

電気自動車を用いたデマンドバスシステムの評価 Evaluation of Demand-Bus System using Electric Vehicles

河村 公輔[†] 向 直人[†]
Kosuke Kawamura Naoto Mukai

1. はじめに

近年、自動車保有台数の増加や、路線数・発着数の不足により、地方公共交通の利用者が減少し、路線バスの廃止や赤字運営が問題となっている。そこで、従来の路線バスに代わる新しい公共交通システムとして期待されるデマンドバスシステムの研究が広く行われている[1][2]。

また、地球温暖化をはじめとした環境問題への関心が高まり、その取り組みの一環として、電気自動車による CO2 排出量の削減が注目を浴びている。そこで、本論文では、公共交通市場や環境問題の現状を踏まえ、電気自動車をデマンドバスシステムに導入することで、環境に優しく利便性の高い、新しい交通システムを提案する。

電気自動車をデマンドバスシステムに導入するには、充電タイミングを考慮した車両の運行計画を構築しなければならない。しかし、既存のデマンドバスシステムでは、顧客の要求を逐次に処理する方式が採用されているため、車両の走行経路や充電タイミングを最適化することは困難である。そこで、本研究では、メタヒューリスティック・アルゴリズムのひとつである遺伝的アルゴリズム（以下 GA）を採用し、運行計画の最適化を試みる。つまり新たな要求を処理するための車両の初期走行経路をノード挿入法(以下 NIA)により構築し、さらに、車両の充電タイミングを GA により最適化し、総走行距離の最小化を図る。

本稿の構成は以下である。第 2 章ではデマンドバスシステム及び電気自動車の現状を示した上で、提案システムの概要を示す。第 3 章では、提案システムにおける運行計画の導出方法について述べ、第 4 章ではシミュレーション実験内容及び結果を報告する。第 6 章で本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. 研究背景

2.1 デマンドバスシステムの現状

デマンドバスシステムとは、路線バスと違って時刻表や経路が設定されておらず、利用者の要求に応じた運行計画を基にバスを走行させるシステムである。利用者は乗車位置、降車位置、希望乗車時間、希望降車時間を自由に指定することが可能である。このため、デマンドバスシステムを導入することで利便性・採算性の改善が期待できることから、赤字路線を抱える地方自治体において、デマンドバスシステムの運用を検討する自治体が増えてきている。

デマンドバスシステムの形態として、以下の 3

タイプがある。

- ・ あらかじめ決められた路線に幅を持たせ、デマンドに応じてその幅内で寄り道をしてくれる寄り道タイプ

- ・ 観光地やショッピングセンター、市役所など利用の可能性の高い場所に停留候補地を設け、その候補地におけるデマンドを処理するよう経路を決めるセミデマンドタイプ

- ・ 街中のあらゆる場所を出発地・目的地としてデマンドを出すことができるフルデマンドタイプ

現状ではデマンドを受けるシステム構築が難しいため、寄り道タイプあるいはセミデマンドタイプが主流である。しかし、近年のインターネットや携帯電話など情報技術の急速な普及により、デマンドの情報を細かく収集することが容易になったことから、フルデマンドバスの導入も比較的現実的などころにまできている。

フルデマンドバスシステムにおいては、利用者の割当て及び、走行経路の最適化をリアルタイムに行う必要がある。内村氏らが提案した手法[3]では、NIA により利用者をバスへ割り当て、GA により走行経路の最適化を行うことで、リアルタイムでデマンドを処理している。しかし、内村氏らの NIA, GA は、電気自動車を対象として設計されていないため、充電スケジュールを考慮した経路を構築することが出来ない。

そこで、本研究では、新たな要求を処理するための車両の初期走行経路を NIA により構築、車両の充電タイミングを GA により最適化し、総走行距離の最小化を図る、というように内村氏らのアルゴリズムを電気自動車向けに拡張する。

2.2 電気自動車の現状

近年、地球温暖化をはじめとした環境問題への関心が高まり、その取り組みの一環として、電気自動車による CO2 排出量の削減が注目を浴びている。神奈川県の調査

(URL:<http://www.pref.kanagawa.jp/press/index.html>)によると、電気自動車は、ガソリン車に比べ、排ガス排出量や CO2 排出量が少ないといった利点を持ち合わせていることがわかる。また、電気自動車はガソリン車に比べてランニングコストが低いといった利点も持ち合わせている。一方で、乗用車だけでなく、電気バスに関する研究も広く行われている。関西電力株式会社は、電気バスと一般小型ディーゼルバスを比較し、表 1 のようにまとめている[4]。電気バスは、一般小型ディーゼルバスに対して、CO2 排出量 62%削減、ランニングコスト

[†] 東京理科大学 工学部第一部 電気工学科

約5分の1といった利点がある。しかし、電気バスの1回のエネルギー補給により走行できる距離は、一般ディーゼルバスの7分の1であるといった欠点がある。よって、デマンドバスシステムに電気バスを導入するには、走行限界距離を超えないように、定期的に電気バスを充電する必要がある。

表1 電気バスと一般小型ディーゼルバスの比較

項目	電気バス (三菱ふそうローザ)	一般バス (三菱ふそうローザ)
CO2 排出	0.204kg-CO2/km	0.528kg-CO2/km
ランニングコスト	5.0 円/km	23.0 円/km
走行距離	74km	500km

2.3 電気バスを用いたデマンドバスシステム

本論文では、電気バスをデマンドバスシステムに導入することで、環境に優しく利便性の高い、新しい交通システムを提案する。提案システムの利点は主に以下の3つである。

① 採算性の改善

デマンドバスシステムでは、路線バスとは異なり、利用者の要求した場所のみを巡回するため、空車が減り、ランニングコストが削減できる。また、電気自動車を導入することにより、燃料費を大幅に削減することが可能である。運行にかかる経費を減らすことで、採算性が改善される。

② 利便性の改善

利用者の需要（希望乗車時間、希望降車時間、出発地、目的地）に基づき運行することで、地方公共交通における便数・路線数の不足を解消する。さらに、フルデマンドタイプのデマンドバスシステムの特徴を活かし、ドア・トゥ・ドアの移動を可能にすることで、子供、高齢者、身体障害者といった交通弱者の利便性を改善する。

③ 環境問題への配慮

電気自動車を導入することにより、排ガス排出量・CO2 排出量の削減を図る。さらに、需要に合わせた運行を行うことで、空車状態で走行する機会を減らし、冗長な排ガス排出量・CO2 排出量を削減する。

提案システムを構築するには、最適な充電時期を考慮した運行計画を作成する必要がある。従来のデマンド処理方法では、充電のタイミングを考

慮して設計されていないため、適切な充電スケジュールを組むことが難しい。充電のタイミングが不相当である場合、デマンドの受理率の低下、電池残量の不足といった問題が起こり得る。そこで、本研究では、充電時期を考慮したアルゴリズムを設計し、計算機シミュレーションにより提案システムを評価することを目的とする。

3. 運行計画の最適化

本章では、電気バスを用いたデマンドバスシステムのモデル、また、バスの運行計画を最適化するためのアルゴリズムを示す。

3.1 提案システムのモデル

坪内氏らによって新しいアルゴリズムによる実用的なデマンドバスシステムの研究[5][6]が行われた。本節では、坪内らのモデルを基に、提案システムにおける利用者・バスの運行計画・充電スタンドのモデルについて述べる。

3.1.1 利用者のモデル

利用者 n のデマンド ND_n を式(1)で与える。式(1)における各変数は、希望乗車位置 R_n 、希望降車位置 D_n 、希望乗車時間 RT_n 、希望降車時間 DT_n を表す。また、希望乗車位置 R_n 、希望降車位置 D_n を、 X, Y 座標で与え、それぞれ式(2)、式(3)として表す。

$$ND_n = (R_n, D_n, RT_n, DT_n) \cdots (1)$$

$$R_n = (X_{R_n}, Y_{R_n}) \cdots (2)$$

$$D_n = (X_{D_n}, Y_{D_n}) \cdots (3)$$

3.1.2 運行計画のモデル

k 台の電気バスの集合を B として式(4)で与える。また、要素 b は、式(5)で与えられ、目的地 g 、現在位置 X_b, Y_b 、電池残量 E 、乗車可能数 C を表している。また、 p 箇所の充電スタンドの集合を S として式(6)で与え、要素 s を式(7)に示す。

$$B = \{b_1, b_2 \cdots b_k\} \cdots (4)$$

$$b = (g, X_b, Y_b, E, C) \cdots (5)$$

$$S = \{s_1, s_2 \cdots s_p\} \cdots (6)$$

$$s = (X_s, Y_s) \cdots (7)$$

電気バス b_m に l 個の要求が割り当てられている場合の運行計画を式(8)で与える。また、要素 r は、 $r_{R_n}, r_{D_n}, r_{S_o}$ のいずれかを意味し、それぞれ利用者 n の乗車地点、利用者 n の降車地点、 o 番目

の充電スタンドの位置を表している。ここで、要素 r ，出発地点 r_{Rn} ，降車地点 r_{Dn} ，充電スタンド r_{S0} を、式(9)，式(10)，式(11)，式(12)で与える。

r_{Rn} ， r_{Dn} ， r_{S0} の持つ要素 t ， e は、それぞれ、バスが到着した時点での予想される時刻，電池残量を表す。

$$R_m = \{r_{m_0}, r_{m_1}, \dots, r_{m_q}, \dots, r_{m_{q-1}}\} \dots (8)$$

$$r = \{r_{Rn} \vee r_{Dn} \vee r_S\} \dots (9)$$

$$r_{Rn} = (x_r, y_r, t_r, e_r) \dots (10)$$

$$r_{Dn} = (x_d, y_d, t_d, e_d) \dots (11)$$

$$r_{S0} = (x_s, y_s, t_s, e_s) \dots (12)$$

式(8)によって与えられる運行計画は、 $q = 0, 1, 2, \dots$ と番号順に整理され、走行経路を表す。例えば、図 1 のような経路で車両が走行する場合、式(13)のように表わすことが出来る。

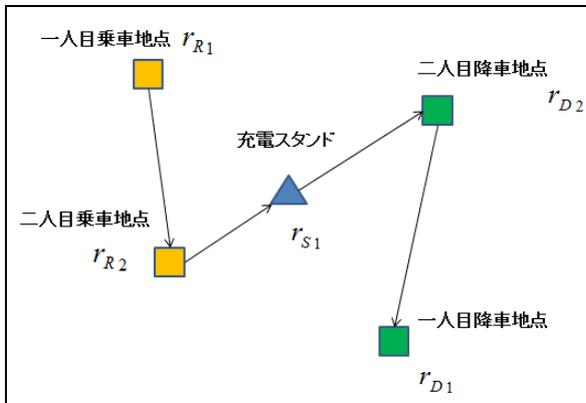


図 1 バス b_m による走行経路の例

$$R_m = \{r_{mR_1}, r_{mR_2}, r_{mS_1}, r_{mD_2}, r_{mD_1}\} \dots (13)$$

つまり、式(13)で表わされる運行計画は、1人目の乗車地点→2人目の降車地点→充電スタンド→2人目の降車地点→1人目の降車地点という順序の走行経路であることを表す。また、処理し終えた地点情報は、逐次消去していく。

3.2 運行計画を最適化するためのアルゴリズム

本節では、運行計画導出の手順を示し、電気自動車向けに拡張したノード挿入法や遺伝的アルゴリズムの詳細を示す。

3.2.1 運行計画導出の概要

電気自動車をデマンドバスシステムに導入するには、充電タイミングを考慮した車両の運行計画を構築しなければならない。しかし、従来のデマンドバスシステムでは、顧客の要求を逐次に処理する方式が採用されているため、車両の走行経路や充電タイミングを最適化することは困難である。そこで、提案システムでは、運行計画の最適化を図るため、新たな要求を処理するための車両の初期走行経路を NIA により構築する。さらに、車両の充電タイミングを GA により最適化し、総走行距離の最小化を図る。図 2 は、運行計画の導出過程を表わしている。システムは、定期的に車両の電池残量を確認し、一定以上であれば、新規のデマンドを NIA により車両の走行経路に割り当てる。もし、電池残量が一定以下であれば、NIA により充電スタンドの地点情報を走行経路に挿入する。最後に、車両の走行経路を、その評価値が最大となるように、GA により最適化する。

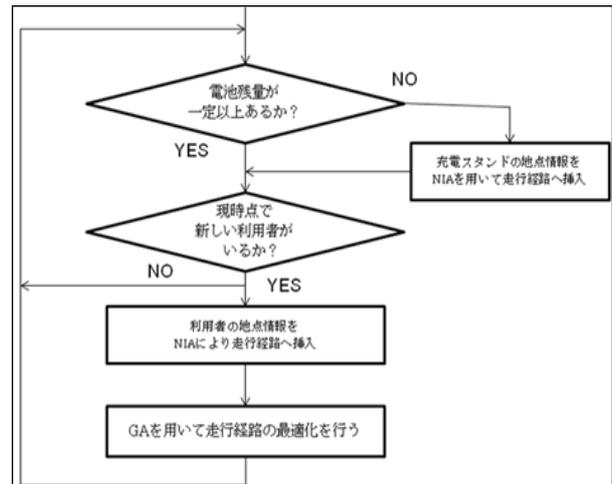


図 2 運行計画の導出過程

3.2.2 ノード挿入法(NIA)

車両の電池残量が一定値以下のとき、もしくは、新規のデマンドが発生したとき、NIA を用いて走行経路に地点情報（乗車地点，降車地点，充電スタンド）を挿入する。電気自動車向けに拡張した NIA の詳細を以下に示す。

(a) 充電スタンドの地点情報の挿入

充電スタンドの地点情報を走行経路に挿入する手順を図 3 に示す。

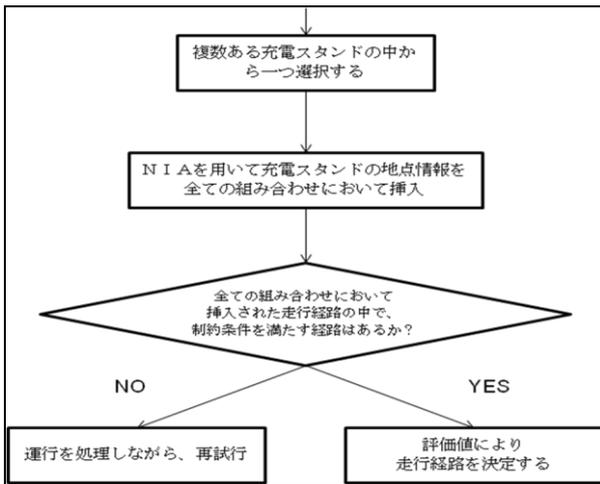


図3 充電スタンドの地点情報の挿入

車両の電池残量が一定以下になったとき、充電スタンドの集合から、最も近い充電スタンドを選択し、走行経路に挿入する。式(14)は、車両から充電スタンドまでの距離を表している。

$$d_{bs} = \sqrt{(X_b - X_s)^2 + (Y_b - Y_s)^2} \dots (14)$$

ここで、 o 番目の充電スタンド r_{s_o} が選択されたとすると、図4に示すように、NIAを用いて、車両 b_m の走行経路 ($r_{m0} \sim r_{m(l-1)}$) 間にある挿入候補位置 ($I(1) \sim I(l-1)$) に、選択された充電スタンド r_{s_o} を挿入する。

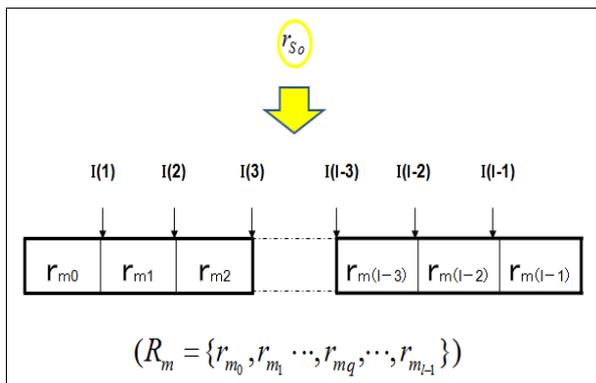


図4 充電スタンド r_{s_o} の挿入

次に、走行経路が以下の二つの制約条件を満足しているかを調べる。

- ① 車両に割り当て済みの利用者の制限時間
- ② 走行距離に対する車両の電池残量

①では、車両の巡回地点への予定到着時間 t_r 、 t_d が、利用者の希望乗車時間 RT_n 、希望降車時間 DT_n よりも早いことを成約条件としている。一方、

②では、車両の電池残量 e がいずれの地点においても0以上であることを制約条件としている。図5に例を示す。左の走行経路では、利用者1の希望乗車時間は15、希望降車時間は55であり、車両の到着時間はそれぞれ10、50であるため、①の制約条件を満足している。また、いずれの地点においても電池残量は0以上であるため、②の制約条件も満足している。一方、右の走行経路では、利用者1の希望乗車時間は15、希望降車時間は45であり、車両の到着時間はそれぞれ10、50であるため、希望降車時間を超えてしまい①の制約条件を満たさない。また、利用者2の乗車地点から電池残量が0となるため②の制約条件も満たさない。

これらの制約条件を満たす挿入候補位置の全組み合わせについて、走行経路の評価値 T を求める。そして、 T が最小となる挿入位置に充電スタンドを挿入する。ここでは、評価値 T は車両の走行距離を表している。もし、NIAによる経路生成で、制約を満たす組み合わせが無い場合、予定されている運行を処理しながら、充電スタンドの再挿入を試みる。

制約条件を満たしている						制約条件を満たしていない					
$R_m = \{r_{mR}, r_{s1}, r_{mR}, r_{mD}\}$						$R_m = \{r_{mR}, r_{mR}, r_{s1}, r_{mD}, r_{mD}\}$					
	r_{mR1}	r_{s1}	r_{mR2}	r_{mD2}	r_{mD1}		r_{mR1}	r_{mR2}	r_{s1}	r_{mD2}	r_{mD1}
t_r	10	-	30	-	-	t_r	10	20	-	-	-
t_d	-	-	-	40	50	t_d	-	-	-	50	60
RT_n	15	-	35	-	-	RT_n	15	35	-	-	-
DT_n	-	-	-	45	55	DT_n	-	-	-	45	55
$e[\%]$	15	5	55	40	25	$e[\%]$	15	0	0	0	0

図5 走行経路の制約条件

(b) 利用者の地点情報の挿入

新規のデマンドが発生したとき、利用者の地点情報を走行経路に挿入する手順を図6に示す。

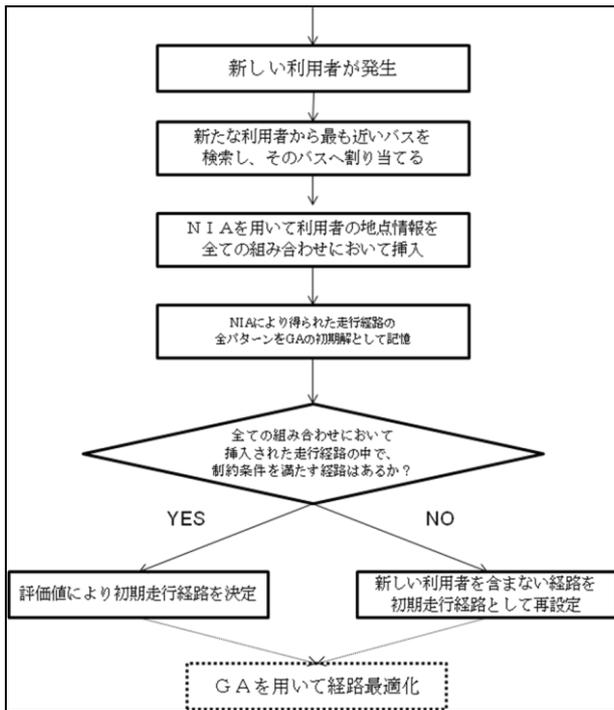


図6 利用者の地点情報の挿入

新規の利用者が発生したとき、利用者の希望乗車位置 R_n から最も近い車両を、車両の集合から選択する。式(15)は、希望乗車位置から車両までの距離を表している。次に、図7に示すように、NIAを用いて、利用者の希望乗車位置 R_n と希望降車位置 D_n を、地点情報 r_{R_n} 、 r_{D_n} として、車両の走行経路 ($r_{m_0} \sim r_{m_{l-1}}$) 間にある挿入候補位置 ($I(1) \sim I(4l-2)$) に、利用者の地点情報 (r_{R_n} 、 r_{D_n}) を、乗車地点よりも降車地点が後方になるように挿入する。

$$d_{db} = \sqrt{(X_{R_n} - X_b)^2 + (Y_{R_n} - Y_b)^2} \dots (15)$$

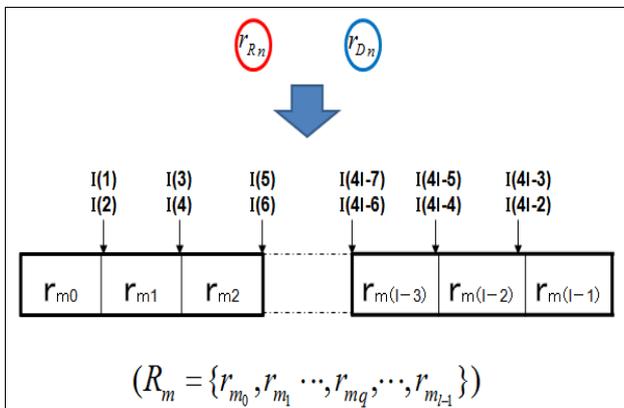


図7 乗車地点情報 R_n 、降車地点情報 D_n の挿入

次に、充電スタンドの挿入と同様に、①、②の制約条件を満たしているかを調べる。これらの制約条件を満たす挿入候補位置の全組み合わせについて、それぞれ走行経路の評価値 T を求める。そして、 T が最小となる挿入位置に乗車地点と降車地点を挿入する。ここでは、評価値 T を走行距離に加え電池残量に基づき決定する。これは、全てのデマンドを処理したときの電池残量が多いほど、新たに発生する利用者のデマンドを受け入れやすいからである。もし、NIAによる経路生成で制約を満たす組み合わせが無い場合、次節で述べる遺伝的アルゴリズムによる経路最適化において、新たに制約を満足する走行経路を探索する。

3.2.3 遺伝的アルゴリズム(GA)

本節では、GAによる経路最適化の詳細を説明する。図8はGAによる経路最適化の手順を示している。突然変異、交叉それぞれの効果を比較するため3種類の方法(突然変異、交叉、突然変異+交叉)を用いて経路を最適化する。NIAによって導出された走行経路を親遺伝子座とし、突然変異、交叉を作用させることで、より評価の高い子遺伝子座を生成する。突然変異、交叉によって得られた子遺伝子座が致死解である場合、電池残量を考慮して修復する。

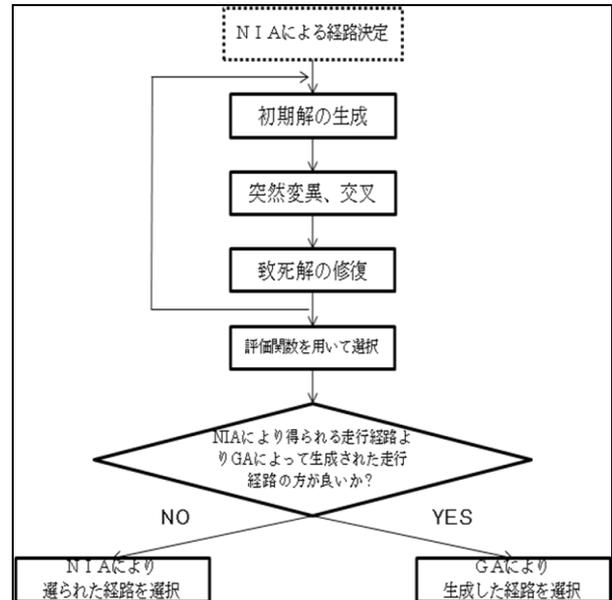


図8 GAによる経路最適化の手順

(i) 初期解の生成

NIAにより得られた走行経路の全パターンからランダムに2つの走行経路を選択する。走行経路における各地点情報 r (r_{R_n} 、 r_{D_n} 、 r_{s_0}) が遺伝子、遺伝子の集合が遺伝子座と呼ばれる。図9にその例を示す。

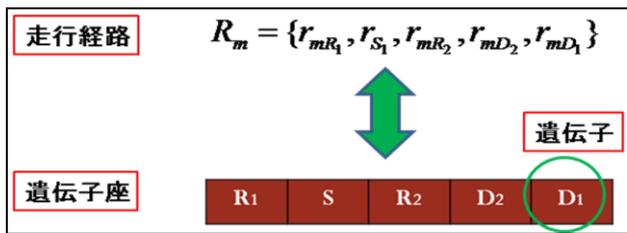


図9 遺伝子型表現

この選択された2つの遺伝子座を親として突然変異と交叉を適用する. 交叉は, 突然変異と比べ, NIAにより得られた走行経路の遺伝子配置とは全く異なるため, NIAでは制約条件を満たす経路が得られない場合でも, 交叉により制約条件を満たす遺伝子座が発生する可能性がある. そこで, NIAで受理されなかった利用者を, 交叉では再度考慮して解を生成する.

(ii) 突然変異

突然変異は, 遺伝子座からランダムに二つの遺伝子を選び, それぞれの遺伝子の位置を置き換える操作である. 図10に突然変異の例を示す. 突然変異は, 親の遺伝子座から二箇所変更するだけであるため, 親の走行経路から極端に変化することはない. このため, 受理率の向上や, 走行距離の最小化を目的とする.

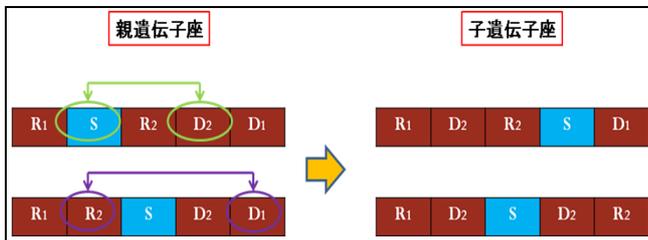


図10 突然変異

(iii) 交叉

交叉は, 親の遺伝子座から交叉点をランダムに選び, 一方の親の交叉点より右側の遺伝子座を, 他方の親の左側の遺伝子座に置き換えることで, 子遺伝子座を生成する. この操作は一点交叉とも呼ばれる. 本手法では, 親遺伝子座に充電スタンドが含まれている場合と含まれない場合とで, 交叉点の位置を変更する. 含まれない場合は, 遺伝子座の中からランダムに選択する. 一方, 含まれる場合は, 両親の遺伝子座において, 充電スタンドを表す遺伝子の位置を比べ, 後方の遺伝子を交叉点として選択する. これにより, 交叉後に, 子遺伝子座に2つ以上の充電スタンドが存在している, もしくは, 子遺伝子座に充電スタンドが全く存在しないといった致死解の生成を防ぐことができる. 図11は交叉の例を示している. (a)では, 遺伝子座に充電スタンドが含まれないため, 任意の位置で一点交叉している. 一方, (b)では, 両親共に充電スタンドを含むため, より後方の充

電スタンドを交差点としている. このように, 交叉では親とは特徴の異なる遺伝子座が生まれやすいため, NIAで受理されなかった利用者を, 交叉によって受け入れることが可能になると考えられる.

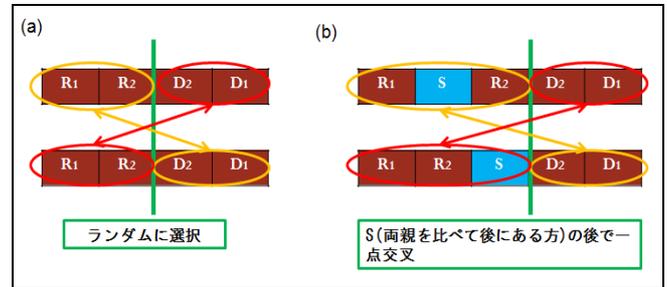


図11 一点交叉

(iv) 致死解の修復

交叉, 突然変異によって生成された子遺伝子座が致死解となる場合, 修復作業を行う必要がある. 遺伝子座を致死解と判断する条件は以下の3つである.

- ① 利用者の乗車地点が降車地点より後方に存在する場合
- ② 親遺伝子座に存在する遺伝子が, 子遺伝子座において欠けている場合
- ③ 巡回地点において電池残量が不足する場合

以下に, それぞれの場合において, 致死解を修復する方法について述べる.

①では, 他の遺伝子の配置は変更せず, 利用者の乗車地点を表す遺伝子と降車地点を表す遺伝子を置換する.

②では, 親遺伝子座にある全ての遺伝子(N 個)を, 乗車地点, 降車地点, 充電スタンドに分け, 子遺伝子座に含まれているか調べる. もし, 同一の利用者の遺伝子が2つ存在する場合はどちらかを削除し, 削除した箇所に不足している遺伝子を挿入する.

③では, 子遺伝子座の全ての巡回地点において電池残量を保つことが可能となる充電スタンドの挿入箇所を探す. もし, いずれに挿入しても電池残量を保てない場合は, 子遺伝子座を抹消する. しかし, 複数箇所見つかった場合は, 最も走行距離が小さくなる箇所を選択する. また, 図12に示すように, 複数存在する充電スタンドの中から, 子遺伝子座の走行距離が最も小さくなる充電スタンドを挿入する.

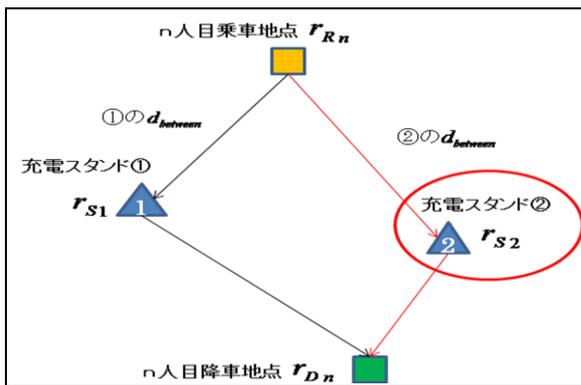


図 12 使用する充電スタンドの変更

(iv) 評価関数

評価関数は、式(16)で与えられ、遺伝子座に含まれる全てのデマンドを処理した時の経過時間と電池残量の線形重みを表している。評価値 f の値が小さいほど、評価が高い遺伝子座であることを示す。

$$f = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2$$

$$= w_1 \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \text{time}(k) + w_2 \cdot 100 \times (1 - \alpha) \dots (16)$$

ただし、各変数の定義は以下である。

f_1, f_2 : 経過時間・電池残量の評価値

w_1, w_2 : 経過時間・電池残量の重み係数

N : 遺伝子座に含まれる遺伝子数

$\text{time}(k)$: デマンド k を処理するまでの経過時間

α : 満充電に対する電池残量の割合

4. シミュレーション

本章では、電気バスを用いたデマンドバスシステムをシミュレーションにより評価し、提案手法の効果を検証する。

4.1 環境設定

デマンドバスシステムの運行領域は、「中村まちバス」が運行されている高知県中村市を想定し 3 km×3 kmの正方領域とする。また、運行時間は 10 時間を想定し、シミュレーションにおいては 1 分間を 1 ステップとみなし、計 600 ステップとする。デマンドは 6 分に 1 人の確率でランダムに発生させる。また、発生から乗車の制限時間は 15~30 分とし、乗車から降車までの制限時間は 30~45 分とした。その他の条件を以下にまとめる。

- ・ 車両台数 3 台
- ・ 充電スタンド 4 箇所
- ・ 充電スタンドでは 30 分で 50% の充電
- ・ 評価関数の線形重み $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$

- ・ バスの乗車可能数 $C = \infty$
- ・ ディーゼルバスと電気バスの性能は表 1 に基づく(ランニングコスト, CO2 排出量, 一回に走行出来る距離)

また、評価項目として以下の 3 つを設ける。

- ① 利用者の受率率
- ② 車両の総走行経路長
- ③ 利用者の平均所要時間

まず、①・②に関して、一般ディーゼルバスと電気バスを比較する。次に、①・②・③に関して、運行計画の導出手法(NIA と突然変異, NIA と交叉, NIA と突然変異+交叉)を比較する。

本研究では、上記のような環境を設定した上で、Artisoc によりシミュレーションを行う。

4.2 実験結果

(i) ディーゼルバスと電気バスの比較

図 13 は、ディーゼルバスと電気バスの①利用者の受率率と②総走行経路長を示している。一般に、受率率に比例して総走行経路長は増加する。しかし、電気バスは、ディーゼルバスと比べて、受率率が低いにもかかわらず、総走行経路が長いことがわかる。これは、電気バスは定期的に充電が必要であり、ディーゼルバスに比べ、稼働率が低くなるのが原因である。しかし、適切なタイミングで充電することで、電気バスの稼働率を改善することが可能だと考えられる。そこで、GA により充電タイミングを最適化する。

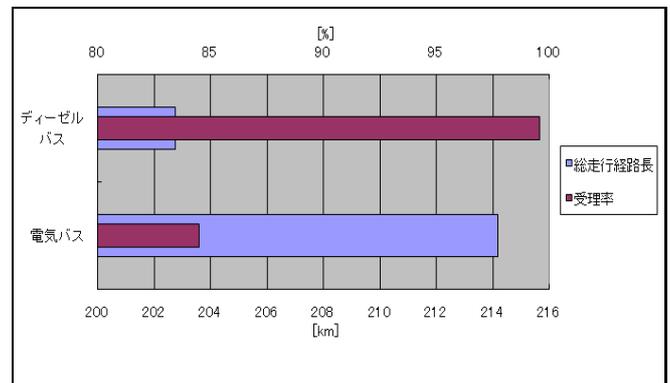


図 13 ディーゼルバスと電気バスの比較

(ii) 利用者の受率率

図 14 は、利用者の受率率に関する、NIA, NIA と突然変異, NIA と交叉, NIA と突然変異+交叉, の比較を表している。いずれにおいても GA により受率率が改善されていることがわかる。また、突然変異と交叉の両方を用いた場合、受率率が約 8% 改善されることがわかる。しかし、交叉は受率率を目的としていたが、突然変異の方が優れているという結果が得られた。

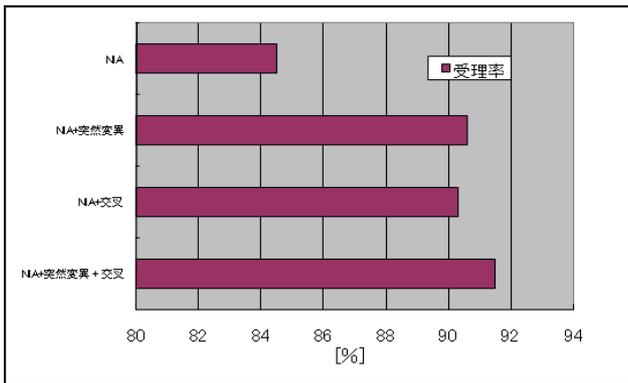


図 14 利用者の受理率に関する比較

(iii) 車両の総走行経路長

図 15 は、総走行経路長に関する、NIA、NIA と突然変異、NIA と交叉、NIA と突然変異+交叉、の比較を表している。GA を用いることで、NIA によって構築された走行経路よりも、総走行経路長が増加している。これは、受理率が全体的に向上したことが理由である。また、突然変異と交叉の両方を用いた場合、総走行経路長の増加分が 2 km であるのに対して、受理率が約 8% 向上していることから、効率的な走行経路が得られていることがわかる。しかし、NIA+交叉では、総走行経路長が他と比べ悪化している。受理率では、突然変異と大差が無いのに対し、総走行経路長に関しては、交叉と突然変異とで大きな違いが見られた。これは、選択方法における交叉と突然変異の差が原因と考えられる。

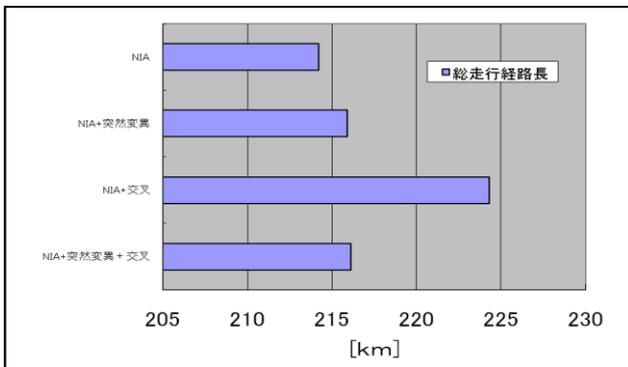


図 15 総走行経路長に関する比較

(iv) 利用者の平均所要時間

図 16 は、利用者の平均所要時間に関する、NIA、NIA と突然変異、NIA と交叉、NIA と突然変異+交叉、の比較を表している。平均所要時間は、利用者がデマンドを発生させてから、目的地に到着するまでの平均時間を表している。NIA と交叉を用いた時に、平均所要時間が最も短くなるのがわかる。NIA で受け入れることができなかった利用者を交叉により受け入れる場合、他の利用者の制限時間を最大限に考慮した運行計画が必要とな

る。結果、交叉を行うことで評価の最も高い走行経路が得られたと考えられる。

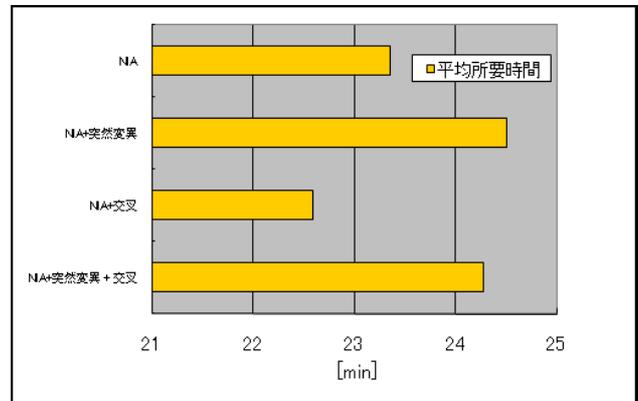


図 16 利用者の平均所要時間に関する比較

4.3 考察

本研究では、突然変異は総走行距離の改善、交叉は受理率の向上を目的とした。しかし、突然変異の方が、総走行経路長、受理率共に良い結果が得られた。図 17 は、総走行経路長と受理率に関する、NIA と突然変異、NIA と交叉、NIA と突然変異+交叉、の比較を表している。受理率に関しては、NIA と突然変異、NIA と交叉は、ほとんど大差がない。一方、総走行経路長に関しては、大きな差がある。この結果は、両手法の経路の選択方法の差に起因すると考えられる。NIA では利用者の受け入れが不可能であっても、交叉により受け入れが可能になる場合、評価値を用いた経路選択を行わなかった。もし、評価値を用いると、乗車数が少ない方が、総走行経路長も短くなり、評価が高くなってしまふ。このため、交叉により新たに利用者を受け入れたとしても、評価値の低い経路が選択され、総走行経路長が長くなってしまふ。結果、利用者の受理率が伸びなかったと考えられる。

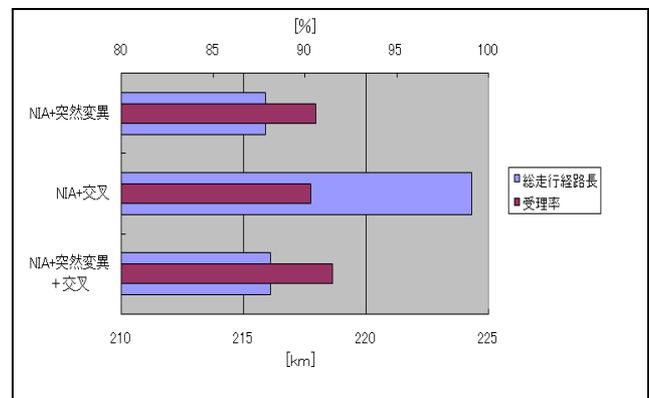


図 17 総走行経路長と受理率の比較

そこで、交叉の場合、総走行経路長の重み係数を大きくすることで、総走行経路長の改善を図れる

と考えた。図 18 に、線形重みの比重を、 $w_1 : w_2 = 6 : 4$ 、 $w_1 : w_2 = 7 : 3$ 、 $w_1 : w_2 = 8 : 2$ と変えたときの、総走行経路長と受理率の変化を示す。総走行経路長は、重み係数を大きくすることで、短くなるのがわかる。受理率は、総走行経路長に比べ、不安定ではあるが、重み係数を大きくすることで、向上していることがわかる。このことから、採算性や利便性など、デマンドバスの実施目的に合わせて、パラメータの調整が必要であることが分かる。

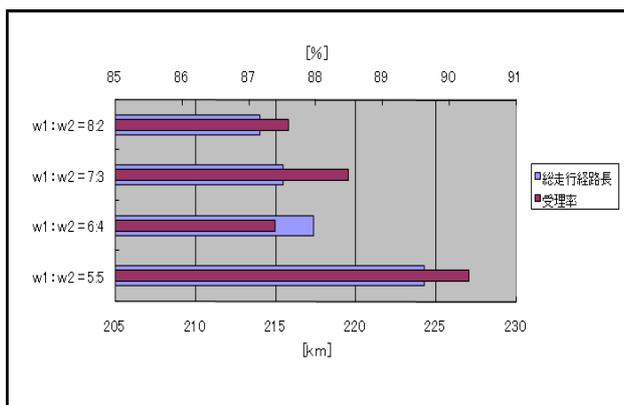


図 18 比重を変えた時の総走行経路長と受理率

最後に、デマンドバスシステムにおける、ディーゼルバスと電気バスの CO2 排出量とランニングコストの比較を表 2 に示す。電気バスの総走行経路長は、NIA+交叉+突然変異によって得られた結果である。電気バスを用いたデマンドバスシステムでは、ディーゼルバスより、総走行経路長は長いものの、CO2 排出量は 60%、ランニングコストは 80%削減可能であるという結果が得られた。以上の結果から、提案した電気バスを用いたデマンドバスシステムは、環境に優しく利便性の高い交通システムであると言える。

表 2 デマンドバスシステムにおける CO2 排出量とランニングコストの比較

	ディーゼルバスを用いた場合	電気バスを用いた場合
総走行経路長 [km]	202.74	216.14
CO2 排出量 [kg]	107.1	44.1
ランニングコスト [円]	4663	1080

5. むすび

本稿では、ランニングコストや CO2 排出量が少ない電気自動車をデマンドバスシステムに導入す

ることで、環境に優しく利便性の高い、新しい交通システムを提案した。電気自動車をデマンドバスシステムに導入するには、充電タイミングを考慮した車両の運行計画を構築しなければならない。しかし、既存のデマンドバスシステムでは、顧客の要求を逐次に処理する方式が採用されているため、車両の走行経路や充電タイミングを最適化することは困難である。そこで、本研究では、新たな要求を処理するための車両の初期走行経路を NIA により構築した。さらに、GA により車両の充電タイミングを考慮して運行計画を最適化した。シミュレーション結果から、NIA だけでデマンドバスシステムを構築した場合、受理率が約 84% と利便性・採算性のある公共交通システムとはならないことが分かった。一方、提案システムでは、GA により運行計画を最適化することで、利用者の受理率を約 8% 改善させることができた。さらに、提案システムでは、CO2 排出量、ランニングコストの大幅な削減が可能であることが分かった。以上より、提案システムは、従来システムに比べ、利便性・採算性において優れており、かつ、環境にも優しいと言える。

今後の課題として、車両の充電タイミングの再検討が挙げられる。交叉による運行計画の最適化では、総走行経路長に関して良い結果は得られなかった。一方、利用者の平均所要時間に関しては、良い結果が得られた。そこで、デマンドバスの目的に合わせて、突然変異・交叉のパラメータを再調整する必要があると考えられる。また、今回のモデルでは、利用者を乗車させた状態で、車両は充電しているため現実的とは言えない。そこで、充電する際に、他のバスと連携し、利用者を交換することで問題を解決したい。

参考文献

- [1] 野田五十樹, 篠田考祐, 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.242~252 (2008).
- [2] 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀行: “デマンドバスはペイするか?”, 電子情報通信学会技術研究報告書 Vol102, No.613, pp.31~36 (2003)
- [3] 内村圭一, 前田竜士: “動的な交通情報を用いたリアルタイム Dial-a-Ride システムの評価”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. j88-A, No.2, pp.277~285 (2008).
- [4] 関西電力株式会社資料: “第 3 回オンデマンドカンファレンス発表資料 電気バスの普及とコンビニクルシステムとの連携” (http://www.nakl.t.u-tokyo.ac.jp/demandbus/dl/3rdc/ODBC3_6.pdf)

- [5] 大和裕幸,坪内孝太：“新しいアルゴリズムによる実用的なオンデマンドバスシステムの研究” 東京大学工学部システム創成学科知能社会システムコース卒業論文, 2004
- [6] 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—”日本オペレーションズ・リサーチ学会,vol.51, no.9.pp579-586(2006)