複数被災シナリオを考慮した道路網接続性向上のための最適整備デザイン問題

安藤　宏恵[1]・倉内　文孝[2]・杉浦　聡志[3]

[1]正会員　熊本大学助教　くまもと水循環・減災研究教育センター

（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39-1）

E-mail:hiroeando@kumamoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　岐阜大学教授　工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

E-mail: kurauchi.fumitaka.c3@f.gifu-u.ac.jp

[3]正会員　北海道大学大学院准教授　工学研究院（〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

災害時の道路ネットワーク接続性を考えるにあたり，被災によって道路の一部区間が通行不可能になることを想定する必要がある．本研究では道路が寸断される被災シナリオが複数存在することを前提に，そのいずれにおいても需要地点と防災拠点が接続していることを制約とする最適整備デザイン問題を構築した．接続性を担保した上で移動コストと整備コストを最小とするための最適な防災拠点配置を求める．さらに，構築したモデルを用いて熊本県球磨川流域を対象とした試算をおこなった．令和 2 年 7 月豪雨の浸水実績を含めた複数の浸水シナリオにおいて，定める全ての需要地点と接続するために必要とされる新たな防災拠点の配置や規模を示す．

Key Words: *road network, connectivity, location problem, disaster scenario, mix integer linear problem*

1. はじめに

東日本大震災や令和元年房総半島台風，令和 2 年 7 月豪雨など過去に発生したあらゆる種類の災害において，電柱の倒壊や土砂崩れ，道路冠水等による交通機能の障害は多く発生している．近年の自然災害の多頻度化，激甚化の状況においては交通障害の発生から復旧までの時間を要し，その影響が長期間に及ぶことも少なくない．円滑な避難や救援物資の輸送など，災害発生後の道路機能が担う役割は大きく，災害時に道路ネットワークの接続性を担保することは重要な課題である．しかしながら，土砂災害警戒区域や雨量規制区間など災害時に道路が寸断されるリスクの高い場所は少なからず存在し，一部区間において道路が使用不可能となることを考慮した上で，輸送機能を担保するインフラ整備が求められる．確定的道路区間（以下，リンク）の被災をもとにしたネットワークデザイン問題として，Bell et al.[1]はゲーム理論における混合戦略ナッシュ均衡のアプローチにより，道路ネットワークの破壊を仮定した災害拠点配置問題を提案している．災害時の拠点配置に関する研究として Wang et al.[2]はリンク破断確率を所与としたうえでサービス施設配置問題を提案している．また，Lo and Tung[3]は交通事故による輸送機能低下を考慮したリンク容量設計問題を提案している．このように道路が被災することを考慮した拠点の配置やリンク容量設計などの道路ネットワークデザインは，リンク破断を確率的かつ独立した事象として捉えていることがほとんどである．しかし，現実に発生する災害において被災するリンクの分布は，周辺環境や地理的条件，災害の種類や規模など多くの前提条件のもとシナリオとして与えられることが想定される．本研究では，リンクの破断を伴う複数の災害シナリオを仮定し，それらを考慮したうえで道路ネットワークの接続性を担保するネットワークデザイン問題を考える．具体的には，移動コストと建設コストを最小にしたうえで，あらゆるシナリオにおいて需要地点と防災拠点を接続するための最適防災拠点デザインモデルを構築する．道路ネットワーク接続性向上において，需要地点と防災拠点が接続しているかどうかが最も重要であるが，本研究の定式化では接続性に加えて移動コストをより少なくすることも加味している．

複数の被災シナリオを想定する対象地域として令和 2 年 7 月豪雨で被災した熊本県球磨川流域を扱う．球磨川流域は歴史的に非常に洪水被害が多い地域であり，令和 2 年 7 月豪雨においても甚大な人的・物的被害が発生した．球磨村渡地区から人吉市街部にかけて 4,811 戸の家屋等浸水被害[4]が生じ，電力や上下水道のライフラインも被害を受けた．球磨川沿川の道路では土砂流出や法面崩落，道路損壊，橋梁 14 橋流失など甚大な被害が発生し，道路網のあらゆる場所が寸断されいくつかの集落は一時的に孤立状態となった．災害発生から 6 ヶ月後においても道路の通行止め数は国道で 2 箇所，県道で 24 箇所とその被害は長期に及んだ[5]．このように甚大な被害をもたらした令和 2 年 7 月豪雨の被災実績もシナリオの 1 つとして扱い，そのほか球磨川水系における浸水シナリオを併せて考慮する．

本章では本研究の背景と目的を述べた．2.では構築する最適防災拠点配置デザインモデルの定式化を記述する．3.では対象とする球磨川水系における使用データについて説明する．4.では球磨川水系の被災シナリオと既存インフラ設備をもとに提案モデルを適用した結果を示す．5.では本研究の成果をまとめ，今後の課題について整理する．

2. 最適防災拠点配置デザインモデル

本研究では災害時の物資輸送または避難行動を想定し，防災拠点と需要地点の接続性を確保するためのインフラ整備を考える．また，ノードとリンクの集合から構成される道路ネットワークにおいて，一部のリンクが災害によって寸断される可能性があると仮定する．リンクが寸断される被災シナリオが多数存在し，そのいずれのシナリオにおいても需要地点が防災拠点に接続可能となる条件を満たす拠点の配置を求める．このとき，全ての需要と供給はいずれも均質であり，どの需要地点もいずれかの防災拠点と接続していればよいと考える．拠点を設置する候補地点はあらかじめ計画者により定められており，提案手法により条件を満たすうえでコストが最小となる拠点配置を候補地点から選択するものとする．

どの拠点と需要地点が接続しているかは問われないため，本提案モデルでは図-1 のように唯一の仮想出発ノードから物理的防災拠点ノードまで仮想リンクを用意することで，one to many の接続性評価モデルとして扱う．本モデル内で使用するリンクとノードの種類は以下の通り定義される．

出発地ノード（仮想）：対象ネットワーク内に 1 つの仮想的な出発地点であり，既存防災拠点リンク，防災拠点設置候補リンク，拡張リンクと接続する．

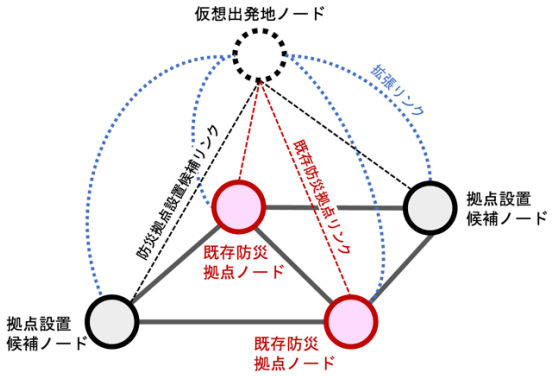


図-1 ネットワーク構成

既存防災拠点ノード：すでに設置されている防災拠点を示すノード

防災拠点設置候補ノード：防災拠点を配置する候補地点を示すノード

需要地ノード：居住者が存在するノード

通常ノード：上記のいずれにも属さないノード

拡張リンク（仮想）：出発地ノードから需要地ノードをつなぐリンク，十分に大きい数Mを所要時間とし需要地ノードまで到達不可能なケースにおいて拡張リンクが使用される．

既存防災拠点リンク（仮想）：出発地ノードから既存防災拠点ノードをつなぐ仮想リンクであり，所要時間は 0 である．リンクが持つ容量は既存拠点の容量を示す．

防災拠点設置候補リンク（仮想）：出発地ノードから防災拠点設置候補ノードをつなぐ仮想リンクであり，設置にかかるコストがリンクコストとなる．リンクが持つ容量は設置される拠点の容量を示す．

通常リンク：実際に存在するリンク

使用する記号を以下の通り定義する．

t_a ： リンクaの移動コスト

x_a^j ： シナリオjのときのリンクaの交通量（未知変数）

c_a^j ： シナリオjのときのリンクaの交通容量

d_n^j ： シナリオjのときのノードnへ到達すべき交通量

y_k ： 防災拠点kを設置すれば 1, しなければ 0（実変数）

e_k ： 防災拠点kの設置コスト

δ_{na} ： リンクaがノードnに流入するなら 1，流出するなら-1，いずれでもなければ 0 をとる変数（ノード・リンク接続行列）

ψ_{ak} ： リンクaが仮想出発点rと防災拠点kを接続するリンクであれば 1, そうでなければ 0 をとる変数

ω_a^j ： リンクaがシナリオjにおいて被災していれば 1，そうでなければ 0 をとる変数

r ： 仮想出発ノード（1 つ）
$\boldsymbol{N}$ ： ノードの集合
$\boldsymbol{J}$ ： シナリオの集合
$\boldsymbol{A}$ ： リンクの集合
$\boldsymbol{A}_u$ ： 仮想出発点と需要ノードを接続する拡張リンクの集合

最適防災拠点配置デザインモデルは混合二値整数線形計画問題として以下の通り定式化される．

$$\min_{x,y} \sum_j \sum_a t_a x_a^j + \sum_k e_k y_k \tag{1}$$

subject to

$$\sum_a \delta_{na} x_a^j = \begin{cases} -\sum_n d_n^j & if\ n = r \\ d_n^j & \forall n \in \boldsymbol{N}|r \end{cases}, \forall j \in \boldsymbol{J} \tag{2}$$

$$x_a^j \le c_a^j \left(1 - \sum_k \psi_{ak}(1 - y_k)\right), \forall a \in \boldsymbol{A}, j \in \boldsymbol{J} \tag{3}$$

$$x_a^j \ge 0,\ y_k = \{0,1\} \tag{4}$$

where

$$t_a = \begin{cases} M & if\ a \in \boldsymbol{A}_u \\ \psi_{ak} t_a & otherwise \end{cases}, \forall a \in \boldsymbol{A} \tag{5}$$

$$c_a^j = \begin{cases} c_a^j & if\ \omega_a^j = 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \forall a \in \boldsymbol{A}, j \in \mathbf{J} \tag{6}$$

である．

式(1)に示す目的関数は，災害シナリオの集合に対する総移動コストと新たな防災拠点設置にかかるコストの和を最小化する拠点設置の有無とリンクフローを求める．ここでのt_aは式(5)の通り設定される．目的関数の最小化により，実質的に接続していないことを意味する十分に大きな所要時間Mの拡張リンクを使用が避けられ需要地点と防災拠点が接続することを保証する．そのため，すべての新設拠点候補の総設置コスト$\sum_k e_k$を上回るMを設定する必要がある．その上で，さらに移動コストと建設コストを小さくする構成となっている．ノードフロー保存の制約条件である式(2)ではあるノードへの流入と流出の差が需要量に等しいことを示し，唯一の出発地からの流出フローは総需要と一致する．式(3)はリンク容量制約を示す．防災拠点設置候補リンクにおいては拠点が設置されたときのみ制約がかかり，設置されないときはフローが流れない．また，式(6)にあるようにリンクが寸断される各シナリオにおいて不通となるリンクは容量c_a^jは 0 となる．既存防災拠点リンクと防災拠点設置候補リンクのリンク容量はそれぞれの拠点の容量を意味し，拠点の使用目的や状況に応じて設定することができる．

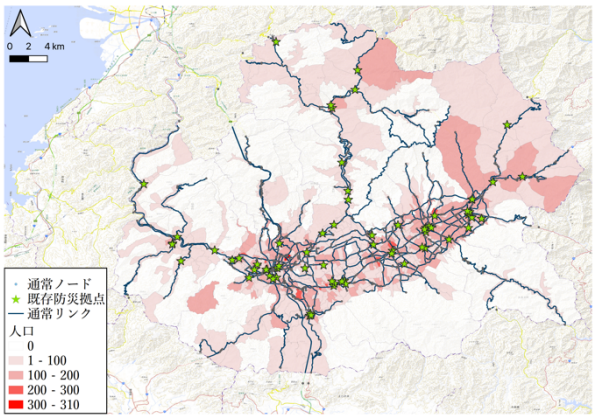


図-2 対象地域と道路ネットワーク

3. 球磨川水系への適用のためのデータ整理

本章では，提案した最適防災拠点配置デザインモデルを球磨川水系へ適用するための使用データとシナリオ設定について述べる．対象地域は熊本県人吉市，球磨郡（錦町，多良木町，湯前町，水上村，相良村，五木村，山江村，球磨村，あさぎり町）の1市4町5村とし，想定する災害の種類は本地域で頻発している大雨による洪水被害とする．

(1) 道路ネットワークと防災拠点

試算に使用する道路ネットワークは 2021 年度版 Arc GIS Geo Suite 道路網の基本道路以上（高速道路，一般国道，主要地方道）とし，**図-2** に示すように 2,292 本のリンクと 968 個のノードによって構成される．リンク所要時間には平成 27 年道路交通センサスの情報をもとにした昼間非混雑時旅行時間(分)を用いる．

既存の防災拠点として各市町村から公開されている避難所情報を参照し，道路ネットワーク内の最も近いノードに吸着させることで**図-2** 中に示す 68 箇所を既存防災拠点ノードに設定する．指定避難所や 2 次避難所など，名称は市町村によって異なるものの，避難者が一時的に滞在することを想定し備蓄品等を整備または整備を計画している場所を選定基準としている．また，需要量は居住者の数と捉え，令和 2 年国勢調査の人口データ [6]を用いる．**図-2** に示すエリアごとの人口をエリア重心にもたせ，道路ネットワーク内の最も近いノードに吸着する．対象地域内の総需要量は 81,480 人である．

(2) 被災シナリオ

対象とする熊本県球磨川流域の球磨郡，人吉市は洪水被害が非常に多い地域である．令和 2 年 7 月豪雨においても大きな人的・物的被害を受けている．過去の被災事例として令和 2 年 7 月豪雨の浸水実績を試算におけるシナリオの 1 つとする．その他の被災シナリオとして，球

磨川水系の洪水浸水想定区域データ[7]を用いる．球磨川水系湯山川，万江川，胸川，川辺川，直轄管理区間の全川を対象とした 5 つの浸水想定を被災シナリオとして加え，令和 2 年 7 月豪雨の浸水実績と合わせた 6 つの被災シナリオにおいて解析を行う．

各シナリオの浸水想定・実績区域を**図-3** に，区域内に存在するリンク数を**表-1** に示す．ここでは浸水深にかかわらず浸水区域に存在するリンクは全て通行不可能となることを前提とし，各シナリオにおいて該当するリンク容量を 0 とする．この場合，浸水区域内に存在する人口は孤立してしまうため，浸水前に近隣の場所へ移動することを想定し人口データの再割り当てをおこなった．既存防災拠点が設置されていない浸水区域内ノードに存在する需要量は浸水区域外の近隣ノードに移し替え，近隣ノードが存在しない際にはダミーノードとダミーリンクを作成し浸水区域外とした．移動の対象となったのは総需要量 81,480 人のうち 8,846 人である．

4. 球磨川水系における防災拠点の配置

前章に記述した手順によって整理したインプットデータを用いて，最適防災拠点配置デザインモデルにより球磨川水系における防災拠点の配置を考える．新たに防災拠点を設置する候補地として，人口（需要量）が 20 人以上かつ既存の防災拠点が設置されていない 374 個のノードを候補と定める．ここでは，人口 20 人以上の全ての需要地点と防災拠点が接続することを担保する．既存の防災拠点から接続できる需要量に上限はなく，防災拠点容量は設けない．なお，防災拠点から需要地点までの制限時間は設けず到達可能かどうかに着目するため，拡張リンクの所要時間Mは十分に大きな数（$M < \infty$）として，通常リンクの交通容量は考えない．最適化計算は汎用数理計画ソルバーGUROBI を Python から呼び出し実行する．未知変数量はシナリオ数*(通常リンク数+拡張リンク数+既存防災拠点リンク数+防災拠点設置候補リンク数)+ 防災拠点設置候補ノード数となり 3,144 であり，そのうち二値変数は 374 である．

表-2 に試算結果を整理する．ここでは新たに配置する防災拠点 1 つあたりの設置コストと容量設定に対して，新設された防災拠点数，その利用者割合，孤立ノード数，孤立需要の総数を示す．孤立ノード数とはどの拠点とも接続できていないノードのことを指し，孤立需要の総数は該当ノードにおいて孤立する人数の全シナリオ分を合計したものである．本試算では人口 20 人以上のノードを防災拠点と接続すべき需要地点として設定しているため，20 人以下のノードではどの防災拠点にも接続できていない孤立状態となる可能性がある．防災拠点の設置

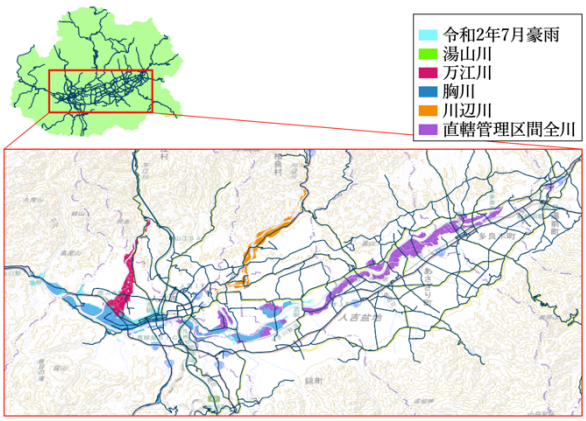


図-3 浸水想定・実績区域

表-1 シナリオごとの被災リンク数

シナリオ No.	被災実績・想定の支川名	被災リンク数 (計 2,292)
0	湯山川	10
1	万江川	42
2	胸川	12
3	川辺川	20
4	直轄管理区間全川	272
5	令和 2 年 7 月豪雨	276

表-2 球磨川水系における試算結果

容量(人/個)	250		500		750		1000		max
コスト($\times 10^3$)	180	225	360	450	540	675	720	900	900
設置された防災拠点数	32	32	23	23	22	22	22	22	22
新設防災拠点接続需要割合(%)	5.2	5.2	6.9	6.9	8.1	8.1	9.2	9.2	13.6
孤立ノード数	10	10	6	6	5	5	5	5	5
孤立需要の総数	973	973	103	103	70	70	70	70	70

コストは，各拠点で賄うことができる需要量（設定容量）の総シナリオにおける 120 分または 150 分の移動コストに相当する値を設定している．容量が増加するにつれて新設される防災拠点の数は減少し，その拠点から接続されている需要地点人口の総需要に対する割合は増加する．容量が 750 人/個より大きくなった場合では，拠点数と孤立ノード数は変化しないが接続する需要量の割合は増加している．750 人/個以上容量を増加させたとしても拠点に接続できないノード数を減らすことはできないが，既存拠点より所要時間の少ない拠点にアクセスすることができる人が増えるため，新設拠点と接続する需要量は増加する．また，整備コストの設定による結果の変化は現れなかった．

新設する防災拠点に容量を設けない場合においても 5 個のノードで全シナリオ合計し 70 人の孤立が発生した．これらは容量に関わらず，本条件の候補地のうちどこに拠点を配置したとしても接続不可能な場所であるといえる．なお 5 個のノードのうち 1 つのシナリオのみで孤立

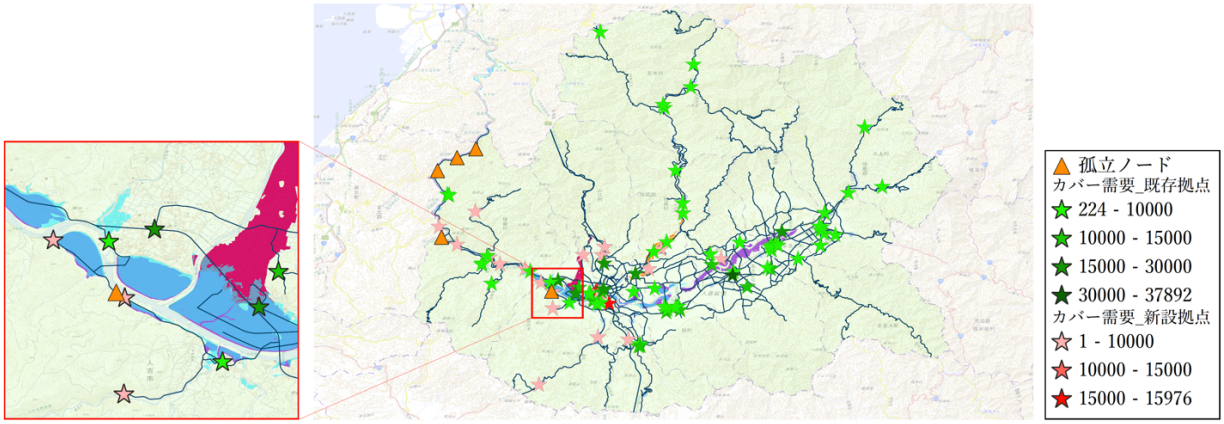


図-4　既存・新設の防災拠点と孤立箇所

したノードが 1 個，その他は 2 つのシナリオで孤立している．このときの結果を**図-4** に示す．孤立ノードはいずれも球磨川沿いに位置していることがわかる．その中でも市街地に近い場所で孤立が発生しているノード周辺を拡大したものを図中左に示す．この孤立ノードは，近隣に防災拠点が新設されているものの，それらに到達するためのリンクが浸水しており使用不可能となっている．さらにこのノードは人口が 20 人以下であり拠点設置の候補地点になっていないため，新設することもできず孤立という結果になった．この例から見てもわかるように，拠点候補の設定は結果に大きな影響を与える．今回のように人口を基準として拠点候補を設定するほかには，予算制約や地理的制約によって拠点候補の数と規模を設定することも考えられる．また，浸水区域周辺の需要が多いエリアでは既存・新設ともに 1 つの拠点で多くの需要をカバーしていることがわかる．**図-4** のカバー需要の値は総シナリオにおいて拠点に到達した人口の合計であるため単純な人数ではない．しかしながらシナリオごとの到達人口をみても，最も多い拠点では 6,902 人（シナリオ No.4）となっており，物資配布や一時滞在など防災拠点に接続する目的に応じて各拠点が接続することができる需要量の上限設定が必要だと考えられる．

5.　おわりに

本研究はあらゆる災害を想定したインフラ整備計画のため，道路ネットワーク上の防災拠点配置について，複数の被災シナリオのいずれにおいても需要地点と防災拠点の接続することを前提として移動コストと整備コストを最小化する最適防災拠点デザインモデルを提案した．災害の種類や規模によって異なるリンクの被災シナリオに対し，どのシナリオにおいても防災拠点と接続するべき需要地点の接続性を担保し，そのうえで効率的かつ効果的な拠点の配置を得ることができる．さらに，提案モデルを用いた実地域での分析として，洪水被害が多く発生している熊本県球磨川水系の球磨村，人吉市を対象に試算を行なった．過去の被災事例の一つである令和 2 年 7 月豪雨の浸水実績に加えて，球磨川支川の浸水想定を含めた 6 つの浸水シナリオにおいて新たに整備すべき防災拠点の配置と各拠点がカバーする需要量を算出した．その結果，配置する拠点に容量を設けない場合，いずれのシナリオにおいても定めた需要地点と防災拠点を接続するには 22 個の防災拠点が必要であることがわかった．

今後の課題を以下に述べる．本稿で示した球磨川水系での試算では新設する防災拠点や道路リンクに容量を設定しておらず，接続できる需要量に制限はない．しかしながら，防災拠点の使用目的によっては備蓄物資の量や避難者の滞在場所など容量設定が必要な例も多い．特に避難行動では接続しているかどうかだけではなく，到達するまでの所要時間も重要となる．そのため，道路リンクの容量や制限時間の設定を行う必要があると考えられる．また，接続性を担保するためのインフラ整備デザインとして，防災拠点のみではなく道路整備や橋梁の新設などリンク補強も有効な対応策である．モデルの構造上，さまざまな種類のインフラ整備を同時に組み込むことも可能であり，対象とする施策を検討する必要がある．これと関連し，整備コストも併せて検証する必要である．防災拠点の新設や道路の拡幅など，実際の施策によって整備にかかるコストは大きく異なり，周辺環境などの要素も少なくない．より現実的なインフラ整備の提案に繋げるためにも，整備コスト設定の精査が必要である．

謝辞：本研究は JSPS 科研費（21H01452, 22K14341），国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発：計画道路の防災機能類似性評価手法に関する研究開発」（代表者：杉浦聡志北海道大学准教授）の助成を受けて遂行された．ここで記して謝意を表する．

参考文献

1) Bell, M. G. H, Fonzone, A and Polyzoni, C.: Depot location in degradable transport networks. Transportation Research Part B: Methodological, 66, pp. 148-161, 2014.
2) Wang, Z., Xie, S., and Ouyang, Y.: Planning reliable service facility location against disruption risks and last-mile congestion in a continuous space, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 165, pp. 123-140, 2022.
3) Lo, H.K. and Tung, Y.K.: Network with degradable links: capacity analysis and design. Transportation Research Part B: Methodological, 37(4), pp.345-363, 2013.
4) 国土交通省 水管理・国土保全局: 令和 2 年 7 月豪雨について，2022.7.8.
5) 国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所: 令和 2 年 7 月豪雨 球磨川水害伝承記 〜後代に残す記録〜（https://kumariver-r0207archive.jp/ 2023.10.10 アクセス）
6) 国勢調査: 令和 2 年国勢調査，小地域集計，男女別人口及び世帯数―基本単位区，2022.2.
7) 国土交通省国土政策局: 国土数値情報，浸水想定区域データ（熊本県，九州地方整備局）, 2013.

(Received October 13, 2023)

INFRASTRUCTURE DESIGN PROBLEM FOR IMPROVING ROAD NETWORK CONNECTIVITY CONSIDERING MULTIPLE DISASTER SCENARIOS

Hiroe ANDO, Fumitaka KURAUCHI and Satoshi SUGIURA