換など外科介入が予想される症例ではCTが選択された。

2群間の比較には、Mann-WhitneyのU検定を用い、有意水準 $p<0.05$ を有意差ありとした。3DRAを含む血管造影、CT検査ともインフォームドコンセントを得て行い、臨床研究に関しては後方視的研究のため倫理委員会等の審査は不要と判断された。

Table 1 Modified Likert scale concerning the diagnostic utility of flat-detector

Misleading	Misleading information for pre-operative planning or intervention.
Not useful	No useable information for pre-operative planning or intervention.
Useful	Useful information for pre-operative planning or intervention, but only minimally superior to the already available information of angiographies.
Very useful	The scan added important information to what was already available.
Essential	The surgery or the intervention could not have been performed appropriately without the additional information provided.

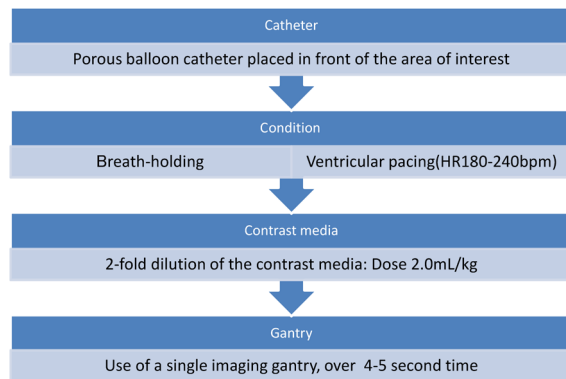


Fig. 1 3DRA rendering protocol

撮影方法

3DRA の実際の撮影方法の詳細を示す。血管撮影装置は、Siemens 社製 AXIOM Artis dBA を、3D 画像構築ワークステーションとして同社の InSpace 3D を使用した。撮影条件は、Zahn らの報告¹⁰⁾ に従い、正面 FPD を 40°/秒の回転速度で 200°の画像収集とし、2 倍希釈の造影剤 1~2 mL/kg を関心領域の手前から多側孔のカテーテルで注入、全身麻酔下、呼吸停止、心室オーバードライブ下での撮影を基本とした (Fig. 1/Video 1)。実際の撮影に際しては、麻酔器等の周辺環境を整備したうえで正面管球の C アームが安全に回転できることを確認し、撮影手技を開始している。ペーシングは、右心系造影時は経大動脈的に 2F 8 極電極カテーテルを左心室内に留置、左心系造影時には 4F または 5F の電極カテーテルを経静脈的に右心室に留置、年齢や基礎の心拍数を考慮し HR180~240 程度でのオーバードライブとした。例外として、血流が層流に近いグレン、フォンタン循環回路の肺動脈撮影等ではオーバードライブを併用していない。造影剤に関しては、体格、Blalock-Taussig 短絡の存在など注入部位、血管形態、弁逆流等を考慮し決定している。右室流出路からの肺動脈造影では概ね 2 mL/kg の使用で良好な造影効果が得られている。撮影後、データをワークステーションに転送し、構築さ

れる Raw data の 3D 画像から肋骨など不要部分を任意の方法に回転しながら除去し、目的部分を取り出すことで 3D 再構築画像が完成する。実際の画像を提示する (Video 2A, B)。

一方で CT は、Siemens 社製 SOMATOM sensation を使用した 64 列 MDCT で、非心電同期、末梢静脈路からの造影剤注入 (2 mL/kg) で施行した。

結 果

3DRA の小児循環器領域での使用および画像評価、被曝線量

3DRA 施行 24 症例の基礎疾患の内訳は、肺動脈閉鎖/心室中隔欠損 (PAVSD: pulmonary atresia with ventricular septal defect)/主要体肺動脈側副血行路 (MAPCA: major aorto-pulmonary collateral arteries) 12 例、肺動脈閉鎖/心室中隔欠損 3 例、ファロー四徴症 2 例 (MAPCA1 例を含む)、大動脈縮窄 2 例、左心低形成症候群 2 例、両大血管右室起始/肺動脈閉鎖、修正大血管転位、大動脈離断が各 1 例であった。その内 13 例が Rastelli 術後症例であった (Table 2)。3DRA による評価対象病変は、MAPCA を含む肺動脈が 22 例、大動脈が 2 例で、3D 再構築により任意の角度からの病変観察が可能であった。全例で 3DRA に加え従来の一方向ないし二方向の血管撮影を併用し診断および治療を行った。24 症例中 13 例で経皮的血管拡張術が施行 (Rastelli 術後症例 8 例) され、治療対象病変は肺動脈 11 例、大動脈 2 例であった。まず対象病変に対する 3DRA を撮影し、その他の造影を施行中に 3D 再構築を施行、再構築の所要時間は概ね 5 分以内であった。再構築画像をもとに病変観察の最適角度を決定の上、同角度で治療を実施した。治療手技は BAP が 11 例、ステント留置が 2 例であった。このうち 5 例では、3DRA 画像をもとに治療は一方向の血管撮影で完結された。全例で合併症なく治療が完遂された。

Likert scale を用いた画像評価では、“essential”; 1 例 (4.2%)、 “Very useful”; 17 例 (70.8%)、 “Useful”; 6

Table 2 Study population

case	Age	Diagnosis	Body weight (kg)	Site	Contrast media (2-fold dilution)	Pacing HR	Likert scale	additional information	Intervention
1	9y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/Rastelli RVOTO	46	RVOT	45	180	4	D	BVP
2	9y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/Rastelli RVOTO	26	RVOT	30	180	4	B, D	—
3	3y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/BTS	11	BTS	12	200	4	B, D	—
4	2y	ccTGA,DORV,IAA,Ebstein s/p.DSO(Senning/Jatene) PABS	11	RVOT	24	220	4	A (ribbon stenosis), B, D	—
5	3y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/BTS	12	BTS	20	200	3	B, D, F	—
6	6y	PAVSD/MAPCA s/p.BTS	15	BTS	15	180	3	B, D, F	—
7	8y	PAVSD/MAPCA,APW s/p.UF/Rastelli PABS	25	RVOT	50	180	3	B, D	—
8	6y	PAVSD/MAPCA,PAPVC s/p.UF/Rastelli RVOTO, PABS	19	RVOT	35	180	4	A (PA torsion), B, D	—
9	5y	TOF/MAPCA s/p.UF/palliativeRastelli PABS	15	RVOT	30	200	4	B, D, F	—
10	1y	CoA	11	Ao	20	240	4	D, E	BAP
11	2y	TOF s/p.ICR PABS	13	RVOT/SVC	25	210	4	C, D	Stent-imp
12	6y	DORV,PA s/p.Rastelli PABS	12	RVOT	25	180	3	A (PA torsion), B, D	BAP
13	1y	CoA	11	Ao	25	240	4	D, E	BAP
14	1y	PAVSD s/p.Rastelli PABS	8	RVOT	20	240	4	A (ribbon stenosis), B, D, E	BAP
15	12y	HLHS s/p.TCPC PABS	37	SVC	45	—	4	A (ribbon stenosis), D	Stent-imp
16	1y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/Rastelli PABS	9	RVOT	20	240	5	A (PA torsion), D, E	BAP
17	12y	IAA,AS s/p.Norwood/Rastelli PABS	60	RVOT	60	180	4	A (ribbon stenosis), B, D	BAP
18	4y	PAVSD s/p.Rastelli PABS	13	RVOT	25	180	4	A (ribbon stenosis), B, D, E	BAP
19	7y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/palliativeRastelli PABS	19	RVOT	40	200	4	B, D, E, F	BAP
20	7y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/palliativeRastelli PABS	15	RVOT	30	200	4	A (PA torsion), B, D, F	TAE-MAPCA
21	2y	HLHS s/p.TCPC PABS	13	Ao/SVC	30	210	3	A (ribbon stenosis), B, C, D	TAE-APCA
22	15y	PAVSD s/p.Rastelli PABS	42	RVOT	60	180	3	A (PA torsion), D, E	BAP
23	2y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/BTS PABS	10	BTS	12	210	4	B, D, F	BAP
24	4y	PAVSD/MAPCA s/p.UF/Rastelli PABS	12	RVOT	25	180	4	A (PA torsion), B, D, F	—

PAVSD: pulmonary atresia with ventricular septal defect, MAPCA: major aorto-pulmonary collateral arteries, ccTGA: congenitally corrected transposition of the great arteries, DORV: double outlet right ventricle, IAA: interruption of aortic arch, PABS: pulmonary artery branch stenosis, APW: aortopulmonary window, PAPVC: partial anomalous pulmonary venous connection, TOF: tetralogy of Fallot, CoA: coarctation of aorta, PA: pulmonary atresia, HLHS: hypoplastic left heart syndrome, AS: aortic stenosis, UF: unifocalization, RVOTO: right ventricular outflow tract obstruction, BTS: Blalock-Taussig shunt, DSO: double switch operation, ICR: intracardiac repair, TCPC: total cavopulmonary connection, BVP: balloon valvuloplasty, BAP: balloon angioplasty, Stent-imp: stent implantation. TAE: transcatheter arterial embolization, APCA: aortopulmonary collateral artery. A: Mechanism of stenosis. B: Simultaneous visualization of multifocal lesions. C: Three-dimensional positional relationship. D: Three-dimensional visualization of stenotic lesions. E: Determination of working angle. F: Accurate evaluation of the remaining lung segment.

例 (25.0%) で “Not useful” や “Misleading” 例はみられなかった。全体の 75% を占めた “essential”, “Very useful” 症例では, ‘ribbon stenosis’ とよばれる体軸の前後方向の狭窄¹⁰⁾ (Fig. 2, Fig. 3B) や屈曲, ねじれ (Fig. 4D) など狭窄の形態的な機序, 複数病変の同時描出 (Fig. 5) など従来法を上回る画像情報が得られた (Table 2)。Fig. 3C, D および Fig. 6 に非心電同期の 64 列 MDCT および 3DRA 画像を提示する。画像のように 3DRA では CT に比してより末梢の肺動脈の描出精度が高く, クリップや胸骨ワイヤー等人工物の影響が少ない (Fig. 4) ため, MAPCA 症例の残存肺区域 (Fig. 5) や人工物周囲のより精密な評価が可能であった。また MDCT では 3DRA に比して狭窄部位が大きく描出される傾向にあった。一方で, 3DRA は血管造影による対象血管を限定した撮影のため, CT のように静脈, 心室, 心房, 気管, 肺など全体を含む描写は不可能であった。

次に被曝線量に関して, 通常の二方向性血管造影および 3DRA が同一セッションで施行された症例を提示する (Table 3)。DAP (dose area product) を通常の血管造影の正面/側面の合算値および 3DRA で比較すると, 3DRA1 回分が通常の血管造影 2.8 回分に相当した。さらに, 肺動脈のインターベンション時に一般に行われる正面管球を頭側または尾側にふって撮影した場合には, 3DRA1 回分が通常の血管造影 2.3 回分に相当した。

インターベンションでの 3DRA 群と CT 群の比較 (Table 4)

全例, 一病変の肺動脈狭窄に対して BAP が施行された Rastelli 術後症例で, 基礎疾患の内訳は, 3DRA 群 5 例: PAVSD/MAPCA 2 例, PAVSD, 両大血管右室起始/肺動脈閉鎖, 大動脈離断が各 1 例, CT 群 10 例: 完全大血管転位 3 型, ファロー四徴症/

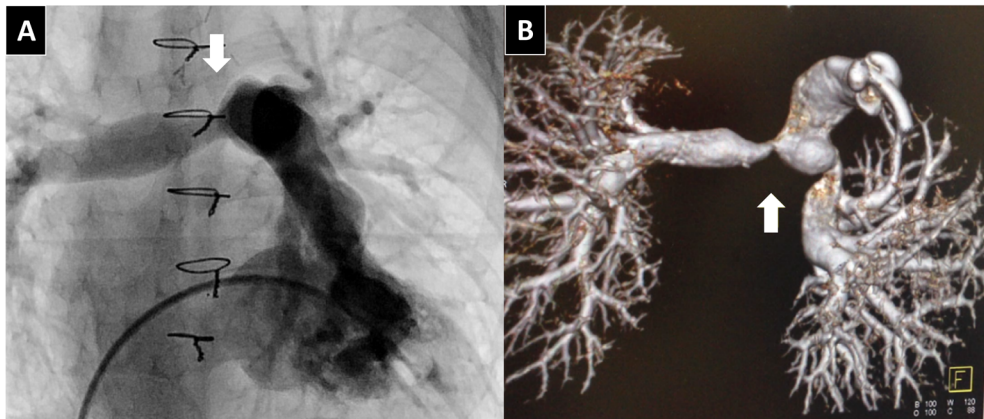


Fig. 2 Arbitrary reference plane

A: Antero-posterior view of the conventional angiogram of congenitally corrected transposition of the great arteries repaired by double switch operation in a 2-years-old boy. B: Reconstructed 3DRA image from caudal side. Arrows indicate the right pulmonary artery bifurcation stenosis (so called "ribbon stenosis") which is better delineated antero-posteriorly in 3DRA images.

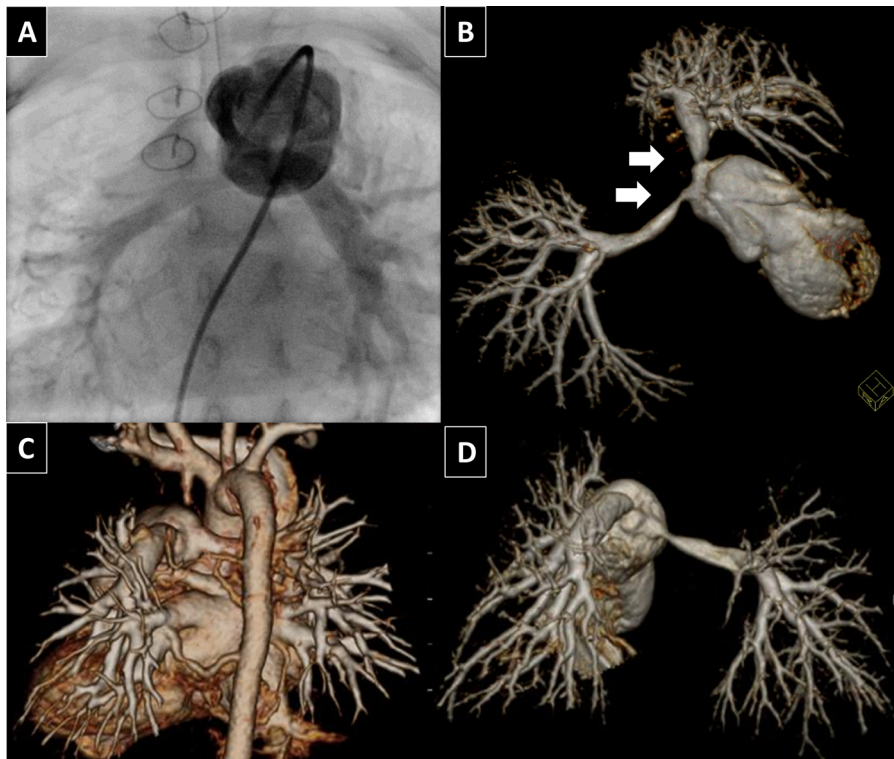


Fig. 3 Case No. 1

A: Antero-posterior view of conventional angiogram of pulmonary atresia with ventricular septal defect repaired by Rastelli procedure in a one-years-old girl. (LAO8°/CAU41°). We were able to grasp the diameter difference, but did not obtain clear visualization of the stenosis. B: Reconstructed 3DRA image indicated the right and left pulmonary artery bifurcation stenosis (so called "ribbon stenosis") which is better delineated anteroposteriorly (RAO44°/CRA71°). C and D: Comparison of reconstructed 3DCT (64-row multi-detector computed tomography) image (C) and reconstructed 3DRA (D) images.

MAPCA, 両大血管右室起始/肺動脈閉鎖が各2例, PAVSD/MAPCA, 大動脈離断, 総動脈管症, 肺動脈弁欠損が各1例であった。

2群間の年齢や体重に有意差はみられず, 血管造影検査1セッションあたりの手技時間, 透視時間, 被曝線量, 造影剤使用量について検討した。3DRA

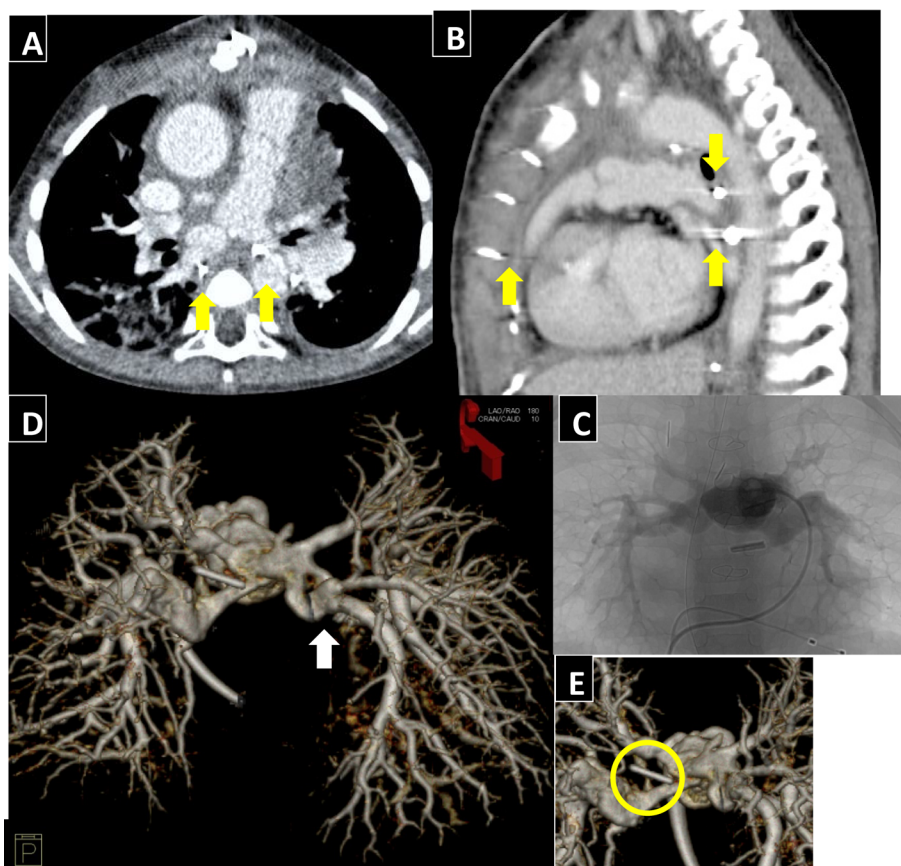


Fig. 4 The images of pulmonary artery with metallic surgical material

A and B: CT angiogram (horizontal (A) and sagittal (B) view) of pulmonary atresia with ventricular septal defect and major aorto-pulmonary collateral arteries (MAPCA) repaired by Rastelli procedure in a 4-years-old girl. The arrows indicate the halation. C: 3DRA of pulmonary artery. D and E: Reconstructed 3DRA image (C:LAO180°/CRA10°, D:RAO160°/CRA0°). The arrow indicates pulmonary artery stenosis by PA torsion. The circle indicates hemo-clip placed for ligation of dual supplying MAPCA during at previous surgery. The image quality was less affected by the clip and sternum wire.

群, CT 群の順で実際の数値を示す. 手技時間: 121 分 (114~212) vs 121 分 (76~196); $p=0.46$. 透視時間: 31.4 分 (22.8~98.8) vs 43.3 分 (17.0~61.0); $p=0.90$. 造影剤使用量 {①血管造影: 3.9mL/kg (2.2~4.7) vs 3.9mL/kg (2.6~5.4); $p=0.54$, ②血管造影+CT: 3.9mL/kg (2.2~4.7) vs 5.9mL/kg (4.6~7.4); $p=0.003$ }. 被曝線量 (DAP/kg): 1.2 (1.1~3.1) Gy \cdot cm²/kg vs 0.8 (0.4~2.4) Gy \cdot cm²/kg; $p=0.10$. なお, 手技時間はシースの挿入から抜去までとし, 造影剤使用量は血管造影のみおよび CT との合算値を, 被曝線量は血管造影のみで比較した.

実際の症例や画像を提示する.

①症例 1 (Case No.1) (Fig. 3)

35 週 1777 g で出生した気管狭窄を合併した PAVSD の症例で, 生後 4 日に気管形成術, 2 か月時に体肺動脈短絡術, 10 か月時に Rastelli 術施行. 術後より指

摘された分岐部肺動脈狭窄に対して, 1 歳 3 か月時にバルーン血管拡張術 (BAP) を施行した. 3DRA により, 左右肺動脈の 'ribbon stenosis' を一度に描出し, 狭窄部位の詳細を評価したうえで, 各々に対して至適角度で BAP を施行した. 左肺動脈は, 最狭部径 2.6mm, 参照血管径 5.7mm に対し, 血管拡張用バルーン Synergy™ (Boston Scientific, Natick, MA) 8.0×20mm, 右肺動脈は, 最狭部径 3.5mm, 参照血管径 6.7mm に Synergy™ (Boston Scientific, Natick, MA) 9.0×20mm を使用し, 左室圧に対する右室圧比 (RVP/LVP) は 0.88→0.64 と低下した. C は Rastelli 術後退院前の CT 画像で同角度の 3DRA 画像を D に示した.

②症例 2 (Case No.2) (Fig. 5)

PAVSD/MAPCA の症例で, 前医にて 2 歳時に右 uniformalization/体肺動脈短絡術, 当院にて 6 歳

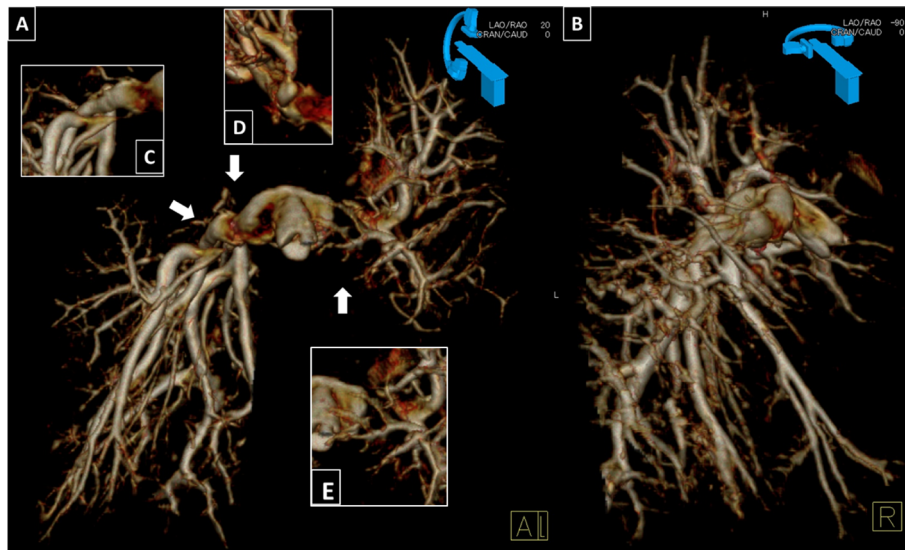


Fig. 5 Case No. 2

A: Antero-posterior view of the reconstructed 3DRA image of pulmonary atresia with ventricular septal defect and major aorto-pulmonary collateral arteries (MAPCA) repaired by palliative Rastelli procedure in a 7-years-old girl (LAO20°/CRA0°). B: Lateral view of the reconstructed 3DRA image (RAO90°/CRA0°). There were multifocal stenotic lesions after unifocalized pulmonary artery. C, D and E indicate lesions viewed from each of the angles (C:LAO10°/CRA0°,D:LAO180°/CRA20°,E:LAO30°/CRA0°). 3DRA image allowed for better evaluation of the residual pulmonary area.

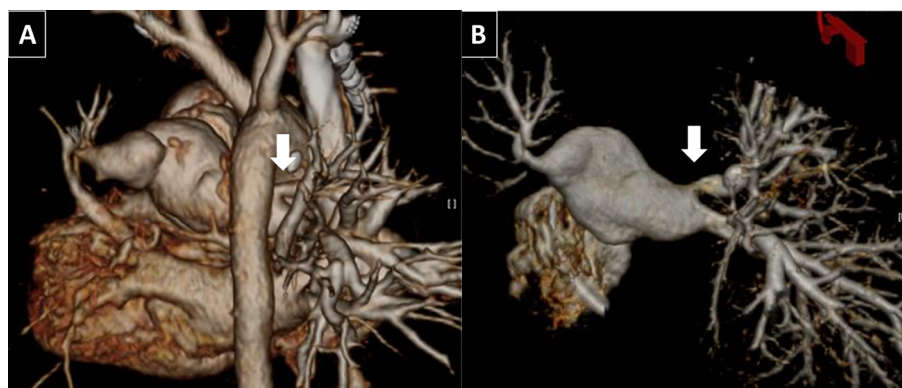


Fig. 6 Comparison of reconstructed 3D images of pulmonary artery

Reconstructed 3D images of pulmonary atresia with ventricular septal defect repaired by Rastelli procedure in a 4-years-old boy. A: 3DCT and B: 3DRA. Arrows indicate right pulmonary artery stenosis.

時に肺動脈形成／体肺動脈短絡術，7歳時に左 unifocalization/ASD 閉鎖／palliative Rastelli 術施行．術後半年でカテーテル検査を施行した．3DRA による 3D 再構築画像（A：正面像，B：右側面像）を用いて詳細な残存肺区域の推定を行い 8 区域と推定された．術後肺動脈狭窄は左右に複数箇所存在し，肺区域が少ないことからリスクの分散を考慮し半年間隔で段階的な BAP を施行した．最初に左肺動脈(E)，最狭部径 3.7 mm，参照血管径 7.0 mm に対して Conquest™ (Bard Peripheral Vascular, Inc., Tempe, AZ)

8.0×20 mm，半年後に右肺動脈(C)，最狭部血管径 1.8 mm，参照血管径 5.4 mm に対して，Mustang™ (Boston Scientific, Natick, MA) 6.0×20 mm，peripheral cutting balloon (Boston Scientific, Natick, MA) 6.0×20 mm，右肺動脈(D)，最狭部血管径 2.9 mm，参照血管径 6.1 mm に対して Mustang™ (Boston Scientific, Natick, MA) 7.0/8.0×20 mm を使用した．術後，SpO₂: 95% 程度まで上昇がみられた．

Table 3 Radiation exposure

Case	Diagnosis	Age (y)	BW (kg)	Conventional angiography(CA)			3DRA		DAPratio 3DRA/CA
				Injection site	Angle	DAP* (Biplane)	Injection site	DAP	
2	PAVSD/MAPCA	9	26.3	RVOT	LAO0 • CRA0 /LAO90 • CRA0	231.8	RVOT	757.6	3.27
5	PAVSD/MAPCA	3	12.1	BTS	LAO0 • CRA0 /LAO90 • CRA0	82.6	BTS	340	4.12
6	PAVSD/MAPCA	6	15.5	BTS	LAO0 • CRA0 /LAO90 • CRA0	125.8	BTS	515.2	4.1
				MAPCA*2	LAO0 • CRA0 /LAO90 • CRA0	254.7	dAo	522.6	2.05
8	PAVSD/MAPCA	6	18.9	PA	LAO0 • CAU45 /LAO90 • CAU13	179.9	RVOT	518.7	2.88
9	PAVSD/MAPCA	5	14.6	PA	RAO7 • CAU45 /LAO90 • CAU14	187.4	RVOT	409.6	2.19
11	TOF	2	13.3	PA	LAO13 • CAU45 /LAO90 • CAU11	164.9	PA/LSVC	360.8	2.19
14	PAVSD	1	7.5	PA	LAO8 • CAU41 /LAO90 • CAU15	170.9	RVOT	313.3	1.83

*DAP=frontal view and lateral view ($\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$) DAP: dose area product ($\text{mGy}\cdot\text{m}^2$), PAVSD: pulmonary atresia with ventricular septal defect, MAPCA: major aorto-pulmonary collateral arteries, TOF: tetralogy of Fallot, RVOT: right ventricular outflow tract, PA: pulmonary artery, BTS: Blalock-Taussig shunt, dAo: descending aorta, LSVC: left superior vena cava, CRA: cranial, CAU: caudal

Table 4 Intervention of Rastelli procedure (3DRA vs CT)

N	3DRA	CT	p-value
	5	10	
Diagnosis	PAVSD/MAPCA:2, IAA:1, PAVSD:1, DORV/PA:1	TGA3:2, TOF/MAPCA:2, DORV/PA:2, PAVSD/MAPCA:1, IAA:1, TAC:1, APVS:1	
Age (year)	9.8 (1.1–12.1)	8.1 (2.7–15.8)	0.71
Body weight (kg)	41.7 (8.6–60.1)	21.2 (14.2–49.8)	0.71
Procedure time (min)	121 (114–212)	121 (76–196)	0.46
Fluoroscopy time (min)	31.4 (22.8–98.8)	43.3 (17.0–61.0)	0.9
DAP ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)/BW (kg)	1.2 (1.1–3.1)	0.8 (0.4–2.4)	0.1
Contrast media (mL/kg): Angiography	3.9 (2.2–4.7)	3.9 (2.6–5.4)	0.54
Contrast media (mL/kg): Total	3.9 (2.2–4.7)	5.9 (4.6–7.4)	0.003

TGA: transposition of the great arteries, PAVSD: pulmonary atresia with ventricular septal defect, MAPCA: major aorto-pulmonary collateral arteries, DORV: double outlet right ventricle, PA: pulmonary atresia, IAA: interruption of aortic arch, TOF: tetralogy of Fallot, TAC: truncus arteriosus, APVS: absent pulmonary valve syndrome, PPS: peripheral pulmonary stenosis

考 察

3DRA の画像特性, 適応

3DRA は目的部位によって造影剤注入用カテーテルの位置や造影剤注入, 撮影タイミング, 心室オーバードライブを設定することにより関心領域, 特に動脈性病変を強調した画像描出が可能となる. 特にオーバードライブは, 心拍出量を低下させ造影剤の拡散を抑えることで, 回転撮影終了までの不明瞭化を防ぐとともに, 心収縮による motion artifact を抑え, 目的部位への造影剤の直接注入と合わせて, 血管壁の性状をよ

り明瞭に描出することを可能とする¹⁰⁾.

また, 一般的な三次元画像と同様に任意の角度から観察が可能であり, Zahn らの報告¹⁰⁾ の多発性肺動脈狭窄のような複数病変の同時描出や Berman らの報告¹²⁾ のような屈曲の強い血管の描出にも優れた効果を発揮する.

加えて 3DRA の有用性として人工物留置例, 例えば脳動脈瘤術後症例でクリップによるハレーションの影響で CT にて観察困難な病変も良好な描出が可能と報告されている¹³⁾.

これらをふまえ当院では, Rastelli 術後の左右分岐

部狭窄や多発性の末梢肺動脈狭窄といった複数病変を有する症例、unifocalization 後 MAPCA 症例の統合化肺動脈のように屈曲やねじれなど複雑な形態をもった血管病変、人工弁置換や対象血管近傍にコイル、クリップ、胸骨ワイヤーなどが使用された病変において 3DRA は効果を発揮すると考え、適応を選択している。

3DRA の有用性

3DRA が小児循環器領域、特にインターベンションにおいて有用と考えられる点は主に、任意の角度からの立体的な病変観察、迅速な 3D 再構築および計測、ワーキングアングルの選別およびロードマップ、被曝線量、造影剤使用量の低減の 4 点があげられる。

①任意の角度からの立体的な病変観察

3DRA では三次元化により 3DCT と同様に任意の角度から立体的な病変観察が可能となるため、事前に造影角度を考慮する必要がなくなる。また従来の二方向性撮影に比べ 70~90% の症例で従来法を上回る病変に関する新たな情報が得られたと報告されている^{12, 14-16)}。我々の検討でも全体の 75% で従来法を上回る質の画像情報が得られており同様の結果であった。‘ribbon stenosis’などの従来法では描出の難しい病変 (Figs. 2, 3) や複数回の撮像が必要であった多発性の病変 (Fig. 5) も一度に可視化され、立体的な狭窄形態の評価が可能となった。Table 2 にあるように、従来の二方向シネ動画を上回る評価と考えられるが、その理由としては、多角的、立体的に画像再構築されているばかりでなく、オーバードライブなどの工夫により血管形態全体の輪郭を描出していることが、病変の性状把握や肺区域数の把握に優位性が高いためと考えられた。従来法では圧較差等から存在が示唆されながら読影者の経験に基づく想像や、CT や心エコー図といった他のモダリティからの類推に頼っていた病変も明瞭に可視化することで、より視覚的に客観的な診断、評価が可能になると考えられる。

②迅速な三次元再構築および計測

3DRA の三次元再構築は概ね 5 分以内に可能で、迅速な再構築により術中モニタリングとして効果を発揮する^{10, 16)}。迅速性は撮影範囲を限定することで CT のように広範囲の肋骨や脊椎等の処理が不要となる点に起因する。このため事前の CT など三次元撮影が不要となり、特に状態が不安定な小児例で、複数回の鎮静や造影剤使用によるリスクを軽減することが可能となる。

血管径の計測は、過去の 3D 再構築画像と従来の二方向性血管造影での血管径は同等との報告^{16, 17)} に基

づき、3D 再構築画像で角度を調節した最狭部位を測定している。また、血管径の計測にあたっては動脈管などで経験するように心周期の影響を受けることが知られている。3DRA では、心室オーバードライブにより心収縮による血管拍動の影響が低減され、CT に比して狭窄部位の過大評価を防げる可能性が示唆された。この点はより精密なインターベンションに繋がると思われた。

③ワーキングアングルの選別およびロードマップ

インターベンションは、病変観察の最適角度を決定し、至適造影角度で施行される。3DRA ではどんな病変でも一度の造影で最適角度の算出が可能で、複数病変の同時評価も可能である。またインターベンションの補助的ツールとして透視画像とのオーバーレイ表示によるロードマップや同一装置の利点をいかした透視画像と 3D 画像の連動性がある。C アーム角度、画像サイズ、寝台位置の変更に 3D 画像もリアルタイムで追従するため、多角性を維持したままでより迅速な治療が可能となる。この Live 3D roadmap は、実際にステント留置や経カテーテルの大動脈弁留置術 (transcatheter aortic valve implantation; TAVI) などの弁留置での有用性が報告されている^{18, 19)}。

④被曝線量および造影剤使用量の低減

3DRA では、多角的観察のため従来法のような複数回の撮像が不要となり血管造影検査 1 セッションあたり被曝線量や造影剤総使用量の低減が期待されている。この点に関しては実際に様々な報告がされているが結論には至っていない。Corredoria ら²⁰⁾ は 3DRA の使用により総 DAP が診断カテーテル検査では 33%、インターベンションでは 16% 増加としたと報告、Glockler ら²¹⁾ は 3DRA の使用により従来の二方向性撮影に比べて透視時間は減少、総 DAP、造影剤使用量は同等としている。一方で主に冠動脈の領域では総被曝線量、造影剤使用量とも減少したと報告²²⁻²⁴⁾ されており、Zahn¹⁰⁾ や Berman¹²⁾ は 3DRA 使用時の総被曝線量、造影剤使用量は従来法と同等レベル以下に抑えうるとしている。また、Glatz⁹⁾、Schwartz ら¹⁹⁾ は、CT 併用に比して血管造影検査 1 セッションあたりの総被曝線量、造影剤使用量とも同等以下と報告している。

自験例では、被曝線量に関して 3DRA 1 回が通常の二方向撮影 2.8 回分に相当した。また、CT 群との比較においては、血管造影検査 1 セッションあたりの手技時間や透視時間、被曝線量は同等であったが総造影剤使用量は低減されていた。3DRA 施行により手技時間や透視時間の延長がみられない理由としては、至

適角度や狭窄部位の正確な計測に加えて同一機器の使用による C アームおよび寝台のスムーズな移動等による 3DRA 手技以外の時間短縮が可能であった点に起因すると考えられた。さらに被曝線量に関しては、CT 撮影分を加味すると総被曝線量として低減の可能性も示唆された。この点に関しては、今後、シングルプレーンの積極的な使用や 3DRA のフレーム数、フレームあたりの放射線量など撮影方法の調整により更なる低減が可能になると思われ、更なる症例の蓄積が必要と考えられた。

3DRA の課題

3DRA は撮像範囲を限定した画像となるため、静脈、心室、心房などを含む全体の描写には向かない。また、Truong ら²⁵⁾ は気道の描出を報告しているが、当院では再構築時間を要することもありリアルタイムでの気道情報の提供には至っていない。したがって周辺構造物を含めた情報の必要時、特に直近での再開胸を含む外科手術の可能性がある場合や気管との位置関係が問題になる場合などは現状では CT を選択すべきと考えている。一方で、気管との位置関係が問題となるステント留置などでこそ、3DRA の利点であるワーキングアングルやロードマップ等が効果を発揮しうるため、気道描出のリアルタイム性を追求するとともに不足情報を従来の二方向性撮影から補填するなどして適応を拡大していくべきと考えている。

また、撮影条件としてペーシングや呼吸停止が必要で、C アームが回転するため麻酔器等周辺環境の整備が重要となる。そのため通常の血管造影に比べて関わる人員も多くなるが、多職種で手順を確認し、安全に施行できるようチームで協力体制をとることが大切になる。その上で症例を積み重ねることでより短時間で安全な撮像が可能になると思われる。

結 論

3DRA は、小児循環器領域でも安全に施行可能で従来法にはない広角的、立体的な画像構築により、より客観的な診断、評価に寄与する可能性が示唆された。さらにインターベンションにおいては、手技時間、透視時間、造影剤使用量、被曝線量などの面で従来法と比べ遜色なく、CT 併用群に比し総造影剤使用低減が可能であった。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はありません。

付 記

この論文の電子版にて動画を配信している。

引用文献

- 1) Benndorf G, Klucznik RP, Strother CM: Angiographic computed tomography for imaging of underdeployed intracranial stent. *Circulation* 2006; **114**: E499–E500
- 2) Engelhorn T, Struffert T, Richter G, et al: Flat panel detector angiographic CT in the management of aneurysmal rupture during coil embolization. *Am J Neuroradiol* 2008; **29**: 1581–1584
- 3) Jou LD, Mohamed A, Lee DH, et al: 3D rotational digital subtraction angiography may underestimate intracranial aneurysms: Findings from two basilar aneurysms. *Am J Neuroradiol* 2007; **28**: 1690–1692
- 4) Biasi L, Ali T, Hinchliffe R, et al: Intraoperative DynaCT detection and immediate correction of a type 1a endoleak following endovascular repair of abdominal aortic aneurysm. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2009; **32**: 535–538
- 5) Wallace MJ: C-arm computed tomography for guiding hepatic vascular interventions. *Tech Vasc Interv Radiol* 2007; **10**: 79–86
- 6) Nolker G, Gutleben KJ, Marschang H, et al: Three-dimensional left atrial and esophagus reconstruction using cardiac C-arm computed tomography with image integration into fluoroscopic views for ablation of atrial fibrillation: Accuracy of a novel modality in comparison with multislice computed tomography. *Heart Rhythm* 2008; **5**: 1651–1657
- 7) Biasi L, Ali T, Thompson M: Intraoperative dynaCT in visceral-hybrid repair of an extensive thoracoabdominal aortic aneurysm. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; **34**: 1251–1252
- 8) Meyhoefer J, Ahrens J, Neuss M, et al: Rotational angiography for preinterventional imaging in transcatheter aortic valve implantation. *Catheter Cardiovasc Interv* 2012; **79**: 756–765
- 9) Glatz AC, Zhu X, Gillespie MJ, et al: Use of angiographic CT imaging in the cardiac catheterization laboratory for congenital heart disease. *JACC Cardiovasc Imaging* 2010; **3**: 1149–1157
- 10) Zahn EM: The Emerging Use of 3-dimensional rotational angiography in congenital heart disease. *Congenital Cardiology Today* 2011; **9**: 1–13
- 11) Ellis AR, Mulvihill D, Bradley SM, et al: Utility of computed tomographic angiography in the pre-operative planning for initial and repeat congenital cardiovascular surgery. *Cardiol Young* 2010; **20**: 262–268
- 12) Berman DP, Khan DM, Gutierrez Y, et al: The use of three-dimensional rotational angiography to assess the pulmonary circulation following cavo-pulmonary connection in patients with single ventricle. *Catheter Cardiovasc Interv* 2012; **80**: 922–930
- 13) Budai C, Cirillo L, Patruno F, et al: Flat panel angiography images in the post-operative follow-up of surgically clipped intracranial aneurysms. *Neuroradiology* 2014; **27**: 203–206
- 14) Moesler J, Ditttrich S, Rempel O, et al: Flat detector computed tomography in diagnostic and Interventional

- pediatric cardiology. *RoFo Fortschr Geb Rontgenstr Nuklearmed* 2013; **185**: 446–453
- 15) Glockler M, Koch A, Greim V, et al: The value of flat-detector computed tomography during catheterisation of congenital heart disease. *Eur Radiol* 2011; **21**: 2511–2520
 - 16) Glockler M, Koch A, Halbfäß J, et al: Assessment of cavo-pulmonary connections by advanced imaging: Value of flat-detector computed tomography. *Cardiol Young* 2013; **23**: 18–26
 - 17) Borik S, Volodina S, Chaturvedi R, et al: Three-dimensional rotational angiography in the assessment of vascular and airway compression in children after a cavopulmonary anastomosis. *Pediatr Cardiol* 2015; **36**: 1083–1089
 - 18) Fagan T, Kay J, Carroll J, et al: 3D guidance of complex pulmonary artery stent placement using reconstructed rotational angiography with live overlay. *Catheter Cardiovasc Interv* 2012; **79**: 414–421
 - 19) Schwartz J, Neubauer A, Fagan T, et al: Potential role of three dimensional rotational angiography and C-arm CT for valvular repair and implantatio. *Int J Cardiovasc Imaging* 2011; **27**: 1205–1222
 - 20) Corredoria E, Vano E, Ubeda C, et al: Patient doses in paediatric Interventional cardiology: Impact of 3D rotational angiography. *J Radiol Prot* 2015; **35**: 179–195
 - 21) Glockler M, Halbfäß J, Koch A, et al: Multimodality 3D-roadmap for cardiovascular interventions in congenital heart disease: A single-center, retrospective analysis of 78 cases. *Catheter Cardiovasc Interv* 2013; **82**: 436–442
 - 22) Akhtar M, Vakharia KT, Mishell J, et al: Randomized study of safety and clinical utility of rotational vs. standard coronary angiography using a flat-panel detector. *Catheter Cardiovasc Interv* 2005; **66**: 43–49
 - 23) Empen K, Kuon E, Hummel A, et al: Comparison of rotational with conventional coronary angiography. *Am Heart J* 2010; **160**: 552–563
 - 24) Klein AJ, Garcia JA, Messenger JC, et al: Rotational coronary angiography. *Cardiol Clin* 2009; **27**: 395–405
 - 25) Truong U, Fagan T, Deterdling R, et al: Use of rotational angiography in assessing relationship of the airway to vasculature during cardiac catheterization. *Catheter Cardiovasc Interv* 2015; **86**: 1068–1077