

二段階最適化を援用した 公共交通の最適サービス決定問題 ～被災地域の公共交通計画を例に～

吉野 大介¹・羽藤 英二²

¹正会員 復建調査設計株式会社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15)

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

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

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

東日本大震災被災地域では防災集団移転促進事業や災害公営住宅の建設着工が着実に進行しており、将来の街の姿を見据えた地域公共交通の見直し・改善の検討のステップに突入しつつある。今後のまちの変化に伴う交通需要分布の変化を踏まえた公共交通のサービス決定に向けた提案を、近年ORの部門で発達を遂げている二段階最適化問題を用いて行う。具体的には、まず従来の四段階推定法に基づいた需要分析を行い、同結果を援用して、公共交通のルーティング・運行便数の設計を行う上位問題と、乗客のルート配分を行う下位問題で構成される二段階最適化問題の定式化を行う。

Key Words: *bi-level optimization, public transport, modal choice, network design*

1. 研究の背景と目的

(1) 研究の背景

東日本大震災の発生に伴い、市街地・産業の構造等、移動を取り巻く環境が大きく変化している中、東北地方の沿岸被災地域では東日本大震災復興交付金事業、特定被災地域公共交通調査事業等を活用して、住民のニーズ変化に対応し、復興を支援すべく生活交通の確保が図られている。現在、進捗状況は市町村によって差はあるものの、防災集団移転事業・災害公営住宅等事業・津波復興拠点整備事業等（以下、まとめて高台移転事業と呼ぶ）は建設着工が着実に進んでおり、徐々に将来のまちづくりを想定した公共交通計画の必要性が高まりつつある¹⁾。復興事業が長時間にわたるとともに、高台移転事業により居住地や生活拠点機能が分散していく状況を前提とし、まちづくりと一体となって、地域全体でどのような交通サービスを確保・維持するか検討していくことが、被災地域において必要とされている。

また、このようなまちの変化に応じた公共交通再編という課題は、被災地域独自のものではなく、都市の縮退が課題となっている今、近い将来全国的な課題として顕在化する可能性があり、東日本大震災被災地のまちづく

りの中で設計手法を整理しておくことは将来的な波及効果の面でも社会的意義が大きいと言えよう。

(2) 研究の目的と構成

上述の背景に基づき、将来のまちの変化に伴う交通需要分布の変化を踏まえた公共交通の最適サービスの提案を研究体系全体の最終アウトプットと位置づけ、本稿では主にモデルの定式化について提案する。

以降、まず2章において先行研究との比較により本研究の特徴について整理した上で、3章で岩手県陸前高田市をケーススタディに、最適サービス設計のための入力情報となる将来交通需要予測モデルの構築及びシミュレーションを実施する。4章では3章で推計された需要をもとに二段階最適化問題を用いて公共交通のルート・便数の設定及び需要者の交通量配分計算を行うモデルの定式化を行う。

2. 先行研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 需要側面からの研究

公共交通の需要予測モデルについては多くの既存研究

の蓄積があるが、基本的には四段階推定法に基づいて発生集中、分布、機関分担、配分という4つの段階を順に経て予測することになる²⁾。本稿で取り扱う陸前高田市のような需要が疎な地域に着目した需要予測に関しては、森山ら³⁾の研究が代表的である。同研究は過疎地域の生活路線を対象として、離散連続モデルを用いて需要予測モデルを構築し、島根県内の中山間地域を対象に、バス及びデマンド交通の需要シミュレーションを行っている。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の意味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採用されている。

(2) 供給側面からの研究

公共交通のサービス設計に関しては、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 (例えば、枝村ら⁴⁾、天野ら⁵⁾)。これらのサービス指標の中でも特に、ルーティングと便数設計については、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。

また、路線不定期運行や区域運行 (デマンド交通) など、乗客の需要に応じてルートや運行時間帯を変更するような交通機関については、上記のルーティング・便数設計問題を動的に取扱い、リアルタイムで効率的なサービス設計を行う位置づけであると言える。なお、元々これら両者の設計においては、それぞれ別々に最適化問題を解く事例が多かったが、Szeto and Jiang⁶⁾は両者を同一の最適化問題内で表現することを試みている。

(3) 二段階最適化問題

近年では、元々OR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二段階最適化問題を土木計画学の分野にも応用する動きが見られる。二段階最適化問題の適用は、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 (均衡配分) を取り扱うことにより、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⁷⁾は公共交通サービスの決定問題についても二段階最適化問題として解くことができることを提案しており、以下の行動仮説を

設定している。

- ① 意思決定主体について、交通計画者Aと交通需要者Bの二者が存在する。
- 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。
- ③ 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思決定の系列があり、このような問題を交通計画者先手のシュタッケルベルグ計画問題 (先手と好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。実際に、前述のSzeto and Jiang⁶⁾やGao et al.⁸⁾などではこのフレームを採用し、上位問題で計画者の視点からルーティング・運行便数の決定モデルを構築し、下位問題で利用者の割り当てモデル (トランジット配分) を構築している。

宮城ら⁷⁾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。

(4) 本研究の位置づけ

宮城ら⁷⁾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の政策検討にあたっては、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トランジット配分を行う【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

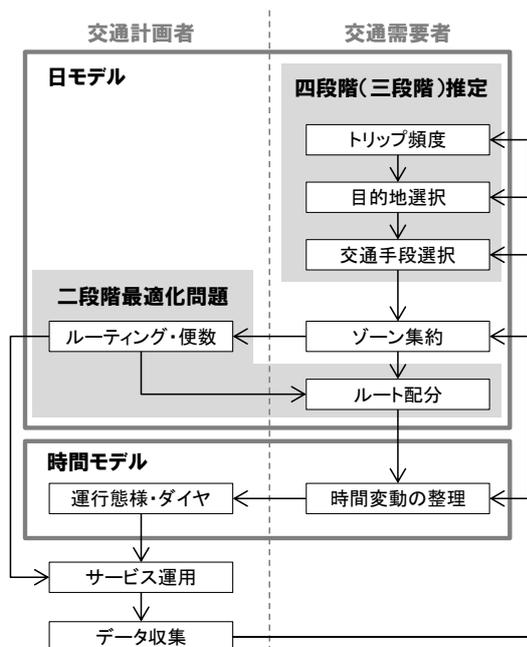


図-1 研究全体のフレーム

択、交通手段選択までの三段階)、②③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。

上記整理を踏まえ、研究全体のフレームを図-1に整理する。まず、需要モデルを二段階最適化問題に挿入した日モデルを構築することにより、ルーティング・運行便数を設計する。次のステップとして、日モデルを時間レベルまでブレイクダウンし、需要の時間変動を束ね、運行態様とダイヤを設計する方法を立案する。その後、実際のサービス運用の中でデータ収集を行い、最適化計算を行うことでサービス修正を図る流れを想定している。

なお、本稿は日モデルの一連の流れをエスキースするため、簡易モデルを用いて需要予測を行い、需要をインプットとして適用した最適サービス探索のための二段階最適化問題の定式化までを行ったものである。そのため、日モデル以降の時間変動のパート及び需要推計方法の精緻化等の細かな問題については、今後、別稿にて改めて整理したい。

3. 交通需要推計

本章では、岩手県陸前高田市を対象にした交通需要推計モデルの構築を行い、今後市内で予定されている復興事業が全て完了した際の公共交通需要の推計を行う。本章で述べる需要モデルは4章で定式化するルーティング・運行便数決定問題へのインプット条件としての適用を前提としたものである。

表-1 陸前高田市交通利用意向調査

調査時期	2012年9月
調査対象	陸前高田市内（行政区の地理的バランスを考慮して抽出）
調査方法	1) 訪問聞き取り調査 2) 郵送配布郵送回収調査
回答者数	1) 31名, 2) 342名
調査項目	デマンド交通が導入された場合の利用意向

表-2 提示したデマンド交通のサービス案

	項目	案A	案B	案C	案D	案E
設問①	所要時間差	0分	0分	0分	0分	0分
	運賃	100円	300円	300円	600円	300円
	停留所/駅	玄関前	玄関前	徒歩5分	玄関前	玄関前
設問②	所要時間差	5分	5分	10分	10分	10分
	運賃	600円	100円	100円	300円	600円
	停留所/駅	玄関前	徒歩5分	徒歩10分	玄関前	徒歩5分

(1) 対象地域の実態

陸前高田市は岩手県南東部の太平洋岸に位置しており、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る。同市では震災後、地域内・地域間バスの整備及びJR大船渡線の仮復旧としてのBRT (Bus Rapid Transit) の整備、市内仮設住宅と市街地を連結するデマンド交通の導入等により市民のモビリティ確保を行っている。

同市では今後予定されている高台移転事業の進展に伴い、まちの姿が大きく変更されることが予定されているが、人口の社会減や復興事業の長期化に伴う人々のニーズの変化等に伴い、復興事業が流動的で随時修正されることから、交通とまちづくりの連携に踏み込んだ計画策定には現時点では至っていない¹⁾。しかしながら、計画の修正を繰り返しながらも事業は着実に進行しており、将来のまちの姿を前提とした公共交通計画の策定が求められる時期に差し掛かっている状況にある。

(2) 交通利用意向調査

交通需要推計モデル構築のための基本データとして、2012年に東京大学都市生活学研究室が陸前高田市において実施した交通利用意向調査結果を用いた。調査概要について表-1に示す。調査内では、デマンド交通が仮に導入された場合を想定した交通機関選択に係るSP調査を実施している。なお、同市においては既にデマンド交通の実証実験が開始されているが、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収集できていないことから、SP調査結果を活用していることをここで断っておく。

SP調査において回答者に提示したデマンド交通のサービス案は表-2の通りである。各回答者には案A～案Eのサービス水準が記載された調査票をランダムに配布し、

表-3 市民アンケート調査

調査時期	2013年8月
調査対象	陸前高田市内（住民基本台帳から無作為抽出）
調査方法	郵送配布郵送回収調査
回答者数	1,042名
調査項目	普段の移動実態

提示条件下において利用したい交通機関（自家用車（運転）、自家用車（送迎）、路線バス、タクシー、デマンド交通、その他）を1つ選択する形式としている。なお、各調査票には設問①と設問②の2ケースのサービス水準が記載されており、回答者はそれぞれのケースで利用する交通手段を回答する形式となっている。

(3) 交通機関選択モデルの推定

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。選択肢は自家用車（運転）、自家用車（送迎）、路線バス、デマンド交通とし、サンプルの少なかったタクシー、その他交通利用者については除外した。なお、自家用車（運転・送迎）利用者については、当該手段の所有者のみそれらの選択肢を選択肢集合に含むものとした。なお、路線バスについては、対象地域の公共交通利用実態より、停留所までの徒歩距離が2～3kmあるようなケースでも公共交通を利用している層があることから、本研究では全員が選択肢集合に含むことにした。デマンド交通についてはSP調査内で全員が利用可能である想定で質問していることから、同じく全員が選択肢集合に含むことにしている。個人 n の選択肢 k の選択確率 P_{ik} は以下のように表される。

$$P_{ik} = \frac{\exp(V_k)}{\sum_{j \in C_n} \exp(V_j)} \quad (1)$$

ただし、 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。ここで、デマンド交通のサービス変数については、SP調査の調査項目をそのまま活用したが、デマンド交通以外の交通機関のサービス変数の設定については以下の通りとした。

- 自家用車（運転及び送迎）の所要時間はトリップ起終点間の最短経路を時速39.8km（平成22年度道路交通センサスにおける陸前高田市内路線の混雑時旅行速度の平均値より設定）として移動した時間とする。移動コストについてはガソリン代で表現することとし、最短経路をもとに、岩手県におけるレギュラーガソリン価格（167.1円/L※平成26年7月22-28日平均）、平成24年度のガソリン乗用車の10・15モード燃費平均値（21.1km/L）をもとに設定した。

表-4 交通機関選択モデルのパラメータ推定結果

（括弧内は変数を設定した交通機関）

変数	パラメータ	t値
定数項（送迎）	-0.492	-2.10
定数項（バス）	-4.188	-8.92
定数項（デマンド）	-2.991	-7.11
乗車時間（全手段）	2.793	2.20
ガソリン代（運転・送迎）	0.429	0.77
運賃（バス・デマンド）	-0.091	-1.30
男性ダミー（運転）	1.016	3.28
停留所アクセス時間（バス・デマンド）	-1.028	-0.71
70歳以上ダミー（バス）	1.036	2.90

- 路線バスについては、岩手県交通(株)及び陸前高田市役所が発行している時刻表及び運賃表をもとに所要時間・運賃を設定した。また、最寄り停留所までのアクセス時間については、トリップ起点から最寄り停留所までの最短経路を時速4kmで歩行した場合の所要時間より算出した。

なお、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ある点に配慮し、2013年に実施した市民アンケート調査（表-3）から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。

$$L_w = \sum_{n \in N} \sum_{i \in C_n} \frac{Q(i)}{H(i)} \ln(P(i|Z_n, \theta)) \quad (2)$$

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-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・組み合わせ及びモデル式を変更してもこの傾向は変わらなかった。結果の解釈に悩むところであるが、所要時間が公共交通利用にあまり大きな影響を及ぼしていない可能性がある。また、コストに関する変数はいずれも有意となっていない。上記を踏まえると、陸前高田市における交通機関選択においてはサービス変数がほとんど効いていない状態であることが伺える。今後、推定値の妥当性検証のため、RPデータと融合するなどして更なる検討を行う必要があるが、少なくともこれまでの結果からは、対象地域の交通機関選択においては、選好そのものが固定化しており、利用可能性のみで決定している状態であることが伺える。なお、修正済み尤度比 ρ^2 は0.591であり、説明力が高いモデルであると言える。

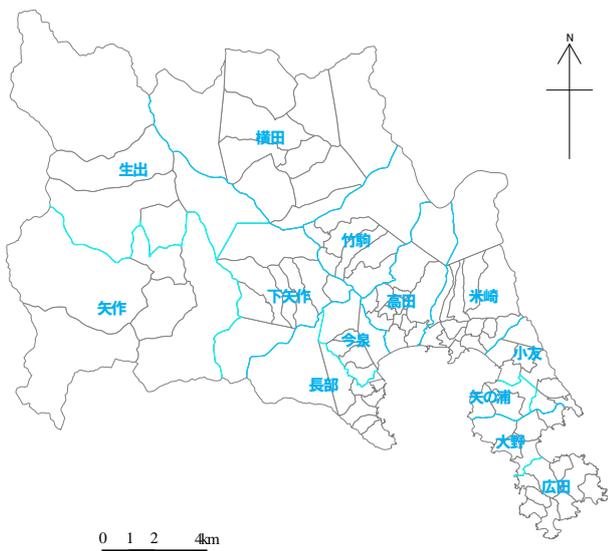


図-2 分析ゾーニング

(4) 高台移転後の需要シミュレーション

前項(3)で構築した交通機関選択モデルを用いて、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した場合（概ね平成30年ごろを想定）の需要分析を行う。

a) 使用データ・ゾーニング

シミュレーションにおいて使用するデータは、前述の市民アンケート調査結果であり、調査結果のうち、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。

分析は図-2に示す13ゾーンで行った。基本的に大字レベルとしたが、同一大字内で復興事業の分布に大きく偏りがある地区、今後のネットワーク計画の検討にあたり、細分化した方が良いと思われる地区については適宜分割している。

b) 分析条件

選択肢集合については、アンケート調査結果をもとに、当該交通手段の保有者のみそれらの選択肢を選択肢集合に含むものとしている。また、所要時間や費用の設定は、基本体にモデル推定時の代替選択肢の設定と同様の方法を取っているが、デマンド交通については、現在の陸前高田市デマンド交通実証実験事業のサービス水準をもとに設定している（1乗車300円、玄関前送迎、所要時間は実際の運行記録より推定）。

発生・集中交通量、分布交通量の設定に関わる高台移転後の人口設定においては次の仮定を置いている。まず、現在の仮設住宅での居住者が全員防災集団移転団地もしくは災害公営住宅に転居する状況を想定する。なお、どの世帯がどの団地・公営住宅に移転するかは限定しておらず、仮設住宅居住者をプールして団地・公営住宅の建設戸数（表-5、表-6）に応じて無差別に配分している。

表-5 陸前高田市内防災集団移転事業計画

地区	団地名	移転戸数	地区	団地名	移転戸数	
長部	福伏	5	小友	両替	14	
	要谷	7		三日市	5	
	双六	9		柳沢	9	
	双六第二	3		茂里花	5	
	上長部	17		新田	7	
	月山	50		只出	11	
	今泉高台	13		長洞	14	
矢作 竹駒 高田 今泉	下矢作	5	広田	大野	7	
	下沢	5		広田大野	18	
	館	8		田谷	32	
	高田高台	158		六ヶ浦	9	
	今泉高台	78		泊第一	3	
米崎	脇の沢	68		泊第二	8	
	堂の前	5		泊第三	14	
				中沢	9	
				久保	7	
合計 30団地					603	

資料：復興News陸前高田⁹⁾

表-6 陸前高田市内災害公営住宅建設計画

地区	建設候補地	計画戸数
今泉	協議中	県60・市60
長部	協議中	市60
	高田西地区	県320
高田	中田地区	県168
	下和野地区	市120
米崎	協議中	県60
小友	柳沢前地区	県40
	協議中	県52
広田	協議中	市60
合計		県700・市300

資料：陸前高田市災害公営住宅供給基本方針¹⁰⁾

将来の人口変動については、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。陸前高田市の年齢別人口の推移予測は図-3に示す通りであり、若年層を中心とした人口減が顕著である。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、年齢階層別1人あたり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が、市内の県立病院については、米崎地区から高田地区に移転する予定となっているため、同病院に通院しているサンプルのみ目的地が現在から将来にかけて変更になる仮定を置いている。

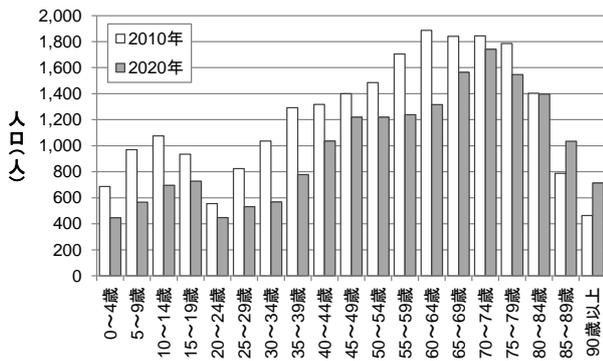


図-3 陸前高田市における今後の年齢別人口の推移予測
資料：国立社会保障・人口問題研究所

c) シミュレーション結果

利用交通機関別発地別トリップ数のシミュレーション結果を図-4に示す。なお、ここでは自動車交通（自分で運転、送迎）及び公共交通（バス、デマンド交通）の2手段に集約して整理している点に留意する。図-3に示す通り陸前高田市全体で人口が減少することから、多くの地区においてトリップの全体数が減少しているが、大きく減少するのは自動車トリップである。一方で、公共交通トリップについては、主たる利用者である高齢者人口は増加するため、大きく減少することはなく、増加する地区も見られる。

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。次章で紹介する公共交通ネットワークの検討の際には、これらの移動需要の分布変化を踏まえることが重要となる。

4. 二段階最適化問題の定式化

(1) 基本モデル

本章では、前章で算出したゾーン別の公共交通需要をインプットとして、復興事業完了後のサービス設計のためのルーティング・運行便数決定問題と利用者のルート配分を定式化する。

定式化においては、Szeto and Jiang⁹⁾が提案した二段階最適化問題（以下、Szeto model）を参考にする。Szeto modelは、ルートと便数の設計を同時に解くことができる点が特徴であり、目的関数及び制約条件内で車内混雑の発生及び乗換回数の増加に伴う不効用を明示的に取り扱っている点が新しい。なお、我々が提案する最適サー

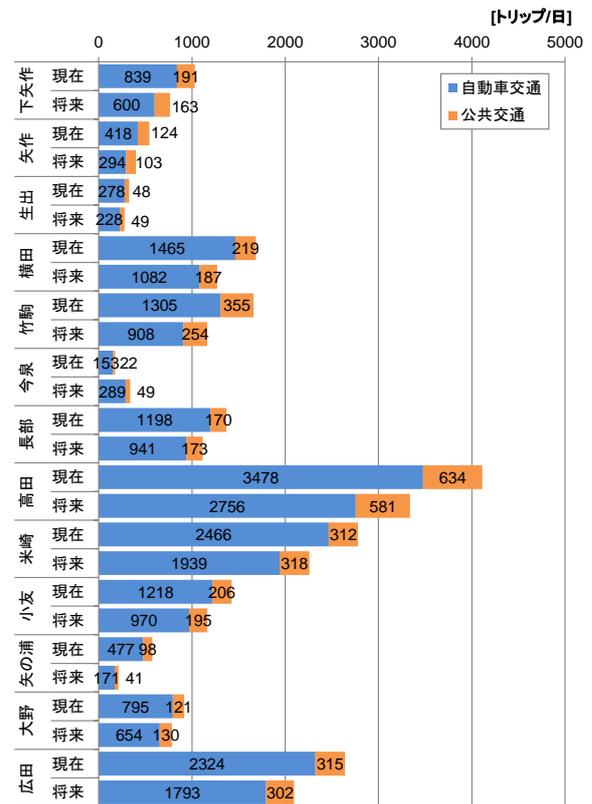


図-4 発地別トリップ数/交通機関分担

ビス設計の定式化にあたっては、当モデルの理解が不可欠であるため、基本概念と定式化の概要について、以下に再掲する。

a) 上位問題

上位問題ではネットワーク全体での乗換客数合計値の最小化が図られるような各路線の便数とルートを決する。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。取り扱うネットワークのイメージは図-5に示す通り、ノード（停留所+セントロイド）とリンクによる有向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の停留所候補地及びターミナル候補地と接続する。なお、起点ターミナルはスタディエリア内、終点ターミナルはスタディエリア外に設置する。

上位問題の定式化は式(3)-(18)の通りである。なお、前章で算出した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 としてインプットされることになる。なお、需要が疎な地域において最大の関心事項となるオペレーション費用については、所与の条件として設定するサービス水準（ W , k_{cap} , R_{max} , f_{min} , S_{max} , T_{max} ）により表現する。

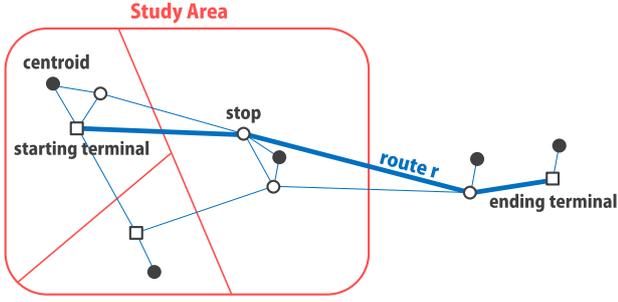


図-5 上位問題のネットワーク設定イメージ
資料：Szeto and Jiang⁹⁾を参考に筆者作成

目的関数

$$\min_{x,t} z_1 = \sum_{i \in T^R} \sum_{e \in G_d} v_i^e \quad (3)$$

制約条件

$$\sum_{j \in U \cup \{0\}} X_{0jr} = 1 \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{0\}} X_{i0r} = 1 \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in Z_U \cup \{0\}} X_{ijr} - \sum_{i \in Z_U \cup \{0\}} X_{jir} = 0 \quad \text{for } j \in Z_U, r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in Z_U \cup \{0\}} X_{ijr} \leq 1 \quad \text{for } j \in Z_U, r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in Z_U \cup \{0\}} X_{ijr} \leq 1 \quad \text{for } j \in Z_U, r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (8)$$

$$X_{jir} = 0 \quad \text{for } j \in Z_U, r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (9)$$

$$T_r = \sum_{i \in Z_U} \sum_{j \in Z_U, j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_i) - s_i \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} 2f_r T_r (1 - X_{00r}) \leq W, \quad (11)$$

$$f_{\min} (1 - X_{00r}) \leq f_r \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (12)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, j \neq i} X_{ijr} \leq S_{\max} \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (13)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_i) - s_i \leq T_{\max} \quad \text{for } r = 1 \text{ to } R_{\max}, \quad (14)$$

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} \sum_{i \in H_m} \sum_{j \in Z_U \cup \{0\}, j \neq i} X_{ijr} \geq 1 \quad \text{for } m \in G_s, \quad (15)$$

$$\sum_{r=1}^{R_{\max}} f_r k_{cap} \delta_r^e \geq \sum_{m \in G_s} d_m^e \quad \text{for } e \in G_d, \quad (16)$$

$$\delta_r^e = \sum_{i \in Z_U} \sum_{e' \in H_e} X_{ie'r} \quad \text{for } e \in G_d, \quad (17)$$

$$q_{ir} - q_{jr} + pX_{ijr} \leq p - 1 \quad \text{for } i, j \in Z_U, i \neq j, r = 1 \text{ to } R_{\max}. \quad (18)$$

b) 下位問題

下位問題では、上位問題によって決定したルートに基

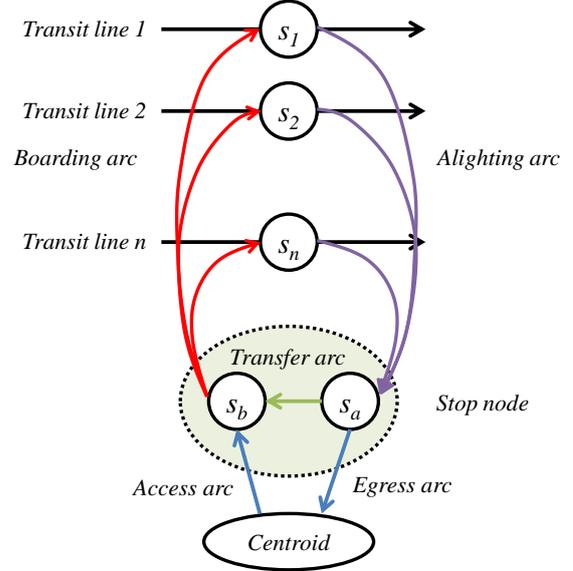


図-6 下位問題のネットワーク設定イメージ
資料：Szeto and Jiang⁹⁾を参考に筆者作成

づき、トランジット配分を行う。配分計算の際の乗客のルート選択行動については、乗車時間・停車時間・待ち時間の合計を最小化するルートを選択するとともに、リンク・車両の容量制約を考慮するルールが置かれている。

下位問題のネットワークイメージを図-6に示す。バス路線とセントロイドの接続をアークで表現し、各アークには移動時間・便数・容量の情報を持たせる。乗車アークと降車アークが各路線 s_1, \dots, s_n と停留所ノード（上位問題の停留所ノードに該当）を連結し、停留所ノードは降車ノード s_a と降車ノード s_b で表現されており、乗換アークが両者を連結することになる。アクセスアーク・イグレスアークはセントロイドから停留所ノードまでの徒歩移動に該当する。停留所と停留所の間はトラベルアークで連結される。

下位問題の定式化は式(19)-(24)の通りである。

目的関数

$$\min_{v,w} z_2 = \sum_{a \in A} \sum_{e \in G_d} c_a v_a^e + \sum_{i \in Z_L} \sum_{e \in G_d} w_i^e, \quad (19)$$

制約条件

$$v_a^e \leq f_a w_i^e \quad \text{for } a \in A_i^+, i \in Z_L, e \in G_d, \quad (20)$$

$$\sum_{a \in A_i^+} v_a^e = \sum_{a \in A_i^-} v_a^e + d_i^e \quad \text{for } i \in Z_L, e \in G_d, \quad (21)$$

$$\sum_{e \in G_d} v_a^e \leq f_a k_{cap} \quad \text{for } a \in A, \quad (22)$$

$$v_a^e \geq 0 \quad \text{for } a \in A, e \in G_d, \quad (23)$$

表-7 変数の設定

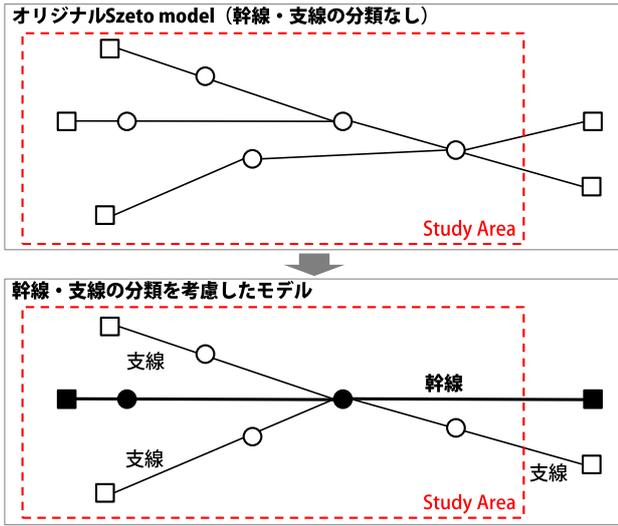


図-7 幹線・支線の分類イメージ

$$w_i^e \geq 0 \quad \text{for } i \in Z_L, e \in G_d. \quad (24)$$

なお、上位・下位問題で使用する変数は表-7の通りである。

(2) 実装に向けた改善点

Szeto modelを我が国の公共交通部門において実装するにあたって、課題となる点及び対応方法案を以下に整理する。

a) 幹線交通と支線交通の分類

Szeto modelは幹線・支線の分類が明示されていないことから、図-7に示すように、モデルにより内生的に決まるルーティングが必ずしも階層化されたものにならない点が課題である。

この問題を解消するには、幹線用の停留所セット C' と支線用の停留所セット C'' を設定し、それぞれのセット内でルート r を形成するルールを制約条件内に加えることが考えられる。なお、幹線と支線の接続を表現するためには、 $C' \subset C''$ の関係（幹線停留所は支線停留所にもなり得るが逆はない）を成立させておく必要がある。

また、幹線と支線のサービス水準（便数、運用車両数、車両容量等）の違いを表現するためには、両者でルートの制約条件を変えておく必要があることから、ルートセットを式(25)-(26)の通り修正する。

幹線ルートセット

$$r' = 1 \text{ to } R'_{\max} \quad (25)$$

支線ルートセット

$$r'' = R'_{\max} + 1 \text{ to } R_{\max} \quad (26)$$

Sets	
Z_U	上位ネットワーク内のノードセット
G_S	スタディエリア内のセントロイドセット
H_m	セントロイド m に接続する停留所セット
U	スタディエリア内の起点バスターミナルセット
V	スタディエリア外の終点バスターミナルセット
G_d	スタディエリア外のセントロイド・目的地セット
C	スタディエリア内のバスターミナル・停留所セット
Z_L	下位ネットワークのノードセット
T^R	下位ネットワークの乗継リンクセット
A	下位ネットワークからのリンクセット
A_i^+	ノード i から出力されるリンクセット
A_i^-	ノード i に入力されるリンクセット
Indices	
i, j, m	ノード
e	スタディエリア外の目的地（セントロイド）
e'	スタディエリア外の終点バスターミナル
r	ルート
Parameters	
c_{ij}	ノード j 間のバス乗車時間（最短経路）
c_a	リンク a の乗車時間
s_i	ノードにおける平均停車時間
d_m^e	ノード m からセントロイド e への交通需要
W	最大バス運用台数（所与）
k_{cap}	バス容量（所与）
R_{max}	最大ルート数（所与）
f_{min}	各ルートの最小便数（所与）
S_{max}	スタディエリア内の最大停留所数（所与）
T_{max}	スタディエリア内の最大旅行時間（所与）
p	サブツアー排除のための巨大数
Decision Variables	
Lower-level	
v_i^e	リンク i から目的地 e に向かう乗換客数
v_a^e	リンク a から目的地 e に向かう乗客数
w_i^e	ノード i における目的地 e に向かう全乗客の総待ち時間
\mathbf{v}	$\{v_a^e\}$
\mathbf{w}	$\{w_i^e\}$
Upper-level	
q_{ir}	サブツアー排除のためのルート r ノード i のポテンシャル
X_{ij}^r	$[0,1]$ ダミー：ルート r がノード i の後ノード j を通過=1
X_{0j}^r	$[0,1]$ ダミー：ルート r がノード j から開始=1
X_{ir}^r	$[0,1]$ ダミー：ルート r がノード i で終了=1
X_{00}^r	$[0,1]$ ダミー：ルート r が利用不可能=1
f_r	ルート r の便数
\mathbf{X}	$\{X_{ij}^r\}$
\mathbf{f}	$\{f_r\}$
Upper-level functions of decision variables	
T_r	起点～終点ターミナルまでのルート r のトリップ時間
δ_r^e	$[0,1]$ ダミー：ルート r がセントロイド e に繋がるターミナルと接続=1
f_a	リンク a の便数
d_i^e	ノード i からバスターミナル e' への乗客数

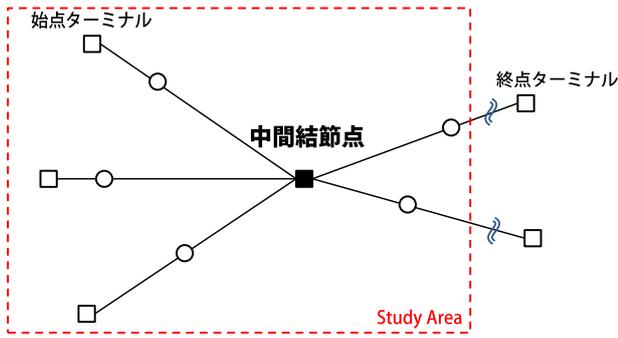


図-8 中間結節点の設置イメージ

ここで、 r' は幹線ルート、 r'' は支線ルートを示すインデックス、 R'_{\max} は幹線ルートの最大数を示すパラメータ（所与）である。 r の設定変更に伴い、上位問題の式(11)-(16)が式(27)-(38)の通り修正される。なお、クォーテーションマークを付与したパラメータは幹線の、ダブルクォーテーションマークを付与したパラメータは支線の値をそれぞれ示す。

$$\sum_{r=1}^{R'_{\max}} 2f_r T_r (1 - X_{00r}) \leq W', \quad (27)$$

$$\sum_{r=R'_{\max}+1}^{R_{\max}} 2f_r T_r (1 - X_{00r}) \leq W - W', \quad (28)$$

$$f'_{\min} (1 - X_{00r}) \leq f_r \quad \text{for } r=1 \text{ to } R'_{\max}, \quad (29)$$

$$f''_{\min} (1 - X_{00r}) \leq f_r \quad \text{for } r=R'_{\max}+1 \text{ to } R_{\max}, \quad (30)$$

$$\sum_{i \in C'} \sum_{j \in C', j \neq i} X_{ijr} \leq S'_{\max} \quad \text{for } r=1 \text{ to } R'_{\max}, \quad (31)$$

$$\sum_{i \in C''} \sum_{j \in C'', j \neq i} X_{ijr} \leq S''_{\max} \quad \text{for } r=R'_{\max}+1 \text{ to } R_{\max}, \quad (32)$$

$$\sum_{i \in C'} \sum_{j \in C', j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_i) - s_i \leq T'_{\max} \quad \text{for } r=1 \text{ to } R'_{\max}, \quad (33)$$

$$\sum_{i \in C''} \sum_{j \in C'', j \neq i} X_{ijr} (c_{ij} + s_i) - s_i \leq T''_{\max} \quad \text{for } r=R'_{\max}+1 \text{ to } R_{\max}, \quad (34)$$

$$\sum_{r=1}^{R'_{\max}} \sum_{i \in H_m} \sum_{j \in Z_U \cup \{0\}, j \neq i} X_{ijr} \geq 1 \quad \text{for } m \in G_s, \quad (35)$$

$$\sum_{r=R'_{\max}+1}^{R_{\max}} \sum_{i \in H_m} \sum_{j \in Z_U \cup \{0\}, j \neq i} X_{ijr} \geq 1 \quad \text{for } m \in G_s, \quad (36)$$

$$\sum_{r=1}^{R'_{\max}} f_r k'_{cap} \delta_r^e \geq \sum_{m \in G_s} d_m^e \quad \text{for } e \in G_d, \quad (37)$$

$$\sum_{r=R'_{\max}+1}^{R_{\max}} f_r k''_{cap} \delta_r^e \geq \sum_{m \in G_s} d_m^e \quad \text{for } e \in G_d. \quad (38)$$

b) 中間結節点の追加

実際のバスネットワークにおいては、図-8のように始点・終点ターミナル以外に中間結節点となる停留所（例

えば鉄道駅・幹線バスとの乗換箇所、すべての路線が經由する施設等）の存在が考えられる。

このような中間結節点となるような停留所の存在を表現するためには、上位問題の制約条件内に式(39)を追加することで、中間結節点となる、ある特定のノード $k(k \in K)$ を必ず經由する制約を課す必要がある。

$$\sum_{k \in K \cup \{0\}} X_{ikr} = 1 \quad \text{for } r=1 \text{ to } R_{\max} \quad (39)$$

ここで、 X_{ikr} はルート r がノード k を通過する場合1、そうでなければ0を取るダミー変数である。なお、上式では全ルートがいずれかの中間結節点を通る制約を課しているが、ルート r の範囲を変更することにより、中間結節点を通らない路線を設定することも可能である。

c) 料金抵抗を考慮するための一般化時間の採用

Szeto modelでは、下位問題の配分計算時に利用者の不効用を表現するために時間（乗車時間・待ち時間・停車時間）を採用しているが、ここには運賃の概念が入っていない。この点については筆者自身も「意思決定において運賃は非常に重要な因子であるため、交通料金構造を配分計算時にルートチョイスに組み込む必要がある」と指摘している。そこで、下位問題の目的関数(19)内で取り扱う時間を式(40)により一般化時間化させることによって運賃の概念をモデル内に組み込むことを提案する。

$$\min_{v,w} z_2 = t_1 \left(\sum_{a \in A} \sum_{e \in G_d} c_a v_a^e \right) + t_2 \left(\sum_{i \in Z_L} \sum_{e \in G_d} w_i^e \right) \quad (40)$$

ここで、 t_1 は乗車時間を一般化時間化するための係数、 t_2 は待ち時間を一般化時間化するための係数である。なお、これらの係数の特定化に資するデータが確保できていないため、以降の分析は今後の研究に譲るが、移動形態・利用者属性（特に若年層・高齢層）別に値を変えることも想定される。

d) 交通事業者のテリトリーの表現

地域内で複数の交通事業者が事業展開している場合、これまでの経緯からそれぞれの事業者でテリトリーを決めて営業を行っている場合が想定される。例えば、タクシー事業者に一般乗合事業を委託する場合、従前の一般乗合事業の営業範囲を踏まえて運行範囲の計画を立てることがある。これらのテリトリーについては、スタディエリアを複数設定し、エリアの設定に応じて停留所・ターミナルのグルーピングを行うことによって表現が可能である（図-9イメージ参照）。なお、図-9はテリトリー間である程度の相互乗り入れを許容している形であるが、場合によってはエリアAの交通事業者はエリアBへの侵入をさせないエリア設定もあり得る。このような業務区域の排他性については地域によって異なると思われることから、スタディエリアの取り扱いについては地域特性

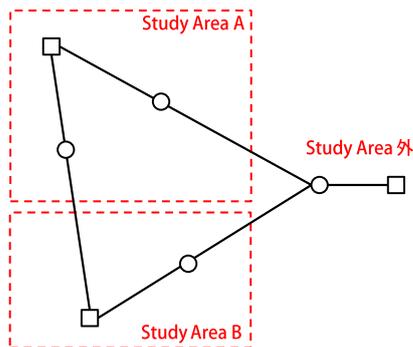


図-9 交通事業者別スタディエリアの設定イメージ

に合わせた配慮が必要である。

e) 路線不定期・区域運行の表現

路線不定期・区域運行も含めたルーティング問題を解く場合、VRPを需要応答型の旅客交通に応用したDARP (Dial-a-Ride Problem)や、出発・到着時刻の許容時間幅 (タイムウインドウ) を考慮したVRPであるVRPTW (VRP with Time Window)の適用が必要となり、路線定期運行のルーティング問題と比較すると更に複雑化する。例えば、Dikas and Minis¹¹⁾はタイムウインドウを持つPick-up and Delivery問題を解くことにより、需要に応じて基本ルートから逸脱するセミデマンド交通のルーティング問題を定式化しており、このような定式化について、上位問題の中で取り入れることで、路線定期・区域運行の表現は理論上可能だと考えられるが、計算が非常に複雑化する可能性が高いことから、具体的な定式化については今後の課題としたい。

(3) アルゴリズム

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困難問題に対応すべく、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。近年ではローカルサーチやアニーリング、タブーサーチ、遺伝的アルゴリズム等のメタヒューリスティクスと呼ばれる各種近似手法が開発されており、対象とする問題の特性を考慮して性能のよいアルゴリズムを設計する必要がある。

今回紹介したSzeto modelについてもNP困難問題であり、ABCアルゴリズムをベースに構築したHybrid ABCアルゴリズムを用いて近似解の計算を行っている。ABCアルゴリズムはKaraboga¹²⁾によって開発された蜜蜂の採餌行動にヒントを得た最適化アルゴリズムであり、遺伝的アルゴリズムでの計算結果と比較して計算スピード・安定性ともに優れているとされている⁹⁾。ただし、本稿で提案した改善点を反映した場合、更に計算が複雑になることから、計算の高速化・精緻化が図られるアルゴリズムの適用が必要とされる。

5. まとめ

本稿の成果を踏まえ、以下に今後取り組むべき課題を整理する。

- ・ 森山ら³⁾が指摘するように、需要が非常に疎な地域では、非補償型意思決定が行われ、所要時間や運賃などのサービス変数ではなく、地域とのつながり (車内で交流できること) や周期性 (毎日決まった時間に移動できること) などの変数が効用に大きな影響を及ぼしている可能性があることから、一般的なサービス変数のみに依存しない地域の実態に即した効用関数を設定した上で需要予測及び最適化計算を行う必要性が高い。
- ・ 本稿で提案した交通需要推計については、トリップ頻度・目的地選択については現状維持を仮定しており、交通機関分担についても単純なMNLによる試算に止まっているため、今後モデルの精緻化を図る必要がある。
- ・ ルーティング・運行便数計画に関しては二段階最適化問題の活用によるフレームを示したのみであり、具体的な計算結果を示すまでに至っていない。今後引き続き、小規模ネットワークへの適用等を通じ、これらの課題に対応していきたい。また、アルゴリズムについては、既往研究ではABCアルゴリズムによる計算が安定かつ効率的だとされているが、他のメタヒューリスティクス手法についてもレビューを重ね、適当な手法を選定する必要がある。
- ・ 次なるステップとして、日モデルのシミュレーション結果を踏まえ、具体的な運行態様やダイヤ設定のための需要の時間変動の整理に落とし込んだ検討が今後必要となる。

謝辞: 本研究を行うにあたって、陸前高田市の住民の方々にアンケート等へのご協力を戴いた。また、調査実施にあたり、陸前高田市及び東京大学都市生活学研究室の協力を戴いた。ここに感謝の意を記す。なお、本稿に記載している全ての事項に関する責任は筆者が負うものとする。

参考文献

- 1) 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・改善に関する調査報告書 (平成25年3月)，2013。
- 2) 北詰恵一：地方都市におけるバス需要予測の枠組み，彦根論叢，Vol.381，pp.21-33，2009。
- 3) 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.786IV-67，pp.39-51，2005。

- 4) 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, Vol.300, pp.95-107, 1980.
- 5) 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, Vol.325, pp.143-154, 1982.
- 6) 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.
- 7) 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, pp507-512, 1997.
- 8) Gao, Z.Y., Shan, L.L.: A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems, *Transportation Research Part B*, Vol.38, No.3, pp235-250, 2004.
- 9) 陸前高田市復興対策局: 復興 News 陸前高田, 第 15 号 (平成 26 年 6 月), 2014.
- 10) 陸前高田市: 陸前高田市災害公営住宅供給基本方針 (平成 24 年 6 月), 2012.
- 11) Dikas, G. and Minis, I.: Scheduled paratransit transport systems, *Transportation Research Part B*, Vol.67, pp.18-34, 2014.
- 12) Karaboga, D.: An idea based on honey bee swam for numerical optimization, *Technical Report TR06*, Computer Engineering Department, Erciyes University, Turkey, 2005.

(?????.?.? 受付)

DESIGN OF PUBLIC TRANSPORTATION SERVICES IN THE DISASTER AREA WITH BI-LEVEL OPTIMIZATION

Daisuke YOSHINO and Eiji HATO