

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

車両衝突時のクロスシート着座乗客の安全性を高める

鉄道事故を防ぐためにさまざまな対策が実施されていますが、踏切事故や自然災害など、鉄道事業者だけでは防ぎきれない場面もあります。このことから、事故などにより鉄道車両に大きな衝撃が発生した際にも、乗客の被害を抑える研究に取り組んでいます。ここでは、特急列車で用いられるクロスシートに着座している乗客に対する、欧米における車両衝突時の安全性の評価方法を紹介しします。また、クロスシート着座乗客への対策に向けて行った、さまざまな事故を想定したケーススタディーによる被害状況の推定結果も紹介しします。



中井 一馬
Kazuma Nakai
人間科学研究部
人間工学研究室
主任研究員
【専門分野】 機械力学、
人間工学、ヒューマンダイ
ナミクス、衝突安全



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】 人間工学、
衝突安全



沖野 友洋
Tomohiro Okino
車両構造技術研究部
車両強度研究室
主任研究員
【専門分野】 車体強度、
衝突安全

はじめに

鉄道事故を防ぐためにさまざまな対策が実施されていますが、踏切事故や自然災害など、鉄道事業者だけでは防ぎきれない場面もあります。このことから、事故が発生した際にも乗客の被害を抑えるという観点で対策を講じておくことは、安全性を高めることにつながると考えています。

衝突などの事故を想定し、被害を抑えることを目的とした研究は衝突安全とよばれており、自動車業界で始まりましたが、現在は鉄道や航空などの他交通機関でも行われています。

鉄道車両の衝突自体を1次衝突とよび、1次衝突により車内に発生した衝撃で、乗客が車内設備や他の乗客に衝突することを2次衝突とよんでいます。1次衝突に対しては、車体構造を対象として、車体の剛性を高める、車体に発生する衝撃を緩衝させるといった対策をとり、2次衝突に対しては、車内設備を対象として、内装品の設計により乗客の被害を抑える対策をとります。

2次衝突対策を考えるためには、事故時に車内に発生した衝撃で、乗客がどのように投げ出され、何に衝突し、身体のどの部位に、どの程度の被害を負ったのかといった被害状況の把握が必須となります。

乗客の被害状況を推定する方法として、スレッド試験による方法、コンピュータ上でスレッド試験を行う解析による方法、事故被害者への聞き取り調査を行う方法などがあります。ここで、スレッド試験とは図1に示すように台車（スレッドとよばれます）上に、乗客を模したダミー人形と車内設備を設置し、台車自体に事故時の衝撃を与えることで、乗客の挙動、被害発

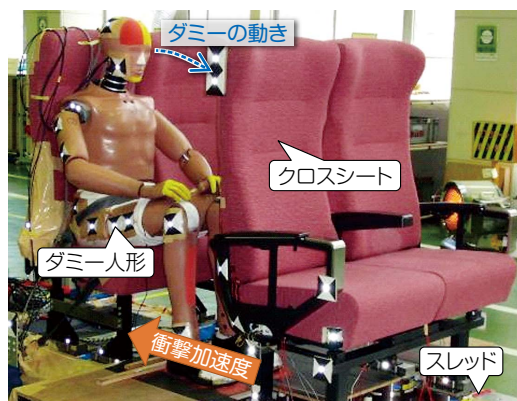


図1 スレッド試験の概要

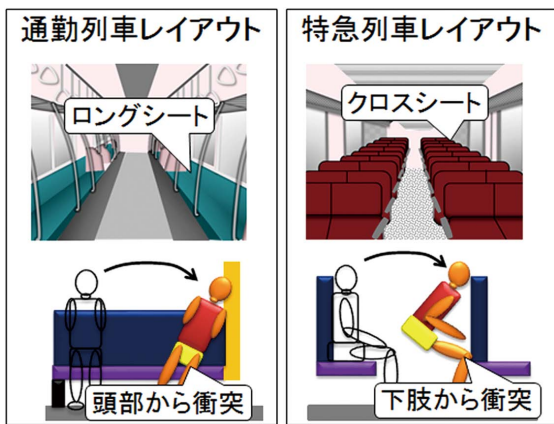


図2 2次衝突の傾向の違い

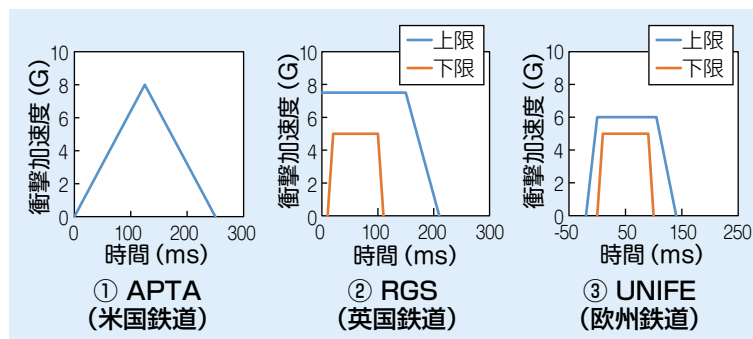


図3 スレッド試験における衝撃加速度の入力条件

生部位や程度を推定する方法です。

被害者への聞き取り調査は、個人情報観の観点などにより鉄道総研独自で行うのは難しく、運輸安全委員会の報告書でも前述した被害状況に関する情報の記載は、一部の事故に限られていることから、対策の参考となる情報は少ない状況にあります。そのため、スレッド試験や解析を活用して被害状況を推定しています。

列車内は、乗客の身体の拘束方法が自動車と異なるため、車内に発生した衝撃が大きい場合には身体が大きく投げ出されます。そのため、自動車業界の知見をそのまま活用するのは難しく、鉄道なら

では被害状況を推定する必要があります。列車内は、座席などのレイアウトにより、乗車姿勢・向きなどが異なるため2次衝突の傾向がさまざまです。たとえば、図2に示すように通勤列車内のロングシートでは頭部から倒れこみながらシート端部の車内設備に2次衝突し¹⁾、特急列車内のクロスシートでは下肢から前席に2次衝突する²⁾など、傾向が異なります。このことから、これらの乗客ごとに切り分けて研究を進めています。

ここでは、クロスシートに着座している乗客に対する、欧米の安全性評価方法と、鉄道総研で行っている2次衝突対策に向けた研究を紹介します。

表1 鉄道と自動車を用いられる傷害評価指標・基準値の比較

評価部位	評価指標	鉄道			自動車 (前面衝突時の技術基準)		
		① APTA PR-CS-S-016-99 Rev.2 (米国)	② RGS GM/RT2100 Issue 5 (英国)	③ UNIFE Technical Report (欧州)	④ FMVSS 208 (米国)	⑤ UN/ECE R94-03 (欧州)	⑥ 技術基準別添23 (国内)
頭部	HIC	HIC15: 700	HIC15: 500	HIC15: 500	HIC15: 700	HIC36: 1000	HIC36: 1000
	H3ms(G)		80	80		80	
頸部	Flexion(Nm)		310	310			
	Extension(Nm)		135	135		57	
	Tensile force(kN)	4.17	4.17	4.17	4.17	1.1-3.3	
	Compressive force(kN)	4.0	4.0	4.0	4.0		
	Shear force(kN)					1.1-3.1	
	Nij	1.0	1.0	1.0	1.0		
胸部	Rotation (degree)		12 (後突時)				
	T3ms(G)	60	60	60	60		60
	Max.deflection(mm)		63	63	63	42	
	VC (m/s)		1.0	1.0		1.0	
腹部	CTI		1.0	1.0			
	Max.deflection(mm)		40	40, 67			
下肢	VC (m/s)		1.98	1.98			
	Peak femur compressive force(kN)	10	4.3-5.7	4.3-5.7	10	7.58-9.07	10
	TI		1.0-1.3	1.0-1.3		1.3	
	Max. tibial compressive force(kN)		8	8		8	
	Max. knee displacement (mm)		16	16		15	
評価指標の数		6	18	17	7	11	3

欧米の乗客安全性評価

国内には衝突安全に関するオーサライズされた評価方法はありますが、欧米には自動車業界で開発された手法を活用した、鉄道ならではの評価方法があります。スレッド試験あるいは解析で確認され、「スレッドに inputs する衝撃加速度の波形条件」、乗客の2次衝突による傷害発生リスクを抑えることを目的とした傷害評価のための「傷害指標・基準値」、車内に生じる1次衝突の衝撃あるいは2次衝突の衝撃による車内設備の変形で乗客が内装品に挟まれるのを防ぐことを目的とした占有空間の評価のための「車内設備の変形量」などが示されています。

「スレッドに inputs する衝撃加速度の波形」は、①APTA³⁾と②RGS⁴⁾の基準と③UNIFE (欧州鉄道産業連合)の技術レポート⁵⁾でそれぞれ異なります(図3)。②RGSと③UNIFEでは加速度波形の上限と下限が設けられており、この範囲に収まることが条件となっています。

傷害評価に用いられる「傷害指標・基準値」を比較し、自動車の前面衝突時の乗員保護の技術基準内の指標・基準値もあわせて表1に示しました。数値が大きいと傷害発生リスクが高くなる指標であり、基準値を超えないことが求められています。表1の1列目と2列目に示すように、評価部位は、頭部、

けい
頸部、胸部、腹部、下肢と全身にわたり、各評価部位には複数の評価指標と基準値があります。欧米の鉄道(表1の①から③)で比較すると、評価指標が必ずしも同一ではなく、同指標を用いても基準値が異なる場合があります。一方、②RGSと③UNIFEは、ほぼ同じ指標・基準値を用いています。鉄道(表1の①から③)と自動車(表1の④から⑥)を比較すると、鉄道は自動車を参考としていることから、米国(①と④)はほぼ同じ指標・基準値を用いています。一方で、欧州(②③と

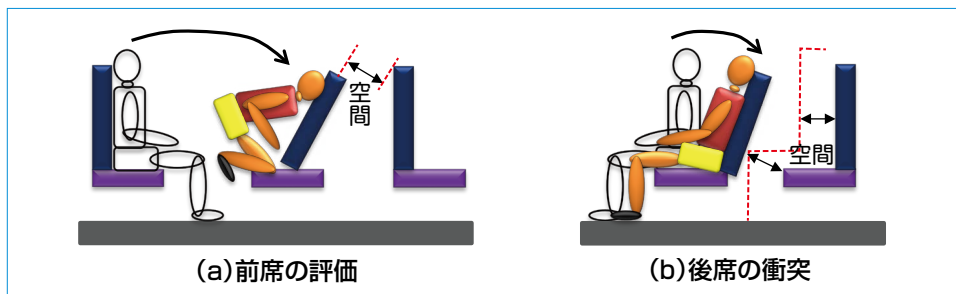


図4 占有空間評価の例 (UNIFE)

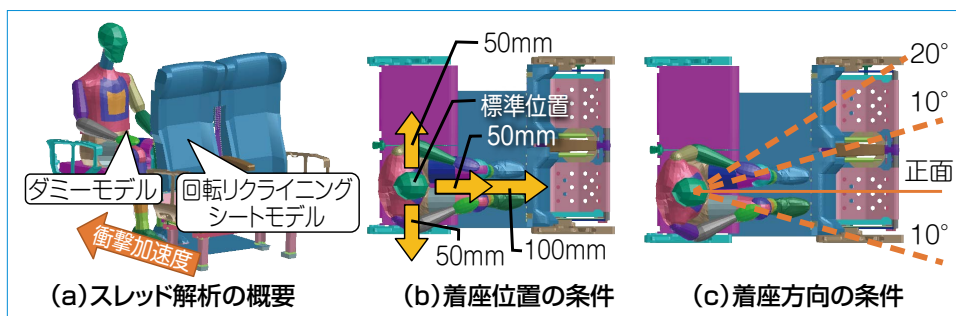


図5 解析による回転リクライニングシートの安全性評価

⑤)は、評価指標の数は自動車より多く、基準値が厳しい指標もあります。たとえば、頭部のHICと下肢のPeak femur compressive forceの基準値は自動車の半分程度です。鉄道で大きな事故が起きた場合には、多数の被害者が発生する可能性があります。そのため、救助が迅速に行えない状況に備えて、乗客が自力で避難できるよう設計する思想があるようです。

占有空間の評価に用いられる「車内設備の変形量」がUNIFEで示されています(図4)。ダミーが前席に衝突してシートが変形した場合でも、前席乗客が挟まらない程度の空間が確保されることが求められます。後への衝突も同様に後席乗客のための空間が示されています。本評価には傷害評価に用いるダミー(約78kg)より大柄なダミー(約101kg)が用いられます。

以上のように、安全性の評価方法は国や地域によって異なっており、各国の事情に合わせて決められています。

解析による乗客の安全性評価

2次衝突対策に向けて行った、解析

によるクロスシート着座乗客の安全性評価⁶⁾について紹介します。

乗客がクロスシートに着座している状況をコンピューター上で再現し、事故を模した衝撃を入力します(図5(a))。クロスシートは、国内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をモデル化しました。

(1) 評価方法

入力する衝撃加速度は、踏切で22tの大型ダンプ側面に35km/h、54km/h、80km/hの速度で衝突する事故を想定し、その際に列車床面に発生する加速度としました。この加速度はコンピューター上でステンレス鋼製の列車モデルを構築し、上記条件で数値解析を行うことで算出しました。

着座条件は、標準位置(ダミーモデルの背中がシートバックに触れる位置)、標準位置から列車進行方向に対して前、右、左に50mm、前に100mmの着座位置5条件(図5(b))と、各着座位置で正面を向く方向と正面から右に10°、左に10°、20°の着座方向4条件(図5(c))としました。

列車の衝突速度、乗客の着座位

置・方向の組み合わせで計57条件(ダミー大腿部と肘掛けが干渉する右に50mm・右に10°の条件を除外)の解析を行いました。

傷害指標・基準値は表1の⑥に示す国内自動車のHIC36(以後、頭部傷害値)とPeak femur compressive force(以後、大腿部傷害値)を用いました。大腿部傷害値は、左右の大腿部に働く荷重の最大値です。

(2) 挙動と占有空間に関する結果

解析から得たダミーモデルとシートの挙動を図6に示します。衝撃加速度入力後に、前席背面に膝が衝突した後に頭部が衝突する挙動がみられました。また、2次衝突後に前席が大きく回転する挙動が条件によってはみられ、前席乗客の占有空間が狭くなる可能性が示唆されました。

(3) 傷害に関する結果

頭部^{だいたい}と大腿部の傷害値を各基準値で割って、列車衝突速度ごとに平均して比較しました(図7(a))。列車衝突速度が高くなると傷害値は大きくなりその傾向は大腿部^{だいたい}で顕著であること、頭部傷害値は大腿部傷害値に比べて相対

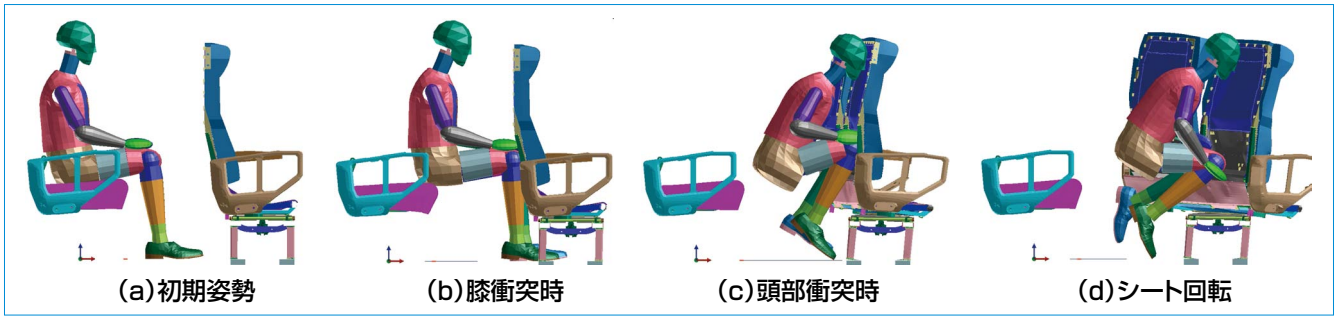


図6 ダミーモデルとシートモデルの挙動(標準位置, 正面)

的に小さく、基準値に対しても非常に小さいことがわかりました。

大腿部傷害値が大きくなった理由を考えるため、膝が2次衝突した際の速度に対する左右の大腿部荷重の最大値を比較しました(図7 (b))。左脚の方が右脚より大腿部荷重が大きいこと、膝の2次衝突速度が同じでも左脚ではとくにばらつきが大きいことがわかりました。そこで左膝が、強度の低い前席背面箇所に衝突した条件の結果をグループ1、強度の高い前席背面の骨組箇所に衝突した条件の結果をグループ2として分類したところ(図7 (b))、グループ2が明らかに大きいことがわかりました。以上のことから、左膝が衝突した箇所の強度が大腿部の傷害発生リスクに大きな影響を与えていることがわかりました。

2次衝突対策の方向性

傷害評価の観点から大腿部の傷害発生リスクを下げる、占有空間の評価の観点から前席の回転を防ぐという対策が考えられます。これらは、自力での避難を考えた場合に重要です。

傷害発生リスクを下げるため、膝が2次衝突する箇所付近に強度の高い部材を配置しない、衝撃を緩衝させる構造を付加するといった対策と、占有空間を確保するため、2次衝突による衝撃でシートが回転しない設計とする対策が考えられます。ただし、回転しないことで2次衝突時の反力荷重が大きくなり、傷害発生リスクが高まる可能

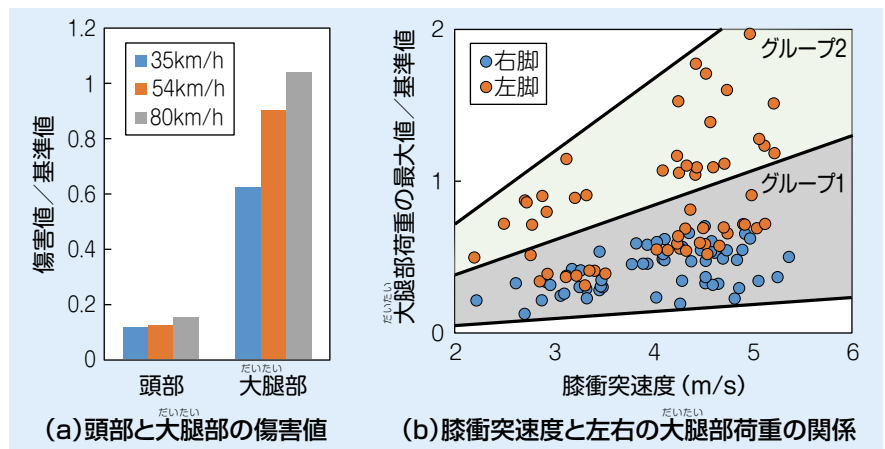


図7 傷害値の比較

性もあることから設計には工夫が必要であると考えています。

おわりに

クロスシートに着座している乗客を対象とした、欧米の安全性評価方法と、鉄道総研で行っている2次衝突対策に向けた研究を紹介しました。

欧州ではリクライニングや回転機構を持つ腰掛は、一般的ではありませんが、国内の腰掛は複雑な構造であり、その構造ならではの特徴があります。解析で示された前席回転もその一つです。以上のことから、背面をスライドさせて向きを変える転換席や、質量が大きくかつ足置きのあるグリーン席などの今回とは異なる構造の腰掛における被害状況の推定や2次衝突対策に向けた研究を進めていきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 中井一馬, 鈴木大輔, 榎並祥太, 沖野友洋, 高野純一: 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, 鉄道総研報告, Vol.33, No.1, pp.29-34, 2019
- 2) 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, 2017
- 3) The American Public Transportation Association: Standard for Passenger Seats in Passenger Rail Cars, APTA PR-CS-S-016-99, Rev. 2, pp.9.19-9.28, 2010
- 4) Railway Safety and Standards Board: Requirements for Rail Vehicle Structures, Railway group standard GM/RT2100 issue 5, pp.24-34, 2012
- 5) UNIFE: Technical Report for Interior Passive Safety in Railway Vehicles, UNIFE REF: 001, pp.31-43, 2014
- 6) 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, 日本機械学会 第31回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 2018