

道路統廃合検討のための接続を維持した 最小道路ネットワーク計画

杉浦 聡志¹・倉内 文孝²・高木 朗義³

¹正会員 岐阜大学研究員 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: sugi_s@gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

平成26年に道路法が改正され、全国の道路管理者は橋梁約70万橋、トンネル約1万本について5年に1度の近接目視による点検が義務付けられた。道路施設の高齢化が進み、点検、修繕工事にかかる費用が増大することを踏まえれば、蓄積されたストックを全て管理し続けることは困難となろう。したがって、重要度の低い道路については廃止することで費用の削減を図る必要も生じる。しかしながら、むやみに廃止すれば、市民の生活や経済活動に影響が生じる。したがって、住民の移動需要を満足しつつ、廃止により管理する道路の量を減少させる必要がある。本研究では、利用者が限定的な生活道路ネットワークを対象として、住民が許容できる旅行時間を満足するようにネットワークの形状を決定する最小道路ネットワークモデルを構築する。構築したモデルを仮想ネットワークで試算し、モデルの挙動を確認する。

Key Words : *smart shrink, network design problem, mixed integer linear programming problem,*

1. はじめに

わが国では、高度成長期から道路ストックが建設され続け、主要構造物である橋梁は約 70 万橋、トンネルは約 1 万本が蓄積されている。全国の平成 26 年に道路法が改正され、全国の道路管理者はこれらの構造物について 5 年に 1 度の近接目視による点検が義務付けられた¹⁾。これにより、点検の結果発見される劣化に対応するために膨大な費用が必要になることが予想される。現状でもひっ迫しており、今後も大幅な増大が見込めない行政の財政事情を踏まえれば、道路維持管理業務はより困難なものとなろう。これらに対応するための LCC (ライフサイクルコスト) を削減するためのアセットマネジメントの取り組みが進められている。一方で、人口減少下において利用者が減少すれば、利用価値が小さくなる道路も多く存在すると考えられる。そのため、現状においても利用頻度が小さく、将来的にも需要が大きくなることが見込まれない道路を統廃合により管理を廃止すれば、点検、修繕の費用が削減できる。広域的な輸送のために利用される幹線道路は、将来的にも経済の発展に資する

であろうから、管理継続を前提としてアセットマネジメントによる投資の合理化が求められる。しかし、生活道路と呼ばれるような近隣住民の日常的な輸送のための道路は、近隣の人口が減少すれば利用者の減少が見込まれるものもあり、今後の維持管理継続是非を検討する価値があるだろう。道路が生活道路であるかどうかを明確に区分することは困難であるが、2 車線分の幅員、すなわち 5.5m に満たない道路の多くは幹線的な役割を持つことは少ないと考えられる。道路統計年報 2014²⁾によれば我が国の道路 1,273 千 km のうち、幅員 5.5m 以上の道路は 2%に過ぎず、3.5-5.5m が 84%、3.5m 未満が 14%となっている。人口の減少量を鑑みれば、幅員が小さい道路のうち、利用者が極めて限定的、あるいはほとんど利用されない道路が相当量あると推量できる。このような道路の管理量を減らせば、道路管理の費用を低減させることが期待できる。一方で、むやみに廃止路線を決定すれば、地域住民の移動需要が満足されないネットワーク形状となることも考えられる。住民が生活するために必要な移動を満足するための道路は継続して管理する必要がある。

道路の廃止手続きについて注目してみよう。路線認定された道路を廃止するときには、各管理者が定める廃止基準に準じた路線廃止の手続きが必要となる。基礎自治体の廃止基準を見ると、多くの場合路線の廃止においては、沿線住民、地域住民の代表者の同意を得ることが求められている^{たとえは真岡市}。住民との合意に至るためには生活を維持するため、移動需要に対応する経路が1つ以上確保されていることは必須であろう。ただし、道路の廃止に合意が得られるとき、その移動にかかる時間については住民の許容できる範囲に各地域の事情に応じたばらつきがあることが想像できる。移動にかかる旅行時間は廃止する道路が少ないほど経路選択の自由度が高いため短く、多くなるほど長くなると考えられる。これは行政の管理費用とトレードオフの関係にある。そのため、住民の合意が得られる範囲の旅行時間で、管理費用が最小となるネットワークを残すように廃止路線を決定することが適切である。しかしながら、想定した旅行時間で住民の合意が得られるかどうかは協議時点まで不明である。したがって、各移動需要において許容されるであろう旅行時間を複数想定し、それらを満足する条件の下、管理費用が最小となるネットワーク形状を複数案提示することが必要になると考える。

以上の背景より、本研究は道路統廃合を検討するための基礎資料となる、住民の移動需要を満足する経路を確保しつつ、管理費用を最小とするネットワークの形状を求める方法を提案する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

人口減少を背景として、都市のコンパクト化により維持管理費用の削減を検討している研究は以下がある。小瀬木ら⁴⁾は道路をはじめ、上下水道やガスなどのインフラについて土地利用の状況と現在、将来の人口の分布からメッシュ単位の集計的な維持管理費用を算出している。佐藤ら⁵⁾や根市ら⁶⁾はメッシュ単位のインフラ維持管理費用算出に加えて、郊外部の人口が都市部に住み替える場合の維持管理費用削減率の算出を試みている。これらの研究はコンパクトシティ施策によって削減できる維持管理費用の算出を目的としている。そのため、具体的にどのインフラの管理を廃止するかなどの議論はされていない。インフラネットワークの役割を鑑みれば、ある部分を廃止しても残されたネットワークは輸送の需要を満足する経路を維持する必要がある。したがって、具体的に廃止する道路を決定するためには、需要を満足するネットワークの形状と管理を継続するためのコストを最適化する問題を検討する必要がある。

輸送に関する利用者のコストと供用に伴うコストの最適化を図る問題はネットワークデザイン問題として定式

化可能であることは知られている⁷⁾。ネットワークに存在する各リンクの最適な容量を決定するCNDP (Continuous Network Design Problem)や、道路の新設時において設定した制約条件下において最適な新規リンクを決定するDNDP(Discrete Network Design Problem)、CNDPとDNDPを同時に扱うMNDP(Mixed Network Design Problem)などがあり、それぞれ多くの解法や実ネットワークへの適用事例が蓄積され、Feremans et al⁸⁾やYang and Bell⁹⁾などで整理されている。これらの研究はネットワーク形状の変更により社会的コストの最適化を目的とする点で本質的には本研究で目指すものと同様の問題を取り扱っている。しかしながらこれらは、新規建設や改良などにより、道路ネットワークの容量を効率よく増大させるための施策を検討するためのものである。本研究の対象である利用者が限定的な生活道路では、混雑の影響を考える必要はないと考えられ、容量の考慮は不要だろう。また、上記は現在の道路ネットワーク容量の縮小を議論したものではない。

道路網の縮減による管理費用の削減をネットワークデザイン問題として議論したものは見当たらない。そこで本研究は生活道路を対象とした路線廃止に向けた住民との協議のための資料の基となるネットワークデザイン問題のモデル化を目的とする。具体的には、容量の制約がないネットワークデザイン問題として管理を継続するネットワーク形状を特定するモデルを構築する。これにより行政は定量的な値に基づく道路縮小のための検討が可能となる。

3. 最小道路ネットワークデザインモデル

(1) モデルの要件

容量の制約がないネットワークデザイン問題は、Johnson et al¹⁰⁾などに知見が蓄積されている。この問題は、ネットワークのデザイン費用、すなわち道路であれば建設費用と、利用者の移動に要する一般化交通費用の和を最小化するものである。本研究においては、利用者が許容できる旅行時間となるようなネットワーク形状となるように管理継続するリンクを特定する。したがって、目的関数に一般化交通費用の項は必要ない。ただし、ネットワーク上の利用者の移動需要(OD)に関する旅行時間が設定した時間内となるような制約条件が必要となる。住民のODを満足する経路を1つ以上確保する条件はこれに内包される。

本稿が提案するモデルにおいては住民のODを設定する必要があるが、住民全てのODを把握することは現実的に不可能である。そのため、住民が居住している集落から、市町村役場、病院、広域に移動できる道路へ接続する交差点などを対象地域ごとに設定する。もし、住民との協議によりODの過不足が明らかになれば、追加す

ればよい。

リンクのデザイン費用であるリンクの総維持管理費用は、長寿命化、更新を適切に計画したときの長期における総費用を設定する。したがって、すべての構造物のLCCが最小となる修繕計画を事前に計画しておく必要がある。

(2) 定式化

道路ネットワーク上のリンクは全て有向リンクで定義する。このときリンクはリンク集合Aにおいて $a \in A$ で表現され、その方向を $b = \{1,2\}$ で表現する。一方で、統廃合を検討する対象は、上下線が分離した高規格な道路ではなく、上下線が共有された道路であると考えられる。そのため、管理を継続する、しないの意思決定においては、上下線を同期させて考えるのが妥当であろう。そこで、最小道路ネットワーク問題はリンクaの管理を継続する、しないのデザイン変数 y_a と、制約条件である住民のODにおける経路を検討するためのデザイン変数 x_{wab} の2つを定義する。定式化にあたって必要となる変数を以下に示す。

- x_{wab} : リンクabがODペアwの経路に含まれていれば1, そうでなければ0をとる二値変数 (未知変数)
- y_a : リンクaの管理を継続するのであれば1, そうでなければ0をとる二値変数 (未知変数)
- t_{ab} : リンクabの所要時間 (ただし, 対称性を仮定して $t_{a1} = t_{a2}$ とする)
- W : 住民の生活のために接続すべきODペアの集合
- T_w : ODペアwにおいて許容される移動完了時間
- N : ノードの集合
- A : リンクの集合
- A_y : 管理が継続されるリンクの集合
- o_w : ODペアwの出発地ノード
- d_w : ODペアwの目的地ノード
- $In(n)$: ノードnに流入するリンクの集合
- $Out(n)$: ノードnから流出するリンクの集合

モデルの要件を踏まえると、道路統廃合のためのネットワークデザイン問題は以下のように定式化できる。この問題はデザイン変数が2値整数の混合整数線形計画問題(Mixed Integer Linear Programming Problem)となる。

$$\min \sum c_a y_a \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{b=1}^2 \sum_{a=1}^A x_{wab} t_{ab} \leq T_w \quad (2)$$

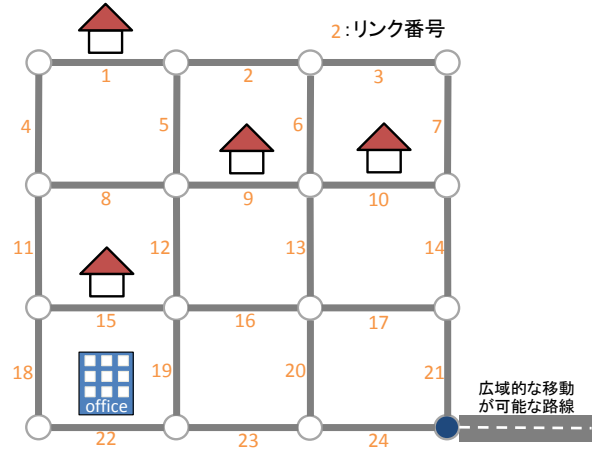


図-1 仮想ネットワーク

$$\sum_{a \in Out(o_w)} x_{wab} = 1, \quad \sum_{a \in Out(d_w)} x_{wab} = 0 \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{a \in In(o_w)} x_{wab} = 0, \quad \sum_{a \in In(d_w)} x_{wab} = 1 \quad \forall w \in W \quad (4)$$

$$\sum_{a \in In(k)} x_{wab} - \sum_{a \in Out(k)} x_{wab} = 0 \quad (5)$$

$$\forall k \in N, k \neq o_w, k \neq d_w, w \in W$$

$$x_{wab} - y_a \leq 0 \quad \forall a \in A, w \in W \quad (6)$$

$$y_a = 0 \quad \forall a \notin A_y \quad (7)$$

$$x_{wab} = \{0,1\}, \quad y_a = \{0,1\} \quad \forall a \in A, w \in W \quad (8)$$

(1)式は各リンクのLCCのネットワーク総和で定義された目的関数であり、これを最小化する。(2)式は住民の旅行時間に関する制約である。(3),(4),(5)式は住民の移動に関して保持すべき条件を示している。つまり、出発地(O)から出発し、目的地(D)に到着しなければならない。そのため、出発地から流出するリンク集合、および目的地に流入するリンク集合のうち、 x_{wab} が1となるものがひとつだけ存在しなければならない。(3)式が出発地に関する条件、(4)式が到着地に関する条件である。(5)式は出発地、目的地以外の中間ノードにおいて、リンクからフローが流入すれば、同じ数だけリンクへ流出する必要があることを示している。(6)式は管理を継続するリンク集合 A_y に含まれるリンクでなければ利用者は通行できない、すなわち $x_{wab} \neq 1$ となることを示している。(7)式はリンク集合 A_y に含まれないリンクは管理を継続しないことを示す。最後に(8)式はデザイン変数 y_a , x_{wab} が二値変数であることを示す。

4. 仮想ネットワークにおける試算

上記までに構築したモデルを用いて仮想ネットワークで試算し、モデルの挙動を確認する。仮想ネットワークを図-1に示す。仮想ネットワークはリンクが24、ノード

が16で構成される。これらが現在供用されている道路とする。ネットワーク上には住居が4件あり、それぞれの住居からリンク22上に存在する役所と、リンク24の右端に存在する広域的な移動が可能な路線と接続するノードを目的地としたODを設定する。ネットワークを有向リンクで表現すると図-2のようになる。各リンクの所要時間は図中に示す値とする。各リンクのLCCは1,000から1,000,000をとる乱数を千の位で丸めた値で与え、表-1のように設定する。各ODの許容される移動完了時間 T_w はそれぞれの現在供用されているネットワークにおける最短経路の所要時間と比べて、1.0倍、1.5倍、2.0倍の3ケースを試算することとして、表-2のように設定する。現在のネットワークで最短経路の所要時間が15分よりも小さいODについては、15分を下限値として設定する。以上の最適化問題は汎用の線形計画問題の求解アルゴリズムであるGUROBIをMATLABから呼び出して求解する。

以上の条件で試算した結果得られた道路ネットワークにおける各ODの所要時間と、LCCのネットワーク合計値を表-3、ネットワーク形状図を図-3、4、5に示す。図中赤線が管理を継続するリンクであり、灰色破線が廃止候補となるリンクである。図によっていずれのODも接続が確保されていることが確認できる。表-3に示すように試算3ケースのうち、最も旅行時間の制約条件が緩和されたケース3が最もLCCが小さくなり、ケース2、1の順に大きくなることが確認できた。一方で、許容される時間を緩和しているため必然であるが各ODの所要時間合計値はケース1、2、3の順で大きくなっている。以上より、許容される時間を緩和するほど管理者の費用は小さくできるが、一方で利用者の移動時間が長くなるトレードオフの関係が確認できた。実務においては地域事情を踏まえて適切な複数の T_w を設定し、住民との協議にあたる。

ここで、対象の地域で管理者、あるいは住民の意向で管理を継続することが必要な道路を考える。これらは例えば、生活道路の中でも比較的幅員が広く地域内の輸送において重要な役割を果たすリンク、対象ネットワークの中に混在する広域的な輸送に利用されるリンクなどが

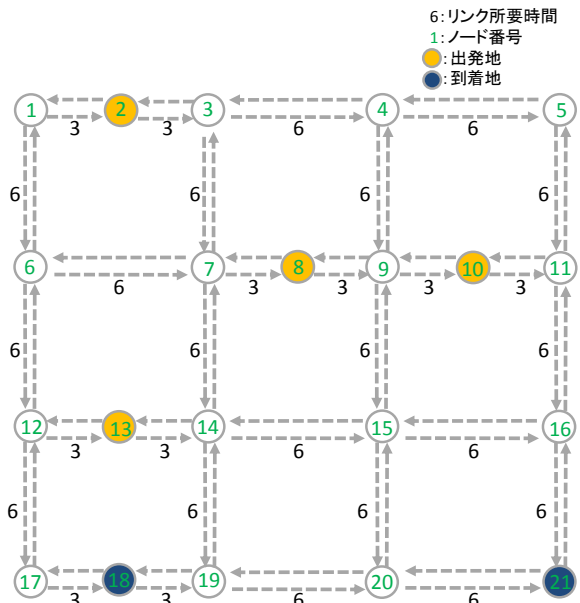


図-2 有向リンクで表現された仮想ネットワーク

表-1 各リンクのLCC

ID	管理費用	ID	管理費用
1	550,000	13	131,000
2	388,000	14	71,000
3	953,000	15	929,000
4	7,000	16	78,000
5	375,000	17	233,000
6	197,000	18	56,000
7	826,000	19	35,000
8	921,000	20	535,000
9	379,000	21	607,000
10	243,000	22	126,000
11	77,000	23	901,000
12	122,000	24	380,000

表-2 ODと試算ケースの設定

ID	出発ノード	到着ノード	最短経路所要時間	ケース1	ケース2	ケース3
				最短時間の1.0倍	最短時間の1.5倍	最短時間の2.0倍
1	2	18	24	24	36.0	48
2	2	21	33	33	49.5	66
3	8	18	18	18	27.0	36
4	8	21	21	21	31.5	42
5	10	18	24	24	36.0	48
6	10	21	15	15	22.5	30
7	13	18	12	15	22.5	30
8	13	21	21	21	31.5	42

表-3 各ケースのOD移動時間とLCC合計

	ケース1	ケース2	ケース3
1	24	30	30
2	33	39	51
3	18	24	18
4	21	21	21
5	24	24	24
6	15	21	27
7	12	12	12
8	21	21	33
移動時間合計	168	192	216
LCCネットワーク計	3,748,000	3,395,000	3,146,000

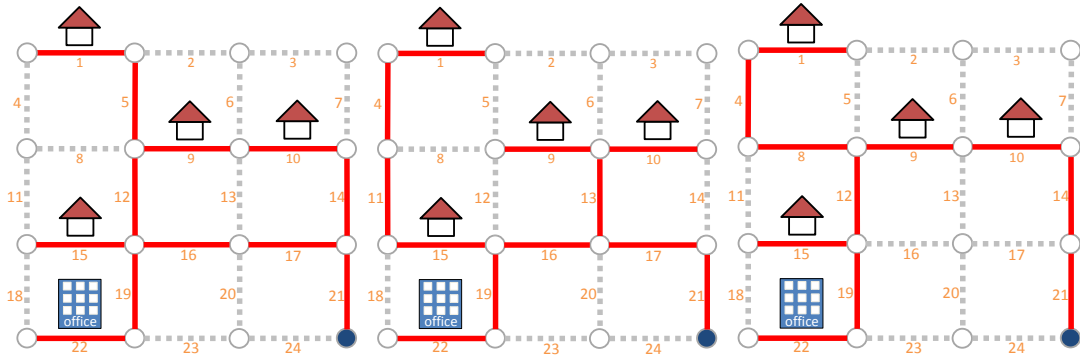


図-3 ケース1の試算結果

図-4 ケース2の試算結果

図-5 ケース3の試算結果

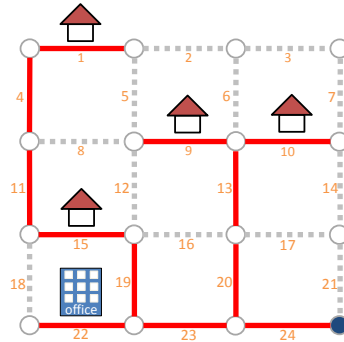


図-6 リンク 23, 24 を事前に管理継続するリンクとして設定したケース

$$y_a = 1 \quad \forall a \in A_{y^*} \quad (9)$$

ここで、 A_{y^*} : 管理を継続することが事前に決定されているリンク集合。

仮想ネットワークの役所と広域的な移動が可能な路線と接続するノードを結ぶリンク 23, 24 が A_{y^*} に該当すると設定して、 T_w をケース2と同じ値で試算した。LCC ネットワーク合計は4,293,000となり、図-6に示すようなネットワークが抽出される結果を得た。図-6と図-4と見比べると図-6ではネットワークを横方向に移動するリンク 23, 24 が $y_a = 1$ となるため、リンク 16, 17 は代替され廃止検討リンクとなった。このように本モデルを用いることで事前に管理を継続することが求められるリンクが存在する場合にもLCCが最小となる道路ネットワークを抽出できる。

5. おわりに

本稿では利用者が限定的な生活道路ネットワークを対象として、住民の旅行時間を制約に加えた容量の制約がないネットワークデザイン問題で定義される最小道路ネットワークモデルを構築した。構築したモデルを仮想ネットワークで試算し、モデルの挙動を確認した。住民の旅行時間を現在のネットワークでの最短距離の倍数で複数設定して、それぞれでネットワーク形状が異なることを示し、旅行時間の制約を緩和すると LCC を小さくできることを示した。また、事前に管理の継続を決められ

たリンクがあるときを想定し、それらを考慮できるようなモデルの改善を行った。

本研究で提案したモデルは、住民との協議に活用されることを期待したものである。協議前においては住民の OD を全て把握できない中で検討せざるをえない。したがって、廃止候補の路線となったリンクでも住民との協議の結果、継続管理することも考えられる。また、廃止候補リンクとなっても、法定外公共物として自治会等が管理することで利用を継続する方法も考えられる。したがって、試算結果で廃止候補となっても、不要なリンクであると断定するものではないことに留意されたい。

本研究で残された課題としては以下がある。

- ・ 災害時における緊急輸送などを鑑みれば、市町村が管理する子細な道路ネットワークにおいても脆弱性を考慮する必要がある。そのため、本モデルで廃止候補リンクを決定する前に防災機能確保のためのリンクを抽出する上位計画が必要となる。
- ・ 本稿では住民の移動を自動車を想定した1つのモードのみで取り扱ったが、歩行者など移動速度と目的地が異なる移動についても同時に考慮できるようなモデルが必要である。
- ・ 本稿で取り扱った戦略は「管理継続」か「廃止」の2つのみであった。実務においては「管理のための投資を最小限にとどめて、寿命がきたときに廃止する」という戦略や、「自動車の通行は禁止して、歩行者にのみ通行を許可する」という戦略も

考えられる。これらを考慮できるようなモデルの改良が必要である。

- ・ 本稿では仮想ネットワークで試算したが、実際のネットワークを用いてより具体的な条件を踏まえた試算により、モデルの実用性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路の維持管理に関する省令・告示の制定について（道路法試行規則の一部改正等），平成 26 年 4 月 2 日，
[<http://www.mlit.go.jp/common/001034659.pdf>]，（最終閲覧日：2015 年 4 月 10 日）
- 2) 国土交通省：道路統計年報 2014，2014.
- 3) 真岡市：「真岡市市道路線認定及び廃止基準等に関する要綱」（2011 年 3 月 3 日告示第 9 号），
[http://www1.g-reiki.net/moka/reiki_honbun/e110RG00000861.html]，（最終閲覧日：2015 年 4 月 10 日）
- 4) 小瀬木祐二，戸川卓哉，鈴木祐大，加藤博和，林良嗣：大都市圏スケールでのインフラ維持管理・更新費用の将来推計手法の開発，土木計画学研究・論文集，Vol.27，No.2，pp.305-312，2010.
- 5) 佐藤晃，森本章倫：都市コンパクト化の度合いに着目した維持管理費の削減効果に関する研究，都市計画論文集，No.44-3，pp.535-540，2009.
- 6) 根市政明，土屋貴佳，室町泰徳：都市のコンパクト化による都市施設マネジメント費用の変化に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.24，No.1，pp.217-222，2007.
- 7) 片山直登：「ネットワーク設計問題」応用最適化シリーズ 2，朝倉書店，2001.
- 8) Feremans, C., Labbé, M., and Laporte, G. : Generalized network design problems. *European Journal of Operational Research*, 148, 1 -13, 2003.
- 9) Yang, H., & Bell, M. G. H. : Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and Some New Developments. *Transport Reviews*, 18, 257 – 278, 1998.
- 10) Johnson, D. S., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. : The Complexity of the Network Design Problem, *Networks*, Vol.8, pp.279-285, 1978.

(2015. 受付)

DESIGN OF ROAD NETWORK WITH MINIMUM REQUIREMENT OF ACCESSIBILITY TOWARDS SMART SHRINKAGE

Satoshi SUGIURA, Fumitaka KURAUCHI and Akiyoshi TAKAGI