

施設の設置コストを考慮したフロー捕捉型配置問題 —京王電鉄鉄道網における列車種別を考慮した配置分析—

田中 健一
電気通信大学

古田 壮宏
奈良教育大学

(受理 2011 年 12 月 11 日; 再受理 2012 年 8 月 18 日)

和文概要 本稿では、鉄道利用者が移動途中に利用する施設を鉄道駅に配置する問題を扱う。Hodgson のフロー捕捉型配置問題を土台にし、経路上に施設が存在するフロー量を最大化するアプローチをとる。鉄道利用者フローの各駅へのアクセスのし易さを列車種別により区別し、各フローの乗車電車の停車駅でのみ捕捉が可能な構造を導入したモデルを提案する。施設の配置コストを駅ごとに与え、総資金制約下で配置施設数と立地場所を決定する資金制約型モデルを構成する。この問題は、鉄道事業者が、多くのフローが立ち寄り易いように運営鉄道網上に商業店舗を展開する場面や、鉄道駅に広告を掲載する際に多くのフローの目につくような広告掲載駅を決定する場面など、幅広い応用をもつ。鉄道流動データと広告掲載料のデータを利用して、京王電鉄の 6 路線 69 駅からなる路線網上で最適配置結果を分析する。本分析結果から、京王電鉄鉄道網においては、(1) 優等列車の停車駅は施設配置コストが高いことを考慮しても配置場所として有利であること、(2) 資金制約型モデルの配置結果は、同数の施設を配置する場合の最大捕捉フロー量に近い値を確保しつつ、比較的少ない資金で捕捉可能な傾向があること、が確認できた。

キーワード: 施設計画, フロー捕捉型配置問題, 最適化, 交通, 鉄道網

1. はじめに

東京首都圏をはじめとする我が国の大都市の鉄道網は、大規模かつ複雑に発達しており、複数の鉄道事業者によって運営されている。各鉄道事業者は、自社の運営する鉄道路線上に、デパートやスーパーなどの商業店舗を展開している場合も多く、これらの適切な配置計画を立てる必要がある。鉄道駅やその付近に施設を計画する場合には、駅周辺の人口のみならず、鉄道利用者の流れに着目することが重要である。実際に、複数の路線が乗り入れる大規模駅付近の施設では、通勤・通学経路上での立寄りによる利用が多いと考えられる。

鉄道事業者が運営路線網上に施設を配置する場面として、(1) スーパー等の商業店舗の配置や、(2) 公共サービスを提供する施設の配置などが挙げられる。京王電鉄のエキチカ [7] や JR 東日本の ecute [5] は、(1) の例であり、駅改札を出てすぐに利用可能な店舗や、駅構内で利用可能な商業空間の整備が行われている。また、(2) の例として、保育サービスに対する需要の高まりに対して、駅付近に保育施設を設ける事業も進められており、小田急電鉄は沿線の駅に複数の保育園を運営している [9]。また、駅に広告を掲載する場面も、鉄道利用者を対象とした施設配置と同様の構造が現れる。

人の流れを需要と捉え、経路上に施設が存在する需要量を最大化する施設の配置方法を決定する問題として、フロー捕捉型配置問題 [2] (Flow Capturing Location Problem, 以降 FCLP とよぶ) がある。FCLP の研究は近年も盛んに行われており、様々な状況に応じた発展モデルが提案されている [1, 4, 8, 12, 14] が、いずれも道路網上の自動車交通流を想定している。一方で、鉄道網に沿って施設を配置する際にも、鉄道利用者の流れを考慮する必要が

あるが、これまでのところ鉄道利用者フローを捕捉する状況を明示した研究は少数にとどまっている。

鉄道網上の人の流れ（フロー）を需要と捉え、鉄道駅に施設を配置する問題を扱った既存研究に田中・古田 [10, 11] がある。これらはともに、Hodgson のフロー捕捉型配置問題 [2] の発展モデルにより、単一路線上での配置分析を実流動データを用いて行っている。田中・古田 [11] は、経路上にある施設数が多いほどより多く捕捉できる構造に着目しており、通常の FCLP との配置の比較を、山手線と京王線を対象として行っている。一方、田中・古田 [10] は、規模と建設コストの異なる大小二種類の施設（大施設と小施設）を想定し、資金制約下で両者の配置を決定する問題を提案している。集客力が大きい大施設へは、移動者が途中停車駅で降りてアクセスする状況が想定されているが、小施設へは起点駅か終点駅にある場合のみの利用が想定されており、鉄道利用者の特徴を捉えたモデル化がなされている。これらはともに、施設を設置する費用はどの駅でも同一と仮定されているが、実際には駅によって施設設置費用が大きく異なっている。

本稿では、鉄道事業者が自社の運営する鉄道網上に店舗展開をする場面や、ある企業が対象鉄道網上の複数の駅に広告を掲載する場面などに着目し、駅ごとに施設配置費用が異なる状況を想定する。そして、意思決定者が総資金制約のもとで施設数と配置場所を決定する問題を構成する。例えば、駅構内に広告やポスターを配置する場合には、駅に広告を掲載する料金は、駅ごとに大きく異なっている。企業が使用可能な広告宣伝費のもとで宣伝効果を最大化するように駅の組合せを対象路線網から選択する問題は、資金制約下での配置を決定する例である。具体的事例として、京王電鉄 6 路線の鉄道網を取り上げ、大都市交通センサス [13] の通勤流動データと駅広告データを用いた配置分析を行う。以降では、Hodgson の FCLP を個数制約型 FCLP とよび、配置駅ごとの設置コストの違いを考慮した FCLP を資金制約型 FCLP とよぶ。

上記の研究 [10, 11] では、各フローが利用する列車種別を考慮していないため、通常であれば鉄道利用者フローの乗車列車が停車しない駅においてもそのフローを捕捉可能であると仮定している。しかし実際には、停車駅の異なる複数種別が存在する場合には、施設へのアクセスのし易さはフローの乗車列車の停車駅かどうかで大きく異なる。通勤・通学等で普段利用する電車が停車しない駅にある施設は、停車する駅にある施設に比べ利用されにくいと考えられる。例えば、図 1 において、急行停車駅 1 から各駅停車のみしか停車しない駅 9 に移動する場合に着目する。急行で駅 8 まで移動し、そこで各駅停車に乗り換えて駅 9 へ至る経路を日頃利用する通勤者にとって、起点と終点の駅 1、駅 9 および急行が停車する駅 5 と駅 8 が立ち寄り易い駅と考えらえる。そこで、鉄道路線網上での出発駅と到着駅の情報から、各フローの列車乗車方法を簡単な規則で与え、その方法で乗車した場合の停車駅でのみ捕捉が可能な構造を考慮する。これは、鉄道利用に特有の構造であり、既存のフロー捕捉型配置モデルではこれまで扱われなかった状況設定である。この構造は、対象鉄道網上の駅構内に種々の店舗を配置する場面や、広告を掲載する駅を決定する場面において、考慮すべき重要な点であると考えられる。

Hodgson らによる、道路ネットワーク上に広告版を掲載する場所を決定するためのフロー捕捉型配置問題（Billboard Location Model [3]）では、経路上で目にする施設（広告版）の数が多ほど、宣伝効果が増大する構造がモデル化されている。本稿で提案する、フローの乗車列車の停車駅でのみ捕捉がなされる点は、鉄道駅に広告版の配置する状況で現れる新しい視点である。また、鉄道流動データに加え、実際の広告掲載料データを用いた最適配置結

果を分析した点も本稿の特徴である。

以降の構成は以下の通りである。第2章でモデルの仮定と定式化を示したのち、第3章で路線網上の鉄道流動データおよび駅広告データについて説明する。さらに第4章で、各駅に施設を一つだけ配置した場合の捕捉量を分析する。第5章では様々な資金制約下での複数施設の最適配置分析を行い、個数制約型 FCLP と資金制約型 FCLP の最適解の特徴を比較する。最後の第6章で、得られた結論をまとめ、今後の課題について述べる。

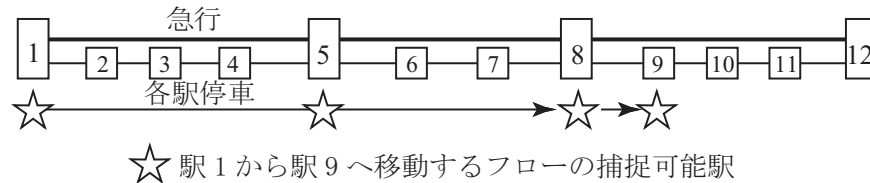


図 1: フローの乗車列車の停車駅における捕捉

2. モデルの仮定と定式化

一般のネットワークを想定して、モデルの仮定を説明し定式化を与える。頂点集合 V と枝集合 E をもつネットワーク $G(V, E)$ を考える。ネットワーク上の施設の配置候補地の集合を K と表す ($K \subseteq V$)。ネットワーク上のある頂点から別の頂点までを、決められた経路に沿って移動する流れをフローとよぶ。フローの集合を Q 、その要素を $q \in Q$ と表し、フロー q の流量を f_q と表す。フローのうち、経路上に利用可能な施設が存在するものを、捕捉フロー（施設によって捕捉されたフロー）とよぶ。フロー q に対し、各候補地 $k \in K$ が（そこに施設が置かれた場合）捕捉可能な場合に 1 を、そうでない場合に 0 をとるデータを α_{qk} と表す。

資金制約型 FCLP では、所与の個数の施設を配置する代わりに以下の構造を仮定する：

仮定 1: 各候補地 $k \in K$ に施設を一つ配置するコスト c_k が与えられている。

仮定 2: 意思決定者は施設配置に使用可能な総資金 b の範囲内で配置場所の組合せを決定する。

定式化には以下の二種類の 0-1 変数を用いる：

x_k : 候補地 k に施設を配置する場合には 1 をとり、配置しない場合には 0 をとる 0-1 変数

y_q : フロー q が捕捉される場合（フロー q の経路上に利用可能な施設が少なくとも一つ以上ある場合）には 1 をとり、捕捉されない場合には 0 をとる 0-1 変数

設置コストを考慮したフロー捕捉型配置問題は、整数計画問題として次のように記述される：

$$\max \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (2.1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in K} c_k x_k \leq b \quad (2.2)$$

$$y_q \leq \sum_{k \in K} \alpha_{qk} x_k \quad \forall q \in Q \quad (2.3)$$

$$x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (2.4)$$

$$y_q \in \{0, 1\} \quad \forall q \in Q \quad (2.5)$$

目的関数 (2.1) は、捕捉されるフロー量の総和を表しており、これを最大化することが目的である。式 (2.2) は、配置施設の総設置コストが総資金 b 以下であることを表している。式 (2.3) の右辺はフロー q の経路上に配置された q を捕捉可能な (q がサービスを受けられる) 施設数を表しており、これが1以上の値をとる場合に限り、 y_q を1にできる (フロー q が捕捉される) ことを表す。したがって、式 (2.3) は、フロー q を捕捉するためには、 q を捕捉可能な候補地に少なくとも一つは施設を配置しなければならないことを意味する。式 (2.4) と式 (2.5) は変数 x_k と y_q の0-1制約を表している。

個数制約型 FCLP では、式 (2.2) の代わりに配置個数を明示した以下の制約式が用いられている [2] :

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (2.6)$$

駅の広告掲載料は、多くのフローが通過する大規模駅ほど高く設定されている。そのため、式 (2.6) の配置個数制約を用いた場合の最適配置結果では設置コストが高い駅が多く選ばれる傾向があると予想される。鉄道路線上の店舗配置戦略 (駅構内の広告の掲載駅) を検討する際には、捕捉フロー量を多く確保するばかりでなく設置コスト (広告掲載コスト) の総和も同時に考慮する必要がある。そのため、式 (2.2) の資金制約下での最適配置結果を分析することは実用上も有益であると考えられる。

α_{qk} の設定方法として、以下の二通りのモデルを想定する。一つ目は、各フローが通過するどの駅においても捕捉可能であるという立場であり、通常の設定方法である。二つ目は、各フローの列車乗車方法を与え、その方法で乗車した場合の停車駅でのみ捕捉が可能とする場合である。

全通過駅捕捉モデル: フロー q が通過する経路上の駅 k すべてについて α_{qk} を1とする場合
 停車駅捕捉モデル: フロー q が通過する経路上の駅のうち、フロー q の列車乗車方法における停車駅 k については α_{qk} を1とし、それ以外の通過駅は0とする場合

これより、 q を捕捉するためには、全通過駅捕捉モデルでは q の経路上のいずれかの駅に施設があればよいが、停車駅捕捉モデルでは q の列車乗車方法での停車駅に施設が置かれる必要がある。なお実際には、施設の置かれた駅がフローの乗降駅であるかどうかによって、捕捉の度合いが異なる場面も考えられるが、本稿ではこの点は区別しない。

小規模な店舗 (例えば駅売店やコンビニエンスストア) の配置を考える際には停車駅捕捉モデルを用いることが望ましい。また、本稿で想定する駅広告の場合にも停車駅捕捉モデルが適切である。鉄道利用者への広告の宣伝効果は、通過駅にあるポスターより停車駅にあるポスターの方が圧倒的に高いと考えられる。上記二通りの設定方法の違いが最適配置に与える影響を把握するために、第4章と第5章の数値例では、両者の配置結果の比較を行う。

3. 使用データ

本章では、次章以降で使用するデータについて述べる。まず、フローデータ f_q に用いる大都市交通センサデータ [13] と、それにもとにした α_{qk} の設定方法を説明する。次に、各駅の設置コスト c_k として利用する駅広告データについて説明する。

3.1. 京王電鉄の鉄道路線網と流動データの作成

京王電鉄の京王線 (新宿-京王八王子)、高尾線 (北野-高尾山口)、動物園線 (高幡不動-多摩動物公園)、相模原線 (調布-橋本)、競馬場線 (東府中-府中競馬正門前)、井の頭線

(渋谷-吉祥寺)の6路線から構成される鉄道網を分析対象とする(図2および図3)。全駅数は74駅(異なる路線の同一名称駅5駅を除くと69駅)である。

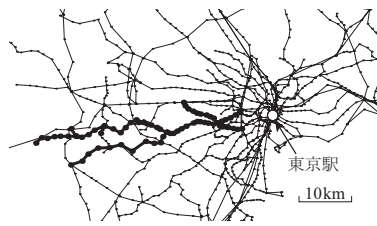


図2: 東京近郊の鉄道網

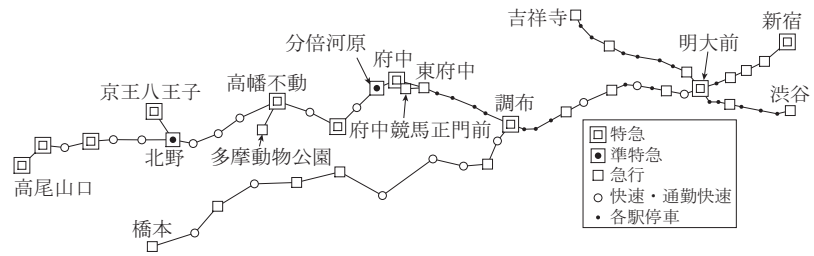


図3: 京王電鉄の6路線のネットワーク

フローデータは平成12年大都市交通センサスデータ「首都圏版」の「初乗り・最終降車駅間経路別人員」をもとに作成した。これには首都圏の1815駅の128路線を対象とした定期券利用の通勤・通学フローについて、初乗り駅、最終降車駅のペアごとに、その利用人員を経路別に集計したデータが収められている。このデータには、初乗り駅から最終降車駅に至る間に利用した路線と利用区間の情報も記載されており、これをもとにフローデータを作成する。具体的には、京王電鉄の路線の一部を移動区間を含むようなフロー集合に着目し、各フローが通過した京王電鉄の路線上の移動経路を抽出して利用する。首都圏全体での経路の異なるフローは153,224種類存在し、全フローの移動人数の合計は8,548,238人である。そのうち、京王電鉄の路線の一部を利用区間を含むフローは11,538種類存在し、移動人数の合計は617,692人である。京王電鉄を利用する各フロー q の移動人数を f_q の値として設定する。

各フローを捕捉可能な駅を表す係数行列 α_{qk} を作成する。 α_{qk} は、フローの経路上にあるすべての駅で捕捉可能な場合(全通過駅捕捉モデル)と、乗車電車が停車する駅でのみ捕捉可能な場合(停車駅捕捉モデル)の二通りを用いる。なおここで、停車駅捕捉モデルでは、京王電鉄鉄道網上での起点駅と終点駅の間を最も停車駅数(停車回数)が少なくなるような列車乗車方法を採用した。その際に、目的駅をいったん通り過ぎて、また逆方向へ戻って目的駅に到達する乗車は行われないと仮定した。例えば、渋谷から東府中に移動する例では、渋谷から明大前まで井の頭線の急行で移動し、明大前から調布まで京王線の特急または準特急で移動し、調布から東府中までは京王線の急行で移動する組合せとなる。この方法は、各列車種別が十分頻繁に運行されている場合には妥当である。

作成したフロー係数 α_{qk} とフロー量 f_q に対し、以下に示す二種類の集約作業を行う。一つ目は駅名が同一の二つの駅を一つの駅として扱うための駅の集約作業であり、二つ目は京王電鉄の路線網上の利用区間が同一となるフローの集約作業である。

同一駅の集約

同一名称駅は一つの駅として扱い、ある駅を通過するフローは、その駅の乗り換え可能駅にある施設へも同様にアクセス可能であると仮定する。すなわち、一方の駅に施設が置かれた場合にはもう一方の駅のみを通過するフローもその施設によって捕捉されると考える。同一駅の集約の様子を図4に示す(図では乗り換え可能なA3駅とB3駅を集約する様子を表す)。対象74駅の中に、路線間の乗換駅となっている明大前、調布、東府中、高幡不動、北野の5駅はそれぞれ二つずつ含まれる。これらを同じ駅として扱う作業は、係数行列 α_{qk} の列の集約に対応する。具体的には、同一視する二つの駅の列に着目し、各行(各フロー)

の要素のいずれか一方が1であれば1をとる列を新たに作成しその列のみを残す．同一視する駅は5ペア存在するため，集約作業後の駅数 (α_{qk} の列数) は69となる．

同一フローの集約

京王電鉄の路線の一部を利用区間に含む 11,538 種類の異なるフローのうち，京王電鉄の路線上では同一の経路となるフローが存在する．このようなフローは (他の路線上での移動にかかわらず) 同一フローとして扱うことができる．同一フローの集約の様子を図 5 に示す．図中の A1 から A5 が施設配置を考える対象路線である場合，実線と破線で示す二つのフローはこの路線上では共に区間 A2 から A4 まで移動しており同一フローとして集約可能である．京王電鉄の路線網上のフローの集約作業を行うとフロー数は 1,282 となり，集約前の 11,538 と比較し大幅に減少した．なお，図 5 の二つのフローのように移動の向きが逆でも利用区間が同じであれば同一の移動として扱った．

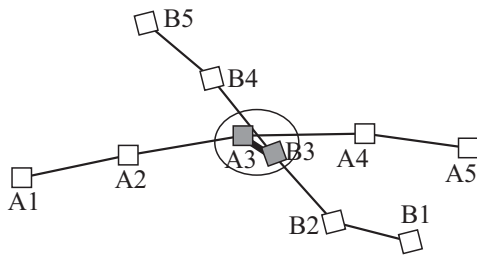


図 4: 同一駅の集約の様子

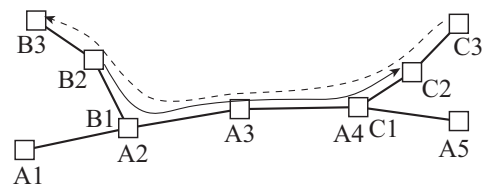


図 5: 同フローの集約の様子

3.2. 駅広告データ

数値例では，各駅の施設の設置コスト c_k として，駅広告のデータを使用する．駅広告は，鉄道利用者に対する宣伝を目的とした駅の広告版に貼るポスターである．データとして図 6 に示す，K 社の 7 日間掲載料金 (2012 年 2 月 6 日時点) を利用する．料金は表 1 に示す 6 種類があり，鉄道利用者が多い大規模駅ほど高く設定されている．新宿と渋谷の二駅が最も高い S ランクであり，明大前と吉祥寺の二駅が次の A ランクである

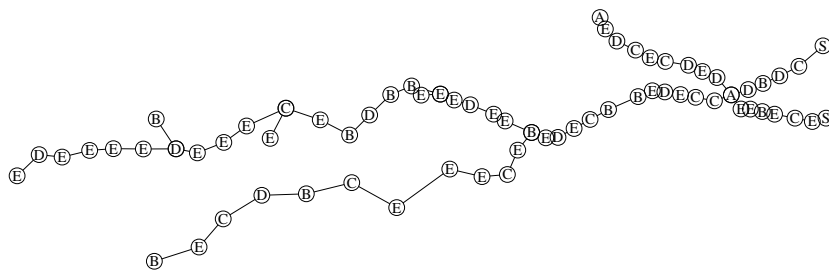


図 6: 各駅の広告設置コスト

ランク	コスト	駅数
S	68,000	2
A	64,000	2
B	54,000	11
C	44,000	11
D	34,000	12
E	24,000	31

4. 各駅の捕捉量と捕捉効率の分析

本章では，各駅に施設を一つ配置した場合の捕捉フロー量と，それを各駅の設置コストで除して得られる捕捉効率を用いた分析を行い，駅のもつ特徴を把握する．これらの結果は，次章の複数施設を同時に配置する場合の基礎となる．

4.1. 各駅の捕捉量の分析

図 7 は、全通過駅捕捉モデルにおいて各駅に配置された施設の捕捉フロー量（対象駅を経路の一部に含むフロー量を集計した値）を表している。図中のグレーで示した駅は値が大きな上位 10 駅を示しており、これら上位 10 駅の駅名を表 2 に示す。全通過駅捕捉モデルの場合、新宿などの端点駅に関わるフローは、必ず一つ内側の駅を通過するため、内側の駅のフロー量は端点駅のフロー量より大きいことに注意されたい。最も捕捉量が大きな駅は、明大前（図 3）である（ $p = 1$ の場合の最適解）。明大前は、京王線（新宿-京王八王子）と井の頭線（渋谷-吉祥寺）の乗換駅であり、新宿および渋谷を目的駅とする多くのフローが通過するために非常に大きな値をとっている。全体として、井の頭線の駅は京王線の駅と比較して捕捉フロー量が少ない。他の上位の駅としては、京王線の明大前付近の駅が多く含まれていることが分かる。

続いて、停車駅捕捉モデルにおける各駅における捕捉フロー量を図 8 に示す。カバー係数 α_{qk} の設定方法より、京王線の新宿、明大前、調布や、井の頭線の渋谷、永福町など、すべての列車が停車する駅（図 3 参照）における捕捉フロー量は変化しない。それ以外の駅では、フローの乗車列車が停車する場合としない場合があるため、捕捉フロー量は図 7 の場合より小さくなる。

表 3 より、捕捉フロー量トップの明大前に続く駅は、新宿、調布、下北沢、渋谷となっている。これらは、京王線と井の頭線の優等列車の停車駅であり、鉄道利用者の多い大規模駅である。先の全通過駅捕捉モデルでは、初台、下高井戸、幡ヶ谷が上位 5 駅に含まれていた。これらは乗客を多く乗せた列車が通過する駅という点で、他の多くの駅よりも優位であるが、実際の経路上での施設利用という観点からは、重要駅とは考えられない。停車駅捕捉モデルは、鉄道利用者の経路上での施設のアクセスのし易さを考慮しており、現実の鉄道駅における施設配置を考える上で、より適切であると考えられる。表 3 において、調布が下北沢や渋谷よりも上位になっている点が興味深い。調布は特急停車駅であり相模原線との乗換駅でもある。また、東京西部から都心方面への流れの中継点となっており、施設配置場所としての調布駅の価値の高さを客観的に確認することができる。

4.2. 各駅の捕捉効率の分析

図 6 でみたように、優等列車が停車する大規模駅では、広告掲載コストが高く設定される傾向がある。そこで次に、各駅に配置された施設の捕捉フロー量を図 6 の設置コストで除した値を用いて駅ごとの特徴を分析する。これは、捕捉の効率性を示す指標とみなすことができる。

図 9 は、全通過駅捕捉モデルにおける捕捉効率を示している。図中のグレーで示した駅は値が大きな上位 10 駅を示しており、これら上位 10 駅の駅名を表 4 に示す。同様に、図 10 は、停車駅捕捉モデルにおける捕捉効率を示している。

全通過駅捕捉モデルでは、京王線の調布から新宿の区間における、各駅停車の駅が大きな値をとっていることが分かる。これらの駅は、都心方面へ向かう乗客を多く乗せた列車が通過する駅である。また、上北沢、芦花公園、柴崎、布田の上位 4 駅の広告設置コストはすべて最も価格の安いクラスとなっており（図 6）、捕捉効率の面で優位であることが分かる。

停車駅捕捉モデルの捕捉効率は、全通過駅捕捉モデルのものと大きく異なる。高い広告掲載料にもかかわらず、明大前、新宿、調布という京王線の特急停車駅や、下北沢、永福町などの井の頭線の急行停車駅が上位に入っている点は注目に値する。実際これらの駅では、全通過駅捕捉モデルの上位駅と比較して、駅構内や周辺における施設が多く存在する。

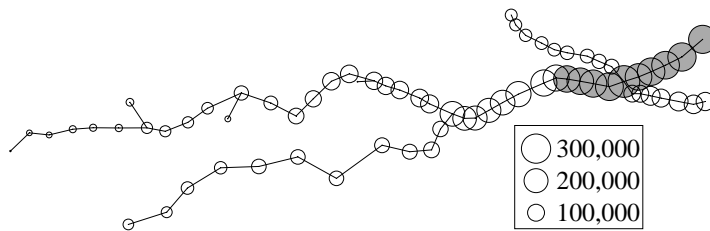


図 7: 捕捉フロー量 (全通過駅捕捉モデル)

表 2: 捕捉量の上位 10 駅
(全通過駅捕捉モデル)

順位	駅名	捕捉量 [人]
1	明大前	352,738
2	初台	280,131
3	新宿	276,215
4	下高井戸	270,279
5	幡ヶ谷	268,306
6	笹塚	264,168
7	桜上水	259,910
8	代田橋	248,353
9	上北沢	247,010
10	八幡山	244,449
平均値		114,466

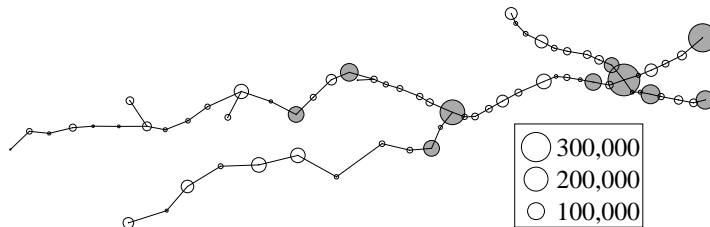


図 8: 捕捉フロー量 (停車駅捕捉モデル)

表 3: 捕捉量の上位 10 駅
(停車駅捕捉モデル)

順位	駅名	捕捉量 [人]
1	明大前	352,738
2	新宿	276,215
3	調布	213,527
4	下北沢	125,489
5	渋谷	117,724
6	府中	108,627
7	桜上水	95,425
8	京王稲田堤	87,492
9	聖蹟桜ヶ丘	86,523
10	永福町	77,268
平均値		39,802

5. 複数施設の最適配置分析

個数制約型と資金制約型の両モデルを用い複数施設の最適配置結果を比較する。ここで、資金制約型 FCLP の最適解において配置された施設数と同数の施設を、個数制約型 FCLP を用いて配置した場合、以下の性質があることに注意されたい：(1) 資金制約型 FCLP の捕捉フロー量は個数制約型 FCLP の値以下であり、かつ (2) 資金制約型 FCLP の総設置コストは個数制約型 FCLP の値以下である。同一駅の集約後の 69 駅を施設配置候補地とし、最適解を IBM ILOG CPLEX 12.2 によって算出した。5.1 節において全通過駅捕捉モデルの結果を示したのち、5.2 節において停車駅捕捉モデルの結果を示す。また、5.3 節では、得られた最適解における設置コストと捕捉フロー量の関係を分析する。

5.1. 全通過駅捕捉モデルの最適配置結果

図 11 に、個数制約型 FCLP の $p = 1$ から $p = 8$ の最適配置結果を示す。 $p = 1$ の場合には、表 2 で見たように最適解は明大前となる。 $p = 2$ の場合には初台と下北沢が選ばれている。下北沢は単一での捕捉量は上位 10 駅に含まれないが、単一での捕捉量が多い初台とは路線が異なるため、通過フローの構成が大きく異なり、これらは良い組合せとなる。 $p = 3$ 以上の場合にも配置に若干の差はあるが、新宿と渋谷に近い二つの駅が常に選ばれていることが分かる。 $p = 3$ の場合には、都心の二駅に加え、相模原線（調布-橋本）の端点駅でもある

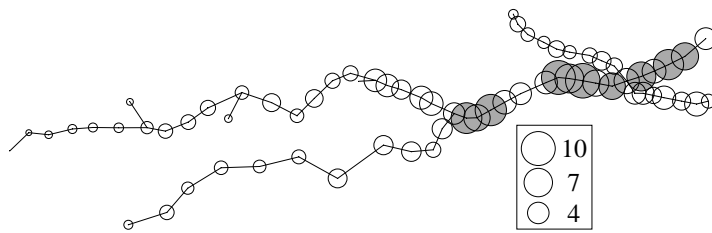


図 9: 捕捉効率 (全通過駅捕捉モデル)

表 4: 捕捉効率の上位 10 駅
(全通過駅捕捉モデル)

順位	駅名	捕捉効率
1	上北沢	10.3
2	芦花公園	9.9
3	柴崎	8.5
4	布田	8.2
5	幡ヶ谷	7.9
6	代田橋	7.3
7	八幡山	7.2
8	初台	6.4
9	下高井戸	6.1
10	国領	6.0
平均値		3.27

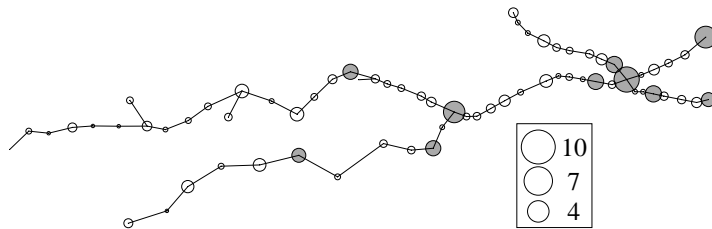


図 10: 捕捉効率 (停車駅捕捉モデル)

表 5: 捕捉効率の上位 10 駅
(停車駅捕捉モデル)

順位	駅名	捕捉効率
1	明大前	5.5
2	新宿	4.1
3	調布	4.0
4	下北沢	2.3
5	永福町	2.3
6	桜上水	2.2
7	府中	2.0
8	京王稲田堤	2.0
9	渋谷	1.7
10	京王永山	1.7
平均値		0.86

調布が含まれている．新宿や渋谷を目的駅としないフローは都心の二駅にある施設のみでは捕捉できない場合が多い．調布にある施設は都心に関わらないフローを多く獲得するために重要な役割を果たすことが分かる．このことは、 $p = 4$ 以上の例でも、 $p = 5$ 以外のすべてのケースにおいて最適解に調布が含まれていることから確認できる．

図 12 に、資金制約型 FCLP の最適配置結果を示す．個数制約型の結果と比較しやすいように、総資金 b の値を設置コスト c_k の平均値 $\bar{c}_k = 36,145$ の定数倍に設定する． \bar{c}_k は、一施設の設置コストの代表的な値と見なすことができる．図 12 は、総資金 b の値を、 c_k の平均値の 1 倍から 8 倍の値に設定した場合の最適配置結果である．最適解において配置された施設数は、順に 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10 であった． $b = \bar{c}_k$ の例では、明大前付近の捕捉フロー量が大きな駅は、資金が及ばず選択できないため、結果として幡ヶ谷が選ばれた．幡ヶ谷は表 3 に示すように捕捉効率が 5 番目に高い駅となっている． $b = 2\bar{c}_k$ の初台と神泉の組合せは、 $b = 4\bar{c}_k$ 以上のケースですべて登場している．両駅は、新宿と渋谷付近の通過フローが多い駅であり、また設置コストも安いことから有利な駅であるといえる．個数制約型の図 11 の最適解では調布駅が多く含まれたが、資金制約型の図 12 では一度も現れていない．これは、調布駅の設置コストが高いためであると考えられる．

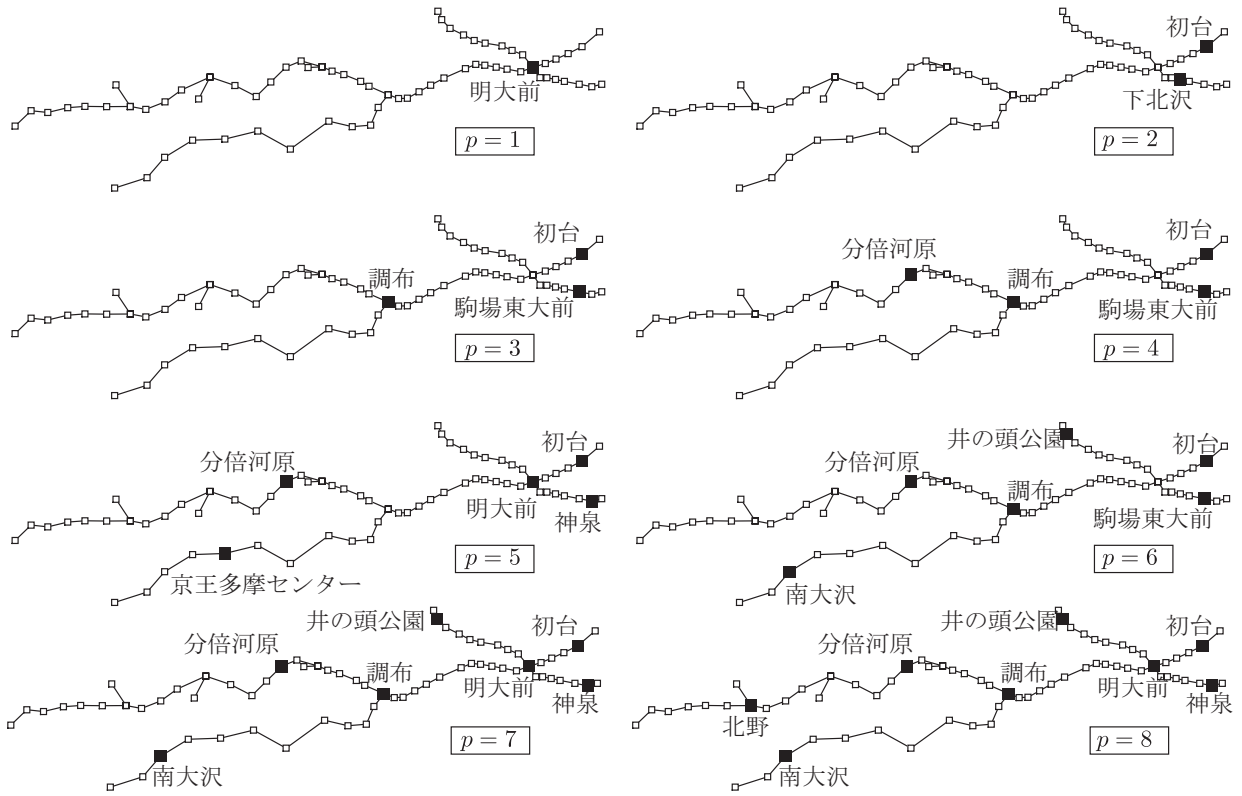


図 11: 個数制約型 FCLP の最適解 (全通過駅捕捉モデル)

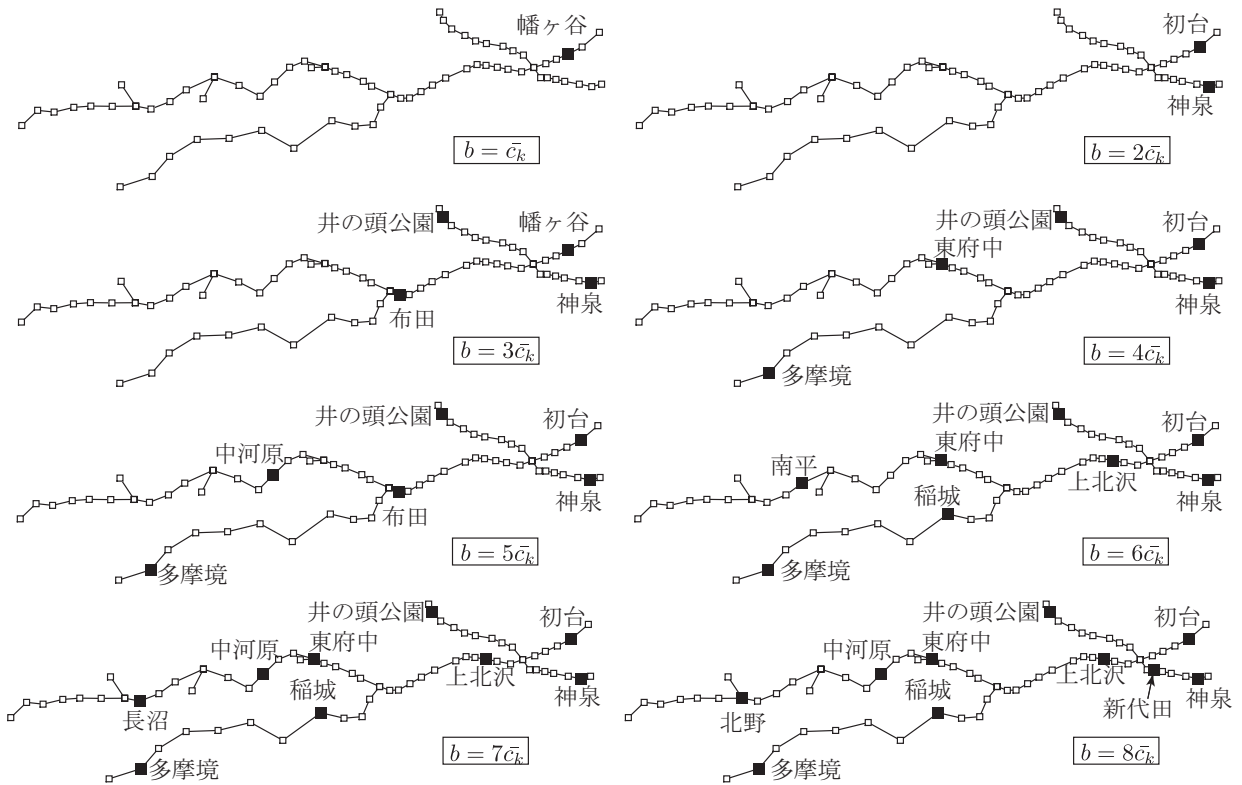


図 12: 資金制約型 FCLP の最適解 (全通過駅捕捉モデル)

5.2. 停車駅捕捉モデルの最適配置結果

図 13 に、個数制約型 FCLP の $p = 1$ から $p = 8$ の最適配置結果を示す。 $p = 1$ の場合には、表 4 で見たように最適解は明大前となる。 $p = 2$ の場合には新宿と下北沢が選ばれている。これらの捕捉フロー量はそれぞれ、2 位と 4 位であり、単独でも大きな値をもつ駅である。さらに、これらは京王線と井の頭線という異なる路線にあるため、フローの重複が少なくトータルで多くのフローを捕捉することができる。 $p = 5$ と $p = 6$ の配置は、 $p = 4$ の配置（新宿、明大前、調布、渋谷）を含んでおり、南大沢と聖蹟桜ヶ丘の郊外の駅が追加された配置となっている。これら郊外の駅は、 $p = 4$ の配置では捕捉できない、京王線と相模原線の調布よりも西側に起・終点をもつフローを捕捉する役割をもつ。 $p = 7$ と $p = 8$ の配置では、吉祥寺が加わっており、重要な拠点駅はほぼ押さえられている。

図 14 に、資金制約型の最適配置結果を示す。総資金 b の値を、 c_k の平均値の 1 倍から 8 倍に設定した。最適解における配置施設数は、1, 1, 2, 3, 3, 4, 5, 6 であった。全体的な配置の傾向は、個数制約型の場合と似ているが、新宿と渋谷の両駅が同時に選ばれるケースはない。これは、設置コスト高い両駅に同時に配置する代わりに、設置コストが安く多くのフローを捕捉可能な他の駅に配置する方が有利であることを意味する。施設が 3 つ以上配置されたすべてのケースに調布駅が含まれている。調布は京王線の特急停車駅であり、京王電鉄網における優位性の高さが見て取れる。先にみたように、全通過駅捕捉モデルの図 12 には調布は一度も現れなかった。これに対し、停車駅捕捉モデルにおいて、多くのフローが停車する拠点駅である調布が現れているのは、鉄道利用者の施設への立ち寄り行動をより適切に表現していると考えられる。

5.3. 捕捉フロー量と設置コストの関係

次に、得られた最適解において、設置コストと捕捉フロー量の関係を分析する。実施の意思決定の場面では、総資金制約のもとで配置を決定する場面が多いと考えられる。決められた個数で最大のフロー量獲得を目指す個数制約型の配置結果と、資金制約型モデルの配置結果を比較し、両者の特徴を分析する。

図 15 では、全通過駅捕捉モデルにおいて、資金制約型モデルの総資金 b の値を、 c_k の平均値の 1 倍から 10 倍の値に設定した最適解における設置コストと捕捉フロー量の関係を、小さい黒丸で示している。また、大きい白丸は、同数の施設を配置する場合の個数制約型の最適解における結果である。また、図中の数字は配置施設数を意味し、灰色の水平の線分は京王電鉄に関連する全フロー量（617,692 人）を表している。図 16 に、停車駅捕捉モデルに対する同じ図を示す。

これらの図より、同数の施設を配置する結果を両モデルで比較すると、資金制約型モデルの最適解（黒丸）における設置コストは、同数の施設を配置する場合の個数制約型モデルの最適解（白丸）の値と比較して大幅に小さいことが分かる。その一方で、捕捉フローはほぼ同水準を達成しているケースが数多く見受けられる。例えば、図 15 において、施設数が 4 の場合の両モデルの最適解（数字 4 が振られた黒丸と白丸）を比較すると、資金制約型モデルの設置コストは個数制約モデルの場合の 58% であるにもかかわらず、捕捉フロー量は 95% 程度を確保している。また、資金制約型モデルの施設が 5 つ配置された解と個数制約型モデルの $p = 4$ の結果を比較すると、資金制約型モデルの設置コストは個数制約モデルの場合の 73% であるにもかかわらず、捕捉フロー量は 100.5% と上回っており、両水準で有利な結果が得られている。このことから、駅ごとの設置コストに意味のある差がある場合には、資金制約型モデルを用いることが望ましい。

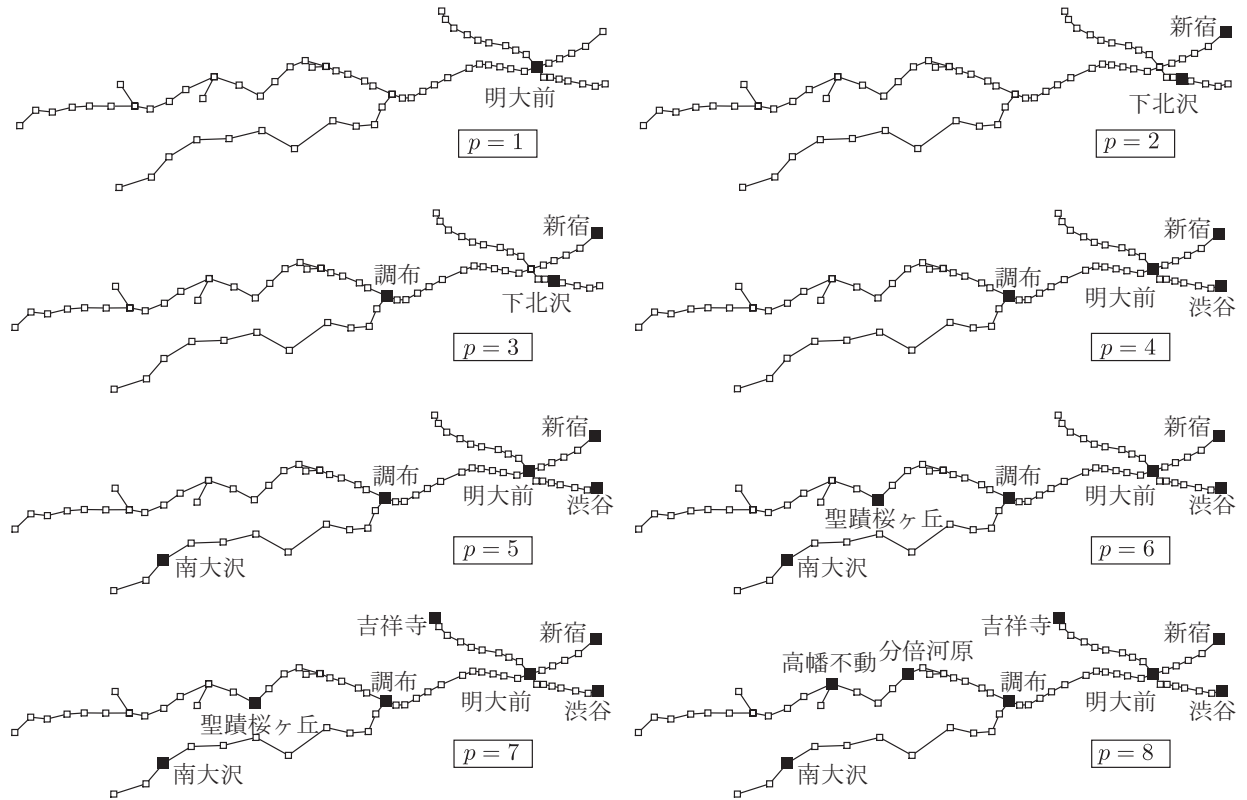


図 13: 個数制約型 FCLP の最適解 (停車駅捕捉モデル)

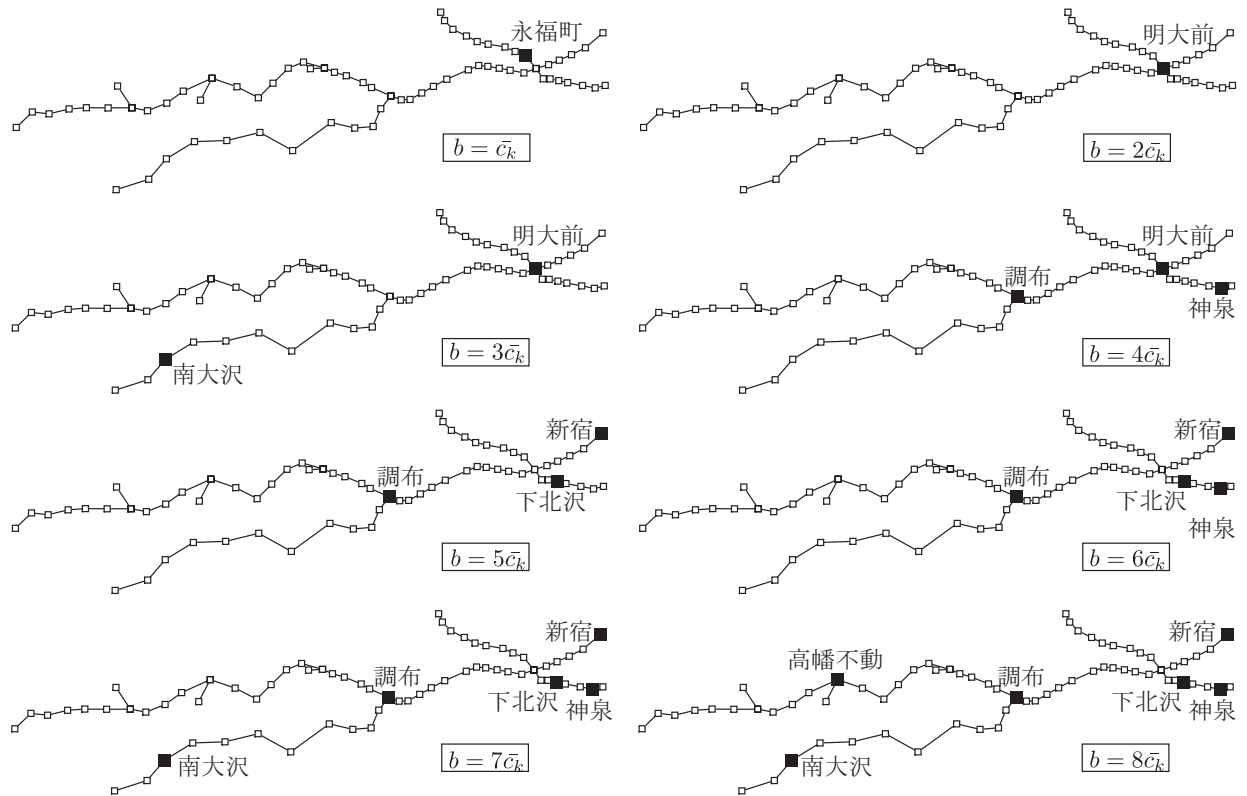


図 14: 資金制約型 FCLP の最適解 (停車駅捕捉モデル)

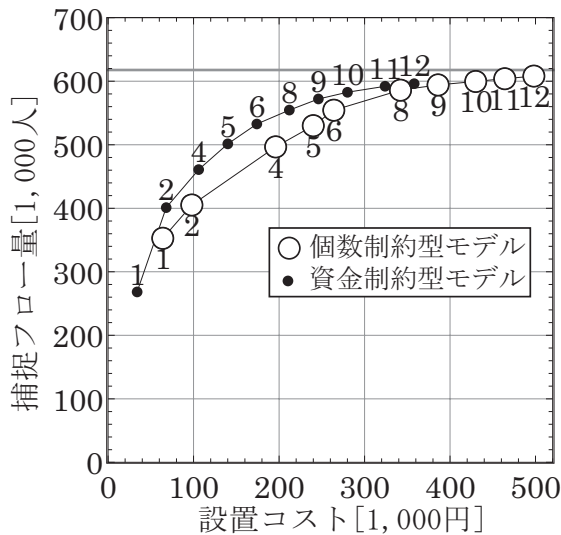


図 15: 設置コストと捕捉フロー量の関係 (全通過駅捕捉モデル)

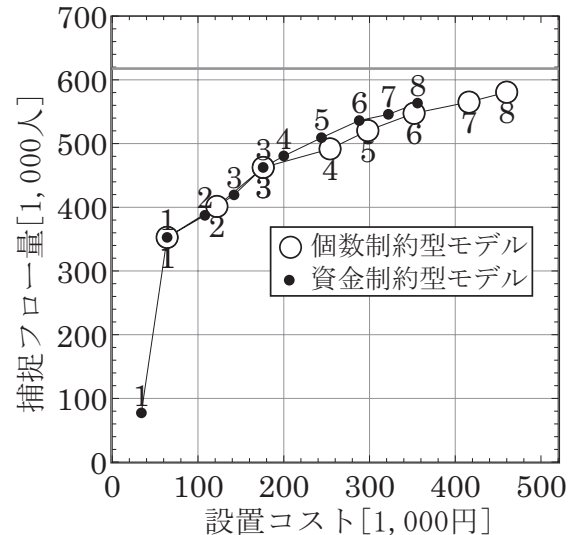


図 16: 設置コストと捕捉フロー量の関係 (停車駅捕捉モデル)

6. まとめと今後の課題

本稿では、鉄道網上のフローに着目し、移動途中に利用する施設を鉄道駅に配置する状況を扱った。駅ごとに施設設置コストを導入し、経路上に施設が存在するフローを最大化するように、総資金制約下で施設を配置する問題（資金制約型モデル）を、Hodgson のフロー捕捉型配置問題（個数制約型モデル）の変形モデルとして構成した。

鉄道利用者にとって、乗車列車の停車駅にある施設の方が、停車しない通過駅にある施設よりも、施設へのアクセスが容易である。この特徴は、対象鉄道網上の駅構内に種々の店舗を配置する場面や、広告を掲載する駅を決定する場面において、考慮すべき重要な点である。これをモデルに反映させるために、鉄道路線網上での出発駅と到着駅の情報から、各フローの列車乗車方法を簡単な規則で与え、その方法で乗車した場合の停車駅でのみ捕捉が可能なモデルを提案した。これは、鉄道利用に特有の構造であり、既存のフロー捕捉型配置モデルでは扱われなかった状況設定である。

京王電鉄の6路線69駅からなる路線網上を対象とし、鉄道流動データと広告掲載料データを利用して、最適な施設の配置駅を求めた。資金制約型モデルの最適解において、同一個数の施設を捕捉フローが最大になるように配置する場合（個数制約型モデル）と比較した。その結果、資金制約型モデルでは、個数制約型の場合と比較して、最大捕捉量に近い水準のフローを捕捉しつつ、総設置コストがかなり小さくなる傾向が観察された。

また、フローの経路上のどの駅でも捕捉可能と考える既存モデル（全通過駅捕捉モデル）とフローの乗車列車の停車駅でのみ捕捉可能と考える提案モデル（停車駅捕捉モデル）の最適解の特徴比較を行った。その結果、全通過駅捕捉モデルの場合には都心付近における設置コストの安い各駅停車駅が選ばれる傾向が確認された。一方の、停車駅捕捉モデルの場合には、新宿、明大前、調布などの京王線の特急停車駅や、渋谷、下北沢などの井の頭線の急行停車駅が、高い設置コストにもかかわらず選ばれる傾向が確認された。

今後の重要な課題として、鉄道利用者の経路上の駅へのアクセスのし易さに応じた捕捉水準を設定可能なモデルへの拡張が考えられる。停車駅捕捉モデルでは、停車駅に施設が置かれた場合には（完全に）捕捉され、それ以外の駅では全く捕捉されないと考えたが、捕捉水

準の違いを導入することで、より記述力の高いモデルが構成できる。例えば、鉄道利用者にとって、移動の起点駅と終点駅や乗換駅にある施設は、途中下車しなければ利用できない施設よりもアクセスが容易である。前者のような駅に施設がある方がその他の駅に施設がある場合よりも便利である点を、捕捉される度合いの違いとして表現するモデルが考えられる。

また、捕捉フロー量の最大化と設置コストの最小化の二つの目的をもつ最適化問題を構成し、パレート最適解を分析することも興味深い。一施設の場合では、単位投資コスト当たりの捕捉フロー量を捕捉効率として駅ごとに分析したが、設置コストを小さく抑えつつ捕捉フロー量を確保するパレート最適解を見つけることは、複数施設配置における投資の効率性を評価するための重要な視点である。

より規模の大きなネットワーク上の配置問題を考える際には厳密な最適解を数理計画ソルバーで解くことが困難になることが予想される。問題の構造を捉えた発見的解法を開発することも重要な課題である。

謝辞

多くの有意義なコメントを下さいました二名の査読者の方々に感謝申し上げます。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A)(課題番号: 24241054)の支援によるものです。

参考文献

- [1] I. Averbakh and O. Berman: Locating flow-capturing units on a network with multi-counting and diminishing returns to scale. *European Journal of Operational Research*, **91** (1996), 495–506.
- [2] M.J. Hodgson: A flow-capturing location-allocation model. *Geographical Analysis*, **22** (1990), 270–279.
- [3] M.J. Hodgson and O. Berman: A billboard location model. *Geographical and Environment Modeling*, **1** (1997), 25–45.
- [4] M.J. Hodgson, K.E. Rosing, and J. Zhang: Locating vehicle inspection station to protect a transportation network. *Geographical Analysis*, **28** (1996), 299–314.
- [5] JR 東日本: 駅スペース活用事業. <http://www.jreast.co.jp/life.service/station/>.
- [6] 京王電鉄: 京王電鉄路線図. <http://www.keio.co.jp/train/map/>.
- [7] 京王エキチカドットコム. <http://www.keio-ekichika.com/>.
- [8] M. Kuby and S. Lim: The flow refueling location problem for alternative-fuel vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences*, **39** (2005), 125–145.
- [9] 小田急ムック保育園. <http://www.odakyu-la.co.jp/hoiku/>.
- [10] 田中健一, 古田壮宏: 鉄道利用者に着目した捕捉フロー最大化問題—JR 山手線を事例として—. *都市計画論文集*, **45** (2010), 145–150.
- [11] 田中健一, 古田壮宏: 複数回の捕捉を考慮したフロー補足型配置問題と鉄道流動データへの適用—京王線と山手線を事例として—. *オペレーションズ・リサーチ*, **56** (2011), 166–174.
- [12] K. Tanaka and T. Furuta: A hierarchical flow capturing location problem with demand attraction based on facility size, and its Lagrangian relaxation solution method. *Geographical Analysis*, **44** (2012), 15–28.

- [13] 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).
- [14] W. Zeng, I. Castillo, and M.J. Hodgson: A generalized model for locating facilities on a network with flow-based demand. *Networks and Spatial Economics*, **10** (2010), 579–611.

田中 健一
電気通信大学 情報理工学部 総合情報学科
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: ken1tnk@se.uec.ac.jp

ABSTRACT

FLOW-CAPTURING LOCATION PROBLEM WITH FIXED COSTS
— OPTIMAL LOCATION ANALYSIS ON KEIO RAILWAY NETWORK
WITH FLOW COVERAGE BASED ON STOPPING PATTERNS OF
TRAINS —

Ken-ichi Tanaka

The University of Electro-Communications

Takehiro Furuta

Nara University of Education

The flow-capturing location problem (FCLP), originally proposed by Hodgson (1990), identifies desirable facility locations on a network for flows traveling between various origins and destinations. The model aims to locate a given number of facilities on a network to maximize flows that have at least one facility along their travel route. Since the users cannot get off the train freely, it is easier for them to access a facility at the station where their train stops. For example, facilities at the express stations are easier to access when riding on an express train. To model this aspect, we proposed a model in which flows can only be covered at stations where the train stops, and it depends on the train types. FCLP and its variants assume that the number of facilities is a fixed input parameter. Often, however, a decision maker has a constraint on a total budget limit to locate facilities instead of the number of facilities. This paper introduces fixed costs of opening facilities into FCLP, making the number of facilities one of the decision variables. We present an integer programming formulation of the proposed model, and apply it to analyze optimal facility locations among stations of Keio Railway Network consisting of 6 railway lines and 69 stations. Commuter traffic flow data and the costs to post a billboard advertisement at each train station are used. Optimal solutions of Hodgson's FCLP and FCLP with fixed costs are obtained by a mathematical programming solver, IBM ILOG CPLEX. By comparing solutions of two models, it is shown that optimal solutions of the proposed FCLP tend to capture large volumes of flows within a relatively small facility location costs.