

位置情報とZDDを組み合わせた バス走行ルートの動的な管理手法

吉野 大介¹・羽藤 英二²

¹正会員 東京大学 復興デザイン研究体 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: yoshino@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

既存の公助型公共交通を補完する手段として、全国各地で自主運行バス等の協働型公共交通の導入が進んでいる。協働型公共交通の持続的な運営のためには、運営側の負担を軽減するとともに、利用者の利便性を最大限引き出す運行計画を、利用者の需要の変化に応じて動的に検討することが重要である。このような問題意識のもと、筆者らはこれまでに外的要因の変化に対応できる運行経路の管理手法として、ZDD（ゼロサプレス型二分決定グラフ）の適用を提案してきた。本研究では、陸前高田市における実証実験をケーススタディとして、実験内で取得した位置情報を活用して同モデルの実ネットワークにおける適用可能性を検証するとともに、運転手が複数存在する場合の割り当て問題における同手法の適用可能性についても検討を行った。

Key Words : ZDD, probe person survey, enumeration, routing, spanning forest

1. はじめに

国内でも先行して人口減少並びに高齢化が進む中山間地域では、マイカーや運転免許を持たない高齢者が増加している。また、現在運転ができるドライバーの中にも身体能力の低下等に伴い運転に不安が生じておりマイカーでの移動の持続性が危ぶまれている状況は多くの地区で見受けられる。また、このような地区では路線バスや乗合タクシー等の既存の地域交通サービスを享受できない集落が存在しており、地域全体でのモビリティが大きく低下していることがある。このような中、従来の公共交通ではカバーしきれない移動ニーズに対応すべく、地域住民主体での協働型のモビリティ確保の取り組みが最近になって全国の市町村で導入されている。

これらの協働型のモビリティサービスの事例に関しては大井¹⁾の研究で網羅的に整理されているが、多くの事例において、オンデマンド型交通と同様のサービス、つまりは利用者の予約に応じて管理者が当日の運行計画を検討するタイプの運行がなされている。つまり、管理者は需要に応じ運行便ごとに運行経路を検討する必要がある。需要変動に対応した運行経路を提示する問題はDARP (Dial-a-Ride Problem) と呼ばれ、VRP (Vehicle Routing Problem) の発展形としての位置づけとされる。

DARPはDial-a-Ride型の交通機関におけるスケジューリング問題に適用できるよう、VRPの考え方を基本としながら目的関数や制約条件の工夫が行われたものであり、タクシーやデマンド交通のスケジューリングにおいて現在広く活用されており、協働型公共交通サービスの運行計画においても導入が可能である。しかしながら、一般的にDARPをはじめとする運行・輸送経路問題はNP-hardと証明されている。つまり、想定される経路の数が多すぎるため、コンピュータを使用しても莫大な時間とメモリ量が必要となる。よって、解析的に最適な運行経路を求めることは容易ではないため、実装にあたっては、多くの場合、近似解法により準最適解を短時間で求める研究が多い²⁾⁴⁾。しかしながら、青野ら⁵⁾が指摘するように、これまでのオンデマンド型交通に関する既往研究のほとんどは供給者側に立ったものであり、利用者の利便性を十分に考慮した上で運行経路等の供給側のサービス検討がなされているものは少ない点が問題であった。また、実際の運行に目を向けると、最適解もしくは準最適解を1つだけ求めるのではなく、ある一定の条件を満たす経路のいくつかを列挙できると、サービス運営の際に運営者・利用者双方にとって都合が良いことが多い。

このような現場での車両運用の実態を鑑み、吉野・羽藤⁶⁾ (以下先行研究と呼ぶ) は、Minato⁷⁾が提案し近年デ

ータ・マイニングの分野で活用の幅が広がっているZDD (Zero-suppressed Binary Decision Diagram: ゼロサプレス型二分決定グラフ) と呼ばれるデータ構造を扱うことでオンデマンド型交通の運行経路の解析手法を提案している。本研究では、先行研究を基本に、利用者の位置情報データを活用した動的な経路列挙による協働型交通サービスの管理手法を提案するとともに、陸前高田市で実施した実証実験を対象にケーススタディを行う。

また、協働型公共交通サービスの場合、地域住民が交代で運転に協力する運営形態を採用することが多いことから、各運転手の経路列挙の前段として、協力可能な運転手が複数名存在する場合、各利用者にどの運転手を割り当てるかという問題についても取り扱う必要がある。本研究では同問題に関しても、同じくZDDを用いた管理手法の提案を行う。なお、本研究を行うに当たって、ZDDの基本的内容に関する理解が不可欠であることから、次章にて概説した後にその適用方法について説明を加える。

2. ZDDのバス走行ルート管理への応用

(1) ZDDの概要

ZDDはMinato⁷⁾によって表現されたグラフ構造による論理関数の表現である。ここでは例として、図-1に示すグラフ構造を取り扱いZDDについて概説する。グラフ $G=(V, E)$ と G 上の2点 s, t が与えられた状況で、 $s-t$ を結ぶ経路を全て列挙する問題を考える。グラフにおける経路をリンクの集合と同一視することにより、全ての $s-t$ 経路を場合分け二分木 $D=(N, A)$ により表現する。図-1 (左) において各リンクに $D=(e_1, e_2, \dots, e_m)$ を与える場合、この入力における全ての $s-t$ 経路を表現する場合分け二分木は図-1 (右) の通り示される。なお、同図における実線を1-枝と呼び、そのリンクが経路として選択されることを示す。点線は0-枝であり、そのリンクが経路として選択されないことを示す。また、終端はそれぞれ0及び1のラベルを保有し、0-終端は $s-t$ 経路が形成されないことを、1-終端は $s-t$ 経路が形成されることをそれぞれ示す。なお、このアルゴリズムが出力する二分木の節点数は $2^{|E|+1} - 1$ であり、この中から正しい組み合わせを取り出すのは効率性に欠ける。そこで、ZDDの構築にあたっては、二分木に対して以下に説明する「冗長節点の削除」と「等価節点の共有」という処理を可能な限り適用することで効率よく列挙を行う (図-2参照)。

(2) 運行経路列挙問題

各運転手の運行経路の列挙に当たっては、先行研究で

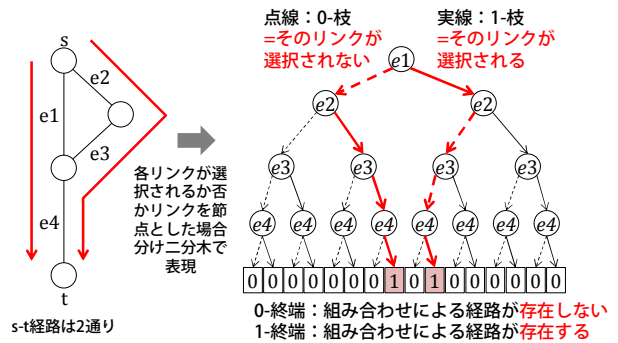


図-1 グラフG(左)とs-t経路の場合分け二分木D(右)

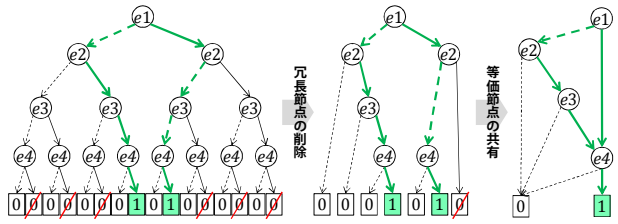


図-2 冗長節点の削除と等価節点の共有

提案した $s-t$ 経路の集合を表現するZDD (以下 $s-t$ 経路ZDDと呼ぶ) に基づいて行う。設定するグラフ構造の例は図に示す通りであり、グラフ G 内のノード $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ は運転手および利用者の位置、リンク $E=(e_1, e_2, \dots, e_m)$ は車両が通行できる道路ネットワークを意味しており、各リンクには接続ノードの情報に加え、各リンクの距離を重み情報として設定する。

$s-t$ 経路ZDDの構築に当たっては、Knuth⁸⁾によるフロンティア法の適用が有効である。フロンティア法は $s-t$ 経路の完成の見通しが立たなくなった時点でその接点を0-終端に直結させるとともに、途中で節点の共有ができそうであれば共有するアルゴリズムであり、途中段階で生成される節点の数が少なくなることから高速にZDDを構築できるメリットがある。フロンティア法によるZDD構築アルゴリズムについては疑似コードの形でAlgorithm 1に示す。Algorithm 1の2行目がZDDの格段についての処理、3行目がその段の各ノードについての処理である。4行目が1-枝 (e_i を $s-t$ 経路のリンクとして採用する場合) 及び0-枝 (採用しない場合) の先のノードを作成する処理である。5行目では終端条件の判定を行う。先行研究では $s-t$ 経路としてハミルトン経路を仮定し、各ノードの次数および連結成分の値から $s-t$ 経路が完成できないと判定した時に n を0-終端に接続する処理を行った。具体的には、 G の部分グラフ $G'=(V, H)$, $H \subseteq E$ が $s-t$ 経路となる条件として、(i) G' はサイクルを持たない、(ii) s, t の次数は2、(iii) s, t 以外の $s-t$ 経路上のノードの次数は1、(iv) G' の連結成分はちょうど1つの根を含むという4つの制約を課した。なお、終端に接続する場合は6-11行目は実行しな

Algorithm 1 ZDD構築アルゴリズム

```

1 1段目に根ノードを作成
2 for  $i=1$  to  $m$  do
3   for すでに作成済みのi段目の各ノードniについて do
4     for  $x=0,1$  do //0枝, 1枝の処理
5       終端条件の判定(a)
6       新しいノードn'を作成
7       n'の情報を更新(b)
8       if n'と等価なノードn'がすでに存在(c)
9         then
10           $n' \leftarrow n''$ 
11        else
12          nのx-枝の先をn'とする
13      end for
14    end for
15  end for

```

い. 7行目ではノードに記憶させる情報(回数および連結成分)を更新し, 8行目で等価節点の共有が可能であるか判定する.

(3) 運転手割り当て問題への適用

本研究では(2)に示した運行経路の検討の前段として, 運転手と利用者の位置情報と道路ネットワーク条件が与えられた際に, どの運転手がどの利用者の送迎を担当するかという問題についても取り扱い, 同じくZDDを用いて解析する. 同手法に関してはInoue *et al.*⁹⁾が根付き全域森の集合を表現するZDD(以下根付き全域森ZDD)を構築することによって電力網における電線スイッチ故障の組み合わせを列挙する手法を提案しており, 本研究では同手法の基本的な考え方を援用している.

根付き全域森ZDDで扱うグラフは*s*-経路ZDDと同様であり, 運転手および利用者の位置をノードとし, 道路ネットワークをリンクとして扱う. 運転手が送迎する利用者については, 道路ネットワークの接続状況で表現し, 各運転手がカバーする範囲は全体グラフの部分グラフとして表現する(図-3). ここで, 部分グラフの制約条件として, 全ての利用者はいずれか1名の運転手から送迎される必要がある(同制約をここではカバー制約と呼ぶ)という設定を置いている. これは, 森を構成する各木がいずれか1つの運転手ノードを含み, すべての利用者ノードがいずれかの木に属していなければならないことを意味している. 木の根として運転手ノードを指定し, 森によってグラフ全体が覆われるため, 根付き全域森として捉えることになる. フロントティア法を用いることですべての根付き全域森を列挙し, カバー制約を満たす部分グラフの集合が得られる.

根付き全域森ZDDの構築手順は*s*-経路ZDDの場合と基本的には同様であるが, 両者の違いは(a)終端条件の判定, (b)ノードに記憶させる情報の更新, (c)ノードの等価性判

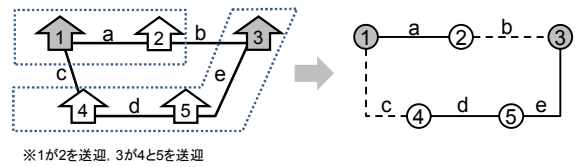


図-3 運転手割り当て問題で取り扱うグラフ

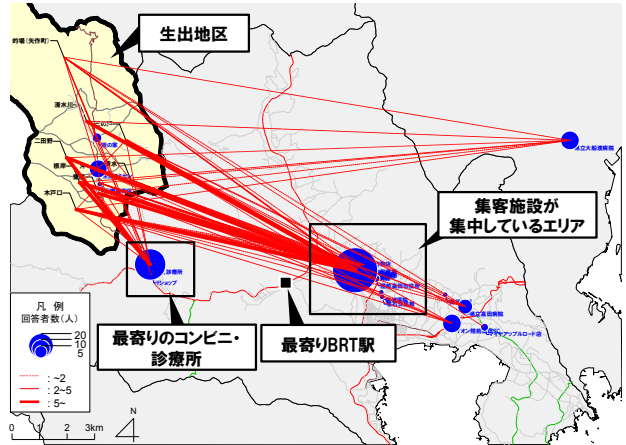


図-4 生出地区住民の移動実態

資料: 生出地区全戸アンケート調査(東京大学)

定に現れる. 具体的には, 部分グラフ G' が全域森になるには, (i) G' はサイクルを持たない, (ii) G' の連結成分はちょうど1つの根を含むという条件のもとでAlgorithm 1(a)-(c)の判定を行う点のみ異なる.

ただし, このように列挙した部分グラフは任意の大きさの木を含むため, 例えば運転手が複数名いる場合でも, ある特定の運転手1名が全利用者を巡回するような, 木の大きさが極端に偏る部分グラフも列挙されることになる. そのため, カバー制約を満たす森の集合から送迎上限数を超える大きな木を含む森を除去する必要がある. フロントティア法はリンクの数を指定して木を列挙することが可能であり, グラフ集合演算によって大きすぎる木を含む森だけを除去することができる. 以上の制約を考慮して列挙した実行可能階の中から, 運行経路の延長を昇順にソートし, 合計が最も小さくなる木を列挙することによって, 各運転手の運行距離を抑えた割り当てを提案する.

3. 陸前高田市におけるケーススタディ

第2章で検討した2つの列挙アルゴリズムについて, 陸前高田市矢作町生出地区で実施した実証運行に適用する. 本章では実験対象地区の概要及び実験の概要について整理する.

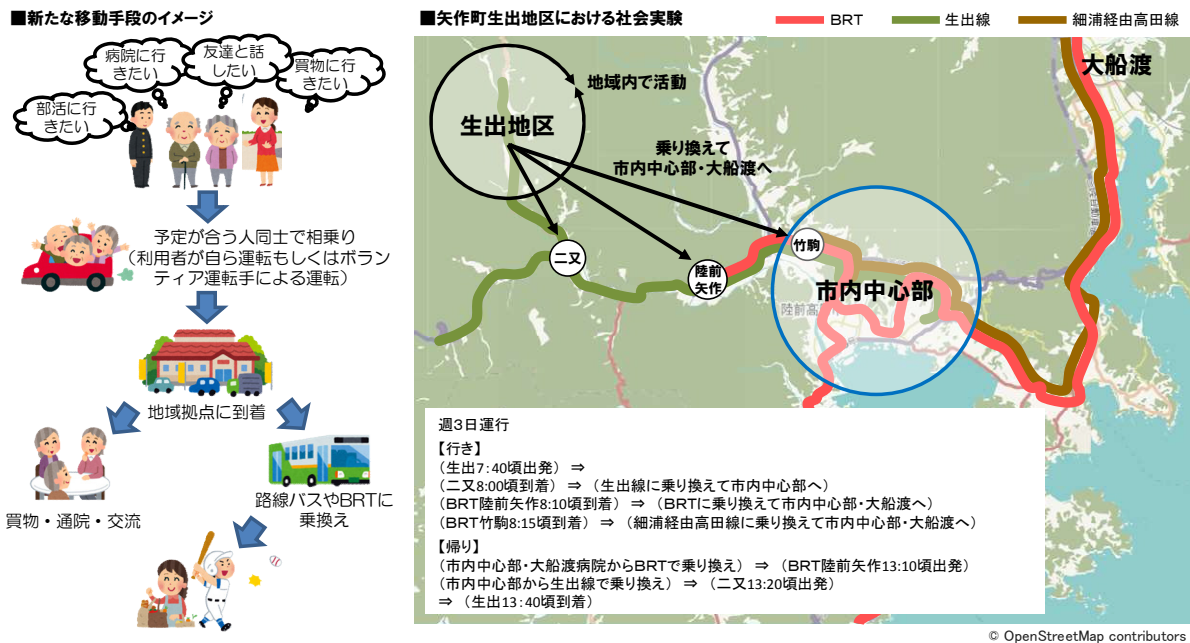


図-5 「おいでみんなのバス」運行範囲及びダイヤ

資料：平成28年度市内公共交通運行方針 資料編（陸前高田市）¹⁰

表-1 「おいでみんなのバス」実験概要

項目	内容
実施主体	東京大学（協力：陸前高田市）
実験期間	平成28年1月14日～平成28年2月29日
運転日	週3回（火・木・金）※予約がある日のみ運行
運行範囲	生出地区～BRT竹駒駅まで（BRT駅及び二又停留所にてBRT・路線バスと接続）
運行回数	1日1回（行き：生出地区7:40発⇒BRT竹駒駅8:15着，帰り：BRT陸前矢作駅13:10発⇒生出地区13:40着） ※BRT及び路線バスとの接続を考慮したダイヤ設定
運行方法	運行範囲内についてはドアトゥドア型（ただし竹駒駅以遠は公共交通との組み合わせ利用）
予約方法	担当日の運転手に前日までに直接連絡
運賃	無料（道路運送法適用外）
利用者	事前に登録した地域住民（24名）
運転手	事前に登録し，自家用有償運送の講習を受講した地域住民（7名）
使用車両	レンタカー（4人乗り軽自動車）

(1) 実験対象地区の概要

実験対象地区である陸前高田市矢作町生出地区は陸前高田市と住田町・一関市の行政界周辺に位置している地区である。地区の中心に比較的交通量が多い県道が通っており，住居は同路線の沿線に配置されている（世帯数は平成27年8月時点で114戸）。地区内に規模の大きい商店や病院が立地していないため，図-4に示す通り，多くの住民は通院や買い物の際に15～20km程度離れた陸前高田市中心部（高田町・竹駒町周辺）の施設まで移動している状況にある。

生出地区内には中心部に向かう路線バス（生出線）が1系統運行されているが，運行回数は1日3回でありサービスレベルが高い系統であるとは言えない。また，比較的運行頻度が確保されているBRT駅（陸前矢作駅）についても地区から概ね10km離れた場所に立地しておりア

クセス負担の大きさから利用が難しい状況にある。更に，最寄りのタクシー営業所は陸前高田市中心部に立地していることから，回送距離が長くタクシーを基本としたサービス展開も難しい地理的条件にある。このような状況であるため，これまでは住民同士の送迎が主要な移動手段の一つとして活用されてきたが，特定の住民に負担が集中する，利用者が気兼ねをすることで外出を控える，等の問題が生じていた。

(2) 実証実験の概要

上述の地域課題を踏まえ，地域住民が車両を共同で保有し，住民同士で送迎を行う新しい移動手段の導入を目指し，平成27年度に東京大学が「おいでみんなのバス」実証実験を実施した。実験概要を図-5及び表-1に示す。運行態様は1日1往復の基本ダイヤのもとでの区域運行と

表-2 調査概要

	PP調査	AD調査
調査期間	2か月間	2週間
参加者数	20名※	20名※
取得データ	<ul style="list-style-type: none"> 時刻 位置情報 気圧 (目的地, 利用交通手段等についてはAD調査とマージさせることで把握)	<ul style="list-style-type: none"> 個人属性 交通機関の選択肢集合 送迎環境 毎日の移動実態 (目的地, 利用交通手段, 出発・到着時刻)

※PPのみ協力2名, ADのみ協力2名, PP及びADに協力18名

したが、基本ダイヤの時間帯以外については地域の共有の車両として、地域活動等で自由に活用して良いこととした(ただし運転手・利用者とも登録を行った者のみ利用を許可した)。なお、設定した運行ダイヤや運行範囲については、地域住民より取得したアンケート調査結果等を踏まえて当初案を作成し、地元でのワークショップを複数回繰り返す中で内容を確定させた。

(3) 調査概要

実証実験の実施に際し、表-2に示す2種類の調査を実施した。以下にその概要を示す。

a) プローブパーソン調査 (PP調査)

実験期間中、運転手・利用者に対してスマートフォン端末を貸出し、2か月間のプローブパーソン調査(以下PP調査と呼ぶ)を行った。被験者は外出時自宅を出発してから帰宅するまでの間スマートフォンを携帯する。スマートフォンには行動履歴(時刻, 位置情報, 気圧)を収集するアプリが搭載されており、移動時に10秒ごとにデータを取得する仕様となっている。静止状態ではデータは取得されない。なお、本調査については被験者が全員60歳以上の高齢者であり、スマートフォンの操作経験が無い人が大半であったことから、被験者に機器の操作は行わず、常に電源が入っている状態を維持することだけ依頼した。また、訪問施設及び移動目的については取得データから判断することとした。

b) 行動日誌調査 (AD調査)

PP調査を補完する位置づけとして、実験参加者の普段の移動実態に関する紙面での行動日誌調査(以下AD調査と呼ぶ)を実施した。実施期間は2016/2/14~2016/2/27の15日間である。本調査に関しては参加者31名中20名からの協力を得た。なお、多くの協力者はPP調査にも協力が得られている状況にある。PP調査において欠損している期間・区間のデータについて、同データを用いて移動時間帯・目的地等を把握する用途で活用している。

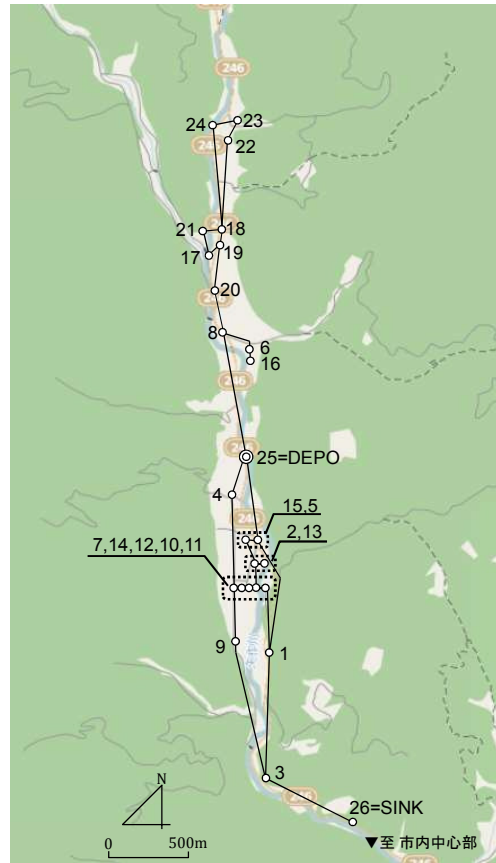


図-6 運転手割り当て問題のグラフ

© OpenStreetMap contributors/CC BY-SA

4. 数値計算

本章では第2章で構築したs-t経路ZDD及び根付き全域森ZDDに対し、実証実験にて取得したデータを適用し数値計算を行うことで、運転手割り付け及び運行経路の動的な管理手法について提案する。なお、いずれのケースについてもZDDの構築に当たってはERATO湊離散構造処理系プロジェクトが主体となって開発しているPython拡張モジュールGraphillion¹¹⁾を使用して計算を行った。

(1) 運転手割り当て問題

PP調査により取得した利用者の居住地と現況の道路ネットワーク条件をもとに、運転手割り当て問題を解析するためのグラフを図-6に示す通り構築した。ここで、リンク数は30、ノード数は26である。グラフ内ノードについては、ノード1~7は運転手宅、ノード8~24は利用者宅を示しており、同居している実験参加者は一つのノードに集約させた。ノード25についてはDEPO(車両を保管しているコミュニティセンター)、ノード26はSINK(地区境)をそれぞれ意味している。リンクは車両が走行できる道路ネットワークであり、各リンクには距離(単位:m)が重み情報として付与されている。

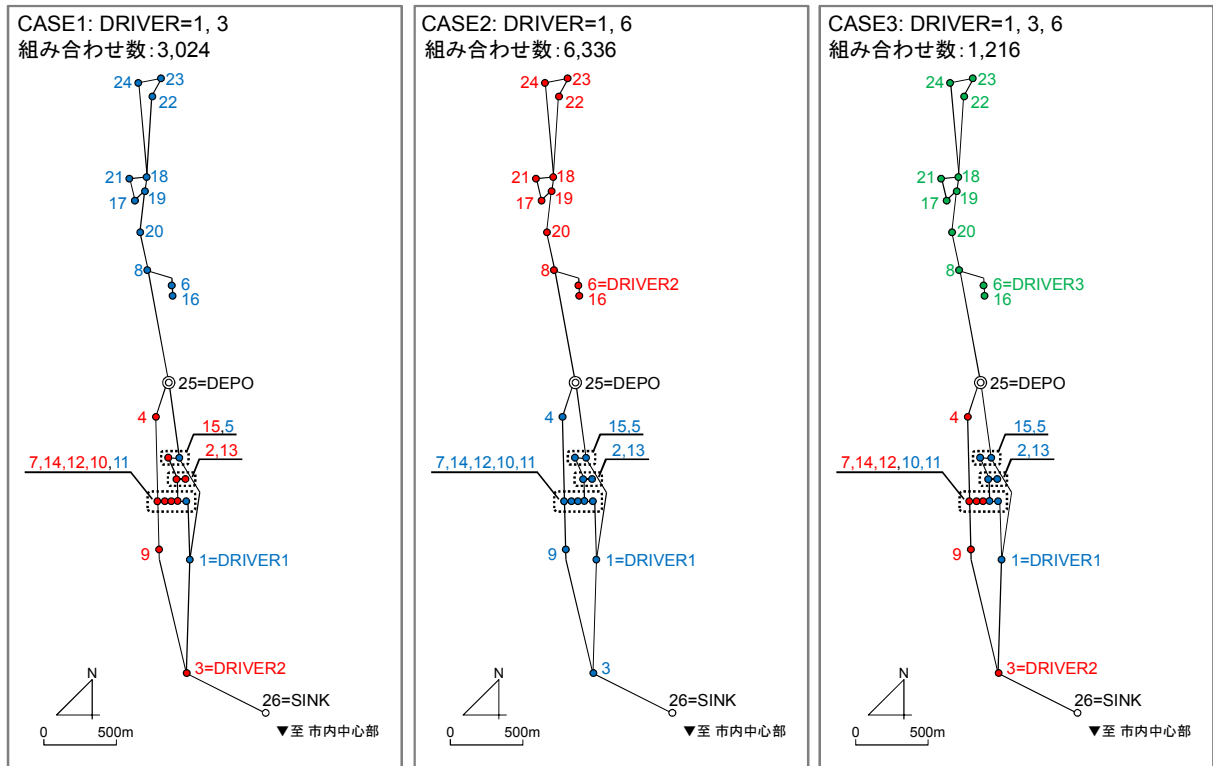


図-7 移動時間最短時の運転手割り付けパターン

表-3 運転手割り付け問題計算結果

CASE (driver)	組合せ数	計算時間 (sec)	
		列挙	ソート
CASE 1 (1,3)	3,024	0.0070	0.2882
CASE 2 (1,6)	6,336	0.0085	0.2600
CASE 3 (1,3,6)	1,216	0.0076	0.3000

(計算環境：2.6GHz Dual-Core Intel-i5/ Mem:8GB ※以下同様)

運転手割り当てを検討するにあたって、まずPP調査をもとに各運転手が外出している日を「運転可能日」と仮定して抽出した。そして、各日において運転に協力できる運転手の送迎の割り当てパターンを列挙した。分析ケースとして、ここではPP調査から取得した特徴的な3日分のデータをもとに、CASE 1：運転手1及び運転手3の2名が運転可能な日、CASE 2：運転手1及び運転手6の2名が運転可能な日、CASE 3：運転手1、運転手3、運転手6の3名が運転可能な日という3ケースでそれぞれ計算を行った。なお、ZDD構築に当たっての構造制約として、1人当たり送迎可能人数は15名（ケース3のみ10名）を設定した。そして、移動時間の合計値が最も小さくなる割り付けパターンから昇順でソートデータを圧縮する処理を行っている。

計算結果は表-3及び図-7に示す通りであり、今回取り扱ったような比較的小規模なグラフ構造においても割り当てパターンはいずれも1,000以上と大きいことが分かる。なお、ここでは全利用者が利用する想定で割り当てパタ

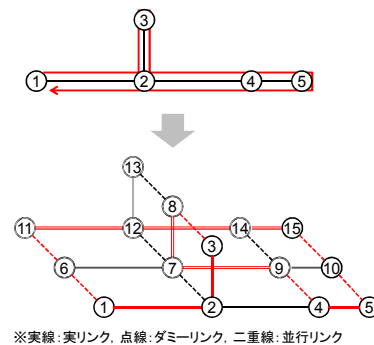


図-8 ダミーリンク・並行リンクの導入

ンを列挙しているが、その日に外出する利用者のみ抽出して割り当てパターンを列挙することも同様に可能である。

(2) 運行経路の列挙

a) グラフ構造の構築

続いて、運転手の割り付けパターンごとに運行経路の列挙を行う。運行経路の列挙に当たり留意すべき点は、ZDDでは経路の重複が許容されないことである。特に、生出地区のように居住地が線形に分布している地区に適用する場合、重複を許容しない限りs-経路が完成しない場合があり得る。この問題を解決するため、本研究では図-8に示すダミーリンクと並行リンクを導入した表現を試みた。ここで、ダミーリンクは経路の重複を許容する目的で追加しており、距離は0として扱っている。並行リンクは実リンクと同じ位置・距離の情報を持たせ、同

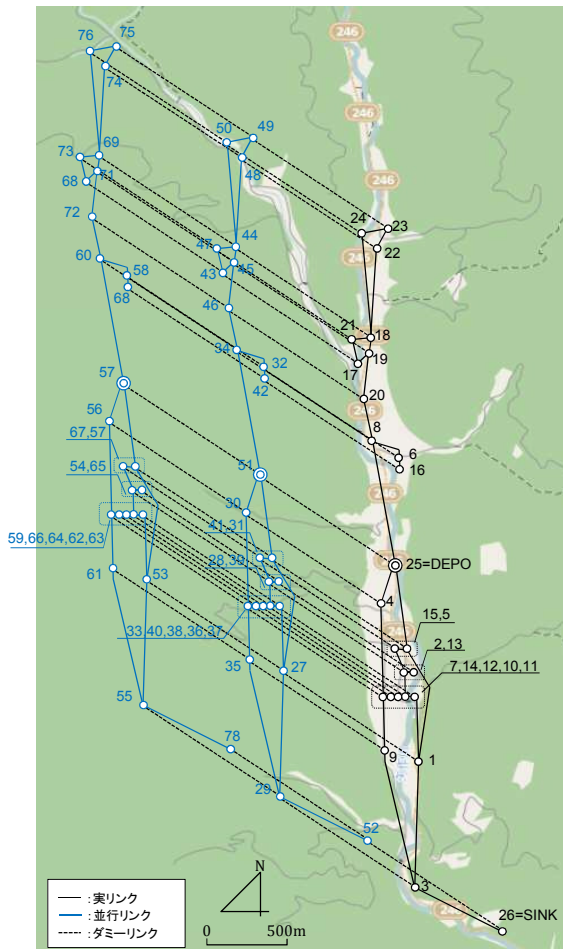


図-9 経路列挙問題のグラフ

© OpenStreetMap contributors / CC BY-SA

経路を3回まで重複して選択できるように設定している。仮にこれらのリンクを含めず解析しようとする場合、図-8上図に示すような重複を許す経路の取り扱いには対応できなかったが、リンクを含めることによりその表現が可能となった。ただし、このようにリンクを追加することはグラフのデータ量の拡大（つまりは経路列挙数の拡大）に直結することから、計算負荷の面からは好ましい処理方法とは言い難い。同問題への対応方針については今後の課題として最終章にて整理する。以上の処理を施し、本研究にて実際に構築したグラフ構造を図-9に示す。ここで、リンク数は142、ノード数は78である。

b) 運行経路の列挙結果

運転手割り当て問題におけるCASE 1の調査日を例に、運行経路の列挙を行った。同日に移動を行った利用者16及び利用者17（PP調査より把握）に対して、DEPO（ノード25）に設置している車両を用いて、運転手1が生出地区外（ノード26）まで送迎する場合を想定し運行経路の列挙を行っている。計算結果は表-4に示す通りであり、経路の重複を許容したことから約30兆通りという膨大な列挙数となったが、列挙に係る計算時間は44秒、ソートに係る計算時間は1秒以下と高速な列挙が可能となって

表-4 経路列挙問題計算結果

経路数	計算時間(sec)	
	列挙	ソート
29,686,796,989,262	44.7215	0.4906

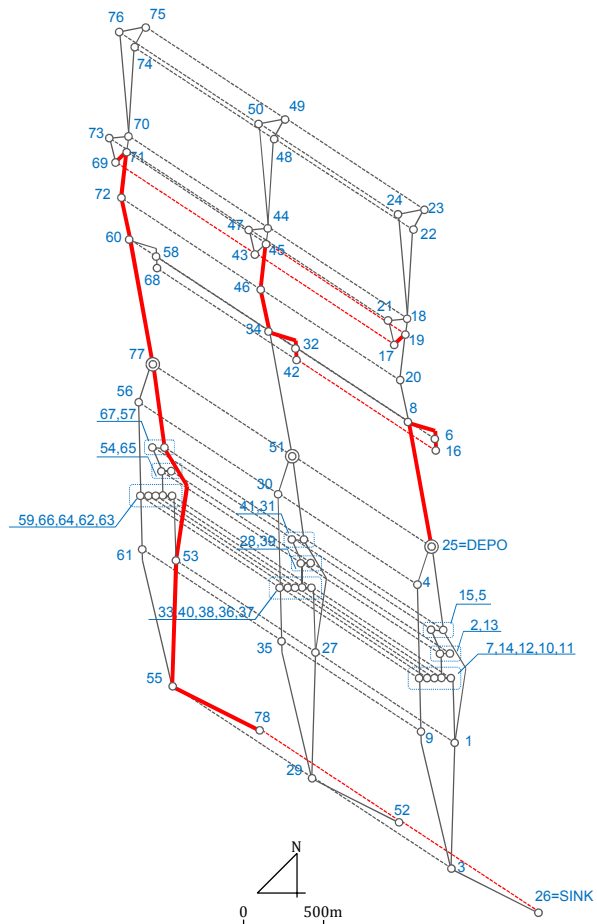


図-10 最短経路の例

いる。

また、ZDDでは列挙解のデータを圧縮したまま指定された条件に適合する経路を抽出することができる利点がある。換言すると、ZDDにより列挙された経路を実行可能解として、異なる目的関数ごとに最小化問題や最大化問題を解き直すことが可能である。ここでは一つの例として移動距離最小化を目的関数に設定し計算を行った。最短経路（車両の移動距離6,850m）については22パターンが存在しており、そのうちの1つを図-10に示す。ZDDで取り扱うグラフでは各リンク・ノードに重み情報を付与することができるため、例えば本試算で示したような所要時間を最小化する経路の探索以外にも、目的関数に応じた経路の探索が可能である。

c) 運行経路の動的管理

ここではZDDの経路列挙結果の活用例として運行経路の動的管理への適用を提案する。前項と同じネットワーク条件下で、現在利用していない利用者が追加された場

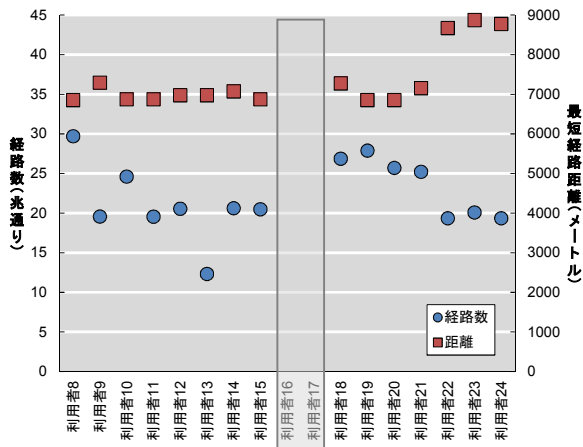


図-11 利用者が追加された際の経路数・距離の変化

合に、どの程度全体の経路列挙数が変動するかを検証した。結果を図-11に示しており、利用者16及び利用者17に加えて利用者8～24までのいずれか1名が追加で乗車する場合の経路列挙数及び最短距離の変化を整理している。計算結果を見ると、利用者12を追加した際に経路列挙数が大きく減少していることが確認される。これは利用者12が主要道路から離れた場所に立地していることに起因している。つまり、利用者12については便乗することで、車両の経路選択の幅が大きく狭まることを意味しており、運転者及び利用者16及び17の立場からすると利用者12宅への立ち寄り行動は「自分たちの経路選択の自由度を低下させる行動」となっている。一方で利用者8に着目すると、位置関係上、利用者16宅にアクセスするには必ず利用者8宅を通過しなければならないことから、便乗したところで経路列挙数にも経路距離にも全く影響を与えない。

このように、ZDDを活用することで、ネットワーク条件に応じて経路列挙数に大きな変化を与えない利用者もいれば、その人を乗せることで大きく経路列挙数が限定されることもあるという特徴が容易に計算できるため、協力ゲームのシャプレー値の概念に近い形で、各利用者のコミュニティでの影響度を計測することができることになる。つまり「ある人が同乗するもしくは同乗しないことにより、協働型公共交通の運行に係る負担がどれだけ変わるのか」という変化が可視化されることになる。この手法を活用することで、例えば、経路列挙数や平均所要時間に大きな影響を及ぼすような人に対しては利用料金を据え置けもしくは高くして、逆に運行経路上で需要が発生すると安く活用できるようにするといった料金施策に発展させることも考えられる。ただし、単純に料金だけを操作するだけでは、公共交通利用に係る地域間の公平性の確保の観点から合意形成を図りにくい可能性もあることから、ある人が新たに利用者として追加される際に、「遠回りしてもよいかから一緒に行きたい」、

「近くても一緒に行きたくない」など、利用者の意向と合わせた形で料金を操作するような施策も考えられる。

このように、需要の分布状況が変化中での公共交通の運営効率性や利用者のインセンティブの在り方等について、計算効率性を確保しつつ検討する上でもZDDは有効である。もちろん、料金施策をはじめとするサービス内容の改正については、関係者間での慎重な議論の上で実施する必要があることを付け加えておく。

5. おわりに

(1) 研究の成果

本研究では、先行研究をベースに協働型公共交通における運転手割り付けと経路選択の2つのフェーズでのZDDの適用方法を提案するとともに、実ネットワークでの適用可能性について示した。ZDDを用いることで既往の列挙アルゴリズムでは達成し得なかった運転手割り付け・運行経路の高速列挙が可能になるとともに、膨大な実行可能解をZDDにより全列挙して索引化しておくことが可能となった。全解を列挙することで、協働型公共交通の実運用において動的に変化する目的変数、制約条件に合わせた運行経路の探索を行うことを可能にした点と、列挙解を用いることにより、PP調査等から把握できる運転手・利用者の分布状況の動的に応じ、各人の利用が全体に与える影響を定量的に示す手法を提案した点が本研究の成果と言えよう。

(2) グラフ構造の簡略化

本研究では経路の重複を許容するため、ダミーリンクと並行リンクを用いて対応したが、前述の通りこの手法では取り扱うグラフ構造が大きく拡大するため、計算効率性が低下する欠点がある。今後の改良の方向性としては、本研究のように実ネットワークをもとに経路列挙を行うのではなく、例えば利用者を完全ネットワーク等で表現し、各利用者間を連結するリンクには利用者間の最短経路の情報を加えるような対応がまずは考えられる。また、利用者を組合せ集合ではなく順列として扱うことにより、後述するSeqBDDの適用も可能性として考えられる。

(3) 時間拡大ネットワークへの拡張

本研究にて援用したZDDはすべての親節点と子節点の間であらかじめ固定された変数順序が守られているため、ノードの出現順序の違い（たとえば、 $\{ab, ba\}$ ）や、ノードの重複（ $\{aba, abca\}$ ）等は区別できない。本研究を時間拡大ネットワークに拡張する場合、ノードの順列を扱う（つまり、 t 期のノードの後に $t-1$ 期のノードが選択されるようなことがあってはならない）必要があるが、

通常のZDDではこの表現が難しい。同問題への対応の一つとして、Loekito et al.¹²⁾が提案した文字列集合の表現が可能であるSequence BDD (SeqBDD: 系列二分決定グラフ)の適用が考えられる。SeqBDDはZDDでは厳しく制約をかけている親節点と子節点の間の変数順序の制約を緩和したデータ構造を有しており、例えば*t*-1期のノードを選択した後は*t*期のノードを選択しないような制約を加えることが可能になる。同手法の導入可能性についてはデータ圧縮効率を鑑みつつ今後検討を進める。

謝辞: 本研究において活用したデータの取得に当たっては、陸前高田市生出地区コミュニティ活性化推進協議会及び生出地区の住民の皆様にご多大なる協力をいただきました。また、実験の実施に際しては陸前高田市企画部企画政策課の協力をいただき、プローブパーソン調査の実施に当たっては(株)トランスフィールドの林竜太郎氏、越智大介氏に協力いただきました。記して感謝の意を表します。なお、本論文の内容に関しての一切の責任は筆者が負うこととします。

参考文献

- 1) 大井尚司: コミュニティ交通の運行形態に関する整理, 2010年度福祉のまちおこし研究事業報告書, 大分大学福祉科学研究センター, 2011.
- 2) 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.424-252, 2008.
- 3) 吉田樹, 秋山哲男, 金載昊: 人口高密度地区におけるDRTシステムとその適用可能性, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 551-558, 2006.
- 4) 福本雅之, 西山陽介, 加藤博和, 孫卓: 公共交通需要気迫地域における小量乗合運送サービス導入方法に関するシミュレーション分析, 土木学会論文集 D, Vol. 65, No. 4, pp. 480-492, 2009.
- 5) 青野亮, 柳川達郎, 杉浦晶子, 加藤博和: オンデマンド型乗合交通システム導入による住民のアクセシビリティ改善評価手法, 土木計画学研究・講演集, Vol. 51, CD-ROM, 2015.
- 6) 吉野大介, 羽藤英二: ZDD を用いたデマンド交通の運行経路の列挙, 土木計画学研究・講演集, Vol. 52, CD-ROM, 2015.
- 7) Minato, S.: Zero-suppressed BDDs for set manipulation in combinatorial problems, *In proceedings of 30th ACM/IEEE Design Automation Conference*, pp. 272-277, 1993.
- 8) Knuth, D.E. : The art of computer programming: Bitwise tricks and techniques; Binary Decision Diagrams, Vol. 4, No. 1, 2009.
- 9) Inoue T., Takano, K., Watanabe, T., Kawahara, J., Yoshinaka, R., Kishimoto, A., Tsuda, K., Minato, S. and Hayashi, Y.: Distribution loss minimization with guaranteed error bound, *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 5, No. 1, pp.102-111, 2014.
- 10) 陸前高田市: 平成 28 年度市内公共交通運行方針 資料編, 2016.
- 11) Inoue, A, Iwashita, H., Kawahara, J., Minato, S. : Graphillion: Software library designed for very large sets of labeled graphs, *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, Springer, 2014.
- 12) Loekito, E., Bailey, J. and Pei, J.: A binary decision diagram based approach for mining frequent subsequences, *Knowledge and Information Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 235-268, 2010.

(???? ?? ?? 受付)

A METHOD OF A DYNAMIC MANAGEMENT IN BUS SERVICE USING LOCATION DATA AND ZDD

Daisuke YOSHINO and Eiji HATO