解説

生体力学シミュレーションのための人体モデル構築

Development of Human Model for Biomechanical Simulation

横田 秀夫* 姫野 龍太郎* *理化学研究所
Hideo Yokota* and Ryutarou Himeno* *RIKEN

1. はじめに

工業製品の開発においては、力学シミュレーションは必要不可欠なツールとして利用されている。一例を挙げれば、自動車の開発には、設計時の構造の検討、風切り音やそのデザイン、製造過程の検証など、構造、流体、鋳造、鍛造等の解析に用いられ、試作経費の軽減、開発期間の短縮、安全性の向上に欠くことができないツールとなっている。

一方、人体を対象とした力学解析は、手術シミュレーションや、放射線治療等、やり直しのきかない事象に対する予測や最適解の探索などに貢献できると期待されている。

しかしながら、生体を対象とした力学シミュレーションでは、工業製品の力学シミュレーションにはない困難な点が多い。その中でも大きな問題は、工業製品では、その形状、物性情報が判明しているが、生体では不明なことが挙げられる。具体的には、ヒトが設計製作する工業製品では、設計図にその形状情報が、部品の材料から機械的特性が記載されており、三次元 CAD による設計情報が存在するが、生体ではその設計情報がまったくない。

この問題に対して、人体の設計図とも言うべき人体モデルがいくつか提唱されている。

- ・ Visible Human: 人体の形状データに関しては、米国 NLM の Visible Human Project により開発され、死体を基にした 0.3 [mm] 分解能の形状データを公開 [1].
- ・ Digital Astronaut: 宇宙環境での人体シミュレーションを目指して米国 NASA が開発 [2].
- ・ Virtual Soldier: 歩兵・可搬兵器・損傷のシミュレーションのために米国 DoD が推進 [3].
- ・ 数値人体モデル: 電磁波シミュレーションのための分解能 2 [mm] の人体モデル. NICT より公開 [4].
- ・ バーチャル人体モデル THUMS: 自動車等の衝突解析人体ダミーモデルとしてトヨタ中央研究所 (株) が開発、販売 [5].

原稿受付 2008 年 2 月 18 日

キーワード: Human Model, Computational Bio-mechanics, Shape Model, Mechanical Property, Simulation

*〒 351-0198 和光市広沢 2-1

*Wako-shi, Saitama

しかしながら、これらの人体モデルは、その分解能、対象、分類 (軟組織、血管) などの点で、手術シミュレーションや装具の開発などにかかわる力学解析には十分ではない。

そこで、理化学研究所では 2004 年より、人体全身を対象とした力学シミュレーションのための全身モデルの構築を行っている [6]. 本報告では、理化学研究所にて開発を進めている人体モデルの構築について述べる。

2. 力学シミュレーションのための人体モデル

人体を対象とした力学シミュレーションを実現するには、人体の形状情報、臓器の硬さ・柔らかさを示す力学的特性が必要である。この目的のために、人体力学モデルとして、人体の形状を対象とした「人体形状モデル」、物性値を示す「身体組織物性値データベース」を開発している。この人体力学モデルは、人体の外形形状のみではなく、その内部の情報も内包する必要がある。また、医療の場では、患者個別の解析を必要としていることから、個別の患者モデルを容易に構築する仕組みが必要となる。そこで、ボランティアを対象に、臨床使用されている X 線 CT, MRI を用い、連続した断面画像群からボクセルデータを構築した。図 1 に本研究での情報の取り扱い方法を示す。人体データを記載したボクセル空間には、各組織の属性を設定している。また、複数の事象に対応するために複数の同じ座標空間のボクセルデータを持つ構造とした。格納情報は、力学的な物性値、ある時間での流速ベクトル、筋力等の力学的

図 1 理化学研究所にて構築中の人体モデル

図2 人体モデル構築のための拘束治具作成

な事象と共に、生理学的な事象をも入れ込める形式とした。

3. 人体形状モデル

3.1 形状データの取得とモデル構築

現在構築している人体モデル構築の手法を述べる。ボランティアを対象に、空間分解能に優れ、空間の歪みのない X 線 CT の情報と、軟部組織や血管の検出に優れるが、空間分解能、空間の歪みに難がある MRI の情報を融合させて、軟組織や血管などの臓器にタグを付けた全身モデルを構築する。このときに、X 線 CT と MRI による撮影が異なることから、撮影空間の原点が異なること、体位が異なることから位置合わせが困難となる。また、MRI の撮影が長時間（約 4 時間）に及ぶことから、被験者の体位を規定するための撮影ジグを作製した。図 2 にジグ作製の様子を示す。患者固定用ビーズマットにより、非験者の背部の形状を転写し、石膏により凸型を作製する。その後、石膏背面に FRP を積層して、オーダーメイドのジグを作製した。作製したジグは、MRI、X 線 CT 撮影には影響を及ぼさないことを確認している。

このジグを用いて、撮影を行った。X 線 CT 撮影は、東芝 16 列の Aquilion を使い、ヘリカルスキャンにて全身を頭頂から膝関節、膝関節から脚部つま先までの 2 回に分けて撮影を行った。撮影は 20 秒程の息止め状態で、体動を抑制した状態で行った。撮影後再構築演算を行い、1 [mm] 分解能の等方性ボクセルの情報を取得した。MRI 撮影は、T1, T2*, MRA (MRI Angio: TOF) にて全身を対象に行った。撮影は Philips Achieva 1.5T を使い、アキシャル断面で、面内分解能 2 [mm]、断面間 2 [mm] ピッチで行った。

3.2 人体形状データ処理

撮影した情報を基に、ボクセルデータを作製して人体形状モデルを構築した。人体全身を対象に 1 [mm] 分解能で、 $600 \times 250 \times 1,800$ の 2.7 億ボクセルであった。

撮影した X 線 CT の DICOM 情報を基に輝度情報の変換 (WindowsLevel 変換) により、骨、軟骨、軟部組織を分別した。また、MRI からは軟部組織の分別と MRA からの血管抽出を行った。さらに、抽出した領域を人の判断により詳細な領域を微調整する作業が必要であった。そこで、三次

図3 ボリュームデータ編集ツール VCAT による人体モデル構築

図4 人体モデルの三次元可視化像

元空間編集ツールである VCAT [7] を用いてマニュアル操作により領域を設定した (図 3)。VCAT は、理化学研究所 VCAD システム研究プログラム生物基盤構築チームで開発を進めている編集ツールで、ボリュームデータに対する三次元版 Photoshop を目指して開発を進め、現在無償公開をしている [8]。このツールはボクセル領域の編集、自動抽出と共に、設定領域のボリュームレンダリング、サーフェスレンダリングによる三次元可視化機能を有する。理化学研究所 VCAD システム研究プログラムで開発を進めている流体・構造解析シミュレーション [9] のためのプリシステムとしてメッシュ作成を行うことが可能である。

これらのツールを用いて、ボランティアの組織を分別したデータを作成した。現在、46 臓器と骨格を皮質骨、海綿骨、骨髓に 240 分類したデータを作成した。

図 4 に臓器個別に領域を設定した断層画像、レンダリングした立体画像を示す。人体全身、筋骨格系、血管系、神経系、泌尿器系、呼吸器系、消化器系として表示した。

4. 身体組織物性値データベース

4.1 文献によるデータベース構築

人体を構成する組織の機械的性質は、組織を摘出し引っ

ID	腱 (Tendon)	Young's modulus	4.50x10 ⁴ MPa
20		Poisson's Ratio	
Reference			
Data Book on Mechanical Properties of Living Cells, Tissues, and Organs (Book)			
Abe, H., Hayashi, K. and Sato, M. (Ed.)			
Young's modulus calculation			
Linear Approximation: $Y = 448.99 X - 1.0902$			
An approximation range: $0.00392 < \text{Strain} < 0.0153$			
$R^2 = 0.9951$

Test Method			
Testing Methods and Experimental Conditions ・腱-骨複合物の圧力のテスト ・クロスヘッドの速度2cm/min. ・37℃の食塩水。 ・ひずみは、ビデオディメンジョンアナライザーを使用して求めた。 ・伸びは、クランプからクランプの距離より求めた。			
Abstract			
Abstract (日本語)			

図5 人体組織物性値データベースの一例

張り—圧縮試験により得ることができる。しかし、実際に人体の力学シミュレーションを実現しようとすると、対象とする組織ごとにデータが分散しており、解析にこぎ着けることが困難であった。そこで、組織の力学的特性を集めたデータベースを整備することとした。

手始めに、既報の文献データより機械的特性を調査し、線形のヤング率を求めたデータベースを整備した[10]。このデータベースには、文献での実験法、英語・日本語の要約を記載しており、詳細な実験条件などが知りたい場合には、元の文献をたどることができる。現在、代表的な41の組織のデータを記載し、NICTにて公開されている数値人体モデルの臓器番号に準じてデータベース化した。なお、このデータベースは、ホームページにより無償公開をしている[11]。図5に公開しているホームページの一部を示す。現在までに50件以上の登録があり、各種シミュレーションに活用がなされている。

次のステップとして、軟組織などの非線形な挙動を表現したデータベースの構築を行っている。組織の機械的特性を非圧縮性の超弾性体として近似し、Mooney-Rivlin体として表現したデータ作成した[12]。このデータについても、近日中にホームページを通じて公開する予定である。

さらに、患者個別の物性値測定を目指して、生体内の臓器の機械的特性を測定する方法を開発している。現在、MRIとアクチュエータによる組織の変形から、FEMを用いて、逆問題として物性値を推定する方法である。この方法によ

図6 人体骨格ヤング率モデル構築のフローチャート

り得られたデータについても、順次データベースに格納し、公開する予定である。また、大学、研究機関が個別に測定されている生体試料の機械的特性について、上記データベースに掲載することを呼びかけている。人体を対象とした力学解析を進めるためにも関係者の協力をお願いする。

4.2 骨の物性値モデル構築

人体のシミュレーションモデルのなかで、骨に関しては物性値の推定が容易な可能な部位である。骨のX線吸収係数(HU: Hounsfield Unit)からヤング率を求めることが可能である[13][14]。そこで、HU値を基にヤング率を推定するシステムを構築した[15]。図6にヤング率推定のフローチャートと推定した全身の骨のヤング率モデルを示す。骨の密度によりヤング率が異なることが可視化できる。このシステムにより、骨格系に関しては、形状データと物性値データを自動的に構築可能であり、患者個別の人体力学シミュレーションモデルが構築できる。

5. 人体モデルを用いた力学シミュレーション

本プロジェクトで開発し、公開している身体組織の機械的性質と、公開されている人体モデルを用いて、生体力学シミュレーションの有効性を確認するために、複数の組織を含む力学シミュレーションを行った。対象は大腿骨大転子付近に荷重が加わる場合の大腿骨の変形、応力の解析とした。高齢者は、骨密度の低下により、転倒時に骨折を起こしやすい。この骨折を防止するために腰部に取り付ける骨折防止パッドの開発が進められており、これを例題として力学シミュレーションを行った。

解析にはVOXELCON ver.2006r3((株)くいと)を用いて、大腿骨頭の脚外側より100[N]の静加重を負荷した状態でヒップパッドの有無による応力を比較した。図7に解析結果を示す。ヒップパッドの装着により、大腿骨骨頭頭

図7 人体モデルを用いた脚部応力解析

部にかかる応力の絶対値が低減し、骨折要因となる応力集中パターンが分散していることが示唆された。今後、ヒップパットの形状、物性値を変更することにより、より応力低減に適したヒップパットの開発が可能であると考えられる。

6. まとめと今後の予定

前記に述べた方法により、1[mm]分解能での人体の形状モデル、物性値モデルの開発により、力学シミュレーションのための人体モデルの構築を進めている。今後、人体形状モデルは0.3[mm]分解能へ高精度化する予定である。また、身体組織物性値データベースでは、超弾性の構成式による非線形なデータベースを構築する。また、いずれのモデルについても、患者個別のモデル構築を目指して、画像処理手法の開発、非侵襲的手法による物性値の測定法を開発する予定である。

これらの人体モデルの整備により、人体の力学シミュレーションが可能となってきた。解析のためのシミュレーションソフトウェアとして、市販の汎用ソルバのほかに、理化学研究所ではVCADシステム研究プログラムにおいて、流体解析、線形構造解析のためのシステムが開発されている[9]。また、同研究所の次世代生命体統合シミュレーション臓器全身チームでは、次世代スーパーコンピュータの上で動くEular型固体流体連成ソルバを開発している。このソルバ

は、精度を追究するためには計算コストが膨大になるが、人体力学シミュレーションモデルの基となるボクセル情報との親和性が非常に高い。これらのソフトウェアと共に、生体特有の現象である、非線形大変形に対応した大規模問題に対応したソルバが開発されることが望まれる。人体シミュレーションが実用化し、苦しんでいる患者さんを救うためにも、関係者の協力を強く希望する。

謝 辞 今回の撮影においては、ボランティアに対する撮影ならびに研究内容について、理化学研究所倫理委員会の承認の元に行われた。撮影に協力いただいた杏林大学放射線科、駿河台日本大学病院放射線科、ならびに被験者に謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] <http://www.digital-humans.org/main.htm>
- [2] <http://exploration.grc.nasa.gov/Exploration/Advanced/Human/Digital/>
- [3] <http://www.digital-humans.org/main.htm>
- [4] 長岡智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡邊聡一, 本間寛之, 鈴木保, 河合光正, 酒本勝之, 小川孝次: “日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発”, 生体医工学, vol.40, no.4, pp.45-52, 2002.
- [5] M. Iwamoto, et al.: “Development of a finite element model of the Total Human Model for Safety (THUMS) and Application to Injury Reconstruction,” IRCOBI, 2002.
- [6] 姫野龍太郎, 横田秀夫: “生体力学シミュレーション研究シミュレーションのためのボクセル人体モデルの構築”, 情報処理, vol.46, no.12, pp.1337-1342, 2005.
- [7] 横田秀夫: “VCAT 技術の開発”, 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究 (第4回), pp.49-51, 2004.
- [8] <http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/research/outline/team/05.php>
- [9] 牧野内昭武: “ポリウム CAD システムの意図するもの”, 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究 (第4回), pp.3-10, 2004.
- [10] 船井孝, 山口進吾, 鈴木敬明, 加藤俊文, 片岡弘之, 横田秀夫, 姫野龍太郎: “生体力学シミュレーションに向けた生体組織の物性値データベース作成とその応用例”, 理研シンポジウム 生体力学シミュレーション研究, pp.71-78, 2006.
- [11] <http://cfd-duo.riken.go.jp/cbms-mp/>
- [12] 船井孝, 長津義之, 山口進吾, 鈴木敬明, 加藤俊文, 片岡弘之, 横田秀夫, 姫野龍太郎: “超弾性を考慮した生体組織の物性値データベース構築”, 日本機械学会第20回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.231-232, 2008.
- [13] D.R. Carter and W.C. Hayes: “The Compressive Behavior of Bone as a Two-Phase Porous Structure,” Journal of Bone and Joint Surgery—Series A, vol.59, pp.954-962, 1977.
- [14] 小関, 北川, 伊能, 植: “X線CT画像に基づく骨体の個別モデリング手法に関する研究 (パーシャルポリウム効果の補正手法の提案)”, 日本機械学会論文集 A, vol.70, no.697, pp.1170-1177, 2004.
- [15] 西村, 村井, 常木, 大竹, 横田, 加瀬, 姫野, 牧野内: “VCADシステムによるテラレーメードインプラント制作システム”, 日本機械学会2006年度年次大会講演論文集5, pp.101-102, 2006.

横田秀夫 (Hideo Yokota)

1991年日本大学農獣医学部卒業, 1993年同大学大学院修士課程修了, 同年(財)神奈川科学技術アカデミー, 1999年から理化学研究所。現在, 生物基盤構築チームリーダー。北海道大学大学院客員助教授。博士(工学)(東京大学)。生体モデル構築に従事。日本機械学会, 日本生体医工学会等の会員。

姫野龍太郎 (Ryutarou Himeno)

1977年京都大学工学部卒業, 1979年同大学大学院修士課程修了。1979年日産自動車(株)入社。1998年から理化学研究所。現在, 情報基盤センター長。東京大学大学院客員教授, 工学博士(東京大学)。生体力学シミュレーションの研究に従事。日本機械学会, 計算工学会

等の会員。