

## 自動車運転時の疲労評価

田口敏行

## Evaluation of Fatigue during Car Driving

Toshiyuki Taguchi

## 要 旨

自動車運転においてドライバーに疲労をもたらす要因は、環境要因、車両要因、人間要因など種々の要因があるが、それらのうち振動要因は、ドライバーに連続的に暴露され精神的および肉体的な影響を常に与えることから、疲労の主要因の一つと考えられる。

本報告では、特に車両の上下振動を対象に、従来の振動・乗り心地評価では検出しにくい蓄積的な影響の評価をねらいとして、次の3段階に分けた検討を行った。すなわち、有効指標の抽出、台上加振実験、実車走行実験の3ステップで実験を構成した。

有効指標の抽出では、長時間運転時のドライバーの疲労感と候補となる各種生理指標の関係を統計的手法で解析し、有効指標として尿中アドレナリンを選び出した。台上加振実験では、この指標を用いて上下振動の周波数影響を評価して、1～2Hzの頭部共振にあたる周波数帯域の振動が、徐々に影響してしかも振動負荷後も回復しにくいという新たな影響を見出した。さらに、この影響を確認する実車走行実験を行い、サスペンション制御による1～2Hzの低周波振動の低減が確かに疲労軽減に有効であることを検証した。

## Abstract

There are many factors including environmental, mechanical and human factors that cause driver fatigue during driving. Among these factors, vibration is one of the major factors because drivers are usually exposed to sustained mechanical vibrations inducing mental as well as physical stress. This paper reports the influence of vertical vibrations lasting for a long time on the driver fatigue. For the assessment of the driver fatigue accumulated over an expanded period of time, experiments have been conducted in three steps: the extraction of a valid index among physiological variables, a vibration-load test using a mechanical vibrator, and a road test using an actual car.

Statistical analyses of the relations between subjective ratings of fatigue and physiological variables indicated urinary adrenaline as a valid index. The results of the vibration-load test in terms of urinary adrenaline suggested that the vertical vibration at low frequencies of 1 to 2 Hz, corresponding to the resonance of head, induced a driver to gradually accumulate fatigue and certainly. This fact has never been reported before in riding comfort studies. Moreover, it was confirmed in the road test that the suspension control capable of reducing the vertical vibration of 1 to 2 Hz reduced driver fatigue at a statistically significant level in actual driving.

キーワード

疲労，ストレス，運転，振動，乗り心地，ホルモン，アドレナリン

## 1. はじめに

自動車運転がドライバーに与える疲労を客観的に評価することは、安全で快適な車両を開発する上で重要な課題と考えられる。しかし、実際の運転状況では疲労をもたらす機構は非常に複雑であり、道路状況などの環境要因、車両特性に起因する車両要因、ドライバー自身の個性に関係する人間要因など種々の要因が影響しあったものであると考えられる<sup>1, 2)</sup>。したがって、運転疲労の全容を明らかにすることは容易ではなく、検討すべき要因を絞る必要がある。そこで対象とする疲労要因として、車両運動特性が如実に反映され道路状況にも関係する振動要因に着目した。ドライバーは連続的に振動に暴露され常に精神的および肉体的な影響を受けることから、特に長時間の運転では疲労の主要因の一つと考えられる。

振動要因については、従来より「振動・乗り心地」という領域で多くの研究が報告されている<sup>3-5)</sup>。そして、その評価の主幹をなすものは、Griffin<sup>6)</sup>が用いている振動感受性評価を中心とした官能評価法であると考えられる。

ところが、「疲労は長時間運転の過程で徐々に蓄積されていく」という運転疲労の一般的特徴を考慮すると、これまでの振動・乗り心地評価では不十分な点があると考えられる。

その一つは、従来の評価の多くは比較的短時間の乗車で評価しているという点である。この理由は、被験者は通常、参照振動と評価振動を比較する方法で評価する<sup>6)</sup>ため、負荷する振動が長時間になると官能評価による比較が難しくなるためと考えられる。

また、大きな振動と感ずることと疲労をもたらす程度は必ずしも一致するとは言えず、とくに徐々に影響する要因は過小評価されやすいという点も挙げられる。

一方、このような主観的評価に代り、ストレスホルモン等の生化学指標や心拍変動等の自律神経系の指標といった客観的指標を用いて評価する試みが報告されている<sup>7-10)</sup>。

そこで本研究<sup>11-14)</sup>では、対象を車両上下振動に絞り、従来の振動・乗り心地評価では検出しに

くい蓄積的な影響の評価をねらいとして、次の3段階に分けた検討を行った。すなわち、

目的に適應する有効指標をいくつかの生理指標から抽出する

抽出された指標を用いた評価を台上での加振実験で行う

台上実験の結果を実車走行実験で検証するの3ステップで実験を構成した。

ここでは、上下振動の周波数影響に着目して、特に低周波振動帯域において新たな影響を見出した点を中心に報告する。

## 2. 疲労評価の指標抽出

### 2.1 実験方法

ドライバーの疲労感に対応する、蓄積的な影響を示す指標を抽出するための走行実験を行った。

疲労感とは、柿崎らが用いた疲労の主観的評定尺度<sup>15)</sup>を基にして評価した。Table 1に評価点とそれに対応する内容を示す。次に、有効指標の候補となる生理変化として次の6指標を選択した。これらの指標は、種々の道路環境場面で走行した検討結果<sup>12)</sup>から選ばれたものである。

まず、循環器 - 自律神経系の指標として心拍数 (HR: Heart Rate)、心拍血圧性変動 (MWSA: Mayer Wave Related Sinus Arrhythmia) 及び心拍呼吸性変動 (RSA: Respiratory Sinus Arrhythmia) を選び、さらに内分泌系の指標として尿中アドレナリン (Adr: Adrenaline)、ノルアドレナリン (Nor: Noradrenaline) 及び唾液中コルチゾール (Cor: Cortisol) を選んだ。なお、MWSAとRSAの計測・解析は渥美の方法<sup>16)</sup>で行った。また、一部

Table 1 Subjective rating of fatigue.

Rating point	Anchored key word
1	Not tired at all
2	Minimally tired
3	Somewhat tired
4	Tired
5	Considerably tired
6	Very tired
7	Extremely tired

の実験では、参考データとして走行中の脳波 $\alpha$ 波出現率と選択反応時間を計測した。

走行実験は男性被験者7名について、高速走行路と荒れた舗装路を種々に組み合わせた周回路を3000ccの乗用車を用いて総時間で約5時間ほど走行させた。疲労感と生理指標の計測は、走行の前後及び走行1時間ごとに行った。

なお、生理指標には日内リズムに基づく変動があるため、各被験者について走行日と別日の同時刻に、着座リラックス状態で生理指標の計測を行い(基底生理計測<sup>12)</sup>)、これを基準レベルとして各生理指標の変化を相対値で示した。

## 2.2 統計解析

疲労感と6つの生理指標について相互相関を調べた結果をTable 2に示す。疲労感との相関が高い指標は、尿中アドレナリンと心拍血圧性変動であり、相関係数が0.5以上あった。なお生理指標相互の相関はあまり高くないことから、それぞれの指標はかなり独立している(特性を異にする)と考えられる。また、各指標間の類似性をみるためにクラスター分析を行うと、Fig. 1に示すように、疲労感と近い距離に尿中アドレナリンと心拍血圧性変動があり、唾液中コルチゾールがそれに続いていた。さらに、疲労感を目的関数としてそれを説明するための有効指標を危険率1%のF検定で抽出すると、尿中アドレナリン、唾液中コルチゾール、心拍血圧性変動の3指標が抽出された。

一方、これらの指標の生理学的意味について考えると、尿中アドレナリンと唾液中コルチゾールはストレスホルモンと呼ばれる精神的ストレスに

応答する指標であり、心拍血圧性変動については、いまだ評価が定まっていないが覚醒低下の指標の一つと考えられている<sup>16)</sup>。このことは、心拍血圧性変動が脳波 $\alpha$ 波出現率や選択反応時間の低下と今回相関したことから裏付けられた(データは省略)。

以上の解析を総合判断して、尿中アドレナリンと心拍血圧性変動が有効指標の候補として挙げられた。

さらに、この2指標と疲労感の時間変化について、今回の実験のうち走行条件が同一の4例の平均値で比較した。Fig. 2に示すように、疲労感を経時的に徐々に増大するのに対して、心拍血圧性変動は走行半ばに上昇し、尿中アドレナリンは、走行初期に少し上昇し走行後半に急激に増加するというそれぞれ異なった変化傾向が認められた。

これらの結果と前述した生理指標の生理的意味とを合わせると次のように考察できる。ドライバが感じる疲労感には、少なくとも特性の異なる2つの因子が係っており、その1つが精神的ストレスの増加であり、もう一つは覚醒度の低下とそれに伴う運転パフォーマンス低下の自覚である。そしてこの2つの因子はほぼ独立したかたちで疲労感に寄与していると考えられる。なお、眠気は疲労とは意味の異なる概念であるが、実際には、ドライバは眠気の状態も疲労感の一部として評価していると推察された。

本研究のねらいは、長時間運転において蓄積的に影響する要因を評価することにある。これを考慮すると、今回抽出された指標のうち、精神的ストレスの増加に対応し運転後半にとくに増加が認められた尿中アドレナリンが適合する指標であると

Table 2 Correlation coefficient between fatigue score and physiological indices.

	Fat.	Adr.	Nor.	Cor.	HR	MWSA	RSA
Fat.	1.0						
Adr.	0.744	1.0					
Nor.	0.202	0.245	1.0				
Cor.	0.404	0.292	0.031	1.0			
HR	-0.226	0.021	-0.289	-0.038	1.0		
MWSA	0.516	0.338	0.261	0.086	0.011	1.0	
RSA	0.344	0.130	0.247	0.104	-0.803	0.121	1.0

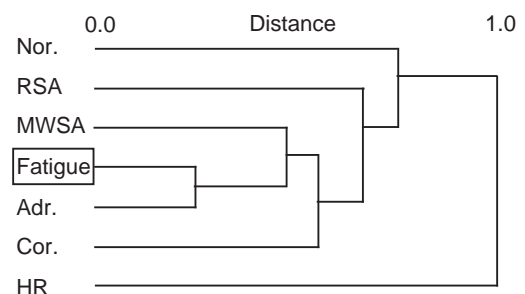


Fig. 1 Result of cluster analysis.

判断された。したがって以下の実験では，尿中アドレナリンをおもな指標として評価を行った。

### 3. 台上実験による評価

#### 3.1 実験方法

Fig. 3に示す上下加振機を含む運転シミュレータを用い，Table 3に示す実験条件で台上での加振実験を行った。

男性被験者6名に対して，1.6，4，6，8，10Hzの正弦波上下振動を0.1Gの加速度一定条件で60分間負荷し，そのときの尿中アドレナリン変化を計測した。設定した振動周波数は，それぞれ頭部，胸部，腹部及び大腿部の共振周波数に概ね相当する。なお，被験者には走行画像と連動したステアリング操作を行わせて実験に対する意欲を維持させた。また，尿中アドレナリンのデータは，前述

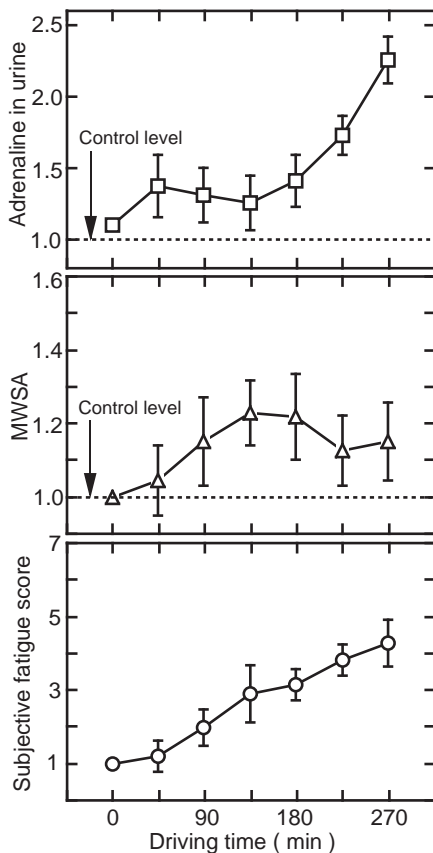


Fig. 2 Comparison among adrenaline, MWSA and fatigue score. Each fluctuation (mean ± SEM, n = 4) is indicated as relative value to its control level.

したように基準レベルに対する相対値で示した。

#### 3.2 結果と考察

1.6Hz及び4Hzで加振したときの尿中アドレナリンの経時変化を比較してFig. 4に示す。4Hz加振（胸部共振帯域に相当）では，加振直後にアドレナリンは著しく増加しており，加振後は逆に急速に減少する傾向が認められた。

それに対して1.6Hz加振（頭部共振帯域に相当）では，4Hz加振ほどの急速なアドレナリンの増加が認められないが，加振後1～2時間後においても依然高いレベルが維持されていた。

そこで，加振直後と加振1時間後のアドレナリンについて各周波数で比較すると，Fig. 5に示す結果となった。まず，加振直後では，4Hz加振の条件で最もアドレナリンが増加していた。この傾向は，「上下振動では4～6Hzの帯域が最も振動感受性が高い」という知見<sup>3,4)</sup>とも一致しており，Fig. 5における加振直後の周波数特性は振動感受

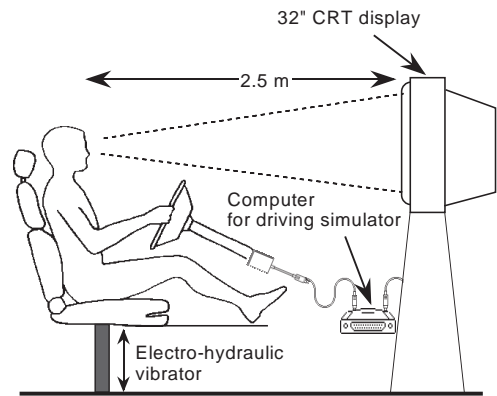


Fig. 3 Apparatus for the vibration-load test.

Table 3 Experimental conditions in the vibration-load test.

Title	Experimental condition
Subject	Six males
Apparatus	Electro-hydraulic vibrator Computer for driving simulation
Vibration exposure	Vertical vibration of 0.1G for 60 min (1-10 Hz of sinusoidal wave form)
Physiological index	Adrenaline in urine

性の周波数特性に類似していた。このことは、運転初期もしくは短時間乗車では、この帯域の振動低減が効果的であることを示すものと考えられる。

一方、加振1時間後では、Fig. 4及びFig. 5に示すように、頭部共振周波数帯域である低周波振動の加振条件でアドレナリンが高いレベルを維持していた。このような徐々に影響して回復しにくい傾向は、従来の乗り心地評価では検出されないか、過小評価されていたものと考えられる。その意味で、アドレナリンを指標として評価した今回の低周波振動の影響は新しい知見になると考えられる。

しかしながら、このようなモデル的な台上実験は実際の走行とはかなり懸け離れたものであることは否めない。そこで、実車走行により上述の低周波振動の影響を検証する実験を行った。

#### 4. 実車実験による評価

##### 4.1 実験方法

実験条件の概要をTable 4に示した。男性被験者4名について、高速走行路と荒れた舗装路を組み合わせた周回路を、車両特性以外は同一とした走行条件で走行させ、そのときの尿中アドレナリン及び心拍血圧性変動を計測した。

実験車は3000ccの乗用車を用い、サスペンションを一定の特性に固定した場合（比較車）と、1

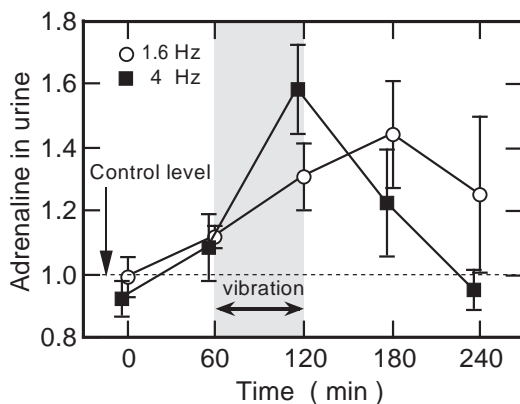


Fig. 4 Comparison of urinary adrenaline (mean  $\pm$  SEM), for vibration exposures (○) at 1.6 Hz and (■) at 4 Hz, at each time, for six subjects.

～2Hzの低周波振動を特に低減するように減衰力を制御した場合（評価車）の2通り設定して各々被験者に走行させた。なお、順序効果をなくすため、比較車と評価車の乗車順は被験者間でカウンタバランスした。

走行実験は45分走行と15分休憩を6回繰り返し（総走行時間：4時間半）、走行の前後および各走行セットごとに生理指標を計測した。なお、サスペンション制御の効果を確認するため車両フロアの上下加速度も計測した。

##### 4.2 結果と考察

荒れた舗装路走行時における車両上下加速度をFFT解析し、その平均パワースペクトル密度を比較した結果をFig. 6に示す。比較車に比べて評価車では、1～2Hzの低周波帯域の振動強度が2～

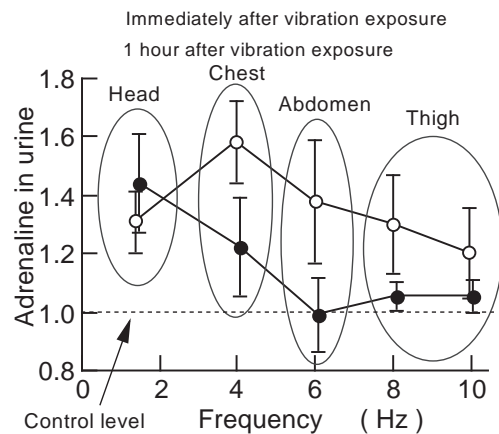


Fig. 5 Comparison of urinary adrenaline (mean  $\pm$  SEM), for (○) immediately after and (■) 1 hour after vibration exposure, at each frequency, for six subjects.

Table 4 Experimental conditions in the road test.

Title	Experimental condition
Subject	Four male drivers
Vehicle	3000cc passenger car with / without suspension control
Test road	Circular course including a rough paved road segment
Driving time	270 min : six sets of 45 min drive and 15min rest
Physiological index	Adrenaline in urine, MWSA

4dB程度低減されたことが認められ，サスペンションの減衰力制御による車両振動の低減を確認した。

次に，尿中アドレナリンの経時変化を比較車と評価車で比較した結果をFig. 7に示す。Fig. 7の尿中アドレナリン変化は3つのフェーズに分けることができる。まず，最初の走行セットではアドレナリンのシャープな増加が認められたが，これはドライバが運転に慣れるための適応過程と考えられる。それに続く運転中盤では，アドレナリンは

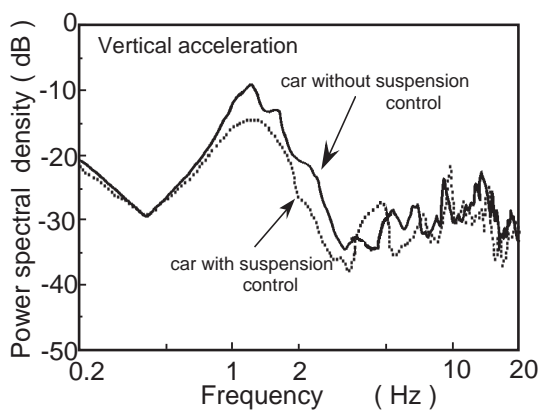


Fig. 6 Comparison of mean power spectral density of vertical acceleration, for the cars with and without suspension control in the road test.

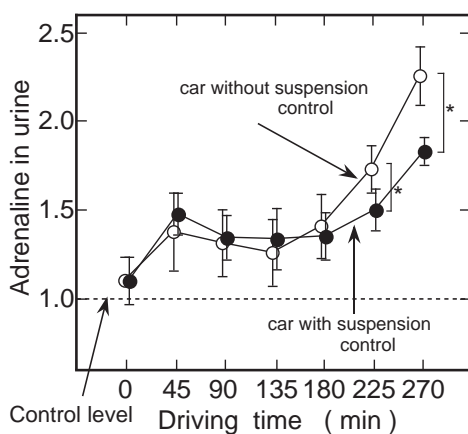


Fig. 7 Comparison of urinary adrenaline (mean  $\pm$  SEM), for the cars (○) with and (●) without suspension control, for four subjects. Results from statistical analyses by paired  $t$ -test are indicated: \* $p < 0.05$ .

やや減少した後一定値を示したが，被験者の中にはねむけを訴える例がみられた。そして，これら2つのフェーズまでは比較車と評価車にはアドレナリンに差が認められなかった。

ところが，最後の2セットの走行では比較車に比べて評価車では明らかにアドレナリンの上昇が抑制され，統計的な有意差（危険率5%）が認められた。一方，心拍血圧性変動には全体を通して差がみられなかった。

以上の結果から，1～2Hzの低周波帯域の振動低減が確かに疲労軽減に効果のあることが検証された。また，アドレナリンの生理的意義から考えて，この振動低減の効果は長時間運転時に蓄積される精神ストレスの軽減に主として寄与すると推察された。

## 5. まとめ

自動車運転におけるドライバの疲労について，疲労の主要因の一つと考えられる車両の上下振動を対象にして，従来の振動・乗り心地評価では検出しにくい蓄積的な影響の評価をねらいとした検討を行った。

まず，蓄積的に影響する要因を評価できる指標として，種々の生理指標から尿中アドレナリンを抽出した。

次にこの指標を用いて，上下振動の影響を台上加振実験で評価し，頭部共振周波数に相当する低周波帯域の振動影響について，徐々に影響して回復しにくいという新たな傾向を見出した。

最後に，低周波振動を低減できる車両を用いて実車走行実験を行い，1～2Hzの低周波振動の低減が確かに疲労軽減に有効であることを検証した。

## 参考文献

- 1) 大久保堯夫："交通と疲労"，からだの科学，臨時増刊「交通と人間」(1986)，20
- 2) 大久保堯夫："人間工学からみた道路と自動車運転"，Asphalt, 34-168(1991)，26
- 3) Leatherwood, J., et al. : "A Design Tool for Estimating Passenger Ride Discomfort within Complex Environments", Human Factors, 22(1980)，291
- 4) 榎戸靖暢，湯川ひとみ："舗装の乗り心地評価と生体反応"，Asphalt, 33-167(1991)，52
- 5) Dupuis, H. and Zerlett, G. : "Whole-body Vibration and

- Disorder of the Spine", *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 59(1987), 323
- 6) Griffin, M. J. et al. : "Vibration and Comfort I. Translational Seat Vibration", *Ergonomics*, 25(1982), 603
- 7) Vivoli, G., et al. : "Biochemical and Haemodynamic Indicators of Stress in Truck Drivers", *Ergonomics*, 36(1993), 1089
- 8) 中田靖子, ほか2名 : "救難隊員の作業負担度について", *航空医学実験隊報告*, 37-3(1996), 47
- 9) Schwabeger, G. : "Heart Rate, Metabolic and Hormonal Responses to Maximal Psycho-emotional and Physical Stress in Motor Car Racing Drivers", *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 59(1987), 579
- 10) Herd, J. A. : "Cardiovascular Response to Stress", *Physiol. Rev.*, 71(1991), 305
- 11) Taguchi, T., et al. : "Study of Driver Fatigue during Long Time Driving", *Proc. the 2nd Japan-China Symp. on Traffic Safety and Health*, Tokyo, (1995), Poster-11
- 12) 田口敏行, ほか3名 : "長時間運転時のドライバ疲労に関する考察", *自動車技術会論文集*, 28-1(1997), 77
- 13) Taguchi, T., et al. : "Influence of Vertical Vibration on Driver Stress Assessed by Stress Hormones", *Proc. the 13th Triennial Cong. of the Int. Ergonomics Assoc.*, Tampere, 6(1997), 457, IEA
- 14) 田口敏行, 稲垣大 : "ドライバの運転疲労における上下振動の影響", *自動車技術会学術講演会前刷集*, 983 (1998), 193
- 15) 柿崎敏雄 ほか2名 : "精神作業中の精神的作業負担と疲労の変動", *産業医学*, 34(1992), 565
- 16) 渥美文治 : "心拍計測によるドライバの意識状態評価", *自動車技術会学術講演会前刷集*, 946 (1994), 133

### 著者紹介



田口敏行 Toshiyuki Taguchi

生年：1958年。

所属：人間工学研究室。

分野：ドライバの生体計測とストレス・疲労に関する研究。

学会等：自動車技術会，日本ME学会，日本化学会会員。