

報告番号	※ 乙 第 7127 号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 INVESTIGATION OF SERIOUS-FATAL INJURIES
USING BIOMECHANICAL FINITE ELEMENT MODELS (人体有限要素モデルによる重症-致死傷害に関する
生体力学的研究)
氏 名 金原 秀行

論 文 内 容 の 要 旨

日本の交通事故データによると、交通事故による死者数は低減傾向にあるものの、傷害者と後遺障害者の人数は依然高い水準にある。重症傷害を簡易傷害度スケール AIS (Abbreviated Injury Scale) で表現すると、重症以上の AIS 3+として表記できる。AIS 3+の交通事故傷害の発生件数を身体の部位別で比較すると、頭部と胸部で最も頻出している。一方、脊髄損傷による重症傷害について調査した結果によると、その発生原因は自動車事故によるものが最多である。交通事故データにおいて脊髄傷害の発生件数は他の傷害に比べて少ないが、ひとたび脊髄で傷害が発生すれば AIS 3以上の重症傷害になる。

女性ドライバーの数は増加傾向を維持しており、近年は交通事故による受傷者の数でも、女性は男性とほぼ同数となっている。米国と英国それぞれの事故データを用いて重症傷害や死亡に至った場合の受傷部位を比較すると、女性の場合、胸部傷害の比率が男性の場合よりも高い。これまでの衝撃生体工学の分野では、女性の衝突安全は、標準男性 AM50 (American Male 50 % ile) からスケーリングして作成された小柄女性 AF05 (American Female 05 % ile) を用いて評価されてきた。しかし、この手法には体格差による影響のみが考慮され、男性と女性との性差による影響は考慮されていない。衝撃荷重に対する身体の変形と傷害評価を行う上で、体格差と性差それぞれの影響について検討する必要がある。

人体の力学モデルは、衝突時の人体傷害を評価するうえで必要な技術である。これまで開発された人体の力学モデルには、衝突実験用人体ダミー (ATD: Anthropometric test devices)、マルチボディーのシミュレーション技術を用いた人体モデル、有限要素 (FE: Finite Element) 解析技術を用いた人体 FE モデルがある。まず ATD は、実車両や実機の安全装置を用いた乗員保護性能を評価する場合に有用なツールである。しかし人体の傷害を評価するという観点では、ATD を用いた実験技術には不十分な点がある。例えば、ATD には同一条件の衝撃荷重に対する荷重-変形特性の再現性が求められているため、ATD は実際の人体よりも強固な構造を持っていると考えられる。また人体に加わる負荷として、ATD では荷重と衝撃加速度の計測値で表現するが、直接的に骨折や脳・内蔵などの軟組織の損傷を評価することは困難である。マルチボディーのシミュレーション技術を用いた人体モデルについて

も同様に、人体各所の傷害を直接評価する指標が明示されていない。一方で、FE解析技術を用いた人体FEモデルでは、頭部、頸部および胸部の解剖学的構造と生体力学特性を表現することが可能である。そのため、人体に加わる荷重と衝撃加速度に加えて、各部位の骨や軟組織に加わる応力とひずみを評価することが可能となる。献体や動物被験体を用いた実験から得られたデータを用いてモデルを検証すれば、骨折や内臓傷害などの耐性限界を仮定することで、人体のひずみと応力から傷害評価に役立てることができる。

そこで主論文では、人体FEモデルを応用して、重症傷害の発生メカニズムを探索することを目的としている。人体の部位としては、自動車の衝突事故で死亡や重症傷害の原因になりやすい、頭部と脳脊髄および胸部を対象としている。頭部と脳脊髄については、脳と脊髄を一体的にFEモデルで表現することで、頭部と胸部から入力される衝撃荷重に対して、脳脊髄モデルのひずみで評価する手法を開発した。脊髄の傷害評価には、生体力学特性を新鮮な豚の被験体を用いた実験から得られた引張破断特性を考慮し、脊髄の最大主ひずみを用いて検討を行った。さらに脳傷害については、頭部の回転挙動だけに基づいた傷害評価指標を提案し、脳FEモデルから得られる脳の最大主ひずみや損傷率CSDM (Cumulative Strain Damage Measure) に対して妥当性の検証を行った。一方、胸部傷害については、まず肋骨の3点曲げ実験と胸部インパクト試験のデータを分析し、肋骨の曲げ特性と胸部のインパクト挙動における男女の性差について検討した。さらに胸部の人体FEモデルを用いて、モデルの体格と肋骨の断面特性を因子とするパラメータスタディを実施した。インパクトによる胸部のたわみ率（胸部たわみ量を初期の胸部厚さで正規化した値）と肋骨骨折の数を算出し、スケーリング手法に用いられる体格の影響や肋骨の断面特性などによる影響について検討した。そして女性の献体データから得られた肋骨断面特性を考慮して、小柄女性の胸部FEモデルを開発した。このモデルを検証するために、女性の献体のみを用いた胸部衝撃実験データのみを対象として、再現シミュレーションを行い、その胸部衝撃特性について検討した。

以上の脳脊髄における神経傷害や男女差を考慮した胸部の重症傷害の発生メカニズムを論述するため、主論文を全7章で構成した。まず第1章は緒言であり、本研究の背景ならびに研究の目的について記している。

第2章では、自動車の前面衝突時における頭部と胸部に入力される衝撃荷重に対する脳と脊髄の衝撃応答特性の関係を調査するため、詳細な脳脊髄を含む人体の頭頸部を模擬したFEモデルを開発した。このFEモデルの基盤には、市販の人体モデルTHUMS-AM50 ver.3（トヨタ自動車と豊田中央研究所の共同開発）を利用した。この人体モデルの頭部の並進性と回転性の衝撃応答および頸部の衝撃屈曲特性は、それぞれの実験データに対する再現シミュレーションが実施済みであり、また生体忠実性の妥当性についても検証されている。本研究ではこの基盤モデルに脊髄の白質と灰白質を有する詳細脊髄モデルを加え、脳モデルと連続的に接続して一体化させた。さらに生体力学特性として、豚の被験体から得られた脊髄の白質、灰白質、軟膜、硬膜それぞれの引張り特性をモデルに与えた。この頭頸部FEモデルに10 m/sの初速度を与え、自動車乗員の前面衝突時の頭部と胸部の衝撃荷重を表現するために緩衝物と接触させ、その直後の脳脊髄の挙動とひずみについて検討した。

頭部と胸部に当てる緩衝物の圧縮強さと緩衝物の前後位置を因子としたパラメータスタディを実施した結果、脳傷害の評価指標となる脳のひずみは頭部への緩衝物が柔らかい時に低

減し、頸部と脊髄への負荷は頭部と胸部の前後方向における相対変位が小さいほど軽減されることが分かった。特に、頭部と胴体部において慣性力の大きさに違いがあるため、頭部に比べて胸部には先に緩衝物が当たる組み合わせが有効であった。

第3章では頭部の回転性衝撃による脳傷害の評価指標を検討するため、頭部の回転加速度の大きさと持続時間に着目した評価指標 RIC (Rotational Injury Criterion) と PRHIC (Power Rotational Head Injury Criterion) を提案し、脳 FE モデルから算出される最大主ひずみと脳損傷率 CSDM と比較してその妥当性を検討した。本解析では、アメフトによる頭部衝撃時の頭部重心周りの 6 自由度加速度データを用いた。使用したデータは 2 つあり、一つ目はバージニア工科大学の学生アメフト選手のヘルメット内に設置された 6DOF センサーから計測された 251 例のボランティア実験データ、二つ目はアメリカのプロフットボールリーグ NFL (National Football League) の試合中に発生した脳震盪事故を、Hybrid III ダミーによる再現実験から求めたデータである。なお、前者のデータには脳震盪事故事例は含まれていないが、後者には 58 例中 25 例で脳震盪事故が発生している。脳 FE モデルから得られた最大主ひずみと脳損傷率 CSDM は、本研究で提案した RIC と PRHIC と強い相関を示したが、従来の頭部傷害評価指標として用いられてきた HIC (Head Injury Criterion) や HIP (Head Injury Power) などとは相関がみられなかった。またロジスティック解析 (修正最尤法) によって傷害発生確率のリスクカーブを描いた。

第4章では、人体の年齢、体格、性別などに対する、胸部の衝撃応答特性と胸部傷害の関係を明らかにするために、過去に実施された 83 例の胸部インパクト実験データと、87 例の肋骨 3 点曲げ実験データについて分析した。胸部インパクト実験データについて、インパクトの衝撃エネルギーを基準に比較した結果、女性の胸部たわみ率は、男性に比べて大きくなる傾向が示された。また肋骨の試験片断面を調査したところ、断面積と断面二次モーメントが男性でそれぞれ $29.6 \pm 7.9 \text{ mm}^2$ と $209.6 \pm 94.2 \text{ mm}^4$ 、女性で $23.2 \pm 5.4 \text{ mm}^2$ と $104.1 \pm 54.4 \text{ mm}^4$ となり、有意 ($p < 0.01$) に女性の肋骨断面が小さいことが分かった。第5章では THUMS-AM50 を用いて胸部のインパクトに関するパラメータスタディを実施し、胸部たわみと肋骨骨折の発生数に対する、人体の体格、骨組織と軟組織の材料特性および肋骨の断面特性の影響について検討した。その結果、第4章で男女差が見いだされた肋骨の断面特性が胸部たわみ率に影響を与え、さらに胸部たわみ率が肋骨骨折の発生数の評価に役立つことが分かった。

第6章では小柄女性 AF05 の胸部 FE モデルを開発した。このモデルの開発には、第4章と第5章から得られた肋骨断面特性の性差を考慮し、女性固有のデータをモデルに反映した。開発したモデルに対して胸部インパクト衝撃解析を行ったところ、小柄女性の献体を用いた実験データと、胸部のたわみ-反力特性と肋骨骨折本数においてほぼ一致することが分かった。

第7章は本研究の結論と今後の展望を示している。すなわち、人体 FE モデルは脳脊髄への傷害メカニズム、胸部の変形と肋骨骨折の関係などを明らかにするうえで有用であった。特に、女性の傷害を評価するためには、体格によるスケールリング手法を単純に用いるのではなく、皮質骨の断面特性における性差の影響を考慮する必要性を示した。

本研究成果が、人体モデルを用いた自動車の安全性評価に活用されれば、自動車による重症傷害の発生件数減少に寄与できるものと期待される。