

特集：人間科学

鉄道における最近の人間科学研究

水上 直樹*

Recent Topics on Human Science for Railways

Naoki MIZUKAMI

The Human Science Division of the Railway Technical Research Institute in Japan, has been conducting research on prevention of human error and safety management as well as the measures for transport disorder and improvement of user environments in order to improve safety, convenience and comfort of railways. This paper outlines the recent accomplishments of the representative research on prevention of human error accidents and improvement of user environments.

キーワード：人間科学，ヒューマンエラー，安全マネジメント，利用環境改善，快適性

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道の従事員、利用者及びこれに関わるシステムなどを対象として、鉄道の安全性、利便性、快適性向上のための問題解決や対策提案を目指した研究開発に取り組んでいる。安全性向上の取組については、ヒューマンエラー事故や労災事故、踏切事故等の防止およびこれらに関わる安全マネジメント支援の研究開発がある。また、利便性、快適性向上の取組については、主に利用者を対象としたバリアフリー対策や衛生環境等の利用環境改善に関わる研究開発がある。

本稿では、この中から、ヒューマンエラー事故防止等に関わる運転士支援、安全マネジメントの支援、利用環境改善については、衛生環境や快適性の向上の取組について、また、鉄道事業者外の要素を主要因とする踏切事故対策についての研究開発の動向や最新の知見、今後の展望について紹介する。

2. ヒューマンエラー事故防止に関わる研究開発

鉄道従事員によるヒューマンエラー事故等の防止のため、個々人の教育訓練手法の開発、運転士支援システムの開発、および事故の再発・未然防止や災害時の対応等のマネジメント支援等に取り組んでいる。ここでは、代表的な最近の研究開発として、デジタル技術を活用した運転士の心身状態推定、および自然災害発生時の対応に関わるマネジメント支援の研究開発について紹介する。

2.1 運転士の心身状態推定の技術開発

運転中に覚醒レベルが大きく低下した状態（眠気）や、異常事象に遭遇した際の心理的動揺が、ヒューマンエ

ラーや事故につながらないように、運転士をモニタリングして支援するための研究開発に取り組んでいる。例えば、眠気を検知して警報を鳴らしたり、心理的にパニックになった場合に指令に通知してサポートすることを想定している。運転士のモニタリング技術には、運転士に対して非接触のタイプとセンサを装着して行うタイプがある。モニタリング可能な運転士の移動範囲や身体への接触感・拘束感等の点で違いがあり、鉄道総研では両タイプについて研究開発を進めている。前者のタイプとして、カメラで運転士を撮影し、画像解析技術により眠気や居眠りを検知する研究¹⁾²⁾があり、強い眠気に移行する前に、音声で警報を提示するシステムの開発に取り組んでいる。以下では後者のタイプである、生理指標を活用して過緊張と覚醒低下の心身状態を推定する手法に関する研究開発³⁾⁴⁾⁵⁾について紹介する。

これまで、簡易的な鉄道運転シミュレータを用いた実験において、多チャンネル高密度脳波計や心電図、運転行動等を同時に計測し、心理的動揺時の脳活動や自律神経指標について調べてきた。また、運転作業を抽象化した認知課題の遂行中に、突発的に音刺激を与えて心理的動揺を誘発させた際の生理指標と運転行動等との関係を調べた。これらの結果、異常事象発生時の実験参加者の行動と対応した前頭前野の脳活動や心拍数、呼吸および瞳孔径等の変化を捉えた。

これらにより、心理的動揺時の脳活動や自律神経指標の特徴的な変化が明らかになってきたが、将来的に運転士の心身状態推定を行う場合、運転席の電磁的なノイズ環境や計測の煩雑さから、脳波を指標に活用することは現実的でない。また、覚醒レベルの低い状態から、強く緊張している状態まで、幅広い範囲の心身状態を検出する必要がある。このため、緊張やストレス評価に関する先行研究の多い自律神経指標に的を絞り、安定性や測定の簡便さなど実用性の観点で、心拍と呼吸を用いて推定

* 人間科学研究部長

する手法の深度化を図った。一般成人を対象に、鉄道運転シミュレータを用いた実験を行い、運転に慣れるための習熟課題、線路内に支障物が現れる課題、運転に余裕時分がないタイムプレッシャー課題の3種の課題（運転）を行わせた。このうち、運転に慣れた後の試番の停車中の時間帯を非緊張区間とし、運転に慣れていない試番およびタイムプレッシャー課題での駅停車直前の時間帯を緊張区間として抽出した。推定に用いた指標は、心拍間隔（心電図ピークの時間間隔）、呼吸長（1回の呼吸の長さ）、副交感神経指標 RC（1呼吸ごとの呼吸性の心拍変動成分の最大値と最小値の差分）、心拍規則性（心拍間隔の規則性）、および呼吸規則性（呼吸周期の規則性）の5つとした。

これまで、生理指標は個人差が大きく、日常的な心身状態においては、定量化や判定が難しいと言われてきた。これに対して今回は、個人ごとに緊張・非緊張の状態推定に適した有効指標を選定し、事前に定めた変化の基準に従い、何れかの指標が「変化」に該当した場合に、緊張／非緊張状態が発生したとし、これを総合判定とする方法を提案した。本手法によると、緊張区間では緊張の判定、非緊張区間では非緊張の判定が多く出現し、10名の実験参加者で、誤判定率15%以下で両緊張状態を検出できた。本手法は、今後、実車で検証を行い、支援システムへの活用を考えている。

2.2 レジリエントな職場・組織づくりの支援

近年、自然災害の激甚化・頻発化が輸送の安全・安定性の脅威となっている。国においては、運輸事業者が取り組む運輸安全マネジメントの基本方針及びガイドラインに「自然災害対応」が明記され、防災体制の構築と実践を進める際に参考とするための「運輸防災マネジメント指針」が策定された⁶⁾。この中で、被害の最小化や災害後の早期復旧・回復のための職場の活動の充実、すなわちレジリエントな組織・現場づくりが求められている⁷⁾。レジリエンスとは、外乱に対する反応を適応させる能力と定義されるが、鉄道事業におけるレジリエンス評価の方法、準備のあり方は、明らかではなかった。

そこで、既存の職場の安全風土の評価手法^{例えは8)}をレジリエンスの視点で見直し、発生頻度が高い降雨災害時の対応の調査結果を踏まえて、災害時の早期回復のための職場活動を評価する手法の開発⁹⁾に取り組んだ。降雨災害への対応の実態について、安全かつ早期に回復するための対応、被害拡大防止のための対応等について、現場管理者に対してヒアリング調査を実施し、職場活動の評価項目の候補を作成した。次に、乗務員、土木、保線、電力、信号・通信、車両の各職場に対して、活動の実態調査をし、災害に備えた職場の活動を評価するための、職場管理者による25の評価項目（例えば、情報伝

達）と代表項目（例えば、普段からの情報伝達時の確認会話の実施）、また、現場社員による14の評価項目（例えば、判断基準の理解）と代表項目（例えば、災害対応のフローや判断基準のわかりやすさ）およびそれらの評価値の算出方法を定めた。この評価値と実際の災害時の対応¹⁰⁾の関連性を調べたところ、「結果的に当初の見込みよりも早く復旧できた」職場では、そうでない職場と比較して、評価項目のうち「災害対応後の振り返り」「リソース・情報の管理」「職場の安全風土」において評価値が高く、本評価値に妥当性があることを確認した。

また、職場活動の評価結果の提示方法と改善の程度との関係について分析し¹¹⁾、単に評価値を提示するだけでなく、低評価の結果についてのコメントを付加する方が改善の程度が大きいことがわかった。この結果をもとに評価結果の提示方法として図1に示すデザイン案を提案した。

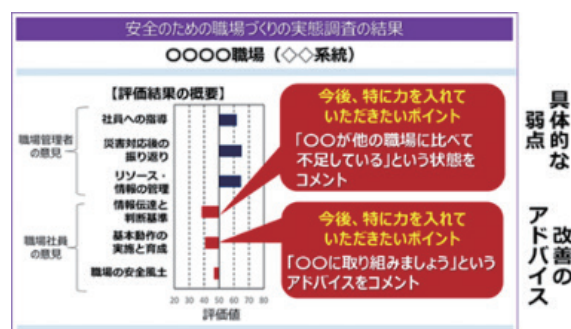


図1 評価結果の提示デザイン⁹⁾

3. 利用環境改善への取り組み

本章では、効果的・効率的な衛生環境の維持・改善策提案についての取組の一貫として、微生物の見える化手法の構築¹²⁾、また、快適性向上策を検討する際に活用する総合快適性の評価手法¹³⁾に関する研究開発について紹介する。

3.1 衛生環境改善の取り組み

車両や駅における環境衛生の維持・向上は、利用者と鉄道従事者の安全・安心や快適性の点で重要である。2017年に運輸安全マネジメント制度のガイドラインが改訂され¹⁴⁾、運輸事業者に期待される安全管理の一つとして、感染症対応の取組に関する記述が追加された。鉄道総研では、これに先立ち、鉄道環境における微生物の詳細な情報を得て、より効果的・効率的な清掃・消毒法の提案や抗菌・抗ウイルス素材導入における判断材料となる科学的エビデンスの提供を目指した研究^{例えは15)}に取り組んできた。今般の新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行を受け、公共交通機関の衛生環境に対する利用者の関心も高まってきている。

このため、遺伝子情報を用いてその場に存在する細菌

や真菌等の微生物の全体像（マイクロバイオーームと呼ぶ）を把握するマイクロバイオーーム解析技術等を活用して、鉄道環境における微生物を見える化する手法を構築した¹²⁾。本手法により、車両の設備表面や浮遊・堆積する塵埃等の微生物遺伝子の種類や割合を把握し、車内に存在する微生物の由来を解析したところ、人が直接手に触れる手すりやつり手には、人由来細菌の割合が多いことがわかった（図2）。感染者から排出される病原体は、通常、健康時に体内に生息する微生物とともに排出されると考えられ、本知見は、人由来微生物を指標とした環境のモニタリングにより、感染機会低減のために重点的に対応すべき箇所の抽出に活用できる。また、デジタルPCR等の遺伝子定量技術を用いて微生物の量をモニタリングして、メンテナンスサイクルの最適化等に繋げる取組みを進めている。

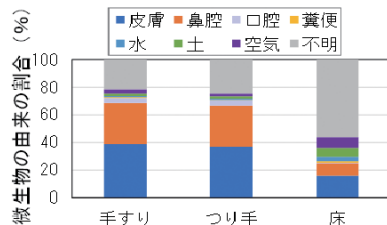


図2 微生物の由来の推定結果¹²⁾

3.2 快適性評価への新たな取組

従来の快適性の研究は、対象とする要因の快適性評価指標を提案し、改善策に活かすことが主なアプローチであった。近年のデジタル技術の進展を踏まえ、鈴木らは、快適性の維持・向上に関する取組みをステップアップし、①快適性の影響要因のデジタルデータ化とネットワークを通じたデータ収集、②データ分析により、快適度をデジタルモデルで再現し、状況を把握・予測、③より快適度を高めるための対応を判断、④的確な環境の自動制御、という一連のサイクルを提案している¹⁶⁾。例えば、駅や車内の温熱環境は、気温、湿度、輻射熱、気流、混雑度等によって逐次変化する。これらを的確に分析・予測して、最適な温熱環境を実現するのが「デジタル化による温熱快適性制御」である。車内の温熱環境は、従来、車掌等が行ってきたが、よりきめ細かなサービス提供や将来の無人運転列車の運行を想定すると、デジタル技術導入による自動制御が不可欠である。また、これまでは駅や車内など個別領域ごとに快適性向上を検討することが多かったが、利用者の側からすれば、鉄道利用の計画から、乗車・乗り換え、および目的地に到着するまでの一連の体験の様々な要因が鉄道利用時の快適性や満足感に影響する。従って、個々の快適性要因の制御・改善により効果的に快適性を向上し、鉄道の優位性を高めるには、総合的な快適性に結び付く旅客の評価構造を明らかにす

る必要がある。このため、旅客の移動体験における総合快適性と各移動局面の快適性の関係について調べた。

利用者の属性と利用目的別に6つの代表旅客を設定して、先行知見から予測される快適性要因を洗い出し、旅客の移動体験の快適性について、COVID-19が拡大する前の2020年2月にWEB調査を実施した。この結果を踏まえ、総合快適性を説明する評価指標原案の評価構造モデル（図3）に重回帰モデルを採用して、各移動局面の快適性から移動体験の快適性を約7割説明できることを確認した。また、COVID-19の拡大の影響を受けた11月の調査結果においても、作成した評価指標原案は同様の推定精度を示し、総合快適性を安定して推定可能なことを確認した。これにより、総合快適性への寄与率が高い快適性要因に対する対策を効率的に講じることが可能になると考えられる。また、総合快適性と個別の快適性要因の概念図を作成した。今後は、俯瞰的視点から、人間の生理心理的な特性を踏まえた環境制御のデジタル化の研究を推進する。

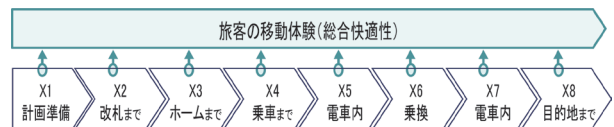


図3 移動体験の快適性と各移動局面の快適性の評価構造モデル（重回帰モデル）の概念図¹³⁾

4. 踏切警報中の歩行者の進入防止への取組

本章では、踏切事故対策に関する各研究開発¹⁷⁾について紹介する。踏切事故において、歩行者による事故の割合（2015年度から2018年度）は約4割を占め¹⁸⁾、歩行者対策は、踏切事故を減らす上で重要である。歩行者による踏切事故の77%が直前横断（警報中の進入）を原因とする¹⁹⁾ことから警報中の踏切進入抑止に取り組んだ。まず、踏切歩行者は警報音の意味をどのように理解しているかについてインターネット調査を実施したところ、警報鳴動中に進入し、遮断完了までに踏切から出られず取り残された経験のある人の6割が、本来「進入禁止」を意味する警報を「注意」と認識していることがわかった。そこで、警報鳴動中に聴覚情報で「進入禁止」を伝える音声メッセージの追加策と、視覚情報でこれを伝える遮断かんの降下開始の早期化を提案した。音声メッセージは「危険です。踏切に入らないでください」とした。遮断かんの降下の動きは、警報の鳴動開始から遮断開始までの時間を短縮する代わりに、進入側遮断かんの降下速度を遅くし、進出側遮断かんの降下速度は変更しないことで、降下完了のタイミングを現行と同じとした。

音声メッセージ追加の効果検証のため、踏切通行を模

擬したシミュレータ実験を実施した。実験参加者は、踏切に接近中に警報が鳴動するCG映像を見て、踏切手前で停止するか進入するかを手元のコントローラーで選択する。この結果、音声メッセージ追加により、警報鳴動中に進入する歩行者の割合が、現行条件より25%減少することを確認した。

遮断開始の早期化の効果検証についてもシミュレータ実験を行った。警報鳴動開始から遮断開始までの時間は、本実験で設定した横断線路が2本の場合に基準とされている4秒を現行条件として、早期化条件では2秒とした。比較のため2秒延長した遅延条件も設定した。この結果、図4のように遮断開始タイミングの早期化は、警報鳴動中に進入する歩行者を現行より64%減らす効果があることがわかった。

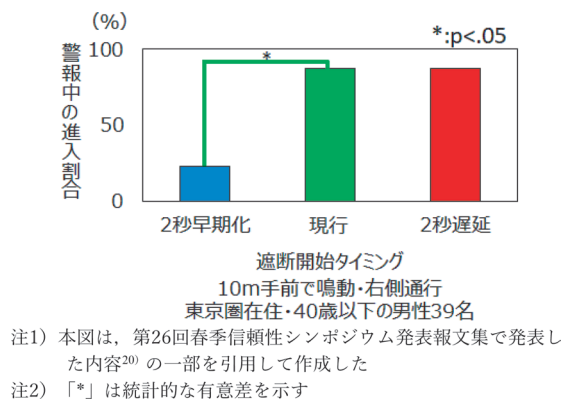


図4 遮断開始の早期化による警報中の進入割合¹⁹⁾

5. 今後の展望

本稿では、最近の人間科学研究のうち、安全性向上と利用環境改善に関わる研究開発について代表的なものを紹介した。最初に紹介した運転士のモニタリングについては、今後、ウェアラブルデバイスを活用した生理指標の計測技術を構築し、現車での検証を実施し、システム提案につなげる。レジリエントな組織・現場づくりの支援については、鉄道事業者への成果・知見の活用促進を図っていく。微生物を対象とした環境衛生の維持・向上策については、今後、様々な微生物の量を定量化するなど、衛生環境のデジタル化の深度化を図り、より効果的・効率的な清掃・消毒方法等の提案につなげる。

音声と遮断開始タイミングの変更による警報中の踏切進入抑止については、文言や早期化の程度を変え、進入防止効果が最大となる組合せについて調べる。

これからも、鉄道事業者のニーズを踏まえた、鉄道の安全や快適性の維持向上に貢献できるヒューマンファクター研究を進めていく所存である。

文 献

- 1) 水上直樹他：運転士の支援に向けた眠気検知手法の開発，鉄道総研報告，Vol.33，No.1，pp.11-16，2019
- 2) 星野慧他：単調作業時の覚醒レベル低下防止のための警報音デザインと警報音の覚醒効果の検討，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2021，2021
- 3) 中川千鶴他：生理指標を活用した運転士状態推定の基礎的検討，鉄道総研報告，Vol.33，No.1，pp.5-10，2019
- 4) 中川千鶴他：フィールド適用に向けた心拍と呼吸計測による心身状態の推定，人間工学，Vol.57，Supplement 号，2G2-02，2021
- 5) 中川千鶴他：生理指標を活用した運転士の心身状態の推定，鉄道総研報告，Vol.36，No.1，pp.11-16，2022
- 6) 国土交通省大臣官房運輸安全監理官：運輸防災マネジメント指針—自然災害への対応に関する運輸安全マネジメント—，2020
- 7) 小松原明哲：運輸安全マネジメントの今日的課題，運輸業の安全に関するシンポジウム，2017
- 8) 宮地由芽子他：職場の安全風土評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.9，pp.23-28，2009
- 9) 宮地由芽子他：レジリエンスの実現のための職場活動評価手法，鉄道総研報告，Vol.36，No.1，pp.5-10，2022
- 10) 宮地由芽子他：鉄道における災害対応行動の組織的学習支援，人間工学，Vol.57（Supplement），2021
- 11) 宮地由芽子他：現業管理者のコミュニケーションスキル評価手法，鉄道総研報告，Vol.31，No.11，pp.5-10，2017
- 12) 吉江幸子他：マイクロバイオーーム解析を用いた列車内の環境衛生評価のための基礎研究，鉄道総研報告，Vol.36，No.1，pp.23-28，2022
- 13) 中川千鶴他：カスタマーエクスペリエンスに基づく鉄道における総合快適性の評価，鉄道総研報告，Vol.36，No.1，pp.17-22，2022
- 14) 国土交通省大臣官房運輸安全監理官：運輸事業者における安全管理の進め方に関するガイドライン—輸送の安全性の更なる向上に向けて—，2017
- 15) 川崎たまみ他：駅構内の空気質に与える微生物の影響評価，鉄道総研報告，Vol.22，No.5，pp.35-40，2008
- 16) 鈴木浩明他：鉄道利用者の快適性に関わる研究の現状と課題，鉄道総研報告，Vol.34，No.1，pp.5-7，2020
- 17) 鍋木俊暁他：音声と遮断開始タイミングによる踏切警報中の歩行者の進入防止策，鉄道総研報告，Vol.36，No.1，pp.35-40，2022
- 18) 鉄道：鉄軌道輸送の安全にかかわる情報の公表について - 国土交通省（平成19年度～平成30年度）
http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk8_000001.html
（参照日：2021年9月10日）
- 19) 鍋木俊暁：音声メッセージと遮断開始タイミングによる踏切警報中の歩行者の進入防止，第346回鉄道総研月例発表会，2021
- 20) 鍋木俊暁他：予告時間の短縮による踏切鳴動後の進入抑止効果の実験結果，日本信頼性学会 第26回春季信頼性シンポジウム発表報文集，pp.65-68，2018