

首都圏鉄道駅の時空間的な立ち寄り易さを測る

田中 健一

本稿では、都市における施設サービスへのアクセスを時間軸を導入して記述するモデルを構成し、首都圏鉄道網と駅間移動データを用いて各駅の立ち寄り易さを分析する。具体的には、退社後の帰宅途中に一定時間サービスにアクセスし決められた時刻までに帰宅可能な人数をサービス利用可能者数と捉え、サービスの提供場所と開始時刻の双方が利用可能者数に与える影響を分析する。分析結果から、JR山手線の各駅は時空間的な立ち寄り易さが際立って高いことが明らかになる。このモデルを基礎として、時空間領域における配置問題として一般化する方向性を示し、今後の展望について記述する。

キーワード：最適配置問題、時間軸、最大フローカバー問題、首都圏鉄道網、公共サービス

1. はじめに

わたしたちは日々の生活の中で、いろいろな時間的制約のもとで行動している。様々な機能を提供する都市施設を利用する場面を考えよう。空間的にアクセス可能であっても個人にとって都合のよい時間帯でなければサービスを受けることはできない。この点を施設を運営する側から眺めると、サービスの提供時間帯をどのように設定すれば多くの人の利用機会をうまく捉えることができるのか、という問題として考えられる。例えば、社会人を対象とした夜間大学院の運営を取り上げよう。この場合の利用者は、仕事を終えた後に大学院で授業を受けてあまり遅くならないうちに家に帰りたい、と考えるだろう。このようなニーズを満たすには、立地がよいことに加え、サービス提供時間帯（授業時間帯）がうまく設定されている必要がある。大学院を運営する側にとって、これらを適切に設定することは潜在的な顧客を多く確保するという意味で極めて重要な問題である。

本稿では、時間軸を明示的に導入し、サービスの提供場所と提供時間帯の設定がサービスの利用可能者数に与える影響を記述するモデルを構成し、首都圏鉄道網データを用いた分析を行う。この問題について、連続空間とネットワーク空間において仮想データを用いた分析[6][7][8]がなされているが、ここでは首都圏鉄道網と通勤移動の実データを用い、各駅の時空間的

な立ち寄り易さの分析を試みる。具体的には、退社後の帰宅途中に施設に立ち寄り一定時間サービスを受け、かつある時刻までに帰宅可能な就業者をサービス利用可能者と想定する。そして、各駅における各時間帯のサービス利用可能者数から首都圏鉄道網のもつ特徴を把握することを試みる。分析結果から、JR山手線の各駅は時空間的な立ち寄り易さが際立って高いことが判明する。これは、各駅の乗降客数データなどとは傾向が異なり、立ち寄り型の施設利用に特有の知見である。

わたしたちの身の回りには、このように時空間的な人の流動が本質的に関連する対象があふれている。都心部における公立図書館の夜間開館の事例やデパートの閉店時間の見直しの事例などは典型的な例であろう。本稿で扱うモデルを土台として、上記のような時空間的な意思決定を有する対象をオペレーションズ・リサーチの手法を用いて追求することは今後なすべき重要な課題であると考えられる。例えば、サービス提供場所が複数の場合への一般化は興味深い展開である。この場合、サービス利用可能者数を最大化する提供場所とサービス時間帯の組み合わせを求める問題は最大カバー型の0-1整数計画問題として定式化可能である[9]。この問題は空間的な意思決定モデルである施設配置問題に時間軸を導入したものを見なすことができ、様々な状況設定に応じたモデルを構成することができる。この方向への展開は最後の節で触れる。

以降の構成は次の通りである。まず2節でモデルの仮定を示した後、3節ではサービス利用可能者数の記述を行う。4節では大都市交通センサスデータを用いた数値例を示し、サービス利用可能者数が各駅・各サ

たなか けんいち
電気通信大学 システム工学科
〒182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1

ービス時間帯ごとにどのように変化するかをやや詳しく分析する。5節では得られた結果を簡単にまとめるとともに、今後の展望について記述する。

2. モデルの仮定

モデルの構成に必要なデータと前提条件を説明する。駅の集合 V と駅間リンクの集合 E をもつネットワーク $G(V, E)$ を考える。駅間リンクには通過に要する所要時間が与えられている。就業者の勤務地と居住地は駅に集約されているものと考え、駅間の移動のみを考える。以降では簡単のため勤務地を会社とよび居住地を家とよぶ。なお、仕事を終えた後の帰宅行動に着目しているため、移動の出発地は会社で到着地は家であることを注意されたい。駅 i に会社があり駅 j に家をもつ就業者数を q_{ij} と表す。以下を仮定する：

- (i) 任意の駅間の移動には最短時間を実現する経路が用いられるものとし、駅 i と駅 j の間の最短所要時間を u_{ij} と表す。
- (ii) 退社可能時刻の累積分布関数を $F_{ij}(t)$ と表す。退社可能時刻の累積分布関数 $F_{ij}(t)$ は、駅 i から駅 j への全移動者のうち、任意の時刻 t までに仕事を終えて会社を出ることができる割合を記述する累積分布関数を意味する。また、最も早く退社する就業者の退社時刻を時間軸の原点に設定し $t=0$ とする。

3. サービス利用可能者数の記述

上述の設定のもとで、サービスを利用可能な人数を導く。図1に示すように、鉄道網に垂直な時間軸を導入した時空間領域を考える。施設がある駅を x 、サー

ビス開始時刻を τ と表す。サービス利用可能者数を多く確保したい提供者の立場からは、 x と τ は決定変数となる。サービスの提供時間を c と表し、固定された定数とする。これによりサービス開始時刻 τ を決めればサービス終了時刻は $\tau+c$ と決まる。この仮定は、授業時間やコンサートの時間などの場合には妥当なものであろう。ただし、プロ野球の試合時間のようにサービス時間 c を確率変数と捉えた方が良い場合もある。以上の設定のもとで、施設が駅 x にありサービスを時刻 τ に開始する場合のサービス利用可能者数を $n(x, \tau)$ と表し、以下のように定義する：サービスを始めから終わりまで受けることができ、かつ時刻 t_h までに家に帰れる人数。ここでは、「始めから終わりまでサービスを受けて初めて満足感を得られる」タイプの施設サービスを想定している。また時刻 t_h は、ある程度の時間までには家に帰りたという通勤者のニーズを表しており、帰宅限度時刻とよぶ。サービス開始が早過ぎると退社後に開始に間に合わなくなり、遅すぎると終了後に帰宅限度時刻までに到着できなくなるため、サービス利用者数を多く確保するためには両者をバランスする開始時刻の設定が必要である。なお、ここでのサービス利用可能者は実際の利用者とは異なり潜在的な顧客を意味することに注意されたい。

サービス利用可能者数 $n(x, \tau)$ の導出手続きを説明する。図1に太線で示す経路は、サービス利用可能者(が実際にサービスを利用する場合)の移動経路を示している。利用可能者数 $n(x, \tau)$ を導くためには、与えられた x と τ に対し、時空間領域内でこのような行動が可能な移動者を足し合わせればよい。ある駅 i にいる就業者がサービス提供場所 x にサービス開始時刻 τ までに到着するためには $t = \tau - u_{ix}$ までに退社可能であればよく、この割合は $F_{ij}(\tau - u_{ix})$ で与えられている。ただし、 $\tau < u_{ix}$ の場合には(退社時刻は早くても $t=0$ であることから)その駅からはサービスにアクセスできないため、 $\tau \geq u_{ix}$ である駅に限定すればよい。一方で、サービス終了後に時刻 t_h までに帰宅するためには、(サービス終了時刻が $\tau+c$ であることより) x からの所要時間が $t_h - \tau - c$ 以内の駅集合に自宅が含まれる必要がある。この二つの条件を満たす駅 i と駅 j 間の利用可能者数は駅間移動者数 q_{ij} に $t = \tau - u_{ix}$ までに退社可能な割合 $F_{ij}(\tau - u_{ix})$ をかけた $q_{ij} \cdot F_{ij}(\tau - u_{ix})$ で与えられる。都市全体でのサービス利用可能者数はこのような会社の駅集合 A

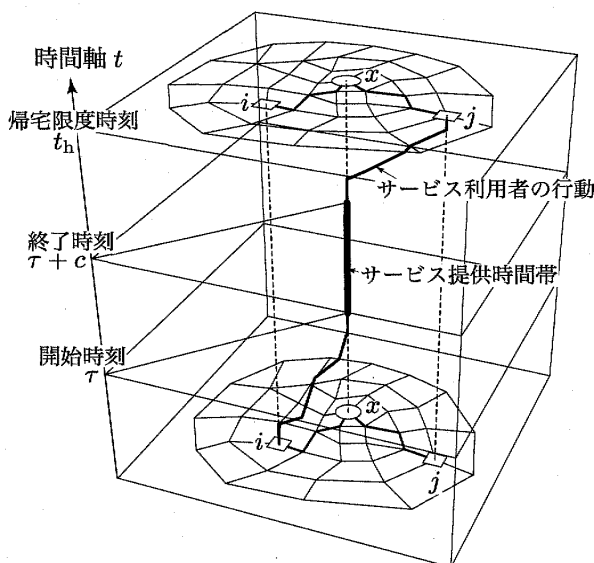


図1 時空間領域におけるサービス利用者の移動経路

と家の駅集合 B の各ペアに対してこの値を足し合わせるにより以下のように表される。

$$n(x, \tau) = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} F_{ij}(\tau - u_{ix}) q_{ij} \quad (1)$$

サービス提供側にとって、利用可能者数を最大化する問題は $n(x, \tau)$ を最大にする x と τ を見つける問題と捉えることができる。

4. 数値例

首都圏の鉄道網データを用いた数値例を示す。鉄道網データ作成に使用したデータは以下の通りである：

- (1) 平成 12 年度大都市交通センサスデータ
- (2) 平成 13 年度版数値地図 25000 (地名・公共施設)

対象駅は図 2 に示す、センサスデータに収録されている駅のうち東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、茨城県に存在する JR・私鉄および地下鉄の 1,796 駅を選択する (ただし新幹線は除外)。対象路線数は 125 路線である。隣接駅間リンクの所要時間は駅間の直線距離を平均的な走行速度で除したものを使用する。駅間の距離は、平成 13 年度版数値地図 25000 (地名・公共施設) より駅の緯度・経度情報を抽出し、これを平面直角座標系に変換して直線距離を計算する。平均速度として、地下鉄等は 30 km/h、それ以外の路線は 60 km/h として設定する。さらに、同名の駅間および直線距離が 500 m 以内の距離にある駅間は乗り換え可能であるとリンクを設定する。乗り換え可能リンクの所要時間は一律 5 分とする。このようにして作

成した首都圏鉄道網データにおいて、全頂点对間の最短経路問題を解き、任意の駅間所要時間 $u_{ij}(i, j \in V)$ を計算する。また、駅間 OD データは、センサスデータに収録されている通勤流動データを用いる。総 OD 量は 8,520,172 人である。以降の数値結果では、各パラメータに以下の値を用いる：サービス時間を $c=3$ 時間、帰宅限度時刻を $t_h=23$ 時とする。退社時刻分布 $F_{ij}(t)$ はすべての駅対 $i-j$ 間の移動について共通のものを用い、17時から21時までの線形増加関数で与える。以上より、サービス開始時刻 τ は 17時から20時の間に設定する (20時以降に開始すると終了時刻が 23時となり帰宅限度時刻を超えてしまう)。

まず、サービス開始時刻が決められている場合に各駅における利用可能者数 $n(x, \tau)$ を計算する。図 3 から図 7 に、サービス開始時刻を $\tau=17$ 時 30 分、18 時、18 時 30 分、19 時、19 時 30 分の 5 通りに固定した場合の $n(x, \tau)$ の分布を示す ($n(x, \tau)$ に比例した半径の円を各駅に描画しており全 OD に対する割合で示している)。都市中心部にあるサービス会場ほど立地場所として優れていることが分かる。17 時 30 分では立ち寄り可能者数は極めて小さく、次第に増加し 19 時でピークを迎える様子が見て取れる。19 時 30 分の例では、サービス終了後に t_h までに帰宅できない割合が増えるために小さな値をとることが分かる。

次に、サービス提供場所が決められた場合に開始時刻によってどのくらいのサービス利用可能者数が見込めるかを計算する。対象駅として、JR 中央線の東京駅、武蔵境駅、八王子駅の三駅を取り上げる。図 8 に、

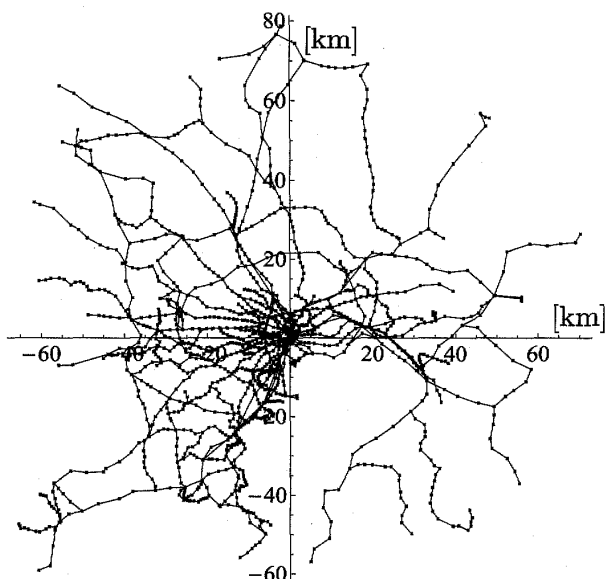


図 2 首都圏の鉄道網データ

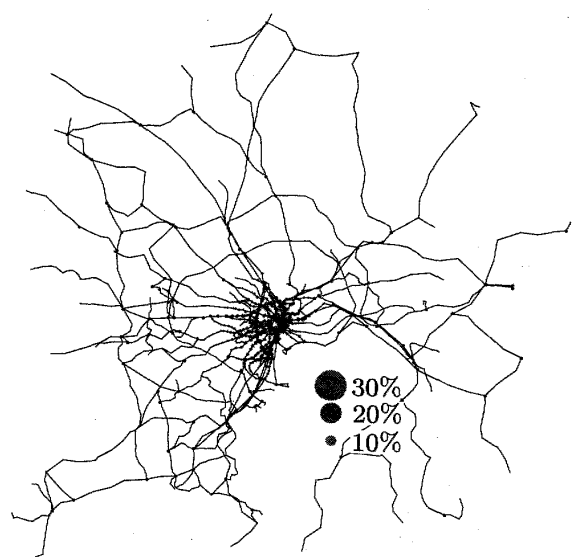


図 3 立ち寄り可能者数 $n(x, \tau)$ ($\tau=17$ 時 30 分)

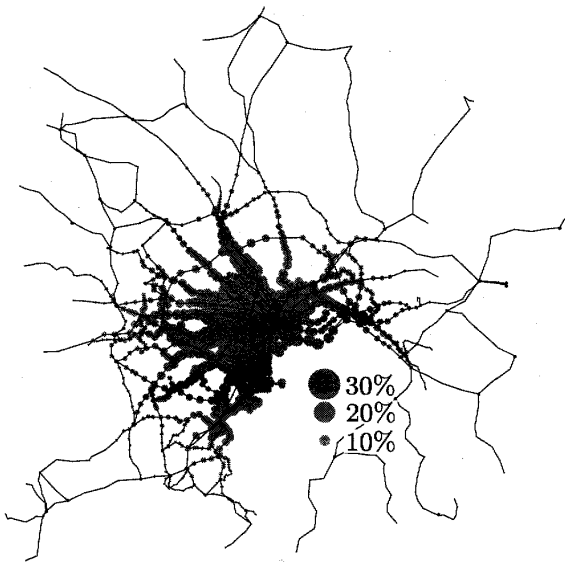


図4 立ち寄り可能者数 $n(x, \tau)$ ($\tau=18$ 時00分)

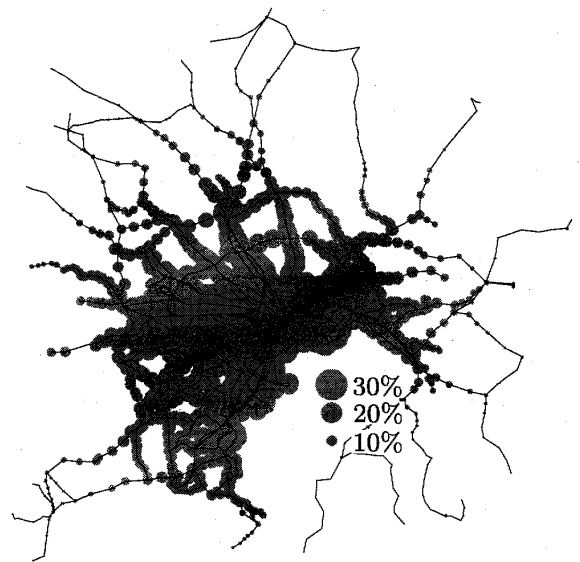


図5 立ち寄り可能者数 $n(x, \tau)$ ($\tau=18$ 時30分)



図6 立ち寄り可能者数 $n(x, \tau)$ ($\tau=19$ 時00分)

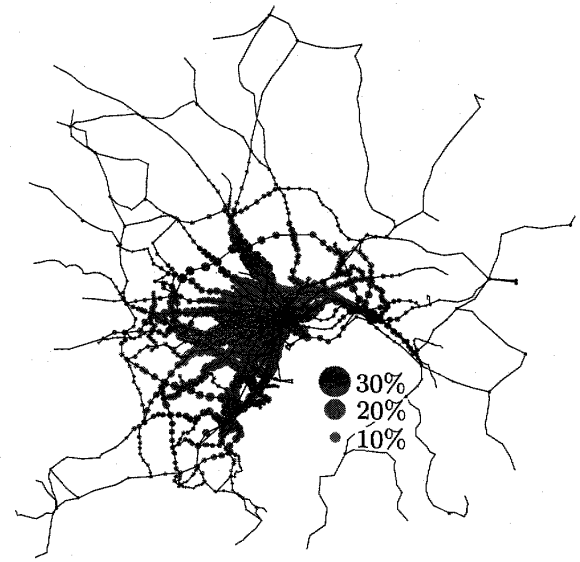


図7 立ち寄り可能者数 $n(x, \tau)$ ($\tau=19$ 時30分)

これらの駅で開始時刻を5分ごとに変化させた場合の立ち寄り可能者数の変化を示す。東京駅の利用可能者数が最も多く、最適な開始時刻は、東京駅：19時00分、武蔵境駅：18時50分、八王子駅：18時50分となる（終了時刻はこれにサービス時間3時間を加えた値）。このことは、東京駅から他の駅へのアクセスの良さによるものと考えられる。東京駅の最適終了時刻は22時（19時00分+3時間）となっており23時までの帰宅に使える時間は1時間である。東京駅から1時間で帰宅可能な駅は多く、これより開始を早める利点はないため開始を遅くし仕事を終えた後に開始に間に合う割合を増やす方が得策であると解釈できる。

続いて、各駅において利用可能者数を最大にする開

始時刻 τ^* とそのときの利用可能者数 $n(x, \tau^*)$ を示す。図9に、都心部の各駅の利用可能者数の最大値を円の大ききで示す（結果の差異が明らかなように半径は値の3乗に比例するよう設定した）。また、表1に最大値の上位40駅の駅名を示す（異なる路線の同名駅の結果は一番大きな値で代表させた）。利用可能者数の値（全OD量に対する割合）としては新宿駅：37.19%、東京駅：36.43%、両国駅：35.03%などとなっている。結果から著しい特徴を読み取ることができる。山手線の29駅が上位を独占しており、33位までにすべての駅が登場している。1位は新宿駅で、その周辺の駅が上位を占めており、東京駅周辺の駅がそれらに続いている。山手線以外の駅としては、御茶ノ

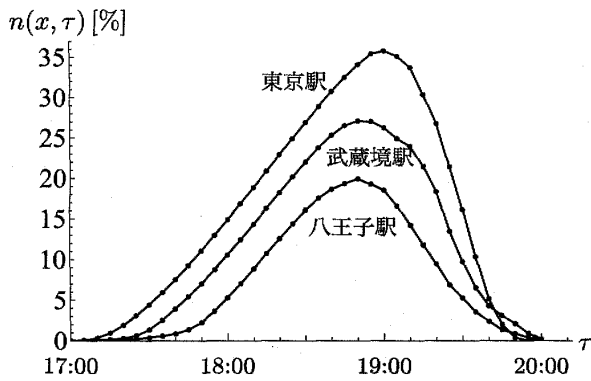


図8 開始時刻ごとのサービス利用可能者数

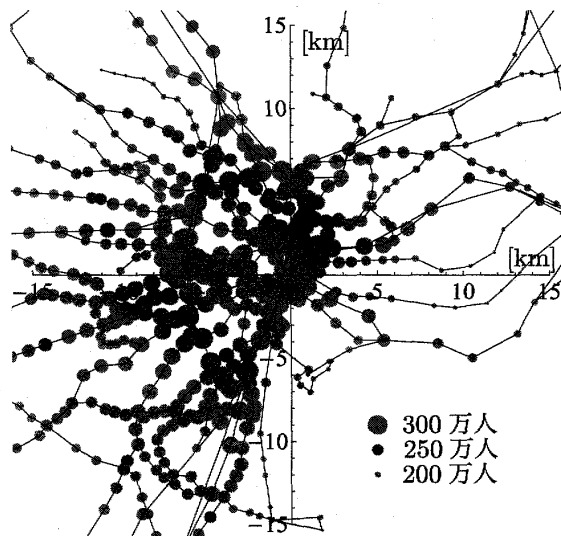


図9 各駅の利用可能者数の最大値

水、飯田橋、千駄ヶ谷、信濃町など、JR中央線・総武線の新宿駅と東京駅を結ぶ区間の駅が登場している。図10に、各駅における利用可能者数を最大化する開始時刻 τ^* を円の大ききで示す(半径を値の3乗に比例するよう設定した)。都心部ほど最適開始時刻が遅くなる(円が大きい)傾向が読み取れる。都心部の駅は他の駅へのアクセスが良く、サービス終了後の帰宅時間を多く確保するよりは開始に間に合う人数を多くするためにやや遅く開始する方が良いことを示している。最適なサービス開始時刻が地点によって異なるという点は時間軸を導入して初めて明らかになる重要な知見である。

5. 今後の展望

本稿では、時空間的な人の流動に着目し、多くの人の利用機会を捉えるようなサービスの提供方法を記述するモデルを示し、首都圏鉄道網データを用いた分析を行った。具体的には、退社後の帰宅途中に施設に立

表1 利用可能者数の最大値の上位40位までの駅名

順位	駅名	順位	駅名
1	新宿	21	上野
2	原宿	22	田端
3	代々木	23	駒込
4	新大久保	24	水道橋
5	目白	25	大塚
6	高田馬場	26	浜松町
7	渋谷	27	飯田橋
8	秋葉原	28	大崎
9	神田	29	目黒
10	東京	30	五反田
11	池袋	31	巣鴨
12	有楽町	32	信濃町
13	新橋	33	千駄ヶ谷
14	御茶ノ水	34	田町
15	御徒町	35	市ヶ谷
16	恵比寿	36	四ツ谷
17	日暮里	37	浅草橋
18	品川	38	大久保
19	西日暮里	39	新宿三丁目
20	鶯谷	40	両国

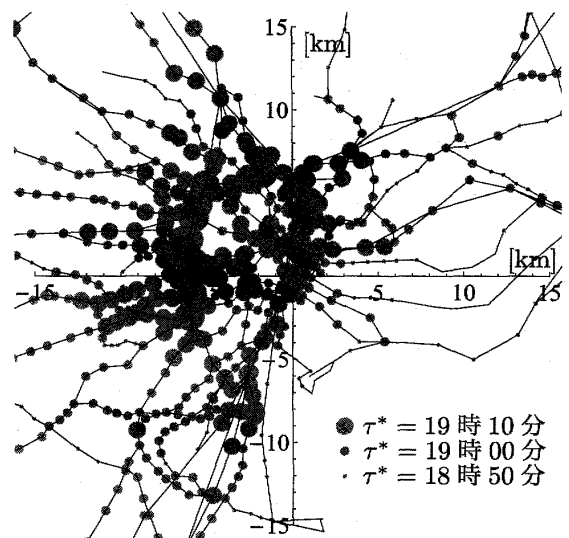


図10 各駅の最適開始時刻

ち寄る行動に着目し、サービス利用可能者数がサービスの提供場所と開始時刻によってどのように変化するかを首都圏鉄道網の各駅・各時間帯において分析した。その結果、JR山手線の各駅の時空間的な立ち寄り易さが際立って高いことが判明した。また、最適なサービス開始時刻は地点によって異なり、都心部にある駅ほど遅く開始することが望ましいことを示した。今回はマクロな構造を記述することを重視したが、より詳細な分析を行うためには使用データおよびモデルの仮

定に関する検討が必要である。特に退社時刻分布に関しては実データやアンケート調査などに基づいた現実的な設定をする必要がある。鉄道網データについては、現実の時刻表通りに運行される電車を時空間ネットワークとして表現する田口[5]による方法は現実を忠実に再現したアプローチといえる。

わたしたちの身の回りには、時空間的な意思決定が本質となる対象があふれており、オペレーションズ・リサーチによる切り口が有効な問題を数多く見つけることができる。ここで示した基礎的な分析をもとにした様々な展開が期待される。そのなかで、オペレーションズ・リサーチの分野で長い歴史をもつ施設配置問題[2][3]に時間軸を導入した展開について簡単に触れよう。複数のサービス提供場所を決める問題は、各施設の提供場所とサービス時間帯を決定する組み合わせ最適化問題として捉えることができる。本稿で扱ったモデルの複数施設版は、最大カバー型の0-1整数計画問題として定式化することができる[9]。この問題は、移動途中に施設サービスを受けることができる人数を最大化する施設配置を求める、最大フローカバー問題[1]を時空間領域で展開したものと見なすこともできる。このモデルをもとに、様々な状況設定に応じた変形モデル・一般化モデルを構成することができ、時空間領域における配置問題としてより一般的な枠組みのもとでの展開が期待される。動的な施設配置モデルの研究[4]は、古典的なモデルと比較して蓄積が乏しく、なかでも人々の時空間的な行動に着目してサービスの提供時間帯の設定を扱った研究は十分になされていない。近年特に、(1)人々の時空間的な行動履歴データや電子地図データの整備、(2)最適化問題に対するメタヒューリスティクス手法の進展、(3)コンピュータの高性能化、などにより本格的な実データに基づく大規模な

問題を扱える環境が整備されてきた。オペレーションズ・リサーチの手法を土台として、時空間的な意思決定構造を含む配置問題に対して、今後様々な展開が期待される。

参考文献

- [1] Berman, O., Hodgson, M. J. and Krass, D., Flow-Interception Problems, *In Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, 389-426, edited by Z. Drezner, Springer-Verlag, New York, 1995.
- [2] Daskin, M. S., *Network and Discrete Location*, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] Drezner, Z. and Hamacher, H. W. (eds.): *Facility Location: Applications and Theory*, Springer, New York, 2001.
- [4] Owen, S. H. and Daskin, M. S., Strategic facility location: A review, *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, 423-447, 1998.
- [5] 田口東, 首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル, 日本オペレーションズ・リサーチ和文論文誌, 48巻, 85-108, 2005.
- [6] 田中健一, 時間軸を考慮した捕捉フロー最大化問題, 都市計画論文集, No. 41, 265-270, 2006.
- [7] 田中健一, ネットワーク空間におけるコンサート問題と東京鉄道網への適用, 都市計画報告集, Vol. 6, No. 4, 117-122, 2008.
- [8] Tanaka, K., Optimal location and opening hours of a single facility which maximally cover flows in a circular city, *FORMA*, Vol. 23, 43-50, 2008.
- [9] 田中健一, 複数施設コンサート問題とその解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季アブストラクト集, 154-155, 2009.
- [10] 財団法人運輸政策研究機構, 平成12年大都市交通センサス, 2002.