

鉄道一般
車 両
施 設
電 気
運転・輸送
防 災
環 境
人間科学
浮上式鉄道

車両衝撃時の乗客の安全を評価する

事故などにより車両に大きな衝撃が生じた際にも、乗客の被害を抑えるための研究に取り組んでいます。研究にはコンピューターを用いたシミュレーションを利用しています。シミュレーションで用いる乗客にみたてたダミーモデルには複数のタイプがあります。自動車業界では想定する事故状況に合わせて使い分けていますが、鉄道においては、使い分けが困難な場面や国内の車内設備を対象とした評価が難しい場面があります。ここでは、これらの問題を解決するために開発した鉄道用の人体モデルについて紹介します。

はじめに

万が一に備えて、事故時の被害を抑える対策は重要であり、さまざまな分野で研究が進められています。鉄道においても、衝突事故時の被害を抑えることを目的とした研究が進められています。欧州規格¹⁾や米国連邦規則²⁾に衝突安全に関する要求が定められている一方で、国内ではJIS E 7106に車体強度の基準はあるものの衝突事故には対応していません。欧米と比べてみますと、まず鉄道利用者の安全性を高めるという観点で、事故時の乗客の被害状況を把握して、車内の安全性を適正に評価することが重要と考えられます。

筆者らの研究では、列車衝突で乗客が受ける被害を2つに分けて整理しています。1つ目は、列車がほかの列車や線路上の障害物などに衝突（以下、1次衝突）した際に、車体変形により乗客が被害を受ける場合です。2つ目は、1次衝突により車内に発生する衝撃で投げ出され、車内設備やほかの乗客へ衝突すること（以下、2次衝突）により被害を受ける場合です。今回は後者に着目して紹介したいと思います。

被害の程度は、2次衝突する際の身体の姿勢や衝突時の速度、あるいは衝突する車内設備の形状や硬さなどの条件に影響を受けます。これらの関係を把握するための試験方法があります。台車上に車内設備と乗客にみたてたダミー人形を乗せて、台車に衝撃を加えることにより、事故で車内に発生した状況を再現して、乗客被害を調べる方法です（図1）。この試験方法はスレッド試験と呼ばれ自動車業界で開発され、航空業界などほかの分野でも用いられています。さまざまな条件で試験を実施することにより衝突時の条件と被害状況の関係が明確になります。しかしながら、物理的制約があるため、試験条件が限られます。

試験を補完する方法として、衝突シミュレーションがあります³⁾。車内を模擬した車内モデルとダミー人形を模擬したダミーモデルを用いて、コンピューター上でスレッド衝撃試験を実施する手法です。この手法により、効率的にケーススタディーが行えます。

ダミー人形には複数のタイプがあり、これに対応してシミュレーションに用いるダミーモデルにも複数のタイ



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、
人間工学



鈴木 大輔
Daisuke Suzuki
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、
人間工学



榎並 祥太
Shota Enami
人間科学研究部
人間工学研究室
研究員
【専門分野】 衝突安全、
人間工学

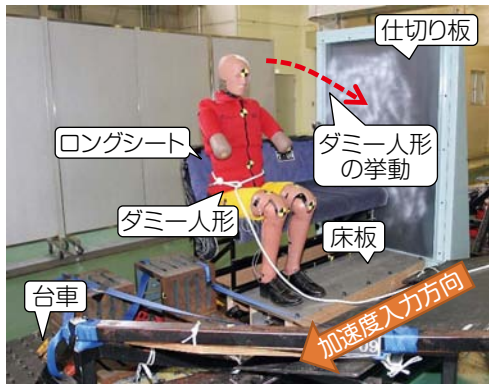


図1 スレッド試験の概略

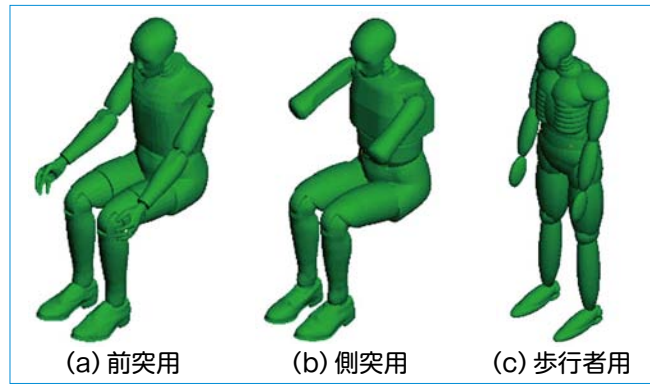


図2 シミュレーションに用いるダミーモデル

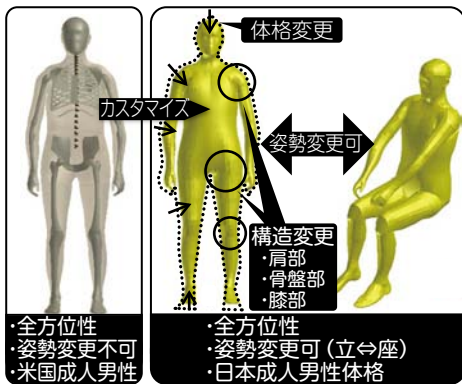


図3 開発した人体モデルの特徴

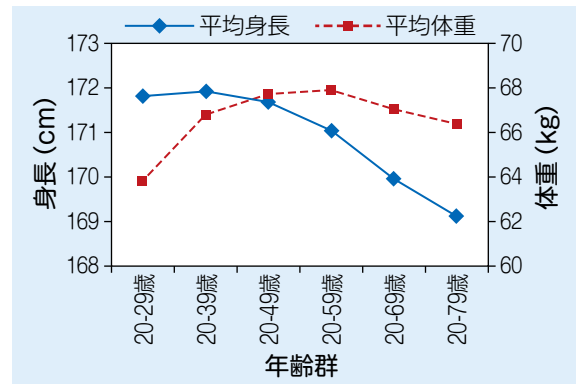


図4 年齢群ごとの平均身長と平均体重の関係

があります(図2)。座っている乗客に対して前面からの衝突を想定したタイプ(前突用)と側面からの衝突(側突用)を想定したタイプは構造が異なります。また、歩行者の評価には立位のダミーモデルが用いられます。自動車業界では想定する事故状況に合わせて、これらの複数のダミーモデルを使い分けています。しかしながら、列車内の乗客の姿勢や向いている方向の多様性に対応するのが困難な場面があります。また、欧米人体格であることから、2次衝突する箇所が日本人と異なるなど、国内の車内設備を対象とした被害評価や対策の検討が難しい場面もあります。そこで、これらの問題を解決するための鉄道用の人体モデルを開発しました。

鉄道用人体モデルの開発

自動車業界では事故時の人体傷害を詳細に評価するために人体に忠実な構造をもつ人体有限要素モデルが開発されています。そこでESI Softwareらが開発した人体有限要素モデルである

H-Model⁴⁾をベースとして、鉄道用の人体モデルを開発しました(図3)。以下に、カスタマイズの概要と解析精度の確認結果を示します。

人体モデルのカスタマイズ

被害状況の把握には、致命傷につながる可能性が高い頭部あるいは胸部の傷害評価が重要です。しかし、従来のダミーモデルにおいて胸部は、それぞれが評価する衝撃方向に特化した構造となっており、実際の人間の胸とは異なっています。このことから、人体と同様の胸の構造をもつ人体モデルであれば、列車内で発生する可能性のある全方位の衝撃を評価できます。そこで、実際の人体と同様の骨格構造でモデリングされていることからH-Modelをベースとしました。このモデルは、全方位の衝撃評価が可能ですが、立ち座りなどの姿勢変更ができないうえ、米人体格(身長約175cm、体重約78kgの平均的な米国成人男性体格)です。国内の列車内設備を評価対象とするため、これらの課題を解決できる

ように、このモデルをカスタマイズしました。

H-Modelは、身体の表面から皮膚、肉、骨のように実際の人体と同様に層になっていて、胸部、腹部には内臓も含まれています。肋骨部分は実際の人体と同様に12対あり、全方位からの衝撃に対して変形するかご型の構造となっています。また、背骨のつながりと四肢などの関節は回転ジョイントで模擬されています。H-Modelから肩部、骨盤部、膝部の一部の構造を変更し、立ち姿勢と座り姿勢への変更を可能にしました。

人体モデルの体格は日本人の成人男性体格をベースに決めました。人間生活工学研究センターが2004年から2006年に約3500人の20代から70代までの男性に対して身長と体重を計測したデータ⁵⁾と、2005年の国勢調査⁶⁾から抽出された20代から70代までの男性の人口から、年齢群ごとの平均身長と平均体重の関係を算出しました(図4)。今後は鉄道利用者に占める

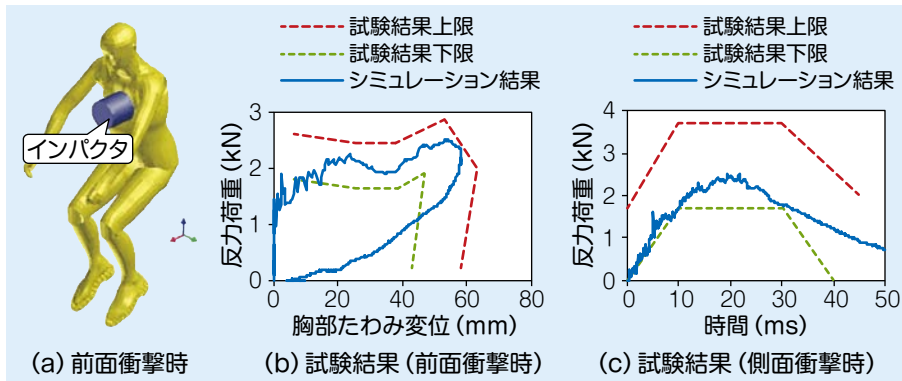


図5 胸部衝撃試験結果とシミュレーション結果の比較(インパクト速度4.3m/sの例)

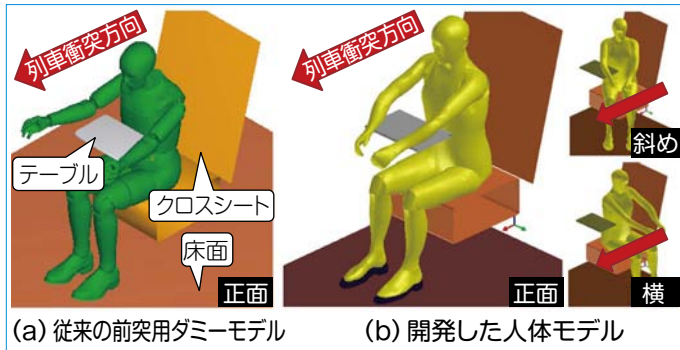


図6 クロスシートテーブルに対する初期配置

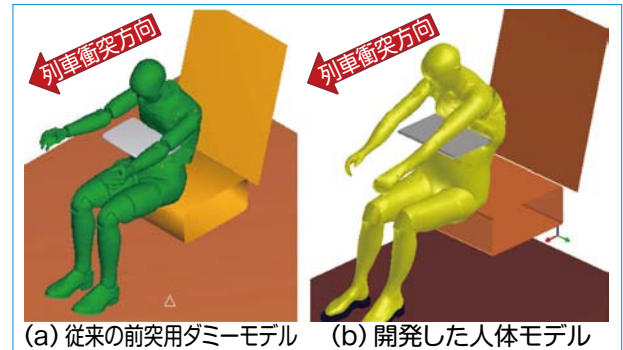


図7 正面向き条件のシミュレーション結果(テーブル衝突後90ms)

高齢者の割合が増加することが考えられることから、人体モデルのカスタマイズにおいて想定する鉄道利用者の年齢の範囲を20代から70代としました。この年代群の平均身長と平均体重を参考に、身長169cm、体重66kgを人体モデルで目指すべき体格としました。

この体格にするために人体各部の質量を調整しました。ただし、解析精度を保ったままでの調整としました。

解析精度の確認

構築した人体モデルの解析精度を確認するために、過去に米国で行われた実際の人体胸部に対する衝撃試験の結果と比較しました(図5)。この試験では直径150mm、質量23kgのインパクトを複数の屍体の胸部に前面および側面から4.3m/sおよび6.7m/sで衝撃させた際の、胸部のたわみ変位とインパクトが受ける反力荷重を計測しています。人体は個体差を持つことから試験結果には幅が見られます。図5(b)では試験と同条件で実施した

シミュレーションでインパクトが受ける反力荷重とインパクト方向の胸部のたわみ変位の関係を試験結果と比較しています。この図からシミュレーション結果は、試験結果上限と下限の間の範囲におおむね収まることが確認できました。胸部側面に対する衝撃試験に対しても図5(c)に示すようにシミュレーション結果は試験結果の傾向を示すことを確認しました。6.7m/sでインパクトを衝撃させた際の解析結果も試験結果とそれぞれ同傾向を示しました。

以上のことから前面および側面からの衝撃に対する人体の特性を精度よく表現できており、全方位からの胸部への衝撃の評価が可能であることが確認できました。

人体モデルを用いた評価

カスタマイズした人体モデルを用いることで、国内の列車内設備を評価できるかを確認するために、胸部傷害や

挙動に影響のされる被害パターンにおいて解析を実施しました。

クロスシートテーブルの傷害評価

図6に示すように従来の前突用ダミーモデルと開発した人体モデルを、クロスシートのテーブルに対して正面向き、斜め向き、横向きに着座させて、胸部にテーブルを衝撃させるシミュレーションを実施しました。ここで、テーブルは一般的なサイズとし、最上面は床面から800mmの位置として、変形のない剛体と仮定しました。前突用ダミーモデルに関しては衝撃時の胸部のたわみ変位量を、人体モデルに関しては背骨に対する肋骨の変位量のそれぞれ最大値を最大胸部変位として傷害の指標としました。

図7に前突用ダミーモデルと人体モデルの正面向きのシミュレーション結果を示します。どちらの条件においても、テーブルが胸部に衝撃し乗客が倒れ込む挙動がみられました。衝撃時に出力された最大胸部変位を図8に示し

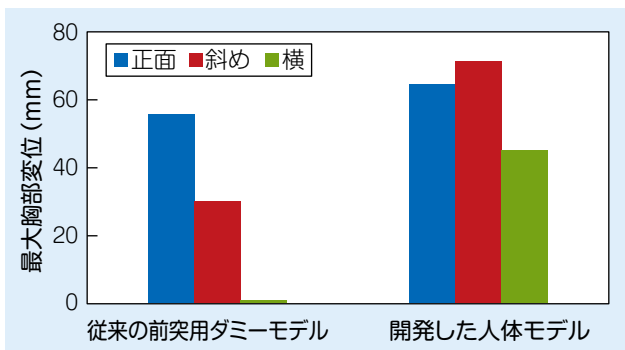


図8 最大胸部変位の前突用ダミーモデルと開発した人体モデルの比較

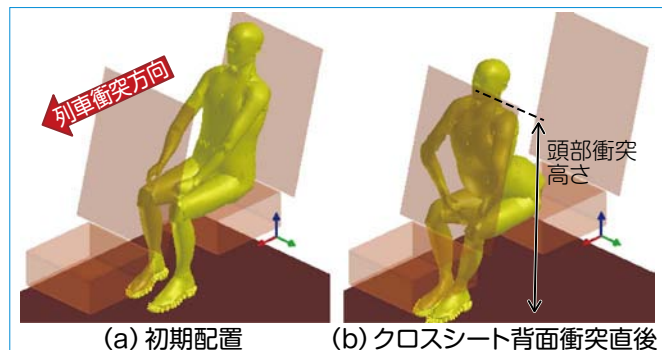


図9 クロスシート乗客のシミュレーション結果 (人体モデル)

ます。前突用ダミーモデルでは、斜め方向および横方向の胸部傷害を過小に評価しますが、開発した人体モデルでは全方位の傷害評価が可能であることが確認できました。

クロスシート乗客の挙動評価

体格差による挙動評価を実施しました。従来のH-Model (米国人体格) と開発した人体モデル (日本人体格) を用いて2次衝突する車内設備の位置の比較を行うため、クロスシートに着座した乗客における衝突シミュレーションを実施しました。頭部(鼻部)が2次衝突するクロスシート背面の床面からの高さを評価指標としました。

図9に人体モデルにおけるシミュレーション結果を示します。クロスシート背面に膝部が2次衝突し、その後、頭部が2次衝突する挙動がみられました。図10に示すように体格差により頭部が衝突する高さは約40mm異なります。一般的なクロスシートにおいて、頭部が2次衝突する付近にはテーブルを固定するつまみがあります。たとえば、今回の条件においては、人体モデルのアゴ付近が、つまみに2次衝突する可能性があることが示唆されました。そこで、被害を低くするために、このつまみ位置の検討が可能です。以上のように開発した人体モデルにより、日本人体格に適した車内設備の評価が可能であることが確認できました。

おわりに

衝突シミュレーションにおいて、従来のダミーモデルでは評価が難しい列車内における2次衝突について、傷害評価が可能な鉄道用の人体モデルを開発しました。このモデルは以下の特徴を有しています。

- ・立位から座位の姿勢変更が可能
- ・全方位からの衝撃評価が可能
- ・日本人の成人男性体格

人体モデルを活用した衝突シミュレーションにより、列車内のさまざまな被害パターンにおける傷害や挙動の評価が可能となり、利用者の安全性を高める対策の検討に有効です。

ただし、人体モデルではスレッド試験との比較による解析結果の検証ができません。一方、ダミーモデルの結果はダミー人形を用いたスレッド試験の結果と比較ができます。そこで、人体モデルは、ダミーモデルで評価できない、乗客の姿勢や向いている方向の多様性に対応するのが困難な場面や、国内の車内設備を対象とした評価をする場合に、補足的に用いようと考えています。

なお、研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR

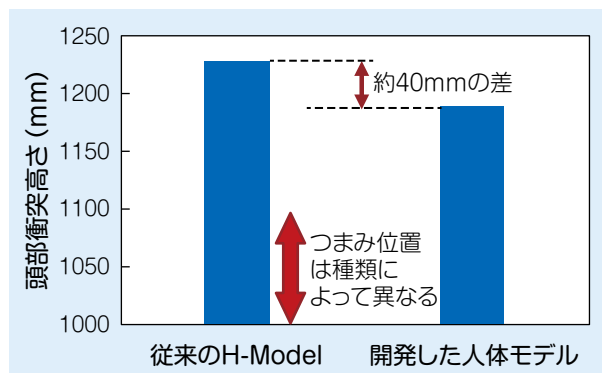


図10 頭部2次衝突高さの比較

文献

- 1) CEN : EN15227 railway applications-crashworthiness requirements for railway vehicle bodies, 2008
- 2) US DOT : 49CFR238 passenger equipment safety standards, Code of Federal Regulations Title 49 Transportation Part 238, 2009
- 3) 中井一馬 : 車両衝突時の乗客の動きを推測する, RRR, Vol.70, No.9, pp.20-23, 2013
- 4) Eberhard, H., Hyung-Yun, C., Stephane, R., Muriel, B. : Human Models for Crash and Impact Simulation, Computational Models for the Human Body Special Volume of Handbook of Numerical Analysis, Vol.XII, pp.297-357, 2004
- 5) 社団法人人間生活工学研究センター : 日本人の人体寸法データブック2004-2006, 2008
- 6) 総務省 : 男女別人口及び人口性比, 平成17年国勢調査 最終報告書「日本の人口」統計表, 2010