

# スキマティックな3次元形状モデリングインタフェースを備えた 心臓電気生理現象シミュレータ

原口 亮<sup>†</sup> 五十嵐健夫<sup>††,†††</sup> 大和田 茂<sup>††</sup> 八尾 武憲<sup>††††</sup> 難波 経豊<sup>†††††</sup>  
芦原 貴司<sup>††††††</sup> 池田 隆徳<sup>†††††††</sup> 杉本 喜久<sup>††††††††</sup> 永田 啓<sup>†††††††††</sup> 中沢 一雄<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 国立循環器病センター研究所 〒565-8565 大阪府吹田市藤白台5-7-1

<sup>††</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科

<sup>†††</sup> 科学技術振興機構さきがけプログラム

<sup>††††</sup> 滋賀医科大学呼吸循環器内科

<sup>†††††</sup> 香川県立保健医療大学保健医療学部

<sup>††††††</sup> 京都大学大学院医学研究科細胞機能制御学

<sup>†††††††</sup> 杏林大学医学部第二内科

<sup>††††††††</sup> 滋賀医科大学医療情報部

E-mail: †haraguch@ri.ncvc.go.jp

あらまし 従来、心臓電気生理現象シミュレーションに用いる心臓形状の生成には煩雑な作業が必要であった。そこで我々は複雑な3次元形状を手書きスケッチ風に簡単に変形できるモデリングインタフェースを利用し、シミュレータと組み合わせるシステムを開発した。開発したシステムにより、形状を変形後即座にシミュレーションを実行し、結果を可視化することができた。本システムは計算機シミュレーションの特長をより生かすことができる。

キーワード スキマティック、モデリングインタフェース、心臓電気生理現象シミュレータ、シミュレーション

## Electrophysiological Heart Simulator with Schematic 3D Modeling Interface

Ryo HARAGUCHI<sup>†</sup>, Takeo IGARASHI<sup>††,†††</sup>, Shigeru OWADA<sup>††</sup>, Takenori YAO<sup>††††</sup>,  
Tsunetoyo NAMBA<sup>†††††</sup>, Takashi ASHIHARA<sup>††††††</sup>, Takanori IKEDA<sup>†††††††</sup>,  
Yoshihisa SUGIMOTO<sup>††††††††</sup>, Satoru NAGATA<sup>††††††††</sup>, and Kazuo NAKAZAWA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Cardiovascular Center Research Institute Fujishiro-dai 5-7-1, Suita-Shi, Osaka, 565-8565 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

<sup>†††</sup> PRESTO, Japan Science and Technology Agency

<sup>††††</sup> Department of Cardiovascular and Respiratory Medicine, Shiga University of Medical Science

<sup>†††††</sup> Faculty of Health Sciences, Kagawa Prefectural College of Health Sciences

<sup>††††††</sup> Department of Physiology and Biophysics, Kyoto University Graduate School of Medicine

<sup>†††††††</sup> The Second Department of Internal Medicine, Kyorin University School of Medicine

<sup>††††††††</sup> Department of Medical Informatics and Biomedical Engineering, Shiga University of Medical Science

E-mail: †haraguch@ri.ncvc.go.jp

**Abstract** We present an electrophysiological heart simulator with schematic 3-D modeling interface. It has been tedious and troublesome interactive work to create a shape of heart for using it in the simulator. In our developing system, as soon as changing the shape of heart easily and quickly, we can execute the simulation and the visualization of the result. Our system increases the facility of computer simulation.

**Key words** Schematic, Modeling interface, Electrophysiological Heart Simulator, Simulation

## 1. まえがき

我々は、これまでに心臓電気現象の大規模シミュレーションにより、システムとしての心臓全体における電気特性を把握し致死性不整脈発生メカニズムの解明を目的とした研究を行ってきた [1]~[5]。より正確なモデルやシミュレーション手法が今後とも求められることは言うまでもないが、将来的に致死性不整脈の効果的な予防・治療を行うためには、得られる結果が正確であるだけでなく、必要が生じたときに迅速にシミュレーションを実行し即座に結果を確認できる環境や、患者の病態に応じてパラメータを簡単にすばやく設定できるインターフェースが不可欠と考えられる。

従来、心臓電気生理現象のシミュレーションに用いられてきた 3 次元心臓形状の生成には、煩雑で手法的な作業が必要であり、数値計算以前に多大な労力が必要であった。そこで我々は複雑な 3 次元形状を手書きスケッチ風に簡単に変形できる 3 次元形状モデリングインターフェースを利用し、シミュレータと組み合わせるシステムを開発した。

複雑な 3 次元形状を簡単に構築したり変形したりするモデリングツールは、近年の計算機能力の向上もあり多数提案されてきているが、本研究のようなシミュレーションとの融合は前例がない。3 次元モデリングインターフェースと実時間応答性の高い簡易シミュレータとの組み合わせは、時間のかかる大規模シミュレーション実行前に可能性を絞り込むためのツールとして、あるいは患者さんへの治療計画の効果的な説明ツール・教育利用への応用等が考えられる。また大規模シミュレータとの組み合わせは、病態把握・予測のためのツールとしての応用等が考えられる。

## 2. システムの構成

本システムは、3 次元形状モデリングインターフェースと心臓電気生理現象シミュレータから構成される。

### 2.1 3 次元形状モデリングインターフェース

心臓電気現象の大規模シミュレーションに用いられてきた心臓形状は、一般には CAD (Computer-aided Design) のシステムを用いて作成したり、MRI や CT といった医用画像から画像処理により抽出したりして作成している。しかしながら、CAD は基本的に精密なモデリングを指向するツールであり、そのオペレーションには熟練を要する。また医用画像処理による形状作成においても、その自動化や作成後の自由な変形は困難である。

このように、3 次元心臓形状を構築するには煩雑で手法的な作業が必要であり、多大な労力を必要とする。この 3 次元形状データの取り扱いの不便さにより、様々な条件設定により何度も繰り返し実験を行えるという計算機シミュレーションの最大の特長が十分に生かされない。

複雑な心臓 3 次元形状を簡単に構築したり変形したりするために、今回我々は Teddy [6] と呼ばれる 3 次元モデリングインターフェースを使用した。これは画面に 2 次元的に描いた自由曲線をもとに適切な 3 次元ポリゴンモデルを自動的に生成する

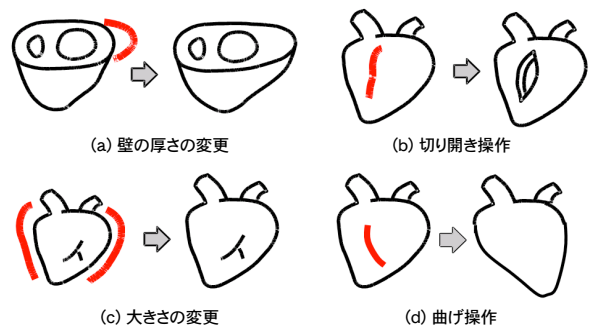


図 1 3 次元形状モデリングインターフェースにおける変形操作の例  
Fig.1 Examples of operation for changing the shape in the 3-D modeling interface

ものである。またユーザが入力するストロークを元にモデルを簡単に切断したり隆起させたりすることができる。例えば、曲げ操作 (図 1(d)) は、変形前・変形後の 2 ストロークを入力するだけで形状全体を意図通りに変形させることができる。この Teddy を心臓電気現象シミュレータと組み合わせる際の形状操作としては、この他にも壁の厚みを変えたり、切り開いたり、全体の大きさを変更したりといった操作を検討している。

Teddy は Java™ 言語により記述されており、一般的な PC であれば形状生成をリアルタイムで十分に処理可能である。この Teddy により生成された心臓形状ポリゴンデータは、ボリュームデータに変換された上でシミュレータに渡される。

### 2.2 心臓電気生理現象シミュレータ

前述の 3 次元モデリングインターフェースにより生成された心臓形状モデルを用いて、心臓電気生理現象のシミュレーションを行う。今回我々は、PC 上で動作する簡易シミュレータを試作した。この簡易シミュレータは、前述の 3 次元形状モデリングインターフェースと同じ PC 上で動作させることができる。これにより、形状モデルの変形操作を行った後に即座にシミュレーションを実行することが可能となる。また十分な計算能力を持つ PC であれば、シミュレーション結果を即座に求め結果を可視化することが可能である。

心臓電気生理現象簡易シミュレータにて用いる活動電位の数値モデルとしては、FHN (FitzHugh-Nagumo) モデル [7], [8] を採用している。FHN モデルは 2 変数 1 次微分方程式系で表され、必要とする計算機パワーが比較的少ない。

今回は 3 次元モデリングインターフェースにより生成した心臓形状ポリゴンモデルを、各辺 64 セルの配列内に収まるようなボリュームデータに変換した。その上で、画像処理により心内膜側表面部分を自動的に認識して仮想刺激伝導系を構築した上で簡易シミュレーションを実行した。本シミュレータでは、形状の変形による結果の違いを観察しやすいように、2 種類の形状について同時にシミュレーションを実行する。心臓形状の可視化には MarchingCubes 法 [9] を用い、さらに電氣的に興奮しているセルを不透明ボクセルで表現してレンダリングを行うことにより、興奮伝播の様子を可視化した。興奮伝播の様子が観察しやすい程度の時間間隔ごとに数値計算を一時中断して可

表 1 簡易シミュレータにおける計算時間の一例

Table 1 Processing Time for FHN simulation

MPU	OS	数値計算	可視化
Xeon/2.8GHz×2	GNU/Linux	0.29 秒	0.11 秒
Pentium4-M/2.2GHz	Windows2000	0.45 秒	0.06 秒
PowerPC7445/867MHz	Mac OS X	1.48 秒	0.42 秒

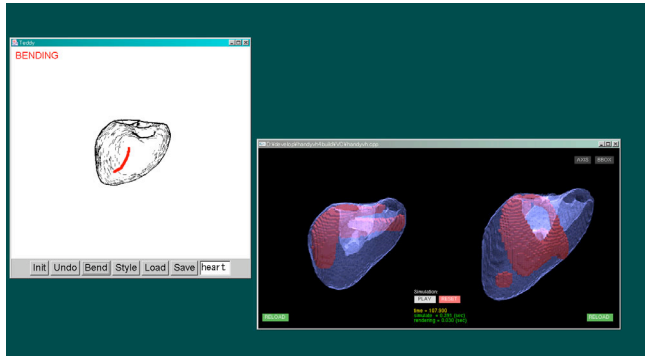


図 2 3次元モデリングインタフェースとシミュレータの同一 PC 上での実行

Fig.2 3-D Modeling Interface and FHN Simulator in use on a PC

視化と表示を行っている．プログラムは C++言語を用いて実装している．また，マルチスレッド・プログラミング・モデルとして OpenMP™ を，計算結果の可視化のための 3次元グラフィックスライブラリとして OpenGL®と GLUT を使用している．

### 3. 結 果

スキマティックな 3次元形状モデリングインタフェースと，心臓電気生理現象簡易シミュレータを同一の PC 上で実行した．実行時の画面の様子を図 2 に示す．心臓形状を手書きスケッチ風に簡便に変形させた後すぐにシミュレーション実行と結果の可視化がリアルタイムで可能であった．

2つの心臓形状モデルを用いて簡易シミュレーションを行った場合の 1 単位時間あたりの実計算時間の一例を表 1 に示す．一般に入手が容易な範囲の計算機パワーがあれば，シミュレーションを実行しながら興奮伝播の様子をリアルタイムで観察することが十分に可能であった．

### 4. ネットワークを介するシミュレーション環境の構築

スキマティックな 3次元形状モデリングインタフェースにより生成した心臓形状モデルを用いての，スーパーコンピュータによる大規模シミュレーションを行うためのシステムの試作も行った．

大規模シミュレーションにて用いる活動電位の数値モデルとしては，LR モデル (フェーズ 1) [10] を採用している．これは現在最も広く利用されているモデルである．LR1 モデルは 8 変数 1 次微分方程式系で表され，必要な計算量が FHN モデルと比べて格段に増大する．今回は各辺 300 セルの配列に収まるよ

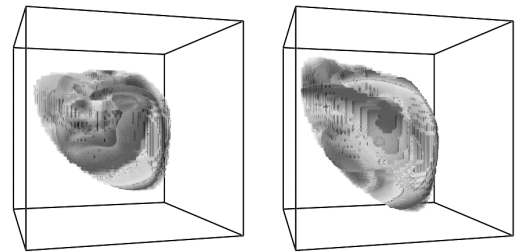


図 3 大規模シミュレーションによる計算結果の可視化

Fig.3 Visualized Results of LR1 simulation on a supercomputer

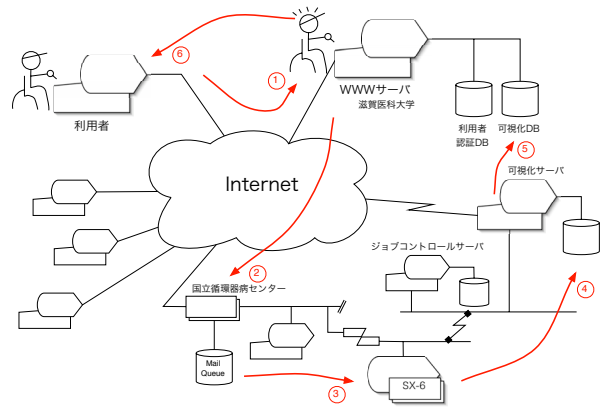


図 4 システムのネットワーク概略図

Fig.4 Overview of Networks for a large-scale simulation

うな心臓形状ボリュームデータを用いて画像処理により心内膜側表面に仮想刺激伝導系を構築した上でシミュレーションを実行した．セル数は約 500 万である．数値計算には NEC 製のベクトル並列型スーパーコンピュータ SX-6/8A を用いた．今回は 6 個のプロセッサを使って並列処理を行い，その理論性能値は 48GFLOPS である．約 1 心拍分 (1 秒) のシミュレーションに要する時間は約 3 時間であった．計算により得られた心室表面および内部の電位分布は，ボリュームレンダリング法 [11] により可視化を行った．可視化結果を図 3 に示す．

我々は現在，遠隔地からインターネット技術を利用して心臓電気現象の大規模シミュレーションを行うシステムを構築中である．システムのネットワーク概略図を図 4 に示す．本システムの利用者は，滋賀医科大学に設置された WWW サーバに接続し，活動電位モデルの各パラメータや期外収縮を生じさせる位置などを指定する．指定されたパラメータ等は国立循環器病センターに送信され，スーパーコンピュータによりシミュレーションが実行される．計算結果は可視化サーバにより画像化 / 映像化された後に，滋賀医大 WWW サーバに登録される．利用者は Web ブラウザを使用してシミュレーション結果を閲覧することができる．

このネットワークを介するシミュレーション環境は現状で試作と基礎的検討の段階にあり，利用できる心臓形状モデルの種類が少なかったり，可視化の際の視点位置が固定であるなど解決すべき項目が残されている．

## 5. 考 察

シミュレーションで使用する心臓形状のモデリングには、これまででは煩雑で用法的な作業が必要であり、形状を変化させながら繰り返しシミュレーションを行うことが困難であった。今回、手書きスケッチ風に簡便に心臓形状を構築できるスキマティックな3次元形状モデリングインタフェースを導入することにより、3次元形状データの取り扱いの不便さを大幅に解消することができた。そしてこのインタフェースと同一PC上で動作する簡易シミュレータとも組み合わせることにより、形状モデルを変形後にすぐにシミュレーションを実行することが可能となった。現段階で一般的に入手可能な計算機ハードウェアであれば、シミュレーションとその結果の可視化をほぼリアルタイムで行うことが可能であることが示された。

本システムでは、形状モデルを変形してシミュレーションを実行し結果を確認するという一連のサイクルが従来に比べて大幅に短縮されている。これにより、利用者が数値計算実行前に形状やパラメータを調整して可能性を絞り込んでいくことが非常に容易となっている。スキマティックな3次元形状モデリングインタフェースとシミュレータとの組み合わせは、様々な条件設定により何度でも繰り返し実験を行えるという計算機シミュレーションの最大の特長をより生かすことができるだけでなく、新しい応用可能性をも示している。例えば、本システムを電子カルテ [12] に組み込み、心臓肥大症の影響やバティスタ手術 (左心部分切除術) の効果を、患者さんのベッドサイド実際に操作しながら示すことの出来る効果的な説明ツールとして、あるいは医療従事者への教育ツールとしての応用等が考えられる。

また、スーパーコンピュータや HPC (High Performance Computer) を必要とするような大規模なシミュレーションにおいても、形状モデリングツールの利用は非常に有用であると考えられる。3次元形状モデリングインタフェースと大規模シミュレータとの組み合わせは、治療戦略や病態把握・予測のためのツールとしての応用が考えられる。

3次元形状モデリングツールとシミュレータ、そしてネットワークの組み合わせは、心臓電気現象シミュレーションにとどまらず様々な分野に適用可能である。例えば建築物や工業製品の構造解析、電子回路設計などの応用分野が考えられる。形状変形とシミュレーションという試行錯誤のサイクルの短縮は生産性や創造性に大きな影響を与えると考えられる。またシミュレーション実行のための強力な計算機資源が手元になくともネットワーク上の計算機資源を利用可能な環境を構築できれば、より多くの利用者がこの組み合わせのもたらすメリットを享受できると考えられる。

## 6. 結 論

我々は、複雑な3次元形状を手書きスケッチ風に簡単に変形できるモデリングインタフェースを利用し、心臓電気生理現象シミュレータと組み合わせるシステムを開発した。開発したシステムにより、形状を変形後即座にシミュレーションを実行し、

結果を可視化することができた。本システムは、様々な条件のもとで試行錯誤を繰り返しながら何度でも繰り返し実験を行えるという計算機シミュレーションの特長を最大限に生かすことができる。

今後の課題としては、3次元形状モデリングインタフェースにおいて心臓 (シミュレーション) に適合した変形操作方法をより具体的に検討し実装するという点が上げられる。また、筋線維方向や導電率の指定など媒質の性質についてもモデリングインタフェースの適用を検討する。さらに、ネットワークを介するシミュレーション環境についても改良を行う予定である。

## 謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)16500311, (C)(2)16590714), 厚生労働省循環器病研究委託費 (15公6) および科学技術振興機構さきがけプログラムによる研究成果の一部である。

## 文 献

- [1] T. Suzuki, T. Ashihara, M. Inagaki, T. Namba, T. Ikeda and K. Nakazawa: "A high-performance computation method for simulation of cardiac excitation propagation using a supercomputer", *Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System* (Ed. by T. Yamaguchi), Tokyo, Springer-Verlag, pp. 193-204 (2000).
- [2] T. Ashihara, T. Suzuki, T. Namba, M. Inagaki, T. Ikeda, M. Ito, M. Kinoshita and K. Nakazawa: "Simulated electrocardiogram of spiral wave reentry in a mathematical ventricular model", *Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System* (Ed. by T. Yamaguchi), Tokyo, Springer-Verlag, pp. 205-216 (2000).
- [3] K. Nakazawa, T. Suzuki, T. Ashihara, M. Inagaki, T. Namba, T. Ikeda and R. Suzuki: "Computational analysis and visualization of spiral wave reentry in a virtual heart model", *Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System* (Ed. by T. Yamaguchi), Tokyo, Springer-Verlag, pp. 217-241 (2000).
- [4] 中沢, 鈴木, 稲垣, 杉町: "バーチャルハート: 仮想心臓による不整脈現象の解明", *画像ラボ*, **14**, 6, pp. 38-43 (2003).
- [5] 中沢, 原口: "仮想心臓による不整脈現象のシミュレーションと可視化", *最新医学*, **58**, 8, pp. 1834-1841 (2003).
- [6] T. Igarashi, S. Matuoka and H. Tanaka: "Teddy: A sketching interface for 3d freeform design", *ACM SIGGRAPH '99*, Los Angeles, ACM, pp. 409-416 (1999).
- [7] R. FitzHugh: "Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane", *Biophysical Journal*, **1**, pp. 445-446 (1961).
- [8] J. Nagumo, S. Arimoto and S. Yoshizawa: "An active pulse transmission line simulating nerve axon", *Institute of Radio Engineers*, Vol. 50, pp. 2061-2070 (1962).
- [9] W. E. Lorensen and H. E. Cline: "Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm", *ACM Computer Graphics* (Proceeding of SIGGRAPH'87), Vol. 21, ACM Press, pp. 163-169 (1987).
- [10] C. H. Luo and Y. Rudy: "A model of the ventricular cardiac action potential: Depolarization, repolarization, and their interaction", *Circulation Research*, **68**, pp. 1501-1526 (1991).
- [11] M. Levoy: "Display of surfaces from volume data", *IEEE Computer Graphics and Applications*, **8**, 3, pp. 29-37 (1988).
- [12] 中沢, 五十嵐: "電子カルテ普及に向けたペン入力インタフェース", *新医療*, **9**, pp. 74-77 (2003).