

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04655

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Evaluation model for dynamic bus network planning in reconstruction process of great disaster area

研究代表者

岩倉 成志（IWAKURA, SEIJI）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：20223373

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：東日本大震災で被災した三陸は、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が急速に変化した。復興事業が進むにつれて住民の人口分布が大きく変化した。住民の移動の不便さを緩和するには、土地利用変化に迅速に対応する公共交通ネットワークの再編が必要である。このため、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、NTTモバイル空間統計で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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バス事業者と利用者双方の評価を統合したバスネットワーク再編の複数案の順位を安定的に解き、かつ携帯位置情報データを用いて被災地の土地利用の急速な変化に整合するバスネットワークの解が得られる独創的な解析方法の研究である。さらに、これまで大手バス事業者でも経験則で構築していたバスネットワークを、計画の立て方自体をも大局的かつ論理的に構築する方法として、被災後の公共交通ネットワーク計画に大きなパラダイムシフトを与える意義のある研究と考える。一般的なコンピュータの計算可能量を大幅に超える長大ネットワークでなければ確実に計算結果を得られ、かつ無料の数値解析ソフトウェアでプログラム開発して実務へ提供できる。

研究成果の概要（英文）：In the areas affected by the Great East Japan Earthquake, land use changed rapidly from evacuation shelters to temporary housing, and then to relocation to higher ground and public housing for disaster victims. During the reconstruction process, the population distribution of the residents changed dramatically. In inconvenience to residents' mobility, it is necessary to reorganize the public transportation network to respond quickly to the land use changes. To solve this problem, we developed a technology to support the extraction of a bus network that can reorganize bus routes sequentially in a short period of time, using ZDD, a method to perform extremely high-speed computation to enumerate all routes on the network, to create a set of candidate bus routes, and to analyze the evaluation functions of operators and users, day-to-day traffic flows using NTT Mobile Spatial Statistics, and the data of the bus route network.

研究分野：土木計画学

キーワード：大規模被災地 復興過程 バスネットワーク ZDD モバイル空間データ 岩手県宮古市

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災で被災した三陸沿岸地域は、仮設住宅への転居、その後の復興に伴う急速な土地利用変化に伴い、住民コミュニティの問題、さらに移動手段の不足による高齢者の生活不活発病の問題が起きていた。生活不活発病へのもっとも効果的な対応は、コミュニティへの参加を充実させ、活動機会を増やし、心身機能を使う機会を増やすこととされている。活動機会を増やすためには、土地利用が大幅に変化する中で、高齢者が希望している社会参加や友人との交流機会への移動抵抗を減少させる路線バス等の公共交通ネットワークとそのサービス水準とを充実させることが必要である。

(1) 実務でのバス路線の計画は、実際のところ経験則と住民要望とで行われており、定量的な需要分析に基づく検討も極めて限られていた。大都市の大手事業者であってもバス事業者は、論理的な意思決定技術を有していない、ゆえに短期間にネットワーク再編を行うことは困難と言わざるを得ない。路線バスネットワークの逐次再編のための方法論を構築する必要があるのではないかと。

(2) 既存研究では整数計画法に基づく非線形最適化や遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算が提案されて、その有用性も確認されているところであるが、莫大な計算負荷がかかり、安定的に解を得る保証がないという問題があった。またこうした方法では、関数上での最適解は得られるものの、バス事業者が再編させやすいと考えるネットワークの次善解(関数上は最適解でなくとも事業者の運営上は最適な解)を得ることができないという実務的には大きな問題も有していた。次善解も含めて、事業者が選択可能なネットワーク再編リストを提示できる技術が必要である。

## 2. 研究の目的

ZDD(ゼロサプレス型二分決定グラフ)と呼ばれるグラフネットワーク上の全ルートを、超高速で計算する技法を応用して、ルート候補集合を作成し、離散選択モデルを用いたネットワーク評価関数を構築し、次善解も含んだバスネットワーク案を論理的に策定する方法を研究する。逐次の交通需要データには、day-to-day の人流データである NTT モバイル空間統計(携帯 GPS データ)の適用性を研究する。以上の2つのアプローチによって、土地利用変化に応じてバスネットワークの逐次再編を検討できる計画支援ツールの技術開発を目的とする。

既存研究では整数計画法に基づく非線形最適化や遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算が提案されて、その有用性も確認されているところであるが、莫大な計算負荷がかかり、安定的に解を得る保証がないという問題が内在していた。この問題は多ノードのネットワークから最適なバスを求める最適化計算のアルゴリズムの限界によって生じていたが、近年、ZDD と呼ばれるグラフネットワーク構造を大幅に圧縮して、超高速で計算する技法が実用可能となっている。この技術を活用して起終点間の全バスを探索した後に、バス事業者の評価関数と利用者の効用関数とを統合して、ZDD で計算される全バスの推奨順位を計算してやれば、極めて安定的に望ましいバスネットワークが抽出できるという着想を得た。

## 3. 研究の方法

デジタル道路地図 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 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。次に被災地住民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て、バス事業者が運行管理や労務管理面から、被災地復興過程により適したバスネットワーク再編の意思決定をおこなえるシステム開発を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 事業者評価関数の推定

#### (a) 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。

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肢集合として用いる。

(b) 事業者評価関数の説明変数

ZDD で抽出された選択肢集合の中から実際のバスルートを実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  $j$  を選択肢集合の中から選択する際の確率  $P_{ij}$  は式 (1) のロジットモデル型の式とし、評価関数はバスルート別の評価関数  $S_{ij}$  として式 (2) を構築する。  
 $S_{ij}$ : 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)

$$P_{ij} = \frac{\exp(S_{ij})}{\sum_{r=1}^N \exp(S_{ir})} \quad (1)$$

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

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。

$$Q_{bus\_ij} = Q_{ij} P_{bus} \quad (3)$$

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

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

$T$ : 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。右左折回数は、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。

(c) 事業者評価関数の推定結果

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右表に示す。推定結果から選択肢数設定が異なる 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。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抽出を行う。

説明変数	選択肢集合 50 パラメータ(t 値)	選択肢集合 100 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

(d) 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と実際の運行経路との乖離要因の解明するために、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できた。

(2) 利用者評価関数の推定

(a) 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 .

(b) 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は , 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 , 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 . 改善の希望内容は運賃 , ダイヤや運行頻度 , バスルートがあげられた .

(c) 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 (4) の選択肢 ( 選択可能性は考慮 ) で推定し , 説明変数は式 (5) の所要時間 , 移動費用 , 待ち時間 , 選択可能なバス停へのアクセス距離とした .

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

(d) 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右表に示す . 所要時間とアクセス距離以外のパラメータは有意とはならなかったが , 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事業者表関数の潜在利用者数の推計にも用いられる .

(3) 逐次バス NW の抽出結果

(a) 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 . また田老地区と鎌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 , 鎌ヶ崎地区では , 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た . 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 .

(b) 復興過程におけるバス NW 候補の推計結果

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 . 事業者評価関数の評価値と , 4. で推定した利用者評価関数から候補経路の 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 事業者評価関数の最適解 NW , 利用者評価関数の最適解 NW , 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 , 次善解 NW についても考察する .

a) 2013 年の路線バス NW 評価

事業者評価 1 位ルートは , S1 の田老地区から宮古駅を結ぶ路線 ( 赤実線 ) の崎山地区で , 国道 45 号を經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經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に重複した .

S1 路線 ( 赤実線 ) では崎山地区に加え , 鎌ヶ崎地区でも乖離が生じた . 鎌ヶ崎地区も 2013 年当時仮設住宅が 2 か所立地している . S4 の津軽石地区からの路線 , S5 の千徳地区から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・利用者評価値分布を図中の右に示した . 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 .

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鎌ヶ崎地区経由ルートが推計された . 他の 4 路線は実ルートと概ね重複する結果となった .



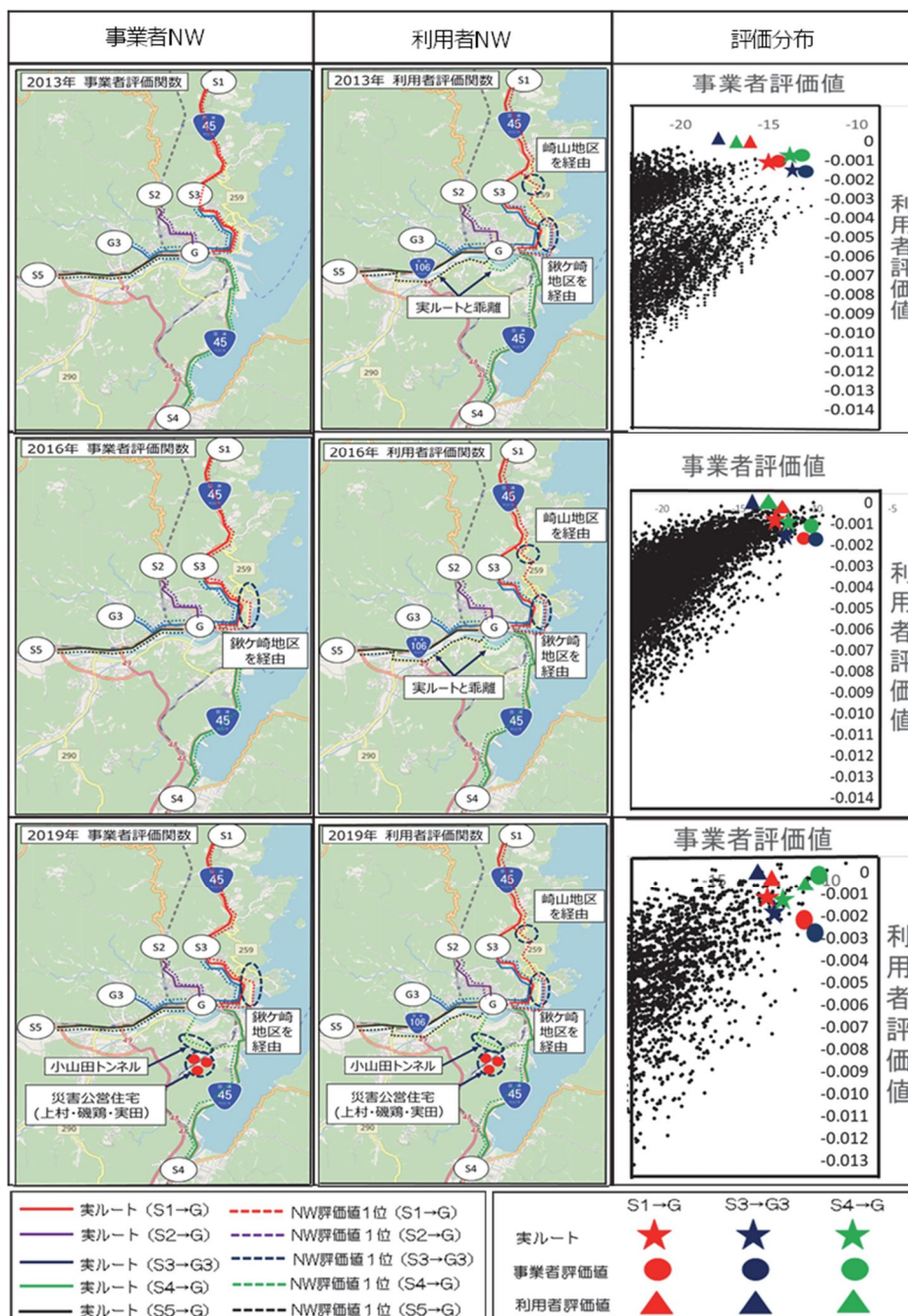
赤実線の路線が崎山地区・鎌ヶ崎地区に加え宮古病院を經由するルートが推計された。また宮古病院から G3 を結ぶ路線（青実線）では鎌ヶ崎地区を經由するルートが推計され、国道 45 号を經由する実ルートと乖離した。

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經由するルートが推計された。そのため宮古駅まで国道 45 号線を經由する実ルートと乖離した。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經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、その近傍を經由するルートが推計されたと考えられる。

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 号を經由せず、復興事業の進展が著しい沿岸の鎌ヶ崎地区を經由するルートが推計された。また S4（津軽石地区）路線の評価値 2 位・3 位ルートは、評価値 1 位ルートが經由した小山田トンネルや災害公営住宅（上村・磯鶏・実田）の近傍を經由せず、実ルートと同じ国道 45 号を經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 位ルートが沿岸部の鎌ヶ崎地区を經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、実ルートと同じ国道 45 号を經由して宮古駅までを結ぶ経路が推計された。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高根 大毅, 岩倉 成志, 小山 真弘	4. 巻 74
2. 論文標題 ZDDを用いたバスネットワークの複数抽出方法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会第74回年次学術講演会	6. 最初と最後の頁 CD
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高根 大毅, 岩倉 成志	4. 巻 61
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第 61 回土木計画学研究発表会	6. 最初と最後の頁 CD
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高根 大毅, 岩倉 成志	4. 巻 65
2. 論文標題 大規模被災地の復興過程に応じた バス路線再編のための計算手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第 65 回土木計画学研究発表会	6. 最初と最後の頁 CD
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高根 大毅
2. 発表標題 ZDDを用いたバスネットワークの複数抽出方法
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高根 大毅
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第 61 回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高根 大毅, 岩倉 成志
2. 発表標題 大規模被災地の復興過程に応じた バス路線再編のための計算手法
3. 学会等名 第 65 回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関