

信号交差点における 自転車の発進挙動に対する縦断勾配の影響分析

青山 恵里¹・小早川 悟²・稲垣 具志³・森田 緯之⁴・佐田 達典⁵・岡本 直樹⁶

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:cser15001@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:kobayakawa.satoru@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学助教 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:inagaki.tomoyuki@nihon-u.ac.jp

⁴フェロー会員 日本大学客員教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:hi-morita@i-transportlab.jp

⁵正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:sada.tatsunori@nihon-u.ac.jp

⁶学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail:csna15003@g.nihon-u.ac.jp

本研究は増加が見込まれる自転車交通について、自転車の車道通行を考慮した道路空間のあり方を交通容量の観点から検討するために、自転車の発進挙動に縦断勾配が与える影響の分析を行った。十分な自転車交通量があり、走行方法が均一化された状況における自転車交通流の実態観測の結果から、交差点流入部および発進後の縦断勾配と車頭時間や飽和交通流率、発進遅れ等との関係を考察した。

その結果、流入部の縦断勾配が自転車の飽和交通流率を低下させること、車頭時間のばらつきを大きくすることがわかった。しかしながら、既存研究において明らかにされている自動車への影響と比べると、飽和交通流率の低下の割合は小さい結果となった。また、発進後の交差点内の縦断勾配は発進遅れの及ぶ台数を低下させる可能性が示された。

Key Words : bicycle, discharging behavior, saturation flow rate, longitudinal grade, signalized intersection

1. はじめに

自転車は身近な交通手段であり、環境配慮や健康志向から利用ニーズが高まっていることに加え、今後は観光交通としての活用や、シェアサイクルの普及等によってさらに需要の増大が見込まれる。平成23年に警察庁から自転車は車道通行を原則とする通達¹⁾が出され、平成24年には国土交通省・警察庁が発出したガイドライン²⁾において自転車交通の需要拡大に対応した適正な走行空間の創出に向けて、自転車の車道通行を基本とした整備について示されている。そのため、自転車を車道において適正に通行させるために自動車だけでなく自転車の走行特性を考慮した道路設計が必要となる。

自転車と自動車を車道上で適切に混在させるためにはそれぞれの走行特性と相互作用について、安全性と円滑

性の両側面からの評価が必要である。このような状況の中で、自動車の円滑性の評価のひとつとして用いられる飽和交通流率については、基本値やその補正率が示されている³⁾。一方で、自転車については走行速度や占有空間といった観点から知見の整理がされているものの、『自転車通行を考慮した交差点設計の手引』⁴⁾において飽和交通流率の調査例が示されているのにとどまっており、詳細な影響要因の検討が不十分である。つまり、自動車に関しては飽和交通流率やそれに与える道路幾何構造の影響が考慮され、円滑性の視点から交差点設計がされているものの、自転車の飽和交通流率への影響は考慮できない状況にある。特に、『自転車道等の設計基準解説』⁵⁾において「自転車道等の設計にあたって、実際に最も問題となるのは縦断勾配である」とされているが、縦断勾配が自転車の飽和交通流率に与える影響は明らか

になっていない。

そこで本研究では今後増加が見込まれる自転車を車道において自動車と混在させるときに、交通容量の観点からの走行環境整備を念頭に、実態観測で得られた自転車の発進挙動から、縦断勾配が自転車交通流に与える影響を交通容量の観点から検討する。

2. 既往研究のレビュー

道路の縦断勾配が交通容量に与える影響を取り扱った研究は、自動車交通を対象としたものしか見受けられない。吉岡ら⁹⁾は自動車飽和交通流率に与える縦断勾配の影響について、大型車と関連させて縦断勾配の影響を実態観測から明らかにしている。この結果から、わが国の飽和交通流率の算定の際の縦断勾配による補正率が検討されている。

自転車交通流の交通容量に関してわが国では筆者ら⁷⁾が分析したもののみであり、飽和交通流率の基本特性について考察しているものの、飽和交通流率の影響要因に関する検討は不十分である。自転車と縦断勾配の関係については稲垣ら⁸⁾による自転車の回遊性への影響を取り扱った研究や、山中ら⁹⁾による坂路における自転車走行抑制デバイスに関する研究、亀谷ら¹⁰⁾による高齢者に着目した発進時と登坂時の走行特性に関する研究があり、自転車と歩行者が交錯する状況や自転車を利用する高齢者に対して自転車を適正に通行させるための知見が得られている。

欧米では自転車の交通容量に関する研究が盛んに行われており、Raksuntomら¹¹⁾は、自転車専用通行帯が整備された環境における飽和交通流率、発進遅れ、交通容量の分析を行っている。自転車と勾配の関係については、自転車の走行環境に関して¹²⁾、日本でも示されている⁹⁾単路部における最急縦断勾配や勾配が続く長さについて検討されているが、欧米においても自転車交通容量に与える影響に関する研究は見受けられない。

このように自転車と縦断勾配の影響について幅広く議論されているが、交通容量のような自転車交通流に与える影響は明らかではない。今後、自転車の車道通行を適正に処理するために、国内における実態観測を行い、自転車の発進挙動から縦断勾配が自転車の交通容量に与える影響を明らかにする必要がある。

3. 分析方法

(1) 自転車の発進挙動の観測データ

本研究では、信号交差点における自転車の発進挙動に

関する分析を目的としているため、分析には十分な自転車交通量があり、走行方法が均一化された状況の調査データを使用する。調査は参加登録した約2,000台の自転車が東京都内の指定されたコースをサイクリングするイベントの開催時に行った。調査地点の概要を表-1に示す。なお、すべての交差点において自転車専用通行帯および、自転車横断帯は整備されていない。イベント開催時には、交通法規を遵守すること、スピードを控えることといった走行方法が事前に提示されていたため、運転者属性による挙動特性に大きなばらつきはないと考えられる。そのため、信号待ちの際は1列に並び、発進時にも並走や追い越しがほとんど見られなかった。また、分析対象の自転車はスポーツタイプが多くの割合を占めていた。

歩道上に設置したビデオカメラにより交差点進入基準線（横断歩道の上流側側端）の自転車後輪通過時刻、信号切り替わり時刻を取得した。取得されたデータより、各交差点における車頭時間を求めた。車頭時間は基準線を自転車後輪が通過した時刻からサイクルごとに取得し、1台目については青開始から基準線通過までの時間が車頭時間でないことに加え、信号待ち時の停止位置が様々であったことから分析から除外している。

筆者らは既往研究⁷⁾において車頭時間分布で検出される外れ値は周辺状況の影響を受けて発生したものであり、飽和交通流率の算出や平均車頭時間の比較の際にはそのようなばらつきを取り除いた状況で分析するために外れ値を分析対象外とした。しかし、外れ値は車線幅員等の道路幾何構造や、他の車両の存在といった周囲の状況の影響を受けることで遅れが生じ、車頭時間が長くなると考え、本研究では縦断勾配の影響を検討するために検出された外れ値を含めて分析を行う。

表-1 調査地点の概要

交差点名	車線数 車線構成	車線幅員 [m]	路肩幅員 [m]
東陽6丁目	3 ←↑ ↑ →	3.00 3.25 2.75	0.5
住吉2丁目	3 ←↑ ↑ →	3.00 3.00 2.75	0.5
業平1丁目	2 ←↑ →	2.75 2.50	0.6
横川1丁目	2 ←↑ →	2.75 3.00	0.5
江東橋	1 ←↔→	4.80	なし
豊住公園前	2 ←↑ →	2.75 2.60	0.4

(2) 観測データ

対象交差点の縦断勾配を取得するにあたり、モバイルマッピングシステム (MMS : Mobile Mapping System) Trimble MX8を用いて計測を行った。MMSではデジタルカメラ、レーザスキャナ、慣性計測装置、GNSS装置、走行距離計等を搭載した移動計測車両を用いて、走行しながら道路空間の3次元点群データを計測することができる。得られる点群データには位置情報 (x,y,z)、色情報 (RGB)、反射強度値が含まれている。縦断勾配は位置情報を使用して算出した。算出位置は自転車の走行が見込まれる車道の左端付近とし、縦断方向に1m間隔で位置情報を抽出した。

図-1に示す縦断勾配の取得区間において、それぞれの交差点で取得した位置情報をプロットしたものを図-2に示す。ここで、横軸が水平位置、縦軸が垂直位置を示し、停止線の水平位置および垂直位置をそれぞれ0mとしている。表-2に各取得区間において算出した縦断勾配を示す。一般的に交差点流入部の縦断勾配は停止線から50mで取得するため、本研究においても流入部の縦断勾配は停止線から上流側50mで取得している(表-2①)。また、発進後の縦断勾配の影響についても検討するため、流入部の停止線から流出部側へ50mの区間で縦断勾配を取得し、これを発進後の縦断勾配とする(表-2③)。しかし

ながら、図-2に示す江東橋のように交差点内が凸型である場合と、東陽6丁目のように上り勾配になっている場合があるため、発進後の縦断勾配は表-2③に示す発進後50m勾配であると、江東橋のような交差点内の縦断勾配は上り勾配の傾きが適切に表現されない。そのため、流入部の停止線から流出部側へ50mの間で各点に対して移動平均を算出し、その中で最大となったものをその交差点の発進後最高勾配とする(表-2④)。さらに、交差点内部の縦断勾配を把握するために、流入部の停止線から流出部の停止線までの間についても同様に移動平均を算

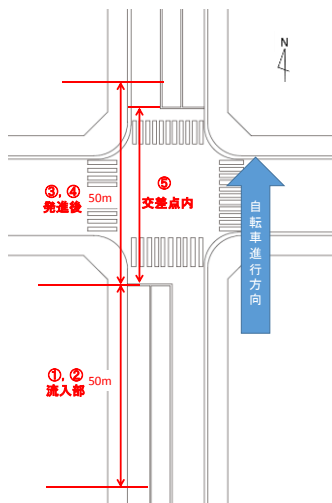


図-1 縦断勾配取得区間

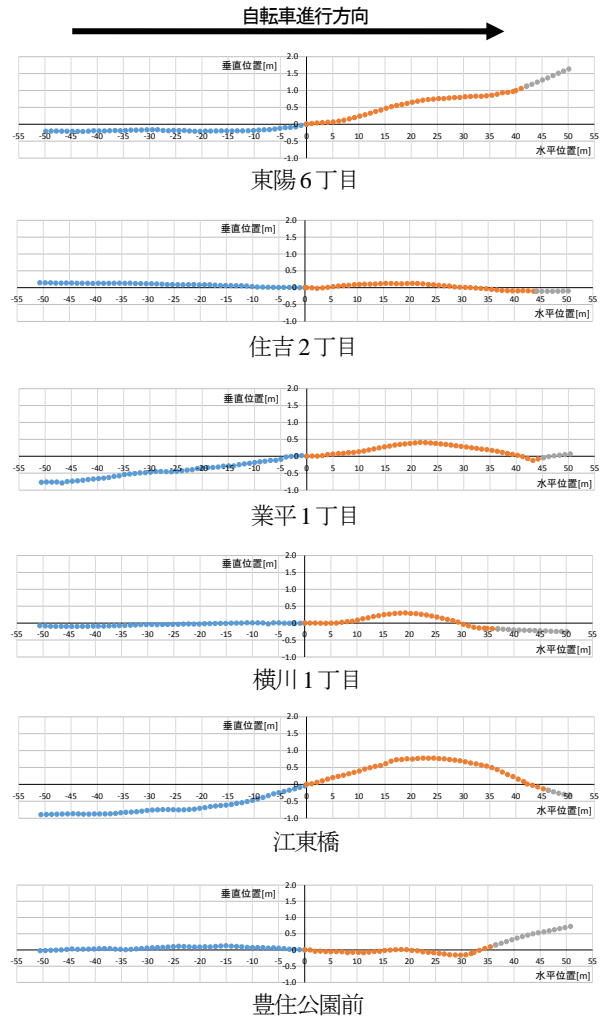


図-2 縦断勾配の概形

表-2 各取得区間における縦断勾配

交差点名	①流入部50m勾配[%]	②流入部最高勾配[%]	③発進後50m勾配[%]	④発進後最高勾配[%]	⑤交差点内最高勾配[%]
東陽6丁目	0.42	2.37	3.25	6.46	4.60
住吉2丁目	-0.29	-0.78	-0.20	1.58	1.58
業平1丁目	1.53	2.73	0.13	2.93	2.93
横川1丁目	0.17	0.58	-0.50	3.20	3.20
江東橋	1.79	4.61	-0.62	4.80	4.80
豊住公園前	0.04	1.09	1.38	5.56	1.51

出し、交差点内最高勾配を算出した(表-2⑤)。流入部の縦断勾配についても流出部の縦断勾配と同様に考えられるため、流入部最高勾配を算出した(表-2②)。なお、住吉2丁目のように下り勾配である場合は、移動平均の最小のものを最大勾配としている。

③ 分析指標

縦断勾配の影響を検討するために、車頭時間の平均値等、縦断勾配が影響を与えると考えられる指標を表-3に示す。各指標の意味、算出方法については以下の通りである。

- ①車頭時間平均値：通過順番2台目以降のすべての車頭時間を対象に平均を算出する。
- ②車頭時間標準偏差：通過順番2台目以降のすべての車頭時間の標準偏差を算出する。
- ③飽和交通流率：サイクルごとの通過順番と累加車頭時間の関係を、通過順番を横軸、青開始からの経過時間を縦軸にとり、プロットされた点の回帰直線を求め、回帰式の係数の逆数として飽和交通流率を求める。自転車の発進遅れの影響を判断するために、飽和交通流率を「2台目以降」、「3台目以降」の順に、「10台目以降」までを分析対象としてそれぞれ算出し、2台目以降から10台目以降までの飽和交通流率を図-3に示す。図中の○印以降は飽和交通流率の変動が小さくなっており、発進遅れが及んでいないと考えられるため、○印の前までが発進遅れが及ぶ台数とし、各交差点の飽和交通流率は○印の分析対象のものとする。
- ④発進遅れが及ぶ台数：③の飽和交通流率の算出で求め

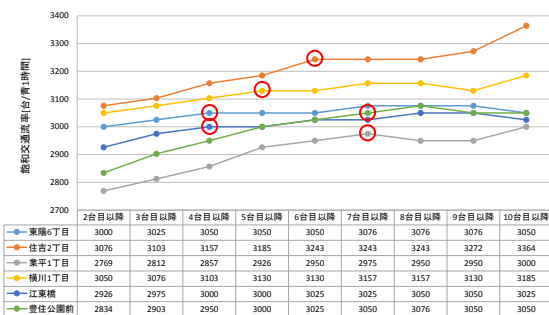


図-3 各交差点における飽和交通流率

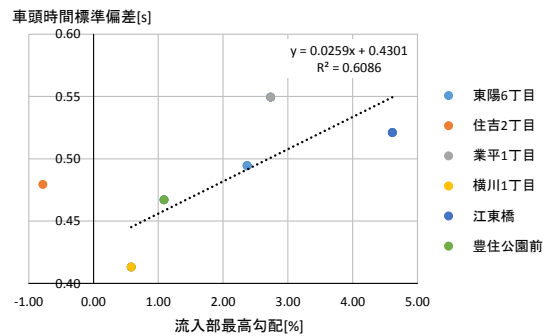
た発進遅れが及ぶ台数とする。

- ⑤発進遅れ無し車頭時間平均値：④の発進遅れが及ぶ台数までの車頭時間を除いて平均を算出する。

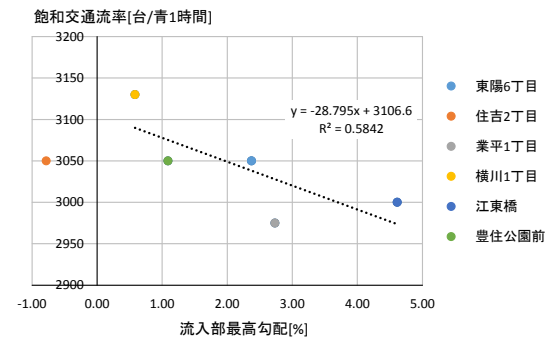
4. 縦断勾配の影響の検討

吉岡ら⁹⁾の研究では縦断勾配と自動車の飽和交通流率との関係を相関関係でみている。本研究では、飽和交通流率だけではなく、車頭時間の平均値やばらつき等の観点からも影響を検討する。

前章において取得した流入部最高勾配(表-2②)を横軸に、表-3に示す分析項目を縦軸に表現し、上り勾配にプロットされた点の回帰直線を求めた。その結果、「車頭時間標準偏差」と「飽和交通流率」の2つにそれぞれ相関が見られた。図-4の(a)からは、上り勾配が大きくなると車頭時間のばらつきが大きくなる傾向にあることが



(a) 車頭時間標準偏差—流入部最高勾配



(b) 飽和交通流率—流入部最高勾配

図-4 流入部縦断勾配と発進挙動の関係

表-3 自転車発進挙動に関する各種指標

交差点名	①車頭時間平均値[s]	②車頭時間標準偏差[s]	③飽和交通流率[台/青1時間]	④発進遅れが及ぶ台数[台]	⑤発進遅れ無し車頭時間平均値[s]
東陽6丁目	1.29	0.49	3050	3	1.22
住吉2丁目	1.25	0.48	3050	5	1.20
業平1丁目	1.37	0.55	2975	6	1.23
横川1丁目	1.22	0.41	3130	4	1.15
江東橋	1.31	0.52	3000	3	1.23
豊住公園前	1.31	0.47	3050	6	1.21

わかる。図-4の(b)からは上り勾配が大きくなると飽和交通流率の値は低下していることがわかる。ここで、図中の回帰式の係数は上り勾配1%あたりの飽和交通流率の低減を示す。吉岡ら⁹⁾は大型車混入率0%の状況において、上り勾配1%あたり0.029[台/秒]だけ低減するとしている。図-4の(b)で得られた結果は上り勾配1%あたり28.795[台/青1時間]低減するという結果であり、これを1秒あたりに換算すると0.008[台/秒]となり、自転車は自動車よりも流入部の縦断勾配の影響は小さくなる可能性が示唆された。

次に発進後の縦断勾配に着目し、同様に発進後最高勾配(表-2④)と表-3に示す各種指標との関係を回帰直線を求めることにより検討したが、いずれの分析項目においても関係はみられなかった。そこで、発進後の縦断勾配ではなく、交差点内最高勾配(表-2⑤)と発進挙動の関係を検討した。その結果、図-5に示す「発進遅れが及ぶ台数」との間に相関が見られた。交差点内の縦断勾配が大きくなると発進遅れが及ぶ台数が少なくなっていることから、自転車運転者が視覚的に交差点内の傾きが大きいと認識すると、自転車運転者は発進時に強く踏み込み、発進遅れの及ぶ台数が少なくなった可能性があると考えられる。

亀谷ら¹⁰⁾は坂道の手前10mに助走区間を用いて自転車のハンドルのぶれについて、若者よりも高齢者の方がぶれは大きくなるとしている。このことから、本研究はスポーツタイプの自転車が多く、比較的自転車に慣れた人を対象とした分析結果であるため、シティサイクルや一般の自転車利用者の発進挙動を対象とすると、より影響が大きくなることが予想される。

5. まとめと今後の課題

本研究では、縦断勾配が自転車交通流に与える影響を交通容量の観点から検討するために、十分な自転車交通量があり、走行方法が均一化された状況において実態観測された自転車交通流から、自転車の発進挙動に対する

縦断勾配の影響を分析した。その結果、交差点流入部の上り勾配は飽和交通流率や車頭時間のばらつきに影響を与えること、交差点内部の上り勾配は発進遅れが及ぶ台数に影響を与える可能性が示された。これより、自転車の通行空間を整備する際には縦断勾配が重要な検討事項となると考えられるが、自動車の飽和交通流率に与える影響よりも、影響の度合いは小さい傾向がみられた。しかしながら、比較している研究対象の交差点流入部の最大縦断勾配は5.4%であり、本研究よりも縦断勾配の範囲が広く、また、分析対象が約40年過去のものであり、現在では自動車性能が大きく向上していることも考えられる。さらに、本研究の調査対象の自転車は、スポーツタイプが多く、自転車走行に慣れている人が多いため、一般の自転車を対象とすると縦断勾配の影響をより受けやすくなる可能性が高い。そのため、改めて自動車の飽和交通流率と縦断勾配の関係について把握すること、自転車と自動車を同じ交差点で調査、比較し交差点部の交通容量に縦断勾配が与える影響を分析すること、一般の自転車利用者の挙動の把握することが必要である。

また、本研究の結果は限られた交差点での傾向であるため、今後さらに多くの調査、分析結果から検討することや、縦断勾配だけでなく、車線幅員や周辺の車両の影響等を併せて検討することが求められる。さらに、欧米では自転車の通行空間としての横断勾配の考え方が示されている¹²⁾ほか、Raksuntornら¹¹⁾が自転車の側方間隔に注目し、縁石や隣接レーンとの側方距離と自転車飽和交通流率との関係について検討している。このように道路空間の中で考慮すべき事項が多数あるため、今回MMSで取得したデータでは縦断勾配のみに着目したが、データ取得方法を活かした横断勾配や縁石といった道路空間の詳細な要素の影響の検討をしていくことが求められる。

謝辞: 縦断勾配のデータ取得にあたりご協力頂いた株式会社ニコン・トリンプルの塩崎周様、岩上弘明様にここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 警察庁：良好な自転車交通秩序の実現のための総合対策の推進について，2011。
- 2) 国土交通省：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン，2012。
- 3) 社団法人交通工学研究会：平面交差の計画と設計，pp.88-95, 2009。
- 4) 社団法人交通工学研究会：自転車通行を考慮した交差点設計の手引，pp.12-13, 2015。
- 5) 社団法人日本道路協会：自転車道等の設計基準解説，p.44, 1974。
- 6) 吉岡昭雄，岩城勝正：平面交差の飽和交通流量，土木技術資料，Vol.12, No.3, pp.34-41, 1979。
- 7) 青山恵里，稲垣具志，小早川悟，森田緯之：信号交

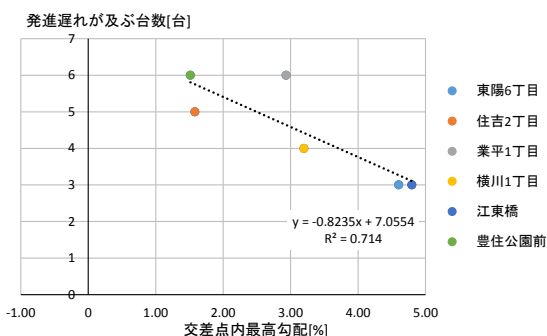


図-5 交差点内縦断勾配と発進遅れが及ぶ台数の関係

- 差点における自転車の飽和交通流率の基礎分析, 交通工学論文集, Vol.2, No.2, pp.A_92-A_99, 2016.
- 8) 稲垣具志, 三村泰広, 安藤良輔: 軌跡データに基づく走行挙動比較による電動アシスト自転車の回遊特性分析, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, pp.I_683-I_688, 2011.
- 9) 山中英生, 松原淳, 福井康朗: 坂路における自転車の走行抑制デバイスの実態と効果, 交通工学研究発表会論文集, 33rd, pp.483-486, 2013.
- 10) 亀谷友紀, 山中英生, 柿原健祐, 横田周典: 坂道と発進時における高齢者の自転車走行特性, 土木計画学研究・講演集, Vol.39, ROMBUN NO.367, 2009.
- 11) Winai Raksuntorn and Sarosh I. Khan : Saturation flow rate, start-up lost time, and capacity for bicycles at signalized intersections, Transportation Research Record, No.1852, pp.105-113, 2003.
- 12) Dean Taylor, W. Jeffrey Davis : Review of Basic Research in Bicycle Traffic Science, Traffic Operations, and Facility Design, Transportation Research Record, No.1674, pp.102-110, 1999.
- (???) 受付

IMPACT ANALYSIS OF LONGITUDINAL GRADE FOR BICYCLE'S DISCHARGING BEHAVIOR AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

Eri AOYAMA, Satoru KOBAYAKAWA, Tomoyuki INAGAKI, Hirohisa MORITA,
Tatsunori SADA and Naoki OKAMOTO