心拍変化を用いた人間・自動車・環境系の精神負担評価モデルの構築*

Study on Construction of Evaluation Model for the Mental Work Load using the Heart Rate

栗谷川 幸代^{*1}, 景 山 一 郎^{*1}Yukiyo KURIYAGAWA^{*2} and Ichiro KAGEYAMA^{*3} College of Industrial Technology, Nihon University,
1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba, 285-8575 Japan

When we evaluate the driver-vehicle-environment systems, we need to consider the adaptability of the driver. Therefore, in the evaluation of these systems, it is important to consider the factor of the Mental Work Load (MWL) for the driver. It is difficult to measure the MWL directly. Much research on MWL in connection with vital reactions has been done. However, a method of evaluation has not yet been established. In this study, a MWL evaluation is performed using the RRI (R-R Interval), because there is a strong correlation existing between the MWL and the RRI. In order to describe the relationship between the RRI and the factor of the MWL, two kinds of models are constructed. The first model is a static linear model, and the second model is a static nonlinear model. In these models, the RRI of drivers is reproduced. From the result, these models include the relationship between the factor of the MWL and the RRI. Finally, we analyzed the relationship between input and output of the model. The result of that the change of effectiveness is at the entrance and exit points of the curve and the tacking point. It is therefore shown that an analytical method using the MWL evaluation model can be useful for the evaluation of the driver-vehicle-environment system.

Key Words: Heart Rate, Mental Workload, Modeling, Factor Analysis, Multiple Regression, Neural Network

1. 序 論

機械の性能や機能面に着目した技術発展が行われ、機械の信頼性、作業環境が向上した結果、近年では、人間と機械のインタラクションをいかに快適で質の高いものにすることが重要となってきた。これらの評価には、人間は高い適応能力を有することから、作業効率や作業成績だけでは十分な評価が行えない場合があり、人間が受ける精神負担や作業遂行に関する努力度合いも含めた評価が必要になる。そこで、これらの評価を定量的に行う方法として、近年では多くの生体反応を用いた研究が行われている¹⁾⁴⁾。これにより、生体反応による精神負担評価はある程度確立して来ているものの、一方で、これらの精神負担がどのような要因により生じるのかに関する検討はあまり行われていないのが実情である。

そこで、本研究では、精神負担要因推定の観点から、精神負担の要因とそれにより生じる心拍の変化を結びつけた精神負担評価モデルの構築を行う。本モデルの構築を行う場合には、まず始めに心拍と精神負担の要因との伝達特性を考慮し、モデル構造の検討を行う必要がある。そこで、これらの伝達特性について、応答性と複雑性に関する検討を行った。具体的には、応答性として静特性と動特性を、また、複雑性として線形性と非線形性を考えた(図1)。この図より、心拍と精神負担の要因との伝達特性の表現には、4つのモデル構造が考えられる。筆者らは、先行研究⁵⁾として、この4構造で最も詳細に心拍と精神負担の要因との関係を表

現できる動特性非線形モデルの構築を行い、自動車運転時におけるドライバの精神負担要因の変動を心拍変動の動特性も考慮して検討を行った。しかしながら、このモデルは非常に複雑な構造となるため、構築にも解析にも時間と手間を要する。そこで、本研究では、前述の4特性の中でより構造が単純な静特性領域における線形および非線形モデルの構築および解析を行い、自動車運転時のドライバの精神負担評価モデルとしての可能性について検討を行う。

2. 実験概要

モデル構築を行うためには、入力と出力のデータが必要となる。そこで、データ収集のための実験を行った。以下に概要を示す。

2.1 実験コース

同様なコース形状が連続するような道路環境において、交通事故がある特定のカーブに集中して発生しているという事故調査報告⁶⁾がある。図2に、この報告にある静岡県の日本平パークウェイを示す。図において、上側が山頂方向、下側が山麓方向である。カーブA、カーブBにおける図中の矢印は、矢印が指す進行方向

Fig.1 Structure of the Model

* 原稿受付 2004 年 1 月 28 日。

^{*1} 正員, 日本大学生産工学部(☎ 275-8585 習志野市泉町1-2-1)。

E-mail: yukiyo@cit.nihon-u.ac.jp

における昭和62年から平成元年上半期までに、警察に届けられた人身事故件数を示している。一般的に、交通事故は偶発性が高いと考えられていることから、発生した事故状況の統計的な解析や事故再現という観点からの原因推定に重きが置かれている。しかし、カーブBといった事故多発地点においては、単に偶発的な事故であるとは考えにくく、人間・自動車・環境系におけるドライバの認知ミス、判断ミス等が生じ、事故を誘発する原因となっているものと考えられる。

そこで、本研究では、前述の事故調査において、形状の類似した事故の少ないカーブAと事故の多発するカーブBにおける精神負担評価モデルの構築を行うことにより、両カーブにおけるドライバの情報処理に伴う精神負担の要因の変動について検討を行い、本モデ

ルの時系列精神負担評価モデルとしての可能性について検討を行う。

2.2 走行実験

実験は前述の片側1車線対面通行の日本平パークウェイで行った。このコースにおいて、練習走行後、走行実験を行い、ドライバの心拍、呼吸、車両の状態量および走行軌跡を計測した。実験車両は、国産2200ccの普通乗用車を使用し、被験者は、ほぼ毎日運転をしている男性2名とした。被験者Nは年齢32歳、運転歴14年、被験者Mは年齢23歳、運転歴5年である。また、被験者Nは、本実験コースの走行が初めてなのに対し、被験者Mは、過去に十数回の走行経験がある。被験者に対して走行速度などの細かな指定は行わず、普段通りの走行を意識させた。

3. 心拍変化を用いた精神負担評価

心拍は、ストレスに対して反応する機構を担う交感神経と、安静時に逆の働きを担う副交感神経の相反する二種類の自律神経の活性度合いを反映する⁷⁾。ここで、心拍は通常心電図のRRIとして測定されることから、人間が受けているストレスなどの精神負担と密接な関係をもつこととなる。具体的には、RRIは人間が精神負担を受けることにより短くなる。図3に、上記実験におけるRRIの結果を示す。図中の横線はカーブ入口から出口まで示し、その前後は直線路である。図より、被験者N、M共にカーブ入口付近では、RRIが

Fig. 2 Experimental course

Distance[m]
Curve A

Subject N

Distance[m]
Curve B

Distance[m]
Curve A

Subject M

Distance[m]
Curve B

Fig. 3 Experimental result of the RRI

短くなっていることがわかる。これより、この地点において被験者の精神負担は増加していることがわかる。一方で、RRIの変化のみでは、これらの精神負担がどのような要因により生じているのかを明確にすることはできない。自動車運転時における人間が行うべきタスクは、走行状況の認知、判断、運転操作があり、遂行すべきタスクの難しさ等により精神負担が生じているものと考えられる。そこで、これらの精神負担要因と心拍とを結びつけて検討を行うため、次章では、この関連性を表現する精神負担評価モデルの構築を行う。

4. 精神負担評価モデル

本研究では、ドライバの精神負担の要因に対する心拍変化を表現するモデル構築として、線形と非線形の二つを用いる。まず始めに、モデルの適用範囲検討の観点から、より構築が簡易である前者の線形モデルである重回帰分析を用いたモデル(重回帰モデル)の構築を行う。次に、非線形モデルであるニューラルネットワーク(以下、NN)モデルの構築を行う。これらのモデルを構築する際には、学習データとして、そのシステムの入力と出力のデータが必要となるが、精神負担評価をモデル解析により行う場合には、このモデルの入力情報の選定が非常に重要となる。

4.1 モデルの入力情報の選定

通常、人間は車両の運転時、絶えず速度などの車両の状態量と周囲の道路状況など、多くの情報により操舵などの車両運動制御を行っているものと考えられる。そこで、モデルへの入力候補として、前述の走行実験により、車両の状態量として、ヨー角、ヨー角速度、ヨー角加速度、ロール角、ロール角速度、ロール角加速度、ピッチ角、ピッチ角速度、ピッチ角加速度、前後方向速度、横方向速度、前後方向加速度、横方向加速度、横すべり角の14項目を、環境情報として、図4に示すレーダーサイト概念に基づく距離情報13項目と角度情報13項目を計測および計測値から算出した。ここで、レーダーサイトとは、車両の進行方向に対し、車

Fig.4 Concept of Radar Sight

両の重心点を基準に正と負の角度をもった複数の視点を考え、これと路肩およびセンターラインまでの距離を距離情報(図中:L)、およびその時の交差角を角度情報(図中:α)としたものである。つまり、距離情報とは、ドライバが自車の走行位置を認識するために用いている情報、また角度情報とは、前方の道路形状等の予測に使用するための情報と考えている⁹⁾。このように多くの情報がドライバには与えられているものと考えられるが、モデルを構築する際、あまりに多くの情報をモデルの入力とすると、モデルの複雑化や入力間の多重共線性が問題となる。そこで、本研究では、前述の収集した40項目データの中から、重回帰分析におけるステップワイズ法を用いて、ドライバの心拍変化に対し寄与度が高いと考えられる入力情報の選定を行った。ステップワイズ法とは、ステップごとにモデルの決定係数を最も増加させる変数を独立変数として取り入れ、同時にその変数の回帰係数の有意性検定を行い、有意ならば、そのときすでに取り入れられている変数の有意性検定を行って、最終的に取り入れられる変数を決定する方法である⁹⁾。この結果、被験者NではカーブA(以下N_A)、B(以下N_B)ともに18項目を、被験者MではカーブA(以下M_A)では19項目、カーブB(以下M_B)では18項目を選定した。選択したこれらの入力情報を用いて、次に、線形モデルおよび非線形モデルの構築を行う。

4.2 線形モデル

線形モデルでは、重回帰式⁹⁾¹⁰⁾を用いる。重回帰モデルは、出力情報と複数の入力情報の因果関係を線形的に表現する回帰方程式であり、下式のように表される。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

y : RRI

a_0 : 定数項

a_n : 偏回帰係数(または標準偏回帰係数)

x_n : 車両情報および環境情報

構築したモデルを解析することにより、精神負担評価を行う場合には、実験値のRRIをモデルがどの程度表現出来ているかを検証する必要がある。図5に推定結果を示す。それぞれN_A、N_B、M_A、M_Bにおけるモデルの自由度調整済み決定係数は、0.916、0.968、0.941、0.824であり、また、2乗誤差は、0.0366、0.0427、0.0434、0.137であった。これより、本モデルが、ドライバの心拍と精神負担要因との結びつきを線形的に表現できたものと考えられる。

4.3 非線形モデル

非線形モデルでは、NNを用いる。NNモデル^{12) 13)}は、複数の入力情報とその状態に対する出力情報を与

Fig.5 Comparison between Experimental result and Analytical result using the Multiple Regression Model

Fig.6 Comparison between Experimental result and Analytical result using the Neural Network Model

えることにより、内部の伝達特性を非線形的に自己組成する非線形方程式であり、下式のように表される。

$$u = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n$$

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}$$

$$y = f(u)$$

y : RRI

ω_i : 重み係数

u : 内部関数

f : シグモイド関数

NNを用いてモデルを構築する場合には、中間層のニューロン数を決定する必要がある。そこで、本研究では、中間層ニューロン数を1から10まで変化させたモデルの構築を行い、各モデルにおける2乗誤差総および学習回数よりニューロン数の決定を行った。これより、中間層のニューロン数9において、誤差および学習効率の成績が良かったため、本モデルでは9とした。図6に学習結果を示す。それぞれN_A、N_B、M_A、M_Bにおいて、2乗誤差は、9.81E-08、2.45E-05、6.99E-09、2.99E-05であり、実験値と学習結果が非常に良く一致した。これより、本モデルが、ドライバの心拍と精神負担要因との結びつきを非線形性も含めて表現できたものと考えられる。

5. 因子解析

前章において、構築した精神負担評価モデルが、ドライバの心拍と精神負担要因との関係を表現できたことを示した。本章では、構築したモデルの因子解析を行うことにより、カーブ走行時の精神負担要因について検討を行う。

5.1 心拍変化に対する精神負担主要因の検討

まず始めに、重回帰モデルにおける標準偏回帰係数を図7に示す。標準偏回帰係数とは、標準化したRRIを目的変数とし、標準化した車両の状態量、環境情報を説明変数として重回帰分析を行うことにより得られる回帰係数である。これらの係数の比較を行うことにより、目的変数であるRRIに対する各説明変数の影響度を見ることができる。なお、図中のRS-Lengthはレーダーサイトの距離情報、RS-Angleはレーダーサイトの角度情報を示す。また、カッコ内のLは左方向、Rは右方向、数字は角度を意味する。この図より、被験者N、M共にカーブAでは、レーダーサイトの距離情報が非常に大きく影響していることが分かる。特に、被験者Nにおいては、その割合は85%以上を占めており、自車の走行位置の認識、判断等の情報処理がRRI変化の主因子となっているものと考えられる。これに対し、カーブBでは、被験者Nは主に車両の状態量や

レーダーサイトの距離情報など、自車の現在の状態に対する情報処理が精神負担の主因子になっているのに対し、被験者Mでは、約70%がレーダーサイトの角度情報となっており、自車の未来の状態を予測する因子の影響が非常に大きいことが分かる。これは、被験者Mが本実験コースの走行経験があり、コースに慣れていることから、より予測情報を用いた車両運動制御が行われているものと考えられる。これにより、走行コースに対する慣れの違いの影響が、ドライバの情報処理といった運転タスクにおいて、事故の少ないカーブAでは小さいのに対し、事故の多いカーブBでは大きいものと考えられる。これは、NNモデルにおける重み係数でも同様の結果であった。これらのことより、カーブ全体における各入力の影響度を検討する上では、線形モデル、非線形モデルともに精神負担評価モデルとして有効であることが示唆できたものと考えられる。

5.2 心拍変化に対する精神負担要因の時系列変動の検討

次に、心拍変化に対する時系列的な精神負担要因変動について検討を行う。始めに、線形モデルの偏回帰係数を用いて時系列精神負担要因解析を行う。偏回帰係数とは標準化していない入出力データを用いて重回帰式を求めた際に得られる各入力の回帰係数である。この係数は、入出力の無次元化を行わずに求められることから単位が揃わず、係数間における各入力の心拍への影響を検討することはできない。しかしながら、これらの各係数に各入力データを掛け合わせることで出力の単位と一致し、心拍変化に対する各入力の時系列的な影響度を検討することが可能となる。図8に解析結果を示す。なお、すべての入力について解析結果を示すと図が非常に乱雑になるため、本論文では前述の標準偏回帰係数が大きな割合を占めた(全体の10%以上)入力の解析結果のみを示す。図より、全ての条件において、カーブの入口および出口において因子が大きく変動していることがわかる。これは、走行状況の変化に伴い、ドライバの認知、判断等における情報処理タスクの変化が心拍に影響を与えたことを示しているものと考えられる。これにより、線形モデルの時系列因子解析を行うことにより、ドライバの情報処理過程に伴う時系列精神負担要因の変動をある程度は表現できることが示唆できたものと考えられる。一方で、時系列的にモデル解析を行うためには、モデル構築における精度が非常に問題となる。言い換えれば、線形モデルではあくまで線形領域における解析を行うことしかできない。そこで、非線形領域を含むさらに詳細な精神負担要因の時系列的変動について検討を行うため、非線

形モデルに対する時系列因子解析を行う。

非線形モデルでも、線形モデル同様、モデル構築の際に得られた重み係数に各入力データを掛け合わせることで、出力に対する各入力の時系列的な影響度合いの変動を算出した。解析結果を図9に示す。図より、カーブの入口およびカーブの変曲点(中心近く)において、精神負担要因の変動が大きくなっていることが分かる。これは、これらの地点における走行環境の変化が大きく、ドライバの車両運動制御における情報処理タスクの必要性から生じているものと考えられる。また、カーブAにおける被験者N、MおよびカーブBにおける被験者Mの精神負担要因の変動は、カーブ全体にわたり急激で大きいことが分かる。これは、ドライバが走行環境変化に伴う車両運動制御に必要な情報処

理の切り替えを時々刻々行っていることにより生じているものと考えられる。これに対し、カーブBにおける被験者Nの影響度合いの変動は、カーブ全体にわたり緩やかなことがわかる。これは、本コースに経験的に未熟な被験者Nにとって、このカーブにおける情報処理は、ある特定の限られた情報により車両運動制御を行っていることを示しているものと考えられる。カーブの違いの影響について考察すると、両被験者において、カーブAでは影響度合いの変動がカーブの入口手前のカーブを認識したと思われる地点から始まっているのに対し、カーブBでは、カーブの中程から始まっていることがわかる。これは、カーブBがカーブAとほぼ同様の形状であるにもかかわらず、ドライバの運転操作に必要な情報処理が遅れていることを表現してい

Fig.7 Ratio of Effectiveness to the Mental Workload

るものと考えられる。これらの結果より、各カーブにおけるドライバへの環境情報提示の違いが事故多発の要因になっている可能性があると考えられる。また、慣れの違いの影響について考察すると、被験者Mは、変動がカーブを通過した後でも続いていることから、見通しが悪く、予測がしにくい次のカーブの存在も経験的に知っており、そのカーブに対する予測行動が変動の継続として表われているものと考えられる。これにより、非線形モデルの時系列因子解析では、ドライバの時系列精神負担要因の変動を線形モデル解析よりも詳細に検討することが出来ることが示され、精神負担評価手法としての可能性が示唆できたものと考えられる。

これらのことより、線形モデルではドライバの精神負担要因の特定およびその要因の時系列変動をある程度評価することが可能であり、非線形モデルでは、さらに詳細な精神負担要因の時系列的変動を評価できることを示唆したものと考えられる。

6. 結 論

本研究では、精神負担要因とそれにより生じる心拍の伝達特性を線形および非線形で表現した精神負担評価モデルの構築を行った。次に、構築した各モデルの因子解析を行い、各モデルにおける精神負担評価モデルとしての可能性について検討を行った。下記に本研究で得た結論をまとめる。

(1)精神負担評価をモデル解析により行うためには、そのモデルへの入出力の選定が非常に重要となる。そこで、本モデルでは、入出力間の因果関係や入力間の多重共線性を考慮し、入力を選定には、統計学に基づくステップワイズ法を使用した。これにより、各評価状況に適した入出力情報の選定を行うことができた。

(2)モデルの適用範囲および構築手法確立の観点から、線形モデルとして重回帰モデルを非線形モデルとしてNNモデルを構築した。この結果、精神負担の要因とそれにより生じる心拍とを線形モデルでは定性的に、非線形モデルでは定量的に結びつけることが出来た。これにより、精神負担の要因と心拍との間には、非線形性を有するが、線形モデルでも評価状況によっては、ある程度の伝達特性を表現することが可能であることがわかった。

(3)精神負担の要因と心拍とを結びつけた精神負担評価モデルの因子解析を行うことにより、ドライバの心拍変化に対する精神負担主要因および精神負担主要因の時系列変動について検討を行った。その結果、カーブ全体における各入力の平均的な影響度を検討する上では、線形モデルの重回帰式における標準回帰係数を用

いることにより、各精神負担要因の心拍変化に対する影響度の概略を捉えられることがわかった。また、非線形モデルの重み係数を用いることにより、カーブ通過時における時系列的な精神負担要因の変動も表現することができた。本論文では、特にドライバの情報処理に伴う精神負担要因の変動について検討を行ったが、事故の少ないカーブと事故多発カーブにおける被験者のコースに対する慣れの影響等を概略的に捉えることができた。これにより、本モデルが、人間・自動車・環境系における精神負担評価モデルとして有効であることを示唆できたものと考えられる。

本研究では手法検討の観点から被験者数および作業条件を限定して行った。そこで、今後はより多くの被験者および作業状況についてモデル構築および解析を行うことにより、本手法の整合性を確認したいと考えている。最後に、本研究を進めるにあたり、ご協力頂いた多くの方々に感謝の意を示す。

参考文献

- (1)大須賀美恵子他，心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調ストレスの評価手法の検討，人間工学，Vol.34，No.3，(1998)
- (2)吉田倫幸，脳波と周波数ゆらぎ計測と感情評価，日本機械学会誌，Vol.98，No.918，(1995)，
- (3)片山硬他，自動車運転時のドライバーの脈波のゆらぎ，自動車技術会論文集，Vol.27，No.4，(1996)
- (4)松浦譲他，運転者の生体反応による操縦時の心身状態評価の研究，自動車技術会論文集，Vol.25，No.1，(1994)
- (5)栗谷川幸代他，機械操作時における心負担推定に用いる心拍変動モデルの構築，日本機械学会論文集，66巻，643号，C編，(2000)
- (6)田久保宣晃他，道路線形と交通事故の関連性について，科学警察研究所編，Vol.32，No.2，(1991)
- (7)早野順一郎，心拍のゆらぎと自律神経，第11回循環器疾患の成因に関する研究会，Vol.17，No.1，(1996)
- (8)長谷川勝也，ホントにわかる多変量解析，共立出版，(1998)
- (9)大野高裕，多変量解析入門，同友館，(1998)
- (10)菅民郎，多変量解析の実践・上，現代数学社，(1993)
- (11)宮脇典彦他，SPSSによるデータ解析の基礎，培風館，(2000)
- (12)合原一幸，ニューラルコンピュータ，東京電機大学出版局，(1988)
- (13)馬場則夫他，ニューラルネットの基礎と応用，共立出版，(1994)

Fig.8 Fluctuation of the Mental Workload Effectiveness (Linear Model)

Fig.9 Fluctuation of the Mental Workload Effectiveness (non-Linear Model)