

心拍変動を用いた自転車利用者の 幹線街路評価に関する分析

今井 克寿¹・鈴木 弘司²・藤田 素弘³

¹学生会員 名古屋工業大学大学院 博士前期課程学生 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: cjk13508@stn.nitech.ac.jp

²正会員 名古屋工業大学大学院准教授 工学研究科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: suzuki.koji@nitech.ac.jp

³正会員 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: fujita.motohiro@nitech.ac.jp

本研究では、自転車利用者視点による幹線街路評価の検討を行うため、幹線街路の自転車歩行者道において走行調査を行い、心拍変動から求められるLP面積を用いて自転車利用者のストレスを計量した。また、自転車利用者が受けるストレスの要因とストレスの増加要因を明らかにするため、ロジスティック回帰分析を行った。その結果、歩道交通量や通過交差点数、放置自転車数などがそれらに影響を与えていることがわかった。一方、アンケート調査より自転車利用者の主観的な評価データを取得し、各評価項目に関する影響要因を重回帰分析により明らかにした。さらに、客観評価と主観評価の影響要因を比較することで、共通要因や各評価に関する特徴を明らかとし、両者の関係性を示した。

Key Words : bicycle user's evaluation, arterial streets, stress, heart rate variability, Lorentz Plot

1. はじめに

都市の交通を支える幹線街路では、歩行者・自転車・自動車の各利用主体に安全かつ快適な走行空間を提供するため、現在のサービスレベルを適切に把握し、計画・設計・運用に反映することが重要である。そのため、近年、具体的な交通状況（サービスの質：Quality of Service, 以下QOS）を表す評価指標の構築が求められている。しかし、現在のQOS評価指標はマクロな交通特性から計算され、その多くは利用者の視点が考慮されておらず、自動車を主体とした評価指標が構築されている状況にある。そのため、自転車利用者や歩行者など、他の主体も考慮に入れたうえでの評価を、利用者視点から検討する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、自転車利用者視点から客観的な評価を得るため、幹線街路走行時に自転車利用者が受けるストレスに着目し、道路状況や交通状況などの外部要因がストレスに及ぼす影響を分析する。さらに、アンケート調査を実施することで自転車利用者の主観評価を取得し、客観評価との関係性を分析する。

2. 心拍データを用いた自転車利用者のストレス 評価手法

ストレスの評価に関する研究は、医学・心理学・人間工学など様々な分野において行われており、心拍や唾液¹⁾、血圧²⁾などの生体データが解析に用いられている。中でも、心拍データを用いてストレスを評価する手法は、計測機器が小型であり、比較的データの取得が容易なことから、交通工学の分野でも歩行時³⁾や自転車⁴⁾・自動車運転時⁵⁾の心理的負担の評価を得るために用いられている。本研究では、時々刻々の自転車利用者のストレスを定量的に評価するため、心拍変動を表すRRI (R-R Interval, 図-1) から算出されるLorentz Plot (以下, LP)

[心電図]

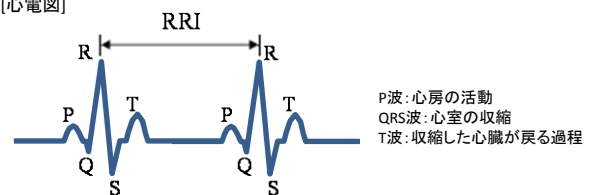


図-1 RRI概要

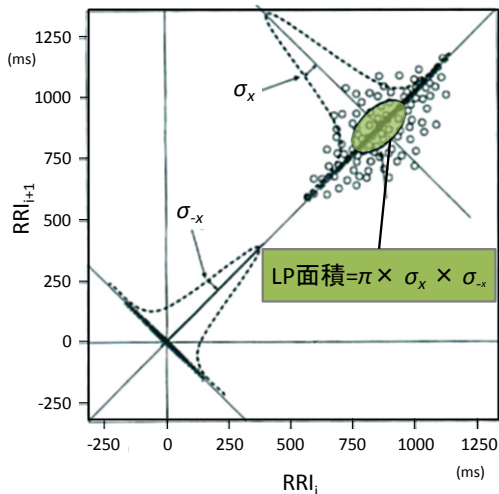


図-2 LP面積概要⁶⁾

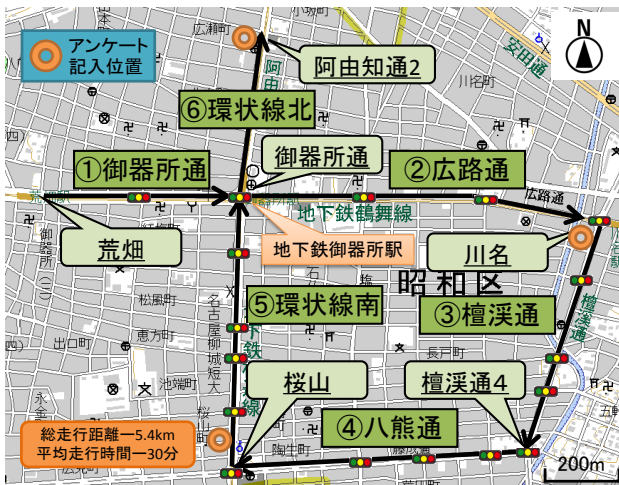


図-3 走行調査コース

を用いる。LPとは、図-2に示すように、横軸にn番目のRRI、縦軸にn+1番目のRRIをプロットしたものであり、楕円の面積（以下、LP面積）が小さいほど、ストレスを感じていると評価することができる⁶⁾。なお、LPはその構造上、不整脈の影響を受けやすいため、LP面積の算出前に、発生した不整脈データを、Polar社製のソフトウェア「Polar Precision Performance SW」を用いて修正する。

3. 走行調査概要

(1) 心拍データ取得のための走行調査概要と対象幹線街路の構造特性

心拍変動データを取得するため、2011年7月と9月に、名古屋市昭和区内の幹線街路において走行調査を、朝1回、夕1回の計2回、6人の被験者で実施した。走行調査は両日天候が良好な日中の時間帯（朝：8時～11時、夕：16時～19時）に実施した。走行調査のコースは、図-3に示す6つのリンクを設定する。また、各リンクの構造特性を表-1に示す。なお、すべてのリンクの歩道部は

表-1 リンク別構造特性

路線名	歩道幅員 [m]	交差点数 (うち信号交差点*)	リンク長 [m]	歩行者・自転車走行位置分離
①御器所通	1.6-3.5	5(1)	630	構造分離
②広路通	2.3-3.0	15(3)	1280	なし
③檀溪通	2.5-3.6	11(3)	860	なし
④八熊通	2.6-3.0	8(4)	1050	なし
⑤環状線南	4.0-4.5	15(5)	980	視覚分離
⑥環状線北	4.2-4.8	9(0)	580	視覚分離

*: 歩行者・自転車専用信号機のみ対象

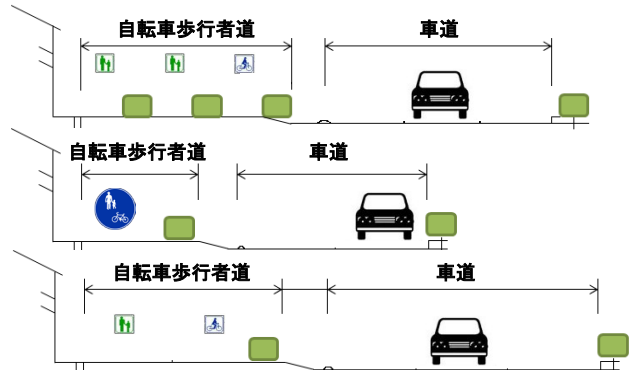


図-4 対象幹線街路横断面（上から御器所通、広路通・檀溪通・八熊通、環状線）



図-5 心拍計

自転車歩行者道であり、本調査では被験者に歩道部を走行させている。また、図-4に示すように御器所通は植栽等による歩行者と自転車の分離が、環状線は啓発サインと視覚による分離が施されている。

自転車走行中のRRIを取得するため、被験者の胸部に走行性に支障のないよう図-5に示す小型のスポーツ用心拍計を取り付け、また、走行中の周辺環境を取得するため、図-6に示すGPS機能付きカメラを車両ハンドル部に取り付ける。本調査で使用する自転車は、一般的な自転車利用者の評価を得るため、図-6に示す市販のシティサイクルを用いる。さらに、自転車利用者の主観評価を得るために表-2に示す内容のアンケート調査を行っている。なお、アンケート記入は2リンクごとに、図-3に示す地点にて被験者自身で行う。



図-6 使用した自転車と GPS カメラ

表-2 アンケート内容

項目	質問内容	回答欄の形式
無信号交差点	沿道施設・無信号交差点を出入りする自動車に対する危険度	1(安全)→7(危険)
信号交差点	信号交差点で交錯する自動車に対する危険度	1(安全)→7(危険)
構造・障害物	歩道上の構造物・障害物による走りにくさ	1(走りやすい)→7(走りにくい)
歩行者・自転車	通行する歩行者・対向する自転車に対する走りにくさ	1(走りやすい)→7(走りにくい)
段差・舗装	路面舗装・段差から生ずる振動による走りにくさ	1(走りやすい)→7(走りにくい)
総合評価	区間の総合評価	1(良い)→7(悪い)

(2) 走行時周辺交通環境特性

次に、走行調査によって得られた周辺環境のデータから各リンクの歩道交通量と放置自転車数を計測した結果を、図-7、図-8に示す。図-7より、広路通と環状線南、環状線北の歩行者・自転車数が、8時台と17時台のラッシュ時に多くなっていることがわかる。これは、通勤・通学による 御器所駅利用者によるものと推測できる。また、図-8より、広路通と環状線南の放置自転車台数が多いことがわかる。これは、御器所駅利用者による違法駐輪によるものと推測できる。

4. ストレス状態の定義とストレス状態・増加要因推計モデルの構築

(1) 個人差を考慮したストレス状態の定義

LP 面積を用いてストレスを評価するため、走行調査から得られた心拍データを用い、1分ごとに LP 面積を算出する。しかし、生体データである RRI から算出される LP 面積は、被験者ごとの個人差が大きくなると考えられる。したがって、その個人差をなくすため、本研究では、個々の被験者の LP 面積のパーセンタイル値（以下、PT）を閾値として設定することにより、ストレス状態を表現することを試みる。被験者ごとの LP 面

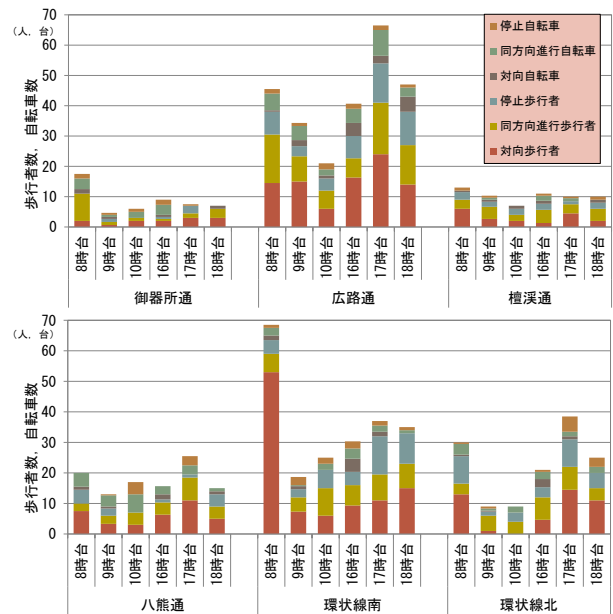
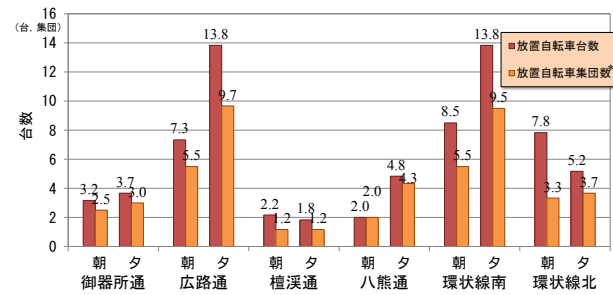


図-7 リンク別・時間帯別歩道交通量



*放置自転車集団数：同じ場所に固まって駐輪してある自転車を1とカウント

図-8 リンク別・時間帯別放置自転車数

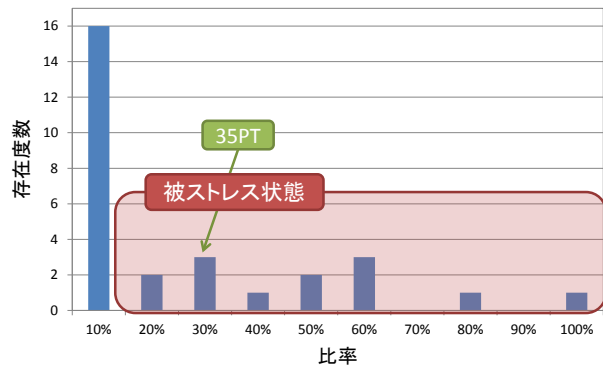


図-9 LP面積の存在割合例（被験者1，朝時間帯）

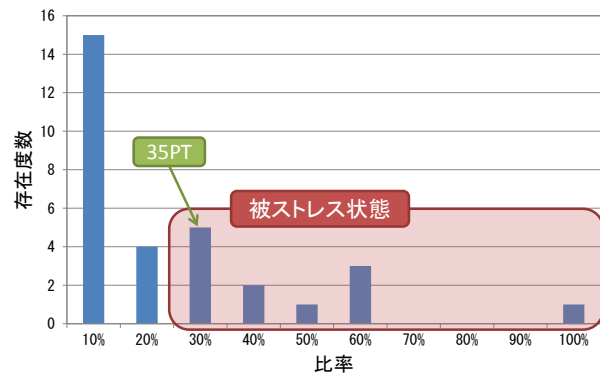


図-10 LP面積の存在割合例（被験者2，朝時間帯）

積の分布を詳細に観察するため、LP 面積の逆数について、最小値を 0、最大値を 1 とし、その間を 10 等分した比率を横軸に、度数を縦軸とするヒストグラムを描く。ここでは例として 2 名の被験者の LP 面積の存在割合について図-9、図-10 にそれぞれ示す。これらのグラフから、20-40%付近より大きい比率において存在度数が低くなり、散在していることがわかる。ここで、ストレス状態を通常でない特異な状態と捉えると、図-9、図-10 の網掛けの範囲をストレスを受けている状態（以後、被ストレス状態）と仮定できる。他被験者も含む全走行において、同様の LP 面積（逆数）のヒストグラムを作成し、PT の値を比較検討したところ、35PT を閾値とすることで被験者の被ストレス状態を概ね正確に把握できることが示された。そこで、本研究では 1 分ごとの LP 面積が走行調査全体の LP 面積の 35PT 以下の状態を被ストレス状態と定義する。走行調査全体の LP 面積の推移例と被ストレス状態の定義例を図-11 に示す。

(2) ストレス状態推計モデルの構築

被ストレス状態ダミー（LP 面積が 35PT 以下=1、超過=0）を目的変数とし、表-3 に示す説明変数を用いてストレス状態推計モデルを構築し、ストレスに影響を与える外部要因を明らかにする。なお、LP 面積の分布特性より、分析には線形回帰分析ではなくロジスティック回帰分析を用いる。

ストレス状態推計モデルを構築した結果を表-4 (A) に示す。これより、歩行者・自転車利用者の人数、駐車場数、交差点数が自転車利用者のストレスに影響していることがわかる。

ここで、モデルの再現性について検証する。走行を 1 分ごとに区切り、走行中にストレスを感じている時間の割合について、被ストレス状態ダミー=1 のサンプル数を調査全体のサンプル数で除した値としてストレス率を定義する。まず、走行調査におけるストレス率を算出すると 41.6%であった。次に、走行調査で取得した現況の各説明変数をモデルに代入し、現況再現を行ったところ、ストレス率は 36.2%となった。以上より、実際値と現況再現値の差が 5%であり、このモデルは、ストレス率を概ね良い精度で再現できていることがわかる。

次に、構築したストレス状態推計モデルを用いて、交通環境を変更した場合のストレス率の変化について感度分析を行った結果を図-12 に示す。なお、シナリオ 1~4 はそれぞれ自転車利用者の進路上からの歩行者数の 25%、50%、75%、100%減少、シナリオ 5、6 はそれぞれ駐車場数の 5%、10%削減、シナリオ 7、8 はそれぞれ 1 リンクあたりの交差点 1 箇所、2 箇所の封鎖を設定した。

これより、自転車専用レーンの設置に代表される歩行者数の 100%削減や駐車場の 10%減少などの対策を施すこ

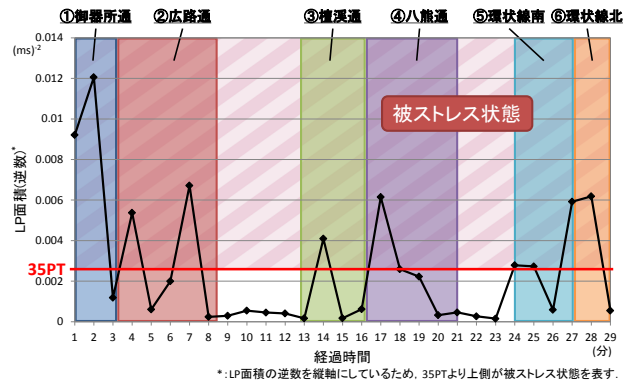


図-11 LP 面積の推移例と被ストレス状態の定義例

表-3 説明変数の定義（第 4 章の全モデルに共通）

変数名	定義・説明
85PT	1秒ごとの速度の85PT。被験者の理想走行速度と仮定。
駐車場数	通過した沿道の駐車場の出入口の数
駐車場増加数	通過した沿道の駐車場の出入口の数の前サンプルからの増加数
有効幅員 [m]	走行可能な自転車歩行者道の幅員(リンクの最小値)
交差点数 [箇所]	通過した接続する道路の本数
同方向進行歩行者数	走行中に追い越した歩行者数
歩行者・自転車数	歩行者数と自転車台数の和
歩行者・自転車増加数	歩行者数と自転車台数の和の前サンプルからの増加数
幅員占有率 [人/m]	歩行者、自転車による幅員の占有率(歩行者・自転車数/有効幅員)
放置自転車台数 [台]	走行動線上に存在する放置自転車台数 [台] (駐輪場・歩道橋の下など、走行に支障をきたさないものは除く)
放置自転車集団数 [集団]	上記の放置自転車台数において、同じ場所に固まって駐輪してあるものをまとめて1とカウントする
歩歩分離ダミー	歩行者と自転車の通行の分離あり=1, なし=0
路面舗装ダミー	路面舗装の形式 (悪路, アスファルト) 該当あり=1, なし=0

表-4 ストレス状態・増加要因推計モデル

説明変数	モデル	A. ストレス状態推計モデル		B. ストレス増加要因推計モデル	
		モデル1	モデル2	モデル1	モデル2
歩行者・自転車数 [人]		0.046**	-	-	-
歩行者・自転車増加数 [人]		-	-	-	0.042***
駐車場数 [箇所]		0.206*	-	-	-
駐車場増加数 [箇所]		-	0.121*	0.121*	-
交差点数 [箇所]		0.179***	0.186***	0.200***	-
放置自転車集団数 [集団]		-	0.192**	-	-
(定数)		-2.523*	-0.497***	-0.327	-
的中率 [%]		67.4	70.4	71.2	-
Nagelkerke R ²		.214	.213	.211	-
サンプル数		279	267		-

*: 1%有意 **: 5%有意 ***: 10%有意

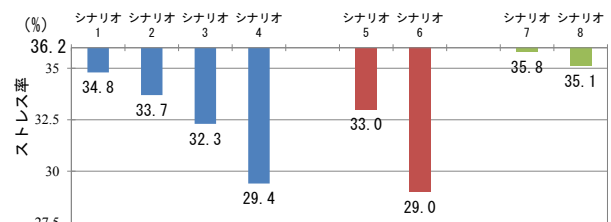


図-12 ストレス状態推計モデルを用いた感度分析

とで、自転車利用者のストレスを大幅に削減でき、シナリオ 1~3 のような歩行者と自転車の分離は、駐車場の 5%削減や 1 リンクにつき 2 箇所の交差点封鎖と同程度のストレス減少効果が見込めることがわかる。よって、歩行者や自動車との交錯危険性を低減させ、自転車利用者が他の利用主体からある程度独立して走行できる環境を作ることが、ストレス抑制の効果的な対策であると考えられる。

(3) ストレス増加要因推計モデルの構築

前節にて、ストレス状態推計モデルについて述べたが、このモデルは走行調査全体に対して、ストレス量の大きい場を説明するモデルである。しかし、自転車利用者の幹線街路に対する心理的な評価は、時間経過を加味して相対的に行われると考えられる。そこで、本節では、LP面積が前時間帯と比べて減少したサンプル、すなわちストレスが増大したサンプルについて、その増大要因を分析する。ストレス増加ダミー（前時間帯よりLP面積減少=1, 増加=0）を目的変数とし、表-3に示す説明変数を用いてロジスティック回帰分析を行い、ストレス増加要因推計モデルを構築した結果を表-4 (B) に示す。

これより、放置自転車集団数、駐車場数の増加、交差点数、歩行者・自転車数の増加が自転車利用者のストレス増加の要因になることがわかる。

ここで、前節同様モデルの再現性について検証する。走行を1分ごとに区切り、前時間帯よりストレスが増加した時間の割合について、ストレス増加ダミー=1のサンプル数を調査全体のサンプル数で除した値として、ストレス増加ダミー率を定義する。これより、実際の走行調査におけるストレス増加ダミー率は52.8%であり、現況再現値はモデル1で55.4%、モデル2で57.7%となった。以上より、実際値と現況再現値の差が3~5%であり、このモデルは、ストレス増加ダミー率を概ね良い精度で再現できていることがわかる。

次に、構築したストレス増加要因推計モデルを用いて感度分析を行った結果を図-13に示す。なお、シナリオ1~4はそれぞれ放置自転車集団数の28%減少、100%減少、50%増加、100%増加、シナリオ5は、地下鉄駅周辺の放置自転車の撤去、シナリオ6, 7は各モデルについてそれぞれ1リンクあたりの交差点1, 3箇所の封鎖を設定した。

これより、放置自転車対策を強化することで、自転車利用者のストレス増加を大幅に抑制でき、地下鉄駅周辺の放置自転車の撤去は、交差点の1リンクにつき1, 3箇所の封鎖と同程度のストレス増加抑制効果を見込めることがわかる。よって、歩道上の放置自転車に対する施策を行い、自転車が走行できる領域を広げることが、自転車利用者のストレス増加を抑制する上で効果的であると考えられる。

5. 自転車利用者の主観評価分析

アンケート結果から、自転車利用者の主観的な評価と外部要因の関係性を明らかにするため、重回帰分析を行う。しかしながら、アンケートの評点は、順序尺度であり、重回帰分析に直接用いることは適切でない。そこで、系列間隔法を用いてアンケートの評点を定量化し、100

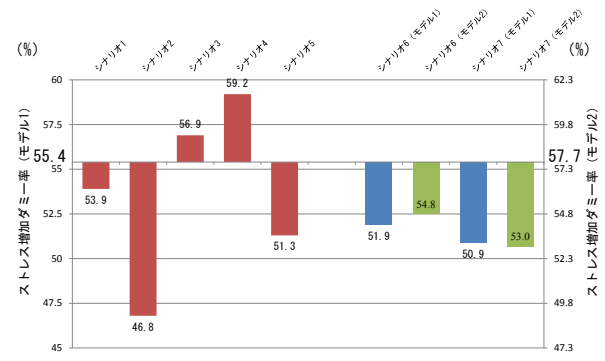


図-13 ストレス増加要因モデルを用いた感度分析

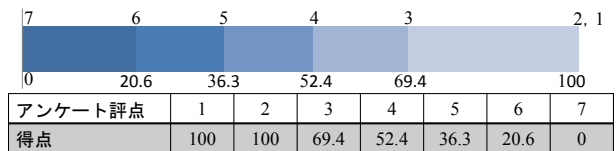


図-14 系列間隔法によるアンケート評点の定量化

表-5 アンケート総合評価回帰モデル (N=72)

説明変数	パラメータ	標準化係数
構造・障害物	0.424*	0.432
歩行者・自転車	0.231*	0.259
段差・舗装	0.363*	0.314
(定数)	1.235	
調整済みR ²	.596	

*:1%有意

表-6 アンケート評価項目回帰モデル (N=72)

説明変数	「構造・障害物」		「歩行者・自転車」	「段差・舗装」
	モデル1	モデル2		
放置自転車台数[台]	-1.146**	-	-	-
放置自転車集団数[台]	-	-1.428**	-	-
狭小箇所数	-13.897*	-14.453*	-	-
有効幅員[m]	10.760*	10.433*	-	-
歩車分離ダミー	-31.322*	-32.816*	-	-
同方向進行歩行者数[人]	-	-	-2.384*	-
幅員占有率	-	-	-0.985***	-
85PT[m/s]	-	-	10.985**	12.508*
路面舗装ダミー:悪路	-	-	-	-11.763***
路面舗装ダミー:アスファルト	-	-	-	10.071**
(定数)	61.931*	63.185*	16.807	-20.172
調整済みR ²	.218	.204	.270	.174

*:1%有意 **:.5%有意 ***:10%有意

点満点の間隔尺度に変換する。系列間隔法による定量化の結果を図-14に示す。これより、両端の評価幅が広がっていることがわかる。

次に、アンケートの各評価項目から総合評価を説明する重回帰分析を行い、構築したモデルの結果を表-5に示す。これより、「構造・障害物」、「歩行者・自転車」、「段差・舗装」の各評価項目が総合評価と関係が強いことがわかる。さらに、この3評価項目を目的変数とし、表-3に示す説明変数を用いて重回帰分析を行い、構築したモデルの結果を表-6に示す。

これより、「構造・障害物」の評価項目は、放置自転

車台数・集団数が多いこと、狭小箇所数が多いこと、有効幅員が狭いこと、歩車分離であることが、「歩行者・自転車」の評価項目は、同方向進行歩行者数が多いこと、幅員占有率が大きいこと、走行速度の85PTが低いことが、「段差・舗装」の評価項目は、走行速度の85PTが低いこと、路面舗装の状態が悪いことやアスファルトの舗装であることが評価を下げる要因になっていると推測することができる。

6. 自転車利用者の客観評価と主観評価に関する比較分析

4章にて自転車利用者の客観的な評価を、5章にて自転車利用者の主観的な評価を取得した。本章では、その両者に関する比較・分析を行う。

まず、放置自転車に関する変数に着目する。ストレス状態推計モデルでは、放置自転車に関する変数が有意ではなかったが、ストレス増加要因推計モデルでは、放置自転車集団数の変数が有意となった。また、主観評価である「構造・障害物」に関するモデルでは、放置自転車に関する変数が有意な結果となった。これより、ストレス増加要因推計モデルと主観評価にて、共通する変数があることがわかり、ストレス増加要因推計モデルより示される客観評価と主観評価の間に関係性があることが示された。

次に、歩道部の狭小箇所数の変数は、客観評価では有意でないが、主観評価では有意な結果となった。これは、狭小箇所の通過時間は瞬間的であり、1分間の走行全体を評価する客観評価では、影響が少なかったためと考えられる。これより、客観評価はこのような瞬間的な外部要因に対する影響が反映されにくいことが推測できる。

また、歩行者数や自転車台数などの歩道の交通量に関する変数は、客観評価、主観評価ともに有意であったが、「歩行者・自転車」の評価構造に関するモデルでは、自転車利用者が視認されにくい方向に進む歩行者を表す同方向進行歩行者の変数のみが有意であった。これより、主観評価は、歩行者の進行方向の違いが与える印象が影響すると推測できる。

さらに、理想的な走行速度を示す変数である85PTについて、主観評価では「歩行者・自転車」と「段差・舗装」に関するモデルで有意であったが、客観評価では有意でなかった。これより、主観評価では、理想的な速度での走行が、評価に強く影響することが推測できる。また、上述のように客観評価では、歩道交通量に関する変数が有意となっていたため、85PTの影響が小さくなったことも考えられる。

7. まとめ

本研究では、自転車利用者の客観評価を得るため、心拍データから得られるLP面積を用いて、幹線街路における自転車利用者のストレスを調査分析し、自転車利用者が受けるストレスの要因とストレスが増加する際に影響する要因を明らかにした。また、アンケート調査から、幹線街路に対する主観評価について、総合的な評価に結びつく評価項目と各評価項目の評点に影響を与える外部要因を明らかにした。さらに、これらのモデルを用いて、自転車利用者の客観評価と主観評価に関する比較分析を行い、客観評価と主観評価では、自転車利用者の外部要因から受ける影響の大きさや、印象の強さなどに差が見られることを明らかとした。しかしながら、ストレス状態推計モデルとストレス増加要因推計モデルの的中率やNagelkerkeの R^2 値、アンケートの各評価項目に関する回帰モデルの R^2 値の低さに問題点が残った。今後は、更なる説明変数の追加や走行調査の実施によるサンプル数の増加などにより、モデルの精度向上に努めると共に、利用主体間の関係性や安全性を十分考慮し、他利用主体の評価構造をモデル化した上で、本研究で示したモデルと組み合わせ、主観評価と客観評価を同時に表現するモデルを構築する予定である。

謝辞：本研究は、科研費（若手研究（B）23760480）の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 井澤修平, 城月健太郎, 菅谷渚, 小川奈美子, 鈴木克彦, 野村忍: 唾液を用いたストレス評価, 日本補完代替医療学会誌Vol. 4, No. 3, pp91-101, 2007
- 2) 岩崎賢一: 変動解析(心拍, 血圧, 脳血流), 日臨麻会誌Vol.28, pp889-899, 2008
- 3) 斎藤健治, 清田勝: 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, 佐賀大学工学部集報34 (2), pp1-7, 2005.12
- 4) 鈴木清, 松田和香, 竹林弘晃, 砂川尊範, 新田保次: 自転車走行時の心理的負担に着目した自転車走行空間の比較評価, 土木計画学研究・講演集Vol.41, No.366, 2010
- 5) 今村友弥, 坂本将吾, 鹿島茂: 心拍変動による自動車運転時の心理的負担の定量的評価, 土木計画学研究・講演集Vol.44, No.169, 2011
- 6) 豊福史, 山口和彦, 萩原啓: 心電図RR間隔のローレンツプロットによる副交感神経活動の簡易推定法の開発, 人間工学Vol.43, No.4, pp185-192

(?)