

自動車対自転車の衝突解析

－ 1BOX 車対自転車乗員衝突における頭部傷害解析－

プロジェクト責任者

羽貝 正道 一般財団法人 日本自動車工業会 総務統括部

著者

勝原 忠典^{*1}、北川 裕一^{*1}、安木 剛^{*1}、羽貝 正道^{*2}、廣川 雄一^{*3}、西川 憲明^{*3}、
岩沢 美佐子^{*3}、浅野 俊行^{*3}

* 1 トヨタ自動車株式会社 車両 CAE 部

* 2 一般財団法人 日本自動車工業会 総務統括部

* 3 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設：独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間：平成 26 年 4 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日

アブストラクト

交通事故で死亡した人のうち、自転車乗員の占める割合は歩行者、自動車乗員に次いで 3 番目に多い（警察庁統計）。自転車乗員の死亡者は頭部を損傷する例が多い。頭部は車体と衝突するだけでなく直接、路面へ落下するケースもある。本研究では人体 FE モデルを用いて 1BOX 車と自転車乗員との衝突、400 ケースを解析し、頭部衝突位置と自転車乗員の頭蓋骨折および脳損傷の一種である Diffuse Axonal Injury (DAI) との関係性を調査した。その結果、車体との衝突では A ピラー、ヘッドなど硬い部品との衝突で頭蓋骨折および脳損傷の発生が予測された。さらに頭部の衝突速度が高い場合にのみ DAI が発生することが分かった。路面との衝突では自動車の速度が高い場合に脳損傷が発生、速度が低い場合でも頭蓋骨折が発生すると予測された。

頭部の路面衝突を含めた計算には通常の車体衝突よりも約 4 倍長い計算時間を要し、400 ケースの計算を完了するには通常の計算機で約 3 年かかる。超並列計算が可能な地球シミュレータ（大規模共有メモリシステム）を利用し、6 ヶ月に短縮することができた。

キーワード：自動車、自転車、衝突安全、路面、頭部傷害

1. 背景・目的

近年、歩行者や自動車乗員の死者数が減少傾向にある中、交通事故全体に占める自転車乗員の割合は増加傾向にある¹⁾。死因となった受傷部位は頭部が最多（約 63 %）で、加害部位としては路面（約 40 %）、A ピラーおよび窓枠（約 25 %）の順に多い¹⁾。Depreitere らはドイツ国内の自転車事故における頭部傷害の臨床データを調査、頭蓋骨折だけでなく、くも膜下出血や脳損傷の発生頻度が高いことを記した²⁾。重度の脳損傷のなかでも、びまん性軸索損傷（DAI: Diffuse Axonal Injury）は頭蓋骨折

などの頭部外傷がなくても発生する可能性がある。本研究では頭蓋骨折および DAI の発生を予測可能な人体 FE モデル Total Human Model for Safety (THUMS) Version 4 を用いて 1BOX 車と自転車乗員の衝突を解析した。様々な自動車速度、自転車速度、衝突方向、衝突位置を因子とした 400 ケースのパラメトリックスタディを実施し、自転車乗員頭部の衝突位置と頭蓋骨折・DAI との関係を明らかにした。頭部が路面に衝突するまでの計算時間は車体との衝突に比べ約 4 倍長く、400 ケースの計算を完了するには弊社計算機で約 3 年を要すると見積もられる。そこで超並列計算が可能な大規模共有メモリシステムを利用する。

2. 計算方法

2.1. モデル概要

Fig. 1 に 1BOX 車対自転車乗員の衝突シミュレーションモデルを示す。自転車乗員が衝突すると予想される部位には実部品の物性を模擬した (例: グリル・フード・フェンダ・フロントガラス・A ピラー・ルーフヘッド)。衝突が予想されない部位については変形しないものとした。自転車はタイヤサイズ

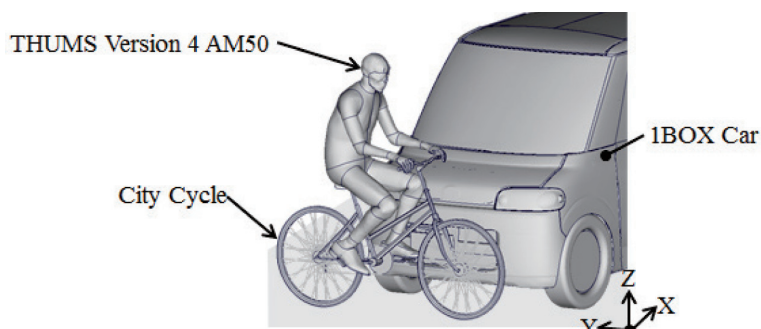


Fig. 1 Cyclist Collision Simulation Model

26 inch のシティサイクルである。タイヤ・フレーム・リムには実部品の物性を模擬し、ハンドルとペダルは変形しないものとした。人体 FE モデル THUMS Version 4 AM50 Occupant Model (身長 1.75 m, 体重 77 kg) を用いて自転車乗員を模擬した。THUMS Version 4 は (株) 豊田中央研究所とトヨタ自動車 (株) で共同開発された。その特徴は、全身の主要な骨格に加え、脳や内臓まで精密に表現した点にある。自転車乗員の乗車姿勢を両手はハンドル上へ、両足はペダル上へ届くように調節した。背中との角度は鉛直から約 25° 前傾させた。

2.2. 計算手法

計算には LS-DYNA mpp s R6.1 を用いた。LS-DYNA は有限要素法を用いた計算ソルバーである。本プロジェクトでは要素数約 300 万、大規模共有メモリシステムの 10 CPU を用いて 1 ケース当たり 540 時間の計算を 400 ケース実施した。

2.3. シミュレーション条件

自動車速度・自転車速度・衝突方向・衝突位置を因子として、1BOX 車と自転車乗員の衝突シミュレーションを実施した。Table 1 に各因子とその変数を示す。自動車速度は 10 km/h から 60 km/h まで 10 km/h 刻みで 6 水準、自転車速度は 5 km/h から 25 km/h まで 5 km/h 刻みで 5 水準である。衝突方向は自動車に対して前面・左側面・背面・斜め前 45°・斜め後 45° の 5 水準である。衝突位置は自動車のバンパ左右中央を 0 mm とし、右側 1200 mm から左側 600 mm (-600 mm) まで 200 mm 刻みで 10 水準である。自転車乗員の頭部重心を衝突位置に合わせた。自動車速度、自転車速度、衝突

方向の変数の幅をそれぞれ市場事故の約 90 % をカバーする範囲とした。衝突位置の変数の幅を衝突後に自転車乗員の体が自転車と接触すると予測される範囲とした。

Table 1 Simulation Parameters

Parameters	Variations
Car Speed	10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60km/h
Bicycle Speed	5 km/h, 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h, 25 km/h
Impact Direction	Front, Side, Rear, Oblique Front 45deg, Oblique Rear 45deg
Impact Position	1200 mm, 1000 mm, 800 mm, 600 mm, 400 mm, 200 mm, 0 mm, -200 mm, -400 mm, -600 mm

3. 頭蓋骨折・DAI 指標

頭蓋骨折の予測には頭部傷害指標 HIC₁₅ を用い、頭蓋骨折の有無だけでなく、頭部の負荷レベルを調査した。HIC₁₅ 700 以上の場合に頭蓋骨が骨折すると仮定した。DAI 発生の予測には歪

Table 2 Head Injury Index and Criteria

Parts	Injury	Index	Criteria
Skull	Fracture	HIC ₁₅	700
Brain	DAI	CSDM	42.5 %

指標 Cumulative Strain Damage Measure (CSDM) を用いた。CSDM は脳部分に属する要素の内、ある歪の閾値を超えた要素体積の割合である。本報告では、最大主歪が 25 % を超えた要素体積の割合を CSDM とし、42.5 % 以上で DAI が発生すると仮定した。これらの値は Takhounts ら (2003) の報告に基づく³⁾。表 2 に頭蓋骨折・DAI の指標および閾値を示す。

4. 計算結果

4.1. 自転車乗員挙動

Fig. 2 に自動車速度 40 km/h、自転車速度 20 km/h、衝突位置 200 mm、自動車前面と自転車側面との衝突における自転車乗員挙動を示す。図示した最終状態は頭部と車体が接触した 110 ms である。図中の太実線は自動車基準で描いた自転車乗員頭部の移動軌跡である。図中赤矢印は自動車と自転車の速度ベクトルとそれらの合成ベクトルである。衝突後 20 ms でグリルが下肢に衝突した。20 ms 以降、腰がフードに乗り上げ、上体とともに自動車の後方に移動した。50 ms で腰がフード後端に衝突、その後上体がフロントガラスに向かって傾き、80 ms で肩がフロントガラスに衝突した。80 ms 以降、頭部が肩を中心として回転し、110 ms でフロントガラス上端に衝突した。上面視で頭部は自動車速度と自転車速度の合成方向に移動し、フロントガラスに衝突した。

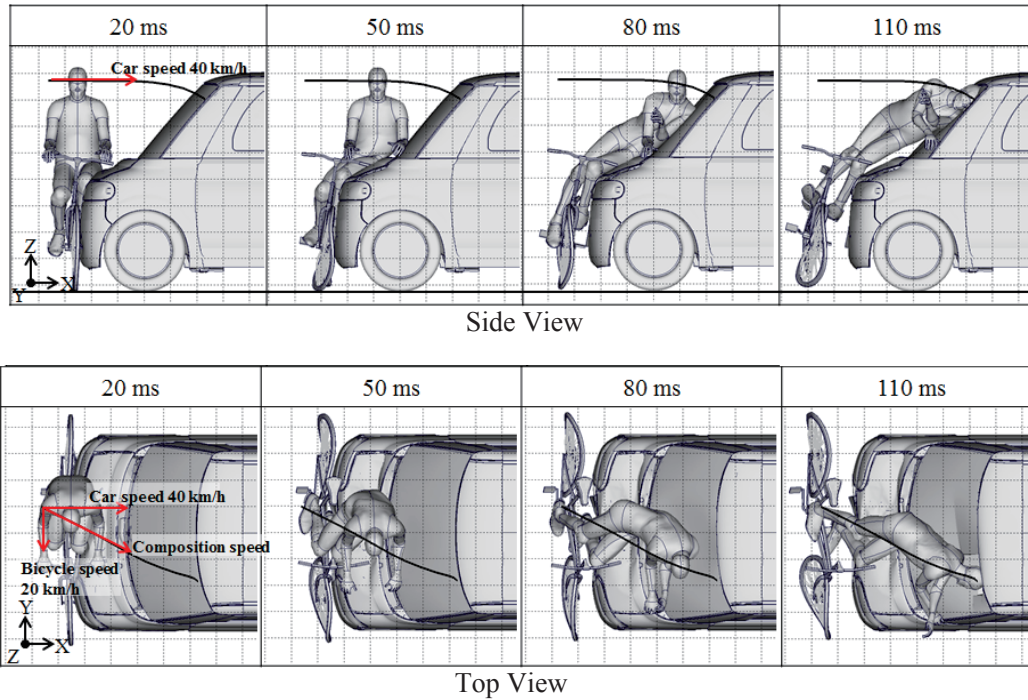


Fig. 2 Kinematics of Cyclist and Head Trajectory (Respect to Car)

Fig. 3 に自動車速度 40 km/h、自転車速度 20 km/h、衝突位置 -200 mm、自動車前面と自転車側面との衝突における自転車乗員挙動を示す。図示した最終状態は頭部が路面と接触した 1010 ms である。図中の太実線は自動車基準で描いた自転車乗員頭部の移動軌跡である。図中赤矢印は自動車と自転車の速度ベクトルとそれらの合成ベクトルを示す。衝突後 80 ms で肩が A ピラーに衝突した。その後、路面へ落下し、920 ms で足が着地した。950 ms から 1010 ms の間に膝、腕、頭部の順で着地した。上面視で頭部は自動車速度と自転車速度の合成方向に移動した。

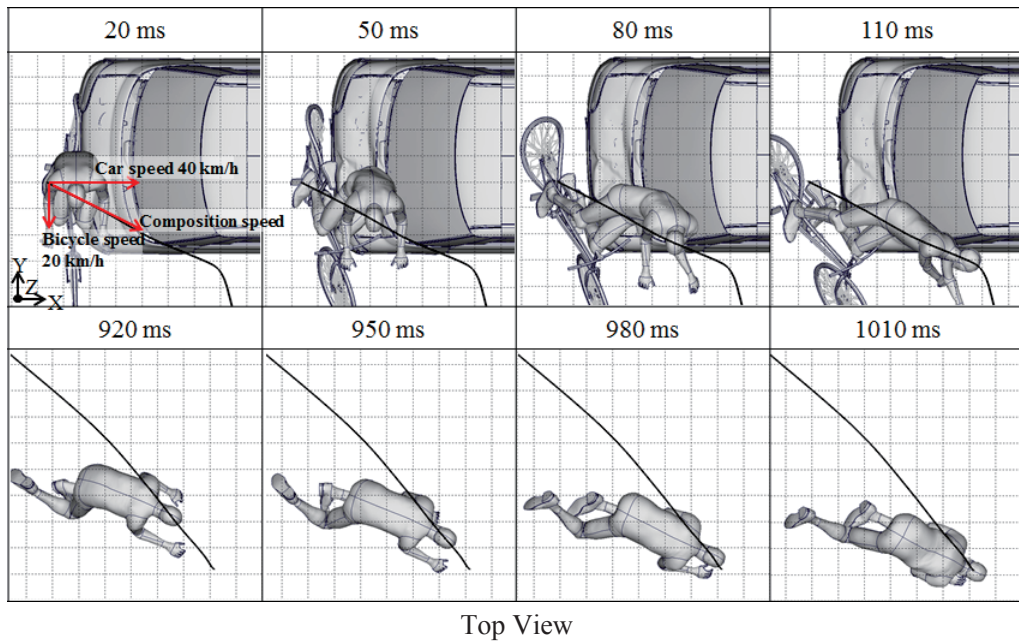
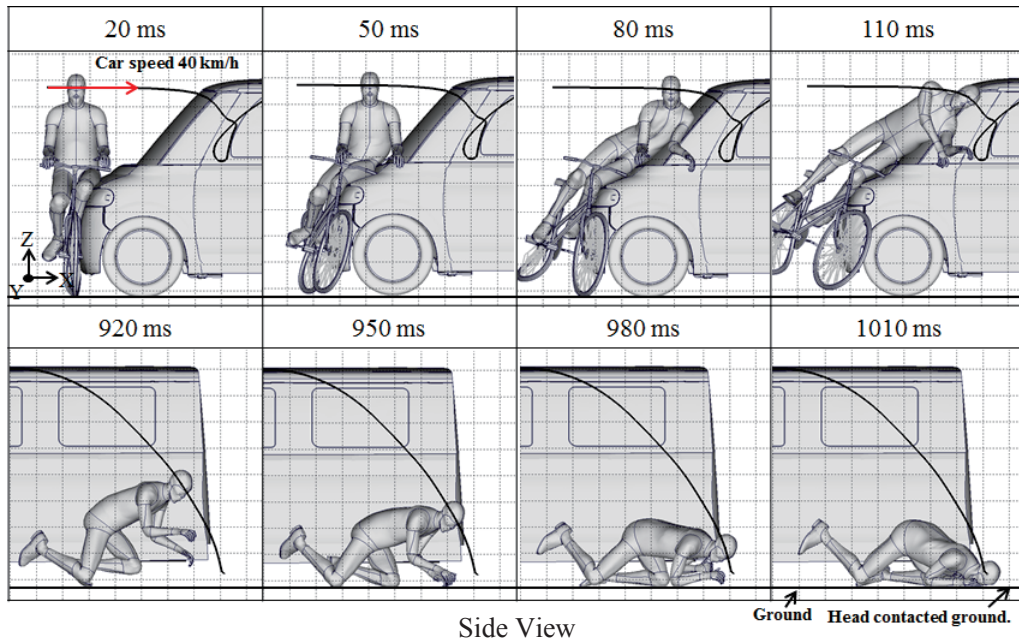


Fig. 3 Kinematics of Cyclist and Head Trajectory (Respect to Car)

4.2. 頭部衝突位置

Fig. 4 - (a), (b) にそれぞれ車体上と路面上の頭部衝突位置を示す。いずれも頭部が最初に衝突した位置である。車体ではフロントガラス中央部から車両後方側に頭部が衝突するケースが多かった。路面では自動車の右側に比べ左側に頭部が衝突するケースが多く、車両に近い場所に衝突するケースが多かった。

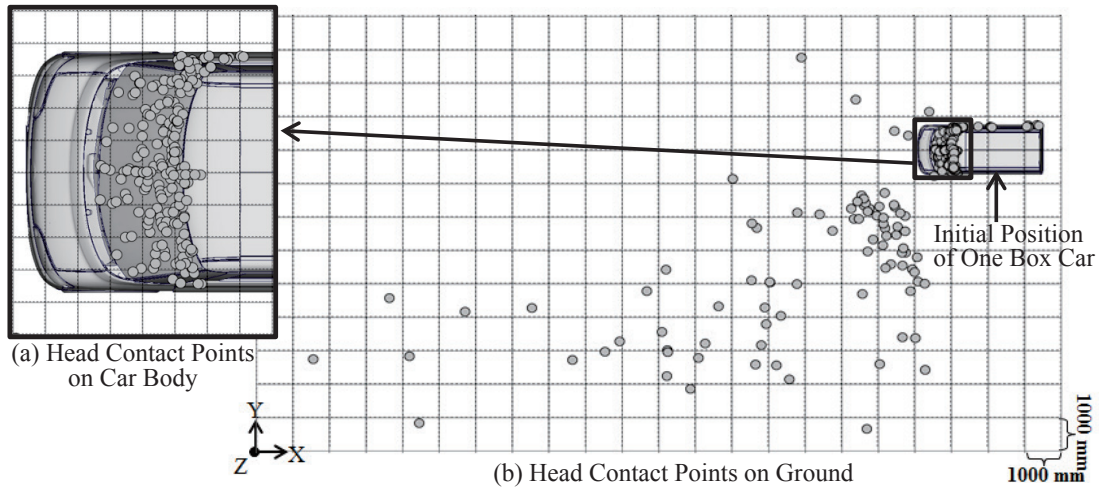


Fig. 4 Distribution of Head Contact Points

4.3. HIC_{15} ・CSDM と頭部衝突位置の関係

Fig. 5 に車体上の頭部衝突位置の分布を HIC_{15} の値で色分けしたものを示す。赤色は HIC_{15} 700 以上、黄色は HIC_{15} 500 以上 700 未満、緑色は HIC_{15} 300 以上 500 未満、青色は HIC_{15} 300 未満を示す。赤色は A ピラー上端、フロントガラス上端およびヘッダに集中した。黄色も赤色と同様だった。緑色も

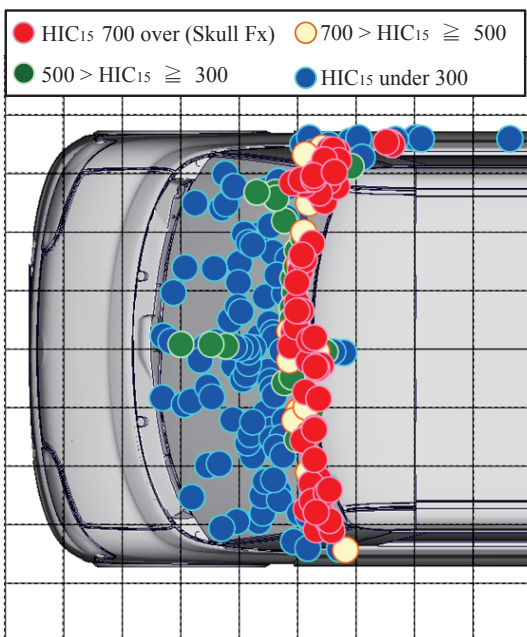


Fig. 5 Distribution of Head Contact Points and HIC_{15} Level (Car Body)

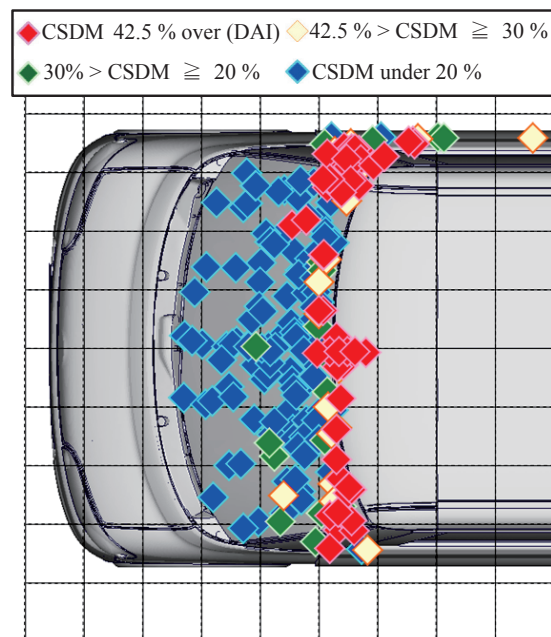


Fig. 6 Distribution of Head Contact Points and CSDM Level (Car Body)

よび青色はフロントガラス全域に分布した。

Fig. 6 に頭部衝突位置の分布を CSDM の値で色分けしたものを示す。赤色は CSDM 42.5 % 以上、黄色は 30 % 以上 42.5 % 未満、緑色は 20 % 以上 30 % 未満、青色は 20 % 未満を示す。赤色は A ピラー上端およびヘッドに集中した。黄色も赤色と同様だった。緑色と青色はフロントガラス全域に分布した。

路面における頭部衝突位置の分布を HIC₁₅ の値で色分けしたものを Fig. 7 に、CSDM の値で色分けしたものを Fig. 8 に示す。また、自動車の初期位置を図中に示す。HIC₁₅ および CSDM の値と色の関係はそれぞれ Fig. 5, 6 と同様である。HIC₁₅ 700 以上を示す赤色と HIC₁₅ 500 以上 700 未満を示す黄色は自動車の初期位置から前方に 2000 mm 以内と 4000 mm 以上に分布した。HIC₁₅ 300 以上 500 未満を示す緑色は主に自動車の初期位置から前方 2000 mm 以内に分布し、HIC₁₅ 300 未満を示す青色は主に赤色および黄色の間に分布した。

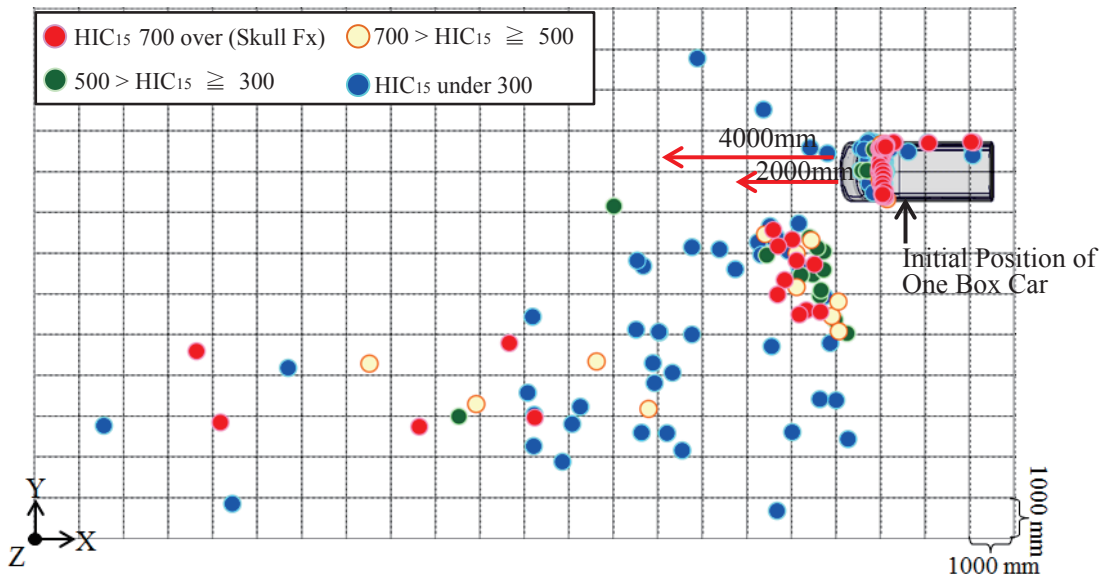


Fig. 7 Distribution of head contact points and HIC15 level (Ground)

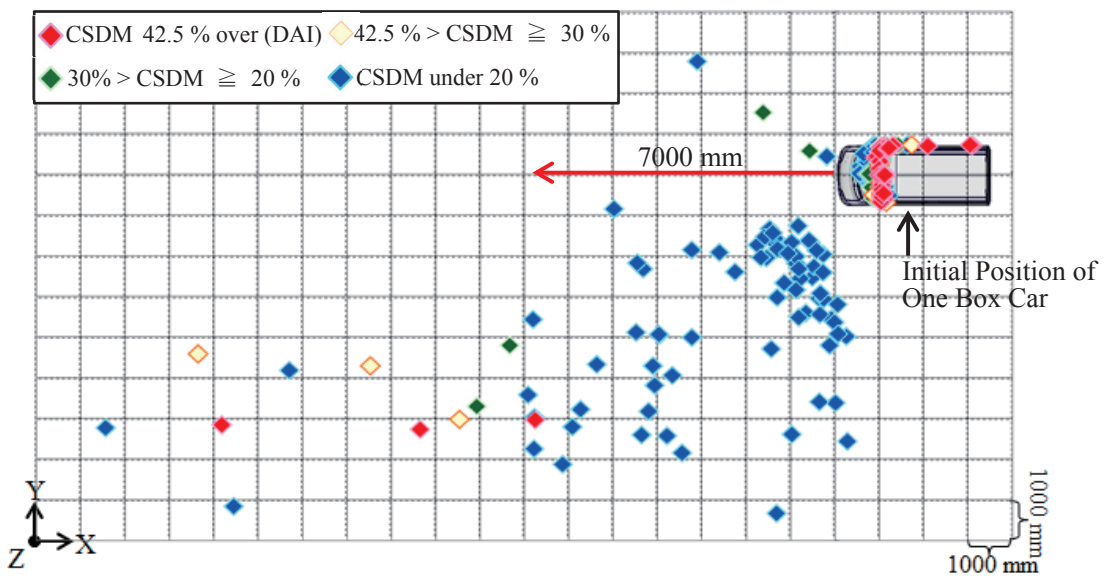


Fig. 8 Distribution of Head Contact Points and CSDM Level (Ground)

CSDM 42.5 % 以上を示す赤色、CSDM 30 % 以上 42.5 % 未満を示す黄色、CSDM 20 % 以上 30 % 未満を示す緑色は主に自動車の初期位置から前方に 7000 mm 以上離れた場所に分布した。CSDM 20 % 未満を示す青色は主に自動車の初期位置から前方 7000 mm 以内に分布した。

5. 考察

Fig. 5, 6 から頭蓋骨折および DAI と車体衝突時の頭部衝突位置の関係を考察した。頭蓋骨折および DAI の発生を表す赤色は A ピラーおよびヘッダに集中した。特に DAI が発生したのは A ピラー上端部やヘッダなど車両後方側であった。自動車の速度が高いほど頭部は車両後方の部品と衝突する。DAI の発生と衝突速度には相関があると考えられる。そこで頭部の衝突速度と CSDM の関係を調査した。

Fig. 9 に頭部衝突速度と CSDM の関係を衝突部品毎に示す。赤色は A ピラー、黄色はヘッダ、緑色はフロントガラスと頭部が衝突したケースを示す。衝突速度が高いほど CSDM が高かった。また、フロントガラスとの衝突では衝突速度が高くても CSDM は閾値を超えなかったことから、DAI は頭部の衝突速度が高く、かつ硬い部品との衝突で発生すると考えられる。

Fig. 7, 8 の結果から、頭蓋骨折および DAI と路面衝突時の頭部衝突位置の関係を考察した。頭蓋骨折を表す赤色は自動車の初期位置から 2000 mm 以内と 4000 mm 以上に分かれた。また、DAI の発生は自動車の初期位置から 7000 mm 以上離れた場所に限られた。車両速度が低いと自転車乗員は初期位置に近い場所に落下、速度が早ければ離れた場所に落下すると考えられる。頭蓋骨折は自動車速度が高い場合だけでなく低い場合にも発生しており、DAI は自動車の速度が高い場合のみ発生していることが分かった。

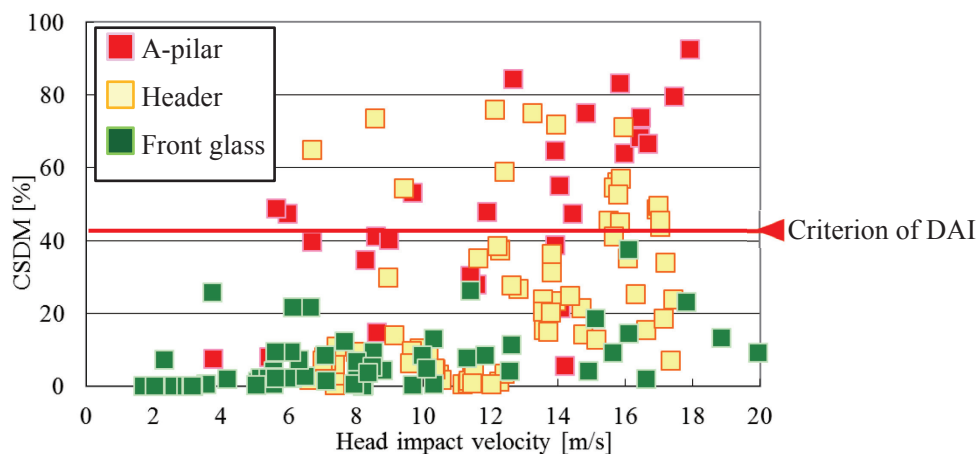


Fig. 9 Relationship between CSDM and Head Impact Velocity on Each Car Parts

6. 結論

1BOX 車と自転車乗員との衝突において、頭蓋骨折・DAI と頭部衝突位置との関係を明らかにした。車体との衝突では、頭蓋骨折は A ピラーやヘッダとの衝突で発生した。DAI も同様であったが、衝突速度は高い場合に限られることが分かった。路面との衝突では、頭蓋骨折は自動車速度が低くても発生し、DAI は自動車速度が高い場合にのみ発生することが分かった。400 ケースの大規模計算を弊社計算機で 3 年要するところ、大規模共有メモリシステムを利用し 6 ヶ月で完了することができた。

謝辞

地球シミュレータの利用に関して海洋研究開発機構様、自動車工業会様に、計算の実行・結果処理に関し日本 SGI 様に多大なご助力をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 財団法人交通事故総合分析センター, ”交通安全教育に役立つ自転車事故の分析”, 平成 23 年度 ITARDA 研究報告書, 2012.
- 2) Depreitere, B., Lierde, C.V., Plets, C., Sloten, J.B., Audekercke, R.V., Goffin, J., “Bicycle-related head injury: a study of 86 cases” , *Accident Analysis and Prevention*, Vol.36, 2004, pp.561-567.
- 3) Takhounts, E. G., Eppinger R.H., Campbell, J.Q., Tannous, R.E., Power, E.D., Shook, L.S., “On the Development of the SIMon Finite Element Head Model” , *Stapp Car Crash Journal*, Vol.47, SAE2003-22-0008, 2003, pp.107-133.