

交通ネットワークを考慮した SCGE モデルによる地震災害の被害計量化の枠組み*

A SCGE Framework Dealing with Transportation Network to Assess Economic Impacts from Catastrophic Earthquakes*

土屋 哲**, 多々納裕一***, 岡田 憲夫****

By Satoshi TSUCHIYA**, Hirokazu TATANO*** and Norio OKADA****

1. はじめに

今日の社会は、地域間の交流・交易を通じて経済的に結びついている。大規模な災害が都市域を襲った場合、直接的・物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経済的な損失を発生させる。したがって、このような広範囲に影響が及ぶ災害の被害予測を行う際には、地域間の相互依存関係が考慮されていなければならない。

地域間の産業連関性を明示的に取り扱い、被害の地域別帰着を計測する手法として、空間的応用一般均衡モデル (SCGE モデル) の利用はひとつの有力な方法である。SCGE モデルを用いる場合、災害の直接的被害による状況の変化を外生的に与え、それに起因して生じる社会・経済的影響 (間接被害) が計算される。このとき、交通施設のような社会基盤の被災は、ネットワークの変化・交通量の変化に伴う地域間交通費用の変化という形で間接的に SCGE モデルに反映される。

図 1 にも示されるように、交通のモデルと SCGE モデルとは、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、地域間交通費用を表現するファクター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。他方交通モデルにおいても、それ単独で経済環境に連動した交通需要の変化を内生的に取り扱うことは難しい。本稿ではこの点に着目し、SCGE モデルをベースに地震災害の経済被害を計測する枠組み

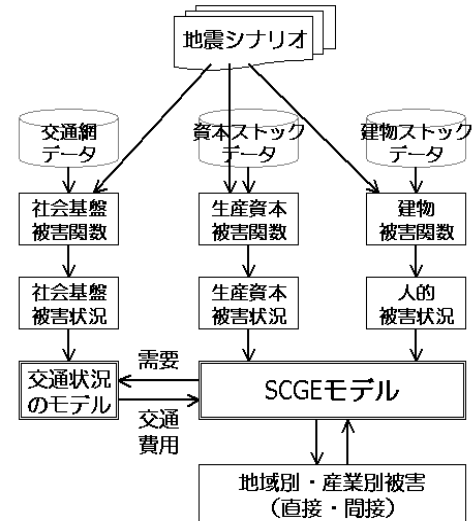


図 1: 総合的な地震被害予測プロセス

を考えつつ、その中に需要変動型の交通経路配分メカニズムを組み込み、交通費用の変化を内生的に決定するモデルの構築を目的とする。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予測するモデルとも一貫したつながりを持つようになり (図 1)、被害予測を全体的視点で捉えることが可能となる。

なお、SCGE モデルと物流ネットワークモデルの統合に関しては、宮城¹⁾が理論的な定式化を示している。本稿は、このような理論研究を災害の被害計量化という文脈で捉えなおし、実際に数値分析を試みるものとして位置づけられよう。

2. SCGE モデルの概要

(1) 家計の消費行動

家計は、自地域に立地する M 種の企業に資本と労働という 2 種類の生産要素を提供して賃金を受け取り、財の消費を行うことで効用を最大化する。家計のこれらの活動は居住地で閉じているものと仮定す

*キーワード: 防災計画, 物資流動, ネットワーク交通

**学生員, 工修, 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, Tel 0774-38-4037, E-mail: tsuchiya@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp)

***正員, 工博, 京都大学防災研究所 総合防災研究部門

****正員, 工博, 京都大学防災研究所 総合防災研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄, Fax 0774-38-4044)

る。このとき、家計の財消費行動は以下の最適化問題により記述される。

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

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^M q_i^k d_i^k \leq y^k \quad (2)$$

ただし、

U^k : 地域 k に居住する家計の間接効用関数、

γ_i^k : 家計の消費に関する効率パラメータ、

σ : 財消費に関する代替パラメータ、

d_i^k : 財 i の消費量、

q_i^k : 財 i の消費地価格、

y^k : 家計の所得、

である。添字 k は、地域 k ($k = 1, 2, \dots, N$) のものであることを意味する。

(2) 企業の生産行動

地域 k には各産業ごとに1つの企業が立地し、操業している。企業 i は、地域 l で生産され自地域に輸送されてきた財 j を中間財として、また労働、資本を生産要素として投入し、規模に関して収穫一定となる一次同次の技術を用いてただ1種類の財 i を生産していると仮定する。図2に企業の生産構造を示す。

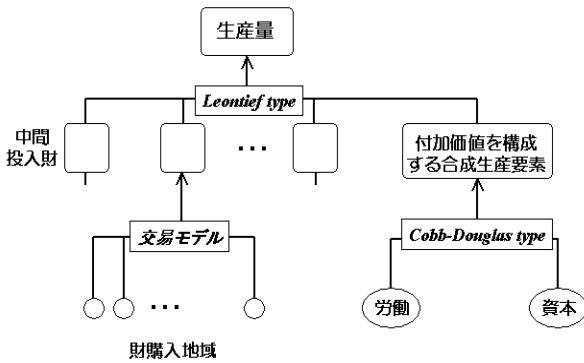


図 2: 生産構造

このような階層化構造を用いて、企業の利潤最大化行動を以下のように定式化する。

上位レベル

$$\pi_i^k = \max p_i^k Q_i^k - \left\{ \sum_{j=1}^M q_j^k X_{ji}^k + cv_i^k V_i^k \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } Q_i^k = \min \left\{ \frac{X_{1i}^k}{a_{1i}^k}, \dots, \frac{X_{Mi}^k}{a_{Mi}^k}, \frac{V_i^k}{a_{vi}^k} \right\} \quad (4)$$

下位レベル

$$cv_i^k V_i^k = \min w_i^k L_i^k + r K_i^k \quad (5)$$

$$\text{s.t. } V_i^k = (L_i^k)^{\delta_i^k} (K_i^k)^{1-\delta_i^k} \quad (6)$$

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、

X_{ji}^k : 企業 i が中間財として投入する j の量、

V_i^k : 労働、資本からなる合成生産要素、

cv_i^k : V_i^k の単位費用関数、

a_{ji}^k : Q_i^k に対する中間財 j の投入比率

a_{vi}^k : Q_i^k に対する合成生産要素 V_i^k の投入比率

L_i^k : 企業 i に提供される労働量、

K_i^k : 企業 i に提供される資本量、

δ_i^k : 企業 i の労働に関するシェアパラメータ、

w_i^k : 賃金率、

r : 利子率、

である。添字 k は、地域 k であることを意味する。

(3) 地域間交易

地域 l の企業が生産者 k を財 i の購入先として選ぶ確率を

$$s_i^{kl} = \frac{Q_i^k \exp \left\{ -\lambda_i \left(p_i^k (1 + \phi_i^{kl}) \right) \right\}}{\sum_{m=1}^N Q_i^m \exp \left\{ -\lambda_i p_i^m (1 + \phi_i^{ml}) \right\}} \quad (7)$$

で与える。 s_i^{kl} は、財 i の地域間生産水準や (生産者) 価格により変化する交易係数である。 λ_i はパラメータである。また、 ϕ_i^{kl} は輸送費用率を表す。これは、地域 k から l へ財 i を1単位輸送するのに伴い失われる量である。いま、暗にこれを、全地域を一手に管理する貨物交通企業 (以下、運輸部門と表記) の収入と考えよう。運輸部門の総収入は $\sum_i \sum_k \sum_l p_i^k \phi_i^{kl} z_i^{kl}$ と表される。ここに、 z_i^{kl} は財 i の地域 k から l への輸送量である。本稿では、運輸部門を他の産業から分離して考えているが、経済主体としては取り扱っていないので、運輸部門は経営に関する意思決定は行わない。

(4) 均衡条件

本 SCGE モデルの均衡条件として、(a) 財市場、(b) 生産要素市場、(c) 空間価格均衡、の3種類が以下のように示される。

(a) 財市場

$$Q_i^k - EX_i^k = \sum_{l=1}^N z_i^{kl} (1 + \phi_i^{kl}) \quad (8)$$

$$z_i^{kl} = s_i^{kl} \left\{ \sum_{j=1}^M X_{ij}^l + d_i^l - IM_i^l \right\} \quad (9)$$

(b) 生産要素市場

$$\sum_{i=1}^M L_i^k = L^k \quad (10)$$

$$r \left(\sum_k \sum_i K_i^k - \bar{K} \right) = \sum_i \sum_k p_i^k EX_i^k - \sum_l \sum_j q_j^l IM_j^l \quad (11)$$

ただし、

L^k : 地域 k の家計が保有する労働の総量、

\bar{K} : 地域全体での資本需要量、

EX_i^k : 地域 k における財 i の輸出量、

IM_j^l : 地域 l における財 j の輸入量、

である。

(c) 空間価格均衡

$$q_i^l = \sum_{k=1}^N s_i^{kl} p_i^k (1 + \phi_i^{kl}) \quad (12)$$

$$p_i^k = \sum_{j=1}^M q_j^k a_{ji}^k + cv_i^k a_{vi}^k \quad (13)$$

(5) 交通網被災シナリオ下における均衡

次に、交通施設の被災等により機能が低下した状況で達する均衡を考える。以下、被災時の変数をラベル⁽¹⁾を用いて表し、平常時と区別する。

(a) 人的被害や生産資本の被害状況の反映

人的被害や生産資本の被害を考慮する場合には、被災下の家計が保有するこれらの生産要素が平常時に比べて減少することで表現できる。なお、これらの被害は地震の直接的被害の表現であり、被災地域 $k = k^*$ にのみ生じうる点に注意する。これを踏まえ、人的被害については式(10)の L^{k^*} を $L^{k^*(1)}$ で置き換えれば、生産資本については式(11)の $\sum_i K_i^{k^*}$ を $\sum_i K_i^{k^*(1)}$ で置き換えればよい。

(b) 交通施設の被害状況の反映

本 SCGE モデル中に登場する輸送費用率 ϕ_i^{kl} は、災害時の交通施設被災による輸送経路の迂回や、迂回に伴う混雑により、交通費用の変化に連動して決定される。ここでは、このような交通施設の被害状況のモデルへの反映を考えよう。

災害の発生によりある路線が不通になると、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れば(図3, 左)最短経路配分法のように交通量とは無関係に交通費用が決まり、容量制約を考慮に入れる場合(図3, 右)には、SCGEモデルも含めた交通量と費用の相互関係の中で交通費用が決定される。

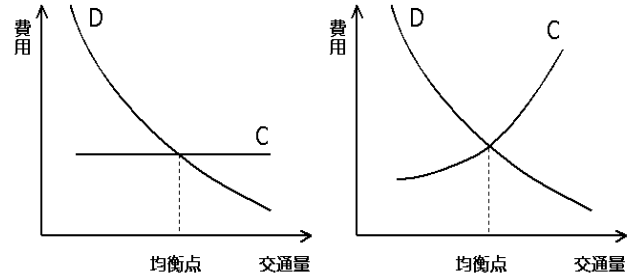


図 3: 輸送容量制約と交通費用

(6) 被害の計量化

本モデルの枠組みで、基幹交通施設の被災により地域間の交通費用体系 ϕ_i^{kl} が変化した場合、その影響は財の価格変化を通して最終的に地域家計に帰着するか、もしくは運輸業の収益の変化となって表れる。地域家計に帰着する被害は、等価変分 EV を用いて次のように表すことができる。

$$U^k(\mathbf{q}^{k(1)}, \mathbf{y}^{k(1)}) \equiv U^k(\mathbf{q}^{k(0)}, \mathbf{y}^{k(0)} + EV^k) \quad (14)$$

ただし、添字⁽⁰⁾は平常時のものであることを示す。

一方、運輸部門が提供するサービスの生産コストが被災時においても平常時と変わらないものとすれば、運輸部門に帰着する被害は、平常時の輸送費用収入から被災時の輸送費用収入を引いた値、すなわち $\sum_i \sum_k \sum_l p_i^{k(0)} \phi_i^{kl(0)} z_i^{kl(0)} - \sum_i \sum_k \sum_l p_i^{k(1)} \phi_i^{kl(1)} z_i^{kl(1)}$ で表される。

3. 被害試算の考え方

(1) モデルサイズと災害シナリオ

以下では、東海地震発生という災害シナリオを想定し、基幹交通施設の被災に起因する被害の試算を行うための手続きを示す。

まず、10地域に分割された国土空間を閉空間として仮定する。全国9地域間産業連関表における地域区分を基本とし、静岡県を関東地方から独立させる。

また、産業区分を農林水産業、鉱工業、建設・サービス業（運輸業は除く）の3部門と設定する。この3部門に地域家計を加えた4主体を経済主体とみなす。

災害シナリオとして、東海地震による交通施設の被災を想定し、静岡県を直接被災地とする。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 $L_i^{k(1)} = L_i^k$ 、 $K_i^{k(1)} = K_i^k$ とする。したがって、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。

(2) 交通施設被災とネットワークの変化

被災下における交通ネットワークのあり方は、交通施設の被災予測に関する資料（例えば2）を参考に静岡県を中心とした被災を想定する。モデルでは図4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、被災した東海道ルート（東名高速道路、国道1号線）の迂回路線となる中央ルート（中央自動車道、国道19、20号線）と北陸ルート（北陸自動車道、国道8、18号線）のうち、東京-名古屋間の輸送経路にネットワーク均衡配分を、その他の路線には最短経路配分を仮定する。

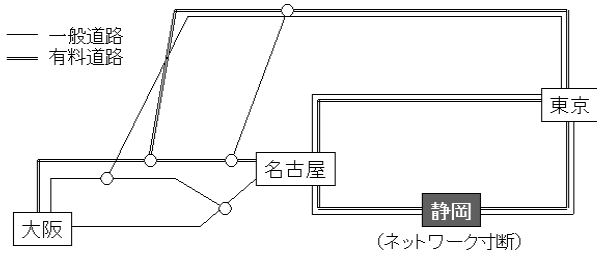


図4: 想定交通ネットワーク（東京-大阪間）

以下、SCGEモデルを起点にして、交通ネットワーク上の変動交通量を考える際に必要となる式を示す。

(a) 地域間交易需要 z_i^{kl} : 式(9)で与えられる。

(b) 地域間交通発生量 x^{kl} :

$$x^{kl} = \sum_{i=1}^M \mu_i^{kl} z_i^{kl} \quad (15)$$

ただし、 μ_i^{kl} は交易量を交通量に変換する係数である。

(c) OD交通と経路交通 x_A^{kl} の関係:

$$x^{kl} = \sum_A x_A^{kl} \quad (16)$$

ただし、 A は経路を表す。

(d) 経路交通とリンク交通 x_h^{kl} :

$$x_h^{kl} = \sum_{kl} \sum_A \delta_{h,A}^{kl} x_A^{kl}, \quad x_A^{kl} \geq 0 \quad (17)$$

ただし、 $\delta_{h,A}^{kl}$ は kl -OD間のパス-インシデンス行列である。

式(16)、(17)はフローの保存条件と呼ばれるものである。このほかにも、保存条件としてノード（セントロイド）における流入・流出・生産による発生・消費による吸収、のバランスがある。

また、交通費用に関する条件として、ある地域間輸送が経路 A により行われる場合に、その交通量 x_A に対する費用関数を $C_A(x_A)$ とすると、任意の A に対してネットワーク均衡に関する条件

$$\begin{aligned} x_A \{C_A(x_A) - C_0\} &= 0, \\ x_A \geq 0, C_A(x_A) &\geq C_0 \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

が成り立つ。ただし、 $C_A(x_A)$ は A に含まれるすべてのリンクのリンクコストの和である。すなわち、

$$C_A(x_A) = \sum_{h \in A} c_h(x_h) \quad (19)$$

である。ここに、 $c_h(\cdot)$ 、 x_h はそれぞれリンク h のリンクコスト関数、リンク総交通量である。

4. おわりに

本稿では、SCGEモデルと交通ネットワークモデルを統合的に取り扱い、地震の被害予測へ応用するための基礎的な枠組みについて検討した。上の交通流の議論は地域間輸送を想定したものであるが、このほか地域内の輸送についても検討が必要である。

なお、被害の試算結果を含む詳細については講演時に報告したい。

参考文献

- 宮城俊彦：混合相補性問題によるSCGEモデルと物流ネットワーク均衡モデルとの統合化，土木計画学研究・講演集，No.22(2)，pp.737-740，1999。
- 損害保険料率算出機構：東海・東南海・南海地震の被害想定結果（市町村別被害想定結果一覧），CD-ROM，2002。