

発話音声から得られる CEM を用いた 心身状態評価手法の開発

澤 貢* 鈴木 綾子* 塩見 格一**
古川 修*** 高橋 征三# 杉山 哲司#

Development of Evaluation Method of Psycho-physiological State Based on CEM of Uttered Voice

Mitsugu SAWA Ayako SUZUKI Kakuichi SHIOMI
Yoshimi FURUKAWA Seizo TAKAHASHI Tetsuji SUGIYAMA

Regarding safety and stability of railway transport, it is an important basis that train drivers can always work in the best psycho-physiological state. This study aims at developing evaluation method of psycho-physiological state for drivers based on “Cerebral Exponent Macro” (CEM) of uttered voice. It has been reported that the CEM is effective as an index value to evaluate workers’ psycho-physiological state so far. However, there have been very few reports on the variation factor of the CEM value. This paper describes the experimental results with the variation factor of the CEM value.

キーワード：CEM, 音声, 想起, 朗読, フリッカー値, 心身状態

1. はじめに

行路, 乗務割交番等に伴う列車の運転士の心身状態を評価するための指標の一つとして, フリッカー値が用いられている^{1), 2)}。フリッカー値とは, 明滅する光を注視させて, それが連続した光に見えるか, ちらついた光に見えるかの境界の値であり, 大脳の活性化や緊張度を表す指標の一つとして, 疲労判定に用いられている。

運転士の心身状態測定では, あらゆる測定に簡便性が要求される。フリッカー値は, 測定のために作業を中断させる必要があり, 測定員が運転士に付き添う必要もある。営業運転の中では, 列車の駅停車時間内という時間的な制約を受けるため, その使用に難点があった。

そこで, フリッカー値に替わる新たな指標の開発として, 電子航法研究所により開発された発話者の音声信号波形のカオス性を分析して得られる CEM (Cerebral Exponent Macro) が, 発話者の心身状態評価に有効であるかどうかの検討を重ねてきた^{3) ~ 6)}。2004年~2006年には, 列車, 自動車のシミュレータ, テストコースによる実車走行等の実験を行い, フリッカー値と作業を中断して測定される短文朗読時の CEM との間に高い相関

($r=0.809$) を見出している (図1)。実験前夜の睡眠条件 (徹夜, 3時間睡眠, 自宅睡眠) を変えて, 列車シミュレータを運転する実験では, 指差喚呼時の CEM が自宅睡眠, 3時間睡眠, 徹夜の順に低くなる傾向が確認されている。精神的負荷に関する実験では, 暗算課題の難易度が高くなるほど回答音声の CEM が高く, 誤答数やフリッカー値も高くなっていることが確認されている。CEM は, 作業経過とともに蓄積される疲労性の指標であり, 作業に必要な注意リソースの量といった一時的に生起する緊張度を反映する特徴を持っていると考えられる。これらの研究が, CEM を活用した心身状態評価としての有効性を示す一つの結論となっている。一方, CEM の変動要因についての検討は行われてこなかった。

フリッカー値等の心身状態評価指標は, 種々の要因の影響を受けやすいため, 測定目的以外の要因の影響をできる限り排除するような調査計画を立てることが重要で

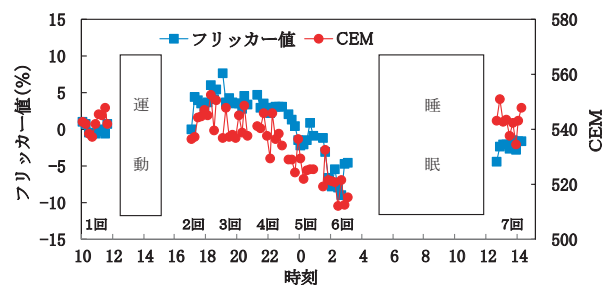


図1 CEM とフリッカー値の関係

* 人間科学研究部 (人間工学)
** 電子航法研究所
*** 芝浦工業大学
日本女子大学

特集：ヒューマンファクター

ある。そのためには、どのような要因が影響しているかを明らかにする必要がある。CEMに影響を及ぼす可能性のある要因としては、年齢、性格等の個人差要因、睡眠、食事、飲酒等の生活要因、作業時間、日間・週間変動等の作業要因、作業空間、作業姿勢等の作業環境要因、指差喚呼、無線交信等の発話の方法・内容に関するものが考えられる。この内、営業運転の中では、作業環境要因および発話の方法・内容に関する要因のコントロールが困難であり、それらを加味した場合の調査結果の意味付けが必要である。

本研究では、CEMを活用した心身状態評価手法の実用化を目指し、CEMの主要な変動要因を把握することを目的とする。具体的な目的としては、次の2点である。

(1) 発話方法の影響

無線交信のように発話自体が主課題になる場合の発話と運転作業の主課題を行っている中で指差喚呼のように副課題になる場合の発話の比較、また、信号機確認のように形状・色等から対象の内容を想起した場合の発話と時刻・通停確認のように文字を見て朗読した場合の発話の比較を行い、発話方法がCEMに及ぼす影響を明らかにする。

(2) 個人差、発話の姿勢・内容の影響

年齢、性別、発話姿勢および母音等発話内容に関するCEMを収集し、これらの要因がCEMに及ぼす影響を明らかにする。

2. CEMとは

CEMは、カオス理論という数学的手法により、発話者の音声信号波形の“ゆらぎ”を分析して得られる。現在のプログラム「SiCECA03r」の概要を図2に示す⁷⁾。なお、今回の一連の研究では、実験によりプログラムのバージョンが異なる。

48kHzのサンプリングレートで録音された音声信号波形の解析対象部分の切り出しを行う。次に、埋め込み次元、埋め込み遅延時間、発展遅延時間を設定し(図2-(a))、マイクロフォンの出力電圧をプロット($P(t_i)$)する。このようなグラフをターケンス・プロットと呼び、

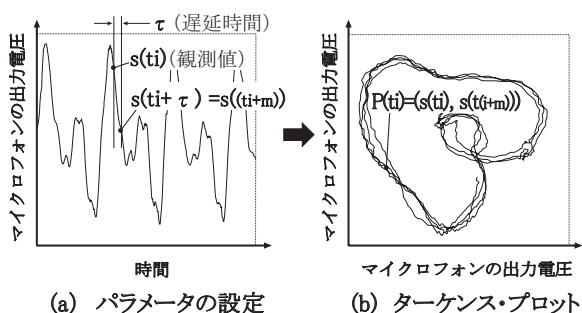


図2 CEMの算出フローチャート

データにカオス性(曲線が周回する)がある場合はストレンジ・アトラクターと呼ぶ(図2-(b))。ストレンジ・アトラクターをある基準時刻から7周回分まで取り出し、要素数が7個の近傍点集合から発展遅延時間後にある発展点集合の“広がり方”を計算する。この広がり方の度合いを第1リアプノフ指数と呼び、初めの近傍点集合の半径と発展点集合の長径の比で表す。以上の計算をすべてのサンプリング時刻を基準に行い、得られた数値の集まりの代表値がCEMである。

3. 発話方法の影響

3.1 方法

主課題と副課題および朗読と想起としての発話の違いがCEMに及ぼす影響を検討するため、図3に示す「自動車シミュレータ」を用いた実験を行った。本シミュレータは、AT車を格納する運転室、コンピュータグラフィックで作成した走行映像を表示する視界表示ユニット、運転操作履歴を記録する記録ユニット等で構成される。

実験条件は、1周322mの正方形型のコースを右回りで走行するものとし、30km/h、60km/hおよび運転なしの0km/hの3つの走行条件に、想起と朗読の2つの発話条件を組み合わせた、計6条件をそれぞれ15分間で走行するものとした。

発話条件として、想起課題は交通信号機を模擬した9種類の画像について(図4)、点灯している色と数を発話させるものとした。例えば、上段左側の画像を「あおいろがひとつ」、中段真中の画像を「きいろがふたつ」、下段右側の画像を「あかいろがみつ」と発話する。朗読課題は想起発話と対応する文章を画像として表示し、発



図3 自動車シミュレータの外観

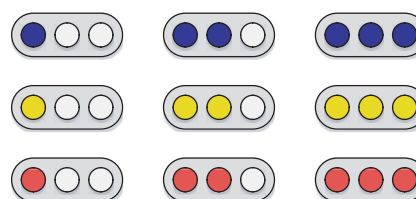


図4 想起課題

話させるものとした。それぞれの発話の大きさは、通常の会話程度とした。

画像の表示位置は、右回り走行に伴う視線移動の容易さを考慮し、走行映像画面の右上とした。それぞれの画像の表示時間は1秒とし、平均30秒のランダムな時間間隔で1条件につき36回～38回、直線区間とカーブ区間に表示させた。

3.2 手続き

被験者は、22歳～24歳の男子大学生11名（平均23.0歳）を対象とした。被験者は、実験の目的、内容、制約条件等を十分に説明された上で実験に参加した。本実験は、2008年12月5日より同年12月14日の6日間、1日2名の被験者が交互に6条件をランダムな試行順序で行った。

実験の手続きは次の通りである。被験者に睡眠時間、体調等に関するフェースシートへの記入を求め、心電図と筋電図をPCカードレコーダ（TEAC：DR-C2）に収録するための電極を貼付けた後、被験者はシミュレータに据えられたシートに着座した。その後、音声オーディオレコーダ（TASCAM：HD-P2）に記録するためのヘッドセットマイクロフォン（DPA：4088）を装着し、実験を開始した。実験開始に先立ち、「決められた走行速度を守ることを被験者に教示した。測定手順として、各走行前に2分間の閉眼安静、フリッカー値測定および3種類の短文朗読、各走行後にフリッカー値測定、3種類の短文朗読、眠気の線分法（左端：はっきり目覚めている、右端：非常に眠い）と疲労度の11件法（0点：まったく疲れていない～10点：疲労困憊している）の質問紙への記入を要請した。これらの測定時間を含めると、1つの条件の実験に要する時間は約25分となった。なお、短文朗読は、「昔々、兎と亀の競争では、兎は山の麓に着く前に休んだので、亀に負けてしまいました」、「因幡では、向こう岸に着く前に吐いた嘘のばれた兎は、鮫に皮を剥がされてしまいました」等の日本昔話を題材とした朗読カードを20種類作成し、ランダムに選択した3枚のカードを被験者に課した。

3.3 結果および考察

3.3.1 各走行の作業負担

発話方法の影響を検討するために、各走行の負担の程度についてみておく必要がある。

図5は、各走行の安静値を基準とした心電図のR-R間隔時間の平均値と標準偏差を示したものである。R-R間隔時間とは、心臓の鼓動間隔時間であり、精神緊張度を表すとされている。図を見ると、運転なしの場合は30km/h走行と60km/h走行に比べ、R-R間隔時間に示される緊張度が高くなっているように見えるものの、3つ

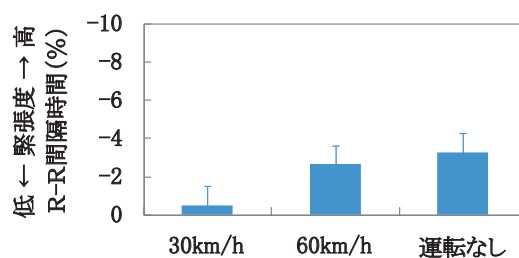


図5 走行条件によるR-R間隔時間の相違

の走行条件のR-R間隔時間の平均値に有意水準5%の差は認められなかった。本実験の走行条件は、それぞれが低負荷であり、走行条件の違いが精神的負担に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

3.3.2 主課題、副課題としての発話の差異

図6は、走行条件と発話条件を組み合わせた計6条件のCEMの平均値と標準偏差を示したものである。発話に配分している注意リソースは、発話自体が主課題の場合は大きく、副課題の場合は小さくなると仮説を立てたが、朗読、想起のいずれも主課題（運転なし）と副課題（30km/h走行と60km/h走行）のCEMの平均値に有意水準5%の差は認められなかった。低負荷環境において、CEMは朗読発話、想起発話ともに主課題と副課題による影響を受けにくいと考えられる。

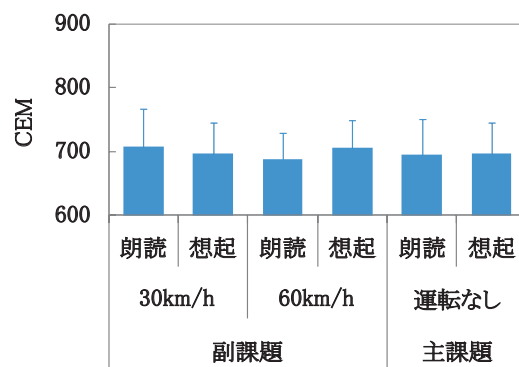


図6 主課題と副課題によるCEMの相違

3.3.3 朗読発話と想起発話の差異

図6のデータを用い、朗読発話と想起発話の違いがCEMに影響を及ぼすかどうかを検討した。その結果、いずれの走行条件も朗読発話と想起発話のCEMの平均値に有意水準5%の差は認められなかった。低負荷環境において、CEMは朗読と想起の発話による影響を受けにくいと考えられる。

図7は、想起発話の内容を色と数により分類し、それぞれのCEMの平均値と標準偏差を示したものである。発話内容の違いがCEMに有意に影響を及ぼし、「あか」の発話を含む場合は「あお」および「きいろ」の発話を含む場合に比べてCEMが高くなっていることが認められた。この傾向は、朗読発話についても同じであった(図

特集：ヒューマンファクター

8). 低負荷環境では、朗読、想起の発話方法よりも発話内容の方が CEM に及ぼす影響が大きいと考えられる。

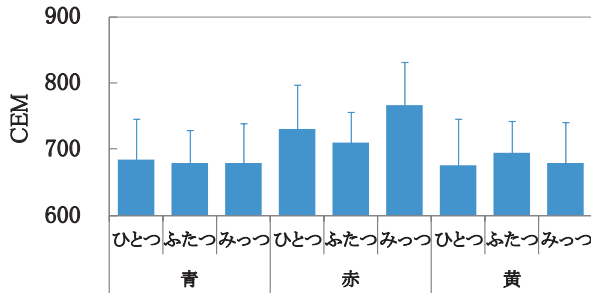


図7 想起発話内容による CEM の相違

ぎてストレンジ・アトラクターに安定な部分を見つけることができないためである。



図9 課題表示例 (課題2)

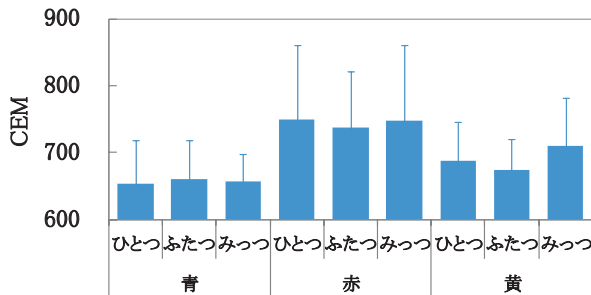


図8 朗読発話内容による CEM の相違

4. 個人差、発話の姿勢・内容の影響

4.1 方法

個人差要因、母音等発話内容、読み易さ(慣れ)および音読姿勢に関する要因が CEM に及ぼす影響を検討するため、表1に示す9種類の音読課題を作成した。それぞれの課題は、オーディオインターフェース (Roland : UA-25EX)、ヘッドセットマイクロフォン (DPA : 4088) およびパーソナルコンピュータ (Apple : MacBook) で構成された「CereaMeter」を用い、13.3インチのディスプレイに表示させた(図9)。音読姿勢は課題1から課題8を椅座位、課題9を立位とした。課題9は、課題2の音読内容と同じである。

分析に際し、CEMは5000より大きい数値を除外することにした。5000以上の数値は、音声信号データが短ず

4.2 手続き

被験者は、保護者および本人の同意を得た首都圏在住の小学4年~6年の女子生徒53名、中学1年~3年の女子生徒53名、高校1年~3年の女子生徒69名および女子大学生の68名である。実験は、2007年11月7日より2009年3月16日の20日間、A中学校、B高等学校およびC大学の実験・準備室および会議室で行った。

1名~5名のグループに割り振られた被験者は、受付室にて実験の目的、内容、制約条件等の全体説明を受けた後、それぞれ指定された部屋(1人1部屋)に入り、「CereaMeter」のディスプレイに直面する形で着座した。被験者に身長、体重、出身地、現在の体調等に関するフェースシートへの記入、脈拍数を測定するパルスオキシメータ(小池メディカル:wrist SO2)および音声を記録するヘッドセットマイクロフォンの装着を要請し、実験を開始した。実験開始に先立ち、「普通の会話程度の大きさで、文字の読み間違いがないように正確に読むことが大切である」と、インストラクションを重ねて被験者に与えた。その後、1分間の閉眼安静後、課題1から課題8までの8課題を被験者による順序効果が相殺されるように決定した試行順序で行い、課題9を最後に実施した。1人の実験に要する時間は、全体説明を含めて約30分であった。

また、首都圏在住の一般成人女子8名(平均45.6歳)

表1 音読課題

課題	音読内容・方法
1	「あ」~「を」までの1文字をそのまま音読
2	「あいうえお」~「わいうえを」までの正順5文字を5文字連続で音読
3	「あいうえお」~「わいうえを」までの正順5文字を1文字ずつ区切って音読
4	「おえういあ」~「をえういわ」までの逆順5文字を5文字連続で音読
5	「おえういあ」~「をえういわ」までの逆順5文字を1文字ずつ区切って音読
6	各音が5個ずつ入った意味のない5文字を1文字ずつ区切って音読
7	意味の通じる短い文章を普通に音読
8	「あかさたなはまやらわ」のように同じ母音の正順10文字を5文字連続で音読
9	立位で「あいうえお」~「わいうえを」までの正順5文字を5文字連続で音読

と一般成人男子10名（平均39.0歳）を対象とした実験を2009年2月23日より同年2月27日の5日間、鉄道総合技術研究所の無響室で行った。実験の手続きは、上記の実験に準拠している。

4.3 結果および考察

4.3.1 個人要因の影響

(1) 年齢

年齢の影響について、小学生、中学生、高校生および大学生の課題1～課題9のCEMを分析した。統計解析の結果、課題1、課題2、課題4、課題7、課題8および課題9は、小学生、中学生、高校生および大学生によりCEMの平均値に有意水準5%の差が認められるものの、年齢が高くなるほどCEMが高くなるまたは低くなるといった一定の関係は見られなかった。

なお、本実験のCEMは、前章の実験時の値と比べて相対的に高くなっている。これは、CEM算出プログラムのバージョンの違いによるものであるが、課題間の比較における解釈において問題はない。

(2) 性別

男女差について、図10は一般成人女子と一般成人男子の課題1～課題9のCEMの平均値と標準偏差を示したものである。統計解析の結果、いずれの課題も女子は男子に比べてCEMが低くなっている傾向が認められた。CEMは、声を生成する器官そのものの特徴を強く反映している可能性が考えられる。

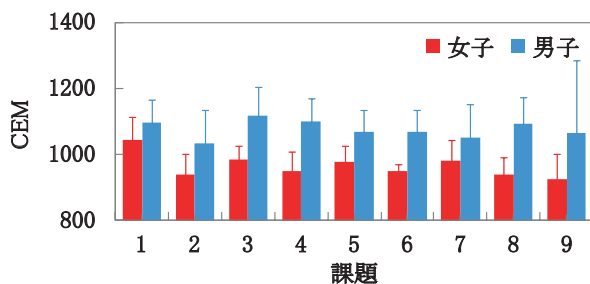


図10 男女によるCEMの相違

4.3.2 発話内容の影響

(1) 母音

言語の構成要素として大きな割合を占める標準日本語の母音(a, i, u, e, o)の影響について、図11は小学生、中学生、高校生および大学生の母音音読(課題1)のCEMの平均値と標準偏差を示したものである。統計解析の結果、小学生、中学生、高校生および大学生のいずれも母音によりCEMの平均値に有意水準5%の差が認められた。また、小学生、中学生、高校生および大学生のいずれも母音とCEMの関係は同じであり、「a」のCEMが最も高く、順に「e」、「u」、「i」、「o」となった。CEMは母音の影響を受けると考えられる。

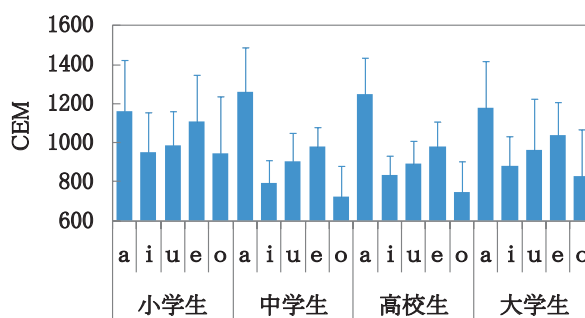


図11 母音によるCEMの相違

(2) 短文朗読

短文内容の影響について、小学生、中学生、高校生および大学生の課題7(表2)のCEMを分析した。統計解析の結果、小学生の結果を除き、6種類の短文内容によりCEMの平均値に有意水準5%の差が認められた。中学生、高校生および大学生は、「犬は大昔から人に飼われてきました」と「夜の海は波の音がとても素敵です」の2つの短文のCEMが全般的に低くなっていた。この2つの短文の母音および子音の構成が他の短文と概ね同じであり、また、課題3(正順5文字の音読)と課題6(意味のない5文字の音読)のCEMの比較において、音読の慣れの点で劣ると考えられる課題6のCEMの方が低くなっていたことから、CEMは短文の読み易さといった要因の影響を受けているのではないかと考えられる。今後、短文の読み易さに関する主観評定および朗読時間等を分析し、明らかにする必要がある。

表2 短文内容

沖縄では一月に桜が咲きます
犬は大昔から人に飼われてきました
昔の人はお月さまを大切にした
夜の海は波の音がとても素敵です
いつもより遠回りして帰りたいですね
ココアを飲むと口のまわりにヒゲができる

4.3.3 発話姿勢の影響

発話姿勢の影響について、小学生、中学生、高校生および大学生の課題2(椅座位)と課題9(立位)のCEMを分析した。統計解析の結果、課題2と課題9のCEMの平均値に有意水準5%の差は認められなかった。一般人女子と一般成人男子との比較についても同様の結果が得られた。発話姿勢がCEMに及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. 今後の課題とCEMの活用方法

発話音声から得られるCEMの高低は、疲労、緊張等

特集：ヒューマンファクター

の脳の活動水準に対応していると考えられる。CEMが低くなることは、心身が定常状態から弛緩状態、疲労状態に移行していることを意味する。一般的に、深夜・早朝帯、長時間の列車の運転では、CEMを低下させる方向に作用すると考えられる。今後の課題は、CEMの安全上の評価基準（生理的な許容限界）を作成することである。一方、本研究において、CEMは個人差要因および母音等発話内容に関する要因の影響を受けていることが明らかになった。CEMは、声帯器官、各音を発声するための唇や舌の運動等の影響も含まれていると考えられる。この生理学的意味の解明は今後に残されたが、個人差要因および母音等発話内容に関する要因の影響を排除するため、以下の方法を提案する。

1人の運転士に対する評価方法は、以下の通りである。

- ① 朗読用の短文を複数用意する。例えば、「昔々、兎と亀の競争では、兎は山の麓に着く前に休んだので、亀に負けてしまいました」である。
- ② 出勤点呼等の運転前に短文を朗読させ、基準値となる音声を記録する。
- ③ 運転作業中の「閉そく進行」等の特定の指差喚呼の音声を記録する。
- ④ 併せて可能であれば、列車の駅停車時間や折返し時間等に別の短文を音読させ、音声を記録する。
- ⑤ 得られた音声データの評価対象箇所を切り出し、2章の手続きによりCEMを求める。
- ⑥ 求められたCEMは、すべて②で記録された音声のCEMを基準とする。
- ⑦ 基準化されたCEMの測定値を時系列に見て、運転士の心身状態および作業環境条件の適否を評価する。例えば、A行路とB行路の2つの行路が存在し、A行路に比較してB行路のCEMの低下率の方が総合的に小さいという結果が得られた場合、B行路の方が運転士の心身状態の観点から望ましいと判断される。

6. まとめ

CEMを活用した心身状態評価手法の実用化を目指し、CEMの主要な変動要因を把握するための基礎的な検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 年齢、性および母音等発話内容がCEMに影響を及ぼすことを確認した。
- (2) 低負荷環境では、主課題と副課題および朗読と想起

としての発話の違いがCEMに表れなかった。また、発話姿勢がCEMに影響を及ぼさないことを確認した。

- (3) 個人差要因および母音等発話内容に関する要因の影響を考慮したCEMを活用した心身状態評価手法を提案した。
- (4) 本研究での成果を踏まえ、今後の課題を整理した。

7. おわりに

CEMは手軽に収集できる利点があり、CEMを活用した運転士の眠気検知・運転支援システム等への展開が考えられるが、これについては個人差による検知精度のばらつき等の課題が解決された段階で検討したい。

なお、本文に記載した研究の一部は、2008年度の芝浦工業大学および電子航法研究所との共同研究、2007年度と2008年度の日本女子大学との共同研究で実施した。

文 献

- 1) 倉又哲夫, 池田守利, 佐藤清, 澤貢: 連続した泊勤務における列車運転士の心身反応: 鉄道総研報告, Vol.12, No.11, pp.21-26, 1998
- 2) 澤貢, 倉又哲夫, 佐藤清, 吉村健志, 大久保堯夫: 1継続乗務キロおよび1継続乗務時間が新幹線運転士の心身負担に及ぼす影響, 日本交通科学協議会誌, Vol.1, No.1, pp.38-44, 2001
- 3) 塩見格一: 発話分析から考える脳機能モデル, 感性工学研究論文集, Vol.4, No.1, pp.3-12, 2004
- 4) Kakuichi Shiomi, Kiyoshi Sato, Mitsugu Sawa, Naoki Mizukami, and Ayako Suzuki, "Experimental Results of Measuring Human Fatigue by Utilizing Uttered Voice Processing," P0557 Proc. of IEEE-SMC, 2008.
- 5) 佐藤清, 澤貢, 水上直樹, 鈴木綾子, 塩見格一, 海津成男: 発話音声を用いた心身状態評価に関する実験的検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.5, pp.17-22, 2007
- 6) 佐藤清, 澤貢, 水上直樹, 鈴木綾子, 塩見格一, 宮崎雅夫: 列車運転士の勤務中の発話音声を用いた覚醒度評価に関する実験的検討, 交通医学, Vol.62, No.1・2, pp.67, 2008
- 7) Kakuichi Shiomi, "Chaotic Voice Analysis Method for Human Performance Monitoring," ESREL 2009, September 7-10, 2009.