

粒子イメージ流速計測法を用いた経カテーテル大動脈弁の弁周囲逆流の可視化法の開発

Development of a flow visualization method of the paravalvular leak
using particle image velocimetry

○ 青山祐介（早大） 高橋東（早大） 小浜和人（早大） 鈴木砂良（早大）
田中穰（湘南鎌倉総合病院） 齋藤滋（湘南鎌倉総合病院） 梅津光生（早大） 岩崎清隆（早大）
Yusuke AOYAMA¹, Azuma TAKAHASHI¹, Kazuto OBAMA², Sara SUZUKI², Yutaka TANAKA³,
Shigeru SAITO³, Mitsuo UMEZU⁴, Kiyotaka IWASAKI⁵

¹Department of Integrative Bioscience and Biomedical Engineering, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

²Department of Major in Modern Mechanical Engineering, Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University

³Department of cardiology at Shonan Kamkura General Hospital

⁴Department of Modern Mechanical Engineering, Waseda University

⁵Department of Cooperative Major in Advanced Biomedical Sciences, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

Abstract: We aimed to develop a flow visualization method of the paravalvular leak of transcatheter aortic valve using stereo particle image velocimetry (Stereo-PIV) for understanding the anatomical factors leading to paravalvular leak. We manufactured a calcified aortic valve model using a transparent silicone based on the CT data of the patient received the transcatheter aortic valve implantation. The calcified aortic valve model implanted with the transcatheter aortic valve was rotated for every 120 degree to image whole circumference of the aortic annulus. This model was installed into a chamber, and the other space of the model was filled with glycerol solution with the refractive index and viscosity of 1.409 and 5.96 mPa·s respectively. The maximum back velocity was 0.5 m/s between the transcatheter aortic valve and the blood vessel wall. Using the S-PIV the distribution of the paravalvular leak was quantitatively elucidated.

Key words: Transcatheter aortic valve implantation (TAVI), Paravalvular leak, Particle image velocimetry (PIV)

1. 緒言

経カテーテル大動脈弁留置術は外科的手術が適用外となった重症大動脈弁狭窄症患者に対する低侵襲な治療法である。カテーテルを介してステント付きの弁を大動脈弁輪部に留置するため、血管壁との不完全圧着による弁周囲の逆流が生じることがある。弁周囲の大きな逆流量は長期予後の悪化の要因であることがわかっている⁽¹⁾。しかし、経カテーテル大動脈弁の弁周囲逆流分布を計測する手法は確立されておらず、定量評価する方法がないことが課題である。

生体の弁周囲逆流計測に用いられる、心臓エコーのカラー Doppler 法では、逆流の有無を計測可能であるが、定量的な逆流の分布計測は困難である⁽²⁾。本研究では、弁の改良指針を将来的に取得できるようにするため、粒子イメージ流速計測法 (Particle Image Velocimetry : PIV) を用いて、経カテーテル大動脈弁周囲の逆流分布を計測するための試験装置を開発することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 患者実形状を有する透明シリコンモデル⁽³⁾

本研究では、経カテーテル大動脈弁で治療した患者の血管内腔形状を模擬した石灰化付大動脈弁モデル、弓部大動脈モデル、腹部大動脈モデルを製作した。血管モデルはそれぞれ患者 CT データから内腔形状を取得し、可視化のために、透明シリコンで製作した。患者 CT 画像から三次元光造形機 (Connex500 Object, Stratasys Japan) を用いて、患者内腔形状の雄型を製作し、製作した雄型に透明シリコンを塗布することで血管外壁モデルを製作した。石灰化付大動脈弁モデルの血管外壁のシリコンの弾性率は 3.40 ± 0.07 MPa とし、ブタバルサルバ洞の周方向の弾性率を模擬した⁽⁴⁾。石灰化病変モデルのシリコンの弾性率は $12.6 \pm$

0.1 MPa とし、ヒト石灰化病変の弾性率を模擬した⁽⁵⁾。

2.2 粒子イメージ流速計測法による経カテーテル大動脈弁の弁周囲逆流を計測するための試験装置の開発

粒子イメージ流速計測法による経カテーテル大動脈弁の弁周囲逆流を計測するために開発した試験装置を図 1 に示す。血管モデルは、屈折の影響を排除するため血管モデルとシリコンの屈折率 $n=1.409(37^\circ\text{C})$ に合わせたグリセリン水溶液で満たしたアクリル製水槽内に設置した。大動脈弁輪面に厚さ 2 mm のレーザーシート (DS20-527, Ni:YLF レーザ, Photonics industries) を照射し、弁輪面を撮像範囲に収めるために光軸間角度を 85° に設置した 2 台の高速カメラ (Imager pro HS 4M, Lavisision) で作動流体内のトレーサ粒子を撮像した。

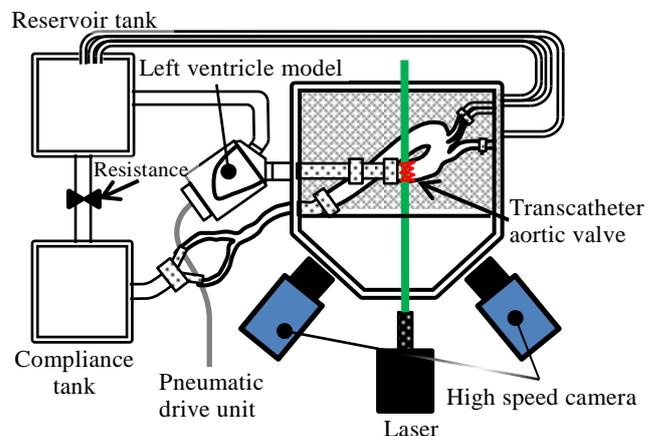


Fig.1 The measurement system of the paravalvular leak

本計測法の計測範囲を図2に示すように大動脈弁輪面の中心からカメラ側の120°の範囲に設定した。弁輪部全周の逆流分布を計測するため、大動脈弁を中心軸に対して回転できる機構を設け、120°毎にモデルを回転させて、3回撮像した。

2.3 試験条件

試験装置の循環条件は経カテーテル大動脈弁留置後の患者の血行動態（拍出流量 4.8 L/min, 平均大動脈圧 90 mmHg, 心拍数 85 bpm）に合わせた。カメラの撮像条件は、ピクセルサイズは 15 μm, 検査領域は 32×32 pixel として、ベクトル分解能は 480 μm で可視化をおこなった。また、トレーサ粒子は密度が 1100 kg/m³, 粒子径が 13 μm の蛍光粒子 (FLUOSTAR®, EBM) を使用した。

3. 結果と考察

取得した流量圧力波形から逆流量は拍出量に対して 30% であった。粒子イメージ流速計測法により取得した弁閉鎖時の平均の逆流速分布を図3に示す。無冠尖と左冠尖の間で平均 0.5 m/s の逆流が生じており、無冠尖と右冠尖の間で平均 0.3 m/s の逆流が生じていることがわかった。

マイクロ CT (TDM-1300, ヤマト科学株式会社) で撮影した大動脈弁輪面を図4に示す。血管壁と経カテーテル大動脈弁との非圧着部の領域の大きいところに大きな逆流が生じている傾向であった。

4. 結語

経カテーテル大動脈弁の弁輪部全周囲の逆流を粒子イメージ流速計測法を用いて可視化するための試験装置と大動脈弁モデルを開発した。本手法で大動脈弁輪面の血管壁と経カテーテル大動脈弁の非圧着部位での弁周囲の逆流量を定量的に評価することが可能となった。

5. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人日本医療研究開発機構「植込み型医療機器の最適な使用成績評価期間の設定方法に関する研究」の支援を得て行った。ここに関係者諸氏に厚くお礼申し上げる。

参考文献

(1) Schewel D, Frerker C, Schewel J, Wohlmuth P, Meincke F, Thielsen T, Kreidel F, Kuck KH, Schäfer U, Clinical impact of Paravalvular Leaks on Biomarkers and Survival After Transcatheter Aortic Valve Implantation, Catheter Cardiovasc Interv, Vol. 85, pp. 502-514, 2015

(2) Khalique OK, H Zahn RT, Gada H, Nazif TM, Vahl TP, George I, Kalesan B, Forster M, Williams MB, Leon MB, Einstein AJ, Pulerwitz TC, Pearson GDN, Kodali SK, Quantity and Location of Aortic Valve Complex Calcification Predicts Severity and Location of Paravalvular Regurgitation and Frequency of Post-Dilation After Balloon-Expandable Transcatheter Aortic Valve Replacement, JACC Cardiovasc Interv., Vol. 7, No. 8, pp. 895-897, 2014

(3) 小浜和人, 福山大貴, 高橋東, 青山祐介, 田中穰, 梅津光生, 齋藤滋, 岩崎清隆, 経カテーテル大動脈弁の弁周囲逆流評価のための石灰化付き大動脈弁モデルの開発, 第28回バイオエンジニアリング講演会講演論文

文集, No. 15-69, pp. 21-26, 2016

(4) 岩崎清隆, 吉田ふみ, 竹野豊, 太田友博, 川辺治樹, 土岐二郎, 尾崎重之, 梅津光生, 組織無細胞化処理が心臓弁を構成する弁葉・血管壁・バルサルバ洞の細胞外マトリクス成分に及ぼす影響の検討, 第22回バイオエンジニアリング講演会講演論文, No. 09-55, pp. 251, 2010

(5) Holzapfel GA, Sommer G, Regitnig P, Anisotropic Mechanical Properties of Tissue Components in Human Atherosclerotic, J Biomech Eng, Vol. 126, No. 5, pp. 657-665, 2004.

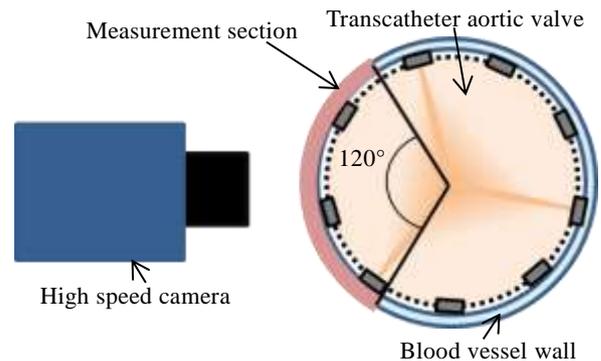


Fig.2 The measured section of the paravalvular leak

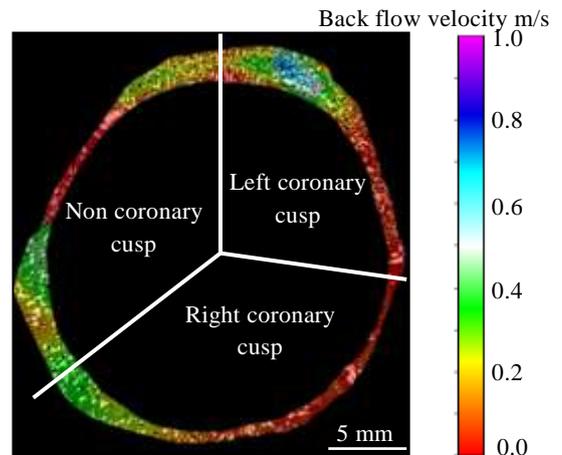


Fig.3 The distribution of paravalvular leak

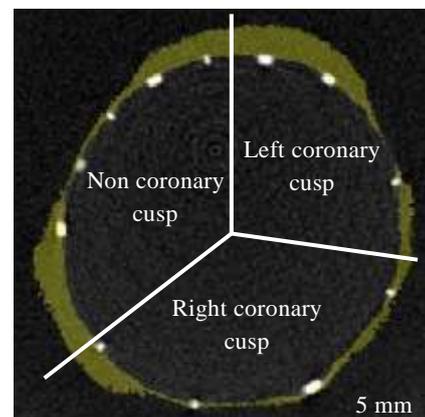


Fig.4 CT image at the aortic annulus after operation