

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14202

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24590864

研究課題名(和文)高齢自動車乗員の胸部損傷予防に向けた医工学的研究

研究課題名(英文)Biomechanical analysis for preventing severe chest injuries in elderly vehicle passengers

研究代表者

一杉 正仁(Hitosugi, Masahito)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：90328352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：目的：高齢者の胸郭特性を明らかにするためにラットを用いた生体工学的研究を行い、さらに人体有限要素モデルを用いて人への応用を試みる。方法：台上で腹臥位にした高齢ラットに加速度を作用させ胸骨部、脊椎部の加速度を経時的に測定した。この結果を人体有限要素モデルに適用し、類似の応答が得られかを確認した。結果：人体胸郭の変形挙動が確認できた。スケーリングの手法を用いて、ラットで計測された加速度値を外挿したところ、人における傷害値と矛盾しなかった。考察：動物実験、人体有限要素モデルを用いた衝撃シミュレーションを行うことで、人体の胸郭剛性が評価できるとおもわれる。

研究成果の概要(英文)：To reduce the fatal vehicle passengers, reduce the severity of thorax injuries is an important problem. In this study, a new animal experiment model for thoracic injury was developed using a drop test system. Time histories of decelerations at the sternum and the spine of the rats were measured. We examined the viscoelasticity of the thoracic cage of elder rats. Then, to apply these results for humans, we used a human finite element model at the same impact condition. In order to compare the results, scaling based on geometric similarity was applied to the acceleration data. The maximum sternum decelerations of rats were similar to those of the human model. The proposed animal model might be useful for examining biomechanical response of the human thoracic injuries. These results may be useful for the safety of the elderly vehicle passengers.

研究分野：社会医学、法医学

キーワード：胸部損傷 胸部特性 加速度 高齢 動物実験 人体有限要素モデル

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 交通外傷予防の重要性

モータリゼーションの進展に伴って、自動車による傷害が大きな社会問題となってきた。世界全体では、毎年約 130 万人が交通事故で死亡し、約 5000 万人が負傷している。2004 年に世界保健機構 (WHO) は、「道路交通傷害は重大であるにもかかわらず、なおざりにされてきた公衆衛生の問題であり、効果的かつ持続可能な防止策に向けての共同の努力が必要である」と指摘した。したがって、交通外傷の特徴を把握し、その予防対策を講じることは世界的に共通の課題である。

わが国では、交通事故死者数は減少しつつあるが、依然として交通事故件数や負傷者数は僅かに増加しつつあり、人的かつ経済的損失の面で社会に大きな打撃を与えている。交通事故分析センターの統計では、2010 年の交通事故死者は 4863 人、負傷者は 896208 人であった。政府は第 9 次交通安全基本計画の中で、交通事故のない社会を目指して、2015 年度までに交通事故死者数を 3000 人以下に、交通事故死傷者数を 70 万人以下にする目標を掲げた。したがって、社会医学の見地からもこの目標に向かって具体的な行動を取ることが要求されている。

### (2) 高齢化社会における優先的課題

わが国では高齢化が進み、2010 年には自動車乗車中の死者 1602 人のうち、36.6% は 65 歳以上の高齢者が占めていた。2020 年には 65 歳以上の高齢者が人口の 30% に達すると予想されており、さらなる死傷者低減に向けて、高齢者に特化した取り組みが必要である。

自動車乗員の重症損傷部位としては胸部が最も多いことから、まず、高齢自動車乗員における胸部損傷の予防、重症度低減が優先的課題である。

高齢者では、骨の退行性変化から、胸部傷害閾値が低下すると言われている。また、高齢者では脊椎の後彎によって運転時に胸部とハンドルとの距離が近くなる。したがって、高齢者の解剖・生理学的特徴を加味したうえで、損傷予防対策が求められる。しかしながら、現在使用されているシートベルトやエアバッグといった乗員安全装置は、一般健康人を全体にシステム設計が行われているゆえ、高齢者に対しては加害性があることが指摘されている。

多発肋骨骨折は自動車乗員に最もよく見られる胸部外傷の一つであるが、肺の換気能力を低下させ、内臓損傷を合併する頻度も高い。したがって、死者を低減し、外傷患者の損傷重症度を低減するためには、多発肋骨骨折の発生メカニズムを明らかにしたうえで、積極的予防策を講じるべき

である。過去の報告では、高齢者は若年者よりもより低い外力で骨折を負い、そして死亡するという [Dolinjak D: Am J Forensic Med Pathol 2008; 29: 99]。また、65 歳以上の高齢者を対象にした検討では、肋骨骨折を負うことで死亡率が高くなるという。さらに、同程度の重症度の肋骨骨折患者を対象にした研究では、65 歳以上の高齢者は、それ以外の人の約 2 倍の死亡率であったという。そして死亡率や肺炎合併率は、肋骨骨折の本数とともに高くなるという [Bulger EM, et al: J Trauma 2000; 48: 1040]。このように、高齢者が肋骨骨折を負った場合、重篤な転帰をとることがあるため、その発生閾値を具体的に明らかにし、予防対策を講じることが望まれる。

## 2. 研究の目的

### (1) 加齢に伴う胸部の耐性変化

加齢に伴う胸部の耐性変化を具体的に明らかにする。すなわち、加齢によって骨密度が低下して胸部が脆弱化することを、外力応答とともに明らかにしたい。老齢および若齢ラットを用いた静的および準静的圧縮試験を行い、胸部の耐性を具体的に明らかにする。

### (2) 胸部特性の人体への適用

老齢ラットを用いた実験で得られた胸部特性を人体に適用する。すなわち、これらの結果から、高齢者に対する安全な自動車乗員拘束装置の条件を具体的に提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) ラットの胸部耐性についてのインパクトバイオメカニクス研究

ラットに可変的に加速度が作用できるような落下装置を製作した (図 1)。



図 1

落下点には衝撃可変式ダンパー（HP110MF-1）4個を置き、落下した台を受け止めた際に加速度が生じる仕組みになっている。この装置は、ステージ上のゲージ内に麻酔をされたラットを腹臥位で置き、最大で 1400mm の高さからステージを自由落下させるものである。対象は Female SLC Wister ラットである。弱齢ラット 2 匹及び高齢のラットを 5 匹（19 ヶ月～25 ヶ月齢）用いて実験を行った。ソムノペンチル（ペンタバルビタールナトリウム 基準 50mg/kg）を投与後、加速度計（ASD-A-1KM、共和電業、東京）を胸骨下端部の皮下、背部の皮下（脊椎の後方）に固定した。その後、落下装置内に置き、落下高さを 280mm、700mm、1200mm、1400mm に設定して、それぞれ 4～5 回ずつの落下実験を行った。

落下前後でそれぞれのパラメータを経時的に計測し、データは 10kHz、Channel filter class 180 で処理した。

なお、本研究は獨協医科大学実験動物委員会の許諾を得て行われた。

## (2) 加速度変化に対する胸部応答の人体への適用

人体への適用を考慮するために、動物実験で得られた成果を、人体有限要素（FE）モデルに入力した（図 2）。

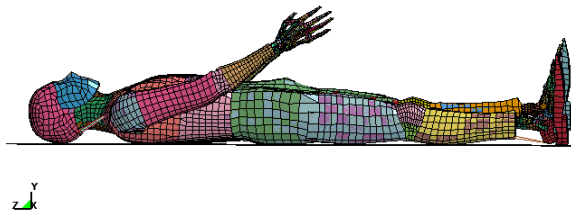


図 2

FE モデルには、自動車衝突時の乗員および歩行者挙動を詳細に解析するために開発された THUMS（Total HUMan Model for Safety）を使用した。

THUMS は平均的な成人男性の形状、骨の強度や皮膚の柔軟性をモデル化しており、負荷作用時の骨格の変形や骨折、軟組織の応力・ひずみ分布の評価が可能である。

本シミュレーションを行うにあたり、THUMS を日本人高齢男性の平均体型に近い身長 162 cm、体重 62.4 kg にスケーリングして使用した。

本解析では、ラットと同様に THUMS の姿勢を腹臥位とし、剛体壁と腹部側とが接触する直前の状態を初期状態とした。剛体壁の上方変位として加速度時刻歴を入力することで落下衝撃による加速度負荷を再現した。

## 4. 研究成果

### (1) ラットの胸部耐性についてのインパクトバイオメカニクス研究

個々のラットにおける落下実験で、台の最大加速度値、胸骨部の最大加速度、脊椎部の最大加速度値を求めた。そして、それぞれの関係をラットごとにまとめた（図 3、4）。

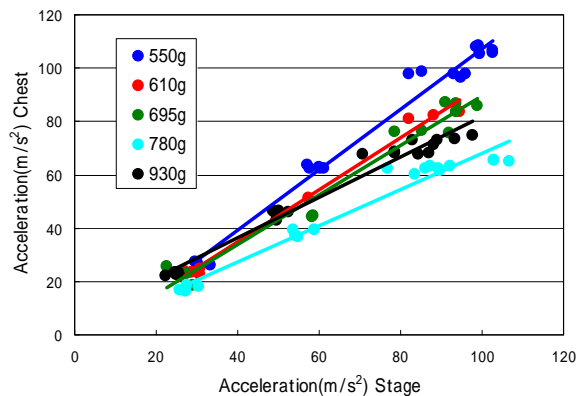


図 3

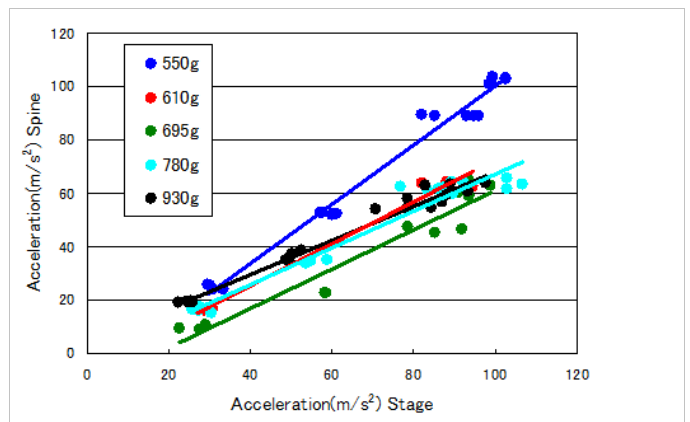


図 4

図から明らかなように、台に作用する加速度に比例して、胸骨部と脊椎部にそれぞれ加速度が発生することが分かった。例えば、週齢 1 年 10 ヶ月のラットを載せた台に平均で 26.4 m/s<sup>2</sup> の加速度を作用させたところ、胸骨部の加速度は 22.4 m/s<sup>2</sup>、脊椎部の加速度は 9.6 m/s<sup>2</sup>であった。この加速度の差は、胸郭のたわみによると考えられた。したがって、胸郭の特性はばねモデルで考えることができた。

ラットの大きさの違いを考慮するために、スケーリングテクニックを用いた。すなわち、体重からスケーリングファクターを算出し、同体格と仮定したうえでの胸郭の特性を検討した。その結果、脊椎部最大加速度の近似線は、ほぼ収束する傾向であり、体格が同じであれば、胸郭の生体的特性がほぼ同じであることが示された。

次に、胸骨部加速度と脊椎部の加速度を 2 回積分し、その差を求めることで胸郭の

変位量を算出した。そして、各実験結果をもとに、加速度-変位曲線を作成した。体重 930g のラットにおける加速度-変位曲線を示す(図 5)。

なお、内臓損傷の有無を調べるために剖検を行ったが、今回作用させた加速度の範囲では内臓損傷はみられなかった。

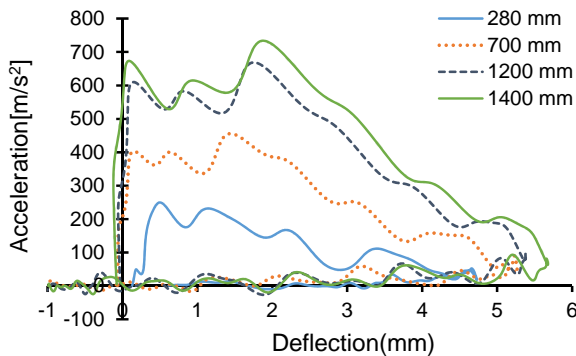


図 5

## (2) 加速度変化に対する胸部応答の人体への適用

人体モデルにおいて、加速度を作用させた際の胸部及び脊椎部の加速度変化を調べた。

台の加速度負荷がピークになるまでは、胸部部の加速度は台の加速度と一致したが、20 ms 以降は台より高い加速度となった。また、脊椎部の加速度は胸部部より遅れて発生し、作用後 31 ms で最大となった。このように、胸部部の加速度の立ち上がりやピーク値が台加速度とほぼ一致することや脊椎部の加速度が遅れて発生するという点ではラットとの類似性が認められた。

人体における胸部変形の挙動を明らかにするために、正中矢状面からみた胸部断面の変形を調べた(図 6)。

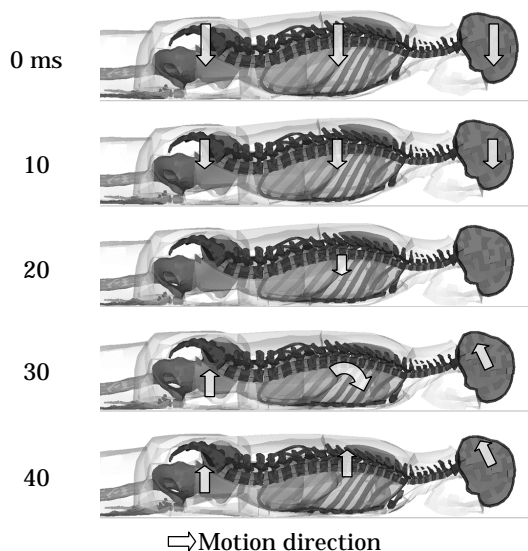


図 6

まず、0-10ms では肋骨下部が剛体壁と接触することで上向き加速度が発生し、肋骨が背側へと移動する。肋骨の背側への移動と慣性による脊椎の腹側への移動によって胸郭が変形し、それに伴い生じる胸郭の復元力が脊柱に作用することで、脊柱にも加速度が発生する。その後、20 ms で頭部及び腰部の剛体壁に対する並進速度が 0 となる。そして、腰部は剛体壁から反発し、上方へと移動する。頭部や腰部に比べて、胸郭は柔軟性を有するため、さらに変形を続けた。そして、胸郭が反発しながら元の形状に戻ろうとする力と、胸郭内の肺の慣性力により、肋骨に下向き加速度が発生したと考えられた。

次に、得られた加速度の値をスケールリングすることで人体 FE モデルと比較した。その結果、胸部部加速度に関しては、スケールリングを施すことで人体モデルとラットとでほぼ同等の応答が得られた。

これまでは、人体の胸部衝撃耐性は死体実験によりデータが取得されてきたが、本研究の結果から小型動物モデルでもスケールリングを行うことで、類似した加速度が得られ、死体実験を代替及び補完できる可能性があると考えられた。

## (3) まとめ

老齢ラットを用いた落下試験を実施し、加速度負荷が作用した際の胸部応答を計測した。また、同様の負荷が人体に作用した際に類似の応答が得られることを確認するため、人体 FE モデルを用いた衝撃シミュレーションを実施した。その結果、胸部部加速度に関してはスケールリングを施すことで人体とラットとでほぼ同等の応答が得られた。

本研究の結果から小型動物モデルでもスケールリングを行うことで、人体の胸部剛性の評価を補完・代替できる可能性が示された。すなわち、高齢者の胸部に加速度が作用した際の応答を具体的に示すことが可能となる。

この結果を応用することで、高齢者に対してシートベルトの拘束を制御するロード(フォース)リミッタやエアバッグ展開時の条件を変えることを提言する。そして、今後は本研究成果に基づいて、乗員拘束能力といった安全性に影響を及ぼさない範囲で胸部たわみ量、胸部荷重を低減できる安全ツールを提案したい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

- 1) Hitosugi M, Matsui Y  
Safety of Japanese K-car in a real-world low severity frontal collision. *Traffic Inj Prev*, 16, 90-94, 2015, 査読有,  
DOI: 10.180/15389588.2014.885649
- 2) Hitosugi M, Murayama H, Motozawa Y, Ishii K, Ogino M, Koyama K  
Biomechanical analysis of acute subdural hematoma resulting from judo. *Biomed Res (Tokyo)*, 35, 339-344, 2014, 査読有.
- 3) 伊藤大輔, 一杉正仁, 本澤養樹, 水野幸治  
ラット落下実験による胸部応答評価と人体有限要素モデルとの比較. *日本交通科学学会誌*, 14 巻, 15-20, 2014, 査読有.
- 4) Hitosugi M, Kawato H, Gomei S, Mizuno K, Tokudome S  
Severity of child pedestrian injuries due to bonnet-type-vehicle collision. *Pediatrics International*, 55, 624-628, 2013, 査読有,  
doi: 10.1111/ped.12140.
- 5) Matsui Y, Hitosugi M, Takahashi K, Doi T  
Situation of car-to-pedestrian contact. *Traffic Inj Prev*, 14, 73-77, 2013, 査読有  
doi: 10.1080/15389588.2012.678511
- 6) Matsui Y, Hitosugi M, Doi T, Oikawa S, Takanashi K, Ando K  
Feature of pedestrian behavior in car-to-pedestrian contact situations in Near-Miss incidents in Japan. *Traffic Inj Prev*, 14, S58-S63, 2013, 査読有  
doi: 10.1080/15389588.2013.796372
- 7) 河内茂紀, 安川 淳, 一杉正仁, 榎 徹雄, 櫻井俊彰  
意識消失時の自動車運転姿勢再現による事故予防対策について. *日本職業災害医学会誌*, 61 巻, 144-147, 2013, 査読有.
- 8) 川戸 仁, 一杉正仁, 小林康祐  
母体腹部に外傷を認めずに児の死亡をきたした妊婦交通事故の一例. *日本周産期新生児医学会誌*, 49 巻, 1291-1294, 2013, 査読有.
- 9) Hitosugi M, Gomei S, Okubo T, Tokudome S  
Sudden illness while driving a vehicle, a retrospective analysis of commercial drivers in Japan. *Scand J Work Environ Health*, 38, 84-87, 2012, 査読有.

- 10) Hang Y, Yang J, Nishimoto K, Mizuno K, Matsui Y, Nakane D, Wanami S, Hitosugi M.

Finite element analysis of kinetic behavior and injuries of pedestrians in vehicle collisions. *Int J Crashworth*, 17, 141-152, 2012, 査読有.

- 11) 榎 徹雄, 一杉正仁  
外傷低減の取り組みについて, 事故再現解析. *バイオメカニズム会誌*, 36 巻, 205-210, 2012, 査読有.

[学会発表](計 14 件)

- 1) 一杉正仁  
シンポジウム 繰り返される事故 事故防止のあり方を考える, 未解決事故の原因を究明する, 事故例からのアプローチ. *安全工学シンポジウム*, 2014 年 7 月 10 日, 建築会館ホール, 東京都港区.
- 2) 一杉正仁  
シンポジウム セーフティプロモーション(公衆衛生アプローチによる安全・安心づくり) - 理論と実践, 交通事故による傷害を減らすために 効果的予防対策の実践, 第 73 回日本公衆衛生学会総会, 2014 年 11 月 5 日~7 日, 栃木県総合文化センター, 栃木県宇都宮市.
- 3) Hitosugi M, Yamauchi S, Matsui Y  
Differences in injury severity of drivers between standard vehicles and the Kei-cars in Japan. *The 23rd World Congress of International Traffic Medicine Association*, 2013 年 5 月 20 日, University of Hamburg, Hamburg, Germany.
- 4) 田中浩史, 一杉正仁  
二次救急病院整形外科における自動車交通外傷の解析. 第 49 回日本交通科学学会学術講演会, 2013 年 6 月 22 日, 帝京大学医学部, 東京都板橋区.
- 5) 一杉正仁  
疾病管理と自動車運転, 交通事故死傷者低減に向けた新たなアプローチ. 第 48 回日本交通科学協議会総会・学術講演会, 2012 年 6 月 20 日-22 日, 日本自動車研究会, 茨城県つくば市.
- 6) 一杉正仁  
シンポジウム 事故の実態と体調管理, 運転者の体調変化による事故: 実態と予防対策について. 第 21 回日本交通医学工学研究会, 2012 年 9 月 17 日, 名城大学, 愛知県名古屋市.

[図書](計 4 件)

- 1) 武原 格, 一杉正仁, 渡邊 修 編集.  
三輪書店, 脳卒中・脳外傷者のための自動車運転, 2013. 総ページ数 151

2) 寺野 彰、一杉正仁 編著。  
メディカルビュー社，集中講義 医事法  
学・法医学，2012．総ページ数 144

6．研究組織

(1)研究代表者

一杉正仁 ( HITOSUGI Masahito )

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：90328352