Vol.2019-MPS-125 No.2
2019/9/25

トランス配置問題の定式化

中川 卓弥 [1,a)]　榎原 博之[2,b)]

概要：本論文では，景観や都市防災の観点から世界的に普及が進められている無電柱化において，電線共同溝方式のトランスを配置する場所を決めるトランス配置問題の定式化を行う．トランス配置問題とは，住宅付近の道路下の共同構内にあるトランス配置候補地に対して，各住宅の電力需要を満たし，かつ最もコストが小さくなるようなトランスの配置地点を求める問題である．トランス配置問題を組合せ最適化問題として定式化するために，本来連続的であるトランスの配置候補地を有限の候補地に限定できることを証明する．この問題の定式化の有効性を検証するために，実際の住宅地を基にした問題例を用いた計算機実験を行う．

キーワード：トランス配置，　最適配置，　無電柱化，組合せ最適化問題，定式化

1. はじめに

配電設備は電力系統の末端に位置し，通信ケーブルなどの各種インフラ設備とともに配設されている．配電線路には大別して架空配電線路と地中配電線路がある．現在日本では多くの場合，建設コストが安価で，事故等の緊急時に早期復旧が可能な架空配電線路が使用されている．しかし，景観への配慮や都市防災の向上，安全で快適な歩行空間の確保などの理由で近年世界各国で無電柱化が推進されており，日本でも平成 28 年に無電柱化の推進に関する法律が施行されるなど，地中配電線路への関心が高まっている．

地中配電線路は電線共同溝方式とそれ以外に大別され，日本では主に電線共同溝方式が採用されている．電線共同溝方式とは，道路の地下空間を活用して電力線，通信線等をまとめて収容する無電柱化の手法であり，主に歩道の下に電線等を埋設する手法である．トランスは地上機として道路上に露出しており，メンテナンスが容易になっている．

配電線路におけるトランスの配置は，業務に精通した設計者によって決定されており，配置の決定には設計者の知識が経験的に重要となる．そのため，業務経験の少ない設計者によって必要量以上のトランスが配置されてしまったり，コストが高くつく場所にトランスを配置されてしまうという弊害が生じている．

[1] 関西大学大学院
Graduate School of Kansai University, Suita, Osaka, Japan
[2] 関西大学
Kansai University, Suita, Osaka, Japan
[a)] k391690@kansai-u. ac. jp
[b)] ebara@kansai-u. ac. jp

現在普及途中であるため，無電柱化におけるトランスの配置場所に関する研究は少ない．従来方式である架空配電線路方式のいわゆる電柱の配置システムについても，トランスの配置場所ではなく，電柱と電線の配置を決定するものが多く，トランスの配置場所を決定するものはほとんどない．また電線の長さと交差箇所の数を小さくする配置方法を求めるには膨大な計算コストがかかるとされている．

本論文では，設備コストや設計コストの削減を目的として，電柱を使わず，電線の配電経路が予め決まっている電線共同溝方式において，連続的な解となるトランスの配置候補地を有限の候補地に限定できることを証明し，コストが最小となるトランスの配置場所を決定する組合せ最適化問題として定式化を行う．また，実際の住宅地を参考に作成した問題例に対して計算機実験を行い，定式化の妥当性を検証する．

2. トランス配置問題

トランス配置問題とは m 件の住宅と住宅地の道路下を通る共同溝が与えられたとき，トランスの配置場所と個数，各トランスに接続される住宅を求める問題である．トランスの設備コストと住宅から伸びる電線の設備コストの和を最小化することを目的とする．電線には長さあたりのコストが設定されており，住宅から接続されるトランスまでの距離に比例してコストが増加する．よって，トランスの設置個数をより少なく，かつ住宅がより近いトランスに接続されることが望ましい．各住宅には要求電力があり，トランスが賄いきれる電力を超える数の住宅は接続できない．また，各住宅は 1 つのトランスのみと接続される．トラン

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

スのコストは電線のコストよりも大きいため，多くの場合，トランスの個数を少なくすることでより良い解が得られやすくなる．

トランス配置問題は電線共同溝方式を基に考えられている．電線共同溝方式とは，住宅に隣接する歩道の地下部分に掘られた地下空間に電力線，通信線等をまとめて収容することで，地中に配電設備を埋設する方式である．電線共同溝方式の模式図を図 1 に示す．配電線は共同構内を網羅しており，電気を家庭用の電圧に変圧するためにトランスに接続される．トランスで変圧された電気は分岐部と呼ばれる部分から伸びる引込線を通じて各住宅に配電される．

トランス配置問題の模式図を図 2 に示す．図の丸部分がトランスの配置候補地であり，各住宅の前に必ず一つ存在する分岐部または共同溝の交点となる．

井上氏ら [1] は架空配電線路方式の電柱において，自動的に電柱の配置場所を決定するために，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いた手法を提案している．井上氏らの研究では新規に電力需要が発生する場合と，既に電線路が施設されている地域の需要が増加する場合の 2 つの状況において，トランスの位置を決定せず，電柱の位置とそれに接続される電線の経路のみを決定するモデルを提案している．本論文では，電線共同溝方式による無電柱化を扱っているため，電柱が存在せず，代わりにトランスの位置と数，それに接続される住宅を決定するモデルを提案する．

駅やバス停のような公共施設や，インフラを管理するための施設の最適配置問題は以前から研究されている [2]∼[5]．[4] はある都市圏内の顧客が最寄りの駅へ向かうまでの乗り継ぎバスのバス停を誘致するモデルを提案している．この研究では矩形状のエリアの中央を通るバスの運行ルート上に，通勤通学者が効率よく移動できる最適なバス停の配置を，顧客目線と，運行会社目線の 2 つの利益の点で提案している．[5] は各地からワイヤレスに送信された電気，ガスメータのデータを電柱上に取り付けられた受信機で受信し，拠点に集めるための受信機の施設配置モデルを提案している．

3. トランス配置問題のモデル化と定式化

本来，住宅から伸びる電線の長さは住宅から分岐部，分岐部からトランスまで伸びる電線の距離の和となるが，配電線から各住宅に電気を引き込む際には引込線を用いる．引込線は住宅の地下部から配電線の分岐部に向かって真っ直ぐに接続される．そのため，トランスの配置場所に関わらず住宅から分岐部までの長さは一定になる．そのため住宅から分岐部までの電線のコストは一定となり，トランス配置問題での配電線のコストの計算からは無視することができる．また，電線共同溝は民地の前の歩道の地下部を通っているため，トランスは電線共同溝内のどの地点でも

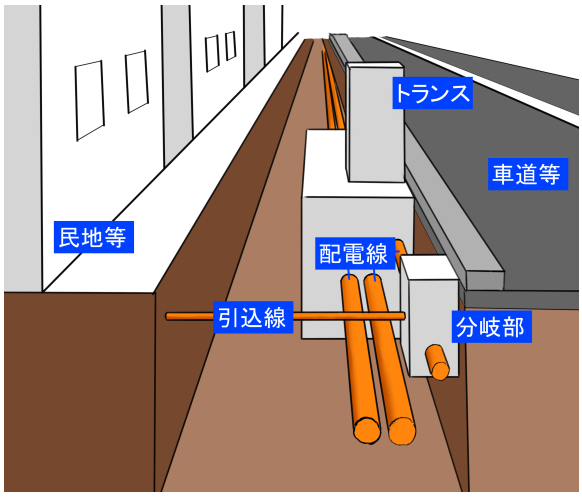

図 1 電線共同溝のイメージ
Fig. 1 Image of common groove

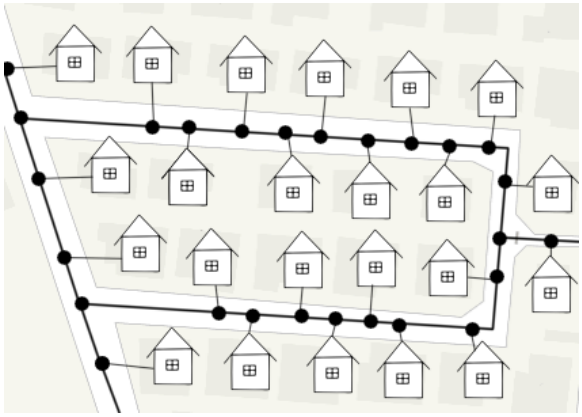

図 2 トランス配置問題
Fig. 2 Transformer location problem

配置することができる．本節では，トランス配置問題を組合せ最適化問題に落とし込むために，トランスの配置候補地が離散的に設定できることを以下の定理で示し，定式化を行う．

定理 1. トランス配置問題において，最適となるトランスの配置候補地は各住宅から引込線が伸びる分岐部か，配電線の交点となる．

証明 1. 図 (3) のように，住宅の分岐部または配電線の交点 A，B の間にトランスを配置した場合の電線コストを考える．このトランスに接続する住宅 $(p+q)$ において A 側には p 件，B 側には q の住宅が接続されるとすると，AB 間の距離を l とし，A から距離 x の場所 P にトランスがあるとすると，電線の長さの合計は式 (1) のようになる．

$$\sum_{i=1}^{p} d_{Ai} + p \times x + \sum_{j=1}^{q} d_{Bj} + q \times (l - x) \qquad (1)$$

d_{Ai} は，i 番目の住宅から A までの距離である．同様に，d_{Bj} は j 番目の住宅から B までの距離である．$\sum_{i=1}^{p} d_{Ai}$ と $\sum_{j=1}^{q} d_{Bj}$ は一定であるので省略すると式 (2) になる．

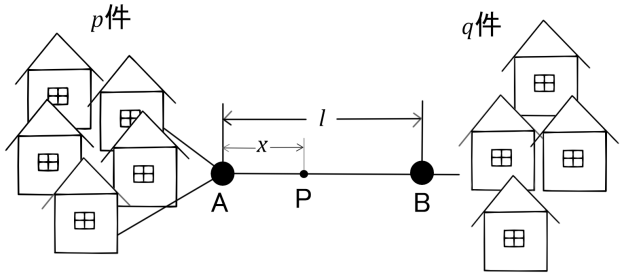

図 3 接続住宅数による，トランス配置場所の変化
Fig. 3 Change in transformer placement location depending on the number of connected houses

$$(l-x)\times q + x\times p = (p-q)\times x + l\times q \qquad (2)$$

式 (2) により，$p > q$ のときは $x = 0$ つまり A にトランスを配置すると最小コストとなる．$q > p$ のときは $x = l$ つまり B に，$q = p$ のときは AB 間のどこに設置してもコストは一定となる．よって，トランスの設置候補地は住宅の分岐部または配電線の交点上に設定すればよい．**(証明終)**

以上のことにより，トランス配置問題は各住宅の前にある分岐部と，共同溝上に発生する交点を候補地とするトランスの最適配置問題として離散的に定式化することができる．

トランス配置問題は，トランスの配置場所とトランスに接続する住宅を求める問題である．トランス配置問題の定式化を式 (3)∼(7) に示す．与えられた住宅の集合を $H = \{H_0, H_1, ..., H_{n-1}\}$ とし，全トランス候補地集合を $V = \{V_0, V_1, ..., V_{m-1}\}$ で表す．ただし $n \leq m$ である

$$\min\ c_{cable} \times \sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1} d_{ij}x_{ij} + c_{trans} \times \sum_{i=0}^{m-1} y_i \qquad (3)$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=0}^{m-1} x_{ij} \times T_j \leq T_{capacity} \quad (\forall V_i \in V) \qquad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} x_{ij} = 1 \qquad (\forall H_j \in H) \qquad (5)$$

$$y_i \leq \sum_{j=0}^{m-1} x_{ij} \qquad (\forall V_i \in V) \qquad (6)$$

$$x_{ij} \leq y_i \qquad (\forall V_i \in V,\ \forall H_j \in H) \qquad (7)$$

式 (3) はトランスの設備コストと住宅からトランスに接続される電線の設備コストを最小化する目的関数である．c_{cable}，c_{trans} はそれぞれ電線の長さあたりのコストとトランスの設備コストを表している．また，d_{if} はトランス候補地 V_i から住宅 H_j までの距離を表し，x_{ij} は配置されたトランス V_i に住宅 H_j を接続するか (1) しないか (0) を表す．y_i はトランス候補地にトランスを配置するか (1) しないか (0) を表す．式 (4) の T_j は各住宅の要求電力を表しており，接続された住宅の要求電力の和がトランスの賄える電力 ($T_{capacity}$) を超えないことを表す．式 (5) では住宅は必ず 1 つのみのトランスと接続することを表す．式 (6) は配置されていないトランスに住宅が接続されないようにする制約であり，式 (7) は配置されているトランスには必ず住宅が接続されるようにする制約である．

4. 計算機実験

4.1 実験方法

定式化の有用性を検証するために検証実験を行う．実際の都市をモデルにトランス配置問題の住宅とトランス候補地を設定した問題例を作成し，計算機を用いて解いた後，解と計算時間を検証する．実験には CPLEX Optimizer[6] を使用する．実験に使用する計算機の構成を表 1 に示す．

実験に用いる各問題例の問題設定を表 2 に，パラメータを表 3 に示す．実験パラメータの c_{trans}，c_{cable} はそれぞれトランスの設備コストと，配電線の 1m あたりのコストである．$T_{capacity}$ は 1 台のトランスが賄うことができる電力容量であり，H_i は住宅 i が要求する電力で，70∼130 の間でランダムに設定する．$T_{capacity}$，H_i は 1 台のトランスに 10 軒程度の住宅が接続されていることが多いことからこのように設定されている．

実験で用いる都市のモデルを図にしたものをそれぞれ図

表 1 計算機の構成
Table 1 Machine environment.

項目	概要
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 @ 2.10GHz
メインメモリ	128 GiB
OS	CentOS release 6.9

表 2 問題設定
Table 2 Problem settings

問題名	住宅数 M	候補地数 N	エリア [m×m]
問題例 A	50	55	200×220
問題例 B	50	78	160×160
問題例 C	50	58	200×400

表 3 実験パラメータ
Table 3 Parameters

パラメータ項目	値
c_{trans}	200,000
c_{cable}	500
$T_{capacity}$	1,000
T_i	70∼130

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

図 4 問題例 A
Fig. 4 Problem Instance A

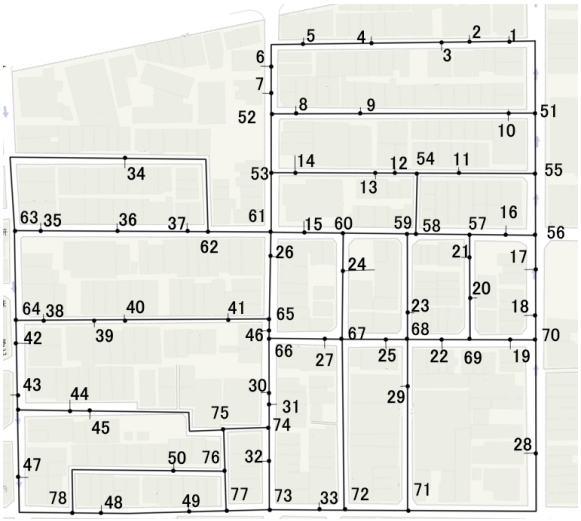

図 5 問題例 B
Fig. 5 Problem Instance B

4~6 に示す．図の黒い点で示されている部分がトランス候補地である．黒い線の部分は配電線が通る共同溝であり，トランスはこの上に配置される．

4.2 実験結果

各問題の計算時間と合計コストを表 4 に示す．表より，3 つ全ての問題において最適解を求めることができた．トランス候補地数の違いよりも，問題例の住宅の配置によって計算時間が大きく変わることがわかった．しかし，各問題が数分程度で計算できることから，このシステムは実際の設計において実用性があると考えられる．

次に実験で計算された解を問題例に図示したものを図 7~9 に示す．図の四角で描かれた部分が，トランスが配置される地点であり，同色の番号の住宅に接続される．結果より，3 つ全ての問題で 50 件の住宅に対して 6 つのトランスが配置されている．問題例 A,B は住宅の合計要求電力がトランス 5 台の電力を上回るため，6 台が最適な配置となっている．問題例 C は住宅の合計要求電力的に考えると，トランスが 5 台で全ての住宅と接続できるが，配電線のコストがトランスの配置コストを上回るため，もう 1 台トランスが配置されている．よって，トランスと配電線のコスト差を大きくすると，トランスの数が 5 台になると考えられる．また，図 7 の 10，11 番の住宅は距離的に最も近いトランスと接続されていないが，これはトランスの容量上最も近いトランスに接続できない場合に，住宅の接続先の変更が起こったためであり，定式化が的確に作用しているといえる．各結果の図より，トランスの配置位置は接続される住宅群の中央に位置されやすい傾向があり，問題 C のような，候補地が線上に一列に並んでいる問題であるほど，トランスの配置位置が決定しやすく，計算時間が短くなるのではないかと考えられる．逆に，問題 B のような，接続される住宅群が面上に配置される問題ほど計算時間が長くなると考えられる．また，本論文の実験パラメータである，c_{trans}，c_{cable} は実際の電線やトランスの値段を参考に設定してあるが，トランスのコストを配電線のコストより高くすればするほどトランスを配置しにくくなり，より計算時間がかかる．以上のことより，本定式化は，住宅の数が 50 程度の都市に対する一般的なトランス配置システムとして有用であると考えられる．

5. まとめ

本論文では，無電柱化の方式の 1 つである電線共同溝方式のトランスの配置場所と接続する住宅を決定するために，トランス配置問題を提案し，定式化を行った．この問題を組合せ最適化問題として定式化するために，トランスの配置候補地が限定されることを証明した．その後，定式化の有用性を検証するために，実際の住宅地をモデルとした問題例を作成し，計算機実験を行った．実験の結果，50 件の住宅で数分程度の計算時間で問題を解くことができ，また，導かれた解についても接続住宅の中心部にトランスが配置されており，妥当な解が導かれたといえる．

本論文では，50 件の住宅で実験を行ったが，配電線とト

表 4 実験結果と計算時間
Table 4 Results and calculation time

問題名	計算時間 [s]	合計コスト
問題例 A	104.31	1,664,000
問題例 B	155.10	1,999,000
問題例 C	2.34	1,817,500

図 6 問題例 C
Fig. 6 Problem Instance C

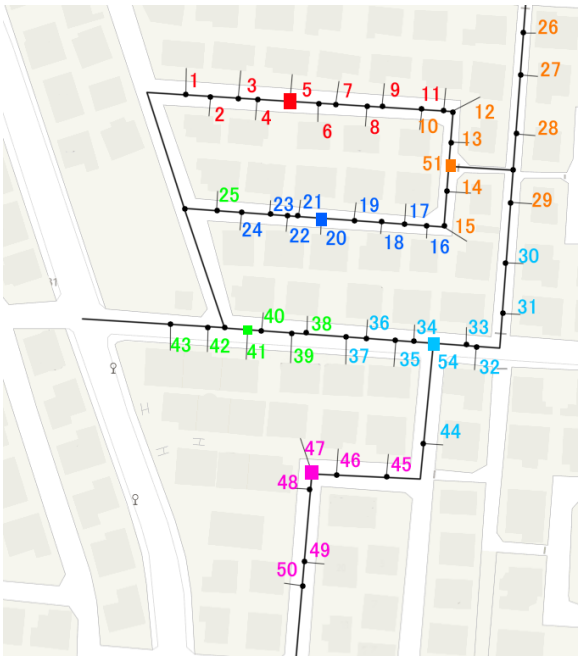

図 7 問題例 A の実験結果
Fig. 7 Result of problemA

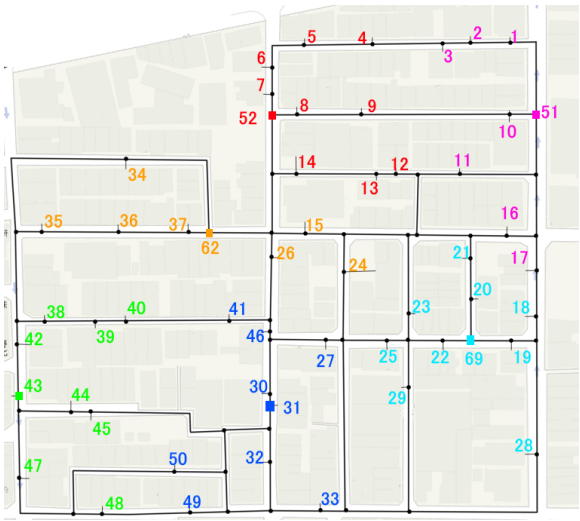

図 8 問題例 B の実験結果
Fig. 8 Result of problemB

ランスのコスト比や，問題エリアや住宅の数などを増大させた場合，計算機で解くことが現実的でない問題例も現れると考えられる．そのため，今後の課題としては，より複雑な問題例を解くためのヒューリスティクス解法の提案が挙げられる．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費 18K11484 と，JSPS 科研費 17K01309，関西大学大学院理工学研究科高度化推進研究費，関西大学先端科学技術推進機構「緊急救命避難支援のための情報通信技術に関する研究開発」研究グループの助成を受けている．

参考文献

[1] Inoue, Y. and Iba, H.: Automatic Arrangement of Utility Poles by Genetic Algorithms, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 123, No. 5, pp. 582–590 (online), DOI: 10.1541/ieejias.123.582 (2003).

[2] OHSAWA, Y.: RELATIONSHIP BETWEEN THE NUMBER OF FACILITIES AND THE LOCATION OF FACILITIES IN FACILITY LOCATION PLANNING, *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, Vol. 61, No. 482, pp. 165–174 (online), DOI: 10.3130/aija.61.165.1 (1996).

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

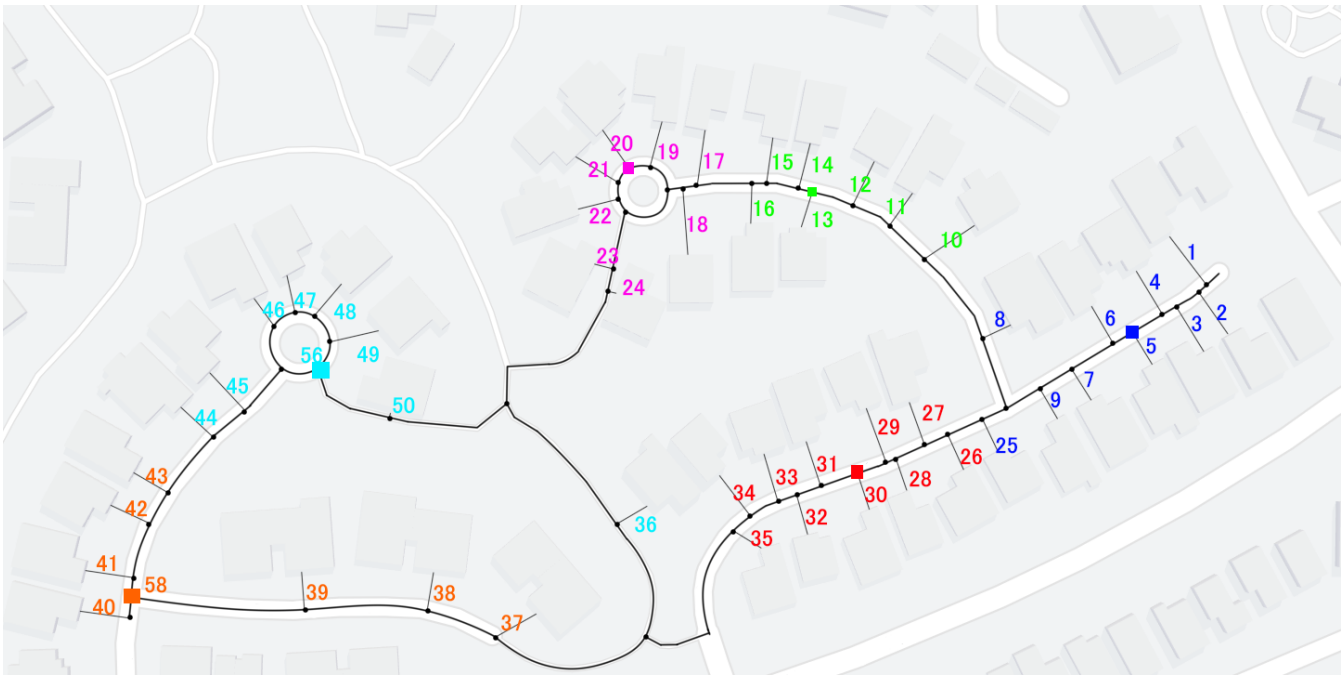

図 9 問題例 C の実験結果
Fig. 9 Result of problemC

[3] Taniguchi, E., Noritake, M., Yamada, T. and Izumitani, T.: Optimization of the size and location of logistics terminals., *Doboku Gakkai Ronbunshu*, No. 583, pp. 71–81 (online), DOI: 10.2208/jscej.1998.71 (1998).
[4] 鈴木勉：通勤バス路線上の停留所の最適配置，日本都市計画学会学術研究論文集，No. 22, pp. 247–252 (1987).
[5] : Optimization methods for receiver location, https://www.researchgate.net/profile/Srinagesh_Gavirneni/publication/2627864_Optimization_Methods_for_Receiver_Location/links/00b7d52b26dddd6825000000.pdf.
[6] 藤井 浩一品野 勇治：オペレーションズ・リサーチ Communications of the Operations Research Society of Japan, Vol. 64, No. 4, pp. 242–243 (2019).