

## シェル要素を用いた胸郭バーチャルダミーモデルの開発

東京都立大学大学院工学研究科 正会員 ○長嶋 文雄  
 大阪市立大学大学院生活科学研究科 正会員 宮野 道雄  
 大阪市立大学大学院生活科学研究科 生田 英輔

### 1. はじめに

人体の Multi-body モデル（剛体をばねなどで連結したモデル）に代わるバーチャルダミー有限要素モデルは、自動車の衝突安全性検討や医療分野への利用などに止まらず、様々な自然災害や人為的災害の軽減化対策に利用できるため、目的に即したオリジナルモデルの開発は今後の重要な研究テーマの一つであると思われる。応用可能分野を思いつくままに列挙しても、震災・水害・火災・群集事故などによる被害の軽減対策、公共交通機関の安全性検討などが挙げられる。また、文献 1) のように、直接被災する人間の観点から構造物の耐震性向上策を検討しようとする試みや、家具転倒や落下物による被害の軽減に役立てようとする試みもある。

本報告は、倫理上の問題などがあって入手困難な人体データの生成方法を含めた現状におけるバーチャルダミーの開発手法と今後の展望について、文献 1) に関連して、主に胸郭モデルを例に挙げて述べたものである。

### 2. バーチャルダミー有限要素モデル開発の現状と意義

人体のバーチャルダミーによるシミュレーション解析は、コンピュータの処理能力上の制約により、従来は、Multi-body モデルを用いたものが主流であった。しかし、最近、RAM や HD が非常に安価となって大量のデータを扱うことが可能となり、またコンピュータの処理速度も向上してきたため、漸く一般的な有限要素モデルを用いた人体のシミュレーション解析を可能とする環境が整ってきた。

交通事故傷害や衝突安全性の問題を扱う、インパクトバイオメカニクス(Impact Biomechanics)分野においても、数年前からは頭部などの部位レベルではあるが、脳などの軟組織を含めた非常に精緻な有限要素モデル開発についての報告例が見られる。この種の問題は、複合領域分野であるため、また、倫理上の問題などがあってデータの入手や扱いが困難であるが、災害対策や構造物や交通機関の安全性を人体側からの視点で検討するためには必要不可欠な技術分野の一つである。

### 3. バーチャルダミー有限要素モデル開発手法

文献 2) を参考にして、市販の人体骨格データ (XDF 形式) を入手し、データの有用性の検討や有限要素データへの変換方法の検討を行った。入手データは、図-1 に示すような Human thorax (Medium) であり、全部で 27 のパーツ；頸椎(C1～C7)、胸椎(T1～T12)、腰椎(L1～L5)、肋骨(RA1)、肋軟骨(RB1)および胸骨(S1)から成る。これを元に、汎用衝撃応答解析コード LS-DYNA とプリ・ポストプロセッサ JVISION を用いた解析を試みた。DXF ファイルを解読した結果、表面データは、3D-Surface という 3 節点で構成される要素の集合であることが判り、Excel 上の Visual Basic のマクロ命令により、各節点の空間座標値を Excel データとして取り出した。テキストデータに変換後、FORTRAN で LS-DYNA 形式データへの変換を行った。

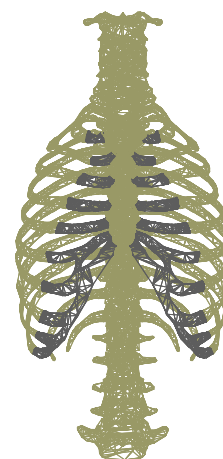


図-1 DXF 形式胸郭データ

骨は、表層の皮質骨と呼ばれる密な骨と、内部にある海綿骨と呼ばれるスポンジ状の骨で構成される。皮質骨を取り除いたときの強度低下はそれほど大きくないため、骨は海綿骨よりも多少高めの剛性を有するソリッド要素でモデル化するのが良いと思われるが、要素数が増えること、表面データからの作成に非常に手間が掛かることなどの理由により、ここではシェル要素でモデル化を行った。シェル要素の強度はシェル厚と剛性によって定まるが、シェル厚をあまり厚くしないために、剛性には皮質骨の剛性に近い値を用い、そのときの

キーワード: バーチャルダミー, インパクトバイオメカニクス, 公共交通災害, 地震防災, 胸郭モデル

連絡先: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻 Tel.0426-77-1111(4531)

シェル厚を圧縮試験シミュレーションによって換算した。椎骨の強度に関するデータ（表-1）に基づき、図-2に示すような载荷装置をモデル化して圧縮強度試験シミュレーションを行った。図-3は12番目の胸骨(T12)のシミュレーション結果を示したもので、縦軸の応力は载荷装置のものである。シェル厚を変化させながら以上のような作業を繰り返して、5種類の椎骨 C3, T1, T8, T12, L5 について等価なシェル厚を決定した。椎骨は下部になるに従って大きさが増し、強度も上がる。算定したシェル厚を C3 のものを基準に無次元化したものと椎骨の各種寸法（W:幅, D:奥行き, H:高さ, A:受圧面積, V:体積, Sqrt(A):面積の平方根,  $V^{1/3}$ :体積の3乗根）との相関性を調べたところ、図-4に示すように、体積の3乗根との相関が最もよかった。この結果に基づき、上記の5種類以外の骨を図-5に示すように採寸し、比例計算により他の骨のシェル厚を決定した。

骨の歪み速度効果については、大腿骨の皮質骨の高速圧縮試験結果などがあり、歪み速度が高くなるにつれて弾性係数と強度が伴に高くなる、いわゆる歪み速度依存性が認められている。これをもとにして、降伏応力・最大応力とひずみ速度との関係を調べた結果、骨のひずみ速度依存性は、下式に示すようなクーパー・シモンズ式を用いたモデル化が可能であることが分かった。

$$s_y = s_{y0} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C_y} \right)^{\frac{1}{P_y}} \right] \quad \dots (1), \quad s_u = s_{u0} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C_u} \right)^{\frac{1}{P_u}} \right] \quad \dots (2)$$

ここで、 $s_y, s_u, \dot{\epsilon}$  は降伏応力、最大応力、歪み速度であり、 $s_{y0}, s_{u0}, C_y, C_u, P_y, P_u$  はそれぞれ、77, 108, 1.05, 1.25, 9, 12 となった。上式と実験値の比較を図-6に示す。図-7はLS-DYNA用にデータ変換された胸郭部の3次元モデル図である。

表-1 椎骨の圧縮強度

|         | (kN) | (kgf) |
|---------|------|-------|
| 類椎 C-3  | 1.5  | 153.1 |
| 胸椎 T-1  | 2.0  | 204.1 |
| 胸椎 T-8  | 2.5  | 255.1 |
| 胸椎 T-12 | 3.7  | 377.6 |
| 腰椎 L-5  | 5.7  | 581.6 |

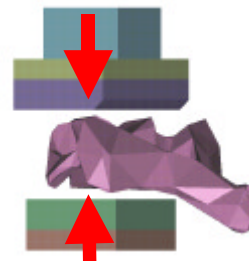


図-2 圧縮試験装置図

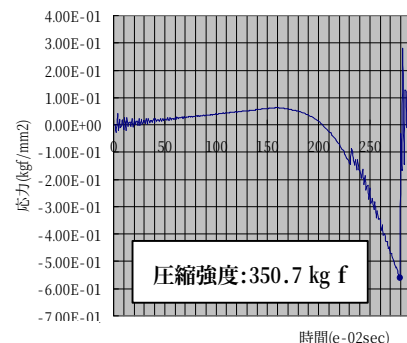


図-3 椎骨の圧縮強度解析結果

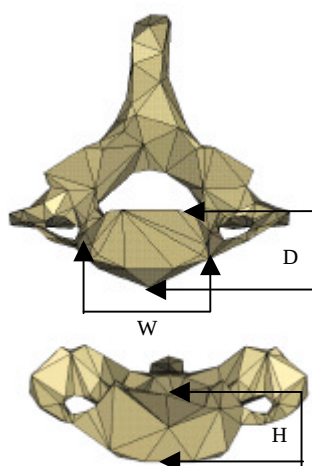


図-5 椎骨の採寸方法

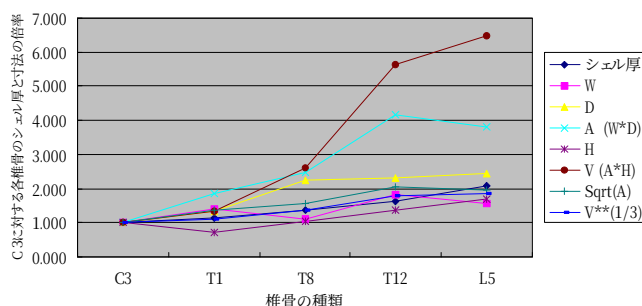


図-4 椎骨のシェル厚と寸法との相関

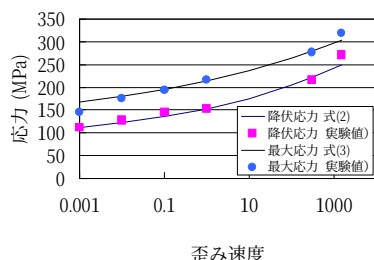


図-6 皮質骨の歪み速度効果

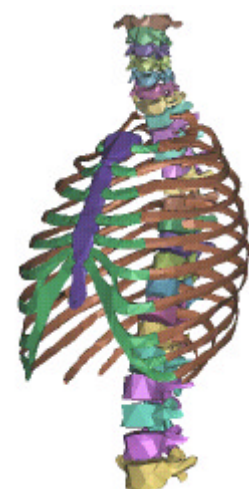


図-7 最終的な胸郭モデル

#### 4. おわりに

バーチャルダミーの開発に関する検討を行った。用いたデータは、市販の骨格データであるが精度は高く、その利用価値が認められた。ただし、演算刻みを左右する非常に細かい要素も多く含まれているため、これらの扱いが厄介であることと、ポリゴンデータであることに注意すべきである。

【参考文献】 1) 土木学会技術推進機構：科学技術振興調整費による総合研究、構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究、平成14年度報告書、平成15年3月。2) 竹内他：脊柱突発性側彎症の成因に関する計算力学的研究、日本計算工学会、2002年2月。