共進化の概念を導入した遺伝的アルゴリズムによる地域施設配置手法

—施設の立地と利用者割当の共進化に基づく最適施設配置—

A NEW METHOD OF FACILITY LOCATION BY A GENETIC ALGORITHM
BASED ON CO-EVOLUTION

—Locational optimization of facilities by co-evolution of their locations and user allocation—

堀 彰男*, 吉川 徹**

Akio HORI and Tohru YOSHIKAWA

The purpose of this study is to develop a general method of facility location by Genetic Algorithm based on Co-Evolution. To this end, this article proposes a new method which forms an individual by the following two chromosomes, that is, 'location chromosome' and 'allocation chromosome'. These two chromosomes co-evolve in an individual. The proposed method is applied to a location-allocation problem of day facilities for the elderly in Karasuyama district of Setagaya-ku, Tokyo. The results are as follows:

- 1) this method shows an excellent ability to search a solution;
- 2) the solutions are obtained through a series of alternate trial-and-error by two chromosomes;
- 3) this method searches a solution which balances various factors of facility location, which gives practicality to the proposed method.

keywords : Location-Allocation Problem, Location, Allocation, Genetic Algorithm, Co-Evolution, Trial-and-Error

最適施設配置問題、施設立地、利用者割当、遺伝的アルゴリズム、共進化、試行錯誤

1. 本研究の目的と背景

本研究は、解空間が離散的かつ膨大で解決が困難な問題の解法として近年注目されつつある「遺伝的アルゴリズム」(Genetic Algorithm: 以下、G.A.)¹⁾に対して、生物学における「共進化」の概念を導入することによる、より汎用性の高い地域施設配置手法の開発を目的とする。本研究は以下2つの背景より位置づけられる。

1.1 最適施設配置研究としての位置づけ

従来の最適施設配置研究では、配置計画案をモデルとして捉える際に、施設の立地問題 (Location Problem) についてのみを組合わせ最適化問題として定式化し、利用者の施設への割当問題 (Allocation Problem) については、最近隣施設選択や確率モデルによる施設選択モデルに従って一意に決定していた²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また利用者の施設割当は地区などの利用者の集団を単位とするものが多い。この点は、G.A.を用いた最適施設配置の既往研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾も同様である。

しかしながらこれは、施設が一意に利用者を割当てていると解釈でき、施設側の視点に偏った傾向にあると考えられる。利用者の施設選択を汎用的にモデル化するためには、個別の利用者の施設への割当問題も組合わせ最適化問題として定式化し、施設選択モデルは利用者が施設を選択する段階で導入すべきである。

青木ら⁹⁾は「利用者サイドの観点に立った」最適施設配置問題を議

論している。また武田⁹⁾は保育所など、目的地への途中に立ち寄る施設である中継施設の最適配置問題をG.A.の一種である「進化戦略」で解いたうえで、「利用者属性によって非集計化」された立地・配分モデルの必要性を指摘している。これらの指摘を突き詰めてゆけば、立地問題と個別利用者割当問題を同時に組合わせ最適化問題として定式化してはじめて、施設と利用者双方の視点を組み込んだ汎用的な最適施設配置問題 (Location-Allocation Problem) になると考えられる。

この点をふまえ、本研究では最適施設配置問題をG.A.で解く手法として、既往研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾の施設位置の進化による最適化だけでなく、個別の利用者の施設への割当をも同時並行的に進化させ最適化する新しい手法を提案する。これにより施設と利用者に対して様々な属性情報を付与することで、定員設定や包含階層構造を有する施設⁹⁾など複雑な構造を持つ施設配置計画に対応できる汎用性の高さが期待される。

1.2 G.A.研究としての位置づけ

建築・都市計画分野におけるG.A.研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾の動向を概観すると、最適化結果を得ることを主眼としたものが多い傾向にあり、結果を得るまでの過程や手法の本質的な議論を扱った研究はそれに比べて未だ少ない。しかしながら、そもそもG.A.は「人工生命」の分野で開発され、その根本的位置づけは「生命とは何か」という究極的探求のための道具である。従って、最適施設配置問題にG.A.を適用する

* 浜銀総合研究所 修士(工学)

** 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻
助教授・博士(工学)

Hamagin Research Institute, Ltd., M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Arch., Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

場合においても、単に解を求めるだけではなく、解を得るまでの過程から問題の本質を探ることに大きな意義があると考えられる。

本手法のG.A.研究としての特徴は、施設立地と個別利用者割当という最適施設配置問題を構成する2要素が互いに影響し合いつつ進化する点である。施設立地が進化すれば、それに合わせて個別利用者割当が進化し、これが施設立地のさらなる進化を促す。これは生物学での「共進化^{注1) 16)17)18)19)20)}」の概念である。

2. 本研究における G.A. の設定

ここでは、本手法におけるG.A.の基本的な設定について述べる。

始めに、以降で使用する用語の意味の明確化を兼ねて、最適施設配置問題をG.A.で解く過程を概観しておく。

それぞれの配置計画案(問題の解の候補)を「個体」と呼ぶ。個体は計算機で処理されるので、配置計画案は数字で表す必要がある。その数字での表現方法を「コーディング」、表現された数字を「遺伝子」、一団の遺伝子の列を「染色体」と呼ぶ。配置計画案の望ましさを示す評価指標(評価関数、目的関数)の値は適応度と呼ばれる。

G.A.による最適解の導出は次の過程を経る。最初にいくつかの個体(配置計画案)を用意する。これらの個体から遺伝的操作と呼ばれる処理(詳細は後述)によって多数の子の世代の個体を作り出す。その中で適応度の良い個体を残し、さらに次世代を作り出す処理を繰り返してゆくことで、より良い配置計画案が練り上げられてゆく。

以降では、本手法におけるコーディング、評価関数(適応度)、遺伝的操作、進化の流れの詳細を述べる。

2.1 コーディング

前述のように本研究では施設立地と個別利用者割当の2要素で1個の配置計画案を構成する。したがってコーディングでは施設立地と利用者割当の2つの染色体で1個体を表現する。例えば図1上の様に、

図1 本研究のコーディング手法

4×4のメッシュに2つの施設が立地し、利用者が利用圏を形成する配置計画案があったとする。この配置計画案をG.A.における個体に変換すると、図1下の様になる。前半の染色体は利用者割当を表現しており、利用者1人1人に対し利用する施設が施設1の時は0、施設2の時は1という遺伝子情報が与えられる。後半の染色体は施設立地を表現しており、施設立地メッシュの番号を2進数表示する。この2つの染色体が1個体を形成し、共進化を起こしながら進化していく。

図1の例では1個体につき40ビット必要となるが、ビット数は対象とする問題によって異なる。本手法は従来に比べビット数が多く解空間が莫大なものとなり(N ビットで解空間は 2^N)、解を探索するのがより困難になる欠点がある。しかしそれは、利用者割当を一意に決定していたものを、利用者をコーディングすることにより汎用性を高めている点とトレードオフの関係にある。この汎用性は解探索能力の高いG.A.を援用するからこそ可能なことなのである。

2.2 評価関数

G.A.では2.1で述べた個体を環境に適応させる。この度合が「適応度」であり、個体と1対1対応しており、計画者が設定する評価関数に従い算出される。つまり環境はこの評価関数に支配されることとなり、評価関数に設計者の意図がどの程度反映するかで、モデルの力量が決定することになる。例えば、各遺伝子にメッシュ空間における「位置情報」を属性として付与することにより、施設と利用者との距離に関する問題(ミニサムの問題やミニマックス問題など)として定式化が可能となる。この様に、各遺伝子に対し、様々な属性(性別、年齢、経済力、身体状況などの情報)を付与することにより、より複雑な定員設定や包含階層構造を有する施設などの定式化が容易に行える。このことが本手法の最大の特徴である。

2.3 遺伝的操作

遺伝的操作は染色体に含まれるスキーマ(適応度を高める遺伝子群)を保存しながら効率よく個体を進化させるという点で重要な処理である。本研究では、交叉処理と突然変異処理を採用する。

交叉処理は、ある条件により選択された2つの個体を親とし、子供を生成することによりスキーマを次世代に継承させる作業のことを言う。ここでは、図2左の様に乱数に従い前半と後半の染色体に対し交叉位置を決定し、2つの親の遺伝子群を入れ替え生成する。1つの

図2 交叉処理と突然変異処理

図3 進化の流れ

カップルから2つの子が生成される。

突然変異処理は、個体を構成する染色体の遺伝子をランダムに対立遺伝子(0ならば1、1ならば0)に変換し、種の多様性を保持する作業のことを言う。ここでは、図2右の様に乱数に従い前半と後半の染色体に対し変異箇所を決定し、遺伝子を入れ替える。

両処理とも前半と後半の染色体の一方にのみ処理を施しているのは、処理そのものに前半は利用者割当、後半は施設立地の変更という2つの意味を持たせるためである。これは一方の変更により個体が環境に適応することで、他方も良い意味でそれに合わせて適応をしていく、両染色体の共進化による「協調・共生」効果を目論んでいる。

2.4 進化の流れ

以上の遺伝的操作により個体を図3に従い進化させる。遺伝的操作は世代によらず常に行い、親の選択は、第1位の個体を除き、適応度に従い重み付けをしたルーレット選択⁽²⁴⁾で決定する。進化を終了させる方法は、設定した終了世代に達するか若しくは、第1位個体の適応度が設定した世代以上変化しなかった場合とする。進化が終了した世代を「収束世代」と呼び、その世代の第1位個体を最適解とする。なお、第1世代の個体は全て乱数により発生させる。

また図中の致死個体とは、配置計画案として成立しない個体(同じメッシュに複数の施設が立地する場合)のことで、これらは上位個体と入れ替えられる。

3. 仮想都市への適用

ここでは本手法の性格と挙動を精緻に分析するため、図4の様にメッシュ分割した仮想都市において、総移動距離の最小化(ミニサム)問題をベースとした施設配置の最適化を試みる。特にここでは、本手法によって自然な定式化が可能になる問題の例として、3.1では定員設定、3.2では包含階層構造を有する施設についての最適配置を行う。また3.3では3.1の最適化結果を用い、進化が収束に至るまでの2つの染色体の挙動を分析することにより、本手法におけるG.A.の進化過程と配置計画案の形成過程との関係を構成的に解釈する。

図4 仮想都市

3.1 定員設定を有する施設の最適配置

(1) 前提条件

計64人の利用者が各メッシュに一様に分布する中で4箇所に施設が立地する問題を考える。各遺伝子には位置情報を付与する。評価関数は次の(1)式を用いた。

$$Z = \sum_{i=1}^m d(i) \cdot \alpha + \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{(pf(j) - capa(j))^2}{n} \right\} \cdot \beta$$

(1)

$d(i)$: 利用者*i*の移動距離 m : 全利用者数
 $pf(j)$: 施設*j*の利用者数 n : 全施設数
 $capa(j)$: 施設*j*の定員 α, β : パラメータ

評価関数の第1項は利用者の総移動距離(1メッシュの幅を1とする)である。サービス水準という意味で施設と利用者双方にとって重要な施設定員(16人とする)を考慮するため、定員が守られない場合のペナルティとして、評価関数の第2項に定員と実際の利用者数との

ずれの二乗平均を加えた。二乗としたのは、定員からの乖離が激しくなると加速度的にサービス水準が低下すると考えたためである。

両者は単位を異にするため、重みを調整するパラメータ(α, β)を各項に掛けている⁽²⁵⁾。このパラメータの値の決定は困難なので、(α, β)=(10,1),(5,1),(1,1),(1,100)について実験し、最も適切な解が得られた(10,1)を採用した。このパラメータ設定では、4施設のうち1施設で利用者数が定員を1名上回り、他1施設で1名下回った場合、総利用距離に換算して0.05のペナルティが課される。

(2) 結果と考察

最適化結果を表1、図5に示す。施設立地と利用圏(図5)は完全な点対称で、各施設の利用者数は定員設定の縛りがあるために16人とばらつきはない。本結果は制限付き全数探索⁽²⁶⁾で得られる最適解と同じことから完全解とほぼ断定できる。組合せ総数 5.7×10^{45} 個の解空間の中から、わずか167万個の探索で完全解を導出していることから、G.A.の解探索能力の高さが明かとなった。

また、本結果の利用圏は直感では導出しづらい複雑な形状であるという点も注目に値するものと思われる。

表1 最適化結果

適応度		収束世代数	探索数	組合せ総数	計算時間 ^(注5)
初期世代	収束世代				
2214.81	984.05	5580	1,674,000	5.7×10^{45}	6:01.22

図5 最適化結果(施設立地と利用圏及び利用者数)

3.2 包含階層構造を有する施設の最適配置

(1) 既往研究のレビュー

包含階層構造を有する施設の最適配置に関する研究は、2つのタイプに分けられる。1つは連続空間において理論的に最適配置問題を扱った鈴木⁽²¹⁾、奥貫⁽²²⁾、岸本⁽²³⁾による研究、もう1つは離散空間において実証的に最適化を行った野坂⁽²⁴⁾による研究である。連続空間では理論的な最適化は可能だが実証的な扱いは難しい。一方、離散空間では実証的なケーススタディが可能な反面、組合せ総数が莫大なものとなり、階層毎に段階的な最適化をせざるを得ず解空間を制限してしまっている。つまりこの2つのタイプはお互いの長所短所を補完し合っているのである。

本手法は後者のタイプに属するが、遺伝子に階層情報を付与することにより、離散空間において階層構造を含めた一体的な最適化が行えるのが特徴である。

(2) 前提条件

上位施設利用者16人、下位施設利用者64人が図6の様に分布し、上

図6 利用者(上位・下位)の分布

位施設2箇所、下位施設2箇所の計4箇所に施設が立地する問題を考える。各遺伝子には位置情報と階層情報を付与し、評価関数は3.1と同様、各階層毎に、総移動距離の項と実際の利用者数と施設定員（上位：8人、下位：16人）との乖離の項からなる、次の(2)式で定式化する。パラメータは3.1に倣って α と β を10、 γ と δ を1とした。

$$Z = \sum_{i=1}^{m_U} d_U(i) \cdot \alpha + \sum_{i=1}^{m_L} d_L(i) \cdot \beta + \left\{ \sum_{j=1}^{n_U} \frac{(pf_U(j) - capa_U(j))^2}{n_U} \right\} \cdot \gamma + \left\{ \sum_{j=1}^{n_L} \frac{(pf_L(j) - capa_L(j))^2}{n_L} \right\} \cdot \delta$$

$Z \rightarrow \text{minimize}$ $d_U(i), d_L(i)$: 利用者 i の移動距離 (U : 上位施設, L : 下位施設)
 $pf_U(j), pf_L(j)$: 施設 j の利用者数 (U : 上位施設, L : 下位施設)
 m_U, m_L : 全利用者数 (U : 上位施設, L : 下位施設)
 n_U, n_L : 全施設数 (U : 上位施設, L : 下位施設)
 $capa_U(j), capa_L(j)$: 施設 j の定員 (U : 上位施設, L : 下位施設)
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: パラメータ (2)

(3) 結果と考察

最適化結果を表2、図7に示す。利用圏（図7）はほぼ完全な点対称で、各施設の利用者数のばらつきもない。

施設の立地に関して3.1の結果（図5）と比較すると、下位施設である③と④は同じ位置に立地しているが、上位施設である①と②は上位施設利用者が地域全体に散らばっていることから、それぞれ1メッシュ、中心に引っ張られている。

利用者の割当に関しては、上位施設利用者がいずれも最近隣施設選択をしている一方で、左端の下から4個めのメッシュなど下位施設利用者が最近隣施設選択をしていないように見える部分がある。これは、施設①と②が図5と位置が変わったため、下位施設利用者にとって最近隣の施設が複数存在するメッシュができたためである。左端の下から4個めのメッシュはその例であり、実際には最近隣施設に割当てられている。これらのメッシュの利用者を定員を守りつつどちらの施設に割当てるかによって複数の最適解が存在する。

以上より、階層構造を含めた一体的な最適化が本手法を用いることにより完全解とは断定できないまでも、解けるということが解った。

3.3 進化過程についての分析

(1) 適応度の推移（最優秀個体と適応度の幅）

最優秀個体の適応度の推移（図8）は、急激な進化と長期間における段階的な進化とに2分される。300世代辺りまでの急激な進化は多様な個体（配置計画案）が生まれる「大進化」、それ以降収束世代までは個体がいくつかに絞られその中でより優秀な個体を選択される「小進化」とであると言える^{注6) 19)}。

この「大進化」において、種の多様性をその世代の適応度の「幅」として表現したのが図9である。第1世代は種が非常に多様である（幅が大きい）が、それ以降世代が進むにつれ適応度が減少するとともに、種の多様性は低下している（幅が小さい）。世代が進むにつれ、種の中で優秀な遺伝子を持った個体が徐々に絞られていることが解る。その一方で、逆に適応度の幅が大きくなる世代もあり、これは前述したルーレット選択による効果である。

(2) G.A.の進化過程と配置計画案の形成過程

実際の配置計画案の形成過程を理解するため、各世代における最優秀個体の進化過程の一部を図10に示した。ここで重要なことは、その個体がどういった遺伝的操作で生成されたかという点である。これを図中では処理を施す染色体の位置によって2つに区別している（白矢印が前半、黒矢印が後半の染色体）。矢印の挙動は世代により差はあ

表2 最適化結果

適応度		収束世代数	探索数	組合せ数	計算時間
初期世代	収束世代				
2577.5	1346.6	7185	2,155,500	2.2×10^{10}	8:03.66

図7 最適化結果（施設立地と利用圏及び利用者数）

図8 最優秀個体の適応度の推移

図9 上位250個体の適応度幅の推移

るが「黒矢印のあと白矢印が数世代連続する」パターンを繰り返している。前半の染色体が利用者割当、後半が施設立地を表現していることから、配置計画案は「まず施設立地を決定し、その立地において利用者割当が徐々に変更される」というパターンを繰り返すことにより形成されていくということが解る。これは、2つの染色体が良い意味で競い合う「協調・共生」の現象で、まさにG.A.において共進化が起こり、2つの染色体が「赤の女王仮説^{注11)}」的振る舞いをしながら進化していると言える。またこれは、人間が配置計画案を考える際に、施設立地と利用者割当のどちらか一方を固定しながら他方を変更していくという作業の繰り返して徐々に案を改善していく思考過程、つまり「試行錯誤」による学習形態と類似している。

この「試行錯誤」についてさらに細かく分析をすると、利用者の割当における試行錯誤過程は図11に示すように2つのパターンに分類できる。両方のパターンとも最終的には利用者の割当が進化する。その途中で、パターン1では施設の立地に関して、パターン2では利用者の割当自体に関して、無駄な案が挟まっている。最終結果を見ると、

図10 各世代における最優秀個体の進化過程

図11 試行錯誤のパターン

両者ともより近道が出来るのにも関わらず、世代と世代の間に余計な「試行錯誤世代」を挟んでいる。これは一見遠回りをしている様に見えるが、試行錯誤とは本来遠回りをしながらもその過程でより良い解を探索していく学習形態のことを指しており、この点においてもG.A.の進化過程が、人間の思考過程と類似していると言える。しかし、人間は経験や知識により「当たり」をつけながら思考するのに対し、G.A.はそれをランダムに行う点が決定的に異なる。つまり先入観等の恣意的な要素に左右されることなく着実に解を探索するという点で、G.A.は人間とは異なる解探索能力を獲得していると言えるのである。

4. 実際の都市への適用 (ケーススタディ)

本章では、本手法の実用性を検証するため、実際の都市にこれを適用し、ケーススタディとする。

4.1 対象地域の概要と前提条件

対象地域を世田谷区烏山地域北部6丁目(図12)とし、100mメッシュにより15×13の195メッシュに分割した。ここに、通所型高齢者施設(デイケア・デイサービスセンター)を最適配置する。当施設は利用者の身体状況により「重介護型(上位)」「痴呆症老人向け毎日通所型(中位)」「軽介護型(下位)」と、3つのサービスからなる包含階層構造を有している。

総利用者数はコーホート変化率法により算出した2020年の高齢者(65歳以上)推計人口と、東京都が設定した高齢者の状況別出現率より、必要施設数はこれらの値と施設定員(上位:45人、中位:16人、下位:90人)より求めた(表3、野坂²⁴⁾と同様)。さらにこの町丁目別の利用者数を野坂²⁴⁾と同様の方法^{注7)}でメッシュに配分した。

4.2 結果と考察

最適化結果を表4、図13に示す。3章に比べ設定が複雑になり、組合せ総数も莫大なもの(3.2×10⁴⁶⁹)となるが、G.A.は約1億個の個体を探索することで解を導出している。

図12 対象地域と2020年の利用者密度

表3 2020年の利用者数と必要施設数

	高齢者人口	上位施設利用者	中位施設利用者	下位施設利用者
北島山4丁目	480	5	6	91
北島山5丁目	137	0	0	26
北島山6丁目	622	8	8	118
北島山7丁目	522	7	7	99
北島山8丁目	300	5	5	57
北島山9丁目	327	0	6	62
計	2388	25	32	453
必要施設数	-	1	2	6

まず利用圏について考察を加える。本結果は複雑な設定にも関わらず、利用圏の飛び地（異なる利用圏をまたいだ形で発生する利用圏）が発生していない。従来のシステマティックな利用者の割当²⁴⁾では、定員に達した施設はその時点で利用者の受け入れを拒否してしまうため、最近隣施設を選択できない利用者による飛び地発生の問題が存在した。堀²⁵⁾ではこの問題に着目し、定員設定に幅を持たせる柔軟な利用者割当により飛び地解消に効果を上げているが、各施設の利用者数がばらついてしまうため、どこまでその幅を持たせるのかという本質的な問題を課題として残している。一方本手法は、評価関数に最近隣施設選択とともに定員設定による縛りがあるため、トレードオフの関係にあるこの2つの要素が、ある種の平衡状態に至っているものと考えられる。それ故に、利用者数のばらつきが少なく飛び地も発生しない、バランスの良い解が得られたのである。

次に施設立地に関して考察を加える。上位施設（①）は、利用者密度が比較的高い地域南東部に若干引張られる形の立地となっている。中位施設（①②）は、地域全体を北東から南西に向けて分断する形で立地している。また、利用者密度の高い地域南東部に位置する①に多くの利用者が割当てられている。下位施設（①②③④⑤⑥）は、利用者密度により地域南東部に多少偏って立地しているものの、全体的にはまんべんなく立地している。これらから、利用者の分布に大きく影響を受ける施設の立地に関しても、階層を一体的に最適化することが可能な本手法は、移動距離と定員設定との微妙な案配をとることによりバランスの良い解を導出したと考えられる。

以上より本手法は、施設立地と利用者割当という2つの問題を一体的に解くと同時に、利用者の分布、移動距離、包含階層構造、施設の定員設定など施設配置計画に関わる複数の要素の微妙な案配をとりながら、解を探索しているということが解った。従って本手法は、より複雑な要素が混在する現実の都市において、それらを一体的に処理することのできる、実用に耐える手法であると言える。

表4 最適化結果

人口密度		収束世代数	総歩数	組合せ総数	計算時間
初期世代	収束世代				
24764.5	11566.07	164,750	98,850,000	3.2×10^{49}	10日程度

図13 最適化結果（施設立地と利用圏及び利用者数）

5. 総括

本研究では、最適施設配置問題が施設立地と利用者割当という2つの問題から成立している点に着目し、特に利用者割当については個別利用者の割当を明示的に表現して、施設立地と利用者割当をG.A.にお

ける個体を形成する2つの染色体とすることにより、それらを共進化させながら最適解を導く新たな手法を提案した。

得られた知見について以下にまとめる。

○最適施設配置問題において、立地問題と個別利用者割当問題を同時に組合わせ最適化問題として定式化して、両者を共進化させることによってG.A.で解く手法を開発した。結果として、定員設定を有する施設の最適配置において、膨大な解空間の中からわずかな探索で完全解を導出することができた。また、包含階層構造を有する施設の最適配置において、階層構造を一体的に最適化することができた。さらに実際の都市における通所型高齢者施設の最適配置において施設配置計画に関わる様々な要素の微妙な案配をとりながら解を導出できた。これらの結果から、本論文での定式化とG.A.による解法は、最適施設配置問題の解法としての一定の汎用性が期待でき、実用に耐えるものであると考えられる。

○個体の進化過程を分析することにより、適応度が「大進化」と「小進化」という2つの進化速度で推移していることが解った。また、配置計画案の進化は、まず施設立地が変更され、その立地において利用者割当が徐々に変更され、また施設立地が変更されるという、共進化に類した過程をたどることが解った。さらに人間の思考過程と類似した「試行錯誤」による解の探索がG.A.でも行われていた。

これら知見をふまえ、今後の課題について以下にまとめる。

○本手法は、計画者の意図による評価関数の設定により、幅広い問題に対応できる汎用性の高い手法を目指している。この論文では手法の実用性の検討という意味で、最もオーソドックスな「距離によるミニサム問題」をベースとして評価関数を定式化した。さらに利用意向調査や生活実態調査などの結果を利用することにより利用者1人1人の価値観を遺伝子に付与し、複雑系を成す現代都市において、それらの要素を一体的に最適化することが可能であると考えられる。このための実証的な研究が必要である。

○G.A.の設定は経験的側面が強く、理論的な裏付けがしにくい。本研究においても、数度にわたる実験を繰り返すことにより、仮想都市（第3章）での設定にたどり着いた。実際の都市におけるケーススタディ（第4章）については、その設定をそのまま用いている。しかし、対象とする問題の内容によってG.A.の設定は異なるため、その問題に適した、より効率的に解を探索する設定があるものと考えられる。特に適応度を算出する評価関数をどのように構成するかは、パラメータの値の決定を含めて重要である。これらG.A.の技術的側面について、理論的な裏付けを行う必要がある。

○本研究では、G.A.の設定において、施設立地と利用者割当を2つの染色体として一個体（配置計画案）を構成した。この結果、施設立地と利用者割当は一体として次世代に引き継がれるため、両者の組み合わせの中で、発生しやすい組み合わせと発生しにくい組み合わせが生じる。一方、G.A.の設定において、両者を異種の生物と見立てて共進化させる方法を採用すれば、両者を別個に処理できる。そうすれば次世代を構成する遺伝的操作などの処理にあたって、より高い自由度が期待できる。これについて検討する必要がある。

○最適施設配置に関する計算手法としては、G.A.以外にもCooper²⁶⁾の

方法などの解法が知られている。本論文の手法は、個別利用者割当を明示的に扱う点で従来の解法とは設定を異にするため、両者の単純な比較は困難である。たとえば本手法は、本論文の例では定員を考慮して個別利用者を割当てている。一方Cooper²⁾ではsource capacities (施設の容量) に制限がない。しかし、利用者数が少ない場合など、単純な構造の問題であれば、両者で解いて比較することが可能であると予想されるので、この比較も将来の課題である。

○実際への適用にあたって、本研究では地域をメッシュに分割した。

この方法の問題点として、次の誤差が生じることが挙げられる。それらは、(1)メッシュへの利用者の割当^{注1)}による利用者密度の誤差、(2)利用者の位置をメッシュ中心で近似することによる距離の誤差、(3)施設位置をメッシュ中心で近似することによる距離の誤差、(4)道路距離を直線距離で近似する距離の誤差、である。

これらの誤差の要因のうち、(1)のメッシュへの利用者割当は、野坂ら²⁹⁾が指摘するように、現状では解消に膨大な手間がかかる。しかし国勢調査の基本単位区データなど詳細な人口分布データのGISでの処理が可能になりつつあるので、将来は誤差の減少が期待できる。(2)、(3)については栗田²⁶⁾や田頭ら²⁷⁾などの研究があるが、これらを実際に適用するためにはさらなる実証研究が必要である。(4)に関しては、腰塚ら²⁸⁾により、両者にはある程度の関連があることが指摘されている。いずれの誤差についても、実際の計画に適用するにあたっては、考慮する必要があるため、これらの誤差を定量的に評価する研究が必要である。

なお本論文の一部は筆者によって口頭で発表されたもの²⁹⁾である。

謝辞

本研究に関して東京都立山崎高等学校教諭の野坂正史氏と匿名査読者から有益な助言を頂いた。ここに記して心から感謝の意を表する。

注

注1) 一般に「進化」と言う種が単独で環境に適応することを指す。ここで言う環境とはその種が生息している地形や天候など物理的環境である。しかし、種はその周りに生息する異種の生物からも様々な影響を受けている。どんな生物も常に進化しているため、ある生物に着目すると、周囲の生物の進化によって自らの生息環境が変化するために、自らもまた進化し続ける必要がある。この説をヴァン・ペイレンは「赤の女王仮説」と名付けた¹⁸⁾。このように、生物が互いに影響を及ぼし合いながら進化することを「共進化」と呼ぶ。なお本研究では、G.A.におけるひとつの個体を構成する2つの染色体を、生物学における異種の生物と見立て、共進化させる。

注2) 次世代に遺伝子を継承させる親個体を選択する方法の1つで、以下のように適応度により重み付けした確率で決定する。

$$P(n) = \frac{\text{fitness}(n) - \text{fitness}(N)}{\text{fitness}(1) - \text{fitness}(N)}$$

$P(n)$: ルーレット選択の確率
 $\text{fitness}(n)$: 第n番目の個体の適応度
 N : 母集団の個体数

ルーレット選択の特徴は、下位個体に対しても親になる可能性を残していることで、種の多様性により進化が活性化され、局所解に陥るのを防ぐ点にある。

注3) この問題を解くためであれば、 α 、 β の比率だけに意味があるので、パラメータはどちらか一方だけで充分である。ただしここでは、将来の汎用性を考慮して、たとえば評価関数の施設運営コストへの換算など、評価関数の値に意味を与えられるよう、ふたつのパラメータを設定した。本論文では評価関数Zの値に意味を持たせてはいないため、評価関数を無単位と考えれば、 α 、 β の単位はそれぞれ、距離の逆数、人数二乗の逆数となる。

注4) 施設立地を決定し利用者は最近隣施設選択をする従来の方法を用いている。この問題だと64メッシュから4メッシュの立地場所を選択する組合せ最適化問題として定式化でき、その組合せ総数は本来、 P_4 となる。しかし、この値は計算機に耐えうる値ではないので、 C_4 として解空間を制限している。

注5) 日本IBM社製ワークステーション (Power2、66.6Mhz、128MB) による。

注6) 種の変化がほとんど見られない「静止」期間が長く続いたあとで、突然大きな進化が起き、それを繰り返しながら進化は進むという、生物学においてゲルドラが主張している「断続平衡説」と類似している。

注7) 町丁目単位で得られた利用者数の100mメッシュへの配分は、それぞれのメッシュについて、メッシュの全体が住宅地のものは1、住宅地を含まないものは0、それ以外は0.5の重みを付けて、重みに比例して配分した。

参考文献

- 1) ジョン・H・ホランド著／嘉数侑昇監訳：遺伝アルゴリズムの理論—自然・人工システムにおける適応—、森北出版、1999.5
- 2) Cooper, L.: Location-Allocation Problems, Operations Research, 11, pp.331-343, 1963
- 3) 岡部篤行、鈴木敦夫：最適配置の数理、朝倉書店、1992.4
- 4) 谷村秀彦：地域施設計画の考え方／地域施設計画モデル、新建築学大系21／地域施設計画、彰国社、pp.3-26／pp.309-386、1984.3
- 5) 谷村秀彦：施設配置計画の数理、谷村秀彦他著：都市計画数理、朝倉書店、pp.56-96、1986.4
- 6) 大澤義明：施設配置理論モデル、日本建築学会編：建築・都市計画のためのモデル分析の手法、井上書院、pp.136-149、1992.7
- 7) 田村亨、榎谷有三、斉藤和夫：遺伝的アルゴリズムによる駐車場の最適配置、日本都市計画学会学術研究論文集、第29号、pp.307-312、1994.11
- 8) 青木義次、村岡直人：遺伝的アルゴリズムを用いた地域施設配置手法、日本建築学会計画系論文集、第484号、pp.129-135、1996.6
- 9) 武田祐子：時空間プリズムを考慮した中継施設の立地・配分モデル、地理学評論、72A-11、pp.721-745、1999.11
- 10) 大崎純：マルコフ連鎖モデルと遺伝的アルゴリズムによる施設配置最適化、日本建築学会計画系論文集、第510号、pp.251-258、1998.8
- 11) 瀧澤重志、河村廣、谷明勲：遺伝的アルゴリズムを用いた都市の土地利用パターンの形成、日本建築学会計画系論文集、第495号、pp.281-287、1997.5
- 12) 日高靖郎、浅見泰司：遺伝的アルゴリズムを用いた画地分割最適化システム、地理情報システム学会講演論文集、第7巻、pp.275-280、1998.9
- 13) 山下剛、友清貴和：遺伝的アルゴリズムを用いた高齢者在宅福祉サービス供給の最適化手法試案、日本建築学会計画系論文集、第509号、pp.105-112、1998.7
- 14) 峰政克義、伊藤健司、古阪秀三：建築生産情報の計画的確定手法の開発とG.A.の適用可能性、日本建築学会計画系論文集、第512号、pp.229-236、1998.10
- 15) 河村廣：知的生命システムの建築構造システムへの応用性、建築雑誌、第115巻、第1450号、pp.36-37、2000.2
- 16) 河田雅圭：進化論の見方、紀伊国屋書店、1989.8
- 17) 高林純示：共進化の謎に迫る—化学の目で見る生態系—、平凡社、1995.3
- 18) マット・リドレー著／長谷川真理子訳：赤の女王—性とヒトの進化—、翔泳社、1995.1
- 19) ナイルズ・エルドリッチ著／新妻昭夫訳：ウルトラ・ダーウィニストたち—古生物学者から見た進化論—、シュプリンガーフェアラーク東京、1998.10
- 20) スチュアート・カウフマン著／米沢富美子監訳：自己組織化と進化の論理—宇宙を貫く複雑系の法則—、日本経済新聞社、1999.9
- 21) 鈴木勉：施設の最適な階層構造に関する考察、日本都市計画学会学術研究論文集、第25号、pp.331-336、1990.10
- 22) 奥貫圭一、岡部篤行：包含階層構造を持つ施設システムの最適化、日本都市計画学会学術研究論文集、第30号、pp.565-570、1995.11
- 23) 岸本達也：多層構造モデルによる複合施設の最適配置、日本建築学会計画系論文集、第529号、pp.233-239、2000.3
- 24) 野坂正史、吉川徹：通所型高齢者施設の配置計画に関する研究—多摩ニュータウンの将来推計人口に基づくケーススタディー—、日本建築学会計画系論文集、第525号、pp.201-208、1999.11
- 25) 堀彰男、吉川徹：定員設定に着目した通所型高齢者施設の配置計画に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集F-1、pp.669-670、1999.9
- 26) 栗田治：移動量の減衰関数に基づいた領域間距離の近似公式、日本都市計画学会学術研究論文集、第28号、pp.391-396、1993.11
- 27) 田頭直人、岡部篤行：地区単位で集計された距離を説明変数とする回帰モデルの安定性、GIS-理論と応用、第6巻、第1号、pp.29-38、1998.3
- 28) 腰塚武志、小林純一：道路距離と直線距離、日本都市計画学会学術研究論文集、第18号、pp.43-48、1983.11
- 29) 堀彰男、吉川徹：共進化の概念を導入した遺伝的アルゴリズムによる地域施設配置手法の提案、日本建築学会学術講演梗概集F-1、pp.777-778、2000.9

(2000年4月4日原稿受理、2000年9月11日採用決定)