

### 3-4 自動車電話の周波数有効利用

—チャンネルの割当アルゴリズム— 仙石正和

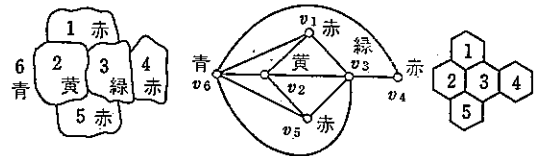
仙石正和：正員 新潟大学工学部情報工学科

#### 1. ま え が き

移動通信（自動車電話）においては使用できる周波数スペクトルが限られていることから、その有効利用が重要な課題となっている。この周波数の有効利用のための通信技術や方式は多種にわたっており、その歴史は古い。全般的な解説は他に譲るとして<sup>(1)~(3)etc.</sup>、ここでは、自動車電話系の小ゾーン方式におけるチャンネルの割当ての仕方による周波数の有効利用に焦点を合せた解説を行う。小ゾーン方式において、あるゾーンの自動車から通話の要求（呼）があった場合、どの周波数（チャンネル）を割当てたら周波数の利用効率を高めることができるかという問題が、ここで扱う問題である。この問題は地図の色分け問題として知られるグラフ理論でのグラフの彩色問題と密接に関連している。そして、このことに注目して、この問題を扱いはじめたのはそれほど古くはない。本文では、小ゾーン方式のチャンネル割当問題をグラフ理論での彩色問題に関連付けながら解説し、今まで提案されてきたチャンネルの割当アルゴリズム等について紹介する。

#### 2. 小ゾーン方式と地図の色分け問題

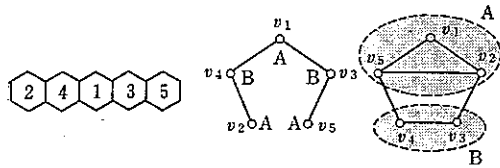
小ゾーン方式（小セル方式）はサービスエリアを複数の小さなゾーンに分割する方法で、各ゾーンの中央に基地局をおき、そのゾーン内の移動局（自動車）はその基地局と無線で接続され、その基地局を介して交換局に接続され全国の加入者と通話ができるようになっている。あるゾーンで使用される電波は例えばそのゾーンから地理的に離れたゾーンでは、その干渉が減少し、同一周波数の電波が再び利用できる。すなわち、同一周波数の電波は複数ゾーンで同時に使用できるため周波数の有効利用が計られる。サービスエリアをどのように小ゾーンに分割するかは電波伝搬、呼量、等種々の要素による<sup>(4)</sup>。あるゾーンの電波が干渉を与えるゾーンをそのゾーンのバッファゾーンまたは干渉ゾーン（interference zones）とよぶ。バッファ



(a) 地図 (b) グラフ (c) 小ゾーン  
図1 地図の色分け問題とグラフ

ゾーンが自身とその隣接ゾーンであるとき、1ベルトバッファ系（1 belt buffering system）、バッファゾーンが一般に  $n$  隣りのゾーンまでのとき  $n$  ベルトバッファ系という。さてこの小ゾーン方式で最少幾つのチャンネル（ここで、チャンネルは周波数帯を表すが、時分割多重の場合はタイムスロットを表す）があれば全ゾーンを覆う（全ゾーンで同時に通話可能となる）ことができるであろうか。

ところで、図1(a)のような地図があり、1~6の各国（1~5は島で、島の外側6は海と考えるとわかりやすい）を区別できるように色でぬり分けのために必要な色数の最小は幾つかという問題は古くより地図の色分け問題として知られている。平面上の地図は4色で十分であるというのが（100年余に及ぶ難問を1976年にアペルとハーケンがコンピュータを用いて証明した<sup>(42)</sup>。4色で十分であるとは信じてコンピュータを用いた証明法に疑問を持つ人もいる）4色問題である。このとき国を点に対応させ隣接している国と国の点を線（枝という）で結んだ図形（これをグラフという）を同図(b)に示す。グラフの枝で結ばれている点と点には同一の色を割り当てないという条件のもとで、各点に一つずつ色を割り当てるのに必要な最小の色数をこのグラフの彩色数（chromatic number）という<sup>(43)</sup>。図1(b)のグラフへは図のように赤、緑、黄、青の4色で各点に一つずつ色が割り当てられたことになる。このグラフのように平面に枝が交差なしに描けるグラフは平面グラフといわれる。4色問題は任意の平面グラフの彩色数は4を超えないと言い換えられる。



(a) サービスエリア (b) 干渉グラフ (c) 非干渉グラフ

図2 干渉グラフと非干渉グラフ

小ゾーンは正六角形でモデル化されることが多い<sup>(1)</sup>。自動車電話の1ベルトバッファ系の場合はゾーンを国に対応させるとまさに地図の色分け問題となっている(但し、サービスエリアの外側は国とみなさない)。そして、そのグラフの彩色数は全ゾーンを覆う最小チャンネル数に等しい。サービスエリアの一例を図1(c)に示す。1ベルトバッファ系の場合のグラフは同図(b)の点 $v_i$ を除いたもので彩色数は3である。ゾーンを点に対応させ、互いに電波の干渉のある(自身は除く)ゾーン(点)の間を枝で結んだグラフを干渉グラフ(interference graph)とよぶことにする。また、干渉グラフの枝を除去し、干渉グラフの枝のなかった点間に枝を付けて得られたグラフ(補グラフという)を非干渉グラフ(non-interference graph)という。説明のための簡単な例を図2に示す。彩色数は2で、二つのチャンネルA, Bの割当ての例を(b), (c)に示す。図1(c)のサービスエリアで2ベルトバッファ系になった場合の干渉グラフは完全グラフ(どの2点間にも枝があるグラフ。また、部分グラフでこの性質を持つものをクリーク、特に $k$ 個の点からなるものを $k$ クリークという)となり、平面上では枝を交差なく描くことのできない非平面グラフ<sup>(2)</sup>となって彩色数は5となる。ところで、一般に地理的な遠近だけで電波の干渉の強弱が決まるとは限らない。つまり、 $n$ ベルトバッファ系のようにバッファ系が規則的とは限らず、またゾーンが平面上に欠落なくしきつめられ

ないサービスエリアも考えられる。すなわち、一般には(非)干渉グラフは特に制限や特徴を持ってはいないと考えるべきであろう。

### 3. チャンネルの割当てによる周波数の有効利用

系は即時式とし、一般の通信トラヒックにおけると同様に、(i)呼の生起はポアソン分布則に従い、(ii)呼の保留時間(通話時間)は指数分布に従うとする。

このように呼の生起は偶発的のため、各移動局が常に通話できるように各局に固有のチャンネルを占有させることは周波数の有効利用の面から得策でない。このような場合、一つのチャンネルを複数の移動局で(時間的に)多重に利用できるように方式(これをマルチチャンネルアクセス方式という)が有利である。すなわち複数のチャンネルをより多くの複数の移動局が共同利用するというのである。このマルチチャンネルアクセス方式は小ゾーン方式であるなしかかわらず適用される技術である。このマルチチャンネルアクセスは前提として、小ゾーン方式ではあるゾーン(の呼)に対してどのチャンネルを割り当てるかという問題が生じる。実は、このゾーンへのチャンネルの具体的な割当てによってチャンネルの利用効率が変わるのである。一例を示す。図3の19ゾーンのサービスエリアで1ベルトバッファ系、移動体からの呼の生起はサービスエリア内で一様、系のチャンネル数は3と仮定する。この系の干渉グラフの彩色数は3である。このサービスエリア内を移動する移動局は3チャンネル共使用できる装置を有するとする。このとき、図のようにA, B, Cの三つのチャンネルを各ゾーンに1チャンネルずつ割り当て、チャンネルの割り当ては時間的に変化しない、すなわち固定的とする。このようにゾーン(の呼)に常に固定的にチャンネルを割り当てる方式を固定チャンネル割当て法(固定法)という。この方式の場合、例えばゾーン1である移動局が通話中(チャンネルA使用中)、ゾーン1で新たな呼が生起した場合、そのゾーンで使用できるチャンネルは一つのため、その呼は呼損となってしまう。ところが、チャンネルの割当てを固定的とせず、三つのチャンネルを中央処理装置でバッファゾーンを考慮しながら時々刻々割り当てるならば(チャンネルBがゾーン1のバッファゾーンで未使用であればゾーン1の新しい呼にBを割り当てることができる)、このような呼損を防ぐことができる(但し、この場合各ゾーンの基地局は全チャンネルを扱える装置をもつとする)。このよ



仙石 正和  
(正員)

昭42新潟大・工・電気卒。昭47北大大学院博士課程了。工博。同年北大・工・電子助手。現在、新潟大・工・情報助教授。回路網理論、グラフ理論、情報伝送などの研究に従事。著書「演習グラフ理論」(共著)。

Efficient Utilization of Frequency Spectrum for Mobile Radio Communication Systems—Algorithms for Channel Assignments—, By Masakazu SENGOKU, Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan).

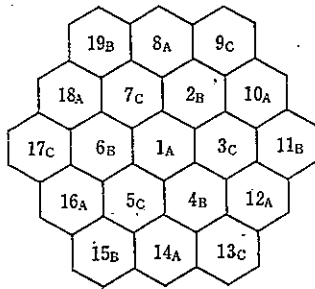


図3 サービスエリア

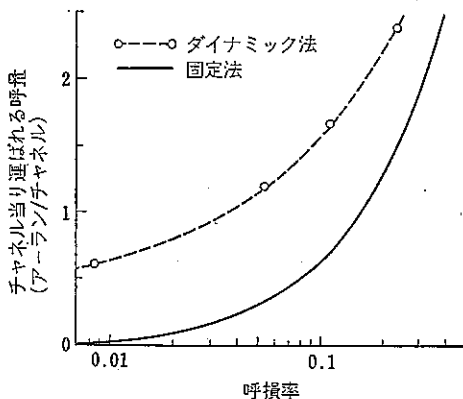


図4 トラフィック特性

うな割当方法をダイナミックチャンネル割当法(ダイナミック法)という。

図3のサービスエリアで呼は(i), (ii)によるとし, 簡単のために通話中のゾーン変更はないとした計算機シミュレーション結果を図4に示す。実線は固定法(良く知られたアーランB式から解析的にも求まる), ○印はダイナミック法の結果である。呼損率0.05のとき, チャンネル当りに運ばれる呼量は固定法の場合約0.3(アーラン, erl), ダイナミック法の場合約1.2erlである。すなわち, ダイナミック法が固定法よりおよそ4倍の呼量を運ぶことがわかる。なお, このダイナミック法のシミュレーションでは空きチャンネルを探す場合, A, B, Cの順で行い, 最初に空いていたチャンネルを割り当て(first available法)た。このようなダイナミック法による割当てで空きチャンネルが複数あった場合, どのチャンネルを割り当てたら最も良いかという問題が生ずる。この割当アルゴリズムについて5.で述べるように従来から多くの研究がなされているのである。

#### 4. チャンネル割当問題のグラフ理論的 とらえ方

小ゾーン方式におけるチャンネル割当問題の研究が本格的に始ったのは1960年代後半からであった。1976年ごろになってこの問題をグラフ理論的にとらえるようになった<sup>(11)-(17)etc.</sup>。その後この問題に対する研究が続いている<sup>(18)-(25)</sup>。このようなとらえ方をする意義はグラフ理論の彩色問題等の成果をチャンネルの割当問題に役立てることができる点にある。

2. で述べた干渉グラフを $g$ , 非干渉グラフを $G$ とする。 $g, G$ の枝集合をそれぞれ $E_g, E_G$ とし, また点集合は共に $V$ とする。ゾーンの生起呼に対するチャンネルの割当ては $g, G$ では点の上へのチャンネルの割当てとなる。系の全チャンネル数を $n_c$ とする。点 $v_i$ に割り当てられたチャンネルの集合を $C(v_i)$ とする。但し,

$$(v_i, v_j) \in E_g \Rightarrow C(v_i) \cap C(v_j) = \phi \quad (1)$$

または

$$C(v_i) \cap C(v_j) \neq \phi \Rightarrow (v_i, v_j) \in E_G \quad (2)$$

点 $v_i$ 上への呼の数すなわち割当てを必要とするチャンネル数を $w_i$ とする。各点に対して $w_1, w_2, \dots$ が与えられたとき, 式(1)または式(2)を満足し,

$$|C(v_i)| \geq w_i, (i=1, 2, \dots) \quad (3)$$

となり, かつ

$$\bigcup_{v_i \in V} |C(v_i)| \leq n_c \quad (4)$$

となるようなチャンネルの割当て $C(v_i) (i=1, 2, \dots)$ が存在するかという問題がチャンネルの割当問題である。

グラフ理論では, 実はこの問題は容易に解くことができない(intractable)(処理時間が問題の大きさの指数関数のオーダーで増す)ものの一つであることが知られている。なぜならば, $g$ の点 $v_i (i=1, 2, \dots)$ を $w_i$ クリークで置き換え, $v_i$ と隣接していた点と $w_i$ クリークの各点とを枝で結んで得られたグラフを考える。このとき, このグラフ上ではチャンネルの割当問題は隣接するどの点にも同じ色がないように各点に1色ずつ割り当てたとき, 色数は $n_c$ で十分かという $n_c$ -彩色可能性を問う問題となっている。この彩色可能性問題はNP完全問題である<sup>(11)</sup>からである。

式(2)より, 同一チャンネルが使用できる点は $G$ 上でクリークをなしていることがわかる。このことから, チャンネルの割当問題は各点のチャンネル数が式(3), (4)を満足するように $G$ の(極大)クリークへチャ

ネルを割り当てる問題と等価となる。この考え方は割当アルゴリズムを考えるとときに便利である<sup>(40)</sup>。更に、 $G$ のクリークの集合はダイナミック法を用いた場合のトラヒック特性の解析に用いられる<sup>(45),(46)</sup>。

以上のように、一般に、大きな系に対してチャンネルの割当てを短時間に行うことは困難であるが、 $g, w_i$ に制限をつけた場合は解が比較的容易に求まる場合がある<sup>(40),(41),(42)</sup>。その中の例で、Greedy アルゴリズムが使用できるものには交換網における再配置接続可能網 (rearrangeable network) や衛星通信の SS/TDMA 方式等が入る<sup>(36)~(38)</sup>。このようにチャンネル割当問題をグラフ理論的にとらえることにより、その問題の複雑性が明確になると共に、従来から多くの研究がなされているグラフの彩色やクリークを求めるアルゴリズム<sup>(44),(45)</sup>が利用できる。

### 5. 種々のチャンネル割当法

チャンネルの割当法は概略次の二つに分けられる。

#### [1] 固定チャンネル割当法

#### [2] ダイナミックチャンネル割当法

固定チャンネル割当法 (固定法) は全チャンネルのゾーンへの割当てが時間によって不変であるものをいい、ダイナミックチャンネル割当法 (ダイナミック法) はチャンネルの割当てが時間によって変化するものをいう。一部のチャンネルのチャンネル割当ては時間的に不変で、残りのチャンネルは時間により変るハイブリッドチャンネル割当法 (ハイブリッド法) を第3の方法とする場合もある。ここでは、ダイナミック法を広い意味に解釈して、全チャンネルの割当てが時間によって不変のもののみを固定法とし、他はダイナミック法とする。固定法については明らかであるからダイナミック法について説明する。

前章で述べたようにゾーンへのチャンネルの割当ては一般には手間がかかる。そのため、何らかの制限を設ける。呼の生起は (i), (ii) に従うとしたとき、微小時間に二つ以上の呼が生起することは極めて少ない。そこで、新たな一つの生起呼にチャンネルを割り当てることだけを常に行うとする。このとき、“既に通話中の呼は継続してそのチャンネルを割り当てる”ことを仮定する。この仮定は大きな制限である。これを除いた場合は次章で述べる。

ダイナミック法は次の二つに分類される。

- (a) call by call 形 (非予測形) チャンネル割当法
- (b) 適応形チャンネル割当法

(a) は初期に種々の方法が提案されたもので、“呼の生起時の通話中の呼の (チャンネルの割当て) 状態のみをみて”生起呼にチャンネルを割り当てる方式である。その中に、① First Available 法<sup>(45),(46)</sup>、② MSQ (Mean square) 法<sup>(45),(46)</sup>、③ Nearest Neighbor (NN) 法<sup>(45),(46)</sup>、④ Nearest Neighbor+1 (NN+1) 法<sup>(45),(46)</sup>、⑤ RING 法<sup>(45)</sup>、⑥ Clique 法<sup>(11),(13)</sup>、⑦ Channel borrowing 法<sup>(7),(9)</sup>、⑧ ハイブリッド法<sup>(9),(10)</sup>等がある。①は3.で述べたが、空きチャンネルの検索において最初の空きチャンネルを割り当てる方法であり、最も簡単な方法である。その他の割当法には種々の工夫がある。その工夫の基本的考え方は「次の生起呼ができるだけ呼損にならないように今の生起呼にチャンネルを割り当てる」というものである。②~⑤はバッファゾーンは互いに地理的に近いことに注目して、チャンネルを密に配置するためにバッファゾーンの外側のなるべく近くのゾーンで多く使われているチャンネルを割り当てる方法である。ところで、2.で述べたように地理的に近いから互いにバッファゾーンとなるとは限らない。このような場合を含めて考えるときは  $G$  を使用すると一般的な考察ができる。⑥のClique法はその一方法である。すなわち、ダイナミック法を用いた場合のトラヒック特性は  $G$  のクリーク数が多い程トラヒック特性が良いことに注目し、次の呼に対してなるべくチャンネル割当可能なクリーク数が減少しないようにチャンネル割当てを行うというものである。⑦はまず全チャンネルを固定的に各ゾーンに配置し、これを各ゾーンの名目上のチャンネルとする。生起呼にまず、そのゾーンの名目上のチャンネルを割り当てる。もし、あるゾーンで名目上のチャンネルでは不足となった場合、そのゾーンの隣接ゾーンからチャンネルをバッファ系を崩さないように借りてくるというものである。⑧のハイブリッド法は前述したようにまず全チャンネルを、固定的に割り当てる固定チャンネルとダイナミックに割り当てるダイナミックチャンネルに分ける。まず、各ゾーンに固定チャンネルを配置し、生起呼に対して固定チャンネルでは不足となったときダイナミックチャンネルを割り当てる。このダイナミックチャンネルの割当アルゴリズムには①~⑥の方法が適用できる。以上の説明からわかるように、⑦と⑧の方法は基本的には同じ考え方に立っていると見ることが出来る。

これらのアルゴリズムのどれが最も良いかはその評価の方法で変る。チャンネルの利用効率は系すなわち  $g, G$  によって変るため一概に何ともいえないが、ダ

表1 空きチャンネルの検索数の比較 ( $n_c$ : 全チャンネル数)

チャンネル割当法	検索数等	検索数	備 考
固定チャンネル割当法		$O(n_z)$	$n_z$ : ゾーン当りの固定チャンネル数 ( $n_c \geq n_z \geq n_c/r$ ) $r$ : $G$ の彩色数
ダイナミックチャンネル割当法 (first available)	全ダイナミックチャンネル ハイブリッド	$O(n_c N)$ $O(n_z' + n_D N)$	$N$ : ゾーン当りのパッパゾーン数 $n_c = n_f + n_D$ $n_f$ : 固定チャンネル数 $n_D$ : ダイナミックチャンネル数 $n_z'$ : ゾーン当りの固定チャンネル数 ( $n_f \geq n_z' \geq n_f/r$ )

イナミック法はチャンネルの利用効率を向上させることは確かである。

アルゴリズムの複雑性(計算量)を一つの生起呼に対する空きチャンネルの最悪の場合の検索数で比較すると表1のようになる。

②~⑦の方法は表1のダイナミック法よりチャンネル割当ての工夫の分の手間がかかる。この表から、固定法よりダイナミック法が極端に手間がかかるとみるか、またはたかだかチャンネル数の係数倍のオーダの違いでしかないかを見るかは系すなわち  $G$  の規模や処理装置の速度によるであろう。以上のような結果から現在のところ、ダイナミックチャンネル割当ての効果もち計算量の少ないハイブリッド法またはそれに類似の方法が有望である。

(a) の場合、呼量が大きくなるとチャンネルの利用効率が固定法より悪くなることもある<sup>(85)</sup>。このことは呼の生起時の系の状態のみをみて割当チャンネルを決めることに問題があることを示している。すなわち、呼の生起時の状態だけでなく前の状態も見ながら、呼の発生状況より将来を予測し、チャンネルを割り当てる必要がある。このような方法を適応形チャンネル割当法(adaptive channel assignment)という。(a)の⑦、⑧は呼の生起時のみの状態しか見ていないが、呼量が増加したとき、チャンネルの割当てが変化する可能性が大きくなる方法である。そのため、この方法はやや適応形に近いといえる。適応形チャンネル割当法には呼の生起状況を常に観測しながらチャンネルの割当法を変える方法<sup>(84), (87)</sup>、また、あらかじめ呼量が増加するゾーンの時間帯がわかっているときはそれに合わせて互いにチャンネルを融通し合う方法(フレキシブルチャンネル割当法という<sup>(1), (88), (89)</sup>)があり、これらについて最近検討がなされてきている。

## 6. 再配置接続の適用

前章では、通話中のチャンネルは割当換えをしないことを前提としてきた。通話中のチャンネルの割当換えは

再配置接続(rearrangement)とよばれ、共通制御交換方式であれば適用できるため、古くから研究がなされてきている<sup>(90)~(92)</sup>。

自動車電話系では通話中に自動車移動してゾーン変更をする場合は強制的に再配置接続が行われる。この再配置接続をチャンネルの利用効率を上げるために積極的にする方式が再配置接続形のチャンネル割当法である。この再配置接続の自動車電話への適用は前章の①において、また⑧において、固定チャンネルに空きができたときダイナミックチャンネルの呼を割当換え(reassignment)するという方法に始った<sup>(7), (9)</sup>。一般に、小ゾーン方式の再配置接続のアルゴリズムの複雑性(計算量)等については最初全く考察されていなかった。その後、この小ゾーン方式における再配置接続問題の定式化、およびアルゴリズムの複雑性等が検討され新しいアルゴリズムも提案されてきている<sup>(90)~(92)</sup>。

式(3)、(4)を生起呼の度に解くことは、再配置接続を前提としている。前述したように一般に、この問題には近似的アルゴリズムが必要である。まず、系の再配置接続を図2の簡単な  $G$  を用いて説明する。チャンネルは  $A, B$  のみとし、図5(a)のように  $A$  はクリーク  $(v_1, v_2)$ 、 $B$  はクリーク  $(v_2, v_3)$  で使用中であるとす。  $v_2$  または  $v_4$  の生起呼には枝  $(v_2, v_3)$ 、 $(v_1, v_2)$  があるから  $B$  が割当可能である。  $v_1, v_3$  または  $v_5$  の生起呼には  $A, B$  共に割当不可能である。ところが、  $v_4$  の生起呼に対し、点  $v_4$  の呼を  $A$  から  $B$  に接続換え

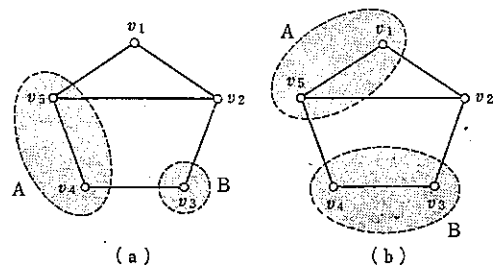


図5 第1段階の再配置接続

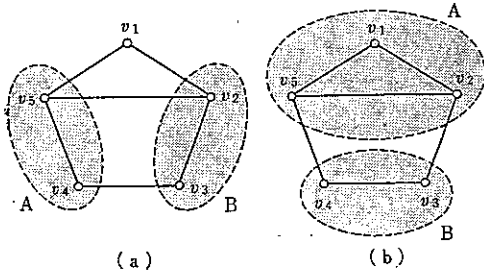


図6 第2段階の再配置接続

すると、Aは $v_3$ のみで使用中心となり、 $v_1$ の呼にも割り当てられる(同図(b)).次に図6(a)にチャンネルA, Bの別の使用状態を示す。 $v_1$ への生起呼に対し、A, B共に割当不可能である。しかし、もし $v_4$ の呼をAからB、 $v_2$ の呼をBからAに接続換えした場合、 $v_1$ の呼にAを割り当てることができる。(同図(b))これも再配置接続によるチャンネルの割当てである。図5, 6ではそれぞれチャンネルの接続換えのチャンネルの数(ゾーンの数でない)1および2である。そこでこれをそれぞれ第1段階および第2段階の再配置接続という。第1段階の再配置接続だけでもその効果がかなり大きいことが知られている<sup>(20)~(22)</sup>。この場合の計算量(検索数)は $O(n_c^2 N^2)$ である。表1の再配置接続しない場合と比較して極端に大きいとみるかどうかは系の規模と処理速度によるであろう。この再配置接続は前章の①~⑧のいずれにも適用できる。例えば、ハイブリッド法で単にダイナミックチャンネルから固定チャンネルへの割当換えのみならず、ダイナミックチャンネル全体に対しても適用できる<sup>(22)</sup>。割当ての計算量を減少させるために、上述のような再配置接続のチャンネル数のみならずゾーンも限定する方法、また4.で述べたように、 $G$ を限定して式(3), (4)をグラフの彩色アルゴリズムを用いて短時間で解く方法も考えられる。どの程度の限定をするかは実際の系の処理速度等によるが、これらは今後の課題である。

### 7. む す び

自動車電話系における周波数の有効利用の一手法であるチャンネルの割当法について述べた。ダイナミックチャンネル割当法および再配置接続を実際のシステム上で実現するためにはアンテナ共用装置等の送信装置、およびチャンネル割当ての制御装置等解決しなければならない種々の課題がある。その中でチャンネルの利用効率がよく、できるだけ少ない計算量のチャンネル割当アルゴリズムを開発しておくことも重要な課題の一つで

ある。小文はこの考え方に沿った研究の流れについて紹介した。その他、これらに関連した種々の興味ある問題や結果があるが、紙面の関係で省略した。ここでは特に、チャンネル割当アルゴリズムの複雑性に注目した解説を試みたつもりである。今後は、系に合せた再配置接続を含む適応型チャンネル割当法の開発等が必要であろう。

### 文 献

- (1) 桑原守二(監修):“自動車電話”, 電子通信学会(昭60).
- (2) “移動通信特集”, 信学誌, 68, 11(昭60-11).
- (3) W.C. Jakes, Jr.: “Microwave Mobile Communication”, John Wiley & Sons (1974).
- (4) L. Schiff: “Traffic capacity of three types of common-user mobile radio communication systems”, IEEE Trans. Comm., COM-18, pp. 12-21 (Feb. 1970).
- (5) D.C. Cox and D.O. Reudink: “A comparison of some channel assignment strategies in largescale mobile communications systems”, IEEE Trans, Comm., COM-20, pp. 190-195 (April 1972).
- (6) D.C. Cox and D.O. Reudink: “Dynamic channel assignment in two-dimensional large-scale mobile radio systems”, Bell System Tech. J., 51, 7, pp. 1611-1629 (Sept. 1972).
- (7) J.S. Engel and Martin M. Peritsky: “Statically-optimum dynamic server assignment in systems with interfering servers”, IEEE Trans. Comm., COM-21, 11, pp. 1287-1293 (Nov. 1973).
- (8) L. Anderson: “A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system”, ibid., pp. 1302-1306.
- (9) D.C. Cox and D.O. Reudink: “Increasing channel occupancy in large-scale mobile radio systems: Dynamic channel reassignment”, ibid., pp. 1302-1306.
- (10) T.J. Kahwa and N.D. Georganas: “A hybrid channel assignment scheme in large-scale cellular-structured mobile radio communication systems”, IEEE Trans. Comm., COM-26, 4, pp. 432-438 (April 1978).
- (11) 仙石, 伊藤, 松本: “移動無線のダイナミックな周波数割当に関する一考察”, 信学技報, CS 75-203 (1976-03).
- (12) 仙石, 伊藤, 松本: “移動通信のダイナミックな周波数割当法における各ゾーンの呼損率について”, 信学技報, CS 76-34 (1976-06).
- (13) M. Sengoku, K. Itoh and T. Matsumoto: “A dynamic frequency assignment algorithm in mobile radio communication systems”, trans. IECE Japan (Section E), E 61, 7, pp. 527-533 (July 1978).
- (14) 伊理正夫(代表): “ネットワーク構造を持つシステムに関する基礎研究”, 文部省科学研究費補助金報告書(昭51, 昭52, 昭53).

- (15) 仙石：“ダイナミック周波数割当法を用いた移動通信系のトラヒック特性について”，信学論 (B), J 61-B, 10, pp. 872-879 (昭 53-10).
- (16) 仙石, 梶谷：“スイッチング網における再配置接続問題に関するグラフ理論的考察”，信学技報, CST 78-157 (1979-10).
- (17) 仙石, 倉田：“再配置接続を行ったスイッチング網の解析法について”，信学技報, CAS 79-111 (1979-10).
- (18) F.S. Roberts：“On the mobile radio frequency assignment problem and the traffic light phasing problems”, Annals N.Y. Acad. of Sci., 319, pp. 466-483 (1979).
- (19) M. Sengoku：“Telephone traffic in a mobile radio communication system using dynamic frequency assignments”, IEEE Trans. Veh. Tech., VT-29, 2, pp. 270-278 (May 1980).
- (20) M. Sengoku, M. Kurata and Y. Kajitani：“Rearrangement of switching networks and its application to a mobile radio communication systems”, Proc. IEEE International Conference on Circuits and Computers, pp. 402-405 (Oct. 1980).
- (21) M. Sengoku, M. Kurata and Y. Kajitani：“Rearrangements in a small cell mobile radio system”, IEEE and NTC, ICC 81, pp. 2371-2375 (June 1981).
- (22) 仙石, 倉田, 梶谷：“移動通信系への再配置接続の適用”，信学論 (B), J 64-B, 9, pp. 978-985 (昭 56-09).
- (23) R.J. Opsut and F.S. Roberts：“On the fleet maintenance, mobile radio frequency, task assignment, and traffic phasing problems”, Proc., Fourth International Conference on the Theory and Applications of Graphs, Wiley, pp. 479-492 (1981).
- (24) R. Kunzel：“A channel assignment scheme for cellular radio networks”, Siemens Forsch. -u. Entwickl. -Ber 11, (Springer-Verlag), pp. 139-142 (1982).
- (25) M. Grevel and A. Sachs：“A graph theoretical analysis of dynamic channel assignment algorithms for mobile radio communication systems”, Siemens Forsch. -u. Entwickl. -Ber. Bd. 12, (Springer-Verlag), pp. 298-305 (1983).
- (26) V.E. Benes：“Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic”, Academic Press (1965).
- (27) 秋山, 岡田：“時分割交換における再配置接続”，信学論 (A), 51-A, 4, pp. 145-152 (昭 43-04).
- (28) 藤木, 雁部：“通信トラヒック理論”，丸善 (昭 55).
- (29) Y. Ito, Y. Urano, T. Muratani and M. Yamaguchi：“Analysis of a switch matrix for an SS/TDMA system”, Proc. IEEE, 65, 3, pp. 411-419 (1977).
- (30) T. Inukai：“Comment on analysis a switch matrix for an SS/TDMA system”, Proc. IEEE, 66, 12, pp. 1669-1670 (1978).
- (31) T. Kashiwabara, S.H. Choe and T. Fujisawa：“Edge-coloring problems in circuit switching networks”, Proc. IEEE, ISCAS 85, 3, pp. 1655-1656 (June 1985).
- (32) 仙石, 倉田, 刈谷, 阿部：“移動通信系のハイブリッドチャネル割当への再配置接続の適用”，信学論 (B), J 65-B, 3, pp. 340-341 (昭 57-03).
- (33) 仙石, 阿部：“移動通信系の適応型チャネル割当法に関する考察”，昭 58 信越支部大, 70.
- (34) 仙石, 工藤, 阿部：“小ゾーン方式移動通信系における適応型チャネル割当アルゴリズム”，信学技報, CAS 84-61 (1984-08).
- (35) 田島, 今村：“移動通信系におけるフレキシブルチャネル割当法の一考察”，信学技報, CS 84-160 (1985-02).
- (36) 田島, 今村：“移動通信におけるダイナミックチャネル割当法の一考察”，信学技報, CS 85-22 (1985-05).
- (37) M. Sengoku, W. Kudo and T. Abe：“Adaptive channel assignments in a small cell mobile radio communication system”, Proc. Eleventh International Teletraffic Congress, 1, pp. 2.3 B-1-1~2.3 B-1-7 (Sept. 1985).
- (38) 仙石, 工藤, 久保田, 阿部：“小ゾーン方式自動車電話のトラヒックの過渡応答について”，昭 60 信越支部大, 77.
- (39) 仙石, 源, 大塚, 阿部：“グリーンシールズモデルを用いた自動車電話系のトラヒックシミュレーションについて”，同上, 78.
- (40) 仙石, 和泉, 吉越, 阿部, 山口, 阿達, ほか：“自動車電話システムのトラヒック解析のための自動車の動きの測定 (I), (II)”，昭 59, 昭 60 信越支部大, 59, 79.
- (41) A.W. Aho, J.E. Hopcroft and J.D. Ullman：“The Design and Analysis of Computer Algorithms”, Addison-Wesley (1979).
- (42) K. Appel and H. Haken：“Every Planer map is 4-colourable”, Bulletin American Mathematical Society, 82, 711 (1976).
- (43) 伊理, ほか：“演習グラフ理論”，コロナ社 (昭 58).
- (44) N. Christofides：“Graph Theory -an algorithmic approach”, Academic Press (1975).
- (45) S.M. Korman：“The graph-colouring problem”, Combinatorial Optimization, Ed. N. Christofides et al., pp. 211-235, Wiley (1979).
- (46) M.C. Golumbic：“Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs”, Academic Press (1980).