

「X線高速イメージングと三次元画像空間補間法による大動脈弁の超高精度 4D 画像解析」

兵庫県立大学工学研究科 河南 治

【研究の背景と目的】

心臓血管外科領域における大動脈弁などの心臓弁に関わる疾患において、弁形成術は重要な外科的療法であるが、弁尖形状などの違いによる弁機能評価は未だ困難である。これを背景として、必要に迫られて実患者に直接行われている大動脈弁形成術や、右室流出路再建術に対して、患者の血行動態循環回路を忠実に模擬した *in vitro* 実験を高精度に行い、現状を打破したいことにある。

この背景に対して、申請者らは、血流によって駆動される大動脈弁の動きや弁周りの流れを、SPring-8 によるシンクロトロン X 線を用いて、これまでにない高速度・高精度な 4 次元イメージング法を提案し、弁挙動の緻密な解析と評価に挑戦する。

本研究では、その第一段階として、CT や MRT、エコーなどの従来的手法では得られない、SPring-8 での X 線高速イメージングを用いた超高精度な 4D (空間 3D+時間) 撮影方法を開発する。

【研究方法・研究内容】

本研究は SPring-8 の医用イメージング専用ビームラインである BL20B2 にて実施する。BL20B2 は偏向電磁石を光源とするビームラインであり、5-113 keV の X 線を利用して、医学利用や様々な X 線イメージングの実験を行う事が可能である。BL20B2 の X 線高速イメージング装置では、およそ H20 mm×W30 mm の視野にて空間分解能 50 μm の X 線透過画像が、設置されている CMOS カメラで毎秒 4000 フレームで取得できる。3D プリンターにて製作したシリコン導管にポリテトラフルオロエチレン製の三尖弁を縫い合わせ大動脈弁とし、図 1 のように、弁周りの試験部を BL20B2 内の回転ステージに固定、内部に 36 %グリセリン水溶液を封入し予備実験を実施した。回転ステージでは 0.2° 刻みで 900 回転かすことで 180° の方向から画像が取得でき、これらから 3D イメージを構築できる。なお、本研究では、高速度カメラの HDD 容量制限から、刻み角度を 2° 刻み、撮影

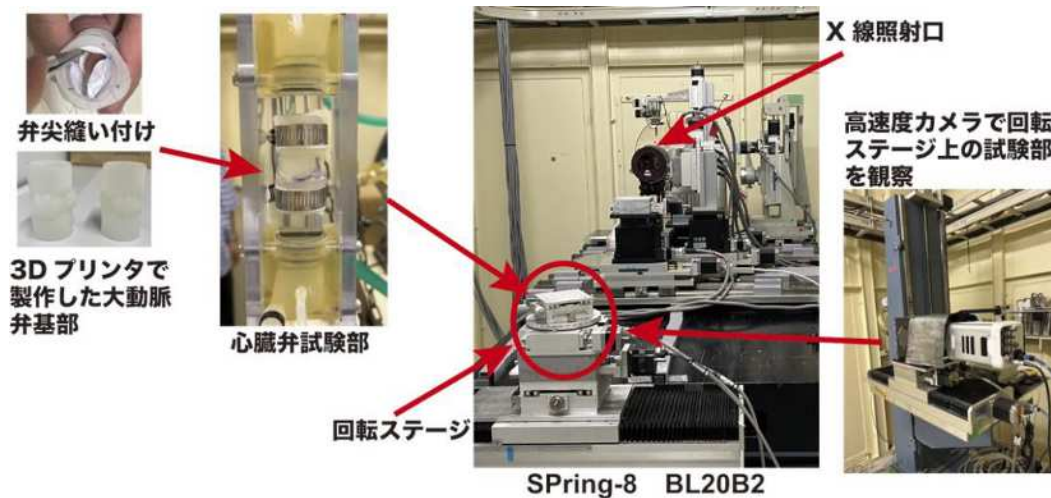


図 1 SPring-8 での実験装置概略

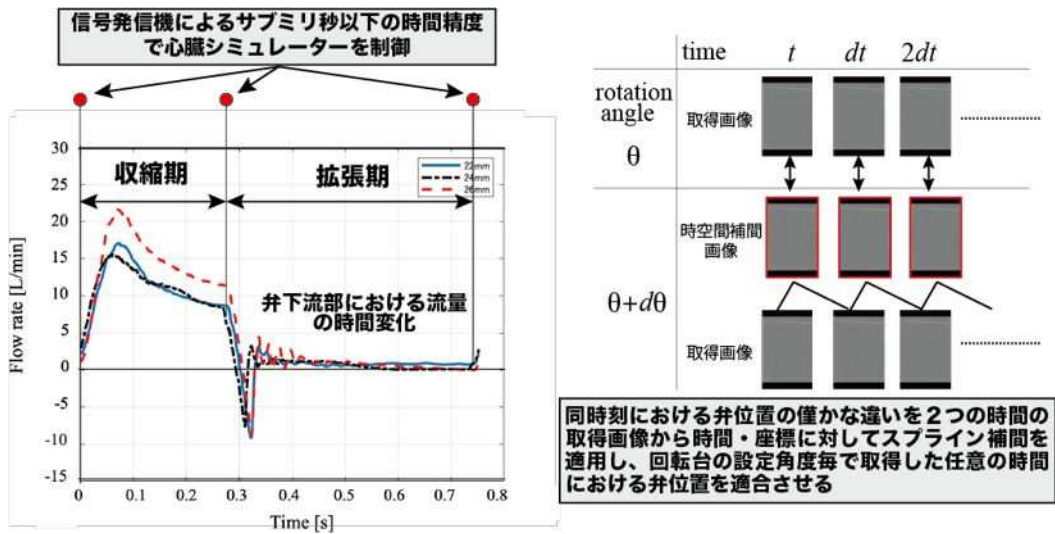


図2 非定常現象である心臓シミュレータ拍動と 3D 構築画像取得方法

速度を 750fps とした。

本研究では、さらに、図2に示すように、心臓シミュレータポンプの拍動周期を、信号発信機を用いて精密に制御し、各角度にて撮影される高速度カメラの各フレームにおいて、弁の動きを同期させ、非定常現象である心臓シミュレータの拍動に合わせた心臓弁挙動について 4D 撮影を実現する。さらに、各フレームにおいて僅かにズレた弁の動きについて、取得した画像から時空間的に弁尖座標に対する三次元スプライン補間を適用することで、異なる角度における心臓シミュレーターの動きが同じ時間に取得した弁位置の僅かな差異を是正し、4D イメージングの高精度化を試みた。

【研究成果】

図3に、SPring-8 で撮影した 4D イメージの例を示す。心臓シミュレータの拍動設定は 72 bpm、5.0 L/min とした。また、2 尖弁形状の心臓大動脈弁を 3D プリンタで製作した導管 (内径 24 mm) に縫い付けている。図3では、弁下流部から弁を見た場合のイメージを、収縮期間 (心臓シミュレータから血流が流れる期間) における弁閉～弁開～弁閉の一連の挙動を示している。視点からみて弁の底側 (弁上流部側) は視野 (H20 mm × W30 mm) の範囲外となっており、弁基部が見切れてしまっているが、血流によって弁が開閉している一連の挙動を Spring-8 の 4D 撮影にて取得することができた。

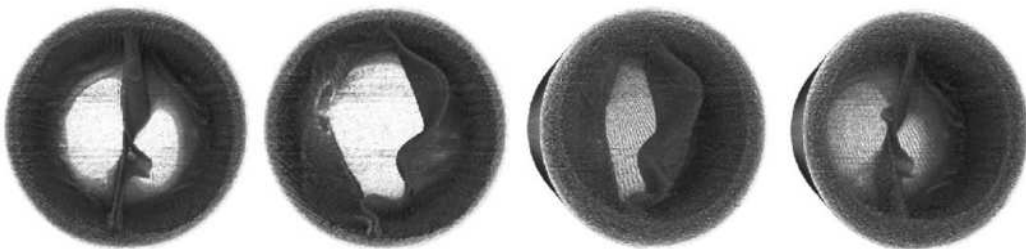


図3 SPring-8 実験で取得した高精度 4D イメージ (3D+時間)。下流部側からの視点における弁開閉挙動。

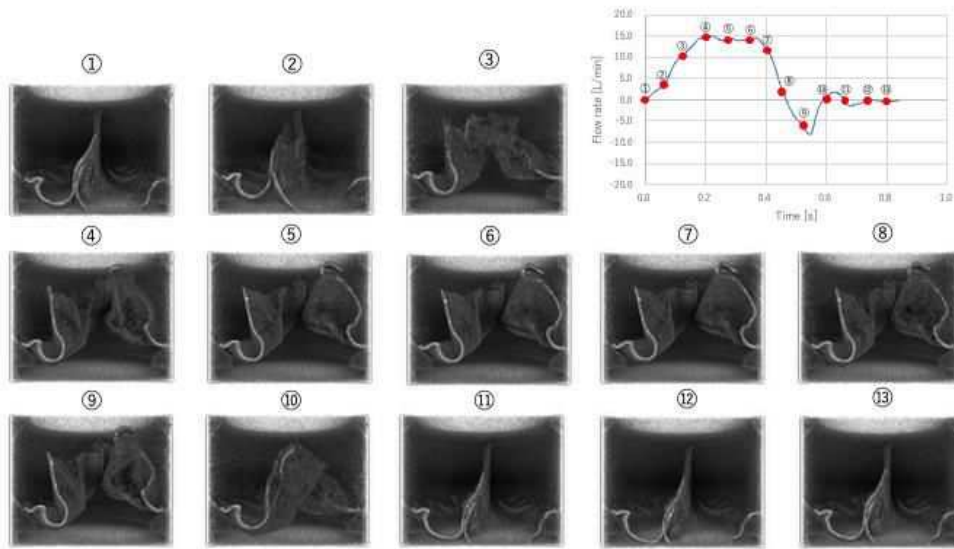


図4 SPring-8 実験で取得した高精度 4D イメージ (3D+時間) の導管中央断面の時間変化

次に、図3で示した条件における3Dイメージの各時相における、導管中央面での断面を図4に示す。図の番号は、右上図の流量の時間変化のグラフにおける各点での断面図であることを示している。この断面図から弁形状は血流による開閉によって、その弁尖形状を複雑に変化させていることがわかる。また、流れ方向に対して弁の開閉面積は大きく変化し、従来研究では知り得なかった流れ方向に対する弁開口部面積変化がどのように血流に影響を与えるかについて議論することが可能となる。例えば、⑦の断面図では、右側の弁尖が流れ方向中央付近で大きく膨らんでから下流に向かって再び絞られる形状となっている。このような形状は、流体力学的には急縮小・急拡大流れに相当し、血流によって弁尖先端近傍に大きな負荷がかかることを意味している。このような形状にならないような、弁尖の取り付け方法や、バルサルバ形状を導管に用いるなどの工夫が必要となることが示唆される。現在、この断面形状を詳細かつ定量的に解析するため、機械学習を用いた解析方法の構築を進めている。

以上、本研究での目標であった「SPring-8でのX線高速イメージングを用いた超高精度な4D(空間3D+時間)撮影方法」を開発することを達成した。

【生活や産業への貢献および波及効果】

本研究が進展し、高精度な心臓弁挙動観察から弁形状や導管形状などの影響を評価することが可能となれば、心臓弁疾患に対する術式や弁デザインへの事前評価が可能となり、患者の予後に対する見通しが大きく改善される。

また、心臓弁、特に大動脈弁や肺動脈弁の人工弁モデルに対するデザイン形状の提案も高く期待できる。今後は医療機器メーカーとの連携を深めていきたいと考えている。