BLE パケットデータによるエリア内人流把握と回遊行動傾向の分析

小宮粋史[*1], 一瀬恭平[*1], 花房比佐友[*1], 堀口良太[*1]
株式会社アイ・トランスポート・ラボ[*1]

本研究では、歩行者が持つ Bluetooth Low Energy (BLE)デバイスのアドレス情報等のパケットデータから滞在行動を含めた人流把握手法の開発を目的とし、藤沢市江の島島内に 16 台と横須賀市内総合公園に 13 台の、シングルボードコンピュータ上に構築したパケットセンサを設置し、継続的にデータ取得を行っている。本稿ではそれぞれのエリア内でのパケットデータの特性の分析、アドレス情報の追跡によるエリア内での回遊行動傾向の分析、津波警報発令時における江の島島内での取得データの変動について報告する。

Bluetooth Low Energy (BLE) Packet-Based People Flow Sensing and Mobility Pattern Analysis in Local Areas

Tadashi Komiya[*1] Kyohei Ichinose[*1] Hisatomo Hanabusa[*1] Ryota Horiguchi[*1]
i-Transport Lab Co., Ltd.[*1]

This study aims to develop a method for tracking pedestrian flow, including their stay behavior, by analyzing packet data such as BLE (Bluetooth Low Energy) device address information. We installed 16 packet sensors built on single-board computers in Enoshima, Fujisawa City, and 13 sensors in a park in Yokosuka City, continuously collecting data. This paper reports on the analysis of packet data characteristics in each area, the examination of movement patterns within the areas by tracking address information, and the changes in collected data from Enoshima during tsunami warnings.

Keyword: Bluetooth Low Energy, Pedestrian flow analysis, Packet sensing, Address tracking

1　はじめに

近年、都市部や観光地における人流の把握は、地域活性化や観光資源の最適配置、混雑緩和策の立案など、様々な分野において重要性が高まっている。とりわけ、観光地における来訪者の回遊行動や滞在傾向の分析は、施設配置やイベント計画、交通施策の最適化に直結するため、定量的かつ客観的なデータに基づく評価手法の確立が求められている。

従来、人流調査にはカメラ映像解析、GPS データ取得、Wi-Fi や携帯電話基地局の接続情報など多様な手法が用いられてきた。カメラ映像解析は特定の端末に依存せず高い認識率を得られる一方で、プライバシー保護の観点から運用に制約があり、広域的な行動追跡は困難である。GPS データの活用は広範囲の人流把握が可能であるが、端末利用者が限定されるためサンプル数や取得頻度に課題がある。Wi-Fi パケットデータを利用する手法も存在するが、近年では端末の MAC アドレスがランダマイズされる仕組みが一般化し、同一端末を継続的に識別・追跡することが困難になっている。その結果、滞留や移動

の連続的な分析には制約が生じ、Wi-Fi による人流把握の信頼性が低下しつつある。

我々の研究グループでは、こうした課題を踏まえ、観光地等における来訪者の回遊行動および滞在傾向を分析するための新たな手法を提案している [1]。本稿では、シングルボードコンピュータ（Raspberry Pi[2]）上に構築したパケットセンサを用いて Bluetooth Low Energy（BLE）パケットデータを収集・解析し、人流の動態を把握するシステムの開発について述べ、藤沢市江の島島内および横須賀市内総合公園を対象として実証観測を行い、観測された BLE パケットデータのマッチング処理による回遊行動の分析、および津波警報発令時における人流データの変化を分析する。分析では警報発令前後における来訪者の滞在傾向や回遊行動の変化を定量的に評価し、BLE パケットデータを用いた人流把握手法の有効性と適用可能性について考察する。

2　提案手法の特徴

従来の人流・回遊行動分析 [3]では、GPS や携帯電話基地局の位置情報、Wi-Fi パケットデータ、BLE ビーコンなど、既存の通信インフラやサービスを活用する手法が広く用いられてきた。これらのデータは取得範囲が広く利便性も高いが、通信事業者や施設管理者など外部主体への依存が不可避であり、データ提供契約やアクセス制限のため、観測条件や分析単位を自由に設定することが難しい。また、商用データの利用には高いコストが発生し、長期的・継続的な観測を行う際の経済的負担が大きい。

さらに、個人端末から得られる位置情報や通信履歴にはプライバシー上の懸念が伴い、匿名化や利用目的の明示など厳格な管理が求められる。このため、MAC アドレスのランダマイズが導入されているが、Wi-Fi では端末の MAC アドレスがアクセスポイント接続ごとにランダマイズされ、継続的な端末識別や移動追跡が極めて困難である。一方、BLE ではアドレスランダマイズが約 15 分間維持される仕様 [4]であり、この猶予時間内であれば同一端末を一時的に識別し、複数センサ地点間での移動推定が可能である。これにより、BLE パケットセンサは短時間スケールでの人流変化や回遊行動を捉えることができる。

ここで開発する Raspberry Pi を用いたシステム構成は、低コストで複数地点に容易に展開でき、BLE 信号の受信・集計・送信を自動的に行うことで、リアルタイムな人流モニタリングを実現する。BLE パケットの受信・集計による観測は、個人を特定する情報を取得せず、匿名化された識別子の観測が可能であるため、プライバシー保護の観点から安全性が高い。また、通信事業者や既存ネットワークに依存しないため、解析項目に応じて観測地点や期間、データ処理方法を自由に設定できる。これにより、外部主体の制約を受けず目的に応じた柔軟な観測が可能となる。

さらに、Raspberry Pi および BLE モジュールはいずれも低価格で入手でき、センサネットワークの拡張や長期運用にかかるコストを大幅に抑えられる。商用システムと比較して初期投資・維持費が低く、学術研究や地域実証など限られた予算での運用に適している。

こうした拡張性・低コスト性により、本研究で構築した BLE パケットセンサは外部データへの依存を排除しつつ、プライバシーに配慮した高汎用な人流観測基盤として機能する。したがって、本手法は従来の位置情報依存型の人流分析を補完・代替する手段として有用であり、持続的かつ倫理的なデータ取得を可能にする点で意義が大きい。

3　BLE パケットセンサの構築

3-1 構成概要

本研究で構築した BLE パケットセンサの概要を示す。BLE モジュールが検知した周囲の BLE パケットデータをメモリ上に蓄積し、1 分間隔で集約して外部サーバに送信する仕組みである。

・ハードウェア：
　Raspberry Pi+USB 型 Bluetooth アンテナ
・電源：家庭用 AC100V（消費電力約 0.05kwh）・
・外形サイズ：
　Raspberry Pi 部分
　　99mm x 71mm x 30mm
　SIM カードドングル部分
　　95mm x 36mm x 13mm
　（屋外設置の場合は防水ボックス
　　256mm×160mm×130mm 内に格納）
・データ取得周期：
　リアルタイム（BLE モジュールが BLE パケットを検知次第、内部バスにデータが流れる）
・取得情報：BLE アドレス、RSSI、検知時刻
・データアップロード：
　公衆 Wi-Fi または携帯電話回線（VPN 上での送信）
・データアップロード周期：1 分

3-2 分析手法の概要

本研究では、BLE パケットに含まれるアドレス情報を用いて、同一端末の検出履歴を時系列的に照合し、来訪者の回遊行動を推定した。具体的には、各センサで取得した BLE アドレスを時刻情報とともに記録し、一定の時間窓内で複数センサ間に共通して検出されたアドレスをマッチングすることで、移動経路を再構成する。これにより、匿名化された端末単位でのエリア間移動の順序や滞在時間を定量的に把握することが可能となる。

4　データ取得の実施

4-1 BLE パケットセンサの設置

構築した BLE パケットセンサを、地権者や施設管理者の許可のもと藤沢市江の島島内[5]に 2025 年 7 月から 16 台と横須賀市内総合公園（ソレイユの丘）[6]に 2024 年 8 月から 13 台配置した。

配置図を図-1、図-2 に示す。（基盤地図情報（国土地理院）を加工して作成）。なお、回遊行動の集計、分析は各エリア別個で行い、エリア間での回遊行動は分析対象外とした。

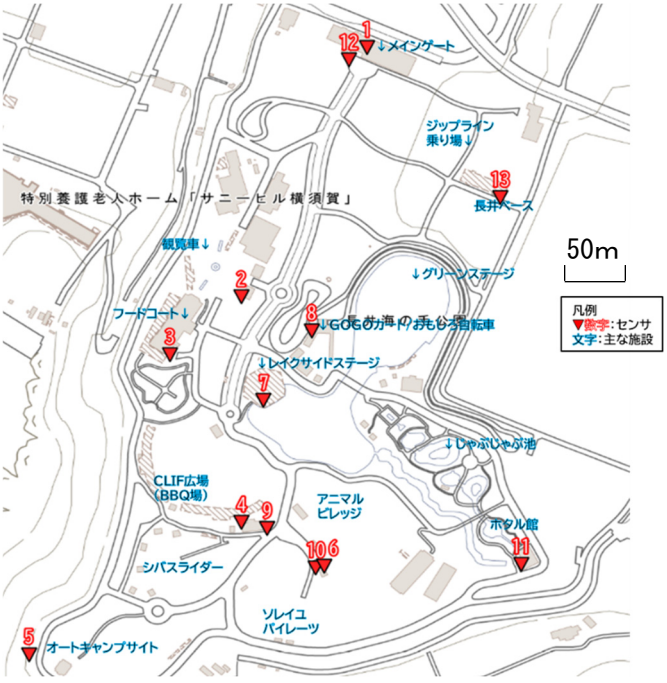

図-1　BLE センサ配置図（ソレイユの丘）

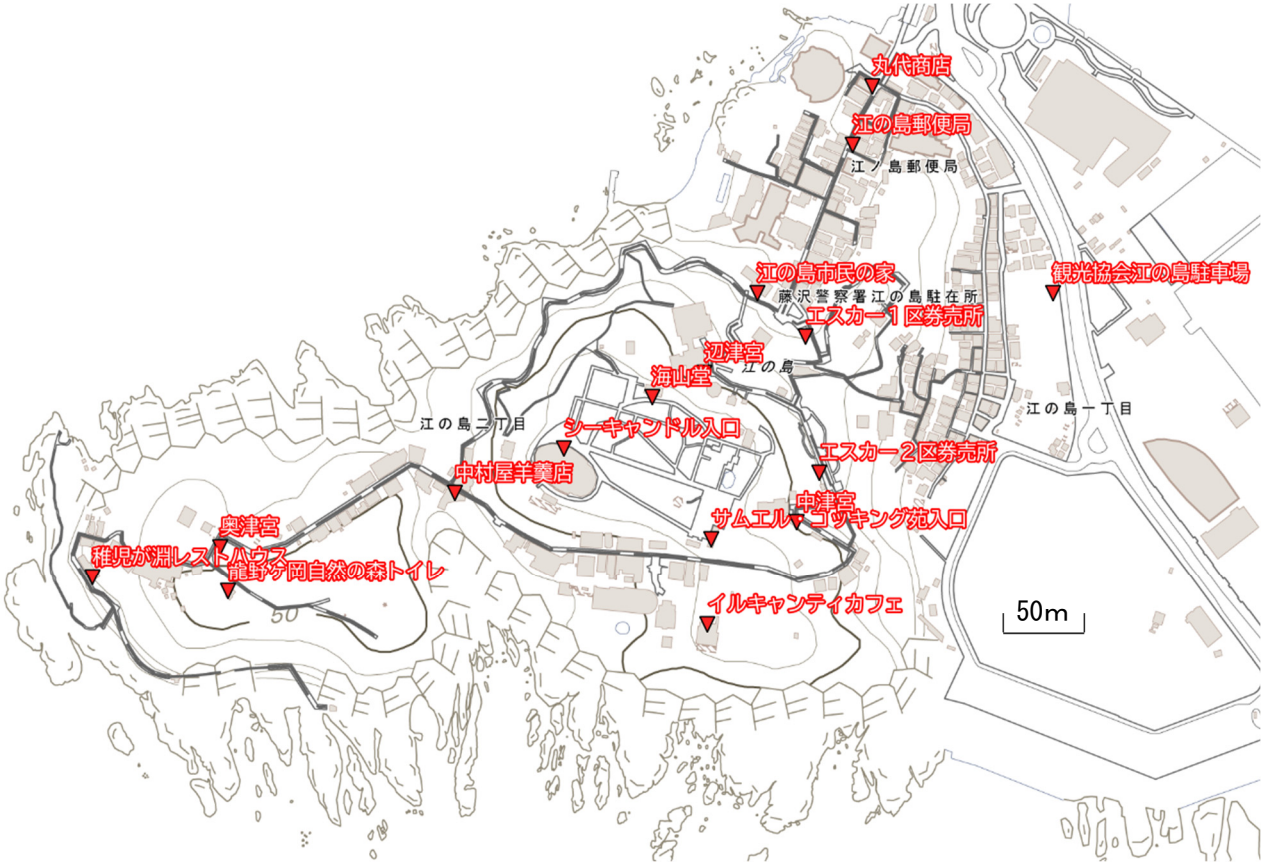

図-2　BLE センサ配置図（江の島）

4-2 取得データの基礎分析

BLE アドレスは追跡回避のためランダマイズ（匿名化、一定時間経過後にアドレス変更）がデバイスによって行われる。短時間でアドレスが変わる場合、同アドレスのマッチングによる移動の追跡や滞留時間の取得が困難になる。

Bluetooth 基本仕様 [7]によると、BLE アドレスは製造時から固有値である public address か、ランダムアドレスが付与され、そのうちランダムアドレスは電源投入毎に値が設定される static random address と、匿名処理が行われる resolvable private address(RPA)、Non-resolvable private address(NRPA)に大別される。

RPA と NRPA の違いは、前者はアドレス解決が可能で、ペアリング済み通信が可能、後者は鍵情報を持たずペアリング不要な機器のための仕様である。

デバイスが private address を使用する場合、そのアドレスの生成は 15 分間隔が推奨されている [4]。各アドレスタイプはアドレスのバイト列から判別可能であるが、流通しているデバイスごとにどのようにランダマイズ処理が実装されているかは不明である。観測された BLE アドレスから、ランダマイズ処理の傾向を把握するため、設置エリア別にアドレスタイプの分類集計を行った。表-1 に集計結果を示す。

表-1　アドレスタイプの集計

	江ノ島（2週間）		ソレイユ（1年）	
StaticRandom	571,835	43.7%	622,231	33.8%
Resolvable	689,696	52.7%	1,160,628	63.0%
NonResolvable	47,545	3.6%	59,140	3.2%
Public	51,317	3.9%	61,640	3.3%
合計	1,309,076		1,841,999	

集計結果から、random address の構成比はおよそ 96%強であり、BLE 機器は、スマートウォッチ、ワイヤレスイヤホン等であり Wi-Fi 同様にランダマイズ機器の普及を示唆しており、BLE パケットデータを用いた分析では、恒久的な個体識別は困難である。しかし、アドレス更新までの短時間（数分～十数分）の間は同一アドレスが継続して使用されるため、同一アドレスを持つ信号を同一端末と仮定し、短時間の移動追跡を行うことが可能である。

本研究では、この特性を利用して、一定時間内のアドレスマッチングに基づく短時間の回遊行動分析を実施した。

図-3 に江の島における各 BLE パケットセンサ配置地点での RPA での固有アドレス観測数と、そのアドレスが他のセンサ配置地点でも観測された箇所数を示す。江の島のメインストリートである仲見世通り周辺に位置する丸代商店や江の島郵便局で多数の観測結果が得られた。エスカー券売所や中津宮等の仲見世通り以遠に配置したセンサでも複数地点とのマッチングが得られた。一方で、エリア端点にある観光協会江の島駐車場や稚児が淵レストハウスでは、他の地点と比べマッチング箇所数は少ない傾向であった。観光協会江の島駐車場は車道に面しているため自動車や自転車由来の BLE デバイスが観測されていること、稚児が淵レストハウスは島内最深部にある岩屋への唯一の経由地点で、この地点の来訪者が他のセンサ配置地点に至るまで 15 分以上間隔が開くことが想定され、アドレスランダマイズの影響によるマッチング数の低下が示唆される。

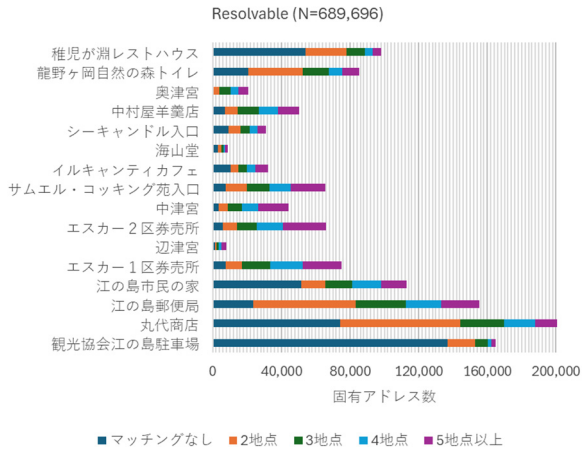

図-3　アドレスマッチング地点数（2 週間合計）

図-4 にセンサ配置地点での固有アドレス観測規模、同一アドレスマッチング箇所を地図上に直線で描画した。来訪者の移動経路や滞留傾向を視覚的に把握することが可能となり、島内における人流の主要な回遊方向および移動集中範囲を明確に示すことができた。

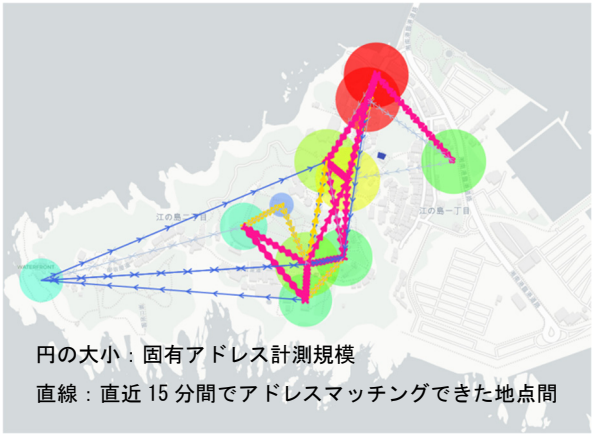

図-4　地点観測数と 2 地点マッチングデータ

5　津波警報発令時の取得データの変動

2025 年 7 月 30 日の津波警報[8]発令時当日（津波警報発令は 8 時 37 分、江の島エリアへの警報拡大は 9 時 40 分（同時刻に公共交通機関停止）、藤沢市による避難指示は 9 時 47 分から 19 時 33 分まで）、午前 6 時から翌 0 時までの BLE アドレス数の集計を行い、平常時との比較を通じて BLE アドレス観測数の変化を分析した。これにより、警報発令後における来訪者の移動傾向や滞在密度の変化を把握し、災害時の人流動態の特徴を BLE パケットセンサから把握した。

図-5 に、各センサ配置地点における BLE アドレス数の時間変化を、平常時の人流と比較するため、前週同時間帯（23 日）に対する減少率 [{N(23 日)−N(30 日)}/N(23 日)] と合わせて示す。減少率が大きいほど、警報発令に伴い検出アドレス数が大きく減少したことを意味する。

江の島弁財天仲見世通りを登った先にある江の島市民の家において、8 時 50 分ころから 12 時ころまで大幅な観測数の増加が見られ、その他の地点では平常時に 10 時以降に見られる観測数の増加が見られない結果であった。特に海面レベルである稚児が淵レストハウスでは観測数が 0 の時間帯も多く、海岸へ近づく来訪者が皆無であったことが見て取れる。

以上の結果から、津波警報発令時には来訪者が海岸部から高所へと移動し、沿岸域への滞在を避ける傾向が明確に示され、来訪者が安全な場所へ集中的に移動したことを示すと考えられる。

6　まとめと今後の課題

本研究では、BLE パケットセンサにより、観光地の人流動態をリアルタイムに観測するシステムを開発・実装した。BLE パケットデータを受信してアドレス数を集計することで、個人を特定することなく来訪者の移動傾向を把握できる。本研究では、江の島におけるセンサ配置地点間での同一アドレス取得状況の確認と、津波警報発令時のデータを対象に平常時との比較分析を行い、災害発生時における人流変化の実態を定量的に評価した。結果として、BLE パケットセンサを用いた観測は回遊行動の解析にとどまらず、災害時の避難・安全確保行動の把握にも有効であることが確認された。また、Raspberry Pi によるセンサ構成は、低コスト・低消費電力で柔軟に運用でき、防災における即時観測システムとしての実用性を有することが示された。一方で、BLE パケットデータのアドレスランダマイズ化が進むことで、同一端末の継続的追跡が困難になる技術的課題が存在する。この課題に対しては、BLE パケットデータの特徴量を活用し、代表的な回遊パターンに応じて最尤推定を行う数値モデルなど、回遊行動推定を可能にする手法[1]の開発に取り組んでいる。今後は、長期的データの蓄積を通じて、イベント時など多様な状況下での人流変化やエリア内の詳細な回遊行動を比較検討する必要がある。さらに、得られた解析結果を観光地の安全管理、避難誘導、混雑緩和など地域運営に活用する仕組みを構築することが課題であり、BLE パケットセンサを活用した人流観測が、防災・観光・地域マネジメントを横断的に支援する統合的情報基盤へ発展することが期待される。

【謝辞】

本研究の BLE パケットセンサ配置にあたっては、長井海の手公園ソレイユの丘指定管理者エリアマネジメント横須賀共同事業体及び株式会社日比谷花壇様、藤沢市観光課様の多大なるご助力とご尽力を頂きました。ここに謝意を表します。

なお、本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究 #08201（JPJ012368C08201）により得られたものです。

【参考文献】

1) 一瀬恭平, 小宮粋史 , 堀口良太, 桑原雅夫, ランダマイズされた BLE パケットセンサー情報を用いた人流把握手法の検討,第 23 回 ITS シンポジウム 2025
2) https://www.raspberrypi.com
3) 国土交通省不動産・建設経済局地理空間情報課, 人流データ利活用事例集 2025, https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan_kensetsugyo/chirikukannjoho/content/001881566.pdf, 2025 年 3 月
4) Bluetooth SIG, Bluetooth Core Specification Version 5.1, Part B, Section 6.1. “Resolvable Private address generation interval”, Bluetooth SIG, 2019.
5) https://www.fujisawa-kanko.jp/spot/enoshima/
6) https://soleil-park.jp/
7) Bluetooth SIG, Bluetooth Core Specification Version 5.1, Part B, Section 1.3.2 “Private Device Address”, Bluetooth SIG, 2019.
8) https://www.jma.go.jp/jma/press/2507/30b/202507301300.html

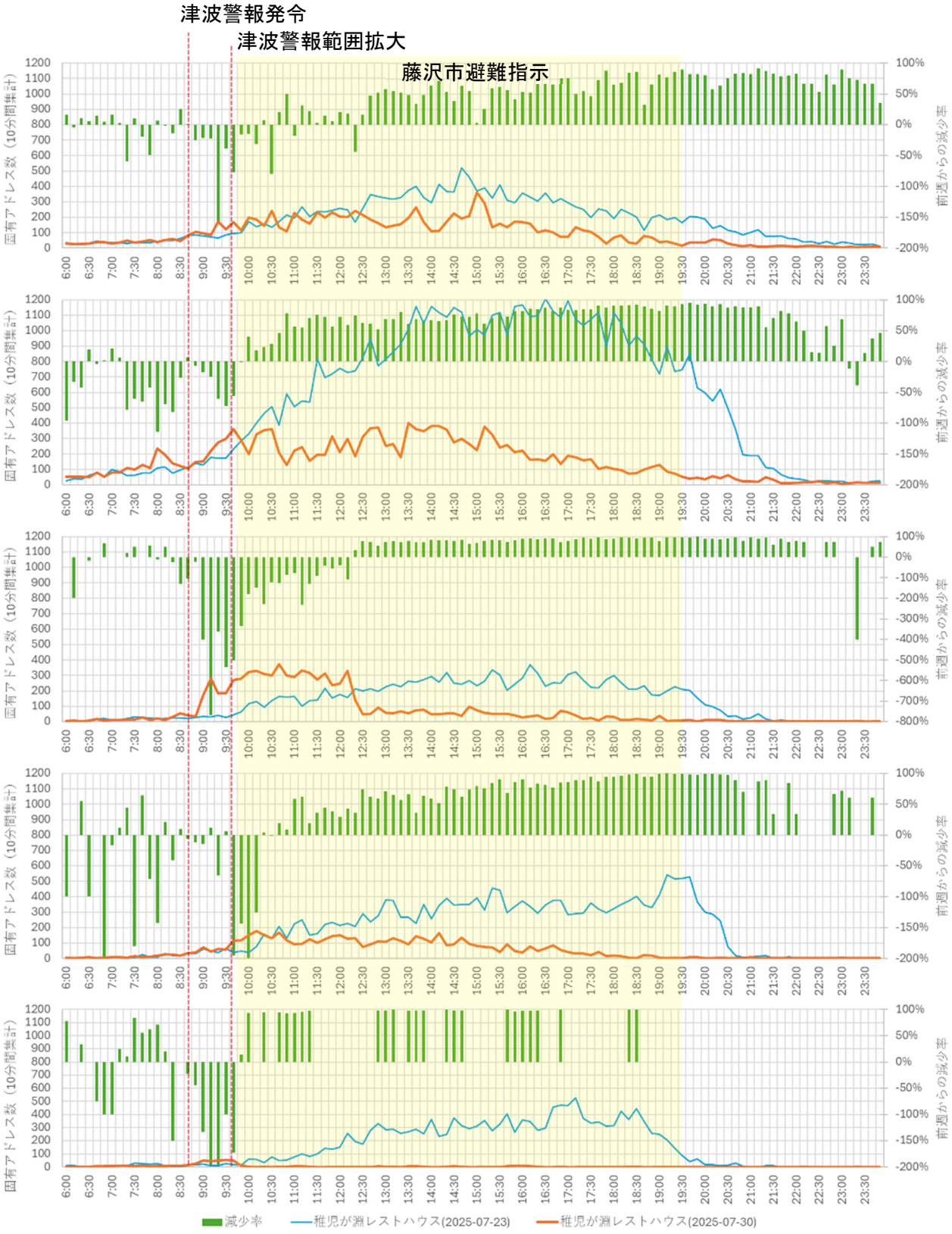

図-5　津波警報発令時の BLE アドレス数