

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 16 日現在

機関番号：82655

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：平成 22 年度～平成 24 年度

課題番号：22560101

研究課題名（和文）歩行者事故における胸部傷害発生メカニズム解明のための生体力学的研究

研究課題名（英文）Impact biomechanics research for clarification of pedestrian chest injury mechanism in car-to-pedestrian accidents

研究代表者

松井靖浩 (MATSUI YASUHIRO)

交通安全環境研究所・自動車安全研究領域・主席研究員

研究者番号：00426230

研究成果の概要（和文）：ボンネット車と 1BOX 車について、車対歩行者の有限要素解析を実施することで、歩行者胸郭の変形・応力を調べた。ボンネット車との衝突では、歩行者胸部は低い速度でボンネット上に衝突し、ボンネットの変形は一様となり変形量は小さくなった。一方、1BOX 車との衝突では、短時間で車体と衝突するため、胸部は高い速度で高剛性のウィンドシールドフレームに衝突し、胸郭が局所的に変形し骨折の危険性が高いことが判明した。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the factors that can affect a pedestrian's chest injuries by the front configuration of a vehicle were investigated using a finite element analysis. In a bonnet-type car-pedestrian accident, the pedestrian's chest impacted the bonnet top at a low velocity according to the rotation of the pedestrian's entire body around the car. The stiffness of the bonnet top where the chest impacted was distributed, and thorax deformation was small and uniform. In a one-box type vehicle-pedestrian accident, the pedestrian's chest was directly impacted by the front of the vehicle at a high velocity. Because the chest was hit by the stiff windshield frame, the thorax was deformed locally. The results showed that vehicle configuration can affect the impact velocity to the chest, and the stiffness of the vehicle structure can affect chest deformation and its mode.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 23 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
平成 24 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料/材料力学

キーワード：生体力学, インパクトバイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

交通統計によると、平成 20 年の国内の交通事故死者数 (5,155 人) のうち、歩行中の死者は 1,721 人 (33.4%) と最も多い (図 1)。頭部は歩行者の死亡事故の中で最も頻度の高い受傷部位であり、胸部は次に頻度の高い受傷部位である。我が国では、車両が衝突した場合でも歩行者の頭部を保護する目的に

より、2005 年からボンネットに対する歩行者頭部保護試験が行われている。試験では、子供と大人の頭部を模擬した衝撃子 (インパクト) をそれぞれボンネットに衝突させ、車両構造のエネルギー吸収によって安全性を確保している。

我が国の車両の販売台数に着目すると、軽自動車の台数が最も多い状況にある。軽自動車

には、軽トラックや軽 1Box を初めとし車両前面がほぼ垂直に近い特徴のある車両が存在する。このような 1Box 車が歩行者へ衝突するとボンネット車が歩行者へ衝突する場合と比較して、重傷の胸部傷害が発生する割合が増加する(図 2)。しかしながら、従来、歩行者胸部の傷害発生メカニズムに関しては、充分解明されてこなかった。

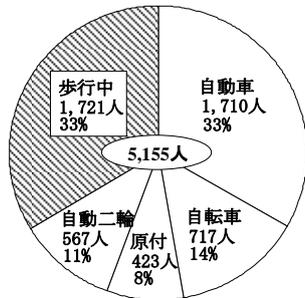


図 1 交通事故死者数の内訳

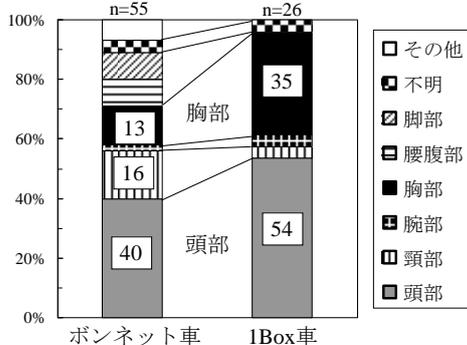


図 2 歩行者事故における受傷部位の割合

2. 研究の目的

本研究では、我が国特有の軽トラックや 1Box などの前面が垂直な車両を中心として、歩行者胸部の傷害発生メカニズムを世界に先駆け解明し、歩行者の胸部傷害に至る要因を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

3.1. 車対歩行者衝突シミュレーション

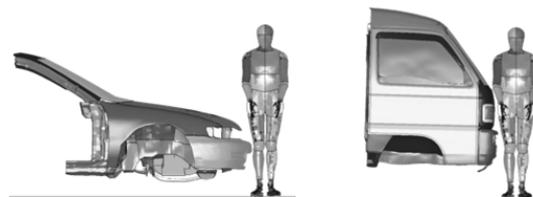
ボンネット車の有限要素モデルについては、National Crash Analysis Center (NCAC)が提供しているアコードを対象としたモデルの車両前部を抽出した。この抽出モデルのボンネット、バンパー、カウル、ウィンドシールドの要素を再分割した。1BOX 車の有限要素モデルについては、実車の軽 1BOX を 3次元測定装置を用いて寸法を測定し、車両形状データを得て要素を分割した。車両の構造材料の特性については、フロントパネル、A ピラーおよびバンパーの部材から取り出した試験片を用いた引張試験を実施し、各部材の材料特性をモデルに組み込んだ。

歩行者の有限要素モデルについては Total

Human Model for Safety (THUMS)を使用した。歩行者は日本人の体格を考慮して身長 165 cm、体重 60 kg とし、成人男性 50th%tile (AM50: 身長 175 cm、体重 77 kg) からのスケーリングにより作成した。本研究では、歩行者の側方に対しボンネット車、1BOX 車をそれぞれ 40 km/h で衝突させた(図 3a)。車に対する胸椎 (T4) の相対速度、胸郭の変形と応力についてボンネット車と 1BOX 車で比較した。

3.2. 歩行者頭部インパクト衝撃シミュレーション

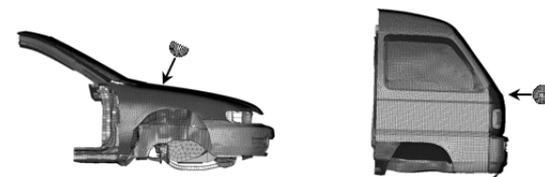
歩行者胸部との衝突による車体変形特性と比較するため、成人頭部インパクト (4.5 kg) を用いた頭部インパクト衝撃試験のシミュレーションを実施した(図 3b)。ボンネット車に対する頭部インパクトの打撃位置、速度、角度は、胸部の衝突状況を考慮して、ボンネット中心線上 (WAD 1600 mm)、35 km/h、65 度とした。1BOX 車に対する頭部インパクトの打撃位置、速度、角度は、ウィンドシールドフレーム (WAD 1100 mm)、40 km/h、0 度とした。



(a) Bonnet-type car

(b) One-box vehicle

図 3a 車-歩行者衝突モデル



(a) Bonnet-type car

(b) One-box vehicle

図 3b 頭部インパクト車両衝突モデル

4. 研究成果

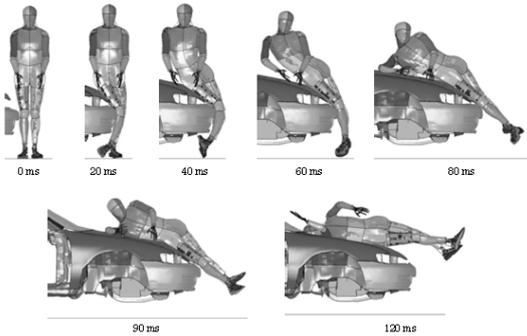
4.1 車対歩行者衝突シミュレーション

(1) 挙動

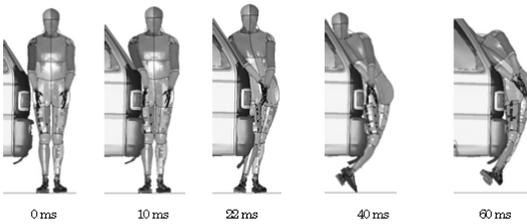
ボンネット車および 1BOX 車が歩行者と衝突する際の歩行者の挙動を図 4 に示す。歩行者はボンネット車と 1BOX 車との衝突において異なる挙動を示した。ボンネット車との衝突では、最初に下腿部がバンパーと接触し、大腿部がボンネットリーディングエッジと接触 (40 ms) した。その後、歩行者は車の前端まわりに回転し、胸部は 90 ms においてボンネット上に衝突した。このときの胸部の車に対する衝突角度は、胸椎 (T4) の速度成分

より 51 度 (図 5) であった。その後、頭部はボンネットカウルに衝突した (120 ms)。

1BOX 車との衝突では、歩行者の回転はボンネット車との衝突時と比べ小さく、短時間で衝突が終了する。下肢がバンパーと接触すると、ほぼ同時刻に腰部と腹部がフロントパネルに衝突した。その後、22 ms において胸部は角度 8 度 (図 5) でウィンドシールド下部と衝突し、頭部はウィンドシールドに接触した。頭部、胸部との衝突により、ウィンドシールドは大きく変形し、歩行者の上体は側屈した。



(a) Bonnet-type car



(b) One-box vehicle

図 4 車両衝撃時の全身歩行者の挙動

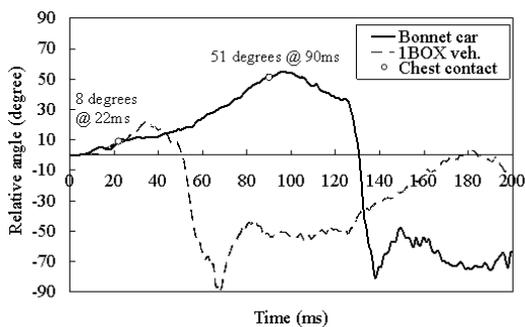


図 5 車に対する胸部の衝突角度

(2) 胸部衝突速度

車に対する胸部の相対合成速度を図 6 に示す。ボンネット車との衝突では、歩行者の上体は車のまわりに回転するため、歩行者の上体の速度は増加する。しかし、歩行者は衝突後に車両進行方向に加速されるため、胸部が

車両と衝突する時点では胸部の相対合成速度は低い値(7.8 m/s)となった。1BOX 車との衝突では、歩行者の体幹は回転をともなわず、胸部は車の進行方向から打撃を受ける。下肢が衝突した後、短時間で胸部は車両と衝突している。その結果、人体は車両進行方向に十分加速されていない状況であるため、車両衝突時の胸部の相対合成速度は 9.6 m/s であった。このように、ボンネット車との衝突と比べ 1BOX 車との衝突では、胸部は高い速度で車両と衝突することが明らかとなった。

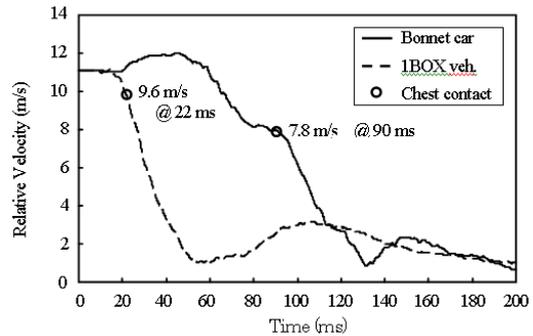


図 6 車に対する胸部の相対合成速度

(3) 胸郭の変形

ボンネット車および 1BOX 車が歩行者と衝突する際の歩行者の骨格に関する変形状況と応力の分布を図 7, 図 8 に示す。ボンネット車との衝突 (図 7) では、ボンネットは一樣に変形し (最大変形量 94 mm)、歩行者の胸部衝突時のエネルギーを効率的に吸収した。また、本研究で対象とした車両モデルでは、ボンネットとエンジンの間のクリアランスが十分に大きかったため、ボンネットとエンジンとの底付きは発生せず、胸郭の大きな変形が防止されたと考えられる。ただし、衝突時に肩関節から伝達される力によって、比較的、高い応力が鎖骨と第 1 肋骨にみられた。

1BOX 車との衝突 (図 8) では、剛性の高いウィンドシールドフレームが歩行者の胸郭下部と接触し、車両前方に押し出されるが、胸郭上部は剛性の低いウィンドシールドの大変形によって車両客室内側へ進入した。その結果、ウィンドシールドとウィンドシールドフレームの剛性差によって、歩行者の胸郭にはせん断変形が発生した。ウィンドシールドフレームとの接触によって胸郭に局所の変形がみられ、下位肋骨の応力は 150 MPa を超える高い値となり、骨折の可能性を示した。一方で、ウィンドシールドに接触した部位の肋骨では、応力は低い値となった。

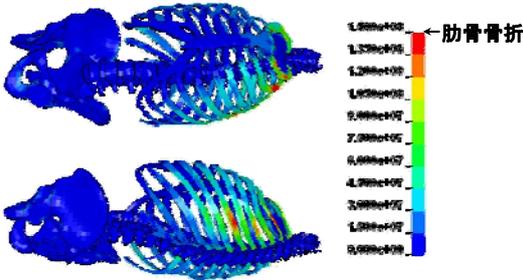
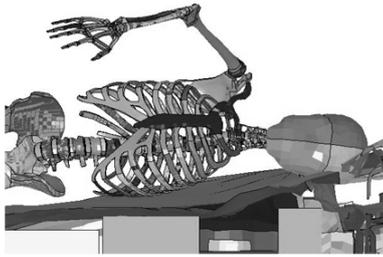


図7 ボンネット車と衝突する際の歩行者の骨格に関する変形状況と応力の分布

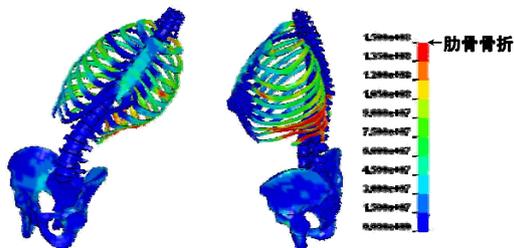
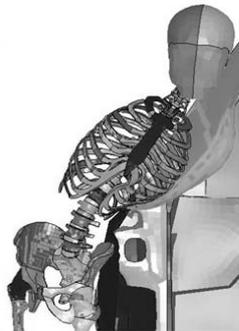


図8 1BOX車と衝突する際の歩行者の骨格に関する変形状況と応力の分布

4.2. 歩行者頭部インパクト衝撃シミュレーション

頭部インパクト衝撃シミュレーションの結果を表1に示す。ボンネット車のボンネットトップでの頭部傷害値 (HIC) は 697 であった。1BOX車ではフロントパネル、ウィンドシールドフレームの HIC は 1000 を超えていたが、ウィンドシールド中央では HIC は 203 であった。したがって、胸郭に大きな変形を与える車体部位であるウィンドシールドフレームでは、HIC も高い傾向となることがわかる。

表1 頭部インパクト衝撃シミュレーションの結果一覧

Vehicle	Area	Velocity (km/h)	Angle (degree)	HIC15
Bonnet-type car	Bonnet top	35	65	697
	Front panel	40	0	1900
1BOX	Windshield frame	40	0	1087
	Windshield center	40	50	203

頭部インパクト衝撃試験および歩行者衝突シミュレーションにおける胸部衝突によるボンネットの接触力とボンネットの変形量を図9に示す。両者の荷重変形特性は大きく異なり、頭部インパクト衝撃試験では接触力が大きな値 (8.1 kN) となるが、歩行者モデルの胸部では接触力は大きくは増加しない (4.1 kN)。また、ボンネットの最大変形量は頭部インパクト衝撃試験が 66 mm、歩行者モデルの胸部衝突時が 94 mm であり、歩行者モデルの胸部が衝突した際の車体変形量の方が大きな値となった。これは、骨盤もボンネットを変形させるため、胸部の接触力は小さいにもかかわらず、胸部が接触したボンネット部位の変形量は大きくなったことも一因として考えられる。

頭部インパクト試験と歩行者モデルの胸部衝突について、接触力と車体変形の関係を図10に示す。両者の荷重変形特性は大きく異なり、頭部インパクト試験では接触力の最大値が 7.7 kN、最大変形量は 45.5 mm となるが、歩行者モデルの胸部衝突時では、最大接触力は 2.8 kN、最大変形量は 61.3 mm であり、歩行者モデルの胸部衝突の方が接触力が小さく、変形量は大きくなった。これは、ボンネット車との衝突と同様に骨盤がフロントパネルに衝突し、ウィンドシールドフレームの変形量を増加させた。

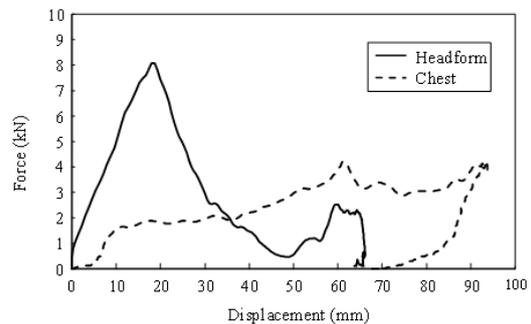


図9 ボンネット車における頭部インパクト、歩行者胸部のボンネット接触力と変形量

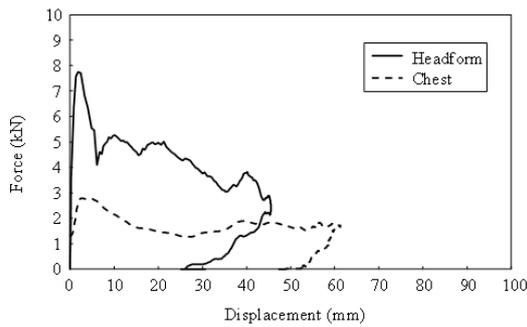


図 10 IBOX 車における頭部インパクト, 歩行者胸部のボンネット接触力と変形量

4.3 考察

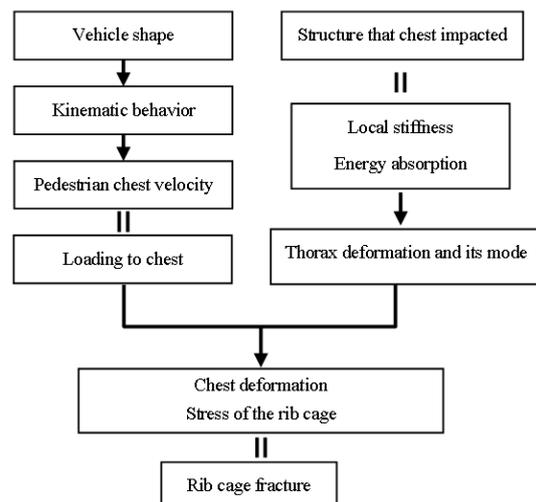
ボンネット車との衝突では, 歩行者は車両前端まわりに回転するが, その間に歩行者は車両方向に加速されること, ならびに胸部は頭部と比較して回転半径が小さいことから, 胸部の車に対する衝突速度は減少した. また, 歩行者の胸部については, ボンネット上のエネルギー吸収エリアが全域に及ぶため変形は一様となり小さかった. これに対して, IBOX 車の衝突では, 歩行者の全身が回転をとまわず短時間で車体と衝突するため, 胸部の衝突速度は高くなった. 歩行者の胸部はフロントパネルとウィンドシールドフレームから直接的な打撃を受け, 剛性の高いウィンドシールドフレームによって歩行者の胸部に局所的な変形と高い応力が生じた. このように, 本研究におけるシミュレーション結果から, IBOX との衝突では, 胸部が骨折する可能性が高くなることを示しており, 実際の歩行者事故において IBOX 車と衝突した場合の歩行者の胸部傷害頻度 (図 2) と同様の傾向を示していると考えられる.

これらの車体前部形状と歩行者胸部の傷害発生過程をまとめると表 2 のようになる. 車体形状による衝突時の歩行者の挙動の違いによって, 車に対する歩行者胸部の衝突速度に差異が発生し, その結果, 胸部への負荷が異なるものとなる. また, 胸部が接触する車体部位の構造により, 剛性とエネルギー吸収特性が異なり, 胸部の変形モードと変形量が影響を受ける. 変形モードが局所的であれば, 骨折のリスクも高くなる. これらの車体形状と胸部の衝突する部位の車体構造によって, 胸部の変形量や胸部の応力が影響を受け, 肋骨の骨折の発生リスクが決まることとなる.

歩行者保護に関する欧州法規検討の際には, 子供の胸部は大腿部インパクト試験によって保護効果が見込めるとして, その検討がなされなかった. 今回の車対歩行者衝突シミュレーションでは, 歩行者の胸部が衝突する車体部位の局所的な剛性が, 胸部の骨折に影響を及ぼすことがわかった. 頭部インパクト

試験は, 成人の胸部が衝突する部位に対しても実施されるが, このとき HIC の高い部位では, 胸部の変形も大きくなることが示された. ただし, 現在の歩行者保護法規 (保安基準) における頭部インパクト試験では, 試験エリアの 2/3 の領域で HIC 1000 以下, 他の領域は 2000 以下を満たすこととなっており, これらの閾値の差が, 車体の剛性差を許容し, 歩行者胸部が衝突したときに胸部の局所的な変形をもたらす可能性がある. また, 歩行者胸部と頭部インパクトによる衝突では車体変形モードが異なる. 歩行者モデルの衝突では, 胸部の他に骨盤も車体を変形させる. その結果, 歩行者モデルの衝突では, 胸部と車体の接触力が小さいにもかかわらず, 胸部が接触する部位の車体変形量は頭部インパクト試験による車体変形量よりも大きくなった. したがって, ボンネット上への胸部の衝突の際にはエンジン底付きにより過大な応力が作用する可能性も考えられる.

表 2 歩行者胸部傷害の発生要因



4.4 結論

本研究では衝突速度 40 km/h によるボンネット車, IBOX 車と歩行者の衝突の有限要素解析をおこない, 車体形状が歩行者胸部の傷害リスクに及ぼす影響を調べた. また, 胸部が衝突するボンネットトップについて, 現在, 頭部インパクト試験によってボンネットのエネルギー吸収特性が評価されていることを考慮し, 頭部インパクトを用いた胸部傷害評価の可能性を調べた. その結果, 以下の結論が得られた.

- (1) ボンネット車では歩行者上部の回転をとまない, 胸部は低い速度でボンネット上に衝突する. 歩行者の胸部はボンネット上のエネルギー吸収エリアが全域に及ぶため変形は一様となり, 変形量は小さかった.

(2) 1BOX 車では、歩行者上体部の回転をとまなわず短時間で車体と衝突するため、胸部は高い速度で車に衝突する。胸部が衝突したウィンドシールドフレームの剛性が高いため、これによって胸郭が局所的に変形し、骨折の危険性が高い結果となった。

(3) 歩行者の胸部が衝突する位置に対して大人頭部インパクトを用いた衝撃試験のシミュレーションをおこない、結果を比較すると、胸郭の変形が大きい部位では頭部インパクトのHICも大きい。また、例えば1BOX車との衝突では、ウィンドシールドとウィンドシールドフレームの剛性差により歩行者胸郭にはせん断変形が生じることから、高剛性の箇所に対する頭部インパクト試験により、胸部傷害リスクが評価できる可能性が存在する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

①松井靖造, 高橋国夫, 西本雄俊, 水野幸治, 一杉正仁, 中根大祐, 和波真吾, 歩行者事故における胸部傷害予測のための有限要素解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No. 5, pp. 1017-1022 (2010)

②Y. Matsui, Y. Han and K. Mizuno, Performance of Collision Damage Mitigation Braking Systems and their Effects on Human Injury in the Event of Car-to-Pedestrian Accidents, Stapp Car Crash Journal, Vol. 55, pp. 461-478 (2011)

③Y. Han, J. Yang, K. Nishimoto, K. Mizuno, Y. Matsui, D. Nakane, S. Wanami, M. Hitosugi, Finite element analysis of kinematic behavior and injuries of pedestrians in vehicle collisions, International Journal of Crashworthiness Vol.17 No.2 pp.141-152 (2012)

④Y. Han, J. Yang, K. Mizuno and Y. Matsui, Effects of Vehicle Impact Velocity, Vehicle Front-end Shapes on Pedestrian Injury Risk, Traffic Injury Prevention, Volume 13 Issue 5 pp. 507-518 (2012)

⑤Y. Han, J. Yang, K. Mizuno and Y. Matsui, A Study on Chest Injury Mechanism and the Effectiveness of a Headform Impact Test for Pedestrian Chest Protection from Vehicle Collisions, Safety Science Vol.50 pp.1304-1312 (2012)

⑥Y. Matsui, T. Doi, S. Oikawa and K. Ando, Features of Fatal Pedestrian Injuries in Vehicle-to-Pedestrian Accidents in Japan, SAE International Journal of Transportation Safety 1(2):(2013) Accepted

[学会発表] (計3件)

①松井靖造, 高橋国夫, 西本雄俊, 水野幸治, 一杉正仁, 中根大祐, 和波真吾, 歩行者事故における胸部傷害予測のための有限要素解析, 自動車技術会 2010 年春季大会学術講演会前刷集 No.78-10, pp.21-26 (2010)

②Y. Matsui, Y. Han and K. Mizuno, Performance of Collision Damage Mitigation Braking Systems and their Effects on Human Injury in the Event of Car-to-Pedestrian Accidents, Stapp Car Crash Journal, Vol. 55, pp. 461-478 (2011)

③Y. Matsui, T. Doi, S. Oikawa and K. Ando, Features of Fatal Pedestrian Injuries in Vehicle-to-Pedestrian Accidents in Japan, Paper2013-01-0777, Proceeding of SP-2341 Accident Reconstruction, 2013 SAE International Congress & Exposition, Society of Automobile Engineers pp. 115-126 (2013)

6. 研究組織

(1)研究代表者

松井靖造 (MATSUI YASUHIRO)

交通安全環境研究所・自動車安全研究領域・主席研究員

研究者番号: 00426230

(2)研究分担者

水野幸治 (KOJI MIZUNO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80335075

(3)連携研究者

一杉正仁 (MASAHITO HITOSUGI)

獨協医科大学・法医学教室・准教授

研究者番号: 90328352