T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	心筋バンド説に基づく模倣心臓の試作
Title(English)	Prototyping soft robotic heart based on unique myocardial band theory
著者(和文)	植田大輝, 難波江裕之, 鈴森康一, 明穂一広, 織田 禎二
Authors(English)	Daiki Ueda, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Kazuhiro Akeho, Teiji Oda
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

心筋バンド説に基づく模倣心臓の試作

Prototyping soft robotic heart based on unique myocardial band theory

○学　植田　大輝　（東工大）　正　難波江　裕之（東工大）
正　鈴森　康一　（東工大）　明穂　一広　（島根大）
織田　禎二　（島根大）

Daiki UEDA, Tokyo Institute of Technology, ueda.d.aa@m.titech.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology
Kazuhiro AKEHO, Shimane University
Teiji ODA, Shimane University

In this study, we created the soft robotic heart that mimics the structure of the human ventricle and evaluated its performance. The unique myocardial band theory, which describes the structure of the ventricle, explains that the human ventricle can be cut open to a single myocardial band which called helical ventricular myocardial band. In this paper, we fabricated a soft robotic myocardial band with thin McKibben artificial muscle that moves as myocardium, and reproduced the ventricular section by rolling it up. Thin McKibben artificial muscles are able to realize the radical expansion like actual muscles. We successfully transported water using the soft robotic heart.

***Key Words*:** Soft Robot, Thin McKibben Artificial Muscle, Silicone Rubber

1　緒言

人間の心臓は血液を全身に送るため，非常に高い効率を持ったポンプ性能を持っている．しかし，高効率なポンプ機能を実現するためのメカニズムは十分には解明されていない．このメカニズムを明らかにすることは，心不全の病態解明やその外科的治療法など幅広い分野の解決手段に応用することが可能であり，外科学的に重要な意味を持つ．本研究では心室部の構造を説明した unique myocardial band 説（心筋バンド説）の妥当性を確認する方法として，心臓の構造を模倣したソフトロボティック心臓を提案する．

心筋バンド説では人間の心室部を図 1 の (a) から (e) への順のように立体構造から順に展開すると，一枚の平面状態の心筋帯と呼ばれる筋肉の帯に展開できると説明している [1][2]．本研究ではまず，図 1(e) を模倣したソフトロボティック心筋帯の形状をシリコーンゴムで製作し，内部に心筋の役割を担うアクチュエータを埋め込む．その後製作したソフトロボティック心筋帯を図 1(e) から (a) の順に巻き上げることで心室部の構造を再現する．

心筋バンド説において心筋帯は図 1（e）の Basal loop, Descendent segment, Ascendant segment の 3 か所に分けて考えられており，上記の順に収縮が発生する [2]．そのため，ソフトロボティック心筋帯に這わせる心筋を 3 か所に分けて配置することで心筋帯の収縮順を再現する．

心臓の構造を再現するにあたって，曲がった状態であっても駆動し，収縮と同時に径方向に膨張するという心筋の特性を再現する事が出来るアクチュエータとして細径 McKibben 型人工筋肉を用いた．

2　ソフトロボティック心臓の製作手順

心筋帯を製作するにあったって,，細径 McKibben 型人工筋肉はシリコンチューブの外形が 2 mm の SM-20(S-muscle 社) を，シリコーンゴムはショア 00 硬度が 30 である Ecoflex 00-30(Smooth-On, Inc.) を用いた．

ソフトロボティック心筋帯の形状をしたシリコーンゴムを，型を用いて製作する．ベースの厚みは 3.4 mm，細径 McKibben 型人工筋肉を埋めるために彫られた溝の深さは 2.9 mm である．シリコーンゴムの溝に細径 McKibben 型人工筋肉をはめ込む．細径 McKibben 型人工筋肉はそれぞれの長さに合わせ制作し，そのうち Descendent segment にあたる細径 McKibben 型人工筋肉はコネクタにてまとめる． その後，ベースを深さ 3.9 mm の型にはめ，上から型に液状シリコーンゴムを流し込み硬化させることで心筋帯を製作した（図 2）.

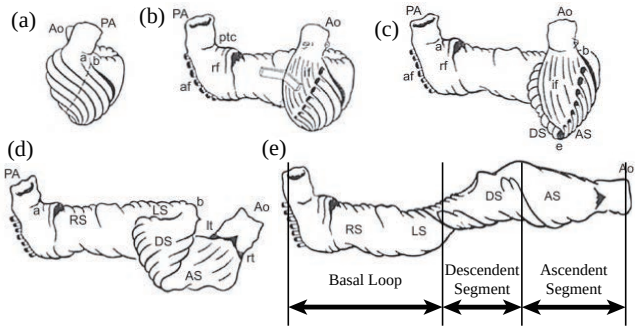

Fig.1 The process of opening up the ventricular part in order from (a) to (e) into the helical ventricular myocardial band (Modified from [1]).

図 1 における (e) から (a) へたどるように製作した心筋帯をまき上げ，仮止めを行う．その後，ソフトロボティック心筋帯同士が接している箇所に液状のシリコーンゴムを塗り硬化させる．これにより心筋帯が巻き上げた形状で維持され，心室部の構造を再現することができる．心室部の構造が再現できた後，心室部側面および下部にある隙間を埋める．また，心室部上部の隙間に対しては外径 10 mm のポリウレタンチューブを取り付けた板状のシリコーンゴムの蓋部を当て液体のシリコーンゴムを縁に塗ることで接着する．蓋部は内部に細径 McKibben 型人工筋肉を含んでおらず，他の箇所に比べ外力による変形が大きい．そのため，蓋部に Ecoflex 00-30 より硬度の高い KE-1603（信越シリコーン）を塗布し，固める．これによりソフトロボティック心臓が完成した (図 3).

3　ソフトロボティック心臓を用いた水の輸送

図 4 の実験装置のようにソフトロボティック心臓にメスシリンダと逆止弁をつなげ，メスシリンダ A からメスシリンダ B への

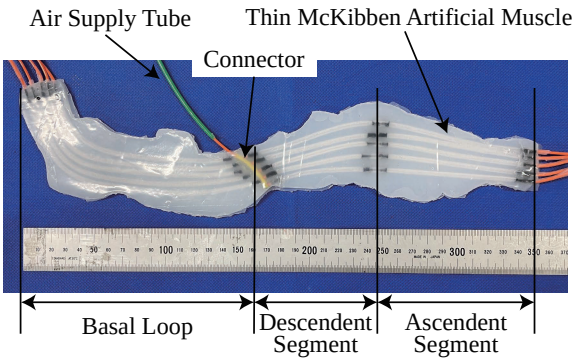

Fig.2 The completed soft robotic myocardial band. The thin McKibben artificial muscles can be controlled independently in each of its three parts.

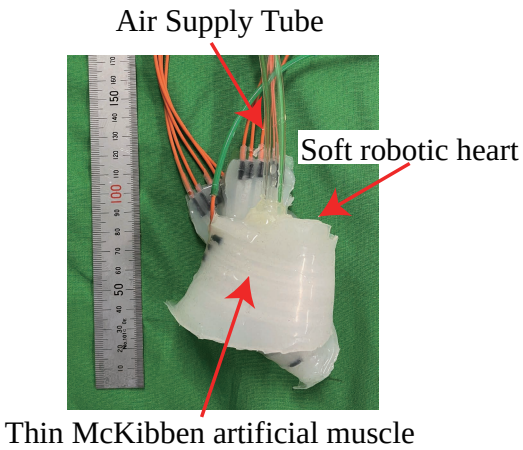

Fig.3 The completed soft robotic heart. The inner space is connected to the outside through tubes.

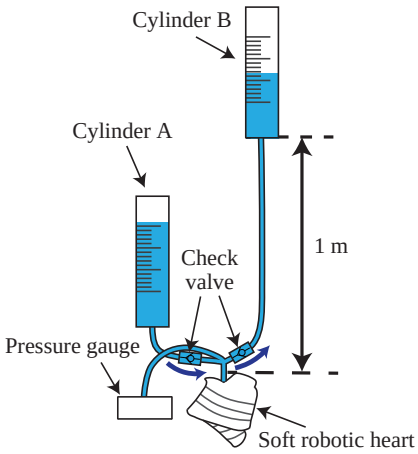

Fig.4 Overview of experimental setup for water transport experiment using soft robotic heart.

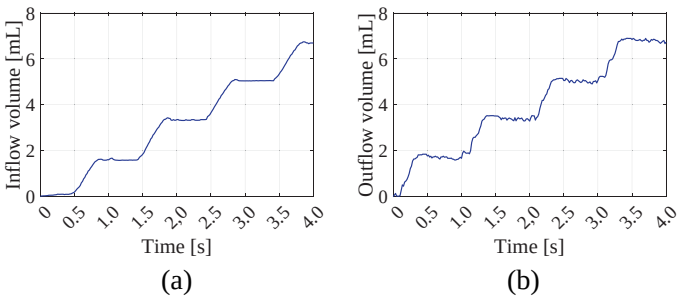

Fig.5 (a)Water inflow volume into the soft robotic heart obtained by tracking the scale of cylinder A. (b)Water outflow volume from the soft robotic heart obtained by tracking the scale of cylinder B.

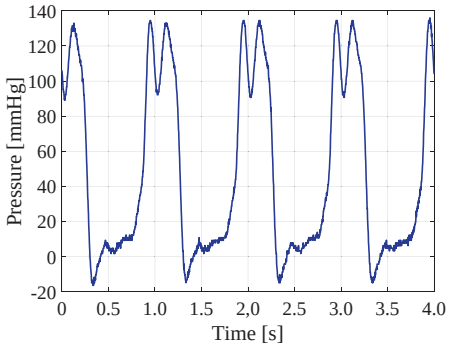

Fig.6 The result of pressure inside the left ventricle of a soft robotic heart.Maximum and minimum pressures are nearly identical to those of the actual heart.

水の輸送を行った．メスシリンダ B をソフトロボティック心臓より 1 m 高い位置に設置することにより実際の心臓の大動脈側の圧を再現している [3][4]．メスシリンダの目盛り変化からソフトロボティック心臓への流入量とソフトロボティック心臓からの流出量をプロットしたのが図 5 となった．また，ソフトロボティック心臓の内圧は図 6 となった．

4　まとめ

本研究では心臓の構造を模倣したソフトロボティック心臓を製作し，水の輸送実験を行った．今後はソフトロボティック心臓の一回当たりの吐出量を増やし，実際の心臓のポンプ性能に近づける．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 基盤研究 C JP22K08958 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Ferran Poveda, Debora Gil, Enric Martí, Albert Andaluz, Manel Ballester, and Francesc Carreras. Helical structure of the cardiac ventricular anatomy assessed by diffusion tensor magnetic resonance imaging with multiresolution tractography. *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, Vol. 66, No. 10, pp. 782–790, 2013.

[2] Francisco Torrent-Guasp, Gerald D Buckberg, Carmine Clemente, James L Cox, H Cecil Coghlan, and Morteza Gharib.

The structure and function of the helical heart and its buttress wrapping. i. the normal macroscopic structure of the heart. In *Seminars in thoracic and cardiovascular surgery*, Vol. 13, pp. 301–319. Elsevier, 2001.

[3] Marcelo B Bastos, Daniel Burkhoff, Jiri Maly, Joost Daemen, Corstiaan A den Uil, Koen Ameloot, Mattie Lenzen, Felix Mahfoud, Felix Zijlstra, Jan J Schreuder, et al. Invasive left ventricle pressure–volume analysis: overview and practical clinical implications. *European heart journal*, Vol. 41, No. 12, pp. 1286–1297, 2020.

[4] Eric O Feigl and Donald L Fry. Myocardial mural thickness during the cardiac cycle. *Circulation Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 541–545, 1964.