

# 左心室内における乳頭筋モデルが及ぼす流れへの影響

## Flow Analysis of Left Ventricle with Papillary Muscle Modeling

- 小林 遼太郎, 早大, 東京都新宿区大久保 3-4-1, E-mail: ryotaro.kobayashi@tafsm.org  
寺原 拓哉, 早大  
滝沢 研二, 早大  
Tayfun E. Tezduyar, ライス大, 早大  
Ryotaro Kobayashi, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo  
Takuya Terahara, Waseda University  
Kenji Takizawa, Waseda University  
Tayfun E. Tezduyar, Rice University, Waseda University

We focus on papillary muscle, which is one of the internal structures of the left ventricle. Medical images cannot resolve the papillary muscle because of the resolution. Therefore, we construct the papillary muscle from coordinates at the top and the bottom of the papillary muscle. Then we attach the papillary muscle to the left ventricle and represent the geometry with cubic T-spline. For the flow computation, we generate the volume mesh with quadratic B-spline.

### 1. 緒言

心臓は全身に血液を送るポンプの役割を持つ臓器であり、4つの部屋で構成されている。本研究の研究対象である左心室はその部屋の1つである。左心室は拡張期に左心房から流入する血液を蓄え、収縮期に大動脈へと血液を駆出する。近年、動脈硬化などの大動脈疾患と血管壁にかかる壁面せん断応力との因果関係が示唆されている。壁面せん断応力を計測するためには、血行動態を詳細に把握する必要がある。その方法として、数値流体解析が期待されている。ここで、大動脈内の血液は左心室から流入するため、その流れは左心室内流れの影響を受ける。したがって、大動脈以降の流れを把握するためには左心室内流れを詳細に捉えることは重要である。

私達の研究チームでは、大動脈などの生体流れに対して物体適合格子を用いて高精度に解析する手法 [1-3] を提案している。物体適合格子は解析上で物体の形状が直接表現されるため、物体上の物理量を精度よく計算できることに加え、境界層の流れを詳細に捉えることできる。私達はさらに基底関数に non-uniform rational B-spline (NURBS) を用いることで、高精度解析を実現している。この解析手法を isogeometric analysis (IGA) [4, 5] と呼ぶ。これまでに私達は本手法を用いた左心室内流体解析に成功している [6]。その解析結果の一部を Fig. 1 に示す。この解析により、左心室内に形成された渦がその構造

る。ここで、左心室の内部構造が左心室の血流に影響を与えることが考えられる。左心室内にはその内壁から突出した乳頭筋と呼ばれる円錐状の筋肉がある。一方で、この解析では左心室の内部構造は簡略化されており、乳頭筋は無視されている。この理由として、医用画像から左心室壁を抽出する際、乳頭筋は細く、抽出が困難であることが挙げられる。そこで本研究では、乳頭筋を取り付けた左心室のモデリングを行う。さらにそれに対する物体適合格子を作成し IGA を用いた流体解析を行う。解析結果を先行研究のものと比較し、乳頭筋の有無が左心室内流場に及ぼす影響を評価する。

### 2. 解析モデル作成

本研究では左心室のモデリングに NURBS を拡張した曲面理論である T-spline [7] を使用する。T-spline は要素同士の共通点が T 字型になっている T-junction や、3つまたは5つ以上の面が一点に集まる extraordinary point を持つ。T-spline はこれらによって NURBS では滑らかに表現することが困難である複雑な形状も滑らかにモデリングを行うことができる。

左心室の医用画像から抽出した形状を Fig. 2 に示す。ここで、1心拍の周期を 0.9 s とする。これをもとに 3D モデリングソフトである Fusion360 [8] を用いて滑らかな T-spline サーフェスを 1 時相に対して作成する。左心室動作を表現する複数時相の T-spline サーフェスを作成する際、物質点の変位を利用する。医用画像から抽出した形状の変位を T-spline サーフェスにプロジェクションすることで、Fig. 3 に示すように格子点の接続が同じであり、かつ物質点の変位を再現した複数時相の T-spline サーフェスを得る。

次に、作成した左心室に乳頭筋を取り付ける。先に述べた理由のため、乳頭筋は直接取り出すのではなく、医用画像から得た乳頭筋の基部及び先端部を表す座標データをもとに作成する。その際、形状は細井らの研究 [9] を参考に Fig. 4 に示す設計をした。ここで、乳頭筋と左心室の接点の物質点は全時相で一意であるが、医用画像から得た座標データは左心室壁に完全に沿っていない。そのため、以下の手順で左心室サーフェス上に基部の物質点を定める。まず、各時相ごとに基部の座標に一番近い左心室壁上の点を探す。ここで得た左心室壁上の点は各時相で誤差があるため、それらの平均を取ることにより、基部の物質点を 1 点に決定する。このとき、乳頭筋の長さは基部と先端部の座標データから、円柱部分の径は心尖と僧帽弁間との距離との比が細井らが作成したものと一致するようにそれぞれ計算した値を用いた。これと左心室サーフェスを接合することにより、Fig. 5 に示す乳頭筋を含む左心

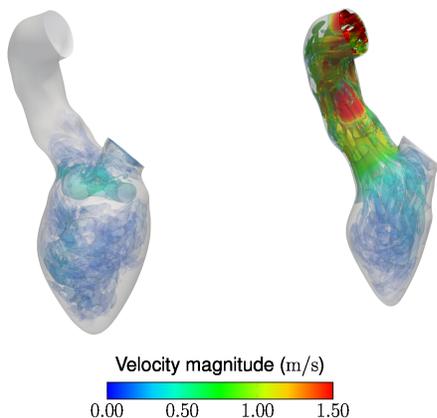


Fig. 1: IGAによる左心室内流体解析 [6]

を保ったまま大動脈へと流れていることが確認できてい

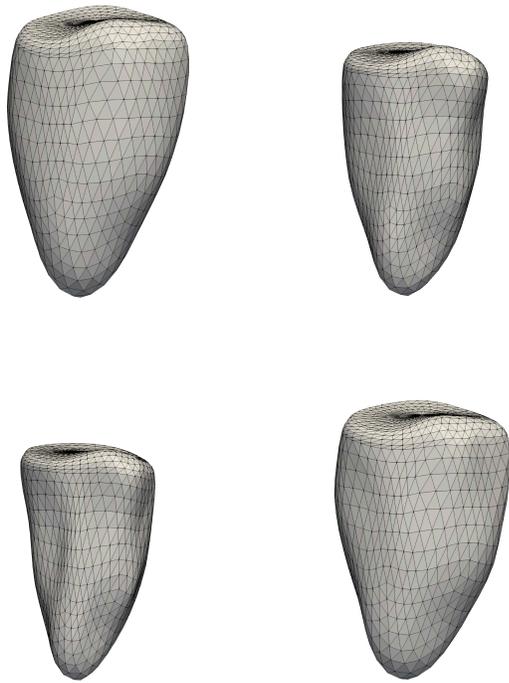


Fig. 2: 医用画像から抽出した形状. 左から右, 上から下に  $t=0.000, 0.225, 0.450, 0.675$  s

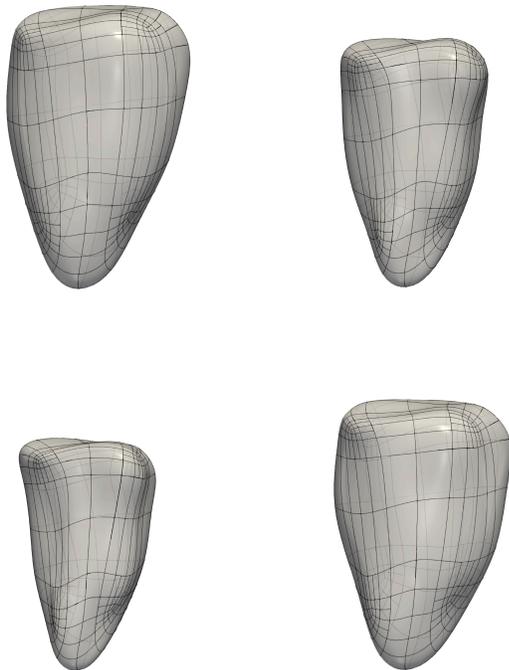


Fig. 3: T-spline サーフェス. 左から右, 上から下に  $t=0.000, 0.225, 0.450, 0.675$  s

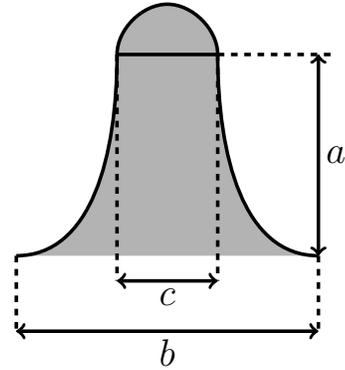


Fig. 4: 乳頭筋形状. 但し,  $a : b : c = 2 : 3 : 1$

室形状を得る.

次に, 作成した形状に沿う流体計算格子を 2 次の NURBS で生成する. CAD ソフトである Rhinoceros [10] を用いて, 乳頭筋を含む T-spline 左心室サーフェスに沿う 3 次の NURBS サーフェスを作成する. その後, 作成したサーフェスを 2 次の NURBS へと変換する. これを表面形状とし, 流体計算格子を生成する.

### 3. 結言

本研究では医用画像から乳頭筋を含む動的な左心室形状を得ることに成功した. この形状をもとに流体計算格子を生成し, 流体解析を行い乳頭筋の有無が左心室内流体場に及ぼす影響を評価する.

### 参考文献

- (1) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space-time interface-tracking with topology change (ST-TC)”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 955–971.
- (2) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space-time fluid mechanics computation of heart valve models”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 973–986.
- (3) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, T. Terahara, and T. Sasaki, “Heart valve flow computation with the integrated Space-Time VMS, Slip Interface, Topology Change and Isogeometric Discretization methods”, *Computers & Fluids*, **158** (2017) 176–188.
- (4) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, Y. Otoguro, T. Terahara, T. Kuraishi, and H. Hattori, “Turbocharger flow computations with the Space-Time Isogeometric Analysis (ST-IGA)”, *Computers & Fluids*, **142** (2017) 15–20.
- (5) K. Takizawa, T.E. Tezduyar, and T. Terahara, “Ram-air parachute structural and fluid mechanics computations with the space-time isogeometric analysis (ST-IGA)”, *Computers & Fluids*, **141** (2016) 191–200.
- (6) A. Tsushima, “Blood flow analysis of the left ventricle”, Bachelor’s thesis, Waseda University, 2019.
- (7) T.W. Sederberg, J. Zheng, A. Bakenov, and A. Nasri, “T-splines and T-NURCCs”, *ACM Transactions on Graphics*, **22** (2003) 477–484.
- (8) “Fusion360”. <http://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>.

- (9) 細井鴻一, 早瀬敏幸, and 宮内優, “左心室の内部構造が血流場に与える影響に関する数値解析 (単純化した乳頭筋モデルの影響)”, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, (2017).
- (10) “Rhinceros modeling tool for designers”. <https://www.rhino3d.co.jp>, 2017.



Fig. 5: 乳頭筋を含む左心室形状. 左から右, 上から下に  $t=0.000, 0.225, 0.450, 0.675$  s