

配電網維持管理の観点からのオフグリッドの効果

Examining Off-Grid in Terms of Maintenance Cost of Power Grid

渡司悠人*・佐野雅人**・鈴木勉***・大澤義明***

Yuto WATASHI*, Masato SANO**, Tsutomu SUZUKI*** and Yoshiaki OHSAWA***

Off-grid is a power system that is completely separated from power grid of electric companies. When introducing it into a local region, a trade-off between maintenance cost of power grid and the number of involved users arises. The purpose of this paper is to find the optimal off-grid solution considering the influence of a power supply's position. Firstly, we assume a simple regional condition and analyze the basic structure of off-grid based on the position of power supply and buildings through the linear models. Secondly, we propose a high-speed processing algorithm and reveal that the optimal off-grid region has a nested structure with network models. Finally, we apply this algorithm to the real electric poles and buildings data in Tsukuba city.

Keywords: off-grid, power grid, maintenance cost, bicriterion optimization, Pareto optimality

オフグリッド, 配電網, 維持管理コスト, 二目的最適化, パレート最適

1 はじめに

くらしや産業を支える電力は、配電網により供給される。電力会社には電力の供給義務（電気事業法第 17 条託送供給義務等）があり、都市部だけではなく離島や山間部にまで電力が供給されている。そのため、国土交通省平成 30 年無電柱化推進計画によると、日本の電柱本数は 3,600 万本にものぼる。2015 年国勢調査による我が国の総人口は 12,709 万人であるので、我が国の一人あたりの電柱本数は 0.28 本となる。したがって、配電の維持には人手と資金がかかり管理コストも膨大となる。また、地方では人口の減少とともに税収が減り、人口のピーク時と同等の配電網を維持していくことは現実的ではない。加えて、近年メガス torm が頻発しており、老朽化に直面する配電網にはさらなる補強が不可欠である。人口減少と老朽化により、配電網の一人あたり維持管理コストは急増しており、現状の配電網をすべて維持する余裕はなく**インフラ維持管理**では**選択と集中**が求められる。しかし、配電網は道路や上下水道などと同じく「つながって意味を持つ」線的なインフラであり、その取捨選択に関する分析は点的インフラと比較して複雑となる。

電力会社の配電網から完全に分離したシステムは**オフグリッド**¹⁾と呼ばれる。再生可能エネルギーを中心とするエネルギー地産地消の推進、ブラックアウト（大規模停電）の回避などの効果もあり、オフグリッドへの期待が高まっている²⁾。特に、配電網から自立できるオフグリッドは、配電線が長くなり非効率となる地方部において特に効果的である。最近では、性能が向上した車載電池や家庭内蓄電池を電源として地域で共有する考え方も浸透しつつある³⁾。さらに、電柱を減らすことで、災害時の避難経路確保の点でもプラスの効果をもたらす⁴⁾。

オフグリッドは配電網の維持管理コストを縮減するが、配電網から切り離された住民へ電力を供給する独立電源の費用を発生させる。すなわち、維持管理コストと独立電源コストとの間に**トレードオフ**が生じる。本研究の目的は、このトレードオフを二目的最適化問題として定式化し、配電網の電源位置の影響も含めオフグリッド政策の効果を分析することにある。維持管理コストは電柱本数に比例するとし、独立電源コストはオフグリッドによって配電網から切り離された建物棟数に比例するものとし、二種類のモデルを提示する。一つ目の直線モデルでは単純な地理条件を想定し、電源と建物との位置関係からオフグリッドの基本的構造を分析する。二つ目のネットワークモデルでは、現実への応用を意識し高速処理の算法を提示するとともに、最適なオフグリッド領域は入れ子構造⁵⁾になることを明らかにする。さらに、現実の電柱や建物データを使用し、この算法をつくば市へ適用して、モデルで得られた知見を解釈する。

なお、オフグリッド政策の効果検証の視点として、現在や将来の人口分布、再生可能エネルギー導入などの地域性、さらには、原油価格、技術進歩による省エネ効果、国民の理解など多数ある。しかし、本研究では、電力需要側（系統電源もしくは独立電源）と供給側（配電網の維持管理コスト）との間に発生する根本的なトレードオフの分析に集中するために、論点を絞り考察を展開する。

インフラ維持管理に関する既往研究を概観すると、点的な施設の削減に関する研究⁶⁾⁷⁾は多いが、線的な施設では少ない。前者はローカルな影響を元に判断すれば良いが、後者においては一部の削減が広い地域へ影響を及ぼす。これまで研究対象とされなかった線的な施設の縮減にはじめて取り組むものである。

* 正会員 アクサ生命保険株式会社 (AXA Life Insurance Co., Ltd.)

** 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)

*** 正会員 筑波大学システム情報系社会工学科 (University of Tsukuba)

2 二目的最適化問題

一か所の電源からすべての建物へ電力を供給する配電網を考える。ただし、ループが無いという意味で効率的な配電網を想定する。したがって、配電網の切断により、電源から切り離されるオフグリッド地域と電源が供給される地域へと二分割される。このように二つの区域を切り分ける位置をカットと呼ぶ。本研究では、二つの評価軸として、 $\phi_1(C)$ をカット C により廃止となる電柱本数、 $\phi_2(C)$ をカット C により配電網から切り離される建物数とする。これら目的関数は金銭タームで表現可能であるため、電柱の重みを金銭タームで示すパラメータ $\alpha (\geq 0)$ を用いて加重和することで、カット位置を決定変数とする次の線形加重和問題を考える。

$$\min_C (\phi(C) \equiv \phi_2(C) - \alpha \phi_1(C)). \quad (1)$$

金銭価値変換パラメータ α が小さければ電柱維持が優先され、 α が大きくなるにつれて電柱削減が進む。パラメータ α の特定は重要であるが、電力設備に関する費用に関しては公開部分が少なく、また地域性や時代によって敏感に変化すると考えられる。電力需要と供給との間に発生する根本的なトレードオフに着眼していることもあり、本研究では、 α を厳密に定めて分析することより変動すると想定し分析することでトレードオフ構造を吟味する。

二目的最適化では、二つの評価指標を二軸で対応させた平面で解釈すると見通しが良くなる。線形加重和問題 (1) では、横軸に ϕ_1 、縦軸に ϕ_2 をプロットすると、 $\phi_1(C)$ が大きく $\phi_2(C)$ が小さいほど良いので、平面の右下方向が二目的評価での改善方向となる。したがって、プロットの下側包絡線がトレードオフ曲線となる。また、線形加重和問題 (1) の最適解は、このトレードオフ曲線と傾き α の直線との接点で与えられる。

本研究では、以下の二種類のモデルを提示する：

- (i) 直線モデル：建物と電柱が直線上で連続的に分布。
- (ii) ネットワークモデル：建物と電柱がネットワーク上で離散的に分布。

なお、同じカット位置でも、式 (1) の目的関数も電源位置で変化するため、電源位置も政策変数と考えることもできる。最適カットの前提で系統電源の位置を変えた効果についても考察する。

3 直線モデル

3.1 前提

直線モデルでは以下の二種類を想定する：

- (i) 域外電源：都市域外に電源が存在。
- (ii) 域内電源：都市域内に電源が存在。

図 1 のように、都市域 $[0, l]$ 上に建物が密度関数 $f(x)$ で分布しているとする。 $F(x)$ を $f(x)$ の累積分布関数、 $F(x) \equiv \int_0^x f(y)dy$ とすると、総建物数 P は、 $P \equiv F(l) = \int_0^l f(y)dy$ となる。この直線上にある電源から区間 $[0, l]$ の

建物へ配電線が敷設されているとする。電柱は連続的に一様に分布するとし、その密度を 1 と単位化する。

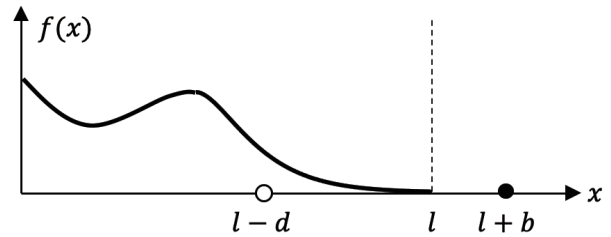


図 1: 直線モデル

3.2 域外電源供給

図 1 の ● に示すように、 $b \geq 0$ とし電源が郊外部 $l+b$ に位置しているものとする。電源が都市域 $[0, l]$ から離れるほど電柱本数が増え、オフグリッドの効果が大きくなる。1 本のカットの位置を横軸 x に対応させると、区間 $[0, x]$ がオフグリッド地域、区間 $[x, l]$ が電源供給地域となる。そのため、 x が削減電柱本数に、 $F(x) = \int_0^x f(y)dy$ が電源から切り離される建物数に対応する。 $\phi_1(x) \equiv x, \phi_2(x) \equiv F(x)$ と定義すると、線形加重和問題 (1) はカット位置 x に関する一変数最小化問題（本研究では直線問題と呼ぶ）として、次のように表現できる：

$$\min_x (\phi(x) \equiv \phi_2(x) - \alpha \phi_1(x)). \quad (2)$$

図 2 に示すように、 $\phi_1(x)$ と $\phi_2(x)$ とのトレードオフ曲線は軌跡 $(x, F(x))$ の一部から構成される。特に、都市域全体に建物があり都市境界 $x=l$ に電源があれば ($f(x) > 0, b=0$)、すべての x で $(x, F(x))$ がパレート最適となる。

直線問題 (2) の最適点をパラメータ α を用いて $x^*(\alpha)$ と表現する。目的関数 $\phi(x)$ の二次導関数は

$$\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) = f'(x). \quad (3)$$

もし電源に向かって建物密度が減少する ($f'(x) < 0$) ならば式 (3) から $\phi(x)$ は上に凸となる。そのため、 $x^*(\alpha) = 0$ もしくは $x^*(\alpha) = l+b$ のみとなる。一方で、もし電源方向で建物密度が増加する ($f'(x) > 0$) ならば、式 (3) より $\phi(x)$ は下に凸となる。最適解 $x^*(\alpha)$ は、二つの端点解 $x^*(\alpha) = 0$ もしくは $x^*(\alpha) = l+b$ 、もしくは $\frac{d}{dx} \phi(x^*) = 0$,

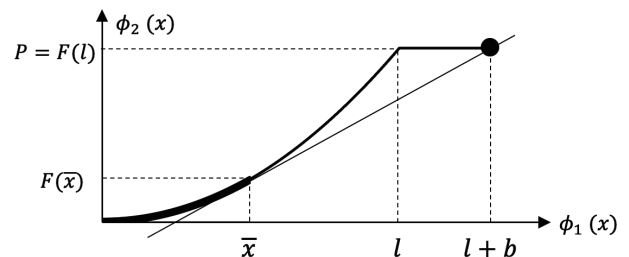
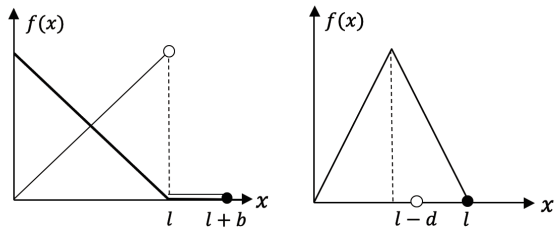


図 2: トレードオフ曲線と内点解上限の求め方



(a) 非対称三角分布 (b) 対称三角分布

図 3: 建物分布と電源位置

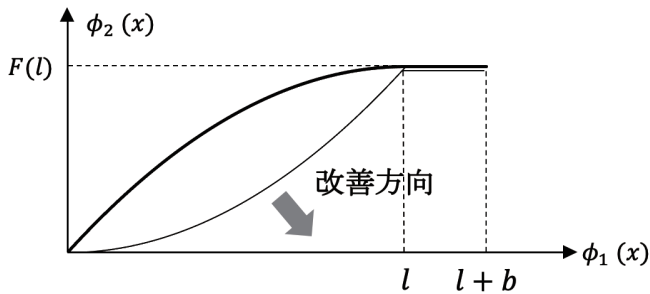


図 4: 非対称三角分布でのトレードオフ曲線

すなわち, $f(x^*) = \alpha$ を満たす内点解となる. 内点解は, パラメータ α に応じて連続的に変化する.

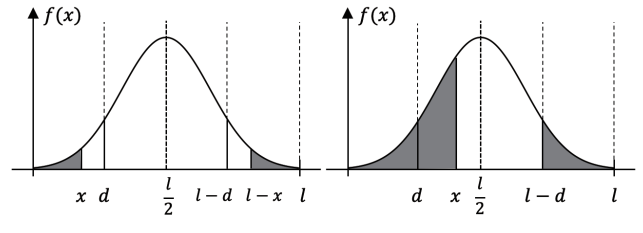
目的関数 $\phi(x)$ の等高線は平行線群であり右下への移動が改善方向である. したがって, 図 2 の太線と黒丸が直線問題 (2) の最適解となる. $\bar{x}$ をこの最適内点解に関する上限値とすると, 図 2 のように座標 $(l+b, F(l+b))$ を通る関数 $F(x)$ の接線が定まり, $\bar{x}$ は次を満たす.

$$\frac{F(l+b) - F(\bar{x})}{l+b - \bar{x}} = f(\bar{x}). \quad (4)$$

よって $\alpha > f(\bar{x})$ ならば, $x^*(\alpha) = l+b$ となる.

分析をさらに深めるために, 図 1 に示した建物分布の特別な場合として, 図 3(a) 及び (b) のような対称及び非対称三角形型の建物分布を考え, 結果を吟味する. 本節では, 最初の例として図 3(a) の二つの三角分布を取り上げる. $f(x)$ が右下がり (図 3(a) 太線) で $f(x) = l-x$, $(0 \leq x \leq l)$ とすると, $F(x) = lx - \frac{1}{2}x^2$ となる. 一方で, $f(x)$ が右上がり (図 3(a) 細線) で $f(x) = x$, $(0 \leq x \leq l)$ とすると, $F(x) = \frac{1}{2}x^2$ となる. 式 (4) から, $\frac{\frac{1}{2}l^2 - \frac{1}{2}x^2}{l+b-x} = x$ を解くことで, $\bar{x} = l+b - \sqrt{b^2 + 2lb}$ を得る. また, 図 4 に示す太線が右下がり, 細線が右上がり三角分布のトレードオフ曲線である. 細線が太線より改善方向である右下に位置しておりどのパラメータに対しても目的関数値が小さく, 右上がり建物分布の方がオフグリッドに向いている.

以上から, 次の二点を明らかにした. 第一に, 電源に近づくると建物密度が下がる都市と上がる都市とを二目的評価で比較すると, 前者が常に劣る. 我が国の多くの地域は, 郊外部に発電所などの電源があり, そこに向かうほど人口



(a) 削減本数が小 ($x \leq 2d$) (b) 削減本数が大 ($x \geq 2d$)

図 5: 左右対称な建物分布と両側カット

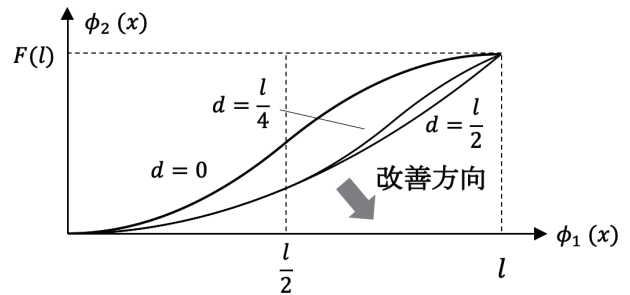


図 6: 対称三角分布のトレードオフ曲線

密度が薄くなるため前者に属すると考えられる. 現実をかなり単純化した直線モデルからの解釈ではあるが, 我が国においてオフグリッドが進まない現状を説明できた. 第二に, 前者のトレードオフ曲線は上に凸で, 後者は下に凸である. 我が国では人口減が進み, 維持管理の負担が増え, パラメータ α が少しずつ上昇すると考えられる. 目的関数 (2) を負とし費用対効果の観点から実行に意味があるカット位置の集合は, 後者では $x=0$ から α とともに伸びる連結集合で構成されるが, 前者では二つに分かれることもある. 特に, 最適解に関しては, 後者では電柱本数が連続的に減少するが, 前者では反応が鈍く「電柱削減なし」状態が続く, ある閾値を超すと突然「完全オフグリッド」へ非連続で劇的に変化する. したがって, 前者は小規模からスタートし社会受容性を確認しながら徐々に拡大していくリーンスターアップの考え方と整合しないうえ, 都市境界を内側にシフトさせるコンパクトシティとの空間的親和性も低いことが理解できる.

3.3 域内電源供給

図 1 に示す $\circ$ のように, $0 \leq d \leq \frac{l}{2}$ に対し電源が $l-d$ に位置する域内電源を想定する. 域内電源では, 電源両側からのカットを同時に考慮に入れなければならない. 明快さを追求するために, $x = \frac{l}{2}$ を中心に左右対称で単峰の建物分布 $f(x)$, $(0 \leq x \leq l)$ に限定し分析する.

二か所のカットのうち原点側のカット位置を x とする. 図 5(a) のように削減本数が小さければ, 両側から対称な位置 x と $l-x$ でのカットが最も効率的であり, 削減電柱本数は $2x$ となる. しかし, 図 5(b) のように削減本数が多くなるとカット位置は非対称となる. x と $l-d$ でのカッ

トが最も効率的となり、削減電柱本数は $d+x$ となる。以上から、削減電柱本数 $\phi_1(x)$ は次のようになる：

$$\phi_1(x) = \begin{cases} 2x, & (0 \leq x \leq d); \\ d+x, & (d \leq x \leq \frac{l}{2}). \end{cases} \quad (5)$$

また、グリッドから切り離される建物数 $\phi_2(x)$ は分布関数 $F(x)$ を用いて次のようになる：

$$\phi_2(x) = \begin{cases} 2F(x), & (0 \leq x \leq d); \\ F(d) + F(x), & (d \leq x \leq \frac{l}{2}). \end{cases} \quad (6)$$

式 (5) 及び式 (6) を用いて、直線問題 (2) を考える。式 (6) から、 $\phi_2(x)$ は距離 d の減少関数である。よって、電源が中央に位置するほど式 (2) の $\phi(x)$ が小さくなる。したがって、最適なカット位置を前提とし、さらに電源が移動できる状況を想定すると、都市域中央 $d = \frac{l}{2}$ が最適立地点であることが理解できる。

例として図 3(b) に示す対称三角分布 $f(x) = x(0 \leq x \leq \frac{l}{2}), f(x) = l-x, (\frac{l}{2} \leq x \leq l)$ を考える。 $F(x) = x^2(0 \leq x \leq \frac{l}{2}), F(x) = lx - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{4}l^2, (\frac{l}{2} \leq x \leq l)$ となる。 $d = 0, \frac{l}{4}, \frac{l}{2}$ に対応する 3 本のトレードオフ曲線を図 6 に示す。 $d = \frac{l}{4}$ に示すように $x = 2d$ までは傾きは緩いが、それ以降は対称な建物分布の特徴である S 字型に従い急増する。また、 $d = \frac{l}{2}$ の曲線が改善方向である右下に位置しており都市域中央が電源最適配置になることも理解できる。

域内電源では、建物分布が対称という前提で次の二点を示した。第一に、二方向の裾側からオフグリッドできるため、トレードオフ曲線の形状では「下に凸」が強調される。そのため、パラメータ α の重みを大きくしていくと連続的に電柱が削減されるが、ある水準を超えると完全なオフグリッドになる。第二に、電源が都市域中央に近づくにつれてトレードオフ曲線が改善方向である右下へシフトする。そのため、電源の最適配置は都市域中央となる。

4 ネットワークモデル

4.1 配電網と最小木

配電網のグラフ特性を把握したいが、電柱間の配電データは公開されていない。一方で、連結性を保持しながらリンク総和長が最小となるグラフは最小木である⁸⁾。配電や維持管理コストを考えると、配電網のグラフ構造が最小木で近似できると予想できる。

そこで、実際の電線が最小木の構造を保持しているかを、2019 年 11 月に茨城県土浦市桜町（中心市街地）、つくば市桜（住宅街）、つくば市上菅間・中菅間（農村地域）を対象に現地調査した。それぞれ、電柱 362 本（4.0km²）、151 本（1.9km²）、347 本（3.3km²）で現実の配電網を調べ、最小木と比較した。最小木で説明できた配電網の割合は、それぞれ、61.5%、70.8%、89.1% である。図 7 は、割合が最も低い土浦市桜町（中心市街地）の事例である。以降、ノードが電柱、リンクが電線となる配電網を考え、それが木構造を有するとし考察する。

4.2 最適化問題

リンクには維持管理コスト、ノードには建物数が重みとして紐付けされている。図 8 のように、配電網を電源を根とする根付き木で表現する⁸⁾。根を除く各ノードは根に向かう経路の直近リンクと一対一対応するので、この対応でノードとリンクの添え字を合わせる。一本のリンクをカットすると、そのリンクと対応ノードを先祖とする部分木が電源から切り離され、オフグリッド地域となる。ネットワーク理論⁹⁾ の概念を利用すると、削減電柱本数とオフグリッド建物数は、それぞれ、カット C で切り離されるリンク重み和 $l(C)$ とノード重み和 $w(C)$ に対応する。したがって、線形加重化問題 (1) は、カットを決定変数とする問題（本研究ではネットワーク問題と呼ぶ）として次のように表現できる：

$$\min_C (\psi(C) \equiv w(C) - \alpha l(C)). \quad (7)$$

n 個のノードの根付き木では、カット総数は 2^{n-1} となり、しらみつぶして比較する列挙法は現実的ではない。そこで、 $n-1$ 個のリンクに着目する。 C_i を、リンク i 、ノード i とその子孫の集合とする。 $\psi(C_i) < 0$ であれば、 C_i を取り除くことで目的関数を改善できる。どのカットも C_i の組み合わせであり、また木構造から C_i の削除は別の葉に影響を与えない。以上から、 $n-1$ 個の部分集合 $C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$ の評価だけで十分であり、3 ステップからなる根付き木カット算法を提案する。

(s1) すべての i に対し、 $\psi(C_i)$ を計算する。

(s2) $\psi(C_i) < 0$ であれば、 C_i を取り除く。

(s3) 残った根付き木が最適解となる。

ステップ (s1)、(s2) 及び (s3) はそれぞれオーダー $O(n)$ で実行できる。したがって、全体の計算量も $O(n)$ というオーダーとなり高速処理できる。

α が上昇すると $\psi(C_i) < 0$ は減少するので、最適な根付き木は単調に縮む。つまり、最適な根付き木は入れ子構造となる。入れ子構造は明快であり、またインフラ縮減を動的に考える上で逐次最適¹⁰⁾ にもなり合理的である。

図 9 の上段に示す、同一リンク長の二種類の木を考える。円内の数値はノード重みを表す。すべてのリンク重み

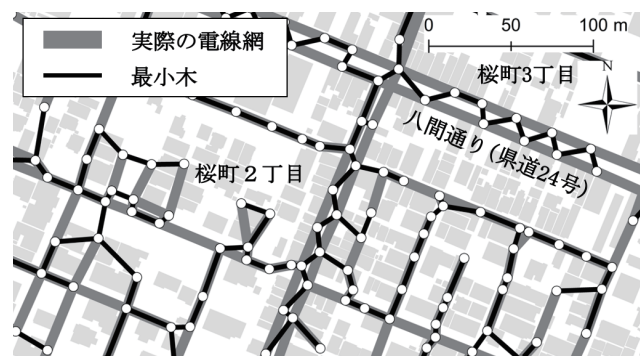


図 7: 土浦市桜町の配電網と最小木

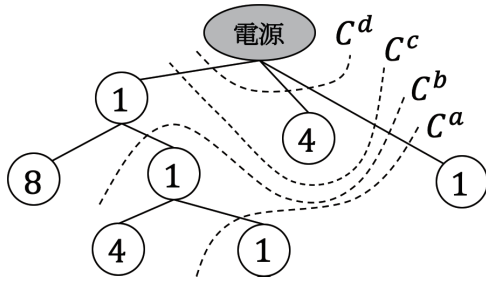


図 8: ネットワークモデル

は同一で 1 と単位化する．中段に 4 個のノードのそれぞれに対応する 4 個のカット C_a, C_b, C_c, C_d の重み和 $l(C_i)$ 及び $w(C_i)$ を示す．この値を踏まえ，相応する二つのトレードオフ曲線を下段に示す．横軸にカットリンク数を，縦軸に最小化できるオフグリッド建物数を示す．

図 9(a) の直列グラフは図 3(a) の太線で示した直線モデルと整合するため，「カットなし」，「全カット」のみが最適となるという下段の結果は，図 4 の太線の結果と矛盾しない．また，図 9(b) の並列グラフでは，「カットなし」から，パラメータ α が増えるにつれて左端から順次リンクが組み込まれ，最終的に「全カット」が最適となる．並列では端部である葉により選択肢が増えトレードオフ曲線は下に凸となり，多くのカットが最適解となる．

図 8 のグラフに根付き木カット算法を適用する．各リンクの長さはすべて 1 とし，各ノードの建物数は円内の数値とする． $\alpha < 1$ ならばカットなし， $1 < \alpha < 2$ ならばカット C_a ， $2 < \alpha < 3$ ならばカット C_b ， $3 < \alpha < 4$ ならばカット C_c ， $\alpha < 5$ ではカット C^d が最適となる．最適なオフグリッド領域に関する入れ子構造を確認できた．

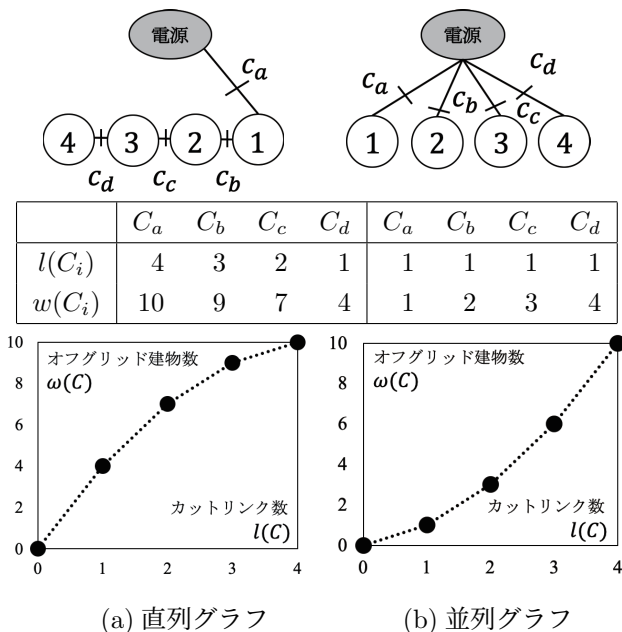


図 9: 単純な木とトレードオフ曲線

5 応用

5.1 データ

ここでは，現実の電柱及び建物データを用いた考察を行う．パレート最適などの結果に関する解釈が容易なことから狭域エリア，根付き木カット算法の実用性を確認するため大規模地域を対象に，ネットワーク問題 (7) を解き，オフグリッド効果を可視化する．対象として，階層性を意識し以下の二地域を選んだ：

- (i) 狭域エリア：つくば市上菅間・中菅間地区（約 3.3km²），
- (ii) 広域エリア：つくば市域（約 283.7km²）．

狭域エリアとして，得られた成果の横展開を意識し 2015 年国勢調査で 640 人が住む首都圏近郊の典型的な農村集落を選定した．両エリアともに，建物データを国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス (2019.12.26 整備完了分)，電柱データを東電タウンプランニング電柱位置情報 (2018.10 取得) から入手した．なお，電柱からの距離が離れすぎている建物は電柱から電力が供給されていないと判断し，電柱から 50m 離れている建物を除外した．そして，残りの建物を最寄りの電柱に紐付けした．その結果，前者の狭域エリアでは電柱が 347 本，建物が 924 棟，後者の広域エリアでは電柱が 60,623 本，建物が 143,838 棟となった．

5.2 狭域エリア

集落中央と集落端部の 2 箇所の電源位置を想定することで，電源の位置が及ぼすオフグリッドの効果や削減される電柱への影響を吟味する．まずパレート最適を求めるため，0-1 整数計画問題であるナップサック問題で定式化し解いた．電柱ごとにオフグリッドか否かを表す 0 または 1 をとる変数を与え，最小化する目的関数をオフグリッド建物数とした．制約条件として，1) 削減電柱本数に関する条件を変数と，2) 親子でのオフグリッド整合性（親がオフグリッドであれば子もオフグリッド）に関する条件を変数間の一次不等式で表現とした．したがって，制約式の数には電柱本数程度となった．電柱本数制約を 1 本から 347 本まで 1 本間隔で変化させナップサック問題の最適解を求めた．これら 347 個の最適解で建物数が同一であれば，

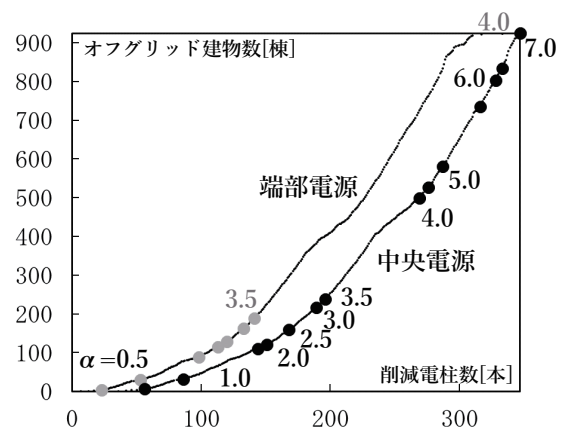


図 10: トレードオフ曲線と最適目的関数値（狭域エリア）

電柱本数の少ない解はパレート最適とはならない。中央電源および端部電源において、それぞれ 54 及び 60 個がそれぞれ該当した。これらを取り除いて得られた、二本のトレードオフ曲線を図 10 に示す。横軸はカット削減電柱本数、縦軸は電源から切り離された建物数を示す。図 10 から、トレードオフ曲線は増加関数ではあるが凹凸があり、必ずしもすべてのパレート最適がネットワーク問題 (7) の最適解にならないことが理解できる。

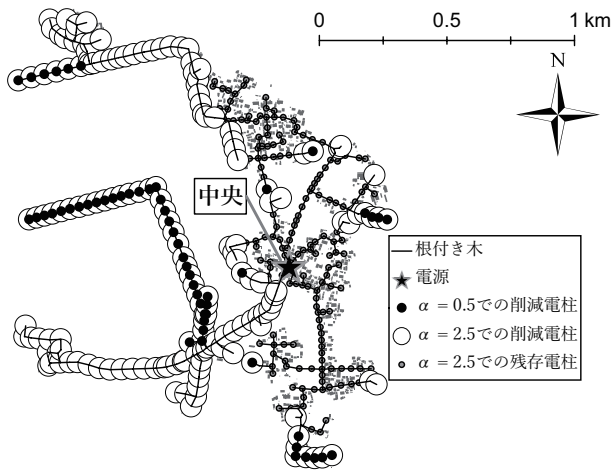


図 11: 中央電源でのオフグリッド領域 (狭域エリア)

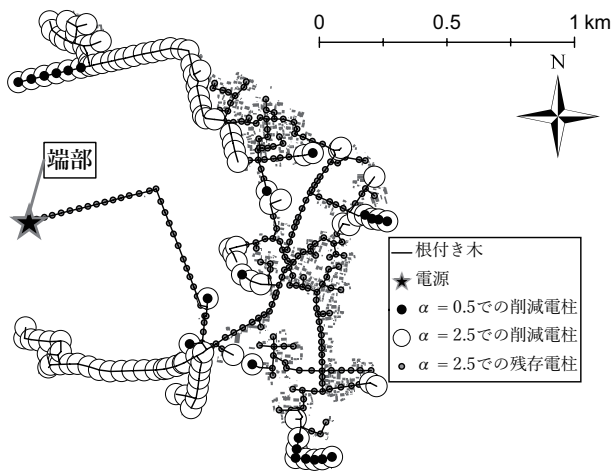


図 12: 端部電源でのオフグリッド領域 (狭域エリア)

次に、パラメータ α を 0.5 から 10.0 まで 0.5 刻みで変化したネットワーク問題 (7) の最適解を根付き木カット算法により求めた。それらでの削減電柱数とオフグリッド建物数を図中の丸表示で示す。図 10 から、電柱コストに対応するパラメータ α が増えるにつれて、削減される電柱本数およびオフグリッドとなる建物数が増加することが分かる。また、地区西部に位置する端部電源では $\alpha = 4.0$ から完全オフグリッドになるが、電源が中央に位置すると $\alpha = 6.0$ でも依然として電柱が残ることが分かる。さらに、根付き木カット算法の解がナップサック問題の最適解

となっている様子も確認できる。

最適解の様子を地理空間で観察する。中央電源にて $\alpha = 0.5$ 及び $\alpha = 2.5$ に相当するオフグリッド領域を図 11 に示す。同様に、端部電源での $\alpha = 0.5$ 及び $\alpha = 2.5$ に相当するオフグリッド領域を図 12 に示す。

トレードオフ曲線 (図 10) 及びオフグリッド領域 (図 11, 図 12) から、次の結果が得られた。第一に、トレードオフ曲線は概ね下に凸の関数である。重み α が大きくなるにつれて電柱削減本数が通増しオフグリッドが加速する。二次元的広がりを有するため図 9(b) の並列グラフの特徴を有していると解釈できる。第二に、中央電源のトレードオフ曲線が端部電源より右側へにシフトしており、中央電源でのオフグリッドの効果が大きい。そして、電源が集落端部にあると、パラメータ α がさほど小さくなくても集落全体オフグリッドが最適となる。これらは 3.3 節の図 6 などで示した結果と整合する。第三に、オフグリッド領域を観察すると、 $\alpha = 0.5$ の地域が $\alpha = 2.5$ の領域に包含される入れ子構造があり、4 章の図 8 などで示した理論的知見と一致する。なお、 α が大きいと両者の電源配置の大きな食い違いは、両電源を結ぶ経路 (電柱 48 本) だけになる。どちらの電源位置でも非効率な葉部分は除去されるため、その経路以外の地域での食い違いは少ない。

5.3 広域エリア

電源の位置を市域中央 (筑波大学付近) と市域端部 (筑波山ロープウェイ乗り場付近) とし、ネットワーク問題 (7) のみを解き、電源位置の影響を抽出する。 $\alpha = 0.1$ から $\alpha = 5.0$ まで 0.1 刻みで 50 個のネットワーク問題 (7) を根付き木カット算法で解いた。中央電源と端部電源の最適目的関数値を、横軸に削減する電柱本数、縦軸にオフグリッドとなる建物数とで表す図 13 及び図 14 に示す。また、この時の根付き木と中央電源及び端部電源の位置を図 15 に示した。

両図から、次の結果が読み取れる。第一に、下に凸となる両図のトレードオフ曲線は、図 10 に示す上菅間・中菅間地区のトレードオフ曲線と形状が似ている。第二に、図 13 及び図 14 から、 $\alpha = 4.2$ まではほぼ同じ値を示しているなど、電源位置による影響の差異は小さい。広域エリアでは中央電源と端部電源を結ぶ領域の全体に占める面的比率は狭域エリアと比較すると小さく、このことが理由として考えられる。また、中央電源では 4.7 と 4.8 との間で、端部電源では 4.2 と 4.3 の間で市域全体でオフグリッドとなり、端部電源の方が早期に完全オフグリッドになるという 3.3 節の理論結果や狭域エリアでの結果と整合するが、そのタイミングは狭域エリアよりかなり遅い。したがって、広域エリアでは、電源の位置に関わらず、小規模から徐々に拡大していくスキームが適用しやすい。

なお、根付き木カット算法による最適解導出の計算時間は、 $\alpha = 0.1$ から 5.0 までの 50 回で計測すると、総時間 477.0 秒、平均 9.54 秒、最大 14.1 秒 ($\alpha = 0.2$)、最小 5.1 秒 ($\alpha = 4.9$) であり、 α が大きいほど (削減本数) が大きい

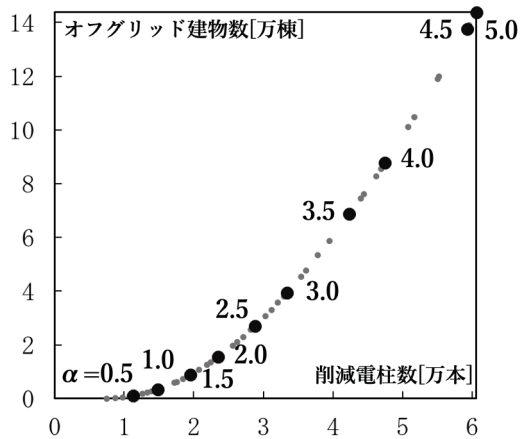


図 13: 中央電源での最適目的関数値 (広域エリア)

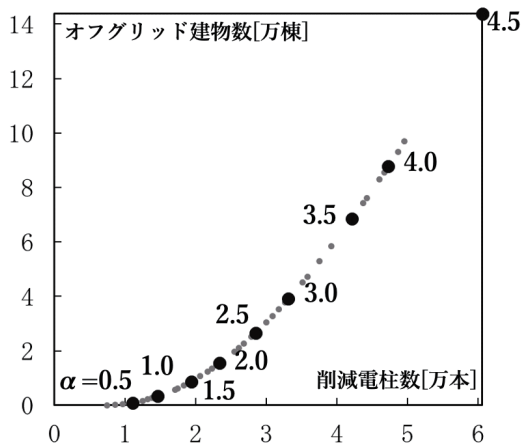


図 14: 端部電源での最適目的関数値 (広域エリア)

ほど) 計算時間が短くなる傾向となった。また、一度取り除いたオフグリッド領域は復活しないという入れ子構造に着目し、 $\alpha = 0.1$ から 5.0 までの 50 個の問題を一括で逐次に解くと、総時間を 335.2 秒まで短縮できた。

6 おわりに

本研究では、維持管理コストと独立電源コストとの間に生じるトレードオフ関係に着目し、オフグリッドの効果をそれらコストの二目的最適化問題の最適解から吟味し、少なくとも次の知見を得た。第一に、直線モデルを通して、郊外部に電源があり、そこに向かうほど人口密度が薄くなる都市構造ではオフグリッドが進みにくい。第二に、ネットワークモデルを通して、最適オフグリッド領域が入れ子構造を有する。第三に、つくば市を対象とした数値実験から、平面的に広がる広域エリアでは小規模から徐々に拡大していくスキームが適用しやすい。

人口減少や財政逼迫を考えると、膨大なコストをかけて現状の配電網を維持していく必要があるだろうか。日本国内では電力システムが高度に発達しているため、オフグリッドは馴染みの薄い言葉である。オフグリッドが社会に受け入れられるためにも本研究を実施する意義は大きい。

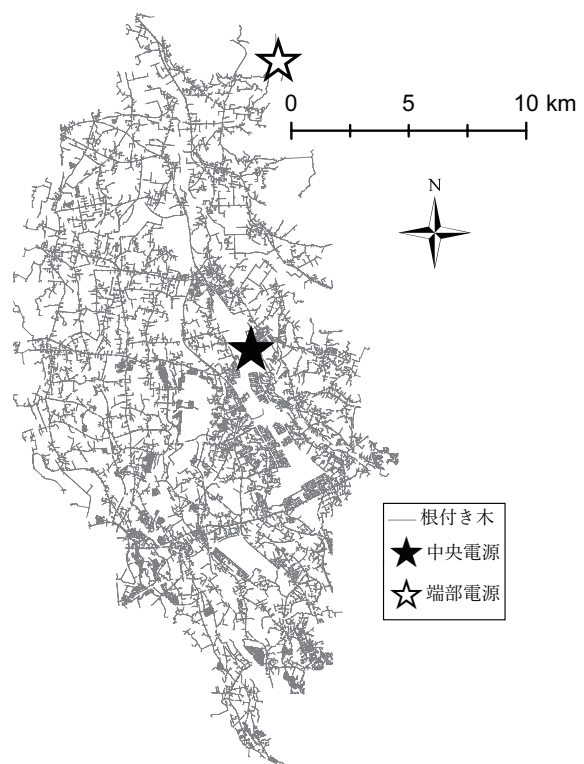


図 15: 根付き木と中央電源・端部電源の位置 (広域エリア)

謝辞

本研究はトヨタ自動車と筑波大学社会工学科との共同研究「オープンイノベーションによる地域社会システムと次世代自動車交通基盤の研究」の一環であり、泉井良夫先生(金沢工業大学)、繁野麻衣子先生、山本幸子先生(筑波大学)、小林隆史先生(立正大学)から貴重なコメントを頂戴した。

参考文献

- 1) サトウチカ (2019): ひらけ! オフグリッド-電線切ったら楽しい暮らしが待っていた。フォレスト出版。
- 2) 泉井良夫 (2019): 電源の地産地消を目指せ, 日本経済新聞 2019 年 10 月 1 日。
- 3) 高原勇, 大澤義明 (2016): 自動車に残るエネルギー量の推定と被災地域への応用, 日本計画行政学会, 39(4), pp.53-60.
- 4) 渡司悠人, 長谷川大輔, 鈴木勉, 大澤義明 (印刷中): 電柱本数・移動距離のトレードオフと無電柱化の効果測定, GIS-理論と応用-。
- 5) B.Korte and J.Vygen(2010): *Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms*. Springer.
- 6) 盆子原歩, 小林隆史, 大澤義明 (2014): 給油所過疎地域に関する数理的考察, 都市計画論文集, 49, pp.603-608.
- 7) 浅見泰司 (2017): 人口減少化のインフラ管理とコンパクトシティ, 都市住宅学, 96, pp.49-54.
- 8) 杉原厚吉 (2001): データ構造とアルゴリズム。共立出版。
- 9) 繁野麻衣子 (2010): ネットワーク最適化とアルゴリズム。朝倉書店。
- 10) T.Koshizuka(1990): Efficiencies of a Sequential Algorithm and an Intuitive Selection Method in a Planar Location Problems, *Operational Research* '90, pp.445-456.