

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

車両衝突時の乗客の動きを推測する

事故によって列車に衝撃が生じたときでも、乗客の被害を最小限に抑えて、より安全性の高い車両を開発するために、車両衝突時の乗客の挙動をシミュレーションする手法の開発に取り組んできました。ここでは、シミュレーションの必要性やこれまでの研究経緯に触れながら、計算モデルの特徴などシミュレーション技術の現状を紹介するとともに、この手法を用いた最近の研究成果を紹介します。



中井 一馬
Kazuma Nakai
人間科学研究部
人間工学研究室
副主任研究員
[専門分野] 衝突安全

はじめに

万が一事故や災害が発生して列車が衝撃を受けた際にも、乗客の被害を軽減させる安全性の高い車両設計に向けた研究に取り組んでいます。衝突安全対策には、車体構造対策と車内設備対策の2つがあります。

前者は、列車が自動車などにぶつかった際にも（以後、1次衝突）、車体の剛性を高くしておくことで車内空間を確保したり、クラッシュブルゾーンなどの緩衝機能を備えることで列車に生じる衝撃を和らげたりする対策です。後者は、1次衝突後に列車に生じた衝撃により乗客が投げ出されて車内設備あるいは他の乗客などにぶつかった際

にも（以後、2次衝突）、車内設備の配置や形状、剛性を適切にしておくことで乗客の傷害の程度を低く抑える対策です。人間工学研究室では、主に後者の車内設備対策を検討しています¹⁾。

車内設備の対策を考えるうえでは、1次衝突後の2次衝突による乗客の傷害発生経緯や傷害発生部位・程度、加害物などの傷害状況を把握し、その傷害パターンに応じた対策を検討するのが効率的です。しかし、傷害状況の情報は非常に限られています。運輸安全委員会の事故調査報告書でも一部の事故や一部の情報に限られているのが現状です。上記のような傷害状況に関する情報がデータベース化されれば、傷



図1 通勤列車前面衝突時の乗客挙動シミュレーション概要

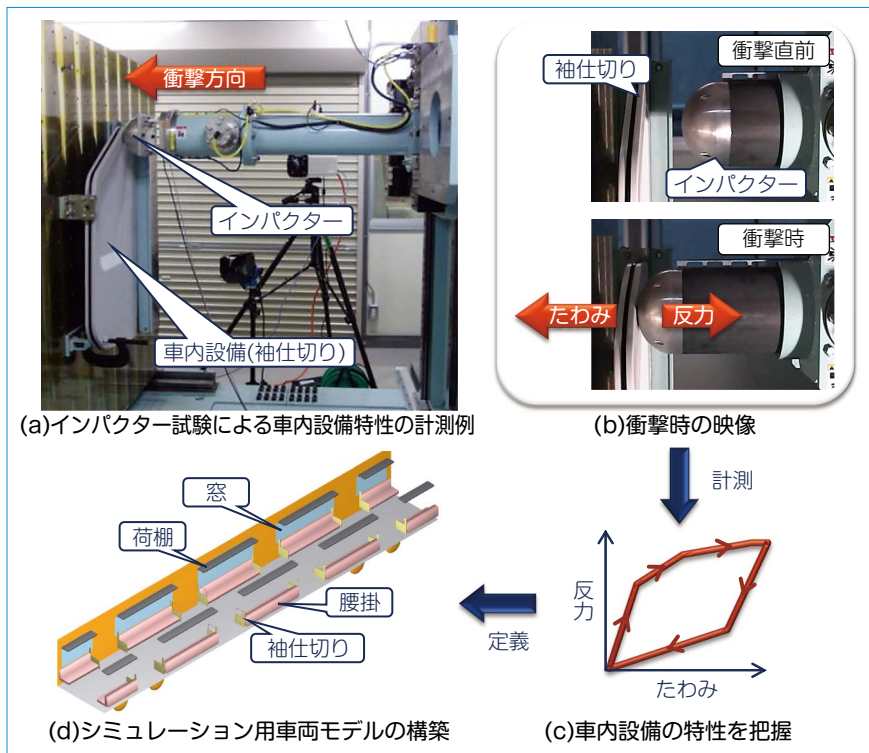


図2 車内設備を含んだ車両モデル構築の概要

害状況も明確になり効果的な対策に結びつくはずです。

そこで、私たちは、コンピュータ上で事故を再現して乗客の傷害状況を推察し、衝突安全対策を検討しています。この検討に用いているのが乗客挙動シミュレーション手法です。

列車内の乗客挙動シミュレーション

乗客挙動シミュレーションの概要を図1に示します。この図では、シミュレーションの都合上、ロングシートを配した車内の一部を壁で仕切り、そこに乗客が複数いる状況で列車が前面衝突した直後の乗客の挙動を示しています。乗客が列車衝突方向に投げ出されて乗客同士が2次衝突する、あるいは袖仕切り脇に立っている乗客が着座乗客側に倒れ込むといった車内の状況を確認できます。

このようなシミュレーション手法は、自動車の衝突安全対策に広く用いられており、この業界で開発され

たMADYMOというソフトを用いて検討を行っています。このソフトには、人体を模した乗客モデルがライブラリーとして用意されています。ただし、列車内、特に通勤形列車を考えると、乗客が多数であり、乗客の拘束が少なく、それゆえに乗客同士の干渉が多いという点で自動車内と状況が大きく異なります。そのため、列車内独自の傷害パターンを掴む必要があります。

車内設備の特性の把握

乗客挙動シミュレーションの手順を説明します。はじめに、コンピュータ上で構築された車内設備を含む車両モデル内に乗客モデルを配置します。次に、1次衝突を模擬した衝撃加速度を車両側に入力します。すると、各乗客の挙動や傷害の程度を表す傷害値が出力されます。言葉にすると簡単そうですが一筋縄ではいきません。特に、車内設備のモデル化では、形状は図面を参考にできますが、これらの設備に乗客が衝突した際に反力が働く特性を

定義する必要があります。この特性は、車内設備の材質と構造によって異なるので、設備モデルごとの定義が必要です。

このような車内設備ごとの特性を把握するため、鉄道総研所有の試験機²⁾を用いて図2(a)に示すようなインパクト試験を実施しています。図2(a)と(b)はロングシート端部にある袖仕切りに対して、頭部を模した球状のインパクトを用いて衝撃試験を実施している例です。実際の車内設備を列車車内と同様あるいは近い構造で取り付けて衝撃を与えます。この試験により、衝撃を与えた際の車内設備のたわみ変位と反力を計測し、図2(c)に示すような特性を把握します。この特性を、図2(d)の車両モデルにおける設備モデルの特性として定義します。

ロングシート周りの対策の検討例

図1のシミュレーション例から、通勤形車両のロングシート周りで着座乗客同士の2次衝突により傷害が発生することや、袖仕切り脇に立っている乗客が着座乗客側に倒れ込むことが推察されました。そこで、これらの傷害パターンについて対策を検討した一例を紹介します。

(a) 乗客モデルと車両モデル

着座乗客モデルには、左右方向からの衝撃に対する傷害評価に適したES-2と呼ばれるモデルを用いました。ロングシートに座っている乗客には、列車の前面衝突時に左右方向の衝撃が作用するからです。車両モデルは10人掛けロングシートを配した一般的な通勤形列車を模擬したもので、床面、車体側面、シート、袖仕切り、荷棚で構成されています。窓とドアは平面とし、見掛け上車体側面を1枚の板としました。また、袖仕切り脇に立っている乗客には、自動車分野で歩行

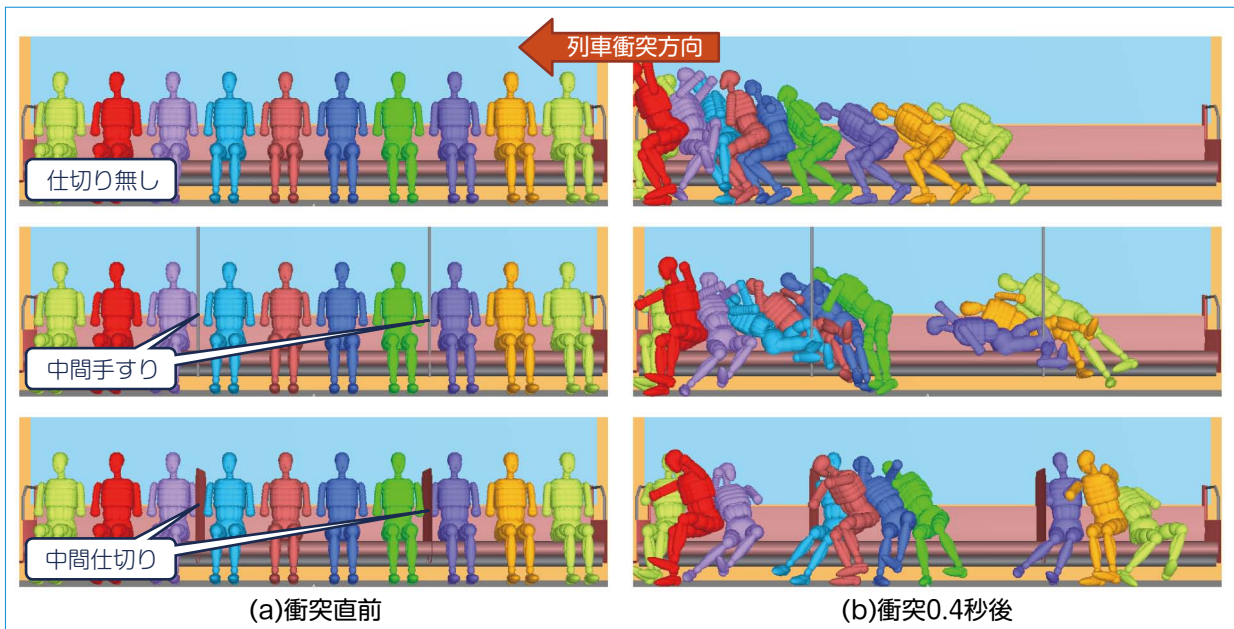


図3 着座乗客の挙動シミュレーション

者の衝突解析に用いられる Hybrid III Pedestrian と呼ばれるモデルを用いました(☞参照)。

(b) 車内設備の条件

着座乗客については、ロングシートの中に手すりまたは仕切りを設けることが乗客に与える影響を評価するために、以下の3つの仕切り条件を設定しました。なお、着座人数は10人(着席乗車率100%)としました。

- ・仕切り無し：ロングシートの途中に手すりや仕切りが無い
 - ・中間手すり：乗客を3：4：3に区切るように手すりを設ける
 - ・中間仕切り：乗客を3：4：3に区切るように仕切り板を設ける
- また、立っている乗客については袖

仕切りの高さを床面から最上端まで1000mmと1150mmの2種類用意し、高さの違いによる倒れこみ挙動を調べました。

(c) 衝撃加速度の条件

踏切において列車が速度60km/hで前面から大型自動車に衝突した際の車体の衝撃加速度をシミュレーションの入力条件としました。なお、レールと垂直な方向には加速度は生じないものとしています。

(d) 傷害の評価方法

着座乗客の傷害指標には胸部傷害値(最大肋骨たわみ)を用いました。最大肋骨たわみは、胸部傷害の起きる可能性を肋骨の左右方向のたわみ量によって表します。自動車の法規では、最大

肋骨たわみ42mm以下を安全基準としており³⁾、この値を許容値と呼びます。ここでは、最大肋骨たわみが許容値を超えた人数を評価に用いました。

(e) シミュレーション結果

図3は、3つのシート条件ごとの着座乗客の挙動を表しています。左側が衝突直前を、右側が衝突0.4秒後を表しています。紙面左側が列車衝突方向です。上段の「仕切り無し」では、乗客は列車衝突方向側に投げ出され、乗客同士が2次衝突しています。中段の「中間手すり」と下段の「中間仕切り」では、手すりや仕切りによって乗客の動きが拘束され、座面に倒れ込んだり、移動が止められたりしています。図4に肋骨たわみが許容値を超えた人数をシート条件ごとに示します。「仕切り無し」と比較して「中間手すり」と「中間仕切り」は許容値を超える人数が少ない傾向でした。これは手すりや仕切りで区切ることにより、仕切りに近い乗客同士が2次衝突しなかった、あるいは乗客同士の2次衝撃が弱められたためと考えられます。

立っている乗客の倒れ込み挙動に

☞ 「衝突シミュレーションに用いられるさまざまな人体モデル」

ロングシート周りの対策の検討で登場しているモデルはES-2とHybrid III Pedestrianですが、その他にもさまざまな人体モデルがあります。例えば、Hybrid III PedestrianモデルはもともとHybrid IIIと呼ばれる着座モデルをベースにしています。Hybrid IIIは人体の前面方向からの衝撃を評価するためのモデルであり、図6に示すシミュレーションではこのモデルを利用しました。また、人体の後面方向からの衝撃を評価するためのBioRID IIと呼ばれるモデルもあり、これは主にむち打ちの評価に適しているモデルです。さらにチャイルドシートの安全性を評価するための子供用のモデルも存在します。自動車業界では、衝撃方向や車内状況に合わせてモデルを使い分けて評価を行っています。

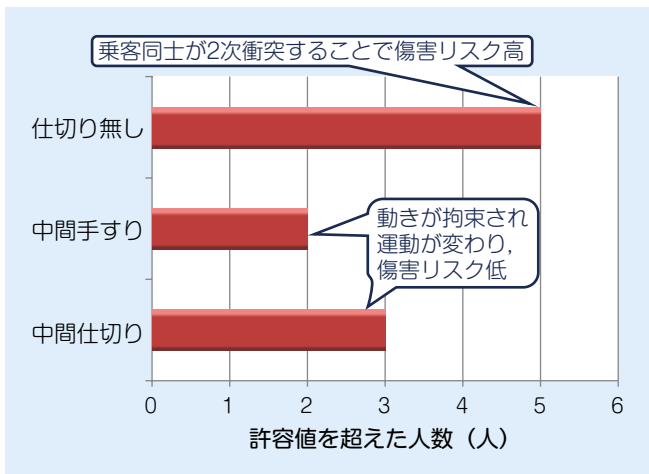


図4 着座乗客の胸部傷害



図6 クロスシートのシミュレーション例

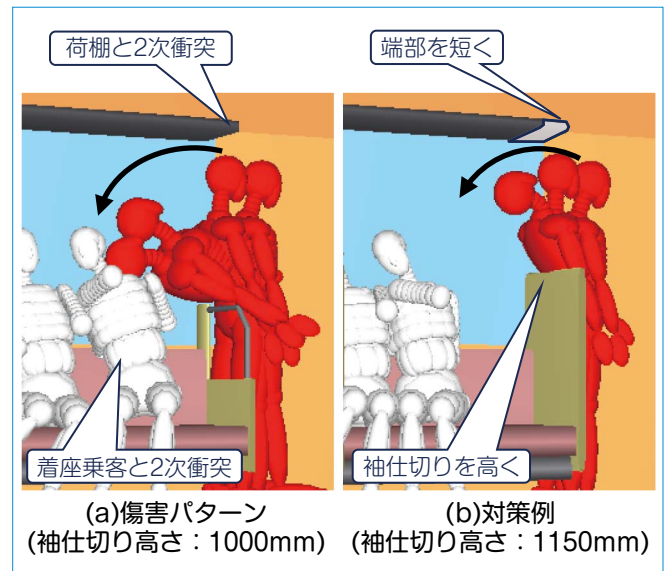


図5 立っている乗客の挙動シミュレーション

よる傷害パターンと対策例を図5に示します。図5(a)は袖仕切りの高さが1000mmの場合です。立っている乗客は腰かけ側に倒れ込み、着座乗客と2次衝突する可能性があり、荷棚が低い場合は後頭部をぶつける可能性が示唆されました。その対策として、図5(b)のように袖仕切りを高くしたり、荷棚端部を短くしたり、高くしたりする対策が有効であると考えられます。荷棚端部を高くする対策は、平成25年に「鉄道車両の衝撃時の乗客被害低減用荷棚(特許第5191979号)」として特許登録されました。

傷害パターン抽出での活用

対策の検討で非常に重要なことは、検討前に傷害状況を把握して、対策を講ずべき乗客の傷害パターンを特定することです。傷害状況は1次衝突による衝撃加速度だけでなく、車内設備のレイアウトなどにも依存します。つま

り、これらの複数のパラメーターの中から傷害パターンを抽出する必要があります。乗客挙動シミュレーション手法は、この処理に力を発揮します。例えば、同様の手法を通勤形車両タイプ以外に適用した例を図6に示します。クロスシートを配した特急形車両におけるシミュレーションにより、膝や頭部を前席の腰掛背面に2次衝突する傷害パターンが確認されました。現在、対策を検討しています。

おわりに

ロングシート周りの対策の検討を例に、車両衝撃時の乗客挙動シミュレーション手法についてご紹介しました。本シミュレーションでは、衝撃加速度の条件を一定として、車内設備対策の検討を実施しましたが、衝撃加速度は車体の剛性やクラッシュアブルゾーンの特性に依存することから、衝撃加速度をパラメーターとしてシミュレーシ

ョンを実施することにより、乗客の傷害評価を行うことで、車体構造対策の検討も可能です。今後も、本手法をより安全性の高い車両設計に役立たせたいと考えています。

なお、本文に記載した研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 小美濃幸司, 中井一馬, 白戸宏明, 鈴木大輔: 通勤列車の踏切事故時の乗客挙動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.1, pp.21-26, 2012
- 2) 中井一馬: 研究開発七つ道具 打ち出し式衝撃・静加圧試験機, RRR, Vol.70, No.6, p.41, 2013
- 3) 自動車技術会編: 交通外傷バイオメカニクス, pp.215-217, 2003