

内水氾濫時の京都市域の道路交通障害予測

深草新*・戸田圭一・宇野伸宏**

* 株式会社建設技術研究所

**京都大学大学院経営管理研究部

要 旨

本稿は、内水氾濫時に発生する道路交通障害の程度を明らかにすることを目的としたものである。京都市域を対象として、氾濫解析によって市内の浸水深分布を求め、道路リンクの浸水深を考慮して時間帯別の交通量の配分計算を行うことにより、浸水時における道路交通の混乱の程度について考察した。その結果、対象領域で1999年に福岡水害をもたらした豪雨を外力として与えたところ、内水氾濫時に市中で混雑する道路が増える様子が表現され、南北方向の車両の移動時間が増加することが示された。また豪雨の発生時間帯によって道路交通障害の程度も変化することも明らかとなった。さらに、交通障害対策としてアンダーパス部での排水能力の増大の効果について検討したところ、浸水のピーク発生時以降の障害軽減に有効であるという知見が得られた。

キーワード：都市水害，内水氾濫，氾濫解析，時間帯別交通量配分，混雑度

1. はじめに

都市部では最近、気候変動の影響にヒートアイランド現象も関係して豪雨による内水氾濫が多発している。高度に発達した都市部で氾濫が生じると、地下浸水など人命を奪いかねない危険な状況が発生する可能性がある。また電気、ガス、上水道といったライフライン施設が浸水すると、それらが停止し、都市機能が麻痺する。さらに道路浸水による街全体の交通障害も市民生活、経済活動に大きな影響を及ぼす。都市水害発生時に都市機能をいかに維持するかは、行政上も学術上も重要な検討課題である。

洪水氾濫時の道路交通障害に関する従来の研究としては加賀屋ら（2003）の研究がある。彼らは札幌市東北部を走る主要幹線を対象ネットワークとし、平常時と浸水時それぞれについて配分計算を行った上で、ネットワーク交通容量を比較することで浸水の道路交通に及ぼす影響について議論している。また、交通対策を施すべき箇所についても解析結果をもとに考察している。浸水時の条件として、彼らは、豊平川流域の内水氾濫シミュレーションの結果から水深が20cm以上となるリンクを途絶させた状態のネットワークを用いている。一方、筆者ら（2007）は、

京都市中心部を対象とし、鴨川の溢水を想定して、ポンドモデルによる浸水解析から得られる道路部の浸水深の分布をもとに日交通量配分を行い、浸水が発生した際の道路交通障害の程度を予測することを試みた。浸水時の条件として、ある時刻の道路リンクの浸水深に応じて走行速度・交通容量を変化させるかたちで交通量の配分計算を行った。そして、浸水時の道路交通障害について、混雑度や所要時間を平常時の結果と比較することで考察を行っている。

本研究は、筆者らがこれまでに用いてきた解析モデルを発展させたものである。非構格子モデルを用いることにより浸水解析の精度向上を図ること、ならびに、時間帯別交通量配分を用いることにより浸水解析と交通量解析の時間的な整合性の向上を図ることを目指し、水害時の道路交通障害を精度よく予測することを主たる目的としたものである。また、モデルの適用をとおして、起こりうる道路交通障害を軽減する方策についても考察を加えている。

2. 解析手法および計算条件

2.1 解析の手順

まず、対象ネットワークで通常の時間帯別利用者

均衡配分を行い、平常時の交通量とした。次に、浸水解析の結果から道路の浸水深を求め、それに伴って走行速度と交通容量を変化させた上で平常時と同様の手法により交通量を算出し、これを浸水時の交通量とした。交通量と交通容量の比を混雑度とし、平常時および浸水時の各リンクの混雑度や代表的な地点間の所要時間を比較し、浸水が道路ネットワークの機能に及ぼす影響について考察した。 Fig.1 に本研究の手順を示す。

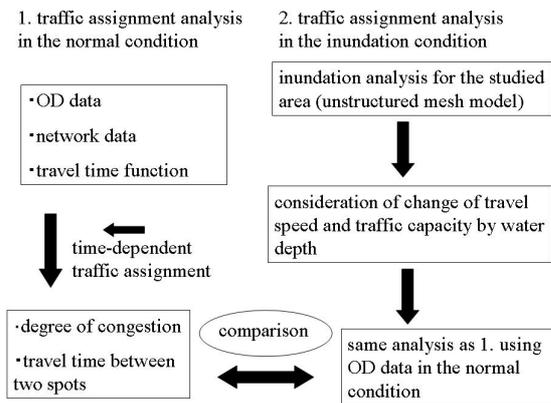


Fig.1 Framework of analysis

2.2 浸水解析

(1) 非構造格子モデル

浸水解析には川池ら（2003）による非構造格子モデルを適用した。これは、複雑な地形を考慮して詳細な水の挙動を表現できる平面二次元氾濫解析モデルである。このモデル中で下水道の影響や地下空間への浸水を考慮し、詳細な地目特性も反映させた。なお、平地の内水氾濫では大きな流速は発生しないと予想されることから、基礎式には、以下に示す連続式および移流項を省略した運動量式を用いた。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e - r_d \quad (1)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 h ：格子水深、 t ：時間、 x,y ：平面二次元座標、 M,N ： x,y 方向の流量フラックス、 r_e ：有効降雨量、 r_d ：下水道による雨水排除量、 g ：重力加速度、 H ：格子水位、 n ：Manningの粗度係数、 u,v ： x,y 方向の流速である。

(2) 対象領域

対象領域は京都市の平地部とした。Fig.2 に対象領域を示す（面積：約80.1km²）。この領域を2504個の解析格子に分割し、京都市発行の縮尺 1/2500の都市計画地図をもとに入力データを作成した。解析格子と地盤高をFig.3 に示す。京都市は北から南に、また、東から西に向かうにつれて、地盤が低くなっていくことがわかる。

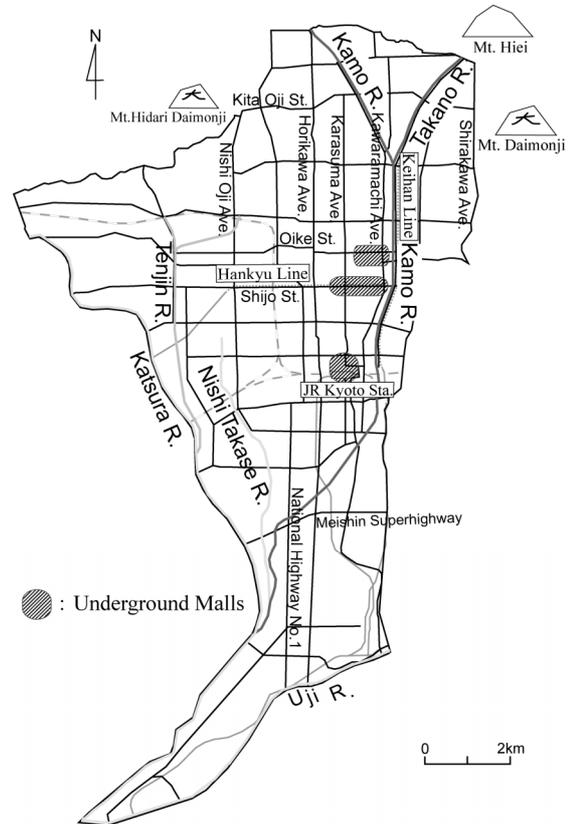


Fig.2 Studied area

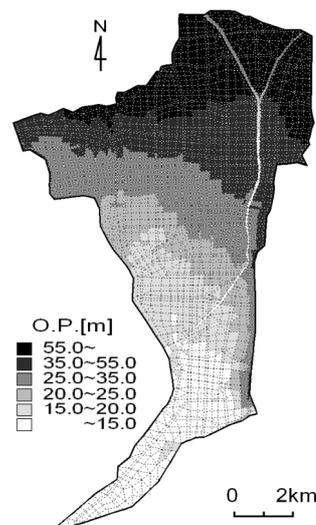


Fig.3 Computational meshes and ground elevation

(3) 構造物に関する計算条件

川池ら（2003）の方法に準じて、格子の底面積に占める実際に水が溜まる底面積の割合を有効率、格子境界の長さに占める実際に水が通過できる長さの割合を通過率と定義し、これを構造物の密集度合に応じて格子ごとに決定し、連続式、運動量式に反映させた。

(4) 中小河川に関する計算条件

対象領域内に位置する比較的大きな河川（鴨川・賀茂川・高野川）については、それらを地盤高の充分低い格子として認識させ、堤防の有無によって越流公式または段落ち式を用いて氾濫水の河道への流入を表現した。なお今回の計算条件では、上記の河川から市街地（堤内地）への溢水は起こらない。

(5) 地下空間に関する計算条件

氾濫水の対象領域内に位置する地下街への浸水を考慮した。地下空間への入口（階段など）では、15cmのステップ高を考慮し、段落ち式により氾濫水の地下への流入量を算出した。

(6) 下水道に関する計算条件

合流式幹線下水道の受け持つ地区に関しては、戸田ら（2000）の手法にならない、下水の流入箇所ごとに複数の格子から成る集水区を決定し、下水処理場の最大排水流量を、それを受け持つそれぞれの集水区の面積で案分することで、集水区ごとに最大排水量を決定した。なお、このように算出した合流式幹線下水道の排水能力が36.4mm/hr（下水道の当面の設計値である52mm/hrの7割の値）に満たない場合には、その差の分量を合流式幹線地区の全格子から横流出として連続式から一律に差し引くこととした。

合流式幹線下水道が受け持たない地区では、下水道による排水能力として、全格子から一律36.4mm/hrを横流出として差し引くこととした。また、アンダーパス部ではポンプによる排水能力100mm/hrを上乗せして計算を行った。

2.3 交通量解析

(1) 時間帯別利用者均衡配分および対象ネットワーク

時刻と交通量の関係を反映させるため、交通量解析には時間帯別利用者均衡配分（土木学会土木計画学研究委員会、2006）を用いた。

京都市内で碁盤の目状に広がる主要道路を対象とし、国道、府道の大部分と一部市道を含めた。浸水解析の対象領域に含まれる区間のみを取り出し、浸水による影響の小さいと思われる高速道路を除外して、対象ネットワークとした。用いたネットワークをFig.4に示す。市内の実測交通量データ（国土交通省、1999；京都市都市計画局都市企画部交通政策課、

2003）を基に作成した時間帯ごとのOD表や、実際の道路状況に応じて設定した各道路リンクの自由走行時間・交通容量などをインプットデータとして計算を行った。なお、自由走行時間や交通容量などの条件設定は、以前の解析（深草ら、2007）に準じている。

時間帯別利用者均衡配分では、各時間帯の終端時間において目的地まで到達できずにネットワーク上に残留する交通が発生する。この2つの時間帯に影響を与える残留交通量を、交通流保存条件を満足しつつ効率的に処理するため、本研究ではOD修正法を採用した。詳細な説明は参考文献（土木学会土木計画学研究委員会、2006）に譲るが、OD修正法を採用したことで、需要変動型交通均衡問題として定式化することが可能となり、数値計算法として広く用いられているFrank-Wolfe法が適用可能となる。

配分計算の結果より、平常時の所要時間や混雑度の時間変化を算出した。なお、時間帯の幅は2時間とした。

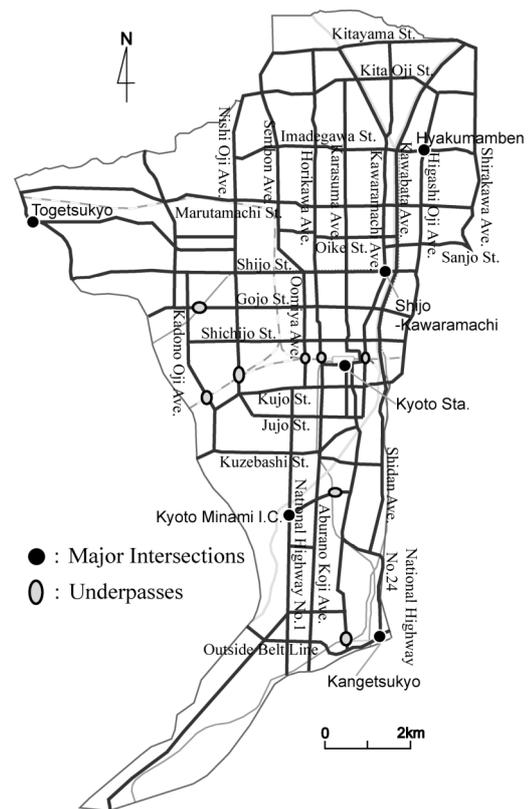


Fig.4 Studied network

(2) 内水氾濫時の計算条件

浸水の道路交通への直接的な影響は、各道路リンクの走行速度と交通容量の低下のみであると仮定し、災害情報による外出の見合わせ等、交通需要の発生に関わる不確定要素の多い項目については考慮しないこととした。それゆえ、浸水時にも平常時と同じ

OD表を用いて交通量配分を行った。

30cm以上の浸水が起きると、自動車は、マフラーなどの冠水によりエンジンが停止してしまい制御不能となると考えられる（河田，2008）。よって、浸水深が30cm以上になると、その道路リンクは道路としての機能を失い実質上の途絶状態に陥ると仮定した。浸水解析結果より道路部の浸水深に注目し、途絶している時間の長さおよびそれ以外の時間の平均浸水深から走行速度・交通容量の低減率をそれぞれ設定し（Fig.5 参照），以下の式から道路リンクごとに各時間帯内での低減率を算出した。

$$(1 - D / 100) = (1 - D_1 / 100) \times (1 - D_2 / 100) \quad (4)$$

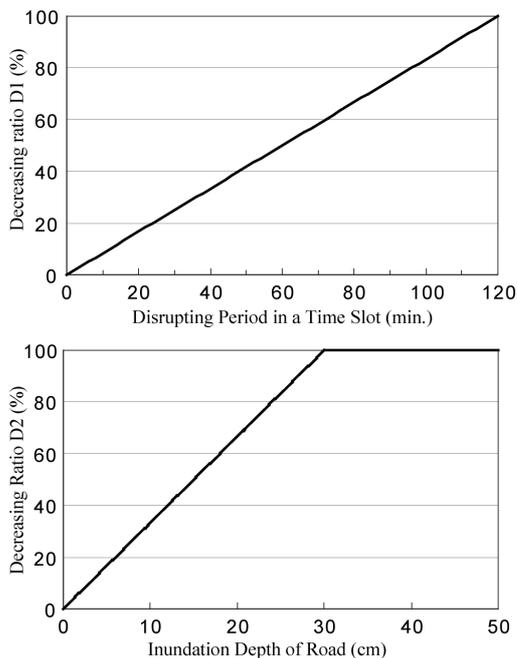


Fig.5 Decreasing ratios of travel speed and traffic capacity

ここに、 D ：各時間帯での低減率[%]， D_1 ：途絶時間による低減率[%]， D_2 ：非途絶時の平均浸水深による低減率[%]である。この低減率より時間帯ごとに走行速度・交通容量を決定し、その条件下での時間帯別配分から、水害時の混雑度や所要時間の時間変化を求めた。

3. 解析結果

3.1 平常時の解析結果

混雑度の分布をFig.6 に、代表的な地点間の所要時間の変化をFig.7 に示す。平常時においては、8時（午前8時，以下、時刻は全て24時間表記）頃から一部区

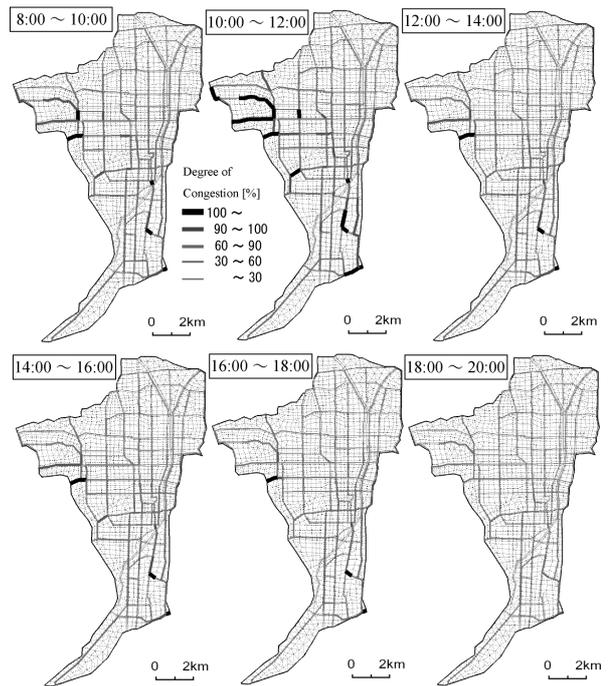


Fig.6 Degree of congestion in the normal condition

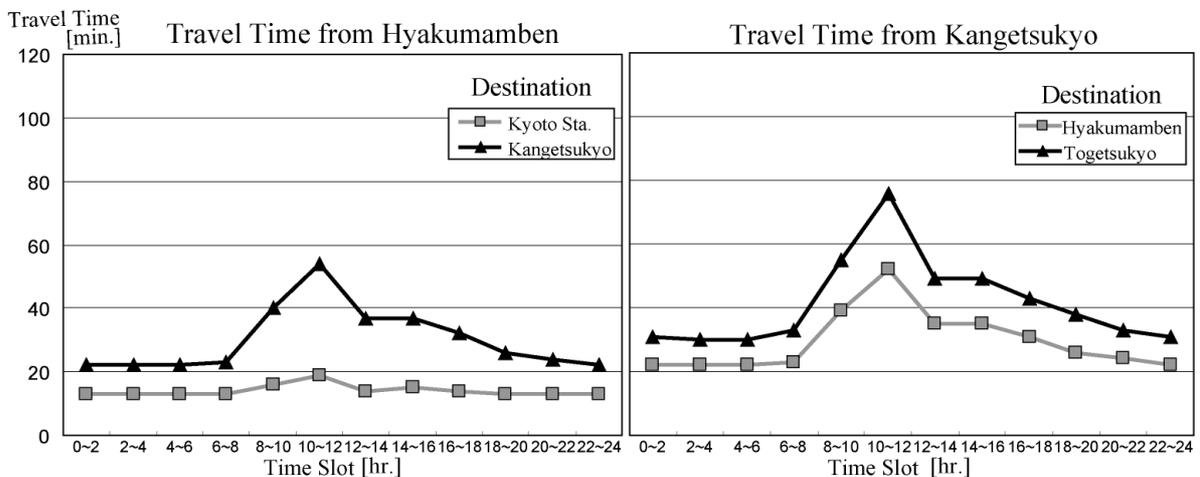


Fig.7 Travel time in the normal condition

間で混雑が始まり、10時～12時の間に混雑のピークが現れる。その後、18時頃まで一部区間では混雑状態が継続する。ピーク時間帯には、南部の国道24号や外環状線、西部の一部区間など、交通容量の小さい区間が混雑状態に陥っている。この結果は、実際の京都市の交通事情をおおむね適切に表現できていると言える。

3.2 内水氾濫時の解析結果

(1) 検討ケース

外力として、1999年に発生した福岡水害時の降雨 (Fig.8 参照) を想定し、流出率を85%としたものを対象領域全体に与えて内水氾濫計算を行った。降雨開始後3時間、5時間、7時間経過時の内水氾濫状況を Fig.9 に示す。地盤の傾斜に沿って南西方向に氾濫水が流下し、西高瀬川沿いの地域において大きな浸水深が現れたほか、宇治川に近い南部でも浸水箇所が見られる。同じ京都市を対象とした従来の解析 (戸

田ら、2000) と比較しても、微地形の影響を受ける浸水挙動の定性的な傾向をおおむね捉えており、筆者らが以前に実施した浸水解析 (深草ら、2007) よりも精度が向上したと言える。

降雨開始時刻を変えた交通量解析4ケース (Table 1 参照) のうち、Case2, Case3 について詳述した後、4ケースの比較を行う。Case2, Case3 の解析結果 (混雑度の分布) をそれぞれ Fig.10, Fig.11 に、所要時間の変化を4ケースまとめて Fig.12 に示す。

Table 1 Traffic analysis cases

Case	Rainfall	Rainfall starting time
Case 1	Rainfall in	0:00
Case 2	Fukuoka flood in	6:00
Case 3	1999 (runoff rate is set 0.85.)	12:00
Case 4		18:00

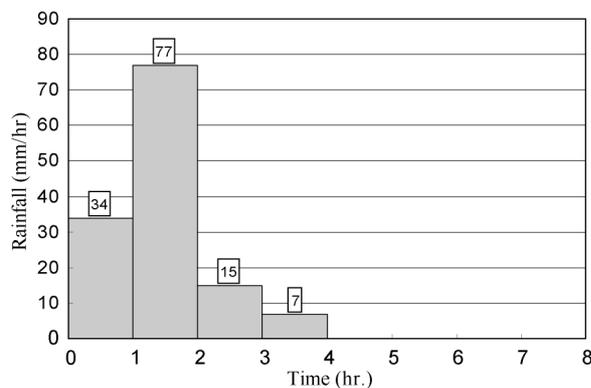


Fig.8 Rainfall condition of Fukuoka flood in 1999

(2) Case2 (降雨開始時刻 6 : 00)

8時～9時頃に浸水深が最大となり、広い範囲で途絶区間が出現した。特に、堀川通、西大路通、葛野大路通といった幹線道路がJRの線路を南北に渡るアンダーパス部の浸水で途絶したため、それ以外の河原町通、烏丸通、大宮通などに交通が集中し、かなりの混雑が引き起こされている。10時～12時頃においても多くの途絶は解消されず、ピーク所要時間が大幅に増加している。また、油小路通の一部区間が一時的に途絶状態となったために、国道1号や国道24号などに迂回する車両が増加し、南部の地域でも混

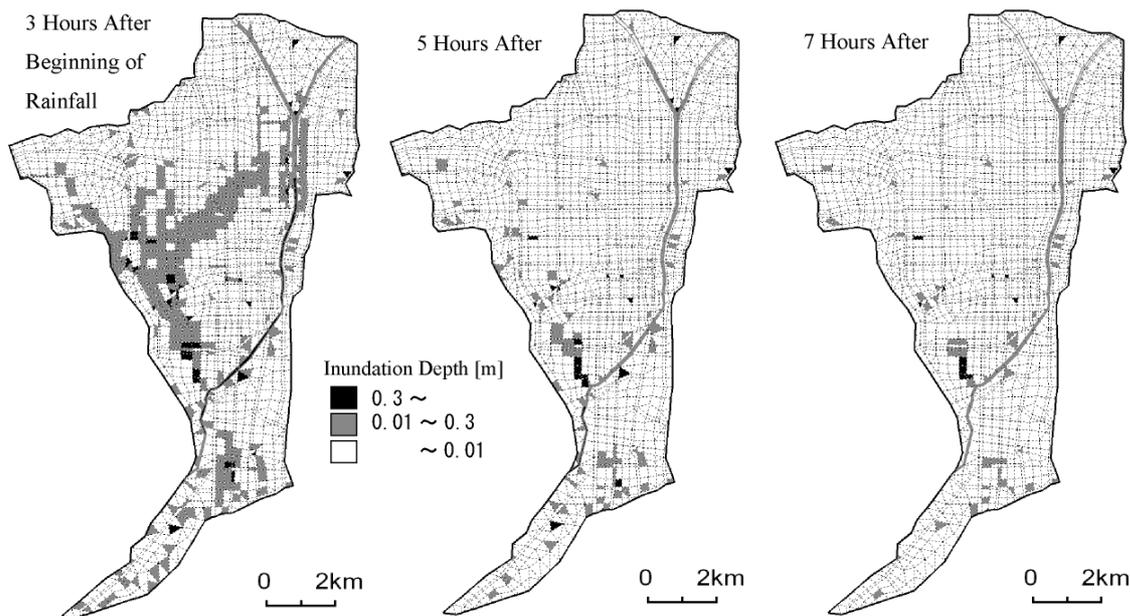


Fig.9 Computed inundation water depth distribution

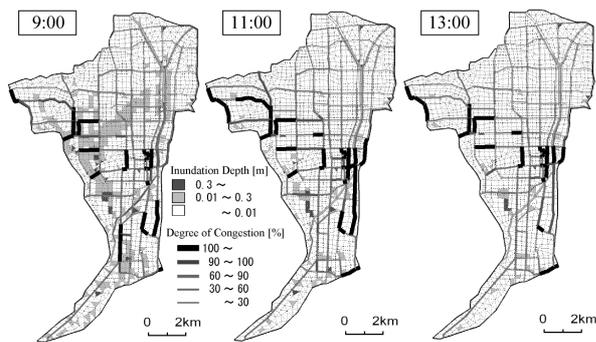


Fig.10 Degree of congestion in inundation (Case2)

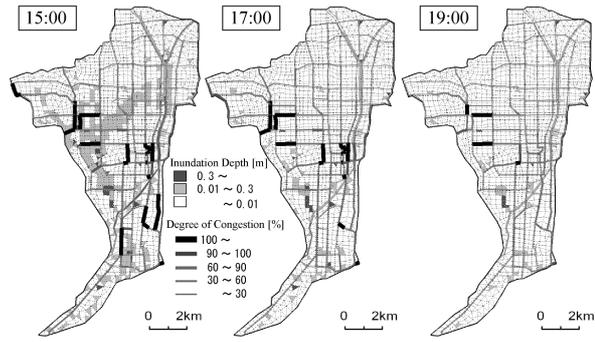


Fig.11 Degree of congestion in inundation (Case3)

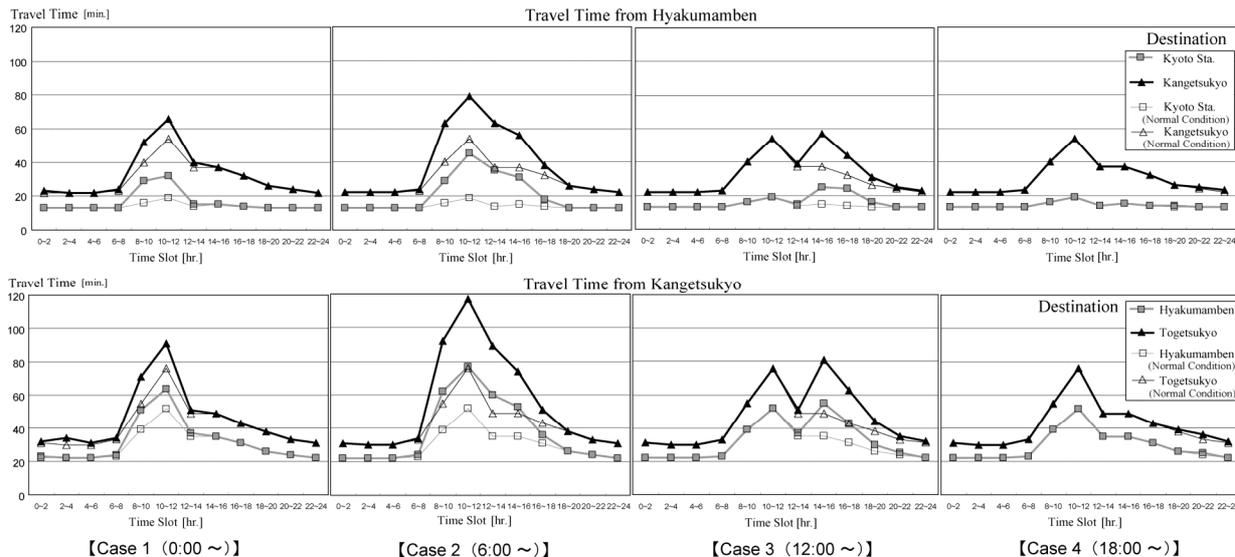


Fig.12 Travel time in the inundation condition

雑が引き起こされている。

(3) Case3 (降雨開始時刻 12:00)

交通量の午前のピークを過ぎた頃に降雨が開始しており、午後のピークに達する14時~16時頃に中心部や南部で多くの区間が混雑している。そのため、1日を通じての交通量のピークである10時~12時より大きな所要時間が14時~16時に現れ、その後、夜まで影響が継続する。

(4) Case1~Case4の比較

4ケースを比較すると、障害の程度は、Case2が最も大きく、Case4が最も小さいことがわかる。Case2は、浸水時間帯の影響で、交通量の多い時刻(朝~昼)に大きな道路交通障害が引き起こされる。またアンダーパスの浸水による長時間の途絶が道路交通障害を引き起こす大きな要因となっている。

Case3は交通量のピーク直後である正午に浸水が発生したため、昼過ぎから夜まで道路が途絶しているのに対して、Case2では朝に浸水が発生し、道路の途絶は朝から昼過ぎまでと、交通量のピーク時刻と重なっている。これが、両ケースの結果を分けた要因である。交通量がピークとなる10時~12時の時間

帯よりも浸水の発生時刻が前か後かによって障害の状況が変わってくる。

4. アンダーパス部の対策

4.1 ボトルネックとなるアンダーパスの探索

JRの線路を渡る箇所は、南北交通にとってボトルネックとなりやすい。そこで、重点的に対策を講じるべきアンダーパスの探索を行う。

対象とするのは、河原町通、堀川通、西大路通、葛野大路通のアンダーパス部 (Fig.4 参照) である。Case2 と同じ外力 (福岡水害, 85%有効降雨, 降雨開始時刻6:00) を与え、それぞれのアンダーパスについて、窪みをなくし (地盤高を両側の格子の平均とし)、排水ポンプを取り除いた (通常の下水のみで排水する) 場合、すなわち、アンダーパスが解消された場合に、どれだけ混雑が解消されるか検討した。混雑解消の度合いが大きいアンダーパスほど、道路交通に大きな影響を及ぼす箇所であることになる。1ヶ所ずつ解消させて解析を行い、領域内の混雑 (混雑度100%以上) もしくは途絶している区間の長

さおよび総走行時間（全車両の移動時間の合計）を時間帯ごとに比較した結果をそれぞれFig.13, Fig.14に示す。

図より、地盤が低く浸水深の大きくなりやすい葛野大路通と交通量の多い堀川通のアンダーパスの影響が他に比べて大きいことがわかる。

4.2 アンダーパス部の排水能力増強策

葛野大路通および堀川通のアンダーパスを解消すればかなりの道路交通障害抑制に繋がることがわかったが、そのような大規模な事業を行うことは現実的でない。そこで、代替案として、葛野大路通および堀川通のアンダーパス部における排水能力の増強策を提案し、その効果をFig.10, Fig.12【Case2】と比

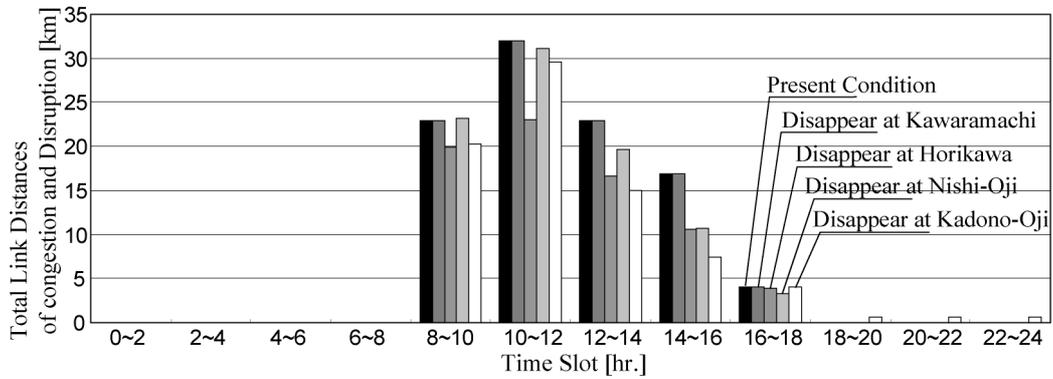


Fig.13 Comparison of total link distances of congestion and disruption in underpass disappearance

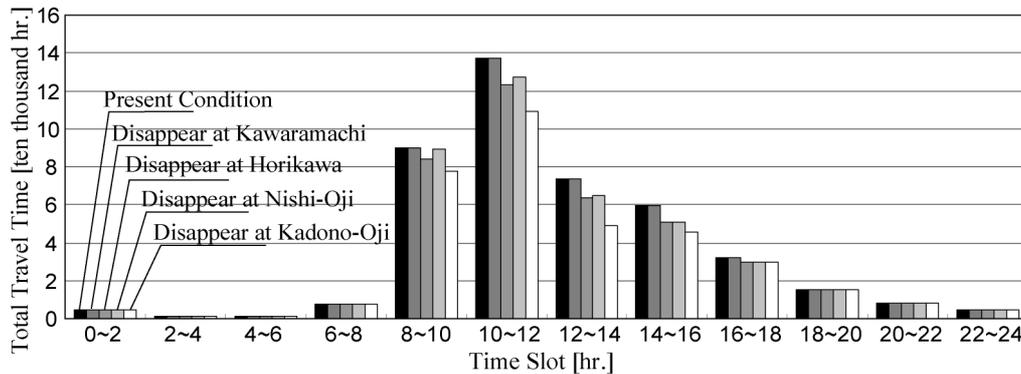


Fig.14 Comparison of total travel times of congestion and disruption in underpass disappearance

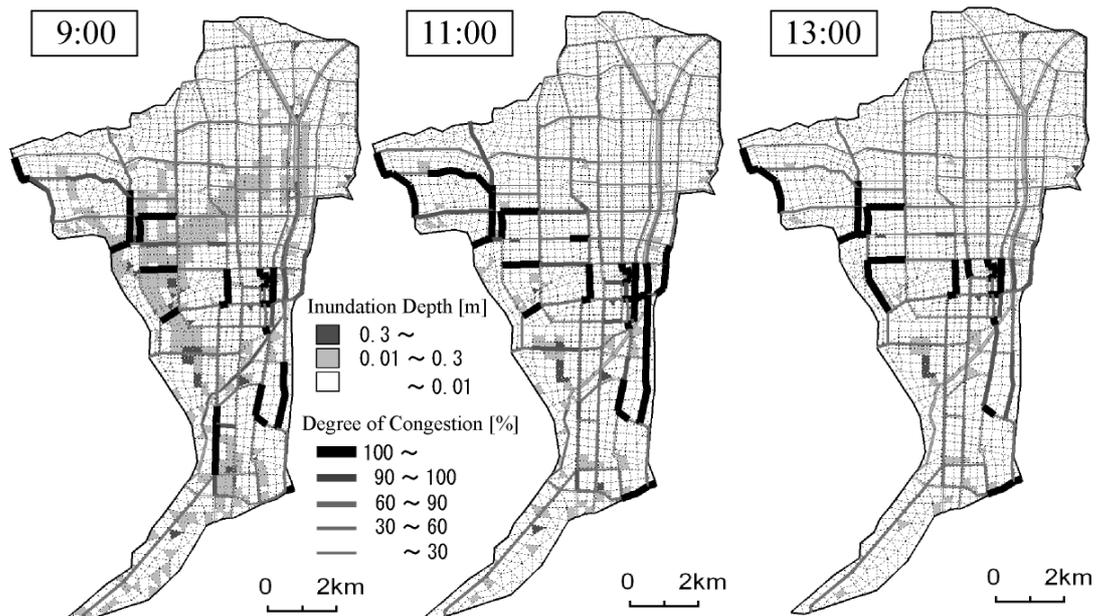


Fig.15 Degree of congestion in inundation by underpass drainage ability increase

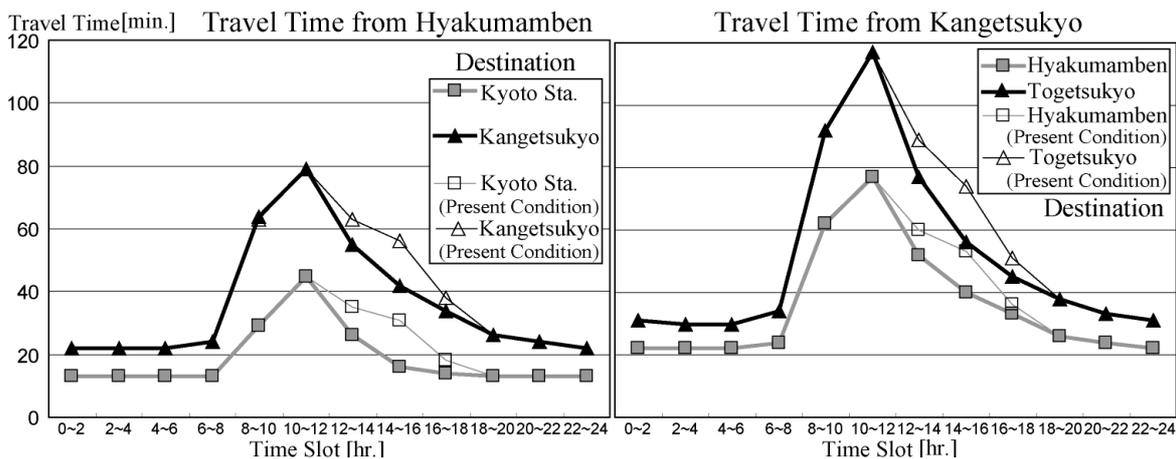


Fig.16 Travel time in inundation by underpass drainage ability increase

較して検討する。

排水能力増強を表現するため、該当箇所のポンプの能力を100mm/hrから200mm/hrに変更した。Case2と同じ降雨外力を与えて解析を行った場合の混雑度、所要時間の変化をそれぞれFig.15, Fig.16 に示す。

最大浸水深の発生時（このケースでは交通量のピーク時間帯に重なる）前後では、排水能力を増強したにも拘らず葛野大路通、堀川通を含む多くの区間で途絶状態に陥った。しかし、その時刻以降では徐々に効果が現れ、Case2と比較して市内中心部の混雑度が改善した。所要時間を見ても、最大浸水深の発生時前後にはあまり効果が現れていないが、それ以降で、南北交通の所要時間が大幅に短縮されているのがわかる。

5. おわりに

下水道や地下空間への浸水、詳細な地目特性を考慮した非構造格子モデルによる氾濫解析と時間帯別交通量配分を組み合わせることにより、内水氾濫の発生箇所や発生時刻に応じたかたちでの道路交通障害の予測を可能にした。また、モデルの適用をとおして、障害の発生状況や対策についての考察を加えた。結論を以下にまとめる。

- * 対象とした京都市域で1999年の福岡水害時なみの短時間豪雨があった場合、広域にわたり混雑度や車両の移動時間が増加することが構築したモデルにより表現できた。
- * 短時間豪雨の発生時間帯によって道路交通障害の程度が異なってくることが明らかとなった。
- * アンダーパス部の排水能力増強策は、最大浸水深発生時の道路交通障害の軽減には有効でないものの、それ以降に継続する障害の軽減には有効であるとの知見が得られた。

なお今回構築したモデルを活用すれば、道路の一

部かさ上げや構造物による氾濫水の遮断といった、考えられる様々な交通障害対策の効果についても検討可能である。さらに今回の成果をもとに、今後、内水氾濫時の道路交通障害による波及被害額の算定についても検討を加えていきたい。

謝辞

本研究の一部は、平成20年度科学研究費補助金（基盤研究（B）No.20310096）の補助を受けて実施したものである。

参考文献

- 加賀屋誠一・内田賢悦・萩原 亨（2003）：札幌市東北部における水災害時のネットワーク交通容量変化に関する研究, 自然災害科学, 21-4, pp.401-415.
- 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人（2003）：寝屋川流域を対象とした氾濫解析モデルの高度化, 水工学論文集, 第47巻, pp.919-924.
- 河田恵昭（2008）：これからの防災・減災がわかる本, 岩波ジュニア新書, 岩波書店, pp.59-60.
- 京都市都市計画局都市企画部交通政策課（2003）：「歩くまち・京都」交通まちづくりプラン.
- 国土交通省（1999）：平成11年度 道路交通センサス.
- 戸田圭一・井上和也・村瀬賢・市川温・横尾英男（2000）：豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No.663/II-53, pp.1-10.
- 土木学会土木計画学研究委員会（2006）：道路交通需要予測の理論と適用 - 第II編 利用者均衡配分モデルの展開.
- 深草新・戸田圭一・宇野伸宏（2007）：都市水害に起因する道路交通障害について—京都市域を対象として—, 自然災害科学, 26-2, pp.177-188.

Prediction of Traffic Difficulties Caused by Inundation Due to Heavy Rainfall in Kyoto City

Shin FUKAKUSA *, Keiichi TODA and Nobuhiro UNO **

* CTI Engineering Co., Ltd., Japan

** Graduate School of Management, Kyoto University

Synopsis

This study treats the degree and characteristics of traffic difficulties caused by urban inundation by heavy rainfall in Kyoto City, Japan. First, in the normal condition, time-of-day user equilibrium traffic assignment is performed and traffic condition on network is computed. Next, assuming heavy rainfall, inundation flow analysis is executed to obtain the water depth distribution. The similar traffic analysis is performed in the inundation condition, by changing run speed and traffic capacity based on the computed water depth of each link. Then, degree of congestion and travel time between major ODs are compared and discussed for the normal condition and the inundation one. As a result, it is found that the inundation at the southwest of studied area including underpass link of JR line has an effect on the traffic network all over the city.

Keywords: urban flood, inundation by heavy rainfall, inundation flow analysis, time-dependent traffic assignment, degree of congestion