

Wi-Fi パケットセンシングによる 沖縄本島観光周遊パターンの特徴抽出

五百藏 夏穂¹・田中 謙大²・中西 航³・神谷 大介⁴・菅 芳樹⁵・福田 大輔⁶

¹学生会員 東京工業大学修士課程 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: n.ihoroi@plan.cv.titech.ac.jp

²学生会員 琉球大学大学院修士課程 理工学研究科 環境建設工学専攻 (〒 903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)
E-mail: k178477@eve.u-ryukyu.ac.jp

³正会員 東京工業大学特任助教 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: nakanishi@plan.cv.titech.ac.jp

⁴正会員 琉球大学准教授 工学部 環境建設工学科 (〒 903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)
E-mail: d-kamiya@tec.u-ryukyu.ac.jp

⁵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)
E-mail: suga@refrec.jp

⁶正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

インバウンド観光客の増加や、私事活動の多様化等が進む中、観光流動を適切に把握することの必要性は以前にも増して高くなっているが、そもそも自由度の大きい観光交通の特徴を効率的かつ適切に捉えることは依然としてチャレンジングな課題である。本研究では、新たな交通行動調査手法である Wi-Fi パケットセンシングを活用して、沖縄本島観光周遊パターンの特徴抽出を試みる。島内数十箇所にセンシング機器を約 1 ヶ月間設置し、膨大な量の機器固有の ID データを収集した。これより、空港あるいはクルーズ船ターミナルより出入りがなされた観光客である蓋然性が高いデータのみを抽出した上で、さらに、少数の「利用者特性」×「訪問スポット特性」によるクラスタリングが可能な確率的ブロックモデルの手法を援用し、典型的な観光周遊パターンをデータマイニングにより明らかにした。

Key Words: Tourists' travel behavior, Wi-Fi packet sensing, stochastic block model

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年の日本では、インバウンド観光客の増加や、休日の余暇活動の多様化等の社会背景のもと、国家的に観光振興が進められている。特に観光が重要産業となっている地域では、より実効性の高い観光施策を施すことが必要である。適切な観光施策を検討するにあたっては、観光客の実際の行動データをもとに、観光行動の実態を把握することが必要である。しかしながら、個人単位での観光が増加し、交通手段や目的などの面で大きく多様化している観光行動の全体像を把握することは、従来の統計情報や交通調査のみの利用では大きな限界があると考えられる。特に、観光交通には交通そのものが目的となるなど、通常の交通とは異なる特徴も存在し、通勤や通学などのように移動を派生需要と見立てるのではなく、分析手法に関しても、観光交通のそのような実情を反映したものが求められている。

本研究で対象とする沖縄県は日本有数の観光地であり、毎年夏期シーズンには多くの観光客が国内外から来訪する。沖縄県の観光客数は近年増加傾向にあり、観

光は沖縄県の主要産業の一つとなっている。さらに近年では、クルーズ船の寄港数の増加や LCC 線の就航に伴い近隣アジア諸国を中心として国外からの観光客も増加し、観光日数や観光パターンに関しても多様化が進んでいる。沖縄県の観光地の特徴として、著名な観光スポットが全島に幅広く存在すること、観光地への主な交通手段としてレンタカーが利用されていることなどが挙げられる。しかし近年では、レンタカー利用の弊害として、観光地周辺や那覇市内での交通渋滞の深刻化という問題も生じている。これらの問題に対する施策を検討する上でも、基礎情報として観光客の行動実態を把握し分析を行うことが重要と考えられる。

(2) 関連既往研究

従来より、観光客の行動把握のために様々な方法を用いた調査が行われてきた。かつての観光交通調査は紙ベースのアンケート調査が主流であった。森地ら¹⁾は、横浜市、川崎市の家庭訪問調査と房総半島での入込調査をもとに観光周遊行動のモデル化を行っている。しかし紙ベースのアンケート調査の限界点として、回収

率の悪さによるサンプル数の少なさ、回答者の記憶による回答の不確実性といった課題が残されている。こうした従来のアンケート調査、断面交通量調査と、それらを用いた入込客数等の母集団推定の限界点については、本橋・永井²⁾がまとめている。

一方、近年における情報通信技術の進歩が目覚ましく、携帯電話などが持つ GPS システムを利用して観光客の行動データを取得することが可能となってきた。こうしたシステムを用いたプローブパーソン調査の可能性と課題については羽藤³⁾が整理を行っている。兵藤ら⁴⁾は、本研究の対象地である沖縄本島においてプローブパーソン調査を用いた観光周遊行動の特徴抽出と施策分析を行っている。しかし、プローブパーソン調査の課題として、携帯端末の貸し出しの困難さ、被験者への協力依頼の難しさ、回答者の母集団代表性の低さなどが考えられる。他方で近年では、携帯電話基地局情報を用いた長期・広域での分析等も行われるようになりつつある。そのようなビックデータの代表例として、NTTドコモ社が提供するモバイル空間統計が挙げられる。このようなデータでは、被験者に負担をかけずとも位置・時間情報を取得できる手法であるとして注目されており、例えば生形・関本⁵⁾では、観光実態把握の基礎情報としての可能性について検討している。しかし、データの機密性のため、分析に用いることができるのは時間的・空間的にあらかじめ集計された統計情報にとどまっている。

このような、Wi-Fi 通信機能を持つスマートフォンなどの通信機器が急速に普及した背景のもとで、スマートフォンから Wi-Fi アクセスポイントを探索するために発信されているプローブリクエスト (Probe Request: PR) に着目した“Wi-Fi パケットセンシング”に基づく交通行動データ収集手法が注目を集めつつある。例えば中西ら⁶⁾は、沖縄県本部半島内の複数の観光施設に Wi-Fi パケットセンサーを設置し、滞在時間や美ら海水族館の来場者数などの把握可能性についての基礎的な検討を行っている。壇辻ら⁷⁾は、奈良県長谷寺参道を対象に、来訪交通手段ごとの観光客回遊行動の分析を行っている。これらの既存研究でも確認されており、Wi-Fi パケットセンシングには既往のアンケート調査や GPS を利用した調査の限界であった、サンプル数の確保の問題や調査被験者への負担をなくし、低コストで観光客の規模に比例した大規模データの取得が可能であるという利点がある。この利点を生かし、広域的に Wi-Fi パケットセンサーを設置することにより、今まで把握が難しかった観光客の多様な行動データを時空間的に正確に把握することが可能となると期待される。また、長期的なモニタリングによって、季節変動を考慮したデータの取得も容易に可能となる。

(3) 研究の目的

そこで、本研究では、Wi-Fi パケットセンシングによって得られたデータを解析して、沖縄本島における観光客の周遊行動の特徴抽出を行うことを目的とする。これにより、既往の観光交通調査方法では把握が困難であった長期・広域的な規模での観光客の時空間的な周遊の特徴を明らかにすることを企図している。

2. Wi-Fi パケットセンシングの原理

Wi-Fi パケットセンシングとは、スマートフォンなどの各端末が Wi-Fi アクセスポイントを探索する際に発信する“プローブリクエスト”(PR)に含まれている情報を受信する仕組みを備えた Wi-Fi パケットセンサーを各地に設置することでデータを取得する調査手法である。この PR には、端末固有の MAC アドレスの他に、アクセス時刻、電界強度の情報が含まれ、これをセンサーが記録する。PR の発信間隔は端末によって異なるものの、数秒から数分間隔で行われ、センサーは、取得可能範囲内にある端末からの PR を収集する。PR の取得可能範囲は周囲の条件によって異なるものの、障害のない見晴らしの良い環境では最大で 500m ほどの範囲まで取得できるとされている。この仕組みを用いて連続的にデータを取得することで、取得可能範囲内に存在するスマートフォンの通過や、当該地域への滞在時間を把握することが可能である。

本研究で用いた Wi-Fi パケットセンサーは、株式会社地域未来研究所が開発した“WiFiScanner”である。図-1 にその外観を示す。このセンサーが沖縄県内の観光流動を把握するのに適している点として、まず機器本体が有する利点が挙げられる。WiFiScanner は機器本体が比較的安価で投資コストも小さい。そのためスマートフォンが普及している地域で有効な調査手法であるとして、沖縄県の観光客が訪れやすい離島などへの展開も可能である。また、調査被験者の情報をパッシブに受信するため、従来の調査方法と異なり、調査被験者である観光客への負担がなく、一度に大量のサンプルを確保することが可能である。このように、沖縄観光流

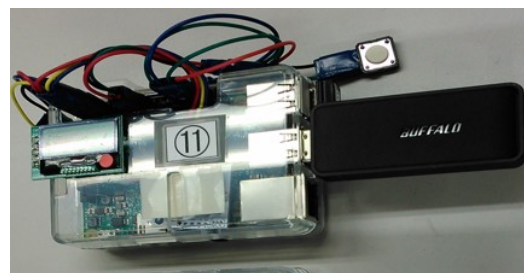


図-1: WifiScanner の外観

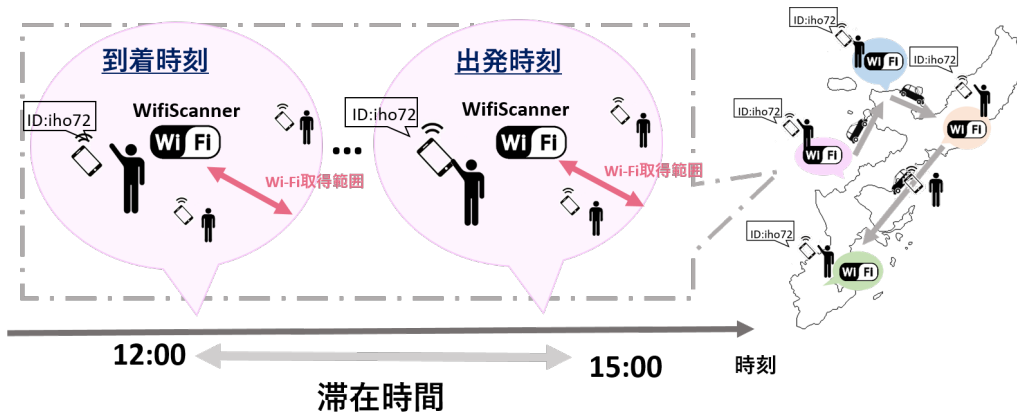


図-2: Wi-Fi パケットセンシングによるデータ収集の仕組み

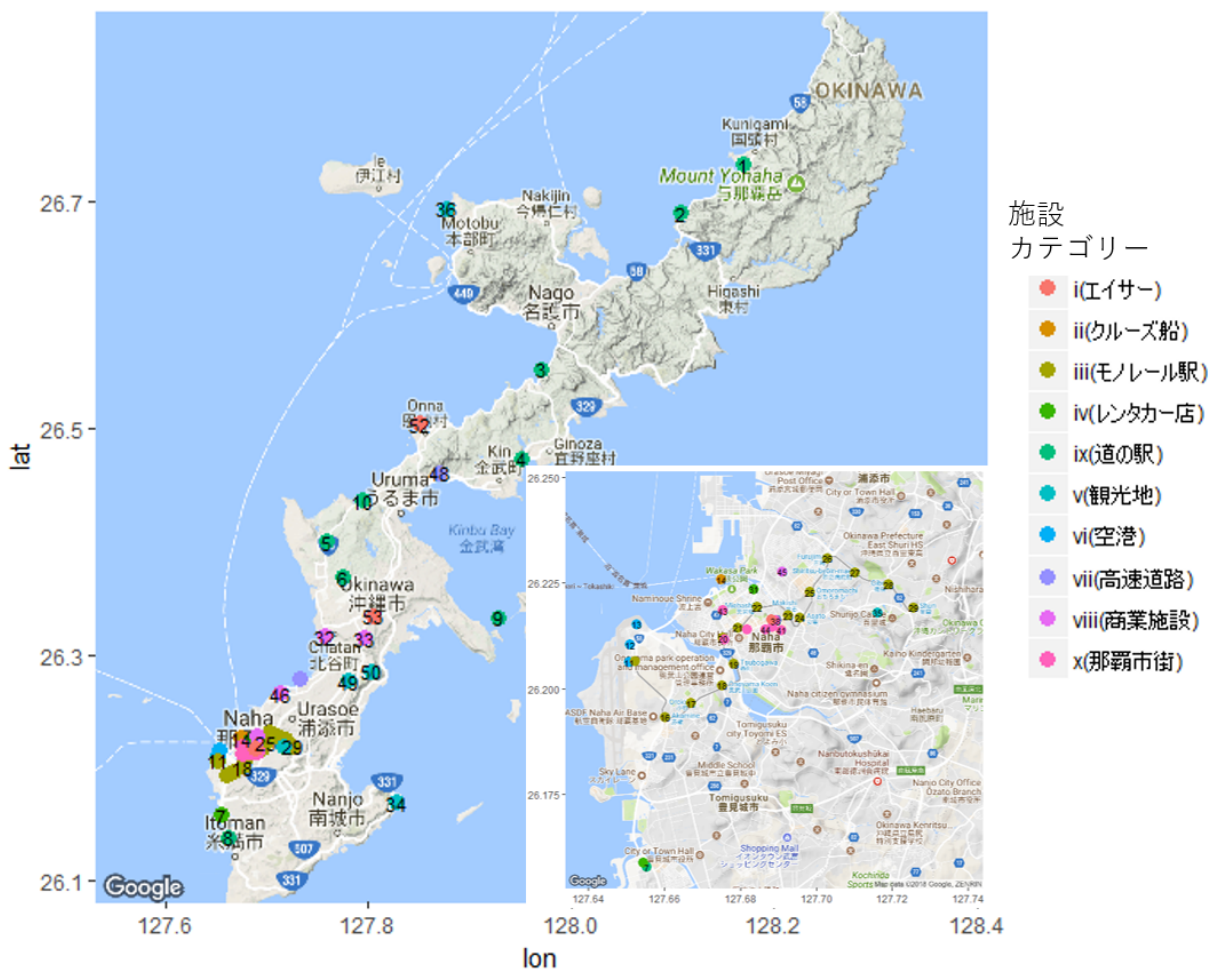


図-3: Wi-Fi パケットセンサーの設置箇所

動データの取得に対し利点を多く有する Wi-Fi パケットセンサーを長期・広域的に観光地や道の駅などに設置することで、長期・広域での観光客の流動を明らかにし、観光周遊パターンの特徴抽出を試みる。図-2 にデータ収集の基本イメージを示す。

3. 沖縄本島におけるモニタリング調査

(1) 調査概要

2017年8月6日～2017年9月19日の約一か月半に渡り、沖縄本島全島に渡り機器を設置してモニタリング調査を実施した。図-3と表-1に Wi-Fi パケットセン

表-1: Wi-Fi パケットセンサーの設置箇所リスト

番号	施設名	設置期間	(エリア, 施設 カテゴリー)	番号	施設名	設置期間	(エリア, 施設 カテゴリー)
1	道の駅国頭	全期間	(a, ix)	28	モノレール儀保	全期間	(h, iii)
2	道の駅大宜味	"	(a, ix)	29	モノレール首里	"	(h, iii)
3	道の駅許田	"	(b, ix)	30	OTS レンタカー豊崎	"	(d, iv)
4	道の駅宜野座	"	(c, ix)	31	OTS レンタカーとまりん	"	(g, iv)
5	道の駅喜納番所	"	(c, ix)	32	北谷町観光情報センター	"	(c, viii)
6	道の駅嘉手納	"	(c, ix)	33	イオンモールライカム	"	(c, viii)
7	道の駅豊崎	"	(d, ix)	34	斎場御嶽	"	(d, v)
8	道の駅糸満	"	(d, ix)	35	首里城	"	(h, v)
9	海の駅あやはし館	"	(e, ix)	36	美ら海水族館	"	(b, v)
10	おんなの駅	"	(b, ix)	37	国際通り	"	(g, x)
11	那覇空港・国内線	"	(f, vi)	38	平和通り	"	(g, x)
12	那覇空港・国際線	"	(f, vi)	39	牧志公設市場	"	(g, x)
13	那覇空港・LCC	"	(f, vi)	40	壺屋焼き物博物館	"	(g, x)
14	クルーズ船ターミナル	"	(g, ii)	41	那覇バスターミナル	"	(g, x)
15	モノレール那覇空港	"	(f, iii)	42	クニダテラス	"	(g, x)
16	モノレール赤嶺	"	(f, iii)	43	浮島通	"	(g, x)
17	モノレール小祿	"	(f, iii)	44	沖縄総合事務局	"	(g, x)
18	モノレール奥武山公園	"	(f, iii)	45	ビザハウス本店	"	(c, viii)
19	モノレール壺川	"	(g, iii)	46	沖縄コンベンションセンター	"	(c, viii)
20	モノレール旭橋	"	(g, iii)	47	伊芸 SA	"	(d, vii)
21	モノレール県庁前	"	(g, iii)	48	中城 PA	"	(d, vii)
22	モノレール美栄橋	"	(g, iii)	49	中城城跡	"	(d, v)
23	モノレール牧志	"	(g, iii)	50	万座毛	8/11 9:00-18:00	(c, v)
24	モノレール安里	"	(g, iii)	51	1万人のエイサー祭り会場	8/6 12:00-19:00	(g, i)
25	モノレールおもろまち	"	(g, iii)	52	エイサーナイト会場	8/12・19 19:30-21:00	(e, i)
26	モノレール古島	"	(h, iii)			8/13・20 19:00-21:00	(e, i)
27	モノレール市立病院前	"	(h, iii)	53	全島エイサー祭り会場	8/15 18:30-21:00	(e, i)
						8/16・17 15:00-21:00	(e, i)

サーの設置箇所と設置期間を記す。本調査では、県外や国外からの観光客の固有アドレスを判別することを目的に、空港やクルーズ船ターミナルなどにもセンサーを設置した。また、観光シーズンとその他のシーズンとの季節性の違いを把握するため、設置期間は長期に渡っている。データ取得の際には、個人情報保護の観点から MAC アドレスをハッシュ化して、オリジナルの MAC アドレスは保持しないこととした。また、取得を望まない観光客には調査中であることを必要に応じて掲示し、Wi-Fi 通信をオフにするよう注意喚起を行うなど、個人情報保護の観点に留意して調査を行った。

(2) データクリーニング処理

取得した全データには、観光客以外の地元住民の所有のスマートフォン等からの PR 情報や、施設に常設されているパソコン機器等からの PR 情報も含まれており、その全てを観光客のデータとみなすことはできない。そこで、以下のような滞在日数や訪問施設の条件から観光客を特定できるような条件を与え、データのクリーニング処理を予め行った上で観光客と思しきデータを抽出し、分析に用いることとする。

- (a) 調査期間内にしか記録されていない PR 情報に限定
- (b) 単独の地点毎のクリーニング
 - 営業時間による条件（施設により異なる）
 - 滞在時間による条件（施設により異なる）
- (c) トリップチェーンを考慮したクリーニング

表-2: クリーニングに伴うユニーク ID 数の変化

調査期間内の観測データ	20,771,606	
営業時間・滞在時間制限(施設別)	19,935,810	
移動の開始点/終点が空港(左) / クルーズ船ターミナル(右)	4,146,738	202,038
トリップ数が 1 以上(左: 空港, 右: クルーズ船ターミナル)	177,302	12,273
総滞在日数制限(左: 空港, 右: クルーズ船ターミナル)	165,464	12,269
クリーニング後の観光客データ	177,733	

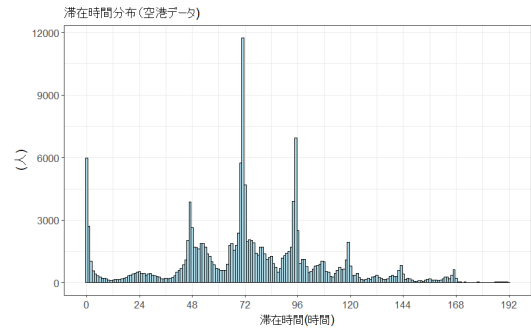
- 最初と最後の観測地点が空港またはクルーズ船ターミナル
- トリップ数が 1 以上(複数の Wi-Fi パケットセンサーで観測があったユニーク ID)
- 妥当な観光日数(空港発着: 8 日以内, クルーズ船ターミナル発着: 2 日以内)

これらのクリーニング処理を施すことで、観光客のデータの絞り込みを行った。クリーニング処理による各過程でのユニーク ID 数の変化を表-2 に示す。

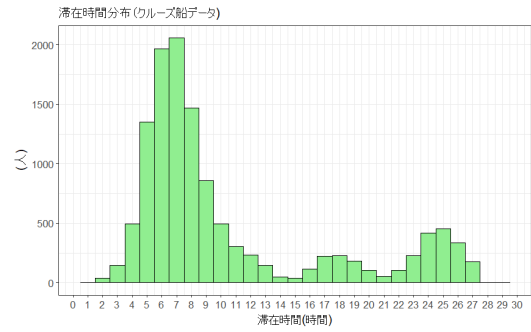
(3) 基礎分析

本節では、クリーニング後のユニーク ID 数に対する基礎的な集計分析を行う。まず、空港発着のデータ及びクルーズ船ターミナル発着のデータを集計して得られる滞在時間と訪問箇所数の分布を図-4 と図-5 にそれぞれ示す。滞在時間を見ると、空港発着データでは 2 日~4 日の滞在が多く、沖縄県の観光統計実態調査⁸⁾の結果と同様の傾向が確認される。一方、クルーズ船ターミナル発着データについては全体的に滞在時間が短くなっている。深夜帯に到着するクルーズ船も存在することなどを考慮すると、活動時間として妥当な滞在時間分布である。トリップ数も滞在時間の影響を受けていると考えられ、滞在時間が長い空港データの方が全体的な訪問箇所数も多いことが傾向として読み取れる。

次に、各施設の日別ユニーク ID 観測数の変遷について分析を行う。図-6 は、観光客が比較的多く来訪すると思われる OTS レンタカー、道の駅許田、首里城、那覇空港国内線ターミナルにおける日別ユニーク ID 数の推移を示したものである。平日と週末の違いはあるものの、これらの地点では、8 月上旬から 9 月へと時間が経つに連れて、一日あたりに観測されるユニーク ID 数が徐々に減少していることが確認できる。これは、観光のピークシーズンである 8 月に観光客が集中しているが、9 月に入って夏休みも終わると、徐々に沖縄本島を来訪する観光客が減少する傾向に呼応した結果となっている。

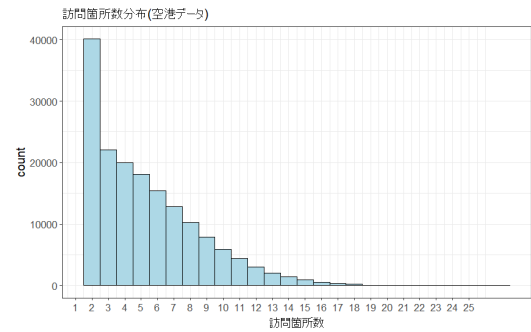


(a) 空港発着データ

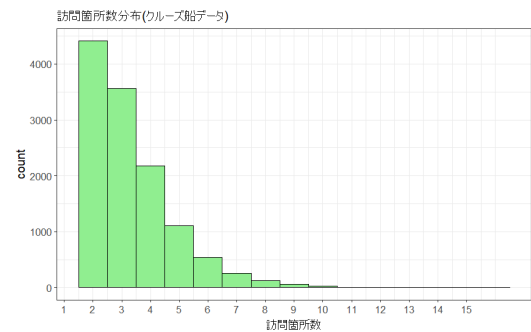


(b) クルーズ船ターミナル発着データ

図-4: 滞在時間分布



(a) 空港発着データ



(b) クルーズ船ターミナル発着データ

図-5: 訪問箇所数分布

また、図-7 には、クルーズ船ターミナル 1 時間別のユニーク ID 数の変化を示す。Wi-Fi パケットセンシングにより得られたデータと、実際のクルーズ船寄港スケジュールと照らし合わせて比較すると、船の入港後と

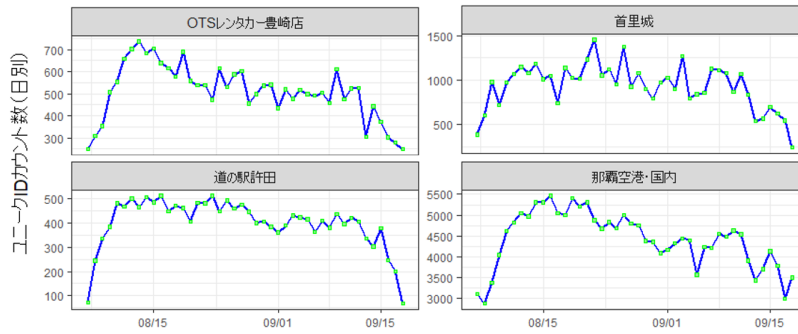


図-6: 日別ユニーク ID 数の変化

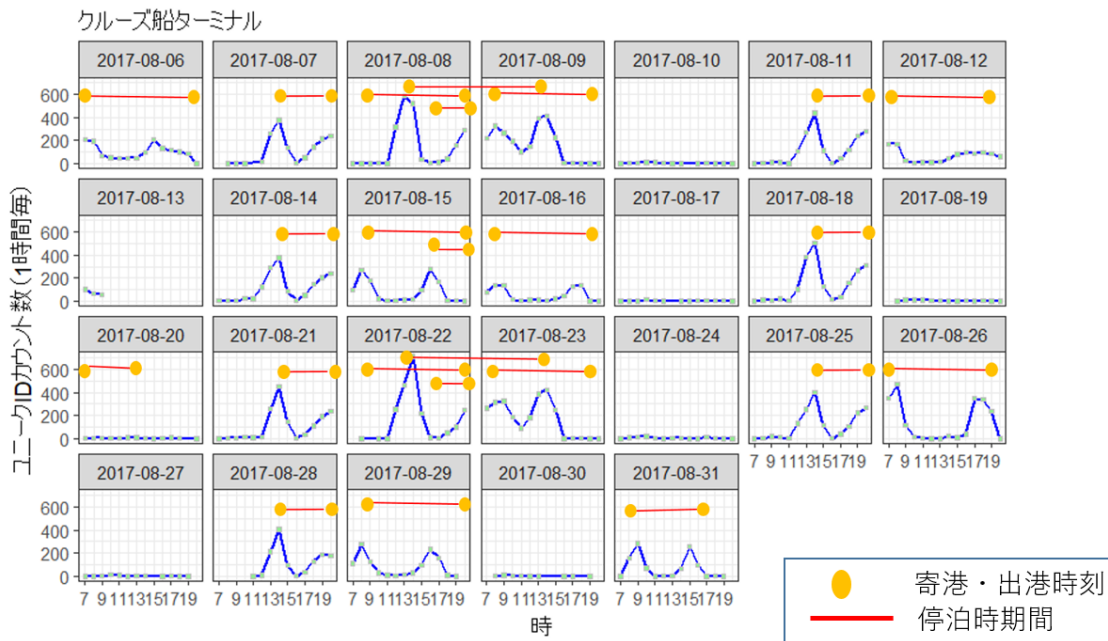


図-7: クルーズ船の来訪タイミングと時間別ユニーク ID 数の関係

出港前に観測数が極端に増えていることが分かり、船舶の規模や複数船滞在時の規模なども概ね反映されていると考えられる。

さらに、図-8には、Wi-Fi パケットセンサーの設置箇所に準じて沖縄本島を 8 つのエリアに大分割し、その上でユニーク ID の空間的推移を集計して得られたエリア単位での OD 表を示す。観光客の主要な出入り口である空港や、那覇市の国際通り周辺での域内トリップが多いことが分かる。これは観光客が集中し、トリップも多い歩行行動エリアにセンサーを多く設置したためであり、那覇市内の詳細な行動データを把握することが可能であると考えられる。一方で、全島に点在する施設は、車での立ち寄り・通過地点となる道の駅や、地域を代表する観光地などを選択してセンサーを設置

したことに起因して相対的に流動量が小さくなっている。このように、エリア間の絶対的な流動量は、各エリア内に設置されたセンサーの総数に大きく依存するものの、本部半島との立ち寄り地点として中部エリアへの流動が生じている状況などについて、一定程度まで類推することが可能となっている。

4. 広域周遊パターンの特徴抽出

(1) 確率的ブロックモデルの概要

大量の Wi-Fi ログデータから効率的に観光客の典型的な空間的流動パターンを把握するために、機械学習の関係データ分析手法の一つである確率的ブロックモデル (Stochastic Block Model: SBM) を用いて観光客の

a.北部	251	225	68	5	11	65	91	7
b.本部半島	156	9902	5601	343	445	2053	9304	530
c.中部	98	6142	3249	589	399	2970	7945	925
d.南部	12	591	1316	4233	562	14869	5355	826
e.東部	22	1670	1545	204	149	633	1302	248
f.那覇空港周辺	45	3570	6929	14190	2708	135802	48343	6334
g.国際通り周辺	43	6319	6393	5042	1428	45888	143279	15925
h.首里周辺	0	520	1501	1196	404	5187	19520	7460
	a.北部	b.本部半島	c.中部	d.南部	e.東部	f.那覇空港周辺	g.国際通り周辺	h.首里周辺
	destination							

図-8: エリア間 OD 表

行動パターンの特徴抽出を試みる。SBM では、大量のデータから、あらかじめ定めた少数の「利用者特性」及び「訪問スポット特性」によって規定される“ブロック”を自動的に生成するクラスタリング手法の一つである。

分析に用いるデータは、表-2 の手順により抽出した 177,733 個のユニーク ID からさらにフィルタリングを行って準備した。具体的には、Wi-Fi パケットセンサーの設置期間が 3 日以内の短期間しか設置していない施設、旅程の起終点となる空港とクルーズ船ターミナル、機器設置を行ったが途中機器の不良によりデータが取れていなかった施設、さらに観光客が訪れづらいたらうと考えられる箇所を除いた 32 施設とし、残った計 159,335 個のユニーク ID を本章における分析の対象とする。

なお、以下の説明は、主に Bhatia et al.⁹⁾, Govaert and Nadif¹⁰⁾, 石黒・林¹¹⁾ に準拠している。観光客が表-1 の各訪問地へ訪問したか否かを 1, 0 で表すバイナリー行列 X では、 I 行の要素 (ユニーク ID) と J 列の要素 (訪問地) によって規定されるものとする。このとき、 $i = 1, \dots, I$ を行のインデックス、 $j = 1, \dots, J$ を列のインデックスとする。SBM によるクラスタリングの実施により、行が K 個のブロックに、列が L 個のブロックにそれぞれ分割されるとしよう。このとき、 $k = 1, \dots, K$ を行のクラスインデックス、 $l = 1, \dots, L$ を列のクラスインデックスとする。さらに、 $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_K), \rho = (\rho_1, \dots, \rho_L)$ で表されるベクトルは、それぞれの行、列が k 番目の行、 l 番目の列クラスに所属する確率を表すものとする。また、二項変数 $z_1 = (z_{11}, \dots, z_{1K}), w_1 = (w_{11}, \dots, w_{1L})$

は、それぞれの要素のクラスラベリングを表し、 i がクラス k に所属するとするとき $z_{ik} = 1$ 、そうでないときは $z_{ik} = 0$ と表す (あるいは、 $z_{ik} = 1$ なら $z_i = k$ のように記述しても良い)。同様の表現を w についてもあてはめることとする。また、 $\theta = (\pi, \rho, \alpha)$ は未知パラメータベクトルとする。

このとき、SBM に基づくデータ生成モデルは以下のように表わされる。

$$f(X; \theta) = \sum_{(z,w) \in Z \times W} \prod_{i,j} \pi_{z_i} \rho_{w_j} f_{z_i, w_j}(x_{ij}; \alpha)$$

ここで、 $f_{z_i, w_j}(x_{ij}; \alpha)$ は確率分布である。本研究で用いるデータは訪問有無を表す 1,0 のバイナリーデータであるので、この確率分布として以下の Bernoulli 分布を採用する。

$$f_{kl}(x_{ij} \alpha_{kl}) = (\alpha_{kl})^{x_{ij}} (1 - \alpha_{kl})^{1-x_{ij}}$$

このとき、対数尤度は以下のように定義される。

$$L_c(z, w, \theta) = \sum_k \sum_i z_{ik} \log \pi_k + \sum_l \sum_j w_{jl} \log \rho_l + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l z_{ik} w_{jl} \log f(x_{ij} \alpha_{kl})$$

この対数尤度の最大化によって未知パラメータの推定を行う。本研究では、BCEM (Block Classification Expectation Maximization) アルゴリズム⁹⁾ に基いてパラメータ $\theta = (\pi, \rho, \alpha)$ の推定を行う。BCEM アルゴリズムは、SBM に特化した EM (Expectation-Maximization) アルゴリズムであり、EM アルゴリズムの間に Classification step (C-step) を導入していることに特徴がある。

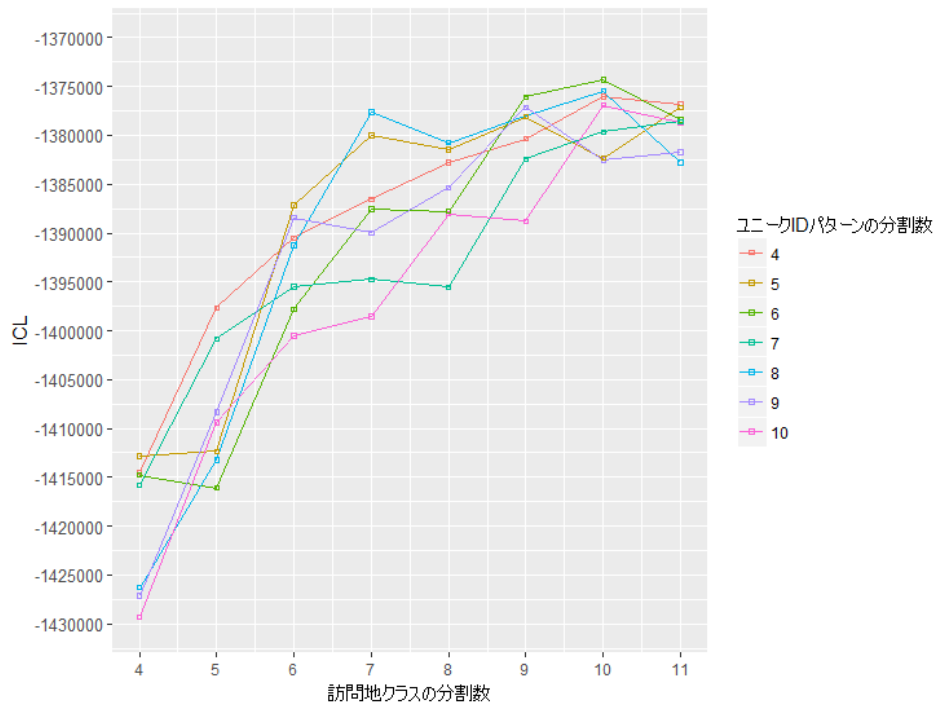


図-9: ICLに基づくブロックパターン（ユニーク ID 分割数×訪問地分割数）の検討

初期値を $(z^0, w^0, \theta(\alpha, \pi, \rho)^0)$ とし, z^c の c を繰り返し回数とする. また $u_{il} = \sum_j r_{jl} x_{ij}$, $v_{jk} = \sum_i t_{ik} x_{ij}$ とすると, BECM アルゴリズムは以下のようなになる.

E-step: 事後確率の計算

$$t_{ik}^c = \frac{\pi_k f_{kl}(x_{ij} \alpha_{kl})}{\sum_k \pi_k f_{kl}(x_{ij} \alpha_{kl})}$$

C-step: t_{ik} を最大化するような z_{ik} のクラスを決定

$$z_{ik}^{c+1} = \operatorname{argmax} t_{ik}^c$$

M-step: 尤度最大化 ($\pi_k^{c+1}, \alpha_{kl}^{c+1}$)

$$\pi_k^{c+1} = \frac{\sum_i z_{ik}^{c+1}}{n}$$

$$\alpha_{kl}^{c+1} = \frac{\sum_i z_{ik}^{c+1} u_{il}}{\sum_i z_{ik}^{c+1} \sum_j w_{jl}^{c+1}}$$

同様のステップを w_{jl}^c についても行い. これらを収束するまで繰り返す.

(2) 推定結果と考察

本研究では, モデル M のユニーク ID の分割クラス数 K , 並びに, 訪問地分割クラス数 L の決定にあたり, 以下の ICL(Integrated Completed Loglikelihood) を評価指標として用いる.

$$ICL(M) = \log p(x, z, w) = \log \int p(x, z, w \mid \theta; M) p(\theta; M) d\theta$$

ここで, $p(\theta)$ は事前分布を示す.

まず, ユニーク ID の分割クラス数を $K = 4 \sim 10$ の間で, また, 訪問地の分割クラス数を $L = 4 \sim 11$ の間で変化させ, それらの全組合せの元で ICL を算出した

結果を図-9に示す. いずれのユニーク ID 分割クラス数においても, 訪問地分割数が小さい $L = 4, 5, 6$ など範囲では急激に ICL の増加 (改善) が見られる. 一方, $L = 10, 11$ 付近ではその増加幅が小さくなり, ICL が概ね収束している傾向が読み取れる. どの分割クラス数の組み合わせに基づくべきかについては, ICL のみならず, その解釈の妥当性によっても判断されるべきである. また, ユニーク ID の分割数が小さい $K = 4, 5$ といった状況では, 観光客の周遊パターンについて非常にラフな考察を行うことしかできない. 他方で, 分割数を大きくし過ぎると明快な解釈が困難なブロックも生じやすくなる.

以上のような考えのもと, 本研究では, 解釈のしやすく, かつ妥当な数でのクラス分類ができていく $K = 8, L = 10$ の場合の SBM の適用結果に着目して考察を行うこととする. 図-10に $K = 8, L = 10$ の場合のクラスタリング結果を記す. ここでは, 訪問地の分割結果を“Class (クラス) 1 ~ 10”と表記する. また, 観光客 (ユニーク ID) の分割結果を“Pattern (パターン) a~”と表記することとする.

表-3には, 10に分割された訪問地の内訳を示す. 多少の乖離はあるものの, 訪問地の各 Class は那覇市内のような主要な観光地を含む Class と, 全島で見たとときの大きなエリア別にまとまった Class という, 二つに大別されることが分かる (大別した結果を表-4にまとめる). これは, 近隣のエリアへの訪問が同時に起こり

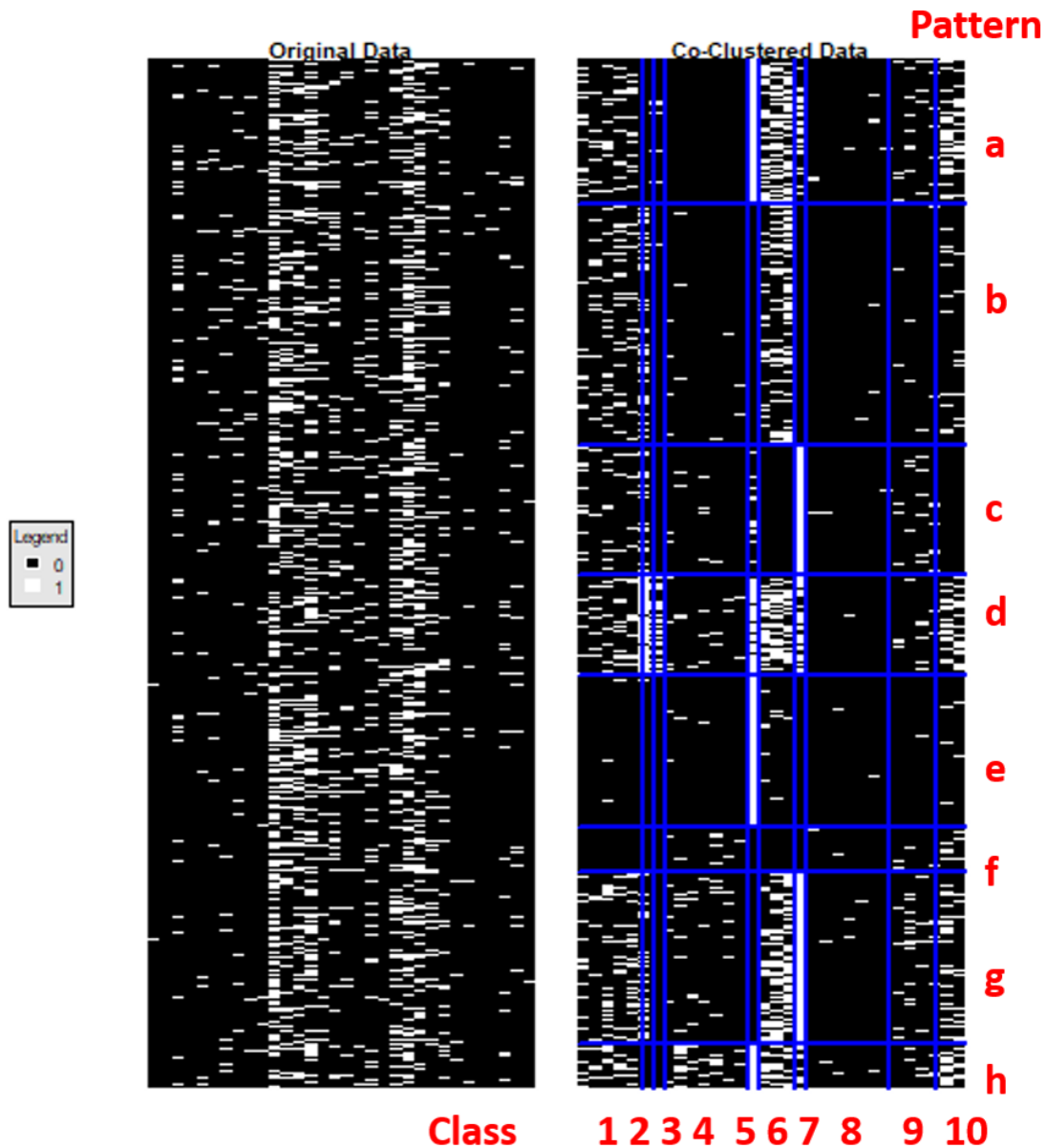


図-10: SBM の適用結果（縦：ユニーク ID・分割数 8，横：訪問地・分割数 10）

やすいことを示唆している。特に前者的那覇市内 Class (Class 2, 3, 5, 6, 10) に関しては、モノレール駅などへの来訪も行われていることから、那覇市内における移動手段についても推測も可能となっている。一方、後者の近隣エリア Class (Class 1, 4, 7, 8, 9) は、全島に点在する主要な観光地への訪問パターンを推測し得る Class となっている。

次に、図-10の結果を縦方向に見ることで、観光客がどのような施設を組合せて訪問しているかという訪問地パターンの特徴について考察する。その解釈の結果を表-5に示す。

- Pattern a は空港発着の観光客で、国際通りと美ら海水族館に訪問しているパターンである。特に、中部エリアでも数多く観測され、那覇市と美ら海水

族館の道中に中部エリアへの立ち寄りを多くしている。

- Pattern b は、主に国際通り近辺や那覇市内をメインに観光する観光客である。特に Pattern a では訪問が見受けられなかった首里城への訪問が比較的多くなされていることが分かる。また、那覇空港駅でも観測されていないことから、主にクルーズ船で沖縄に入港した観光客のパターンであることが推測される。
- Pattern c は、美ら海水族館と中部エリアへの立ち寄りが確認されるパターンである。特に Class 6 や Class 10 に分類される国際通り周辺のモノレール各駅で観測がほとんど見られないことから、那覇市内においても自動車で移動している観光客、あ

表-3: 各 Class に含まれる訪問地

Class 1	Class 2	class3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10
道の駅許田	首里城	モノレール首里	道の駅喜納番所	モノレール那覇空港	モノレール県庁前	美ら海水族館	道の駅国頭	道の駅嘉手納	モノレール旭橋
モノレール安里			道の駅豊崎		モノレール牧志		道の駅大宜味	北谷町観光情報センター	モノレールおもろまち
イオンモールライカム			道の駅糸満		国際通り		道の駅宜野座	伊芸 SA	
平和通り			海の駅あやはし館				壺屋焼き物博物館	中城 PA	
牧志公設市場			おんなの駅				ビザハウス		
			畜場御嶽				沖縄コンベンションセンター		
			浮島通り				中城城		

るいは、那覇市内の観光はほとんど行っていない観光客と解釈することができる。また、Class 2 の首里城への訪問が比較的多く見受けられるが、Class 3 の首里駅では観測がされていないため、首里城へはモノレール以外の交通手段で訪れていることが推測される。

- Pattern d は首里城、美ら海水族館、国際通りの3か所を訪問しており、沖縄本島観光の王道そのものの周遊パターンを行っているものと解釈することができる。また、Pattern d における来訪が多く観測される Class 3 にはモノレール首里駅が単独で含まれており、首里城を利用するにあたりモノレールを利用している観光客であると解釈することができる。
- Pattern e は、那覇空港駅でしかほとんど観測されていないパターンである。
- Pattern f は、先述の王道的な観光地における観測がまったく見られない、例外的な周遊行動をとっている観光客と考えられる。主に、Wi-Fi パケットセンサーが設置されていない場所への訪問を行っている可能性が考えられる。
- Pattern g は Pattern d 同様、王道的な訪問地を周遊するパターンである。しかし Pattern d とは異なり、Class 3 の首里駅では観測がされていないため、首里城へはモノレール以外の交通手段で訪れていることが推測される。
- Pattern h では、他のパターンに比べて、南東エリアへの訪問が多くなっている。

このように、確率的ブロックモデルを用いて特徴的な観光周遊パターンを抽出することができた。なお、北部エリアに関しては、そのエリアのみを訪問するような観光客は非常に少なく、広域を周遊する中で若干名

表-4: 各訪問地 Class の特徴

Class	特徴	那覇市内またはエリア
1	中部①	エリア
2	首里城	那覇市内
3	モノレール首里	那覇市内
4	南東部	エリア
5	モノレール那覇空港	那覇市内
6	国際通り周辺	那覇市内
7	美ら海水族館	エリア
8	北部+稀少訪問地	エリア
9	中部②	エリア
10	国際通り付近の駅（おもろまち駅・旭橋駅）	那覇市内

表-5: 各観光客 Pattern の特徴

Pattern	特徴	構成率 (%)
a	国際通り+美ら海水族館型（市内：モノレール）	14.1
b	那覇市内型（モノレール）	23.5
c	中部+美ら海水族館型	12.4
d	王道型（首里城：モノレール）	9.81
e	空港のみ型	14.7
f	王道以外訪問型	4.44
g	王道型（首里城：モノレール非利用）	16.7
h	国際通り+南東部型（市内：モノレール）	4.33

の観光客が併せて北部エリアも訪問するようなパターンであることも示唆された。

5. まとめと今後の課題

本研究では、新たな交通行動調査手法である Wi-Fi パケットセンシングを活用して、沖縄本島観光周遊パターンの特徴抽出を試みた。島内数十箇所にセンシング機器を約1ヶ月間設置し、膨大な量の機器固有のIDデータを収集した。これより、空港あるいはクルーズ船ターミナルより出入りがなされた観光客である蓋然性が高いデータのみを抽出した上で、さらに、少数の「利用者特性」×「訪問スポット特性」によるクラスタリングが可能な確率的ブロックモデルの手法を援用し、典型的な観光周遊パターンをデータマイニングにより明らかにした。より具体的には、確率的ブロックモデルを用いたパターン抽出によって、訪問地だけでなく、市内の交通利用状況などにもとづいてパターン分類を行うことができた。特に王道と考えられる美ら海水族館、国際通り、首里城の3地点全てを訪問するパターンは全体のごく一部に過ぎず、中部エリアへの立ち寄りや、東南部の周遊など、訪問エリアが多様化していることが示唆された。

今回のデータ分析でも明らかになったように、確率的ブロックモデルに基づくパターン分類の限界として、沖縄本島北部のような観光客が訪れにくいエリアへの訪問を、他の主要な観光エリアへの訪問と同様に明確にクラス分類することが難しいことが挙げられる。この点に関しては、データセットを訪問パターンや規模によってさらに分割をするなどの工夫が必要となる。他方、Wi-Fi パケットセンシングに基づく観光周遊調査の限界として、センサーを設置していない箇所への訪問を把握することが不可能であることが挙げられる。例えば、Pattern e や Pattern f のように一部の場所でしか観測されていない観光客や、Pattern c のように主に全島周遊を指向する訪問パターンにおいては、今回センサーを設置していない場所への訪問を多く行っている可能性が考えられる。また、確率的ブロックモデルに関して、本研究では推定方法として BCEM を採用したが、推定結果は初期値への依存性が高く、推定の試行数を増やすなどの検討を今後行う必要がある。また、今回は、訪問の有無というバイナリーの情報のみに基づいてパターン分類を行った。しかし、今後実用的な観光交通政策などへの適用を考える上では、訪問場所の組合せのみならず訪問の順序についても明示的に考慮する必要があると考えられる。

謝辞 本研究は、国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術研究開発「ETC2.0 プローブ情報等を活用した“データ駆動型”交通需要・空間マネジメントに関する研究開発」(代表：福田大輔)の支援を受けて行われ

た。調査の実施にあたり、内閣府沖縄総合事務局開発建設部より多大なるご支援を頂戴した。また、各調査実施箇所の管理者の皆様にもご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 森地茂, 兵藤哲朗, 岡本直久: 時間軸を考慮した観光周遊行動に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 10, pp. 63–70, 1992.
- 2) 本橋稔, 永井護: 観光地における交通行動の調査方法に関する研究, 土木学会論文集, No. 625, pp. 53–64, 1999.
- 3) 羽藤英二: モデルとデータ: プローブパーソナル調査の課題と今後, 土木計画学研究・講演集, Vol. 27, 2003.
- 4) 兵藤哲朗, 高下寛之, 鈴木紀一: 複数調査データを用いた沖縄本島内の観光交通分析手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 26, No. 3, pp. 411–420, 2009.
- 5) 生形嘉良, 関本義秀: GPS データによる観光実態の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, 2012.
- 6) 中西航, 小林巴奈, 都留崇弘, 松本拓朗, 田中謙大, 菅芳樹, 神谷大介, 福田大輔: Wi-Fi パケットセンサーによる観光周遊パターンの把握可能性: 沖縄・本部半島における検討, 土木計画学研究・講演集, Vol. 55, 2017.
- 7) 壇辻貴生, 杉下佳辰, 福田大輔, 浅野光行: Wi-Fi パケットデータを用いた観光客の滞在時間特性把握の可能性に関する研究, 都市計画論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 247–254, 2017.
- 8) 沖縄県: 平成 28 年度観光統計実態調査, http://www.pref.okinawa.jp/site/bunka-sports/kankoseisaku/kikaku/report/tourism_st_statistic_report/h28_tourism-statistic-report2.html.
- 9) Bhatia, P., Ivoleff, S. and Govaert, G.: Blockcluster: An R Package for Model-Based Co-Clustering, *Journal of Statistical Software*, Vol. 76, No. 9, pp. 1–24, 2017.
- 10) Govaert, G. and Nadif, M.: Clustering with block mixture models, *Pattern Recognition*, Vol. 36, No. 2, pp. 463–473, 2003.
- 11) 石黒勝彦, 林浩平: 関係データ学習, 講談社, 2016.