

# 発話音声から疲労を知る

鈴木 綾子  
人間科学研究部  
(人間工学 研究員)

佐藤 清  
同  
(同 主任研究員)



すずき あやこ



さとう きよし

## はじめに

人間が関与する運転等の事故には、「疲労事故」という分類はありません。しかしながら、「疲労」をはずして事故防止対策を考えることはできません。

それは、「疲労」そのものより、「疲労」によって起こる覚醒レベルの低下した状態が運転中の機器操作の精度を低下させ、その延長にある居眠り運転事故の発生に深く関わってくるからです。

また、疲労が及ぼす影響については、社会的にもあらゆるところで問題となっています。たとえば、日本では「過労死」がマスコミなどで盛んに取り上げられるようになり、有名な言葉となりましたが、実は海外でもその現象は“karoshi”という用語で通用するのです。長時間の過重労働が、疲労の蓄積をもたらし、脳・心臓疾患の発症との関連性を強めるということは、医学的に明らかにされています。この「過労死」の増加などによって、過重労働に対処する必要が生じており、厚生労働省では平成13年に、脳・心臓疾患の労働災害の認定基準の中に、長時間にわたる疲労の蓄積を考慮することを盛り込んでいます。これに伴って、脳・心臓疾患による労働災害の申請件数は年々増加す

る傾向にあります(図1)。さらに、平成18年には、労働安全衛生法が改正され、事業者は、労働者の週40時間を超える労働が1月当たり100時間を超え、かつ、疲労の蓄積が認められるときは、労働者の申出を受けて、医師による面接指導を行わなければならないことが義務付けられました。

このような社会的な動きは、個人だけでなく事業者にとっても、労働者の過重労働による健康障害を防止する義務がさらに強く求められていることを意味しています。

疲労が生じるメカニズムの詳細は未だ不明な点もありますが、疲労に伴う事故防止等のために「疲労を測る」試みは、昔から、多くの研究者によって行われています。

ここでは、現在私達が、開発元(独立行政法人 電子航法研究所)と共同で研究を進めている、発話音声をカオス論的に解析して得られる数値(CEM = Cerebral Exponent Macro)を用いた疲労判定法について、ご紹介いたします。

## 従来の疲労を測定する指標とは

まず、従来の疲労の測定方法を指標に分類して考えると、表1のようにまとめることができます。疲労の測定指標は、大きく心理的・生理的・行動的指標に分けられます。心理的指標は、疲労状態にある者の主観的反応を測定する指標であり、主に質問紙法によって測定されます。生理的指標は、生体の示す客観的反応の指標であり、中枢神経系・自律神経系・内分泌系・免疫系などの各種指標によって測定されます。行動的指標は、課題に対する遂行の程度として表される反応の指標であり、反応時間やパフォーマンスなどの指標や第三者による行動観察などによって測定されます。

これらの各種測定指標は、長所と短所や、測定される疲労の側面がそれぞれ異なっています。たとえば、心理的指標は、簡便に使用することが可能ですが、意図的に結果を歪曲させることもできます。また、意図的ではなくとも、

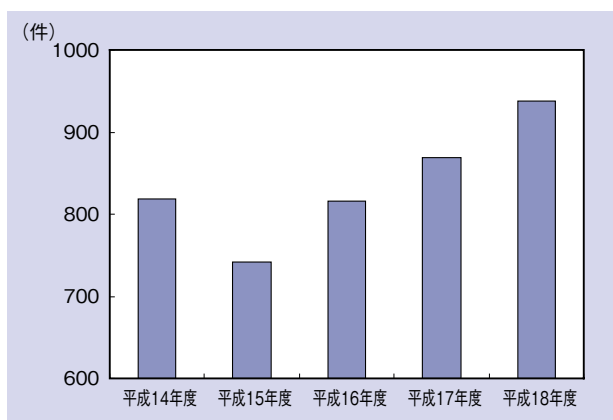


図1 脳血管疾患及び虚血性心疾患等の労働災害申請状況(厚生労働省)

表1 疲労を測定する各種指標の例

生体反応	指標	被験者から見た測定の方法	
心理的反応	蓄積疲労兆候インデックス	主に疲労の度合いを点数などで主観的に評定する	
	蓄積疲労度自己診断チェックリスト		
	自覚症しらべ		
生理的反応	中枢神経系	フリッカー(CFF)	計測用筒を覗き、光の点滅・非点滅を判断する
	自律神経系	心拍(HR)	身体に電極のコードなどの測定装置を装着する
		血圧	
		瞬目	
	内分泌系・免疫系	コルチゾール	血中、尿中、唾液中などから採取する
		カテコールアミン	
行動的反応	反応時間	作業を行い、作業精度などから測定する	
	正答(エラー)率		

極度の疲労状態にあり、自分の疲労を正しく判定できなくなった場合などは、妥当な結果が得られないこともあります。また、測定に際しては、主作業(例えば、自動運転の疲労を測定する場合、運転作業そのもののことを指す)を一時中断することが必要になります。一方、生理的指標の多くは、意図的な操作が難しいものの、被験者・実験者双方にとって実施に負担が伴うことが多いといえます。たとえば、心拍を測定するために心拍計を身体に装着するように、自律神経系の各指標の測定には器具などの装着が必要となり、内分泌系・免疫系の各指標の測定には、唾液や尿、血液などの採取が必要となります。行動的指標については、行動的指標として設定した反応時間や正答率を測定するための課題を、主作業とは別に設定している場合、やはり主作業を中断して測定を行わなければなりません。

もし、発話音声から疲労を測定することができれば、これらの従来の測定指標の短所をカバーすることのできる新たな疲労判定法として利用することができます。たとえば列車運転士は、喚呼(運転士が線路状況等を確認する時に行う短い発話)しながら作業を行うため、普段作業確認のために発している音声を利用できれば、新たに課題を設定する必要もありません。また、意識して自分の疲労状態を評価する必要がないので、結果が本人の意図で左右されることもありません。さらに、唾液や血液などを採取する必要もなく、拘束性が高い器具を用いなければならない必要もありません。このように、疲労の測定に発話音声を用いることができれば、非常に有用性の高い指標として期待することができます。

## 音声で疲労を知ることは可能か？

言葉は、地球上の生物で唯一人間が作り上げた、優れた情報伝達手段です。言葉を発する(発話する)ためには、肺に溜まった空気を体外へ放出する際に声帯を震わせるだけでなく、唇や舌などを動かす必要があります。この時、顔だけでなく、上半身の骨格筋が活動します。骨格筋は随意筋(意識的、意図的に動かすことができる筋肉)ですので、これを動かして正常な発話をするためには、筋肉を動かす中枢が活性化していなければなりません。

発話の中枢は、運動性言語野といわれ、人間で大変よく発達した、脳の最も外側にある大脳皮質の左前頭葉の運動野下部(顔やあごおよび舌等の活動を支配する部分)にあります。

したがって、発話者が意思を伝えるなど自らの意図をはっきりと持って発話している場合には、発話に関わる部位がよく活性化されており、単に課題を読み上げるなど意図をはっきりと持っていない場合には、その部位があまり活性化されていないと考えられます。

私達は、これまでに、CEMについて、従来の覚醒状態評価指標との関係を知るための実験を行い、大脳皮質の活性度を評価できそうであることを確認しています(RRR2005年10月号)。疲労している場合もちろん、大脳皮質の活性度に何らかの変化が生じていることが考えられるので、CEMは疲労のある側面をも表していると私達は推測しています。

## 疲労がCEMに与える影響を検討する実験例

私達が行ってきたCEMに関する実験の中で、特に作業に伴う疲労による心身の変化とCEMの関連性を検討した実験をいくつかご紹介します。

一つ目の実験は、長時間拘束による疲労を検討した実験です。この実験は、11名の男子大学生・男子大学院生を実験協力者として、29時間拘束の中で(1日目9時から2日目14時まで)疲労発現のための有酸素運動と、列車シミュレーターの運転を組み合わせた課題を実行してもらうというものです。

疲労の判定基準作成のために、被験者が疲労していない運動前に、各種指標(CFF, HR, 朗読音声, 眠気尺度, 疲労尺度)の測定(基準測定)と約90分のシミュレーター運転を行ってもらいました。朗読音声とは、一般的に知られている日本昔話の内容を10秒程度の文章課題とし、それを朗読した音声のことを指しています。この実験では、

測定精度を保つために、喚呼のような短い発話ではなくある程度の長い文章による音声を測定することにしました。その後軽食を摂り、自転車エルゴメーター等により、約4時間の有酸素運動を行った上で、入浴と食事の時間を設定しました。有酸素運動は、運動強度を80%（年齢に応じた最大心拍数の80%の心拍数）程度として行っています。運動後から翌日早朝まで、シミュレーター運転と適宜測定を行い、早朝から昼まで約6時間睡眠を取ってもらい、起床後さらに約90分のシミュレーター運転を行い、睡眠による回復状態を評価するための測定を行いました（図2）。

結果は、表2と図3に示したとおりです。

図3は、CFFと朗読によるCEMの経時的変化を示しています。運動直後から睡眠前までの両者の変動の傾向は、非常に良く一致しており、時間経過に伴って両者とも低下を示しています。表2の値は、絶対値が大きいほど両者の

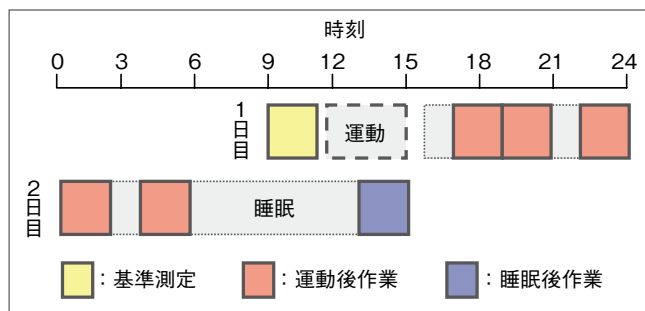


図2 疲労実験の流れ

表2 朗読CEMと従来の覚醒度評価指標の相関係数

	CFF	自覚症しらべ (1970年版)	眠気尺度	疲労尺度	HR
相関係数	0.81	-0.63	-0.55	-0.74	0.74

関連性が強いことを示しています。HRと朗読によるCEMについても、同様に高い正の一致を示し、時間経過に伴い低下することが明らかとなりました。また、眠気尺度と疲労尺度については、負の一致が認められ、時間経過に伴って眠気尺度と疲労尺度の得点は上がる一方、CEMは下降することが示されています。

このように長時間拘束による疲労がもたらされる条件下では、従来私達が使用してきた指標である、CFFやHRは低下する傾向を示し、疲労尺度や眠気尺度は増加する傾向を示すことがわかります。そして、新しい指標であるCEMは、CFFやHRと正の相関、疲労尺度や眠気尺度とは負の相関を示し、特にCFFとの関連性が最も強いことが明らかとなりました。したがって、このような疲労状態においては、CEMは経時的に低下していくという性質を持っていることが推測されます。

二つ目の実験は、短時間拘束の疲労を検討した実験です。この実験は、6名の成人男性を実験協力者として、30分程度の拘束時間で、難易度の異なる暗算課題を実行してもらうというものです。

作業前の各指標の基準値を調べるために、課題遂行前に各種指標（CFF、朗読音声、眠気尺度、疲労尺度）の測定をした後に、暗算作業を行い、再び各種指標の測定を行っています。暗算作業時には、暗算の回答音声とHR、誤回答数を測定しました。暗算課題は難易度によって3条件とし、①1桁と1桁の数字を1回加算する繰り返りなしの課題（低負荷）、②2桁と2桁の数字を1回加算し、20%が1回繰り返り上がり、80%が繰り返りなしの課題（中負荷）、③2桁と2桁の数字を1回加算し、50%が2回繰り返り上がり、45%が1回繰り返り上がり、5%が繰り返りなしの課題（高負

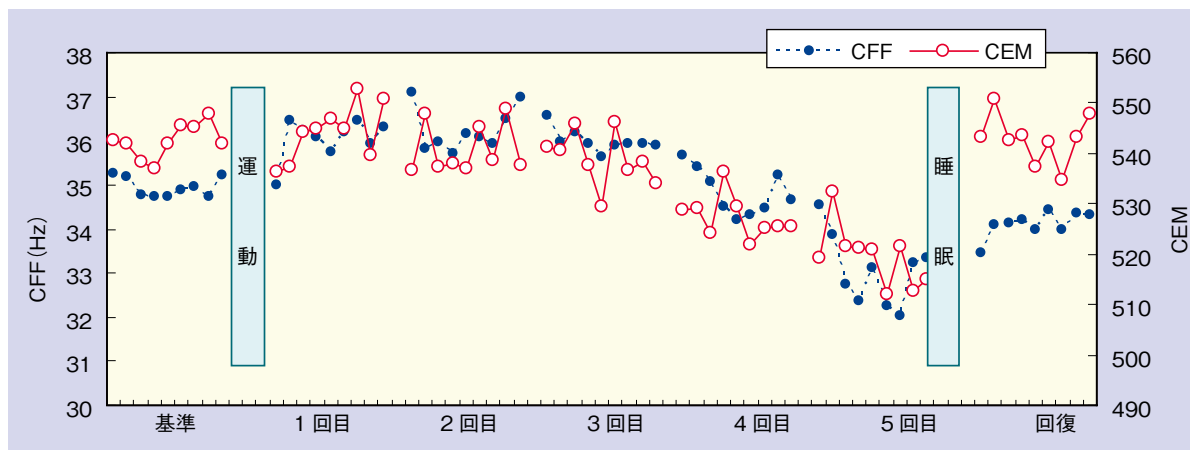


図3 CFFと朗読のCEMの経時変化

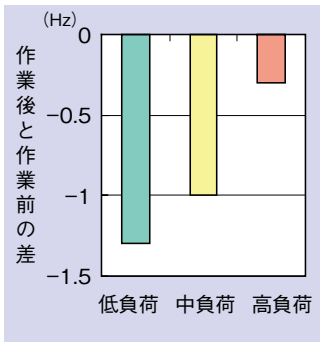


図4 各条件のCFF  
(作業後と作業前の差)

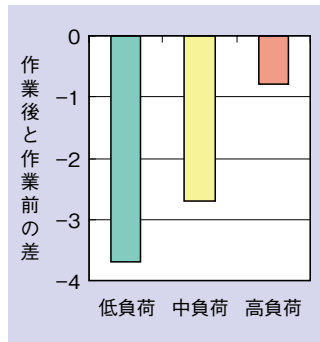


図5 各条件の朗読音声CEM  
(作業後と作業前の差)

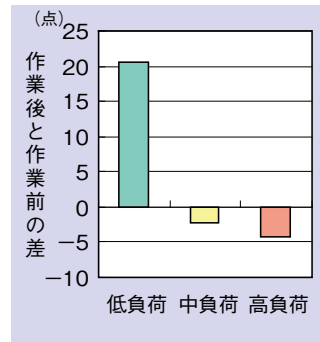


図6 各条件の眠気尺度  
(作業後と作業前の差)

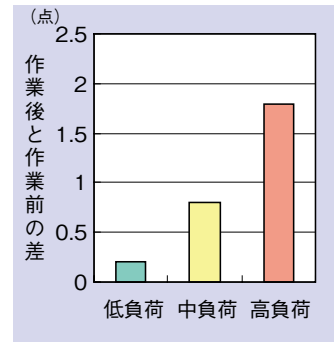


図7 各条件の疲労尺度  
(作業後と作業前の差)

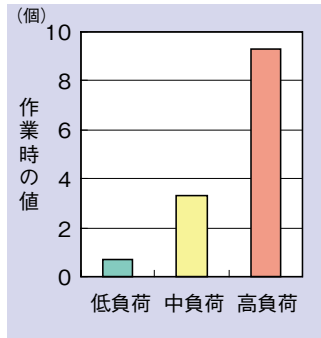


図8 各条件の誤回答数

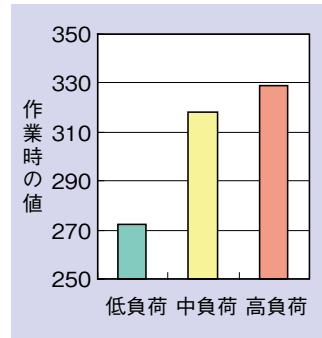


図9 各条件の回答のCEM

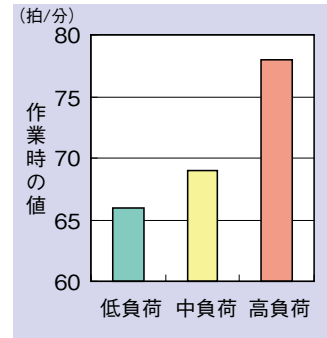


図10 各条件のHR

荷)を設定しました。

結果は、図4～図10に示したとおりです。

暗算作業の前後に測定した指標(CFF, 朗読音声, 眠気尺度, 疲労尺度)については、作業後と作業前の差を用いています。誤回答数や回答音声によるCEM, HR, 疲労尺度は難易度が高くなるにつれて値が上昇していることがわかります。また、CFF, 朗読音声によるCEMは、難易度が高くなるにつれて、課題遂行前との差が小さくなる、すなわち条件ごとにみた場合は値が高くなることがわかります。なお、このような短時間の疲労の実験の場合、作業前と比較して、低負荷条件では眠気を強く感じるものの疲労は弱く、中負荷・高負荷条件ではむしろ眠気が弱いものの疲労を強く感じるということが示されています。以上の結果から、このような条件下では、CEMは条件の難易度が高いほど上昇していくという性質を持っていることが推測されます。

これらの実験結果のように、疲労を測定する場合には、疲労の性質や継続時間などの測定条件によって、各種測定指標への影響が異なるということがいえます。CEMの場合、現時点の実験結果では、中枢神経系の活動を表すといわれているCFFとの関連性が特に強い可能性が考えられます。いずれにせよ、CEMは、従来疲労の指標として用いてきた各指標との関連性が認められ、疲労の測定指標としての可能性が示されているということが出来ます。

## おわりに

実験の結果から、発話音声を解析することによって得られるCEMが、疲労を評価できる可能性が示唆されています。しかしながら、CEMの性質はまだまだ明らかになっていないことも数多く残っています。たとえば、「あ」という音と「い」という音では、同じ条件で発声してもCEMの値が異なることがわかっています。また、看板などの文字を単純に読み上げる方法と、標識などの手がかりを見つけた際にあらかじめ決められた言葉を想起して発声する場合とではCEMが異なることがわかっています。これらより、CEMを評価する際の発話音声課題に含まれる母音や課題そのものの意味をどのように設定するかなど、まずは標準的な課題の検討を行う必要があります。さらに、研究を進める中で、新たに検討すべき課題も多く示されています。たとえば、今回ご紹介した2つの実験結果から示されているとおり、CEMの値は、漫然とした状態から緊張状態までは値が上昇し、疲労状態では低下していくところから、CEMには至適範囲が存在することが推測されますが、その至適範囲はどの程度なのかということも未だ明らかになっていないところです。これらの疑問点は、今後他の疲労指標などとの関連性から、明らかにしていくべき課題であると考えています。[RRR]