

完全置換型人工心臓の循環平衡自動制御システムの開発

*¹国立循環器病研究センター循環動態制御部, *²済生会熊本病院循環器内科, *³秋田県立循環器・脳脊髄センター研究所

上村 和紀*¹, 横田 翔平*¹, 鷗木 崇*², 松下 裕貴*¹, 此内 緑*¹, 吉田 祐希*¹, 佐々木 一益*³,
西川 拓也*¹, 川田 徹*¹, 朔 啓太*¹

Kazunori UEMURA, Shohei YOKOTA, Takashi UNOKI, Hiroki MATSUSHITA, Midori KAKUUCHI,

Yuki YOSHIDA, Kazumasu SASAKI, Takuya NISHIKAWA, Toru KAWADA, Keita SAKU

1. 背景・目的・方法

末期心不全に対して、小型植込み式の遠心ポンプ (centrifugal pump, CFP) を2機用いて左右心室を置換し、完全置換型人工心臓 (total artificial heart, TAH) とすることが試みられてきた。しかし、同時駆動する2機の左右CFPの各流量を安定させ、入口部の吸引 (サクション) や肺うっ血を起こさず、かつ体内血液量の状態に応じていかに好適に制御するかは難しい課題であった。この難題を解決するために、循環平衡理論に基づき、TAHにおける2機CFPのコンピュータ自動制御システムを開発し、動物実験で検証した¹⁾。

我々が開発したシステムは、Frank-Starling (FS) の心臓法則をCFPが模擬するように、2機CFP回転速度を負帰還制御する。その際、有効循環血液量 (stressed blood volume, SBV) を循環平衡理論に基づき推定し、SBVに応じて設定する目標CFP流量・左右心房圧を正確に達成するように回転速度は制御される。麻酔下でイヌ9頭において、2機CFPを用いてTAH回路を確立し、開発システムによるCFP制御の安定性と精度を検証した。

2. 結果

開発システムによるCFP制御下に輸液や脱血でSBVを変動させると、左右CFP流量と左右心房圧の関係はそれぞれ、FS対数関数 [CFP流量 = $S \times \{\text{Log}(\text{心房圧} - a) + b\}$], S はFS曲線の傾き、 a と b は定数] で正確に近似でき (決定係数 >0.98), FS法則を正確に模擬しえた。システム制御下で下行大動脈閉塞あるいは肺動脈送血管狭窄により左右

CFPの後負荷を各々増加させても、CFP流量・左右心房圧を安定して維持した。一方、実臨床に即してCFP回転速度を固定した状態で各後負荷を増加すると、肺うっ血 (左心房圧 >18 mmHg) や左心室サクション (左心房圧 <0 mmHg) が認められ、循環が破綻する動物も認められた。SBVを一定に保ちつつCFPを制御すると、あらかじめ設定した目標CFP流量、左右心房圧を高い精度 (CFP流量誤差5%未満, 心房圧誤差 <2 mmHg) で達成できた。

3. まとめ・独創性

開発システムは、TAHにおける2機の左右CFPを安定して正確に制御できた。循環平衡理論という包括的循環生理モデルに基づき、人工心臓を自動制御する試みは世界初であり、きわめて独創的と考える。今回の結果は、開発システムによるTAHの臨床応用可能性を強く示唆する。植込み型のCFP流量や心房圧センサーの開発を含め、更なる開発が望まれる。

利益相反の開示

朔 啓太: 【役職・顧問職】株式会社Cubec, 【講演料など】日本アビオメッド株式会社, マリンクロット ファーマ株式会社, 【研究費・寄附金】Abiomed, Inc., NTT Research, Inc., Neuroceuticals Inc., テルモ株式会社, セオンメディカル株式会社, 旭化成ゾールメディカル株式会社, 川田 徹: 【役職・顧問職】NTT Research, Inc.

その他の著者には規定されたCOIはない。

文 献

- 1) Yokota S, Uemura K, Unoki T, et al: Novel closed-loop control system of dual rotary blood pumps in total artificial heart based on the circulatory equilibrium framework: a proof-of-concept in vivo study. IEEE Trans Biomed Eng, 2024 [Epub ahead of print]

■ 著者連絡先

国立循環器病研究センター循環動態制御部
(〒564-8565 大阪府吹田市岸部新町6-1)
E-mail. kuemura@ncvc.go.jp