

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 ～高松における「心電図トランスミッタ」を活用した調査を通して～

Evaluation for comparison of Bicycle Road Space that pays attention to psychological load
when bicycle running ～Through the investigation that uses " Heart rate Monitor " in Takamatsu～

鈴木清**・松田和香***・竹林弘晃****・砂川尊範****・新田保次*****
By Kiyoshi SUZUKI**・Waka MATSUDA***・Hiroaki TAKEBAYASHI****・
Takanori SUNAGAWA****・Yasutsugu NITTA*****

1. はじめに

近年、自転車は、環境負荷の低い交通手段として注目され、健康志向の高まりを背景にその利用ニーズが高まっている。一方で、都心部において不足する自転車走行空間の整備のためには、現状の道路空間の再配分が必要であり、自転車走行空間の安全性や快適性といったサービスレベルを客観的に表現できる評価指標や手法の構築が重要である。

特に、自転車交通は、人間が直接の原動力となるため、走行時に感じる心理的負担が、自転車走行空間の走行快適性に直接的に影響を及ぼす。そのため、自転車走行空間の評価には、安全・安心に加えて、走行快適性の評価も重要と考える。しかしながら、これらに関する既往研究は、アンケート等を中心とした主観的な評価が多い。

そこで、本研究では、今後ますます創出が必要となる中心市街地での自転車走行空間の走行快適性を評価するため、自転車走行中に感じる瞬時の心理的負担を把握する指標及びその指標を計測する調査機器、さらにその指標を用いた心理的負担の評価手法について、高松市内の道路において実測したデータをもとに分析・検討した。

2. 走行快適性を評価する空間構成要素の研究事例

自転車走行空間の走行快適性を評価する空間構成要素について研究・整理した事例を、表 1 に示す¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。金らは、自転車走行空間整備の妥当性を評価するために、欧米の評価手法等を参考にして、利用者の立場で評価でき

る定性的評価表「チェックリスト」を作成し、整備事例に適用して比較評価を行っている。その評価では、自転車や歩行者等の交通量や速度、路面、段差、勾配、幅員、道路占有物、交差点等、自転車走行空間の評価に影響すると考える多様な空間構成要素を体系的に抽出している。

本研究では、これらの空間構成要素が、自転車走行空間の快適性に影響を与えると考え、データ比較する路線を抽出する際の参考とした。また一方で、既往研究では、自転車の走行快適性に関する評価は、定性的評価が主体となっていることが多いことから、定量的な評価指標の抽出および調査手法の構築が課題と認識した。

表 1 自転車走行空間の走行快適性を評価する空間構成要素の研究・整理事例

タイトル	空間構成要素
○ Bicycle Compatibility Checklist の作成と自転車道先行事例の評価 ¹⁾ (金・五上)	交通量 (歩行者, 自転車, 自動車), 速度 (歩行者, 自転車, 自動車), 路面, 段差, 勾配 (縦断, 横断), 幅員, 道路占有物 (電柱, 植樹帯, 街灯・照明, 歩道橋, バス停, 駐輪自転車, 駐車自動車, 標識), 交差点, 走行快適性に関する満足度など
○ 自転車と歩行者の混在状態下における通行快適性に関する調査 ²⁾ (諸田・大脇ら)	交通量 (歩行者, 自転車, 自動車), 速度 (自転車, 自動車), 走行快適性に関する満足度 (アンケート調査に基づく)
○ 岡山市内国道 53 号線における自転車道整備効果の検証 ³⁾ (阿部・崎ら)	交通量 (歩行者, 自転車), 速度 (歩行者, 自転車), 走行快適性に関する満足度 (アンケート調査に基づく)
○ 既存道路空間を活かした自転車レーン設置による自転車・自動車の共存可能性 ⁴⁾ (吉村・亀野)	交通量 (歩行者, 自転車, 自動車), 走行快適性に関する満足度 (アンケート調査に基づく)

3. 心理的負担評価指標および計測方法の検討

(1) 自転車走行時の心理的負担評価指標の検討

ストレスなどによる心理的負担を把握するには、一般的に心拍変動を表す「RR間隔 (心電図の波形で、最も大きく出るR波と次のR波までの間隔)」 (図 1) を計測し、解析する手法が用いられる。

斎藤・清田⁵⁾は、ホルター心電図等を用いてRR間隔を計測し、RR間隔の変動の周波数成分を解析して求める「LF (0.04～0.15Hzの低周波成分)」、 「HF (0.15～0.4Hzの高周波成分)」を求め、副交感神経活動を反映するといわれる、その成分比「LF/HF」により、歩行者と

*キーワード: 自転車交通計画, 公共事業評価法

**正員, 国土交通省 四国地方整備局 香川河川国道事務所
(香川県高松市高松町2422-1, TEL087-844-4316,
E-mail: suzuki-k8814@skr.mlit.go.jp)

***正員, 博 (社会学), 国土交通省 四国地方整備局 道路部道路計画課 (香川県高松市サンポート3-33, TEL087-851-8061, E-mail: matsuda-w92gk@skr.mlit.go.jp)

****正員, 株式会社建設技術研究所 (大阪府中央区道修町1-6-7, TEL 06-6206-5689, E-mail: sunagawa@ctie.co.jp)

*****正員, 工博 (土木工学), 大阪大学工学研究科地球総合工学専攻 (大阪府吹田市山田丘2-1, TEL06-6879-7609, E-mail: nitta@civil.eng.osaka-u.ac.jp)

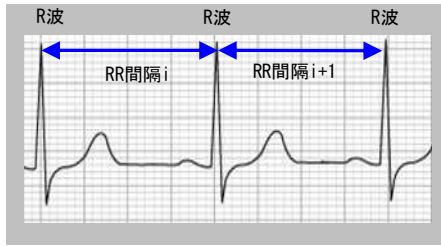


図 1 RR間隔

自動車や自転車のすれ違い評価を行っている。

また、本多・塚口⁶⁾らは、斉藤らと同様に、RR間隔変動の周波数成分の解析により求めた「LF/HF」により、心理的負担をとらえ、あわせて身体エネルギー消費量を測定し、歩行者の「あせり」や「緊張」といった意識を定量化している。

上記の研究事例は、歩行者の心理的負担を計測する手法として、有用な手法と考える。その一方で、本研究では、分単位で環境が変化する自転車走行時の心理的負担を把握する必要があるため、周波数解析によって5分間など一定時間帯データの解析で求められる「LF/HF」での評価は難しいと考える。そこで、一定の速度で走行する自転車の心理的負担評価は、可能な限り瞬時の心理的負担を計測できる必要があると考え、RR間隔のLP (Lorenz Plot) により解析する手法の適用を考えた。

RR間隔のLPによる評価とは、周波数解析を行わずに、時系列信号を評価する方法である。LPとは、横軸を n 番目のRR間隔、縦軸を $n+1$ 番目のRR間隔としてグラフ上にプロットしたもので、LF/HFから導き出される副交感神経活動評価よりも、簡易に瞬時に分析できる手法であるとされている⁷⁾。また、心電図を用いた自律神経機能検査の一つとして用いられてきており、RR間隔の変動を視覚的に捉える有用な方法と報告されており、LPの面積が大きい場合は、そのときの心理的負担が大きいと判定される(図2)。本研究では、このLP面積を用いて、自転車走行時の心理的負担の把握を行うものとした。なお、この心理的負担が、自転車での走行快適性を阻害していると表現していると考えた。ただし、この心理的負担は人間が知覚(認識)したストレスに反応するので、認識していない安全性には反応しないと想定している。

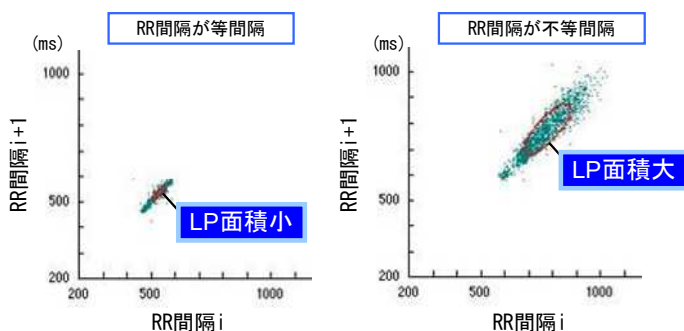


図 2 RR間隔によるLP面積の解析方法

(2) 自転車走行時の心理的負担計測手法の検討

装着者の心拍変動(RR間隔)を計測する機器としては、ホルター心電計を始め様々な機器があるが、持ち運びや取り付けが容易で、装着者が運動状態の計測にも適し、リアルタイムでの心拍変動の確認も可能な機器である「心電図トランスミッタ」を用いて、心理的負担状況を計測することとした(図3)。

自転車走行調査では、心電図トランスミッタを被験者に装着し、心理的負担状況を把握する他、心理的負担要因を特定するためにビデオカメラ、さらには走行位置情報を把握するためにGPSを、自転車に搭載して計測するものとした。

この計測手法の実施可能性を確認するため、実走による試験調査を行った。調査概要を表2に示す。

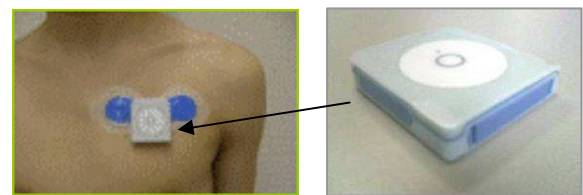


図 3 心電図トランスミッタ

表 2 試験調査の概要

項目	内容
被験者	6人(性別・年齢(3区分)別)に1名ずつ
調査方法	被験者は、心電図トランスミッタとGPSを、追走する記録要員の自転車には、ビデオカメラを装着。
対象路線	高松市内にあるメインストリートである中央通り(自転車走行空間は構造分離)、商店街、海岸沿いの道路

試験調査を実施した結果、自転車走行中における心電図トランスミッタによるRR間隔データは、属性、走行路線等に関係なく計測でき、LP面積を算出できた。

LP面積を1分帯ごとで算出した結果(23歳男性データ)を、図4に示す。図4に示すように、他の時分帯よりも突出してLP面積が高い時分帯が存在する。このうち、「14:58」は自動車の飛び出し、「15:03」は歩行者の飛び出しが発生していることが、ビデオカメラ画像により確認できた。したがって、この突発事象要因の影響を受け、心理的負担が大きくなったと考える。

一方で、「15:13」は、飛び出し等の突発事象が発生していない時分帯であった。この要因把握のため、時間帯1分間の心拍一拍一拍の傾向を確認した。その結果、RR間隔が突如著しく大きくなった波形があり、不整脈発生が確認された。なお、不整脈の判断には、一般的に、瞬時心拍数(RR間隔を毎分の心拍数に換算したもの)が

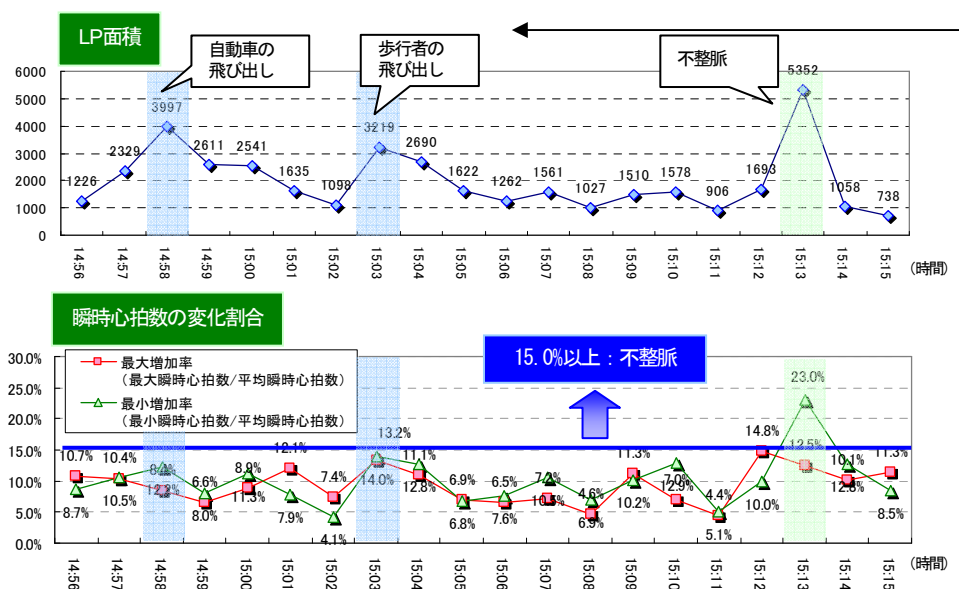


図 4 試験調査での心理的負担状況の計測結果 (23 歳男性, 中央通り)

用いられており、その基準は、瞬時心拍数の変化幅が1分間平均値の15%以上か否かに基づく。この考え方にしたと、「15:13」の時間帯は、瞬時心拍数1分間平均値110.2に対して最小瞬時心拍数が84.9で23.0%と、15%を上回っていることから、不整脈と判断した。

また、本試験調査では、若年層から高齢層での計測としたが、高齢層での不整脈の発生頻度は、若年層に比べて、多頻度であった。LP面積による解析は、LF/HFによる解析方法に比べて、直接的に不整脈の影響を受けやすいことから、不整脈発生頻度の低い若年層による計測が不可欠であり、また若年層においても発生する不整脈データの除去が、適切な評価を行うためには重要と考える。

4. 自転車走行空間構成要素の違いによる自転車走行時の心理的負担状況比較のための調査

道路を自転車で走行する上では、多様な走行空間が存在し、また、自転車走行空間を構成する多様な要素が重なり、自転車の走行快適性に影響を与えている。

そこで、どのような自転車走行空間構成要素が、自転車走行時の心理的負担により大きく影響を与えるかを明らかにするため、先に示した計測手法により、高松市内の路線で実走し、比較分析するものとした。

本調査の概要は、表 3に示す。対象路線は、自転車走行位置 (7路線)、駐輪・駐車状況 (3路線)、交差点横断方法 (5路線) 別に抽出し、それぞれ比較するものとした。それぞれ比較する対象路線は、比較する自転車走行空間構成要素以外の構成要素は、極力同様となる区間を抽出した。なお、自転車道は、最も自転車

表 3 本調査の概要

項目	内容
調査日	2009年11月24日 (火) ~27日 (金)
被験者	若年層延べ36人
調査項目	LP面積：心電図トランスミッタ 突発事象の発生状況：ビデオカメラ 自転車走行位置：GPS
調査方法	・各被験者に心電図トランスミッタを装着し、自転車にはビデオカメラ、GPSを取り付けて、対象路線を普通自転車で走行。
対象路線	・自転車走行位置 (7路線) - 路線 1 自転車道 - 路線 2 自転車歩行者道 (構造分離) - 路線 3 自転車歩行者道 (視覚分離：カラー) - 路線 4 自転車歩行者道 (視覚分離：ライン) - 路線 5 自転車歩行者道 (幅員広い、分離なし) - 路線 6 自転車歩行者道 (幅員狭い、分離なし) - 路線 7 路肩 ・駐輪・駐車状況 (3路線) - 路線 8 放置自転車・駐車自動車が多い - 路線 9 放置自転車・駐車自動車が少ない - 路線10 商店街 ・交差点横断方法 (5路線) - 路線11 信号交差点 - 路線12 地下道 (歩行) - 路線13 地下道 (エレベーター) - 路線14 歩道橋 (スロープを歩行) - 路線15 歩道橋 (エレベーター)

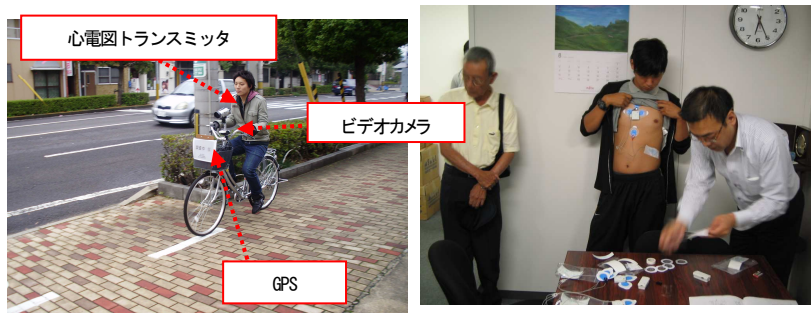


図 5 調査実施状況



図 6 調査対象路線

走行快適性が高い路線と仮定し、全被験者（延べ36人）が走行して基準値とした。なお、調査の実施状況は、図 5に、走行した対象路線の断面構成は、図 6に示す。

5. 計測データのクリーニング手法の検討

(1) データクリーニングの流れ

前述したように、自転車走行空間における心理的負担の評価をする際、不整脈による影響を除去したデータとすることが必要である。また、自転車の走行空間としての評価のため、走行毎に異なる自動車飛び出し等の突発事象による影響を除去したデータとすることが必要である。

そこで、本調査で計測したデータは、図 7に示す流れによりデータクリーニングを行い、空間要因が分析可能なデータとする。

データクリーニングは、まず「不整脈多発被験者の除去」を行い、「サンプルごとの瞬時心拍数による不整脈の除去」、「突発事象の除去」を段階的に行って、空間要因を比較できるデータとした。

以降では、段階別のデータクリーニングの方法と、本調査結果のデータクリーニング結果を示す。

(2) 不整脈多発被験者の除去

不整脈は誰もが起る心拍の動きであるが、発生頻度の高い人は、データの欠損が多くなり、連続したデータとしての分析が難しくなる。

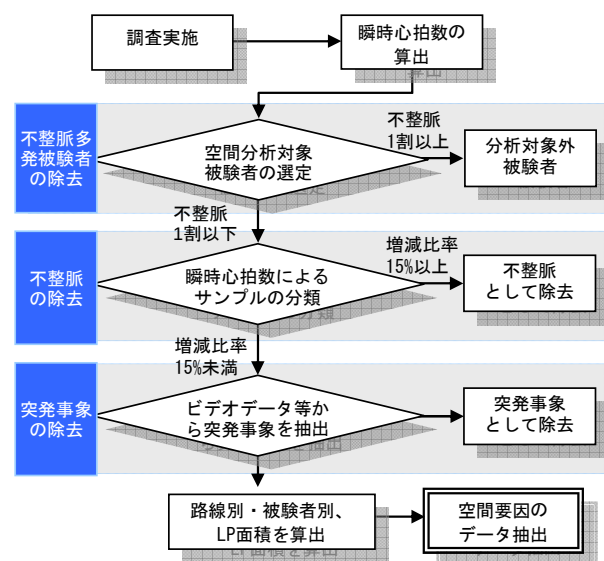


図 7 データクリーニング方法の流れ

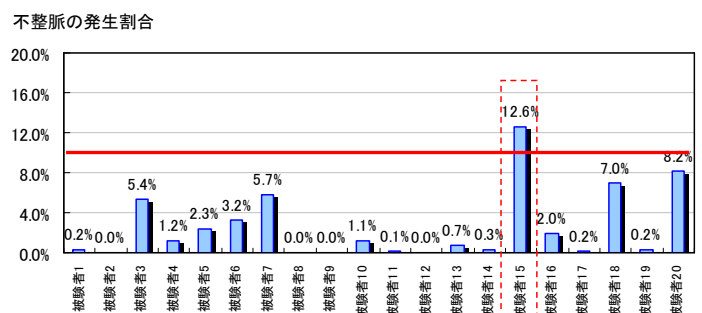


図 8 被験者別の不整脈発生割合

本調査の被験者20人に対して、心拍一拍一拍に対して、不整脈か否かを瞬時心拍数に基づき確認した結果、不整脈データが1割以上ある被験者1名について、分析対象から除外することとした(図 8)。

(3) 瞬時心拍数による不整脈の除去

試験調査時に示した瞬時心拍数による不整脈の判断手法により、サンプルごとの不整脈を除去した(図 9)。

参考として、不整脈を除去しない場合のLP面積と比較した結果、LP面積が7千から、不整脈除去後には3千と大幅に補正された被験者データとなった。

(4) 突発事象の除去

自転車走行空間の評価に阻害となる突発事象の要因は、対向する歩行者、自転車や自動車の飛び出し、追い抜き、すれ違い行為があげられる。そこで本調査では、ビデオデータとの3軸加速度を分析することで、自転車走行時に偶発した突発事象を抽出した。

突発事象の除去は、不整脈の除去とは異なり、突発事象が発生した瞬間だけのデータを取り除くことでは、不十分である。突発事象を認知し、心理的負担が高くなり、その高まりが標準値に戻るまでの間のデータを除去する必要がある。

本調査で計測した突発事象発生前後の全データの瞬時心拍数の増減は、図 10に示すように、発生後に瞬時心拍数が右肩上がりとなり、次第に微減している。そこで、突発事象発生前の瞬時心拍数を標準値とし、標準値に戻

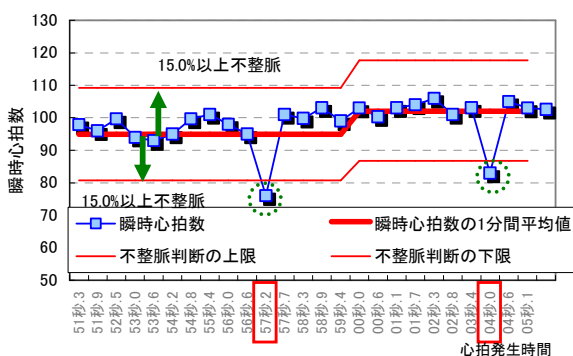


図 9 不整脈の除去方法

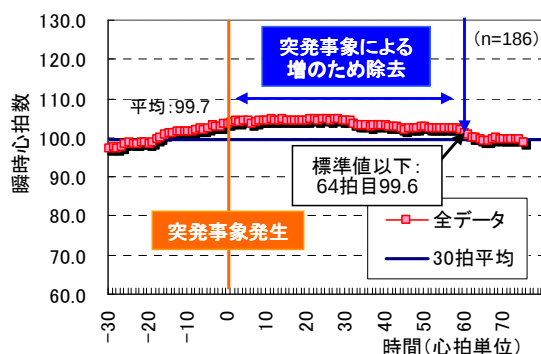


図 10 突発事象の除去方法

るまでの63拍目までを突発事象の影響により増加したとして、突発事象を除去するものとした。

6. 自転車走行空間別の心理的負担状況の比較分析結果

本調査で計測したデータを、前述したデータクリーニング手法による処理により空間要因データとして生成して、自転車走行空間構成要素別の心理的負担状況の比較を行った結果を以下に示す。

○自転車走行位置での心理的負担結果(図 11)

- ・心理的負担状況を示すLP面積の値は、感覚的にも自転車走行性が高いと考える「自転車道」で1,452と最も小さい。一方、自転車走行性が低いと考える「路肩」や「自転車歩行車道(幅員狭)」は、LP面積が各4,046、3,940と高い結果となった。
- ・また、自転車歩行者道の中での比較では、「ライン形式の視覚分離」、「カラー形式の視覚分離」のLP面積が、視覚分離されていない「自転車歩行車道」よりも、低い値となり、走行快適性が高い結果となった。
- ・その一方で、「構造分離」のLP面積が高く、走行快適性が低い結果となった。この要因としては、歩行者との安全性を高める分離柵が、障害物と認識されることにより圧迫感を与え、走行快適性を低下させているものと推測される。

○駐輪・駐車状況での心理的負担結果(図 12)

- ・感覚的にも障害物や交錯機会が多く自転車走行性

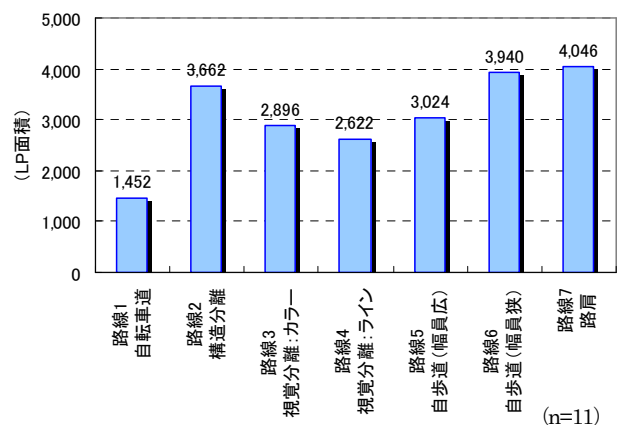


図 11 自転車走行位置における路線別平均 LP 面積

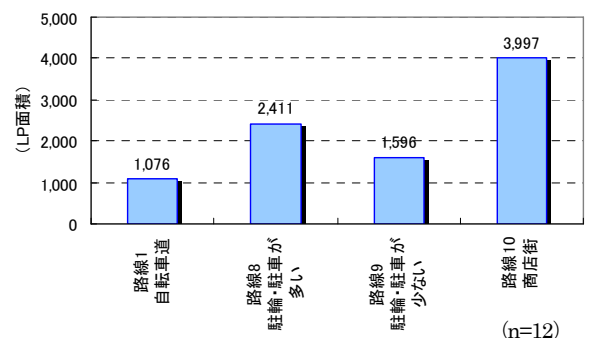


図 12 駐輪・駐車状況における路線別平均 LP 面積

が低いと考える「商店街」が、LP面積3,997と特に高い値となった。また、「駐輪・駐車が多い区間」は、「駐輪・駐車が少ない区間」に比べて、LP面積が高く、走行快適性が低い結果を確認した。

○交差点横断方法での心理的負担結果（図 13）

- ・平面で横断する信号交差点での横断が、地下道やエレベーターでの横断よりもLP面積が高いのは、横断時に自動車など注意を払うべき対象物が多いことが起因していると推測される。
- ・また、エレベーター利用が、スロープ利用よりも比較的LP面積が高くなっており、エレベーターという閉鎖空間が心理的側面に影響していると考えられる。なお、被験者のうち女性（1名）のLP面積は、特にエレベーターの利用で高い値を示した。

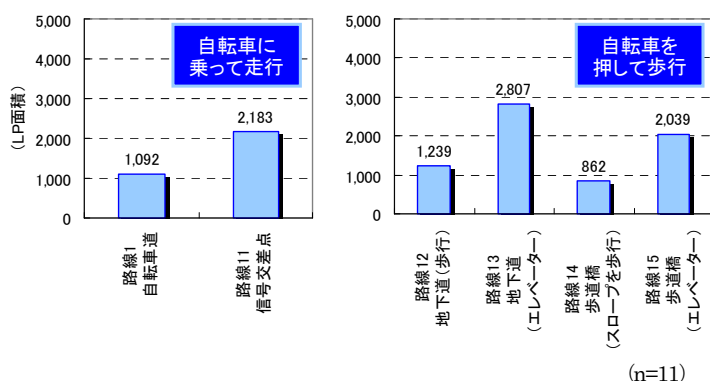


図 13 交差点横断方法における路線別平均LP面積

7. まとめ

本研究では、自転車走行空間の安全性や快適性といったサービスレベルを人間の生理的な現象によって客観的に表現することを目的とし、心電図トランスミッタを活用して自転車走行時の心理的負担状況を計測する手法を構築した。

この際、分単位で環境が変化する自転車走行時の心理的負担を把握するため、心拍変動であるRR間隔を周波数解析せず、時系列信号を評価する方法であるLP面積を評価指標とした。不整脈データの除去等を行うデータクリーニング手法を検討し、心理的負担状況を精度良く工夫を行った結果、LP面積は対象路線別に差異があり、サービスレベル評価指標として適用可能であることが確認できた。

さらに、その調査・分析手法を用いて、自転車での走行快適性に影響を及ぼす空間構成要因別の比較分析を行い、心理的負担により影響を与える構成要因を抽出した。

今後、他地域での適用や、本指標によってサービスレベルが低いとされた箇所の改善効果を把握するなどして、調査データをさらに蓄積し、本評価手法の信頼性を向上していく必要がある。

また、本指標では、3章で示したとおり、安全性の側

面がすべて表現されているわけではなく、人間が知覚（認知）できる安全性のみが表現されうると考える。しかし、例えば、本調査では、構造分離の道路断面の走行快適性が低い結果となったが、構造分離は、歩行者・自転車の交錯機会の減少による安全性向上を重視した改良である。このため、こういった人間が認知していない安全性の側面も含めたサービスレベルの表現も重要であるため、今後の課題としたい。

本指標は、市街地などの面的に広がる自転車走行空間ネットワークのサービスレベル向上に向けたマネジメント指標として実務的に有効に活用できると考える。このため、本計測手法を体系的にマニュアル化するなど、汎用化できるようにすることも念頭に置いている。

なお、本調査実施及び分析にあたっては、大阪大学医学系研究科 公衆衛生学領域 大平哲也講師に多くのアドバイスを頂いた。感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 金 利昭, 五上尚美: Bicycle Compatibility Checklist の作成と自転車道先行事例の評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, 2008. 6
- 2) 諸田恵士, 大脇鉄也, 奥谷正: 自転車と歩行者の混在状態下における通行快適性に関する調査, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, 2008. 6
- 3) 阿部宏史, 崎大樹, 岩元浩二, 富田修一: 岡山市内国道53号線における自転車道整備効果の検証, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, 2008. 6
- 4) 吉村充功, 亀野辰三: 既存道路空間を活かした自転車レーン設置による自転車・自動車の共存可能性, 土木計画学研究・公園集, Vol. 39, 2009. 6
- 5) 斉藤健治, 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, 佐賀大学理工学部集報34(2), pp. 1-7, 2005. 12
- 6) 本多竜, 塚口博司, 里見潤, 坂本剛健: 身体的エネルギー消費量および心理的負荷を考慮した歩行行動評価に関する研究, 交通工学, 2009, vol.44 No.4
- 7) 豊福史, 山口和彦, 荻原啓: 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, 第21回生体生理工学シンポジウム, 2006