

制動行動におけるドライバの心拍数変化

The Change of Driver Heart Rates under the Influence of Braking

谷 田 公 二*
Koji TANIDA

要 旨

運転行動を解明する手掛かりとして、制動行動におけるドライバの心拍数変化に着目した。様々なブレーキ状況を想定したテストから、制動行動時のドライバの心理状態が心拍数変化に表れていることを見出した。障害物が横から飛び出す想定ではドライバの心拍数に急激な増加が認められた。他方、停止線で停車する想定では心拍数は停車前から漸減していった。このように心拍数変化は制動行動に呼応した特有のパターンを持っていることが推察される。以上を踏まえ、制動行動がパニックブレーキであったか否かを判別するためにブレーキを踏む前後の心拍加速反応の大きさを用いた指標式を提案した。

ABSTRACT

Attention was focused on changes in driver heart rate while braking as an approach to understanding driving behavior. Using tests designed to model a variety of different braking conditions, it was observed that driver psychological states while braking are shown in the form of changes in heart rate. In a test envisioning an obstacle that dashes out from the side, driver heart rates were observed to increase suddenly. On the other hand, a test that envisioned the vehicle coming to a halt at a stop line showed the heart rate gradually slowing before the vehicle stopped. It was inferred that changes in heart rate thus take on a distinctive pattern in response to braking behavior. In this light, an index formula was proposed that uses the magnitude of the response in heart acceleration around the time of braking in order to determine whether an instance of braking behavior represented panic braking or not.

1. まえがき

自動車開発は安全な車作りを目指し、衝突被害の軽減を目的とした2次安全はもちろん、交通事故防止に効果があると考えられている1次安全にも努力を注いでいる。その製品化はアンチロックブレーキシステムやブレーキアシストシステム等となり、これらの効果検証の一つとしてパニックブレーキでのテストが行われている⁽¹⁾。このテストでは被験者がパニック状態に陥るようにテストを設定し、緊急状態での運転者の制動行動が観察される。また、上野らの緊張度評価⁽²⁾では運転者の生理状態に注目し、過度の緊張状態がパニックであると設定した。しかしながら、パニックブレーキでの生理心理状態に着目した研究例は少ないことから、運転者の生理的観点に基づいて運転行動を評価するテストを試みることは、今後の自動車開発にとって有用であると考えられる。

本稿では、横からの車両の飛び出しを想定した制動行動

に対する、運転者の心拍数変化を用いたパニック状態の判別方法について論述する。

2. 心理状態と生理反応

情動に関係ある自律神経には交感神経と副交感神経があり、拮抗することで心理状態のバランスを保っている⁽³⁾と考えられている。我々の心理状態が緊張や危険などにさらされた状態になると、交感神経を中心とした生理反応が認められる。交感神経が優位であるときには、心臓循環器系においては、末梢の血管は収縮し血圧が高まる。また心拍数は上昇し、心拍間隔のバラツキは小さくなって行く。一方、副交感神経(迷走神経)が優位であるときには、これとは逆に心臓のはたらきは穏やかとなり、心拍数は低く、揺らぎをもった心拍間隔となる^{(4), (5)}。

そこで、本研究では制動行動の違いと心拍数変化に着目して類別することを試みた。

3. 制動行動の分類

制動時の緊張を比較検討するために制動行動を規定する必要がある。実際の運転では様々な制動行動が行われていると考え、ここでは5つのモードに分類し設定した。単純な制動として、

- (1) 赤信号点灯時などの目標停止位置が定まった「信号停止モード (Signal mode)」
- (2) 適正な車速まで減速することを目的とした、コーナ進入に代表される「コーナモード (Curve mode)」を設定した。また、複雑な制動として、
- (3) 本線に並走車がある高速道路流入など、操舵回避(例えば合流区間終了)までの時間を確保することを目的とした「回避モード (Escape mode)」
- (4) 予め分かっている制動開始位置から急制動を行う「急制動モード (Hard mode)」
- (5) 障害物の突発的な出現、いわゆる飛び出しに対し、瞬時に制動行動(パニックブレーキ)をとるような「飛び出しモード (Panic mode)」を設定した。

上記の「急制動モード」は特異なモードではあるが、本研究での主旨から、「飛び出しモード」と比較して、制動開始点を予め知っていたか否かの生理反応の差異を見るために設定した。

4. 試験方法

4.1. 試験概要

被験者は 20 ~ 50 代の 39 名(男性 34 名, 女性 5 名), テスト車両は 1600cc, 4速オートマチックトランスミッション車を用いた。被験者には普段の運転のように走行するよう指示してあるが、飛び出しテストがあることは知らせていない。このような制動テストには車速管理が重要である。したがって、被験者にはテストの前に車両に慣れ、さらに車速を合わせられるように慣熟走行を十分に行なわせた。そして各被験者が車速管理を十分にできた頃を見計らい、その慣熟走行の途中で予告せずに飛び出しモード試験を実施した。この予告しなかった試験については被験者に理解を求め、以降のテストへの同意を確認した。その後、各モードの内容を説明し、引き続き信号停止モード5回、コーナモード3回、回避モード3回、急制動モード2回の計 13 試験を行った。なお、モード順序は被験者毎に変えて行った。

4.2. テストコース設定

Fig. 1 に各制動モードでのテストコースを記す。また Fig. 2 は飛び出しモードでの試験光景である。飛び出しモードは、全被験者が操舵回避を伴わず急制動を行なうよう、筒状の風船を1車線分1秒でターボファンを用いて膨

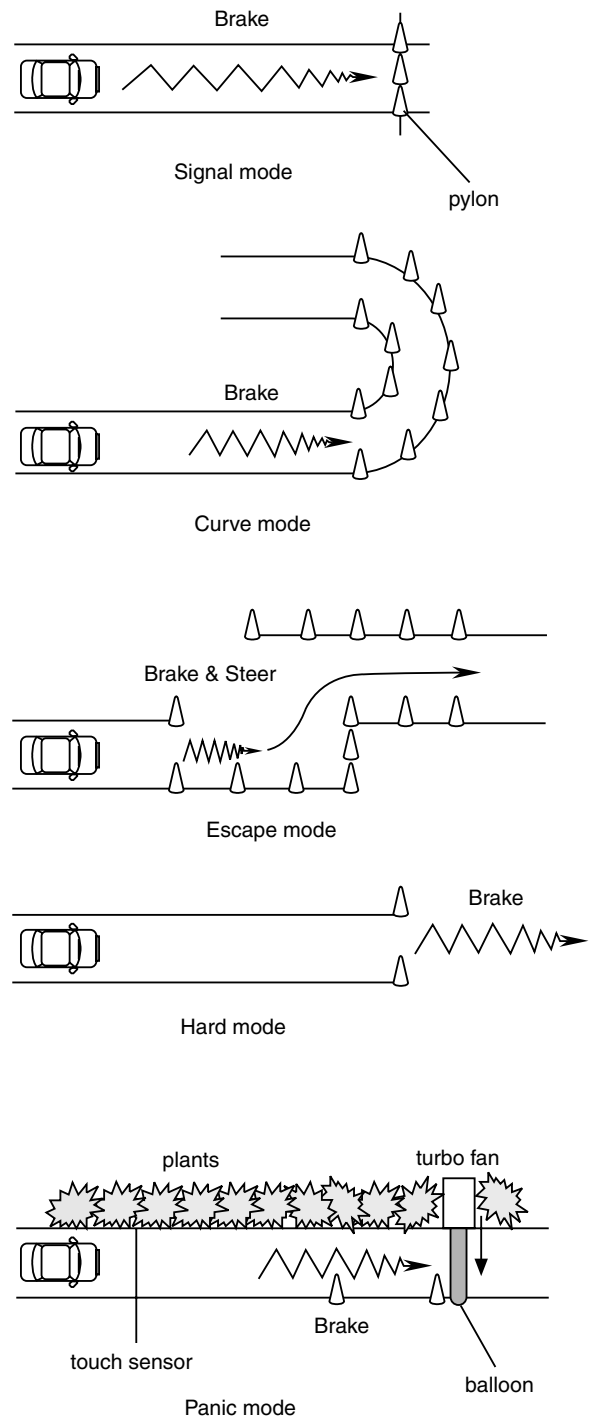


Fig. 1 Braking test modes



Fig. 2 Panic mode

らませ、道路左側から走行車線を完全に遮断する設定とした。また飛び出しタイミングを統一するため、タッチセンサを路面に貼った。これにより車両前輪が通過すると、ターボファンのスイッチが入る仕組みとなっている。

なお、それぞれのモードは、およそ 200m の助走区間を設け、一定車速 50km/h からの制動試験とし、他車両の存在による交通流がない状況で行なった。また、本テストはパイロンで規制した道路を設定したため、被験者は普段の運転状況よりも進路の把握が難しく、間近にならないと道路形状を確認しにくい。したがって、被験者は普段以上に注意を払って運転していたことを明記しておく。

4.3. 心拍数計測

心拍数計測では、耳葉にアース電極を貼り、胸部 2 電極から心電図 ECG (Electro cardiogram) を誘導した。ECG はサンプリング周波数 500Hz でデータレコーダに記録した。一般に自律神経系の生理量はサーカディアンリズムという日内周期変動をもつ⁽⁶⁾。したがって、各テストは測定時刻を統一する必要がある。しかし、ストレスが加わったときに生じる変化に着目するならば、日内どの時刻においても変化の方向は一定であると思われる。したがって、ここではサーカディアンリズムの特定を行わず制動行動中の心拍数変化のみに着目した。

4.4. 心拍データの解析範囲

飛び出しは予見性がなく、急激な心理変化を引き起こすので、心拍数はこの時を境に急変化すると考えられる。一方、被験者が飛び出しをいつ認知したか、あるいはどの時点で制動を開始しようとしたかは脳内で起こる事象であるので、外部からその規定は困難である。しかし、本テストにおいてどの被験者にも共通するのは、ブレーキペダルへの足の踏み替えとその直前の「アクセルペダルを放す」行動である。したがって、アクセルペダルを放す動作を始めた瞬間を特定するために、計測車両のアクセルペダルにはレーザセンサを備え、ストローク量を計測できるようにした。このように、制動行動中でも特にアクセルペダルが戻る前後の心拍数変化に着目し、解析はこのアクセルペダルが戻る前後の範囲とした。

5. 試験結果

本テストでの有効被験者数は 39 名のうち 36 名となった。これはシートベルトとのこすれにより生体電極が外れたなど計測できなかったためである。

以下にテスト結果を示す。

5.1. モードに応じた心拍数変化パターン

1 試験ごとに Fig. 3 に示すようなデータが得られる。こ

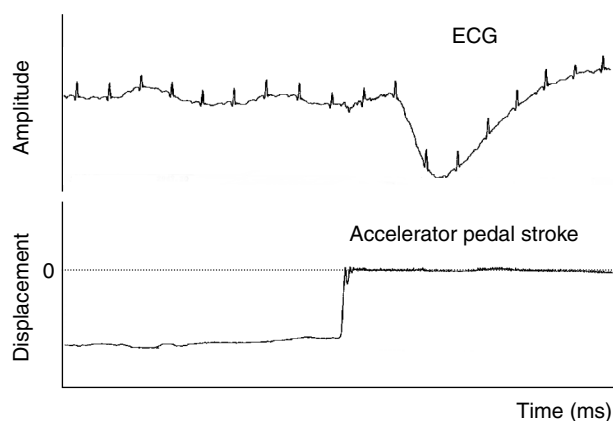


Fig. 3 Driver electrocardiogram (ECG) and accelerator pedal stroke displacement

れは飛び出しモードの 1 事例である。アクセルペダルを放す前後 5 秒間を明示したものである（後ろ 5 秒間は信号停止モード、急制動モード、飛び出しモードともに停車するのに十分な時間である）。図中上部は心電波形であり、急でかつ強い制動のために生じた上体前屈による、あるいは緊張発汗によるものと思われる基線の揺らぎが生じている。図中下部はアクセルペダルのストローク量である。グラフ上ではペダルを踏み込む方向を負としてストローク量を明示している。このグラフより被験者はアクセルペダルを放す瞬間まで、定速維持のためアクセルペダルストローク量をほぼ一定に保っていたことが分かる。この心電波形のピーク間隔(RRI)から瞬時心拍数を算出することで、心拍数の時系列データが得られる (Fig. 4)。図中「AP-off」はアクセルペダルを放した瞬間を示す。

このような変換を全被験者、全試験に行なうと以下のような心拍数変化の定性的傾向が得られる。ここでは 2 名のデータを挙げる (Fig. 5)。

すなわち、信号停止モードでは、制動行動に入る前から心拍数が下がり始め、制動行動開始後も車速が落ちる

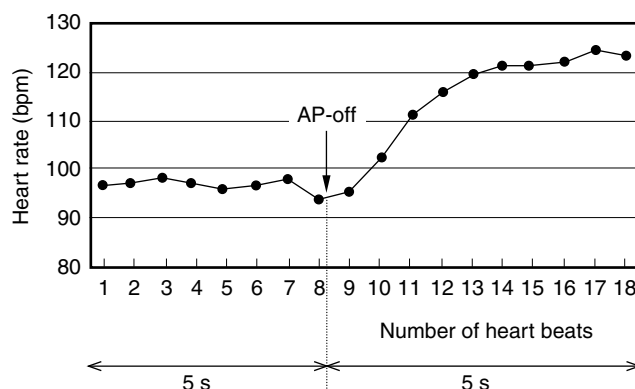


Fig. 4 Change in heart rate between 5 s before and after accelerator pedal release (AP-off)

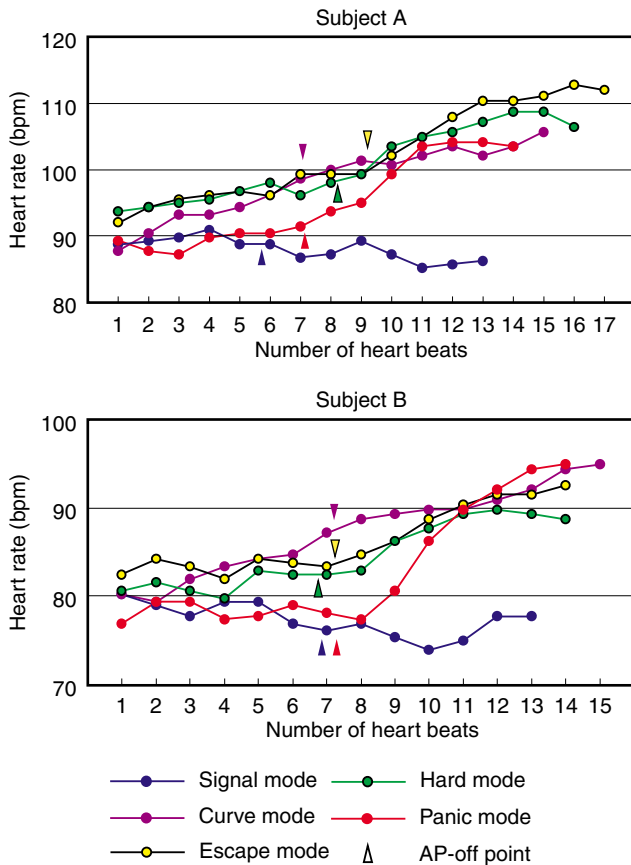


Fig. 5 Heart rate change pattern in each mode

にしたがいそのまま心拍数は緩やかに揺らぎながら上がって行く。

コーナモードでは、コーナに接近するにしたがい心拍数は上昇し、旋回を開始してから心拍数上昇が継続する。

回避モードでは、制動開始点に近づくにしたがい心拍数の上昇が見られる。その後の操舵回避中も心拍数が増加する。

急制動モードでは、制動開始点に車両が接近するにしたがい心拍数は上昇する。またそれ以降も心拍数は増加するが、停止直前には心拍数は減じて行く。

飛び出しモードにおいては、制動行動直前までは心拍数の変動は見られない。しかし、その後は心拍数が急増する。

このように各モードに呼応した心拍数変化のパターンが現れることが明らかとなった。次に定量的にパニックブレーキを区別抽出することを試みた。

5.2. 心拍加速反応の定量化

ここで用語の注釈を加えておく。文中、心拍加速反応とは心拍数が増加する生理的な様相を指す。定義式を式(1)に示す。 V_{tr} は、アクセルペダルを放す直前の1心拍データとその後の3つの心拍データからなる回帰直線の傾き HR_{tra} と、ペダルを放す直前5秒間の心拍データの回帰直線の傾

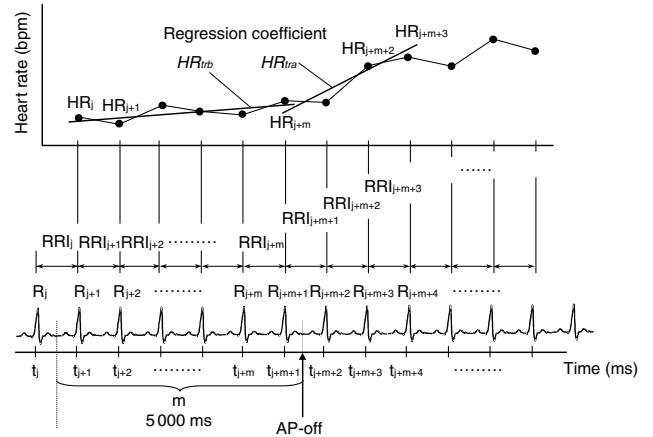


Fig. 6 Explanation for Eq.1

き HR_{trb} との差である。これは時系列に並べた心拍数データの傾きの折れ曲がり具合を表わすもので(Fig. 6)、ペダルを放す前から少しずつ上昇する心拍数やその後に起こるコーナ旋回中などの心拍数上昇の影響を考慮することができる⁽⁷⁾。

$$V_{tr} = HR_{tra} - HR_{trb} \quad (1)$$

here,

$$HR_{trb} = \frac{\sum_{i=j}^{j+m} (t_{i+1} - \frac{\sum_{i=j}^{j+m} t_{i+1}}{m}) (HR_i - \frac{\sum_{i=j}^{j+m} HR_i}{m})}{\sum_{i=j}^{j+m} (t_{i+1} - \frac{\sum_{i=j}^{j+m} t_{i+1}}{m})^2}$$

$$HR_{tra} = \frac{\sum_{i=j+m}^{j+m+3} (t_{i+1} - \frac{\sum_{i=j+m}^{j+m+3} t_{i+1}}{4}) (HR_i - \frac{\sum_{i=j+m}^{j+m+3} HR_i}{4})}{\sum_{i=j+m}^{j+m+3} (t_{i+1} - \frac{\sum_{i=j+m}^{j+m+3} t_{i+1}}{4})^2}$$

- V_{tr} : difference between HR_{trb} and HR_{tra} (beats/min/s)
- HR_i : heart rate (beats/min)
- HR_{trb} : regression coefficient calculated from heart rate data before AP-off (beats/min/s)
- HR_{tra} : regression coefficient calculated from heart rate data after AP-off (beats/min/s)

Fig. 7 の V_{tr} 度数分布はある被験者のデータを処理した一事例である。

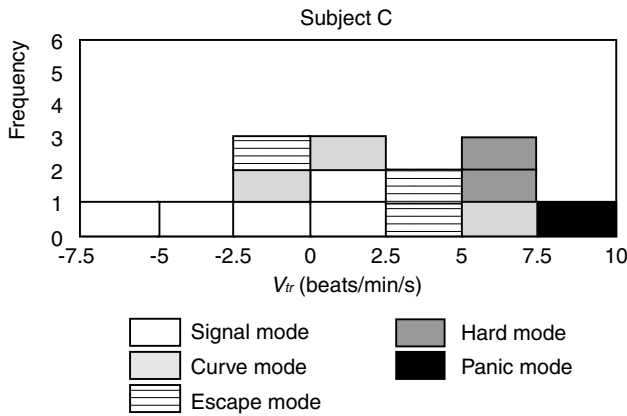


Fig. 7 V_{tr} frequency distribution (subject C) in each mode

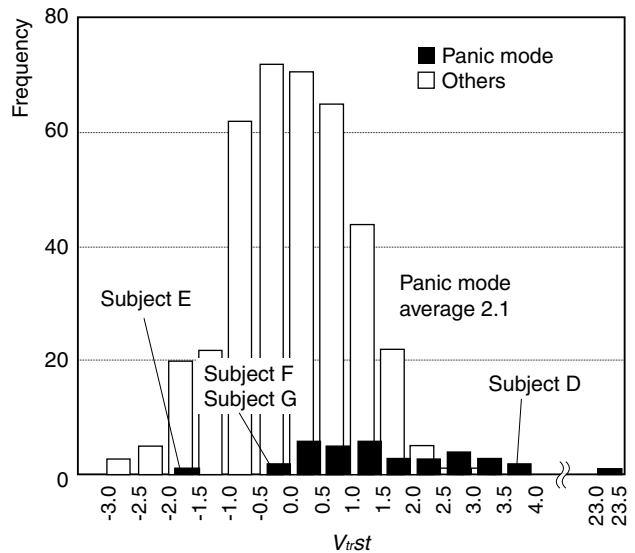


Fig. 8 V_{trst} frequency distribution

5.3. V_{tr} の標準化

このように心拍加速反応に着目したが、被験者には全試験を通じて元々反応の小さい人や逆に大きな人が存在する。したがって、単に V_{tr} 値だけの大小比較では、全被験者間の比較には不適切である。そこで全被験者間での比較検討をするために各被験者毎で V_{tr} 値の標準化を試みた。標準化には下式(2)を定義する。

$$V_{trst} = \frac{V_{tr} - AVV_{tr}}{\sigma} \quad (2)$$

V_{trst}

σ : standard deviation of V_{tr} without panic mode

AVV_{tr} : average value of V_{tr} without panic mode

この式から、被験者毎の各モードでの V_{tr} がその被験者の度数分布図に対してどの位置に分布されるかが分かる。ここで飛び出しモードは普段の制動行動で頻繁に起こる事象ではないので、通常の運転を想定した σ と AVV_{tr} の算出には飛び出しモード値を含めない。この V_{trst} を用いて被験者全体を一まとめにすると度数分布図 Fig. 8 を得る。

5.4. 内省

被験者には飛び出しモードテスト後、直ちに自由記述を交えた内省調査を行なっている。飛び出しモードに対して「気付きもしなかった」、「全く驚かなかった」、「少し驚いた」、「非常に驚いた」の4件法で回答させた。その結果 36 名中 34 名が驚きを覚えていたと回答した(Fig. 9)。

また、飛び出しの最中に自分がどのように判断したかも回答させている。「何もできなかった」、「思わずブレーキを踏んだ」、「色々考えたがブレーキを踏んだのがやっと」、「対処法を考えてやった」の4件法を用いた。その分布をFig. 10に示す。これより、36 名中2名が飛び出しに対して「何もできなかった」と答えていることが分かった。

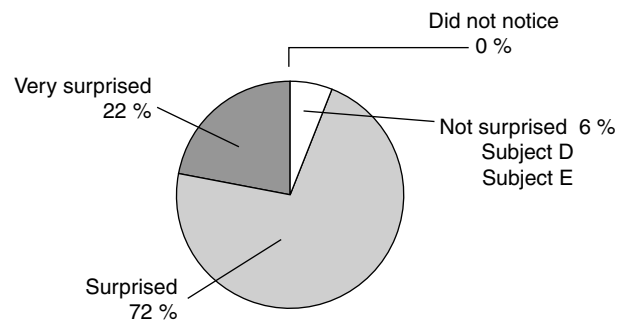


Fig. 9 Self-evaluation of feelings toward panic mode

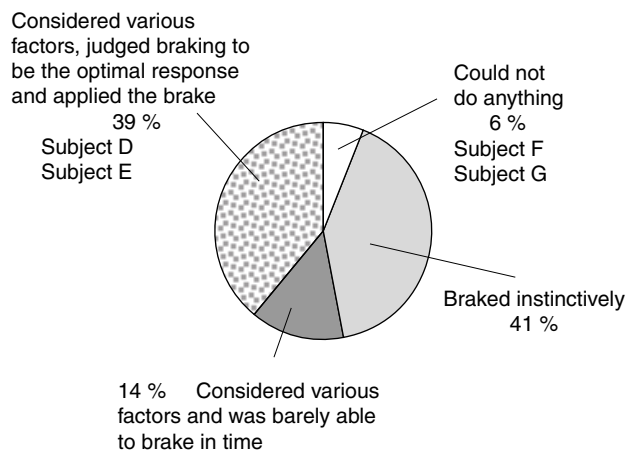


Fig. 10 Self-evaluation of behavior in panic mode

6. 考察と結論

6.1. 心拍数変化パターン

心拍数変化パターンは制動行動に呼応した特徴を持っていた。コーナモード、回避モードと急制動モードにおいてアクセルペダルから足を放す前から心拍数が上昇していたのは、制動開始点に自車両が近づくにしたがい緊張が増していったためと考えられる。これは宇野ら⁽⁸⁾の予測に対する心拍計測と同様、心構えによる緊張が生じた結果であると考えられる。この場合の心構えは、それぞれ旋回、レーンチェンジ、大きな負の加速度が対象である。したがって、飛び出しモードでは、アクセルペダルを放す直前まで心拍数の上昇が見られなかったことから、被験者は飛び出しを予知せず心構えが生じていなかったことが確認できる。またコーナモード、回避モードにおけるその後の心拍数上昇はそれぞれ、制動に加えた旋回、レーンチェンジの運転タスクに伴う緊張状態の継続を表わし、一方、信号停止モードでの心拍数の漸減や急制動モードでの制動終了近くでの心拍数の減少は、制動に伴った車速低下による、並びに車両停止に伴う運転タスク終了による緊張緩和を表わしていると考えられる。したがって、信号停止モードでのアクセルペダルを放す前からの心拍数漸減については制動行動の前から既に緊張緩和が始まっていたと思われる。

6.2. 心拍加速反応と内省との関連

驚きを覚えなかった2名のうち、被験者Dは障害物の出現に対して「すぐに冷静になれる程度でしかなかった」ので、飛び出しモードとしては「全く驚かなかった」と回答した。そして、飛び出しに対して瞬時に「対処法を考えて」ブレーキを掛けるのが適切であると判断し、制動行動をとっている。その時の心拍加速度差分の標準化値 V_{tst} は高く、心拍数が瞬時に増加した状態が現れている (Fig. 8)。次に被験者Eの場合は、計測者側の不手際から飛び出しを事前に周知していたことにより、「全く驚かなかった」のである。したがって、どの地点から飛び出しに対し制動行動をとればよいのかも周知であった。この時の V_{tst} は心拍数の急増を示していない。また、被験者Fと被験者Gの2名は、飛び出しに驚きはしたが、「何もできなかった」と回答し、両名の飛び出しモードでの V_{tst} は各々の他のモードの分布中でも低い方に属する結果となった。一方、行動の面では、両名とも他の被験者同様に、飛び出しモードでブレーキを踏んでいる。

以上から、飛び出しモードでの心拍加速反応は、飛び出しそのものに対する驚きの反応というよりも、飛び出し対処のための制動行動をとっている最中に、急に緊張が生じたか否かを表わしていると考えられる。即ち、被験者Dの場合は回答通り、飛び出しに「すぐに冷静に」はなったが、直

後の制動において緊張が生じたため、 V_{tst} が高い値をとっていると思われる。被験者Eはあらかじめブレーキを掛けることが分かっていたため急な緊張が生じなかったと思われる V_{tst} は低くなっている。また被験者Fと被験者Gの V_{tst} の低さは、飛び出しへの対処として何もできないと制動をあきらめた結果、制動中の緊張が生じなかったためと解釈される。したがって、「何もできなかった」と回答しつつブレーキを踏んだこの両名の心拍変動は、自動的過程⁽⁹⁾と思われる意識レベル以下の行動中の生理変化を捉えた結果となった。

このように飛び出しモードにおいて、心拍数が急増するのは、飛び出しの対処のために制動行動をとろうと急に緊張したために生じるものと考えられる。ただし本研究では生理量として心拍のみに着目したので、制動行動中に被験者が“はっと息を飲んだ”ために心拍加速反応が生じたのか、吸気が長く続いたために心拍加速反応が生じたのか明らかにできない。あるいは制動をかけた時に上体に力が入り、シートベルトとともに心肺に圧力が加わったために心拍加速反応が生じたという可能性もある。しかし、少なくともこのように何とか止まらなければという緊張をともなった急な制動行動を行なう時は、大きな心拍加速反応が生じることが実験結果から明らかとなった。

6.3. パニックブレーキの検出

心拍加速度差分に着目することで、定量的指標を用いたパニックブレーキの識別が可能であると考えられる。飛び出しは他のモードと異なり、不測状況下での制動行動という点で性質上異なる。そこで飛び出しモードと他のモードとの V_{tst} 母集団に差があるか否かU検定を試みると(ここで前述の結果から被験者E, F, Gの3名は除く)、これらのモードは同じ母集団に属さない独立した分布であると考えられる ($p=1.18E-05 < 0.025$)。また本試験での飛び出しモードを除いた V_{tst} 分布は正規分布と認められる ($p=0.44 > 0.05$) ことから、制動行動に伴う V_{tst} が正規分布であると仮定すると、 V_{tst} 分布の95%信頼区間からパニックブレーキを判別する閾値はおおよそ $V_{tst}=2$ 付近にあると思われる。しかしながら標準化に用いた試験は普段の運転状況よりも難しく設定していたことから、分布そのものが高い値で構成されていたと思われる。したがって、通常の運転状況を考えるならば、その分布は相対的に低い位置に移り、その結果、パニックブレーキとの区別がさらに明確になると思われる。また、飛び出し後の制動行動中には心拍数は急激に100～120beats/min前後まで上昇するので、ここで提案した定義を用いると、ドライバの急激な心拍数変化を誘発するような制動行動開始から2秒前後の内にパニック状態を判定することもできる。

7. まとめ

制動行動中の内省、行動、生理反応に着目し、それらの関係について実車を用いた試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 様々な制動モードについて心拍数の変化パターンがあることを見出した。例えば、コーナに近づくにつれ心拍数が上昇し進入のための心構えが心拍数変化に現れること、また飛び出しに対する制動行動時には大きな心拍加速反応が生じることが明らかとなった。
- (2) 次にこの傾向を定量化する方法を提案し、パニックブレーキを踏むような通常でない制動行動と生理反応を関連付け、心拍加速反応を用いてパニック時の制動行動を検出判定できる可能性を示唆した。

参考文献

- (1) 山本敦ほか：一般ドライバの緊急ブレーキ操作に対するアシストシステムの開発，自動車技術会学術講演会前刷集 973, p.165-168(1997)
- (2) 上野克巳ほか：皮膚インピーダンス計測における自動車性能評価への適用，自動車技術，Vol.45, No.10, p.73-77(1991)
- (3) 大須賀美恵子ほか：精神緊張度モニタの開発，計測自動制御学会論文集，28(8), p.910-915(1992)
- (4) 関根太郎ほか：車両運転時のドライバの緊張度測定法，自動車技術会学術講演会前刷集 946, p.125-128(1994)
- (5) 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, p.133-136(1994)
- (6) 橋本邦衛ほか：生体計測としての機能測定の意味，生体機能の見かた，東京，日本出版サービス，1973, p.12-16
- (7) 谷田公二：ブレーキ時の心拍加速反応からみたパニック同定の試み，人間工学，Vol.37, No.4, p.159-168 (2001)
- (8) 宇野宏ほか：横風受風時のドライバの心拍変化，自動車研究，第 17 巻，第 2 号，p.55-58(1995)
- (9) 八木昭宏：知覚と認知，東京，培風館，1997, 147p.

■ 著 者 ■



谷田 公二