

## 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

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。

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

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。

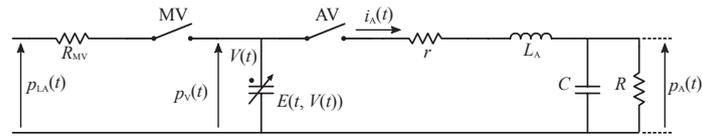
### 4. 考察とまとめ

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

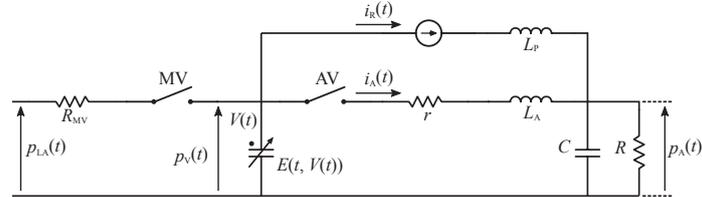
本受賞レポートの対象論文はJ Artif Organ誌に掲載されています。Ogawa D, Kobayashi S, Yamazaki K, et al. J Artif Organs 22: 276-85, 2019

#### ■ 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

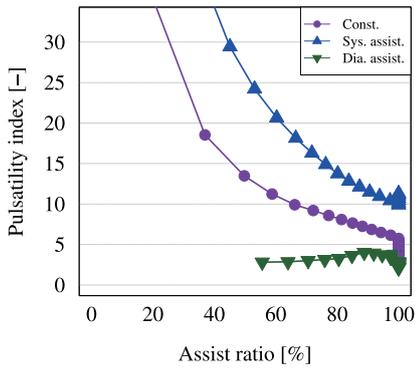


(a) RBPを含まないモデル

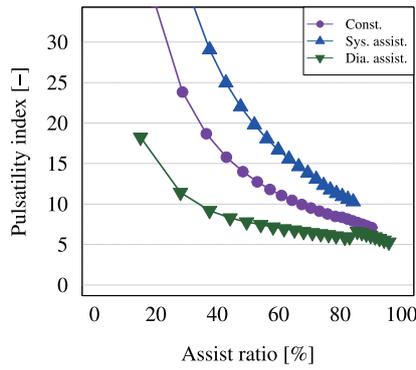


(b) REPを含むモデル

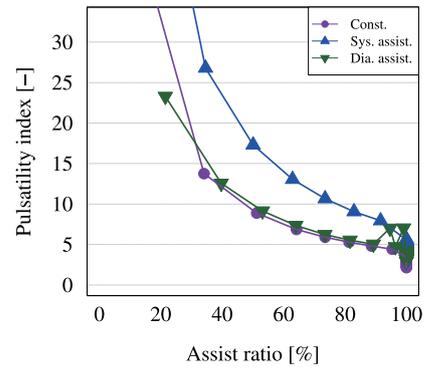
図1 循環系の電気回路モデル



(a) 心機能中

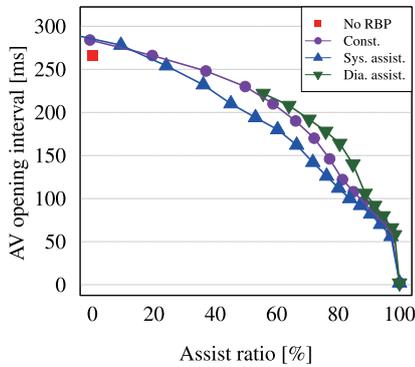


(b) 心機能高

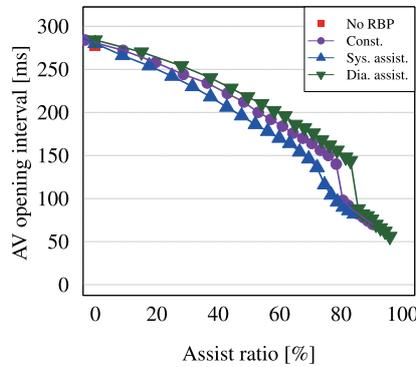


(c) 心機能低

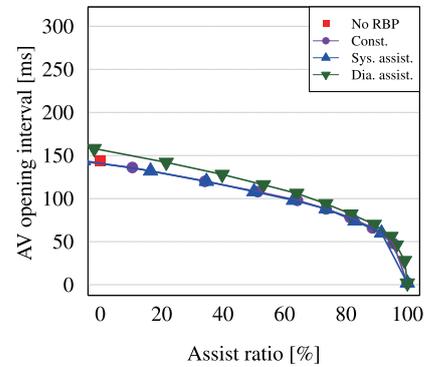
図2 回転数一定制御, 収縮期制御, 拡張期制御時における pulsatility index の比較



(a) 心機能中



(b) 心機能高



(c) 心機能低

図3 回転数一定制御, 収縮期制御, 拡張期制御時における大動脈弁開放時間の比較

以前に示された実験的な結果と一致している。

RBP使用時の大動脈圧上昇が大動脈弁不全に繋がる場合が報告されているが、拡張期制御により大動脈弁の開放が促進されることで、弁不全を抑制する効果が期待される。

## 5. 独創性

本研究では、これまで実験的に示されていた心拍同期制御の効果を数理モデルにより実証した。

動物実験のような評価系では、血行動態を一定に保てないこともあり、様々な実験条件を網羅的に試行することは困難で、多大な労力を要する。一方で数理モデルを用いた解析では、血液ポンプ回転数、心機能などのパラメータを任意に設定でき、より詳細な評価が可能である。

また、心拍同期制御が臨床応用される際には、本稿で述べた数値解析により、事前に設定条件の検討や効果予測を

行えるという利点がある。

## 利益相反の開示

小川大祐:【社員】株式会社サンメディカル技術研究所  
小林信治, 山崎健二:【役員・顧問】株式会社サンメディカル技術研究所  
本村 禎:【役員・顧問】Evaheart, Inc.  
その他の著者には規定されたCOIはない。

## 文 献

- 1) Naito N, Nishimura T, Iizuka Y, et al: Rotational speed modulation used with continuous-flow left ventricular assist device provides good pulsatility. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, **26**:119-23, 2018
- 2) Zhong L, Ghista DN, Ng EY, et al: Passive and active ventricular elastances of the left ventricle. *Biomed Eng OnLine*, **4**:10, 2005