

博士論文

経路索引の構造化処理による公共交通の
逐次最適化と被災地復興におけるその適用

吉野 大介

論文要旨

2011年3月11日に発生したわが国未曾有の大災害である東日本大震災における最も大きな特徴は、縮退局面での持続可能な都市構造の構築が復興において重要な課題となっている点にある。もともと社会経済的な面で問題を抱えている地域においては、社会資本の整備が復興に直結しづらく、各集落の需要が縮小する中で、今後どのように人々の生活環境を整え、いかに地域の活力を減らすことなく復興を遂げるかという点が最大の関心事となる。

一方で、このような事態は何も被災地だけに限ったことではない。超高齢社会を迎える日本において、特に需要が疎な地域における高齢化・過疎化は深刻である。各地域において離散的に存在する集落がそれぞれ縮退する中で、いかに生活の基盤を維持していくかという視点は、今後全国的に重視されることになる。既に都市の縮退に伴う需要の縮小と財政面での制約等により、住民の生活を維持するためのサービスについても縮小せざるを得ないという判断を下す自治体は全国でも数多く見られる。一方で、人々が健康で文化的な生活を営むためには、買い物・医療等、様々なサービスの享受が必要である。持続可能な都市構造を構築し、生活の利便性を保ちながら生活できる環境を整えることは、社会基盤の言わば使命であり、その中で、地方や過疎地域における地域公共交通サービスは、人々の生活を保護するためのひとつの政策手段として位置づけられる。つまり、需要の規模と分布に即し、かつ関係者全員にとって持続可能な地域公共交通を適切に構築することは、都市を健やかな状態で維持させることと同意であると言えよう。

地域公共交通を計画における視点には、様々な切り口が存在する。車両や結節点そのものを設計する工学的視点や、政策を導き評価する経済学的視点等も地域公共交通の計画の視点のひとつであるが、公的セクターが主導して公共施策として地域公共交通を計画する際には、もう少し実務的な視点に基づき、地域公共交通のコスト低減や利用者の最大化等、将来の明確な目標を実現するための具体計画を導く、経営科学的なアプローチを採ることが多いとされる。経営科学的な視点に立ち、最適な計画を立て行動するためには、あらかじめできるだけ正確に将来を予測する必要がある。

地域公共交通については、現況のサービス内容が必ずしも合理的な計画に基づいていない。むしろ、これまでの社会的背景を鑑みると、交通事業者任せで需要追隨的に成長を続けている傾向があり、現状のサービスを前提とした部分的な手直しや対症療法的な改正が適当でないケースも多い。このような状況のもとでは、現状の自然的状態の延長を知ろうとする探索的接近（どうなるかの予測）ではなく、先に何らかの目標を設定し、これを達成するための必要条件を探る規範的接近（どうするかの予測）をもとに議論しないことには、抜本的な改善が図られない。また、地域公共交通ネットワークの構成要素に関する計画を行う際には、単に個々の部分の計画として考えるのではなく、ネットワーク全体の評価を行う計画として扱うことが必要であり、規範的状态の設定に当たっては、客観的な基準を設け、それを最適にする解を求める問題を考えなければならない。

このような規範的予測技法の考え方は、地域公共交通のネットワーク計画を講じる際のみならず、計画した路線における最適な車両運行計画の検討や、実施効果の高い交通施策（交通モードの導入、利用促進

策等)を講じる際にも同様のアプローチが必要となる。また、特に被災地復興においては、都市が破壊された状態からの復興計画が必要とされることから、計画策定における自由度が高く、その結果、想定される代替案が膨大になるため、規範的状态の設定と規範状態に向けたアプローチの提示に対する必要性が高いと言えよう。

しかしながら、地域公共交通に関しては、それぞれの地域が置かれている状況や抱える課題が千差万別であることに加え、行政担当者や交通事業者、住民の能力や事情も様々であることから、このような課題に対する処方箋としての計画方針や分析手法をオーソライズすることが難しい。そのため、これまでの地域公共交通計画は各地区の創意工夫に依存する形で作成されてきたが、目先の問題にのみ着目し、中長期的な視点を欠いた対症療法的な計画や、地域公共交通全体ないしまちづくり全体への視点が欠けている計画が散見されている実情があるのも事実である。

また、行政や交通事業者による経験と勘の中で、移動に関する多くの意思決定がなされていることも珍しくない。熟練した実務者による経験や勘による計画・運営は強力なツールであり、数理計画問題等を用いた机上計算では取扱うことが難しい地域や事業者の雰囲気、人間関係、個々の細やかなニーズ等を包含した計画を策定することが可能であるという側面もある。しかしながら、これらの経験と勘に完全に依存して計画や運営が決まってしまうと、サービスの評価がアドホックなものになり、利用者にとっての利便性の確保と事業の持続可能性が両立しない状況に陥る危険性を孕んでいる。

以上の問題意識を踏まえ、本研究では、需要変動が発生する条件下での公共交通サービスについて、地域全体の公共交通ネットワークを1つのシステムとして捉え、俯瞰的な視点から、計画・運営・政策判断それぞれの段階における設計・実装手法を、規範的予測技法のフレームのもとで構築することを第一の課題として設定する。また、計算負荷の問題等から、これまでの運用管理施策に関する検討は仮想ネットワークを用いて行われることが多かったが、実規模のネットワークでの実装を前提とした分析モデル及びアルゴリズムの提案を行うことが重要であり、これを第二の課題として設定する。

以上で整理した地域公共交通の計画技術については、上述の通り被災地における復興交通計画の検討においても有意義であると考えられる。被災地で発生している需要やネットワーク構造の急激な変化は、被災地以外の地域において今後5年、10年かけて発生する変化の縮図と位置づけられるため、基本的には最適化問題等を活用した規範的予測技法の適用は、被災地・被災地外の分類に関係なく可能であり、時々刻々と変化する社会環境へのスピーディーな対応の必要性という面から見ると、被災地での有効性は特に高いと言えよう。そこで、被災地の地域公共交通計画における規範的予測技法の重要性を鑑み、本研究のケーススタディの対象として被災地を選定する。

本論文は、第1章の序論に続いて、第2章では公共交通の設計と実装の基礎となる、公共交通に関する需要予測、供給側の機能計画それぞれの研究分野について、網羅的に既往研究体系の整理を行った。

第3章では、需要が疎な地域におけるデマンド交通や協働型交通といった需要応答型交通の効率的なオペレーションのあり方を検討すべく、運行経路と運転手割り当てを列挙索引化手法であるZDD (Zero-Suppressed Binary Decision Diagram: ゼロサプレス型二分決定グラフ)により構造化処理を行う手法の提案を行った。そして、簡易ネットワークにおける数値計算、更には陸前高田市生出地区で実施した協働型交通サービス実証実験を例に、実規模ネットワークへの適用可能性の検証を行った。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、あらかじめ列挙しておいた膨大な実行可能解を索引し活用する処理が可能となった。また、全ての解を列挙することにより、デマンド交通の実運用において課題とされてきた環境変化に合わせた運転手割り当て及び運行経路の探索を行うことを可能にした。併せて、列挙解を影響指標として用いることにより、各利用者の利用行動が全体に与える影響を定量的に示す手法を提案した。

第4章では、既往研究を参考に、需要が疎な地域のバス路線のサービス設計を行うための二段階最適化問題の定式化を行い、その解法アルゴリズムとして Cross-Entropy(CE) 法と ZDD の組み合わせ技法を開発した。開発モデルについては簡易ネットワークにおける数値計算により結果の考察を行うとともに、CE法の主要パラメータであるサンプル数とエリート戦略抽出率を変動させた際の目的関数値及び計算時間の感度分析を通じてその適用可能性について検証を行った。更に、実際の都市において提案モデルを適用し、実規模ネットワークにおける適用可能性についても示した。

第5章では、行政セクターにおける予算制約に伴い、公共交通施策の中でもその施策が有する公平性と効率性という2つの観点から整備優先順位を検討し、その事業が実施目的に対して妥当なものかどうか社会的合意を得る必要があるという問題意識のもと、施策効果が得られそうなターゲットを戦略的に選定する手法の重要性に着目した。戦略的なターゲットの選定に当たっては、ある程度まとまった潜在需要が見込まれ、公共交通の整備やサービス改変、外的インパクト等によって効率的に公共交通需要の顕在化が図られるか否かという点から評価を行うべきであり、本研究では路線ポテンシャルの考え方を基本に、効率性評価モデルである DEA (Data Envelopment Analysis: データ包絡分析) を用いて潜在需要評価モデルの改良を行った。併せて、DEA と Malmquist 指数を組み合わせることにより、潜在需要評価の動学化を図った。

本研究は、規範的予測技法のフレームを軸に、地域公共交通の「計画」、「運行」、「政策評価」それぞれの段階における意思決定支援ツールを構築し、ケーススタディ内でその適用可能性を確認した。特に、これまでは計算コストがネックで活用が難しかった列挙索引化による構造化処理技術を援用することにより、厳密解を即座に索引する技術の導入可能性を示した点が最大の成果と言えよう。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	地域公共交通の維持・確保・改善に向けて	1
1.1.1	都市縮退局面における「移動」	1
1.1.2	地域公共交通の計画手法	2
1.1.3	交通モード別の計画課題	3
1.1.4	地域公共交通に関する政策判断における課題	7
1.1.5	被災地復興における規範的予測技法の適用意義	8
1.2	本研究のねらい	11
1.3	本論文の構成	11
第 2 章	既往研究の整理	14
2.1	緒言	14
2.2	需要側面に関する研究	16
2.2.1	モード選択問題	16
2.2.2	乗客配分モデル	17
2.3	需要に対する機能計画に関する研究	20
2.3.1	路線定期・不定期運行に関する機能計画：ゾーンベースでの輸送計画	21
2.3.2	区域運行に関する機能計画：個人ベースでの輸送計画	22
2.4	最適な公共交通システムの選択に関する研究	25
2.4.1	二段階最適化問題	25
2.4.2	最適化問題のアルゴリズム	27
2.5	列挙索引化に関する研究	29
2.5.1	交通行動の記述と計画手法の変化	29
2.5.2	列挙索引化のアルゴリズム	30
2.5.3	BDD と ZDD	31
2.5.4	BDD ファミリーの適用可能性	32
2.6	事業実施に係る合意形成に関する研究	33
2.6.1	地域公共交通に求められる公平性と効率性	33
2.6.2	公共交通事業に関するパフォーマンス評価	33
2.6.3	需要顕在化評価に関する研究	34
2.7	研究の位置づけ	35
2.7.1	構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援方法の検討	35

2.7.2	構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画の検討	35
2.7.3	需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開の検討	36
第 3 章	構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援	38
3.1	緒言	38
3.2	ZDD のバス運行経路管理への適用	40
3.2.1	ZDD の概要	40
3.2.2	$s-t$ 経路集合を表す ZDD の構築アルゴリズム	41
3.2.3	FBS のフロー	43
3.2.4	数値計算実験	46
3.3	ZDD の運転手割り当て問題への適用	52
3.3.1	根付き全域森 ZDD の構築アルゴリズム	52
3.3.2	数値計算	54
3.4	グラフ構造別の列挙結果の違い	55
3.4.1	グリッドグラフとランダムグラフによる列挙数・計算時間の違い	55
3.4.2	ノード数・リンク数をそれぞれ変動させた際の列挙数・計算時間の違い	56
3.4.3	ZDD の適用に適したグラフ構造に関する考察	59
3.5	協働型交通の運行管理への適用	60
3.5.1	実験対象地区の概要	61
3.5.2	プローブパーソン調査に基づくグラフ構造の作成	64
3.5.3	運転手割り当て問題	65
3.5.4	運行経路列挙問題	66
3.6	結言	72
第 4 章	構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画	75
4.1	緒言	75
4.2	問題の定式化	75
4.2.1	上位問題の定式化	76
4.2.2	下位問題の定式化	78
4.2.3	上位問題と下位問題の接続	79
4.3	解法アルゴリズムの設計	80
4.3.1	CE 法の概要	80
4.3.2	CE 法の適用方法	81
4.3.3	制約条件の導入	84
4.4	数値計算実験	85
4.4.1	評価に用いるネットワーク	86
4.4.2	計算結果に関する考察	86
4.4.3	パラメータの感度分析	88
4.5	需要変動下におけるバスネットワーク検討-陸前高田市への適用	88
4.5.1	陸前高田市におけるバスネットワークの変遷	89
4.5.2	分析ケースの設定	102

4.5.3	インプットデータの作成	102
4.5.4	推計結果	106
4.6	結言	109
第5章	需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開	114
5.1	緒言	114
5.2	DEAの概説	115
5.2.1	DEAとは	115
5.2.2	DEAに基づく需要顕在化率評価のイメージ	116
5.2.3	パラメトリック法とノンパラメトリック法	116
5.2.4	小サンプルでの分析への適用性	116
5.2.5	多出力系への適用性	117
5.2.6	需要顕在化を考える際の地区間異質性の評価の必要性和その際のベンチマークの設定の有効性	118
5.2.7	本研究におけるDEAの選定理由	118
5.2.8	公共交通事業におけるDEAの適用事例	118
5.3	DEAを援用した需要顕在化率評価モデル	119
5.3.1	モデル式	119
5.3.2	優位集合非所属地区の設定	120
5.3.3	入出力変数の設定	121
5.4	陸前高田市におけるケーススタディ	121
5.4.1	インプットデータの作成と分析ケースの設定	121
5.4.2	現行の需要顕在化の動向	130
5.4.3	デマンド交通のサービス改変・将来の需要分布の変動に伴う需要顕在化の動向	134
5.5	結言	145
第6章	結論	148
6.1	本研究の成果のまとめ	148
6.1.1	地域公共交通の計画手法に関する現状と課題	148
6.1.2	公共交通の設計と実装に関するレビュー	148
6.1.3	構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援	149
6.1.4	構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画	150
6.1.5	需要顕在化指標を用いた公共交通施策の戦略的な展開	150
6.2	被災地復興への貢献と課題	151
6.2.1	地域公共交通の計画	151
6.2.2	地域公共交通の運用	152
6.2.3	地域公共交通の政策評価	152
6.3	今後の課題	153
6.3.1	共通課題	153
6.3.2	構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援	154
6.3.3	構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画	156

6.3.4	需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開	159
付録 A	将来発生集中交通量の設定	161
A.1	商業施設	161
A.1.1	面積	161
A.1.2	発生集中原単位	162
A.1.3	自動車分担率	162
A.1.4	平均乗車人数	162
A.2	公共公益施設	162
A.2.1	面積	162
A.2.2	発生集中原単位	162
A.2.3	自動車分担率	163
A.2.4	平均乗車人数	163
A.3	住居・集合住宅	163
A.3.1	人口・世帯数	163
A.3.2	発生集中原単位	163
A.3.3	自動車分担率	163
A.3.4	平均乗車人数	163
参考文献		164
謝辞		174

図目次

1.1	探索的予測技法と規範的予測技法	3
1.2	予測手法の分類	4
1.3	輸送密度と交通モードの関係性	5
1.4	探索的予測技法と規範的予測技法	9
1.5	本論文の構成	12
2.1	既往研究の整理総括図	15
2.2	common lines problem	19
2.3	時空間ネットワークによる表現例	20
2.4	交通ネットワーク計画問題の検討プロセス	23
2.5	公共交通の網形成計画における二段階最適化問題の適用イメージ	25
2.6	データオリエンティッド型の交通行動の把握における計算コストの削減アプローチ	30
2.7	二分決定木と BDD/ZDD	31
2.8	BDD/ZDD の簡約化規則の違い	32
3.1	運行経路選択における制約条件の変化イメージ	39
3.2	最適化と列挙索引化のオペレーションにおける適用の違い	40
3.3	グラフ G と $s-t$ 経路の場合分け二分木 D	41
3.4	冗長節点の削除と等価接点の共有	42
3.5	次数及び連結成分の更新の様子	43
3.6	等価な途中状態の例	45
3.7	使用するグラフ構造	46
3.8	グリッド数-経路列挙数の感度分析	49
3.9	グリッド数-経路列挙に掛かる計算時間の感度分析	49
3.10	各ケースにおける最短運行経路の一例	50
3.11	各ノード需要発生時の経路数の変化	50
3.12	各ノード需要発生時の平均所要時間の変化	51
3.13	各ノード追加時の平均所要時間分布	52
3.14	運転手割り当て問題への根付き全域森 ZDD の援用	53
3.15	送迎時間が最小となる割り当ての例 (ケース 2)	55
3.16	送迎時間が最小となる割り当ての例 (ケース 3)	55
3.17	グリッド数-割り当て列挙数の感度分析	56
3.18	グリッド数-割り当て列挙に掛かる計算時間の感度分析	56

3.19	同一ノード・リンク数のグリッドグラフとランダムグラフのイメージ	57
3.20	割り当て列挙におけるノード・リンク数と列挙数・計算時間の関係	57
3.21	経路列挙におけるノード・リンク数と列挙数・計算時間の関係	58
3.22	割り当て列挙におけるリンク数と列挙数・計算時間の関係（ノード数固定）	58
3.23	割り当て列挙におけるノード数と列挙数・計算時間の関係（リンク数固定）	58
3.24	経路列挙におけるリンク数と列挙数・計算時間の関係（ノード数固定）	59
3.25	経路列挙におけるノード数と列挙数・計算時間の関係（リンク数固定）	59
3.26	ノード数・リンク数が同数のグラフにおけるフロンティアサイズの違い	60
3.27	グラフ形状の違いによるフロンティア上のノード数の推移	61
3.28	同一グラフにおいてリンクの変数順序付けを変更した彩のフロンティアサイズの違い	61
3.29	変数順序付けの違いによるフロンティア上のノード数の推移	62
3.30	生出地区住民の移動実態	63
3.31	生出地区の位置及び公共交通手段の概要	63
3.32	プローブパーソン調査機器	65
3.33	運転手割り当て問題のグラフ	66
3.34	ZDD の構築・索引による列挙のイメージ	66
3.35	移動時間最短時の運転手割り付けパターン	67
3.36	ダミーリンク・並行リンクの導入	68
3.37	経路列挙問題のグラフ	69
3.38	ケース 2 における最短経路の例	70
3.39	最短経路と実輸送ルートと比較	71
3.40	ケース 2 に対して利用者が追加された際の経路列挙数の変化	72
4.1	上位問題のネットワーク設定イメージ	76
4.2	下位問題におけるネットワーク改善案	79
4.3	CE 法における確率分布の設定方法	82
4.4	OD ペア情報をもとにしたバス路線列挙のイメージ	85
4.5	車両台数制約・OD 別容量制約を考慮するための OD 表の設定方法イメージ	86
4.6	構築したアルゴリズムフロー	87
4.7	評価に用いるネットワーク及び交通需要	87
4.8	簡易ネットワークにおけるバス路線最適化結果	89
4.9	車両 1 台目のバス路線に対応するリンク別交通需要	90
4.10	サンプル数-目的関数値の感度分析	91
4.11	サンプル数-計算時間 (sec) の感度分析	91
4.12	抽出率-目的関数値の感度分析	91
4.13	抽出率-計算時間 (sec) の感度分析	91
4.14	路線図：震災前（2010 年時点）	94
4.15	路線図：集中復興期前半（2012 年 10 月時点）	95
4.16	路線図：集中復興期前半（2013 年 4 月時点）	96
4.17	路線図：集中復興期後半（2014 年 4 月時点）	97
4.18	路線図：集中復興期後半（2015 年 6 月時点）	98

4.19	路線図：復興・創生期（2016年6月時点）	99
4.20	路線図：復興・創生期（2017年7月時点）	100
4.21	ゾーニング図	102
4.22	震災前（2005年）ゾーン別発生交通量分布	105
4.23	震災後（2012年）ゾーン別発生交通量分布	105
4.24	将来（2030年）ゾーン別発生交通量分布	105
4.25	震災前（2005年）ネットワーク図	107
4.26	震災後（2012年）ネットワーク図	107
4.27	将来（2030年）ネットワーク図	107
4.28	震災前（2005年）路線図及び実路線ネットワーク	110
4.29	震災後（2012年）路線図及び実路線ネットワーク	111
4.30	将来（2030年）路線図	112
5.1	既往の路線ポテンシャルと本研究における需要顕在化率の評価イメージ	115
5.2	1入力2出力型DEAの効率性計測イメージ	117
5.3	D効率値に基づく潜在需要の算出イメージ	117
5.4	陸前高田市内のバス路線図	122
5.5	分析対象エリア及びゾーニング	123
5.6	需要予測における分析ゾーニング	129
5.7	発地ベース公共交通トリップの将来予測結果	129
5.8	D効率値及び優位集合算出結果のプロット（ケース1：現況）	130
5.9	優位集合所属地区の位置図	132
5.10	各地区における優位集合所属地区の違いを踏まえた潜在需要量の分布	134
5.11	平均利用者数の増加率と潜在需要量の関係性	135
5.12	Malmquist指数による効率性の表現イメージ	135
5.13	CU指数・FS指数の値による算出結果の解釈	137
5.14	D効率値及び優位集合算出結果のプロット（ケース2-1：ダイヤ改正及び増便）	138
5.15	D効率値及び優位集合算出結果のプロット（ケース2-2：当日予約）	138
5.16	施策実施に伴うCU指数・FS指数の算出結果（ケース2-1：ダイヤ改正及び増便）	141
5.17	施策実施に伴うCU指数・FS指数の算出結果（ケース2-2：当日予約）	141
5.18	D効率値及び優位集合算出結果のプロット（ケース3：将来趨勢）	144
5.19	施策実施に伴うCU指数・FS指の算出結果（ケース3：将来趨勢）	146
6.1	地域社会全体における本研究が取扱う領域	154
6.2	路線間競争を表現した二段階最適化問題の設定イメージ	157

表目次

1.1	被災地復興における規範的技法の適用イメージ（陸前高田市を例に）	10
2.1	交通行動の記述方法の違い	29
2.2	BDD ファミリーの適用が想定される問題	32
2.3	取扱い対象から見た本研究の対象と各章の位置づけ	37
3.1	ハミルトン経路が成立しない条件	44
3.2	FBS による取扱いデータ量の圧縮	44
3.3	FBS による ZDD 構築アルゴリズム	45
3.4	分析ケース別経路列挙数	47
3.5	グリッド数 $n = 12$ までの経路列挙数と計算時間	48
3.6	各ノード追加時の所要時間統計量	52
3.7	割り当て列挙数	54
3.8	「おいでみんなのバス」実験概要	64
3.9	運転手割り付け問題計算結果	67
3.10	経路列挙計算結果	69
4.1	FBS による ZDD 構築アルゴリズム（再掲）	84
4.2	簡易ネットワークにおける推計結果	88
4.3	陸前高田市におけるバス路線網の変遷概要	93
4.4	震災前～震災復興前期～復興・創生期にかけての路線別運行内容の変遷	101
4.5	陸前高田市バス OD 表（震災前-震災後-将来）	104
4.6	陸前高田市における推計結果	108
5.1	DEA の入出力変数	125
5.2	入出力変数の基本的統計指標	125
5.3	各ケースにおけるパラメータ α （需要顕在化率）の設定	127
5.4	交通機関選択モデルのパラメータ推定結果	128
5.5	D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 1：現況）	131
5.6	優位集合所属地区における入出力変数の値	131
5.7	D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便）	139
5.8	D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 2-2：当日予約）	140
5.9	施策実施に伴う CU 指数・FS 指数の算出結果（ケース 2：サービス改変）	142

5.10	D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 3：将来趨勢）	143
5.11	施策実施に伴う CU 指数・FS 指数・Malmquist 指数の算出結果（ケース 3：将来趨勢）	145
A.1	将来 OD 表作成における根拠資料一覧	161
A.2	各地区における自動車分担率	162

第 1 章

序論

1.1 地域公共交通の維持・確保・改善に向けて

1.1.1 都市縮退局面における「移動」

本稿を執筆するに当たり、まずは 2011 年 3 月 11 日に発生したわが国未曾有の大災害である東日本大震災について触れたい。その時まで、誰もが自分たちの元に当然のごとく存在していると信じて疑わなかった住民の生活基盤を同災害は根底から覆し、「安心して暮らすことができる」ということの価値を改めて我々の心に深く刻み込んだ。本稿を執筆している 2017 年現在、東北の沿岸地域においては防災集合移転事業による高台への移転、災害公営住宅での新しい生活の開始、浸水区域の嵩上げによる中心市街地の形成が進んでおり、復興庁が定めた「復興・創生期間」の終了予定年である 2020 年度をひとつの目標として復興事業の完成に向け日々現場は動いている。

東日本大震災の被災の最も大きな特徴は、都市縮退局面における持続可能な都市構造の構築が復興において重要な課題となっている点にある。東日本大震災の被害が甚大であった岩手県、宮城県、福島県の人口密度は 1km^2 当たり 157 人であり、これは全国平均である $341\text{人}/\text{km}^2$ と比較しても低く、更に震災前の 2005 年～2010 年にかけて 2.2% の人口減少を記録していた。つまり、もともと人口密度が低くかつ人口減少に苦しんでいる中で震災という更なる試練が襲ったという状況にある。

阪神・淡路大震災のように、都市部かつ都市の成長局面での被災であれば、インフラ整備が進むにつれて住民が徐々に戻ってくるとともに、第三次産業を中心に産業も復興しやすいと言われている¹⁶⁴⁾。一方で、東日本大震災の被災地のような地域は、震災前から社会経済的な面で問題を抱えていた状況であり、そのような地域では社会資本の整備が復興に直結しない。より具体的に述べると、これまでの成長局面での災害であれば、都市部であれば、空間だけを復興しておけば人が住まい、産業が埋まっていくことになり、農山漁村であれば、そこに都市部で稼いだ税を多めに配分することで、元通りの空間にすることができた⁷⁹⁾。しかし都市縮退局面においてはそのような復興のあり方は期待できず、各集落の需要が縮小する中で、今後どのように人々の生活環境を整え、いかに地域の活力を減らすことなく復興を遂げるかという点が最大の関心時となる。このような縮退局面における復興の留意点に関しては、浜口 (2013)¹⁵¹⁾ が「創造的復興」というキーワードをもとに整理しており、震災によって破壊されてしまった社会資本の再建に当たっては、人口減少、高齢化・少子化という長期趨勢のもとでは、原状回復を基準とすると過剰な社会資本を作り出してしまふことになりかねず、ある程度集約化する必要があることを述べる一方で、その実現の難しさについても指摘している。

一方で、このような事態は何も被災地だけに限ったことではない。世界に先駆けて超高齢社会を迎える

日本において、特に地方部の需要が疎な地域における高齢化・過疎化は極めて深刻である。近年では、過疎地域における限界集落の問題が表面化し、更には都市部・都市近郊部においても将来的に消滅へと向かう可能性がある¹¹⁾とされる。各地域において離散的に存在する集落がそれぞれ縮退し、場合によっては集落の積極的撤退としての集落移転の可能性も検討されている中で、いかに生活の基盤を維持していくかという視点は、今後全国的に重要となると言えよう。山崎(2014)¹⁷⁹⁾が指摘するとおり、被災地は近い将来全国で発生するであろう集落の自然消滅が、仮設住宅への集団移転という形で、極めて短期間で発生したと言える。そして集落移転によって大きく変動した需要分布に対する生活の基盤整備のフォローについても、同じく今後過疎地域で生じる課題を先取りした状態と言え、被災地における持続可能な生活基盤の維持の検討は、他地域への展開における汎用性を有していると考えられる。

都市の縮退に伴う需要の縮小と財政面での制約等により、住民の生活を維持するためのサービスについても縮小せざるを得ないという判断を下す地方公共団体は全国でも数多く見られる。一方で、人々が健康で文化的な生活を営むためには、医療サービスや買い物サービスを始め、様々なサービスの享受が必要である⁹⁸⁾。持続可能な都市構造を構築し、生活の利便性を保ちながら生活できる環境を整えることは、社会基盤の言わば使命であり、地方や過疎地域における地域公共交通サービスは、人々の生活を保護するためのひとつの社会インフラとして位置づけられる。つまり、需要の規模と分布に即し、かつ関係者全員にとって持続可能な地域公共交通を適切に計画することは、都市を健やかな状態で維持させることと同意であると言えよう。

1.1.2 地域公共交通の計画手法

地域公共交通の計画における視点には、様々な切り口が存在する。車両や結節点そのものを設計する工学的視点や、政策を導き評価する経済学的視点等も地域公共交通の計画の視点のひとつであるが、公的セクターが主導し、公共施策として地域公共交通を計画する際には、もう少し実務的な視点に基づき、地域公共交通のコスト低減や利用者の最大化等、将来の明確な目標を実現するための具体計画を導く、経営科学的なアプローチを採ることが多いとされる¹⁰⁴⁾。

経営科学的な視点に立ち、最適な計画を立て行動するためには、あらかじめできるだけ正確に将来を予測する必要がある。一般的に、予測技法は図 1.1 に示すとおり、探索的予測技法と規範的予測技法に分類できる。前者は、現在の技術的基盤に基づいて、現在までの傾向から過去の延長線上で将来の変化を予測推定するものであり、分析的な傾向が強い。後者は、技術・環境・社会等の要請、かつ未来の技術目標を規範とし、未来から現在を招くための技術のキーや問題点を割り付けていく手法であり、計画的な傾向が強い。先に述べた経営科学的なアプローチは、あらかじめ明確な目標を設定し、目標を実現するための方向性を探ることから、規範的予測技法に該当する。

地域公共交通については、現況のサービス内容が必ずしも合理的な計画に基づいていない。むしろ、これまでの社会的背景を鑑みると、交通事業者任せで需要追従的に成長を続けている傾向があり、現状のサービスを前提とした部分的な手直しや対症療法的な改正が適当でないケースも多い。このような状況のもとでは、現状の自然的状態の延長を知ろうとする探索的接近（どうなるかの予測）ではなく、先に何らかの目標を設定し、これを達成するための必要条件を探る規範的接近（どうするかの予測）をもとに議論しないことには、抜本的な改善が図られない。また、森津(1984)¹⁷³⁾が指摘するように、地域公共交通ネットワークの構成要素に関する計画を行う際には、単に個々の部分の計画として考えるのではなく、ネットワーク全体の評価を行う計画として扱うことが必要であり、規範的状态の設定に当たっては、客観的な基準を設け、それを最適にする解を求める問題を考えなければならない。

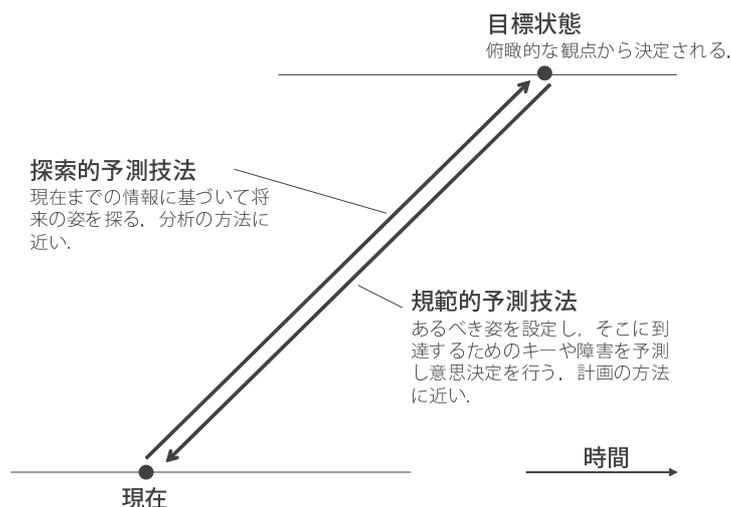


図 1.1 探索的予測技法と規範的予測技法 (三浦・浜岡 (1991)¹⁶³⁾ を参考に作成)

しかしながら、現在公表されている各地の地域公共交通に関する再編計画等を概観すると、現況のネットワーク条件を基本とし、利用者数が低迷、もしくは収支比率が悪い路線を統廃合する等、規範的状态の設定が局所最適もしくはアドホックな設定となっているケースが多く見受けられる。また、国土交通省が平成 28 年に公表した「地方路線バス事業の経営ビジネスモデル実施マニュアル」¹¹⁴⁾ についても、ビッグデータを活用したバス路線の効率的な再編手法の提案がなされているが、ここで紹介されている手法についても、基本的には現行のバス路線をベースに停留所やルート、運行頻度等を見直す方法であり、作成した計画案が最良の計画であるという保証がない。このような考え方は、現況のネットワークが理想的な状態に近く、かつ将来にわたって都市構造や社会情勢が大きく変化しない条件のもとでは適当である可能性もあるが、抜本的な再編計画が必要とされる地域においては不向きであることもある。

図 1.2 は探索的・規範的視点から予測技法を体系的にまとめたものである。なお、これらの分類は絶対的なものではなく、多くは両者の性質を備えている点に留意されたい。規範的予測技法の中で、経営、ロジスティクス、公共交通の問題等、最も実際によく用いられる方法が、後に詳述する数理計画を用いたモデル化である。これは、問題のある評価基準から見て「最も望ましい状態」を求める数学的問題に定式化するものである。つまり、朝倉 (1988, 1993)^{83, 84)} が指摘するとおり、交通システムにおいて最適化問題を用いる意義は、「特定の制約条件のもとで、ある与えられた評価基準から見て最も理想化した状態を表現し、これをひとつの規範として検討する」点にある。

1.1.3 交通モード別の計画課題

地域公共交通の計画に当たっては、図 1.3 に示すように、検討対象エリアの輸送密度に応じた交通モードを検討する必要がある。鉄道やバスといった路線定期運行型のサービスは、数千人/時間以上の輸送需要に対応しており、地域内における基幹的なモードとして位置づけられる。これらの交通モードは需要を集約して輸送するゾーンレベルの輸送サービスであり、できるだけ多くの需要を効率的に束ねるためのネットワーク計画の検討が必要とされる。ネットワーク計画に関する分析手法は集計的なもの・非集計的なもの両者が考えられるが、最終的にはゾーンレベルで需要を集約し、最適化問題等を用いることにより最適なバス路線網を求解する手法を採ることが多い。

一方、近年では都市の縮退局面における持続可能なひとつの公共交通の運営方法として、需要応答型の

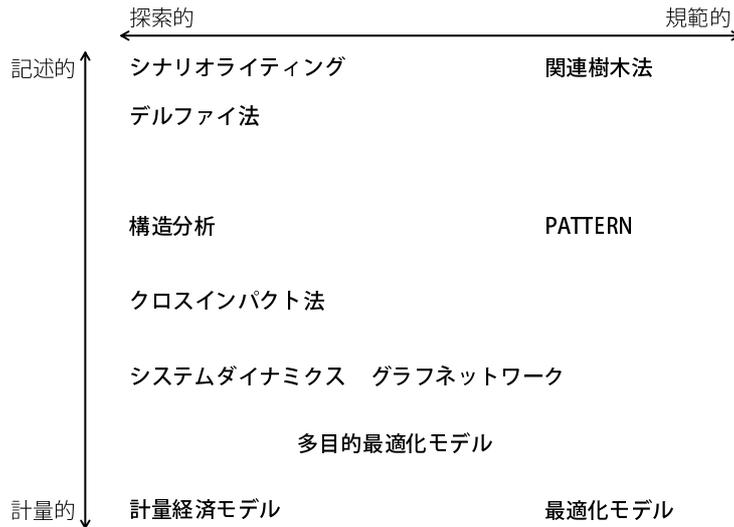


図 1.2 予測手法の分類 (茅・森 (1985)¹⁰⁴⁾ を参考に作成)

公共交通サービス，いわゆる「デマンド交通」の導入がこれまでに拡大してきている。デマンド交通は路線バス等の路線定期運行では経営が成り立たない輸送密度の低い地区を中心に導入が進められており，特定の路線を設定することなく，個々の需要に対応して運行戦略を検討する点が特徴である。つまり，個々の需要発生パターンに応じて運転手や運行経路を設定する個人レベルの輸送サービスと位置づけることができる。

これらの分析アプローチは対象とするエリアの移動特性によって異なる。ただし，少なくとも地域公共交通の検討に際しては，このように輸送密度と交通モードの関係性を鑑み，対象モードの輸送単位をゾーンレベルで捉えるべきか，個人レベルで捉えるべきかをまずは見極める必要がある点に変わりはない。

また，地域公共交通の計画は，計画内容が陳腐化しないよう，需要分布やネットワークの変動に応じて逐次再編を検討する必要があるが，ゾーンレベルの輸送手段については，まちの姿に合わせた再編（概ね5～10年スパンでの見直し）が，個人レベルの輸送手段については，便ごとのニーズに合わせた再編が必要とされている。つまり，両者とも逐次再編が必要であるが，再編を取扱う時間的なスケールが両者で異なる点にも留意が必要である。以上を踏まえ，以降に路線定期運行とデマンド交通それぞれの検討における課題について概説する。

(1) 路線定期運行のネットワークの検討における課題

高山ら (2001)¹²⁹⁾ が指摘するように，高齢化・福祉社会の到来を契機に，公共交通はこれまでの量的拡大から人々の多様なモビリティに対応すべく，質的充実とその要求性能がシフトしている。このような社会的要求に応える形で，これまで民間の交通事業者を中心に検討されてきたバス等の公共交通のネットワーク計画について，近年はこの枠組みを見直し，地域の総合行政を担う地方公共団体が中心となって，地域戦略の一環として持続可能なネットワークの形成を進めることが奨励されている。

このような中，「地域公共交通の活性化及び再生に関する法律」の改正が2014年11月20日に施行され，各地方公共団体において地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画の策定が可能となった。両計画は，地域公共交通ネットワーク全体を一体的に形づくり，持続させることを目的として，地域全体の公共交通のあり方，交通事業者・行政・住民それぞれの役割を定めるものである。具体的には，公共交通ネットワークを「リンク（路線）」，「ノード（交通結節点）」の集合として捉え，地域の移動特性や

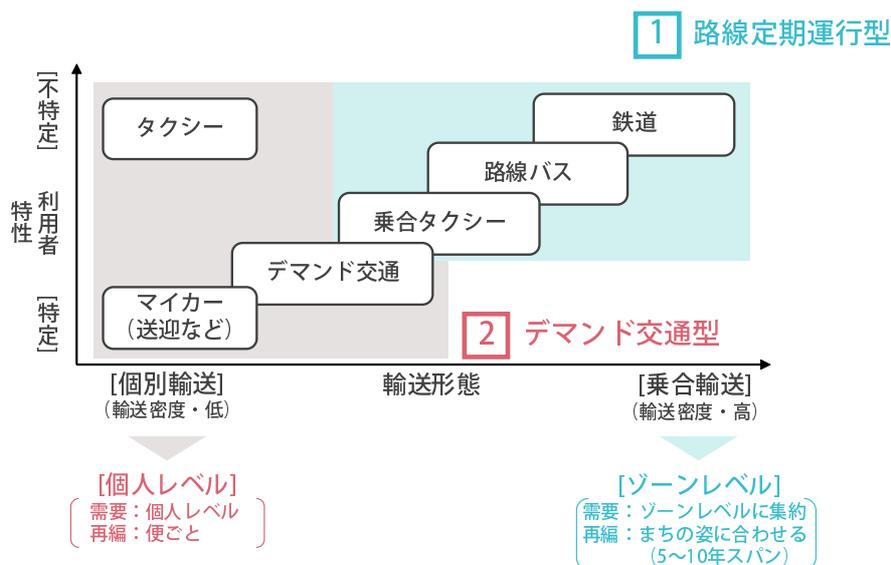


図 1.3 輸送密度と交通モードの関係性

ニーズと現在の公共交通ネットワークを照らし合わせ、望ましいネットワークのあり方、ルートやダイヤ、運賃体系、車両、事業スキーム等の具体的なサービス内容を定めた計画策定が求められる¹¹²⁾。

一方で、藤原(2007)¹⁶⁰⁾が指摘するように、地域公共交通の活性化に取り組むに当たって、公共交通事業の主たる関係者である交通事業者・行政・住民の3者はそれぞれ以下の課題を抱えている。まず、公共交通の担い手となる交通事業者は、経営状況が厳しい中、より効率的・効果的な公共交通サービスの模索が求められるが、その一方で利用者の利便性も確保維持すべき重要な要因であり、両者のバランスに配慮したサービスのあり方を検討する必要がある。行政については、上述の通り近年では公共交通の計画者としての役割が求められているが、公共交通の専任スタッフを擁していない地方公共団体も多く、計画策定や運営に係るノウハウの蓄積が十分でなく、適切な輸送計画策定が難しいことが多い。また、住民については、利用しやすい公共交通を要望するものの、実際の行動にはそれらが反映されず、利用が進まないことが多く、需要の顕在化の面で課題がある。

しかしながら、地域公共交通の計画に関しては、それぞれの地域の置かれた状況や抱える課題が千差万別であることに加え、行政担当者や交通事業者の能力や事情も様々であることから、このような課題に対する処方箋としての計画方針や分析手法をオーソライズすることが難しい。また、既往研究の中では最適化問題による規範的予測技法に基づく計画策定手法が提案されているが、定式化や解法アルゴリズムにおける試行錯誤が続いており、我が国において、実務ベースで活用されるまでには至っていない（既往研究については第2章にて詳述）。そのため、これまでの地域公共交通計画は各地区の創意工夫に依存する形で作成されてきたが、目先の問題にのみ着目し中長期的な視点を欠いた対症療法的な計画や、地域公共交通全体ないしまちづくり全体での視点が欠けている計画が散見されている実情があるのも事実である¹³⁴⁾。

地域公共交通に関する取り組みは本来、事業ごとに局所最適化を測るのではなく、ネットワーク全体から俯瞰的に行うことが望ましいと言え、国土交通省でも、前述の地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画という2つの計画の策定により、地域公共交通をネットワーク全体で最適化する施策の推進を支援している。しかしながら、その計画策定における方法論については未だ明確な手法が確立されていない状態にある。そのため多くの地域において、行政や交通事業者による経験と勘の中で多くの意思決

定がなされている状況にある。これらの経験や勘による計画・運営のブラッシュアップは定性的・感覚的なものではあるものの、強力なツールであり、数理計画問題等を用いた机上計算では取扱うことが難しい、地域や交通事業者の雰囲気、人間関係、個々の細やかなニーズ等を包含した計画を策定することが可能であるというメリットがある。しかしながら、これらの経験と勘に完全に依存して計画や運営が決まってしまうと、サービスの評価がアドホックなものになることが懸念され、利用者にとっての利便性の確保と事業の持続可能性が両立しない状況に陥る危険性を孕んでいる。このような状況に対し、谷島(2009)¹⁷⁸⁾は交通事業者の立場から、運行実態や利用者ニーズをデータとして把握し、そのデータに基づいた理論的なバックボーンのもとでの公共交通のネットワーク計画・運営計画の立案の重要性を論じている。

(2) デマンド交通の運行支援における課題

デマンド交通は、ドアツードアの利便性が高い点と、当時需要が疎な地域における路線定期運行で問題となっていた「空気を運ぶバス＝客が乗っていないのに走っているバス」という状態を省くことができる点が強みであり、わが国においては、1972年に大阪府豊能郡能勢町で初めて導入され、1980年代にかけて栃木県の鬼怒川温泉や、東京都世田谷区の駒沢・深沢地区等でも運行を開始した。当時は今ほどIT技術が発達していない時代であったため、利用に当たっては電話で予約をし、それをオペレータが受け、複数の予約を調整して運行経路を作るのもオペレータが対応するという非IT型のオペレーションを行っていた¹²⁴⁾。そのため、利用者が多い時等は十分な対応ができず、運行も遅れることがあり、このような時間信頼性の問題やオペレータの作業負担の大きさ、人件費の問題等により、多くのデマンド交通事例において事業からの撤退が相次いだ。

しかしながら2000年以降、道路運送法改正(2006年)やIT技術の進展、効率性の高い公共交通サービスに対する社会的ニーズ等に応ずる形で、デマンド交通が再び着目されるようになった。2000年代前半に高知県中村市や福島県南相馬市等で導入が進み、その後全国的に事業の展開が進んでいることは周知の通りである。なお、残念なことに導入事例の中には、戦略なき流行現象としてデマンド交通の導入を行っている事例も少なからず存在しているが¹⁷¹⁾、少ない需要を効率的に輸送し、かつ路線定期運行と比較して決め細やかなサービスを実現する乗り物として、住民の生活を維持する上での一定の効果を発揮していることは紛れもない事実である。その一方で、デマンド交通についても、担い手となる交通事業者及び運転手の不足というオペレーション側のリソースが不足しているという課題は、他の地域公共交通機関と同様に深刻であり、全国の行政・交通事業者といったデマンド交通の供給者は、限られた人員・予算の中で、いかに効率的に多くの移動ニーズを充足させるかという課題に対し、日々の運行において対応が求められている。

デマンド交通のうち、路線を設定せず区域運行を行う運行態様については、まちの構造の変化に対しフレキシブルな移動手段の提供が可能になるというメリットがある。その特徴を生かし、近年では、被災地における復興を支援する交通まちづくりの一環としても導入される例があり、例えば岩手県釜石市¹¹⁹⁾や陸前高田市¹⁸⁵⁾では、復興により変わりゆく施設配置やネットワーク条件に柔軟に対応すべく、デマンド交通の導入による生活交通の確保を試みている。これらの事例は、いずれも被災した地元タクシー事業者が担い手となっており、人員・車両とも余裕がない中、行政との積極的な連携のもとで事業を継続しており、市民の活動を足元から支援している。

しかし、被災地に限らず地域公共交通を取り巻く人材不足は深刻であり、交通事業者の協力が得られる地域であればまだ条件は恵まれていると言え、全国を見渡すと公共交通の担い手が見つからない地域や、担い手が撤退してしまう地域も近年では増えているのが実態である。このような地域の中には、交通事業者による事業モデルを諦め、NPO等による公共交通空白地有償運送や、住民主体でのボランティア運

行という形態を採って地域公共交通の維持確保を図っている例もある（例えば、飯南町¹⁰³⁾、福井市¹⁰⁶⁾等）。東日本大震災の復旧段階においても、日ごろからの地域のコミュニティが密で、世帯内だけでなく世帯間での送迎活動等も活発であった地域では、仮設住宅の住民同士でのカーシェアリング¹⁴⁹⁾や避難所におけるボランティア運行¹¹³⁾等、自助・共助による移動の確保が早期に行われた実績がある。

デマンド交通や協働型交通等の需要応答型交通の運用に当たっては、運営体制の若干の違いはあれ、多くの地域において運営者側のオペレーションの負担と経費を低減しつつ、利用者ひとりひとりの移動機会を維持するという考え方が重視されている。交通事業者や行政の公共交通担当者は、上記の問題意識のもと適切な移動サービスを評価し、時間をかけず効率的に代替案を絞り込む必要があるが、そのようなノウハウがある運営主体は全国的にも少ない。そのため、運営者個々の能力に大きく依存することなく、データから適切な運行計画を検討するための支援ツールが必要となる。

デマンド交通の運行においては、既に NTT 東日本や東京大学等により IT 活用型の予約・配車システムが開発されており、予約者の自宅、目的等の一連の情報をオペレーションセンターと車両間の無線通信を利用してドライバーへ提供することが可能である。このような IT 活用型のデマンド交通システムは全国的に展開されており、特に、ある程度需要が密であり、タクシー無線や電話・FAX 等に依存したアナログでの予約管理が困難となる地区のデマンド交通運行において導入されている（例えば、福島県南相馬市小高区¹⁰¹⁾、三重県玉城町¹⁸²⁾等）。これらの予約・配車システムの仕様は、開発者によって若干の違いはあれ、基本的に DEAP (Dial-a-Ride Problem) 等の最適化問題をベースに、所与の需要分布とネットワーク条件下で運行コスト（距離、時間等）を最小化する経路を提案する、言わば規範的予測技法に基づいたソリューションを提案するものと言える。

また、デマンド交通に限定するものではないが、運行における意思決定を支援するツールの例として、国土交通省中国運輸局、広島大学、経済界は、地域におけるコミュニティバス計画支援シミュレーションシステム (ComPASS: Community-bus Planning Aid Simulation System) と市町村バス運行管理支援ソフト (ComMASS: Community-bus Management Aid and Support System) という2つのシステムを開発し、一般利用のためにパッケージ化し、地方公共団体に無償配布している¹⁵⁹⁾。このうち、ComMASS については、設定したバス路線計画をインプット要件として、バスダイヤの作成や車両の管理、運転者の勤務時間管理を行うことができるシステムである。

このような科学的な手法を援用した運行経路等の意思決定ツールの重要性は各所にて指摘されている。一方、デマンド交通のような個人レベルでの輸送計画を検討する上で最も大きなネックとなっているのは、散らばって存在している全利用者について、需要を集約することなく、個々のニーズに合致した運行計画を便ごとに逐次作成する必要があるという点にある。このとき、利用者それぞれに制約条件が掛かることになり、かつその制約条件が便ごとに異なるため、複雑な計算をより短時間で処理することが主たるテーマとなる。しかしながら既往の最適化問題に基づくオペレーションではリアルタイム性に課題があることが確認されており、かつ、交通事業者の経験や勘では全ての制約に対してカバーしきれない問題も想定され、実務での活用が可能な操作性の高い意思決定支援ツールの開発が必要とされている。

1.1.4 地域公共交通に関する政策判断における課題

地域公共交通については、需要が疎な地方部を中心に、運営がビジネスとして成立していない地域が多く、そのような地域では公的セクターからの補助により運営が行われることになる。地域公共交通の計画検討や事業運営に公的支援が入る場合、他の公共事業と同様に、その事業が実施目的と照らし合わせて効果的・効率的なものであることを事業評価により示し、社会的合意を得る必要がある。また、先に紹介し

た路線バスのネットワーク形成やデマンド交通の導入だけでなく、その他需要喚起施策等のソフト施策も含め、施策実施に係る公的セクターの支出額を天井知らずとすることはできないため、事業評価結果を踏まえ、適切な支出額を設定する必要がある。

公的負担の適切な支出額を算出・管理する手法としては、これまでに限界依存人口に基づく方法（停留所勢力圏人口等）や路線ポテンシャルに基づく方法等が提案されている¹⁴²⁾。また、先に紹介した中国運輸局の ComPASS¹⁵⁹⁾ はバス路線整備に伴う採算性や生活の質の変化を予測することが可能であり、各地域の公共交通担当者が効率的に代替案を絞り込むことが可能である。

政策判断においては、本来対症療法的な対応ではなく、予防的な対応、つまりは理想的なまちづくりを誘導するための政策実施が求められることになり、ここでも規範的予測技法による理想的な将来像を明確にした上での判断が必要とされることになる。しかしながら、そのような評価手法は未だ確立されていない状況にあり、各地域において地域の実情に応じて試行錯誤の中で評価がなされているのが実態である。実務での運用可能性を鑑みると、この評価手法は、現場の事情を踏まえた、説明力があり、操作性の高い手法である必要がある。また、予算制約の中で政策の重点化を戦略的に進めるためには、トップダウン型の規範的な意思決定が必要とされているが、既往手法に関しては、これらの要件を全て満たす手法とはなっていない。

1.1.5 被災地復興における規範的予測技法の適用意義

以上で整理した地域公共交通に関する課題解決を検討することは、被災地における復興交通計画を検討する上でも有意義であると考えられる。上でも触れたとおり、被災地で発生している需要やネットワーク構造の急激な変化は、被災地以外の地域において今後5年、10年かけて発生する変化の縮図と位置づけられるため、東北運輸局の調査結果¹¹⁵⁾でも述べられているが、基本的には課題解決のアプローチは被災地・被災地外で異なることはなく、最適化問題等を活用した規範的予測技法の適用は汎用的な手法であると言える。一方で、環境変化が目まぐるしく変わるということは、現地で取得できるデータが短期間のものであっても、逐次再編のケーススタディが可能であるということの意味しており、被災地復興の場面は逐次再編のケーススタディ対象として適当であるという性格も有している。

また、表1.1に災害発生後の各段階における交通課題を整理しているが、被災地特有の交通課題に関しても、上述した「ネットワーク検討」、「運行支援」、「政策判断」の各要素技術の適用により求解できる課題が多いことがわかる。また、被災地復興においては、都市が破壊された状態からの復興計画が必要とされ、かつ、生活を取り巻く外部環境が大きく変化することになる。森津(1984)¹⁷³⁾が指摘するように、新たな地域に交通網を作るような場合には、代替案になり得る解が多数存在することになり、少数の代替案を決めることが困難であることがある。このような状況においては、各段階の検討を最適化問題として整理し、数理計画手法を適用することが重要である。すなわち、客観的な基準を設け、それを最適にする解を求める問題を考える必要があることから、被災地以外の地域と比較しても、規範的状态の設定と規範状態に向けたアプローチの提示に対する必要性が高いと言えよう。

なお、東日本大震災のように被害が甚大であり、復興期間が5年、10年を超える場合、まちの完成形を想定した地域公共交通の再編はもちろん重要であるが、暫定的な土地利用条件のもとでの地域公共交通の整備が短期的には必要となる。そのため、図1.4に示すように、最終的な規範状態はまちの完成形を想定しつつも、復興段階に応じた規範状態を逐次的に設定・更新し、短期的なモビリティ支援計画を構築するとともに、その内容が最終的な目標状態と大きく乖離していないかどうかをモニタリングしつつ施策を展開することが重要となる。一方で、復興事業の動向によっては、最終的な目標自体が当初の予定から大き

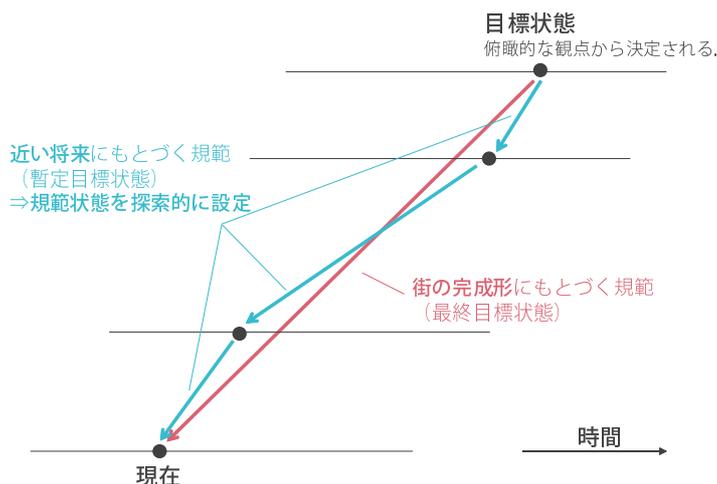


図 1.4 探索的予測技法と規範的予測技法 (三浦・浜岡 (1991)¹⁶³) を参考に作成)

く変化することもあり得ることから、規範状態の逐次的な更新結果を踏まえた

また、短期的なスパンでの逐次再編を繰り返すことは、再編そのものの経験の蓄積にも繋がることから、復興後のまちの変遷に合わせた地域公共交通の計画・運営においても有意義であると言える。

ここで、被災後のモビリティ確保に関しては、災害時特有の対応が多い緊急・応急期及び復旧期と、平常時の取り組みと考え方が近い復興期という特徴を踏まえた対策を検討することが重要となる。前者に関しては、発災後の時間的な猶予が少なく、緊急的な輸送や臨時交通サービスの提供といった、イレギュラーかつリアルタイム性の高い対応が求められる。特に、牧野 (2011)¹⁶² が指摘するように、バスをはじめとする地域公共交通を、地域におけるインフラと捉えるのであれば、このような緊急時の判断は交通事業者任せにするのではなく、地域の課題として関係者全員で適切に検討する必要がある。後者に関しては、発災後の時間的な猶予があり、また、まちづくりとの連携等、平常時の取り組みと考え方が近いという特徴がある。

よって、復旧期までの期間においては、災害後の混乱期に関係者全員が適切かつ円滑に対応をとることができるよう、また復興期以降については、まちの将来像に整合した地域公共交通の復興を推進できるよう、事前復興計画として備える必要がある。また、災害発生後については、事前復興計画に基づいて対応するだけでなく、想定シナリオとの乖離が生じた場合には再度ブラッシュアップを図る使い方も想定される。

表 1.1 被災地復興における規範的技法の適用イメージ（陸前高田市を例に）

段階	移動手段	交通課題※（）内は本研究テーマとの連携
緊急・応急期（～1ヶ月）	<ul style="list-style-type: none"> 入浴バス 買物・通院バス等 	<p>緊急輸送及び最低限の生活のために必要な移動手段の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> 広域幹線の啓開（ネットワーク計画） 鉄道代替バスの運行（ネットワーク計画，運行支援） 特定目的バスの運行（ネットワーク計画，運行支援） 共助型交通による移動（ネットワーク計画，運行支援）
復旧期（～6ヶ月）	<ul style="list-style-type: none"> 仮設巡回バス等 	<p>日常生活の再開に合わせた移動手段の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> 仮設住宅を巡る移動支援（ネットワーク計画，運行支援） 道路の復旧・仮設店舗建設に伴う運行ルート変更（ネットワーク計画，運行支援）
集中復興期（～5年）	<ul style="list-style-type: none"> BRT 路線バス・乗合タクシー デマンド交通等 	<p>仮設住宅における生活交通の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> 建設・撤退が同時発生中の公共交通サービス見直し（ネットワーク計画） 道路の新設・通行止に合わせた運行ルート変更（ネットワーク計画，運行支援） 柔軟なサービス変更が可能なドアツードア型デマンド交通の導入（運行支援） 将来の交通サービス水準を想定した交通まちづくりの基本コンセプトの立案（政策判断）
復興・創生期（～10年）	<ul style="list-style-type: none"> BRT 路線バス・乗合タクシー デマンド交通等 	<p>まちの完成形を見据え，活力あるまちづくりを支援する生活交通の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> まちの完成形を見越した網形成計画の立案（ネットワーク計画） 持続可能なサービス水準の検討（再編及び縮退）（ネットワーク計画，運行支援） 地域全体の均衡ある発展のための施策の重点化（政策判断）

1.2 本研究のねらい

本章ではここまで、地域公共交通の計画・運営・政策判断というそれぞれの段階において、規範的予測結果に基づく検討が重要であるという立場から、理想的な将来像を提示し、仮説設定や議論の補助線を整理することの重要性を述べてきた。しかしながら、地域公共交通の実務の現場においては、行政担当者や交通事業者、コンサルタント等の検討の拠り所となる規範的予測技法は未だ確立されておらず、また、研究ベースで開発されている最適化問題を援用した規範的予測技法については、理解の難しさや金銭的・時間的コスト、社会受容性、精度等が障壁となり、実務ベースでの活用に至っていない、もしくは課題を抱えている状況にある。そのため、結局のところ、局所最適の考え方にとどまる規範状態の設定が行われていたり、現場の経験や勘に依存した検討が主となっていたりするのが現状であり、低コストで説明力・信頼性が確保されている規範的予測技法に基づく検討手法の確立が急務となっている。特に、被災地域においては、代替案になり得る施策が数多く、何らかの評価基準のもとで最適解を提示することの重要性が高いことに加え、時々刻々と変遷する社会環境に対応した意思決定が求められる場面が多いため、特に俯瞰的な視点に基づく規範的予測技法の導入必要性が高いと言える。

以上の問題意識を踏まえ、本研究では、需要変動が発生する条件下での公共交通サービスについて、地域全体の公共交通ネットワークをひとつのシステムとして捉え、俯瞰的な視点から、計画・運営・政策判断それぞれの段階における設計・実装手法を、規範的予測技法のフレームのもとで構築することを第一の課題として設定する。また、計算負荷の問題等から、これまでのネットワーク計画や運用管理施策に関する検討に当たっては、仮想ネットワークを用いて行われることが多かったが、本研究の趣旨を踏まえると、実規模のネットワークでの実装を前提とした分析モデル及びアルゴリズムの提案を行うことが重要であり、これを第二の課題として設定する。また、被災地の地域公共交通計画における規範的予測技法の重要性を鑑み、ケーススタディの対象として被災地復興の現場を選定する。

なお、本研究は行政担当者や交通事業者の経験や勘を否定するものではなく、議論の下地となる情報としての、規範的予測結果に基づいた議論の重要性を訴える位置づけであり、モデルが提供する「理論」と経験や勘を組み合わせる形でサービスを「実装」させるための具体的な手法の開発・適用を行うことを目的としている。

以上の課題認識を踏まえ、具体的に本研究では、

1. 利用者にとって利用しやすく、交通事業者の持続可能性に配慮したデマンド交通のオペレーション方法の提案
2. 需要変動下におけるバス路線ネットワーク計画の策定のためのモデル・アルゴリズムの提案
3. 公平性・効率性の観点から見た戦略的な交通施策実施のための判断基準の提案
4. 1から3の被災地復興をフィールドとした実装

について検討を行い、手法の整備に向けて知見と課題を明らかにすることを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は図 1.5 に示すように全 6 章で構成される。

第 1 章の序論に続いて、第 2 章では公共交通の設計と実装の基礎となる、公共交通に関する需要予測、供給側の機能計画それぞれの研究分野について、体系的に既往研究の整理を行う。また、これら需要・供

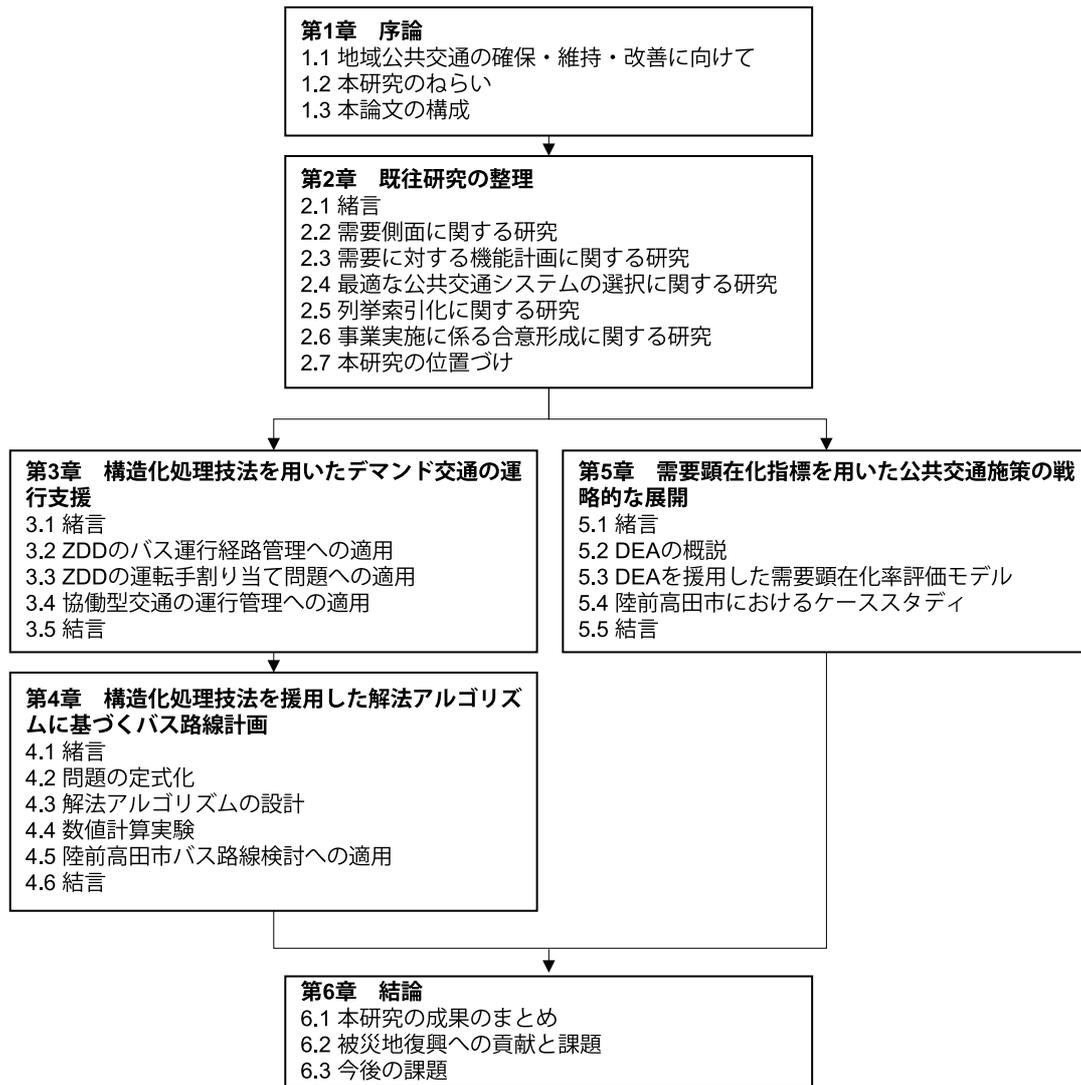


図 1.5 本論文の構成

給の両視点を組み合わせる形で地域公共交通計画を実装する手法として、近年活用が進んでいる二段階最適化問題に関する先行研究のレビューを重点的に行う。また、最適化手法と関連して、その解法アルゴリズムの概説と近年の技術開発動向の整理を行うとともに、最近の計算機性能の向上に伴い徐々に適用の幅が広がっている列挙索引化手法について、その概要と研究動向を整理する。加えて、交通計画者の立場から見た地域公共交通事業の実施可否における政策判断の意思決定の考え方について、「公平性」と「効率性」という2つの観点から整理を行い、政策判断のための理論モデルとして潜在需要評価手法を中心にレビューを行う。

第3章では、操作性の高いデマンド交通のオペレーションの検討を行うことを目的として、交通事業者のオペレーションにおける「運行経路の検討」と「運転手割り当て」の2つに着目し、両者について、列挙索引化手法によるオペレーションの適用可能性を検討する。具体的には、需要分布とネットワーク形状をグラフ構造により表現し、与えられたグラフ構造の中からある制約条件を満たすような部分グラフ構造を全て列挙し、それらを ZDD (Zero-Suppressed Binary Decision Diagram: ゼロサプレス型二分決定グラフ) により圧縮表現する構造化処理技法について提案する。また、ZDD によって得られた列挙解を用いることにより、地域コミュニティ内での各個人の交通行動が与える影響分析への適用可能性についても検

討を行う。

第4章では、バス路線のネットワーク計画の立案のため、需要分布と道路ネットワーク形状、交通事業者の制約を踏まえた地域公共交通のサービス設計問題について、二段階最適化問題により定式化する。また、その解法アルゴリズムとして、CE法(Cross-Entropy法)と上述のZDDの組み合わせ技法を提案する。更に、提案した手法を岩手県陸前高田市の震災前～震災後～将来の実ネットワークに適用することで実証分析を行い、震災を経て復興が進む中で需要分布及びネットワーク条件が大きく変遷する中での効率的・効果的な地域公共交通の設計と実装に対する有効性を示す。

第5章では、行政セクターにおける予算制約の中で、住民の合意形成を図りつつ円滑な公共交通施策を遂行するための方法論について検討する。具体的には、地域公共交通が有する「公平性」と「効率性」の両側面に着目し、公共交通サービスの導入に伴い、最も効率的に公平性の確保が得られる方法を選定するためのアプローチとして、各地区の公共交通需要の顕在化率をDEA(Data Envelopment Analysis: データ包絡分析)をもとに定量化する手法を提案する。また構築したモデルを実際の交通施策の検討シーンに適用し、今後の公共交通関連施策の具体的な実施方針に関する検討を行う。併せて、DEAとMalmquist指数を組み合わせることによる需要顕在化の時系列評価への拡張手法についても提案を行う。

最後に第6章で、本研究により得られた研究成果を総括し、今後の展望と課題について述べる。

第 2 章

既往研究の整理

2.1 緒言

本章では、公共交通の計画・運行・政策判断に関する既往研究の動向を体系的にレビューし、本研究の位置づけを示す。

Wirasinghe(2003)⁷⁴⁾ は公共交通の計画・運行段階の既往研究を整理した上で、全ての問題は以下の 4 つのサブ問題に帰着するとしている。

1. 運行に用いるモードもしくはモードの組合わせの選択問題（需要側面）
2. 現在及び将来の需要予測（需要側面）
3. 需要に対する機能計画（供給側面）
4. 1 から 3 を踏まえた最適な公共交通システムの選択（需要・供給両側面）

ここでは、まずは Wirasinghe が提案する 4 つのサブ問題の視点に基づき、まず 2.2 節では需要側面からの研究（上記項目 1 及び 2 に該当）のレビューを、次に 2.3 節では供給側面からの研究（上記項目 3 に該当）のレビューを行い、これまでの公共交通の計画問題の概観について整理する。更に、これら両側面から見た最適な公共交通システムの選択に関する研究（上記項目 4 に該当）に関しては、近年適用が広がっている二段階最適化問題の適用事例を中心に、その解法アルゴリズムとともに 2.4 節にて紹介する。また、最適化のための解法アルゴリズムと関連して、近年の計算機能力の向上に伴い技術開発と工学的応用が進んでいる全列挙索引化技術の動向について 2.5 節にて紹介する。

公共交通の政策判断の視点からの研究レビューに関しては、2.6 節において公共交通の持つ「公平性」と「効率性」の 2 つの性格を踏まえた公共交通サービスの展開に係る意思決定に関する研究動向を整理した上で、意思決定の際のひとつの基準としての潜在需要評価モデルの紹介を行う。以上の研究レビューの整理総括図については、図 2.1 に示す。

最後に、2.7 節にて既往研究を踏まえた本研究の位置づけを明確化する。

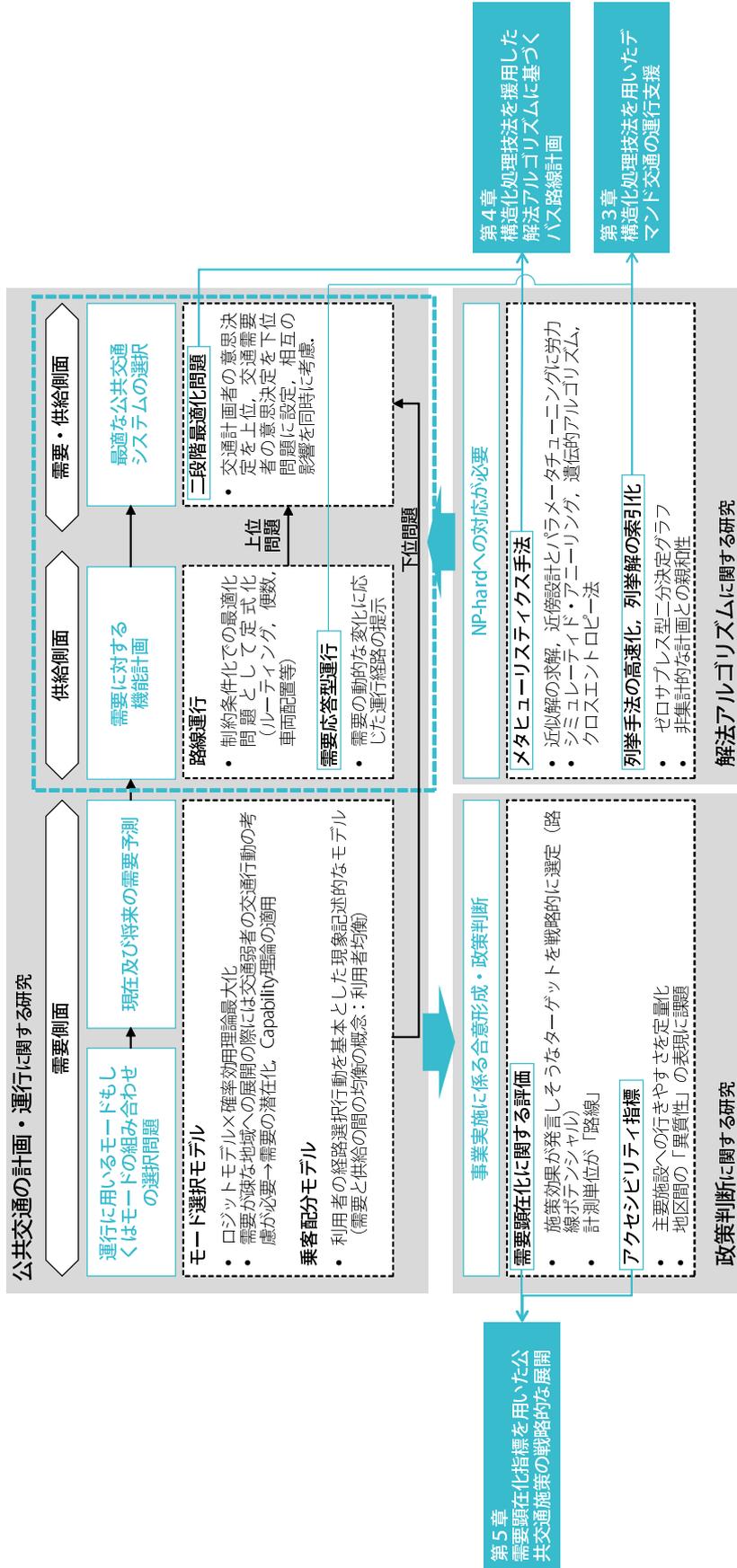


図 2.1 既往研究の整理総括図

2.2 需要側面に関する研究

2.2.1 モード選択問題

公共交通のモード選択，需要予測については，交通計画や政策の決定に当たって不可欠な要素であることから，これまでに非常に多くの既存研究の蓄積があるが，その中で最も実務上で伝統的に用いられてきたのが，四段階推定法である．この手法は，パーソントリップ調査と合わせて体系化された交通需要推計法であり，トリップチェーンから分解された個人のトリップをトリップ目的及び代表交通手段別にゾーンごとに集計し，発生集中，分布，手段選択，配分という4つの段階を順に経てモデル化を行う手法である．このうち，トリップのひとつの属性である代表交通手段を離散選択モデルによって表現する手段選択分析は，実務においても学術的研究においても最も頻繁に取り上げられたテーマである．中でもMcFadden(1974)⁵⁴⁾は，操作性の高いロジットモデルを個人の確率効用最大化理論と結びつけることにより理論を大きく発展させ，その後の多くの研究に影響を与えている．

本研究で取扱うような，需要が疎な地域に着目した公共交通の手段選択分析を行う際には，その利用者の多くが自家用車を運転できない高齢者・障がい者等のいわゆる交通弱者である点に留意が必要であり，モデル検討に当たってはこれらの属性の交通行動を十分に取り入れることが不可欠となる．交通弱者の交通行動分析については，1980年代に入り交通実態の研究が多く発表されたが，その後，1980年代後半から交通環境に関する意識分析が盛んになり，追って高齢者が置かれる交通困難の状況に関する研究報告が活発となった．1990年代からは，青島ら(2000)⁸⁰⁾の研究をはじめとして，交通弱者のモビリティ確保に関する研究が徐々に報告されるようになった．これらの研究の蓄積の中で，交通弱者の交通行動は従来の健常者の通勤・通学のような交通とは異なり，身体的制約条件や低水準の交通サービス条件に抑制されて潜在化した交通需要を考慮することが重要であるということが清水(1995)¹²¹⁾や三星・新田(1995)¹⁶⁸⁾の研究等で示されている．

これらの課題を踏まえ，その後，新田・都(2000)¹⁴⁸⁾が高齢者を対象としたコミュニティバスの需要予測に対して，利用頻度選択モデルと利用頻度増加モデルから構築される需要予測モデルを構築し，更に森山ら(2002, 2005)^{175, 176)}は高齢者・障害者の交通行動が潜在化するサービスレベルの閾値を明らかにした上で，非補償型効用関数を適用した離散連続モデルの活用により，潜在需要を明示的に取扱った利用頻度予測モデルを開発した．更に，森山らは同モデルを活用し，実際の路線を対象として，路線バス及びデマンド交通の需要シミュレーションに実装している．森山らの研究の最大の特徴は，高齢者の交通行動の特性として，料金がいくら安くてもバス停までの距離が遠い場合は利用しないといった非補償型的意思決定をモデル内で再現している点である．同モデルについては，その後全国の中山間地域をフィールドに，数多くの研究において援用されている．

なお，交通弱者の潜在需要は利用者の身体的特性に起因するものだけではなく，サービスに対する認知度の低さ（そもそも存在を知らない）や内容に対する理解の少なさ（使い方がわからない），サービスインに至るまでの心理的抵抗（予約行動に対する抵抗等）等が及ぼす影響も大きい点にも留意しなければならない．例えば，林・湯沢(2006)¹⁵²⁾はデマンドバス利用者数の予測に当たっての説明変数として地元説明会の有無を設定しており，説明会の有無が利用者の拡大に有意に作用していることを確認している．しかし，これらの潜在需要の要因は，公共が提供する説明会等の接触機会の有無だけでなく，世帯内やコミュニティ内での普段のコミュニケーション充実度，個人の情報感度の高さ等，様々な要因に左右されるため，回帰分析の中でこれらの外的要因の有効性を語ろうとすると，アドホックな手法に陥りやすいとい

う問題がある。

また、需要が疎な地域のインフラ整備に関しては、そもそも効用最大化理論に基づく評価だけでは不十分であり、どのような施策がその地域にとって望ましいかという判断は効用最大化理論の評価を基本にしつつも、別の視点からも補完的に検討を行うアプローチが必要とされている^{125, 90)}。そのような議論の中、栄徳・溝上(2008)⁹⁶⁾は、インフラが持つ多様な価値の評価を行うべきであるという視点から、生活満足度の計測が適当であると指摘している。近年の中山間地や交通弱者の交通環境評価においては、QOL(Quality Of Life)や社会的厚生、Capability理論等により交通が生活満足度にもたらす影響を総合的な視点から評価するアプローチが多くの研究において採用されている。

2.2.2 乗客配分モデル

乗客配分モデルは四段階推定法の四段階目に位置づけられるモデルであり、推計した交通機関別のOD需要をネットワーク上に配分する段階であることから、後述する機能計画の検討と関連が深いモデルである。

(1) 乗客配分モデルの均衡問題

乗客配分モデルは、現実の交通網を抽象化した交通ネットワークを対象に、需要OD交通量と配分原則を与件として、ネットワークを構成する各リンクを流れる交通量を予測する問題である。乗客配分モデルの定式化においては、利用者の経路選択行動を基本とした現象記述的なモデルが主流となっており、その中心にあるのが利用者均衡配分である。

需要と供給の間の均衡という概念は、元来、新古典派経済学の分野で発展してきたが、交通量配分の問題として明確化したのはWardrop(1952)⁷⁵⁾が最初である。彼は2つの配分原則を提唱し、それぞれ次のように定義している。

● Wardropの第一原則

利用される経路の旅行時間はみな等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しい。

● Wardropの第二原則

道路網上の総旅行時間が最小となる。

第一原則は、その定義から等時間原則ともいわれる。ただし、この等時間原則が成立するためには、(i) 全ての利用者は常に旅行時間を最小とするように行動する（最小費用経路選択仮説）、(ii) 利用者は常に利用可能な経路についての完全な情報を得ている（完全情報仮説）という2つの条件が満たされなければならない。一方、Wardropの第一原則によって実現する交通均衡状態は、次のように表現することができる。

● Wardrop均衡（利用者均衡）

均衡状態においては、もはやどの利用者也経路を変更することによって自己の旅行時間をそれ以上短縮することはできない。

利用者均衡は最も一般的に用いられる交通均衡であるが、すべての利用者が対象となるOD間において利用可能なすべての経路を認知しており、かつすべての利用者は実旅行時間を最小にするように行動するという仮定が置かれている。しかしながら利用者は必ずしも最小旅行時間の経路を確定的に利用するとは限らず、また、利用者が持つ経路情報は完全に正しいとは言えないことは明らかである。そこで、現

実にみられる利用者の経路選択の多様性や不確実性に着目して、確定的な利用者均衡における実旅行時間に対して誤差項を負荷し、確率変数で定義された旅行時間（知覚旅行時間）を用いることにより、利用者の交通選択行動における情報の不完全性や行動の不確実性を考慮する確率的な利用者均衡モデルが Daganzo and Sheffi(1977)²⁰⁾ や Fisk(1980)³²⁾ によって提案されている。この状態は Wardrop の第一・第二原則を緩和し、「一方的に経路を変えることによって、もはやどの利用者も OD 間の知覚旅行時間を改善することができない」均衡状態に達することを意味する。これを確率的利用者均衡 (SUE: Stochastic User Equilibrium) と呼ぶ。確率的利用者均衡状態は以下のような数理最適化問題に置き換えられる。

minimize

$$Z = \sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega - \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \left(- \sum_k \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \ln \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \right) \quad (2.1a)$$

subject to

$$x_{ij} = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{ij,k}^{rs} \quad \text{for } (ij) \in A \quad (2.1b)$$

$$q_{rs} = \sum_k f_k^{rs} \quad \text{for } k \in N, r \in R \quad (2.1c)$$

$$x_{ij} \geq 0, f_k^{rs} \geq 0 \quad (2.1d)$$

ここで、 x_{ij} はリンク ij の交通量、 f_k^{rs} は OD ペア rs 間の経路 k の交通量、 $\delta_{ij,k}^{rs}$ は OD ペア rs 間の経路 k にリンク ij が含まれるとき 1、そうでないとき 0 を取るダミー変数、 θ はパラメータを示す。

目的関数は第 1 項で示されるリンクパフォーマンス関数が単調増加関数であれば、第 2 項は経路交通量に対して狭義の凸関数であることが証明されており、制約条件によって決まる変数の実行可能領域が凸集合であれば解は一意に定まる。パラメータ θ は利用者の経路選択行動のばらつきを表す。すなわち $\theta \rightarrow \infty$ のとき、目的関数の第 2 項はゼロに近づき第 1 項だけが卓越することから、等時間原則配分モデルと等価になる。一方、 $\theta \rightarrow 0$ のときは目的関数の第 2 項が卓越するため、有効経路に対して等確率なランダム配分モデルとなる。

(2) 頻度ベースサービスと時刻表ベースサービス

自家用車の交通量配分とは異なり、公共交通の乗客配分を行う際には、交通機関の運行頻度（もしくは運行便数）を定式化の際に組み入れる必要がある。Nuzzolo(2003)⁵⁷⁾ が整理しているとおり、路線定期運行のサービス形態としては、時刻表が存在せず一定の間隔で車両が来るというサービス（頻度ベースサービス）と、時刻表に基づいたサービス（時刻表ベースサービス）の 2 形態が存在する。

●頻度ベースサービス

路線単位でサービスを評価する。運行スケジュールは明示的に考慮されておらず、路線の到着時間間隔もしくはその逆数であるサービス頻度を考慮している。つまり、各乗客がどの便を選択するかを明示的に表現するのではなく、乗客フローを路線単位の平均的な値で算出することになる。

●時刻表ベースサービス

実際の公共交通車両の出発・到着時刻に着目してサービスを評価する。乗客が経路選択を行う時点におけるサービス属性を明示的に考慮することが可能である。

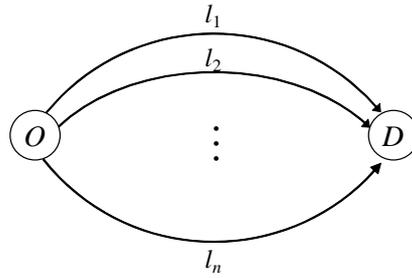


図 2.2 common lines problem

頻度ベースサービスを対象とした公共交通の乗客配分の初期の研究の多くは、common lines problem⁴⁷⁾をいかに扱うかに焦点を当てたものであった。ここで、common lines problem とは、頻度ベースで運行されている公共交通において生じる特有の問題であり、「同一目的地に乗り場を共有している複数の路線を利用して到達することが可能な場合、それらの路線の中から魅力的な経路集合 (attractive set) を選択する問題」と定義することができる。Chriqui and Robillard(1975)¹⁴⁾ は common lines problem の基本的な解法を示しており、以下にその手順を概説する。

ここに、図 2.2 に示す n 本のバス路線がある。それぞれの路線の乗車時間は t_i 、運行頻度は f_i である。乗客は起点 O から終点 D に移動するために、路線集合 A のうち最初に起点 O に到着するバス路線 s を利用するという仮定のもと、バスの到着がポアソン分布に従うと仮定すると、 s の期待所要時間 T_s は以下の通り与えられることを示した。

$$T_s = \frac{1 + \sum_{i \in s} t_i f_i x_i}{\sum_{i \in s} f_i x_i} \quad (2.2)$$

ここで、 x_i は路線 i が選択路線に含まれれば 1、そうでなければ 0 をとるダミー変数である。式 (2.2) における第 1 項は期待待ち時間、第 2 項は期待乗車時間を示している。Nguyen and Pallotino (1988)⁵⁶⁾ は所要時間を最小にする路線選択集合 X を hyperpath と定義している。また、Spiess and Florian (1989)⁶⁶⁾ は、乗客は期待所要時間を最小にする strategy を選択するとして、均衡状態をフロー非負制約及びフロー保存則を制約条件とした総所要時間最小化問題として定式化している。つまり、Spiess and Florian が定義した strategy と Nguyen and Pallotino が定義した hyperpath は同義と言えよう。なお、ここでは、hyperpath という表記を統一的に用いることにする。

hyperpath に基づくモデルは、その後容量制約による旅客の積み残しの考慮や、混雑効果の導入といった改良が進められ、倉内ら (2006)¹¹⁰⁾ の京都のバスネットワークへの適用、Schmöcker et al.(2008)⁶⁵⁾ のロンドン地下鉄への適用、柳沼ら (2010)¹⁷⁷⁾ の首都圏鉄道ネットワークへの適用等、実ネットワークにおける経路配分モデルとしての適用が進んでいる。また、Fukuda et al.(2013)³³⁾ は、東日本大震災発生後の計画停電による鉄道会社の節電対応（運行頻度削減、相互直通運転の中止、優等列車の停止）により、利用者の利便性がどの程度減少したのかを、最小費用 hyperpath の概念に基づいて検証する等、交通施策の影響を厳密に捉えるためのアプローチとしても活用されている。

ただし、わが国においては、頻度ベースサービスは首都圏等の都市部での展開に限定されており、需要が疎な地域の多くは後者によるサービスが展開されている。一方で、既往研究における乗客配分モデルのアプローチの多くは頻度ベースサービスである。これは、時刻表ベースサービスについては、時間軸も考慮する必要があるため、モデルの実装に当たっての計算負荷が大きいことに起因している。しかし近年

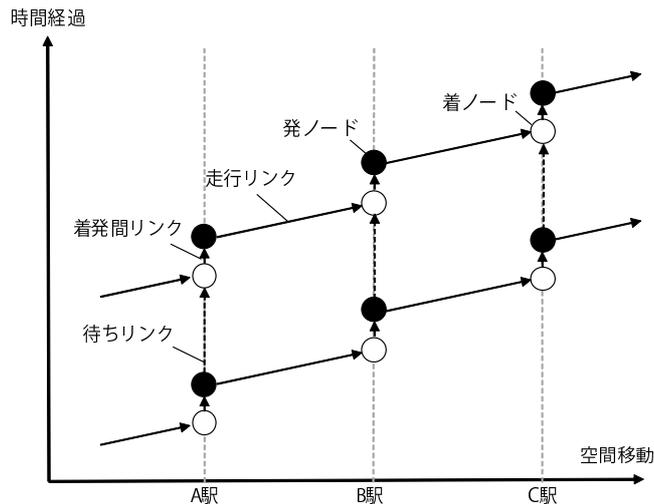


図 2.3 時空間ネットワークによる表現例

では、時空間ネットワーク（図 2.3 参照）を対象とした利用者均衡配分等のアプローチによる構築事例が徐々に増えてきている。時空間ネットワークは横方向に時間軸（時刻）、縦方向に空間軸（駅、駅間）を持つネットワークによって公共交通のダイアグラムを表現している。これによって、時刻表ダイヤ上の時刻を追っての車両の選択，乗り換えのための駅と車両選択等の動的な交通需要分析を，ネットワーク上の静的な交通需要分析に置き換えて行うことが可能になる。

時空間ネットワークを用いた分析の例として，例えば赤星ら (2012)⁸²⁾ は，極めて低頻度の公共交通ネットワークにおいては，停留所での待ち時間が非常に長くなる場合があり，平均待ち時間のみでは適切な評価ができない恐れがあるという問題意識から，頻度ベースの分析ではなく，時空間ネットワークを用いた時刻表ベースでの公共交通ネットワークと都市構造の関連分析を行っている。高松 (2015)¹²⁸⁾ は，岩手県沿岸部のバスネットワークと時刻表データをもとに時空間ネットワークを構築し，バス時刻表を設計する問題を最適化問題として記述して解く手法を提案している。また，都市部への適用についても，例えば田口 (2005, 2008)^{130, 131)} は，首都圏の電車を利用する通勤通学客を対象に，出発駅から到着駅への交通需要を時空間ネットワークにより表現し，利用者均衡配分問題として定式化し，計算結果と観測データの比較によりモデルの妥当性の確認を行うとともに，混雑による電車の遅れ時間をシミュレートしている。

2.3 需要に対する機能計画に関する研究

需要に対する供給側の機能計画については，交通ネットワーク計画問題 (Transit Network Planning Problem) としてこれまでに多くの研究の蓄積がある。ここでは，わが国における公共交通の運営実態のフレームに沿って既往研究の位置づけを整理したい。

わが国において道路上で自動車を使用して有償で旅客を運送することは，道路運送法第 3 条の旅客自動車運送事業に当たり，国土交通省の事業許可が必要である。いわゆる乗合バス・乗合タクシー・デマンド交通は一般乗合旅客自動車運送事業といい，その運行の形態により，(i) 路線を定めて定期的に運行する「路線定期運行」，(ii) 路線は定めるものの時刻が不規則な「路線不定期運行」，(iii) 路線を定めず旅客の需要に応じた運行を行う「区域運行」の 3 種類に区分される。なお，(iii) の区域運行は需要応答型交通（デマンド交通）が該当する。

公共交通の機能計画を検討する際には，まず路線定期運行や路線不定期運行といった，ゾーンベースで

需要を束ねる運行形態での事業成立可能性に着目することになる。そして、第1章にて説明した輸送密度と交通モードの関係をもとに、需要が疎であり路線定期運行での運営が困難である場合は、個人ベースでの運行形態である区域運行の導入可能性を検証することになる。このように路線定期・不定期運行と区域運行では機能計画の際の需要の取扱い方が異なるため、以降で両者における機能計画に係る既往研究の動向をそれぞれ概説する。

2.3.1 路線定期・不定期運行に関する機能計画：ゾーンベースでの輸送計画

路線定期運行及び路線不定期運行 (i 及び ii) については、エリア内でネットワークを形成し、交通需要に対する機能を果たしている。そのため、ネットワークの一部のみを変更した場合であっても、その影響がネットワーク全体に及ぶことが多い。そのため、ネットワークの構成要素に関する検討を行う際には、ネットワークの一部に着目した部分的な問題として捉えるのではなく、ネットワーク全体の評価を行う問題として捉えることが必要である。

地域公共交通ネットワークの設計に当たっては、ある制約条件の中で目的を達成するための政策変数を決定する最適化問題として扱われることが一般的である。すなわち、客観的な基準を設け、それを最適にする解を求める問題として定式化されることになる。その際に、代替案は問題の内部で作成され、問題を解くことにより、ある基準においては最適であることが保証されたネットワーク案が得られることになる。検討に際しては集計的アプローチ・非集計的アプローチ両者が考えられるが、最終的にはゾーン単位での需要を効率的に集約して輸送するためのサービス設計を行うことになる。設計に関しては、巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem, TSP) やロジスティクスの分野で発達してきた車両配送問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) 等をベースに、対象地域の総走行キロや時間を最小化するようなルーティング、便数設計、停留所・ターミナル設置、車両配置の設計を行う数理最適化手法がこれまでに開発されてきた。

Ibarra-Rojas et al.(2015)³⁵⁾ は既往の交通ネットワーク計画問題を体系的にレビューしており、同問題を以下の通り類型化している。なお、これらのサービス指標の中でも特に、交通ネットワークデザイン問題と運行頻度設定問題については、他のサービス設計の基本となることに加え、利用者の行動を大きく決定づけることから、公共交通計画者が主導的に検討すべき重要な指標として位置づけられてきた⁶⁷⁾。わが国においても、概ね1970年代後半より、交通事業者の経験や勘に寄らない再編方針の検討に当たり、総走行時間等のシステム効率性指標を最適化するような路線網や運行頻度を決定する数理最適化手法が開発されてきた。例えば、森地ら(1975)¹⁷⁴⁾ は、バス系統を外生的に与えて運行頻度を出力する最適化問題を定式化しており、その後、枝村ら(1980)⁹⁷⁾ や天野ら(1982)⁸⁵⁾ はバス系統が最適化問題の内部で作成される、交通ネットワークデザイン問題の定式化を行っている。

●交通ネットワークデザイン (Transit Network Design)

先に紹介したモード選択・需要予測の推計により算出した人々の移動需要をもとに、供給側・需要側のコスト最小化等を目的関数に、需要を満たすことができるような路線の計画、車両のタイプの選定、停留所の場所の割り付け等を行う問題である。

●運行頻度設計 (Frequency Setting)

需要パターンをもとにピーク、オフピーク等の設定を行うとともに、各時間帯における単位時間当たりの運行頻度を設定する問題である。

●時刻表決定問題 (Transit Network Timetabling)

与えられた路線について、各停留所の発車時刻と到着時刻を決める問題である。その際の目的関数については、時刻変動を伴うある特定の需要パターンをまかなうこと、複数のバス路線を同期させること、利用者にとって都合の良い乗り換えの実現回数を最大化すること等、様々なものが想定される。また、複数路線をもつ時刻表ベースのサービスでは、サービスを運行する上で車両のスケジューリングが必要となる。

●車両スケジューリング問題 (Vehicle Scheduling Problem)

所与の時刻表に沿った運行を実行するための最適な車両の配分を決定する問題である。

●運転手スケジューリング問題 (Driver Scheduling Problem)

1日の運行予定を所与として、労働条件の制約下で各運転手の1日の運行スケジュールを決定する問題である。

●運転手当番表決定問題 (Driver Rostering Problem)

ある特定の期間に必要な業務量が定められているとき、労務規定の制約下で必要な人件費が最小となるように各ドライバーに業務を割り当てる問題である。

以上の研究体系については、Ceder(2003)¹⁰⁾ がまとめているように、図2.4に示すプロセスで進められることになり、上位に位置づけられる問題におけるアウトプット情報を下位問題のインプット情報として設定する構造となっており、個々の問題がそれぞれ独立に位置づけられているのではなく、全体のプロセスの中で個別問題の検討が進められることになる。

2.3.2 区域運行に関する機能計画：個人ベースでの輸送計画

区域運行の運行形態は導入地区によって様々であるが、基本的には予約した乗客の需要に合わせて効率的に移動するサービスを提供するものであり、採算性の高さやドアツードアの利便性の高さから便利な輸送システムとして活用されている。また、交通事業者による区域運行の運営が難しい地域の中には、NPOによる交通空白地域有償運送や、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導入されている地区もある。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(2011)⁹⁹⁾の研究で体系的に整理されているが、多くの事例において、タクシー会社が提供するデマンド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需要応答型の運行がなされている。

デマンド交通の運行形態は、経路がある程度固定されているタイプと、特定の路線を決めず需要に応じて運行経路を決定するタイプに二分されるが、いずれも利用者各個人の需要に対応した運行経路を提示する問題としてDARP (Dial-a-Ride Problem) により定式化される。なお、前者については路線定期運行と概ね同様のアプローチにより運行計画の立案が可能であるが、後者については需要分布と運行経路が毎便変更になるため、運行便ごとに運行経路を決定する必要がある。

DARPはVRPの発展形としての位置づけとされる。DARPはWilson et al.(1969)⁷³⁾によって確立された一種のスケジューリング問題であり、その後Psaraftis(1980)⁵⁹⁾によって単一車両による動的プログラミングアルゴリズムが開発された。DARPの定式化においては、ある制約条件の中で全てのトリップを実現する最適な経路を決定するよう、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ている。また、DARPの発展形として、Feuerstein and Stougie(2001)³⁰⁾は運行台数が変化した場合の最適化手法について取り組んでおり、Charikar and Raghavachari(1998)¹²⁾は乗車定員を考慮に入れた方法を検討している。また、利用者が設定する出発もしくは到着する時間の余裕幅(タイムウィンドウ)をスケジューリングに組み入れる方法については、Psaraftis(1983)⁶⁰⁾以降研究が進められてきている。

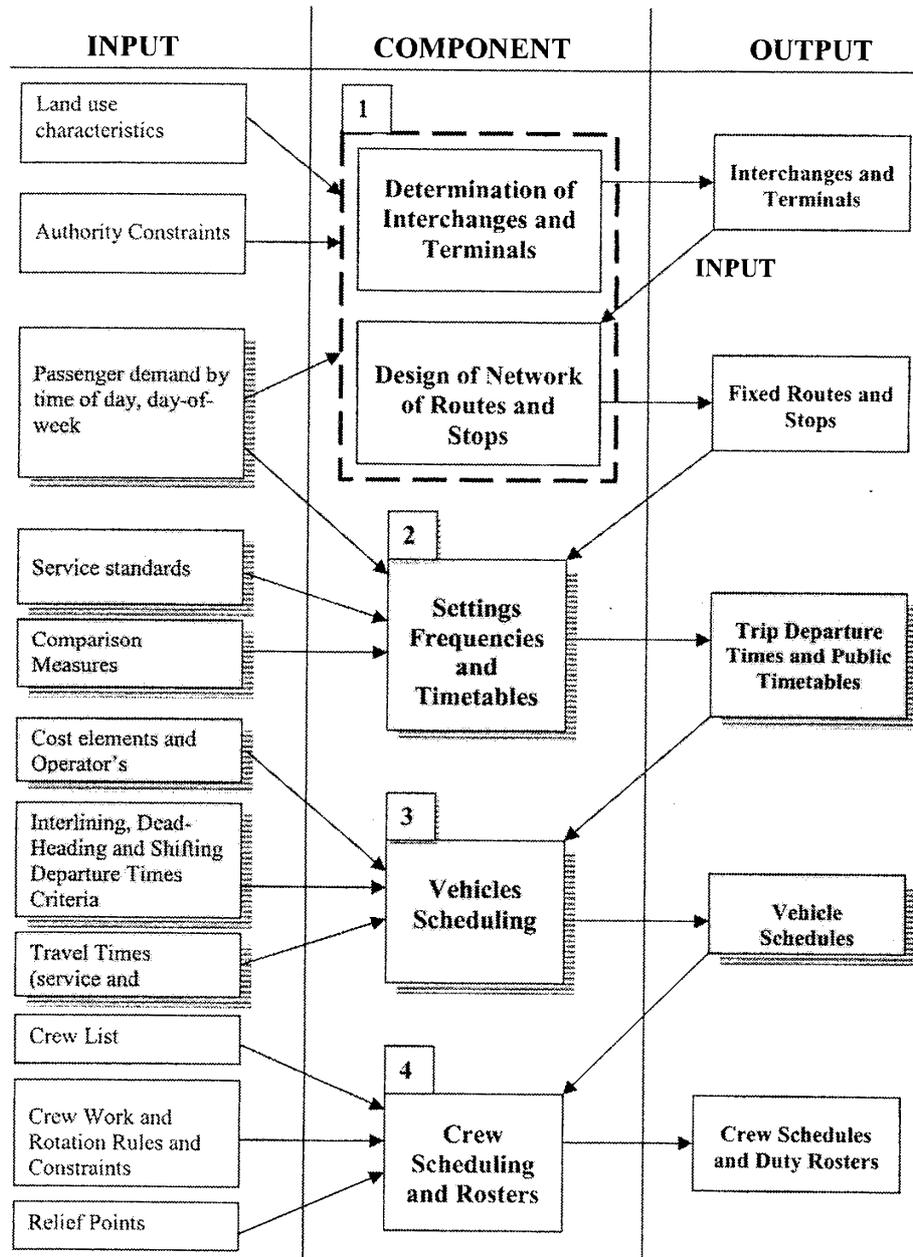


図 2.4 交通ネットワーク計画問題の検討プロセス (Ceder(2003)¹⁰⁾ より引用)

以下に, Cordeau(2003)¹⁷⁾ の定式化を参考に, タイムウィンドウを考慮した DARP の一般式について概説を加える. まず, 利用者数 (予約件数) が n であり, ノード $N(N = P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}, P = \{1, \dots, n\}, D = \{n + 1, \dots, 2n\})$ 及びアーク A で構成されるグラフ $G = (N, A)$ を設定する. ここで, ノード集合 P 及び D は乗車・降車ノードであり, ノード 0 及びノード $2n + 1$ は車両の起終点となる DEPOT である. 各利用者 i は起点ノード i から目的地ノード $n + i$ に向かうとする. 車両 $k \in K$ はそれぞれ容量が Q_k であり, 各車両における運行時間上限は T_k とする. 各ノード $i \in N$ に対しては需要 q_i と乗降時間 d_i が設定されている. 各ノード i にはタイムウィンドウ $[e_i, l_i]$ が設定されており, e_i, l_i はそれぞれ早着・遅着の限界時間を意味する. なお, 各アーク $(i, j) \in A$ には移動コスト c_{ij} 及び移動時間 t_{ij} の情報が付与されている. また, L を乗車時間の上限値として設定する. 以上の条件のもとで DARP を定式化すると以下の通りとなる.

minimize

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (2.3a)$$

subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 1 \quad \text{for } i \in P \quad (2.3b)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{n+1,j}^k = 0 \quad \text{for } i \in P, k \in K \quad (2.3c)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k = 1 \quad \text{for } k \in K \quad (2.3d)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 0 \quad \text{for } i \in P \cup D, k \in K \quad (2.3e)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,2n+1}^k = 1 \quad \text{for } k \in K \quad (2.3f)$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{ij}) x_{ij}^k \quad \text{for } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.3g)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j) x_{ij}^k \quad \text{for } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.3h)$$

$$L_j^k = B_{n+i}^k - (B_i^k + d_i) \quad \text{for } i \in P, k \in K \quad (2.3i)$$

$$B_{2n+1}^k - B_0^k \leq T_k \quad \text{for } k \in K \quad (2.3j)$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \quad \text{for } i \in N, k \in K \quad (2.3k)$$

$$t_{i,n+i} \leq L_i^k \leq L \quad \text{for } i \in P, k \in K \quad (2.3l)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad \text{for } i \in N, k \in K \quad (2.3m)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \text{for } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.3n)$$

ここで、 x_{ij}^k は車両 k がノード i, j 間を移動することを示すダミー変数、 B_i^k は車両 k がノード i に到着した時刻、 Q_i^k は車両 k がノード i における需要量（乗車人数）、 L_i^k は車両 k がノード i における乗降時間を意味する。目的関数 (2.3a) は総移動コストを最小化するように設定している。制約条件 (2.3b), (2.3c) により、同一車両は起点・終点ノードを必ず 1 回だけ訪問するように設定している。式 (2.3d) ~ (2.3f) は車両 k がそれぞれ起点 DEPOT から運行を開始し、終点 DEPOT で運行を終了するような条件付けを行っている。時間と需要量に関する制約は式 (2.3g) と (2.3h) により設定しており、式 (2.3i) 及び (2.3l) で各利用者の乗車時間を所定の範囲内に抑えている。式 (2.3j), (2.3k), (2.3m) はそれぞれ各運行における運行時間制約、タイムウィンドウの制約、車両容量制約をそれぞれ設定している。

なお、制約条件 (2.3g) 及び (2.3h) については非線形であるため、定数 M_{ij}^k 及び W_{ij}^k を用いて以下の通り線形化する。

$$B_j^k \geq B_i^k + d_i + t_{ij} - M_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \quad \text{for } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.4a)$$

$$Q_j^k \geq Q_i^k + q_j - W_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \quad \text{for } i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.4b)$$

これらの制約条件の妥当性については、 $M_{ij}^k \geq \max\{0, l_i + d_i + t_{ij} - e_j\}$ と $W_{ij}^k \geq \min\{Q_k, Q_k + q_i\}$ と設定することにより保証される。これらの制約式は TSP における Miller-Tucker-Zemlin 部分巡回路排除制約と極めて類似している。



図 2.5 公共交通の網形成計画における二段階最適化問題の適用イメージ

また、車両運行計画の立案だけでなく、その導入可能性の検討や導入効果の測定に関する検討事例として、吉田ら(2006)¹⁸³⁾は、人口高密度地区におけるデマンド交通の導入事例に着目し、サービスの導入適性について迂回率を指標に取ったシミュレーションと実験運行データから検討している。また、福本ら(2009)¹⁵⁷⁾は実際のフィールドを対象に、複数の運行形態のデマンド交通の導入効果について、運行経費や必要車両数の観点からシミュレーションを行っている。

2.4 最適な公共交通システムの選択に関する研究

2.4.1 二段階最適化問題

公共交通のネットワーク計画においては、かつては Wirasinghe が提案する 4 つのサブ問題についてそれぞれ独立に解く事例が多かったが、本来それぞれのサブ問題は独立しておらず、互いに影響を及ぼしあっている。これらのサブ問題を「交通計画者」と「交通需要者」の 2 つの視点から再整理すると、公共交通における施策決定においては、交通計画者が交通需要者の行動を勘案しながら自身の目的を最大限達成する施策を提示し、交通需要者は提示された政策のもとで自身の目的を最大限満たすよう行動する、という枠組みで考えることが可能である(図 2.5 参照)。この考え方は、二段階最適化問題の枠組みの中で表現することが可能である。二段階最適化問題はもともとオペレーションズ・リサーチの分野で研究されていた上位・下位問題が両方とも数理最適化問題で構成される問題である。

交通施策検討における二段階最適化問題の適用に当たっては、上位問題で交通計画者側の政策決定モデルを、下位問題で利用者の行動記述モデルを取扱うことにより、計画者が日常的に行う計画策定プロセスそのものを厳密に表現することができる点が評価されている。宮城ら(1997)¹⁶⁹⁾が紹介しているように、二段階最適化問題の適用対象は幅広く、土地利用と交通ネットワークの整合性、交通施設の組み合わせ最適化のほか、公共交通サービスの決定問題についても適用が可能であることを示している。

交通施策検討において二段階最適化問題を適用する場合、以下の行動仮説を設定することになる。

1. 意思決定主体について、交通計画者 A と交通需要者 B の 2 者が存在する。
2. A は B の行動規範や制約条件に関する情報を持っているが、B は A が示す戦略しか分からず、示された戦略に対して自己最適な行動をとる。

このように、A は主導権を持っていて彼にとっての最適戦略を B より先に決定できるという意味決定の系列があり、このような問題を交通計画者先手のシュタツケルベルグ計画問題(先手と後手の区別を設けた非協力ゲーム)で記述できる。つまり、A の行動規範を上位問題でシステム最適化問題として解き、B の行動規範を下位問題で需要変動型利用者均衡問題として解くというフレームである。シュタツケルベ

ルグ問題では、主問題、制約問題ともに最適化問題として定式化されている。

宮城らが指摘しているように、従来の四段階推定法を用いた交通政策の検討は、厳密に定式化すれば二段階最適化問題そのものとなるが、従来モデルは上位計画のシステム最適化の概念が希薄であったことから、政策変数をパラメトリックに変化させ、下位問題で現象の確認を行うケースが多かったと言える。しかしながら、被災地域をはじめ、全国の縮退する都市における交通計画は政策の効率性が今まで以上に求められることから、上位問題である政策決定モデルをより厳密に構成し、下位問題との関係性の中で解を探索することが必要である。

Zhou and Lam(2003)⁷⁸⁾ を参考に、二段階最適化問題を一般化すると以下の通り定式化される。

$$\underset{x}{\text{minimize}} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) \quad (2.5a)$$

subject to

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) \leq 0 \quad (2.5b)$$

ここで、 $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ は以下により定義される。

$$\underset{y}{\text{minimize}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (2.6a)$$

subject to

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \quad (2.6b)$$

ここで、 \mathbf{F} は上位意思決定者（ここでは交通計画者）の目的関数、 \mathbf{x} は上位意思決定者の決定ベクトル（運賃）、 \mathbf{G} は上位決定ベクトルの制約条件、 \mathbf{f} は下位意思決定者（ここでは乗客）の目的関数、 \mathbf{y} は下位意思決定者の決定ベクトル（乗客フロー）、 \mathbf{g} は下位決定ベクトルの制約条件をそれぞれ意味する。このように、最適化問題の制約条件に別の最適化問題が含まれている点が二段階最適化問題の特徴である。

宮城らの提案する公共交通サービス決定問題における二段階最適化問題を援用する場合、交通計画者 A の政策検討に当たっては、交通需要者 B の将来需要量がインプット条件となることから、二段階最適化問題に対して、需要モデルを挿入する処理が必要となる。具体的には以下のフローでモデル化を行うことになる。

1. 従来の四段階推定法に則り、トリップ頻度の決定、目的地選択、交通手段選択を踏まえて日レベルで発生する交通需要を推計し、この時点で個人の需要を束ねてゾーン別の需要を算出する。【B のゾーン別需要を算出】
2. 推定した需要を各ゾーン（セントロイド）の情報として持たせ、ルーティング・運行便数を設定する【B の需要をもとに、A が行動規範を提示する】
3. 設定されたサービスレベルのもとで乗客の配分を行う【A の規範を踏まえ B の行動戦略を決める】

このうち、1 は四段階推定法（トリップ頻度、目的地選択、交通手段選択までの三段階）、2、3 については二段階最適化問題により解き、2 を上位問題、3 を下位問題として記述する。

二段階最適化問題の公共交通計画への適用については 1990 年代から研究の蓄積が始まり、Constantin and Florian(1995)¹⁶⁾ は上述の運行頻度設計問題への適用を試みており、上位問題は総所要時間を最小化する運行頻度を決定する問題として、下位問題は上位問題で設定した条件のもとでの乗客配分モデルとして定式化し、劣勾配法を用いて計算を行っている。その後 2000 年代に入り、解法アルゴリズムの改良に伴い適用事例が増えており、例えば Zhou and Lam(2000)⁷⁷⁾ は、自身らが過去に構築した確率的利用者均

衡配分モデルを下位問題として設定し、乗客の総移動コストの最小化を目的関数とした運賃決定モデルを上位問題として構築した。また、Gao et al.(2004)³⁴⁾ は De Cea and Fernandez(1993)²³⁾ が構築した、容量制約条件を組み入れた公共交通配分モデルを下位問題として、乗客の総移動コストと列車稼働コストの和を最小化するよう上位問題を定式化し、頻度を決定する二段階最適化問題を構築している。嶋本ら(2009)¹²⁰⁾ は、交通事業者は自身の目的のみならず、乗客あるいは社会的な目的も考慮して施策を提示する可能性があることに着目し、上位問題を多目的最適化問題として定式化する必要があることを指摘した。そして、上位問題を乗客の総移動コスト最小化と混雑度に関する格差最小化を選択した多目的最適化問題として記述し、Kurauchi et al.(2003)⁴⁵⁾ で構築した乗客配分モデルを下位問題に設定し、均衡制約付き最適化問題 (MPEC: Mathematical Programming with Equilibrium Constraints) として定式化した。また、Shimamoto et al.(2010)⁶⁴⁾ において、同モデルを広島市の実ネットワークへ適用し、社会実装の可能性の検証を行っている。また、Ceder et al.(2015)¹¹⁾ は、これまでの交通ネットワークデザインの分野における数理計画問題の中で明示的に取扱われてこなかった地形の不均一性、つまりは勾配がもたらす加減速時の車両の遅延や歩行速度の低下に伴うアクセシビリティの低下、歩行者の需要の低下等に着目し、停留所までのアクセス経路におけるアクセシビリティを、ルート選択の際に明示的に取扱う二段階最適化問題の定式化を行った。

また、これまで多くの公共交通の設計問題においては、ルーティングと便数設計問題を別々に取扱ってきたが、両者はいずれも公共交通のサービスレベルを決定する指標であり、同時に解く必要性が高い。このような問題意識から、Szeto and Jiang(2014)⁶⁷⁾ は上位問題で総乗換客数を最小化する目的関数のもとでルーティング・運行便数の決定モデルを構築し、下位問題にて上述した Spiess and Florian(1989)⁶⁶⁾ が構築した乗客配分モデル（厳密に言うと Spiess and Florian のモデルに対して、リンク容量制約を課す改良を施している）を解く二段階最適化問題を定式化している。

一方、下位問題の配分モデルについては、他の交通機関も表現したマルチモーダルネットワークとして設定している例もある。例えば、内田・加賀屋(2005)⁹⁵⁾ や Yoo et al.(2010)⁷⁶⁾ は下位問題に確率的利用者均衡乗客配分モデルを設定し、交通機関間の相互作用を考慮したマルチモーダル配分モデルを二段階最適化問題に導入している。また、山田ら(2012)¹⁸⁰⁾ はサプライチェーンネットワーク設計に同様の分析フレームを適用しており、下位問題で取扱うネットワークをサプライチェーンネットワークと交通ネットワークを統合したスーパーネットワークとして設定した、スーパーネットワーク均衡モデルとして解くことにより、道路ネットワーク上の交通状態とサプライチェーンネットワーク上の各主体の行動の相互作用を考慮している。ただし、マルチモーダル配分を取扱っている既往研究に関しては、いずれも、実ネットワークでの検証においては課題が残るとしている。

このように、二段階最適化問題においては定式化に若干の違いはあれ、基本的には各地区の交通課題に対して求められる解決策を示唆する指標を目的関数に設定し、ネットワーク形状やサービスレベルに関する制約のもとで最適化を図るアプローチが採られている。

2.4.2 最適化問題のアルゴリズム

(1) メタヒューリスティクス

一般的に、ネットワーク計画問題や輸送経路問題は 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、実装に当たっては、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。例えば野田ら(2008)¹⁵⁰⁾ は、遺伝的アルゴリズムと逐次最適挿入法

を用いることで利便性・採算性の面から路線定期運行とデマンド交通の比較を行っている。

公共交通のルーティングやスケジューリング問題は離散最適化問題で記述されることから、NP-hard に対応すべく、良い近似解を求めるアルゴリズムを設計する必要がある。そこで、最適性の保証はないが効率よくより良い近似解を求めるためのメタヒューリスティクス手法がよく利用される。ヒューリスティクスとは発見的解法と呼ばれるものであり、何もない状態からあるルールに基づいて解を構築する構築法と適当な実行可能初期解からあるルールに基づき解を更新していく改善法に大別される。メタヒューリスティクスとはこれらのヒューリスティクス手法を有機的に結合させて問題を効率的に解くテクニックのことを言い、最近では実務的な問題を楽に解くためのフレームワークとして、実務家の間でよく用いられる最適化アルゴリズムとなっている。

メタヒューリスティクスの最も基本的な方法は局所探索法と呼ばれる手法である。これは解が与えられた際にその解の近傍を複数定義し、もし近傍解の目的関数値が現在の解を改善する場合はその近傍を新たな解として、そうでない場合は現在の解を保持し、その近傍からまた新しい改善解を探索する手法である。局所探索法の問題点は、初期解の設定によっては大域的最適解にたどり着けず局所最適解に陥る可能性があることである。このような問題を解決するため、局所探索法をベースとした解法に様々な条件を付け加えたメタヒューリスティクス手法がこれまでに提案されている。例えば、局所最適解から抜け出すために近傍探索によって解を変更する際に改善解のみ受理するのではなく、確率的に改悪解も受理するシミュレーテッド・アニーリング（模擬焼きなまし法）や、近傍定義の際に過去受理した近傍の特徴を記録しておき、その特徴を持つ近傍は除外して探索することで解のループを防止するタブー・サーチ（禁断探索法）等がよく知られている。

Ibarra-Rojas et al.(2015)³⁵⁾ のレビューによると、ルート最適化問題については、数ノードで構成されるサンプルネットワークであれば厳密解法で解くことができるが、実ネットワーク等の複雑なネットワークに適用する場合にはメタヒューリスティクス手法が用いられており、前述したシミュレーテッド・アニーリング以外に、遺伝的アルゴリズムや蟻コロニーアルゴリズム、人工蜂コロニーアルゴリズム、粒子群最適化法等が一般的に用いられている。一方で、これらの手法は問題に応じた解の改定ルールの設計、状態近傍の設定、パラメータ・チューニング等への労力がかかる点が課題とされている。これらの設定に係る負担が必要とされず、かつアルゴリズム設計において任意性がほとんど介入しない手法として Cross-Entropy 法（CE 法）がある。CE 法は複雑な推定問題及び最適化問題を解決するための汎用的なモンテカルロ技法であり、Rubinstein(1999)⁶²⁾ が稀少事象確率を推定するための手法である分散減少法を更に拡張したものである。

(2) Cross-Entropy 法

伏見・逆瀬川 (2014)¹⁵⁸⁾ が整理しているように、CE 法は以下の 2 つのタイプの問題に適用することができる。

●推定のための CE 法

$l = \mathbb{E}H(\mathbf{X})$ を推定する。ここで、 \mathbf{X} はある集合 \mathcal{X} の値をとる確率変数あるいは確率ベクトルで、 H は \mathcal{X} 上の関数である。

●最適化のための CE 法

全ての $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ にわたって $S(\mathbf{x})$ を最大化、あるいは最小化する。ここで、 S は \mathcal{X} 上の目的関数である。 S は既知の、あるいは雑音のある関数である。後者では目的関数を例えばシミュレーションによって推定する必要がある。

表 2.1 交通行動の記述方法の違い

取扱うスケール	観測方法	記述方法	計算負荷
ゾーンレベル	PT 調査, アンケート調査等	四段階推定法, シミュレーション等	低い
ドットレベル	PP 調査, IC カードデータ等	データ・マイニング等	高い

最適化の解法アルゴリズムとしての CE 法の活用は、「最適化のための CE 法」に該当し、まず最適化問題を稀少事象推定問題に変換し、その後、推定のための CE 法が最適解を探索する適合的アルゴリズムとして利用されることになる。また、推定の場合、CE 法は 2 つの標本分布の近さの尺度として Kullback-Leibler 距離 (Cross-Entropy) を用いた適応的重点抽出法と捉えることができる。

ネットワーク最適化の解法アルゴリズムとしての CE 法の適用については、Wang et al.(2007)⁷²⁾ は無人航空機の運航計画に、武井・長江 (2015a, 2015b)^{132, 133)} は道路ネットワーク強靱化のための耐震化戦略の検討に、今泉・羽藤 (2015)⁹³⁾ は首都圏における過積載車両の制御計画に、Maher et al.(2013)⁵²⁾ 及び和田ら (2015)¹⁹¹⁾ は動的信号制御問題においてそれぞれ実装している。また、和田ら (2015)¹⁹¹⁾ は厳密解法 (Bender の分解原理に基づく解法)、アニーリング法に基づく解法との比較の結果、CE 法が高速に最善解へ収束することが明らかにしているほか、Ma(2012)⁵¹⁾ は MSA(Method of Successive Averages) や遺伝的アルゴリズムと比較した場合の CE 法の優位性について、実務利用を念頭に置いた大規模な問題に適用することにより、検証を行っている。

2.5 列挙索引化に関する研究

2.5.1 交通行動の記述と計画手法の変化

近年の計算機性能及び計算技術の向上により、位置情報を基盤に、データから得られる知識を直接利用することでインフラ整備計画やオペレーションの計画の検討を行うことが可能になってきている。具体的には、表 2.1 に示すように、これまでは計算負荷や収集できるデータ量の制限により、ゾーンレベルでパーソントリップ調査やアンケート調査結果等を用い、推計手法を用いることで交通行動の記述が行われてきたが、近年ではプローブパーソン調査結果や IC カードデータに基づく膨大なドットデータをマイニングすることによってデータから直接交通行動を捉えることが可能になりつつある。

しかしながら、このようなデータオリエンティッド型の交通行動の把握は、計算機性能が向上したとは言え、計算コストの大きさが課題として残っている。計算コストの削減への対応として、図 2.6 に示すように、これまでは計算機性能の向上、計算方法の工夫 (並列計算等) が主に採用されてきた。しかし、これら 2 つの視点の他にもうひとつの重要な視点として、データベースの構築方法の工夫が考えられる。これは、具体的にはデータベースを構築する際に、インプットデータの列挙・圧縮を可能な限り効率化し、必要なデータを即座に索引化できるようにするための構造化処理技術のことを指す。列挙・索引化技術の社会的実装の意義については、都市部の鉄道を例に研究を行っている堀山・羽室 (2015)¹⁶¹⁾ の研究や、電力網の信頼性・頑健性の評価を行っている Inoue(2014b, 2015)^{37, 38)} の研究等でも述べられており、特に各需要の個別データから直接ネットワーク計画や運行計画を検討する非集計的な処理において優れた手法と

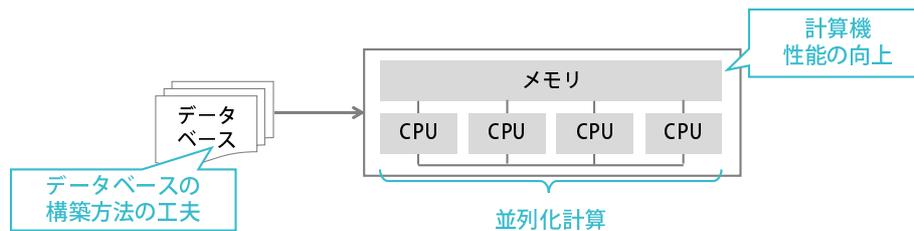


図 2.6 データオリエンティッド型の交通行動の把握における計算コストの削減アプローチ

言える。

2.5.2 列挙索引化のアルゴリズム

列挙問題とは、与えられた集合 F の要素で性質 P を満たすものを漏れなく重複なく出力する問題であり、列挙アルゴリズムとはこの列挙問題を解くアルゴリズムのことを言う。岡本 (2012)¹⁰⁰⁾ によると、アルゴリズムの正当性（出力すべき対象を漏れなく重複なく出力し、正しく問題を解くこと）を満たしつつ、効率性（入力した問題のサイズに対して、アルゴリズムが費やす計算時間をできるだけ抑えること）を向上させることが列挙アルゴリズムの設計における要点であるとされている。

一般に、アルゴリズムの計算速度は、入力した問題のサイズ n に対する多項式時間アルゴリズムとして形式化されることが多い。しかし、列挙問題の場合は出力を漏れなく行うことから、計算量が出力数 N を下回ることはない。また、 N が n の多項式で抑えられる保証はなく、むしろ N が n の指数オーダーになることも珍しくない。そのため、列挙問題の計算量は N と n に依存する形で算定することになる。また、経路列挙においては一般に N は巨大数となることが多いため、計算量が N に対して比例する計算時間で列挙することができれば、それが最適なアルゴリズムとされてきた¹⁵⁶⁾。

このような伝統的な列挙アルゴリズムは、基本的に再帰的あるいは逐次的な手法に基づいたものが多く、列挙問題でよく用いられているバックトラック法や分割法、ヒープに蓄え列挙する方法や、多面体の端点を列挙する逐次追加法等、これまでにいくつかの列挙アルゴリズム構築法が提案されているが、これらのアルゴリズムに共通して言えることは、列挙に係る無駄な試行錯誤をいかに減らすかが最大の関心事である点である。しかし、本研究で取扱うデマンド交通の運行経路のように、解の個数が膨大になる場合は、いくら解の個数に比例的な計算時間が得られたとしても、現実的な時間内に全てを列挙することは不可能である。つまり、このような問題を取扱う場合に、既往の列挙アルゴリズムのような「ひとつの解が見つかるたびに重複の有無のチェック等を行い、出力し、次の解の探索に移る」という処理を繰り返す方法では大きな計算時間の改善の見込みはなく、複数の解をまとめて列挙し、なおかつそれらを圧縮して出力するという技法が不可欠となる。

このような経路列挙の課題に対し、あるグラフ構造が与えられたときに、その中からある制約条件を満たすような部分グラフ構造を全て列挙し、それらを圧縮表現して索引化する技法として、BDD(Binary Decision Diagram: 二分決定グラフ)とその改良形である ZDD(Zero-Suppressed Binary Decision Diagram: ゼロサプレス型二分決定グラフ)が挙げられる。

なお、経路列挙の概念と類似した研究分野として、最短経路問題が挙げられる。最短経路問題は、重み付きグラフの与えられた 2 つのノード間を結ぶ経路の中で、重みが最小の経路を求める最適化問題である。最短経路問題は 2 頂点对最短経路問題、単一始点最短経路問題、全点对最短経路問題の 3 つに大別されるが、単一始点最短経路問題と全点对最短経路問題については複数ノードペア間の最短経路を列

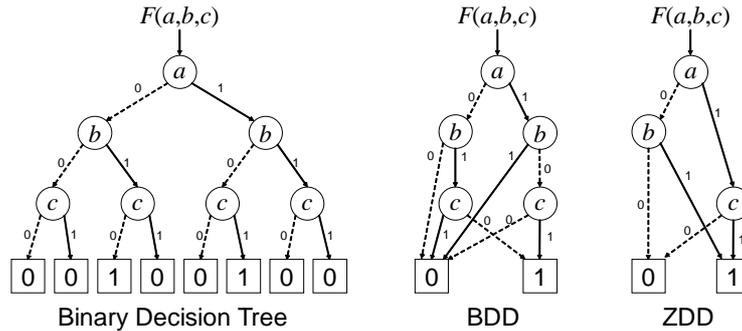


図 2.7 二分決定木と BDD/ZDD

挙する手法と言え、前者については Dijkstra 法や Bellman-Ford 法がよく知られている。後者については Warshall-Floyd 法が良く知られており、近年では Abdelghany et al.(2015)¹⁾ が並列計算による計算負荷の軽減を試みる等の発展が見られる。最短経路問題と経路列挙との端的な違いは、最短経路はノードペア間の「最短経路」をノードペア分列挙する手法であるのに対して、経路列挙はノードペア間の「全経路」をノードペア分列挙する点にある。つまり、同規模のネットワークにおいては、経路列挙のほうが列挙数は大きくなることになる。また、経路列挙については列挙解から適当な指標に基づいた最適解を即座に索引することが可能であり、その索引に用いる指標も状況に応じて変更することが可能（例えば、ある時は最短経路を、またある時は最長経路を索引する等）である点も特徴である。

2.5.3 BDD と ZDD

BDD はグラフ構造による論理関数の表現である。 $F(a,b,c) = abc \vee \bar{a}b\bar{c}$ を表現した例を図 2.7 に示す。論理関数の値を全ての変数について場合分けした結果を二分決定木で表し、これを縮約することにより BDD が得られる。このとき、場合分けする変数の順序を固定し、「冗長節点の削除：0 でも 1 でも分岐点と同じであれば分岐節点を削除して直結」と「等価節点の共有：共通の行き先を持つ分岐節点が 2 個以上あれば 1 個にまとめて他を削除」という 2 つの縮約処理を可能な限り行うことにより、論理関数をコンパクトかつ一意に表すことが知られている⁴⁾。更に、複数の論理関数を表す BDD の間においても、変数順序を固定すれば互いにサブグラフを共有することが可能であり、ひとつのメモリ空間の中で多数の論理関数データをコンパクトに圧縮して索引化することができる。

なお、BDD を構築する際に、まず二分決定木を作成してからそれを圧縮するというプロセスを経ると、常に指数関数的な時間とメモリ量を要することから現時的ではない。そこで BDD を実際に構築する際には、BDD 同士の二項論理演算の結果を表す BDD を直接生成するアルゴリズム（通称 Apply 演算）が Bryant(1986)⁸⁾ により提案され、同手法の開発がきっかけで BDD の普及が大きく進んだ。

ZDD は組合わせ集合データの処理に特化した BDD という位置づけであり、Minato(1993)⁵⁵⁾ により提案された。ZDD の等価節点の共有規則は BDD と同様であるが、冗長節点の削除規則については BDD と処理方法が異なる。具体的には、図 2.8 に示すように、1-枝が 0-終端節点を直接指している場合に、当該節点を取り除くことになる。その代わりに、BDD で削除されるような冗長節点については、ZDD においては削除しない。ZDD の構築方法については、BDD と同様に Apply 演算が用いられることもあるが、Knuth(2009)⁴²⁾ による Simpath アルゴリズムや Kawahara(2014)⁴⁰⁾ が提案する FBS (Frontier-Based Search) の計算速度のほうが圧倒的に速いことがこれまでに確認されている。これらの ZDD 構築に当たってのアルゴリズムに関しては、第 3 章にて詳述する。

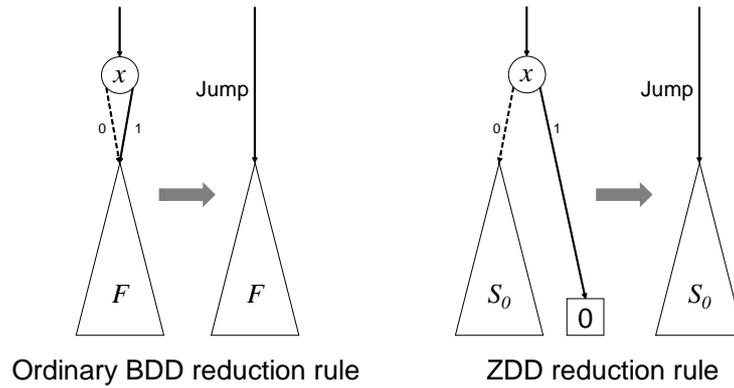


図 2.8 BDD/ZDD の簡約化規則の違い

表 2.2 BDD ファミリーの適用が想定される問題

問題	具体例
パス系問題	複数端点对パス, サイクル, 複数サイクル, ハミルトンパス・サイクル, オイラーパス・サイクル, 1 対多点間パス, 全点对パス, 有効グラフのパス・サイクル
森系問題	連結部分グラフ, 大域木・林, カットセット, k -分割カット
ハイパーグラフ	集合被覆, 集合パッキング, 集合分割
グラフ以外の問題	独立集合, 支配集合, クリーク, 頂点彩色, 部分和問題, 行列積問題, マトロイド

2.5.4 BDD ファミリーの適用可能性

グラフを辿りながら BDD/ZDD を生成する技法は、経路列挙においても有効であるが、それ以外の様々な列挙問題に対しても応用することが可能である。川原・湊(2012)¹⁰⁵⁾を参考にすると、BDD ファミリーの活用が想定される問題については表 2.2 のとおり整理できる。

最近では机上研究だけでなく社会への実装も徐々に進んでおり、例えば Inoue(2014b)³⁷⁾ や Inoue(2015)³⁸⁾ は k 箇所の発電所でカバーして配電する電力網の配線パターン列挙や、電線の切断やスイッチ故障といったリスクに備えた頑健な電力ネットワーク計画の立案に ZDD を援用している。また、Takizawa et al.(2013)⁶⁸⁾ は逆探索と ZDD の 2 つの手法を組み合わせることにより、災害時における避難所の容量制約を加味した最適な避難所割り当ての検討を行い、京都をフィールドに実装を試みている。また、同様の考え方で、Takizawa(2014)⁶⁹⁾ は住宅の間取りを単位グリッドで区切り、各グリッドの隣接関係をグラフ構造で表現し、住宅の間取りを ZDD により列挙する方法を提案している。

また、ZDD が対象とするネットワークは物理ネットワークに限定されることはなく、高橋ら(2015)¹²⁷⁾ が適用しているように、生産現場における工程設計とスケジューリングの統合的解空間から制約を見たす解を抽出する際に ZDD を活用している例も見られる。

このように、これまで難しかった列挙索引化の社会実装を可能にする強力なツールとして、ZDD は近

年適用のフィールドが拡大しているが、土木計画分野における適用は現時点では限定的であり、本研究以外では、井上・長江(2017)⁹¹⁾が交通量配分の中での適用可能性を検証しているが、それ以外には適用実績が確認されていない。

2.6 事業実施に係る合意形成に関する研究

2.6.1 地域公共交通に求められる公平性と効率性

わが国では近年、地方部を中心に公共交通サービスの提供がビジネスとして成り立たない状況が生じ始めている。しかしながら、特に需要が疎な地域においては、自家用車が利用できない人にとって公共交通は日常生活に必要不可欠な移動手段であり、現在、多くの地方公共団体では補助金等を活用し、その確保・維持・改善に努めている。

公共交通がビジネスとして成立しなくなった地域では、利潤追求を目的とする民間交通事業者に運行を委ねるだけでは社会的に必要なサービスは過少にしか供給されない可能性がある。よって、このような地域においては、喜多(2008)¹⁰⁷⁾が指摘する通り、公共交通、とりわけ地域公共交通に関しては、社会資本として捉えられるべきであろう。そして、公的主体により地域公共交通整備が行われ、その財源として税が投入される場合、道路整備事業等の他の公共事業と同様に、その事業が実施目的と照らし合わせて効果的・効率的なものであることを示し、社会的合意を得ることが必要になる。また、交通施策実施に係る公的セクターの支出額には上限があり、事業評価結果を踏まえて適切な支出額を設定する必要がある。

地域公共交通の整備の目的は様々であるが、合意形成を図る上で市民が最も関心を寄せていることは、地域公共交通が提供する「公平性」であるとされる。公平性の概念は人により異なるが、喜多(2007)¹⁰⁸⁾は地域公共交通計画を策定する際の公平性の概念を「行政投資の均等化」、「サービス特性の均等化」、「活動機会の均等化」の3つに単純化している。その中でも、最低限の活動機会を保障するという観点から、地域公共交通計画は「活動機会の均等化」に依拠するのが良いとしている。これは、地域特性の差異により住民を取り巻く地理的・社会的条件は地域間で異なるが、通院や通学等の移動を確保するというセーフティネットとしての地域公共交通はどの地域においても確保すべきという考え方であり、本研究においても、この「活動機会の均等化」を公平性の定義として考える。

また、公平性に次ぐ市民の2つ目の関心事はその公平なサービスをいかに少ない負担で手に入れるかという「効率性」である¹⁰⁸⁾。従って、地域公共交通サービスの設計においては、サービスの提供により「公平性」の確保が「効率的」に行われるかを明確にする必要がある¹³⁵⁾。公平性の確保の重要性は明らかであるが、実際には、例えば限定的な需要のために莫大な税金を費やしサービス提供を行うことは社会的に正当化され難い。つまり、公的負担の上限額を鑑み、仮に域内全域への網羅的な施策展開が難しい場合は、サービスにより提供し得る活動機会の質に留意し、最も効率的に施策の実施効果が得られそうな地区を選び施策を実施するという考え方が必要になる。

2.6.2 公共交通事業に関するパフォーマンス評価

公共交通システムのパフォーマンス評価手法については、Fielding et al.(1985)³¹⁾によって、Technical efficiency (Cost efficiency), Operational effectiveness, Service effectiveness に分類されている。ここで、Technical efficiency は、運行に伴う車両や燃料、情報システム、運転手等に関わる様々なサービス投資に対し、どれだけのサービス供給が行われたかを評価する指標である。サービス供給のレベルについては、走行台キロ等の指標が用いられている。Operational effectiveness とは、サービス投資に対して利用者による

サービス消費がどれだけ効率的に行われたかを評価する。サービス消費については、利用者数等の指標が用いられることが多い。最後に、Service effectiveness とは、サービス供給に対してどれだけサービス消費がなされたかを示す指標である。

既往研究を概観すると、Technical efficiency と Operational effectiveness に着目した研究が多く見受けられる。一方で、Service effectiveness に関する研究は、Barnum et al.(2008)⁶⁾ や Lao and Liu (2009)⁴⁶⁾ 等一部で行われているがその数は少ない。これは、指標算出において制御不能な外的要因（人口密度、アクセシビリティ等）の関与があるため、モデリングが複雑になることと、指標算出のための統合的なデータセットの構築が難しかったことに起因しているとされている⁷⁰⁾。しかし、Service effectiveness の考え方は、いわゆる公共交通に関する需給ギャップの検証と同意であり、上述した交通需要の顕在化動向の評価に直結する指標と言える。

2.6.3 需要顕在化評価に関する研究

施策効果が得られそうなターゲットを戦略的に選定する手法のひとつとして、需要顕在化指標の活用が考えられる。ある程度まとまった潜在需要があると判断される地区は、地域公共交通の整備やサービス改変、モビリティ・マネジメント等の外的インパクトによって効率的に交通需要の顕在化が図られる地区と見なせることになるため、地域公共交通利用による活動機会の均等化（公平性の確保）が効率的に図られる地区と言える。

この需要顕在化状況の評価については、竹内・山田 (1991)¹³⁶⁾ によって提案された、「公共交通の利用実態の評価を実乗車人員ではなく潜在需要によって行う」という路線ポテンシャルの考え方が一般的である。路線ポテンシャルとは、「バス路線の沿線地域がどの程度の需要を発生する可能性を持つか」を表す指標であり、バス停勢力圏内の居住人口や従業人口、生徒数、病床数等を説明変数に持つ回帰モデルにより算出される。この考え方は、パフォーマンス評価指標のうち、Service effectiveness の考え方と整合的と言える。路線ポテンシャルの導入により、路線別の効率性の議論が明確になるだけでなく、各路線の性格を踏まえた公共交通計画の策定が可能になった。

同指標はその後の多くのバス路線計画に関連する研究に援用されており、例えば、杉尾ら (2001)¹²³⁾ は GIS を用いて路線ポテンシャルと限定依存人口を計測し、その結果をバス路線網代替案作成に活用する研究を行っている。溝上ら (2005)¹⁶⁵⁾ は竹内・山田や杉尾らの考え方を踏襲し、バス輸送の持つ生産効率性と潜在需要の顕在化可能性という2つの視点からバス路線の特性評価を行い、評価結果に基づくバス路線網の再編計画を検討している。また、谷本・吉田 (2010)¹³⁷⁾ は回帰式によるポテンシャルモデルに関する一般性・汎用性の面での問題点を踏まえ、路線沿線人口に原単位を乗じることで潜在需要を計測する手法を提案している。

また、需要顕在化評価と類似した研究分野として、アクセシビリティ指標の計測がある。アクセシビリティ指標は、公共交通及び自動車によると市内の様々な施設への行きやすさを定量的に示す指標であり、その定義においてはこれまで様々な考え方が提示されているが、例えば、加知ら (2006)¹⁰²⁾ は、主要施設の配置を考慮したアクセシビリティ指標群を提案し、交通利便性評価の枠組みを示した。吉田 (2010)¹⁸⁴⁾ は、路線ポテンシャルの概念を基本として、路線バスを対象に人口分布や生活関連施設の立地を考慮した空間的なアクセシビリティを計測し、その水準が公共交通需要の発生強度に与える影響を定量評価している。また、家田ら (2014a, 2014b)^{87, 88)} は、我が国における公共交通サービスについて、人口・面積等の条件の差異を捨象して、単純・統一的に評価するための手法としてアクセシビリティ指標を定式化した。全国の市町村を対象に、「鉄道・バスの路線長」、「鉄道・バスの平均運行本数」、「鉄道・バスの運賃」等の公

公共交通に関するデータをもとに、可住地人口密度等に応じた標準的な公共交通のサービス水準等を整理している。同研究成果はその後、国土交通省において実用化に向けた検討が進められており、各市町村における公共交通のサービスを相対化・見える化した評価カルテの作成が行われ、既に一定規模以上の市町村に配布されている。

これらの路線ポテンシャルやアクセシビリティ指標については、現況の実態や施策の導入効果を定量的に評価することが可能であるため、地域公共交通に係る政策判断の根拠として有用なものである。

しかしながら、路線ポテンシャルについては計測単位が路線であり、地区全体としての地域公共交通の利用可能性の視点が欠けていること、アクセシビリティ指標については、地区間での相対評価の際に各地区の異質性を評価しにくいこと等、いずれも実装に当たっていくつかの解決すべき課題を抱えている。その詳細と解決の方向性については、第5章にて記述する。

2.7 研究の位置づけ

本章のまとめとして、ここまでの整理をもとに本研究の位置づけを整理する。また、表 2.3 にてその概要を整理する。本研究では以下の3つのテーマを柱に次章以降で検討を行う。

2.7.1 構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援方法の検討

デマンド交通等の需要応答型の地域公共交通機関の実運用の場面においては、運行を取り巻く環境（例えば、時間制約の強い利用者が乗車する、渋滞や事故等により予定ルートの通行ができなくなる、利用者が急にキャンセルする等）が動的に変わったことを示す情報が得られた際に、運行計画システムに求められるのは、速やかに最適なサービスを再度計算し提案することである。また、その前提として、全ての乗客の移動需要を漏れなく、可能な限り利便性や採算性を鑑みつつ輸送することが求められる。

このように各利用者の様々な制約の中でリアルタイムに最適な運行内容を確定しなければならない運行管理の場面では、DEAPのような最適化計算によって環境変化が起こるたびに逐次的に計算を行うことは計算コストの観点から難しいことがある。そこで本研究では、事前の実現可能解を全て列挙し、状況に応じてそこから索引するオペレーション手法の有効性について検証を行う。これまでは計算コストの面から活用の機会が限定されていた列挙アルゴリズムであるが、近年の計算機性能の向上等に伴い、想定される実現可能解を全て列挙し、ソートすることで最適解を導出する列挙索引化手法の改良及び工学的応用が進んでいる。本研究では列挙索引化技法のひとつである ZDD をデータの構造化処理に適用し、運転手の割り当てと運行経路を効率的に提示する運行管理支援ツールの開発を行う。

2.7.2 構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画の検討

地域公共交通ネットワーク計画検討のための最適化手法としては、需要サイドと供給サイドの視点を両方同時に取扱う二段階最適化問題の優位性が高いことが既往研究等から明らかになってきている。しかしながら、その解法アルゴリズムについては未だ明確な優位性が示されておらず、遺伝的アルゴリズム等の様々なヒューリスティクス手法が試行錯誤されている状況にある。解法アルゴリズムにおける大きな課題として、多くのヒューリスティクス手法は近傍設計やパラメータ・チューニングの負担が大きい点である。そのような中、最近では近傍設計が不要であり、かつパラメータ設定に任意性の介入が少ない CE 法が注目されている。本研究では CE 法の考え方を基本に、CE 法における確率分布の設定において ZDD による構造化処理を組み込んだ二段階最適化問題の解法アルゴリズムを提案する。

2.7.3 需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開の検討

ルートやオペレーション等の交通施策を検討した上で、次に課題となるのはその施策の展開方法である。公的セクターの視点から地域公共交通事業を検討する際に重要になることは、限られた予算規模の中で公平性と効率性を両立させ、社会的に合意形成を図りつつ交通施策を検討することである。そのためには、地域内における施策の優先順位の検討が必須となり、既往研究の中では需要顕在化指標の適用による施策優先順位の検討の有効性が指摘されている。しかしながら、既往の需要顕在化指標やアクセシビリティ指標については、優先順位評価に適用するに当たって解決しなければならない問題をいくつか抱えており、本研究においてそれらの問題をカバーした需要顕在化に関する評価手法の提案を行う。更に、実際の都市における地域公共交通施策の検討に提案モデルを適用し、その適用可能性について検証する。

表 2.3 取扱い対象から見た本研究の対象と各章の位置づけ

段階	実施主体	イメージ	概要
計画段階	計画者 行政等	<p>OD及びネットワーク条件に応じた最適なバス路線を決定</p> <p>道路ネットワーク OD需要</p>	<p>第4章 構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画</p> <ul style="list-style-type: none"> OD需要量及び道路ネットワーク条件が与えられた中での路線バスのネットワーク計画(ルート及び運行便数)の検討を行う 従来は二段階最適化問題により表現 <p>→二段階最適化問題によりバス路線の最適化問題を記述し, CE法とZDDを組み合わせた解法アルゴリズムを提案</p>
運営段階	運営者 交通事業者等	<p>担当エリア及び各運転手の運行ルートを決定</p> <p>運転手A ⑤ → ①</p> <p>運転手B ⑤ → ①</p>	<p>第3章 構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援</p> <ul style="list-style-type: none"> 車両台数(運転手人数), 需要分布, 起終点等の情報が与えられた中でのデマンド交通車両の運転手の割り当て及び各運転手の輸送ルートの検討を行う 従来はDARP等の最適化問題により表現 <p>→運転手の割り当ておよび各車両の運行ルートをZDDを活用した構造化処理により表現</p>
政策判断段階	評価者 行政等	<p>需要顕在化指標をもとに施策内容・展開エリアの優先順位を検討</p> <p>デマンド交通の利用促進 路線バス デマンド交通運行エリア 路線バスの利用促進</p>	<p>第5章 需要顕在化指標を用いた公共交通施策の戦略的な展開</p> <ul style="list-style-type: none"> 所与の公共交通サービスの条件下における移動需要の顕在化傾向を把握し, 今後重点的に顕在化を図っていくべき地区を把握 従来は路線ポテンシャル指標により路線別に評価 <p>→DEA及びDEAとMalmquist指数の組み合わせにより評価</p>

第3章

構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援

3.1 緒言

近年、デマンド交通等の需要応答型交通の全国的な展開が進んでおり、その運行形態は各導入地域の特性に応じて多種多様なものとなっている。しかしながら、基本的には予約した乗客の需要に合わせて効率的に移動するサービスを提供するものであると言えよう。つまり、運転手の割り当て問題や各運転手のルーティング問題を動的に取扱い、リアルタイムなサービスを提案する必要がある。第2章で整理したとおり、デマンド交通のスケジューリングにおいては DARP を基本としたモデルが広く用いられているが、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。そのため実装に当たっては、多くの場合、ヒューリスティクスにより近似解を導出する例が多い。

一方で青野ら (2015)⁸¹⁾ が指摘するように、これまでのデマンド交通の運行・輸送経路問題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。しかしながら、少人数のニーズに応えつつ運行する交通機関だからこそ、利用者のニーズや移動実態を十分に踏まえたサービスにする必要性は高い。路線バス等の路線定期運行は需要を集約し運行計画を検討する集約型の検討が必要なのに対して、デマンド交通は個別需要をそのまま取扱う非集計型の検討が必要であると言えよう。

また、デマンド交通の実運用に目を向けると、最適解もしくは準最適解をひとつだけ求めるのではなく、ある一定の条件を満たす経路をいくつか列挙できると、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。実際に、交通事業者がデマンド交通の運行経路を検討する際には、利用者の希望や制約に応じて便ごとに経路選択における制約条件が変わることがある。例えば図 3.1 に示すように、通常は交通事業者の運行経費を最小化するように運行経路を決めていたとしても、鉄道への乗換客が乗車する便については、目的地到着の遅れ時間が生じないようなスケジュールに変更するといったことは実際のデマンド交通の運行においても行われていることである。また、制約条件が変わらない場合でも、利用者の突然のキャンセルによる需要分布の変化への対応や、事故等による道路の寸断等、ネットワーク形状の変化への対応が求められることも多く、このような外部環境の変化に応じ、臨機応変な運行経路を即座に検討することが必要とされている。

その点、列挙索引化技法は、事前実現可能な解を全て列挙し索引化するため、環境変化が生じた際に即座に最適解を索引できる点に大きな利点がある。また、実際の運行の現場では、いくつかの実現可能な運行経路の組み合わせの中から評価尺度別に上位何件かを取り出して比較検討したり、与えられた制約を満

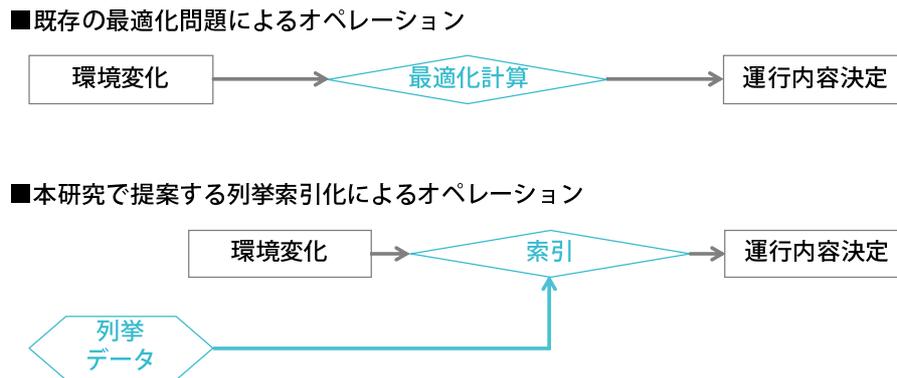


図 3.2 最適化と列挙索引化のオペレーションにおける適用の違い

以上で述べたような経路列挙の有効性を鑑み、本研究では、所与の道路ネットワーク条件のもとで実現可能なデマンド交通運行経路の全ての構成を列挙索引化技法により求める。最適解をひとつ求めるだけであれば、わざわざ解を全て列挙しなくても、はるかに短い時間で計算できる場合がある。しかし、制約条件の性質によっては、結局全列挙する以外に真の最適解を見つけられない問題も存在する。また、前述の通り、実際のデマンド交通の運営においては、運行便ごとに制約条件や需要分布が変化する場合も多いため、現地での様々な問題に臨機応変に対応する意味でも、ある条件を満たす解を列挙索引化する技術の有用性は高いと言える。更に、最適解のみならず次善の解も含めた代替案を得ることができることは、利用客の層に応じたサービスの提案の実現につながることから、利用者満足度の観点からも望ましいと言える。

更に、需要が疎な地域では運転手のリソースが限られていることも多く、運転手の配置計画も重要な課題であり、各運転手の経路列挙の前段階の検討項目として、協力可能な運転手が複数名存在する場合、各利用者にとどの運転手を割り当てるかという問題についても取扱う必要がある。例えば、運転手側の事情として、デマンド交通は地域のタクシー事業者等の中小規模の事業者が担い手となる例が多く、一般タクシーと兼務する形でデマンド交通事業を運営している例も見られる。よって、一般タクシーに手を取られる時間帯は割り当てられる運転手が制限されてしまい、繁忙時間帯と閑散時間帯で運転手の割り当てを動的に見直す必要がある例も見られる。本研究では同問題に関しても、同じく列挙索引化技法を用いた運営手法の提案を行う。なお、本研究では、主にデータ・マイニングの分野で近年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列挙索引化技法として扱うこととする。

3.2 ZDD のバス運行経路管理への適用

3.2.1 ZDD の概要

本研究で取扱う ZDD は、Minato(1993)⁵⁵⁾ 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。本研究は ZDD の特性を活かした分析であり、当データ構造の理解が不可欠であることから、ここでは湊(2012)¹⁶⁶⁾ に基づいて、ZDD による経路の組合わせ列挙の表現について簡単な説明を加える。

例として、図 3.3 に示すグラフ構造を取扱う。グラフ $G = (V, E)$ と G 上の 2 点 s, t が与えられた状況で、 $s - t$ を結ぶリンクの重複を許容しない経路を全て列挙する問題を考える。換言すると、これは与えられたグラフ構造から制約条件を満たす部分グラフ構造を構築する問題であるとも言える。グラフにおけ

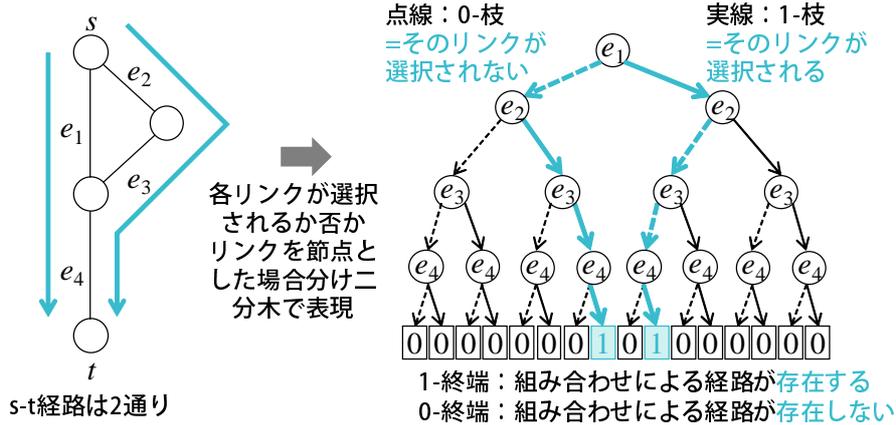


図 3.3 グラフ G (左) と $s-t$ 経路の場合分け二分木 D (右)

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 3.3 (左) において各リンクに $D = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 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 3.3 (右) の通り示される。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、このとき出力され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 の構築に当たっては、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 3.4 参照)。

●冗長節点の削除

ある節点 n_i の 1-枝が 0-終端を指している場合に、この節点を取り除き、ひとつ上の階層の節点 n_{i-1} から節点 n_i に指している枝を、節点 n_i における 0-枝の行き先に直結させる処理のことを指す。

●等価節点の共有

節点名が同一であり、なおかつ 0-枝同士、1-枝同士の行先が同じ節点を共有する処理のことを指す。

3.2.2 $s-t$ 経路集合を表す ZDD の構築アルゴリズム

前節で紹介した ZDD の生成方法は、根節点から深さ優先でグラフをバックトラックして辿り、冗長節点の削除と等価節点の共有を可能な限り繰り返す技法である。しかし、このような形で二分木を毎回作成しては、膨大な組み合わせを持つ問題を扱う際に現実的な時間内で計算ができない。そこで、Knuth(2009)⁴²⁾ が提案した経路列挙アルゴリズム (Simpath) の適用が有効である。同技法は、任意のグラフのある 2 点間を端点とする経路を列挙するためのアルゴリズムであり、経路完成の見通しが立たなくなった時点でその節点を 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処理を施す点の特徴である。経路の列挙と節点の共有を同時並行で進めるため、途中段階で作成される節点の数が少なくなり、高速に ZDD を構築することができる点が大きなメリットと言える。

具体的には、深さ優先で探索を行う中で 0-枝または 1-枝の先の節点を作成する際に、「 $s-t$ 経路の完

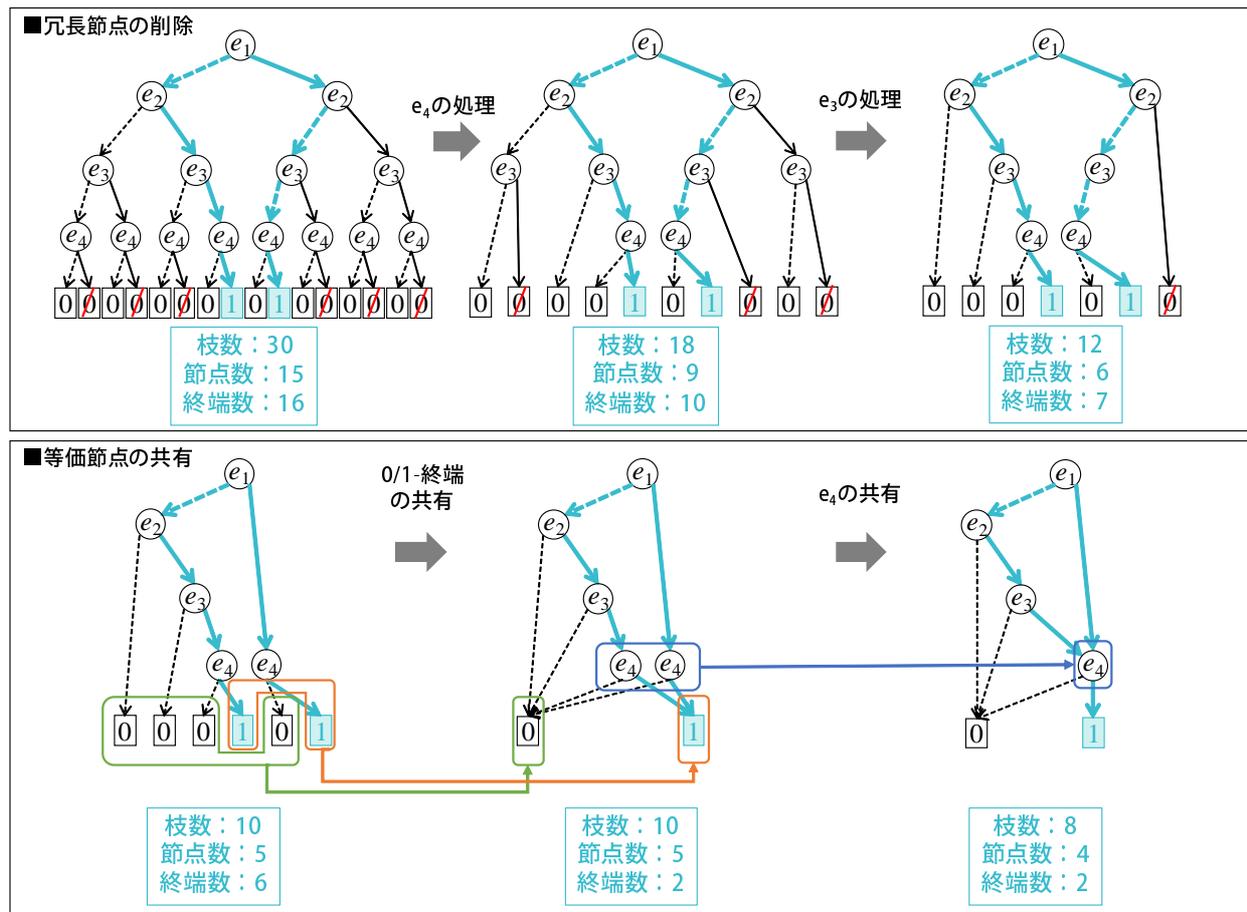


図 3.4 冗長節点の削除と等価接点の共有

成の見込み」があるかどうかを判定し、その時点で見込みがない場合は枝の先を直接 0-終端に接続し、それ以上の子節点を作成しないという処理を行うことになる。この「 $s-t$ 経路完成の見込み」の有無については、グラフ内のノード v に次数 $deg[v]$ と連結成分 $comp[v]$ の情報を持たせ、経路を示す二分木の節点 n が持つ配列を $n.deg$ と $n.comp$ で表し、それぞれの値を節点に記憶することで効率よく判定することを可能にしている。ここで、次数とはグラフにおいて各ノードに接続しているリンクの本数を意味している。また「グラフ $G = (V, E)$ が連結である」とは、任意の 2 ノード $v, w \in V$ に対して、 w から v に至る経路が存在していることを意味しており、連結成分の値は、ノード v と w が部分グラフの同一の連結成分に含まれている場合は $comp[v] = comp[w]$ を取り、含まれていない場合は $comp[v] \neq comp[w]$ を取る 1 から n までの自然数とする。なお、初期値として $comp[v_i]$ は i に設定する。

本研究における次数と連結成分の更新におけるアルゴリズムの考え方を図 3.5 に示す。同技法については、先述の Simpath をもとに Kawahara et al.(2014)⁴⁰⁾ が提案した FBS (Frontier-Based Search) を援用している。FBS は、Simpath を経路だけでなく全域木や頂点被覆等の様々な部分グラフを表す ZDD を構築できるように汎用化したアルゴリズムである。ZDD を構築するアルゴリズムについては、主に Simpath, FBS, ZDD 同士の集合演算 (通称 Apply 演算⁸⁾) によるものに大別されるが、Apply 演算と FBS を比較すると、経路列挙の ZDD を構築する上では、FBS の計算速度が圧倒的であることが確認されている¹⁶⁶⁾。また、Simpath と比較した場合でも、FBS の経路列挙の方が、本研究で取扱うグリッド型ネットワークを含め、多くのネットワーク形状において計算速度の面で優れていることが確認されている⁴⁰⁾。これらの既往研究成果を踏まえ、本研究では FBS を ZDD の構築アルゴリズムとして採用した。

3.2.3 FBS のフロー

ここでは、図 3.5 に示すリンク数 5、ノード数 4 で構築されるグラフにおける経路を ZDD で表現することを考える。以下、FBS の計算フローを概説する。

■初期状態 各ノードに次数と連結成分の初期値 $n'.deg$ と $n'.comp$ を設定する。初期状態においては、いずれのリンクも選択されていない状態であるため全ノードが孤立点であり、次数は全て 0 である。また、いずれのノードも連結されていない状態であるため、連結成分は全て異なり、それぞれノード番号のサフィックスと同値を設定する。

■リンク e_1 が選択されない場合 グラフ内リンク e_1 が選択されない状態を示す二分木内の節点 n_0 については、リンクが何も選択されていない初期状態 n' に対して新たなリンクが追加されない状態であるため、次数と連結成分の変更が生じない。よって、初期値 $n'.deg$ と $n'.comp$ の情報がそのまま $n_0.deg$ と $n_0.comp$ にコピーされる。

■リンク e_1 が選択される場合 リンク e_1 が選択された状態を示す節点 n_1 においては、リンク e_1 の両端のノードの次数が 1 増える。また、これら 2 つのノードで連結成分が結合されることになるため、 $n'.comp$ の値が更新される。なお、更新に当たっては、連結成分番号が大きい方の値を小さい方の値に書き換えるというルールのもとで処理を行っている。

■終了条件 以上の処理を e_5 まで全リンクについて行い、次数・連結成分の値から $s-t$ 経路の完成の見込みがあるかどうかを確認する。ここで、経路完成の判断基準については、経路の種類によって異なり、詳細については Kawahara et al.(2014)⁴⁰⁾ で紹介されているため参考にされたい。なお、ここでは例として、後ほど数値計算にて取扱うハミルトン経路（全体グラフの全てのノードを通る $s-t$ 経路）のケースをもとに説明する。

ハミルトン経路の場合、表 3.1 に示す 5 つの条件について、いずれも一度も満たされないことが経路成

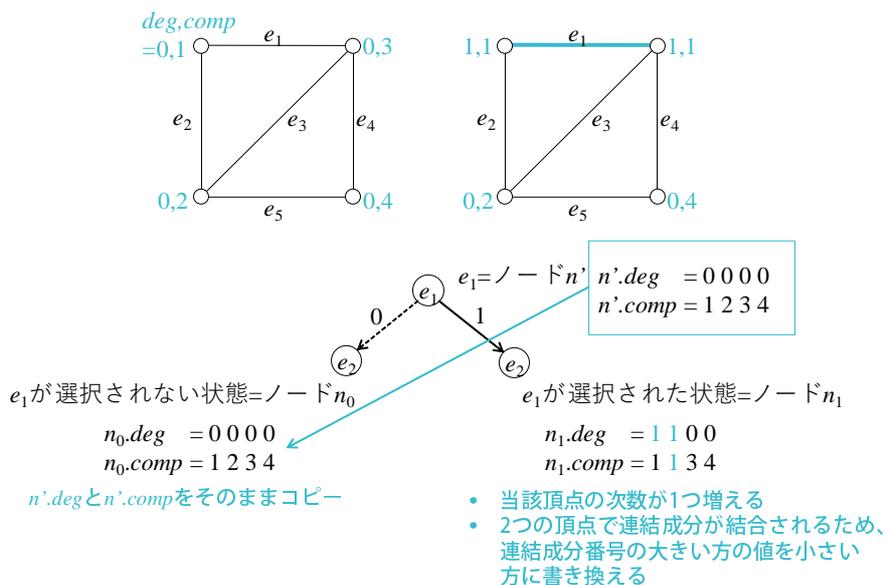


図 3.5 次数及び連結成分の更新の様子

表 3.1 ハミルトン経路が成立しない条件

条件	
1	s または t の次数が 2 以上
2	s, t 以外のノードの次数が 3 以上
3	ノードの次数が 0 に確定
4	$s - t$ 経路が途中で分断 (s と t の連結成分が異なる)
5	サイクルの発生 ($comp[v] = comp[w]$ ($v, w \neq 0$)) であるノード v, w が連結

表 3.2 FBS による取扱いデータ量の圧縮

状態	枝数	節点数	終端数
二分木完成時	60	31	32
FBS 計算中 (最大値)	26	13	14
ZDD 完成時	16	8	2

立の条件である。つまり、次数と連結成分より、「 s と t の次数は 1、それ以外のノードの次数は 2 でありサイクルを含まない状態」ということが確定した際に、その部分グラフを示す二分木は 1-終端に接続される。逆に上記 5 つのいずれかに該当した場合、即座に当該節点は 0-終端に接続され、それ以上の探索は行われなくなる。このように、ZDD は一度二分木を作成した後にデータ圧縮を行うのではなく、二分木を作成しながら経路の完成見込みがないと判断した瞬間に枝刈りを行う点に特徴がある。図 3.5 に示すグラフに関しては、表 3.2 に示す通り、一度二分木を構築してしまうと枝数 62、節点数 31 というデータ量となるが、FBS を用いると二分木の節点を作成しつつ枝刈りを行うことで冗長な情報が大きく圧縮され、計算途中の最大値でも枝数 26、節点数 13 まで低下する。このような取扱うデータ量の違いは、今回のような非常に単純なグラフでは大きな計算コストの差異となることはないが、グラフ構造が複雑になると顕著に表れることになる。

なお、上記の手続きでは、経路完成の見込みがない場合に 0-終端に直結させることにより無駄な計算を省いているが、FBS では更に、二分決定木を構築する際に、「等価な途中状態」を持つ複数の節点をひとつに共有することで、計算量の大幅な圧縮を実現している。ここで、等価な途中状態とは、残りのリンクの取捨選択によって経路が成立するか否かが全く同じ結果となるようなリンクの組み合わせのことを指す。残りのリンクの組み合わせが同じになるかどうか判定するには、フロンティアと呼ばれるノード集合の状態を確認する。フロンティアとは、すでに処理済みのリンクと未処理のリンクとの両方に接続するノードの集合である。例えば、図 3.6 において、 $s - t$ 経路を列挙すべく e_1 から e_{12} までのリンクを処理したとすると、フロンティアとなるノード集合は v_7, v_8, v_9, v_{10} である。このとき、図 3.6 のどちらの状態も、残りのリンクで v_8 と v_{10} を連結し、更に v_7 と終点 $t(e_{16})$ が連結できれば良いため、以降のリンクの取捨選択の制約条件は全く同じである。つまり、 e_{13} より下位の二分木が完全に一致し、途中状態が等価であるため、 e_{13} のレベルで節点を共有してしまうことが可能である。

以上で説明した FBS による ZDD 構築アルゴリズムについて、疑似コードの形で表 3.3 に整理した。表内 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-

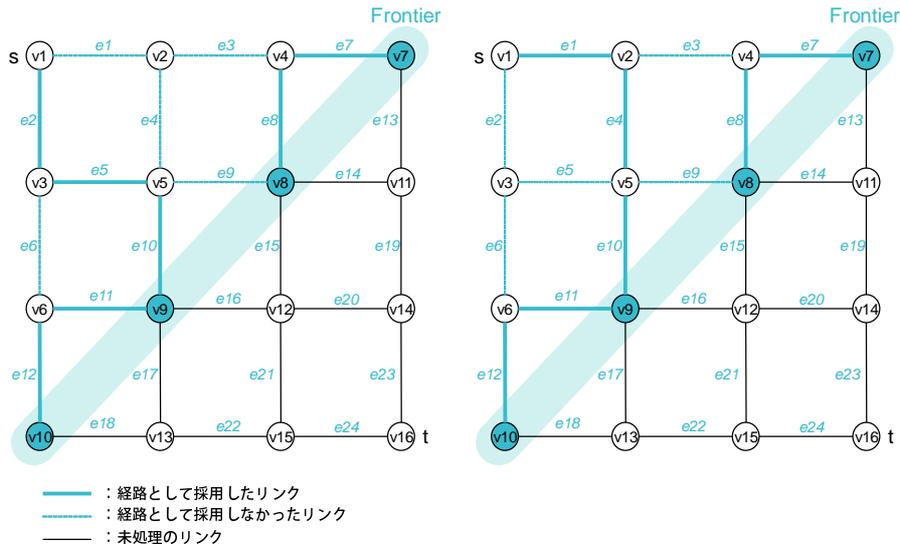


図 3.6 等価な途中状態の例

表 3.3 FBS による 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
3	for すでに作成済みの i 段目の各ノード n について do
4	for $x = 0, 1$ do // 0-枝, 1-枝の処理
5	収束条件の判定 (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'' が既に存在 (c)
9	then $n' \leftarrow n''$
10	else n の x - 枝の先を n' とする
11	end for
12	end for
13	end for

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. ここでは, $s-t$ 経路としてハミルトン経路を仮定し, 表 3.1 に示す各ノードの次数及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. なお, 終端に接続する場合は, 6-11 行目は実行しない. 7 行目ではノードに記憶させる情報 (次数 deg 及び連結成分 $comp$) 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.

3.2.4 数値計算実験

(1) 簡易ネットワークを対象とした経路列挙

本項では、前項にて紹介した FBS に基づく ZDD の構築方法をデマンド交通の運行経路の列挙索引化に援用する。ここでは、仮想都市として図 3.7 に示す 5 × 5 のグリッドで表現されるグラフ構造を設定する。ここで、グラフ内のノードはデマンド交通利用候補者の位置（各ノードに利用候補者が 1 名ずつ存在している状態を仮定する。なお、グラフ内でハッチングされているノードについては、後述する分析ケース内で利用者を実際に配置した需要発生ノードである。）、リンクは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、各リンクの通過時間（単位：min）が図 3.7 に示す通りリンクの重み情報として設定されている。

設定したグラフを用い、表 3.4 に示すケース 1 ~ 3 について経路の列挙を試みた。ここでは計算の簡略化のため、いずれのケースについても、デマンド交通車両は必ず起点ノード 1 から終点ノード 36 に向かう設定とした。運行経路の成立の可否の判別に当たっては、前章で説明したハミルトン経路の判別方法に則るが、その際、次数が 2 に確定するノードについては、各ケースで設定した需要発生ノードに限定する設定を置いている。つまり、利用者が存在するノードについては全て経由し、利用者が存在しないその他のノードについては経由の義務を設けずに目的地に到着するルートを列挙している。なお、本試算に当たっては、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 Graphillion³⁶⁾ を使用した。

ZDD の構築によって得られる各ケースの経路列挙の結果については表 3.4 に示す通りである。ケース 1 についてはノード 1 ~ ノード 36 間の迂回を許容する $s-t$ 経路の探索に等しい。本試算で扱ったグラフ構造はグリッド形の非常に単純なものであるが、それでも 2 ノード間の経路数は 120 万以上と膨大である。また、ケース 2 で需要発生ノードを増やしたり、ケース 3 でリンクをカットしたりすることで経路の制約を強めた場合については、ケース 1 で構築した ZDD から索引することで列挙が可能であり、数万 ~ 数十万の経路列挙がなされている。また、これ以外にも、出発地 ~ 目的地までの所要時間の上限を設定

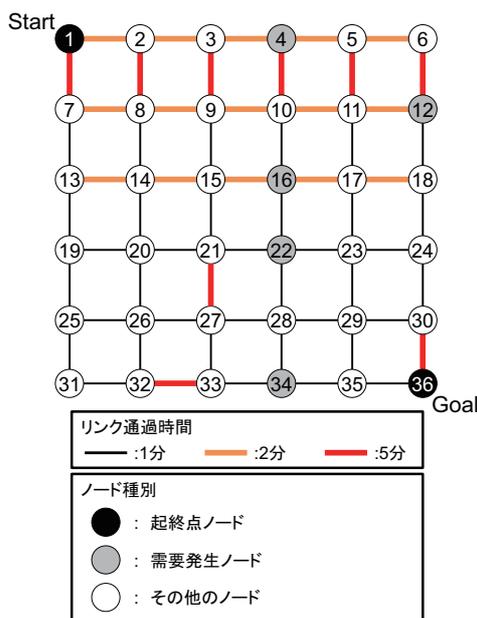


図 3.7 使用するグラフ構造

表 3.4 分析ケース別経路列挙数

ケース	需要発生ノード	経路列挙数	計算時間 [sec]		
			構築	索引	ソート
ケース 1	ノード 1	1,262,816	0.006	-	0.008
ケース 2	ノード 1,4,12,16,22,34	313,633	-	0.004	0.006
ケース 3	ノード 1,4,12,16,22,34 ^a	64,506	-	0.007	0.005

^a リンク (22,28), (28,34) が通行止の場合

する等、リンクに付与している重み情報（所要時間）を活用した索引も可能である。また、乗客の上限人数を設定する、ある利用者の送迎時刻をあらかじめ設定したタイムウィンドウ内で行う、といった制約についても、ZDD 構築時に保存する情報を追加することで同様に索引することが可能となる。

次に、ZDD 構築における計算コストについて既往の列挙アルゴリズムとの比較のもとで検証する。表 3.5 はグリッドの対角 2 ノードを連結する経路の列挙を行っており、図 3.8 は様々なグリッド数の組み合わせごとに経路列挙数の感度を確認した結果を示しているが、グリッドの増加に伴い経路列挙数は指数関数的に増加している。実際の都市における道路ネットワークは更に複雑であることもあり、複雑なグラフ構造を対象に単純な数え上げによる列挙を行うことはほぼ不可能と言えよう（計算環境：3.40GHz Intel Core i7-6700 / Mem: 16GB）。実際に、DFS（Depth-First Search：深さ優先探索）により数え上げを行った場合、 $n < 4$ では ZDD とほぼ同等の計算速度が発揮されているが、 $n = 5$ では 1.047sec（ZDD の約 200 倍）、 $n = 6$ では 626.663sec（同じく約 24,000 倍）の計算時間が掛かっており、 $n > 7$ の規模になると、今回の計算環境では現実的な時間で解くことが難しくなった（表内 T/O: Time-Out）。その点、FBS を用いて ZDD を構築する場合、図 3.9 に示すように n に対しておよそ 3^n に比例した時間で計算ができることが確認されており、本研究においてもグリッド数 $n = 12$ （ノード数 169, リンク数 312）までは数分で計算が終了することを確認している。

また、リンクに重みが付与されている場合でも、ケース 1 の ZDD 構築・列挙に掛かる計算時間は表 3.4 に示すように 0.006sec と極めて効率的に解の列挙ができた。また、ケース 2・ケース 3 については、ケース 1 に対して新たに制約を追加している位置づけであることから、ケース 1 で構築した ZDD から経路を索引することで導出できる。索引に関しても、両ケースとも瞬時に処理することが可能であることが確認され、一度全列挙をしておけば、列挙するサブグラフが変更されても大きな計算時間をかけることなく様々なパタンの経路を索引することができることが確認できた。このように、ZDD を一度構築してしまえば、グラフ構造が変わらない限り再度 ZDD を構築することなく、索引処理のみで経路の列挙が可能になる点が大きなメリットである。

また、ZDD による経路列挙のもうひとつの大きなメリットとして、列挙された全経路を圧縮された状態を保持したまま、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。図 3.10 に各ケースにおける最短経路の探索結果のアウトプット例を示しているが、ZDD で取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ルートの探索以外にも、目的関数に応じた経路の探索が可能である。また、表 3.4 に示すように、重み情報によるソートについても短時間での出力が可能となっている。

表 3.5 グリッド数 $n = 12$ までの経路列挙数と計算時間

n	経路列挙数	ZDD 計算時間 [sec]	DFS 計算時間 [sec]
1	2	<0.001	<0.001
2	12	<0.001	<0.001
3	184	<0.001	0.001
4	8,512	0.002	0.006
5	1,262,816	0.005	1.047
6	5.758×10^8	0.027	626.663
7	7.894×10^{11}	0.106	T/O ^a
8	3.267×10^{15}	0.304	T/O
9	4.104×10^{19}	1.425	T/O
10	1.569×10^{24}	6.592	T/O
11	1.824×10^{29}	45.867	T/O
12	6.453×10^{34}	267.553	T/O

^a T/O: Time-Out (今回の計算環境のもとでは現実的な計算時間で解くことができなかったもの)

(2) 列挙数に基づいたネットワークにおける各利用者の影響度の把握

デマンド交通事業は個人レベルでの輸送手段であり、基本的には乗客個々人のニーズに応えることを主目的としている。しかしながら、持続可能な地域の足の確保の観点からは、事業継続性も同時に考えなければならず、効率的な運営のためには、運営側としては、運行便当たりの利用者をできるだけ多く確保する（多くの人に乗り合ってもらおう）ことが重要である。しかし、その際に運行コストや利用者の満足度が大きく悪化することは望ましくないため、効率的な需要の束ね方が重要となる。つまり、運行コストや満足度を大きく悪化させない利用者に積極的に便乗してもらおうことを考えることは、（ここでは公平性の観点を無視するとして）営業戦略的に見ると望ましい。

ここでは、ケース1～3の需要発生ノード及びネットワーク条件下で、現在デマンド交通を利用していないある1名がデマンド交通車両に便乗することになった場合の列挙解の変化を計測し、ネットワークにおける影響度合いを指標化（以降、影響度指標と呼ぶ）することを試みた。ここでは、影響度指標として「経路列挙数」と「全列挙解の目的関数値」の2つの指標を用いることでその挙動を確認している。なお、ここでの運行計画における目的関数は「運行に掛かる所要時間の最小化」としている。

ある1名の追加利用が発生することで、その追加利用者が存在するノードを経由する経路を選択する必要が生じることから、(1)の計算結果からもわかるように、経路列挙数は現状維持もしくは減少することになる。経路列挙数が減少するという事は、運転手及び利用者の経路の選択肢集合が減少することを意味する。ここでは若干強い仮定であるが、「選択肢集合が多い方が、運転手及び利用者の経路選択の自由度が高まることにつながり、結局は各自の効用が高まる」という考え方のもと、経路列挙数の変動を影響度指標のひとつとして選定した。また、もうひとつの指標である目的関数値（所要時間）については、利用者の乗車時間及び待ち時間、運転手の拘束時間と連動していることから、利用者・運転手のデマンド交通利用に対する抵抗要因（経済的・身体的・精神的負担度合い）を表現する影響度指標として選定した。

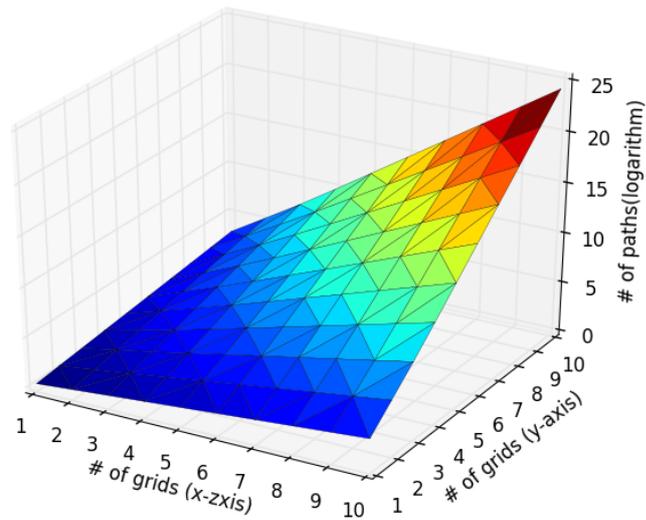


図 3.8 グリッド数-経路列挙数の感度分析

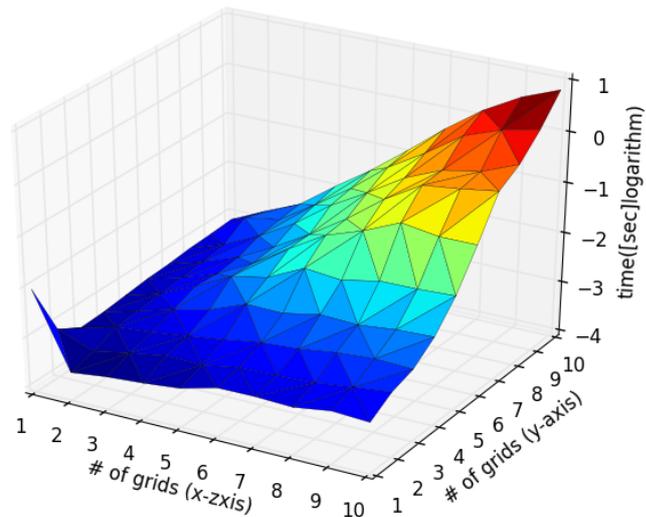


図 3.9 グリッド数-経路列挙に掛かる計算時間の感度分析

なお、今回使用した指標以外についても、運行コストや収支差、遅延時間等、影響度指標として適当なものは存在すると考えられ、実運用におけるニーズを踏まえ、今後の研究の中で指標選定のあり方については検討を深化する必要がある。ここでは飽くまでも試行的に上記2指標を用いて影響度の把握を行った点に留意されたい。

■経路列挙数 経路列挙数の変動結果について図 3.11 に示す。需要の発生がノード 1 のみ（つまりケース 1 の計算結果と同意）の場合は、(1) で示した通り 1,262,816 通りの列挙解が得られるのに対し、ノード 1 以外のある単一ノードでデマンド交通の追加利用が発生した場合、追加利用なしの場合と比較して概ね

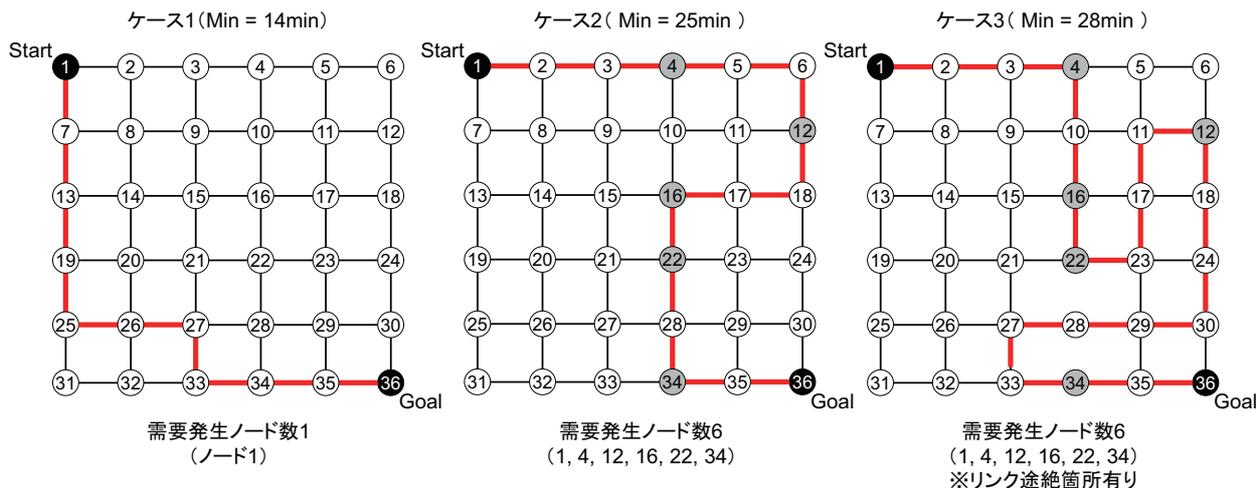


図 3.10 各ケースにおける最短運行経路の一例

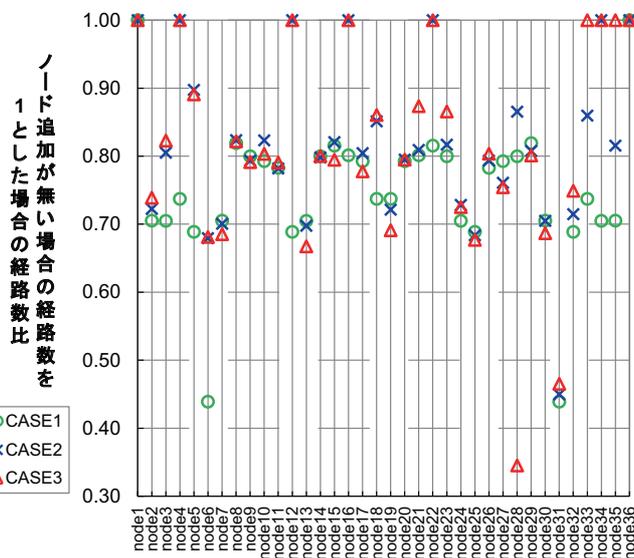


図 3.11 各ノード需要発生時の経路数の変化

70 ~ 80% (80 万 ~ 100 万通り程度) まで列挙数が低下することがわかる。ただし、ノード 6 及びノード 31 が追加で利用した際の挙動だけは他と大きく異なり、列挙数が大きく落ち込み、44% (55 万通り程度) まで列挙数が低下している。これは、当該ノードを経由することで経路選択の幅が大きく狭まることを意味しており、デマンド交通の関係者 (つまり運営者及び当該ノード以外に立地するデマンド交通利用者) にとってみれば、ノード 6 及びノード 31 の利用者は、若干乱暴な表現を使うと「自分たちの経路選択の自由度を低下させる存在」となっている。

しかし、この傾向はネットワーク条件が変わると状況が異なる。図 3.11 内ケース 2 の結果においては、近くに需要発生ノードが立地していないノード 31 が追加で利用した場合は、依然として全体の列挙数を大きく低下させているが、同じくケース 1 で全体の列挙数を下げていたノード 6 については、近隣のノードでデマンド交通が利用されていることに起因して、列挙数を大きく下げることがなくなっている。また、ケース 3 ではノード 28 の利用に伴う列挙数の低下が著しくなっている。これはノード 28 が途絶リンク (22, 28), (28, 34) の周辺に立地していることが大きな要因になっていると考えられる。

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

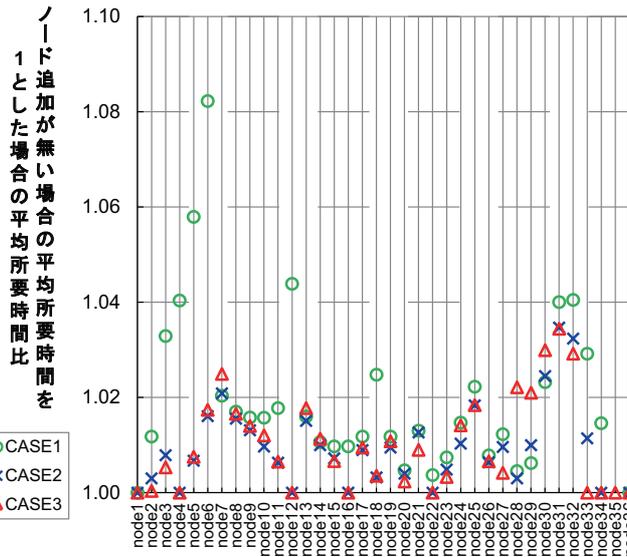


図 3.12 各ノード需要発生時の平均所要時間の変化

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把握できる。

■目的関数値（所要時間）の平均値 続いて、上で導出した列挙解とリンクに付与した重み係数を活用して、運行に掛かる目的関数値（所要時間）を大きく低下させる利用者の存在を明らかにする。なお、影響度指標として想定される統計量はいくつか考えられるが、ここでは例として列挙された全経路の所要時間の平均値を算出し、その動向について把握を試みた。結果を図 3.12 に示す。

平均所要時間については、経路数の計算結果とは異なり、まず全体的な傾向として、ケース 1 と比較して経路の制約が強まるケース 2 及びケース 3 の方がノード間での平均所要時間のばらつきが小さくなった。また、個別ノードに着目すると、経路列挙数の結果と同様に、ノードが置かれた位置によって各ケースでの結果の挙動が異なることが分かる。例えばノード 6 については、起終点ノードから時間距離が離れた場所に立地しているため、ケース 1 の条件で利用する場合は全体の平均所要時間を大きく押し上げてしまう。しかし、ケース 2 及びケース 3 の条件で利用する場合は、需要発生ノードであるノード 4 とノード 12 の間に位置していることから、ケース 1 と比較すると影響が小さくなる結果となっている。なお、ノード 6 と逆の傾向を示すノードとしてノード 28 がある。同ノードは終点ノードに近いことから、ケース 1 では利用に当たり平均所要時間に大きな影響を与えることはないものの、ケース 2 やケース 3 において需要分布とネットワーク条件が変わることによって、ノード 28 の利用に伴って迂回が生じることから、全体の平均所要時間を増加させることになっている。

■目的関数値（所要時間）の分布状況 平均値の分析に関して、追加するノードによっては、仮に平均所要時間の変動状況が類似していたとしても、列挙解の目的関数値の分布状況が異なることもある。例えば、ケース 1 に対してノード 4 及びノード 32 がそれぞれ追加された場合を考える。表 3.6 に示すように、両者で平均所要時間に大差はないが、標準偏差はノード 32 追加時の方が若干大きい。実際に両者の列挙解の所要時間分布を確認したところ、図 3.13 に示す通り、ノード 4 追加時のほうが所要時間のばらつきが小さいことが分かる。所要時間のばらつきが小さいということは、仮に更なる環境変化が生じた場合でも大きな所要時間の変動が生じないことを意味する。換言すると、運行時間のロバスト性が比較的高

表 3.6 各ノード追加時の所要時間統計量 (ケース 1 に対して追加した場合)

		追加なし (ケース 1)	ノード 4 追加	ノード 32 追加
経路列挙数		1,262,816	930,924	869,871
所要時間 (min)	Max.	76	76	76
	Min.	14	17	16
	Av.	48.605	50.567	50.572
	Std.	8.322	7.160	7.771

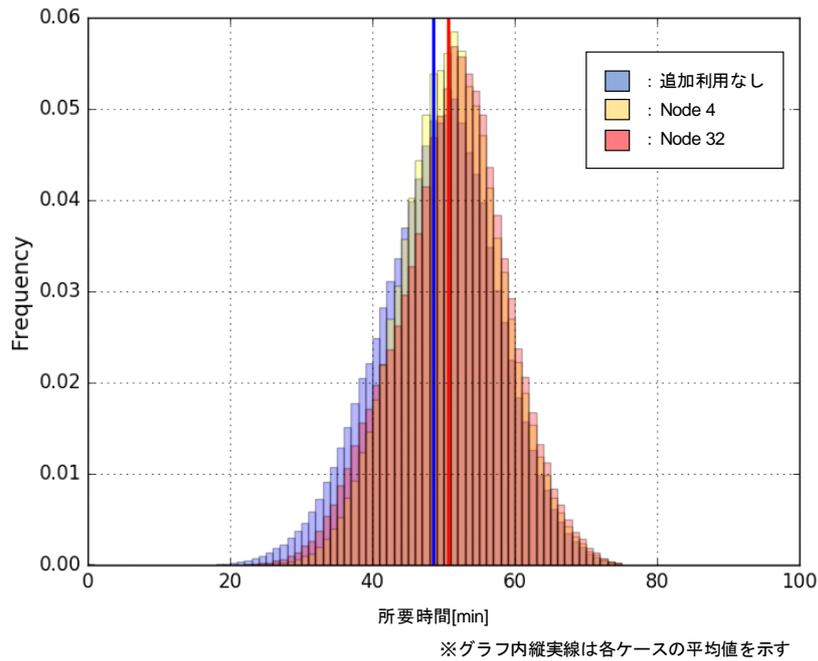


図 3.13 各ノード追加時の平均所要時間分布

い状態と考えられる。

なお、本研究で扱ったネットワークは上下左右が対称であり、なおかつリンク間で通過時間のばらつきが小さいことから、結果的に所要時間分布に大きなばらつきが生じにくくなっているが、実ネットワークでの分析においては、追加するノードの位置関係によっては分布形状が大きく異なることも想定される。このように、列挙解が持つ目的関数値の分布状況から影響度の評価が可能になる点も、構造化処理技術の大きな利点であると言えよう。

3.3 ZDD の運転手割り当て問題への適用

3.3.1 根付き全域森 ZDD の構築アルゴリズム

本研究では以上で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扱い、同じ

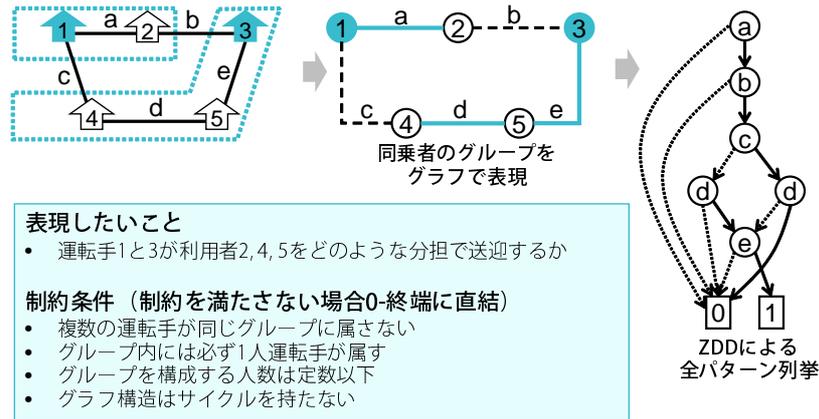


図 3.14 運転手割り当て問題への根付き全域森 ZDD の援用

く ZDD を用いて解析する．割り当て問題への ZDD の適用に関しては，Inoue et al.(2015)³⁸⁾ 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合わせを列挙する技法を提案しており，本研究では同技法の基本的な考え方を援用している．

根付き全域森 ZDD で扱うグラフは先に用いた $s-t$ 経路 ZDD と同様であり，運転手及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 3.14 参照）．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ひと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．FBS 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， $s-t$ 経路 ZDD の場合と基本的には同様であるが，両者の違いは前掲の表 3.3 における (a) 終端条件の判定，(b) ノードに記憶させる情報の更新，(c) ノードの等価性判定に現れる．具体的には，グラフ $G = (V, E)$ と，根と呼ばれる V 上の頂点 r_1, \dots, r_ℓ が与えられたとき， D 上の全域森とは，以下の条件を満たす G の部分グラフ $G' = (V, E')$ ， $E' \subseteq E$ である． G 上の全ての根付き全域森を構築するには，(i) G' はサイクルを持たない，(ii) G' の連結成分はちょうどひとつの根を含む，(iii) 異なる根を持つ連結グラフ同士が結合されていない，という 3 つの条件のもとで (a)-(c) の判定を行うことになる．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．FBS 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過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解の中から，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．

なお，運転手割り当てと運行経路については，別の問題として解かず，まとめて列挙索引化する手法も考えられる．その場合，複数運転手が同一グラフ上で同時に経路選択を行うことになるため，経路の重複

表 3.7 割り当て列挙数

ケース	条件	組み合わせ数	計算時間 [sec]		
			構築	索引	ソート
ケース 1	全運転手の組み合わせ	257,582,095,024,128	9.979	-	0.019
ケース 2	運転手 1,6 ※担当数上限なし	69,519,330,017,280	-	0.019	0.015
ケース 3	運転手 1,6 ※担当数 20 名/人まで	4,358,335,744,908	-	41.400	1.965

が多数発生することがあり得るが、ZDD では同一リンクを複数回通過する経路の列挙を単純には表現できず、表現しようとするインプットするグラフ構造が非常に複雑になることが懸念される（詳しくは 3.5 節参照）。そのため、運転手割り当てと運行経路については二段階に分け、別の問題として扱う方が望ましいと考えた。

3.3.2 数値計算

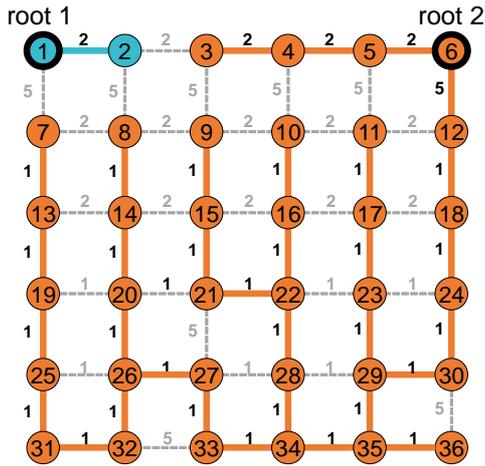
本項では根付き全域森 ZDD の構築方法を運転手割り当て方法の列挙に援用する。想定するネットワークは $s-t$ 経路列挙のもの（図 3.7）と同様とし、指定したノードに運転手が存在し、その他のノードには利用候補者が存在していると仮定する。まず、ケース 1 にて運転手がノード 1～36 のいずれか 2 箇所に立地しているとして、ノード 1～36 を 2 つの木からなる全域森に分割する問題を解く。全組み合わせパターンは表 3.7 に示すとおり、約 257 兆通りと膨大であるが、ZDD の構築及び列挙に要する時間は 9.979sec と短時間で計算が可能であった。また、連結グラフを構成するリンクの所要時間の和（つまり送迎に掛かる所要時間）でソートする際にも、処理時間は 0.019sec と即座に求解できた。

ケース 2 では、ノード 1 及びノード 6 に運転手及び送迎車両が立地しており、その他のノード全てに利用者が貼り付いている状況を設定し、2 名の運転手の各利用者への割り当てパターンを列挙した。ケース 2 はケース 1 に対して制約を強めた条件となっていることから、ケース 1 で構築した ZDD から索引することで計算が可能である。同ケースは約 70 兆通りの組み合わせが存在するが、列挙時間は 0.015sec で高速に列挙できた。

一方、ケース 3 では、ケース 2 に対して運転手 1 名当たりの担当数に上限を定めており、同ケースについてもケース 1 の ZDD からの索引によって列挙が可能であるが、索引に 41.400sec を要した。ケース 2 については、単純に当該ノードが含まれるか否かを索引する処理を行っているが、ケース 3 については大きすぎる木（運転手 1 人当たりの担当者数が多すぎる組み合わせパターン）を索引する処理を行うことになり、索引プロセスが複雑になったことからこのような計算時間の差が生じているものと考えられる。

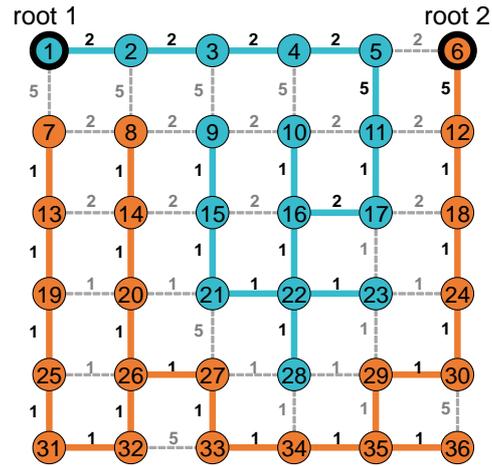
なお、送迎時間の合計値が最小となるグラフについては、各ケースの列挙解をソートすることで出力可能である。ケース 1・2 はそれぞれ 0.019sec, 0.015sec で、ケース 3 については 1.965sec で出力されている。ケース 2, ケース 3 の結果をそれぞれ図 3.15, 図 3.16 に示す。

グリッド数と経路列挙数及び計算時間の関係性については図 3.17 及び図 3.18 に示す通り、経路列挙の場合と挙動が類似しており、グリッド数が増加すると経路数は指数関数的に増加するが、割り当て列挙のほうが列挙数は多いため、計算時間についても大きくなる傾向にある。



root1:2min/root2:39min =total:41min

図 3.15 送迎時間が最小となる割り当ての例(ケース 2)



root1:23min/root2:24min total:47min

図 3.16 送迎時間が最小となる割り当ての例(ケース 3)

3.4 グラフ構造別の列挙結果の違い

ここでは、グリッドグラフとランダムグラフという2つのグラフを対象に、グラフ形状が変わることによる列挙数・計算時間の変化の動向から、ZDDの適用が適したグラフ形状について考察を行う。

3.4.1 グリッドグラフとランダムグラフによる列挙数・計算時間の違い

まず、ノード数・リンク数が同数のグリッドグラフとランダムグラフ(図 3.19 参照)を比較し、列挙数・計算時間の違いを検証する。運転手割り当て列挙時における結果を図 3.20 に、経路列挙時の結果を図 3.21 にそれぞれ示す。この際に、 $s-t$ 経路は、ノード番号1~ノード番号 $(n+1)^2$ 間を、運転手割り当てについてはノード番号1とノード番号 $(n+1)^2$ に運転手が存在している状況を想定した。なお、グラフの横軸にはグリッド数 n に対応したノード数 $(n+1)^2$ のみを表示しているが、ノード数が $(n+1)^2$ の場合、リンク数はいずれのグラフも $2n(n+1)$ で共通としている。なお、ランダムグラフについては、グラフ構造を10パターンランダムに生成し、平均値を図示している。

図 3.20, 図 3.21 に示される通り、割り当て列挙・経路列挙とも結果の傾向は類似しており、いずれもノード数・リンク数の増加に対して列挙数は指数関数的に増加する。そしてノード数・リンク数が同数であれば、列挙数はグリッドグラフのほうが卓越する傾向が見られる。一方、計算時間については、ノード数が16未満であればグリッドグラフのほうが大きいですが、それ以上の規模になるとランダムグラフのほうが大きくなる。更に、ランダムグラフについてはノード数が36を超えると本計算に用いた計算環境では計算が困難となるケースが発生しており、規模の大きいグラフ構造を扱うことが難解であることが確認された。

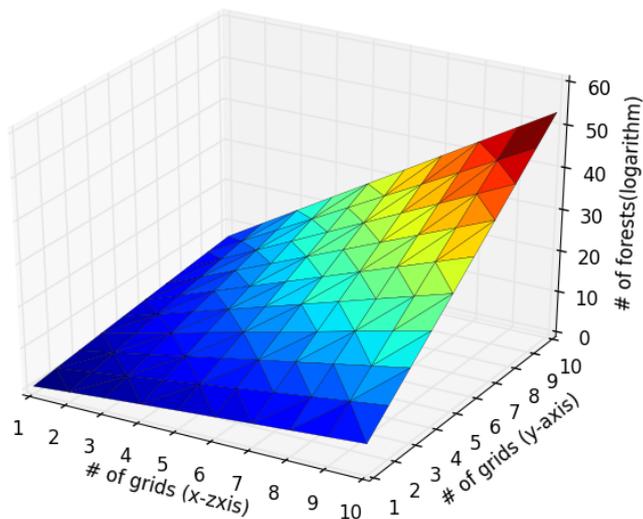


図 3.17 グリッド数-割り当て列挙数の感度分析

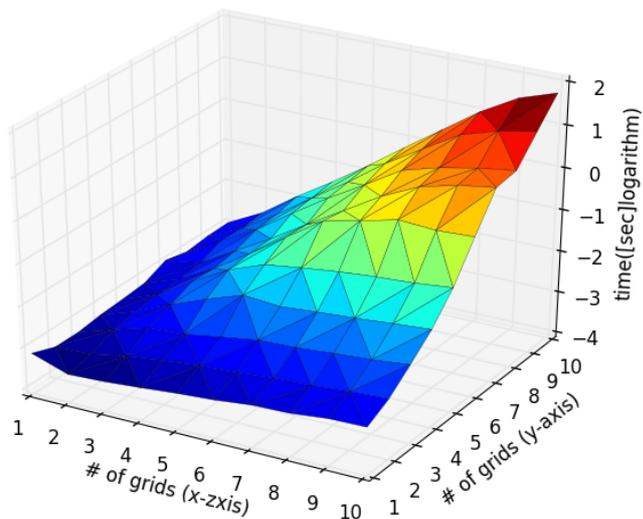


図 3.18 グリッド数-割り当て列挙に掛かる計算時間の感度分析

3.4.2 ノード数・リンク数をそれぞれ変動させた際の列挙数・計算時間の違い

以上 3.4.1 項では、ノード数・リンク数を同時に変化させて結果の違いを検証した。続いて、3.4.1 項と同様のグラフをベースに、ノード数もしくはリンク数のいずれかを固定することで、ノード数、リンク数それぞれの変化が計算結果にもたらす影響を検証する。ここでは、 $s-t$ 経路はノード番号 1 ~ グラフ内の最大数のノード番号の間を、運転手割り当てについてはノード番号 1 とグラフ内の最大数のノード番号にそれぞれ存在している状況を想定した。

結果を図 3.22 ~ 図 3.25 に示す。割り当て列挙・経路列挙で若干の結果の違いはあるが、いずれもノード数・リンク数が小さい領域ではランダムグラフのほうが列挙数は大きく、ノード数が増えるほどグリッドグラフの列挙数が卓越する傾向にある。また、列挙数の増加はノード・リンクとも指数関数的に増加することが確認されている。

一方、計算時間については割り当て列挙・経路列挙ともに、ランダムグラフにおいて、ノード数が 36、リンク数が 60 程度で大きく跳ね上がる傾向にあり、グラフ形状にも寄るが、本研究における計算環境のもとでは、これ以上のグラフ規模になると PC のメモリ不足により計算ができなくなる状況が確認された。一方、グリッドグラフについては、ノード数・リンク数の増加に対する計算時間の増加がランダムグラフと比較して穏やかであり、表 3.5 で紹介した通り、グリッド数 $n = 12$ (ノード数 169, リンク数 312) 程度のグラフであっても現実的な時間での計算が可能である。

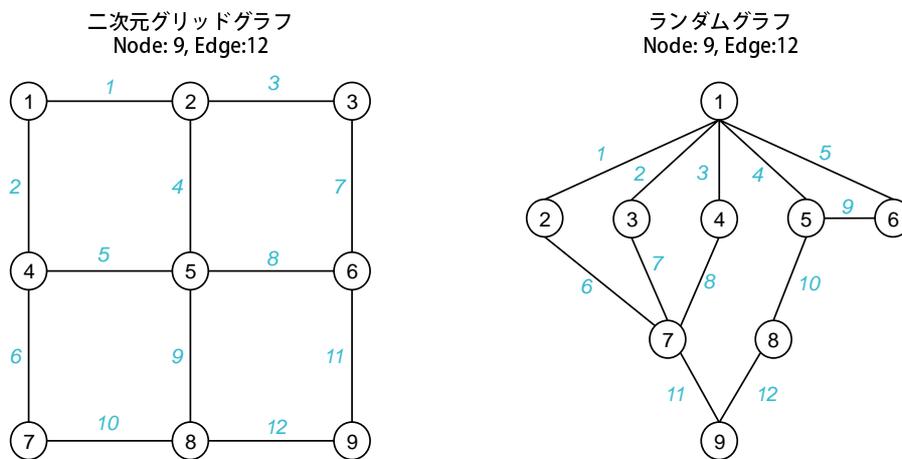


図 3.19 同一ノード・リンク数のグリッドグラフとランダムグラフのイメージ

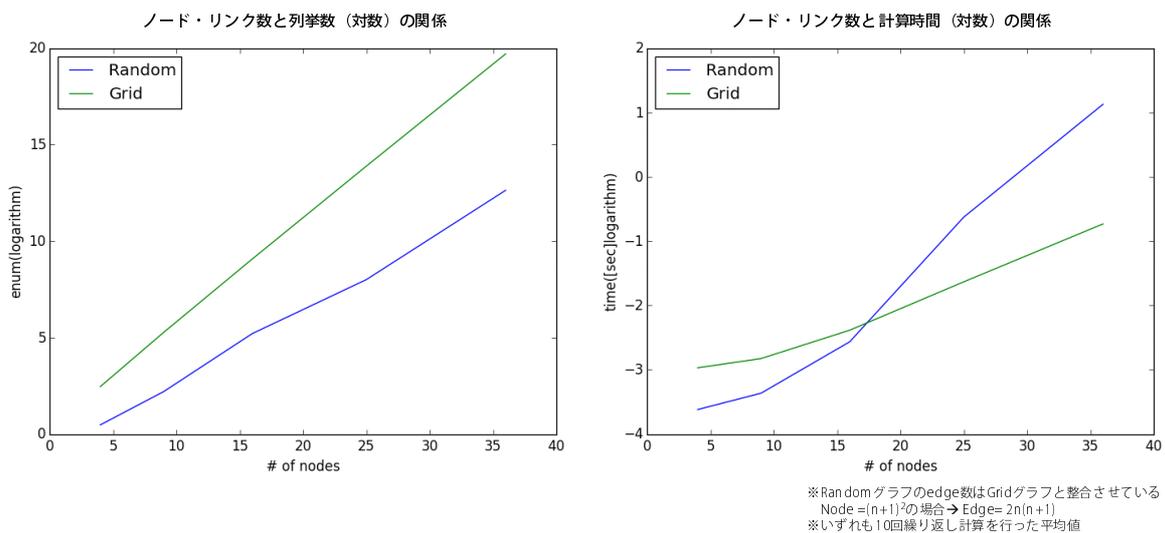


図 3.20 割り当て列挙におけるノード・リンク数と列挙数・計算時間の関係

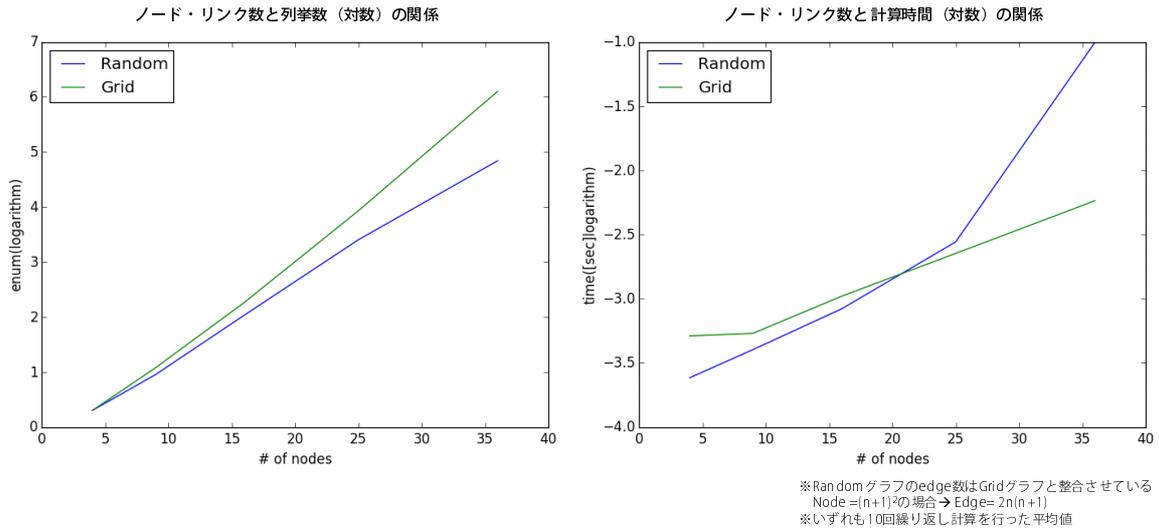


図 3.21 経路列挙におけるノード・リンク数と列挙数・計算時間の関係

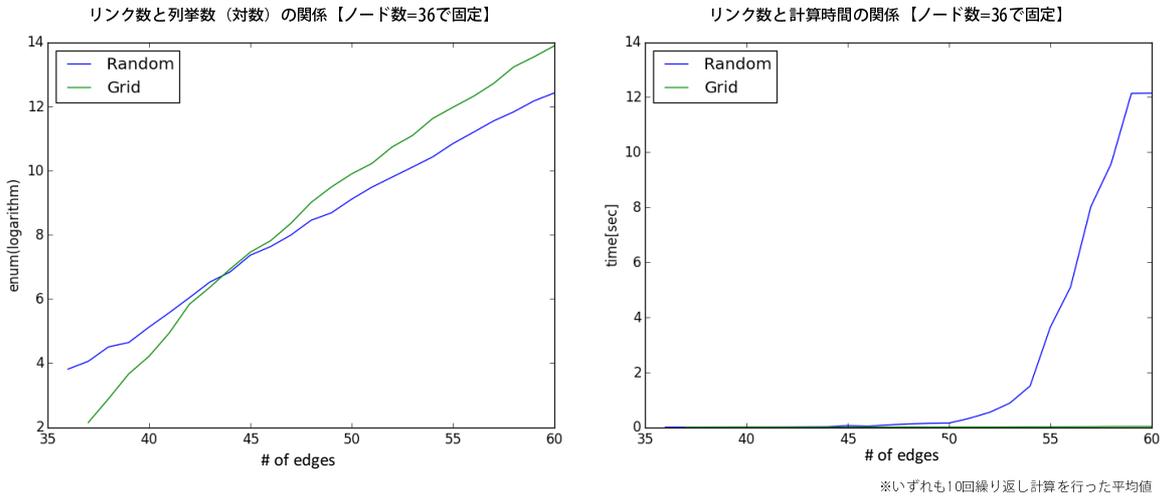


図 3.22 割り当て列挙におけるリンク数と列挙数・計算時間の関係 (ノード数固定)

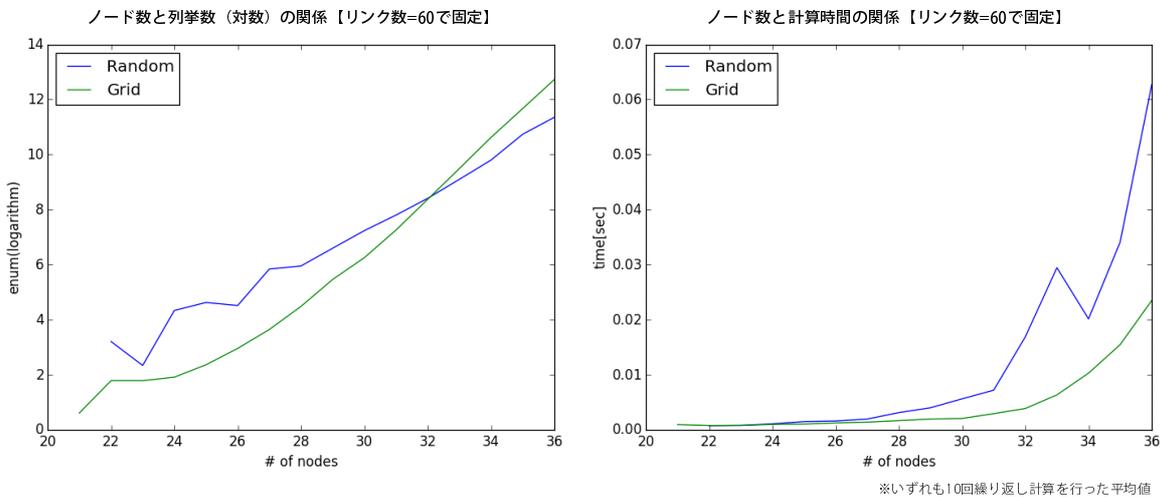


図 3.23 割り当て列挙におけるノード数と列挙数・計算時間の関係 (リンク数固定)

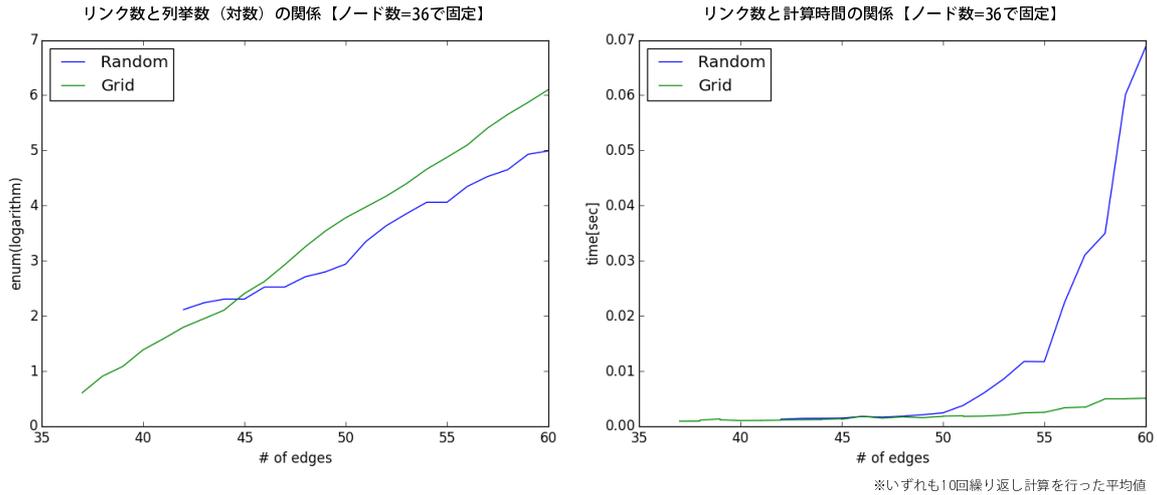


図 3.24 経路列挙におけるリンク数と列挙数・計算時間の関係（ノード数固定）

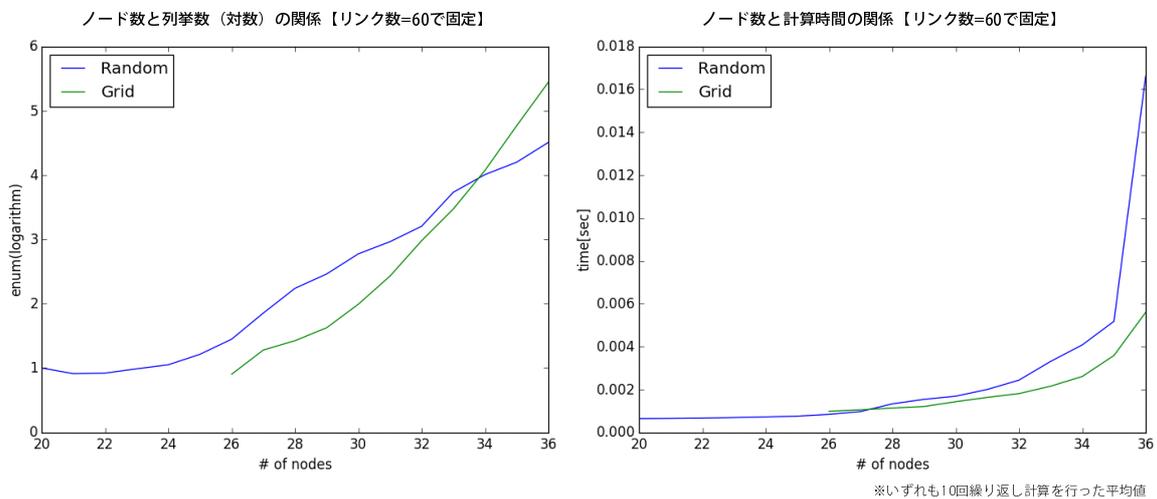


図 3.25 経路列挙におけるノード数と列挙数・計算時間の関係（リンク数固定）

3.4.3 ZDD の適用に適したグラフ構造に関する考察

グラフ規模が大きくなった際に計算途中で PC のメモリ不足が生じる理由としては、FBS の処理過程において途中段階でフロンティアに属する頂点数が増加することで、互いに異なる途中状態が多く発生し、計算量が增大している状態に陥ることにある。湊 (2012)¹⁶⁶⁾ によると、フロンティアサイズが膨らむ要因としては、グラフの形とリンクの変数順序付けに依存するとされているが、今回活用した Graphillion においては、グラフの各ノードを幅優先順に変数順序付けを行うことから⁸⁹⁾、変数順序付けのルールはグラフ形状が変わっても同一である。よって、今回の場合、計算コストに大きく影響を及ぼしているのはグラフの形状であると考えられる。

ここで、図 3.26 に示すノード数・リンク数が同数の 3 つのグラフ構造について、それぞれノード 1 からノード 9 までの $s-t$ 経路を列挙することを考える。リンク番号順にフロンティアを構築していく際にフロンティアに属する頂点数の推移を示すと図 3.27 の通りとなり、グラフ構造が細長くなるほどフロンティアサイズの膨張を抑制できることが確認できる。実際に、図 3.26 下に示す通り、ある特定のノード

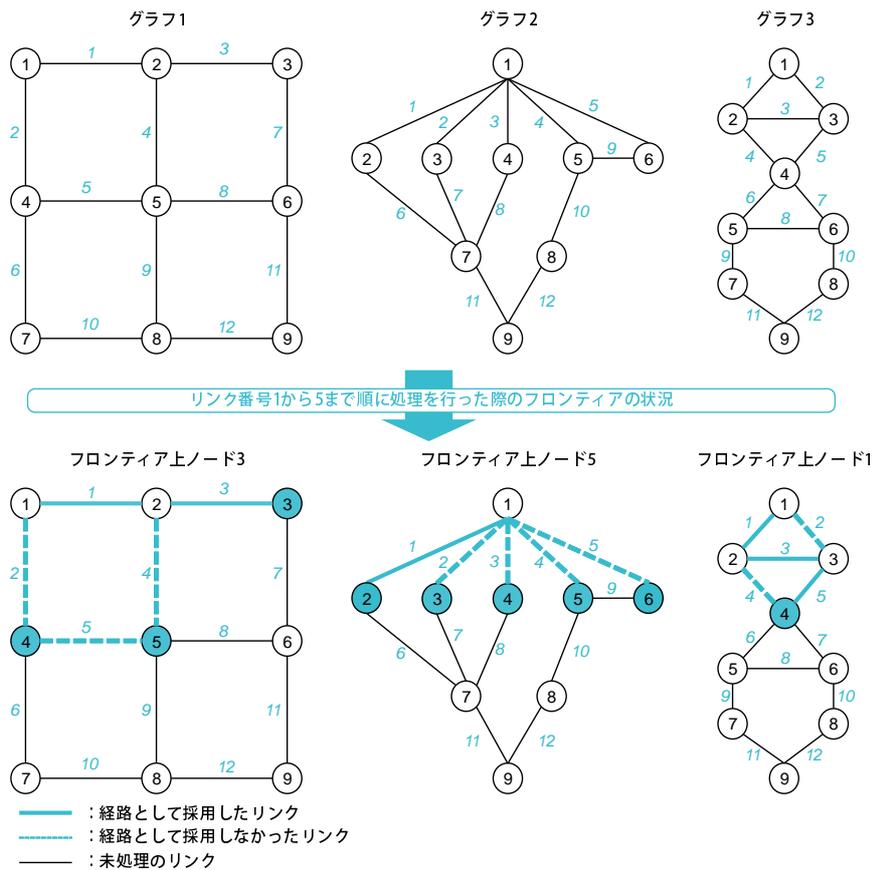


図 3.26 ノード数・リンク数が同数のグラフにおけるフロンティアサイズの違い

における次数が大きいタイプのグラフにおいては、分岐先のリンクをそれぞれ処理する際にフロンティアサイズが増加するため、その間の計算負荷が大きくなる。なお、ここでは経路列挙を例に考察を行ったが、運転手割り当てにおいても同様の解釈が可能である。

なお、前述の通り、Graphillion を使っている際には問題とならないため、本研究では詳細な分析は行わないが、フロンティアサイズを増大させるもうひとつの要因として、リンクの変数順序付けがある。例えば、図 3.28 に示すとおり、グラフ形状が同様であっても、処理するリンクの順番が異なると、図 3.29 に示すように、途中段階のフロンティアサイズが大きく増加することがある。そのため、辺順序に対応した頂点順序を最適化し、分離点集合数をできるだけ小さくすることに興味が集まる。分離点集合数が最小となる頂点順序を求める問題は、グラフのパス幅が最小となるパス分解を求める問題と等価であるため、一般のグラフについて NP 完全問題であることが知られている。最適な頂点順序を求めるアルゴリズムとしては、これまでに分枝限定法や貪欲法、幅優先探索、ビームサーチ等が用いられている⁹²⁾。

3.5 協働型交通の運行管理への適用

ここでは、前節までに構築した $s-t$ 経路 ZDD 及び根付き全域森 ZDD を 2015 年度に岩手県陸前高田市矢作町生出（おいで）地区で東京大学が実施した実証運行に適用する。

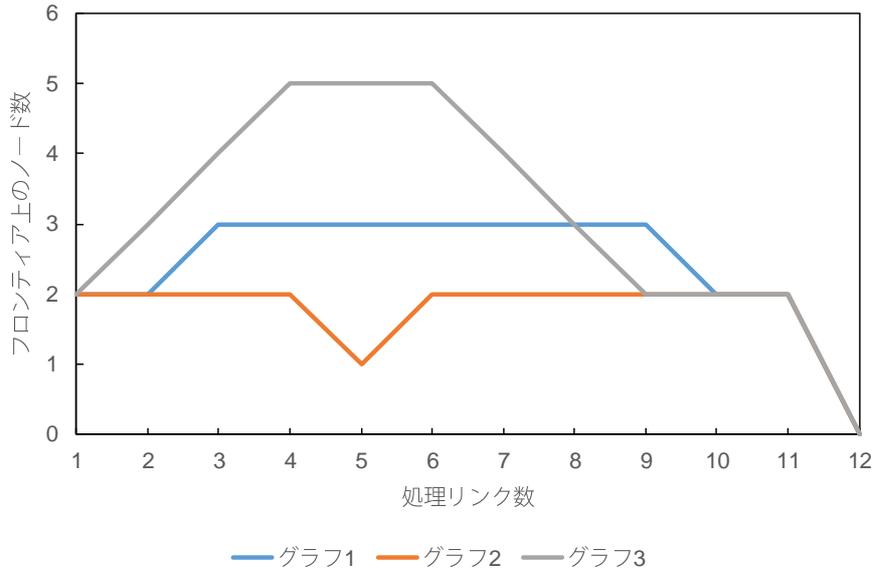


図 3.27 グラフ形状の違いによるフロンティア上のノード数の推移

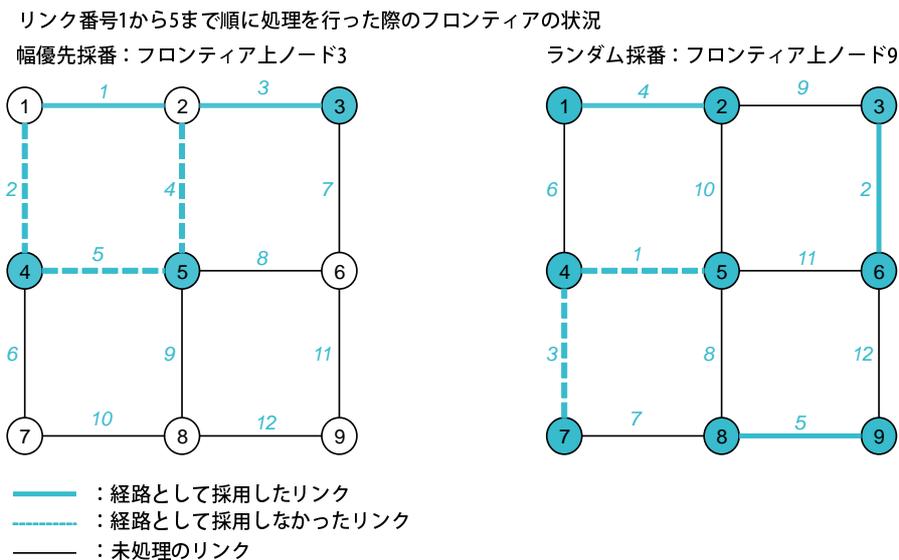


図 3.28 同一グラフにおいてリンクの変数順序付けを変更した彩のフロンティアサイズの違い

3.5.1 実験対象地区の概要

実験対象地区である生出地区は陸前高田市の北西部に位置しており、市内中心部から約 17km 離れた住田町・一関市の行政界周辺に位置している地区である。四方を山に囲まれた静かな山村であり、かつては平泉の黄金文化を支えた金採掘の一翼を担い、1600 年代には膨大な量の木炭生産が行われており、現在も同地区を支える主要な生業のひとつである。地区の中心には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 2016 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 3.30 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。65 歳以上人口割合は 43% であり、市平均 34%（いずれも H24.3 時点住民基本台帳データ）と比較しても 10 ポイント程度

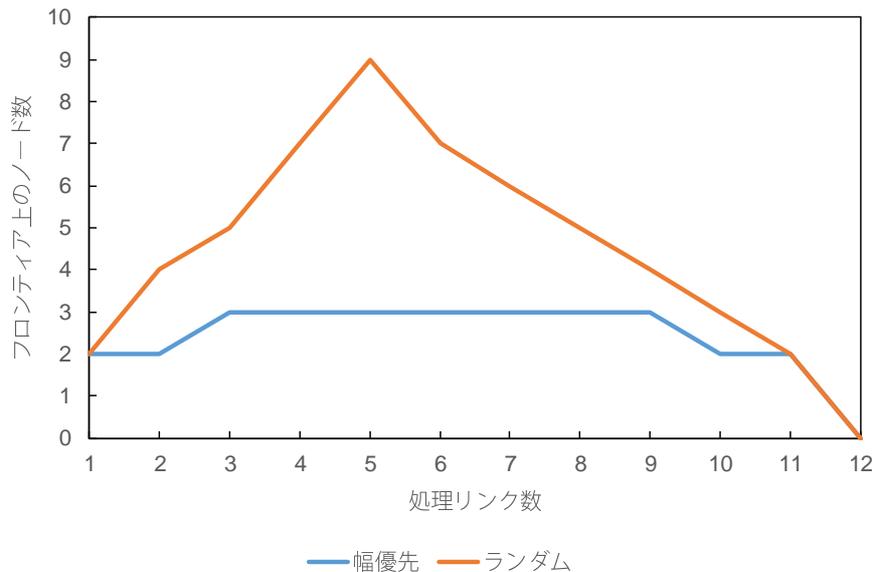


図 3.29 変数順序付けの違いによるフロントティア上のノード数の推移

高く、市内でも特に高齢化の進行が著しい地区のひとつである。

生出地区内には図 3.31 に示すように、市内中心部に向かう路線バス（小黒山経由生出線）が 1 系統運行されているが、運行回数は 1 日 3 往復であり、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。また、バス路線を運行する交通事業者は、震災前は陸前高田市市内にバスターミナルを保有していたが、震災に伴う津波によって流出し、現時点で再建はなされていない。そのため現在は、30km 以上離れた大船渡市内の営業所から車両を手配しており、回送に伴う運行経費の負担が大きく、かつ運転手の拘束時間の制限もあることから、現状以上のサービスの大きな改善は事実上困難な状況にある。更に、最寄りのタクシー事業者及び貸切事業者については、いずれも陸前高田市市中心部に立地していることから、回送距離が長くなってしまい、タクシー等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ひと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。

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、2015 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。実験概要を表 3.8 に示す。運行態様については、1 日 1 往復の基本ダイヤのもとでの区域運行とした。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。

おいでみんなのバスは、地域住民がボランティア運転手となり、手分けをして住民を送迎するサービスである。運転手は一般住民であり、運転手の割り当てや運行経路といった日々の運行計画を立案するノウハウを有しておらず、円滑な運行計画の立案のため、意思決定ツールの導入の必要性が高いと考え、本研究のケーススタディ対象として選定した。

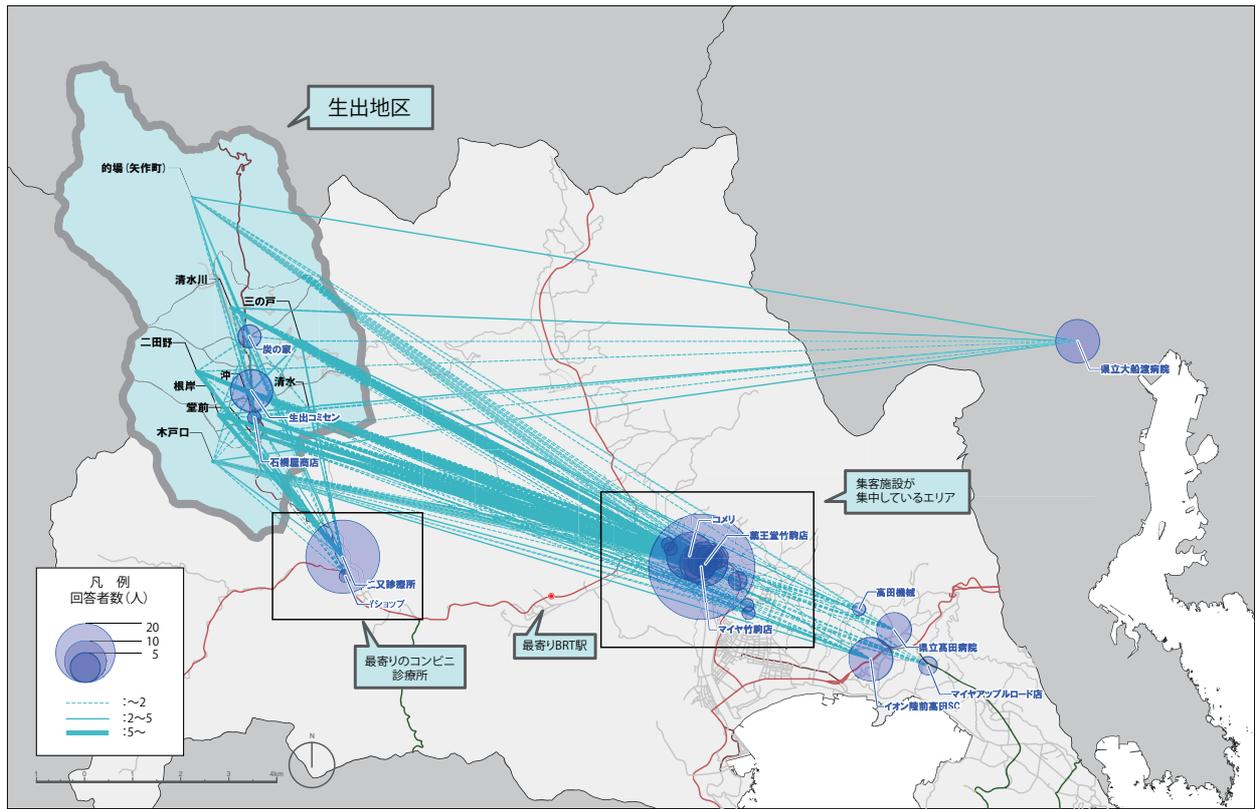


図 3.30 生出地区住民の移動実態



図 3.31 生出地区の位置及び公共交通手段の概要

表 3.8 「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	2016年1月14日～2016年2月29日
運転日	週3回（火・木・金） ^a
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2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） ^b
運行方法	運行範囲内についてはドアツードア型 ^c
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（道路運送法適用除外）
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	4人乗り軽自動車（レンタカー） ^d

^a 予約がある日のみ運行。運行中以外の時間帯については地域共有の車両として使うことも可とする。

^b BRT及び路線バスとの接続を考慮したダイヤ設定とした。

^c ただし竹駒駅以遠は公共交通との組み合わせ利用に限定。

^d 冬季は積雪・凍結が発生するため四輪駆動車両を手配した。

3.5.2 プローブパーソン調査に基づくグラフ構造の作成

実験期間中，運転手・利用者に対してスマートフォン端末 (GALAXY NEXUS SC-04D docomo)(図 3.32 参照)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 10sec 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な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。

PP 調査データが提供する被験者の移動軌跡は，緯度・経度等の座標情報であり，この情報のみでは各被験者がどの路線を移動したかを判断することができない。そこで，データが取得した PP 調査データの誤差を補正し，道路ネットワーク上で移動経路特定するマップマッチング処理を行った。マップマッチング手法については様々な考え方があがるが，ここでは Point to Curve Map-Matching を使用している。この手法は，PP 調査データによる被験者の一座標の情報を用いて，ネットワークデータの中から最も近いリンクを抽出し，抽出されたリンク上に走行位置を特定するものである。同手法は高密度なネットワークではマッチングを誤りやすい欠点があるが，本研究の対象地区は道路ネットワークが非常に疎であり，適用することに問題は少ないと判断した。なお，通常のマップマッチング処理においては，道路ネットワークデータとして DRM(Digital Road Map) を使用することが多いが，本研究の対象地区については細街路が



図 3.32 プローブパーソン調査機器

多く、DRM では十分な情報が取得できないことから、OpenStreetMap をトレースすることで GIS 用のネットワークデータを作成した。

3.5.3 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 3.33 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ひとつのノードに集約させた。ノード 25 については DEPOT（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。

分析に当たっては、まず運転手 7 名のうちいずれか 2 名/3 名の組み合わせによる全送迎割り当てパターンについて ZDD を構築し列挙した（それぞれ ZDD1/ZDD2 とする）。そして、ある特定の運転手の組み合わせが確定した場合、これらの送迎割り当てパターンについてはあらかじめ構築した ZDD の部分集合となることから、構築した ZDD から索引処理を行うことにより列挙を行うことが可能である（図 3.34 参照）。

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、ZDD1 から組み合わせを索引するケースとして「運転手 1 及び運転手 3 の 2 名が運転可能な日（ケース 1-a,1-b に該当）」、「運転手 1 及び運転手 6 の 2 名が運転可能な日（ケース 2-a,2-b に該当）」を設定した。また、ZDD2 から組み合わせを索引するケースとして「運転手 1、運転手 3、運転手 6 の 3 名が運転可能な日（ケース 3-a,3-b に該当）」を設定し、それぞれ計算を行った。なお、ケース 1～3 の計算に当たり、ZDD 構築に当たっての構造制約を与えないパターン（枝番-a）と与えるパターン（枝番-b）をそれぞれ設定し、構造制約として、1 人当たり送迎可能人数を 15 名で設定した。

計算結果は表 3.9 及び図 3.35 に示す通りであり、今回取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数千～数万通りと大きいことが分かる。一方で ZDD の構築に要する時間は 2 人で 0.420sec、3 人で 3.408sec と短時間で処理が可能となっており、索引に当たっては、いずれのケースも 0.005sec 以下で処理できている。なお、ここではノード 8～24 の全利用者が利用する想定で割り当てパター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。

3.5.4 運行経路列挙問題

(1) 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 $s-t$ 経路が完成しない場合があり得る。生出地区のような場所は本来 ZDD による経路列挙に不向きな地区であるとも言えるが、ケーススタディ内でこの問題に対する対応方策を検討すべく、本研究では図 3.36 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、同じノードを 3 回まで重複して選択できる（袋小路となるノードへの送迎が可能となる）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

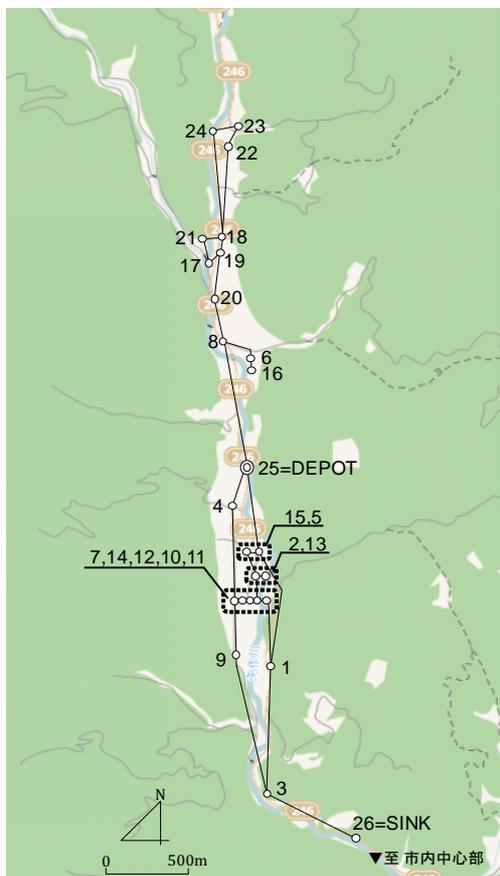


図 3.33 運転手割り当て問題のグラフ

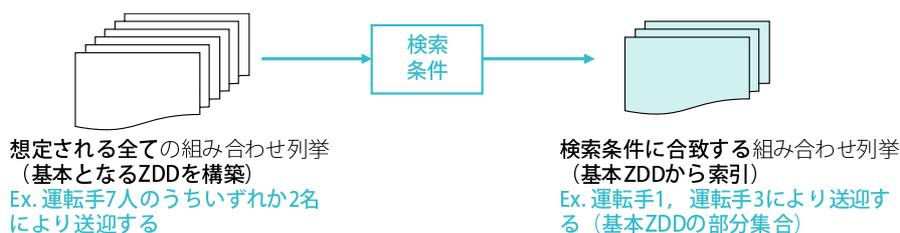


図 3.34 ZDD の構築・索引による列挙のイメージ

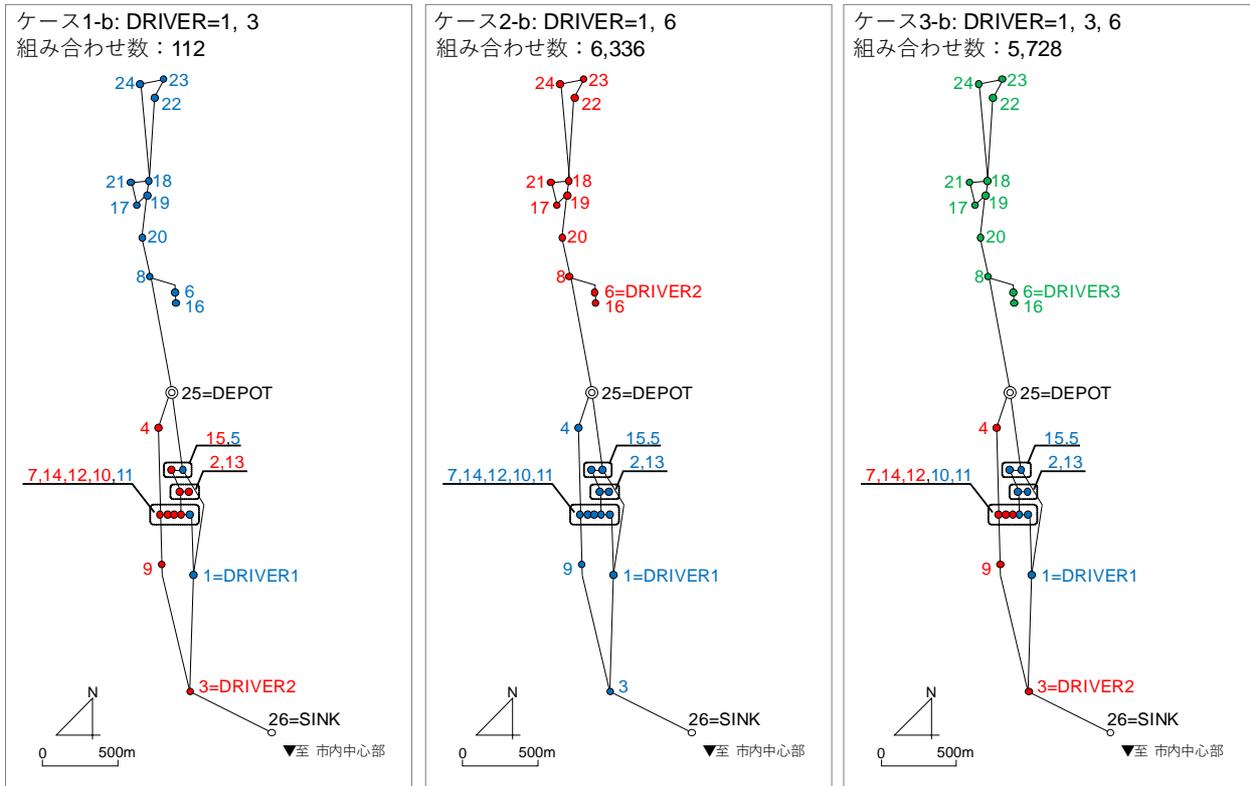


図 3.35 移動時間最短時の運転手割り付けパターン

表 3.9 運転手割り付け問題計算結果

ケース (driver)	組み合わせ数	計算時間 [sec]		
		構築	索引	ソート
ZDD1 構築 (2 名全組み合わせ)	55,008	0.420	-	<0.001
・ 索引ケース 1-a (1,3) ※乗車人数上限なし	3,024	-	0.001	<0.001
・ 索引ケース 1-b (1,3) ※ 15 人上限	112	-	0.004	<0.001
・ 索引ケース 2-a (1,6) ※乗車人数上限なし	12,304	-	0.002	<0.001
・ 索引ケース 2-b (1,6) ※ 15 人上限	6,336	-	0.005	<0.001
ZDD2 構築 (3 名全組み合わせ)	393,432	3.408	-	<0.001
・ 索引ケース 3-a (1,3,6) ※乗車人数上限なし	9,760	-	0.001	<0.001
・ 索引ケース 3-b (1,3,6) ※ 15 人上限	5,728	-	0.004	<0.001

ようとする場合、図 3.36 上図に示すような重複を許す経路の取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。

なお、このような形でアイテムの種類と出現場所の2つを組合わせて符号化することにより系列の表現を試みた例として Kurai et al.(2007)⁴⁴⁾ 等がある。また、今回提案した符号化の手法以外にも、上下方向でリンクを分割する手法も想定される。しかし、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 3.37 に示す。ここで、リンク数は 142、ノード数は 78 である。

(2) 運行経路の列挙結果

運転手割り当て問題におけるケース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、DEPOT（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。計算手順としては、まずはDEPOTからSINKまでの間の全ての経路をZDDで列挙し（ケース1（ZDD構築））、そのうちノード16及び17を通過する経路をZDDから索引した（ケース2（索引））。計算結果は表3.10に示す通りであり、ケース1では約117兆通り、ケース2では約30兆通りという膨大な列挙数となったが、ケース1の基本ZDD構築・列挙に掛かる計算時間は42.800sec、ケース1の基本ZDDからケース2の組合わせを索引列挙するのに掛かる計算時間は3.957secと現実的な時間での列挙が可能となっている。

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。ここではひと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。所要時間でのソートはいずれのケースにおいても0.001sec以下で計算されている。最短経路（車両の移動距離6,850m）については22パターン（ただし、実道路ネットワークに落としこんでルート描画を行った場合は2パターン）が存在しており、そのうちのひとつを図3.38に示す。ZDDで取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。

なお、ZDDにより索引された最短経路と、PP調査にて把握した実輸送ルートの比較を行った結果を図

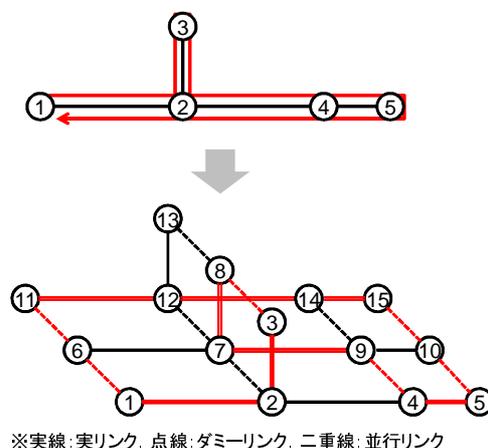


図 3.36 ダミーリンク・並行リンクの導入

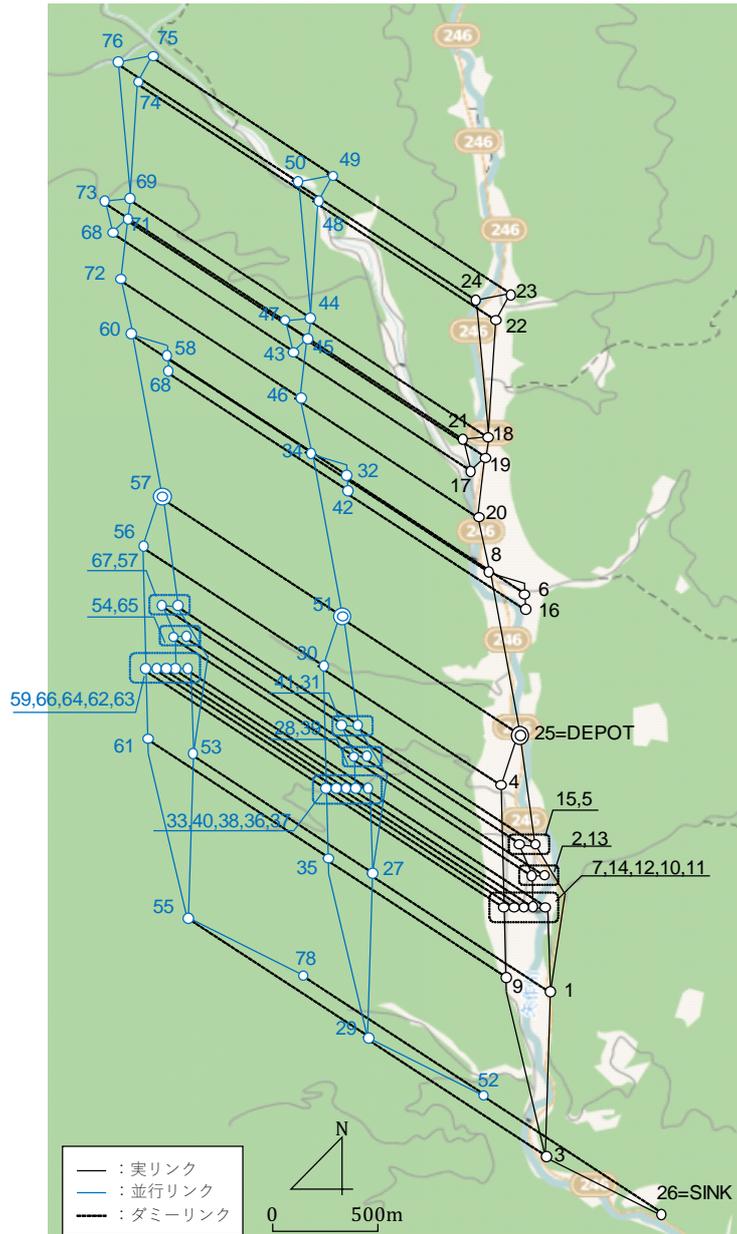


図 3.37 経路列挙問題のグラフ

表 3.10 経路列挙計算結果

ケース	条件	経路数	計算時間 [sec]		
			構築	索引	ソート
ケース 1 (構築)	DEPOT~SINK までの全経路	117,248,590,974,392	42.800	-	<0.001
ケース 2 (索引)	ケース 1 のうち 16, 17 を経由する経路	29,686,796,989,262	-	3.957	<0.001

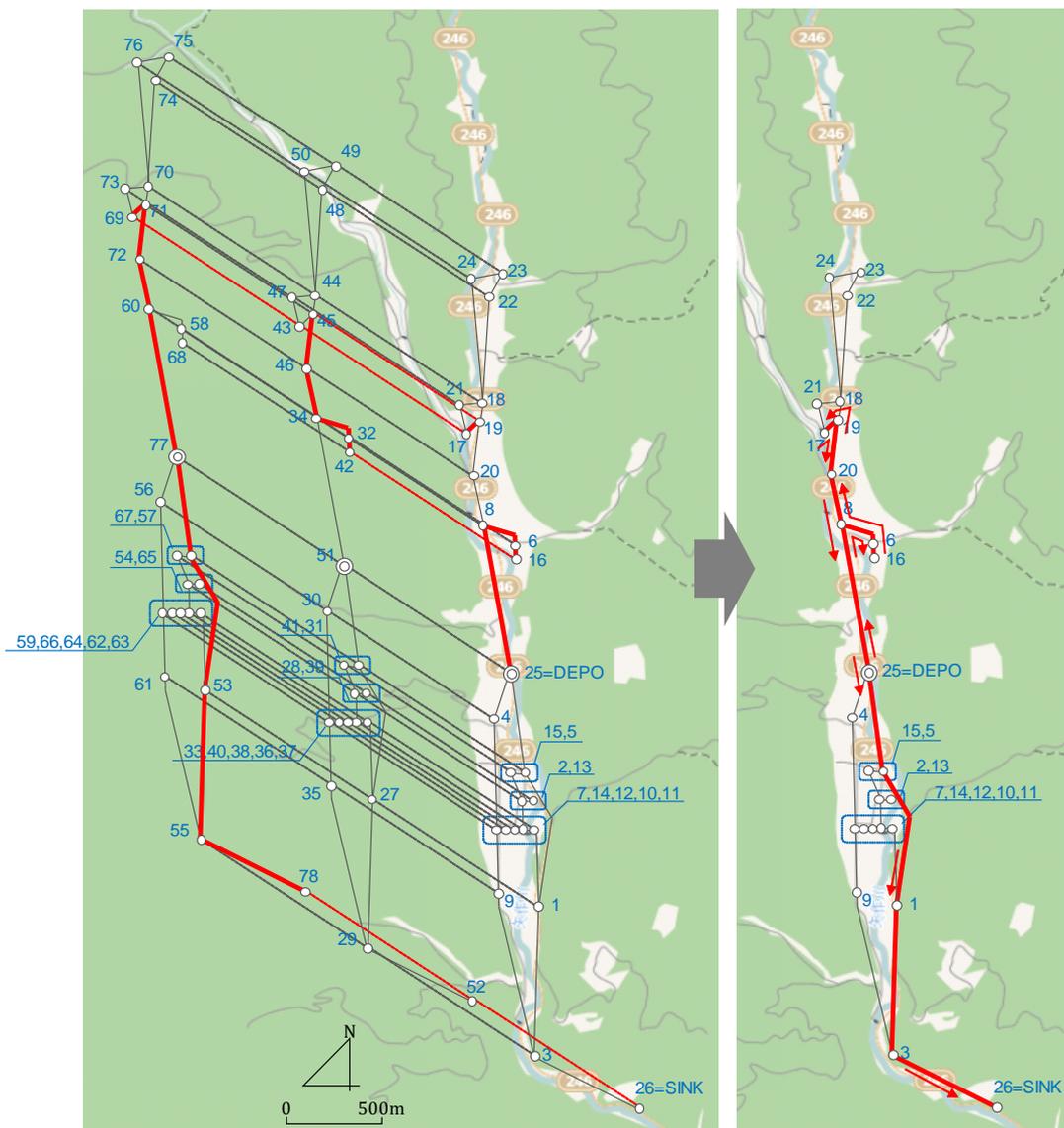


図 3.38 ケース 2 における最短経路の例

3.39 に示す．ZDD により列挙された最短経路 2 パタンのうち，DEPOT を出発し，ノード 17,16 を経由して SINK に向かうルートと実輸送ルートが整合していることが確認された．

(3) 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．前項のケース 2 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合に，どの程度全体の経路列挙数が増加するかを検証した．結果を図 3.40 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

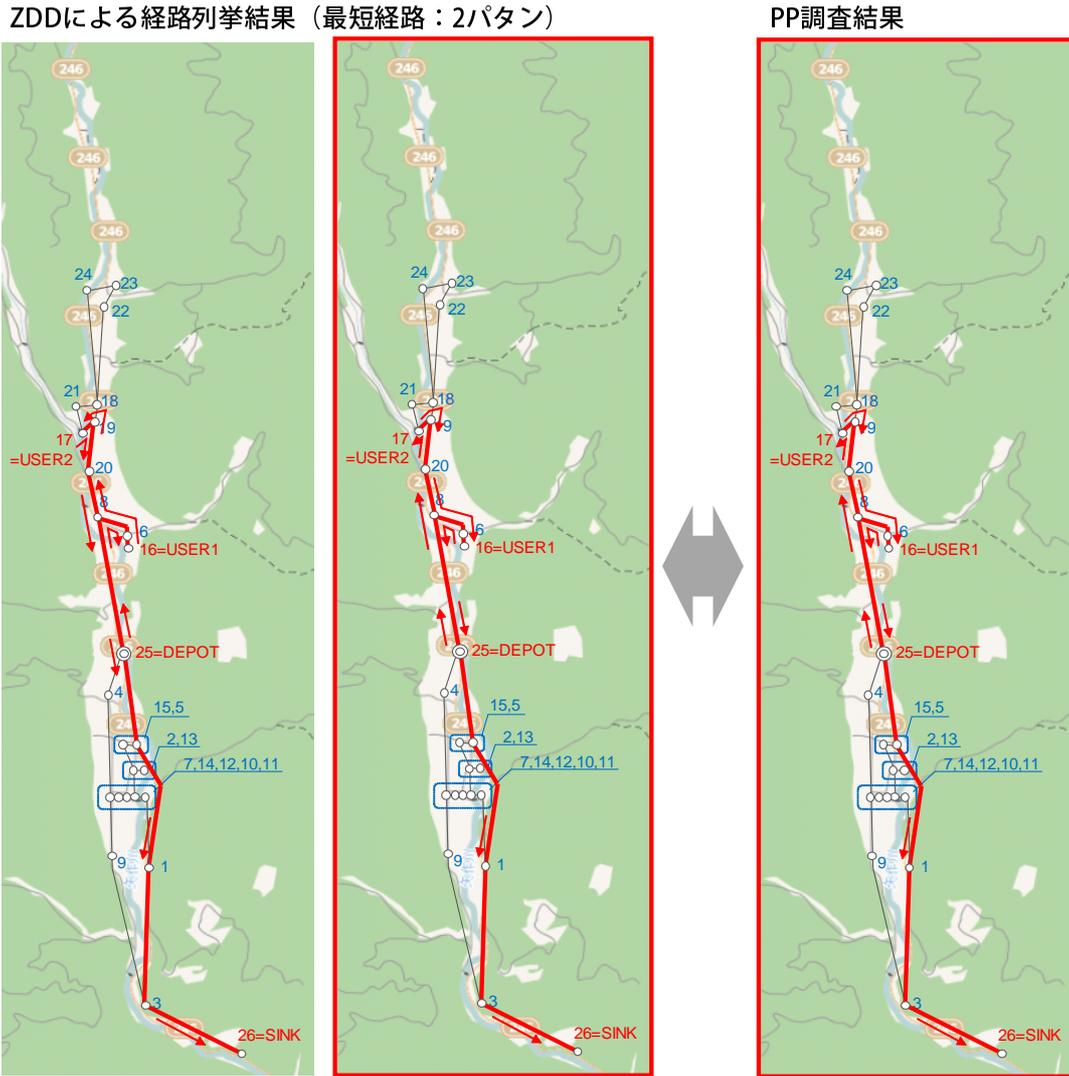


図 3.39 最短経路と実輸送ルートの比較

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による列挙解を活用することで協力ゲームのシャプレー値の概念に近い形で、各利用者のデマンド交通利用コミュニティ内での影響度を計測することができる。先にも述べたが、影響度が低い人については、その人が便乗しても運転手や他の利用者に与える負の影響が小さいことから、デマンド交通の運営側からすると（飽くまでも、効率的な運営の観点のみから言えば）積極的に使ってもらいたい利用者であると言える。このような利用者には、例えばリアルタイムの運行情報や知り合いの利用情報等を提供するようなアプローチにより、運行予定の便に積極的に便乗させる取り組みが営業戦略上有効であると考えられる。逆に、影響が大きい利用者については、全体での運営の効率性を可能な限り低下させない利用の仕方を提案していくことが重要になる。例えば、デマンド交通の運行経路上にミーティングポイントを設定し、影響度が大きい利用者にはそこまで自力で出てきてもらうことで利用に係る影響度指標を下げてもらう行動を打診する等のアプローチが考えられる。

また、各人の影響度指標をもとに利用料金を変動させるようなインセンティブ施策への展開（料金設定を非固定化し、その便において影響度が大きい人には利用料金を多目に払ってもらう等）も考えられるが、今回扱った2つの指標のみでは施策設計の提案に向けた知見が得られるほどの関係性が把握できない

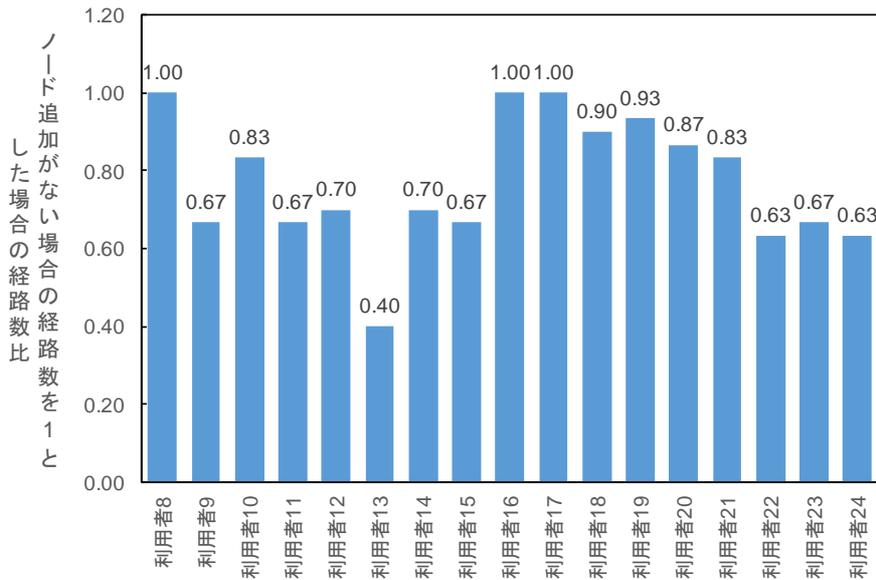


図 3.40 ケース 2 に対して利用者が追加された際の経路列挙数の変化

ため、今後、例えば価格を示す指標（運行コストや収支差等）を影響度指標として用いた分析結果をもとに議論を行う必要がある。併せて、運行計画の立案に当たってコストの概念が入る際には、経路選択の目的関数が単純な最短経路ではなくなる点にも注意が必要である。更に、各人の支払い意思額の違いや、料金が非固定となることに対する抵抗等も想定されるため、ZDD の枠外でのフィージビリティの検証も必要になる。

なお、交通事業者は事業効率を重視するが、利用者は利便性を重視する等、主体ごとに公共交通において重視している点は異なる場合がある。また、シビルミニマムとしての公共交通が整備されている地区では、事業効率性を犠牲にしたサービスモデルを検討せざるを得ない地区も存在する。各種施策を検討する際にはこれらの要因についても配慮の上決める必要があることは言うまでもなく、今回提案した影響度指標の結果の活用は飽くまでも議論の補助線を定める位置づけであり、最終的には関係者間での慎重な議論の上で実施する必要がある。また、このような議論を行う際には経路列挙数だけでなく、前節の簡易ネットワークで試算を行ったように、運行時間や運行経費等、経路のウェイト値を用いた目的関数の平均値等を用いた評価が望ましい。ただし、ZDD では目的関数値の高速圧縮は可能であるが、目的関数値を全て出力する場合、出力処理に多大な時間を要することから、現行のアルゴリズムでは列挙数以外の指標を用いることが難しい。出力処理の効率化については今後の課題として検討を進めたい。

3.6 結言

第3章では、デマンド交通や協働型交通といった、需要に応じて毎回運行経路や運転手配置が変更になる交通手段を対象とし、運行経路及び運転手割り当てについて列挙索引化技法により構造化処理する方法を提案した。具体的には、需要分布とネットワークをグラフ構造により表現し、与えられたグラフ構造の中からある制約を満たすような部分グラフを全列挙し、それらをFBSに基づくZDDにより圧縮表現して索引化する技法を提案した。同技法の適用により、既往の逐次探索型の列挙アルゴリズムでは達成し得なかったデマンド交通の運行経路及び運転手割り当てパタンの高速列挙が可能となったことに加え、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現実的に可能となった。同手法により、既存

の DARP 等の最適化問題を用いて最適解もしくは準最適解をひとつだけ求めるのではなく、全解を漏れなく列挙することで、需要応答型交通の実運用において時々刻々と変化する目的関数、制約条件に合わせた運行経路及び運転手割り当てパタンの探索を行うことを可能にした。

また、グリッド型の簡易ネットワークでの試算を通じて、計算時間における既往の列挙技法との比較優位性を確認したほか、グリッド数が増加した際の列挙数及び列挙に掛かる計算時間について感度分析を行い、概ね 12×12 程度のグリッド規模であれば一般的な計算機を用いても 10 分ほどの計算時間で ZDD の構築・列挙が可能であることを示した。

加えて、列挙解を用いることにより、需要の分布状況に応じ、各人の利用が全体に与える影響をゲーム理論のシャプレー値に近い概念で定量的に示すアプローチを提案した。このような全解の統計量をベースにした影響度評価は最適化問題による求解においては取扱うことが難しく、これまでの ZDD に関する既往研究の中でもこのようなアプローチは扱われていないことから、本研究の新規性のひとつであると考えられる。

更に、グリッドグラフとランダムグラフという2つのグラフを対象に、グラフ形状が変わることによる列挙数・計算時間の変化の動向から、ZDD の適用が適したグラフ形状について考察を行った。その結果、グリッドグラフと比較した際のランダムグラフにおける計算コストの増加が発生しており、リンクの変数順位が適切であれば、線形に近いグラフ構造ほどフロンティア上のノード数が抑えられることが確認された。ただし、線形に近いグラフ構造のほうが FBS における計算コストが抑えられる一方、実社会での運用においては、線形に近づくほど重複リンク選択を許容しなければ、経路列挙が不可能となる場合も考えられる。その際には、符号化ノードの導入が必要となるため、グラフ規模が大きくなり、かつ、符号化に伴い各ノードの次数が増加するため、結果的に計算負荷が大きくなるという課題がある点に留意が必要である。

提案技法については、陸前高田市における実規模ネットワークを対象にケーススタディを行い、その適用可能性を検証した。PP 調査等から把握できる運転手・利用者の分布状況に応じて運転手割り当てと経路選択を動的に把握することができ、外部環境の変化に応じて最適な解を即座に索引できることから、リアルタイム性が求められる需要応答型交通のオペレーションにおける有効性を示した。特に、道路工事や災害の発生等による突然のリンクの破断や、バスの乗継時間や病院の予約時間等への対応の必要性、利用者の急なキャンセル等、想定外の事態に対して即座に最適解を求められる点はメリットと言える。また、このような構造化処理は PP 調査データのような膨大なデータをそのまま運行計画に活用するという、いわゆるデータオリエンティッド型の公共交通の運営を行う際に基本となるデータベースの構築という観点でも有用である。

本章の課題として、まずは経路列挙の際の経路重複の表現が挙げられる。今回のケーススタディ内で扱ったような線形に近いネットワークにおいては、同一リンクを複数回通過する経路を表現する必要があるが、本研究では符号ノードの導入により表現を試みた。しかしながら、符号ノードの導入はグラフ構造の複雑化を招くことから、今回取扱った集落程度のネットワークであれば計算が可能であるが、同程度のネットワーク密度を自治体全体に拡張すると計算が困難になることが想定される。実際に、生出地区において符号化ノードをもう 1 階層増加させ、104 ノード、198 リンクで計算を行ったところ、今回の計算環境ではメモリ不足により ZDD の構築に至らなかった。また、リンク重複を取扱わない場合であっても、ZDD で取扱い可能なグラフ規模には限度があるため、道路の種級等を判断材料に、運行ルートとして使用できるリンクを限定する等、グラフ構造の間引きが必要となる。

また、ZDD の最大のメリットは、グラフ構造が変わらない限り、一度構築した ZDD を索引することで列挙が可能であるという点にある。しかし、これを裏返すと、グラフ構造が変わるたびに再度 ZDD を構

築しなければならないということになる。そのため、生出地区のような他地域からの転入者（ノードの追加）がほとんど存在せず、かつ道路ネットワークの新規整備（リンクの追加）が行われないような過疎が進む中山間エリアであれば、グラフ構造の変化が生じないため大きな問題は生じない。しかし、都心部や新興住宅等においては、グラフ構造の拡張が生じる場合もあり、そのような地区においては、事前にノード・リンクの挿入を想定した上でグラフ構造を構築しておく必要がある点に留意が必要である。

ケーススタディの計算結果については、PP 調査結果との比較により、運転手は最短経路と同様の移動経路を通過したことが確認された。しかしながら、今回取扱ったケースのように、利用者が数名であり最短経路がドライバーから見ても明確な場合は問題ないが、需要分布が大きくばらついた際にドライバーがどのような経路を実際に通っているか、計算結果との比較の中で検証し、ZDD により表現ができる挙動・できない挙動を明確にしていくことが必要となる。本実験では乗り合いが発生したケースが少なかったためこのような検証はできないが、今後の課題として考えたい。

なお、既往の最適化問題によるオペレーションとの計算コストの違いについては、今後より詳細な検証を行う必要がある。例えば大和ら (2008)¹⁸¹⁾ は千葉県柏市北部地域（停留所 8 箇所，利用候補者 146 人）を対象に、最適化問題をヒューリスティクスを用いて解くことにより、デマンド交通の経路成立のシミュレーションを行っており、1 便当たり数秒～数十秒程度で計算処理が行われている。大和らの研究と本研究ではネットワーク規模や制約条件の違いがあり、特に時間制約の単純な比較はできないが、少なくとも大和らが制約条件内で設定しているタイムウィンドウの設定は ZDD 構築の際に保存する情報を追加することで表現が可能であることから、今後同様の条件のもとで手法間での比較優位性の検証を行う必要がある。

第4章

構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画

4.1 緒言

近年、地域公共交通網形成計画の策定が全国の地方公共団体において進んでいるが、需要量や道路ネットワーク等の条件下で、どのような路線バスネットワークを構築すればよいか（ネットワーク形状、起終点及び中間停留所の位置、運行便数等）判断に悩んでいる例は多い。第1章にて説明したとおり、科学的な手法に基づくネットワーク計画の手法については我が国において未だ確立されておらず、各地方公共団体の裁量に任せた検討がなされている点にあり、個別路線の採算性や利便性の議論に終始している例、全体のネットワーク計画は検討しつつも定性的な検討にとどまる例が多く見受けられる。

このような実務的な課題の一方、第2章にて説明したとおり、理論研究においては既往研究の中で二段階最適化問題によるネットワーク計画の検討が蓄積されつつある。公共交通のサービス設計を行うに当たっては、供給と需要のどちらか一方を固定して検討するのではなく、両方の視点からその検討を行うことの重要性は高い。この考え方については、公共交通における施策決定を政策決定者が乗客行動を勘案しながら自身の目的を最大限達成する施策を上位問題で設定し、乗客は上位問題のもとで自身の目的を最大限満たすような行動を下位問題で設定することにより、二段階最適化問題の枠組みで定式化することが可能である。

二段階最適化問題の定式化及び解法アルゴリズムにおいて試行錯誤が行われているが、実務での援用を考えると操作性が高く、解釈が容易であり、かつ計算コストが大きくなりすぎないアルゴリズム検討が喫緊の課題となっている。そこで本章では、需要変動下において行政・交通事業者の各種制約を踏まえた最適サービス決定問題を構築し、その解法アルゴリズムとしての構造化処理技法を提案する。

4.2 問題の定式化

二段階最適化問題の定式化においては、Szeto and Jiang(2014)⁶⁷⁾ 及び Ceder et al.(2015)¹¹⁾ が提案した定式化（以下、既存モデルと呼ぶ）を参考にし、需要が疎な地域の共通課題である、運行経費の確保、人員・車両の確保の重要性を踏まえ、サービス設計のためのバス路線決定問題を以下の通り整理した。なお、参考文献のうち前者については主に上位問題、後者については主に下位問題の定式化に当たり参考にしている。

4.2.1 上位問題の定式化

上位問題では、ネットワーク全体での利用者の利便性及び運営側のコストを最小化することを念頭に、単位需要量当たりの期待所要時間が最小となるような各路線の路線を決定するモデルとして定式化した。なお、制約条件により同時に停留所の位置も決定することになる。取扱うネットワークのイメージは図4.1に示す通り、ノード（停留所及びセントロイド）とリンク（道路ネットワーク）によるグラフで形成される。エリアはゾーンに分割し、各ゾーンにセントロイドを配置する。OD需要量はセントロイド間で付与し、各セントロイドは同一ゾーン内と接続する。これらのグラフ構造については入力変数として分析者が与える必要がある。

上位問題の定式化は式の通りである。なお、グラフ構造と併せて入力変数として設定が必要である交通需要については、発地セントロイド m から目的地セントロイド e への交通需要 d_m^e としてインプットする。

(1) ネットワーク形状の記述

制約条件内のネットワーク形状の記述は以下の通りである。まず、全ての路線 $r \in R$ は起点停留所ノードセット U から出発し、終点停留所ノードセット V に到着する制約について、接続状態を示唆する 0-1 変数 X_{ijr} を用いて設定する。ここで、 i, j はノード番号を示す。なお、既存モデルでは図4.1に示すようにスタディエリアを設定の上、スタディエリア内の起点ノードセットとスタディエリア外の終点ノードセットを明確に区分しているが、本研究では適用対象として中山間地域を想定しており、起終点となり得るノードが明確に把握できない場合が多いことを鑑み、起点・終点ノードを区分しない形で定式化を行った。

$$\sum_{j \in U \cup \{0\}} X_{0jr} = 1 \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.1a)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{0\}} X_{i0r} = 1 \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.1b)$$

また、起終点以外の停留所ノードについては必ず前後ノードを設置する。ここで、 Z_U は全ノードセットを示す。

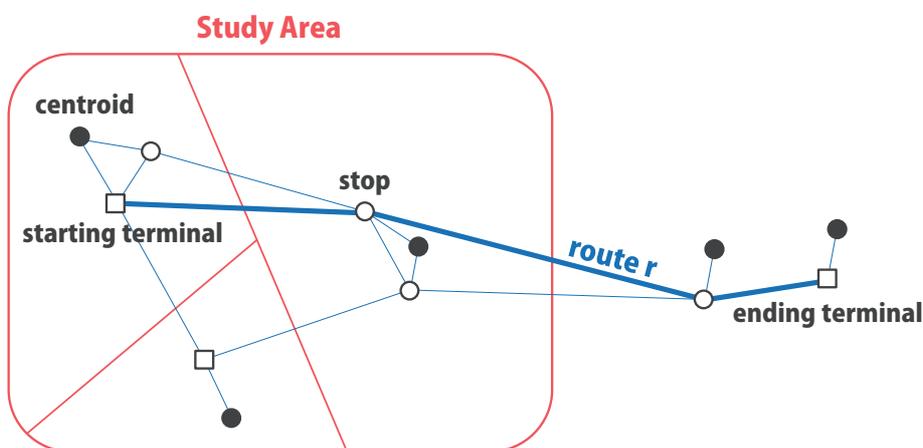


図4.1 上位問題のネットワーク設定イメージ

$$\sum_{i \in Z_U \cup \{0\}, i \neq j} X_{ijr} - \sum_{i \in Z_U \cup \{0\}, i \neq j} X_{jir} = 0 \text{ for } j \in Z_U, r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.2)$$

目的地ノード $e \in G_d$ は、終点停留所ノード $e' \in H_e$ と接続する。なお、 δ_r^e は、路線 r がセントロイド e に繋がるターミナルと接続している場合 1、そうでない場合 0 を取るダミー変数である。

$$\delta_r^e = \sum_{i \in Z_U/V} \sum_{e' \in H_e} X_{ie'r} \text{ for } e \in G_d \quad (4.3)$$

セントロイドノード $m \in G_s$ については、式 (4.4) により、必ずどこかひとつの停留所ノードに接続される。

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} \sum_{i \in H_m} \sum_{j \in Z_U \cup \{0\}} X_{ijr} \geq 1 \text{ for } m \in G_s \quad (4.4)$$

部分巡回路（全ての停留所ノードを通らず停留所ノードの部分集合を巡回する閉路）を除くための制約を式 (4.5) の通り設定する。 q_{ir} は部分巡回路排除のための路線 r ノード i におけるポテンシャル指標、 p は巨大数である。

$$q_{ir} - q_{jr} + pX_{ijr} \leq p - 1 \text{ for } i, j \in Z_U, i \neq j, r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.5)$$

(2) 所要時間の定義

路線 r の所要時間 T_r は、停留所における平均停車時間 s_t とリンクの最短乗車時間 c_{ij} の和により式 (4.6) の通り表現される。

$$T_r = \sum_{i \in Z_U} \sum_{j \in Z_U, j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_t) - s_t \text{ for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.6)$$

(3) サービス提供に係る制約

ネットワーク全体での運用車両台数 W 、路線延長の上限 S_{\max} 、下限 S_{\min} 、移動時間 $T_r < T_{\max}$ に係る制約は、以下式 (4.7a)-(4.7d) の通りである。ここで、 l_{ij} はノード i, j 間の最短距離である。

なお、既存モデルでは制約条件の中で運行頻度の上限値を設定している。第2章にて整理したとおり、公共交通の経路選択行動に関しては、頻度ベースサービスを対象としたモデルと時刻表ベースサービスを対象としたモデルに分けられるが、赤星ら (2012)⁸²⁾ が指摘するように、需要が疎な地方部の公共交通においては、停留所での待ち時間が非常に長くなる場合があり、平均待ち時間では適切な評価ができない可能性が高く、頻度ベースサービスによる分析ではなく、時刻表ベースサービスに基づく分析が求められる。とりわけ中山間地域のように需要が極めて疎な地域では、単一もしくは複数路線を組合わせた形で、運転手1名・車両1台でのワン・オペレーションが行われていることを鑑み¹⁸⁶⁾、本研究においては運行頻度を直接設定するのではなく、車両運用台数により表現することとした。

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} 2f_r T_r (1 - X_{00r}) \leq W \quad (4.7a)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, j \neq i} X_{ijr} c_{ij} / l_{ij} \geq S_{\min} \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.7b)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, j \neq i} X_{ijr} c_{ij} / l_{ij} \leq S_{\max} \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.7c)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_t) - s_t \leq T_{\max} \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max} \quad (4.7d)$$

また、ノード m から目的地 e への需要 d_m^e は、所与の車両容量（定員） k_{cap} 以内で輸送する制約を加える。

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} k_{cap} \delta_r^e \geq \sum_{m \in G_s} d_m^e \quad \text{for } e \in G_d \quad (4.8)$$

(4) 目的関数

目的関数については、単位時間当たりの需要処理数の最小化を表現するため、選択した路線を通行する際の総所要時間を輸送される需要量で除した値を最小化する形で定式化した。

$$\text{minimize } z_1 = \frac{\sum_{r=1}^{R_{\max}} T_r (1 - X_{00r})}{\sum_{e \in G_d} v_a^e} \quad (4.9)$$

4.2.2 下位問題の定式化

下位問題は上位問題によって決定した路線に基づき、以下の定式化により乗客の配分を行う。配分に当たっては、期待乗車時間を最小化する路線を最短経路探索により選択する。

$$\text{minimize } z_2 = \sum_{a \in A} \sum_{e \in G_d} c_a v_a^e \quad (4.10)$$

ここで、 $a \in A$ 、 $i \in Z_L$ は下位問題のリンク及びノードである。リンクフロー保存及び容量 k_{cap} に関する制約を式 (4.11a)-(4.11b) により設定する。ここで、 A_i^+ はノード i から出発するリンク集合、 A_i^- はノード i に侵入するリンク集合、 d_i^e はノード i から目的地 e への需要量をそれぞれ意味する。

$$\sum_{a \in A_i^+} v_a^e = \sum_{a \in A_i^-} v_a^e + d_i^e \quad \text{for } i \in Z_L, e \in G_d \quad (4.11a)$$

$$\sum_{e \in G_d} v_a^e \leq W k_{kap} \quad \text{for } a \in A \quad (4.11b)$$

乗客数 v_a^e については以下の通り非負制約を課す。

$$v_a^e \geq 0 \quad \text{for } a \in A, e \in G_d \quad (4.12)$$

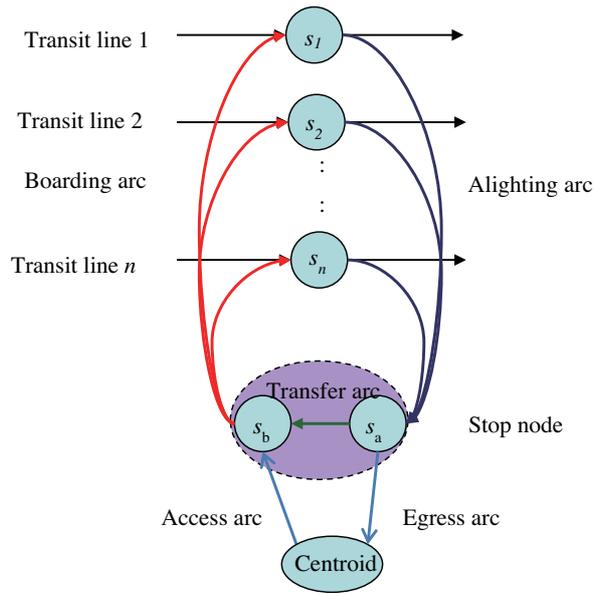


図 4.2 下位問題におけるネットワーク改善案 (Szeto and Jiang (2014))⁶⁷⁾ より引用)

なお、本研究においては計算処理の簡略化のため、上位問題と下位問題のネットワークは同様としており、交通需要者の路線間の乗り継ぎ移動は考慮していない。乗継移動を表現するためには、上位問題と下位問題で取扱うネットワークを変更し、下位問題にて図 4.2 に示すような、乗車・降車・ラインホール・乗継がそれぞれ表現されるネットワークを構築する必要がある。

4.2.3 上位問題と下位問題の接続

下位問題で取扱う乗客は、上位問題で設定したバス路線の利用可否を選択する。下式の交通機関選択モデルを導入し、各 OD ペアについてバスを利用するか否かの二項選択を表現する。なお、ここでは簡単のために線形確率モデルを導入しているが、他のモデル式についても同様に導入可能である。算出されたバス利用 OD については下位問題で取扱う需要量 d_i^e として取扱い、バス非利用 OD については他の交通機関に転換したものとみなし、下位問題の入力変数には含めないこととする。

$$E(y|\mathbf{X}) = Pr(y = 1|\mathbf{X}) = \beta' \mathbf{X} \tag{4.13}$$

上式は条件付期待値 $E(y|\mathbf{X})$ を線形にモデル化したものであり、 \mathbf{X} は条件付期待値に影響を及ぼす要因であり、本研究においては路線 r 利用時の i, j 間の所要時間 T_{ijr} として設定した。

なお、既存モデルにおいては、下位問題の計算結果を上位問題にフィードバックし、収束条件を満たすまで計算を繰り返す処理を行うが、本研究においては交通計画者と交通計画者の間の均衡を明示的には取扱っていない。これは本研究が解法アルゴリズムの開発に主眼を置いたという消極的な理由もあるが、実務レベルの交通量配分で広く使われている分割配分法と同様に、計算処理を簡略化し、操作性を高めかつ結果の解釈を容易にするという積極的な理由もある。なお、このような手法を採用することによる影響・課題については最終章にて詳述する。

4.3 解法アルゴリズムの設計

下位問題は OD ペアごとに割り当てられた路線に対し需要の配分を行うことから、上位問題の解を固定し、最短経路探索により計算が可能である。一方、上位問題については、全停留所ノードの中からどのノードを選択して路線を構成するかという組み合わせ最適化問題となり、膨大な組み合わせがあり全ての解を列挙することはできないため、通常は何らかのメタヒューリスティクス手法を用いて求解する必要がある。Ibarra-Rojas et al.(2015)³⁵⁾ のレビューによると、路線最適化問題については、数ノードで構成されるサンプルネットワークであれば厳密解法で解くことができるが、実ネットワーク等の複雑なネットワークに適用する場合にはメタヒューリスティクス手法が用いられており、遺伝的アルゴリズムや、蟻コロニー最適化、人工蜂コロニーアルゴリズム等が一般的に用いられている。一方で、これらのメタヒューリスティクス手法は問題に応じた解の改訂ルール、近傍の設定、パラメータチューニング等に対して労力がかかる点が課題であり、本研究ではこれらの負担を必要とせず、アルゴリズム設計において任意性がほとんど介入しない Cross-Entropy 法 (CE 法) を用いて求解する。

CE 法は Rubinstein(1999)⁶²⁾ が稀少事象確率を推定するための手法である分散減少法を更に拡張したものであり、ある確率分布に従って解候補を生成し、優れた解ほど高い確率で生成されるように確率分布を更新する手法である。計算手順は簡潔かつ実装に当たり任意性の介入がほとんどない。そのため、上記の既存のメタヒューリスティクス手法が抱える課題を解決することが可能であり、なおかつネットワーク問題に対してはノードあるいはリンクに確率分布を付与することによって、CE 法の自然な導入が可能である²¹⁾。

4.3.1 CE 法の概要

前項にて構築した概念的な定式化について、経路集合 \mathcal{Z} を変数とした最適化問題として表現すると以下の通りとなる。

$$S(\mathbf{z}^*) = \gamma^* = \max_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} S(\mathbf{z}) \quad (S(\mathbf{z}) = -z_1(\mathbf{z})) \quad (4.14)$$

この問題の最適解を \mathbf{z}^* 、目的関数の最小値を $\gamma^* = D(\mathbf{z}^*)$ とする。CE 法では、経路生成パターン \mathbf{z} は確率変数として表現され、ある確率密度パラメータ $\mathbf{P} \in \mathcal{P}$ に基づく確率密度関数 $f(\cdot; \mathbf{P})$ に従って生成される。このとき、最適解 \mathbf{z}^* が生成される確率は、以下の通り表される。

$$l(\gamma^*, \mathbf{P}) = \sum_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} I_{[D(\mathbf{z}) \leq \gamma^*]} f(\mathbf{z}; \mathbf{P}) \quad (4.15)$$

ここで、 $I_{[D(\mathbf{z}) \leq \gamma^*]}$ は、ある経路パターン \mathbf{z} が $D(\mathbf{z}) \leq \gamma^*$ を満たせば 1、それ以外なら 0 をとる許容領域 \mathcal{Z} 上の標的関数である。許容領域を満たす経路パターンが膨大である場合、最適解が生成される確率 l は極めて小さくなる (稀少確率となる)。そこで、CE 法では確率 l が大きくなるように、重点サンプリングが用いられる。これは、許容領域 \mathcal{Z} 上の特定の領域から重点的にサンプリングする手法であり、 $I_{[D(\mathbf{z}) \leq \gamma^*]}$ が稀少事象とならないように確率密度 $f(\mathbf{z}; \mathbf{P})$ を修正し、効率よくサンプルを生成していくことになる。

理想的な重点サンプリング密度 (つまり、標的事象 $I_{[D(\mathbf{z}) \leq \gamma^*]}$ が確率 1 で生成されるような密度) $g(\mathbf{z})$ は次のように定義される。

$$g(z) = \frac{I_{[D(z) \leq \gamma^*]} f(z; \mathbf{P})}{l(\gamma^*, \mathbf{P})} \quad (4.16)$$

そして、確率密度 $f(\mathbf{z}; \mathbf{P})$ と $g(\mathbf{z})$ の距離を示す指標として、以下に示す Kullback-Leibler 距離（または Cross-Entropy と呼ぶ）を導入する。

$$\mathbf{E} \left[\ln \frac{g(\mathbf{z})}{f(\mathbf{z}; \mathbf{P})} \right] = \sum_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} g(\mathbf{z}) \ln g(\mathbf{z}) - \sum_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} g(\mathbf{z}) \ln f(\mathbf{z}; \mathbf{P}) \quad (4.17)$$

最も $g(\mathbf{z})$ に近い確率密度 $f(\mathbf{z}; \mathbf{P})$ を得るには、この Kullback-Leibler 距離を最小化するようなパラメータ \mathbf{P}^* を求める必要がある。 \mathbf{P}^* は式 (4.17) に対して式 (4.16) を代入することによって、以下の通り求められる。

$$\mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \sum_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} I_{\{S(\mathbf{z}) \leq \gamma\}} f(\mathbf{z}; \mathbf{P}) \ln f(\mathbf{z}; \mathbf{P}) \quad (4.18)$$

しかし、全ての \mathbf{z} を数え上げるのは不可能であるので、ある確率分布 $f(\cdot; \mathbf{P})$ に従って生成されたサンプル Z_1, \dots, Z_k, Z_N を用いて許容水準 $\gamma (\geq \gamma^*)$ を適当な方法で定めるとともに、 \mathbf{P}^* を推定する。

$$\hat{\mathbf{P}}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{\{S(\mathbf{Z}_k) \leq \gamma\}} \ln f(\mathbf{Z}_k; \mathbf{P}) \quad (4.19)$$

この $\hat{\mathbf{P}}^*$ で確率パラメータ \mathbf{P} を更新し、その確率密度関数に従って新たな経路パターンを生成していくことで、より最適解に近い解が高い確率で得られるようになる。

4.3.2 CE 法の適用方法

(1) 確率分布の設定方法

ここでは、対象とする経路生成問題へと CE 法を適用する具体的な方法を示す。CE 法を適用する際には、まず確率密度 f のモデル化及び更新方法の設定が必要になる。CE 法のネットワーク問題への実装に当たっては、まず、武井・長江 (2015)^{132, 133}、今泉・羽藤 (2015)⁹³ が設定しているように、ノードあるいはリンクに確率分布を設定する手法が考えられる（図 4.3 内 (1)）。

しかしながら、経路最適化問題を扱うのであれば、わざわざネットワークをノードとリンクに分割した上で確率分布を設定しなくても、起点から終点に向かう経路自体をひとつのサンプルとして、経路ごとに直接的に確率分布を設定する方が効率的であるという考え方もある。その点については、Wang et al. (2007)⁷² や和田ら (2015)¹⁹¹ が CE 法によるネットワーク上での最適経路の求解の際に、ネットワーク上のマルコフ連鎖の推移確率行列に確率分布を設定している（図 4.3 内 (2)）。同手法は起点から確率推移行列に従って終点に到着するパターンをひとつのサンプルとするため、経路最適化の際の制約条件となるフロー保存則を満たしつつ、効率的にサンプルを生成することが可能である。

一方で、図 4.3 内 (3) に示すように、ノードやリンクに確率分布を付与し、当該ノード・リンクを通過する全ての連結グラフを列挙することにより、フロー保存則を満たしつつ、全ての連結グラフを漏れなく列挙した上で厳密解を選択することが可能である。このような手法は、これまではグラフの列挙数が膨大となった場合に、計算技術の問題から実装が難しかったが、前章で紹介した ZDD を用いることにより、制約条件を満たすグラフセットを高速に列挙索引化することが可能となる。また、このような最適化の解法アルゴリズムと列挙索引化手法の融合による解法アルゴリズムを用いることで、目的関数に需要の不確

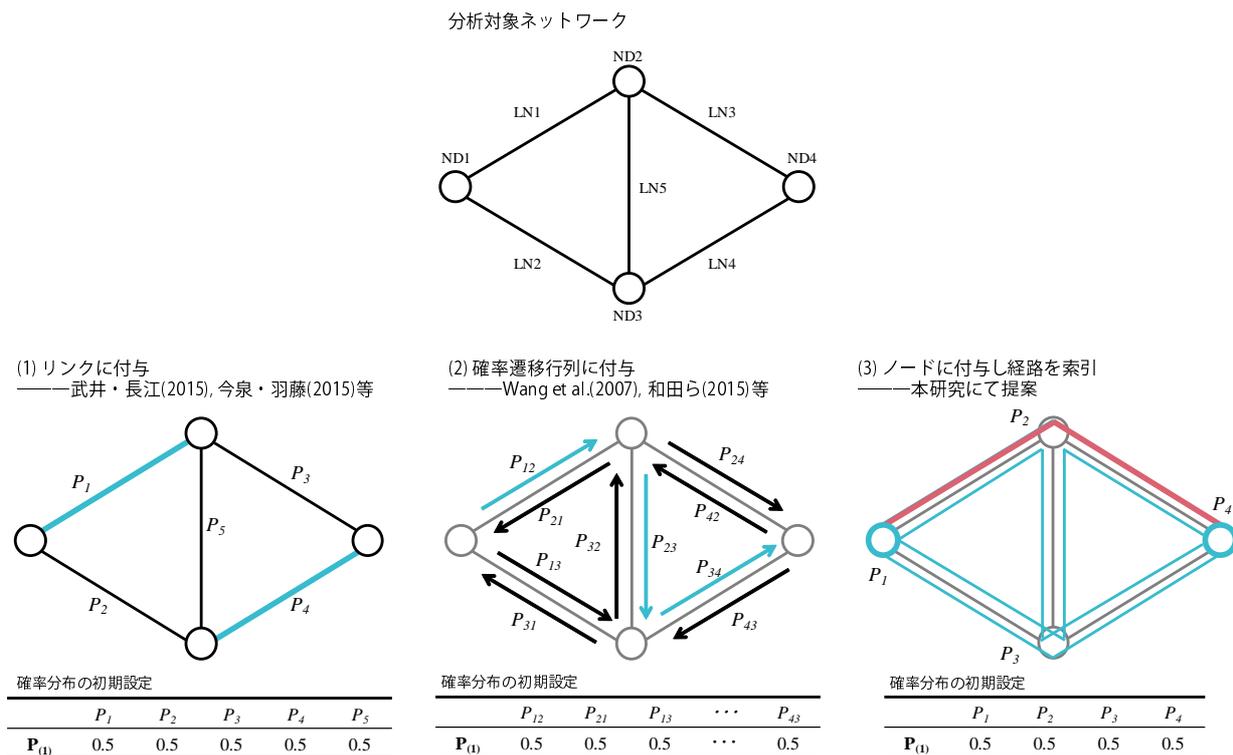


図 4.3 CE 法における確率分布の設定方法

実性を表す指標（例えば期待遅れ時間最小化問題等）を取扱う際に，列挙解をもとに統計的に不確実性指標の算出が可能になるというメリットもある。

更に，提案手法については，選定したバス路線を通過可能である OD ペアごとに，最短経路情報についても ZDD に格納しておくことが可能であるため，バス路線が選択されると，路線上の全 OD の最短経路も同時に ZDD に保存されるため，上位問題と下位問題を同時に解くことが可能になる．このような実用化のメリットを鑑み，本研究においては，CE 法に列挙索引化による構造化処理技法を組合わせた解法アルゴリズムを開発するとともに，その有用性を確認することを目的とする。

(2) 提案技法の利用者均衡配分への発展性

第 2 章で紹介した確率的利用者均衡モデルは理論的に優れたモデルであるが，経路選択モデルに関する実適用上の問題として，原・赤松 (2014)¹⁵³⁾ は (i) 経路選択枝間の類似性の表現法，(ii) 経路選択枝集合の決定法の 2 つを挙げている。

(i) に関して，重複経路におけるロジットモデルの IIA (Independence from Irrelevant Alternatives) 特性による問題は古くから指摘されており，古くから提案されている IIA 特性を緩和する手法として，経路選択モデルとして Probit モデルを適用する方法がある．しかしながら，計算量が膨大になること等から現時点ではあまり適用が進んでいない．GEV 型の経路選択モデルを用いるアプローチとして Cross Nested Logit モデルを用いた手法^{71, 58)} や，Generalized Nested Logit 型利用者均衡配分モデルとして定式化する例⁷⁾ もあるが，これらの手法は経路列挙が必要となり，大規模ネットワークでの適用可能性が難しいと言われている。

(ii) に関して，Dial のアルゴリズム²⁵⁾ は経路列挙を必要とせず，ロジットモデルに対応する交通量を配分することが可能である．しかし，経路選択枝集合を有効経路に暗黙的に限定しているため，不自然・非

現実的なフローパターンを生成する問題がある。一方で佐佐木のマルコフ連鎖配分¹¹⁸⁾を応用したロジットモデルと整合的なマルコフ連鎖配分はサイクリックな経路を含むすべての経路選択枝集合を扱うことができる。しかし、この方法も過大なサイクリック経路フローの生成可能性や IIA 問題の増幅の可能性が指摘されている。また、(i) で挙げた重複経路の IIA 特性を緩和するモデルは、既存の方法論では経路を明示的に列挙する必要があり、上記のアプローチが適用できないという問題が存在している。一方で、今回提案する解法アルゴリズムは、ZDD により当該 OD 間のすべての経路列挙が可能であり、経路列挙が困難であることに伴う経路選択モデルに関する実適用上の問題が解消されることになる。特に、有効経路の限定が難しい場合、つまり、確率的利用者均衡モデルの目的関数（第2章の式(2.1a)）におけるパラメータ θ がゼロに近づく、例えば災害直後等の有効経路のランダム性が高まる場合に有効であると考えられる。

(3) ペナルティ法の導入

ネットワーク問題は、ネットワーク形状以外にも容量制約等の様々な制約条件が付与された最適化問題であるため、これらの制約への対応として、Kroese et al.(2006)⁴³⁾を参考に、ペナルティ法を用いた目的関数を設定し、制約条件の表現を試みる。ペナルティ関数のアイデアは、制約付きの問題に対して、制約を破ることを表す項を目的関数に重みを付けて加えることにより、本来の問題を制約のない問題に変形することである。具体的には、目的関数を式(4.20)の通り修正する。

$$\hat{S}(\mathbf{z}) = S(\mathbf{z}) + \sum_{i=1}^k H_i \max\{G_i(\mathbf{z}), 0\} \quad (4.20)$$

ここで、 $H_i < 0$ は、 i 番目のペナルティの重要性を評価するものである。なお、制約を考慮せずに生成し、採択・棄却を決定する方法もあるが、実行可能なサンプルが見つかるまでに多数のサンプルが棄却される可能性が高く、効率的ではないため、ペナルティ法を採用した。

CE 法の実装に当たっては、目的関数のレベル γ と経路生成確率 v を更新していく多段階アルゴリズムを用いた。手順は以下の通りまとめられる。

■初期準備 バス路線を構成するノードの生成確率の適当な初期値 $\mathbf{P}^{(1)}$ 、生成サンプル数 N 、エリート戦略抽出率 ρ 、収束条件 κ 、制約条件（車両台数、輸送容量、路線延長の上限・下限）を与え、繰り返し回数 $n = 1$ として開始する。なお、本研究においては、生成確率を一様分布により与えているが、効率よく求解するために適した確率分布に関しては、今後検証の必要があると考える。

■Step 1（サンプルの生成） まずは設定したネットワークのもとで発生するすべての OD ペア間の移動を可能にするバス路線網について、当該 OD ペアを形成するノードを全て含む全域木により表現（図 4.4 参照）し、ZDD により圧縮保存する。なお、全域木 ZDD の作成については、前章で紹介した全域森 ZDD とほとんど同様のプロセスにより作成可能であるが、両者の違いは表 4.1（再掲）における (a)-(c) の判定について、全域森 ZDD では (i) G' はサイクルを持たない、(ii) G' の連結成分はちょうどひとつの根を含む、(iii) 異なる根を持つ連結グラフ同士が結合されていない、という 3 つの条件のもとで決定したのに対し、全域木 ZDD では (iii) の条件を考慮しないという点が異なる。

なお、ここでバス路線を経路に関する制約を加えず全域木により表現しているのは、前述したとおり、中山間地域等の地区拠点が明確でないエリアにおけるバス路線計画の場合、起終点をどこに設置すればよいのかという点も含めてモデルのアウトプットとして算出されることが望ましいためである。よって、本モデルのアウトプットはあくまでも優先して整備すべきノードセットが提案されることになり、選択されたノードをどのように巡回するかについては別途スケジューリング問題を解く必要がある点に留意する。

表 4.1 FBS による ZDD 構築アルゴリズム (再掲)

1	1 段目に根ノードを作成
2	for $i = 1$ to m
3	for すでに作成済みの i 段目の各ノード n について do
4	for $x = 0, 1$ do // 0-枝, 1-枝の処理
5	収束条件の判定 (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'' が既に存在 (c)
9	then $n' \leftarrow n''$
10	else n の x - 枝の先を n' とする
11	end for
12	end for
13	end for

なお、仮に交通結節点が明確に示されるエリアで適用する場合は、路線の OD を所与とし、経路の制約に基づいて ZDD を構築することも考えられる。

次に確率 $\mathbf{P}^{(1)}$ のもとで OD ペアの生成パターンを N セットずつ生成し、各セットにおいて生成される OD ペアを含むバス路線について ZDD による列挙解から該当する組み合わせを検索する (図 4.4 参照)。そして各セットのペナルティ項付き目的関数値を計算し、全てのサンプルの目的関数値を小さい順に並び替え、 ρN 番目の値を許容水準 γ^n とする。

■Step 2 (確率分布の更新) 許容水準 $\gamma^{(n)} = \dots = \gamma^{(n-\kappa)}$ となれば $\mathbf{P}^{(n)}$ を最適確率パラメータとして終了する。そうでなければ $n = n + 1$ として Step 1 に戻る。

この手順により、確率パラメータ $\mathbf{P}^{(n)}$ が最適解のみを極めて高い確率で生起させるようなパラメータ \mathbf{P}^* に収束する。

4.3.3 制約条件の導入

より現実的な制約を追加することによって基本的な解法の拡張を行う。具体的には、車両台数制約、車両容量制約及び路線延長制約である。

(1) 車両台数制約・OD 別容量制約

車両台数制約とは単位期間における導入車両台数 W の制約を意味し、OD 別容量制約とは、ある 1 路線に着目した際に、OD ペアごとに輸送可能な需要の上限値 k_{cap} を意味する。実装に当たっては、オリジナルで設定した OD データから車両容量分を差引くことで 1 便ごとの OD データを作成し、OD ペアごとに最適化計算を行うことで対応した (図 4.5 参照)。

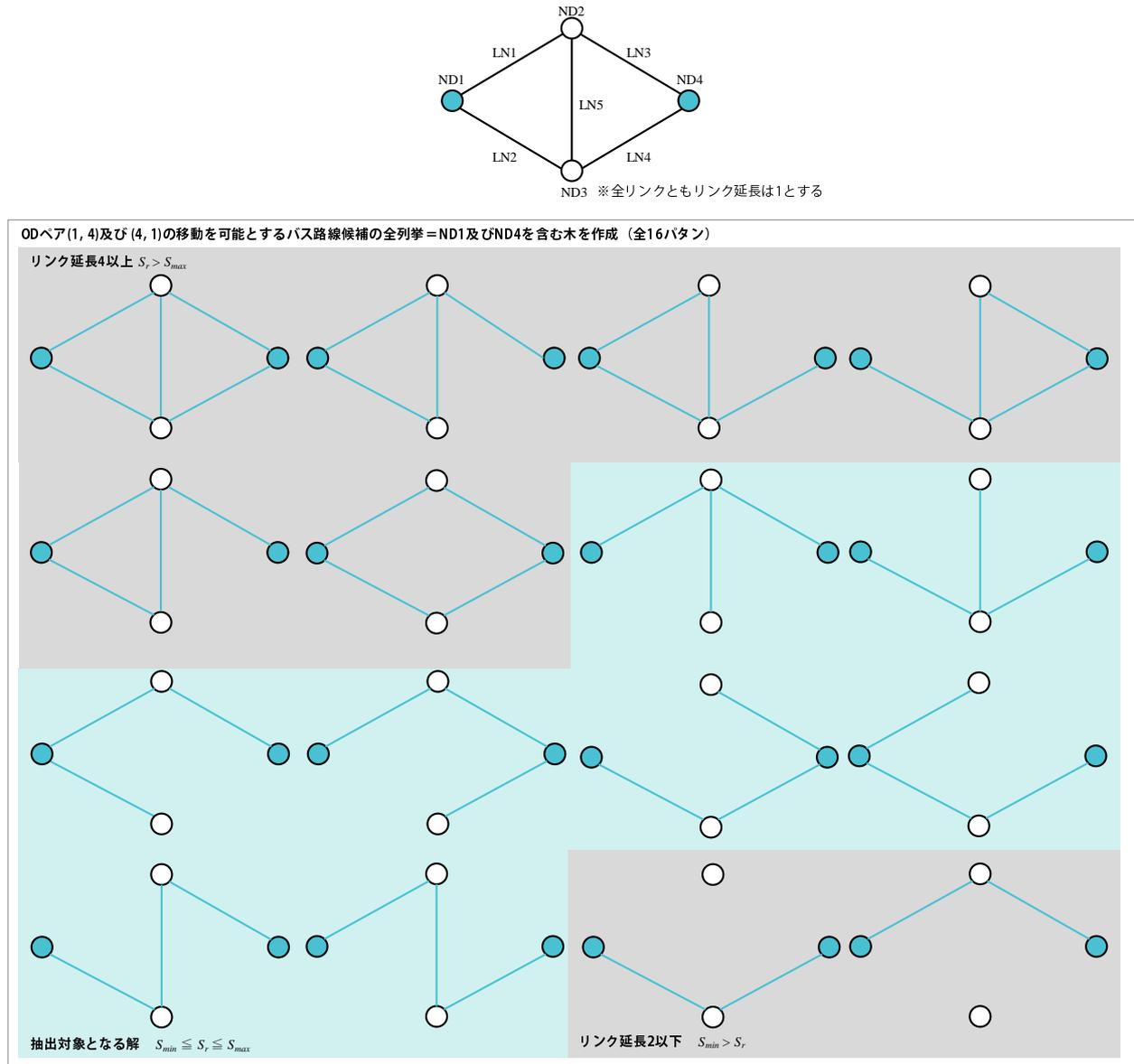


図 4.4 OD ペア情報をもとにしたバス路線列挙のイメージ

(2) 路線延長制約

路線延長制約については、路線の長大化や、極端に距離の短い路線の設置を回避すべく、各路線の路線長の上限 S_{max} 及び下限 S_{min} を設定することを意味する。実装に当たっては、ZDD による列挙解の中から探索する際に、あらかじめ設定した路線長の範囲 $S_{min} \leq S_r \leq S_{max}$ の木しか探索されない制約を加えることにより対応した。以上の制約条件を考慮したアルゴリズムフローを図 4.6 に示す。

4.4 数値計算実験

本節では、グリッド型の簡易ネットワークを対象としてバス路線計画を検討する。前節で構築したアルゴリズムを適用して数値計算を行った結果を示すとともに、結果の特徴及び有効性に関して考察を行う。具体的には、まず算出されたバス路線に関する考察を行うとともに、CE 法のパラメータの感度分析につ

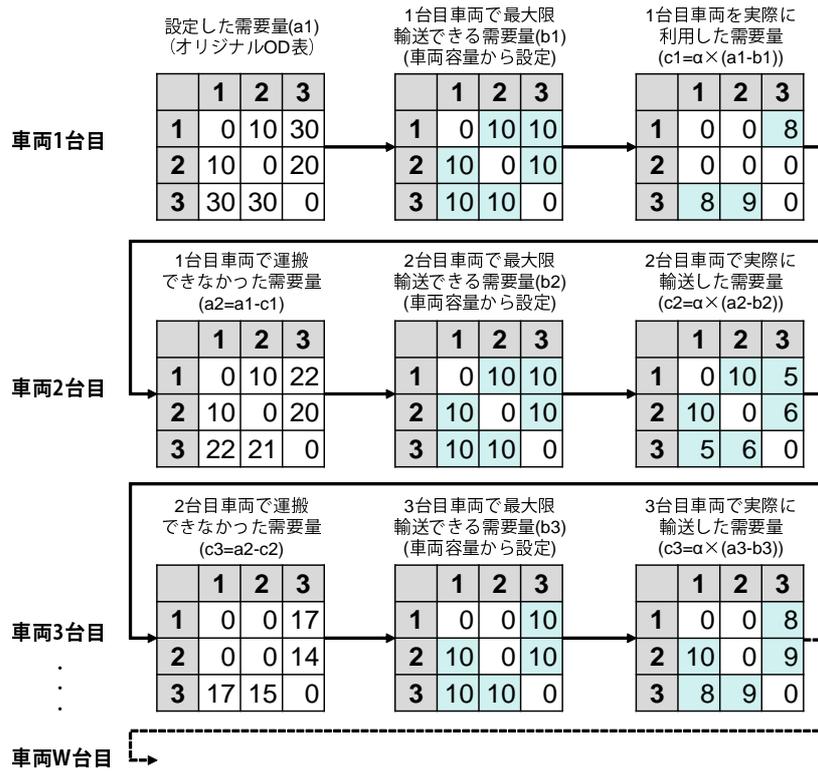


図 4.5 車両台数制約・OD別容量制約を考慮するためのOD表の設定方法イメージ

いても併せて行う。なお、アルゴリズムについては Python によりコーディングされており、計算環境としては Intel Core i7-6700 CPU 3.40GHz, メモリ 16GB の計算機を使用している。なお、ZDD の構築に当たっては、前章と同様に Python 拡張モジュール Graphillion³⁶⁾ を使用した。

4.4.1 評価に用いるネットワーク

検証に用いる簡易ネットワーク図及びノード m から目的地 e への需要 d_m^e の条件を図 4.7 に示す。ネットワークは無向グラフにより表現し、各リンクには距離 l_{ij} の情報が付与されている。なお、制約条件として車両台数 W は 6 台、OD 別容量制約 k_{cap} は 1OD ペア当たり 10trip, 路線延長については下限 $S_{min} = 20\text{km}$, 上限 $S_{max} = 8\text{km}$ として設定した。バスの旅行速度は一律 20km/h , 停留所での平均停車時間は $s_t = 30\text{sec}$ で設定している。なお、計算の簡略化のため、セントロイドノードと停留所ノードは同一としている。なお、CE 法のサンプル数 $N = 300$, エリート戦略抽出率 $\rho = 0.2$ と設定して試算を行った。また、設定されたバス路線の選択割合 Pr については、乗車時間 $t = 0\text{min}$ であれば $Pr = 1$ とし、 $t \leq 30\text{min}$ においては所要時間に対して線形に減少 ($Pr = 1 - t/30$) するものと仮定し、 $t \geq 30\text{min}$ の場合は $Pr = 0$ として設定した。

4.4.2 計算結果に関する考察

設定した簡易ネットワークにおけるバス路線網の計算結果を図 4.8 及び表 4.2 に示す。なお、6 台分の計算時間については 7.621sec であった。

リンク両端におけるノードに関連する OD 需要量 d_m^e が大きく、かつリンク延長 l_{ij} が短いことから、リンク 7 が 4 路線によって選ばれている一方で、リンク延長が極端に長いリンク 9 が選択されない等、需

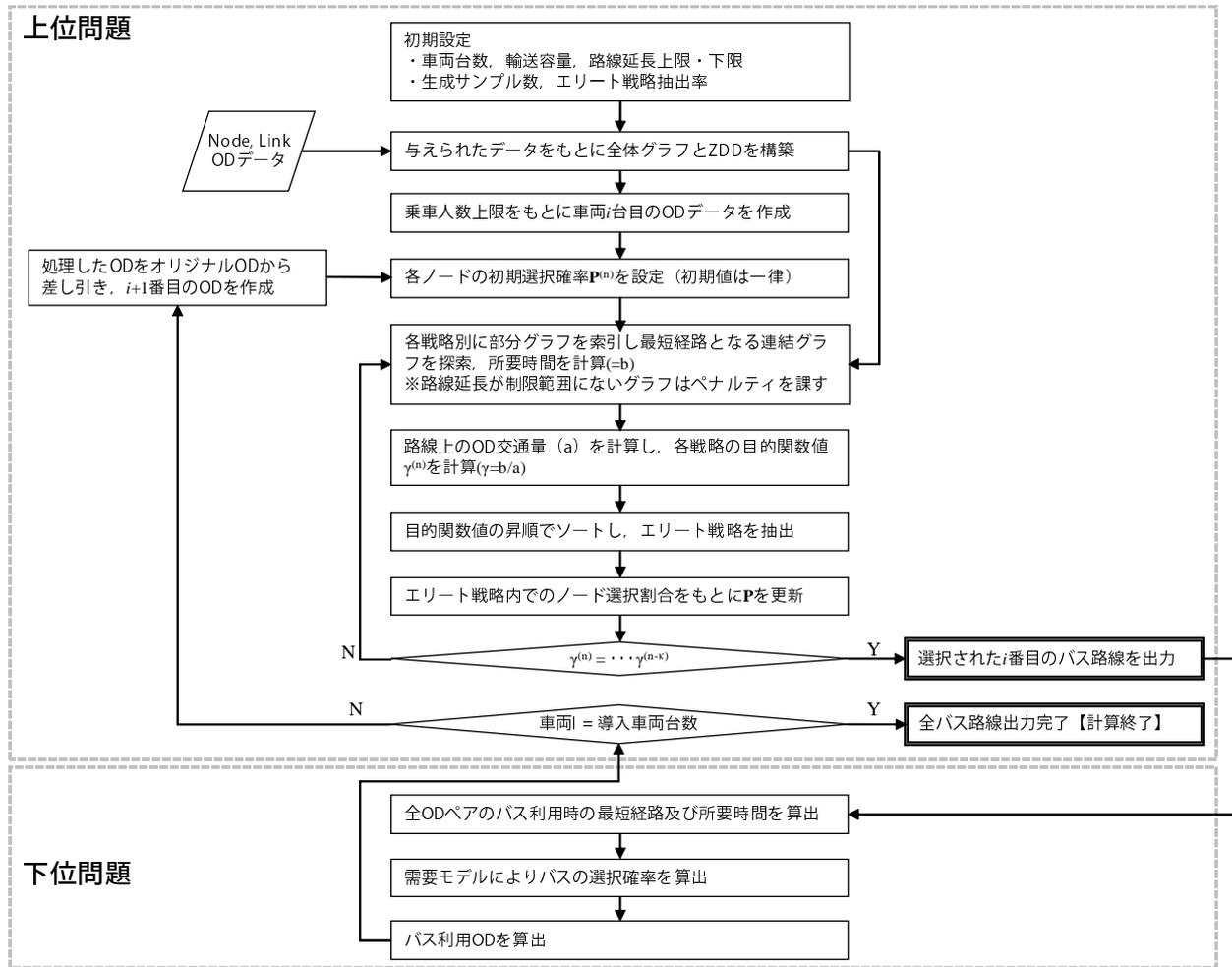


図 4.6 構築したアルゴリズムフロー

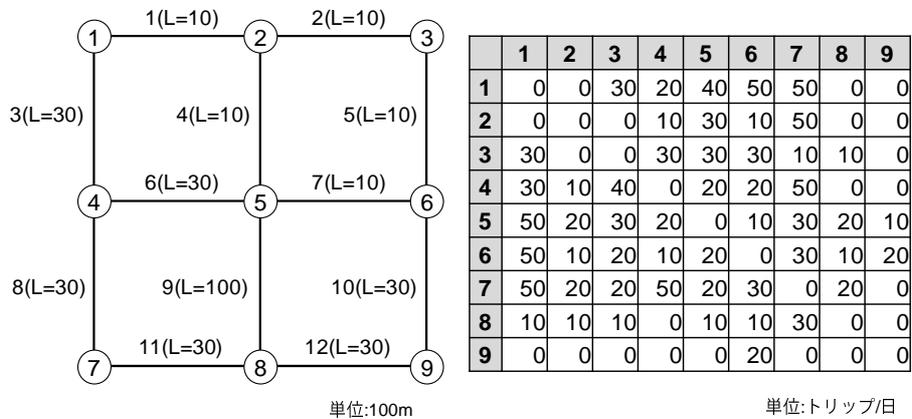


図 4.7 評価に用いるネットワーク及び交通需要

表 4.2 簡易ネットワークにおける推計結果

ケース	路線	経由ノード	所要時間 [min]	総需要 [trip]	目的関数値
震災前	1 台目	[1,2,3,5,6]	14.0	160	87.5
	2 台目	[1,2,3,4,5,6]	23.5	128	183.6
	3 台目	[4,5,6,7]	22.5	70	321.4
	4 台目	[5,6,8,9]	22.5	60	375.0
	5 台目	[1,2,4,7]	22.5	46	489.1
	6 台目	[3,6,8,9]	22.5	32	703.1

要パターンとリンク条件に概ね合致した路線選定が行われていることが確認されることとなった。

また、下位問題については、上位問題で把握した各経路 r 上のノードを通過する OD ペアを対象に ZDD から最短経路を検索し重ね合わせるにより、図 4.9 に示すように各路線におけるリンク別需要量を計測することが可能である。

4.4.3 パラメータの感度分析

続いて、CE 法における主な設計パラメータであるサンプル数 N とエリート戦略抽出率 ρ を対象に、目的関数値と計算時間の変化に着目した感度分析を行う。

まず、サンプル数パラメータ N について 10 から 1,000 まで変化させた際の目的関数及び計算時間の変化を図 4.10 と図 4.11 に示す。なお、各サンプル数について、100 回計算を行いその平均値をグラフ化している。サンプル数の増加は目的関数の改善に寄与するが、今回の計算で用いた簡易ネットワーク程度であれば、100 サンプル程度あれば目的関数は収束することが確認された。また、計算時間はサンプル数に対して高々線形にしか増加しないことが確認できることから、ネットワークの複雑性が高まる場合においては、基本的にはサンプル数の増加は、解の精度を向上させる上で有効であると言える。

続いて、サンプル数を 300 に固定して、抽出率パラメータ ρ について 0.01 から 0.99 まで変化させた結果を図 4.12 と図 4.13 に示す。こちらも、各パラメータ値について 100 回計算を行い、その平均値をグラフ化している。抽出率を大きくすると質の悪い解を抽出する可能性が高くなり、確率分布が改善されないため、 $\rho = 0.7$ を超えると最適解に到達できないケースが存在している。一方、計算時間についてはサンプル数と同様に線形に増加している。これは抽出率を上げるに従って確率分布の変化が穏やかになることと、ZDD による経路探索に時間を要するためである。以上より、抽出率の増加は解の精度を向上させるには至らず、むしろ計算時間を加味すると、ある程度低い抽出率を設定する必要があることが示唆される。

4.5 需要変動下におけるバスネットワーク検討-陸前高田市への適用

本節では、前節で構築したアルゴリズムを、陸前高田市におけるバス路線計画の検討に適用する。陸前高田市は 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う大津波により公共交通ネットワークが壊滅したが、翌 2012 年度前半には地域公共交通確保維持改善事業を活用した路線バスや乗合タクシーによる生活の足の確保が行われ、以降、復興事業の進捗に合わせて路線・ダイヤの見直しを行っている。ここでは同市における震災前～震災後～将来にわたっての需要分布とネットワークの変遷をインプット要件とし、

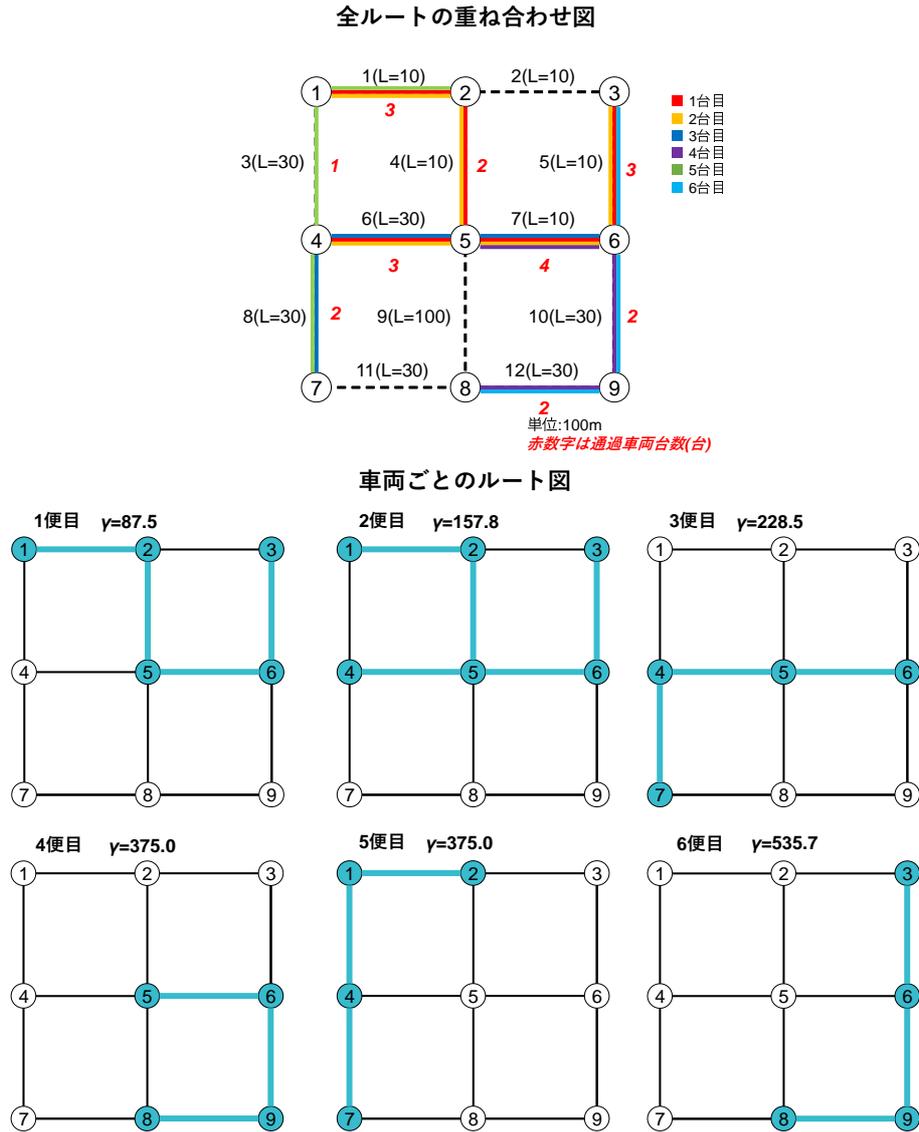


図 4.8 簡易ネットワークにおけるバス路線最適化結果

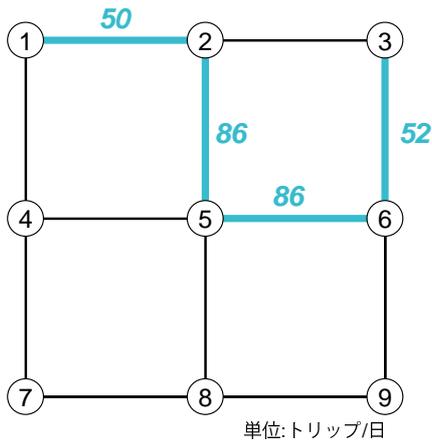
需要変動下における各段階において適切なバス路線形態を検討するために開発手法の適用を行う。なお、分析条件の明確化のため、本分析において取扱うバス路線は、陸前高田市内で完結するバス路線のみを想定しているが、インプットデータの収集範囲を拡大することにより、複数の自治体を跨ぐ地域間幹線系統の取扱いも可能である。

なお、被災地である陸前高田市をケーススタディ対象として選定した理由は、第1章でも述べたとおり、被災地域は都市が破壊された状態から復興に向けた計画を立案する必要があり、最適化問題等による規範的予測技法に基づくネットワーク計画が特に必要とされる地域であると考えたためである。

4.5.1 陸前高田市におけるバスネットワークの変遷

分析に先立ち、陸前高田市における震災前から震災後にかけての各時点のバス路線の変遷についてまとめる。表 4.3 に示すように、市内路線バスは震災に伴う津波被害、応急仮設住宅・仮設店舗の建設・撤退、都市計画道路等の供用、災害公営住宅、嵩上げ市街地、公共公益施設の再建等に合わせて毎年再編を行ってきた（各時点の路線図は図 4.14 ～図 4.20 を参考にされたい）。

■第1便のリンク別トリップ数



■第1便のOD条件

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	10	10	10	10	10	0	0
2	0	0	0	10	10	10	10	0	0
3	10	0	0	10	10	10	10	10	0
4	10	10	10	0	10	10	10	0	0
5	10	10	10	10	0	10	10	10	10
6	10	10	10	10	10	0	10	10	10
7	10	10	10	10	10	10	0	10	0
8	10	10	10	0	10	10	10	0	0
9	0	0	0	0	0	10	0	0	0

単位:トリップ/日

■ODペア別経路出力結果

O/D	1	2	3	5	6
1			$d_{13}=8$ 	$d_{15}=9$ 	$d_{16}=8$
2				$d_{25}=9$ 	$d_{26}=9$
3	$d_{31}=8$ 			$d_{35}=9$ 	$d_{36}=9$
5	$d_{51}=9$ 	$d_{52}=9$ 	$d_{53}=9$ 		$d_{56}=9$
6	$d_{61}=8$ 	$d_{62}=9$ 	$d_{63}=9$ 	$d_{65}=9$ 	

図 4.9 車両 1 台目のバス路線に対応するリンク別交通需要

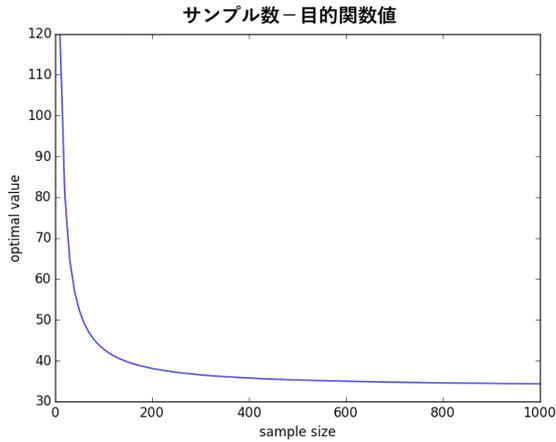


図 4.10 サンプル数-目的関数値の感度分析

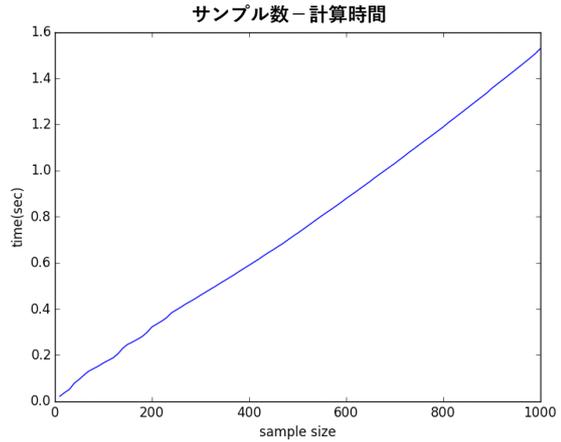


図 4.11 サンプル数-計算時間 (sec) の感度分析

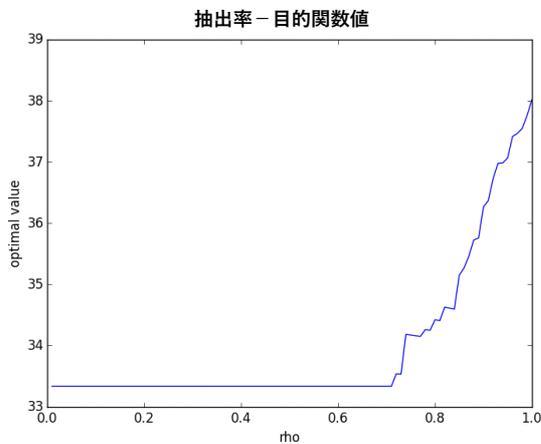


図 4.12 抽出率-目的関数値の感度分析

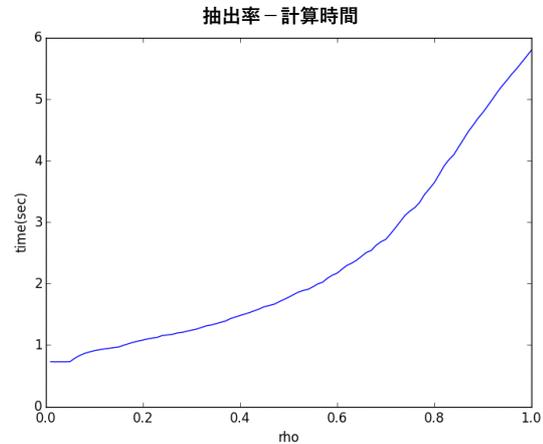


図 4.13 抽出率-計算時間 (sec) の感度分析

また、震災前～集中復興期前半（BRT・デマンド交通導入前）～現在にかけての運行内容の変遷について、表 4.4 に示す。震災に伴って JR 大船渡線が休止となったほか、営業距離が比較的長大な系統については、震災前と比較して震災後の運行頻度が大きく低下する等、地域間幹線を担う路線が震災前と比較してサービスレベルを大きく低下させている傾向にある。その後、JR 東日本において、地域交通を早期に安全で利便性の高いサービスを提供する観点から、大船渡線をバス高速輸送システム（BRT）で仮復旧する提案が行われ、同路線は BRT による本復旧が決定し、震災前と比較しても高い運行頻度での復旧を遂げた（BRT による復旧の詳細については永井 (2013)¹⁴³⁾ 等が詳しい)。

一方、市内路線については、もともとの運行頻度が低かったこともあり、広田線を除くと、震災前後で大きな運行頻度の変動は見られない。また、後述する国の補助事業等の活用により、震災前と比較して、決め細やかなルート設定が実現できており、集中復興期前半に当たる平成 25 年のうちに、現在の市内公共交通体系の基本形が完成していることがわかる。

2017 年 7 月現在、陸前高田市市内には、地域間幹線としての役割を担う系統として、JR 大船渡線 BRT、一関大船渡線、陸前高田住田線、細浦経由高田線が整備されている。このうち、陸前高田住田線と細浦経由高田線については、国土交通省の被災地域地域間幹線系統確保維持事業の補助を受けて運行している。地域間幹線系統は BRT の導入に伴い、並行する系統の減便等も行われているが、全体で見ると震災前と比較してサービス水準は向上している。

また、地域内フィーダーを担う系統として、小黒山経由生出線、広田線、矢の浦線、竹駒線、福伏線、今泉線、デマンド交通気仙地区、デマンド交通小友・広田地区が運行されている。このうち、デマンド交通を除く路線定期運行の系統については、特定被災地域公共交通調査事業を活用して運行している。市内路線については、震災前と比較しても遜色ない整備状態にまで回復しており、デマンド交通の新規導入等を踏まえると、震災前よりもサービスレベルが上がっている地区も一部見られる。なお、市内路線については、震災前はバス車両により運行されていたが、震災後については、需要に対する車両サイズの適正化が図られ、マイクロバスもしくはタクシー車両での運行に切り替わっている区間がほとんどである。また、運用車両の変更に伴い、交通事業者も路線バス事業者から貸切バス事業者もしくはタクシー会社に変更されている。

また、起終点や経由地についても震災前と震災後で大きな変動がある。震災前は沿岸の国道45号沿線に都市機能が集積しており、バス路線も同エリアに集中していたが、震災による津波被害により壊滅的な被害を受け、震災後の生活の拠点は応急仮設住宅が立地している高台に移った。それに伴い、バス路線も山沿いのルートを経由するようになり、その後も復興まちづくりの形成が高台中心で進んだことから、現在も震災前と比べてネットワークの重心が高台方向にシフトしている。

表 4.3 陸前高田市におけるバス路線網の変遷概要

時点	概要
震災前（2010年時点）	震災前の市内公共交通機関は鉄道（JR 大船渡線）とバスによって構成されていた。JR 大船渡線は隣接する気仙沼市と大船渡市を連絡しており、鉄道がカバーしていない市内横田町、住田町方面、市内矢作町方面、広田半島方面の移動はバスによってカバーされていた。バス路線については、岩手県交通株式会社により運行されており、いずれも廃止代替バスとして、市の補助を受けて運行されていた ¹⁷²⁾ 。
集中復興期前半（2012年10月時点：BRT・デマンド交通導入以前）	震災に伴う津波の発生に伴い、陸前高田市内にある JR 大船渡線の5駅のうち、陸前矢作駅を除く4駅は駅舎が流出した。また、バス路線については、市内前122バス停のうち66箇所が被災し、全路線が運行を中止した ¹⁷²⁾ 。その後、暫定的な無償運行を経て、2012年6月より、特定被災地域公共交通調査事業（国土交通省）を活用した路線バス・乗合タクシーの有償（道路運送法21条による実証実験）での運行が開始された ¹⁸⁵⁾ 。
集中復興期前半（2013年4月時点：BRT・デマンド交通導入後）	JR 大船渡線の復旧が長期化することを鑑み、JR は暫定的措置として BRT による復旧を行った。また、同時期に、陸前高田市は復興交付金事業を活用し、復興事業の変遷にあわせフレキシブルな運行内容の変更が可能となるデマンド交通実証実験（道路運送法21条による実証実験）を開始した ¹⁸⁵⁾ 。
集中復興期後半（2014年4月時点：デマンド交通停留所の増設、市内路線のコスト削減）	商店・医療施設等の再開、住民の移動ニーズの多様化に合わせて、デマンド交通の目的地となる停留所の増設を行った。併せて、運行コストが大きく財政を圧迫していた的場線・合場線を統合し、小黒山経由生出線を新設した ¹⁸⁷⁾ 。
集中復興期後半（2015年6月時点：市内高校の再開、災害公営住宅への入居への対応）	2015年度には市内の唯一の高等学校である県立高田高校が市内高田町内で再建されたことに伴い、生徒の通学で活用できるよう、BRT 高田高校前駅及び高田高校前停留所が設置された。また、市内の災害公営住宅への入居が開始したことに伴い、各団地の居住者の利用が可能になるよう、路線の再編を行った ¹⁸⁸⁾ 。
復興・創生期（2016年6月時点：暫定市街地へのアクセス性改善への対応）	竹駒地区、米崎地区に立地する商業施設へのアクセス性改善を目的に、市内路線の若干の改正を行った ¹⁸⁹⁾ 。
復興・創生期（2017年7月時点：嵩上げ市街地の交通広場完成に伴う再編）	2017年4月、嵩上げ市街地に大型商業施設「アバッセたかた」が開業したことを契機に、同施設を市内路線の結節点にする動きが加速した。2017年度中に完成予定である同施設に隣接する交通広場及び BRT 陸前高田駅は、同市の交通結節点として機能することになる ¹⁹⁰⁾ 。

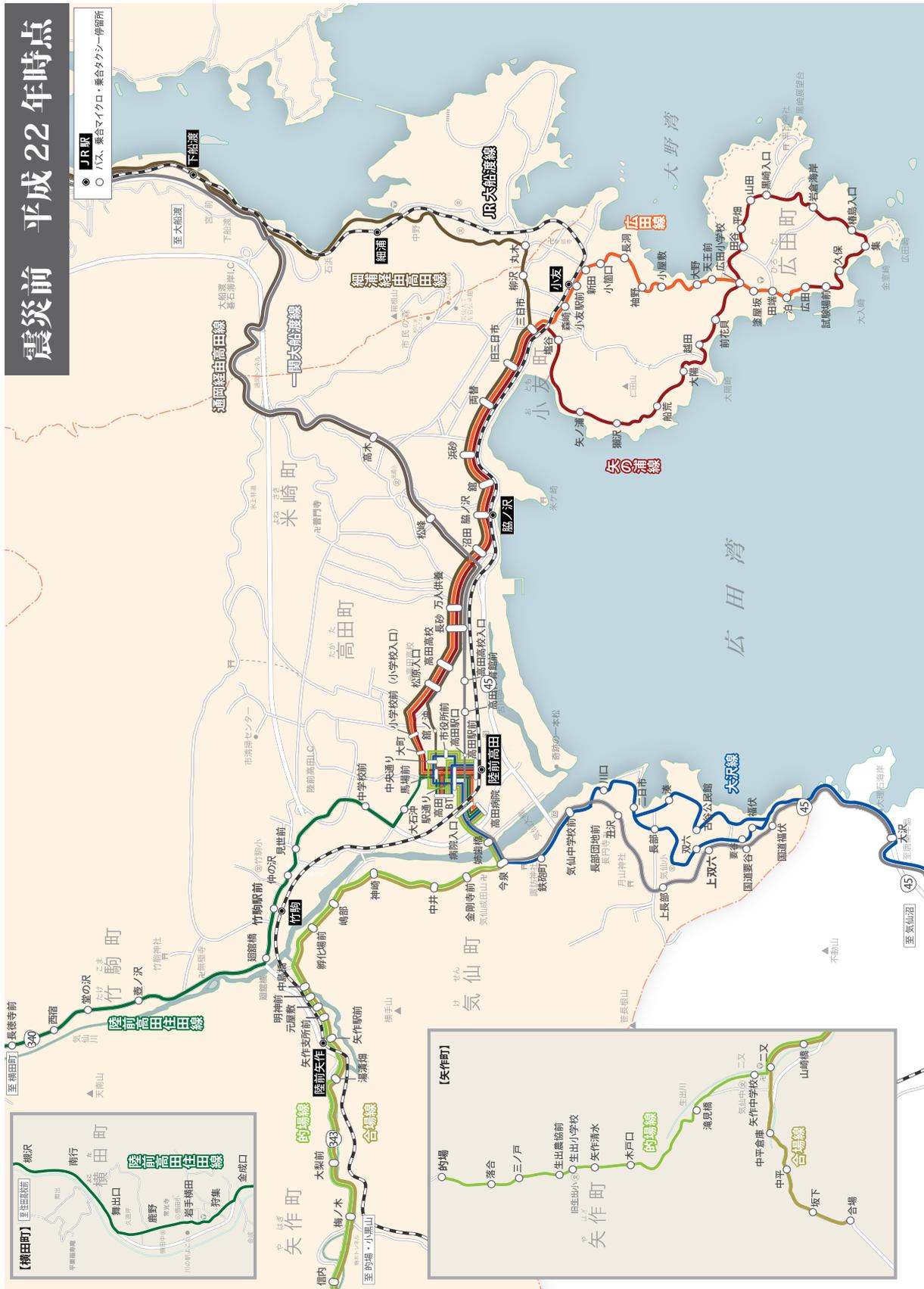


図 4.14 路線図：震災前（2010 年時点）



図 4.16 路線図：集中復興期前半（2013年4月時点）

表 4.4 震災前～震災復興前期～復興・創生期にかけての路線別運行内容の変遷

地区	路線名	震災前 2010時点	集中復興前半 (BRT・デマンド導入前) 2012.10時点	復興・創生期 (現在) 2017.7時点
地域間幹線	JR大船渡線 (BRT)	気仙沼⇨陸前高田⇨盛 19回/日 (市内5駅) JR東日本/鉄道車両	BRTによる復旧	気仙沼⇨陸前高田⇨盛 68回/日 (市内10駅) JR東日本/バス車両 (4条)
	一関大船渡線 (特急一関線)	一ノ関駅前⇨県立病院・権現堂 16回/日	一ノ関駅前⇨立根 8回/日 岩手県交通/バス車両 (4条)	一ノ関駅前⇨立根 8回/日 岩手県交通/バス車両 (4条)
	通岡経由高田線	大農前⇨高田BT 6回/日	—	—
	細浦経由高田線	岩手県交通/バス車両	—	—
	陸前高田住田線	県立大船渡病院・大農前⇨高田BT 22回/日	県立大船渡病院・立根⇨ 礪石岡地前 平日13回/日・土日祝11回/日 岩手県交通/バス車両 (4条)	立根⇨県立大船渡病院⇨ 竹駒駅前 2回/日 県交通/バス車両 (4条)
	合場線	住田高校前⇨高田駅前・県立高田病院 平日16回/日・土日祝6回/日	住田高校前⇨ 米崎小学校前 6回/日 岩手県交通/バス車両 (4条)	住田高校前⇨ イオンSuC陸前高田 平日10回/日・土日祝7回/日 岩手県交通/バス車両 (4条)
	的場線	岩手県交通/バス車両 (4条)	合場⇨ 米崎小学校前 6回/日 岩手県交通/バス車両 (21条)	合場⇨ 米崎小学校前 6回/日 岩手県交通/バス車両 (21条)
	生出线	岩手県交通/バス車両 (4条)	岩手県交通/バス車両 (4条)	岩手県交通/バス車両 (4条)
	荒谷線	荒谷前⇨高田BT 4回/日	—	—
	福伏-マイヤアップルロード店線	岩手県交通/バス車両 (4条)	福伏⇨ マイヤアップルロード店 4回/日 高田タクシー・気仙タクシー/タクシー車両 (21条)	福伏⇨ 高田病院前 2回/日 高田タクシー・気仙タクシー/タクシー車両 (21条)
市内中心部	マイヤアップルロード店-マイヤ滝の里店線	—	【新設】 マイヤ滝の里店⇨マイヤアップルロード店 4回/日 高田タクシー・気仙タクシー/タクシー車両 (21条)	—
	竹駒線	—	—	滝の里⇨ 高田病院前 4回/日 高田タクシー・気仙タクシー/タクシー車両 (21条)
小友・広田方面	広田線	広田⇨高田BT・高田病院・小友駅 平日12回/日・土日祝13回/日	広田小学校⇨ 米崎小学校前 4回/日	広田小学校⇨ 小友駅・高田病院 平日7回/日・土日祝6回/日
	矢の浦線	岩手県交通/バス車両 (4条) 広田⇨高田病院 6回/日	碓石観光企画/マイクロバス車両 (21) 矢の浦⇨ 米崎小学校前 4回/日 碓石観光企画/マイクロバス車両 (21条)	碓石の浦⇨ 高田病院前 平日4回/日・土日祝2回/日 碓石観光企画/マイクロバス車両 (21条)
デマンド交通	デマンド交通	—	—	【新設】 気仙地区8回/日 小友・広田地区6日/回 高田タクシー・気仙タクシー/タクシー車両 (21条)

※運行内容が変更となった箇所については赤字で示している

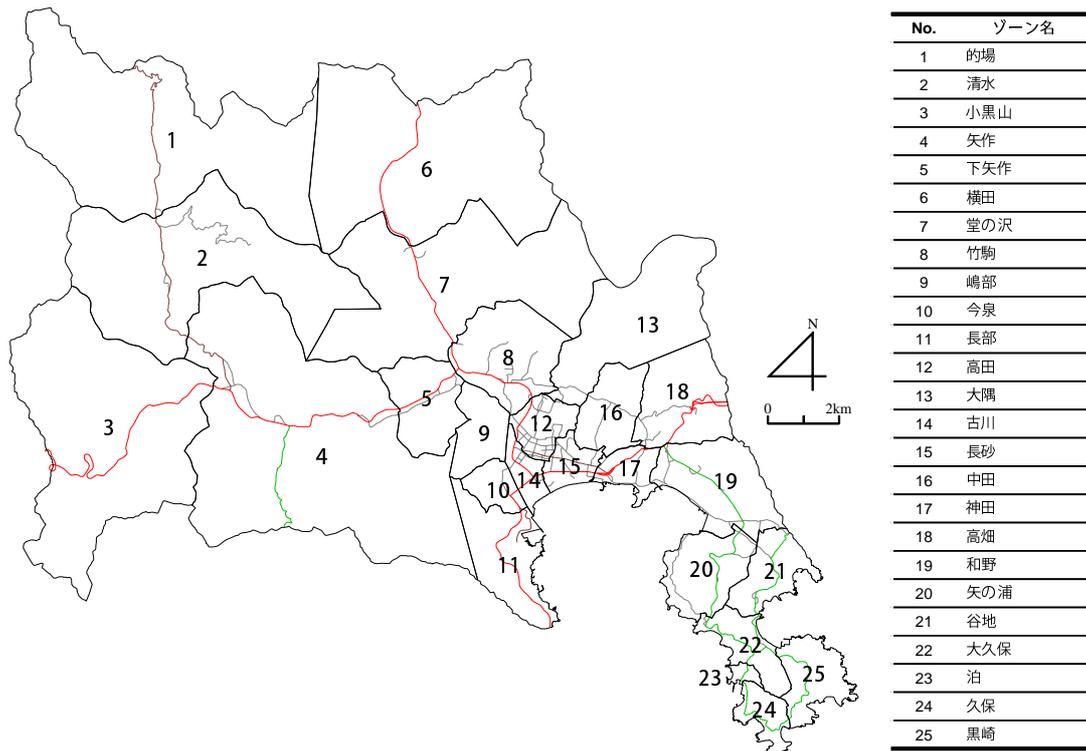


図 4.21 ゾーニング図 (Zone 1-25)

4.5.2 分析ケースの設定

本研究で設定する分析ケースは、震災前（平成 17(2005)年時点）、震災後（平成 24(2012)年時点※震災復興前期に該当）、将来（H42(2030)年時点）の 3 ケースとし、それぞれのケースにおけるネットワーク、需要条件のもとで各時点において最適なバス路線計画の検討を行う。

4.5.3 インプットデータの作成

(1) ゾーニングの設定

分析におけるゾーニングの設定については、国勢調査の小地域分類におけるゾーニングをベースに適宜集約を行い、図 4.21 に示すように、市内を 25 ゾーンに分割した。

(2) バス OD データの作成

■震災前（2005 年時点）OD 表の作成 2005 年時点の OD 表については、平成 17 年度道路交通センサスにおける道路交通起終点調査結果をベースとした現況 OD 表（全車種合計値）を基本データとして用い、先に設定したゾーニングをもとに集約・細分することにより作成した。なお、バス OD データの推計に当たっては、東京大学が 2012 年度に同市において実施した利用交通手段に関するアンケート調査結果で把握した交通手段別分担率をもとに、全車種合計の OD 交通量に対してバス分担率 10% を乗じるにより設定した。

■震災後（2012 年時点）OD 表の作成 2012 年時点の OD 表については、平成 17 年度道路交通センサスをベースとした現況 OD 表より確認できる 2005 年時点の各ゾーンにおける発生集中交通量 (G_i, A_j) の

総量に対して、2005年から2012年の人口減少比を乗じたものをコントロールトータルとし、2012年3月31日時点の住民基本台帳データの町丁目別世帯数を按分指標として各ゾーンの発生集中交通量を設定した。ただし、住民基本台帳については、明らかに住居が存在しない浸水区域においてデータ上居住者が存在している等、震災前からデータの更新が行われていない箇所もあるため、ゼンリン住宅地図¹²⁶⁾をもとに、地図上で民家が立地していない地区は居住者をゼロに置換した。

上記の手順で推計した発生集中交通量を元に、ゾーン間の最短経路延長 l_{ij} をインピーダンス指標とした式(4.21)に示すグラビティモデルを用いて OD 需要量 d_{ij} の推計を行った。

$$d_{ij} = \frac{G_i \cdot A_j}{l_{ij}} \quad (4.21)$$

ここで、 d_{ij} はゾーン i, j 間の交通量、 G_i はゾーン i の発生交通量、 A_j はゾーン j の集中交通量、 l_{ij} はゾーン i, j 間の距離を示す。なお、 G_i 及び A_j の調整に当たっては式 4.22 に示すフレーター法を用いた。

$$D_{ij} = d_{ij} \cdot \frac{G_i}{g_i} \cdot \frac{A_j}{a_j} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{g_i}{\sum_j d_{ij} \cdot A_j / a_j} + \frac{a_j}{\sum_i d_{ij} \cdot G_i / g_i} \right] \quad (4.22)$$

ここで、 D_{ij} 及び d_{ij} は補正後・補正前それぞれのゾーン i, j 間の交通量、 G_i 及び g_i は補正後・補正前それぞれのゾーン i の発生交通量、 A_j 及び a_j は補正後・補正前それぞれのゾーン j の集中交通量を意味する。

■将来（2030年時点）OD表の作成 2030年時点のOD表については、2005年時点のOD表をベースに、陸前高田市が公表している復興計画（土地利用計画等）及び将来人口フレームをもとに推計した。発生集中交通量については、市のWebページ等で公表されている資料から把握できる範囲で市全体の計画人口、高台団地及び災害公営住宅等の計画戸数、商業・公共公益施設の床面積等に対して「大規模開発地区関連交通計画マニュアル 改訂版（平成26年）¹¹⁶⁾」の発生集中原単位を乗じて算出した全車種合計の発生集中交通量に対して、バス分担率（2005年と同値）を考慮して算出した。以上の手順により推計した発生集中交通量をもとに、2012年時点OD表の作成方法と同様の手順で、グラビティモデルとフレーター法を用いて将来OD交通量の推計を行った。なお、発生集中交通量の推計方法の詳細については巻末の付録Aにて整理しているためここでは割愛する。

作成したOD表を表4.5に示す。また、各ゾーンにおける需要の概況を把握するため、図4.22～図4.24に発生交通量の分布状況を示す。震災前と比較して震災後は応急仮設住宅が浸水区域外に分散して建設されたことに伴い、需要の低密度分散化が進行している。また、将来の需要分布については、災害公営住宅や高台団地、嵩上げ市街地が市内中心部に集約されることになり、震災前・震災後の現在と比較して比較的コンパクトな需要分布に変わっていることが確認できる。ただし、震災前・震災後はゾーン12に需要が集中していたが、将来はゾーン8, 10, 16, 17でも高台団地や嵩上げ市街地の形成に伴い比較的大きな需要が発生することが見込まれており、中心部をミクロに見ると中心部内で需要が分散化していることが分かる。

(3) 道路ネットワークデータの作成

続いて、分析のための道路ネットワークデータを作成する。2005年時点の道路ネットワークデータについては、平成17年度道路交通センサスにて調査対象となっている陸前高田市内の道路ネットワークをもとに、各ゾーンにおけるセントロイド間の接続状況が把握できる程度にまで簡略化したスパイダーウェ

表 4.5 陸前高田市バス OD 表 (震災前-震災後-将来)

震災前 (H17時点) OD表

単位: トリップ/日

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	5	0	0	2	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	4	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	1	2	3	3	1	2	3	19	1	1	8	3	2	1	4	1	3	2	1	1	1	1
5	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	7	0	1	3	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0	0
6	0	1	1	2	1	0	3	3	1	2	3	20	1	1	8	3	2	1	4	1	3	1	1	1	1	1
7	0	1	1	3	1	3	0	3	1	2	4	22	1	2	9	3	2	1	5	2	3	1	1	1	1	1
8	0	1	1	3	1	3	3	0	1	2	4	23	1	2	10	3	2	1	5	2	4	2	1	1	1	1
9	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	4	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
10	0	1	0	2	1	2	2	0	0	2	14	1	1	6	2	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	3	1	3	4	4	1	2	0	27	1	2	12	4	3	2	6	2	4	2	1	2	2	2
12	3	5	4	19	7	20	22	23	4	14	27	0	7	11	69	22	16	10	35	11	25	11	8	9	10	
13	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	7	0	0	3	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	1	1	1	2	2	0	1	2	11	0	0	5	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
15	1	2	2	8	3	8	9	10	2	6	12	69	3	5	0	10	7	4	15	5	11	5	3	4	4	
16	0	1	1	3	1	3	3	3	1	2	4	22	1	1	10	0	2	1	5	2	3	2	1	1	1	1
17	0	1	0	2	1	2	2	2	0	1	3	16	1	1	7	2	0	1	3	1	3	1	1	1	1	1
18	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	2	10	0	1	4	1	1	0	2	1	2	1	1	1	1	1
19	1	1	1	4	2	4	5	5	1	3	6	35	2	2	15	5	3	2	0	2	6	2	2	2	2	2
20	0	0	0	1	0	1	2	2	0	1	2	11	0	1	5	2	1	1	2	0	2	1	1	1	1	1
21	1	1	1	3	1	3	3	4	1	2	4	25	1	2	11	3	3	2	6	2	0	2	1	1	2	2
22	0	0	0	2	1	1	1	2	0	1	2	11	1	1	5	2	1	1	2	1	2	0	1	1	1	1
23	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	8	0	1	3	1	1	1	2	1	1	1	0	0	0	1
24	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	2	9	0	1	4	1	1	1	2	1	1	1	0	0	0	1
25	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	2	10	0	1	4	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1

震災後 (H24時点) OD表

単位: トリップ/日

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	5	1	1	1	1	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	5	2	0	3	4	2	5	0	1	4	8	1	0	1	2	2	2	3	1	1	1	0	1	1	1
5	0	1	0	3	0	3	2	10	0	0	2	5	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
6	0	1	0	4	3	0	7	7	0	1	6	11	1	0	1	3	3	3	4	2	2	1	1	1	1	2
7	0	1	0	2	2	7	0	7	0	0	3	6	1	0	0	1	1	2	2	1	1	1	0	0	0	1
8	1	1	0	5	10	7	7	0	1	2	8	27	4	0	1	6	4	5	4	2	2	1	0	1	2	
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	4	7	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	1	0	4	2	6	3	8	1	4	0	25	2	1	2	5	5	6	5	2	3	2	1	1	2	
12	1	2	1	8	5	11	6	27	4	7	25	0	11	2	12	34	16	13	10	5	5	3	1	2	4	
13	0	0	0	1	1	1	1	4	0	0	2	11	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	2	12	0	0	0	3	5	2	1	0	1	0	0	0	0	0
16	0	1	0	2	1	3	1	6	0	1	5	34	2	0	3	0	8	6	3	2	2	1	0	1	1	1
17	0	1	0	2	1	3	1	4	0	1	5	16	1	0	5	8	0	6	3	1	2	1	0	1	1	1
18	0	1	0	2	1	3	2	5	0	1	6	13	1	0	2	6	6	0	9	3	3	2	1	1	2	2
19	0	1	0	3	1	4	2	4	0	1	5	10	1	0	1	3	3	9	0	10	20	5	2	2	5	5
20	0	0	0	1	1	2	1	2	0	0	2	5	0	0	0	2	1	3	10	0	4	3	1	1	3	3
21	0	0	0	1	1	2	1	2	0	0	3	5	0	0	1	2	2	3	20	4	0	4	1	2	3	3
22	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	2	3	0	0	0	1	1	2	5	3	4	0	7	5	11	11
23	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	1	1	7	0	5	5	5
24	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	2	1	2	5	5	0	4	4
25	0	0	0	1	1	2	1	2	0	0	2	4	0	0	0	1	1	2	5	3	3	11	5	4	0	0

将来 (H42時点) OD表

単位: トリップ/日

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	1	1	1	2	0	3	1	10	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	1	2	0	1	0	4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	2	3	0	4	1	13	0	0	1	2	2	0	2	0	1	1	0	0	0	1
7	0	0	0	1	1	2	0	5	0	3	1	10	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
8	0	1	1	2	2	3	5	0	1	11	2	56	1	0	3	6	5	1	4	1	1	1	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	1	12	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	3	1	4	3	11	5	0	14	114	1	0	7	8	13	1	9	1	3	2	0	2	2	2
11	0	0	0	1	0	1	1	2	1	14	0	19	0	0	2	2	3	1	2	0	1	1	0	1	1	1
12	2	3	3	10	4	13	10	56	12	116	19	0	5	0	37	37	50	4	26	4	9	6	0	4	6	6
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	5	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	1	0	1	1	3	1	7	2	37	1	0	0	5	13	1	3	0	1	1	0	0	1	1
16	0	1	0	1	1	2	1	6	1	8	2	37	1	0	5	0	14	2	7	1	2	1	0	0	1	1
17	0	1	0	1	1	2	1	5	1	13	3	49	1	0	13	14	0	2	8	1	2	1	0	1	1	1
18</																										

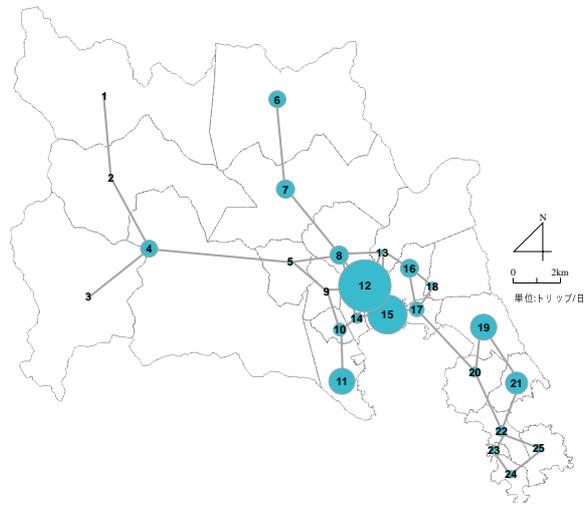


図 4.22 震災前（2005 年）ゾーン別発生交通量分布

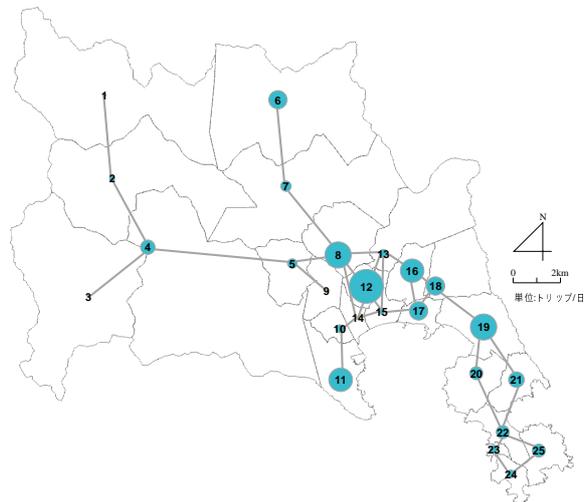


図 4.23 震災後（2012 年）ゾーン別発生交通量分布

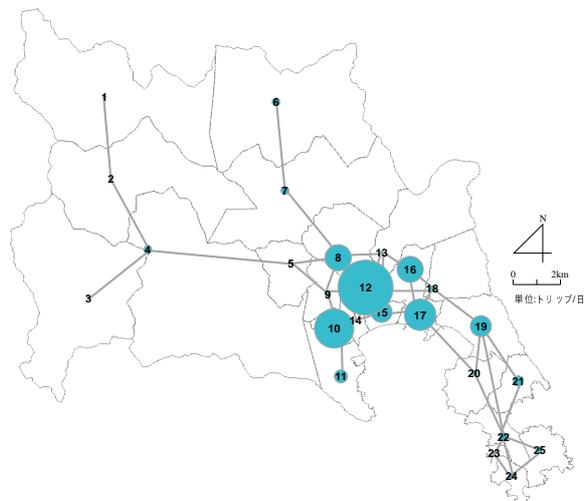


図 4.24 将来（2030 年）ゾーン別発生交通量分布

ブネットワークにより設定した。また、平成17年度道路交通センサスの情報に基づき、セントロイド間の最短経路通行時の距離を各リンクの距離情報として与えた。作成したネットワーク図を図4.25に示す(ノード数25, リンク数34)。

2012年時点の道路ネットワークデータについては、2005年時点の道路ネットワークデータに対して、図4.26に示す赤実線リンク(アップルロード(大船渡広田陸前高田線)の整備を表現)が追加され、赤点線リンク(気仙川に架かる姉齒橋の崩壊及び広田湾沿岸部の路線の被災を表現)がカットされた状態として設定する(ノード数25, リンク数32)。

また、2030年時点の道路ネットワークデータについては、陸前高田市のWebページで公開されている都市計画図を参考に、2012年時点の道路ネットワークデータに対して図4.27に示す赤実線箇所のリンク(今後共用が予定されている主要な都市計画道路の整備を表現)を追加した状態とする(ノード数25, リンク数39)。

4.5.4 推計結果

以上で作成したバスOD表及び道路ネットワークデータをインプットとして、前節で構築した構造化処理技法を適用することにより、震災前～震災後～将来の各時点における陸前高田市内の最適なバス路線を推計した。なお、CE法のサンプル数 $N = 1000$, エリート戦略抽出率 $\rho = 0.2$ と設定し、制約条件として、車両台数は6台、OD別容量制約は1OD当たり5trip, 路線延長の上限は30km, 下限は5kmとした。なお、バスの旅行速度は一律30km/h, 停留所での平均停車時間は一律60secで設定している。また、設定されたバス路線の選択割合 Pr については、乗車時間 $t = 0\text{min}$ であれば $Pr = 1$ とし、 $t \leq 60\text{min}$ においては所要時間に対して線形に減少($Pr = 1 - t/60$)するものと仮定し、 $t \geq 60\text{min}$ の場合は $Pr = 0$ として設定した。

推計結果を表4.6に示す。また、各ケースにおいて導出されたバス路線ネットワーク図については、それぞれ以下に詳細を整理する。なお、6台分の計算時間については震災前:315.842sec, 震災後:267.431sec, 将来:221.491secであった。

(1) 震災前

震災前の数値計算結果を図4.28に示す。震災前の都市機能はゾーン12(中心市街地)及びゾーン15(JR陸前高田駅, バスターミナルが立地)周辺に集中していたため、同ノード周辺の路線網が密になっていることが確認できる。路線網については、各方面からゾーン12・15関連のOD需要を輸送できるように路線が整備されている。

なお、震災前の実際の路線バスネットワークと比較すると、ゾーン12, 15周辺から放射状にネットワークが形成されている点は共通している。一方、実ネットワークのほうが路線の重複が全体的に少ないことがわかる。これは、本研究で採用したモデルは運行頻度を明示的に取扱っていないため、運行頻度の大きさが路線の重複数で表現される傾向にあることが原因であると考えられる。また、ゾーン1～4やゾーン23のように、最適化問題の計算結果では、ネットワークの整備優先順位が低いとされている地域においても実際にはバス路線が整備されていることもある。これは、公共交通が持つ公共性に起因しており、需要は少ないものの公共施策としてバスを走らせるという意味決定がなされている地域が存在していることに起因する。

一方で、ゾーン13, 16周辺のように、計算結果ではネットワーク整備が行われている地域において、実際にはバスが運行されていないというケースも発生している。同地区については、最適化計算結果から



図 4.25 震災前（2005 年）ネットワーク図



図 4.26 震災後（2012 年）ネットワーク図



図 4.27 将来（2030 年）ネットワーク図

はバス路線の整備が必要であるという結果が得られているが、実際には運行されていない。これは、地区内の道路幅員が狭く、かつ勾配が急であったこと等に起因しているが、後で紹介する震災後については同区間でバスが運行されており、実際には通行に支障はない。そのため、当時同区間でバスが運行されていれば、より多くの需要が顕在化していた可能性もある。

(2) 震災後

震災後の数値計算結果を図4.29に示す。震災による津波被害に伴い、ノード9とノード12を接続するリンク（姉齒橋）が寸断されたことから、その北部のノード5とノード8を接続するリンク（廻館橋）が多く路線によって用いられるようになっていたことが確認される。なお、この現象は震災後の現地においても実際に生じており、廻館橋は気仙川の右岸と左岸を連絡する貴重なリンクとして、自動車交通・公共交通ともに活発に利用された。また、ゾーン16からゾーン21にかけては、入居戸数が比較的大きい応急仮設住宅が複数建設されたことから、一時的に交通需要が集中し、同ノード周辺の路線網が密になっている。なお、震災前と比較して需要分布の重心は全体的に沿岸から山際に移っている傾向がみられるが、ノード12は震災後についても都市機能が集中したことから、路線網については震災前と同様に、各方面からの移動需要の多いノード12を連絡する形で整備されていることが分かる。ただし、交通結節点機能は総合病院が立地するゾーン16に移動していることが確認できる。

なお、当時の実際の路線バスネットワークと比較すると、山側のネットワークを重視するようになった

表4.6 陸前高田市における推計結果

ケース	路線	経由ノード	所要時間 [min]	総需要 [trip]	目的関数値
震災前	1台目	[5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17]	53.4	362	147.5
	2台目	[12,15,16,17,18,19,20,21,22,23]	58.6	226	259.3
	3台目	[7,8,9,10,12,14,15,17,19,20,21]	58.8	140	420.0
	4台目	[8,12,15,17,19,20,22,23,24,25]	58.8	102	576.5
	5台目	[4,5,7,8,9,10,11,12,13,15,16]	57.4	78	735.9
	6台目	[6,7,8,12,15,16,19,20,21]	57.8	62	932.3
震災後	1台目	[5,6,7,8,12,13,15,16,17,18]	43.8	276	158.7
	2台目	[8,12,15,17,18,19,20,21,22,23,25]	59.0	252	234.1
	3台目	[7,8,10,11,12,13,14,16,17,18,19,21]	58.8	168	350.0
	4台目	[4,5,6,7,8,9,10,11,12]	55.0	100	550.0
	5台目	[10,11,12,14,15,16,17,18,19,20,21]	56.4	54	1044.4
	6台目	[12,16,18,19,21,22,24,25]	49.6	62	800.0
将来	1台目	[7,8,9,10,11,12,13,15,16,17]	41.4	268	154.5
	2台目	[5,8,9,10,12,15,16,17,18,19,21]	52.8	188	280.9
	3台目	[10,12,18,19,20,21,22,24,25]	57.0	132	431.8
	4台目	[6,7,8,12,13,16,17,19]	46.6	54	863.0
	5台目	[4,5,6,7,8,10,11,12]	50.4	52	969.2
	6台目	[8,12,15,16,17,20,22,24,25]	54.2	50	1084.0

点、ゾーン12周辺を中心とした放射状ネットワークを形成している点については共通している。計算結果と実ネットワークの差異に関しては、ゾーン1～4については震災前と同様の傾向が見られる。また、沿岸エリアの道路ネットワークについては、通行事態は可能であるが、ダンプカー等の工事車両の通行が多く通行の安全性が確保されにくい状態だったこと、路線の維持確保に活用した国の補助事業が応急仮設住宅の移動支援の色合いが濃く、所要時間を多少犠牲にしても、山沿いの応急仮設住宅を連絡するルートにする必要があったこと等の理由により、計算結果と比較して実ネットワークのほうがより山側のネットワークが重視される傾向にある。

(3) 将来

将来の数値計算結果を図4.30に示す。先の2ケースでは需要がノード12に集中する傾向にあったが、将来ケースはゾーン12だけでなくゾーン10や16周辺でも大規模開発が進むことから、市内中心部エリア内で需要が分散することになる。それに伴い、バス路線についても中心部の路線の重なりが若干少なくなっていることがわかる。

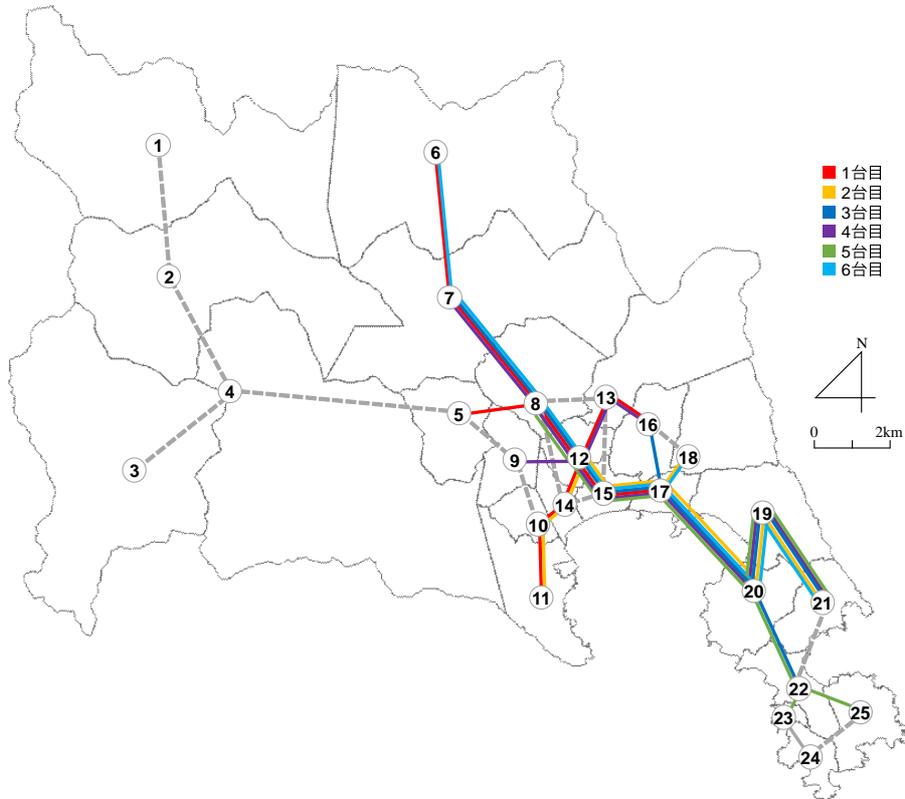
4.6 結言

第4章では、既往の二段階最適化問題の定式化をベースとしてバス路線の最適化問題をネットワーク問題に落とし込み、最適化問題の解法アルゴリズムであるCE法と列挙索引化技法であるZDDを活用し、両手法を組合わせた新たな最適化問題の解法アルゴリズムを提案した。同手法は既往のネットワーク問題におけるCE法の適用例では実現されていなかったサブグラフを直接的に取扱った確率分布の設定を行っている点が特徴である。開発アルゴリズムについては、ZDDによる全列挙情報をもとにサブグラフの探索を行うため、CE法が最適なノードにたどり着けば、手法的には厳密解を得ることができると言える。また、バス路線を利用可能なODペア間の最短経路についてはバス路線の列挙と同時にZDDに格納されることになるため、二段階最適化問題における上位問題・下位問題を同時に解くことができると言う点も大きなメリットと言えよう。

提案アルゴリズムについては、まずはグリッド型の簡易ネットワークを対象としたバス路線計画に適用した。出力結果については、設定したOD需要とネットワーク条件から見て概ね妥当であることが確認され、また一般的な計算機のもとでも現実的な時間内に計算が可能であるということを確認した。併せて、CE法における主要な設計パラメータであるサンプル数及びエリート戦略抽出率をそれぞれ変動させ、目的関数の値と計算時間に関する感度分析を行った。分析結果より、サンプル数の増加は解の精度を向上させる上で有効であることを示し、計算時間に配慮しつつ、サンプル数については可能な限り確保することが望ましいことが明らかとなった。一方でエリート戦略抽出率については、増加させることが解の精度を向上させることに寄与するわけではなく、計算結果と計算時間を鑑みると、ある程度低い抽出率を設定する必要があることが明らかとなった。

また、構築した構造化処理技法を陸前高田市の実規模ネットワークに適用し、同手法の適用可能性を検証した。具体的には、陸前高田市における震災前～震災後～将来の各時点のOD需要量とネットワーク条件のもとでの最適なバス路線の変遷の様子を、開発アルゴリズムを用いて検証した。その結果、震災被害や復興事業の完成に伴う需要分布とネットワークの変化に伴い、最適となるバス路線に変化が生じることが確認された。また、震災前・震災後については当時の実際のバス路線形状と比較することで計算結果の考察を行った。その結果、交通結節点となるエリアや概ねのネットワーク形状については開発モデルにより把握できることが確認された。しかしながら、実際には公共性を重視した低採算路線の整備必要性や、

最適化計算結果（震災前：H17）



震災前路線バスネットワーク

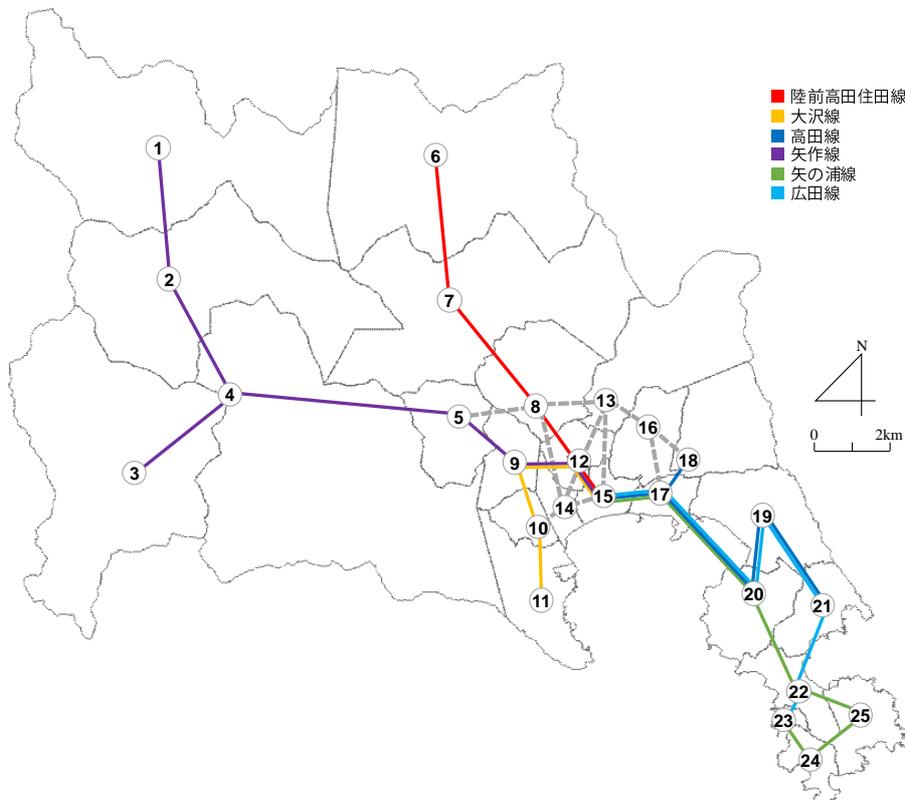
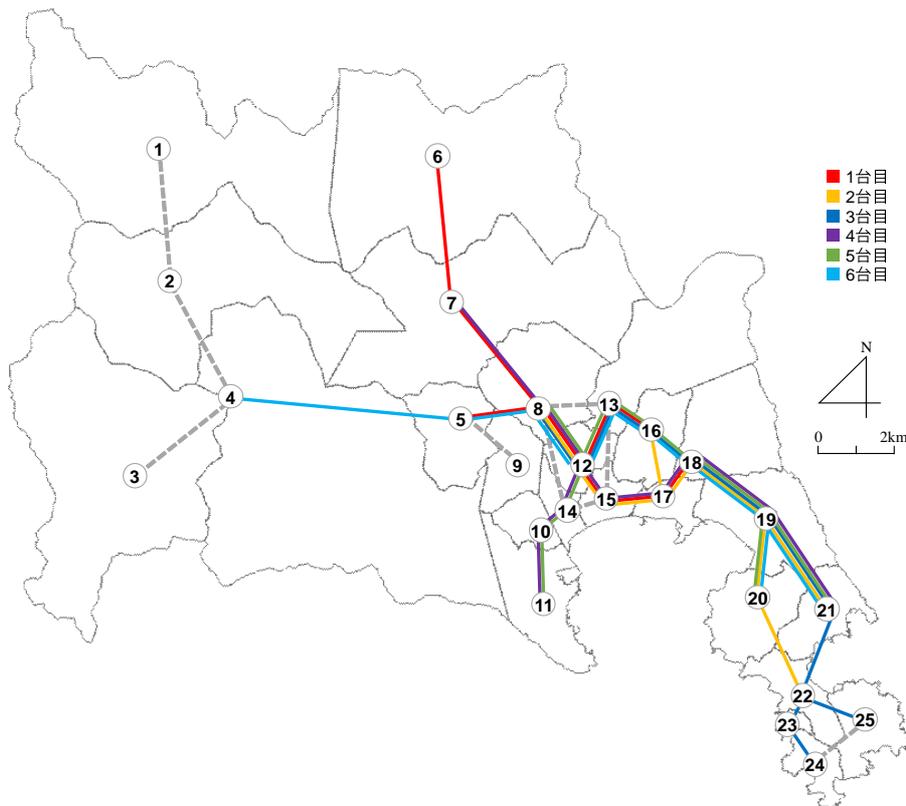


図 4.28 震災前（2005 年）路線図及び実路線ネットワーク

最適化計算結果（震災後：H24）



震災後路線バスネットワーク

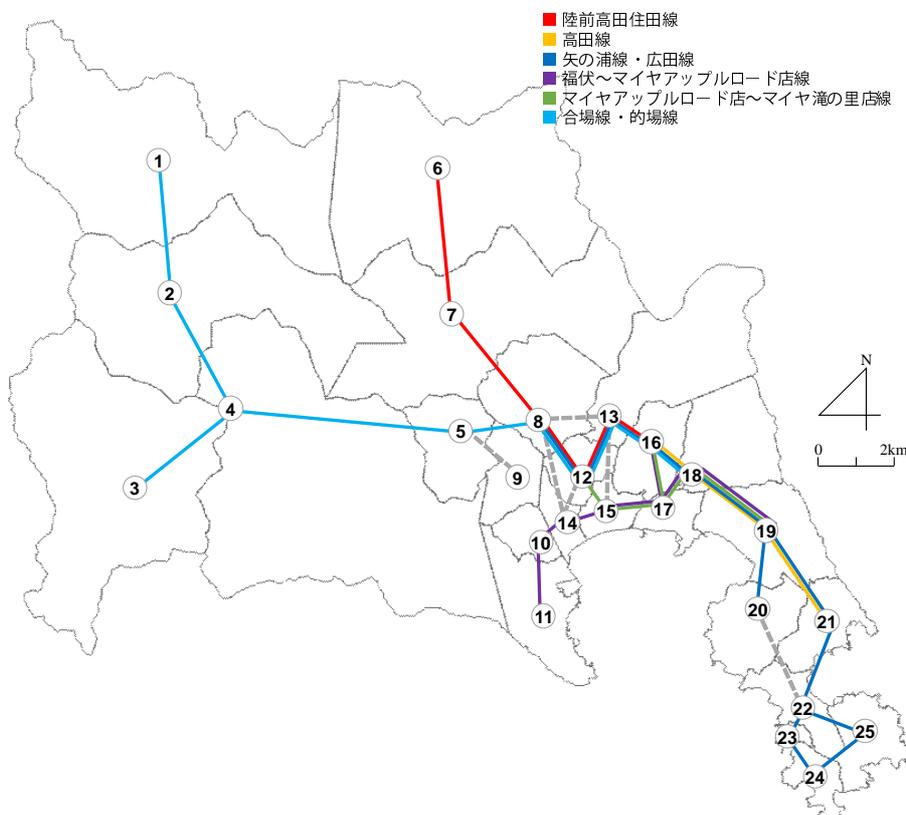


図 4.29 震災後（2012 年）路線図及び実路線ネットワーク

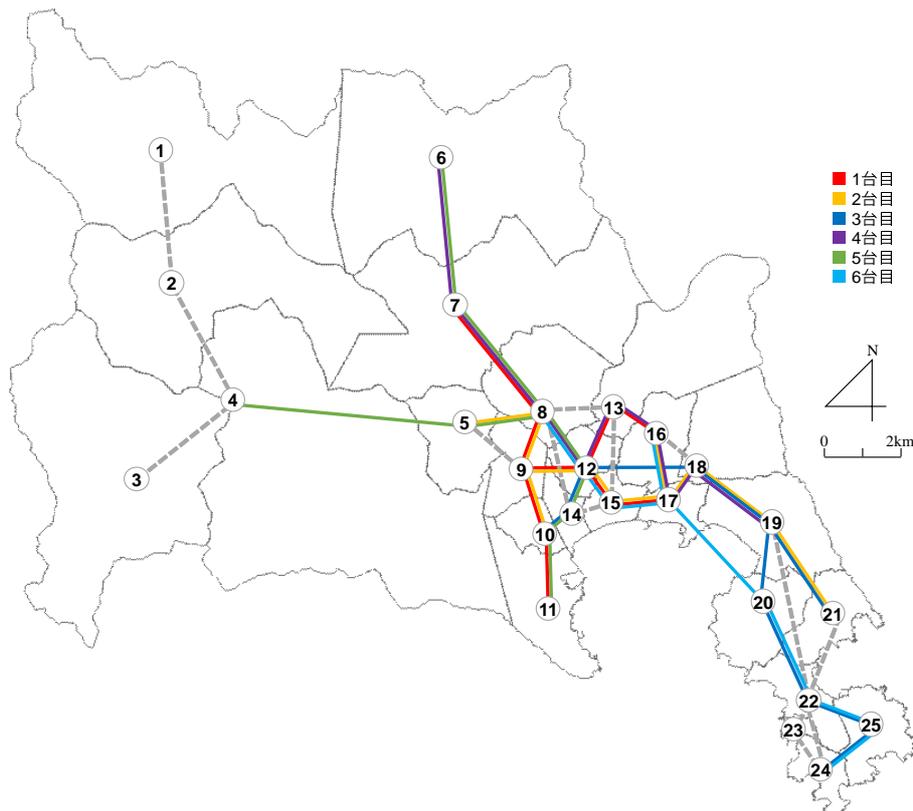


図 4.30 将来（2030 年）路線図

バス運行に不向きな道路ネットワークの存在等に起因して、計算結果と実ネットワークに差異が生じる箇所についても確認された。今回得られた計算結果については、設定した評価基準のもとでの望ましいネットワーク形状を意味しており、評価基準が変わると結果は変わることになる。一方で、想定される評価基準を全て網羅した計算は難しいことから、計算結果を下地に実運用の計画・評価を行う際には、結果から得られた知見を活用することはもちろん有益であるが、結果には現れないが実運用上必要となる対策も念頭に、結果の取扱いを議論することが重要である。

今回開発したアルゴリズムは、陸前高田市の復興まちづくりを支援する公共交通体系の検討だけでなく、例えば今後災害が発生する可能性がある地域における災害発生後の公共交通ネットワークの事前復興の検討や、人口減少により消滅する可能性がある集落を含むエリアの地域公共交通の網形成計画等の検討に耐えうる計算結果を導いており、地域全体を俯瞰した公共交通ネットワークの最適化を検討する上で有益な示唆を与える手法と考えられる。

本章の課題として、まずは各路線について独立に上位・下位問題を解いており、他路線の整備に伴う需要変動を考慮していない点にある。このようなカスケード的求解のメリットは、データセット作成やモデルの操作性の面で優れる点にあり、今後維持確保を図るべき路線の優先順位検討であれば問題なく活用できると考えられるが、路線整備による路線間の競合が表現できないため、複数路線が重複するエリアにおける詳細な需要予測に援用する際には、上位問題で全ての路線セットを求解した後に下位問題で競合性を考慮しつつ解く必要がある（詳細は最終章を参照）。

また、本研究は上位問題におけるアルゴリズムの改良の方向性を検討する点に主眼を置いたことから、上位問題で交通計画者が設定した路線については、下位問題での選択結果に寄らず確定する仮定を置いているが、本来であれば下位問題での交通機関選択状況によって上位問題を再度解きなおし、均衡するまで

繰り返し計算を行う必要がある。一方で、特に需要が疎な地域の公共交通利用に関しては、公共交通のサービス水準が著しく低い、あるいは利用者側に資源利用能力等が低いことが多く、ニーズの欲求水準を実現可能な水準まで引き下げる認知的適応が生じる。谷本・喜多(2006)¹³⁸⁾はこの現象を「ニーズの切り下げ」と表現しており、効用アプローチを基本とした需要モデルに基づく需要予測が難しいとされている¹⁰⁹⁾。そのため、このような地域においては、まずは交通計画者側で路線計画を策定し、その後利用動向を踏まえて計画内容を見直す進め方が望ましいと言え、計画者主導での計画検討においては本モデルで採用した解法でも一定の知見は得られるものと考えられる。

また、本研究ではバス路線を全域木により表現していることから、出力される提案はあくまでも優先して整備すべきノードセットの提案であり、選択されたノードをどう巡るかはスケジューリング問題で別途求解する必要がある。なお、中山間地域のように起終点ノードが明確でないエリアでは全域木による表現が適当だと考えるが、交通結節点の整備が進んでおり、起終点ノードが明確なエリアで本手法を援用する場合は、バス路線の表現に経路の制約を加えて、経路を直接的に求解する手法が適していると考えられ、対象エリアに応じたバス路線の表現が重要となる。

なお、CE法とZDDの組合わせに関しては、各戦略において選択されたノードを含む全てのサブグラフの列挙は可能であり、各戦略内では必ず最適解を探索することが可能であるが、そもそも最適なノード選択がなされるという保証がない。本研究では数値計算実験における感度分析の中でパラメータの感度を検証したものの、局所解に陥る可能性は否定できない点に留意が必要となる。

第5章

需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開

5.1 緒言

前章までの分析は、地域公共交通の計画を作成し、事業を運営する方法論について整理してきたが、本章では、前章までのプロセスの中で決定した公共交通施策等の実施可否や優先順位に係る政策判断を行うための方法論について提案する。ここでは、各地区における公共交通に係る潜在的な移動需要を踏まえるべきという考え方にに基づき、需要前顕在化動向に関する評価による公共交通施策の優先順位検討手法を開発する。

需要顕在化の評価に当たっては、第2章で詳述した竹内・山田¹³⁶⁾による路線ポテンシャルの考え方を援用するが、ポテンシャル指標を援用して地域公共交通の需要顕在化率を計測する際には、コミュニティにおける総合的な公共交通の利便性を踏まえる必要がある。しかしながら、従来の路線ポテンシャルの考え方は実運用に当たり以下の3つの問題点を有している。

まず1点目は、同一地区内に複数の公共交通体系が導入されている場合の評価である。このような地区においてサービス改変や利用促進策を実施する際には、公共交通体系の総合的な利用可能性を踏まえた提案が必要とされる。そのためには、従来の路線別に独立したポテンシャル計測（図5.1左イメージ）ではなく、居住地区を集計単位とした路線複合的な需要顕在化率の計測、つまりは複数交通機関の需要を同時に扱うことができる多出力系のモデルの採用が必要となる（図5.1右イメージ）。しかしながら、従来の回帰モデル等に基づくポテンシャル指標ではこのような表現が難しい。なお、国土交通省が提案するアクセシビリティ指標を用いることで、地区単位での総合的な公共交通の利用可能性を鑑みた評価は可能であるが、アクセシビリティ指標は市町村単位での評価を想定した手法であるため、取扱う地区のスケールが異なる。また、以下で説明する2点目の課題をクリアすることができないという問題もある。

2点目は、複数交通機関の需要を扱う際の地区間の異質性を考慮することの重要性である。例えば、一般的にデマンド交通は需要が疎な地域、路線定期運行型のバスは需要がまとまって存在する地区への適用が向いているとされており、地域特性によって適当な運行態様は異なるはずである。つまり、各地区の公共交通機関の利用可能性に影響を受けることにより、需要顕在化率を計測する際に考慮すべき交通機関は異なるため、需要顕在化率の評価における交通機関間の重みづけは対象地区で一様ではない。しかしながら、回帰モデルや原単位を用いたポテンシャル評価ではこのような非画一的尺度による評価が実現できない。

3点目は、需要顕在化の際のベンチマークの有効性である。仮に上述の非画一的な尺度を導入した場

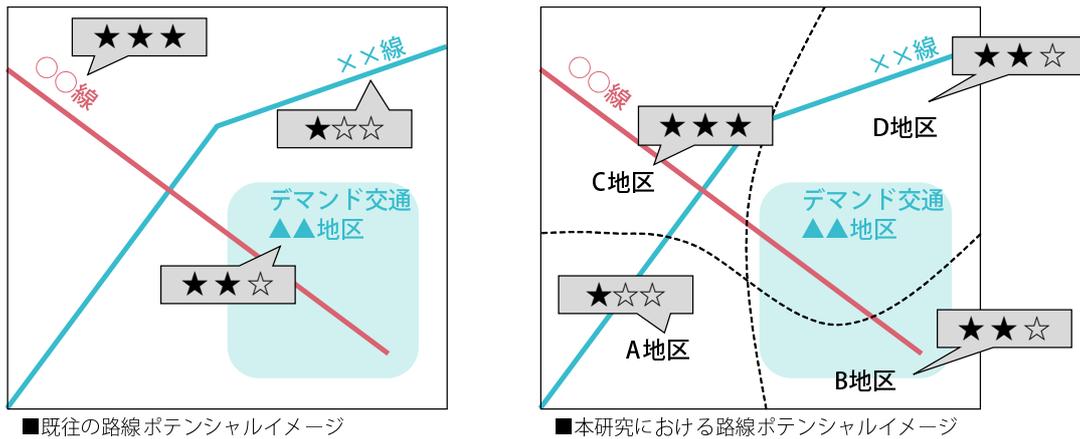


図 5.1 既往の路線ポテンシャルと本研究における需要顕在化率の評価イメージ

合、各地区の交通実態に即した評価が可能になるが、顕在化に向けたアプローチについても非画一的となるため、ベンチマークとなる地区の明確化、そしてベンチマーク地区におけるこれまでの需要顕在化の取り組み事例が今後の各地区の施策検討の際に有効な指標となる。

以上3点をまとめると、居住地区ベースかつ複数の交通機関を同時に評価して潜在需要を計測すること、つまりは多出力系への適用と、顕在化のためのベンチマークの設定が重要となる。これらの要件に合致する評価手法はこれまでに幾らか開発されているが、本研究では DEA (Data Envelopment Analysis : データ包絡分析) を採用することにした。

本章では、DEAにより自治体内の各小地区の需要顕在化率を定量評価できるモデルを構築することにより、地域公共交通施策により効率的に公平性の確保を実現するためのあり方を提案する。開発モデルにより、ある程度まとまった潜在需要が残っていると判断される地区は、地域公共交通の整備やサービス改変、モビリティ・マネジメント等の外的インパクトによって効率的に移動需要の顕在化が図られる地区と見なせることになる。つまり、地域公共交通利用による活動機会の均等化(公平性の確保)が効率的に図られる地区と言えよう。加えて、開発したモデルを実際の都市に適用し、算出結果を踏まえて各地区における効率的な公平性の確保の方針について検討を行う。

5.2 DEA の概説

5.2.1 DEA とは

DEA は Charnes et al.(1978)¹³⁾ によって、経営分析手法のひとつとして開発され、計算と理解の容易性から様々な分野において効率性評価手法として利用されてきたモデルである。DEA は線形計画法によって構築された効率的フロンティアに基づいて各事業体 (DEA においてはこれを DMU: Decision Making Unit と呼んでいる) の効率性の評価を行う手法であり、本研究では DMU を「地区」と定義する。DEA は最も優れたパフォーマンスを示す地区をもとに効率的フロンティアを計測し、この効率的フロンティアをひとつのベンチマークとして、他の地区を D 効率値 (DEA Efficiency) と呼ばれる、フロンティアとの乖離度合いを示唆する指標により相対的に評価する。

5.2.2 DEAに基づく需要顕在化率評価のイメージ

DEAによる効率性計測イメージを図5.2に示す。地区A-Eのプロットは各地区の生産活動の結果を示す。この中で、地区A-Dにより形成されるパレート最適ラインを効率的フロンティアと呼び、フロンティア曲線上の地区はいずれもD効率値が1(効率的)である。一方、フロンティア曲線上にない地区Eは効率的フロンティアと比較すると非効率的であり、D効率値は OE/OP により算出される。また、ここで、地区Eにとって効率化に向けて参照すべきベンチマークとなる地区(優位集合所属地区)は点Pが線分AB上に位置することから、地区A及び地区Bと判断できる。

需要顕在化率と潜在需要の算出における評価モデルの活用イメージを図5.3に示す。ここでは、D効率値を「出力：各公共交通機関の利用者数/入力：公共交通利用者に影響を及ぼす各種要因」として定義する。ある地区においてD効率値=1であれば(図5.3内地区Fに該当)、当該地区は対象となる地区集合内において、需要の顕在化率が相対的に最も高く、自地区以外の地区を優位集合に設定することでは需要の顕在化の方向性を探ることができない状態を意味する。一方、D効率値が1を下回る場合は(図5.3内地区Gに該当)、フロンティア上の地区を参照して更なる需要の顕在化を図ることができる状態であることを意味する。

DEAの効率性計測が分析対象地区間の相対比較に基づいている以上、各地区の潜在需要の絶対量を計測しているわけではない点に留意すべきであるが、ここでは便宜上、フロンティア上の地区は相対的に需要が最も顕在化している状態、フロンティア以外の地区は顕在化の余地が残っている状態であると定義する。併せて、本研究における各地区の潜在需要量は、図5.3に示すように、「現況の需要量」と「DEAにより得られる最大限顕在化が図られた状態の需要量」の差分として定義する。なお、需要の顕在化に向けた取り組みの際に各地区が参照すべき先導的な地区は、各地区の優位集合により判断することができる。

5.2.3 パラメトリック法とノンパラメトリック法

効率的フロンティアを使用した各事業体の効率性の評価については、DEA以外のモデルも開発されている。地域公共交通に限らず、一般的に効率性を推定する方法としては、パラメトリック法とノンパラメトリック法とがある。前者は、費用関数あるいは生産関数を用いてあるべき平均像を確定するものであり、これまでにSFA(Stochastic Frontier Analysis: 確率的フロンティア分析)³⁾やCOLS(Corrected Ordinary Least Squares: 修正最小二乗法)²⁾等が開発されている。一方、DEAはノンパラメトリック法の代表的な分析手法であり、先験的に関数形を仮定せずに与えられたデータにより効率的フロンティアを描き、個別比較対象のフロンティアまでの距離を測ることで相対的な効率性を比較する手法である。本研究で取扱う需要顕在化率の評価に当たっては、パラメトリック法・ノンパラメトリック法いずれも適用が可能であるが、以下に挙げる両者の特徴を踏まえモデルの選定を行った。

5.2.4 小サンプルでの分析への適用性

SFAは統計的な仮設検定が比較的容易に行うことができるという長所がある一方で、少ないサンプルでは分析が難しいという短所がある。本研究では、ある1自治体に着目し、自治体内の地区別(国勢調査の小地域程度)の潜在需要を評価するモデルを構築するため、サンプル数は概ね数十程度となる。そのため、パラメトリック手法を適用するにはサンプル数が少なく、統計的に優位な結果が得られなくなるおそれがある。その点、DEAは生産関数の関数形や誤差項の分布について、事前の仮定を前提としていない

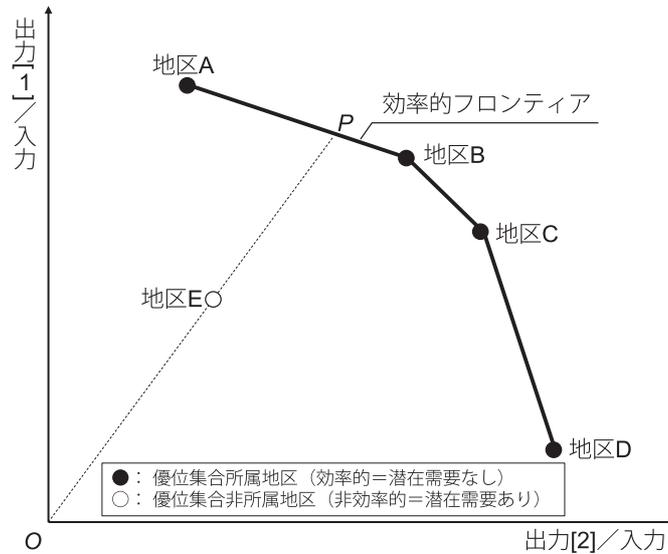


図 5.2 1 入力 2 出力型 DEA の効率性計測イメージ

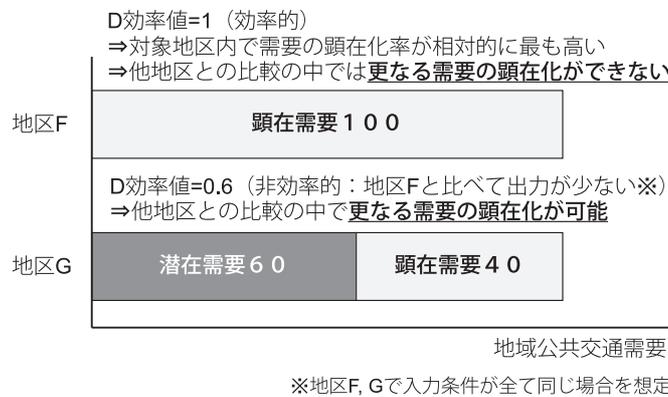


図 5.3 D 効率値に基づく潜在需要の算出イメージ

ため、小サンプルでも統計的に問題が生じないという長所がある。

5.2.5 多出力系への適用性

パラメトリック法を適用しなかった大きな要因として、多出力系への適用が容易でない点が挙げられる。従来、パラメトリック法における多出力系の取扱いは困難とされており、多出力系の効率性計測においては多くの事例で DEA が用いられてきた。近年、パラメトリック法でも距離関数を用いることで多出力系の効率的フロンティアを計測する手法が開発されており、実際に DEA と距離関数を用いた COLS により計測結果の比較を行っている例もある (例えば、中西 (2008)¹⁴⁴⁾ や中山 (2003)¹⁴⁶⁾。しかし、目的関数の選択と COLS において仮定する生産関数の形状の選択によって、両者の効率値が大きく変わる結果が出ていることや、距離関数の定式化の煩わしさ等を踏まえると、現時点では多出力系の計算においてパラメトリック法に優位性があると言える状況には至っていない。加えて、DEA の計算の容易さを踏まえると、多出力系の効率性計測においては、DEA の優位性は未だ失われていないものと判断した。

5.2.6 需要顕在化を考える際の地区間異質性の評価の必要性とその際のベンチマークの設定の有効性

DEA では、複数の入出力変数を扱う際のパラメータ（ウェイト）は、当該地区の効率的最大化の観点から最も有利なように定められるよう内生的に決定している。そのため、例えば先に述べた「各地区において潜在需要を顕在化する際に、デマンド交通の利用を重視するのか、路線定期運行型のバスの利用を重視するのかは地区によって異なる」という着眼点に対しては、DEA を適用することで、これらの交通機関間の重みづけを最も効率性を高めるように内生的に決定した上で効率性を計測できる。

また、DEA ではその際に、他の地区との比較を通じたベンチマーキングを行うことができるため、当該地区が今後参照すべき地区を明確化できる。この点は社会への実装においても感覚的にわかりやすく、具体的な施策立案を行う上でも有用であると言えよう。ただし、逆に言うと、DEA により計測される効率性は、最も効率的なサンプルに対する相対的な概念であり、現実のデータを追認する相対評価と言え、ある種のベンチマークに過ぎない。結果の解釈においてはその点に留意が必要である。

5.2.7 本研究における DEA の選定理由

これまでに述べたとおり、本研究では小サンプルでの分析に対応すること、複数交通手段の需要を同時に評価する多出力系に対応すること、地区によって各交通手段の評価ウェイトを変更する必要があること、そして需要顕在化のためにベンチマークの設定が有効であること等の技術的な理由と、これらの設定における計算の理解とハンドリングの容易性の面での理由から、ノンパラメトリック法が本研究の定式化において適していると考え、評価モデルの定式化に当たり、DEA を選定した。

ただし、小林ら (2004)¹¹⁷⁾ や Lin and Tseng(2005)⁴⁹⁾ が指摘しているように、DEA は統計上の誤差を排除できず、効率性の推計がサンプル上の異常値に大きく影響を受けてしまう問題点があることから、取扱うデータについては異常値の確認等、事前のデータチェックが不可欠である点には留意が必要である。

5.2.8 公共交通事業における DEA の適用事例

DEA は Fethi et al. (2001)²⁹⁾ をはじめ、国内外での空港経営の効率性分析において適用事例が多いほか、荒谷・轟 (2011)⁸⁶⁾ は都市間公共交通サービスの充足状況のマクロ的評価に適用している。Chu et al. (1992)¹⁵⁾ や宮良・福重 (2002)¹⁷⁰⁾、平井ら (2009)¹⁵⁵⁾ は DEA を用いてバス事業者の経営効率性の評価を行っている。これらの研究の多くは、バス事業者の目的を単に利潤最大化とせず、年間走行キロをアウトプットとする技術的な効率性の分析を行っている例が多い。また、Cowie and Asanova (1999)¹⁹⁾ は欧州の交通事業者の合併や買収に伴う経営効率性の時系列分析を追跡し、経済効率性の変動から都市交通構造の調整活動（例えば補助金の変動、民営化の推進、規制緩和の推進等）に影響を及ぼしていることを示していることを DEA により明らかにした。このように、公共交通部門の生産効率性分析への DEA の適用事例はこれまでに数多くあり、公共交通事業との親和性が高い手法であると言えよう。

なお、本研究と類似した先行研究として、DEA の派生モデルである Network DEA²⁸⁾ を用いて、札幌市のバス路線を対象に事業者目線での経営効率と利用者視点でのサービス効率評価を行っている東本ら (2005)¹⁵⁴⁾ の研究が挙げられる。彼らが実施した、「事業者目線での経営効率に関する分析」のうち、「乗車効率」指標については、沿線人口を入力変数に、出力変数に乗車人員を設定し、DEA を用いて路線別の効率性を算出しており、本研究で提案する方法に近い着眼点で分析が行われている。しかし、ここで算

出されている効率性は、前述した「居住地区を集計単位とし、かつ複数の交通機関を同時に評価した効率性の計測」の形式には至っていない点が大きく異なる。また、同研究はビジネスとして成立している路線を取扱い、交通事業者の経営効率を高める方策を検討する研究である。よって、本研究で検証しようとしている、公平性確保のための需要顕在化率の評価や、需要の顕在化に向けた検討を目指したアウトプットになっていないという点も異なる。

5.3 DEA を援用した需要顕在化率評価モデル

5.3.1 モデル式

任意の地区 k に関する DEA を援用した需要顕在化率評価モデルの式形は以下の通り設定した。

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \end{aligned} \quad (5.1a)$$

subject to

$$-\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.1b)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad (5.1c)$$

$$v_i \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5.1d)$$

$$u_r \leq 0 \quad (r = 1, \dots, s) \quad (5.1e)$$

ここで、 x_{ij} 、 y_{rj} は地区 j における変数 i 、 r の入出力量、 u_r は出力変数 r に対する最適ウェイト、 v_i は入力変数 i に対する最適ウェイト、 n は対象地区数、 m と s は入出力変数の数をそれぞれ示す。上式の双対問題は実数 θ と双対変数 λ を用いて下式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & \theta \end{aligned} \quad (5.2a)$$

subject to

$$-\sum_{i=1}^m x_{ij} \lambda_j + \theta x_{ik} \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5.2b)$$

$$\sum_{i=1}^m \leq y_{rj} \lambda_j \quad (5.2c)$$

$$\lambda_j \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.2d)$$

$$\theta : \text{制約なし} \quad (5.2e)$$

DEA は各地区の効率性を示すだけでなく、同時に非効率な地区の改善案についても示すことができる。例えば地区 k が非効率であるとき、最適解を λ^* 、そのときの目的関数値を θ^* とすると、式 (5.2a) ~ (5.2e) に対応する優位集合は以下のように表される。

$$R_k = \{j | \lambda_j^* > 0, j = 1, \dots, n\} \quad (5.3)$$

優位集合 (R_k) に所属する地区は効率的である一方、 R_k に属する地区の存在が、地区 k を非効率とさせる原因であり、この集合を非負結合したものが、地区 k の D 効率値を決定する効率的フロンティアを形成する。式 (5.2a) において地区 k の効率値は DEA 最適解を $(\theta^*, \lambda_1^*, \dots, \lambda_n^*)$ とすると、この効率的フロンティア上のダミー地区 $(\theta^* x_{1k}, \dots, \theta^* x_{mk}, y_{1k}, \dots, y_{sk})$ と相対比較することで決定される。ここで、 $\theta^* x_{ik}$ と y_{rk} は次のように表される。

$$\theta^* x_{ik} = \sum_{j \in R_k} \lambda_j^* x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5.4a)$$

$$y_{rk} = \sum_{j \in R_k} \lambda_j^* y_{rj} \quad (r = 1, \dots, s) \quad (5.4b)$$

すなわち、地区 k は入力を θ^* 倍に縮小させることで効率的な地区となる。ただし、非効率な地区を効率的に改善する方法として唯一の方法ではなく、平井ら (2009)¹⁵⁵⁾ が扱っているように、スラック変数を操作しフロンティアに近づく方法もあり、分析者の判断により効率化のアプローチは変更して良いことになっている¹²²⁾。ここで、 λ_j は地区 j のウェイト値、 θ は最小化問題における D 効率値である。

なお、上記の定式化は DEA の最も一般的なモデルである CCR モデル (Charnes et al.(1978)¹³⁾) をもとに作成している。CCR モデルは、ある地区の D 効率値を測定する際に、図 5.2 に示すように、原点から放射状に伸ばされた直線の長さに基づき、当該地区のパフォーマンスとそれを効率的フロンティアにシフトさせた地点のパフォーマンスを相対比較して効率性を測る「ラディアル測定」と呼ばれる手法に分類される。

DEA による効率性計測においては、ラディアル測定によらない「非ラディアル測定」も用いられており、代表的な手法のひとつに De Borger et al.(1994)²²⁾ が開発した FDH (Free Disposal Hall) がある。FDH は Kerstens(1996)⁴¹⁾ 等、公共交通事業の経営評価においても適用例が散見される。FDH の効率的フロンティアのもとで非効率的な地区とされる条件は、ある地区より全ての入力量が少なく、同時に全ての出力量が多い有意な地区が存在することであり、FDH は完全非効率な地区を探すために用いられるモデルと言える。この特性は分析サンプルがかなり大きくなると発揮されず、本研究のようにサンプルが小さい場合、全ての地区の D 効率値が 1 となることが末吉 (2001)¹²²⁾ によって指摘されている。なお、本研究で取扱った地区に対して FDH で D 効率値を試算したところ、サンプルが少なく全地区で 1 となったため、本研究では FDH を採用しなかった。また、FDH 以外の非ラディアル測定手法もこれまでに複数開発されているが、これらの測定手法の違いによる D 効率値の違いについては、今後の研究に譲ることにしたい。

5.3.2 優位集合非所属地区の設定

これまでに構築した評価モデルは、いずれの地区についても優位集合に所属する可能性がある。しかしながら、何らかの理由により他の地区のベンチマークとしたりたくない地区 (例えば、津波被災地沿岸部等) が優位集合に所属してしまうと、得られる需要顕在化率指数が現実的でなくなる可能性がある。そのため、優位集合に所属させないア priori に外すことも考える必要がある。

具体的には、優位集合非所属地区については、 $\lambda_j \leq 0$ の制約を課さないことにより表現可能であるため、式 (5.2d) を以下の通り変更する。

$$\lambda_j \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n') \quad (5.5)$$

ここで、 $j = 1, \dots, n'$ は優位集合所属地区、 $j = n' + 1, \dots, n$ は優位集合非所属地区である。

5.3.3 入出力変数の設定

評価モデルの出力変数については、地区内の地域公共交通の顕在需要を示す指標、入力変数については需要顕在化に影響を及ぼす指標のうち、出力変数に対して正の相関がある指標、つまりは地域公共交通の利用を推進する要因を選定する。本研究で具体的に設定した指標については次項にて詳述する。

5.4 陸前高田市におけるケーススタディ

5.4.1 インputデータの作成と分析ケースの設定

(1) 陸前高田市における公共交通の諸元

前章で構築した潜在需要評価モデルを岩手県陸前高田市の地域公共交通の評価と施策提案に適用する。同市は東日本大震災により引き起こされた大津波によって甚大な被害を受けた都市であり、津波被害に伴う車両の損失、送迎者であるパートナーの喪失、高齢化の進行に伴う運転能力の低下等に伴い、自身で運転できない交通弱者に対する地域公共交通によるモビリティ確保が求められている。このような社会的ニーズに対し、市及び交通事業者は震災後、様々な態様の公共交通機関を実証実験として導入してきた。2016年2月時点では、市内交通については図5.4に示す通り、路線定期運行が5路線（路線番号1～5に該当。なお、乗合バス、乗合マイクロバス、乗合タクシーが運行されているが、以降まとめて路線バスと呼ぶ）整備されており、上記路線を補完する位置づけで前日までの事前予約型のデマンド交通が2区域（路線番号9、10に該当）整備されており、対象ゾーン内の利用者宅の玄関前から市内の主要医療施設・買物施設等の玄関前まで送迎を行うサービス内容となっている。また、本研究では分析対象としないが、地域間幹線として、JR大船渡線BRT及び路線バス4路線（路線番号6～8及び11、12）が市内に乗り入れている。なお、同市における震災前から震災後にかけての公共交通ネットワーク及び運行内容の変遷に関しては、前章の4.5.1項にて取りまとめているため、参考にされたい。

一方で、同市の地域公共交通の運営状況は良好とは言い難い。震災前はバス事業者が市内全路線の運行事業者として参画していたが、震災後の建設業界への人材流出、市内バスターミナルの損失、車両の老朽化等によりバス事業者単体での市内全路線の維持が困難な状態に陥った。そのため、現在は一部路線を除き市内地域公共交通については市がコミュニティバスとして運行し、運行業務を地元タクシー事業者に委託している。現在の市内路線バスについては、いずれも収支率が2割以下に落ち込む中、利用者も概ね横ばい傾向にあり、新規顧客の開拓は十分に進んでいない¹⁸⁷⁾。被災地域の不便な生活に配慮した低価格での運賃設定等、被災地域特有の厳しい生活環境も収支率を低下させている要因であるため、他都市との横並びでの比較はできないが、少なくとも利用促進による運賃収入の確保が今後の大きな課題であることに間違いない。しかしながら、市内交通事業者の運営実態を踏まえると、現状のサービス内容に対する抜本的な改善は困難であり、既存サービスの中でどれだけ効率的に利用者を新規開拓していくか、つまりは現行の地域公共交通利用者の利用頻度の拡大と非利用者の潜在需要の掘り起こしが今後の重要な課題である。

その点で、2013年2月から実証実験を開始したデマンド交通については、運行開始当初は予約運行に対する心理的抵抗や認知が広まらなかったこと等により利用が伸び悩んでいたものの、利用者へのヒアリングに基づく度重なるサービスの改正、説明会の開催、無料試乗会の実施といった地道な営業活動が実を結び、2013年度後半にかけては堅調に利用者が増加している。デマンド交通における利用者拡大の実績

を踏まえ、他の市内地域公共交通路線のサービス設計の見直しやモビリティ・マネジメント施策の導入が地域公共交通の利用促進に好影響を及ぼすことは想像に難くない。ただし、これらの施策はハード整備を伴わない比較的成本負担が小さい施策とは言え、地域行政の公的負担の上限や交通事業者の経営状況等を踏まえると施策の展開には限度がある。このような陸前高田市の地域公共交通部門が抱える問題意識を踏まえ、同市内の各地区を本研究のケーススタディ対象として選定した。以降では現在の市内各地区の地域公共交通の需要顕在化率を計測した上で、今後積極的にサービス設計の見直しや利用促進を図っていくべき地区を明確化する。また、算出結果に基づき、潜在需要を顕在化する上で有効な施策のあり方についても考察する。

なお、本モデルは被災地に限定した適用を想定しておらず、被災地以外も含め汎用的に使えるモデルである。しかしながら、本研究において復興局面にある地区をケーススタディ対象に選定した理由は大きく分けて2つある。まずひとつ目の理由は、復興局面における地域公共交通サービスに関する周知の重要性にある。被災地においては、仮設住宅の建設・集約、道路の付け替え、まちづくりの進展等が短期間のうちに行われるため、それに合わせて地域公共交通のサービス内容が短期的に大きく変化したり、新たな移動サービスが導入されたりする。そのため、利用者にはサービス変更の状況を的確に理解し使ってもらう必要があり、公的セクターとしては、どの地域においてサービス認知が進んでいないのかをモニタリングすることが重要となる。本モデルを用い、サービス変更や需要の変動が発生するたびに需要顕在化状況を評価することで、サービス認知や利用が進んでいない地区に対して情報提供等を図っていくことで、復興途上でのモビリティの確保が進むことになる。

もうひとつの理由は、被災地域における計画的復興を支援する上で、本モデルで示される規範的予測結

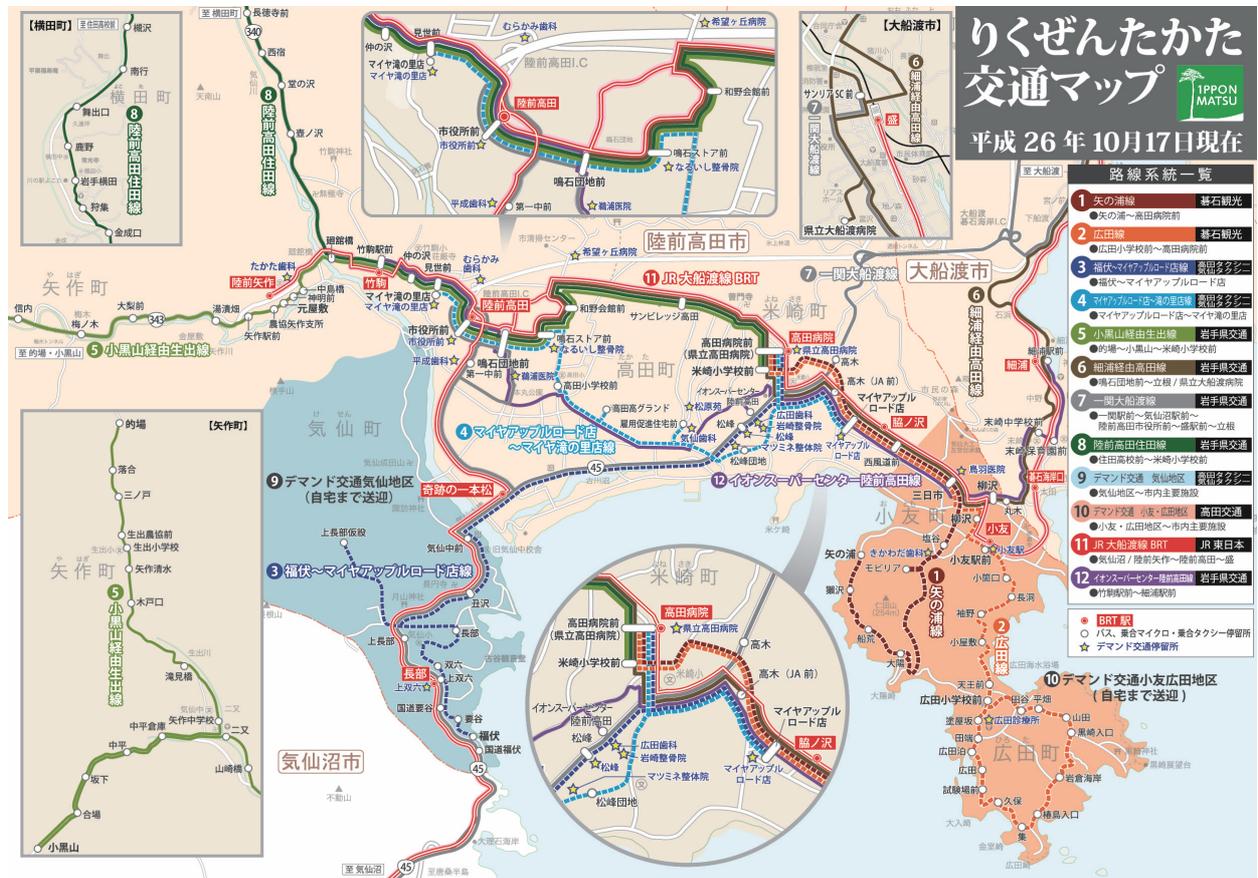


図 5.4 陸前高田市内のバス路線図 (187)



図 5.5 分析対象エリア及びゾーニング

果が特に有用であることにある。復興という言葉には、災害前の状態に戻すだけでなく、被災地を興す、つまりは旧態を改め発展させるという要素も含んでいる。復興を抜本的なまちづくりの機会と捉え、復興過程においてまちを理想的な方向に導くことが重要となる。本モデルを用い、人々の移動需要を最大限顕在化させる交通施策及び都市施策のあり方を見出すことが、被災地におけるスマートグロースの貢献に寄与すると考える。

(2) 分析対象エリアの設定

分析対象エリアとゾーニングは図 5.5 に示す通りである。分析エリアは基本的に陸前高田市全域とするが、地域間幹線交通の乗降客数データの取得が叶わなかったことから、市内路線バス及びデマンド交通が運行されている地区に限定し、地区内に乗り入れる公共交通が地域間幹線のみである市内横田町及び竹駒町の一部地区については分析対象から除外した（図 5.5 内灰色着色地区は除外）。

分析エリアの区分は平成 22 年国勢調査における小地域に準じて設定している。ただし、浸水に伴い無人となった地区や震災前に無人だったが応急仮設住宅の建設により居住地が新たに発生した地区等、平成 22 年時点と居住形態が大きく変化した地区については適宜集約・分割している。

(3) 入出力変数の設定

評価モデルの入出力変数は表 5.1 の通り設定した。なお、前述の通り、本来であれば市内路線だけでなく、地域間路線や JR 大船渡線 BRT の利用可能性も含めた評価を行うべきであるが、市内路線以外の停

留所別乗降客数データが入手できなかったことから、本研究では市内路線に限定した評価を行うこととした。

■出力変数 出力変数については、公共交通の顕在需要を表現する指標を以下の通り設定した。

a) 地区別デマンド交通利用者数 デマンド交通については、2013年4月1日～2014年3月31日の1年間の運行日誌データをもとに整理した。なお、デマンド交通については、現時点では市内全域をカバーしておらず、図5.4に示すとおり市内気仙町・小友町・広田町居住者のみ利用可能であるため、利用対象地区外のデマンド交通利用者数はゼロに設定した。

b) 地区別路線バス利用者数 路線バスについては、地区別利用者数の調査を行っていないため、ここではバス停留所勢圏を300mと仮定し、停留所別乗降客数を勢圏と地区境界の重複状況を踏まえて振りわけることによって地区別の利用者数を算出した。なお、勢圏が複数地区を跨ぐ場合は、地区別人口比により乗降客数を地区別に按分した。ベースとなる停留所別乗降客数データは、デマンド交通と同様に2013年4月1日～2014年3月31日の1年間の延べ乗降客数の実績をもとに設定したが、的場線・合場線（現在は1系統に統合されて小黒山経由小出線に名称変更）については年間データを調査していなかったため、2013年度に実施した9日間の乗降客調査データを年間データに拡大したものをを用いた。

■入力変数 入力変数については、出力変数との正の相関がある以下の4つの指標を選出した。

a) 65歳以上人口 2012年3月31日時点の住民基本台帳を基に設定した。ただし浸水区域において居住者が存在している等、震災前からデータの更新が行われていない箇所もあるため、ゼンリン住宅地図¹²⁶⁾をもとに、地図上で民家が立地していない地区は居住者をゼロに置換した。

b) 停留所アクセス距離 現行の路線バス停留所のポイントデータと現況の道路網データ及び各町丁・字の中心地点のポイントをGIS上で整理し、Dijkstra法による最短経路探索により、分析ゾーン内に含まれる町丁・字中心と最寄り停留所までの平均距離により設定した。なお、DEAでは、出力変数との正の相関を仮定した入力変数を選定する必要があるが、停留所アクセス距離と公共交通利用者数の間には負の相関が存在する。そのため、停留所アクセス距離については観測値をそのまま用いるのではなく、刀根(1993)¹⁴¹⁾を参考に、式(5.6)を用いて順位逆転処理を行った値を設定した。

$$x'_j = 2\mu - x_j \quad (5.6)$$

ここで、 x_j は地区 j における停留所アクセス距離（観測値）、 μ は対象地域全体の停留所アクセス距離の最大値と最小値の平均値、 x'_j は順位逆転処理後の値である。

c) 地区内バス路線の運行頻度 陸前高田市及び岩手県交通が公表しているバス時刻表（2013年3月31日時点）により各ゾーン内を運行している路線の運行頻度の総和により設定した。

d) 地区内に立地する買物・医療施設の集客力 陸前高田市が実施した調査結果¹⁸⁷⁾における、「市民が普段よく訪問する施設（買物施設及び医療施設）」の回答者数をもとに、施設を地区別に集計し設定した。

表5.2に入出力変数の基本的統計指標を示す。なお、停留所アクセス距離については順位逆転処理を行う前の値を用いている。

なお、入出力データに関しては、データの利用可能性の制約により、妥協案を採用した部分もあることから、データ項目及び計測方法については今後も精査が必要である。特に、路線バス乗降者数データの計測手法については、本来であれば地区単位で路線バスの利用者数を観測すべきであるが、本研究では停留所単位の利用者を集約する形で設定しているため、一部地区では乗降実態と整合していない可能性がある。また、幹線交通の乗降客数データを計測していないことから、地域内公共交通のみの評価に留まって

表 5.1 DEA の入出力変数

変数	出典
入力 65 歳以上人口 [人]	住民基本台帳 (2012 年 3 月) を基本とし、ゼンリン住宅地図 ¹²⁶⁾ を用いて補正
停留所アクセス距離 [m] ^a	町丁・字中心から最寄りの停留所までの平均距離により設定 ^b
地区内バス路線の運行頻度 [便/日]	時刻表より設定
地区内に立地する買物・医療施設の集客力 [人/日]	市民アンケートの回答者数より設定
出力 地区別デマンド交通利用者数 [人/年]	デマンド交通予約実績データ ^c
地区別路線バス利用者数 [人/年]	地区内に立地する停留所別乗客数を合計 ^d

^a 式 (5.6) により順位逆転処理済みのものを設定

^b 市内路線バスへの距離を算出しており、地域間幹線交通は除外

^c 登録者居住地に基づいて集計

^d 市内路線バスのみ計測しており、幹線交通は除外

表 5.2 入出力変数の基本的統計指標

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
65 歳以上人口 [人]	70.8	55.5	0	385
停留所距離 [m]	644.9	538.5	50	2689
路線バス便数 [便/日]	5.0	4.8	0	20
集客度 [人/日]	17.8	74.5	0	510
デマンド交通利用者 [人/年]	23.6	51.7	0	224
路線バス利用者 [人/年]	467.6	1212.7	0	8720

おり、市内公共交通の体系的な整理ができていない点も課題であり、今後追加的な調査が求められる点を補足しておく。

また、今回はデータが入出できなかつたため採用していないが、バス路線の目的地に関する情報を入力変数として扱うことも考えられる。仮にデータが入出でき場合は、例えば、居住地から目的地までの距離が近ければ移動負担が小さく、需要が顕在化しやすくなる可能性が考えられることから、各ゾーンにおける主たる目的地までの平均距離等を入力変数として採用することも、今後検討の余地があると考えられる。更に、被災地では人口の社会増減、仮設店舗等の建設・撤退による目的地の変更等、特に復興集中期頃までの期間については、本研究で設定した入力変数が短期的に変化する。先に述べた、需要顕在率のモニタリングとして本モデルを適用する際には、需要変動等に合わせてデータを更新し評価を行うアプローチが重要となる。

(4) 優位集合非所属地区の設定

優位集合非所属地区については、津波浸水エリア内の地区及び現況で路線バス・デマンド交通両方の利用者数が極めて少ない地区（気仙町砂盛、広田町越田、矢作町雪沢、大嶋部、打越、枡内、高田町栃ヶ沢、大石沖、裏田、中和野、砂畑、米崎町高畑、佐野、糠塚沢、地竹沢、沼田、神田、脇の沢、堂の前）とした。

(5) 分析ケース

需要顕在化動向の分析については、以下に示す 3 ケースを設定した。

■ケース 1：現行の需要顕在化の動向 ケース 1 の分析に当たっては、表 5.1 に示す現況の入出力変数を用いた D 効率値の計測により評価する。つまり、各地区の高齢人口、公共交通のサービスレベル、施設の集客力といった、公共交通利用を促進する要因に対して、デマンド交通及び路線バスの需要が現時点でどれだけ顕在化しているか、相対比較により計測している。

なお、地域公共交通利用が顕在化している要因は、地区によって様々であると想定される。例えば、ある地区では高齢者が数多く居住していることにより需要が大きくなっていることもあれば、バス停が集落に近接し利便性が高いことにより需要が伸びている地区も考えられる。また、需要が顕在化している交通モードについても、デマンド交通の利用が卓越する地区もあれば、路線バスの利用が卓越する地区もあり、両者がバランスよく利用されている地区もある。このような各地区における社会経済特性や公共交通利用特性の異質性に対し、DEA では入出力変数のウェイトが当該地区の効率的最大化の観点から最も有利なように定められるよう内生的に決定されるため、これらの異質性を踏まえた、身の丈に合った効率性評価が可能となる。

■ケース 2：デマンド交通のサービス改変に伴う需要顕在化の動向 本研究で取扱ったデマンド交通のサービス改変内容は、「ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便（現行のダイヤに対し、時間帯変更もしくは増便により利用者が使いたい時間に使いやすくするサービス）」及び「ケース 2-2：当日予約への対応（現在のサービスでは利用者は前日夕方までに電話予約を行う必要があるが、これに対して当日の運行開始直前までの予約を許容するサービス）」の 2 ケースである。

評価方法については、表 5.1 に示すデマンド交通利用者数を、別途実施したシミュレーションにより算出した、各ケースのデマンド交通利用者数の推計値で代替した状態で D 効率値を算出し、ケース 1 の結果との比較を行うことで評価する。各ケースのデマンド交通利用者数のシミュレーションに当たっては、2013 年にデマンド交通登録者を対象に実施したアンケート調査結果から把握した需要顕在化率（表 5.3 参照）に基づき、式 (5.7) を用いて算出した。なお、アンケート調査票においては、ケース 2-1 については「デマンド交通のダイヤが自身の生活スタイルと合致したダイヤになる、もしくは今よりも便数が増える場合利用するか否か」、ケース 2-2 については「利用当日の予約に対応した場合利用するか否か」という設問を設定しており、全回答者数に対して「利用する」と回答した人数の割合によって α を設定している。

$$x_j = \alpha \cdot \beta \cdot d_j \quad (5.7)$$

ここで、 x_j は各ケースにおける地区 j のデマンド交通利用延べ人数予測値、 α はアンケート調査に基づく各ケースの需要顕在化率（デマンド交通未利用者のうち各サービスが導入された場合に新規に利用すると回答した割合のこと。表 5.3 の通り設定。）、 β は現行デマンド交通利用者の年間平均利用回数（2013 年度の利用実績をもとに 14.1 回/人・年とした。）、 d_j は地区 j におけるデマンド交通未利用者の人数をそれぞれ示す。

表 5.3 各ケースにおけるパラメータ α (需要顕在化率) の設定

ケース	質問項目	需要顕在化率 (α)
2-1	ダイヤ改正及び増便が行われた場合デマンド交通を利用する	9.2%
2-2	当日予約に対応した場合デマンド交通を利用する	21.6%

なお、本研究においては、地区別集計を可能にするデータが入手できなかったため全地区一律としているが、本来、 α については、地区別に集計した値を用いることで、施策実施時の地区間の需要の顕在化率のばらつきを表現することが望ましい。ただし、地区別の値を使用しているデマンド交通未利用者数 d_j については、施策実施前の各地区におけるデマンド交通の潜在需要量を示唆する指標として捉えることができる。よってここでは、ある施策を実施した場合、施策実施に伴う「需要の顕在化率」は地区間で同一とするが、「需要の顕在化量」は施策実施前の潜在需要量（デマンド交通未利用者数 d_j ）によって異なるという観点から、 d_j の地域間のばらつきにより、施策実施後の地域間の需要顕在化動向の差異の表現を試みている。ただし、施策実施後の需要の顕在化量を精緻に予測できる手法ではないため、今後改善の余地がある点に留意が必要である。

■ケース 3：将来における需要分布変更に伴う需要顕在化の動向 将来シナリオにおける潜在需要については、DEA の入出力変数のうち、「65 歳以上人口」、「デマンド交通利用者数」、「路線バス利用者数」の 3 変数について、将来の趨勢値に代替することによって計算する。このうち、65 歳以上人口については、国立社会保障・人口問題研究所の推計値を用いることにより設定した。デマンド交通・路線バス利用者数については、東京大学が 2012 年に陸前高田市で実施した、交通機関選択に係る SP(Stated Preferences) 調査結果をインプットデータとして構築した交通機関選択モデルにより推計した。以下に概要を示す。なお、本来であれば RP(Revealed Preference) 調査結果に基づくモデル構築が望ましいが、現時点で交通機関選択モデルの構築に耐えうる利用者の行動データが取得できていないことから、SP 調査結果を活用している。

a) 交通機関選択モデルの構築 SP 調査においては、各回答者に対し、交通機関（自家用車（運転）、自家用車（送迎）、路線バス、デマンド交通）のサービス水準を記載した調査票を配布し、提示条件下において利用したい交通機関をひとつ選択する形式としている。交通機関選択行動の表現については、MNL (Multinomial Logit Model) を適用した。選択肢は上記の 4 手段とし、選択肢集合の設定に当たっては各個人の利用可能性を鑑み設定した。MNL における個人 n の選択肢 k の選択確率 P_{ik} は以下の通り表される。

$$P_{ik} = \frac{\exp(V_k)}{\sum_{j \in C_n} \exp(V_j)} \quad (5.8)$$

ここで、 V_k は各選択肢の効用関数の確定項、 C_n は個人 n の各サンプルにおける代替選択肢集合である。なお、今回実施した SP 調査はデマンド交通の利用意向を調査したものであることから、実際の交通機関選択と比較して選択結果に偏りが生じる可能性がある点に配慮する必要がある。そこで、2013 年に陸前高田市において実施された市民アンケート調査より得られた市内全体の公共交通利用実態を用い、WESML (Weighted Exogenous Sampling Maximum Likelihood) を適用したパラメータの推定を行った。尤度関数式は以下の通りである。

表 5.4 交通機関選択モデルのパラメータ推定結果

説明変数	パラメータ	t 値	
定数項 (送迎)	0.50	2.94	**
定数項 (バス)	-2.59	-8.53	**
定数項 (デマンド)	-1.70	-6.00	**
乗車時間 (全手段)	2.32	3.06	**
ガソリン代 (運転・送迎)	0.38	1.05	
運賃 (バス, デマンド)	-0.09	-2.09	*
男性ダミー (運転)	0.78	-3.42	**
停留所アクセス時間 (バス, デマンド)	-1.00	-1.13	
65 歳以上ダミー (バス)	1.00	4.65	**
サンプル数		1240	
尤度比		0.60	
修正済み尤度比		0.59	

* は 5 % 有意, ** は 1 % 有意, 説明変数括弧内は変数を設定した交通機関

$$L_W = \sum_{n \in N} \sum_{i \in C_n} \frac{Q(i)}{H(i)} \ln(P(i|Z_n, \theta)) \quad (5.9)$$

ここで、 $P(i|Z_n, \theta)$ は特性値 Z_n と未知パラメータ θ が与えられたときに選択肢 i が選択される確率、 $Q(i)$ は母集団の i 番目選択肢選択率、 $H(i)$ はサンプリングデータ内の i 番目選択肢選択率である。

表 5.4 にパラメータ推定結果を示す。乗車時間の推定値がプラスになっており、変数の与え方・組み合わせ方及びモデル式を変更してもこの傾向は変わらなかったことから、所要時間が交通機関選択にあまり大きな影響を及ぼしていない可能性がある。このことは運賃においても現れており、選考そのものが固定化している可能性がある。なお、修正済み尤度比 $\bar{\rho}^2$ は 0.59 であり、説明力が高いモデルであると言える。

b) 将来需要予測 以上で構築した交通機関選択モデルを用いて、交通機関別の利用者数の推計を行う。手順としては、まずは現況の利用者数の再現を行い、その後、将来シナリオにおける需要予測を行った。なお、将来シナリオにおける DEA の入出力変数の設定に当たっては、モデルにより推計された将来の利用者数をそのまま適用するのではなく、推計結果から導出される現況と将来の利用者数の変化率を DEA の入出力変数に乗じることにより設定している。なお、分析対象年次については現在陸前高田市内で事業化されている高台移転事業が全て完了する 2020 年ごろを想定している。

推計において使用する入力データは、前述の市民アンケート調査結果であり、陸前高田市内を発着する内々トリップ（移動目的：通勤、買い物、通院）を対象とした。分析ゾーニングの設定に当たっては、アンケート調査結果の制約上、図 5.6 に示す大字レベル（復興事業の分布に応じて一部個所は大字を分割する形でゾーン設定を行っている）の 13 ゾーンで行った。よって、各地区における DEA の入出力変数の設定の際に、同じゾーン内に属す地区は一律の変化率が乗じられることになる。

選択肢集合については、市民アンケート調査結果を元に、各個人の利用可能性を想定して設定した。なお、デマンド交通のサービス水準については将来についても現行どおりで設定している（運賃 1 乗車 300 円、玄関前送迎、所要時間は実際の運行記録より設定）。

将来の人口については、国立社会保障・人口問題研究所が公表している将来推計人口（2020 年）を用いて設定している。また、各自のトリップ数については、平成 22 年度全国都市交通特性調査結果より、年



図 5.6 需要予測における分析ゾーニング

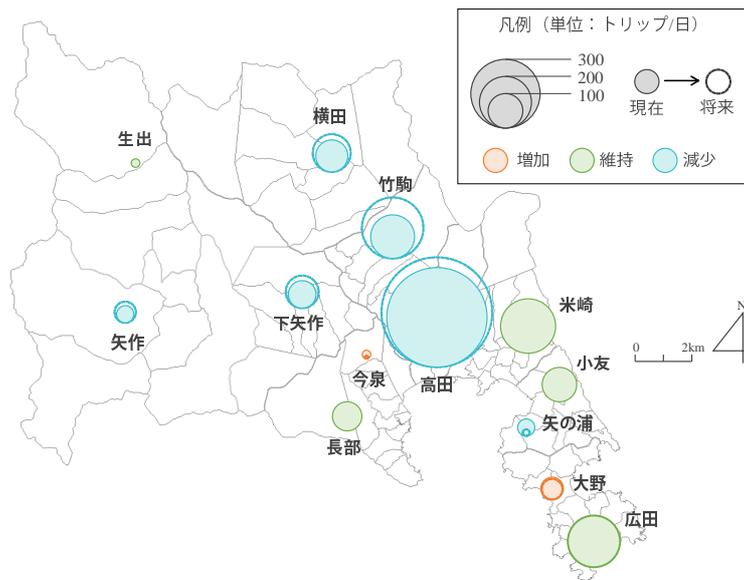


図 5.7 発地ベース公共交通トリップの将来予測結果 (路線バス+デマンド交通の合計値)

年齢層別 1 人当たりのトリップ数を抽出することで設定した。なお、本研究ではトリップ数は現在から将来にわたって変更しない仮定のもとで分析を行っている。目的地選択については基本的には現在から将来にわたって変化がないものとしている。

シミュレーションにより算出した公共交通の発地別トリップ数を図 5.7 に示す。今回の分析ゾーンのうち、今泉地区については大規模な高台移転により、移動需要が大きく拡大する可能性が高い。一方で矢の浦地区については、現在百数十戸の大規模仮設住宅が立地しているが、同地区内では復興事業が予定されていないため、他地区と比較して将来の人口流出が顕著であり、人口減に伴い、移動需要についても大きく減少する可能性がある。

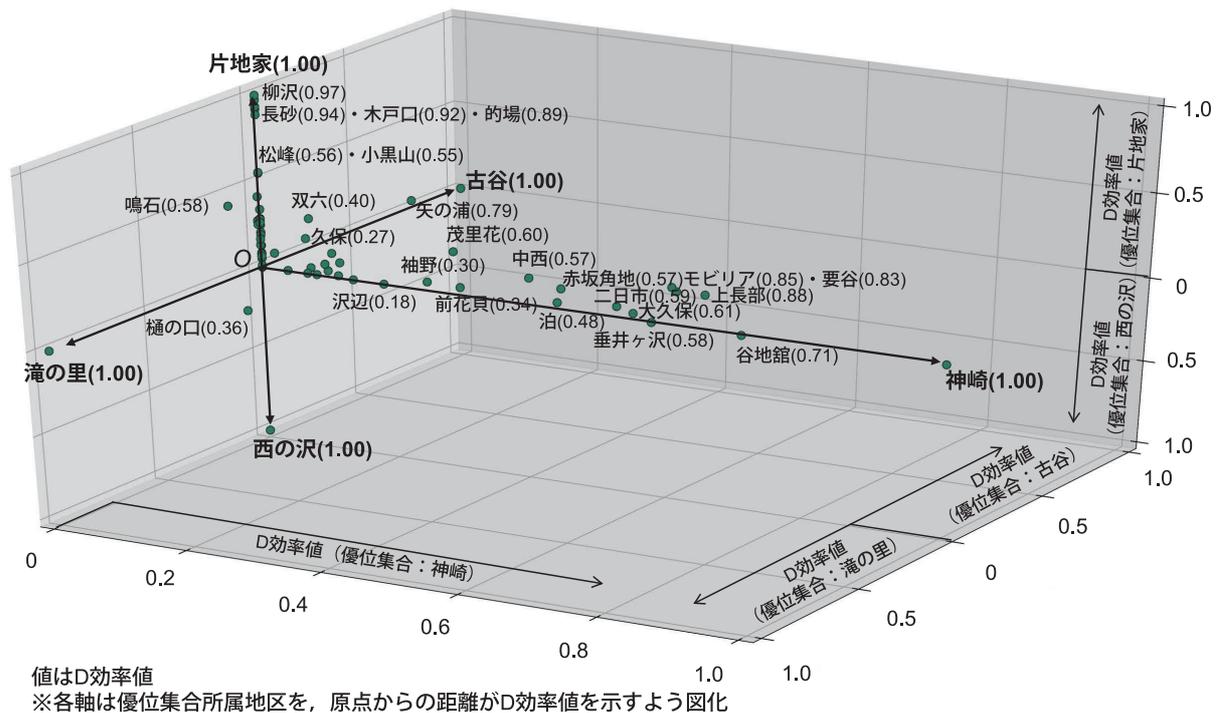


図 5.8 D 効率値及び優位集合算出結果のプロット（ケース 1：現況）

5.4.2 現行の需要顕在化の動向

前項で示した分析ケースのうち，まずは「ケース 1：現行の潜在需要評価」の算出結果について本項にて取りまとめる．なお，第 5 章の計算に当たっては，全て GAMS(General Algebraic Modeling System) を用いてコーディングを行った．また，以降の分析結果は飽くまでもデータ取得時点の実態に基づいているものであり，復興事業が進んだ現在においては状況が異なる箇所もある点に留意されたい．

(1) D 効率値及び優位集合の算出結果

DEA により算出された D 効率値及び優位集合の算出結果を表 5.5 及び図 5.8 に示す．優位集合所属地区（D 効率値 = 1 であり潜在需要が残存しない地区）は神崎，古谷，片地家，滝の里，西の沢の 5 地区である．特に神崎地区及び片地家地区が多く参照されており，両地区においてこれまでに実施されてきた需要顕在化施策は多くの地区において参考になる可能性が高い．

大字別にみると，気仙町，小友町については D 効率値の平均値が比較的高く，大字内での値のばらつきが比較的小さい．反面，その他の地域については，D 効率値のばらつきが大きいほか，公共交通利用者が存在していない地区（D 効率値 = 0）が含まれており，需要の顕在化状況において地区間での格差が比較的大きいことが伺える．

(2) 優位集合所属地区に関するプロファイリング分析

算出した D 効率値をもとに，優位集合所属地区に着目して具体的な公共交通の利用実態に関するプロファイリングを行うことで，潜在需要の顕在化において必要な要件を整理する．また，図 5.9 に各地区の位置を図示し，表 5.6 に各地区における入出力変数の値を示している．

表 5.5 D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 1：現況）

地区名	D効率値	優位集合(λ)					地区名	D効率値	優位集合(λ)				
		神崎	古谷	片地家	滝の里	西の沢			片地家	滝の里	西の沢		
気仙町	神崎	1.000	1.000				矢作町	雪沢	0.000				
	町裏	0.039	0.121					大嶋部	0.000				
	砂盛	0.000						越戸内	0.113	0.160		0.200	
	垂井ヶ沢	0.579	0.455					諏訪	0.206	0.260			
	川口	0.138	0.182					神明前	0.083	0.790			
	二日市	0.593	1.621		0.198			片地家	1.000	1.000			
	湊	0.340			0.300			打越	0.000				
	古谷	1.000	1.000					栢内	0.000				
	上長部	0.879	1.465	0.698	0.600			飯森	0.127	0.990			
	双六	0.399	0.300		0.133			信内	0.136	0.132	0.300		
	要谷	0.833	1.380	0.653	0.600			二又	0.292	0.276	0.120		
	福伏	0.111	0.880	0.330	0.260			馬越	0.078	0.160			
	気仙平均	0.493						木戸口	0.921	0.460			
小友町	三日市	0.113		0.390	0.330			二田野	0.190	0.950			
	両替	0.069	0.197					的場	0.889	0.445			
	中西	0.570	0.844	0.619				坂下	0.286	0.143			
	柳沢	0.973			0.324			小黑山	0.552	0.270			
	財当	0.083	0.182					矢作平均	0.287				
	谷地館	0.709	3.394					高田町	栢ヶ沢	0.000			
	小ヶ口	0.267	0.610		0.810	0.600			大石沖	0.000			
	茂里花	0.597	0.194	0.478	0.110	0.170			鳴石	0.577	0.474	0.164	
	沢辺	0.184	0.197						本丸	0.281	0.940		
	矢の浦	0.789		0.477	0.280				裏田	0.000			
	モビリア	0.848	1.126	0.591	0.850				砂畑	0.000			
	小友平均	0.473							大隅	0.269	0.228	0.100	
広田町	大祝	0.039	0.910						中和野	0.000			
	蒲田	0.248			0.830				西和野	0.262	0.262		
	六ヶ浦	0.133	0.213	0.110	0.110				長砂	0.935	0.312		
	赤坂角地	0.569	0.697		0.190				中長砂	0.428	0.138	0.300	
	集	0.208	0.910		0.690				法量	0.168	0.152	0.200	
	久保	0.273	0.300		0.910				高田平均	0.243			
	中沢	0.127	0.424		0.420			米崎町	高畑	0.000			
	泊	0.481	2.810	0.259	0.740				佐野	0.000			
	大久保	0.612	1.879		0.153	0.380			西の沢	1.000	1.000		
	前花貝	0.343	0.758		0.114				糠塚沢	0.000			
	越田	0.000							地竹沢	0.000			
	長船崎	0.007			0.200				沼田	0.000			
	袖野	0.299	0.500		0.100				神田	0.000			
	長洞	0.165	0.760		0.550				松峰	0.556	0.185		
	広田平均	0.250							脇の沢	0.000			
竹駒町	滝の里	1.000			1.000				堂の前	0.000			
	仲の沢	0.264		0.259	0.300				樋の口	0.356	0.350	0.530	0.150
	細根沢	0.051		0.470					和野	0.009	0.600		
	館	0.064		0.640					和方	0.009	0.600		
	竹駒平均	0.345							米崎平均	0.148			

※網掛はD効率値が1の地区、太字は優位集合所属地区

表 5.6 優位集合所属地区における入出力変数の値

	神崎	古谷	片地家	滝の里	西の沢
65 歳以上人口 [人]	28	52	45	172	50
停留所距離 [m]	2689	734	430	475	325
路線バス便数 [便/日]	0	4	12	16	20
集客度 [人/日]	0	0	0	510	378
デマンド交通利用者 [人/年]	66	128	0	0	0
路線バス利用者 [人/年]	0	156	2548	8720	6224

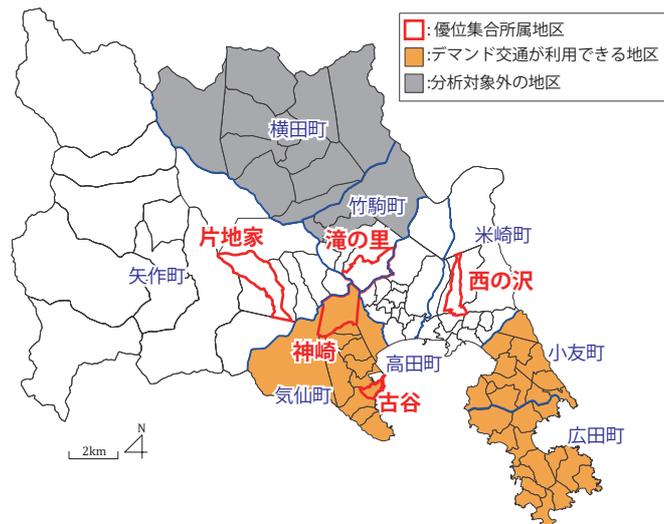


図 5.9 優位集合所属地区の位置図

■**気仙町神崎地区（デマンド交通利用可能地区）** 神崎地区は気仙町内の気仙川右岸に位置する地区であり、バス路線である国道45号から2～3km離れた場所に位置する。なお、神崎地区によりも海側の気仙川沿いは浸水区域であり、現在、今泉地区被災市街地復興土地区画整理事業の区域に指定されている。震災前からの住宅は、気仙川から数百メートル内陸に入った浸水区域外に残っており、人口規模は小さい。同地区は最寄り停留所までの距離が非常に遠いことからデマンド交通導入以前は交通空白地域であったが、デマンド交通導入後、口コミにより利用が広まり、生活の足として頻繁に使われていることから延べ利用者数は比較的多い。

■**気仙町古谷地区（デマンド交通利用可能地区）** 古谷地区は気仙町内の広田湾に面する高台に位置し、沿岸部の一部は浸水したが、多くの世帯が震災前と同じ場所で生活している。現在は震災前まで地区内に立地していた路線バス停留所が休止中となっており、活用できる最寄り停留所までの距離が若干長いですが、利用者は一定数確保されている。一方で、同地区内集会所において2013年度にデマンド交通に関する説明会を実施したことで、その後の説明会参加者の口コミでの情報拡散により、デマンド交通利用者は増加傾向にある。

■**矢作町片地家地区（デマンド交通利用不可能地区）** 片地家地区は旧JR陸前矢作駅（JR大船渡線のBRTでの復旧に伴い移転）周辺を含む地区である。内陸部で浸水被害区域からは外れている。陸前矢作駅周辺は矢作町の中心地区であることから、民家が密集しており、なおかつ路線バス停留所へのアクセスも容易である。加えて、地区内を運行する路線バスの運行頻度についても他地区と比較すると多いこと等が要因となり、路線バスの利用者が多い地区である。

■**竹駒町滝の里地区（デマンド交通利用不可能地区）** 滝の里地区は、震災後に商業施設や金融機関等の立地が集中した地区であり、現在は多くの市民の買物目的地となっている。これらの生活利便施設と停留所のアクセスも比較的容易であることから、公共交通を利用して来訪する市民も多い。滝の里地区最寄りの見世前・マイヤ滝の里店（現：滝の里）両停留所は市内でも利用者数が多い停留所である（なお、マイヤ滝の里店の移設に伴い、現在は滝の里停留所の隣の停留所であるマイヤ竹駒店停留所のほうが利用が活発となっている）。

■米崎町西の沢地区（デマンド交通利用不可能地区） 西の沢地区は、震災以降、総合病院である県立高田病院の仮設診療所が建設されたため、現在多くの通院者の目的地となっている地区である。病院前には路線バス停留所が設置されており市内でも利用者数が多い停留所のひとつである。

(3) 優位集合所属地区の特性を踏まえた今後の施策展開案

プロファイリング分析を踏まえ、優位集合所属地区の特性を踏まえた今後の施策展開案を整理する。

■デマンド交通利用の促進（神崎・古谷地区型） 神崎・古谷地区は入力変数に対して、出力変数のうちデマンド交通の利用者が比較的多い地区である。神崎地区についてはこれまでに家族・コミュニティ内でのデマンド交通利用者同士の口コミにより利用拡大が図られており、古谷地区については前述した公共交通説明会の実施が有効に機能し、利用者増につながっている。よって、両地区を優位集合に設定している地区については、両地区で効果的に機能した広報・営業活動に関する取り組みを参考にしながら、利用促進を図ることが望ましい。

■路線バス利用の促進（片地家地区型） 片地家地区は路線バスの利用によって需要の顕在化が図られている地区と言える。同地区住民へのヒアリング結果によると、震災前から同じ系統のバスが運行されていたことから、移動時のバス利用がある程度住民間で定着しており、実際に通院・買物の際にバスを利用していたり、地区内を運行しているバスのサービス内容や乗継方法について理解していたりする住民が比較的多いことが確認されている。片地家地区を優位地区に設定している地区については、ある程度路線バスの利用可能性が高い地区であるため、例えば片地家地区住民のバス利用スタイルを説明会等で紹介し、バス利用に馴染みがない住民に対して、具体的な利用イメージを持ってもらうような情報提供の方法が有効だと考えられる。

■施設ベースでの公共交通利用促進（滝の里・西の沢地区型） 滝の里・西の沢両地区については、地区内に集客力の強い買物施設・医療施設が立地しており、施設利用者によるまとまった公共交通需要が存在している。両地区を優先集合に設定する地区については、地区内にある程度まとまった需要が見込まれる集客施設が立地していることが多く、施設への来訪者の公共交通利用の誘導が有効である。例えば施設内での情報提供や医療施設における公共交通利用者の優先診療、商業施設における公共交通利用者への割引クーポンの発行等、施設と連携した利用促進策が有効に機能する可能性が高い。また、交通機関別に見ると、これら両地区とも路線バスの利用によって需要の顕在化が図られている。

■優位集合所属地区の違いを踏まえた潜在需要量の分布状況 以上の整理を踏まえ、表 5.5 の結果を地図上にプロットしたものが図 5.10 である。色の違いは優位集合に設定している地区の違いを示しており、橙はデマンド交通型（神崎・古谷を参照）、青は路線バス型（片地家、滝の里、西の沢を参照）、そして緑はデマンド交通型・路線バス型の地区両者が優位集合となっている折衷型の地区を意味している。また、色の濃淡は潜在需要の大きさを示している。

結果より、路線バス沿線地区では優位集合所属地区を路線バス型もしくは折衷型に設定している地区が多く、バス路線から離れた地区においてはデマンド交通型地区が参照されやすい傾向が確認できる。また、現在デマンド交通が導入されていない地区（気仙町・小友町・広田町以外の地区）においても折衷型の優位集合が設定されている地区が多く、特に郊外部の矢作町北西部（生出地区）においてその傾向が強い。このように、デマンド交通の今後の事業拡大の方向性を検討する上でも興味深い結果が得られている。

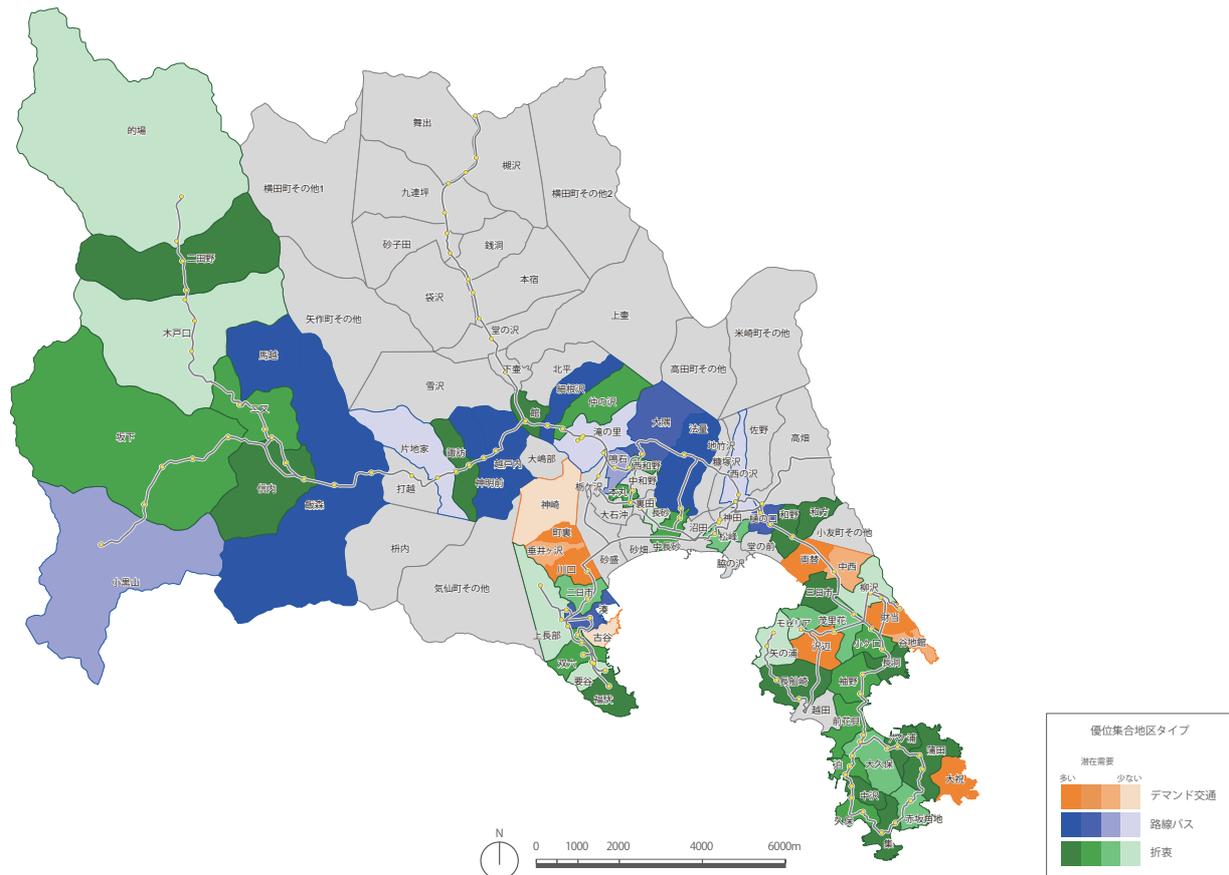


図 5.10 各地区における優位集所属地区の違いを踏まえた潜在需要量の分布

(4) 施策展開の一例

優位集所属地区における利用者拡大の実績を踏まえ、潜在需要が残存している地区に対して公共交通に関する説明会を実施した。説明会については各地区の集会所に市職員・コンサルタントが訪問し、デマンド交通型地区・路線バス型地区・折衷型地区それぞれについて、各地区において現状で利用可能な公共交通機関に関する利用方法をパネルや紙芝居等を活用してわかりやすく説明するとともに、市内公共交通マップや個人別にオーダーメイドした時刻表を手渡し、積極的に公共交通を利用するよう PR を行った。

実施成果については、図 5.11 に示すとおり、地区によって多少のばらつきはあるものの、概ね潜在需要が大きい地区においては、説明会実施に伴い、各地区における公共交通の平均利用者数が増加する傾向が確認された。以上より、事例的にはあるものの、モビリティ・マネジメント施策のようなソフト施策を検討する上で、優先的に施策を展開すべき地区の選定において潜在需要指標を用い、かつ各地区における優位集合の特性を把握することで、効率的な地区選定と施策展開が可能であることを示す結果が得られた。

5.4.3 デマンド交通のサービス改変・将来の需要分布の変動に伴う需要顕在化の動向

ここでは、陸前高田市内で運行されているデマンド交通に着目し、今後のサービス改変により期待される需要顕在化の効果を示すとともに、今後の復興事業に伴う需要分布の変化に伴う需要顕在化の動向について、評価モデルを用いて明らかにする（前者は上で設定した分析ケース 2、後者はケース 3 に該当）。

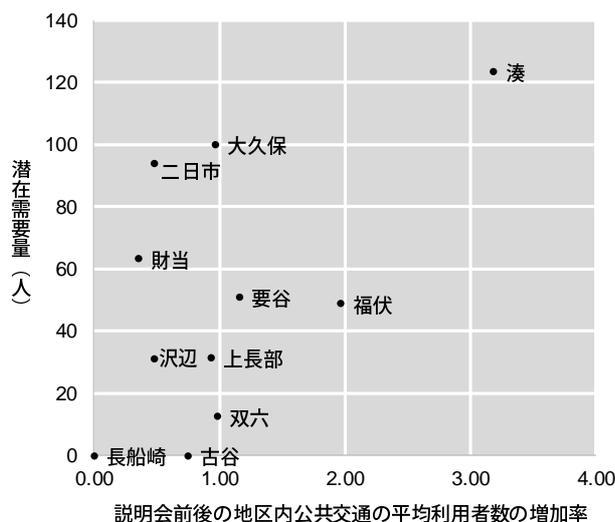


図 5.11 平均利用者数の増加率と潜在需要量の関係性

(1) Malmquist 指数に基づく分析

ケース 2, ケース 3 のように, 施策実施効果の検証や時系列分析に DEA を適用する際には, t 期から $t + 1$ 期に移行する間に, 優位集合に所属する地区が入れ替わる現象が発生する可能性がある点に留意しなければならない. これは, 評価の基準となる効率的フロンティアの定義自体が時系列によって異なることを意味している. この問題については, 荒谷・轟 (2011)⁸⁶⁾ や筒井 (2000)¹³⁹⁾ をはじめ, これまでに多くの研究実績がある Malmquist 指数と DEA の組み合わせ手法を援用することにより, フロンティア・シフトを数量化指数として表現し, 評価モデルの動学化を行うことが可能になる.

Malmquist 指数は Malmquist(1953)⁵³⁾ によって提唱された概念を Caves et al.(1982)⁹⁾ が生産性指標に発展させたものであり, Fare et al.(1992)²⁶⁾, Fare et al.(1994)²⁷⁾, Ray and Desli(1997)⁶¹⁾ でその分解が検討されてきた.

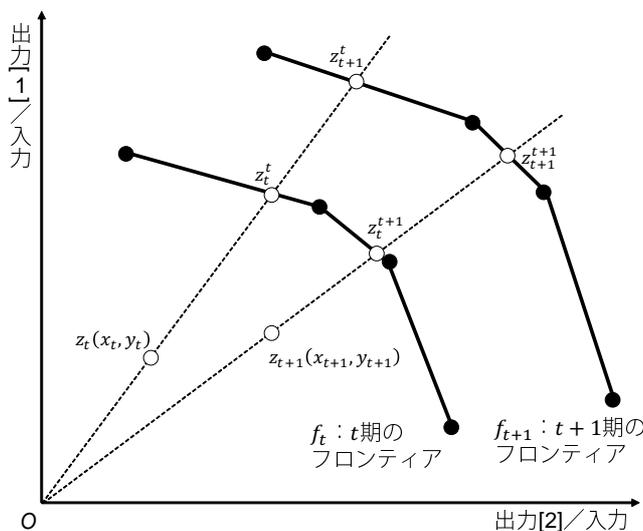


図 5.12 Malmquist 指数による効率性の表現イメージ

図 5.12 において、単時点で DEA を用いる場合、効率化の方向性は地区 i が状態 z^i から状態 z_t^i に改善することを意味するが、施策前後で効率性を評価する場合、with-without でフロンティア自体のシフトがあり、そのプロセスに関する説明を更に拡張する必要がある。つまり、 t 期（施策前）の D 効率性を $t+1$ 期（施策後）のフロンティアで評価し直す必要がある。Malmquist 指数はこうしたフロンティアの時点間でのシフト幅を考慮して、各都市の効率性の変化及び技術進歩を定量的に評価できる手法である。

ここで、ある地区のパフォーマンスが t 期において z^t 、 $t+1$ 期において z^{t+1} で示されるとする。同様に、 t 期における効率的フロンティアは f_t で、 $t+1$ 期における効率的フロンティアは f_{t+1} で表す。図 5.12 において、 t 期における z^t が、その期において効率化した場合は z_t^t で表すことにする。なお、上の添字 t は t 期のパフォーマンスを、下の添字 t は t 期の効率的フロンティアをそれぞれ示す。また、 t 期のパフォーマンスを $t+1$ 期のフロンティアで評価する際には、 z^t は $t+1$ 期のフロンティア上の z_{t+1}^t にシフトすることになる。逆に $t+1$ 期のパフォーマンスを t 期のフロンティアで評価する場合も同様に考えることができる。

k 地区における t 期～ $t+1$ 期での Malmquist 指数の変化率は、以下の式 (5.10) の通り定式化される。

$$M_k = \frac{F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{F_t(x^t, y^t)} \cdot \left[\frac{F_t(x^{t+1}, y^{t+1})}{F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{F_t(x^t, y^t)}{F_{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

ここで、 $F(x, y)$ は入力要素 x と出力要素 y を持つ地区の D 効率性を意味しており、 F の添字がフロンティアの期間、 x 及び y の添字がそれぞれデータの取得時期 (t : 施策前、 $t+1$: 施策後) を表している。図 5.12 と対応させると、以下式 (5.11a)～(5.11d) の通り示される。

$$F_t(x^t, y^t) = z_t^t / z^t \quad (5.11a)$$

$$F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) = z_{t+1}^{t+1} / z^{t+1} \quad (5.11b)$$

$$F_t(x^{t+1}, y^{t+1}) = z_t^{t+1} / z^{t+1} \quad (5.11c)$$

$$F_{t+1}(x^t, y^t) = z_{t+1}^t / z^t \quad (5.11d)$$

なお、式 (5.10) 右辺括弧外を Catch Up 指数 (CU 指数)、括弧内を Frontier Shift 指数 (FS 指数) と呼ぶ。CU 指数は、 t 期から $t+1$ 期にかけてのフロンティアへの近傍度を表しており、施策前と比較して施策後に自地区の D 効率値がどの程度変化したかを表す。CU 指数が 1 と等しいとき、当該地区の効率性が施策実施前後で変動しなかったことを意味し、CU 指数が 1 未満のとき当該地区の効率性が下降、つまりフロンティアから遠ざかったことを示し、CU 指数が 1 を超えたとき効率性が向上、つまりフロンティアに近づいたことをそれぞれ意味する。

FS 指数は、 t 期から $t+1$ 期にかけてのフロンティアのシフト幅を表しており、施策前と比較して施策後にどの程度フロンティアが移動したかを表す。すなわち、FS 指数の向上はフロンティア上の地区の効率値の向上を意味する。FS 指数も CU 指数と同様に、1 と等しいとき優位集合所属地区の交通需要の顕在化レベルに施策前後で変化がない状態を示し、FS 指数が 1 を超えると顕在化レベルの進歩を、1 を下回ると顕在化レベルの後退をそれぞれ意味する。

以上の CU 指数・FS 指数の定義を鑑みると、優位集合所属地区とそれ以外の地区における施策前後での D 効率値の動向の相違が、ネットで Malmquist 指数全体を押し上げているか否か、つまりは CU 指数と FS 指数の組み合わせにより、地区は図 5.13 の通り 4 つに分類できる。ここで、 $CU \geq 1, FS \geq 1$ のケースはフロンティアの改善と自地区のフロンティアへのキャッチアップが両立できていることを示しており、4 つのケースの中でもっとも望ましい状態であると言えよう。 $CU < 1, FS \geq 1$ のケースは、フロン

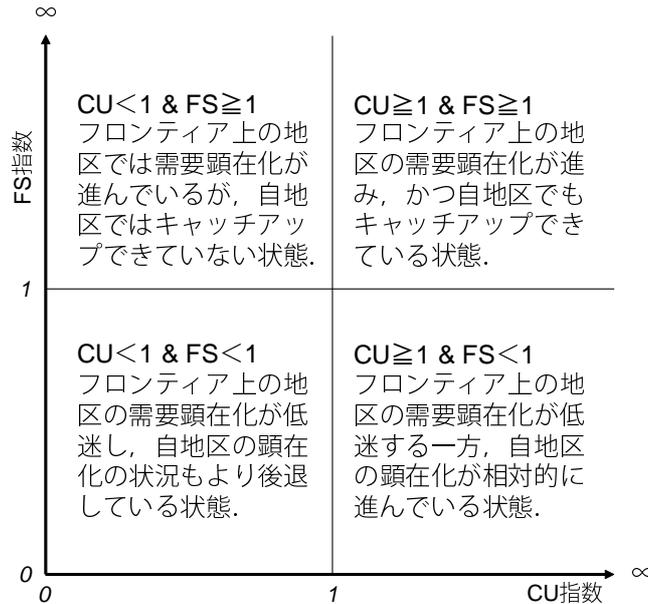


図 5.13 CU 指数・FS 指数の値による算出結果の解釈

ティア自体は改良の方向にあるが、自地区がフロンティアにキャッチアップできていない状態、つまりは非効率的な地区が優位集合所属地区の需要顕在化水準から遅れをとり、水準の格差が進行している状態を示唆する。 $CU \geq 1, FS < 1$ のケースはフロンティアの改善は進んでいないが、自地区におけるフロンティアへのキャッチアップは進んでいる状態であり、優位集合所属地区における需要顕在化が伸び悩む一方で、非効率的な地区の需要顕在化が相対的に進行している状態である。 $CU < 1, FS < 1$ はフロンティア・シフト及びキャッチアップがともに低下している状態を示す。

(2) ケース 2：デマンド交通のサービス改変に伴うに需要顕在化の動向

デマンド交通のサービス改変前後での D 効率値及び優位集合所属地区について、表 5.7 及び図 5.14 にケース 2-1（ダイヤ改正及び増便）の結果を、表 5.8 及び図 5.15 にケース 2-2（当日予約）の結果をそれぞれ示す。

「ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便」については、上長部地区で D 効率値が 1 に達するほか、矢の浦地区、谷地館地区、沢辺地区、泊地区、六ヶ浦地区等で需要の顕在化が進む。しかし、全体的な傾向で言うと、ダイヤ変更については利用に至るインセンティブとしての効果が若干弱く、大きな顕在化が進まないという結果となった。

「ケース 2-2：当日予約」に関しては、ケース 2-1 にて需要が顕在化した地区に加えて、福伏地区、大祝地区等、ケース 1 において D 効率値がゼロに近かった地区においても需要の顕在化が大きく進む結果が得られた。例えば、現行で D 効率値が 0.2 程度の沢辺地区において、当日の予約対応により D 効率値が 0.8 程度にまで上昇する等、各地区でドラスティックな効果が期待できる結果となった。一方で、例えば古谷地区等、現行で既に需要の顕在化が進行しているが施策の実施による更なる顕在化が望めない地区では、ケース 1 と比較して D 効率値が低下する地区も見受けられる。これらの地区については、ケース 2-2 において新たに優位集合に所属した地区の取り組みを参照し、新たなデマンド交通登録者を募集する等のフロンティア自体のシフトを促す取り組みが必要とされる。

次に、前項で定式化した Malmquist 指数を適用し、政策実施前後でのフロンティア・シフトを考慮した

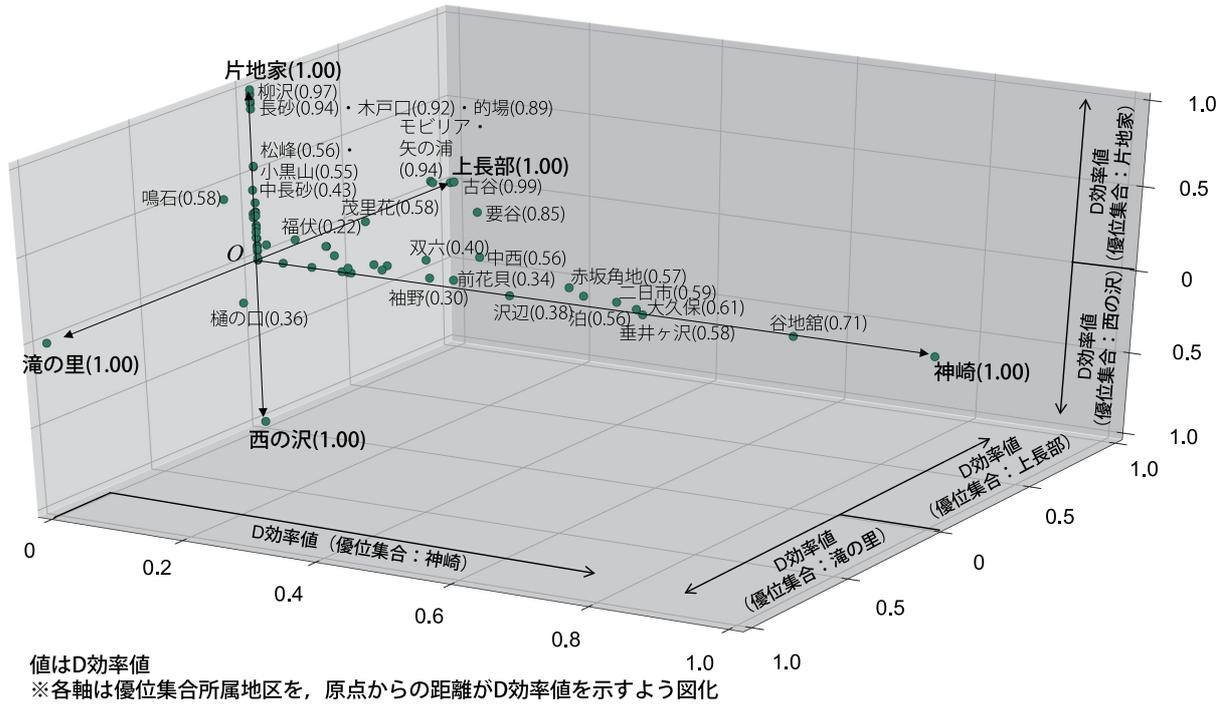


図 5.14 D 効率値及び優位集算出結果のプロット（ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便）

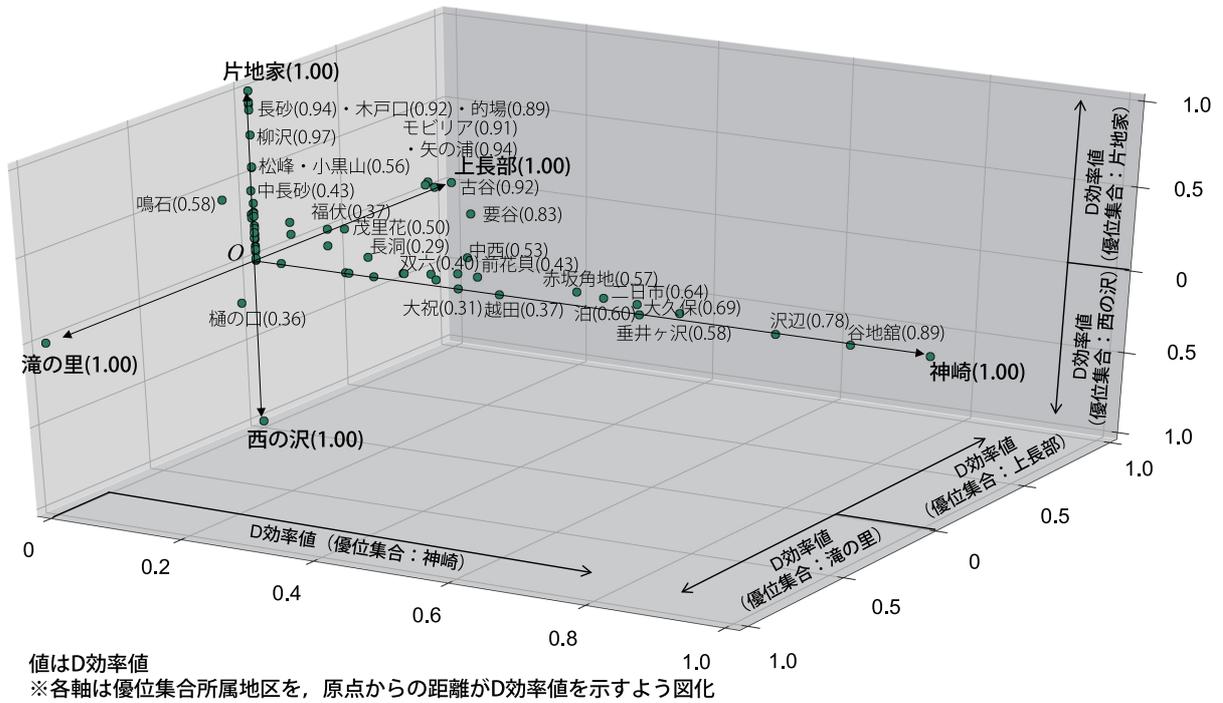


図 5.15 D 効率値及び優位集算出結果のプロット（ケース 2-2：当日予約）

表 5.7 D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便）

地区名	D効率値	優位集合(λ)					地区名	D効率値	優位集合(λ)				
		神崎	上長部	片地家	滝の里	西の沢			片地家	滝の里	西の沢		
気仙町	神崎	1.000	1.000				矢作町	雪沢	0.000				
	町裏	0.039	0.121					大嶋部	0.000				
	砂盛	0.000						越戸内	0.113	0.160		0.200	
	垂井ヶ沢	0.579	0.455					諏訪	0.206	0.260			
	川口	0.138	0.182					神明前	0.083	0.790			
	二日市	0.593	2.450		0.198			片地家	1.000	1.000			
	湊	0.340			0.300			打越	0.000				
	古谷	0.985		0.561	0.300			橋内	0.000				
	上長部	1.000	1.000					飯森	0.127	0.990			
	双六	0.399	0.242		0.133			信内	0.136	0.132	0.300		
	要谷	0.848	0.136	0.768	0.210			二又	0.292	0.276	0.120		
	福伏	0.216		0.150	0.170			馬越	0.078	0.160			
	気仙平均	0.511						木戸口	0.921	0.460			
小友町	三日市	0.112	0.220	0.330				二田野	0.190	0.950			
	両替	0.143	0.490					的場	0.889	0.445			
	中西	0.556	0.379	0.482				坂下	0.286	0.143			
	柳沢	0.973			0.324			小黑山	0.552	0.270			
	財当	0.083	0.182					矢作平均	0.287				
	谷地館	0.798	3.818					高田町	柳ヶ沢	0.000			
	小ヶ口	0.267	0.610		0.810	0.600			大石沖	0.000			
	茂里花	0.580		0.325	0.800	0.170			鳴石	0.577	0.474	0.164	
	沢辺	0.382	0.490						本丸	0.281	0.940		
	矢の浦	0.939		0.329	0.230				裏田	0.000			
	モビリア	0.935		0.781	0.410				砂畑	0.000			
	小友平均	0.524							大隅	0.269	0.228	0.100	
広田町	大祝	0.129	0.330						中和野	0.000			
	蒲田	0.248	0.212		0.830				西和野	0.262	0.262		
	六ヶ浦	0.250	0.430	0.229					長砂	0.935	0.312		
	赤坂角地	0.569	0.990		0.190				中長砂	0.428	0.138	0.300	
	集	0.208	0.910		0.690				法量	0.168	0.152	0.200	
	久保	0.273	0.242		0.910				高田平均	0.243			
	中沢	0.236	0.516	0.158	0.260			米崎町	高畑	0.000			
	泊	0.556	2.570	0.415	0.470				佐野	0.000			
	大久保	0.612	2.727		0.153	0.380			西の沢	1.000	1.000		
	前花貝	0.343	0.758		0.114				糠塚沢	0.000			
	越田	0.000							地竹沢	0.000			
	長船崎	0.007			0.200				沼田	0.000			
	袖野	0.299	0.712		0.100				神田	0.000			
	長洞	0.165	0.288		0.550				松峰	0.556	0.185		
	広田平均	0.278							脇の沢	0.000			
竹駒町	滝の里	1.000			1.000				堂の前	0.000			
	仲の沢	0.264			0.259	0.300			樋の口	0.356	0.350	0.530	0.150
	細根沢	0.051			0.470				和野	0.009	0.600		
	館	0.064			0.640				和方	0.009	0.600		
	竹駒平均	0.345							米崎平均	0.148			

※網掛はD効率値が1の地区、太字は優位集合所属地区

需要顕在化の動向について検証を行った。結果を表 5.9 及び図 5.16, 図 5.17 に示す。なお, Malmquist 指数の算出については全地区を対象に実施したが, 表記を分かりやすくするため, 図内にはデマンド交通が利用可能である気仙町, 小友町, 広田町内の地区のみプロットしている点に留意する。

表 5.9 より, ケース 2-1 とケース 2-2 を比較すると, ケース 2-2 のほうが CU 指数・FS 指数ともに高い傾向にあり, 特にケース 1 において気仙町と比較して相対的に D 効率値が小友町・広田町において CU 指数・FS 指数が 1 を超える地区が多くなっている。施策別に見ると, ケース 2-1 では大祝地区において CU 指数が 3.333 と卓越しており, その他両替地区, 沢辺地区等で CU 指数が 2 を超える等フロンティアへのキャッチアップが進んでいることが確認できる。一方で, FS 指数については 1 前後の値を示す地区が多く, 大きな改善が少ない。ケース 2-2 においても, 大祝地区で CU 指数が 8.000 と卓越しているほか, 沢辺地区や福伏地区等で CU 指数が大きい値を示している。こちらのケースについても FS 指数は茂里花地区や中西地区等で 1.2 程度の値を示すほかは 1 程度の値の地区が多い。

表 5.8 D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 2-2：当日予約）

地区名	D効率値	優位集合(λ)						地区名	D効率値	優位集合(λ)				
		神崎	上長部	谷地館	片地家	滝の里	西の沢			片地家	滝の里	西の沢		
気仙町	神崎	1.000	1.000					矢作町	雪沢	0.000				
	町裏	0.039	0.121						大嶋部	0.000				
	砂盛	0.000							越戸内	0.113	0.160		0.200	
	垂井ヶ沢	0.579	0.455						諏訪	0.206	0.260			
	川口	0.138	0.182						神明前	0.083	0.790			
	二日市	0.636	2.218	0.610		0.191			片地家	1.000	1.000			
	湊	0.340				0.300			打越	0.000				
	古谷	0.923		0.524		0.700			枅内	0.000				
	上長部	1.000	1.000						飯森	0.127	0.990			
	双六	0.399	0.455			0.133			信内	0.136	0.132	0.300		
	要谷	0.830	0.136	0.749		0.230			二又	0.292	0.276	0.120		
	福伏	0.372		0.192		0.800			馬越	0.078	0.160			
	気仙平均	0.521							木戸口	0.921	0.460			
小友町	三日市	0.246		0.700		0.280			二田野	0.190	0.950			
	両替	0.143	0.490						的場	0.889	0.445			
	中西	0.532	0.363	0.461					坂下	0.286	0.143			
	柳沢	0.973			0.100	0.324			小黒山	0.552	0.270			
	財当	0.181	0.394						矢作平均	0.287				
	谷地館	0.886	4.242					高田町	栃ヶ沢	0.000				
	小ヶ口	0.275	0.428	0.140		0.780	0.600		大石沖	0.000				
	茂里花	0.498		0.273		0.190			鳴石	0.577	0.474	0.164		
	沢辺	0.778	0.833						本丸	0.281	0.940			
	矢の浦	0.938		0.328		0.230			裏田	0.000				
	モビリア	0.912		0.760		0.430			砂畑	0.000				
	小友平均	0.578							大隅	0.269	0.228	0.100		
広田町	大祝	0.309	0.727						中和野	0.000				
	蒲田	0.248			0.500	0.830			西和野	0.262	0.262			
	六ヶ浦	0.266	0.450	0.244					長砂	0.935	0.312			
	赤坂角地	0.569	1.121			0.190			中長砂	0.428	0.138	0.300		
	集	0.317		0.740		0.620			法量	0.168	0.152	0.200		
	久保	0.273	0.455			0.910			高田平均	0.243				
	中沢	0.336	0.682	0.251		0.170			米崎町	高畑	0.000			
	泊	0.599	2.619	0.477		0.410				佐野	0.000			
	大久保	0.690	3.366	0.158		0.120	0.430			西の沢	1.000	1.000		
	前花貝	0.428	0.673	0.124		0.110				糠塚沢	0.000			
	越田	0.371	0.212							地竹沢	0.000			
	長船崎	0.007				0.200				沼田	0.000			
	袖野	0.311	0.853	0.170		0.980				神田	0.000			
	長洞	0.290	0.182	0.181		0.360				松峰	0.556	0.185		
	広田平均	0.358								脇の沢	0.000			
竹駒町	滝の里	1.000				1.000				堂の前	0.000			
	仲の沢	0.264				0.259	0.300			樋の口	0.356	0.350	0.530	0.150
	細根沢	0.051				0.470				和野	0.009	0.600		
	館	0.064				0.640				和方	0.009	0.600		
	竹駒平均	0.345								米崎平均	0.148			

※網掛はD効率値が1の地区、太字は優位集合所属地区

以上の結果より、今回取扱った2つのデマンド交通のサービス改変施策はフロンティアへのキャッチアップを促す傾向が強く、地区間での需要顕在化水準の格差を緩和する性格を有していることが分かる。その一方で、優位集合所属地区における需要の更なる顕在化に対する効果はあまり大きくなく、フロンティア上の地区におけるイノベーションを促すためには、今回取扱った施策以外のアプローチが必要になる可能性が確認される結果となった。

(3) ケース 3：将来における需要分布変更に伴う需要顕在化の動向

将来趨勢シナリオにおける D 効率値及び優位集合所属地区の結果を表 5.10 及び図 5.18 に示す。将来においては、柳沢地区や木戸口地区、的場地区において D 効率値が 1 になり、垂井ヶ沢地区が優位集合に所属する等の変化はあるものの、全体的に見ると D 効率値の傾向に大きな変化は見られない。

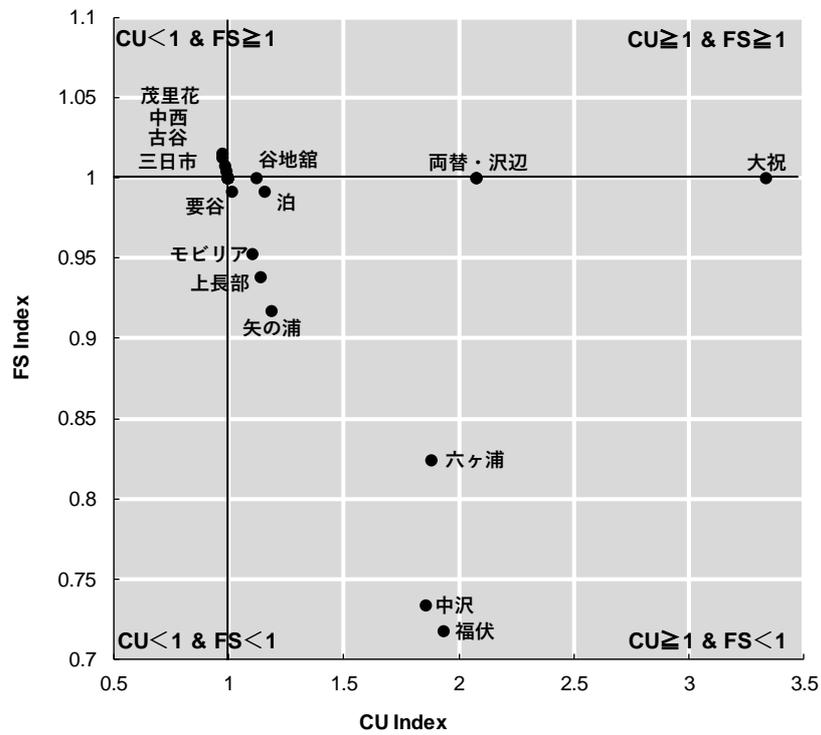


図 5.16 施策実施に伴う CU 指数・FS 指数の算出結果（ケース 2-1：ダイヤ改正及び増便）

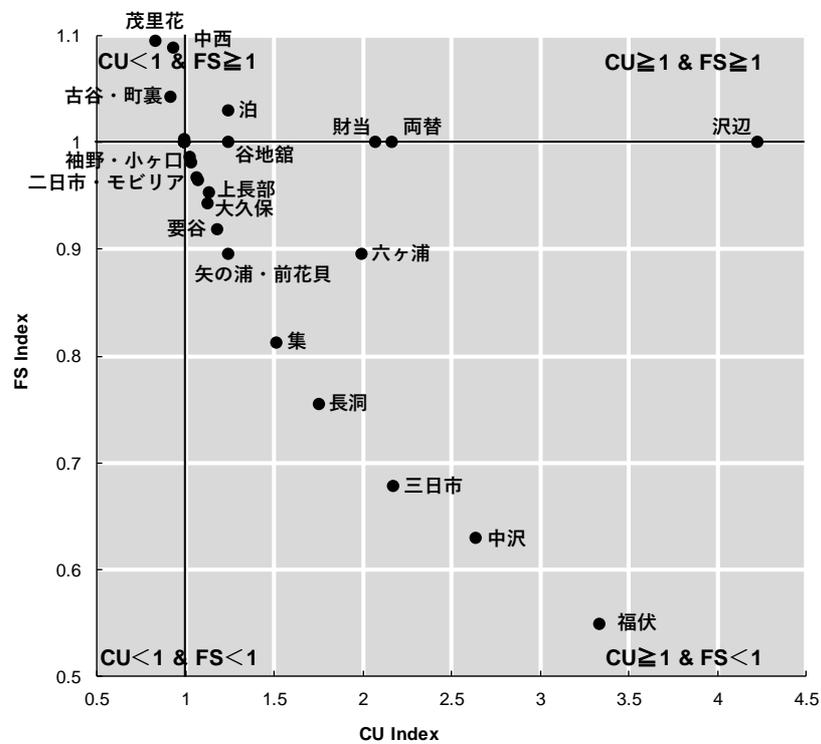


図 5.17 施策実施に伴う CU 指数・FS 指数の算出結果（ケース 2-2：当日予約）

表 5.9 施策実施に伴う CU 指数・FS 指数の算出結果（ケース 2：サービス改変）

地区名	ケース1	ケース2-1（ダイヤ改正及び増便）				ケース2-2（当日予約）				
	D効率値	D効率値	CU	FS	MA	D効率値	CU	FS	MA	
気仙町 神崎	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
	町裏	0.039	0.039	1.000	1.000	1.000	0.039	1.000	1.000	1.000
	砂盛	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	垂井ヶ沢	0.579	0.579	1.000	1.000	1.000	0.579	1.000	1.000	1.000
	川口	0.138	0.138	1.000	1.000	1.000	0.138	1.000	1.000	1.000
	二日市	0.593	0.593	1.000	1.000	1.000	0.636	1.071	0.966	1.035
	湊	0.340	0.340	1.000	1.000	1.000	0.340	1.000	1.000	1.000
	古谷	1.000	0.985	0.985	1.007	0.992	0.923	0.923	1.041	0.961
	上長部	0.879	1.000	1.137	0.938	1.067	1.000	1.137	0.952	1.082
	双六	0.399	0.399	1.000	1.000	1.000	0.399	1.000	1.000	1.000
	要谷	0.833	0.848	1.017	0.991	1.008	0.830	0.996	1.002	0.998
	福伏	0.111	0.216	1.937	0.718	1.391	0.372	3.336	0.548	1.828
	気仙平均	0.493	0.511	1.006	0.888	0.955	0.521	1.122	0.876	0.992
小友町 三日市	0.113	0.112	0.991	1.004	0.995	0.246	2.179	0.677	1.475	
	両替	0.069	0.143	2.077	1.000	2.077	0.143	2.077	1.000	2.077
	中西	0.570	0.556	0.976	1.012	0.988	0.532	0.934	1.087	1.015
	柳沢	0.973	0.973	1.000	1.000	1.000	0.973	1.000	1.000	1.000
	財当	0.083	0.083	1.000	1.000	1.000	0.181	2.167	1.000	2.167
	谷地館	0.709	0.798	1.125	1.000	1.125	0.886	1.250	1.000	1.250
	小ヶ口	0.267	0.267	1.000	1.000	1.000	0.275	1.031	0.985	1.016
	茂里花	0.597	0.580	0.971	1.015	0.986	0.498	0.835	1.094	0.913
	沢辺	0.184	0.382	2.077	1.000	2.077	0.778	4.231	1.000	4.231
	矢の浦	0.789	0.939	1.190	0.917	1.091	0.938	1.188	0.918	1.091
	モビリア	0.848	0.935	1.102	0.952	1.049	0.912	1.076	0.964	1.037
	小友平均	0.473	0.524	1.228	0.991	1.217	0.578	1.633	0.975	1.570
	広田町 大祝	0.039	0.129	3.333	1.000	3.333	0.309	8.000	1.000	8.000
蒲田		0.248	0.248	1.000	1.000	1.000	0.248	1.000	1.000	1.000
六ヶ浦		0.133	0.250	1.882	0.824	1.551	0.266	2.002	0.895	1.792
赤坂角地		0.569	0.569	1.000	1.000	1.000	0.569	1.000	1.000	1.000
集		0.208	0.208	1.000	1.000	1.000	0.317	1.519	0.811	1.232
久保		0.273	0.273	1.000	1.000	1.000	0.273	1.000	1.000	1.000
中沢		0.127	0.236	1.856	0.734	1.362	0.336	2.642	0.629	1.662
泊		0.481	0.556	1.156	0.991	1.146	0.599	1.245	1.029	1.281
大久保		0.612	0.612	1.000	1.000	1.000	0.690	1.128	0.942	1.063
前花貝		0.343	0.343	1.000	1.000	1.000	0.428	1.250	0.895	1.119
越田		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.371	0.000	0.000	0.000
長船崎		0.007	0.007	1.000	1.000	1.000	0.007	1.000	1.000	1.000
袖野		0.299	0.299	1.000	1.000	1.000	0.311	1.040	0.980	1.019
長洞	0.165	0.165	1.000	1.000	1.000	0.290	1.757	0.754	1.325	
広田平均	0.250	0.278	1.231	0.896	1.171	0.358	1.756	0.853	1.607	

※網掛はD効率値が1の地区

表 5.10 D 効率値及び優位集合算出結果（ケース 3：将来趨勢）

地区名	D 効率値					優位集合 (λ)											
	神崎	垂井ヶ沢	古谷	柳沢	片地家	木戸口	的場	滝の里	西の沢	地区名	D 効率値	柳沢	片地家	木戸口	的場	滝の里	西の沢
気仙町	1.000									矢作町	0.000						
町裏	0.039	1.000								雪沢	0.000						
砂盛	0.000	0.123								大嶋部	0.000						
垂井ヶ沢	0.577	0.455								越戸内	0.113	0.150					0.200
川口	0.138	0.182								諏訪	0.203	0.178	0.500				
二日市	0.630	0.721								神明前	0.083	0.790					
湊	0.373									片地家	1.000	1.000					
古谷	1.000		1.000							打越	0.000						
上長部	0.895	0.674	0.678							柞内	0.000						
双六	0.424	0.130	0.290							飯森	0.128	0.970					
要谷	0.846	0.660	0.629							信内	0.134	0.122	0.100				0.400
福伏	0.114	0.490	0.180							二又	0.289	0.233	0.580				0.160
気仙平均	0.503									馬越	0.082	0.160					
小友町	0.101		0.300							木戸口	1.000	1.000					
両森	0.063	0.780								二田野	0.215	0.900					0.197
中西	0.497	0.310	0.551							的場	1.000	1.000					
柳沢	1.000			1.000						坂下	0.263	0.600	0.390				0.213
財当	0.075	0.710								小黒山	0.558	0.266					
谷地館	0.624	1.350								矢作平均	0.298						
小ヶ口	0.288	0.570								高田町	0.000						
茂里花	0.530	0.950	0.394							柳ヶ沢	0.000						
沢辺	0.153	0.320								大石沖	0.000						
矢の浦	0.623		0.158							鳴石	0.616	0.425	0.500				0.236
モビリア	0.641		0.398							本丸	0.276	0.276					
小友平均	0.418									箕田	0.000						
大祝	0.032	0.320								砂畑	0.000						
蒲田	0.264									大隅	0.290	0.241					0.150
六ヶヶ浦	0.116	0.870	0.730							中和野	0.000						
赤坂角地	0.604	0.253								西和野	0.284	0.280	0.600				
集	0.238	0.320								長砂	0.916	0.916					
久保	0.290	0.130								中長砂	0.427	0.290	0.130				0.500
中沢	0.135	0.156								法量	0.182	0.164					0.300
泊	0.421	1.990	0.133							高田平均	0.249						
大久保	0.723	0.688								米崎町	0.000						
前花員	0.401	0.325								高畑	0.000						
越田	0.000									佐野	0.000						
長船崎	0.007									西の沢	1.000	1.000					1.000
袖野	0.341	0.214								糠塚沢	0.000						
長洞	0.187	0.320								地竹沢	0.000						
広田平均	0.269									沼田	0.000						
竹駒町	1.000									神田	0.000						
仲の沢	0.220									松峰	0.605	0.650					
細根沢	0.042									脇の沢	0.000						
館	0.053									堂の前	0.000						
竹駒平均	0.329									榎の口	0.393	0.300	0.600				0.160
										和野	0.010	0.400	0.400	0.200			0.223
										和方	0.010	0.400	0.400	0.200			
										米崎平均	0.155						

※網掛はD効率値が1の地区、太字は優位集合所属地区

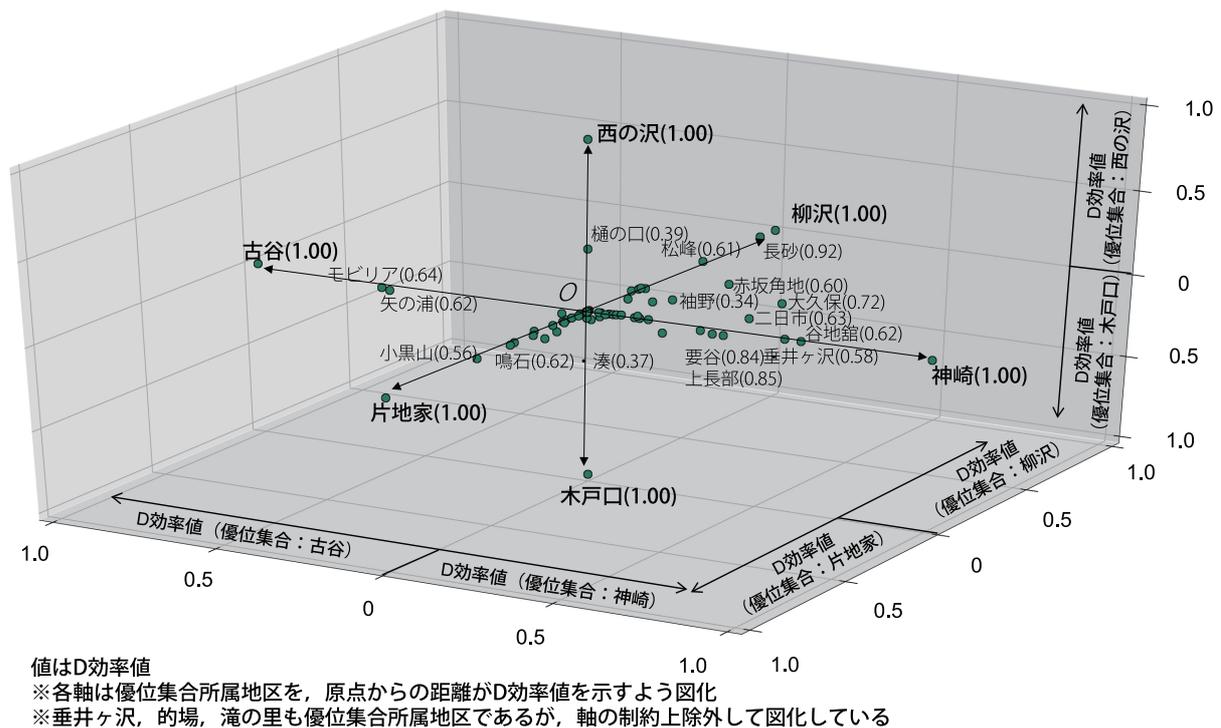


図 5.18 D 効率値及び優位集合算出結果のプロット (ケース 3: 将来趨勢)

Malmquist 指数の結果を表 5.11 及び図 5.19 に示す。表 5.11 より、全体的には FS 指数が CU 指数を上回る傾向にあり、フロンティア自体がシフトしていることが確認される結果となった。なお、CU 指数については 1 を下回る値をとる地区も存在しており、これは、優位集合所属地区とそれ以外の非効率な地区との格差が広がる傾向にあることを示している。このような結果が得られる要因としては、神崎地区や柳沢地区等、もともと D 効率値が高い地区において災害公営住宅や嵩上げ市街地、高台団地が形成されることにより、需要が更に増加し、需要顕在化のフロンティア水準が高まる一方、矢の浦地区やモビリア地区で見られるように、現況で非効率な地区において仮設住宅が撤去されたり、高台団地等への移転が進んだりすることにより需要が更に減少していることが考えられる。

このような状況を回避するためにはフロンティアへのキャッチアップを促す施策が必要であり、ケース 2 で取扱ったデマンド交通のサービス改変等は有効な施策のひとつであり、将来の需要顕在化の格差を是正する意味でも有意義な取り組みとなる可能性が伺える結果となった。

なお、本研究では、趨勢シナリオを設定して将来における需要の顕在化動向の予測を行っているが、この設定は、世の中の実際の動きを追従する形で評価を行っている立場にある。しかしながら、復興局面においては、通常の交通まちづくりと比較してドラスティックな内容が含まれることが多く、被災を契機に理想的な交通まちづくりが進められるよう誘導するアプローチが必要とされる場面もある。本研究では、推計に活用できるデータが入手できなかったためシナリオに含めていないが、例えば将来趨勢シナリオだけでなく、将来においてコンパクトアンドネットワークの推進が進むケース等、都市施策を追加的に実施する場合、もしくは新たな移動手段を導入するケース等交通施策を追加的に実施する場合等についても、同様に本モデルにより需要顕在化評価を行い、趨勢ケースと追加施策実施ケースの比較の中で、需要顕在化の観点から望ましい施策展開の方向性を見出すアプローチも今後検討すべきテーマであると考えられる。

表 5.11 施策実施に伴う CU 指数・FS 指数・Malmquist 指数の算出結果（ケース3：将来趨勢）

地区名	ケース1	ケース3（将来趨勢）				
	D効率値	D効率値	CU	FS	MA	
気仙町	神崎	1.000	1.000	1.000	1.520	1.520
	町裏	0.039	0.039	1.015	1.323	1.343
	砂盛	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	垂井ヶ沢	0.579	0.577	0.997	1.323	1.319
	川口	0.138	0.138	1.002	1.323	1.326
	二日市	0.593	0.630	1.062	1.290	1.370
	湊	0.340	0.373	1.096	1.270	1.392
	古谷	1.000	1.000	1.000	1.330	1.330
	上長部	0.879	0.895	1.018	1.318	1.342
	双六	0.399	0.424	1.064	1.290	1.373
	要谷	0.833	0.846	1.016	1.320	1.341
	福伏	0.111	0.114	1.020	1.316	1.342
気仙平均	0.493	0.503	0.941	1.219	1.250	
小友町	三日市	0.113	0.101	0.889	1.390	1.236
	両替	0.069	0.063	0.910	1.323	1.204
	中西	0.570	0.497	0.872	1.231	1.073
	柳沢	0.973	1.000	1.028	1.290	1.326
	財当	0.083	0.075	0.897	1.323	1.187
	谷地館	0.709	0.624	0.880	1.323	1.164
	小ヶ口	0.267	0.288	1.079	1.151	1.242
	茂里花	0.597	0.530	0.888	1.267	1.125
	沢辺	0.184	0.153	0.833	1.323	1.102
	矢の浦	0.789	0.623	0.789	1.014	0.800
	モビリア	0.848	0.641	0.756	1.035	0.782
	小友平均	0.473	0.418	0.893	1.243	1.113
広田町	大祝	0.039	0.032	0.842	1.323	1.114
	蒲田	0.248	0.264	1.062	1.290	1.370
	六ヶ浦	0.133	0.116	0.876	1.421	1.245
	赤坂角地	0.569	0.604	1.062	1.290	1.370
	集	0.208	0.238	1.141	1.245	1.421
	久保	0.273	0.290	1.062	1.290	1.370
	中沢	0.127	0.135	1.063	1.290	1.371
	泊	0.481	0.421	0.875	1.421	1.243
	大久保	0.612	0.723	1.182	1.117	1.320
	前花貝	0.343	0.401	1.169	1.275	1.490
	越田	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	長船崎	0.007	0.007	1.062	1.290	1.370
	袖野	0.299	0.341	1.141	1.290	1.472
	長洞	0.165	0.187	1.137	1.290	1.467
広田平均	0.250	0.269	0.977	1.202	1.259	

※網掛はD効率値が1の地区

5.5 結言

本研究では、社会資本としての公共交通事業の効率的な推進に向けて、公共交通の潜在需要に着目して今後の利用活性化の優先順位の検討及び具体的な施策の検討に資する需要顕在化動向の評価モデルの開発を行った。評価モデルの構築に当たっては、効率性評価の分野で適用事例のストックが多く、かつ公共交通事業の効率性評価の観点からも親和性が高いとされている DEA を用いて定式化を行った。

また、ケーススタディとして陸前高田市における今後の地域公共交通施策の実施優先地域の選定のために開発モデルを適用し、市内各地区における地域公共交通の需要顕在化率及び顕在化に向けた具体的な方針の検討を行った。現行の需要顕在化率評価の結果、市内の5地区（神崎、古谷、片地家、滝の里、西の

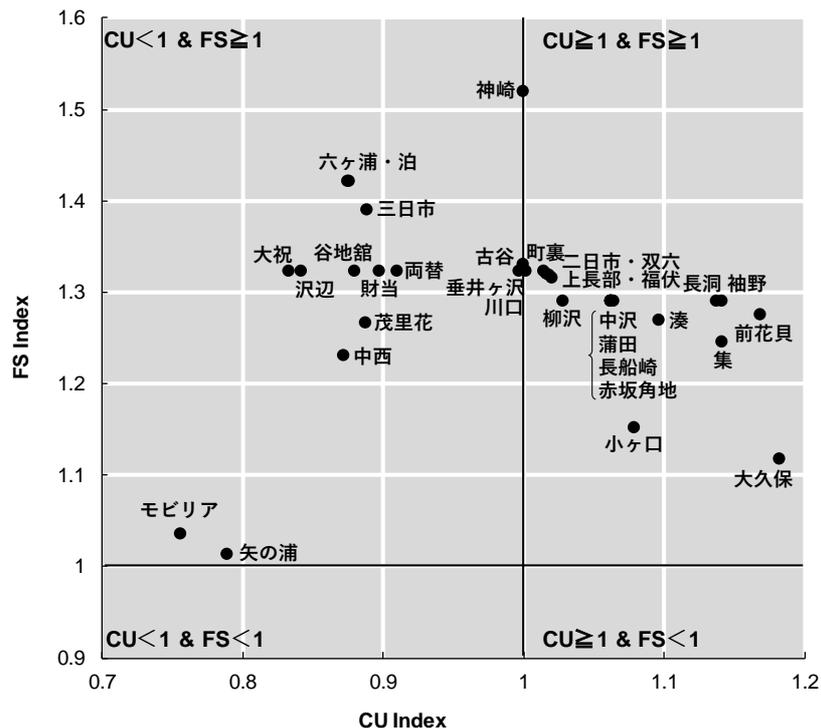


図 5.19 施策実施に伴う CU 指数・FS 指の算出結果（ケース 3：将来趨勢）

沢)が優位集合所属地区として選定された。これら 5 地区については、利用が多い交通手段にばらつきがあり、かつ人口規模、地区内の公共交通の整備状況、地区内の施設立地状況等の現状が様々であったことから、DEA の導入によって地区間の異質性や地区ごとの地域公共交通の導入状況等を多角的に評価した上で優位集合が選定されたことが確認された。また、各地区を参照している地区の特性を見ても、非現実的な目標を設定している地区は存在しておらず、フロンティアの設定も適切になされていることが伺える結果となった。選定された 5 地区については、各地区の社会経済状況や公共交通の整備・利用実態等を細かくプロファイリングし、優位集合に所属しない潜在需要が残存する地区が、それぞれどのように今後の地域公共交通施策を展開していくことが望ましいか、その方向性について検討を行った。

続いて、デマンド交通事業に着目し、サービス改変（ダイヤ変更及び当日予約対応）に伴う顕在化効果についてのシミュレーションを行った。その結果、地区の特性によって、サービス導入による需要の顕在化の大きさに開きが生じていることが確認された。また、サービス改変に関しては、全体的に見るとダイヤ変更よりは当日の予約変更に対応したほうが需要の顕在化が図られることが明らかとなったが、地区ごとに見るとダイヤ変更のほうが需要顕在化において有効であるというケースも確認され、ここでも地区の異質性を踏まえた評価が実現できていることが確認できた。また、施策実施前後それぞれの D 効率値の比較のみならず、施策実施に伴うフロンティア・シフトの発生を想定した Malmquist 指数及びその構成要素である CU 指数と FS 指数による評価を行い、各地区・各施策によって潜在需要の顕在化に働きかけるメカニズムが異なる点を明らかにした。また、提案手法については時系列分析にも適用し、Malmquist 指数により、将来趨勢シナリオにおいては需要顕在化の地域間格差が拡大し、フロンティアへのキャッチアップを推進する取り組みが重要となることを示した。

本章の課題として、DEA の入出力変数の選定に当たっての恣意性の混入が挙げられる。これは、裏を返すと対象エリアの実態やデータの利用可能性を踏まえた柔軟な評価が可能ということでもあるが、入出力変数、特に入力変数の設定については、十分な議論のもとで評価方針に適合したものを設定する必要がある。

ある。例えば、本研究ではバス路線の運行頻度を入力変数のひとつとして設定しているが、いくらバスの頻度が多くても住民のニーズに合致していないダイヤ設定がなされている場合、運行頻度はバス利用を誘発する要因にはならないことになる。今回はデータの利用可能性から運行頻度を入力変数として設定したが、運行頻度よりも生活パターンに対するダイヤの適合状況を示唆する変数のような指標を設定したほうが望ましい可能性もあり、社会厚生を改善していくアプローチと整合した入出力変数の設定が必要になると考えられる。

なお、DEAは相対比較による評価を前提としており、トップランナー以上の成長を想定した評価が難しい。よって、自治体内での潜在需要格差を解消していくための施策検討においては適した分析手法であると言えるが、フロンティアのイノベーションを促す施策検討を行う際にはDEA単体では検討が難しい点にも併せて留意が必要である。

第 6 章

結論

6.1 本研究の成果のまとめ

本研究では、規範的予測のフレームに基づき、地域全体を俯瞰した全体最適としての公共交通ネットワークの検討のための手法の構築を目指し、取扱う問題に応じて数理最適化手法と列挙索引化手法を組み合わせつつ、モデル化及び実装を行なった。本研究は地域公共交通の計画、運用、政策決定（評価の側面も含む）それぞれの段階における検討に対して適用可能なものであり、本研究成果をパッケージで活用することにより、地域公共交通のトータルコーディネートのための補助線を引くことが可能になる点が、研究全体を通じての成果と言えよう。以下に、各章における成果について簡単にまとめる。

6.1.1 地域公共交通の計画手法に関する現状と課題

第 1 章では、需要が縮退していく中での地域公共交通のあり方について整理した。対象エリアの輸送密度に応じて適切な輸送モードが異なり、かつ輸送モードによって需要の取扱い方と計画検討の方向性が異なることを示すとともに、公共交通の計画・運営・政策判断の各段階において地域公共交通が抱える課題について言及した。そして、規範的予測技法に基づく数理的な解析・予測に基づく公共交通計画の必要性と、本研究の着眼点を示した。

特に、地域ネットワークをひとつのシステムとして捉え、最適なサービスのあり方を規範的予測結果に基づき検討することの重要性と、地域公共交通の計画分野において規範的予測結果に基づく計画論が確立されていないことに対する課題認識を整理した。

6.1.2 公共交通の設計と実装に関するレビュー

第 2 章では、公共交通の各検討段階における研究動向を整理すべく、公共交通に関する既往研究を体系的に整理し、本研究の位置づけを明確化した。

公共交通に関する需要・供給の両側面における既往研究を整理するとともに、需要・供給における意思決定を同時に取扱うことができる二段階最適化問題に関する研究についてレビューを重点的に行った。また、二段階最適化問題の解法アルゴリズムとしてのメタヒューリスティクス手法の整理を行い、恣意性の混入の少なさと近傍設計が不要である点から CE 法の比較優位性を示した。また、近年の計算機性能の向上により実用レベルに耐えうる性能を有するに至った BDD/ZDD による列挙索引化手法の研究開発動向とその工学的応用の状況について整理した。

一方で、計画した公共交通施策は行政の予算等の各種制約を踏まえると、必ず実施優先順位を検討する

必要があるという観点のもとで、公共交通が有する「公平性」と「効率性」という2つの観点に関する研究を整理するとともに、公共交通需要の顕在化率を評価することで効率的に公平性の確保を進めている研究事例についてレビューを行った。

6.1.3 構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援

第3章では、需要が疎な地域におけるデマンド交通や協働型交通といった需要応答型交通の効率的なオペレーションのあり方を検討すべく、運行経路と運転手割り当てを列挙索引化手法であるZDDにより解析を行う手法の提案と、簡易ネットワークにおける数値計算、更には陸前高田市生出地区で実施した協働型交通サービス実証実験を例に、実規模ネットワークへの適用可能性の検証を行った。

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、一度ZDDを構築しておけば、グラフ構造が変わらない限り膨大な実行可能解から即座に索引化することができ、データベースの効率的な構造化処理が可能となった。このように全ての解を列挙することで、需要応答型交通の実運用において課題とされてきた、動的に変化する需要分布と制約条件に合わせた運転手の割り当てと運行経路の探索を行うことを可能にした点が大きな成果である。これは、例えば突然の通行止の発生や時間制約の強い移動、急なキャンセルの発生等、運行計画の変更にリアルタイム性が求められる場面においてその威力を発揮すると考えられる。また、列挙解を用いることにより、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もうひとつの成果と言える。

特に、デマンド交通については、個々のニーズに対し漏れなく的確に対応する必要があり、最適化計算で処理すると計算コストが大きくなることが懸念される。このように需要を非集計として取扱う交通モードの運行計画を検討する際には、全ての可能性を列挙し、状況に応じて即座に最適解を索引できる技法の優位性は高いと言える。

本研究の活用場面については、特に人口高密度地区等の都市部においては、簡易ネットワークで取扱ったようなグリッド型に近いネットワーク構造を有していることが多く、このようなネットワークでは経路の組み合わせ数が膨大となることから、列挙索引化による構造化処理の適用の優位性が明らかに示されると考えられる。ただし、単純なグリッド型のネットワークでは、現在グリッド数 $n = 26$ までの数え上げに成功しているが、それ以上の規模では計算できていない状況にある⁹⁴⁾。

一方で、地方部で導入されているデマンド交通については、ネットワーク構造が都心部と比較して疎であることに加え、地元交通事業者の長年の運転経験が活用できること等の理由により、運行経路の検討においては、必ずしも列挙索引化技法の導入を必要としない場合も考えられる。しかしながら、本研究で扱ったようなシンプルなネットワークでも経路の列挙数は膨大であったことから、この中から適切な運行経路を感覚的に抽出することは難しい場合も考えられる。ただし、今回取扱ったような線形に近いネットワーク形状での構造化処理を行う場合、経路の重複が多数発生するため、グラフ構造の階層化に伴う計算コストの増大がネックとなる点には留意が必要である。

また、利用者の影響度把握によるサービス設計については、実装に向けた課題は残存するものの、各利用者の利用がネットワーク全体に与える影響については感覚的に把握しづらい場面も多いため、地方部においても活用可能なケースはあるものと考えられる。特に、全解の分布が把握できることによる目的関数値のロバスト性の把握は、全解を列挙することの大きなメリットであり、道路ネットワークの信頼性評価等、交通事業の運営以外でも活用のフィールドは考えられる。

6.1.4 構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画

第4章では、需要が疎な地域のバス路線のサービス設計を行うための最適化問題の定式化を Szeto and Jiang(2014)⁶⁷⁾ 及び Ceder et al.(2015)¹¹⁾ が提案した二段階最適化問題を参考に行い、CE法とZDDの組み合わせによる解法アルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムは、既往のCE法の適用例では実現されていなかった、経路を明示的に取扱った確率分布の設定について、ZDDを用いた高速列挙・索引化による構造化処理と組み合わせることによって可能にした点が最も大きな特徴である。

提案手法については、簡易ネットワークにおいてCE法の主要パラメータ（サンプル数及びエリート戦略抽出率）に対する目的関数値及び計算時間の感度分析を行い、各パラメータの妥当な設定範囲に関する検討を行なった。また、実規模ネットワークへの適用に関しては、震災を経て大きく需要分布及びネットワーク形状が変化しつつある陸前高田市を対象に、震災前～震災後～将来それぞれの需要分布・ネットワーク条件のもとで適切なバス路線網の形状について検討した。検討結果は感覚的にも概ね妥当な内容となっており、計算時間についても現実的な計算時間の中で処理されたことから、今後他の被災地域における公共交通ネットワークの検討や、人口減少によりバス路線網の効率化が求められている地域への適用や、南海トラフ等今後災害による被害が想定される地区における被災後の復旧計画の事前検討等、活用の裾野は広いと考えられる。

6.1.5 需要顕在化指標を用いた公共交通施策の戦略的な展開

第5章では、行政セクターにおける予算制約に伴い、公共交通施策の中でもその施策が有する公平性と効率性という2つの観点から整備優先順位を検討し、その事業が実施目的に対して妥当なものかどうか社会的合意を得る必要があるという問題意識のもと、施策効果が得られそうなターゲットを戦略的に選定する手法の重要性に着目した。戦略的なターゲットの選定に当たっては、ある程度まとまった潜在需要が見込まれ、公共交通の整備やサービス変更、外的インパクト等によって効率的に公共交通需要の顕在化が図られるか否かという点から評価を行うべきであり、本研究では竹内・山田(1991)¹³⁶⁾ が提案した路線ポテンシャルの考え方を基本に、効率性評価モデルであるDEAを用いて需要顕在化評価モデルの改良を行った。

また、提案モデルを陸前高田市に適用し、計算結果を元にモデルの適用可能性について検証を行った。需要顕在化評価の結果、それぞれ特徴的な交通特性・地域特性を有する5地区が優位集合（他地区にとつてのベンチマークになる地区）として選定され、従来の線形回帰による需要顕在化評価では実現し得なかった、地区の異質性を包含した評価がDEAによって可能になったことがひとつの成果であると言える。また、計算結果については、感覚的な評価には留まるが、現状の公共交通ネットワーク等の実情を鑑みると概ね妥当であることも確認した。

更に、現行サービスに対してデマンド交通のサービス変更を行った場合の需要の顕在化動向について、DEAとMalmquist指数の組み合わせにより検証を行った。その結果、需要顕在化効果は地区によって大きくばらつくことが示されており、そのばらつきの要因として、DEAの入出力変数で用いた社会経済指標及び公共交通関連指標が大きく寄与していることが明らかとなった。また、Malmquist指数の構成指数であるCU指数（フロンティアへのキャッチアップ効果）とFS指数（フロンティア自体の改善効果）を比較するとCU指数が卓越する結果となった。

同様に、将来の復興事業の完成に伴う需要分布の変動に伴う潜在需要の変動についても、同手法を援用

して検証を行った。その結果、FS 指数が改善し、フロンティア上の地区の需要顕在化水準が更に改善する一方で、需要顕在化が進まない地区との格差が増大する傾向が伺える結果となり、上述のサービス改変のようにキャッチアップを促進する施策との組み合わせが有効である可能性が高いという知見が得られた。

6.2 被災地復興への貢献と課題

本研究においては、規範的予測技法に基づく計画策定の必要性が高い、被災後の地域公共交通計画の策定の場面を想定し、各テーマにて開発した分析手法について、陸前高田市をフィールドにケーススタディを行い、その適用可能性について検証を行った。ここでは、計画、運用、政策決定それぞれの視点から、被災地における交通課題の実態と、本研究の知見として得られた規範的将来像との比較の中で、復興期の公共交通のあり方について考察を加える。

6.2.1 地域公共交通の計画

(1) 集中復興期前半（2012 年ごろ）まで

バスネットワークの形成計画に関しては、第4章の震災後ケースの分析結果より、暫定市街地を核とした放射状のバスネットワークの形成が望ましいことが確認された。一方で、実際に整備されたバスネットワーク形状は、放射状ネットワークを基本にしつつも、公平性の観点から非効率なルートを形成している箇所もあり、事業効率化の追及の面から考えると、改善の余地が残っていたことがわかる。しかしながら、これは応急仮設住宅や主要施設が分散して立地したことや、工事用車両が通行する関係で幹線道路をバス路線に設定できなかったこと等、震災後の土地利用や道路条件の制約下でネットワーク計画を検討せざるを得なかったことに起因しており、バス路線の最適化検討のみで取扱うことができる問題ではない。

この問題解決に当たっては、復興途中の暫定的な都市機能の配置計画が、地域公共交通でのアクセス性の確保の観点から検証されてこなかったことが課題として挙げられる。従って、例えば、震災後の応急仮設住宅の候補地選定や、工事用車両のルーティング計画等を検討する際には、同時に整備する地域公共交通の整備コストや利便性の観点からも評価を行い、分野横断的に適切な配置の計画を検討することが重要になる。

(2) 集中復興期後半から復興・創生期にかけて

上記の復興期前期までの検討課題については、復興期後期においても同様に課題となっている。第4章の将来ケースの分析結果からは、将来にかけて都市機能が低密度分散化することにより、バス路線についても、それに追随する形でネットワーク密度が疎になることが示されている。これは、現在計画されているまちの完成形を固定とすれば最適なバスネットワーク形状と言えるが、都市機能がより高密度化することによって、バス路線の改善の余地が残っている可能性も否定できない。

そのため、例えば将来の施設集約パターンを変更した状態（この状態は二段階最適化問題におけるインプットデータである OD 需要分布を変更することで表現する）のもとで、最適なバス路線を検証する等、復興後のまちづくり計画とバス路線計画を一体的に取扱い、中長期的な地域公共交通の維持管理コストの観点も鑑みた復興を支援する交通まちづくりの計画が必要となる。つまり、中村(2011)¹⁴⁵⁾が指摘している通り、復興に伴う道路整備や土地利用規制の誘導、土地の所有権の移管、公共施設の再配置等と同時に、バス路線・停留所の設定及びバス路線を補完する交通機能（例えば、デマンド交通等）についての基本方針を盛り込んでおくべきであることが、本研究成果からも確認されたことになる。

6.2.2 地域公共交通の運用

第3章の生出地区を対象とした分析結果より、集落単位での輸送オペレーションに関しては、概ね、地域住民の経験と勘に依存した輸送結果と列挙索引化による計算結果が整合していたことが確認された。しかしながら、利用者が増えた場合やドライバーの配置が変わった場合、外部環境が大きく変わる場合（突発的な通行止の発生や、突然のキャンセル等）に対応することを考えると、経験や勘による判断には限界があり、今回提案したような構造化処理技法の導入が必要になると考えられる。

また、今回取扱った「おいでみんなのバス」のように、需要追従型で全ての需要をドアツードアで輸送する形態を採る場合、車両の経路上から大きく離れている住民が追加的に乗車する場合等に、既存利用者に大きな時間コストを生じさせる可能性があることが、分析結果より確認されたことから、需要の適切な束ね方や乗客の時間コストを極力抑えるための誘導方法の検討が必要となる。なお、これらの内容については復興段階に依存せず、個別需要を輸送する際には共通して配慮すべき事項であると考えられる。

なお、被災地域は道路運送法第21条による実証運行が許可される期間が長く比較的フレキシブルな対応が可能であり、また「おいでみんなのバス」のような道路運送法適用除外の運行態様であれば大きな問題にはなりにくい。道路運送法第4条許可による本格運行の場合、停留所の新設・廃止、運賃の変更、運行エリアの変更等に時間を要する点がボトルネックとなり、結果的にオペレーション部分のリアルタイム性の追求が全体として大きな意味を持たなくなってしまう可能性もある。運行計画を策定し地方運輸局に許可申請を行う際には、運行時に必要となる自由度を想定し、オペレーションのリアルタイム性が十分に発揮できるようにしておくことも実運用上は重要である。

6.2.3 地域公共交通の政策評価

(1) 集中復興期前半（2012年ごろ）まで

第5章の現況ケースの分析結果より、公共交通需要の顕在化に当たっては、単に交通機関を整備するだけでなく、その後の利用促進策の充実度が大きく影響することが確認された。つまり、陸前高田市において震災後、新たな交通モードを導入するたびに実施していた仮設住宅等での説明会が有効に機能していることが確認される結果となった。また、デマンド交通の導入が図られてない地区の中にも、デマンド交通型地区を優位集合に設定している地区もあり（例えば、市内生出地区等）、各地区の需要顕在化が有効に図られる交通モードを把握しつつ、導入エリアを選定することの重要性も確認された。

一方で、浸水区域外に立地している地区等、震災の被害が比較的小さかった地区については、交通モードの追加的導入が図られず、むしろ震災前と比較して不便になった地区も存在している。そのような地区は、移動需要が相対的に潜在化する傾向にあることも確認されている。持続可能な復興まちづくりを推進するためには、震災被害の大きさだけでなく、需要顕在化率の地域間バランスに配慮しつつ、施策展開の優先順位を検討することが重要であることが伺える結果が得られた。

(2) 集中復興期後半から復興・創生期にかけて

第5章の将来趨勢ケースの分析結果より、現行の地域公共交通サービスが継続されたまま現在計画されている復興まちづくりが推進されると、需要顕在化に関する地区間格差が広がり、現在需要顕在化が進んでいる地区はより顕在化が進み、そうでない地区はその動きにキャッチアップできない状況が想定されることが確認された。この状況を回避する方法として、ひとつは地域公共交通のサービス改善を将来にかけ

て追加的に行うことで、フロンティアへのキャッチアップ効果を高めることが考えられる。

しかしながら、計画の項目でも述べたとおり、このような対策は、飽くまでも都市機能の配置が固定であるという前提に基づいているため、都市機能の配置が変わることで、更なる需要顕在化が進む可能性もある。本研究においては、将来ケースについてはデータの制約上、趨勢シナリオしか分析ができていないが、例えば、将来にかけてまちのコンパクト化が進んだ場合も追加的に分析ケースとして設定し、趨勢ケースとの比較の中で、まちづくりの面から需要顕在化を誘導する可能性についても、検証する余地があると言えよう。

6.3 今後の課題

最後に本研究の内容に関する今後の課題を述べる。

6.3.1 共通課題

(1) 規範的予測技法に基づく計算結果の解釈について

最後に、本研究全体のテーマと言える規範的予測技法に基づく計算結果の解釈について考察を加える。本研究では、各章ともある理想的な状況を想定し、それに向けた障害やキーを検証することで地域公共交通の計画・運営・政策判断を下すアプローチを提案している。この理想的な状況は、地域全体の公共交通ネットワークをひとつのシステムとして捉え、俯瞰的な視点から予測したものであり、経験や勘、もしくは探索的予測技法に基づく対症療法的な手法からの脱却を図ったものと言える。しかしながら、ここで示した規範的な将来像は、地域公共交通の市場にのみ着目し、ある与えられた評価基準のもとでの規範的な将来像であり、地域社会全体の中ではマイオピックな規範性を扱っている点に留意が必要である。

本来、地域公共交通に関する意思決定は交通市場内で閉じたものではなく、地域の社会経済活動やまちづくり、医療・福祉、観光振興、観光、防災等、他の分野との兼ね合いの中で検討されるべき事項であるが、本研究で取扱ったマイオピックな規範性のもとではこれらの影響が切り離されている状況にある。そのため、クロスセクター効果¹⁴⁷⁾として、地域公共交通が存在する（存在しない）ことにより、各分野において追加的に必要となる（割愛できる）対策に着目する等、地域公共交通が生み出す価値を他分野も含めて確認し、社会全体での事業効率をモニタリングしつつ、分野間の予算やリソースのバランスを検証するプロセスが、本研究で取扱ったプロセスの上位の意思決定として必要となる。

換言すると、本研究は、図 6.1 に示すように、社会全体の中で地域公共交通部門の資源配分が行われた後に、サービスの計画者と需要者という 2 人のプレイヤーから見た、最適なサービス設計を検討するためのツールであるという位置づけである。そのため、分野横断的な意思決定が行われた上で具体的なサービス検討を行う際の計画手法としての有効性は高いが、本研究における提案技法によって得られた政策的含意そのものについては分野横断的ではないため、本研究による分析結果を、再度分野間の資源配分の検討にフィードバックする等の対応が必要となる。

(2) データセット作成の労力

各章ともに、モデルにインプットするデータセットの作成が必要となる。第 3 章・第 4 章については、ベースとなるグラフ構造の構築（リンク・ノード情報の設定）が必要となり、取扱う規模が大きくなると当然データ構築の労力も大きくなる。また、取扱うシナリオに応じてネットワークの緒元を外生的に変更する処理も必要となる。

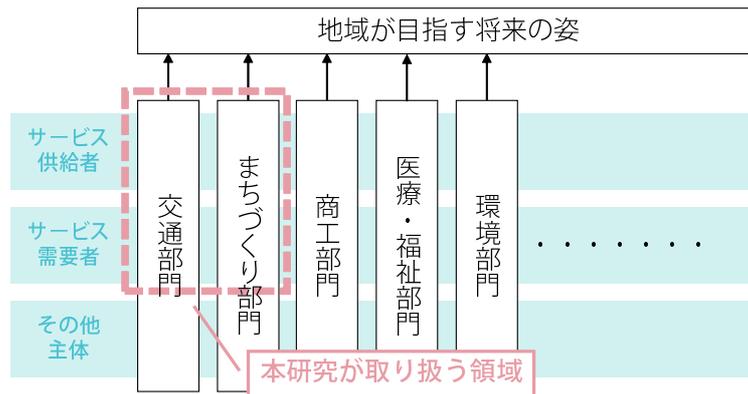


図 6.1 地域社会全体における本研究が取扱う領域

また、第 4 章については、グラフ構造の情報に加え、ゾーン間の OD 需要量をインプットする必要がある。取扱うシナリオに応じた OD 需要量を別途推計する必要がある。併せて、運用車両の平均速度や平均停車時間、運用する車両の台数及び容量、路線長の上限・下限距離等については、適用する地区の実情に合わせて変更が必要なポイントであり、関係者へのヒアリング等を踏まえ、現実的な値を外生的に設定する必要がある。

第 5 章については、公共交通の利用に影響を及ぼす要因と公共交通の顕在需要量を取扱うシナリオ別に設定する必要がある。前者については統計データ等から入手できる指標以外に、路線図や時刻表の調査や、アンケート調査を実施しなければ入手できない指標もある。また、後者については、利用実態調査もしくはシミュレーションが必要となる。採用する指標によっては調査規模が大きくなることもあることから、適用する地区の実態を鑑みつつ、現実的に入手可能な変数の選定を行うことが重要である。

(3) バス路線ネットワーク検討に当たっての計算結果の取扱い

第 1 章でも述べたとおり、規範的予測技法に基づく検討結果は、公共交通サービスをアドホックなものにしないために必要な情報である。しかしながら、住民・交通事業者・行政それぞれの事情や予算制約、政治的制約、倫理的問題等により最適案がそのまま適用案になるということではなく、結果の解釈には留意が必要である。全体を俯瞰し、建設的な話し合いをするための議論の補助線として結果を活用するという基本的なスタンスを忘れてはならない。

6.3.2 構造化処理技法を用いたデマンド交通の運行支援

ZDD と FBS を用いた列挙索引化については、単純な経路の列挙のみならず、湊 (2012)¹⁶⁶⁾ や川原・湊 (2012)¹⁰⁵⁾ が整理しているように様々な列挙問題に応用することが可能であり、本研究の提案手法に関する応用の方向性についていくつか提案する。これらについては今後の課題として取り組むこととしたい。

(1) 経路列挙のバリエーション展開

経路列挙のための ZDD の構築においては、各ノードの次数及び連結成分番号のみを記憶させればよかったが、これらの情報に加えて、起点からの累積リンク数やリンク重み係数（例えば本研究の試算にて取扱ったようなリンク所要時間等のインピーダンス情報）を各ノードに記憶させることにより、例えば走行時間や距離、通過停留所数、車両の定員等の制約を加えた上での経路の列挙も理論上可能になる。

また、このような拡張を行うことで、例えばデマンド交通の出発地から目的地まで到達する場合の移動

欲求発生時間と達成時間の差（つまり利用者にとっての利便性）や、単位時間におけるバス 1 台当たりの需要処理数（つまり交通事象者にとっての採算性）を目的関数にとった経路列挙も可能になる。

なお、本研究ではサイクルの発生を経路の不成立条件としたが、運行便の目的関数と需要発生パターンによっては、サイクルの発生を許容し、循環型路線での送迎を採用した方が最適な経路となり得ることも考えられる。この点に関しては、サイクルを許容するハミルトン経路を許容する終了条件を設定することにより、ZDD を用いた表現が同じく可能である。

(2) 列挙索引化の効率化

運転手割り当て問題においては、木の大きさに上限を設けた解析に計算コストが掛かっていることが確認された。この原因として、グラフ集合演算によって大き過ぎる木を含む森だけを除去する処理に時間を要していることが挙げられる。例えば、FBS で全域木を列挙する過程で、各連結成分に属す頂点の重みの和を同時に計算しておき、その大きさが最大値を超えないものだけを列挙することで計算コストが抑えられる可能性があることから、計算速度の面からの比較検討を今後進めたい。

(3) 影響評価指標としての活用可能性

ZDD による列挙解についてはグラフ構造における各個人の影響評価指標として活用できる可能性を示した。しかしながら、ZDD ではグラフ構造に付与されたウェイトの高速圧縮は可能であるが、ウェイト値の出力処理に多大な時間を要する。現に第 4 章で取扱った簡易ネットワークでは目的関数値（所要時間）を評価指標として活用し影響評価を行うことができたが、ケーススタディで取扱ったネットワークでは出力処理が現実的な時間では困難であり、現行のアルゴリズムでは列挙数以外の指標を用いることが難しい。このような出力処理の効率化については今後の課題として残る。

(4) グラフ構造の簡略化

本研究では、実ネットワークにおける経路列挙の際に、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。しかし、この手法では取扱うグラフ構造が大きく拡大するため、計算効率が低下する欠点がある。ネットワーク形状にも依存するが、現在、重み情報が付与されているグラフ構造の場合、ノード数が 200 弱に達すると、家庭用 PC では計算が困難となることが確認されている。また、現在の ZDD の処理系においては、効率の良い並列処理の方法についても課題が残る状況にある¹⁶⁷⁾。

よって、今後の改良の方向性としては、設定するグラフ構造自体の工夫がまず考えられる。例えば、ZDD 構築時の次数制約を緩和する対応、入次数と出次数に分けて有効グラフで表現する対応、PP 調査等から得られる人々の移動実態を踏まえて冗長な階層化を削除していく対応等が考えられる。また、利用者を組合わせ集合ではなく順列として扱うことにより、後述する SeqBDD⁵⁰⁾ の適用の可能性も考えられる。

(5) 時間拡大ネットワークへの拡張

本研究では、デマンド交通のある 1 便に着目して運行経路を検討する静的なアプローチにとどまっているが、実社会におけるデマンド交通の運行においては、利用者間の調整を図りつつ運行開始時間を変動させたり、利用者が利用便を変更させたりすることがある。このような場合、運行便を時系列で捉え、前後の運行内容を踏まえて当該便の運行経路の検討することが必要になる。時系列での最適化を含めた検討を行うためには、例えば時間拡大ネットワーク上の経路を ZDD で表現する等の動学化の工夫が必要になると考えられる。

しかしながら、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（例えば、 ab, ba ）や、ノードの重複（ $aba, abcba$ ）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。

同問題への対応のひとつとして、Loekito et al.(2010)⁵⁰⁾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。また、同様の制約をリンク自体に禁則処理を課すことで表現する方法も考えられる。このような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。

ただし、リンク重複を許容した経路列挙をノードの符号化により行う場合、1時点ネットワークの段階で既にネットワークが階層化されることになるため、そのまま時間拡大ネットワークに拡張することが難解である。上述したような、有効グラフの表現等、グラフ構造の簡略化と合わせた検討が必要となる。

(6) 列挙アルゴリズムの精査

本研究では既往研究において優位性が確認されているFBSを適用してZDDを構築したが、湊(2012)¹⁶⁶⁾が指摘するように、FBSはどのような問題についても汎用的なアルゴリズムとはなっていない。グラフの種類によっては、従来手法であるApply演算が効率よく解ける問題も存在しており、クリーク列挙のZDD生成についてはCoudertの方法¹⁸⁾の性能の高さが確認されている。また、非常に疎なネットワークにおいては、分枝限定法や逆探索法等のオーソドックスな列挙手法を用いたほうが効率的な場合もあり、個々の問題それぞれについてアルゴリズムの吟味が必要である。

また、本研究で活用したGraphillionは利便性の高さから多くのZDD研究において活用されているが、列挙途中段階でのフロンティアサイズを抑制することを考えると、より柔軟な問題解法の設計が可能なC++ライブラリTdZddの適用が有効となる可能性が戸田ら(2017)¹⁴⁰⁾により指摘されていることから、今後活用の可能性について検討を深める。

6.3.3 構造化処理技法を援用した解法アルゴリズムに基づくバス路線計画

(1) 路線間の競合性の評価

本研究においては、上位問題の解法アルゴリズムの開発に主眼を置いたことから、モデル内で各バス路線を独立に扱い、路線をカスケード的に決定する簡略的な手法を採用した。このような手法は交通量配分における分割配分と類似した考え方であり、先に決定した路線の需要は後に決定する路線の需要の動向に左右されないことになる。本手法は実務的な観点からすると操作性が高く、かつ結果の解釈が比較的容易であるというメリットがあり、社会実装の面では比較的優れた手法と言えよう。また、バス路線の整備優先順位を検討する上では有用な手法と考えられる。

しかしながら、路線間の競合を表現できない点は課題として残るため、路線数が増大した際には図6.2に示すように、上位問題で対象路線を全てまとめて求解し、下位問題においても全路線を同時に扱って需要配分を行うアプローチも必要になる。分析対象エリアにおいて想定するバス路線網の密度に応じた手法の使い分けが必要である。

また、今回設定した二段階最適化問題は上位問題で設定された路線について、下位問題で各利用者の利用可否の判断と需要配分を行う流れでアルゴリズムを構築しているが、本来であれば下位問題で決定した

上位問題

- 所与のノード間OD、ネットワーク接続条件のもとでバス路線をr路線同時に整備
- 各路線はそれぞれ独立に生成（レイヤを分ける）

下位問題

- 上位問題で設定されたバス路線について、ダミーリンクを加えて階層化ネットワークとし、需要配分を行う（乗り換えも評価できる）
- 交通機関選択については需要モデルにて表現

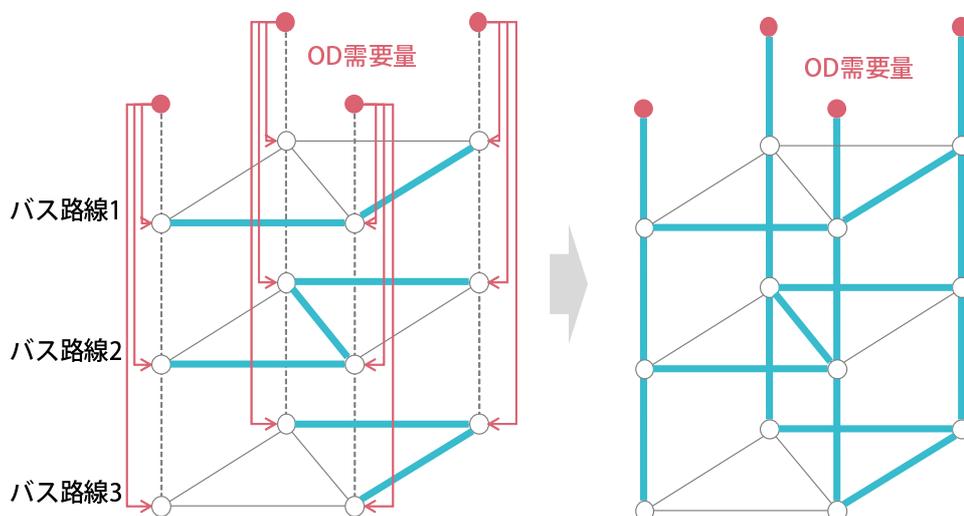


図 6.2 路線間競合を表現した二段階最適化問題の設定イメージ

OD 需要については、再度上位問題のインプット情報として使用し、両者が均衡するまで繰り返し計算を行う必要がある。今回定式化の際に参考にした Szeto and Jiang (2014)⁶⁷⁾ 及び Ceder et al.(2015)¹¹⁾ のモデルでも均衡の考え方は導入されていることから、均衡での求解についても今後検討が必要である。

(2) 経路列挙への展開

本研究ではバス路線を連結グラフに見立ててネットワーク計画を行ったが、本来であれば運行経路として取扱う必要がある。運行経路として取扱うことができなかつた理由は、ZDD 単体では重複を許す経路の列挙ができず、重複を表現しようとするグラフ構造の階層化が必要となり、計算コストが大きく増加するという消極的理由と、地方部においては起終点となる停留所が不明瞭であり、起終点の位置を最適化問題の中で出力する必要があり、バス路線の起終点ノードを限定できないという積極的理由がある。

なお、連結グラフにより表現する場合においても、端点と中点で次数の制約を変えることにより、途中で路線の分岐がない、一筆書きでの連結グラフを表現することも可能であるが、陸前高田市のような需要が疎な地域においては、交通事業者のリソースの不足等により 1 台の車両が迂回や同経路の往復を繰り返して利用者を輸送することが多く行われているため、分岐を許容するグラフが必要となる場面も多い。こうした中山間の実情を鑑みると、本ケーススタディの結果については実運用の検討において示唆を与えるものとなっているが、対象地区の状況によっては非効率な運行を求める結果となる可能性もあり、グラフ列挙に関する制約に関しては、地域の実情を踏まえて適切なものを選択する必要がある。

(3) 局所解に陥る可能性について

CE 法と ZDD の組合わせに関しては、CE 法における確率分布設定の際に、必ずしも最適なノード選択がなされるという保証がないため、局所解に陥る可能性が残されている。この問題は CE 法の手法そのものが抱えている課題であるが、例えばシミュレーテッド・アニーリングのように改悪解も許容する探索を行うことで解消される可能性がある。また、武井・長江 (2015b) が指摘しているように、CE 法は局所

的な最適戦略に陥る可能性がある。CE法と比較して高い最適性を有している手法としては Gibbs cloner 法⁶³⁾もあり、今後援用の可能性について検証の余地がある。

更に、CE法における初期の確率分布の設定においても、今回のように一様分布を仮定するのではなく、最適解を効率的に探索可能な確率分布の設定の可能性もあると考えられることから、今後適切な設定方法について検討を深めたい。

(4) 大規模ネットワークへの対応

構造化処理技法のアルゴリズムにおいて、列挙手法のパートについては ZDD を適用しているため、ZDD に関する課題は上記と共通である。また、実ネットワークへの適用に際して、今回分析対象とした陸前高田市においては 25×25 の OD ペアを扱い、現実的な計算時間での処理が可能であったことが確認された。この程度の OD ペアであれば実用に当たって問題はないが、例えばゾーン数が増えた場合や、需要を非集計で取扱う場合等、OD ペア数が増え計算が大規模となる場合はメモリが不足することから、本手法について今後適用の幅を広げていくことを考えると大規模計算に耐えうるプログラムの開発が必要である。特に ZDD 演算のパートのうち、路線延長の上限・下限の中での索引列挙に掛かる計算コストの負担が大きい状態であるため、ZDD の構築・索引のバランスを再考する等、演算の効率化を検討する必要がある。

(5) 頻度ベースサービスへの適用

本研究では需要が疎な地域を対象とした分析を行ったため、公共交通を時刻表ベースサービスとして取扱った。しかしながら本手法を都市圏での分析に適用する場合、時刻表ベースサービスでは計算コストが非常に高くなってしまふことから、二段階最適化問題の定式化において、下位問題の部分を頻度ベースサービスで整理しなおす必要がある。その際には例えば hyperpath を ZDD で列挙する等の工夫が必要となる。また、hyperpath を用いることにより、路線管野乗り継ぎの表現も可能になる。

また、時刻表ベースサービスで分析する場合についても、本来であれば下位問題は単純なリンク所要時間を用いた最短経路探索はなく、ノードに頻度情報を持たせることにより停留所での待ち時間を考慮した Transit Passfinder Algorithm²⁴⁾により定式化するほうが望ましい。なお、ZDD での列挙に当たっては、リンク情報だけでなくノード情報も列挙過程において記録することが可能であるため、本研究で提案した構造化処理技法の枠組みはそのまま活用できるものと考えられる。

(6) 車内人数の考慮

今回開発したアルゴリズムは、車両ではなく OD ペア別に容量を設定しているため、本来考慮すべき車両容量が考慮されていないが、実際の運用に当たっては、車両容量をオーバーすることによる積み残しの発生や代車の手配等を考慮しなければならない。経路列挙 ZDD については、ノードに車内人数を記録していくことによって車内人数と車両容量の関係性が把握可能であるが、今回バス路線の表現において取扱った全域木 ZDD については起点・終点の概念がないため、車内人数の情報の組み入れ方については工夫が必要となる。例えば、各木の根ノードを起点とし、根ノードからの累積利用者数を記録することで車内人数を表現することも考えられることから、今後実装の可能性について検討を進める。

(7) 需要モデルの精緻化

本研究では上位問題と下位問題を接続する需要モデルについて、バス利用時の所要時間のみを説明変数にとった交通機関選択モデル（バス・バス以外の二項選択）を採用した。本研究では最適化問題全体のモ

デルの挙動を確認することを目的としたため、需要モデルは簡易な式形としたが、本来であれば、停留所での待ち時間や運行便数、停留所までのアクセス距離、路線の複雑度等、様々な要因により交通機関選択はなされるため、需要モデルの精緻化を今後行う必要がある。

6.3.4 需要顕在化指標を用いた地域公共交通施策の戦略的な展開

(1) 入出力変数の選定方法

DEA による分析は、設定する入出力変数によって結果及びその解釈が大きく変わる。そのため入出力変数、特に地域公共交通の利用に影響を及ぼす要因である入力変数の選定方法が非常に重要となる。本研究ではケーススタディ対象地区でのデータの利用可能性を鑑み設定したが、今回の設定方法が絶対的なものではない。

例えば、本研究ではバスの運行頻度を入力変数のひとつとして採用したが、実際には、バスがいくら頻度高く運行されていても、沿線住民の生活スタイルに合致していなければ利用は進みにくい。逆に運行頻度が少なくても、バスのダイヤに合わせた生活が定着していれば満足度の大きな低下は起こらず、一定の利用者数が確保できるということもある。この場合、運行頻度ではなく、例えば生活スタイルへのダイヤの適合性を示す指標（通院が集中する時間帯に病院行きのバスが運行されているか否か等）のほうが入力変数として適切である可能性もある。また、このようなバス利用の影響要因は時代によって変わる可能性があり、被災地においては復興段階によって変わる可能性もある。その時々々の社会厚生のあるあり方を鑑み、データの取得可能性を踏まえつつ入出力変数の選定を行うことが重要となる。

(2) モデル形態及びフロンティア設定の精査

現行モデルにおいては、モデルによって導出されたベンチマークが必ずしもその地区にとって実現可能な姿になっているという保証を定式化の際に組み込んでいない。解の実現可能性を担保するためには、評価対象を事前にクラスタリングの上、基本的にはクラスター内で優位集合を発見させるモデリングが必要になる可能性がある。例えば、今後の地域公共交通網形成計画等を参考に将来の公共交通の利用可能性を踏まえたクラスタリングを事前に行うことで提案内容の実現可能性を担保する等、今後の評価モデルの精緻化の際に参考にしたい。更に、本研究は先行研究等における知見をもとに、ラディアル測定による DEA (CCR モデル) をもとに評価モデルの定式化を行ったが、効率的フロンティアの考え方の精査 (例えば BCC モデル⁵⁾ の導入等) や非ラディアル測定も考えられる。

また、DEA のようなノンパラメトリック法に基づく評価は、トップランナーに対する相対比較により評価が行われることになるため、トップランナー以上の成長を前提としない評価となる点に留意が必要である。トップランナーを超える成長を前提とした評価のためには SFA 等のパラメトリック法を用いたフロンティア設定が必要になることから、今後その導入可能性を検証し、潜在需要評価において適切なモデルのあり方についても今後検討を深める必要がある。

(3) 費用対効果分析への適用

提案モデルでは変数の中で価格を扱っていない。これは、あくまで本研究では、公共交通の需要と供給のバランスから潜在需要を評価し、事業費の割り振りの優先順位については評価結果をもとにモデルのフレーム外で検討するというスタンスに基づいているためである。

しかしながら、今回使用した DEA はもともと事業主体の経営分析において活用されていた手法であり、各自治体における施策を費用対効果の面から評価する際にも活用可能な手法である。実際に、宮良・

福重¹⁷⁰⁾ や平井ら¹⁵⁵⁾ は DEA を用いて公営バス事業者の経営効率性の分析を行っており、その適用可能性については既に確認されていることから、DEA の費用対効果分析への拡張可能性についても今後検討を進める。

付録 A

将来発生集中交通量の設定

ここでは、陸前高田市バス路線最適化問題における、将来（2030年）シナリオの発生集中交通量の設定方法について整理する。発生集中交通量は、ゾーン単位の世帯数及び商業・公共公益施設の床面積に「大規模開発地区関連交通計画マニュアル 改訂版（平成26年）」¹¹⁶⁾の発生集中原単位を乗じることで設定した。表 A.1 に各数値の根拠資料を示す。

以降に各施設種別における発生集中交通量の設定方法をまとめる。

A.1 商業施設

A.1.1 面積

「高田・今泉地区土地利用計画（案）」¹⁸⁶⁾に記載されている業務系・商業の敷地面積（ロードサイド施設型及び商業・業務施設）をゾーンごとに集約することで各ゾーンの敷地面積を算出した。延床面積については、ロードサイド型は建ぺい率30%、街中商業型は建ぺい率50%として敷地面積より算出した。なお、市内に現存する商業施設のうち以下の3店舗については建築確認を経て建築されており、2030年時点での存続の可能性があることから、各ゾーンの延床面積に含めることとする。

- イオンスーパーセンター陸前高田店（2014年7月～、米崎町） 延床面積 5,986.44m²
- マイヤ竹駒店（2014年12月～、竹駒町） 延床面積 2,384.20m²
- マイヤアップルロード店（2012年3月～、米崎町） 延床面積 1,713.15m²

表 A.1 将来 OD 表作成における根拠資料一覧

項目	参考資料名
発生集中原単位	大規模開発地区関連交通計画マニュアル 改訂版（平成26年） ¹¹⁶⁾
敷地面積	高田・今泉地区土地利用計画（案）（2013年11月 陸前高田市） ¹⁸⁶⁾
人口・世帯数	住まいの復興工程表（2014年12月 陸前高田市） 防災集団移転促進事業住宅団地位置図（2015年1月 陸前高田市） 災害公営住宅建設予定箇所図（2013年6月 陸前高田市）
バス分担率	アンケート調査結果（2012年 東京大学）

表 A.2 各地区における自動車分担率

	矢作町	横田町	竹駒町	気仙町	高田町	米崎町	小友町	広田町
自家用車分担率	81%	86%	72%	77%	72%	74%	77%	87%

A.1.2 発生集中原単位

「大規模開発地区関連交通計画マニュアル」¹¹⁶⁾の商業施設（平日，三大都市圏周辺部及び地方都市）の発生集中原単位を用い，下式により算出した。

$$10,600 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \text{ (単位：人 T・E/ha・日)} \quad (\text{A.1})$$

ここで， α_1 は延床面積による割引率， α_2 は鉄道駅の距離による割引率である。

A.1.3 自動車分担率

陸前高田市企画政策課が2013年度に実施した「市民アンケート調査」より，大字別に設定した（表 A.2 参照）。

A.1.4 平均乗車人数

「大規模開発地区関連交通計画マニュアル」¹¹⁶⁾の商業施設（平日）の台換算係数 1.5 人/台を用いた。

A.2 公共公益施設

A.2.1 面積

「高田・今泉地区土地利用計画（案）」¹⁸⁶⁾に記載されている公共・公益施設用地の敷地面積をゾーンごとに集約することで各ゾーンの敷地面積を算出した。ただし，市役所については現時点で場所が確定しておらず，学校施設については現時点で統廃合の動向が流動的であるため，これらの施設については検討に含めず，コミュニティホール，病院，体育館，消防署を対象とした。延床面積については現時点で確定していない施設が多いことから，全施設一律建ぺい率 50% として敷地面積より算出した。

A.2.2 発生集中原単位

「大規模開発地区関連交通計画マニュアル」¹¹⁶⁾の事務所（平日，三大都市圏周辺部及び地方都市）の発生集中原単位を用い，下式により算出した。

$$2,200 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \text{ (単位：人 T・E/ha・日)} \quad (\text{A.2})$$

ここで， α_1 は商業床面積による割引率（全施設商業床は含まない仮定で算出）， α_2 は鉄道駅の距離による割引率である。

A.2.3 自動車分担率

商業施設同様の設定とした。

A.2.4 平均乗車人数

「大規模開発地区関連交通計画マニュアル」¹¹⁶⁾の事務所の台換算係数 1.4 人/台を用いた。

A.3 住居・集合住宅

A.3.1 人口・世帯数

陸前高田市が定めている将来フレーム及び地区別人口をもとに事業区域及び事業区域外の将来人口のコントロールトータルを確定（高台団地の戸数については「H26.12 住まいの工程表」をもとに更新）した。

●高田・今泉地区

「高田・今泉地区土地利用計画（案）」¹⁸⁶⁾に記載されている住宅系の敷地面積（住宅等及び集合住宅等）をもとに計画人口・世帯数をゾーン別に按分した。ただし、高田町内事業区域外のゾーンについては国勢調査夜間人口をもとに按分した。

●高田・今泉地区外

陸前高田市 Web ページにて公開されている「防災集団移転促進事業住宅団地位置図」及び「災害公営住宅建設予定箇所図」をもとに人口・世帯数を設定した上で、両事業による団地に居住しない部分については、人口・世帯数を国勢調査夜間人口に基づき按分した。

A.3.2 発生集中原単位

「大規模開発地区関連交通計画マニュアル」¹¹⁶⁾の住宅の発生集中原単位（7 人 T・E/戸・日）を用いた。

A.3.3 自動車分担率

商業施設同様の設定とした。

A.3.4 平均乗車人数

「全国都市交通特性調査（平成 17 年度）」の盛岡市における平均乗車人員（1.4 人/台）を用いた。

参考文献

- 1) Abdelghany, K., Hashemi, H. and Alnawaiseh, A: Parallel all-pairs shortest path algorithm: A network-decomposition approach, *Compendium of Papers CD-ROM, the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D. C., CD-ROM, 2016.
- 2) Aigner, D. J. and Chu, S.: On estimation the industry production function, *American Economic Review*, Vol. 58, pp. 826-839, 1968.
- 3) Aigner, D. J., Lovell, C. A. K. and Schmidt, P.: Formulation and estimation of stochastic frontier models, *Journal of Econometrics*, Vol. 6, pp. 21-37, 1977.
- 4) Aker, S. B.: Binary decision diagrams, *IEEE Transactions on Computer*, Vol. C-27, No. 6, pp. 509-516, 1978.
- 5) Banker, R. D., Charnes, A. and Cooper, W. W.: Some models for estimating technical and scale inefficiency in data envelopment analysis, *Management Science*, Vol. 30, pp. 1078-1092, 1984.
- 6) Barnum, D. T., Tandon, S. and McNeil, S.: Comparing the performance of bus routes after adjusting for the environment using data envelopment analysis, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 77-85, 2008.
- 7) Bekhor, S. and Prashker, J.: Stochastic user equilibrium formulation for the generalized nested logit model, *Transportation Research Record*, Vol. 1752, pp. 84-90, 2001.
- 8) Bryant, R. E.: Graph-based algorithm for Boolean function manipulation, *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-35, No. 8, pp. 677-691, 1986.
- 9) Caves, D. W., Christensen, L. R. and Diewert, W. E.: The economic theory of index numbers and the measurement of input, output and productivity, *Econometrica*, Vol. 50, pp. 1393-1414, 1982.
- 10) Ceder, A.: Public transport timetabling and vehicle scheduling, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service*; edited by William H.K. Lam and Michael G.H. Bell. Pergamon, pp. 31-57, 2003.
- 11) Ceder, A., Butcher, M. and Wang, L.: Optimization of bus stop placement for routes on uneven topology, *Transportation Research Part B*, Vol. 74, pp. 40-61, 2015.
- 12) Charikar, M. and Raghavachari, B.: The finite capacity dial-a-ride problem, *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 458-467, 1998.
- 13) Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E.: Measuring efficiency of decision making units, *European Journals of Operational Research*, Vol. 2, pp. 429-444, 1978.
- 14) Chriqui, C. and Robillard, P.: Common bus lines, *Transportation Science*, Vol. 9, pp. 115-121, 1975.
- 15) Chu, X., Fielding, G.J. and Lamar, B.W.: Measuring transit performance using data envelopment analysis, *Transportation Research Part A*, Vol. 26, No. 3, pp. 223-230, 1992.
- 16) Constantin, I. and Florian, M.: Optimizing frequencies in a transit network: a nonlinear bi-level pro-

- gramming approach, *International Transactions in Operations Research*, Vol. 2, pp. 149-164, 1995.
- 17) Cordeau, J.-F.: A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem, *Operations Research*, Vol. 54, No. 3, pp. 573-586, 2003.
 - 18) Cordert, O.: Solving graph optimization problems with ZBDDs, *Proceeding of ACM/IEEE European Design and Test Conference (ED & TC '97)*, pp. 224-228, 1997.
 - 19) Cowie, J. and Asenova, D.: Organisation form, scale effects and efficiency in the British bus industry, *Transportation*, Vol. 26, pp. 231-248, 1999.
 - 20) Daganzo, C. F. and Sheffi, Y.: On stochastic model of traffic assignment, *Transportation Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 253-274, 1977.
 - 21) De Boer, P. -T., Kroese, D. P., Mannor, S. and Rubinstein, R. Y.: A tutorial on the cross-entropy method, *Annals of Operations Research*, Vol. 134, No. 1, pp. 19-67, 2005.
 - 22) De Borger, B., Kerstens, K., Moesen, W. and Vanneste, J.: A non-parametric free disposal hull (FDH) approach to technical efficiency: an illustration of radial and graph efficiency measures and some sensitivity results, *Swiss Journal of Economics and Statistics*, Vol. 130, No. 4, pp. 647-667, 1994.
 - 23) De Cea, J. and Fernandez, E.: Transit assignment for congested public transport systems: An equilibrium model, *Transportation Science*, Vol. 27, pp. 133-147, 1993.
 - 24) Dial, R. B.: Transit pathfinder algorithm, *Highway Research Record*, No. 205, pp. 67-85, 1967.
 - 25) Dial, R. B.: A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol. 5, pp. 83-111, 1971.
 - 26) Färe, R., Grosskopf, S., Lindgren, B. and Roos, P.: Productivity changes in Swedish pharmacies 1980-1989: A non-parametric Malmquist approach, *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 3, pp. 85-101, 1992.
 - 27) Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. and Zhang, Z.: Productivity growth, technical progress, and efficiency changes in industrialized countries, *American Economic Review*, Vol. 84, pp. 66-83, 1994.
 - 28) Färe, R. and Grosskopf, S.: Network DEA, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 34, pp. 35-49, 2000.
 - 29) Fethi, M. D., Jackson, P. M. and Weyman-Jones, T. G.: European airlines: a stochastic DEA study of efficiency with market liberalization, *Seventh European Workshop on Efficiency and Productivity Analysis*, 2001.
 - 30) Feuerstein, E. and Stougie, L: On-line single-server dial-a-ride problems, *Theoretical Computer Science*, Vol. 268, No. 1, pp. 91-105, 2001.
 - 31) Fielding, G. J., Brenner, M. E. and Faust, K.: Typology for bus transit, *Transportation Research Part A*, Vol. 19, No. 3, pp. 269-278, 1985.
 - 32) Fisk, C.: Some developments in equilibrium traffic assignment, *Transportation Research Part B*, vol. 14, No. 3, pp. 243-255, 1980.
 - 33) Fukuda, D., Fujita, R. and Yaginuma, H.: Analyzing the effects of the rolling blackouts on railway service in the Tokyo Metropolitan Area after the 2011 Great East Japan Earthquake, *Journal of JSCE*, Vol. 1, pp. 479-489, 2013.
 - 34) Gao, Z. Y., Shun, H. and Shan, L.L.: A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems, *Transportation Research B*, Vol. 38, pp. 235-250, 2004.
 - 35) Ibarra-Rojas, O.J., Delgado, F., Giesen, R. and Munoz, J.C.: Planning, operation, and control of bus

- transport systems: A literature review, *Transportation Research Part B*, Vol. 77, pp. 38-75, 2015.
- 36) Inoue, A, Iwashita, H., Kawahara, J. and Minato, S.: Graphillion: Software library designed for very large sets of labeled graphs, *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, Springer, 2014.
- 37) Inoue, T., Takano, K., Watanabe, T., Kawahara, J., Yoshinaka, R., Kishimoto, A., Tsuda, K. and Minato, S.: Distribution loss minimization with guaranteed error bound, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, pp. 102-111, 2014b.
- 38) Inoue, T., Yasuda, N., Kawano, S., Takanobu, Y., Minato, S. and Hayashi, Y.: Distribution network verification for secure restoration by enumerating all critical failures, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 843-852, 2015.
- 39) Jaw, J.-J., Odoni, A. R., Psarafits, H. N., Wilson, N. H. M.: A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride Problem with time window, *Transportation Research Part B*, Vol. 20, No. 3, pp. 243-257, 1986.
- 40) Kawahara, J., Inoue, T., Iwashita, H. and Minato, S.: Frontier-based search for enumerating all constrained subgraphs with compressed representation, *TCS Technical Report Series A*, TCS-TR-A-14-76, 2014.
- 41) Kerstens, K.: Technical efficiency measurement and explanation of French urban transit companies, *Transportation Research Part A*, Vol. 30, No. 6, pp. 431-452, 1996.
- 42) Knuth, D.E.: The art of computer programming: Bitwise tricks and techniques; Binary Decision Diagrams, Vol. 4, No. 1, 2009.
- 43) Kroese, D.P., Porotsky, S. and Rubinstein, R.Y.: The cross-entropy method for continuous multi-extremal optimization, *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol. 8, pp. 383-407, 2006.
- 44) Kurai, R., Minato, S. and Zeugmann, T.: N-gram analysis based on zero-suppressed BDDs, *New Frontier in Artificial Intelligence*, Vol. 4384, pp. 289-300, 2007.
- 45) Kurauchi, F., Bell, M. G. H. and Schmöcker, J.-D.: Capacity constrained transit assignment with common lines, *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, Vol. 2, No. 4, pp. 309-327, 2003.
- 46) Lao, Y. and Liu, L.: Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 33, No. 4, pp. 247-255, 2009.
- 47) Le Clerq, F.: A public transportation assignment method, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-96, 1972.
- 48) Li, H. and Lim, A.: Local search with annealing-like restart to solve the VRPTW, *European Journal of Operational Research*, Vol. 150, pp. 115-127, 2003.
- 49) Lin, L. C., and Tseng, L. A.: Application of DEA and SFA on the measurement of operating efficiency for 27 international container ports, *Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 5, pp. 592-607, 2005.
- 50) 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.
- 51) Ma, T.-Y.: A comparative study of the cross entropy approach with the state-of-the-art simulation-based traffic assignment algorithms, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, pp. 749-757, 2012.
- 52) Maher, M., Liu, R. and Ngoduy, D.: Signal optimisation using the cross entropy method, *Transportation Research Part C*, Vol. 27, pp. 76-88, 2013.

- 53) Malmquist, S.: Index numbers and indifference surfaces, *Trabajos de Estadística*, Vol. 4, No. 2, pp. 209-242, 1953.
- 54) McFadden, D.: Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, *Frontiers in Econometrics*; edited by Zarembke, P., Academic Press, New York, pp. 105-142, 1974.
- 55) Minato, S.: Zero-suppressed BDDs for set manipulation in combinatorial problems, *Proceedings of 30th ACM/IEEE Design Automation Conference*, pp. 272-277, 1993.
- 56) Nguyen, S. and Pallotino, S.: Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks, *European Journal for Operational Research*, Vol. 37, pp. 176-186, 1988.
- 57) Nuzzolo, A.: Transit path choice and assignment model approaches, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service*; edited by William H. K. Lam and Michael G. H. Bell. Pergamon, pp. 125-164, 2003.
- 58) Prashker, J.N. and Bekhor, S.: Investigation of stochastic network loading procedures, *Transportation Research Record*, Vol. 1645, pp. 94-102, 1998.
- 59) Psaraftis, H. N.: A dynamic programming approach to the single-vehicle, many-to-many immediate request dial-a-ride problem, *Transportation Science*, Vol. 14, pp. 130-154, 1980.
- 60) Psaraftis, H. N.: An exact algorithm for the single-vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time window, *Transportation Science*, Vol. 17, pp. 351-357, 1983.
- 61) Ray, S. C. and Desli, E.: Productivity growth, technical progress, and efficiency changes in industrialized countries: comment, *American Economic Review*, Vol. 87, pp. 1033-1039, 1997.
- 62) Rubinstein, R. Y.: The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization, *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol.1, pp.127-190, 1999.
- 63) Rubinstein, R.: The Gibbs cloner for combinatorial optimization, Counting and sampling, *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol. 11, No. 4, pp. 491-549, 2008.
- 64) Shimamoto, H., Murayama, N., Fujiwara, A. and Zhang, J.: Evaluation of an existing bus network using a transit network optimization model: A case study of the Hiroshima city bus network, *Transportation*, Vol. 37, No. 5, pp. 801-823, 2010.
- 65) Schmöcker, J.-D., Bell, M. G. H. and Kurauchi, F.: A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, No. 10, pp. 925-945, 2008.
- 66) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal strategies: A new assignment model for transit networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 23, pp. 83-102, 1989.
- 67) Szeto, W.Y., Jiang, Y.: Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach, *Transportation Research Part B*, Vol. 67, pp. 235-263, 2014.
- 68) Takizawa, A., Takechi, T., Ohta, A., Katoh, N., Inoue, T., Horiyama, T., Kawahara, J. and Minato, S.: Enumeration of region partitioning for evacuation planning based on ZDD, *Proceeding of the 11th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management*, pp. 64-71, 2013.
- 69) Takizawa, A., Miyata, Y. and Katoh, N.: Enumeration of floor plans based on zero-suppressed binary decision diagram, *Proceeding of the 19th International Conference of the Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, pp. 275-284, 2014.
- 70) Tran, K. D., Bhakar, A., Bunker, J. and Lee, B.: Data envelopment analysis (DEA) based transit route temporal performance assessment: a pilot study, *Australasian Transport Research Forum 2016 Pro-*

- ceedings, 2016.
- 71) Vovaha, P. and Bekhor, S.: The link-nested logit model of route choice: overcoming the route overlapping problem, *Transportation Research Record*, Vol. 1645, pp. 133-148, 1998.
 - 72) Wang, J., Gao, X., Shi, J. and Li, Z.: Double unmanned aerial vehicle's path planning for scout via cross-entropy method, *Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, pp. 632-635, 2007.
 - 73) Wilson, N. H. M., Sussman, J. M., Goodman, L. A. and Higonnet, B.T.: Simulation of a computer aided routing systems (CARS), *Winter Simulation Conference IEEE Proceeding of the Third Conference on Application Simulation*, pp. 171-183, 1969.
 - 74) Wirasinghe, S.C.: Initial planning for urban transit systems, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service*; edited by William H.K. Lam and Michael G.H. Bell. Pergamon, pp. 1-29, 2003.
 - 75) Wordrop, J. G.: Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceeding of the Institute of Civil Engineers Part*, Vol. 1, No. 3, pp. 325-362, 1952.
 - 76) Yoo, G. -S., Kim, D. -K. and Chon, K. S.: Frequency design in urban transit networks with variable demand: Model and algorithm, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 403-411, 2010.
 - 77) Zhou, J. and Lam, W. H. K.: A bi-level programming approach-optimal transit fare under line capacity constraints, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 35, pp. 105-124, 2000.
 - 78) Zhou, J. and Lam, W. H. K.: Models for optimizing transit fares, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service*; edited by William H.K. Lam and Michael G.H. Bell. Pergamon, pp. 315-345, 2003.
 - 79) 饗庭伸: 災害復興から学ぶ, 都市をたたく, pp. 195-235, 花伝社, 2015.
 - 80) 青島縮次郎, 伊東弘行, 杉本直: 地方都市における身体障害者のモビリティと交通機関使い分け行動特性との関連分析, *土木計画学研究・論文集*, No. 17, pp.893-898, 2000.
 - 81) 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.
 - 82) 赤星健太郎, 高松瑞代, 田口東, 石井儀光, 小坂和義: 低頻度な公共交通網を有する地域の移動利便性の評価手法に関する研究, *都市計画論文集*, Vol. 47, No. 3, pp. 847-852, 2012.
 - 83) 朝倉康夫: 利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル, *土木計画学研究・論文集*, No. 6, pp. 1-19, 1988.
 - 84) 朝倉康夫: 交通計画におけるネットワーク最適化, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 38, No. 2, pp. 53-56, 1993.
 - 85) 天野光三, 銭谷善信, 近東信明: 都市街路網におけるバス系統の設定計画モデルに関する研究, *土木学会論文報告集*, No. 325, pp. 143-154, 1982.
 - 86) 荒谷太郎, 轟朝幸: マルムキスト指数を用いた都市間公共交通モビリティの時系列変化の要因分析, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol. 67, No. 5, pp. 939-945, 2011.
 - 87) 家田仁, 今岡和也, 白熊良平, 井藤俊英, 野地寿光: 地域公共交通サービスにおける時間的・空間的アクセシビリティ評価の試み(前編), *運輸と経済*, Vol. 74, No. 3, pp. 93-99, 2014a.
 - 88) 家田仁, 今岡和也, 白熊良平, 井藤俊英, 野地寿光: 地域公共交通サービスにおける時間的・空間的アクセシビリティ評価の試み(後編), *運輸と経済*, Vol. 74, No. 4, pp. 149-159, 2014b.
 - 89) 伊藤華, 井上祐馬, 湊真一: ZDD のトップダウン構築における変数順序付け法の実験と考察, *情報科学技術フォーラム講演論文集*, Vol. 30, No. 1, pp. 115-116, 2015.

- 90) 猪井博登, 新田保次, 中村陽子: Capability Approach を考慮したコミュニティバスの効果評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 167-174, 2004.
- 91) 井上紳一, 長江剛司: 全ての Simple Path を対象としたロジック型交通量配分法, 土木計画学研究・講演集, Vol. 55, CD-ROM, 2017.
- 92) 井上祐馬, 鈴木浩史, 伊藤華, 湊真一: グラフの部分集合を現す ZDD 構築のための変数順序決定ヒューリスティクス, 2016 年度人工知能学会全国大会 (第 30 回), 1D5-OS-02b-4, 2016.
- 93) 今泉孝章, 羽藤英二: 経路選択に着目した地点制御による道路維持管理手法と首都圏ネットワーク評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 51, CD-ROM, 2015.
- 94) 岩下洋哲, 宇野毅明: 「おねえさんの問題」の世界記録, 超高速グラフ列挙アルゴリズム (編: 湊真一, 著: ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト), pp. 103-116, 2015.
- 95) 内田賢悦, 加賀屋誠一: 積雪寒冷地における凍結防止剤の最適散布量決定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol. 800, pp. 87-100, 2005.
- 96) 栄徳洋平, 溝上章志: QoM 指標によるモビリティ水準の地域間比較手法の提案, 土木計画学研究・論文集, Vol. 25, pp. 109-119, 2008.
- 97) 枝村俊郎, 森津秀夫, 松田宏, 土井元治: 最適バス路線網構成システム, 土木学会論文報告集, No. 300, pp. 95-107, 1980.
- 98) NHK スペシャル取材班: 縮小ニッポンの衝撃, 講談社現代新書, 2017.
- 99) 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.
- 100) 岡本吉央: 列挙の基本と基礎的なアルゴリズム, 電子情報通信学会誌, Vol. 95, No. 6, pp. 477-483, 2012.
- 101) 奥山修司: おばあちゃんにやさしいデマンド交通システム, NTT 出版, 2007.
- 102) 加知範康, 岑貴志, 加藤博和, 大島茂, 林良嗣: ポテンシャル型アクセシビリティに基づく交通利便性評価指標群とその地方都市への適用, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 675-686, 2006.
- 103) 加藤博和: 島根県飯南町における自治振興会輸送活動の制度的特徴, 米子工業高等専門学校研究報告, Vol. 45, 2010.
- 104) 茅陽一, 森俊介: 予測の方法, 社会システムの方法, pp. 48-73, オーム社, 1985.
- 105) 川原純, 湊真一: グラフ列挙索引化法の種々の問題への適用, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 57, No. 11, pp. 604-609, 2012.
- 106) 川本義海: 過疎と高齢化が進む集落における共助型輸送活動による持続的な住民のモビリティ確保, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 44, CD-ROM, 2011.
- 107) 喜多秀行: 地域社会が保証すべき生活交通のサービス水準に関する研究, 国際交通安全学会 平成 19 年度研究調査報告書, pp. 1-4, 2008.
- 108) 喜多秀行: 過疎地域における生活交通の確保に関する課題と展望, 運輸と経済, Vol. 67, No. 3, pp. 23-30, 2007.
- 109) 喜多秀行, 池宮六季, 菅洋子, 四辻裕文: 潜在能力アプローチによる地域公共交通計画の検討フレーム, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 71, No. 5, pp. 163-169, 2015.
- 110) 倉内文孝, 嶋本寛, 王萍, 飯田恭敬: 最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 23, 2006.
- 111) 国土交通省国土政策局: 国土形成計画策定のための集落の状況に関する現状把握調査, 2007.
- 112) 国土交通省総合政策局: 地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画策定のための手引

- き（第3版）, 2016.
- 113) 国土交通省総合政策局参事官室（総合交通体系）：地域のモビリティ確保の知恵袋～災害時も考慮した「転ばぬ先の杖」～, 2012.
- 114) 国土交通省総合政策局・自動車局：地方路線バス事業の経営革新ビジネスモデル実施マニュアル, 2017.
- 115) 国土交通省東北運輸局：東日本大震災の被災地域における公共交通の確保・維持・改善に関する調査, 2013.
- 116) 国土交通省都市局：大規模開発地区関連交通計画マニュアル 改訂版, 2014.
- 117) 小林潔, 北濃洋一, 渡辺晴彦, 石川美知郎：下水道システムの費用効率性評価法, 土木学会論文集, No. 751/IV-62, pp. 111-125, 2004.
- 118) 佐佐木綱：吸収マルコフ過程による交通流配分理論, 土木学会論文集, No. 121, pp. 94-102, 1965.
- 119) 佐々木大也, 鳩山紀一郎：被災地に居住する高齢者の生活活性化に求められる交流環境の検討とその効果～岩手県釜石市北部地域を対象として～, 都市計画報告集, No. 13, pp. 84-89, 2014.
- 120) 嶋本寛, 倉内文孝, Schmöcker, J.-D., 村山直樹：乗客行動を考慮したバス路線網決定モデル, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 40, CD-ROM, 2009.
- 121) 清水浩志郎：高齢者・障害者交通研究の意義と今後の展望, 土木学会論文集, No. 518 / IV-28, pp. 17-29, 1995.
- 122) 末吉俊幸：DEA一経営効率分析法, 朝倉書店, pp. 84-102, 2001.
- 123) 杉尾恵太, 磯部友彦, 竹内伝史：GISを用いたバス路線網計画支援システムの構築—潜在需要の把握による路線評価について—, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, No. 4, pp. 617-626, 2001.
- 124) 鈴木文彦：デマンド交通とタクシー活用—その計画策定と運行と評価, 地域科学研究会, 2013.
- 125) アマルティア・セン：不平等の再検討：潜在能力と自由（池本幸生, 野上裕生, 佐藤仁 訳）, 岩波書店, 1999.
- 126) 株式会社ゼンリン：ゼンリン住宅地図（岩手県陸前高田市）, 2012.
- 127) 高橋啓太, 小野里雅彦, 田中文基：ゼロサプレス型BDDを用いた動的生産プランニングの統合的解候補表現のための解法, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 3, pp. 107-115, 2015.
- 128) 高松瑞代：バス時刻表の最適化, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 60, No. 9, pp.512-516, 2015.
- 129) 高山純一, 柳沢吉保, 中野泰啓, 加藤隆章：コミュニティバスの路線網策定システムの構築, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, No. 4, pp. 705-711, 2001.
- 130) 田口東：首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文集, Vol. 48, pp. 85-108, 2005.
- 131) 田口東：鉄道の通勤利用モデルとソフトな混雑緩和策, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 53, No. 8, pp. 433-438, 2008.
- 132) 武井伸生, 長江剛志：道路ネットワーク強靱化のための耐震化戦略: Gibbs cloner and cross-entropy アプローチ, 土木計画学研究・講演集, Vol.52, CD-ROM, 2015a.
- 133) 武井伸生, 長江剛志：乱択アルゴリズムによる道路ネットワーク耐震化問題の解法, 第29回人工知能学会全国大会, CD-ROM, 2015b.
- 134) 竹内健蔵：中小都市交通ネットワークにおける交通政策の視点: Downs-Thomsonのパラドックスの検証, 経済と社会: 東京女子大学社会学紀要, Vol. 25, pp.37-53, 1997.
- 135) 竹内伝史：路線バスにおける公共負担の設計, 土木計画学研究・講演集, Vol. 29, CD-ROM, 2004.
- 136) 竹内伝史, 山田寿史：都市バスにおける公的補助の論理とその判断指標としての路線ポテンシャル,

- 土木学会論文集, No. 425/IV-14, pp. 183-192, 1991.
- 137) 谷本圭志, 吉田絵梨子: 地域公共交通の標準的な潜在的利用者数の導出に関する考察, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, CD-ROM, 2010.
- 138) 谷本圭志, 喜多秀行: 地方における公共交通計画に関する一考察-活動ニーズの充足のみに着目することへの批判的検討-, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 599-607, 2006.
- 139) 筒井美樹: マルムキスト指標を用いた日米電気事業の部門別効率性比較-DEA 手法による計測-, 電力中央研究所報告, 2000.
- 140) 戸田貴久, 斎藤寿樹, 岩下洋哲, 川原純, 湊真一: ZDD と列挙問題-最新の技法とプログラミングツール-, コンピュータソフトウェア, Vol. 34, No. 3, pp. 97-120, 2017.
- 141) 刀根薫: DEA のモデルをめぐる, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 38, No. 1, pp. 34-40, 1993.
- 142) 土木学会: バスサービスハンドブック, 丸善, 2006.
- 143) 永井孝弥: 津波で被災した JR 線の BRT による仮復旧の取組み-被災地域の復興に貢献する地域交通サービスの提供-, 土木学会誌, Vol. 98, No. 8, pp. 40-43, 2013.
- 144) 中西一: 複数生成物を含む地方公営交通事業の評価: DEA と COLS による効率性の測定, 佐賀大学経済論集, Vol. 41, No. 2, pp. 13-59, 2008.
- 145) 中村文彦: 震災から学ぶモビリティ確保の課題-回復力の強い交通インフラとしてのバスシステムへの期待-, 運輸と経済, Vol. 71, No. 8, pp. 61-63, 2011.
- 146) 中山徳良: パラメトリックな方法とノンパラメトリックな方法による距離関数の比較: 日本の公立病院の例, 医療と社会, Vol. 13, No. 1, pp. 83-95, 2003.
- 147) 西村和記, 土井勉, 喜多秀行: 社会全体の支出抑制効果から見る公共交通が生み出す価値: クロスセクターベネフィットの視点から, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 70, No. 5, pp. 809-818, 2014.
- 148) 新田保次, 都君燮: 高齢者に配慮したコミュニティバスの利用頻度予測モデルについて, 土木学会論文集, No. 646/IV-17, pp. 37-45, 2000.
- 149) 一般社団法人日本カーシェアリング協会: 被災地カーシェアリング活動報告, 2011.
- 150) 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.
- 151) 浜口伸明: 創造的復興について, 国民経済雑誌, Vol. 207, No. 4, pp. 35-46, 2013.
- 152) 林光伸, 湯沢昭: デマンドバス導入のための需要予測と運行形態の評価に関する一考察, 日本都市計画学会都市計画論文集, Vol. 41, No. 3, 2006.
- 153) 原祐輔, 赤松隆: Network GEV 型経路選択モデルを用いた確率的利用者均衡配分, 土木学会論文集 D3, Vol. 70, No. 5, pp. 611-620, 2014.
- 154) 東本靖史, 岸邦宏, 佐藤馨一: 包絡分析法を用いたバス路線の総合効率性評価に関する研究-札幌市のバス路線を事例として-, 日本都市計画学会都市計画論文集, Vol. 40, No. 3, pp. 379-384, 2005.
- 155) 平井健二, 小池淳司, 喜多秀行: DEA 手法による公営企業の運営効率性評価-公営バス事業を事例とした評価-, 土木計画学研究・論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 133-140, 2009.
- 156) 福田公明: 逆探索とその応用, 離散構造とアルゴリズム II(藤重悟編), 近代科学社, pp. 47-78, 1993.
- 157) 福本雅之, 西山陽介, 加藤博和, 孫卓: 公共交通需要希薄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.
- 158) 伏見正則, 逆瀬川浩孝: モンテカルロ法ハンドブック, 朝倉書店, pp. 484-503, 2014.
- 159) 藤原章正, 坂田俊平, 城福健陽, 森山昌幸: 身の丈にあった地域公共交通サービスを目指して-計画支援シミュレーションシステム ComPASS-, 運輸と経済, Vol. 64, No. 2, pp. 61-68, 2004.

- 160) 藤原章正: 地域公共交通が抱える課題～ComPASS・ComMASS を活用した人材育成～, 運輸政策研究, Vol. 69-71, 2007.
- 161) 堀山貴史, 羽室行信: 大都市近郊区間の経路の効率的な列挙と検索, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 60, No. 10, pp. 600-607, 2015.
- 162) 牧野英紀: 宮城交通グループにおける輸送復旧の道程と復興に向けた課題, 運輸と経済, Vol. 71, No. 8, pp. 122-131, 2011.
- 163) 三浦武雄, 浜岡尊: システム計画技法, 現代システム工学概論 (改訂2版), pp. 35-86, オーム社, 1991.
- 164) みずほ総合研究所: 被災地の人口的な特徴から見た復興のあり方—参考にするべきは大都市復興の事例にあらず—, みずほリサーチ, Vol. 6, 2011.
- 165) 溝上章志, 柿本竜治, 橋本淳也: 路線別特性評価に基づくバス路線網再編手法の提案, 土木学会論文集, No. 793/IV-68, pp. 27-39, 2005.
- 166) 湊真一: BDD/ZDD を用いたグラフ列挙索引化技法, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 57, No. 11, pp. 597-603, 2012.
- 167) 湊真一: BDD/ZDD 一論理と集合に関する演算処理系の技法—, 超高速グラフ列挙アルゴリズム (編: 湊真一, 著: ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト), pp. 117-130, 2015.
- 168) 三星昭宏, 新田保次: 交通困難者の概念と交通需要について, 土木学会論文集, No. 518 / IV-18, pp. 31-42, 1995.
- 169) 宮城俊彦, 赤松隆, 朝倉康夫, 秋山孝正, 鈴木崇児, 溝上章志: 均衡制約付き最適化問題の土木計画への応用可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 20, No. 1, pp. 507-512, 1997.
- 170) 宮良いずみ, 福重元嗣: 公営バス事業の効率性評価, 会計検査研究掲載論文, Vol. 26, pp. 25-43, 2002.
- 171) 元田良孝: 自治体が行うバス (コミュニティバス) 計画作成のポイント, 2010.
- 172) 元田良孝, 宇佐美誠史: 津波被災地の公共交通復旧プロセス—陸前高田市の事例—, 土木計画学研究・講演集, Vol. 44, CD-ROM, 2011.
- 173) 森津秀夫: 最適交通網構成手法に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1984.
- 174) 森地茂, 岩井壮三, 鈴木純夫: バス輸送改善のための基礎的考察, 土木学会論文報告集, No. 238, pp. 61-68, 1975.
- 175) 森山昌幸, 藤原章正, 杉恵頼寧: 交通サービス水準の制約により潜在化した交通需要の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 25, CD-ROM, 2002.
- 176) 森山昌幸, 藤原章正, 張峻屹, 杉恵頼寧: 中山間地域における高齢者対応型公共交通サービスの需要予測モデルの提案, 土木学会論文集, Vol. 786/IV-67, pp. 39-51, 2005.
- 177) 柳沼秀樹, 島野和樹, 福田大輔, シューマッカーヤンディヤーク: 頻度ベース公共交通配分手法の首都圏鉄道ネットワークへの適用, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, CD-ROM, 2010.
- 178) 谷島賢: 見える化と PDCA サイクルによる路線バス事業改善の取り組み, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, Vol. 53, No. 9, pp. 403-406, 2009.
- 179) 山崎亮: 仮設住宅の入居方法に学ぶ集落移転, 撤退の農村計画 (編: 林直樹, 齋藤晋), pp. 83-89, 学芸出版社, 2014.
- 180) 山田忠志, 中村昂雅, 横山大河, 谷口栄一: サプライチェーンを考慮した交通ネットワークの離散型最適化: 最適設計と脆弱性評価, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 68, No. 4, pp. 272-284, 2012.
- 181) 大和裕幸, 坪内孝太, 稗方和夫: オンデマンドバスのためのリアルタイムスケジューリングアルゴリズムとシミュレーションによるその評価, 運輸政策研究, Vol. 10, No. 4, pp. 2-10, 2008.
- 182) 大和裕幸, 鹿渡俊介, 本多建: デマンド交通導入が利用者の交友関係に与える影響の評価—三重県玉城

- 町のオンデマンド交通を対象として-, 運輸政策研究, Vol. 16, No. 4, pp. 15-22, 2014.
- 183) 吉田樹, 秋山哲男, 金載炅: 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.
- 184) 吉田樹: 公共交通需要の発生強度の計測と需要の顕在化率に関する定量的評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, CD-ROM, 2010.
- 185) 吉野大介, 山根啓典, 三谷卓摩, 稲田利徳, 羽藤英二: 東日本大震災被災地におけるデマンド交通導入に関する基礎的研究-陸前高田市における事例-, 土木計画学研究・講演集, Vol. 47, CD-ROM, 2013.
- 186) 陸前高田市: 高田・今泉地区土地利用計画(案), 2013.
- 187) 陸前高田市: 平成 26 年度市内公共交通運行方針, 2014.
- 188) 陸前高田市: 平成 27 年度市内公共交通運行方針, 2015.
- 189) 陸前高田市: 平成 28 年度市内公共交通運行方針, 2016.
- 190) 陸前高田市: 平成 29 年度市内公共交通運行方針, 2017.
- 191) 和田健太郎, 白井健人, 柳沼秀樹: Cross-Entropy 法に基づく待ち行列の延伸を考慮した交通信号群の最適化, 土木計画学研究・論文集, Vol. 71, No. 5, pp. 1055-1064, 2015.

謝辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導とご援助を戴いた皆様に感謝申し上げます。

東京大学大学院 羽藤英二教授には、研究に向き合う姿勢や対象とする問題の捉え方、理論の構築の仕方など、研究全体にわたってご指導をいただき、深甚な謝意を表します。研究室に通い始めた頃、羽藤先生からいただいた、「企業で長く業務に携わっていると、表現や論理構成は身に付く。ただ、何かをきちんと理解したいとき、手法が身に付いていないと対応できる問題が限定されてしまう」という言葉が今でも心に残っているのですが、一緒に研究に取り組ませていただいたこの数年間で、研究だけでなく、普段の業務における着眼点も大きく変わっていることを実感しています。一方で、私の実力不足により、ご指導いただいたことに十分応えられなかったことも多々あり、申し訳なく感じています。今後引き続き、研究成果を積み重ねる中でご恩を返していければと考えております。

東京大学大学院 大口敬教授には、審査の過程で多くの貴重なご指摘を戴きました。特に、構造化処理技術の社会的な有用性を考える上で有益なコメントを戴くとともに、大局的な視点から、関連する研究体系全体の中での位置づけを明確にするよう導いてくださいました。深く感謝申し上げます。

東京大学大学院 本田利器教授には、審査段階に加え、復興デザイン研究体の活動においても多くのご指摘・ご指導を戴き、深く感謝申し上げます。先生から一貫してご指摘戴いた、「実務者として本研究が社会でどれだけ使えるのかを突き詰めて考える」という点は、研究を取りまとめる上での軸になりました。

東京大学大学院 布施孝志教授には、審査の過程で多くの貴重なご指摘を戴きました。深く感謝申し上げます。私自身が説明の中で不明瞭だと感じていた点や、自身が見落としていた重要な着眼点について、布施先生との議論やご指摘により、頭の中が整理できた点が多くあったと感じております。

広島大学大学院 藤原章正教授には、広島大学で卒業論文・修士論文のご指導を戴いて以来、現在に至るまでの約 10 年に亘り、様々なテーマでご指導戴き厚く御礼を申し上げます。学部時代に履修した、藤原先生の「交通システム工学」の授業と、研究室で常に目にしてきた先生の研究に対峙される姿が、これまでの私の研究活動の原点となっています。

東京理科大学大学院 柳沼秀樹講師には、学術的、実務的な観点から幾多の助言を戴きました。第 4 章の研究成果は 2016 年 10 月の柳沼先生と羽藤先生との打合せが無ければ存在しておらず、先生の柔軟かつ前衛的なアイデアに助けていただきました。ここに深く感謝の意を表します。

副査の先生方からの数多くのご指摘、ご助言により、自分の研究を見つめ直し、考えを大きく深めることができました。本研究が先生方の全ての問いかけにお応えできているわけではありませんが、これから更に研究を深めていく中で、徐々に成果としてご報告できればと考えております。

また、私が本論文を執筆することになったのは、東京大学復興デザイン研究体への参画がきっかけであり、窪田亜矢特任教授、大月敏雄教授、田島芳満教授、井本佐保里助教には、スタジオ演習や勉強会に参加させていただく中で、復興の現状を学ばせていただきました。また、同じく研究体のメンバーであるアジア航測株式会社の皆様とは、様々な議論を重ねさせていただきました。厚くお礼申し上げます。

広島大学の張峻屹教授，塚井誠人准教授，力石真准教授には，私の学生時代から学会や勉強会等でお会いするたびに，研究の進捗について気にしていただき，厚く御礼申し上げます。宮崎大学の嶋本寛准教授には，研究会等でお会いするたびに色々とアドバイス・ご指導を戴きました。東北大学の長江剛志准教授には，学会にてZDDについて議論させていただき，大変参考になるコメントを戴きました。その他にも，研究発表の場において，数々の先生方から貴重なご意見を戴き，皆様に厚くお礼申し上げます。

羽藤研究室の先輩博士の皆様には，研究活動全般において大変お世話になりました。原祐助教，福山祥代研究員，大山雄己研究員（現スイス連邦工科大学ローザンヌ校）には，審査の過程で何度も発表練習に付き合ってください，大変心強いサポートをいただきました。特に福山さんには，お忙しい中，審査に関する様々な学内手続きも含めてご協力戴き，心よりお礼申し上げます。同じく研究室の先輩博士である神戸大学の浦田淳司助教には，東京大学在学時から研究を進める上で身近な頼りになる存在として支えて戴きました。

羽藤研究室のメンバーの皆さんにも，深く感謝申し上げます。羽藤先生とともに日々高いレベルで研究を続けられている皆さんとゼミ等で議論できたことは私にとってかけがえの無い経験でした。また，井澤佳那子さん，植田瑞貴さん，山野壱成さんには大変お忙しい中，審査の際にお手伝いを戴き，秘書の岡田舞さん，黒田由佳さんには，研究活動を進める上で常に細かい気遣いを戴き，心よりお礼申し上げます。

現地での社会実験等においては，株式会社トランスフィールドの林竜太郎様，越智大介様とはシステム開発の面からフォローを戴き，原佳代子様，根本英明様をはじめ，日産自動車株式会社の皆様には，車両を提供していただくとともに，実運用に向けた議論の機会を戴きました。感謝申し上げます。

また，本研究は，岩手県陸前高田市で実装の可能性を検証しており，陸前高田市企画部企画政策課の皆様，陸前高田市デマンド交通予約センターの皆様，株式会社気仙タクシーの皆様，高田タクシー有限会社の皆様，有限会社高田交通の皆様，生出地区住民の皆様には，調査等で大変お世話になりました。今後も微力ながら引き続き復興を支援し，まちの復興を皆様と共に目にすることができればと考えています。

なお，本論文は私がコンサルタントとして勤務しながら執筆を進めたものであり，在職のままの研究活動を許可いただいた復建調査設計株式会社の小田秀樹代表取締役社長をはじめ役職員の皆様には深く感謝申し上げます。とりわけ，私が所属する総合計画部門の皆様には研究との両立の面で様々なご配慮・フォローを戴きましたことを感謝いたします。山根哲之進支社長，安達誠部長，竹葉克浩次長，山崎孝調査役には，私が入社して以来，研究への取り組みに理解を戴き，大学との共同研究への参画にご支援を戴きました。金沢洋和課長には，実務的な観点から本論文に対して有益なコメントを戴きました。山根啓典センター長には，羽藤先生を紹介戴き，大学での勉強の場という貴重な機会を用意していただきました。佐藤啓輔氏には，日ごろから研究・業務の両側面から相談に乗っていただきました。山下大輔氏，高橋恵一氏，三谷卓摩氏（現東北大学）には陸前高田のプロジェクトの中で，様々な面からご協力いただきました。研究を進めるにあたり，ご指導，ご支援いただきながらここに名前を記すことができなかつた皆様もいらっしゃいますが，深く感謝を申し上げます。

最後に，私の研究活動を家庭で温かく支えてくれると共に，職場では陸前高田市におけるデマンド交通事業において力強くバックアップしてくれた妻さつきと，常に私の身体の心配をしてくれた両親・家族に心からの感謝の気持ちを記し，本論文の結びとさせていただきます。

2017年10月

吉野大介