

ネットワーク成長，修正モデルによる 公共交通機関の路線網構築法

間島 隆博^{†1} 高玉 圭樹^{†2}
渡部 大輔^{†3} 勝原 光治郎^{†4}

自家用車から公共交通機関へのモーダルシフトは，大気汚染の緩和，二酸化炭素排出量の削減に対して大きな効果をもたらすため，LRT (Light Rail Transit) の導入や河川舟運の活用といった検討がさかに行われている．通常，公共交通機関の輸送システムでは設定された路線内を輸送機材 (バス，船など) が往復する運行形態が採用されるが，路線経路の決定や複数の路線で構成するネットワークの構築は輸送システムのパフォーマンスを左右する重要な問題となる．本稿では，路線で構成されるネットワークを生成するモデルとして，複雑ネットワークの成長モデルにより，初期路線の集合を生成し，生成された路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより，路線網を進化させるモデルを構築した．マルチエージェントシステムは進化ルールを変更，追加することで，様々な路線網を生成できる柔軟なシステムになる可能性が期待され採用した手法であるが，ここでは最適化の側面に焦点を当てて報告する．なお，ここで構築したモデルを過去に行われたベンチマーク問題に応用した結果，既存の結果より良い路線網を生成することが確認できた．

Network Evolution, Modifying Model for Public Transit Network

TAKAHIRO MAJIMA,^{†1} KEIKI TAKADAMA,^{†2}
DAISUKE WATANABE^{†3} and MITUJIRO KATUHARA^{†4}

Since modal shift from automobile to public transport is expected to mitigate air pollution and reduce the emission amount of carbon dioxide, introduction of LRT (Light Rail Transit) or transportation system with rivers is investigated actively. The public transit network is comprised of lines and the organization of the lines affect to the performance of the transportation system. In this paper, a model organizing lines and generating public transit network is proposed. This model has two stages. At first stage, modified network evolution model in the research field of complex network produces the initial line set. At second

stage, the lines generated in the first stage evolve as agent in the framework of the multi agent system. The proposed model provided better solutions than that of precedent work for a benchmark problem.

1. はじめに

自家用車から公共交通機関へのモーダルシフトは，大気汚染の緩和，二酸化炭素排出量の削減に対して大きな効果をもたらすと考えられ，路線の再構成やLRT (Light Rail Transit) 導入などの検討がさかに行われている．また，首都直下型地震などでは帰宅困難者 (通勤困難者) の大量発生が問題となっており⁷⁾，代替輸送経路としてバスだけでなく河川舟運にも期待が寄せられている．通常，これらの輸送システムでは設定された路線内を輸送機材 (バス，船など) が往復する運行形態が採用されるが，路線経路の決定や路線が構成するネットワークの構築は輸送システムのパフォーマンスを左右する重要な問題となる．

従来，路線網構築に関する手法は次のように4つの段階に分類して考えられるケースが多い⁵⁾．

- (1) 路線の経路選択
- (2) 路線に投入されるバス台数の決定
- (3) バスのスケジューリング
- (4) 運転者のスケジューリング

本稿では最初の2項目，すなわち路線の経路とバス台数に焦点を当て，両者を同時に求めるモデルについて報告する．

路線網構築に関する問題は古くから最適化問題として扱われ，バス台数，路線経路など，上記した様々な項目に焦点を当てた数多くの手法が提案されている．古典的な数理計画などの最適化手法を用いた場合には格子状や放射状の道路網を仮定した極端に単純化されたバ

^{†1} 独立行政法人海上技術安全研究所
National Maritime Research Institute

^{†2} 電気通信大学
The University of Electro-Communications

^{†3} 東京海洋大学
Tokyo University of Marine Science and Technology

^{†4} 社団法人日本工業技術振興協会
Japan Technology Transfer Association

ターンに対してのみ最適解が得られている^{4),19)}が，道路網などの制約条件を課したり，不均一な需要分布といった現実的な条件への問題に対しては応用できない．また，外性的に与えられた路線経路に対して，各路線に運行させるバス台数，到着頻度を最適化する問題を扱う場合が多い．一方，路線を定義する経路の決定については，最近では遺伝的アルゴリズム^{6),11),20)}を適用した事例も現れ始めているが，それ以前は，ヒューリスティックな手法に限られる^{1),13),17),25)}，いずれにしても，生成する路線網は利用者のコストを表す所要時間や運行会社のコストを表すバス台数のいずれか，もしくは両者の和を最小化する問題として扱われており，上記した災害時に必要になると思われる路線網の冗長性といった他の価値観の導入には工夫が必要となる．

開発したモデルには2つの段階がある．まず，複雑ネットワークの成長モデルにより，初期路線集合を生成し，次に生成された路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより，個別の路線を進化させることで路線網を修正する．複雑ネットワークの知見を利用した理由は，距離と迂回率を指標として利用した単純なアルゴリズムを用いて，実存する地下鉄網のトポロジを再現できたことが報告され¹⁰⁾，単純なルールにより路線の経路を決定できる可能性が期待されたためである．また，マルチエージェントシステムは進化ルールを変更，追加することで，従来求められていたコスト最小化だけでなく高い冗長性など，様々な性質を持つ路線網を生成できる柔軟なシステムになる可能性が期待され採用した．ここではコスト最小化を目指した最適化の側面を中心に，本モデルの有効性を過去に行われたベンチマーク問題に対する解との比較により示す．

2. 路線網構築法

ここで取り上げる問題はバス停の位置，道路（バス），河川（水上バス），軌道（鉄道）などのインフラネットワーク，OD（出発地：Origin，目的地：Destination）別の需要，バスの定員（一定），バスの運行速度（一定）を所与とし，この条件の下で，バス路線の経路とバス台数を求める．なお，バス路線は停車順に並んだバス停の集合で表現され，バスは路線内の駅やバス停を各駅停車で往復するものとする．

本モデルでは，まず，2.1節に示すネットワーク成長モデルにより路線が生成される．2.2節では1つの路線を1つのエージェントとしたマルチエージェントシステムが採用され，進化ルールに基づき他の路線エージェントと相互作用をしながら路線経路が修正される．一方，路線網の利用者は各OD別に2.2.1項に示す手法により経路を選択する．この経路選択の結果は路線エージェントの進化ルールで利用される．

生成される路線網の評価関数は過去の報告²⁵⁾で利用されている次式とした．

$$\min Z = \sum_{S_i \neq S_j} T_{S_i, S_j} D_{S_i, S_j} + w_1 \sum_{L_k} B_{L_k} \quad (1)$$

ここで， D_{S_i, S_j} は出発地が S_i ，目的地が S_j となる単位時間あたりに発生する需要である．出発地，目的地ともに複数ある場合，行を出発地，列を目的地とした行列の形式で表すことができ，OD表と呼ばれている． T_{S_i, S_j} は出発地が S_i ，目的地が S_j である利用者の所要時間であり，移動時間だけでなく待ち時間も含まれる． B_{L_k} は路線 L_k のバス台数で， w_1 は重み付けの係数である．第1項は所要時間の総和を意味し利用者のコストを，第2項はバス運行会社のコストを意識したものであり，両者のバランスは係数 w_1 で考慮できる．なお，係数 w_1 は外性的に与えられるべき値があり，この変数の最適化には意味がない．

2.1 路線成長モデル

ここで扱うネットワークではノードはバス停（や駅など）を，リンクはそれが結ぶ2つのバス停間の輸送サービスがあることを意味する．路線エージェントの生成では，複雑ネットワークの研究分野で研究が進んでいるネットワーク成長モデルを応用する．

近年，スモールワールドネットワーク²⁴⁾，スケールフリーネットワーク²⁾などの複雑ネットワークが注目を集めている．複雑ネットワークはWWW，神経網など現実の世界に数多く見出されており，従来の研究では数学的な取扱いが容易なためノードやリンクの重みを考慮しない関連性のネットワークを中心に研究が進められてきた²³⁾．また，鉄道や道路網など物理空間上における距離を重みとしたネットワークに関する研究^{14),15)}や，輸送量，輸送能力を重みとする解析結果¹⁸⁾も現れ始めている．複雑ネットワークの研究は複雑ネットワークを生成するネットワーク成長モデルの研究とともに発展してきた．事実，スケールフリーネットワークはPreferential Attachmentと呼ばれるルールに基づくネットワーク成長モデルとともに提案されており²⁾，このほかにも数多くの成長モデルが発表されている^{3),8)-10),12)}．ネットワーク成長モデルとは時間進行とともにネットワークに新規ノードが追加され，あらかじめ規定したルールに従って，新規追加ノードの接続先ノードが既存ネットワーク内のノードの中から決定されるモデルである．規定するルールは単純で局所的な情報を利用するため，高速にネットワークが成長する．なかでも，新規追加ノードの接続先ノードの選択にユークリッド空間上のノード間距離を指標として成長するモデルが提案され，現実の公共交通機関である地下鉄網の物理的なトポロジが再現できた¹⁰⁾．本節ではこのモデルに新たに路線の概念を導入したモデルについて記述するが，成長の起点となるノードはモデルの性質上1つに限定されるため，目的地となるバス停を1カ所とする（出発地

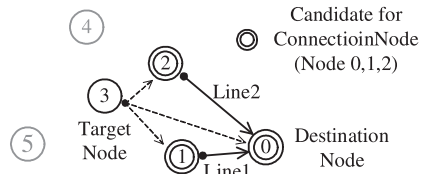


図1 ネットワーク成長モデルの概略
Fig.1 Schematic drawing for network evolution model.

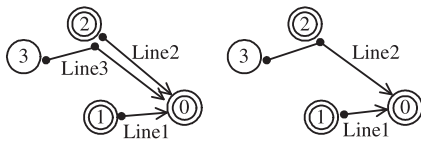


図2 路線接続の型 (左: 追加型, 右: 吸収型)
Fig.2 Line connection type (left: addition type, right: subsumption type).

は複数ある)。

本ネットワーク成長モデルを図1で説明する。目的地となるバス停(以下、目的地ノード, 図1ではノード0, Destination Node)を1つだけ選択し, そのバス停へ向かう需要があるバス停(接続元ノード, 図1では0以外のすべてのノード, Target Node)を1ステップに1つだけ追加していく。その接続元ノードは目的地ノードに近い順番に選択する(図1では1, 2, 3...の順番であるが, 図は3ステップ目の状態を表している)。次に, 接続元ノードのリンク先となる接続先ノードは, すでにネットワークに接続されている全ノード(接続先ノード候補, 図1ではノード0, 1, 2, Connection Node)の中から決定し, 1つのリンクを生成して, これをバス路線とする。なお, 接続先ノードから目的地ノードまでは, 接続先ノードを通る既存の路線と同じルートをたどることとする。ただし, 路線の概念を導入するため接続先ノードとの接続方法には図2のように2つの方法を考慮した。1つは追加型接続で接続先ノードから目的地ノードへ向かう既存路線には何ら影響を与えず, 新たに路線を追加する形態であり, 路線数が1増加する。もう一方は吸収型であり, 接続先ノードを終点とする既存路線と融合するため, 路線数は増加しない。

接続先ノードと接続型を決定する評価関数には式(1)を利用するが, 今, 目的地 S_j は1カ所だけであり, S_i は接続先ノード候補と接続元ノードとなる。この評価値が最小となる接続先ノードと接続型が選択され, 路線網が成長していく。ここで, 複数の路線が乗り入れ

るバス停での待ち時間は, 以下の式で計算する¹³⁾。

$$Tw_i = t_1 \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{r=1}^{N-1} \frac{(-1)^r t_1^r}{(r+1)(r+2)} \sum_{j_1=2}^{N-r+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-r+2} \dots \sum_{j_r=j_{r-1}+1}^N \frac{1}{t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_r}} \right\} \quad (2)$$

ここで, t_i はそのバス停に乗り入れている路線 i の到着間隔を表すが, t_1 はその中でも最小の到着間隔に設定する必要がある。なお, 路線 L_i の到着間隔は路線 L_i の往復移動時間 Tr_{L_i} およびバス台数 B_{L_i} により次式で計算する。

$$t_{L_i} = Tr_{L_i} / B_{L_i} \quad (3)$$

路線を運行させるバス台数 B_{L_i} は追加型, 吸収型の2つの路線接続型別に計算する。追加型では以下の式を用いる。

$$B_{L_i} = \lceil Tr_{L_i} D_{S_i} / C_B \rceil \quad (4)$$

ここで, D_{S_i} は接続元ノード S_i での需要, C_B はバスの定員(バスによらず一定)である。これは, 接続元ノードの需要を満たす最小のバス台数を表す。吸収型の場合, バス台数は以下の式による。

$$B_{L_i} = \lceil Tr_{L_i} D_{S_i} / C_B + B_{L_j} Tr_{L_i} / Tr_{L_j} \rceil \quad (5)$$

ここで, 添え字の L_j は接続先ノードから目的地ノードへ向かう吸収される既存路線を意味する。式(5)の第1項は式(4)と同様, 接続元ノードの需要を満たすバス台数であり, 第2項は既存路線 L_j のバス停での運行時間間隔を維持するために必要なバス台数である。よって, この式(5)は既存のネットワーク内にあるバス停におけるバスの到着間隔を維持もしくは短縮する方向に働く。まとめると, 接続先ノード候補別, 2つの接続型別に式(1)の評価関数による計算を行い, 最小値となる接続先ノードと接続型が選択され, ネットワークが成長していく。よって, ネットワークは目的地ノードを起点として外側に向かって成長し, 「木」の構造を持つことになる。

このモデルでは, 前述のとおり目的地が1つのバス停に限られている。首都圏のバス路線では, 鉄道駅に向かう需要が集中している場合が多く, 本モデルだけでも有用と考えられる。本モデルの特性に関する詳細な報告は既報¹⁶⁾を参照されたい。

2.2 路線修正モデル

前節の路線の生成手法は, 目的地を1つに限定しているため, 複数の目的地を持つ問題には対応できない。この問題に対処する方法として, 目的地別に前節のモデルを独立に実行し, 生成した路線を重ね合わせることが考えられるが, 目的地が多くなると無駄な路線が多数生成されてしまう。そこで, 路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステム

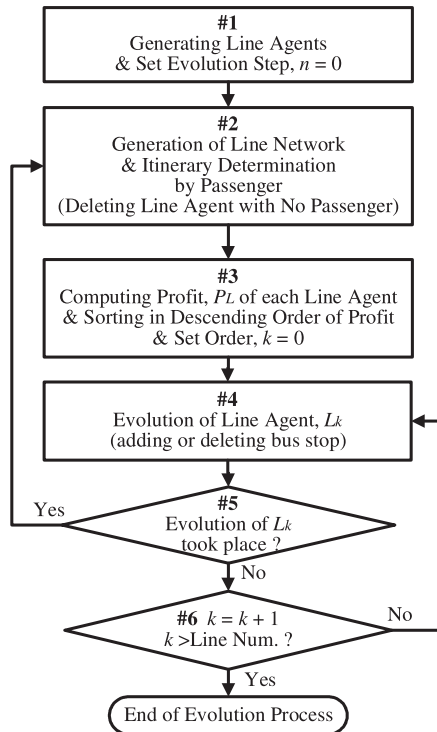


図3 路線エージェントの進化過程の流れ
Fig.3 Flow diagram for evolution of line agent.

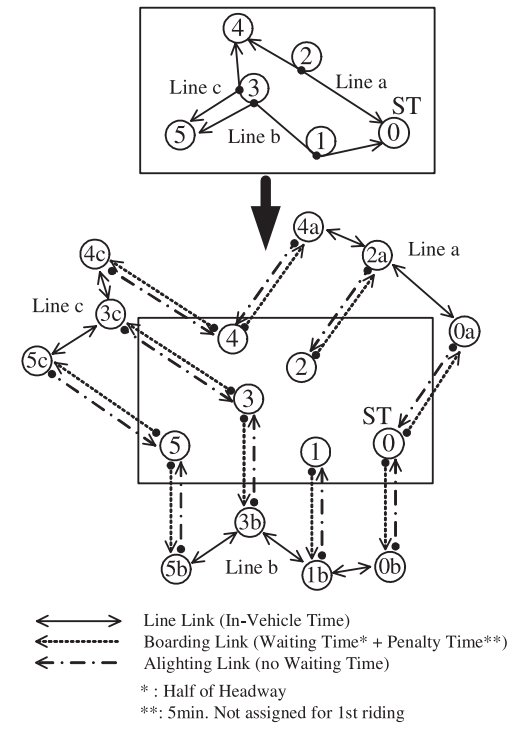


図4 ネットワークの変換
Fig.4 Conversion of network.

により路線を進化させる方法を採用する．進化過程の流れを図3にまとめる．

ここで，2.1節の手法により，目的地別に独立に生成した路線を初期の路線エージェントの集合として利用する（図3の#1）．また，以下に示す2.2.1項（図3の#2，利用者の経路選択）および2.2.2項（図3の#3-6，路線の進化）は交互に実行され，利用されない（乗客数が0の）路線は削除されるため，結果として路線数は減少する（路線エージェントが淘汰される）．

2.2.1 利用者の経路選択

本稿では路線網の利用者は最小所要時間となる経路を選択することとする．すなわち，式(1)の第1項を最小化する経路をとる．本項の過程で，全ODペアの利用者について，利

用路線，移動時間，待ち時間，乗換数の解析が行われ（図3の#2に対応），結果は次の2.2.2項の路線の評価や進化に利用される．

これらの解析結果を得るため，路線網を図4に示すような，物理的なバス停と路線を構成するバス停を別のノードで表したネットワークを利用する．たとえばバス停3を表すノード3は路線b,cが乗り入れているため，各路線にノード3b,3cが新たに設定される．また，路線のバス停間をつなぐリンク（Line Link）には移動時間（リンク距離/移動速度）を，物理的なバス停と路線のバス停をつなぐ乗車リンク（Boarding Link）には待ち時間の期待値（路線の運行時間間隔/2）を持たせ，降車リンク（Alighting Link）に係る時間は0としている．さらに，後述する解析では既報¹⁷⁾にならうために，乗換えに生ずるコストを1人回

あたり5分として乗車リンクの待ち時間に加算した(ただし，最初の乗車は乗換えではないため，経路選択の結果として得られる総所要時間から1人あたり5分を減ずる)．これは待ち時間とは別に乗換には心理的なコストが発生することを意味している．

このネットワークのリンクには所要時間がすでに設定されているため，最短路を求めるアルゴリズムであるダイクストラ法をヒープソートアルゴリズムと組み合わせることで，高速に最小所要時間となる経路が導出できる²¹⁾．また，利用されない路線は即座に消去されるため，最短経路に限定することで路線エージェント数が速やかに減少することが期待される．

2.2.2 路線の進化

各路線エージェントは2.2.1項の解析結果を用いて，下式による収益が計算され，この収益を増加させることを目的として利己的に進化する．なお，収益が高い路線の進化を促すことを意図し，収益の降順で進化対象となる路線エージェントを選択する(図3の#3に対応)

$$P_{L_k} = R_{L_k}^n - w_2 B_{L_k}^n \quad (6)$$

ここで， n は進化ステップを， R_{L_k} ， B_{L_k} は路線 L_k の利用者数とバス台数である． w_2 は路線にとっての利益である利用者数とコストであるバス台数の関係をつなぐ調整係数である． w_2 を小さくすると，利用者数を増加させるために路線を延長し，大きくするとバス台数を減少させ，路線を縮小する進化が期待される．路線 L_k の利用者数 R_{L_k} とバス台数 B_{L_k} は以下の式で求める．

$$R_{L_k}^n = \sum_{S_i \in L_k} d_{S_i, L_k}^n \quad (7)$$

$$B_{L_k}^n = \lceil \max(B_{min}^n, B_{opt}^n, 1) \rceil \quad (8)$$

$$B_{min}^n = \max_{S_i, S_{i+1} \in L_k} (d_{S_i, S_{i+1}}^n) Tr_{L_k}^n / C_B \quad (9)$$

$$B_{opt}^n = \sqrt{Tr_{L_k}^n R_{L_k}^n / (2w_1)} \quad (10)$$

ここで $d_{i,j}$ は前節に示した経路選択の結果得られた i から j へ移動する人数を意味する． i ， j はバス停あるいは路線であり，たとえば i がバス停， j が路線の場合，バス停 i で路線 j へ乗車する人数を意味する．また，式(9)は需要を満たすために必要な最低のバス台数であり，式中の $\max_{S_i, S_{i+1} \in L_k} (d_{S_i, S_{i+1}}^n)$ は路線 L_k に所属し，隣り合うバス停 S_i ， $S_{i+1} \in L_k$ 間の断面交通量の最大値である．式(10)は今考慮している路線 L_k にのみ式(1)を適用した場合，この評価値を最小とするバス台数となる．これは利用者の待ち時間のコストとバス

台数にかかるコストが等しくなる点で式(1)の評価値が最小となる⁴⁾ことから導出されている．つまり，個別の路線エージェントは式(6)の収益の増大を目指すが，式(10)で決定されるバス台数を通じ，式(1)の路線網全体の評価値と関連を持つこととなる．

次に，進化の内容は，進化の対象となる路線エージェント L_k に所属しない1つのバス停 $S_j \notin L_k$ の取り込み，もしくは，所属する1つのバス停 $S_i \in L_k$ の削除を考慮する(図3の#4に対応)．どのバス停に関してどの操作(取り込み，削除)を採用するのかは，取り込み，削除別に定義した以下の式(11)，(17)による収益の増減 A を計算して決定する．ここでは後に示すように A が最大となる組合せ(1つのバス停とそのバス停に対する1つの操作)を選択することとした．

● バス停の取り込み

バス停 $S_j \notin L_k$ の取り込みについては，隣り合うバス停 S_i ， $S_{i+1} \in L_k$ 間にバス停 S_j を取り込むこととする(S_i や S_{i+1} が終点である場合も考慮する)．この条件のもと路線長の増加が最小となるバス停 S_i, S_{i+1} を選択し，以下の式で収益の増減 A_{S_j} を計算する．

$$A_{S_j} = \Delta R_{L_k} - w_2 (B_{L_k}^{n+1} - B_{L_k}^n) \quad (11)$$

$$\Delta R_{L_k} = \sum_{S_i \in L_k} D_{S_j, S_i}^n - r \quad (12)$$

ここで， D_{S_j, S_i} は所与のOD表で与えられる出発地が S_j ，目的地が S_i の需要の人数であるが，路線 L_k への乗換えがあるODペアの需要は除外する．また， r は次式のように計算される．

$$\begin{aligned} r &= 0 & \epsilon &\geq 0.8 \\ r &= -d_{S_i, L_k}^n - d_{S_{i+1}, L_k}^n & \epsilon &< 0.8 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで ϵ は文献14)で導入された迂回の度合いを示す「効率」と呼ばれる指標であり，バス停 S_1 ， S_2 の間の路線に沿った距離を l_{S_1, S_2} ，直線距離を l'_{S_1, S_2} とすると，以下の式で計算される．

$$\epsilon = l'_{S_i, S_{i+1}} / (l_{S_i, S_j} + l_{S_j, S_{i+1}}) \quad (14)$$

すなわち， r はバス停 S_j の取り込みによりバス停 S_i ， S_{i+1} 間の迂回距離が大きくなる場合には，迂回の影響が大きいバス停 S_i ， S_{i+1} における路線 L_k への乗車がなくなる可能性を考慮している．

また，式(11)のバス台数 B_{L_k} の上付き添え字である $n+1$ はバス停の取り込みにとも

なうバス台数の予測値であることを示し，次式で求める．

$$B_{L_k}^{n+1} = \max(B_{min}^n, B_{opt}^{n+1}, 1) \quad (15)$$

$$B_{opt}^{n+1} = \sqrt{Tr_{L_k}^{n+1}(R_{L_k}^n + \Delta R_{L_k}) / (2w_1)} \quad (16)$$

ここで， $Tr_{L_k}^{n+1}$ はバス停の取り込みを行った路線の往復時間を意味する．

● バス停の削除

バス停 S_i の削除にともなう収益の増減は，削除されるバス停における路線 L_k への乗車人数が 0 となることを意図し，次式で求める．

$$AS_i = \Delta R_{L_k} - w_2(B_{L_k}^{n+1} - B_{L_k}^n) \quad (17)$$

$$\Delta R_{L_k} = -d_{S_i, L_k}^n \quad (18)$$

式 (17) のバス台数 $B_{L_k}^{n+1}$ はバス停の削除にともなうバス台数の予測値であることを示し， $Tr_{L_k}^{n+1}$ をバス停の削除を行った路線の往復時間として，式 (15)，(16) により求める．

ただし，上記したバス停の取り込みと削除に関して，次の事項に該当する操作は，収益の増減， AS_i ， AS_j の計算対象から除外する．

- ・ 前提としている各駅停車が成立できなくなるバス停の取り込み，削除
- ・ 削除によりバス停が非連結となる（孤立して他のバス停へ至る経路がなくなる）バス停の削除
- ・ 路線 L_k で削除されたバス停の，路線 L_k による再取り込み（同じバス停の取り込みと削除の繰返しを回避するため）
- バス停と操作の決定

どのバス停に対するどの操作（取り込み，削除）を採用するのかは，以下の式に示すように，増収の最大値 π が見込まれる組合せとする．

$$\pi = \max_{S_i, S_j} (AS_i, AS_j) \quad (19)$$

ただし， $\pi < 0$ となる場合は，今，対象としている路線 L_k の進化は行わず（図 3 の # 5 から No への流れに相当），次に収益が高い路線 L_{k+1} でバス停の取り込み，削除に関する同様な手順を実行する（図 3 の # 6 から No への流れに相当）．

さらに，ある路線で上に示したバス停の取り込みまたは削除が発生したら，それより収益の低い他の路線について，バス停の取り込みまたは削除を実行せず，前の 2.2.1 項に示した

利用者の経路選択に移る（図 3 の # 5 から Yes への流れに相当）．

最終的にすべての路線に関して $\pi < 0$ となれば，進化の過程は終了する（図 3 の # 6 から Yes への流れに相当）．

3. 解 析

前章までに示したモデルを過去に解析が行われた問題¹⁷⁾ に応用し，本モデルの有効性を示す．この問題のインフラネットワーク（道路，河川，軌道などに該当する）を図 5 に示す．図中，ノードの数字はバス停の ID 番号を，リンク横の数字はバス停間の所要時間を示している．過去に行われた解析例では，表 1 のようなほぼ全 OD ペアに需要がある状況が設定されている．バスの定員は既報の文献の設定条件に沿い，50 人とした．また，表 1 は 1 日の需要であるが，この需要が 10 時間で均一に発生すると仮定した．なお，この需要が発生する時間間隔は需要を満たす最低限のバス台数を算出する式 (9) の結果に影響を与える．

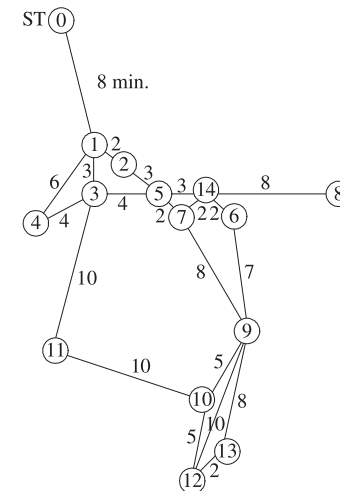


図 5 ベンチマーク問題
Fig. 5 Benchmark problem.

表 1 ベンチマーク問題の OD 表
Table 1 OD matrix for benchmark problem.

ST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. 解析結果

4.1 進化過程の評価値

調整係数 w_1, w_2 をそれぞれ 0.8, 5.0 としたときの利用者の総所要時間 (図中の TTT) とバス台数 (図中, Vehicle Num.) を進化履歴として図 6 に示す. 各値は路線の進化が進むにつれ減少する傾向を示している. これより, 2.2 節の修正モデルは所要時間とバス台数の和で表される式 (1) の評価値を減少させ, より良い評価値となる路線網へ進化させる効果があることが示された.

4.2 w_1 の効果

調整係数 w_1 の効果を見るため, 図 7 には $w_2=5$ として w_1 を変化させたときの所要時間とバス台数の関係を示す. この図は, w_1 を変化させた各条件で得られる (図 6) に示した進化履歴のうち, 式 (1) の評価値が最小値をとる進化ステップの結果をプロットしている. w_1 が所要時間とバス台数に与える影響は式 (1) から以下のように推察できる. w_1 の増加は, バス台数を抑制する効果を生むが, 運行時間間隔が上昇するために利用者の待ち時間の悪化をもたらす. 図は, w_1 が上昇すると所要時間は上昇し, バス台数は減少する傾向を示している. これより, 両者はトレードオフの関係となることが確認できた.

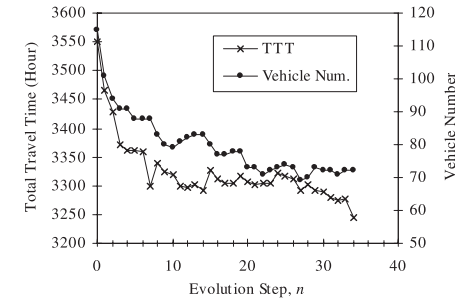


図 6 評価値の進化過程の履歴

Fig. 6 Evolution history of evaluation values.

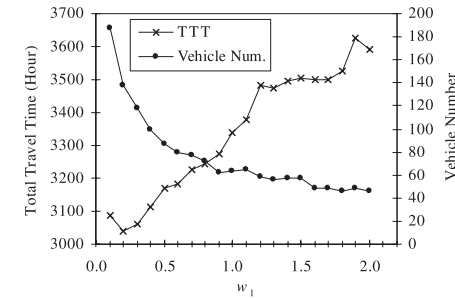


図 7 係数 w_1 が所要時間とバス台数に与える効果 ($w_2=5$)

Fig. 7 Effect of w_1 on total travel time and vehicle number ($w_2=5$).

4.3 路線成長モデルの効果

2.1 節で示した路線成長モデルの有効性を確認する. 図 3 の # 1 のステップにおいて路線成長モデルにより生成される初期路線エージェントの集合を, すべての OD ペアに対して 1 つの路線を生成した集合に置き換えた. この初期路線エージェント集合が 2.2 節の進化過程を経て得られた路線網の所要時間やバス台数は, 図 7 に示す路線成長モデルを用いて得られた所要時間やバス台数と同等な結果となった. しかしながら, 図 8 に示すように, 最小評価値が得られる進化ステップ数は路線成長モデルを利用した結果 (図中, Network Evolution) の方がここで置き換えた全 OD ペアに 1 つの路線を割り当てた結果 (図中, All OD Pairs) より小さくなった. これより, ネットワーク成長モデルはネットワークの規模

表 2 ベンチマーク問題の解析結果の比較
Table 2 Comparison of results for benchmark problem.

	Baa, et al. ¹⁾		Mandl ¹⁷⁾	Shih, et al. ²²⁾	Zhao ²⁵⁾	This Method, $w_1=0.8$			
	$w_2=5$	$w_2=9$				$w_2=5$	$w_2=9$		
Directly(%)	78.6	80.0	81.0	69.9	87.7	99.1	99.0	94.6	88.3
Transfer1(%)	21.4	20.0	19.0	29.9	12.3	0.90	1.0	5.4	11.6
Transfer2(%)	0	0	0	0.13	0	0	0	0	0.1
Total(hr)	3428	3511	3714	3651	3401	3272	3285	3244	3291
In-Vehicle(hr)	2801	2818	3006	2957	N.A.	N.A.	N.A.	2662	2661
Waiting(hr)	349	432	462	302	N.A.	N.A.	N.A.	512	478
Transfer(hr)	278	260	247	392	159	11.7	13.4	70	152
Line Num.	N.A.	N.A.	N.A.	4	8	4	6	6	6
Vehicle Num.	89.3	76.9	82.2	99.3	68	82	77	72	64

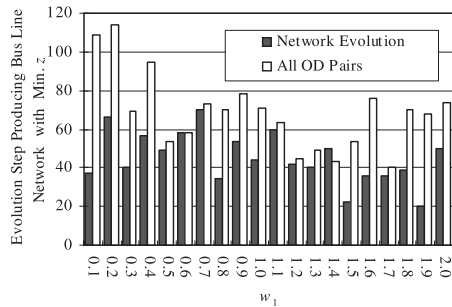


図 8 初期路線網と最小評価値が得られるステップ数の関係

Fig. 8 Effect of initial line set on evolution step yielding minimum evaluation value.

が大きくなる場合に，計算時間の短縮の観点で有効な手法になると考えられる．

4.4 既報の結果との比較

本提案モデルによる結果を過去の文献に見られる結果と表 2 で比較し，その有効性を確認する．なお，本提案モデルの結果（表中，This Method の列）は調整係数を $w_1=0.8$ ， $w_2=5$ ，9 と設定して得られたものを示した． $w_2=5$ とした解析結果は，過去に報告された利用者の最小総所要時間の解（3,272 時間，82 台 ²⁵⁾）と比べて，所要時間，バス台数ともに低い値（3,244 時間，72 台）を示し，最良の結果が得られている．また， $w_2=9$ とした解析結果は，最小のバス台数が報告された結果（3,401 時間，68 台 ²²⁾）と比べて，所要時間，バス台数ともに低い値（3,291 時間，64 台）を示し，こちらでもより良い結果が得られている．これよ

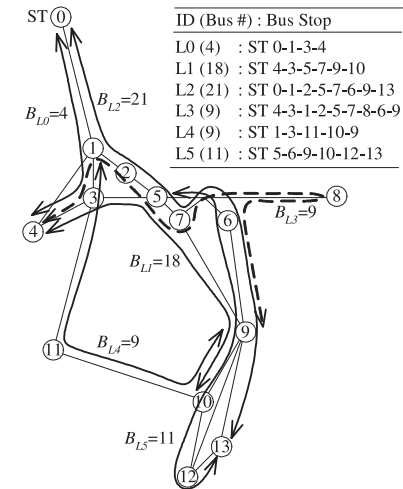
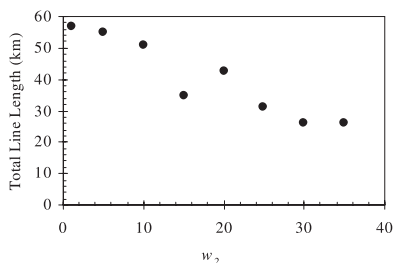


図 9 構築された路線網 ($w_1=0.8, w_2=5$)

Fig. 9 Generated line network ($w_1=0.8, w_2=5$).

り，本提案モデルが過去の手法より良い路線網を出力する能力を持つことが示された．

図 9 には， $w_2=5$ の条件で生成された路線網を示す．ST9 には 6 本ある路線のうち 5 本が乗り入れている．表 1 に示した OD 表を見ると ST9 の発着需要が他のバス停に比べて大きい．これより，ST9 への乗り入れ路線は大きな需要を獲得でき，路線の削除の対象から

図 10 係数 w_2 と路線長の関係Fig.10 Effect of w_2 on total line length.

はずれて進化過程を生き残ったと考えられる。

4.5 w_2 の効果

調整係数 w_2 の効果を見てみる。 w_2 に大きな値を設定すると，式 (6) の収益を上げるために利用者数を上昇させるよりバス台数を減らす進化が発生しやすくなる。これは，前節，表 2 に記載した $w_2=5, 9$ の 2 つの結果から支持される。バス台数は式 (16) で路線長と関係するため， w_2 により路線長を調整できることが期待される。図 10 はバスの運行速度を 20 km/hr とし計算した路線網の全長と w_2 の関係を示している。図に示すとおり w_2 を変化させることで，路線網の全長を変化させることが可能であることが確認できた。なお，ある路線の途絶があっても他の路線で目的地へ到達できる可能性を考えると，路線網の全長はネットワークの冗長性とも関連し，冒頭に記述した災害時における帰宅困難者対応などの問題では重要な指標になると考えられる。

5. まとめと課題

本稿では複雑ネットワークでさかんに研究されているネットワーク成長モデルにならない，路線を生成するモデルを構築した。また，生成された路線をエージェントと見立てたマルチエージェントシステムにより，路線網を修正，進化させるモデルを構築した。構築したモデルをベンチマーク問題に応用した結果，既報の結果よりも良い路線網が得られた。

本稿では構築したモデルが出力する解に対してコスト最小化という点を中心に論じたが，エージェントの進化ルールを変更，追加することで，コスト最小化以外の価値観を導入することも可能と考えられる。これはマルチエージェントシステムを利用した本モデルの利点である。ここでは調整係数を変化させることで生じる路線網全長の変化から冗長性に関して簡

単に触れたが，冗長性は様々な面からとらえる必要があり，本格的に考慮するためには新たな進化ルールが必要となる。また，軌道を必要とする鉄道や LRT などでは路線新設にともなうコストが生じるが，本稿では無視している。今後の課題としては，このコストも評価関数やエージェントの進化ルールの中にも含めることがあげられる。さらに，他の課題として，本モデルは Greedy な戦略により路線が成長，進化する手法を採用しており，得られる路線網は一意に決定される。よって，さらに良い解を得るためには局所的最適解を回避する対策が必要となる。

謝辞 本研究は文部科学省科学研究費補助金，基盤研究 B，17360424 の助成を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Baaj, M.H. and Mahmassani, H.S.: An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.25, No.2, pp.187-210 (1991).
- 2) Barabási, A.-L. and Albert, R.: Emergence of Scaling in Random Networks, *Science*, Vol.286, pp.509-512 (1999).
- 3) Barthélemy, M. and Flammini, A.: Optimal Traffic Networks, arXiv physics/0601203v2 (2006).
- 4) Byrne, B.F.: Public Transportation Line Positions and Headways for Minimum User and System Cost in a Radial Case, *Transportation Research*, Vol.9, pp.97-102 (1975).
- 5) Ceder, A.: Methods for Creating Bus Time Tables, *Transportation Research*, Vol.21A, No.1, pp.59-83 (1986).
- 6) Charkroborty, P. and Dwivedi, T.: Optimal Route Network Design for Transit Systems using Genetic Algorithms, *Engineering Optimization*, Vol.34, No.1 pp.83-100 (2002).
- 7) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」：首都直下地震対策専門調査会報告 (2005).
- 8) Dorogovtsev, S.N. and Mendes, J.F.F.: *Evolution of Networks*, Oxford University Press (2003).
- 9) Ferber, C.V., Holovatch, T., Holovatch, Yu. and Palchykov, V.: Public transport networks: empirical analysis and modeling, arXiv 0803.3514v1 (2008).
- 10) Gastner, M.T. and Newman, M.E.J.: Shape and Efficiency in Spatial Distribution Networks, *J. Stat. Mech.* P01015 (2006).
- 11) 原口友心，高山純一，塩土圭介，加藤隆章：バス路線網再編計画検討システムの構築に関する研究，第 36 回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.601-606 (2001).

- 12) Kaiser, M. and Hilgetag, C.C.: Spatial Growth of Real-World Networks, *Phys. Rev. E*, Vol.69, 036103 (2004).
- 13) Lampkin, W. and Saalmans, P.D.: The Design of Routes, Service Frequencies and-Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A case study, *Operation Research Quarterly*, No.18, pp.375-397 (1967).
- 14) Latora, V. and Marchiori, M.: Efficient Behavior of Small-World Networks, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.87, No.19, 198701 (2001).
- 15) Majima, T., Katuhara, M. and Takadama, K.: Analysis on Transport Networks of Railway, Subway and Waterbus in Japan, *Emergent Intelligence of Networked Agents, Studies in Computational Intelligence*, Namatame, A., Kurihara, S. and Nakashima, H. (Eds), Vol.56, pp.99-113, Springer (2007).
- 16) Majima, T., Takadama, K., Watanabe, D. and Katuhara, M.: Network Evolution Model for Route Design of Public Transport System and its Application, *Proc. Workshop on Emergent Intelligence on Networked Agents (WEIN07)*, pp.57-69 (2007).
- 17) Mandl, C.E.: Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks, Presented at the *3rd European Congress on Operation Research Amsterdam*, Netherlands (1979).
- 18) Montis, A.D., Barthelemy, M., Chessa, A. and Vespignani, A.: The Structure of Inter Urban Traffic: A Weighted Network Analysis, arXiv physics 0507106v2 (2005).
- 19) Newell, G.F.: Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes, *Transportation Science*, Vol.13, No.1, pp.20-35 (1979).
- 20) Pattnaik, S.B., Mohan, S. and Tom, V.M.: Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.124, No.4, pp.368-375 (1998).
- 21) Sedgewick, R.: *Algorithms in C Part 5 Graph Algorithms, 3rd Edition*, Addison-Wesley (2002).
- 22) Shih, M.-C. and Mahmassani, H.S.: A Design Methodology for Bus Transit Networks with Coordinated Operations, *SWUTC/94/60016-1*, Center for Transportation, Univ. of Texas at Austin (1994).
- 23) Strogatz, S.H.: Exploring Complex Networks, *Nature*, Vol.410, pp.268-276 (2001).
- 24) Watts, D.J. and Strogatz, S.H.: Collective Dynamics of 'Small-World' Networks, *Nature*, Vol.393, pp.440-442 (1998).
- 25) Zhao, F. and Zeng, X.: Optimization of User and Operator Cost for Large-Scale Transit Network, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.133, No.4, pp.240-251 (2007).

(平成 20 年 8 月 21 日受付)
 (平成 20 年 10 月 5 日再受付)
 (平成 20 年 11 月 4 日採録)



間島 隆博

平成 4 年名古屋工業大学機械工学科卒業。同年運輸省船舶技術研究所入所(平成 13 年(独)海上技術安全研究所に名称変更)。現在、海上技術安全研究所物流研究センター主任研究員。海洋環境、海上物流に関する研究に従事。平成 15 年度日本航海学会論文賞受賞。日本物流学会，日米機械学会，日本船舶海洋工学会，日本航海学会等の各会員。



高玉 圭樹(正会員)

平成 10 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，博士(工学)。同年株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)入所。平成 14 年東京工業大学大学院総合理工学研究科講師。平成 18 年電気通信大学電気通信学部。現在，電気通信大学准教授。マルチエージェントシステム，分散人工知能，強化学習，創発的計算手法の研究に従事。計測自動制御学会，人工知能学会，IEEE 等の各会員。



渡部 大輔

平成 18 年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了，博士(工学)。同年海上技術安全研究所入所。平成 19 年東京海洋大学海洋工学部。現在，東京海洋大学助教。物流および物流の最適化手法に関する研究に従事。平成 13 年度日本 OR 学会学生論文賞受賞，日本物流学会，日本 OR 学会，日本都市計画学会等の各会員。



勝原光治郎

昭和 48 年，東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士．昭和 49 年運輸省船舶技術研究所入所．現在，日本工業技術振興協会主任研究員．日本船舶海洋工学会，日本 OR 学会，日本海運経済学会，日本交通学会等の各会員．
