GA による移動無線基地局への周波数割当ての最適化

正 員 所 健 一 ((財)電力中央研究所)
非会員 松 井 正 一 ((財)電力中央研究所)
非会員 西 野 能 啓 (九州電力(株))
非会員 橋 口 英 夫 (九州電力(株))

A Genetic Algorithm for Optimal Frequency Assignment in Mobile Communications

Ken-ichi Tokoro, Member, Shouichi Matsui, Non-member (CRIEPI), Yoshihiro Nishino, Non-member, Hideo Hashiguchi, Non-member (Kyushu Electric Power Company)

As demand grows for wireless communication systems, the problem of frequency assignment becomes increasingly important. This paper therefore investigates the frequency assignment problem (FAP) as it relates to the mobile communication systems of the Kyushu Electric Power Company. A number of algorithms for solving the FAP have been proposed. However the FAP investigated in this paper is more complex than the benchmark problems used in these studies. Thus we propose a hybrid algorithm of genetic and greedy algorithms to solve the problem. A global optimal assignment can be obtained in a very short time using the algorithm. Thus we are able to reduce the time required for finding the optimal assignment.

キーワード：チャンネル割当て、周波数割当て、遺伝的アルゴリズム、移動通信、最適化

1. ま え が き

電力用移動無線システムのデジタル方式への移行を検討している九州電力(株)では、無線基地局への周波数割当てが重要な課題となっている。移動体通信の急速な普及により、周波数がますます貴重な資源となっている現在、電力用移動無線システムにも、基地局に対し周波数を最適に割り当て、利用周波数の帯域幅を最小化することが求められている。しかし、基地局に対する周波数割当ての膨大な組合せの中から、最適な割当てを見つけ出すことは非常に困難な作業となる。

移動無線基地局への周波数割当てを最適化問題(周波数割当て問題)として定式化し、これを解くことで最適な割当てを求める研究が数多く行われている。周波数割当て問題の解法として、数理計画法による手法⁽¹⁾、ニューラルネットワークを用いた手法^{(2)~(4)}、GA(Genetic Algorithm)を用いた手法^{(3)(5)~(9)}など、様々な手法が提案されている。このうち数理計画法を用いた手法は、大域的最適解を求めるという観点では優れているものの、これらの手法が適用されている問題と比較して規模が大きく、また目的関数や制約条件がより複雑な、九州電力での周波数割当て問題へ適用するには計算時間の面で問題がある。一方、ニューラルネットワークとGAを用いた手法については、計算時間の観点

では優れているものの、単純な問題においても大域的な最適解に収束しないことが多いという問題がある。

周波数割当てに関する多くの論文で、ベンチマーク問題として利用されているフィラデルフィア問題の高速解法として、松井らは貪欲アルゴリズムとGAの組合せによる手法を提案した⁽¹⁰⁾。利用可能な周波数のうち、チャンネル番号最小のものから順次割当てを行う貪欲アルゴリズムを基本に、基地局へ周波数を割り当てていく最適な順序をGAにより探索することで、文献(2)で扱われるフィラデルフィア問題の大域的最適解が、非常に短い計算時間で求められた。しかし、このベンチマーク問題と比較して、九州電力の周波数割当て問題はより複雑である。九州電力における周波数割当て問題では、二つの異なる帯域幅のそれぞれを最小化しなければならず、またベンチマーク問題には無い、同一の送信機に割り当てられる周波数のチャンネル間隔を一定値以下とする制約も考慮しなければならない。このため文献(10)のアルゴリズムをそのまま適用しても、最適な割当てを効率的に見つけ出すことはできない。

本論文では、文献(10)のアルゴリズムに九州電力での周波数割当て問題に合わせた改良を加え、これを用いて実際に周波数割当て案を求めた。グラフ理論の応用により得られる情報と、送信機が設置される基地局の地理的位置により割当ての優先順位を付けたうえで、周波数を割り当てていく

送信機の順序を染色体としてコード化することで、効率的に理論的に最適な割当てを見つけ出すことができた。提案アルゴリズムを 100 回実行したところ、そのうちの 50 回、九州電力管内の 168 基地局に対する理論的に最適な周波数割当て（大域的最適解）が求められた。なお、1 回のアルゴリズムの実行に必要な計算時間は、Pentium II 333MHz のパーソナルコンピュータで約 260 秒である。このように提案アルゴリズムにより、これまで担当者の手作業を中心に、長い時間をかけて行われていた周波数割当作業の大幅な効率化が可能となった。

2. 定式化

本節では九州電力における、電力用移動無線基地局への周波数割当て問題を定式化する。なお、代表的な移動無線基地局へのチャンネル割当て方式には、固定チャンネル割当て法（FCA: Fixed Channel Allocation）、動的チャンネル割当て法（DCA: Dynamic Channel Allocation）、さらにその混合であるハイブリッド割当て法（HCA: Hybrid Channel Allocation）の三つがあるが、ここでは電力用移動無線システムにおいて採用されている、FCA 方式によるチャンネル割当てを対象とする。FCA 方式とは、各基地局に対してあらかじめチャンネルを割り当てておき、その基地局のエリア内で発生した通話要求に対しては、その基地局に割り当てられたチャンネルの中から一つを選んで割り当てる方式である。本節では、まずは前提となる条件について述べ、次に周波数割当て問題の目的関数について説明する。そして最後に問題の制約条件を示す。

〈2・1〉 前提条件 最適な周波数割当ての探索にあたり、以下のデータが与えられるものとする。

(1) 要求チャンネル数：各基地局で必要となるチャンネル数が与えられるものとする。以降、基地局 i で必要なチャンネル数を r_i と記述する。本論文では一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能とし、基地局には要求チャンネル数に合わせた台数の送信機が設置されるものとする。つまり基地局 i には $\lceil r_i/2 \rceil$ 台の送信機が設置されることになる。ここで $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を表す。

(2) 基地局の干渉条件：すべての基地局の組に対して、信号対干渉電力比（CIR）の値から、同一のチャンネルが利用可能かどうか与えられるとする。基地局 i と j で同一のチャンネルが利用可能なら $p_{ij} = 1$ 、利用不可能なら $p_{ij} = 0$ とする。

〈2・2〉 目的関数 以下の 2 つの利用周波数の帯域幅最小化を目的に、基地局に周波数を割り当てる（図 1）。なお本論文では、利用する周波数のうち、チャンネル番号最大のもので、最小のものとの差を帯域幅と定義する。

(1) 利用周波数帯域幅の最小化：九州電力管内の全基地局で利用する周波数の帯域幅を最小化する。 S を九州電力管内の基地局の集合、 $\bar{f}_i$ を基地局 i に割り当てられたチャンネル番号最大の周波数とすると、 $\max_{i \in S} \bar{f}_i$

図 1 周波数割当て問題の目的

Fig. 1. Target of the frequency assignment problem.

が最小となるように周波数を割り当てる。

(2) 干渉地域利用周波数帯域幅の最小化：九州電力管内だけでなく、電力会社全体で見た周波数利用の効率化を考え、他電力会社の基地局との干渉地域に位置する基地局で利用する周波数の帯域幅を最小化する[†]。 $C \subset S$ を干渉地域に設置される基地局の集合とすると、 $\max_{i \in C} \bar{f}_i$ が最小となるように周波数を割り当てる。

〈2・3〉 制約 以下の三つの制約条件が満たされるように周波数を割り当てる。

(1) 同一チャンネル割当て条件：信号対干渉電力比（CIR）が許容値を越える基地局の組には、同一の周波数を割り当てない。つまり $p_{ij} = 0$ となる局 i, j に対しては、同一のチャンネルを割り当てない。

(2) 同一局でのチャンネル間隔条件：同一の基地局に割り当てるチャンネルには、 δ 以上の間隔を設ける。局 i に割り当てられる任意の二つのチャンネルを f_i^k, f_i^l とすると、条件 $|f_i^k - f_i^l| \geq \delta$ を満たすようにチャンネルを割り当てる。

(3) 同一送信機でのチャンネル間隔条件：同一の送信機に割り当てられるチャンネルは、間隔が一定値 ϵ 以下となるようにする。局 i に設置される一台の送信機に割り当てられる二つのチャンネルを f_i^k, f_i^l とすると、条件 $|f_i^k - f_i^l| \leq \epsilon$ を満たすようにチャンネルを割り当てる。

〈2・4〉 ベンチマーク問題との比較 周波数割当てに関する多くの論文では、フィラデルフィア問題と呼ばれる問題群が、代表的なベンチマーク問題として利用されている。これは、フィラデルフィア近郊におけるセルラーシステムをもとに作られた、21 のセルに対して、各セルの要求を満たすように周波数を割り当てる問題である。このベンチマーク問題と比較して、九州電力の周波数割当て問題は以下の点でより複雑である。

[†]電力会社全体で見た周波数利用の効率化のためには、本来であれば干渉地域にある他電力の基地局が利用する周波数を考慮したうえで、九州電力管内の基地局への周波数割当てを決めるべきである。しかし、九州電力では他電力に先駆けて電力用移動無線システムのデジタル方式への移行を検討しており、周波数割当ての検討段階において、他電力の周波数割当てに関してはまだ何も決まっていない状況にある。また、他電力の基地局が利用する周波数は、九州電力が決めるべきものでもない。そこで、ここでは他電力になるべく利用可能な連続した広い帯域幅が残るよう、干渉地域での利用帯域幅が最小となるように割当てを行うこととした。

目的関数： ベンチマーク問題では、許容チャネル数以下の周波数割当ての探索か、あるいは単に全基地局での利用帯域幅の最小化を目的としている。これに対し九州電力における周波数割当て問題では、全基地局での利用帯域幅を最小化することに加えて、同時に干渉地域での利用帯域幅も最小化する周波数割当てを求めることを目的としている。

チャネル間隔条件： ベンチマーク問題では、距離が近いセルに配置される周波数には、一定以上のチャネル間隔を設けることを制約としている。これに対し九州電力における周波数割当て問題では、同一基地局内に配置する周波数には一定以上のチャネル間隔を空けることに加えて、同一送信機に配置される周波数の間隔を一定値以下とすることを制約としており、割当てが満たすべき条件がより厳しいものとなっている。

以上のように九州電力における周波数割当て問題は、一般的なベンチマーク問題と比較して、より大域的最適解を得ることが難しい問題となる。このためベンチマーク問題に対しては、他の GA やニューラルネットワークを用いた手法と比較して、大域的最適解への高い収束性を示す文献(10)のアルゴリズムをそのまま適用しても、九州電力における割当て問題に対しては、大域的最適解を効率的に見つけることはできなかった(〈5・2〉参照)。

3. 必要チャネル数の下界値

基地局へ周波数を割り当てるのに最低限必要となるチャネル数(チャネル数の下界値)は、以下に示すようにグラフ理論における彩色問題を解くことで求められる。

〈3・1〉 彩色問題 彩色問題とは、頂点と辺からなるグラフに対して、直接辺で結ばれた頂点は異なる色を塗る条件の下、必要となる色数が最小となる各頂点の塗り分けを求める問題である。以下のようにして作ったグラフ G の最小彩色数は、すべての基地局へ周波数を割り当てるのに必要となるチャネル数の下界値となる。

- (1) すべての基地局を対象に、一つの局を1頂点とし、 $p_{ij} = 0$ となる局同士を直接辺で結んだグラフを作る(図2(b))。
- (2) 各頂点を $r_i - 1$ 個複製する。この時、他の頂点との辺も同時に複製する(図2(c))。
- (3) 同じ局に相当する頂点同士を辺で結ぶ(図2(d))。

〈3・2〉 最大クリーク グラフ G の頂点を塗り分けるには、最低でもこのグラフの最大クリークの位数の色数が必要となる。クリークとは、それに含まれる任意の二つの頂点が直接辺で結ばれている、グラフ G の部分グラフである。そしてクリークのうち、それに含まれる頂点の数(位数)が最大のものを最大クリークと呼ぶ。図2の最大クリーク(図2(d)の円で囲った部分グラフ)の位数は4であるから、この例での周波数割当てには最低四つのチャネルが必要となる。なお、最大クリークにより求まるのは、あくまで必要となるチャネル数の下界値である。グラフ G の作

成には、制約条件のうちのチャネル間隔条件は考慮していないため、実際にはこれ以上のチャネルが必要となることもある。

〈3・3〉 最大クリークの計算 最大クリークを求めること自体 NP 完全な問題となるが、これを効率的に求める手法が提案されている⁽¹¹⁾。本論文では、この手法を用いて管内全体の基地局を対象としたグラフの最大クリークと、干渉地域に属する基地局のみを対象としたグラフの最大クリークを求め、これを GA による探索の効率化や、得られた割当ての最適性の評価に利用する。

4. 提案する割当て手法

提案手法では貪欲アルゴリズムと GA の組み合わせにより、二つの利用周波数の帯域幅が最小となる基地局への最適な周波数割当てを探索する。本節では、まず貪欲アルゴリズムについて説明し、次に GA による割当て順序の探索について述べる。

〈4・1〉 貪欲アルゴリズム 利用帯域幅がなるべく小さくなるように、送信機に周波数を割り当てる方法の一つに、割当て可能な周波数のうち、チャネル番号最小のものから順次割当てを行う、以下の貪欲アルゴリズムが考えられる。

貪欲アルゴリズム

- (1) 周波数の探索：送信機 k に割当て可能な周波数を見つける。
 - (a) k に割り当てられるチャネル数が1の時： k に割当て可能なチャネル番号最小の周波数 f_1 を見つける。
 - (b) k に割り当てられるチャネル数が2の時：チャネル間隔条件 $\delta \leq f_2 - f_1 \leq \epsilon$ を満たす、 k に割当て可能な周波数 f_2 ($f_2 > f_1$) が存在する、 k に割当て可能なチャネル番号最小の周波数 f_1 を見つける。
- (2) 局への割当て：(1) で見つけた周波数を送信機 k に割り当てる。そして送信機 k が設置される基地局 i に対して、 $p_{ij} = 0$ となる局 j においては、周波数 f_1 、(f_2) を割当て不能とする。

提案手法では、この貪欲アルゴリズムにより送信機に周波数を割り当てることを基本に、GA により最適な送信機への周波数の割当て順序を探索する。

〈4・2〉 GA による最適割当て順序の探索 GA を実問題へ適用するには、染色体の表現形式や、個体の適応度の計算方法、交叉や突然変異などの遺伝的操作方法を決める必要がある。これらについて本論文では、以下の設定を行った。

〈4・2・1〉 染色体表現 基地局に設置される送信機に1から n までの番号を付けたうえで、J. J. Grefenstetteらが巡回セールスマン問題(TSP)を解くための順序表現(Ordinal Representation)として採用したものと同様の形式で、チャネルを割り当てていく送信機の順序を染色体として表現する。ここで n は管内全体で設置される送信機の

図2 彩色問題としての定式化

Fig. 2. Formulation as a graph coloring problem.

図3 染色体と送信機への割当て順序

Fig. 3. Assignment order of the transmitters corresponding to a chromosome.

総数を表し、一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能であるから、 $n = \sum_{i \in S} \lceil r_i/2 \rceil$ と計算される。

この染色体表現での i 番目の遺伝子は、 $i-1$ 番目までの遺伝子の情報に従った割当てが行われた時点で、次に周波数を割り当てる送信機が、未割当てリストの何番目の要素であるかを表している。未割当てリストとは、まだ周波数が割り当てられていない送信機の番号を列挙したものである。例としてチャンネルを割り当てるアンテナの総数が7の場合における、染色体 $[1, 5, 3, 1, 3, 1, 1]$ に対応する送信機の割当て順序を図3に示した。なお、図3の縦に並んだ数値列は、それぞれの割当て時における未割当てリストを表している。

また、最大クリークに属する基地局間では、同一の周波数を利用することはできず、これらの基地局は干渉条件がもっとも厳しい（割当てが難しい）局の集まりと考えることができる。そこで本論文では、基地局全体を対象としたグラフと、干渉地域にある基地局のみを対象としたグラフの最大クリークをそれぞれ求め、(1) 全体での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(2) 全体での最大クリークには含まれず、干渉地域での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(3) その他の送信機の順に周波数が割り当てられるよう、送信機 i には表1のように番号を付けたうえで、図4の染色体表現を採用した。ここで L_q , L_c はそれぞれ、基地局全体での最大クリーク

表1 送信機 i の番号付け

Table 1. Numbering of the transmitter i .

送信機 i の配置される基地局	送信機 i の番号
全体の最大クリークに含まれる基地局	$1 \leq i \leq L_q$
全体の最大クリークには含まれず	
干渉地域の最大クリークに含まれる基地局	$L_q + 1 \leq i \leq L_q + L_c$
その他の基地局	$L_q + L_c + 1 \leq i \leq n$

図4 染色体表現

Fig. 4. Chromosome representation.

表2 遺伝子座 j の対立遺伝子

Table 2. Allele of the locus j

遺伝子座 j	対立遺伝子
$j \leq L_q$	区間 $[1, L_q - j + 1]$ の整数
$L_q + 1 \leq j \leq L_q + L_c$	区間 $[1, L_c - j + 1]$ の整数
$j \geq L_q + L_c + 1$	区間 $[1, n - L_q - L_c - j + 1]$ の整数

に含まれる基地局に設置される送信機の数、全体の最大クリークには含まれず干渉地域の基地局での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機の数を表す。また、この時の図4の遺伝子座 j の対立遺伝子は表2のようになる。

〈4・2・2〉 個体の適応度 個体の適応度を $(f_s - \max_{i \in S} \bar{f}_i) + (f_c - \max_{i \in C} \bar{f}_i)$ で評価する。ここで f_s は全局を対象としたグラフの最大クリークの位数を、 f_c は干渉地域の基地局のみを対象としたグラフの最大クリークの位数を表す。ここで f_s , f_c はそれぞれ、基地局全体と干渉地域とで最低限必要となるチャンネル数となるので、適応度0の割当てでは理論的に見て最適な割当てとなる。また、スケール方式としてはシグマスケールを用いる。

〈4・2・3〉 遺伝的操作 上述の染色体に対し、突然変異率0.05の一樣変異を加える。交叉の遺伝的操作は行わない。これは様々な突然変異率と交叉率の組合せに対して実際に割当てを行った結果から、もっとも探索効率が高い組

図 5 突然変異による割当て順序の変化

Fig. 5. Effect of the mutation operator to the assignment order.

表 3 突然変異により影響を受ける割当て順序

Table 3. Assignment order influenced by the mutation operator.

突然変異する遺伝子座 i	影響を受ける送信機の割当て順序
$i \leq L_q$	i 番目から L_q 番目までの割当て順序
$L_q + 1 \leq i \leq L_q + L_c$	i 番目から $L_q + L_c$ 番目までの割当て順序
$i \geq L_q + L_c + 1$	i 番目から n 番目までの割当て順序

合せを選択したものである。

ここでの効率的な解の探索に、交叉の遺伝的操作が必要とならない理由としては、以下が考えられる。前述の染色体表現を用いた場合、ある一つの遺伝子の突然変異は、単にその遺伝子に対応した送信機の割当て順序だけでなく、それ以降の割当て順序にも影響する。たとえば染色体 $[1, 5, 3, 1, 3, 1, 1]$ の 2 番目の遺伝子座の値が 5 から 2 に突然変異したとすると、送信機への割当て順序は 1, 6, 4, 2, 7, 3, 5 から、1, 3, 5, 2, 7, 4, 6 へと変化し、単に対応する遺伝子が突然変異した 2 番目に周波数を割り当てる送信機だけでなく、それ以降の送信機の割当て順序も変化する (図 5)。チャンネルを割り当てる送信機に優先順位を設けた本論文の染色体では、正確には遺伝子座 i に生じた突然変異は、表 3 のように送信機の割当て順序に影響を与える。つまり、ここでの突然変異は、ある順番以降の割当て順序を部分的に並べ変える、一般的な二点交叉に似た変化を染色体に与える。本論文で扱う問題においてはこうした突然変異の遺伝的操作が、最適な送信機へのチャンネル割当て順序を効率的に探索するのに有効であるものと考えられる。

〈4・2・4〉提案解法の枠組み 提案手法により周波数割当てを求める手順をまとめると、以下のようになる。

- (1) 最大クリークの計算： 与えられた条件の下、すべての基地局を対象としたグラフの最大クリークと、干渉地域の基地局のみを対象としたグラフの最大クリークを求める。
- (2) 送信機数の算出： 各基地局での必要チャンネル数に応じて、基地局で必要となる送信機数を算出するとともに、(1) で求めた最大クリークに基づき、表 1 にしたがって送信機を番号付けする。
- (3) GA の適用： GA により最適な割当て順序を探索する。

(3-1) 初期化： 初期集団として 200 個体をランダムに生成する。

(3-2) 適合度の計算： 個体の染色体で表現された割当て順序にしたがい、前述の貪欲アルゴリズムによりチャンネルを割り当てる。そして、その結果に基づいて個体の適合度を計算する。

(3-3) 反復ループ： 最適な (適応度 0 の) 割当てが求まるか、あるいは 500 世代に達するまで以下を繰り返す。

(3-3-1) 新世代の生成： 適合度の高い個体をルーレット選択により 180 個体抽出し、これらを新しい個体とする。

(3-3-2) 突然変異： 新しい個体に対して、確率 0.05 で染色体中の遺伝子を他の対立遺伝子へと変化する。

(3-3-3) 淘汰： 新しい個体の適合度を計算し、現世代の 200 個体と新しい 180 個体の中から、適合度の高いものを 200 個体抽出し、これを新世代とする。

5. 実問題への適用

提案アルゴリズムを用いて、実際に九州電力管内の基地局に対する周波数割当て案を求めた。

〈5・1〉九州電力における周波数割当て問題 九州電力管内には全部で 168 の基地局があり、カバーするエリア内の通信需要に合わせて、各基地局に 1~3 までのチャンネル数分の周波数を割り当てる。各基地局に割り当てるチャンネル数を合計すると 276 チャンネルとなる。また、1 台の送信機には最大二つのチャンネルが割り当てられるので、各基地局に割り当てるチャンネル数から、そこに設置される送信機の数計算できる。九州電力全体で設置される送信機の数計算すると 186 となる。なお、基地局のうち他電力との干渉地域に位置するのは 42 局であり、これに割り当てる周波数のチャンネル数の合計は 67 チャンネルである。

また、チャンネル間隔条件として以下の条件を考える。

同一局でのチャンネル間隔条件： 同一基地局に割り当てられる周波数には、1 チャンネル以上の間隔を空ける

同一送信機のチャンネル間隔条件： 同一送信機に割り当てられるチャンネルの間隔は、7 チャンネル以下とする

〈5・2〉文献 (10) のアルゴリズムの適用結果 提案アルゴリズムとの比較のため、九州電力における周波数割当て問題に対して、文献 (10) のアルゴリズムを適用した。200 個体を 500 世代まで進化させる実験を 100 回行ったところ、表 4 に示す結果となった。九州電力管内の全基地局と、干渉地域に属する基地局を対象とした最大クリークの位数はそれぞれ 36, 20 であるから、チャンネル条件を満たす周波数割当てを行うには、最低でも全体で 36 チャンネル分の帯域幅が、また干渉地域では 20 チャンネル分の帯域幅が必要となる。したがって文献 (10) のアルゴリズムでは、100 回の探索のうちの 14 回、この下界値と一致する理論的に最適な割当て (大域的最適解) が求まったことになる。しかし実際

表 4 文献 (10) のアルゴリズムの適用結果
Table 4. Computation result of the algorithm proposed in (10).

帯域幅 (全体)	帯域幅 (干渉地域)	回数
36	20	14
36	21	5
37	20	61
37	21	8
38	20	12

表 5 提案アルゴリズムの適用結果
Table 5. Computation result of the proposed algorithm.

帯域幅 (全体)	帯域幅 (干渉地域)	回数
36	20	50
37	20	50

表 6 最適解を得るまでの世代数
Table 6. Required generations for attaining global optima.

平均	最小	最大
166.6	32	494

の周波数割当作業を行うには、何種類もの条件設定の下での周波数割当問題を解く必要があり、割当作業を効率良く進めるには、より一層の精度向上が望まれる。そこで、本文では新たな効率的アルゴリズムについて検討を行った。

なお、九州電力における周波数割当問題への適用にあたり、文献 (10) のアルゴリズムに以下の修正を加えた。まず全基地局での利用周波数の帯域幅最小化を目的としたベンチマーク問題を対象とした、文献 (10) のアルゴリズムで用いた適応度の評価方法では、二つの利用帯域幅の最小化を目的とするこの問題には適用できない。そこで、ここでは提案アルゴリズムと同様、個体の適応度を $(f_s - \max_{i \in S} \bar{f}_i) + (f_c - \max_{i \in C} \bar{f}_i)$ で評価した。また、交叉率と突然変異のパラメータについて、この問題に対してもっとも探索効率が高い組合せを探索し、交叉率 0.8、突然変異率 0.05 とした。

〈5・3〉提案アルゴリズムの適用結果 九州電力における周波数割当問題に対して、提案アルゴリズムを 100 回実行したところ、表 5 に示す結果が得られた。前述のように九州電力管内の全基地局と、干渉地域に属する基地局を対象とした最大クリークの位数はそれぞれ 36、20 であるから、提案アルゴリズムによる 100 回の探索のうちの 50 回で、理論的に最適な割当て（大域的最適解）が求まったことになる。また、最適な割当てが求まらなかった 50 ケースについては、干渉地域での利用周波数の帯域幅は最小化されたものの、全体での利用帯域幅のチャンネル数が 1 だけ増えた。ここで、最適な割当てが得られた 50 ケースについて、最適な割当てを得るまでに要した世代数は表 6 のとおりである。

以上のように文献 (10) のアルゴリズムでは、個体の適応

度評価を問題に合わせて修正し、交叉と突然変異の遺伝的操作のパラメータを調整しても、100 回の計算のうち 14 回しか理論的な最適解が求まらなかった（表 4）。これに対し提案アルゴリズムでは、全体の最大クリークに含まれる基地局の次に、干渉地域の最大クリークに含まれる基地局に周波数が優先して割り当てられるように染色体の表現方法を改良し、これに合わせて遺伝的操作のパラメータを調整することで、100 回の計算のうちの半数の 50 回で理論的に最適な割当てを求めることができるようになった（表 5）。また、文献 (10) のアルゴリズムでは、全体の帯域幅が 38 チャンネルとなる割当てが求まるなど、得られる解のばらつきが大きかったが、提案アルゴリズムにより得られる解のばらつきも低く抑えられている。

なお、200 個体を 500 世代まで進化させるのに要する計算時間は、Pentium II 333MHz のパーソナルコンピュータで約 260 秒である。100 回の実行中 50 回理論的に最適な割当てが求まったこの計算では、平均的には 2 回の GA の実行、つまり 520 秒の計算により、理論的に最適な基地局への周波数割当てを求めることができた。

6. む す び

本論文では電力用移動無線システムにおける基地局への周波数割当てに対して、GA に基づく新たな割当手法を提案した。提案手法は配置する送信機に対して、利用可能な周波数のうち、チャンネル番号が最小となるものから割り当てていく貪欲アルゴリズムを基本に、GA により最適な割当順序を探索するものである。提案手法を用いて、実際に九州電力における電力用移動無線システムの周波数割当案を求めたところ、平均的には Pentium II 333MHz のパーソナルコンピュータによる約 520 秒の計算で、理論的に最適な割当てを求めることができた。周波数の割当作業はこれまで担当者の手作業を中心に行われていたが、提案手法を用いることで、短時間で理論的に最適性が保証された割当てが求まるようになり、割当作業の大幅な効率化が可能となった。今後は九州電力管内だけでなく、より広い範囲での最適な周波数割当てを行う手法について検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の推進にあたり、数多くの有益な御助言をいただきました、九州電力（株）電子通信部の寺本副長、山下副長に深甚の謝意を表します。
(平成 12 年 7 月 25 日受付、同 12 年 11 月 15 日再受付)

文 献

(1) K. I. Aardal, H. Hipolito, C. van Hoesel, B.Jansen, C. Ross and T. Terlaky, "Implementation and Testing of Polyhedral Techniques and Interior Point Methods", EUCLID CALMA Radio Link Frequency Assignment Project Report 2.2.1, 1995, <ftp://ftp.win.tue.nl/pub/techreports>

/CALMA/221.ps.gz.

- (2) N. Funabiki and Y. Takefuji, "A neural network parallel algorithm for channel assignment problems in cellular radio networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.41, no.4, pp.430-437, Nov. 1992.
- (3) S. Hurley and D. H. Smith, "Fixed spectrum frequency assignment using natural algorithms," Proc. of Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, pp.373-378, IEE, Sep. 1995.
- (4) D. Kuntz, "Channel assignment for cellular radio using neural networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.40, no.1, pp.188-193, Feb. 1991.
- (5) W. Crompton, S. Hurley, and N.M. Stephens, "Applying genetic algorithms to frequency assignment problems, Proc. SPIE Conf., Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing, vol.2304, pp.76-84, Jul. 1994.
- (6) M. Cuppini, "A genetic algorithm for channel assignment problems," Eur. Trans. Telecommun., vol.5, no.2, pp.285-294, Mar. 1994.
- (7) K. W. Lai and G. G. Coghill, "Channel assignment through evolutionary optimization," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.45, no.1, pp.91-96, Feb. 1996.
- (8) 村上登, 小川恭孝, 大鐘武雄: 遺伝的アルゴリズムを用いた移動通信におけるチャネル割り当て法, 信学技報 RCS98-48, pp.87-94, Jun 1998.
- (9) C. Y. Ngo and V. O. K. Li, "Fixed channel assignment in cellular radio networks using a modified genetic algorithm," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.47, no.1, pp.163-172, Feb. 1998.
- (10) 松井正一, 所健一: 割当順序表現を用いる遺伝的アルゴリズムによる移動無線における固定チャネル割当ての高速解法, 信学論 B, Vol. J83-B, No.5, pp.645-653, May 2000.
- (11) R. Carraghan and R. M. Pados, "An exact algorithm for the maximum clique problem," Oper. Res. Lett., vol.9, no.6, pp.375-382, Nov. 1990.
- (12) 北野宏明 (編): 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 東京, Jun 1993.
- (13) 伊庭育志: 遺伝的アルゴリズムの基礎~GAの謎を解く~, オーム社, 東京, Sep. 1994.

西 野 能 啓 (非会員) 1986年九工大・工・電子卒。1988年同大学院電子工学修士課程修了。同年九州電力(株)入社。現在, 福岡電力所電子通信課副長

橋 口 英 夫 (非会員) 1988年鹿大・工・電子卒。同年九州電力(株)入社。現在, 佐賀支店技術部電子通信グループ

所 健 一 (正員) 1987年慶大・理工・管理卒, 1989年同大学院理工学修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。現在, 情報研究所主任研究員。情報処理学会, 日本OR学会各会員

松 井 正 一 (非会員) 1979年東大・工・計数卒。1981年同大学院情報工学修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。現在, 情報研究所上席研究員。1980年度情報処理学会論文賞受賞。情報処理学会, 日本OR学会, 土木学会, ACM各会員