

通勤列車の踏切事故時の乗客挙動シミュレーション

小美濃 幸司* 中井 一馬*
白戸 宏明* 鈴木 大輔*

Simulation of Behavior of Passengers aboard Commuter Train in the Event of Level Crossing Accident

Koji OMINO Kazuma NAKAI Hiroaki SHIROTO Daisuke SUZUKI

In order to discuss safety of passengers aboard a train car, we analyzed passengers' behaviors in the event of a train collision by using a numerical simulation. Supposing a commuter train collided with a car at a level crossing, we discussed the key points and ways to reduce the probability of causing the injuries of passengers seated on bench seats. As a result, it has been found out that the devices, such as some handrails installed on a bench seat to divide appropriately the passengers sitting on the seat, can reduce passengers' damages. Furthermore, it has been also found out that a proper shape of divider installed on the seat can also them.

キーワード：安全，人間工学，踏切事故／乗客挙動シミュレーション，被害軽減，通勤列車，乗客，ロングシート

1. はじめに

鉄道の安全確保のために様々な事故を想定した対策がとられているが，列車衝突事故に対しては保安装置により衝突そのものを防止することが基本となっている。しかし，自然災害，踏切障害事故等，鉄道側で防止が難しい事故も考えられ，更なる鉄道の安全向上のために，こうした災害や事故が発生した際に被害を最小限に抑える対策も重視されるようになってきた。この中で筆者らは，万が一，事故により列車に衝撃が生じた際にも，乗客への影響を低減できるような，より安全性の高い車両開発のための基礎情報を得ることを目的とし，衝撃時の乗客挙動シミュレーション手法の開発に取り組んできた^{1), 2)}。

ここで述べる乗客挙動とは列車が衝突した際の衝撃を受けた乗客の動きを指している。衝撃で飛ばされたり，倒されたりして，乗客が車内で他の乗客や内装品などと衝突する挙動を推定することができれば，衝突時に乗客に傷害を及ぼす可能性のある要因を推定していくことができる。さらに，その要因に対する対策を考える際に，対策によって乗客挙動の変化がどの程度であるか，傷害の可能性をどの程度低減できるかということも，乗客挙動シミュレーションを行うことによって検討していくことができる。

これまでに筆者らが実施した事故調査や乗客挙動シミュレーションにおいて，いくつかの被害軽減に関わるポイントが挙げられている。その中からロングシート（腰掛）周りで，被害につながる可能性のある乗客挙動として，次のようなものがあった。

- ・腰掛に座っている乗客が互いにぶつかり合う，あるいはそで仕切りとぶつかる
- ・そで仕切り脇に立っている乗客がそれを乗り越えて腰掛に座っている乗客側に倒れ込む

今回，踏切でトラック等に衝突する事故を想定し，シミュレーション解析を行った。解析は上記先行研究の結果を踏まえ，具体的に腰掛に座っている乗客と腰掛のそで仕切り脇に立っている乗客に焦点を当てたもので，以下にそのシミュレーション手法と結果について報告する。

2. 座っている乗客の挙動シミュレーション

まず腰掛に座っている乗客同士のぶつかり合いに焦点を当てたシミュレーション解析を実施した。列車進行方向の衝撃に対して腰掛に座っている乗客の挙動の特徴を把握するとともに，その被害軽減対策の一案として腰掛中間に仕切り等を設けることが傷害発生の可能性に与える影響について評価した。

* 人間科学研究部 人間工学研究室

特集：人間科学

2.1 解析条件

2.1.1 乗客モデル

乗客挙動シミュレーションにはマルチボディダイナミクス理論に基づく数値解析ソフトMADYMO (TNO社製)を使用した。乗客にはMADYMOデータベースのES-2ダミー剛体モデル(図1(a))を用いた。このダミーモデルは自動車業界で側面衝突の解析に用いられており、左右方向からの衝撃による傷害の評価に適している。列車が前面衝突した場合にロングシート(腰掛)に座っている乗客の挙動は左右方向が主であることからこのモデルを選択した。

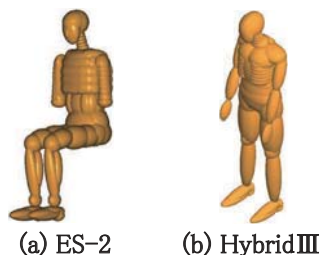


図1 ダミー剛体モデル

車内はロングシート(腰掛)を配した一般的な通勤列車を模擬したもので、床面、車体側面、腰掛、そで仕切り、荷棚、つり手で構成されている(図2)。窓とドアは平面とし、見掛け上車両側面を1枚の板とした。また、各種内装品の形状は楕円体、平面、円柱の組み合わせで近似している。荷棚、腰掛および窓に剛性を定義している。つり手は握り部を楕円体で近似し、つり手棒と硬いバネで接続した。なお、乗客と車内との接触部位の摩擦係数はすべて0.3とした。

2.1.2 衝撃加速度

踏切において車両が速度30km/hおよび60km/hでトラック(40t)に前面衝突した際の床面の加速度波形を図3に示すような2種類の台形波形と仮定し解析の入力条件とした。この2つの入力条件のうち前者を低速度、後者を中速度と呼ぶ。なお線路と垂直な方向には加速度は生じないものとした。

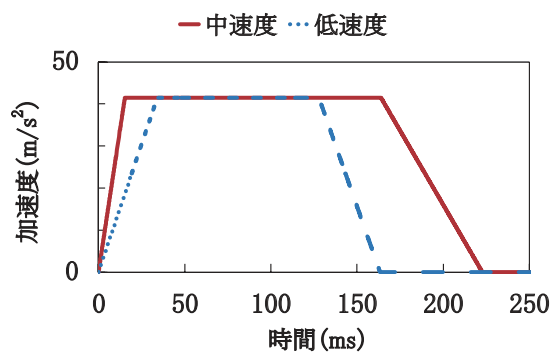


図3 加速度波形

2.1.3 乗客の配置と腰掛の区切り方

腰掛中間に仕切り等を設けることによる乗客に与える影響を評価するために、乗車率100%相当(着座人数10名)で、仕切り等の7条件に対して解析を行った。図4の左の列にそれぞれの初期条件を示す。(a)は座席の途中に手すりや仕切りが無い10人掛けの腰掛であり、図の左側が衝突面側であり、座っている乗客を左から乗客1, 乗客2, ..., 乗客10という。この条件を「仕切り無し」と呼ぶ。(b)は乗客3と乗客4および乗客7と乗客8の間に手すりを設け、10人の乗客を3:4:3に区切る条件で「中間手すり(3:4:3)」と呼ぶ。(c)は乗客2と乗客3, 乗客5と乗客6および乗客8と乗客9の間に手すりを設け、10人の乗客を2:3:3:2に区切る条件であり、「中間手すり(2:3:3:2)」と呼ぶ。(d)は低い仕切り板(上端が床面から635mm)で乗客を3:4:3に区切る条件であり、「中間低仕切り(3:4:3)」と呼び、(e)は低い仕切り板で乗客を2:3:3:2に区切る条件であり、「中間低仕切り(2:3:3:2)」と呼ぶ。(f)は高い仕切り板(上端が床面から1150mm)で乗客を3:4:3に区切る条件であり、「中間高仕切り(3:4:3)」と呼び、(g)は高い仕切り板で乗客を2:3:3:2に区切る条件であり、「中間高仕切り(2:3:3:2)」と呼ぶ。

2.1.4 傷害評価方法

各乗客の傷害の評価は自動車分野で広く用いられている頭部傷害値(HIC)と胸部傷害値(最大肋骨たわみ)の

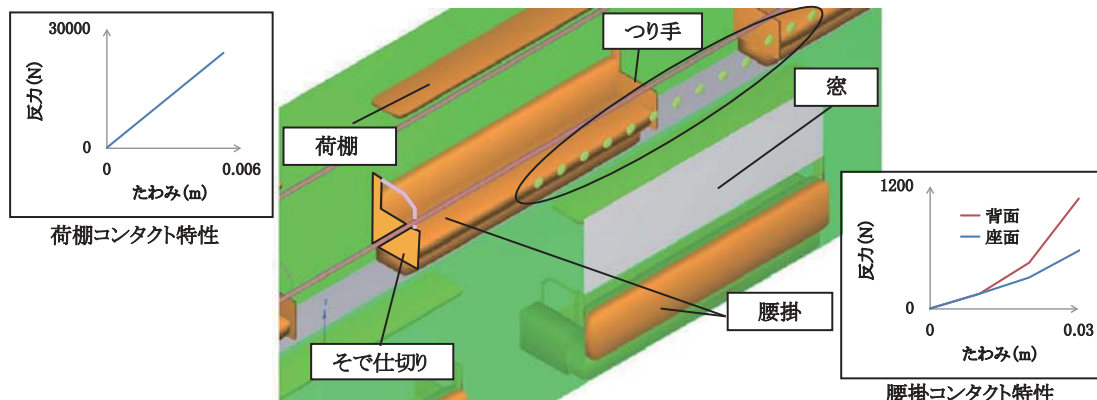


図2 車内モデル

2つの指標³⁾を使用した。HICは頭部傷害の起きる可能性を、最大肋骨たわみは肋骨の横方向のたわみから得られる胸部傷害の起きる可能性を表している。自動車の法規ではこれらの指標に対して安全基準（HIC：1000、最

大肋骨たわみ：42mm）を設けている。この値を参考値と呼び、安全性評価には参考値を超えた人数を用いた。また、個々の乗客についての安全性評価が必要な場合には参考値に対する傷害値の比（傷害値/参考値）を用いた。

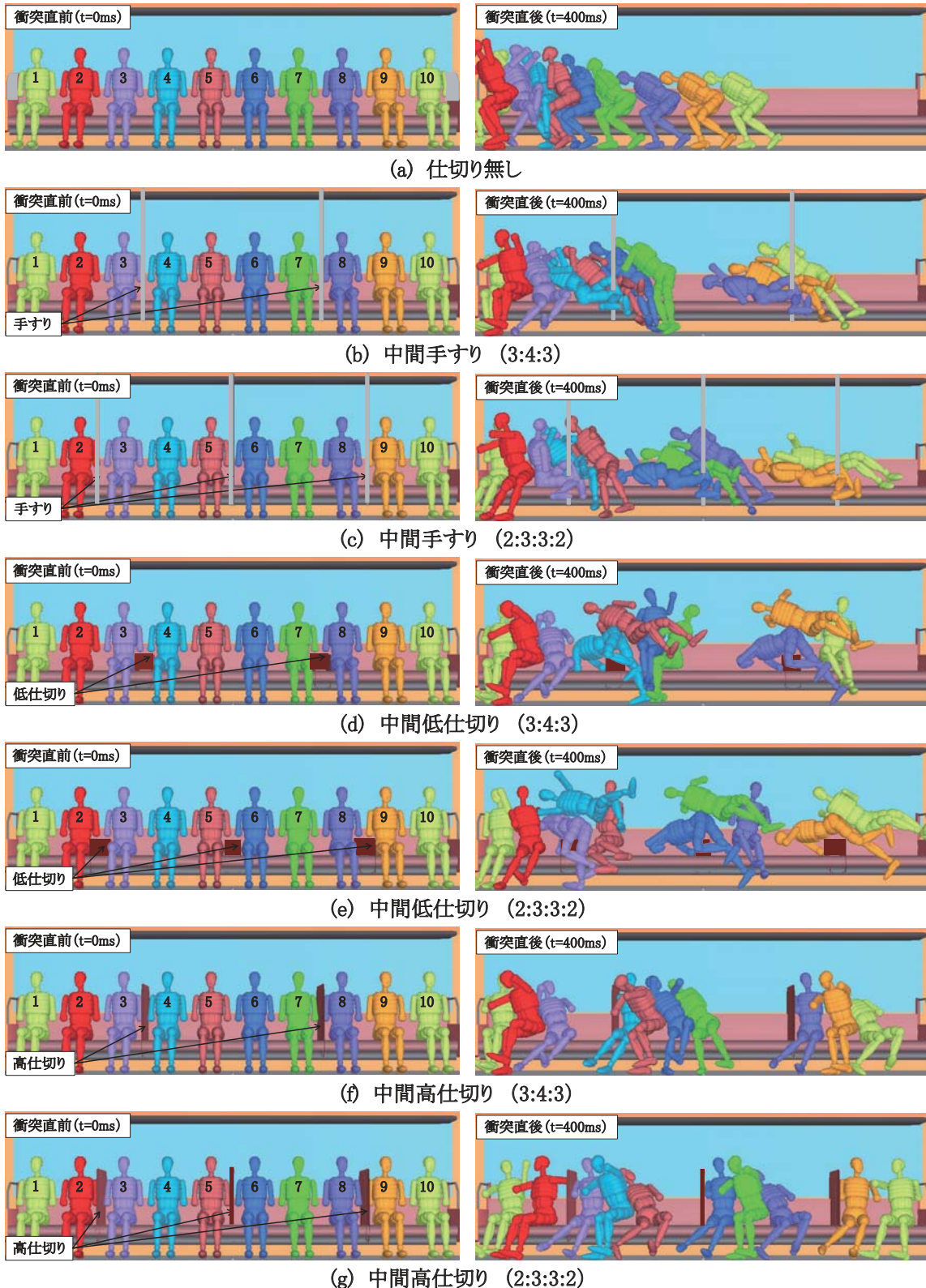


図4 乗車率100%相当の解析条件および挙動（中速度）

特集：人間科学

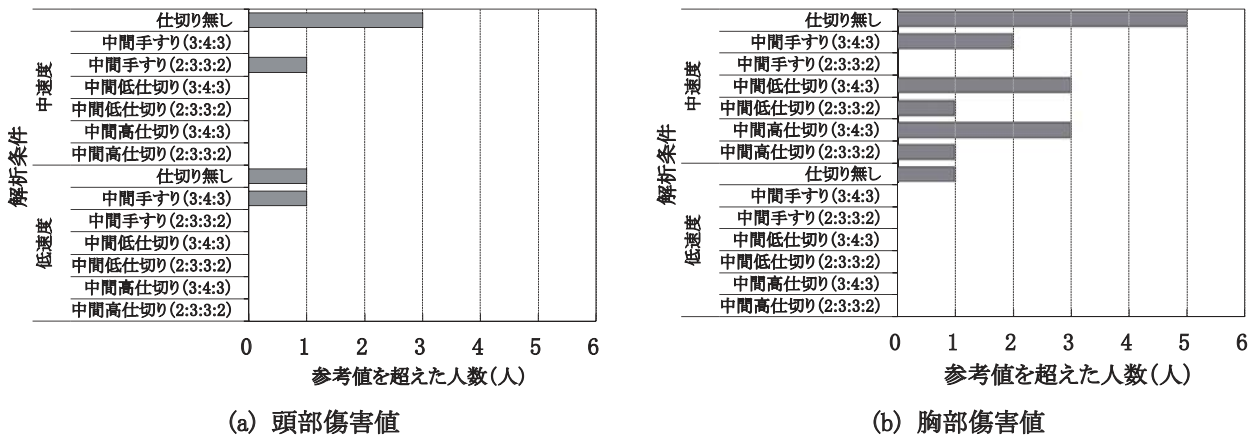


図5 解析条件毎の参考値を超えた人数の比較

2.2 解析結果

(1) 乗車率100%相当の傾向

図4の右側は、中速度における衝突後400ms後の挙動を表している。(a)の「仕切り無し」においては、乗客は紙面左側に流され、乗客同士がぶつかる状況がみられる。それ以外の条件については、手すりや仕切りによって衝突面方向の運動が拘束され、逆方向もしくは座面に倒れ込む方向に変化していることが分かる。また、(f)と(g)の「中間高仕切り」では、乗客が仕切りを挟んだ隣の乗客にぶつからないことが確認できる。

図5に解析条件毎に頭部傷害値と胸部傷害値について参考値を超える人数を示す。(a)の頭部傷害値については、頭部がぶつかるか否かによりばらつきがあるものの、中速度と低速度共に参考値を超える人数は少ない。参考値を超えたのは全解析条件において合計で6人であり、全て他の乗客へぶつかることが原因であった。(b)の胸部傷害値については、低速度では参考値を超える人数は少なく、これに比べて中速度では参考値を超える人数が増えている。また、「仕切り無し」と比較して「中間手すり」、「中間低仕切り」、「中間高仕切り」は参考値を超える人数が少なくなる傾向があった。さらに、腰掛を2:3:3:2に区切る条件は、3:4:3に区切る条件より参考値を超える人数が少なくなる傾向がうかがわれた。中速度の解析結果を乗客毎にみると、乗客3および乗客4が「仕切り無し」で参考値を超える傷害値を示したが、「中間手すり」、「中間低仕切り」、「中間高仕切り」では全て下がった。これは、仕切り等で区切ることににより、仕切り周りの乗客(乗客2~乗客5付近)の挙動が変化し、乗客同士がぶつかり合うことによる衝撃が弱まったためと考えられる。同様の傾向は低速度の乗客3においてもみられた。

3. 腰掛のそで仕切り脇に立っている乗客挙動シミュレーション

1章「はじめに」で述べたように、列車前面衝突の際、

そで仕切り脇に立っている乗客がそれを乗り越えて腰掛に座っている乗客側に倒れ込むことで傷害が生じる可能性が指摘されている。また、近年、ユニバーサルデザインの観点から、荷棚の高さを低く設定する車両が増えてきているが、そで仕切り脇に立っている乗客が腰掛側へ倒れ込み、頭部が荷棚端部にぶつかる可能性がある。そこで、そで仕切り脇に立っている乗客に焦点を当て、そで仕切り形状と荷棚端部の寸法が傷害の可能性に与える影響を評価することとした。なお、前章と同様に踏切でトラックと衝突した想定で解析を行った。

3.1 解析条件

3.1.1 乗客モデル・車内モデル

座っている乗客モデルと車内モデルは前章のモデルを用い、立っている乗客モデルにはMADYMOデータベースのHybrid IIIダミー剛体モデル(図1(b))を用いた。後者は主に自動車分野で歩行者の衝突解析に使用されるものである。ただし、いずれも姿勢制御機能を持たないダミー人形であり、自立能力はない。

3.1.2 衝撃加速度

この解析では2章の中速度を入力条件とした。

3.1.3 そで仕切りの形状と寸法の影響

腰掛のそで仕切り脇に立っている乗客が腰掛側に倒れ込む挙動に、そで仕切り形状と寸法が与える影響を評価するために、そで仕切り脇に乗客を立たせ(図6)、図7に示す6種類のそで仕切りを解析条件としてシミュレーション解析を行った。身体が中心が車両側面から220mm離れ、背中をそで仕切り面に合わせるように乗客モデルを立たせた。図7の(a)は座っている乗客の胸部付近がパイプで仕切られる構造となっており、上端高さが床面から1000mm、幅が車両側面から595mmでありI型と呼ぶ。(b)は長方形の板で構成されており、上端高さが床面から1150mm、幅が車両側面から595mmでありII型と呼ぶ。また、(c)は端部に手すりを有しており、下端(幅が車両側面から570mm)から上端に向かってそで仕切り

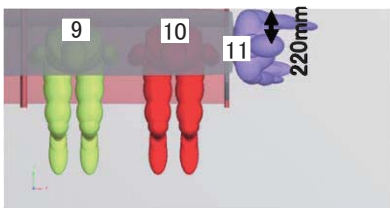
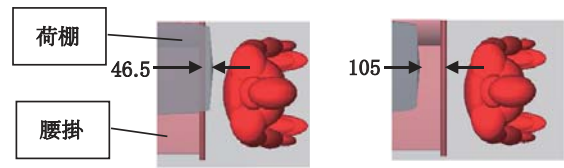


図6 立っている乗客の初期配置



(a) 荷物長さ標準 (b) 荷物長さ短縮
図8 荷物端部の長さ(単位:mm)

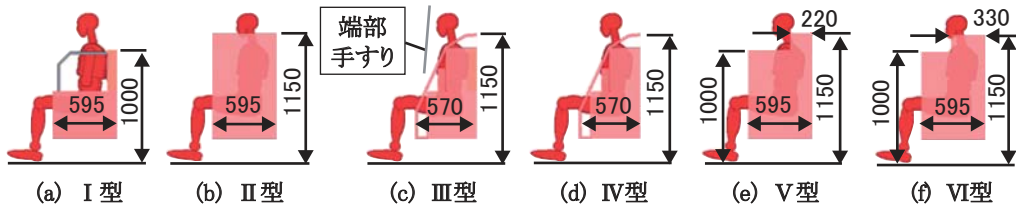


図7 そで仕切り形状(単位:mm)

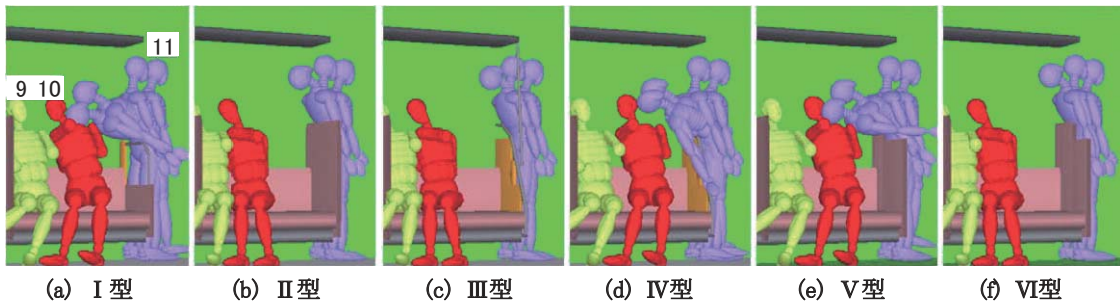


図9 そで仕切り形状による挙動の比較

の幅が狭くなる形状で、最上端が床面から1150mmであり、III型と呼ぶ。(d)は、III型から端部手すりが無くなった条件でIV型と呼ぶ。(e)はそで仕切りの最上端高さが床面から1150mmであり、その部分の幅が車両側面から220mmである形状をV型と呼び、(f)は幅が330mmでありVI型と呼び、(e)、(f)共に床面からの高さが1000mm以下における幅は車両側面から595mmである。

3.1.4 荷物端部の長さの影響

そで仕切り脇に立っている乗客が腰掛側へ倒れ込み、頭部が荷物端部にぶつかる挙動に対する対策として、荷物端部の形状を適正化することが考えられる。ここでは荷物長さ2種類(図8)を解析条件とし、その端部の車両長手方向の位置が、そで仕切り中心を基準として長くなる方向(紙面左側)を正にとった場合、+46.5mmと-105mmなるようにした。前者の荷物長さ条件を標準、後者を短縮と呼ぶ。なお、荷物高さは床面から1700mmとし、そで仕切り形状はII型(図7の(b))とした。

3.2 解析結果

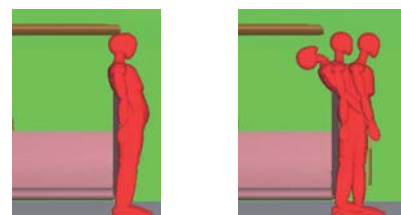
3.2.1 そで仕切りの形状と寸法の影響

図7に示された条件に対するシミュレーション結果を図9に示す。この図はそで仕切り脇に立っている乗客を衝突直前から100ms毎にトレースしている。座っている乗客9と乗客10については衝突後200msの時(図9の(b)、(c)、

(f)、もしくは300msの時(図9の(a)、(d)、(e))のみ表示している。高さが1000mmのI型であると立っている乗客の倒れ込みが大きく、座っている乗客とぶつかり、高さが1150mmのII型であると倒れ込みが少なく、ぶつからない。但し高さが1150mmであっても、その上端部の幅が220mm以下(IV型、V型)であると倒れ込みを抑える効果は小さく、幅が330mm(VI型)であると倒れ込みが大幅に小さくなる。また、III型ではそで仕切りに接続した手すりが身体を支えることにより倒れこみが防がれる。

3.2.2 荷物端部の長さの影響

図10は荷物の長さの違いについての2条件に対する乗客の挙動を100ms毎にトレースしたものである。荷物が床面から約1700mmである場合、荷物長さ標準ではそで仕切り脇に立っている乗客の後頭部がぶつかるが、荷物を150mm程度短くすることでこれを回避することができたことがわかる。



(a) 荷物長さ標準 (b) 荷物長さ短縮
図10 立っている乗客の挙動の比較

特集：人間科学

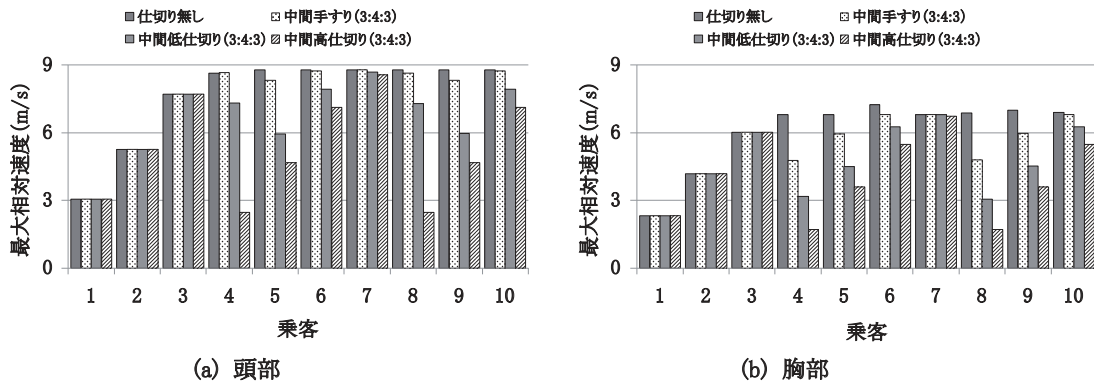


図 11 中間仕切りによる乗客毎の最大相対速度の比較（中速度）

4. 腰掛中間にある仕切り等が座っている乗客へ与える影響の考察

2章の解析条件において、腰掛中間に仕切り等があると、座っている乗客の傷害値が下がることが示された。ここでは、傷害値が下がる理由を考察する。傷害値は乗客が他の乗客や内装品にぶつかる際の乗客の速度に依存する値である。速度が大きいと、他の乗客や内装品にぶつかった時に傷害が発生する可能性が高くなると考えられる。そこで、車両床面に対する各乗客の最大相対速度を求め、中間仕切りの効果について考えてみる。

図 11に「仕切り無し」、「中間手すり (3:4:3)」、「中間低仕切り (3:4:3)」、「中間高仕切り (3:4:3)」の4つの条件の乗客毎の最大相対速度の比較を示す。横軸は各乗客を表している。速度方向は衝突面側を正としている。乗客の最大相対速度は、全体的な傾向としては、中速度と低速度共に衝突面寄りの乗客（乗客1～乗客3付近）が小さくなる傾向にある。「仕切り無し」（図4の(a)）では乗客が衝突面（図4の紙面左側）に動いて乗客同士が順番にぶつかっていく。このため衝突面寄りの乗客ほど最大相対速度が大きくなる前にそで仕切りや他の乗客にぶつかり、最大相対速度が抑えられている。一方、衝突面側から遠い乗客（乗客4～10付近）の最大相対速度はほぼ一定である。すなわち乗客4～10についてはぶつかる対象物が同じであれば、同等の傷害値が発生する可能性があったといえる。

頭部に関しては「仕切り無し」と比較して「中間手すり」の最大相対速度は大きく変わらないが、「中間低仕切り」「中間高仕切り」では最大相対速度は小さくなり、「中間高仕切り」はその傾向が顕著である。胸部に関しては頭部と概ね同様の傾向であり、さらに「中間手すり」の乗客4および乗客8の最大相対速度も小さくなる傾向が見られる。これは、手すりに乗客4および乗客8の右膝付近がぶつかり、このぶつかったところに近い身体部位ほどより強く動きが拘束されたためと考えられる。「中

間高仕切り」については右大腿部から右腰、右肩でぶつかることにより身体全体が拘束されたためと考えられる。これらのことから、腰掛中間の仕切り等で乗客の動きが拘束されて最大相対速度が下がり、傷害値が下がる傾向に繋がったものと考えられる。

車両に対する各乗客の最大相対速度を小さくすることが可能であれば、他の乗客や内装品へのぶつかりによる自身の傷害値が小さくなるとともに、他の乗客への加害性も小さくなる。このような対策の方向性は座っている乗客に関わらず一般的に言えることと考えられ、立っている乗客に対しても有効ではないかと推測される。

5. まとめ

踏切において通勤形列車が速度30km/h、60km/hでトラックに衝突する事故を想定して、ロングシート（腰掛）に座っている乗客とその腰掛のそで仕切り脇に立っている乗客を対象とした乗客挙動解析を行った。その結果、座っている乗客が互いにぶつかり合うことにより傷害が発生する可能性が高いことが確認された。これに対して、腰掛中間に仕切り等を設けること、そで仕切り形状を適正化すること、荷棚端部に対しての配慮により安全性向上が図れると考えられた。

なお、この研究は国土交通省からの鉄道技術開発費補助金を得て実施された。

文献

- 1) 小美濃幸司, 白戸宏明, 田中綾乃: 列車衝撃時の乗客挙動推定, 鉄道総研報告, Vol.13, No.11, pp.27-32, 1999
- 2) 小美濃幸司, 白戸宏明, 齊藤綾乃, 遠藤広晴: 人体挙動解析による着座乗客の衝突安全性の検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.5, pp.23-28, 2007
- 3) 自動車技術会編: 交通外傷バイオメカニクス, pp.215-217, 2003