

人間の疲労を測る

水上 直樹

人間科学研究部(人間工学 主任研究員)



みずかみ なおき

鉄道における人間の疲労の問題

鉄道の分野で、人間の疲労が問題となるのはどのような場合でしょうか。まず、鉄道会社の従業員の疲労について考えると、列車運転士を始めとして、保線や工場など様々な現場の人にとって重要なのは安全性との関わりです。強い疲労感や眠気を感じながら仕事をしているようでは、ヒューマンエラーによる事故に結びつきかねません。また、疲労感が強くて、作業に遅れが生じる、作業の質が低下するなど作業能率への影響も無視できません。第三に、従業員の健康問題があります。日々の仕事の中で疲れを感じることは、自然なことですが、通常の休養で回復せず、慢性的に疲労を感じていては、心身共に健康が失われていくことになります。第四に、個人の生活性の観点も看過できません。仕事が終わると疲れ切って、休日があっても疲れの回復に費やされるのでは、家庭や社会上の活動をする余裕がありません。一方、鉄道利用者の側に着目すると、快適な鉄道環境を提供する上で疲労の低減は重要なポイントの一つです。例えば、乗客が疲れにくい座席は、快適な座席の要件の一つといえるでしょう。また、駅構内において、足腰の弱った高齢の方でも著しい疲れを感じずに移動できるように工夫することも大切です。

このように、鉄道において、人間の疲労は、様々な分野と深い関わりがあります。本稿ではこのうち列車運転士の疲労調査に関して述べます。最初に、労働の場面における疲労の概念や、疲労の生理的なメカニズムについて、簡単に触れておきたいと思えます。

疲労の概念およびその発生メカニズム

ISOによる疲労の概念

人が作業をすることで生じる疲労を測定し、その要因や対策について論じる際には、「疲労」に加えて、「負荷」や「負担」の概念が重要になります。これらの用語は、紛らわしいところがあるので、最初に整理しておきます。国際標

準化機構 (ISO) の規格「作業システム設計のための人間工学の原則 (ISO6385)」では、作業の負荷や作業による負担、疲労の用語が規定されています。その定義を要約すると、作業負荷は、作業者の生理的・心理的な状態に影響を与える外的要因のことです。一方、作業負担は、作業負荷によって作業者の内部で起きている心身の状態の変化を指します。従って、作業者の身体寸法、年齢、体力、能力、技能などの個人的な特徴によって負担の程度は異なります。また、疲労については、精神的あるいは身体的な、また、局所あるいは全身に対する過度の負担によって現れる状態で、休息すれば完全に回復できるものと定義されています。さらに、精神的な作業について規定している規格 (ISO10075) では、精神疲労は、精神的負担の強さや持続時間などの影響を受ける精神的、身体的機能の効率の一時的な減退のことで、休息などの回復作用で消失するものと定義されています。すなわち、疲労は、負担の強さとその時間的な影響によって、一時的に心身機能が減退している状態であり、かつ、休息によって回復することがポイントになります。

人間の疲労のメカニズム

それでは、人間が疲労した時、体の中では何が起きているのでしょうか。私たちが疲れを感じたり、集中力が低下する、作業にミスが生じるのは、脳の働きやその変化に他なりません。従って、脳の中のどこかに疲労を感じる部位や神経回路が存在し、集中力や作業の遂行に関わる部分の機能が変化 (低下) しているはずですが、この疲労の本態ともいふべき現象を物理学的・生理学的に捉えるには、疲労のメカニズムがわかっていなければなりません。

これまで、ヒューマンエラーによる事故発生や、過労の問題など、疲労は重要で身近な問題であったにも関わらず、その生理的なメカニズムについてはほとんど解明されていませんでした。人間の疲労の解明に対する社会的な要請の高まりもあり、平成11年に、文部科学省・科学技術振興調整費による「疲労および疲労感の分子・神経メカニズム

とその防御に関する研究」が疲労研究班によって始められました。脳内の局所的な血液量変化を計測することでその活動を画像化する陽電子放出断層撮影装置 (PET) や機能的核磁気共鳴イメージング (fMRI) などを用いた実験によって、現在のところ、次のような作業仮説が提示されています¹⁾。健常者が疲労感を覚えている時は、大脳の眼窩前頭野と下前頭野 (大脳皮質を52の領域に分けたブロードマンの脳地図上では、それぞれブロードマン11野、ブロードマン10野にあたる) という領域の一部が活動を高めます。また、意欲やコミュニケーションにおいて重要なブロードマン9/46d野や、集中力や注意を担っていて自律神経系の調節にも深く関わっているブロードマン24野の活動低下が、疲労時における脳機能低下に関する中心的な部位であることなどが明らかになりつつあります (図1)。

疲労のメカニズムや、疲労時に特異的に変化する生体のパラメータに関しては、このように研究途上にあり、現時点では、簡単な検査で疲労そのものを測るというわけにはいきません。しかし、産業場面においては、作業者の疲労の程度を知り、実際に対策を立てる必要性に迫られていたため、後述するように、疲労に伴って現れる自覚症状の訴え、作業パフォーマンスの低下、および生体指標を用いて、疲労の評価や判定がなされてきました。

列車運転士の疲労調査

疲労調査の目的と運転作業

列車運転による運転士の疲労調査は、冒頭に述べた安全性、作業能率性、健康性、生活性の観点で、より好ましい作業や勤務を構築するために役立てるためのものです。実際の運転士を対象に調査を行い、その負担や疲労の程度を通して、作業条件や勤務を評価します。後述する「問題のある」疲労が生じていないかを判断し、改善案の提示やルールの策定に活かします。

このような疲労調査を行うためには、負担や疲労に関係する運転作業 (負荷) の特徴を押さえておかなければなりません。列車の運転は、信号に従い、制限速度を守り、かつ所定のダイヤに合わせるという決められた作業の反復ないし連続です。共通する特徴は、以下ようになります。

- 1) 特別な筋力作業を必要としない精神的な作業である。
- 2) 監視的要素が大きく、時間的、姿勢的な拘束が強い。
- 3) 眠気の生じやすい深夜早朝帯での作業が含まれる。
- 4) 勤務時間は不規則・不定型である。

これらの特徴に加え、運転速度や線路形状、車種なども

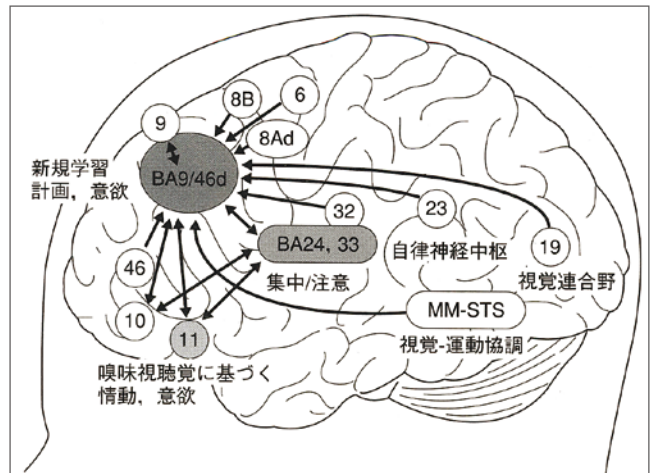


図1 疲労神経回路

(渡辺恭良：脳機能イメージングによる疲労および疲労感の解析。医学のあゆみ, 204(5):296-301, 2003, p.297図1)

含めた運転環境、乗務時間や休日などの配分を決める勤務編成など、いくつかの負荷要因が絡み合って、負担や疲労が生じます。なお、運転士への負担が過度であると疲労発生につながることから、疲労調査では、通常、疲労の評価とともに、負担を捉えることにも力点が置かれます。

同じ眠気でも一疲労と単調

列車運転の疲労調査では、覚醒レベル (眠気あるいは目覚めの程度) の低下に関する測定項目は必須です。但し、覚醒レベルは、疲労時以外にも低下することがあるので注意が必要です。例えば、忙しくて睡眠が十分に取れない日が続いた時は、ワープロを打っている最中でも居眠りしてしまうことがあります。その一方で、休養は十分に取れていて、作業に取りかかる前は元気澆刺としていたにも関わらず、作業が単純な繰り返しであったため、ついうとうとしてしまうこともあるでしょう。両者とも、覚醒レベルが低下している点では同じですが、前者は、疲労状態にあり、後者は、単調に陥っている状態です。単調とは、期待する情報や刺激が過度に少ない場合や、刺激があっても同じものが繰り返され、大脳が活性化されていない状況のことで、疲労は、心身に過度の負担が生じた時、その過度の活動に対する補償として休息を必要とするものです。つまり、疲労が「休息の要求」であるのに対して、単調は、変化に乏しい状況から抜け出したいという「場面転換・変化の要求」であるといえます。

疲労も単調も「眠気」や「意欲の減退」などを伴うので、一般の人々は、どちらの場合でも、単に「眠かった」「疲れた」と表現することが少なくありません。しかし、その対策が異なるため、両者を区別する必要があります。例えば、単調による眠気を払拭するために、停車中に体を意識的に動かすことなどは有効でしょう。しかし、疲労による眠気の

表1 6項目式負担調査票

眠気・疲労	1. まぶたが重かった 2. ひと休みしたいと思った
負担に抗する努力	3. 緊張していた 4. 気の休まるひまがなかった
あき・集中困難	5. 意欲がわかなかった 6. 作業にあきてきた

解消には、休息をとることが欠かせません。多くの作業者が過度の疲労を訴えていた場合は、作業の負担が過大にならず、休養も取りやすいように勤務の条件や編成を変更することが必要です。

疲労調査の測定項目

ここでは、列車運転士の疲労調査で用いられてきた主な測定項目について述べます。

○自覚症しらべ

主観的な疲労症状を捉えるものとして、日本作業衛生学会の疲労研究会が考案した「自覚症しらべ」があります。この調査票(1970年版)は、「あくびがでる」などの「ねむけとだるさ」(Ⅰ群)、「いらいらする」などの「注意集中の困難」(Ⅱ群)、「肩がこる」などの「身体的違和感」(Ⅲ群)という疲労の3因子についての30項目の質問から構成されます。該当する症状があったら○、なかった場合は×を作業者自身がつけるものです。各質問項目が、具体的な疲労症状を示しているため、「疲れ」という漠然とした感覚から、その負担要因を探るのに有効です。なお、本調査票は、2002年に改訂されました。改訂理由は、視覚負担や局所筋負担のような近年の作業形態の変化に十分対応したものにすることや、各項目を5段階評定にすることで、自覚症状の量的な変化も把握できるようにすることなどです。

自覚症しらべは、これまで、主に運転の前後に実施していました。理想的には、途中の停車駅でも測定を行うことが好ましいのですが、質問数が多いため、時間的に困難です。そこで、当研究所では室内実験に基づき、30秒ほどの短時間で、列車運転士の負担を評価できる方法として「眠気・疲労」、「負担・努力」および「飽き・集中困難」の6尺度で構成される運転負担質問票を作成しました(表1)。

○フリッカーテスト

深夜早朝帯での作業が含まれ、かつ、単調的要素の強い運転作業では、覚醒レベルの低下には特に注意しなければなりません。この覚醒レベルを反映するフリッカーテストもよく用いられてきました。光を点滅させた場合、単位時間あたりの点滅頻度が高いと、この点滅が知覚できず、持



図2 フリッカー測定器と心拍計

続光と同じに見えますが、点滅頻度が低いとちらついた光(このちらつきをフリッカーという)にみえます。単位時間当たりの点滅頻度をフリッカー値(単位Hz)、ちらついた光とみえるか持続光と感ずるかの境界の値を臨界融合頻度(critical frequency of fusion: 以下CFF)と呼び、このCFFを測る装置をフリッカー測定器(図2)とといいます。覚醒レベルが低下していると、このCFFが小さくなります。CFFは精神作業の成績とも関係があり、検査に要する時間も数十秒程度と比較的簡便に測定できるため、これまで、CFFの結果に重点をおき調査を行ってきました。

○心拍数

心拍数は、直接的には、疲労の測定項目ではありませんが、生体負担の程度を知る目安として活用してきました。心拍数は心臓の1分間あたりの拍動数のことです。心拍は、この他に血圧や胃腸の運動、体温調節など様々な生理機能を調節する自律神経系の支配を受けています。自律神経系は交感神経系と副交感神経系の二種類からなります。肉体労働など、体を大きく動かす時には、交感神経の活動亢進によって心拍数は高まるため、作業負担の大小を比較する指標として用いられます。一方、緊張感が高まったり、興奮した場合も、脳の視床下部を介して、交感神経の活動が亢進し、心拍数は高くなります。従って、精神作業において、動作や姿勢がほぼ同一とみなせる場合は、この心拍数の高まりの差により精神的負担の影響を大まかに比較することが可能です。携帯型の心拍計を用いることで、運転士の生体の状態を連続的に捉えられることが大きな利点の一つです(図2)。

心拍数を参考にするのは以下のような場合です。例えば、運転終了後のCFFの低下が大きい時、運転中の負担が過大でなかったかが気になるところです。この場合、運転中

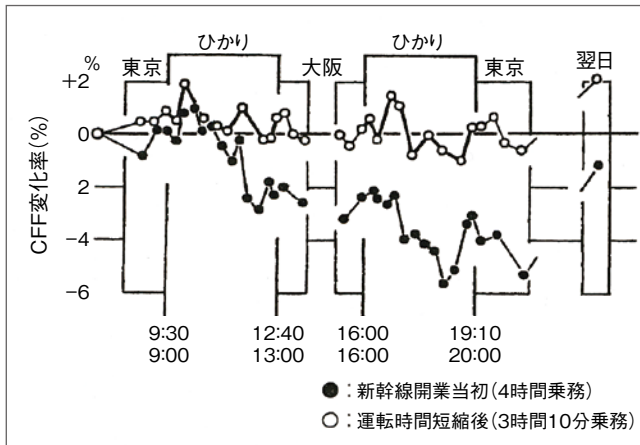


図3 新幹線開業当初と運転時間短縮後の運転士のCFF

の心拍数を、過去に得られた運転時の心拍数増加の程度と比較します。また、運転開始後、比較的早期に、CFFが大きく低下し、運転終了直後にCFFが作業前の状態に戻った場合は、単調感が強かったことが推測されますが(場面転換により回復しているため)、運転中に著しく心拍数が低下していればこの見方を補強することができます。

疲労の判定

当該業務によく慣れた複数名の運転士(実際には6~10名程度であることが多い)の測定データを平均し、疲労兆候がみられたら、それが以下のような観点で‘問題のある疲労’であるかどうかを判断します。

(1) 一勤務による疲労が次の勤務に持ち越されていないか。

自覚症しらべやCFFにみられた疲労兆候が、休息をとっても回復されず、翌日など次の勤務に持ち越されているようでは問題です。

(2) 事故やミス発生の可能性が高まる程度までCFFが低下していないか。

CFFの変化と作業パフォーマンスの関係を調べた実験では、CFFが作業前の値に対して約10~15%低下すると作業パフォーマンスが急激に乱れていました。このため、CFFが10%低下しているラインを‘生理的な安全限界’とし、より安全をみた、5%の低下ラインを‘好ましい限界’として、判断の目安としてきました。

(3) 疲労によって、勤務終了後、あるいは休日の生活行動が制約を受けていないか。

運転士の生活行動を調べると、勤務中の眠気防止や、勤務後の疲労を回復するために、仮眠を勤務前後に取っていることがわかります。このような仮眠は、眠気や過労の防止という意味では有効ですが、余暇の時間がなくなるようでは勤務等に問題があると言わざるを得ません。

運転士の負担・疲労調査の例

運転士の負担・疲労調査の一例として、新幹線の開業当初で東京-大阪間を4時間で結んでいた時と、同区間がスピードアップにより3時間10分に短縮された時の結果を紹介します。いずれも、東京を出て新大阪まで運転し、そこで3時間の休憩をとった後、その日のうちに東京へ戻ってくるという勤務です。3時間10分乗務と4時間乗務で、それぞれ6名の運転士を被験者とし、乗務前の安静値に対するCFFの変化率(以下、CFF変化率)を示したものが図3です。開業当初の4時間乗務についてみると、往路では運転開始から3時間経過したあたりでCFFが大きく低下し始めました。新大阪での休憩後の復路でもCFFは下がり続け、約3時間経過した頃には-5%を下回っています。この影響は東京に帰着後も残り、翌日になっても完全には回復していませんでした。一方、3時間10分乗務では、往路、復路ともに、乗務前のレベルを維持しながら推移しており、覚醒レベルが好ましい状態で運転がなされていたことがわかります。4時間乗務では約3時間を経過したあたりからCFFの顕著な低下が始まり、また、翌日にまで疲労が残されていることから、このような運転では、乗務時間が3時間から4時間の間に問題となる疲労発生の変化点があると考えすることができます。

さいごに

今回紹介した自覚症しらべやフリッカーテストは、運転中には測定が出来ないという欠点があります。今月号の「発話音声から疲労を知る」で紹介しているように、現在、運転士の換呼(運転士が線路状況等を確認する時に行う発話)による音声から覚醒レベルを測定する方法について研究を行っています。

冒頭に述べたように、人間の疲労は、列車運転士の作業や勤務の評価以外にも、様々な分野と関わりの深い問題です。より簡便で精度の高い疲労評価法の開発が望まれています。[RRR]

文献

- 1) 渡辺恭良: 脳機能イメージングによる疲労および疲労感の解析, 別冊医学のあゆみ, pp6~11, 2005