

道案内の数理モデル —経路決定を含む施設配置問題によるアプローチ—

八尾 優作 田中 健一
慶應義塾大学

(受理 2019 年 4 月 23 日; 再受理 2019 年 12 月 25 日)

和文概要 旅行などで初めて訪れる場所では、何らかの方法で目的地までの道のりに関する情報を得る必要がある。道案内には、案内板やアクセスマップのようにあらかじめ決定された経路を案内するものと、カーナビゲーションシステムや地図アプリケーションのように動的に経路を決定して案内するものがある。本稿では、前者の案内板や大規模イベント時の誘導員などによる情報提供場所を決定するための問題を提案し、この問題を案内板配置問題とよぶ。案内板配置問題は、各移動需要の起点と終点の間の経路はあらかじめ決定されておらず、施設配置問題であると同時に経路決定構造を含んだ問題である。経路案内は、交差点に配置された案内板が移動者に右左折等を指示することにより実行される。これを、仮想的なアークを追加した拡張ネットワークを導入し、経路決定を含んだ形での施設配置問題の定式化を実現した。本稿では、案内板配置問題について、集合カバー型および最大カバー型の問題における拡張ネットワークの作成方法および定式化を示し、東急東横線日吉駅西口の実際の道路網に適用する。許容される案内経路の迂回の程度や案内板の配置に使用可能な資金に応じて、移動需要の捕捉量が異なる様子を分析し、提案モデルの有効性を確認した。

キーワード: 施設計画, 都市計画, 公共サービス, 観光, 案内板

1. はじめに

ここ数年、訪日外国人旅行者数は増加の一途をたどっており [15]、観光地には多くの外国人が訪れている。旅行者の増加は、都市や地域の活性化につながり、また経済面でも大きな利益をもたらす。しかし同時に、旅行者、特に外国人旅行者が増加することで、観光地側も新たなインフラを整備する必要がある。その一つとして挙げられるのが、道案内に関するものである。駅や観光案内所などの施設には、現在地を記した地図が設置されていたり、観光案内のスタッフが在籍したりしていることが多いものの、街中で道に迷ったり、途中で目的地を変更したりした場合には、目的地までの案内に関して十分な情報を得られるとは限らない。そのような場面において、道案内の情報源として考えられるのが、携帯型の地図や、スマートフォン等の地図アプリである。しかし、携帯型の地図は現在地がわからない上に、掲載されている情報が最新であるとは限らない。スマートフォン等の地図アプリについては、特に外国人旅行者に関して、通信環境が整備された場所でないとは利用することができない* 上に、そもそもスマートフォン等のハードウェアがなければ利用することができない。また両者とも、道を確認するためにその場に立ち止まったり、地図を確認しながら歩き回ったりすることで、人の流れを妨げたり、混雑による事故を引き起こす可能性も考えられる。

そこで、街中での道案内の手段としてもう一つ考えられるのが、観光案内板である。観光案内板には、基本的に目的地の方向と目的地までの距離が記載されており、観光案内板を適切に配置することで、旅行者は最低限の情報で目的地までたどり着くことが可能となる。

*訪日外国人旅行者が旅行中困ったことの上位に「無料公衆無線 LAN 環境」がある [16].

本稿では、道路網上を移動する複数の移動需要に対し、交差点において目的地へ誘導するための移動方向を示し、右左折等を促す案内板の配置、およびそれに伴う経路決定を考えることで、明確でスムーズな人の移動を実現し、安全性や流動性の向上を目指す。また、本稿では街中における案内板配置を目的とした定式化を行うが、それ以外にも様々な場面に応用することができる。例えば、オリンピックのような大規模なイベントにおいて誘導員の配置を最適化することで、イベント会場への円滑な経路案内や人件費の削減といった効果を期待することができる。

覺知ら [4] や松田ら [7] は、案内経路に着目し、道案内のための情報記述量や歩行者の嗜好に基づいて経路の評価を行った。また、永山ら [9] は、経路の案内・誘導をスムーズにするための案内板のデザインについて研究を行った。これらのように、経路の案内については様々な分野で研究がなされている。Toi ら [11] は、高速道路上における経路案内標識の配置および記載内容について、動的計画法による定式化を行った。これに対し本稿では、街中における歩行者の移動に着目し、一つまたは複数の移動需要に対し、起点から終点まで正確に案内するような案内板配置をする問題を考える。この案内板配置問題は、案内板についての施設配置問題であると同時に、案内板の配置によって移動需要の経路が異なる構造をもつ経路決定問題でもある。このように、訪れる場所と経路を同時に決定するような問題には、賞金獲得型巡回セールスマン問題 [1] やオリエンテーリング問題 [13] がある。これらの問題では、あらかじめ配置されている施設に対して移動フローがどの程度の効用を得ることができるかという視点に立っている。一方で Hodgson [3] のフロー捕捉型問題は、経路の定められた移動フローに対して、施設の配置を最適化している。本稿では、後者である Hodgson [3] のフロー捕捉型問題を基に案内板配置問題の定式化を行う。Kuby ら [6] は、代替燃料車の燃料補給施設についてのフロー捕捉型配置問題を提案した。この問題では、従来のフロー捕捉型配置問題と異なり、移動フローを複数の施設で捕捉することを考慮できる。Kim ら [5] は、燃料補給施設についてのフロー捕捉型問題において、本来の経路からはずれる迂回行動を許した形での定式化を提案した。この問題は、本来の経路からの逸脱を許容する経路決定構造をもつ。また、Wang ら [14] は Origin-Destination (以下, OD) 間、つまり起点から終点の間のフローデータの代わりに距離行列のみを使用することで、車両の航続距離を考慮したフローベースの集合カバー問題の定式化を実現した。MirHassani ら [8] は、同様の問題において拡張ネットワークを導入することで、Wang ら [14] よりも計算時間が短く、また燃料補給施設の種類やドライバーの行動に関する仮定をモデルに組み込みやすい形での定式化を実現した。この定式化では、いずれかの移動フローが訪れるノードに施設を配置すればよいため、問題の構造が非常にシンプルである。本稿では、案内板配置問題を定式化する際に、MirHassani ら [8] のアプローチを参考にする。

以降の章構成は以下の通りである。2章では案内板配置問題について説明し、問題の仮定と拡張ネットワークの作成方法について述べる。3章では Toregas ら [12] の集合カバー問題の考え方に則した形、および Church ら [2] の最大カバー問題の考え方に則した形での定式化を行い、4章で集合カバー型および最大カバー型のそれぞれの定式化を実際の道路ネットワークへ適用した結果を示す。そして5章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 仮定と拡張ネットワークの作成

本章では、集合カバー型および最大カバー型の案内板配置問題について、状況設定を説明し、拡張ネットワークの作成について述べる。問題を明確にするために、各移動需要につい

て下記の仮定1, 仮定2および仮定3を設ける. なお, 仮定2の「道なり」とは, 案内なしで移動可能な経路に沿った自然な区間を意味する(詳しくは2.1節で定義を述べる).

仮定1. 起点において, 進むべき道を把握している.

仮定2. 「道なり」に沿った区間(2ノード間の経路)については, 案内板による指示なしで移動することができる.

仮定3. 案内板の指示のみによって起点から終点へ到達可能な場合に移動需要が捕捉されることとする.

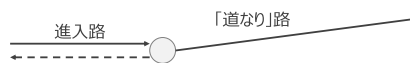
仮定1は, 起点における行動を規定しており, 起点において案内板の指示が不要であることを表している. 起点, つまり移動需要が発生する地点では, 最初に少なくともどの方向へ行くべきかの情報は持っているのが妥当である. そのため本稿では, 各移動需要が起点において, 進むべき道を把握していると仮定する. 仮定2は, 経路の特性と案内板の必要性に関する仮定であり, 「道なり」に移動可能な2ノード間については案内板による指示がなくても適切に移動できることを表している. 現実の場面を想定すると, 一本道に沿ったカーブや曲がり角を曲がる場合や, 交差点を直進する際に案内がなくても, 経路を逸脱するとは考えづらい. そのため, ノードにおいて進入方向からみて「道なり」なアークへ進む場合, 案内板による指示が必要ないと考えるのが妥当である. 逆に, 「道なり」ではないアークへ進む場合には, 案内板による指示が必要であると考えることができる. 仮定3は, 移動需要が捕捉される場合について規定している. 案内板による指示および「道なり」に沿った移動のみによって起点から終点へ到達可能な場合にのみ, 移動需要が捕捉されると仮定する.

2.1. 道なりの定義

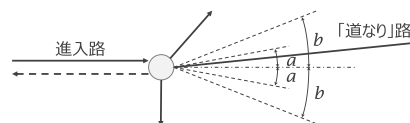
道路網において案内板による道案内が必要となるのは, 交差点のように, 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合の出次数が2以上のノードを曲がる場合である. そのようなノードを直進したり, 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合の出次数が1のノードを通過したりする場合には, ノードを自然に通過できるため, 案内板による指示は必要ないとする. 本稿では, 覚知ら [4] による道なり状態の定義を基に, ノードについて以下の2つの場合を「道なり」通過として定義した.

1. 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合のノードの出次数が1である(図1(a)).
2. 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合のノードの出次数が2以上であり, さらに次の条件を満たす.

[条件] 進入方向となす角が最も小さいアークとのなす角が a 以下であり, それ以外の



(a) 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合のノードの出次数が1の場合



(b) 進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合のノードの出次数が2以上の場合

図1: 「道なり」の定義

アークとのなす角が b 以上のときの、なす角が最も小さいアークへの移動 (図 1 (b)).

2.2. 拡張ネットワークの作成

MirHassani ら [8] は, OD 間の自動車による移動を可能にするような燃料ステーションの配置問題において, 拡張ネットワークを導入した定式化を示した. 拡張ネットワークでは, 燃料水準に応じた連続走行可能距離以内のノード間について疑似的なアークを追加する. これにより, フローが補給を必要としないノードを訪れる必要がなくなるため, フローが訪れるノードにのみ燃料ステーションを配置すればよいと考えることが可能になる. 本稿では, この考え方を応用し, 案内の必要性を拡張ネットワーク上で表現する. 具体的には, 各移動需要について, あるノードにおいて歩行者が経路選択の意味で案内を必要とする場合にのみノードを訪ればよい, という状況を拡張ネットワークで表現する.

道路ネットワーク G のノード集合を N とし, 移動需要集合 (OD ペア集合) を Q とする. これに対し, 移動需要 $q \in Q$ についての拡張ネットワークをノード集合 \hat{N}^q およびアーク集合 \hat{A}^q を用いて $\hat{G}^q = (\hat{N}^q, \hat{A}^q)$ と表す. \hat{N}^q はノード集合 N において移動需要 q の起点のノードを起点ノード s_q , 終点のノードを終点ノード t_q と置き換えたノード集合であり, \hat{A}^q は以下に示す手順において作成される, 「道なり」で移動可能な 2 ノード間についてのアーク集合である. また, \hat{A}^q の各アーク (i, j) の長さを l_{ij} と表す. l_{ij} の値は道路ネットワーク G においてノード i からノード j へ「道なり」に沿って移動した場合の移動距離を設定する. 加えて, 迂回係数 α を導入する. 迂回係数 α (1 以上の実数) は, 案内経路が最短経路からどの程度までの迂回を許すかを表現する定数である. 本稿では, 案内経路距離が移動需要 q の OD 間の最短経路距離 d_q よりも, 一定水準以上に大きくなるような案内経路の生成を防ぐため, d_q に対して案内経路距離が αd_q 以下となるように距離制約を設定する.

本節では, 拡張ネットワークの作成について述べ, 図 2 のような 6 つのノードと 12 本のアークを持つ道路ネットワークを例として, 作成される拡張ネットワークを示す. ここで, 図中の数字はアークの長さを表している.

拡張ネットワーク $\hat{G}^q = (\hat{N}^q, \hat{A}^q)$ の作成手順について説明する. 初期状態において, \hat{N}^q は上記のようにノード集合 N において移動需要 q の起点のノードを起点ノード s_q , 終点のノードを終点ノード t_q と置き換えた集合であり, \hat{A}^q は空集合であるとする. ノード $i \in \hat{N}^q$ について, 道路ネットワーク G においてノード i から「道なり」で移動可能なノードのリストを L_i とする. L_i は, 道路ネットワーク G におけるノード i の隣接ノードおよび, ノード i から隣接ノードへ向かった場合に「道なり」に到達することができるノードから成る. 具体的には, まずノード i の各隣接ノード j を L_i に追加する. 次に, 各隣接ノード j につい

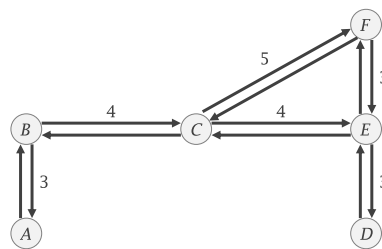


図 2: 例題の道路ネットワーク G

て、アーク (i, j) を進入路とした場合に「道なり」なアーク (j, j') が存在する場合には、ノード j' を L_i に追加する。同様にしてアーク (j, j') を進入路とした場合に「道なり」なアーク (j', j'') が存在する場合には、ノード j'' を L_i に追加する。このようにして、「道なり」なアークが存在しなくなるまで「道なり」なアークを辿っていくことで L_i を得る。そして、ノード i から L_i の各ノードへのアークを \hat{A}^q に追加することで \hat{A}^q を作成する。ただし本稿では、計算の効率化のため、案内板配置問題を解くにあたって実際には考慮する必要がないアークの一部を拡張ネットワークの作成時にあらかじめ排除することを考える。そのために、以下に示す条件 1 を設け、これを満たすノード i についてのみ L_i を作成する。さらに、条件 2 および 3 を設け、 L_i の要素のうちこれらを同時に満たすノード j についてのみアーク (i, j) を \hat{A}^q に追加することで、 \hat{A}^q を作成する。

条件 1. ノード i が下記のいずれかを満たしている。

- (i) 起点ノード s_q である。
- (ii) 道路ネットワーク G において、ノード i への少なくとも 1 つの進入路について進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合の出次数が 2 以上である。

条件 2. ノード j が下記のいずれかを満たしている。

- (i) 終点ノード t_q である。
- (ii) アーク (i, j) と逆方向へのアークを除いた場合の、道路ネットワーク G におけるノード j の出次数が 2 以上である。

条件 3. アーク (i, j) を通るという条件のもとで、拡張ネットワーク \hat{G}^q 上での起点ノード s_q から終点ノード t_q への最短経路距離が αd_q 以下である。

条件 1 および 2 は、案内が不要なノードを端点に持つアークを排除するためである。条件 1 (ii) や条件 2 (ii) において出次数が 1 の場合は、図 1 (a) のような場合であり、「道なり」通過以外の選択枝が存在することはない。「道なり」通過以外の選択枝が存在しない場合、ノードにおいて案内の必要がないため、拡張ネットワーク上でそのノードを訪れる必要もない。また、条件 1 (ii) や条件 2 (ii) において出次数 0 のノードは行き止まりを表しているため、そのノードを訪れる必要はない。そのため、ノード i もしくはノード j が条件 1 や条件 2 を満たさない場合、それらを端点に持つようなアーク (i, j) を通ることを考える必要はない。図 3 および図 4 は、それぞれ条件 1 (ii) および条件 2 (ii) について条件を満たす場合と満たさない場合の例を示している。図 3 をみると、(a) ではノード i について上側からの進入路が、進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合の出次数が 2 であるため条件 1 (ii) を満たしているのに対し、(b) では右側および左側からの進入路がいずれも進入路と同じ区間の逆向きアークを除いた場合の出次数が 1 であるため条件 1 (ii) を満たしていない。また、図 4 をみると、(a) ではアーク (i, j) と逆方向へのアークを除いた場合の、道路ネットワーク G におけるノード j の出次数が 2 であるため条件 2 (ii) を満たしているのに対し、(b) では出次数が 1 であるため条件 2 (ii) を満たしていない。

条件 3 は、距離制約によって選択される可能性がないアークを排除するためである。アーク (i, j) を通るという条件のもとで、拡張ネットワーク \hat{G}^q 上での起点ノード s_q から終点ノード t_q への最短経路距離は、

$$s_q \text{ から } i \text{ への最短経路距離} + \text{アーク } (i, j) \text{ の長さ} + j \text{ から } t_q \text{ への最短経路距離}$$

と表すことができ、これが αd_q よりも大きい場合にはアーク (i, j) を通った時点で距離制約を満たすことができなくなるため、アーク (i, j) を通ることを考える必要はない。以上のよ

うにして作成される拡張ネットワークは、元の道路ネットワークと異なるアーク集合を持つため、出次数および入次数が0であるノードが存在する可能性がある。そのようなノードについては、定式化において考慮する必要がないため \hat{N}^q から削除する。

図 5 (a) は、図 2 の道路ネットワーク G において、起点が A 、終点が F である移動需要 q の拡張ネットワーク作成の初期状態を示している。このとき、 $\hat{N}^q = \{s_q, B, C, D, E, t_q\}$ であり、 \hat{A}^q は空集合である。図 5 (b) は、 α として案内経路距離が最短経路距離 (= 12) から多少の迂回を許すような値 ($\alpha = 1.2$) を設定した場合に作成された拡張ネットワークである。起点ノード s_q に注目すると、 L_{s_q} は $\{B, C, E\}$ となる。しかし、 B についてみると、アーク (s_q, B) と逆方向へのアークを除いた場合の、道路ネットワーク G における B の出次数は 1 であり、条件 2 を満たしていないため、 B へのアークは追加しない。よって、3 つの条件をすべて満たしている C および E へのアークのみを \hat{A}^q に追加する。また、ノード B に注目すると、本来 L_B は $\{s_q, C, E\}$ となるが、ノード B が条件 1 を満たしていないため、実際には L_B は作成されない。次に、ノード C に注目すると、 L_C は $\{s_q, B, E, t_q\}$ となる。しかし、 s_q についてみると、アーク (C, s_q) を通る場合に案内することができる最短経路距

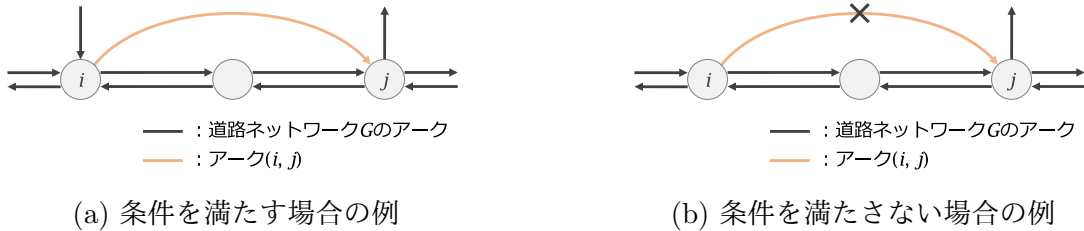


図 3: 条件 1(ii) の図解

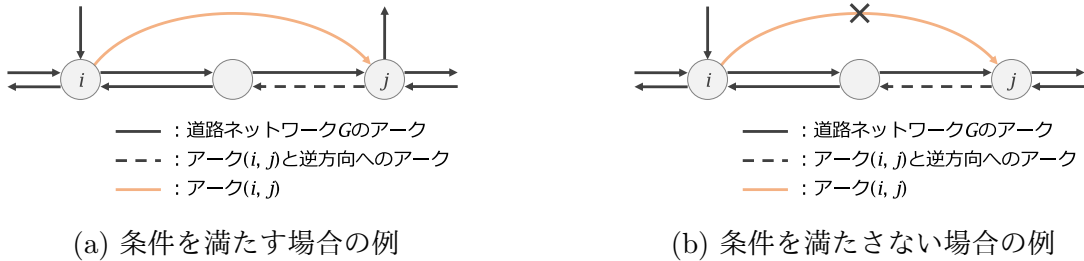


図 4: 条件 2(ii) の図解

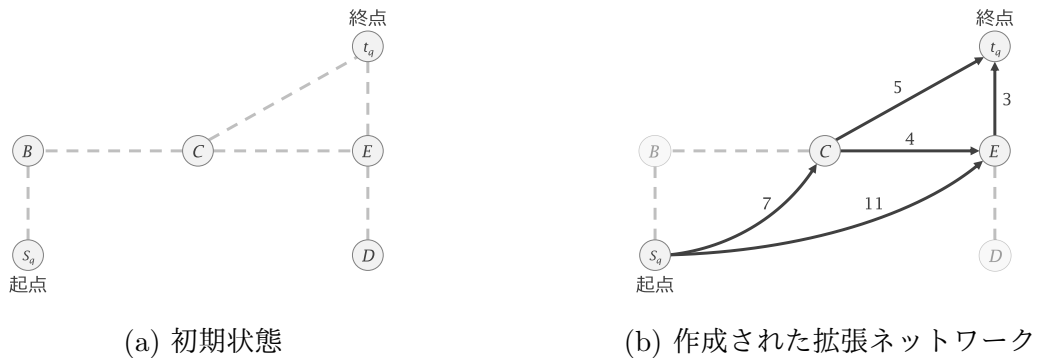


図 5: 例題の拡張ネットワーク \hat{G}^q

離は $26(=7+7+12)$ であり, $14.4(=12 \times 1.2)$ よりも大きく, 条件 3 を満たしていないため, s_q へのアークは追加しない. また, B については条件 2 を満たしていないため, E および t_q へのアークのみを \hat{A}^q に追加する. ノード E についても同様にして, L_E の要素のうち, t_q へのアークのみを \hat{A}^q に追加する. 加えて, アーク追加操作完了時に出次数および入次数が 0 となる B および D をノード集合から削除することで, この移動需要 q についての拡張ネットワークのノード集合 \hat{N}^q およびアーク集合 \hat{A}^q はそれぞれ, $\hat{N}^q = \{s_q, C, E, t_q\}$, $\hat{A}^q = \{(s_q, C), (s_q, E), (C, E), (C, t_q), (E, t_q)\}$ となる.

計算の効率化を考えない場合, つまり L_i のすべてのノード j についてアーク (i, j) を \hat{A}^q に追加する場合には, \hat{A}^q の各アークは道路ネットワーク G において案内板による指示を必要としない移動パターンであり, そのアークの尾 (tail) から頭 (head) までは自然な経路に沿っている. 実際, \hat{A}^q に「道なり」で移動可能な 2 ノード間についてのアークを追加していく操作は, 移動需要に関する仮定 2 を拡張ネットワーク上で実現していると言えることができる. ここで, 隣接するすべての 2 ノード間は「道なり」で移動可能であるため, \hat{A}^q は道路ネットワーク G のアーク集合 A を部分集合として含んでいる (ただし, 起点のノードを起点ノード s_q , 終点のノードを終点ノード t_q と置き換えている). そのため, 拡張ネットワークにおける s_q から t_q への移動パターンは, 元の道路ネットワーク G における起点から終点へのすべての移動パターンを網羅していることになる.

また, \hat{A}^q は道路ネットワーク G において案内板による指示を必要としない移動パターンに対応しているため, 拡張ネットワークにおける s_q から t_q への移動経路が決定すると, それを案内するための案内板配置を一意 (移動需要が訪れるノードにのみ案内板を配置) に決定することができる. 例えば, 図 5 (b) において $s_q \rightarrow C \rightarrow t_q$ という移動経路を案内するための案内板配置箇所は C である. これを基に考えると, 図 5 の例題において案内板配置数が最小となる案内経路は $s_q \rightarrow C \rightarrow t_q$ および $s_q \rightarrow E \rightarrow t_q$ のいずれかであり, そのときの案内板配置場所はそれぞれ C および E となる. これに加えて様々な要因を考慮することで, より詳細な条件のもとで最適な案内板配置場所を決定することができる. 例えば, 案内板配置数が最小であり, かつその中で案内経路距離が最も短くなる案内板配置場所は C となる. また, 起点が A , 終点 F である移動需要に加えて, 図 6 のような起点が A , 終点 D である移動需要が存在する場合には, E に案内板を配置することで 2 つの移動需要を同時に捕捉することができるため, 案内板配置数が最小となる案内板配置場所は E となる.

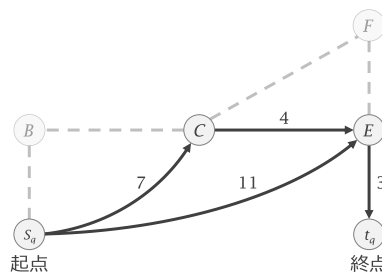


図 6: 起点が A , 終点 D の場合

3. 案内板配置問題の定式化

本章では、案内板配置問題として、集合カバー型と最大カバー型の二つのモデルを説明し、整数計画問題としての定式化を示す。集合カバー型の問題は、すべての移動需要を起点から終点まで案内するために必要な案内板の配置コスト（または特殊ケースとして案内板の配置数）を最小化する問題である。一方、最大カバー型の問題は、与えられた配置コスト（または配置数）を所与とし、起点から終点まで案内することができる移動需要量を最大化することを目的とする。両者は、古くから施設配置問題で頻繁に用いられるモデル化の方法である。

案内が必要な移動需要や、対象とすべき重要な移動需要が予め把握できている場合には、すべての需要をカバーする集合カバー型により、必要となる案内板の数やコストを見積もる際に役立てられるだろう。また、入力データとなる移動需要に対し、すべてを捕捉する必要がない場合や、コストの面で現実的ではない状況では、最大カバー型の問題を用いることで、案内効果の大きな配置方法を検討する際に活用できるだろう。

3.1. 集合カバー型の案内板配置問題の定式化

本節では、移動需要に関する集合カバー型の案内板配置問題、つまりすべての移動需要を起点から終点まで案内するために必要な最小の案内板配置コストを求める問題についての定式化を行う。

定式化にあたり、ノード集合 N において、いずれかの移動需要 q の拡張ネットワークのノード集合 \hat{N}^q に含まれるノードの集合 $\hat{N} = \bigcup_{q \in Q} (\hat{N}^q \setminus \{s_q, t_q\})$ を導入する。また、定式化に用いる変数は以下の通りである。

$$x_{ij}^q = \begin{cases} 1 & \text{拡張ネットワーク } \hat{G}^q \text{ において移動需要 } q \text{ の案内経路がアーク } (i, j) \text{ を通る場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{ノード } i \text{ に案内板を配置する場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

ノード i の案内板設置コスト c_i とすると、定式化は以下のように書くことができる。

$$\min. Z = \sum_{i \in \hat{N}} c_i y_i \quad (3.1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{(i,j) \in \hat{A}^q} l_{ij} x_{ij}^q \leq \alpha d_q \quad \forall q \in Q \quad (3.2)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \hat{A}^q\}} x_{ij}^q - \sum_{\{j|(j,i) \in \hat{A}^q\}} x_{ji}^q = \begin{cases} 1 & i = s_q \\ -1 & i = t_q \\ 0 & i \neq s_q, t_q \end{cases} \quad \forall q \in Q; \forall i \in \hat{N}^q \quad (3.3)$$

$$\sum_{\{j|(j,i) \in \hat{A}^q\}} x_{ji}^q \leq y_i \quad \forall q \in Q; \forall i \in \hat{N}^q \setminus \{s_q, t_q\} \quad (3.4)$$

$$x_{ij}^q \in \{0, 1\} \quad \forall q \in Q; \forall (i, j) \in \hat{A}^q \quad (3.5)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \hat{N} \quad (3.6)$$

目的関数 (3.1) は、案内板設置コストの最小化を表している。なお、目的関数 (3.1) では案内板設置コストのみを評価指標としているため、最適解が複数存在する場合には制約を満たす範囲内で最短ではない経路に割り当てられてしまう恐れがある。そこで、目的関数とし

て第二項に距離に関するペナルティを加えた (3.7) 式のような式を採用することで最適解が複数存在する場合でも合理的な経路を選択させるようにする. ここで, ε は距離に関する項が案内板設置コストの項に影響を与えるのを防ぐための係数であり, 例えば c_i を整数値で設定する場合には, $\varepsilon\alpha \sum_{q \in Q} d_q < 1$ を満たすような ε を設定すればよい.

$$\min. Z = \sum_{i \in N} c_i y_i + \varepsilon \sum_{q \in Q} \sum_{(i,j) \in \hat{A}^q} l_{ij} x_{ij}^q \quad (3.7)$$

制約条件 (3.2) は, 前章で述べた案内経路の距離制約を表している. 左辺は移動需要 q の案内経路距離であり, 案内経路距離が最短経路距離の α 倍, つまり αd_q 以下でなければならないことを意味する. ここで, 各移動需要 q がどの程度までの迂回を許すかについては他の設定方法も可能であることに注意されたい. 例えば, 問題設定に応じて α の代わりに d_q に関する減少関数である α_q を用いたり, $d_q + \alpha$ のように一定の距離までの迂回を許すような形にすることも可能である. 制約条件 (3.3) は, 各ノードにおける流量保存則を表している. 制約条件 (3.4) は, いずれかの移動需要が通るノードには, 案内板が配置されることを規定している. 拡張ネットワーク上では, いずれかの移動需要が通るノードにのみ案内板を配置すればよいため, この制約条件によって最適な案内板配置を決定することができる. また, (3.3) 式と (3.4) 式により, すべての移動需要が起点から終点まで適切に案内されることになる. 制約条件 (3.5) および制約条件 (3.6) は, それぞれ 0 か 1 のみをとる変数であることを表している.

3.2. 最大カバー型の案内板配置問題の定式化

最大カバー型の案内板配置問題では, 集合カバー型の案内板配置問題と異なり捕捉されない移動需要が存在する. MirHassani ら [8] は, 移動需要が捕捉されない場合に 1 をとる変数 x_{st}^q を導入することで最大カバー問題の定式化を行った. 本節では, この考え方にに基づき, 移動需要に関する最大カバー型の案内板配置問題, つまり与えられた案内板配置コスト b に対し, 起点から終点まで案内することができる移動需要量を最大化する問題についての定式化を行う.

移動需要 q のアーク集合 \hat{A}^q に起点ノード s_q から終点ノード t_q へのアーク (s_q, t_q) を追加する. 図 5 の例題における拡張ネットワークでは, 図 7 のようになる. アーク (s_q, t_q) を導入することで, 移動需要 q が捕捉されているか否かを判定することが可能になる. アーク (s_q, t_q) に対応する変数 $x_{s_q t_q}^q$ について考える. $x_{s_q t_q}^q = 1$ である場合, 移動需要 q はいずれのノード $i \in N$ にも訪れることなく捕捉される. そのため, $x_{s_q t_q}^q$ が 1 の場合には, 実際には

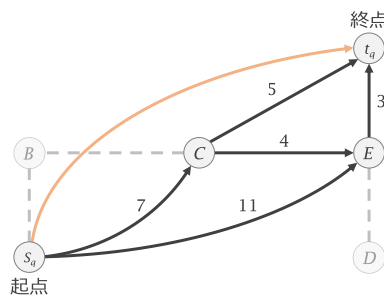


図 7: アーク (s_q, t_q) の追加

移動需要 q が捕捉されていないと考えることができる。つまり、 $x_{s_q t_q}^q$ の値によって移動需要 q が捕捉されているか否かを判定することができる。ここで、 $x_{s_q t_q}^q$ を導入するにあたり、注意しなければならない点がある。それは、移動需要 q の起点から終点へ「道なり」で移動可能である場合である。この場合には、拡張ネットワークの作成段階において、 $x_{s_q t_q}^q$ がアーク集合 \hat{A}^q に追加されることになる。そのため、 $x_{s_q t_q}^q$ の値が1であっても案内板による指示なしで目的地にたどり着けることになる。これに対応するため、起点から終点へたどり着くために案内板による指示が少なくとも一回は必要となるような移動需要の集合 Q' を導入する。 Q' を導入することで、捕捉されているか否かを判定する場合には Q' に含まれる移動需要 q についてのみ $x_{s_q t_q}^q$ の値を考慮すればよいことになる。

移動需要 q の需要量を f_q とすると、最大カバー型の案内板配置問題の目的関数は (3.8) 式のように書くことができる。

$$\max. Z = \sum_{q \in Q'} f_q (1 - x_{s_q t_q}^q) \quad (3.8)$$

目的関数 (3.8) は、移動需要 $q \in Q'$ について $x_{s_q t_q}^q$ の値が0、つまり捕捉された移動需要の需要量の合計の最大化を表している。また、制約式は以下のように書ける。

$$\text{s. t. } \sum_{i \in \hat{N}} c_i y_i \leq b \quad (3.9)$$

$$(3.2) - (3.6).$$

制約条件 (3.9) は、案内板の配置コストの合計が b 以下となることを規定している。

なお、目的関数 (3.8) では捕捉される移動需要量のみを評価指標としているため、需要量と同じ移動需要が存在する場合などでは複数の最適解が存在する可能性が考えられる。このような場合には、第二項に距離などに関する項を追加することで、より詳細な条件のもとで最適な案内板配置場所を決定することができる。例えば、目的関数に (3.8) 式の代わりに (3.10) 式を用いることで、需要量と同じ場合に最短経路距離が長い移動需要を優先的に捕捉することができる。

$$\max. Z = \sum_{q \in Q'} f_q (1 - x_{s_q t_q}^q) + \varepsilon \sum_{q \in Q'} d_q (1 - x_{s_q t_q}^q) \quad (3.10)$$

4. 道路ネットワークへの適用

本章では、集合カバー型および最大カバー型の案内板配置問題を単純な格子状ではないやや特徴的な形状を持つ実際の道路ネットワークに適用し、その結果について述べる。今回は、放射環状の部分を持つ東急東横線日吉駅西口の道路網について、OpenStreetMap (<https://openstreetmap.jp/>) のデータを基に作成した道路ネットワーク (図 8) を適用例として用いる。道路ネットワークのノード数は 120 であり、アーク数は 314 である。本章では、図 8 の道路ネットワークに対し、起点と終点を 1 つずつ設定した適用例 I (図 9 (a)) および、1 つの起点と 8 つの終点を設定した適用例 II (図 9 (b)) について案内板配置を考える。これらの適用例において、起点および終点は、提案モデルを応用する場面を意識し、モデルの特徴が分かり易く現れるように設定した。まず、移動の起点は日吉駅西口の駅の最寄りノードに設定した。これは、観光地等において、中心的な鉄道駅やバス停などを出発点とし、複数ある観光スポットへの案内方法を検討する状況を想定している。また、移動の終点について

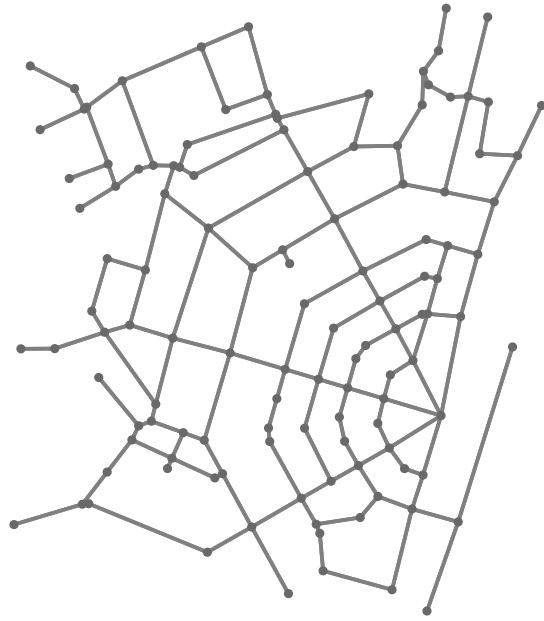


図 8: 日吉駅西口の道路ネットワーク

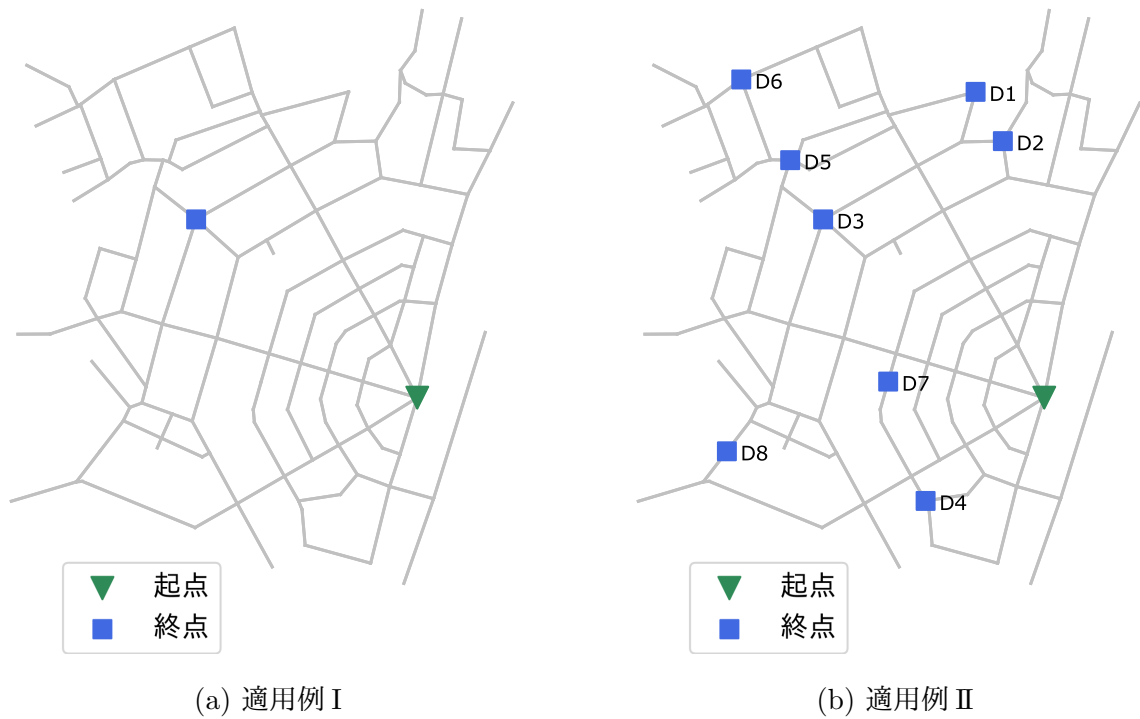


図 9: 起点および終点の設定

は、目的地に至る最短経路に沿った場合に複数回の右左折を必要とする経路を含むように選定した。これにより、迂回距離の上限値に関する α や、使用可能なコスト等のパラメータに応じて、案内経路が変化する様子が観察できるようになっている。ここで、本章の各図において、起点を \blacktriangledown 、終点を \blacksquare 、そして案内板配置場所を \bullet で表す。また、「道なり」通過の定義に関するパラメータ a および b については、覺知ら [4] の数値を引用し、 $a = 20^\circ$ 、 $b = 25^\circ$ とした。なお、4.1 節の数値例における最適解は、(3.7) 式を目的関数として設定した上で得られたものであり、4.2 節の数値例における最適解は、(3.10) 式を目的関数として設定した上で得られたものである。計算は、Intel(R) Core(TM) i7-7700T 2.90GHz, 16GB メインメモリの PC 上で、プログラミング言語 Python と Gurobi Optimizer 7.5.2 を用いて行った。

4.1. 集合カバー型の案内板配置問題の実行結果

本節および次節では、問題を単純にするため $c_i = 1$ ($\forall i \in \hat{N}$) とし、案内板の配置数のみを考える。

まずはじめに、適用例 I (図 9 (a))、つまり起点および終点を 1 つずつ設定した道路ネットワークについての実行結果を示す。 $\alpha = 1$ および $\alpha = 1.1$ における案内板配置は、図 10 のようになった。図 10 および本節、次節の図において、橙色のアーチはいずれかの移動需要の案内経路が通過していることを表している。図 10 (a) は、 $\alpha = 1$ 、つまり案内経路が最短経路と一致する場合である。図 10 (a) をみると、2 つの案内板が配置されていることがわかる。1 つ目の案内板は右折を促す指示をし、2 つ目の案内板は左折を促す指示をする。移動需要は、これらの指示に従うことで最短経路を通過して起点から終点まで移動する。それに対し図 10 (b) は、 $\alpha = 1.1$ 、つまり案内経路距離が最短経路距離の 1.1 倍までの迂回を許す

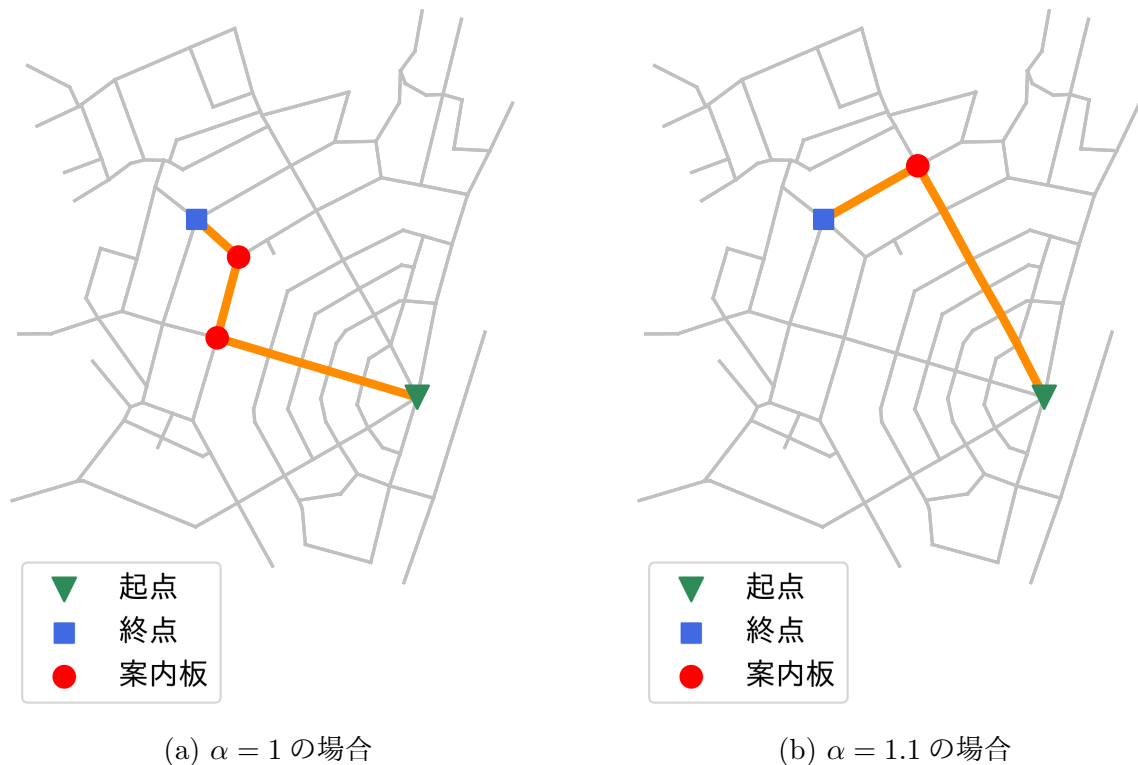


図 10: 集合カバー型の問題における案内板配置 (適用例 I)

場合である．図 10 (b) をみると，配置されている案内板が 1 つであることがわかる．最短経路を案内経路とする場合には 2 つの案内板が必要であるのに対し，案内経路が最短経路からの迂回を許される場合には案内板が 1 つでよい．また，それぞれの場合の案内経路距離は 385m および 411m であり，最短経路距離から 1.07 倍程度の迂回をすることで案内板の数を 1 つ減らすことができる．これらのことから，案内経路距離と案内板配置数（案内板配置コスト）の間にはトレードオフ構造が成り立っていることが確認できる．

次に，適用例 II（図 9 (b)），つまり，1 つの起点および 8 つの終点を設定した道路ネットワークについての実行結果を示す． $\alpha = 1.1$ および $\alpha = 1.5$ における案内板配置は，図 11 のようになった．また，図 12 は適用例 II の各移動需要の OD 間の最短経路を示している．図 11 (a) をみると，8 つの案内板が配置されていることがわかる．1 つの案内板は，複数の方向への案内を表示することができる．例として，D1 および D3 への移動需要の案内経路をみると，2 つの案内経路について同一の案内板によってそれぞれ右折および左折を促す指示がされていることがわかる．本稿における定式化では，1 つの案内板に表示する情報量については言及していないが，Toi ら [11] のように 1 つの案内板に書くことができる目的地の数の上限を設定するなど案内板の情報量に関する制約を追加することも可能である．また，D6 への移動需要は起点から終点へ「道なり」で移動可能であり，案内板による案内が無くても移動需要が捕捉されていることがわかる．図 11 (b) をみると，5 つの案内板が配置されており， $\alpha = 1.1$ の場合と比較すると，案内板配置数が 3 つ少なくなっていることがわかる．これは，距離制約が緩和されたことでより大きな迂回をすることが可能となり，D2 および D7 への移動需要の案内経路が変化したためである．図 13 は，適用例 II について α の値を 1 から 2 の間で 0.05 刻みで変化させたときの案内板配置数を示したものである．図 13 から

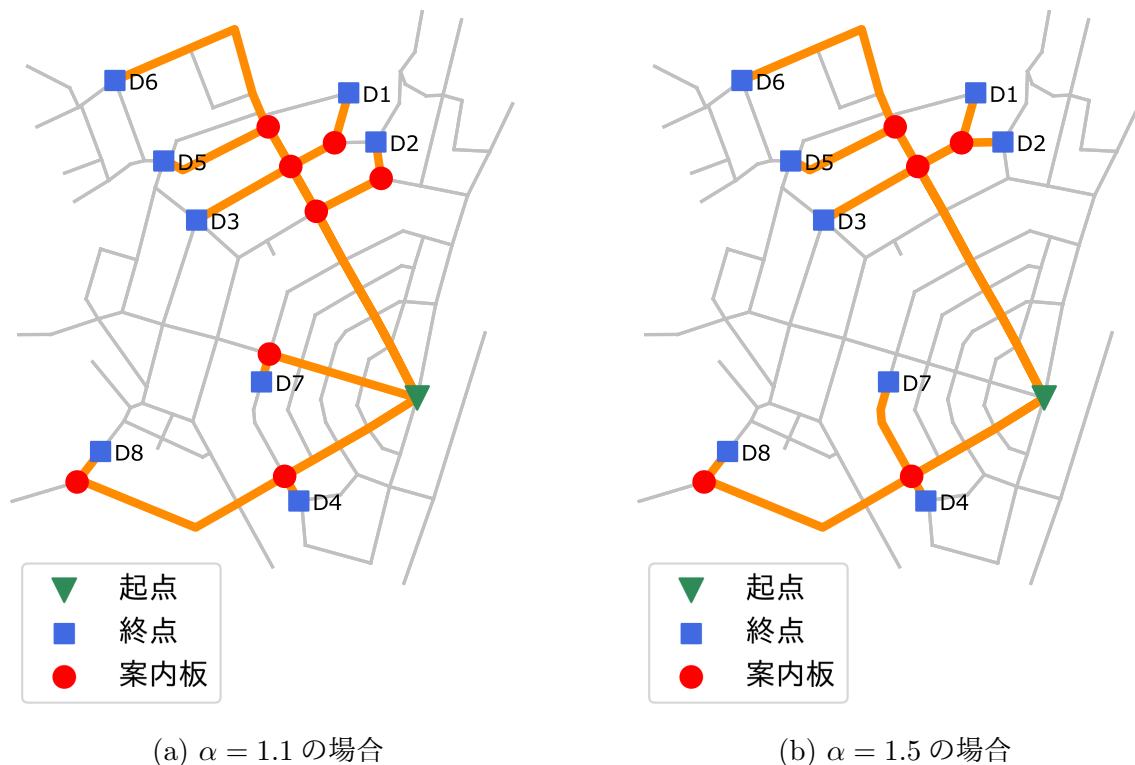


図 11: 集合カバー型の問題における案内板配置（適用例 II）

も、 α の値を大きくする、つまり長い案内経路距離を許容することで案内板配置数（案内板配置コスト）を減らすことができるというトレードオフ構造が確認できる。

適用例Ⅱのように複数の移動需要が存在する場合、特定の移動需要について、本来案内板の必要ない箇所に案内板が配置されることがある。例えば、図 11 (b) をみると、D8 への

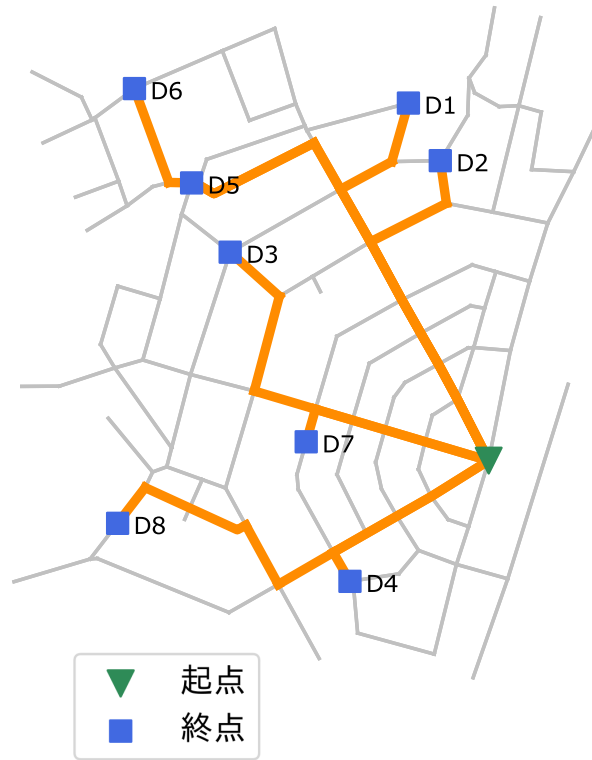


図 12: 適用例Ⅱにおける最短経路

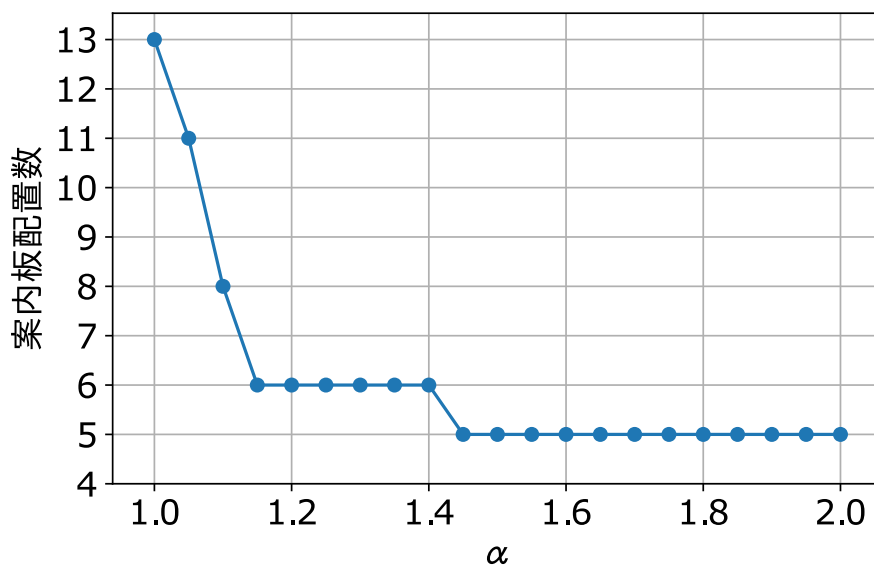


図 13: α の値と案内板配置数

移動需要の案内経路上には2つの案内板が配置されていることがわかる。しかし、実際にD8への移動需要を捕捉するために必要なのは2つ目の案内板のみであり、1つ目の案内板はD4やD7への移動需要を捕捉することを目的として配置されたものである。このとき、事後的にD8への移動需要に対して「道なり」方向への移動を指示する案内を追加することができる。移動需要の捕捉のみを考えた場合、「道なり」方向への移動を指示する必要はないが、「道なり」方向への移動を指示する案内を表示することで、移動者に対して安心感を与えたり、案内経路からの逸脱のリスクを軽減したりする効果が期待できる。また、図14のように、あるノード*i, j*間について距離が同じであるため、目的関数値が等しくなる経路が複数存在する場合、終点と同じにもかかわらず移動需要によって異なる経路が案内される可能性がある。その場合、ノード*i*において1つの終点に対して2方向への案内が表示されることになる。そのため、得られた最適解においてこのような状況が起こっている場合、事後的に案内経路を変更し、いずれかの方向への案内に統一することができる。

図15は、図11の $\alpha = 1.1$ および $\alpha = 1.5$ の場合において各移動需要の最短経路距離と案内経路距離の関係を示したものである。図15の各点の数字は、終点の番号を示している。図15をみると、いずれの場合においてもすべての点が $\alpha = 1.1$ および $\alpha = 1.5$ の直線と $\alpha = 1$ の直線の内側、もしくは直線上にあり、すべての移動需要の案内経路が距離制約を

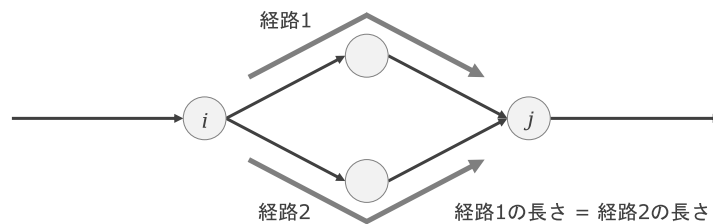


図 14: ノード間の距離が同じ経路が複数存在する場合

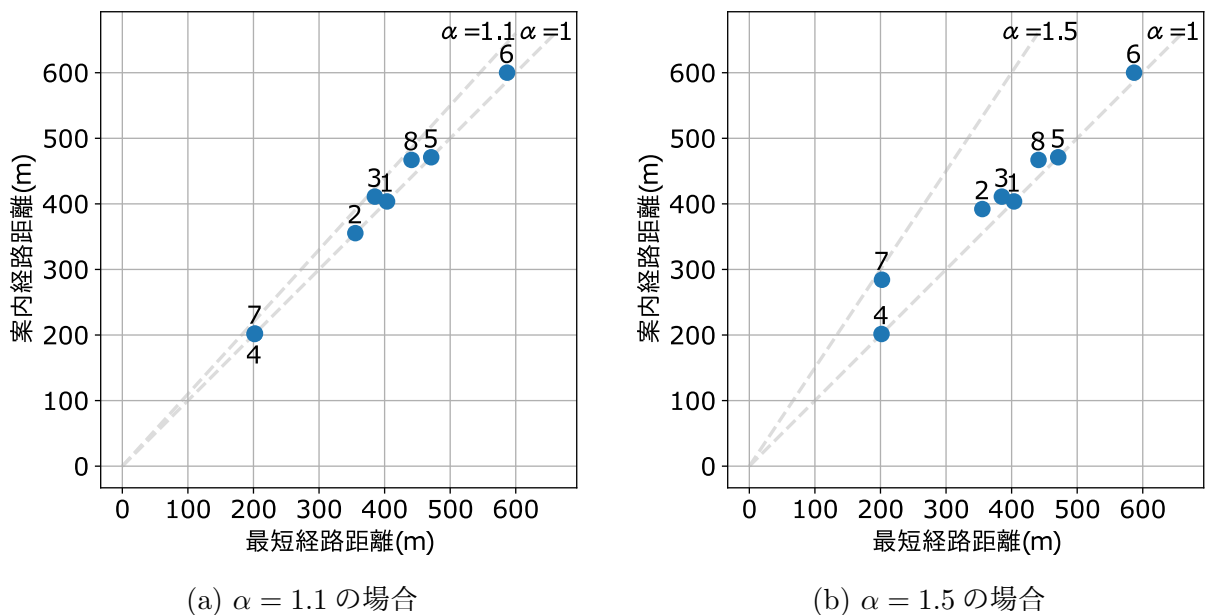


図 15: 最短経路距離と案内経路距離

表 1: 拡張ネットワークの作成時間と案内板配置問題の規模および実行時間

適用例	α	拡張ネットワーク作成時間 (s)	変数の数	制約式の本数	求解時間 (s)
I	1	0.020	23	15	0.018
I	1.1	0.040	63	31	0.032
II	1.1	0.309	480	248	0.055
II	1.5	0.759	1647	578	0.067

満たしていることが確認できる。また、図 15 (a) および図 12 をみると、 $\alpha = 1.1$ の場合には D3, D6 および D8 への移動需要の案内経路が最短経路とは異なっていることがわかる。 $\alpha = 1.5$ の場合には、さらに D2 および D7 への移動需要の案内経路が最短経路と異なる。図 15 (b) をみると、 $\alpha = 1.5$ の場合における D7 への移動需要の案内経路が $\alpha = 1.5$ の直線と接近していることがわかる。実際、このときの案内経路距離は最短経路距離の 1.405 倍であり、距離制約を $\alpha = 1.5$ に緩和したことによって得られた案内経路であることがわかる。また、D2 への移動需要の案内経路距離は最短経路距離の 1.103 倍であり、こちらも距離制約を $\alpha = 1.5$ に緩和したことによって得られたものである。逆に、D2 および D7 以外の終点への移動需要の案内経路は $\alpha = 1$ の直線上にあるか、直線に接近していることがわかる。これは、目的関数において距離に関するペナルティを課しているためであり、 $\alpha = 1.5$ の場合の距離制約を満たす範囲において D2 および D7 以外の終点への移動需要についての案内経路を変化させても案内板配置数が減少しないため、 $\alpha = 1.1$ の場合と案内経路が変化していない。このように、目的関数において距離に関するペナルティを課すことで、案内板配置数が変化しない場合には各移動需要に対し最も距離の短い経路を案内することが保証される。

表 1 は、図 10 および図 11 のそれぞれの場合における拡張ネットワークの作成時間と最適化問題の規模および計算時間である。案内板配置問題の求解時間は、拡張ネットワークの作成時間と最適化問題の計算時間の和となる。表 1 からわかるように、本節で示した適用例の求解時間は、いずれも 1 秒未満となった。

4.2. 最大カバー型の案内板配置問題の実行結果

本節では、適用例 II (図 9 (b)) について、 $\alpha = 1.2$ としたときの実行結果を示す。ここで、仮定より $c_i = 1 (\forall i \in \hat{N})$ であるため、 b は案内板配置数を表す。また本節では、問題を単純にするため $f_q = 1 (\forall q \in Q)$ とし、捕捉された移動需要数のみを考える。

$b = 1$ および $b = 2$ における案内板配置は、図 16 のようになった。図 16 (a) をみると、案内板は D5 への移動需要を捕捉できるように配置されていることがわかる。また、D6 への移動需要は案内を必要としないため、合計で 2 つの移動需要が捕捉されたことになる。 $b = 2$ の場合には、2 つの案内板が配置される。図 16 (b) をみると、D6 への移動需要を含む 4 つの移動需要が捕捉されているが、 $b = 1$ の場合に捕捉されていた D5 への移動需要が捕捉されていないことがわかる。これは、配置することができる案内板の数が増えたことによって案内板が 2 つ必要な D1 および D2 への移動需要を捕捉することが可能になったためであり、 b を大きくして案内板の配置コストに関する制約を緩和した場合に案内板の配置が大きく変化し、それまで捕捉されていた移動需要が捕捉されなくなる可能性があることがわかる。

図 17 は、前節および本節で用いた 3 つの α の値について、案内板配置数を 0 からすべての移動需要を捕捉するのに十分な数まで変化させたときに捕捉される移動需要数を示している。図 13 と図 17 より、各 α について、すべての移動需要が捕捉される場合の案内板配置

数が、集合カバー型問題の最適解における案内板配置数と一致していることが確認できる。図 17 において、 α の値が大きくなるにしたがって、捕捉される移動需要数が増加することがわかる。また、案内板配置数 (= b) を 1 増やした場合に、捕捉される移動需要数が 2 つ増える場合と、全く変化しない場合があるなど、増加の様子に特徴がある。すべての需要をカバーすることを前提とする集合カバー型問題に対し、最大カバー型問題では α や b の値に応

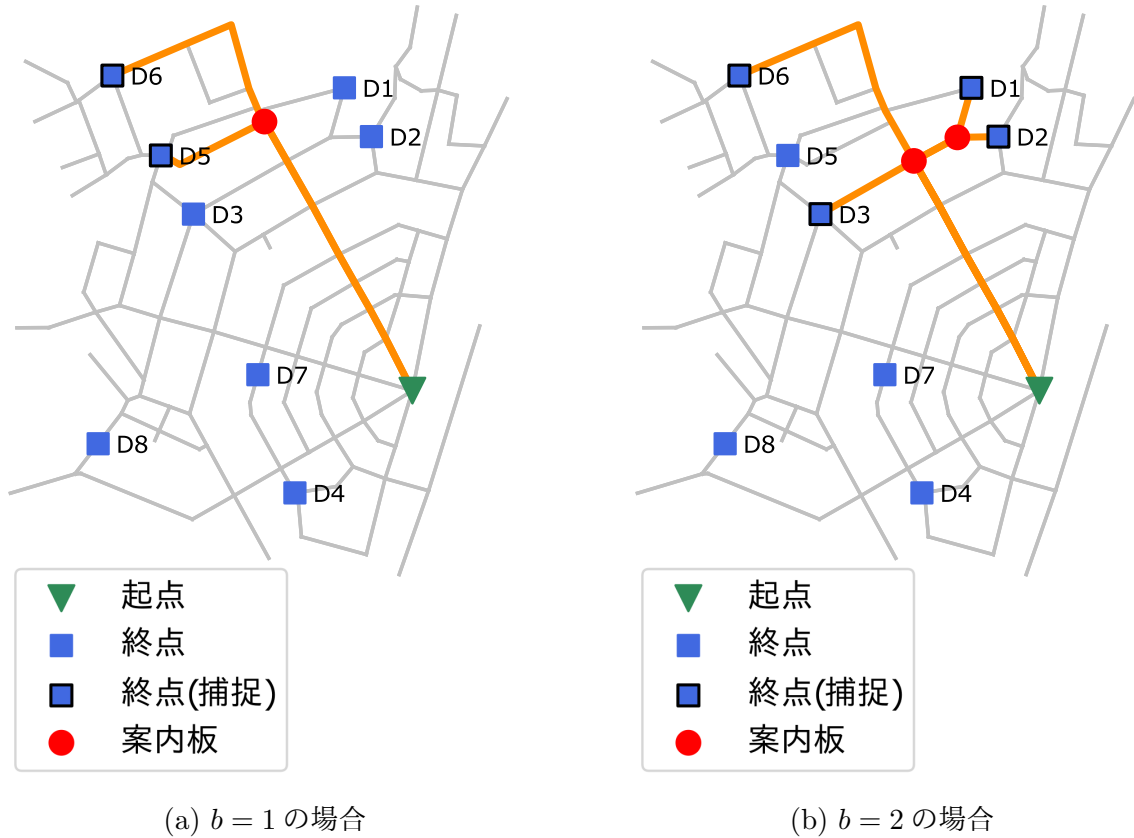


図 16: 最大カバー型の問題における案内板配置

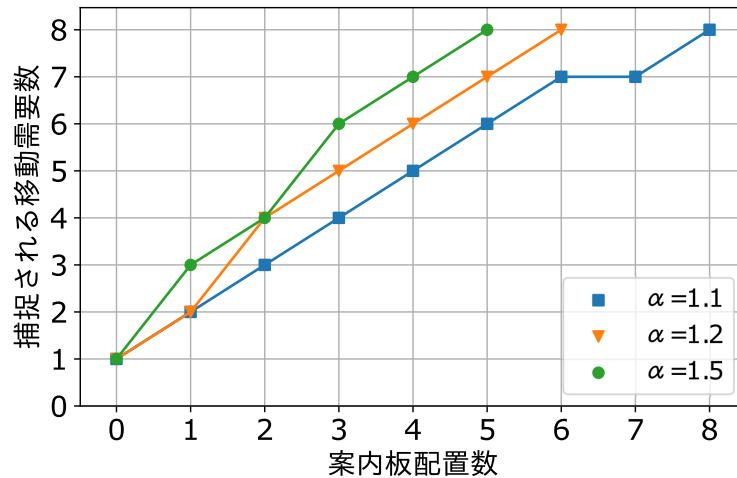


図 17: 案内板配置数と捕捉される移動需要数

じて案内板配置や案内経路が変化の様子を詳しく比較・分析することができる。

5. おわりに

本稿では、観光案内板のような街中で歩行者に対して案内を行なう施設に注目し、集合カバー型および最大カバー型の案内板配置問題を提案した。案内板配置問題では、移動需要に関して起点および終点の情報のみが与えられており、あらかじめ経路が決定されていないため、案内板についての施設配置問題であると同時に案内板の配置によって経路が決定する経路決定問題を含んでいる。そこで本稿では、MirHassaniら [8] の考え方にに基づき、歩行者が経路選択の意味で案内を必要とする場合にのみノードを訪ればよいと考えることを可能にするための拡張ネットワークを作成し、案内板の配置の最適化についてフロー捕捉型配置問題に即した形での定式化を行った。そして、集合カバー型および最大カバー型の案内板配置問題について、東急東横線日吉駅西口の道路網に適用した結果を示した。集合カバー型の案内板配置問題における実行結果から、許容する最短経路距離からの迂回の大きさと案内板配置コストの間にトレードオフ構造があることを確認した。

案内板配置問題は、状況設定に応じて起点における考え方や「道なり」通過の定義について適当な仮定を置くことで、拡張ネットワークの作成や定式化に様々な仮定を組み込むことができる。また、すべての移動需要を捕捉するのに十分な案内板が配置されているという状況下において、各移動需要がより道幅の広い道を通ることができるようにするなど、問題設定についても定式化の形を大きく変更することなく様々な場面を考慮することができる。

本稿では、計算の効率化のために、 L_i の作成および \hat{A}^q へのアークの追加に対して条件を設定した。これにより、拡張ネットワークの規模を縮小することができるため、定式化における変数の数や制約式の本数を削減することができる。しかし、2.2節で設定した条件によって必ずしも実際には考慮する必要がないアークをすべて排除できているとは言えない。そのため、条件の設定方法については検討する余地がある。

Toiら [11] における状況設定と同様に、実際の街中では歩行者が案内板を見落とししたり、案内板の指示に従わないなど必ずしも案内の通りに行動するとは限らない。また、交差点の形状によっては人によって案内板の必要性が異なったり [10]、「道なり」の基準が異なったりするため、問題設定において意図した「道なり」から逸脱する可能性が考えられる。本稿では、これらのような案内経路からの逸脱については考慮されておらず、確率的な事象を検討することも重要なテーマである。

参考文献

- [1] E. Balas: The prize collecting traveling salesman problem, *Networks*, **19-6** (1989), 621–636.
- [2] R. Church and C. ReVelle: The maximal covering location problem, *Papers of the Regional Science Association*, **32-1** (1974), 101–118.
- [3] M.J. Hodgson: A flow-capturing location-allocation model, *Geographical Analysis*, **22-3** (1990), 270–279.
- [4] 覺知昇一, 吉川徹: 道案内の情報記述量に着目した都市空間の利便性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, **67-562** (2002), 217–223.
- [5] J.-G. Kim and M. Kuby: The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37-6** (2012),

5406–5420.

- [6] M. Kuby and S. Lim: The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles, *Socio-Economic Planning Sciences*, **39-2** (2005), 125–145.
- [7] 松田三恵子, 杉山博史, 土井美和子: 歩行者の経路への嗜好を反映した経路生成, 電子情報通信学会論文誌, **J87-A-1** (2004), 132–139.
- [8] S.A. MirHassani and R. Ebrazi: A flexible reformulation of the refueling station location problem, *Transportation Science*, **47-4** (2013), 617–628.
- [9] 永山雅大, 原田一, 永山広樹: 広域災害における避難誘導サインユニットの製作, デザイン学研究, **65-1** (2018), 9–18.
- [10] 杉山博史, 土井美和子: 交差点形状が与える心理的影響を考慮した道案内システム, 電子情報通信学会論文誌, **J87-A-1** (2004), 59–67.
- [11] S. Toi, T. Nomura, M. Kiyota, Y. Kajita, T. Yoshitake, and H. Tatsuni: A method for planning of road sign system in highway using straying index, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **6** (2005), 981–996.
- [12] C. Toregas, R. Swain, C. ReVelle, and L. Bergman: The location of emergency service facilities, *Operations Research*, **19-6** (1971), 1363–1373.
- [13] P. Vansteenwegen, W. Souffriau, and D.V. Oudheusden: The orienteering problem: A survey, *European Journal of Operational Research*, **209-1** (2011), 1–10.
- [14] Y.W. Wang and C.C. Lin: Locating road-vehicle refueling stations, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **45-5** (2009), 821–829.
- [15] 日本政府観光局: 年別 訪日外客数、出国日本人数の推移 (1964年–2016年), https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/marketingdata_outbound.pdf (2019年12月24日アクセス).
- [16] 観光庁: 受入環境について訪日外国人旅行者にアンケート調査を行いました — 2017年 — 報道発表 — 報道・会見 — 観光庁, http://www.mlit.go.jp/kankocho/news08_000233.html (2019年12月24日アクセス).

田中 健一

慶應義塾大学 理工学部

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

E-mail: ken1tnk@ae.keio.ac.jp

ABSTRACT

**MATHEMATICAL MODEL FOR ROUTE GUIDANCE
—DEVELOPING A GUIDE SIGN LOCATION AND ROUTING
PROBLEM—**

Yusaku Yao Ken-ichi Tanaka
Keio University

In places where people visit for the first time on a travel, people need to get information about the route to their destination in some way. There are two methods for route guidance: one is to provide a predetermined route, such as a guide sign or an access map, and the other is to present route candidates dynamically, such as a car navigation system or a map application on a mobile phone. In this paper, we propose problems to determine the location of information provision by the guide signs or the staffs giving directions, and call this problem *the guide sign location and routing problem*. This problem determines not only the location of facilities (e.g., guide sign) but also the route between origin and destination of each trip. A facility located at a road intersection instructs trip takers to make a right turn or a left turn at the facility in order to guide them to a destination. We introduce an expanded network to describe this structure and present integer programming formulations of the proposed model. We explain a procedure for constructing an expanded network, and present set-covering type and maximum-covering type formulations. The proposed model is applied to an actual road network in the west side of the Hiyoshi Station on the Tokyu-Toyoko Line. We analyze how location of guide signs and route of each trip change depending on the budget available for locating facilities and the additional distance traveled compared to the shortest path. The results show potential usefulness of the proposed model for solving real-world problems.