

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560087
 研究課題名（和文） 日本人人体有限要素モデルによる自動車衝突時の後席乗員保護に関する研究
 研究課題名（英文） Occupant protection in car crashes using Japanese human finite element model
 研究代表者
 水野 幸治 (Koji Mizuno)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80335075

研究成果の概要：自動車の衝突時の後席乗員について、標準日本人を想定し骨盤形状とそのまわりの軟部組織を有する人体有限要素モデルを作成し、ラップベルトと骨盤に働く力の関係を調べた。骨盤形状や軟部組織はラップベルトに働く力に対して及ぼす影響は小さいが、初期の乗員の骨盤角度、ラップベルトのアンカー角度がサブマリンの発生に、ショルダーベルトの位置が乗員挙動と加速度に影響を及ぼすことがわかった。さらに、子ども乗員についても、傷害発生メカニズムを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：交通事故，生物・生体工学

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車の衝突時の後席乗員保護の重要性が認識されている。自動車アセスメントを実施している独立法人自動車事故対策機構は衝突ダミーを用いて、後席シートベルト着用の有無による衝突実験を行った（2005年）。本申請者はこの解析を自動車事故対策機構からの委託により実施した。その結果、シートベルトは後席乗員にとって、人体と客室内との衝突を防止し、傷害防止に対して非常に有効であることが明らかになった。しかし、エアバッグなどで保護されている前席と

は異なり、後席ではシートベルトのみによって人体を保護するため、ベルトから乗員に大きな負荷が加わる。

自動車の衝突試験では1990年代後半より車体の運転席側のみを衝突させるオフセット前面衝突試験が行われるようになった。オフセット前面衝突試験は、ダミーの傷害値を下げるために客室侵入量を減少させる必要がある。その結果、今日に至るまで、客室強度が向上し続けている。これらは前席乗員にとっては、客室侵入量の低減による傷害の防止という直接的な利益をもたらす。しかし、

車両加速度が増加するため、客室侵入量が傷害に影響を及ぼす影響が小さい後席乗員にとっては、むしろ衝撃環境は厳しくなっていると考えられる。これに対する後席乗員の拘束装置はシートベルトのみであり、前席に比較してシートベルトプリテンショナーやベルトフォースリミッタなどのデバイスも導入されておらず、後席乗員の傷害危険度は年々、高くなっていると考えられる。

自動車ユーザーへの後席のシートベルト着用の必要性が、警察庁、国土交通省、自動車連盟などから訴えられている。後席のシートベルト着用率が向上すれば、死亡・重傷者数は減少することは明らかである。しかし、現在のシートベルト性能のままであれば、シートベルトを着用したことによる肋骨骨折などの重傷者数は、現在よりも増加すると考えられる。

国際的にも後席乗員を保護するべきという方向が示されつつある。米国運輸省による事故解析では、かつては後席乗員、助手席乗員、運転席乗員の順に傷害率が高かったが、現在では助手席乗員、後席乗員、運転席乗員の順に変わっていることが指摘されている。特に高齢者では、後席のシートベルトによる肋骨骨折が増えていることが示されている。

2. 研究の目的

交通事故分析によって後席乗員の受傷状況を明確にし、これらを踏まえた上で後席乗員の衝撃条件を設定する。また、MRI データを用いて、日本人の形状を模擬した人体有限要素モデルを作成する。このモデルによって後席乗員衝撃シミュレーションを行い、乗員の胸部骨折危険度を低減し、サブマリンを防止するためのシートベルト特性やレイアウトを検討する。また、後席では様々な体格の乗員が着座することを考慮して、小柄女性と子供乗員について数値シミュレーションを実施する。これらをもとに、後席乗員を保護するためのシートベルト特性とレイアウトを提案する。

3. 研究の方法

マルチボディダミーモデル(Hybrid III AF05 AM50)及び人体FEモデル(THUMS AM50)を用いて、体格差を考慮した後席乗員の衝撃応答解析を行い、後席乗員の傷害リスクを評価した。また、ベルトアンカーポジションによるサブマリンの可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) 事故分析

事故統計(平成 19 年)によると、一般道路におけるシートベルト着用率は、運転席乗員が 95.0%、助手席乗員が 86.3%、後席乗員が 8.8%となっている。成 14 年から平成 18 年の

国内のシートベルト着用有無別の事故データより、後席乗員に関してシートベルト着用有無別の致死率及び死亡重傷率を調査した。後席乗員の致死率は、シートベルト着用の場合 0.10%、シートベルト非着用の場合 0.47%となっている。また、後席乗員の死亡重傷率は、シートベルト着用の場合 1.84%、シートベルト非着用の場合 4.81%となっている。事故データよりシートベルト非着用とシートベルト着用を比較すると、致死率は 4.7 倍、死亡重傷率は 2.6 倍となる。

(2) 体格差を考慮した人体衝撃応答解析

① シートベルト着用後席乗員の傷害リスク

後席乗員の傷害リスクを評価するために、Hybrid III AM50・AF05 ダミーマルチモデルを用いて、一般的なセダン車の後部座席を模擬した解析を実施した。後席拘束装置は、プリテンショナーおよびフォースリミッターのない一般的な後席シートベルトをモデル化した。前席を模擬するために、発泡材と剛体で構成されたフロントボードを用いた。

Hybrid III AM50・AF05 ダミーモデルの傷害値を図 1 に示す。傷害閾値として、HC15 700, Head 3mclip 80 G, Chest 3mclip 60 G, 大腿骨荷重 10 kN (AM50) 6.8kN (AF05), 胸たわみ 50 mm (AM50) 41 mm (AF05)を用いた。後席では、シートベルトのみにより上半身を拘束し、また、フォースリミッターがないため、胸部に大きな集中荷重が発生する。Hybrid III AM50・AF05 ダミーモデルのいずれも胸部の傷害値が高くなる傾向があった。後席では、肋骨骨折などの傷害の可能性が高いと考えられる。

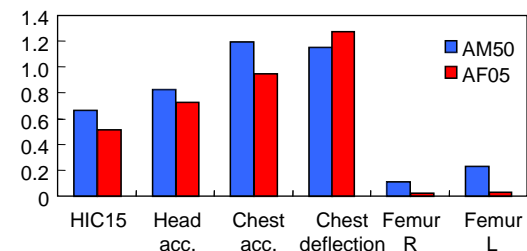


Fig.1 Injury criteria / IARVs

② サブマリン評価

Hybrid III AM50, AF05 ダミーモデル、および人体有限要素 (FE) モデルを用いて、ラップベルトアウターアンカー、フロントボード位置のサブマリン発生に対する影響を検討した。ラップベルトアンカーポジションは図 2 に示す①～④を用いた。

衝突ダミーにおけるサブマリン発生の可能性が、骨盤とベルトの角度により評価できる。ダミーモデル及び人体 FE モデルに対して、骨盤 - ベルト角度を用いてサブマリンの

可能性の評価を行った。人体 FE モデルにおける骨盤角度は、寛骨臼中心 - 仙骨底中央と水平面とのなす角度と、ダミーモデルのヒップジョイント - 腰椎アタッチメント中心と水平面とのなす角度を一致させ、ダミーモデルの骨盤角度 0° を人体FEモデルの骨盤角度 0° とした。ベルト角度は、アウター側とインナー側の2つのラップベルト角度を用いた。

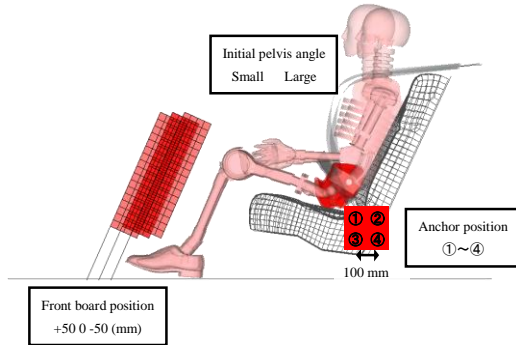


Fig. 2 Lap belt outer anchor position

③ 腰部挙動

(a)Hybrid III AM50 いずれのアンカーポジションにおいても、顕著なサブマリンは発生しなかった。アンカーポジションが1, 2, 3の場合にラップベルトが腹部に移動する挙動がみられたが、このときラップベルト荷重は数百N程度であるため、腹部傷害の原因になることはないと思われる。

(b)Hybrid III AF05 AM50と同様にいずれのアンカーポジションでも顕著なサブマリンの発生はなかった。アンカーポジション2の場合にラップベルトが骨盤から完全に外れたが、AM50同様ラップベルト荷重が小さいため、腹部傷害の原因になることはないと考えられる。

(c)人体FEモデル NICTより公開されている日本人平均男性の数値人体データベース(TARO)を用いて、腰部まわりの軟部組織形状を作成した(図3)。すべてのアンカーポジションでインナー側ラップベルトが骨盤から腹部に移動した。アンカーポジション2では、アウター側ラップベルトも骨盤から腹部に移動した。

人体FEモデルは胸椎が屈曲するため、ショルダーベルトのピークがラップベルトのピークよりも遅れる。60msでラップベルト荷重が最大となった後に、ショルダーベルトによりバックルが上方に移動する。そのため、インナー側ラップベルト角度が浅くなる。それにより、インナー側ラップベルトにおいて、サブマリンが発生した。このときのラップベルト荷重は6~8kNである。図3にアンカーポジション2の腰部拘束状態を示す。ラップベルトが骨盤から完全に外れ、腹部に大

きな荷重がかかっており、腹部傷害の可能性が非常に高いと考えられる。

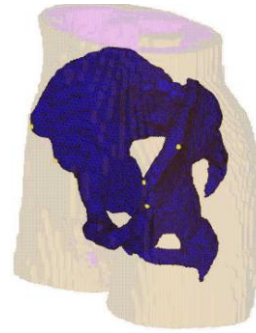


Fig. 3 Pelvis model

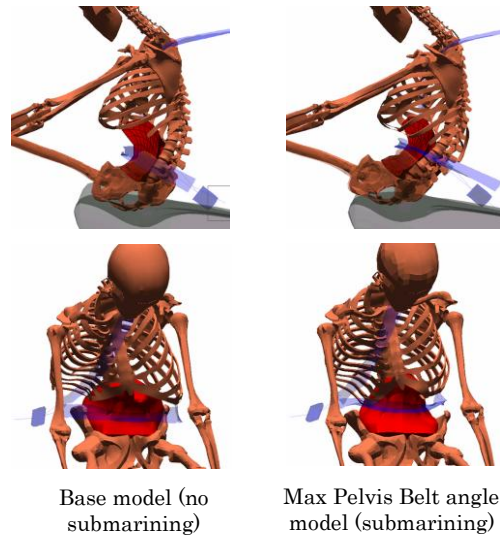


Fig. 4 Submarining of human FE model (anchor position 2)

④ 骨盤 - ベルト角度

ラップベルト荷重が2kN以上における、骨盤 - ベルト角度の最大値を図4に示す。アンカーポジションが4, 3, 1, 2の順に骨盤 - ベルト角度が大きくなっていくことが分かる。ダミーモデルにおいては、顕著なサブマリンは発生しなかったが、腰部挙動を考慮すると、骨盤 - ベルト角度が大きくなるにつれ、サブマリン発生の危険性が高まっていると考えられる。また、人体FEモデルにおいて、アンカーポジション1, 2, 3では、インナー側でサブマリンが発生し、アンカーポジション2では、アウター側でもサブマリンが発生したことを考慮すると、人体FEモデルにおいても、骨盤 - ベルト角度によりサブマリンの可能性を評価できることが示された。また、インナー側の骨盤 - ベルト角度においても、同様の傾向がみられた。これにより、アウター側のアンカーポジションがインナー側におけるサブマリンの発生にも影響を与えると考えられる。

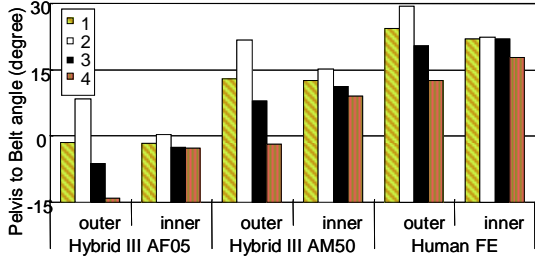


Fig. 5 Pelvis - belt angle

⑤ まとめ

人体 FE モデルとダミーモデルにより、体格差を考慮した衝撃応答解析を行い、後席乗員の傷害リスクやアンカーポジションのサブマリンの発生に及ぼす影響を検討した。結論は以下のとおりである。

- (i) 一般的な後席においては、胸部の傷害リスクが高い。
- (ii) 人体 FE モデルに対してもサブマリンの可能性を骨盤 - ベルト角度により評価が可能となった。
- (iii) アンカーポジションが乗員に対して前下方向であるとサブマリン防止に有効である。

(2) 子ども乗員の保護に関する研究

CRS に着座する子ども乗員は、CRS がシートベルトや ISOFIX により座席に固定され、乗員はハーネスやシールドによって CRS に拘束される。今後 ISOFIX による固定方法(図 6)が主流になると考えられる。しかし、ISOFIX の乗員傷害値はこれまでの座席ベルトによる固定 CRS と比較して低くはならない。この要因をライドダウンから検討した。

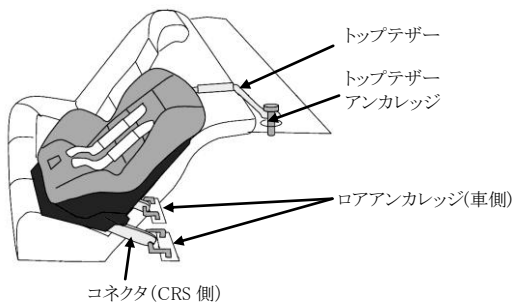


Fig. 6 ISOFIX CRS

CRS 乗員の衝撃時の安全性評価としてスレッド試験が用いられることが多い。スレッド試験と実車試験は加速度は同じであるが、速度と変位が異なる。そのため、実車試験の座標系と初期条件で定義されるライドダウンエネルギーを検討するためには、スレッド試験の変数を実車試験の変数に変換をする必要がある(図 7)。車両、及び乗員の変位 X , x

はスレッド試験における加速度を用いると次のようになる。

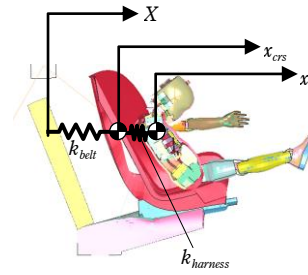


Fig.7 Coordinate system of CRS occupant

$$X = V_0 t + \iint \ddot{X}_{sled} dt dt \quad (1)$$

$$x = V_0 t + \iint \ddot{x}_{sled} dt dt \quad (2)$$

ここで、 \ddot{x}_{sled} , \ddot{X}_{sled} はそれぞれスレッドの加速度、乗員の加速度、 V_0 は実車衝突における初速度である。乗員と CRS の運動方程式はそれぞれ次のようになる。

$$m\ddot{x} = -k_{harness}(x - x_{CRS}) \quad (3)$$

$$m_{CRS}\ddot{x}_{CRS} = -k_{harness}(x_{CRS} - x) - k_{belt}(x_{CRS} - X) \quad (4)$$

ここで、 m : 乗員の質量(たとえば胸部質量)、 m_{CRS} : CRS の質量、 $k_{harness}$: CRS のハーネスによる乗員と CRS を結合するばね定数、 k_{belt} : CRS を座席に固定するシートベルトによる CRS と座席を結合するばね定数である。式(3)と(4)の和をとると次のようになる。

$$m\ddot{x} + m_{CRS}\ddot{x}_{CRS} = -k_{belt}(x_{CRS} - X) \quad (5)$$

CRS のハーネスの吸収するエネルギー $E_{rs(harness)}$ と CRS を座席に取り付けるシートベルトの吸収するエネルギー $E_{rs(CRS)}$ は、それぞれ式(3)、(5)を用いると、

$$\begin{aligned} E_{rs(harness)} &= \int k_{harness}(x - x_{CRS}) d(x - x_{CRS}) \\ &= -\int m\ddot{x} d(x - x_{CRS}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_{rs(CRS)} &= \int k_{belt}(x_{CRS} - X) d(x_{CRS} - X) \\ &= -\int (m\ddot{x} + m_{CRS}\ddot{x}_{CRS}) d(x_{CRS} - X) \end{aligned}$$

となる。一般に衝突時に乗員に外部から加わる仕事は、次式で示すようにライドダウンエネルギー E_{rd} と拘束装置の吸収するエネルギー E_{rs} に分けられる。

$$\begin{aligned} E &= -\int m\ddot{x} dx \\ &= -\int m\ddot{x} dX - \int m\ddot{x} d(x - X) \\ &= E_{rd} + E_{rs} \end{aligned} \quad (7)$$

拘束装置の吸収するエネルギー E_{rs} は、CRS の変位 x_{CRS} を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E_{rs} &= -\int m\ddot{x}d(x-X) \\
&= -\int m\ddot{x}d(x-x_{CRS}+x_{CRS}-X) \\
&= -\int m\ddot{x}d(x-x_{CRS}) - \int m\ddot{x}d(x_{CRS}-X) \\
&= E_{rs(harness)} + E_{rs(CRS,occupant)}
\end{aligned} \tag{8}$$

$E_{rs(CRS, occupant)}$ は CRS を座席に固定するシートベルトの吸収するエネルギー $E_{rs(CRS)}$ のうち、乗員の質量が関与している部分であることがわかる。すなわち、乗員の拘束エネルギー E_{rs} は、ハーネスの吸収するエネルギーと CRS を座席に固定するシートベルトの吸収するエネルギーからなると考えることができる。初期の乗員の運動エネルギーに対して、それぞれのエネルギーの比の最大値は次のようになる。

$$\begin{aligned}
\mu_{rd} &= \frac{E_{rd}|_{\max}}{mV_0^2/2} \\
\mu_{rs(harness)} &= \frac{E_{rs(harness)}|_{\max}}{mV_0^2/2} \\
\mu_{rs(CRS, occupant)} &= \frac{E_{rs(CRS, occupant)}|_{\max}}{mV_0^2/2}
\end{aligned} \tag{9}$$

図 8 に有限要素解析から計算した CRS 乗員の胸部加速度と $\mu_{rs(harness)}$ の関係を示す。 $E_{rs(harness)}$ は CRS のハーネスが吸収するエネルギーであるから、 $\mu_{rs(harness)}$ が大きいほど乗員に加わる負荷が大きく乗員加速度が高くなる傾向が見られる。

図 9 に同じハーネス特性を持つシートベルト固定 CRS と ISOFIX CRS について、乗員運動エネルギーの初期値に占めるそれぞれのエネルギーの割合を示す。ISOFIX CRS ではライドダウンエネルギーの占める割合は大きい、ISOFIX コネクタやトップテザーの吸収するエネルギーが小さいため、拘束装置の吸収するエネルギーの割合は、ISOFIX CRS とシートベルト固定 CRS で同様となる。そのため、ISOFIX CRS ではライドダウンエネルギーが大きいにもかかわらず、乗員の胸部加速度はシートベルト固定 CRS (433 m/s^2) と ISOFIX CRS (444 m/s^2) で同様のレベルとなる。このように CRS 使用時の乗員のライドダウンについては、CRS を車の座席に固定している部位の吸収するエネルギーを考慮することによって、ISOFIX CRS 乗員の高い加速度レベルを理解することが可能となった。

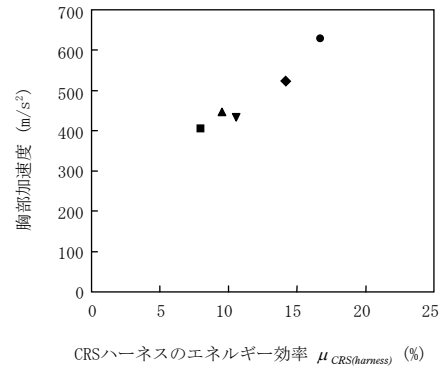


Fig. 8 Energy absorbed by CRS harnesses and Occupant chest acceleration based on finite element analysis

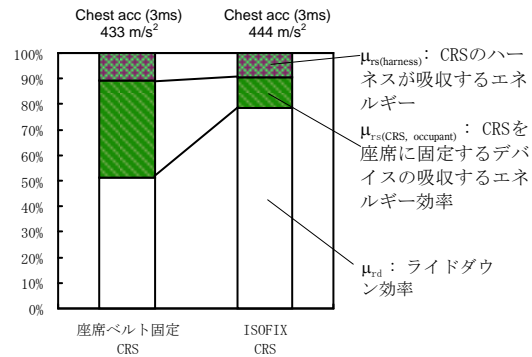


Fig. 9 Energy ratio for seat belt CRS and ISOFIX CRS based on finite element analysis

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 5 件)

- ① Jia Hu, K. Mizuno, The Kinematic Behavior and Responses of Hybrid III 3YO Dummy and Child Human FE Model in ISOFIX CRS in Frontal Impact, International Journal of Crashworthiness, 2009 (掲載決定).
- ② 松井靖浩, 水野幸治, 碓 孝浩, 富田賢一, フルラップ前面衝突実験による後席シートベルト着用の有効性について, IATSS Review, 34, 2009 (掲載決定)
- ③ K. Mizuno, K. Iwata, T. Namikiri, N. Tanaka, Comparison of Human FE Model and Crash Dummy Response in Various Child Restraint Systems, International Journal of

Crashworthiness, Vol.14, Issue 2, pp.139-149, 2009.

- ④ J. Hu, K. Mizuno, E. Tanaka, S. Takagi, N. Hosokawa, Y. Matsui, H. Yonezawa, R. Yoshida, Occupant Responses in Child Restraint Systems in Side Impact Tests, International Journal of Vehicle Safety, Vol. 3, No. 3, pp. 14-31, 2008.
- ⑤ T. Kapoor, W. Altenhof, M. Tot, W. Zhang, A. Howard, J. Rasico, F. Zhu, and K. Mizuno, Load Limiting Behaviour in CRS Tether Anchors as a Method to Mitigate Head And Neck Injuries to Children in Frontal Crash, Traffic Injury Prevention, Vol. 9, No. 3, pp. 243-255, 2008.

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 佐々木泰博, 山口真誠, 山本創太, 水野幸治, 田中英一, 自動車の側面衝突時における CRS 使用時の 3 歳児乗員挙動 FE シミュレーション, 日本機械学会東海支部第 58 期総会・講演会, 2009 年 3 月 17-18 日, 岐阜
- ② J. Hu, K. Mizuno, Child Occupant Protection in ISOFIX CRS, The Sixth International Forum of Automotive Traffic Safety and Seminar for Impact Biomechanics and Injury Prevention, December, 2008, Xiamen, China.
- ③ K. Mizuno, Y. Arai, The Effectiveness of Matching of Front Rail Height in Car-to-Car Crashes, ICrash 2008, July, 2008, Kyoto, Japan.
- ④ J. Hu, K. Mizuno, The Effectiveness of a Top-Tether Force Limiter in ISOFIX CRS, ICrash 2008, July 2008, Kyoto, Japan.
- ⑤ 水野幸治, 衝突事故時の衝撃がもたらすもの, 子どもの重傷事故防止シンポジウム, 財団法人母子衛生研究会, 2008 年 2 月 6 日, 東京 (招待講演)
- ⑥ 榊田貴之, 水野幸治, 体格差を考慮した後席乗員の衝撃応答解析, 日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2008 年 1 月, 東京
- ⑦ 榊田貴之, 水野幸治, ダミーと人体 FE モデルを用いた後席乗員衝撃応答解析, 日本機械学会 第 20 回計算力学講演会, 2007 年 11 月, 京都
- ⑧ 水野幸治, 小児有限要素モデルの開発と CRS 衝撃解析への適用について, LS-DYNA ユーザー会議, 2007 年 10 月, 名古屋
- ⑨ K. Mizuno, T. Ikari, K. Tomita, Y. Matsui, Effectiveness of Seatbelt for Rear Seat Occupants in Frontal Crashes,

Paper Number 07-224, 20th International Technical Conference on the Enhanced-Safety of Vehicles, June 2007, Ryon, France.

- ⑩ K. Mizuno, T. Namikiri, S. Yamamoto, Analysis of Child Responses in CRS using Child Human FE Model, Paper Number 07-224, 20th International Technical Conference on the Enhanced-Safety of Vehicles, June 2007, Ryon, France.

〔図書〕(計 4 件)

- ① 水野幸治, 衝突事故時の衝撃がもたらすもの, 重傷事故防止のためのチャイルドシート着用啓発事業, 財団法人母子衛生研究会, pp.14-15, 2007.
- ② 水野幸治, 衝突時の後席乗員のシートベルト着用の有効性について, アスカ 21, 日本交通福祉協会, 第 67 号, 2008.
- ③ 水野幸治, 自動車衝突時の子供の安全, バイオメカニズム学会誌, Vol.33, No.1, 2009.
- ④ 水野幸治, 自動車衝突時に起こること, チャイルドヘルス, 診断と治療社, Vol.12, No.5, 2009. 5.

〔その他〕

- ① ホームページ <http://www.biomech.mech.nagoya-u.ac.jp/iplweb/> にシミュレーションの動画を掲載している.
- ② テレビ朝日 ニュースステーション「交通事故の盲点～危険な後席シートベルト”非着用”」(2007 年 5 月 24 日放送) に出演し, 研究内容を説明した.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 幸治 (MIZUNO KOJI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80335075

(2) 研究分担者

田中 英一 (TANAKA EIICHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00111831

山本 創太 (YAMAMOTO SOTA)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 80293653