



# Virtual reality computed tomography evaluation: Anatomy and clinical implications for valve- sparing aortic root replacement

辻本, 貴紀

---

(Degree)

博士 (医学)

(Date of Degree)

2022-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8489号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482237>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(課程博士関係)

## 学 位 論 文 の 内 容 要 旨

### Virtual reality computed tomography evaluation: Anatomy and clinical implications for valve-sparing aortic root replacement

VR 技術を活用した CT による画像評価：  
自己弁温存大動脈基部置換術のための解剖学的知見および臨床的有用性

神戸大学大学院医学研究科医科学専攻  
心臓血管外科学

(指導教員：岡田健次教授（主任教授）)

辻本 貴紀

## 内容要旨

### 【背景】

自己弁温存大動脈基部置換術 (VSARR) は 1990 年に登場し、近年その手術適応は拡大している。この手術においては、大動脈基部解剖の十分な理解とそれに基づく適切なグラフトサイズ選択が重要であるが、VSARR 術前患者の大動脈基部についての立体的特徴を詳細に報告した研究は極めて少ない。そこで、当院で VSARR を施行した患者の術前 CT データを用いて、その立体的特徴を明らかにすることを目的とした。一般に CT データにおける計測は、multiplanar reconstruction (MPR) または curved planar reconstruction (CPR) を用いて行われる。しかし、これらの方法は、大動脈基部という立体的に複雑な構造物の計測において、複雑で時間のかかる作業であった。そこで我々は、virtual reality (VR) 技術を活用し CT データを 3 次元空間内で直接計測できるように設計された、VR-CT ワークステーション、True 3D (EchoPixel 社) を用いた。具体的にはまず、当院で VSARR 術前患者の大動脈基部の形状をこの VR ワークステーションを用いて計測し、その解剖学的特徴を評価した。次に、計測値の信頼性を評価するため、対応する術中計測値と比較した。最後に、選択したグラフトサイズ群間での VR-CT 計測値の差異を分析し、どの計測値が VSARR の際のグラフトサイズ選択に重要な役割を果たすかを検討した。

### 【方法】

#### ・研究モデル

本研究は神戸大学医学部附属病院の施設審査委員会（承認番号 B200328）により承認された研究であり、神戸大学内の 2008 年 9 月から 2021 年 5 月の間に神戸大学医学部附属病院で VSARR 前に心臓 CT を受けた連続 103 例から CT データを後方視的に収集した。画像が不明瞭な症例 (n=15)、急性大動脈解離 (n=4)、大動脈弁が二尖または四尖 (n=12) である症例は解析対象から除外した。計測には、心電図同期下の撮影で拡張中期の画像を使用した。

#### ・VR-CT 計測

画像を VR ワークステーションにエクスポートすると、大動脈基部は 3D モニターの前に立体的に表示される。まず、大動脈基部のみを抽出し、各大動脈尖の nadir、各弁尖の commissure、free margin の中点、ILT の底部など解剖学的ランドマークのラベリングを行う。その次に、解剖学的ランドマークに基づいて自由縁長 (FML)、各弁尖の GH、有効高 (EH)、弁輪径 (VBR) (各大動脈尖の底部を通る平面と定義)、洞房接合部 (STJ)、交連の高さ (CH) および交連間距離 (ICD) (2 つの交連間の距離と定義) を測定した。また、VBR と STJ の間の傾斜角は、3 つの交連と 3 つの nadir の座標をもとに数学

的に算出した。

・術中計測

全例に reimplantation を用いた VSARR を施行し、大動脈基部の術中計測は、心停止下に術者が直接計測した。術中の測定は、VBR、GH、FML、EH、左冠尖/無冠尖間の CH (LN-CH) について行われた。グラフトサイズの決定については、2011 年まで VBR のサイズより 3~5mm 大きいグラフトサイズを選択し、2011 年以降は LN-CH の同じ大きさのグラフトサイズを選択した(ただ、術者は LN-CH だけでなく術中の GH、VBR、STJ 径等の大きさも鑑みて最終的にグラフトサイズ選択を行っている)。統計解析はすべて市販のソフトウェア (JMP 14.3.0; SAS Institute, Cary, NC, USA) を用いて行い、統計的有意性は  $p < 0.05$  とした。

【結果】

先述の基準より、72 名の患者データを対象とした。対象者の平均年齢は  $58.4 \pm 17.9$  歳であり、20.8%が女性であった。中等度または重度の大動脈弁閉鎖不全 (AI) は 53 名 (73.6%) に認められ、16 名 (22.2%) に弁尖の逸脱を認めた。

・AAE の解剖学的特徴

VR-CT 測定の結果、VBR と STJ はそれぞれ  $25.9 \pm 3.3$  mm と  $39.6 \pm 7.2$  mm であり、傾斜角は  $13.0 \pm 5.7^\circ$  であった。GH, FML, EH, CH の平均値はそれぞれ  $17.2 \pm 2.4$  mm,  $36.0 \pm 5.2$  mm,  $10.5 \pm 3.2$  mm,  $24.0 \pm 4.3$  mm であった。左冠尖/右冠尖間の CH は LN-CH と同様であったが ( $p=0.63$ )、右冠尖/無冠尖間の CH は 3 者の中で有意に大きかった。左冠尖において FML、ICD が最も小さく、右冠尖は FML、ICD が最も大きかった。一方で右冠尖の GH と EH は最も小さかった。

・VR-CT 計測値と術中計測値の比較

VR-CT 測定値は術中測定値と強い相関があり、特に 3 尖の GH 平均値 (mean GH,  $R^2=0.75$ )、LN-CH ( $R^2=0.79$ ) は強い相関を認めた。ただ一方で、術中計測値は VR-CT 計測値と比較して、平均 GH では 3.2mm、平均 FML では 2.0mm、LN-CH では 4.0mm 大きかった。逆に、VBR では 0.9mm、平均 EH では 1.3mm 術中計測値が小さかった。

・VR-CT 測定値と選択されたグラフトサイズとの関係

72 名の患者のうち、66 名は退院までに行われた心エコー図検査にて軽度以下の AI であった。この 66 名の中で VR-CT 測定値が術中選択した 4 つのグラフトサイズ群間 (24~30) でどのように異なるかを分析すると、平均 GH は各グラフトサイズ群間で有意に異なっていた ( $p<.05$ )。

## 【考察】

この論文は VR-CT ワークステーションにより、VSARR 前の患者における生理的な大動脈基部形状をより簡便に評価ができることを示した初めての報告である。

従来の MPR や CPR による評価では、大動脈弁の自由縁など、一平面上に存在しない複雑な形状の計測に不向きである一方で、VR-CT ワークステーションはあらゆる形状の計測を正確かつ迅速に行うことが可能である。

### ・AAE 患者の解剖学的特徴

当院では、Izawa らが CT を用いて成人の標準的な大動脈基部の計測を行い、左冠動脈洞が最も小さく、FML はそれぞれの洞の大きさを反映していることを示した。また、右冠状動脈洞の GH は他の冠動脈洞の GH より短いことを示しており、この特徴は本研究でも強く認められた。冠動脈洞が拡大した場合、十分な弁の接合を得るためには長い GH を必要とするが、右冠動脈洞は拡大しているにもかかわらず GH が短く、結果的に右冠尖は最も短い EH を持つことになった。この VSARR 術前患者が持つ解剖学的特徴は、右冠尖がしばしば大動脈弁閉鎖不全症の原因となることを裏付けている。

交連高に関しては、右冠動脈／無冠動脈間の交連高が左冠動脈／無冠動脈間および左冠動脈／右冠動脈間の交連高よりも高く、この非対称性は STJ と VBR 間の傾斜角 ( $13.0 \pm 5.7^\circ$ ) が、正常解剖における傾斜角 ( $5.5^\circ \sim 11^\circ$ ) より急峻であることと関係していると考えられる。

### ・VR-CT 測定値と術中測定値の比較

これまでの研究では、CT 測定により、正常な大動脈の形状を持つ症例の平均 GH は 13～16mm であることが報告されている一方、Schäfers らは術中の測定における平均 GH は約 20.0mm であることを示しており、その他多くの研究において、CT による測定値が術中測定した値よりも小さくなっている。本研究でも、2つの測定方法は強い相関がある一方で、両者の間には数値的な乖離が存在した。術前 CT では拍動下の生理的な心臓の基部を測定するのに対し、術中では心停止状態で術者が手動で弁尖を伸展させて測定するのでこの乖離が生じたのではないかと考えられる。

術中計測では、GH は約 3mm、FML は約 2mm、CH は約 4mm 長く、逆に VBR は若干小さかった。

### ・臨床的意義

適切なグラフトサイズの選択は、VSARR に重要である。グラフトサイズ選択のための様々な方法が報告されているが、多くは術中計測値に基づいている。そこで我々は、より生理的で再現性が高い術前測定値から適切なグラフトサイズを推測できないかを検討した。

我々は、術後の心エコー図検査で AI が軽度以下であった患者 (n = 66) から

VR-CT 測定値とそれに対応するグラフトサイズを抽出した。残りの 6 例は、グラフトサイズを適切に選択できない可能性があるため、あえてこの解析から除外した。選択したグラフトサイズ群間で VR-CT の測定値がどのように異なるかを解析したところ、平均 GH は各群で有意な差があり、選択したグラフトサイズはすべての群で平均 GH に 10mm を加えた値に近かった。グラフトサイズは、原則として LN-CH の同じ大きさを基準としていたが、現実には大動脈基部の全体的な形状を考慮し、術者の判断でサイズが変更されることが多かった。実際、LN-CH と同じサイズのグラフトを選択した症例は 25/61 例 (41%) に過ぎなかった。

これらの結果から、平均 GH がグラフトサイズ選択において重要な役割を果たすと考えられる。術中の評価を省略できるとまではいえないが、今後の症例においてグラフトサイズ選択のガイドとなる可能性がある。

#### ・制限事項

本研究は、いくつかの limitation がある。本研究は、すべて VSARR 前の患者から得られた CT データを用いた単一施設の後向き研究であり、選択バイアスを排除することができなかった。しかし、VSARR 術前患者の解剖学的特徴を詳細に解析し、VR-CT による測定値を術中測定値と比較し、グラフトサイズ選択について検討した研究は他にないため、本研究は臨床的に重要であると考えられる。第二に、本研究における適切なグラフトサイズの定義が妥当かを議論する必要がある。術後の AI は、術前の AI 重症度、弁尖の変形、弁尖の修復術など、グラフトサイズ以外の多くの因子と関係することが知られており、適切なグラフトサイズ選択を達成するための術前 VR-CT 評価の有用性を評価するためには、弁尖の修復術、術後の VR-CT 測定、および長期の転帰を考慮したさらなる研究が必要である。最後の limitation は、CT 画像はいかなるワークステーションを用いたとしても、ウィンドウレベルや幅の調整によって影響を受け、画質の精度によって測定誤差が生じる可能性があることである。

#### 【結論】

VR-CT 評価により、大動脈基部の解剖学的構造をより詳細に理解することができ、この研究の知見は自己弁温存大動脈基部置換術をより標準化し、適切なグラフトサイズを容易にする可能性がある。

論文審査の結果の要旨			
受 付 番 号	甲 第 3231 号	氏 名	辻本 貴紀
論 文 題 目 Title of Dissertation	Virtual reality computed tomography evaluation: Anatomy and clinical implications for valve-sparing aortic root replacement VR 技術を活用した CT による画像評価: 自己弁温存大動脈基部置換術のための解剖学的知見および臨床的有用性		
審 査 委 員 Examiner	<div> <div>主 査 Chief Examiner</div> <div>副 査 Vice-examiner</div> <div>副 査 Vice-examiner</div> </div> <div>           平田 康一            村上 卓道            眞庭 謙昌         </div>		

(要旨は1, 000字～2, 000字程度)



## 【目的】

自己弁温存大動脈基部置換術 (VSARR) は 1990 年に登場し、近年その手術適応は拡大しているが、大動脈基部解剖の十分な理解とそれに基づく適切なグラフトサイズ選択が重要である。申請者らは、virtual reality (VR) 技術を活用し、CT データを 3 次元空間内で直接計測することで VSARR 術前患者の大動脈基部の立体的特徴を明らかにし、グラフトサイズ選択に有用であるかについて明らかにすることを目的に本研究を行った。

## 【方法】

2008 年 9 月から 2021 年 5 月の間に神戸大学医学部附属病院で VSARR 前に心臓 CT を受けた連続 103 例から CT データを後方視的に収集した。CT 画像を VR ワークステーションで大動脈基部を 3D モニターの前に立体的に表示し、大動脈基部のみを抽出し、各大動脈尖の nadir、各弁尖の commissure、free margin の中点、ILT の底部など解剖学的ランドマークのラベリングを行った。次に、解剖学的ランドマークに基づいて自由縁長 (FML)、各弁尖の GH、有効高 (EH)、弁輪径 (VBR) (各大動脈尖の底部を通る平面と定義)、洞房接合部 (STJ)、交連の高さ (CH) および交連間距離 (ICD) を測定した。全例に reimplantation を用いた VSARR を施行し、大動脈基部の術中計測は、心停止下に術者が直接計測した。

## 【結果】

VR-CT 測定の結果、VBR と STJ はそれぞれ 25.9 mm と 39.6 mm であり、傾斜角は  $13.0^{\circ}$  であった。GH, FML, EH, CH の平均値はそれぞれ 17.2 mm, 36.0 mm, 10.5 mm, 24.0 mm であった。左冠尖/右冠尖間の CH は LN-CH と同様であったが、右冠尖/無冠尖間の CH は 3 者の中で有意に大きかった。左冠尖において FML、ICD が最も小さく、右冠尖は FML、ICD が最も大きかった。一方で右冠尖の GH と EH は最も小さかった。VR-CT 測定値は術中測定値と強い相関があり、特に 3 尖の GH 平均値 LN-CH は強い相関を認めた。ただ一方で、術中計測値は VR-CT 計測値と比較して、平均 GH では 3.2mm、平均 FML では 2.0mm、LN-CH では 4.0mm 大きかった。逆に、VBR では 0.9mm、平均 EH では 1.3mm 術中計測値が小さかった。

## 【考察】

本研究は VR-CT ワークステーションにより、VSARR 前の患者における生理的な大動脈基部形状をより簡便に評価ができることを示した初めての報告である。本研究では、CT による測定値と術中測定値は強い相関がある一方で、両者の間には数値的な乖離が存在した。術前 CT では拍動下の生理的な心臓の基部を測定するのに対し、術中では心停止状態で術者が手動で弁尖を伸展させて測定するのでこの乖離が生じた可能性が考えられる。



### 【結論】

申請者らは、VR-CT が大動脈基部の解剖学的構造を術前に詳細に評価できることを示し、自己弁温存大動脈基部置換術をより標準化し、手術成績の向上につながる可能性を示した価値ある研究である。よって本研究者は、博士（医学）の学位を得る資格があると認める。