

# アクセス系集線の配備コスト最小化手法の構築

中山 悠\*

## Construction of Cost-Minimizing Aggregation for Access Network

Yu Nakayama\*

**Abstract:** Deployment cost of the aggregation for access network depends on spatial conditions such as the number of subscribers and the office distribution. The purpose of this study is to construct the method of deriving the cost-minimizing aggregation for access network. The deployment cost was formulated as location-allocation model, using variables such as the scale of equipments and the network topology. The program of deriving the cost-minimizing aggregation was implemented as the plugin of QuantumGIS. The constructed method was verified with test data, and the result indicated that cascaded aggregation can reduce the cost in the areas where the number of subscribers is small.

**Keywords:** アクセスネットワーク (access network), アクセス系集線 (aggregation), 立地配分モデル (location-allocation model), QuantumGIS

### 1 背景と目的

FTTH(Fiber To The Home) アクセスの回線数は増加傾向にあり、現在ブロードバンドサービス全体の 5 割を超えており（総務省, 2009）。FTTH アクセスは、今後、人口が少なく需要の散在した地域（全国均衡のあるブロードバンド基盤の整備に関する研究会, 2005）（以下ルーラルエリア）への展開が期待される。

マスユーザ向け FTTH アクセスネットワーク（以下 NW）において、OLT（Optical Line Terminal: 光端局装置）にて集線されたユーザを、集線装置（以下 SW）を用いてエッジルータ（以下 ER）に接続する区間をアクセス系集線と呼ぶ。ER はさらに上位のコアルータ（以下 CR）に接続され、NGN やインターネットに接続する。

現在のアクセス系集線の構成（図 1(a)、以下従来構成）は、大規模な SW を直接 ER に接続する構成であり、ユーザ密度の高い大都市に最適化されている。そのため、従来構成をルーラルエリアに適用した場合、収容率低下により相対的に高コストとなる課題があった。

そこで筆者らは、小規模な SW を多段接続した上で ER に接続する構成（図 1(b)、以下提案構成）を提案し

\*中山: 神奈川県横須賀市光の丘 1-1, 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所  
Tel: 046-859-2106

E-mail: nakayama.yu@lab.ntt.co.jp

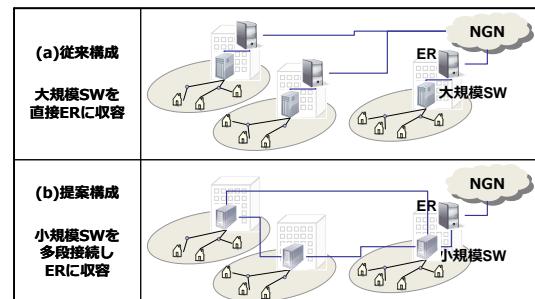


図 1 従来構成と提案構成

た（中山ほか, 2010）。SW 同士を多段接続し十分に集線を行った上で ER に接続することで、集線率の低下による ER 収容率低下や、ユーザ管理等の機能を有し分散配置が好ましくない ER の数の増大を抑制できる。

ここで、最適な SW 規模や上位 NW への接続形態は回線収容局（以下局）の空間的な分布や収容数等に依存する。よって、アクセス系集線コストを低減するためには、提案構成の適用条件を含め、最適な構成の導出方法を明確化する必要がある。

施設等の最適配置を求める立地配分モデルに関しては、電話局の最適配置問題（Hakimi, 1964）以来、数多くの研究がなされている（石崎, 2003）、（ReVelle and Eiselt, 2005）、（Current *et al.*, 1990）。都市インフラに関しては、交通拠点の立地（鈴木, 2003）や交通ネットワークを考慮した職住配置（円山, 原田, 2003）等が検討されている。

一方、アクセス NW の最適化に関しては、所外配線形

態の検討 (Petersen and Kos, 2008), (Okumura, 2007), (勝山ほか, 1993)、所内システムの検討 (金井ほか, 2005)、無線適用性の評価 (阿部ほか, 2001), (小川, 瀬川, 1995) 等がある。しかしながら、これらはユーザを局に収容する NW の構築方法が対象であり、アクセス系集線の SW 規模や上位 NW への接続形態に関して、局の位置等の地理空間的条件を含めて検討した事例はない。

そこで本研究では、地理空間的条件をもとに、アクセス系集線の配備コストを最小化する構成を導出する手法を構築することを目的とする。

## 2 検討条件

まず、本研究の検討条件を示す。表 1 に示す変数を使用し、 $i, j$  は局を指す識別子とする。任意の局に収容されるユーザが存在する範囲をエリアと呼び、エリア内のユーザ分布や SW 配下の NW 構成は考慮せず、サービス加入率  $\rho$  は常に一定とする。ユーザの回線は最近隣の局において SW に収容されるとする。SW は挿抜可能なモジュール上にユーザ収容端子を備える構成とし、ユーザ数に合わせ最大  $m^{md}$  個のモジュールを配備可能なものとした。モジュールあたりのユーザ収容率  $p^{md}$  は、配下 NW の運用方針などにより定まる値である。

ER の数は各エリアに最大で 1 とし、SW は距離  $D^{max}$  以内の任意の ER のインターフェース (以下 IF) と接続さ  
表 1 変数一覧

項目	変数名
エリア人口	$N_i^{area}$
サービス加入率	$\rho$
エリア SW 数	$\mu_i$
SW の最大収容数	$n^{sw}$
SW の最大モジュール数	$m^{md}$
モジュールあたりのユーザ収容率	$p^{md}$
ER の SW との最大 IF 数	$m^{if}$
局間距離	$d_{ij}$
SW-SW, SW-ER 間の最大伝送距離	$D^{max}$
既存局間リンク容量	$l_{ij}$
必要局間リンク容量	$\xi_{ij}$
ER-CR 間の必要リンク容量	$L^{core}$
SW の最小構成単価	$v_b^{sw}$
SW のモジュール単価	$v_m^{sw}$
ER の最小構成単価	$v_b^{er}$
ER の SW との IF 単価	$v_i^{er}$
局間リンク新設単価	$v_{nw}^{link}$
局間リンク増設単価	$v_{ex}^{link}$

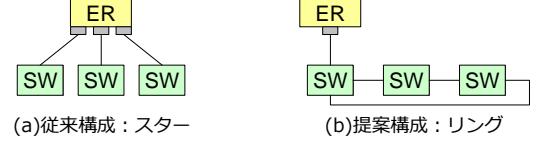


図 2 トポロジ

れる。その接続トポロジは、従来構成ではスター型、提案構成ではリング型とし (図 2)、各 ER においてスター型とリング型の共存を許容する。局をまたいで装置を接続する際、局間リンク容量  $l_{ij}$  が必要リンク容量に満たない場合にはリンク敷設が必要である。この際、新設と既存リンク増設とでは、必要なコストが大きく異なる。

複数エリアの集合をブロックと称し、任意のブロックには 1 つ以上のコアルータ (以下 CR) が存在し、ER は任意の CR と接続される。CR の位置は所与とする。

本研究では、任意のブロックにおいて、局の位置とユーザ数及び CR の位置を与えられた際に、SW の設置・接続コスト  $C^{sw}$ 、ER の設置・接続コスト  $C^{er}$ 、ER の CR への接続コスト  $C^{core}$  の合計コスト  $C^{all}$  を最小化する構成を最適な構成とする。なお、保守運用等のコストは考えず、設備自体の配備コストに限定して扱う。

## 3 コスト算出モデル

$C^{all}$  は、式 1 として表される。以下では、式 1 の各項に関し、その導出方法を述べる。

$$C^{all} = C^{sw} + C^{er} + C^{core} \quad (1)$$

### 3.1 SW の設置・接続コスト $C^{sw}$

局  $j$  における SW 設置コスト  $c_j^{sw}$  は、適用 SW 規模  $n^{sw}$  とユーザ数  $N_j^{area} \rho$  により定まる。天井関数を用いて、必要な SW モジュール数は  $\lceil \frac{m^{md} N_j^{area} \rho}{n^{sw} p^{md}} \rceil$ 、SW 数  $\mu_j$  は  $\lceil \frac{N_j^{area} \rho}{n^{sw} p^{md}} \rceil$  と表せる。 $v_b^{sw}$ 、 $v_m^{sw}$  は装置規模に比例して増大すると考えられ、定数  $z_b, z_m$  を用いて、 $v_b^{sw} = v_b'^{sw} n^{sw} + z_b$ ,  $v_m^{sw} = v_m'^{sw} \frac{n^{sw}}{m^{md}} + z_m$  と表せる。 $c_j^{sw}$  は式 2 で求められる。 $n^{sw}$  に関し、適用 SW が大規模の場合  $n_{large}^{sw}$  を、小規模の場合  $n_{small}^{sw}$  を代入する。

$$c_j^{sw}(n^{sw}) = (v_b'^{sw} n^{sw} + z_b) \lceil \frac{N_j^{area} \rho}{n^{sw} p^{md}} \rceil + (v_m'^{sw} \frac{n^{sw}}{m^{md}} + z_m) \lceil \frac{m^{md} N_j^{area} \rho}{n^{sw} p^{md}} \rceil \quad (2)$$

$i, j$  間を接続するリンク設置コスト  $c_{ij}^{link}$  は、式 3 となる。 $M$  は任意の大きな値であり、 $\xi_{ij} = \frac{L^{core}}{m^{if}}$  である。

$$c_{ij}^{link} = \begin{cases} d_{ij}v_{ex}^{link}(\xi_{ij} - l_{ij}) & (\xi_{ij} > l_{ij} \wedge l_{ij} > 0 \wedge d_{ij} < D^{max}) \\ d_{ij}v_{nw}^{link}\xi_{ij} & (\xi_{ij} > l_{ij} \wedge l_{ij} = 0 \wedge d_{ij} < D^{max}) \\ 0 & (\xi_{ij} \leq l_{ij} \wedge d_{ij} < D^{max}) \\ M & (d_{ij} \geq D^{max}) \end{cases} \quad (3)$$

SW の設置・接続に関する立地配分モデルは以下である。 $j$  における適用 SW が大規模の場合  $Y_j^{SW} = 0$ 、小規模の場合  $Y_j^{SW} = 1$  とする。 $Y_j^{SW} = 1$  の局に関し、 $d_{i,j} \leq D^{max}$  である局同士を 3 以上接続しリンクを構成する。相互的なリンク接続構成ゆえ、 $i, j$  間リンクの存在を  $X_{ij}^{SW} = 1$ 、非存在を  $X_{ij}^{SW} = 0$  とすると、 $X^{SW}$  は  $i$  に関し  $i \neq j$  である 2 つの局に対し  $X_{ij}^{SW} = 1$ 、それ以外に対し  $X_{ij}^{SW} = 0$  である対称行列となる。任意のリンクあたりの合計収容数の最大値は  $n_{large}^{SW}$  と等しい。一方、 $Y_j^{SW} = 0$  の局では、任意の  $i$  に関し  $X_{ij}^{SW} = 0$  である。

$X^{SW}, Y^{SW}$  に関する制約条件は以下である。 $X^{SW}$  は対称行列ゆえ、Jacobi 法により、 $X^{SW}$  を対角化する直行行列  $U^{SW}$  が求められる。 $U^{SW}$  は Givens 回転を表す直行行列の積であり、 $Y_j^{SW} = 0$  である任意の  $j$  に関し、 $i = j$  のとき  $U_{ij}^{SW} = 1$ 、 $i \neq j$  のとき  $U_{ij}^{SW} = 0$  となる。また、 $Y_j^{SW} = 1$  である任意の  $j$  に関し  $U_{ij}^{SW} \neq 0$  となる  $i$  は  $j$  と同じリンクを構成し、 $U^{SW}$  の成分は  $-1 < U_{ij}^{SW} < 1$  を満たす。 $V_{ij}^{SW} = \lceil |U_{ij}^{SW}| \rceil$  である行列を  $V^{SW}$  とおく。

以上から、任意のブロックにおける SW 設置コスト  $C^{SW}$  は式 4、その制約条件は式 5～式 10 と表される。

$$C^{SW} = \sum_j (c_j^{sw}(n_{large}^{SW}) + Y_j^{SW}(c_j^{sw}(n_{small}^{SW}) - c_j^{sw}(n_{large}^{SW}))) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j c_{ij}^{link} X_{ij}^{SW} \quad (4)$$

$$\sum_j X_{ij}^{SW} = 2Y_i^{SW} \quad \forall i \quad (5)$$

$$X_{ij}^{SW} = X_{ji}^{SW} \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_j N_j^{area} \rho V_{ij}^{SW} \leq n_{large}^{SW} \quad \forall i \quad (7)$$

$$Y_j^{SW} - X_{ij}^{SW} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$X_{ij}^{SW} = \begin{cases} 0, 1 & (i \neq j) \\ 0 & (i = j) \end{cases} \quad (9)$$

$$Y_j^{SW} = 0, 1 \quad \forall j \quad (10)$$

### 3.2 ER の設置・接続コスト $C^{ER}$

$C^{ER}$  は、ER 数と SW との IF 数、局  $i, j$  間のリンク設置コストにより定まる。 $j$  における ER の有無を  $Y_j^{ER}$ 、 $j$  の ER への  $i$  の SW の収容の有無を  $X_{ij}^{ER}$  で表し、各々、有の場合 1、無の場合 0 とする。リンク設置コストは式

3 の  $\xi_{ij}$  に  $\frac{L^{core}}{m^{if}}(1 + (1 - Y_i^{SW})(\mu_i - 1))$  を代入して求める。

$X^{ER}, Y^{ER}$  に関する制約条件は以下である。任意のリンクを構成する局の組を  $j = a_1, a_2, \dots, e, \dots$  とし、 $e$  のみから  $Y_b^{ER} = 1$  である  $b$  に対するリンクが存在するとおく。 $X_{eb}^{ER} = 1$  であり、 $V^{SW} \cdot X^{ER}$  の  $a$  行においては、 $V_{ae}^{SW} X_{eb}^{ER}$  を含む成分のみが 1、他の成分は 0 となる。 $Y_b^{ER} = 0$  の場合も、局の組が  $e$  のみとおけば同様である。

以上から、任意のブロックにおける ER の設置コスト  $C^{ER}$  は式 11、その制約条件は式 12～式 16 と表される。

$$C^{ER} = v_b^{er} \sum_j Y_j^{ER} + v_i^{er} \sum_i \sum_j X_{ij}^{ER}(1 + (1 - Y_i^{SW})(\mu_i - 1)) + \sum_i \sum_j c_{ij}^{link} X_{ij}^{ER} \quad (11)$$

$$\sum_j V^{SW} \cdot X^{ER} = 1 \quad \forall i \quad (12)$$

$$Y_j^{ER} - X_{ij}^{ER} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$\sum_i X_{ij}^{ER}(1 + (1 - Y_i^{SW})(\mu_i - 1)) \leq m^{if} \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$X_{ij}^{ER} = 0, 1 \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$Y_j^{ER} = 0, 1 \quad \forall j \quad (16)$$

### 3.3 ER の CR への接続コスト $C^{CORE}$

CR の有無は所与のパラメタであり、局  $j$  における CR の有無を  $Y_j^{CR}$  で表す。 $i$  の ER が  $j$  の CR に収容される場合を  $X_{ij}^{CR} = 1$ 、そうでない場合を  $X_{ij}^{CR} = 0$  と表す。 $i, j$  間を接続するリンク設置コスト  $c^{core}$  は式 17 である。

$$c^{core} = \begin{cases} d_{ij}v_{ex}^{link}(L^{core} - l_{ij}) & (L^{core} > l_{ij} \wedge l_{ij} > 0) \\ d_{ij}v_{nw}^{link}L^{core} & (L^{core} > l_{ij} \wedge l_{ij} = 0) \\ 0 & (L^{core} \leq l_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

任意のブロックにおける ER の CR への接続コスト  $C^{CORE}$  は式 18、制約条件は式 19～式 22 と表される。

$$C^{CORE} = \sum_i \sum_j c^{core} X_{ij}^{CR} \quad (18)$$

$$\sum_j X_{ij}^{CR} = Y_i^{ER} \quad \forall i \quad (19)$$

$$Y_j^{CR} - X_{ij}^{CR} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (20)$$

$$X_{ij}^{CR} = 0, 1 \quad \forall i, j \quad (21)$$

$$Y_j^{CR} = 0, 1 \quad \forall j \quad (22)$$

## 4 最適な構成の算出

$C^{ALL}$  を最小化する構成を算出する方法を以下に述べる。まず  $C^{SW}$  に関し、式 2 の最大値を最小化することを考慮し、 $[x] < x + 1$  を用いて変形し、 $N_j^{area} \rho$  を一定とすると、 $c_j^{sw}$  を最小化する  $n_{large}^{SW}$  が定まる。最適な SW

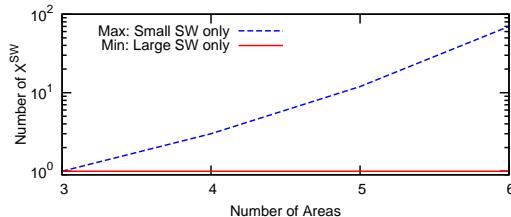


図3 制約条件を満たす SW 間接続の組み合わせ数

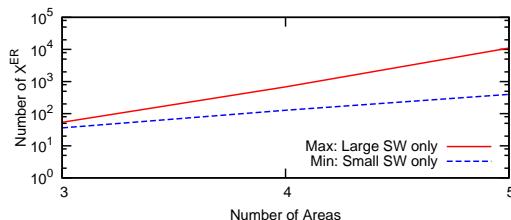


図4 制約条件を満たす ER への SW 収容の組み合わせ数

規模として  $n_{large}^{SW}$ ,  $n_{small}^{SW}$  を与えるユーザ数を各々  $N_{large}^{area}\rho$ ,  $N_{small}^{area}\rho$  とする。 $n_{large}^{SW}$ ,  $n_{small}^{SW}$  を式2に代入し、 $N_j^{area}\rho$  の関数とみなすと、 $\sqrt{N_{large}^{area}N_{small}^{area}\rho}$  を閾値とし、ユーザ数が多い場合  $n_{large}^{SW}$  が、少ない場合  $n_{small}^{SW}$  が優位となる。

また、 $C^{ER}$ ,  $C^{CORE}$  に関しては、一方を最小化すると他方が増大する局所最適に陥りやすいため、合計値を最小化するのが良い。例えば、 $C^{CR}$  を最小化するには ER を全て CR と同じ局に設置すれば良いが、その場合 SW-ER 間距離が増大し、 $C^{ER}$  が増大する。

よって、各局のユーザ数に応じ適用 SW を定めた後、 $C^{SW}$  を最小化する接続、 $C^{ER} + C^{CORE}$  を最小化する配置を順に求めるボトムアップ手法が効率的と考えられる。

上記手法を適用するにあたり、候補となる構成を全て手作業で探索することは現実的ではない。なぜならば、図3に示す通り、制約条件を満たす  $X^{SW}$  の数は、対象プロック内の小規模 SW 数が増加すると急激に増加するためである。同様に、図4の通り、制約条件を満たす  $X^{ER}$  の数は、対象エリア数の増大に伴って増加する。

そこで、上記手法により最適な構成を算出するプログラムを、QGIS1.5.0 のプラグインとして実装した。これを用いることで、対象エリア数に関わらず、最適な構成を容易に算出することが可能となった。また、QGIS はオープンソースソフトウェア (FOSS4G) ゆえに、本手法の拡張および再配布が容易であるという利点がある。

## 5 まとめ

本研究では、地理的条件に応じアクセス系集線の配備コストを最小化する構成の導出方法に関して、立地配分モデルを用いて定式化を行い、これを求めるプログラム

を Quantum GIS のプラグインとして実装した。結果として、対象エリア数に関わらず、最適な構成を容易に算出可能となった。今後の課題として、実際の NW に近い条件での本手法の有効性の実証、従来構成および提案構成それぞれの適用条件の明確化等が挙げられる。

## 6 引用文献

- Current J. H. Min and D. Schilling 1990. Multiobjective analysis of facility location decisions. European Journal of Operational Research 49:295–307.
- Hakimi S. L. 1964. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. Operations Research 12:450–459.
- Okumura Y. 2007. Cost Analysis of Optical Access Network Migration Scenarios to Broadcast Service. IEICE Transactions 90-B:1071–1078.
- Peternel B. and A. Kos 2008. Broadband Access Network Planning Optimization Considering Real Copper Cable Lengths. IEICE Transactions 91-B:2525–2532.
- ReVelle C. S. and H. A. Eiselt 2005. Location analysis: A synthesis and survey. European Journal of Operational Research 165:1–19.
- 阿部武 佐々木淳 三石大 船生豊 2001. 中山間地域におけるケーブルと無線を併用したハイブリッドネットワークの経済性に関する検討. 信学技報 101:75–80.
- 円山琢也 原田昇 2003. ネットワーク上の混雑を考慮した最適職住配置手法の構築とその実証研究. 都市計画論文集 38:517–522.
- 金井俊介 井上晃 宇野浩司 篠原弘道 2005. 光アクセスネットワークにおける異種ドメイン間の選定プロセス最適化技術. 電子情報通信学会論文誌 B 88:1178–1190.
- 勝山豊 稲川勝雄 山本良一 1993. 加入者線路網の評価設計ツールとシングルスター/ダブルスター網の経済比較. 信学報 93:9–16.
- 小川圭祐 瀬川純 1995. 有線、無線を併用した電気通信網のアクセス系における経済性評価および構成法. 電子情報通信学会論文誌 B 78:444–455.
- 石崎研二 2003. 立地配分モデル 地理空間分析 朝倉書店 61–83.
- 全国均衡のあるブロードバンド基盤の整備に関する研究会 2005. 「次世代ブロードバンド構想 2010 ディバイド・ゼロ・フロントランナー日本への道標」最終報告.
- 総務省 2009. ブロードバンドサービス等の契約数の推移 (平成21年12月末).
- 中山悠 太田憲行 大高明浩 2010. アクセス系集線における多段接続方式の研究. 電子情報通信学会総合大会講演論文集 B-37:188.
- 鈴木勉 2003. 都市内流動を最小化するフロー需要施設配置モデルを用いた拠点立地に関する考察. 都市計画論文集 38:391–396.