

# 自己組織化マップを用いたデマンドバスシステムの分析

上杉健太郎<sup>†</sup> 渡邊 豊英<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科社会システム情報学専攻

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: [†uesugi@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp](mailto:†uesugi@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp)

あらまし 近年，地方都市における固定路線バスの衰退が大きな問題となり，デマンドバスシステムが新たなバスシステムの形態として注目を浴びている．デマンドバスの配送アルゴリズムや，より効率的な運用形態については多くの議論がなされているが，どのようなサービスエリアにおいてどのようなデマンドバスシステムが有効であるかは十分に議論されていない．本研究の目的は，様々な特徴を持つデマンドバスシステムを，様々な特徴を持つサービスエリアにおいてシミュレーションを行うことにより，デマンドバスシステムの「都市への適合性」に関する知見を得ることである．デマンドバスやサービスエリアは多くの要因により特徴づけられるため，一つ一つの組合せに着目するだけでは，十分な知識を得ることはできない．本研究では，実験結果を自己組織化マップにより可視化することで，有用な知識を導き出す．実験の可視化結果から，どのようなサービスエリアにおいてどのようなデマンドバスシステムが有効であるかを示す．

キーワード 自己組織化マップ，車両配送問題，遺伝的アルゴリズム，シミュレーション実験

## Analysis of Demand Bus System Using Self-Organising Map

Kentaro UESUGI<sup>†</sup> and Toyohide WATANABE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 Japan

E-mail: [†uesugi@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp](mailto:†uesugi@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp)

**Abstract** In this paper, we focus attention on demand bus system which is a new transportation system. Traditional simulation researches of demand bus system analyzed the adaptability of demand bus system to its service area by comparing to other bus systems. However, these researches deal with a small number of parameter to analyze the adaptability, because it becomes difficult when the number of parameters for simulations increases. It is just a “locally” estimation. Our objective is to analyze the adaptability of bus systems to its service area “globally”. In this paper, we propose a framework in which it is possible to deal with various parameters of demand bus system and its service area. Our framework for analysis consists of two phases; simulation phase and visualization phase. In the simulation phase, we construct database from experimental data. In the visualization phase, we visualize relationship among parameters for bus system and its service area. The parameter maps show that if a service area is small or users distribute uniformly, the bus system is not adapted to the service area. However if an adequate number of demand bus is assigned, it is possible to constraint the degradation of adaptability. Using our analysis framework, it becomes possible to analyze the adaptability of bus systems to its service area globally.

**Key words** Self-Organizing Map, VRP, GA, Simulation

### 1. はじめに

近年の交通システムは，慢性的な交通渋滞や，公共交通ネットワークの連携不足など，多くの問題を抱えており，新しい公共交通システムが必要とされている．本研究では新しい交通システムの一つであるデマンドバスシステムに着目する．

デマンドバスシステムとは，利用者の要求（デマンド）に従って，オンデマンドに走行経路を決定する顧客輸送システムである．従来の固定路線バスシステムは，予め定められた時刻に，定められた経路を運行する．利用者にとって単純で分かりやすいシステムであるが，利用者によっては，目的地からバス停との距離が大きい場合や，必要な時間帯にバスが来ない場合

があり、必ずしも全ての利用者にとって利便性の高い交通システムではない。また、固定路線バスシステムでは、車両が定められた経路を定められた時刻通りに運用する為、利用者がいない場合にも空車のまま運行する。このように、経路や運行時刻が予め定められることで、利便性の低下や、運営上の無駄が発生する。一方デマンドバスシステムは、利用者が必要な時刻に、必要な経路を作成する。このため、自由度の高い運行計画を作成でき、効率よく利用者の輸送が可能である。また、デマンドバスシステムを利用することで Door-to-Door に移動できるため、利用者にとって利便性の高い交通システムである。

固定路線バスとデマンドバスを併用することでバスシステムを再構築し、システムの利便性を向上した実例がいくつも存在する。大和らは、千葉県柏市の北部において、デマンドバスシステムを運用し、アンケート結果などからその利便性を示した[1]。一方で、採算性が取れないためにサービスの継続が困難なデマンドバスシステムが存在することも事実である。一般に交通システムとそのサービスエリアの適合性は、利用者側に立った「利便性」と運営者側に立った「採算性」で評価し、交通システムがそのサービスエリアでどの程度有用に働くを示す指標である。デマンドバスシステムとそのサービスエリアの適合性は、運用形態や運用するサービスエリアの特徴に応じて大きく変化するため、どのような状況下でデマンドバスシステムが有用であるかを明らかにする必要がある。

デマンドバスの採算性や利便性を評価することで、デマンドバスの有用性を検証する研究は多くなされている。境らはシミュレーション実験により、サービスエリアの面積を小さくすることで、デマンドバスシステムの利便性・採算性が向上することを示した[2]。また、野田らはデマンドバスシステムと固定路線バスを比較し、運行規模が大きくなることで、採算性を維持しながら固定路線バスより高い利便性を提供できることを示した[3],[4]。鳥居らは固定路線バスとデマンドバスを同じ車両台数で運用したときの、デマンドバスの優位性を示した[5]。このように、ある限定された条件下におけるデマンドバスの有用性は様々な視点で検証されている[6]~[8]。しかし、サービスエリアやバスシステムは多種多様な特徴を持っている。このため、どのようなバスシステムがどのようなサービスエリアに適合するかを知るためには、バスシステムやサービスエリアの特徴を制限した中で、局所的な視点によるデマンドバスの有用性を議論するのみでは十分とは言えない。様々な特徴を持つバスシステムやサービスエリアを扱い、大域的な視点で検証する必要がある。

また、これらの研究の多くは、デマンドバスシステムと固定路線バスシステムをそれぞれ独立したシステムとして捉えた上で、デマンドバスシステムのみを用いて運用する場合の有用性を検証している。しかし、実際は固定路線バスを全て廃止して、デマンドバスだけの運行に頼る地域は少なく、デマンドバスは固定路線バスを補助する役割で導入されることが多い。従って、デマンドバスシステムの利便性や採算性を評価する際には、デマンドバスと固定路線バスが混在するバスシステムを評価する必要がある。デマンドバスと固定路線バスが混在するバスシ

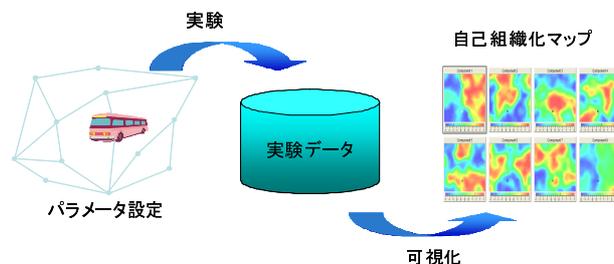


図1 フレームワーク

テムを扱った研究として、内村らはバスシステムを階層的に捉え、最下層にデマンドバスを適用する複合的な新バスシステムを提案した[9]。また、磯崎らは都市部においてデマンドバスと固定路線バスを併用した時の最適な運行計画作成法について議論した[10]。これらの研究は、バスシステムの運用方法の提案として大きな意義を持つが、有用性を明らかにする立場ではなかった。

これらを踏まえ、本研究の目的は、「固定路線バスとデマンドバスが混在するバスシステム」において、サービスエリアとバスシステムの適合性を分析することである。言い換えると、本研究の目的は、「どのようなサービスエリアにおいて、どのようなバスシステムが有用であるか」という問に対する知見を得ることである。このためアプローチとして、大域的な視点で適合性を分析するためのフレームワークを用いる。我々のフレームワークでは、まず従来の手法と同様にシミュレーション実験を繰り返す。このとき、バスシステムとサービスエリアの多種多様なパラメータを変化させ、様々な実験結果を得る。次に、複数の実験結果からパラメータの関係を可視化手法により明らかにする(図1)。様々な条件におけるシミュレーション実験を行うことで、多くのパラメータを同時に考慮した大域的な視点で実験結果を分析することができる。本稿はバスシステムとサービスエリアとの適合性を分析することを目的とするが、そのためのフレームワークを提案する側面も持っている。本稿では実験結果の可視化手法として自己組織化マップを用い、バスシステムとサービスエリアの適合性を分析する。

本稿の構成は次の通りである。まず2章でバスシステムとサービスエリアとの適合性を分析するためのフレームワークについて議論し、3章でシミュレーション実験の手法について述べる。4章では可視化手法について議論し、5章でその可視化結果を報告し、6章で本稿をまとめる。

## 2. フレームワーク

バスシステムとサービスエリアは、それぞれが様々な特徴を持つ。例えば、デマンドバスシステムであればオンデマンドに運行する車両の割合や、車両の大きさなどにより特徴が決まる。また、サービスエリアは道路ネットワークの形状や、利用者発生数などにより特徴が決まる。

本稿の目的は、バスシステムとサービスエリアとの適合性を大域的な視点で分析することである。ここで大域的な視点とは、サービスエリアやバスシステムの多様性を考慮し、多角的に分

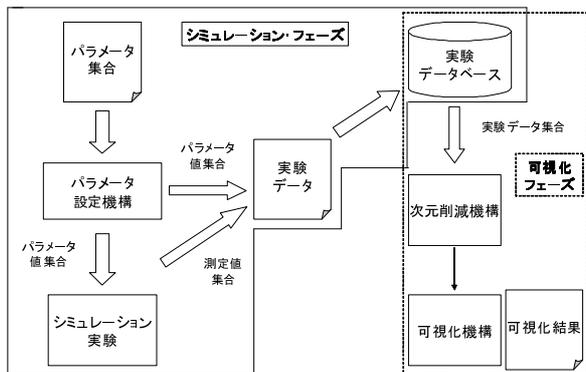


図2 データの流れ

析を試みる視点である。既存の研究はこれらの多様性を考慮するには至っていない。我々は、研究のもうひとつの側面として、バスシステムとサービスエリアの適合性分析のためのフレームワークを提案する。本章では、提案するフレームワークについて議論する。

提案フレームワークにおけるデータの流れを図2に示す。提案フレームワークは、シミュレーション・フェーズと可視化フェーズの2つで構成される。図2の実線部分が、シミュレーション実験のフェーズであり、破線部分が可視化のフェーズである。それぞれの特徴を以下に述べる。

### 2.1 シミュレーション・フェーズ

以下に提案フレームワークにおけるシミュレーション・フェーズを説明する。シミュレーション・フェーズでは、多数のシミュレーション結果を格納した「実験データベース」を作成することを目的とする。本稿におけるシミュレーション・フェーズの詳細は3章にて述べる。

#### (1) パラメータ集合の選択

提案フレームワークでは、まず検証するパラメータを定める。ここでは、バスシステムとサービスエリアの多様性を表現するために、必要十分であるパラメータ集合を選択する。パラメータの不足は、バスシステムとサービスエリア本来の多様性を制限し、余分なパラメータの選択は、明瞭な可視化を妨げる。

#### (2) パラメータ値の設定

パラメータ値設定機構により、パラメータの値を決定する。パラメータ値設定機構は、現実世界に対応する妥当なパラメータ値を設定する機構である必要がある。

#### (3) シミュレーション実験

パラメータ値設定機構により定められたパラメータ値を用い、シミュレーション実験を行い、バスシステムとそのサービスエリアの適合性を評価する。シミュレーション実験により作成する実験データを基に適合性を分析するため、構築するモデルの妥当性、パラメータの感度を十分に議論する必要がある。

#### (4) 実験データの作成、データベースへの挿入

シミュレーション実験により得られた「測定値とパラメータ値の集合」をひとつの実験データとして実験データベースに格納する。測定値とは、実験により明らかになる値で、適合性の評価値の他に、「デマンドバスと固定路線バスの利用者比率」や

「固定路線バスの経路長」などが該当する。

パラメータの設定とシミュレーション実験のステップを繰り返すことにより、さまざまなパラメータ値による実験結果を実験データベースに格納する。このとき作成される実験データは、「測定値と実験に用いたパラメータ値の集合」であるため、多くの要素からなる多次元データである。従来のデマンドバスに関する多くのシミュレーション研究では、これらのデータから二次元グラフを作成することでデマンドバスシステムとそのサービスエリアの適合性に関する知見を得ていた。しかし、従来の手法ではパラメータ数が増加するにつれて、パラメータ間の関係把握が困難となる。このため、パラメータ数を制限した上で、デマンドバスシステムとそのサービスエリアの適合性を局所的に検証していた。大域的に適合性を検討するためには、より多くのパラメータ間の関係を把握する必要がある。そこで提案フレームワークでは、パラメータの関係を可視化することで、大域的な検証を可能とする。

### 2.2 可視化フェーズ

シミュレーションによる実験結果は実験で用いたパラメータの値と、観測値からなる多次元データである。可視化フェーズでは、実験データベースの次元を削減し、実験データの各要素間の関係を可視化する。

多次元データの次元を削減し、関係を可視化する手法は多く知られているが、可視化するデータの特徴に応じて手法を選択する必要がある。提案フレームワークで採用する次元削減・可視化手法は、以下に示す二つの特徴が必要である。

(1) データの欠損を許可する。

(2) データのクラスタ構造を保存する。

(1) 提案フレームワークでは、多くのパラメータを扱い、各パラメータを様々な値に変化させてシミュレーション実験を行う。従って、パラメータ値の組合せが無数に存在し、すべてのパラメータ値の組合せでシミュレーション実験を行えるわけではない。このため、シミュレーション・フェーズで作成する実験データベースにおいては、一部の実験データに欠損が生じることが考えられる。以上の理由より、提案フレームワークに用いる次元削減・可視化手法には、「実際に実験されていないデータを補完」する特徴が必要である。

(2) 提案フレームワークは、バスシステムとそのサービスエリアの適合性を分析するためのフレームワークである。提案フレームワークを用いることで、次元削減・可視化手法を適用した結果から、有用な知見を導出する。このためには、実験データの各要素がどのような関係を持っているかを知る必要がある。一般にデータの特徴である「各要素間の関係」は、データのクラスタ構造として現れる。したがって、次元の削減によりデータのクラスタ構造が失われると、我々の必要とする「各要素間の関係」を把握することが困難となる。したがって、提案フレームワークで用いる次元削減・可視化手法はデータのクラスタ構造を保存する必要がある。

本稿では、二つの特徴を併せ持つ次元削減・可視化手法である自己組織化マップを用い、実験結果を可視化する。自己組織化マップについては4章で述べ、その可視化結果は5章にて報

表 1 サービスエリア・タイプ

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4
横ノード数	50	100	100	200
縦ノード数	50	25	100	50
面積	250	250	1000	1000

表 2 分布タイプ

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4
正規分布の数	0(均等分布)	1	2	4

告する．

### 3. シミュレーション・フェーズ

シミュレーション実験では様々なパラメータの組合せで、デマンドバスシステムとサービスエリアの適合性を評価する．評価項目は利便性と採算性である．

#### 3.1 サービスエリア

サービスエリアの道路ネットワークはノードとエッジからなる、グラフ・ネットワークで表される (式 (1))．ノードは交差点、エッジはノードを繋ぐ道路セグメントを表す．利用者は道路ネットワーク上のいずれかのノード上でバスへの乗車/降車を行う．

$$\begin{cases} G = (N, E) \\ N = \{n_0, n_1, \dots, n_{L-1}\} \\ E = \{e(n, n') : n, n' \in N\} \end{cases} \quad (1)$$

また、本稿ではサービスエリアは碁盤目状の道路ネットワークとし、座標平面状  $x$  軸上のノード数と、 $y$  軸上のノード数により形状が決定する．実験では表 1 に示すような面積と形状の異なる 4 つのパターンを用いた．

利用者  $u_i$  は出発地  $o_i$ 、目的地  $d_i$ 、出発時刻  $t_o$ 、帰宅時刻  $t_d$  により与えられる (式 (2))．利用者  $u_i$  は時刻  $t_o$  に出発地点  $o_i$  を出発し、目的地  $d_i$  へ向かう．その後帰宅時刻  $t_d$  になると、目的地  $d_i$  を出発し、出発地  $o_i$  に戻る．

$$u_i = (o_i, d_i, t_o, t_d) \quad (2)$$

一般に、時間帯に応じて、出発地として選択されるエリアと目的地として選択されるエリアは異なる．例えば、多くの都市において、朝の出勤ラッシュの時間帯には住宅エリアが出发地として選択され、オフィスエリアが目的地として選択される．このため、出発地や目的地として各ノードが選択される確率の分布は互いに独立に設定する．ノードが選択される確率の分布は、複数の正規分布を重ね合わせた分布により表現する．シミュレーション実験では、表 2 のように重ね合わせる正規分布の数に応じて 4 つのタイプを用いた．

#### 3.2 バスシステム

本研究が対象とするバスシステムは、固定路線バスとデマンドバスが混在するシステムである．オンデマンドに運行する車両の割合がバスシステムの一つの特徴を表す (表 3)．また、システムの採算性は車両 1 台あたりの一日の利用者数で表す．

#### 3.2.1 固定路線バスシステム

固定路線バスシステムは複数の経路を持ち、利用者は目的地に応じて経路を選択し、システムを利用する．また、利用者の分布に応じた最適な経路を解析的に作成することは困難であるため、遺伝的アルゴリズムにより準最適な経路を求める [4]．

遺伝的アルゴリズムにおける個体は、一つの固定路線バスシステムを表す経路集合であり、適合度は利用者にとってのシステム利便性を用いる．これにより、遺伝的操作を繰り返すことで、より利便性の高い経路集合を作成することができる．

遺伝的操作では選択・交叉・突然変異を行い、次世代を作成する．選択の操作では、エリート選択により優秀な個体群を次世代にコピーする．また、交叉では、個体間で一部の経路を交換する．突然変異では、個体内の経路の形状を変える．以上の 3 つの遺伝的操作を随時適応することで、次世代を作成する．

#### 3.2.2 デマンドバスシステム

デマンドバスシステムは、固定された経路を持たず、利用者のデマンド (要求) に応じた経路を動的に作成し、利用者を出発地から目的地まで Door-to-Door で輸送するバスシステムである．デマンドバスシステムの最適な経路を求める問題は、Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW) と呼ばれ NP 困難な問題として知られている．このため、精度の高い近似解を求めるヒューリスティックな最適化アルゴリズムが多く議論されてきたが [11] ~ [14]、これらの問題はいずれも静的な問題である．つまり、すべてのデマンドは経路作成の前にあらかじめ決まっており、経路を一度だけ作成すればよい問題といえる．本研究が対象としているのは現実を想定した動的な経路作成問題である．動的 VRPTW の解法としてマルコフ決定過程に基づく手法 [15] や、 $A^*$  に基づく手法 [16]、R-Tree に基づく手法 [17] などが存在する．本稿では、高速に局所解を探索する組合せ最適化手法である逐次挿入法 [18], [19] に基づき、デマンドバスの経路を作成する．逐次挿入法では、現在の経路に新規利用者  $u_i$  の出発地  $o_i$ 、目的地  $d_i$  を挿入する．その際に、挿入可能な箇所を全て探索し、最も挿入コストが小さい箇所に挿入する．挿入コストとは、新規利用者を乗せることで、乗り合わせる他の利用者に発生する遅延である．既存の経路に基づいて新たな経路を作成するため、局所解に陥りやすいが高速に経路を作成することができる．

#### 3.3 評価項目

バスシステムとサービスエリアの適応性は、システムの利便性と採算性で評価する．利便性  $F_1$  は利用者の平均所要時間により定義され、式 (3) により与えられる．利用者の所要時間  $T(u_i)$  は、歩いて出発地から目的地へ到達する場合の所要時間  $T_w(u_i)$  と、固定路線バスを用いた場合の所要時間  $T_f(u_i)$  とデマンドバスを用いた場合の所要時間  $T_d(u_i)$  の中から最も小さいものが選ばれる．

表 3 パラメータ一覧

No.	パラメータ名	取りうる値
1	サービスエリア・タイプ	1 ~ 4
2	利用者の発生頻度	100 ~ 2000
3	出発地分布タイプ	1 ~ 4
4	デマンドバスの割合	0.0 ~ 1.0
5	車両台数	1 ~ 100

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \sum_{i=0}^{|\mathbf{U}|} T(\mathbf{u}_i) \\ T(\mathbf{u}_i) = \min(T_w(\mathbf{u}_i), T_f(\mathbf{u}_i), T_d(\mathbf{u}_i)) \\ T_w : \text{歩いて移動する場合の所要時間} \\ T_f : \text{固定路線バスを用いた場合の所要時間} \\ T_d : \text{デマンドバスを用いた場合の所要時間} \end{array} \right. \quad (3)$$

採算性  $F_2$  は車両一台あたりの一日の獲得利用者数により定義され、式 (4) により与えられる。

$$F_2 = \frac{1}{|\mathbf{B}|} \sum_{i=0}^{|\mathbf{B}|} |\mathbf{U}_i| \quad (4)$$

変化させるパラメータとその取りうる値を表 3 に示す。表 1 のそれぞれのパラメータを、その取りうる値の中からランダムに選択し、様々な組合せでバスシステムのシミュレーション実験を行う。

#### 4. 可視化フェーズ

本フレームワークではシミュレーション・フェーズにより、様々なデマンドバスシステムを様々なサービスエリアにおいて運用した際の有用性を評価する。これにより多次元の実験データから実験データベースを作成する。可視化フェーズでは、我々が目標とするデマンドバスシステムとサービスエリアの適合性分析を可能とするために、実験データベースの多次元データを可視化する。

##### 4.1 多変量解析手法

シミュレーション実験の結果は、パラメータ集合と評価値集合で構成される多変量データである。このような多変量データを解析する手法は多く知られているが、解析するデータの特徴にあわせて手法を選択する必要がある。2.2 節で述べたように、本研究で用いる多変量解析手法は以下に示す 2 つの特徴が必要である。

- (1) データの欠損を許可する。
- (2) データのクラスタ構造を保存する。

(1) 本研究では、多種多様なパラメータを変化させてシミュレーション実験を行う。このため、考え得るすべてのパラメータの組合せで実験を行うこと困難である。したがって、本研究で用いる手法には、実際に実験していないデータを補う機能が必要である。

(2) また、本研究の目的は、バスシステムとサービスエリアの関係を知ることである。実験データから、パラメータ群がどのように関係し合っているか、利便性や採算性に影響を与えているかを知るためには、これらの関係を構造的に捉える必要がある。このため、次元の削減や、可視化を行った際に、データのクラ

スタ構造を保存する必要がある。

多変量解析手法は、線形解析手法と非線形解析手法のいずれかに分類される。線形解析手法では主成分分析による解析手法が有名であり、様々な議論がなされている [20]。主成分分析は、対象データの特徴をよく表す新たな変数を主成分として設定する手法である。これにより、データの特徴を最もよく表す部分空間を高速に求めることができる。

主成分分析を代表とする線形解析手法は、計算が速く、直感的に分かりやすい手法が多いが、データが線形に分布していることが前提である。本研究では、実験データの構造が未知であるため、非線形の解析手法を採用する。

非線形の解析手法はカーネル関数を用いる手法や、位相マップによる手法が知られている。カーネル関数を用いる主成分分析であるカーネル主成分分析は、データを高次元特徴空間上に写像し、その上で主成分分析を行う。その結果を 2 次元空間へ逆写像することで、非線形データに主成分分析を適応する [21]。

位相マップによる手法では、データを位相空間に射影する。このため、カーネル関数を用いる手法と同様に、データが非線形に分布している場合にも、データの構造を保持したまま低次元の写像を形成できる。また、学習データに欠損が生じていても、近隣ノードの関係から推測し、欠損データを補いながら学習を進めることができる。位相マップを作成する手法は、主に自己組織化マップが知られている。

シミュレーション・フェーズでは、様々なパラメータの組合せで実験するが、全てのパラメータの組合せで実験することは容易でない。このため、作成する実験データベースにはデータの欠損が多く存在することが考えられる。そこで、本稿では非線形なデータ分布に対応し、欠損データを補完できる学習アルゴリズムを持つ、自己組織化マップを用い、多次元データを可視化する。

##### 4.2 自己組織化マップの概要

自己組織化マップ (Self-Organizing Map, SOM) は教師なし競合学習のアルゴリズムを持つ、フィードフォワード型のニューラルネットワークである。SOM の学習アルゴリズムは、教師なし競合近傍学習によって、入力データの特徴を学習する。これにより、多次元のデータを類似性の高いデータ同士が近くに配置されるように二次元空間に射影し、位相マップを作成する [22]。また、自己組織化マップは位相マップに射影する次元削減法であるため、データに欠損がある場合も、データを補完した二次元マップを作成することができる。つまり、自己組織化マップは、データ数が足りない場合や、データ自体に欠損がある場合にも適用可能な学習アルゴリズムである。自己組織化マップの学習により作成された位相マップはデータマイニングツールとして、また多次元データの可視化ツールとして様々な分野で利用されている。例えば、データマイニングツールとして、定性分析や定量分析、特徴抽出などに使われる。可視化ツールとしては、多目的最適化問題のパレート解の分類への利用がなされている [23], [24]。

##### 4.3 自己組織化マップの学習アルゴリズムと可視化手法

SOM は図 3 に示すように、入力層と競合層の二つの層から

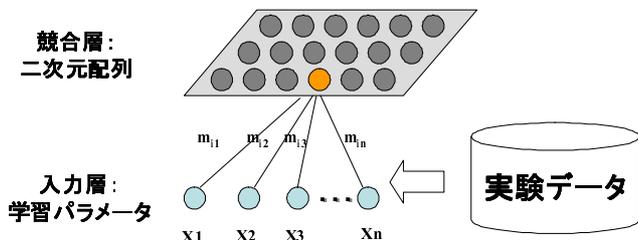


図 3 自己組織化マップの学習

構成され、隠れ層を持たないニューラルネットワークである。入力層は学習データの次元と等しい数の入力ノード  $X$  で構成され、入力ベクトルのそれぞれのパラメータ値がそれぞれの入力ノード  $X$  に与えられる。本研究においては、一つの実験データが一つの入力ベクトルに相当し、それぞれのパラメータ値や評価値が  $X$  に与えられる。また、競合層にはノードが格子状に配置される。ノード  $i$  は入力層のノード数と等しい次元の参照ベクトル  $m_i$  を持つ。

$n$  次元の学習データを例に、以下に SOM の学習アルゴリズムを示す。

- (1) 参照ベクトルの初期化  
競合層のすべてのノードの参照ベクトルをランダムに設定する。
- (2) 入力ベクトルの入力  
入力層に入力ベクトル  $bfX = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  を与える。
- (3) 距離の計算  
競合層のすべてのノードに対して、参照ベクトルと入力ベクトルとの距離を算出する。ベクトル間の距離には、一般的にユークリッド距離を用いる。競合層の  $j$  番目のノードと入力ベクトルとの距離を式 (5) で与える。

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_{ji})^2} \quad (5)$$

- (4) 勝者ノードの決定  
入力ベクトルとのユークリッド距離が最小となるノードを勝者ノードとする。
- (5) 参照ベクトルの学習  
勝者ノードとその近傍ノードの参照ベクトルを、式 (6) に従い更新する。ここでは  $c$  番目のノードが勝者ノードとして選択されたとする。

$$\Delta m_{ji} = h(j, c, t) (x_i - m_{ji}) \quad (6)$$

ここで  $h(j, c, t)$  は近傍関数と呼ばれ、次の性質を持つ。

- 学習回数  $t$  に対する単調減少関数で、 $t$  が無限大で  $h$  は 0 に収束する。
- ノード  $c$  とノード  $j$  の距離に関して単調減少する。この性質により学習が進むにつれ、学習が及ぶ範囲（近傍範囲）は小さくなる。

(6) 2へ戻る

2~5のステップを繰り返し、学習を進める。

SOM の学習アルゴリズムでは式 (6) に示すように、勝者ノードとその近傍ノードは全て、入力ベクトルに近づくように更

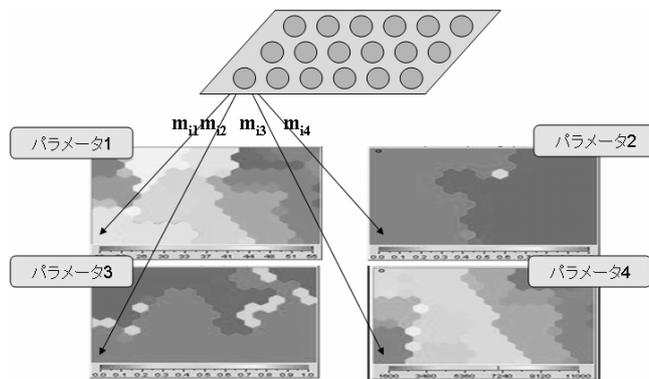


図 4 自己組織化マップによる可視化

新される。学習の初期段階では近傍関数の特徴により、多くのノードを近傍とみなす為、大まかな位相マップが作成される。また、学習が進むに連れて、近傍とみなされるノードが限定される為、局所的に微調整される。このようにして、競合層では類似性の高いデータ同士が近くなるように配置された位相マップが作成される。本研究においては、学習データに実験結果を用いている為、位相マップにおける一つのノードを一つの実験結果と見なす事ができる。このため、学習結果の位相マップはパラメータや評価値の特徴の似ている実験を近くに配置した二次元マップと捉えることができる。

学習結果の位相マップは、パラメータ毎に別々の 2 次元平面 (パラメータ・マップ) 上に表示することで、図 4 のようにパラメータ間の関係を可視化できる。このとき、位相マップのノードの位置は変わらないので、それぞれのパラメータ・マップにおける同じ領域に着目することで、パラメータ間の関係を知ることができる。例えば、図 4 であれば、パラメータ 2 の値が大きく、パラメータ 3 の値が小さい時にパラメータ 1 の値が大きくなる事が分かる。また、パラメータ 1 のパラメータ・マップとパラメータ 4 のパラメータ・マップの類似性が高いことから、これらのパラメータの相関が強い事が分かる。

このように、自己組織化マップを用いることで、多変量のデータにおけるパラメータの関係を視覚的に捉えることができる。次章では、3 章にて報告した実験手法による実験結果を SOM を用いて可視化し、バスシステムとサービスエリアの適合性を分析する。

## 5. 可視化結果

自己組織化マップによる可視化結果を図 5 に示す。利用者の発生分布は一様分布に、利用者発生数は 1000 に固定した。

まず、利用者にとっての有用性を示す利便性に着目する。利便性は平均所要時間で評価し、値が小さいほどバス・システムの利便性が高い。図 5 より、面積の小さいサービスエリア・タイプ 1, 2 の領域に平均所要時間の大きい領域が重なり、面積の大きいサービスエリア・タイプ 3, 4 の領域に平均所要時間が大きい領域が重なっている。これにより、サービスエリアの面積が小さい時にデマンドバス・システムの利便性が高いことがわかる。また、利便性が高い領域に着目すると、総車両数が

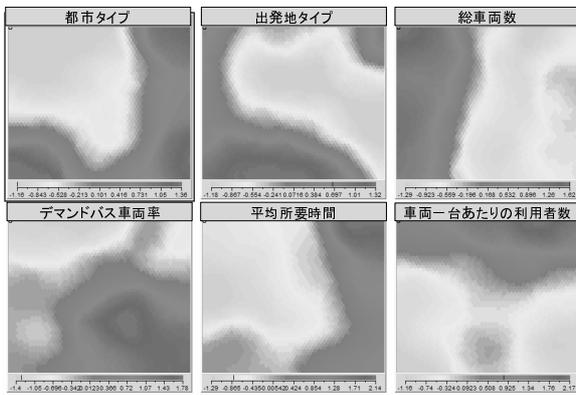


図 5 実験結果の可視化

多い領域と重なっていることがわかる。さらに、総車両数が小さいにもかかわらず、利便性が高い領域は、サービスエリアの面積が小さく、デマンドバスの比率が高い領域である。このことから、総車両数が少なくても、サービスエリアの面積が小さい場合、デマンドバスに多くの車両を割当てることで、利便性を高めることができると言える。逆に最も利便性が低い領域に着目するとサービスエリアのタイプが 4 で車両数が少なく、デマンドバスの比率が低い領域であることがわかる。以上、デマンドバス・システムの利便性に着目すると、サービスエリアの面積が小さい場合デマンドバスを用いることで、利便性の改善に繋がることがわかった。また、サービスエリアの面積が大きい場合は、固定路線バスの比率を高め、車両数を増やすことで利便性を向上することができる。

次に運営者にとっての有用性を示す採算性に着目する。採算性が低い領域は、車両数が多い領域と、サービスエリアの面積が広く、デマンドバスの比率が高い時である。車両数が多い領域は、利用者数に応じた必要な車両数を上回る量の車両数を用いている場合であると考えられる。また、サービスエリアの面積が広い場合は、利用者の平均移動距離が増加する。このため、デマンドバスの利用者は他の利用者の目的地へ移動する際の遅延コストが増加し、デマンドバス 1 台が担当できる利用者数が減少する。したがって、面積の広いサービスエリアにおいて、デマンドバスの割合を大きくすることが採算性の低下につながったと考えられる。

また、利用者の発生分布は、利便性や採算性に与える影響が小さかった。これは、他のパラメータの影響が大きすぎたため、利用者の発生分布の影響が自己組織化マップの学習結果に反映されなかったことが理由であると考えられる。

## 6. おわりに

本稿では、「デマンドバスシステムとサービスエリアの適応性」を分析することを目的とし、シミュレーション実験を行い、実験結果を自己組織化マップを用いて可視化した。可視化結果より、どのようなサービスエリアにおいて、どのようなデマンドバスシステムが有用であるかを明らかにした。

可視化結果より、デマンドバスは、サービスエリアの面積が広がることで、利便性、採算性ともに低下することが分かっ

た。サービスエリアが広い時には、車両数を増やし、固定路線バスの割合を増やすことで、利便性と採算性の低下を防ぐことができる。

今後の課題として、パラメータの精練があげられる。本稿の可視化結果においては、利用者の発生分布が有用性に与える影響が小さかった。これは、他のパラメータの影響が大きすぎたため、利用者の発生分布の影響が自己組織化マップの学習結果に反映されなかったことが理由と考えられる。どのようなパラメータが評価値に強い影響を与えるのかを考慮に入れる必要がある。

## 文 献

- [1] 大和裕幸, 稗方和夫, 坪内孝太: “オンデマンドバス: 公共サービスに於けるイノベーション”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol. 51, No. 9, pp. 579-586 (2006).
- [2] 境周平, 若林竜太, 内村圭一: “デマンドバスの運用面積に関する考察”, 情報処理学会研究報告. ITS,[高度交通システム], Vol. 2000, No. 83, pp. 19-24 (2000).
- [3] 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀之: “デマンドバスはベイするの?”, 情報処理学会研究報告, pp. 31-36 (2003).
- [4] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之: “シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価”, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 1, pp. 242-251 (2008).
- [5] 鳥居健太郎: “デマンドバスシステムの利便性の評価シミュレーション (交通工学・交通流シミュレーションとその応用, 一般)”, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol. 104, No. 506, pp. 13-18 (2004).
- [6] 元田良孝, 若林武文, 山口善英: “雲石フレキシブルバスの運行について”, 土木研究学研究・講演集, Vol. 29, (2004).
- [7] M. Ohta, K. Shinoda, I. Noda, K. Kurumatani and H. Nakashima: “Usability of Demand-bus in Town Area”, *IPSSJ-MBL02023033 2002* (2002).
- [8] 岡谷正博, 平田富夫, 誉田安秀: “中山間地におけるデマンドバスシステムの開発: デマンドバスの実際の経路探索法”, 情報処理学会研究報告. ITS,[高度交通システム], Vol. 2001, No. 18, pp. 7-12 (2001).
- [9] K. Uchimura, H. Takahashi and S. Takashi: “Demand Responsive Services in Hierarchical Public Transportation System”, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol. 51, pp. 760-766 (2002).
- [10] 磯崎晶光, 吉村充功, 奥村誠: “都市近郊デマンドバス運用に関する理論的考察”, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 847-852 (2004).
- [11] M. B. Barrie and M. A. Ayechev: “A genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem”, *Computers & Operations Research*, Vol. 30, pp. 787-800 (2003).
- [12] M.S. Marius: “Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints”, *Operations Research*, Vol. 35, pp. 254-265 (1987).
- [13] S. Yan, C.J. Chi and C.H. Tang: “Inter-City Bus Routing and Timetable Setting Under Stochastic Demands”, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 7, pp. 572-586 (2006).
- [14] E. Feuerstein and L. Stougie: “On-line Single-Server Dial-a-Ride Problems”, *Theoretical Computer Science*, Vol. 268, No. 1, pp. 91-105 (2001).
- [15] K. Seongmoon, E. L. Mark and C. W. Chelsea: “Optimal Vehicle Routing With Real-Time Traffic Information”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 178-188 (2005).
- [16] 中谷昭彦, 藤田聡: “デマンドバスシステムのための最適経路選択

法の実装とそのオンライン配車システムへの応用”, 情報処理学会研究報告. ITS,[高度交通システム], Vol. 2002, No. 115, pp. 231–238 (2002).

- [17] J Mukai, N. Feng and T. Watanabe: “R-Tree Based Optimization Algorithm for Dynamic Transport Problem”, *Proc of KES2006*, Vol. 2, pp. 1095–1102 (2006).
- [18] M.M. Solomon: “Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints”, *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 254–265 (1987).
- [19] M. Diana and M. M. Dessouky: “A New Regret Insertion Heuristic for Solving Large-Scale Dial-a-Ride Problems with Time Windows”, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 6, pp. 539–557 (2004).
- [20] 森裕一, 垂水共之, 田中豊: “変数の一部に基づく主成分分析: 変数選択手法の数値的検討”, *計算機統計学*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–12 (1999).
- [21] 統計数理: “パターン認識における主成分分析顔画像認識を例として”, *統計数理*, Vol. 49, No. 1, pp. 23–42 (2001).
- [22] T.Kohonen ed.: “*Self-Organizing Maps*”, Springer, 3 edition (2000).
- [23] 大林茂: “多目的最適化とデータマイニング”, 年次大会講演論文集: JSME annual meeting, Vol. 2005, No. 8, pp. 226–227 (2005).
- [24] 立川, 大山, 藤井: “多目的空力最適化におけるデータマイニング手法の研究”, *計算工学講演会論文集*, Vol. 13, (2008).