

首都圏人流の人口重心を用いた時空間分析

一井直人*・鈴木勉**・大澤義明**

Temporal spatial analysis of metropolitan area human flows using population centers of gravity

Naoto ICHII*, Tsutomu SUZUKI**, Yoshiaki OHSAWA**

In addition to the real-time and highly accurate accumulation of cell phone location data, it is also possible to obtain the attributes of cell phone users, such as their place of residence. In this paper, we calculate the population center of gravity by place residence in time series and analyze its movement to systematically grasp the population flow in the Kanto region. Furthermore, the efficiency of the current public facility layout is analyzed by calculating the Pareto optimum of the location problem that minimizes the linear distance sum of squares. In addition, by calculating the population centers of gravity before and after the COVID-19 epidemic, we will examine the extent to which the flow of people, especially across prefectures, has been suppressed.

Keywords: 携帯電話人口統計 (mobile phone population statistics), 人口重心 (population center of gravity), 時系列分析 (temporal spatial analysis), 新型コロナウイルス (COVID-19)

1. はじめに

1.1. 研究背景

近年の都市計画においては、DX やデジタル化の推進に注目が集まっている。例えば、国土交通省は都市政策のあらゆる領域でDXを推進し、人口減少・少子高齢化の下で豊かな生活、多様な暮らし方・働き方を支えるサステナブルな都市―「人間中心のまちづくり」を実現するためのビジョンの検討として、令和4年4月7日から「まちづくりのデジタル・トランスフォーメーション実現会議」を設置するなど、DX活用の基盤を急速に整備している[1]。

人口統計データの領域において、今後の活用が期待されるのが携帯電話人口統計である。携帯電話登録情報に紐づいた利用者属性が得られる点や、24時間365日データを取得できる点で、少子高齢化時代における先鋭的で効率的な都市計画への活用可能性が広がっている。また、COVID-19の流行以降は人流への注目度が高まり、携帯電話人口統計の活用に関する研究も行われている[2]。

1.2. 研究目的

本稿では、人口重心を用いることで人流の見える化、定量化を行う。本研究の目的は4つある。第一

に人口重心の性質に関して整理し、解釈の優位性を示す。第二に人口重心の地域間比較を行い、地域の特徴付けを行う。第三にCOVID-19流行前後の比較することで流行による人流の抑制を考察する。第四に直線距離二乗和が最小になるような立地問題を考え、施設配置に関するパレート最適を導出することで、現状の庁舎位置の効率性に関する考察を行う。

人口重心に関する研究は多くの蓄積があり、鈴木[3]による従来人口統計指標を用いた重心の算出や、田村ら[4]の施設配置問題に応用した例、さらに、二乗距離を用いてパレート最適を導出した Ohsawa ら[5]などがある。しかしながら、携帯電話人口統計を用いて連続的な時間帯で人口重心を算出した研究はこれまでになく、本稿の新規性としている。

1.3. 使用データ

本稿では、NTTドコモモバイル空間統計を用いる。NTTドコモの基地局データをもとに、1時間ごとの人口を推計したデータとなっている。本稿で使用したデータの集計単位は自治体単位のものを用いている。対象地域を関東地方の1都7県、対象の期間を2015年～2021年の7年間、それぞれ4月上旬の3週間としている。また、自治体単位のデータを使用し

* 学生会員 筑波大学大学院サービス工学学位プログラム (University of Tsukuba)
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 E-mail : s2120499@s.tsukuba.ac.jp

** 正会員 筑波大学社会工学域 (University of Tsukuba)

ているので、市役所の位置にその時間帯のすべての人口が存在しているとして、人口重心の算出を行った。

2. 人口重心の性質

2.1. 移動距離最小化問題

平面上の対象地域が n 地区から構成されているとし、地点 i の場所を (x_i, y_i) とする。そして、人口は時間帯とともに変化するとし、時刻 t での地点 i の人口を $\omega_i(t)$ とする。ただし、総人口を基準化し、 $\sum_{i=1}^n \omega_i(t) = 1$ を満たすとする。時刻 t において住民からの直線距離二乗和が最小となる立地問題を考える。このような単一施設配置の最適問題の目的関数は、時刻 t に依存し施設配置 (x, y) の変数となる。住民一人当たりでの平均値で換算すると目的関数 $\phi(x, y; t)$ は次のように表現できる：

$$\phi(x, y; t) \equiv \sum_{i=1}^n \omega_i(t) ((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2). \quad (1)$$

この目的関数は x 及び y に関する二次関数となる。したがって、移動距離を最小にする地点 (x, y) を求める最適化問題は次のように表現できる：

$$\min_{x, y} \phi(x, y; t). \quad (2)$$

2.2. 人口重心

時刻 t での人口重心を $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ とすると、

$$\bar{x}(t) \equiv \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) x_i, \quad \bar{y}(t) \equiv \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) y_i.$$

ここで、人口重心 $\bar{x}(t)$ を用いると、式(1)の第一項及び第二項は、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) (x - x_i)^2, \\ &= \frac{x^2}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) - \frac{2x}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) x_i \\ & \quad + \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) x_i^2 \\ &= x^2 - 2\bar{x}(t)x + \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) x_i^2, \\ & \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) (y - y_i)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{y^2}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) - \frac{2y}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) y_i \\ & \quad + \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) y_i^2 \\ &= y^2 - 2\bar{y}(t)y + \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) y_i^2. \end{aligned}$$

よって式(1)で示した目的関数 $\phi(x, y; t)$ は、人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ を用いて、

$$\begin{aligned} \phi(x, y; t) &= x^2 - 2\bar{x}(t)x + y^2 - 2\bar{y}(t)y \\ & \quad + \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) (x_i^2 + y_i^2). \end{aligned}$$

特別な場合として、人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ で評価すると、

$$\begin{aligned} \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t); t) &= \frac{1}{W(t)} \sum_{i=1}^n \omega_i(t) (x_i^2 + y_i^2) - (\bar{x}(t)^2 + \bar{y}(t)^2). \end{aligned}$$

以上から、重心での目的関数値 $\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t); t)$ を用いることで、式(1)で示した $\phi(x, y; t)$ は、

$$\begin{aligned} \phi(x, y; t) &= \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t); t) + (x - \bar{x}(t))^2 + (y - \bar{y}(t))^2. \quad (3) \end{aligned}$$

と簡潔に表現でき、次のことがわかる。

1. 不等式 $\phi(x, y; t) \geq \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t); t)$ が成り立つから、式(1)の最適地点 $(x^*(t), y^*(t))$ と、最適目的関数値 $\phi(x^*, y^*; t)$ は次のようになる：

$$\begin{aligned} (x^*, y^*) &= (\bar{x}(t), \bar{y}(t)), \\ \phi(x^*, y^*; t) &= \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t); t). \end{aligned}$$

2. 目的関数 $\phi(x, y; t)$ の等高線は、それぞれ人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ を中心とする同心円となる。

2.3. 各県民の人口重心

2019年4月8日(月)の深夜0時と昼間12時の各県民における人口を重心を示したものを図1、2021年4月5日(月)において同様のものを図2、各日付における深夜0時と昼間12時の重心間の距離を示したものを表1とする。これらの図表からは2点のことがわかる。第一に、各県民の重心は深夜0時から昼間12時にかけて東京方面へ移動している。特に、埼玉県民・千葉県民・神奈川県民はその距離が長い。第二に、2019年4月8日(月)から2021年4月5日にかけて深夜0時と昼間12時の重心間の距

離が減少していることがわかる。特に、栃木県民や神奈川県民の減少率は高くなっている。

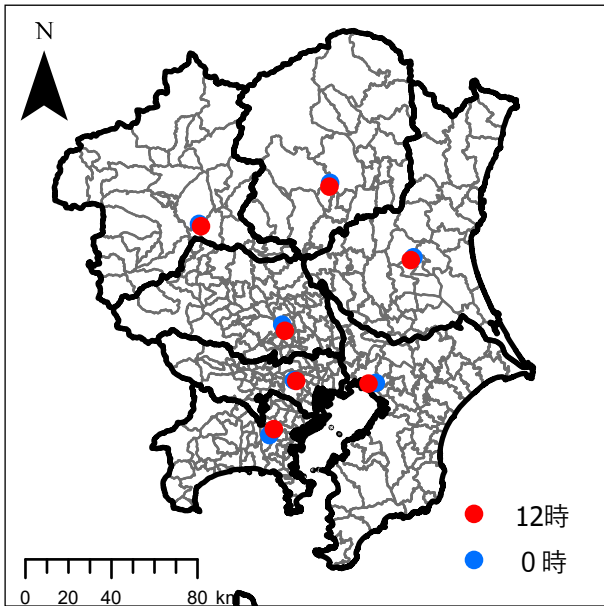


図 1 2019年4月8日(月)における各県民の重心

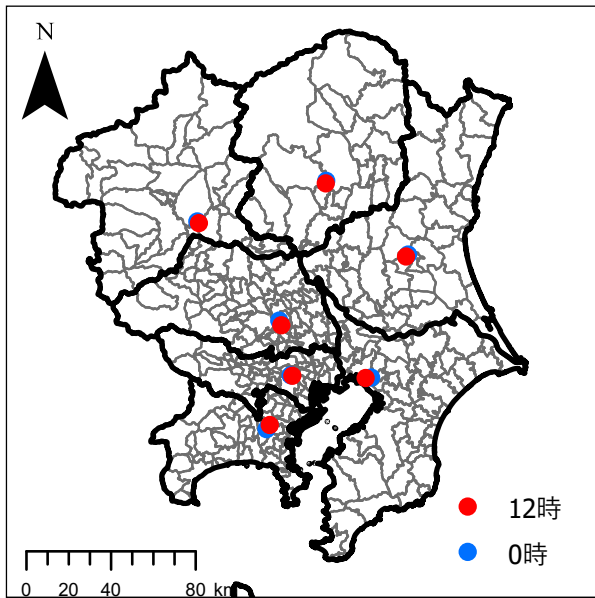


図 2 2021年4月5日(月)における各県民の重心

2.3. 各市民の人口重心

図 3 に 2019 年 4 月 8 日 (月) における各市民の深夜 0 時と昼間 12 時の人口重心を示す。図 3 から 2 点のことがわかる。第一に人口重心は各自自治体の特徴をに見える化している。例えば、茨城県を見ると、県中央部は東京方面に人口重心が移動し、県西部・県東部は県中央部に人口重心が移動している。茨城県の県中央部には常磐線が通っており、前者は常

表 1 深夜 0 時と昼間 12 時の重心間距離の比較

K m	茨城 県民	栃木 県民	群馬 県民	埼玉 県民	千葉 県民	東京 都民	神奈 川 県民
A	1.81	1.77	1.42	3.09	3.42	1.11	3.46
B	1.34	1.23	1.09	2.41	2.60	0.83	2.47
減 少 率	25.9 %	30.8 %	23.1 %	21.9 %	24.0 %	25.3 %	28.6 %

A : 2019年4月8日(月) B : 2021年4月5日(月)

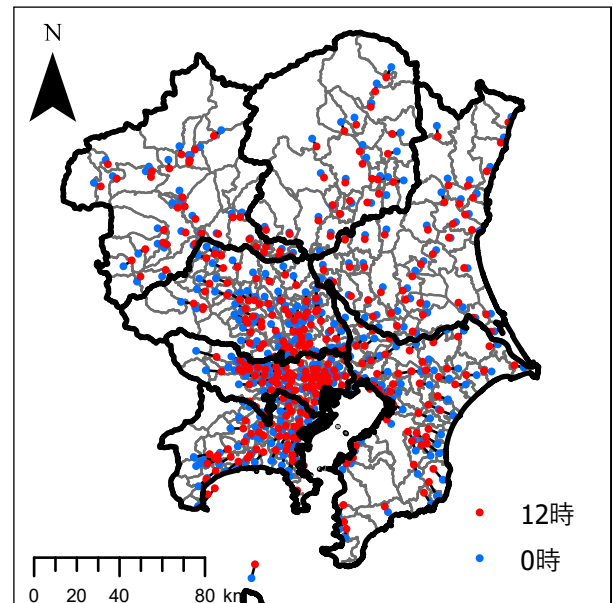


図 3 2019年4月8日における各市民の重心

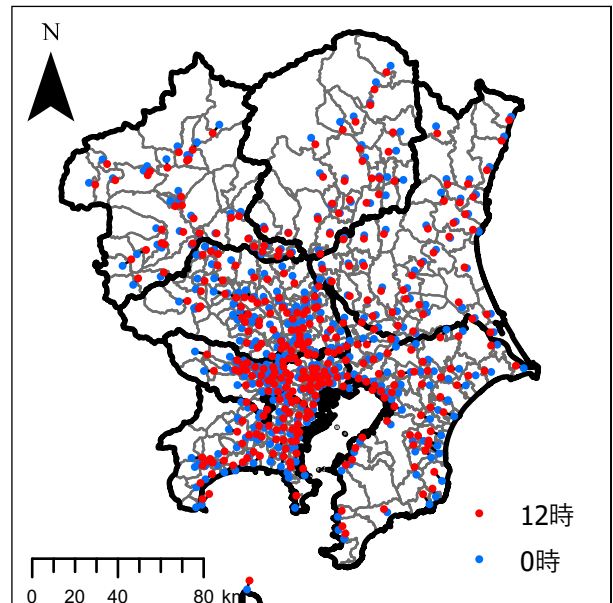


図 4 2021年4月5日における各市民の重心
磐線に沿うような東京方面への移動、後者は駅があ

り比較的発展している街に人口移動が起きていることがわかる。第二に、埼玉県・千葉県・神奈川県各自治体の深夜 0 時と昼間 12 時の重心間の距離の方が、北関東の 3 県の深夜 0 時と昼間 12 時の重心間の距離よりも長い傾向があることがわかる。

また、2021 年 4 月 5 日における各市民の深夜 0 時と昼間 12 時の人口重心を図 4 に示す。市民単位も県民単位と同様に COVID-19 の影響によって、深夜 0 時と昼間 12 時の重心間の距離が短くなっていることが伺える。

2.4. weber 点との比較

施設配置問題に多く用いられる weber 点と人口重心との比較を行う。weber 点は各住民の移動コストの総和を最小化する点であり、式(1)と同様に、地点 i の場所を (x_i, y_i) 、時刻 t での地点 i の人口を $\omega_i(t)$ とすると、(ただし、総人口を基準化し、 $\sum_{i=1}^n \omega_i(t) = 1$ を満たすとする。)以下の式(4)に表すように人口の重み付けをした総移動距離 $\zeta(x, y)$ を最小化する点として与えられる。

$$\zeta(x, y) \equiv \sum_{i=1}^n \omega_i(t) \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (4)$$

図 5 に 2019 年 4 月 8 日における各市民の深夜 0 時と昼間 12 時の weber 点を示す。人口重心では深夜 0 時から昼間 12 時にかけて、東京方面に移動していたのに対して、weber 点の位置は深夜 0 時と昼間 12 時の時点ではほとんど同じ位置となっている。(地図上では 12 時の点に隠れてしまっていて、0 時の点が見えなくなっている。)

人口重心と weber 点の違いは図 6 に示すように 1 次元の都市を考えると解釈が容易である。ここでは茨城県つくば市民の人口重心と weber 点の違いを解釈するため、茨城県つくば駅から東京都秋葉原駅に向かうつくばエクスプレスの駅をそれぞれつくば市民がいる地点として考え、図のような人数を配置した場合を考える。夜のつくば市民を見ると、全員つくば市内にいる状況である。ここで、weber 点は人口分布の中央値、つまり研究学園駅になることがわかっている[6]。一方で、人口重心は重み付け人口の平均値なので、つくば市内の駅の間隔が等間隔であるとすると、研究学園駅が人口重心となり、weber

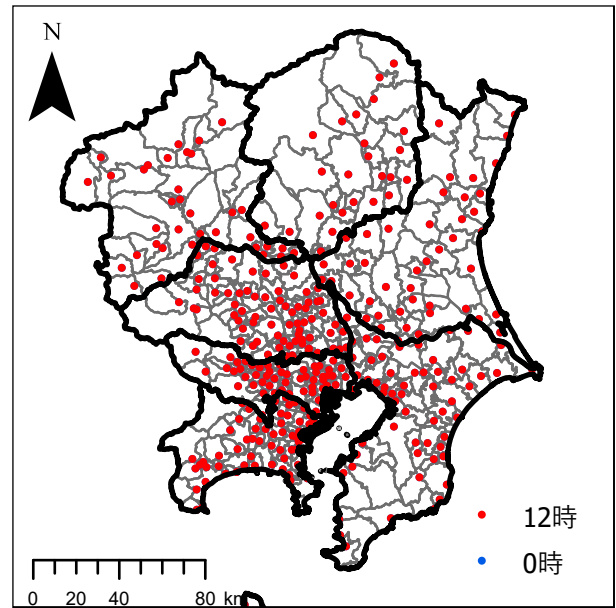


図 5 2019 年 4 月 8 日における各市民の weber 点も人口重心も同じつくば市内となる。一方で数人のつくば市民が北千住や秋葉原に移動している昼に着目した場合の中央値はみどりのであり、夜と変わらずつくば市内にあるが、重み付け人口の平均値である人口重心は北千住あたりになることが予想される。このような理由から、人口重心は人流に敏感に反応するが、weber 点は自治体単位では変動しづらい。

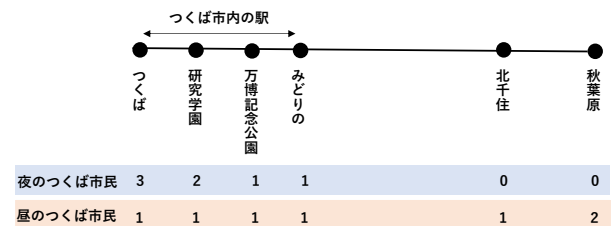


図 6 weber 点と人口重心の違い

本稿では、下記に示すような理由で人口重心を中心に話を展開していくが、例えば、乳児の育児支援施設など自治体内にとどまる人の利用を想定した施設などにおいては、人口重心ではなく weber 点で議論したほうが良い場合があることに関しては留意しなくてはならない。

この節以降人口重心を中心に議論を展開する。理由は 2 点ある。第一に図 3 と図 5 の比較からもわかるように、人口の移動に反応しやすく人流をわかりやすく見える化することに向いているためである。

第二に人口重心の定式化は重み付け人口の平均という単純な最適解であるため、式変形に優れているためである。一方で weber 点の算出にはニュートン法など、繰り返し計算を行うような処理が必要であり、次節以降の式変形に向いていない。

2.5. 着地ベースの重心

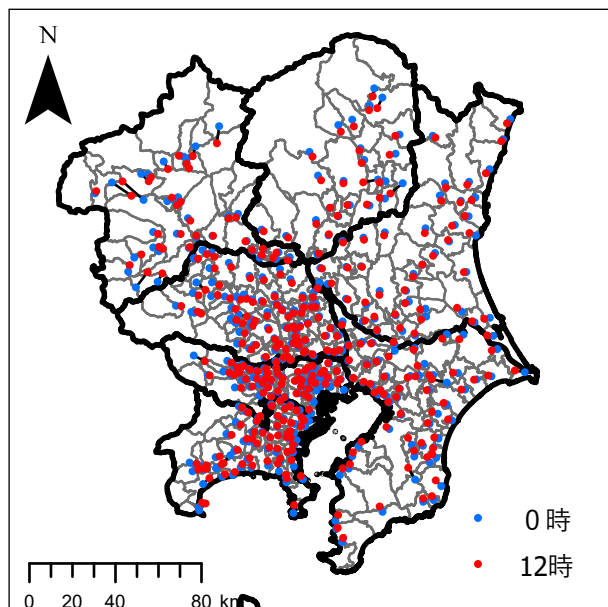


図 7 2019年4月8日における各自治体の着地ベースの重心

ここまでは、各市民の重心を居住地データを基にした発地ベースの重心を議論していたが、その自治体にその時間帯にいる人はどの自治体から来ているのかという着地ベースの視点から求めた重心の傾向も確認する。図 7 に 2019 年 4 月 8 日における着地ベースの深夜 0 時と昼間 12 時の人口重心を示す。着地ベースの重心も発地ベースの 0 時と 12 時の移動の傾向は似ているが全体的にその長さは短い。例えば茨城県北部では、流出する人口は東京方面に多くの人口が比較的長い距離を移動しているのに対して、逆に流入してくる人口は南部から来るもの、その数と距離は長くないことが推測される。

施設配置を考える時には、まずその施設の特徴によって発地ベース、着地ベースの重心を使い分けなくてはならない。例えば観光地に対する施策などはどこから人が来るのかを PR 面や交通面からも把握する必要があるので、着地ベースの議論を展開したほうがいだろう。しかし、本稿では以降は住民へ

のサービスの提供、公共インフラの維持管理の視点から発地ベースの議論を展開する。

3. 最適との乖離

3.1. 最適空間ベース

時刻 t と s との最適地点の差異を、二地点間の距離の二乗で表現すると、次のようになる：

$$(\bar{x}(t) - \bar{x}(s))^2 + (\bar{y}(t) - \bar{y}(s))^2. \quad (5)$$

したがって、時刻 t と s との最適地点との差異 $\delta(x, y: t)$ は、二地点間の距離の二乗で表現すると、次のようになる：

$$\delta(x, y: t) = (x - \bar{x}(t))^2 + (y - \bar{y}(t))^2. \quad (6)$$

3.2. 目的空間ベース

任意の地点 (x, y) での目的関数値 $\phi(x, y: t)$ を最適な場合の値 $\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t)$ と比較する乖離 $\gamma(x, y: t)$ は次のように定義できる：

$$\begin{aligned} \gamma(x, y: t) &\equiv \frac{\phi(x, y: t)}{\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t)} \\ &= 1 + \frac{(x - \bar{x}(t))^2 + (y - \bar{y}(t))^2}{\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t)} \end{aligned} \quad (7)$$

この式から、次のことがわかる。

1. 乖離は、地点 (x, y) と人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ との距離の二乗 $(x - \bar{x}(t))^2 + (y - \bar{y}(t))^2$ で定まる。これは二つの軸で表現される。例えば、通勤・通学などで昼夜間移動に関して東京方面への人流の基
2. 軸があるとする。それを x 軸もしくは y 軸に合わせると、式(4)で示した乖離は基軸方向の乖離 $(\bar{x}(t) - x)^2$ とその直交方向の乖離 $(\bar{y}(t) - y)^2$ へ二分できる。また、 x 軸に合わせなくても、人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ から地点 (x, y) への方向ベクトルを人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ から東京方面への方向ベクトルへ正射影しその長さを用いても表現できる。
3. 異なる時刻 s において人口重心の目的関数値を評価する。式(5)に時刻 s の人口重心を代入した $\gamma(\bar{x}(s), \bar{y}(s): t)$ や時刻 s の目的関数値に時刻 t の人口重心を代入した $\gamma(\bar{x}(t), \bar{y}(t): s)$ は、次のように整理できる：

$$\begin{aligned} & \gamma(\bar{x}(s), \bar{y}(s): t) \\ &= 1 + \frac{(\bar{x}(s) - \bar{x}(t))^2 + (\bar{y}(s) - \bar{y}(t))^2}{\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t)}, \\ & \gamma(\bar{x}(t), \bar{y}(t): s) \\ &= 1 + \frac{(\bar{x}(t) - \bar{x}(s))^2 + (\bar{y}(t) - \bar{y}(s))^2}{\phi(\bar{x}(s), \bar{y}(s): s)}. \end{aligned}$$

右辺の分母が共通で、式(4)で示された、時刻 t と時刻 s との人口重心間距離の二乗となる。もし時刻 s の方が人流が活発ならば、 $\phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t) \leq \phi(\bar{x}(s), \bar{y}(s): s)$ であるから、 $\phi(\bar{x}(s), \bar{y}(s): s) \geq \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): s)$ が得られる。

3.2. 東京方面への正射影

2019年4月8日(月)において、深夜0時の人口重心から昼間12時への方向ベクトルを深夜0時の人口重心から東京駅への方向ベクトルへ正射影し、その長さを図8に示す。図8からは2点のことがわかる。第一に正射影の長さ長い自治体は千葉県の南東部、東京都西部、神奈川県南西部に多いことがわかる。第二に北関東の3県は正射影の長さが短く、特に東京駅方面の県境付近の自治体は正射影の長さが短いことがわかる。また、茨城県常総市など、一部自治体では東京駅とは真逆の方向に正射影が伸びている自治体もある。

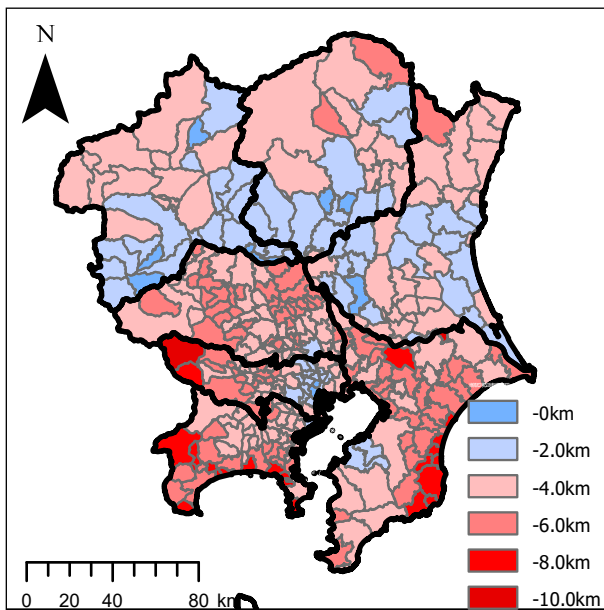


図8 2019年4月8日における東京方面への正射影

3.3. 深夜と昼間での目的関数値の評価

2019年4月8日(月)において、深夜0時と昼間

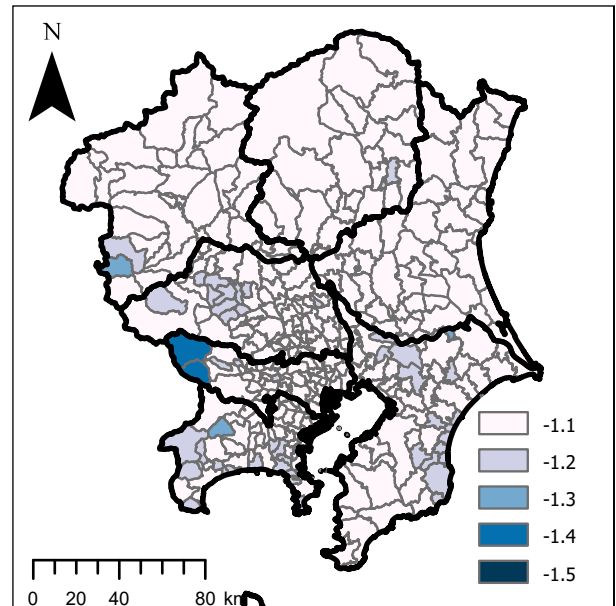


図9 2019年4月8日における $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0): 12)$

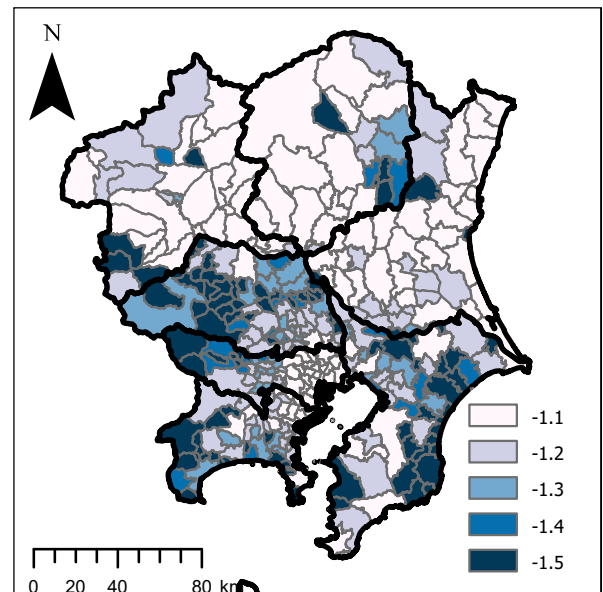


図10 2019年4月8日における $\gamma(\bar{x}(12), \bar{y}(12): 0)$

12時の目的関数値の評価を行う。それぞれ $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0): 12)$ と $\gamma(\bar{x}(12), \bar{y}(12): 0)$ とを比較することで、例えば庁舎などの住民が使うような公共施設の立地を考えたときに、どの時間帯が効率的であるのかを吟味する要素とすることが出来る。図9に深夜0時の人口重心の評価値 $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0): 12)$ 、図10に昼間12時の人口重心の評価値 $\gamma(\bar{x}(12), \bar{y}(12): 0)$ を示す。3.2で示したように、人流が活発である12時の人口重心の評価値である $\gamma(\bar{x}(12), \bar{y}(12): 0)$ の方

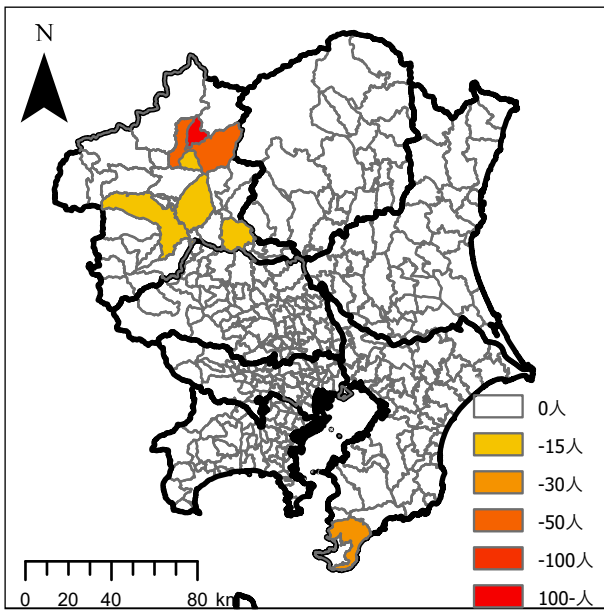


図 6 2019年4月8日0時における川場村民

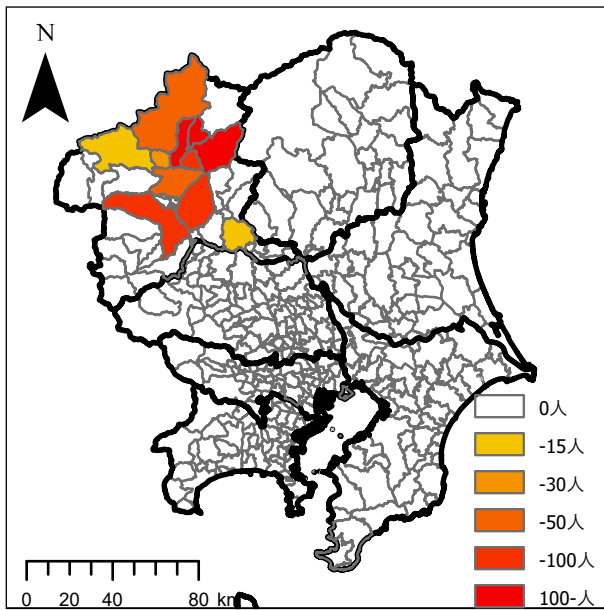


図 5 2019年4月8日12時における川場村民

が、 $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0); 12)$ よりも大きい、つまり1人当たりに必要な移動距離の二乗が大きくなることがわかる。また、値が大きくなる自治体は深夜0時と昼間12時の人口重心間の距離が長い自治体であることがわかる。この2つの時間帯において、 $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0); 12) \geq \gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0); 12)$ となる自治体が群馬県片品村と川場村の2自治体ある。川場村民の0時と12時の人口分布を示したものをそれぞれ図11、図12に示す。2つの図を比べると、深夜0時においては千葉県の南房総市に川場村民がいることが

わかるが、逆に昼間12時においては南房総市には川場村民がいないことがわかる。このことによって、深夜0時の方が昼間12時よりも人流が活発であるとなり、 $\gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0); 12) \geq \gamma(\bar{x}(0), \bar{y}(0); 12)$ となったことがわかる。

3.4. 時間別の目的関数値の推移

2019年4月8日の0時の人口重心・12時の人口重心・茨城県庁のそれぞれの位置を固定した場合の茨城県民の時間別の目的関数値を図11に示す。0時の人口重心は夜間人口を用いて施設を配置した場合の移動距離の二乗のコスト、12時の人口重心は昼間の人口統計を用いて施設を配置した場合の移動距離の二乗のコスト、県庁の値は現状の移動距離の二乗のコストであるとそれぞれ考えられる。図13からは2点のことがわかる。第一に0時の重心を用いた場合と12時の人口重心を用いた場合の結果に大きな差はなく、人口の移動が活発になる夜間から昼間にかけて目的関数値が増加すること。第二に、現在の県庁の位置は人口重心を用いた場合に比べてどの時間帯でも約1.3倍の二乗距離があることがわかる。

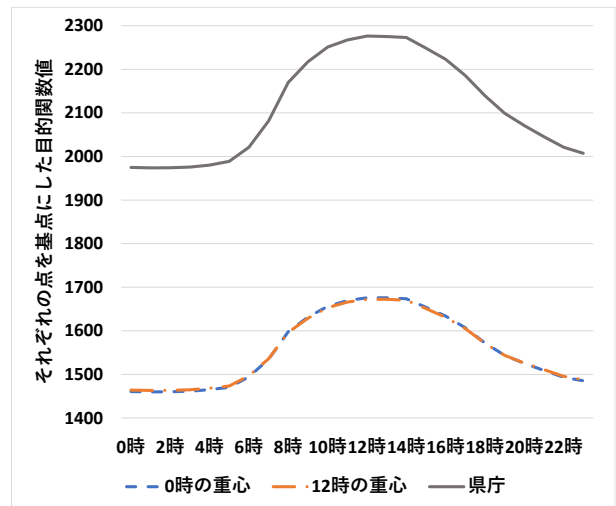


図 7 施設を固定した茨城県民の目的関数値

4. 二目的立地問題

4.1. パレート最適配置

異なる時刻 $t, s (s \neq t)$ における目的関数 $\phi(x, y; t)$ と目的関数 $\phi(x, y; s)$ は競合する。そこでこの二つの目的関数を用いて、施設候補となる地点を限定していく。そのために、パレート最適や優越を定義する。

- ① $\phi(x_A, y_A: t) \leq \phi(x_B, y_B: t)$ かつ $\phi(x_A, y_A: s) \leq \phi(x_B, y_B: s)$
- ② $\phi(x_A, y_A: t) \leq \phi(x_B, y_B: t)$ かつ $\phi(x_A, y_A: s) < \phi(x_B, y_B: s)$, または $\phi(x_A, y_A: t) < \phi(x_B, y_B: t)$ かつ $\phi(x_A, y_A: s) \leq \phi(x_B, y_B: s)$

のであれば, 地点 (x_A, y_A) が地点 (x_B, y_B) を優越する, と定義する. そして, 他どの地点からも優越されない地点をパレート最適 (非劣解) と呼ぶ. 施設配置に関するパレート最適すべてを求める以下の二目的立地問題を考える:

$$\min_{x,y} \{ \phi(x, y: t), \phi(x, y: s) \}. \quad (8)$$

式(3)から, 目的関数 $\phi(x, y: t)$ と $\phi(x, y: s)$ の等高線は共に同心円となる. そのため, 両最適点を結ぶ線分以外の場所は, そこから線分への垂線の足, もしくは線分端点と比較すると両目的関数値は共に大きい. 一方, この線分上の二点を比較するとどちらかの目的関数値が高く, 残りが低い. すなわち, 互いに支配関係とはならない. 以上から人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ と $(\bar{x}(s), \bar{y}(s))$ とを結ぶ線分がパレート最適になることが幾何学的にわかる(図 12).

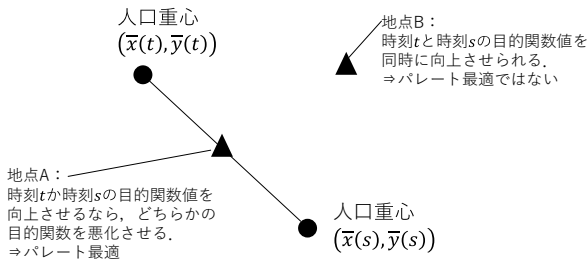


図 12 幾何学的に理解するパレート最適

関数 $\phi(x, y: t)$ 及び $\phi(x, y: s)$ は凸関数なので, パレート最適はパラメータ $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ を用いた線形加重問題を通して, 次の集合と一致する:

$$\{(x, y): \operatorname{argmin}_{x,y} \theta \phi(x, y: t) + (1 - \theta) \phi(x, y: s)\}$$

実際, 式(3)から, $\theta \phi(x, y: t) + (1 - \theta) \phi(x, y: s)$ を最小とする地点 (x^*, y^*) は,

$$(x^*, y^*) = \theta(\bar{x}(t), \bar{y}(t)) + (1 - \theta)(\bar{x}(s), \bar{y}(s))$$

となるから, パレート最適は式(8)で表現されることが代数学的にも確認できる.

4.2. トレードオフ曲線

地理的空間で定められたパレート集合から, 最終的に合理的な施設配置点を一箇所選ぶ, あるいは限定していくためには, 目的関数ベースでトレードオフ関係の吟味が不可欠である.

人口重心 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ と $(\bar{x}(s), \bar{y}(s))$ 上を結ぶ線分上の位置 (x, y) は, パラメータ $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ を用いて, $(x, y) = \theta(\bar{x}(t), \bar{y}(t)) + (1 - \theta)(\bar{x}(s), \bar{y}(s))$ と表現できる. この関係を式(3)に代入し, 式(5)を用いることで,

$$\begin{aligned} \phi(x, y: t) &= \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t) \\ &\quad + (\theta \bar{x}(t) + (1 - \theta) \bar{x}(s) - \bar{x}(t))^2 \\ &\quad + (\theta \bar{y}(t) + (1 - \theta) \bar{y}(s) - \bar{y}(t))^2 \\ &= \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t) \\ &\quad + (1 - \theta)^2 (\bar{x}(s) - \bar{x}(t))^2 \\ &\quad + (1 - \theta)^2 (\bar{y}(s) - \bar{y}(t))^2 \\ &= \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t) + (1 - \theta)^2 \delta(t, s). \end{aligned} \quad (10)$$

同様に, 時刻 s では,

$$\phi(x, y: s) = \phi(\bar{x}(s), \bar{y}(s): s) + \theta^2 \delta(s, t). \quad (11)$$

式(10)と式(11)を見比べると右辺の $\theta^2 \delta(s, t)$ が共通である. これら式を統合させパラメータ θ を消去することで, 次のようなトレードオフ曲線が得られる:

$$\begin{aligned} \phi(x, y: t) = & \left\{ \sqrt{\phi(x, y: s) - \phi(\bar{x}(s), \bar{y}(s): s)} - \sqrt{\delta(t, s)} \right\}^2 \\ & + \phi(\bar{x}(t), \bar{y}(t): t) \end{aligned} \quad (12)$$

横軸を $\phi(x, y: s)$, 縦軸を $\phi(x, y: t)$ とする目的空間を考えると, 例えば茨城県の2019年4月8日で $t = 0$, $s = 0$ とすると, 図 13 のようなトレードオフ曲線が描ける. なお, 参考までに茨城県石岡市の市役所における目的関数値も示している. また, 関東1都6県における同様の時刻でのトレードオフ曲線と県庁の位置での目的関数を図 14 に示す. 図 14 からは2つのことがわかる. 第一に茨城県, 栃木県, 千葉県順に目的関数値が大きくなっているという点である. これらの県は昼夜間での平均移動距離が長い県であると解釈できる. 第二に茨城県庁と茨城県のトレードオフ曲線の乖離が大きく, 逆に東京都の乖離は小さい. これは県民, あるいは都民が集まってい

るところに庁舎が立地しているのかの指標になるが、茨城県は県庁の位置する水戸市の他につくば市が人流の中心となっているほか、県南地域の東京近郊への意識も強い。

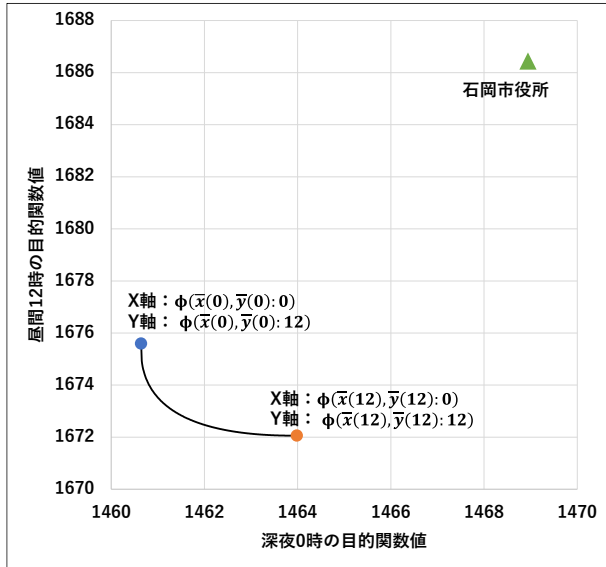


図 13 茨城県におけるトレードオフ曲線

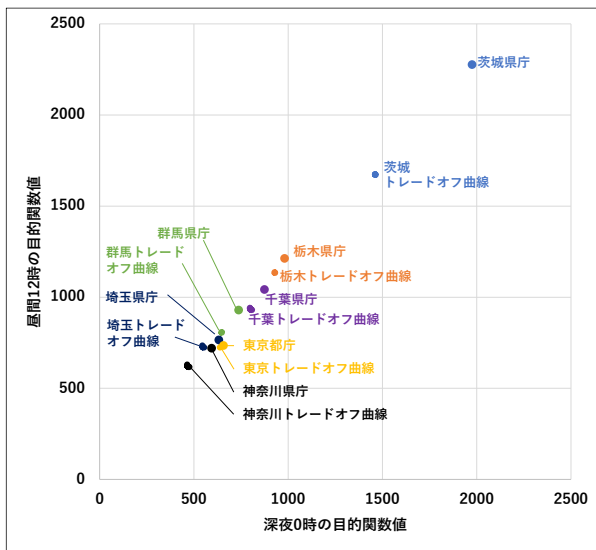


図 14 各県のトレードオフ曲線と県庁の位置

5. 多目的立地問題

5.1. 多目的立地問題のパレート最適配置

異なる時刻 t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) に対し、 n 個の目的関数値、 $\phi(x, y; t_1), \phi(x, y; t_2), \dots, \phi(x, y; t_n)$ を考える。二目的計画問題と同様に、

- ① $j \neq i$ に対し、 $\phi(x_A, y_A; t_i) \leq \phi(x_B, y_B; t_i)$ かつ $\phi(x_A, y_A; t_j) \leq \phi(x_B, y_B; t_j)$

- ② $j \neq i$ に対し、 $\phi(x_A, y_A; t_i) \leq \phi(x_B, y_B; t_i)$ かつ $\phi(x_A, y_A; t_j) < \phi(x_B, y_B; t_j)$ または、 $\phi(x_A, y_A; t_i) < \phi(x_B, y_B; t_i)$ かつ $\phi(x_A, y_A; t_j) \leq \phi(x_B, y_B; t_j)$

のであれば、地点 (x_A, y_A) が地点 (x_B, y_B) を優越すると定義する。そして、地理空間上のパレート最適集合を求める次の多目的立地問題を考える：

$$\min_{x,y} \{ \phi(x, y; t_1), \phi(x, y; t_2), \dots, \phi(x, y; t_n) \}. \quad (13)$$

この多目的最適計画問題のパレート最適も解析的に求めることが出来る。

$n = 3$ では、ペア数は 3 組ある。それらペアの人口重心を結ぶことで三角形が構成される。目的関数 $\phi(x, y; t_1), \phi(x, y; t_2), \phi(x, y; t_3)$ の等高線は同心円となるため、三角形の外側の場所は、三角形の境界への垂線の足もしくは端点と比較すると、3 目的関数の少なくとも 1 本、多くても 2 本の値が大きくなり、三角形内ではお互いに支配関係とはならない。以上から三角形のみがパレート最適である (図 15)。

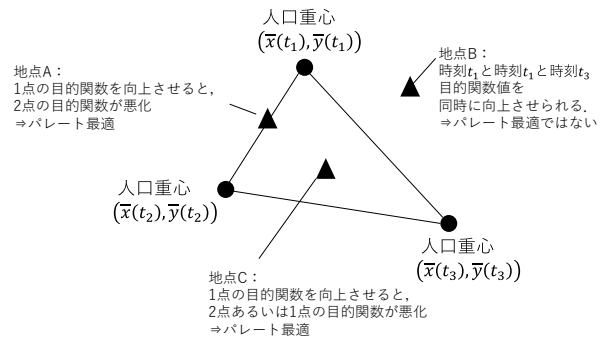


図 15 $n = 3$ の時のパレート最適

$n (\geq 4)$ 個の目的関数 $\phi(x, y; t_i)$ の目的関数 $\phi(x, y; t_i)$ の場合、 n 個の人口重心が求まりその凸包を考える。凸包外のどの点も凸包境界への垂線の足もしくは端点と比較すると n 個の目的関数値はいずれも大きくなる。一方で、凸包内のどの点も凸包内の別の点と比較して n 個の目的関数の内少なくとも 1 つの目的関数では小さくなり、凸包内では支配関係は成立しない。以上から、凸包のみがパレート最適となる [7]。

5.2. 各都道府県の凸包

図 16 は 2015 年から 2019 年の 4 月上旬から 3 週間分の平日合計 1, 800 時間分の茨城県民の人口重心を算出し、夜間 (18 時~5 時)・昼間 (6 時~17 時) でそれぞれ凸包を作成したものである。凸包は茨城

県石岡市に存在し、夜間よりも人流が活発な昼間の方が大きくなり、茨城県かすみがうら市にもまたがるようになる。

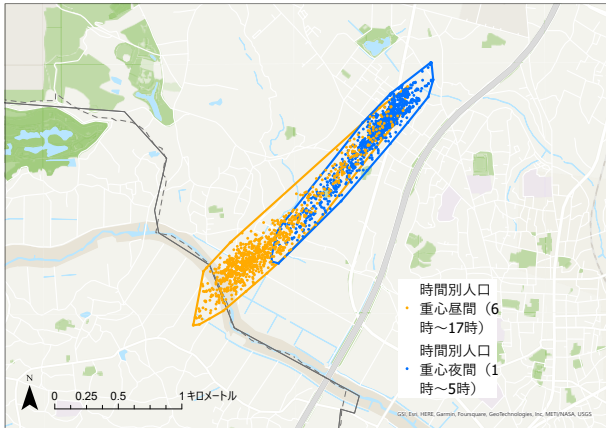


図 16 2015 年～2019 年平日の茨城県民の凸包

次に、同様の時間帯における関東地方の凸包と県庁所在地を図 17 に示す。図 19 からは 2 点のことがわかる。第一に茨城県の他の都県においても昼間の凸包の方が東京方面に位置しており、面積も大きくなっている。第二に凸包のある自治体は茨城県と東京都を除き、県庁所在地と同じである。(政令指定都市の場合は区単位では一致していない。)

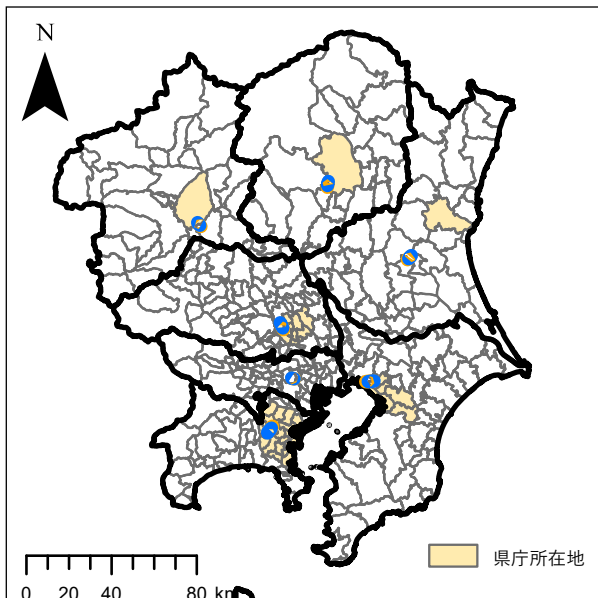


図 17 各都県の凸包と県庁所在地

6. まとめ

本稿では関東全域の時間帯ごとの人口重心を用いることで、二目的・多目的における立地問題のプレート最適を導出出来た。また、それと共に人口重心を用いて関東地方の人口が東京に集中することを明らかにした。今後、ビッグデータを活用したまちづくりは大きく広がる。人口減少社会において自治体の施設維持等も時間別人口や属性別人口を用いることで効率的に行われることが期待される。本稿では、その基盤の考え方になる部分を整理し、携帯電話人口統計活用の可能性を示した。

謝辞

本研究はトヨタ自動車と筑波大学社会工学域との共同研究「モビリティイノベーションの社会応用と未来社会工学研究フェーズIV」の一環で実施した。また、本研究の一部は、株式会社ドコモ・インサイトマーケティングよりご指導を頂いた。

参考文献

- [1]国土交通省ホームページ重点的施策：https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/toshi_daisei_fr_000050.html#1st (最終閲覧日 2022 年 8 月 29 日)。
- [2]斧田佳純・浅野礼子・鈴木俊博 (2020)：ウィズアーターコロナ時代におけるモバイルビッグデータの活用可能性,「横幹連合コンファレンス予稿集」,第 11 回横幹連合コンファレンス, C-4.
- [3]鈴木啓祐 (1979)：わが国の人口中心とその移動,「人口学研究」, 2 巻, pp.17-22.
- [4]田村一軌・大澤義明・古藤浩・青木充広 (2009), 平面上の k -centrum 立地問題の解法に関する研究.「GIS-理論と応用」, 17 (1), pp.101-110.
- [5] Yoshiaki Ohsawa, Naoya Ozaki and Frank Plastria(2008):Equity-Efficiency Bicriteria Location with Squared Euclidean Distances. *Operations Research*,56(1),pp.79-87.
- [6]栗田治 (2004)：『都市モデル読本』, 共立出版
- [7] Yoshiaki Ohsawa, Naoya Ozaki, Frank Plastria, Kazuki Tamura (2007): QUADRATIC ORDERED MEDIAN LOCATION PROBLEMS. *Journal of the Operations Research Society of Japan*,50(4),pp.540-562.