

論文

# 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

加賀屋誠一\*・内田 賢悦\*・萩原 亨\*

## A Study on Changes of Network Traffic Capacity in the Case of Inundation in the Northeast Part of Sapporo City

Seiichi KAGAYA\*, Ken-etsu UCHIDA\* and Tohru HAGIWARA\*

### Abstract

In this study, two analyses of road network capacity in the case of inundation in the north part of Sapporo City are carried out. That is, changes of road network capacity caused by both the cut off of road sections caused by inland water inundation and the traffic measures that prevent links from being cut off are examined. As the results, the following two conclusions are obtained. I) The network capacity in the case of the flood decreases 32% compared with that in usual status. II) Because the traffic measure made to a road section has additive, alternative or synergistic effect each other, it is important to consider the interaction between road sections in examining the effect of traffic measures. If traffic measures are made to three of links cut off in the case of inundation, the increases of network capacity vary from 2 % to 38% compared with the network capacity when no traffic measure is made.

キーワード：ネットワーク交通容量，都市型水害，内水氾濫，交通対策

Key words : network traffic capacity, urban flood, inland water inundation, traffic measure

### 1. はじめに

都市部では緑地空間が減り、コンクリートやアスファルトで地面が覆われる面積比率が大きくなっ

ている。このことにより、地面の保水能力が低下し、さらに都市部で発生する集中豪雨が主な原因となり、近年大都市において都市型水害が多発している。都市型水害とは、都市部で発生する内水

\* 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻  
Division of Urban and Environmental Engineering,  
Graduate School of Hokkaido University

本論文に対する討論は平成 15 年 8 月末日まで受け付ける。

氾濫・外水氾濫による水害の総称である。1999年には、福岡と東京で地下室が水没し、死者も出るといった、これまでにない形の水害となっている。また2000年に発生した東海豪雨を契機に建設省（現国土交通省）は、頻発する都市型水害に対応するため、「都市型水害緊急検討委員会」を組織し、同委員会より「都市型水害対策に関する緊急提言」が出された<sup>1)</sup>。こうしたことからみても、都市型水害対策が緊急課題となっていることが窺える。

近年、水理学や水文学に基づく雨水の流動や分布を表現し得る工学的なコンピュータモデルにより、豪雨・洪水・土砂流出・氾濫等の水災害に関わる現象の解析と予測が可能となりつつある<sup>2)</sup>。たとえば、降雨状況に応じた都市水害予測シミュレーションモデルが既に開発されており<sup>3),4)</sup>、こうしたモデルによる分析結果は、ハザードマップの作成にも用いられ、都市型水害対策を立てる上で重要な役割を果たしている。一方、水害時の交通影響に関する研究は、旅行時間に着目した例<sup>5)</sup>はいくつかあるが、ネットワーク交通容量に対する影響を分析した例は、筆者らの知る限りでは紹介されていない。特に道路ネットワークは、水害時の避難支援、水防活動、復旧活動等に必要な資機材、人員等の輸送に欠かせないものである。したがって、そのような緊急時は、交通輸送に対する分析に基づき、水害時に適切な交通運用・管理により、交通機能の確保を図ることが重要となる。

そこで本研究では、都市型水害の中でも比較的起こりやすいと考えられる内水氾濫を想定し、道路交通ネットワークへの影響分析を行う。対象地域としては、低地部が多く存在し、さらに土地利用の高度化が進んだ札幌市東北部をとりあげる。分析の前提条件としては、内水氾濫により道路浸水および湛水が起り、道路ネットワーク上に途絶区間が発生するものとする。こうした条件下におけるネットワーク交通容量の変化を明らかにする。また、現状では内水氾濫により途絶すると考えられる道路区間について、将来の道路かさ上げ、下水管拡張工事、河川のポンプ能力増強等の対策により、内水氾濫時であっても通行可能となる場

合を想定し、その容量増強効果に関する分析も行う。これらの対策は、水災害時において交通機能確保を図るものと考え、以下では交通対策と呼ぶことにする。ここでの分析は、交通対策によるネットワーク交通容量の増強効果の定量化を試みるものである。

## 2. 都市型水害と都市機能への影響

都市型水害（都市型豪雨災害）とは、豪雨災害のうち、主に都市部で発生し、都市中心部での地下街への浸水による災害を含む浸水被害の拡大、土砂災害の発生など、従来の災害とはやや異なる特徴を持つ災害をいう<sup>6)</sup>。東京全域を浸水させた1958年狩野川台風は、その最初の顕著な事例とされている<sup>6),7)</sup>。一方、都市水害は都市化の進展に伴う降雨流出特性の変化と都市域の場の特性が結びついて生じる水害のことをいう<sup>6)</sup>。都市型水害は、特にここ数年では、それまで川が氾濫しても影響の少なかった水田地帯などに高度経済成長期以降発達してきた都市部で水害が発生するケースが顕著になってきている<sup>8)</sup>。水害時には、内水氾濫だけでなく、破堤による外水氾濫、またはそれらが複合的に発生するため、その対策は極めて複雑なシステムとなる。

都市型水害の特徴は、氾濫水全量よりもピーク時の流量だけが極端に大きくなっていることである<sup>8)</sup>。東海豪雨において、特に被害が深刻であった自治体では、避難勧告が出たときには既に家屋への浸水が始まっており<sup>9)</sup>、福岡水害の際は、氾濫のあった河口から2.5~4 kmの区間で1時間半程度の間河川の水位が約3.5 m急増したことも報告されている<sup>10)</sup>。人口や資産が集中する都市部では、一度水害が起れば、その被害が甚大となり、また土地利用の高度化が進んでいるため、治水対策が困難となっている。こうしたことから、早急な対応が被害軽減のためには重要であり、ハード面だけではなくソフト面での対策の重要性が近年認識されている。

想定される被害として、都市機能の麻痺が挙げられる。その主要なものとして、「都市型水害対策に関する緊急提言」にも盛り込まれているように、

ライフライン機能と交通機能が考えられる。ライフラインについては、浄水場の冠水による断水、管路の流失によるガス供給停止、電力や電話は、施設の水没、電柱の倒壊、ケーブルの切断等により障害が生じる可能性がある。1982年の長崎大洪水では、実際にこのような被害が報告されている<sup>11)</sup>。

交通機能については、浸水により道路が通行不能となることが考えられる。また、無理な自動車利用は故障を招き、こうした放置車両が道路通行を妨げる2次被害をもたらすことも考えられる。さらにこうした状況は、通行可能箇所へ自動車を集中させ、緊急車両の通行を妨害することにもなる。

### 3. 浸水時における交通影響分析

浸水はわずかな高低差によって状況が変化することから、浸水状況の把握には微地形情報の蓄積が図られなければならない。また、降雨特性、河川、下水道等の整備状況、都市施設の状況等によっても浸水状況は異なり、特に地下空間は、公共施設や民間の施設が地下で連結されている。したがって、空間形状、構造、地上や他施設との連結、防水対策施設の位置等、基礎情報の蓄積も図られなければならない。こうした情報を踏まえ、状況に応じた数段階のシナリオを設定し、浸水予測シミュレーションにより浸水状況の予測を行うことになる。

浸水による最も大きな交通機能への影響として、道路区間上に通行不能箇所が出現することに起因する、ネットワーク交通容量の低下がある。この影響を把握するためには、浸水予測シミュレーションによる予測結果を参考に、人間の行動原理に基づく交通モデルを適用して分析を行う必要がある。こうした手順により、はじめて交通機能確保を図る適切な対策の検討を行うことが可能となる。

## 4. 札幌市東北部における水害

### 4.1 台風に伴う水害による交通被害

札幌市東北部(北区、東区、白石区の一部)は、豊平川左岸部に位置し、低地帯が多く存在する。

特に白石区東米里は、海拔4メートルの泥炭地であり、地盤沈下も激しい地域でもある。そのため、札幌市東北部は水害常襲地帯と形容され、これまで幾度となく水害経験をしてきた。中でも昭和50年8月の台風6号や昭和56年8月の台風15号による被害は、記録的なものであった。

昭和50年8月23日に北海道に上陸した台風6号による被害は、25日時点で、北区篠路、東区中沼、白石区東米里の三地区を中心になお79世帯が床上浸水、1097世帯が床下浸水となっており、特に北区での被害が甚大であった<sup>12)</sup>。27日時点の浸水家屋は札幌市全域で295戸、このうち白石区東米里の床下浸水5戸を除く、290戸が北区となっており、水はけも極端に悪いことを露呈した<sup>13)</sup>。また土木被害については、札幌市全体で河川決壊5箇所、氾濫17箇所、道路通行不能35箇所となった<sup>13)</sup>。特に札幌の中心部を通る主要幹線の石狩街道には、故障のため乗り捨てられた車が列をなす状況となり、こうした放置車両は交通への2次被害を拡大させた<sup>12)</sup>。この台風被害について、当時の岸力北海道大学教授(河川工学)は、河川流域の治水対策が不十分のまま、無制限に都市化の輪を広げていくことの問題点を指摘している<sup>12)</sup>。

昭和56年8月の台風15号は、23日に札幌市を通過し、同市での降雨量は戦後最大規模となった。そのため、水害常襲地帯といわれる札幌市東北部だけでなく、全市的な被害をもたらした。台風15号による札幌市の被害状況をまとめたのがTable 1であり<sup>14)</sup>、全市的な被害があったものの、東北部での被害が特に大きかったことが窺える。冠水した道路は札幌市で180本、白石区東米里付近では水深1メートルを越えていた。道路破損や冠水のため、23日朝から市内各地で72本に上る交通規制が行われ、台風直撃から2日経過した時点でも、国道で14路線20区間、道道で65路線65区間が依然として通行止めになったままであった。市内中心部では、北1条通(国道)が冠水のため朝から午後5時まで通行止め、北12条通(市道)における陥没等の被害も報告されている<sup>15)</sup>。

Table 1 Damage by typhoon No. 15 (1981) in Sapporo City

	家 屋 (棟数)			道路 (区間数)		河川 (箇所)		破損流失 橋数	崖崩れ 発生数	田畑冠水 (ha)
	全半壊	床上浸水	床下浸水	陥没・破損	冠水	溢水	決壊			
中央区	0	119	111	1	47	7	4	0	4	5
北 区	0	100	939	3	37	8	0	0	0	515
東 区	1	101	1392	0	19	2	1	0	0	365
白石区	0	189	640	1	33	13	0	1	0	175
豊平区	0	15	91	18	26	8	0	1	11	165
南 区	4	135	310	7	5	37	35	9	56	92
西 区	0	103	344	0	13	17	14	5	0	88
計	5	762	3872	30	180	92	54	16	71	1405

#### 4.2 内水氾濫による交通への影響と交通対策

札幌市東北部では、これまでに行われてきた河川の治水工事により、現在では破堤による外水氾濫の危険性は小さくなっている。一方、札幌市東北部は、土地利用の高度化が進んでおり、都市型水害の危険性は依然として高い地域でもある<sup>16)</sup>。

「石狩川水系工事実施基本計画」は、昭和56年の台風による降雨量規模を想定して立てられており、札幌中心部を流れる豊平川 (Fig. 1 上図) もその対象河川となっている。以下では、このような降雨量がある場合を想定し、内水氾濫シミュレーション<sup>3)</sup>による札幌市東北部における浸水状況を調べることにする。

Fig. 1 下図は、昭和56年8月の台風15号の雨量、すなわち、3日間雨量310mm (既往最大雨量) とし、1913年に記録した1時間あたり最大50mm雨量 (既往最大雨量) を想定し、内水氾濫が始まってから40時間後の浸水状況をシミュレーションした結果を示している<sup>17)</sup>。Fig. 2 にそのハイトグラフを示す。同シミュレーションでは、下水管路の流出量およびマンホールからの湧出量の計算は平井の計算法<sup>18)</sup>に準拠し、下水管路は幹線部 (管梁) および枝線部 (管梁) に分け、前者は管水路の不定流計算、後者は集水域をラッピングした貯留関数を基本として計算を行っている<sup>3)</sup>。

内水氾濫が発生した場合、特に東苗穂 (図中A)、北区役所周辺 (図中B)、二十四軒周辺 (図中C) の3地域は、特に浸水しやすい低地部となってい

る。Fig. 3 は、これら3地域における湛水深の時間経過を示しており、降雨開始後40時間では、3地域とも水深が20cm以上となっていることがわかる。また、水深が20cm以上となっている継続時間は、短い地域で約3時間、長い地域では、約10時間となっている。氾濫水の広がりや、降雨開始後41時間をピークとし、時間経過とともに徐々に解消されていた。水深が20cm以上になると自動車通行が困難になるだけでなく、自動車故障も起こると考えられる。そのため、こうした地域では通行不能となる道路区間が出現し、そこでは道路が途絶した時と同じ影響を与えることになる。このことは、札幌市東北部における道路ネットワーク機能を著しく低下させ、ひいては札幌市全体の道路ネットワークへも影響すると考えられる。

内水氾濫を発生させる規模の降雨があった場合、道路交通機能を維持するための対策として以下の2点が考えられる。第1の対策は対症療法的なものであるが、ネットワーク交通容量が低下しても、ドライバーへの適切な情報提供や交通規制、交通誘導を行うことで交通需要管理を行い、必要となる交通機能確保を図るものである。

第2の対策は、道路区間での浸水そのものを防ぐものであり、具体的には浸水地域に影響する下水管拡張や、途絶する可能性の高い道路区間のかさ上げ、河川のポンプ能力増強等の交通対策により、内水氾濫によるネットワーク交通容量の低下

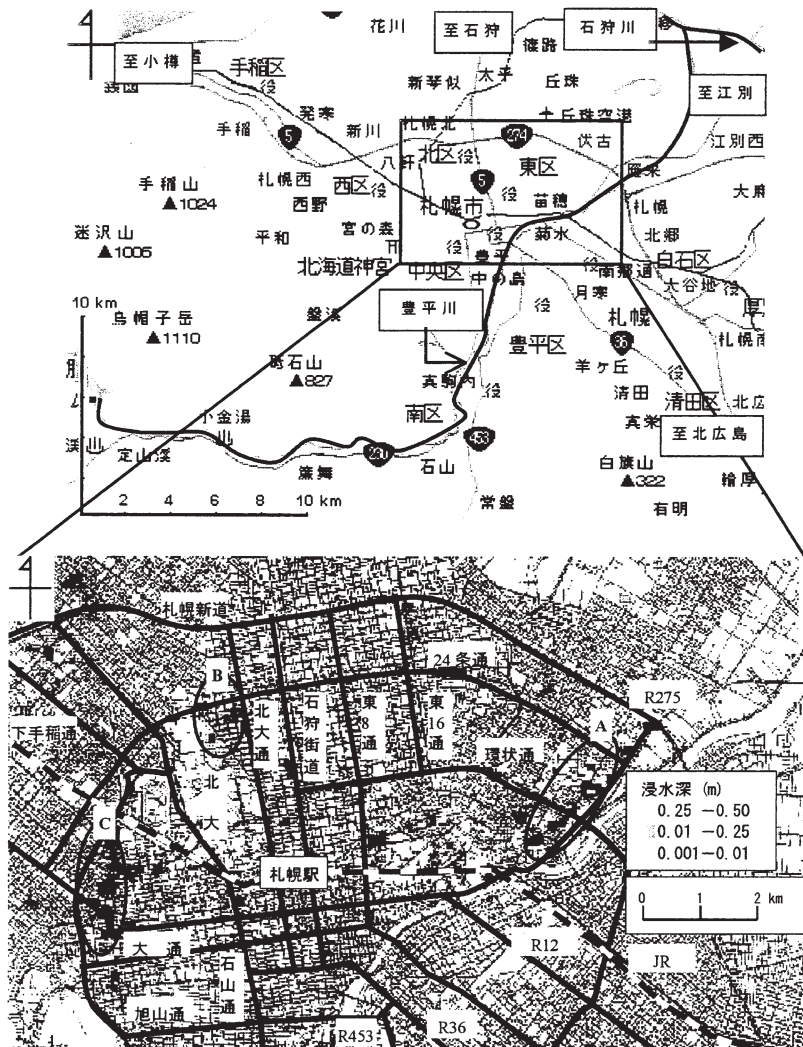


Fig. 1 Effect of inundation

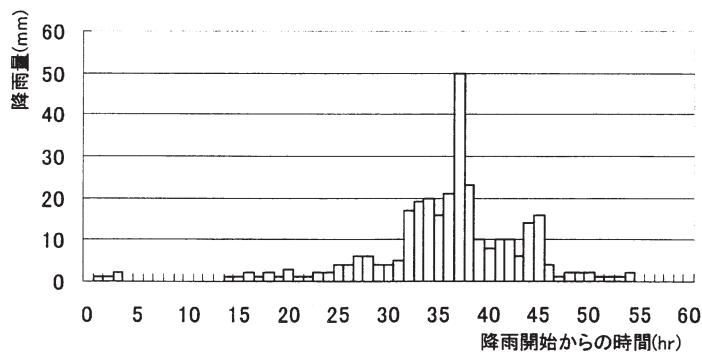


Fig. 2 Hyetograph

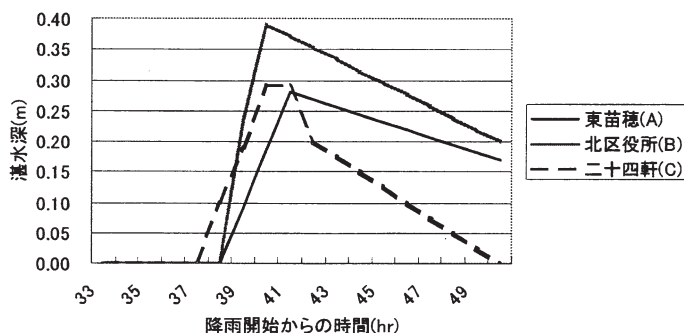


Fig. 3 Time series of water depth in case of inundation

を防ぐものである。しかし、内水氾濫により途絶すると考えられる全ての道路区間を通行可能とするのは、予算の制約からも非現実的である。そのため、前述の交通需要管理と並列的に対処する必要がある。

以下では、こうした対策検討の前段階と位置付けられる、道路ネットワークの容量解析を行う。ここでは、内水氾濫により道路区間が途絶した場合のネットワーク交通容量の変化を明らかにする。地震等により道路が破壊された場合の途絶と異なり、内水氾濫時による途絶は、その継続時間が短いことが特徴として挙げられる。そのため、分析で用いる需要交通量、リンク交通容量等は時間単位のものを用いる必要がある。こうした分析は、時間単位の適切な交通需要管理を行う上でも必要となる。また、前述した交通対策が可能な場合、予算制約の関係から効率性評価が行わなければならない。交通対策を施した場合、道路区間の浸水状況は、内水氾濫シミュレーションにより予測され、この結果をもとに交通容量解析を行うことにより、効率性評価は可能となる。このことも視野に入れ、途絶区間における交通対策による効果の検討も行う。

## 5. ネットワーク交通容量解析

### 5.1 ネットワーク交通容量

ここでは、ネットワーク交通容量についての説明を加える。ネットワーク交通容量とは、ネットワークを構成する全リンクの交通容量および需要

交通量が与えられた場合、ネットワークが処理可能な最大交通量である。Fig. 4は3つのノードと2本のリンクからなる道路ネットワークを示している。リンクI、リンクIIのリンク交通容量はそれぞれ、50 [台/単位時間]、100 [台/単位時間]である。このとき、ノード1を起点（出発地：Origin）としノード3を終点（目的地：Destination）とするOD交通量（需要交通量）を $q_{13}$  [台/単位時間]と表現する。この場合、ネットワーク交通容量は50 [台/単位時間]となる。すなわち、リンクIの交通容量がネットワーク交通容量となる。

次に途絶リンクの交通対策効果について考える。道路ネットワークの内、2本のリンクが途絶した場合を考える。このとき、交通対策により2本のリンクのうち、どちらか1本が通行可能となった場合のネットワーク交通容量の増分をそれぞれA、Bとする。また、2本同時に通行可能となったときのネットワーク交通容量の増分をCとする。A+BとCの関係から、交通対策による効果は以下に示す3つの関係に分類される。

$$C = A + B \text{ (加法関係)}$$

$$C > A + B \text{ (相乗関係)}$$

$$C < A + B \text{ (代替関係)}$$

加法関係の簡単な例として、Fig. 5に示す道路ネットワークを考える。各リンクの交通容量は100 [台/単位時間]であり、OD交通量は $q_{12}$ のみとする。2本のリンクが途絶している場合を現状と考えると、現状のネットワーク交通容量は、

100 [台/単位時間] である。途絶しているリンクのどちらかに交通対策が施されると、容量は現状よりそれぞれ 100 [台/単位時間] 増加することになる ( $A=100, B=100$ )。2 本ともに交通対策が施された場合、容量は現状より 200 [台/単位時間] 増加することになる ( $C=200$ )。すなわち、途絶リンクの交通対策による効果には、加法関係が成立する。

次に相乗関係の簡単な例として、Fig. 6 に示す道路ネットワークを考える。リンク I~IV のリンク交通容量はそれぞれ 200 [台/単位時間], 200 [台/単位時間], 200 [台/単位時間], 100 [台/単位時間], OD 交通量は  $q_{13}$  のみとする。現状のネットワーク交通容量は 100 [台/単位時間] である。途絶しているリンク I に交通対策を施すと、ネットワーク交通容量は 100 台増加する ( $A=100$ )。リンク II に交通対策を施しても、ネットワーク交通容量は変化しない ( $B=0$ )。しかし、2 本ともに交通対策を施した場合、ネットワーク交通容量は 200 [台/単位時間] 増加する ( $C=200$ )。すなわち、途絶リンクの交通対策による効果には、相乗関係が成立する。

最後に代替関係の簡単な例として、Fig. 7 に示す道路ネットワークを考える。各リンクの交通容量はすべて 100 [台/単位時間] であり、OD 交通量は  $q_{13}$  のみとする。このとき、現状のネットワーク交通容量は 100 [台/単位時間] となる。途絶リンク I に交通対策を施す場合、ネットワーク交通容量は 100 [台/単位時間] 増加する ( $A=100$ )。一方、途絶リンク II に交通対策を施す場合も、ネットワーク交通容量は 100 [台/単位時間] 増加する ( $B=100$ )。しかし、2 本ともに交通対策を施す場合、ネットワーク交通容量は 100 [台/単位時間] しか増加しない ( $C=100$ )。すなわち、途絶した 2 本のリンクの交通対策による効果には、代替関係が成立する。

一方、実際の道路ネットワークでは、OD ペアが複数存在し、さらに OD 間の利用可能な経路も多数考えられる。そのため、これまでに示した例のように簡単にネットワーク交通容量を求めることはできない。そのため、実際規模のネットワー



Fig. 4 Network traffic capacity

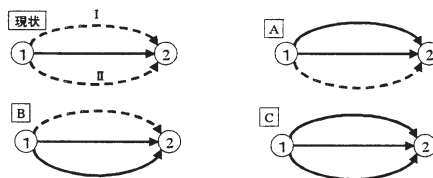


Fig. 5 Additive relation

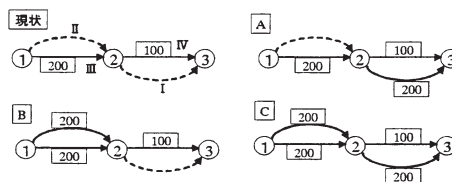


Fig. 6 Synergistic relation

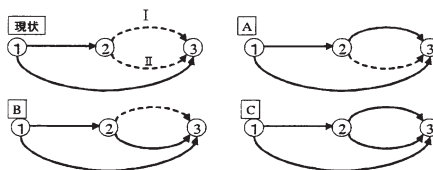


Fig. 7 Alternative relation

クを解析可能な手法が必要となる。

### 5.2 解析法

ネットワーク交通容量は一般に、フロー特性 (OD 間の需要交通量, リンク交通量), ネットワーク特性 (ネットワーク形状, リンク交通容量) および自動車利用者の経路選択によって規定される。ネットワーク交通容量問題は、自動車利用者の経路選択を内生化した式 (5.1) ~ (5.7) に示す制約条件付き非線形最適化問題として定式化され、これを解くことによってネットワーク交通容量は求められる<sup>19)</sup>。

$$\text{Min. } \underset{q_{od}}{\text{Min.}} Z(q_{od}) = \sum_{od} q_{od} \ln(q_{od} / \bar{q}_{od}) \quad (5.1)$$

subject to

$$\sum_{ij} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(w) dw + \sum_{od} \bar{u}_{od} e_{od} \leq \bar{\eta} \quad (5.2)$$

$$x_{ij} = \sum_{od} \sum_r f_r^{od} \delta_{ij,r}^{od} \quad 0 \leq x_{ij} < c_{ij} \quad \forall ij \quad (5.3)$$

$$\sum_r f_r^{od} = q_{od} \quad \forall od \quad (5.4)$$

$$q_{od} + e_{od} = \bar{q}_{od} \quad \forall od \quad (5.5)$$

$$e_{od} \geq 0 \quad \forall od \quad (5.6)$$

$$f_r^{od} \geq 0 \quad \forall od \quad (5.7)$$

$\bar{q}_{od}$  : OD ペア  $od$  間の目標需要交通量

$\bar{q}_{od}, \bar{u}_{od}$  : OD ペア  $od$  間の需要交通量と  $od$  間に与える十分に大きな値 (理論的には無限大に相当)

$f_r^{od}$  : OD ペア  $od$  間の  $r$  番目経路交通量

$q_{od}$  : OD ペア  $od$  間のネットワーク交通容量

$e_{od}$  : OD ペア  $od$  間において容量制約により通行できない需要交通量

$x_{ij}$  : リンク  $ij$  の配分交通量

$t_{ij}(x_{ij})$  : リンク  $ij$  の交通量が  $x_{ij}$  のときのリンク所要時間

$\delta_{ij,r}^{od}$  : OD ペア  $od$  間の  $r$  番目経路がリンク  $ij$  を含めば 1, そうでなければ 0 となる変数

$\bar{\eta}$  : OD ペア間の需要交通量とネットワーク特性で決まる定数

リンク所要時間関数には, 容量制約を表現した式 (5.8) に示す関数型を用いる。

$$t_{ij}(x_{ij}) = t_0^{ij} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{x_{ij}}{c_{ij} - x_{ij}} \right) \right\} \quad (5.8)$$

$t_0^{ij}$  : リンク  $ij$  上の交通量が 0 台のときの所要時間

$c_{ij}$  : リンク  $ij$  の交通容量

$\alpha$  : パラメータ

式 (5.1) は, 外生的に与えられる目標 OD パターン  $\bar{q}_{od}$  に分布形状が最も似た (i.e. 相互情報量を最小とする) OD 間の最大ネットワーク交通容量  $q_{od}$  を求めることを示している<sup>19)</sup>。

式 (5.2) の左辺は固定需要型の利用者均衡下で

の最大ネットワーク交通容量を求める場合,  $q_{od}, x_{ij}$  に関して最小化を行う目的関数となっている<sup>19)</sup>。利用者均衡とは, 「もはやどの利用者も経路を変更することによって自己の旅行時間をそれ以上短縮できない交通状況」を意味する<sup>20)</sup>。これは, 各 OD 間において, 利用者がより旅行時間の短い経路を選択することを繰り返すことで達成されるであろう状況であり, 「各 OD 間において, 利用される経路の旅行時間は全て等しく, 利用されない経路の旅行時間より小さいか, せいぜい等しい交通状況」と換言できる。式 (5.2) 左辺の目的関数を最小化する場合, 「各 OD 間における利用される経路の旅行時間は全て  $\bar{u}_{od}$  となり, 利用されない経路の旅行時間より小さいか, せいぜい等しい交通状況」が達成され, このときの  $q_{od}, x_{ij}$  が求められることになる。また, ここで得られる目的関数の最小値が式 (5.2) 右辺の  $\bar{\eta}$  である。この最小化問題では, 目的関数 (式 (5.2) 左辺) はリンク交通量  $x_{ij}$  に関しては狭義の凸関数となるが, OD 間のネットワーク交通容量  $q_{od}$  に関しては, 広義の凸関数となっている。すなわち,  $x_{ij}$  は一意的な解を持つが,  $q_{od}$  は一意的な解は持たない。そのため, 式 (5.2) 左辺を目的関数, 式 (5.3) から式 (5.7) を制約条件として一度解き, その結果を新たな制約条件 (式 (5.2)) に置き替え, 主問題 (式 (5.1)) を解く構造となっている。式 (5.1) は,  $q_{od}$  に関して狭義の凸関数となっているため,  $q_{od}$  は一意的に決定される。

式 (5.3), 式 (5.4) は, それぞれ経路交通量とリンク交通量の関係, OD 間のネットワーク交通容量と OD 間の経路交通量の関係を示している。

## 6. 解析結果

### 6.1 道路ネットワークの設定

Fig. 8 は Fig. 1 下図に太線で示した道路をもとに作成した, 解析対象とする道路ネットワークの模式図である。図中の  $t_0, c$  は, それぞれリンクの自由走行時間, リンク交通容量 (片側, 単位: 台/時) を示している。Fig. 8 に示した交通容量は, リンクの片側容量であるが, 一本のリンクには,



双方向に交通容量が設定されているため、双方向の交通容量はその2倍の値をとることになる。ネットワークは、178本のリンクと54個のノードから構成されている。路線は札幌新道、北24条通、環状通、国道12号、大通、旭山公園通、下手稲札幌線、石山通、北大通・駅前通、石狩街道、東8丁目通、東16丁目通、国道275号、国道453号および国道36号をとりあげている。これらの路線は、札幌中心部における主要幹線と位置づけられ、交通機能の重要な役割を果たしている。

Fig. 8 に示した道路ネットワークにおけるOD交通量を推計するため、その前段階として、札幌都市圏の道路網を対象に利用者均衡配分<sup>20)</sup>を行った。以下にOD交通量の推計方法を示す<sup>21)</sup>。

はじめに札幌都市圏を対象とする広域ネットワーク(Fig. 9)で配分計算を行う。このとき、道路ネットワークは主要幹線で構成され、OD交通量は道

路交通センサス<sup>22)</sup>によるデータ(日交通量)を使用した。ここで、広域ネットワーク上に配分された交通量のうち、配分対象ネットワーク(Fig. 9)の断面を通過する交通量(完全通過交通、流入交通、流出交通)を記録する。ここで、Fig. 9の配分対象ネットワークは、Fig. 8に示したネットワークに対応している。完全通過交通量は、配分対象ネットワークに入る境界ノードと、そこから出る境界ノードを起・終点とするOD交通量とする。このOD交通量は、そのまま配分対象ネットワークのOD交通量となる。交通が発生/集中するノードをセントロイドと呼ぶが、ここでは、Fig. 8に示したネットワークの外周に位置するセントロイド(以下、境界セントロイドとする)をFig. 9における境界ノードと見なしている。流入交通量は、境界セントロイドと配分対象ネットワーク内部のセントロイド(以下、内部セントロイドとする)

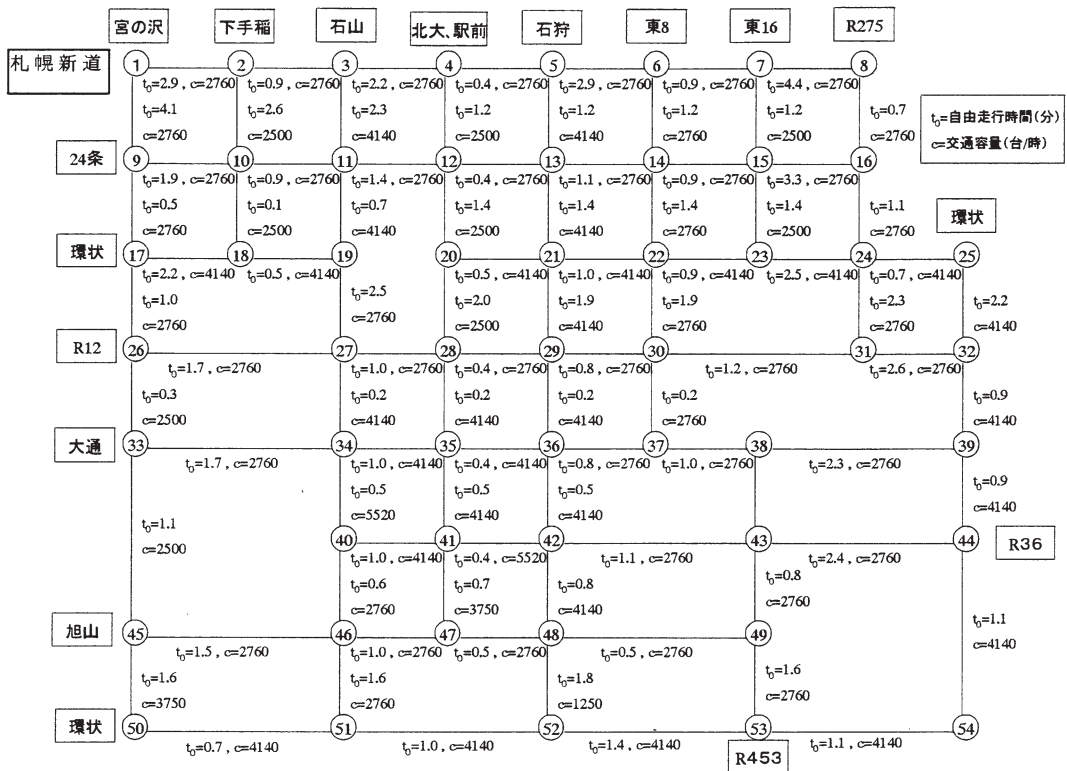


Fig. 8 Road network

を起・終点とする OD 交通量と考える。流出交通量に関しても同様である。一方、Fig. 9 において配分対象ネットワークの内部セントロイドは数個あるが、これらを Fig. 8 における内部セントロイドベースの OD 交通量に変換する。本研究では、以下に示すフローで OD 交通量に変換した。

- ① Fig. 9 に示した配分対象ネットワークのゾーン（内部セントロイド）は土地利用を参考に細分割し、これらを Fig. 8 に示したネットワークの内部セントロイドと考える。
- ② その土地利用と延べ床面積を考慮して原単位法<sup>23), 24)</sup>より、内部セントロイドにおける発生集中交通量を推計する。
- ③ 先に求めた流入（または流出）交通量の終点（または起点）を内部セントロイド（または境界セントロイド）と仮定し、前述した発生集中交通量の割合で流入（または流出）交通量を内部セントロイド（または境界セントロイド）に比例配分する。

こうして得られる OD 交通量をピーク率 10%<sup>20)</sup>とし、時間交通量に変換したものを配分対象ネットワークの OD 交通量および式 (5.1) に示した目標 OD 交通量とした（約 700 OD ペア、計 112,436 台/時）。

## 6.2 平常時のネットワーク交通容量

Fig. 8 に示すネットワークを対象に容量解析を行った結果、全需要交通量 112,436 台/時のうち、67%に相当する 75,614 台/時がネットワーク交通容量となることが明らかになった。Fig. 10 にネットワークにおける配分交通量（双方向合計、単位：台/時）を示す。図中の点線は、リンク交通容量に対するリンク交通量の比（飽和度）が 0.9 を超えるリンクを結んだものであり、道路ネットワークのボトルネック部に相当する。平常時では北大・駅前通、石山通、国道 275 号、札幌新道等の路線における混雑が目立つ結果となった。

解析対象ネットワークでは、札幌都心部の主要幹線のみをとりあげており、その他の細街路は含まれていない。一般に、ネットワークを構成するリンク数を減らすとネットワーク交通容量も減少

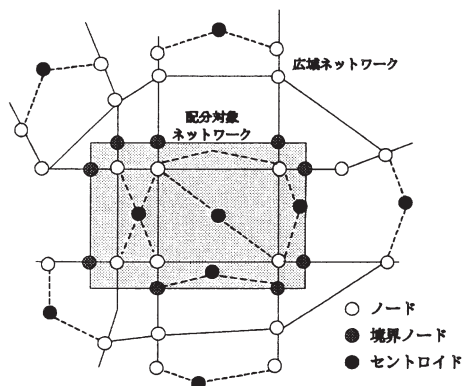


Fig. 9 Conceptual diagram of wide area road network in Sapporo City

するため、ネットワーク交通容量が全需要交通量より小さくなったものと考えられる。本研究では、先述の容量を平常時におけるネットワーク交通容量と考えることにし、以下では内水氾濫時のネットワーク交通容量についての分析を行う。

## 6.3 内水氾濫時のネットワーク交通容量

ここでは、前述した 3 日間雨量 310 mm、1 時間あたり最大 50 mm の降雨があった場合を想定して容量解析を行う。Fig. 11 は Fig. 1 に示した結果を参考に、湛水深が 20 cm 以上となるリンク（ノード間 8-16, 15-16, 16-24, 23-24（東苗穂周辺）、11-12（北区役所周辺）、17-18, 17-26（二十四軒周辺）の各リンク）を途絶させた場合の配分交通量（双方向合計、単位：台/時）を示している。この場合、平常時よりネットワーク交通容量は 32%減少し、51,393 台/時と算定された。Fig. 10 と Fig. 11 の配分交通量を比較すると、ネットワーク交通容量が 32%減少したにも関わらず、ノード間 6-14, 7-8, 7-15, 19-27, 20-28, 21-29, 22-30 および 30-31 のリンクにおける配分交通量が内水氾濫時に増加する結果となった。また、それらのほとんどが南北を結ぶリンクとなっており、さらに環状通と国道 12 号間に集中している。そのため、これらの区間では混雑が予想され、内水氾濫時には南北方向の交通機能確保を図ることの重要性を示した結果といえる。図中の点線は、飽

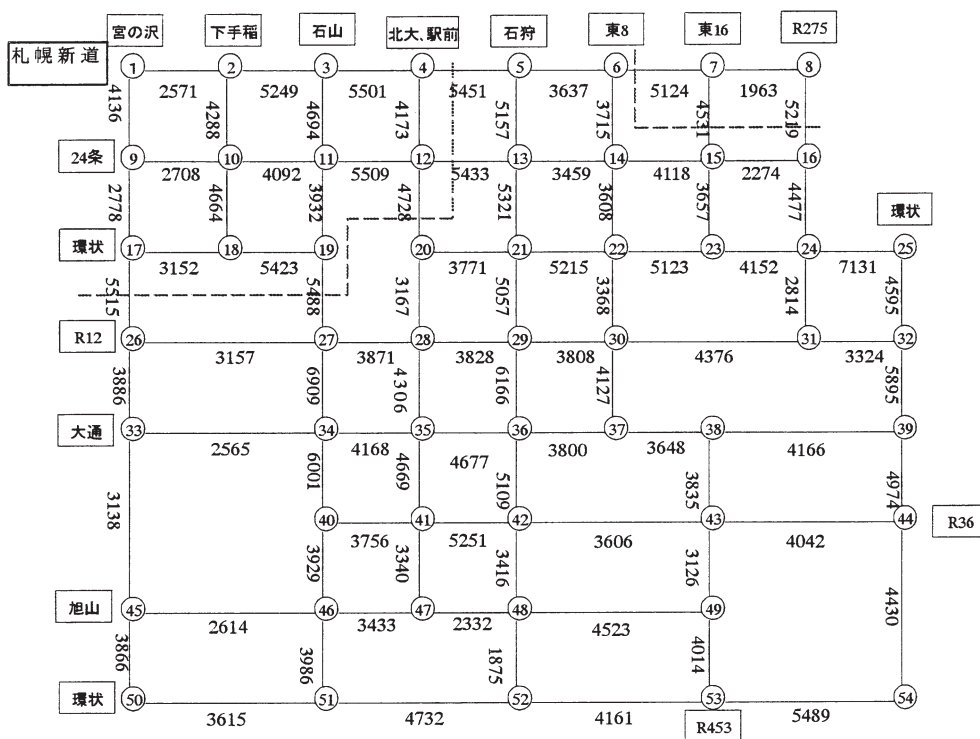


Fig. 10 Assigned traffic volume in usual condition (Vehicles/hour)

和度が 0.9 を超えるリンクと関連する途絶リンクを結んだものであり、これらのリンクはネットワークのボトルネック部分である。

Fig. 12 は、全国各地で記録的な豪雨が発生している近年の気象状況を考慮し、3 日間雨量 360 mm、1 時間あたり最大 100 mm の降雨があった場合、降雨開始から 40 時間経過し、湛水深 20 cm 以上となるリンクを途絶させた場合の配分交通量（双方向合計、単位：台/時）を示している。ここでの降雨量は、Fig. 2 に示したハイエトグラフにおいて、降雨開始 37 時間後の最高降雨量（50 mm）を 100 mm とした場合を想定している。Fig. 12 の設定は、先述の内水氾濫シミュレーションによる結果に基づくものである<sup>17)</sup>。Fig. 11 に示した途絶リンクの他に、ノード間 3-11、6-7、7-8、7-15、9-10、11-19、22-30 の各リンクが途絶状態になった。その結果、Fig. 11 と比べて配分交通量が大きく増えたリンクは、ノード間 1-2、1-9、

2-10、10-18、18-19 および 24-25 のリンクとなっており、その他のほとんどのリンクでは配分交通量が著しく減少する結果となった。この場合、平常時よりネットワーク交通容量は 45 % 減少の 41,244 台/時と算定され、平常時の約半分のネットワーク交通容量となることが明らかになった。

一方、途絶リンクに交通対策が施されたとしても、ネットワーク交通容量は需要交通量やドライバーの経路選択の影響も受けるため、容量増強が図られるとは限らない。そこで次節では、Fig. 11 に示した途絶リンクにおける交通対策による効果についての検討を行う。

#### 6.4 途絶リンクにおける交通対策による効果

内水氾濫時にネットワーク交通容量を低下させないためには、途絶する可能性のある道路のかさ上げ、または関係する下水道管の拡張、河川のポンプ能力増強を施し、交通機能を確保する必要が

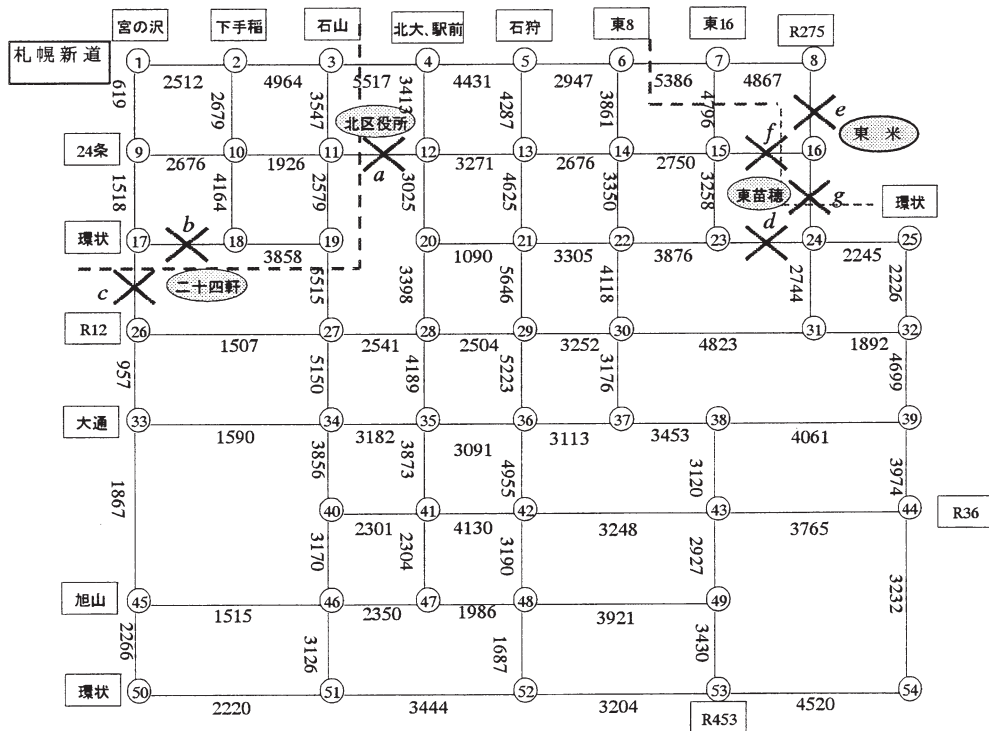


Fig. 11 Assigned traffic volume in flood condition (Case 1, vehicles/hour)

ある。そこで、途絶リンクにおける交通対策効果、すなわちネットワーク交通容量の増強効果を明確にする。

Fig. 11 に示した途絶する 7 本のリンクそれぞれに交通対策を施したときのネットワーク交通容量の変化を Table 2 に示す。これより、途絶リンク 1 本に交通対策を施した場合に効果があるのは、リンク *a* およびリンク *c* となり、ともに 3% のネットワーク交通容量の増加が見込まれる結果となった。また、その他のリンクに交通対策を施したとしても、ネットワーク交通容量の増加はないことも明らかになった。ここで注目すべき点は、ノード 16 はセントロイドであるにも関わらず容量増強効果が現れないことである。OD 交通量を無視すると、リンク *f* に交通対策を施した場合、ネットワーク交通容量の増強が図られると考えられる。しかし、解析ではノード 16 を起点または終点とする OD ペアノードは、ノード 1、ノード 2 およ

びノード 9 と設定しており、これらの OD ペア間を分断するボトルネックの影響から交通が流れることはできず、容量増強は図られない結果となった。このように、ネットワーク形状だけでなく、各 OD 間の需要交通量とそれによって発生するボトルネックの位置によっても、ネットワーク交通容量は変化する。これに対して、物理的な交通容量を求めたい場合は、全てのノード間に OD 交通量を設定すれば計算可能となるが、実際の交通現象を考えた場合、妥当な設定とは考えにくい。本研究では、6.1 で示した方法により OD 交通量の推計を行っているため、このような設定にはなっていない。

次に途絶リンク 2 本に交通対策を施した時のネットワーク交通容量の変化を Table 3 に示す。分析においては、全ての組合せについて計算を行っているが、交通対策による容量増強効果が最も大きい場合を含み、かつ傾向がわかるような特徴的な

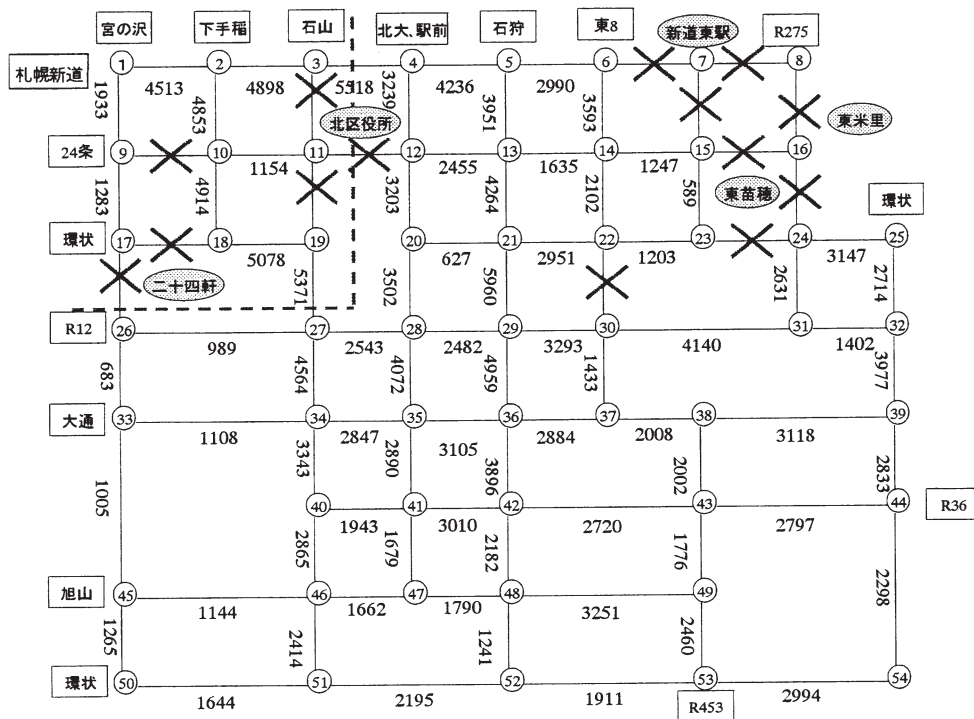


Fig. 12 Assigned traffic volume in flood condition (Case 2, vehicles/hour)

結果を Table 3 に示している。後に示す途絶リンク 3 本と 4 本に交通対策を施した場合の結果（それぞれ Table 4, Table 5）についても同様である。Table 3 より、リンク e, リンク f の 2 本に交通対策を施したときに、20%の容量増加効果があることがわかる。しかし、2 本に交通対策を施したとしても、リンク d, リンク g のように効果が現れない場合もある。Table 2 と Table 3 の比較より、単純に 1 本に交通対策を施したときの効果を加えると、2 本に交通対策を施したときの効果になるわけではないことがわかる。たとえば、リンク a とリンク c には代替効果があり、リンク e とリンク f には相乗効果がある。

途絶リンク 3 本に交通対策を施した時のネットワーク交通容量の変化を Table 4 に示す。これより、リンク e, リンク f, リンク g の 3 本に交通対策を施した場合、容量増加は 26%と高い値をとる。一方、リンク b, リンク d, リンク g 等の組合

せでは、効果が現れない。

途絶リンク 4 本に交通対策を施したときのネットワーク交通容量の変化を Table 5 に示す。これより、リンク a, リンク c, リンク e, リンク f の 4 本に交通対策を施したことによる容量増加は 38%となり、次いでリンク b, リンク d, リンク e, リンク f による容量増加も 27%と高い。

Table 3 から Table 5 に示した結果より、リンク e, リンク f, リンク g への交通対策には相乗関係があり、効果が高いことがわかる。しかし、これらの途絶リンクでは、単独に交通対策を施したことによる効果はほとんどない。

予算制約内で考えられる複数の交通対策代替案が実施された場合、それぞれの場合の浸水状況は内水氾濫シミュレーションにより予測できる。さらに、その結果をもとに交通解析を行うことによって、交通に対する対策効果の検討を行うことができる。本研究は、こうした手順による、水災害時

Table 2 Effects of measure (1 link)

		ネットワーク容量(台/時)	増分
改修無し		51,393	
改修するリンク	a リンク11-12	53,049	3%
	b リンク17-18	51,402	0%
	c リンク17-26	52,935	3%
	d リンク23-24	51,463	0%
	e リンク8-16	50,099	0%
	f リンク15-16	51,841	1%
	g リンク16-24	51,415	0%

Table 3 Effects of measure (2 Links)

		ネットワーク容量(台/時)	増分
改修無し		51,393	
改修するリンク	a, b	53,087	3%
	a, c	52,874	3%
	b, c	52,823	3%
	d, g	51,476	0%
	a, d	53,142	3%
	c, d	53,059	3%
	e, f	61,840	20%

Table 4 Effects of measure (3 link)

		ネットワーク容量(台/時)	増分
改修無し		51,393	
改修するリンク	e, f, g	64,630	26%
	c, d, f	53,038	3%
	b, d, g	51,466	0%
	b, c, e	52,475	2%
	a, d, e	52,374	2%
	a, c, g	52,862	3%
	a, b, f	53,028	3%

Table 5 Effects of measure (4 link)

		ネットワーク容量(台/時)	増分
改修無し		51,393	
改修するリンク	c, d, e, g	56,419	10%
	b, d, e, f	65,511	27%
	b, c, f, g	52,547	2%
	a, d, f, g	53,115	3%
	a, c, e, f	70,913	38%
	a, b, e, f	57,220	11%
	a, b, c, d	52,951	3%

における交通対策評価の重要性を示したものと考えられる。

## 7. おわりに

本研究では札幌市東北部を対象とし、内水氾濫を想定したネットワーク交通容量分析を行った。さらに、交通対策を前提とした容量増強効果の検討も行った。その結果、3日雨量310mm、1時間あたり最大50mmの降雨を仮定した内水氾濫時には、ネットワーク交通容量が32%減少し、特に南北方向の交通機能が低下することが明らかとなった。また道路区間への交通対策による効果の検討においては、単独道路区間での効果よりも、複数道路区間の相互関係による効果の方が大きいこと、その相互関係を考慮することの重要性を示した。

本研究で行った分析では、OD交通量が平常時と内水氾濫時とで変化しないと仮定している。これは、内水氾濫発生後ある程度の時間が経過し、交通状況が定常状態に戻ったことを前提とすれば、妥当な仮定である。しかし、交通状況が定常状態に戻るまでの分析も重要であり、この場合OD交通量は平常時と異なっているものと考えられる。これに関する研究は、水災害時の交通量観測を重ね、さらにこの結果に基づいたモデル手法の確立

が必要となるが、まだ確立されていない状況にある。今後は、こうしたフロー特性の変化を含めて、内水氾濫がネットワークに与える影響も分析する必要があるが、これは今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 都市型水害対策緊急検討委員会：都市型水害に関する緊急提言，2000。
- 2) 寶 馨：この10数年で何が得られたか—自然災害科学の世紀の節目と新世紀—，自然災害科学52, Vol.18, No.4, pp.404-406。
- 3) 中津川 誠，山田孝治，橋本識秀：豊平川流域における洪水時危機管理のための氾濫シミュレーション，土木学会北海道支部論文報告集，第55号(B)，pp.414-419，1999。
- 4) 兪 朝夫：近年の都市水害の特徴と予測，にほんのかわ，第93号，pp.8-20，2001。
- 5) たとえば，嶋田嘉昭，加藤哲男，本多義明：自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察—福井都市圏におけるケーススタディー—，第30回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.97-102，1995。
- 6) 日本自然災害学会：防災事典，築地書館，pp.284-287，2002。
- 7) 新井正他：都市の水文環境，共立出版，pp.175-176，1988。
- 8) 国土交通省河川局：災害列島2000—都市型水害を考える—，pp.16，2001。

- 9) 国土交通省河川局：災害列島 2000— [東海豪雨]  
残された課題・新たなる取り組み一, pp.42-43,  
2001.
- 10) 橋本晴行, 松永勝也, 南里康久：1999年6月福  
岡水害における氾濫水の挙動と水害体験者の対応・  
意識, 自然災害科学 20-1, pp.43-58, 2001.
- 11) 坂上 務, 伊勢田哲也：昭和57年7月豪雨災害  
に関する調査研究, 第20回自然災害科学総合シ  
ンポジウム講演論文集, pp.17-20, 1983.
- 12) 北海道新聞社：北海道新聞縮刷版, 昭和50年8  
月号, pp.759-762.
- 13) 北海道新聞社：北海道新聞縮刷版, 昭和50年8  
月号, pp.807.
- 14) 北海道新聞社：北海道新聞縮刷版, 昭和56年8  
月号, pp.817.
- 15) 北海道新聞社：北海道新聞縮刷版, 昭和56年8  
月号, pp.787.
- 16) 加賀屋誠一：都市河川流域における土地利用高度  
化問題—札幌市東北部における小河川での事例,  
日本都市計画学会研究発表論文集, pp.49-54,  
1982.
- 17) 豊平川洪水危機管理検討委員会事務局：豊平川洪  
水危機管理検討委員会資料, 2000.
- 18) 平井真砂郎, 道上正規, 檜谷 治：地下水路系シ  
ステムにおける実用的な水理解析手法, 水工学論  
文集, 第42巻, pp. 829-834, 1998.
- 19) 赤松 隆, 宮脇 治：利用者均衡条件下での交通  
ネットワーク最大容量問題, 土木計画学研究・論  
文集, No.12, pp.719-729, 1994.
- 20) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析—最新  
の理論と解法一, 1998.
- 21) 朝倉康夫他：二段階配分とOD推計を組み合わせ  
た道路網交通流分析手法の適用, 第17回交通工  
学研究発表会論文報告集, pp.185-188, 1997.
- 22) 建設省：平成6年道路交通センサス.
- 23) 札幌市：札幌市大規模小売店舗実態調査報告書,  
1992.
- 24) 道央都市圏総合交通体系調査協議会：第3回道央  
都市圏パーソントリップ調査報告書(現況分析編),  
1995.

(投稿受理：平成14年5月20日  
訂正稿受理：平成14年11月21日)