

CT画像に基づく代替動物大腿部有限要素モデルを用いた皮下出血の発生メカニズム解析

Occurrence mechanism of soft tissue bruise injury used by porcine thigh finite element model

寺門仙太郎¹⁾, 杉浦隆次²⁾, 西本哲也³⁾

Sentaro Terakado, Ryuji Sugiura and Tetsuya Nishimoto

1) 日本大学大学院 工学研究科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1, E-mail: cese21001@g.nihon-u.ac.jp)

2) 博(工) 日本大学 工学部 教授 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1, E-mail: sugiura.ryuujii@nihon-u.ac.jp)

3) 博(工) 日本大学 工学部 教授 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1, E-mail: nishimoto.tetsuya@nihon-u.ac.jp)

Limitation of mechanical inputs on human-robot interaction should be clarified for human safety. In vivo impact test assuming human-robot interaction has been conducted using live porcine and drop weight impact tester in order to obtain bruise injury criteria. As a results, bleeding was found to occur at the part of adipose tissue and muscle. In this study, 3-dimensional finite element analysis were conducted on porcine thigh finite element model based on CT images. Moreover, bruise injury mechanism was discussed by comparing analytical results with experimental results.

Key Words : Personal Care robot, Bruise Injury, Soft Tissue, Finite Element Analysis

1. 緒言

生活支援ロボットは、少子高齢化による介護人材の不足を補う手段として、介護現場等での活躍が期待されている。この生活支援ロボットの安全設計および運用のためには、ロボットがヒトに危害を加えないとする出力エネルギーの制限値を明らかにする必要がある。

Fujikawaら[1,2]およびSugiuraら[3,4]は、ヒトとロボットが接触した際に発生する皮下出血に着目し、代替動物を用いたIn vivo衝撃実験による出血耐性評価を行っている。本研究では、代替動物のCT画像に基づいて構築した有限要素モデルを用いた3次元有限要素解析を行い、皮下出血の発生メカニズムを明らかにする。

2. In vivo衝撃実験とその結果

Fujikawaら[1,2]およびSugiuraら[3,4]は、図1に示す落錘型およびMarmarou型[5]衝撃試験機を用いてIn vivo衝撃実験を行った。これらの試験機は、重錘質量 $m[\text{kg}]$ と落下高さ $h[\text{m}]$ の組み合わせにより供試体に衝撃を負荷する機構となっている。供試体には、ヒトとブタの皮下組織構造が類似しているという報告[6]に基づいてブタを選定した。衝撃負荷部位は、代替動物の前・側腹部および大腿部の2部位を選定した。この衝撃負荷部位を図2に示す。供試体に衝撃を負荷した後に、衝撃箇所を採取し、HE染色を施した。これにより、出血(血管外に漏出した赤血球)の有無の特定を行った。この染色観察例を図3に示す。出血の有無の調査の結果、出血は脂肪組織および筋肉層に好発することがわかった。また、大腿部は、腹部よりも出血発生に要するエネルギーが極めて低く、大腿部は腹部に比べて出血しやすいことが明らかになっている[3]。

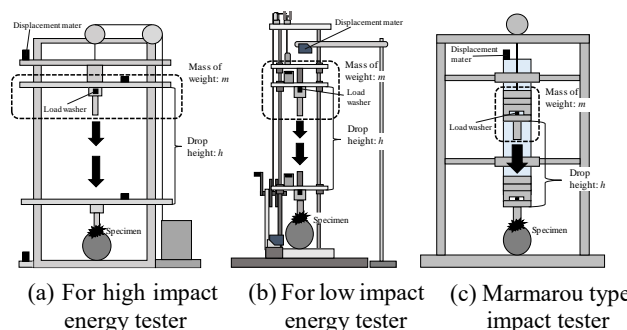


Fig.1 Schematic illustration of the drop weight impact tester

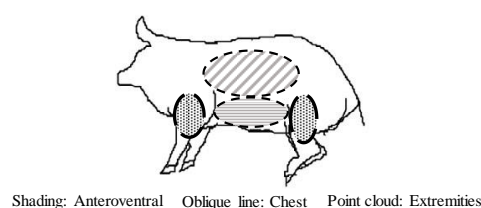


Fig.2 Schematic illustration of the impact area

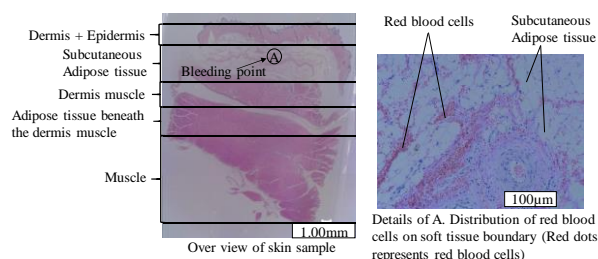


Fig.3 Observational results of hematoxylin eosin stains

この実験は、承認番号 AP15EN001-2 号および

AP19CEB001-3号として、日本大学より動物実験の了承を得ている。

3. 代替動物大腿部を対象とした有限要素解析

本研究では、腹部に比べて出血耐性値が低く、出血しやすい大腿部を対象とした3次元有限要素解析を行い、衝撃による皮下出血の発生メカニズムを明らかにする。

(1) 代替動物大腿部有限要素モデルの構築

代替動物大腿部有限要素モデルを構築するために、代替動物大腿部のCT撮影を行った。このCT撮影には、Revolution ACT (GE HealthCare, IL, USA)を用い、スライス厚さは1.25mm、画像サイズは512×512とした。このCT画像の一例を図4に示す。CT撮影によって得られた394枚のCT画像から皮膚、脂肪、筋肉、骨の3次元形状を3D-Slicer [7]を用いて抽出した。抽出した3次元形状に基づいて、メッシュをHypermesh (Altair, Troy, MI, USA)を用いて生成した。構築した代替動物大腿部有限要素モデルを図5に示す。このモデルの総節点数は281467、総要素数は1428650である。ここで、実験時の代替動物大腿部固定台を再現するために、剛体床を設置している。インパクトモデルは、実際の衝撃実験に用いたインパクトの形状を模しており、先端形状は直径25mm、先端にR2.5mmが施されている。なお、インパクトモデルと骨は軟組織と比較して十分に剛性が高いことから剛体とした。

(2) 構成則

代替動物大腿部有限要素モデルにおける皮膚、脂肪、筋肉の構成則には、Ogdenモデル[8]とProny級数を組み合わせた一般化Maxwellモデルを用いた。OgdenモデルとProny級数は式(1)、(2)でそれぞれ定義される。

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 \right) \quad (1)$$

$$g(t) = g_{\infty} + \sum_{i=1}^N g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2)$$

ここで、 W はひずみエネルギー密度関数[J/m³]、 λ は主伸比[-]、 μ [Pa]および α_i は材料定数、 g_i は緩和係数[-]、 τ_i は緩和時定数[s]である。式(1)における μ_i 、 α_i は著者らの先行研究[9]と同様のものとし、式(2)における g_i および τ_i はHiguchiら[10]の報告に基づいて決定した。皮膚・脂肪・筋肉の質量密度は 1.0×10^{-6} kg/mm³とし[11]、ポアソン比は非圧縮性を仮定して0.499と一定とした。

(3) 解析条件

解析条件は、モデル化した実部位に与えた実験条件に基づき、質量2[kg]のインパクトモデルが初速度2.89[m/s]で強制落下するものとした。なお、解析にはPAM-CRASH ver. 17.5 (ESI Group, Paris, France)を用いた。

4. 解析結果

解析より得られた荷重変位特性を実験結果と合わせて図6に示す。図6より、解析における荷重および変位は実験



Fig.4 CT image of porcine thigh

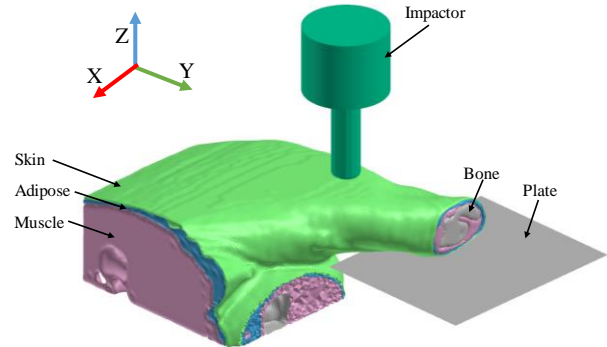


Fig.5 Porcine thigh finite element model

結果よりも高い値を示すが、本研究で構築した有限要素モデルは実験結果を概ね再現していると考えられる。

図7に示す断面位置における相当応力分布と相当ひずみ分布を図8、9にそれぞれ示す。図8は相当応力が最大値を示す時刻付近である16.8ms時の相当応力分布、図9は相当ひずみが最大値を示す時刻付近である20.2ms時の相当ひずみ分布をそれぞれ示している。図8より、高相当応力域はインパクト直下の皮膚層であることがわかった。また、図9より、高相当ひずみ域はインパクト下の筋肉層であることがわかった。

5. 考察

本解析で参照した実験結果における出血箇所は、図3に示すように脂肪組織であることを確認している。本解析結果において、高相当応力域は皮膚層であるが(図8)、皮膚層を除いた際の高相当応力域は脂肪層である。このため、高相当応力域と出血箇所は対応関係にあることが考えられる。しかし、衝撃実験において、出血が筋肉層に生じた実験結果も多数存在する。また、出血箇所と高ひずみ域の対応関係も報告されていることから[9, 10]、衝撃による皮下出血の評価において、応力とひずみで評価可能な条件範囲を明らかにする必要があると考えられる。

6. 結言

本研究では、衝撃による皮下出血の発生メカニズムを明らかにするために、代替動物のCT画像に基づいて構築した有限要素モデルを用いた3次元有限要素解析を行った。この結果、高相当応力域はインパクト直下の皮膚層であり、高相当ひずみ域はインパクト下の筋肉層であることがわかった。衝撃による皮下出血の発生箇所は脂

肪組織および筋肉層であり、皮下出血の評価において、応力とひずみで評価可能な条件範囲を明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] Fujikawa, T. et al.: Critical Contact Pressure and Transferred Energy for Soft Tissue Injury by Blunt Impact in Human-Robot Interaction, *Proc. ICCAS 2017*, pp.867-872, 2017.
- [2] Fujikawa, T. et al.: Marmarou-type Impact Tests to Investigate Criteria for Avoiding Bruises in Extremities by Human-Robot Contact, *Proc. IEEE ISR 2021*, pp.297-300, 2021.
- [3] Sugiura, R. et al.: Soft Tissue Bruise Injury by Blunt Impact in Human-Robot Interaction - Difference of Tolerance between Chest and Extremities, *Proc. ICCAS 2019*, pp.792-797, 2019.
- [4] Sugiura, R. et al.: *In vivo* impact tests assuming human-robot contact to evaluate soft tissue bruise injury tolerance, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.9, No.6, DOI: 10.1299/mej.22-00153, 2022.
- [5] Marmarou, A. et al.: A new model of diffuse brain injury in rats: Part I: Pathophysiology and biomechanics, *J. neurosurgery*, Vol.80, No.2, pp.291-300, 1994.
- [6] Sullivan, T. P. et al.: The pig as a model for human wound healing, *Wound repair and regeneration*, Vol.9, No.2, pp.66-76, 2001.
- [7] Gering, D. T. et al.: An integrated visualization system for surgical planning and guidance using image fusion and interventional imaging, *Proc. MICCS*, Vol.99, pp.809-819, 1999.
- [8] Ogden, R. W.: Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol.326, pp.565-584, 1972.
- [9] 寺門, 他: *In vivo* 衝撃実験と有限要素解析による皮下出血の発生メカニズム, 日本機械学会 第33回バイオフロンティア講演会講演予稿集, 1D20, 2022.
- [10] Higuchi, Y. et al.: Development of a porcine thigh finite element model for evaluating the soft-tissue injuries caused by blunt impacts during human-robot interactions, *Proc. IEEE ISR 2021*, pp.301-305, 2021.
- [11] Sakai, S. et al.: Study on Impact Loading and Humerus Injury for Baseball, *J. Computational Science and Technology*, Vol.2, No.4, pp.609-619, 2008.

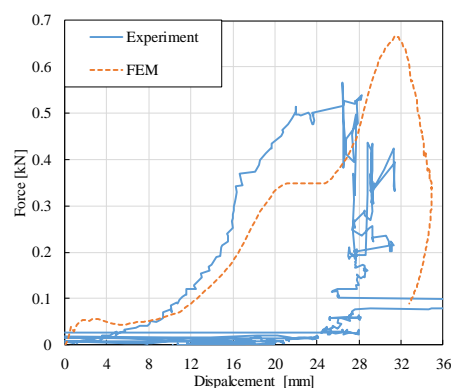


Fig.6 Force-displacement curve

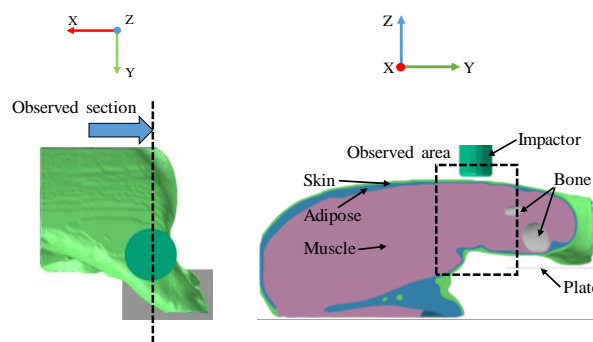


Fig.7 Observed section and area

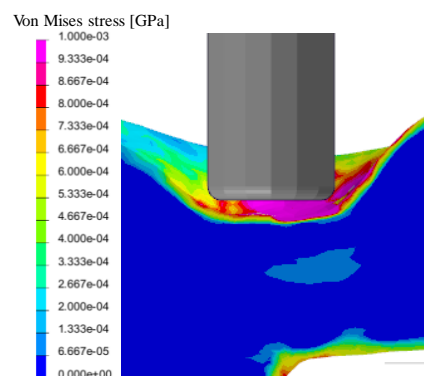


Fig.8 Contour maps of von Mises stress of porcine thigh finite element model at 16.8ms

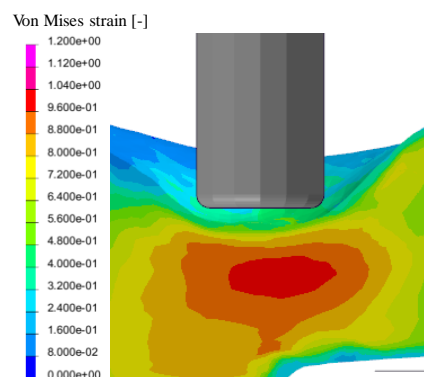


Fig.9 Contour maps von Mises strain of porcine thigh finite element model at 20.2ms