

発話音声による乗務員の覚醒度評価技術

人間科学研究部 人間工学
主任研究員 佐藤 清

1. 研究の目的

運転士のエラーは、覚醒度が低下した時に起こることが多い。その原因となる疲労の蓄積や過度の単調化を抑えるために、作業や勤務の適正化が、また、運転士の体調や健康管理が重要である。そこで、鉄道総研では、フリッカー値 (CFF=Critical Flicker Fusion Frequency) と心拍数 (HR=Heart Rate) および質問紙 (自覚症状しらべ等) を評価の柱とした調査や研究を行ってきた。

ところが、近年の鉄道における速達性の向上により、CFFや質問紙のように、作業の中断が測定の必須条件となる評価の場合、指標そのもののデータ取得が難しくなっているため、CFFと同様の性質を持ち、運転中でも測定可能な指標の開発を検討していた。その1つとして、発話音声をカオス論的に解析することで得られる数値 (CEM=Cerebral Exponent Macro)¹⁾ に着目している。現在、CEMによる覚醒度評価の可能性を知るための実験的検討を行っており、これまでに得られている結果について述べる。



図1 フリッカー値測定風景

2. 発話音声の生理学と解析方法

発話は、肺に溜まった空気を体外に放出する際に、声帯を振動させて、言葉を発する行為のことである。発話では、肺から空気を押し出し (腹筋や横隔膜等)、言葉を発するための開口運動 (舌骨上筋群や舌骨下筋群等) を行い、言葉の調整のための唇や舌の運動 (口輪筋や舌筋等) に、多くの骨格筋が関与する。骨格筋の収縮には大きなエネルギーを必要とするが、発話時のエネルギーの拡散現象にカオス性があると考えられる。骨格筋の活動は随意的であり、言語中枢 (大脳皮質前頭葉) など大脳の高次中枢の制御を受ける。

脳は、その役割から、大脳皮質 (行動中枢) と、大脳辺縁系・脳幹 (自律神経中枢) に分けられる。そのため、覚醒度評価に用いる指標も、行動中枢系指標 (作業成績、CFF、質問紙など) と自律神経中枢系指標 (HRや血圧など) に分けられる。発話音声は、中枢の部位から、前者に相当すると考えられる。

発話音声のカオス解析には、音声の母音を用いられる。音声解析結果は、3次元のアトラクタ図形として表すことができ、それにより、収



覚醒度高い
CEM大きい

覚醒度低い
CEM小さい

図2 母音「オ」のアトラクタ

集されたデータにカオス性のあることが確認できる。CEMは、このアトラクタの繰り返される軌道のばらつきの大きさを評価している。そして、軌道のバラツキが大きい時ほど覚醒度が高いことを意味する（図2）。

なお、発話は、単独で行われる場合（単独発話）と複数で行われる場合（複数発話）に分けられる。前者は、発話が主作業の場合と副作業の場合とに分けられ、さらに、主作業の場合には課題の影響が結果に影響を及ぼす場合が考えられ、副作業の場合には喚呼対象物による負担度の差異が考えられる。後者は、口頭試問や指令とのやり取りのように一方が問いかけ一歩が答えるような問答形式の場合や、点呼のような復唱を含む復唱形式および、仲間との雑談等の会話形式に分けられる。複数発話では、発話する際の自由度が高いか低いかでCEMへの影響が異なるものと考えられる。

3. 研究事例

ここでは、昨年度までに行った実験や調査の中から4つの実験について紹介する。

3.1 疲労実験

この実験の目的は、作業の疲労に起因する覚醒度低下を、CEMにより評価（疲労判定）が可能かどうか明らかにすることであった。男子大学生10名（22.0±1.9歳）を被験者として、29時間（1日目の9時から2日目の14時まで）拘束する方法で行われた。

被験者には、列車シミュレータの運転（測定を含めて約90分を1セットとした）を、運動強度（年齢から見た最高心拍数=220-年齢）80%程度の有酸素運動を行なう前の疲労していない状態（基準）で1セット、運動後（夕方～早朝まで）の疲労していく過程で5セット、睡眠後の疲労が回復した状態（回復）で1セット行わせた。測定項目は、CFF、HR、朗読音声、眠気尺度、疲労尺度とした。

結果は図3のようで、朗読CEM（○）とCFF（●）の運動直後から睡眠前までの変動傾向はよく似ている（ $r=0.809$ ）。また、朗読CEMと他の指標との関係では、眠気尺度（ $r=-0.939$ ）と疲労尺度（ $r=-0.825$ ）およびHR（ $r=0.737$ ）とも有意な相関関係が認められた。

今回は、CFFの精神的作業における疲労判定基準²⁾を参考に、以下に示す判定基準を作成した。

- ① 1度でも低下率が-10%を下回る
- ② -5%を下回ることが半分以上ある

運動前の基準作業時CFFの平均値を基準値として被験者個々のCFFの変動率を求めて、上記2基準のどちらか一方でも当てはまる被験者を疲労している者（疲労群7名）とし、どちらにも該当しなかった者を疲労しなかった者（非疲労群3名）とした。

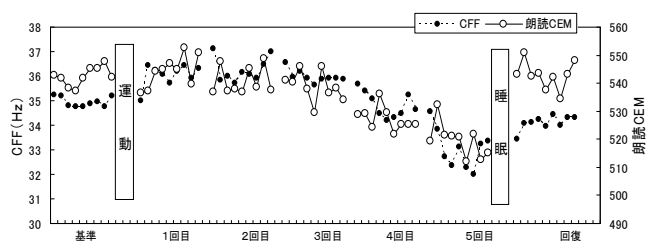


図3 CFFと朗読CEMの経時変化

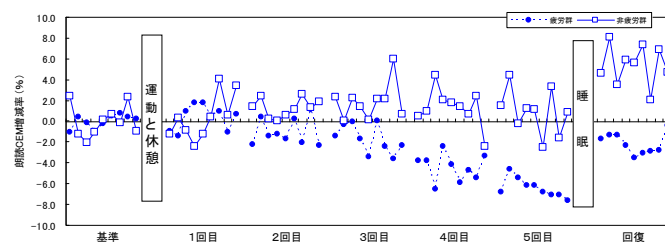


図4 朗読CEMにおける疲労群と非疲労群の経時変化

図4は、CEMを疲労群と非疲労群に分けた結果である。時間経過とともに両群の乖離が明確になる様子がうかがえる。また、疲労群では睡眠後でも基準レベルまで回復していない。以上の結果から、朗読CEMは、CFFと同様に用いることが可能と判断された。

3.2 発話方法と負担度に関する実験

この実験の目的は、鉄道における発話音声（指差喚呼確認時の音声）の利用可能性を知ることである。今回は、自動車のシミュレータを用いたが、鉄道で行う指差喚呼を模擬した課題を被験者に課した。被験者にはドライビングシミュレータ（以下DS=Driving Simulator）の運転によくなれた男子大学生6名を充て、運転速度は60km/h（単調になりやすい速度）と100km/h（当該DSにおける標準運転速度）および140km/h（カーブでのほぼ限界速度）の3種類とした。DS運転中にはHRと標識や道路形状等に対して喚呼させた時の音声を測定した。

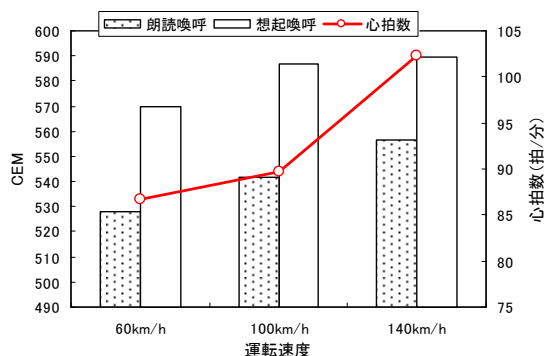


図5 運転速度とHRおよび喚呼CEMの関係

図5をみると、HRと喚呼CEMともに、課題が難しくなるほど数値が高くなる傾向がみられる。ただし、喚呼CEMでは、案内標識を読ませた時（朗読喚呼CEM）とトンネル等の通過時に決められた方法を想起して喚呼した時（想起喚呼CEM）を比べると、後者の方が大きくなっている。また、後者では課題が難しくなると増加が抑制される傾向になっている。

以上の結果は、運転中に発話させる場合、指示された発話方法を想起して行う方が、提示された文字を朗読するよりも負担が大きくなる可能性を示唆している。

なお、この実験において眠気尺度は、作業前に比して作業後に、60km/h（最大）と100km/hでは増加したが、140km/hでは減少した。

3.3 運転速度と喚呼CEMとの関係解明実験

この実験の目的は、自動車運転中に発する音声と運転速度との関係を知ることにあつた。曲線部がバンク状のテストコース（1周が3.2km=120km/hまではハンドル操作しなくとも走行が可能）において、ワンボックスカーを用い、運送会社の社員12名を被験者として実施された。

被験者には、60km/h、80km/h、100km/h、120km/hの各条件について、約20分間ハンドル操作を行なわずに一定の速度で運転させた。自動車運転中には、HRと看板通過時に喚呼音声を測定した。

図6の自動車運転中に測定した心拍数と喚呼音声の結果をみると、HRでは、概ね、運転速度が高くなると増加する傾向が示されるが、喚呼音声では、100km/hまでは増加傾向となるものの、120km/hになると低下に転じるという、逆の結果になっている。

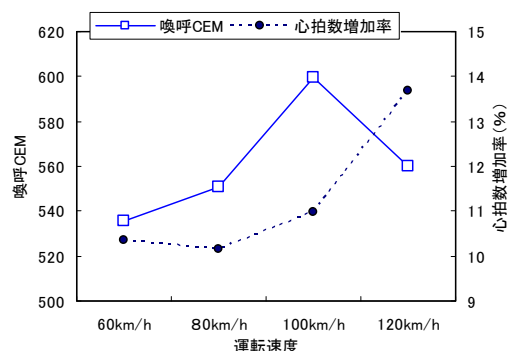


図6 HRと喚呼CEMの関係

なお、この実験において眠気尺度には、作業前に比して作業後に、速度の上昇に伴う低下傾向が示され、120km/hでは減少する結果が示された。

この実験とDS実験の結果から、喚呼CEMについては、覚醒度が低下した状態であれば、数値が単純に低下するだけなので、単独での評価が可能と考えられた。

3. 4 勤務模擬実験

この実験の目的は、運転士が勤務中の、出勤時や退勤時などで行う点呼の音声（点呼CEM）と乗務中に行う指差喚呼の音声（喚呼CEM）のいずれかにより、運転士の覚醒状態評価が可能かどうか知ることであった。運転士の日勤勤務を模擬し、運転経験のある社員4名を被験者にして、勤務前夜の睡眠条件を変えて、列車シミュレータ（JR西日本安全研究所）を運転させる実験を行った。睡眠条件は、自宅で普段どおりに寝る（自宅睡眠）場合と、まったく寝ないで朝まで起きている（徹夜）の両極を設定し、その間の条件として、乗泊で3時間睡眠できる条件（3H睡眠）を設定した。

図7は、点呼CEMと喚呼CEMについて、睡眠状態が最も良好だったと考えられる自宅睡眠を基準にして、他2条件でのCEMの低下度を比較したものである。点呼CEMに比して、喚呼CEMの低下度が大きくなっている。

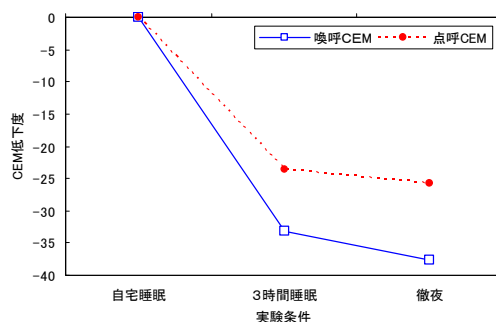


図7 喚呼CEMと点呼CEMの感度比較

この結果は、覚醒低下を評価する上で、鉄道で利用できる音声として、立位で単発的に対話的に行う点呼時の音声よりも、座位で同じような発話を単独で継続する喚呼時の音声の方が適切である可能性を示唆している。

4. まとめ

これまでの実験結果を以下にまとめる。

- ① 朗読CEMは、疲労した状態であれば、CFFや質問紙および心拍数との間に高い相関関係がみられ、中でも、眠気尺度との相関が高かった。
- ② 喚呼CEMは、標識等を読む朗読喚呼よりも鉄道で行っている想起喚呼の方が高かった。
- ③ 想起喚呼CEMは、緊張度の高い高覚醒状態では増加が抑制あるいは低下したが、居眠りが生じやすい低覚醒状態では低下傾向のみがみられた。
- ④ 自宅睡眠に対する3H睡眠と徹夜における低下度は、立位で単発的に行われる点呼時よりも、座位で継続的に行われる喚呼時の方が、覚醒度の低下が大きくなった。

以上より、CFFに変わるCEMを用いた覚醒度評価の可能性が示された。ただし、CEMに対する個人の資質的要因（年齢・性別ほか）や発話する言葉・文章の母音の種類および数の影響等は明らかでなく、こうしたことも今後検討していく予定である。

文 献

- 1) 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 4：3-12，2004
- 2) 橋本邦衛，遠藤敏夫：生態機能の見かた，日本出版サービス，1983