

短時間人流観測による都市施設滞在人数推定

—丸ビル周辺人流データを用いたケーススタディー—

Estimating Building Occupancy from Short-Term Pedestrian Flow Observations: A Case Study Using Human Flow Data around the Marunouchi Building

彩藤ひろみ*

SAITO T. Hiromi

要旨

都市施設周辺の短時間人流観測から施設滞在人数を推定する方法を検討した。対象は東京都千代田区丸の内丸ビル周辺とし、国土交通省が公開している「大手町・丸の内・有楽町エリア人流オープンデータ」を用いて分析を行った。

地下通路の人数カウントデータから流入・流出人数を算出し、その差分の累積から滞在人数を推定した。さらに、1分観測をランダムに3回抽出した3分間観測人数と当該時間総流量の関係を100回サンプリングで評価した。

推定された流量を用いて滞在人数曲線を再構成したところ、平日の日中帯では実測に近い形状を再現できた。一方、週末祝日では推定精度が低下する傾向が確認された。

本研究は、数分程度の簡易観測から都市施設の滞在人数を推定できる可能性を示したものであり、都市計画や防災計画における実態把握の簡便な手法としての応用可能性を示している。

キーワード：都市人流，滞在人口推定，スケーリング則，短時間観測，都市施設利用分析

Abstract

This study examines a method for estimating building occupancy from short-term pedestrian flow observations around urban facilities. The analysis focuses on the area surrounding the Marunouchi Building in Tokyo, using the open human flow dataset released by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

Inflow and outflow pedestrian counts observed in an underground corridor were used to estimate building occupancy by accumulating the difference between the two flows. The relationship between three-minute observation counts (obtained from three randomly selected one-minute samples) and the hourly pedestrian volume was evaluated through 100 sampling trials.

The reconstructed occupancy curves reproduced the overall daytime pattern on weekdays, while the estimation accuracy decreased on weekends and holidays. The results suggest that building occupancy can be approximated from only a few minutes of observation, providing a simple approach for understanding facility usage in urban planning and disaster management.

Keywords: Urban pedestrian flow, Occupancy estimation, Scaling law, Short-term observation, Urban facility usage analysis

* 一般財団法人都市防災研究所 上席研究員

1. はじめに

都市施設における滞在人数の把握は、都市計画、防災計画、施設管理などにおいて重要な基礎情報となる。しかし、実際の都市施設で滞在人数を直接把握することは容易ではない。

従来、建築計画分野では、建物の用途別床面積と用途別人口密度を用いて滞在人数を設定する方法が広く用いられてきた。しかし、この方法は平均的な人口密度に基づいており、都市中心部の大規模複合施設のように時間帯や利用状況によって滞在人数が大きく変動する場合には、実態との差が生じる可能性がある。

実態を把握する手段はいろいろ考えられる。携帯端末の利用基地データ等から、属性別に人の位置、移動を詳細に知ることもできるようになってきた。他にも観測手段は増えていて、将来にわたっては、容易に人流データを獲得する方法が出てくるかと思うが、現時点では、コスト高、データの巨大化、プライバシー等、解決すべき問題が多く残っている。

一方、都市における人間行動に一定のパターンがあることから、簡易な方法で都市施設の滞在人数を推定する方法を探った。オープンな人流データを利用し、スケーリング則があてはまるか考察する。結果を利用し、短時間の人流観測からその時点の実態に近い施設滞在人数を推定する。

2. 既存研究

2.1 建築計画における人口密度

丸の内周辺など、大規模ビル別の滞在人数推計には、用途別床面積を用途別人口密度で割った値を用いる方法が一般的に用いられている。日本建築学会『建築設計資料集成』¹⁾では用途別の標準的な人口密度が整理されており、オフィスでは10~12 m²/人、商業施設では3~5 m²/人、飲食施設では1.5~2 m²/人程度が目安とされている。

丸の内ビルディングを例にとると、延床面積約159,000 m²のうち、オフィス約70%、商業・飲食約20%、共用・ホール約10%とされており、これらの人口密度を用いると滞在人数は平日昼ピークとして約1.5~2万人程度と設定される。

この方法は建物の床面積から滞在人数を簡便に推計できるため、建築計画や防災計画において広く利用されてきた。しかし、これらの人口密度は施設用途ごとの平均値であり、時間帯や利用状況による変動を十分に反映するものではない。

2.2 人流データによる滞在人数推定

人流データを用いた滞在人数推定では、携帯端末位置情報 [Yoshimura, 2016]²⁾、ビーコン、Wi-Fi、入退館ログ、カメラ画像、LiDAR [今井龍一ほか, 2024]³⁾ など、さまざまな観測手段が用いられている。これらの手法は、従来の床面積・人口密度法に比べて時系列変動を把握しやすいという利点をもつ一方、観測範囲、サンプル率、プライバシー配慮、機器設置コストなどの制約がある。

丸の内周辺では、2019年に三菱地所は富士通株式会社とともに「丸の内データコンソーシアム」を設立し、丸の内エリア内に約700個のビーコンを設置し、携帯アプリをインス

トールした来訪者データを蓄積している⁴⁾。人の移動を連続的に把握することで、エリア内のビル間・フロア間移動を検知できるとしている。ただ、このデータは社内で共有はされていないものの、オープンデータではない。

測定データを公開情報として提供しているものも増え、本研究では、その中のひとつ、国土交通省の「大手町・丸の内・有楽町エリアにおける人流オープンデータ」⁵⁾を分析に使う。

2.3 都市現象とスケーリング則

日本では1990年代「複雑系 (complex systems)」という言葉が社会現象を起こし、一般本屋にもコーナーが出来るほどであったが、都市研究との関係では、ジェフリー・ウェスト (Geoffrey West) が、都市スケーリング理論を提唱し、都市を「社会的有機体」として理解する枠組みを示し、ルイス・M・A・ベッテンコート (Luis M. A. Bettencourt) と、複雑系理論を都市研究に応用し、都市の様々な指標が、べき乗則に従うことを示した⁶⁾。

人間の行動は一定の行動パターンを周期的に示すと考えられており [González, 2008]⁷⁾、統計的性質にはスケーリング則が見られることが知られている [Bettencourt, 2013]⁸⁾。この考え方を都市空間に適用すると、短時間の人流観測から都市施設の滞在人数を推定できる可能性がある。

3. 研究方法

3.1 研究対象

本研究では、東京都千代田区丸の内に位置する丸の内ビルディング (以下、丸ビル) およびその周辺エリアを対象とする。丸ビルは、オフィス、商業、飲食、ホール等から構成される大規模複合施設であり、平日昼間には就業者、来訪者、買物客、飲食利用者など多様な利用者が滞在している。

丸の内エリアは日本有数の業務集積地区であり、周辺には多数のオフィスビル、商業施設、交通結節点が存在する。このため、建物周辺の歩行者流動は建物内部の利用状況と密接に関係していると考えられる。本研究では、丸ビル周辺の歩行者流動を観測することで、建物内部の滞在人数を推定する可能性を検討する。

3.2 使用データ

本研究では以下の2種類のデータを使用する。

第一に、国土交通省が公開している「大手町・丸の内・有楽町エリアにおける人流オープンデータ」である。このデータは、対象エリア内の歩行者軌跡や通行量を把握できるものであり、丸ビル周辺の人流の時間変動を把握するために利用した。

データは、地上（丸ビル丸の内仲通り側）と地下（丸ビル行幸通り側地下1階通路）の2か所で2021/1/15 9:00 から2021/2/14 17:59 まで計測された。設定エリアの人数カウントデータが1秒単位で提供されている。



図1 計測エリアと丸ビルとの位置関係（説明資料より作成）

図1は、計測エリアと丸ビルとの関係を図示したものである。提供データのうち、地上、地下とも、in1 データが丸ビル方向、in2 のデータが丸ビルから離れる方向になっている。

第二に、現地における短時間観測データである。観測は丸ビル周辺の歩行動線上において実施し、一定時間内に通過する人数を記録した。観測時間は1～2分程度とし、複数回観測を行うことで代表的な流量を把握することを試みた。観測においては、通過人数に加えて、通行者の属性を概略的に分類した。具体的には、ワーカーとみられる来訪者、一般来訪者、年齢層および性別などについて簡易的に記録した。

3.3 滞在人数推定モデル

本研究では、建物周辺の人流量と建物内部の滞在人数との関係をスケーリング則として表現することを試みる。

観測された人流量を x 、施設の滞在人数を N とすると、両者の関係を次式で表す。

$$N = ax^b$$

ここで

N : 施設滞在人数
 x : 観測された人流量
 a, b : パラメータ
である。

指数 $b=1$ の場合は比例関係となり、 $b \neq 1$ の場合には非線形なスケーリング関係を表す。本研究ではまず比例関係を基準とし、人流量と滞在人数の関係を検討する。

4. 結果

4-1.単純集計（平均と分散）

約1か月分のデータから平日と週末祝日（この期間の祝日は2月11日建国記念日）に分けて、地上、地下のそれぞれ in1（丸ビル方向人数カウントデータ）、in2（丸ビルから離れる方向人数カウントデータ）をグラフにしたものが、図2である。

地上（Ground）in2 と地下（Underground）in1、および地上（Ground）in2 と地下（Underground）in1 に相似形が見て取れる。ここで、地上観測エリアでは、地図上の丸ビル出入口ドアとの関係で、in1 を丸ビル方向、in2 を丸ビルから離れる方向、としたが、地上エリアは、周辺に抜けていく道が存在し、必ずしも、丸ビルへの来館者のデータとはみなせない。オープンデータと共に配布されているデータ説明書にも「設置場所=地上(丸ビルの内仲通り側)はオープンな空間となっており、現地を観察していると歩道から外れ画像左側の樹木の間から車道に抜けて行く通行者が見受けられ」と記述されており、以後、本研究では丸ビル方向の主要動線に近い地下通路データを分析対象とした。

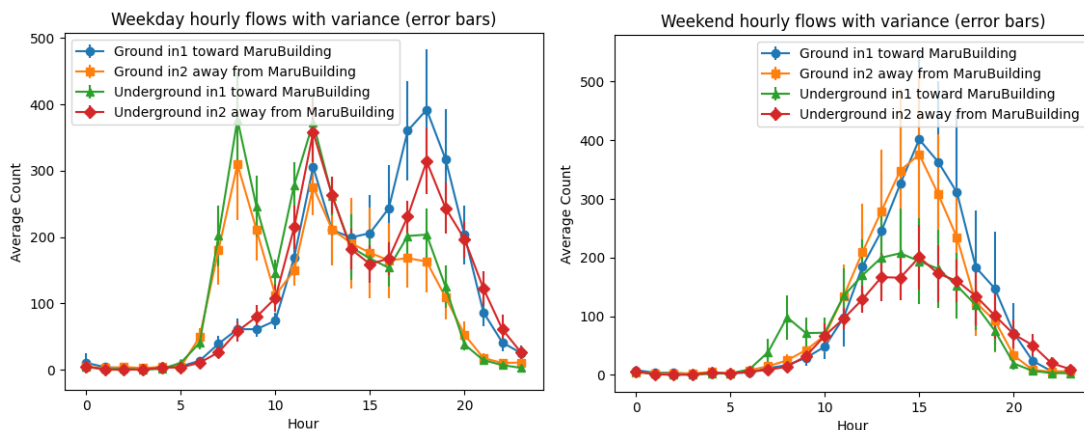


図2 人数カウントデータ平日と週末祝日別、地上、地下、方向別

4-2.滞在人数変化グラフ（Flow-Stock）

地下データを使い、in1 を丸ビル方向流入人数、in2 を丸ビル方向からの流出人数とみなし、滞在人数曲線を描いたものが図3である。

ここで滞在人数は、

$$N(t) = \sum_0^t (in1 - in2)$$

で計算し、各時間の標準偏差（分散の平方根）を、エラーバーとして表示している。

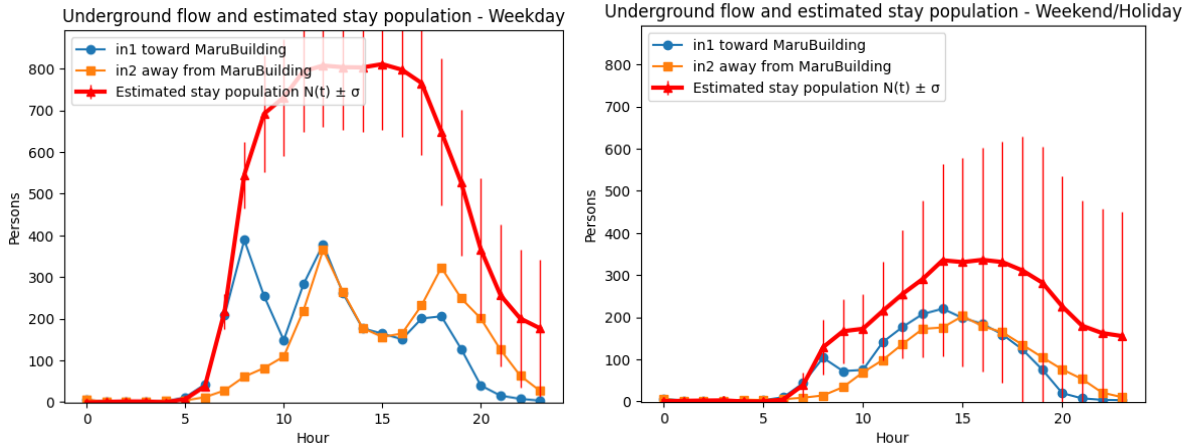


図3 滞在人数変化平日と週末祝日別（地下データのみ）

図3からわかることは、平日では、朝の時間帯7時～9時の急激な流入とそれにとともなう滞在人数の急増である。10時～16時は、流入人数と流出人数が拮抗し、滞在人数が安定し、分散も比較的小さい。18時以降は徐々に流出人数が増え滞在人数が減る。商業飲食サービスは、丸ビルでは、11時開始であるので、11時から12時にかけて流入人数が増えている。

週末祝日の傾向をみると、平日に見られる朝の急激な流入はほとんど確認されず、人流は日中に向かって緩やかに増加する。流入と流出の変化は比較的滑らかである。

平日の人流は主として出勤・退勤といった時間帯の規則性が強い行動に依存しているため、日ごとの差異が比較的小さい。一方、週末・祝日では、商業施設利用、飲食、イベント参加、観光、待ち合わせなど、来訪目的が多様であり、来訪時間や滞在時間のばらつきが大きくなる。

4-3. 短時間観測による一日の滞在人数推定の可能性

図3に示したように、地下通路の人流データから推定された滞在人数は、平日では朝の流入増加、日中の安定、夕方以降の流出増加という一定の時間構造を示している。また週末祝日では、朝の集中は見られず、日中を中心とした緩やかな変化が観察される。このように、人流と滞在人数の時間変化には一定のパターンが存在することが確認できた。

そこで、1秒単位の人数カウントデータを用い、約1か月の観測データに含まれる各時間を独立サンプルとして、短時間観測流量と時間総流量との相関を評価した。各時間帯について、その時間内からランダムに30秒、1分、2分、3分、5分の観測区間を抽出し、その人数と当該時間の総人数との相関係数を算出した。図4に結果を示す。ランダムサンプルなので、細かい数値は毎回変わるが、3分観測で0.8以上の相関が確認できた。

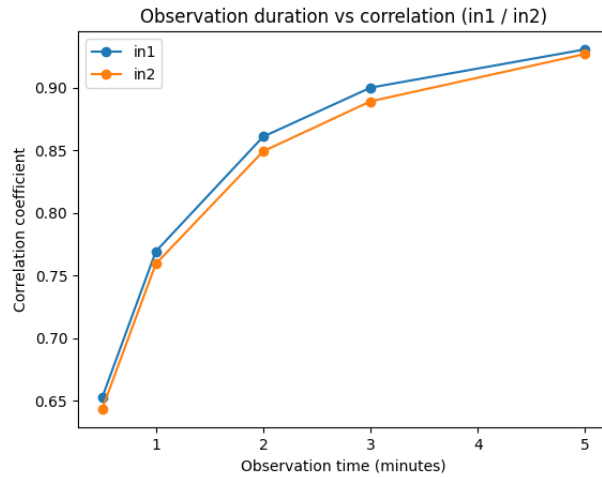


図4 観測時間と時間総人流量との相関関係の一例（地下データ）

すなわち、今回のオープンデータが扱っている地下通路の人流データについては、2～3分程度の観測でも当該時間帯（1時間単位）の人流規模を把握できる。

4.4. 毎時短時間（3分）観測人流数と該当時間人流数の相関

前節の結果を受け、観測時間3分とし、その時間総流量との相関係数を求める。簡易にデータ取得する手段として、3分間連続ではなく、ランダムに1分間を3回人数カウントすることを想定して検証する。

すなわち、平日のデータを使い、1時間内の1分観測をランダムに3回抽出し、その合計を3分観測値とした。このサンプリングを100回繰り返し、各回について、べき乗回帰および線形回帰を実施した。結果を図5に示す。

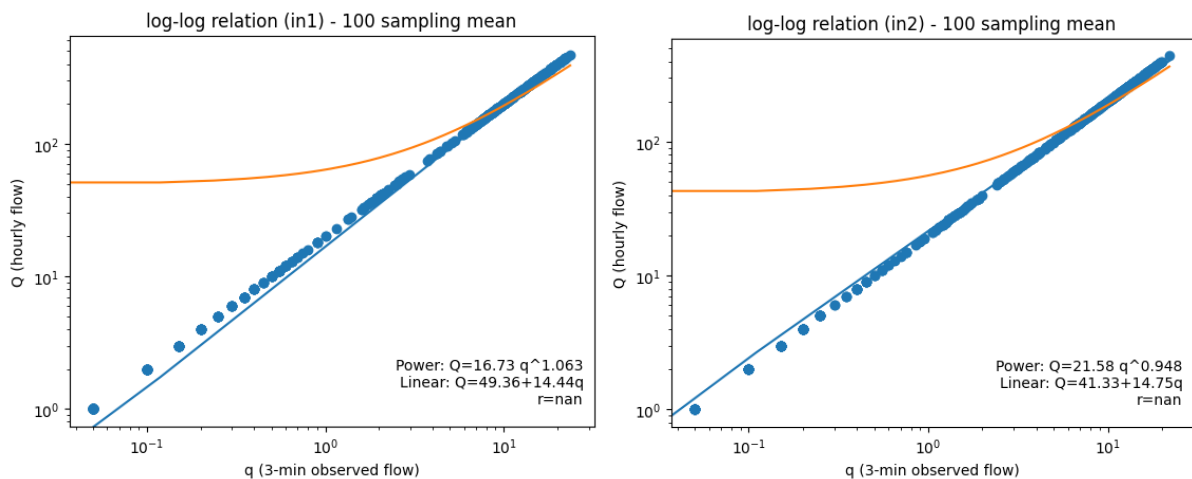


図5 100回サンプリング平均3分間観測人数と当該時間総人数との相関

本分析では同一時間帯データからランダムサンプルを抽出しているため、構造的に高い相関が得られる。

表1 係数整理表

流量	モデル	推定式	a	b
in1	Linear	$Q = a + bq$	49.36	14.44
in1	Power	$Q = a q^b$	16.73	1.063
in2	Linear	$Q = a + bq$	41.33	14.75
in2	Power	$Q = a q^b$	21.58	0.948

in1:流入 in2:流出 Q:当該時間総人数 q:100回サンプリング3分間観測人数 a,b:係数

いずれも指数は1に近似しており、短時間観測人数と当該時間総人数の間にはほぼ比例関係が確認できた。

4-5. 平日の滞在人数推定グラフ

求めたモデルを使い、各時間帯の流入(in1)-流出(in2)の累積から、滞在人数を推定したグラフが図6である。線形モデルではやや低めに推定されている。

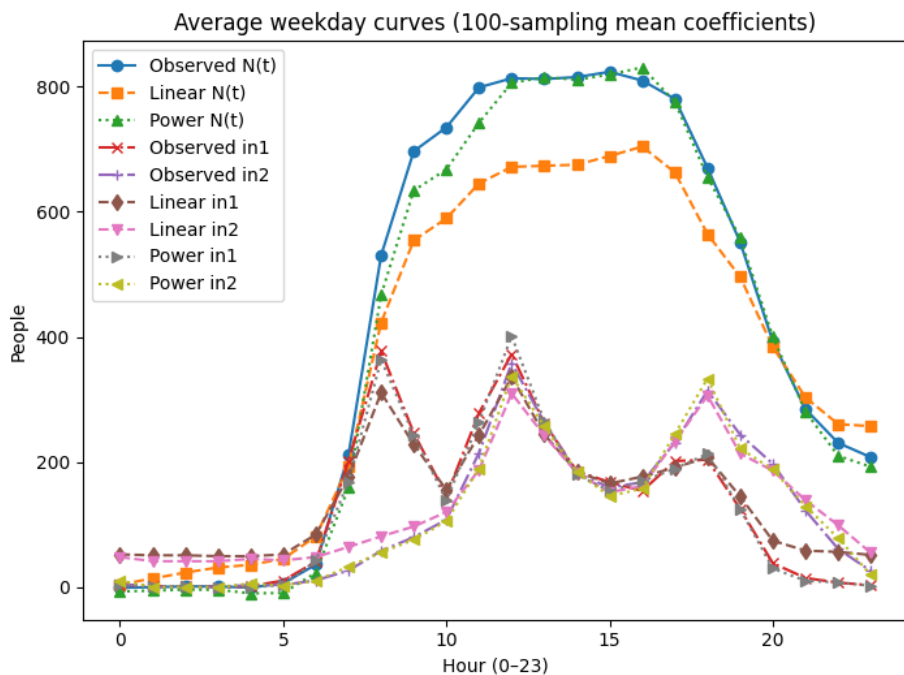


図6 100回サンプリング3分間観測データによる平日滞在人数推定グラフ

4-6. 短時間観測データによる全体推定

実際に流入出データを入手するためには、準備、設備、コストなどハードルが高い。そこで、短時間の観測データだけで全体をどの程度説明できるか調べるために、平日平均の時間別流量を基準とし、8時台・12時台・18時台の短時間観測から推定された時間流量を用いて、スケール表を出した(表2)。

表2 100回サンプリング3分流量平均と時間プロファイル

時間帯	平日平均流量		スケール表					
	in1(流入)	in2(流出)	in1 朝	in1 昼	in1 夕	in2 朝	in2 昼	in2 夕
0	0.18	0.27	0.009	0.01	0.017	0.094	0.015	0.017
1	0.06	0.01	0.003	0.003	0.006	0.003	0.001	0.001
2	0.07	0.01	0.004	0.004	0.007	0.003	0.001	0.001
3	0.02	0.02	0.001	0.001	0.002	0.007	0.001	0.001
4	0.07	0.15	0.004	0.004	0.007	0.052	0.008	0.01
5	0.55	0.18	0.029	0.029	0.053	0.063	0.01	0.011
6	1.95	0.54	0.103	0.104	0.19	0.189	0.03	0.034
7	10.10	1.29	0.533	0.539	0.982	0.451	0.072	0.082
8	18.96	2.86	1	1.012	1.842	1	0.159	0.183
9	12.51	4.00	0.66	0.668	1.216	1.399	0.222	0.255
10	7.25	5.38	0.382	0.387	0.705	1.881	0.298	0.344
11	13.65	10.66	0.72	0.728	1.327	3.727	0.591	0.681
12	18.74	18.04	0.988	1	1.821	6.308	1	1.152
13	13.28	13.16	0.7	0.709	1.291	4.601	0.729	0.84
14	9.15	9.15	0.483	0.488	0.889	3.199	0.507	0.584
15	8.22	7.86	0.434	0.439	0.799	2.748	0.436	0.502
16	7.60	8.34	0.401	0.406	0.739	2.916	0.462	0.533
17	10.09	11.50	0.532	0.538	0.981	4.021	0.637	0.734
18	10.29	15.66	0.543	0.549	1	5.476	0.868	1
19	6.25	12.29	0.329	0.334	0.608	4.297	0.681	0.785
20	1.97	9.81	0.104	0.105	0.192	3.43	0.544	0.626
21	0.78	6.19	0.041	0.042	0.076	2.164	0.343	0.395
22	0.37	3.15	0.02	0.02	0.036	1.101	0.175	0.201
23	0.15	1.32	0.008	0.008	0.015	0.462	0.073	0.084

オープンデータ中、決められた枠内データ（ここでは、8:10,8:20,8:40 の1分間人数カウントデータ×3、12時、18時も同様）3分間分データを、時間帯スケール（朝0-10、昼11-16、夕17-23）で変換し、滞在人数を推定した結果、MAPE（平均絶対パーセント誤差）の値により、一番よくフィットした日、平均的なフィットと言える日、フィットが悪い日の3種類とMAPE分図を図7に示す。

1) 2021年2月9日 最良フィット日 MAPE≈20%

べき乗モデルの形がよく合っているが、ピーク数値は低く出た。

2) 2021年1月28日 平均フィット日 MAPE≈78%

山の形は合うが高さがずれる。帰宅時以降の山が高い。

3) 2021年2月1日 MAPE 500%越え

平均プロファイルと全く違う日。ピークでは倍以上大きく見積もられる。

MAPE 分布図からわかるのは、べき乗モデルも線形モデルも 20 平日中、MAPE が 40~120%に集中していた。ただ、200%~500%という誤差が見られ、これは平均プロフィールが成立しない日といえる。MAPE 中央値は、べき乗モデルでは 77.4%、線形モデルでは 66.8%であった。

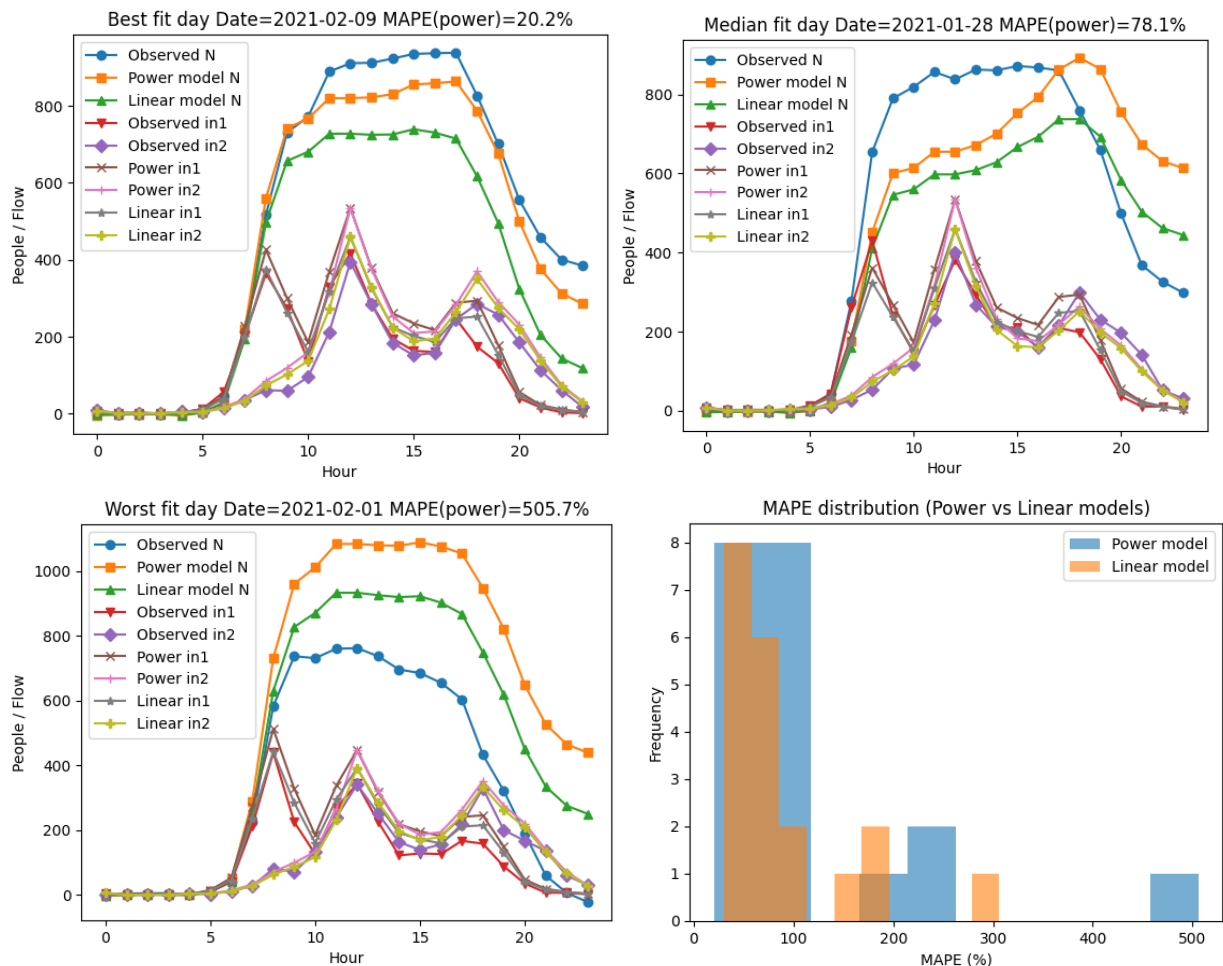


図7 限定（8時台、12時台、18時台）3分間観測のみの滞在人数推定結果と MAPE 分布図

時間ごとの MAPE をグラフ化したものが図8である。

べき乗モデルは、8~18時で誤差がかなり小さく、特に12~17時はほぼ0~2%台である。

線形モデルは、日中も10~17%前後の誤差が残る。

ただし、6時と夜間（21~23時）は両モデルとも誤差が大きくなり。特に線形モデルは23時で約44%になる。この図から、平日平均滞在人口の再現には、全体としてべき乗モデルの方が適していると言える。特に日中滞留帯での一致が良い。

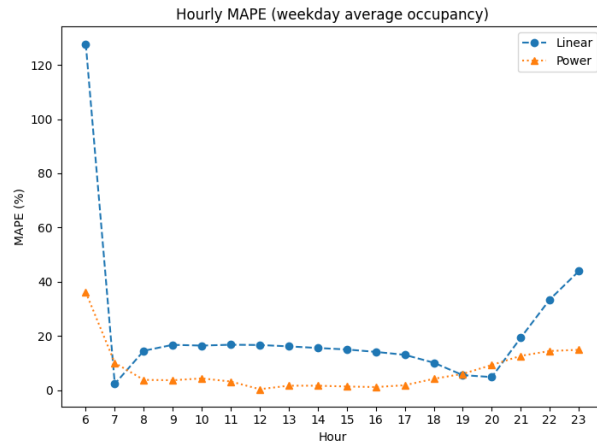


図8 100回サンプリング3分間観察データによる平日滞在人数推定グラフ

4-7. 週末祝日データについて

週末祝日データについても、平日と同様に1分観測をランダムに3回抽出する操作を100回繰り返し、短時間観測人数と時間総流量の関係を検討した。

その結果、in1 および in2 のいずれについても指数は1に近く、短時間観測人数と時間総流量の間にほぼ比例関係が確認された。一方、8時台・12時台・18時台の短時間観測から1日の滞在人口曲線を推定した場合、MAPE中央値は平日より大きく、平均プロファイルに基づく推定精度は週末祝日で低下する傾向が見られた。これは、週末祝日では来訪目的や滞在行动の多様性が大きく、平均的な時間プロファイルが成立しにくいと考えられる。

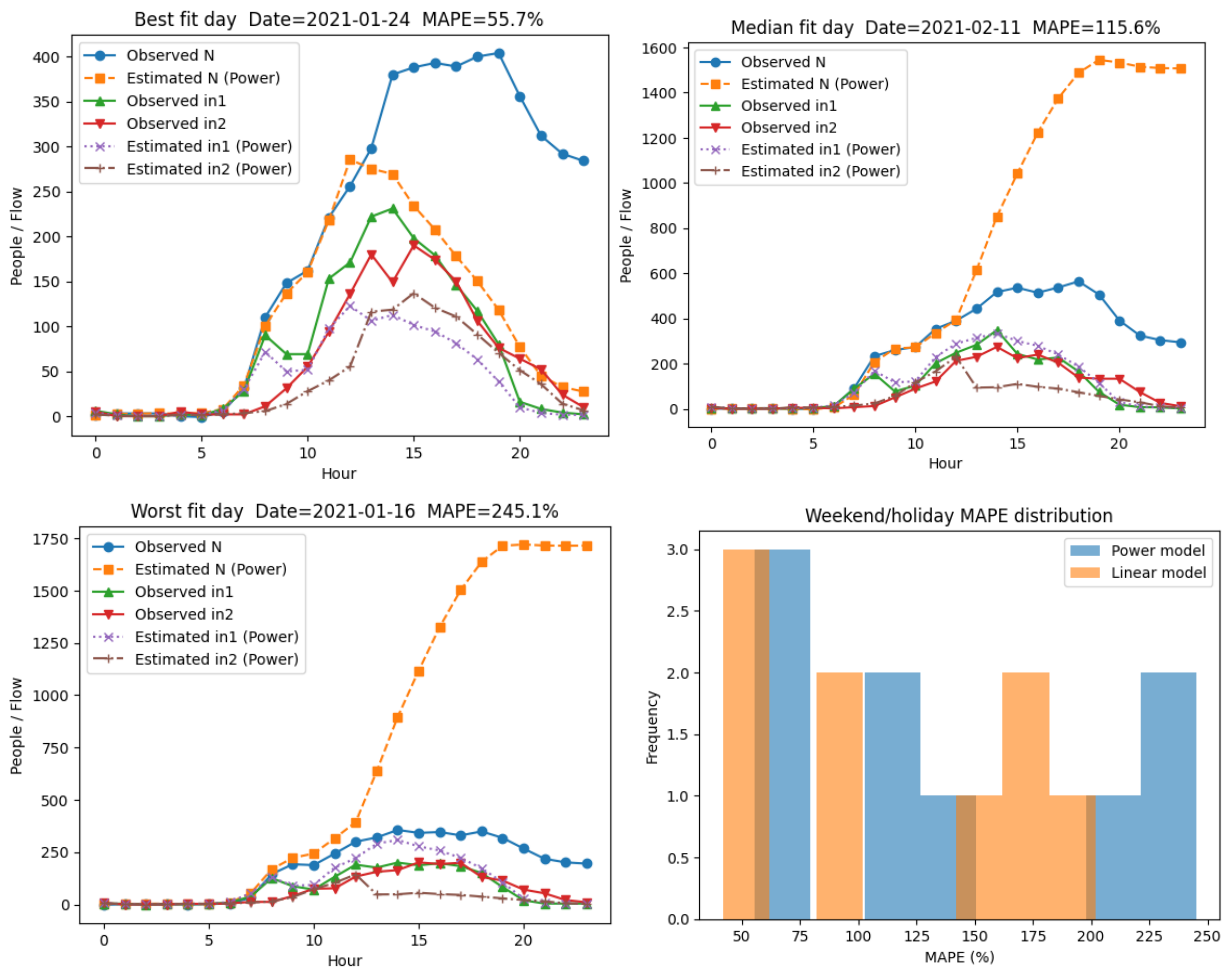


図9 週末祝日（8 時台、12 時台、18 時台）3 分間観測と MAPE 分布図

5. 考察

本研究では、丸ビル周辺の人流オープンデータを用い、短時間観測によって都市施設の滞在人数を推定できる可能性を検討した。特に、数分程度の観測データと時間総流量の関係、およびその関係を用いた一日の滞在人数推定の精度について分析した。

まず、短時間観測と時間総流量の関係については、3分間観測人数と当該時間総流量の間に強い相関がある。べき乗回帰および線形回帰のいずれの場合も、推定式の指数は1に近く、短時間観測人数と時間総流量の関係はほぼ比例関係で表される。これは、人流が完全にランダムではなく、一定の統計的安定性を持つことを示している。都市における人間行動には統計的スケール関係が存在することが知られており、この結果はその知見と整合的である。

スケール則を利用し、短時間観測により全体の滞在人数が推定可能かどうか検証した。これは、多様なセンサやアプリケーションを用いることなく、その時間帯の滞在人数を推定することを目的としている。8時台・12時台・18時台の3回の短時間観測のみを用

いて一日の滞在人数を推定する場合、MAPE 中央値はべき乗モデルで 77.4%、線形モデルで 66.8%となった。MAPE の分布は 40~120%付近に集中しており、多くの日では平均プロファイルに基づく推定が一定程度成立していることが確認された。しかし、一部の日では 200%を超える誤差が観測され、最大では 500%を超えるケースも確認された。これらの日は、平均的な時間プロファイルと実際の人流構造が大きく異なっている日であり、特定イベント、天候、社会活動などの影響を受けている可能性が考えられる。

週末祝日データについても同様の分析を行った結果、短時間観測人数と時間総流量の間には平日と同様に強い相関が確認された。しかし、一日の滞在人数推定の精度は平日より低下する傾向が見られた。これは、週末祝日では来訪目的が多様であり、来訪時間や滞在時間のばらつきが大きいため、平均的な時間プロファイルが成立しにくいことが原因であると考えられる。平日は主に出勤・退勤という比較的規則的な行動によって人流が形成されるのに対し、週末祝日では観光、買物、飲食、イベント参加など多様な活動が混在するため、日ごとの変動が大きくなる。

滞在人数推定の目的を非常時の人数把握ということに絞れば、推定値が実際値よりも大きく、つまり安全側に出るほうがよい。午後にピークがあること、オフィス面積割合にもよる可能性があるが、平日ほど多くないこと、夕方から夜にかけてのばらつきが大きいことが把握できた。

これらの結果は、都市施設の滞在人数推定において、短時間観測が有効な情報を持つことを示している。特に、数分程度の観測でも当該時間帯の人流規模を把握できることから、簡易な現地観測によって都市施設の利用状況を把握できる可能性がある。これは、従来の床面積・人口密度に基づく推計方法と比較して、実際の利用状況により近い推定を行う方法として位置付けられる。

一方で、本研究にはいくつかの限界も存在する。第一に、滞在人数は地下通路の流入・流出人数の差分から推定しており、建物内部の実測値ではない点である。第二に、観測点は丸ビル周辺の特定地点に限定されており、建物全体の利用状況を完全に代表しているとは限らない。第三に、平均プロファイルを用いた推定は、イベント日や特異日には適用が難しい可能性がある。

6. 結論

本研究では、都市施設周辺の短時間人流観測から施設滞在人数を推定する方法を検討した。対象は東京都千代田区丸の内丸ビル周辺とし、国土交通省が公開している「大手町・丸の内・有楽町エリア人流オープンデータ」を用いて分析を行った。

地下通路の人数カウントデータから流入・流出人数を算出し、その差分の累積から滞在人数を推定した。さらに、1分観測をランダムに3回抽出した3分間観測人数と当該時間総流量の関係を100回サンプリングで評価した。その結果、短時間観測人数と時間総流量の間には強い相関が確認され、両者はほぼ比例関係で表されることが分かった。

推定された流量を用いて滞在人数曲線を再構成したところ、平日の日中帯では実測に近い形状を再現できた。一方、平均時間プロファイルを用いた一日推定では誤差のばらつきが大きく、週末祝日では推定精度が低下する傾向が確認された。

本研究は、数分程度の簡易観測から都市施設の滞在人数を推定できる可能性を示したものであり、都市計画や防災計画における実態把握の簡便な手法としての応用可能性を示している。

参考文献

- 1) 日本建築学会 (2003) : 建築設計資料集成 [人間] , 丸善
- 2) Yuji Yoshimura, Stanislav Sobolevsky et al. (2014): An Analysis of Visitors' Behavior in the Louvre Museum: A Study Using Bluetooth Data, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, Volume 41 Issue 6, December 2014.
- 3) 今井 龍一ほか「廉価な LiDAR の動的な点群データを用いた歩行者交通量調査への適用可能性の検証」土木学会論文集/80 卷 (2024) 22 号
- 4) 「大丸有エリアの街行動データをダッシュボードで見える化。データ活用による「街の新たな価値創造」への挑戦」Web での概要紹介サイト 2020,三菱地所+株式会社 unerry https://www.unerry.co.jp/case/mitsubishiestatecompany_daimaruyu/
- 5) 「大手町・丸の内・有楽町エリアにおける人流オープンデータ」 (国土交通省) <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/human-flow-marunouchi>
- 6) Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., West, G. B. (2007): Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities, PNAS.
- 7) González, M. C., Hidalgo, C. A., & Barabási, et al. (2008): Understanding individual human mobility patterns, Nature 453.
- 8) Bettencourt, L. (2013): The Origins of Scaling in Cities, Science