

1. 研究背景と目的

現在、世界各国で都市への人口集積が見られ、日本でも、東京、大阪、名古屋の三大都市圏に全人口の半数以上が集中しています。このような人口集積現象の主な要因 (Why) は、集積の経済という概念により説明されています。しかし、人口集積の規模 (How) と配置 (Where) に関する規則性やメカニズムは、実証研究が進んでおらず、十分に説明されていません。

その中でも、Ikeda et al.¹⁾や恩田ら²⁾により、人口集積パターンの特徴を検出するため、スペクトル解析法を用いた実証研究が行われています。しかし、これらは“都市間”スケールの解析にとどまっており、“都市内”で見られる人口集積の空間的特徴の検出とその理解には至っていません。

そこで本研究では、スペクトル解析法を用いた“都市内”人口の空間分布パターンの検出を行います。そして、短時間での人口分布の時系列変化に着目し、都市内人口分布の特徴を明らかにします。

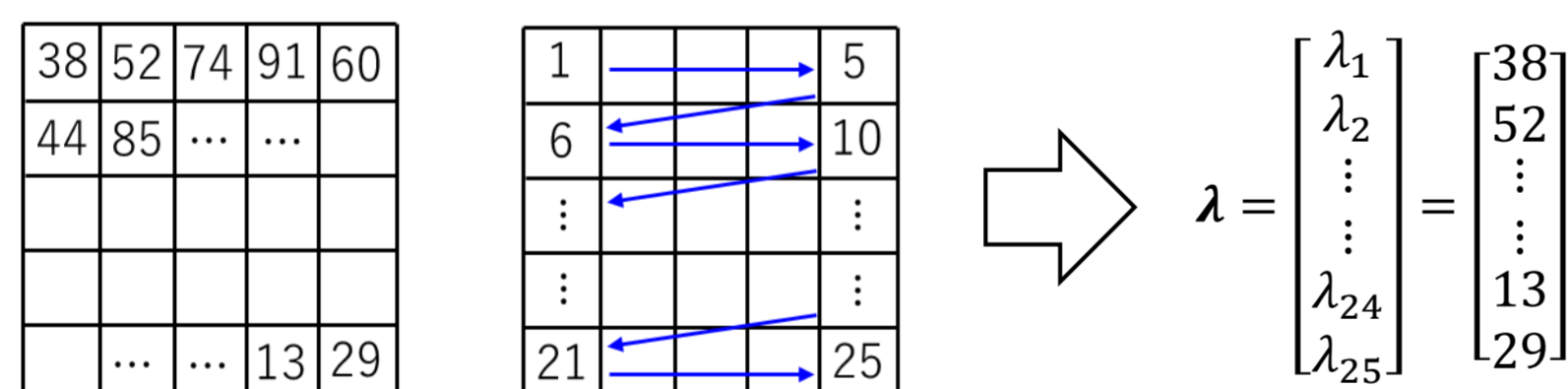


都市内で人口集積が見られる場所のイメージ

2. 空間分布パターンの算出

本研究では、隣接行列の固有値・固有ベクトルを用いて、人口集積の規模と配置を表現する空間分布パターンを算出します。

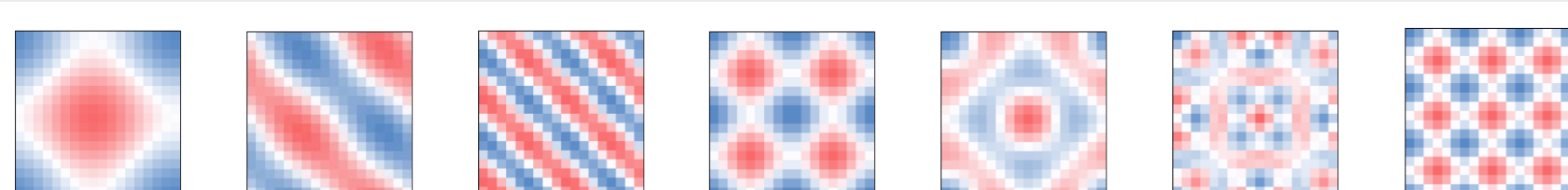
まず、本研究で用いる実人口データは、モバイル空間統計です。モバイル空間統計は、1時間ごとに推計される500m四方のメッシュデータとなっており、そのメッシュから正方形領域 (解析領域) を設定し、隣接行列を作成する際の対象領域とします。また、各メッシュに番号を振っていき、その番号順に人口データを並べた人口ベクトル λ を作成することで、実際の人口を数学的に表現します。



解析領域の設定と人口ベクトルの作成

次に、隣接行列の固有値・固有ベクトルを計算して、空間分布パターンを算出します。隣接行列の固有値・固有ベクトルには、集積を表現する性質があります。正の大きい固有値に対応する固有ベクトルは大域的集積、正の小さい固有値に対応する固有ベクトルは局所的集積を示し、負の固有値に対応する固有ベクトルは明確な集積を示さないことが知られています。

この性質を用いて、隣接行列の固有値 μ ごとに空間分布パターンを分類します。下図の赤いメッシュは正の固有ベクトル成分を、青いメッシュは負の固有ベクトル成分を表しており、その濃度は固有ベクトル成分の絶対値を表します。すなわち、空間分布パターンの赤い部分が人口集積を表現します。本研究では、 $\mu=3.879$ を一極集中パターン、 $\mu=3.759$, 3.064 を直線分布パターン、 $\mu=3.532$ を4都心パターン、 $\mu=3.411$, 2.227 を核・周辺分布パターン、 $\mu=3.000$ を9都心パターンとします。



空間分布パターンの分類

3. スペクトル解析と有意性検定

スペクトル解析は、Ikeda et al.や恩田らと同様の手順で行うものとし、手順の概要を以下に示します。

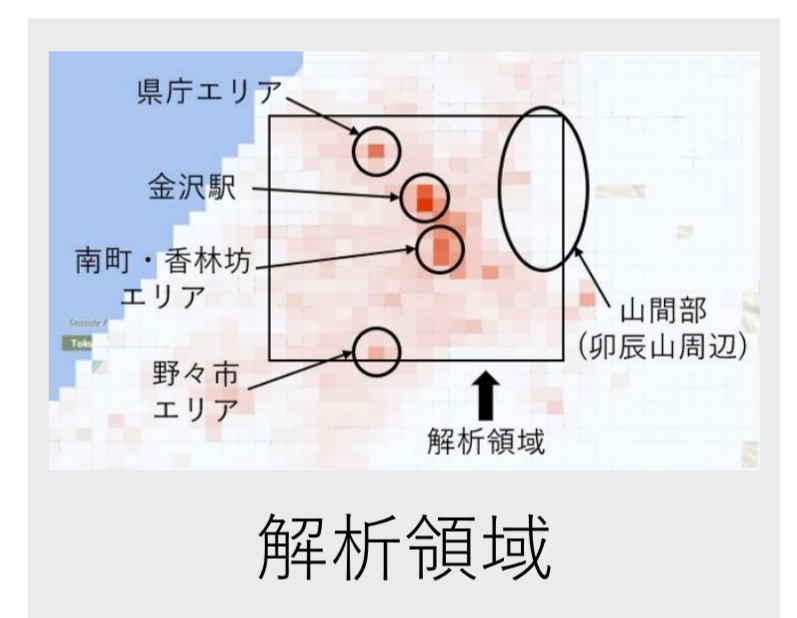
また本研究では、スペクトル解析の結果に対する有意性検定には、恩田らが提案するPermutation testを採用します。Permutation testとは、人口規模に依存しない、人口集積の配置のみに着目した有意性検定です。具体的には、非復元抽出により解析領域内の人口をランダムに並び替え、その疑似的な人口ベクトルのスペクトル解析結果と実際の人口ベクトルのスペクトル解析結果の比較によって有意性を判断します。

スペクトル解析の手順

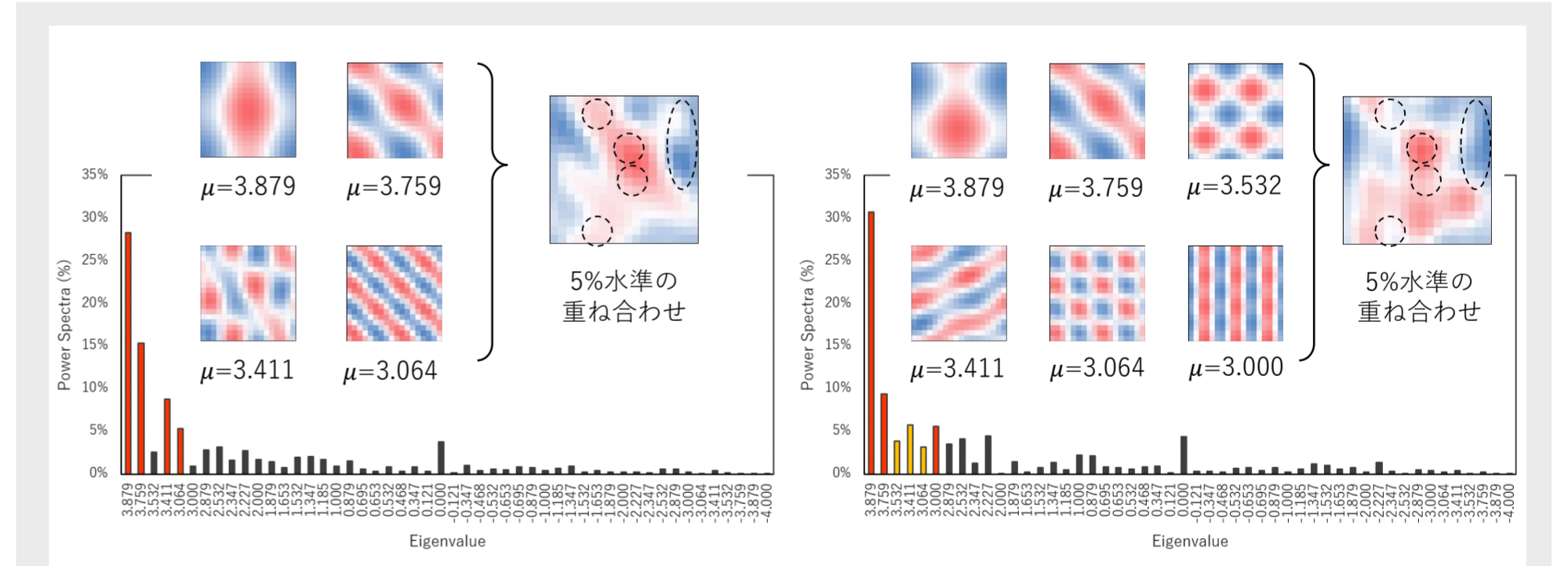
- ① 隣接行列の第 i 固有ベクトル q_i^μ を用いて人口ベクトル λ をスペクトル分解する $\lambda = \sum_{\mu} \sum_i c_i^\mu q_i^\mu$
- ② 重み行列 c_i^μ を求める $c_i^\mu = \lambda^T q_i^\mu$
- ③ 各固有値ごとの線形和 q^μ を求める $q^\mu = \sum_i c_i^\mu q_i^\mu$
- ④ パワースペクトル P^μ を求める $P^\mu = \|q^\mu\|^2 / \sum_{v \in R(G)} \|q^v\|^2$

4. 空間分布パターンの時系列変化

石川県金沢市を対象として解析領域を設定し、スペクトル解析を行った結果を以下に示します。スペクトル図は、人口ベクトル λ がパワースペクトル割合 P^μ で構成されていることを表しており、Permutation testによって5%有意を橙色、1%有意を赤色で示しています。

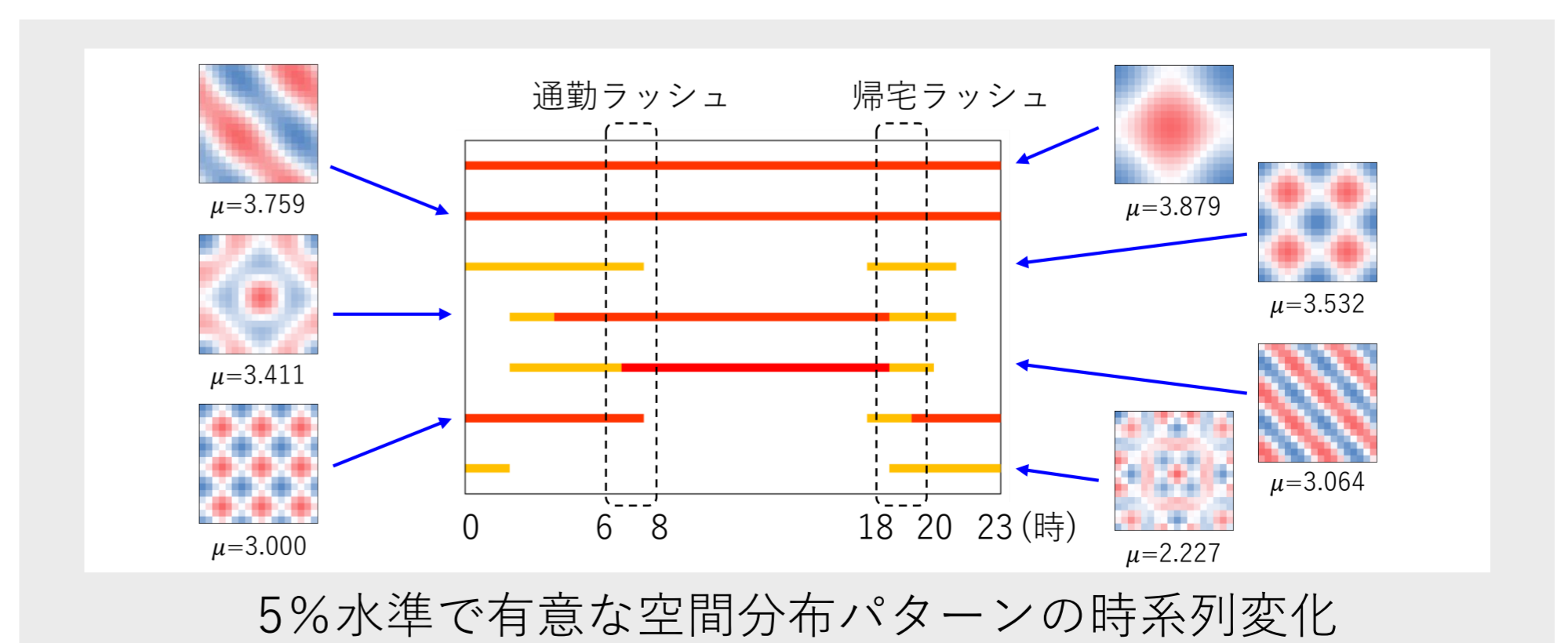


スペクトル図からは、昼間・夜間ともに解析領域内の人口分布は大域的な集積を表現する数種類の空間分布パターンのみで説明できることがわかります。また、5%水準で有意となる空間分布パターンの重ね合わせに着目すると、中心市街地である県庁エリアや金沢駅、南町・香林坊エリア、野々市エリアの集積や、山間部 (卯辰山周辺) の人口が少ないエリアを適切に捉えており、昼間は単一の人口集積地、夜間は複数の人口集積地があることがわかります。



スペクトル図 (左: 昼間 右: 夜間) と5%水準の重ね合わせ

次に、5%水準で有意に検出される空間分布パターンに限定した時系列変化を以下の図にまとめました。有意に検出される空間分布パターンが変化する時間帯と人口移動が活発となる通勤ラッシュ・帰宅ラッシュの時間帯が重なり、空間分布パターンの時系列変化から人々の移動による人口分布の変化を読み取ることができます。



5%水準で有意な空間分布パターンの時系列変化

参考文献

- 1) Ikeda, K., Takayama, Y., Onda, M., and Murakami, D.: Group-theoretic spectrum analysis of population distribution in Southern Germany and Eastern USA, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.28, No.14, pp.1830045-1-27, 2018.
- 2) 恩田 幹久, 村上 大輔, 池田 清宏, 高山 雄貴, 大澤 実, 木暮 洋介: 群論的スペクトル解析による空間集積抽出手法の高度化, 土木学会論文誌D3 (土木計画学), Vol.74, No.4, pp. 398-410, 2018.