

衝突事故におけるクロスシート着座乗客の傷害評価

沖野 友洋* 中井 一馬** 高野 純一*
榎並 祥太** 長尾 裕*** 小川 征輝***

Injury Evaluation of Passengers Seated in the Transverse Seat in the Event of a Collision Accident

Tomohiro OKINO Kazuma NAKAI Junichi TAKANO
Shota ENAMI Yutaka NAGAO Masaki OGAWA

In the event of a level crossing accident, train passengers seated in a rotating and reclining seat have a risk of getting injured due to collision with seats in front of them. In order to evaluate the passenger's kinematic behavior and injury quantitatively in this situation, the authors carried out impact tests using crash-test dummies. As a result, it was clarified numerically that the most important passenger's part to which attention should be paid was the femur, and the head and the chest had a low risk of serious injury. However, if the impact acceleration was increased, the forward seat was not able to catch the passengers because of its revolution or deformation and there was a possibility of injury caused by their jumping out forward.

キーワード：衝突事故，傷害評価，クロスシート，衝突安全，衝撃試験，人間工学

1. はじめに

鉄道車両が大型自動車等と衝突した場合、客室内では衝撃加速度によって乗客が進行方向に投げ出され、内装品と衝突（以後、2次衝突と呼ぶ）して負傷する可能性がある。この時の乗客の挙動や負傷する箇所、負傷の程度を検討することは、乗客の安全性向上の観点から重要である。一方、実際の衝突を検討する場合、客室内には様々な内装品があり、乗客の姿勢も様々であるため、多くの状況が考えられる。これまでの研究で、ロングシートに着座した乗客あるいは立位乗客の挙動評価、鉄道用人体モデルの開発を行ってきた^{1)~4)}。本報告では、回転リクライニングシートに着座した乗客が前席の背面に衝突するケースを最も基本的な状況の1つとして検証対象とする。ここで、旅客用腰掛に関する規格として、日本工業規格⁵⁾があり、強度に関しては、利用時に発生する力に対する静的強度試験方法の規定があるが、2次衝突対策としては、けがの原因となる可能性のある箇所を丸くすることや、緩衝材を付けることなどの定性的な記述に留まっている。そのため、衝突事故時において、乗客が2次衝突により負傷する箇所やその程度などの具体的な被害状況や負傷する原因を明確にすることは重要である。一方、2次衝突時の乗客被害を検証する方法と

して、乗客を模擬した人体ダミー人形とシートをスレッド（土台）上に設置し、スレッドに衝撃加速度を負荷するスレッド試験がある。

本報告では、鉄道車両が大型自動車と衝突した際の乗客およびシートの挙動、ならびに乗客が衝突する箇所と衝突による傷害値を把握することを目的として、スレッド試験を実施し、ダミー人形の傷害値が比較的大きくなる部位を明確にし、その原因を考察する。さらに、試験による検証結果から、より安全なシートを設計するための方向性を述べる⁶⁾。

2. 着座した乗客を想定したスレッド試験

2.1 スレッド試験方法

我が国における標準的な在来線特急車用回転リクライニングシート（以後、シートと呼ぶ）と乗客を模擬した前面衝突試験用人体ダミー人形（Hybrid-Ⅲ 50th, 以後、ダミー人形と呼ぶ）を用いて、スレッド試験を実施した。試験条件は表1に示す4条件とした。1Aおよび1B条件ではダミー人形1体を進行方向右側（窓側）に着座させた。これは、1人着座の場合、窓側の着座頻度が比較的高いと考えられるためであり、左側に回転ペダルがある。2Aおよび2B条件ではダミー人形を2体着座させた。入力加速度波形は1Aおよび2Aが最大7Gを、1Bおよび2Bが最大14Gを目標とする波形とした（以後、それぞれ7G波形、14G波形と呼ぶ）。各試験条件で目標と

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

** 人間科学研究部 人間工学研究室

*** コイト電工株式会社

特集：車両技術

する衝撃加速度波形を図1に示す。7G波形は過去の踏切重大事故の統計調査結果から、22トンの大型トレーラの側面に速度15m/s(54km/h)で列車が衝突する解析⁷⁾を実施して得られた客室内の衝撃加速度波形を基に、当該スレッド試験装置で再現可能な範囲で設定した。また、2.2.1項に詳細を示すように、7G波形ではダミー人形の各傷害値が基準値に対して低かったため、より厳しい14G波形を条件に加えた。

表1 試験条件

試験条件	1A	2A	1B	2B
ダミー人形	1体(右側)	2体	1体(右側)	2体
入力波形	7G波形	7G波形	14G波形	14G波形

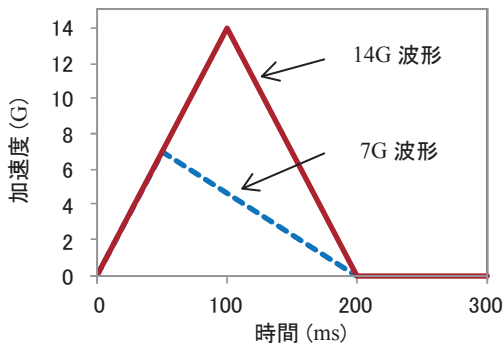


図1 目標入力波形

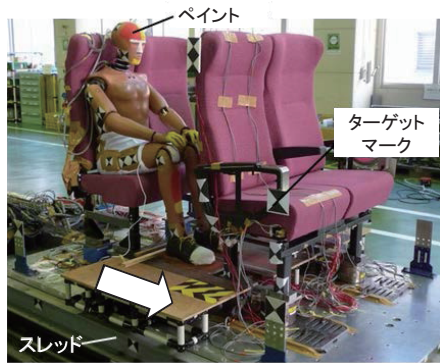


図2 試験状況(1A条件)

いずれの条件とも、ダミー人形を座らせる座席と衝突させる座席を進行方向に向け、相互の間隔は一般的な値(960mm)とした。1A条件での試験状況を図2に示す。ダミー人形の額、手、膝、脛および靴には、衝突箇所が分かるようにペイントを施した。

計測項目は、スレッドの加速度、ダミー人形の頭部加速度、胸部加速度および大腿部荷重、シート各部の加速度とひずみおよび取付け部の荷重、ならびに高速度カメラによる全体の映像である。紙面の都合上、シート各部の加速度とひずみおよび取付け部の荷重については詳

細には触れないが、各部の時々刻々の挙動評価や解析との比較に活用した。道路運送車両の保安基準⁸⁾の前面衝突時の乗員保護の技術基準では、ダミー人形の傷害評価はHIC(頭部合成加速度から算出)、胸部合成加速度の累積時間3msの値、大腿部荷重の3つの指標が定められている。本研究では、これらの指標を頭部傷害値(HIC36)、胸部傷害値(3msG)、大腿部傷害値(大腿部荷重)と定義する。頭部、胸部傷害値は加速度から、大腿部傷害値は荷重から求める。これらの指標に対して、傷害基準(HIC36:1000以下、3msG:60G以下、大腿部荷重:10kN以下)を定めており、本試験においてもこれらを準用した。

2.2 スレッド試験結果

2.2.1 7G波形

表2に7G波形の各試験条件におけるダミー人形の傷害値の結果一覧を、図3にダミー人形の脛、膝および頭部がシートに衝突した時の高速度カメラの画像を、図4に1Aおよび2A条件における試験後の状況を示す。

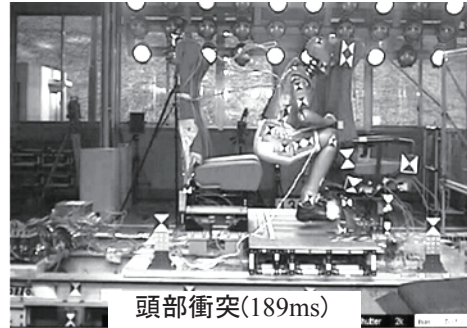
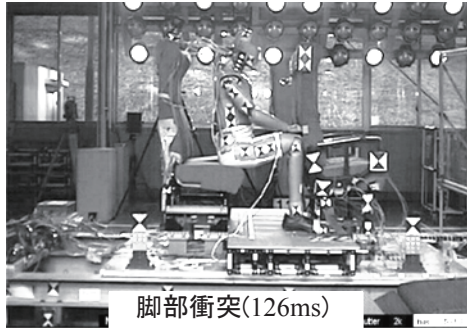
表2 傷害値の試験結果(7G波形)

試験条件	1A		2A	
	右側	左側	左側	右側
HIC36 基準値:1000	65	130	130	120
3msG (G) 基準値:60	9.7	9.5	9.5	10.4
大腿部荷重 (kN) 基準値:10	左	5.4	2.8	3.4
	右	3.4	3.6	2.4

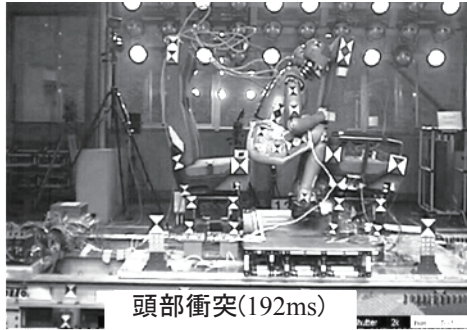
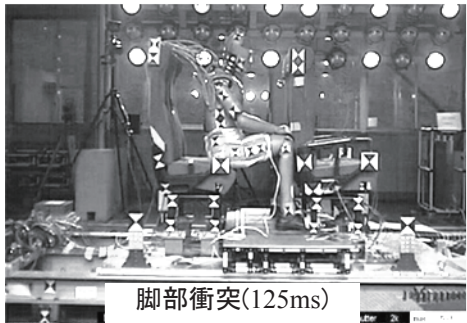
表2より、今回の試験条件において、各ダミー人形の傷害値が前述の傷害基準値を超えることはなかった。頭部傷害値は1人着座が65、2人着座は左右ほとんど差がなく120~130程度であり、基準値1000に対して十分小さかった。胸部傷害値はいずれも10G程度で基準値60Gに対して十分小さかった。なお、今回は胸部が直接シートに衝突することはなかった。大腿部傷害値は1人着座の方が大きく、左大腿部で5.4kN、2人着座は3.6kNとなり、最大でも基準値10kNの54%程度だった。図3、図4より、まず脛および膝が125ms付近で背ずり下部に衝突し、これによりシートとダミー人形がともに前傾し、190ms程度の時に頭部が背ずり上部に衝突した。膝衝突時に、シート上部にある受けがストッパを乗り越え(本来は受けとストッパによりシートの左回転を止める)、2A条件では、2体のダミー人形がほぼ同時にシートに衝突するため、頭部が衝突した後、シート上部は回転せずダミー人形は後方に戻されたのに対し、1A条件では、シートの右側のみの衝突のため、シート上部が左

回転し、頭部が衝突した後、ダミー人形は側方に倒れ込んだ。そのため、2人着座ではほぼ背ずり中央に頭部が衝突したのに対し、1人着座では左にずれて衝突した。

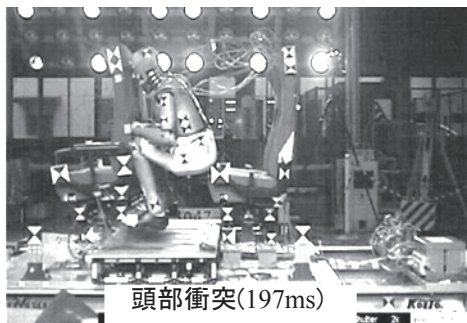
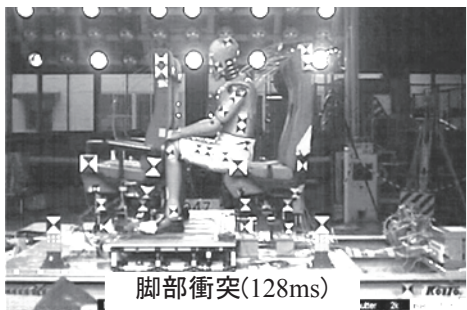
1人着座の頭部傷害値が2人着座のそれよりも低くなったのは、背ずりが逃げる方向に挙動したことと衝突位置による影響と考えられる。大腿部傷害値において、



(a) 1A条件 右側ダミー人形の挙動

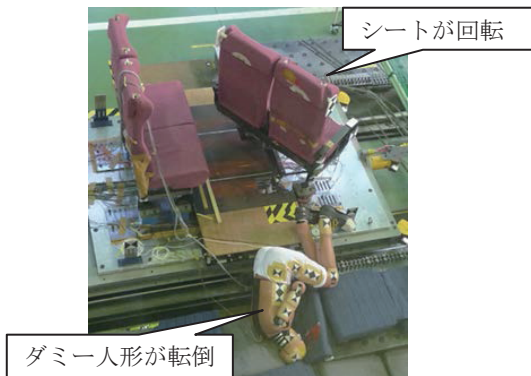


(b) 2A条件 右側ダミー人形の挙動



(c) 2A条件 左側ダミー人形の挙動

図3 1A および 2A 条件の高速度カメラ画像



(a) 1A 条件



(b) 2A 条件

図4 スレッド試験後のダミー人形とシートの状況

特集：車両技術

左右の足で差が発生したのは靴が前席の脚台に衝突することによって、脛および膝がシートに衝突するタイミングがずれ、先に衝突した方が大きくなること、および背ずりの取り付け方に起因する背ずり剛性の違いが要因であると考えられる。

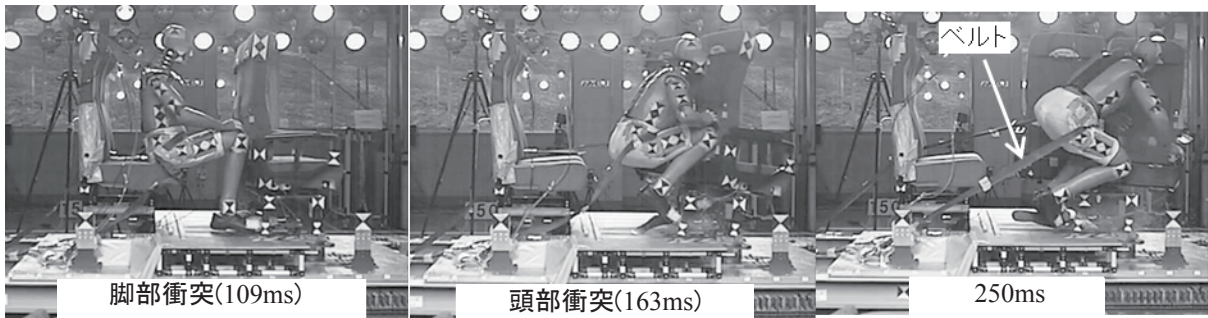
2.2.2 14G 波形

14G 波形の各試験条件におけるダミー人形の傷害値の結果一覧を表3に、ダミー人形の脛、膝および頭部がシートに衝突した時と250ms時の高速度カメラの画像を図5に、試験後の状況とダミー人形の脛、膝、頭部が衝突した箇所を図6および図7に示す。なお、図5におけるベルトはダミー人形の頭部が前席に衝突した後に、ダミー人形が飛び出して装置を破損しないように、ダミー人形を拘束するために設置したもので、各部傷害値結果に影響を与えるものではない。

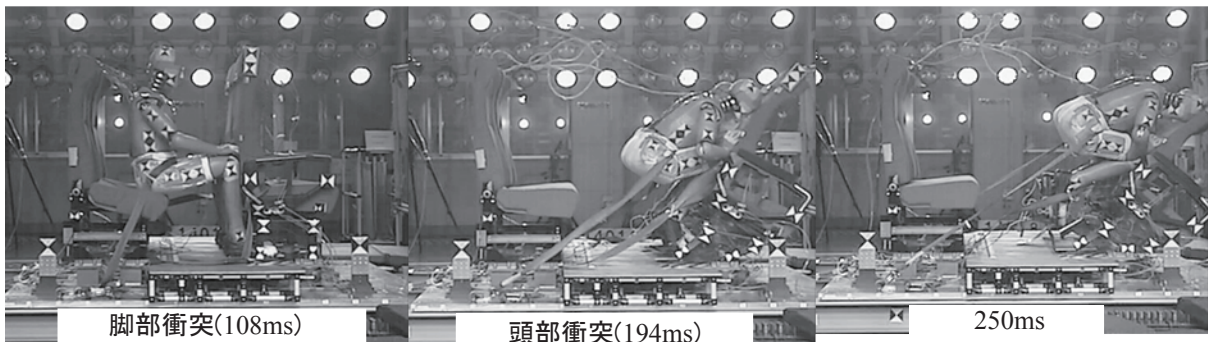
表3より、全ての傷害値が7G波形の試験結果よりも大きくなり、1B条件における左大腿部傷害値が基準値を超えた。ただし、それ以外は基準値を超えなかった。

表3 傷害値の試験結果（14G 波形）

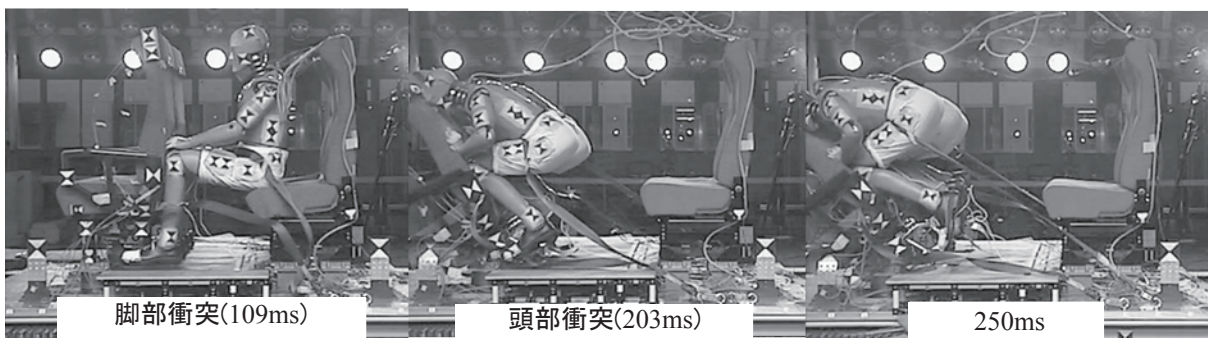
試験条件	1B	2B		
ダミー人形	右側	左側	右側	
HIC36 基準値:1000	288	219	161	
3msG (G) 基準値:60	50.5	12.3	20.0	
大腿部荷重 (kN) 基準値:10	左	12.8	4.7	6.6
	右	5.9	5.6	5.3



(a) 1B 条件 右側ダミー人形の挙動



(b) 2B 条件 右側ダミー人形の挙動



(c) 2B条件 左側ダミー人形の挙動

図5 1B および 2B 条件の高速度カメラ画像

頭部傷害値は1B条件が288、2B条件の左側ダミーが219、右側ダミーが161であり、基準値1000に対して29%弱と小さかった。胸部傷害値は1B条件が50.5Gと基準値60Gに対して84%と大きくなったが、2B条件では33%程度であった。いずれも胸部が直接シートに衝突しなかったため評価対象とはならない。大腿部傷害値は1B条件が12.8kNと基準値10kNに対して128%となり基準値を超えた。2B条件では6.6kNとなり、66%程度となった。

図5より、1B条件では脛および膝がシート背面下部に衝突し（この時、図6のように背ずり背面のリベット部が破断したと推定される）、これによりシートが前傾して回転し、約163msで頭部が背ずり背面上部に衝突した。その後もダミー人形の進行が止まらず、シートは90°以上回転し、約250msではベルトによりダミー人

形が拘束された。最終的には図6のようにダミー人形は右側方に転倒した。なお、左大腿部荷重の波形は最大荷重12.8kNの後、急激に荷重が低下した。試験後にダミー人形を調査したところ、左脚の膝関節下部の脛の溶接部が破断しており。これが荷重低下に影響したと推定される。図6に示すように脛が衝突したバックカバーと比較して、膝が衝突した背ずり下部の方が変形量が大きくなった。これにより、膝下に著大なせん断力が発生したことが破断の原因と考えられる。2B条件では左右2体ほぼ同時に衝突するため、シートはほとんど回転しないが、シートの脚台が前方へ大きく変形して破断し（図7参照）、約250msではベルトによりダミー人形が拘束された。最終的には図7のようにダミー人形は左右いずれも側方に転倒した。いずれの条件もベルトがなかった場合、ダミー人形は前方へ飛び出すと推測される。

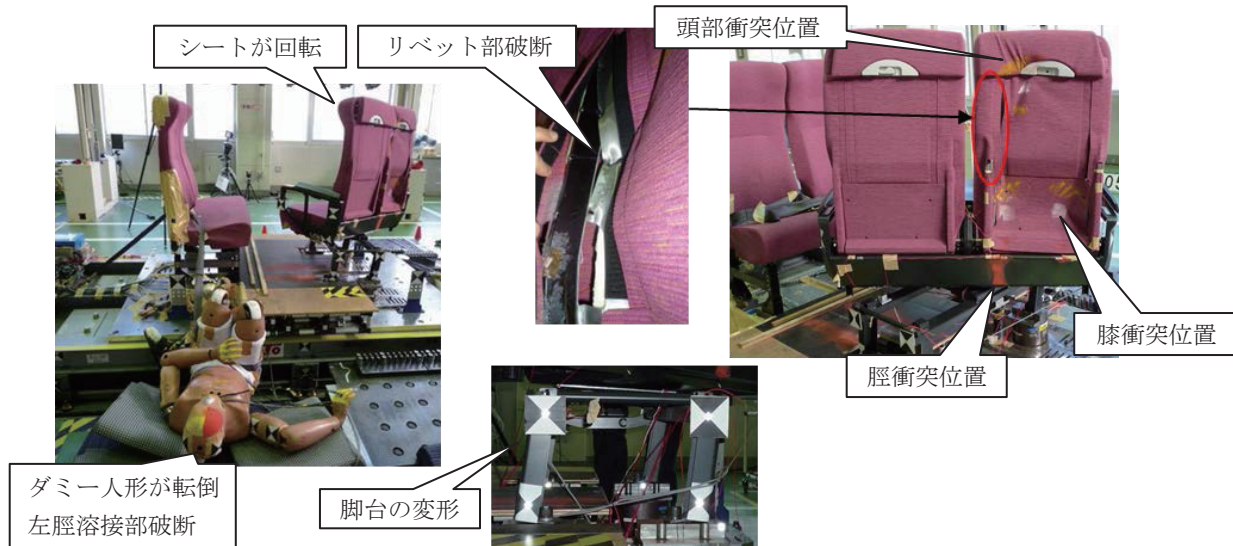


図6 スレッド試験後のダミー人形とシートの状況（1B条件）

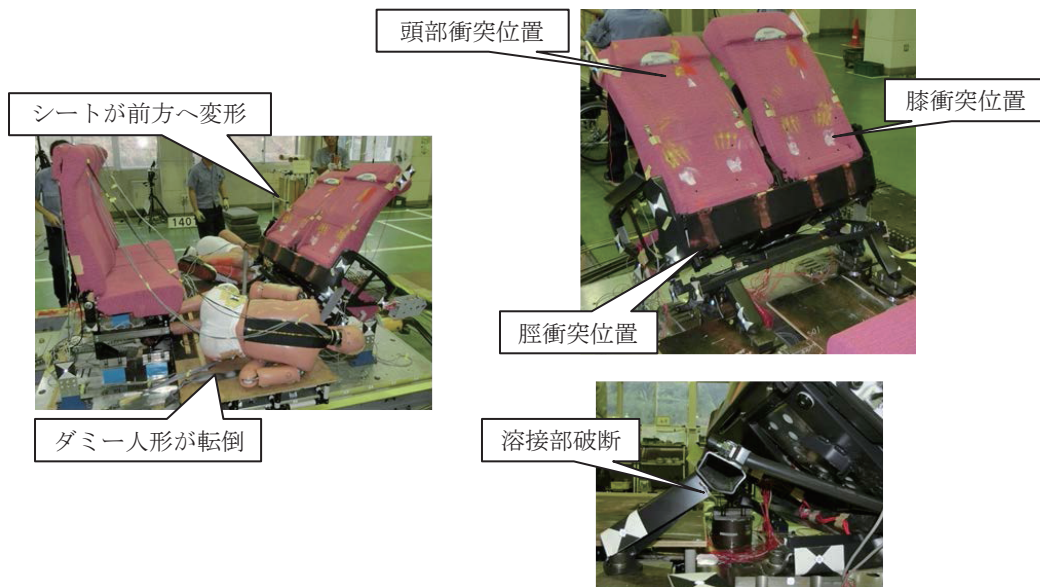


図7 スレッド試験後のダミー人形とシートの状況（2B条件）

特集：車両技術

大腿部傷害値の左右差および1人着座の方が大きくなる傾向は7G波形と同様であったが、頭部傷害値は1人着座の方が大きくなった。これは、14G波形の2人着座ではシートの脚台が破断し、シートが大きく前傾した状態で頭部が衝突したためであると考えられる。

3. おわりに

鉄道車両が大型自動車等と衝突した場合、客室内では衝撃加速度によって乗客が進行方向に投げ出され、内装品と2次衝突して負傷する可能性がある。多くの客室内の状況のうち、回転クライニングシートに着座した乗客が前席の背面に衝突するケースを最も基本的な状況の1つとして検証対象とし、スレッド試験による乗客の挙動や傷害値を検証することで以下の結論を得た。

- (1) 着座乗客が前席に衝突することによって重傷となる可能性が高いのは、大腿部であり、2人着座よりも1人着座の方が傷害値が高くなる。また、脛および膝が衝突する箇所の強度や剛性の差により、膝下に著大なせん断力が発生する可能性がある。一方、胸部は直接シートに衝突することはないため、重傷となる可能性は低い。
- (2) 膝等との衝突により背ずりが前方へ傾斜する過程で頭部が背ずりに衝突するため、頭部は重傷となる可能性が低い。ただし、衝撃加速度が大きくなると2人着座の場合、前席の前方への変形で、1人着座の場合、シート上部の回転により乗客を受け止めることができず、前方へ飛び出す可能性がある。この場合、他の内装品に衝突して重傷となる可能性がある。
- (3) 乗客の安全性向上のための対策としては、大腿部傷害値や膝下のせん断力を下げるために脛および膝が

衝突する箇所の強度、剛性を揃えつつ全体的に下げ一方、乗客を確実に受け止めるためシートの回転を抑止し、全体（特に脚台）の変形量を抑えて頭部傷害値の上昇を最小限とすることが考えられる。

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) 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
- 3) 中井一馬, 鈴木大輔, 榎並祥太: 衝突シミュレーションで用いる鉄道用の人体モデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.7, pp.33-38, 2015
- 4) Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S., Okino, T., Takano, J. and Palacin, R., "An Estimation of Behavior and Severity of Injury to Rail Passengers Occupying Longitudinal Seats in the Event of Collision," IRCOBI conference proceedings, pp.315-326, 2015.
- 5) 日本規格協会: JIS E7104 (鉄道車両-旅客用腰掛), 2015
- 6) 沖野友洋, 中井一馬, 高野純一, 榎並祥太, 長尾裕, 小川征輝: 列車衝突事故時の回転クライニングシート着座乗客の傷害評価, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.846, No.16-00235, 2017
- 7) 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
- 8) 交文社: 新・道路運送車両の保安基準, p.756, 2009