

Ant Colony Optimization による最適経路探索アルゴリズムの構築と 道路線形最適化問題への応用に関する研究

Study on Algorithm for Searching the Optimum Path by Ant Colony Optimization and its Application to Optimum Road Alignment

阿部淳一*・杉本博之**

Junichi ABE and Hiroyuki SUGIMOTO

*工博 北武コンサルタント株式会社 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目4番7号)

** 工博 北海学園大学教授 社会環境工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目)

Ant Colony Optimization (abbreviated as ACO after) is an optimization method based on the efficient foraging behavior of ant colonies. The ACO can be regarded as the specialized method for searching the shortest paths. So the method has been applied restrictively to only the impractical problem that has a concept of paths like traveling salesman problem. For such a problem like a TSP, it was concluded that the ACO showed the superiority to Genetic Algorithms in efficiency and accuracy. From such a point of view, in this paper, by studying the efficient behavior of ant colonies the searching method applicable to the road or railway planning or channel planning is proposed. The proposed method is applied to find the optimum three-dimensional road alignment and shows the practicability and validity.

Key Words: ACO, optimum design, 3-D road alignment, road design

1. まえがき

群れを成して行動する昆虫や動物などは、単体では単純な原理に従い行動しているが、集団になると時として効率的な行動をとることがある。このような効率的な群行動は Swarm Intelligence として数値モデル化され、種々の分野で研究が行われている。その中でも、蟻の採餌行動は身近に確認できる代表的な群行動の1つである。

蟻の集団が餌を探して巣に持ち帰るとき、始めは巣と餌場までの間をランダムに行動している。しかし、ある蟻が巣と餌場までの短い経路を探索すると、他の蟻はその経路に寄ってくる。すると、やがて蟻の集団は巣と餌場までの最短経路を探し出し、その最短経路に列を成して行動する。このとき、各蟻は情報交換の手段として、フェロモンを使用するとされている。蟻はより短い経路に多くのフェロモンを分泌し、またより多くのフェロモンがある箇所集まる習性を持つ。各蟻がフェロモンを使用することにより、群全体で最短の経路を探索する。このような、蟻の効率的な経路選択の群行動をモデル化し、最適化手法に取り入れた Ant Colony Optimization (以下、ACO) と呼ばれる手法がある。

ACO は Dorigo¹⁾らによって提案された手法で、組み合わせ最適化問題の中でも爆発的な設計空間となる巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem, 以下、TSP) を解くために提案された。ACO は前述のように、蟻

が最短の経路を探索することをモデル化しているため、経路の概念を有する設計問題に対して効率的に解の探索を行えることが特徴である。筆者らもこれまでに、ACO を TSP に応用していくつかの数値計算を試みたが、他の最適化手法と比較しても非常に高い効果が確認された²⁾。しかし、現実の設計問題のなかで、最短の経路を探索するような問題は比較的少なく、ACO を現実的な設計問題へ応用した事例もやはり少ないと考えられる。

一方、ACO の基となる蟻の効率的な採餌行動とは、最短経路を探索する行為であり、これはすなわち、道を形成する行為である。この道を形成する行為を人間社会に例えると、土木分野における道路や鉄道の路線計画や、河道計画に他ならない。これらの計画では、景観性への配慮や様々な制約条件など多くの検討事項を含むが、基本的には工費最小化を目的として行われる。工費にも種々の項目が含まれるが、基本的にはより短い線形であるほど工費は減少する。そのため、短い経路を探索する能力に特化した ACO の論理を、上述の路線や河道の設計問題に拡張を行えば、効率的な経路の最適化が可能になると考えられる。

一方、路線の設計問題に対して最適化を試みた事例に、山崎らの研究がある⁴⁾。山崎らは高速道路を対象として、最適化に適した路線の線形モデルを構築し、遺伝的アルゴリズム³⁾ (以下、GA) を用いた最適化を行っている。しかし、3次元空間を設計空間とした場合、検討可能な

路線の組み合わせ数は爆発的となることは自明である。このように爆発的な路線の組み合わせの中から、最適な経路を探索する路線設計問題は、前述の TSP と同質の設計問題であると考えられる。そのため、筆者らの過去の研究からも、路線設計問題の最適化に対しては、ACO を用いることの有効性が期待できる。

このような観点から、本論文では蟻の効率的な群行動である道を形成する行為に着目し、ACO を基とした 3 次元空間内に対して最適経路を探索するアルゴリズムの構築を試みるものである。また、このアルゴリズムは、3 次元空間内に対して経路を作成する道路や鉄道の路線計画、あるいは河道計画などの様々な問題に適用可能であり、本論文では道路の路線設計最適化問題へ応用を試みた事例について示す。

2. ACO の概要

ここでは、ACO の概要について説明する。蟻の採餌行動をモデルとした ACO は、蟻の経路選択行動とフェロモンを数値モデル化することにより最適化を行う。図-1 に ACO のアルゴリズムを示す。図のように ACO は 5 つの STEP で構成され、比較的簡単なアルゴリズムとなる。以下に、アルゴリズムの各 STEP について説明する。

なお、ここでは ACO の概要を把握することを目的として、まず TSP を解くために提案された ACO について説明する。後に、本論文が ACO を基に改良を行ったアルゴリズムについて説明する。

STEP1：初期化

初期化を行う。各蟻の初期位置をランダムに設定し、全経路のフェロモン情報を一定量に初期化する。

STEP2：巡回路の構築

訪問する都市を順次選択し、巡回路の構築を行う。訪問する都市は、フェロモン情報、およびヒューリスティック情報と呼ばれる二つの情報から、各蟻が確率的に選択する。フェロモン情報、およびヒューリスティック情報についての詳細は後述する。

蟻の総数を N_A とすると、 n ($n=1 \sim N_A$) 番目の蟻が都市 i から j に行く経路 ($i-j$) を選択する確率 $P_{ijn}(t)$ は、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} P_{ijn}(t) &= \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{j \in C} \tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta} \quad (i=1 \sim N_C, j \in C, n=1 \sim N_A) \\ P_{ijn}(t) &= 0 \quad (i=1 \sim N_C, j \notin C, n=1 \sim N_A) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、

τ_{ij} : フェロモン情報

η_{ij} : ヒューリスティック情報

α : フェロモン情報に対する乗数

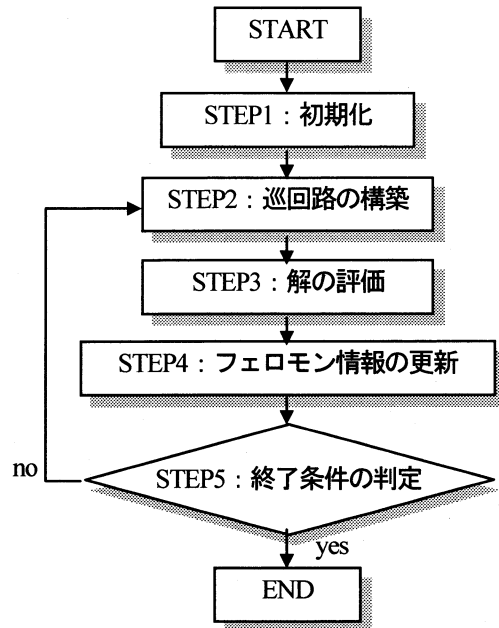


図-1 ACO のアルゴリズム

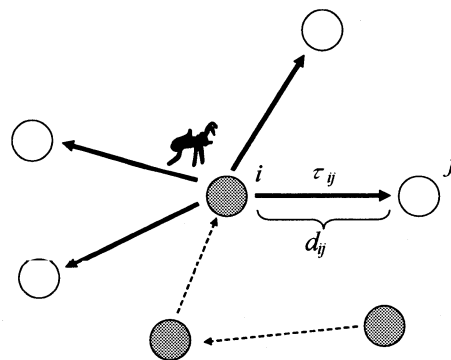


図-2 経路選択の概念図

β : ヒューリスティック情報に対する乗数

C : 都市 i から選択することが可能な都市の集合

N_C : 都市数

である。擬似乱数を用いて式(1)により訪問する都市を順次決定し、巡回路を構築していく。

式(1)のフェロモン情報 τ_{ij} は、各蟻がこれまで(後述の STEP4)に経路に付着させてきた情報で、より短い巡回路ほど高い値となるように付着する。

一方、ヒューリスティック情報 η_{ij} は、経路の距離の逆数を用いる。 η_{ij} は、次式で与えられる。

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (i=1 \sim N_C, j=1 \sim N_C) \quad (2)$$

ここで、

d_{ij} : 経路 ($i-j$) の距離

である。

ヒューリスティック情報 η_{ij} は、蟻が都市を選択する時、

巡回路の総距離に関係無く、より短い経路となる都市ほど高い確率で選択するような情報となる。

ACO における確率的経路の選択方法の概念図を図-2 に示す。図中の●がこれまで訪問した都市、○が未訪問都市である。蟻の現在位置を都市 i として、未訪問都市の集合 C の中から都市 j に行く確率は、経路に蓄積されているフェロモン情報 τ_{ij} がより高いほど、また都市までの距離 d_{ij} がより短いほど高くなるようにモデル化されている。

STEP3： 解の評価

STEP2 において、各蟻が順次選択した都市の巡回路の総距離を算定する。

STEP4： フェロモン情報の更新

ここでは、巡回路の各経路にフェロモン情報を追加する。TSP の場合、巡回路の総距離の最小化問題であるため、追加されるフェロモン情報は巡回路の総距離が短いほど高い値とする。よって、追加されるフェロモン情報は、次式で与えられる。

$$\Delta\tau_{ijn} = \frac{1}{L_n} \quad (i=1 \sim N_C, j=1 \sim N_C, n=1 \sim N_A) \quad (3)$$

ここで、

$\Delta\tau_{ijn}$: n 番目の蟻により追加されるフェロモン情報

L_n : n 番目の蟻によって選択された巡回路の総距離である。

経路に蓄積されるフェロモン情報は、各蟻が選択した巡回路に対して、式(3)で算定される値を新たに追加する。また、全経路に付着されているフェロモンは、自然現象と同様に蒸発することも数値モデル化される。すなわち、ある時間(繰り返し回数) t におけるフェロモン情報 $\tau_{ij}(t)$ は、 $t+1$ において次式で更新される。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{n=1}^{N_A} \Delta\tau_{ijn} \quad (4)$$

$$(i=1 \sim N_C, j=1 \sim N_C)$$

ここで、

ρ : フェロモンの蒸発率

である。

フェロモン情報が時系列的に蒸発することにより、最近の行動を重視し局所解に陥ることを回避し、大域的な解の探索を可能にする。

STEP5： 終了条件の判定

探索回数が最大回数以下なら STEP2 に戻る。最大回数を満足していれば、終了となる。

ACO は以上のように、比較的簡単なアルゴリズムで構成される。しかし、フェロモン情報とヒューリスティック情報の2つの情報を用いることにより、過去の設計解(巡回路)に対しての評価のみならず、個々の設計変数

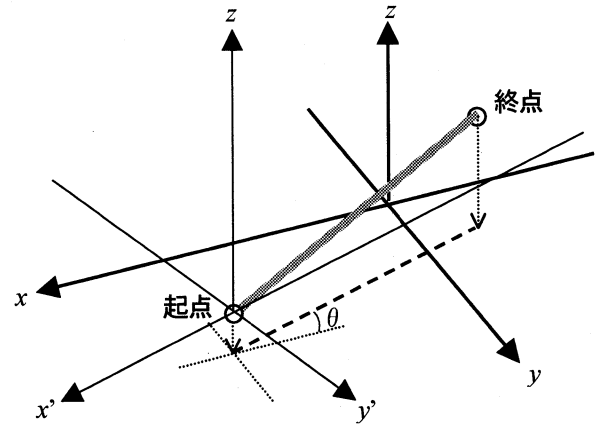


図-3 起終点を結ぶ座標系の作成

(経路)に対する評価も設計解の算定に考慮されるため、最短巡回路の探索に特化した手法となる。

次節では、上述した ACO の基本的なアルゴリズムを応用し、本研究が提案する最適経路算定アルゴリズムについて示す。

3. 最適経路算定アルゴリズムの提案

ここでは、上述の ACO を応用して、本論文が提案する最適経路算定アルゴリズムについて説明する。

3.1 設計空間の設定

最適経路算定アルゴリズムは、3次元空間内に複数の蟻を歩かせ、群全体で最適な経路の算定を行うものとする。このとき、蟻の選択する経路は、ACO の基本的な論理である式(1)を用いることを前提とする。すなわち、より高いフェロモン情報と、ヒューリスティック情報がある経路ほど、高い確率で選択するようなモデルである。しかし、TSP を解くような一般的な ACO では、与えられた都市の中から1つの都市を順次選択すればよいが、最適経路探索アルゴリズムでは、3次元空間の中から進行する場所を逐次選択しなければならない。

このように、3次元空間内に対して式(1)を応用して、蟻の進行する場所を逐次選択するには、まず3次元空間を離散変数で表す必要がある。そのために、まず本研究では図-3のように、 x - y - z 平面で表される3次元空間内に、経路を計画する起点と終点(図中の○)を設定する。このとき、起点と終点の x - y 座標を抽出し、 x - y 平面上で起点と終点を結ぶ直線(図中の破線)を作成する。 x - y 平面上におけるこの直線の傾きを θ とし、 θ 傾いた座標系 x' - y' - z を作成する。

さらに起点から終点内の空間を、図-4のように網目状に分割する。このとき、 x' 方向の分割数を N_x 、 y' 方向の分割数を N_y 、 z 方向の分割数を N_z とする。そして、

N_x 分割された x' 方向の分割をさらに N_d 分割する. このように $N_d \times N_y \times N_z$ の網目状に分割された 3 次元空間の中から 1 点を, 蟻は図-5 のように選択する. 設定した起点から, 上述の作業を N_x 数繰り返して経路を構築し, N_x 数目に選択したメッシュの交点から終点に到着させることにより, 図-6 のように 3 次元空間内に経路が作成されることになる.

以上の方法を用いると, 蟻の確率的な経路の選択である式(1)は, 3 次元空間における最適経路算定アルゴリズムでは次式のようになる.

$$\left. \begin{aligned} P_{ijn}(t) &= \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{j \in c_{i+1}} \tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta} \\ (i=1 \sim N_x, j \in c_{i+1}, n=1 \sim N_A) \\ P_{ijn}(t) &= 0 \quad (i=1 \sim N_x, j \notin c_{i+1}, n=1 \sim N_A) \end{aligned} \right\} (5)$$

ここで,

τ_{ij} : フェロモン情報

η_{ij} : ヒューリスティック情報

α : フェロモン情報に対する乗数

β : ヒューリスティック情報に対する乗数

c_{i+1} : i 番目に選択されたメッシュの交点から選択することが可能な, $i+1$ 番目の $N_d \times N_y \times N_z$ 数に分割されたメッシュ空間の交点の集合

N_x : x' 方向の分割数

である.

なお, x' 方向に対しては, N_x 個に分割した後, さらに N_d 個に分割している. これは, 道路の設計問題などでは短区間に曲線を複数個配置はしないが, 曲線を配置する位置は詳細に検討する必要があるためである. x' 方向を 2 段階に分割することにより, 最大でも N_x 個の箇所経路の方向が変わり(曲線の配置), その配置位置はそれぞれ x' 方向に N_d 個の候補があることを示している. 当然, N_x の数を増やし, N_d を 1 とすれば, x' 方向に対してすべてのメッシュで方向が変わる経路を配置可能な設計問題になる.

一方, 提案する手法は, N_x 番目に選択したメッシュの交点から終点へは, 強制的に経路が構築される. そのため, 解の探索初期の段階では, 最適解とはならないことが明白な, 終点から極端に離れるような経路も選択され, 非効率的な計算が行われていることがいくつか確認された. これは, 起点からのみ蟻を移動させていることが大きな要因であると考えられ, 今後, 起終点間を往復させる論理などの追加の必要性が考えられる.

以上の設計空間の設定により, 蟻を 3 次元空間内に歩かせることが可能となった. この 3 次元空間内に, フェロモン情報とヒューリスティック情報を設定し, 蟻を確率的に移動させる. 次節では, 最適経路算定アルゴリズムにおける, フェロモン情報とヒューリスティック情報について説明する.

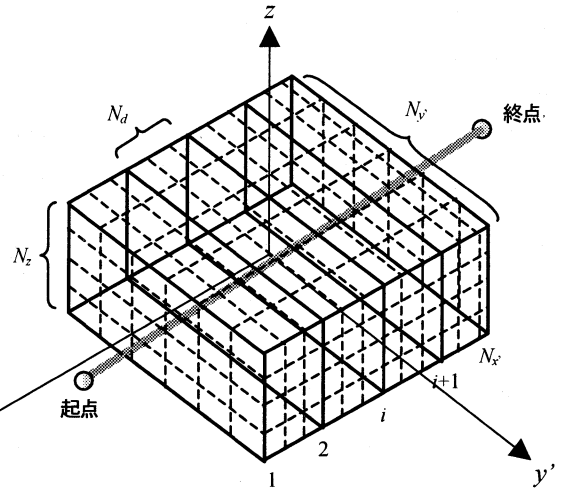


図-4 メッシュの作成

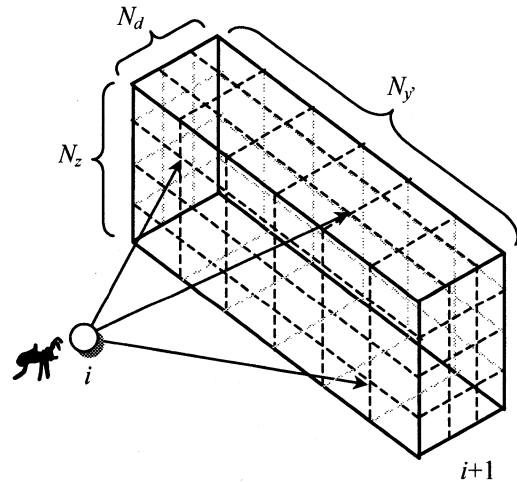


図-5 3次元空間内の経路選択の概念図

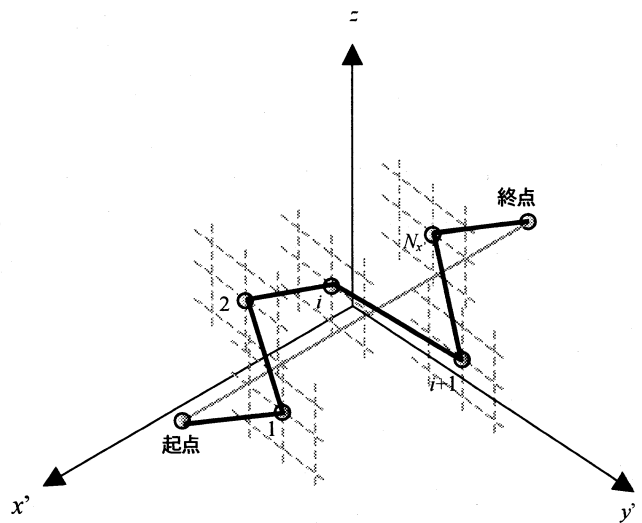


図-6 経路構築の概念図

3.2 フェロモン情報とヒューリスティック情報

ACOにおける確率的な経路の選択は、ヒューリスティック情報とフェロモン情報の2つの情報を用いる。ヒューリスティック情報は、2.に示したTSPでは蟻がより短い経路であるほど高い確率で選択するとして情報であった。本論文が提案する最適経路算定アルゴリズムでも、基本的により短い経路を探索する問題を対象とするため、ヒューリスティック情報は、式(2)と同様により短い路線を高い確率で選択するように、次式により算定される。

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij} \cdot \gamma_{ij}} \quad (i=1 \sim N_x, j \in c_{i+1}) \quad (6)$$

ここで、

η_{ij} : i 番目に選択されたメッシュの交点から、 $i+1$ 番目に選択したメッシュの交点 j を結んだ経路($i-j$)のヒューリスティック情報

d_{ij} : i 番目と $i+1$ 番目に選択したメッシュの交点を結んだ経路($i-j$)の距離

γ_{ij} : i 番目と $i+1$ 番目に選択したメッシュの交点を結んだ経路($i-j$)の付加情報

である。

ヒューリスティック情報はメッシュ間の距離の逆数を用いることにより、TSPの場合と同様な性質を持つ。すなわち、より近い場所に移動を試みようとする情報である。これらのように、距離の概念を直接解の探索に応用できるため、より短い路線を選択するような問題に対しては、他の最適化手法と比べ本手法の適用性が高いと考えられる。

また、式(6)では式(2)に変わり、新たに γ_{ij} を追加している。これは、経路の距離に関する情報以外に、対象とする設計問題に固有な情報を付加できるようにしたものである。たとえば、道路線形最適化問題において、工費の最小化を試みる場合、より短い経路を算定することのほかに、切土や盛土などの土工を少なくすることも重要となる。このとき、 γ_{ij} には路線の計画高と地盤高の差を代入すれば、より短い経路であるほど、またより地盤高に近い経路であるほど高い確率で選択するような情報となる。このように、 γ_{ij} を追加することにより、対象とする設計問題に応じた様々なヒューリスティック情報を設定できるものとした。

一方、2.に示したTSPにおけるフェロモン情報は、巡回路長が短いものほど高い値となるように設定された。これは、TSPの目的関数が、巡回路長の最小化としているためである。そこで、本研究が提案する最適経路算定アルゴリズムでは、対象とする設計問題に応じた目的関数が最小化問題であることを前提とし、目的関数がより小さいほど高いフェロモン情報となるように設定する。すなわち、式(3)のフェロモン情報は次式に変換される。

$$\Delta \tau_{ijn}(t) = \frac{1}{F_{pn}} \quad (i=1 \sim N_x, j \in c_i, n=1 \sim N_A) \quad (7)$$

ここで、

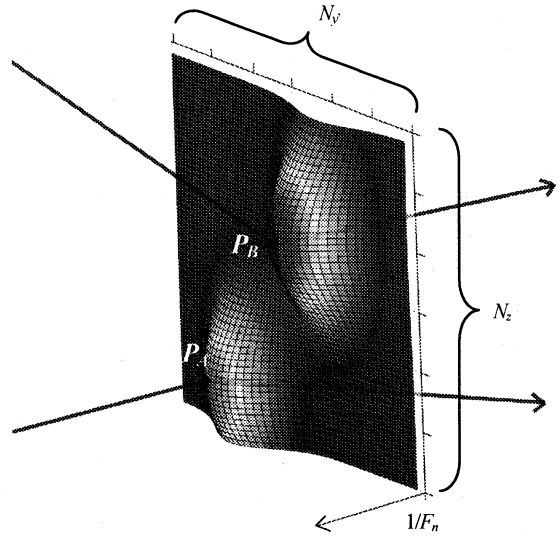


図-7 フェロモン情報の範囲付着

$\Delta \tau_{ijn}(t)$: 繰り返し回数 t において、 n 番目の蟻が i 番目に選択したメッシュの交点 j に付与するフェロモン情報

F_{pn} : F (対象とする最適設計問題の目的関数)と g_j (対象とする設計問題の制約条件、 $j=1 \sim N_c$)から算定されるペナルティー関数により無制約化した、 n 番目の蟻による設計解の目的関数値

N_c : 制約条件の数

である。式(7)のように、設計問題が制約条件付き問題であることを前提とし、ペナルティー関数を用いて無制約化した目的関数値をフェロモン情報に用いている。

また、前述までのようにACOによる最適化は、フェロモン情報とヒューリスティック情報を用いるが、式(5)に示すように、フェロモン情報の値が0であると、その経路を選択する確率は0となってしまう。(ヒューリスティック情報は距離の情報であるため、0にはならない)大域的な解の算定のためには、より広範囲に探索範囲を広げる必要があり、そのためには各蟻が設計空間全域に対してフェロモン情報を付与させる必要がある。しかし、爆発的な組合せ数の設計空間を有する3次元の最適経路算定問題の場合、設計空間全域に対してフェロモン情報を付与させることは難しいと考えられる。

そこで本研究では、従来のACOのように蟻が通過した経路のみにフェロモン情報を付与するのではなく、通過した経路周辺に対して広範囲にフェロモン情報を付与できるように、式(7)を次式に改良した。

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{n=1}^{N_A} \left(\frac{1}{F_{pn}} \cdot \exp \left(- \left(\frac{d_{mix}^2}{r_x'^2} + \frac{d_{niy'}^2}{r_y'^2} + \frac{d_{niz}^2}{r_z'^2} \right) \right) \right) \quad (8)$$

($i=1 \sim N_x, j \in c_i$)

ここで、

d_{hx}, d_{hy}, d_{hz} : n 番目の蟻が i 番目に選択したメッシュの交点 j から, x', y', z 方向の各距離
 r_x, r_y, r_z : フェロモン情報を範囲付着する範囲を決定する, x', y', z 方向にそれぞれ対応した係数である。

式(8)の概念図を図-7に示す。図は $N_d=1$ として, ある i 番目の平面のメッシュにフェロモン情報を付与する場合の例である。蟻が通過した経路を矢印で示し, ある蟻 A が i 番目に選択したメッシュの交点を P_A , ある蟻 B が i 番目に選択したメッシュの交点を P_B とする。また, フェロモン情報は高いほど赤くなるように表記する。すると, 図のように選択した P_A, P_B を中心として, 楕円形にフェロモン情報が高くなるようにメッシュ内に付与されている。なお, $N_d>1$ であれば球状にフェロモン情報が付与されることになる。

ACO は, これまで探索してきた解に対してフェロモン情報を付着し, そのフェロモン情報を基にさらに良質な解の探索を行う。従って, 探索初期の段階で比較的良好な解が得られた場合, その解周辺のフェロモン情報が高くなり, 局所解に陥る可能性も高くなる。このとき, 探索初期の段階では, 式(8)のフェロモン情報の付着範囲を決定する係数 r_x, r_y, r_z を比較的高い値に設定すれば, 少ない蟻の数でも設計空間全域に対してフェロモン情報を付与させることが可能となり, 局所解に陥ることを回避できる。さらに, 探索後半では r_x, r_y, r_z を比較的低くすれば, 良質な解周辺の空間には高いフェロモン情報が付与されるため, 良質な解周辺に対しても局所的に効率良く経路の探索をすることが期待できる。

式(8)の各蟻が付着させるフェロモン情報を用いて, ある時間 t における設計空間全域のフェロモン情報は, $t+1$ において次式により変化させる。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (9)$$

$$(i=1 \sim N_x, j \in c_i)$$

式(9)は, 各メッシュに付与されたフェロモン情報を ρ の割合で蒸発させ, 新たに各蟻が通過した経路周辺のメッシュに対して, 新たにフェロモン情報を付与させることを示している。

以上に示したアルゴリズムで, 3 次元空間内に最適な経路を, ACO の概念の基に探索することが可能となった。次章ではこのアルゴリズムを, 道路線形最適化問題へ応用を試みた事例について説明する。

4. 道路線形最適化問題への応用

上述した最適経路探索アルゴリズムを, 道路線形最適化問題へ応用した例について示す。提案する最適経路探索アルゴリズムは, 3 次元空間内に対して直線の組み合わせで経路が探索される。しかし, 道路線形では直線と曲線を組み合わせで路線が計画される。そこでここでは,

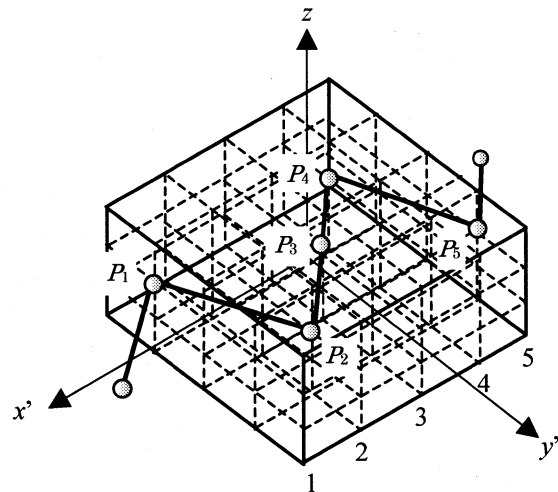


図-8 直線の組み合わせによる経路

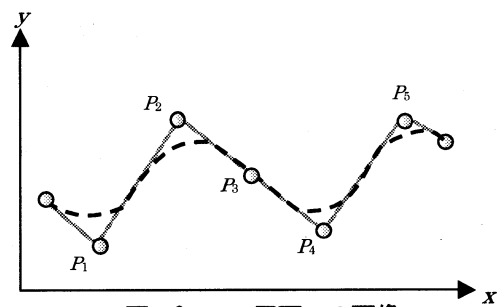


図-9 x-y 平面への写像

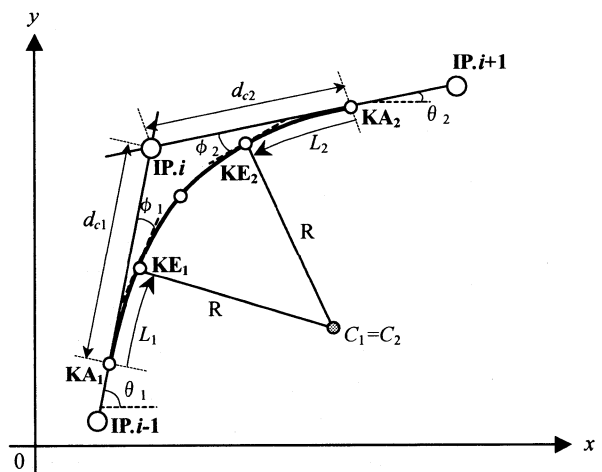


図-10 平面曲線の配置

直線の組み合わせで作成された経路に対して, 曲線を含む平面線形および縦断線形を導入する方法について説明する。

4.1 平面線形の導入

最適経路探索アルゴリズムで作成される経路は, 図-8に示すように 3 次元空間内に対して全て直線の組み合わせで構成されるため, 道路線形に直接応用することができない。そこで, この直線の組み合わせにより構成される経路から, 曲線を有する平面線形を得るために, まず

N_x 個選定された各折れ点 $P_i (i=1 \sim N_x)$ の x 座標と y 座標を抽出し、図-9 のように平面図に写像する。このとき、各折れ点の交角が 0° でなければ、そこに曲線を導入することになる。すなわち、図-9 では P_1, P_2, P_4, P_5 で曲線を導入することになる。

ある i 番目の箇所では曲線を導入する場合、最適経路探索アルゴリズムで選択された、 P_{i-1}, P_i, P_{i+1} 番目の3点の情報を用いる。なお、導入する曲線は、クロソイドと円弧の組み合わせから構成されるものとする。

円弧の曲線半径 R は、道路構造令⁹⁾に示される最小曲線半径の望ましい値を使用した。またクロソイドに関しては、道路構造令に示される許容量最小パラメータ A と上述の曲線半径 R を用いて、緩和曲線長 L^6 を算出する。なお、曲線半径、および緩和曲線長は走行性などの観点から、より長い方が望ましいとされる。そのため、いくつかの曲線半径の候補値から、対象とする曲線部に応じた曲線半径を各蟻に決定させる論理を組み込むことも可能であるが、これらは今後の課題とし、ここでは一定の曲線半径と緩和曲線長を用いた。

円弧、およびクロソイドの各パラメータが決定されると、クロソイドの起点、終点、および円弧の起点、終点は以下のように決定される。

図-10 のように、ある i 番目の箇所では曲線を導入する点（以下、 IP_i とする）から、 IP_{i-1} を結ぶ直線上に配置されるクロソイドの起点を KA_1 とする。また、 IP_{i-1} から IP_i を結ぶ直線の傾きを θ_1 、 IP_i と KA の直線距離を d_{c1} とする。

クロソイドの各パラメータは上述のように決定されており、 KA_1 から緩和曲線長 L_1 進んだ点（円弧の起点）を、 KE_1 と表す。 IP_{i-1} と IP_i を結んだ直線と、 KE_1 との接線角を ϕ_1 とすると、 $\phi_1 + 90^\circ$ の方向に曲線半径 R 進んだ位置が、 IP_{i-1} 方向から考えた場合の円弧の中心位置 C_1 となる。

同様に、 IP_i から IP_{i+1} を結ぶ直線の傾きを θ_2 とし、クロソイド終点を KE_2 とする。そして、 IP_i と KE_2 の直線距離を d_{c2} とする。さらに、 IP_i と IP_{i+1} を結んだ直線と、 KE_2 との接線角を ϕ_2 とすると、 KE_2 から $\phi_2 + 90^\circ$ の方向に曲線半径 R 進んだ位置が、 IP_{i+1} 方向から考えた場合の円弧の中心位置 C_2 となる。 IP_{i-1} 方向から考えた場合の円弧中心位置 C_1 と、 IP_{i+1} 方向から考えた場合の円弧の中心位置 C_2 が一致するような d_{c1} と d_{c2} を決定すれば、クロソイドを含む円曲線が導入される。

d_{c1} および d_{c2} は、 C_1 および C_2 の x, y 座標に関して連立方程式を作成することにより、結果的に次式により算定される。

$$d_{c1} = \frac{\begin{pmatrix} \tan \theta_2 \times \begin{pmatrix} Cx_1 \cos \theta_1 + Cy_1 \sin \theta_1 + R(\cos \theta_{d1} - \cos \theta_{d2}) \\ + Cx_2 \cos \theta_2 - Cy_2 \sin \theta_2 \end{pmatrix} \\ - Cx_1 \cos \theta_1 + Cy_1 \sin \theta_1 + R(\cos \theta_{d1} - \cos \theta_{d2}) \\ - Cx_2 \cos \theta_2 - Cy_2 \sin \theta_2 \end{pmatrix}}{(-\sin \theta_1 + \tan \theta_2 \cos \theta_1)} \quad (10)$$

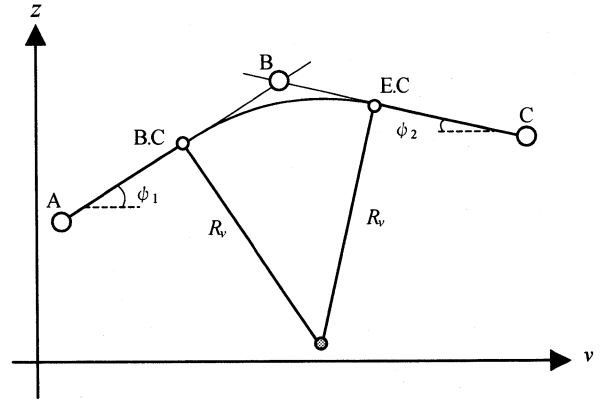


図-11 縦断曲線の配置

$$d_{c2} = \frac{\begin{pmatrix} (Cx_1 - d_{c1}) \times \cos \theta_1 + Cy_1 \sin \theta_1 + R(\cos \theta_{d1} - \cos \theta_{d2}) \\ + Cx_2 \cos \theta_2 - Cy_2 \sin \theta_2 \end{pmatrix}}{\cos \theta_2} \quad (11)$$

ただし、 $\theta_2 \neq 0, \pm \frac{\pi}{2}$

ここで、

Cx_1, Cx_2 : クロソイド曲線長 L_1, L_2 および曲線半径 R に対応する、主接線と直角方向への変動量(m)

Cy_1, Cy_2 : クロソイド曲線長 L_1, L_2 および曲線半径 R に対応する、主接線方向への変動量(m)

$$\theta_{d1} = \pi/2 - \phi_1$$

$$\theta_{d2} = \pi/2 - \phi_2$$

$$\phi_1, \phi_2 : KE_1, KE_2 \text{ における接線角(rad)}$$

である。

なお、上述のように、メッシュ化した設計空間を用いて道路線形最適化問題に応用する場合、メッシュの分割数によって道路の線形要素が決まることになる。メッシュの分割数を多くすれば、詳細に線形を検討できるが設計空間は広くなり、良質な解の探索には比較的多くの時間を要することになる。一方、メッシュの分割数を少なくすれば、解の探索時間は減少できるが、良質な線形の検討は行えなくなり、設計者の判断による適切なメッシュの分割数の設定が必要となる。

4.2 縦断線形の導入

縦断線形は、最適経路探索アルゴリズムによる $i-1$ 番目と i 番目、および $i+1$ 番目の折れ点の z 座標と、上述の平面線形により算定される道路延長との関係より算定される。

今、図-11 のように、横軸に道路延長 v 、縦軸に z とし、 $i-1, i, i+1$ 番目に選択された折れ点をそれぞれ A, B, C とする。さらに点 A から B への角度を ϕ_1 、点 B から C への角度を ϕ_2 とする。また、縦断曲線半径を R_v とする。

縦断曲線には緩和曲線を用いないため、縦断曲線半径が決まれば、縦断曲線の起点 $B.C$ と終点 $E.C$ は、前述の

式(10)および式(11)に含まれる ϕ_1 、 ϕ_2 および L_1 、 L_2 の値を0として、座標系を v と z に変更すれば求めることができる。なお、縦断曲線の曲線半径は、本研究では道路構造令に示される縦断曲線半径の望ましい値の2倍を用いる。

上述の平面線形、および縦断線形の導入により計画路線が決定されると、その路線周辺の地形は、国土地理院発行のデジタル数値地図とリンクし自動で認識される。この地形データを基に、対象とする設計問題の目的関数などを決定することになる。

以上に示した論理を基に、次章では道路線形最適化問題の数値計算例を示す。

5. 道路線形最適化問題の数値計算例

ここでは、上述の最適経路探索アルゴリズムを、道路線形最適化問題へ応用した数値計算例を示す。以下に最適設計問題の定式化、および数値計算結果を示す。

5.1 対象地域

路線計画の対象とするのは、図-12に示す札幌市周辺の山地部とした。路線計画の起終点の座標を (x,y,z) と表すと、起点の座標を(1014,1684,134)、終点の座標を(5783,5084,81)とした。各座標の単位はいずれもメートル(m)である。なお、作成した最適経路算定アルゴリズムにおける座標系 x および y は、緯度経度、および道路線形に一般的に用いられる直交座標系それぞれに対応している。しかし、ここに示した座標系は簡単化のために、図-12に示す設計の対象とする地形の範囲内で任意に原点を作成した場合の座標系である。

図-12のように、起終点間を結ぶ直線には大小2つの山が存在するように設定している。なお、最適経路算定アルゴリズムにおける起終点は、従来線との連結などのために接線角度を任意に設定できるが、本計算例では接線角度の設定は行っていない。

5.2 目的関数

目的関数は直接工事費の最小化問題とした。以下に目的関数を示す。

$$OBJ = C_r + C_p + C_b + C_t \rightarrow \min \quad (12)$$

ここで、

C_r : 道路に関する直接工事費(unit)

C_p : 舗装に関する直接工事費(unit)

C_b : 橋梁建設に関する直接工事費(unit)

C_t : トンネル建設に関する直接工事費(unit)

である。

検討する路線の道路区分は第3種第3級、設計速度を60km/hと仮定して計算を試みる。また幅員構成は、車線3.0m、路肩0.5mで往復2車線と仮定した。道路に関す

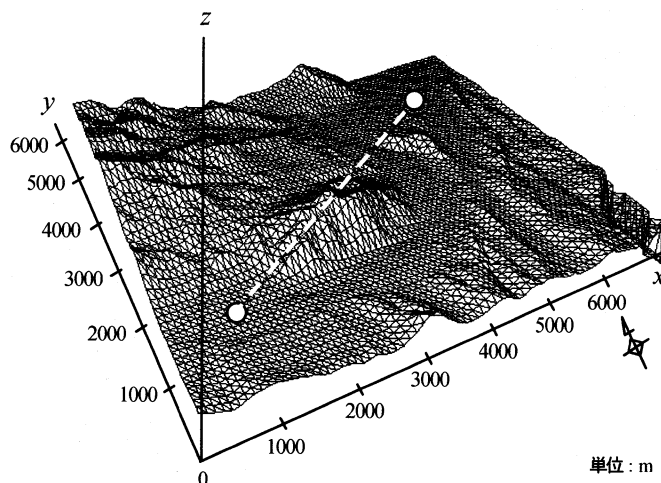


図-12 設計対象の地形図

表-1 道路に関する費用の単価

項目		単位	単価 (unit)
土工	伐開工	m ²	1500
	掘削工	m ³	2000
	路体盛土工	m ³	1500
	路床盛土工	m ³	2000
	捨土	m ³	3000
法面工	客土	m ³	2500
	切土法面整形	m ²	1000
	盛土法面整形	m ²	500
	法覆工	m ²	1000
排水工	U型側溝	m	6500
	小段排水	m	5000
	路床排水	m	1500
防護柵工	ガードケープル	m	8000

表-2 舗装に関する費用の単価

項目		単位	unit
路盤工	凍上抑制層(t=60cm)	m ²	2,000
	下層路盤(t=25cm)		1,500
舗装工	アス安定処理(=6cm)		1,000
	粗粒度アスコン(t=5cm)		2,000
	排水性舗装混合物(t=4cm)		1,500

表-3 橋梁に関する費用の単価

支間長 L_B (m)	単位	単価 (unit $\times 10^3$)
$0 < L_B \leq 20$	m ²	100
$20 < L_B \leq 40$		200
$40 < L_B \leq 60$		300
$L_B \geq 60$		350

る直接工事費には、伐開工、土工、法面工、法覆工、排水工、防護柵工、捨土、客土に関する費用を考慮した。

表-1 には本研究でモデル化した道路に関する直接工事

費の単価を示す。

土工や法面工は、道路延長に対して 20m 間隔でそれぞれ算定する。このほか、クロソイド起終点、円弧起終点、縦断曲線起終点でもそれぞれ算定する。土工の算定に用いる地表高は、前述のように国土地理院発行のデジタル数値地図を用いて、対象とする地点の横断を含む標高データから算定する。使用したデジタル数値地図は、数値地図 25000 を用いた。

土工が切土の場合、切土高さが 5m 以下であれば、1 : 1.2 の法面とし、5m 以上であれば、1 : 1.5 の法面で、5m に 1 つ幅 1.0m の小段を設けることとした。また、切土の段数を最大 5 段とし、5 段以上となる場合には、切土に変わりトンネルを建設することとした。

一方、土工が盛土の場合、盛土高さが 5m 以下であれば、1 : 1.5 の法面とし、5m 以上であれば 1 : 1.8 の法面として、5メートルに 1 つ幅 1.5m の小段を設置することとした。また、盛土の高さが 3 段以上となる場合には、盛土に変わり橋梁を建設することとした。

舗装に関する直接工事費は路盤工、および舗装工をそれぞれ考慮した。表-2 にモデル化した舗装に関する工事費の単価を示す。

橋梁に関する直接工事費は、PC 橋を前提として、単位橋面積当りの工事費を支間長別に設定した。設定した橋梁の単価を表-3 に示す。トンネルに関する直接工事費は、200 万 unit/m と仮定して計算を試みた。

なお、道路線形の設計問題では、本研究が対象とした工事費最小化問題のほか、景観性などの種々の目的関数を検討する必要性があり、これらは今後の課題とする。

5.3 制約条件

制約条件は、平面線形および縦断線形に関する条件を考慮した。平面線形に関する条件は、

1. 道路構造令に示される望ましい最小曲線半径の値を用いて、式(10)、式(11)により円弧を配置できる。
2. 道路構造令に示される許容量最小パラメータを用いて、クロソイド曲線を配置できる。
3. 曲線長が、道路構造令に示される最小曲線長以上である。

とした。一方、縦断線形に関する条件は、

1. 縦断勾配が道路構造令の規定値以下である。
2. 道路構造令に示される縦断曲線半径の望ましい値の 2 倍、あるいは必要縦断曲線長の規定値を用いて、縦断曲線が配置可能である。
3. 平面曲線と縦断曲線が組み合わされる場合に、クロソイド起終点位置よりも内側に縦断曲線の起終点位置が配置されている。

とした。

各設計解は、上述の各制約条件を満足しなければ、式(7)に示したように、ペナルティー関数によって高い目的関数となるため、結果的に細かいアップダウンなどの

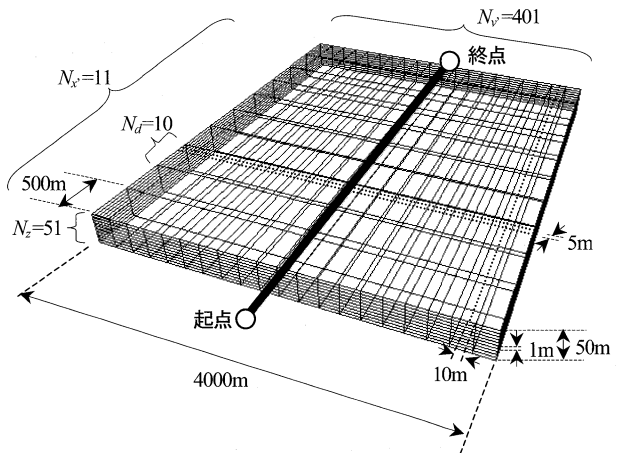


図-13 設計空間

極端な線形要素を有する設計解が最適解として選ばれることは少なくなる。さらに、縦断線形の最小交点間隔の目安などの制約条件を追加すれば、極端な線形を回避することが可能である。

一方、道路の路線設計問題ではこのほか、安全性や走行性に関する条件なども考慮する必要性が考えられるが、これらを考慮するのは今後の課題として、ここでは上述のような平面および縦断線形に関する条件のみを考慮することとした。

5.4 設計変数

設定した設計空間を図-13に示す。図中の○で示した線は、前述した起終点である。

設計変数は、まず x' 方向の分割幅を 500m とし、起終点間を 11 のメッシュで分割した ($N_x=11$)。さらに、 x' 方向の各メッシュを 10 分割 ($N_d=10$) し、5m 間隔で曲線配置位置を調整できるものとした。

y' 方向に対しては、起終点を結ぶ直線を中心に 4000m の範囲を設計の対象とした。この範囲に対して 10m 間隔でメッシュを作成することにより、 $N_y=401$ として計算を行った。

z' 方向に対しては起終点を結ぶ直線を中心に 50m の範囲内を設計の対象とした。この範囲に対して 1m 間隔でメッシュを作成することにより、 $N_z=51$ として計算を行った。なお、図-13 では描画が複雑となるため、 y' および z' 方向の全てのメッシュは表記していない。

5.5 数値計算結果

道路線形最適化問題の数値計算結果を示す。まず、数値計算に用いた ACO のパラメータを以下に示す。

- 1) 蟻の数 n : 500
- 2) フェロモン乗数 α : 3.0
- 3) ヒューリスティック乗数 β : 1.0
- 4) ヒューリスティック付加情報 γ_{ij} : $h_{ij}-z_{ij}$

表-4 ランダムシイズ別の最適解

ランダム シイズ	目的関数値 (unit × 10 ⁶)	繰り返し回数 (回)	目的関数比
1	2016	2211	0.08
2	1914	1922	0.03
3	1860	2613	0.00
4	1980	2989	0.06
5	1931	1608	0.04

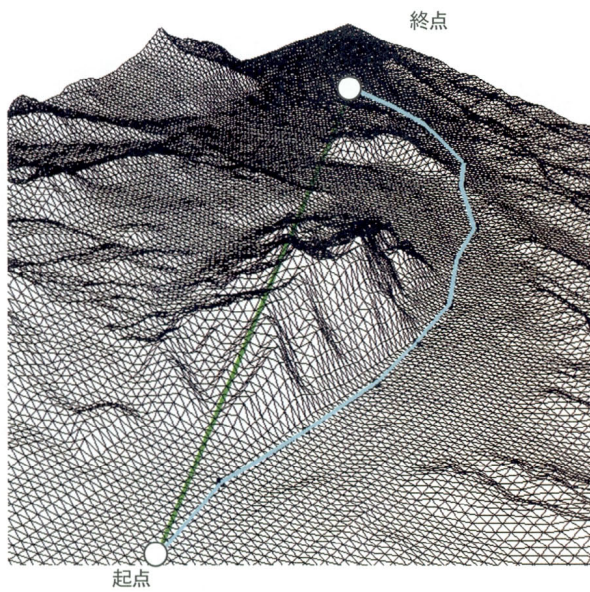


図-15 最適経路探索アルゴリズムによる最適解

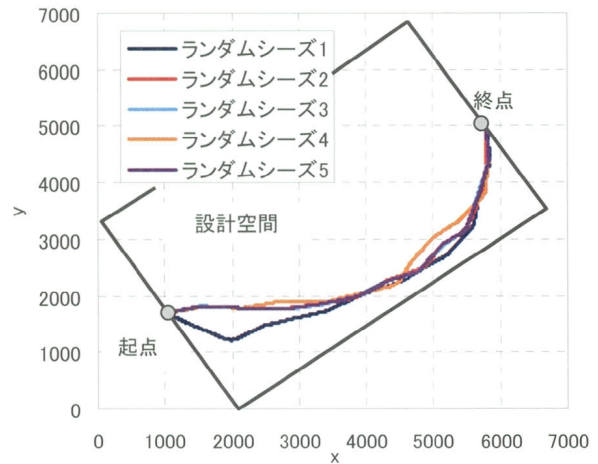


図-14 ランダムシイズ別の最適解の平面線形

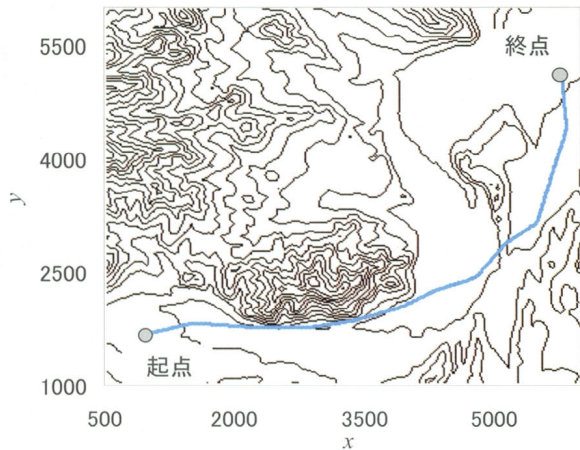


図-16 最適解の平面線形

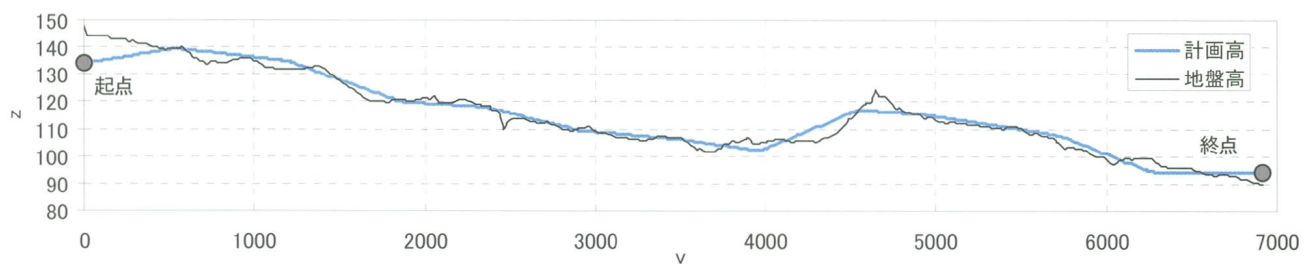


図-17 最適解の縦断線形

ここで,

h_{ij} : メッシュ ij に対応する地形の標高

z_{ij} : メッシュ ij の z 座標

である.

5) 最大繰り返し回数 N_{max} : 5000

6) 範囲付着係数 r_x, r_y, r_z : $N_d/5, N_y/5, N_z/5$

ACO では式(1)に示したように, 擬似乱数を用いて確率的に経路の探索を行うが, 使用する乱数によって算定

される解が大きく異なるのであれば, 最適化手法として有効ではない. そこでまず, 擬似乱数の元となるランダムシイズを5種類用意し, 上述のパラメータを用いてそれぞれ計算を行い, 得られた設計解の比較から提案する手法の安定性を確認する. 表-4 にはランダムシイズ別の最適設計解の目的関数値, 繰り返し回数, および目的関数比をそれぞれ示した. 表中に黄色で示した箇所は, 5つのランダムシイズのうち, 目的関数値が最小となった

設計解である。また、表中の繰り返し回数は、最適解が得られたときの繰り返し回数を表し、目的関数比は表中の黄色で示した最小の目的関数値との差を割合で表したものである。

5つのランダムシーズのうち目的関数値が最小となったのは、ランダムシーズ3の設計解で 1860×10^6 unit、繰り返し回数は2613回だった。

ランダムシーズ別に得られた最適解を比較すると、最小の目的関数値に比べ3~8%の差となり、ランダムシーズを変えても、極端に目的関数値が異なるような設計解が得られていないことが確認できる。なお、最適経路探索アルゴリズムを用いずに、ランダムに100,000回解を探索すると、目的関数値の平均は概ね15000(unit $\times 10^6$)となった。得られたランダムシーズ別の最適解は、ランダム探索による結果の12%程度となる解をいずれも探索しており、提案する最適経路探索アルゴリズムの探索能力の安定性が確認できる。

次に、ランダムシーズ別に得られた最適設計解の平面線形を、図-14に示す。図中の●は起終点で、黒の太線で示した範囲内が設定した設計空間である。図のように、ランダムシーズ別に得られた各設計解は、いずれも極端にルートが異なるような線形ではないことが確認できる。また図中の青線は、目的関数値が最大であるランダムシーズ1の線形であり、他の線形に比べ $x=2000\text{m}$ 、 $y=1000\text{m}$ 付近で膨らんだ曲線であることがわかる。

5つのランダムシーズの中で、最小の目的関数となったランダムシーズ3の設計解の詳細を示す。図-15に最適経路探索アルゴリズムにより得られた経路、図-16に平面線形、図-17には縦断線形を示す。図-16および図-17の●は、いずれも図-15の起終点と一致している。図-17は、青線が最適解の縦断線形、実線が地盤高である。また、図-18には切土量、および盛土量を示す。図-18より、切土量は $84,726 \times \text{m}^3$ 、盛土量は $86,582 \times \text{m}^3$ となった。切土量と盛土量の比はわずか2%程度と、土量バランスが保たれた設計解であることがわかる。また、得られた設計解にはコストの高い橋梁、およびトンネルが建設されることは無く、切土と盛土のみの路線が探索された。

6. まとめ

蟻の採餌行動をモデル化したACOは、最短経路の探索に特化した最適化手法である。しかし、従来のACOを用いて、最短経路を探索するような現実の問題は多く存在しない。このような観点から、本研究では蟻の採餌行動が道を形成する行為であることに着目し、3次元空間内に対して最適な経路を作成するアルゴリズムを、従来のACOを基に提案した。そして、提案したアルゴリズムを道路線形最適化問題へ適用し、数値計算例を示した。以下に、本研究で得られた結果を示す。

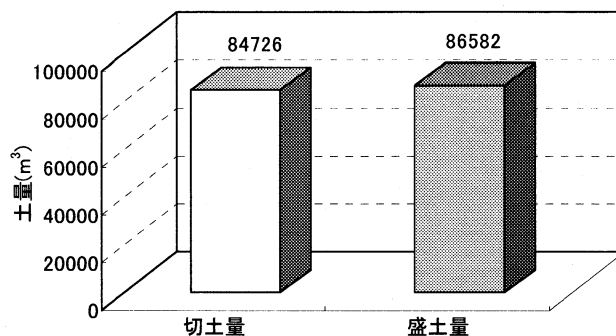


図-18 最適解の土量

- 1) 3次元空間内をメッシュで分割し、経路およびフェロモン情報を付着することによって、ACOを基とした最適経路探索アルゴリズムを提案した。
- 2) 最適経路探索アルゴリズムは、解の探索に距離の概念を応用することができるため、路線計画のような最適化問題に対して、解の探索を合理的に行うことが期待できる。
- 3) 提案したアルゴリズムは、道路や鉄道の路線計画や、河道計画などの現実的な種々の設計問題に応用が可能である。
- 4) 提案したアルゴリズムを、道路設計問題へ応用した結果、異なるランダムシーズを用いても同程度の質の解を探索することが可能となり、比較的安定した手法であることが確認された。
- 5) 最適解の詳細を検討すると、工費の最小化のみならず、土工量のバランスが保たれた線形が得られており、対象とする設計問題に適した最適な経路を探索することができた。

一方、本研究は提案するアルゴリズムに対する基礎的な研究であり、今後の課題もいくつか考えられた。以下に、今後の課題について示す。

- 1) 道路線形最適化問題への応用は、道路構造令に示される比較的簡単な制約条件のみを扱った。より現実的な設計問題とするには、さらに詳細な制約条件の設定が必要となる。
- 2) メッシュの分割数によって道路の線形要素数が決定されるため、適切なメッシュ分割数の設定が求められる。
- 3) 目的関数には直接工事費のみを扱ったが、実際の問題では景観性などの種々の目的関数があり、これらを考慮した最適化が必要である。
- 4) 地形データには既存の構造物や河川などの情報を含めていないため、これらのデータを自動で認識し、回避するなどのアルゴリズムを追加する必要性が考えられる。

- 5) 他の最適化手法との比較検討を行い, 本手法の有効性の検討を行う必要がある.

今後, これらの課題を検討し, アルゴリズムをさらに改良することで, より現実的な設計問題に対応可能な手法を構築したいと考えている. さらに, 道路線形のみならず, 鉄道や河道計画などへの応用も試みたいと考えている.

参考文献

- 1) Marco Dorigo and Thomas Stutzle: Ant Colony Optimization, Bradford Book, 2003.
- 2) 阿部淳一, 杉本博之: Ant Colony Optimization の構造最適設計への応用について, 北海学園大学 工学部研究報告 第 35 号, pp.23-26, 2008.
- 3) 杉本博之, 鹿美麗, 山本洋敬: 離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 4) 山崎元也, 本郷廷悦, 比屋根一雄, 谷田部智之, 遺伝的アルゴリズムによる高速道路線形最適化のための線形モデルの検討, 土木学会論文集, No.758/IV-63, pp.57-69, 2004.
- 5) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 丸善株式会社, 2006.
- 6) 日本道路協会: クロソイドポケットブック, 丸善株式会社, 2000.

(2008 年 4 月 14 日 受付)