

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560468

研究課題名（和文） 人体構造の防災用有限要素モデル化に関する研究

研究課題名（英文） Development of Cyber Dummy FE-Model for Evaluating Human Damage

研究代表者

長嶋 文雄（NAGASHIMA FUMIO）

首都大学東京・大学院都市環境科学研究科・教授

研究者番号：90094276

研究成果の概要：地震や津波などの自然災害や、車両・船舶の衝突、群集事故などの人為的な災害による被害軽減策を検討する上で、被災メカニズムの解明は重要な課題である。本研究は、バイオメカニクスや身体運動学の先端的な知見を応用して、災害で直接被害を受ける人体側からの視点による減災策の検討を試みるものである。3年間にわたる研究の成果として、防災用に特化したサイバー・ダミー（コンピュータでシミュレーション解析が可能な有限要素モデル）の開発を行い、日本人成人男性の平均身長を有する人体モデルを完成させた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成19年度	500,000	150,000	650,000
平成20年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：

科研費の分科・細目：工学分野、土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学（5202）

キーワード：サイバー・ダミー、防災用人体モデル、被災過程解明、有限要素モデル

1. 研究開始当初の背景

地震などの災害による人体の被災メカニズムの解明を行うための一つ的手段として、物理的なダミー人形を用いて実験を行う方法がある。自動車前面衝突用人体ダミー（Hybrid-II）を用いて実物大の木造2階建家屋の倒壊実験を行い、その適用性についての検証を行った例がある。しかし、(1) 既存の自動車衝突用ダミーでは、荷重を受けたあ

る部位が破壊することによって、他の部位が荷重を受けるような場合において、精密な計測が行えないこと、また、(2) この問題点を解決するために、人体に近い柔軟なモデルの開発を行うことが考えられるが、この場合は繰り返しの使用に耐えられないため実験コストが大きくなると予想されること、などの点に使用上の問題があり、現状では物理的なダミーを使用した被災メカニズムの解明に

はやや難がある。

物理的人体ダミーの代替案として人体構造の FEM モデルを用いた数値実験が考えられる。インパクトバイオメカニクス分野では、自動車衝突時の乗員の安全を検証する手段として、コンピュータによる数値シミュレーションが行われている。従前は簡便な FEM モデルとして、各部位を剛体で表し、それらを連結した剛体ダミー (multibody system のモデル化と同類) が用いられていたが、現在の先端的研究では人体構造を比較的忠実にモデル化した変形可能な有限要素モデルを用いたシミュレーションが主流となっている。これを研究代表者はバーチャルダミーと呼び、シェル要素とビーム要素で構成した胸部モデルについて検討してきた。しかし、より高精度のモデル化には、筋肉や臓器などの軟組織を含める必要があり、そのためには、複雑な形状をした部位のソリッド要素を半自動的に生成する手法の確立が不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究は、防災対策の一つとして、バイオメカニクスやキネシオロジー (kinesiology: 身体運動学) の先端的な知見を応用して、直接被害を受ける人体側からの視点による減災策の検討を試みるものである。直接被害を受ける人体側からの視点で安全性を考え、これを設計へフィードバックする手法を土木・建築分野で確立させるための基礎研究と位置づけることも出来る。このような手法は乗用車の設計で用いられているが、建設系では殆ど見受けられない。バイオメカニクスに関する研究は機械系で先行して行われて来ているが、情報量が非常に乏しく、ここでの課題であるバーチャル・ダミーモデルに関してもコンピュー

タ能力の制約などにより、未だ満足できるようなものとはなっていない。しかし、今後コンピュータの能力がマルチ・コア化などの先進技術により飛躍的に向上することになれば、高精度のモデル化が可能である。本研究課題は人体の高精度の有限要素モデル化を試みるものであり、将来的には全身モデルに発展させたいと思っている。また、研究成果は防災の専門家が利用できるだけでなく、被災過程のアニメーションを公開することなどにより、一般の人々の防災意識を高めることにも活用できるものと思われる。

3. 研究の方法

人体有限要素モデルの例としては、頭部と頸椎を詳細にモデル化した KTH (Royal Institute of Technology : スウェーデン) や FE model、Wayne State University (米国) の WSU Human Injury Investigation Model などがあり、全身モデルとしては、汎用衝撃解析 PAM-CRASH を用いてシミュレートする H-model や豊田中央研究所の THUMS などが挙げられる。しかし、H-model や THUMS は部分的にメッシュが粗く、使用に際しての制約が厳しく、また高額であるなどの問題点がある。したがって、現存するサイバー・ダミーをそのまま防災用に転用することは殆ど不可能である。

ハードウェアの分野では、最近の CPU のマルチコア化技術などによる計算機の性能向上が見られるものの、未だ十分な性能ではなく、したがって満足のいくモデル精度は得られない。本研究では、研究補助金で最新の CPU クロック数 3.6 GHz、記憶容量 3.0 GB の PC と汎用解析コード LS-DYNA を購入して解析を行ったが、この場合に計算可能な要素数は 20 万弱程度である。このため、現状

での人体 FEM モデルによる解析は、衝撃などの荷重による人体の損傷度の評価が主な用途になると考えられる。その評価も骨などの比較的剛性の高い部位は精密に行い得るが、臓器等の軟組織については難しい。ただ、人体のモデル化には多くの労力と時間がかかるため、今からその準備をしておく必要がある。

(1) 人体の形状データの入手方法

精密な人体 FE モデルを作成するためには、詳しい人体形状データが必要であるが、体内の筋や骨などの三次元形状の計測には多大な労力がかかる。CT スキャナーや MRI などを用いた人体の三次元モデル化には、被験者への X 線被爆や電磁波による健康問題があり、望ましい人体データを入手することは殆ど困難な状況にある。ただし、限られたデータであれば、有償、または無償で得ることができる。無償の人体形状データの例としては、

(独) 情報通信研究機構が有する数値人体モデルデータベースがある。このデータベースは、携帯電話使用時に電磁波が人体に与える影響を計算するために作成されたものであり、日本人の平均的な体形を有する成人男女の MRI 断面画像から作成されている。要素は 1 辺が 2 mm の立方体であり、総要素数は男性モデルの場合で 44,339,200 要素である。また、これらの要素は、骨や心臓、肺などの内臓など 50 以上の部位に分類されている。しかし、現状で、この膨大な要素数の解析を PC 上で行うのは困難であり、実際の使用に際してはデータの加工をして要素数を減らし、さらに平滑な曲面に変換する必要がある。本研究ではこの点についても検討を行った。

有償の人体形状データの例としては、コンピュータ・グラフィックス関連の三次元データを用いることである。人体のデータ (anatomy data) については、全身モデルや、

腕部・脚部だけのモデルなど多種が用意されている。本研究ではこれらの中から、臓器なども含む全身モデルを入手し、このデータを元にして人体 FEM モデルの開発を行った。全ての部位が三角形 3D-Surface と呼ばれる要素で構成されており、この三角形の総数は 271,512 個、頂点の数は 227,980 個である。また、筋肉や臓器、骨などが 230 種のグループに分けられている。

「平成 15 年度国民健康・栄養調査報告」における、日本人の世代別身長・体重の平均値によれば、20 歳代における身長の平均は約 1710 mm である。本研究では、オリジナルデータの寸法を調整して、身長 1716 mm のモデルを作成した。

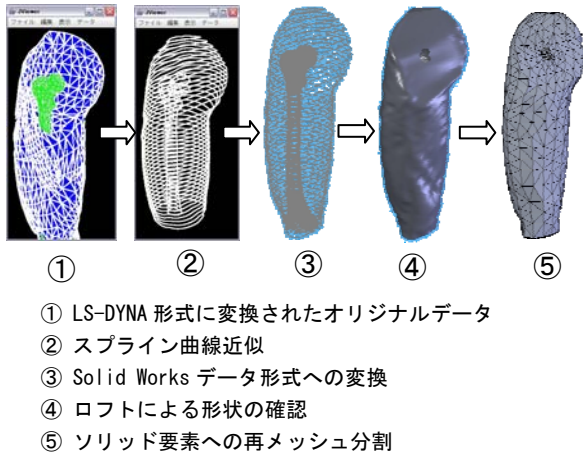
(2) 人体形状データのデータ変換

入手した人体形状データは DXF 形式のデータであり、有限要素として使用するためには、データの変換を行う必要がある。DXF 形式ファイルから汎用解析コード LS-DYNA での読込が可能な形式に変換するプログラムを JAVA で作成した。

(3) 筋肉のソリッド要素生成方法

図-1 に、大腿部を例として、半自動的にソリッド要素 (大腿部筋肉) を生成する手順を示す。DYNA 形式へ変換した後のデータ①は、オリジナルデータと同様に三角形シェル要素となっている。大腿部筋肉は、いずれも三角形シェル要素で構成される大腿骨表面と筋肉表面で囲われた空間内にソリッド要素として生成する必要があるが、両者のメッシュの大きさや分割の状況が異なるために、どんなに手間を掛けてもメッシュ分割するのは殆ど不可能である。そこで、大腿骨表面と筋肉表面を適当な間隔に輪切りにし、断面形状を閉スプライン曲線で近似的に表す方法②を考案した。このようなスプライン曲線群を与えることにより③、3次元設計ソフト Solid Works

に付属している機能でロフト④と呼ばれる閉曲面が作られる。この段階に至れば、任意の基本要素長を与えることによって自動的に四面体要素にメッシュ分割することができる⑤。



- ① LS-DYNA 形式に変換されたオリジナルデータ
- ② スプライン曲線近似
- ③ Solid Works データ形式への変換
- ④ ロフトによる形状の確認
- ⑤ ソリッド要素への再メッシュ分割

図-1 軟組織の半自動的メッシュ分割の流れ

(4) 閉スプライン曲線の求め方

閉スプライン曲線は切断面上にある点列データを与えることによって生成される。点列データは三角形シェル要素ABCと切断面 Π が交差するときに行ける線分の両端点p, qの空間座標値で構成される(図-2 参照)。これは次のような手順で求められる。

- 1) 切断面の法線ベクトルと三角形要素の3辺それぞれの方向ベクトルの内積から、両者の交点の存在の可能性を調べる。
- 2) 交点の存在の可能性がある場合に、三角形要素の辺上に交点が存在する調べ、ある場合には交点(辺の内分点)の座標を求める。
- 3) 以上の作業を、部位を構成する全要素について繰り返し、切断面上の断面形状(多角形)を表す頂点のデータ列を求める。

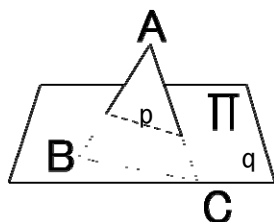
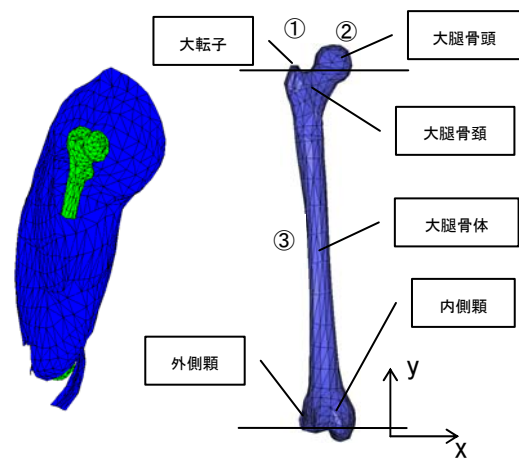


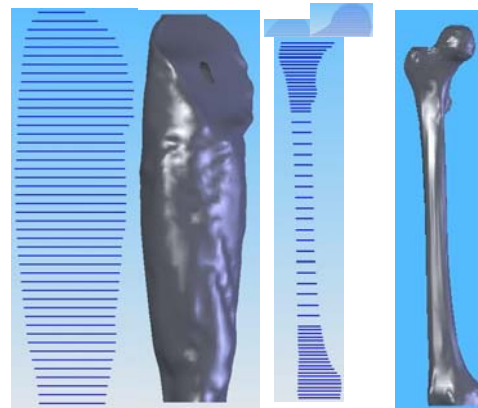
図-2 スプライン曲線の点列データ作成説明図

(5) 半自動メッシュ生成の例

大腿部のロフトを作成するためのスプライン曲線の形状データを得るために、図-3(a)に示すようなオリジナルの大腿骨のデータを同図(b), (c)に示すように輪切りにする。大腿骨上部は二股に分かれており、球状で大きい部分は大腿骨頭、小さい部分は大転子である。同一切断面上に複数のスプライン曲線を作ることができないので、ここでは、二股部分よりもやや下の部分で上下を分割してロフトを作成した。



(a) 大腿部のオリジナル形状データ



(b) 筋肉のスプラインとロフト (c) 大腿骨のスプラインとロフト

図-3 大腿部のロフト作成過程説明図

ロフトは、互いに組み合わせることや除去することも可能であり、大腿部筋肉のロフトから大腿骨のロフトを取り除くことになる。作成した大腿骨のロフトを図 3(b), (c)に示す。このようにして作成したロフトは、平均

的な要素長を与えることによって自動的に4節点ソリッド要素にメッシュ分割される。

関節部の連結にはポールジョイント要素(spherical joint)、ピン連結要素(revolute joint)などのジョイント要素を用いた。各ジョイントには、それぞれ伸展方向を正、屈曲方向を負として表す特有の可動域と関節の粘性抵抗および非線形回転抵抗トルクを与えている。

4. 研究成果

人体FEMモデル作成に不可欠な基盤技術の開発に成功した。一つは、人体形状データの入手方法とその変換手法である。入手データはDXF形式であり、本研究で用いた汎用解析コードLS-DYNAの形式に変換が必要であったため、変換用のアプリケーションをJAVAで作成した。次に、軟組織の半自動メッシュ分割手法を開発した。ここでは3次元設計ソフトの、ソリッド要素のメッシュ自動分割機能を利用したモデル化を行うことでこの課題を解決した。メッシュ自動分割機能を用いるためには、人体形状データをロフトと呼ばれる形式に再構築する必要があり、この変換を行うアプリケーションを開発した。また、汎用解析コードへのデータ変換手法の構築もするなど、ソリッド要素による筋肉のモデル化に必要な一連の手法を確立した。本研究課題の当初の目的は、胸郭部と大腿部のモデル化であったが、予想以上に研究が進み、最終的には右半身モデルを完成させた。各部位のメッシュ分割は、詳しいスプライン曲線のデータが保存されているので、将来のコンピュータ性能の向上に応じて、任意の要素寸法で離散化することができる。

以下に、作成した半身モデルを示す。

(1) 下肢部モデル

下肢部モデルは、大腿部、下腿部、腰部、足

部から成り、股関節、膝関節、足関節の3箇所

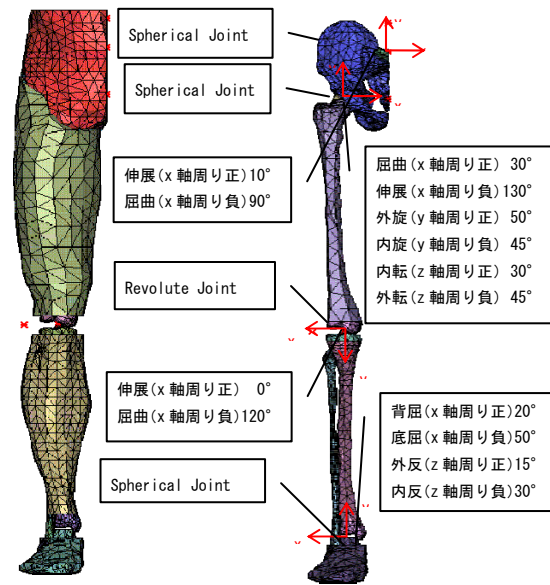


図-4 連結された右足のモデル

(2) 上肢部モデル

上肢部モデルは、上腕部、前腕部、手部から構成される。ジョイントは、上腕部-前腕部間の肘関節と、前腕部-手部間の手関節に設置した。

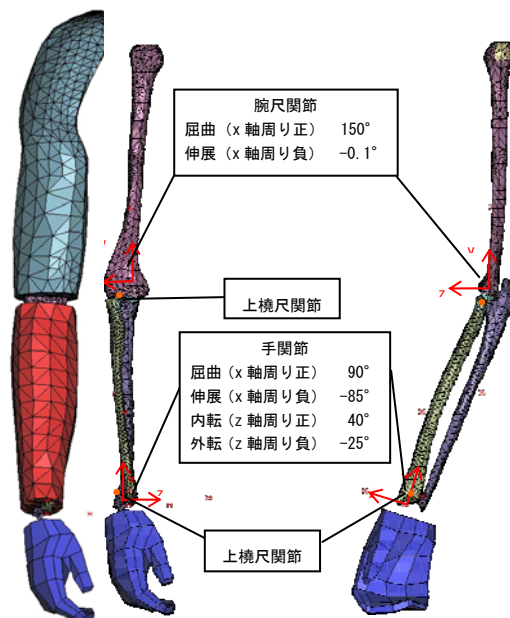


図-5 自由上肢の連結

手関節は顆状関節であり屈曲、伸展、外転(橈

屈)、内転(尺屈)が可能である。

(3) 胸部・頭部モデル

胸部・頭部モデルは、24個の椎骨と12本の肋骨、肋軟骨、胸骨、鎖骨、肩甲骨、頭蓋骨、下顎骨から成る。肋軟骨-胸骨-肋骨間は節点を共有させて連結した。肋骨と胸椎間の連結は、靭帯で強靭に結合されていることから、シェル要素を用いて連結した。胸郭と鎖骨は、胸鎖靭帯と肋鎖靭帯で連結されている。また、鎖骨と肩甲骨は、肩鎖靭帯、円錐靭帯、菱形靭帯に相当するシェル要素で連結した。図-6に、作成した頭部・胸部モデルの正面図と背面図を示した。

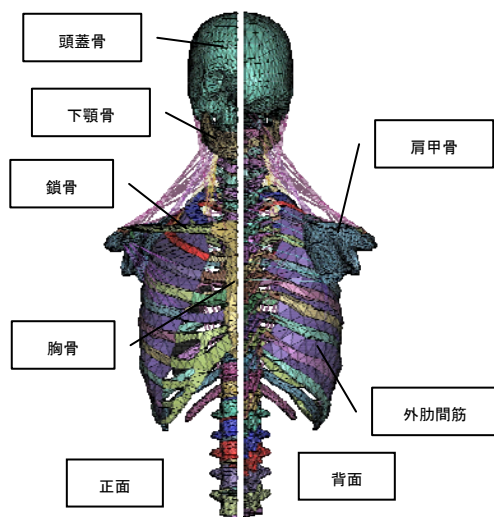


図-6 胸部・頭部モデル

(4) 今後の展望

本研究課題をさらに発展させることにより、建設系における初めての試みとして、直接被災する人間の安全性向上の観点から構造物の終局状態を考える設計手法を提案することができると思われる。

本研究は、医学、工学、社会学などの専門知識を必要とする学際的な研究であり、倫理問題など難しい問題を含む課題であるが、世界的にも珍しく、今後の発展が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

(1) 長嶋文雄・尾崎潤・生田英輔・宮野道雄: パーチャルダミーによる胸部圧迫-変形挙動のパラメータ解析、安全工学シンポジウム2007講演予稿集、pp. 111-114 (2007)、査読有

(2) 尾崎潤・長嶋文雄: 防災用サイバー・ダミーの有限要素モデル生成手法に関する検討、土木学会地震工学論文集、第29巻、pp. 926-933, (2007)、査読有

(3) 長嶋文雄, 尾崎潤, 生田英輔, 宮野道雄: スプライン曲線群を用いたサイバー・ダミーのモデル化手法、スプライン曲線群を用いたサイバー・ダミーのモデル化手法、安全工学シンポジウム講演予稿集、pp. 307-310, (2008) 査読有

(4) 宮野道雄, 生田英輔, 長嶋文雄, 田中裕, 梶原浩一, 奥野倫子: 地震時の人体被災度計測手法の開発-胸部圧迫実験用ダミーの作製-, 地域安全学会論文集、No. 10, pp. 49-54 (2008)、査読有

〔学会発表〕(計3件)

(1) Eisuke Ikuta, Michio Miyano, Fumio Nagashima and Jun Ozaki: Framework of Biomechanical Modeling for Evaluating Human Body Damages Caused by Collapsed Building in Grate Earthquake, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, ID 1815 (CD-ROM), Geneva, Switzerland (2006)、査読無

(2) Fumio NAGASHIMA and Jun OZAKI: Framework of Development of Cyber Dummy FE-Model for Evaluating Human Body Damage, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Oct. 12-17, Beijing, China (2008)、査読無

(3) 生田英輔, 宮野道雄, 長嶋文雄, 田中裕, 梶原浩一, 小中良太, 長江拓也, 大西一嘉: 地震時の人体被災度計測手法の開発-衝撃荷重による大腿骨骨折の基礎的検討-, 第23回地域安全学会研究発表会梗概集、pp. 103-104 (2008)、査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長嶋文雄 (NAGASHIMA FUMIO)

首都大学東京・大学院都市環境科学研究科・教授

研究者番号: 90094276

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

以上