歴史都市における災害時ネットワークの孤立性を考慮した道路整備に関する研究

久下　紗緒里[1]・安　隆浩[2]・小川　圭一[3]・塚口　博司[4]

[1]正会員　パシフィックコンサルタンツ株式会社（〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5）
E-mail:saori.kuge@ss.pacific.co.jp

[2]正会員　立命館大学准教授　理工学部都市システム工学科（〒525-8577 草津市野路東一丁目1-1）
E-mail: ahnyh@fc.ritsumei.ac.jp

[3]正会員　立命館大学准教授　理工学部都市システム工学科（〒525-8577 草津市野路東一丁目1-1）
E-mail: kogawa@se.ritsumei.ac.jp

[4]フェロー会員　立命館大学教授　理工学部都市システム工学科（〒525-8577 草津市野路東一丁目1-1）
E-mail: tsukaguc@se.ritsumei.ac.jp

近年，日本では地震が多発しており，様々な対策が施されつつある．その中で，機能障害が生じた災害時の交通ネットワークに対してどの対策が必要なのかが検討されつつある．しかしながら，全ての交通ネットワークに対策を行うのは困難であり，非効率的な方法になってしまう．そのため，災害時危険になる確率が高い区域から優先順位を決めることが重要となろう．

本研究では，兵庫県南部地震のデータを用いて京都市の災害時交通ネットワークの状況を把握し，閉塞する道路箇所数と位置に影響されるネットワークの孤立性に着目した．そして，災害時における交通配分を行い，ネットワークの孤立性と交通状況との関係を把握した．結果的に孤立している区域を整備すれば，その区域における災害危険性は低減するが，その周辺に新たな渋滞が発生する区域もあることがわかった．

Key Words : *road improvement, travel demand, disaster mitigation, historical city*

1. はじめに

平成 23 年に発生した東北地方太平洋沖地震を受けて、国民の防災・減災に対する関心が飛躍的に高まっている．さらに今後も，東海，東南海，南海地震発生が危惧されており，これとともに，様々な方面から防災に関する研究が進められている．

本研究で対象地域として取り上げた京都市は，観光客が年間 5000 万人を超える国内有数の観光都市である．その一方で，京都市には花折断層などの多くの活断層が存在し，将来的に大規模な地震が発生することが予想されている．また京都市は，多くの文化遺産が市街地に点在しているため，市街地が被害を蒙れば，その被害が文化遺産におよぶ可能性が高い．観光都市である京都において，文化遺産の消失は多大な損害をもたらす．したがって，数多くの文化遺産が点在する歴史都市において災害が発生した場合，これらの文化遺産と周辺住民および地域とを一体として守ることが必要である．

平成７年に発生した兵庫県南部地震の際には，道路が損傷し沿道の構造物が倒壊することにより，道路の交通処理能力が低下した．また，災害時特有の交通行動の発生により，機能障害を少なからず受けている災害時の道路の処理能力を上回る交通量が発生したため，大規模な渋滞が発生した．その結果，緊急車両などの優先順位の高い車両の通行が円滑に処理できない事態が発生した．このように，将来京都市においても同様の渋滞が発生すれば，文化遺産をはじめ周辺住民や観光客が多大な損害を被ることが予想される．そのため事前に道路整備計画などを作成し，備えておく必要がある．

災害時の交通に関する既往研究では，本田ら[1)]（1996）は兵庫県南部地震の影響調査を行い，地震発生時刻が異なれば道路混雑や被害の様相が異なったと述べている．また，松本ら[2)]（1996）は兵庫県南部地震の被災地の住民を対象にアンケート調査を実施・分析し，震災から３日間における交通行動について明らかにしている．中村ら[3)]（2005）は各文化遺産について消防署からの最短経路をもとに重要リンクを抽出し，重要リンクは上京区，東山区に多く分布していることを明らかにしている．さらに，塚口ら[4)]（2008）は兵庫県南部地震における道路幅員ごとの道路閉塞がポアソン分布に従うことを示し，これを用いて京都市内の通行可能率が算出している．

本研究では，災害時の交通ネットワークを推定した後、閉塞する道路箇所数と位置に着目し、孤立箇所を発生させないための道路整備を行うことによって災害時の交通にどのような影響がもたらされるかについて検討する．

2. 対象道路ネットワーク

本研究では上京区，中京区，東山区，下京区の4区（以下：4区）を対象地域とした．4区における対象道路は京都市の主要幹線道路とする．また，4区における域内ゾーンは平成17年度の小学校区として合計38ゾーンを設定し，交通の起終点であるセントロイドは小学校の位置とした．さらに，4区以外は13個のダミーゾーンに分けた．ダミーゾーンに振り分けられた地域は行政区および行政区を分割した地域から成っている．図-1に4区における域内ゾーン及びセントロイドの位置を，図-2に対象道路ネットワークおよびダミーリンクの位置を示す．

3. 平常時の道路状況

平常時における分布交通量は，第四回京阪神都市圏パーソントリップ調査結果[5]（以下：PT調査）を用い，本研究の目的に合うようにゾーン分割を行った上で求めた．配分を行う時刻帯は，自動車による移動主体が全時刻帯内で最も多い8時台とした．配分方法はダイクストラ法による最短経路探索とFrank-Wolfe法を使った[6]．警察庁及び国土交通省による「道路交通情報の提供の在り方に関する基本的考え方」[7]を参照し，旅行速度が10km/h以下のリンクを渋滞，20km/h以下のリンクを混雑と定義すると，域内の渋滞リンクは19リンク，混雑リンクは107リンクであった．

4. 通行可能率を考慮した災害時の渋滞個所の把握[8]

(1) 災害時における交通需要推計

災害時における交通需要推計は，平常時と同様にPT調査をベースとし，京都市民アンケート調査[9]および兵庫県南部地震の実態調査[10]の結果を用いて震災2日後程度における交通需要を予測した．この結果，災害時8時台における自動車交通量は，平常時8時台における自動車交通量の約73%になることが分かった．

(2) モンテカルロシミュレーションを用いた閉塞箇所の選定

京都市内の災害時における道路ネットワークは通行可能率を考慮して作成した．本研究では，モンテカルロシミュレーションを用いて閉塞するリンクを推定し，さまざまな状況における渋滞箇所を把握した．各リンクの通行可否の組み合わせが異なる20ケースのネットワークを作成したのち，それぞれのケースについて配分交通量を算出した．なお，閉塞リンク数が全リンク数の約11.0%から約14.5%の間であり，平均値と比較してもバランスよく分布していることから，これら20ケースのネットワークを用いた．

(3) 災害時の道路状況

災害時交通需要および災害時道路ネットワークを用いて20ケースの配分を行った．20ケースの平均値は，閉塞リンクが127.1リンク，渋滞リンクが55.6リンク，混雑リンクが168.5リンクであった．

それぞれのリンクにおいて，20ケース中に渋滞する回

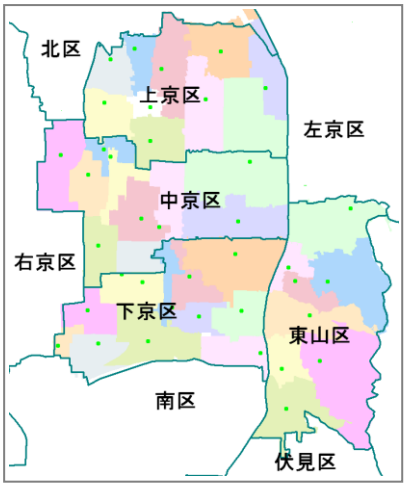


図-1　京都市4区

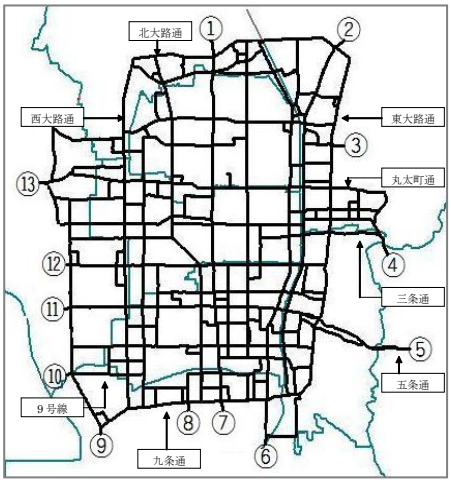


図-2　対象道路

数を図-3に示した．これより，渋滞リンクは対象地域の外周部に比較的多く存在することが分かる．特に，山科区や滋賀県からの流出入のため，平常時でも交通量が非常に多く，渋滞している三条通および五条通においては，他に迂回する道路もないことから，災害時にはさらなる混乱が生じることが予想される．三条通および五条通周辺は，清水寺や知恩院など多くの文化遺産が存在する地域である．

また，ケースごとの閉塞・渋滞・混雑リンク数を比較したグラフを図-4に示す．閉塞リンク数が少ないケースでも渋滞・混雑リンク数が平均より多くなる場合や，反対に，閉塞リンク数が多くても渋滞・混雑リンク数が平均より少なくなる場合も存在した．また，図-5示す散布図をみても，閉塞リンク数と渋滞リンク数や混雑リンク数の間に相関はほとんどみられない．このことから，閉塞リンクの数が必ずしも渋滞または混雑リンクの数の上昇または減少につながるわけではないと考えられる．そのため，同程度の被害状況においてのリンクの渋滞や混雑は，閉塞するリンクの数によってではなく，閉塞するリンクの場所に左右されるのではないかと推察できる．そこで，特定の道路を整備し，安全性を高めておくことで渋滞または混雑を緩和できると考えられる．

5. 孤立性を考慮した道路整備

(1) 孤立性を考慮した道路整備の考え方

災害時においては，道路自体の損壊や沿道建物の倒壊等による道路閉塞のために機能障害が生じること，また，安否確認や状況把握など災害時に特有な交通が発生することによって，道路交通が極度に混乱し，緊急車両も走行できない状況となると考えられる．

このため，交通需要を円滑に処理するためには，緊急車両等の通行する可能性の高い道路や平常時から交通量の多い道路で閉塞する可能性の高い箇所をあらかじめ整備し，あるいは閉塞した場合において応急復旧することにより，通行可能な道路網を広げることが考えられる．そこで本稿では，交通需要に影響を与える可能性の高い道路を把握し，さらに，道路整備を行った場合の道路状況について検討する．5章ではそれぞれの道路に対して，道路の拡幅などの具体的な整備案は検討していない．また，道路整備を行ったリンクは閉塞しないものとして扱うこととする．

(2) セントロイドと一体となって孤立する個所の整備

配分計算を行った20ケースの中には，セントロイドとノードが一体となって孤立するケースが存在した．セントロイドとノードが一体となって孤立しているということは，それだけその地域の被害が大きく，混乱が生じる地域であると考えられる．

そこで，配分計算を行った20ケースに，さらに20ケースを加えた40ケースに関して孤立する個所を把握し，セントロイドとノードが一体となって孤立する個所を図-6示した．①で2ケース，②で2ケース，③で1ケース，④で6ケース発生している．このため，これらの場所には何らかの対策を講じる必要があるといえる．そこで，本研究では最も孤立回数が多く発生しているエリア④について道路整備を行うこととする．

エリア④は第一種住居地域，近隣商業地域または準工業地域からなる．エリア④において孤立する道路は塩小路通から九条通までを南北に結ぶ道路であり，ＪＲ京都駅の東側に位置している．平常時に混雑が起こるリンクが存在する．また，災害時には渋滞や混雑，あるいは閉

図-3　20ケース配分した場合の各リンクの渋滞回数

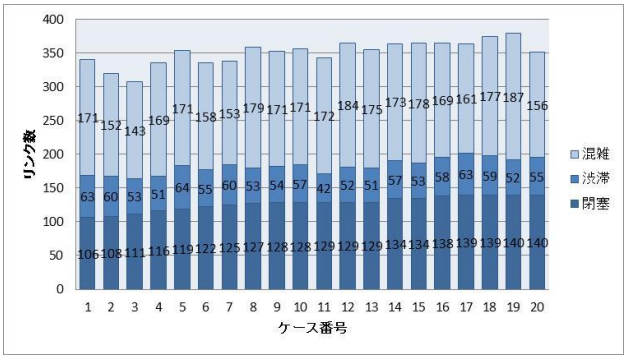


図-4　各ケースごとの閉塞および渋滞，混雑リンク数の比較

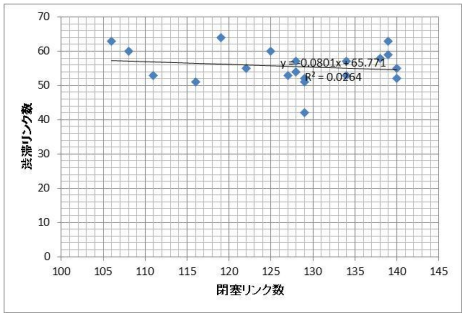


図-5　渋滞・混雑リンク数と閉塞リンク数の相関

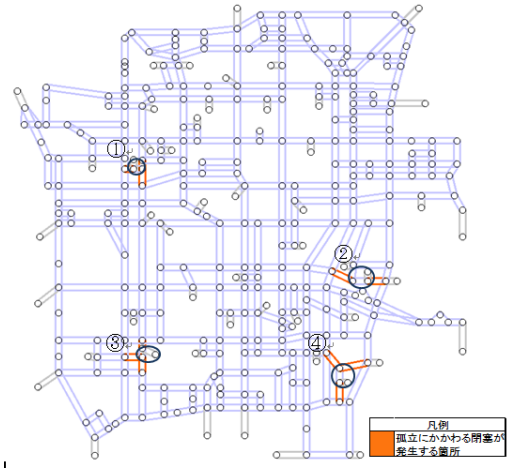


図-6セントロイドとノードが一体となって孤立する個所

図-9　エリア④を整備したときの渋滞回数（13ケース）

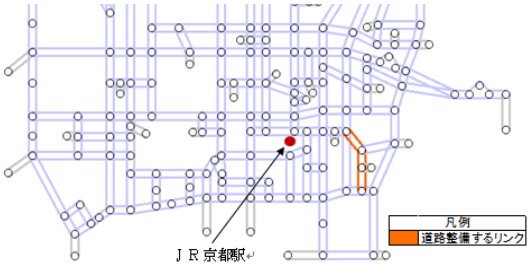


図-7　整備するリンク

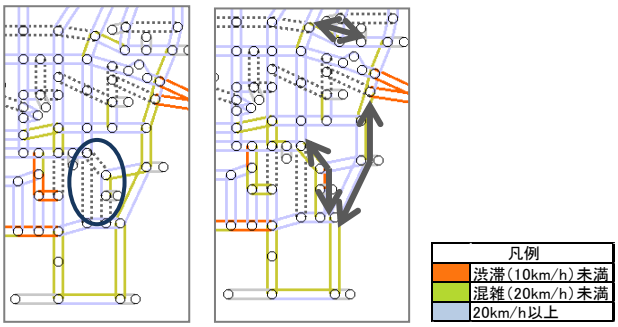
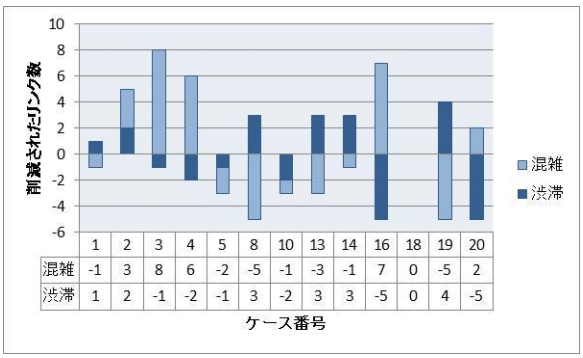


図-10　ケース16の道路状況（左：整備前　右：整備後）



	1	2	3	4	5	8	10	13	14	16	18	19	20
混雑	-1	3	8	6	-2	-5	-1	-3	-1	7	0	-5	2
渋滞	1	2	-1	-2	-1	3	-2	3	3	-5	0	4	-5

図-8　渋滞・混雑リンク数の変化

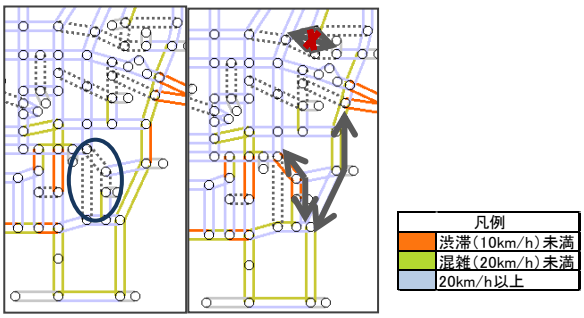


図-11　ケース19の道路状況（左：整備前　右：整備後）

塞が発生することによりほとんどのケースにおいてスムーズに通行することができない．また，図-7にエリア④が孤立しないように道路整備を行うと仮定した箇所を示す．選定した上下方向合わせて6リンクの通行可能率はそれぞれ0.50，0.68，0.41であり，閉塞する可能性のやや高いリンクが存在する．

20ケース中13ケースに関して，選定した6リンクのうちいずれかが閉塞していた．そのため，これら13ケースに対して選定した6リンクが閉塞しないとして配分計算を行った．また，エリア④を整備した時の各ケースの渋滞・混雑リンク数の変化について図-8にまとめた．さらに，図-9にエリア④を整備したときの渋滞回数を示す．

渋滞・混雑リンク数は減少したものもあるが，増加しているものも多数存在している．

図-10にケース16の整備前後の状況を，図-11にケース19の道路整備前後の状況を示す．ケース16とケース19では，周辺リンクの閉塞状況にほとんど差が見られない．しかし，ケース19では矢印で示したように，万寿寺通のリンクが閉塞していることにより，迂回できる道路がケース16よりも少なくなっている．

このことにより，道路整備をしたリンクに多くの交通量が集中したのではないかと考えられる．また，エリア④の渋滞・混雑リンク数の増減に注目すると，渋滞リンク数や混雑リンク数がすべて減少するわけではなく，減少するケースもあれば増加するケースも存在した．これらのことから，孤立しているエリアを孤立しないようにする場合，そのエリア付近のリンクの状況なども考慮して，直接は孤立にかかわらないリンクも整備する必要があると考えられる．

(3) 閉塞すると迂回できなくなるリンクの整備

20ケースの配分計算を行った際，閉塞すると渋滞および混雑リンク数の増加が顕著だったリンクは，図-12に示す2リンクであった．当該リンクは三条通と御池通を東西に結ぶ，仁王門通りの一部である．このリンクが途絶すると，ダミーゾーン④から流入する自動車交通がすべて三条通を通過しなければならないため，渋滞・混雑が増加する．これを解消するためにこれら2リンクを整備することとした．選定した上下方向合わせて2リンクの通行可能率は0.92であり，閉塞する確率は小さい．また，このリンクは都市計画道路網には含まれていない．

20ケース中，3ケースに関して，選定した2リンクが閉塞していた．そのため，これら3ケースに対して選定した2リンクが閉塞しないとして配分計算を行った．整備するリンクの数は，いずれのケースも2リンクである．整備した時の渋滞・混雑リンクの数の変化は，ケース3で渋滞リンク数が-6リンク，混雑リンク数が+8リンク，ケース15で渋滞リンク数が-4リンク，混雑リンク数が-5リンクであり，ケース8では変化がなかった．ケース3およびケース15における渋滞・混雑リンクの中で変化が顕著であった個所を図-13，図-14にそれぞれ示す．また，渋滞・混雑リンクに全く影響のなかったケース8について，当該リンク周辺の状況を図-15に示す．

ケース3，ケース15ではいずれも三条通のみに流出入していた交通量が御池通や丸太町通方面へ流れるようになった結果，三条通の渋滞が大きく緩和できた．整備した仁王門通では渋滞・混雑が発生している．一方で，ケース3に関しては，御池通や二条通において新たに混雑が発生している．三条通周辺に関して，ケース3とケース15の閉塞リンクにあまり大きな違いは見られないことから，大きな違いとみられる点線で示したリンクが閉塞していることが原因ではないかと考えられる．

また，ケース8に関しては複数のリンクの閉塞が重なることによって，新たに孤立が発生してしまっている．そのため，当該リンクを整備しても状況は変化せず，渋滞リンク数や混雑リンク数に変化はない．このように，三条通と御池通の分断が発生しないようにするために，他のリンクも整備するべきであると思われる．

そこで，図-16に示すリンクを新たに整備個所として設定した．このとき，20ケース中17ケースに関して，選定した8リンクのいずれかが閉塞していた．そのため，これら17ケースに対して選定した8リンクが閉塞しないとして配分計算を行った．図-17に各ケースの渋滞・混雑リンクの数の変化を示す．また，図-18に整備したときの各リンクの渋滞回数をそれぞれ示す．当該リンクの整備を行った場合，多くのケースで渋滞リンク，混雑リンうな箇所がある場合，迂回できるように道路整備を行えば効果が高くなると言える．

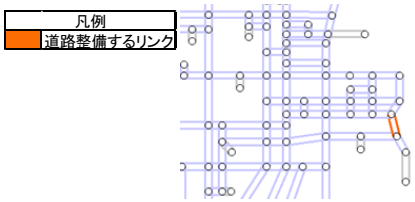


図-12　整備するリンク

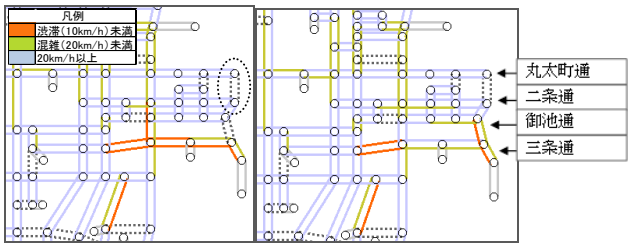


図-13　ケース3の道路状況（左：整備前　右：整備後）

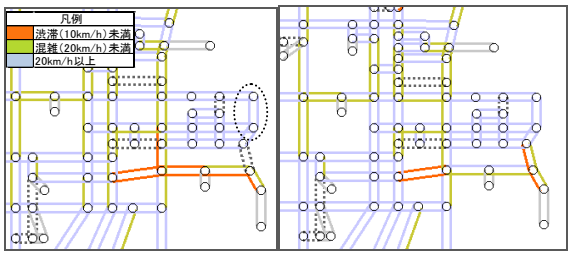


図-14　ケース15の道路状況（左：整備前　右：整備後）

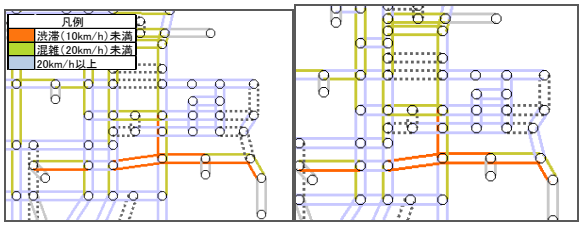


図-15　ケース8の道路状況（左：整備前　右：整備後）

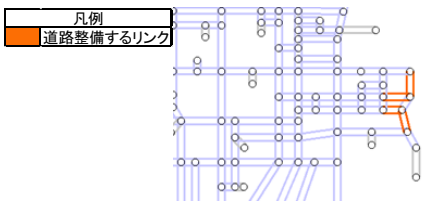
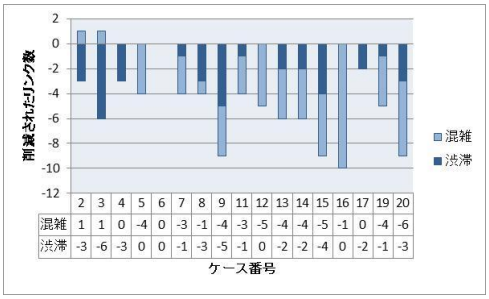


図-16　整備するリンク



	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	19	20
混雑	1	1	0	-4	0	-3	-1	-4	-3	-5	-4	-4	-5	-1	0	-4	-6
渋滞	-3	-6	-3	0	0	-1	-3	-5	-1	0	-2	-2	-4	0	-2	-1	-3

図-17　渋滞・混雑リンク数の変化

図-18　渋滞回数

6.　おわりに

本研究では，推定した道路状況をもとに，渋滞を緩和させる方法を災害が発生する前の道路整備の面から検討した．まず，個々の災害時ネットワークについて分析し，セントロイドとリンクが一体となって孤立する箇所を把握した．その結果，４つのエリアに関してセントロイドとリンクが一体となって孤立することが分かった．これらの箇所は，災害時に道路が多くの箇所で閉塞して地域そのものが孤立している状況であり，大きな混乱をもたらすと考えられる．そのため，これらのエリアで孤立が発生しないように道路整備を行うこととした．これらのエリアで道路整備を行ったとして配分計算を行ったところ，渋滞・混雑リンク数がすべて減少するわけではなく，減少するケースもあれば増加するケースも存在した．渋滞や混雑リンク数が増加した原因としては，別のリンクに迂回していた交通が道路整備をしたリンクに流れ込み，道路整備を行うとしたリンク自体が渋滞または混雑してしまったことや，迂回できるルートが少ないことなどがあげられる．このことから，孤立しているエリアを孤立しないようにする場合，そのエリア付近のリンクの状況なども考慮して，直接は孤立にかかわらないリンクも整備しておく必要があると考えられる．

また，２０ケースの配分計算を行った際，閉塞すると渋滞および混雑リンク数の増加が顕著だった三条通と御池通を東西に結ぶ仁王門通りの一部を整備した場合について検討した．この場合，多くのケースで渋滞リンク，混雑リンクが減少した．このことから，交通量の多い道路の付近で，リンクが閉塞することによって迂回できなくなるような箇所がある場合において，迂回できるように道路整備を行えば効果が高くなると言える．

以上のことから，リンクごとの道路整備を検討するよりは，迂回できるルートが増加するように道路整備を検討していく方が，高い効果を期待できると考えられる．

本研究では，道路整備を行ったリンクは閉塞しないという前提で研究を進めた．しかし，対象地域である京都市は観光客が年間5000万人を超える国内有数の観光都市であり，歴史的な街並みが多く残る地域である．そのため，道路整備と言っても，道路の拡幅のような手段をとれない個所もあろう．そこで，今後は道路整備を扱うにあたって，どのような道路整備を行うかについて検討し，それと併せて道路整備個所についても検討していく必要がある．

参考文献

1) 本田武志・谷垣博司・飯田祐三・岸野啓一：震災の影響調査に対する京阪神都市圏での取り組み，土木計画学研究・講演集 No.19(2)， pp.311～314，1996.
2) 松本誠・小谷通泰・峪尾哲哉：震災後の被災地内におけるマイカー利用の実態分析，土木計画学研究・講演集 No.19(2)，pp.327～330，1996.
3) 中村真幸・本郷伸和・塚口博司・小川圭一：文化遺産防災における道路モニタリングシステムの提案～京都市における事例研究～，平成 17 年度土木学会関西支部年次学術講演概要， pp.IV-18，2005.
4) 塚口博司・小川圭一・本郷伸和：大震災時における道路の通行可能確率の推定，歴史都市防災論文集 Vol.2，2008.
5) 京阪神都市圏交通計画協議会：第 4 回京阪神圏パーソントリップ調査 <http://www.keihanshin-pt.com/index.html>
6) 鈴木慧・塚口博司・小川圭一・安隆浩：大規模震災に対応する京都における交通マネジメントに関する一考察，平成 22 年度学術研究発表会講演論文集，大阪交通科学研究会，pp.21-22, 2010.
7) 警察庁交通局・国土交通省道路局：道路交通情報の提供の在り方に関する基本的考え方 <http://www.npa.go.jp/koutsuu/jouhou/kihonntekikanngaekata.pdf>
8) 久下紗緒里・塚口博司・小川圭一・安隆浩：れきしとしにおける災害時交通需要推計と災害時交通マネジメントに関する一考察，歴史都市防災論文集 Vol.6, 2012.
9) 八木昭憲・駒井新人・塚口博司・小川圭一：災害時における交通需要の予測のための交通行動の分析，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，第Ⅳ部門，Ⅳ-155，2007.
10) 松本誠・小谷通泰・峪尾哲哉・今井秀幸：震災時におけるマイカーの利用に関する考察，土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.513～520，1997.