Wi-Fiパケットセンサーによる交通流動解析

西田　純二[1]・足立　智之[2]・牧村　和彦[3]・森本　哲郎[4]・上善　恒雄[5]

[1]正会員　株式会社 社会システム総合研究所　（〒550-0002 大阪市西区江戸堀1-10-27）
E-mail:nishida@jriss.jp

[2]正会員　西日本高速道路株式会社　海外事業本部　（〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20）
E-mail:t.adachi.af@w-nexco.co.jp

[3]正会員　一般財団法人計量計画研究所　企画部　（〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町2番9号）
E-mail:kmakimura@ibs.or.jp

[4]非会員　株式会社 社会システム総合研究所　（〒550-0002 大阪市西区江戸堀1-10-27）
E-mail:morimoto@jriss.jp

[5]非会員　大阪電気通信大学総合情報学部　（〒575-0063 大阪府四条畷市清滝1130-70）
E-mail:jozen@dg.osakac.ac.jp

近年の急速なスマートフォンの普及により，多くの移動体がWi-Fi機能を持つ通信端末を備えるようになった．スマートフォンの多くはスタンバイ状態でも機種固有のアドレスを含むある種のWi-Fiパケットを送出しているため，これらのパケットを受信し解析することで，移動体の交通流動を把握することができる．私たちはWi-Fiパケットを受信し，その固有アドレスを一方向ハッシュ関数により匿名化し，安全に交通流動の解析を行うためのセンサー（AMPセンサー）を開発した．このセンサーを用いて複数の高速道路，一般道路，SAや都市部の人の滞留する場所において計測実験を行い，本センサーが幅広い目的の交通流動解析や交通流常時観測装置として活用できるという結果を得た．

Key Words : *システム分析，交通行動調査，道路計画，公共交通計画，交通情報，ITS*

1.　研究の目的と背景

近年の急速なスマートフォンの普及により，多くの移動体がWi-Fi機能を持つ通信端末を備えるようになった．スマートフォンの多くはスタンバイ状態でも機種固有のアドレスを含むある種のWi-Fiパケットを送出しているため，これらのパケットを受信し解析することで，幅広い移動体の交通流動を把握することができる．

このWi-Fiパケットを路側で受信し，複数個所での受信データを突合することで，極めて低コストに車両や人の区間移動速度（旅行速度）の計測が可能となる．また，同じ場所で連続して観測されるWi-Fiパケットの始終時間を計測すれば，人・車などの滞留状況を測定することができる．

このように路側等で，容易に交通流動の観測を行うことができる交通流動センサーは，我が国でも多くの分野で活用が期待されるところであるが，特に交通観測インフラの設置が十分ではない開発途上国では，一層実用化への期待は大きい．

無線パケットの固有情報の取得による交通流動の分析手法は，ここ数年，各方面で実用化に向けた研究や様々な取組みが進められてきたが，その多くはBluetoothを用いた方法となっており，Wi-Fiパケットに関する研究の蓄積は多いとは言えない．さらに，無線パケットの固有情報の取得による交通流動計測にあたっては，個人のプライバシー保護にも十二分に配慮した運用手法を示さなければ，技術的な課題をいくら解決したとしても，社会の理解を得ることは困難であろう．

私たちは，交通流動解析にWi-Fiパケットセンサーを利用するためのハードウェアとソフトウェアの開発を行い，それを複数のフィールドに適用し，多数の測定データを得た．これを分析した結果，Wi-Fiパケットセンサーが高速道路，一般道路などの自動車交通の流動計測に利用できるほか，SAや都市部など人の滞留する場所における人流を把握するためのセンサーとして有効であることを確認した．さらに取得データの匿名化や個人情報保護法への対応上不可欠である，取得されることを望まないユーザに対するデータ消去対策，いわゆるオプトアウトへの対応方法などを検討し，法的にも社会倫理上も問題がない形で、センサーの運用を行う方法を提案した．

本論文は，Wi-Fiパケットセンサーを利用した交通流動解析システムの中で，特に自動車交通の解析に関する

研究結果について述べたものである．センサー開発に関する情報処理，ハードウェア，性能測定等の詳細に関しては，本論文と並行して発表の予定である「交通流動センシングのためのWi-Fiパケットセンサの開発と性能実験」に述べているので、こちらを参照いただきたい．

2. Wi-Fiパケットセンサーとは

近年は，Wi-Fi通信機能を持つ携帯用情報機器が急速に普及している．最も普及率が高い端末はスマートフォンであるが，これ以外にもノートPCや携帯用ゲーム機をはじめ，昨今はデジタルカメラ等でもWi-Fi通信機能が装備されている．

これらの機器の多くは，スタンバイ時にもWi-Fiルータと接続するための探索パケット（Probe Request Packet）と呼ばれる管理パケットを送出している．このパケットの送出間隔は機器によって幅があるが，30秒から90秒程度の間隔で常時発信されている場合が多い．このパケットには端末ごとに与えられた固有アドレス（MACアドレス）が含まれているため，複数地点に設置したセンサーにより取得されたパケットのMACアドレスを比較することで，さまざまな交通流動解析を行うことができる．

パケットに含まれる機器固有の情報は，それ単独では個人の特定を行うことはできないが，例えば狙った個人を追跡してMACアドレスを取得する等，悪意を持って個人情報との紐付けが行われた場合には，個人の行動追跡が行われる可能性がある．そこで私たちは，取得したMACアドレスをセンサ内で一方向ハッシュ関数により変換し，匿名化を行った上で分析処理を行うこととした．

このように匿名化（Anonimous）したMACアドレスを用いたProbe Requestを受信するセンサーをAMPセンサー（Anonimous MAC address Probe Sensor）と呼ぶこととした．

3. 関連研究のレビュー

(1) Bluetoothパケットによる流動解析の研究

自動車に搭載されたBluetooth機器から発信されるパケットを受信し，MACアドレスを識別子として比較することで自動車の旅行速度を測定することができる．特に海外を中心に，この手法による流動解析の研究が2010年頃から多数発表されている．Trung Vo[1]はこの手法を用いて幹線道路における自動車の旅行時間の計測を行い，ナンバープレート認識や磁気センサー，RFIDタグによる計測方式などと比較して，計測の正確さ，コスト面での優位性，匿名性などの点で本方式が有効であることを示している．この他，本方式による交通流の解析については多数の研究[2]が行われてきた．

日本国内では，北澤・塩見他が阪神高速道路において旅行時間計測を試みた研究[3]があり，阪神高速道路の２地点で計測されたBluetooth通信パケットのMACアドレスを比較する方法で旅行時間計測に成功している．

(2) Wi-Fiパケットによる流動解析

Bluetoothによる交通流動解析と比較して，Wi-Fiパケットによる流動解析の研究は少ない．

Luber Andreas 等は，BluetoothとWi-Fiによる道路の旅行速度計測を比較し，それぞれの優位性を再評価する研究[4]を行っている．しかし道路に設置したガントリーにWi-FiとBluetoothの無線機を設置し検出率を比較したところ，Bluetoothの6.5%に対してWi-Fiは1%となり，Bluetoothが有利という結論を出している．なお，道路以外の分野では，中野隆介他によるProbe Request Packetの測定による鉄道車内混雑度推定の研究[5]があり，車両内に設置した受信機で車両内の旅客数の推定を試みている．

(3) BluetoothとWi-Fi方式の比較

以上に述べたように，既往の研究を見る限り，Bluetoothによる計測はWi-Fiによる計測よりも有利であるという結論を示している例が多い．

この理由は，Bluetooth での計測ではまず最初にセンサー側から API 接続要求（カップリングのための要求）を発行し，それに相手側端末が答えるのを待ち，相手側の返信に含まれる MAC アドレスを取得するという手順を取るため，相手側端末の MAC アドレスの取得が容易であることが上げられる．また自動車の搭載機器間の通信手段，例えば携帯電話のヘッドセットや音響機器の接続デバイスとして Bluetooth の普及が先行したため，Bluetooth による検出率は Wi-Fi より高いという測定結果が出ていたのだと推察する．

しかし高速道路における流動解析では，Bluetooth による計測を行う場合，接続要求を発行してから相手側機器が反応するまでに一定の時間（8～13 秒）を要するため，その間に車両がセンサーの感知有効範囲から出てしまうことがあり，高速走行をする車両の検知では，検出率が下がるという指摘[5]がある．先に紹介した北澤他の研究[3]でも，阪神高速道路の 2 地点間で共通に観測できた MAC アドレスの数は 2 時間の観測で 2～17 個と多いとは言えない．この原因は，カップリングのための反応時間の他，Bluetooth に許可される電波強度の問題，すなわち海外では 100mW の電波出力が認められていることに対して，日本の電波法ではその半分の 50mW までしか許可されていないことが上げられよう．

一方，昨今のスマートフォンの急速な普及は，Wi-Fi 機器を搭載する車両を短期間に激増させた．我々の研究

とほぼ同じ時期に発表された ITS World の記事を見ると，オランダの Blip Systems 社の計測結果の紹介[7]として，以前は Bluetooth による検知率が明らかに高かったことに対して昨今は Wi-Fi による検知率が Bluetooth を上回るようになったと述べている．

Bluetooth による検知と Wi-Fi による検知は，いずれをとるかという問題ではなく，両方の通信方式に対応するハイブリッド型センサーを用いることで，より検知率の高い交通流動解析が可能となる．オランダの Blip Systems 社では，既に両方式を同時に計測するセンサーを開発[7]している．

しかし，この二つの方式は通信距離や通信方式の違いから，利用される機器の性格が異なっている．このため，個人情報保護のための対策も異なることから，両方式を単純に車両の認識率だけの観点から評価することは適切ではない．この点については，7.において詳しく述べる．

4. システム構成

AMPセンサーの開発にあたっては，さまざまな環境に容易にインストールができることを目的として，次の二つの開発を行った．

A.汎用PCで作動するセンサー・ソフトウェアの開発
B.低価格で小型のセンサー・ハードウェアの開発

(1) 汎用PCで動作するセンサーソフトウェアの開発

Macintosh，Windows，Linuxの３つの異なるオペレーティングシステム（OS）で動作するセンサーソフトウェアの開発を完了している．

AMPセンサー・ソフトウェアの構成は図 1の通りであり，Wi-Fiパケットをキャプチャした後，すぐにそれをSHA-1ハッシュ化処理を行い，取得ログを内部メモリに保存した後，一定時間ごとにクラウド・ストレージ・サーバにアップロードを行う．

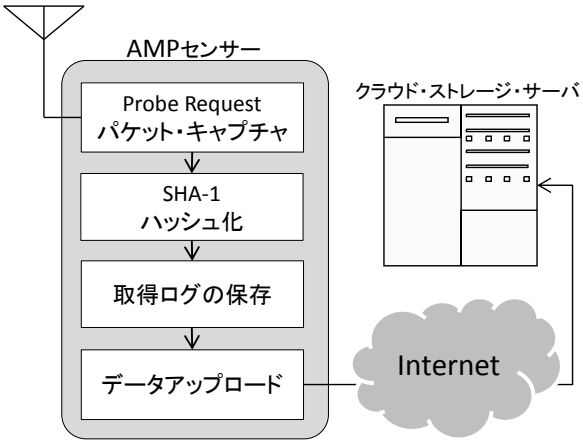

図1　AMP センサーのシステム構成

WindowsはMac、Linuxに比べて開発の自由度が低く、Wi-Fiアダプタの制御に困難さがあり、低価格・汎用のWi-Fiアダプタではプローブリクエスト・パケットの取得が困難であった.. そこでプロトコルアナライザ用に開発されているデバイスであるAirpcapを用いてセンサーソフトウェアの開発を行った．

Macintosh用センサーソフトウェアについてはパケットキャプチャライブラリであるlibpcapを用いてプローブリクエストを取得する軽量プログラムを開発した。Wi-Fiパケットセンサー用ソフトウェアとチャンネルの設定方法などの仕様が一部異なるものの、得られる結果についてはWindows用と共通化されている。Linux用のソフトウェアはMacintosh用と同じ構造である．いずれも時刻はNTPで同期させるため，複数のAMPセンサーのタイムスタンプは同期して，正確な時刻を記録する．

(2) 低価格で小型のセンサー・ハードウェアの開発

ハードウェアはRaspberry PI Model Bで，CPUはARM 1176JZF-S 700MHz を搭載し，ストレージはSDRAM 512MB，有線での通信には本体の10/100BaseT イーサネットソケットを，無線通信にはUSB 2.0 コネクタにUSB無線LAN アダプタを挿して使用する．消費電力は3.5W，OS はLinux ベースのRaspbian 3.6.1+である．

本器はイーサネット等でインターネットへ接続されているときはクラウド・ストレージ・サーバに記録したデータを自動的にアップロードするが，単独で設置されているときはSDカードにログを記録し，１カ月程度の連続運用が可能となっている．またUPS（無停電電源装置）機能を持たせるために接続をしているモバイルバッテリーで運用している場合は，電源供給がない状態でも３時間程度の稼働が可能となっている．

本器は屋内設置を想定して製作したものであるが，屋外への設置のためには，産業用基板などを利用して，温度変化や対候性に配慮して生産する必要がある．

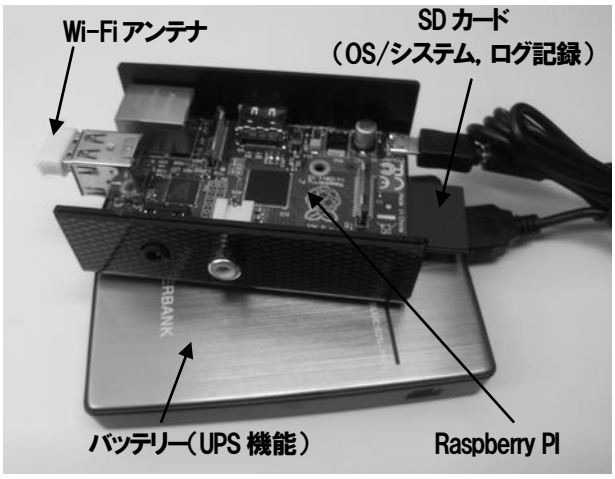

図2　AMP センサー・ハードウェア構成

(3) クラウド・ストレージ・サーバ

NEXCO西日本は大量のプローブデータの収集・分析・サービスを行う目的でインターネットからアクセス可能なクラウド・ストレージ・サーバを保有している．このクラウド・ストレージ・サーバはデータ量の増大に対して容易にスケールアウトが可能で，ビッグデータ処理を想定した分散型データベース処理エンジンを搭載している．

AMPセンサーから送出される収集されたパケットデータは，SHA-1方式でハッシュ化されたMACアドレスと，取得時間，受信強度の３つの情報を１行のレコードとして，一定時間ごとに蓄積した取得ログをサーバに記録していく．テスト段階ではAMPセンサーから送出されるデータ量は多くはないが，将来，多数のAMPセンサーが設置され，連続運用が行われた場合を想定し，円滑なデータ処理ができるように，このNEXCO西日本で保有する高性能のクラウド・ストレージ・サーバを利用できるようにしている．

サーバにアップロードされたデータは，すぐに解析システムにより集計処理され，指定された二地点間で観測された同一IDデータの時間差から，一定時間ごとに区間ごとの旅行速度分布が計算され，モニタに出力される．

(4) Wi-Fiパケットの到達距離

(1)～(3)で述べたシステムを用いて，AMPセンサーの動作とデータ処理に関する各種の性能試験を行っている．Wi-Fiプローブパケットの到達距離は200～350mとかなりの距離となる．しかしパケットごとに電波強度を計測しており，この電波強度（－35db～－95db）を用いることにより距離の判定ができる可能性がある．一定の距離に複数のAMPセンサーを設置しておき，電波強度を利用して位置を同定する仕組みの構築については，研究の緒についたばかりであり，今後の研究課題となっている．

5. 道路の流動解析

開発したAMPセンサー，あるいは開発中のAMPセンサープロトタイプにより，次のように道路の旅行速度等の測定を行った．

A)国道163号四条畷付近におけるパケット取得試験
　日時：2013年4月の複数日

B)山陽自動車道三木・加古川間の区間旅行速度計測
　日時：2013年7月5日　11:50～12:50

C)山陽自動車道三木SAにおける滞留計測
　日時：2013年7月5日　13:35～14:25

D)大阪市内四ツ橋筋における区間旅行速度計測
　日時：2014年1月12日　10:00～12:00

E)インドネシア・マカッサル市での区間旅行速度計測
　日時：2014年1月22日

本論文では，上記の中から初期に実施したB)の山陽自動車道の区間旅行速度計測の結果と，E)のインドネシア・マカッサル市での区間旅行速度の計測結果について述べる．

(1) 山陽自動車道における区間旅行速度の計測

AMPセンサーの開発の初期段階において，汎用PC（Macintosh　MacBook Air，Linux PC）の内蔵Wi-Fiアンテナと開発したセンサーソフトウェアを用いて，高速走行する車両からWi-Fiパケットが受信可能か，またMacアドレスの突合により区間旅行速度の測定が可能かどうかを確認するために，山陽自動車道の三木東・加古川の11.4㎞の区間に機器を設置し，測定実験を行った．

この実験の前に，一般道路国道163号沿道で実施した予備実験では，一定数のユニークなIDが受信できることを確認していたが，高速で走行する車両の旅行速度計測が可能かどうかを確認する目的で本実験を行った．この時の測定区間を図3に示している．

図3　山陽自動車道における旅行速度計測実験

測定は，側道に停車した車両の横でMac Book Air，LinuxノートPCなどを駆動させてパケットをモニタリングするという方式（図 4）とした．このため上下線のパケット取得に偏りが出たり，専用アンテナを設置しなかったために，受信感度が低いという問題があった．

図4　山陽自動車道での実験風景

しかし，このような簡易な計測方法を採用したにもかかわらず，表 1の通り，60分間の測定で三木東側134，加古川側139，両方の地点で共通して受信できた有効サン

プル22という結果が得られた．

表 2は取得データから算出された車両の旅行速度であるが，表 1に示す近傍地点に設置されたトラフィックカウンターが計測した走行速度の傾向と一致している．なおサンプル番号の20～22は，旅行速度が19.1～45.6km/hと非常に遅くなっているが，この２つの計測地点の間には三木SAが存在するため，ここへの立ち寄りを行った車両であると推定される．平均速度80km/hで走行すると仮定すれば，三木SAの滞在時間は6分から27分程度となる．

この実験を通して私達は，受信感度の高いアンテナを適切な位置に配置すれば，Wi-Fiパケットセンシングによる旅行速度の計測は，高速走行する車両を対象とした測定でも，実用化の可能性があるという手ごたえを得た．

表1　山陽自動車道での取得パケット数（計測 60 分）

場所	走行台数	走行車線平均速度	追越車線平均速度	取得パケット	取得率
三木東	1,092台	87.0km/h	103.9km/h	134個	12.2%
加古川	1,247台	87.6km/h	105.4km/h	139個	11.1%
		共通取得パケット		22個	1.76%

注）走行台数と車線別走行速度は調査地点近傍のトラフィックカウンタによる計測値（NEXCO西日本提供）

表2　取得したデータから求めた旅行速度

サンプル	時間差（秒）	旅行速度(km/h)	三木SA(分)
1	342.481	119.8	平均速度80kmで走行したと仮定したときに、三木SAに滞在していた時間（分）
2	356.781	115.0	
3	369.128	111.2	
4	374.231	109.7	
5	395.383	103.8	
6	407.784	100.6	
7	408.896	100.4	
8	441.045	93.1	
9	443.945	92.4	
10	444.562	92.3	
11	447.322	91.7	
12	453.151	90.6	
13	458.658	89.5	
14	460.465	89.1	
15	484.484	84.7	
16	488.563	84.0	
17	494.112	83.1	
18	516.353	79.5	
19	525.361	78.1	
20	900.668	45.6	6.3
21	1,011.087	40.6	8.2
22	2,153.624	19.1	27.2

(2)　インドネシア・マカッサル市での旅行速度計測

インドネシア等の開発途上国では急激に自動車交通が増大しているが，トラフィックカウンターのような交通流を観測するためのインフラは不十分であるため，道路の渋滞状況が把握できず，高速道路の利用などを含む適切な経路選択が行われていない．そこでITSの導入により，道路交通状況に関する情報提供を行うためのシステム検討を目的として，マカッサル市における高速道路・一般道路の旅行速度の計測を行った．

図 5は現地で旅行速度を計測した区間を示しているが，①の区間が高速道路，②と③の区間が高速道路と並行する一般道路である．３つの区間それぞれについて，両端と中間の3箇所に計測地点を設けて，測定調査を行った．

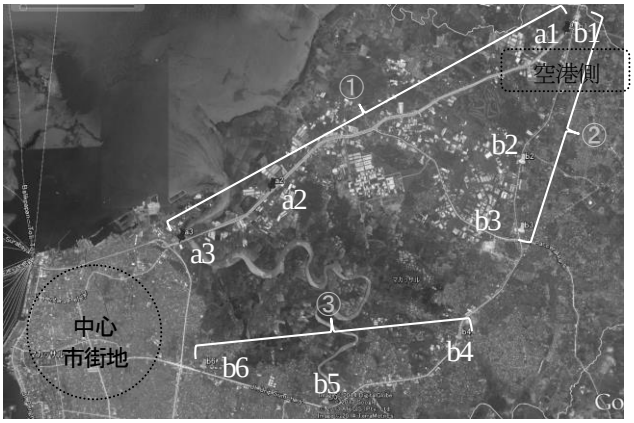

図5　マカッサル市での旅行速度測定区間

現地での計測試験では，通関の制約から汎用型ノートPCを計測機として採用し，Linux/ubuntu13.10をインストールした．Wi-Fiアンテナには事前の国内試験で受信感度が高い外付型アンテナを使用した．このアンテナを路側に駐車した車両の屋根にマグネットで固定して測定を行った．図 6にa3地点での測定状況を示している．

図6　高速道路の路側での測定状況（a3 地点）

計測対象とした高速道路には側道があり，a1-a2区間の側道は四輪と二輪が走行しており，a2-a3区間の側道は狭幅員の区間が多く二輪専用道となっている．高速道路本線は二輪（オートバイ）の走行はできない．

Wi-Fiパケットの飛距離は，４(4)で述べたように，200m～350mであるため，本線に設置したAMPセンサーは，側道を走行する車両の旅行速度も同時に測定してしまうという問題がある．同様に一般道路においては，走行する車両だけではなく，自転車，歩行者の旅行速度も

同時に計測を行うこととなる．

次に一般道の２区間の状況について説明する．図 5の②区間（調査地点b1･b2･b3）は空港から市街地に向かう幹線道路で，主に片側１車線の幹線道路であり，沿道には商業施設が立地している．③区間（調査地点b4･b5･b6）は片側２～３車線の幹線道路であるが，中心市街地に近く，朝夕のピーク時間帯を中心に渋滞が多発する．

図7　一般道路（b5-b6 区間）の交通状況

次にこれら①～③の区間で，AMPセンサーによる計測を行った結果を表3に示す．

表3　マカッサルでの計測結果

路線区間	地点	計測時間中の走行台数	計測したユニークID数	計測時間（分）	1分あたりユニークID数	捕捉率（%）	2地点で共通計測したユニークID数	1分あたり共通計測したユニークID数
高速①	a1	2,025	143	90	1.6	7.1%	74	0.82
	a2	3,177	318		3.5	10.0%	94	1.04
	a3	3,258	173		1.9	5.3%		
一般道東②	b1	4,512	158	60	2.6	3.5%	56	0.93
	b2	6,456	246		4.1	3.8%	83	1.38
	b3	5,898	217		3.6	3.7%		
一般道西③	b4	12,738	471	60	7.9	3.7%	171	2.85
	b5	12,120	761		12.7	6.3%	217	3.62
	b6	13,794	459		7.7	3.3%		

＊ユニークIDとは、各観測地点で計測されたWiFiパケットに含まれる機器固有のID数。
観測されたWiFi機器の数に一致する
＊一般道路の走行台数には二輪（モーターバイク）の台数を含む
＊a2計測地点は料金所付近で，車両が減速　＊b5計測地点は近傍に商業施設がある

この結果を見ると，2013年7月に山陽自動車道で実施した日本国内での計測結果よりも捕捉率は低い．2地点で共通計測されたIDの数，すなわち旅行速度計測に利用できる観測数は，高速道路で１分平均0.8～1.0個，一般道路で0.9～3.6個となった．同程度の交通量がある時間帯であれば，旅行速度計測の時間単位を15分とすれば，高速道路でも上り下りで15分で平均数個以上のサンプルが取得できる．現地ではスマートフォンの普及率が上昇しつつあることから，今後は旅行速度計測手法としてさらなる精度向上が期待できる．またさらにa2地点のように，高速道路であっても中間料金所付近の走行速度が低下する地点では，捕捉率が上昇している．これらの地点に優先してセンサーを設置する等の対応を行えば，捕捉率はさらに高くなる．

次に，2地点で共通計測できたパケットから地点間の旅行速度を算出した．各測定区間で旅行速度の分布を求めたが，この中でa2-a3間の測定結果を図8に示した．

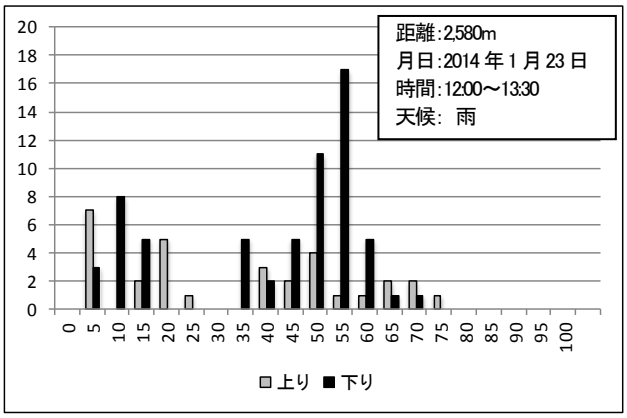

図8　高速道路での旅行速度計測結果（a2-a3 区間）

白線が上り（空港→市街地），黒線が下り（市街地→空港）を示している．全体に下り線の観測数が多いのは，観測車両が下り線側の路側に駐車して測定を行ったことの影響によるものと考えられる．分布形が二つに分かれているのは，速度の低い群が側道走行をしている車両で，速度の高い群が高速道路の本線を走行している車両と解釈できる．高速道路での調査を開始して10分ほど経過して，熱帯地方特有のスコールが発生し，スリップしやすいコンテナトレーラのような大型車両は速度を落として走行していた．高速道路本線上における走行車両の速度分布が35～75km/hと横に広がっているのは，スコールによる影響と推察される．

次に一般道路での旅行速度計測の中から，b5-b6区間の結果を図9に示している．

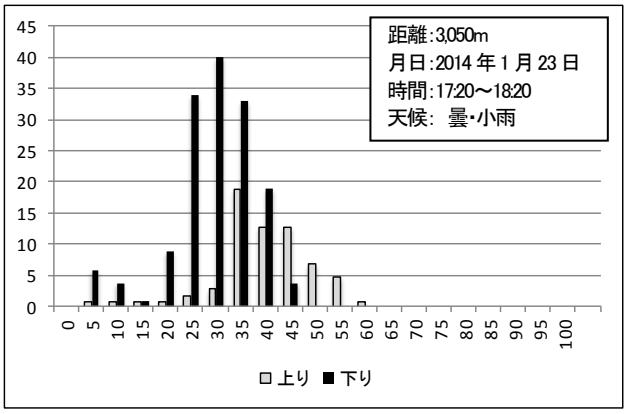

図9　一般道路での旅行速度計測結果（b5-b6 区間）

マカッサルの一般道路ではまだ信号機の設置が少なく，渋滞が発生していない時間帯の走行速度は40～50km/hとかなり高くなるが，ラッシュ時間帯には対向車線から右折しようとする車が随所で走行を遮るため，激しい交通渋滞が発生する．観測を行った時間帯は，夕方のラッシュ時に差しかかる時間であり，特に帰宅方向となる下り線で，渋滞による旅行速度の低下が観測されている．

6. 滞留解析

AMPセンサーによる流動解析では，２地点間での旅行速度の解析といった用途以外に，同じIDが連続して観測される時間を集計することで，滞留時間の分布を知ることができる．高速道路ではSA/PAの混雑や利用傾向の分析などに有効である．

この滞留解析の事例を次に紹介する．

(1) 三木SAにおける滞留時間分布

５(1)で紹介した山陽自動車道の三木東・加古川間の旅行時間の測定と同じ日時に，三木SAにおいてSA内のイートインコーナーで滞留時間分布を測定した．この測定結果を図10に示している．

三木SAのイートインコーナーは物販店舗と隣接しているが，レストラン・トイレとは離隔している．この結果を見ると，調査を行った50分間で約60サンプルが計測された．ここでは1分以上連続して観測されたサンプルだけを滞留と定義することとしており，SA建物内に留まらずに建物前を短時間で通過したサンプルは除外されることとなる．

13時35分から観測を開始したため，昼食時を少し過ぎた頃ではあるが，SA内には食事をする利用者の姿も多数見受けられたが，多くは自販機で飲料を買い求めて店内を一周だけして退出する利用者が視認された．図 10の結果は，この時間帯のSA施設の利用は，短時間の立ち寄り利用が多いことを示している．

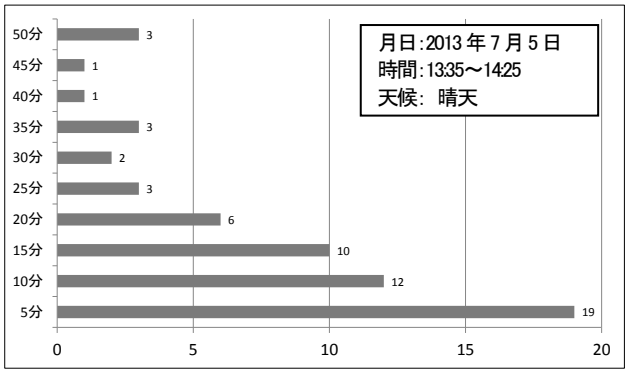

図 10　三木 SA における滞留時間の分布

(2) 駅前ファーストフード店舗での滞留時間分布

道路と関係する分析例ではないが，駅前ファーストフード店の協力を得て，17日間にわたる連続計測を行った．店舗名・計測日時の公表はできないが，計測データについては学術的目的に限り利用できる．図 11はこの店舗で計測した1時間ごとのPOSレジ来店客数とAMPセンサー観測数を，週末を挟む5日についてグラフ化したものである．この結果を見ると，駅前ファーストフード店におけるPOSレジでカウントされた来店客と，AMPセンサーが捉えた滞在客数が極めて高い精度で一致していることがわかる．この二つの数値の相関係数は0.945となっていた．

POSレジ来店客数とAMPセンサー観測数は微妙な差異が生じているが，POS客数が高めに出るのは平日昼間の時間帯で，学生やサラリーマンの帰宅時間に重なる夕刻にはAMPセンサーの観測数が高くなる．この店舗は郊外立地で，昼間には主に中高年の主婦層のグループ利用が多く，夕刻には学生・サラリーマンの利用が多いことから，時間帯と客層によるスマートフォン保有率の差が影響していると推測している．なお，実数ベースでPOS客数とAMPセンサー観測数が近い値を示している理由であるが，POS客数はグループの来店客ではそのうちの一人が代表して精算することが多く，実数ベースでの来店客数はこれよりも多くなっている．一方AMPセンサーは来店客のうちスマートフォンを保有し，Wi-Fiをオンにしている数だけをカウントするため，平均グループ人数がスマートフォン保有率の逆数に近い場合は，この二つの数字が一致することとなるためだと推察している．

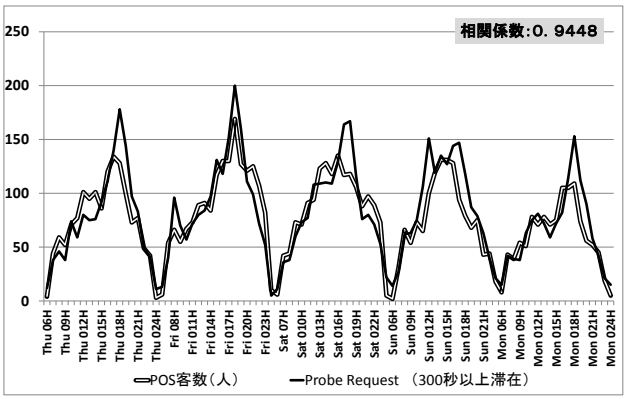

図 11　駅前ファーストフード店での POS レジ数と観測数

7. センシングと個人情報保護

AMPセンサーのシステムでは，計測したMACアドレスをハッシュ関数により匿名化を行い，また暗号化やサーバの侵入対策を厳しくするなど，個人情報保護には最大限の配慮を行うこととしている．

本システムで取得する情報は，我が国の個人情報保護法が規定する個人情報には分類されないが，ひとりひとりの行動を判別することができるパーソナルデータの性格を有している．現在わが国では，個人情報保護法の改定に向けて検討が進められており，2015年には法案が提出される予定となっている．この改訂に関係して，2013年12月に，パーソナルデータの保護に関して，「パーソナルデータの利活用に関する制度見直し方針 」[8]が示された．そこで，この方針に従い，次のような対策を行った上でシステムの運用を行う方針とした．

① 計測するデータの利用目的の明示
② 計測するデータの内容とその取扱い方法の明示
③ 計測されることを避けたい方への対策の明示（スマートフォンのWi-Fi機能をオフにする等）
④ 意思に反して自分のデータが取得された場合に，そのデータを消去するための申入れ先の明示と対策方法の準備（オプトアウト対策）
⑤ 計測データの分析のためのデータ保持期間を有期に設定し，第三者提供を行わないことの明示

上記①～⑤の明示については，狭い範囲での計測の場合はセンサー周辺への掲示物の貼付を行ったり，広域にわたる計測の場合はホームページへの掲出やプレスリリースを行うなど，適切な方法での情報伝達に努める必要があろう．

さて個人情報保護の観点から，BluetoothとWi-Fiによるセンシングを比較してみる．まずBluetoothの場合は，簡易で短距離の通信を想定していることから，利用者がBluetoothの電波を発していることを認識していないケースがある．また図 12のようなBluetoothを利用する車載装置では，通信機能をオフにすることができない場合があり，上記の③の対策をとることが難しいケースが存在する．

図 12　車載ナビに組みこまれた Bluetooth

これに対してWi-Fiの場合は，スマートフォン等の多くの機器で利用者がWi-Fi機能をオフにする方法が準備されているケースがほとんどであり，また④のオプトアウトを行うために自分の機器のMACアドレスを知る方法も比較的容易となっている．

またBluetoothでは，ハンズフリーヘッドセットやコードレスオーディオなどのように，MACアドレスを表示させる機能を持たない簡易な機器が多いため，カップリングの手順を利用してMACアドレスを取得し，取得したMACアドレスに対してオプトアウトを行うサービスを準備するなど，パーソナルデータ保護のための対策を講じる必要があろう．

8. まとめ

本論文では，近年急速に普及が進むスマートフォン等が発するWi-Fiパケットをセンシングすることにより，交通流動解析を行うための，センサーソフトウェア，ハードウェア開発の経過について述べた．そしてこれらを利用した旅行速度計測，滞留分析への応用例を示し，開発したAMPセンサーが高速道路を含む自動車交通の流動解析や人流解析で活用の可能性が高いことを示した．さらに実用化の際に，法的・倫理的なハードルとなる可能性が懸念される個人情報保護，パーソナルデータ保護への対応策を提案した．

Wi-Fiパケットセンサーは，ここ１～２年で急速に実用化に向けた環境が整ってきた観測手法であり，幅広い社会領域での活用が期待できるところである．

今後は，本論文に示した旅行速度計測や滞留時間分布といった少数地点間の分析だけではなく，より広域に多数のセンサーを配置することによって，面的な交通流動を把握するためのシステムや，低コストで実施できるOD調査手法への応用などについて研究を進めていきたい．さらに防災計画や都市施設の運営管理など，より幅広い分野における活用について研究を深めていきたい．

謝辞　本研究の中で 4. は「総務省情報通信開発推進制度（SCOPE）」(受付番号 132307011)の委託を受けて実施しました．また 5. (2)の成果は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです．ここに謝意を表します．

参考文献

1) Trung Vo : An Investigation of Bluetooth Technology for Measuring Travel Times on Arterial Roads:A Case Study on Spring Street ;;A Thesis Presented to The Academic Faculty Georgia Institute of Technology, May 2011
2) Sten Ruppea, Marek Junghansa, Mathias Haberjahna, Christian Troppenza : Augmenting the Floating Car Data Approach by Dynamic Indirect Traffic Detection , Transport Research Arena– Europe 2012

3) 北澤 俊彦・塩見 康博・田名部 淳・菅 芳樹・萩原 武司：Bluetooth 通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析，土木計画学研究・講演集(CD-ROM)Vol.47, pp.303，2013
4) Luber Andreas, Junghans Marek, Bauer Sascha, Jan Schulz：On Mesuring Traffic with Bluetooth and Wi-Fi , 18th ITS World Congress, 2011
5) 中野隆介・沼尾雅之：無線 LAN アクセスポイントへの検索要求を利用した鉄道車内混雑度測定，日本データベース学会論文誌，Vol.12，No.1,pp.121-126,2013
6) Stevanovic Aleksandar, Olarte Claudia L, Galletebeitia Alvaro, Galletebeitia Borja, Kaisar Evangelos I：Testing Accuracy and Reliability of MAC Readers to Measure Arterial Travel Time, 18th ITS World Congress, 2011
7) Bluetooth and Wi-Fi offer new options for travel time measurements, ITS International www.itsinternational.com, Oct.2013
8) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：パーソナルデータの利活用に関する制度見直し方針，平成 25 年 12 月 20 日
9) 望月祐洋・上善恒雄・西田純二・中野秀男・西尾信彦：Wi-Fi パケットセンサを利用した匿名人流解析システムの構築，IPSJ SIG Technical Report, 2014
10) 三神山駿・森本哲郎・白濱勝太・上善恒雄：Probe Requet を利用した人流解析システム，第 12 回情報科学フォーラム（FIT2013）講演論文集，M-010，2013

TRAFFIC FLOW ANALYSIS BY THE Wi-Fi PACKET SENSOR

Junji NISHIDA, Tomoyuki ADACHI, Kazuhiko MAKIMURA, Tetsuro MORIMOTO and Tsuneo JOZEN