

## 有限要素法を用いた大腿義足ソケットの定量的解析と評価

## The quantitative analysis and evaluation of prosthetic sockets

## for trans-femoral amputees using finite element methods

○ 田山文子 (芝浦工業大学) 大西謙吾 (東京電気大学) 大塚博 (人間総合科学大学)

東江由起夫 (新潟医療福祉大学) 花房昭彦 (芝浦工業大学) 山本紳一郎 (芝浦工業大学)

Fumiko Tayama, Shibaura Institute of Technology  
 Kengo Onishi, Tokyo Denki University  
 Hiroshi Otsuka, University of Human Arts and Sciences  
 Yukio Agarie, Niigata University of Health and Welfare  
 Akihiko Hanafusa, Shibaura Institute of Technology  
 Shinichiro Yamamoto, Shibaura Institute of Technology

**Abstract:** The prosthetic sockets are produced by manually Prosthetist and Orthotist (PO). The beginner of PO is necessary a long time experience to get product skill. Therefore, the produced sockets depend on PO's empirical knowledge. We made finite element (FE) model using residual limb's internal tissues from MRI data, simulated pressure occurring residual limb's surface. The purpose of this study is to compare the relationship between FE analyzed pressure and experimental result from pressure sensor. There is a high positive correlation between FE analysis and experimental result. We could evaluate FE analysis's advantage and appropriation.

**Key Words:** prosthetic sockets, trans-femoral amputees, FE analysis

## 1. 研究背景・目的

現在の義足ソケットは、切断者各人に適合するものを義肢装具士の手作業で製作しているため、提供するまでに時間を要する。また、製作技術を獲得するには長期に及ぶ経験が必要となり、製作するソケットの断端への適合性は義肢装具士の熟練度に依存する<sup>(1)</sup>。そのため、それらの要因に影響されない適合性の高い義足ソケットの製作方法の確立が望まれる。本研究では、MRI から取得した内部組織のデータより有限要素 (FE) モデルを作成して、断端の皮膚表面に発生する圧力をシミュレーションした結果と、力覚センサを用いた圧力計測実験の結果を比較した。

## 2. 計測対象

被検者は左大腿部切断者 1 名 (年齢 38 歳, 身長 169[cm], 体重 65[kg], 義足使用歴 8 年), 製作者は製作歴 26 年の義肢装具士 1 名である。計測に使用した UCLA ソケットは、目標周径と断面形状の特徴を把握して陽性モデル修正に焦点を当てて製作されるものであり、前後方向に径が広く、内外方向に径が狭い形状をしている。

## 3. 解析方法

断端の MRI を股上位の位置から断端末端までを輪郭抽出範囲とし、Voxar3D (Barco 社製) を用いて大腿骨形状を基準に矢状面と前額面の位置合わせを行い、水平面の間隔 10[mm]のスライスデータを取得した。10[deg]間隔に放射状の補助線を引き輪郭と交差する部分をプロットしスプライン関数近似によってデータ補間を行った。その際、骨の輪郭の中心座標を原点として断端全体を扇状に分割することで座標データを取得した。これを LS-DYNA (リバモア・ソフトウェア社製) を用いて FE モデルを作製し、ソケット非装着時の断端形状がソケット装着時の断端形状に変形する際に発生する圧力をシミュレーションし評価を行った。FE モデル作製時の生体組織は、皮膚、脂肪、筋、骨の 4 つとし、その生体材料特性に関しては、先行研究<sup>(2) (4)</sup> の報

告を参照した (Table.1).

Table 1 Material property of tissues in the trans-femoral model

| Tissues | Element | Material | Density [kg/mm <sup>3</sup> ] | Young's Modulus [MPa] | Poisson's Ratio |
|---------|---------|----------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Skin    | Solid   | Elastic  | 0.906E-09                     | 0.5                   | 0.49            |
| Fat     |         |          | 0.906E-09                     | 0.5                   | 0.49            |
| Muscle  |         |          | 1.051E-09                     | 1                     | 0.49            |
| Bone    | Shell   | Rigid    | 4.00E-09                      | 17700                 | 0.3             |
| Socket  |         |          | 5.20E-09                      | 1886                  | 0.39            |

## 4. 解析条件

- \*ソケット装着時及び立位時に断端に発生する圧力を模擬
- ・解析時間: 2 [s]
- ・拘束条件: 断端 - 全並進回転無拘束  
ソケット - X-Y-Z 並進回転拘束
- ・荷重条件: 自重 - 9.8 [m/s<sup>2</sup>]  
被検者荷重 - 32.5 [kg] (=1/2W) 骨頭に付加
- ・摩擦: 静摩擦・動摩擦共に 0.1
- ・時間増分: 0.01
- ・ダンパー: 10 [%]
- ・接触判定: 0 ~ 1.0 × 10<sup>28</sup> [s]
- ・ペナルティー係数: 1.0
- ・計測: 節点接触力
- ・アワグラス: 断端軟組織 - 粘性型  
骨・ソケット - 剛性型

## 5. 結果

力覚センサを用いて、近位 (坐骨結節より遠位 40[mm]), 遠位 (坐骨結節より遠位 140[mm]) 各 4 か所 (前後内外) の計 8 か所の位置で計測した断端に対し法線方向の圧力と、

それとほぼ同位置あたりの FE モデルの節点接触力を要素面圧に変換し圧力とした値を比較した（杉本の報告を引用する）. FE 解析では、前方近位及び内側近位で高い圧力の分布を示し、実測値ではFE解析の結果と同様の部位に加え、外側遠位及び後方遠位にも高い圧力が分布することが分かった. また、FE 解析の結果と実測値の結果の相関をとった結果、両者間に高い正の相関を見出すことができ圧力の分布傾向に類似性があることを示唆した.

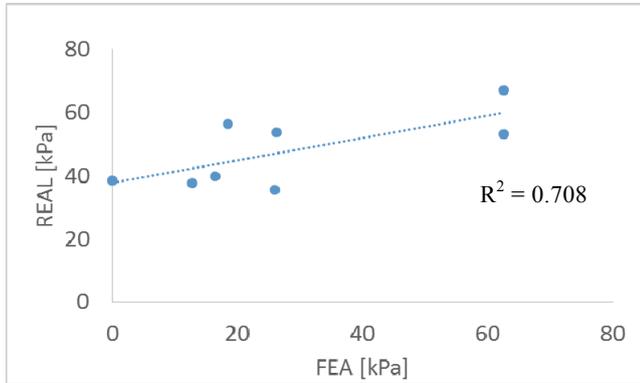


Figure 1 FEA-REAL correlation

〔 FEA : finite element analyzed pressure  
REAL : experimental result from pressure sensor 〕

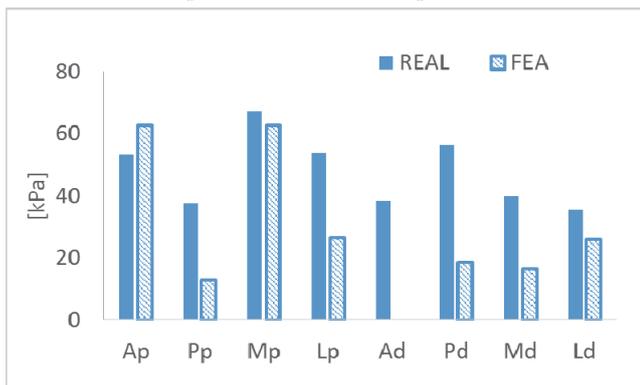


Figure 2 FEA-REAL pressure distribution

〔 Ap : Anterior proximal Pp : posterior proximal  
Mp : Medial proximal Lp : Lateral proximal  
Ad : Anterior distal Pd : posterior distal  
Md : Medial distal Ld : Lateral distal 〕

## 6. 考察

先行研究<sup>(3)</sup>の実施した下腿切断者を対象とする内部軟組織の力学的作用に関する報告では、脛骨遠位及び腓骨遠位の内外側方向の筋組織に大きな圧力が作用することを明らかにした. また、先行研究<sup>(4)</sup>も下腿切断者を対象としてFE解析と実測値との比較を行ったところ、両者の結果に類似傾向を見出し、前後方向よりも内外側方向の方が高圧力であることを報告した. 本研究では大腿切断者を対象として実施したため、先行研究<sup>(3)(4)</sup>と切断部位は異なるが、体重支持基点（下腿:膝蓋骨・膝窩、大腿:坐骨結節・大腿骨長軸）として設定した位置付近の軟組織に高い圧力が分布するという点に関して、両先行研究と同様の傾向があるのではないかと考えられる. 通常、静止立位時の体重心は義足よりも内側にあるため、ソケット内では坐骨結節を支点とした反時計回りの力が骨盤に働く. この力は、骨盤を内側方向へ移動させるように働き、同時に大腿骨を外転させるように作用するため、側方安定性を低下させ、立脚期には過

剰にその影響を及ぼす (Figure.3). 本研究で使用した UCLA ソケットの設計理論としては、大転子上部、ソケットに包み込まれた坐骨枝、ソケット外壁から大腿骨への Counter force による 3 点固定の原理によって他動的に大腿骨に内転位を与え、側方への安定性を高める機能を有することが考えられてきた. また、骨盤の内側方向へのシフトは、坐骨結節内側と大転子直下間の骨内外側方向からの力によって大腿骨と骨盤をしっかりと固定することで防ぐことができると考えられてきた (Figure.4). 今回の解析結果からは、ソケット装着時に各ソケットの設計理論を反映するような作用が生じ、大腿骨を内転させるためにそこに大きな圧力が発生するのではないかと考えられる.

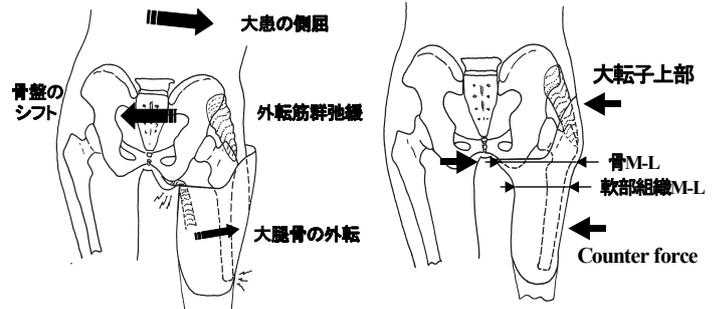


Figure 3 Abduction of femur Figure 4 Theory of 3 point fix

## 7. まとめ・展望

本研究では、FE 解析を用いて、現状に近いソケット装着時及び立位時の条件設定を検討した. また、FE 解析で求めた断端に発生する圧力と実測の圧力を比較し、両者の相関を調べた. 今回のシミュレーションでは、荷重によってソケットに断端を収納しているが、実際には摩擦抵抗の低い布を断端に巻きソケット装着後、ソケット遠位に開けられた穴から布を引き出し断端とソケットを密着させている. そのため、今後は断端とソケットの密着の方法について検討する必要があると考える. そして、FE 解析結果と実測値の圧力比較では、両者の圧力分布に類似性を見出すことができ先行研究との一致を図ることができた.

今後の課題としては、現状に近い境界条件を明確に設定できていない可能性があるため、FE 解析結果の妥当性の評価を行っていきたい. また、歩行時のパラメータ（関節可動域、関節モーメント、床反力等）を用いて、歩行シミュレーションに応用させていきたいと考える.

## 参考文献

- (1) 東江由起夫, 2007年  
日本義肢協会関東支部セミナー資料
- (2) C.Mario, Medical, The quasi-static response of compliant prosthetic sockets for transtibial amputees using finite element methods  
Engineering & Physics, 114-121, 2006
- (3) S.Portnoy, Internal mechanical conditions in the soft tissues of a residual limb of a trans-tibial amputee  
J.Biomechanics, 1897-1909, 2008
- (4) J.C.H.Goh, Development of an integrated CAD-FEA process for below-knee prosthetic sockets,  
Clinical Biomechanics, 623-629, 2005