

衝突事故時のロングシート着座乗客に対する 手すりの傷害軽減効果の実験的検証

中井 一馬* 榎並 祥太*

Experimental Verification of Handrail Effect on Injury Reduction
for Passengers Seated in Long Seats in the Event of Collision

Kazuma NAKAI Shota ENAMI

In order to enhance the safety of passengers seated in long seats, it is important to identify the risk to passengers in the event of a collision. In a prior study, case studies using numerical analysis showed that the installation of handrails reduced the secondary impact velocity of the passenger's head. The purpose of this study is to investigate the effect of handrails in reducing the severity of injury to passengers by some physical tests. The experiment results showed that passengers seated third from bench-end partitions in long seats are at higher risk, and that the severity of head and thorax injury decreased significantly because of handrails.

キーワード：衝突安全, スレッド試験, 車内設備, ロングシート, 傷害評価

1. はじめに

鉄道事故を未然に防止する取り組みは種々行われているが、踏切での直前横断や自然災害など鉄道事業者だけでは防ぎきれない場面がある。鉄道のさらなる安全性向上に向けて、事故等により車両に大きな衝撃が発生した際の被害軽減対策を考えることは重要である。ハード面の対策には車体構造に対するアプローチと車内設備に対するアプローチがある。前者は、列車が自動車等に衝突（以後、1次衝突と呼ぶ）した際に車体の剛性を高めることで車内空間を確保し、かつ、クラッシュアブソルブション等の衝撃吸収構造を設置することで車内に発生する衝撃を抑えるといった対策である。後者は、衝撃により列車内で乗客が投げ出されることで発生する車内設備や他の乗客との衝突（以後、2次衝突と呼ぶ）への対策である。本研究は後者をターゲットとしている。

国内で発生した踏切障害事故のうち大きな被害を出した事故の特徴から、踏切上で前面から大型貨物自動車と衝突する事故シナリオを想定して研究を行っている。これまでに、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が発生することを解析で示し、この傷害を軽減させるためにロングシート中間に手すり等の仕切りを設置することを提案した¹⁾。その後、ロングシート端部の袖仕切りや妻面といった車内設備との2次衝突時の被害状況を把握するために、車内設備に用いられる材料の1つであるSS400の1枚鋼板をロングシート端部に配置してスレッド試験を

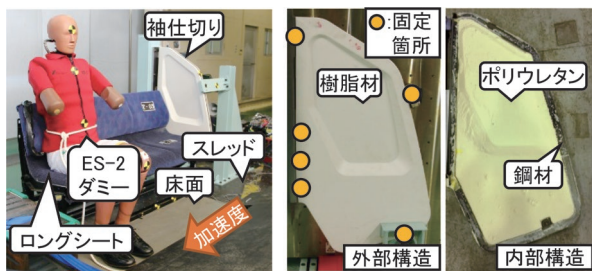
行った。その結果、ロングシート端部から2席目あるいは3席目に着座している乗客において頭部の傷害発生リスクが高くなること、頭部の2次衝突速度が高くなるほど頭部傷害の程度が大きくなることを示した²⁾。さらに、ロングシート中間に手すりを設置することで、ロングシート端部の車内設備への頭部の2次衝突速度が下がることを解析で示した³⁾。しかしながら、端部の車内設備や手すりを剛体と仮定した解析結果であり、頭部に関しては傷害指標（後述する）による評価は行っていない。

傷害の程度は2次衝突速度だけでなく、2次衝突した車内設備の形状や強度などの特性にも依存すると考えられる。そこで本研究では、実際にロングシート端部に採用されている袖仕切りを用いたスレッド試験を行い、ロングシート乗客と袖仕切りとの2次衝突時の被害状況を評価した。また、ロングシート中間への手すりの設置が傷害軽減に与える効果を検証した。

2. 試験方法

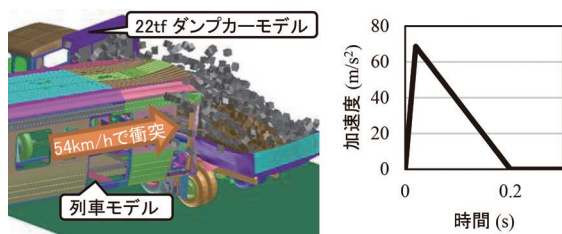
スレッド試験により、踏切事故を想定したロングシート乗客の被害状況の評価を行った。図1(a)に示すようにスレッド上に、床面、ロングシート、袖仕切りを配置し、横方向からの衝撃による傷害評価が可能な人体ダミーであるES-2ダミー⁴⁾を1体あるいは2体着座させ、スレッド自体に事故時の加速度波形を入力した。その際に、ダミー内の加速度計や変位計等から得られた計測値から傷害指標を算出することで、乗客の傷害発生部位とその程度を評価した。試験に用いた袖仕切りは、外側は樹脂材で、内側は鋼材のフレーム枠とその枠内に充

* 人間科学研究部 人間工学研究室



(a) スレッド上(1体条件) (b) 袖仕切り構造と固定箇所

図1 スレッド試験状況



(a) 事故シナリオ (b) ターゲット波形

図2 事故シナリオと入力波形

填されたポリウレタンで構成された板型タイプである(図1(b))。列車内では図に示す位置で固定されており、試験においても同位置で固定した。板型タイプの袖仕切りは現在国内で広く採用されている。

2.1 入力加速度条件

スレッドへ入力する加速度の条件は、図2(a)に示す踏切事故を想定して定めた。コンピュータ上でステンレス鋼製の列車モデルを速度54km/hで総重量22tfのダンパーモデルに衝撃させ⁵⁾⁶⁾、その際、列車モデル床面に発生した加速度波形の最大値、作用時間、加速度波形を積分して得られる速度波形を参考に、試験装置の仕様上再現可能な波形(0.02sで7G、0.2sで0Gとなる三角波形)を入力条件のターゲットとした(図2(b))。ここで、スレッド試験装置の仕様上、入力する加速度波形を完全にコントロールできないためターゲットと表現している。

2.2 初期着座条件

乗客の初期着座位置について、図3および表1に示す6条件を設定し、合計12回の試験を実施した。最初に、乗客の初期着座位置が袖仕切りとの2次衝突時の被害状況に与える影響を評価するため、ダミーを1体として3条件設定した。試験に用いたロングシートの座面は凹型形状が連なっており、この座幅中心に乗客が着座しやすい設計となっているため、ダミーについても同様に着座させた。袖仕切りから最も近い1席目の着座位置をPosition A、2席目をPosition B、3席目をPosition Cとした(図3(a)~(c))。次に、乗客同士の2次衝突が被害状況に与える影響を評価するため、ダミー2体とし

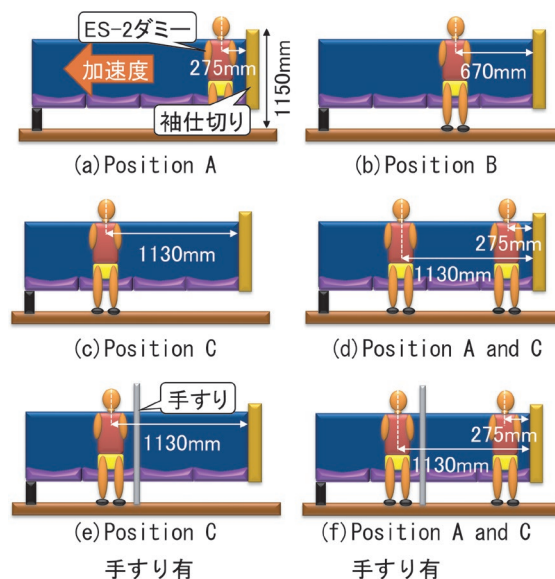


図3 初期着座位置

表1 試験条件

試験名	初期着座位置	手すりの有無
T01	Position A	無
T02	Position B	
T03	Position B	
T04	Position B	
T05	Position C	
T06	Position C	
T07	Position C	
T08	Position A and C	
T09	Position C	有
T10	Position C	
T11	Position C	
T12	Position A and C	

てPosition AとPosition Cに着座させる条件(図3(d))を実施した。さらに、手すりの傷害軽減効果を検証するため、Position Cの着座位置でPosition BとCの間に手すりを加えた条件(図3(e))と、Position AとCの着座位置で手すりを加えた条件(図3(f))も実施した。なお、同じ条件における結果のばらつきを考慮して、T02からT04とT05からT07とT09からT11はそれぞれ同条件で3回行った。

2.3 評価方法

ハイスピードカメラ(MEMRECAM GX-1)による映像と、袖仕切りへの2次衝突時のダミー頭部速度(以後、SIVH: Secondary Impact Velocity of Headと呼ぶ)でダミー挙動の評価を行った。SIVHはフレームレート1000Hzで記録したハイスピードカメラによる画像解析より算出された頭部速度から求めた。スレッド上に固定されているロングシート脚部のマーカーから見たダミー額部の座標を求め、この座標を微分した値をダミーの頭部速度とした。

傷害評価には、自動車業界で用いられる側面衝突評価用のES-2ダミーを用い、乗員保護装置に関する技術基準⁴⁾で規定されている、Head Performance Criterion (以後、HPCと呼ぶ)、Rib Deflection Criteria (以後、RDC)とPubic Symphysis Peak Force (以後、PSPF)を指標として用いた。これらの指標は、横方向からの衝撃で発生する頭部、胸部と腰部の傷害の程度を表し、数値が大きいほど傷害発生リスクが高まり、それぞれ1000、42mm、6kNが限度値とされる。ここで、HPCは前面方向からの頭部の評価指標であるHead Injury Criterionと同じ計算方法であることから、以後HICと呼ぶ。HICはダミー頭部の並進3方向の合成加速度から式(1)を用いて算出される。ES-2ダミーの胸部は上部、中部、下部と3つに分割されており、それぞれ横方向に変位可能な構造となっている。これらの変位量のうち最大値がRDCである。但し、胸部の構造は左右非対称となっており、両側の胸部変位が同時に計測できない。そこで、T08とT12のPosition Aのダミーのみ、Position Cのダミーとの2次衝突による胸部の影響を評価するため、胸部右側の変位を計測し、それ以外の条件では、胸部左側の変位を計測した。PSPFはダミー骨盤部に取付けられた荷重計から得られる横方向に発生する荷重の最大値である。

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

$|t_1 - t_2| \leq 36\text{ms}$, $a(t)$: 頭部に生じる
3軸合成加速度 [G]

3. 試験結果

3.1 ダミー挙動の評価

手すり無の条件におけるPosition Aの着座条件のダミー挙動は、袖仕切りに胸部全体が2次衝突した後、頭部が2次衝突した(図4)。頭部が2次衝突する位置は袖仕切りの上側面付近であった。Position Bの条件は、Position Aの条件より倒れこみながら肩付近から袖仕切りに2次衝突した直後に頭部が2次衝突する挙動がみられた(図5)。頭部が2次衝突する位置は袖仕切りの上側付近であった。Position Cの条件は、Position Bより倒れこみながら頭部から袖仕切りに2次衝突する挙動がみられた(図6)。頭部が2次衝突する位置はPosition Bより低い位置であった。Position AとPosition Cに着座している条件では、Position Cのダミーの肩部がPosition A胸部に2次衝突するとともに頭部同士が2次衝突する挙動がみられた(図7)。

手すり有の条件におけるPosition Cの着座条件のダミー挙動は、ダミー下肢が手すりに引っかかることで、倒

れこみが大きくなり、手すり無の場合と比較して、頭部の2次衝突位置が低くなり、胸部の袖仕切りへの2次衝突もみられなくなった(図8)。Position AとPosition Cに着座している条件では、Position Cのダミーは倒れこみながらPosition Aのダミーに2次衝突する挙動がみられた(図9)。



図4 Position Aのダミー挙動 (T01)



図5 Position Bのダミー挙動 (T02)



図6 Position Cのダミー挙動 (T05)

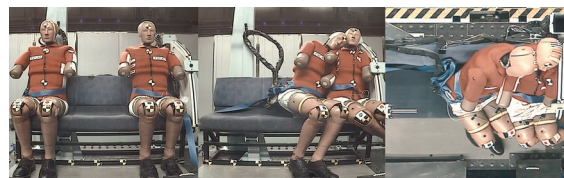


図7 Position AとCのダミー挙動 (T08)

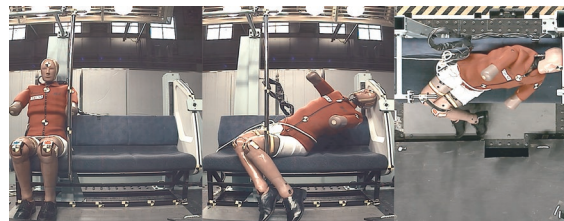


図8 Position C手すり有のダミー挙動 (T09)

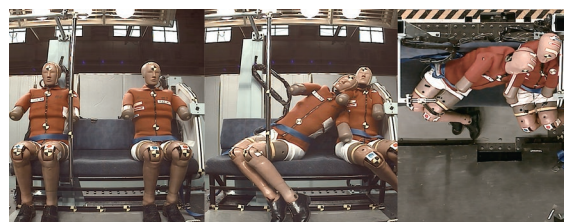
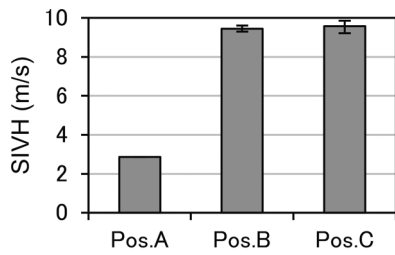
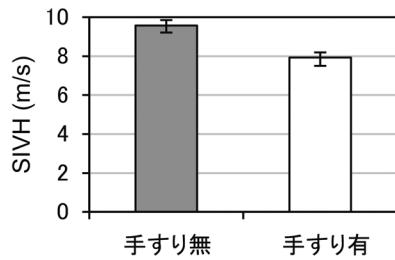


図9 Position AとC手すり有のダミー挙動 (T12)



(a) Position A から C 手すり無 (T01-T07)



(b) Position C 手すり無と有 (T05-T07, T09-T11)

図 10 頭部 2 次衝突速度 SIVH の比較

ダミーの挙動を定量的に評価するため、図 10(a) においてダミー 1 体の条件における着座位置毎の頭部の 2 次衝突速度である SIVH を比較した。Position B と Position C は同条件で 3 回ずつ実施したので、平均値で示し、エラーバーは最大値と最小値を表している（以後、全ての図におけるエラーバーも最大値と最小値を表す）。Position A は他の着座条件と比較して小さく、Position B と C は同程度であった。また、図 10(b) に Position C の着座条件における、手すりの有無による SIVH を比較した。手すりによるダミー挙動の変化の結果、袖仕切りへの SIVH は約 20% 小さくなった。

3.2 傷害指標による評価

本節では、まず、一般的な傾向について述べ、次に HIC, RDC, PSPF の傷害指標を個別に評価する。同条件で 3 回実施した条件はそれらの平均値で評価した。

3.2.1 一般的な評価

ダミー 1 体の条件における着座位置毎の HIC, RDC, PSPF を比較した (図 11)。各傷害指標の限度値のスケールが異なることから、各指標をそれぞれの限度値で除して標準化した。3 つの傷害指標のうち傷害値が相対的に高いのは HIC であり限度値を超える条件があること、相対的に低いのは PSPF でどの条件においても限度値を大きく下回ることが示された。

3.2.2 頭部傷害指標 HIC による評価

図 12(a) (b) にダミー 1 体を用いた条件 (T01-T07, T09-T11) における HIC を比較した。全条件とも、ダミー頭部の袖仕切りへの 2 次衝突が原因でそれぞれの値を

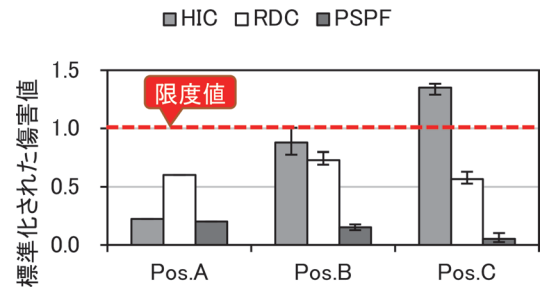
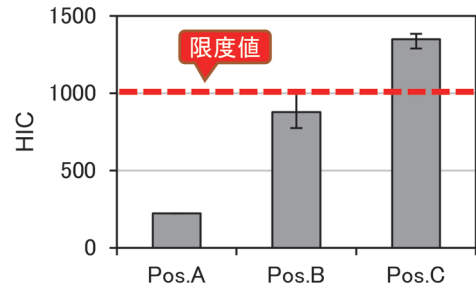
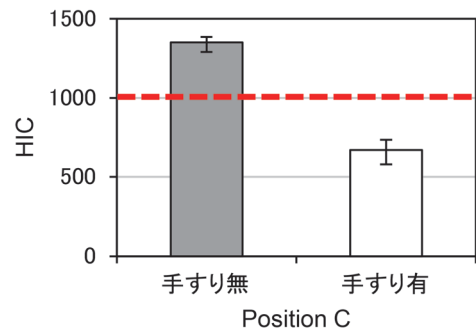


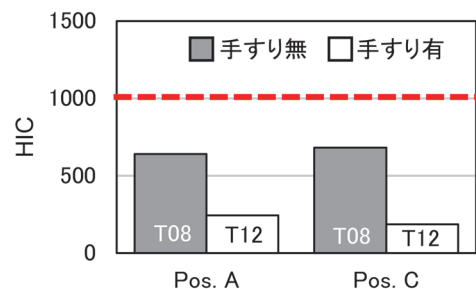
図 11 各傷害値の比較



(a) Position A から C 手すり無 (T01-T07)



(b) Position C 手すり無と有 (T05-T07, T09-T11)



(c) Position A と C 手すり無と有 (T08 と T12)

図 12 HIC の比較

示した。図 12(a) は手すり無の条件における結果を示しており、全体としては、初期着座位置が袖仕切りから離れるほど HIC が大きくなる傾向がみられた。限度値 1000 を超えるのは Position C の着座条件 (T05-T07) のみであった。図 12(b) に Position C の着座条件で手すりの有無による HIC を比較した。手すりの設置により、HIC は約 50% 低下し限度値以下となった。図 12(c)

にダミー2体で手すりの無 (T08) と手すり有 (T12) の条件における HIC を比較した。手すり無の T08 条件における Position A のダミーと Position C のダミーの HIC は、頭部同士の2次衝突が原因で 600 以上の値を示した。また、手すり有の T12 条件では、Position A のダミーは袖仕切りへの2次衝突が、Position C のダミーは Position A のダミー肩部への2次衝突が原因でそれぞれの値を示した。これらの値は、どちらの条件においても限度値 1000 を超えなかったが、手すりの設置によりさらに低下した。

3.2.3 胸部傷害指標 RDC による評価

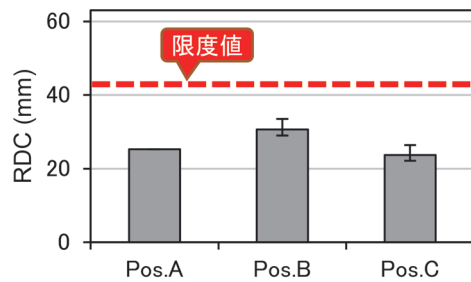
図 13(a) (b) にダミー1体を用いた条件 (T01-T07, T09-T11) における RDC を比較した。全条件とも、ダミー胸部の袖仕切りへの2次衝突が原因でそれぞれの値を示した。図 13(a) は手すり無の条件における結果を示しており、Position B の RDC がその他の着座位置条件に対して相対的に大きかったが、限度値である 42mm は全ての条件で超えなかった。図 13(b) に Position C の着座条件で手すり無と手すり有の場合を比較した。手すりを設置することにより、RDC は大幅に低下した。図 13(c) にダミー2体を用いた手すり無 (T08) と手すり有 (T12) の条件における RDC を比較した。手すり無の T08 条件における Position A のダミーは、限度値 42mm を大きく超えた。これは Position C のダミー左肩部が Position A のダミー右胸部に2次衝突したことが原因であった。手すりを設置することで、どちらの着座位置でも低下する傾向がみられ、Position A のダミーでその傾向が顕著であった。

3.2.4 腰部傷害指標 PSPF による評価

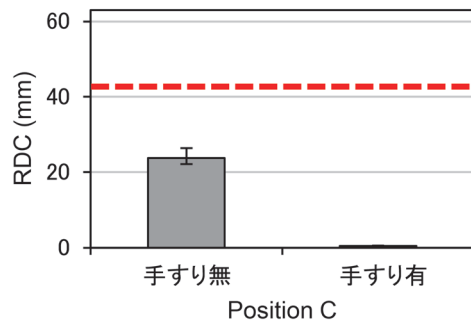
図 14(a) (b) にダミー1体を用いた条件 (T01-T07, T09-T11) における PSPF を比較した。図 14(a) は手すり無の条件における結果を示しており、全体として限度値である 6kN を大きく下回っていた。図 14(b) に Position C の着座条件で手すり無と手すり有の場合を比較した。どちらの場合も限度値以下となり、手すり設置による影響は限度値に対して小さかった。図 14(c) にダミー2体を用いた条件で手すりの無 (T08) と手すり有 (T12) の条件における PSPF を比較した。Position A のダミーの方が Position C のダミーより傷害値は大きくなったが、共に限度値を大きく下回った。また、手すりの設置による影響は限度値に対して小さかった。

4. 考察

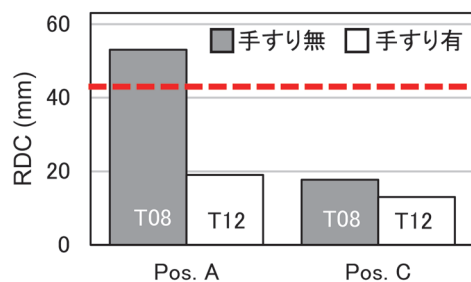
Position C の着座条件における、手すりによる頭部への傷害軽減効果について考察する。先行研究における解析結果³⁾ から得られた、頭部2次衝突速度 SIVH の手すりによる低下はスレッド試験でも確認された (図 10



(a) Position A から C 手すり無 (T01-T07)



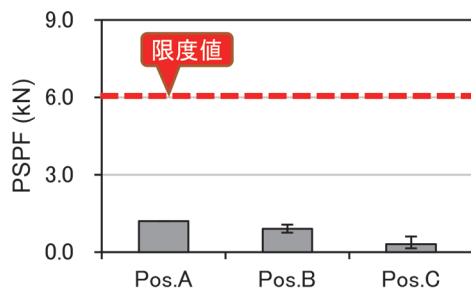
(b) Position C 手すり無と有 (T05-T07, T09-T11)



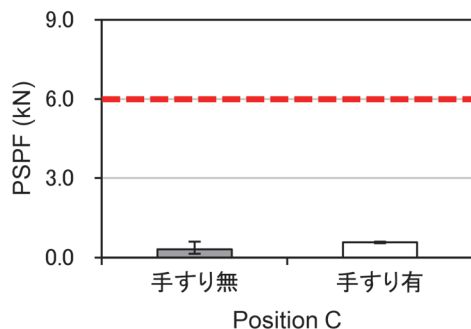
(c) Position A と C 手すり無と有 (T08 と T12)

図 13 RDC の比較

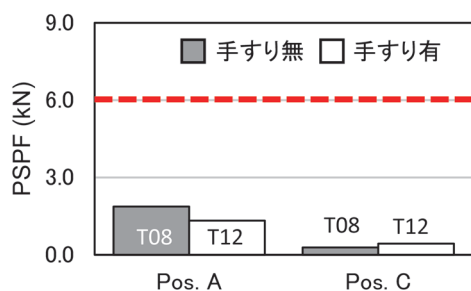
(b)。また、図 15 に手すり無である T05 の条件と手すり有である T09 の条件におけるダミー頭部の袖仕切りへの2次衝突位置を示し、図 16 に手すり無の3条件 (T05 から T07) と手すり有の3条件 (T09 から T11) の頭部衝突位置をまとめて示した。頭部の2次衝突位置が手すりの設置により変化していることが確認できる。手すり無の条件では、袖仕切り内に鋼材フレームがある剛性が高い箇所に2次衝突したが、手すりを設置することで袖仕切り内にポリウレタンが充填されている剛性が低い箇所に2次衝突した。この2次衝突した箇所の剛性強度の違いも、HIC の低下に寄与していると考えられる。以上を踏まえると、今回とは異なる構造の袖仕切りを用いた場合に、手すりにより2次衝突速度は下がっても、2次衝突する箇所の剛性強度が高い場合は、手すりによる傷害軽減効果は低い、あるいは高くなる可能性もある。



(a) Position A から C 手すり無 (T01-T07)



(b) Position C 手すり無と有 (T05-T07, T09-T11)



(c) Position A と C 手すり無と有 (T08 と T12)

図 14 PSPF の比較

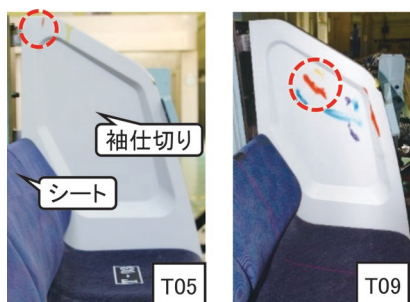


図 15 頭部の 2 次衝突位置

5. まとめ

衝突事故時におけるロングシート着座乗客の袖仕切りへの 2 次衝突時の被害状況を評価し、ロングシート中間への手すりの設置が傷害軽減に与える効果を検証することを目的としてスレッド試験を実施した。その結果、袖

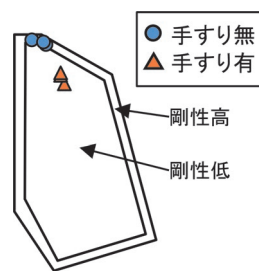


図 16 頭部の 2 次衝突位置の比較

仕切りから 2 席目と 3 席目の間に手すりを設置することで、袖仕切りや他の乗客との 2 次衝突時の頭部と胸部の傷害が軽減され、安全性が高まることが期待できるが、手すりによる 2 次衝突箇所的位置や剛性の変化も考慮して車内設備を設計する必要があることが分かった。

本報告は、2019 年に日本機械学会論文集で発表した内容⁷⁾の一部を割愛の上、転載した。

文献

- 1) Nakai, K., Omino, K., Shiroto, H. and Suzuki, D., "Simulation of Passenger Behaviour on Board a Commuter Train in the Event of a Level Crossing Accident," Quarterly Report of RTRI, Vol.53, No.4, pp.235-240, 2012.
- 2) Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S., Okino, T., Takano, J. and Palacin, R., "An Estimation of Behaviour and Severity of Injury to Rail Passengers Occupying Longitudinal Seats in the Event of Collision," Proceedings of IRCOBI Conference 2015, pp.315-326, 2015.
- 3) Suzuki, D., Nakai, K., Enami, S. and Palacin, R., "A Countermeasure to Reduce Secondary Impact Velocity and Rib Deflection Criterion of Longitudinal-Seat Passengers in Railway Collisions," Proceedings of IRCOBI Conference 2017, pp.296-297, 2017.
- 4) 国土交通省：新・道路運送車両の保安基準，交文社，pp.769-811，2009
- 5) 沖野友洋，山本勝太，高野純一，宇治田寧：列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価，第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No.12-79，pp.557-560，2012
- 6) 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 M&M2017 材料力学カンファレンス講演論文集，OS0430，2017
- 7) 中井一馬，榎並祥太：列車衝突事故時のロングシート着座乗客に対する手すりの傷害軽減効果の実験的検証，日本機械学会論文集，Vol.85，No.878，2019