Wi-Fi パケットセンサを用いた人流解析と可視化

森本 哲郎† 辻本 悠佑† 白浜 勝太† 上善 恒雄‡

†大阪電気通信大学大学院 総合情報学研究科 〒575-0063 大阪府四條畷市清滝 1130-70
‡大阪電気通信大学 総合情報学部 〒575-0063 大阪府四條畷市清滝 1130-70
E-mail: †{mw13a007, mw14a003, mw14a002}@oecu.jp, ‡jozen@dg.osakac.ac.jp

あらまし スマートフォン等の Wi-Fi 通信機器が発信する管理パケットには機器に固有の識別子が含まれ，その識別子と地点情報を蓄積し解析することによって人流を把握することができる．我々は，Wi-Fi パケットを取得するセンサデバイスを作成し，大規模商業施設に 20 台設置し 2 ヶ月間，利用者のプライバシに配慮した上でデータを取得した．個人の移動履歴を匿名化した時系列データを用いた人流解析とその可視化手法について報告する．

キーワード 位置情報，人流解析，可視化，Wi-Fi

1. はじめに

人々の流動を把握することは，都市計画，交通計画，マーケティング，施設管理など様々な分野において需要があり，特に，東日本大震災以後，防災計画が社会的課題となっている．一方で，パーソナルデータの利活用に関して，国際的に方針やルールは見直され大きく変わってきている現在の社会おいては，個人の特定が可能なデータは個人情報保護の対象に該当する．

近年，スマートフォンやタブレット，モバイル型のゲーム機器など Wi-Fi 通信機能を持つデバイスは多く普及しており，これらのデバイスの移動を把握することで，人や車の流動を把握することができ，滞留の分布，目的地までの所要時間，速度などの交通情報を提供することが可能になる．また，障がい者や子どもなど見守りが必要な方には，その人の移動履歴を知ることができ，どこに居るのか分かるシステムへ応用することができる．

我々が開発した Wi-Fi パケットセンサは，Wi-Fi パケットに含まれる固有の識別子である Mac アドレスを受信することができる．この Wi-Fi パケットセンサを都市の多地点に設置し，群衆をセンシングすることにより，人や交通の流動を把握でき，様々な都市環境の制御が可能になると考える．

また，現在では様々な分野でクラウド化が進み，膨大なデータがクラウドに収集されるなかで，そのデータ解析が重視されているが，ビックデータ解析を行った後にはそれを表示し人間が認識できる形態でなければ，社会にとって利益は少ないものとなる．今後，情報を可視化するシステム環境や手法は益々需要がある．

我々は，大阪市北区梅田北エリアに立地し，JR 大阪駅と接続している大規模複合商業施設，グランフロント大阪において，施設所有・管理者との協議の上，許可を得て，2 ヶ月間，20 台の Wi-Fi パケットを収集するセンサデバイスを用いてデータを取得し，人流解析の実証実験を実施した．

2. Wi-Fi パケットセンサ

2.1 Probe Request と位置情報

Wi-Fi 通信機能を持つデバイスは，常時，Probe Request と呼ばれる管理パケットを発信しアクセスポイントをスキャンしている．Wi-Fi パケットセンサは，この Probe Request を受信し，それに含まれる一意なアドレスである Mac アドレスと任意の地理情報，タイムスタンプを関連付けたデータを生成する．座標等の地理情報とタイムスタンプを関連付けることで，GPS 等と同様に位置情報として扱うことが可能である．通常，スマートフォン等の GPS 機能から位置情報を取得する場合は，ユーザの使用許可が必要であるが，Wi-Fi パケットセンサでは，位置情報の取得のための許可はなく，Wi-Fi 通信のオン・オフに依存するという特徴を持つ．

2.2 Mac アドレスの匿名化

公共の場で群集をセンシングするにあたり，一意なアドレスを含む位置情報は，個人の行動の履歴であり職場や自宅の特定をすることも可能であるため，Wi-Fi パケットセンサで取得した Mac アドレスはそのままでは保存せず，一方向ハッシュ関数 SHA-1 を用いて匿名化を行っている．以下，Wi-Fi パケットセンサを AMP センサ(Anonymous MacAddress Probe センサ)と呼び，匿名化した Mac アドレスを AMac アドレス(Anonymous Mac アドレス)と呼ぶ．

2.3 AMP センサのシステム構成

Wi-Fi の通信パケットを受信するためには，Monitor mode に対応した Wi-Fi アンテナやアダプタを用い，Wireshark や tcpdump, pcap 等のモニタリングツールでそのトラフィックを取得することができる．これらは特別な仕組みではないため，今までに，Raspberry Pi, Macbook，Intel NUC(Next Unit of Computing)などをベースに,実験を行う環境に合わせてハードウェアや OS を選択してきた．図 1 に AMP センサの基本構成を示す．

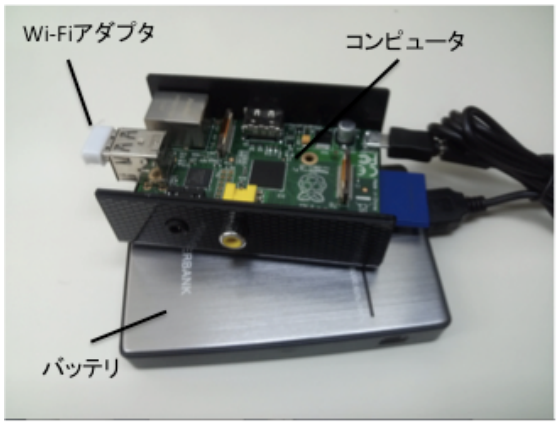

図 1 AMP センサの基本構成

2.4 データ構造

AMP センサが Probe Request をセンシングし生成するデータは，以下の項目を一組としたデータ構造である．

・タイムスタンプ
・AMac アドレス
・設置した地点 ID
・OUI(Organizationally Unique Identifier)
・シーケンス番号
・受信信号強度 RSSI
・アクセスポイントの識別名 SSID

2.5 設置方法

グランフロント大阪のショッピングエリア各所には，コンパスタッチと呼ばれるタッチパネル式デジタルサイネージがあり，このデジタルサイネージの筐体内部に AMP センサの設置を行った．図 2 は 2F のフロアマップで，マップ上の緑色の四角形がコンパスタッチの設置箇所である．グランフロント大阪の B1F から 6F のフロア(フロアマップは[1]を参照)にあるコンパスタッチ 20 台に AMP センサを設置した．

図 2 グランフロント大阪 2F フロアマップ[1]

3. 個人情報の保護

前節でも述べたが，個人の移動履歴は個人情報であり,プライバシの保護を適切に行わなければならない．我々は，個人情報に十分に配慮した体制をとり，ウェブページ(図 3)で以下の項目について明記した[2].

・実験の内容

スマートフォン等から Wi-Fi パケットに含まれる情報を用いて，地区内の流動・滞留を把握し，防災計画・都市計画・商業活性化・交通計画など多方面で活用可能なアノニマス（匿名性）人流解析を行うことを目的にしている．

・実施する場所と期間

グランフロント大阪・北館および南館で，2014 年 11 月 10 日 (月)から 2015 年 1 月 13 日 (火)まで計測を実施する予定である．

・実験方法と取得するデータ，及びその取扱い

北館・南館のコンパスタッチに設置した AMP センサを通して，スマートフォンが定期的に送出する管理パケット (Probe Request フレーム)を収集する．管理パケットに含まれる端末識別情報を，端末が特定できない識別情報に変換（MAC アドレスを不可逆関数でハッシュ化）し記録する．通信内容を傍受するものではない．

・個人情報は取得しない

管理パケットには，名前やメールアドレスなどの個人情報は一切含まれておらず，記録されたデータでは端末や個人を特定することはできない．調査の目的である流動・滞留解析以外には使用せず，また取得データを第三者に提供することはない．取得したデータは数学的・統計的に処理し，個人の行動追跡が行われることはない．

・観測を望まれない場合

Wi-Fi パケットを自動的に観測するが，観測されることを望まれない方は，スマートフォンの Wi-Fi 機能をオフにすることで観測されなくなる．

・問い合わせ

問い合わせ先とオプトアウトについて明記した．

もし観測されたデータの消去を希望される場合は，観測データの中から対応するデータをすべて消去する．

さらに，AMP センサが内部に設置されている全てのコンパスタッチに図 4 のステッカーを貼り，実験中であることとウェブページの URL を告知している．

なお、実験開始より 2 ヶ月を経過した 2015 年 1 月 10 日時点で，実験に関するクレームは一つも無い．

図 3 実証実験のホームページ

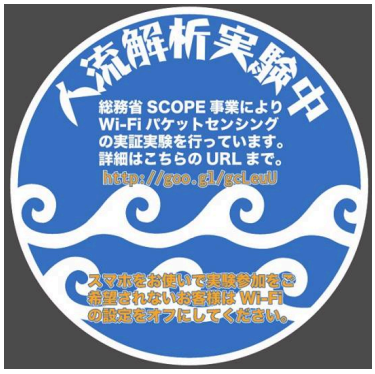

図 4 実験中を告知するステッカー

4. 先行研究

田名ら[3]は，Bluetooth を用いて，高速道路を対象とした交通流計測を行い，計測区間の所要時間はループコイル式車両感知器の所要時間と近似する結果を得ており，上下線での所要時間計測が可能であると述べている．都市高速道路においては OD 計測を実施したが，Mac アドレスの取得率のバラつきから OD 計測には限界があると述べている．これは，Bluetooth での Mac アドレスの取得率が Wi-Fi に比べると低いためだと考えられる．

中野ら[4]は，Probe Request 用いて混雑度推定を行っており，位置推定，端末選択，入退室時間補完，特徴量計算から成る混雑度推定手法の提案と実験を行い，その有用性を示している．

我々が行ったインドネシア・マカッサル市での実験では，AMP センサで車両をセンシングし，高速道路と一般道の上下線別で旅行速度の解析を行い，十分な結果が得られた．また，ファーストフード店での人の滞留について AMP センサと POS レジスタで比較し，AMP センサで観測された数値と POS レジスタの来客数が近似する結果となり，滞留に関しても計測が可能であることを確認した[5]．

大阪電気通信大学の卒業制作展である「なわてん」で四條畷キャンパスと，グランフロント大阪のナレッジキャピタル内アクティブラボにおいて，AMP センサを用いた人流計測を行い，滞留や移動の解析と集計を行い，AMP センサを用いた人流の傾向把握ができることを確認した[6]．

さらに，なわてんでは，3DCG 環境を用いてリアルタイムに計測した人流の可視化を行った[7]．3D モデルの建物とキャラクターを表示させ，AMP センサからアップロードされるデータを解析し，キャラクターを移動させることで人流を可視化した (図 5)．

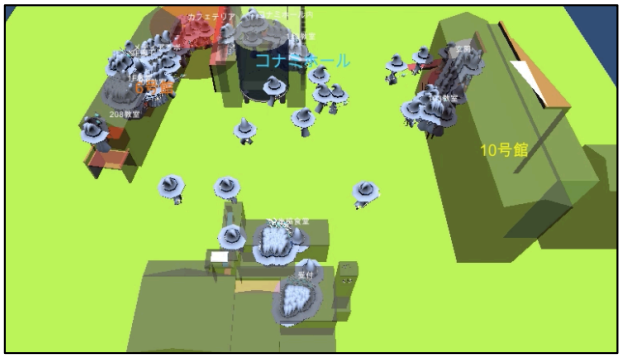

図 5 3DCG 環境での人流の可視化

5. システム構成

AMP センサが収集したデータは暗号化された SSL 通信でクラウドストレージサーバにアップロードし集約される．クラウドストレージサーバは，データ量に応じてスケールアウト可能で，データを高速に処理可能な分散型データベース処理エンジンを搭載したクラウドサーバを目標にしている[6]が，現段階では，VPS レンタルサーバ等で解析処理を行い，解析データの配信と可視化を提供する構成である (図 6)．

人流可視化システムは，解析したデータを基に人流に関する情報を可視化するシステムで，Websocket を用いたサーバ・クライアント方式のソケット通信になっており，ウェブサーバと各端末のウェブブラウザの同期が行えるようになっている．ウェブサーバでは，

Node.js アプリケーションが動作しており，Websocket でクライント側のウェブブラウザごとに異なる解析データを分配可能になっている．

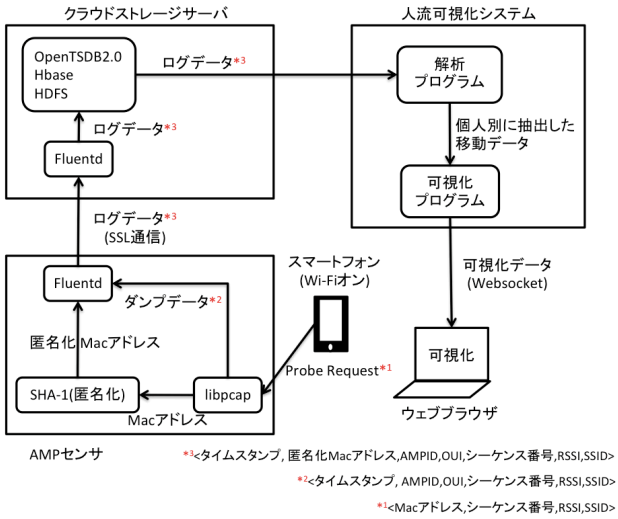

図 6 システム全体構成

6. 人流可視化システム

最終的に，蓄積したデータに解析や統計等の処理を行い生成されたデータは，単純な表やグラフで表現しきれない部分も，データの粒度に伴いながら人間が理解できる形で表現し，場合によってはデータとのインタラクティブ性を併せ持つ情報環境でデータを可視化すべきである．

6.1 解析手法

グランフロント大阪に設置した 20 台の AMP センサは，1 日あたり約 34500 件のユニークな AMac アドレスを観測し(付録図 1)，データ総数は 1 日あたり約 1827000 件がアップロードされクラウドストレージサーバに蓄積された(付録図 2)．AMP センサがダンプするデータは，時刻と座標を持つシンプルなデータ列であるため，AMac アドレスごとの移動履歴を静的に記憶する方法にすることで，本実験のデータ量を処理することが可能である．

まず，1 日の中で新規に AMac アドレスが登場した時刻とその AMac アドレスを 1 組みとし，時刻でソートしたメタデータを生成する．次に，メタデータに含まれる各 AMac アドレスごとの移動情報データを生成する．メタデータをシーケンシャルに走査し，AMac アドレスの移動履歴データを取得することで，時系列データの人流の解析と可視化が行えるようになる．これらのデータは，様々なアプリケーション間で汎用性を持たせるために JSON 形式とした．

この解析手法から，付録図 3 と 4 に示す通りグランフロント大阪では，平日は通勤通学の 8 時，昼食の 12 時，帰宅の 18 時に来客のピークがあり，休日は 15 時のみピークがあるという特徴が分かった．

6.2 可視化アプリケーション

ウェブブラウザ側の人流の可視化を行うウェブ画面(図 7)は，2 段構成になっており，上部は人流を可視化するエリアでグランフロント大阪のフロアマップ上に人の動きに関する情報を表示し，下部には観測された AMP センサから次に観測された AMP センサへの移動回数，つまり各 AMP センサ間の移動の自至が何回発生したかを表す表になっている．この表をパーソントリップ表と呼び，縦軸と横軸に AMP 番号をとり，横が自，縦が至を表し，その移動の回数を集計したものである．例えば， AMP5 番から AMP3 番への移動件数は，縦の AMP5 番と横の AMP3 番を参照すればよい．

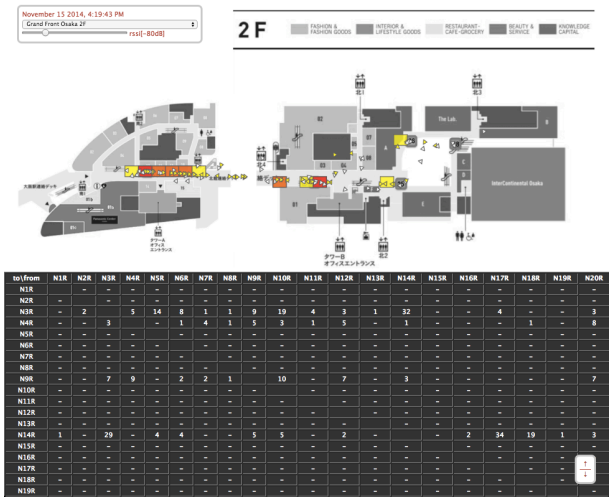

図 7 可視化アプリケーション画面構成

6.3 人流の可視化手法

人流可視化システムを用いて，施設管理・店舗のマーケティング等での活用を目的として以下の可視化実験を行った．

1) 矢印(線)での表現による動線の可視化

AMP センサを通じて，匿名化した個人別の移動の解析が可能である．移動履歴から動線を抽出し，人の移動を矢印方向の移動で可視化し，他フロアへ流入出する場合は矢印を色分けし，移動先の階数を矢印方向のラベルにすることで他フロアへの流入出が分かるようになっているため，人の移動と移動先の関連性を把握できる(図 8)．人がどのように移動するかの様子を

見ることができ，また，移動を線で表すことで利用頻度の多い経路は多くの線で構成されることになり，実際に人が利用する経路を可視化することができる．つまり，時間帯による人流の変化や経路の利用状況が把握できる可視化表現である．

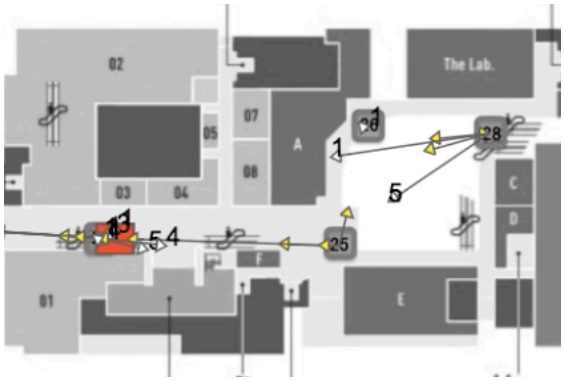

図 8 動線の表示

2)　人数の分布の可視化

1)の表現から人の移動を抽象化し，人の分布を見ることで滞留を可視化することができる．フロアを N×M の格子に分け，格子内の人数に応じて色分けすることで直感的に人の分布を捉えることが可能である(図 9)．格子内の色を，黄色，橙色，赤色の順番で人数の多さを表示している．1)と同様に，時間帯による滞在の変化を把握することができる可視化手法である．

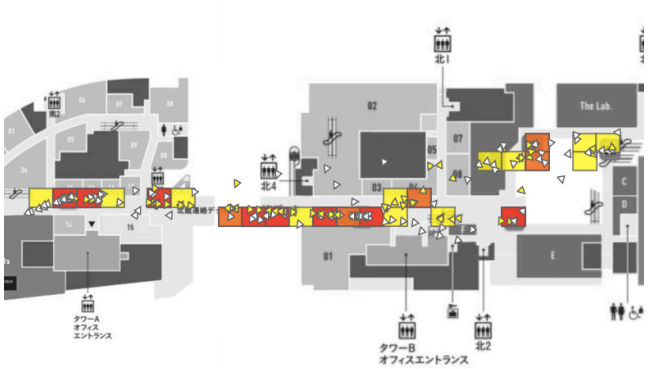

図 9 人数の分布

3)　パーソントリップ解析と可視化

人流解析において，経路間の利用率や傾向を捉えることは重要である．図 10 のパーソントリップ表は，フロアマップ上で描画される人流と同時進行でパーソントリップを集計するものである．

to\from	N1R	N2R	N3R	N4R	N5R	N6R	N7R	N8R	N9R	N10R
N1R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N3R	-	2	-	3	10	10	1	2	18	18
N4R	-	-	2	-	-	2	1	1	14	-
N5R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N6R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N7R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N8R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N9R	1	-	13	17	-	1	1	-	-	4

図 10 パーソントリップ表

このパーソントリップ抽出と同じアルゴリズムを用いれば，日別のパーソントリップの抽出が可能で，図 11 は，AMP14 番のパーソントリップデータを時系列に並べたものである．このグラフから AMP14 番からの移動は AMP18 番と 17 番が主な移動経路で，次いで 3 番が利用され，他の 17 本の経路については利用頻度が少ないことが読み取れる．図 13 のフロアマップで見ると，AMP14 番は南館の 2F で，18 番は南館の 3F，17 番は南館の 4F でどちらも 14 番からエスカレーターかエレベーターに乗って分岐し移動していることが推測できる．さらに，14 番から北館 2F の 3 番へ直進している比率が低いことも推測できる．このように，パーソントリップデータを見ることにより経路の利用頻度が推測でき，マーケティング等の基礎データに活用できるものと考える．

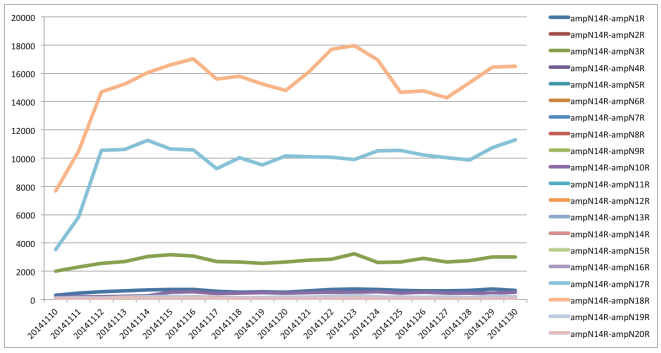

図 11 日別のパーソントリップデータ

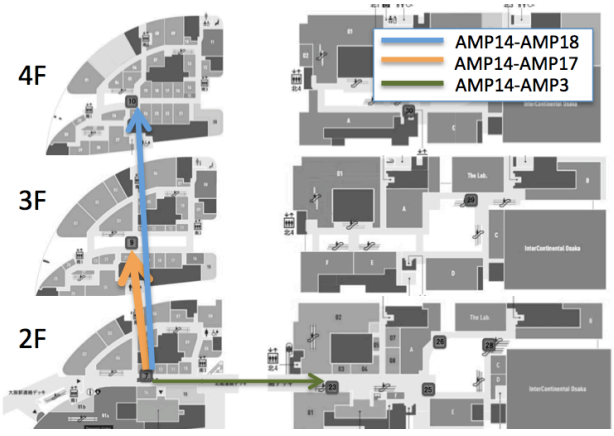

図 12 フロアマップ上での移動

また，図 11 のグラフでは AMP センサ 1 台に対し 1 つのグラフを用意する必要があるが，AMP センサを頂点とし，AMP センサ間を辺と考えると頂点が 20 個の完全グラフであるため，弦グラフを用いてパーソントリップグラフ(図 13)を生成することができる．弦グラフの幅は移動量に比例おり，直感的に移動量を捉えることが可能で，また，マウスオーバーでトリップの絞り込みができるようになっている(図 14)．さらに，この円形の弦グラフだけでは AMP センサを設置した地理的な関連がないが，フロアマップを並べ，弦グラフの絞り込みと連動し，AMP センサ間を線で繋ぎ移動量を線の太さで表示することで地理情報を補完した(図 15)．

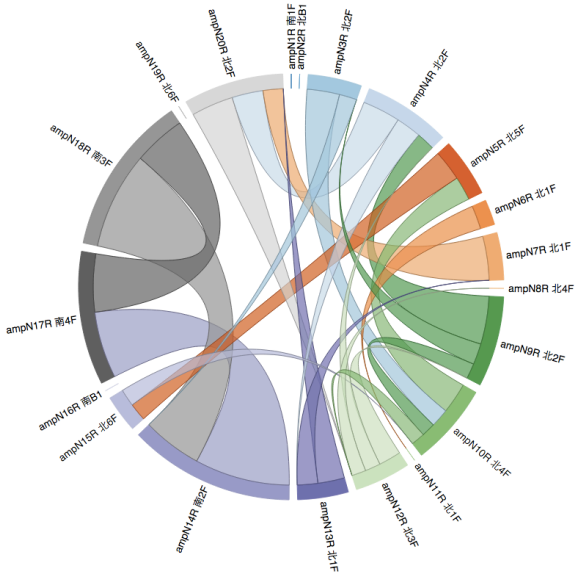

図 13 パーソントリップの弦グラフ

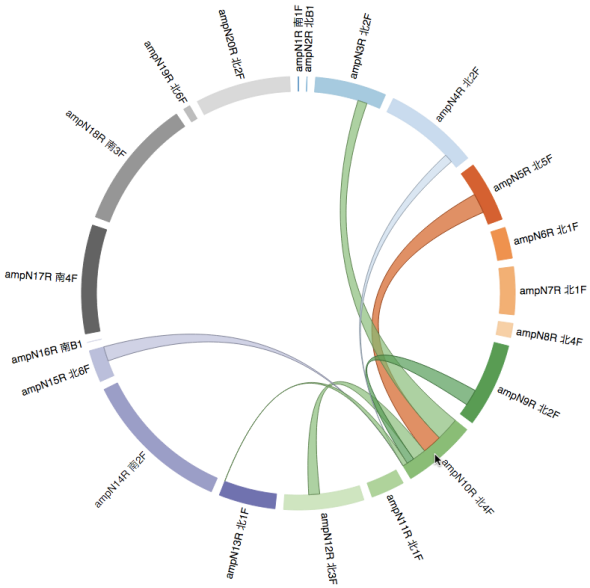

図 14 パーソントリップの絞り込み

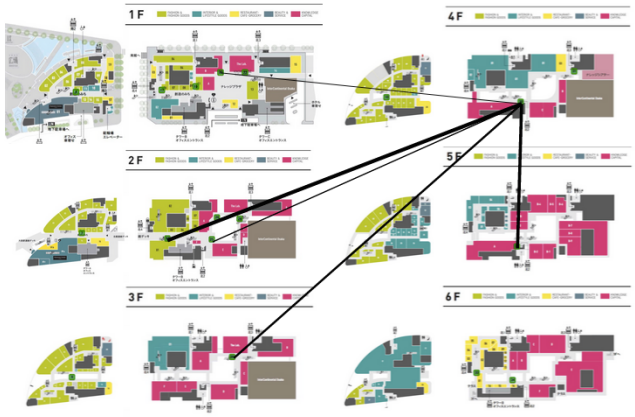

図 15 フロアマップ上での位置関係

4)　複数のタブレットを用いた可視化環境

ウェブページの一画面で全てのフロアを表現することは PC の画面だけでは難しく，フロアの切り替えができる機能程度では優れたユーザビリティと可視化手法とは言えない．また，[4]の 3DCG での表現から分かるように，3D 環境での可視化では，ビル内部での人の動きが表現し難いと考え，タブレットを複数台用意し可視化を試みた．

図 16 では，タブレットをタイルドディスプレイのように並べ各タブレットで異なるフロアマップを表示し，その上で人流を表示することで，地理的な関連性を把握しながら人流を可視化することができ，1 台の PC 画面で表示するよりわかりやすく表現することが可能である．

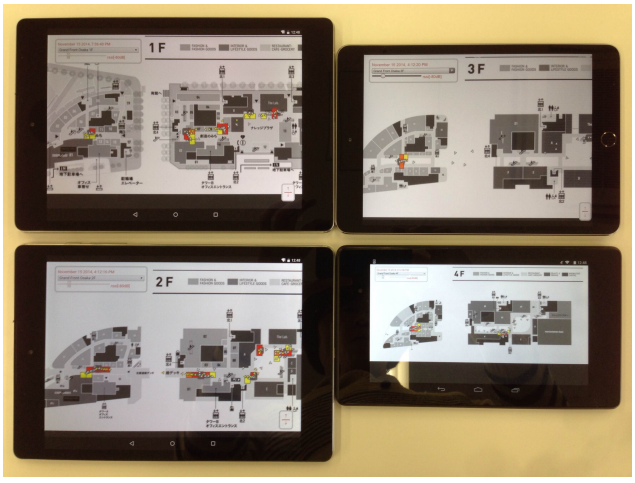

図 16 タイルドディスプレイ方式

7. 評価

グランフロント大阪においてセンシングしたデータの解析と可視化について，以下にその評価をまとめる．

1) グランフロント大阪の北館には広場があり 1 階から 7 階までの大きな吹き抜けがある．この環境下では，訪問者が 3F に居ながら 1F~4F~2F~4F などと順に別フロアの AMP センサに観測されることが多く見られた．これらの観測データは，実際にユーザが移動したのか，端末の Probe Request を AMP センサが受信しただけなのかは RSSI 値を比較しても判断し難い．

2) メタデータや移動履歴データの加工過程では，1 日毎のデータをバッチ処理で行ったが，1 日分のデータを約 2~3 分で処理しキャッシュすることができ，処理時間等の不満を感じることはなかった．

3) パーソントリップの可視化でグラフとフロアマップを連動させたように，可視化にはインタラクティブな要素を加えることで，データを適切に表現することができる場合もあり，さらには，その可視化環境にはタブレットを用いたタイルドディスプレイ環境のように，可視化を行う情報環境が重要である．

8. まとめ

Wi-Fi 対応機器が発信する管理パケットに含まれる Mac アドレスを収集し，解析処理を行うことによって Wi-Fi 対応機器所有者の人流を把握することが可能である．我々は，大規模複合商業施設グランフロント大阪において，Wi-Fi パケットをセンシングするセンサデバイス(AMP センサ)を用いて，人流解析システムの実証実験を行った．本報告では，匿名化を施し個人情報を保護した人流解析と可視化を行い，その結果を示した．実証実験の結果から，AMP センサによる匿名人流解析とその可視化は可能であり，その中でも特に，タブレットによる可視化手法が人流を表現するひとつの手段であると確認できた．

今回実験した人流解析から得られた結果とグランフロント大阪の来客に関する資料を比較し，人流解析の精度を確認することは課題として残る．また，Wi-Fi パケットが屋内の吹き抜けで広範囲の AMP センサで受信された影響をフィルタリングし，補正する処理の検討を行い，人流解析と可視化の精度を高めることも今後の課題である．AMP センサからアップロードされるデータをリアルタイムに解析・可視化するシステムの実装も今後の課題であるが，現在の解析システムを改良することで可能であると考えている．

謝辞 本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開 発推進制度 (SCOPE)」(受付番号 132307011) の支援を受けて実施された．

付　録

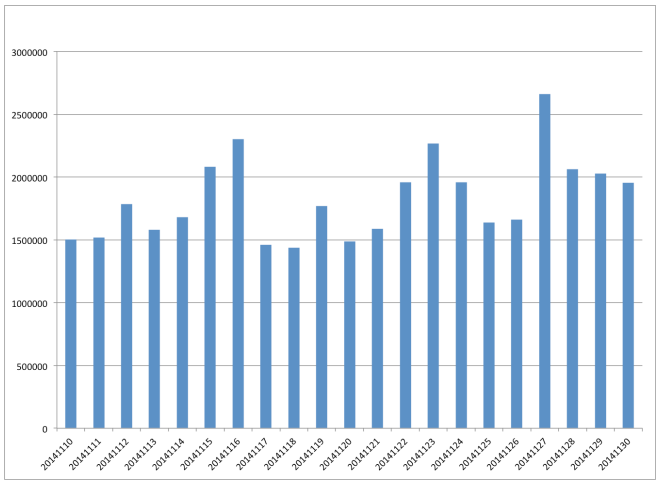

図 1 1 日あたりの取得データ件数

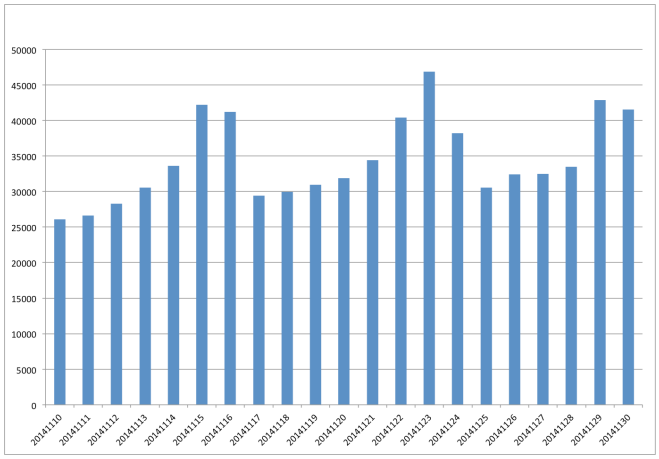

図 2 1 日あたりの AMac アドレス数

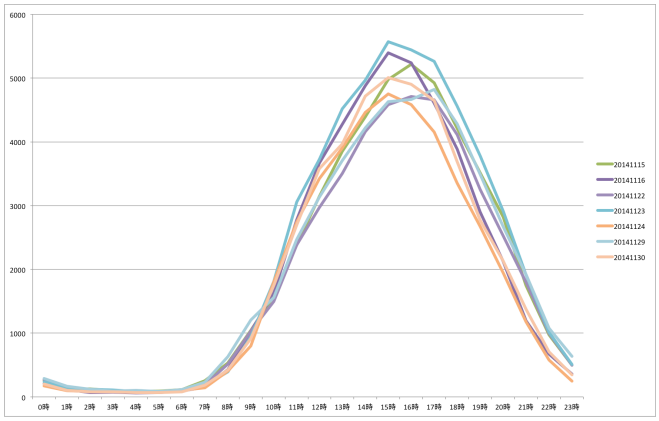

図 3 休日の 1 時間あたりの AMac アドレス数

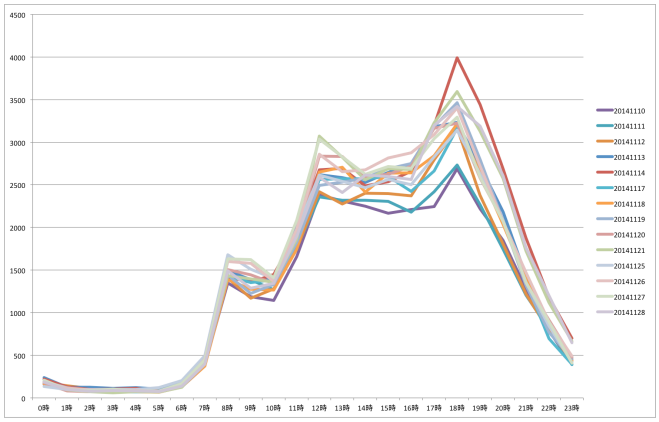

図 4 平日の 1 時間あたりの AMac アドレス数

参　考　文　献

[1] グランフロント大阪，“フロアマップ”，http://www.gfo-sc.jp/floorguide/，2014 年 1 月現在

[2] Wi-fi パケットセンサー研究開発チーム，“「うめきた」における Wi-Fi パケット・アノニマス人流解析システムの研究開発の実証実験”，http://goo.gl/2Gnmd，2014 年 12 月現在

[3] 田名部淳・割田博・松下剛・萩原武司，“高速道路における Bluetooth を用いた交通流計測の取り組み”，土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会, No.49(CDROM), 2014 年 6 月

[4] 中野隆介,沼尾雅之:無線 LAN アクセスポイントへの検 索要求を用いた屋内混雑度推定手法,日本データベース学会論文誌,Vol. 12, No. 1, pp. 121–126　2013

[5] 西田純二・足立智之・牧村和彦・森本哲郎・上善恒雄, “Wi-Fi パケットセンサーによる交通流動解析”, 土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会, No.49(CDROM), 2014 年 6 月

[6] 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,情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], Vol. 2014, No. 45, pp. 1–8(オンライン)

[7] 上善恒雄・三神山駿・辻本悠佑・望月祐洋・西尾信彦・西田純二，“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”，土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会，No.49(CDROM), 2014 年 6 月