

# 社会コストを最小化する拠点と公共交通路線の同時配置

榎本俊祐\*・嚴先鏞\*\*・鈴木勉\*\*\*

## Simultaneous Location of Hubs and Public Transportation Routes for Minimizing Social Costs

Shunsuke ENOMOTO\*, Sunyong EOM\*\*, Tsutomu SUZUKI\*\*

In the context of a declining and aging population, issues related to the maintenance of living service facilities have arisen, especially in suburban areas. In order to solve this problem, it is important to design a public transportation network and centralized hubs for daily life service facilities. On the other hand, there is a lack of a quantitative method for designing efficient hubs and public transportation routes. This study aims to develop the simultaneous location model of hubs and routes and clarify the features of network layout for minimizing social cost, including infrastructure, operation, and travel time under the budget limitation. The results show that (1) there is a trade-off relationship between hubs and routes depending on their cost, (2) the optimal layout of low travel load scarify the users' travel time to minimize the social cost, and (3) using all possible budget does not necessarily guarantee the minimum social cost.

**Keywords:** 拠点配置 (hub location), 路線配置 (route planning), 社会コスト (social cost), 都市構造 (urban structure)

### 1. はじめに

日本においては人口減少や高齢化といった背景により特に地方部において生活サービス施設の維持に関する課題が生じている。このことにより高齢者や年少者といった自力による交通が困難な人々にとっての生活環境の悪化が懸念される。同時に自治体の財政状況の悪化も考えられ、費用に対して効率的なまちづくりが求められている。この課題に対して国土交通省では生活サービス施設の集約と公共交通ネットワークによる接続を行う「コンパクトシティ・プラス・ネットワーク」に基づいたまちづくりが推進されている。これを受けて生活サービス施設の集約による拠点づくりの計画としては「立地適正化計画」、公共交通網の計画としては「公共交通網形成計画」といった計画が各自治体では策定されつつある。しかし、拠点と公共交通の設計は相互に影響をもたらすものであることから同時に設計することにより更に効率的な街づくりが可能となることが考えられ

るが、現状において拠点と公共交通ネットワークの効率の整備の定量的評価を行う知見は十分とは言いがたい。地域公共交通における利用者の利用実態に関する研究として西堀ら(2017)による兵庫県神戸市の住吉台という地域における高齢者のコミュニティバスの利用実態のアンケート調査が存在する。この研究では高齢者の移動は商業施設や医療施設といった施設へのものが多いことが示されている。また路線構築に関する研究としては Schittekat ら(2006)や Ledesma & González(2012)は学校への通学に用いるスクールバスのルーティング問題としてヒューリスティックスを用いて、平面上のノードの中に目的地となる単一のノード及びバス停の候補点を設定しその点への総移動距離を最小化するルーティングを求める研究を行っている。また、Martins De Sá ら(2015)はノード間にバス停留所を選択した上でそれらを結ぶバス路線について、ハブ間を結ぶネットワークの全てのノード間のフロー需要を重みとした重み付き

\* 学生会員 筑波大学大学院理工情報生命学術院システム情報工学研究群 (University of Tsukuba)

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 E-mail : s2020527@s.tsukuba.ac.jp

\*\* 正会員 筑波大学システム情報系 (University of Tsukuba)

総移動時間の最小化を目的として停留所の設置とルーティングを行っている。更に、路線における車両の運行頻度を考慮して路線設計を行った研究として、Salzborn(1972)による、バスの乗車可能人数と発着地へと戻る時間を用いて台数を最小化するスケジューリングをおこなっている。そして、それを参考として Gallo ら(2011)は地下鉄の路線設計問題に対して地下鉄の運行頻度に焦点を当てた研究を行っている。また、拠点配置問題の研究としては Hakimi(1964)による  $p$ -median 問題をはじめとして拠点配置と路線配置を組み合わせた研究として、長谷川・鈴木(2019)はノード毎の重みとして、ノードが代表する人口・医療機関の診療科数・店舗面積を用いて  $p$ -median 問題を求解している。そうして路線型公共交通機関の発着する拠点を配置し、その後ハブ間にバス路線を配置し、補足されるフロー交通量を最大化する路線配置を求める研究を行い、実際の市街地に対してそれを適用している。この研究では格子状の都市モデルを利用することで実際都市への当てはめを容易としている。一方で、これらの研究では路線配置による最適な拠点配置の変化という点が考慮されていないという課題がある。ルーティング問題と拠点の配置計画を行った研究として Arslan(2021)は拠点からある一定の範囲では路線型交通を利用しなくてもたどり着けるという仮定を置いた上で拠点設置費用・運行費用・自力での移動費用の総和が最小となる様に拠点の配置及び路線の最適化を行っている。一方で、考慮されている交通手段が路線型のみである他、範囲外の利用者のすべてを路線が回るという想定となっており、一方範囲内では一律で自力による移動となっているがその範囲内での移動時間の増加による利用者の時間損失という形での社会コスト増について考慮されていないという問題点がある。また、運行費用を考慮した研究として石田ら(1999)は路線長と交通需要密度を用いて都市空間を想定し事業者側の運行費用と運賃収入による採算限界と輸送能力により規定される輸送限界から各交通機関の有利地域を求め、各都市圏における交通機関成立領域の差異を明らかとしている。また長谷川ら(2017)はデマンド型交通について路線

型・タクシー型などの運用方法を類型化しそれぞれについて一人当たり運行費用を定式化し各自治体の需要密度からコストを最小化するデマンド型交通の類型を明らかとしている。一方で、実際の公共交通の路線網の設計には言及していない他、モデルで想定される移動距離についても各自治体の中で平均化されたものであるため具体性に欠けた部分がある。

そこで、本研究では長谷川・鈴木(2019)を参考として、バスを想定した公共交通路線と拠点を同時配置し、総移動時間を最小化し、更に路線と拠点の維持コスト及び利用者の移動時間による利用者側総移動負荷の概念を導入することにより、それらの総和としての総社会コストを最小化する路線と拠点の配置を求める問題を解くことを試みることにし、拠点と公共交通の同時最適化を行うことを目的とする。

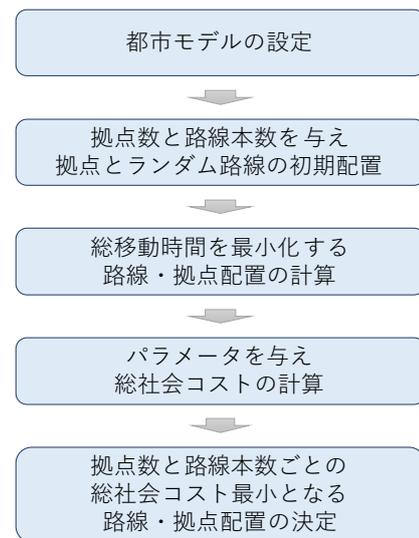


図 1：全体のフローチャート

## 2. 総社会コストを最小化する路線と拠点配置

### 2.1. 都市モデルの設定

都市モデルにある程度の不規則性を持たせるため 2次元平面上で 7km 四方の範囲にて座標をランダムとしてノードを配置し、それらの間をドローネ網で接続するリンクを設置した。人口は 1つのノードにつき 100 人を想定した。また、人々は最も移動時間を短くする拠点を目的地として移動を行うものとする。

### 2.2. 拠点配置の及び路線の配置方法

始めに拠点数 $p$ を与え、ノード間のリンクを通る移動距離 $d_{ij}$ をダイクストラ法により求め、 $d_{ij}$ を用いて以下のように定式化される  $p$ -median 問題により拠点を初期配置した。

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} P_i d_{ij} r_{ij} \quad (1)$$

$$s. t. \sum_{j \in N} r_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$r_{ij} \leq s_j \quad \forall i, j \in N \quad (3)$$

$$\sum_j s_j = p \quad (4)$$

$$r_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$s_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (6)$$

$N$ : ノードの集合

$d_{ij}$ : ノード $i$ と $j$ 間の距離

$P_i$ : ノード $i$ の利用人口

$p$ : ハブとなるノード数

$r_{ij}$ : ノード $i$ の拠点 $j$ への割当を示すバイナリ変数

$s_j$ : 拠点ノード $j$ を示すバイナリ変数

更に路線本数 $q$ を与え、リンク上にランダムに配置し路線の初期配置を行う。そしてヒューリスティック

ックアルゴリズムを用いて拠点と路線配置の最適化を行う。このアルゴリズムは初期配置の路線の全てについてそれぞれ未配置のリンク全てに置き換えを行い、各ノードから拠点までの総移動時間の最も短い置き換え先を保存する。路線の入れ替えが発生しなくなった時点で、式(8)で求められる全てのノード間の移動時間 $t_{ij}$ を求める。なお、この時の経路は移動時間を最小化する経路となる。 $d_{ij}$ を $t_{ij}$ と置き換え、式(1)~(6)の  $p$ -median 問題を再び求解することで拠点への総移動時間の最小化を目的関数として拠点を再び最適化し、この配置に変化があった場合にはその時点での路線配置を初期配置とした上で路線最適化を再び行い、路線と拠点の配置が変化しなくなるまで繰り返す。(図2) このアルゴリズムにより、総移動時間を最小化する路線配置及び拠点配置が求められる。

$$\min T_p^q = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} P_i t_{ij} r_{ij} \quad (7)$$

$$s. t. t_{ij} = d_{ij} \sum_{k \in E} \sum_{l \in E} u_{kl}^{ij} \{x_{kl}/v_b + y_{kl}/v_w\} \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} = q \quad (9)$$

表1: 定数・パラメーター一覧

区分		概要	拠点コスト一定	路線コスト一定
定数	$P$	ノードの利用人口	100	100
	$v_b$	バスの速度(km/h)	15	15
	$v_w$	徒歩の速度(km/h)	2	2
	$H_b$	1日当たりバス運行時間(h)	12	12
	$f_u$	1日当たりの利用回数(回)	0.29	0.29
パラメータ	$p$	拠点数	1	1
			2	2
			3	3
			4	4
			5	5
	$c_b$	路線長当たり費用(円/km)	47.72	95.43
			95.43	
			143.14	
	$c_h$	拠点当たり費用(円/箇所)	20000	10000
				20000
				40000
	$c_u$	利用者側の時間価値(円/h)	100	100
			500	500
			1000	1000

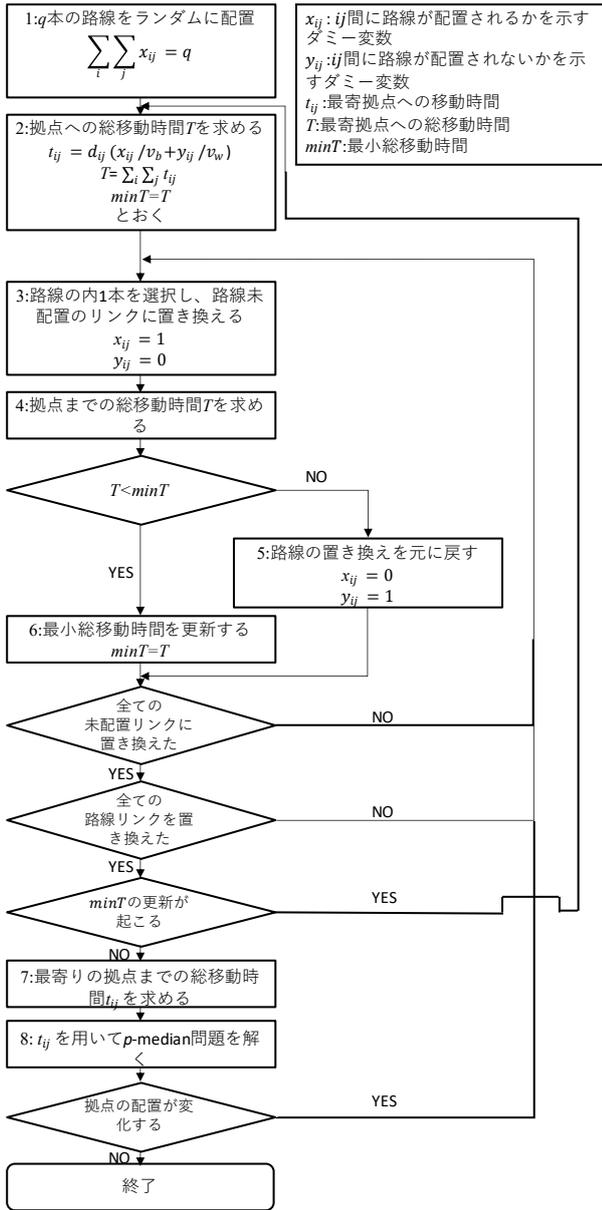


図2: 路線・拠点配置のフローチャート

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E \quad (10)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E \quad (11)$$

$$u_{kl}^{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j, \forall (k,l) \in E \quad (12)$$

$E$ : リンクの集合

$T_p^q$ : 路線本数  $q$  拠点数  $p$  の時の純移動時間 (h)

$t_{ij}$ : ノード  $i$  と  $j$  間の移動時間

$v_b$ : バスの速度 (km/h)

$v_w$ : 徒歩の速度 (km/h)

$x_{ij}$ : 路線配置リンク  $ij$  を示すバイナリ変数

$y_{ij}$ : 路線未配置リンク  $ij$  を示すバイナリ変数

$u_{kl}^{ij}$ :  $ij$  間の移動経路を示すバイナリ変数

### 2.3. 総社会コストの計算

式(13)の通り示される路線長による事業者側のコストと純移動時間  $T_p^q$  と待ち時間を合わせた時間的損失による利用者側コストの合計である  $C_p^q$  を求めた。そして、パラメータ毎に最も総社会コスト  $C_p^q$  を小さくする拠点数  $p$  と路線本数  $q$  を求めた。

$$\min C_p^q = H_b B v_b c_b + p c_h + \left( T_p^q + \sum_{i \in N} \frac{P_i f_b}{2} \right) f_u c_u \quad (13)$$

$$s. t. B \geq \frac{\sum_{i \in L} \sum_{j \in L} x_{ij} d_{ij}}{f_b v_b} \quad (14)$$

$H_b$ : バスの1日の営業時間 (h)

$B$ : 車両台数

$c_b$ : 走行キロ当たり費用 (円/km)

$c_h$ : 拠点当たり費用 (円/箇所・日)

$f_u$ : 利用者の利用頻度 (回/人・日)

$c_u$ : 利用者の移動負荷 (円/h)

$f_b$ : バスの運行間隔 (本/h)

パラメータとしては表1に示される通りとなっている。式(13)の最適化計算においては運行間隔  $f_b$  が変数となり、総路線コストと利用者側総移動負荷に影響する。総路線コストはまず運行間隔  $f_b$  とバスの速度  $v_b$  の積で路線長を割ることにより、必要なバス台数  $B$  を求める。そして1日にバス台数  $B$  が営業時間  $H_b$  だけ走り続けることを想定した2つの値の積  $H_b B$  により全てのバスの走行時間の総和が求められる。そこにバスの速度  $v_b$  をかけることで1日の総走行距離を求め走行キロ当たり費用 (以後、路線コスト)  $c_b$  の積が総路線コストとなる。利用者側総移動負荷は、まず運行間隔  $f_b$  を用いて期待待ち時間をノード別に求め総待ち時間を純移動時間  $T_p^q$  と併せて総移動時間を求める。それに移動時間によって利用者に課される負荷を概念的に金銭換算したパラメータを佐藤(2006)らを参考として「移動負荷」と命名した  $c_u$  と2015年全国都市交通特性調査より求めた1人1日当たりの平均的な買物・通院目的移動回数である  $f_u$  を掛け合わせるにより求められる。

上記の定式化に基づき、繰り返し計算によるヒューリスティックアルゴリズムで最も総社会コストを最小化する路線・拠点配置の解を求めた。

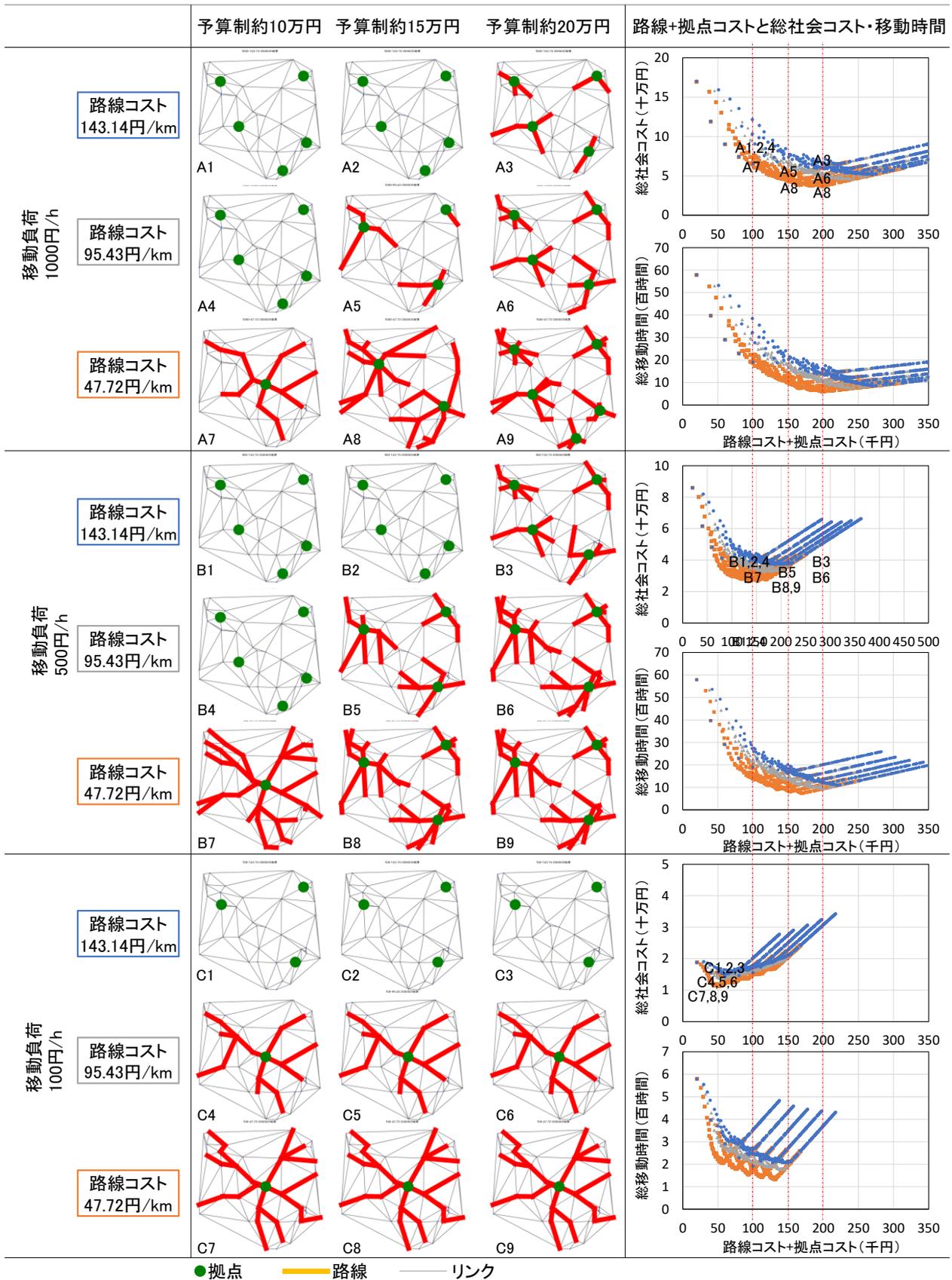
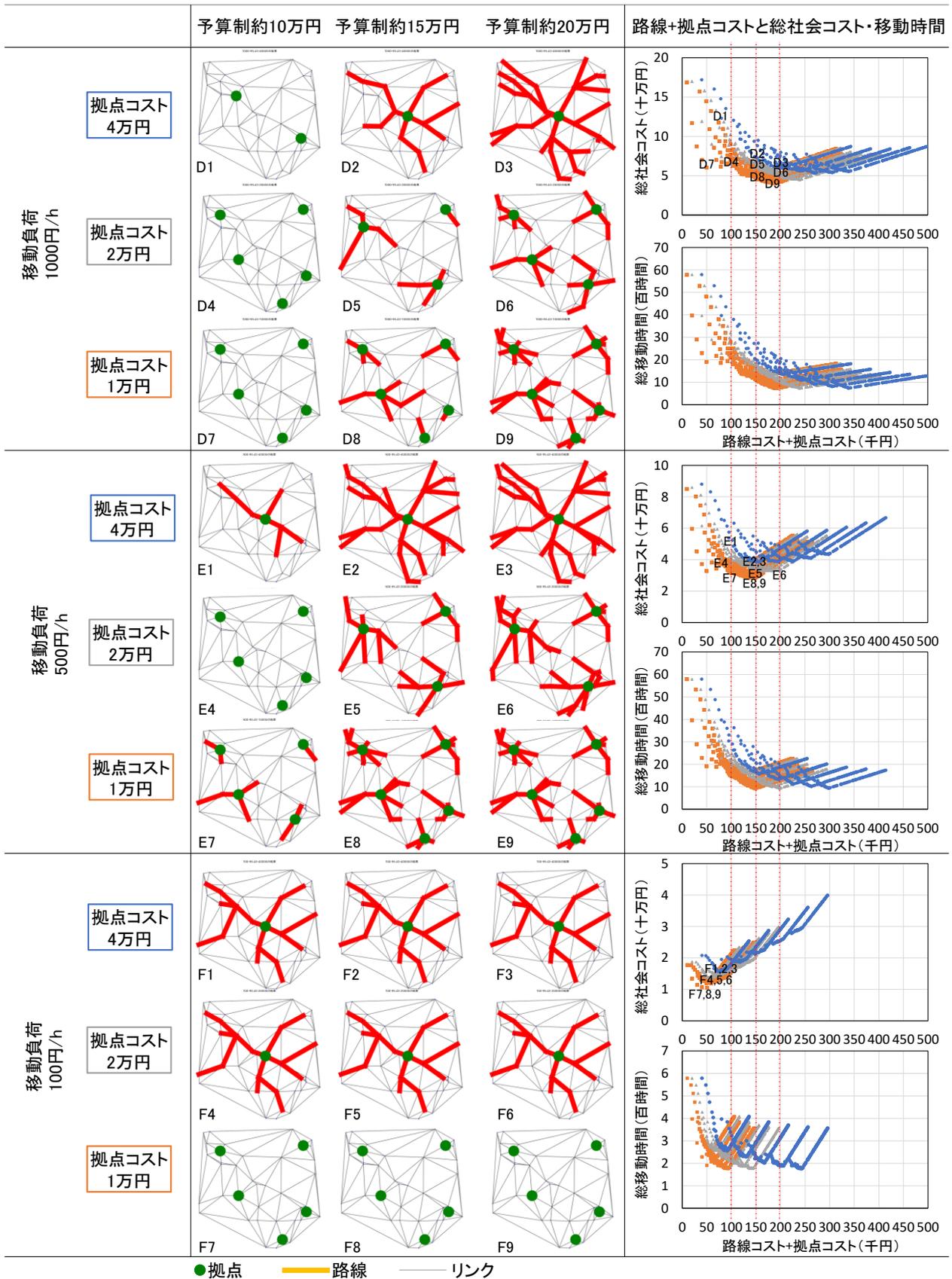


図3：拠点コスト一定の各パラメータによる最小総社会コストとなる路線と拠点配置・予算と総社会コストと総移動時間の散布図



●拠点    路線    —リンク

図4：路線コスト一定の各パラメータによる最小総社会コストとなる路線と拠点配置・予算と総社会コストと総移動時間の散布図

### 3. コスト算定パラメータによる最適路線・拠点配置の変化

#### 3.1. 移動負荷の差異による最適配置の違い

表1における「拠点コスト一定」の各パラメータ条件での総社会コスト最小化拠点・路線配置及び、サービスの供給者の投資額を表す路線コストと拠点コストの総和の違いによる総社会コストと総移動時間の変化を示したものが図3であり、「路線コスト配置一定」の結果を示したものが図4である。この図では供給者側の投資額について政策実施時の予算制約を想定した3種類の制約をかけた結果を示している。移動負荷に着目すると、移動負荷が高い1000円・500円の場合には予算を増加させることで路線長・運行間隔や拠点数を増加させ、総社会コストをより小さくすることができる。これは、移動負荷の高い高齢者などの多い都市では総社会コストをより小さくするために予算を高くする必要があることを示唆している。翻って移動負担が低い100円の場合には予算制約10万円の時点で総社会コストが最小化されており、予算を増加させる必要がないことも示される。また、移動負荷が大きい場合に路線長がむしろ短くなる場合がある。また、運行頻度は移動負荷が大きい場合には短くなる。このことから、移動負荷が大きい場合には路線長を短くしてでも運行頻度を上げた方が良いという結果がみてとれる。このことは、予算と総移動時間の散布図において予算が低い場合に予算の増加に対する総移動時間の減少が著しい部分があることによっても示唆されている。更に、移動負荷が低い100円の時、予算に対する総社会コストの極小値は総移動時間の極小値よりも低いことが確認できる。このことは、移動負荷が小さい場合には公共交通への投資が小さく公共交通を利用したときの総移動時間が長い時においても総社会コストを最小化されている可能性を示している。これらのことから、移動負荷の高い高齢者の多い都市では最適となる拠点・公共交通整備の形態が変わる可能性が示唆される。

#### 3.1. 路線・拠点コストの差異による最適配置の違い

運行されるバスの運行形態に関する路線コストの変化による影響について路線コストの増加により

路線長は減少する。それに伴って拠点数は(A9→A6)のとき以外には増加するか変わらないトレードオフ関係がみられた。例外である(A9→A6)のときには運行間隔が小さくなっている。このことから、路線コストが増加しても拠点数を増やすのではなく運行頻度を増加させた方が最適である場合もあることがわかる。

次に、目指される拠点のサービスレベルと関係する拠点コストの変化による影響については、拠点費用が増加した場合に総社会コストを最小化する拠点数が減少していることがわかる。一方でこのときの路線長は多くの場合増加するが、一部(D8→D5・D9→D6・E7→E4・E8→E5)のときにはむしろ路線長は減少する。このとき同時に運行間隔は小さくなっている。従って路線長を伸ばすことと運行間隔を小さくすることの移動時間を短縮する2通りの方法があり、どちらがより有効かは場合によることがわかる。更に時間負荷が高く拠点コストが低い場合に運行間隔の縮小が有効である場合が多いことがわかる。

### 4. まとめ

本研究では路線型公共交通と目的地としての拠点の移動時間の最小化を目的とする同時最適化による設計を通して利用者の利便性も含めた総社会コストを最小化する路線と拠点の数量と配置決定を行った。そしてパラメータの違いによる結果の差異を分析した。この結果として以下のことが分かった。

- ①移動負荷の高い場合には総社会コストを小さくするために公共交通と拠点により多く予算を割く必要性がある。
- ②移動負荷が小さいときには総社会コストの極小値をとる予算と総移動時間の極小値をとる予算では前者が低くなることが示されたことから、公共交通による総移動時間が長い場合でも総社会コストが最小化されている状況である場合がある。
- ③これらより、高齢者が多いなど住民の移動負荷が大きい場合には公共交通に多くの予算を割くことが望ましくなる場合がある。
- ④自動運転化などによる路線コストの削減といった状況においては拠点数を削減するのが望ましい場合

がある。

⑤コストが高い拠点を整備する場合は拠点数を減らし、路線長を伸ばすか運行間隔を小さくすることによって社会コストの最小化を達成することができる。

今後の課題としては、まず考慮する公共交通を路線型のみならずデマンド型を想定した非路線型にまで拡大することが挙げられる。また、公共交通路線のコスト算定においてその走行距離をより正確に算定するために路線から走行する系統までを設計することが今後の課題として考えられる。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 19H02374 および JSPS 科研費 19K15185 の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

西堀泰英・土井勉・安東直紀 (2017) 利用実態と住民意識からみた住民主体の地域公共交通が果たす役割. 都市計画論文集, 52 (3), 818-824.

Schittekat, P., Sevaux, M., Sørensen K. (2006). A mathematical formulation for a school bus routing problem, *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, 2, 1552-1557.

Riera-Ledesma J., Salazar-González J. J. (2012). Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser problem: A branch-and-cut approach, *Computers and Operations Research*, 39(2), 391-404.

Martins De Sá, E., Contreras, I., Cordeau J. (2015). Exact and heuristic algorithms for the design of hub networks with multiple lines, *European Journal of Operational Research*, 246(1), 186-198.

Salzborn, F. J. M. (1972). Optimum Bus Scheduling, *Transportation Science*, 6(2), 137-148.

Gallo, M., Montella, B., D'Acierno, L. (2011). The transit network design problem with elastic demand and internalisation of external costs: An application to rail frequency optimization, *Transportation Research Part C*, 19(6), 1276-1305.

Hakimi, S.L. (1964). Optimum Locations of Switching

Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, *Operations Research*, 12(3), 450-459.

長谷川大輔・鈴木勉 (2019) 路線網形状を考慮したバス・デマンド型交通併用効果の分析. 「GIS-理論と応用」, 27 (1), 1-11.

Arslan, O. (2021). The location-or-routing problem, *Transportation Research Part B*, 147, 1-21.

石田東生・谷口守・鈴木勉・古屋秀樹 (1999) 交通手段の成立可能領域と有利地域に着目した交通政策の有効性の分析. 運輸政策研究, 2 (1), 14-25.

長谷川大輔・鈴木勉 (2017) 需要密度・移動距離に着目した多様な公共交通システムの優位性に関する理論的考察. 都市計画論文集, 52 (3), 1284-1289.

佐藤栄治・吉川徹・山田あすか (2006) 地形による負荷と年齢による身体能力の変化を勘案した歩行換算距離の検討—地形条件と高齢化を勘案した地域施設配置モデルその 1—. 日本建築学会計画系論文集, 610, 133-139.

榎本俊祐・佐野雅人・鈴木勉・大澤義明 (2021) 流動人口データを用いたコミュニティバスのルート設計. 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2021 年春季研究発表会

榎本俊祐・巖先鏞・鈴木勉 (2020) 公共交通運賃の空間構造と公共交通優位地域の空間的評価. 都市計画論文集, 55 (3), 1227-1232.