

# 産業連関 交通ネットワーク統合モデルに基づく道路網の耐震化/復旧戦略\*

## Retrofit and Recovery Strategy of Road Network Based on an Integrate Input-Output and Transportation Network Model\*

水上裕治\*\*・梶谷義雄\*\*\*・皆川勝\*\*\*\*・吉田郁政\*\*\*\*

By Yuji MIZUKAMI\*\*・Yoshio KAJITANI\*\*\*・Masaru MIINAGAWA\*\*\*\*・Ikumasa YOSHIDA\*\*\*\*

### 1. はじめに

今日の経済活動は主に都市部を中心に行われ、各産業間の取引は交通ネットワークシステムに依存しており、基本的に、輸送ネットワークシステムは日常生活を営む上で最適に計画されている。

しかしながら、大規模災害に対し交通ネットワークシステムは非常に脆弱である。交通ネットワークの破損が引き起こす流通の途絶の影響は、産業の取引構造を通して波及し広範囲の地域に経済的影響を引き起こす。

2004年10月23日夕刻に発生した新潟中越地震はその典型的なケースである。この災害では交通ネットワークが激しく損傷し、多くの輸送が迂回路を使用しなければならず増加する輸送コストは経済被害の原因の1つとなった。さらに、取引の停止による経済被害は被災地域外へも波及した。したがって、交通ネットワークの損傷によって引き起こされる損失を把握することや、破損すると大きな経済被害をもたらす重要経路を特定することは災害後の復旧計画の立案や平常時の補強防災計画を導くために重要になっている。

ODフロー・データと交通配分モデルを使用して交通コストの増加を把握することはできるが、多くの場合、被災地は小さなエリアであり、ODフロー・データをそのまま用いることは不可能である。さらに災害時には、一時的、または長期間にわたって産業間の取引構造が変化するという問題がある。

Kimら<sup>1)</sup>は産業連関モデルと交通ネットワークモデルを統合し、広域的な地域間におけるODフローとリンクフローを導き出す手法を提案している。本研究ではKimらのモデルを拡張し、被災地域内の各市町村間および被災

\*キーワード：耐震補強復旧戦略、交通ネットワークモデル、産業連関モデル、経済損失

\*\*学生員、工修、武蔵工業大学大学院工学研究科

(東京都世田谷区玉堤1丁目28-1、  
TEL03-5707-2110、FAX03-5707-2226)

\*\*\*正会員、工博、電力中央研究所 地震工学領域

(千葉県我孫子市我孫子1646、)

\*\*\*\*正会員、工博、武蔵工業大学大学院工学研究科

地域内から被災地域外への交通に焦点をあてることを試みた。また、新潟県中越地震を対象に、各リンクの交通コストの増加と総交通コストの変化を計算し、実際に行われた補修の進行に伴うコストの変化を試算した。

### 2. 研究の枠組み

交通ネットワークの損傷によって引き起こされる経済的損失推計に関する研究はこれまでも多数存在する。基本的に、ODフロー・データを得られると交通配分モデルを適用することが可能であることから、災害時の交通の試算ではODフローを見積ることが主要な問題となる。ODデータが得られない状況ではODフローをモデルによって推計する必要があり、例えば、ChoとGordonら<sup>2)</sup>(2001)はSouthern California Planning Model (SCPM)と呼ばれる計量経済モデルを構築し、産業連関モデル、交通ネットワークモデル、通勤や出荷などの人々の交通現象を統合することによりODフローを導いた。

Kimら<sup>3)</sup>(2002)は交通ネットワークモデルと産業連関モデルを統合しinterregional commodity flow model (ICFM)と呼ばれるモデルを開発した。エヴァンのAlgorithmとウィルソンの繰り返し平衡法に基づいて、運送費を計算することが可能である。Sohnら<sup>4)</sup>(2003)はモデルを1812年のニューマドリッド地震の分析に適用し、その結果、経済的観点から重要な経路と高い確率で破壊される重要路線は異なっているということを指摘している。

日本においても地域間交通を交易係数として捉えたタイプの研究は多いが、災害時において実際にルート選択を検討したような研究は限られている状況にある。

本研究ではKimらのモデルを拡張し、被災地域内における災害時のリンクの途絶を考慮した交通フローの推計を行いリンクコスト増加の観点から重要路線を特定するアプローチを取る。また、新潟県中越地震を例にモデルの適用を試みる。

### 3. 産業連関モデルと交通ネットワークモデルの統合

本研究ではKimらのモデルの拡張を目指す。図-1に本研究で用いたモデルの簡単な概要構造を示す。

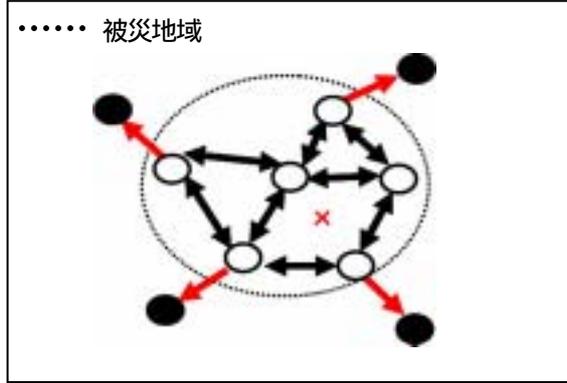


図 1 モデルの概要構造

被災地域から被災地域外へ移動する地域間交通の影響を調べるために、交通ネットワーク上に被災地域内ノードと被災地域外ノードの2種類のノードを設置した。地域内ノード間の交通量はそれぞれの特定のノード間の取引関係を満たさなければならないが、地域外ノードへの交通は各地域内ノードからもっとも交通コストが安価となる地域外ノードであれば、どのノードにでも向かうことができるものとした。

各リンク a 上の被災地域間フロー  $f_a$  および  $f'_a$  は次式で与えられる。

$$\sum_m \sum_{ijr} h_{ijr}^m = f_a \quad \forall a \quad (1)$$

$$\sum_m \sum_{ijr'} h_{ijr'}^m = f'_a \quad \forall a \quad (2)$$

ただし

$f_a$  : 地域内の交通フロー

$f'_a$  : 地域外への交通フロー

$h_{ijr}^m$  : m産業の被災地域 i から被災地域 j へリンク r を使用する交通 (ton)

$h_{ijr'}^m$  : m産業の被災地域 i から地域外 j へリンク r' を使用する交通 (ton)

ここでリンク r (r') を使用する場合  $\delta_{ijr}^m$  ( $\delta_{ijr'}^m$ ) = 1 であり、その他の場合は0となる。

各経路の均衡配分から、目的関数は式(3)で与えられる。

$$\min_{h,x,h',x'} Z(h,x,h',x') = \sum_a \int_0^{f_a+f'_a} d_a(\omega) d(\omega) + \sum_{mj} d_{ij} \frac{x_{ij}^m}{g^m} + \sum_m \frac{1}{\beta^m g^m} \left\{ \sum_{ij} (x_{ij}^m) \ln(x_{ij}^m) + \sum_{ij'} (x_{ij'}^m) \ln(x_{ij'}^m) \right\} \quad (3)$$

ただし

$h$  : 地域内交通量 (ton)

$X$  : 地域内交通量 (円)

$h'$  : 地域間交通 (ton)

$x'$  : 地域間交通 (円)

$f_a$  : 地域内交通フロー

$f'_a$  : 地域間交通フロー

$x_{ij}^m$  : m産業の被災地域 i から被災地域 j への交通

$x_{ij'}^m$  : m部門の被災地域 i から地域外 j' への交通

$d_a$  : リンクパフォーマンス関数

$\beta^m$  : 産業部門 m の感度パラメータ

$g^m$  : 産業部門 m の t から円の変換係数 (円/ton)

ここで第一項はリンクパフォーマンス関数であり、第二項はノード内の交通を表す。また、第三項はエントロピー項である。

また、条件式として以下の(4)式から(6)式を得る。ここで(4)式は産業連関モデルから導かれるマテリアルバランスであり、式(5)は交通量 (ton) と交通量 (円) の関係を表し、(6)式は交通量が非負数であることを表す。

s. t

$$\sum_i (x_{ij}^m) = \sum_a \left( \sum_k x_{ik}^m + x_j^m \right) + y_j^m + E_j^m - M_j^m \quad \forall m, j, \forall k \in j, j' \quad (4)$$

$$\sum_r h_{ijr}^m = \frac{x_{ij}^m}{g^m} \quad \sum_{r'} h_{ijr'}^m = \frac{x_{ij'}^m}{g^m} \quad \forall m, i, j, j' \quad (5)$$

$$h_{ijr}^m \geq 0, \quad h_{ijr'}^m \geq 0 \quad \forall m, i, j, j' \quad (6)$$

ただし

$a^{mn}$  : 投入係数

$y_j^m$  : 産業部門 m の j 地域における域内最終需要 (円)

$M_j^m$  : 産業部門 m の j 地域の被災地域外からの移輸入量

$E_j^m$  (円) : 移輸出から導き出される産業部門 m の被災地域外輸送量

これらをラグランジェの未定乗数法をもちいて交通量 x について解き、ウィルソンの繰り返し平衡法とエヴァンを交互に行うことによって収束させ、交通量 x とリンクコスト  $\mu$  を得る。

また、被災地域外への交通 ( $h'$ 、 $x'$ ) の総額は、各産業間の取引額と最終需要から一定の割合で導かれるものとし、その割合は各地域、各産業の事業所数、事業所規模、従業員から算出する。

### 4. ケーススタディの設定と試算

(1) 新潟県中越地震における交通ネットワークの被害

新潟県中越地震は2004年(平成16年)10月23日(土)午後5時56分に新潟県小千谷市を震源として発生したマグニチュード6.8の直下型の地震である。小千谷市、十日町市、長岡市、見附市周辺で、51名が死亡、4,794名

が負傷、避難した住民は最大で約10万3千人（10月26日）を数え、家屋の全半壊はおよそ1万6千棟に上った。

この地震では亀裂や陥没などのほか土砂崩れ、がけ崩れなどを原因とした非常に多くの交通ネットワークの分断が発生した。新潟県はもともと地滑りの発生しやすい地形が多く、同年は7月に大規模な水害が発生したことや過去最多の台風の上陸があったことから例年にない多雨に見舞われていたため、地盤が緩み、地震をきっかけに多くの土砂崩れが発生した。交通の被害は北陸自動車道や関越自動車道などの高速道路、国道17号や国道8号などの多くの一般国道の他、多くの県道や生活道路で発生した。山間部の集落の一部は周辺の道路が全て通行止めとなったことから全ての通信・交通手段を失って孤立した。

一方、比較的範囲の広い地方間や県間の交通は迂回路を使用することによって取引の低減を押しえられた。例えば新潟県と東京都間の交通は関越高速道路が破損したため長期間制限されたが、信越高速道路と磐越高速道路を迂回路として用いることが可能であった。深刻な交通の途絶は震源地を中心に比較的狭い範囲の被災地域内交通で顕著に発生している。

## (2) 被災地データ

本研究では被害の大きかった中越地方を中心に市町村単位で22個のノードを設定し、それぞれを結ぶ主要道路を中心に49本のリンクを設定した。また、主要道路7本を延長させ、被災地域と被災地域外とのリンクを設定した。

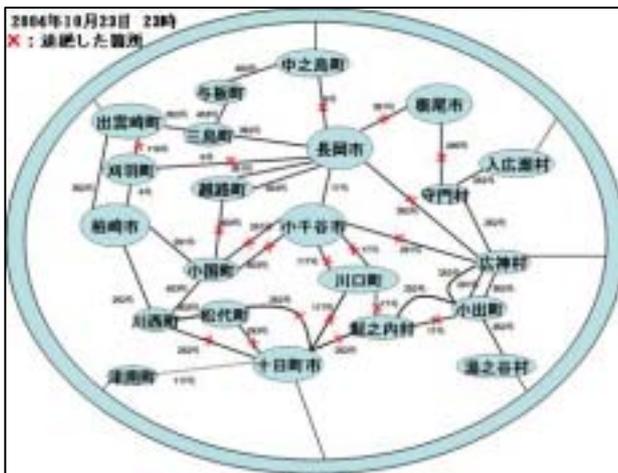


図 - 2 試算に使用したモデルの構造と10月23日の被害  
図 2は試算に使用したモデルの構造と2004年10月23日の交通ネットワークの被害の状況である。半数以上のリンクが被害を受けていることが分かる。

地震発生後しばらくはおおきな余震が続き、新たな土砂崩れの発生によって復旧工事が妨げられた。復旧作業が進むのは約1週間後からである。11月上旬には多くの道路の復旧が進み12月にはほとんどの道路の復旧が完了

した<sup>5)-6)</sup>。(図 3)

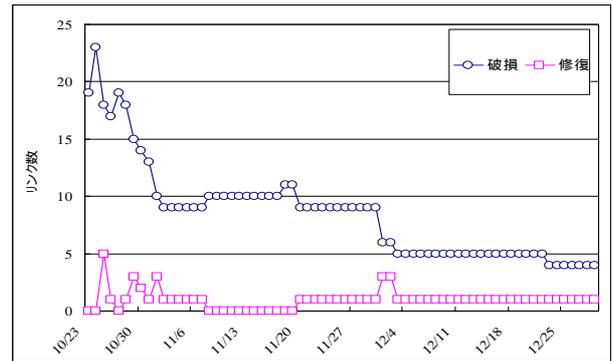


図 3 破損の発生と修復が行われたリンクの本数  
ケーススタディでは各ノードの投入係数行列は新潟県のものと同じとし、各産業の従業員数の割合に従って輸出入の量を決定した。最終需要は各ノードの人口に比例させて決定する。

被災地域外への交通は、被災地域内から被災地域外への一方通行とした。なお、産業間の取引から導かれる地域間交通量は新潟県内の被災地域外への交通を意味し、最終需要から導き出される交通量は県外への交通を意味している。

産業連関モデルの産業部門数は12部門のものを用い、求められた交通量は365分割することによって、1日あたりの値とした。

また、地震の後も生産活動は停止せず、最終需要は減少しないものとした。

## (3) 試算結果

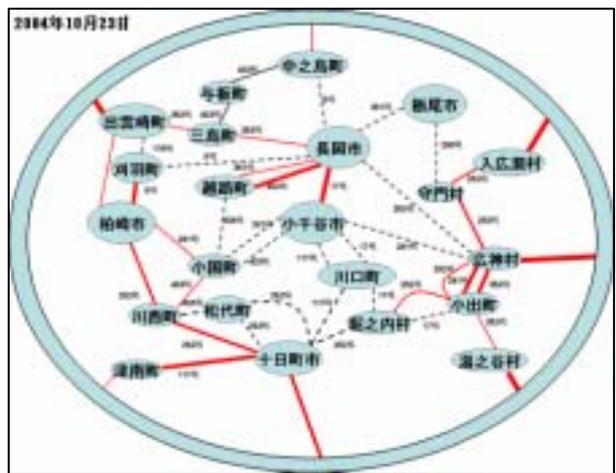


図 4 10月23日の交通コストの増加量

図 4は2004年10月23日の被害状態での交通コストの増加を表したものである。図において、赤線はコストが増加したリンクを示しており線の太さは増加量を表している。点線は破損したリンクである。

湯之谷村や出雲崎町から被災地域外へのリンクのような被災地域から被災地域外への交通コストが増大している。交通ネットワークモデルの損傷は被災地域から被災

地域外への交通に大きな影響を及ぼすことが分かる。10月下旬以降、時間の経過と共に交通コストの増加は低減し、12月の交通コストは震災以前とほとんど等しくなるという結果が得られた。各月の平常時からの交通コストの増加率を図 5 に示す。その他試算例については講演時に紹介する。

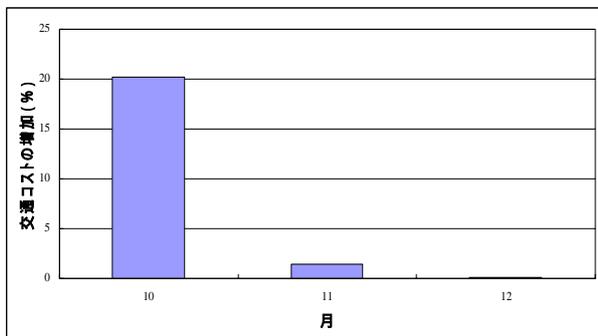


図 5 各月の交通コストの平常時からの増加率

## 5. おわりに

大規模災害によって引き起こされる交通ネットワーク損傷の経済被害の見積もりは交通網の補強と復旧計画を立案するうえで非常に重要である。しかし、多くの場合被災地域は比較的狭い地域であり、ODフローデータをそのまま用いることは不可能である。さらに、災害による産業構造は一時的、または長期間にわたって変化する。

本研究では、産業連関モデルと交通ネットワークモデルを統合させ、交通ネットワーク損傷の際の交通コスト増加の試算を試みた。また試算例として新潟県中越地震をとりあげ、道路情報や被害の実態と回復状況、その他の経済データを用いて交通コストの増加を試算した。その結果、被災地域の交通ネットワークの損傷は被災地域と被災地域外間の交通に多大な影響を及ぼすことが示された。

災害後に交通量の回復と交通コストの軽減を効率的に行い、経済被害が可能な限り軽減する復興計画を立案するためには重要路線の特定が必要となり、本モデルの活用が可能となる。しかし、重要路線の特定には路線を補修する際の費用の観点の検証や、産業間の取引だけでなく家計の交通行動やレスキュー隊の緊急車両など、災害時特有の要素を考慮に入れる必要があり、それらの導入も今後の課題である。

本稿の段階では産業連関モデルから導かれた交通量を単純に365分割してケーススタディに用いているが、産業間の取引は季節や月ごとに特徴がある。例えば新潟県の場合農林水産部門が大きな生産量を誇っているが、農林水産部門は季節によって取引の形態が大きく異なることは容易に想像が付き、災害発生時の季節的な影響は無

視できない。モデルの精度を高めるためにはそれらの要素の導入もはかっていきたい。

## 参考文献

- 1) Kim, T.J. : "A combined land use-transportation model when zonal travel demand is endogenously determined." *Transportation Research*, 17B 449-462. 1983
- 2) Cho, S., Gordon, P., Moore II, J.E., Richardson, H.W., Shinozuka M. and Chang, S. : "Integrating transportation network and regional economic models to estimate the cost of a large urban earthquake." *Journal of Regional Science*, 41 (1) 39-65. 2001
- 3) Kim, T.J. , Ham, H. and Boyce, D.E. : "Economic impacts of transportation network changes: Implementation of a combined transportation network and input-output model." *Papers in Regional Science* 223-246. 2002
- 4) Sohn, J., Kim, T.J., Hewings, G.J.D., Lee, J.S. and Jang, S.G. : "Retrofit Priority of Transport Network Links under an Earthquake." *J. Urban Planning & Development*, 195-210, 2003
- 5) 国土交通省道路局企画課道路事業分析評価室提供資料, 平成16年10月23日新潟県中越地震による一般車両の前面通行禁止の状況, 2005.12
- 6) 新潟県土木部道路管理課提供資料, 平成16年新潟県中越大震災による通行規制状況, 2005.11
- 7) 太田勝敏, 古木守靖: 道路交通需要予測の理論と適用・第1編 利用者均衡配分の適用に向けて, 土木学会, pp.35-105, 2006.8