

ライフラインの機能損傷が及ぼす経済被害の計量化に関する研究

多々納裕一・土屋 哲*・梶谷義雄**

* 長岡技術科学大学 環境・建設系

** (財)電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域

要 旨

大規模災害発生時の施設被害の中でも、電力、水道、ガスといった供給系ライフライン施設の被害は地域の住民生活や企業生産に多大な影響を及ぼす。効果的な被害軽減施策を検討する上では、被害の定量的評価が不可欠である。本稿では、企業生産のライフライン途絶に対する耐性（レジリエンシー）を考慮に入れつつ、包括的な被害計量化手法である応用一般均衡モデルを用いて新潟県中越地震のケースでライフライン途絶による経済被害を計量化する。

キーワード: ライフライン途絶, レジリエンシー, 経済被害, 応用一般均衡モデル

1. はじめに

今日の都市社会は、人口や資産の都市部への集積とともに、電力・水道・ガスといったライフラインへの依存度を高めてきている。この結果、地震などの災害発生時のライフライン機能損傷が地域の企業生産や住民生活に及ぼす影響も甚大なものとなってきている。ライフライン途絶などの機能損傷がもたらす二次的被害を軽減するためには、施設そのものの強化やバックアップ機能の強化など効果的な施策を実施していくことが重要である。そのためには、ライフラインの途絶影響を定量的に評価する必要がある。しかしながら、ライフラインの途絶による機能水準低下を経済被害と結びつけた議論は少なく、これまで十分な枠組みの下で経済的な影響が評価されてきたとは言い難い。

災害時にライフライン途絶状況下にあっても、自家発電の利用や投入エネルギーの代替・節約、他地域での代替生産といった様々な対応策をとることで、企業の操業水準は完全に停止状態にならず

まうわけではない。これは、企業が予期せぬ災害に対して適応的に行動するためである。災害が社会経済に与える影響を評価する場合にこのような要因（適応行動）を考慮しなければ、過大な被害推計を行ってしまう可能性がある。あるいは、一種類のライフラインの途絶が、（途絶していない）別のライフラインの機能性を奪ってしまう場合が起こり得るように、複数のライフラインが補完的に機能して操業が成り立つ産業もあるかもしれない。ライフラインのサービスは人間活動と密接に結びついているがゆえ、上記のような性質を踏まえて社会経済的な評価ができることが望ましい。

このような問題意識のもと、本稿では、2004年に起こった新潟県中越地震を事例として、ライフラインの機能損傷が地域経済に及ぼした経済被害の計量化を目的とする。その際に、企業が持つライフライン途絶への耐性を考慮し、地域がシステム途絶に強くなることと被害軽減の関連についても考察する。

2. 研究の枠組み

災害時にライフラインが途絶することにより、企業は平常時のように操業（生産）できなくなる。企業生産の変化は、途絶するライフラインの種類やその程度、影響を受ける産業業種によってさまざまである。

個々の企業・事業所で見ると、事業継続は、業務の継続を妨げる要因に対してその影響度を極小化し、影響を受けた後の復旧を早めることが要である。これは、レジリエンシーという概念を用いて「しなやかな回復力」などと表現される。事業継続は、このような目的で事業継続計画（BCP）や事業継続マネジメント（BCM）という形で議論されている。

本研究では、レジリエンシーを、災害の経済被害計量化を視野に入れつつ、地域でマクロに考えることに着目する。そのためには、レジリエンシーを反映しうる被害計量化モデルの構築が必要である。

レジリエンシーの概念は様々な分野で用いられており、災害のみをとっても個々の具体的な問題対象に沿った形で定義・説明がなされている。Rose (2004) は、レジリエンシーとしてみた経済主体の適応行動と経済的被害について論じており、被害推計シミュレーションモデルの災害時における経済主体の適応行動の考え方次第で出力も大きく変わりうる点に言及している。

本研究では、既述した「レジリエンシー」を、『対象となるシステムの途絶に対して地域や企業が有する耐性』と捉えることとする。"Resiliency Factor"はこれと密接に関連する指標であり、ライフライン途絶状況下における生産量の対平常時比として定義され（梶谷ら, 2005a）、産業別のライフラインへの依存度を定量的に表したものであるといえる（Fig. 1）。これは、米国の ATC-25 (Applied Technology Council, 1991) などにおける、ライフラインの産業活動への重要度を表す指標と同様の考え方である。我が国では、上述の梶谷ら（2005a, 2005b）によりこの種の分析がなされ、ライフライン途絶抵抗係数（= Resiliency Factor）が産業業種ごとに推定されている。例えば、食料品製造業の電力途絶（水道、ガスは機能）に係る途絶抵抗係数が 0.04 であるとすれば、食料品製造業は電力途絶時の生産が電力供給時の 4% になってしまうことを意味する。また、白谷ら（2006）においては、ライフライン停止が地域に与える経済的影響をマクロ的に推計するためにライフライン途絶抵抗係数と同様の指標を活用している。

梶谷ら（2005a, 2005b）による途絶抵抗係数の推定プロセスは、被害推計のための地域経済モデルとの

融合を視野に入れたものでもある。レジリエンシー概念を応用一般均衡モデルに組み込み、水道網の途絶による経済的影響を推計した先行研究に Rose and Liao (2005) がある。彼らのモデルでは、階層型の CES 生産関数における代替パラメータによって企業生産のレジリエンシーが考慮されている。ただし、代替パラメータの値自体は、第 1 次オイルショック期の米国製造業における代替性パラメータ推定値などを引用して用いている。

本研究では、Rose and Liao (2005) のアプローチおよび前述の梶谷らによるライフライン途絶抵抗係数推定のための企業アンケート調査をヒントとして、災害の文脈で企業生産関数の代替性に係るパラメータを推定し、その結果の活用を念頭においた応用一般均衡モデルの構築を試みる。そうしてつくられた応用一般均衡モデルを用いて、新潟県中越地震を例に、ライフラインの途絶が地域経済に及ぼした影響を計量化する。そこで、モデルの要件として、各種ユーティリティ投入を投入財の一種類として扱うことと、レジリエンシーを反映したモデルとするために、中間投入に関する財の代替関係を表現しうる関数を用いることがあげられる。一般均衡モデルにおいて最も一般的なものは、代替弾力性一定の関数（CES型関数）を用いることであり、このとき代替弾力性パラメータが代替のしやすさを表す。

応用一般均衡モデルでCES型生産関数を導入すること自体は決して特別なことではないが、一般に代替弾力性のパラメータは、基準データとして用いる一時点の社会会計表のみからでは推定することができないため、先行研究における推定値を引用して外生的に与え、感度分析によりパラメータの値の変化とアウトプットの変動の関係を把握することが多い。

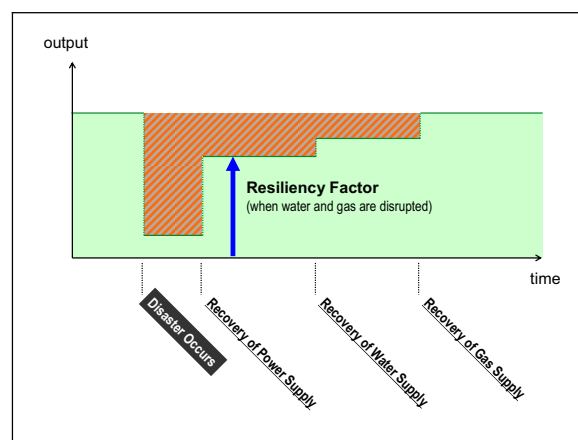


Fig. 1 Industrial Resiliency to Lifeline Disruption

しかし、この種のパラメータは、地域特性や分析対象となる問題によっても異なっている可能性がある。したがって、可能な限り、分析目的に即したパラメータを推定して用いることが望ましいであろう。災害の文脈でこのような分析を行った事例は、著者らの知る限り存在しない。本研究は、中越地震後の事業所調査から得たデータを用いてパラメータ推定を行い、被害推計モデルに反映させるという手続きを踏んでいる点に特徴がある。

3. 応用一般均衡モデルの定式化

3.1 CGEモデルと災害の経済被害推計

応用一般均衡モデル（CGEモデル）による災害の経済被害の分析は、近年、研究が蓄積されつつある（阪神・淡路大震災を事例に萩原（2001）、交通ネットワークの寸断を対象に小池・右近（2006）や土屋ら（2003）、社会資本の損傷を対象に小池・上田（2005）、生産資本の損傷を対象に土屋ら（2006）など）。本研究が対象としているレジリエンシーを考慮したライフライン途絶の分析では、先述の Rose and Liao（2005）があげられる。このように、同じ種類の災害の分析であっても、また、同じような施設被災を対象とした分析であっても、被害計量化のフレームワークは必ずしも同一ではない。モデル構造や関数形に柔軟性を持たせることは、同じ入力条件であってもモデルが異なれば計算結果もある程度異なりうることを意味するが、筆者らは、分析目的や着眼点に応じてモデルにバリエーションがあって良いと考えている。

ここでは、地震時のライフライン途絶による経済被害推計のための応用一般均衡モデルを構築する。本モデルでは、ライフラインに関連する部分を幾分

詳細に検討し、企業生産に係るレジリエンシーを考慮する。それ以外の部分については比較的シンプルなモデル構造となっている。

財と生産要素の流れを明示した社会経済システムの概略を Fig. 2 に示す。閉じた一国の経済を考え、その中で、被災地域外への被害の波及を捉えるため、社会は2地域モデルから成るとする。

3.2 一般企業の行動モデル

地域 k に立地する企業 i_k 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、および電力・水道・ガスという3種類のユーティリティを生産要素として、規模に関して収穫一定となる一次同次の技術を用いて財（商品） i を生産するものと仮定する。企業の階層的生産構造はFig. 3 に示す通りであり、企業の利潤最大化行動を以下のように段階的な最適化行動モデルで記述する。

Stage 1

$$\pi_i^k = \max p_i^k Y_i^k - c_{Vi}^k V_i^k - \sum_j q_j^k X_{ji}^k - q_u^k u_i^k \quad (1)$$

subject to

$$Y_i^k = \min \left\{ \frac{V_i^k}{a_{Vi}^k}, \frac{X_{li}^k}{a_{li}^k}, \dots, \frac{X_{Mi}^k}{a_{Mi}^k}, \frac{u_i^k}{a_{ui}^k} \right\} \quad (2)$$

Stage 2-A

$$c_{Vi}^k V_i^k = \min w^k L_i^k + r K_i^k \quad (3)$$

$$\text{subject to } V_i^k = (L_i^k)^{\delta_{Li}^k} (K_i^k)^{\delta_{Ki}^k} \quad (4)$$

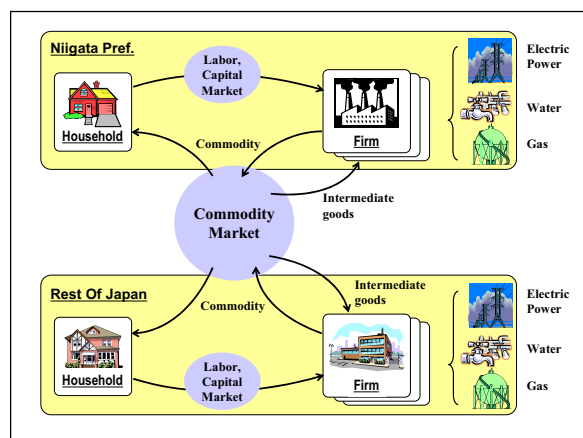


Fig. 2 Regional Economic System

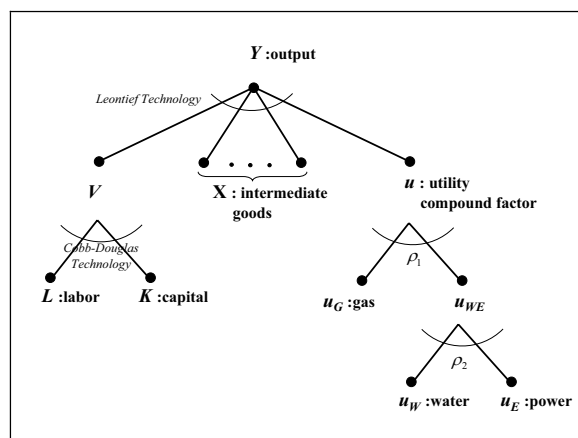


Fig. 3 Production Technology of General Sectors

Stage 2-B

$$q_u^k u_i^k = \min q_G^k u_{Gi}^k + q_{WE}^k u_{WEi}^k \quad (5)$$

subject to

$$u_i^k = \left\{ \alpha_{Gi}^k (u_{Gi}^k)^{\rho_{1i}} + \alpha_{WEi}^k (u_{WEi}^k)^{\rho_{1i}} \right\}^{\frac{1}{\rho_{1i}}} \quad (6)$$

Stage 3-B

$$q_{WE}^k u_{WEi}^k = \min q_W^k u_{Wi}^k + q_E^k u_{Ei}^k \quad (7)$$

subject to

$$u_{WEi}^k = \left\{ \alpha_{Wi}^k (u_{Wi}^k)^{\rho_{2i}} + \alpha_{Ei}^k (u_{Ei}^k)^{\rho_{2i}} \right\}^{\frac{1}{\rho_{2i}}} \quad (8)$$

ただし、

π_i^k : 企業 i_k の利潤,
 p_i^k : 財 i の生産地価格,
 Y_i^k : 企業 i_k の生産量,
 V_i^k : 企業 i_k の付加価値を形成する合成生産要素量,
 c_{Vi}^k : V_i^k の単位費用関数,
 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,
 q_E^k : 電力の消費地価格 (E→Wで水道, Gでガス),
 u_{Ei}^k : 電力投入量 (E→Wで水道, Gでガス),
 a_{ji}^k : 企業 i_k の生産に関する中間財 j の投入係数,
 a_{Vi}^k : 企業 i_k の生産に関する付加価値係数,
 w^k, r : 賃金率および資本レント

L_i^k, K_i^k : 企業 i_k に提供される労働・資本の量,

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

α_{Ai}^k : 各種ユーティリティのシェアパラメータ

ρ_{1i}, ρ_{2i} : 代替弾力性パラメータ,

である。添字 k は、地域 k における変数・パラメータであることを表す。

以上の3段階最適化行動問題(1)–(8)を解くことで、次の需要関数が得られる。

・労働需要関数

$$L_i^k = \left(\frac{r}{w^k} \frac{\delta_{Li}^k}{\delta_{Ki}^k} \right)^{1-\delta_{Li}^k} V_i^k \quad (9)$$

・資本需要関数

$$K_i^k = \left(\frac{r}{w^k} \frac{\delta_{Li}^k}{\delta_{Ki}^k} \right)^{1-\delta_{Ki}^k} V_i^k \quad (10)$$

・中間財需要関数

$$X_{ji}^k = a_{ji}^k Y_i^k \quad (11)$$

・合成生産要素需要関数

$$V_i^k = a_{Vi}^k Y_i^k \quad (12)$$

・ユーティリティ投入財需要関数

$$\frac{u_{Gi}^k}{u_i^k} = \left(\frac{\alpha_{Gi}^k}{q_{Gi}^k} \right)^{\sigma_{1i}} \Omega_{1i}^k \quad (13)$$

$$\frac{u_{WEi}^k}{u_i^k} = \left(\frac{\alpha_{WEi}^k}{q_{WEi}^k} \right)^{\sigma_{1i}} \Omega_{1i}^k \quad (14)$$

$$\frac{u_{Wi}^k}{u_{WEi}^k} = \left(\frac{\alpha_{Wi}^k}{q_{Wi}^k} \right)^{\sigma_{2i}} \Omega_{2i}^k \quad (15)$$

$$\frac{u_{Ei}^k}{u_{WEi}^k} = \left(\frac{\alpha_{Ei}^k}{q_{Ei}^k} \right)^{\sigma_{2i}} \Omega_{2i}^k \quad (16)$$

ただし、

$$\Omega_{1i}^k = \left\{ (\alpha_{Gi}^k)^{\sigma_{1i}} (q_{Gi}^k)^{1-\sigma_{1i}} + (\alpha_{WEi}^k)^{\sigma_{1i}} (q_{WEi}^k)^{1-\sigma_{1i}} \right\}^{\frac{\sigma_{1i}}{1-\sigma_{1i}}} \quad (17)$$

$$\Omega_{2i}^k = \left\{ (\alpha_{Wi}^k)^{\sigma_{2i}} (q_{Wi}^k)^{1-\sigma_{2i}} + (\alpha_{Ei}^k)^{\sigma_{2i}} (q_{Ei}^k)^{1-\sigma_{2i}} \right\}^{\frac{\sigma_{2i}}{1-\sigma_{2i}}} \quad (18)$$

$$\sigma_{ni} = \frac{1}{1-\rho_{ni}} \quad (n=1,2) \quad (19)$$

3.3 公益企業の行動モデル

公益企業（電力、水道、ガス）は、それら自身のレジリエンスファクタが推定されていないため、代替パラメータを設定してFig. 3のような生産構造を考えることが困難である。そこで、ユーティリティ投入に関して階層型CES関数を用いる代わりにFig. 4に示すようなLeontief型の構造を仮定する。

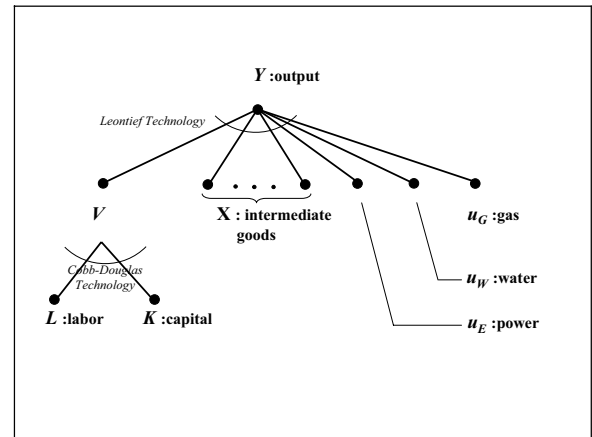


Fig. 4 Production Technology of Public Utilities

最適化行動より導かれる公益企業の要素需要関数はユーティリティ需要関数のみが一般企業のケースと異なり、以下ようになる。その他は、一般企業の需要関数（式(9)～(12)）と同じである。

・公益企業のユーティリティ投入財需要関数

$$u_{Gi}^k = a_{Gi}^k Y_i^k \quad (13)$$

$$u_{Wi}^k = a_{Wi}^k Y_i^k \quad (15)$$

$$u_{Ei}^k = a_{Ei}^k Y_i^k \quad (16)$$

3.4 家計の行動モデル

家計は、一定の所得 y の制約下で効用 U を最大化するように、財の消費量を決定する。家計は消費活動をすべて自地域内で行うものと仮定する。このような家計の行動は、次の最適化問題で記述できる。

$$U^k(d_i^k, y^k) = \max \left\{ \sum_i (\gamma_i^k)^{\frac{1}{\sigma}} (d_i^k)^{\frac{1-\sigma}{\sigma}} \right\}^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (20)$$

subject to

$$\sum_i q_i^k d_i^k \leq y^k (= \sum_i w_i^k L_i^k + r K_i^k) \quad (21)$$

ただし、

d_i^k : 家計の財 i の消費量、

y^k : 家計の所得、

γ_i^k : 家計の財消費に関するシェアパラメータ、

σ : 家計の財消費に関する代替パラメータ、

である。添字 k は地域 k における変数・パラメータであることを表す。

式(20)、(21)を解くと、次の需要関数を得る。

$$d_i^k = \frac{\gamma_i^k (q_i^k)^{1-\sigma}}{\sum_j \gamma_j^k (q_j^k)^{1-\sigma}} \frac{y^k}{q_i^k} \quad (22)$$

式(22)を(20)に代入すると、次を得る。

$$U^k(\mathbf{q}^k, y^k) = \left\{ \sum_i \gamma_i^k (q_i^k)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{1}{\sigma-1}} y^k \quad (23)$$

3.5 財の地域間交易モデル

財の地域間交易（移出入）については、同種財の生産地域による異質性を考慮した Armington の仮定を採用し、消費地側では合成財として取り扱う。この前提に立ち、同一業種であっても生産地ごとに財

が異質であるとする。各購入先地域からの財の購入量を（財購入に係る地域的意思決定と捉えて）、以下の費用最小化行動として記述する。

$$q_i^l X_i^l = \min \sum_k p_i^k (1 + \phi_i^{kl}) x_i^{kl} \quad (24)$$

$$\text{subject to } X_i^l = \left\{ \sum_k \lambda_i^{kl} (x_i^{kl})^{\frac{v_i-1}{v_i}} \right\}^{\frac{v_i}{v_i-1}} \quad (25)$$

ただし、

ϕ_i^{kl} : 財 i の輸送に係るマークアップ率、

λ_i^{kl} : シェアパラメータ、

v_i : 地域間代替弾力性に係るパラメータ、

X_i^l : 地域 l における財 i の総需要、

x_i^{kl} : 地域 k から l に輸送される財 i の量、
である。地域需要としての X_i^l は、財 i に係る域内最終需要と企業の中間投入需要の和で定義する。財の地域間・地域内輸送に係るマークアップの設定については、輸送される財の一部が輸送により失われる iceberg 型を仮定する。

式(24)、(25)を解くと、地域 l で消費する合成財 1 単位あたりの需要関数が次式のように求められる。

$$\frac{x_i^{kl}}{X_i^l} = \left(\frac{\lambda_i^{kl}}{\tilde{p}_i^{kl}} \right)^{v_i} \left\{ \sum_k (\lambda_i^{kl})^{v_i} (\tilde{p}_i^{kl})^{1-v_i} \right\}^{\frac{v_i}{1-v_i}} \quad (26)$$

ただし、

$$\tilde{p}_i^{kl} = p_i^k (1 + \phi_i^{kl}) \quad (27)$$

である。また、（合成財としての）財 i の消費地価格は、次式で表される。

$$q_i^l = \left\{ \sum_k (\lambda_i^{kl})^{v_i} (\tilde{p}_i^{kl})^{1-v_i} \right\}^{\frac{1}{1-v_i}} \quad (28)$$

3.6 経済均衡条件（平常時）

平常時の経済社会の均衡では、生産地価格・消費地価格を通じ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状態（長期均衡）を想定する。この長期均衡は、以下の式のセットで表現される。

(1) 労働・資本市場

まず、労働市場については、家計の地域間移動を考えないという条件より地域ごとに均衡し、次のような均衡式となる。

$$\sum_i L_i^k = L^k \quad (29)$$

ただし、 L^k は平常時の地域総労働量である。

次に、資本市場は地域間移動が自由であり、全国で均衡する。一国で閉じた経済を考えているため、平常時均衡状態における均衡式は次のようになる。

$$\sum_k \sum_i K_i^k = K \quad (30)$$

ただし、 K は平常時の国内総資本量である。

(2) 財市場

財市場では、家計及び企業の財需要量（地域需要合計）と交易モデルを通じて決まる各地域企業への需要量が、その企業の財供給量と次式のように均衡する。

$$Y_i^k = \sum_l x_i^{kl} (1 + \phi_i^{kl}) \quad (31)$$

ここに、左辺が企業 i_k の財供給量、右辺が企業 i_k への財需要量を表す。

(3) 空間価格均衡

財市場の均衡価格は、均衡状態における生産者価格 p_i^{k*} とそれに対応する消費者価格（式(28)）により決まる。平常時の p_i^{k*} は、企業の利潤関数（式(1)）で利潤をゼロとしたときの価格

$$p_i^k = c_{vi}^k a_{vi}^k + \sum_j q_j^k a_{ji}^k + q_u^k a_{ui}^k \quad (32)$$

に等しくなる。これは、長期均衡において企業が競争均衡の状態にあるとの前提に基づいている。

(1)～(3)を総合すると、労働については式(9)と(29)が、資本については式(10)と(30)が、財市場については式(11)、(13)～(19)、(22)、(26)と(31)が、それぞれ条件式として必要である。このほか、価格均衡として式(27)、(28)と(32)が必要である。

3.7 災害時の経済均衡

災害時には、ライフライン途絶の結果、ユーティリティ供給量が減少し、それを中間財として用いている産業の生産水準にも影響を与える。これを受けて価格の上昇や地域間流動バランスの変化が起こりながら、新たな均衡状態へと移るが、このとき本モデルでは、財市場については平常時と同様に地域間で均衡するが、労働・資本市場では移動がない（調整メカニズムが十分に機能しない）との条件を付加した短期均衡のメカニズムを想定し、被害の一部が企業自身に帰着する仮定（土屋ら、2006）をおく。

つまりここでは、ライフライン途絶シナリオに応じて当該ユーティリティの生産キャパシティが低下し、それを受けて財市場が新たな均衡状態へと移る。これに関連する式は、式(11)、(13)～(19)、(22)、(26)、(31)、及び価格に関する式(27)、(28)と(32)である。

3.8 経済被害の定義

本分析の枠組みでは、経済被害は次の二つの部分に分かれる。一つは、市場システムを介して外部に波及していき、最終的に家計に帰着する被害である。これを、等価変分（EV）を用いて次式で評価する。

$$EV^k = \frac{u(\mathbf{q}^{k(1)}) - u(\mathbf{q}^{k(0)})}{u(\mathbf{q}^{k(0)})} y^k \quad (33)$$

ただし、

$$u(\mathbf{q}^k) = \left\{ \sum_i \gamma_i^k (q_i^k)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{1}{\sigma-1}} \quad (34)$$

である。

二つ目は、いわゆる企業にとどまる被害である。これは、災害時のライフライン途絶により生産キャパシティが低下するときに遊休資源化する労働・資本の金銭価値で表される。生産キャパシティの低下分を ΔY_i^k と表すと、式(12)より、

$$\Delta V_i^k = a_{vi}^k \Delta Y_i^k \quad (35)$$

だけの（労働・資本からなる）合成生産要素量が遊休化する。したがって、その金銭価値は

$$c_{vi}^k \Delta V_i^k = c_{vi}^k a_{vi}^k \Delta Y_i^k \quad (36)$$

で表される。これを被災地域の産業ごとに求めたものと式(33)によって全体の経済被害を定義する。

4. データセットおよびパラメータ設定

4.1 基準均衡データ

CGE モデルにより分析を行う際には、基準年において経済均衡が成立しているものと仮定し、産業連関表を中心とする諸経済統計データがその均衡解であると考ええる。本分析では、利用可能な最新のデータが整備されている 2000 年を基準年とし、同年の産業連関表をもとに基準均衡データを作成する。作成手順の要点は次の通りである。

(1) 地域および産業部門数の設定

「新潟県」と「新潟県を除く日本全国」（以下、「ROJ」と記す）からなる 2 地域モデルで分析を行うこととする。産業部門は、中分類規模で電力、水道、ガスを個別に見ることができるよう、Table. 2 に示す 27 部門とする。

(2) 地域間産業連関表への展開

新潟県と全国の 2000 年産業連関表（それぞれ新潟県、総務省統計局のホームページより入手可能）を 27 部門に統合した後、ROJ の移出入を除いた部分を「全国」－「新潟県」の値で決定する。さらに、ROJ

の移出・移入量をそれぞれ新潟県の移入・移出量として定め、最後に、財の産出・消費量のバランスをチェックする。

(3) データの調整

(2)までの作業で地域間表自体の整合はとれているが、本モデルでは経済が一国で閉じている状況を仮定している。そこで、基準データにおいても閉じた経済となるよう、実データには存在する輸出入実績値をゼロとするために資本収支とあらかじめ調整しておく。また、一部の部門で地域の最終需要が負の値をとっている。本モデルで想定している家計の行動と整合をとるためには最終需要が非負であることが必要なので、負値の最終需要をゼロに置き換え、再度、表全体のバランスをとって最終的な基準均衡データとする。

4.2 被災シナリオ

被災シナリオの作成では、災害時にどのライフラインが途絶し、どのライフラインが機能しているかを適切にモデルの入力変数に反映させる。ただし、（本CGEモデルで被災地域と想定している）新潟県全体が一様に途絶したりしなかったりするわけではないので、地域でマクロに見た途絶率を算出する必要がある。本モデルでは、次のように簡単に考えることとする。いま、被災地域において、ライフライン途絶の影響を受ける企業の割合を β とし、ある途絶シナリオの下で平常時の生産レベル Y が rY ($r < 1$: resiliency factor)に変化する場合、集計化された災害時の生産キャパシティは

$$Y' = (1 - \beta)Y + \beta rY = (1 - \beta + \beta r)Y \quad (37)$$

となる。これを、Fig. 1 に想定するライフライン途絶・復旧シナリオごとに求め、モデルの入力とする。その後の計算は 3.7 に従う。ただし、計算の際に途絶ライフライン復旧のための費用は考えない。

なお、Fig. 1 にも示したように、地震による被災シナリオは、まず全ライフラインが途絶し、その後電力、水道、ガスの順番で復旧がなされるものと仮定する。各ライフラインの途絶期間は、資料（日本政策投資銀行新潟支店、2004）をもとに、地震発生からライフライン途絶の影響を受けた家屋（戸数）の9割が復旧するまでの日数であるとし、電力3日、水道12日、ガス30日をベースケースとする。

4.3 パラメータ出典一覧

本モデルに登場する多くのパラメータは、基準均衡データが方程式系の解となるように設定される（キャリブレーション）。ただし、一部のパラメー

Table. 1 Parameter Sources

Symbol	Source
$a_{ji}^k, a_{vi}^k, a_{ui}^k$	平成 12 年産業連関表
$\delta_{Li}^k, \delta_{Ki}^k$	平成 12 年産業連関表
$\alpha_{Ei}^k, \alpha_{Wi}^k, \alpha_{Gi}^k$	平成 12 年産業連関表
ρ_{li}, ρ_{2i}	梶谷ら (2005a, 2005b) を利用して 4.4 で設定
σ_{li}, σ_{2i}	ρ_{li}, ρ_{2i} 設定後に式(19)
γ_i^k	平成 12 年産業連関表
σ	市岡 (1991)
ϕ_i^{kl}	set by authors
λ_i^{kl}	平成 12 年産業連関表
v_i	土谷ら(2005)
β	工業統計, 事業所統計等

タはあらかじめ外生的に与えておく必要があり、通常これらは既往研究をもとに設定され、シナリオ分析に合わせて感度分析を実施して全体の挙動を確認するという手続きをとる。

パラメータの一覧を Table. 1 に示す。

4.4 代替弾力性パラメータの推定

(1) 途絶抵抗係数と代替弾力性の関係式

代替弾力性に係るパラメータを推定するために、一般企業の階層型 CES 型生産関数と途絶抵抗係数の定義から式展開を施し、関係式を導こう。まず、導出過程に必要な式を再掲する。

$$Y_i^k = \min \left\{ \frac{V_i^k}{a_{vi}^k}, \frac{X_{li}^k}{a_{li}^k}, \dots, \frac{X_{Mi}^k}{a_{Mi}^k}, \frac{u_i^k}{a_{ui}^k} \right\} \quad (2)$$

$$q_u^k u_i^k = \min q_G^k u_{Gi}^k + q_{WE}^k u_{WEi}^k \quad (5)$$

$$u_i^k = \left\{ \alpha_{Gi}^k (u_{Gi}^k)^{\rho_{li}} + \alpha_{WEi}^k (u_{WEi}^k)^{\rho_{li}} \right\}^{\frac{1}{\rho_{li}}} \quad (6)$$

$$q_{WE}^k u_{WEi}^k = \min q_W^k u_{Wi}^k + q_E^k u_{Ei}^k \quad (7)$$

$$u_{WEi}^k = \left\{ \alpha_{Wi}^k (u_{Wi}^k)^{\rho_{2i}} + \alpha_{Ei}^k (u_{Ei}^k)^{\rho_{2i}} \right\}^{\frac{1}{\rho_{2i}}} \quad (8)$$

梶谷ら (2005a, 2005b) における途絶抵抗係数 r の定義より,

$$r(\theta_E, \theta_W, \theta_G) = \frac{Y(\theta_E, \theta_W, \theta_G)}{Y(1,1,1)} \quad (38)$$

である。ただし、 $\theta_E, \theta_W, \theta_G$ はそれぞれ電力、水道、ガスの災害時における機能水準を表すダミー変数で、1 のときに機能していることを、0 のときに途絶していることを表す。すなわち、式(36)右辺は、災害時のライフライン途絶状況下における企業の生産水準の対平常時比を表している。

式(38)以降、煩雑さを避けるために添字 i, k を省略する。式(38)に(2)を代入する。このとき、

$$r(\theta_E, \theta_W, \theta_G) = \frac{u(\theta_E, \theta_W, \theta_G)}{u(1,1,1)} \quad (39)$$

を仮定すると、

$$\begin{aligned} r(\theta_E, \theta_W, \theta_G)^{\rho_1} &= \frac{u(\theta_E, \theta_W, \theta_G)^{\rho_1}}{u(1,1,1)^{\rho_1}} \\ &= \frac{\alpha_G(u_G(\theta_G))^{\rho_1} + \alpha_{WE}(u_{WE}(\theta_E, \theta_W))^{\rho_1}}{\alpha_G(u_G(1))^{\rho_1} + \alpha_{WE}(u_{WE}(1,1))^{\rho_1}} \end{aligned} \quad (40)$$

となり、右辺の分子分母を $\alpha_G(u_G(1))^{\rho_1}$ で割ると

$$\begin{aligned} r(\theta_E, \theta_W, \theta_G)^{\rho_1} &= \frac{(r_G)^{\rho_1} + \tilde{\alpha}(u_{WE}(1,1)/u_G(1))^{\rho_1}(r_{WE})^{\rho_1}}{1 + \tilde{\alpha}(u_{WE}(1,1)/u_G(1))^{\rho_1}} \end{aligned} \quad (41)$$

が導かれる。ただし、 $r_G = u_G(\theta_G)/u_G(1)$, $r_{WE} = u_{WE}(\theta_E, \theta_W)/u_{WE}(1,1)$, $\tilde{\alpha} = \alpha_{WE}/\alpha_G$ である。

ウェイトパラメータ α_{WE}, α_G は、一般に基準データのみから値を定めることは困難だが、その比 α_{WE}/α_G は一定であり、式(5), (6)の最適化問題の一階条件より次の関係が導かれる。

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_{WE}}{\alpha_G} = \frac{q_{WE}(u_{WE}(1,1))^{1-\rho_1}}{q_G(u_G(1))^{1-\rho_1}} \quad (42)$$

これより、

$$\tilde{\alpha} \left(\frac{u_{WE}(1,1)}{u_G(1)} \right)^{\rho_1} = \frac{q_{WE}u_{WE}(1,1)}{q_Gu_G(1)} \quad (43)$$

となり、式(43)右辺は中間投入財としての水道・電力合成財とガスの投入金額シェアを表しているため、これは産業連関モデルで言う投入係数の比に等しくなる。すなわち、

$$\frac{q_{WE}u_{WE}(1,1)}{q_Gu_G(1)} = \frac{a_{WE}}{a_G} = \frac{a_W + a_E}{a_G} \quad (44)$$

である。

式(42)~(44)を(41)に代入して整理すると、最終的に次の関係を得る。

$$r(\theta_E, \theta_W, \theta_G)^{\rho_1} = \frac{a_G(r_G)^{\rho_1} + a_{WE}(r_{WE})^{\rho_1}}{a_G + a_{WE}} \quad (45)$$

式(39)~(45)と同様の手順で、別の階層における次の関係式(46)を導出できる。

$$r_{WE}(\theta_E, \theta_W, \theta_G)^{\rho_2} = \frac{a_W(r_W)^{\rho_2} + a_E(r_E)^{\rho_2}}{a_W + a_E} \quad (46)$$

式(45), (46)より r_{WE} を消去すると、未知パラメータ ρ_1, ρ_2 の除くすべての変数はデータから入力できるので、未知パラメータの数だけ災害時の状況に関するデータのセット $(r, r_E, r_W, r_G, a_E, a_W, a_G)$ を用いて ρ を推定することが可能となる。

(2) 事業所調査結果に基づくパラメータ推定

2004 年新潟県中越地震後の中越地域の 6000 事業所を対象としたアンケート調査 (中野ら, 2006) より推定されたライフライン途絶抵抗係数を用いて、代替弾力性に係るパラメータの推定を行う。企業の生産技術は Fig. 3 の階層構造を仮定し、(電力=E, 水道=W, ガス=G) の各要素が (機能, 途絶, 途絶), (機能, 機能, 途絶) の 2 時点におけるデータを、式(45), (46)の関係に代入して ρ_1, ρ_2 を決定した。なお、投入係数 $\mathbf{a}$ については、調査対象地域が含まれる新潟県の産業連関表を用いている。

$\rho_{ni}(n=1,2)$ の推定後、

$$\sigma_{ni} = \frac{1}{1 - \rho_{ni}} \quad (47)$$

により代替弾力性値 σ_{ni} が計算できる (i は産業を表すラベル)。この値が 1 のとき、当該階層の投入-産出構造は Cobb=Douglas 型で規定され、0 のとき、Leontief 型で規定される。 σ_{ni} は通常、0 と 1 の間の値をとる。

パラメータ推定結果を Table. 2 に示す。パラメータは、Rose and Liao (2005) で用いられているものよりもより弾力的である。これは一つに、災害時の短期の代替弾力性にはレジリエンシー効果があるために、通常 (長期) の値よりも高くなっているためと予想される。

Table.2 Calibrated Substitution Parameters of 27 Sectors

Classification of Industry	σ_1	σ_2	#sample
1 Agriculture, Forestry and Fishing		0.577	4
2 Mining	1.000	0.678	1
3 Food and Beverage	0.639	0.593	36
4 Textiles	0.678	0.652	37
5 Lumber and Wood Products	0.753	0.649	6
6 Pulp, Paper and Paper Products	0.753	0.649 *1)	
7 Chemicals	1.000	0.674	7
8 Petroleum and Coal Products	1.000	0.548	1
9 Plastic Products	1.000	0.548 *2)	
10 Non-metallic Mineral Products	0.661	0.666	10
11 Iron and Steel	0.724	0.638	13
12 Non-ferrous Metal and Products	0.441	0.630	2
13 Fabricated Metal Products	0.772	0.620	12
14 Machinery	0.667	0.640	21
15 Electrical Machinery	1.000	0.615	8
16 Transport Equipment	0.760	0.654	6
17 Precision Instrument	0.730	0.636	12
18 Other Manufacturing	0.712	0.611	16
19 Construction	0.714	0.646	60
20 Electric Power Supply			
21 Gas, Heat Supply			
22 Water Supply			
23 Wholesale and Retail Trade	0.663	0.633	100
24 Finance, Insurance and Real Estate	0.728	0.613	11
25 Transportation and Communication	0.947	0.678	9
26 Services	0.893	0.714	82
27 Others	1.000	0.609	29

*1) : referred to Lumber and Wood Products.

*2) : referred to Petroleum and Coal Products.

5. 経済被害の試算

5.1 Base caseでの経済被害

4.2 で設定したシナリオの下で計算を行った結果を Fig. 5 に示す。数字は、年単位で出力された被害額を単純に 365 等分して日単位に換算している。また、各種ライフラインの途絶期間を一つのフェーズと捉え、あるフェーズから次のフェーズへの移行に

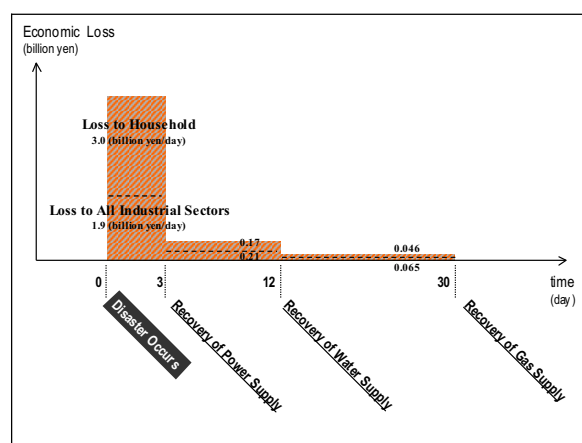


Fig. 5 Economic Losses to Household and Industries

際しては、損傷したライフライン機能の復旧費用などは考慮せず、モデルへの入力条件のみを変化させて被害評価を行っている。

電力・水道・ガスのすべてのライフラインが途絶した状況 (phase 1) では、家計も産業も大きな被害をこうむる。その被害額は、新潟県と県外を含めた家計が 30.3 (億円/日)、全産業部門が (19.0 億円/日) であり、産業業種別では、生産額規模の大きい第 3 次産業に大きな被害が出ている (サービス業 5.7 億円/日、金融・保険・不動産業 3.2 億円/日、商業 2.8 億円/日など) が、それ以外の第 1 次・第 2 次産業では、電気機械 (0.59 億円/日)、農林水産業 (0.58 億円/日)、金属 (0.54 億円/日) の順となっている。また、平常時生産規模に対する被害の比率でみると、製材・木製品、非鉄金属、繊維製品などの業種が製造業で上位にくる。

いったん電力が回復すると、多くの産業業種で生産性が大きく回復するため、電力回復後の 2 つのフェーズにおける被害額は、電力が途絶していたときに比べてかなり小さく、ガス・水道が途絶しているときの全経済被害は約 3.8 (億円/日)、水道が復旧してガスのみが途絶している状況では約 1.1 (億円/日) である。このことから、電力の早期復旧が被害軽減の鍵であることが分かる。

Fig. 5 から途絶期間も考慮に入れて各フェーズで推定された被害を合計すると、ライフライン途絶の総損失は 203 億円となった。これは、操業利益損失推定額の約 3,200 億円 (中野ら, 2006) に対して 6~7% の大きさである。

Fig. 5 から読みとれるように、地域全体で見た場合には、明らかに電力の早期復旧により被害が大きく軽減される。ただし、産業別に見た場合には、電力のみの復旧では生産性を十分に回復しえない業種もあり、どのライフラインがどの産業部門の生産活動に大きな影響を及ぼしているのかについては、例えば途絶抵抗係数 (梶谷・多々納, 2006) をみることで判る。電力以外にガスの途絶が大きく影響する部門には非鉄金属などがあり、水道の途絶が影響する部門には食料品製造業などがあげられる。

Fig. 6 に、全ライフラインが回復するまでの 30 日間に企業がこうむった経済被害額を示す。金額的にはやはり第 3 次産業の被害額が大きく、全体の約 8 割を占めるが、平常時粗付加価値額に対する被害の比としてみると、大きい部門順に非鉄金属 (0.190%)、窯業・土石製品 (0.166%)、繊維製品 (0.157%)、精密機械 (0.153%) となっている。被災した中越地域の産業では繊維や精密機械のシェアが比較的高いので、被害で見ても地域特性が表れていると言えよう。

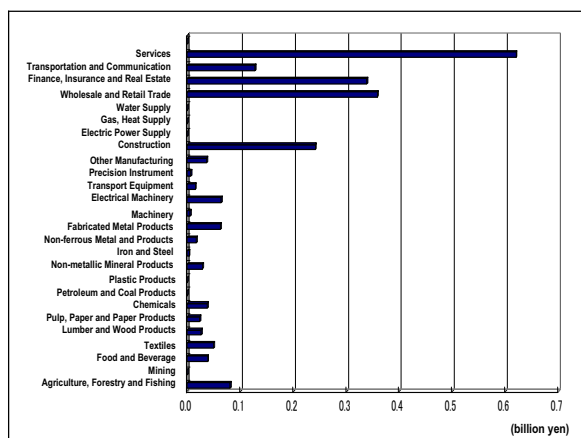


Fig. 6 Cumulative Losses to Individual Industrial Sectors

5.2 感度分析

(1) 企業生産レジリエンシーパラメータ

経済被害額を通して「ライフライン途絶に対する企業生産レジリエンシー」を評価するには、現状のレジリエンシーによる被害軽減（もし代替弾力性がゼロだった場合の被害額との比較）に加え、ユーティリティ投入に係る代替がより弾力的になった場合にどのくらいの被害軽減効果があるかを分析することが重要である。そこで、企業生産レジリエンシーに係るパラメータであるユーティリティ投入の代替弾力性を変化させ、被害額の変化を把握する。

ここでは、感度分析の例として、水道とガスが途絶しているフェーズにおいてユーティリティ投入の代替弾力性 σ_i が各階層で 0.8 および 0.9 に変化した場合に、どのくらいの被害が軽減されるかを試算した。Table. 3 にその結果を示す。標準ケースにおける弾力性の値は、各産業に固有のものであるが (Table. 2)、感度分析では全産業について統一的に 0.8 または 0.9 に変化させるものとし、その中で製造業業種のみを変化させた場合と非製造業業種のみを変化させた場合に分けてみている。

Table. 3 Sensitivity Analysis on Parameter σ

parameter	target sector(s)	household	industry	total
base	all sectors	171	213	384
0.8	all sectors	137	189	327
	manufacturing	170	208	379
	nonmanufacturing	138	194	332
0.9	all sectors	108	170	278
	manufacturing	170	204	374
	nonmanufacturing	109	179	287

1) : million yen/day.

2) : if a sector has a parameter larger than 0.8(0.9), it holds the original value.

Table. 3 を見ると、ユーティリティ投入の代替弾力性が高いときほど被害が小さく、仮に弾力性値が全産業で 0.9 であったとすると、水道とガスが途絶しているフェーズでの被害は、標準ケースに比べて 1 日当たり約 1 億円軽減されることになる。これは割合に直すと、約 3 割という大きさである。製造業より非製造業の部門において被害軽減の額が大きくなっているが、これは、非製造業の金額規模が製造業よりも大きく、企業にとどまる被害でみても全体の約 8 割を占めているためである。

(2) 地域間交易の代替弾力性パラメータ

本分析で地域間交易の代替弾力性パラメータ設定の参考としている土谷ら (2005) の研究では、第 1 次・第 2 次産業の 28 業種についてパラメータ推定の検討を行っており、第 3 次産業に属する業種は含まれていない。本研究の被害試算においては、第 3 次産業は現地の特性があるために地域間代替性はあまり高くはないと考え、第 1 次・第 2 次産業業種のほとんどの地域間代替パラメータ推定値よりも小さい 0.8 という値 — 既往研究 (小池・右近, 2006) においても参考値として用いられている — を設定しているが、設定にそれ以上の根拠はないため、感度分析を行って、パラメータの設定により出力にどの程度の変化が見られるのかを確認する。

Fig. 7 は、電力・水道・ガスのすべてが途絶してしまうフェーズで計測される被害のうち、最終的に家計に帰着する被害が、第 3 次産業に属する業種の地域間代替弾力性パラメータ ν_i の値の設定によって、どのくらい新潟県および ROJ に帰着するかを表している。図より、新潟県で起こったライフライン途絶の影響は、全国合計で見ると弾力性の値によらずにほぼ一定の被害額であるが、弾力性が小さいときほど、被害のほとんどが新潟県に集中する。

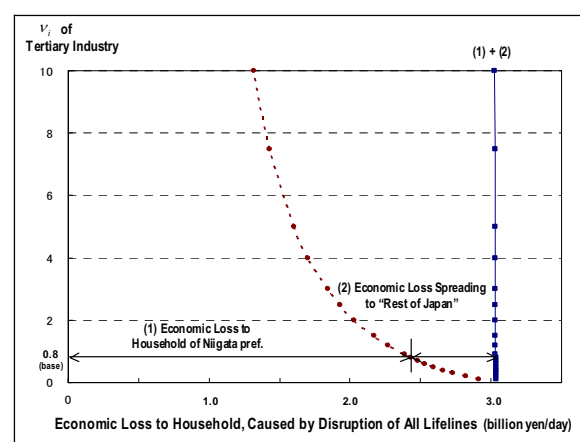


Fig. 7 Sensitivity Analysis on Substitution Parameter ν_i

6. おわりに

本研究では、災害時におけるライフライン機能の損傷が地域経済に及ぼす影響を計量化するために、応用一般均衡モデルを用いて経済被害の評価を行った。その中で、産業ごとのライフライン途絶に対する生産レジリエンシーに関する基礎的な検討として、災害時の企業のライフライン途絶に対するレジリエンシー指標としてCES型生産関数の代替パラメータに着目し、既往研究のライフライン途絶抵抗係数を利用してこのパラメータを推定した。これをふまえた上で、産業ごとのユーティリティ投入に係る代替性を応用一般均衡モデルに反映させて被害推計に適用している点に、本研究の方法論的な意義がある。

分析の結果、まず、各ライフラインの途絶状況（フェーズ）に応じた経済被害を地域家計および産業別に把握することができた。ライフライン途絶の総損失は203億円と試算され、操業利益損失推定額の10%弱の割合を占める大きさである。損失の大部分は、電力途絶を伴う水道・ガスの全ライフラインが途絶している地震発生直後の3日間に集中しており、電力が回復してからの1日あたりの被害額と比べても、電力の途絶が地域経済に大きく影響していることがわかる。また、地域産業がライフライン途絶に対してレジリエンシーを高めておくことでどのくらいの被害が軽減されるかについても検討を行った。

レジリエンシー概念に基づく適応行動は、家計についても考えることができる。例えば、企業の行動モデルと同様に、災害時のユーティリティ利用量が幾分減ったとしても他の何かで代替して効用水準を少しでも高く保てることをモデルに取り入れることは可能である。家計の行動に貯蓄を取り入れることもその一つであろう。

また、本モデルは分析の関心をライフライン途絶にしていることから、それ以外の点についてはシンプルな構造となっていたが、地域間交易の代替弾力性パラメータに係る感度分析結果からもわかるように、交易関係を通して経済被害の地域帰着構造を正しく理解するために地域間交易に関する議論、すなわち交通の問題を議論に入れる必要がある。

以上、いくつかの課題が残されているものの、これらはすべてモデル構造を発展させることにより取り扱うことができる。応用一般均衡モデルを用いて被害評価を行う強みの一つはこの点にあり、今後、交通ネットワークを考慮して交通の被災や資本損傷による被害評価にも適用し、ミチゲーション政策への有用な計画情報提供の役割を担える総合的なモデルへと拡張したい。

参考文献

- 市岡 修(1991):応用一般均衡分析,有斐閣,281pp.
- 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田善治 (2005a): 製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定, 自然災害科学 Vol.23, No.4, pp.553-564.
- 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田善治 (2005b): 非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定, 自然災害科学, Vol.24, No.3, pp.247-255.
- 梶谷義雄, 多々納裕一 (2006): 日本におけるライフライン途絶抵抗係数, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.1282-1285.
- 小池淳司, 上田孝行 (2005): 大規模地震による経済的被害の空間的把握, 多々納・高木編著『防災の経済分析』第8章, 勁草書房, 370pp.
- 小池淳司, 右近 崇 (2006): 新潟県中越地震における磐越道・上信越道のリダンダンシー効果, 高速道路と自動車, Vol.49, No.7, pp.17-26.
- 白谷啓行, 能島暢呂, 杉戸真太, 佐藤慶昇 (2006): 供給系ライフラインの地震時機能停止が製造業に与える影響の評価モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.1238-1241.
- 土谷和之, 秋吉盛司, 小池淳司 (2005): SCGEモデルにおける地域間交易の代替弾力性に関する検討, 第19回ARSC研究発表会講演概要, 4pp.
- 土屋 哲, 多々納裕一, 岡田憲夫 (2003): 空間応用一般均衡アプローチによる東海地震の警戒宣言時の交通規制に伴う経済損失の評価, 地域安全学会論文集, No.5, pp.319-325.
- 土屋 哲, 多々納裕一, 岡田憲夫 (2006): 新潟県中越地震による経済被害の計量化の枠組み, 土木計画学研究・論文集, Vol.23, pp.3xx-3xx.
- 中野一慶, 多々納裕一, 藤見俊夫, 梶谷義雄, 土屋哲 (2006): 2004年新潟県中越地震における産業部門の経済被害に関する研究, 第34回土木計画学研究・講演集, CD-ROM.
- 日本政策投資銀行新潟支店 (2004): 緊急レポート 新潟県中越地震が及ぼした県内経済等への影響について, 44pp.
- 萩原泰治 (2001): 神戸CGEモデルによる阪神・淡路大震災の影響に関する分析, 国民経済雑誌 第183巻 第1号, pp.71-78.
- Applied Technology Council (1991): Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, ATC-25, Redwood City, California.

Rose, A. (2004) : Economic Principles, Issues, and Research Priorities, Chapter 2 of the book “Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters”, Springer, 323pp.

Rose, A. and S. Liao (2005) : Modeling Regional Economic Resilience to Disasters: A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions, Journal of Regional Science, Vol.45, No.1, pp.75-112.

Measuring Economic Losses Caused by Lifeline Disruption

Hirokazu TATANO, Satoshi TSUCHIYA* and Yoshio KAJITANI**

* Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology

** Earthquake Engineering Sector, Central Research Institute of Electric Power Industry

Synopsis

A catastrophic disaster damages to lifeline facilities such as electric power, water and gas services, and it causes enormous effect on community life and business activity. This report considers industrial resiliency in order to investigate measurement of economic impacts due to lifeline disruption from the Niigata-Chuetsu earthquake in 2004. Using survey data, resiliency factor was firstly estimated so that it could take adaptive responses of industrial sectors into account. Secondly, with the estimated resiliency factor reflected on substitution parameters of production function, economic impacts of the earthquake were analyzed by computable general equilibrium model.

Keywords: lifeline disruption, resiliency, economic losses, computable general equilibrium model