

一般口演 | 医療データ解析

一般口演13 モデル構築・検証

2021年11月20日(土) 14:10 ~ 16:10 D会場 (2号館1階212)

[3-D-1-02] ヒト心房の3次元モデルに基づく心房細動興奮伝播様式の再現を目指した電気生理学シミュレーションと可視化

*岸田 優作¹、浦田 友和¹、大星 直樹¹、宮崎 晃²、芦原 貴司³、坂田 憲祐⁴、柴田 仁太郎⁵、井尻 敬⁶、高山 健志⁷、信太 宗也⁸、原 良昭⁸、稲田 慎⁸、中沢 一雄⁸（1. 近畿大学 理工学部 情報学科, 2. 市立奈良病院, 3. 滋賀医科大学 情報総合センター, 4. 滋賀医科大学 循環器内科, 5. 新宿三井ビルクリニック, 6. 芝浦工業大学 工学部 情報学科, 7. 国立情報学科研究所 コンテンツ科学研究系, 8. 森ノ宮医療大学 保険医療学部 臨床工学科）

*Yusaku Kishida¹, Tomokazu Urata¹, Naoki Ohboshi¹, Akira Miyazaki², Takashi Ashihara³, Kensuke Sakata⁴, Nitarou Shibata⁵, Takashi Iziri⁶, Kenshi Takayama⁷, Shuya Shida⁸, Yoshiaki Hara⁸, Shin Inada⁸, Kazuo Nakazawa⁸（1. 近畿大学 理工学部 情報学科, 2. 市立奈良病院, 3. 滋賀医科大学 情報総合センター, 4. 滋賀医科大学 循環器内科, 5. 新宿三井ビルクリニック, 6. 芝浦工業大学 工学部 情報学科, 7. 国立情報学科研究所 コンテンツ科学研究系, 8. 森ノ宮医療大学 保険医療学部 臨床工学科）

キーワード：arrhythmia, atrial fibrillation, Non-paroxysmal atrial fibrillation

[背景]

心房細動は不整脈の一種であり、心不全や脳梗塞などの主な原因となる。わが国だけでも患者数が100万人にも及ぶ有病率の高い疾患である。心房細動の複雑な興奮伝播様式とそのメカニズムについては、未解明な部分が多く、その治療においても経験則に頼らざるを得ない実態がある。心房細動の持続メカニズムの解明のため、興奮伝播様式を可視化する必要がある。

[目的]

ヒトの3次元心房の形状モデルを作成し、電気生理学的なコンピュータシミュレーションを実施して、心房細動の複雑な興奮伝播様式を可視化する。心房細動の典型的な症例を再現し、有効な治療戦略構築に向けたシミュレーションと可視化システムを開発する。

[方法]

MR I データを元にヒトの3次元心房の形状モデルを作成し、電気生理学的なコンピュータシミュレーションを実施した。シミュレーションで用いる MRIデータから作成したモデルだけでは、心筋組織の心外膜面と心内膜面のみで構成されたサーフェスモデルであるため、心筋内組織を含めたユニットモデルへ変換した。作成したユニットモデルにヒト心房細胞の活動電位を再現することが可能な微分方程式モデルを組み込み、心房内の不整脈を想定した電気生理学的シミュレーションを行った。その後、シミュレーション結果に基づき心房の興奮伝播様式を可視化した動画を作成した。

[結果と考察]

3次元心房形状モデルにおいて、初期の発作性心房細動の興奮伝播を仮想的に表現することができた。しかしながら、臨床で見られる典型的な非発作性心房細動の症例の再現までには至っていない。今後は、非発作性心房細動の再現に向けて、ユニット数を増やして大規模なシミュレーションの実施と有力なパラメータの同定を図る必要がある。シミュレーションによる理論的な非発作性心房細動の治療戦略構築と、結果をより見やすくわかりやすいものにすることを目標とする。

ヒト心房の 3 次元モデルに基づく心房細動興奮伝播様式の再現を目指した電気生理学的シミュレーションと可視化

岸田 優作^{*1}、浦田 智和^{*1}、大星 直樹^{*1}、宮崎 晃^{*2}、芦原 貴司^{*3}、坂田 憲祐^{*4}、
柴田 仁太郎^{*5}、井尻 敬^{*6}、高山 健志^{*7}、信太 宗也^{*8}、原 良昭^{*8}、稲田 慎^{*8}、中沢 一雄^{*8}
*1 近畿大学理工学部情報学科、*2 市立奈良病院、*3 滋賀医科大学情報総合センター、
*4 滋賀医科大学循環器内科、*5 新宿三井ビルクリニック、*6 芝浦工業大学工学部情報学科、
*7 国立情報学科研究所コンテンツ科学研究系、*8 森ノ宮医療大学保健医療学部臨床工学科

Electrophysiological simulation and visualization aiming at the reproduction of atrial fibrillation based on a 3D human atrium model

Yusaku Kishida^{*1}, Tomokazu Urata^{*2}, Naoki Ohboshi^{*3}, Akira Miyazaki^{*2}, Takashi Ashihara^{*3}, Kensuke Sakata^{*4}
Nitaro Shibata^{*5}, Takashi Ijiri^{*6}, Kenshi Takayama^{*7}, Shuya Shida^{*8}, Yoshiaki Hara^{*8}, Shin Inada^{*8}, Kazuo Nakazawa^{*8}

*1 Department of Informatics, Faculty of Science and Engineering, Kindai University, *2 Nara City Hospital,

*3 Information Technology and Management Center, Shiga University of Medical Science,

*4 Department of Cardiovascular Medicine, Shiga University of Medical Science,

*5 Shinjuku Mitsui Building Clinic,

*6 Department of Informatics, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology,

*7 Content Sciences Research Division, National Institute of Informatics,

*8 Department of Clinical Engineering, Faculty of Health Sciences, Morinomiya University of Medical Sciences

Background: Atrial fibrillation (AF) is a high prevalence arrhythmia causing heart failure and/or cerebral infarction. To improve the treatment, understanding the complicated excitation propagation during AF is required. However, the biological information obtained from the electrocardiograms is limited. **Objectives:** To investigate the excitation propagation during sinus rhythm and AF, computer simulation was performed in a 3D model of human atria. **Methods:** The 3D atrial model was constructed based on human MRI data, and simulated atrial excitation propagation was visualized. **Results and Discussion:** In the human atrial model, the excitation propagation during AF was virtually reproduced. In the next step, we plan to increase the number of myocardial units and to perform large-scale AF simulation. In addition, we will try to improve the software visualizing AF observed in clinical practice. In the near future, more effective visualization technique will be required for proposing novel strategy for refractory non-paroxysmal AF treatment.

Keywords: atrial fibrillation, computer simulation, excitation propagation, visualization

1. はじめに

心房細動(AF)は不整脈の一種であり、心不全や脳梗塞などの主な原因となる。我が国だけでも患者数が 100 万人にも及ぶ有病率の高い疾患である。発作性AFの治療には、カテーテルアブレーションが有効であるが、非発作性 AF の治療成績は良いとは言えない。実際、非発作性 AF の複雑な興奮伝播様式とそのメカニズムについては未解明な部分が多く、その治療においても経験則に頼らざるを得ない実態がある。非発作性 AF の持続メカニズムの解明のため、興奮伝播様式を可視化する必要がある。従来、我々の研究グループでは不整脈を中心にコンピュータシミュレーションや可視化の研究を精力的に行ってきた。これまで、AF のリアルタイム可視化¹⁻³⁾や洞結節から周囲心房筋組織への伝播シミュレーション^{4,5)}などについて報告を行った。

2. 目的

本研究の目的は、非発作性 AF の典型的症例を再現し、有効なカテーテルアブレーションによる治療戦略構築に向けたシミュレーション技術の開発と、その結果を分かりやすく可視化することにある。本稿では、MRI データから作成したヒトの 3 次元心房モデルを使って、電気生理学的なコンピュータシミュレーションを実施し、基本となる AF の興奮伝播様式を 3 次元表示として可視化する。

3. 方法

3.1 3次元心房モデルの作成

MRI データから用手的に 3 次元心臓形状のサーフェスモデルを作成した。心臓形状サーフェスモデル作成には、汎用 3 次元モデル作成ソフト Blender⁶⁾を使用した。さらに、心臓モデルから心房部分を抜き出し、3 次元心房のサーフェスモデルとした。このモデルは心筋組織の心外膜面と心内膜面のみで構成されたサーフェスモデルであるため、サーフェスモデルから心筋内組織を含めたユニットモデル(ポリウムモデル)へと変換した⁴⁾。今回、コンピュータシミュレーション実験に使用したユニットモデルのユニット数は 284,392 である。

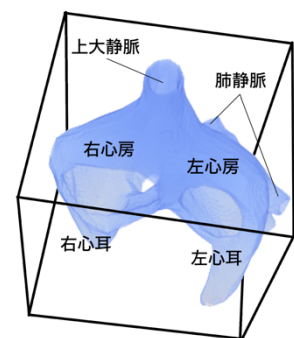


図 1 3次元心房モデル

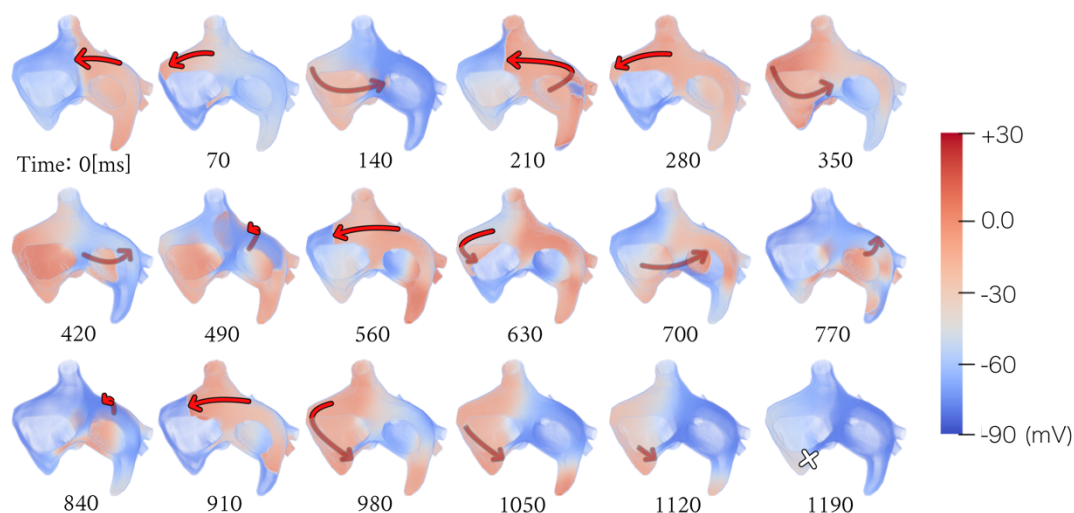


図2 3次元心房モデルによる心房細動の可視化

3.2 電気生理学的コンピュータシミュレーション

作成したユニットモデルの各ユニットに対して、ヒト心房の活動電位を再現することが可能な21変数からなる微分方程式モデル⁷⁾を組み込み、心房内の不整脈を想定した電気生理学的コンピュータシミュレーションを行った。したがって、実質は約600万変数(21×284,392)の微分方程式(系)の数値解析を、大阪大学サイバーメディセンターにあるスーパーコンピュータを用いて実施した。その後、心房における興奮伝播様式をParaview⁸⁾を用いて可視化した。

4. 結果

心臓興奮の生理的なペースメーカーである洞結節から周囲心房筋組織への伝播を宮崎らの結果^{4,5)}に基づいて再現し、追加刺激を加えて、細動現象の発端となる巡回性興奮波を発生させることに成功した。典型的結果を図2に示す。興奮波は左心房の前部から三尖弁周囲を伝わって後部から肺静脈付近へ巡回する。その後、巡回性興奮波は軌道を徐々に変化させながら3周した後、4周目途中では後部に回り込めず右心耳で消滅した。さらに、条件を変化させて実験を繰り返すも、持続的に巡回する興奮波を作成することは出来なかった。図3に、巡回性興奮波の巡回軌跡のイメージを示す。

5. 考察

今回の実験では、強制的に細動現象の発端となる巡回性興奮波を発生させている。しかしながら、非発作性AFを想定した持続的な巡回性興奮波を発生させるには至らなかった。発生させた巡回性興奮波は非常に初期の発作性AF、あるいは心房粗動の特徴を示すように数周巡回するのみで消滅した。この結果は、ヒト心房の活動電位を再現する細胞モデルをそのまま採用したこと起因するものと思われる。本来、AFを発生する心房筋では線維化などがかなり進行し、病的な状態であることが推測される。現在、正常な細胞モデルから活動電位の幅を短くした実験を継続中であり、より持続的な発作性、さらに非発作性AFを前提とした巡回性興奮波の再現を目指している。

6. 結論

3次元心房モデルにおいて、初期の発作性AFの特徴が

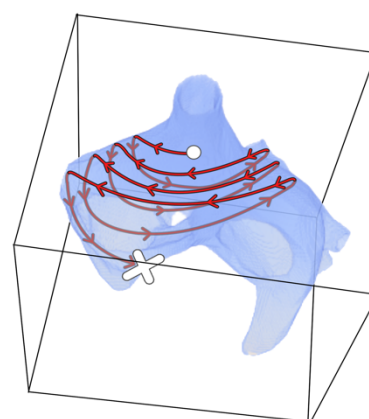


図3 巡回性興奮波の巡回軌跡のイメージ

認められる巡回性興奮波の興奮伝播様式を再現した。今後は持続する非発作性AFを再現し、その治療戦略の立案に向けて、より精密なシミュレーションの実施を図る予定である。

7. 文献など

- 1) 芦原貴司ほか：慢性心房細動アブレーションの新たな治療戦略に向けたインシリコ応用. 第37回医療情報学連合大会, 2017.
- 2) 芦原貴司ほか：心内心電図処理に基づく心房細動のリアルタイム可視化がもたらすカテーテルアブレーションの変革. 第38回医療情報学連合大会, 2018.
- 3) 芦原貴司ほか：心房細動のリアルタイム映像に基づくカテーテル治療の効率化に向けた心内心電図解析改善の取り組み. 第39回医療情報学連合大会, 2019.
- 4) 宮崎晃ほか：3次元心房形状モデルに基づく心房細動興奮伝播様式の再現と心筋焼灼治療をめざした電気生理学的シミュレーション. 第40回医療情報学連合大会, 2020.
- 5) 岸田優作ほか：ヒト心房の3次元モデルに基づく洞調律興奮伝播シミュレーションと可視化. 第60回日本生体医工学大会, 2021.
- 6) Blender. [https://www.blender.org/ (cited 2020-Sep-01)].
- 7) Courtemanche M, et al.: Ionic mechanisms underlying human atrial action potential properties. Insights from a mathematical model, American Journal of Physiology, 1998.
- 8) Paraview. [https://www.paraview.org/ (cited 2020-Sep-01)].