

# 通勤列車踏切事故時の乗客挙動シミュレーション

人間科学研究部 人間工学研究室

副主任研究員 中井 一馬

## 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の検討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提供することを目的とし、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<sup>1)</sup>。

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シミュレーション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つた。

- ・腰掛に座っている乗客が互いにぶつかり合う、あるいはそれで仕切りとぶつかる
- ・それ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れで仕切り脇に立っている乗客に焦点を当てたもので、ここでは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。

### 2.1. 解析条件

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。

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。

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。今回はつり手を使用した解析を行っていないが、ある程度の力で乗客がつり手をつかんでいる状況を模擬するために、乗客の手とつり手をセグメントで接続し、セグメントは握力を超える荷重が作用したときに破断するものとした。また、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。

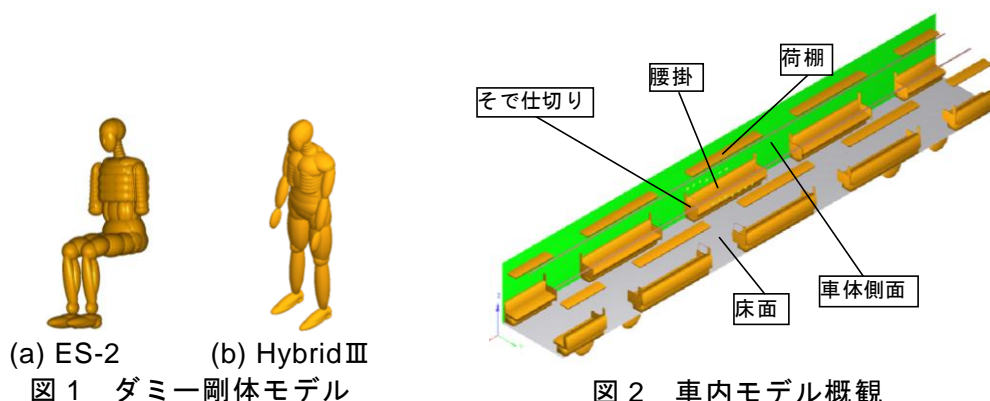


図 1 ダミー剛体モデル

図 2 車内モデル概観

踏切において車両が速度 60km/h で大型自動車等に衝突した際の床面の加速度波形を図 3 に示すような台形波形と仮定し解析の入力条件とした。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。

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、次の仕切り等の条件に対して解析を行った。1 つめの条件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 4 の上段の図で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 とした。

この条件を「仕切り無し」と呼ぶ。2 つめの条件は乗客 3 と乗客 4 および乗客 7 と乗客 8 の間に仕切り板を設け、10 人の乗客を 3:4:3 に区切る条件で「中間仕切り」と呼ぶ。3 つめの条件は手すりや乗客を 3:4:3 に区切る条件であり、「中間手すり」と呼ぶ。

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 2 つの指標<sup>2)</sup>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

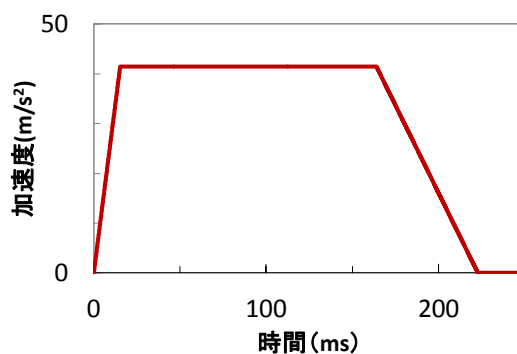


図 3 加速度波形

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。

## 2.2.解析結果

図4の2, 3, 4段目の図は、腰掛の区切り条件それぞれにおける衝突後400ms後の挙動を表している。「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、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。

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、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。

図4の中丸で示された数字は解析条件毎に胸部傷害値について参考値を超える人数を示す。胸部傷害値については「仕切り無し」と比較して「中間手すり」と「中間仕切り」は参考値を超える人数が少なくなる傾向であった。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」と「中間仕切り」ではいずれの乗客も値は下がった。これは、仕切り等で区切ることにより、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。

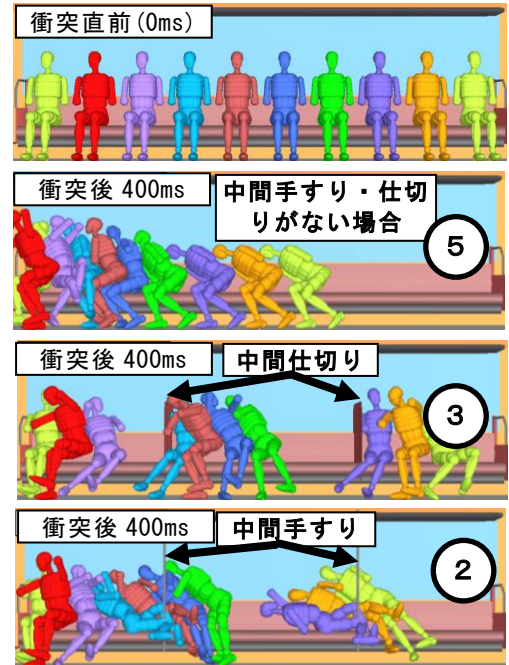


図4 ロングシートの間中手すり等の影響の解析例  
※丸の中の数は胸部傷害を受ける可能性のある人数

## 3. 腰掛のそで仕切り脇に立っている乗客の挙動シミュレーション

「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、前章と同じ踏切事故の衝突を想定した条件で解析を行った。

### 3.1.解析条件

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HybridIII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。

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挙動に対する対策として、荷棚端部の形状を適正化することが考えられる。ここでは荷棚の長さ2種類(図5)を解析条件とした。前者の荷棚の長さ条件を標準、後者を短縮と呼ぶ。なお、荷棚高さは床面から1700mmとした。

入力加速度は2章で使用した図3とした。

### 3.2. 解析結果

図6は荷棚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。荷棚が床面から約1700mmである場合、荷棚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、荷棚を150mm程度短くすることでこれを回避することができた。

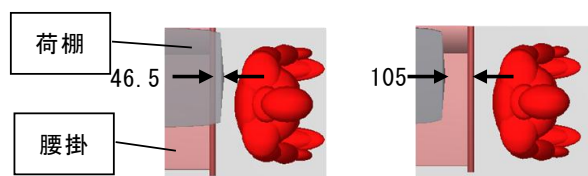
### 4. まとめ

踏切において通勤形列車が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、荷棚端部に対する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。

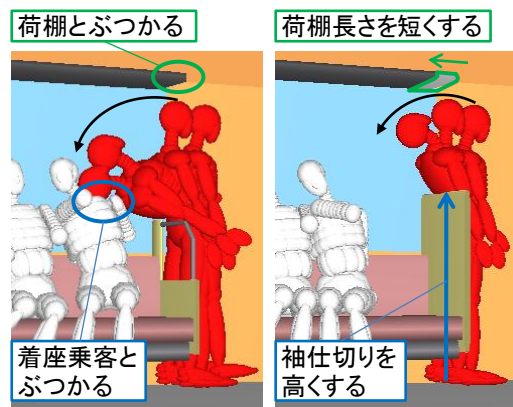
### 文献

- 1) 小美濃幸司, 白戸宏明, 斉藤綾乃, 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
- 2) 自動車技術会編: 交通外傷バイオメカニクス, pp215-217, 2003



(a) 荷棚長さ標準 (b) 荷棚長さ短縮

図5 荷棚端部の長さ(単位:mm)



a) 対策の留意点 b) 対策例

図6 立っている乗客の解析例