

ヒューマンエラーを防ぐ人間科学研究への計測技術の活用

人間科学研究部長
小美濃 幸司



1. はじめに

鉄道が安全・安心であるためには事故を起こさない継続的な取り組みが重要であり、鉄道の事故の原因としてしばしばとりあげられてきたヒューマンエラーの対策は、特に重要な課題の1つである。このため、これまでもヒューマンエラー対策として教育訓練、業務管理、ハード対策、環境整備などさまざまな対応が取られてきている。ただし、安全・安心を維持していくためには、これまでの取り組みを継続していくとともに、より高いレベルの安全・安心を目指した努力が欠かせない。

そこで鉄道総研では、人間科学的観点からエラーを減らす、また、エラーが起きても事故につなげないための新たな対策や改善提案を目指した研究開発に取り組んでおり、本稿では、鉄道事故のリスクが大きいヒューマンエラーとして運転作業のエラーを取り上げ、安全スキル向上の教育訓練などの成果について紹介する。さらに、近年進展が著しいICTの要素技術である生体計測技術を活用した運転士支援の研究開発の方向を述べる。

2. 鉄道のヒューマンエラー

2.1 重大運転事故にみる運転作業のエラー

鉄道運転重大事故記録¹⁾の記載を基に1987～2010年度の重大運転事故80件の主たる原因の割合を整理すると、運転作業のエラーが全体の1/3 (21件) 以上を占めており、部内要因 (鉄道側の要因) に限ると3/4を占めている (図1)。その内訳をみると、信号冒進・信号確認未実施が6件と最も多い (表1)。その他の部内要因も、駅係員の代用閉そく取扱誤り、保守作業取扱誤り、整備不良などヒューマンエラーとみなされるものが多いが、運転作業のエラーはそれらの3倍以上を占めていることから、特に重大事故につながる危険なエラーといえる。

2.2 ヒヤリハットにみる運転作業のエラー

図2は、ある鉄道事業者で5年間に収集された事故やヒヤリハット報告7963件の分析から抽出されたヒューマンエラー1503パターンについてのリスクマップである²⁾。図の横軸はヒューマンエラーパターンで想定さ

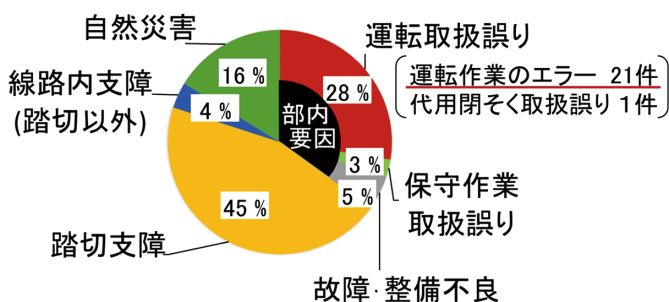


図1 重大運転事故80件の原因の割合 (1987～2010年度)

表1 重大事故にみる運転作業のエラーの内訳 (件)

信号冒進・信号確認未実施	6
速度超過	4
不適切なブレーキ操作	3
無閉塞運転取扱誤り	2
車両故障対応誤り	2
前方不注意	1
停車駅通過	1
列車防護手配誤り	1
意識欠如	1

注)1987～2010年度重大運転事故の運転作業エラーに関わる21件を対象 (図1 参照)

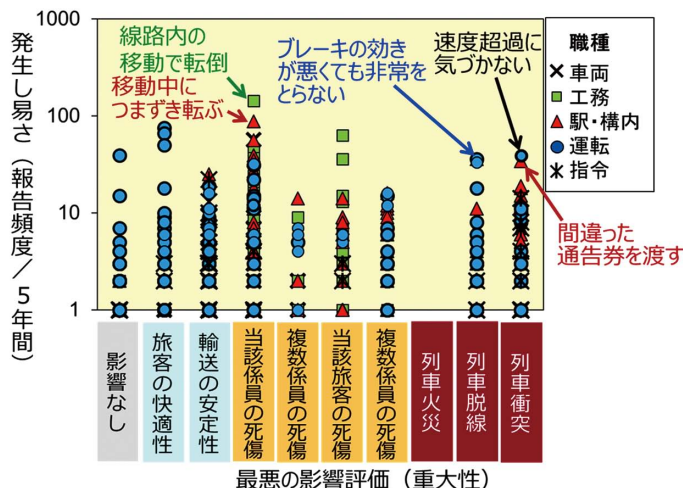


図2 ヒヤリハット報告のヒューマンエラーリスクマップの事例²⁾

れる「最悪の影響評価」、縦軸は発生頻度であり、右上にプロットされたヒューマンエラーパターンほどリスクが高い評価となる。この中には「ブレーキの効きが悪くても非常をとらない」「速度超過に気づかない」などの運転業務のエラーのリスクが高いことがわかる。

ヒューマンエラーは事故の原因であるが、一方でヒューマンエラーを引き起こす誘発要因があり、その意味ではヒューマンエラーは結果であり、その原因である誘発要因に対して対策を打つ必要がある。たとえば、同じ「減速タイミングの遅れ」というエラーであっても、眠気があってうっかり減速が遅れた場合と、遅延を回復しようという意図から減速が遅れた場合では、心理的メカニズムが違うため、適切な対策が異なる。そこで鉄道総研では、ヒューマンエラーの背景となる誘発要因を分析する「鉄道総研式ヒューマンファクター分析法」^{3),4)}を開発し、これまで多くの事業者に活用されてきた。

今回、運転作業に関わる約200件のトラブル事例について分析し、187パターンのヒューマンエラーとその誘発要因を33抽出し、さらに共通の対策が考えられる誘発要因を1つにまとめて整理した15項目を、「エラー対策に求められる課題」とした⁵⁾(図3)。また、「エラー対策に求められる課題」に対応するすべてのエラーのリスクと誘発要因の頻度の積を指標として、その課題の対策の優先度を評価した。その結果、「注意の逸れ」「雑念」「焦り」といった誘発要因によって発生する「異常時という場面に気づかない」エラーに対する「システムによる警報などのバックアップ」や、「低頻度の手順」「手続きの変更」「環境の変化」による「取

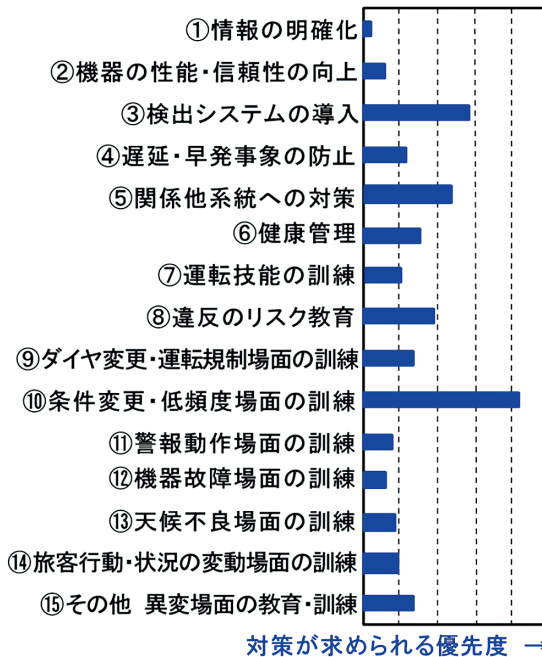


図3 運転作業のエラー対策に求められる課題と優先度の事例⁵⁾

扱い誤り」エラーに対する「異常場면을模擬した教育・訓練」が対策の優先度が高かった。

2.3 異常時の運転作業のエラー対応の課題

以上、重大事故やヒヤリハット情報の分析から、運転作業のエラーのリスクが高く、特に、異常時にそのエラーが起きやすく、事故に発展するリスクが高いと考えられる。さらに、今後、技術の進歩により鉄道システムの自動化が進むと、ヒューマンエラーの低減が期待される一方、残された課題として、運転士にとって自動化しきれない想定外の異常時対応の重要度が高くなることが想定される。このようなことから、今後の鉄道の安全性向上を考えるうえで、異常時の運転作業のエラー対応が重要課題といえる。

運転作業における主な異常時として、車両などのシステム異常、心身の異常、線路内・沿線の障害物、自然災害が考えられ、こうした異常時に対して、エラーの発生を減らし、エラーを事故に繋げないためには、2.2節の分析を踏まえると「異常時の対応スキル向上」と「異常を検知してバックアップ」することが必要である。そこで、現在、鉄道総研では人間科学の視点から「異常時の対応スキル向上」として「異常を見落とさないスキル」や「経験のない事態の判断対応」のための教育訓練手法の研究開発に取り組んでいる。また、「異常を検知してバックアップ」する対策として「車両、沿線状態

の異常や自然災害の対応の支援システム」「運転士の心身の異常の検知」手法の研究開発に取り組んでいる。

3. ICTの活用—人を測る技術—

人の生理（神経、循環器、筋などの活動）、視線や瞬きなど、人の機能や形態を測ることを生体計測と呼んでいるが⁶⁾、最新の技術を活用する工夫を行うことで計測自体を意識させずに測定することができ、エラー検知のみならず、エラーを起こしやすい状態をとらせることが期待できる。なお、本稿では、生体計測の中において、生理的な測定に限る場合には生理計測と呼ぶことにする。

鉄道分野において当初、主に医学適性検査や健康診断に心電図や脳波などの生体計測技術が使われてきたが、1960年代頃から人間科学分野にも応用され、脳波、心拍、フリッカーテストなどはそれぞれ緊張度、脳活動、覚醒度を測定するために早い時期から活用され始めた（図4）。また、近年では脳波計の技術が進歩するとともに、MRI、光トポグラフィーなど多くの脳活動計測技術が開発され、本人もわからない脳内の情報処理活動が、非侵襲で測定できるようになってきた。鉄道総研では、こうした生体計測を活用して運転作業のエラー対応の課題解決を目指しており、そこで積極的に活用していこうとしている視線計測と脳活動計測について紹介する。

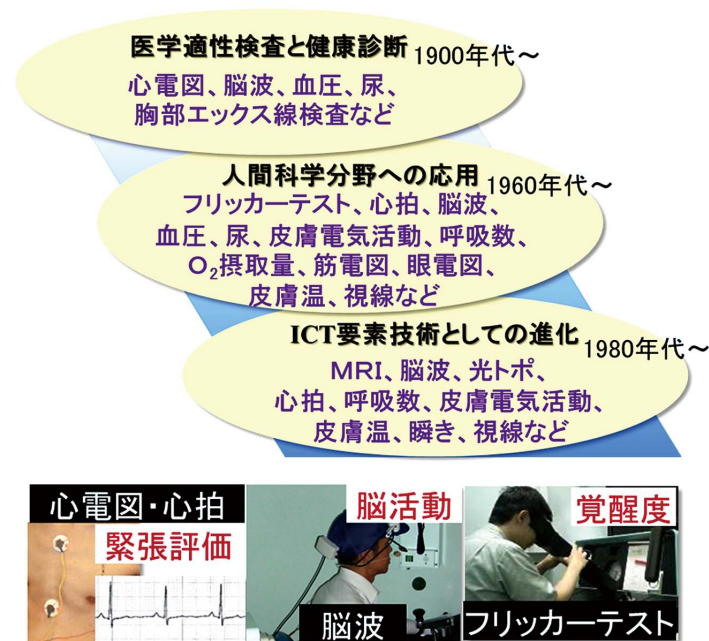


図4 生体計測の活用の歴史

3.1 カメラによる視線検知と注視点推定

運転作業で最も重要な作業として、前方監視や信号確認などの目視による確認作業があげられる。重大運転事故にみる運転作業のエラーの内訳（表1）からも、これらの確認のエラーがしばしば重大事故に繋がっており、前方監視や信号確認の重要性が理解される場所である。

このため、運転士が何を見ているか、何を確かしているかということは、運転作業のエラー対策を考えるうえで極めて重要な情報である。たとえば、運転シミュレータを活用した異常時対応能力向上訓練において、運転士の注視点のデータがあれば、振り返りの指導で確認の動きのチェックに有効であると考えられる。

近年、こうした目の動きはカメラでとらえられるようになってきている。カメラによる視線検知装置としては大きく、ウェアラブル型と非接触型の2種類がある。ウェアラブル型の特長としては、直接、視線方向を計測するため、比較的、検知精度が高い。ただし、眼鏡を使用している方には不向きであり、装着感が生じるといった影響がある。一方、非接触型は運転台などに取り付けるため、装着感などの不必要な感覚は生じない。ただし、顔画像から両眼を抽出して視線を推定するため、ウェアラブル型に比べ、精度が劣る傾向にある。どちらの型にも一長一短があり、現状では目的や環境条件に応じて使い分ける必要があるが、いずれの場合においても、運転訓練の指導などで活用するために、さらに視線から運転士がみている前方映像上の注視点を推定している。

また、近年ではカメラの顔画像からまぶたの開眼度を推定する技術が開発されており、すでに自動車分野で居眠り検知装置として活用されている。この技術は鉄道にも応用が期待される場所であり、鉄道総研ではその技術を眠気検知（居眠り直前の眠気の検知）の研究開発に活用して取り組んでいる場所である。

3.2 脳活動計測技術

100年以上前から脳の機能局在は知られていたが、近年の脳活動計測技術の進歩に伴い、局在する部位と機能の関係がより正確に、詳しく分かってきている。これまで、運転作業のミスにつながる自覚できない影響を測定することは難しかったが、こうした脳活動計測技術を活用することで、特定のヒューマンエラーに陥りやすい脳活動（心身の状態）がモニタリングできる可能性がでてきている。モニタリングで得られた知見は、教育訓練方法の検討や、運転作業のバツ

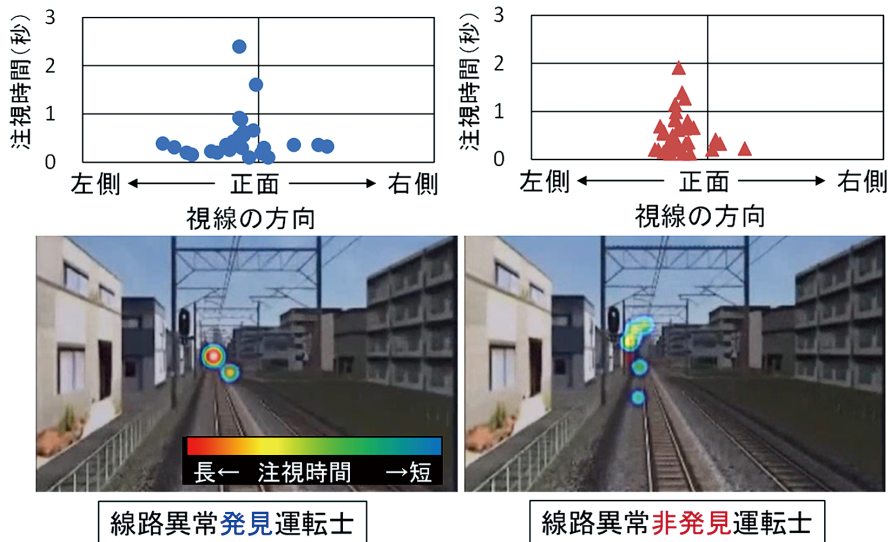


図5 運転シミュレータ訓練の注視点データ(上段)と可視化(下段)

クアアップシステムの検討に役立つことが期待される。そこで、2つの代表的な脳活動計測技術、脳波と機能的磁気共鳴画像法(fMRI)についてその特徴を簡単に述べる。

脳波計は頭皮表面にセンサーを付けて大脳皮質の活動を測定する技術である。脳波計の特長として、時間分解能が高く、リアルタイムで脳活動がわかることがあげられる。現在、大脳皮質活動を100ch以上の多点で計測できるもの(高密度センサー脳波計)が開発されて空間分解能も向上し、より脳局在機能に対応した情報が得られるようになってきた。

fMRIはMRIで測定した脳構造の上に機能活動を重ねて画像化する技術である。fMRIの特長として空間分解能が高く、深部まで局在的な脳活動が測定できることがあげられる。ただし、頭部を拘束し、大型設備MRIの中で測定する必要があり、リアルタイムでの測定はできないなど制約も多いため、人間科学分野では主に基礎研究で活用されている。

4. 運転作業のエラー対策への生体計測応用

鉄道の安全の維持向上のためには、異常時の運転作業のエラー対策がポイントであることを述べた。最新の生体計測技術を活用することで、運転士自身では意識して回避することが難しいエラーに対して、エラーが起きている、あるいは、エラーの前兆の心身の状態をとらえられる可能性があると考えている。ここでは、こうした技術を活用してさらにレベルの高い安全を目

指した研究開発として「異常時対応スキルの向上のための安全教育」と「心身の異常を検知するシステム」の取り組みと今後の方向について述べる。

4.1 異常時対応スキル向上のための安全教育

鉄道事業者ではヒューマンエラーを防ぐスキルの維持、向上を図るため、さまざまなエラー防止教育に取り組んでいる。スキルのレベルを維持させるためには常に訓練内容の改善に努める必要があるが、その改善に苦心している事業者も多いのが実情である。鉄道総研ではその支援として訓練方法やその教材の開発に取り組んでいる。

スキルには、専門職それぞれに必要なテクニカルスキルとそれを支えるノンテクニカルスキルがある。ノンテクニカルスキルには、意思決定、コミュニケーション、状況認識等が含まれ、安全上の重要な研究課題として近年注目されている。ここでは、テクニカルスキルを向上する手法の例として「視線検知機能を活用した運転シミュレータ訓練」⁷⁾を、ノンテクニカルスキルの例として「脳機能に基づく意思決定スキル訓練手法」⁸⁾について紹介する。

課題として挙げている異常時の運転作業のエラーを低減するスキル、特に目による確認で異常を見逃さないスキルを向上するための「視線検知機能を活用した運転シミュレータ訓練手法」について紹介する。

異常時、特に自身のエラーが関係する時に、更なるエラーを引きやすい心理状態に陥り易くなっている。運転シミュレータを使った異常時対応能力向上訓練はその1つである⁹⁾。特に、前方確認は運転士の重

要な作業の1つであり、視線データは訓練の振り返りに非常に有効と考えられ、視線検知機能を活用した運転シミュレータ訓練の研究開発に取り組んでいる。まずは、異常を見逃さない視線の動きを調査するために、「ATS地上子が故障」という通告を受取り、この先さらに隣接線が陥没しているという異常事態が重なるというシナリオで、シミュレータ訓練を実施した。この場合のその線路の異常に気づきやすい視線の動きと、そうでない動きのパターンが分かかってきており、陥没に気づいた運転士は注視点の移動範囲が広く、特に前方注視の時間が長い(図5上段)。こうした知見を踏まえて運転の振り返りができれば効果的であるが、この研究ではさらに、どのような情報の形でフィードバックするのがよいのかを検討している。図5下段はフィードバックの1例であり、注視点の動きを画像で可視化することが有効と考えられる。

今後の課題としては、直感的に気づきを促す最適な可視化方法と、視線検知システムの精度向上があげられる。

危機管理の観点から、近年ではこれまで想定外とされてきた事象も想定する取り組みや研究が進められている。こうした特別な状況下での危険回避、事故対応などで鉄道従事員は負荷の高い精神状態にあり、判断誤りを起こしやすい状況にあるといえる。一方、通常の作業においても、ちょっとした確認を省略して、判断誤りを犯す場合がある。両者の判断誤りの原因は異なると考えられるが、背景にはそれぞれ判断を偏らせる認知的要因があり、判断の偏りを起こしにくくできる何らかのスキルがあるものと考えている。そこで

偏った意思決定に陥らないためのスキルを見出し、身につけるため、その評価手法の開発に取り組んでいる。

まず、脳活動の解明を通じて意思決定に偏りが生じる過程を説明できるモデルの提案と、モデルに基づいた作業課題を開発する。その作業課題を活用して意思決定スキルの評価手法を開発する。最終的な成果として意思決定スキルの教育訓練手法を目指しており、訓練効果評価にこの評価方法を活用する予定である。

現在は、最初のステップの意思決定を偏らせる作業課題の開発に取り組んでいるところである。一度下した判断への固執が生じやすい場面で、再判断を行う作業課題(図6左)はその1つである。判断の難しいシナリオと2つの選択肢が提示され、どちらかを選択すると、もう一方の選択を選ぶ方がよいと思われる情報が追加される。そこで、再び同じ選択を求められる課題である。例えば、「トンネル内で列車が脱線しました」という状況で、「A:車内で待機する」を選択すると、「お客様の一部が車外に避難しました」という情報が提示され、再度選択が求められる。この時、fMRIで確認すると角回という意思決定関連の脳領域が活性化していることが確認された(図6右)。今後は、適切な判断をしているときの脳活動パターンを特定し、その領域が活性化するスキルの開発を進めて行く。

4.2 心身の異常を検知するシステム

リアルタイムで人を測り、心身状態を推定し、早期に異常を検知、警告するシステムを目指している。ここでは「顔画像を活用した運転士の眠気検知システム」¹⁰⁾と「生理指標を活用した運転士心身状態のモニ

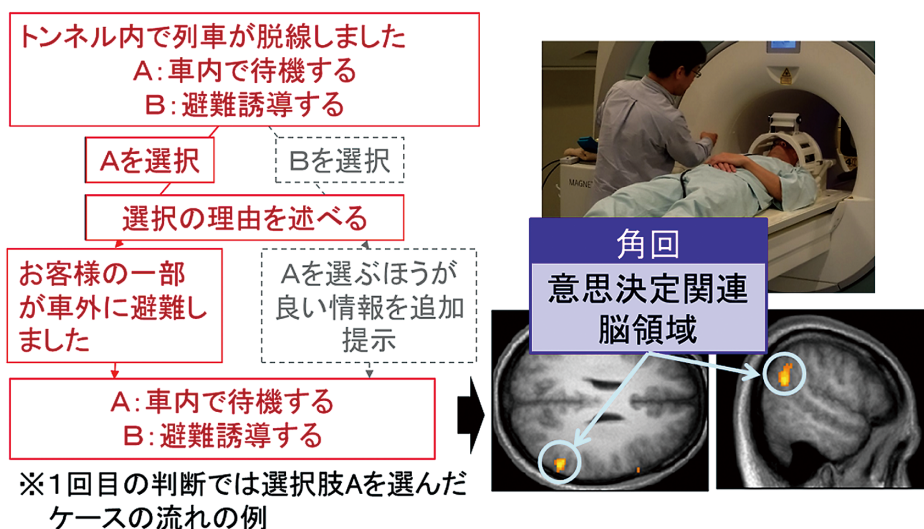


図6 作業課題(左)と意思決定時のfMRI画像(右)

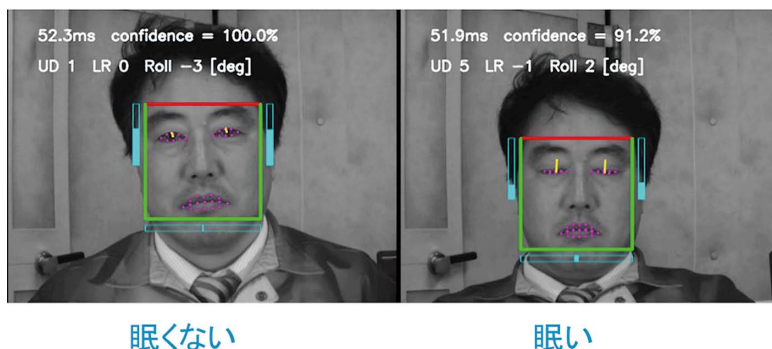


図7 画像解析技術を活用した眠気推定

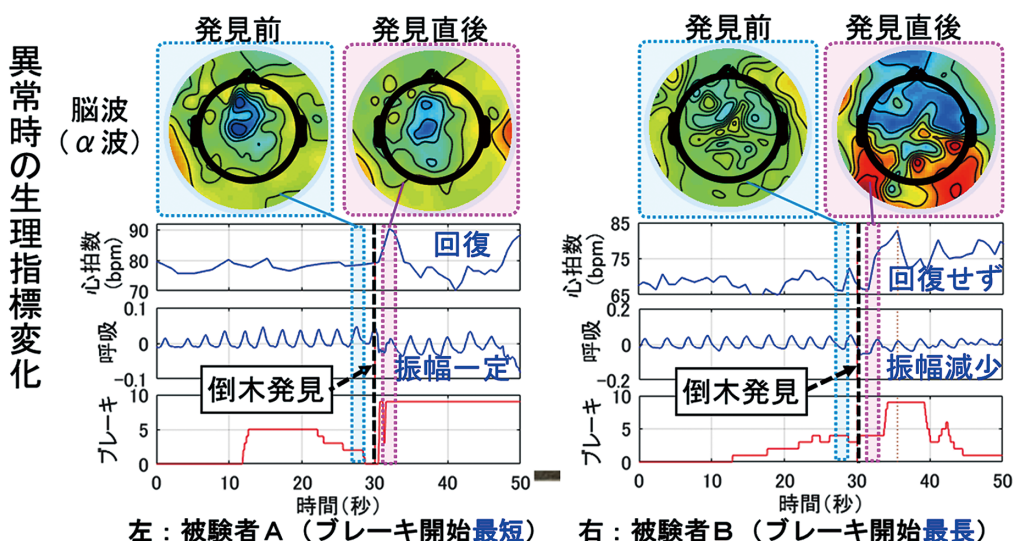


図8 異常発見時の脳活動と心拍・呼吸に現れる変化

タリング手法」^{11),12)}の研究開発について紹介する。

居眠り検知装置はすでに自動車分野で商品化されているが、鉄道総研では鉄道にこの技術に応用することを考えている。ただし、目指すところは居眠りだけでなく、その前兆である強い眠気を検知し、警告を発出するシステムを目指している。その際、営業運転を意識し、画像解析技術の活用により、検知のために動きを拘束したり、運転士に負担がかかったりせず、また、目立たず、意識させない小型カメラの活用を考えている。

図7は、最新の画像解析によりカメラ画像からまぶたの開眼度を推定し、眠気の強さを判定する試みの1例である。顔わきの水色のバーが長いほど開眼度が大きいことを示している。夜間時間帯など眠気を催す環境下でのシミュレータ実験を行い、そのデータを基に開眼度を含む15種類の画像特徴量を使った眠気推定式を提案している。

まだ、西日などの影響や、また、自動車と違いシー

トベルトなどの姿勢の拘束が少なく、体の動きが多いことなど課題は多く、さらに高度な認識技術が必要であり、これらの解決に取り組んでいるところである。

生理指標を活用した運転士心身状態モニタリングの研究開発の運転支援のイメージとしては、個々の運転士データから良好な状態を学習した上で、逸脱を検出し、教育訓練や指導にその情報を活用したり、あるいはその情報を検知したときに列車を自動停止させたり、指令に知らせて対応したりできるもので、まず、そのために必要な心身状態モニタリング手法の開発を目指している。システム開発に必要な、運転状態の推定手法における課題として、「生理指標を活用した運転士の心身状態の推定法」と、「運転席における非拘束計測方法」の開発があげられる。現在は、その基礎研究に取り組んでいるところである。近年の計測技術向上により脳波でリアルタイムに直接脳活動がモニタリング可能になってきており、脳活動を心拍、呼吸などの

簡易な測定 of 生理指標に対応付けて実用化していくことができるものと考えている。

図8は、簡易な運転シミュレータで運転している状態の脳波、心拍、呼吸を計測している様子である。運転のシナリオとして、突然、運転中に倒木が目の前に出現する異常事態とし、的確に非常ブレーキを引くことができるかをみる内容であった。図8左がブレーキを最短で引くことができた被験者Aのデータであり、右がブレーキを引くまでに最も長い時間を要した被験者Bのデータである。グラフ内に黒の点線で示された時刻が倒木に気が付いた時点を示しており、その上段は脳波の α 波を示しており、青い状態ほど α 波が減衰して過緊張にあることを示している。被験者Bは、発見後、特に前頭部 α 波が減衰し、過緊張状態であり、呼吸も浅くなっている。このように脳波で異常な脳活動がとらえられるとともに、心拍数や呼吸波形においても対応した変化がみられることから、さらに生理計測データを蓄積して心拍と呼吸を組み合わせ心身の逸脱判定ができる指標を検討していく予定である。

5. 安全・安心のためのヒューマンエラー対策へのICT活用

本章ではここまで述べてきた内容を整理して、本稿のまとめとする。

運転作業のエラーは重大事故につながる課題であり、ヒューマンエラーの低減対策と、起きても事故に繋がらない対策が必要である。現在、鉄道事業者では、運転作業のエラー対策として運転環境の整備、事故に繋がらないバックアップ装置、適性検査、教育訓練など多重の対策を実施してきている。

一方、リスクの高い運転作業のエラーの特徴として、「異常に気が付かない」「普段と違う状況で起きやすい」などが課題として残っており、さらなる鉄道の安全のためには、異常時の運転作業のエラー対応が今後の課題としてあげられる。人間科学の観点から鑑みると、その対策の方向としては「異常時対応スキル向上」「運転士の心身の異常の検知」が考えられ、近年の技術の進歩により、ICT要素技術である生体計測技術の活用により課題解決の可能性が見えてきている。特に、運転作業のエラーを考えた場合に、カメラによる視線検知技術、脳活動計測技術の活用が期待される。

まず、異常時対応スキル向上の研究開発として、さらなる確認スキル向上を目指し、異常に気づくスキルを身につけるため、シミュレータ訓練への注視点デー

タ活用手法について紹介した。また、異常時の判断スキル向上のため、脳活動データに基づき、偏った判断を防止するスキルを身につける教育訓練手法を目的とした、意思決定スキル評価手法について紹介した。

運転士の心身の異常の検知の研究開発として、運転士に負担をかけず、意識をさせることなく、心身の異常を検知するカメラ顔画像を活用した居眠り運転警告システムと、運転士の心身異常を素早く検知する自律神経センサーを活用した心身異常モニタリング手法の基礎研究について紹介した。

以上、運転作業のエラー対策の課題と研究の重要性、取り組むべき方向、それに向けた現状の取り組みと今後の課題などについて述べてきた。これらを踏まえ、鉄道総研ではICT技術の1つである生体計測技術を活用し、異常時の運転作業での教育訓練や、身心異常を検知するシステムの研究開発により、さらなる鉄道の安全・安心への貢献に向け、ヒューマンファクター研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 日本鉄道運転協会編：重大運転事故記録・資料（復刻版），日本鉄道運転協会，2013
- 2) 宮地由芽子他：ヒヤリハット情報を用いた安全管理支援手法，鉄道総研報告，Vol.30，No.9，pp.5-10，2016
- 3) 宮地由芽子：職場安全管理の改善に向けたヒューマンファクター分析手法，鉄道総研報告，Vol.21，No.5，pp.11-16，2007
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道総研式ヒューマンファクター分析法マニュアル[初級編]，鉄道総合技術研究所，2017
- 5) 宮地由芽子，柴田徹：背景要因を考慮した運転作業エラーのリスク評価手法の開発，宮地他，鉄道総研報告，Vol.23，No.9，pp.17-22，2009
- 6) 富田豊：生体計測の考え方，バイオメカニズム学会誌，Vol.34，No.4，pp.305-307，2010
- 7) 鈴木大輔，山内香奈：シミュレータ訓練における運転士の注視行動と異常事象の発見，運転協会誌，Vol.60，No.1，pp.11-14，2018
- 8) 北村康宏他：判断ミス防止訓練に向けた意思決定課題の基礎的評価，鉄道総研報告，Vol.31，No.11，pp.17-22，2017
- 9) 小美濃幸司，遠藤広晴：運転士の異常時対応能力向上プログラムの実用化，鉄道総研報告，Vol.27，No.3，pp.17-22，2013

- 10) 佐々木君章：知能列車による安全性・信頼性向上, RRR, Vol.72, No.7, pp.8-11, 2015
- 11) 中川千鶴他：自律神経系指標を用いた鉄道運転作業時の心理状態の推定の検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, D4-1, 2017
- 12) 渡部貴浩, 中川千鶴：鉄道運転行動時の脳活の基礎的検討, Proceedings of Life Engineering Symposium 2018, 9-12, 2018