

自動車，自転車とのすれ違いにおける歩行者の ストレスに関する心拍変動による評価

斎藤健治*・清田 勝*

Stress of Pedestrian Estimated from Heart Rate Variability in Passing with Car and Bicycle

By

Kenji SAITOU and Masaru KIYOTA

Abstract: The purpose of this study was to estimate for stress of pedestrians, who were passed with cars and bicycles, through the analysis of heart rate variability (HRV). Three kinds of experiments for recording the heartbeat of pedestrians were executed. Two experiments of them used the situation of passing with a car and one of them used the situation of passing with a bicycle. The electrocardiograms (ECGs) of pedestrians were recorded before and after passing. The HRV was estimated by calculating the power spectrum density of R-R interval waveform extracted from ECG. The stresses of pedestrians were estimated from the ratio of high frequency component and low frequency component of the HRV. The effects of driving speed and passing width on the stresses before and after passing with a car or a bicycle were analyzed statistically by two-way ANOVA or one-way ANOVA. In the first experiment of passing with a car, the effects of the factors of driving speed and passing width were significant. In the experiment of passing with a bicycle, the effect of the factor of passing width was significant.

Key words: Pedestrian, Bicycle, Car, Passing, Heart Rate Variability (HRV), Stress

1. はじめに

歩行者の存在は，都市の賑わいを演出し，公共交通を成立させ，経済活動を活性化させることから，「歩行者は都市の資源である」といわれる⁽¹⁾。しかしながら，現在では多くの都市で歩行者数が激減し，2000年段階において，1970年の5分の1に減った都市もあるといわれる⁽¹⁾。これは，実感としては，歩行者が都市から消えてしまった状態であるともいわれる。

一方で，我が国の全交通事故死者のうち，歩行中および自転車利用中の者は4割以上であり，この比率は先進国中で最も高い数値であるといわれる⁽¹⁾。皮肉なことに，歩行者の数が激減した一方で，高齢者を中心とした歩行中の交通事故死亡者の数は倍増しているのである⁽²⁾。

これは，自家用車保有台数が8,000万台に及ぶ車飽和社会において，歩行者の安全を確保するという

意識が，少なくとも施策等の実現にまで及んでいないことの証明であるともいえる。つまり，現代社会は，自家用車による利便性のためには，住宅地の生活道路であれ，商業地近隣の道路であれ，通過交通（安全が確保できないとして）もやむなしとする風潮が潜在しているのである。しかも，その通過交通を優遇するかのようには，歩行者に対するハード，ソフト両面のサポートは副次的で，掛け声の割に後回しであるという感否めない^{(3),(4)}。

実際，通勤時間帯の幹線道路における渋滞を避けて，生活道路であり通学路でもある住区内街路に通過交通として進入してくる自動車は至る所で確認できる。そして，通勤時間帯は小中学生の通学時間帯とも重なるため，通過交通を制限しないということは，小中学生を主とした歩行者の安全を省みていない状態であるともいえる。この対策の一つとして，清田ら⁽⁵⁾は，通過交通による危険度を軽減するために，住区内街路に自動車の走行スピードを抑制するハンプを設置して，その有効性を検討している。

一方で，通過交通とのすれ違いを余儀なくされて

いる歩行者はどの程度、通過交通を危険と感じているのだろうか。歩行者の感性を測る生理学的手法として、心拍数や血圧、あるいは心拍変動等を計測分析する方法がある。清田ら⁽⁶⁾は、自転車利用者が自動車とすれ違うときの危険感を、心拍数の上昇から評価し、危険度予測モデルを構築している。その一方で、危険感としての上昇数の有意性について問題を残している。この危険感をストレスと捉え、自律神経系の交感神経と副交感神経の活動割合が示す精神的負荷(ストレス)を危険感とみなすことができる。このような自律神経系の活動を推定する手法をRR間隔変動(以下、心拍変動)解析と呼び、ストレス推定に利用されている⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。

そこで本研究では、心拍変動解析を用いて歩行者が自転車や自動車とすれ違い時にストレス(危険感や不快感)を感じているかどうかを検討するとともに、その適用可能性についても検討した。

2. 心拍変動の計測・分析方法

心電図の記録には実験1ではホルター心電計(フクダ電子, FM-100)を、実験2および3ではテレメータ(日本光電, WEB-5000)を用いた。アルコールによる脱脂後、記録電極は被験者の胸骨上縁と剣状突起部に、アース電極は右脇腹(第8肋骨近辺)に貼付した(図1)。ホルター心電計の場合は、記録器を腰に巻き付けて心電図を記録した。テレメータの場合は、送信機を腰に巻き付けて、受信機を通してAD変換後にコンピュータに取り込んだ。

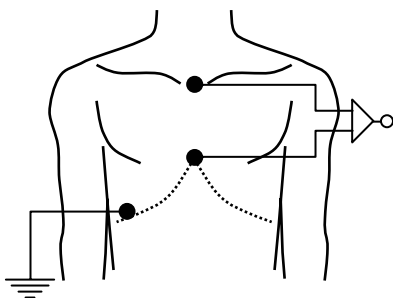


Fig. 1 Position on which electrodes for recording ECG were stuck.

心電図信号はサンプリング周波数 200 Hz, 精度 12 bit, 長さ 240 s(すれ違う前 120 s, すれ違い後 120 s)でAD変換した。記録した心電図の波形例を図2に示す。心電図波形は周期的であり、一周期中に見られる極値にP, Q, R, S, およびT波という名前がつけられている。このうち、最大値を示すスパイク部分をR波と呼び、R波間をRR間隔と呼ぶ(図3)。

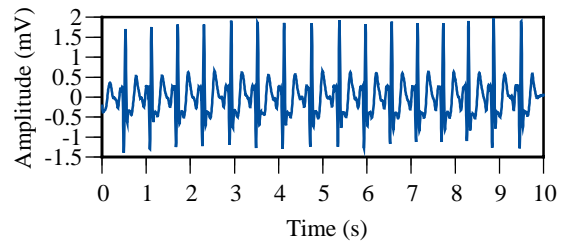


Fig. 2 An example of ECG. The spikes of this waveform are the R-wave described below

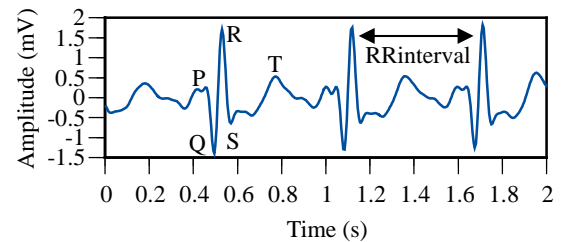


Fig. 3 An example of expanded waveform of ECG on time scale. Local maximum and local minimum of ECG waveform were called P, Q, R, S and T-wave in turns. The time between adjoined R-waves was defined as RR interval.

心拍変動とは、心臓の拍動周期の変動のうち、洞結節に対する自律神経入力ゆらぎに起因するものをいう⁽¹¹⁾。つまり、期外収縮や心ブロックなどによる心周期ゆらぎによる変動は除外しなければならないが、一般的に連続する洞調律QRS波(図3)よりなるスパイク間隔,すなわちRR間隔から求めることができる⁽¹¹⁾。

心拍変動を求めるためには、まず、RR間隔の時系列を求めなければならない。心電図波形から得られるRR間隔データは、RR間隔程度(約1s間隔程度)の精度しかないうえ、サンプル間隔が不均一である。そのため、ここではRR間隔データを補間することにより、0.05s等間隔の時系列データを作成した(図4)。

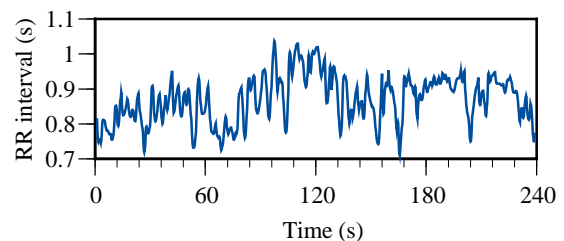


Fig. 4 An example of the time series of interpolated RR interval waveform. This waveform shows the HRV.

図4のように得られた，等間隔サンプリングのRR間隔の変動の周波数成分を分析するために，ARモデル法（Yule-Walker法）によりパワースペクトル分布（心拍変動スペクトル）を求めた．図5および6にその例を示す．図5は自動車とのすれ違い前，図6はすれ違い後の心拍変動スペクトルの一例である．

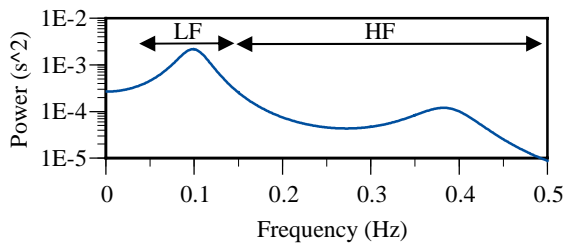


Fig. 5 An example of power spectrum density of the HRV, which was calculated from ECG recorded before passing with a car. The frequency component 0.04 to 0.15 Hz was defined as low frequency component LF. The frequency component 0.15 to 0.5 Hz was defined as high frequency component HF.

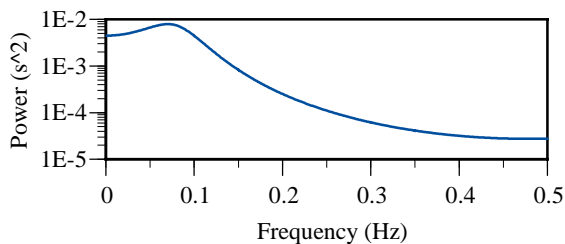


Fig. 6 An example of power spectrum density of the HRV, which was calculated from ECG recorded after passing with a car. The definition of frequency component was the same as figure five.

心拍変動スペクトルの 0.04 ~ 0.15 Hzを低周波成分LF，0.15 ~ 0.5 Hzを高周波成分HFとする⁽¹¹⁾．そして，HFは副交感神経，LF/HFが交感神経活動を反映するといわれる．そして，精神的負荷などにより心臓交感神経の賦活，あるいは心臓副交感神経の活動が低下すればHF成分が減少し，LF成分，すなわちLF/HFが増加する⁽¹¹⁾．

したがって，すれ違い前後のLF/HFの値を比較することで，すれ違いの影響による精神的負荷（ストレス感）を評価できる可能性がある．そこで，すれ違い時における歩行者のストレス感の評価のために，すれ違い前後のLF/HFについて，自動車あるいは自転車の走行スピードとすれ違い幅を要因とする二元配置の分散分析を行った．その結果，交互作用が認められなかった場合には，それぞれの要因について一元配置の分散分析および多重比較を行った．また，比較のために心拍数の解析も同様に行った．

3. 実験1 自動車とのすれ違い1

3.1 実験1 方法

被験者は成人男性10名であった．すれ違い局面は，一方通行道路（幅員4.3m）の路肩を歩く被験者のそばを，自動車が走り抜けることにより再現した（図7）．この際，被験者には自動車とのすれ違いについて示唆していなかった．すれ違いは，自動車と被験者の対面と自動車による追越であった．心電図はホルター心電計を用いて一旦レコーダに記録し，すれ違い時刻の前後5min間の心電図を分析した．実験条件は自動車の走行スピードが20, 30, および40 km/h，被験者とのすれ違い幅が0.5, 0.75, および1.0 mであった．したがって被験者一人について，追越と対面の18試技となった．

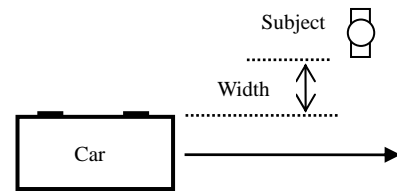


Fig. 7 Schematic diagram of the experiment for passing with a car.

3.2 実験1 結果

追越すれ違い，および対面すれ違いのそれぞれにおける心拍数とLF/HF前後比について，スピードとすれ違い幅を要因とした二元配置の分散分析を行った結果，いずれの場合にも交互作用が認められたため（ $p < 0.01$ ），スピードとすれ違い幅の組み合わせについて一元配置の分散分析および多重比較（Tukeyの方法）を行った．

図8に，追越すれ違い時の，各「スピード すれ違い幅」の条件下における心拍数について示す．一元配置の分散分析の結果，組み合わせ要因の影響は有意であった（ $p < 0.01$ ）．多重比較の結果，「40 km/h 0.5 m」と「20 km/h 1.0 m」の組み合わせの影響が，他の組み合わせに対して有意に差があることが認められた（ $p < 0.05$ ，図中 印）．

図9に，対面すれ違い時の，各「スピード すれ違い幅」の条件下における心拍数について示す．一元配置の分散分析の結果，組み合わせ要因の影響は有意であった（ $p < 0.01$ ）．多重比較の結果，「40 km/h 0.5 m」と「20 km/h 1.5 m」の組み合わせの影響が，他の組み合わせに対して有意に差があることが認められた（ $p < 0.05$ ，図中 印）．

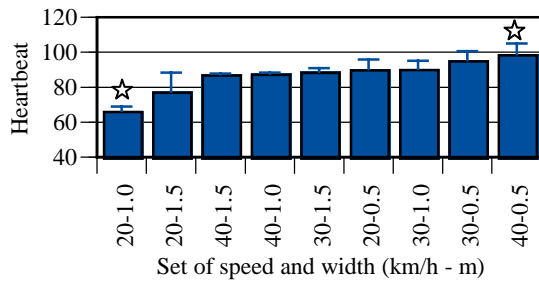


Fig. 8 Heartbeat of pedestrian about the effect of the set of driving speed and width before and after overtaking from behind. Star symbols show the significant differences from the other conditions.

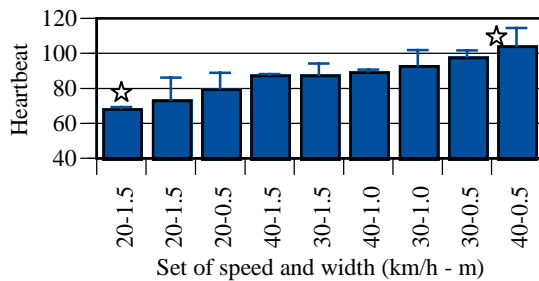


Fig. 9 Heartbeat of pedestrian about the effect of the set of driving speed and width before and after facing oncoming. Star symbols show the significant differences from the other conditions.

図 10 に、追越しすれ違い時の、各「スピード すれ違い幅」条件下における LF/HF について示す。一元配置の分散分析の結果、組み合わせ要因の影響は有意であった ($p < 0.01$)。多重比較の結果、「40 km/h 0.5 m」、「40 km/h 1.0 m」および「20 km/h 0.5 m」の組み合わせの影響が、他の組み合わせに対して有意に差があることが認められた ($p < 0.05$, 図中 印)。

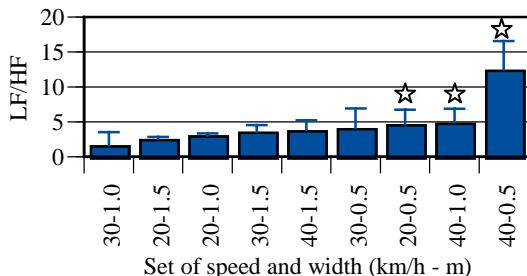


Fig. 10 Ratio of the high frequency component and the low frequency component of the power spectrum density, LF/HF, about the effect of the set of driving speed and width before and after overtaking from behind. Star symbols show the significant difference from the other conditions.

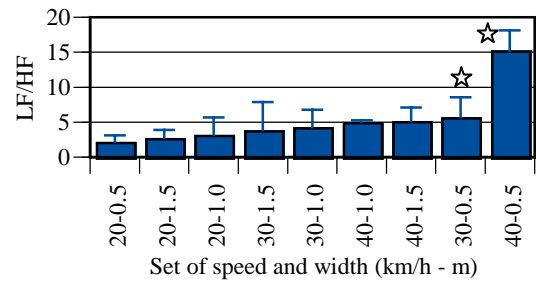


Fig. 11 Ratio of the high frequency component and the low frequency component of the power spectrum density, LF/HF, about the effect of the set of driving speed and width before and after facing oncoming. Star symbols show the significant difference from the other conditions.

図 11 に、対面すれ違い時の、各「スピード すれ違い幅」条件下における LF/HF について示す。一元配置の分散分析の結果、組み合わせ要因の影響は有意であった ($p < 0.01$)。多重比較の結果、「40 km/h 0.5 m」および「30 km/h 0.5 m」の組み合わせの影響が、他の組み合わせに対して有意に差があることが認められた ($p < 0.05$, 図中 印)。

4. 実験 2 自動車とのすれ違い 2

4.1 実験 2 方法

被験者は成人男性 10 名であった。すれ違い局面は、実験走行路上に静止した被験者のそばを、自動車が走り抜けることにより再現した。すれ違いは対面のみであった。心電図は、テレメータを用いて、自動車と被験者のすれ違い時刻の前後それぞれ 2 min 間記録した。実験条件はスピードが 20, 30, 40, および 50 km/h, すれ違い幅が 0.5, 0.75, および 1.0 m であった。したがって被験者一人に対して 12 試技となった。疲労の影響を除くために、試技間は十分時間を取り、被験者は椅子に座って休息した。

4.2 実験 2 結果

走行スピードとすれ違い幅が、心拍数に及ぼす影響は認められなかった。また、すれ違い前後の心拍数は、それぞれ 77.3 ± 11.8 拍および 77.5 ± 15.0 拍で、差はなかった。

対面すれ違いにおける LF/HF 前後比について、スピードとすれ違い幅を要因とした二元配置の分散分析を行った結果、交互作用は認められなかった。したがって、走行スピードとすれ違い幅のそれぞれについて一元配置の分散分析を行った。

図 12 に、対面すれ違い時の、各スピード条件下に

における LF/HF 前後比を示す．実験 1 で見られたような，走行スピードにともなう一定の傾向は見られず，したがって，一元配置の分散分析の結果，有意な影響は認められなかった．

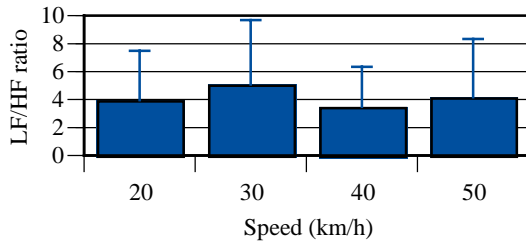


Fig. 12 Ratio of LF/HF of the power spectrum density before and after facing oncoming with a car about the effect of driving speed. No consistent tendency was found.

図 13 に，対面すれ違い時の，各すれ違い幅条件下における LF/HF 前後比を示す．すれ違い幅 0.5 および 0.75 m において 1.0 m より大きくなる傾向が見られたが，一元配置の分散分析の結果，有意な影響は認められなかった．

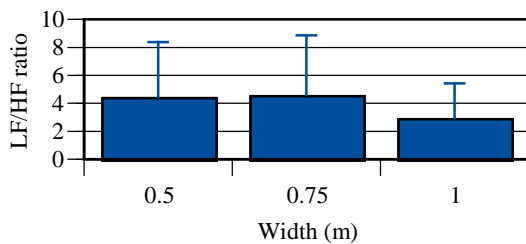


Fig. 13 Ratio of LF/HF of the power spectrum density before and after facing oncoming with a car about the effect of passing width. No significant effect of the factor of width was found.

5. 実験 3 自転車とのすれ違い

5.1 実験 3 方法

被験者は成人男性 9 名であった．実験走行路上において，静止した被験者のそばを自転車が走り抜けることによりすれ違いを再現した（図 14）．すれ違いは自転車と被験者の対面すれ違いと，自転車による追越しすれ違いであった．テレメータを用いて，すれ違い時刻の前後それぞれ 2 min 間の心電図を記録した．実験条件は，スピード 10, 15, および 20 km/h, すれ違い幅 0.5 および 0.75 m で，それぞれ追越しと対面の計 12 試技であった．疲労の影響を除くために，試技間は十分時間を取り，被験者は椅子に座って休息した．

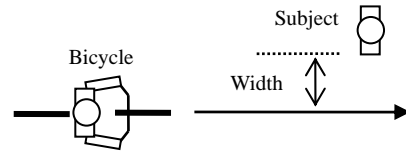


Fig. 14 Schematic diagram of the experiment for passing with a bicycle.

5.2 実験 3 結果

走行スピードとすれ違い幅が心拍数に及ぼす影響は認められなかった．すれ違い前後の心拍数は，それぞれ 81.4 ± 16.0 拍および 80.5 ± 16.1 拍で差はなかった．

対面すれ違い，および追越しすれ違いのそれぞれにおける LF/HF 前後比について，スピードとすれ違い幅を要因とした二元配置の分散分析を行った結果，交互作用は認められなかったため，スピードとすれ違い幅のそれぞれについて一元配置の分散分析を行った．

図 15 に，対面（F）および追越し（O）すれ違い時の，各スピード条件下における LF/HF 前後比について示す．一元配置の分散分析の結果，有意な影響は認められなかった．

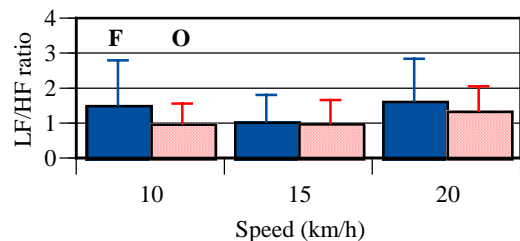


Fig. 15 Ratio of LF/HF of the power spectrum density before and after passing with a bicycle about the effect of cycling speed (F: facing oncoming, O: overtaking from behind).

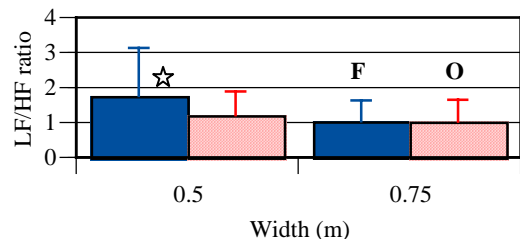


Fig. 16 Ratio of LF/HF of the power spectrum density before and after passing with a bicycle about the effect of passing width (F: facing oncoming, O: overtaking from behind). Star symbol shows the significant difference between the conditions of width.

図 16 に, 対面および追越すれ違い時の, 各すれ違い幅条件下における LF/HF 前後比について示す。一元配置の分散分析の結果, 対面すれ違いにおいてすれ違い幅の影響は有意で, すれ違い幅 0.5 m において有意に大きかった ($p < 0.05$, 図中 印)。

6. 考察

6.1 すれ違い時の心拍変動について

三つの実験の結果, 統計的有意性の有無はあるものの, 実験 2 におけるスピードの影響を除いて, 概略, スピードが大きいくほど, そしてすれ違い幅が小さいほど, LF/HF あるいは LF/HF 前後比, すなわち交感神経系への影響が大きくなる傾向が伺えた。また, 実験条件の違いはあるものの, 自転車より自動車の影響の方が強く出たのは自明といえる。

実験 1 では, スピードとすれ違い幅の複合的な影響が認められたため, 各条件の組み合わせの影響を調べた。追越, 対面すれ違い時の心拍数の上昇および心拍変動への影響の大小関係の詳細には, 若干差異が認められたものの, スピード 40 km/h, すれ違い幅 0.5 m の条件の影響が最も強い点では共通していた。また, スピードにかかわらず, すれ違い幅 0.5 m の影響が強い傾向も認められた。条件が異なる実験 2, 3 の結果についても, 自動車, 自転車にかかわらず, 同様にスピードよりすれ違い幅の影響が強い傾向が伺える。

一方, 追越と対面では, その影響の違いは明確ではなかった。一般的には, すれ違いに対して精神的準備ができない追越によるすれ違いの方が, 影響が大きいと考えられるが, そのような傾向が見られなかったのは, 実験条件設定も影響していると考えられる。つまり, 実験 2 では対面のみ, 実験 3 では追越の場合も, そのタイミングがある程度予測できる実験条件であった。このような実験条件が, 追越と対面の違いを曖昧にし, 一部に一貫性のない結果が出たことに関連すると考えられる。

6.2 ストレスから見た歩行者の道路環境

本研究の結果から, 自動車や自転車とのすれ違いが歩行者に強いストレスをもたらしているとの結論に, 必ずしも直結するものではない。しかしながら, 個体差も無視できない心拍変動という生理学的指標を用いた評価であることを鑑みると, 明確な結果が出なかった場合においても, すれ違い時に生じる歩行者のストレス感というものを軽視することはできない。

本研究における被験者は, 交通空間においては最も強い世代といえる成人男性であり, 自転車や自動車との接触等の事故経験者であれば, 本研究における被験者より遙かに大きなストレスを感じるであろうことは想像に難くない。逆に, 多くの高齢者は, 種々の身体機能低下の影響により, ストレスという感覚が低下している可能性もある。同様に, 子供においては, 概して近傍に関心が行きやすく視野が限定されやすい特徴がある⁽²⁾。つまり, そばを走り抜ける交通に対する無頓着, 無関心からくるストレス感の欠如も考えられ, その結果, 油断からくる事故の危険性が高まることも考えられる。

このようなことから, 少子高齢社会において, 特に交通弱者を意識した, 歩行空間の整備は今更ながら強調せざるを得ない⁽¹²⁾。スウェーデンにおいては, 30 年以上も前に, 「子供を交通事故から守るには, 子供を交通安全教育により交通状況に合わせるのではなく, 子供が交通事故に遭わずにすむ交通環境をつくるしか方法はない」という結論を導き出している⁽¹³⁾。本研究における統計的結果を参照するならば, 走行スピードが 40 km/h, すれ違い幅 0.5 m という条件において, 特に心拍変動に及ぼす影響が大きかったことから, 生活道路等における通過交通のスピードを制限し, かつ自動車との近接感のない歩行空間を確保することが望まれる。たとえば, 歩道を確保することのできない住区内街路等の規格の低い道路においては, ハンプのみならず, 自動車交通幅員の狭窄や進入禁止等の措置を講じる必要もあるだろう⁽⁴⁾。また, 自転車歩行者道というスタイルではなく, 自転車と歩行者の錯綜のない専用道の確保も, 改めて問われるべき課題である。そのためには, 自動車交通を制約せざるを得ないのはいうまでもない。

6.3 心拍変動解析の適用可能性

清田ら⁽⁶⁾が, 心拍数の上昇から危険度を予測しえたように, 本研究の実験 1 における心拍数の有意な上昇は, 心拍数を危険度予測に用いる妥当性を示しているといえる。一方, 本研究の実験 3 においては, 心拍数の上昇がないにもかかわらず, 心拍変動解析の結果, すれ違い幅が危険感に及ぼす有意な影響が検出された。自律神経系の影響が, 心拍数に現れるのと同様に心拍変動 (RR 間隔) にも現れるのは当然ともいえるが, 本研究の実験 3 における結果が示すように, 心拍変動解析を優先的に用いる意義もありそうである。

一方, 心拍変動スペクトルの LF/HF が, 必ずしも交感神経系の活動を反映し得ないという研究成果も

ある⁽¹¹⁾。また，本研究では，心電図計測時間が4, 5分間と短めであり，交感神経活動の時定数を考えると⁽¹¹⁾，本研究の実験2のように十分反映されなかった可能性もある。これらのことを含めて，今後，フィールドで必ずしも条件を制御できない交通工学問題への生理学的手法の適用可能性について，さらに検討していく必要がある。

7. おわりに

心電図計測により得られる心拍変動を解析することにより，歩行者が自動車，自転車とすれ違うときに感じるストレス感を調べた。すれ違い時の自動車や自転車の走行スピードとすれ違い幅を要因として分散分析を行うことにより，次のような結果が得られた。

- 1) 自動車とのすれ違いを示唆されていない場合は，スピード，すれ違い幅の両要因の影響を受けて心拍が変動した。特に，スピード40 km/h，すれ違い幅0.5 mにおいて，交感神経系の活動が有意に強まり，精神的負荷が大きかったと考えられた。
- 2) 自動車とのすれ違いをあらかじめ示唆された場合においては，一貫した影響が見られなかった。
- 3) 自転車とのすれ違いにおいては，走行スピードよりも，すれ違い幅において心拍変動への影響が強かった。
- 4) 全般的に，スピードよりすれ違い幅の方が心拍変動への影響が強い傾向が伺えた。

本研究で用いた生理学的手法は，その適用可能性や妥当性についてさらに検討を積み重ねる必要がある。しかしながら，上記の結果は，特に住区内街路等の生活道路の整備に真剣に取り組まなければならないことの一つの根拠を示しているといえる。

参 考 文 献

- (1) 谷口 守: 都市の資源としての「歩行者」を支える, 交通工学, 第35巻, 第4号, 3~6頁(2000)
- (2) 浜岡秀勝: 子供の視点に着目した道路空間整備, 道路, 第775号, 28~31頁(2005)
- (3) 岡本直久: 少子高齢化時代の交通課題, 交通工学, 第38巻, 第1号, 3~6頁, (2003)
- (4) 清田 勝: 人優先の道づくり 地区交通環境改善への取り組み, 道路, 第775号, 18~23頁(2005)
- (5) 清田 勝, 斎藤健治, 渡辺義則, 伊藤昌明: ハンプを主体にした交通安全対策の有効性, 土木計画学研究・論文集, 第22巻(2005)(印刷中)
- (6) 清田 勝, 角 知恵, 田上 博: 住区内細街路において自動車とすれ違う自転車利用者の危険感知予測モデル, 第17回交通工学研究発表会論文集, 97~100頁(1997)
- (7) 村田厚生: 心拍変動性指標によるメンタルワークロードの測定, 人間工学, 第28巻, 第2号, 91~98頁(1992)
- (8) 村田厚生: R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元解析 フラクタル次元に基づくMWL評価の試み, 人間工学, 第30巻, 第6号, 389~393頁(1994)
- (9) 大須賀美恵子, 寺下裕美, 下野太海: 心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈, BME, 第11巻, 第1号, 75~85頁(1997)
- (10) 下野太海, 大須賀美恵子, 寺下裕美: 心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討, 人間工学, 第34巻, 第3号, 107~115頁(1998)
- (11) 日本自律神経学会編: 自律神経機能検査 第3版, 文光堂, 140~147頁(2001)
- (12) 鈴木昭利: 高齢者の視点から見た快適な歩行空間づくり, 都市計画, 第45巻, 第5号 No.204, 19~22頁(1996)
- (13) 反町吉秀, 白川太郎: 交通弱者の死亡事故をいかにして減らすか? ~医学的・疫学的根拠に基づくスウェーデンの交通外傷予防政策に学ぶ~, 道路, 第775号, 48~53頁(2005)