

追従走行実験における心理的・生理的反応に基づく運転疲労の定量化に関する研究*

A Study of Quantification for Driver's Fatigue on Psychological and Physiological Response by Driving Experiment*

上田 誠**・近藤 光男***・松本 博次****・早川 晴雄*****・中田 隆現*****

By Makoto UEDA**・Akio KONDO***・Hirotsugu MATSUMOTO****

・Haruo HAYAKAWA*****・Takami NAKATA*****

1. 研究の背景と目的

我が国における交通事故の発生件数と負傷者数は、この20年間増加の一途を辿っており、平成15年には過去最悪を記録した（昭和55年の約2倍：約95万件と約118万人）¹⁾。中でも、全件数の約3割を占める最多事故は追突であり、近年、市街地単路での発生が顕在化している（平成5年の約1.8倍）。一方、第1当事者の法令違反では、前方不注意、脇見・漫然、操作不適などの安全運転義務違反が増加している（平成5年の約1.6倍、全件数の約7割）²⁾。これらの違反行為は、交通安全意識の欠如や運転疲労などに起因していると考えられる³⁾。

一般に、運転疲労は、目の疲れなど身体に感じる疲労の他に、眠気や疲労感などの心理面の変化、あるいは周囲環境に対する不注意や交通状況に対する判断・運転操作の遅れなどの生理面の変化、ひいては居眠り、操作粗雑といったパフォーマンスの変化として現れる。このうち生理面に現れる疲労は、自覚が困難なばかりか、症状の種類・強さや発現時期が、ドライバーの内的条件（サーカディアンリズム〔本来そなわっている概ね1日単位の生命現象のリズム〕、健康状態、年齢・性別、運転の経験・頻度等）や外的条件（時間帯、天候、追従・渋滞・多車線等の道路交通環境による負荷等）によって異なる^{4) 5)}。このような自覚し難く、時々刻々と変化する運転疲労の放置は、安全運転義務違反行為を増長し、交通流に沿った速度維持や適正な車間距離の確保を困難にするなど、追従・渋滞交通の多い市街地道路で多発する追突事故の原因の一つになっていると考えられる⁶⁾。

近年のITS推進政策の枠組みの中で、国土交通省を中心に進められているASV（先進安全自動車）におい

ては、覚醒度を検知してドライバーの危険状態を警報するといった予防安全技術の開発が進められている⁷⁾。また、同じ枠組みの中で、座席の体圧分布変化から疲労変化を計測する車載システム高度化支援技術や脳波の周波数差分による個人特性に適合した疲労度呈示技術の研究が、経済産業省を中心に行われている⁸⁾。しかしながら、いずれの研究も、多岐にわたる心理面・生理面の変化を包括して運転疲労を捉えようとするものではない。

最近のストレス計測技術に関する研究⁹⁾によると、ストレスの定量的、客観的評価には生理的反応に関する指標が有効とされている。その一方で、計測時の利便性や評価時の個人差の問題が依然として残っており、動的状況下で簡易に計測できる適切な指標が必要との指摘がある。また、計測環境による影響を考慮した客観的な評価方法や、指標の多様な特性を考慮して複数指標を同時に計測し総合判断する方法の必要性も指摘されている。

そこで、本研究は、渋滞時の市街地等において交通流に沿った低速走行を強いられる場合に生じると考えられる運転疲労を対象とし、追従走行実験で同時計測したドライバーの多岐にわたる心理的・生理的反応を包括するという観点から、運転疲労の定量化方法について実証的な分析を行い、総合的計量の可能性を示すことを目的とする。

2. 研究の特徴

運転疲労の計測・評価に関しては、上記のような政府レベルの研究開発以外においても、これまで様々な研究機関で調査研究が行われている^{10) - 13)}。それらの研究では、心理学や生理学分野で扱われる指標を適用した計測・評価が試みられているが、その多くが個別指標毎の分析・評価に終わっている。

本研究においても、ドライバーの心理的・生理的反応の計測に際して従来の計測指標を適用するが、その計測方法は以下のような特徴を有する。

a) 公道外での走行実験

任意に被験者を選定して公道外で走行実験を行うことにより、運転疲労の発現に影響するドライバーの内的・

*キーワード：交通安全、交通弱者対策

**正員、工修、徳島大学大学院エコシステム工学専攻
(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1, TEL:088-656-7339,
E-mail:ueda@eco.tokushima-u.ac.jp)
復建調査設計(株)総合計画部高松計画課
(〒760-0020 高松市錦町1-4-40, TEL:087-826-1918,
E-mail:ueda@fukken.co.jp)

***正員、工博、徳島大学大学院エコシステム工学専攻

****正員、医博、徳島文理大学人間生活学部心理学科

*****学生員、徳島大学大学院エコシステム工学専攻

外的条件を可能な限り統一する。これにより、計測を簡易にするとともに、被験者特性や時間帯、道路交通状況等の計測環境による影響を考慮した計測を可能にする。

b) 追従交通の再現

走行実験では、交通流に沿った低速走行を強いられるような渋滞時の市街地等における走行状態を公道外において再現する。そのため、自由走行時に行われやすい能動的な疲労緩和行為（自分本位の減速や休憩等）を抑制するような追従条件を被験者に与える。このことにより、運転時間の継続とともに先行車との適正な車間距離の確保や走行速度の調整・維持が困難になる状況を運転疲労として捉えることができる。

c) 複数指標の同時計測

運転時間の継続とともに、心理面・生理面に現れる変化を捉えることのできる各指標を同時計測する。これにより、指標毎の特性を考慮して、運転疲労の計量に適切と考えられる指標を選定できるとともに、指標の重要性を考慮して疲労を包括的かつ定量的に表すことが可能となる。

3. 追従走行実験における運転疲労定量化の考え方

(1) 運転疲労の捉え方

人間工学的視点から、ISO-6385における運転疲労の定義に基づくと、運転疲労は、“運転によりドライバーの心理的・生理的状态を乱すように作用する外的負担（運転負荷）によって生じる内的反応（運転負担）の現れ”であると示されている¹⁴⁾。このことから、追従という行為は運転負荷に相当し、それによりもたらされる心理的・生理的反応の変化は運転負担に相当すると考えられる。

一方、交通心理学においては、ドライバーの運転状態を表す概念として「運転行動」がある。それは、“道路交通環境に対するドライバーの適応行動”と定義されており、「認知・判断・操作」という絶え間ない心理的・生理的過程によって営まれるとされている⁵⁾。

これらの定義を踏まえると、運転疲労は、図-1に示すような流れで捉えることができると考えられる。すなわち、追従という「運転負荷」によりもたらされる運転疲労は、それに起因して発現する心理的・生理的反応の変化（運転負担）として捉えられ、さらに、それは「認知・判断・操作」といった運転機能の変化を介して捉えることができると考えられる。

また、このようなドライバーの運転行動の変化は、車両挙動を介して、走行状態が乱れるなど交通現象面にも現れ、交通流に応じた速度維持や車間距離の確保が困難になるなど、先行車両との関係に影響を及ぼすことが考えられる¹⁵⁾。本研究では、このようなドライバーの運

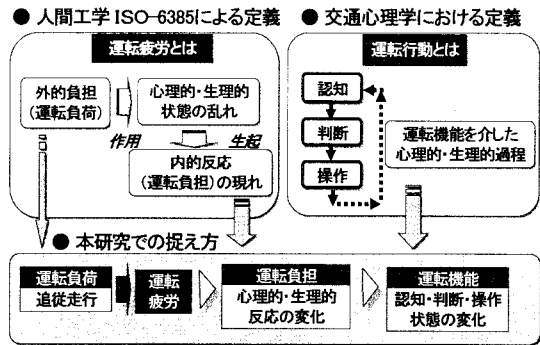


図-1 運転疲労の捉え方

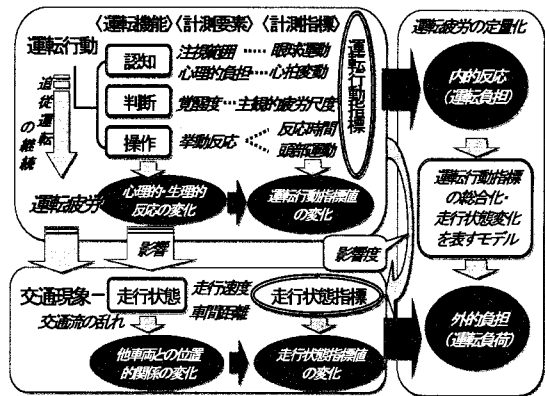


図-2 運転疲労の定量化方法に関する概念

転行動の変化（運転負担）、さらには車両挙動を介して、交通現象面に現れる速度維持や車間距離確保の困難さといった走行状態の変化（運転負荷）【例えば、可能な限り車間距離を維持するという追従条件を遵守できなくなるような状態の現れ】の両者を、追従走行がもたらす「運転疲労」と定義する。

(2) 運転疲労の定量化方法

図-2は、(1)で述べた考え方に基づき、追従走行時の運転疲労を定量化するための方法を概念的に示したものである。

ここで、ドライバーの運転行動を規定する各運転機能のうち、認知機能は注視範囲や心理的負担で、判断機能は覚醒度で、操作機能は挙動反応という各要素で表されると仮定する。それにより、追従走行がもたらす運転疲労は、これら各機能における心理的・生理的反応の変化として捉えられる。これら要素を適切に計測できる指標として、眼球運動や心拍変動、主観的疲労尺度、反応時間、頭部運動などの指標^{16) 17)}（以下、『運転行動指標』と称する）を用いれば、各機能における心理的・生理的反応の変化を運転行動指標値の変化として把握できる。

ここで、交通現象面に現れる運転疲労を定量的に求めるために、“運転疲労として交通現象面に現れる走行状

態の変化は、ドライバー固有の運転機能の変化に影響される”と仮説する。それに基づき、走行速度、車間距離といった運転車両の走行状態を示す指標（以下、『走行状態指標』と称する）に対する運転行動指標の影響度（相関の強さ）を求め、運転行動指標の総合化という形で走行状態の変化を表す数学モデルを導くことを考える。これにより、追従という外的負担（運転負担）が与えられた場合にドライバーにもたらされる内的反応の変化（運転負担）、さらに、その総合値として求まる走行状態指標の変化を、交通現象面に現れる運転疲労として定量的に求めることができると考える。

（3）運転疲労を表すモデル式の構造

運転疲労の定量化に際し、追従による運転負担をドライバーに生じる運転負担の重み付き総和として求めるモデル（以下、「運転疲労定量化モデル」と称する）を導く。運転負担に対応する走行状態指標と運転負担に対応する運転行動指標との間に線型関係が成り立つと仮定し、重回帰式を用いて、式（1）のような構造を設定した。なお、式中には、ドライバーの内的条件として、年齢や性別等を属性ダミーとして用いている。式（1）において、説明変数として選定した運転行動指標の実測値（ X_{it} ）に重み（ a_i ）を乗じた $a_i X_{it}$ を「運転負担成分」と称する。その総和に個人属性値（ $\sum b_j \delta_j$ ）と定数 c を加えて求められる予測値が、交通現象として発現する運転疲労（運転負担）に相当すると考える。ただし、式（1）は、運転疲労時における走行状態と運転行動との関係を表すモデル式であることから、構築に用いるサンプルは、運転疲労状態にあることが前提となる。

$$Y_t = \sum_i a_i X_{it} + \sum_j b_j \delta_j + c \quad \dots\dots \text{式(1)}$$

ここで、

- Y_t : 走行回数 t における走行状態指標
(ex. 車間距離あるいは走行速度)
- X_{it} : 走行回数 t における運転行動指標
(ex. 眼球運動, 心拍変動, 主観的疲労尺度, 反応時間, 頭部運動等)
- δ_j : 属性ダミー (ex. 年齢, 性別等)
- a_i, b_j, c : 運転行動指標、属性ダミーおよび定数の偏回帰係数

4. 追従走行実験の実施と心理的・生理的反応の計測

（1）計測指標と計測装置

各運転機能のうち、認知機能は注視範囲と心理的負担で表されるとの考えにより、眼球運動の計測にはアイカメラ（アイマークレコーダ）を、心拍変動の計測に心電計を用いた。判断機能は覚醒度で表されるとの考えから、眠気等を計測要素とする主観的疲労尺度調査票¹⁷⁾を用いた。操作機能は挙動反応で表されると考え、反応時間



図-3 計測装置の被験車両への搭載状況

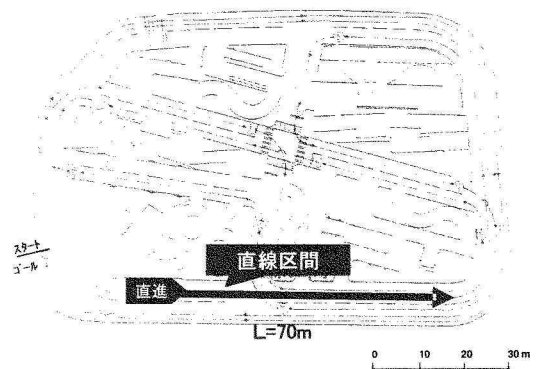


図-4 走行経路と分析対象区間

と頭部運動を計測するための装置を製作した。

一方、被験者の走行状態の計測に際しては、先行車両との車間距離を画像データとして取得するためデジタルビデオカメラを被験車両に設置した。

各計測装置（30Hz）と同期をとるための機器（同期誤差1/30秒）の被験車両への搭載状況を図-3に示す。

（2）走行実験の概要

徳島市内の自動車教習所コース（図-4参照）を実験場所とし、非営業日の日曜日（2003年9月から11月の計6日間）に実施した。早朝に低下を示すサーカディアンリズムを考慮して、午後の実験（14時～16時頃）とし、晴天時を原則とした。被験者には、20歳代および40歳代の男女と60歳代女性の計5名（いずれも免許取得後3年以上の運転健全者で運転頻度が1回/日以上）を選んだ。

車間距離（概ね10～15m）については、コース内の規定速度に基づく停止距離を目安に設定し³⁾、被験者には、その距離を可能な限り一定に保つような追従条件を与えた。また、先行車両のドライバー（20歳代男性）には、コース内の規定速度を遵守させた。

各被験者とも、図-4に示した経路（1周当たりの走行距離：約1.5km、走行時間：約6分）を15回走行させ、

運動行動指標および走行状態指標を1名当たり約90分にわたり同時計測した。なお、被験者はアイカメラや心電計などの計測機器を装着した状態での走行を強いられるため、慣れない運転環境に起因する緊張や不安などが、運動行動や走行状態の計測に影響を及ぼすことが予想される。このような影響を取り除くとともに走行経路を把握させるため、計測前に予備走行を2回行った。また、1回毎の本走行直後には、主観的疲労尺度調査票（1周毎の前半・後半走行経路別）への記入とアイカメラのキャリブレーションを行うために2分程度停車している。主観的疲労尺度は厳密には他の計測指標（30Hz）との同時計測ではないが、他の計測指標の1回毎平均値と同等と考えた。さらに、計測値の個人差の問題を解消するため、非運転時の計測値についても別途取得した。

5. 運転疲労定量化モデルの構築と運転疲労分析

（1）分析対象区間の設定

直線区間は、交差点部やカーブ区間と比べて道路構造による運転疲労への影響が小さいと考えられるため、図-4に示す任意の直線区間を分析対象区間として設定した。スタート地点から対象区間までの走行距離は約700m、区間延長は約70m、区間内走行時間は被験者毎、走行回数によって多少異なるが約8秒であった。

（2）モデル式の変数に用いる指標の選定

モデル構築に際し、目的変数に用いた走行状態指標ならびに説明変数に用いた運動行動指標を表-1に示す。

各指標値の算出には、直接的に指標値が得られる主観的疲労尺度を除き、計測で得た画像データを数値化した30Hzの時系列デジタルデータを用いた。なお、主観的疲労尺度については、分析対象とした直線区間が走行経路のほぼ中間地点であることから、前半と後半の平均値を用いた。

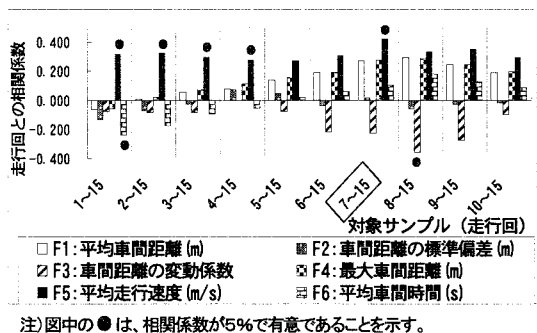
（3）運転疲労発現時期の特定とモデル構築に用いるサンプルの選定

式（1）で示した運転疲労を表すモデル式では、構築時に用いるサンプルが運転疲労状態にあることを前提としている。ここでは、走行実験で計測した走行状態指標値を用いて、被験者の運転疲労が交通現象面に現れている時期、すなわち、可能な限り車間距離を維持するという追従条件を遵守できなくなるという疲労現象が走行状態指標値の変化として現れている時期を特定し、モデル構築に用いるサンプルの選定を行った。

5人の被験者に行った追従走行実験では、どの被験者とも90分程度を要した15回におよぶ継続的な走行であり、原則として途中休憩を含まなかったことから、運転疲労

表-1 走行状態指標および運動行動指標一覧

計測指標区分		記号	適用指標
走行状態指標 Y	車間距離	F1	平均車間距離(m)
		F2	車間距離の標準偏差(m)
		F3	車間距離の変動係数
		F4	最大車間距離(m)
	走行速度	F5	平均走行速度(m/s)
	車間時間	F6	平均車間時間(s) [=F1/F5]
運動行動指標 X	認知機能 【注視範囲、心理的負担等】	A1・A2	注視点総移動距離(deg) [水平・鉛直方向別]
		A3・A4	注視点平均移動速度(deg/s) [水平・鉛直方向別]
		A5	注視点総移動距離(deg) [全体]
		A6・A7	注視点移動速度の標準偏差(deg/s) [水平・鉛直方向別]
		B1	RRRの平均
		B2	RRRの標準偏差
	半筋機能 【覚醒度等】	B3	RRRの変動係数
		C1	運転特異刺激距離に対する主観的反応尺度
		C2	気分転換要求に対する主観的反応尺度
		C3	眠気に対する主観的反応尺度
		C4	うんざり感に対する主観的反応尺度
	主観的疲労尺度	C5	全体的な疲労感に対する主観的反応尺度
		D1	前方ブレーキ点灯からアクセルOFFまでの時間(s)
		D2	前方ブレーキ点灯からブレーキONまでの時間(s)
		D3	アクセルOFFからブレーキONまでの時間(s)
	操作機能 【挙動反応】	E1・E2	頭部位置の平均(pixel) [左右・前後方向別]
		E3・E4	頭部位置の標準偏差(pixel) [左右・前後方向別]
		E5・E7	頭部移動距離(pixel) [左右・前後方向別、全体]
		E8・E10	頭部移動速度の平均(pixel/s) [左右・前後方向別、全体]
		E11・E13	頭部加速速度の標準偏差(pixel/s ²) [左右・前後方向別、全体]



注) 図中の●は、相関係数が5%で有意であることを示す。

図-5 走行状態指標と走行回数との相関係数

の発現時期以降においても疲労状態は継続することが想定される。なお、この場合の疲労は、総走行時間が90分程度と短いことから、「一晩の睡眠で回復する軽度の疲労」⁵⁾と考えられ、どの走行回においても蓄積疲労（慢性疲労）は生じていないと考えた。

そこで、まず、全被験者サンプルを、「1～15回」の全走行回を含むサンプル群から「10～15回」サンプル群までの10グループに分類し、グループの前後間で、走行回数の増加とともに走行状態に顕著な変化（例えば、車間距離と走行速度との変化量や車間距離のパラツキなどの大差）を生じた場合の境界となる走行回を運転疲労の発現時期として特定することにした。

図-5は、サンプル群のグループ毎に各走行状態指標と走行回数との相関係数を求めて示したものである。全

指標を通して高い相関は得られていないが、この図から次のような傾向が読み取れる。全グループについて走行回数の増加とともに平均走行速度が上昇傾向にあること、最大および平均車間距離は、後半のグループになるにつれて走行回数の増加に伴い増大傾向が強まっていること、車間距離の変動（バラツキ）は後半のグループほど走行回数の増加とともに小さくなる傾向があること、さらに、平均車間時間（＝平均車間距離／平均走行速度）の相関係数の正負が、6回あるいは7回付近を境として負から正に転じていることである。このうち、平均車間時間に関する変化は、前半走行回を含むグループでは、走行回数の増加とともに走行速度の上昇割合が車間距離の増大割合を上回っているが、後半グループでは逆に、車間距離の増大割合が走行速度の上昇割合を上回っていることを示している。すなわち、6回あるいは7回付近の走行回において、車間距離と走行速度の増加割合に顕著な差が現れたことを物語っている。

このことから、各被験者は「可能な限り車間距離を維持する」という追従条件を遵守するため、分析対象とした直線区間に入るまでに既に増大していたと考えられる車間距離を、同区間において走行速度を上昇させることにより縮めている。しかしながら、6回あるいは7回以降では、走行速度を上昇させても車間距離が縮まらず、逆に車間距離が増大していくという走行状態に変化していったことが推察される。そこで、3.（1）で述べた「運転疲労」の定義に基づき、運転疲労の発現時期を6回あるいは7回付近と特定する。

モデル構築に用いるサンプルには、運転疲労の発現がより顕著であると考えられる後者の7～15回のサンプル（N=39；一部被験者の欠損データを除く。表-2の注3参照。）を選定した。

（4）運転疲労定量化モデルの構築

モデル構築に際しては、計測値の個人差による影響を解消するため、非運転時を考慮した（運転時計測値を非運転時計測値で除して求めた）指標値を用いるケース①と、運転時計測値に年齢と性別のダミー変数を含めるケース②について検討した。その結果を表-2に示す。

ケース①においては、平均走行速度を目的変数とし、眼球運動、頭部運動および主観的疲労尺度のうち、2つの説明変数からなるモデル1およびモデル2を推定した。心拍変動と反応時間は、変数に選択されていない。重相関係数は、両モデルとも0.7未満と低い。説明変数の偏回帰係数およびt値の正負から、走行回数の増加に伴う指標の変化傾向をみると、注視点鉛直方向移動速度の標準偏差と頭部前後方向座標値の標準偏差は低減傾向、頭部前後方向座標値の平均と眠気に対する主観的反応尺度は増加傾向が伺われる。

表-2 運転疲労定量化モデル検討結果

		目的変数 Y	説明変数 X				定数
		走行状態指標 (F)	運転行動指標 (A~E)	ダミー変数			
ケース① 非運転時を考慮する	モデル1	F5: 平均走行速度 (m/s)	A7: 注視点鉛直方向移動速度の標準偏差 (deg/s)	E2: 頭部前後方向座標値の平均 (pixel)	—	—	定数
	B	—	-0.322	0.254	—	—	9.440
	R, t	R= 0.648	t= -3.677	t= 2.479	—	—	t= 68.361
	r	0.423*	-0.188	0.305	—	—	—
	モデル2	F5: 平均走行速度 (m/s)	C3: 眠気に対する主観的反応尺度	E4: 頭部前後方向座標値の標準偏差 (pixel)	—	—	定数
	B	—	0.040	-0.657	—	—	9.130
	R, t	R= 0.689	t= 4.112	t= -4.688	—	—	t= 59.416
	r	0.423*	-0.019	-0.242	—	—	—
	モデル3	F1: 平均車間距離 (m)	A6: 注視点水平方向移動速度の標準偏差 (deg/s)	C3: 眠気に対する主観的反応尺度	年齢	—	定数
	B	—	-0.078	0.234	5.234	—	31.290
ケース② 非運転時を考慮しない	R, t	R= 0.710	t= -3.092	t= 2.000	t= 2.064	—	t= 11.251
	r	0.271	-0.239	-0.019	—	—	—
	モデル4	F5: 平均走行速度 (m/s)	A5: 注視点総移動距離 (deg)	E12: 頭部前後方向加速度的標準偏差 (pixel/s ²)	—	性別	定数
	B	—	-0.002	0.070	—	-0.990	8.626
	R, t	R= 0.712	t= -2.857	t= 4.196	—	t= -3.832	t= 24.871
	r	0.423*	-0.319*	0.038	—	—	—
	モデル5	F5: 平均走行速度 (m/s)	A5: 注視点総移動距離 (deg)	E12: 頭部前後方向加速度的標準偏差 (pixel/s ²)	年齢	性別	定数
	B	—	-0.002	0.078	0.887	-0.851	8.155
	R, t	R= 0.799	t= -4.445	t= 5.302	t= 3.498	t= -3.730	t= 27.791
	r	0.423*	-0.319*	0.038	—	—	—

注1) Bは偏回帰係数、Rは重相関係数。t値はすべて5%で有意。

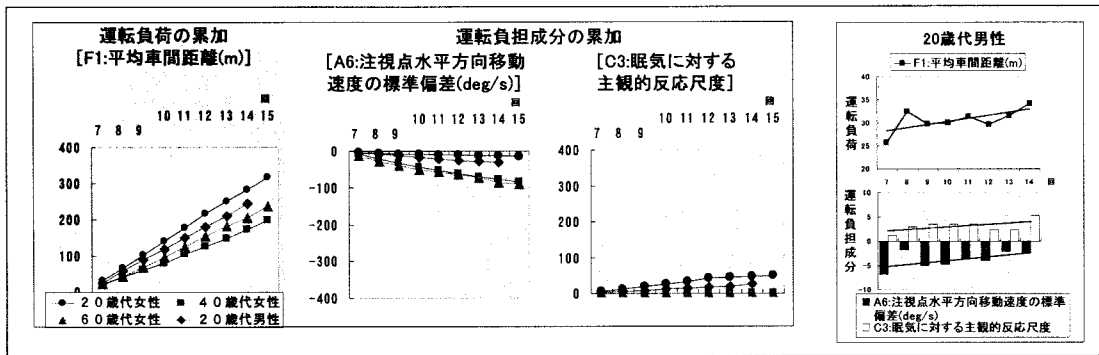
注2) rは走行回数との相関係数。*は5%で有意。

注3) 用いたサンプル [N=39] の内訳は以下のとおり。
 なお、20歳代男性の15回データの欠損および40歳代男性の11～15回データの欠損は太陽光反射による頭部運動計測値の取得不可による。
 ・20歳代男性 (8) [7～14回]、40歳代男性 (4) [7～10回]
 ・20歳代女性 (9)、40歳代女性 (9)、60歳代女性 (9) [いずれも7～15回]

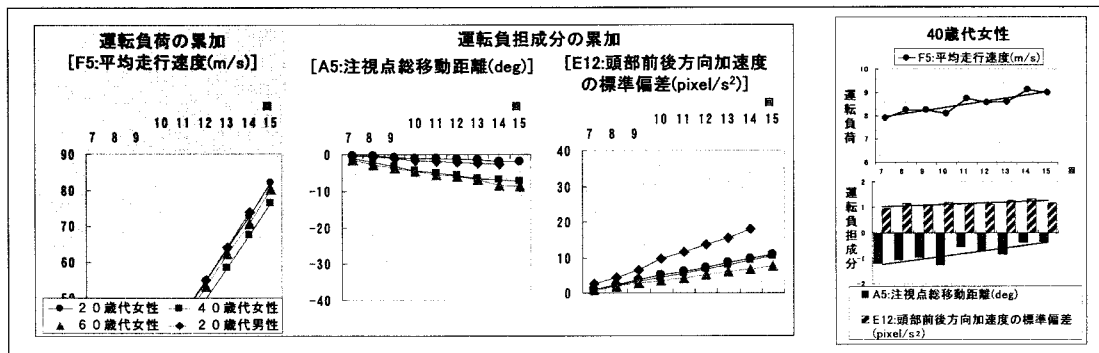
注4) ダミー変数には、年齢 (60歳代=1) と性別 (男性=1) を使用。

ケース②では、平均車間距離あるいは平均走行速度を目的変数とし、眼球運動と主観的疲労尺度の2変数あるいは眼球運動と頭部運動の2変数と、年齢あるいは性別のダミー変数から構成されるモデル3～モデル5を推定した。このケースにおいても、心拍変動や反応時間は変数として選択されていない。重相関係数はどのモデルとも0.7～0.8の範囲内にあり、ケース①を上回っている。また、眠気に対する主観的反応尺度以外の説明変数は、全てケース①とは異なっている。説明変数の走行回数の増加に伴う変化傾向についてみると、注視点水平方向移動速度の標準偏差および注視点総移動距離は低減傾向、眠気に対する主観的反応尺度と頭部前後方向加速度的標準偏差は増加傾向がみられる。

なお、目的変数に対する寄与度を示すt値は、ケース①、②ともに説明変数よりも定数項が大きく、両ケース間では、ケース①における定数項のt値が、年齢、性別



図－6 モデル3を用いた運転疲労の計量分析結果



図－7 モデル5を用いた運転疲労の計量分析結果

をダミー変数に用いたケース②のそれを大きく上回っている。

(5) 運転疲労の計量分析

被験者毎の運転疲労に関しては、構築したモデルの説明変数に各被験者の運転行動指標値を当てはめることにより試算できる。以下では、平均走行速度を目的変数とするモデルのうち重相関係数が最も高いモデル5と、平均車間距離を目的変数とするモデル3を用いて、追従走行によりドライバーにもたらされた各運転負担成分（各運転行動指標の重み付き推定値）と、交通現象面に発現したと考えられる運転負荷（各運転負担成分の総和として求められる走行状態指標推定値）を被験者毎、走行回毎に試算した。さらに、各指標推定値の時系列累加値を被験者毎に算出し総計として求めれば、運転の継続により被験者間に生じる差異をより明確に捉えることができると考えた。以下では、被験者毎、各指標推定値毎に時系列累加をとり、最終回付近の累加値に基づいて被験者間の差異を比較した。

まず、モデル3により求めた図－6の15回における累加値をみると、平均車間距離および注視点水平方向移動速度の標準偏差は、眠気に対する主観的反応尺度に対して、それぞれ約2.4倍、約1.6倍の差異がみられた。平均

車間距離の累加値が被験者の中で中程度の20歳代男性に対して、運転負荷と運転負担成分の時系列変化をみると、平均車間距離と注視点水平方向移動速度の標準偏差はともに緩やかな増加傾向があり、その変化傾向も比較的類似しているといえる。

同様に、モデル5により求めた図－7の14回における累加値をみると、頭部前後方向加速度的標準偏差は、平均走行速度および注視点総移動距離に対して、ともに約1.7倍の差異があることが確認できた。同様に、頭部前後方向加速度的標準偏差が被験者の中で中程度の40歳代女性に対して、各推定値の時系列変化をみると、平均走行速度と注視点総移動距離はともに緩やかな増加傾向があり、時系列変化傾向も類似していることが伺える。

6. 考察

(1) 運転疲労定量化モデルについて

ケース①、②で構築したモデルは、非運転時を考慮した（運転時計測値を非運転時計測値で除して求めた）指標値を説明変数に用いたこと、あるいは運転時計測値を説明変数とし年齢と性別をダミー変数として用いたことにより、計測値の個人差による影響をある程度解消できたと考えられる。全般的に重相関係数が低い原因として

は、走行実験で用いた運転行動指標および走行状態指標の計測装置における測定誤差や画像解析の精度、あるいは指標相互間における心理的・生理的反応のズレ（タイムラグ）などが考えられる。なお、年齢、性別をダミー変数としたケース②の方が、それら被験者属性を変数に与えないケース①に比べて重相関係数が大きく、定数項の寄与度（ t 値）も小さい。このことから、モデル構築において個人差による影響を考慮する際に、非運転時計測値により基準化するよりも、個人属性を説明変数に加える方がモデルの精度が高く、有効であることを示している。

構築した5つの運転疲労定量化モデルの目的変数として、平均走行速度あるいは平均車間距離が選定され、車間距離の変動（標準偏差や変動係数）に関する指標は選定されていない。このことは、分析対象とした直線区間の距離が70m程度と短いことから、運転疲労として発現する交通現象面の変化が、走行速度や車間距離の平均値の変化といったマクロ的な現象としては捉えやすいが、車間距離の変動量の変化といったミクロ的な現象としては捉えにくいことを示している。

次に、モデルの説明変数として、眼球運動や頭部運動、主観的疲労尺度が選定され、心拍変動や反応時間は選定されなかった。このことは、追従という運転負荷により生起するドライバーの内的反応の変化が、眼球や頭部の動きといった生理面あるいは眠気といった心理面に現れやすく、心理的負担を表す心拍変動や運転操作に係る反応時間には現れにくいことを示しているといえる。これについては、今回設定した公道外での追従走行という実験条件が起因していると考えられる。一般に、渋滞、多車線といった実際の道路交通状況下においては、前方車両の急な速度変動や側方からの車線変更など他車両からの影響を受けやすいため、心理的負担や反応時間に変化が現れやすい状況にあると考えられる^{18) 19)}。一方、走行実験を行った公道外においては、被験車両がそのような他車両からの影響を受けないため、走行時間が増大しても心拍変動や反応時間に顕著な変化が現れにくい状況にあったと考えられる。このことが、それら指標と走行状態指標との間に明確な相関関係が成立せず、モデルの説明変数に選定されなかった原因であると推察できる。

説明変数の偏回帰係数および t 値の正負によると、注視点移動速度のバラツキと注視点総移動距離は減少傾向にあることがわかった。また、頭部の前後方向座標値の平均と前後方向加速度のバラツキは増大する傾向がみられ、前後方向座標値のバラツキは減少する傾向がみられた。このことから、運転疲労にともなうドライバーの内的反応の変化は、眼球運動における注視点の停滞あるいは頭部位置の前方傾斜や頭部加速度の変動として現れやすいことが明らかとなった。

（2）運転疲労の計量分析結果について

モデル3およびモデル5を用いて求めた被験者毎の運転負担成分と運転負荷の時系列累加特性によると、眠気に関しては被験者間に差異がない反面、平均車間距離と注視点移動速度のバラツキには差異がみられた。一方、平均走行速度と注視点の総移動距離に被験者間の差異はないが、頭部加速度のバラツキに差異が確認された。

このことから、追従による運転疲労が、眠気といったドライバーの心理的反応面に被験者間の差異として顕著に現れない場合でも、運転疲労として交通現象面に発現する車間距離の差が、被験者間に生じていることが明らかとなった。また、追従による運転疲労が、平均走行速度といった交通現象面に被験者間の差異として顕著に現れない場合でも、頭部加速度の変動といったドライバーの生理的反応面に被験者間の差異が現れていることが判明した。

（3）結論

以上の分析結果から、追従走行によりドライバーの内的反応として発現する運転疲労（運転負担）は、各運転行動指標の重み付き推定値（運転負担成分）で捉えられることを示した。さらに、そうした内的反応の変化による影響を受けて交通現象面に発現する運転疲労（運転負荷）は、年齢や性別といった個人属性を説明変数に加えて、各運転行動指標に対応する運転負担成分の総和として求まる走行状態指標の推定値（運転負荷）で捉えられることを示した。このことから、当初3.（2）で設定した“運転疲労として交通現象面に現れる走行状態の変化は、ドライバー固有の運転機能の変化に影響される”という仮説は検証できたといえる。

また、被験者間における運転疲労の差異は、運転機能の個人差や運転機能に係る心理的・生理的反応のタイムラグ等に起因して、必ずしも運転行動面あるいは交通現象面に同時に現れない場合があることが判明した。このことから、それら複数反応の変化を同時に計測し、かつ総合的に判断することの必要性を示すことができた。

今回構築した5つのモデルの説明変数には、眼球運動や頭部運動、主観的疲労尺度が選定されているが、心拍変動や反応時間は選定されておらず、当初想定した全ての計測指標を網羅した形でモデルは構築されていない。このことは、渋滞や多車線といった実際の道路交通環境条件を与えられないという公道外走行実験における走行条件の限界によるものと考えられる。しかしながら、今回構築したモデルは、図-2で仮説した概念図における運転機能毎の計測要素に漏れはなく、認知機能には注視範囲（眼球運動）が、判断機能には覚醒度（主観的疲労尺度）が、操作機能には挙動反応（頭部運動）が選択されている。このことから、このモデルを用いることによ

り、心理的・生理的反応を包括して運転疲労を捉えるという研究目的には少なからず合致する結果が得られたと考えている。

以上のことは、今後、公道での走行条件下において、運転疲労の検知に有効な心理的・生理的反応を表す指標あるいは運転疲労の発現を交通現象面からの確に判断し呈示する指標をリアルタイムに計測し、個人属性等を踏まえて運転疲労を総合的に計量する車載システムを構築することができれば、自覚困難とされる運転疲労症状の種類や程度、発現時期等を走行中のドライバーに警報し、危険状態を認知させることが可能になることを示すものといえる。

7. まとめと今後の課題

本研究では、追従という運転負荷を与えた場合にドライバーに発現する運転疲労の定量化方法について定義付けや概念化を行い、それに基づき、公道外において追従走行実験を実施した。実験で同時計測した心理的・生理的反応データを用いて、運転行動指標の走行状態指標に対する相関の強さ（影響度）に基づき、運転行動指標の総合化により走行状態を表す形で「運転疲労定量化モデル」を構築した。そのモデルを用いて行った運転疲労に関する計量分析により、追従走行という外的負担が与えられた場合に、ドライバーにもたらされる内的反応の変化（運転負担）や交通現象面に発現する走行状態の変化（運転負荷）を定量的に把握することができた。また、運転疲労の時系列的変化の累加傾向から、発現する疲労の種類や程度は、被験者の年齢や性別によって異なる傾向があることが確認できた。

今後は、ドライバーの心理的・生理的反応等をより高精度に検知する車載システムを用いた運転疲労の総合的計量方法の実現に向けて、主要な運転行動指標を対象として、指標値算出の元となった計測値（30Hz データ）を用いたスペクトル解析等を行うなど、運転疲労発現時期における運転行動の変化について、よりミクロな視点から分析を試みる予定である。

参考文献

- 1) 内閣府編：交通安全白書（平成16年版），独立行政法人 国立印刷局，2004.
- 2) 警察庁 HP：平成15年中の交通事故の発生状況，警察庁交通局，<http://www.npa.go.jp/toukei/>
- 3) 松永勝也：交通事故防止の人間科学，ナカニシヤ出版，2002.
- 4) 宮田洋：新生理心理学 生理心理学の基礎，北大路書房，1998.
- 5) 村井健祐：応用心理学の現在，北樹出版，2001.
- 6) （財）交通事故総合分析センター：追突事故はどうして起きるのか，イタルダ・インフォメーション NO. 23，2003.
- 7) 特許庁 HP：先進安全自動車（運転負荷軽減技術）に関する特許出願技術動向調査（平成15年5月），http://www.jpo.go.jp/shiryu/pdf/gidou-houkoku/new_g_car.pdf
- 8) 経済産業省 HP：人間行動適合型生活環境創出システム技術開発事後評価報告書（平成16年3月），独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構・独立行政法人産業技術総合研究所・研究評価委員会，<http://www.nedo.go.jp/inkai/hyouka/houkoku/16h/jigo/05page1-195.pdf>
- 9) （社）人間生活工学研究センター HP：ストレス計測技術の安全対策への適用可能性に関する調査研究報告書－要旨－（平成16年3月），（財）機械システム振興協会，<http://www.hql.jp/gpd/jpn/www/stress/stressyoushi.pdf>
- 10) 西田泰ほか：長時間運転による疲労の評価実験用運転シミュレータ・プログラムの開発，第23回交通工学研究発表会論文報告集，（社）交通工学研究会，pp. 97-100，2003.
- 11) 大橋正樹ほか：高速道路走行における心理的負担の計測と安全性評価に関する研究，都市計画論文集，（社）日本都市計画学会，pp. 541-546，2000.
- 12) 江部和俊ほか：ドライバの視聴覚認知に伴う負担度評価，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol. 34，NO. 3，pp. 55-62，1999.
- 13) 田口敏行：自動車運転時の疲労評価，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol. 33，NO. 4，pp. 25-31，1998.
- 14) 岩倉成志ほか：長距離トリップに伴う運転ストレスの測定－AHS の便益計測を念頭に－，土木計画学研究・論文集，No. 18，pp. 439-444，2001.
- 15) 成波ほか：追従走行時のドライバの運転特性に関する研究－運転動機の観点から見た車間距離設定のメカニズム－，第2回交通安全環境研究所研究発表会論文集，pp. 69-74，2002.
- 16) 海保博之ほか：シリーズ・心理学の技法 認知研究の技法，福村出版，1999.
- 17) 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.
- 18) 小倉俊臣ほか：心拍変動を用いた運転者の心理状態の変化に関する研究，第23回交通工学研究発表会論文報告集，（社）交通工学研究会，pp. 85-88，2003.
- 19) 宇野宏ほか：通常走行における高齢ドライバの運転特性に関する研究－その1－市街地の実車走行による運転行動調査，自動車研究，第24巻，第1号，pp. 33-36，2002.

追従走行実験における心理的・生理的反応に基づく運転疲労の定量化に関する研究*

上田 誠**・近藤 光男***・松本 博次****・早川 晴雄*****・中田 隆現*****

本研究では、追従走行時におけるドライバーの心理的・生理的反応の総合的判断により運転疲労を捉えるという観点から、追従という外的負担（運転負荷）を与えた場合にドライバーに発現する内的反応（運転負担）の変化に着目し、運転疲労の計量化方法について概念化を行った。男女計5名の被験者を対象として実施した公道外での追従走行実験において、先行車両との位置的関係ならびに眼球運動や頭部運動、心拍変動、主観的疲労等の心理的・生理的反応を同時計測し、運転疲労を総合的に計量化するためのモデル式を導いた。そのモデルを用いた疲労分析により、運転疲労の発現傾向が年齢や性別によって異なることが明らかとなった。

A Study of Quantification for Driver's Fatigue on Psychological and Physiological Response by Driving Experiment*

By Makoto UEDA**・Akio KONDO***・Hirotsugu MATSUMOTO****

・Haruo HAYAKAWA*****・Takami NAKATA*****

The authors turned their attention to the changes of inner responses (drive burden) of the driver when the external burden of follow-up driving was given to him. The authors conducted an experiment on five male and female drivers to simultaneously measure their psychological and physiological responses such as the distance from the car ahead, eye and head movement, and subjective fatigue and developed a model expression for quantifying drive fatigue synthetically. It was elucidated by the analysis performed by using the model expression that drive fatigue differed between aged drivers and non-aged ones, and between male drivers and female ones.
