

## Mathematical evaluation of cardiac beat synchronization control used for a rotary blood pump



\*<sup>1</sup>株式会社サンメディカル技術研究所, \*<sup>2</sup>北海道循環器病院, \*<sup>3</sup>Evaheart, Inc.,  
\*<sup>4</sup>愛媛大学大学院医学系研究科, \*<sup>5</sup>国立循環器病研究センター研究所人工臓器部

小川 大祐\*<sup>1</sup>, 小林 信治\*<sup>1</sup>, 山崎 健二\*<sup>2</sup>, 本村 禎\*<sup>3</sup>, 西村 隆\*<sup>4</sup>,  
島村 淳一\*<sup>5</sup>, 築谷 朋典\*<sup>5</sup>, 水野 敏秀\*<sup>5</sup>, 武輪 能明\*<sup>5</sup>, 巽 英介\*<sup>5</sup>  
Daisuke OGAWA, Shinji KOBAYASHI, Kenji YAMAZAKI, Tadashi MOTOMURA,  
Takashi NISHIMURA, Junichi SHIMAMURA, Tomonori TSUKIYA, Toshihide MIZUNO,  
Yoshiaki TAKEWA, Eisuke TATSUMI

### 1. 目的

筆者らは左心室補助に用いる定常流型血液ポンプ (rotary blood pump, RBP) の心拍同期制御を実験的に評価してきた。臨床においてはRBPの回転数を一定に保つ回転数一定制御が主に用いられているが、1心拍内に回転数を変動させる心拍同期制御を行うと、拍動性改善などの効果があることが動物実験にて示されている<sup>1)</sup>。本研究では、RBPを含む左心・動脈系の数理モデルを求め、心拍同期制御法の理論的な評価を行った。

### 2. 方法

左心室、動脈系、及びRBPを含む循環系を電気回路モデルで表したものを図1に示す。このモデルでは、左心室機能をZhongらのモデル<sup>2)</sup>、血液ポンプを静特性に基づく多項式モデル、動脈系をWindkesselモデルにより模擬した。図1のモデルでは大動脈弁と僧帽弁を模擬するスイッチを開閉することで、1心拍内の等容性収縮期、駆出期、等容性拡張期、充満期をそれぞれ表すことができる。この回路から各心周期の基本方程式を導出して、非斉次連立微分方程式(式1)の形式にまとめる。適切な初期条件を与え、式1

本受賞レポートの対象論文はJ Artif Organ誌に掲載されています。Ogawa D, Kobayashi S, Yamazaki K, et al. J Artif Organs 22: 276-85, 2019

#### ■ 著者連絡先

株式会社サンメディカル技術研究所開発グループ  
(〒392-0012 長野県諏訪市四賀2990)  
E-mail. d-ogawa@evaheart.co.jp

を微分方程式ソルバで解くことで、血圧、血流量などの血行動態に関する時系列波形が得られる。

$$\frac{d}{dt}x(t) = A(t)x(t) + b(t) \quad \dots\dots\text{式1}$$

このように構築されたシミュレータを用いて、一定回転数制御及び心拍同期制御(収縮期及び拡張期制御)を行った。回転数一定制御では血液ポンプの回転数を $N = 1000 \sim 2000$  rpmとしたが、収縮期制御では収縮期及び拡張期の回転数をそれぞれ $N + N_d$ ,  $N - N_d$  [rpm]、拡張期制御では $N - N_d$ ,  $N + N_d$  [rpm]と与えた。ただし $N_d = 400$  rpmである。

計算結果に基づき、補助率 (assist ratio, AR) ごとに、血液ポンプ流量から算出したpulsatility index (PI)、大動脈弁開放時間 [aortic valve (AV) opening interval] を求めて比較した。

### 3. 結果

各心機能条件下における、制御手法及び補助率ごとのPIを図2に、大動脈弁開放時間を図3に示す。

補助率ごとに比較すると、いずれの心機能条件下であっても、回転数一定制御に比べて収縮期制御時にPIが増加することが示された。一方、拡張期制御により大動脈弁開放時間が延長した。

### 4. 考察とまとめ

数理モデルを用いて心拍同期制御を評価したところ、収縮期制御による拍動性の向上が解析的に示された。これは