

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study of Influence of Vehicle Shape and Stiffness on the Lower Extremity Injury of Child and Adult Pedestrians (子供と成人の歩行者の下肢傷害と自動車の形状・剛性の関係に関する研究)

氏 名 安木 剛

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、自動車事故による死傷者数に占める比率が高まりつつある歩行者の死傷者数の低減方策を探るため、歩行者の傷害のなかでも頻度が高い下肢の傷害と自動車前面の形状と剛性の関係を解明することを目的とする。

第1章では、交通事故の統計データから研究対象と研究手段を絞り込んだ。交通事故の統計データから歩行者事故で発生頻度の高い傷害部位と自動車の加害部位を抽出した結果、下肢の傷害の発生頻度が高く、加害部位は自動車前面であった。1990年代の交通事故の統計データによると下肢の傷害のなかでは脛の骨折の頻度が高いが、2000年代の交通事故の統計データによると下肢の傷害のなかでは膝関節の損傷の頻度が高い。これより、1999年代と2000年代の自動車前面の形状と剛性の差が、下肢の傷害発生部位の差の原因の一つと推定した。そこで、自動車前面の形状と剛性と下肢の傷害の関係を評価できる手段を文献で調査した結果、トヨタ自動車株式会社と株式会社豊田中央研究所が開発した人体の有限要素モデル (FEモデル) である Total Human Model for Safety (THUMS) を評価手段に選択した。

第2章では、THUMSの生体忠実度を確認した。THUMS (平均男性成人) の下肢の脛骨、大腿骨、腸骨、膝関節など歩行者の下肢の主なコンポーネントの荷重・変位特性を文献に記載された実験値と比較検証し、おおむね実験と合致することを確認した。さらに、Schroederら (2008) の歩行者献体とスポーツユーティリティビークル (SUV) の試験を参考に、THUMSの体格を試験で使用された献体相当の体格に変換し、献体の骨密度を参考に骨折判定基準値 (皮質骨のひずみ) を補正した。Schroederら (2008) が試験で使用したSUVと同型のFEモデルを作成し、ユーロエヌキャップ (EURO-NCAP) の頭部インパクト試験結果とフードの剛性を、脚部インパクト試験結果とSUV前面の剛性を比較検証し、荷重・変位特性が概ね一致することを確認した。このSUVのFEモデルと体格変換などされたTHUMSの衝突計算結果は、Schroederら (2008) の試験結果と頭部や腰部の軌跡、献体の打撲位置が一致した。下肢には、膝靭帯断裂が観察され、脛は骨折せず、献体試験と同様であった。THUMSにより歩行者の下肢の傷害を評価できること

が確認された。

第3章では、セダンと衝突した場合の体格差による下肢傷害の差を比較検証した。THUMS（平均男性成人）と同様な構成のFEモデルであるTHUMS AF05（小柄女性）とTHUMS 6YO（6歳児）を使用した。小柄女性と6歳児の献体試験結果は公開された文献に見当たらなかったため、その各パーツの荷重・変位の検証と全身の挙動は試験と比較検証しなかった。セダンのアッパーバンパーはTHUMSの脛に、THUMS AF05の膝関節に、THUMS 6YOの大腿部に接触した。THUMSとTHUMS AF05では膝関節の内側側副靭帯（MCL）が断裂し、THUMS 6YOではMCLと前十字靭帯（ACL）が断裂し、傷害発生部位が体格に依存した。また、これらの計算結果では膝関節の曲げ角度の増加に伴いMCLが断裂し、膝関節の曲げ角度は脛骨の曲げ変形とも関係することが判明した。

第4章では、自動車前面の形状と剛性を最適化することで膝関節の傷害と脛の骨折の低減を試みた。セダンのFEモデルのフード、グリル、アッパーバンパー、ロアバンパーをそれぞれウレタン製のブロックのFEモデルに置き換えた。これらのウレタンブロックの荷重変形特性はセダンのFEモデルの計算結果のTHUMSとの接触荷重から決定された。第3章の結果からMCLの破断に影響すると推定されたアッパーバンパーの剛性とロアバンパーの前後位置を変数として27ケースのパラメータスタディーをウレタン製ブロックのFEモデルで実施した。MCLの破断リスクは、THUMSではロアバンパーの前後位置を車両の前方に移動させると、THUMS AF05ではアッパーバンパーの剛性を低下させると、THUMS 6YOではロアバンパーの前後位置を車両の前方に移動させ、アッパーバンパーの剛性を低下させると低下した。歩行者の体格差を考慮してTHUMS, THUMS AF05, THUMS 6YOのそれぞれでMCLとACLが断裂せず、脛の骨折しないアッパーバンパーの剛性とロアバンパーの前後位置を見いだせた。

第5章では、Schroederら（2008）の試験で使用したのとは別のSUVと衝突した場合の下肢傷害を研究し、脚部インパクトの挙動とも比較した。このSUVでは膝関節から下が車両と接触しなかった。THUMSのMCLとACLが断裂した。これより、膝関節から下の脛、足などの慣性力だけでもMCLとACLが断裂する可能性があり、脛を支持するロアバンパーなどの追加あるいは脛、足などの慣性力の低減によりMCLとACLの断裂のリスクが低減可能と推定される。

第6章では、SUVでのMCLとACLの断裂のリスクを、脛と足などの慣性力の低減により可能かを検討した。第4章と同様な手法でSUVに相当するウレタン製ブロックのFEモデルを作成した。フード、グリル、アッパーバンパーの剛性を低減した6ケースのTHUMSとウレタン製ブロックのFEモデルの衝突計算を実施したが、6ケースともMCLが断裂し、そのうち3ケースでACLが断裂した。すべてのブロックの剛性を10分の1にまで低下させたところMCLとACLは断裂しなかったが、アッパーバンパーの変形量は500mmを超過した。脛、足などの慣性力の低減によりMCLとACLの断裂のリスクは低減するが、正面衝突でのSUVの安全性確保と大きな背反があると考えられる。

第7章では、セダンと衝突した場合のTHUMSと脚部インパクトの膝曲げ角度の発生要因の差を研究した。THUMSの脛が曲げ変形する時間帯では膝関節の曲げ角度は増加せず、脛の曲げ角度は膝関節の曲げ角度と同じオーダーである。脚部インパクトは脛の曲げ変形がないため、THUMSに比べて膝関節の曲げ角度を過大評価する傾向があることが

判明した。

第8章では、脚部インパクトを例に、膝曲げ角度が発生する要因を運動学の観点から考察した。脚部インパクトを膝関節で接合された2個の剛体と仮定し、その運動方程式を作成した。この剛体と自動車との衝突は非線形のバネで近似し、これらのバネの定数は第7章の脚部インパクトの衝突計算結果から設定した。この運動方程式から得られた膝曲げ角度と脛の加速度は第7章の結果と傾向的に一致し、前述の非線形バネなどを変数とするパラメータスタディが可能である。まず、フード、アッパーバンパー、ロアバンパーなどが膝関節の曲げ角度に与える影響が解明され、第7章で判明したアッパーバンパーの接触力増加は膝関節の曲げ角度を増加させ、フードとロアバンパーの接触力増加は膝関節の曲げ角度を減少させることが剛体の運動に起因することが解明された。非線形バネなどを変数とするパラメータスタディにより、ロアバンパーの剛性が大きいほど脚部インパクトの膝関節の曲げ角度は小さく、脛の加速度は小さくなる傾向が判明した。脛の加速度は膝関節の直下の脛骨の損傷の評価指標であり、これより200mm程度下方に接触するロアバンパーの剛性が影響するのは不自然であり、脛の曲げ変形を無視した副作用と推定される。

第9章は、まとめである。この研究を通じて得られた知見は次のとおりである；

THUMSは歩行者の下肢の傷害の有力な評価手段である。

歩行者事故では膝関節の傷害か脛の骨折の一方だけが発生する原因が不明であったが、THUMSとセダンの衝突解析結果から、最初に脛の曲げと膝関節の曲げが発生し、次に脛の曲げが増加しその骨折リスクが増加した。最後に膝関節の曲げが増加し膝靭帯断裂のリスクが増加することが判明した。脛に接触するロアバンパーの剛性が高い場合は脛の骨折が発生する。これが低い場合は脛の骨折が発生せずに膝靭帯が断裂する。

歩行者の体格差は下肢の傷害に影響する。体格ごとアッパーバンパーやロアバンパーの衝突位置での人体耐性値を考慮した剛性の設定により、成人男性から6歳児までの下肢傷害のリスク低減が可能である。

脚部インパクトの膝関節曲げ角度は、ロアバンパーの剛性が大きいほど小さく、脛の加速度は大きくなる傾向が判明した。脛の加速度は膝関節の直下の脛骨の損傷の評価指標であり、これより200mm程度下方に接触するロアバンパーの剛性が影響するのは脛が剛体のためと推定される。

以上