

# 鉄道における人間科学とシミュレーション技術

鈴木 浩明\*

## Applications of Simulation Technology for Human Scientific Approach in Railway Systems

Hiroaki SUZUKI

“Human simulation” has been one of the major keywords in recent human science experiments and published papers. This particular paper reviews applied human simulation methods for railway ergonomics. There are two types of simulations: one is environmental simulators applying virtual reality technology such as Driving Simulators, Ride Comfort Simulators and Railway Station Simulators. Another type is computer simulations dealing with topics such as (i) evaluations of the workload level experienced by train drivers, or, (ii) passengers’ motion patterns and injuries caused by train collisions.

キーワード：人間科学，シミュレーション，心理学，人間工学，安全性，快適性

### 1. はじめに

ヒューマンシミュレーションとは、人の動作、行動、判断などを評価・予測するシミュレーション技法の総称である。コンピュータ性能の飛躍的向上に伴い、医療、建築、サービス、交通などの各分野で、その活用例が急速に増えている。鉄道においても、利用者や従業員の安全性と快適性の向上にはたすヒューマンシミュレーション技術の役割は今後一層大きくなるものと考え、鉄道総研では2005年からの5年間、「安全性・快適性を向上させるヒューマンシミュレーション技術」というプロジェクトに取り組んだ<sup>1)</sup>。本稿では、鉄道以外の分野における主なヒューマンシミュレーション技術を概観した上で、本プロジェクトの概要と主な成果を紹介する。

### 2. ヒューマンシミュレーションの特徴

#### 2.1 自然科学と人間科学

シミュレーションの定義は様々であるが、本稿では、「現実のシステムに近い状態や環境を人工的に作り出して模擬実験を行い、現実のシステムを評価・予測すること」と定義する。ヒューマンシミュレーションにおける現実のシステムとは「人」そのものであり、人の動作、行動、判断などを指している。

人を対象にしたシミュレーションでは、「A：環境要因」と「B：人間（動作、行動、判断等）」との関係を扱うが、Bは感情、意思、経験、疲労、体調、好み、文化など、定量化しにくい諸々の要因に影響される点でAと大きく異なる。このため、人間科学分野では、Aの環境

要因のみにシミュレーション技術を適用した「体験型シミュレータ」を開発し、実験ツールとして利用するケースが多い。

たとえば、鉄道総研では以下のような体験型シミュレータを開発してきた。

- 1) 列車運転シミュレータ：列車の運転室環境を模擬しており、運転時の操作情報と、脳波・心拍などの生理情報を計測できる。ヒューマンエラー事故防止のための実験に活用している。
- 2) 車内快適性シミュレータ：列車走行時の振動、騒音、車窓風景などを模擬でき、車内の快適性に影響する環境要因の特定や、手すり・つり手等の車内設備の有効性の検討に活用している。
- 3) 駅シミュレータ：橋上駅を模擬したもので、コンコース、改札、階段等から構成される（図1）。駅空間の快適性評価や、異常時の避難誘導に関わる基礎実験に活用している。



図1 駅シミュレータの外観

\* 人間科学研究部 部長

特集：ヒューマンファクター

2.2 環境シミュレーションと行動シミュレーション

前述のAとBのタイプの違いに着目し、人間科学分野における実験とシミュレーションとの関係を整理したものを図2に示す。①は、環境・人間ともにシミュレーションを用いず、実際の人間を被験者として実験や調査を実施するケースである。乗客に乗り心地の評価を求めたり、高齢者に駅のバリアフリー度を評価してもらう例などがこれに相当する。②は、前述したように体験型シミュレータを活用するもので、本報告ではこれを「環境のシミュレーション」と呼ぶ。③は、人の動作や行動を多数のパラメータで規定される物理量に置き換えて模擬するもので、自然科学における検討方法と基本的に変わらない（「行動のシミュレーション」と呼ぶ）。駅における旅客流動シミュレーションや衝撃時の乗客挙動シミュレーションなどが代表例である。

①や②では、データを得るために必ず人を必要とするが、③では必要としない。ただし、シミュレーションの信頼性や妥当性を検証するには、人から得られたデータでの確認が重要となる。

以上を整理すると、鉄道システムの様々な場面の中から、「環境シミュレーション」に適した課題を抽出し、その「体験型シミュレータ」を開発すること（図2の①→②への発展）と、シミュレータ実験や調査を重ねて、「行動シミュレーション」に発展させること（同①②→③）が当面する課題となる。

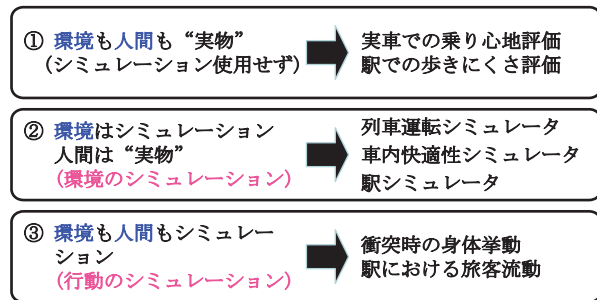


図2 人間科学における実験とシミュレーション

3. 鉄道以外の分野でのヒューマンシミュレーション

3.1 環境シミュレーションの例

(1) 医療

この10年ほどの間に、手術訓練用の「体験型シミュレータ」の活用例が急増した<sup>2) 3)</sup>。例えば、内視鏡による検査・手術では体内に器具を挿入するため、失敗すれば患者の身体を傷つけることになる。このため、人体の質感や機構を詳細に再現した「手術シミュレータ」を活用して新人医師の訓練を行うことが、きわめて一般的な教育・訓練手法となっている。

(2) 交通・産業

航空分野では、悪天候時や機体異常時の操縦訓練のために、操縦室環境を模擬したフライトシミュレータが古

くから活用されており、100年近い歴史を有している<sup>4)</sup>。電子制御技術の発達により、振動、音、映像などの車内環境の表現が容易になった結果、機構が複雑化するとともに、その用途も多様化した。現在では単に訓練のみでなく、パイロットの技能を確認するための試験装置としても利用されている。

また、大型のクレーン車など、産業・建設機械の操縦訓練用シミュレータも数多く開発されている<sup>5)</sup>。大型スクリーンとモーションキャビンから構成され、実際にクレーンを操作しているかのような体感をえながら、訓練可能なため、実機を操作しての訓練期間を短縮できる。

以上の例から、操作者の失敗が人命の損失や施設の破壊など極めて重大な結果に至る分野では、ある程度の経費をかけてでも、臨場感あふれるシミュレータの開発が有益と判断されていると結論できる。

なお、乗り物や産業機械シミュレータの原理や機構を活用して、宇宙空間を旅行したり、ジェットコースターのような激しい動きを室内で体感できるアミューズメントタイプのシミュレータ開発も盛んである。バーチャリアリティ技術を駆使して開発された大型シミュレータは、今やテーマパークにおける体験型アミューズメントマシンの主力となっている。

3.2 行動シミュレーションの例

(1) 衝撃安全性

衝撃安全性の研究で先行しているのは自動車分野であり、交通事故死傷者の低減を目的に古くから開発が進められてきた<sup>6) 7)</sup>。車両の安全対策を進めるには、人体の衝撃応答を調べ、傷害発生メカニズムと衝撃への耐性を明らかにする必要がある。このような目的から、実験に供する人体の代替物としての人体模擬装置（ダミー）が開発されてきた。最近では、人体模擬装置による既存技術の限界を補完するツールとして、コンピュータによる人体シミュレーションモデルの開発が盛んである。人体の構造的・機械的な特性を細かく模擬できる特徴を活かして、傷害発生メカニズムの解明や車両の衝突安全性評価に活用する事例が増えている。

(2) 人（群衆）の流れ

公共施設や商業施設の内部における人の移動や、災害時の避難行動など、人（群衆）の流れに関わるシミュレーションモデルの開発も活発である<sup>8) 9)</sup>。近年では、コンピュータ技術の発達により、マルチエージェントモデルに代表されるように、群衆（集団）ではなく、個人の動きを詳細に予測しようとするものが増えている。

災害から避難する人々の行動をシミュレーションして、防災計画の策定に活かそうとするニーズに応えるため、高層ビルでの火災、原子力施設の事故、地震時の津波発生など、様々な事例に関わる避難シミュレーション

が開発されている。地震時の例では、建物の損壊、街路の延焼、津波による浸水範囲など、物理的なシミュレーションとあわせて、避難場所までの避難所要時間や避難場所の有効性、警報の効果などを評価できる。

(3) デジタルヒューマン

人の機能をコンピュータ上にモデル化することで、様々な産業の発展に役立てようという一連の研究を「デジタルヒューマン研究」と総称することがある<sup>10)</sup>。例えば、コンピュータ内に仮想の人間（人体モデル）を持ち込んで、住居の使いやすさや衣服のコーディネートを評価しようとする試みがある。

デジタルヒューマンの活用法としては、以下の2種を区別できる。一つは消費者集団をカバーするような統計的なデジタルヒューマンを生成し、それに基づいて製品を設計するための技術である。衣服や靴などの着用品や自動車の設計分野などで活用されている。もう一つは、消費者個人個人の人体特性をデータに用いて、その人にとって適切なサイズ・タイプを選択したり、適正な調整位置を調べたりする際に活用するアプローチである。

このほか、乳幼児行動シミュレータなるものもデジタルヒューマンの特殊例と位置付けられる<sup>11)</sup>。これは、発達行動モデルに基づいて規定された乳幼児の典型的な行動パターンを内在したデジタルヒューマンを用いて、乳幼児を取り巻く環境内での事故の潜在可能性を評価し、安全な環境設計に活かそうというものである。

4. 鉄道におけるヒューマンシミュレーション

鉄道分野で開発してきた代表的な環境シミュレーション（体験型シミュレータ）には、前述の列車運転シミュレータ、車内快適性シミュレータ、駅シミュレータなどがある。これらのシミュレータを活用して実験・調査を行うとともに、衝撃安全性、群衆流などに関わる数値シミュレーションモデルを活用することで、本課題では諸々の成果を得た。以下、シミュレーションの対象を、①列車運転の安全性向上、②駅や車内における旅客の安全性向上、③駅や車内における旅客の快適性向上の3つに分け、代表的な成果を順に述べる。

4.1 列車運転の安全性向上

(1) 異常時対応能力向上プログラムの開発

列車運転シミュレータを用いた従来の訓練では、異常

時の環境的な側面（視覚、音、振動など）の模擬が重視され、運転士の心理状況の模擬は十分でなかった。訓練後に受験者（運転士）へフィードバックされる情報は、教師役（指導者）の主観的な評価が中心になりがちで、その客観化に向けた課題も残されている。このため、現役運転士の協力を得て、異常時における運転士の心理的な側面の模擬体験が可能で、かつ、運動作業や運転士の生理状態などを記録して客観的にフィードバックできる「異常時対応能力向上プログラム」を開発した。このプログラムは図3に示す5つのステップから構成される。これにより、運転操作情報とその際の生理的反応を関連づけて運転士にフィードバックすることができ、運転士自身の気づきを活用した教育効果が期待できる<sup>12)</sup>。

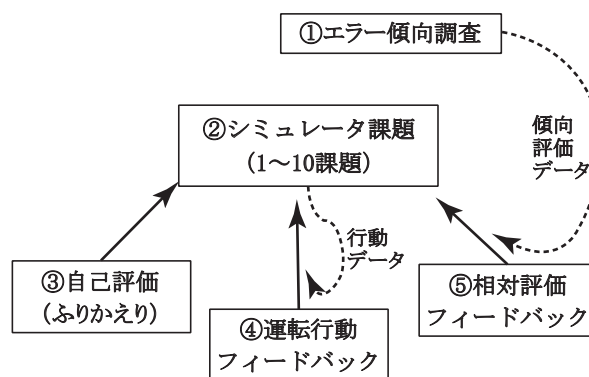


図3 運転士の異常時対応能力向上プログラムの構成<sup>12)</sup>

(2) 運転士のワークロード評価法の開発

実際の乗務時のデータ分析と列車運転シミュレータを用いた実験結果から、列車種別とダイヤ設定条件の影響、休養効果などを考慮に入れ、運転士の時々刻々の作業負担（ワークロード得点）を判定する新たな基準を提案し、ソフトウェア化した。これにより、乗務員運用に指定されている作業種別（本線運転、出入区、入換など）、休憩条件および各々の開始・終了時刻などから、運転士のワークロード変動を推定できる。シミュレーション結果の表示例（抜粋）を図4に示す。見直すべき行路や交番の抽出、事故防止の重点指導列車や休養管理の重点指導行路の把握への活用を想定している<sup>13)</sup>。

4.2 駅や車内における旅客の安全性向上

(1) 駅の旅客流動評価と避難誘導のシミュレーション

駅の旅客流動シミュレーションソフトは、すでに多くの

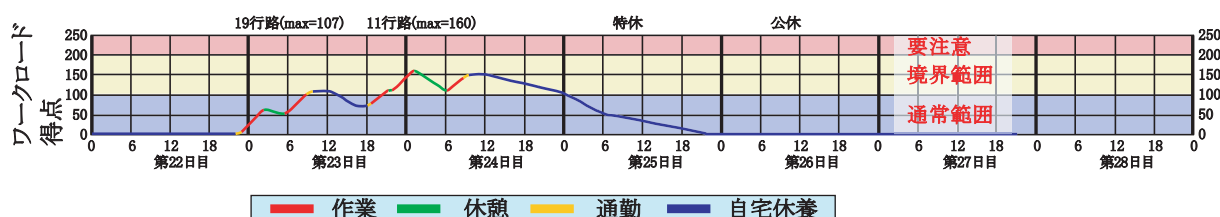


図4 乗務員のワークロードシミュレーションの結果表示例（抜粋）<sup>13)</sup>

## 特集：ヒューマンファクター

事業者に活用されているが、本研究では駅構内の歩きやすさを旅客の視点で数値化して評価できるように改良を加えた。実駅ホームで待ち行列や階段歩行実態を把握し、駅シミュレータを活用して歩行速度やすれ違いの影響を確認する試験を実施した。これにより、混雑状況と旅客が感じる歩きやすさの関係性を把握して、駅構内の歩きやすさ評価式を作成した<sup>14)</sup>。

また、旅客流動シミュレーションのノウハウを活用し、異常時の避難誘導シミュレーションの開発に取り組んだ。避難時の基本的な行動特性を把握するために、駅シミュレータを活用して一連の実験を実施した。例えば、停電を模した暗闇状態で光や音声による誘導の有無が、旅客の避難行動にどう影響するかを把握した<sup>15)</sup>。この結果を、実績の豊富な旅客流動シミュレーションに組み込み、避難シミュレーションのプロトタイプを開発した。

## (2) 衝撃時の身体挙動シミュレーション

踏切事故などで通勤列車が衝突した際の車内の乗客挙動を解析し、乗客の被害の程度を推定できる数値シミュレーション方法を開発した。通勤車両を剛体近似したモデルの中に、乗客を模擬した人体ダミーモデルを配置したもので、衝撃条件を入力すると、乗客の動きと被害程度を推定できる<sup>16)</sup>。正面衝突や追突に関する検討はこれまでも進めてきたが、今回は側面衝突についての検討を可能にした。これにより、傷害を引き起こす車内の原因を特定できるとともに、シミュレーションで対策を講じた場合の乗客の動きと被害の程度を予測することができ、被害対策の検討に活かすことが可能になる。

## 4.3 駅や車内における旅客の快適性向上

## (1) 駅空間の快適性評価

駅空間をさらに快適で過ごしやすい場としていくために、快適度の評価法開発に取り組んだ<sup>17)</sup>。例えば、駅の温熱環境シミュレーションの機能向上を図り、駅コンコースの温熱環境計算結果から PMV 分布を面的に表現できるようにした。なお、PMV とは ISO の定める温熱快適性指標で、環境側 4 要因（気温、放射温度、気流、湿度）などから算出できる。

## (2) 混雑時の乗り心地評価

従来の乗り心地評価法の中に、車内の混雑率の影響を考慮したものがないことから、通勤電車のブレーキ時の不快感に焦点をあてて、その影響を検討した<sup>18)</sup>。その結果、混雑率が 200% を超えると乗り心地が急激に悪化することを確認し、混雑率を考慮したブレーキ時の乗り心地（＝許容不可率）推定式を導き出した。

## 5. おわりに

本稿で概観したヒューマンシミュレーション技術の中には、実用化フェーズにあるものや、今後さらなる改良・

発展が必要なものが含まれる。この種のシミュレーション技術の発展には、人間科学、建築、車両、輸送情報、環境など、鉄道に関わる様々な技術分野の力の結集が必要である。引き続き実用的なヒューマンシミュレーション技術の開発・整備に努めたい。なお、本研究の一部は国土交通省補助金を受けて実施した。

## 文献

- 1) 鈴木浩明他：ヒューマンシミュレーション技術の鉄道への適用，RRR，Vol.67，No.6，pp.30-33，2010
- 2) 菰田弘他：内視鏡手術トレーニングにおけるバーチャルリアリティシミュレータ，外科，Vol.69，No.1，pp.54-59，2007
- 3) 金出武雄他：医療のためのデジタルヒューマン，日本情報処理学会誌，Vol.46，No.12，pp.1325-1330，2005
- 4) 道本徹：パイロットとシミュレータ，電気学会誌，Vol.117，pp.520-523，1997
- 5) 亀崎允啓他：双腕建機における操作技能トレーニング用シミュレータの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集（CD-ROM），2007
- 6) 山崎邦夫他：人体コンピュータモデル開発に関する自動車工業会の取り組み（インパクトバイオメカニクス研究），自動車研究，Vol.27，No.11，pp.655-660，2005
- 7) 上地幸一他：交通事故における傷害低減のための人体 FE モデルの構築，自動車技術，Vol.62，No.5，pp.34-39，2008
- 8) 日本火災学会：避難シミュレーションの現状とこれから，日本火災学会シンポジウム予稿集，2010
- 9) 渡辺公次郎他：津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発，日本建築学会計画系論文集，Vol.74，No.637，pp.627-634，2009
- 10) 持丸正明他：人に合わせるデジタルヒューマン研究，デジタルヒューマンシンポジウム CD-ROM，2009
- 11) 北村光司他：乳幼児行動の総合的理解のための乳幼児行動シミュレータ，第23回日本ロボット学会学術講演会，2005
- 12) 井上貴文：運転士の異常時対応能力向上プログラムの開発，第234回鉄道総研月例発表会講演要旨，2010
- 13) 澤貫他：運転士のワークロード予測手法の妥当性向上，鉄道総研報告，Vol.22，No.7，pp.11-16，2008
- 14) 山本昌和他：駅の歩きやすさを向上する，RRR，Vol.67，No.1，pp.27-30，2010
- 15) 石突光隆他：駅シミュレータを用いた避難行動特性に関する基礎研究，鉄道総研報告，Vol.22，No.7，pp.17-20，2008
- 16) 小美濃幸司他：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
- 17) 伊積康彦他：駅空間の快適性を向上する，RRR Vol.65，No.6，pp.30-33，2008
- 18) 小美濃幸司他：混雑と乗り心地の関係を探る，RRR，Vol.65，No.6，pp.26-29，2008