

各種交通機関における操縦者のワークロードと 状況認識に関わる諸問題

芳賀 繁*

鉄道運転、船舶操縦、自動車運転に関わるワークロード測定の研究例を紹介し、航空パイロットを含めた各種交通機関操縦者のワークロードと状況認識について、問題の所在を比較検討した。ワークロードの評価目的と作業負荷の種類がそれぞれ異なっていることを認識し、適切な測定手法を選択しなければならないと結論された。作業負荷要因の特定にはタスク分析が重要であり、測定手法を選択するためには、作業負荷、作業負担、負担の減退的効果のそれぞれと各種ワークロード指標がどのような関係にあるのかを知ることが肝要である。

Workload and Situation Awareness in Various Modes of Transportation

Shigeru HAGA*

This paper reviews examples of workload studies on train driving, ship handling, and automobile driving, and compares issues concerning workload and situation awareness of operators in various modes of transportation, including airplane pilots. Because the purpose of workload assessment and the main factors of work stress differ among the different modes of transportation, it is important to carefully choose the proper measure of workload, suitable for the purpose of the assessment and for the source of work stress. The author suggests performing a task analysis in order to identify the source of work stress. Then the proper measurement technique can be chosen on the basis of the understanding of the relationship between workload indices and workload stages (stress-strain effects).

1. はじめに

本稿では、鉄道運転士と船長のワークロードを測定・評価する目的で行った筆者の研究を紹介するとともに、自動車ドライバーおよび航空パイロットを含めた各種交通機関操縦者のワークロードと状況認識に関わる諸問題を比較検討する。

なお、本稿の中で用いる用語の定義はISO6385およびISO10075(JIS Z 8502 1994)に基本的には準拠するが、一部は筆者独自の使い方も許容されたい。す

なわち、「作業負荷(Work stress)」は外部から作業者に影響を及ぼす負担要因であり、課業要求、作業強度、困難度など、「作業負担(Work strain)」は作業負荷に対する作業員内部に生じる反応であり、課題遂行の努力、処理資源の割り当てなどがこれに相当する。「作業負担の減退的効果(Impairing effects of work strain)」にはエラー、疲労、注意力低下などが含まれる。また、作業負荷と作業負担を合わせた意味で「ワークロード(Workload)」の語を用い、「精神的負荷(Mental stress)」、「精神的負担(Mental strain)」、「メンタルワークロード(Mental workload)」は、それぞれ作業負荷、作業負担、ワークロードの精神的要素、あるいは精神的側面とする。

「状況認識(Situation awareness)」とは作業環境の

* 立教大学文学部心理学科教授
Professor, Dept. of Psychology,
Rikkyo University
原稿受理 2004年11月22日

時空間中に存在する課題遂行に必要な要素を知覚し、その意味を理解し、近未来における状態を予測すること¹⁾、簡単に言うと、今何が起っていて、この先どうなりそうかがわかっていることである。

一般的に、システムが複雑化するとオペレータのメンタルワークロードが増大し、異常時等に過負荷となったオペレータがエラーをおかしがちになる。その対策としてシステムの自動化、コンピュータ化を進めるとメンタルワークロードは低減するが、状況認識が難しくなり、異常時等に状況認識を誤ったオペレータがエラーをおかす。状況認識を阻害することなくメンタルワークロードを軽減するような自動化はどうあるべきかが、現在、さまざまな分野で重大な関心事となっているのである。

2. 鉄道

2-1 作業負担問題の歴史の変遷

鉄道の場合、運転する列車や動力車の種類によって作業負担と負担の減退的效果が異なる。

蒸気機関車の操縦は重労働であり、機関士と機関助手にとって最大の作業負担要因は身体的負荷であり、減退的效果は身体的疲労であった。

その後、動力は電気またはディーゼルに変わり、身体的負荷は大幅に軽減されたが、その副作用とも言べき作業の単調性が問題となる。短時間であれば単調作業も我慢できるが、長時間に及ぶと注意力の維持は困難になり、居眠り事故が多発する。したがって、電気機関車、ディーゼル機関車、電車、気動車の操縦における重要な負担要因として、作業の単調性と作業時間をあげることができる。とくに、電気機関車またはディーゼル機関車が牽引する貨物列車の運転は、走行速度が遅く、深夜に走ることが多く、列車交換(単線での行き違い)や退避(別の列車に追い越されること)のための長時間停車があるので、最も減退的效果が大きい作業である。しかし、問題は貨物列車にとどまらず、大都市内、都市近郊を運行する電車列車であっても、運転士の居眠りが原因と思われる事故やトラブルがしばしば発生している。

一方、中・長距離旅客輸送においては、航空や高速道路との厳しい競争を勝ち抜くために、列車の高速化が進められてきた。高速列車の運転は、信号やカーブやポイントの制限速度に応じて頻繁に加減速操作を行わなければならないだけでなく、信号その他からの情報が運転士に提示される時間密度が高くなり、それらを迅速に情報処理しなければならない。

このような鉄道システムでは、メンタルワークロードをどのように測定・評価するかが問題となる。

モノレールや新交通システムなど低速な都市内輸送には全自動運転が既実用化されているが、将来は高速都市間輸送にも拡大される可能性がある。その場合、列車運転士は平常時にはシステムの監視以外何もすることがなく(過小負荷)、ごく稀に生じる異常時に対処できないほど過大な作業負担が課されるという、原子力プラントのシステム・オペレータのような性質のワークロードになるだろう。メンタル・ワークロードよりも状況認識が重大な問題として浮上するかもしれない。しかし、このようなシステムでは、運転士よりも列車指令員のワークロードと状況認識が問題となるに違いない。

2-2 運転士のワークロード測定

JRの場合、一つの旅客鉄道会社に電気機関車もディーゼル機関車も電車も気動車もある。一人の運転士が各駅停車も特急列車も操縦する。したがって、運転士のワークロードを測定するにはさまざまな種類の負荷・負担に対応しうるツールが必要となる。

ここで、筆者らが鉄道総合技術研究所で行った一連の室内実験の一部と、その結果に基づいて開発した列車運転士用作業負担調査票を紹介したい²⁻⁴⁾。

まず、鉄道運転士のタスク分析により、主要な作業負担が列車操縦、信号監視、定時運転のための時間計算の三つから成り立っていると考え、それぞれに対応する三つのタスクをコンピュータスクリーンで同時に遂行する室内実験課題を考案した(Fig.1)。実験参加者は、ランダムなタイミングでランダムな方向に向きを変えるターゲット刺激が画面中央に描かれた円の中に留まるよう、トラックボールを使って操縦する作業を継続的に行いながら、画面上部で変化する信号が赤になった場合にはできるだけすばやくボタンを押すこと、さらに、画面下部に定期的に提示される三つの一桁数字を足し算して、その答えが偶数か奇数かをボタンで答えることが要求された。列車速度はターゲット刺激の動く速度と、信号

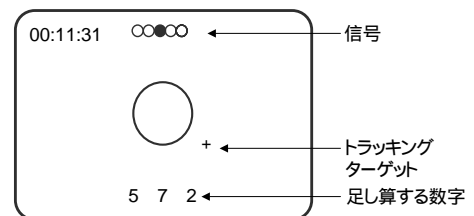


Fig. 1 列車運転作業の要素を盛り込んだ室内実験課題

および計算課題の刺激提示頻度でシミュレートされた。また、課題を90分連続で行う「長時間条件」と、30分で終了する「短時間条件」を設定した。

被験者は課題終了後ただちに日本語版NASA TLX⁵⁾の六つの下位尺度と、20項目からなる精神疲労尺度⁶⁾に記入した。その因子分析結果に、運転作業の専門家の意見を加味して完成させたのが、7尺度14項目からなる「負担度調査票」(Table 1)である。

3. 船舶

船舶操縦(操船)における作業負荷要因としては、天候、潮流、岩礁などの自然環境、航行海域の交通環境、船舶の操舵性能、航行速度、船橋における機器と人員を含む船舶運行体制などがあげられる。近年、一部の混雑海域における操船の困難性と、船舶の高速化に伴ってメンタルワークロードの問題が重要性を増しているが、操船ワークロードに関する研究は少ない。

筆者は1995年に法政大学の鈴木、郵船海洋科学(現在の社名は日本海洋科学)の杉崎らと共同で、混雑海域における船長の作業負担を、操船シミュレータ(Fig. 2)を用いて測定する試みを行った⁷⁾。

実験には実際の船長および一等航海士が参加した。実験参加者に与えられた課題は、自船(7万tのLNGタンカー)が安全に海峡を抜けるよう、操舵担当者とエンジンルームに指示を出すことである。航海の途中に3.6万tのコンテナ船が、右舷5、30、または100度の方向から接近してくるが、自船がそのまま進んでも衝突しないベクトルで来る場合(P条件)と、避航しなければ衝突する場合(C条件)があ

る。各試行は両船が航過した時点(スタートから20~40分)で終了した。

実験参加者は航行中ゴムボールを手に持ち、緊張の程度に応じて握る強さを変えるよう教示された。その強さは前腕部の長掌筋より導出した筋電図で評価する。課題終了後、日本語版NASA TLXを操船タスクに合わせて一部改変したものによる負担調査も行われた。

Fig. 3はC条件における筋電図分析の結果を示す。縦軸は、各実験参加者の最大筋力に対する握りの強さ(%MVC)を平均したものである。前方(100度)から他船が接近する場合には避航すべきか、すべきでないかの判断が難しく、他船が間近に迫ったときから急激に緊張感が増大する。この間、船長は頻繁に他船の方位と距離を測っており、何らかの情報支援装置ないしは衝突防止警報装置の開発によって、メンタルワークロードの軽減を図ることの必要性が示唆された。

なお、ChauvinとSaad⁸⁾によって操船と自動車運転のタスク分析が行われ、両者が比較されているので参考にしてほしい。たとえば、タスクの要求(作業負荷)に関連して、(a)オペレータがなしうる車両・



出典) 株式会社日本海洋科学の許可を得て同社のウェブサイトより転載。

Fig. 2 操船シミュレータ

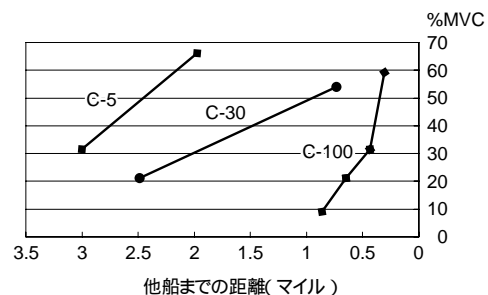


Fig. 3 他船との距離および見合い角と、ボールを握る強さで評価された危険感との関係

Table 1 列車運転士用に作られた負担度調査票の尺度

尺度	質問
難しさ	1. 注意が必要だった
	8. 緊張していた
達成感	2. 作業が思うようにできた
	9. いっしょけんめい作業していた
集中困難	3. 意欲がわかなかった
	10. 作業に集中できなかつた
疲労	4. ひと休みしたいと思った
	11. 途中でやめたいと思った
眠気	5. まぶたが重かつた
	12. 眠ってしまいそうだった
忙しさ	6. 気の休まるひまがなかつた
	13. 時間に追われていた
飽き	7. 作業にあきていた
	14. 作業から逃れたかつた

船舶の制御の程度は同程度であるが、大型船の場合は反応が遅いという特有の問題を航海士が考慮しなければならない、(b)他車・他船の位置などの有用な情報が船舶ではブリッジで得られるが、自動車ドライバーは自ら観察しなければならない、(c)時間的制約は自動車の方がはるかに強い(短い)、(d)自動化の程度は船舶の方が高いので、航海士は船舶を断続的に制御すればよいが、ドライバーは継続的に制御し続けなければならない、などと記述されている。

4. 自動車

自動車運転の特徴は自由度の高さにある。職務上の運転でなければ、交通法規を守っている限り、旅行の時期、目的地、ルート、速度、車線をドライバーが自由に選ぶことができる。

Fig. 4は運転行動(単純化するため速度選択に限定)と知覚されたリスクとの間の「サーボメカニズム」を示す。ドライバーはリスクが高いと感じたら速度を落とし、安全の余裕度が十分にあると思えば先を急ぐために速度を上げる。結局リスク水準は高すぎも低すぎもないある一定レベルの周辺に留まるのである。やや余談になるが、このメカニズムゆえに、運転技能の訓練は交通安全に寄与しない。なぜなら、訓練によって以前より上手に運転できるようになっ

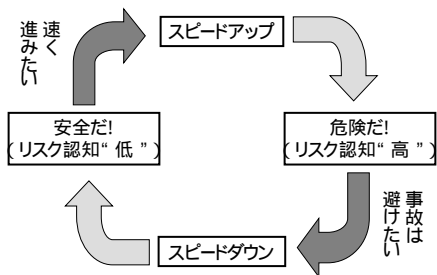


Fig. 4 運転行動(速度選択)と主観的リスクとの間のサーボメカニズム

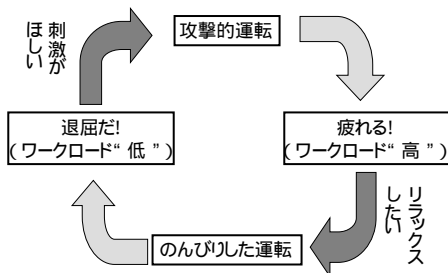


Fig. 5 運転行動と主観的ワークロードとの間のサーボメカニズム

たドライバーは、同じ交通環境のリスクを低く感じ、したがって以前よりも速い速度で走行するようになるからである。

このようなフィードバックメカニズムが、総体としての国や地域の道路利用者にも働いていると考えたのがWildeのリスクホメオスタシス説^{9,10)}である。彼は、交通環境や車両の改善によってもたらされるリスクの低減が、道路利用者が知覚するリスクの水準に影響を与え、長期的には事故リスクが元の水準にまで戻ってしまうこと、それを防ぐには人々が受け入れるリスクの目標水準を引き下げのしかないと主張した。

同様のサーボメカニズムはメンタルワークロードにも当てはまる(Fig. 5)。ドライバーは作業負担を目標水準の近くに保つよう、速度などを調節して作業負担を自ら制御することができる。

このように、自動車運転は、列車や船舶の操縦よりも作業の自律性ははるかに高いので、ワークロードの測定や研究はバス、トラックなど職業ドライバーの勤務時間、シフト、運転と休憩の時間的配置、疲労などに焦点が絞られていた。それは、“第2種の”オーバーロードを予防するためである。

第2種のオーバーロードとは、作業負担の減退的效果が作業時間の経過とともに蓄積して、作業者の限界を超える現象のことを筆者が名づけて呼んだものである。これに対し、情報処理負担などが一時的に人間の処理能力を超える現象を“第1種の”オーバーロードと呼んで区別した(Fig 6参照)。自動車や列車の運転のように、低～中程度の作業負担が長時間にわたって継続するような作業においては、第2種のオーバーロードの方が大きな問題であると筆者は10年ほど前に主張した¹¹⁾。

しかし、最近では自動車においても第1種のオーバーロードが重大な関心事となっている。それは、

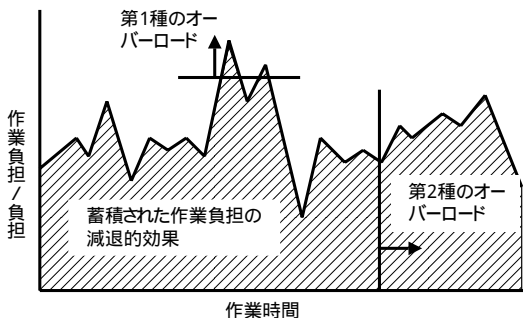


Fig. 6 第1種のオーバーロードと第2種のオーバーロード

運転中の携帯電話使用のほか、ナビゲーションシステム、衝突警報装置、暗視装置、ACC、ADAS、ISAなど車両搭載情報機器の開発、商品化、普及が急激に進んでいるからである。

たとえば、豊田中央研究所のUchiyamaらは交通渋滞、天候、レストランなどに関する音声情報サービスを車内で提供する際に、ドライバーの作業負担を推定したうえで余裕がある時にだけ情報提供するシステムを開発しようとしている¹²⁾。作業負担は、速度、ハンドル角度、アクセルペダル位置、ブレーキペダル位置、車間距離などに基づいて計算する。作業負担を正確に見積もるために、室内実験により、上記の各変数と、二重課題法(記憶課題)で測定されるスペア・キャパシティとの間の相関が調べられた。その結果はFig. 7に示すとおり、アクセルペダルを離すタイミング、次いでブレーキペダルを離すタイミングと作業負担の関係が最も強いことが明らかになった。

5. 航空

メンタルワークロードの研究は1980年代のアメリカで、主に航空のために発展したと言っても過言ではない。それは、コックピット計器類のCRT化、飛行管理システム(FMS) 対地接近警報装置(GPWS) などさまざまな安全/自動化システムの導入、それに伴う航空機関士の廃止による運航乗務員の3人から2人への減員といった時代背景を反映したものであった。その後、航空機の自動化はさらに進み、パイロットのタスクは航空機を操縦するというよりも、自動化機器に目標値を入力することと、その後の動作を監視することが中心となった。ここに至って、航空ヒューマン・ファクターの専門家の関心はメンタルワークロードから状況認識の問題へと大きくシ

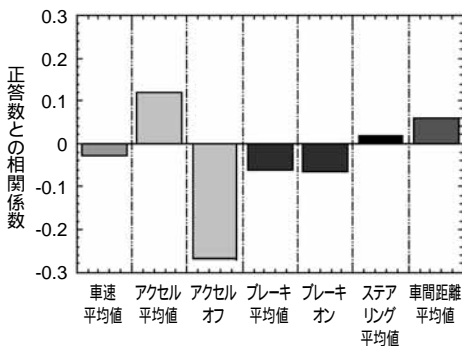


Fig. 7 車上センサーから得られる各変数と記憶テスト正答数の相関係数

フトした。人間が担当していた情報処理を機上のコンピュータが肩代わりして作業負担が低減した代償として、パイロットが状況認識を誤り、事故につながる事例が頻発したからである。

したがって、現在、航空安全を確保するために解決すべき緊急課題として、状況認識を支援するための機器設計、訓練手法の開発に力点が置かれている。

6. まとめ

各種交通機関における操縦者のワークロードと状況認識に関する現状を簡単にまとめよう。

鉄道では従来、運転時間が作業負担要因の中心であったが、列車の高速化、情報化に伴って情報処理負担(精神的負担)の問題が生じた。将来、運転の自動化がさらに進むと状況認識の問題が浮上する可能性があるが、それは運転士ではなく、列車指令員が対象となるだろう。

海運では、混雑海域における船長の情報処理負担と緊張感(精神的負担)が問題となり、コンピュータ支援装置の開発と改良に取り組んでいる。

自動車交通の場合、長時間運転による疲労や眠気(作業負担の減退的效果)が最大の問題で、もっぱら職業ドライバーの勤務時間や連続運転時間に関連してワークロードが測定されてきた。しかし、近年、

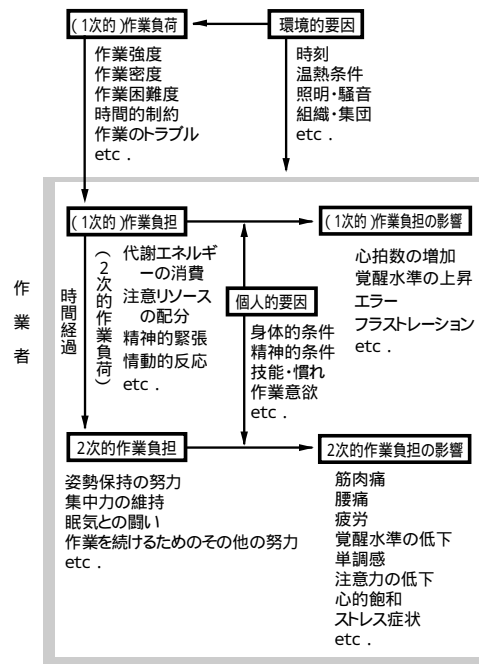


Fig. 8 ワークロードに関連する諸概念とワークロード指標

車載情報機器が急速に普及しつつあり、ドライバーのメンタルワークロード測定・評価のニーズが高まっている。

航空では、コクピット自動化の進展に伴い、メンタルワークロードから状況認識へと関心が移っている。

ここで留意してほしいことは、ワークロード測定の目的が交通機関によって異なる点である。

鉄道では、運転士の乗務時間を規制するためにワークロード測定が求められる。たとえば、従来運転開始から2時間で到着する駅で運転士が交替していた同じ区間を、速度向上の結果1時間半で走れるようになったとき、さらに30分運転を継続して先の駅で交替することは是非か、科学的見地から調査・検討して答えを出さなければならない。

航空では、新しい機種が開発されるたびに、いくつかのコクピットデザイン、計器デザインの中から最良のものを選択したり、新機種で作業負荷が増加しないことを在来機と比較して証明するなど、もっぱら設計段階でのワークロード評価が求められる。

自動車では鉄道に近いニーズと、航空に近いニーズの両方があると言える。

したがって、結論はいたって単純で、言わずもがなの感ではあるが、ワークロードの評価目的と作業負荷の要因の種類に合せて、最適の測定手法を選ぶことに尽きる。作業負荷要因の特定には、何らかの形のタスク分析を行うことが重要と考える。

Fig. 8はワークロードに関連する諸概念の間の関係を示したものである¹³⁾。図中の「2次の作業負荷」は作業時間の継続であり、その結果生じる作業者の内的反応を「2次の作業負担」とした。1次的作業負担の影響と2次の作業負担の影響は、測定指標の値としては逆の動きとなることがあるので、十分注意する必要がある。各種ワークロード測定法がワークロードのどの部分に対応しているかについては、『人間工学ハンドブック』¹⁴⁾のp.149表3.4を参照されたい。

参考文献

- 1) Endsley, M. R. : Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), pp. 32-64, 1995
- 2) 芳賀繁「課題困難度と作業時間が精神的作業負担および精神疲労の主観的指標に及ぼす影響」『日本心理学会第61回大会発表論文集』p. 321、1997年
- 3) 澤貢、宇賀神博、藤浪浩平、田中綾乃、大久保堯夫「作業時間が作業者の心身状態に及ぼす影響の実験的検討」『鉄道総研報告』11巻11号、pp. 25-30、1997年
- 4) 芳賀繁、澤貢、藤浪浩平、宇賀神博「列車運転作業を模した課題を用いた室内実験による作業負担測定と負担度調査票の開発」『立教大学心理学科研究年報』第41号、pp. 25-34、1999年
- 5) 芳賀繁、水上直樹「日本語版NASA TLXによるワークロード測定：各種作業に対する指標の感度」『人間工学』32巻2号、pp. 71-79、1996年
- 6) 篠田晴男、國分三輝、芳賀繁「二重課題作業の困難度と作業時間が心理・生理的指標に及ぼす影響(3)：蓄積的な負担の評価について」『日本心理学会第60回大会発表論文集』p. 446、1996年
- 7) 芳賀繁ほか「混雑海域における操船のメンタルワークロード測定」『人間工学』32巻特別号(第37回大会講演集)、pp. 118-119、1996年
- 8) Chuavin, C., and Saad, F. : Interaction and communication in dynamic control tasks: Ship handling and car driving, In T. Rotengatter and R. D. Huguenin (Eds.) *Traffic and Transportation Psychology*, Elsevier, pp. 101-111, 2004
- 9) Wilde, G. J. S. : *Target Risk 2*, PDE Publications, Toronto, Canada, 2001
- 10) 芳賀繁「リスク・ホメオスタシス説：論争史の解説と展望」『交通心理学研究』9巻1号、pp. 1-10、1993年
- 11) 芳賀繁「メンタルワークロードの測定と注意リソースの測定」『人間工学』29巻6号、pp. 349-352、1993年
- 12) Uchiyama, Y., et al. : Voice information system adapted to driver's mental workload, *Proceedings of the Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society*, 2002
- 13) 芳賀繁『メンタルワークロードの理論と測定』日本出版サービス、2001年
- 14) 芳賀繁「ワークロード」伊藤謙治ほか(編)『人間工学ハンドブック』朝倉書店、pp. 138-151、2003年