

遺伝的アルゴリズムを用いた 光アクセスネットワークの設計法

武 田 和 時†

光分岐素子を用いることにより1本の光ファイバを複数の加入者が共有するように構成される光アクセスネットワークが次世代の光通信の基盤技術として検討されている。このネットワークの設計では、光分岐素子の設置点（光ファイバ分岐点）と光ファイバケーブルの心線数が通減する点（通減点）の配置（数と位置）を、ネットワークのコストが最小になるように決める必要がある。本論文では、この設計に遺伝的アルゴリズム（GA）を用いる方法を提案する。まず、光アクセスネットワークのコストを光ファイバ心線、光ファイバ心線の接続、光分岐素子のコストの合計として算出するためのモデルを明らかにする。次にGAの構成方法として、ネットワーク形状を反映したツリー構造の染色体表現を用い、光ファイバ分岐点と通減点の設置パターンを交叉および突然変異（光ファイバ分岐点と通減点の発生、消滅、交換）させることによりコスト最小のネットワーク構成を求める方法を明らかにする。また計算機実験により実規模のネットワークの最適設計例を示すと同時に、計算時間も短く実用的に問題がないことを示す。最後に、GAのパラメータの設定方法についての検討結果を述べる。ここでは、8種類のネットワークと約700種類のGAのパラメータの組合せについて検討し、すべてのネットワークモデルに共通する最適なGAパラメータの組合せのあることなどを明らかにした。

Optical Fiber Access Network Design Using a Genetic Algorithm

KAZUTOKI TAKEDA†

The optical fiber access networks employing optical splitters in order to share one optical fiber with several subscribers, are being developed as the infrastructure for the future telecommunication system. The number of points and positions at which these splitters are installed and the fiber number in the optical fiber cables are reduced are important in terms of minimizing the total cost of the design. This paper proposes a genetic algorithm (GA) as an effective network design method. The total cost of the network, which comprises fiber cables, splitters and fiber splices, is calculated based on subscriber distribution in the network. The GA is composed of a chromosome representation with a tree structure, one-point crossover operation for the splitter and reduction point location patterns, and 3 kinds of mutations for splitter and reduction points. The experimental network designs provided by the GA are considered to be optimum and the calculation time is practical. Experiments for 8 different network models with about 700 different GA parameter value combinations show that a combination of GA parameter values shortens the convergence time to the optimal solution for all the network models.

1. はじめに

光分岐素子を用いることにより1本の光ファイバを複数の加入者が共有するように構成される光アクセスネットワークが次世代の光通信の基盤技術として検討されている¹⁾。このネットワークでは光ファイバ分岐点と通減点²⁾の配置（数と位置）を、ネットワークの構成コストが最小になるように設計する必要がある。こ

こで、光ファイバ分岐点は光分岐素子を設置するケーブルの接続点である。また通減点はケーブルの心線数を通信センタ側から徐々に減少させていくためのケーブルの接続点（直線接続、分岐接続）であり、通信センタ側の余分な心線はここで終端される。しかし従来、光分岐素子を用いたネットワークの光分岐素子の設置点と通減点の配置方法についての報告は見当たらない。また、現在主に用いられているメタリックケーブルを用いたネットワークの設計においても通減点の配置に関する設計は経験的に行われている³⁾。

ネットワークに加入者を接続する点は引落し点と呼

† NTT アクセス網研究所

NTT Access Network Systems Laboratories

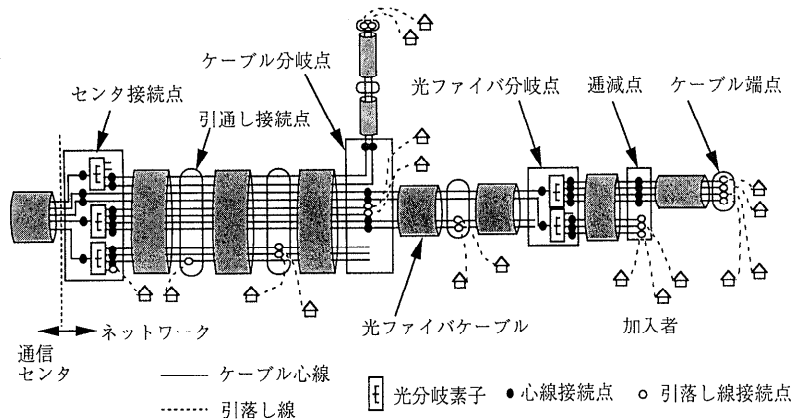


図1 光アクセスネットワークのモデル
Fig. 1 Optical fiber access network model.

ばれる。ここでは、ネットワーク上の引落し点の位置を既知の設計要因とし、光ファイバ分岐点と通減点がこれらの引落し点に設置されると仮定する。この場合、ネットワークコストを最小とする光ファイバ分岐点と通減点の配置を求める問題は組合せ最適化問題になる。このような組合せ最適化問題に対して、遺伝的アルゴリズム (GA) が有効であることが知られている^{4),5)}。そこで本論文では GA を光アクセスネットワークの設計に適用する方法を検討する。なお従来、ネットワークの設計問題に対して GA の適用が検討されている^{6),7)}。しかし、それらは通信ケーブルのネットワークの構成を前提とし、その上に交換装置や多重化装置を最適配置することを検討するものであり、通信ケーブルのネットワークの構成の最適化についての報告は見当たらない。

本論文ではまず、光アクセスネットワークのコストを光ファイバ心線、光ファイバ心線の接続点、光分岐素子のコストの合計として算出するためのモデルを明らかにする。次にネットワーク形状を反映したツリー構造の染色体表現を用いることによる、光ファイバ分岐点と通減点の設置パタンの交叉と突然変異 (光ファイバ分岐点と通減点の発生、消滅、交換) の方法を述べる。次に計算機実験により実際の規模のネットワークの最適設計例を示す。最後に GA の収束を高速化するための検討の結果を述べる。

2. ネットワークのコストモデル

光分岐素子を用いたネットワーク構成については、ネットワークコストが算出できる程度まで述べられた文献が見当たらないため、2.1 節において簡単に述べる。2.2 節ではネットワークコストの算出方法を述

べる。

2.1 ネットワークの構成

ネットワークの構成の概要を図1に示す。

光ファイバケーブルは、光ファイバ心線の束に保護用のプラスチックを被覆したもの (図1の円筒部) であり、通信センタからツリー状に布設されている。

ケーブルの接続は、布設ルートの分岐点、光分岐素子の設置点、ケーブル心線数の通減点において行われ、ここでは、これらをそれぞれケーブル分岐点、光ファイバ分岐点、通減点と呼ぶ。光分岐素子は通信センタからの光信号をネットワークの下部側に分岐するとともに、加入者からの光信号を集束して通信センタに伝送するための光回路部品である (図1の□)。ここで下部側は通信センタのない側であり、通信センタのある側は上部側と呼ぶ。

図2、図3はそれぞれ光ファイバ分岐点と通減点におけるケーブル心線の接続状態を示す。便宜上、通信センタ内のケーブルとネットワークのケーブルを接続する通信センタに最寄りのケーブル接続点をセンタ接続点と呼ぶ。光ファイバ分岐点と通減点は設計の対象となる接続点であるため、これらを設計接続点と呼ぶ。

ケーブル分岐点では上部側の1本のケーブルに下部側の複数のケーブルが接続される。そこで、ある下部側のケーブルについては光分岐素子を介する接続とし、別のケーブルについては心線数を通減させる接続とすることが可能である。しかしここでは簡単化のため、どちらか一方の接続方法をとるものとする。すなわちケーブル分岐点は光ファイバ分岐点か通減点かどちらかとして設計されるものとする。

次に、ケーブル心線の流れについて述べる。通信センタからの心線はすべて、光ファイバ分岐点の光分岐

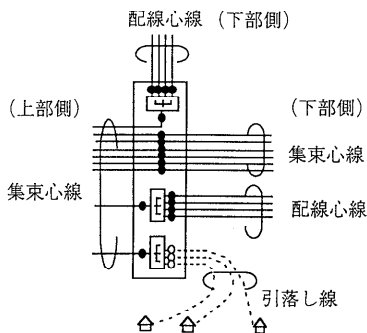


図2 光ファイバ分岐点の構成
Fig. 2 Fiber branch point.

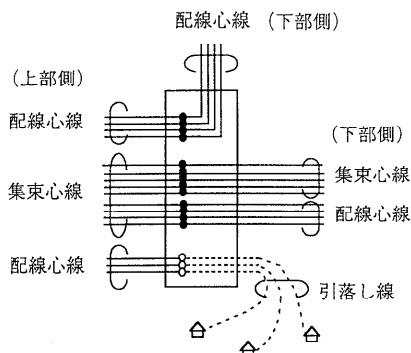


図3 通減点の構成
Fig. 3 Fiber number reduction point.

素子に接続され、分岐した後、引落し線（図1の破線）を介して加入者に接続されるものとする。ここで、通信センタと光分岐素子の間を結ぶケーブル心線を集束心線、光分岐素子と加入者の間の心線を配線心線と呼ぶ。また、引落し線をネットワークに接続する箇所を引落し点と呼ぶ。上記のケーブル接続点のほかに、ケーブル端点と引通し接続点もまた引落し点として扱われる。ここで、ケーブル端点はケーブルの終端であり、引通し接続点はケーブルの被覆を除去してケーブル心線を取り出して引落し線を接続する点である。図4に引通し接続点における心線接続の様子を示す。以下では、引落し点の位置と引落し点における加入者数（引落し数と呼ぶ）は設計の前提として既知とする。

以下においてネットワーク上のケーブル区間を区別するためにケーブル区間とケーブル要素という用語を用いる。ケーブル区間はネットワークをケーブル分岐点とケーブル端点を境界とするケーブル区間である。ケーブル要素は境界点としてさらに光ファイバ分岐点と通減点を加えた場合のケーブル区間である。ケーブル要素内ではケーブル心線数は変化しないため、ケーブル要素はケーブルコストを算出する際の基本単位に

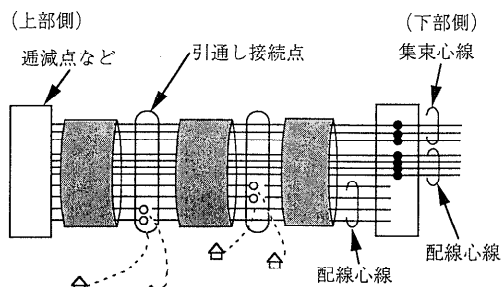


図4 引通し接続点の構成
Fig. 4 Through joint point.

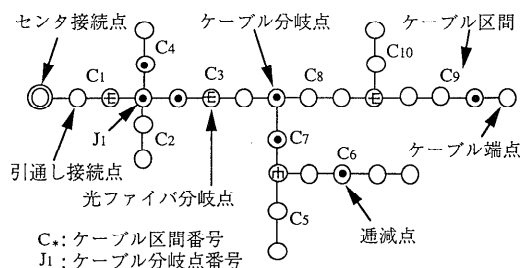


図5 ネットワークの簡略表現
Fig. 5 Simplified expression of network.

なる。

なお図1のネットワークの構成は複雑なため、設計に関係する要点のみを示した略記図を用いる。図5はその例であり、同図において実線はケーブル、◎はセンタ接続点、○は引通し接続点、⊕は光ファイバ接続点、●は通減点である。

2.2 ネットワークコストの計算

ネットワークコストには、地下管路や電柱など、さまざまな付帯設備も関係するが、ここでは光ファイバ分岐点と通減点の配置のみを問題としているため、ケーブルと光ファイバ接続および通減点のコストの合計をネットワークコストとする。また引落し線の接続（図1の○）、ケーブル心線の接続がない引通し接続点およびケーブル端点のコストも無視することとする。

2.2.1 項ではケーブル要素の心線数と長さ、光ファイバ分岐点および通減点の光分岐素子数、心線接続数を求め、2.2.2 項ではこれらを用いてネットワークコストを算出する。

2.2.1 ネットワーク構成要素のコストパラメータの計算方法

ケーブル要素のケーブル心線数、光ファイバ分岐点の光分岐素子数と心線接続数、通減点の心線接続数は、次の式(1)~(12)により求められる。これらはすべて下部側のパラメータから上部側のパラメータを求める

ようになっている．このためケーブル端点から上部側の構成要素のパラメータを順次求めていくことができる．ケーブル分岐点では下部側のすべての分岐ケーブルの計算を終了した後，上部側のケーブル区間の計算に進むようにする．

【ケーブル端点】

ケーブル端点の上部側の配線線数 n_{fd} と集束線数 n_{fb} は，ケーブル端点の引落し数を n_d とすればそれぞれ次式で表される．

$$n_{fd} = n_d \quad (1)$$

$$n_{fb} = 0 \quad (2)$$

【ケーブル要素】

ケーブル要素の心線数 n_f ，上部側の集束線数 n_{fb} ，配線線数 n_{fd} は，ケーブル要素の引落し点 i における引落し数を n_{di} ($i = 1, 2, \dots, N_d$: N_d は引落し点数)，下部側のケーブル端点あるいは設計接続点の配線線数を n_{fd}' ，集束線数を n_{fb}' とすれば次式で表される (図4 参照)．

$$n_f = n_{fd}' + \sum_i n_{di} + n_{fb}' \quad (3)$$

$$n_{fd} = n_{fd}' + \sum_i n_{di} \quad (4)$$

$$n_{fb} = n_{fb}' \quad (5)$$

ここで， $\sum_i$ は i について和をとることを示す (以下同様)．

【光ファイバ分岐点】

光ファイバ分岐点の光分岐素子数 n_b ，心線接続数 n_s ，上部側の集束線数 n_{fb} ，配線線数 n_{fd} は，光分岐素子の分岐数を N_b ，光ファイバ分岐点での引落し数を n_d ，下部側のケーブル要素の配線線数を n_{fd}' ，集束線数を n_{fb}' とすれば次式で表される (図2 参照)．

$$n_b = \lceil (n_d + n_{fd}') / N_b \rceil \quad (6)$$

$$n_{fd} = 0 \quad (7)$$

$$n_{fb} = n_b + n_{fb}' \quad (8)$$

$$n_s = n_d + n_{fd}' + n_b + n_{fb}' \quad (9)$$

ただし， $\lceil * \rceil$ は $*$ に等しいか， $*$ より大きい最小の整数を表す．

【通減点】

通減点の心線接続数 n_s ，上部側の集束線数 n_{fb} ，配線線数 n_{fd} は，通減点の引落し数を n_d ，下部側のケーブル要素の配線線数を n_{fd}' ，集束線数を n_{fb}' とすれば次式で表される (図3 参照)．

$$n_{fd} = n_d + n_{fd}' \quad (10)$$

$$n_{fb} = n_{fb}' \quad (11)$$

$$n_s = n_{fd}' + n_{fb}' \quad (12)$$

【ケーブル分岐点】

ケーブル分岐点が光ファイバ分岐点である場合の光

分岐素子数と心線接続点数は，下部側の分岐ケーブルの心線数の合計値を用いることにより，式 (6)～(9) により求めることができる．ケーブル分岐点が通減点である場合の心線接続点数は下部側の分岐ケーブルの心線数の合計値を用いることにより，式 (10)～(12) を用いて求めることができる．

2.2.2 ネットワークコストの計算

ネットワークのコスト Y は，2.2.1 項で述べた構成要素のパラメータを用いて次式により求めることができる．なお，ネットワークのケーブル要素，光ファイバ分岐点および通減点には，それぞれ通し番号が付けられているものとする．

$$Y = \sum_i (a_c n_{fi} + b_c) l_i + \sum_j (a_b n_{bj} + b_b + a_s n_{sj} + b_s) + \sum_k (a_s n_{sk} + b_s) \quad (13)$$

ここで， i はネットワークのケーブル要素の番号 ($i = 1, 2, \dots, N_c$: N_c は要素ケーブル数)， n_{fi} ， l_i はそれぞれケーブル要素 i の心線数と長さ， a_c はケーブルの単位長さ，1 心線あたりのコスト (比例係数と呼ぶ)， b_c は単位長さあたりのコスト (固定コストと呼ぶ)， j は光ファイバ分岐点の番号 ($j = 1, 2, \dots, N_b$: N_b は光ファイバ分岐点数)， n_{bj} ， n_{sj} はそれぞれ光ファイバ分岐点 j の光分岐素子数と心線接続数， a_b は光分岐素子 1 個のコスト (比例係数と呼ぶ)， b_b は固定コスト， a_s は心線接続 1 カ所あたりのコスト (比例係数と呼ぶ)， b_s は固定コスト， k は通減点の番号 ($k = 1, 2, \dots, N_o$: N_o は通減点数)， n_{sk} は通減点 k の心線接続数である．

式 (13) において，ケーブルコスト，光ファイバ分岐点および通減点のコストは，光ファイバ心線数，光分岐素子数および心線接続点数に比例するとしたが，これらの数値の増加に対して段階的に増大する場合，式 (13) を階段関数を用いて表せばよい．

3. 遺伝的アルゴリズム

ネットワークコストを最小とする光ファイバ分岐点と通減点の配置を探索するための GA の構成方法を述べる．まずネットワークを表現する染色体の記述方法について述べ，次にコスト最小個体を探索するための染色体の操作方法を述べる．なお，GA の適応度としてはネットワークコストそのものを用いる．

3.1 ネットワークの染色体表現

ネットワークのケーブル区間の接続状態を表すリスト (ケーブル区間リストと呼ぶ) と，ケーブル区間上

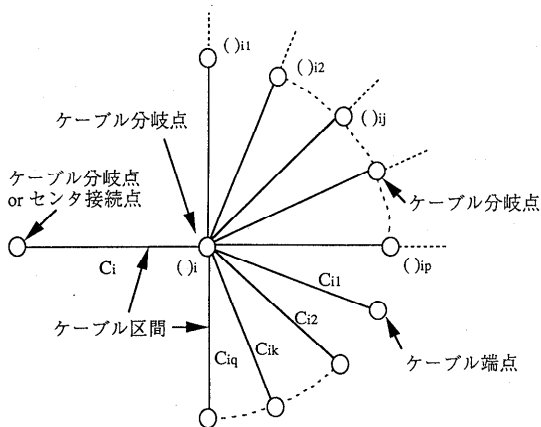


図6 ケーブル区間の接続状態の表現

Fig. 6 Expression of connection of cable sections.

の設計接続点の配置を表すリスト（設計接続点リストと呼ぶ）の組をネットワークの染色体とする方法を以下に述べる。

〔ケーブル区間リスト〕

ネットワークの1つのケーブル分岐点 J_i ($\in$ ケーブル分岐点の集合) におけるケーブル区間の接続状態 $()_i$ を次式で表す (図6参照)。

$$()_i = (C_{i1}()_{i1}()_{i2} \dots ()_{ij} \dots ()_{ip} \\ C_{i1}C_{i2} \dots C_{ik} \dots C_{iq}) \quad (14)$$

ここで、 C_{ij} は J_i の上部側のケーブル区間である。 $()_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, p$; p は J_i の下部側のケーブル分岐点の数) は J_i の下部側のケーブル分岐点の接続状態であり、 C_{ik} ($k = 1, 2, \dots, q$; q は J_i の下部側のケーブル端点の数) は J_i の下部側のケーブル端点である。

ネットワーク全体についてのケーブル区間の接続状態 (ケーブル区間リスト) は、センタ接続点に最寄りのケーブル分岐点 (図5の J_1 参照) を式 (14) を用いて表し、その右辺の空白の括弧がなくなるまで、下部側の接続状態を代入していくことにより得られる。たとえば、図5のネットワークは次式で表される。

$$(C_1C_2(C_3(C_7C_5C_6))(C_8C_9C_{10}))C_4) \quad (15)$$

〔設計接続点リスト〕

ケーブル区間上の設計接続点の配置は、設計接続点の位置を示す引落し点番号 d_j と、設計接続点が光ファイバ分岐点か通減点かを表す変数 s_j を対にして並べることにより次式のように表す (図7参照)。

$$((d_1s_1)(d_2s_2) \dots (d_js_j) \dots (d_ms_m)) \quad (16)$$

ここで、引落し点番号 d_j は上部から下部方向に順に付されているものとする。 m はケーブル区間上の設計接続点数である。ここで、ケーブル分岐点は上部側のケーブル区間に属するものとする。

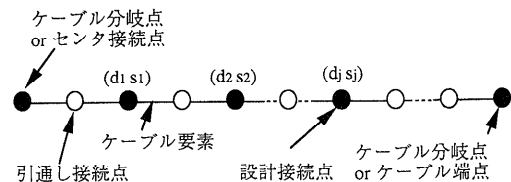


図7 設計接続点の表現

Fig. 7 Expression of design points.

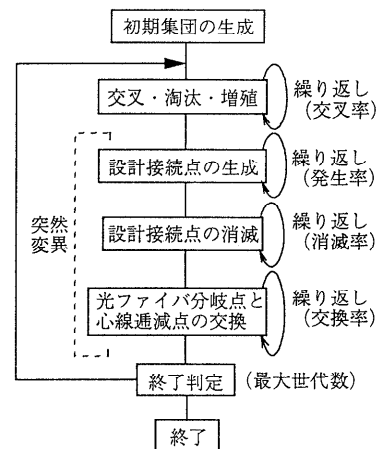


図8 光アクセスネットワーク設計のためのGA

Fig. 8 Genetic algorithm for optical fiber access network design.

3.2 遺伝子操作の方法

ここでは3種類の突然変異操作を含む遺伝子操作を用いた。遺伝子操作の手順を次に示す (図8参照)。

- (1) 初期集団の生成
- (2) 交叉・淘汰・増殖
- (3) 突然変異
 - (3-1) 設計接続点の生成
 - (3-2) 設計接続点の消滅
 - (3-3) 光ファイバ分岐点と通減点の交換
- (4) 世代数が設定値 (最大世代数) の場合には終了し、設定値以下の場合には (2) に戻る

以上の操作において得られるコスト最小の個体をGAの解とする。集団は、上記 (2) から (3-3) の操作を1回受けることにより、1世代進化するものとし、このとき世代数が1増加するものとする。遺伝子操作における、下記4つ、

- (1) 交叉・淘汰・増殖、
 - (2) 設計接続点の生成、
 - (3) 設計接続点の消滅、
 - (4) 光ファイバ分岐点と通減点の交換
- と世代数との比をそれぞれ、交叉率、発生率、消滅率、

交換率で表す。たとえば1世代に交叉回数が5回の場合、交叉率は5、交叉回数が5世代に1回の場合、0.2である。

以下に、上記の各遺伝子操作の詳細を述べる。

3.3 初期集団の生成

センタ接続点を光ファイバ分岐点、ケーブル分岐点を通減点、その他の引落し点を引通し接続点とする個体を集団サイズだけ生成し、初期集団とする。

3.4 交叉・淘汰・増殖

交叉・淘汰・増殖は次の手順による。

(1) 集団の中からコスト Y_p が次式を満足する2個の個体をランダムに選択して親とする。

$$Y_{\min} \leq Y_p \leq Y_{\min} + \alpha_p(Y_{\max} - Y_{\min}) \quad (17)$$

ここで、 $Y_{\max}$ と $Y_{\min}$ はそれぞれ集団の個体のコストの最大値と最小値、 α_p はGAのパラメータとして設定する定数（親選択率と呼ぶ）である。 α_p をより小さく設定することは、コストのより小さい個体が親になる確率を大きくすることを意味する。

ここで、2個の親のケーブル区間リスト P, P' はそれぞれ次式で表されるものとする。

$$P = (C_1 \dots (C_c \dots) \dots) \quad (18)$$

$$P' = (C'_1 \dots (C'_c \dots) \dots) \quad (19)$$

また、後述する(3)で選択される交叉位置の属する2個の親のケーブル区間の設計接続点リスト D, D' はそれぞれ次式で表されるものとする。

$$D = (d_1 s_1) \dots (d_{j-1} s_{j-1}) (d_j s_j) \dots (d_m s_m) \quad (20)$$

$$D' = (d'_1 s'_1) \dots (d'_{j-1} s'_{j-1}) (d'_j s'_j) \dots (d'_m s'_m) \quad (21)$$

(2) 集団の中からコスト Y_d が次式を満足する2個の個体をランダムに選択して淘汰（消去）する。

$$Y_{\min} + \alpha_d(Y_{\max} - Y_{\min}) \leq Y_d \leq Y_{\max} \quad (22)$$

ここで、 α_d はGAのパラメータとして設定する定数（淘汰率と呼ぶ）である。 α_d をより小さく設定することはコストのより小さい個体が淘汰される確率を大きくすることを意味する。

(3) (1)で選択された2個の親から交叉により2個の子を作る（図9参照）。2個の親はそのまま集団に残し、2個の子は(2)で淘汰された個体の代わりに集団に追加する。ここで交叉の方法を以下に述べる。

センタ接続点とケーブル端点を除くネットワーク上の引落し点から交叉位置をランダムに選択しその引落し点番号を d とし、 d の属するケーブル区間を C_c および C'_c とする。ここでは d より下部側のネットワークを交換し、交叉とする（図9参照）。

このとき交叉による2個の子のケーブル区間リスト

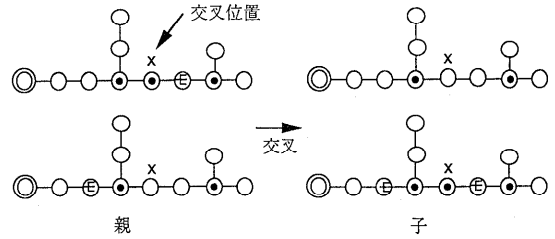


図9 交叉
Fig. 9 Crossover.

Q, Q' は次式により表される。

$$Q = (C_1 \dots (C_c \dots) \dots) \quad (23)$$

$$Q' = (C'_1 \dots (C'_c \dots) \dots) \quad (24)$$

設計接続点リストについては、 d に等しいか大きい最小の設計接続点の引落し点番号を d_j, D' についてのそれを d'_j とすれば、2個の子のケーブル区間 $C_{1\dots i_j}$ と $C'_{1\dots i'_j}$ の設計接続点リスト D と D' は、それぞれ次式により表される。

$$D = ((d_1 s_1) \dots (d_{j-1} s_{j-1}) (d'_j s'_j) \dots (d'_m s'_m)) \quad (25)$$

$$D' = ((d'_1 s'_1) \dots (d_{j-1} s_{j-1}) (d_j s_j) \dots (d_m s_m)) \quad (26)$$

以上において下線は交叉による変化部分を示す。

3.5 突然変異

(1) 設計接続点の生成

集団からランダムに1個の個体を選択して、設計接続点が生成される個体とする。この個体のネットワークのセンタ接続点、ケーブル接続点、ケーブル端点を除く引落し点から1つの引落し点をランダムに選択して、設計接続点の生成位置とする。ここで、生成位置の属するケーブル区間を C 、引落し点の番号を d とする。次に、設計接続点の種類 s (s は光ファイバ分岐点か、通減点かを示す変数とする) は光ファイバ分岐点と通減点のそれぞれを0.5の確率でランダムに選択する。次にケーブル区間 C の設計接続点生成前の設計接続点リスト

$$D = ((d_1 s_1) (d_2 s_2) \dots (d_j s_j) (d_{j+1} s_{j+1}) \dots (d_m s_m)) \quad (27)$$

を、生成後

$$D' = ((d_1 s_1) (d_2 s_2) \dots (d_j s_j) (\underline{ds}) (d_{j+1} s_{j+1}) \dots (d_m s_m)) \quad (28)$$

のように変化させる。ここで、 $d_j < d < d_{j+1}$ とする。なお、選択された引落し点が設計接続点の場合には何も行わない。

(2) 設計接続点の消滅

集団から1個の個体をランダムに選択し、その個体のケーブル分岐点を除く設計接続点をランダムに1個選択して消滅させる。選択された個体に設計接続点がない場合には何も行わない。

(3) 光ファイバ分岐点と通減点の交換

集団から1個の個体をランダムに選択し、その個体の設計接続点をランダムに1個選択し、その設計接続点について光ファイバ分岐点と通減点の交換を行う。選択された個体に設計接続点がない場合には何も行わない。

4. 実験結果

3章のGAの特性を評価するため計算機実験を行った結果を述べる。

4.1 実験条件

ネットワークの形状と加入者分布の異なる3種のネットワークについてGAによるコスト最小となる構成を求めた。実験条件を表1に示す。ケーブルの固定コストは、光ファイバ分岐点と通減点の配置によらず一定であるため無視することとし零とした。

表1のネットワークケーブル長や引落し点数は、現在の通信の主体であるメタリックケーブルのネットワークの構成を参考にして決めた。この程度の計算が行えれば実用上の問題はないと考えられる。ただし、現在この技術分野の進歩が速いため正確な数値を得ることが難しい構成要素のコストには仮想値を用いている。

GAのパラメータ数を少なくするため、親選択率 α_p

表1 実験に用いた条件

Table 1 Experimental conditions.

モデル番号		1	2	3
ネットワーク	形状	直線	分岐	
	引落し点数	21	23	
	引落し点間隔 (m)	50		
	引落し数	6 一定	7 平均	
構成要素のコスト	ケーブルコスト	比例係数 ac	20	
		固定コスト bc	0	
	心線接続コスト	比例係数 as	100	
		固定コスト bs	10,000	
	分岐素子コスト	比例係数 ab	40,000	
		固定コスト bb	40,000	
GAパラメータ	集団サイズ		10	
	交叉率		1	
	突然変異	設計接続点の発生率	5	
		設計接続点の消滅率	5	
		分岐・通減点の交換率	1	
	淘汰率		0.2	

と淘汰率 α_d に関しては、淘汰率 α_d のみをパラメータとし、親選択率は淘汰率を用いて次式により定めた。

$$\alpha_p = 1 - \alpha_d \quad (29)$$

これは、極端に悪い個体を選択的に淘汰するときには極端に良い個体を親とし、ほとんどの悪い個体を淘汰するときはほとんどの良い個体が親であることを意味する。

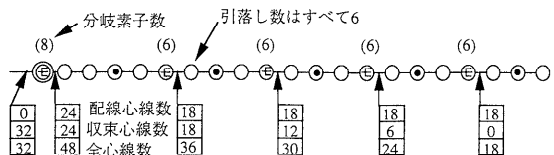
GAのパラメータ値については、別途行った実験を参考にして収束が良好な条件とした(5章参照)。

実験にはcray T932とC言語を用いた。

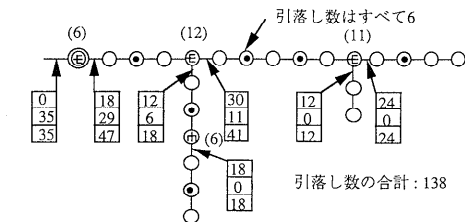
4.2 実験結果と考察

GAにより求めたコスト最小のネットワーク構成を図10に示す。(a)~(c)の図において、光ファイバ分岐点の括弧内の数値は光分岐素子数、また四角の枠で示した3つの数値は、上段から下段方向に向けてケーブルの矢印の点における配線心線数、集束心線数、全心線数を示す。

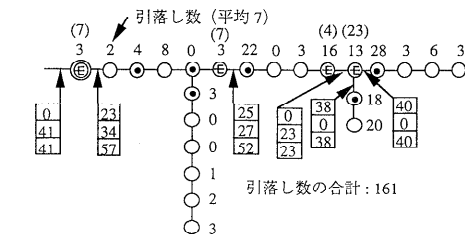
図10(a)は、表1のモデル1の直線状のネットワークの最適構成を示す。光ファイバ分岐点と通減点が周期的に並んでいることが分かる。これは、すべての引落し点において引落し数を同一としたためと考えられる。なお、個々の光ファイバ分岐点と通減点について



(a) モデル1 (コスト: 2.14×10^6) 引落し線数の合計: 126



(b) モデル2 (コスト: 2.20×10^6) 引落し数の合計: 138



(c) モデル3 (コスト: 2.52×10^6) 引落し数の合計: 161

図10 ネットワークの最適設計例

Fig. 10 Examples of the network optimal design.

その位置を上部側とケーブル端末側に1引落し点だけ移動させたときのコストを求め、図の構成がコスト最小であることを確認した。このことは図 10 (b), (c) についても同様に行った。

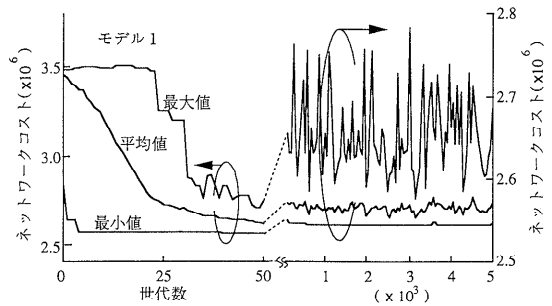
なお、図 10 (a) では光分岐素子を合計 32 個使用している。これは全加入者数（全引落し数）に対する光分岐素子の必要最小数と一致し、図の構成がコスト最小であることを裏付けている。なお、ネットワークの全引落し数は 126 であり、光分岐素子の分岐数が 4 であるから、光分岐素子数の必要最小数は 32 個 ($\lceil 126/4 \rceil = 32$) になる。光分岐素子の合計数が、必要最小数に一致することは図 10 (b), (c) についても同様に確認した。

図 10 (b) は表 1 のモデル 2、すなわちネットワーク形状が分岐形の場合の最適構成を示す。光ファイバ分岐点と通減点が図 10 (a) と類似したパターンで並んでいることが分かる。これは、引落し数の分布が図 10 (a) と同一であるためと考えられる。このことは、直線状のネットワークにおいて求めた設計接続点の配置パターンが、分岐のあるネットワークに適用できる可能性を示唆している。

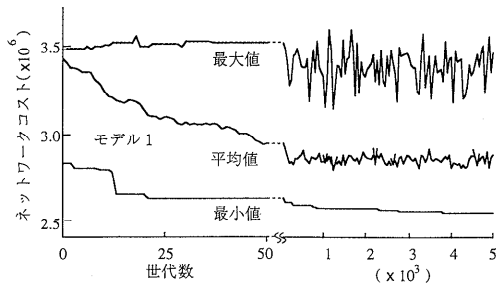
図 10 (c) は表 1 のモデル 3 のネットワーク形状が分岐形で、引落し数がランダムの場合である。引落し数が大きい引落し点の上部側の引落し点が光ファイバ分岐点となる傾向のあることが分かる。

図 10 (a)~(c) を求めるのに要した時間は、ほぼ同一でそれぞれ約 1 秒であった。また、世代数は 900~1,000 であった。この計算量をランダムサーチによる探索と比較してみる。図 10 (a) のモデルのケーブル端点を除く引落し点の数は 20 であり、これらの各点は引通し点、光ファイバ分岐点、通減点のうちのどれかとして設計される。したがって設計における選択の組合せは $3^{20} \approx 3.5 \times 10^9$ であり、ランダムサーチによる最適解の探索ではこの程度の試行回数が必要になると考えられる。図 10 (b), (c) ではケーブル端点を除く引落し点の数が 20 である。このうち 2 点はケーブル分岐点であり、光ファイバ分岐点、通減点のどちらかになり、設計における選択の組合せは $3^{18} \times 2^2 \approx 1.5 \times 10^9$ になる。これらの値に比べて、GA の世代数はきわめて小さく効率的に解が得られていることが分かる。

図 10 (c) の計算過程における GA の世代数とネットワークコストの関係を図 11 (1) に示す。図において最小値、平均値、最大値はそれぞれ集団におけるネットワークコストの最小値、平均値、最大値を示す。最小値は世代数 10 までに最小値近くまで低下している。平均値は世代数 20 位までは急激に低下し、その後は



(1) 表 1 の GA パラメータを用いた例（収束が早い）



(2) 収束が遅い例（GA パラメータは本文に記載）

図 11 GA による最適ネットワークの計算過程

Fig. 11 Calculation processes of optimal networks by the GA.

緩やかに低下し、世代数 50 以上ではランダムに変動している。最大値については急激に低下する点が世代数 50 までに 2 回生じ、その後はランダムに変動している。

図 11 (1) は最適解への収束がきわめて速い場合である。図 11 (2) は参考のため収束がきわめて遅い場合を示している。ここでは、GA の集団サイズを 50、交叉率を 1、設計接続点の発生率を 5、消滅率を 5、光ファイバ分岐点と通減点の交換率を 1、淘汰率を 0.2 とした。この場合、世代数 10,000 においても収束していない。最小値と平均値は世代数とともに一様に低下しているが低下が緩慢である。最大値については終始ランダムに変動している。

5. GA パラメータの最適条件

GA の収束を高速化するための集団サイズ、交叉率、設計接続点の発生率などの GA パラメータの設定方法について実験的に検討した結果を述べる。

5.1 実験条件

ネットワークのモデル 8 種類に対して、GA のパラメータ 6 種類について各パラメータの設定値を変えて、ネットワークコストが予備計算で求めた最低値に収束するまでの計算時間と世代数を求めた（表 2 参照）。この計算は、擬似乱数の系列を変えて 11 回を

表2 最適 GA パラメータの検討条件
Table 2 Calculation conditions for optimal GA parameter investigation.

ネットワーク					
モデル番号	形状	引落し点数	引落し数	引落し点間隔	
1	直線	6	6	50 (m)	
2		11	6		
3		16	6		
4		21	6		
5	分岐 (図10参照)	23	3	平均7 (ランダム)	
6		23	6		
7		23	12		
8		23	平均7 (ランダム)		

ネットワーク構成要素のコスト: 表1による

GAパラメータ					
集団サイズ	交叉率	突然変異			淘汰率
		設計接続点の発生率	設計接続点の消滅率	光ファイバ分岐・通減点の交換率	
100	5	5	5	5	0.8
50	1	1	1	1	0.5
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

行い、計算時間と世代数の平均値を求め、GAのパラメータの組合せに対する評価値とした。なお、最大世代数(10,000とした)に達し計算が打ち切られた場合には、便宜上、世代数を10,000とし、計算時間はそのときの時間とした。

ネットワークのモデルの設定では、引落し点数と引落し数をパラメータとしたが、それ以外のケーブルの分岐位置や引落し点間隔、構成要素のコストなどについては4章と同一とした。また、計算は表2に示すパラメータ6種、設定値数各3の全組合せ(729)について行った。

5.2 実験結果と考察

〔計算時間と世代数の分布〕

表2の8種のモデルについて、収束に要した計算時間(平均値)と世代数(平均値)を求めた結果を図12(1)~(8)に示す。図の1つの点はGAのパラメータの1つの組合せに対応する。

図12(1)~(4)は、直線状のネットワークにおいて引落し点数が増加した場合に計算時間と世代数が増加する様子が分かる。仮に計算が容易と考えられる条件を計算時間が5秒以下であり、かつ世代数が5,000以下であることとすれば、引落し数が5の場合(図12(1)), GAのパラメータの729すべての組合せがこの条件を満足している。一方、引落し数が20の場合(図12(4)), 前記の条件を満足するGAのパラメータの組合せは約20と極端に減少している。

図12(5)~(7)は、分岐状のネットワークにおいて引落し点数が同一で、引落し数の引落し数が増加した場合に、収束時間と収束世代数が増加する傾向を示し

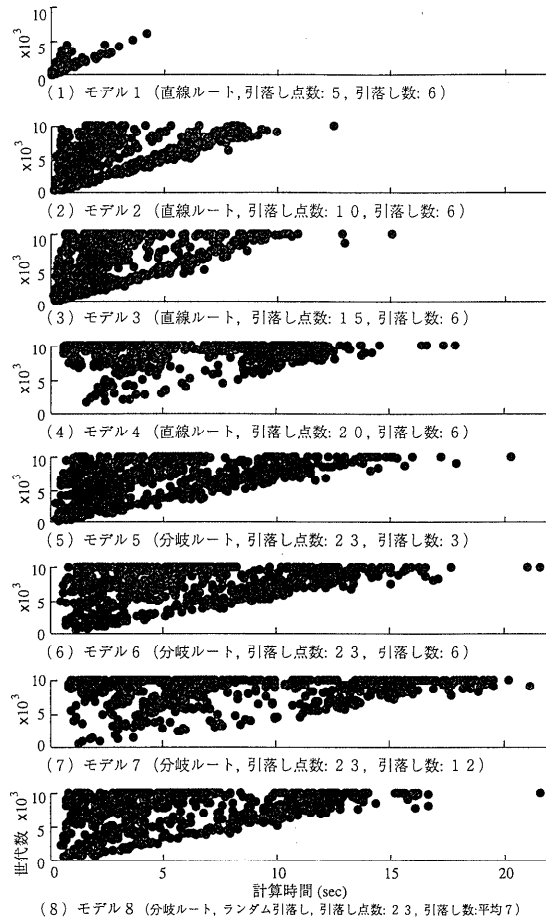


図12 最適ネットワーク発生時の計算時間と世代数
Fig. 12 Computation time and generation when optimal networks are generated.

ている。引落し数が3の場合(図12(5))には、きわめて多くのGAのパラメータの組合せが計算が容易な条件を満足するが、引落し数が12の場合(図12(7))には約30であり、きわめて少なくなっている。

図12(8)は引落し数がランダムなネットワーク(平均引落し数7)の場合の分布であるが、引落し数がほぼ等しい図12(6)(引落し数6)の場合に類似していることが分かる。

〔GAパラメータ値の設定方法〕

図12(1)~(8)の各々に示された計算時間と世代数を示す点の中から、世代数が2,000以下で、計算時間が最小から5個の点のGAのパラメータ値を取り出して、図13に示す。(1)~(8)の図において、●は左側から順に、集団サイズ、交叉率、設計接続点の発生率、消滅率、光ファイバ分岐点と通減点の交換率、淘汰率の値を表しており、●の上中下の位置は表2のパ

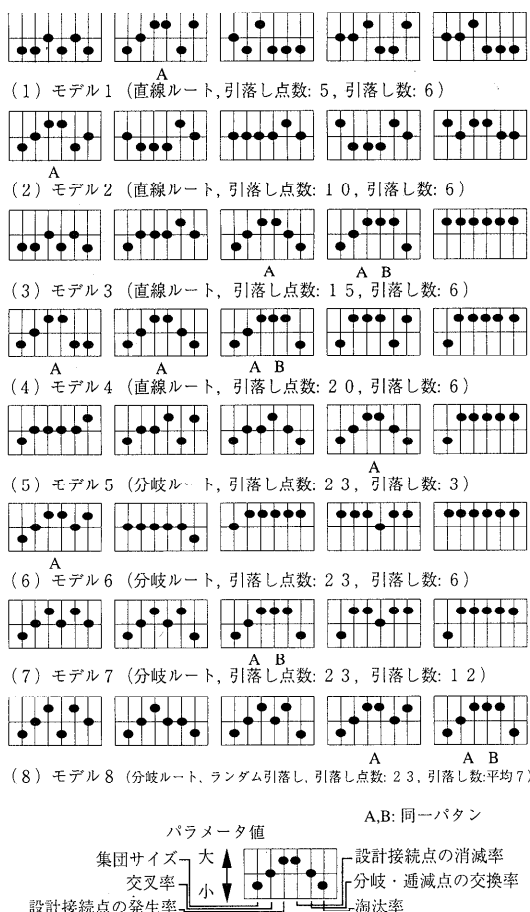


図 13 計算時間最小の GA パラメータのパターン (世代数 2,000 以下)

Fig. 13 GA parameter patterns when Calculation times are minimal and generations are less than 2,000.

ラメータ値の大中小を表している。ここで、四角枠内に並ぶ 6 個の GA パラメータ値の並びの形をパラメータパターンと呼ぶ。

図 13 において、A と記されたパラメータパターンは、集団サイズ:10, 交叉率:1, 設計接続点の発生率:5 のパターンであり、ネットワークモデル 1~8 のすべてに共通している。したがって、このパラメータパターンは一般的に使用できると考えられる。

B と記されたパラメータパターンは、集団サイズ:10, 交叉率:1, 設計接続点の発生率:5, 消滅率:5, 光ファイバ分岐点と通減点の交換率:5, 淘汰率:0.2 のパターンである。B のパラメータパターンを含むモデルは、3, 4, 7, 8 であり、引落し点数が多いモデルに共通しており、B のパラメータパターンはこのような場合に使用できると考えられる。

6. む す び

光分岐素子を用いた光アクセスネットワークについて、光分岐素子の設置点 (光ファイバ分岐点) と光ファイバケーブルの心線数の通減点の最適配置の設計を GA を用いて行う方法を検討した。検討内容を次に示す。

- (1) 光アクセスネットワークの構成を解析し、コストの計算方法を明らかにした。
- (2) ツリー状のネットワークの構成を表すリストを用いた染色体の表現方法を明らかにするとともに、光ファイバ分岐点と通減点の設置パターンの交換による交叉、光ファイバ分岐点と通減点の発生、消滅、交換からなる GA の構成方法を明らかにした。
- (3) 将来的に想定される規模のネットワークについて計算機実験を行い、実用的な計算時間の範囲内において良好な設計結果が得られることを確認した。
- (4) 8 種類のネットワークモデルと約 700 種類の GA パラメータの組合せを用いてコスト最小値が得られる計算時間を評価した。この結果、すべてのネットワークモデルに共通する最適な GA パラメータの組合せのあることが明らかになった。

本論文では、ケーブル分岐点において下部側ケーブルの接続種別 (光ファイバ分岐点か通減点かの別) は、下部側のケーブルのすべてに対して同一とした。この接続種別を下部側ケーブルに対して個別に選定できるようにした場合、設計の自由度が大きくなり、ネットワークコストをより減少させることができる。このことは、3 章のアルゴリズムにおいてケーブル分岐点における設計変数を追加することにより可能となる。これらについては、今後の検討課題としたい。

また、ネットワークの構成と最適 GA パラメータパターンの関係を検討し、計算の高速化に反映させることにより、より大規模な問題への適用を図る予定である。

謝辞 光アクセスネットワークの構成などに関してご教示いただいた NTT アクセス網研究所満永豊グループリーダー、藪田哲郎部長、小山田弥平部長に感謝いたします。

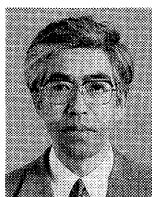
参 考 文 献

- 1) Kumozaki, K. and Okada, K.: Functional Structure of the Fiber-Optic Passive Double Star System, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E75-B, No.9, pp.832-840 (1992).

- 2) 齋木哲, 久保田俊昭: 加入者線路の設計, pp.137-139, 電気通信協会, 東京 (1982).
- 3) 日本電信電話公社: 設計エンジニア必携 (市内線路編), p.150, 電気通信協会, 東京 (1971).
- 4) Davis, L.: 遺伝アルゴリズムハンドブック, 森北出版, 東京 (1994).
- 5) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 東京 (1994).
- 6) Celli, G., Costamagna, E. and Fanni, A.: Genetic Algorithms for Telecommunication Network Optimization, *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, Vol.2, pp.1227-1232 (1995).
- 7) Elbaum, R. and Sidi, M.: Topological Design of Local Area Networks Using Genetic Algorithms, *Proc. IEEE INFOCOM*, Vol.1, pp.64-71 (1995).

(平成9年1月8日受付)

(平成9年9月10日採録)



武田 和時 (正会員)

1948年生, 1971年大阪電気通信大学工学部電子工学科卒業, 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 茨城電気通信研究所入所. 現在, NTT アクセス網研究所主任研究員. 博士 (工学). 通信線路網の保守方式, 光通信ケーブルの設備設計法, 通信線路網の故障位置探索法, 光通信網構成法などの研究, 実用化に従事. 電子情報通信学会, 機械学会, 物理学会, OR学会各会員.