

Bluetooth通信を用いた 旅行時間計測に関する基礎的分析

北澤 俊彦¹・塩見 康博²・田名部 淳³・菅 芳樹⁴・萩原 武司⁵

¹正会員 阪神高速技研株式会社 (〒550-0011 大阪府大阪市西区阿波座1-3-15 JEI西本町ビル11F)
E-mail: toshihiko-kitazawa@hanshin-tech.co.jp

²正会員 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³正会員 株式会社地域未来研究所 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島1-5-17 堂島グランドビル)

⁴非会員 株式会社地域未来研究所 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島1-5-17 堂島グランドビル)

⁵正会員 阪神高速道路株式会社 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)

近距離無線規格であるBluetoothの普及を背景とし、諸外国ではBluetoothのMACアドレス（個体識別ID）を路側で把握することで旅行時間計測やOD計測など交通調査に活用する試みがなされている。わが国でもBluetoothを搭載した電子機器や通信機器が市場に出回るようになってきていることから、受信機を設置した任意地点間の旅行時間が計測可能と考えられる。

本研究では、BluetoothのMACアドレスを計測・記録して旅行時間計測を行うための調査システムについて検討するとともに、実環境で容易に利用可能な計測ツールの開発を行った。さらに、一般道路や都市高速道路を対象として旅行時間を観測したケーススタディを通じて、Bluetoothを用いた旅行時間計測に関する基礎的な分析を行い、現段階でも旅行時間調査に適用可能なシステムであることが確認できた。

Key Words : Bluetooth, MAC Address Matching, Travel Time Monitoring

1. はじめに

近距離無線規格である Bluetooth の普及を背景とし、諸外国では Bluetooth の MAC アドレス（Media Control Access address・個体識別 ID）を路側で把握することで旅行時間計測や OD 計測など交通調査に活用する試みがなされている。わが国でも Bluetooth を搭載したヘッドセットやカーナビゲーション等の電子機器および携帯電話やスマートフォン等の通信機器が市場に出回るようになってきていることから、上記のような交通調査への適用可能性が徐々に高まっていると思われる。

本研究では、Bluetooth の MAC アドレスを計測・記録して旅行時間計測を行うための調査システムについて検討するとともに、実環境における取り扱いが容易な計測ツールの開発を行う。さらに、一般道路や都市高速道路を対象として旅行時間を観測したケーススタディを行って、Bluetooth を用いた旅行時間計測の可能性と今後の課題について述べる。

2. 既往研究のレビュー

旅行時間情報は多様な交通情報の中でも最も重要な情報の一つであり、適切な交通マネジメントのため、正確な旅行時間計測手法の確立が求められている。これまでに提案・実用化されている主な手法としては、車両感知器による集計データを利用した同時刻和法・タイムスライス法やAVIによる地点間旅行時間計測手法が挙げられる。しかしながら、集計データを用いる場合には推計された旅行時間の正確性や交通状況の急変への対応性に課題がある。また、AVIを用いる場合、旅行時間の直接的な観測が可能となるが、導入コストに課題があるほか、プライバシーの問題も指摘されている。

一方、BluetoothのMACアドレスを利用した旅行時間計測手法では、機器に対してユニークなIDが特定されるという点でプライバシーの問題は依然存在するものの、旅行時間を直接観測でき、かつ導入コストが安価であること¹⁾から、主に2008年以降、実運用に向けた研究・検討が欧米諸国を中心に進められている。具体的には、MACアドレスマッチングによって計測された旅行時間の精度検証を行った研究事例²⁾³⁾⁴⁾やOD交通量を推計した事例⁵⁾が報告されている。また、Bakula et al.⁶⁾は実験に基づき、MACアドレスの検知率を受信機からの距離・

走行速度の関係で整理しているほか、Brennan et al.⁹⁾は受信機の設置位置とMACアドレスの検知率の関係を明確化するなど、MACアドレスの検知特性を把握する研究もなされつつある。さらに、異なる電界強度を持つ複数の受信機を同時に用いることにより旅行時間の計測精度を高める手法¹⁰⁾も提案されており、Bluetoothを利用した旅行時間計測システムの高度化が進められている。その他、アジア諸国での適用事例¹¹⁾¹²⁾や、歩行者¹³⁾・自転車¹⁴⁾の旅行時間計測事例なども散見される。

その一方で、わが国ではBluetoothを用いた車車間通信・路車間通信システムの構築に関する研究事例¹⁵⁾¹⁶⁾は散見されるものの、MACアドレスマッチングによる旅行時間計測の可能性を検討した事例は未だ見当たらない。一般的に普及している携帯電話やスマートフォンの仕様やBluetoothを利用した車載機器の普及率は国によって異なることが予想される。そのため、一般街路や高速道路でのMACアドレスの検知率や、それを用いた旅行時間計測の可能性については必ずしも自明ではない。すなわち、わが国を対象として、Bluetoothを用いた旅行時間計測の適用可能性を検証する意義は少なくないといえる。

3. 調査システム概要

(1) 旅行時間の算定手法

一般の道路利用者が所有する電子機器に搭載されているBluetoothを活用して任意区間の旅行時間を計測するには、まず、利用者が所有しているBluetoothのMACアドレスを路側に設置したBluetoothレシーバ（受信機）で取得し、そのMACアドレスを取得したタイムスタンプとともに記録することが必要である。MACアドレスは、ネットワーク上でノードを識別するために設定されているLANカードなどのネットワーク機器のハードウェアに一意に割り当てられる物理アドレスであり、48ビットの符号で表現される。最初の24ビットがベンダーID部、次の8ビットが機種ID、最後の16ビットがシリアルIDとなることが一般的であり、上位32ビットでネットワーク機器の機種名まで特定可能である。このMACアドレスは世界で唯一の番号であるため、異なる地点で観測された同一MACアドレスのタイムスタンプを比較（マッチング）することで地点間の旅行時間計測が可能となる。2地点間旅行時間の算出イメージを図-1に示す。

(2) MACアドレスのマッチングに係る課題

Bluetoothには電界強度を規定したクラスという概念があり、各機器はいずれかのクラスに分類されている（表-1）。Bluetoothの通信可能距離はClass1の場合には100m程度に達するため、例えば一般道路と高速道路が並行す



図-1 2地点間旅行時間の算定イメージ

表-1 Bluetoothの電界強度クラス

クラス	出力	到達距離
Class 1	100mW	100m
Class 2	2.5mW	10m
Class 3	1mW	1m

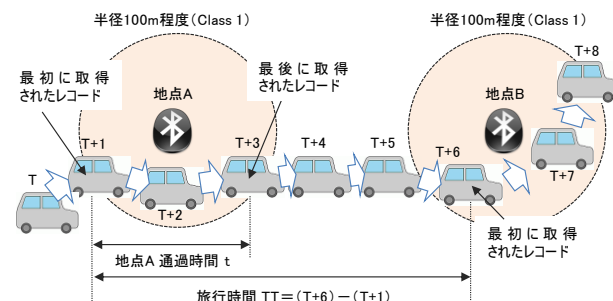


図-2 旅行時間算定イメージ図（最初に取得されたレコードを地点通過時刻として採用した例）

図-3は、開発したツール画面キャプチャ（タブレット）を示している。画面には、Bluetooth MACアドレスキャプチャのツールが表示されている。画面の上部には、BT MAC Address Capture Ver.1.0と表示されている。画面の中央には、キャプチャされたデータのリストが表示されている。リストには、車両のMACアドレス、タイムスタンプ、および機種名が記載されている。画面の下部には、検索ボタンが表示されている。

図-3 開発したツール画面キャプチャ（タブレット）

るような場所で観測を行った場合、道路種別を区分することは困難である。さらに、旅行時間を計測する2地点がともに一般道路と高速道路が並行しているような場合には、高速道路利用と一般道路利用の旅行時間が混在し、多峰型の旅行時間分布を示してしまうことが想定される。また、計測区間が短い場合には、徒歩や自転車など自動車以外の手段で移動したトリップの旅行時間が計測される可能性もある。従って、Bluetoothを用いる場合には、マッチングで算定した旅行時間をそのまま用いるのでは

なく、何らかのクリーニングを行う機能が必要となる。
 なお、高速道路利用の場合には途中の SA や PA 等への立ち寄り、一般道路利用の場合には店舗などへの立ち寄りや道路の迂回等によって極端に大きい旅行時間が含まれている可能性もあり、同様に何らかのクリーニングが必要となる。

さらに、通信可能距離が長いことに起因するもう一つの課題に対処するための機能も必要である。具体的には、交通状況によっては通信可能距離内で同一 MAC アドレスを複数回受信する可能性があるため、これらのデータから地点通過時刻を決定するための機能が不可欠である。地点通過時刻を決めるための具体的なアルゴリズムは今後実証実験等を通じて検討する必要があるが、本研究では、単純にそれぞれの地点において最初に取得されたレコードを地点通過時刻として採用することとした(図-2)。

(3) 計測ツールの開発

近隣に存在する MAC アドレスを定期的に取得し、ファイルに出力保存する計測ツールを開発した。屋外で利用することを考慮してスマートフォンもしくはタブレット上で動作することとし、OS は Android (バージョン 2.0 以上) とした。開発したツールのキャプチャを図-3 に示す。MAC アドレスを取得するために、まず、近隣に存在する Bluetooth を探索する API を発行する。発行後、API がタイムアウトするまでの間、不定期に返信されてくる近隣に存在する Bluetooth 機器からの MAC アドレスをタイムスタンプと共にファイルに出力している。通常は、約 12 秒程度で自動的にタイムアウトが発生するが、このツールでは、タイムアウトまでの時間を自由に設定することを可能とした。また、探索用 API を発行してから MAC アドレスが返ってくるまでの経過秒も同時に保存することとした。

4. 基礎実験

開発したツールを用いて、屋内にて MAC アドレスを取得する基礎実験を実施した。実験では、10cm 程度の近傍に Bluetooth 機器を 10 台設置し、タイムアウト秒を 10 秒として、連続で 30 回 MAC アドレスの取得を行った。実験イメージを図-4 に示す。また、API を発行してから MAC アドレスが返ってくるまでの経過秒を集計した結果を図-5 に示す。

MAC アドレスの取得数は、API を発行してからの経過秒に応じて増えていくが、5 秒を過ぎたあたりから、その傾きが緩やかになっている状況が見てとれる。また、10 秒経過時点でも全ての MAC アドレスの取得はできず、MAC アドレス取得数の構成比は 69%にとどまった。この結果からは、むやみにタイムアウトまでの秒数を長く



図-4 MACアドレス取得実験イメージ図

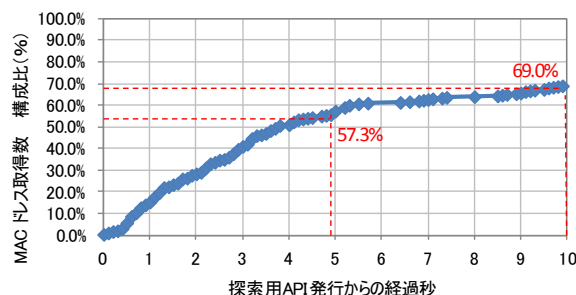


図-5 API発行からの経過秒と取得数の関係



図-6 一般道での実証実験概要

表-2 MACアドレス取得数集計結果
 (上表：クリーニング前，下表：クリーニング後)

	地点A: 本町	地点B: 堂島
クリーニング前		
総取得数	1,374 (18)	1,727 (24)
ユニーク数	160 (2)	176 (2)
クリーニング後		
総取得数	447 (6)	533 (7)
ユニーク数	155 (2)	171 (2)

※()は1分あたりの取得数

設定しても全ての MAC アドレスは取得できず、逆に API 発行後に通信可能エリアに進入してきた Bluetooth 機器の MAC アドレスを取得する機会を逸することになる可能性が高いことが示唆される。一方、経過秒が 5 秒と 10 秒で取得構成比の差分（約 12%）は無視できるほど

小さいものではない。

以上の考察を踏まえて、次章の実証実験ではタイムアウトまでの秒数を 10 秒に設定するとともに、1 つの地点で複数の取得ツールを動作させることで取得できる MAC アドレス数を確保することとした。

5. 実証実験

開発したツールを用いて、一般道路および高速道路の 2 地点間を対象とした旅行時間計測の実証実験を実施し、サンプル数や旅行時間を集計・分析した。

(1) 一般道路での実証実験

図-6 に示す 2 地点間で実証実験を実施した。地点 A、地点 B それぞれの地点で開発したツールを入れたタブレットを 2 台ずつ設置して MAC アドレスの取得を 1 時間 30 分程度行った。

a) MAC アドレスの取得数

2 地点で取得された MAC アドレスの取得総数およびユニークな MAC アドレスの集計結果を表-2 (上表) に示す。1 分あたりの取得数に換算すると、地点 A で 18 個、地点 B で 24 個であり、かなりの数の MAC アドレスが取得できている。しかし、このデータには、オフィスや店舗などに設置されたパソコンやプリンターなどの固定機器の MAC アドレスも含まれている可能性がある。

MAC アドレス別の取得数を地点別に集計した結果 (上位 10 位まで) を表-3 に示す。ここで、滞在時間換算値とは、その地点に滞在していたと推定される秒数であり、取得数×10 秒 (MAC アドレス取得ツールのタイムアウト秒を 10 秒として計測を行ったため) により算出した値である。滞在時間換算値が大きい MAC アドレスが少なからずみられるが、これは計測地点の近傍に存在する機器 (例えばコピー機やパソコンなど) のアドレスを連続して取得し続けているためと思われる。本研究では、このような移動体以外のデータを除去することとし、閾値を 5 分としてデータのクリーニングを行った。クリーニング後の MAC アドレスの集計結果を表-2 (下表) に示す。また、時間帯別の MAC アドレスの取得数を図-7 に示す。時間帯により多少バラツキはあるものの、特定の時間に偏って取得されているわけではないことがわかる。

b) 旅行時間

地点 A : 本町から地点 B : 堂島までの旅行時間を算定した結果を表-4 に示す。マッチングできた MAC アドレスは全部で 30 件であり、そのうち、旅行時間がマイナス (堂島から本町への移動) となったデータが 1 件あった (SEQ : 30)。また、旅行時間が他と比較して大きい値となっている結果も確認された (SEQ : 8, 18)。これは経路途中で立ち寄りを行った車両や、車以外で移動

表-3 MAC アドレス別取得数 (上位 10 位まで)

地点A: 本町

順位	MACアドレス	名前	取得数	構成比	滞在時間 換算値(分)
1	00:18:XX:FB:C0:XX	707SC	412	30.0%	68.7
2	00:03:XX:32:81:XX		220	16.0%	36.7
3	5C:9A:XX:1E:CB:XX	T008	170	12.4%	28.3
4	7C:6D:XX:91:B5:XX	iMac	71	5.2%	11.8
5	00:1D:XX:8C:A8:XX		54	3.9%	9.0
6	00:1C:XX:3B:30:XX		14	1.0%	2.3
7	00:22:XX:6F:CF:XX	ECLIPSE BT	14	1.0%	2.3
8	40:2C:XX:67:52:XX	H1111025	12	0.9%	2.0
9	00:24:XX:21:07:XX		11	0.8%	1.8
10	68:79:XX:98:76:XX		10	0.7%	1.7

地点B: 堂島

順位	MACアドレス	名前	取得数	構成比	滞在時間 換算値(分)
1	00:10:XX:EC:47:XX	Canon MP610	539	31.2%	89.8
2	00:19:XX:E6:BF:XX	WELL-PC	433	25.1%	72.2
3	00:1F:XX:32:E6:XX	MobileHi-Vision	118	6.8%	19.7
4	00:22:XX:5D:24:XX		67	3.9%	11.2
5	64:B9:XX:E6:8B:XX	iMac	37	2.1%	6.2
6	00:17:XX:80:76:XX	BP-80	25	1.4%	4.2
7	BC:B1:XX:2A:5D:XX	SH004	13	0.8%	2.2
8	00:26:XX:7E:94:XX	RAKU NAVI	13	0.8%	2.2
9	00:1F:XX:38:B0:XX	CA003	12	0.7%	2.0
10	E8:9D:XX:75:4F:XX	T005	12	0.7%	2.0

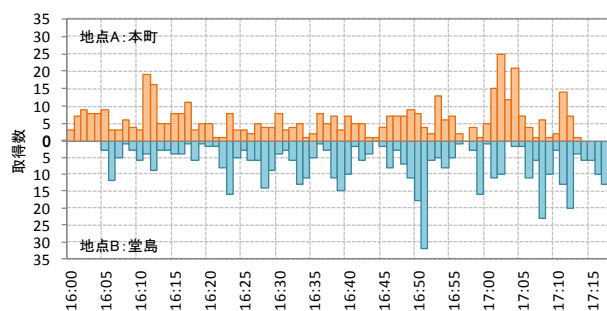


図-7 時間帯別 MAC アドレス取得数 (クリーニング後)

表-4 旅行時間算定結果 (クリーニング前)

SEQ	MACアドレス	名前	地点A:本町 計測時刻	地点B:堂島 計測時刻	旅行時間
1	00:22:XX:11:ED:XX		16:00:28	16:05:53	5:25
2	34:C7:XX:F3:01:XX		16:00:31	16:05:58	5:27
3	34:C7:XX:E4:0E:XX		16:11:20	16:15:59	4:39
4	44:A7:XX:13:63:XX		16:13:46	16:18:24	4:38
5	00:22:XX:16:83:XX		16:13:47	16:18:34	4:47
6	00:07:XX:FD:A1:XX		16:23:36	16:28:07	4:31
7	6C:23:XX:E8:9E:XX	S007	16:23:45	16:28:34	4:49
8	68:79:XX:EA:5A:XX		16:25:56	17:11:15	45:19
9	00:12:XX:95:8A:XX		16:28:06	16:33:37	5:31
10	00:17:XX:89:61:XX		16:29:04	16:35:55	6:51
11	00:22:XX:18:7D:XX		16:32:00	16:37:05	5:05
12	00:14:XX:B2:4A:XX		16:32:59	16:36:14	3:15
13	00:22:XX:03:85:XX		16:37:55	16:42:27	4:32
14	00:22:XX:6F:DD:XX	ECLIPSE BT	16:41:31	16:45:54	4:23
15	04:98:XX:7F:5A:XX		16:46:14	16:50:59	4:45
16	34:C7:XX:45:52:XX	CAR MULTIME	16:46:46	16:52:16	5:30
17	BC:B1:XX:72:F0:XX		16:48:26	16:53:04	4:38
18	00:24:XX:1E:8A:XX		16:50:48	17:07:22	16:34
19	A0:DD:XX:4A:0F:XX		16:53:47	16:58:14	4:27
20	6C:23:XX:F7:D5:XX		16:55:00	16:58:35	3:35
21	5C:9A:XX:55:E4:XX	F001	17:01:33	17:06:19	4:46
22	00:1E:XX:BF:9F:XX		17:01:40	17:06:16	4:36
23	00:22:XX:70:AE:XX	ECLIPSE BT	17:03:46	17:08:20	4:34
24	00:22:XX:2D:21:XX		17:03:55	17:08:31	4:36
25	90:03:XX:42:F7:XX	RAKU NAVI	17:04:07	17:08:33	4:26
26	68:79:XX:EA:5A:XX		17:05:13	17:09:31	4:18
27	00:26:XX:95:71:XX		17:05:53	17:10:42	4:49
28	90:03:XX:13:28:XX		17:06:27	17:11:06	4:39
29	00:22:XX:12:5A:XX		17:10:51	17:15:43	4:52
30	BC:B1:XX:5D:A1:XX		17:11:39	17:02:05	- 9:34

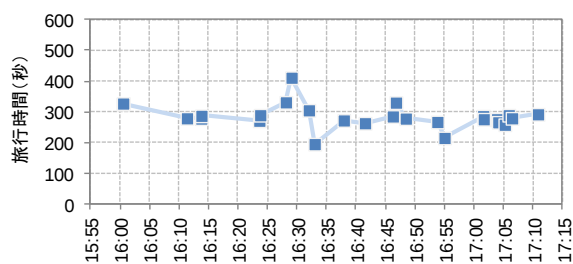


図-8 旅行時間算定結果（クリーニング後）

したトリップのデータであると推察される。これらのデータを除くと、平均旅行時間は 4 分 45 秒、標準偏差は 39 秒であった。クリーニング後の旅行時間算定結果を図-8 に示す。対象が信号制御のある路線であることに鑑みると、標準偏差はそれほど大きくなく、安定的な旅行時間計測ができていると考えられる。また、時間帯を 5 分単位で集約した場合にはデータが欠損する時間帯が生じるが、集約時間を 10 分単位にすれば各時間帯の代表値は得られそうな結果となっている。

(2) 高速道路での実証実験

阪神高速道路上の 2 地点間で実証実験を実施した（図-9）。一般道路での実証実験と同様に、地点それぞれに 2 台ずつタブレットを用いて、タイムアウト 10 秒で MAC アドレスの取得を行った。

a) MAC アドレスの取得数

2 地点で取得された MAC アドレスの取得総数およびユニークな MAC アドレスの集計結果を表-5 に示す。1 分あたりの取得数に換算すると、地点 A で 11 個、地点 B で 3 個程度であり、地点 A の方が多い結果となった。なお、一般道路での実証実験の結果と同様に、このデータにも移動体以外のデータも含まれている可能性があるため、MAC アドレス別のデータ取得数を集計した。結果的に、地点 A および地点 B とともに同一の MAC アドレスが連続して大量には取得されておらず、クリーニングの必要はなかった。

それぞれの地点における断面交通量（車種計・方向計・2 時間計）を平成 22 年道路交通センサスから集計し、さらに取得できたユニークな MAC アドレス数とともに整理した結果を表-5 に示す。Bluetooth 機器を所持した歩行者や自転車の影響もあるため厳密な値は算出できないが、自動車交通量と取得されたユニーク数から MAC アドレスの抽出率を試算したところ、地点 A で 4.8%、地点 B で 3.0%となった。なお、断面交通量の差以上に地点 B での取得数が地点 A に比べて少なくなっている。これは、地点 B の設置環境が影響していると考えられる。地点 B は、池田線下り方向である、北行きの府道 10 号沿いの歩道上に機器を設置して計測を行ったため（地点 A は道路上の歩道橋に設置）、反対車



図-9 阪神高速道路での実証実験概要

表-5 MAC アドレス取得数集計結果

	地点A: 法円坂	地点B: 加島
A. 総取得数	1,326 (11)	414 (3)
B. ユニーク数	786 (7)	351 (3)
C. 交通量計(台)※	16,373 <6,235>	11,628 <1,905>
D. 抽出率(B/C)	4.8%	3.0%

※H22道路交通センサスデータより／車種計・方向計・2時間計
※<>は一般道路のみの交通量、()は1分あたりの取得数

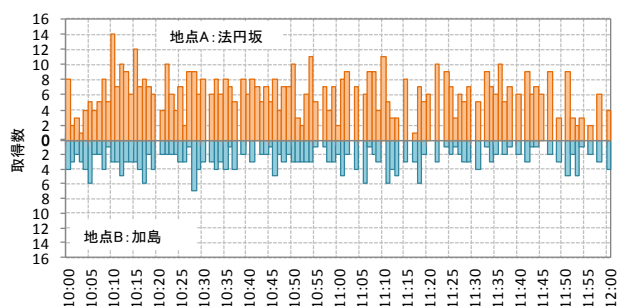


図-10 時間帯別 MAC アドレス取得数

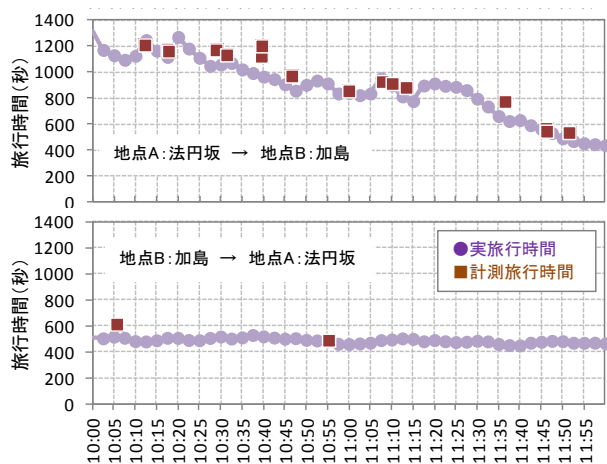


図-11 旅行時間算定結果

線である池田線上り方向の MAC アドレスが取得しにくい状況となっていた可能性が高い。反対車線までの間には低い分離帯があり、歩道—一般道（2 車線）—《分離帯》—高速道（2 車線）—《分離帯》—高速道（2 車線）という形状で 25m 程度の距離があり、また、タブレットを歩道上に設置したため、Bluetooth の電波が分離帯によって遮断されていた可能性がある。今後は、計測機器の設置位置や設置条件（高さや遮蔽物の有無など）による影響を確認する必要がある。

次に、時間帯別の MAC アドレスの取得数を図-10 に示す。時間帯により多少バラツキはあるものの、特定の時間に偏って取得されていたり、あるいは連続的にデータが欠損した時間があるわけではないことを確認することができる。

b) 旅行時間

2 地点間（地点 A：法円坂と地点 B：加島）の旅行時間を方向別に算定を行った。地点 A から地点 B の方向（下り方向）では、17 件マッチングできた。そのうち、1 件だけ旅行時間が他と比較して大きい値（1 時間 5 分）となっており異常値データとして除去した。一方、地点 B から地点 A の方向（上り方向）では、6 件マッチングできたものの、旅行時間が 1 時間以上と異常値と思われるデータが 4 件あり、異常値データ除去後の算定結果は 2 件のみとなった。異常値を除去した後の旅行時間分布を図-11 に示す。ここで、実所要時間とは、阪神高速道路上に 500m ごとに設置されている車両検知器で計測された旅行速度データから、タイムスライス法を用いて旅行時間を算定した推定値である。

当日は 11 号池田線下り福島合流を先頭とする渋滞によって環状線から放射路線上りにかけて渋滞が延伸しており、その渋滞は概ね 11 時過ぎから解消に向かうといった交通状況であった（逆に 11 号池田線上りの塚本合流では渋滞が発生していない）。図-11 の旅行時間分布はこのような交通状況と整合的な結果であり、実旅行時間ともほぼ一致していることから、Bluetooth を活用することで高速道路上でも旅行時間計測が可能であることを示している。概ね 15 分単位であれば旅行時間の代表値が算定が可能な程度にはデータが取得できる結果であった。

6. おわりに

本研究では、開発した調査ツールを用いて 2 地点で計測された Bluetooth の MAC アドレスから区間旅行時間を算定する手法および問題点について整理を行った。また、一般道路及び高速道路における実証実験を行った結果、以下のような知見が得られ、現段階でも旅行時間調査に適用可能なシステムであることが確認できた。

- ・場所により異なるが、交通量の多い都市部において

は 2~7 個/分のユニークな MAC アドレスが取得可能である

- ・現状でも、マッチングされたサンプルを用いて一般道路では概ね 10 分単位、高速道路では 15 分単位で旅行時間の代表値を算定できるレベルにある
- ・高速道路における実証実験で得られた異常値除去後の旅行時間分布は、実験当日の交通状況と整合的な傾向を示しており、一定の精度で旅行時間を計測できる可能性がある

今後は、当該システムを用いて計測した観測値と AVI や ETC などから算出した真値との比較を通じた旅行時間精度の検証を複数区間において実施する必要がある。また、効率的にデータを取得するためには、計測機器の設置位置や設置条件について検討を行うことが必要である。

参考文献

- 1) Sintonen, H.: Bluetooth based travel time estimation, *Research reports of the finnish transport agency* 48, 2012.
- 2) Wasson, J.S., Sturdevant, J.R., Bullock, D.M.: Real-time travel time estimates using media access control address matching, *ITE Journal*, Vol. 78, No. 6, pp.20-23, 2008.
- 3) Quayle, S., Koonce, P., DePencier, D. and Bullock, D.: Arterial performance measures using MAC readers: Portland pilot study, *Proc. Transportation research Board 89th Annual Meeting*, CD-ROM, 2009.
- 4) Haghani, A., Hamed, M., Sadabadi, K.F., Young, S. and Tarnoff, P.: Data collection of freeway travel time ground truth with Bluetooth sensors, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2160, pp.60-68, 2010.
- 5) Tsubota, T., Bhaskar, A. and Chung, E.: Simulation analysis toward the use of Bluetooth data for signalized arterials, *Proc. of 2nd International Workshop on Traffic Data Collection & its Standardisation*, 2011.
- 6) Barcelo, J., Montero, L., Marques, L. and Carmona, C.: Travel time forecasting and dynamic OD estimation in freeways based on Bluetooth traffic monitoring, *Proc. Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, CD-ROM, 2009.
- 7) Blogg, M., Semler, C., Hingorani, M. and Troutbeck, R.: Travel time and origin-destination data collection using Bluetooth MAC address readers, *Proc. of Australasian Transport Research Forum*, 2010.
- 8) Bakula, C., Schneider, W. and Roth, J.: Probabilistic model based on the effective range and vehicle speed to determine Bluetooth MAC address mathes from roadside traffic monitoring, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No.1, pp.43-49, 2012.
- 9) Brennan, T., Ernst, J., Day, C., Bullock, D., Krogmeier, J. and Martchouk, M.: Influence of vertical sensor placement on data collection efficiency from Bluetooth MAC address collection devices, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136, No.12, pp.1104-1109, 2010.
- 10) Araghi, B.N., Christensen, L.T., Krishnan, R., Olesen, J.H.

- and Lahrman, H.: Improving the accuracy of Bluetooth based travel time estimation using low-level sensor data, *Proc. Transportation research Board 93th Annual Meeting*, CD-ROM, 2013.
- 11) Li, J., Van Zuylen, H., Liu, C. and Lu, S.: Monitoring travel times in an urban network using vide, GPS and Bluetooth, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol.20, pp. 630-637, 2011.
 - 12) Agarwal, N., Varma, S. and Vanajakshi, L.: Evaluation of Bluetooth for stream travel time estimation under Indian conditions, *Proc. Transportation research Board 93th Annual Meeting*, CD-ROM, 2013.
 - 13) Malinovskiy, Y., Saunier, N. and Wang, Y.: Analysis of Pedestrian Travel with Static Bluetooth Sensors, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2299, pp. 137-149, 2012.
 - 14) Mei, Z., Wang, D. and Chen, J.: Investigation with Bluetooth Sensors of Bicycle Travel Time Estimation on a Short Corridor, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2012, Article ID 303521, 2012.
 - 15) 杉浦彰彦、Demawan, C.: 渋滞時におけるBluetoothを用いたITS向けシステムの研究、電気学会論文誌C、Vol.124、No.1、pp.49-55、2004.
 - 16) 浜尾和秀、高樋昌、石川泰弘、橋本健一、宗像友男、石山修司、櫻井俊明：スマートフォンを活用した道路状況センシングとその局所的情報交換のための車車間通信の研究開発—スマートフォンBluetoothを用いたすれちがい通信による車車間通信の研究開発—、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.112、No.72、pp.19-24、2012.

(???受付)

FUNDAMENTAL ANALYSIS OF TRAVEL TIME MONITORING USING BLUETOOTH

Toshihiko KITAZAWA, Yasuhiro SHIOMI, Jun TANABE,
Yoshiki SUGA and Takeshi HAGIHARA