

# マルチエージェントシステムによる 路線網構築法

間島 隆博, 高玉 圭樹

マルチエージェントシステムは、自律した多数の主体（すなわちエージェント）が与えられた環境の中で局所的な情報をもとに行動するが、環境がエージェントの活動により変化し、エージェント自身もその変化や他のエージェントの影響を相互に受けながら自らの振る舞いを決定する。すなわち、マルチエージェントシステムは集中管理型システムとは逆のボトムアップ的なアプローチに基づいており、一部のエージェントの不具合がシステム全体の機能不全に至らない特徴を有する。本稿ではこの特徴を生かし、路線網の構築を対象としたマルチエージェントシステムに関して報告する。

キーワード：マルチエージェントシステム、複雑ネットワーク、路線網

## 1. はじめに

首都直下型地震等では鉄道網の途絶による帰宅困難者や通勤困難者の大量発生が社会的な問題となっており、代替輸送手段として、バスだけでなく河川舟運にも期待が寄せられている。これらの輸送モードでは、路線を公表し、利用者は自らの目的に合った路線を選択する輸送形態が自然である。路線網の構築は古くから最適化問題として扱われ、本稿では、路線の経路と路線に割り当てられるバス台数を同時に求める問題を扱う。この路線網構築問題はバス停が少数であっても、組み合わせの爆発が容易に発生するため、様々な制約条件を満たしつつ効率的な路線網を手動により構築することには限界があり、計算機の支援は必要不可欠といえる。そこで、路線網を自動構築する手法として、従来研究で求められている所要時間やバス台数で計算される評価値の最適化を志向するだけでなく、災害時における利用を想定して、バス停の開設、廃止や道路封鎖といった条件変化にも柔軟に対応できる手法について研究を行った[1]。本稿ではその内容を概説するが、マルチエージェントシステムを採用した本手法が従来手法と大きく異なるため、手法の記述に多くの紙

面を割り、結果や応用については少数の例を示す。

## 2. 手法

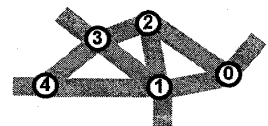
ここで取り上げる問題は図1のように、バス停の位置、道路（バス）、河川（水上バス）、軌道（鉄道）などのインフラネットワーク、OD（出発地：Origin, 目的地：Destination）別の需要、バスの定員（一定）、バスの運行速度（一定）を所与とし、この条件の下で、バス路線の経路とバス台数を求める。なお、バス路線は停車順に並んだバス停の順列で表現され、バスは路線内の駅やバス停を各駅停車で往復を繰り返すものとする。

本手法では、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

OD Matrix (persons/hour)

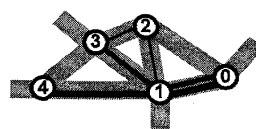
ST		Destination				
		0	1	2	3	4
Origin	0	0	30	70	40	
	1	5	10	0	0	
	2	0	10	0	10	
	3	10	5	0	5	
	4	0	30	10	20	

Vehicle Speed : 20 km/hr  
Seating Capacity : 50 persons



① Station or Bus Stop  
Infrastructure Network (Street, River, Rail)

(a) 問題



(b) 解

図1 本稿で対象とする(a)問題と(b)解の例

まじま たかひろ

(独)海上技術安全研究所 物流研究センター

〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1

たかだま けいき

電気通信大学 電気通信学部

〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

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、2.2.2節の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節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。

バス路線網の構築は次式（あるいは、これに類似した関数）で定義される評価値  $Z$  を最小化する問題として解かれる場合が多い。

$$Z = \sum_{i+j} T_{i,j} D_{i,j} + w_1 \sum_k B_k \quad (1)$$

ここで、 $T_{i,j}$  は出発地が  $i$ 、目的地が  $j$  となる所要時間、 $D_{i,j}$  は単位時間あたりに発生する  $ij$  間の移動需要、 $B_k$  は路線  $k$  に割り当てられるバス台数、 $w_1$  は代理乗数である。第1項は利用者の評価値、第2項はバス路線サービスの提供者の評価値を意味している。すなわち、立場が異なる評価値が二つ混在しており、本問題を困難にしている1つの要因となっている。

### 2.1 初期路線エージェント集合の形成

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[2]、スケールフリーネットワーク[3]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いだされており、船舶航路、鉄道網、バス路線網など、輸送網に関する解析結果も報告されている。複雑ネットワークの研究はネットワーク成長モデルの研究とともに発展してきた。新規追加ノードが接続するノードの決定にユークリッド空間上の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ーが再現できた[4]。本節ではこのモデルに新たに路線の概念を導入した成長モデル[5]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箇所とする（出発地は複数ある）。本路線ネットワーク成長モデルを図2で説明する。

目的地となるバス停（以下、目的地ノード、図2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必要があるバス停（接続元ノード、図2では0以外のすべてのノード、Target Node）を

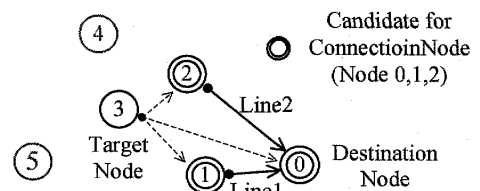


図2 路線成長モデルの例

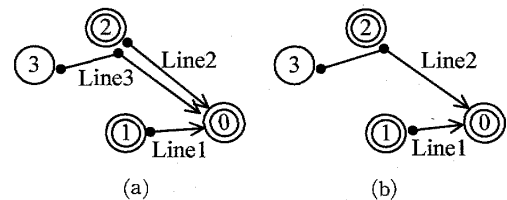


図3 路線の接続型(a)追加型(b)吸収型

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2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、既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2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。さらに、路線の概念を導入するため接続先ノードとの接続には図3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)を利用し（目的地  $j$  は1箇所限定されており、 $i$  は接続元ノードと接続先ノード候補を表す）、評価値が最小となる組み合わせが選択され、路線網が成長していく。ここで、各路線に割り当てるバス台数は停車するバス停での需要を満たす最小のバス台数とする。さらに、式(1)、第1項に含まれる利用者の所要時間は、待ち時間の期待値（バス台数、路線長、移動速度から単純に計算される平均到着時間間隔の半分）も含まれ、上述の2つの接続型はこれらの値に影響を及ぼす。

### 2.2 マルチエージェントシステム

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適応できない。

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で対処するが、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により路線を進化させる方法を採用した。進化過程の流れを図4にまとめる。

ここで、前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路線エージェントの集合として利用する(図4の#1)。また、以下に示す2.2.1節(図4の#2、利用者の経路選択)および2.2.2節(図4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

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、与えられた路線網において式(1)の第1項を最小化する経路を採る。本2.2.1節の過程で、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4の#2に対応)、結果は2.2.2節の路線の評価や進化に利用される。

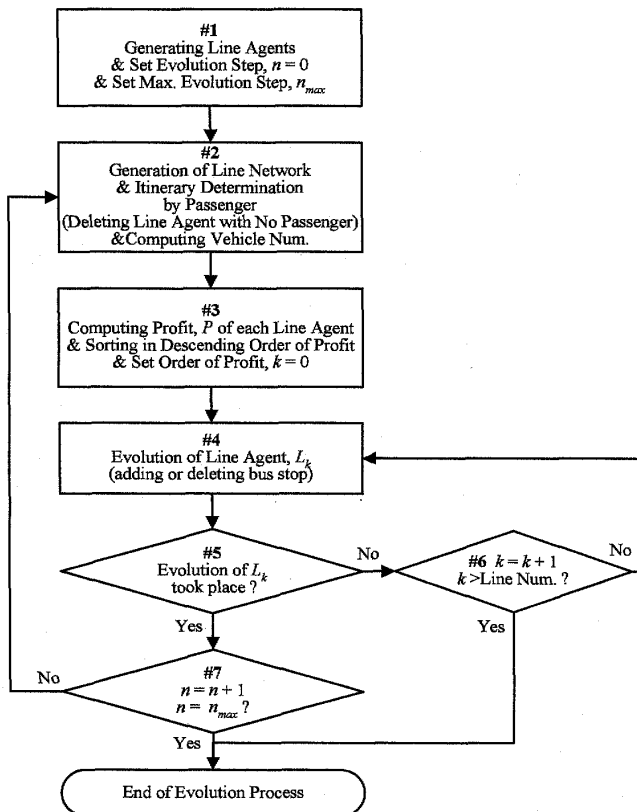


図4 路線網進化過程の流れ図

これらの解析結果を得るため、図5に示すように、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。

例えばバス停3を表すノード3は路線a, bが乗り入れているため、各路線にノードa3, b3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(到着時間間隔/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[6]に倣うために、乗換に生ずるコストを1人回あたり5分として乗車リンクの待ち時間に加算する。

このネットワークのリンクには所要時間が設定されているため、最短路探索アルゴリズムで最小所要時間となる経路が導出できる。また、利用されない路線が判明でき、路線エージェント数が速やかに減少する。

### 2.2.2 路線エージェントの進化ルール

各路線エージェントは2.2.1節の解析結果を用いて、下式による収益 $P$ 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4の#3に対応)。

$$P_k = R_k^n - w_2 B_k^n \quad (2)$$

ここで、 $n$ は進化ステップを、 $R_k$ 、 $B_k$ は路線 $k$ 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代理乗数である。 $w_2$ を小さくとると、利用者数を増加させるために路線を延長し、大きくと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 $k$ の利用者数 $R_k$ は、2.2.1節に示した利用者の経路選択過程の結果から得ることができ、バス台数

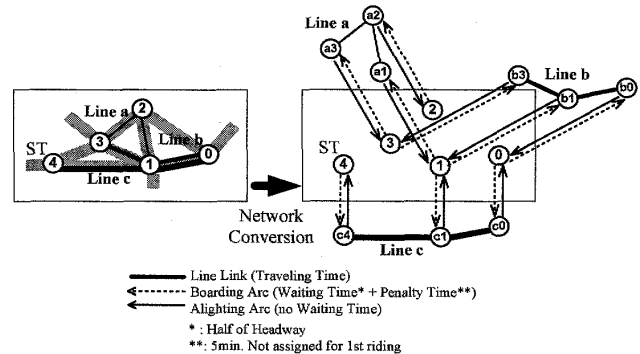


図5 利用者の経路選択過程に利用する路線網ネットワーク

$B_k$  は需要を満たす最低限のバス台数と以下の式で求まるバス台数を比較し、大きな値を採用する。

$$B_{opt} = \sqrt{T_k^2 R_k^2 / (2w_1)} \quad (3)$$

ここで、 $T_k$  は路線  $k$  の往復時間である。式(3)は今考慮している路線  $k$  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ことから導出されている[7]。

次に、進化の内容は、進化の対象となる路線エッジメント  $k$  で、 $k$  に所属しない1つのバス停の取込、もしくは、所属する1つのバス停の削除を考慮する(図4の#4に対応)。どのバス停に関してどの操作(取込、削除)を採用するのかは、取込、削除別に、式(2)に定義した収益の増減、 $\Delta P$  を(予測)計算し、これが最大、 $\Delta P_{max}$  となる組み合わせを選択する。例えば、図5の路線bが進化対象となる場合、図6のように取込(左列)、削除(右列)、それぞれ2ケースの修正候補に対して  $\Delta P$  が計算される。

また  $\Delta P_{max} < 0$  となる場合は、今、対象としている路線  $k$  の進化は行わず(図4の#5からNoへの流れに相当)、次に収益が高い路線  $k+1$  でバス停の取込、削除に関する同様な手順を実行する(図4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込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、バス停の取込または削除を実行せず)、前2.2.1節に示した利用者の経路選択に移る(図4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  $\Delta P_{max} < 0$  となれば、進化の過程は終了する(図4の#6からYesへの流れに相当)。

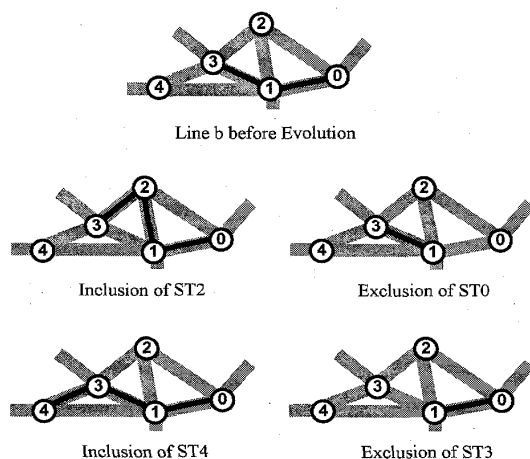


図6 路線経路の修正候補の例

### 3. シミュレーション

3.1節でベンチマーク問題に対して本手法を適用し、最適化の面でその有効性を示す。3.2節では本手法が条件変化に対し柔軟に対応できる例を示す。3.3, 3.4節では、災害時に期待されている、河川舟運を活用した水上バスや都内道路網上のバス路線網の構築例を示す。

#### 3.1 ベンチマーク問題

過去に解析が行われた問題[6]に本手法を応用し、最適化手法としての有効性を示す。図7(a)は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)である。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。需要は1日の総数で15,570人、ほぼ全ODペアに需要がある状況が設定されている。また、バスの定員は既報の文献に沿い50人とした。

図8は式(1)に示した路線網の評価値を、利用者の所要時間(TTT)とバスの総台数に分離し、進化ステップの履歴として表している(代理乗数は  $w_1=0.7$ ,  $w_2=5$ )。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、本手法は、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する効果があることが分かる。また、表1は所要時間とバス台数に関して、過去に報告があった結果との比較を示す。図7(b)には最小の所要時間(3,253 hour)となった5つの路線で構成される路線網を示す。これより、本手法は最小の所要時間、バス台数が出力でき、最適化手法として利

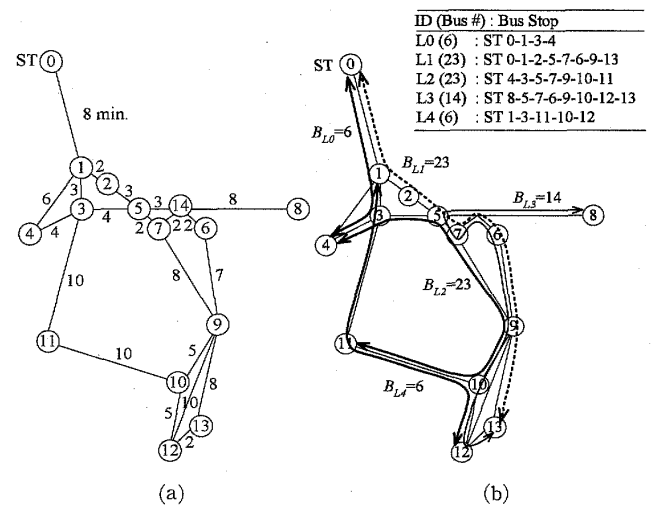


図7 ベンチマーク問題 (a)インフラネットワークと(b)本手法により構築された路線網 ( $w_1=0.7$ ,  $w_2=5$ )

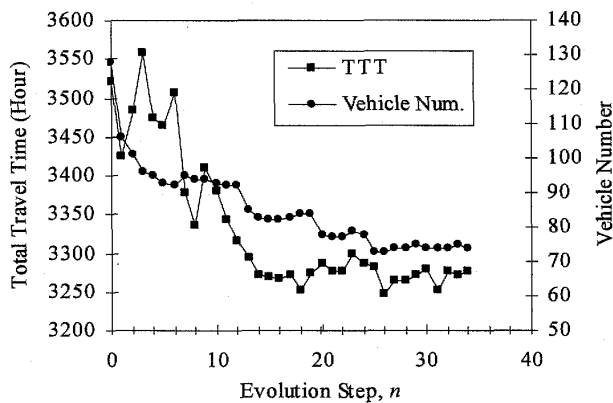


図8 路線網進化過程の所要時間とバス台数の履歴

表1 他手法との比較

	Travel Time(hr)	Vehicle Num.
Mandl (1979) [6]	3651	99.3
Baaj <i>etal</i> (1991) [8]	3428	89.3
	3511	76.9
Shih <i>etal</i> (1994) [9]	3714	82.2
	3401	68
Zhao (2007) [10]	3272	82
	3285	77
<b>Present Method</b> ( $w_1=1.0, w_2=5$ )	<b>3278</b>	<b>59</b>
<b>Present Method</b> ( $w_1=0.7, w_2=5$ )	<b>3253</b>	<b>72</b>

用可能であることが確認できる。

### 3.2 条件変化への対応

本手法ではエージェントとして表現される路線の削除、追加が自由にできる。これはマルチエージェントシステムを採用した利点であり、条件変化に対して柔軟に対応することが可能となる。災害時の復興・復旧過程において、頻繁に発生すると考えられるバス停の追加、削除、道路の閉鎖、開通は、すなわち、この解析条件の変化である。例えば、前節の問題で、バス停8が無い状態で路線網を構築した結果を図9(a)に示す。その後、バス停8が新設された場合、バス停8を起点とした路線を2.1節の手法で生成、追加し、2.2節の進化過程を経て出力された路線網を図9(b)に示す。新規追加した路線は淘汰され、既存の $B_{L3}$ 路線がバス停8を取り込む結果となった。このとき、所要時間は3,260時間、バス台数は71台となり、表1に示した値と遜色ない評価値が得られている。さらに、既存の路線を大きく変更しないという点も、利用者の混乱を防ぐ上で、利点として挙げられる。

### 3.3 水上バス路線網の構築

首都圏における災害時輸送に対して河川舟運が代替

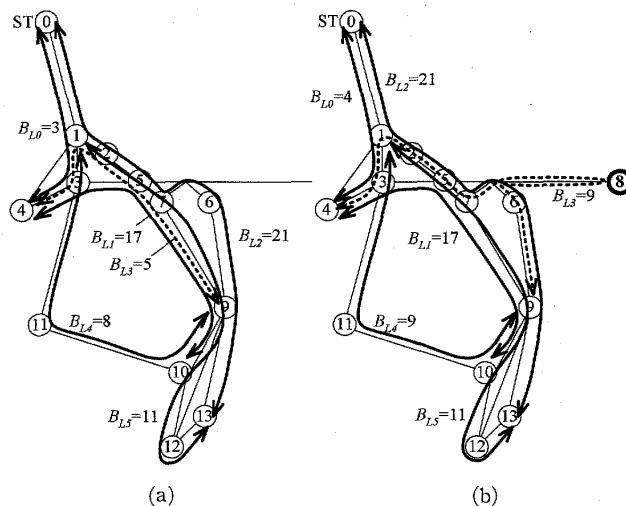


図9 条件変化への対応例(a)バス停8が無い条件での路線網(b)バス停8が新設された後、進化した路線網

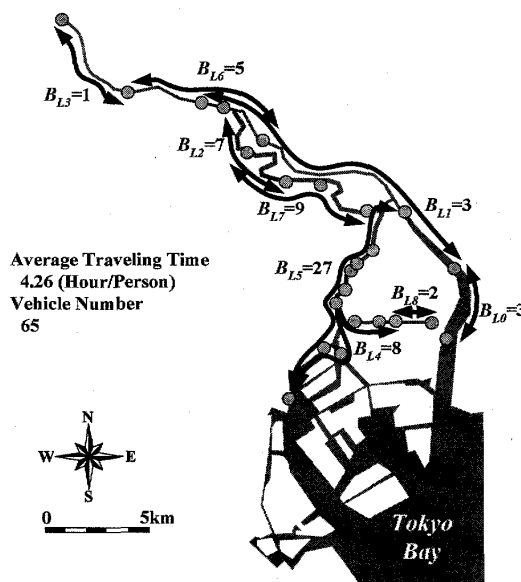


図10 水上バス路線網の解析例

輸送経路として期待されており、主要な河川沿いにリバーステーションなどの整備が進められている。図10に示した東京を流れる隅田川、荒川、小名木川に設置されている24カ所の船着場をバス停とし、これを覆う水上バス路線網を求める問題[11]に対して、手作業で構築した路線網は所要時間の平均値が4.30時間、水上バス(移動速度10 knot, 定員110人)は67隻となった。

一方、本手法による路線網(図10に示す)では、4.26時間、65隻となった。手作業と本手法で得られた評価値には大差無いが、手作業では路線網構築に数日を要し、本手法では0.5秒(Core 2 Duo U 7500, VC++, Visual Studio 2005)で結果が得られた。早



図 11 都内役所，役場と新宿駅，東京駅を結ぶ路線網

急な対策が必要とされる災害時対応に有効と考えられる。

### 3.4 帰宅，通勤困難者対応バス路線網の構築

帰宅困難者や通勤困難者の輸送をイメージして，東京駅，新宿駅を起点とし，都内，市区町村の役所，役場を結ぶバス路線網を道路ネットワーク上に構成した。図 11 は南南東から北北西を見た鳥瞰図で，底面に道路網が描かれ，生成されたバス路線が垂直方向に積み重なって表示されている。

## 4. おわりに

本稿では複雑ネットワークで研究されているネットワーク成長モデルに倣い，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，進化させる手法を構築した。本手法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るとともに，バス停の新設といった条件変化に対し，容易に対応できることを示した。さらに，実問題への応用として東京都を対象とした水上バス，バス路線網の解析結果を示した。

**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 の助成を受けたものである。

### 参考文献

[1] 間島隆博，高玉圭樹，渡部大輔，勝原光治郎，「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」，情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用，Vol. 2, No. 2, pp. 92-102, 2009.

[2] Watts, D. J. and Strogatz, S. H., "Collective Dynamics of 'Small-World' Networks," Nature, Vol. 393, pp. 440-442, 1998.

[3] Barabási, A.-L. and Albert, R., "Emergence of Scaling in Random Networks," Science, Vol. 286, pp. 509-512, 1999.

[4] Gastner, M. T. and Newman, M. E. J., "Shape and Efficiency in Spatial Distribution Networks," J. Stat. Mech. P01015, 2006.

[5] 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.

[6] Mandl, C. E., "Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks," Presented at the 3rd European Congress on Operation Research Amsterdam, Netherlands, 1979.

[7] 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.

[8] Baaaj, 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 間島隆博，樋富和夫，勝原光治郎，「災害時緊急輸送システムの技術開発に関する研究」，海上技術安全研究所報告，Vol. 6, No. 1, pp. 1-35, 2006.