

心拍変動による自転車車道走行の 快適性評価モデルに関する考察 ～高松市中心部における自転車のネットワーク検討を通して～

鈴木 清¹・砂川 尊範²・竹林 弘晃³・土井 健司⁴

¹正会員 国土交通省 四国地方整備局 香川河川国道事務所（〒760-8546 高松市福岡町4丁目26番32号）
E-mail: suzuki-k8814@skr.mlit.go.jp

²正会員 (株)建設技術研究所 大阪本社 道路交通部 計画室（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7）
E-mail: sunagawa@ctie.co.jp

³正会員 (株)建設技術研究所 大阪本社 道路交通部 計画室（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7）
E-mail: takebays@ctie.co.jp

⁴正会員 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1）
E-mail: doi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

安全なまちづくりを進めるには、自転車走行位置を区分して自転車や歩行者が、安全で利用しやすい道路空間を整備していく必要がある。限られた中心市街地の道路空間の中で、自転車走行空間を確保していくためには、その整備効果を客観的に評価できる手法が重要である。こうした状況を受け、筆者らは心拍変動データの解析により、自転車走行中に感じるストレスについて客観的に快適性を評価するCHMを提案している。しかしながら、CHMによる快適性の定量化は、評価対象区間を現地調査しなければならず、多くの時間と費用を要するという欠点を持つ。

そこで本研究では、「自転車通行指導帯」や「路肩」等の自転車走行時の快適性を、面的かつ簡易に評価するための心理的負担予測モデルの構築を試みる。さらに自転車ネットワーク整備計画の整備優先順位や整備形態の選定等への活用可能性について考察する。

Key Words : bicycle network plan, bicycle running space, spatial assessment, safety, community

1. はじめに

近年、地球温暖化が進展する中で、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。また、コンパクトで持続可能な集約型都市づくりを目指すには徒歩や自転車、公共交通等の様々な交通手段の有機的な連携が求められており、特に自転車はまちの代表的な交通手段として、今後、重要な役割を果たすものと考えられる。

その一方で、高松市のような地方中核都市では、自転車利用が多いにもかかわらず、十分な自転車走行空間が整備・確保されていないため、道路空間における安全性や自転車の走行快適性に対する課題も多い。中心市街地においては、限られた道路空間の中で不足する自転車走行空間を確保していくためには、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の評価が重要である。

こうした状況から、筆者ら¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は、適切な自転車通行位置の遵守に向けた案内サインの視認特性分析、自転車が快適に走行可能な経路・流動に着目した分析、自転車交通量を面的に把握可能な推計手法の構築等、安全で快適な自転車走行空間の確保に向けた様々な研究を進めてきた。これらの研究は、快適な自転車走行空間の確保に向けた基礎情報の把握を目的としたものである。こうした要素を包括する道路空間のサービスレベルの評価手法として、筆者ら⁶⁾は心理的負担に着目した研究を進めてきた。具体的には、自転車走行中に感じるストレスを「ホルター心電計」を用いて計測し、心拍変動を表すRR間隔を解析することによって、自転車走行空間を客観的に評価できる評価指標及び手法としてCHM（Comfort based on Heart rate Method）を提案し、快適性を定量化している。しかしながら、CHMによる空間評価は、評価対象区間を現地で自転車走行しなければならず、多くの時間と費用を要するという欠点を持つ。

これまで高松市中心部の自転車歩行者道では、自転車歩行者の通行区分を促す看板柱を設置した構造分離、路面標示による視覚分離を中心に自転車走行空間を確保し、ネットワーク整備を推進してきた。しかしながら、平成24年11月に策定された「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン⁷⁾（以降、自転車ガイドラインと言う）」では、自転車は原則車道通行と明記された。今後は、この自転車ガイドラインに沿った「自転車道」や「自転車専用通行帯」、「自転車及び自動車の混合通行」の整備が主となってくることから、自転車ネットワーク整備計画の見直しによる整備優先順位及び整備形態の選定等が求められる。

こうした自転車ネットワーク整備計画の整備優先順位及び整備形態の選定等に当たっては、自転車走行空間整備の実現可能性といった構造的な整理の他に、現在の走行空間における走行快適性や安全性といった視点も重要となる。しかしながら、快適性を定量化するCHMでは、自転車ネットワークの対象路線における面的かつ簡易な快適性評価は困難である。

そこで本研究では、既往研究の内容及び自転車ガイドラインの方針を踏まえ、「自転車通行指導帯」や「路肩」における自転車走行時の快適性を、面的かつ簡易に評価するための心理的負担予測モデルの構築を試みる。心理的負担予測モデルは、評価対象区間の道路構造及び交通特性に関するデータをインプットすることで、既存の道路空間において簡易な快適性評価を可能となる。また、この評価結果について、自転車ネットワーク整備計画の整備優先順位や整備形態の選定等への活用可能性について考察する。

2. 既往研究のレビュー

自転車走行空間の快適性を評価する指標として、自転車走行速度、走りやすさ等の指標が挙げられるが、これらの指標は、アンケートやヒアリングという主観的な評価となるという問題がある。そのため、近年では、自転車等の走行中に感じる心理的負担に着目した評価研究が注目されており、筆者ら⁹⁾もその研究を進めている。

心理的負担に関する研究は、特に自動車運転手を対象とした研究事例が多い。大塚・栗谷川⁹⁾は、自動車運転手が感じる心理的負担に着目し、自動車走行中にヒヤリと感じた状況と感じていない状況において、呼吸波形の呼吸時間と振幅の特徴を分析し、安全性評価に結びつけている。宮田⁹⁾は、心拍がヒヤリハット事象のような強い危険を感じる事象では上昇し、事象に強い危険を感じず注意を向ける程度の事象では低下することを把握している。また、栗谷川・大須賀¹⁰⁾は、自動車運転手が他車の割り込み等のヒヤリハット事象に遭遇した際、

急で大きな心拍の上昇を確認している。

一方で、研究事例は少ないものの、自転車利用者の心理的負担に関する研究もある。渡辺・金¹¹⁾は、少サンプルながら、自転車道における心理的負担をRR間隔の変動に着目して把握している。その際、自転車や歩行者との錯綜時、自転車道に進入する際のクラック周辺において、心理的負担が高まることを確認している。

筆者ら⁹⁾は、こうした心理的負担に関する多様な研究成果を参考にし、先述した自転車走行空間を客観的に評価できる評価指標及び手法としてCHMを提案し、快適なお、心理的負担に関する研究において、予測モデルを構築した研究事例は確認できていない。

3. 高松の交通まちづくりと自転車走行空間

高松市は、温暖少雨の気象条件や平坦な地形が多いという特性から、我が国でも屈指の自転車利用を誇る地域である。平成20年12月に策定された「高松市都市計画マスタープラン¹²⁾」では、人と環境にやさしい公共交通を基軸とした環境共生都市「多核連携型コンパクト・エコシティ」を目指している。この中で安全で快適に移動でき、過度に自動車に依存しない、徒歩や自転車と公共交通機関が有機的に連携したまちを実現するため、自転車が持つ利便性や快適性を一層引き出すことのできる社会環境整備が求められている。その一方で、人口当たりの自転車事故件数は全国ワースト1位¹³⁾であり、近年は特に高齢者が関連して大きな事故に繋がるケースも見られ、

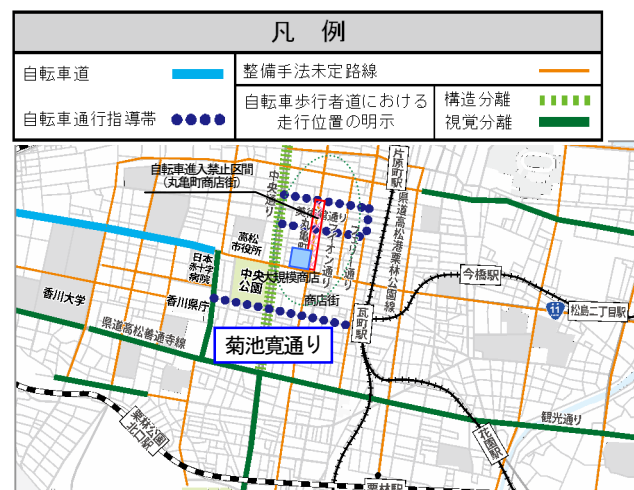


図1 高松市中心部における自転車ネットワーク

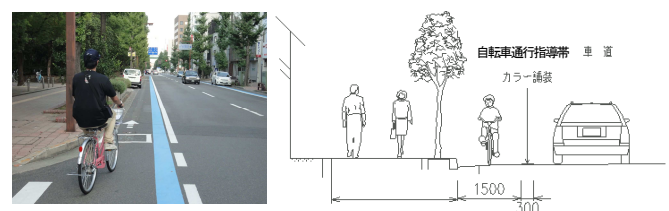


図2 菊池寛通りの自転車利用環境整備状況

安全性の高い道路空間整備が喫緊の課題となっている。

このような中、近年「香川の自転車利用に関する提言書（2007.8）^{14）}」、「高松地区における自転車を利用した都市づくり計画（2008.11）^{15）}」、「高松市中心部における自転車ネットワーク整備方針（2008.11）^{16）}」等、自転車の側面からまちづくりを考える計画が策定されている。こうした計画に基づき、自転車歩行者道内における自転車通行空間の確保がなされている。その一方で、郊外部からの鉄道を一つに結節する瓦町駅から香川県庁に続く菊池寛通りでは自転車通行指導帯が整備されている。

菊池寛通りは、商店街や中央公園、日本赤十字病院、学校等の様々な施設が周辺に立地していることから、子供からお年寄りまでの多様な属性が、通勤や通学、買い物等で利用している。そのため、自転車や歩行者交通量が多い空間であり、特に自転車と歩行者の通行区分が求められていた。こうした状況から、歩行者や自転車利用者が安全で快適に通行できる空間とするために、道路空間における歩道幅員の現状を鑑み、自転車通行指導帯を整備して自転車を車道走行とした。高松市中心部において、当該箇所以外には自転車専用通行帯や自転車通行指導帯等の車道上に自転車走行空間を確保している道路はなく、例えば、自転車ネットワークの対象路線であっても、路肩部を自転車走行させているのが現状である。

4. 心拍変動による自転車走行空間の快適性評価

(1) 現地調査の概要

自転車走行空間タイプ別の快適性をCHMにより明らかにするため、高松市内の複数の路線を対象に、実験的に調査・分析を行った。調査概要を表1に示す。調査路線は、高松市中心部において自転車が車道走行している3路線を抽出している。具体的には、自転車通行指導帯、歩道がある道路空間の路肩（以降、路肩という）、歩道がない道路空間の路肩（以降、車道路肩という）である。前者の路肩は、歩行者と自転車の通行空間が分離されている一方で、後者の車道路肩は混在空間である。なお、調査はサンプル数を一定確保するために、同路線を午前と午後の計2回実施した。

調査の際には、自転車走行する被験者が、歩行者や自転車とすれ違う回数を把握するために、ビデオカメラを頭部に設置した。頭部に設置したのは、被験者が走行中に視認している方向の状況を常に撮影できるよう工夫したものであり、被験者の負荷にならないよう、スマートフォンのビデオカメラ機能を活用して、軽量かつコンパクトなものを設置することとした。

また、不整脈が多発する被験者は、適正なデータ取得ができない^{9）}ことから、一般的に不整脈の多い高齢者を

除いた若年層での調査とした。被験者は、健康診断等で不整脈と判断された経験の有無を事前に確認して選定している。

表1 調査概要

項目	内容
調査日	平成23年9月6日（火）
被験者	若年層10人 ※自転車通行指導帯AMは20人、PMは30人走行 ※路線走行頻度：各被験者とも半年に1回程度
調査方法	・各被験者にホルター心電計、ビデオカメラを取り付け、対象路線を普通自転車で走行 ・調査終了後、心理的負担を感じた内容・場所をヒアリングによって把握
調査状況	
路線① 自転車通行指導帯	 路線延長：2.1km、 すれ違い台数AM：74人・台/回 すれ違い台数PM：50人・台/回
路線② 路肩	 路線延長：1.3km すれ違い台数：46人・台/回 すれ違い台数：48人・台/回
路線③ 車道路肩	 路線延長：1.2km すれ違い台数：36人・台/回 すれ違い台数：39人・台/回

※すれ違い台数は、ピーク時間帯における歩行者、自転車、自動車のすれ違い及び追い抜かれた台数の平均

(2) 調査結果の分析

CHMによる快適性評価に基づき、計測した心拍データから心理的負担状況を把握し、自転車走行空間別に比較した結果を図3に示す。なお、以降で示す心理的負担は被験者によって個人差があるため、普段の生活における平常時値（椅子に座った状態におけるLP面積）を基準値として路線別LP面積の比率を取り、その逆数（以降、快適度とする）を用いて分析している。逆数としたのは値の増加に伴い、快適性も向上するという正の相関にすることで、視覚的に分かりやすくするためである。

快適度は、「自転車指導帯AM」が0.47で最も低く、次いで「自転車指導帯PM」が0.55、「路肩PM」が0.66で続く。路面が青色に塗られ、自転車走行位置が分かりやすく示されている「自転車通行指導帯」は、快適度が高いと予想していたものの、他の空間に比べて低い結果となっている。「自転車通行指導帯」は、他の空間に比べ、

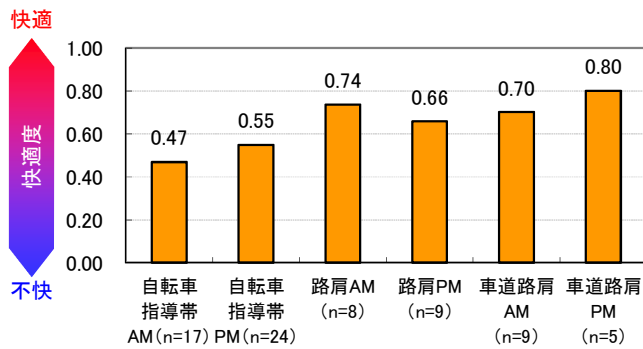


図3 自転車車道走行のLP面積による快適性評価

表2 自転車車道走行調査時における交通特性等

項目	自転車指導帯		路肩		車道路肩	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM
すれ違い台数(人・台/回)	74.2	49.9	46.4	47.6	35.7	39.0
走行速度(km/h)	13.0	14.2	15.1	15.5	14.6	15.6
駐停車車両(台/km)	12.6	9.1	0.9	1.4	5.6	1.2
自転車走行幅員(m)	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
信号交差点率(機/km)	5.7	5.7	3.8	3.8	3.3	3.3
サンプル数	17	24	8	9	9	5

※各被験者の平均

※すれ違い台数は、走行調査時において歩行者、自転車自動車のすれ違い及び追い抜かれた台数の平均

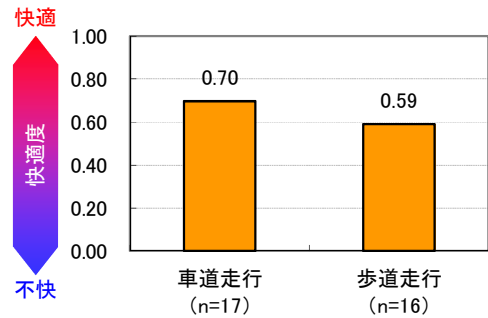
調査時におけるすれ違い台数、駐停車車両、信号交差点率が高く、また走行速度が低い(表2)。これら値の差異は、快適度を不快方向へと導くものであり、この結果に起因して快適度が低い値を示すと考える。

歩道がある道路空間の路肩、歩道がない道路空間の車道路肩については、後者に比べて前者の方がすれ違い台数がやや多く、そのために快適度が低いと考えられる。なお、自転車走行後に行ったヒアリング調査では、円滑に走行できると快適に感じる、駐停車車両が多い箇所は走行しにくい、信号待ちは不快に感じるなどの意見が多くあった。

一方、歩道がある道路空間の路肩の自転車車道走行と歩道走行時の快適性を比較分析した(図4、表3)。その結果、歩道走行が0.59に対して車道走行は0.70と高い値を示し、車道走行の方が快適性が高いことが確認された。このときの交通特性等について比較すると、車道走行時の自転車走行幅員は1.0mに対して歩道走行は2.5mと大きい。歩道幅員が広ければ快適性が高いと予測されることから、同一幅員となれば、さらに車道走行における快適性の高さが顕著になると考える。なお、その他の項目は大きな差異はない。

5. 車道走行の心理的負担予測モデルの構築

自転車走行空間の心理的負担を評価する場合、全ての路線において調査を実施することは、時間面及び費用面で問題がある。そこで、走行空間の道路構造や交通特性等、比較的容易に把握が可能なデータと心理的負担との関係から、簡易的に走行快適性を評価することができる



※歩道走行は、平成22年11月の調査結果

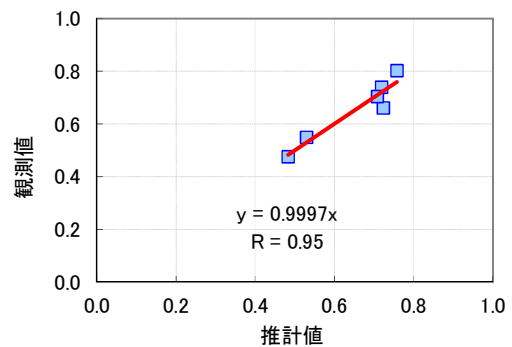
図4 車道及び歩道走行のLP面積による快適性評価

表3 車道及び歩道走行時における交通特性等

項目	車道走行	歩道走行
すれ違い台数(人・台/回)	47.0	51.0
走行速度(km/h)	15.3	16.2
駐停車車両(台/km)	1.3	0.0
自転車走行幅員(m)	1.0	2.5
信号交差点率(機/km)	3.8	3.8
サンプル数	17	16

※各被験者の平均

※すれ違い台数は、走行調査時において歩行者、自転車自動車のすれ違い及び追い抜かれた台数の平均



※心理的負担について、自転車走行空間別・AM/PM別の平均値をプロット

図5 予測モデルの推計値と観測値との相関分析

心理的負担予測モデルの構築を試みる。

モデル構築に用いたデータは先述した自転車車道走行の調査結果であり、走行空間は3タイプ、午前・午後別のデータで、サンプル数は合計72サンプルである。心理的負担予測モデルの目的変数は「快適度」とし、説明変数は現地で容易に把握が可能な道路構造及び交通特性等に関するデータとの相関分析から重相関係数が高い項目を選定した。その結果、「信号交差点率(機/km) : 1kmあたり信号交差点数」, 「自動車駐停車台数(台/km) : 路肩部1kmあたり自動車駐停車台数」, 「走行速度(km/h) : 自転車走行速度」の3つが、それぞれ0.93, 0.90, 0.87と特に重相関係数が高い傾向が把握できた。

それらの項目と快適度との多変量解析により、心理的負担予測モデルを構築する。多変量解析は様々な種類があり、目的変数及び説明変数のデータタイプによって分類されている。本検討で用いるデータは、目的変数及び

説明変数ともに定量データであることから、重回帰分析を用いる。分析した結果、心理的負担予測モデルは、以下のように構築された。各説明変数の係数は、走行速度が正、信号交差点率が自動車駐停車台数が負の符号を示しており、快適性との関連性はイメージに合っている。

$$Z=(-0.06)S+(-0.01)C+(0.02)V+0.66 \quad (1a)$$

Z：快適度（平常時値に対するLP面積比率の逆数）

S：信号交差点率（機/km）

C：自動車駐停車台数（台/km）

V：走行速度（km/h）

構築した予測モデルについて、実際に調査で得た観測値と心理的負担予測モデルによって推計した推計値との相関分析を実施し、現況再現性を検証した。その結果、重相関係数0.95と非常に高い値を示し、予測モデルの妥当性が確認された（図5）。しかしながら、本心理的負担予測モデルは、高松市中心部における自転車車道走行の3タイプの自転車走行空間における観測値を用いたものであるため、予測モデルを活用するための制約条件を設定しておく必要がある。

予測モデルの構築に用いたデータは、以下に示す範囲内のデータである。範囲内のデータについては推計値と観測値との相関分析からモデル誤差を確認済みである。一方で、範囲外のデータについては、検証を実施していないため、活用にあたっては留意が必要である。評価対象の自転車走行空間は自転車指導帯、路肩、車道路肩の3タイプであり、また勾配、段差等、起伏が小さい空間での計測結果から構築した予測モデルであるため、起伏が小さい断面のみ使用可能と考える。

S：信号交差点率（機/km） $3.3 \leq S \leq 5.7$

C：自動車駐停車台数（台/km） $0.9 \leq C \leq 12.6$

V：走行速度（km/h） $13.0 \leq V \leq 15.6$

6. まとめ

本研究では、自転車ガイドラインの方針を踏まえ、自転車通行指導帯や路肩における自転車走行時の快適性を、面的かつ簡易に評価するため、精度の高い心理的負担予測モデルの構築を試みた。また、評価対象区間の道路構造及び交通環境の特性に関するデータを、心理的負担予測モデルにインプットすることで、既存の道路空間における快適性を簡易に評価可能であることを確認した。予測モデルの構築によって、自転車ネットワーク整備計画上の対象路線について、快適性を面的に評価することができ、快適性が低い箇所の整備を優先していくための優先順位検討の一指標として活用することが考えられる。しかし、現在の予測モデルには制約条件があり、全道路

空間に対する予測が困難である。今後、自転車道や自転車専用通行帯、自転車歩行者道等の整備形態別に、快適性評価が可能なモデルへの改良を行い、快適性の相違が把握できるものとしたい。さらに、自転車走行空間整備前後の快適性評価が可能になれば整備効果評価指標の把握するツールとしての活用も期待できる。

一方で、本研究で構築した心理的負担予測モデルには、次のような課題が残る。構築した心理的負担予測モデルを活用して、先に示した整備前後といった時点間での活用可能性、他地域の自転車走行空間への適用可能性について、本予測モデルは検証できていない。今後、地域間比較及び時点間比較を行い、予測モデルの改良が必要と考える。また、現在構築している予測モデルは、サンプル数が72サンプルと少ない。モデル精度の向上に向けてはサンプル数増は必須であり、加えて多様な自転車走行空間におけるデータを用いてモデルを再構築することが重要と考える。具体的には、交通量の多い自転車専用通行帯や、駐停車車両の多い自転車と自動車の混在通行の空間等が挙げられる。こうした課題を検定によってモデル検証し、モデルの妥当性を示していく必要がある。そして、自転車道等の他の自転車走行空間でも活用可能な心理的負担予測モデルを新たに構築していきたい。さらに、面的な評価として自転車ネットワーク計画策定の一指標としての活用を検討していきたい。

最後に、調査および分析にあたっては、大阪大学大学院医学系研究科 社会環境医学講座 大平哲也准教授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) 鈴木、砂川、竹林、土井：アイマークレコーダを活用した自転車案内サインの視認特性分析と自転車走行空間改善方策に関する考察、第32回交通工学研究会、2012.9
- 2) 土崎、鈴木、神田、土井、松田：自転車交通の需要特性と一貫性・直接性に着目した実践的なネットワーク計画に関する研究、土木計画学研究・講演集、Vol45、2012.6
- 3) 鈴木、土井、神田、土崎：自転車走行経路・流動の分析手法に関する試案と適用～高松市中心部をケーススタディとして～、第31回交通工学研究会、2011.9
- 4) 鈴木、土崎、神田、土井：自転車走行環境整備による需要変化の実践的評価に関する一考察、土木計画学研究・講演集、Vol47、2013.6
- 5) 砂川、鈴木、福富、吉岡、土井：パーソントリップデータを活用した自転車交通量推計手法に関する考察、土木計画学研究・講演集、Vol47、2013.6
- 6) 鈴木、砂川、新田：心拍変動による自転車走行空間の安全性・快適性評価方法に関する研究、福祉のまちづくり研究、vol.14、No.2、2012.7

- 7) 国土交通省道路局，警察庁交通局：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン，2012.11
- 8) 大塚善行，栗谷川幸代，景山一郎：ヒヤリハット検出システムの構築に関する研究，第42回学術講演会，2009年12月
- 9) 宮田監修：新生理心理学第2巻，pp30，1997年
- 10) 栗谷川幸代，大須賀美恵子，景山一郎：ドライバの整理指標変化をトリガにした危険・苦手場面検出，自動車技術会学術講演会前刷集，No.134-07，pp.5/8，2007年
- 11) 渡辺和憲，金利昭：心拍間隔指標を用いた自転車走行空間のストレス計測手法に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集，Vol42，2010年11月
- 12) 高松市：高松市都市計画マスタープラン～「多核連携型コンパクト・エコシティ」をめざして～，2008.12
- 13) 警察庁統計資料，
<http://www.pref.kagawa.jp/police/toukei/gaikyou/02/index.htm>，2010年
- 14) 香川の自転車利用を考える懇談会：香川の自転車利用に関する提言書～安全で快適な自転車王国香川を目指して～，2007.8
- 15) 自転車を利用した香川の新しい都市づくりを進める協議会 高松地区委員会：高松地区における自転車を利用した都市づくり計画～人と自転車が笑顔で行き交うサイクル・エコシティ高松～，2008.11
- 16) 自転車を利用した香川の新しい都市づくりを進める協議会 高松地区委員会 安全空間確保部会：高松市中心部における自転車ネットワーク整備方針，2008.11

(2013.xx.xx 受付)

Consideration about the comfortable valuation modeling of the bicycle driveway run by heart rate variability

～Let network examination of the bicycle in Takamatsu central part pass～

Kiyoshi SUZUKI, Takanori SUNAGAWA, Hiroaki TAKEBAYASHI, and Kenji DOI

It is necessary to classify a bicycle run position for advancing safe city planning, and to improve the road space which a bicycle and a pedestrian are safe and tend to use. In order to secure bicycle run space in the road space of the limited central city area, the technique of the ability to evaluate the maintenance effect objective is important. Writers have proposed CHM which evaluates comfortable nature by analysis of heart-rate-variability data objective about the stress felt during a bicycle run in response to such a situation.

However, the quantification of the comfortable nature by CHM must carry out the field survey of between the divisions for evaluation, and has the fault of requiring many time and expenses. then – this research – the comfortable nature at the time of a bicycle run of a "bicycle passing instruction belt", a "road shoulder", etc., etc. – a field – construction of the psychological burden forecasting model for evaluating-like and simply is tried. Furthermore, the possible use to the maintenance priority of a bicycle network preparation plan, selection of a maintenance form, etc. is considered.