



地震災害時におけるライフライン被害の産業部門への影響評価 —小地域メッシュ統計を活用した2004年新潟県中越地震時の交通分析

梶谷義雄¹⁾

1) 正会員 電力中央研究所, 主任研究員 工博
e-mail : y-kaji@criepi.denken.or.jp

要約

本研究では、地震災害時における複数の社会基盤が同時に被災した状況を対象に、産業部門間の交通量や道路混雑への影響を評価するための分析アプローチについて基礎的な検討を行う。特に、各種社会基盤の局所的な被害影響を評価する方法として、小さな空間スケールで整備された経済統計（小地域統計データ）の利用に着目し、必要となるデータ処理手法を含めた分析手法を検討する。具体的には、企業の生産活動を対象に、電力、水道、ガスの供給停止の影響に関する調査結果と交通工学で用いられる経路選択モデルを活用した影響評価方法を検討し、2004年新潟県中越地震の社会基盤被害状況を対象としたケーススタディを通して分析手法の適用性や今後の課題について考察する。

キーワード： 小地域統計, 地震災害, 経済影響, 社会基盤, 交通時間変化

1. はじめに

地震災害時における電力、道路網等の社会基盤施設の被災は、その復旧のために施設管理者や地方自治体に経済的負担を強いるだけでなく、住民生活や企業の経済活動を制約し、地域社会全体へ影響を及ぼす。実際、本研究で対象とする2004年新潟県中越地震時の産業部門の経済活動においても、各種社会基盤の被害に伴う営業停止等の間接被害（高次被害波及）が大きいという調査結果が得られている¹⁾。地震防災研究の分野においては、被害発生要因の分析や今後発生する恐れのある外力の評価が進み、中央防災会議や一部の地方自治体では間接被害による経済損失についても試算を行いつつある。そして、このような地域経済の被害の試算結果も加味しながら、ライフラインや橋梁の耐震化等の様々な防災計画が検討されつつある。しかし、間接被害による経済損失の計量化に用いるモデルの空間スケールと物的被害の想定に用いられている空間スケールには大きな乖離があるため、両推計結果を有効に活用した防災対策計画の立案方法は十分に確立されていないのが現状である。

次節において詳細を述べるが、災害時における間接被害を含めた正負様々な経済影響の予測のために、地域経済学や交通工学を活用したモデルが用いられてきた。しかし、その基本データとなる産業連関表や産業別生産額等の経済統計データが県や市区町村単位等で整備されているためもあり、比較的大きな空間スケールの分析が行われている。一方、直接被害の分析や施設の復旧予測に用いられるようなモデルについては、建物一軒単位の情報を利用した被害想定モデル²⁾や復旧人員の空間的な動きまでを予測するモデル³⁾が開発されつつあり、広範なエリアを対象とした場合においても1kmメッシュ単位等の地形情報を活用したような被害想定手法が提案されている⁴⁾。より局所的な物的被害の影響や災害対策の



影響を把握するためにも、間接被害予測モデルに用いる空間スケールを直接被害予測モデルと整合的にするためのデータ補完方法等を検討する必要がある。また、各社会基盤で講じられる対策の効果を計測し、それぞれの社会基盤の役割分担を議論するためにも、複数の社会基盤被災と社会・経済的影響の関係を表現するためのモデルの開発が必要となっている。

そこで本研究では、地理空間情報の整備やコンピューター処理能力向上を背景にデータ蓄積が進みつつある小地域統計⁵⁾に着目し、災害時における小地域単位の経済活動の影響を把握するための評価方法を検討する。データ整備区分として小地域統計という言葉が用いられているが、実際は、町丁目単位、あるいは250m~1kmメッシュ単位で整備されている社会経済統計データを指しており、本研究においてもこれらの空間スケールあるいはそれ以下の集計単位で整備されている社会経済統計データを小地域統計と呼ぶ。特に、本研究では、災害時の小地域単位の産業の活動水準に焦点をあて、既往の調査研究や交通工学で用いられる均衡配分モデルをベースに、各種ライフライン途絶時における取引や納入等のための交通量や交通所要時間の変化を分析するためのケーススタディ方法を検討する。具体的には、実際の災害事例として2004年に発生した新潟県中越地震を取り上げ、復旧状況を含めた社会基盤施設被害の影響を分析することで、小地域統計データによるアプローチの適用性と発展性を明らかにする。

2. 分析モデル

2.1 既往の研究のレビュー

災害時における各種社会基盤被害と経済影響の関係について検討した研究はこれまでも数多く存在する。例えば、Roseら⁶⁾は、電力施設の被害に着目し、産業連関モデルを用いた経済被害推計方法について検討を行っている。また、Cho and Gordonら⁷⁾は、Southern California Planning Model(SCPM)と呼ばれる計量経済モデルを構築し、橋梁被害の経済影響について検討を行っている。ロサンゼルス中心部の1543ゾーン別に分類された交通トリップのデータと308の行政境界内の経済データを基に、交通網への被害発生時における通勤や出入荷などの人々の交通現象について分析を行っている。都市圏内の比較的小ゾーンの分析を行っている点において、先駆的研究と考えられる。一方、Kimら⁸⁾は、交通ネットワークモデル(利用者均衡配分モデル)と産業連関モデルを統合したInterregional Commodity Flow Model(ICFM)と呼ばれるモデルを利用し、米国全域に広がる基幹交通網の被害影響について検討を行っている。この研究では、交通混雑に伴う迂回経路選択問題を内生化しており、幹線道路一本毎の被害影響を把握できる点に特徴がある。

国内においても、地域経済モデルを活用した検討事例が蓄積されつつある。例えば、高橋ら⁹⁾による産業連関と地域間取引を考慮した阪神大震災の被害影響分析や小池ら¹⁰⁾やTatano and Tsuchiya¹¹⁾による空間的一般均衡モデル(Spatial Computable General Equilibrium Model)を用いた研究が存在する。また、武藤,上田¹²⁾は、SCGEモデルを比較的小地域の分析に適用できるようにアレンジし、主に市区町村間の交通被害を考慮した災害の経済被害分析について検討を行いつつある。

このように、災害の経済的影響評価に関する既往研究において、地域経済学や土木計画学の分野で利用が進められている産業連関モデルや一般均衡モデルを活用した分析がなされつつある。これらのモデルでは、施設被害や復旧情報のある程度の空間スケールに集約した形で設定する必要があるものの、電力や交通網などの社会基盤が被害を受けた状況における地域別の生産額の減少や厚生の変化の分析が可能であり、社会基盤施設の災害対策の費用便益分析などを行う上で有用な情報となる。

一方、地震工学の分野においても災害時の社会基盤被害にともなう社会経済への影響評価についての試みは数多く存在する。特に本研究においても主要テーマとなる交通網被害の影響に焦点を絞ると、例えば、崔ら¹³⁾による災害後の交通需要変動に焦点をあてたものやNojimaら¹⁴⁾による交通量を考慮した災害時の交通網の機能評価に関する研究等が実施されている。また、社会経済的影響とは異なるが、広域的な交通網被害予測手法として、近年の災害情報に基づく脆弱性曲線なども適宜追加検討がなされており¹⁵⁾、過去の災害事例を丁寧に検討しながら、交通網被害の影響を評価する手法が蓄積されつつあ



る。

本研究と同様に小地域統計データを用いて、自然災害の経済的影響の評価を試みた事例もいくつか存在する^{16),17)}。これらは、より小さなスケールで評価された物的被害の情報と小地域統計に記載された産業部門の分布を重ねあわせ、地域全体の集約した産業部門別の全壊割合等を推計することで、経済モデルの空間スケールに整合させることを目的としている。例えば、梶谷ら¹⁷⁾は、産業部門別の直接被害推計結果と上記のICFMとを阪神大震災の事例に適用し、主要経路被災状況下における当時の迂回状況の再現性について検討を行っている。一方、小地域の被害情報を集約せずに、各小地域の間接被害を推計した研究¹⁸⁾も存在するが、各小地域は独立しており、本研究のように交通ネットワークを介した地域間の空間的な繋がりについては考慮されていない。これに対し、交通工学の分野において、鳥居ら¹⁹⁾は、震災時における救援物資等の緊急車両に関する起終点交通量データを作成し、細街路を含めた交通シミュレーションモデルを作成している。詳細な交通ネットワークを対象とした災害時の交通流分析手法として有用であるが仮定も多く、今後の研究課題が多く存在している分野となっている。本研究では、産業部門の物流を対象とした小地域単位の災害シミュレーションを対象とするが、この分野での検討事例は少なく、適用可能性の把握と今後の課題抽出を行う上で必要な検討になるものと考えられる。

2.2 本研究の位置づけと分析のフロー

本研究では、我が国において事業所統計等の小地域統計が整備されているという利点を活用し、電力、水道、ガス、道路の各種社会基盤が被災した状況において、小地域単位の産業部門の交通量を予測し、一般道レベルの交通ネットワークを明示的に取り扱った検討を行うことを目的とする。これは従来のより小さな空間スケールの情報を集約して経済モデルを適用する標準的なアプローチとは逆のアプローチに相当する。推計結果は、利用する経済データの空間スケール、小地域への按分方法、原単位の精度に大きく依存する。再現性の検証やモデルパラメーターの修正には、部分的にでも観測データが必要となるが、本研究ではその点については今後の課題としている。したがって、本研究のアプローチは、公的な経済統計データを用いて、より詳細な社会基盤情報を災害影響評価に活用するための一手段であり、災害の社会経済的影響の表現方法の一つとして位置付けられる。

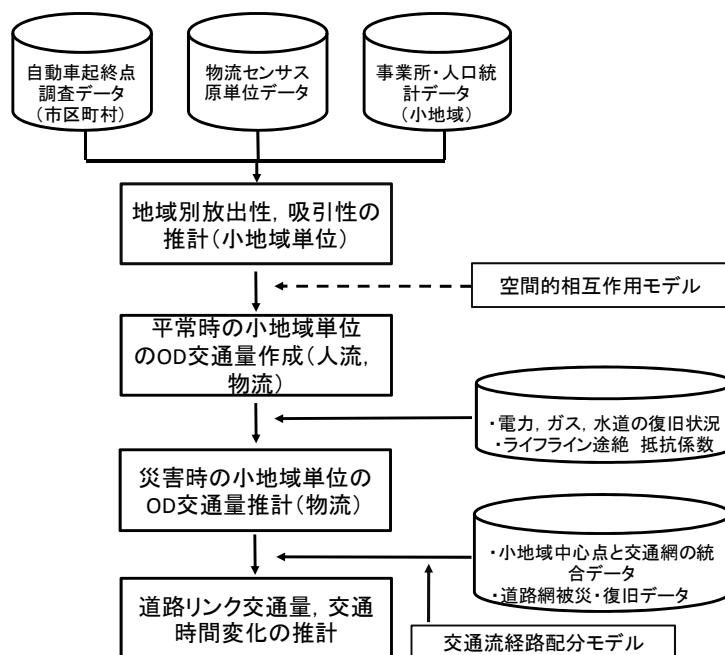


図1 分析のフロー



図1に本研究における分析のフローを示す。各種社会基盤途絶時における経済活動の水準の予測と車輛の迂回行動等を予測するモデルを小地域統計や被災ネットワークに適用するための各種データ処理や加工方法、ならびに分析アプローチの有効性と発展性についての検討が中心的課題となる。表1に、本研究で利用するデータとその概要を示す。データの年度については、後のケーススタディで利用するデータの調査年を記載している。

表1 利用するデータの概要

| データ名 | 調査母体 | 空間スケール | 調査年 | その他 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------|------------------|
| 事業所・企業統計 ²⁰⁾ | 総務省・統計局 | 500~1kmメッシュ | 2001年 | 産業別従業員数を利用(小地域) |
| 国勢調査 ²¹⁾ | 総務省・統計局 | 500~1kmメッシュ | 2000年 | 総人口のみ利用 |
| 自動車起終点調査 ²²⁾ (道路交通センサス) | 国土交通省・道路局 | 独自設定のゾーン | 1999年 | 乗用車, バス, 貨物車等に分類 |
| 全国貨物純流動調査 ²³⁾ (物流センサス) | 国土交通省・道路局 | 県 | 2000年 | 発着産業別貨物量・原単位を利用 |
| 道路ネットワークデータ (JMC マップ ²⁴⁾) | 国土交通省・国土地理院 | 主要地方道, 一般県道 | 2004年 | |

図1に示した分析のフローの最初のステップとして、小地域単位の起終点(OD)交通量を推計する方法を検討する必要がある。交通センサスの起終点調査データ¹⁾は、市区町村を数個に分割したゾーン単位が最小であり、本研究で対象とする小地域には対応していない。そこで、地理学の分野において開発された空間的相互作用モデルにおける放出性、吸収性(魅力度)²⁵⁾の概念を援用する。

まず、代表的なモデルであるWilsonの空間的相互作用モデルを紹介する。このモデルは、移動費用を制約条件とした移動主体の起終点交通量データに関するエントロピー最大化問題の解として得られ、総流動(交通量)制約型のモデルに関しては、以下の式で表わされる。

$$OD_{ij} = kv_i^\alpha w_j^\beta f(d_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 v_i^α : 地域*i*における放出性の測度、 w_j^β : 地域*j*における吸収性の測度、 $f(d_{ij})$: *ij*間の距離 d_{ij} を変数とする関数、となる。 k は、推計結果を観測値の総交通量に適合させるための調整項に相当する。

また、小地域*i, j*から構成される市区町村単位の空間をそれぞれ*I, J*とすると、地域*I, J*に対応する起終点交通量は以下の式で表わされる。

$$OD_{IJ} = \sum_i \sum_j kv_i^\alpha w_j^\beta f(d_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2)$$

さらに、対象地域全域(例えば県全体)の小地域単位同士の計算は膨大になることから、対象地域内の詳細な分析を行う地域*R*を設定し、小地域と小地域の集計地域との間の起終点交通量については、以下の式を基にパラメーターの値を推計する。

$$OD_{IJ} = k \sum_i v_i^\alpha w_j^\beta f(d_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in J, I \in R, J \notin R \quad (3)$$

$$OD_{IJ} = k \sum_j v_i^\alpha w_j^\beta f(d_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in J, I \notin R, J \in R \quad (4)$$

放出性、吸収性の測度については、人流と物流(貨物車)とで異なることが予想される。そこで、本研



究では、人流については、放出性、吸引力ともに人口分布とし、物流については物流センサスから得られる発着別の年間貨物取扱量（台数換算）の推計値を用いた以下の式により推計を行う。 Emp_i^s は*i*地域の産業*s*の従業員数、 $Export^s$ を産業*s*の従業員1人あたりの年間出荷量(ton)、 $Import^s$ を産業*s*の従業員1人あたりの年間出荷量(ton)とすると、

$$sv_i = \sum_s Emp_i^s \cdot Export^s \quad (5)$$

$$sw_i = \sum_s Emp_i^s \cdot Import^s \quad (6)$$

となる。

災害時には、放出性と吸引力の値が変化する。特に、物流は産業の操業水準に応じて変化することが予想されるため、産業の操業水準の推計値に基づき、災害時の放出性と吸引力の測度を決定する必要がある。本研究では、操業水準に影響を及ぼす要因として、電力、ガス、水道の供給状況を考慮する。各ライフラインの影響は、産業別に大きく異なることが予想され、また供給パターンの違いによっても変化する。本研究では、既往の調査から推計されたライフライン途絶抵抗係数（Lifeline Resiliency Factor）を用い、各産業の活動水準を予測する^{26,27}。ライフライン途絶抵抗係数とは、ライフライン途絶時の企業の活動水準を 0～1 までの指標で基準化したもので、0：活動停止、1：影響なし、に相当する。本研究で着目するライフライン途絶状況下における放出性と吸引力の測度をそれぞれ sv' 、 sw' とすると、

$$sv'_i = \sum_s r^s(water_i, gas_i, electricity_i) \cdot sv_i \quad (7)$$

$$sw'_i = \sum_s r^s(water_i, gas_i, electricity_i) \cdot sw_i \quad (8)$$

となる。ここで、 $r^s(water_i, gas_i, electricity_i)$ は、*i* 地域の産業 *s* を対象に、水道 (water)、ガス (gas)、電力の供給状態に応じて決定されるライフライン途絶抵抗係数の値を示し、各ライフラインの供給状態は 0 (供給なし) または 1 (供給あり) の値で表わされる。次いで、交通量に影響を及ぼす変数として、各地点における産業の活動水準を予測する必要がある。

式 (7)、(8) の sv'_i と sw'_i の値を式 (2)、(3)、(4) の v_i と w_i に代入することより、各小地域間、小地域と小地域の集計地域間のライフライン供給状態に対応した物流に関する起終点交通量の予測を行う。なお、災害時の人流の設定や緊急車両の予測については今後の課題であり、平常時と同じ交通量を用いることとする。また、十分に整合性が取れていない産業分類もいくつかあるが、本研究で用いる物流センサス、事業所統計、ライフライン途絶抵抗係数間の産業分類（大分類）の対応結果を表 2 に示す。

表2 各データベースの産業部門の統合表

| 事業所統計 | 物流センサス(発) | 物流センサス(着) | 途絶抵抗係数 |
|------------|-----------|------------|--------|
| 農林漁業 | — | 農林水産業 | 農林水産業 |
| 鉱業 | 鉱業 | 鉱業 | 鉱業 |
| 建設業 | — | 建設業 | 建設業 |
| 製造業 | 製造業 | 製造業 | 製造業 |
| 運輸・通信業 | 倉庫業 | 運送業・倉庫業 | 運輸・通信業 |
| 卸売・小売業、飲食店 | 卸売業 | 卸売・小売業、飲食店 | 卸売・小売業 |
| 金融・保険業 | — | 金融・保険業 | 金融・保険業 |
| 不動産業 | — | 不動産業 | 不動産業 |
| サービス業 | — | サービス業 | サービス業 |
| 公務、その他 | — | — | — |



図1に示す分析フローの最終段階では、式(2)から(8)に基づき設定を行った起終点交通量をベースに、交通ネットワーク被災状況下における交通量配分を行う作業を行う。災害時は交通時間や経路の通行止めなどの状況などが不明なケースが多く、このような情報不完全な状況における交通量配分方法としてはモデル改良のための検討の余地が大きい。本研究では平常時において最も一般的な配分手法であるワードロップの等時間原則を満たす以下の確定的利用者均衡配分モデルを用いる²⁸⁾。

$$\min. \quad Z_p = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K_{ij}} f_k^{ij} - OD_{ij} = 0 \quad \forall ij \in \Omega \quad (10)$$

$$x_a = \sum_{k \in K_{ij}} \sum_{ij \in \Omega} \delta_{a,k}^{ij} f_k^{ij} \quad \forall a \in A \quad (11)$$

$$f_k^{ij} \geq 0, \quad x_a \geq 0 \quad (12)$$

ここで、 a :リンク集合 A の要素、 x_a : リンク a ($\in A$) の交通量 (台)、 f_k^{ij} : ij 間を結ぶ経路 k の交通量 (台)、 $\delta_{a,k}^{ij}$: ij 間を結ぶ交通網において、経路 k 、リンク a が構成要素に含まれるときに1、それ以外は0を取る変数、 $t_a(\bullet)$:交通量と交通時間の関係を示すリンクパフォーマンス関数、となる。ネットワークが大規模な場合に理論解の算出は困難なため、本研究では、代表的な計算アルゴリズムとして、最短経路探索に Dijkstra 法、最短経路情報をもとに交通量の逐次配分法を行う Frank-Wolf 法を用いた²⁸⁾。

$t_a(\bullet)$ は交通量と交通時間の関係を示すリンクパフォーマンス関数であるが、本研究では代表的な関数である以下の BPR 関数を用いる²⁹⁾。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (13)$$

ただし、 t_a : 旅行時間、 t_{a0} : 自由旅行時間、 x_a : リンク交通量、 c_a : 交通容量、 $\alpha \cdot \beta$ はパラメータである。また、道路の交通容量は、道路構造令に基づき、道路種別ならびに車線数を考慮して設定を行う³⁰⁾。基本的に、道路種別は第1種～第4種に大別され、都市部と地方部、高速道路や自動車専用道路とそれ以外によって4パターンに分類される。概略のみを記載すると、第1種: 地方部の高速道路または自動車専用道路、第2種: 都市部の高速道路または自動車専用道路、第3種: 地方部のその他道路、第4種: 都市部のその他道路、となる。さらに、それぞれの種別において、地形条件の違いなどに応じていくつかの等級に分類されている。本研究では、交通センサスの箇所別基本表も参考にしながら、構造令上の設計基準交通量を用いて道路容量の設定を行うが、等級の不明地点については、各道路種別の等級別設計容量の中間値に相当する表3の値を設定した。

表3 道路種別と交通容量(1車線あたり)

| 道路種別 | 内容 | 交通容量 (台/日) (設計範囲) |
|------|--------------------|------------------------|
| 第1種 | 高速道路と自動車専用道路 (地方部) | 11,000 (8,000-12,000) |
| 第2種 | 高速道路と自動車専用道路 (都市部) | 17,500 (17,000-18,000) |
| 第3種 | 一般国道, 地方道 (地方部) | 7,500 (5,000-11,000) |
| 第4種 | 一般国道, 地方道 (都市部) | 11,000 (10,000-12,000) |



以上、図1の分析のフローに従い、利用するデータとその加工方法、並びに分析モデルについて紹介を行った。以降では、本節における一連の評価プロセスを実際の被災地域に適用することで、各種仮定の影響や今後必要となるモデル開発の方向性について検討を行うこととする。

3. 事例分析

3.1 事例分析の設定条件

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、道路の亀裂や陥没などのほか、土砂崩れが多く発生し、交通ネットワークに大きな被害をもたらした。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号などの一般国道の他、多くの県道や生活道路で発生している。また、周辺の道路に通行止めが多く発生したため、電力、水道、ガス等のその他社会基盤の回復も遅れた。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トリップのキャンセル等の被害が軽減された。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。深刻な交通の被害は震源地を中心に比較的狭い範囲の被災地域内交通で発生したものと考えられる。

以下では、事例分析として、2004年に発生した新潟県中越地震を取り上げる。対象とする道路ネットワークは、新潟県全域のリンク数7712本、ノード数5675個から構成され、高速道路・国道・県道・地方道・一般道に分類した。また、県内から県外、県外から県内への交通を考慮したモデルにするため、新潟県を通る東北道・磐越道・関越道・上信越道・北陸道の最も外側のノードより、他の46都道府県庁所在地までの最短経路を検索し、外部ノードとして設定した。

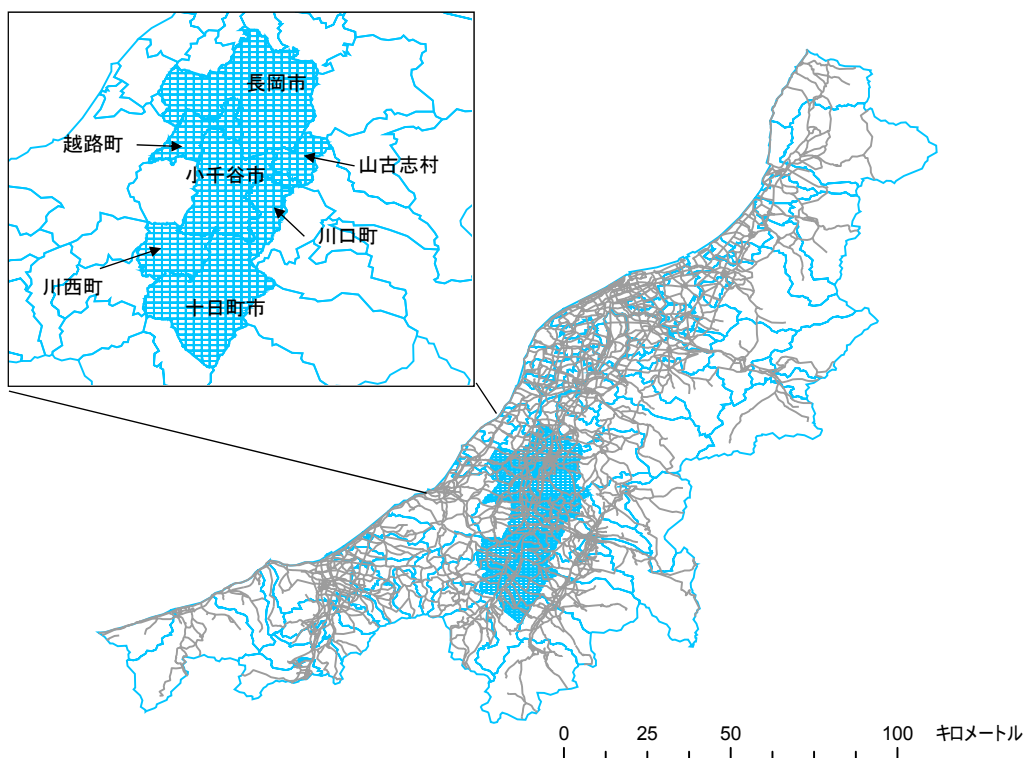


図2 作成した交通発生・集中ゾーン（青枠線）と交通ネットワークデータ（黒線）

最高速度については、高速道路は、100km/h、国道と県道と地方道は、60km/h、一般道は、40km/hとした。さらに式(7)における代表的なパラメーターの値として、 α, β をそれぞれ0.48, 2.82とした²⁸⁾。次いで、小地域統計データと交通ネットワークデータの統合は、以下のように実施した。まず、新潟県全地域を小地域単位に区分すると、計算量が膨大になることが予想される。そこで、詳細なネットワークの分析が必要な地域Rとして、激甚災害指定地域に注目し、図2に示すように、当該地域における小地域単位（1Kmメッシュ）の人口、事業所データを整備し、その他地域については、市区町村単位で整備した。その結果、新潟県全体が合計1197の地域に分割されることとなる。また、図3に示すように、国土交通省北陸地方整備局によって公表されている主要な道路の被災箇所288地点のうち、地理的位置との対応が確認できた241地点の被害状況をデータベース化した³⁰⁾。各被災箇所の日単位の復旧状況については11月30日時点の公表資料より設定している³¹⁾。次いで、各交通の集中・発生ゾーンの中心点と最近距離にある交通ネットワークとを結ぶリンクを作成することで、各地域の事業所統計データと交通ネットワークの結合を行った。

表4に激甚災害指定地域の電気、上水道、都市ガスの復旧日数を示す。各地域の復旧日数として、被災後の企業調査結果¹⁾における各企業の復旧日数の平均値を用いた。試算ケースとしては、平常時 (Case 1)、発災1日後 (Case 2)、5日後 (Case 3)、10日後 (Case 4)の4パターンを対象とする。道路については、上記の被災箇所の復旧状況に加えて、高速道路における一般車両の規制状況を考慮し、北陸道を発災5日後のケースから使用可能、関越道は全期間閉鎖とした(表5)。なお、起終点調査データとして、平成11年度に実施された調査データを用い、新潟県中越地域を発着地点とするデータのみを用いた。従って、通過交通量は含まれていない。

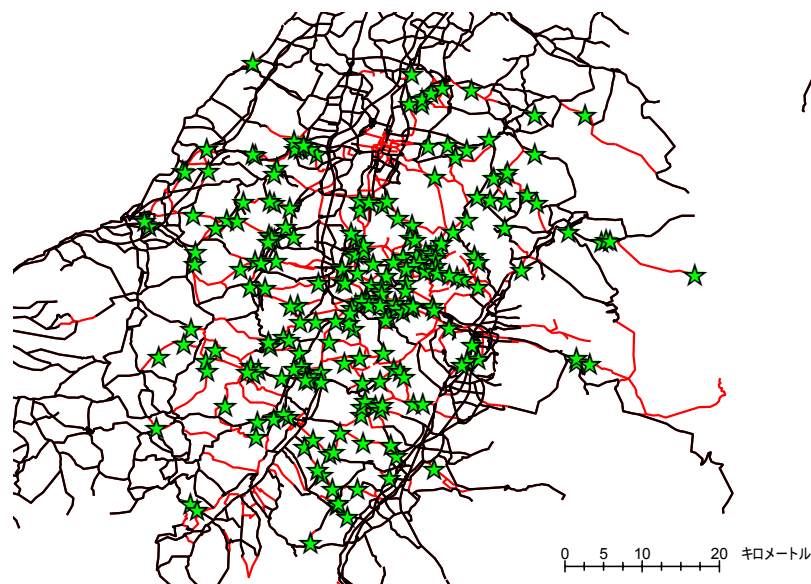


図3 ネットワークの被災状況

(赤線：被災した道路、星印：被災箇所と復旧日時の対応確認済みの点 (2004年11月30日時点))

表4 各地域のライフライン復旧日数

| | 電気 | 上水道 | 都市ガス |
|-------------|-----|------|------|
| 長岡 (越路含む) | 1.5 | 1.9 | 3.0 |
| 小千谷 (山古志含む) | 7.9 | 15.6 | 23.1 |
| 十日町 (川西含む) | 2.0 | 4.1 | 0.4 |
| 川口 | 4.3 | 20.0 | 21.0 |

表5 試算ケース

| 対象 | 道路被害箇所数 |
|-------------------|---------|
| 発災前 (Case 1) | 0 |
| 発災 1 日後 (Case 2) | 241 |
| 発災 5 日後 (Case 3) | 203 |
| 発災 10 日後 (Case 4) | 154 |

3.2 小地域単位の起終点交通量の推計結果

以下では、式(2)～(8)に基づき、小地域単位の起終点交通量の推計を行う。元々の空間スケールに相当する市区町村単位の起終点交通量データをそのまま利用した場合における交通量推計結果の再現性と比較することで、小地域統計データを導入した場合の精度の変化について検討を行う。また、式(1)～(4)中における地域間距離の影響を表わす項 $f(d)$ については、代表的な関数として $f(d) = \exp(-\gamma d)$ で表わされる指数関数を用いた。

表6, 7に貨物車（物流）と貨物車以外（人流）を非線形最小二乗法によって推計した結果をそれぞれ示す。また、市区町村単位で物流と人流の地域間交通量を推計した結果をプロットしたものを図4に示す。交通量は、貨物車が298422台、貨物車以外が725757台である。表中の市区町村間の列は、観測交通量データをそのまま使ったパラメーターの推計結果であるが、各市区町村内々の交通量は除いている。また、小地域を含む推計結果については、小地域単位の交通量の推計値を市区町村単位に集計した結果である。

表6の物流のケースの方が、表7の人流のケースよりも決定係数が小さくなっており、産業別の従業員数や出荷量の原単位を用いた物流の評価モデルの精度の方が人口データを用いた人流の評価モデルよりも低いことがわかる。しかし、式(3), (4)に基づき、小地域統計データを用いて、市区町村単位の分析同様に「市区町村間」の推計を行った場合は、物流の推計精度が決定係数の測度において向上している。小地域単位の分析を導入することで、より正確な地域間距離の計算や産業の立地状況が反映され、推計精度を高めた可能性が考えられる。

一方、式(2)を用いた市区町村内の小地域間の推計結果を市区町村単位で集計した結果は、市区町村間の推計結果よりも決定係数が大きくなった。図5に小地域間の推計結果を示すが、交通量が突出したデータがあり、その観測値の再現性をある程度確保することで、決定係数もある程度大きくなる。パラメーターの値からも、その他の地域間交通量の統計的關係とは異なっており、地域内交通の推計における距離の影響（小地域間距離の最小値の半分）などがあるものと考えられる。

表6 貨物車（物流）を対象とした空間相互作用モデルの推計結果

| 変数 | 市区町村間 (式(1)) | 小地域間 (式(2)) | 小地域→市区 町村(式(3)) | 市区町村→小 地域(式(4)) |
|--------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| k | 6.58 | 0.49 | 0.39 | 0.44 |
| α | 0.49 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| β | 0.46 | 0.49 | 0.47 | 0.45 |
| γ | 0.13 | 0.15 | 0.14 | 0.16 |
| R^2 (決定係数) | 0.50 | 0.85 | 0.61 | 0.57 |

表7 貨物車以外（人流）を対象とした空間相互作用モデルの推計結果

| 変数 | 市区町村間 (式(1)) | 小地域間 (式(2)) | 小地域→市区 町村(式(3)) | 市区町村→小 地域(式(4)) |
|--------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| k | 0.01 | 0.44 | 0.27 | 0.24 |
| α | 0.70 | 0.43 | 0.39 | 0.40 |
| β | 0.70 | 0.44 | 0.39 | 0.39 |
| γ | 0.14 | 0.16 | 0.13 | 0.12 |
| R^2 (決定係数) | 0.71 | 0.95 | 0.73 | 0.71 |

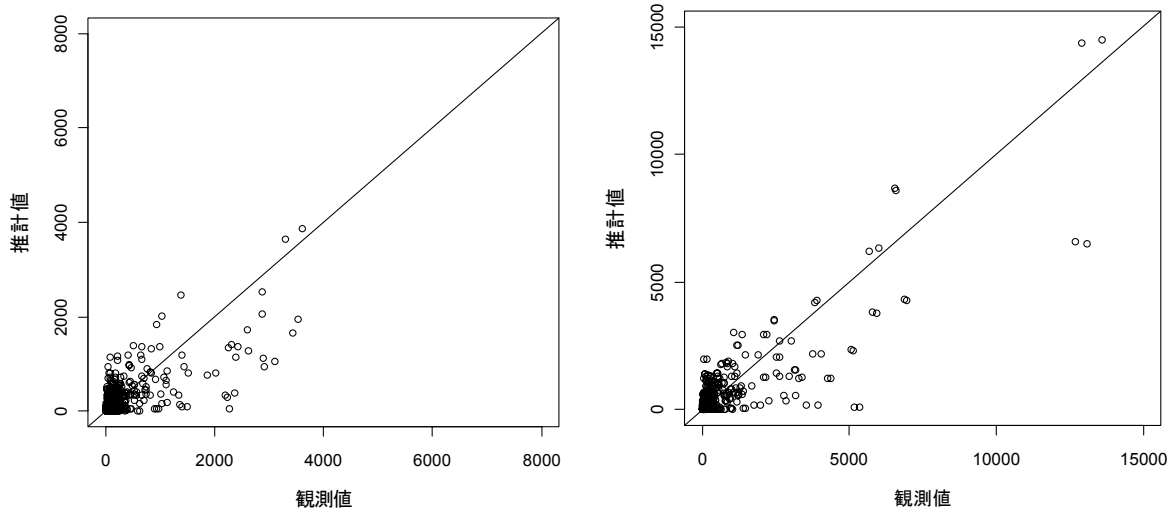


図4 小地域と市区町村単位の利用した貨物車（左）と貨物車以外（右）の交通量の推計結果と観測値の比較（単位：台，式（3），（4）を利用）

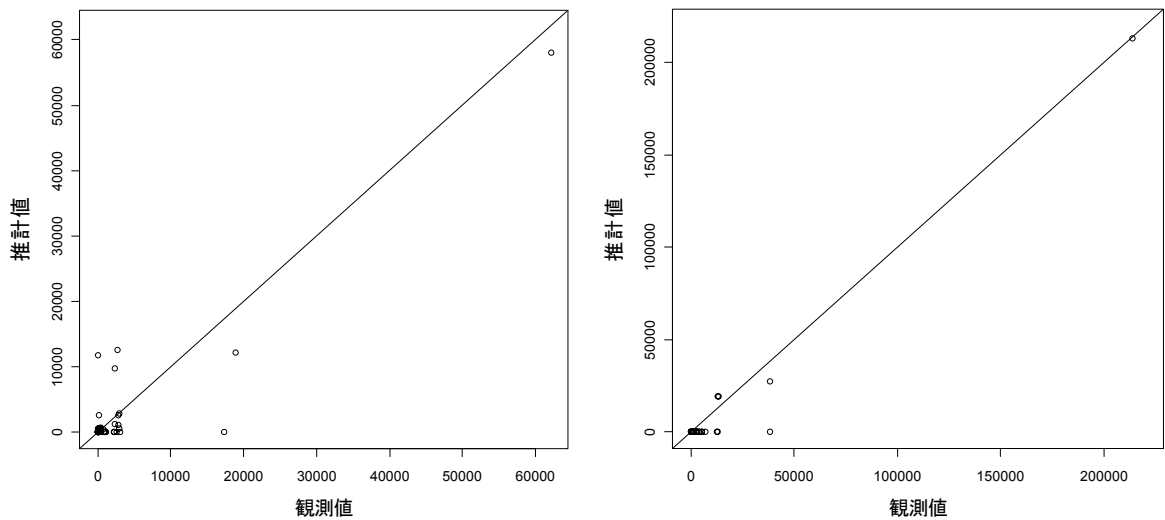


図5 小地域単位のみを用いた貨物車（左）と貨物車以外（右）の交通量の推計結果と観測値の比較（単位：台，式（2）を利用）

3.3 交通量の配分結果

3.1の諸条件に基づいて試算した各被災ケースにおける交通量と平常時における交通量（図6）との比較結果を図7～図9に示す。交通量は、各道路リンクにおける上下線の合計値とし、被災ケースの交通量が平常時の交通量に比べてどれだけ増減したかを示している。ここでは、貨物車以外の交通量は災害時においても変化しないものと仮定しているため、産業部門の被災による影響部分のみを抽出した仮想的な状況におけるシミュレーション結果となる。また、全てのCaseの試算結果を、総交通量と1台あたり平均旅行時間の観点からまとめたものを図10に示す。

まず、平常時の交通量となる図6のケースをみると、対象としている中越地域を中心に交通量が多く分

布していることが分かる。図10に示すように、このときの交通量は全体で1041747台、平均旅行時間は4.2時間となっている。一方、図7に示す被災直後（Case 2の交通量からCase 1の交通量を引いた増減量）においては、全ての供給系ライフライン（e.g. 電力、水道、ガス）が途絶しているため、被災地域を中心に産業活動が低下し、交通量が平常時と比較して20万台ほど減少している（Case 1: 1041747台、Case 2: 844483台）。しかし、被災地内の交通網が被害を受け、北陸道と関越道の一般交通の利用が制限されているため、被災地周辺や被災地内の利用可能な道路には交通量が集中して増加していることが分かる。渋滞回避のための通行規制や復旧優先順位の設定などよりきめ細かな意思決定の上で、本ケーススタディのような空間スケールによる分析が重要になることがうかがえる。

基本的に、供給系ライフラインの途絶は産業活動を低下させ、交通量の減少と混雑の減少による旅行時間の減少をまねく。一方、交通網の被害はより交通時間のかかる代替ルートを選択と通行可能な道路への交通量の集中を招くため、旅行時間は増加する。すなわち、供給系ライフラインと交通網の機能回復状況のバランスで旅行時間の大きさが決定されることとなる。平均旅行時間は図10よりCase 1とCase 2で同程度の所要時間であるため、全体としてみれば、産業活動の低下の影響も大きく、交通網被害による渋滞や迂回による交通時間の増加は発生しない結果となった。

供給系ライフラインが徐々に回復している災害発生から5日後のCase 3（図8）と10日後のCase 4（図9）では、交通量は全体で2万台ほど（Case 3: 864792台、Case 4: 864928台）回復するが、被災直後のCase 2（図7）に比べて交通量が増加している道路リンクの数が減少している。図10に示すCase 3, 4の平均旅行時間も小さくなっており、道路の機能回復が供給系ライフラインの機能回復とそれに応じた産業部門の生産回復よりも早いことが影響しているものと考えられる。また、Case 4の方がCase 3に比べて、交通量の増加リンクの数が若干少なくなっていることも分かる。Case 3とCase 4の供給系ライフラインの機能回復状況の違いは、小千谷市と山古志村における電力の供給状態のみであるため、交通量の回復量も全体で136台程度と少ない。一方、道路の通行止めは全体の約20%に相当する49箇所がこの期間中に回復しており、Case 3と4の間においても供給系ライフラインよりも道路機能の回復の方が早く、交通渋滞に与える影響が小さくなってきているものと考えられる。ただし、本ケーススタディは新潟県を横断、縦断する通過交通等を考慮しておらず、また緊急・復旧車輛の影響を考慮していないため、実際の災害時の旅行時間はより大きなものとなる。

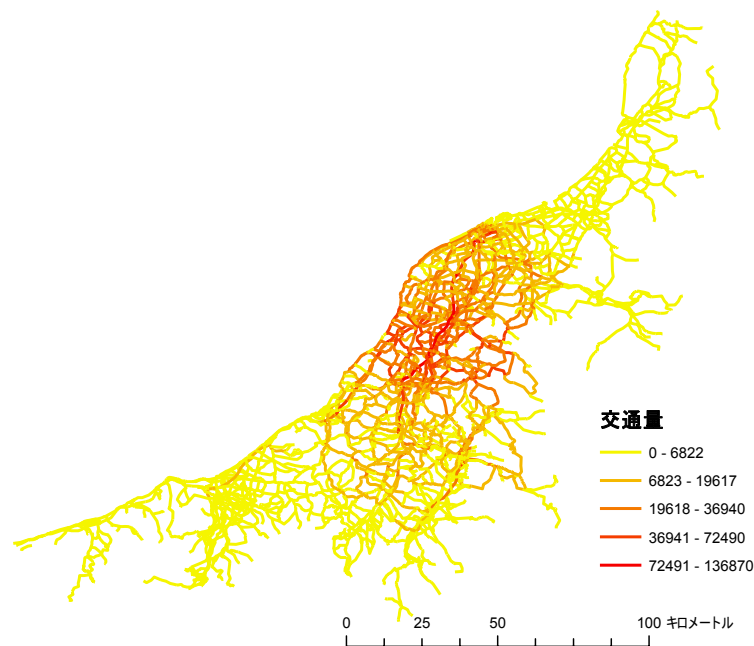


図6 平常時（Case 1）における各リンクを通過する交通量（台）の推計結果

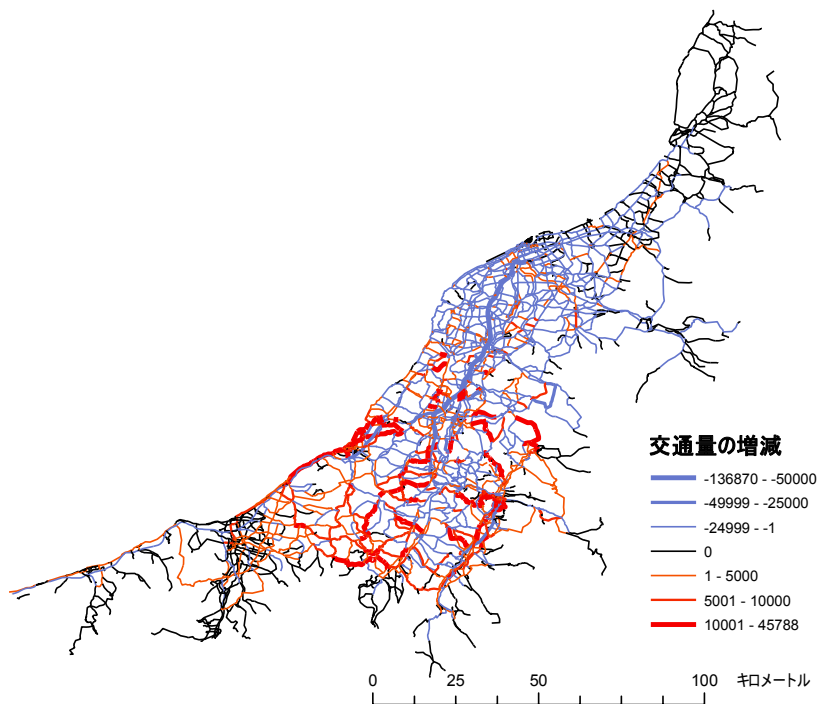


図7 各リンクを通過する交通量（台）の推計結果の比較
 (Case 2の交通量からCase 1の交通量を引いた増減量)

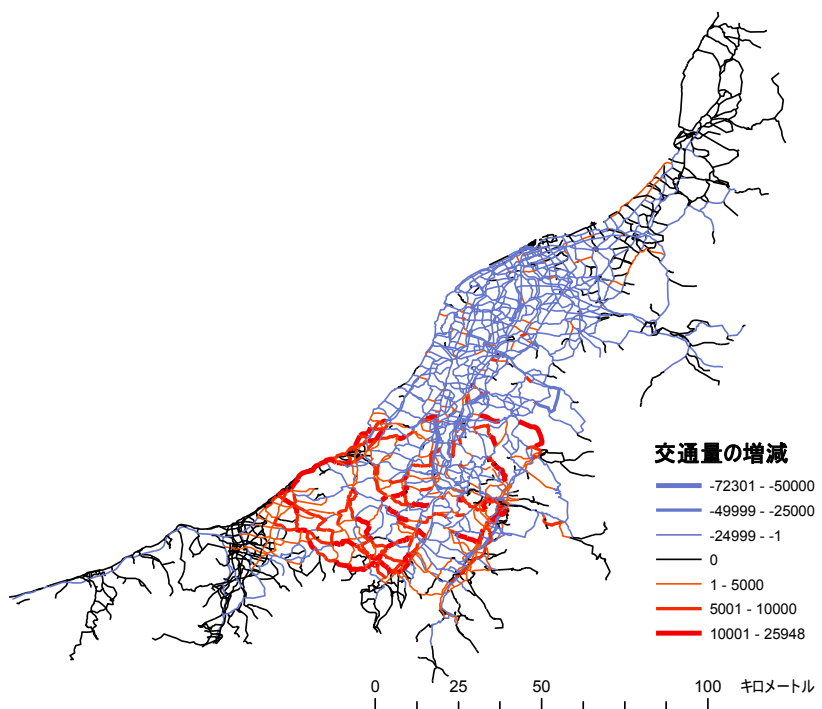


図8 各リンクを通過する交通量（台）の推計結果の比較
 (Case 3の交通量からCase 1の交通量を引いた増減量)

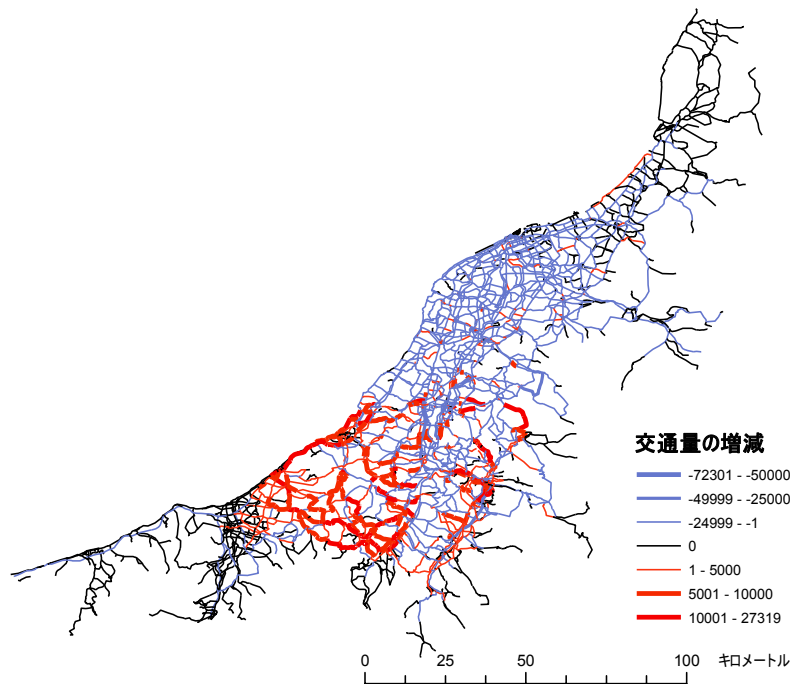


図9 各リンクを通過する交通量（台）の推計結果の比較
 (Case 4の交通量からCase 1の交通量を引いた増減量)

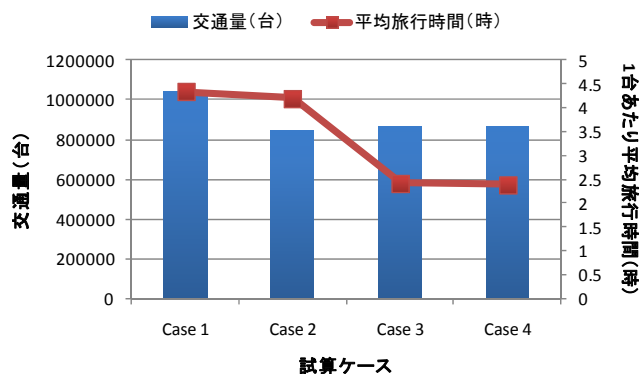


図10 各ケースにおける交通量（台）と平均旅行時間（時）の推計結果のまとめ

4. まとめ

本研究では、地震災害時における局所的な社会基盤被害の影響を分析するために、小地域メッシュ統計を活用した地震災害による産業部門の交通量や経路変更への影響評価方法について検討を行った。このアプローチは既往の災害経済影響評価で用いられている手法と比較して、大量のデータ処理や仮定の吟味が必要となっており、災害の事後分析や被害推計などへの適用は充分に行われてこなかった。本検討においてもデータ作成方法や仮定設定とその影響の検討が中心的課題となっている。

まず、研究の鍵となる小地域単位の起終点交通量の予測にあたっては、地理学分野で用いられてきた空間的相互作用モデルを用いて統計的に推計することで、より大きな空間スケールで集計されている起終点調査データを小地域メッシュ単位に按分するアプローチを行った。小地域単位のデータを用いる

ことで、貨物車と乗用車などのそれ以外車輛の両方において、調査データの再現性がより高くなる可能性があることが示された。災害時の交通量については、電力、水道、ガスの供給停止の影響に関する調査結果を基に、各産業部門の活動水準を予測し、得られた活動水準に応じて起終点交通量調査データの推計を行った。このデータを基に交通経路選択モデルを適用することで取引のための交通時間を予測するが、本研究における交通量配分には、経路間の所用時間が等しくなる利用者均衡配分モデルを用いた。

次いで、2004年の新潟中越地震を対象としたケーススタディを実施し、産業部門への影響について検討を行った。激甚災害指定地域における水道、ガス、電力の復旧日数と241箇所の道路被害/復旧状況に関する情報を集め、災害発生から1, 5, 10日後を対象としたシミュレーションを実施した。分析の結果、交通網が大規模な被害を受けている状況においても、供給系ライフライン被害による産業活動の低下の影響も大きく、県全体の平均的な旅行時間には影響しない結果となった。しかし、被災地周辺を中心に、交通量が集中し、混雑を招いているリンクも多数発生しており、災害時の交通規制や復旧の優先順位を設定するためには、より小さな空間スケールでの分析が必要となることがうかがえた。また、本検討は復旧車両や緊急車両を考慮していないため、実際の混雑はより大きくなるものと考えられる。

以上、地震災害時の社会基盤被害が産業部門の経済活動や交通流へ及ぼす影響について、小地域統計を活用した検討を行った。災害影響分析が対象とする時空間スケールの詳細化は、各社会基盤管理者やユーザーの意思決定を行う上で有効であり、本検討は課題抽出のための一事例になるものと考えられる。本研究では、分析に必要となるデータと整理方法、小地域単位のシミュレーション方式を中心に事例を提供しているものの、モデル面においては、最新の研究成果を取り入れる余地が多く残されている。小地域の起終点交通量データの推計にあたっては、詳細な土地利用を考慮した交通モデルなども開発されつつあり、災害時の交通行動を考慮したモデル作成とあわせて検討が必要となる。また、災害時における交通量観測結果に基づく検証や建物被害等の推計結果と併せた検討も重要な課題となる。

謝 辞

本研究は、財団法人統計情報研究センターの助成研究として実施した。また、匿名の査読者の方からは大変貴重なご意見を賜った。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 京都大学防災研究所，電力中央研究所，中越復興市民会議：2004年新潟県中越地震による県内事業所への影響調査 単純集計結果，(<http://www.cf-network.jp/>)，2006年。
- 2) Hori, M., Ichimura, T. and Oguni, K. : Integrated Earthquake Simulation – Estimation of Strong Ground Motions and Structural Response, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol.81, 2006年, pp.331-339.
- 3) 築山勲，佐藤忠信，古田均，森まゆこ：広域被害における水道管復旧戦略支援システムの開発，自然災害科学，Vol.24, No.4, 2006年, pp.367-377.
- 4) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，1993年，pp.51-56.
- 5) 財団法人統計情報研究センター：<http://www.sinfonica.or.jp/>，2008年。
- 6) Rose, A., Benavides, J., Chang, S., Szczesniak, P., Lim, D.: The Regional Economic Impact of an Earthquake: Direct and Indirect Effects of Electricity Utility Damages, Journal of Regional Science, Vol.37, No.3, 1997年, pp.437-458.
- 7) 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, 2001, pp.39-65.
- 8) 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, 2002, pp.223-246.
- 9) 高橋顕博，安藤朝夫，文世一：阪神・淡路大震災による経済被害推計，土木計画学研究・論文集，No.14,

1997年, pp.149-156.

10) 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, 2004年, pp.367-374.

11) Tatano, H. and Tsuchiya, S.: A Framework of Economic Seismic Loss Estimation for Transportation Network Disruption, Natural Hazards, Vol.44, 2008, pp.253-265.

12) 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, 第34回土木計画学研究発表会・講演集, Vol.34 (CD-ROM), 2006年.

13) 崔宰栄, 川島一彦: 北海道南西沖地震が交通需要の変動に与える影響, 土木学会論文集 No.543/I-36, 1996年, pp.259-269.

14) Nojima, N. and Sugito, M., "Simulation and Evaluation of Post-earthquake Functional Performance of Transportation Network," Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000, paper No.1927 (CD-ROM).

15) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集A, Vol. 64, No. 2, 2008年, pp.208-216.

16) 陳光輝: 阪神大震災による神戸市の事業所被害: メッシュデータによる推計, 国民経済雑誌, Vol.174, No. 4, 1996年, pp.89-96.

17) 梶谷義雄, 水上裕治, 皆川勝, 吉田郁政: 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, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, 2009年, pp.219-220.

18) Yamano, N., Kajitani, Y., Shumuta, Y.: Modeling the Regional Economic Loss of Natural Disasters: The Search for Economic Hotspots, Economic Systems Research, Vol.19, No.2, 2007, pp.163-181.

19) 鳥居広頭, 福田大輔, 屋井鉄雄: マイクロシミュレーションを活用した震災後道路ネットワークの容量分析, 第26回交通工学研究発表会論文報告集, 2006年, pp. 245-248.

20) 総務省・統計局: 平成13年事業所・企業統計調査, <http://www.stat.go.jp/data/jigyoyu/2001/index.htm>, (確認日: 2009/12/21) .

21) 総務省・統計局: 平成12年国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/index.htm>, (確認日: 2009/12/21) .

22) 国土交通省・道路局: 平成11年自動車起終点調査, 2006年.

23) 国土交通省・道路局: 全国貨物純流動調査(物流センサス), <http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/census/census.html>, (確認日: 2009/12/21) .

24) 財団法人 日本地図センター: JMCマップ(日本), <http://www.jmc.or.jp/data/jmcmmap.html>, (確認日: 2009/12/21) .

25) 杉浦芳夫: 地理空間分析, 朝倉書店, 2003年.

26) 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田善治: 製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計, 自然災害科学論文集, Vol.23 No.4, 2005年, pp.553-564.

27) 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田善治: 非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計, 自然災害科学論文集, Vol.24, No.3, 2005年, pp.247-255.

28) 太田勝敏, 古木守靖: 道路交通需要予測の理論と適用 第I編 利用者均衡配分法の適用に向けて, 土木学会, 2003年.

29) 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年.

30) 社団法人交通工学研究会: 交通容量データブック 2006年.

31) 国土交通省, 新潟県: 新潟県中越地震による一般車両通行禁止状況について(12月17日判明分), <http://www.hrr.mlit.go.jp/road/niigata/> (確認日: 2009/12/28).

32) 国土交通省, 新潟県: 新潟県中越地震による一般車両通行禁止状況について(11月30日判明分), <http://www.hrr.mlit.go.jp/road/niigata/> (確認日: 2004/12/01).

(受理: 2009年8月17日)

(掲載決定: 2010年2月26日)

Economic Impacts of Infrastructure Damages on Industrial Sector
–Traffic Analysis Based on Small Area Statistics during the 2004
Mid-Niigata Earthquake

KAJITANI Yoshio ¹⁾

1) Member of JAEE, Research Scientist, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

ABSTRACT

This paper proposes a basic model for evaluating economic impacts on industrial sectors under the conditions that multiple infrastructures are simultaneously damaged during the earthquake disasters. Especially, focusing on the available economic data developed in the smallest spatial scale in Japan (small area statistics), economic loss estimation model based on the small area statistics and its applicability are investigated on. In the detail, a loss estimation framework, utilizing survey results on firms' activities under electricity, water and gas disruptions, and route choice models in Transportation Engineering, are applied to the case of 2004 Mid-Niigata Earthquake.

Key Words: Small Area Statistics, Earthquake Disaster, Economic Impacts, Infrastructures, User Equilibrium Model