

# 走行中のパーソナルモビリティによる危険感

横関 俊也<sup>1</sup>・森 健二<sup>2</sup>・矢野 伸裕<sup>3</sup>・萩田 賢司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 科学警察研究所 交通科学第一研究室（〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-3-1）  
E-mail: yokozeki@nrrips.go.jp

<sup>2</sup>正会員 科学警察研究所 交通科学第一研究室（〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-3-1）  
E-mail: mori@nrrips.go.jp

<sup>3</sup>正会員 科学警察研究所 交通科学第一研究室（〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-3-1）  
E-mail: yano@nrrips.go.jp

<sup>4</sup>正会員 科学警察研究所 交通科学第一研究室（〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-3-1）  
E-mail: hagita@nrrips.go.jp

本研究では、パーソナルモビリティの交通ルールの検討等に資するために、パーソナルモビリティが側方を通過した時の歩行者の危険感を、心拍変動とヒアリングデータの解析により評価した。実験では、パーソナルモビリティと歩行者の離隔（0.3m, 0.6m, 0.9m）、パーソナルモビリティの速度（6km/h, 12km/h）等の条件を変えて、それぞれ状況での危険感を分析することとした。得られた心拍変動データの中央値の比較からは、離隔が狭いほどストレス量が高くなる傾向が見られたが、分散分析からは有意な差は確認できなかった。危険感のヒアリングデータの解析では離隔0.3mでパーソナルモビリティの速度が12km/hという条件が一番厳しい場合のみ、危険を感じる人が有意に多いことがわかった。

**Key Words :** *personal mobility veicle, sense of risk, hert rate variability*

## 1. はじめに

世界各地において、様々な用途のパーソナルモビリティ（以下、PMV）が開発されている。セグウェイに代表される立ち乗り型のもの、座りながら搭乗する車いす型のもの、一輪車タイプのもの等がある。これらのモビリティがすでに公道を走行している国もあるが、日本国内においては法規制による影響等もあり、特区等においてのみ公道での実証実験が行われていた<sup>1)</sup>。しかし、平成 27 年 7 月には各種規程<sup>2)3)</sup>が整備されて、全国の公道での実証実験が可能となった。今後、各地での実証実験をとおして安全性が検証されることで、これらの新しいモビリティが普及していくことも考えられる。こうした実証実験では、実験主催者の責任のもと、速度や走行ルートの制限、保安要員の配置、運転講習会の受講、防具の装着等、十分な安全が確保された上で実施されることが多い。一方で、PMV の公道走行が認められ、日常的に利用されるようになると、安全の確保は利用者のセルフコントロールに依存する部分が大きいため、交通ルール・交通マナー等を取り決めておく必要が出てくる。しかし、国内共通の PMV に関する具体的な交通ルール等はほとんど考えられていない。これらの交通ルール等を決めていく上では、歩行者等の他交通参加者が、

PMV から感じる危険感等をひとつの判断材料とすることができる。

そこで、本研究では、PMV が側方を通過した際の歩行者の危険感を、実験参加者に体験してもらい、心拍変動やヒアリングにより評価することとした。

## 2. 先行研究のレビューと研究の位置づけ

PMV の走行特性・安全性に関する研究は、国内においてもいくつか行われている。菱川ら<sup>4)</sup>は、座位タイプや立位タイプ等の複数のタイプの PMV に対する歩行者の感じるリスクを尋ねるアンケートを実施し、座位タイプの方が立位タイプよりもリスクが小さく認知されるという結果を得ている。また、PMV に対する認知度が高いほどリスク評価が小さくなること、女性は男性よりもリスク評価が大きくなること、29 歳以下より 50 歳以上の方がリスク評価が大きくなること等が示されている。Charitha ら<sup>5)</sup>は、PMV と他の交通手段が混在する環境下での相互作用を分析するために、PMV で歩行者や自転車に追従し、反応時間を計測する実験を行った。その結果、通常の実験状態では歩行者追従と自転車追従で異なる反応時間だったのに対して、急減速の危険な状態では

両者の反応時間に差がないことを示した。中根・金<sup>9)</sup>は PMV に関する挙動実験とアンケート調査から社会受容性・共存条件等に関する分析を行っており、PMV は成人の自転車との共存性が高いこと、歩行者の通行帯とは別にした方がよいこと等を示している。西尾<sup>7)</sup>は模擬歩道 (2m, 3m, 5m) において、歩行者や PMV 運転者が感じる圧迫感やすれ違い時・追い抜かれ時の感じ方について聞き取り調査を行った。その結果、5m の広い空間では安全性を感じる人が多くなったとしている。PMV の公道での危険性については鶴賀<sup>11)</sup>による報告があり、4 年におよぶ実証実験の結果、危険を感じるようなインシデントは発生していないとしている。海外における PMV の事故例については、2005-2008 の 41 件のカルテを調査した Keith<sup>9)</sup>による報告があり、セグウェイ利用中の事故は増加傾向にあるうえに重大な症状が多いとされ、危険性の周知や練習の必要性に言及している。

歩行者等が他の交通手段に感じる危険感・ストレスを評価する研究もいくつか事例がある。清田ら<sup>10)</sup>は、歩行者が歩道上で感じる自転車に対する危険レベルを、観測調査とその映像を見せるインタビュー調査から求め、歩行者の危険度予測モデルを作成した。ここでは、自転車の速度、自転車と歩行者の離隔、歩行者密度等を変数としており、特に速度と離隔が主要な説明要因になっている。足達ら<sup>11)</sup>は、歩行者と自転車接近時に、双方が感じる危険感を計測するために、実際に歩行者と自転車のすれ違いを発生させ、回避行動をとる位置を計測する実験を行った。その結果、危険感認知率には、自転車の速度と自転車と歩行者の離隔が影響し、自転車よりも歩行者が先に危険を感じる傾向があることを示した。これらの危険感やストレスを、実験参加者からの聞き取りではなく、心拍変動という客観的な計測値から求める研究も行われている。斎藤・清田<sup>12)</sup>は、歩行者が自動車や自転車とすれ違う時に感じるストレスを心拍の変動から計測した。その結果、あらかじめ自動車とすれ違うことを予告されていた場合は心拍に影響が見られなかったが、予告していない場合は、速度と離隔の影響を受けて交感神経系の活動が強まったことを示した。また、自転車とのすれ違いでは、速度よりも離隔の影響が大きくなるとしている。渋谷・金<sup>13)</sup>は、歩行者と自転車混在時における歩行者のストレスを心拍変動から解析した。TSV という指標を用いてストレス量を計算したところ、自転車とのすれ違いの条件では、すれ違う自転車の台数と比例してストレス量が増加すること、自転車に追い越される条件では、追い越される台数が複数であっても 1 台の場合とストレス量が同じであること等が示されていた。

以上のような既存研究があるが、PMV とすれ違う歩行者がどの程度のストレスを受けるかを計測した研究は十分になされていない。歩行者が PMV から受けるスト

レスが明確になることで、(各地での実証実験と同様に) PMV が歩道を走行する場合における適切な速度と必要な離隔 (歩道幅員) を検討する上での貴重な知見とすることができる。そこで、本研究では、歩行者役の実験参加者に心拍計を装着し、PMV と各種条件下 (速度・離隔) ですれ違う等の実験を行った。そこから得られた心拍データと、実験参加者へのヒアリングから、歩行者のストレスや危険感を分析し、危険を感じない離隔と速度について考察することとした。

### 3. 方法

#### 3.1 実験概要

本研究では、歩行者と PMV がすれ違うときに感じるストレスや危険感を分析するために、図-1 に示すような模擬歩道 (全長約 30m) において歩行者と PMV をすれかわせる実験を行った。実験参加者は、主に歩行者として模擬歩道の左端 (テープで左端幅 0.6m に目印を設置) を歩行する。実験条件として、歩行者と PMV の離隔 (0.3m, 0.6m, 0.9m)、PMV の速度 (6km/h, 12km/h) を設定し、パターン A~F を実施することにした。パターン O は歩行者同士ですれ違うもので、その後の危険感のヒアリング調査時の参考としてもらうために実験の最初に実施し、パターン P・Q は実験参加者に PMV 搭乗者となってもらうものである。実験手順は、表-2 に示すとおり、パターン A~F を 3 回実施し、3 回目は PMV 搭乗者を経験してからの試行としている。パターン A~F は実施順による影響を考慮して、実験参加者ごとにランダムな順番とした。実験参加者には、心拍データを計測するた

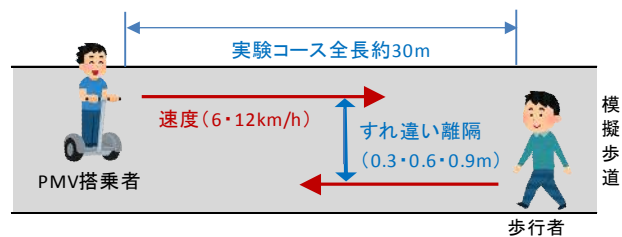


図-1 実験概況図

表-1 実験条件

パターン	実験参加者	対向者	離隔(m)	PMV速度(km/h)	評価対象
A	歩行者	PMV	0.9	12	○
B	歩行者	PMV	0.9	6	○
C	歩行者	PMV	0.6	12	○
D	歩行者	PMV	0.6	6	○
E	歩行者	PMV	0.3	12	○
F	歩行者	PMV	0.3	6	○
O	歩行者	歩行者	0.3	—	対象外
P	PMV	歩行者	0.9	9	対象外
Q	PMV	歩行者	0.9	6	対象外

表-2 実験手順

手順	内容
1	パターンO
2	1巡目(パターンA~Fをランダムの順番で)
3	2巡目(パターンA~Fをランダムの順番で)
4	PMV搭乗練習(15分程度)
5	PMV搭乗(パターンP・Qをランダムの順番で)
6	3巡目(パターンA~Fをランダムの順番で)

※1~3巡目の各パターン終了時にヒアリングを実施



図-1 実験状況(離隔0.6m)



図-2 使用したパーソナルモビリティ (AirWheel S3)

表-3 パーソナルモビリティの諸元

高さ	1280mm	重量	22.4kg
幅	613mm	最高速度	18km/h
長さ	587mm		12km/hでアラーム

めの心拍計を装着し、各パターン終了後に調査員が実験参加者に聞き取る形式で危険感のヒアリングを行った。今回の実験参加者は20-30歳代の成人男性7名である。

### 3.2 使用するパーソナルモビリティ

PMV には冒頭に述べたとおり様々なタイプが存在し、今後も新しいタイプが開発されていくと考えられる。しかし、現存の製品を全てを実験対象とすることは難しい。そこで本研究では、既に市販されており、多くの社会実験でも使用されてきたセグウェイと同様の立ち乗り型のPMVである「Airwheel S3」を採用した(図-2参照)。本装置の諸元は表-3に示すとおりである。



図-3 心拍計とその装着方法

表-4 心拍変動にかかわる用語・指標

R波	心電図における鋭いピーク
RRI	R波のピークの間隔. 各種要因により変動
LF	血圧に由来する低周波変動. 交感神経及び副交感神経が活性化していることを示す指標. 今回は0.04-0.15Hzの領域としている
HF	呼吸に由来する高周波変動. 副交感神経が活性化していることを示す指標. 今回は0.15-0.40Hzの領域としている
LF/HF	HFが相対的に高いと副交感神経が優位でリラックス状態. HFが相対的に低いと交感神経が優位で緊張状態にあると推定される

### 3.3 心拍変動データの評価方法

実験参加者の心拍変動データは、図-3に示す心拍計(GMS社製 AC-301A)で計測し、実験終了後に心拍計に記録されているデータを読み出すかたちで取得した。心拍変動からストレス量を算出するには様々な指標が用いられるが、今回は心拍のR波間隔(R-R Interval:RRI)の変動から高周波(High Frequency:HF)と低周波(Low Frequency:LF)を読み取り、ストレス量を解析することとした。指標等の意味は表-4に示すとおりであり、データの解析には時系列データ解析ソフトウェアであるMemCalc/winを用いた。ソフトウェアでの解析で得られたLFとHFからLF/HFを算出することで、PMV等から受けるストレス量を推計した(LF/HFが大きいほうがストレス量が多い傾向)。しかし、心拍変動データであるLFやHFは、個人や環境により測定値に大きな差が発生する。こうした影響を取り除くために、それぞれの試行パターンについて開始前30秒と開始後30秒間(歩行者とPMVのすれ違いは開始後10~15秒後程度で発生)の

LF/HF を算出し、その前後比をもって、すれ違い時のストレス量を推計することとした。開始後の LF/HF が、開始前の LF/HF よりも高い場合は、LF/HF 前後比は 1.0 よりも高くなり、すれ違いによりストレス量が増加していると推定される。

### 3.4 危険感のヒアリング

本研究では、心拍変動データによるストレス量の計測の他にヒアリングでの危険感の聞き取りも実施した。ヒアリングはひとつの試行パターンが終了するごとに、調査員が実験参加者に聞き取る形式で行われ、図-4 に示す 4 段階形式で、PMV とのすれ違い時に感じた危険感を評価してもらった。

低いことが分かる。表-7は、図-6のデータから実験への慣れない1巡目を除いた2巡目と3巡目について、実験参加者ごとの全パターンのLF/HF前後比平均値を算出し、分散分析を実施したものである（1元・参加者内・欠測と外れ値があった実験参加者1名分のデータを除外）。ここでは、 $p<0.05$ の有意な差はみられなかったが、 $p<0.10$ となり「有意な傾向」がみられるという結果になった。



図-4 ヒアリング調査票

## 4. 分析結果

### 4.1 心拍変動データの分析

図-5は、試行6パターンごとに、7人×3巡目分のLF/HF前後比を対数変換したものを箱ひげ図にまとめたものである（123データ・欠測3データ）。ひげの上段は最高値、箱の上段は75パーセンタイル値、箱の途中の棒は中央値、箱の下段は25パーセンタイル値、ひげの下段は最低値（●で示す外れ値がある場合は、25パーセンタイル値から箱の幅×1.5の位置）となっている。LF/HF前後比を対数変換した理由としては、開始前のLF/HFの方が高い（開始前のストレス量大きい）場合、LH/HF前後比は0~1.0になり、0~1.0の間に偏在が発生すると考えられるためである。図-5では、正の場合はすれ違いによりストレス量が増加し、負の場合は開始前のストレス量の方が高い傾向にあることを示している。この図からは、PMVの速度が遅い（6km/h）パターンB・D・Fが、速度のはやい（12km/h）パターンA・C・EよりもLH/HF前後比の中央値が高くなっていることが分かる。また、離隔の狭い（0.3m）パターンE・FのLH/HF前後比の中央値は、離隔の広い（0.9m）パターンA・B及び、（0.6m）パターンC・Dよりも高くなっていることも伺える。次に、速度と離隔での分散分析（2元・参加者内・欠測と外れ値があった実験参加者1名分のデータを除外）を実施した。1名の実験参加者は同じ実験パターンを3回経験しているが、ここでは3回の平均値を用いて解析している。その結果、表-6に示すように離隔では条件の違いによる有意差はみられなかったが、速度については $p<0.10$ になり「有意な傾向」がみられた。離隔の分散分析において有意な差とならなかったのは、サンプル数が少なかったことも要因のひとつとして考えられる。

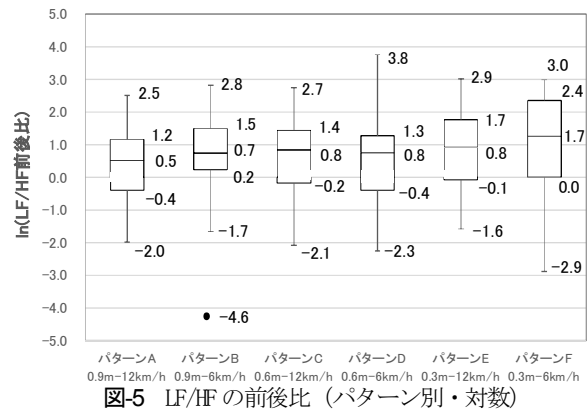


図-5 LF/HFの前後比（パターン別・対数）

表-6 LF/HFの前後比の分散分析（速度と離隔・対数）

変動要因	平方和	自由度	分散	F値	p
速度	2.002	1	2.002	2.869	+
離隔	0.942	2	0.471	0.675	0.517
交互作用	0.774	2	0.387	0.555	0.580
残差	20.932	30	0.698		
合計	24.650	35			

+ $p<0.10$  \* $p<0.05$  \*\* $p<0.01$

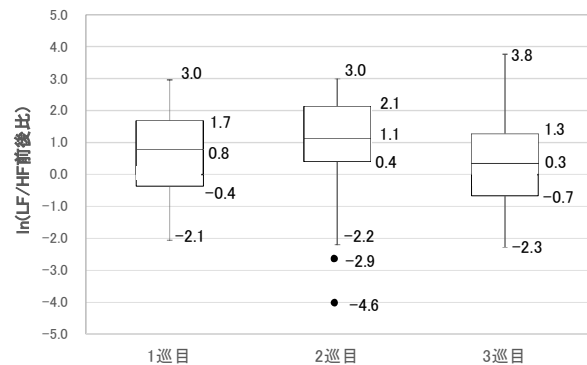


図-6 LF/HFの前後比（巡目別・対数）

表-7 LF/HFの前後比の分散分析（2, 3巡目・対数）

変動要因	平方和	自由度	分散	F値	p
巡目	1.9023	1	1.902	3.451	+
残差	5.5119	10	0.551		
合計	7.4141	11			

+ $p<0.10$  \* $p<0.05$  \*\* $p<0.01$

図-6は図-5と同じデータを巡目別に箱ひげ図に集計したものである。この図からは、LF/HF前後比の3巡目の中央値が0.3であり、1巡目の0.8、2巡目の1.1と比較して

表-8 危険感のヒアリングの結果

	パターンA 0.9m-12km/h	パターンB 0.9m-8km/h	パターンC 0.6m-12km/h	パターンD 0.6m-8km/h	パターンE 0.3m-12km/h	パターンF 0.3m-8km/h
1巡目	1.0	1.0	1.1	1.0	1.7	1.1
2巡目	1.0	1.0	1.3	1.0	1.6	1.1
3巡目	1.0	1.0	1.1	1.0	1.7	1.1
平均	1.0	1.0	1.2	1.0	1.7	1.1

表-9 危険感のヒアリングの分散分析表（速度と離隔・対数）

変動要因	平方和	自由度	分散	F 値	p
速度	0.595	1	0.595	7.584	**
離隔	1.254	2	0.627	7.989	**
交互作用	0.492	2	0.246	3.135	0.056
残差	2.825	36	0.078		
合計	5.167	41			

+ $p < .10$  \* $p < .05$  \*\* $p < .01$ .

そのため、2巡目と3巡目の間で実施したPMVの搭乗経験等がストレス量の低下に影響しているとも考えられる。

#### 4.2 危険感のヒアリングの分析

危険感のヒアリングを単純集計した結果は表-8のようになり、離隔が最も狭く、PMVの速度がはやい（0.3m・12km/h）パターンEで危険感を感じる人がいるという結果になった。これを、心拍変動データの分析と同様に、速度と離隔での分散分析（2元・参加者内）を実施したところ、表-9のとおり $p < .01$ であり、速度と離隔の条件により危険感に有意な差が発生するという結果となった。また、巡目による分散分析（1元・参加者内）には有意な差はみられなかった。

#### 5. 考察

心拍変動データであるLF/HF前後比の中央値の比較では、離隔が狭いとストレス量が多い傾向がみられたが、分散分析の結果からは有意な差は見られなかった。また、PMVの速度が遅いと歩行者のストレス量が多くなる傾向があったが、こちらについては $p < .10$ で「有意な傾向」がみられた。一般的にPMVの速度がはやい方がストレス量が多いと考えられるが、心拍変動は比較的長期間の刺激に対するストレス量を計測することに適しているため、歩行者とPMVのすれ違いという短時間の刺激は計測が困難であったと考えられる（PMVの速度が遅い方が長時間の刺激となり、ストレス量が計測しやすい）。巡目別集計の中央値の比較からは、PMVの搭乗を経験している3巡目のストレス量が低くなる傾向が確認され、分散分析でも「有意な傾向」が見られた。以上のように、心拍変動データによる分散分析において有意水準5%以内の有意差が確認できなかった理由としては、サンプル数が少なかったことに加え、心拍変動データが実験参加者の心境や天候等に左右される不安定な指標で

あることが考えられる。

一方で、ヒアリングによる危険感の聞き取りでは、離隔が最も狭く（0.3m）、PMVの速度が高い（12km/h）条件において、ようやく少しの危険を感じるという結果であった。今回のPMVの速度は、高い条件（12km/h）であっても自転車程度の速度であるため、それほど危険を感じなかったと推測される。本実験でのヒアリングによる「1. 危険を感じない」というレベルを維持するという観点で評価すると、PMVが6km/hで走行するのであれば2m（歩行者0.6m、離隔0.3m、PMV0.6m、側方余裕0.6m）程度、12km/hであれば（歩行者0.6m、離隔0.6m、PMV0.6m、側方余裕0.6m）2.5m程度の歩道幅員で、歩行者が危険を感じないPMVの走行が可能だと考察された。

心拍変動データによる分析と危険感のヒアリング分析において、巡目による影響が異なった理由としては、ヒアリングでの4段階評価では細かな心理的な変化を拾いきれなかったことが考えられる。

#### 6. まとめ

本研究では、歩行者がすれ違うPMVから感じる危険感を心拍変動とヒアリングから計測した。離隔とPMV速度の条件を変更して実験を行った結果、PMVによる危険感には、0.3mまで近づいた状態でPMVが12km/hの速度を出すことで、ようやくわずかな危険を感じるようになるといった結果であった。また、多くの人にPMV搭乗を経験させてPMVに慣れさせることでストレス量を軽減させることも考えられる。以上より、歩行者と立ち乗り型PMVが、現況の歩道上で共存できる可能性が見えてきた。しかし、今回の実験ではサンプル数が少なかったこともあり、心拍変動データの分散分析では、 $p < .05$ の有意な差がみられなかった。そのため、実験参加者数を増やして実験すること、PMVの台数を増やす等の短時間の刺激を正確に計測する実験方法を考えることが今後の課題として挙げられる。また、若年層の男性7名で実験を行っているため、より危険を感じやすい女性や高齢者での実験、横断勾配や障害物の多い実際の歩道での実験を踏まえて、慎重に結論を出す必要がある。

謝辞：本研究の実施は科学研究費補助金・若手研究（B）17K18382の補助を受けている。

#### 参考文献

- 1) 鶴賀孝廣：モビリティロボットの公道実証実験—特区制度の利用から全国展開へ—, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.8, pp.564-567, 2015.
- 2) 国土交通省：搭乗型移動支援ロボット認定申請の手引き, 2017.
- 3) 警察庁：「搭乗型移動支援ロボットの公道実証実

- 験」に係る取扱いについて, 2017.
- 4) 菱川貴之, 井料美帆, 長谷川悠: パーソナルモビリティの導入に対する歩行者のリスク認知に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.57, CD-ROM, 2018.
  - 5) ディアス チャリタ, 井料美帆, 霜野 慧亮, 中野 公彦: 混合交通下におけるセグウェイ利用者挙動の実験的分析, 生産研究, Vol.69, No.2, p.81-85, 2017.
  - 6) 中根優仁, 金利昭: セグウェイの特性分析と共存条件に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.48, CD-ROM, 2013.
  - 7) 鶴賀孝廣: モビリティロボットの公道実証実験—特区制度の利用から全国展開へ—, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.8, p.5664-567, 2015.
  - 8) 西尾新平: セグウェイ導入に夜走行環境への影響と課題, 日本大学理工学部社会交通工学科卒業論文概要集, 2008.
  - 9) Keith Boniface, Mary Pat McKay, Raymond Lucas, Alison Shaffer, Neal Sikka : Serious Injuries Related to the Segway Personal Transporter: A Case Series, *Annals of Emergency Medicine*, Vol.57, Issue 4, pp.370–374, 2011.
  - 10) 清田勝, 外井哲志, 梶田佳孝, 松岡淳: 歩行者と自転車の共用空間における歩行者の危険度評価, *交通工学*, Vol.41, No.1, p.75-83, 2006.
  - 11) 足達健夫, 吉村正浩, 萩原亨, 内田賢悦, 加賀屋誠一: 歩行者・自転車双方の立場から見た歩道空間における危険感知領域に関する基礎的研究, *土木計画学・研究論文集*, Vol.23, No.2, p.567-573, 2006.
  - 12) 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, *佐賀大学理工学部集報*, Vol.34, No.2, p.1-7, 2005.
  - 13) 渋谷大地, 金利昭: ストレス計測手法を用いた歩行者・自転車・自動車混在時の走行環境評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.48, CD-ROM, 2013.
- (2019.104 受付)

THE TENDENCY OF BICYCLE COMPLIANCE IN THE PAST 10 YEARS  
ESTIMATED FROM THE BICYCLE ACCIDENT IN CHIBA PREFECTURE

Toshiya YOKOZEKI, Kenji MORI, Nobuhiro YANO, Kenji HAGITA