



工学的事故再現分析を活用した原因究明 — エスカレーター側面からの転落事故 —

宮崎祐介 Miyazaki Yusuke

東京工業大学工学院システム制御系 准教授

2013年消費者庁消費者安全調査委員会専門委員、2016年から臨時委員。国土交通省自動車アセスメント評価検討会委員、自動車事故対策機構衝突安全技術検討WG座長等。2012年より現職

はじめに

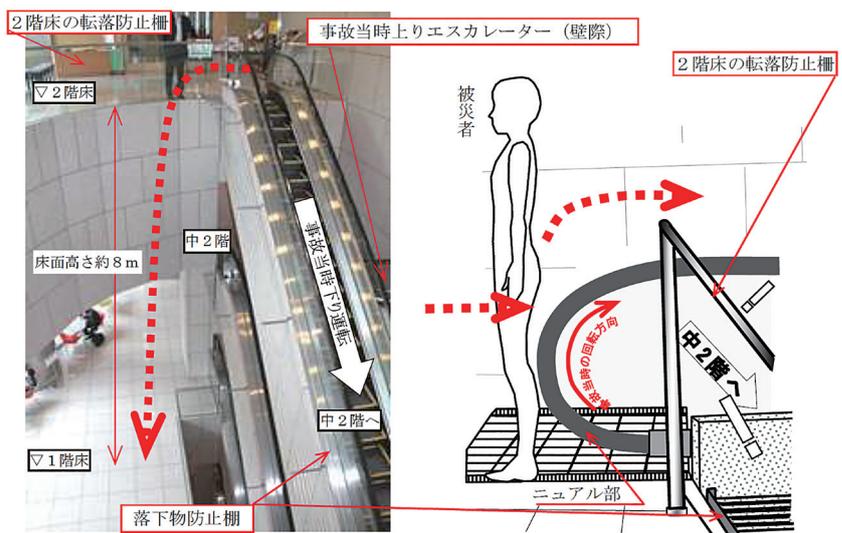
消費者事故が発生した際には、現地に赴き、実際の事故品を直接に確認し、現実の条件・情報に基づき原因究明を行い、対策を講じていく必要があります。これは現地、現物、現実の「三現主義」として事故調査の基本として非常に重要です。一方、三現主義に基づいて現地調査を行ったとしても、事故の発生した状況、要因について不明な点が多々あります。例えば、目撃者がいない、目撃者がいても覚えていない、監視カメラにより事故発生時の状況が撮影されていたとしても事故原因につながる瞬間は映っていないなどです。そこで、現地調査において収集できる情報を最大限に活用し、事故の再現実験やコンピューターシミュレーション技術を活用して、事故発生時において欠損した情報を補うことが有効です。筆者は、人体構造や運動を再現した力学的なシミュレーションモデリングとその活用を専門としています。消費者安全調査委員会専門委員としてエスカレーター事故調査^{*1}に携わった際に、現地調査に加えて工学的な事故再現分析を活用して、事故原因究明を試みました。そこで、本稿では、エスカレーター事故調

査を具体的な事例として工学的シミュレーション技術を活用した事故再現分析方法について紹介したいと思います。

調査対象事故の概要

まず、調査対象となった転落事故の概要について消費者安全調査委員会報告書より一部抜粋して記します。吹き抜けに設置されたエスカレーターのハンドレールに被災者（45歳、男性）の臀部付近が接触し、体がハンドレールの上に持ち上がり、吹き抜け部分から約9m下の1階に転落し、その後死亡が確認された事故でした（図1）。

図1 事故発生場所の吹き抜け写真とエスカレーター周辺図



※（左写真の出所）「東京都内エスカレーター事故調査報告書平成26年10月社会資本整備審議会」（国土交通省）。消費者安全調査委員会にて一部追記

出典：消費者安全調査委員会「消費者安全法第24条第3項に基づく事故等原因調査報告書 平成21年4月8日に東京都内で発生したエスカレーター事故」（図2～4も同じ）

*1 消費者安全調査委員会「消費者安全法第24条第3項に基づく事故等原因調査報告書 平成21年4月8日に東京都内で発生したエスカレーター事故」（2015年6月26日）https://www.caa.go.jp/policies/council/csic/report/report_005/pdf/150626_honbun.pdf



本件事故は、初めにエスカレーターのハンドレールのニュアル部*2に被災者が後ろ向きに接触して持ち上がり、その後にエスカレーター側面から転落するという、2つの事象が連続して発生した事故です。消費者安全調査委員会では、両事象について工学的手法を活用した分析を行いました。誌面の都合上、特に前者の事象における工学的分析の活用について詳しく説明します。

工学的な事故再現方法の方針

まず、事故発生場所に2台の監視カメラが設置されていたため、詳細な状況を把握するために当該記録映像の分析を試みました。しかし、記録映像は静止画像が1秒ごとに連続して記録されたもので、1秒未満の時間に発生した被災者の持ち上がりは記録されていませんでした。このような場合、例えば、再現実験を行うことが1つの方法と考えられますが、転落事故の再現実験は危険が伴うために、人間による再現は行えません。また、本件施設のエスカレーター乗降口には、本件事故後に固定式誘導手すりや落下物防止板が設置されており、事故当時の環境とは変わっていました。

一方、コンピューターシミュレーションは、安全面での問題がない、事故後に現場環境が変わっていたとしてもコンピューター上で当時の環境を再現できる、一瞬の現象である接触瞬間における床やハンドレール等にかかる力の状態を計算できるという利点があります。そこで、事故状況を再現したコンピューターシミュレーションを実施する

ことにより、原因究明と対策案を検討することとしました。

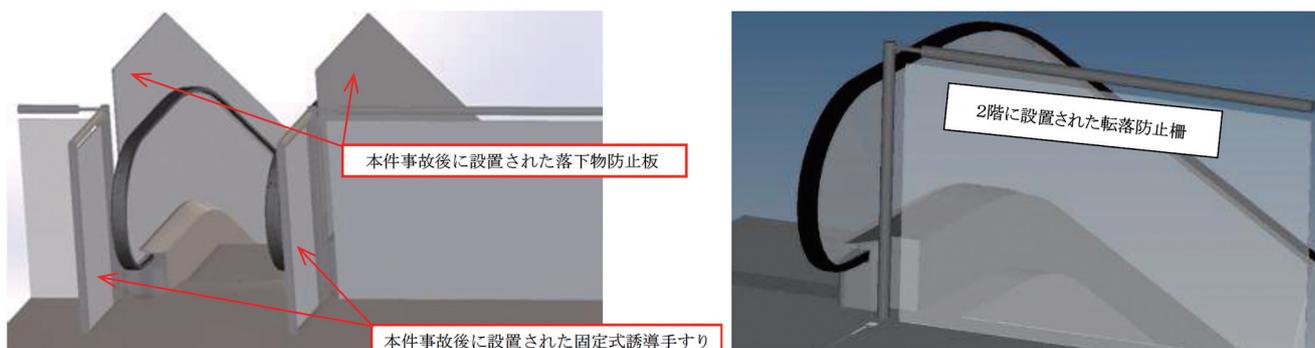
現地調査における実験とシミュレーションによる事故再現分析

現地調査として、通常必要な現場環境の寸法計測や聴取り調査に加えて、コンピューターシミュレーション実施に必要な被災者の行動再現実験を行いました。被災者と近い体型の被験者を選定し、監視カメラの情報を参考に被災者の行動を再現してもらいました。その際に、身体に取り付けたマーカーの動きを複数台のカメラで撮影し、三次元動作分析を行うことで、ハンドレールに接触する際の速度や姿勢を計測しました。

また、現地調査においては、事故発生場所の三次元計測（形状、寸法及び機器の配置等の計測）を行い、三次元環境モデルを構築しました。図2左に示すように、現地調査時には、固定式誘導手すり^{さざま}と落下物防止板が設置されており、事故発生時と異なる環境となっていました。しかし、コンピューターモデル内ではこれらの形状データを削除することができますので、図2右のように事故当時の環境を再現することができました。

さらに、被災者自身の全身CTスキャンデータを提供していただき、外見的な体型にとどまらず、皮膚の厚さや骨の形状など身体内部の構造も含めて、三次元的に再現した特定体型モデルを作成しました。また、被災者自身が着用していた衣服^{さまざま}など様々な生地とハンドレールとの接触時の摩

図2 現場環境の三次元環境モデル



※ (左) 調査時点の環境モデル、(右) 事故当時の環境モデル

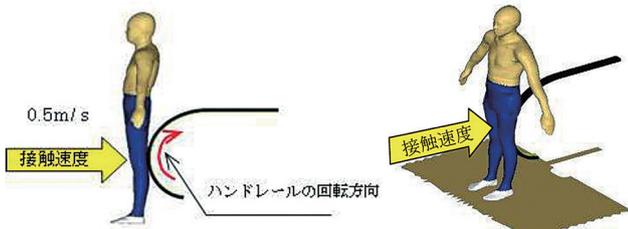
*2 エスカレーター乗降口のハンドレールの折り返し部を指す



摩擦係数を独自の試験機にて計測しました。

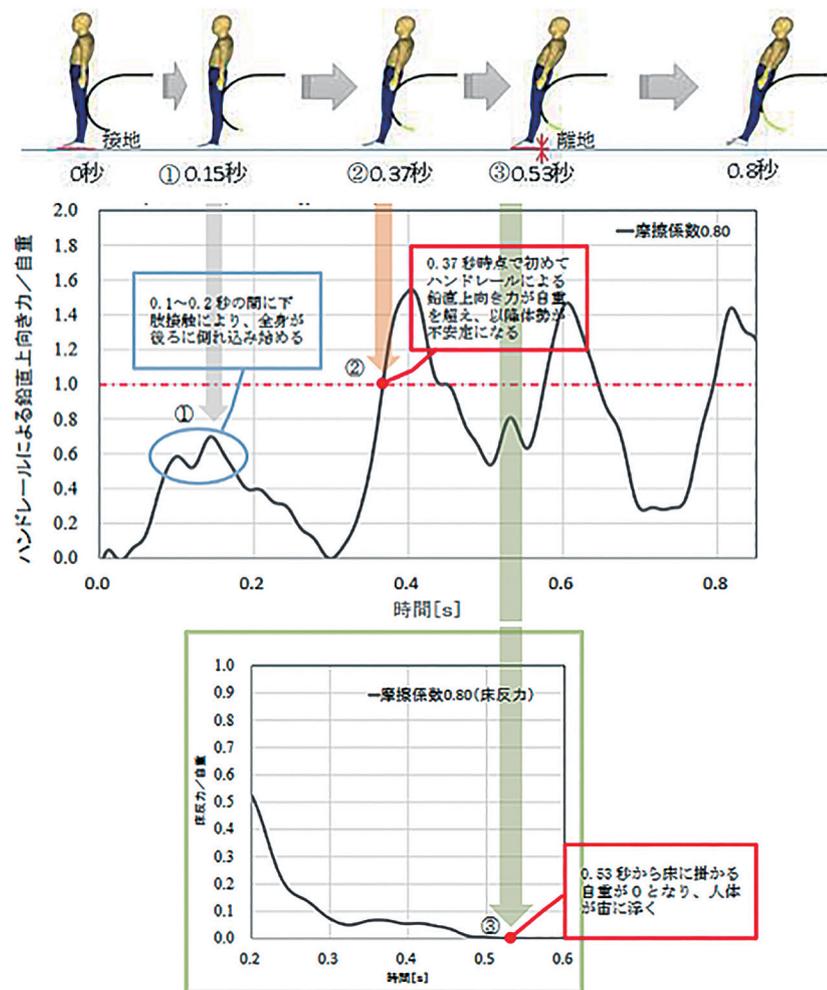
こうして、現地調査において、1) 被災者の行動再現データ、2) 現場環境の三次元環境モデルを取得するとともに、3) 被災者の内部骨格構造も

図3 ハンドレールへの接触時の現象解明のための工学的シミュレーション



※ハンドレールへの接触により人体が持ち上がる可能性を検証するモデル

図4 特定体型モデルにおけるハンドレール接触力の工学的分析結果



※(上) 特定体型モデル、摩擦係数0.80の条件における持ち上がり、(中) ハンドレールによって特定体型モデルに作用する鉛直上向き力の時刻歴(摩擦係数0.80)、(下) 特定体型モデルにおける床反力*4の時刻歴

再現した特定体型モデル、4) 衣服とハンドレール接触時の摩擦係数のデータがそろいましたので、ハンドレールへ接触した際の現象解明のための工学的シミュレーションを実施しました(図3、4)。まず、①0.1～0.2秒において、特定体型モデルの下肢がハンドレールに接触後、下肢接触点を中心に人体が後ろに倒れ込み始め、ハンドレールによる鉛直上向き力*3の最初のピークが見られました。次に②0.3～0.4秒において特定体型モデルの倒れ込みにより臀部(尾てい骨周辺)がハンドレールに接触し、ハンドレールによる鉛直上向き力が増加します。そして、0.37秒時点においてハンドレールによる鉛直上向き力が初めて自重を超え、自立が困難で体勢が不安定になりました。そして③0.53秒において床にかかる自重が0となり人体が宙に浮くことが分かりました。以上のように、工学的事故再現技術を活用することにより、人体がハンドレールに接触してから持ち上がりが発生するまでに1秒未満の瞬間的な状況について情報を補うとともに、人体の持ち上がり力の時間変化を物理的に客観的に把握することで事故原因究明に貢献することができました。

おわりに

本稿では、事故要因分析を行ううえで、比較的新しい方法として工学的シミュレーションによる事故再現分析について、具体例に基づいて解説しました。近年のシミュレーション技術の発展により、デジタル世界にて事故環境の再現を行えるようになりつつありますので、事故調査において不足する情報を補う点で有効な手段です。

*3 水平面に対して垂直方向の上向きにかかる力のこと

*4 地面にかかる力に対して、反対向きに作用する力のこと