

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

中井 一馬* 鈴木 大輔* 榎並 祥太*
沖野 友洋** 高野 純一**

An Estimation of the Severity of Passenger Injuries Seated on a Longitudinal Seat
in a Train Accident and Measures to Mitigate it by Using Numerical Simulation

Kazuma NAKAI Daisuke SUZUKI Shota ENAMI
Tomohiro OKINO Junichi TAKANO

It is of vital importance to enhance on-board passenger safety in the event of a train collision. In order to design the interior fittings to reduce passenger injury levels, it is necessary to examine the probability of such injuries. The purpose of this study is to grasp the severity of injuries the occupants of longitudinal seats suffer and to consider the measures to mitigate it by using FEM simulation. For this simulation, bench-end partition was modeled on the basis of an FEM model. It was found that the passengers seated on a longitudinal seat with a high risk of injuries are those seated second-furthest and third-furthest away from the bench-end partition and that the severity of head injury decreased significantly because of the handrails.

キーワード：衝突安全，車内設備，ロングシート，サバイバルファクタ

1. はじめに

万が一、列車事故が発生した際にも被害を抑えるための対策を考えておくことは重要である。例えば、踏切事故により列車が大型自動車等に衝突（以下、1次衝突と呼ぶ）した際に、車両内に発生した衝撃で乗客が投げ出され、車内設備や他の乗客に衝突（以下、2次衝突と呼ぶ）し傷害が発生する可能性がある。このような傷害の軽減に向けて、2次衝突をあらかじめ考慮して車内設備を設計しておくことが安全性の観点から有効である。効果的な設計を行うには、事故時に乗客はどのように投げ出され、どの車内設備に2次衝突し、どのような傷害を負うのかといった被害状況を把握する必要がある。

事故が発生した際に、運輸安全委員会が事故原因と被害状況を調査し公表しているが、乗客の傷害に関する上記のような詳細な情報は非常に少ない。そのため、鉄道ならではの被害状況を把握するためには、自動車業界で開発されたスレッド試験（方法は2.2.2で述べる）や、本試験をコンピュータ上で行なうシミュレーション（以下、乗客挙動解析と呼ぶ）の活用が必須である。

鉄道総研では、ロングシートに着座した乗客の被害状況を定量的に推定するための乗客挙動解析手法を構築した¹⁾。本手法において、40tの大型自動車に列車が

60km/hで前面衝突する踏切事故シナリオを想定し、ロングシートに複数の乗客が着座している場合、乗客同士の2次衝突により、胸部傷害のリスクが高まることが分かった。このような被害を抑えるために、ロングシートの中に仕切りを設けるなどの対策を提案した。しかしながら、本解析手法は、車内設備を剛体モデルで構築していることから、2次衝突時の傷害を抑えるための剛性強度の検討に直接活用することが難しかった。

本研究は、対策に向けた車内設備の設計に直接活用するため、構築した解析手法を、車内設備の複雑な形状や構造等を考慮できるように改良し、この手法を活用することで、ロングシート乗客の被害推定、ならびに対策の設計の仕様例とその効果を示すことを目的としている。

2. 袖仕切りモデルの構築

乗客の被害に影響を与える車内設備の剛性強度は、材質や構造、列車内への固定位置等に依存することから、これらの条件を検討するため、ロングシート端部の袖仕切りを有限要素でモデル化することで、既存の解析手法を改良した。解析精度の検証はインパクトによる衝撃試験とスレッド試験との比較により行った。

解析にはTass International社製の数値解析ソフトMADYMO（バージョン7.6）を使用した。剛体モデルと有限要素モデルの運動を数値シミュレーションするこ

* 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

特集：人間科学

とが可能な商用ソフトであり、自動車業界で広く用いられている。同ソフト上で使用できる乗客を模擬したダミーモデルにより事故時の乗客挙動や傷害の評価を行える。

2.1 袖仕切りのモデリング

袖仕切りは図1に示すように外側は樹脂材で覆われているが、内側は鋼材のフレーム枠とその枠内に充填されたポリウレタンで構成されており、車内では図に示す位置で固定される構造となっている。これらの構造や材質を考慮して節点数が約18000、要素数が約48000となる有限要素で袖仕切りをモデル化した(図2)。ヤング率や密度等の材料物性値は別途行った試験で得られた値を入力し、固定方法などの境界条件は、以下で述べる衝撃試験やスレッド試験の結果を参考に設定した。

2.2 解析精度の検証

2.2.1 衝撃試験による検証

構築した袖仕切りモデルの解析精度の検証は、同条件で実施した衝撃解析との比較により行なった。

(1) 衝撃試験の方法

図3(a)(b)に示すように剛体壁に実際の車両と同様に固定した袖仕切りに対してインパクトを衝突させる衝撃試験を行った。後述するスレッド試験時のダミー頭部の2次衝突位置と速度を参考にして、内側に鋼材フレームがある箇所Aとポリウレタンがある箇所Bに対して、約16km/hで衝撃させ、その際のインパクトへの反力荷重と、袖仕切りのたわみ変位を計測した。反力荷重はインパクト内の加速度計とインパクト質量から算出し、た

わみ変位は衝撃後のインパクトの移動量としてマグネスケールで計測した。

(2) 衝撃解析との比較

袖仕切りモデルに対しても同条件でインパクトモデルを衝撃させる解析を実施した(図3(C))。この際の試験結果と解析結果を比較したのが図4である。解析結果は最大反力荷重・たわみ変位とそこに至る過程において試験結果と同傾向を示した。反力荷重の試験結果と解析結果の平均二乗誤差の平方根を試験の反力荷重の最大値の割合で比較すると、衝撃箇所Aは13%、衝撃箇所Bは7%という精度であった。

2.2.2 スレッド試験による検証

鉄道総研で既に実施しているロングシート乗客を対象としたスレッド試験²⁾結果と、前項で衝撃試験との検証がなされた袖仕切りモデルを用いた乗客挙動解析の結果を比較することで、解析精度を検証した。

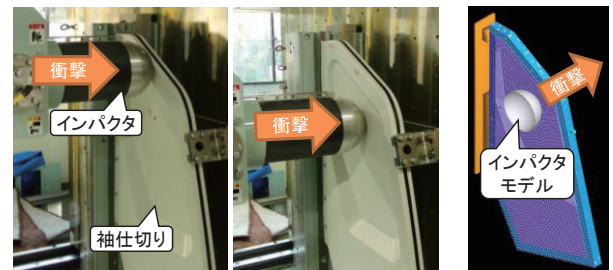


図3 衝撃試験と衝撃解析の概況

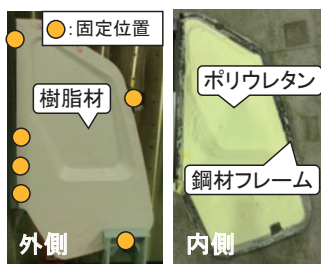
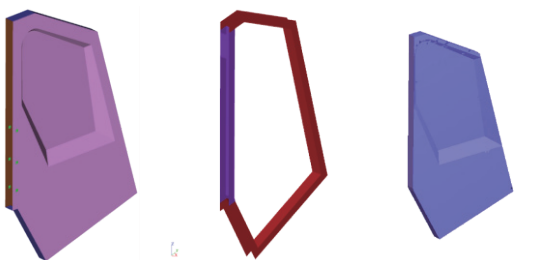
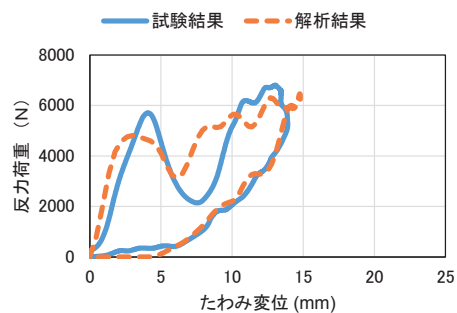


図1 袖仕切りの構造・材質

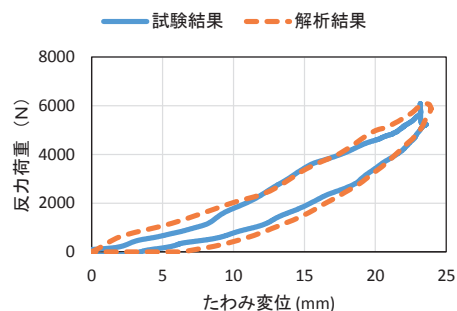


(a)樹脂材 (b)鋼材フレーム (c)ポリウレタン

図2 袖仕切りモデルの構成



(a)衝撃箇所A



(b)衝撃箇所B

図4 試験結果と解析結果の比較

(1) スレッド試験の方法

スレッド試験で入力した加速度を解析の入力条件として比較した(図5は試験で用いた入力条件の1つである)。ここで、スレッド試験とはスレッドと呼ばれる台車上に車内設備や乗客を模したダミー人形(本試験では側面方向からの評価に適したダミー人形³⁾)を用いた。以下、ダミーと呼ぶ)を配置し、事故を想定した加速度をスレッドに直接入力することにより、事故を再現して被害状況を推定する手法である(図6)。ダミーの頭部や胸部等の身体の各部位に加速度計や変位計が内蔵されており、

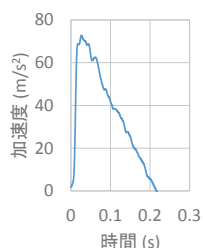


図5 入力加速度の例



図6 スレッド試験の概況

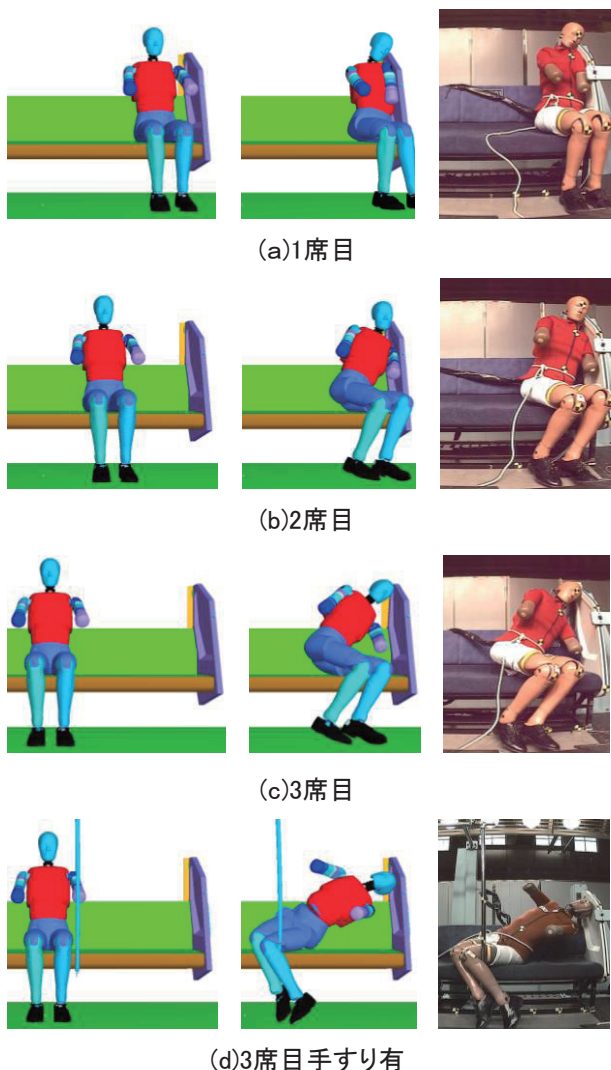


図7 解析結果と試験結果のダミー挙動の比較

試験時に得られた各計測値から算出される傷害指標とその限度値により乗客の傷害の程度が推定できる。スレッド試験は、自動車業界で開発された手法であるが、航空業界⁴⁾や欧米の鉄道業界^{5) 6) 7)}等でも乗客の安全性評価に広く用いられている。

(2) 乗客挙動解析との比較

スレッド試験で行った4条件において、乗客挙動解析を行いダミー挙動の比較を行った。比較した条件は、ダミー1体で袖仕切りから1席目に着座した条件、袖仕切りから2席目と3席目にそれぞれ着座した条件、3席目に着座し手すりを付加した条件である。これらの条件のダミー挙動を比較したところ、解析のダミーモデルの挙動は、試験のダミー挙動と同じ傾向を示していた(図7)。図8に、2席目条件におけるダミー頭部と胸部の加速度入力方向のスレッド上からみた速度と2次衝突するタイミングを示した。2次衝突するまでの傾向、2次衝突する時間、2次衝突時の速度は試験結果を概ね再現しており、他の3条件でも同等の精度であった。

さらに、これらの4条件のスレッド試験と解析で得られた頭部傷害値(本研究で用いた頭部の傷害指標であり、定義については3.1.2で述べる)について比較した(図9)。解析結果は、試験結果に対して、17%の誤差の範囲で再現していることが確認できた。

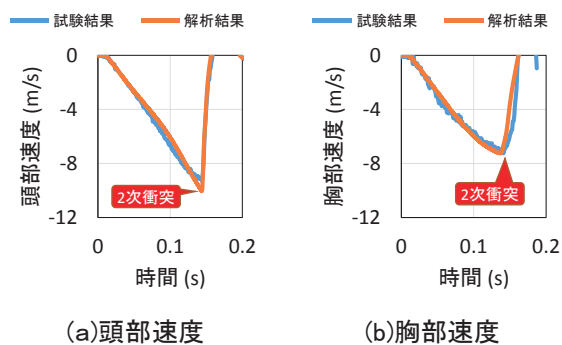


図8 試験と解析のダミー頭部速度および胸部速度の比較(2席目条件)

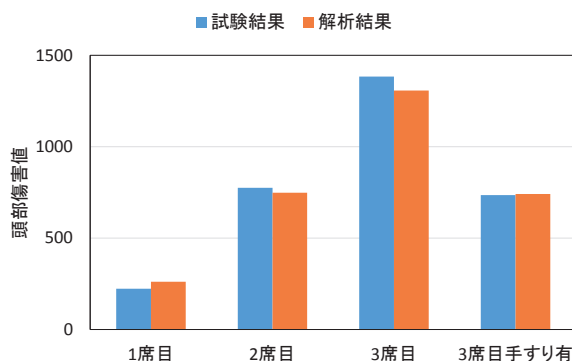


図9 試験と解析の頭部傷害値の比較

3. 乗客挙動解析による被害推定と対策検討

前章で解析精度が検証された袖仕切りモデルを用いて、ケーススタディを行い、被害状況を推定し、対策の検討を行った。

3.1 ケーススタディによる被害推定

3.1.1 解析条件

図10に示すように列車内の状況をコンピュータ上で再現した。袖仕切りに繋がっている手すりは、ロングシート上面の荷だなに固定されていることから、手すりを同位置で固定する設定を行った。

加速度の入力条件は、踏切において40tの大型自動車に列車が60km/hで前面衝突するシナリオを想定し、その際に車両床面に発生する加速度とした。この加速度は、コンピュータ上で列車の車両モデルを構築し、事故を再現する数値解析⁸⁾と同じ手法で、上記シナリオを設定することで求めた。

初期着座条件は、ダミーモデル1体を袖仕切りに対して1席目から4席目まで着座させる条件とした(図11)。また、ダミーの着座のさせかたを試験の着座位置より10mm浅く着座させた条件と左右にそれぞれ10度向きを変える条件を行うことで、これらの組み合わせで全15条件を行った。

3.1.2 評価方法

乗客の安全性を評価する身体の部位は、頭部と胸部とした。各部位の評価には自動車業界の基準であるECE95³⁾で規定されているHPC(以下頭部傷害値と呼ぶ)とRDC(以下胸部傷害値と呼ぶ)を用いた。これらの傷害指標は、身体の側面からの衝撃による傷害を評価する指標である。頭部傷害値は1000を、胸部傷害値は42mmを超えないことが定められており、この値(以下、限度値と呼ぶ)で評価した。頭部傷害値はダミー頭部の並進3方向の合成加速度 $a(t)$ から式(1)を用いて算出され(t_1 と t_2 は計算開始時刻と終了時刻であり、全ての時刻で計算したなかで最も値が大きくなる時刻)、胸部傷害値はダミー胸部(肋骨に相当する)の最大変位量であり、ダミー胸部内に含まれる変位計で計測される。

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

3.1.3 解析結果と考察

図12にケーススタディによる頭部傷害値と胸部傷害値の解析結果を示す。頭部傷害値については、着座の仕方によりばらつきはあるものの、どの条件においても2席目と3席目の着座位置の傷害値が相対的に高く、また

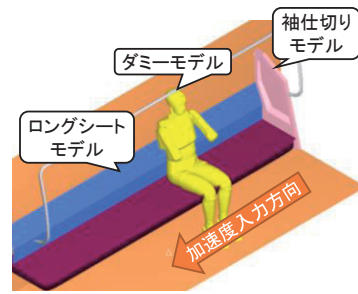


図10 解析の概況(3席目の条件例)

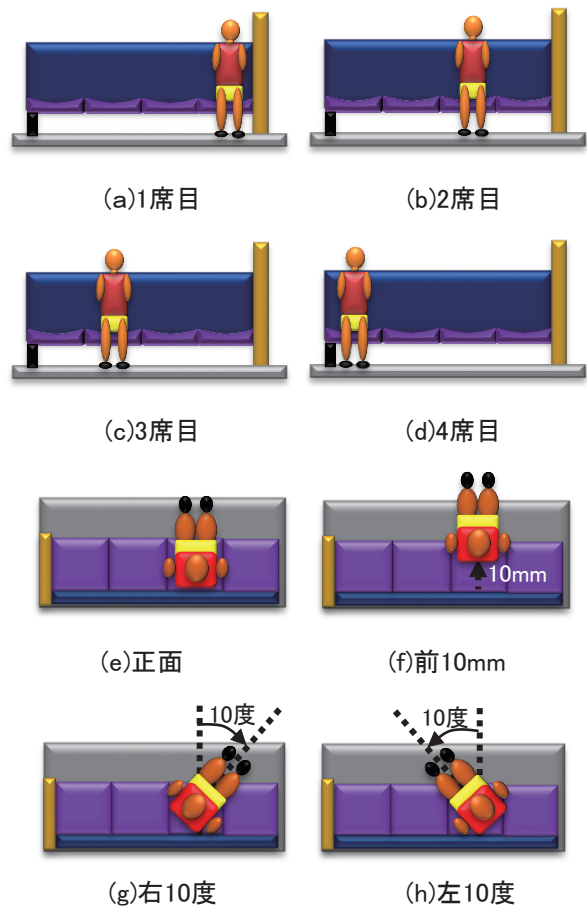
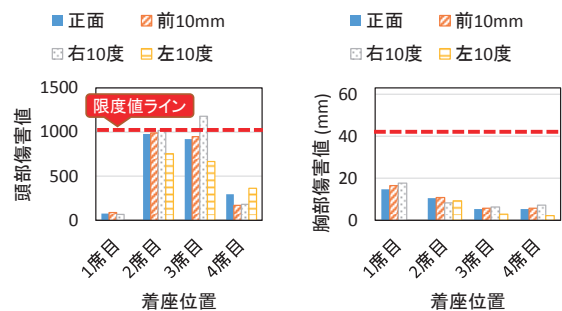


図11 初期着座条件



(a)頭部傷害値 (b)胸部傷害値

図12 解析結果の傷害値の比較

限度値を超える条件もみられた。一方、胸部傷害値については、1 席目が相対的に高いものの限度値を大きく下回る事が分かった。以上のことから、胸部と比較して頭部のリスクが相対的に高く、特に2 席目と3 席目の乗客のリスクが高いことが分かった。

2 席目と3 席目の頭部のリスクが相対的に高かった理由について考察する。袖仕切りに頭部が2 次衝突した際の加速度入力方向の頭部速度を比較した(図13)。この図より、2 席目と3 席目の頭部衝突速度は1 席目と4 席目より相対的に高いことが分かる。この影響により、2 席目と3 席目の頭部傷害値が相対的に高くなったと考えられる。

3.2 安全性向上に向けた対策検討

前節において、2 席目と3 席目の条件で乗客の頭部リスクが高いことが明らかになった。本節では、これらのリスクの高い条件において、対策の検討を行う。

3.2.1 2 席目条件への対策

2 席目に着座している条件への対策として、袖仕切りの剛性強度を下げることを目的として、仕切り内の鋼材フレームの板厚を現状に対して約30%減少させて解析を行った。初期着座条件は、3 席目に着座している条件への効果も併せてみるため2 席目と3 席目に正面を向き着座している条件で行った。その結果、図14(a)に示すように現状と比較して頭部傷害値が下がる傾向がみられた。また、3 席目の条件においても同傾向を示し、その傾向はより顕著であった。また、胸部傷害値を現状と比

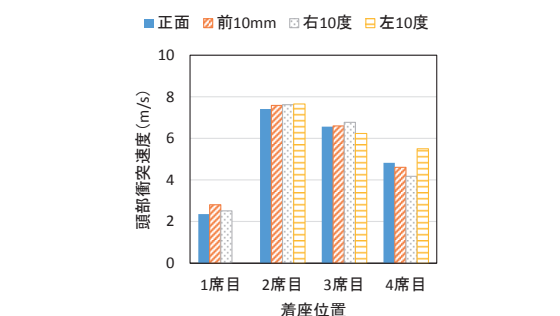
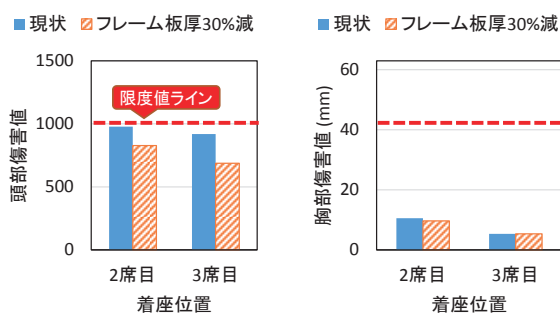


図13 頭部衝突速度の比較



(a)頭部傷害値 (b)胸部傷害値
図14 フレーム板厚30%減少の影響

較した結果、同程度であった(図14(b))。これらの結果から、フレームの板厚を薄くすることは2 次衝突時の安全性向上に繋がる事が確認できた。

3.2.2 3 席目条件への対策

3 席目に着座している条件への対策として、袖仕切りへの2 次衝突速度を下げることを目的として、3 席目条件に隣接するよう手すりを付加する条件で解析を行った(図15(a))。初期着座条件は、3 席目正面条件、3 席目前10mm条件と3 席目右10度条件の全3 条件とした。解析から得られた頭部傷害値と胸部傷害値を図16に示す。この図から、どの条件においても頭部傷害値は大幅に下がること、胸部傷害値については正面条件においてのみ大きくなるものの、限度値ラインと比較すると十分小さく、大きな悪化はみられないことが分かった。以上のことから、手すりを付加することは2 次衝突時の安全性向上に繋がる事が確認できた。

手すりにより、頭部傷害値が大幅に下がった理由について考察する。頭部が袖仕切りに2 次衝突した際の頭部の速度・衝突位置を図17に比較した。図17(a)からどの条件においても頭部の2 次衝突速度が下がることが確

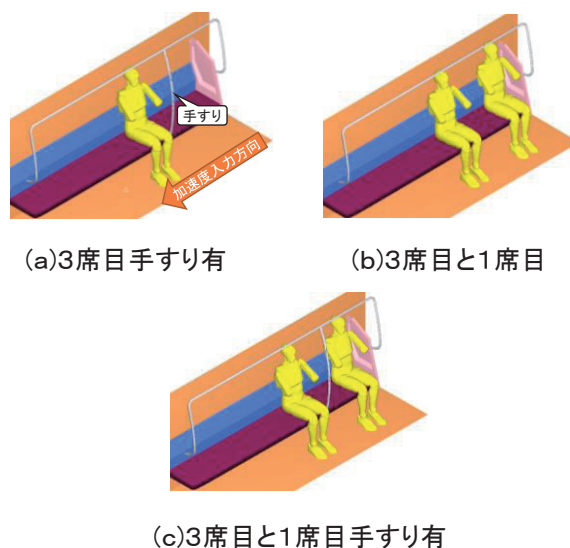
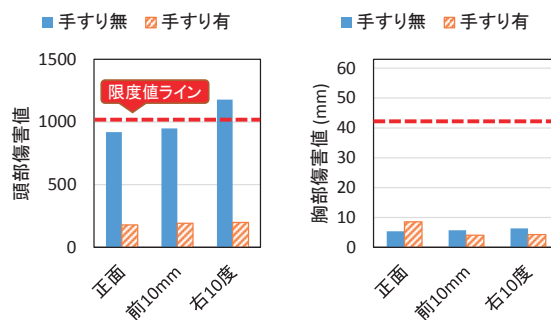


図15 手すりの有無の影響をみるための条件



(a)頭部傷害値 (b)胸部傷害値
図16 手すりの有無の影響の比較(3 席目の条件)

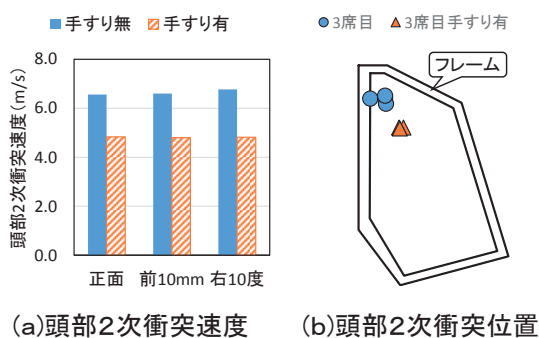


図 17 頭部 2 次衝突速度と衝突位置の比較

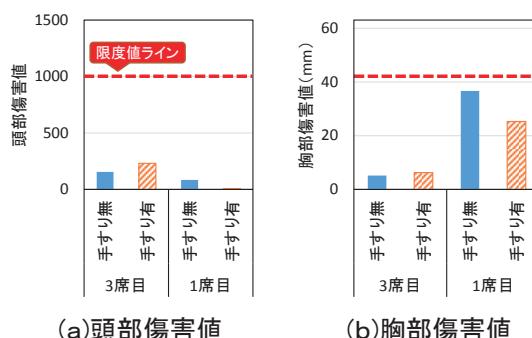


図 18 手すりの有無の影響の比較

認できる。また、頭部の 2 次衝突位置は、剛性強度が高いフレーム付近から剛性強度が低いポリウレタン部分に変化している (図 17(b))。以上のことから、手すりの付加により 2 次衝突速度が下がったこと、剛性強度が低い位置に 2 次衝突位置が変化することで、頭部傷害値が大幅に下がったと考えられる。このことから、仮に手すりを付加した際に、2 次衝突位置が、より剛性強度の高い位置に変化した場合には頭部傷害値が高くなる可能性もあることから、頭部が 2 次衝突すると予想される付近についてはその剛性強度を下げる必要がある。

3 席目条件の頭部傷害値を下げる対策として手すりの付加は非常に有効であったが、乗客が複数いた場合の影響をみるため、図 15(b)(c) の条件においてケーススタディを行った。頭部傷害値と胸部傷害値の比較を図 18 に示す。頭部傷害値についてはどちらの条件も限度値に対して十分小さかったが、胸部傷害値については、1 席目に着座しているダミーは大きくなった。但し、手すりにより胸部傷害値は下がる傾向がみられた。胸部傷害値は 3 席目に着座しているダミーの肩部が 1 席目に着座しているダミーの胸部に 2 次衝突することにより、高くなったものの、手すりの付加により、ダミーの挙動が変わり、胸部への衝撃が小さくなったことが原因であると考えられる (図 19)。以上のことから、乗客が複数いた場合でも手すりの付加は 2 次衝突時の安全性向上に繋がることが確認できた。

4. おわりに

ロングシート端部の袖仕切りを有限要素でモデル化し、鉄道総研で開発した解析手法を改良した。この手法により、初期着座位置・向き、乗車人数を条件として踏切事故を想定したケーススタディを行った。その結果、袖仕切りから 2 席目あるいは 3 席目に着座している乗客では袖仕切りへの 2 次衝突が原因で、頭部の傷害発生リスクが高まることが分かった。また、この場合の対策として袖仕切り内のフレーム板厚を薄くする、手すりを付加するといった、車内設備設計の仕様例とその効果を示

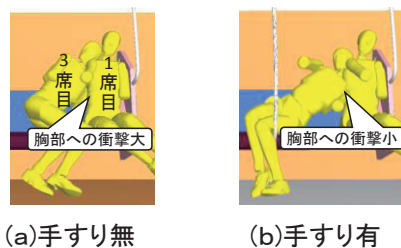


図 19 2 次衝突時の挙動

した。今後は本手法を用いて、ロングシート乗客の安全性向上に向けて、実用的な開発検討を行っていく。

文 献

- 1) 小美濃幸司, 中井一馬他: 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, 榎並祥太: 列車衝突時におけるロングシート乗客に対する手すりの傷害軽減効果の試験検証, J-Rail 2018 講演論文集, 2018
- 3) United Nations Economic Commission for Europe. ECE Regulation No. 95: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision, Geneva, Switzerland, 2014.
- 4) 国土交通省: 耐空性審査要領, 鳳文書林出版, 2012
- 5) Railway safety and standards board :Railway Group Standards GM/RT2100, issue 5, Requirements for rail vehicle structures, 2012.
- 6) The Association of the European Rail Industry :UNIFE Technical Report for Interior Passive Safety in Railway Vehicles, 2014.
- 7) The American Public Transportation Association :APTA PR-CS-S-016-99, Rev. 2, Standard for Passenger Seats in Passenger Rail Cars, 2010.
- 8) 沖野友洋, 佐藤裕之, 小林秀敏: 数値解析による踏切衝突事故時の鉄道車体の衝撃変形挙動評価, 日本機械学会材料力学カンファレンス講演論文集, 2017