

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06604

研究課題名(和文) 生体反応指標による自転車乗車時のストレス計測に基づいた自転車LOSに関する研究

研究課題名(英文) Bicycle Level of Service Based on Stress Measurement by Vital Reactions

研究代表者

吉田 長裕 (Yoshida, Nagahiro)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20326250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、自転車インフラのサービスレベル(LoS)の実用的な評価手法の確立に向けて、以下の3つの課題を明らかにすることである。1. バイタル反応に基づくストレス測定法の検討、2. 走行行動とそれに関連する反応の分析、3. 従来のLOS評価手法との比較による適用範囲の明確化。実験の結果、ストレス反応の大きさは、自転車のインフラの違いや、被験者の走行経験との関連で運動や運転の程度が影響していることがわかった。詳細要因の影響を定量化した上で自転車インフラを比較すると、車や歩行者との追い越しやすれ違いの頻度によっては、車道走行の方が歩道走行よりも高いストレス評価が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、自転車通行環境整備において、自転車利用者のストレス要因から通行環境を改善する方法を示すことができた点にある。従来は心拍指標を用いてきたが、高負荷の運動の伴う自転車利用時への応用可能性、また詳細なストレス要因の把握可能性に加え、ストレス評価では、ストレスはないほうがよいが、注意すべき要因への反応としては必要な側面もあり、それらを分ける必要性があった。自転車利用経験別に反応の程度を比較・分析した結果、利用経験の低いグループの反応が低かったことから、低減可能/不可能なストレス要因をわけることができた。新たな生体反応指標を使うことで、通行環境に起因するストレス要因を詳細に把握できた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to clarify the following three issues towards establishment of a practical method of assessing the level of service (LOS) of bicycle infrastructure. 1. Investigation of stress measurement methods based on vital responses, 2. Analysis of driving behavior and the related responses, and 3. Clarification of the scope of application by comparison with conventional LOS evaluation methods.

As a result of the experiments which were conducted in a route on the actual road with a total length of about 6 km, we found that the magnitude of stress response was affected by different bicycle infrastructure as well as the degree of physical exercise or driving task in relation with subjects riding experience.

A comparison of bicycle infrastructure after quantifying the impact of detailed factors shows that riding on roadways have higher stress ratings than riding on sidewalks, depending on the frequency of overtaking or being passing with cars or pedestrians.

研究分野：交通工学

キーワード：自転車交通 レベルオブサービス 生体反応 筋電 電気皮膚反応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、歩道上における歩行者対自転車事故の増加から、自転車は車両であることが警察の通達によって再確認され、それを受けて車道上の自転車通行空間の整備の検討が進められつつある。歩道通行をしていた自転車利用者の多くは、車道通行の危険性を指摘しているものの、車道通行時の危険感に対する科学的知見が不足しているため、車道上に自転車レーンなどの通行空間を設けたとしても使われない可能性があり、その背景には様々な自転車利用者層の反応の違いによる影響が指摘されている。

国内における通行環境整備のモデル事業の結果によると、車道上の自転車レーンにおける事故発生率は相対的に低く、自歩道を整備しても事故はそれほど減らないことが示され、自転車利用者の主観的な安心/危険感と客観的な安全性が一致しないことが示唆された。

海外では、自転車通行空間を対象とした主観的評価もしくは客観的評価に基づいた LOS 評価の研究事例等があるものの、主観的評価に関するものは自転車視点のビデオ映像とアンケート調査を併用したものである。これらは実験室で安全に LOS 評価を実施できる反面、視覚情報のみに頼るものであるため、従来の歩行者やドライバーを対象とした方法では実通行空間の質の違いを捉えることができず、具体的な空間設計や改善効果を把握できるまでには至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、自転車通行環境の安全性・快適性を評価するための方法論として、生体反応を用いたストレス計測とそれに基づいた自転車通行空間サービスレベル(LOS)の実用的な評価方法の確立を目的とする。ストレス計測や LOS 評価の研究は、その多くが自動車を対象としたもので、これらは運動負荷および高ストレス下にあると考えられる自転車には適用できないため、(1)生体反応に基づいたストレス計測方法の検討(2)自転車利用者の運転行動反応との関連分析(3)従来の LOS 評価手法との比較による本手法の適用範囲の明確化、以上の3つの課題に取り組むこととした。

3. 研究の方法

(1) 生体反応および運動負荷を同時計測するための実験装置の構築

自転車乗車時の生体反応には、ストレス反応と運動負荷の影響が同時に発生するため、これらの影響を分離できるかが重要となる。そこで、被験者に生体反応をモニタリングできる計測センサーを、自転車に運動負荷をモニタリングするためのセンサーを取り付け、これらのデータを用いて運動負荷の影響をキャンセルしたストレス反応の計測の妥当性について検討する。検証のための走行場所は、交通の影響を受ける/受けない状態(後述の単純/複雑コース)で比較を行う。

(2) 運動負荷による違いの検証

運動負荷による違いを明らかにするための実験方法を検討した。具体的には、心拍計測の時系列分析により、運動負荷の影響をみることにした。(1)も踏まえ、本研究で構築した計測実験装置は、S&ME社製のバイオログセンサーを用い、自転車で走行した時の被験者の RRI(心拍変動間隔)EMG(筋電図)GSR(電気皮膚反応)及び車両の傾斜角度を計測した。心拍 ECG センサーの電極を胸部に、発汗 GSR センサーの電極を人差し指と薬指の指先に取り付けた。なお、筋電 EMG センサーの電極取り付け位置については、運動による反応とストレス反応との区別が付きやすい場所を、簡易実験により5つの筋肉の候補の中から決定し、咀嚼筋の咬筋に取り付けることとした。傾斜角度センサーについては、車体のダウンチューブに設置した。また、走行実験において、走行中の位置、被験者の挙動及び周辺状況を記録するために自転車のハンドルに GARMIN の 360°カメラを取り付けた(図1)。



図1 実験装置の概要: 計測機器及び電極取り付け位置

(3) 国内通行環境整備事例における実走行実験

自歩道や自転車レーンや指導帯などの通行環境の異なる路線において、(1)(2)を考慮した計測手法を用いて、整備パターンの異なる路線において走行実験を行った。実験は主に2回行ったが、ここでは後半の実験結果について示す。被験者は、自転車運転経験の異なる学生と教員 15

名（運転経験別人数）を対象とし、実験コースは、運転タスクの異なる単純／複雑（実道路）の2つに分けることとした。単純な運転タスクを要求する実験コースは、幅（1m・0.8m・0.65m）の直線1m、幅15cmの一本橋1m、急制動、間隔2.5mのスラローム15m、カーブ走行（曲線半径3段階）から構成されるもので、他の交通モードの影響の受けない大学内に設定した。一方、複雑な運転タスクを要求する実験コースとしては、実際の道路上にある自転車用の路面表示整備箇所（全面着色・矢羽根・高視認性・視覚分離）と路面表示のない生活道路から構成される全長約6km（所要時間30分）のコースで（図2）大阪府堺市に設定した。なお、本研究では通行帯の名称を交通量の大小から表1のように命名した。計測の際は、運動状態での生体反応を正常値とするため、安静状態・自転車走行状態を一定時間計測した後、コース走行状態での計測をおこなった。計測した被験者別のデータ数を表2に示す。分析方法については、RRI以外の観測されたデータを学内実験では0.001秒ごと、路上実験では0.1秒ごとに平均値を算出し、ストレス要因（イベント）ごとに平均値、標準偏差を算出し比較をおこなった。



図2 路上コース

表1 本研究における通行帯区分

通行帯区分	種別	路面標示		交通量	区間平均走行速度 (km/h)
自歩道	自歩道	あり	視覚分離	小	16.0
車道混在型 A	車道	なし			16.1
車道混在型 B	車道	あり	高視認性矢羽根	大	17.4
車道混在型 C	車道	あり	全面着色		16.2
車道混在型 D	車道	あり	通常矢羽根		18.7

表2 計測したデータ数（被験者別）

		被験者No.1	被験者No.2	被験者No.3	被験者No.4	被験者No.5	被験者No.6	被験者No.7	被験者No.8
学内実験	RRI	286	366	290	405	264	254	282	301
	EMG・GSR	178990	212410	180720	265940	158401	172680	180150	173940
路上実験	RRI	3440	4270	3892	3209	3203	3133	3184	3552
	EMG・GSR	19191	20547	17123	20013	19207	17061	17357	17051
		被験者No.9	被験者No.10	被験者No.11	被験者No.12	被験者No.13	被験者No.14	被験者No.15	
学内実験	RRI	300	253	296	300	360	422	305	
	EMG・GSR	199780	143000	156350	146002	190420	257310	167630	
路上実験	RRI	3307	3330	3692	4216	3601	2767	3280	
	EMG・GSR	20903	18538	19666	21454	18967	17608	17529	

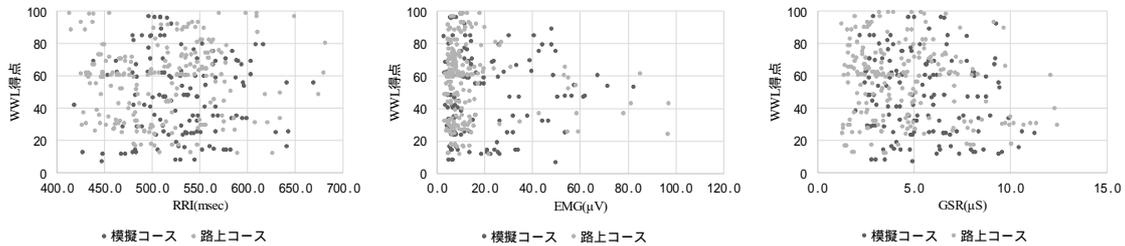
4. 研究成果

(1) 生体反応特性

路上実験において計測した生体反応をそれぞれ比較した結果、EMGとGSRについて、RRIが反応している場合と同じように数値が上昇しているため、EMGとGSRにおいて反応しやすいストレス要因が、それぞれRRIが反応しやすいストレス要因と一致している傾向がみられるが、EMGと比べてGSRの方がRRIとの相関が高いため、よりRRIとの反応傾向に共通点があることが分かった。また、EMGとGSRについては、負の相関がみられたため、両者の反応しやすいストレス要因に違いがあることが明らかとなった。また、通行帯ごとに生体反応間の相関分析をおこなった結果、自歩道においてEMG、GSRそれぞれとRRIとの相関係数が他の通行帯と比べて高くなっているため、自歩道における共通のストレス要因に対してすべての生体反応指標で反応しやすい傾向にあることが分かった。

(2) 運転タスク別のストレス要因比較

学内と路上実験におけるイベント（ストレス要因）について、模擬コースと路上コースを比較したところ、RRIとGSRでは、路上コースにおけるイベントの方が大きな反応を示している場合もみられたが、EMGについては、一本橋や急制動など瞬間的に力が入りやすいイベントについての反応が路上コースに比べて非常に大きくなった（図3）。



(左: RRI、中: EMG、右: GSR)

図3 生体反応・WWL 得点比較

(3) 学内実験ストレス要因比較 (運転経験別)

学内実験におけるストレス要因 (イベント) に対する生体反応を被験者の運転経験別 (通学・通勤での使用の有無、日常利用者 8 名・非日常利用者 7 名) に平均値で比較をおこなった。RRI と GSR では、ストレス要因によっては日常利用者の方が非日常利用者と比較して反応が大きくなる傾向がみられたが、EMG については、すべてのストレス要因について日常利用者 (M=14.9, SD=26.9) より非日常利用者 (M=22.2, SD=31.9) の方が反応は大きくなり、有意な差がみられた (t=80.2, df=431074, p<.01)。

(4) 路上実験ストレス要因比較 (運転経験別)

路上実験における各通行帯を走行した際の生体反応を被験者の運転経験別に平均値で比較をおこなった。すべての生体反応指標において、どの自転車通行帯についても非日常利用者とは比べて日常利用者の方が大きな反応を示しており、統計的な有意差がみられた (表 3)。しかし、車道混在型 C における GSR の反応についてのみ、非日常利用者の反応の方が大きくなっており、要因としてバスなどの大型車による追い抜かれ時の反応が非日常利用者の方が大きく (t=22.6, df=101, p<.01) 通行帯を通しての評価にも影響したと思われる。

また、各通行帯内における路上駐車への追い抜きや歩行者との錯綜などのストレス要因についても日常利用者の方が大きな反応を示していたが、自動車や大型車に追い抜かれた際の GSR の反応については、非日常利用者の方が大きな反応を示していた。従って、非日常利用者の方が自動車によるストレスを受けやすく、GSR については自動車による追い抜かれなどの精神的負荷によって反応することが分かった。

表 3 通行帯比較 (運転経験別平均値) 有意検定結果

	RRI		EMG		GSR	
	自由度	t値	自由度	t値	自由度	t値
自歩道	4737	29.7 **	25500	33.7 **	25500	22.3 **
車道混在型A	9569	32.4 **	51137	47.5 **	51137	38.5 **
車道混在型B	5314	17.4 **	27007	25.4 **	27007	5.0 **
車道混在型C	5182	10.3 **	28573	31.0 **	28573	15.5 **
車道混在型D	9148	17.7 **	47198	41.3 **	47198	37.9 **

(*:p<.05 **:<.01)

また、各通行帯内における路上駐車への追い抜きや歩行者との錯綜などのストレス要因についても日常利用者の方が大きな反応を示していたが、自動車や大型車に追い抜かれた際の GSR の反応については、非日常利用者の方が大きな反応を示していた。従って、非日常利用者の方が自動車によるストレスを受けやすく、GSR については自動車による追い抜かれなどの精神的負荷によって反応することが分かった (表 4)。

学内・路上実験の結果から、模擬コースのように他の交通モードの影響を受けないような状況下では、運転経験による影響が運転スキルとして表れ、一本橋などの走行に技術が要求されるような状況下に大きく反応していたと思われる。一方、実道路上では、歩行者や自転車など他の交通モードの影響を大きく受けるため、日常的に自転車に乗車することで、歩行者や自転車とすれ違う際の相手の動き方の予測など、乗車中に常に危険に対して予測する能力が発達し、日常的に使用していない人と比べて、危険予測によるストレスとして生体反応に表れた可能性が高いと思われる。

表 4 追い抜かれ時 (運転経験別平均値) 有意検定結果

	RRI		EMG		GSR	
	自由度	t値	自由度	t値	自由度	t値
車道混在型A	93	-5.2 **	524	9.0 **	524	-2.1 *
車道混在型B	152	-4.2 **	793	3.2 **	793	-1.8 *
車道混在型C	546	-4.7 **	3004	5.4 **	3004	-1.5
車道混在型D	807	-4.7 **	4138	9.0 **	4138	13.0 **

(*:p<.05 **:<.01)

(5) 生体反応への影響要因分析

目的変数に生体反応、説明変数に通行帯ダミー（自歩道、車道混在型 A、B、C、D）、車体の傾斜角度（横）、区間ごとの平均速度（km/h）・自動車追い抜かれ台数、メンタルワークロード測定における TD 得点と FR 得点、被験者の自転車利用頻度（回/週）、自信度を用いて重回帰分析をおこなった。その結果（表 5）RRI では、車道混在型 B ダミー・速度・自転車利用頻度・自信度、EMG については、車道混在型 C ダミー・傾斜角度・FR 得点・利用頻度、GSR については、車道混在型 C ダミー・傾斜角度・利用頻度が反応を上昇させる要因となっていることが分かった。また、すべての指標において、自己申告によるメンタルワークロード指標の時間圧力得点（TD 値）が負に影響しており、走行速度を制限されたか、もしくは速い速度での走行を要求される方がストレスとなっていることが分かった。

これらの結果から、RRI については車体の傾きや走行速度による影響が高いことから、身体的負荷による影響を受けやすい傾向にあると予想される。また、EMG と GSR において、共に車道混在型 C ダミーの影響度が高く、EMG では心理的・身体的負荷である路上駐車に対する追い抜きに対して、GSR では心理的負荷である自動車や大型車による追い抜かれに対して大きな反応を示していたことが要因であると考えられる。

表 5 生体反応影響要因比較 重回帰分析結果

	RRI		EMG		GSR	
	偏回帰係数	t 値	偏回帰係数	t 値	偏回帰係数	t 値
自歩道ダミー	-	-	1.505	8.834 **	-	-
車道混在型 A ダミー	-4.662	-4.489 **	-	-	7.018	7.018 **
車道混在型 B ダミー	-21.124	-16.763 **	6.142	33.619 **	11.515	11.515 **
車道混在型 C ダミー	-4.541	-2.482 *	11.346	43.161 **	17.992	17.992 **
車道混在型 D ダミー	-18.603	-8.220 **	10.357	31.790 **	11.027	11.027 **
傾斜角度（横）	-0.497	-6.295 **	0.306	23.593 **	19.179	19.179 **
速度（km/h）	-2.455	-11.083 **	-1.401	-38.773 **	-13.134	-13.134 **
自動車追い抜かれ台数	0.486	4.849 **	-0.271	-16.548 **	-3.203	-3.203 **
TD（時間圧力）	0.465	28.594 **	-0.303	-115.286 **	-5.438	-5.438 **
FR（もどかしさ）	0.414	29.734 **	0.051	22.013 **	-1.905	-1.905
利用頻度	-6.330	-55.642 **	1.757	95.209 **	60.617	60.617 **
自信度	-5.298	-27.975 **	-0.503	-15.986 **	-75.437	-75.437 **
定数項	577.289		41.835		6.945	
サンプル数	33960(約 2300/人 × 15)		179425(約 12000/人 × 15)		179425(約 12000/人 × 15)	
補正 R2	0.192		0.127		0.067	

(*:p<.05 **:p<.01)

(6) まとめ

本研究では、自転車利用環境に関わるストレス要因と反応の関係を計測する手法について、基礎的な知見を得るために、運転タスクとストレス要因の異なる複数の通行空間において、心拍間隔、筋電図、電気皮膚反応の 3 つの生体反応を計測し、利用者の反応と運転タスクの程度との比較分析をおこなった。

生体反応特性について、EMG と GSR において反応しやすいストレス要因が、それぞれ RRI が反応しやすいストレス要因と一致している傾向がみられ、中でも EMG と比べて GSR の方が RRI との反応傾向に共通点があることが分かった。また、EMG と GSR については、両者の反応しやすいストレス要因が異なることが明らかとなった。

次に、運転経験別での生体反応の比較により、交通モードの影響を受けないような状況下では、運転経験による影響が運転スキルの差として EMG に表れていたが、実道路上では、日常的に自転車に乗車することで他の交通モードとの接触の可能性を常に予測する能力が発達し、日常的に自転車を使用していない人と比べて、危険予測をおこなうことによるストレスがすべての生体反応指標に表れた可能性が高いと予想した。また、自動車や大型車による追い抜かれなどの心理的負荷によって GSR による反応が顕著にみられた。

最後に、生体反応と運転タスクに対する影響要因についての重回帰分析により、RRI については車体の傾きや走行速度による影響が高いことから、身体的負荷による影響を受けており、EMG については、路上駐車に対する追い抜き、GSR については、自動車による追い抜かれによる心理的・身体的負荷による影響度合いが高いということが分かった。

従って、すべての生体反応指標において、身体的・心理的負荷の両方を計測することができるが、GSR については心理的負荷に起因するストレス要因、RRI と EMG は身体的負荷に起因するストレス要因に対して反応しやすい側面を持っていることが確認できた。特に RRI については運転負荷が継続するような状況下で、EMG については身体的動作による瞬間的な体の力みに対して反応しやすい傾向にあることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 立野勝真, 吉田長裕	4. 巻 2018
2. 論文標題 生体反応を用いた自転車利用環境のストレス計測に関する実験的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 2 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 立野勝真, 吉田長裕	4. 巻 -
2. 論文標題 タスクの程度を考慮した自転車利用者の生態反応を用いたストレス計測に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第39回交通工学研究発表会論文集 (研究論文)	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 立野勝真, 吉田長裕	4. 巻 -
2. 論文標題 タスクの複雑さを考慮した生体反応による自転車利用環境のストレス計測に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第58回土木計画学研究発表会・講演集	6. 最初と最後の頁 P142_1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 立野勝真, 吉田長裕	4. 巻 -
2. 論文標題 運転経験による自転車通行空間における生体反応への影響要因分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第61回土木計画学研究発表会・講演集	6. 最初と最後の頁 4 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 立野勝真, 吉田長裕
2. 発表標題 生体反応を用いた自転車利用環境のストレス計測に関する実験的研究
3. 学会等名 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立野勝真, 吉田長裕
2. 発表標題 タスクの複雑さを考慮した生体反応による自転車利用環境のストレス計測に関する研究
3. 学会等名 第58回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsumasa TATSUNO, and Nagahiro YOSHIDA
2. 発表標題 Vital reactions as a measure of stress levels in bicycle riders according to task complexity
3. 学会等名 The 8th International Cycling Safety Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立野勝真, 吉田長裕
2. 発表標題 タスクの程度を考慮した自転車利用者の生体反応を用いたストレス計測に関する研究
3. 学会等名 平成31年度自転車利用環境向上会議 in札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagahiro YOSHIDA, and Katsumasa TATSUNO
2. 発表標題 An Analysis on Level of Stress for Bicycle Facilities by using Vital Reactions according to Driving Tasks
3. 学会等名 The 9th International Cycling Safety Conference 2020 (確定) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立野勝真, 吉田長裕
2. 発表標題 タスクの程度を考慮した自転車利用者の生態反応を用いたストレス計測に関する研究
3. 学会等名 第39回交通工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立野勝真, 吉田長裕
2. 発表標題 運転経験による自転車通行空間における生体反応への影響要因分析
3. 学会等名 第61回土木計画学研究発表会・講演集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----