



心臓シミュレータが拓くテーラーメイド医療 ～世界最先端の心臓シミュレータとその適用例のご紹介～



富士通株式会社 次世代テクニカルコンピューティング開発本部
アプリケーション開発統括部長

かどおか
門岡 良昌

皆様こんばんは。ただいまご紹介いただきました門岡でございます。津川様、ご丁寧なご紹介ありがとうございます。本日はこのような立派な席にお招きいただきましたことを大変感謝しております。私の話が皆様に少しでも感銘を与えることができれば幸いです。

なお本日の内容は、東京大学の新領域創成科学研究科の久田俊明教授、杉浦清了教授の研究室との共同成果でございます。

早速本題に入りたいと思いますが、まず始めに皆さんに質問があります。ご自身の心臓を実際に見たことがある方はいらっしゃいますか。「何て変なことを聞くのだ、今日のスピーカーは!」とお思いかもしれません。実は私はあるんです…。

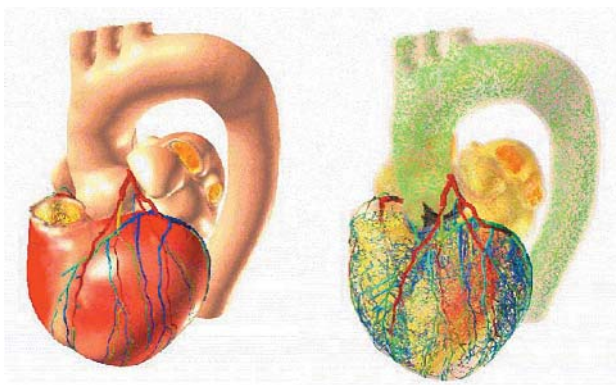


図1. 心臓シミュレーション結果の動画

これ(図1)が私の心臓なんです。動いていますよね。これは、コンピュータグラフィックスのデザイナーが制作した心臓のアニメーションではございません。実際に心臓をモデル化し、コンピュータシミュレーションを行い、その結果を可視化したものです。図の黒い部分が大動脈弁です。心臓の周りの血管を冠循環といいます。そして血流と心筋が連動して動いている。このような状況をコンピュータの中で再現することができます。心臓が悪い方は病院に行ってCTを撮りますね。そのCTデータがあれば、こういった形で皆さんの心臓を取り出すことなく見ることができるんです。そういう最先端技術について本日はご紹介させていただきます。

まず心臓ですが、一拍でおよそコーヒークップ1杯分の血液を拍出します。1日でタンクローリー1台分なんです。一生か

かってタンカー1隻分。すごいですよね。ですがこの心臓は、平均寿命80歳として、80年間一度も止まることがないんです。私は昔交換機の仕事をやっていたのですが、交換機はCCITTの規格では20年に1時間は止まっても良い。だけど心臓は絶対止まってはいけない。こんな素晴らしい機械を誰が作れますか? やっぱり神様が作ったと思わざるを得ないのです。

次に心臓の構造についてお話しします。皆さんが病院に行かれると、血圧を測ったり心電図を撮ったり、あるいは少し病気の症状があるとCTやMRIを使って、心臓の映像を撮られますね。しかし心臓は、実はここ(図2)にありますように横軸をマルチスケール、すなわち分子構造・機能、細胞、臓器、生体全体というように取って、縦軸に力学現象、生化学反応、電気現象を取った場合に、この全部を包含した形で出来上がっているんです。

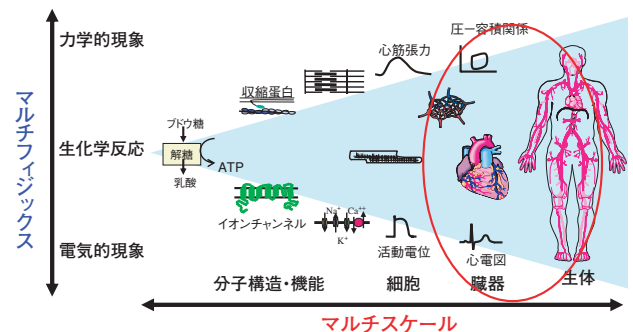


図2. マルチスケール・マルチフィジックス問題としての心臓循環器系

今申し上げましたように皆さんが病院に行って診られるのは、この部分(図2の赤い楕円)だけなんです。でも実はもっと奥深いんです。その部分は実はお医者様の経験と勘で治療が行われているというのが実態なんです。そこで我々はコンピュータを使って、この細胞や分子構造、そして生化学反応も含めて皆さん一人一人の心臓を再現して、的確な治療を行えるような、そういう技術を開発しております。

1. マルチフィジックス心臓シミュレーション

この心臓なんですけれども、CT画像を撮っていただいて、心臓を切り出して(セグメンテーション)、コンピュータで計算しやすいような形に加工します。そして、心臓シミュレー



ションを行います。本日ご紹介する心臓シミュレーションは2種類あります。一つはマルチフィジックス心臓シミュレーションです。

心臓はどのように動いているのか。右心房の一番上のところに、洞房結節というのがあります。いわゆるペースメーカーです。これがその周囲の心筋細胞に電気的な刺激を送ると、各細胞がカルシウムイオンを放出します。そのカルシウムイオンを心筋細胞の中に注入します。心筋細胞にはアクチンとミオシンというたんぱく質がありまして、ミオシンがまるで船のオールを漕ぐような形で動くことによって、心筋が伸びたり縮んだりします。この刺激が心臓全体に伝播することにより、心臓が拍動するのです。我々の心臓シミュレータは、この心筋細胞を力学モデルに置き換えることによって、心臓全体のシミュレーションを行います。

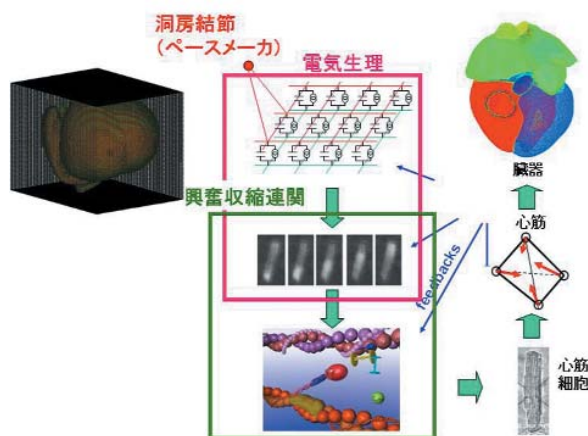


図3. 血液ポンプとしての心臓拍動の原理

しかし、力学モデルで置き換えることだけで心臓シミュレーションができるかというと、そう単純ではございません。実は心筋細胞というのは、縦に長いんですね。心臓の内壁から中間、それから外に向かってどんどんねじれているんです。ですから、心臓は単純にパクパク動いているのではなくて、キュッキュッと絞るように動いているんです。心筋細胞の一つ一つは10%しか伸び縮みしないんですが、心臓全体では約55%もの血液を一度に拍出することができるんです。そういう非常に不思議なものなんです。ですから、心筋の繊維方向をきちんとシミュレーションする必要があるんです。そのために心筋細胞の線維方向もモデル化して心臓シミュレータに含めています。

このようなモデルを基に心臓の電気現象と力学現象をシミュレーションしております。電気現象は、先程お話したように、洞房結節から刺激が発生し、周りの細胞にどんどん電気的な刺激を伝えていく、そういう現象をシミュレーションし

ていきます。力学現象は、血流と心筋の動きを連成させて解いています。さらに、電気現象の解析をするときには個別の組織の電気の伝導係数が分かっておりますので、それを基に、体表面に出てくる電流をコンピュータが捉えます。それによって、その人の心臓がどのような電気現象を起こしているのかを知ることができます。さらに力学現象において血流と心筋の動きだけでなく、弁の動きまでを忠実に再現したのは世界でも我々だけでございます。このようにして出来上がった心臓シミュレータなんですが、実際の心臓と比べて本当に正確なのか、どのくらいの精度なのかを見るために、我々はコンピュータの中の心臓に対して心電図を撮ってみました。

これはその一例ですが、力学現象と電気現象、それから胸部モデルを作って、コンピュータの中の心臓に対して第2誘導心電図を撮ってみました。その結果がここに表れているグラフなんです。非常にきれいな波形をしています。

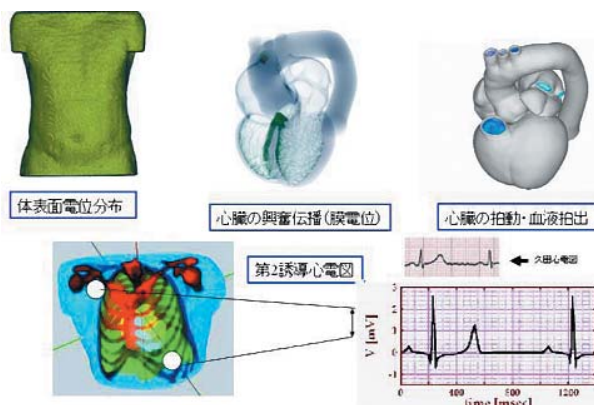


図4. 心臓の正常拍動と心電図

そこで、一例を紹介いたします。これ(図5)は心筋梗塞の患者さんの心臓です。心筋梗塞になるとここから先は血液が行かないので、心筋が壊死してしまって、プロブヨの状態になって、伸び縮みができない。そうすると、このように心室瘤ができます。これがひどいと、心臓全体として拍出量や拍出圧が十分でないため、全身に血液が回らないんです。じゃあどうするかというと、お医者さんは手術をして、プロブヨの部分を取り取って、縫い合わせるんです。ただ、どこまで取り取って縫い合わせたらキチッと元通りの拍出量が出るかというのは、まさにお医者さんの経験と勘によります。ですから、患者さんの胸を開けて心臓を取り出すまで最終的な判断ができないんです。でも心臓シミュレータを使いますと、皆さん一人ひとりの心臓をコンピュータの中で再現できるので、こういった患者さんの場合はですね、じゃあこういうふうにかってみたらどうなるか? また別の切り方をしたらどうなるか? というふうには、何回も何回もコンピュータの中で手術が



できるんです。一切その患者さんに触れることなく。そうやって、最適な（手術）術式をお医者さんが決定して、実際に手術に臨む、そうすることによって大変危険な手術を安全に施すことができる。他にもたくさんありますけれども、今日は時間の関係で割愛致します。

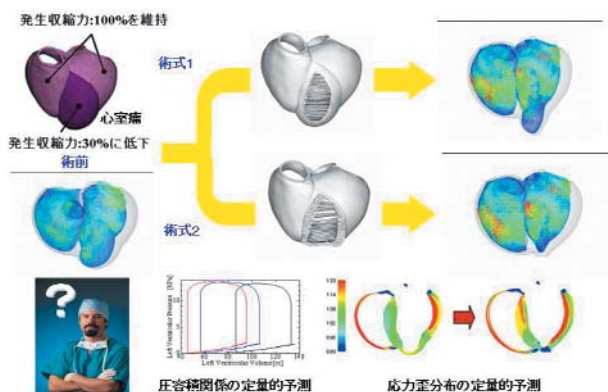


図5. 外科領域における応用：
梗塞心の切除領域に関するBatista手術の事前評価

2. マルチスケール心臓シミュレーション

そしてもう一つは、マルチスケール心臓シミュレーションです。心臓シミュレーションは心筋細胞を積み上げていると言いましたが、先ほどのは非常に簡単な力学モデルを使っています。マルチスケールとは、もっと精緻な20万自由度の心筋細胞モデルを作り、これを積み上げていって、臓器レベルまでを再現する、そういうシミュレーションなんです。では、なぜマルチスケール心臓シミュレーションが必要なのか。実験で心臓の病気を解明する場合には、一つの心筋細胞に対して圧力を加えたり、薬を入れたりして検証しているだけなんです。ところが、実際の心筋細胞は、心臓の中で多くの細胞に囲まれて動いているわけですから、一つを見ただけでは心臓全体の中での挙動が分からないんです。よって実際の環境の中でどう心筋が振る舞うのかということを見る必要がありますが、生きている人の心臓を使うわけにはいきません。でもコンピュータの中でならできるんです。そのために、マルチスケール心臓シミュレータが必要なんです。

これ（図6）は心筋ですね。こちらが左心室、こっちが右心室です。先ほど心筋の繊維の方向が違ってお話ししましたが、そこの内側、心内膜と心外膜の部分で、血液の流れがどういふふうになるかを表したものです。こういうふうになり血圧の分布が変わってくるんです。同じ心筋細胞でも場所によって動きが全然違って来ますね。そういったこと

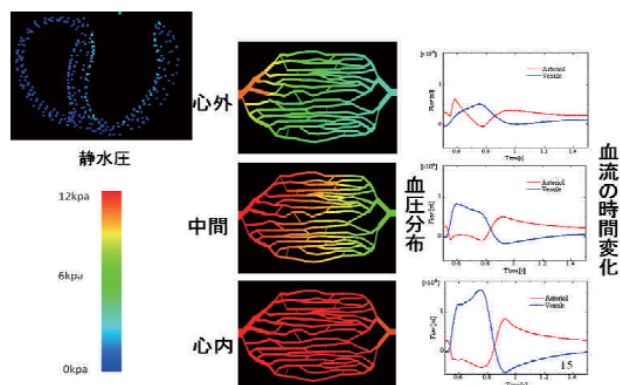


図6. 毛細血管内の血流のマルチスケール解析

を我々の心臓シミュレータで確認できております。さらに、これは今朝4時に出来上がったばかりのホットな動画です。造影剤を冠動脈から入れて、冠静脈から抜け出すまでに何拍かかるのかということコンピュータの中で調べました。コンピュータの中でおよそ7拍から8拍で抜けています。東大の循環器内科の先生は「通常は5拍から6拍で抜け出す。少しずれがありますが、これをコンピュータの中で再現したというのはすごい。」と評価されています。

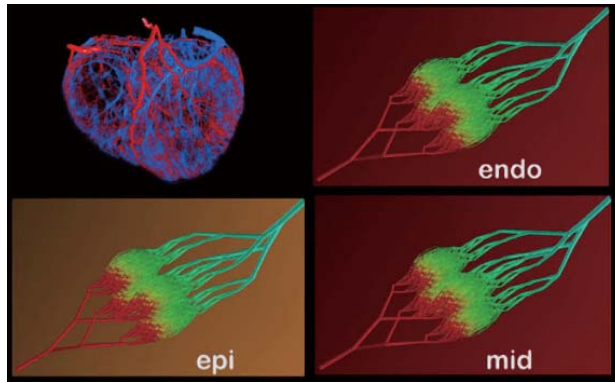


図7. 毛細血管内の血流のマルチスケール解析

これ（図7）は毛細血管レベルまでシミュレーションした結果です。これは毛細血管で、500マイクロの長さです。心筋細胞1つで100マイクロですから、心筋細胞5個分なんです。外側（epi）では造影剤の粒子が割とスムーズに流れていますが、内側の心筋（end）になると、淀んでいる粒子が戻って来ています。こういう状態を我々は世界で初めて再現することに成功したんです。これは実験では分からないんです。生きている人の心臓を使っても見ることはできないのです。そういったことが、コンピュータの中で解明されつつあるのです。



3. 心臓シミュレータが拓くテーラーメイド医療

我々は、この心臓シミュレータを使いまして、クラウドの上に心臓シミュレータセンターを構築したいと考えています(図8)。各病院から患者さんのデータをこのセンターに送っていただいて、シミュレーションをして各病院に返してあげる。そのようにして、患者さんの治療に役に立ちたいと考えております。

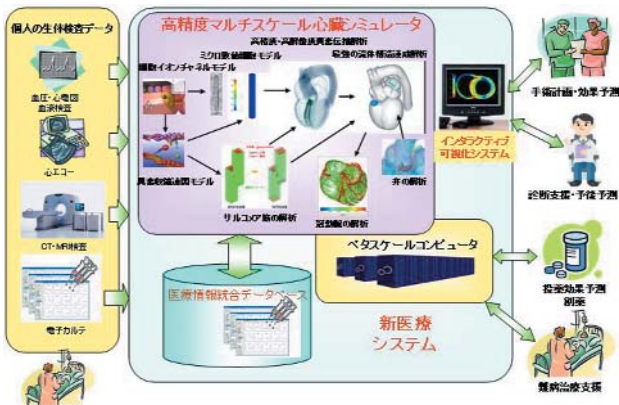


図8. 心臓シミュレータによるテーラーメイド医療システム

ちなみに、先ほどのマルチスケール心臓シミュレータで1細胞を20万自由度でシミュレーションしようとする、全体で66万個の細胞を積み上げて、一つの心臓にするんですが、1拍させるだけで、ちょっとスペックが古いんですが、Pentium IVの128ノードのPCクラスで何と700日の計算が必要なんです。ところが、神戸に設置中の次世代スーパーコンピュータでは、大体2日でこれをやっってしまうということに我々はチャレンジしております。ですから、森会長がおっしゃったように、2番じゃダメなんです。1番のコンピュータを使って、こういうことをもっと早くできるようにしていかなくてはならないんです。そのためには、ハード屋さんとアプリケーション屋さんが連携してやっていかなくてははいけない。そのように強く思っています。

そして、心臓シミュレータの応用をやってみました。携帯電話を活用したヘルスケアサービスの事例です(図9)。

これは弊社が開発した携帯電話です。南さん、これに触っていただけますか。これは、南さんの心電図の波形です。こんな感じで南さんの心電図の波形が表示されています。そしてここにあります心臓のアニメーションは、今の南さんの心臓の鼓動をそのまま再現しています。つまり、同期しているんです。

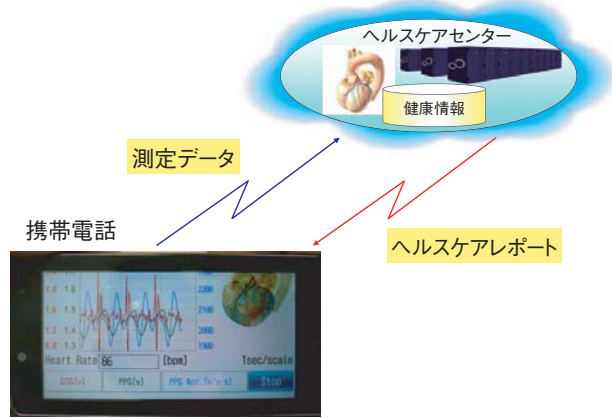


図9. 携帯電話を活用したヘルスケアサービスの事例

ちょっと緊張気味ですね。リハーサルの時には1分で60ぐらいだったのですが、何だか90ぐらいある。私の心臓じゃ面白くないので、今日は南さんに来てもらいました。どなたか、会場の中で、自分の心臓を見てみたい方はいらっしゃいますか? ご協力をお願い致します。じゃあ、どうぞ。ここがセンサーになっておりまして、第I誘導心電図を撮っております。

おお、なかなかきれいな波形ですね。私は医者ではないので、余計なことを言っちゃいけないんですが。他にもいらっしゃいますか…。皆さん、素晴らしい波形をお持ちですね。これは携帯電話ですから、ここで記録したデータは、全てネットワークを介して、ヘルスセンターがあれば、そちらの方に蓄積できて、その方の心臓のデータを日々チェックすることができる。さらに、心臓のパクパク感をご自身で確認できるという、そういうものでございます。こういったこともやっております。

4. まとめ

我々は東京大学の先生方とマルチフィジックス・マルチスケール心臓シミュレータを共同で開発中でございます。この心臓シミュレータは分子・細胞から組織、臓器までの力学・生化学・電気現象を再現することが可能です。クラウド上に構築するハートセンターでテーラーメイド医療を実現し、医療の発展に貢献することを目指しております。

なお、冒頭にご紹介しました心臓ですが、実は私の心臓ではありません。私の心臓は近い将来に準備できる予定です。ご容赦下さい。

ご清聴ありがとうございました。

(2011年3月8日 第391回ITUクラブ例会より)