

交通ネットワーク上の貨物流動予測モデルを用いた

自然災害の経済的影響評価に関する基礎的研究*

Economic Impacts of Natural Disasters Using a Transportation Network-Based Interregional Commodity Flow Model*

梶谷義雄**・水上裕治***・皆川勝****・吉田郁政****

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

1. はじめに

大規模災害により基幹交通ネットワークが被害を受けると、地域間取引関係に依存した全ての企業活動が、迂回経路の選択や取引の中断を余儀なくされるなどの様々な影響を受ける。例えば、1995年の兵庫県南部地震や2004年に発生した新潟中越地震はその典型的なケースである。これら災害では高速道路などの基幹交通ネットワークに甚大な被害が発生し、増加する輸送コストや調達先の変化は各企業の経済的損失の一因となった。

このような交通網被災による経済活動への影響を評価するためには、地域間の産業間取引と利用する経路について、定量的な分析を行う必要がある。災害時の交通ネットワークには避難や救助といった様々な重要な役割があるが、交通ネットワークを構成する各リンクや経路レベルで経済的な重要性を評価することによって、優先的に補強、修繕すべき地点の特定などのより具体的な災害対策の立案に寄与するものと考えられる。

そのための手法の一つとして、地域経済の分野で利用されている産業間の物流や取引を分析するためのモデルや交通工学分野の利用者均衡配分モデルを統合したアプローチが挙げられる。交通ネットワークを構成するリンクレベルの財や産業毎の交通量を予測することで、そのリンクが被災した場合の影響を把握することが可能となる。例えば、Kimら¹⁾は産業連関モデルと利用者均衡配分モデルを統合したモデル(Integrated Input-Output and Transportation Network ModelもしくはInterregional Commodity Flow Model:以下、ICFMと呼ぶ)を用い、基幹交通網の被災による経済影響評価を実施している。しかし、モデルの適用は米国における限られた状況での検討であり、災害時の需要や生産の制約などのより一般的な状況でのパフォーマンスや拡張性の検討については十分な研究の

*キーワード: 防災計画, 交通問題, 経済被害

**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,

TEL04-7182-1181, FAX04-7184-2941)

***正会員, 工修, (株)鹿島建設 糸魚川工事事務所

****正会員, 工博, 武蔵工業大学大学院工学研究科

蓄積がない状況である。

そこで本研究では、既往のICFMに関するモデルをレビューし、その適用性についての検討に焦点を置く。具体的には、1995年の阪神大震災を対象に当時の地域間の財の取引状況を本モデルを用いて再現し、リンクの被災や生産、需要の制約が発生した状況における地域間交易の変化をシミュレーションする。いくつかのシミュレーションの実施によって得られた結果を基にモデルの特徴や拡張性について考察する。

2. 交通被害の経済影響に関する既往の研究

交通ネットワークの損傷によって引き起こされる経済被害推計に関する研究は、前述のKimらの事例以外にもいくつか存在する。例えば、Cho and Gordonら²⁾はSCPM(Southern California Planning Model)と呼ばれる計量経済モデルを構築している。このモデルは、産業だけでなく、人流も含めた比較的詳細な都市圏内の交通を対象としている点に特徴がある。基本的には、産業連関モデルや各地域の経済データをベースに、重力式の交易モデルを用いて災害時の交通行動を設定しており、開発したモデルをロサンゼルス都市圏における橋梁の被害に伴う経済影響分析に適用している。また、Sohnら⁴⁾は前述のICFMを用い、1812年に発生したニューマドリッド地震による経済影響の分析に適用している。分析の結果、経済的観点から重要な経路と高い確率で破壊される経路は異なっているということを指摘している。

国内においても、武藤ら⁵⁾、小池ら⁶⁾、Tatano・Tsuchiya⁷⁾らなど、SCGE(空間的一般均衡モデル)をベースとした自然災害による経済影響評価に関する研究が蓄積されつつある。また、地域経済モデルとは異なるが、長江ら⁸⁾は、トリップの回避などを含めた需要変動型の利用者均衡配分モデルを構築し、ローカルな地域における交通網被災の影響分析を行っている。

ICFMは、1980年代にBoyceらによって検討されてきたモデルである⁹⁾。モデルの特徴は、基本的には地域間産業連関構造を制約としたエントロピーモデル¹⁰⁾と利用者均衡配分モデルの統合モデルである。交通時間が所与の

もとで地域間取引を決定するモデルと、地域間取引量を交通台数に換算し、利用者均衡配分を行うことで交通時間を決定するモデルの均衡点を探す問題となる。これにより、リンク一本毎の性能が地域間の取引に与える影響等の分析ができるため、マクロな経済影響の波及問題だけでなく、地域間の幹線道路一本毎の容量の増加や耐震性能の向上などのミクロな意思決定の問題に適用可能である。しかし、災害による被災地域は局所的で、平常時と比較して生産や需要の状況は複雑になるため、必要となる交通ネットワークの精緻さやモデルパラメータの値の設定の影響などのモデルの適用性についての検討が必要となる。KimらやSohnらの分析事例では、広域的な地域間交通の被災に焦点があてられており、また実際の災害を対象とした実証的な検証は行われておらず、本モデルを用いた災害影響分析に対する検討の余地は大きいものと考えられる。

このような観点からも、本研究では、産業連関モデルと利用者均衡配分モデルをベースとしたICFMによる経済的影響評価のアプローチを踏襲し、災害時を対象とした道路リンクレベルでの経済的重要度について検討を行うこととする。ICFMによる国内での検討としては、例えば、奥田・林¹⁾による運輸部門への環境税導入の検討事例などが存在するが、実証的な研究ではなく、また災害の文脈での適用はなされていない。本研究では、外生的に設定する必要がある需要や産業別の直接被害等のパラメータについて、適用対象の阪神大震災当時の災害統計などを活用し、そのような要因を加えることの影響について検討を行う。

3. ICFMの自然災害影響評価への適用

(1) ICFMの概要

本節では、基本モデルとしてKimらやSohnらで用いられている一般的な定式化をベースに、ICFMを紹介する。基本的にはエントロピー付きの確率論的利用者均衡配分モデルに地域間産業連関構造（競争輸入型）を満たすよう移出入量（物流取引量）の制約式を加えた形になる。

まず、各リンクの交通量を次式で定義する。

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

ここで、 f_a : 地域内のリンク $a \in A$ を使用する交通量、 h_{jr}^m : 産業部門 m の地域 $i \in \Omega$ から地域 $j \in \Omega$ へ経路 $r \in R_j$ を使用する交通量（台）である。ここで、リンク a を使用する場合は $\phi_{jr}^a = 1$ 、その他の場合は $\phi_{jr}^a = 0$ となる。

このとき、ICFMで想定する目的関数ならびに制約条件は以下のように表現される。

$$\min_{h,x} Z(h,x) = \sum_a \int_0^{f_a} d_a(\omega) d\omega + \sum_{mj} d_{jj} \frac{x_{jj}^m}{g^m} + \sum_m \frac{1}{\beta^m g^m} \left\{ \sum_{ij} (x_{ij}^m) \ln(x_{ij}^m) \right\} \quad (2)$$

st.

$$\sum_r h_{jr}^m = \frac{x_{jj}^m}{g^m}, \quad (3)$$

$$\sum_i (x_{ij}^m) = \sum_n a^{mn} \left(\sum_k x_{jk}^n \right) + y_j^m + E_j^m - M_j^m, \quad (4)$$

$$h_{jr}^m \geq 0. \quad (5)$$

ここで、 x_{ij}^m : 産業部門 m の被災地域 i から被災地域 j への移出額（円）、 m : 産業部門、 g : 交通量（台数）と生産物の移出額（円）の変換係数、 $d_a(\omega)$: リンクパフォーマンス関数、 β^m : 産業部門 m の費用感度パラメータ、 d_{jj} : 地域内の移動時間、である。エントロピー項を含めることで、同一の業種間での物資のやりとりや同一の経路に物流が集中しない効果が生まれ、観測値との整合性が取りやすくなる。

また、制約条件として式 (3) から式 (5) を用いる。まず、式 (3) は交通量（交通台数）と出荷額（円）の変換式である。式 (4) は、地域別の産業連関構造を表す。ここで、 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）、 E_j^m : 産業部門 m の被災地域外 j からの移出額（円）、 M_j^m : 産業部門 m の被災地域外 j からの移入額（円）である。最後に、前リンク交通量は負数とはならないことを考慮し、式 (5) で示すように経路交通量に関する非負制約が設けられる。

モデルの特徴は、産業連関表に用いられる金銭的な地域間の取引を交通量に換算し、実際の物理ネットワーク上での均衡配分を行っている点である。これにより、交通コストが急激に増加したような場合、産業連関構造を満たしながら取引構造が変化するような状況が描写可能となる。さらには、災害時に需要が変化したような場合において、各地の産業への波及効果とそれに伴う交通量変化のような関係が分析可能となり、経済活動側の要因と交通量の関係が明示的に分析可能となっている。

モデルの適用のための前提条件としては、以下のものが挙げられる。

- ・外生変数として、投入係数 a^{mn} 、最終需要 y 、輸出货量 E 、輸入量 M 、を設定する。
- ・物流以外の一般交通量については、考慮しない。（初期条件として別途設定する必要がある。）
- ・地域間輸送は全て道路によって行われる設定である。

(輸送機関別の分担率を導入することで対応が可能である。)

- ・平常時と災害時の両ケースにおいて、同じ費用感度パラメーター β を用いる。

最後の前提条件は、交通費用の地域間の取引構造決定への影響の大きさは平常時も災害時も同じと想定していることに相当する。実際には、災害時の代替生産を行う際には、別途調整コストが発生するために、交通費用の変化が速やかな取引構造の変化に繋がらない可能性が高い。しかし、現時点において代替生産に関するデータは少なく妥当な設定方法の検討が困難であるため、本研究では、次章以降の実証分析において、交通量変化の観点からこの前提の影響について考察する。

(2) 制約条件の追加とモデルの推計方法

前述したように、災害時には交通網の被災だけでなく、供給の制限や需要の低下といった問題が発生する。ICFM において、需要は外生的に与え、それを充足するように各地域の生産量が決定される。これは、各地域の生産量に大きな変化が発生せず、生産能力の限界値を超えないという仮定に等しい。しかし、災害時には、地域の生産能力が著しく減少する可能性があるため、その点を考慮した以下の制約式を追加する。

$$\sum_j x_{ij}^m \leq \hat{x}_{i\max}^m \quad (6)$$

ここで、 $\hat{x}_{i\max}^m$: 産業部門 m の地域 i での最大可能な生産額 (円) である。式 (6) では、各企業の財は同業種において代替的に各企業の生産能力の集計値が地域全体の財の生産能力に相当するものと仮定している。また、災害後の短期間では、設備の復旧や増強、地域間の移転ができないものと仮定しており、各企業の個別の行動の影響はないものとしている。

式 (2) ~ 式 (6) を考慮し、ラグランジュの未定乗数法に基づく一階の条件式を、交通量 x について整理すると以下の式群を得る。

$$x_{ij}^m = \delta_i^m \varepsilon_j^m \eta_i^m \exp(-\beta^m \mu_{ij}^m), \quad (7)$$

$$\delta_i^m = \exp(-\beta^m g^m \sum_j \gamma_j^m a_j^m - 1.0), \quad (8)$$

$$\varepsilon_j^m = \exp(\beta^m g^m \gamma_j^m), \quad (9)$$

$$\eta_i^m = \exp(-\beta^m g^m \theta_i^m). \quad (10)$$

式 (7) ~ (10) に用いられている、 γ 、 μ 、 θ はそれぞれ制約式 (3)、(4)、(6) に関するラグランジュ定数である。ここで、式 (10) は不等式条件であるため、以下の条件を満たす必要がある。

$$\theta = 0, \quad \text{if} \quad \sum_j x_{ij}^m \leq \hat{x}_{i\max}^m, \quad (13)$$

$$\theta > 0, \quad \text{if} \quad \sum_j x_{ij}^m = \hat{x}_{i\max}^m. \quad (14)$$

また、 μ_{ij}^m については1階の条件式を整理することで以下の条件を得る。

$$\mu_{ij}^m = \sum_a d_a(f_a) \phi_{ijr}^a, \quad \text{if} \quad h_{ijr}^m > 0, \quad (15)$$

$$\mu_{ij}^m \leq \sum_a d_a(f_a) \phi_{ijr}^a, \quad \text{if} \quad h_{ijr}^m = 0. \quad (16)$$

式 (7) をwilsonの繰り返し平衡法¹⁰⁾ (δ , ε の値を順番に更新する手法) によって推計することで、各地域間の産業部門別の交易量とOD交通量を得る。生産能力制約を加えたことによって発生する η についても、 δ , ε を更新した後、制約条件を満たすような η に更新させるプロセスが必要となる。得られた結果を解の探索方向として目的関数最小化問題を解くことで、式(15)における μ を更新する。この地域間交易量と交通量を同時に更新する問題は、Evansのアルゴリズム¹²⁾ によって解くことができる。さらに、再びwilsonの繰り返し平衡法を用いてOD交通量を算出するという二段階の繰り返し計算を収束するまで行うことによって、最終的な地域間交易量とOD交通量が決定する。

以上の方法を基に観測交通量 (平均移動時間) に適合するような費用感度パラメーター β ($=\beta^m \times g^m$) のキャリブレーションを行う。この方法としては、いくつか提案されており、本研究では、Hyman¹³⁾の方法をベースにした β のキャリブレーションを行うが、その詳細については既往文献³⁾ に譲る。

4. 阪神大震災を対象としたケーススタディ

(1) 利用するデータとモデル適用の前提条件

1995年に発生した阪神淡路大震災は、神戸市を中心とした地域の交通システムに大きな被害を与えた。特に臨海部の東西方向に位置する高速道路や国道が壊滅的な被害を受け、復旧にも長期の時間を要した。神戸市には中央部に位置する六甲山を通過して南北方向に向かう道路が少なかったこともあり、域内へのアクセスは大きく制限された。代替経路としては、比較的早期に機能が回復した中国自動車道や舞鶴自動車道などを利用したルートが主に利用されたことが報告されている¹⁴⁾。以下では、被災後数週間~1ヵ月間程度の被災期間を対象にケーススタディの諸条件を決定する。この期間においては、阪神高速神戸線、湾岸線、国道2号線、43号線といった主要道路は回復していない状況である。なお、本研究の分析対象とは異なるが、阪神大震災による物流への影響としては、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会¹⁵⁾ において、被災地域内の貨物流動に関して詳細な分析がなされており、域内・域外の交通状態を把握する上で貴重

な情報が提示されている。

まず、地域としては、利用するデータソースの一つである平成7年の地域間産業連関表の区分に合わせて、図-1に示す9地域（北海道、東北、関東、中部、関西、中国、四国、九州、沖縄）を対象とする。また、交通ネットワークとしては、全ての高速道路に加えて被災地域から一定の範囲に関しては、国道を追加し、より詳細な物流の分析を行うこととした。図-2は、追加した被災地域周辺道路を拡大したものであり、地域間輸送の経路として代表的なものについては太字で記載している。以上の作業により、合計7771個のノードと8313本のリンクから構成されるネットワークデータを作成した。



図-1 対象とする9地域と道路ネットワーク



図-2 神戸周辺の主な地域間輸送の経路

交通量の発生/集中ノードについては、各地域内の交通ネットワークの中の任意の一つのノードに設定している。従って、道路の容量の制約によって、交通発生/集中ノード近傍の交通の混雑度が大きくなる可能性がある。より詳細な産業分布データに基づき、発生/集中ノードを複数点設定することによって、より実用的な分析が可能となる。また、便宜上、発生する地域間交通量の小さな沖縄地域の発生/集中ノードは、九州地域の南端の点と

した。各地域の域内の移動時間については、Kimらと同様に、対象とする地域から最も近い地域までの地域間移動時間の半分の時間を設定する。

その他の外生的に決定する必要のある変数の設定方法については、表-1にまとめて示す。表中の産業部門別の生産能力の設定については、芦谷・地主¹⁹⁾において用いられた方法を参考に、各産業の90年から95年の生産額の最大値を生産能力とする方法によって設定を行っている。この場合、各産業の生産能力は、95年の生産額の1~1.1倍程度（鉱業は1.5倍）で分布している結果となった。また、被災地域の産業の生産能力については、図-3に示すように、建物被害分布状況を参考に設定した既往文献²⁰⁾の値を設定している。実際には、建物被害だけでなくライフライン停止の影響などもあるため、生産能力の低下はより大きくなるものと予想される。

式(3)中の g^m （移出入額と交通量の換算係数）については、表-2に示す物流センサスで示された物流の原単位を利用した。表に記載されていない産業については、貨物流動が発生しないものと仮定している。また、各リンクの物流以外の一般交通量については、一般交通量の割合を一定とし、表-3に示す距離帯別の道路輸送分担率を考慮した。

表-1 外生変数の設定方法

変数	設定方法
a^{mn} E_j^m M_i^m	平成7年地域間産業連関表（12部門） ¹⁶⁾
y_j^m	近畿以外については、同上の（兵庫県の最終需要については、兵庫県産業連関表と月別に実施されている家計調査 ¹⁷⁾ より民間消費支出のみに減少率（0.3）を設定）
g^m	物流センサスデータ ¹⁸⁾ を利用（表-2）
$\hat{x}_{i\max}^m$	近畿以外の地域については、芦谷・地主 ¹⁹⁾ に基づき設定。近畿については、兵庫県の産業別の直接被害率（ストック被害）を既往文献 ²⁰⁾ を基に設定し、その他近畿地域の産業の生産能力は、生産額実績値の1.0倍とした（図-2）。
$d_a(\omega)$	リンクパフォーマンス関数はBPR型を仮定 $(d_a(\omega) = a_0 \{1 + \alpha(\omega/C_a)^\nu\})$. $\alpha=0.48$, $\nu=2.82$ を設定 ²¹⁾ 。リンク容量 C_a としては、高速道路：72000（台/日）、国道：12000（台/日）を設定。交通速度は、高速道路：100km/h、国道：60km/hを設定。
その他	貨物車の割合：任意に設定（0.55）、道路分担率：物流センサス ¹⁸⁾ に基づき設定（表-3）。

表-2：利用した物流の原単位¹⁸⁾

	重量/出荷額 (トン/百万円)	重量/ロット (トン/台)	ロット/出荷額 (台/百万円)
農林水産業	0.13	1.8	0.07
鉱業	5.13	96.02	0.05
製造業	7.30	3.04	2.40
商業・運輸	0.80	0.66	1.89

*卸売りの原単位を利用

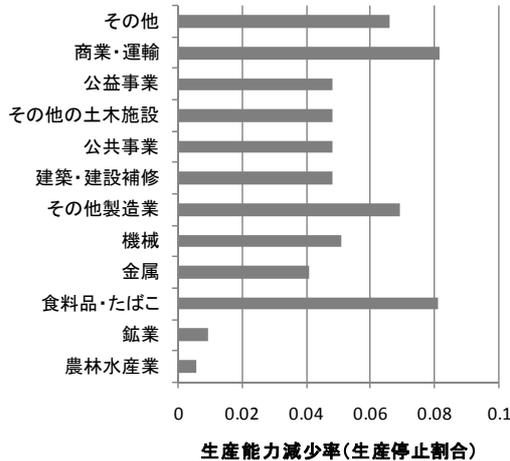


図-3 各産業部門の生産能力の推計値

表-3：貨物輸送手段全体に占める道路輸送分担率¹⁷⁾

距離帯	分担率
1-100km	89.9%
101-300km	79.9%
301-500km	59.8%
501-1000km	50.4%
1001km以上	31.2%

(2) パラメーターの推計

(1) で設定した諸条件に基づき β の推計を行った結果を以下に示す。まず、図-4は、平均旅行時間（時間/台）の収束状況と対応する β の値を示す。適合させる旅行時間としては、地域間産業連関表と前節で示した物流の原単位から推計されたOD交通量をもとに、通常の利用者均衡配分を適用した結果を用いた。7回程度の繰り返し計算によって、目標とする旅行時間（=2.78時間）を満たす β の値が得られていることが分かる。また、図-5はキャリブレーション終了時におけるWilsonの平衡法の収束状況を示す。80回程度の試行で収束判定の指標（各地域の各産業の最終需要推計値と観測値の差を観測値で除した値の最大値（Relative Gap））が、収束判定基準である0.001以下となっている。Wilsonの方法にかかる時間が数秒程度と安定的に収束するため、実際のキャリブレーションの時間は、Evansのアルゴリズムによる均衡配分計算時間にほぼ等しい。

図-6は、ICFMによる推計値と地域間産業連関表のみによる推計値の比較を行ったものである。Logスケールでの相関係数は0.71（自然対数を取らない場合は0.99）となっている。交通台数の少ない領域においてICFMによる推計値の方が交通台数を低く見積もっているが、地域間産業連関表のみによる推計値とある程度の整合性がある結果が得られている。

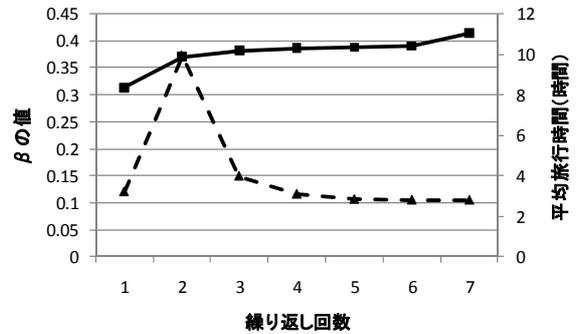


図-4 平均旅行時間の収束状況

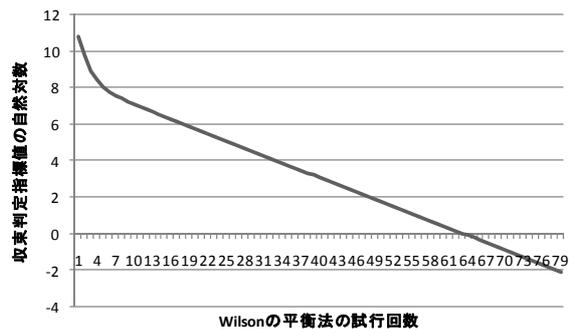


図-5 Wilsonの平衡法による収束結果（キャリブレーション終了時）

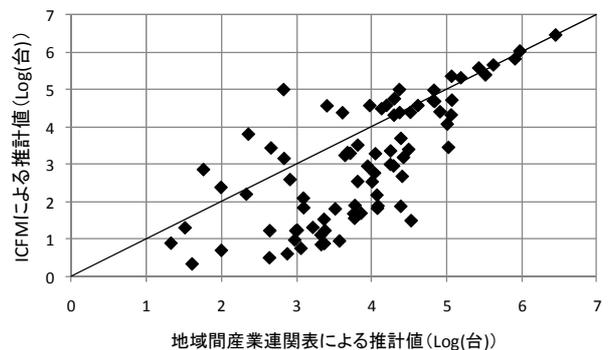


図-6 ICFMによる推計値と地域間産業連関表のみによる推計値の比較

図-7は、最終的に得られた交通量をリンク上に示したものである。神戸市周辺を拡大した地図によると、阪神高速3号線、国道2号線、43号線、中国自動車道、国道

372号線が東西の交通に利用されていることが分かる。災害時に迂回経路として選ばれたと考えられている舞鶴自動車道については、交通量は配分されない結果となった。また、近畿から、北海道、東北、関東、中部、中国、四国、九州への所要時間を計算すると、それぞれ26, 17, 12, 7, 4, 4, 8時間となった。

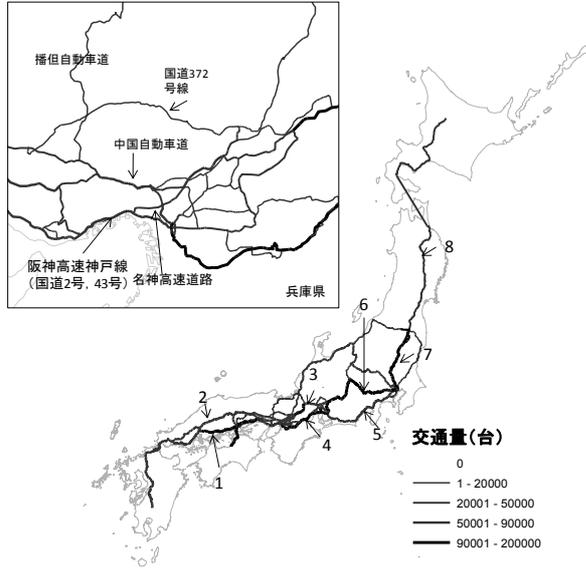


図-7 平常時の交通量の推計結果
(上下両方向の交通台数の平均)

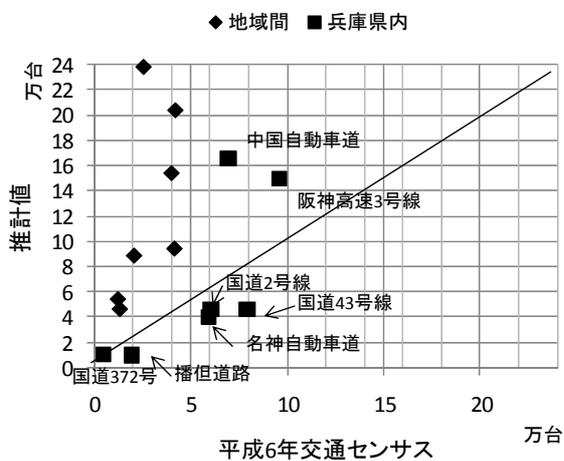


図-8 推計値と交通センサスとの比較結果
(上下両方向の交通台数の合計)

図-8にICFMの推計結果と平成6年度の交通センサス²⁾との比較結果を示す。図-6中の地域間交通量の観測点(全8地点)における24時間交通量ならびに被災地周辺の主要道路上の24時間交通量の平均値との比較を行っている。地域間交通量については大幅な過大推計になっている地点が多い。一方、被災地域周辺の平常時の交通量は、地域間交通量の推計値と比較して、過大推計になる

ケースは少なくなっている。物流の原単位の精度の問題も考えられ、ネットワーク上の交通量の予測精度は決して高いとはいえないが、地域間交通を分担する一般道を追加し、ネットワークデータを精緻にすることで、より観測値に近い推計結果が得られる可能性があるものと考えられる。

(3) 道路被害ならびに産業別の被災地の需給制約の影響

(2) で得られたパラメーター (β) に基づき、道路被害の影響についてシミュレーションを実施する。この際、生産能力と最終需要の減少(需給制約)を考慮しない場合と考慮する場合の二通りを計算し、需給制約の影響について考察を行うこととした。道路被害としては、主要道路である国道2号線、43号線、阪神高速道路は利用できず、中国自動車道についても車線規制の状況を想定し、容量を平常時の三分の一とした。

図-9は、兵庫県の最終需要の減少と各産業部門の生産能力の低下を考慮したケースにおける目的関数の収束状況を示したものである。本検討では、19回の繰り返し回数で各道路リンクのRelative Gapの最大値が0.001以下となった。繰り返し回数が増え、最終的な解の周辺になるにつれて収束がやや緩慢になる傾向があることがうかがえる。

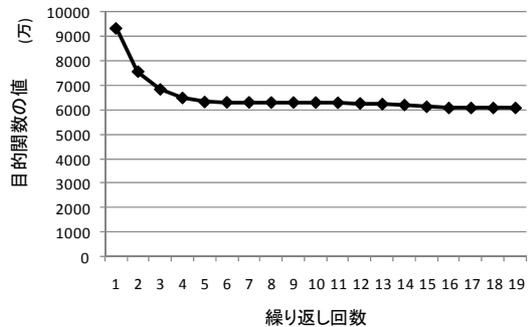
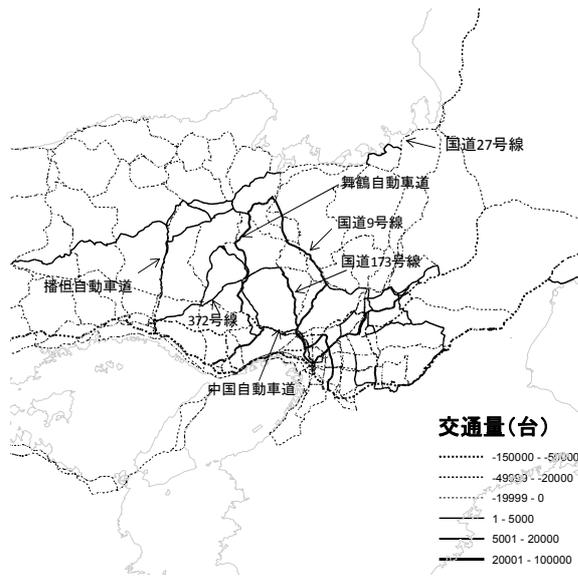


図-9 目的関数の収束の状況

図-10は、平常時の交通量との差分(災害時-平常時)を各リンクごとに表示したものである。播但自動車道や舞鶴自動車道から国道9号線を通る迂回ルートや国道372号線から国道173号線に向かう迂回ルートの交通量が増えていることが分かる。阪神・淡路大震災調査報告書¹⁾に記載されているアンケート調査によると、24件の神戸地域通過型サンプル(17件が中国自動車道を利用)のうち、22件が災害時に経路変更を行っており、そのうち11件が舞鶴自動車道を通り、その後7件が国道9号線を利用している。また、阪神地域にアクセスする方法としては、舞鶴自動車道を利用後、372号、173号と利用しているケースが報告されており、この点についても推計

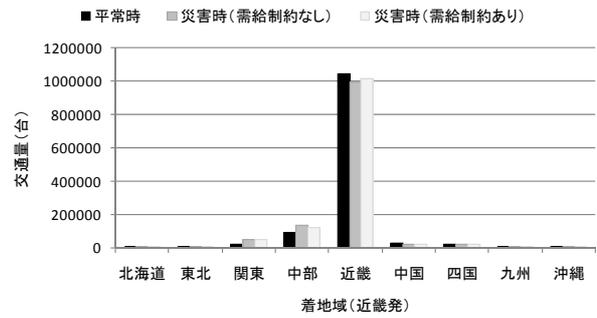
結果とある程度の整合性がある。しかし、実際に観測された舞鶴自動車道—国道27号—北陸自動車道方面のより大きな迂回ルートの利用については推計されていない。



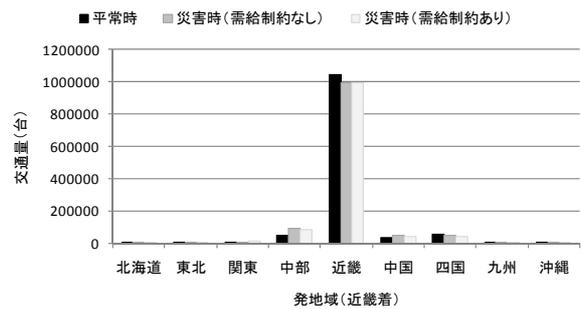
図一10 道路被害発生時の交通量の推計結果
(災害時の交通量—平常時の交通量)

さて、図11, 12は、平常時、道路被災時（需給制約なし）、道路被災時（需給制約）ありの場合における近畿発着の地域間の交通量を比較した結果である。需給制約なしの場合は、最終需要が平常時と同じと仮定したケースであり、各地域の生産力は代替生産の余力があるものと想定している。災害時には、近畿地域内の取引が減少し、中部地域との取引が増加していることが分かる。これは、地域内移動時間の増加が主な要因であるものと考えられる。すなわち、最も近い距離に位置する四国地域や中国地域とのアクセスが悪くなり、これら地域のアクセス時間の半分として計算する地域内移動時間が増加するためである。なお、交通量図は需給制約ありの場合とない場合では同様の結果であったため、割愛している。

需給制約のある場合はない場合に比べて近畿地域内の交通量が多くなっているが、この理由としてはいくつか考えられる。一つ目の理由として、域内の需要の低下が近畿圏に到着する交通量を低下させ、域内の移動時間が約0.15時間程度短くなっていることがあげられる。二つ目の理由としては、他地域で代替生産が行われる結果、近畿発の他地域への交通量が減少していることが考えられる。実際に、得られた結果とその理由の妥当性を検討するためには、代替生産や委託生産に関してさらなる実証分析が必要になる。



図一11 地域間交通量の比較 (近畿発)



図一12 地域間交通量の比較 (近畿着)

5. まとめ

本研究では、地域経済分野や交通工学の分野で利用される産業連関モデルと利用者均衡配分モデルを統合したモデル(ICFM)に着目し、自然災害の経済的影響評価への適用性について検討を行った。本モデルは、地域間に波及するマクロな自然災害の経済影響評価だけでなく、地域間交通ネットワークのリンカー本毎の性能が地域間の物流に与える影響を評価することが可能であり、道路の耐震性能の決定などのミクロな意思決定への活用を目的に検討されつつある。しかし、災害による被災地域は局所的で、平常時と比較して生産や需要の状況は複雑になるため、必要となる交通ネットワークの精緻さやモデルパラメーターの値の設定の影響などのモデルの適用性についての検討が必要となっていた。

そこで、本研究では、阪神大震災を対象にモデルの適用性について実証的な検討を行った。まず、1995年の地域間産業連関表と交通ネットワーク等に基づいて、平常時のモデルの推計を行った。モデルの中心部分は地域間産業連関構造を制約とした利用者均衡配分とエントロピーモデルの統合モデルの推計であるが、パラメーター推定において発散等は発生せず、安定した結果が得られている。本研究で対象としたネットワークよりも大規模でまた地域分割数の多い産業連関表を対象とした場合への適用が今後の課題となる。さらに、推計結果と交通センサデータとを比較した結果、地域間を結ぶリンクにお

ける交通量が過大推計となった。本研究では、交通発地点や被災地周辺以外の地域間交通については、簡単な設定を行っているため、より丁寧な交通ネットワークの設定ならびに物流の原単位データの作成による改善効果の検討が必要と考えられる。

次いで、災害時を対象に神戸地域を東西に結ぶリンクを切断し、地域全体の生産能力や需要を制限したモデルを推計した結果、神戸地域周辺については、ある程度実際の迂回行動の調査結果に近いと考えられる分析結果が得られた。また、需給制約を設けた結果、近畿地域内の自給率が上がり、被災地域内の交通時間が短くなる現象が推計された。被災地域外における代替生産の影響があるものと考えられるが、この点についてはさらに実証的なデータの収集やモデルの拡張が必要になる。特に、災害時の代替生産を決定する交通費用感度パラメーターに、平常時の感度の値をそのまま利用しており、この点については実証データに基づくモデルの拡張が必要となる。

以上、いくつかの知見が得られたが、本研究では比較的単純な条件設定の下での試算であり、観測交通量の再現性などの面においていくつか問題がある。実際に活用するためには、災害調査に基づく個人の交通行動の考慮、被災後の交通費用感度パラメーターの設定方法、複数モデル間の比較などについても、丁寧な実証分析が必要になるものと考えられる。

参考文献

- 1) Kim, T.J. : A combined land use-transportation model when zonal travel demand is endogenously determined, *Transportation Research*, Vol.17B, pp.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*, vol.41, No.1, pp.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*, Vol.81, pp.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, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.129, No.4, pp.195-210, 2003.
- 5) 武藤慎一・上田孝行：広域社会基盤を対象とした災害対策代替案の設計・評価のための狭域地域経済モデルの開発 土木計画学研究・講演集 vol.34(CD-R), 2006.
- 6) 小池淳司・上田孝行・秋吉盛司，社会資本ストック崩壊による経済的被害の空間的把握—空間的応用一般均衡モデルによる計量厚生分析—，土木計画学研究・論文集，Vol.21, pp.367-374, 2004.
- 7) Tatano, H. and Tsuchiya, S: A framework for economic loss estimation due to seismic transportation network disruption: a spatial computable general equilibrium approach, *Natural Hazards*, Vol.44, pp.253-265, 2008.
- 8) 長江剛志・藤原友・朝倉康夫：GIS と需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価，土木計画学研究・論文集，Vol. 24, No.2, pp.233-242, 2007.
- 9) Boyce, D.: Combined Model of Interregional Commodity Flows on a Transportation Network, In Hewings, Sonis and Boyce (eds) *Trade, Networks and Hierarchies* (pp.29-40, Springer, 2002.
- 10) Wilson, A.G.: *Entropy in urban and regional modeling*. London, Pion, 1970.
- 11) 奥田隆明・林良嗣：運輸部門を通じた環境税の影響分析手法—地域間産業連関モデルと交通ネットワーク均衡モデルの統合モデル，土木計画学研究・論文集，Vol.11, pp.271-278, 1991.
- 12) Evans, S.P.: Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, Vol.10, pp.37-57, 1976.
- 13) Hyman, G.M.: Calibration of trip distribution models. *Environment and Planning Vol.1*, pp.105-112, 1969.
- 14) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：交通施設と農業施設の被害と復旧，丸善株式会社，1998.
- 15) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：社会経済的影響の分析，丸善株式会社，1998.
- 16) 財団法人 経済産業調査会：平成 7 年地域産業連関表，2000.
- 17) 兵庫県：兵庫県統計書（平成 7 年），1996.
- 18) 国土交通省：第 7 回全国貨物純流動調査（物流センサス）結果，2002.
- 19) 芦谷恒憲・地主敏樹：震災と被災地産業構造の変化，*国民経済雑誌*，Vol.183, No.1, pp.79-97, 2001.
- 20) 梶谷義雄・山野紀彦・朱牟田善治：大規模災害後の経済回復関数の推計，*土木学会計画学研究・講演集*，Vol.30(CD-ROM), 2004.
- 21) 太田勝敏・古木守靖：道路交通需要予測の理論と適用 第 II 編 利用者均衡配分法の展開，土木学会，2006.
- 22) 建設省道路局：平成 6 年度道路交通センサス，1995.

交通ネットワーク上の貨物流動予測モデルを用いた自然災害の経済的影響評価

に関する基礎的研究*

梶谷義雄**・水上裕治***・皆川勝****・吉田郁政****

大規模災害により交通ネットワークが被害を受けると、交通ネットワークによる他企業との取引関係に依存した全ての企業活動が迂回経路の選択や、取引の中断を余儀なくされるなどの様々な影響を受ける。したがって、このような経済活動への影響をできるだけ効果的に減少させるためには、各経路や道路と経済活動との関係を分析し、優先的に補強、修繕すべき重要経路を特定することが重要となる。そこで、本研究では、地域経済分野や交通工学の分野で利用される産業連関モデルと利用者均衡配分モデルを統合したモデル（ICFM）に着目し、自然災害の経済的影響評価への適用性について検討を行った。特に、阪神大震災を対象としたケーススタディへの適用を通じて、本モデルの特徴について分析を行った結果、観測値の再現性や災害時の需給制約の影響などについていくつかの知見を得た。

Economic Impacts of Natural Disasters Using a Transportation Network-Based Interregional Commodity Flow Model*

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

When a large-scale disaster occurs, a road network system can be severely damaged. This damage causes economic loss due to the failure of trading goods inside and outside the physically damaged areas. In order to reduce this type of economic loss, it is important to analyze the relationship between each road link and economic activities and determine which route should be reinforced or quickly recovered. For this purpose, this paper focusing on the model so called “Interregional Commodity Flow Model”, which integrates both the transportation network model (user equilibrium model) and input-output model. Through the model application to the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake, the model characteristics and applicability is demonstrated, especially related to the fitting accuracy to observed data, convergence time, and influences of supply and demand decreases during disasters.
