

FEM 解析による衝突事故時のクロスシート着座乗客の 傷害度評価手法

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 Method of Passengers Seated in the Transverse Seat
in the Event of a Collision Accident by means of FE Analysis**

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 have carried out impact tests using crash-test dummies. In this paper, we performed FE analyses under the same condition as the tests. As a result, the numerical results obtained by the FE analyses by means of a rigid dummy model developed for the automobile were generally consistent with the empirical results of the impact tests in terms of dummy's behavior and injury values.

キーワード：衝突安全，傷害度評価，クロスシート，有限要素法，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。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)}。また、著者らは、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対象として、乗客を模擬した人体ダミー人形とシートをスレッド（移動架台）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を実施して、衝突事故時の乗客の挙動や傷害値を検証した⁵⁾。

スレッド試験は、実際の乗客の挙動や傷害の程度を模擬できる有用な試験法であるが、試験規模が大きくなるため、多数の試験条件を実施するのは困難である。そこで、本報告では、前述のスレッド試験に相当するFEM解析を実施して試験結果と解析結果を比較検討することにより、ダミーモデルの各傷害値の解析精度を検証した結果について述べる⁶⁾。

2. スレッド試験の概要

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, ダミー人形と呼ぶ）を用いて、スレッド試験を実施した⁵⁾。試験条件は表1に示す4条件とした。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を目標とする図1に示す波形とした。

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

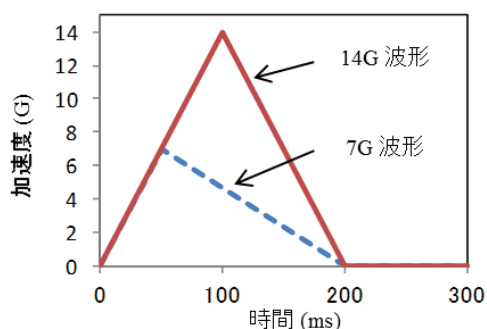


図1 目標入力加速度波形

* 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

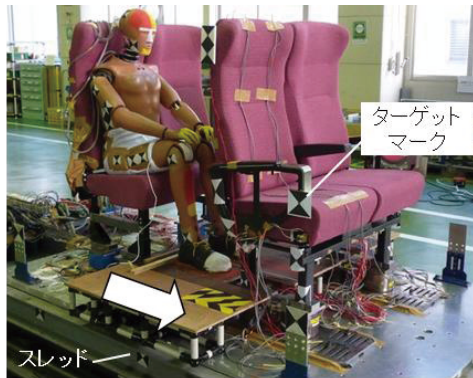


図2 試験状況（1A条件）

1A条件での試験状況を図2に示す。ダミー人形の傷害度評価は、頭部傷害値（HIC36）、胸部傷害値（3msG）、大腿部傷害値（大腿部荷重）の3つの指標を用い、傷害基準値をそれぞれHIC36：1000以下、3msG：60G以下、大腿部荷重：10kN以下とした。

3. スレッド試験に相当するFEM解析

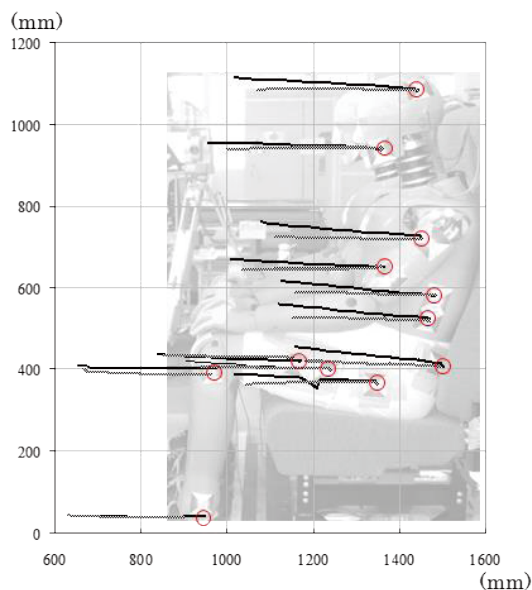
3.1 着座シートモデルの材料特性

スレッド試験相当のFEM解析を実施するにあたり、ダミー人形の飛び出し挙動を検証した。これは最終的に得られる頭部傷害値や大腿部傷害値の精度に対して、ダミー人形の衝突位置や角度が強く影響することによる。ダミー人形の飛び出し挙動解析は着座時の座ぶとんの沈み込み量が重要であるため、座ぶとん単体の強度試験より荷重－変位特性を取得し、図3の解析モデルでダミー人形の自重による着座時の状態を解析した。シートモデルは変形を考慮できるFEMモデルであり、ダミーモデル

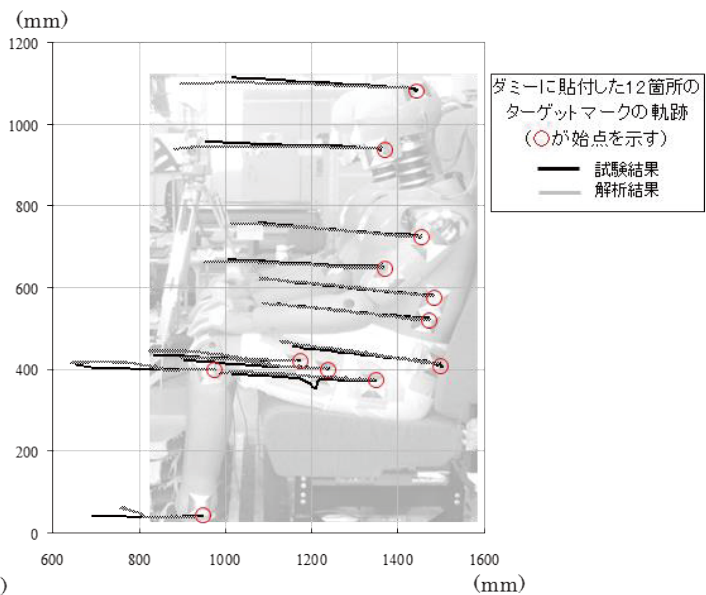


図3 FEM解析モデル（2人掛け条件）

は剛体モデルである。図4に座ぶとんの上下方向変形量結果（コンター図）を示す。赤色の部分が変形量の大きい箇所である。次に、ダミー人形の飛び出し方向に着目し、着座状態を初期状態として2A条件のスレッド試験に相当する条件で解析を実施した。ダミー人形が前席に衝突する前までの挙動結果を図5(a)に試験結果と併せて示す。挙動比較は図2のターゲットマークの軌跡で行い、図5中の背景のダミー人形はターゲットマーク位置を明示するための参考図である。図5(a)より、着座時の初期姿勢は一致しているが解析による軌跡は試験結果に比べて飛び出し角度が低くなった。この差異の原因が座ぶとんの硬さによるものと考え、座ぶとんの材料物性をひずみ速度依存性を考慮したものに変更した。ひずみ速度依存性を考慮した解析と試験の挙動比較結果を図5(b)に示す。飛び出し角度はほぼ一致し、試験結果と同等の挙動となった。この補正により頭部傷害値や大腿部傷害値などの最終的な計算結果の精度が向上した。



(a) ひずみ速度依存性を考慮せず



(b) ひずみ速度依存性を考慮

図5 座ぶとんのひずみ速度依存性考慮の有無によるダミーモデルの飛び出し角度の比較（2B条件）

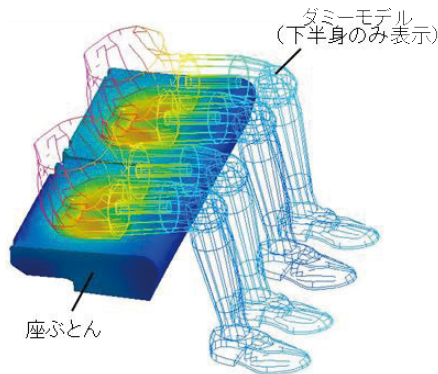


図4 着座時の座ぶとん変形解析結果

3.2 スレッド試験に相当する FEM 解析

シートモデルとダミーモデルを用いて、図3の状態におけるスレッド試験に相当する衝突解析を実施した。各解析の入力波形は、試験で得られたスレッドの加速度波形を用い、各試験結果に応じてダミーモデルの初期姿勢を調整した。それぞれの条件におけるダミーモデルの傷害値の解析結果を試験結果とあわせて表2に、各傷害値を基準値で除した結果を図6に示す。また、ダミーモデルの脛、膝および頭部がシートに衝突する時刻付近における状況を図7、図8に示す。

表2および図6より、頭部傷害値は試験結果と比較して概ね低い値となり、7G波形の試験では最大60(46%)の誤差、14G波形の試験では最大105(36%)の誤差と

なった。一方、胸部傷害値は1B条件が誤差31G(61%)であったが、それ以外はほぼ一致した(ただし、今回の条件では胸部がシートに直接衝突することはなかった)。解析においては、1B条件のスレッド試験で生じた高い胸部傷害値を再現できず、その原因を特定することはできなかった。また、大腿部傷害値は1人掛けである1Bおよび1A条件は良く一致したが、2人掛け条件は全てスレッド試験より高い値となり、2A条件では最大1.1kN(31%)の誤差、2B条件では最大2.0kN(30%)の誤差となった。これは、ダミーモデルが2体ほぼ同時に衝突するため、初期姿勢の僅かな違いが相互に影響を及ぼし、解析の再現性が低下するためと考えられる。

図7について、試験結果⁵⁾と比較すると、膝衝突および頭部衝突時の時間やダミーモデルの姿勢は概ね一致しており、ダミーモデルの挙動はスレッド試験の結果と良く一致した。また、いずれの条件でも試験結果と同様にシート上部がストoppaを乗り越え、1A条件では回転する状況が再現できた。図8については、脛、膝衝突時の時間やダミーモデルの姿勢は概ね一致しているが、頭部衝突時は脚を抱え込むような姿勢となり、ダミーモデルの太腿部と腹部が干渉した(2B条件でより顕著であり、頭部衝突時間が20ms程度早くなった)。これは、ダミーモデルの各部が相互の接触を考慮しない剛体要素で構成されているためである。ただし、最終的なシートの回転や前傾、ダミー人形の前方への挙動は再現できた。

表2 ダミー傷害値の解析と試験結果の比較

試験条件		1A	2A		1B	2B	
ダミーモデル		右側	左側	右側	右側	左側	右側
頭部傷害値 (HIC36) 傷害基準値 1000		54(65)	70(130)	63(120)	183(288)	153(219)	169(161)
胸部傷害値 (3msG)(G) 傷害基準値 60		11.1(9.7)	11.0(9.5)	9.4(10.4)	19.5(50.5)	21.9(12.3)	22.2(20.0)
大腿部傷害値 (大腿部荷重)(kN) 傷害基準値 10	左	4.8(5.4)	3.2(2.8)	4.2(3.4)	12.7(12.8)	6.4(4.7)	8.6(6.6)
	右	3.4(3.4)	4.7(3.6)	2.9(2.4)	6.1(5.9)	7.3(5.6)	6.8(5.3)

注：括弧内は試験結果を示す

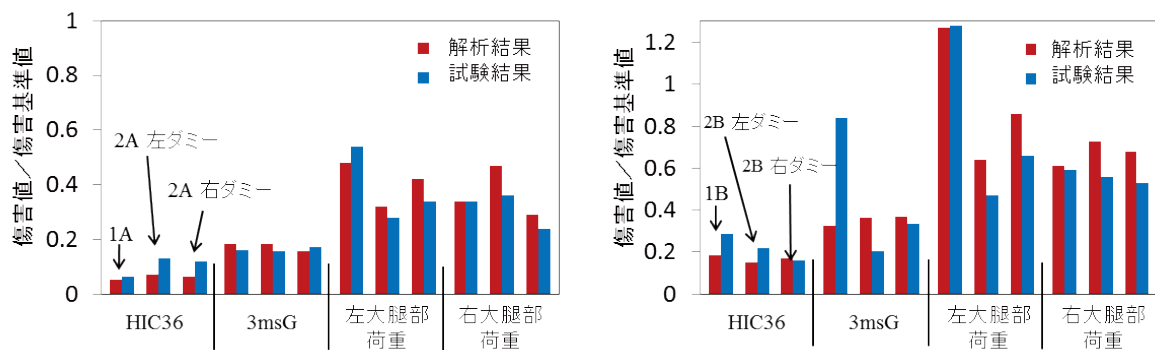


図6 傷害基準値に対するダミー傷害値の割合に関する解析と試験結果の比較

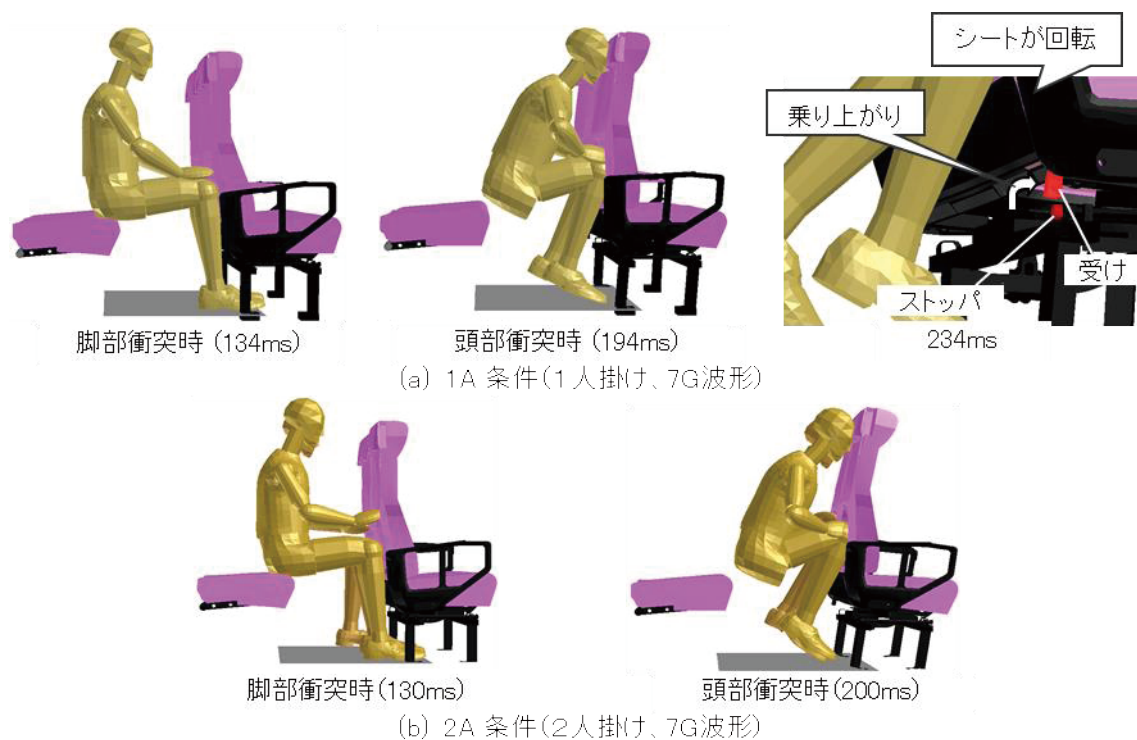


図7 7G 波形によるダミーおよびシートの挙動解析結果

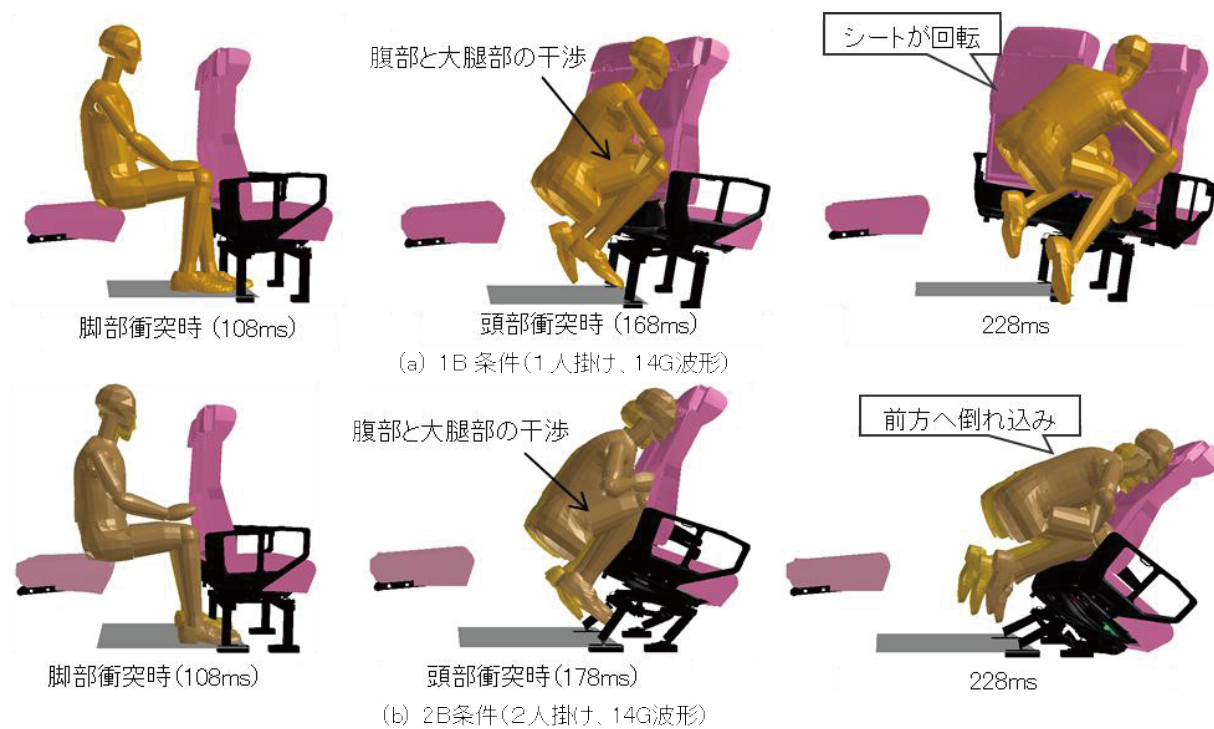


図8 14G 波形によるダミーおよびシートの挙動解析結果

以上の結果から、剛体要素で構成されたダミーモデルを使用する本解析手法では、今回のように脚を抱え込むような姿勢となる条件について、姿勢や頭部傷害値の絶対値を正確に再現することが困難である。一方、図6に示すように、傷害基準値に対する各部位の傷害値の割合を評価する場合には概ね良好な精度が確保されていると考えられる。特に大腿部傷害値については、1人掛けの条件の誤差が $-0.6 \sim +0.2\text{kN}$ ($-11 \sim +3\%$)の範囲なので、絶対的な傷害値を評価するのに十分な精度がある。

今後の課題として、図6において、頭部傷害値は基準値に対して30%以下と大幅に低い試験結果であり、これに基づく解析精度の評価が困難であるため、頭部傷害値が基準値に近くなる条件での試験結果との比較が必要である。

次に、スレッド試験において、重傷となる可能性が高いのは大腿部であり、2人掛けよりも1人掛けの方が傷害値が高くなることおよび膝下に著大なせん断力が発生する可能性があることを示した⁵⁾。これらを検証するために、2A条件の解析モデルの左側ダミーモデルを削除し、その他の条件を同等とした解析を実施した。その結果、右側ダミーモデルの左および右大腿部傷害値がそれぞれ 4.2kN が 5.0kN に、 2.9kN が 3.5kN に増加し、1人掛けの方が傷害値が高くなることを確認した。さらに、2A条件の解析において、図9に示すように背ずり（主に膝と衝突）およびシートフレーム（主に脛と衝突）がダミーモデルの脚部と衝突した際の接触荷重を計算した。

ダミーモデルがシートと衝突した際の応力コンター図を図10に、右側ダミーモデルの接触荷重波形を大腿部荷重波形とあわせて図11に示す。図10および図11より、大腿部荷重はシートフレームと脛との接触によって発生し、シートフレームのうち、背面カバーの内側にあるバックバーの影響が大きいたことが分かった。バックバーは左右座席を貫通した一本の棒であるため、2人掛けの条件

では2体のダミー人形が分担して前方に押し出すことになる。そのため、2人掛けの方が大腿部傷害値が低下したと考えられる。

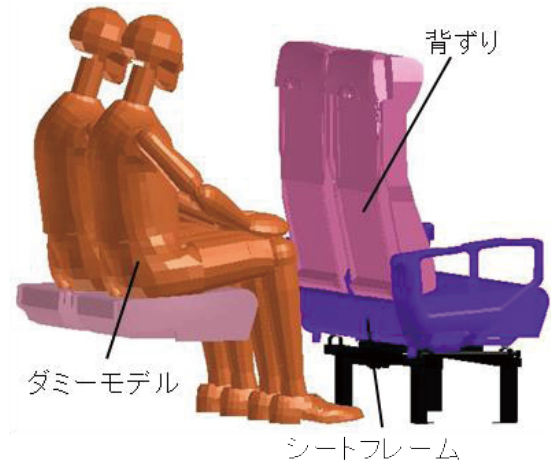


図9 背ずりとシートフレーム

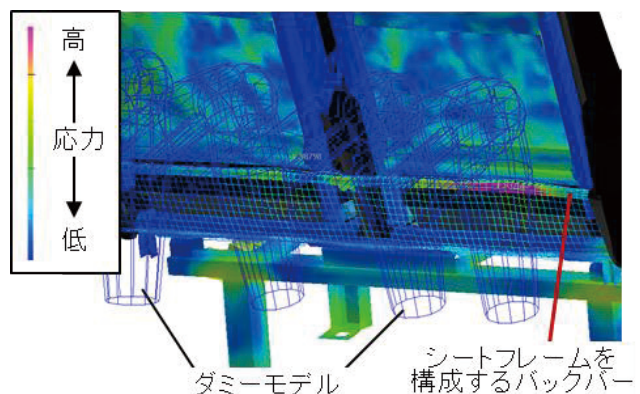
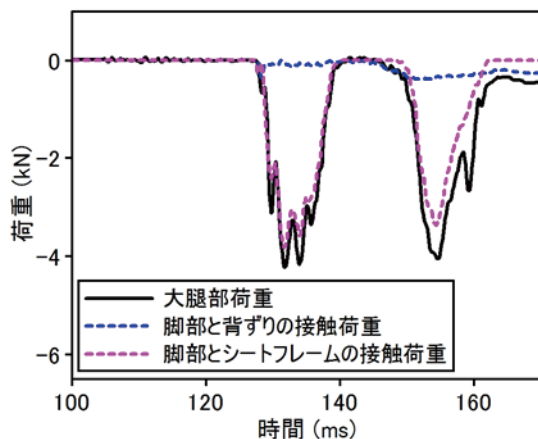
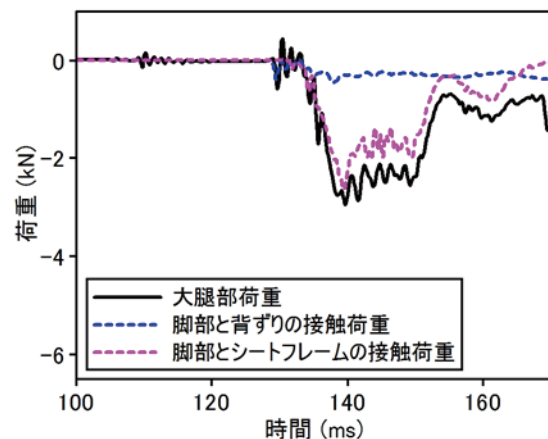


図10 2A条件における応力コンター図



(a) 左脚



(b) 右脚

図11 2A条件におけるダミー脚部と背ずりおよびシートフレームとの接触荷重

特集：車両技術

4. 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し、スレッド試験によって得られた乗客の挙動や傷害値について、試験に相当するFEM解析を実施して結果を比較検討した。その結果、自動車用に開発されたFEM剛体ダミーモデルを用いたスレッド試験に相当するFEM解析では、ダミー人形の挙動は概ね再現できるが、例えば脚を抱え込むようなダミー人形の部位同士が相互に作用する姿勢の場合、再現が困難となった。解析における傷害値に関しては、大腿部傷害値は概ね試験結果を再現できるが、頭部傷害値は試験結果と比較して低くなる傾向があり、最大誤差は46%であった。ただし、傷害基準値に対する各部位の傷害値の割合を評価する場合には概ね良好な精度が確保されていることが確認できた。

本解析手法により、様々な事故状況における乗客の傷害度を評価することが可能となった。これまでに、乗客の着座位置や姿勢などをパラメータとした評価^{7) 8)}や、様々な踏切事故条件下における乗客の傷害度評価⁹⁾に活用してきた。今後も、このような様々な条件下における評価を続ける予定である。

文 献

- 1) 小美濃幸司, 白戸宏明, 斎藤綾乃, 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) 沖野友洋, 中井一馬, 高野純一, 榎並祥太, 長尾裕, 小川征輝: 衝突事故におけるクロスシート着座乗客の傷害評価, 鉄道総研報告, Vol.32, No.1, pp.29-34, 2018
- 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リ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) 榎並祥太, 中井一馬, 沖野友洋: FEM解析による列車衝突事故時の着座姿勢が乗客の傷害に与える影響評価, 第30回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 講演番号1D10, 2017
- 8) 榎並祥太, 中井一馬, 沖野友洋: FEM解析による列車衝突事故時の回転リクライニングシート乗客の傷害評価と対策の検討, 第31回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 講演番号2E24, 2018
- 9) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故における乗客安全性の解析的検討, 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス講演論文集, 講演番号OS0226, 2018