

SCGE モデルを用いた基幹交通網に関する 地震リスクのパブリックマネジメント

PUBLIC MANAGEMENT ON TRANSPORT INFRASTRUCTURE
AGAINST EARTHQUAKE RISK –BY SCGE MODEL

土屋 哲¹・多々納 裕一²

¹ 修士（工学） 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (E-mail: tsuchiya@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp)

² 博士（工学） 京都大学防災研究所教授 総合防災研究部門 (E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp)

本論文では、空間的応用一般均衡モデルを用いて地域間の物資・旅客流動や産業連関を考慮した地域経済のモデル化を行い、交通施設の機能損傷に起因する経済被害の空間的帰着構造を分析する枠組みについて述べる。次いで、この枠組みを用いて、東海地震の警戒宣言発令時や東海地震発生時における基幹交通網の機能低下の影響や、ネットワーク整備などの被害軽減施策の効果を定量的に評価する。また、構築したモデルをベースとした巨大地震リスクのマネジメントのあり方について検討する。

キーワード：地震リスクマネジメント，経済被害，基幹交通網，空間的応用一般均衡モデル。

1. はじめに

我が国は、国土の大部分が地震、台風などの大規模自然災害の脅威にさらされている。特に、人口・資産の集中した都市域において大規模災害が発生した場合、その被害は甚大なものとなりうる。

また、現代の我々の生活は、地域間の交流・交易という点で基幹交通網に大きく依存している。これは同時に、洪水や地震などの自然災害時におこる交通の断絶によって発生する社会的損失も大きくなる可能性があることを意味する。実際に、1995年の阪神・淡路大震災や2000年の東海豪雨の時には、交通の途絶により旅客輸送・物資輸送に大きな影響が及んだ。

一般に、地震災害による被害は、地震によってもたらされる直接的な人的・物的損害を直接被害として、直接被害を起因として生じる社会・経済的影響を間接被害として区別される。特に都市域の人口・資産の集積した地域における大規模な災害は、直接的な損害を被った地域に加えて、被災をまぬがれた地域にも社会経済的な損失を発生させ、間接被害が直接被害に比べて無視できないほど大きいことが既往の研究結果から示されている^{1),2)}。このことは、直接被害の軽減に加えて間接被害を小さくする方策が必要であることを意味している。

現在、我が国では東海地震や東南海・南海地震の発生が懸念されている。これらの地震によって発生する被害は当該地域への直接的被害ばかりでなく、東海道新幹線や東名高速道路といった基幹交通の分断・機能麻痺に起

因して東西の交流・交易が遮断されることにより間接的被害という形で全国に波及することが懸念されている。その場合、被害額は甚大なものになるとの予想もある。

国や自治体が巨大災害に対してリスクマネジメントを実施していく際、実施コストやマネジメント施策により期待される効果などを検討しながら、より有効な政策オプションの実施が求められることは想像に難くない。しかしながら、災害の影響は極めて広範囲に及び、地域住民や企業など多くの主体を潜在的当事者として問題に巻き込むものと予想される。このとき、政策の実施が当事者間の利害関係を変化させる可能性もある。このような状況下で政策決定を行っていくためには、種々の政策オプションの実施に対する結果の帰着について各主体に理解を促し、多数の主体の合意を得ることが求められるものと考えられる。そのための第一歩として、上で想定するような巨大地震が発生した場合に何が起きるかを描くことは重要であろう。

このような背景のもと、本論文では巨大地震リスクを対象に、地震の発生による経済的影響として、高速道路や高速鉄道といった基幹交通網の被災が社会に及ぼす影響を分析するための枠組みを提示することを第一の目的とする。具体的には、地震災害関連シナリオによる交通ネットワーク機能の低下を、迂回や混雑に伴う地域間交通費用の変化として表現し、それが地域・産業間の連関性をもつ経済システムを通して最終的に地域の厚生水準に現れる影響を被害として計量化する。さらに、このようにして求め

た地域別の被害が入力値によってどのくらいの幅を持って変化するかについて、代替路線整備の被害軽減効果と、迂回交通による既存代替路線の混雑という二つの点から検討を行い、安全・安心な国土の形成のための基幹交通ネットワークのあり方に関する代替案について考察する。最後に、本モデルを中心に据えた帰着の議論と基幹交通のマネジメントのあり方に言及し、今後の課題を整理して本論文を結ぶ。

2. 既往研究と本論文の視点

地震災害時の交通機能の損傷による経済被害に関する分析についてはいくつかのアプローチがあり、例として以下の研究をあげることができる。Gordon et al.²⁾ は、1994年のノースリッジ地震で交通施設の被災が業務へ及ぼした影響を、空間配置モデルを用いて分析し、この種の被害が65億ドル以上であると推計して、その額が構造物の被害総額(250億ドル以上)に比べてずっと小さいものの、無視できない大きさであることを示した。高橋ら³⁾ は、計量経済モデルと産業連関表を組み合わせ、阪神・淡路大震災の間接的な影響を捉えるために生産設備および輸送施設の被害を考慮した経済被害推定モデルを構築し、被害推計を行っている。また、Ueda et al.⁴⁾ は、空間的応用一般均衡モデル(SCGEモデル)を用いて、高速鉄道網が1年間被災した場合の経済被害を計算し、そのインパクトや被害の地域間波及について知見を得ている。

このように複数のアプローチが可能の中で、本論文ではSCGEモデルの枠組みにより経済被害の評価を考えていくこととする。その第1の理由は、SCGEモデルの特徴である地域間相互依存関係のメカニズムにより、局所的に発生する交通施設の被災の影響が周辺地域および全国へと波及しうることを、モデルのアウトプットから地域別経済被害を求めて把握できる点にある。

本論文でSCGEモデルを用いる第2の理由は、SCGEと交通ネットワークとの関係にある。Fig. 1は、物理現象としての地震の発生から人的被害、生産資本の被害、交通インフラの被害を予測するプロセスと、これらの被害情報を入力として交通モデルやSCGEモデルを用いて最終的に地域別産業セクター別の経済被害を計算するプロセスを統合的に見た、総合地震被害シミュレーションモデルのプロセスの一例を表している。Fig. 1から分かるように、交通モデルとSCGEモデルは交通需要と交通費用という要素を通して相互依存の関係にある。したがって、社会基盤の整備または損傷の効果は、それによって交通行動に起こる変化を通じて最終的に定まる交通費用をSCGEモデルに入力することで、同モデルの出力か

ら評価がなされる。

しかしながら、従来SCGEモデルを用いた分析では、このような評価を行う際に地域間交通費用(あるいは費用率)を直接政策変数として外生的に与えて分析を行うことが多かった。本論文ではこの点に着目し、想定される交通ネットワーク機能の条件から交通費用を計算するプロセスを明示的に経て、SCGEモデルを用いた分析の枠組みを示すこととする。このようにすることでSCGEモデルが、交通費用を決定する交通モデルと明確に結びつくばかりでなく、その前の段階で地震発生シナリオから直接被害をシミュレートするモデルとも一貫したつながりを持つようになる。したがって、物理現象としての地震の発生から、直接的被害の予測を経て地域に帰着する経済被害を予測するという、社会技術として有意義な被害予測の方法論体系(Fig. 1全体)を構築することができる。

もちろん、この方法論体系が完全に構築されるにはFig. 1のすべての要素についてデータセットや関数式などが準備されていないといけない。本論文ではまだその段階には至っておらず、Fig. 1のうち、巨大地震を想定したインフラ被害状況を所与の入力変数として、基幹交通ネットワークを反映したSCGEモデルを構築し、交通網の被災による地域別被害を計算する部分のみを扱う。その結果、地震によって局所的に生じる交通施設の被災に伴い被害が地域間に波及・帰着することと、巨大地震に対する国土レベルでの交通ネットワークの整備状況を検討し、被害軽減のための代替案に関する基礎的な分析を行うことができる。

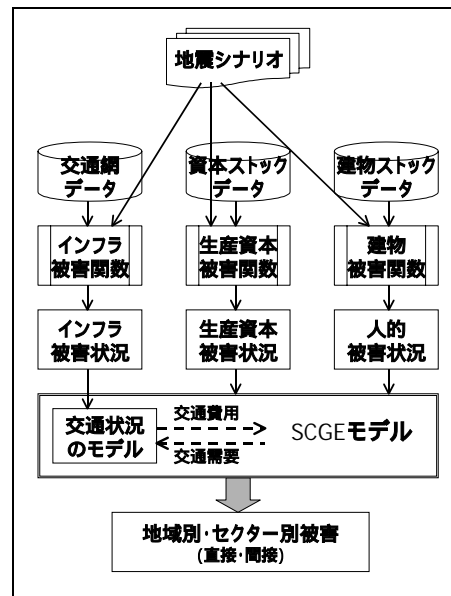


Fig. 1 総合地震被害シミュレーションのプロセス

3. SCGE モデルの構築と被害計量化の枠組み

3.1. 家計の行動モデル

本章では、SCGE モデルの定式化を行い、被害を計量化するプロセスを示す。まず、家計の行動を定式化しよう。家計は、一定の所得制約下で効用を最大にするように各財の消費量を決定する。家計は消費活動をすべて居住地域内で行い、ここでは財の消費量に関してのみ意思決定を行うものとする。このとき、家計の最適な財消費行動は以下の最適化問題により記述される。

$$U^k(d_i^k, y^k) = \max \left\{ \sum_{i=1}^M (\gamma_i^k)^{\frac{1}{\varphi}} (d_i^k)^{\frac{\varphi-1}{\varphi}} \right\}^{\frac{\varphi}{\varphi-1}} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^M q_i^k d_i^k = y^k = w^k L^k + rK^k \quad (2)$$

ただし、

U^k : 家計の効用、

y^k : 家計の所得、

γ_i^k : 財消費に関するシェアパラメータ、

d_i^k : 財 i の消費量、

φ : 財消費に関する代替パラメータ、

q_i^k : 財 i の消費地価格、

w^k, r : 賃金率および利率、

L^k, K^k : 家計が保有する労働・資本の量、

である。添字 k は地域 k の変数・パラメータであることを表す。式(1), (2)を解き、消費者の需要関数として次式を得る。

$$d_i^k(q^k) = \frac{\gamma_i^k (q_i^k)^{1-\varphi} y^k}{\sum_{j=1}^M \gamma_j^k (q_j^k)^{1-\varphi} q_j^k} \quad (3)$$

3.2. 企業の行動モデル

地域 k に立地する企業 i は、地域 l で生産され、自地域内に輸送されてきた中間投入財 j と労働、資本、そして知識獲得のための業務トリップを生産要素として、規模に関して収穫一定となる一次同次の技術を用いて商品 i を生産するものと仮定する。Fig. 2 に企業の生産構造を示す。このような階層化構造により、企業の利潤最大化行動を以下の3段階の最適化行動モデルで記述する。

レベル 1 (生産量および中間財投入量の決定)

$$\pi_i^k = \max p_i^k Q_i^k - \left\{ \sum_{j=1}^M q_j^k X_{ji}^k + c_{vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box}) V_i^k \right\} \quad (4)$$

$$\text{subject to } Q_i^k = \min \left\{ \frac{X_{1i}^k}{a_{1i}^k}, \dots, \frac{X_{Mi}^k}{a_{Mi}^k}, \frac{V_i^k}{a_{vi}^k} \right\} \quad (5)$$

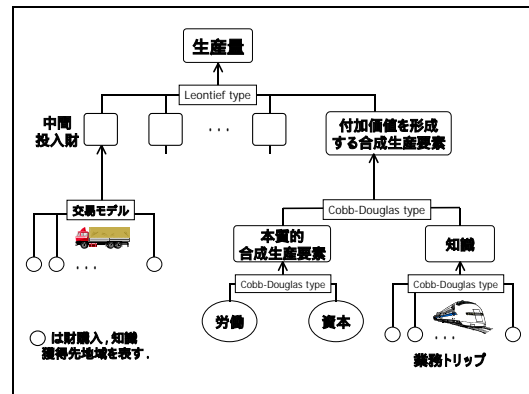


Fig. 2 企業の生産構造

レベル 2 (労働、資本投入量の決定)

$$c_{Vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box}) V_i^k = \min w^k L_i^k + rK_i^k + c_{Ti}^k(\tau^{k\Box}) \kappa_i^k \quad (6)$$

$$\text{subject to } V_i^k = \alpha_{2i}^k \left\{ (L_i^k)^{\delta_{Li}^k} (K_i^k)^{\delta_{Ki}^k} \right\}^{1-\beta_i^k} (\kappa_i^k)^{\beta_i^k} \quad (7)$$

レベル 3 (業務トリップ投入量の決定)

$$c_{Ti}^k(\tau^{k\Box}) \kappa_i^k = \min \sum_{l=1}^N \tau^{kl} n_i^{kl} \quad (8)$$

$$\text{subject to } \kappa_i^k = \alpha_{3i}^k \prod_{l=1}^N (n_i^{kl})^{\delta_n^{kl}} \quad (9)$$

ただし、

π_i^k : 企業 i の利潤、

p_i^k : 財 i の生産者価格、

Q_i^k : 企業 i の生産量、

q_i^k : 財 i の消費地価格、

X_{ji}^k : 財 i の生産に使われる中間投入財 j の量、

V_i^k : 企業 i で付加価値を形成する合成生産要素、

c_{Vi}^k : V_i^k の単位費用関数、

a_{ji}^k : 企業 i の生産に対する中間財投入比率、

a_{vi}^k : 企業 i の生産に対する合成生産要素投入比率、

κ_i^k : フェイス・トゥ・フェイスコミュニケーションにより獲得する知識、

c_{Ti}^k : κ_i^k の単位費用関数、

τ^{kl} : 地域 k から l への一般化旅客交通費用 (\Box は任意の地域を表す)、

L_i^k, K_i^k : 企業 i に提供される労働、資本の量、

$\delta_{Li}^k, \delta_{Ki}^k$: 企業 i の労働、資本のシェアパラメータ、

β_i^k : 企業 i の本質的合成生産要素 (L_i^k, K_i^k のみからなる合成生産要素) と知識の代替パラメータ、

n_i^{kl} : 企業 i の地域 k から l へのトリップ数、

δ_n^{kl} : 業務トリップの目的地選択に関するパラメータ、

$\alpha_{2i}^k, \alpha_{3i}^k$: 係数、

である。添字 k は地域 k の変数・パラメータであることを表す。式(4) - (9)を解くと、以下の需要関数を得る。

・業務トリップ需要関数

$$n_i^{kl} = \frac{\delta_n^{kl} \beta_i^k c_{Vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box})}{\sum_{l=1}^N \delta_n^{kl} \tau^{kl}} \quad (10)$$

・労働需要関数，資本需要関数

$$L_i^k = \delta_{Li}^k \frac{(1 - \beta_i^k) c_{Vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box})}{w^k} \quad (11)$$

$$K_i^k = \delta_{Ki}^k \frac{(1 - \beta_i^k) c_{Vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box})}{r} \quad (12)$$

(ただし, $\delta_{Li}^k + \delta_{Ki}^k = 1 \quad \forall i, k$)

・中間財需要関数，合成生産要素需要関数

$$X_{ji}^k = a_{ji}^k Q_i^k \quad (13)$$

$$V_i^k = a_{vi}^k Q_i^k \quad (14)$$

ただし, $\beta_i^k \neq 0$ のとき,

$$c_{Vi}^k = \frac{1}{\alpha_i^k} \left\{ \frac{\prod_{l=1}^N (\tau^{kl})^{\delta_n^{kl}}}{\beta_i^k} \right\}^{\beta_i^k} \left\{ \frac{(w^k)^{\delta_{Li}^k} (r)^{\delta_{Ki}^k}}{1 - \beta_i^k} \right\}^{1 - \beta_i^k} \quad (15)$$

であり, $\beta_i^k = 0$ のとき,

$$c_{Vi}^k = (\alpha_i^k)^{-1} (w^k)^{\delta_{Li}^k} (r)^{\delta_{Ki}^k} \quad (16)$$

である ($\alpha_i^k = \alpha_{2i}^k \cdot \alpha_{3i}^k$)。

3.3. 地域間交易モデル

地域間交易に関する定式化は、空間価格均衡モデルに確率要因を導入して構築することとする。地域 l の企業が生産地 k を財 i の購入先として選ぶ確率を

$$S_i^{kl} = \frac{Q_i^k \exp\{-\lambda_i (p_i^k (1 + \phi_i^{kl}))\}}{\sum_{m=1}^N Q_i^m \exp\{-\lambda_i (p_i^m (1 + \phi_i^{ml}))\}} \quad (17)$$

で与える。ここに、 ϕ_i^{kl} は輸送費用率を表す。また、 λ_i はスケールパラメータである。式(17)を用いると地域 l における財 i の消費地価格均衡条件は式のようなになる。

$$q_i^l = \sum_{k=1}^N S_i^{kl} p_i^k (1 + \phi_i^{kl}) \quad (18)$$

一方で、生産者価格の均衡は次の式により表される。

$$p_i^k = \sum_{j=1}^M q_j^k a_{ji}^k + c_{vi}^k(w^k, r, \tau^{k\Box}) a_{vi}^k \quad (19)$$

3.4. 平常時の経済均衡

平常時の経済社会の均衡では、生産者価格・消費地価格を通して財市場が地域間で均衡し、労働・資本市場が地域内で均衡すると仮定している。以下に、これらの均衡に関連する式を示す。価格均衡に関しては式(17) - (19)が、労働・資本と財に関しては、生産部門・家計部門の需要関数(式(3), (7), (10) - (13))と、以下の式(20) - (23)が成立する。

a. 生産要素市場

生産要素(労働 L^k , 資本 K^k)市場は、家計が地域間移動を行わないという条件から各地域で均衡する。

$$\sum_{i=1}^M L_i^k = L^k \quad (20)$$

$$r \left(\sum_k \sum_i K_i^k - K \right) = \sum_k \sum_i p_i^k EX_i^k - \sum_l \sum_j q_j^l IM_j^l \quad (21)$$

ただし、 EX_i^k , IM_j^l はそれぞれ輸出、輸入を表す。

b. 財市場

財市場に関しては、発地・着地ベースのそれぞれについて均衡式がつけられる。

$$Q_i^k = \sum_{l=1}^N z_i^{kl} (1 + \phi_i^{kl}) \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^N z_i^{kl} = \sum_{j=1}^M X_{ij}^l + d_i^l - IM_i^l \quad (23)$$

ここに z_i^{kl} は、財 i の地域 k から l への交易量を表す。

3.5. 交通網被災シナリオ下における経済均衡

(1) モデル入力値となる各変数に関する考え方

次に、災害の発生に伴う交通施設の被災等により交通機能が低下した状況で達する均衡を考える。以下、Fig.3に示すようにラベル(0), (1)を用いて平常時と被災下を区別する。

a. 生産資本の被害状況の反映

生産資本の被害を考慮する場合は、これを被災下で家計が保有する資本量が被災前よりも減少することで表現できる。直接被害を受ける地域 $k=k^*$ にのみ生産資本の被害が生じるとすると、新たな均衡条件式のひとつとして

式(21)の左辺 $\sum_i K_i^{k(0)}$ を $\sum_i K_i^{k*(1)}$ で置き換え

たものを用いる。

b. 人的被害の状況の反映

人的被害については、家計から企業への労働力の減少という形で a. と同様に考えることができる。直接被害を受ける地域 $k=k^*$ のみ人的被害が起こるものとする。被災下の家計の保有労働力総量 $L^{k*(1)}$ を用いて式(20)の

外生的要因	平常時の均衡	交通網被災シナリオ	被災下で想定する均衡
	交通費用(旅客), 費用率(物流)		$\tau^{kl(0)}, \phi_i^{kl(0)}$
内生的要因	労働・資本		$L_i^{k(1)}, K_i^{k(1)}$
	業務トリップ		$n_i^{kl(1)}$
	産業部門(財の量)		$Q_i^{k(1)}, X_{ji}^{k(1)}, z_i^{k(1)}$
	家計部門(財需要)		$d_i^{k(1)}$
	財の価格		$p_i^{k(1)}, q_i^{k(1)}$

(0) は平常時, (1) は被災時を表す.

Fig. 3 平常時, 交通網被災下の均衡状態

右辺 $L^{k(0)}$ を $L^{k(1)}$ で置き換える. また, 被災者は一方で消費活動主体でもあったから, 消費需要の減少も同時に起こる. これは, 式(2)において, 被災下の地域 $k=k^*$ に居住する家計の資本・労働がそれぞれ $\sum_i K_i^{k^*(1)}, L^{k^*(1)}$ と減少するのに伴い所得が減ると考えればよい.

c. 交通施設の被害状況の反映

Fig. 1 に従えば, 基幹交通施設の被害を入力として交通モデルにより交通費用が出力され, その交通費用が SCGEモデルの入力として用いられるが, ここでは, 基幹交通施設の被害を直接地域間交通費用の変化と捉え, SCGEモデル内の輸送費用率に反映させる. これをFig. 4 を用いて説明しよう.

いま, Fig. 4 に示すようなネットワーク形状で地域Bから地域Aへ交易が行われているとする. 災害により一本の路線が不通となると, 平常時にその路線を利用している交通は輸送経路もしくは交易相手地域を変更する.

前者の場合, 不通区間を除く新たな交通ネットワークの下で, 与えられた交通需要に対し輸送費用が最小となるように経路配分が行われ, 新たな利用状況が生まれる. この際, 経路に十分な容量があるとみなせる (Fig. 5, 左) ならば最短経路配分により, 容量制約を考慮しなげなければならない場合 (Fig. 5, 右) にはネットワーク均衡配分により交通量が配分され, いずれの場合にも, 交通量に関する需要曲線と費用曲線が交わる点で地域間輸送費用が1つの値に決まる. この値によりSCGEモデル内の輸送費用率が決定され, 交易パターンの変化を通じて, SCGEのアウトプットとして今度は逆に地域間交通需要が決定する. このとき, 式(17)により地域間の交易関係が変化しうから, 被災下では, 平常時と異なる交易パターンが生まれる可能性があり, その結果として後者のように交易相手地域の変更が起こりうるのである. 被災前後における交通費用の変化は, 鉄道については式

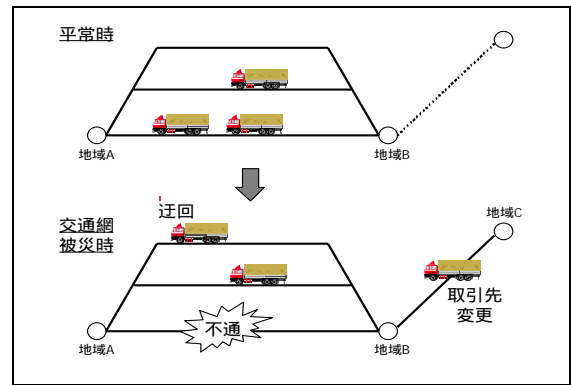


Fig. 4 交通網被災シナリオ時の交通の変化

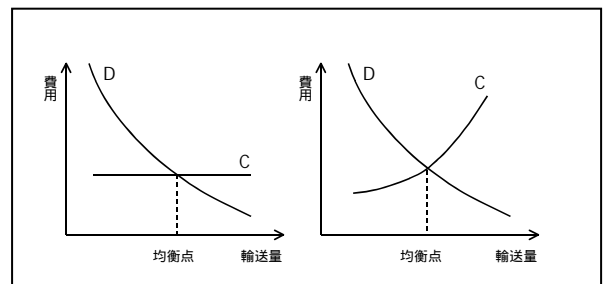


Fig. 5 交通量に関する費用関数と需要関数

(10) - (12), (16) において $\tau^{kl(0)}$ を $\tau^{kl(1)}$ で置き換え, 道路については, 交通費用の変化率を輸送費用率の費用率の変化として捉え, $\phi_i^{kl(0)}$ を $\phi_i^{kl(1)}$ で置き換えた値を式(17), (18), (22) に適用すればよい.

(2) 市場の均衡メカニズムに関する考え方

静学的な一般均衡の枠組みを有するモデルでは 通常, 財や生産要素は瞬時に均衡状態に達すると想定される. 長期にわたる影響を分析する場合には, これら財や生産要素が均衡状態に達すると想定して良い. しかし, 本稿で考えるような地震による交通施設の被災期間 (すなわち, 復旧が完了するまでの時間) には, 財・サービス市場における均衡は達成されるかも知れないが, 労働や資本といった生産要素が十分に調整されるとは想定し難い.

そこで本モデルでは, 平常時においては 3.4 で述べたように生産要素市場および財・サービス市場が均衡に達していると想定するが, 被災下においては労働や資本といった生産要素市場での調整は行われないものと仮定し, 財・サービス市場のみが均衡する状況を想定して分析を行う. これはミクロ経済学でいう「短期」の考え方である⁵⁾. このような設定を置いて分析をすすめる方が, すべての要素の調整を仮定するよりも, アプローチとして妥当であろう.

3.6. 被害の計量化

前節の議論を考慮した上で、均衡条件により被災下の均衡価格 $p_i^{k(1)}, q_i^{k(1)}$ とその他の内生変数が決定される。このとき、市場内での変化は、ある主体にとっての効果別の主体にとっての不効果として相殺され、最終的に交通費用の変化の影響は地域家計の(不)便益となって表れる。経済被害は、家計の効用水準の変化として等価変分 EV を用いて次のように計測することができる。

$$U^k(\mathbf{q}^{k(1)}, y^k) \equiv U^k(\mathbf{q}^{k(0)}, y^k + EV^k) \quad (24)$$

式(1), (3), (24)より、等価変分 EV^k は次で与えられる。

$$EV^k = \frac{u(\mathbf{q}^{k(1)}) - u(\mathbf{q}^{k(0)})}{u(\mathbf{q}^{k(0)})} y^k \quad (25)$$

ただし、 $u(\mathbf{q}^k) = \left\{ \sum_{i=1}^M \gamma_i^k (q_i^k)^{1-\phi} \right\}^{\frac{1}{\phi-1}}$ である。

最後に、本SCGEモデルによる一連の分析プロセスを Fig. 6 にまとめる。

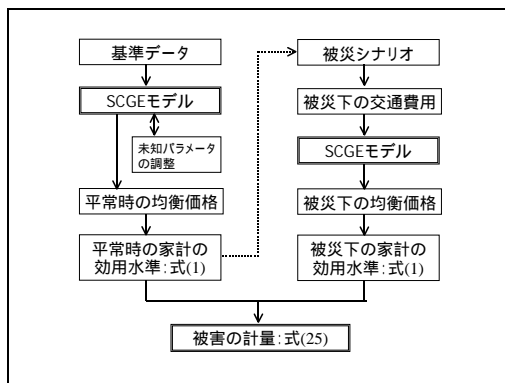


Fig. 6 本SCGEモデルによる分析プロセス

4. 被害試算事例

4.1. 計算の枠組み

本章では、3. で構築されたモデルを基に、均衡条件を含む分析プロセスに関して共通の枠組みを用いて、現在基幹交通の寸断による影響が大きく懸念されている東海地震の警戒宣言発令時と東海地震発生時という2大シナリオを想定し、交通ネットワークの機能低下に起因する被害の試算を行う。

道路交通条件の変化については、Fig. 7 に示すような交通網を考え、輸送費用を決定する交通量配分ルールとして全地域に最短経路配分を仮定する。そして、被災前後における地域間交通費用の変化を 3.5.(1)-c のようにして求め、被災下の交通費用として SCGE モデルに入力する。なお、ここでは道路輸送(物流)の費用変化を、

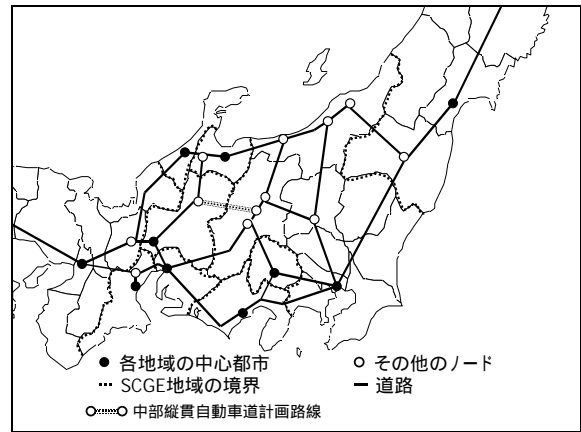


Fig. 7 想定道路交通ネットワーク

輸送経路変更に伴う所要時間の変化分として $\phi_i^{kl(1)}$ に反映させることとする。同様に、鉄道についても新幹線と主要幹線からなるネットワークを想定し、地域間の移動が最短経路配分により行われると仮定する。

また、3.5.(2) で述べた短期均衡の考えに基づき、これらのシナリオ発生後に家計の保有する労働量や資本量は平常時から変化せず、産業間での移転もないものとする。すなわち、すべての地域 k 、産業 i で

$$L_i^{k(1)} = L_i^{k(0)}, \quad K_i^{k(1)} = K_i^{k(0)} \quad (26)$$

とする。したがって、警戒宣言や地震の発生後においても家計は災害前と同じように働き、災害前と同じだけの賃金を得ていることとなり、このときに計算される経済被害には人的被害や生産資本被害に起因する部分は無く、すべて基幹交通網の機能低下による交通条件の変化に起因する被害となる。

4.2. モデルサイズと基準データ

3産業部門(農林水産業, 鉱工業, 建設・サービス業), 14地域 (Fig. 8 に示す区分) のモデルサイズにより計算を行う。Table. 1 にパラメータ・外生変数の出典を示す。

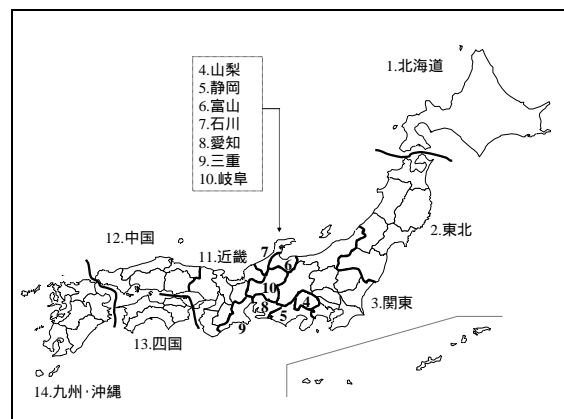


Fig. 8 地域区分

Table.1 パラメータ・外生変数の出典

記号	出典
a_{ji}^k, a_{vi}^k	地域間産業連関表
β_i^k	地域間産業連関表
$\delta_{Li}^k, \delta_{Ki}^k$	地域間産業連関表
δ_n^{kl}	旅客純流動調査
y^k, w^k, L^k, K^k	県民経済計算年報
γ_i^k	地域間産業連関表
φ	文献 ⁶⁾
λ_i	式(17)に、最もフィットするように決定.
τ^{kl}	鉄道時刻表
ϕ_i^{kl}	産業連関表, 道路時刻表

SCGE 分析の基準データセットに用いる産業連関表は全国9地域間表である。分析に際しては、県単位の産業連関表と物流センサスを補完的に用いて、中部地方と関東地方の一部を県単位の分割した14地域用のデータを作成している。詳細は文献⁷⁾を参考されたい。

4.3. 東海地震の警戒宣言シナリオ

本節では、警戒宣言発令シナリオにおける交通規制に伴う被害の試算を行う。警戒宣言時には、最も厳しい対応策がとられる場合、東海地域を中心とした防災対策強化地域にて新幹線が運転を中止したり、道路交通規制が行われて外部から対象地域への流入ができなくなったりする。特に、東名ルート、中央ルートの両方について対象地域に含まれる区間があるため、警戒宣言の発令期間が長期にわたって継続すれば、その経済的影響は非常に大きなものになると予想されている。本モデルでは、山梨・静岡・愛知・三重の4県を警戒宣言の防災対策強化地域と想定し、同地域の交通がシャットダウンすることでこれらの地域を通過しない輸送パターンを考え、その時の交通費用の変化が地域経済に与える影響を分析する。

また、既存の交通路線網に加えて、現在北陸新幹線や中部縦貫自動車道が計画もしくは建設中の段階にある。これらの路線は、警戒宣言の発令により東海地域の交通が規制された場合の代替ルートとして機能するものと考えられる。そこで、このような路線の整備が警戒宣言時にどのくらい被害を軽減しうるのかを見るために、2つの小シナリオの下で計算を行い、その結果を比較する。

以下の計算では、警戒宣言時の交通条件に関して次の3つのシナリオを想定して、分析を行う。

(1) Scenario A-1: 警戒宣言対象地域内の高速道路の最高速度が40キロに制限される。また、新幹線も一部運転を見合わせ、東海道新幹線よりも北陸ルートに迂回する

- る方が関東～近畿間を速く移動できる状況を想定する。
- (2) Scenario A-2: Scenario A-1に加えて北陸新幹線の供用を想定する。北陸ルートによる移動費用が短縮する。
- (3) Scenario A-3: Scenario A-2に加えて中部縦貫自動車道の供用と交通規制緩和を想定する。中部縦貫ルートの所要時間が短縮する。さらに、警戒宣言時の高速道路速度規制がScenario A-1の最高40キロから60キロに緩和される。

分析結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、警戒宣言時の交通規制による東海地域を中心とした交通費用の変化による影響が、当該地域ばかりでなく全国へ波及していることが読み取れる。また、交通を主原因として家計全体に最終的に帰着する経済被害額は、Scenario A-1～A-3の順にそれぞれ全国1日当たり約1,100億円、約1,020億円、約620億円となった。このことから、交通ネットワークの整備による被害軽減効果が大きいことが読み取れる。また、東名ルートと中央ルートの両方が不通になることの影響がいかに甚大であるかが推察される。

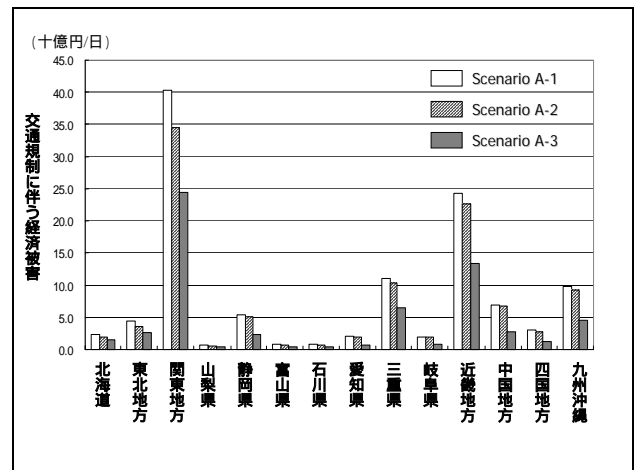


Fig. 9 警戒宣言シナリオによる地域別経済被害

4.4. 東海地震発生に伴う交通施設被災シナリオ

4.3. と同様の分析の枠組みで、本節では東海地震発生時の交通施設の機能損傷による経済被害の試算を行う。

東海地震の被害想定では、静岡県平野部のほぼ全域で震度6強以上の強い揺れが発生するものと予測されている。これと交通機関への施設被害影響予測結果⁸⁾を参考に、静岡県内で東名高速道路、国道1号線、東海道新幹線の橋梁などが複数箇所損傷する状況を想定し、交通条件を設定する。詳細については、文献⁷⁾を参照されたい。

交通施設の被災により、地域間の物流経路がTable. 2のように変化すると仮定して被災下の地域間交通費用を決定する。また、鉄道はすべて中央線に迂回すると仮定する。

Table. 2 交通施設の被災による物流経路の変更

地域	変更後の経路
静岡以東～静岡	富士 - 静岡間は混雑した国道1号線（所要時間は平常時の2倍）を利用．
山梨～静岡	国道52号線の代わりに東京を經由．
関東以東～愛知以西	中央道に迂回する．
静岡～石川・富山	平常時は名古屋廻りで行われる輸送が、被災時には関東地方経由で行われる．
静岡～愛知以西	静岡県内は混雑した国道1号線を利用し、愛知県以西は高速道路を利用．

なお、復旧期間は3ヶ月と仮定し、この期間の被害を計測する．また、上記基本シナリオを Scenario B-1 とし、混雑の影響を外生的に考慮した2つの分析をScenario B-2, Scenario B-3とする．

- (1) Scenario B-1：既述の交通条件 (Table. 2)．
- (2) Scenario B-2：Scenario B-1 に加え、代替路線として機能する中央自動車道の慢性的混雑（輸送所要時間が平常時より10%増加する）を考慮した交通条件．
- (3) Scenario B-3：Scenario B-2 に加え、愛知県内、三重県内の所要時間がそれぞれ平常時より 15%増加した交通条件．

分析結果をFig.10 に示す．前節の結果と同様に、被害が全国に波及している．地域家計に最終的に帰着する経済被害の総額は、3ヶ月間被災が継続するシナリオの下で約2.8兆円となった．また、Scenario B-2, Scenario B-3 ではそれぞれ約3.4兆円、約3.5兆円となった．地域全体で見ただけでは関東地方に帰着する被害が大きい、1就労者数あたりの額で見ただけでは、交通施設の被災下にある（すなわち、どの地域との取引についても交通施設被災の影響を受ける）静岡県で最も帰着被害額が大きいことがグラフから読み取れる．

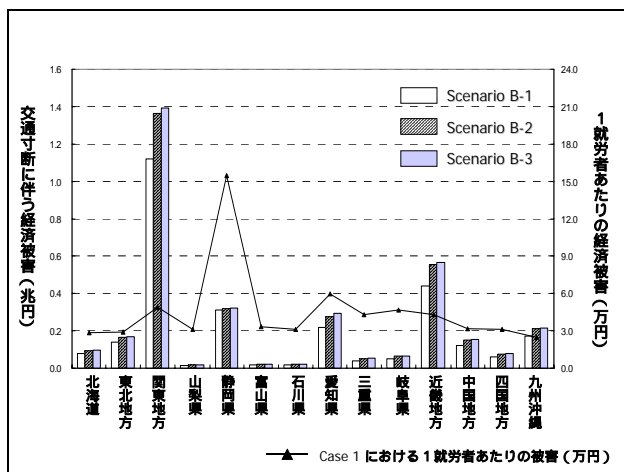


Fig. 10 東海地震シナリオによる地域別経済被害

4.5. 2大シナリオの被害試算結果から

最後に、本章で行った2つの被害試算を比較し、リスクマネジメントの観点で考察する．以下では Scenario A-1 と Scenario B-1 とを比較する．前者は警戒宣言発令時を想定した交通網シナリオであり、東京 - 名古屋間の高速道路・高速鉄道輸送に東海ルート、中央ルートがともに利用できない．後者は東海地震の発生を想定した交通網シナリオであり、高速道路・高速鉄道輸送に東海ルートのみが利用できない．したがって、両シナリオ間の主たる相違点は中央ルートが機能しているかどうかである．

Scenario B-1 のもとで計算された経済被害の総額を1日当たりに換算すると、およそ300億円/日となる．一方、Scenario A-1 における経済被害総額は約1,100億円/日である．すなわち、東海ルートが被災し機能不全に陥った場合に、中央ルートの道路・鉄道が機能を維持していることの効果は単純な減算 $1,100 - 300 = 800$ から、およそ800億円/日となる．様々な仮定の下での計算結果であるにせよ、東海ルートの代替機能として中央ルート存在の意義が非常に大きいことが推察される．この効果は、「東海・東南海地震を想定したときに、耐震補強などの方策で中央ルートを守っておくことにより、たとえ東海ルートが被災して不通になったとしても約800億円/日という損失から免れることが可能である」と言い換えることもできる．

上記比較で想定した条件は、迂回交通による混雑を考慮したものではない．基幹道路の不通は、代替路線の混雑をもたらす．このため、Scenario B-2 では代替路線の慢性的な混雑を考慮して分析を行った．その結果、輸送時間が10%増加することにより、その時間損失にもなって生じる被害は約6,000億円/90日 67億円/日となった．これは、Scenario B-1 のもとで計算された経済被害総額300億円/日のおよそ2割強という大きさである．種々のリスクマネジメント施策を検討するに当たっては、代替路線確保の次の段階として、混雑を緩和できるような施策が求められると言える．

また、Scenario A-2, Scenario A-3 は、現在計画もしくは建設中の段階にある道路や鉄道の、東海・中央ルート不通時の代替機能という点に着目し、その効果をみたものである．Scenario A-2 の結果は、東海道新幹線が不通になった場合に、代替機能を果たしうる高速鉄道として北陸新幹線が供用されていれば被害が約80億円/日 軽減しうることを意味している．北陸新幹線については部分的に建設が始まっており、全線開通は遠い未来のことであるにしても、在来線特急と結ばれて早期に高速ネットワークを形成し、ある程度代替路線としての役割を担えるようになることが望まれる．次に Scenario A-3 の結果は、計画されている中部縦貫自動車道の供用により、北陸ルートに対する輸送時間短縮に基づく被害の軽減で

あり、およそ $1,020 - 620 = 400$ (億円/日)となる。これは、代替路線の確保に関して、できるだけ遅延が小さくなるような路線の整備が有効であることを示していると言える。同路線に関しても部分的に建設が始まっている、新幹線と場合と同様に、全線開通前であっても旧街道とのネットワークによって、より効果的な代替ルートとなりうる。

5. おわりに

本論文では、SCGE モデルを用いて巨大地震を想定した基幹交通網の被災に伴う経済被害を分析する基礎的な枠組みを示した。特に、従来必ずしも明示的にはなされてこなかった、交通網の被災シナリオと交通費用の変化の関係を考慮し、SCGE モデルの分析へと展開している点が特徴的である。本文中にも述べたように、このような分析の枠組みを持つことで、地震発生から直接的被害の予測を経て地域に帰着する経済被害を予測するまで一貫した議論をすることが可能である。また、警戒宣言や東海地震シナリオを想定して被害予測を行い、被害を定量的に把握するとともに、考察を通じて基幹交通ネットワークのマネジメント方策に関する知見を得た。

現在、地方分権推進の流れに乗って、中央から地方への権限委譲が行われつつある。また、交通についても分割・民営化の流れがある。大規模災害の場合には、地域間・国家間の協力が become 必要になるのだから、このような脱・中央集権化の流れは不利であり、地方政府だけ、あるいは個々の地域の交通経営主体だけでは、対応が困難になるものと思われる。このような状況を踏まえると、全国レベルに影響を及ぼしうる災害のインパクトを事前に評価し適切な対策を講じることは、今後ますます重要になってくるであろう。

本論文におけるアウトプットとしては地域別の経済被害(交通施設の機能不全に起因する被害)のみを示すにとどまっているが、地域間の交易状況を交通流動量に置き換える工夫を加え、交通混雑を考慮することで、基幹交通ネットワークの各路線における災害時の交通流動量の変化を読み取ることができる。このようにして、地域・国土レベルでの重要路線・重要区間を評価することが可能である。これはまた、防災投資を計画する際に、費用便益分析の考え方に沿って優先順位付けなど行う際にも有益な情報を提供することになるだろう。

さらに、被害の帰着に関しては、本論文で扱った地域別の帰着から地域・主体別への展開が可能であり、実際にマネジメントを考えていくに当たっては、意思決定主体となるステークホルダーを特定した上で、複数の地震シナリオと政策オプションが彼らにどのような帰着をも

たらずのかを提示できるようなモデルへと発展させていくことが求められる。それにより、多主体の協調の下に施策の実施がなされうるのである。本モデル中では、このような帰着の議論までは扱っていないが、基幹交通ネットワークのマネジメントという文脈でこれを扱う場合には、モデルの中で最低限交通企業を独立セクタとし、さらに道路と鉄道に分離する必要がある。この点に関して、データ整備に一工夫を要する。

最後に、今後の課題について述べる。まず、2. で述べたように、本論文では Fig. 1 に示した被害予測の方法論体系の中で、SCGE モデルを用いて交通施設の機能低下に伴う経済被害を計測するという部分を扱ったに過ぎない。残された部分に関する計算方法やデータの整備が早急に必要である。こうして、地震シナリオから少なくとも交通施設の被災状況を出力するシミュレーションの部分と、本論文で扱った SCGE の部分が結ばれることにより、災害による被災と国土レベルの交通ネットワークの関係がより明確になり、本モデルの枠組みが意思決定に有効に反映させることができる。

実用上は、都市圏などより細かな空間スケールで同様の分析を行い、さらに様々な地震シナリオに対応する被害予測や交通ネットワークの評価が必要となる。また、不確実性を伴って生じる交通ネットワークの被災や一意でない被災状況・復旧状況に対してもできるだけ機能を確保できるようにしておくことが重要であり、これを実現するような、すなわちリダンダンシーを増すような施策の実施が求められる。このようなハード面の施策は「個々の施設の耐震性強化」と「幹線の多重化・高規格代替ルートの確保」に大別できよう。どの地域でどちらの施策にどれだけの防災投資を行うかについては、資源の効率的な配分のみならず、日常時の地域経済への影響など総合的な観点で、上に示した2種類の策のベスト・ミックスにより意思決定を行うこととなる。その過程で、経済学に基づく本 SCGE モデルによる分析は、効率性という点から国土交通政策上の示唆を与えるであろう。

次に、SCGE モデルの技術的な面についての課題を述べる。SCGE モデルについては、すでに多くの研究が蓄積されており、本モデルで扱っていない様々な議論がある。これらの議論については、今後モデルの改良に伴い、分析目的に即して何が重要な議論かを加味しながら取り込んでいくべきであろう。例えば、被災時の国際貿易関係に着目するとすれば、交通ネットワークの面からは、港湾へのアクセス道路や港湾そのものの機能・耐震性などを必然的に考慮することとなる。また、SCGE モデルは地域内の交通流動を必ずしも明確には表現しないので、交通ネットワークと統合的に議論していくに当たり、地域内の交通流動の配分に関して一考の余地がある。というのも、SCGE モデルを都道府県レベル・都市圏レベ

ルと細かくゾーン分割していったとしても、やはりゾーン内に OD(起終点)をもつ交通量の方がゾーン間の OD 交通量に比べて多いと考えられるからである。

なお、本分析では交通量配分に最短経路配分を仮定しているが、混雑を考慮する場合には経路配分交通量と地域間交通費用が相互に関連しあう形となる。これは、SCGE のアウトプットとして求まる地域間交易量をその地域間の交通需要と捉え、交通ネットワーク上を流れる交通量に対応させて考えることができる。

以上、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 豊田利久, 河内朗 (1997): 阪神・淡路大震災による産業被害の推定, 国民経済雑誌 第 176 巻第 2 号, pp.1-15.
- 2) Gordon, P. and Davis, B. (1998). Transport-Related Impacts of the Northridge Earthquake, *Journal of Transportation and Statistics*, pp.21-36.
- 3) 高橋顕博, 安藤朝夫, 文世一 (1997): 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, pp.149-156.
- 4) Ueda, T., Koike, A. and Iwakami, K. (2001). Economic Damage Assessment of Catastrophe in High Speed Rail Network, Proceedings of 1st Workshop for "Comparative Study on Urban Earthquake Disaster Management", pp.13-19, 2001.
- 5) ハル・R・ヴァリアン, 佐藤・三野訳 (1986): 『ミクロ経済分析』, 勁草書房.
- 6) 市岡修 (1991): 『応用一般均衡分析』, 有斐閣.
- 7) 土屋哲, 多々納裕一, 岡田憲夫 (2004): 巨大地震災害時の交通施設の機能低下に起因する社会経済損失の計量化に関する研究, 京都大学防災研究所年報 第 47 号 B.
- 8) 損害保険料率算出機構 (2002): 東海・東南海・南海地震の被害想定結果 (市区町村別被害想定結果一覧), CD-ROM

PUBLIC MANAGEMENT ON TRANSPORT INFRASTRUCTURE AGAINST EARTHQUAKE RISK –BY SCGE MODEL

Satoshi TSUCHIYA¹ and Hirokazu TATANO²

¹M.Eng. (Civil Engineering), Kyoto University, Graduate School of Engineering, Dept. of Urban Management
(E-mail: tsuchiya@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp)

²Ph.D. (Engineering) Professor, Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute, Division of Integrated
Management for Disaster Risk (E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp)

This paper intends to show a process of analyzing regional economic impacts due to transport infrastructure damage, by a spatial computable general equilibrium (SCGE) model considering inter-regional trading, business trips and inter-industrial systems. The model is applied for calculating transport-related economic losses from the Tokai Earthquake Warning Declaration and from occurrence of the Tokai Earthquake, and for assessing the effects of mitigation policies on transportation network. Based on the model, we lastly mention catastrophic earthquake disaster risk management.

Key Words: *Earthquake Disaster Risk Management, Economic Losses, Major Transport Infrastructure, Spatial Computable General Equilibrium Model.*