

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14258

研究課題名（和文）災害発生直後の要求機能に着目した道路網脆弱性分析手法の開発

研究課題名（英文）Development of road network vulnerability analysis focusing on required functions immediately after a disaster

研究代表者

杉浦 聡志（Satoshi, Sugiura）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：30648051

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は道路網の脆弱性を評価し、改善策を提案する手法を提供することを目的とした。脆弱性評価のための手法として、最小カット理論を応用し、接続の強さを評価する2つの指標（孤立脆弱性、局所容量脆弱性）およびそれらを求めるモデルを構築した。2指標を実際の道路網に適用し、孤立しやすい箇所の特長や、一斉避難時に混在が予想される領域を特定した。くわえて、孤立脆弱性を緩和するためのネットワークデザイン問題を構築し、北海道北部の主要地点の孤立脆弱性を緩和する新たな道路区間の追加箇所を特定した。これらの研究成果は2編の高水準学術誌に掲載され、一定の評価を得たものとする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は災害直後に道路網が要求される性能、すなわち避難路としての冗長性、および孤立生起のしやすさを評価し、その水準を増強するための方策を与えるものである。構築したモデル群はいずれも実際の道路網で適用できることを確認しており、実務適用も可能であると考えている。構築した手法論は、以降の防災計画において資するところが小さくないと考える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to provide a method for evaluating the vulnerability of road networks and proposing improvement measures. Using the minimum cut theory, we developed two indicators to assess connection strength: isolation vulnerability and local capacity vulnerability, and constructed models to calculate these indicators. These indicators were applied to actual road networks to identify locations prone to isolation and areas expected to be congested during mass evacuations. Additionally, we formulated a network design problem to mitigate isolation vulnerability and identified new road sections to be added to reduce isolation vulnerability at key locations in northern Hokkaido. These research outcomes were published in two high-level academic journals and are considered to have received a certain level of recognition.

研究分野：土木計画、交通計画

キーワード：災害 道路網分析 ネットワークデザイン問題 グラフ理論 脆弱性

1. 研究開始当初の背景

我が国で頻発する豪雨災害や大規模地震に対して、道路網は円滑な避難や緊急物資の輸送、あるいは復旧復興など、災害のフェーズに応じた機能を発揮することが求められる。災害発生後のフェーズと道路網が求められる機能は、表1のように整理できる。大規模災害の発生直後には、緊急避難需要に対して避難可能とするために避難路の道路容量が重要となり、その後救急救命や救援物資が確実に輸送できるような、道路網の接続性が重要になる。復旧期や復興期はより多くの交通需要に対して、円滑な移動を可能とする道路網全体の交通容量や総走行時間に基づいたサービス水準が求められる。自然災害や人為的な破壊による道路網の脆弱性を評価する研究は交通研究分野で取り組まれており、Berdica (2002), D'Este and Taylor (2003) により輸送網脆弱性の概念が整理されて以降、道路網の評価基準を総走行時間 (Jenelius et al. (2006), Bell (2000), Murry-Tuite and Mahmassani (2004) など)、アクセシビリティ (Chen et al. (2007), Taylor (2008)) に基づいた脆弱性を評価するための手法が開発されてきた。これらは評価基準から明らかなように復旧期や、復興期に求められる広域的な道路のサービス水準に着目しており、災害発生にごく近いフェーズで求められる避難のための交通容量や、接続の強さに焦点を当てた研究は多くない。Bell et al. (2020) や Chen et al. (2011), Xu et al. (2018) などは接続性に焦点を当てた脆弱性指標を提供しているが、いずれも道路網全体の接続性が大きく低下するような箇所を出力しやすい。緊急避難や孤立などは、移動需要と供給が被災地とその周辺の間で局所的に発生する現象であり、これらは道路ネットワーク全体に生じる影響を集計してしまえば相対的に小さく評価されやすいためである。また、道路網の断絶が人命に関わるような状況は、山間地など道路網が疎な範囲に人が居住する地区を多く有し、地震・豪雨災害が頻発する我が国に多く起こるものであり、他国ではそれほど注意を払われていないことも研究されていない一因であろう。

そこで、本研究では以下の問いに応えるための研究に取り組む。

1. 大規模災害発生直後の避難や救命救急の確実な実行を阻害するような、道路網の弱点を評価・特定する手法するにはどうすればよいか。
2. 北海道の道路網において、被災地の孤立に対して、および緊急避難のための容量が脆弱な地点、あるいは防災拠点はどこか。
3. 発見された脆弱な地点に対して、脆弱さを緩和するための最適な道路の新設やその他の施策を提案するためにはどうすればよいか。

2. 研究の目的

避難や救急救援が災害発生によっていくつかの道路区間が破損しても目的を達成できるかどうかは直接外力がおよぶ地域とその周辺の避難・救援可能な地域との接続の強さを評価することが適切であろう。このような評価方法はグラフ理論の分野では最小カットの理論を応用した手法が展開されている。そこで、本研究課題では最小カットおよびそれらを応用した手法を参照し、道路網の接続の強さを適切に評価するための手法構築を目指す(問1に対応)。通信網や電力網に最小カットを応用した脆弱性

評価は散見されるが、道路網での例は申請者らの研究杉浦(2018)、中島ら(2018)を除いて見当たらない。道路網は通信網や電力網と異なり、多くの閉路(ある点から一筆書きで同じ点に戻ることができるネットワーク形状)を含み、また、フローの発生集中点が広域に多数分布していることが異なる。これら道路網とのネットワークの性質の違いが評価結果の妥当性に与える影響も考えられるため、本研究課題では妥当性を確保するために最小カットの概念を拡張した手法を構築する必要があると想定される。構築した評価モデルは北海道の道路網に適用し、接続が脆弱な箇所を特定する(問2に対応)。また、北海道地域防災計画で指定されている避難所や災害拠点病院の設定について、評価モデルの出力結果と見比べることで指定された施設の配置が適切であるか評価する。これによって、周辺道路網により十分な接続性が確保されていない施設の有無が明らかとなる。もし、重要拠点が周辺と十分な接続性を有さない場合には、新設の道路や他の輸送モードによる代替の計画が必要になる。適切な代替施策を与えるために、接続性増強のためのネットワークデザイン問題を構築する(問3に対応)。ネットワークデザイン問題

表1: 災害フェーズに応じて求められる道路の機能例

発災からの経過時間	災害対応の段階	指標(例)
直後	緊急避難	避難地点までの接続性
数日	救急救命	拠点病院までの接続性
数ヶ月	救援(救援物資輸送)	災害拠点から避難所へのアクセシビリティ
数ヶ月	復旧活動	交通容量, 消費者余剰, 総走行時間
数年	経済活動の継続・復興	交通容量, 消費者余剰, 総走行時間

多々納裕一: 道路ネットワークのレジリエンスの計量化に向けて、高速道路と自動車, 第60巻, 第9号, pp.5-8, 2017. をもとに申請者が作成

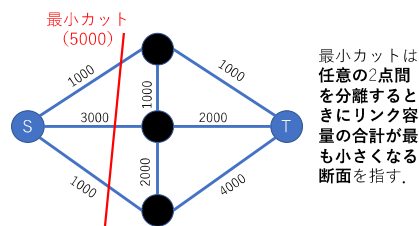


図1: 最小カットの例

最小カットは任意の2点間を分離するときリンク容量の合計が最も小さくなる断面を指す。

(Network Design Problem: 以下 NDP という)は既存のネットワークの部分的な増強により、所定の評価基準を効率的に向上させるための戦略を特定するための数理的アプローチである。一般的な NDP には総走行時間や一般化費用などが評価基準に用いられる。ここでは、構築した脆弱性指標を評価基準として、これを増強させる道路網の改良施策を探索する問題とする。本研究課題ではグラフ理論の分野で研究が進められている「辺連結度増大問題」を応用した手法を検討する。辺連結度増大問題の解法として 2 点間の最小カットの値を最も効率よく増大させるために加える新しいリンクを探索するアルゴリズムが提供されている。これを応用することで最も効率の良い増設リンクを比較的小さな計算負荷で求められることを期待している。本研究では、災害時の代替性を考慮するために、道路の新設、改良のみならず、ヘリコプターなどを含む道路交通でないモードを考慮可能な NDP の構築を目指す。以上一連の検討により、北海道を対象として、災害発生時に近いフェーズで要請される地域間の接続性に関する機能を増強するための整備方針の提示を目指す。

### 参考文献

杉浦聡志 (2018): 辺連結度と最小カットセットを用いた道路脆弱性分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.57, 43-06.  
 中島雅大, 杉浦聡志, 高木朗義 (2018): 辺連結度 +  $k$ -カットを考慮した道路ネットワーク孤立脆弱性評価手法の構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.58, 148.

### 3. 研究の方法

1 年目には道路網の孤立と避難のための脆弱性を示す指標を 2 つそれぞれ検討した。1 つは被災地における孤立のしやすさを表現する指標 (以下, 孤立脆弱性という), もう 1 つは, 火山や原子力発電所の事故などに伴う広域的な避難に対する道路の容量と通過需要の関係を表現する指標 (局所容量脆弱性) とした。孤立脆弱性は図 2 のように「被災地を孤立させるために, 除去しなければならない道路区間数の最小値」の値で定義した。一方で, 広域避難の検討には道路区間の数では評価できず, 通過する避難需要に対して, 被災地周辺の道路網が十分な容量を提供できるかが問題となる。そこで, 広域避難需要と周辺道路網の供給容量に関する指標, 局所容量脆弱性を評価する手法を構築した。基本的にはこのモデルも最小カットの理論で用いられる手法を応用することで導出可能と考えている。具体的にはネットワーク内の最小カットの構造を表現する Gomory-Hu 木の特性 (図 3) を利用し, 容量が小さなカットとそのカットを通過する避難需要を特定する。構築した手法は仮想ネットワークへ適用し, 孤立脆弱性と局所容量脆弱性それぞれの特性を把握した。

2 年目には定義した二つの指標, およびその評価手法に基づいて, 北海道の道路ネットワークを対象に分析した。分析には DRM (Digital Road Mapping) の全道路データを購入し, まずそのデータを分析用途に足るように修正・整理した。構成されたネットワークにおいて両脆弱性指標を計算した。このとき, 演算時間および導出された解の妥当性を確認することで, 実用性を評価した。さらに, 北海道の地域防災計画等に災害時対応に関連する文書を整理して, 災害時における重要拠点 (広域避難施設, 災害拠点病院など) を抽出し, 災害時において想定されているような輸送の実現可能性が十分であるか評価した。すなわち, 拠点が局所的脆弱な範囲内に配置されていないかを分析した。

3 年目には孤立脆弱性を緩和するための NDP を構築した。まず, 辺連結度増大問題の単純な適用を試みて, その解の妥当性を確認した。道路網はノードの空間的な位置関係がリンクの接続関係に大きく依存するため, 辺連結度増大問題の結果が道路網の整備としては非現実的な解を出力する可能性が危惧される。したがって, 一般的な辺連結度増大問題の操作変数がとりうる範囲に, 空間的な関係を制約する条件等を加える必要がある可能性が高いと考えられた。これに対応するため, 空間的な位置関係に関する制約を付加しても求解が可能なアルゴリズムを構築する。アルゴリズム構築にあたっては道路網の特性を考慮しつつ, 整備方針として妥当な制約条件を検討すること, および計算負荷が極端に大きくならないような手法を提供できた。

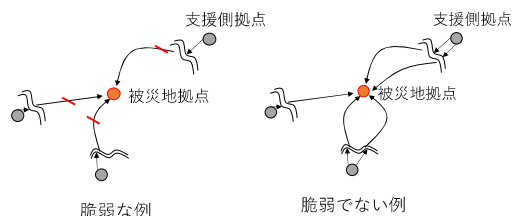
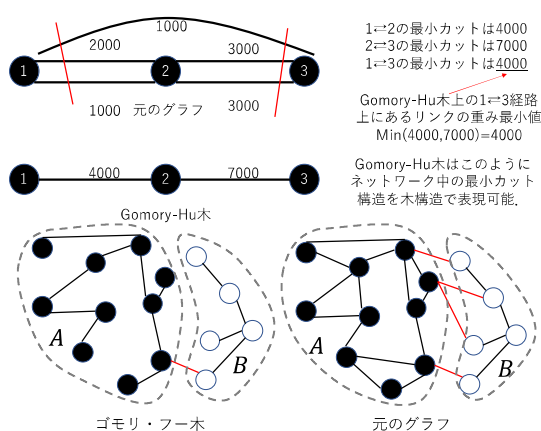


図 2: 孤立脆弱性評価イメージ



ゴモリ・フー木上の任意の辺を除去したときにできる2つの部分グラフ (A  $\in$  N, B  $\in$  N) この部分グラフのカットは元のグラフの(s,t)間最小カットと一致する。これにより, カット上を通過する需要を補足できる。

図 3: Gomory-Hu 木の特性

## 4. 研究成果

### (1) 孤立脆弱性分析手法の開発

孤立脆弱性分析手法は最小カットを求める最適化問題を、実際の道路網へ適用するために再構成した one-to-one ネットワークを入力として求める手法を構築できた。2 年目に構成した DRM ネットワークを用いて、札幌市内の指定避難所を対象とし、孤立脆弱性を評価した。その結果は図 4 に示す通りに得られた。

札幌市街地に位置する避難所は孤立脆弱性が大きくないことを示す寒色で配色された避難所が多いことがわかる。これは、道路網が密であり、

少ない数の道路区間の破損では孤立が生じにくいことを示している。一方で、定山溪や郊外部に近づくほど、孤立脆弱性が大きいことを示す暖色に配色された避難所が多いことがわかる。これは、道路網が疎であり、他地域からの支援を受けるための経路冗長性が小さいことが原因である。図中の Fujinosawa で示される避難所では、1 つの道路区間が破損すれば孤立する避難所も存在することが確認でき、防災計画に注意が必要であることが示唆される。

図中の Jozankei 地区では、ある 4 つの道路区間の同時破損により 7 個の避難所が同時に孤立する結果も得られた。定山溪地区では、観光客および周辺施設従業員が多くいることも考えられ、同時の破損が生じたときには、多くの孤立人口が生起する事も考えられる。したがって、道路の補強や、事前の孤立時のための備蓄品の用意などが重要とあることが示唆される。なお、本研究成果は Sugiura and Kurauchi (2023) として高水準学術誌に掲載された。

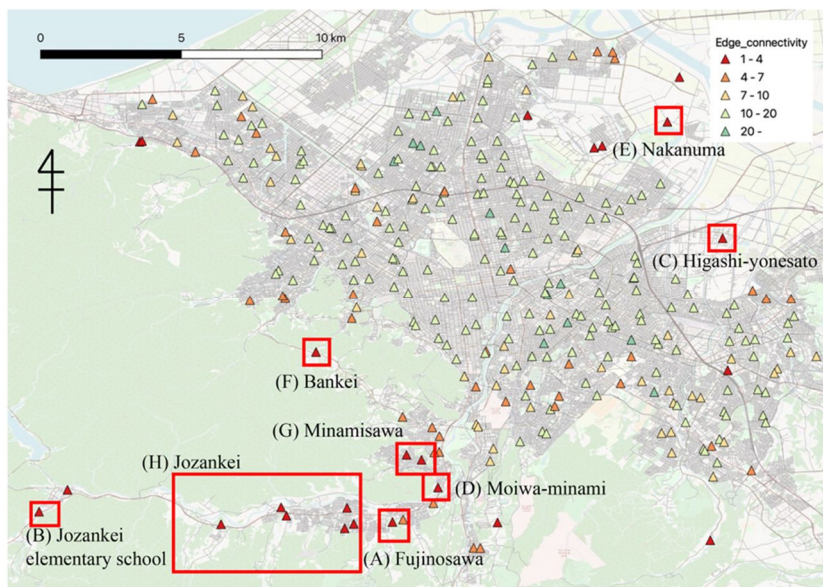


図 4：札幌市内における指定避難所の孤立脆弱性評価結果

### 参考文献

Satoshi Sugiura, Fumitaka Kurauchi., Isolation vulnerability analysis in road network: Edge connectivity and critical link sets, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 119, 103768, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103768>.

### (2) 局所容量脆弱性分析手法の開発

局所容量脆弱性分析手法では、Gomory-Hu 木の特性を活用し、道路ネットワークを最小カットの値で構成される木形状のグラフに縮約し、その特性を調べることで、道路を通過する交通の容量とその上を通過する需要の量を分析する手法を構築できた。カットの特性を活用することで、比較的小さな計算負荷で分析が可能となるため、大規模なネットワークへも適用が可能となっている。

中部地域の道路ネットワークに構築した手法を適用し、局所の容量、すなわち、道路ネットワーク上のある小さな部分領域を分断する道路区間の集合において、容量の総和と通過する需要の比率を分析することで、例えば火山や地震、津波など一斉に大規模な人口が避難する必要がある状況でより混雑しやすい領域を特定した。

図 5 に得られた結果の一部を示している。図中の Rank 1 “Tahara” は渥美半島の付け根に位置しており、半島の特性上道路網の冗長性が小さくなりやすい。その状況に依存して、交通容量が小さい道路区間の集合が形成された。この領域に対して、海岸部には工業地帯が形成されており、多

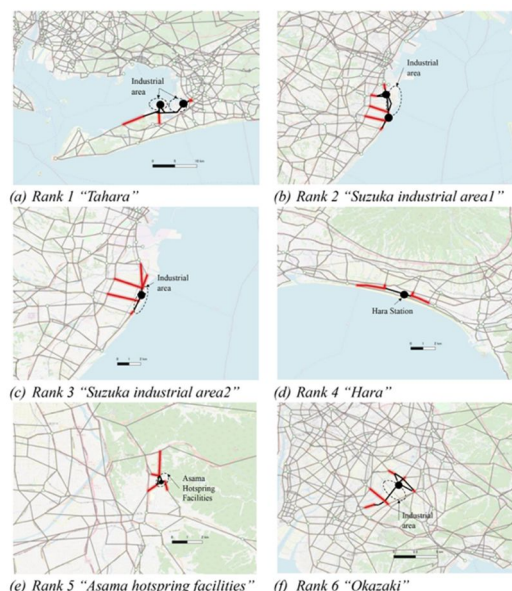


図 5：中部地区ネットワーク局所容量脆弱性評価における脆弱領域の評価結果

くの需要が通過する．そのため，この領域では，交通容量に対して2.93倍の需要が通行すると見込まれ，同時に避難する需要が殺到すれば，深刻な混雑が生じると危惧される．その他の箇所では，“Suzuka industrial area 1,2”などでも，工業地帯により大きな需要を抱える一方で沿岸地域である特性により，道路網の冗長性が小さいため，局所容量脆弱性が高い結果となった．また，Rank 5 “Asama hot spring facilities”は浅間温泉周辺の領域であり，山間地を含むため，道路網の冗長性は小さく，一方で観光客や従業員等による交通需要が大きい．そのため，局所容量脆弱性は高い結果となったものと考えられる．このような領域の避難に関連する危険性が高い具体的な箇所の抽出する手法は，防災計画立案のための一助となるものと考えられる．脆弱性の高い領域の抱える問題をそれぞれ考察し，適切な対応が必要となろう．例えば工業地帯からの避難では，個別輸送（自家用車）等で避難すれば交通需要に耐えられる容量を確保するためには膨大な道路事業が必要となるため，避難のためのバス等による集団輸送を検討することも有効であろう．なお，この内容の一部は Sugiura and Chen (2021)として高水準学術誌に掲載された．

### 参考文献

Satoshi Sugiura, Anthony Chen: Vulnerability analysis of cut-capacity structure and OD demand using Gomory-Hu tree method, Transportation research part-B Methodological, Vol. 153, pp.111-127, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.08.013>.

### (3) 孤立脆弱性を緩和する NDP の構築

孤立脆弱性を緩和する NDP はグラフ理論の領域で議論されている辺連結度増大問題の応用を試みたが，道路網のもつ特性（有向グラフであること）を考慮すると必ずしも適切でないことが明らかになった．そこで，数理最適化問題として孤立脆弱性を増強するリンクの追加問題を定式化した．孤立脆弱性は小さい値ほど，容易に孤立が生起しうるため，脆弱性を緩和するよう，この値が任意のより大きな値になるような条件を満たしつつ，かつ最も総延長が小さくなるように新しく接続すべき2点区間を求める手法を構築した．構築した手法の求解性を小さなネットワークで確認したうえで，北海道北部の道路ネットワークに適用した．

北海道北部の主要地点（市町村役場を想定）の孤立脆弱性を評価し，図6に示す結果を得た．図中の数値は各主要地点の孤立脆弱性の指標値を示している．この条件の下，緩和させる水準を孤立脆弱性=5として計算した．また，計算にあたっては，あまりに延長の長い2点間は最適解に含まれることがないことを利用し，計算に含める候補から除外する手順を設けることで，計算時間の縮小を図った．得られた結果を見ると，例えば“Nakagawa”，“Otoineppu”は緩和目標の水準である孤立脆弱性=5に対して現状3であるため，2つの新たな経路を構成できるような道路区間の追加が必要となる．これに対応した最適解は，“Nakagawa”，“Otoineppu”を相互に接続する新しい区間，および“Esashi”へ山間地を通過して通行できる新たな区間を追加する．これらの増強によりいずれの主要地点も孤立脆弱性が5を上回ったことを確認した．

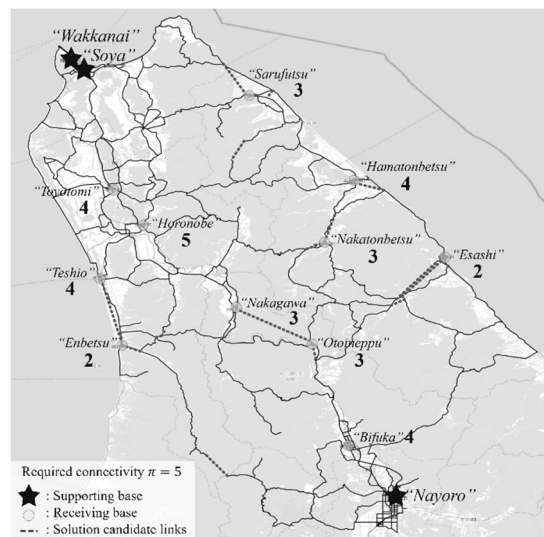


図6：中部地区ネットワーク局所容量脆弱性評価における脆弱領域の評価結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugiura Satoshi、Kurauchi Fumitaka	4. 巻 119
2. 論文標題 Isolation vulnerability analysis in road network: Edge connectivity and critical link sets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transportation Research Part D: Transport and Environment	6. 最初と最後の頁 103768 ~ 103768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trd.2023.103768	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 NARUOKA Ryosuke、SUGIURA Satoshi	4. 巻 78
2. 論文標題 Gomory-Hu木に基づくコミュニティセントロイドへのノード集約によるネットワーク縮約手法の構築	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 I_483 ~ I_490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.78.5_i_483	査読の有無 有
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 ASADA Tomohiro、SUGIURA Satoshi	4. 巻 78
2. 論文標題 複数の避難手段を考慮した最適浸水一次避難計画手法の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 I_141 ~ I_151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.78.5_i_141	査読の有無 有
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 Satoshi Sugiura, Anthony Chen	4. 巻 153
2. 論文標題 Vulnerability analysis of cut-capacity structure and OD demand using Gomory-Hu tree method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Research Part B: Methodological	6. 最初と最後の頁 111-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trb.2021.08.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akioka, M., and Sugiura, S.
2. 発表標題 Connectivity enhancement network design problem for emergency receiving bases: on the concept of isolation vulnerability
3. 学会等名 The 26th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 只隈大暉, 杉浦聡志
2. 発表標題 生活必需施設の配置と住民のトリップに着目したグラフカットに基づく生活圏検出手法の構築
3. 学会等名 第65回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成岡亮佑, 杉浦聡志
2. 発表標題 Gomory-Hu木に基づくコミュニティセントロイドへのノード集約によるネットワーク縮約手法の構築
3. 学会等名 第65回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木颯馬, 杉浦聡志
2. 発表標題 2 点間旅行距離を増大させるリンク集合特定手法の開発
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和3年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成岡亮佑, 杉浦聡志
2. 発表標題 Gomory-Hu木を援用したセントロイド周辺ノードの集約によるネットワーク縮約手法の構築
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和3年度年次技術研究発表会
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		
中国	Hong Kong polytechnic university		