

# 踏切衝突事故時のロングシート着座乗客の被害度に及ぼす影響因子

中井 一馬\* 榎並 祥太\* 沖野 友洋\*\*

**Influence Factor on Severity of Injury to Rail Passengers Occupying Longitudinal Seats  
in the Event of Level Crossing Accident**

Kazuma NAKAI Shota ENAMI Tomohiro OKINO

It is important to enhance the safety of passengers on board in the event of a train collision. In order to design a carbody to reduce the passenger injury levels, it is necessary to examine the influence factor of the accidents on safety to passengers. The purpose of this study is to grasp the elements in a level crossing accident scenario, including the horizontal collision position to a dump truck, the collision angle, the vertical collision position and the load weight of the dump truck by using numerical simulation. The scenario influences the severity of injury to passengers sitting on longitudinal seats. We find that the impact position in the horizontal direction to a dump truck and the load weight of the dump truck have a big influence on the injury level.

キーワード：衝突安全，踏切事故，車体強度，ロングシート，傷害評価

## 1. はじめに

万が一の事故に備え、乗客の被害を抑えることを想定して車両を設計しておくことは重要である。事故などにより車体に大きな衝撃が発生した場合に、「車体構造」と「車内設備」の両面からの乗客の傷害を軽減するアプローチが必須である。

衝突安全性を考慮した車体構造の設計においては、事故シナリオを設定する必要がある。車両に大きな衝撃が発生する可能性がある事故種別として列車衝突事故、列車脱線事故、踏切障害事故、道路障害事故、鉄道物損事故があり、2007年度から2016年度までに国内で発生した鉄道運転事故では踏切障害事故の件数が最も多い<sup>1)</sup>。また、同期間に発生した踏切事故（踏切障害に伴う列車衝突事故、列車脱線事故、列車火災事故と踏切障害事故を指す）では、被衝突物の約半数が自動車であり、原因は直前横断や踏切上での停滞・落輪・エンストが約8割を占めていた。従って、列車は前面から衝突する割合が高い<sup>1)</sup>。以上の状況から、踏切上の大型自動車に列車が衝突する事故シナリオを中心として研究を進めている<sup>1)~5)</sup>。

踏切で自動車と衝突した事故の被害状況をみると、列車衝突速度が高い場合に死傷者数が多いとは限らず<sup>3)</sup>、自動車への衝突形態が大きな影響を与えていると推定される。この影響を定量的に評価して明らかにすることは、車体構造を設計する上で重要な知見となる。

このような観点で、鉄道総研ではクロスシートに着座

した乗客を対象として、踏切衝突事故時の各因子が乗客の被害度に与える影響を数値解析により評価した<sup>3) 4)</sup>。しかしながら、これは回転リクライニングシートに着座している乗客が前席に衝突（以後、2次衝突と呼ぶ）する状況についての検討であり、例えばロングシート（車体のレール方向に設置された腰掛）に着座した乗客が大きく投げ出されて車内設備に2次衝突するなど、検討すべき状況が残されていた。

そこで、本稿では数値解析により、踏切衝突事故時の各因子がロングシートに着座した乗客の被害度に及ぼす影響を定量的に明らかにする。

## 2. 数値解析による乗客被害度の推定方法

列車と大型自動車の衝突を模擬する数値解析で列車に発生する衝撃減速度波形をもとめた上で、当該波形を入力とした車内の数値解析により乗客と車内設備との2次衝突における傷害度を推定する。

車体側の数値解析は、沖野らが構築した踏切事故の車両衝突解析モデルを用いた<sup>3)</sup>。解析モデルは、列車モデル（総質量30.7t）とダンプカーモデル（車両質量11t、積荷質量0～13.75tの範囲で可変）で構成されている（図1）。本解析モデルを用いて、静止状態のダンプカー側面へ列車が衝突した際の様々な入力条件をパラメータとして、列車客室の前方、中央および後方の3カ所から衝突時の衝撃減速度波形を出力する。本解析には汎用の陽解法有限要素解析プログラムPAMCRASH Ver. 2016.0を使用した。

\* 人間科学研究部 人間工学研究室

\*\* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

車内側の数値解析には、著者らが構築したロングシート着座乗客の傷害度を推定するための乗客傷害度解析モデルを用いた<sup>5)</sup>。本解析モデルは、乗客を模したダミーモデル、実際に列車内で用いられているロングシートとロングシート端部に配置される袖仕切りなどの車内設備モデルで構成されている（図2）。乗客傷害度解析にはTass international社（現シーメンス社）の数値解析ソフトMADYMO Ver. 7.7を使用した。人体ダミーモデルは、側面衝突試験用人体ダミー人形ES-2<sup>6)</sup>を模擬した剛体モデルを使用し、ロングシートは実際の形状・シート特性を設定した剛体モデル、袖仕切りは有限要素モデルで構築した。本モデルの入力には、上記車両衝突解析から出力された列車客室の衝撃減速度波形を用いた。図2に示すようにダミーモデルの挙動が推定されるとともに、2次衝突（図は袖仕切りから3席目に着座した条件の例）における傷害の程度（頭部の傷害度など）も推定される。



図1 列車モデルとダンプカーモデル

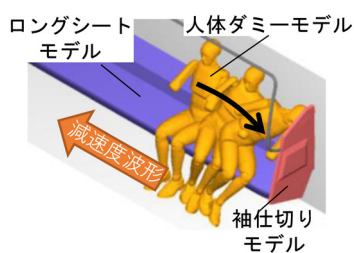


図2 ダミーモデルとロングシートモデル

## 2.1 踏切事故の車両衝突解析条件

沖野らは、昭和62年度から平成22年度までに発生した踏切における重大事故の分析から、列車衝突速度の平均値を54km/hと推定した<sup>7)</sup>。本稿では、当該列車衝突速度を想定し、水平方向衝突位置、衝突角度、上下方向衝突高さとして積荷質量を組合せて全17条件の踏切事故解析を行った（表1）。基準となる条件Case1-1は、図1に示すように、列車から見た水平方向の衝突位置について、列車の中心線をダンプカーの積荷中央と一致させ、列車とダンプカーの進行方向を直角とした。また、上下の衝突高さはモデル化した列車とダンプカーの形状を参考に実際に踏切上で衝突する高さ位置（以後、基準高さ）とし、積荷質量は11t（車両総質量は22t）とした。

水平方向衝突位置の解析ケースは、列車の中心線に対してダンプカーの積荷の中央（Case1-1, Case2-1～Case2-4, Case3-1～Case3-3, Case4-1～Case4-5）、積荷含むダンプカー全体の重心（Case1-2）、ダンプカーのキャビン重心（Case1-3）、ダンプカーの積荷最後尾（列車車体幅半分のラップ条件, Case1-4）、積荷の最後尾から750mm後方へずれた位置（列車車体幅1/4ラップ条件, Case1-5）の5条件とした。衝突角度については、積荷中央位置を回転軸としてダンプカーの運転台を列車に近づける方向への回転を正方向と定義して、列車とダンプカーの進行方向が直角の条件を0度とし（Case1-1～Case1-5, Case3-1～Case3-3, Case4-1～Case4-5）、±5度および±10度の5条件とした（Case2-1～Case2-4）。上下方向衝突高さは、前述した基準高さ（Case1-1～Case1-5, Case2-1～Case2-4, Case4-1～Case4-5）、基準高さよりダンプカーが177mm低い位置（Case3-1）、基準高さよりダンプカーが355mm低い位

表1 踏切事故解析の条件

解析条件	衝突位置	衝突角度 [degree]	衝突高さ	積荷質量 [t]
Case1-1	積荷中央	0	基準高さ	11
Case1-2	ダンプカー重心	0	基準高さ	11
Case1-3	キャビン重心	0	基準高さ	11
Case1-4	1/2 ラップ	0	基準高さ	11
Case1-5	1/4 ラップ	0	基準高さ	11
Case2-1	積荷中央	+5	基準高さ	11
Case2-2	積荷中央	-5	基準高さ	11
Case2-3	積荷中央	+10	基準高さ	11
Case2-4	積荷中央	-10	基準高さ	11
Case3-1	積荷中央	0	基準高さ -177mm	11
Case3-2	積荷中央	0	基準高さ -355mm	11
Case3-3	積荷中央	0	基準高さ -512mm	11
Case4-1	積荷中央	0	基準高さ	0
Case4-2	積荷中央	0	基準高さ	2.75
Case4-3	積荷中央	0	基準高さ	5.5
Case4-4	積荷中央	0	基準高さ	8.25
Case4-5	積荷中央	0	基準高さ	13.75

置（列車の床構体とダンブカーの荷台主柵の中央高さ位置を揃えた条件、Case3-2）、基準位置よりダンブカーが512mm低い位置（列車の床構体下面とダンブカーの積荷下面の高さ位置を揃えた条件、Case3-3）の4条件で解析した。積荷質量は、0t (Case4-1), 2.75t (Case4-2), 5.5t (Case4-3), 8.25t (Case4-4), 11t (Case1-1 ~ Case1-5, Case2-1 ~ Case2-4, Case3-1 ~ Case3-3), 13.75t (25%の過積載を想定, Case4-5) の6条件とした。

以上の水平方向衝突位置、衝突角度、上下方向衝突高さと積荷質量を組合せて全17条件の踏切事故解析を行い、各条件から列車客室前方、中央、後方の3カ所の減速度波形を算出することで、計51の減速度波形を得た。

## 2.2 乗客の解析条件と傷害指標

袖仕切りとの2次衝突時の傷害度に与える乗客の初期着座位置の影響を評価するため、図3に示すようにダミーモデルを1体として、袖仕切りに対して1席目から4席目まで着座させる条件で(Ps1 ~ Ps4) 解析を行った。シート1人分の座幅を460mmとして、その中心が頭部中心と一致するように着座させた。但し、1席目条件については、ダミーモデルの体格によりこのように着座させることが出来なかったため、座面中心よりも47mm袖仕切りから遠い側に着座させている。これらの着座条件毎に、前節で述べた51の減速度波形を入力することで、

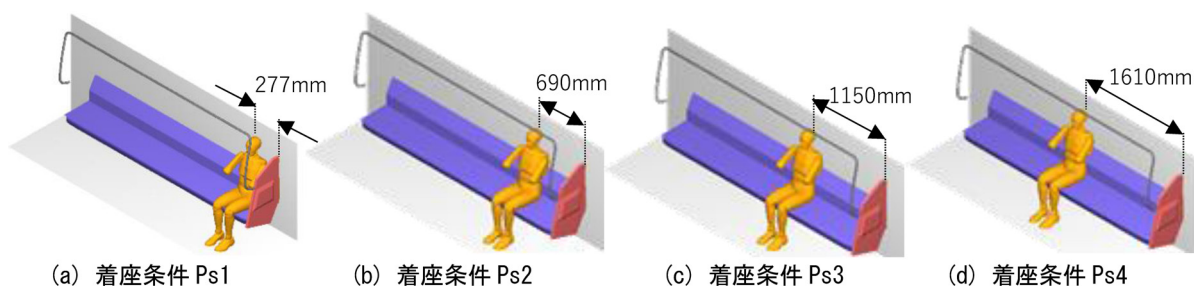


図3 初期着座位置

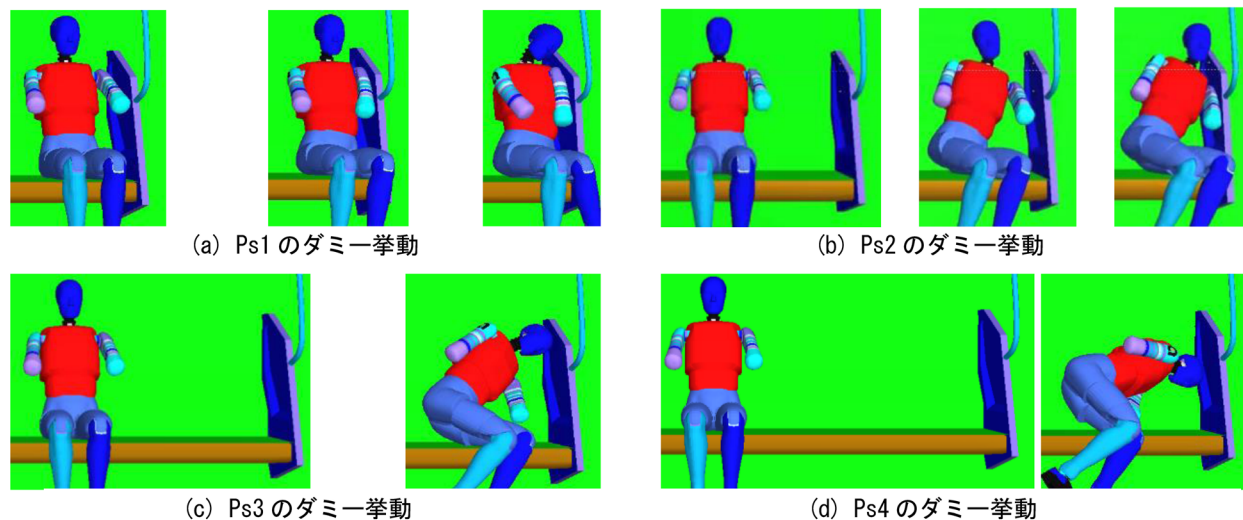


図4 ダミー挙動の比較 (Case1\_1 客室中央)

全204条件の解析を実施した。

頭部の傷害度、袖仕切りとの2次衝突時の減速度入力方向の頭部速度と床面からの頭部の高さ（額の位置、以後、頭部高さ）をダミーモデルから算出した。頭部の傷害度については、保安基準<sup>6)</sup>で規定されている Head Performance Criterion（前面方向からの頭部傷害指標である Head Injury Criterion と同じ計算方法であることから、以後 HIC と呼ぶ）を傷害指標として用いた。数値が大きいほど傷害発生リスクが高まる指標であり、限度値として1000が規定されている。HICはダミー頭部の並進3方向の合成加速度から式(1)を用いて算出した。

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

$$|t_2 - t_1| \leq 36ms, \text{ (但し } t_2 > t_1 \text{ である)}$$

$a(t)$ : 頭部に生じる3軸合成加速度 [G]

## 3. 各因子が被害度に及ぼす影響評価

解析を実施した全204条件のうち、頭部が袖仕切りと2次衝突する挙動が確認されたのが180条件であり、それ以外の24条件ではこのような挙動が確認されなかった。

本稿では、前者の条件を対象として、列車のダンプカーへの衝突位置、衝突角度、衝突高さ、積荷質量といった各因子が乗客の傷害度に及ぼす影響評価を行った。3.2節から3.5節においては、列車客室の前方、中央部および後方の3カ所の減速度波形を入力した結果（頭部傷害値と頭部衝突速度）の平均値と標準偏差を算出して比較した。

### 3.1 基準条件 Case1\_1 の評価

基準条件である Case1\_1（表1参照）における客室中央部の減速度波形を入力した場合のダミー挙動、頭部傷害値、頭部衝突速度について述べる。

図4に示す通り、着座条件 Ps1 においては身体の左側面全体が袖仕切りに2次衝突した後に、頭部が首を中心に回転して袖仕切り上側面に2次衝突する挙動がみられた。着座条件 Ps2 では、袖仕切りに身体全体が倒れ込みながら左肩、頭部の順に2次衝突する挙動がみられた。着座条件 Ps3 では、より倒れ込みながら頭部から袖仕切りに2次衝突する挙動がみられた。着座条件 Ps4 では、Ps3 よりさらに倒れ込みながら、頭部から袖仕切りに2次衝突する挙動がみられた。2次衝突時の倒れ込みは、初期着座位置が袖仕切りから離れているほど大きくなり、この傾向は、他の入力条件でも確認された。但し入力する減速度波形によっては、頭部が袖仕切りに2次衝突しない条件もあった。

頭部速度を縦軸、減速度を入力した時刻を0とした時間を横軸として、着座条件毎の変化と2次衝突するタイミングを図5に示した。着座条件 Ps1 では頭部が2次衝突する前に身体の左側面全体が2次衝突することから、速度が下がったタイミングで頭部が2次衝突する。着座条件 Ps2 では、ダミーの身体全体が倒れ込むことにより頭部速度が高まったタイミングで2次衝突する。着座条件 Ps3 および Ps4 では、ダミーがより倒れ込み、頭部の袖仕切り方向の速度が減少し、鉛直方向（座面方向）の速度が増加したタイミングで2次衝突することで、2次衝突時の速度は低下している。

図6に頭部傷害値を縦軸、2次衝突速度を横軸として、着座条件毎に示した。全般的には、2次衝突速度が大きくなると頭部傷害値が高まる傾向がみられたが、着座条件 Ps2 と Ps3 を比較すると、Ps2 の頭部衝突速度が明らかに高いにも関わらず、頭部傷害値は Ps3 より小さかった。そこで、衝突位置を比較するために、2次衝突時の頭部高さを縦軸、初期着座位置の袖仕切りからの距離を横軸として、着座条件毎に図7に示した。初期着座位置が袖仕切りから離れる条件ほど、頭部高さが低くなり、着座条件 Ps3 は Ps2 より約0.2m程度低い位置に2次衝突した。着座条件 Ps3 の2次衝突位置は袖仕切りの車体への固定部分に近かったが、Ps2 の2次衝突位置は固定部分から離れている袖仕切り上端部分であり、この差が

Ps2 の傷害値が小さかった理由であると考えられる。

以上のように、入力する衝撃減速度が同じでも、着座位置によって、2次衝突速度・衝突位置に違いがあり、その結果として頭部傷害値が異なることが分かった。

### 3.2 車両の衝突位置による影響評価

頭部傷害値および頭部衝突速度に対するダンプカーへの衝突位置（表1参照）の影響を比較した（図8）。着座条件 Ps1 と Ps4 において、「キャビン重心」、「1/2 ラップ」、「1/4 ラップ」の衝突位置では袖仕切りへの2次衝突が見られなかった。衝突位置が「積荷中央」と「ダンプカー重心」の場合、頭部傷害値と衝突速度は高く、「キャ

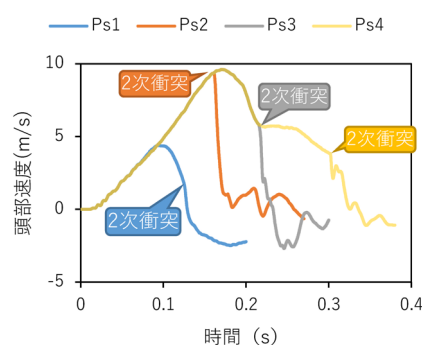


図5 着座条件毎の頭部速度 (Case1\_1 客室中央)

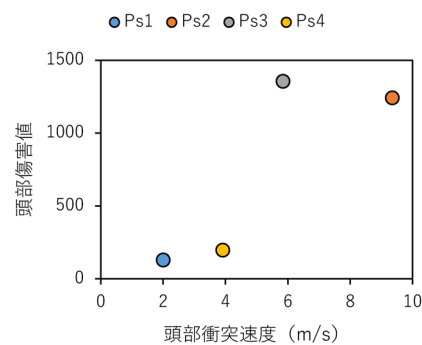


図6 頭部傷害値と頭部衝突速度の比較 (Case1\_1 客室中央)

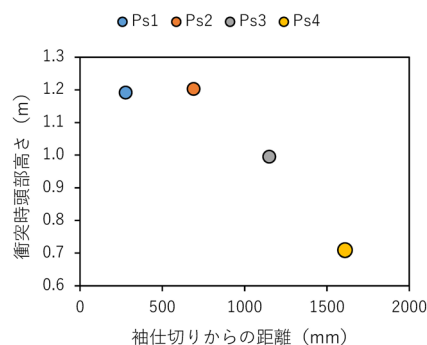


図7 衝突時頭部高さとして袖仕切りから距離の比較 (Case1\_1 客室中央)

ビン重心」、「1/2 ラップ」、「1/4 ラップ」は低くなる傾向がどの着座条件でもみられた。この理由として、ダンプカーの重心から離れた位置に衝突することで、列車に発生する衝撃が小さくなり、頭部衝突速度が下がることで傷害値が低下したと考えられる。以上のことから、衝突位置が傷害度に与える影響は着座位置によらず大きいことが確認された。

### 3.3 車両の衝突角度による影響評価

頭部傷害値と頭部衝突速度に対するダンプカーへの衝突角度（表1参照）の影響を比較した（図9）。頭部傷害値と衝突速度共に、どの着座条件でも衝突角度に依存する傾向は見られなかった。この理由として、±10度の範囲においては、衝突時に車体に発生する衝撃に大きな差がなく、その結果頭部衝突速度にも差がなく、結果として傷害値にも差が見られなかったと考えられる。以上のことから、±10度の範囲での衝突角度の影響は着座位置によらず小さいことが確認された。

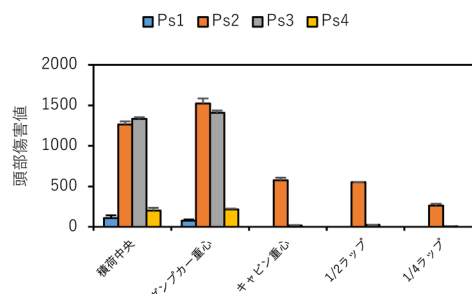
### 3.4 車両の衝突高さによる影響評価

頭部傷害値と頭部衝突速度に対するダンプカーへの衝突高さ（表1参照）の影響を比較した（図10）。「基準高さ -512mm」は列車床構体（剛性が高い）とダンプカーの積荷の衝突、「基準高さ -355mm」は列車床構体と荷台主柱の衝突、「基準高さ -177mm」は「基準高さ」と荷台主柱との中間高さでの衝突である。列車とダンプカーの構造から、「基準高さ」、「基準高さ -177mm」、「基準高さ -355mm」、「基準高さ -512mm」の順に傷害値が高まると予想され、着座条件 Ps4 ではこの傾向がみられた。図11に着座条件 Ps4 の頭部傷害値を縦軸として、横軸を頭部衝突速度として示した。同図から頭部衝突速度が4m/sから5m/sの範囲において、急激に傷害値が高くなる傾向が確認された。一方で、他の着座条件においては、2次衝突速度が微増しているにも関わらず、傷害値が下がる条件もみられた。これは、3.1節で述べたように、2次衝突する速度だけでなく、袖仕切りと頭部が2次衝突する高さの差が理由であると考えられる。以上のことから、車両の衝突高さが傷害度に与える影響は着座位置に依存することが確認された。

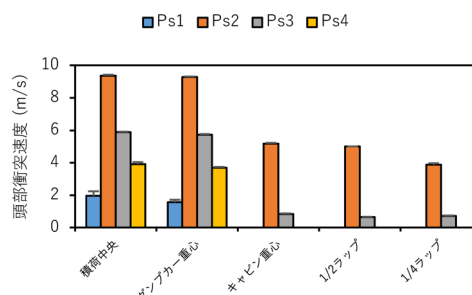
### 3.5 積荷質量による影響評価

頭部傷害値と頭部衝突速度に対するダンプカーの積荷質量（表1参照）の影響を比較した（図12）。積荷質量が0tのとき Ps1 と Ps4 の着座条件では2次衝突が見られなかった。全般的には、積荷質量が大きくなると頭部傷害値は高まる傾向がみられた。しかしながら、着座条件 Ps2 では積荷質量が大きくなると頭部衝突速度が高まるにも関わらず、8.25t以上の条件で頭部傷害値はそれ

以上高まらなかった。これについては、3.4節と同様に、2次衝突する位置の差が理由であると考えられる。以上のことから、積荷質量が傷害度に与える影響は着座位置によらず大きいことが確認された。

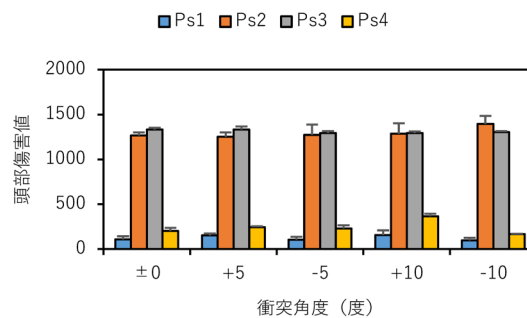


(a) 頭部傷害値の比較

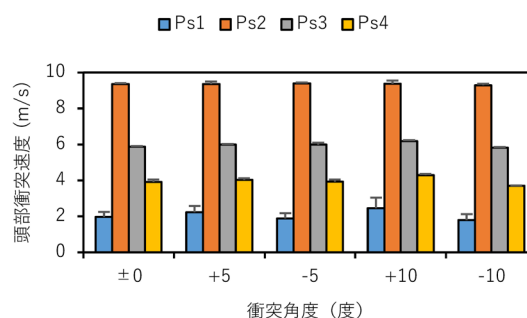


(b) 頭部衝突速度の比較

図8 衝突位置による評価（エラーバー：標準偏差）



(a) 頭部傷害値の比較



(b) 頭部衝突速度の比較

図9 衝突角度による評価（エラーバー：標準偏差）

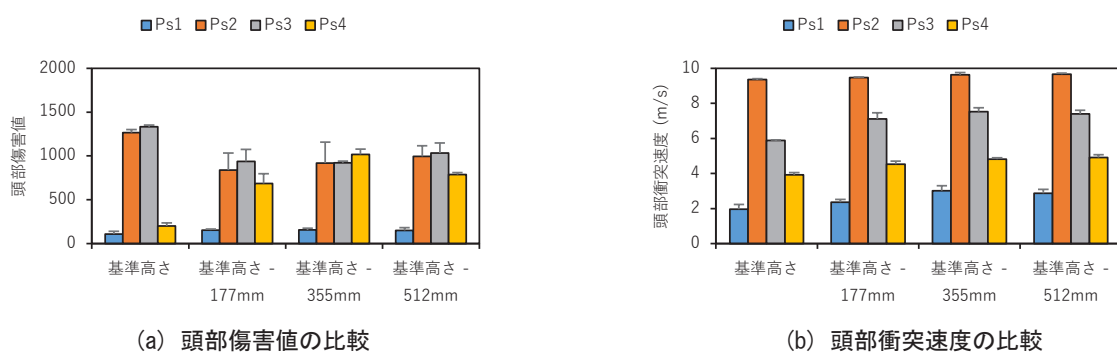


図 10 衝突高さによる評価（エラーバー：標準偏差）

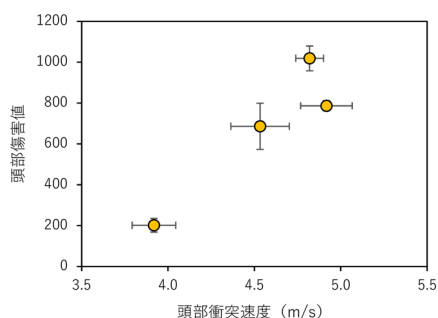


図 11 着座条件 Ps4 の頭部傷害値と衝突速度の比較（エラーバー：標準偏差）

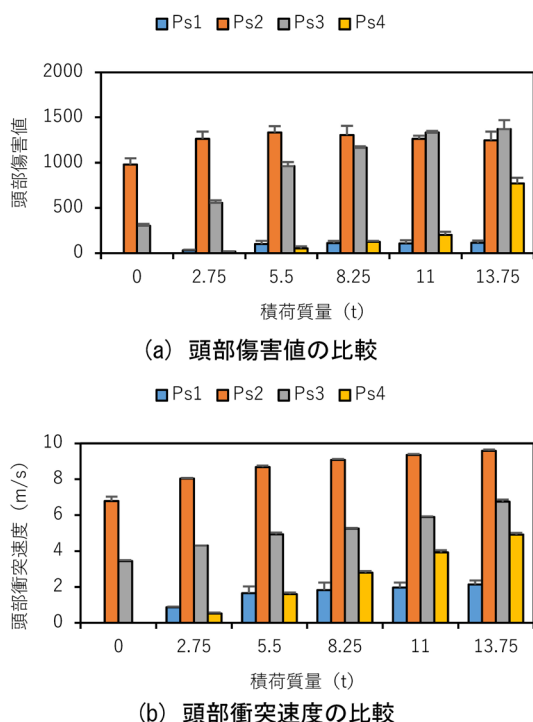


図 12 積荷質量による評価（エラーバー：標準偏差）

#### 4. まとめ

踏切衝突事故時の各因子がロングシートに着座した乗客の被害度に及ぼす影響を評価するため、数値解析を

行った。その結果、以下を明らかにした。

- ダンプカーへの衝突位置と積荷質量が乗客頭部の傷害度に与える影響は着座位置によらず大きい
- ダンプカーへの衝突角度が乗客頭部の傷害度に与える影響は着座位置によらず小さい
- ダンプカーへの衝突高さが乗客頭部の傷害度に与える影響の大きさは、ロングシート上での着座位置に依存する

ダンプカーへの衝突位置と積荷質量の条件は、着座位置によらず傷害度に与える影響が大きいことから、衝突安全性の高い車両を設計する際の事故シナリオはこれら条件を考慮して設定する必要がある。

#### 文 献

- 1) 中井一馬, 榎並祥太: 列車衝突事故時のロングシート着座乗客に対する手すりの傷害軽減効果の実験的検証, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.878, 2019
- 2) 沖野友洋, 中井一馬, 高野純一, 榎並祥太, 長尾裕, 小川征輝: 列車衝突事故時の回転リクライニングシート着座乗客の傷害評価, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.846, 2017
- 3) 沖野友洋, 永田恵輔, 佐藤裕之, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故時の各因子が列車乗員の被害度に及ぼす影響評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869, 2019
- 4) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性評価方法, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.881, 2020
- 5) 中井一馬, 鈴木大輔, 榎並祥太, 沖野友洋, 高野純一: 列車事故時の乗客挙動解析によるロングシート乗客の被害推定と対策, 鉄道総研報告, Vol.33, No.1, pp.29-34, 2019
- 6) 国土交通省: 別添 24 側面衝突時の乗員保護装置の技術基準 新・道路運送車両の保安基準, pp.769-811, 2009
- 7) 沖野友洋, 山本勝太, 高野純一, 宇治田寧: 列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価, 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) 講演論文集, No.12-79, 2012