

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420012

研究課題名(和文) 交通事故時の自転車乗員の頭部保護に関する研究

研究課題名(英文) The head protection of cyclist in vehicle collisions

研究代表者

水野 幸治 (Mizuno, Koji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80335075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： 自転車乗員と四輪車の有限要素法による衝突解析を行った。自転車乗員の挙動は膝高さが四輪車のフード高さによりも高い場合には、自転車乗員は大腿部まわりに回転する。膝高さがフード高さによりも低い場合には腰部がフード上を滑り、頭部が四輪車後方に衝突する。これらの知見は事故分析や頭部保護技術に反映されることが期待される。

事故データから自転車乗員頭部が四輪車のAピラーと衝突した際には、重症度が大きい。頭部インパクトを用いて速度35km/hにてフロントピラーに対する衝撃試験を実施した。頭部傷害値はヘルメット着用で減少したがその値は3000を超えた。Aピラーの変形エネルギーの吸収が必要であることが示された。

研究成果の概要(英文)： Finite element analyses of car-cyclist collisions were conducted. When the knee position of the cyclist was higher than the hood leading edge, the hood leading edge contacted the cyclist leg, and the pelvis slid over the hood top and the wrap-around distance of the cyclist's head was large. When the cyclist's knee was lower than the hood leading edge, the hood leading edge contacted the cyclist thigh, and the cyclist rotated with the femur as the pivot point about the hood leading edge. Accident analyses show that the head injury risk is high in impacts with stiff A-pillars. The headform impact tests were conducted using the pedestrian headform. In the A-pillar impact at 35 km/h, the HIC reduced substantially from without helmet (4815) to with helmet (3000) though it was far above the injury acceptance level (1000). From a simple model of the head acceleration in the A-pillar impact, it was confirmed that a deforming A-pillar could reduce the HIC of the head with helmets.

研究分野：機械工学

キーワード：生体力学 傷害バイオメカニクス 自動車工学 交通事故 自転車乗員保護

### 1. 研究開始当初の背景

平成 23 年の交通事故統計によると、自転車乗員の死者数は 628 人(交通事故死者数全体の 13.6%)、重傷者数 6,437 人(22.2%)、軽傷者数は 132,331 人(16.4%)に上っている。自転車乗員の事故では若年層の割合が多く、死傷者数のうち 32%が 19 歳以下である。特に、中高校生では自転車通学者数が多いため、このような若年層の安全確保が望まれる。一方、警察では警察庁丙交企発第 85 号等において「良好な自転車交通秩序の実現のための総合対策の推進について」(警察庁丙交企発第 85 号等、平成 23 年)が発出され、自転車は原則として車道を走ることが周知させることが確認された。近年の環境意識の高まりや経済情勢にともなう自転車利用の推奨、利用者数の増加もあり、今後、四輪車と自転車乗員による衝突事故件数が大きく増加することが予測される。

交通事故分析とマルチボディシミュレーションによって自転車乗員および歩行者の保護について研究が進められ、衝突において自転車乗員は歩行者と同様に、四輪車の車体形状に沿う形で運動し、頭部がウィンドシールド(前面窓ガラス)と衝突することがわかっている。また、頭部がウィンドシールドやそのまわりに衝突すること、また、フロントピラーまわりでは重症度が大きいという結果も得ている。

自転車乗員の傷害(重傷以上)では、頭部が受傷部位となる頻度が最も高いため、傷害防止には頭部を保護するヘルメットが最も有効であると一般に認識されている。例えば、平成 20 年 6 月の道路交通法改正にともない、13 歳未満の児童・幼児に対して自転車用ヘルメットの着用努力が義務化された。自転車の利用増加の情勢を踏まえ、さらに自転車ヘルメットの着用促進・義務化の論議が活発化すると考えられる。既に米国の一部の州やオーストラリアでは、自転車乗員のヘルメット着用が義務づけられている。事故分析によって、法規化による傷害低減効果について多くの検証研究がおこなわれている。しかし、統計的有意差が表れるほどのヘルメットの効果は得られておらず、ヘルメット着用義務化のコストベネフィットに関してはまだ結論に至っていない。

自転車のヘルメットの安全基準(SG 規格: JIS T8133)には、ヘルメットの性能評価のための頭部模型落下試験が規定されている(図 3)。頭部剛体模型にヘルメットを着用させ、剛体板と半球剛体に落下させたときの頭部模型の加速度が規定されている(1.5 m 落下時の加速度 150G 以下)。これまで自転車用ヘルメットの自動車衝突時の有効性について、実験的に検証されたものは国際的にもみあたらない。

以上より、四輪車衝突時の自転車乗員の挙動を把握した上で、頭部傷害をどのように低減するかを検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、自転車乗員の傷害メカニズムを明らかにすること、ならびに頭部保護方法として、路面ならびに車との衝突の両者に有効に働く、バイオメカニクスを考慮したヘルメットの設計指針を得ることにある。

そのため、自転車乗員の衝突挙動を求め、頭部と車の衝突速度・角度を明らかにする。この条件にもとづき頭部インパクト実験を実施し、ヘルメットに必要なエネルギー吸収要件を求める。

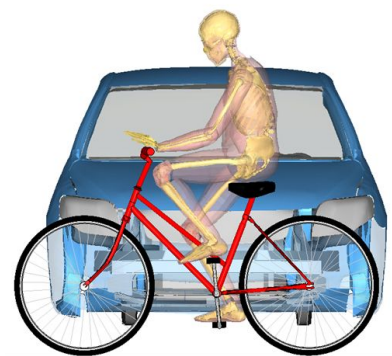
### 3. 研究の方法

自転車乗員の保護に関する研究は、一般にマルチボディ解析、ヘルメットの落下試験、自転車乗車ダミー実車実験などの方法が用いられてきた。これに対して、本研究では自転車乗員の実質的な傷害防止を図るため、人体有限要素モデルによる解析を行い、バイオメカニクスに基づく人体の頭部保護方法を検討し、ヘルメットの有効性を検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 自転車乗員の全身挙動

本研究では、自転車乗員に THUMS Ver3.0 AM50 乗員モデルを使用した。自転車はシティサイクルをモデル化し、ハンドルとタイヤの軸には回転する運動学ジョイントを設定した。自動車は自転車乗員の側面に衝突するものとし、自動車の衝突速度は 40 km/h、自転車の走行速度は 0 km/h とした。自転車乗員はペダルを回転させるため、足部の位置が変化し、様々な下肢姿勢を取る。そのため、自動車と衝突する側の足部(右足)の位置をもとに、代表的な 3 条件(右足上、右足前、右足下)で解析を行った。図 1 に自動車と自転車乗員の衝突位置、自転車乗員の下肢姿勢を示す。



Right foot down

図 1 自転車乗員シミュレーションモデル

自転車乗員の全身挙動を図 2 に示す。自転車乗員は衝突時の下肢の姿勢によって、異なる挙動を示す。右足上姿勢の場合は、下腿部の中央とフードリーディングエッジが接触

し、その後、自転車のフレームが右足部、左大腿部が右下腿部に接触する。膝部の位置はフードリーディングエッジよりも高いため、大腿部と腰部はフード上に乗り上げフード上を滑りながら、上体は車両後方に移動し大腿骨大転子を中心に人体前後軸まわりに回転する。また、下腿部が車体前部から力を受けることで、大腿部がモーメントアームとして働き、人体上下軸まわりに力のモーメントが作用する。その結果、上体が左回転し、後頭部からウィンドシールドに衝突した。

右足前姿勢では下腿部近位部がフードリーディングエッジと衝突し、自転車のフレームは右下腿部と接触し、左下肢がフレームを押し込む。自転車乗員の全身挙動は腰部の車両後方移動量は小さくなるが、右足上姿勢の場合と類似したものとなった。

右足下姿勢の場合は、足部がロアアブソバ、膝部がグリル、フードリーディングエッジは大腿部と接触する。その後、自転車のフレームが右下腿部に接触した。自転車乗員はフードリーディングエッジと衝突した大腿部中央を中心に人体前後軸まわりに回転し、側頭部からウィンドシールドに衝突した。

右足下姿勢の場合、歩行者と同様の下肢姿勢であるため、大腿部を支点とし、人体前後軸まわりで上体が回転するといった歩行者と似た挙動であった。一方、右足上と右足前姿勢の場合、下腿部がフードリーディングエッジと接触し、腰部はフード上を水平移動する。そのため、右足下姿勢の場合よりも、頭部の水平移動量が大きくなり、自動車との頭部衝突位置が後方となる。

このように自転車乗員では、腰部の高さが同じであっても下肢姿勢によって、頭部速度や上体の人体上下軸まわりの回転に違いが見られる。さらに、自転車が速度の有無では、車体と接触しない側の下肢の慣性運動によって、自転車乗員には人体上下軸まわりの回転が異なる。

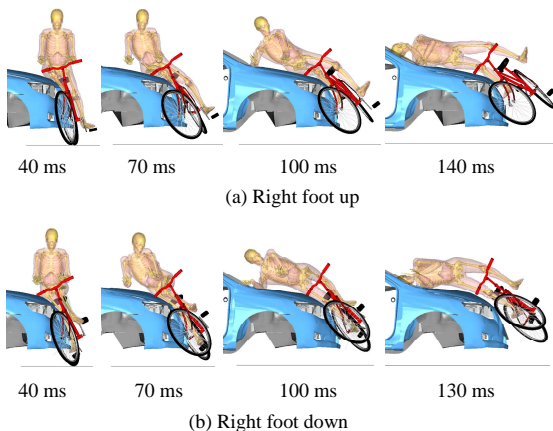


図2 自転車乗員の挙動

## (2) 頭部の有効質量

歩行者衝突はインパクトを用いた簡易的

な車両衝突に置き換えることができる。しかし、自転車衝突は衝突モードが異なるため歩行者衝突と同様に置き換えられるか検討する必要がある。そこで自転車衝突における自転車乗員頭部と車両の接触力から、頭部の有効質量を求め、実際の頭部質量と比較した。一般的に有効質量  $m_e$  は力積(運動量)をもとに計算される。接触力を  $F$ 、頭部重心の加速度と速度を  $a, v$ 、接触の開始時刻と終了時刻を  $t_1, t_2$  とすると、 $t_1 < t < t_2$  おいてつぎの運動方程式が成り立つ。

$$m_e a = F$$

1次元の場合、上式の両辺を時間積分すると有効質量が計算される。

$$m_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F dt}{\int_{t_1}^{t_2} a dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F dt}{v(t_2) - v(t_1)} \quad (1)$$

自転車乗員の頭部がAピラーと衝突するときは、頭部は3次元方向に力を受ける。そのため、上の式のような1次元のモデルによって計算はできない。そこで、接触力  $F$  と頭部加速度  $a$  をそれぞれ3軸の合成接触力と合成加速度として計算することができる。

また、仕事量(エネルギー)を用いた有効質量の算出方法も試みた。運動方程式の両辺を変位によって積分すると

$$m_e = \frac{\int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds}{\int_{s_1}^{s_2} a \cdot ds} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F \cdot v dt}{\int_{t_1}^{t_2} a \cdot v dt} \quad (2)$$

が得られる。

式(1)(2)を用いて、歩行者と自転車乗員の頭部が車体と接触した後の、頭部有効質量を計算した(図3)。歩行者は人体モデルの頭部質量 4.2 kg よりも大きい値となり、自転車乗員では小さい値が得られた。これは、自転車乗員は歩行者と異なり車両に飛び込む形で衝突するため、首からの軸力が働くことが要因と考えられる。また、歩行者と自転車乗員では収束の時間が異なる。これは、歩行者は衝突後に頭部が跳ね返るが、自転車乗員は後頭部に頸部からの軸力がはたらき、Aピラーに対して頭部を押し込むことによる。

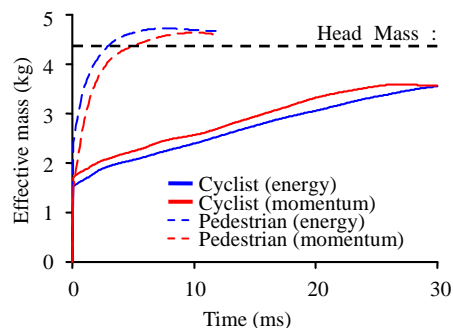


図3 頭部の有効質量



### (3) 頭部インパクト試験

自転車乗員の頭部がAピラーに衝突したときのヘルメット着用による衝撃緩和効果を、歩行者頭部インパクト試験により検討した。歩行者頭部インパクトにヘルメットを装着し、小型車のAピラー中央に対して衝突させた(図4)。衝突速度と角度は35 km/h, 65°とした。

実験では3種類のヘルメットを用いた。形態の異なるハードシェル(HS), ソフトシェル(SS), サイクルヘルメット(CH)を用いた。サイクルヘルメットは通学用で使用されているものである。実験で使用したヘルメットはいずれも外側のシェル, 衝撃吸収用のライナーおよびあごひもで構成され, ハードシェルおよびサイクルヘルメットはシェル部の剛性が高い。いずれのヘルメットも鋼製平面形状アンビル及び半球形状アンビルに対する落下による衝撃試験を含むJIS T8134(8)を満たしている。ヘルメットによる頭部保護性能は歩行者頭部インパクトで計測される加速度  $a$  から頭部傷害基準 HIC(Head Injury Criteria)を計算した。

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{\max}$$

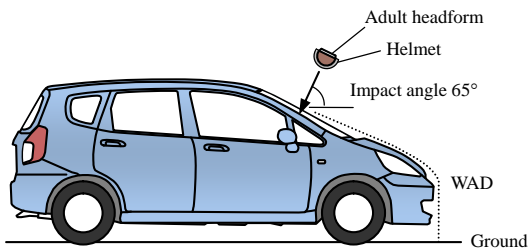
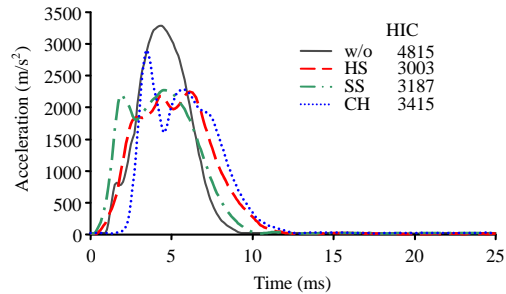


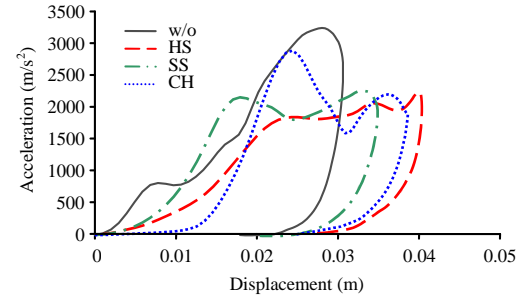
図4 頭部インパクト試験

頭部インパクトの加速度を時間および変位との関係として図5に示す。Aピラーの剛性が高いため, 加速度の最大値はヘルメットがない場合には  $3284 \text{ m/s}^2$ , ヘルメットを装着した場合でも  $2000 \text{ m/s}^2$  と高い値を示した。加速度変位線図から変位 20 mm 以降では頭部インパクトの加速度レベルはほぼ一定となっており, この荷重はインパクトの質量(4.5 kg)を考慮すると 9 kN と計算される。ヘルメットのライナーの厚さはおよそ 20 mm であるから, この荷重でライナーがほぼ底付くと同時にAピラーに塑性ヒンジが形成され, ほぼ一定の荷重で変形が進行したと考えることができる。

ヘルメット非装着では HIC は 4816 であったが, これがヘルメット装着によって 3003 (HS), 3187 (SS), 3415 (CH)となり, 29 - 38% 減少した。しかし, HIC 3000 は AIS 4 の傷害確率 90%に相当し, 衝突速度 35 km/h ではヘルメットによるエネルギー吸収は十分ではない。



(a) Resultant acceleration

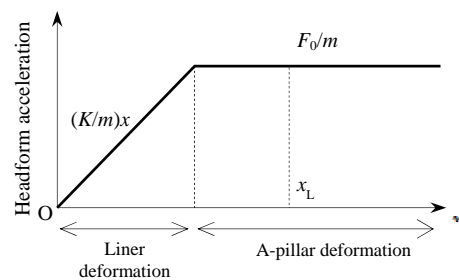


(b) Acceleration-displacement

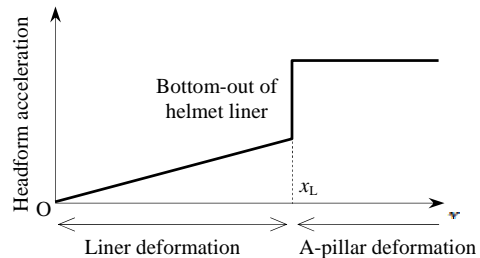
図5 頭部インパクトの加速度

### (4) 頭部インパクト試験

実車実験および有限要素解析より, 頭部のAピラーに対する衝突ではヘルメットを装着していても HIC が高く, これに対してはライナー特性のみならずAピラーの変形特性が影響することが示唆された。ライナーの変形特性とAピラーの剛性を単純化した頭部加速度波形モデルを用いて, ヘルメットとAピラーの変形特性が HIC に及ぼす基礎的な影響を調べた。すなわち, 図6に示すように初期のヘルメットの変形による直線領域と, 後半のAピラーの変形が中心となる頭部加速度が一定となる領域からなるものとした。



(a) Stiff liner



(b) Soft liner

図6 ヘルメットを装着した頭部の加速度波形モデル

図7に衝突速度 25 km/h と 35 km/h について、ヘルメットを装着した頭部インパクトの HIC を、ヘルメットライナーの剛性と A ピラーのつぶれ強度によって示す。衝突速度 25 km/h では HIC はヘルメットライナーの剛性と A ピラーの変形荷重に依存し、両者がともに低い値を取るほど HIC は小さい。衝突速度 35 km/h では A ピラーのつぶれ強度が大きいほど HIC は高い値となり、ライナーの剛性の影響は小さい。したがって、ヘルメット装着した頭部の A ピラーへの高速度衝突での HIC 低減に関しては、A ピラーの潰れ荷重を低減することが有効であることが示された。

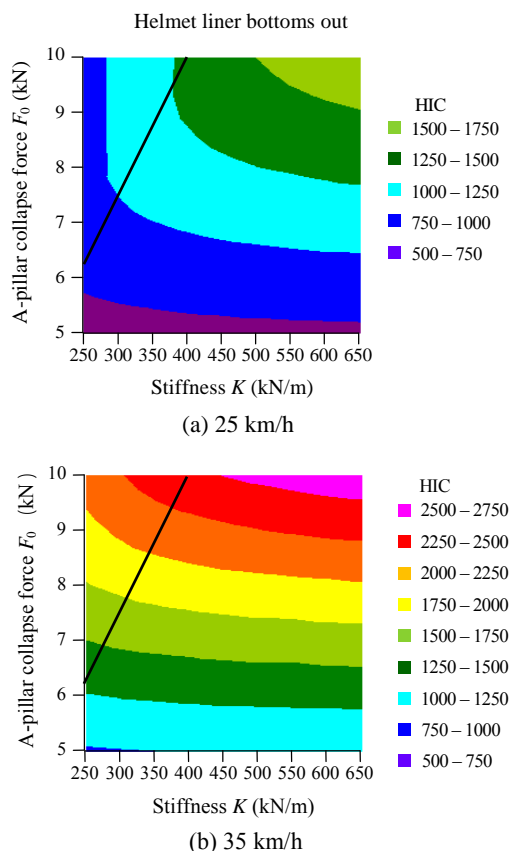


図7 A ピラーつぶれ強度とヘルメット剛性による HIC の分布

## 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 7件)

Mizuno K., et al., The influence of lower extremity postures on kinematics and injuries of cyclists in vehicle side collisions, *Traffic Injury and Prevention* (accepted), 査読有.

Mizuno K., et al., Adult headform impact tests of three Japanese child bicycle helmets in vehicle-cyclist collisions, *Accident Analysis and Prevention*, 査読有, 73, 359-372, 2014.

Ito D., Mizuno K., Ueyama T., Nakane D., Wanami S., Bumper contact sensor for

pedestrian collisions based on analysis of pedestrian kinematic behavior, *International Journal of Crashworthiness*, 査読有, 19(5), 514-523, 2014.

水口浩爾, 伊藤大輔, 水野幸治, 自動車衝突時の下肢姿勢違いにおける自転車乗員の挙動・傷害への影響, *自動車技術会論文集*, 査読有, 47(2), 485-490, 2016.

山田英史, 伊藤大輔, 水野幸治, 自動車衝突時における自転車乗員の挙動・傷害の有限要素解析, *自動車技術会論文集*, 査読有, 46(3), 639-644, 2015.

伊藤大輔, 笈田桂治, 小林吾一, 水野幸治, 吉田良一, A ピラー衝突における自転車ヘルメットによる頭部保護, *自動車技術会論文集*, 査読有, 46(2), 2015(自動車技術会論文賞受賞).

伊藤大輔, 水野幸治, 齋藤大蔵, JTDB を用いた歩行者, 自転車乗員の傷害発生に関する分析, *日本交通科学学会誌*, 査読有, 15(2), 36-49, 2015.

[学会発表](計 3件)

Mizuno K., Ito D, Mizuguchi H, Yong H, The Influence of Cyclist Lower Extremity Postures and Bicycle Velocity in Vehicle Collisions, *IRCOBI Asia*, Seoul, Korea, May 16-18, 2016.

Ito D, Yamada H, Oida K, Mizuno K., Finite element analysis of kinematic behavior of cyclist and Performance of cyclist helmet for human head injury in vehicle-to-cyclist collision, *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact*, Berlin, Germany, September 10-12, 2014.

Mizuno K., Ito D, Oida K, Kobayashi G, Han Y, Head protection with cyclist helmet in impact against vehicle A-pillar, *International Crashworthiness Conference*, Kuching, Malaysia, August 25-28, 2014.

[産業財産権]

出願状況(計 1件)

名称: 保護制御装置

発明者: 若林亜星, 堀口健士, 橋本和久, 水野幸治, 伊藤大輔

番号: 2015-138054

出願年月日: 2015年7月9日

国内外の別: 国内

## 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・工学研究科教授

研究者番号: 80335075