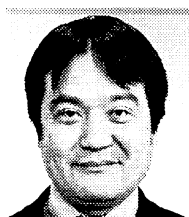


生体力学シミュレーションと VR

姫野龍太郎

理化学研究所



1. はじめに

VR の医療分野への応用を考えたとき、スーパーコンピュータによって新しい応用が開けてくるのだろうか。私自身、VR の研究を手がけてきたわけではなく、しかも、医療に携わっている訳でもないが、スーパーコンピュータを使ったシミュレーション側の研究者として考えたことを、ここでは述べてみたい。

まず、これまで VR が医療分野で使われてきたのは以下の3つに分類できるだろう。

- 1) 医師の支援 (仮想手術・手術支援)
- 2) 患者の支援
- 3) 測定やシミュレーション結果の把握 (可視化)

1) は医師が手術する前に事前に手術方法を検討したり、非熟練者を教育するようなものと、実際の手術において、手の動きを縮小して細かな動きを可能にしたり、目で直接見えない情報を医師の眼前に提示したりと、直接手術中に医師を手助けするものがあるだろう。これらは飛行機のシミュレータを作ってパイロットを訓練することや、オートパイロットやフライバイワイヤーと呼ばれるシステムで、パイロットの意図をコンピュータが解釈して、コンピュータが操作するようなこと、コックピットの計器ではなくフロントのガラスに直接情報を提示する HUD (Head Up Display) などと、基本的には同じ意図である。

2) は動けない患者に外の世界を自由に動き回れるように見せたり、退屈な歩行訓練でも外を歩いているように見せることでより励みを与えたり、患者を手助けすること

である。

3) はいろいろな分野に共通のもので、データの把握の手伝いであり、直感的な理解や問題のある部分への容易なアプローチを助けるものである。

これらの分野で、スーパーコンピュータを使うと改善される部分や新しく応用が広がる部分があるだろうか。

2. スーパーコンピュータによるシミュレーションと VR

スーパーコンピュータによってシミュレーションの世界は大きな進展をもたらすことは言うまでもない。人体は内なる大宇宙とも呼ばれるように、広大な未知の世界である。その人体を、スーパーコンピュータを使って仮想的に再現しようというプロジェクトをわれわれは 1999 年に理化学研究所で開始した[1-3]。似て非なるプロジェクトとして、アメリカに Visible Human Project がある。これは死体を頭部から足先までを数ミリ厚さで切断して行き、断面を撮影して、コンピュータに取り込むというものである。この場合、解剖学的には完全に人体がコンピュータ上に再現できている。しかしながら、我々が目指したことは、これとまったく違うものである。Visible Human Project が再現した人体は死体であって、全く活動しない。我々が目指したものは生きている人体をコンピュータ上に再現するものである。もちろん、まったく未知な生体現象をコンピュータで作り出そう、あるいはコンピュータで解明しようという試みではない。すでに、ある程度理解が進んでいる力学的な生体現象をコンピュータ上に再現することで、病気や怪我の診断や治療、あるいはリハビリ

の手助けをしようというものである。VR を広く解釈し、仮想的な現実感を与えるモデルも含めることができるのであれば、これはスーパーコンピュータがもたらす新しい VR の応用分野であろう。宇宙開発事業団・日本原子力研究所・海洋科学技術センターの三機関が開発している地球シミュレータもこの部類に入るかもしれない。

VR は人とのインターフェース部分であり、その裏で映像や力覚などを作り出しているものが実験データであろうとシミュレーション結果であろうと、問題ではなく、実際とどれだけ近いかが問題なはずである。VR という観点からスーパーコンピュータによるシミュレーションを見たとき、問題なのは、即答性（実時間での応答性）であろう。これまでスーパーコンピュータは対話形式で使われることは少なく、いわんや即答性が要求されることは無かった。巨大なシミュレーションを鷹揚に計算すれば良かったのである。しかし、そのことと、スーパーコンピュータで即答性が期待できないということとは違う。その意味で今後スーパーコンピュータと結びついた VR というのは、二つの方向がある。一つは実時間の応答性を追求する方向で、コンピュータの演算速度を問題規模に合わせて高速化（現実には並列化して）する、あるいは、演算速度に合わせて問題規模を小さくする。もう一つの方法は、あらかじめ想定されるパラメータ範囲を計算しておき、すでに蓄えられた計算結果を使って応答を決める方向である。

我々が生体力学シミュレーションで実際に対象とした分野を個別に紹介しながら、この方向性を検討してみよう。取り上げたのは、日本人の死亡率の 2、3 位を占める循環器系シミュレーション、骨折などの治療に関係した骨や軟組織などの器官の損傷・治療シミュレーション、リハビリやスポーツを対象とした筋肉骨格モデルに基づく運動器系シミュレーションの 3 分野である。

3. 循環器系シミュレーション

1993 年の統計によると、日本人の死因の 1 位はがん・腫瘍で 26.8 %、2 位は心臓疾患（心筋梗塞など）で 20.5 %、3 位は脳血管疾患（脳溢血や脳梗塞など）で 13.5 % となっている。心臓と脳の血管疾患による死亡は合わせると 34 % にもなり、癌よりも多い。これらの血管の疾患は、血管が血圧に耐え切れずに破裂して起こるものと、どこかでできた血栓が細い血管を塞いで起こるものがある。これらの疾患は、コレステロールによる血管の狭窄や動脈硬化、血管が袋状に膨らむ瘤（動脈瘤や静脈瘤）の発生とその破裂、さらに血栓の発生など、様々な

原因で引き起こされる。いずれの場合にも、血流がこれらの病変にきわめて大きな影響を与えている。このため、血流のシミュレーションはこれらの病変の起こる仕組みに迫ることで、あるいは、見つかった病変が治療を必要とするかどうかという診断でも、さらには、手術が必要だとしたら手術法はどのようにしたらよいかという手術計画の検討でも、医師に大きな情報を与えることができると考えている。

シミュレーションの技術的な観点からすると、血流のシミュレーションは厄介である。まず、流れ単独、あるいは構造物単独のシミュレーションでも生体材料では簡単ではない。血液は赤血球がたくさん入っており、流体としての性質が管の太さや流れの速度で変わる。血管は三層からなり、それぞれで特性の異なる異方性材料である。流れは管の形によって変化し、一方の管も流れによって形を変える。どちらも一方だけでは決まらず、同時に両方を解く必要が流体構造連成問題である。これを理研のスーパーコンピュータ VPP700E を使って計算したのが図 1 である[4]。この場合は動脈を想定し、心臓の拍動によって間欠的に流れが起り、瘤が流れを受けて変形する様子が計算できている。計算時間は VPP700E の 1PE で数時間であるが、並列化が容易で性能向上も十分期待できる。この程度の問題であれば我々の持つ 160PE の VPP700E で十分即応性が保証できる。

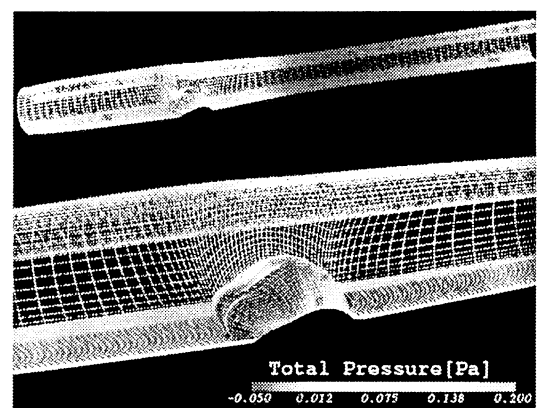


図 1. 動脈瘤による狭く部分を拍動する血流が通るときの変形の様子（色は血流の圧力）

近年、医療用の超音波診断装置や MRI、CT などの装置によって、体の中のいろいろな臓器の様子が分かるようになってきた。しかし、血流の詳細な様子は測定が困難である。このような流れの様子を調べるのであれば、シミュレーションが特に有効である。最近我々のところで、心臓の動きを捉えた超音波診断装置から、左心室の中の

血流の様子がシミュレーションできるようになった (図 2) [5]。さらに人工心臓弁の流れの解析なども進めている。このまま進めば近い将来、毛細血管以外の血流はかなり解析できるようになるだろう。循環器系全体のシミュレーションをこのような三次元モデルで計算することは実際それほど必要としない。枝分かれする管路の一次元モデルと、毛細血管の部分の 0 次元モデルを加え、部分的な三次元モデルとを組み合わせた簡略モデルを使うことで実用上十分だろう。かつて、ミクロの決死圏という映画があったが、このような単なる想像図の CG 版ではない、シミュレーションに基づいた映像世界はすぐにも作れそうなどころにある。

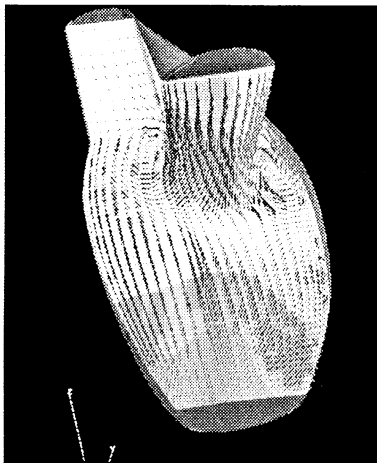


図 2. 左心室に流れ込む血流の様子 (色は圧力を表す)

脳動脈瘤のカテーテルによる手術や心臓の冠状動脈のカテーテル手術などは、今最も容易に実現可能な応用分野だ。もともと、これらの手術では肉眼で内部の様子は見られないので、X 線による外部からの映像などを頼りにカテーテルを操作している。また、カテーテルには回転と一次元の前進後退しか自由度がないので、インターフェースも容易に開発できる。カテーテルの血管壁との摩擦や血流から受ける力をモデル化すれば良い。臨場感のある手術シミュレーションを通常のコンピュータで行うためには、このシミュレーションモデルを簡略化して、レスポンスを良くする必要がある。現在のシミュレーションモデルでは数秒の現象が計算時間数時間にもなり、実現象の数千倍もかかってしまう。先に述べた流体構造連成問題の計算が非常に困難であるからだ。しかし、理論性能 40 TFLOPS という近々稼働予定の地球シミュレータなら、実は十分実現象並の速度で計算できるだろう。地球シミュレータを占有したり、組み込んだりするのは高価す

ぎて現実的ではないだろうが、可能な限り精密に作られた計算モデルによる、正確な予測シミュレーションでも、価格さえ度外視すれば実現可能な範囲に入ってきている。

この分野での応用はいずれも医師の援助を目指したものである。患者の立場から考えたとき、手術計画がずっと理解しやすくなるので、不安が和らげられるかもしれない。

4. 器官の損傷・治療シミュレーション

交通事故や衝突、転倒などの場合、人体の器官が損傷を受ける。このようなときの器官の損傷の様子や、治療における力学的なシミュレーションを行っている。この場合、それぞれの器官によって特性が異なるので、対象を眼球のシミュレーションと骨の骨折治療に絞って行っている。

4.1 眼球シミュレーション

眼球のシミュレーションでは二つのことを行っている。一つは目に異物が衝突したとき、どのような場所に大きな損傷が起こるのかをシミュレーションするものである。眼球は周りを骨で囲まれているため、衝突時の圧力波が骨で反射され、思わぬところで大きな応力が発生する。このため、重大な損傷を治療の初期段階で見落としてしまう恐れがある。これを防ぐためのシミュレーションである。

もうひとつは、網膜はく離の治療方法を検討するためのシミュレーションである。網膜はく離の治療では、眼球にバンドを巻いて眼球を変形させ、剥離した網膜が再びくっつくようにしている。このとき、患者の状態に合わせて事前にシミュレーションを行い、最適なバンドの選択やバンドの眼球への固定方法を検討できるようにすることが、この目的である。計算例を図 3 に示す[6]。

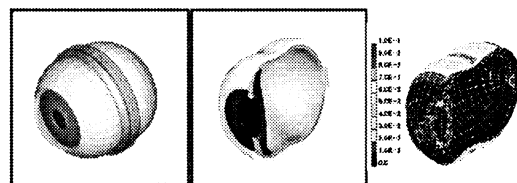


図 3. 網膜はく離手術で使うバンドによる眼球の変形と応力の様子

このシミュレーションは手術の事前検討用のものであるが、もちろん VR を応用することで簡単に実際の手術シミュレーションに移行できるはずである。熟練を要するこ

のような外科手術を、死体や実験動物でなく、仮想体験できることの価値は非常に高いであろう。この場合の技術的な問題は、血流の場合のような計算時間ではなくマンマシンインタフェースの方であろう。

4.2 骨の適応シミュレーション

骨折は日常的に非常に多い、外科的な治療を要する損傷である。骨は再生能力が高く、普通、骨折した部分を物理的にくっつけて固定しておけば、元に戻る。しかし、関節付近で複雑骨折した場合など、元のように戻らない場合もある。特に股関節など、大きな力がかかり、しかも、複雑な動きを可能にする関節では人工股関節などを埋め込んで治療することも行われている。ここで問題になるのは、このような人工物を骨に固定する部分である。骨は力がかかるとそれに耐えるように自分で自分を作る能力がある。逆に力がかかると、その部分で骨は密度が小さく、弱くなる。この非常に合理的な適応が邪魔をして、人工物を骨に固定するボルトが緩んだり、抜け落ちたりすることにつながっている。この様子を解析しようと言うのが、この骨の適応シミュレーションの目的である。そして、うまくボルトが緩まないような設計ができることを狙って、神戸大学と共同で研究している[7]。

VRはこのようなシミュレーションでも、いろいろな設計パラメータを選ぶためのインターフェースに応用できるだろう。

5. 運動器系シミュレーション

人体の運動を筋骨格モデル（骨・関節と筋肉からなるモデル）で再現するものである。テレビや映画、あるいはゲームでもCG（コンピュータ・グラフィックス）を使い、本物の人間のような動きが表現されている。この場合には、人間の動きをモーション・キャプチャリングによって、コンピュータに取り込み、その動きに合わせてCG映像を動かして合成している。われわれの運動器系シミュレーションでは、モーション・キャプチャリングを行うところまでは同じである。その後、筋骨格モデルと筋力モデル（図4）を使って、どの筋肉がどのような力を、いつ出しているか、求めている。こうすることによって、筋肉が疲労したときの動きや、どれかの筋肉が損傷を受けたときの動きなどを推定することができる[8]。これにより、個別の患者に適したリハビリの方法を検討することが可能になる。また、運動の最適化計算を行うことで、スポーツのフォームを改良することも可能である。

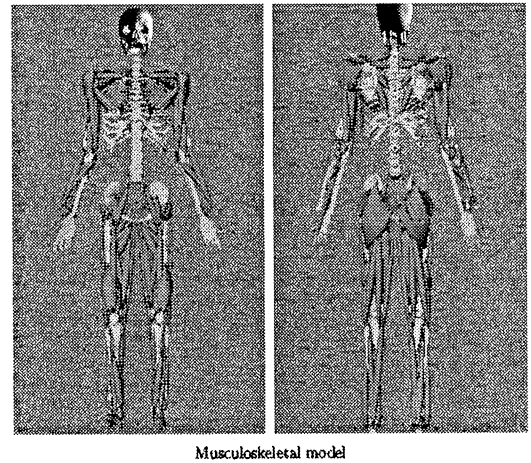


図4. 筋骨格モデル

現在、我々のところでも野球の投球や打撃におけるシミュレーションを行い、VR技術を応用した研究を行っている。図5は打撃のシミュレーションがVR環境でできるようにしたものである。球種や速度、コースなどを自由に設定でき、打者の体の動きだけでなく、視点の動きも測定可能である。今後熟練者と初級者の特性の違いを調べることにしている。

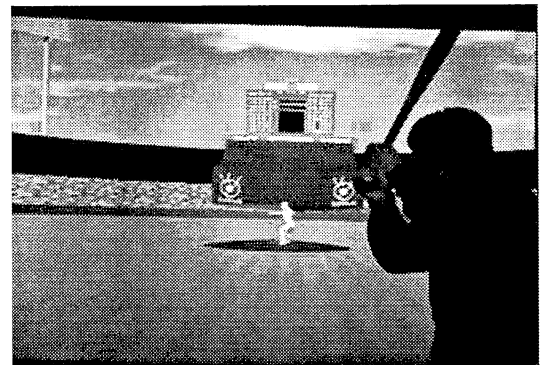


図5. 野球の打撃のシミュレーションと計測

この運動シミュレーションはこれだけにとどまらず、明るい未来があるように感じられる。リハビリやスポーツなど、ある運動を体得しようとするのは容易ではない。しかし、理想的な運動と現実との差を提示することで、より容易に体得することができるのではないかと考えている。今ある肉体的な能力で実現可能な最適な運動フォームを提示し、今の運動とどこが違うかを、運動中に提示したり、オーバーワークにならないように運動量を積分してトレーニングを監視したりと、短期間で効率的かつ安全な運動の習熟を可能にできると想像している。

この応用分野は医師（あるいは指導者）への支援もちろんであるが、より直接患者（実演者）への支援につながっていることでユニークであると思う。

5. おわりに

我々の進めている生体力学シミュレーションの研究を紹介しながら、スーパーコンピュータを使ったシミュレーションと VR 応用を考えてみた。ここで取り上げた応用分野では医師への援助が主になっているが、運動に関するシミュレーションでは患者の直接的な支援が可能である。とはいえ、これらの研究は部分的で、端緒に着いたばかりである。はるかな先になるだろうが、人体が生きて活動する、その様子を単に観察するだけでなく、外界からのアクションに対して反応する、それらの全てを VR で再現できることを夢見ている。

参考文献

- [1]生体力学シミュレーション研究、理研シンポジウム予稿集、1999年
- [2]生体力学シミュレーション研究、理研シンポジウム予稿集、2000年
- [3]生体力学シミュレーション研究、理研シンポジウム予稿集、2001年
- [4]渡辺他、血管病巣を模した非軸対象狭窄管内流の数値解析、第13回数値流体力学シンポジウム講演論文集、D03-3、1999年
- [5]岩瀬英仁他、左心室内の血流動態の数値解析、第13回バイオエンジニアリング講演会予稿集、日本機械学会、2001年、pp.62-63.
- [6]孫智剛、牧野内昭武、超弾性体と静止液体の連成解析 FEMプログラムの開発及び眼球網膜剥離手術のシミュレーションへの応用、日本機械学会論文誌、掲載予定
- [7] Adachi, T. et al., Trabecular Surface Remodeling Simulation for Cancellous Bone Using Microstructural Voxel Finite Element Models, Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 123-5, 403-409, (2001) .
- [8] Komura, T. et al., Creating and Retargetting Motion by the Musculoskeletal Human Body Model', The Visual Computer, Volume 16, issue 5(2000) pp.254-270

【略歴】

姫野龍太郎 (HIMENO Ryutarō)

理化学研究所、情報基盤研究部・情報環境室。1955年1月23日生まれ。1977年京都大学工学部電気系学科卒業。1979年同大学院修士課程終了。1979年日産自動車入社。総合研究所車両研究所に勤務。主に、車の空気力学の研究に従事。1997年から理化学研究所に移り、現在、情報基盤研究部情報環境室室長。野球の変化球の解析と、人体の血流シミュレーションが現在の主要な研究テーマ。日経サイエンス主催コンピュータビジュアルイノベーションコンテスト最優秀賞をはじめ、日本機械学会・学会賞、計算力学部門業績賞、可視化情報学会・映像展賞（芸術賞）などを受賞。著書に魔球をつくる～究極の変化球を求めて～（岩波科学ライブラリー）、魔球の正体（ベースボールマガジン社、共著）がある。