

大規模被災地の復興過程における 逐次バスネットワーク再編の数理解析

高根 大毅¹・岩倉 成志²

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: me18074@shibaura-it.ac.jp

²正会員 芝浦工業大学 教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

大規模被災地の復興過程では居住地や商業業務地の立地が刻々と変化していく。住民の移動の不便さを緩和するためには、土地利用変化に迅速に対応する公共交通のネットワーク再編と地域鉄道を含む交通モード間の接続性などのサービス改善とを迅速に計画する必要がある。

このため、被災地のバス事業者が土地利用変化に応じて運行可能なバス路線を短期間に逐次再編するバスネットワークの抽出支援技術を構築する。ZDD (ゼロサプレス型二分決定グラフ) というネットワーク上の全ルートを超高速計算で列挙する方法を利用してバスルート候補集合を作成し、事業者と利用者の評価関数および、NTT モバイル空間統計による day-to-day の人流データを用いて、路線バスネットワーク候補案を順位づけする計算方法を開発した。

Key Words : Great East Japan Earthquake, Bus network reorganization, zero-suppressed binary decision diagram, Mobile spatial statistics

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災により甚大な被害を受けた三陸沿岸は、避難所から仮設住宅、そして高台移転や災害公営住宅など土地利用や昼夜間人口が急速に変化した。復興事業が進むにつれ住民の人口分布が大きく変化していった。これに合わせて岩手県北バスはバスルートの再編を進めており、例えば図-1に示す宮古市内の再編をおこなった。

このような急速な土地利用や人口移動に迅速に対応するバスネットワーク (以下バス NW) の構築は、地域住民の生活利便性の向上、さらには被災地の復興を交通の側面から支える上で重要な課題と考える。

また南海トラフ地震も、東日本大震災と同じような極めて広範囲な被災と、避難や復興事業に伴う土地利用・人口移動の急速な変化が予想されている。しかし従来のバス NW 計画の多くは、バス事業者の経験則と住民要望とで意思決定がなされており、土地利用の急速な変化に合わせて論理的かつ短期にバス NW を再編することは困難だと考えられる。

バス NW の既存研究は整数計画法や遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算が提案され^{例えば1)~3)}、その有用性も確認されているが、計算負荷が高い。吉野ら⁴⁾によって

ZDD を用いてバスネットワーク再編手法が提案されているが、関数上の最適ルート解が得られても、バス事業者が実現させやすい再編案 (関数上は最適解でなくとも事業者の制約を考えれば最適な次善解) を得る方法ではない。ゆえに、バス事業者が実行可能な選択肢を複数提供するネットワーク再編案を抽出する解析技術が必要と考えた。

本研究では岩手県宮古市を対象に、復興状況に応じてバスネットワークの逐次再編を支援する数理解析技術の構築をおこなう。



図-1 宮古市内のバス NW 再編 (赤が被災後の新規路線)

2. 逐次再編バスNWの抽出技術の概要

本方法の主要な特徴の一つは、特定の関数に従った最適ルート解のみの出力ではなく、路線バスの起終点を特定した後、起終点間を結ぶ莫大なルート候補を列挙して、バス事業者と利用者の選好からルート候補の順位の計算結果を示し、計算結果に基づいてバス事業者の判断で路線を選定できることにある。もう一つは、PT 調査などが実施されない市町村で、携帯位置情報データ（本研究ではモバイル空間統計）を使用して、day-to-day の交通需要を把握して、被災後に大きく変わる土地利用に対応したバスネットワーク案の候補を提案できることにある。

図-2 に本方法の簡単なフローを示す。DRM によって道路ネットワークを確定（被災後の道路の変化を追えない可能性はあるが、プローブカーデータを組み合わせると通行可能な道路や復旧した道路を特定できると考える）し、ZDD（ゼロサプレス2分決定グラフ）を用いて莫大なルート候補を短時間に計算する。バス事業者の現在もしくは過去の実路線決定に基づいたバス事業者評価関数を構築する。本研究では大手バス会社で路線策定経験の多い国際興業株の路線決定をモデル化した。次に被災地の交通行動データを用いて交通機関選択モデルを推定し、推定された効用関数を利用者評価関数とする。ZDD で抽出された莫大なバスルートと複数の起終点を組み合わせて得られるバスネットワークの評価を事業者と利用者の双方の評価で順位付けする。順位付けされたネットワーク候補が抽出された後は、バス事業者が運行管理や労務管理面から、より被災地に適したバスネットワークを土地利用の変化に合わせて意思決定していく。

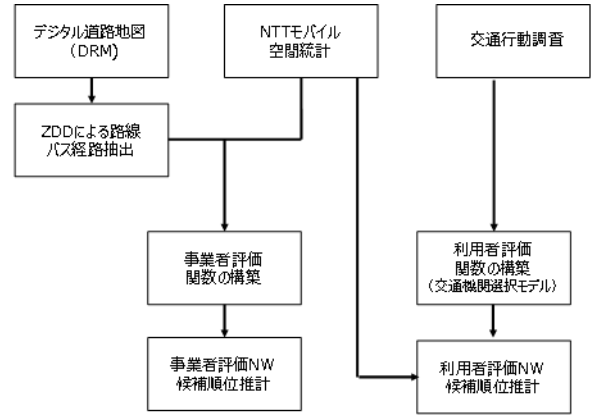


図-2 本研究のフロー

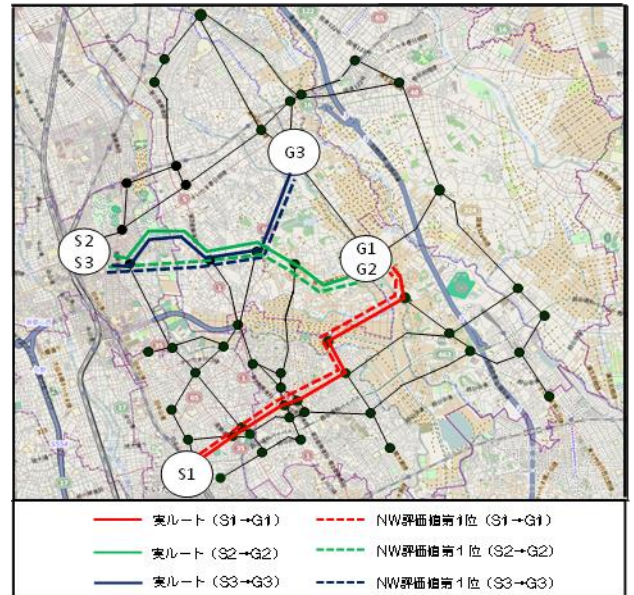


図-3 大宮地区のリンク・ノード

3. バス事業者評価関数の推定

(1) ZDDによる起終点間の全列挙計算

事業者評価関数の構築は宮古市での分析の前段として、埼玉県大宮浦和地区・川口地区・東京都赤羽地区の3地区のバスNWを対象とし、起終点間の経路数算出と評価関数の推定をおこなう。3地区ごとにエリア内の国道や県道・都道などを含む主要幹線道路（リンク）と交差点（ノード）をZDD上に展開させ起終点間の経路数算出をおこなった。

図-3は大宮・赤羽地区の道路リンクとノード（黒点）を示した図で、大宮・浦和地区には全19路線のバス路線があり（川口地区は13路線、赤羽地区は11路線）、始点Sと終点Gをそれぞれ19箇所定める。

ZDDで起終点間の経路候補の算出を実行した結果、例えばS1（浦和駅東口）からG1（さいたま東営業所）までで約420万通り、S2（大宮駅東口）からG1までで約349万通りあり、その数は数十万から数百万通りにも及ぶ。このようにして大宮・赤羽地区、川口地区、赤羽地区内

の全43路線を対象とし、始点S・終点Gを43箇所定めてから起終点間の全経路数を列挙した。この経路数を評価関数の選択枝集合として用いる。

(2) 事業者評価関数の説明変数

ZDDで抽出された選択枝集合の中から実際のバスルートを再現する離散選択モデルを構築する。

バス事業者*i*がバスルート候補*j*を選択枝集合の中から選択する際の選択確率 p_{ij} は式(1)のようなロジットモデル型の選択確率式とし、評価関数はバスルート別の評価関数 S_{ij} とし、式(2)を構築する。

$$p_{ij} = \frac{\exp(S_{ij})}{\sum_{t=1}^{100} \exp(S_{it})} \quad (1)$$

$$S_{ij} = \theta_1 Q_{bus-ij} + \theta_2 D_{ij} + \theta_3 C_{ij} + \theta_4 RL_{ij} \quad (2)$$

S_{ij} : バス事業者評価値, Q_{ij} : 潜在的利用者数 (人) D_{ij} : 営業距離 (km) C_{ij} : 渋滞距離 (km) RL_{ij} : 右左折回数 (回)

バス会社の収益に影響する代理変数である潜在的利用者数 Q_{bus_ij} は、仮想バスルートを設定した場合にバスに乗車すると仮定した人数と定義し、式(3) (4) (5)の交通機関選択モデルから推計した人数である。この交通機関選択モデルは 4. で詳しく説明する。バス利用者数 Q_{bus_ij} の推計に使用する OD 交通量 Q_{ij} は、居住地と 500m メッシュ間の交通量を day-to-day で把握できるモバイル空間統計の人口分布統計を用いる。

$$Q_{bus_ij} = Q_{ij} \times P_{bus} \tag{3}$$

$$P_{bus} = \frac{e^{V_{bus}}}{e^{V_{bus}} + e^{V_{walk}} + e^{V_{bicycle}} + e^{V_{rail}} + e^{V_{car}}} \tag{4}$$

$$V_{bus} = \theta_1 T_{bus} + \theta_2 C_{bus} + \theta_3 W_{bus} + \theta_4 \ln \sum_{n=1}^4 e^{\theta_5 acc_n} + \dots + const. \tag{5}$$

T: 所要時間 (分) C: 費用 (円) W: 待ち時間 (分) acc_n : バス停 n へのアクセス距離 (km)

営業距離は運行費用の代理変数であり、起終点間の距離でリンク間の距離情報が特定できるデジタル道路地図 (DRM) を用いてデータ整備をおこなった。渋滞距離は、路線の定時性の代理指標である。データは起終点間のリンクの渋滞距離が特定できる日本道路交通情報センター (JARTIC) の渋滞統計システムを用いる。右左折回数、交差点での待機時間による定時性・速達性影響を代理する。使用データはデジタル道路地図を用いてプログラム上で計算させた。

(3) 事業者評価関数の推定結果

先に述べたように全経路数 (選択肢集合) が数十万通りから数百万通りあり、評価関数のパラメータを推定する上で計算負荷が高い。そこで選択肢集合の中から後述する潜在的利用者数の多い上位 50 通り・100 通りを抽出してパラメータ推定をおこない、パラメータの安定性を確認する。パラメータ推定結果を表-1 に示す。推定結果から 2 ケースとも説明変数の符号の整合性を確認でき、サンプル数が異なっても安定していることがわかった。後の宮古市での分析で用いる評価関数は選択肢集合 50 のパラメータを用いてバスルートの抽出を行う。

(4) パラメータ感度に対する事業者へのヒアリング

推定した評価関数の説明変数の妥当性やパラメータの感度、抽出した最適評価値ルート (図-3 は赤 91 系統と大 04 系統) と実際の運行経路との乖離要因の解明するために、バスを運行する国際興業株式会社とヒアリング調査を行った。対象路線は、赤 91 系統、赤 53 系統の 2 系統である。赤 91 系統では実ルートが再開発が進む沿線の地区を経由するため乖離が生じ、赤 53 系統では終点の駅の転回場の有無により乖離が生じた。説明変数の選定及びパ

表-1 パラメータ推定結果 (事業者評価関数)

説明変数	選択肢集合 50		選択肢集合 100	
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
潜在的利用者数 (人)	0.00027	1.06	0.00027	1.37
営業距離 (km)	-0.636	-9.19	-0.665	-9.61
渋滞距離 (km)	-0.032	-3.74	-0.033	-7.68
右左折回数 (回)	-0.563	-7.43	-0.590	-7.51
尤度比	0.284		0.279	
サンプル数	43		43	

ラメータ感度に関しては、潜在的利用者数や営業距離についてバスルートを選定する上で特に重視していること、パラメータ感度の妥当性も確認することが出来た。

4. 利用者評価関数

(1) 宮古市での交通行動調査

2019 年 10 月 27 日から 11 月 15 日までの約 3 週間、宮古市内の復興住宅 (高台移転住宅・災害公営住宅) の居住者を対象に高校生以上の世帯全員の 1 日の外出行動、震災前から現在にかけての居住地や外出先の変遷をアンケートで調査した。690 世帯を訪問し、180 世帯 222 名に協力いただき、有効回答として回収できた。

男性 42%、女性 58%、40 才未満が 11%、40 才から 59 才が 23%、60 才台が 21%、70 才台が 33%、80 才以上が 12% の構成である。世帯人数は一人世帯が 35%、2 人世帯が 40%、3 人世帯が 15%、4 人以上の世帯が 10% である。高齢者や一人世帯が多いが、外出には困難を感じないとする方が 89%、杖を使って外出が 7%、介助が必要または外出困難とする方が 4% である。

(2) 路線バスの利用実態と希望改善点

年齢階層別のバスの利用頻度を図-4 に示す。生徒や学生は日常的に利用していることや、生産年齢層でも 20%、高齢者で 40% 程度は月に数回以上路線バスを利用していることがわかる。2019 年現在の交通機関分担率は図-5 に示すように年齢に従ってバスの利用シェアが増加しており、高齢者では 20% の割合を占めており、重要な交通機関となっていることがわかる。

路線バスを利用しない理由としては、車など他交通機関が利用なことを除けば、図-6 のようにダイヤ設定の問題と目的地への直行性の問題 (乗り継ぎ問題) に集約される。改善の希望内容は図-7 のように運賃、ダイヤや運行頻度、バスルートがあげられた。

(3) 利用者評価関数の説明変数

利用者評価関数は、宮古市居住者の交通機関選択モデルの効用関数とする。式 (9) の 5 選択肢 (選択可能性は考慮する) のロジットモデルで推定し、説明変数には所要時間、移動費用、待ち時間、選択可能なバス停へのアク

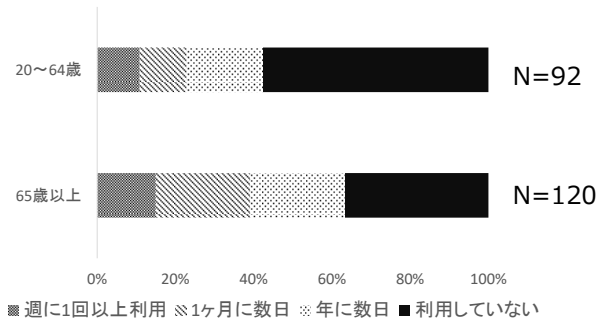


図4 年齢階層別の路線バスの利用頻度

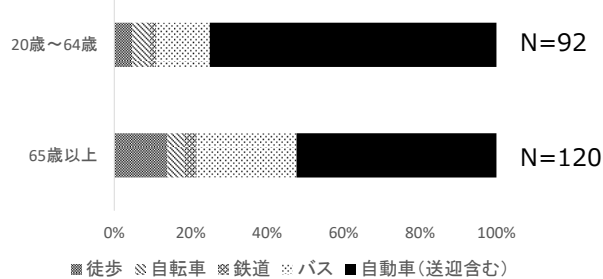


図5 年齢階層別の交通機関分担率

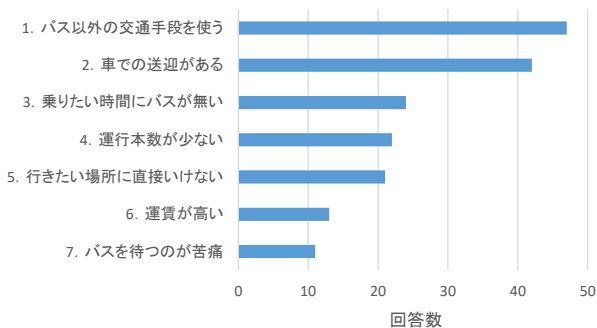


図6 路線バスを利用しない理由

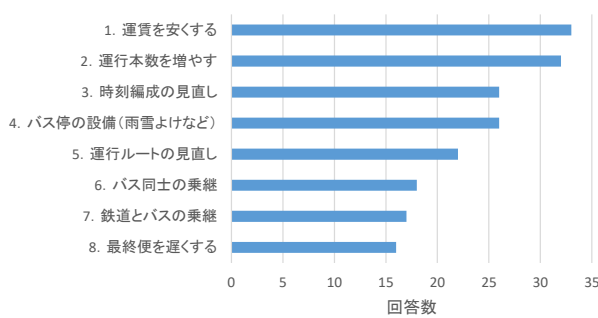


図7 路線バス改善の希望内容

セス距離とした。

$$P_{bus} = \frac{e^{V_{bus}}}{e^{V_{bus}} + e^{V_{walk}} + e^{V_{bicycle}} + e^{V_{rail}} + e^{V_{car}}} \quad (9)$$

$$V_{bus} = \theta_1 T_{bus} + \theta_2 C_{bus} + \theta_3 W_{bus} + \mu \ln \sum_{n=1}^4 e^{\theta_4 acc_n} \quad (10)$$

(4) 利用者評価関数の推定結果

利用者評価関数の推定結果を表-2に示す。所要時間とアクセス距離以外のパラメータは有意にならなかったが

表-2 パラメータ推定結果 (利用者評価関数)

説明変数	パラメータ	t値
所要時間 (分)	-0.285	-5.99
費用 (円)	-0.018	-0.79
待ち時間 (分)	-0.013	-0.11
スケールパラメータ	0.129	1.26
尤度比	0.524	
サンプル数	92	
バス停アクセス距離 (km)	-0.086	-2.88
尤度比	0.423	
サンプル数	27	

尤度比は0.5であり、再現精度は十分であると判断し、本稿では、この効用関数を利用者評価関数とする。なお、この交通機関選択モデルは3.(2)の事業者表関数の潜在利用者数の推計にも用いられる。

5. 逐次バスNWの抽出結果

(1) 宮古市の復興状況

宮古市は東日本大震災復興計画に注力してきた。被災者の再建支援と災害に強いまちづくりの推進を図ることを目的とし、市が積極的に災害公営住宅や高台移転施設といった復興住宅を整備し、道路の復旧・整備に注力してきた。災害公営住宅の整備は、震災から4年後の2013年から開始され、翌年の2014年には253戸、2015年には743戸、2016年には766戸整備され、計画した25団地766戸の全てを完成させた。また田老地区と鉾ヶ崎地区などで復興市街地整備事業が行われた。田老地区では2016年3月までに、鉾ヶ崎地区では、2018年3月までに宅地が全て使用可能になっている。

災害に強い交通ネットワークの形成計画の一環として、市内各所で高規格幹線道路の整備が進められてきた。このうち市北部の環状道路の山口～佐原間は2016年12月に供用を開始し、2019年12月には山口～近内地区まで延伸され、市の西部(山口地区・近内地区)から国道45号線、宮古病院までのアクセス性が向上した。各地区内の市道整備も進められ、2017年度までに9路線中6路線の整備が完了した。残りの3路線についても引き続き事業が進められている。

(2) 復興過程におけるバスNW候補の推定結果

宮古市内の5路線を対象にZDDで列挙した起終点間の候補経路の中から、最適解NW及び次善解NWを抽出した。復興過程のバスNW抽出を行うため、2013年から2019年の各年でバスNW抽出を行った。3.で推定した事業者評価関数である式(11)の評価値と、4.で推定した利用者評価関数から式(12)に示す候補経路の1人当たりの評価値を算出し、両指標の差異を確認する。以下では2013年、

2016 年, 2019 年の各年における①事業者評価関数の最適解NW, ②利用者評価関数の最適解NW, ③候補ルート事業者・利用者評価値分布を図-8 に示す. 加えて, 事業者評価関数の次善解 NW と利用者評価関数の次善解 NW についても考察する.

$$S_{ij} = 0.00027Q_{ij} - 0.636D_{ij} - 0.032C_{ij} - 0.563RL_{ij} \quad (11)$$

S_{ij} : バス事業者評価値, Q_{ij} : 潜在的利用者数 (人) D_{ij} : 営業距離 (km)
 C_{ij} : 渋滞距離 (km) RL_{ij} : 右左折回数 (回)

$$U_{ij} = \sum_{ij} Q_{ij} V_{ij} / \sum_{ij} Q_{ij} \quad (12)$$

U_{ij} : 1人当たり利用者評価値, Q_{ij} : 潜在的利用者数 (人)

a) 2013 年の路線バス NW 評価

事業者評価 1 位ルートは, S1 の田老地区から G の宮古駅を結ぶ路線 (赤実線) の崎山地区で, 国道 45 号を経由して宮古駅へ向かう実ルートとは乖離した. 崎山地区は 2013 年当時仮設住宅 (崎山第 2 仮設団地) が立地し NW 評価 1 位ルートはその近傍を経由するルートとなった. 残りの 4 路線については実ルートと完全重複した.

利用者評価 1 位ルートは実ルートとの乖離がやや目立つ. S1 から G までの路線 (赤実線) では崎山地区に加え, 鉾ヶ崎地区でも乖離が生じた. 鉾ヶ崎地区も 2013 年当時仮設住宅が 2 か所 (日立浜町仮設団地・日立浜町第 2 仮設団地) 立地し, 1 位ルートはその近傍を経由するルートとなった. その他 S4 の津軽石地区から G までの路線, S5 の千徳地区から G までの路線でも実ルートとやや乖離が生じ, 両線とも宮古駅の南側から駅にアプローチする経路となった.

複数の候補ルートの事業者・利用者評価値分布は図-8 中の右に示した. 事業者評価値の上位を占める 2 路線 (赤丸・青丸) では利用者評価値がやや低い. 理由として事業者評価値ルートが国道 45 号を経由し, 仮設住宅が立地する崎山・鉾ヶ崎地区を経由しない点があげられる.

b) 2016 年の路線バス NW 評価

事業者評価 1 位ルートは, 沿線の崎山地区に加え, 復興事業の進展が著しい沿岸部の鉾ヶ崎地区を経由するルートが推計された. 他の 4 路線については実ルートと概ね重複する結果となった.

利用者評価 1 位ルートは, 赤実線の路線が崎山地区・鉾ヶ崎地区に加え宮古病院を経由するルートが推計された. また宮古病院から G3 を結ぶ路線 (青実線) では鉾ヶ崎地区を経由するルートが推計され, 国道 45 号を経由する実ルートと乖離が生じた. その他の路線も事業者評価ルートと比較してやや乖離が目立つ結果となった.

複数の候補ルートの事業者・利用者評価値分布は, 事業者評価値の上位を占める S3 から G までを結ぶ路線 (青丸) では利用者評価値がやや低い. 理由として事業者評価ルートが国道 45 号を経由し, 復興住宅を立地する鉾ヶ

崎地区を経由しない点が挙げられる.

c) 2019 年の路線バス NW 評価

S4 (津軽石地区) から G までを結ぶ路線の事業者評価 1 位ルートは, 災害公営住宅 (上村・磯鶏・実田) が建設された宮古市南部の磯鶏地区および 2017 年に開通した小山田トンネルを経由するルートが推計された. そのため宮古駅まで国道 45 号線を経由する実ルートと乖離が生じた.

利用者評価値 1 位ルートは, 災害公営住宅が立地する磯鶏地区と小山田トンネルを経由するルートが推計された. 災害公営住宅の立地による磯鶏地区への人口移動が原因で, その近傍を経由するルートが推計されたと考えられる.

複数の候補ルートの事業者・利用者評価値分布は, S3 から G を結ぶ路線 (青丸) を除いては事業者の評価が高くなるにつれて利用者の評価も高くなる結果となった.

d) 次善候補のバスルートの評価

事業者評価関数の次善解 NW では, S3 (宮古病院) から G3 までを結ぶ路線 (青実線) の評価値 3 位ルートが国道 45 号を経由せず, 復興事業の進展が著しい沿岸部の鉾ヶ崎地区を経由するルートが推計された. また S4 (津軽石地区) から G までを結ぶ路線の評価値 2 位・3 位ルートは, 評価値 1 位ルートが経由した小山田トンネルや災害公営住宅 (上村・磯鶏・実田) の近傍を経由せず, 実ルートと同じ国道 45 号を経由して宮古駅にアプローチする経路となった. 利用者評価関数の次善解 NW では, S3 から G3 までを結ぶ路線の評価値 2 位・3 位ルートが評価値 1 位ルートと同様に, 沿岸部の鉾ヶ崎地区を経由するルートが推計された. また S4 から G までを結ぶ路線の評価値 2 位・3 位ルートは, 事業者評価関数と同様に実ルートと同じ国道 45 号を経由して宮古駅までを結ぶ経路が推計された.

6. おわりに

復興事業による土地利用や人口移動の急速な変化に対応可能なバス NW の構築を図るため, 起終点間の候補経路を短時間で列挙できる ZDD と, Logit モデルから推定されるバス事業者評価関数と利用者評価関数を組み合わせて, 運行経路の最適解のみならず次善解を抽出する方法を提案した.

なお NW 候補の評価順位を推計する本方法を実装していくためには, 居住者の生活スケジュールに応じたダイヤ設定の最適化や, それにともなうバス車両運用.

ドライバーの労働時間制約, 収支採算性条件の組み込みが必要である. 図-9 はアンケート結果から出発・帰宅分布とダイヤ上の運行本数の関係を示している. 需要と一致している地区はあるものの, 不一致の時間帯も見てとれる.

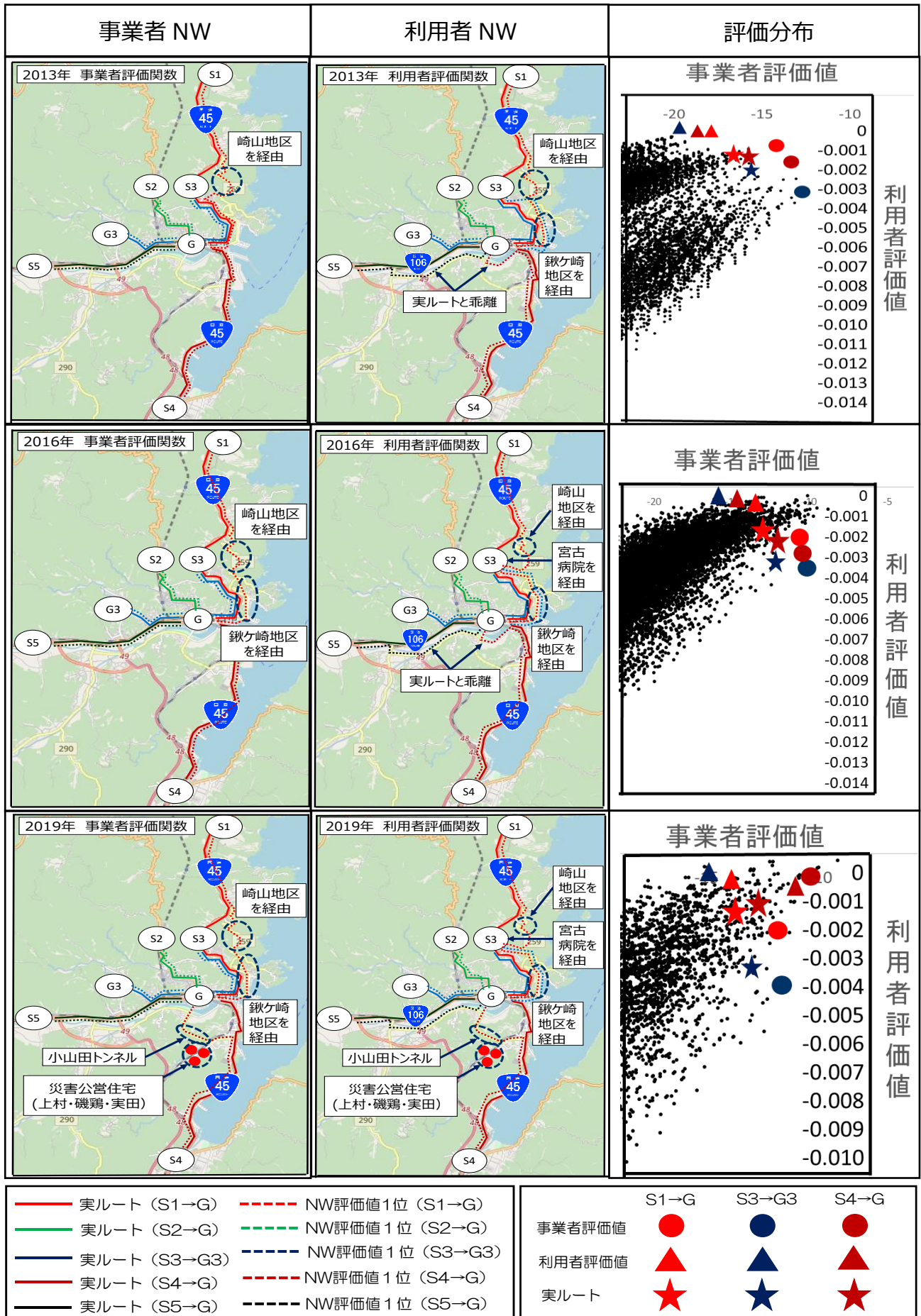


図-8 事業者最適解 NW・利用者最適解 NW・評価値分布

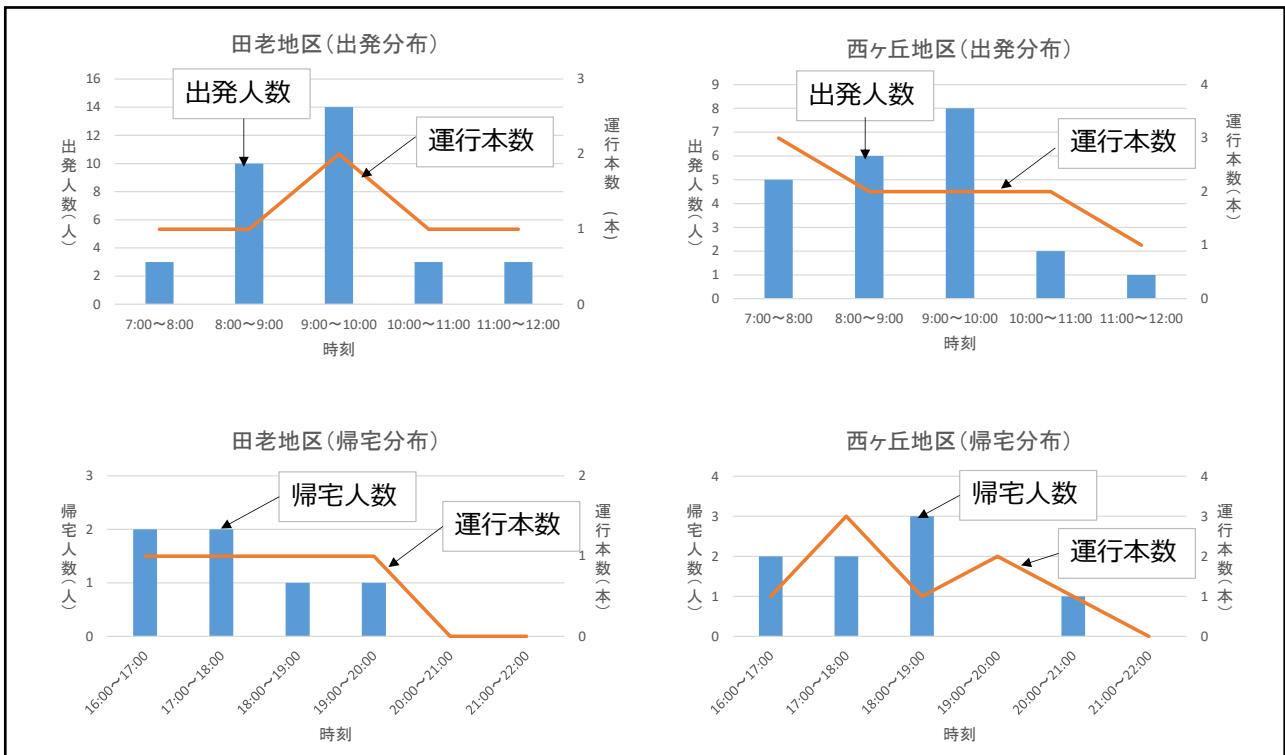


図-9 各地区の出発分布・帰宅分布と運行本数の関係

参考文献

- 1) 枝村 俊郎, 森津 秀夫, 最適交通ネットワーク問題の厳密解法と近似解法, 土木学会論文報告集 262 号, p.113-127, 1977
- 2) 高山 純一, 宮崎 耕輔, バスダイヤを考慮した最適バス路線網再編計画策定に関する研究 土木計画学研究・論文集 13 巻 p. 827-836, 1996
- 3) Szeto, W.Y., Jiang, Y., Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial becolony algorithm approach. Transportation Research Part B 67, 235-263, 2014.
- 4) 吉野 大介, 羽藤 英二, 柳 沼秀樹: 列挙策引化技法を組み込んだ構造化処理による公共交通の逐次再編手法, 第 55 回土木計画学研究発表会・講演集, 2017.

謝辞

国際興業(株), 岩手県北自動車(株), 岩手県交通(株)の方々には研究に対する多くのアドバイスをいただいた。また, 岩手県宮古市の居住者の方々にアンケート調査にご協力いただいた。ここに深く感謝します。本研究は, (一財) 国土技術研究センター, JSPS 科研費【19K04655】, (一財) 日本デジタル道路地図協会の研究助成を受けたものである。