

運転時の生体脈波を用いたリアプノフ指数 および軌道平行測度による心理的負担の評価

学生氏名 藤原 慎
指導教員 皆川 勝

東京都市大学 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail: fjwrmkt1130@gmail.com
東京都市大学教授 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

近年、人々の交通事故対策への関心は高まっており、多くの対策が行われている。しかし、生理指標を用いて交通事故対策を検討した研究は少ない。平成27年度は15年ぶりに交通事故死亡者件数が増加し、また高速道路での死亡事故は後を絶たない。事故の大半はドライバーのヒューマンエラーによるものであり、疲労やストレスの負荷などによってヒューマンエラーが起こりやすい。本研究では運転時に生じるドライバーのストレスを評価することに適している生体脈波を用いて、ドライバーの心理的負担を生体脈波の caos 解析によって得られるリアプノフ指数および軌道平行測度を比較し、評価していく。その際、道路環境の改善を検討する為に潜在的危険な箇所や道路構造を明確にし、ドライバーの運転時の負担と道路環境的問題との関係を検討する。

Key Words : mental load, stress, pulse wave, traffic accident, tiredness

1. 序論

(1) 社会背景

近年、交通安全の関心が高まっているため、図-1からわかるように交通事故は減少傾向にある。しかし、平成27年の交通事故¹⁾による死者数は前年と比べて+4人と15年ぶりに増加した。そのため、今後も交通事故の防止対策を考えることは非常に重要なことである。

また、高速道路における交通事故は現在も課題の1つであり、特に死亡事故が問題視されている。その中でも最も交通事故の多い高速道路は首都高速道路である。交通事故が多い要因として、カーブが多いこと、渋滞が多く発生していること、そしてJCTが最も多いことなどが挙げられる。

図-2は平成27年における交通事故の発生状況¹⁾を死亡事故、重傷事故、軽傷事故に分けてグラフ化したものである。前方不注意や動静不注意の割合は、死亡事故では約5割、重傷事故では約5割、軽傷事故では、約7割と非常に高い。交通事故が発生する主な原因は、判断遅れや操作ミスといった、ドライバーのヒューマンエラーに関連している。ドライバーのヒューマンエラーによる交通事故の割合は9割以上だと言われており、実際に自動車を運転する際ドライバーは様々な道路環境によって疲労や緊張、ストレスなどといった負の影響を受ける。このように負の影響が加わり続けることはドライバーへの負担となり、認知や判断、操作といった運転行動に必要な動作や情報の伝達に大きな影響を及ぼしヒューマンエラーが発生しやすい環境になっている。

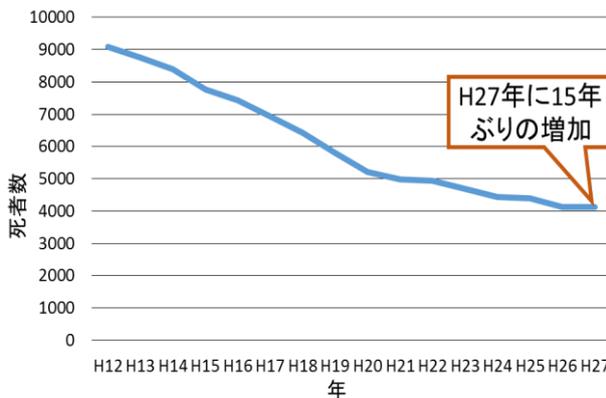


図-1 交通事故による死者数の推移

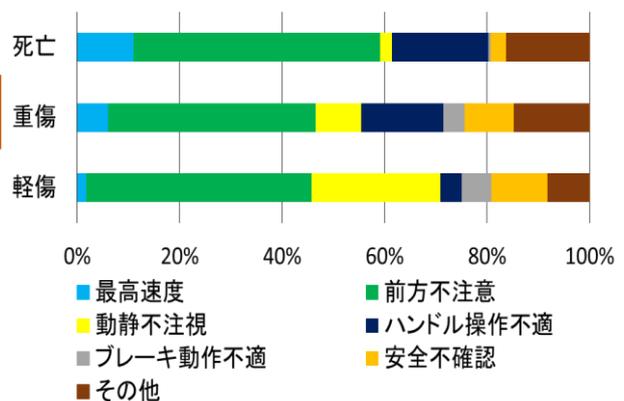


図-2 交通事故の発生状況

(2) 既存の研究

a) 運転が与える負担を把握するための研究

これまでも人間の内面への影響を生理的指標の生体情報を用いた研究が行われている。主な例として、内田ら²⁾は、高速道路の実走実験から得られたR-R間隔変動に着目した分析を行い、R-R間隔変動指標を用いて各個人において心理的負担量を表現した。また、事故の発生していない地点での潜在的な問題を指摘できる可能性を示した。平田ら³⁾は単調な走行条件では、特に単路部区間において意識水準の低下が生じ、意識水準の低下した状態で交通の乱れる地点に進入した場合、適切な回避行動がとれない危険性を示唆している。運転ストレスが血圧を含めた循環動態に及ぼす影響を確かめる実験⁴⁾や緊張度の測定とした心拍変動のパワースペクトル解析の検討なども行われている。岩倉ら⁵⁾はRRI変化率指標により長距離トリップに伴うストレスの蓄積を確認した。また、周波数解析により自律神経の活動を把握し、心拍変動を詳細に分析した。これらは運転がどの程度の負担を与えているか把握するための研究されている。

b) 脈波のカオス性の把握、カオス解析に関する研究

清水ら⁶⁾はテストコースにおける異なる速度の走行実験および高速道路の実験の結果、最大リアプノフ指数はドライバーのメンタル負担状態の有効な指標であること示した。馬庭ら⁷⁾はサロゲート法を用いて加速度脈波のカオス性を検証し、軌道平行測度を用いて加速度脈波の解析を行った。これらは、脈波のカオス性の把握やカオス解析を用いた脈波の評価手法の研究である。

c) リアプノフ指数を用いた運転時の負担に関する研究

原田ら⁸⁾は、生体脈波のカオス解析によって得られたリアプノフ指数により各イベントや道路ごとの乗り心地評価を検討し道路利用者の生体脈波を評価する方法が、道路の乗り心地を区別化する新たな評価方法として有効であると示した。

d) 軌道平行測度を用いた医療分野に関する研究

馬庭ら⁹⁾は、実際の症例を用いて加速度脈波のカオスとSOM解析からメタボリックシンドロームの特徴を考察した。カオス解析では、軌道平行測度を採用し、健常値より高値の場合は血流にランダム性が加わり、循環不全や動脈硬化が疑われると示した。

ここで本研究では、簡易に測定が可能で、運転に影響を与えない耳朶容積脈波を株式会社TOAS研究所製の「Vital meter」(写真-1)を用いて測定した。測定された容積脈波から加速度脈波を算出し、リアプノフ指数および軌道平行測度より評価した。



写真-1 生体脈波測定器具(Vital meter)

(3) 本研究の目的

本研究では、ドライバーの高速道路走行時における負担の評価を行うために、ストレスや疲労といった生体情報を測定することが可能な生理指標の一つである生体脈波を用いる。本実験では実走行のため、簡易に測定が可能で測定器具装着時による影響が少ない耳朶容積脈波を株式会社 TOAS 研究所製の「Vital meter」を用いて測定した。被験者に対象のコースを実走行し、運転中の脈波データを得る。その脈波データのカオス解析から得られ、従来から運転時の負担の評価がされているリアプノフ指数と医療分野で実績のある軌道平行測度を比較して検討する。また、走行時の構造特性別による負担の度合いや発生要因を分析し、運転者の生理状態へどのような影響を与えるか検討することを目的とする。

2. 生体脈波とその測定原理

(1) 生体脈波について

生体脈波とは、身体組織のある部分への血液の流入によって生じる容積変化を体表面から波形としてとらえたものを示し、血管運動反応をとらえる。生体脈波は中枢から末梢にいたる血行動態に関して多くの情報を含んでいる。末梢血管の運動を測定することによって、間接的に心電図 R-R 間隔と同様の意味を持つ情報が得られるとされている。容積脈波は、末梢血液循環状態を反映する検査の一つとしてばかりでなく、自律神経機能検査の一つとしても用いられてきた。しかし、容積脈波は、基線の不安定や波形の変曲点の起伏が乏しく、波高も低く、解析が問題視される。そこで、近年佐野ら¹⁰⁾は、従来の容積脈波を時定数 0.01 秒で二回微分した加速度脈波に変換し、容積脈波で問題視されてきた基線の安定と同時に波形の変曲点を強調し、血液循環動態の良否を判断することができることを明らかにした。

(2) 生体脈波の測定原理

生体脈波の測定は、図-3のように指先や耳朶に近赤外光を皮膚表面から照射し、受光素子で透過光または反射光を検出する。透過光または反射光が測定部位に流れている血流量によって変化することを利用し、血流量の変化を電気信号に変換する。つまり、血流量の変化を電圧値として捉え、A/D変換回路によって電圧値を数値化してExcelに表示する。脈波のサンプリング周期は0.01秒で横軸が時間、縦軸に血流量の変化を電圧として捉えた値で表現されている。

3. カオス解析による本研究の評価方法

(1) 生体脈波のカオス性について

生体脈波の波形はカオス性を有することから一般的にカオス解析が用いられる。カオスとは非常に複雑な不規則かつ不安定な振る舞いをしているにもかかわらず、決定論的な法則から成り立っているものである。カオス解析では、Takensの埋め込み定理より時系列信号を時間遅れ座標系に生成し、アトラクタを構成する。カオス解析とは複雑な時系列を決定論的カオスの立場から解析することである。従来の線形理論に基づいた周波数解析では見ることが困難であった生体の全体論的特徴を時系列信号の不規則さを生み出す原因を排除することなく評価することができる。カオス時系列解析の目的は、対象となる時系列データからカオス的特徴の解析を行い、システムに内在する決定論的な特徴を解明することにある。そのため、周波数解析では生体信号の瞬間的特徴、静的情報を評価するに過ぎなかったが、カオス時系列解析を解析に取り入れることによって、生体が持つ動的情報を定量的に評価することができる。カオス解析の代表的な解析手法として、フラクタル次元解析、リアプノフスペク

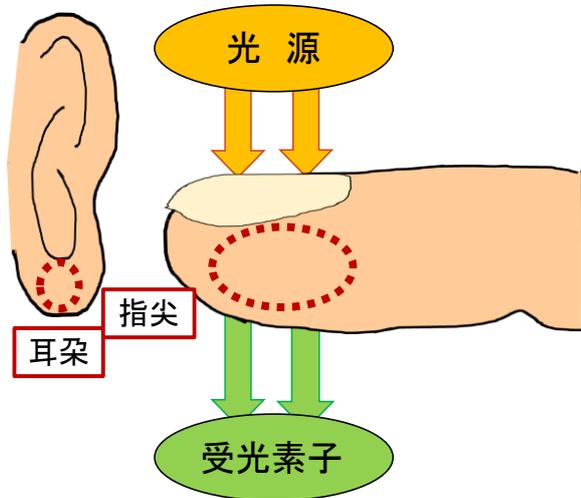


図-3 生体脈波の測定原理

トル解析などがあり、対象の力学的特徴を評価するのに用いられる。本研究では、リアプノフ指数および軌道平行測度を用いる。以下に具体的な手法を示す。

(2) Takensの埋め込み定理⁸⁾

生体脈波の場合、記録したデータは1変数の時系列である。1次元の時系列変化を遅れ値を用いて、一定の時間遅れ毎の差分による時間の遅れ値(以下を遅れ値とする)による座標変換をして、ある次元の状態空間に埋め込む方法をTakens埋め込み法という。遅れ値とはアトラクタの軌道を描ために多次元状態空間に埋め込むときのパラメータである。この方法によってシステムのアトラクタが1つのデータから再現でき、図-4のように視覚的に表示されることになる。

ある時系列データを $x(t)$ とする。この時系列データを用いてベクトルをつくる。ベクトルを作る式は、以下に示す。

$$(x(t), x(t-\tau), \dots, x(t-(n-1)\tau))$$

τ : 遅れ値

n : 次元数

t : 時間

このベクトルを n 次元状態空間に順次プロットしていくと軌道が描かれる。図-4は3次元状態空間にアトラクタを再構成する場合に対する埋め込みの例である。このアトラクタからリアプノフ指数および軌道平行測度を算出することが可能である。

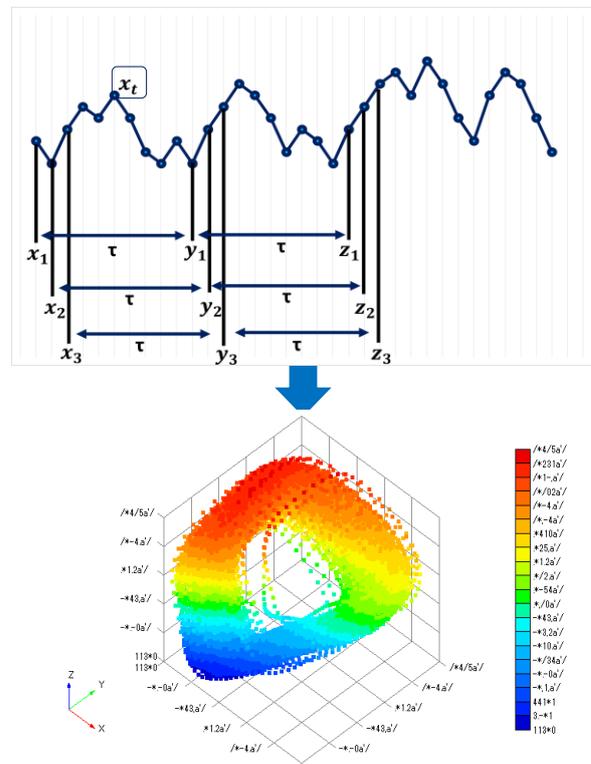


図-4 Takensの埋め込み定理概念図

(3) リアプノフ指数⁸⁾

以上の手順を経ても、アトラクタの構造はまだ不足しており、分析の際、さらに重要な情報を得るため、リアプノフ指数(LE:Lyapunov Exponent)の計算が必要になる。リアプノフ指数とは、近接した2点から出発した二つの軌道がどのくらい離れていくかを測る尺度である。式(1)で $\lambda > 0$ の場合は軌道は離れていき、 $\lambda < 0$ の場合は軌道は近づいていく。よって、軌道が離れていく割合は λ の値により決定される。この λ がリアプノフ指数である。軌道がカオス的であるとき、軌道は指数関数的に離れていく。すなわち、リアプノフ指数が正であることが軌道がカオス的であることの1つの定義とされる。

より詳細には、系の状態変数が k 個($k > 1$)の場合、すなわち相空間が k 次元である場合は各次元ごとに固有のリアプノフ指数を持つ。これらのリアプノフ指数の組をリアプノフスペクトラムと呼び、そのうちの最大のリアプノフ指数を最大リアプノフ指数と呼ぶ。各々のリアプノフ指数を見れば正であったり負であったりするが、最大リアプノフ指数が正であれば、その系はカオスの特徴の1つである初期値鋭敏性を持つといえる。

リアプノフ指数は、Takensの埋め込み定理によって構成されたアトラクタ軌道上のある点に着目し、そこから微小距離の近傍点を探す。図-5において、ある点での距離 d_1 と近傍点での距離 d_2 を式(1)に代入することでリアプノフ指数を算出できる。 λ はリアプノフ指数、 n は時間を示す。

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log \frac{d_2}{d_1} \dots (1)$$

- λ : リアプノフ指数
- n : 時間
- d_1 : ある点での距離
- d_2 : 近傍点での距離

リアプノフ指数では、心理的負担が少ない場合には、脈波が安定しているため、リアプノフ指数は低い値を示し、心理的負担が大きい場合は大きな値を示す。

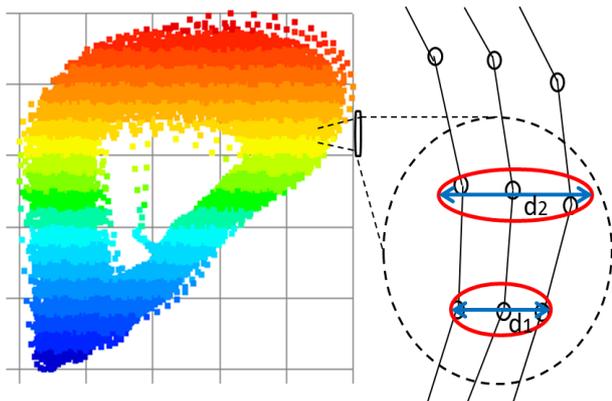


図-5 リアプノフ指数概念図

(4) 軌道平行測度¹¹⁾

多次元状態空間に埋め込まれた時系列の任意のデータベクトルと、その近傍空間内でのデータベクトルの軌道に対する正接単位ベクトルの方向は、理想的な決定論に基づく時系列であればほぼ同一方向であるが、確率過程系の場合ではランダムとなる。この性質を利用して決定論に基づく時系列と、確率過程に基づく時系列の分離・識別を把握するための測度が軌道平行測度法(TPM: Trajectory Parallel Measure)である。

図-6のようにTakensの埋め込み定理によって構成されたアトラクタから埋め込みベクトル X_i を選択する。そしてユークリッド距離において埋め込みベクトルに近い m 個の近傍ベクトル X_j を選択する。次に埋め込みベクトル X_i と近傍ベクトル X_j の軌道に対するそれぞれの単位接ベクトル T_i と T_j を導出する。単位接ベクトル T_i の導出は選択した点 X_i とその前後の点の3点を通る超円を想定し近似的に導出する。同様に、 T_j を求める。

こうして求められた単位接ベクトル T_i を基準としたときに、近傍ベクトルの単位接ベクトル等の方向のばらつきを式(2)により求める。さらにこの処理をアトラクタ全体からランダムに K 個サンプリングした局所空間について行うため、そのアトラクタ全体の軌道の平行測度の平均を式(3)により求める。

$$\gamma_i = \frac{1}{4m} \sum_j^m \|T_i - T_j\|^2 \dots (2)$$

$$\Gamma = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |\gamma_i| \dots (3)$$

- γ_i : 局所空間における平行測度
- m : 近傍ベクトル数
- T_i : 抽出したデータベクトル X_i の単位接ベクトル
- T_j : 近傍ベクトル X_j の単位接ベクトル
- Γ : 軌道平行測度
- K : サンプル数

軌道平行測度では、心理的負担が少ない場合には、脈波が安定しているため、軌道平行測度は低い値を示し、心理的負担が大きい場合は大きな値を示す。

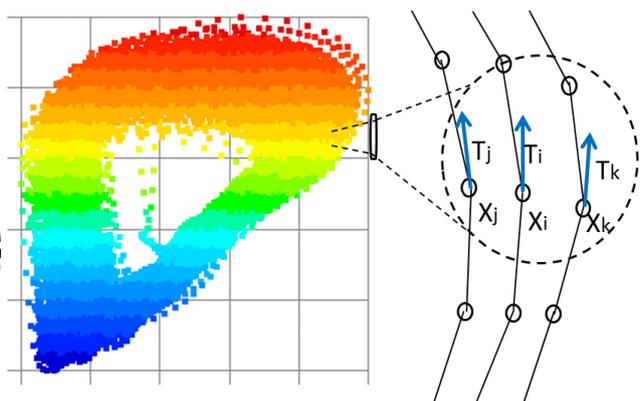


図-6 軌道平行測度概念図

4. 実験の概要

(1) 調査地点

本研究では、道路線形等の交通環境とドライバーの行動の関係を明確にするために、道路間環境が比較的単純化されている高速道路を対象とする。中でも平成27年度において事故が多発している用賀本線料金所、三軒茶屋入口～池尻出口、大橋JCTを含む、首都高速道路渋谷3号線上路(用賀～渋谷)(図-7)(図-8)の約7.8kmを調査対象地点とした。



図-7 平成27年度の首都高速道路危険箇所



図-8 実験コース



写真-2 脈波測定器装着時

(2) 実験条件

本研究では、大学生21歳～22歳の10名を対象とした。同世代を対象とすることで、年齢によって生じる脈波のばらつきを小さくするためである。リアプノフ指数および軌道平行測度を近傍ベクトル数は3、埋込み次元を3、遅れ時間を10、アンプリング数を3とし、同様の条件とした。以下に実験における条件を示す。

- 車線変更を行わない
- 前日の睡眠時間は6時間以上
- 前日飲酒をしていない
- ピアスやネックレスとの貴金属は外す
- 車内温度の調整
- 晴天時に行う
- 平日の12時から15時の間に行う

これらの理由として、車線変更を行うにあたってドライバーはより多くの道路環境情報を得る必要があるため、必要以上の負担がかかると考えられる。また、睡眠不足による運転は、睡魔によって安全走行の妨げになると同時に、脈波に影響が出てしまうため前日6時間以上の睡眠をとる。人によってはお酒の大量摂取により翌日までアルコールが残る人がいるため前日飲酒をしていない。さらに、写真-2に示すように脈波測定器は耳に装着するため測定時にセンサー部分が直接皮膚に接するようにピアスやその他貴金属を外し、髪を挟まないようにする。車内温度の調整の選定理由として、過度な寒さや暑さはストレスを受ける外的要因の一つであると考えられるため一般的に不快に感じないと言われている、温度25～27℃に設定した。晴天時に測定を行う理由としては、天候による路面状況の変化が測定結果に大きく影響すると考えられるためである。実験の時間を設定した理由は、日によって違いはあるものの、平日では7時から11時、17時から18時、休日では一日中交通量が多いためである。

(3) 実験コースにおける評価イベント

本研究では、リアプノフ指数および軌道平行測度より評価を行う。評価においては、イベント(合流地点、ジョイント走行時、車間距離が短くなる場合、並走時、JCT走行時、カーブ走行時)ごとに評価を行う。また、カーブ走行時においては、さらに短いカーブと長いカーブに分類し、評価を行った。以下に各イベントごとの特徴および評価方法を示す。



写真-3 合流地点の映像



写真-5 車間距離が短くなる時の映像



写真-4 ジョイント走行時の映像



写真-6 並走時の映像

- 合流地点

合流地点(写真-3)は用賀本線料金所、大橋JCT、渋谷入口、渋谷出口の4か所である。大橋JCTおよび渋谷入口での合流は他車による合流であり、用賀本線料金所および渋谷出口での合流は自車による合流である。合流地点では、車の流れに乗らないといけないため、焦りなどのストレスが生じやすいと考えられる。評価においては合流地点直前から合流地点通過後を対象とした。

- ジョイント走行時

首都高速道路は高架橋であり、分割施工を行ったため、ジョイント(写真-4)が多く存在する。老朽化している影響もあり、振動や騒音が発生するため、これらが被験者に与えるストレスと考えられる。また、雨天時ではスリップの危険性がある。評価においては、用賀から三軒茶屋ではノージョイント化工事により振動や騒音が少ないため、三軒茶屋から渋谷の区間を対象とした。

- 車間距離が短くなる時

車間距離が短くなる場合(写真-5)は、首都高速道路を走行しているため、一般道走行時と比べ速度が速く、急なブレーキなどは後車にとってヒヤリハットなどのストレスが生じやすいと考えられる。評価においては、前車がブレーキを踏み車間距離が縮まるときや他車が車線変更を行い、自車の前に入った場合を対象とした。

- 並走時

今回の実験では車線変更を行わないため、常時左車線を走行している。そのため、右車線から追い越してくる車も多く存在する。その時に、並走になる場合(写真-6)があり、特にトラックなどの大型車との並走は被験者への圧迫感や不安感などのストレスが生じやすいと考えられる。評価においては、被験者の真横の位置に他車の先端が並んだところから、車載映像で他車が全て映るまでの間を対象とした。



写真-7 JCT 走行時の映像



写真-9 短いカーブ走行時の映像



写真-8 カーブ走行時の映像



写真-10 長いカーブ走行時の映像

- JCT走行時

今回の実験コース内のJCT(写真-7)は大橋JCTのみである。大橋JCTは首都高速道路渋谷3号線上りにおいて、渋谷・都心環状線方面と湾岸線方面・東北道方面への分岐となっている。そのため、利用者が多く、大橋JCTにおいては他の箇所と比較して、やや混雑する傾向が見られる。評価においては、大橋JCT分岐の案内板(約400m手前)から分岐が終わる地点までを対象とした。

- カーブ走行時

今回の実験コース内のカーブ(写真-8)は右カーブ、左カーブ、S字カーブを含む9か所である。カーブ走行時は直線走行時と比べ、ドライバーへの負担がかかりやすい道路環境である。評価においては、短いカーブと長いカーブでは、走行時間や道路環境も異なるため、それぞれ分類し、評価する。

- 短いカーブ走行時

短いカーブ(写真-9)は全部で5か所である。長いカーブと比べ、カーブ走行時間は短いものの、急なカーブが比較的多いため、被験者への負担は大きいと考えられる。また、見通しは比較的良好のため、前方の状況は把握しやすい道路環境である。評価方法においては、カーブ走行時の時間が10秒未満の場合を対象とした。

- 長いカーブ走行時

長いカーブ(写真-10)はS字カーブを含む4か所である。カーブ走行時間が長い場合、被験者への負担も長くかかる。また、首都高速道路渋谷3号線には遮音壁があり、長いカーブ走行時においては、カーブ先の見通しが悪く、前方の状況を把握できないなどの不安感が生じると考えられる。評価方法においては、カーブ走行時の時間が10秒以上の場合を対象とした。

5. 実験結果

本研究の走行試験によって得られた10名のコース全体のリアプノフ指数および軌道平行測度の各イベントごとの平均の結果を表-1, 表-2に示す。また、実験コース全

体の平均を1とした場合のリアプノフ指数および軌道平行測度の各イベントの比較を表-3, 表-4に示す。これは、各イベントの値を被験者の平均で割ることにより算出した。本研究では、値が1より大きい場合(赤文字)は被験者がストレスを感じていると仮定する。

表-1 各イベントごとのリアプノフ指数

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
合流	4.42	4.24	3.76	5.35	3.41	4.87	4.90	5.01	4.89	4.90
ジョイント	4.94	4.45	4.24	5.53	3.47	5.41	5.20	4.92	3.80	4.88
車間距離	6.21	5.66	4.13	5.86	3.88	5.26	5.29	4.70	5.29	5.78
並走	2.89	2.79	3.55	4.41	2.06	4.78	4.82	3.28	3.05	4.53
JCT	4.20	4.97	4.74	3.89	3.00	3.04	4.86	3.31	3.26	4.89
カーブ	5.03	3.84	3.58	4.45	3.13	5.36	5.29	4.76	3.61	5.31

表-2 各イベントごとの軌道平行測度

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
合流	0.06	0.04	0.07	0.11	0.10	0.09	0.06	0.12	0.12	0.08
ジョイント	0.06	0.04	0.08	0.12	0.11	0.09	0.07	0.08	0.09	0.09
車間距離	0.08	0.04	0.07	0.10	0.10	0.10	0.05	0.06	0.05	0.07
並走	0.10	0.12	0.08	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.12	0.10
JCT	0.08	0.05	0.18	0.11	0.07	0.09	0.07	0.11	0.15	0.06
カーブ	0.09	0.06	0.08	0.11	0.10	0.09	0.07	0.09	0.10	0.08

表-3 平均を1とした場合の各イベントごとのリアプノフ指数

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
合流	1.01	1.05	1.04	1.14	1.09	1.01	1.02	1.24	1.38	1.02
ジョイント	1.13	1.10	1.17	1.18	1.11	1.12	1.08	1.22	1.07	1.01
車間距離	1.42	1.40	1.14	1.25	1.24	1.09	1.10	1.17	1.50	1.20
並走	0.66	0.69	0.98	0.94	0.66	0.99	1.00	0.81	0.86	0.94
JCT	0.96	1.23	1.31	0.83	0.96	0.63	1.01	0.82	0.92	1.01
カーブ	1.15	0.95	0.99	0.95	1.00	1.11	1.13	1.18	1.02	1.10

表-4 平均を1とした場合の各イベントごとの軌道平行測度

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
合流	0.63	0.57	0.96	1.10	0.99	1.03	0.85	1.30	1.22	0.96
ジョイント	0.73	0.60	1.09	1.21	1.06	1.07	0.94	0.90	0.90	1.06
車間距離	0.95	0.66	0.89	1.05	0.93	1.08	0.70	0.62	0.53	0.86
並走	1.15	1.93	1.02	1.12	1.04	1.27	1.32	1.13	1.27	1.12
JCT	0.95	0.84	2.48	1.14	0.68	1.01	0.95	1.21	1.54	0.70
カーブ	1.01	0.97	1.07	1.17	1.01	1.00	0.86	1.01	1.05	0.89

6. 考察

今回の実験から得られた、被験者10人のリアプノフ指数および軌道平行測度の値を各イベントごとに棒グラフにまとめた。以下に各イベントごとの考察とリアプノフ指数と軌道平行測度の差異を示す。

● 合流地点

合流地点では図-9からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数10人、軌道平行測度4人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中8人を占めた。合流地点では、短い区間の間に他車が合流してくることや自転車が合流することなどの急な反応が起こると考えられる。このような急な反応が起こる合流地点においては、軌道平行測度よりもリアプノフ指数による評価が適していると考えられる。

● ジョイント走行時

ジョイント走行時では図-10からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数10人、軌道平行測度5人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中8人を占めた。ジョイント走行時では、被験者は段差があることを認知していなく、一瞬ではあるがジョイント走行時に振動や騒音が発生するため、それにより急な反応が起こると考えられる。このような急な反応が起こるジョイント走行時においては、軌道平行測度よりもリアプノフ指数による評価が適していると考えられる。

● 車間距離が短くなる時

車間距離が短くなる場合では図-11からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数10人、軌道平行測度2人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中10人を占めた。車間距離が短くなる場合では、被験者は前車がブレーキをかけるタイミングは予測できないため、特に近接時においてはヒヤリハットのような急な反応が起こると考えられる。このような急な反応が起こる車間距離が短くなる場合においては、軌道平行測度よりもリアプノフ指数による評価が適していると考えられる。

● 並走時

並走時では図-12からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数0人、軌道平行測度10人という結果となった。また、リアプノフ指数よりも軌道平行測度の値が大きい人は、10人中10人を占めた。並走時では、他車と継続的に並走し、特にトラックなどの大型車との並走時では、圧迫感や不安感などのストレスが継続的にかかることが考えられる。このような継続的な反応が起こる並走時においては、リアプノフ指数よりも軌道平行測度による評価が適していると考えられる。

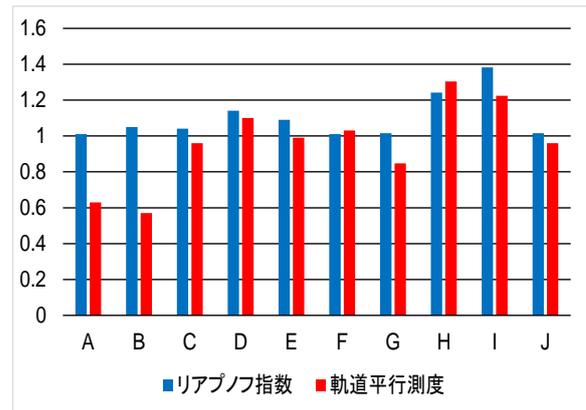


図-9 合流地点における比較

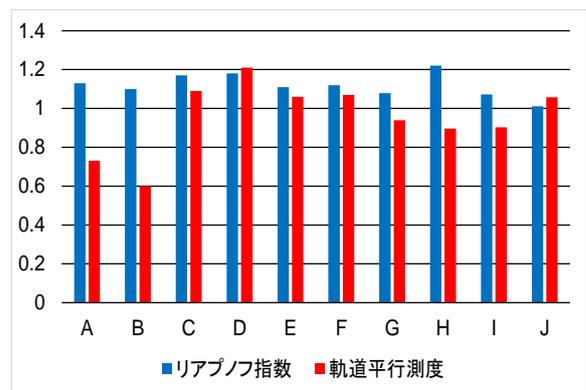


図-10 ジョイント走行時における比較

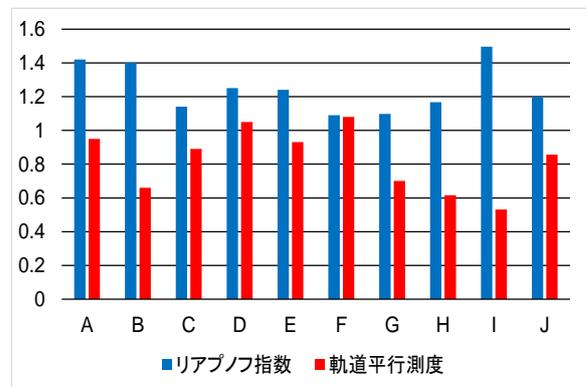


図-11 車間距離が短くなる時の比較

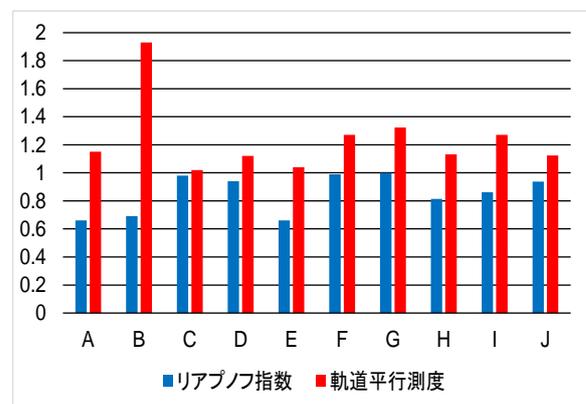


図-12 並走時の比較

● JCT走行時

JCT走行時では図-13からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数4人、軌道平行測度5人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中5人を占めた。大橋JCTは首都高速道路渋谷3号線上下において、渋谷・都心環状線方面と湾岸線方面・東北道方面への分岐となっている。そのため、他のイベントと比べて、やや混雑する箇所である。被験者A,B,E,G,Jはブレーキにより前車と接近したため急な反応が起こり、被験者C,D,F,H,Iは渋滞が発生していたため、継続的な反応が起こることが考えられる。このように接近などの急な反応が起こる場合はリアプノフ指数による評価が適しており、渋滞などの継続的な反応では軌道平行測度による評価が適していると考えられる。

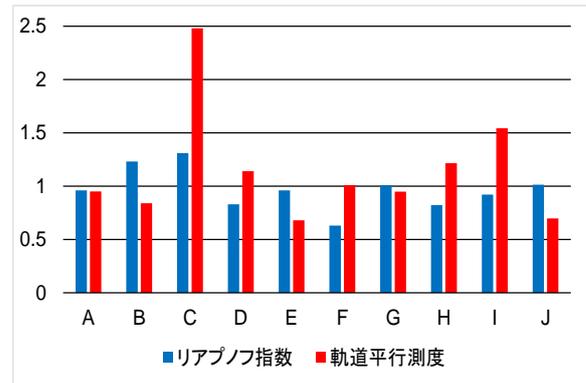


図-13 JCT走行時の比較

● カーブ走行時

カーブ走行時では図-14からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数6人、軌道平行測度6人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中5人を占めた。今回の実験コース内には様々なカーブが存在し、全てのカーブをまとめて評価を行うことは困難である。そのため、比較的走行時間や道路環境の似ている短いカーブ(走行時間10秒未満)と長いカーブ(走行時間10秒以上)に分けて評価を行う。

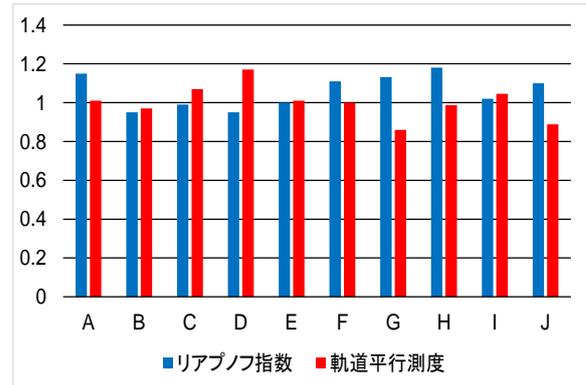


図-14 カーブ走行時の比較

● 短いカーブ走行時

短いカーブ走行時では図-15からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数8人、軌道平行測度2人という結果となった。また、軌道平行測度よりもリアプノフ指数の値が大きい人は、10人中9人を占めた。短いカーブ走行時では、走行時間が短く、見通しが良好のため前方の状況を把握できるものの、やや急なカーブにより、ハンドル操作の対応などの急な反応が起こると考えられる。このような急な反応が起こる短いカーブ走行時においては、軌道平行測度よりもリアプノフ指数による評価が適していると考えられる。

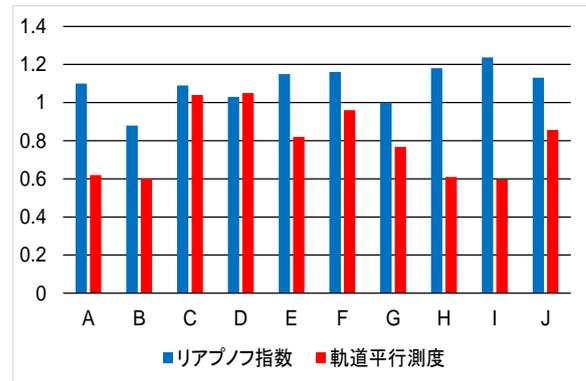


図-15 短いカーブ走行時の比較

● 長いカーブ走行時

長いカーブ走行時では図-16からわかるように、ストレスを感じているのは、リアプノフ指数5人、軌道平行測度10人という結果となった。また、リアプノフ指数よりも軌道平行測度の値が大きい人は、10人中8人を占めた。長いカーブ走行時では、比較的緩やかなカーブであるが、走行時間が長いことや遮音壁の影響で見通しが悪く、前方の状況を把握できないことにより、継続的な反応が起こると考えられる。このような継続的な反応が起こる長いカーブ走行時においては、リアプノフ指数よりも軌道平行測度による評価が適していると考えられる。

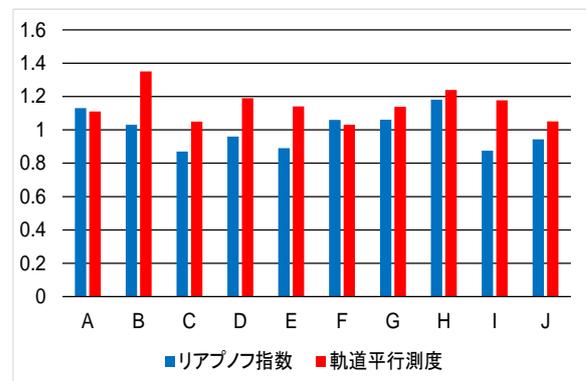


図-16 長いカーブ走行時の比較

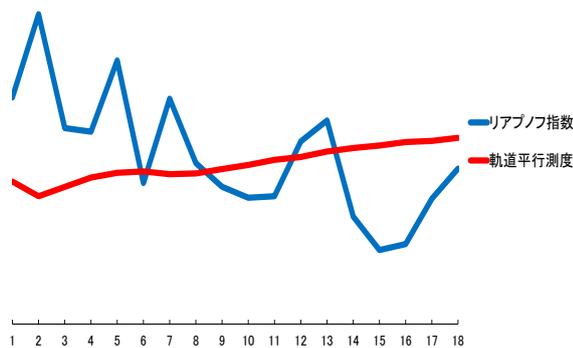


図-17 被験者Bのある時間における比較

図-17は被験者Bのある時間におけるリアプノフ指数と軌道平行測度の値の変化である。このグラフからリアプノフ指数の1秒ごとの変化と比較して、軌道平行測度の1秒ごとの変化が小さいことがわかる。この点から、リアプノフ指数は値の変化が激しく、ドライバーの瞬間的な反応を捉えている。また、軌道平行測度は値の変化が穏やかであり、ドライバーが徐々に感じる反応を捉えている。

7. 結論

上記の考察を踏まえて、合流地点、ジョイント走行時、車間距離が短くなる場合、JCT接近時、短いカーブ走行時ではリアプノフ指数による評価が適している。これら5つのイベントにおいては、急な反応が起こる。合流地点では一瞬の焦りや判断、ジョイント走行時では振動や騒音、車間距離が短くなる場合やJCT接近時ではヒヤリハット、短いカーブ走行時では急カーブへの対応である。このような急な反応や短時間の反応においては、リアプノフ指数による評価が適している。

また、並走時、JCT渋滞時、長いカーブ走行時では軌道平行測度による評価が適している。これら3つのイベントにおいては継続的な反応が起こる。並走時では圧迫感や不安感、JCT渋滞時では渋滞によるストレス、長いカーブ走行時では前方の状況を把握できないことである。このような継続的な反応や長時間の反応においては軌道平行測度による評価が適している。

8. 参考文献

- 1) 平成27年中の交通事故の発生状況：警察庁
- 2) 屋井鉄雄, 内田智也, 大橋正樹：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, 平成12年度都市計画論文集, pp.541-546
- 3) 平田輝満, 飯島雄一, 屋井鉄雄：都市内地下道路における運転者の意識水準低下に関する分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.4, 2004.9.
- 4) 川村光生：運転中の血圧モニタリング, 医学と工学からみた交通安全対策, pp.53-58, 1995, 日本交通医学工学研究会
- 5) 西脇正倫, 岩倉成志, 安藤章：長距離トリップに伴う運転ストレスの測定, 土木計画学研究・論文集, No.18, No.3, pp.439-444, 2001.9.
- 6) 清水俊行, 苗鉄軍, 下山修：指先脈波のカオス分析を用いたドライバーの心身状態の定量化, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol.6, No.1, pp.97-99, 2004
- 7) 馬庭芳朗：複雑系科学のカオスと可視化のSOMを用いた新しい健康評価法に関する研究
- 8) 原田隆郎, 横山功一：生体脈波を用いた道路の乗り心地評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.68, No.1, pp.40-51, 2012.
- 9) 馬庭芳朗, 徳高平蔵, 藤村喜久郎, 大北正昭：加速度脈波のカオスとSOMから解明するメタボリックシンドローム, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.19, No.6, pp.642-648, 2007
- 10) 佐野裕司, 片岡幸雄, 小山内博ほか：加速度脈波による血液循環の評価とその応用, 労働科学61: 129-143, 1985
- 11) 藤本泰成, 五百旗頭正, 谷村隆義：観測された時系列データの決定論的性質を測る軌道平行測度法, 日本ファジィ学会誌9(4), 580-588, 1997. 8.15

Psychological load evaluation based on Lyapunov exponent and trajectory parallelism
using biological pulse wave during driving

Student name Makoto Fujiwara
Advising teacher Masaru Minagawa

In recent years, concern for countermeasures against traffic accidents has increased, and many countermeasures have been taken. However, there are few studies on countermeasures against traffic accidents using physiological indicators. In fiscal 2015, deaths from traffic accidents have increased for the first time in 15 years, fatal accidents on highways are still high. Most accidents are due to driver's human error, human error due to fatigue, stress load. In this study, the Lyapunov exponent obtained by chaos analysis of biological pulse wave is compared with orbital parallelism, and the psychological burden of the driver is evaluated by using biological pulse wave suitable for stress evaluation during driving.

In doing so, in order to examine the improvement of the road environment, we clarify the potentially dangerous place and the road structure and investigate the relationship between driver's driving burden and road environmental problems.