

復旧シナリオを考慮した地震による経済被害予測手法の開発

中野 一慶¹・多々納 裕一²・梶谷 義雄³

¹正会員 情報博 京都大学大学院情報学研究所 (現 財団法人電力中央研究所) (〒 100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1)
E-mail: k-nakano@criepi.denken.or.jp

²正会員 工博 京都大学防災研究所 社会防災研究部門 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学防災研究所 社会防災研究部門 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

自然災害による産業部門の経済被害を軽減するには、事前の防災投資や事後的な復旧対応策を組み合わせることで、被災後の生産能力の低下を軽減するとともに早期の復旧を実現する必要がある。費用便益分析を行い事前・事後の対策を効率的に組み合わせた計画を策定するには、復旧の過程を考慮して災害による経済被害の総額を事前に予測することが不可欠である。本研究は地震災害による経済被害の総額をライフラインや生産資本の復旧過程を考慮して予測する手法を開発する。本手法では復旧のシナリオを設定し、応用一般均衡モデルを用いて各復旧の段階における経済被害を計算し、それを集計することで経済被害の総額を評価する。特に各経済主体に様々な形で帰着する経済被害を集計し被害の総額を評価する際には、二重計算など被害評価における整合性の問題を回避する必要があることに着目し、経済被害を整合的に評価する手法を提案する。また本手法を2004年新潟県中越地震に適用し経済被害評価を行う。

Key Words : *natural disaster, resiliency, overall economic loss, recovery process, consistent measurement of economic loss*

1. はじめに

近年、急速な都市化の進行によって自然災害リスクの高い地域にも人口や資産が集積していくのに伴い、自然災害による社会経済的影響は増加の一途を辿っている。特に地域経済の基盤となる産業部門は自然災害による大きな脅威に曝されている。自然災害による産業部門の被害を軽減するには、被災後の生産能力の低下を軽減するとともに早期の復旧を実現する必要がある。災害によるショックを和らげ、被害を軽減するこうした特性はレジリエンシーと呼ばれる。

耐震化などの事前の対策は、災害時の生産能力の低下を軽減することでレジリエンシーの向上に寄与し、効果的な復旧対応など事後的な対策は、復旧速度を上げることでレジリエンシーを向上させる。また事後的な対応を事前に取り決めておくことは早期の復旧を実現するための重要な手段の一つであり、例えばBCP(事業継続計画)は近年重要な被害軽減対策として着目されてきている。こうした事前と事後の対策を効果的に組み合わせるには、事前・事後の対策の組み合わせた代替案を設計し、その被害軽減効果を分析・評価する必要がある。そのためには事前に、災害後の復旧の過程を考慮して経済被害の総額を予測することが不可欠となる。

わが国では中央政府や地方政府などにおいて大規模

な地震災害の被害想定が実施されており¹⁾²⁾、近年では経済的な影響についてもますます被害想定の中に取り込まれるようになってきている。こうした経済的な影響の評価手法は多くの研究の蓄積の中で高度化されてきており、地域の様々な経済主体に帰着する経済被害を詳細に分析するために地域経済モデルを用いた被害計量化の枠組みも多く提案されてきている(例えば生産能力の低下³⁾⁴⁾や、道路ネットワークの寸断⁵⁾⁶⁾⁷⁾、ライフラインの途絶を対象とした研究⁸⁾⁹⁾などがある)。こうした被害計量化手法は被災後のある時点での影響を評価しようとするものが多く、復旧の動的な過程を考慮できるものは十分に開発されているとは言い難い。本研究では災害後の復旧の過程を考慮し、経済被害の総額を事前に予測する方法を開発することを目的とする。そのために本研究では、段階的な復旧フェーズを設定し、各復旧のフェーズにおける均衡での経済被害を逐次的に計算し、それを集計することで経済被害総額の評価を行うアプローチを採用する。復旧の過程を考慮して災害の経済被害を評価する場合、資本ストックの被害による資産価値の損失や、復旧の過程で生じる営業利益の損失、復旧にかかるコストなど、様々な形で現れる被害の項目を評価する必要がある。これらを足し合わせて被害の総額を評価しようとする場合には、二重計算などの問題に注意する必要がある¹⁰⁾。またこ

うした被害評価における整合性の問題を解決するには、複数の主体に帰着する被害をどのように集計化することで地域経済の被害が整合的に評価できるかという論点についても整理する必要がある。先行研究ではこうした二重計算を防ぎ、経済被害の総額を整合的に評価する方法を被害の整合的評価方法と呼び、その手法を提案してきている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。例えば Tatano et al.¹¹⁾は災害の被害総額は復旧費用と利益減少によって整合的に被害を評価できることを示した。また 中野・多々納¹²⁾は定常状態において予期せぬショックとして起こる災害を対象として、i) 国内家計が国内企業を全て所有している、ii) 労働賃金・雇用に変化がない、iii) 復旧費用が保険でカバーされない、iv) 最終消費財価格に変化がない、という条件の下で、災害の被害総額が復旧費用と利益減少の総和によって評価できることを示した。しかしそこで提案されてきた手法では価格の変化による家計需要への影響が考慮されておらず、本研究のような応用一般均衡モデルを用いた被害評価に直接適用できるものではない。本研究は先行研究において提案されてきた被害の整合的評価方法を、価格の変化による影響を考慮できるように拡張し、被害予測手法に組み込む。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 復旧過程を考慮した経済被害額の予測手法の提案

本研究では、被災後の生産能力の低下を軽減し、復旧の早期化を実現する方策の分析、評価のために利用することを目的とした経済被害予測手法を提案する。そのために図-1のような段階的な復旧のフェーズをもち、各段階ごとに経済が均衡に達すると仮定することで逐次的に均衡を計算する、逐次動学型の経済均衡モデルのアプローチを採用する。

例として図-1では、被災直後に電気と水道とガスが途絶し、生産資本も損傷すると仮定する。その後電気、水道、ガス、生産資本の順番に回復していくと仮定している。図-1の上の図は復旧フェーズの推移に伴って企業の操業水準も回復していく様子を描いている。図-1の手法では、各復旧フェーズでのライフラインや生産資本の回復状況を地域経済モデルの入力値とし、各復旧のフェーズにおける経済被害の計算を行う。また復旧フェーズが推移するのにかかる費用も同時に予測する。図-1のような手法にすることで、早期の復旧による被害軽減効果を分析することが可能となる。例えばライフラインなどの復旧の早期化の効果は、復旧のフェーズの推移の変化による地域産業の被害の軽減額として評価できる。

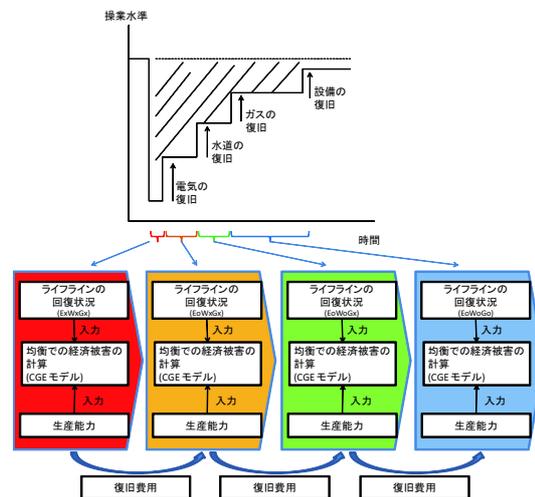


図-1 災害後の復旧過程を考慮した逐次動学型の経済被害評価モデルの概略

3. 災害による経済被害評価のための応用一般均衡モデルの定式化

(1) 応用一般均衡アプローチ

CGEモデルは地域経済をモデル化するためのツールであり、多くの政策分析に用いられてきている。近年では災害の被害の分析にも用いられている。CGEモデルは産業連関モデルなどの他のモデルに比べて、[1] 生産投入要素間の代替や生産要素の調達先地域の代替による災害のショックへの対応や、[2] 資本ストックの損傷による供給制約を表現でき、[3] 生産関数などを変化させて様々な分析目的に合わせたモデルを構築できる、などの点で優れた分析ツールとなっている。CGEモデルは基本的に長期的な経済の均衡状態を想定しているモデルであり、そのままでは災害時の経済状況を表現することに利用するには限界がある。そのため先行研究でも、短期均衡の仮定を置くなどして、災害の分析に応用されてきた。例えば Tsuchiya et al.⁶⁾は資本や労働の地域間の移動に制限を導入することで、短期均衡を仮定し、災害の影響を評価している。Rose and Guha¹⁴⁾は、生産要素間の代替弾力性の変化によって、ライフライン途絶などの短期的状況を表現できることを示唆している。本研究では土屋らのアプローチに倣い、労働・資本の地域間・産業間の移動に制限を導入することでCGEモデルを災害の影響評価に適用する。

(2) モデルの基本的な構造

1つの国の中に N 個の地域が存在することを想定する。一つの地域には代表的家計と M 種の産業の企業、 M 種の交易エージェントが立地していると仮定する。また産業には電力、水道、ガスを供給する3つの産業

が含まれるとする。以下ではこれら3つの産業をライフライン産業と呼び、その他の産業を一般産業と呼ぶ。企業はライフラインを含めた中間財と労働、資本を用いて生産を行う。家計は労働と資本を提供し、財を消費する。労働市場は地域内で閉じていると仮定し、労働の地域間移動は制限されているが産業間では移動可能と仮定する。資本は地域間・産業間の移動が可能である。財は国際的に取引されると仮定する。Armington 仮定によって、生産地の違う財は異なる財であると見なす。図-2 はモデルの概要を示したものである。

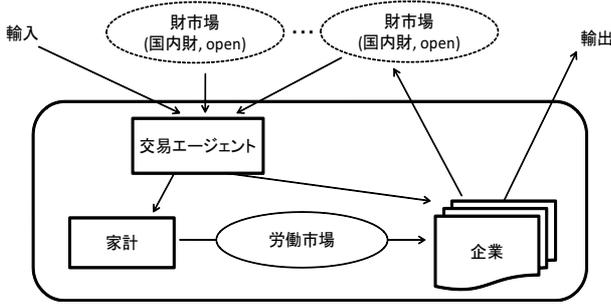


図-2 経済被害評価のための CGE モデルの概要

(3) 企業の行動

a) 一般産業の企業の生産構造

土屋らに倣い¹⁵⁾、一般産業の企業の生産構造は図-8 のような階層型の生産技術を持つと仮定する。一般産業の企業は労働、資本、中間財、各種ライフラインサービスを投入している。ライフラインの途絶に際しても、企業はある程度の操業水準を保つことができる¹⁶⁾。これは生産関数上ではライフライン間の代替によってモデル化可能である⁹⁾。

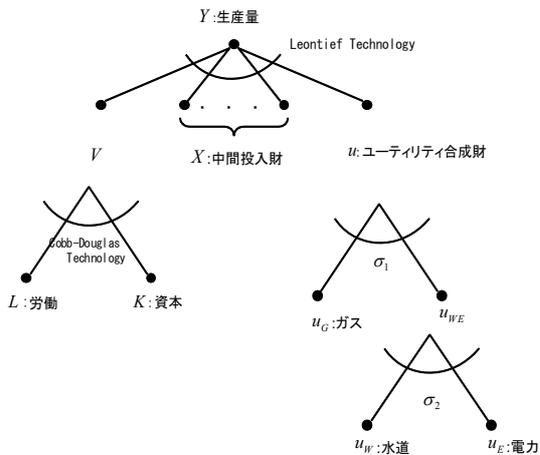


図-3 一般産業の企業の生産構造

企業の利益最大化問題は以下のような段階的な最適

化問題として定式化できる。

Stage 1

第一階層では、企業は Leontief 技術を用いて利潤を最大とするように行動し、中間財投入量、付加価値の投入量、ライフラインの合成財の投入量を決定する。その最大化問題は以下のように定式化できる。

$$\pi_i^k = \max_{x_{ji}^k, V_i^k, u_i^k} p_i^k Q_i^k - \sum_{j=1}^{M-3} q_j^k x_{ji}^k - C_{V_i}^k V_i^k - q_u^k u_i^k, \quad (1)$$

$$s.t. Q_i^k = \min \left\{ \frac{x_{ji}^k}{a_{ji}^k}, \dots, \frac{x_{M-3,i}^k}{a_{M-3,i}^k}, \frac{V_i^k}{a_{V_i}^k}, \frac{u_i^k}{a_{u_i}^k} \right\}, \quad (2)$$

ここで p_i^k 地域 k における財 i の生産者価格、 x_{ji}^k は地域 k の産業 i における中間財 j の投入量を表す。また a_{ji}^k ($j = 1, \dots, M-3$) はレオンチェフ型生産関数の中間投入係数を表す。 $a_{V_i}^k$ と $a_{u_i}^k$ はそれぞれ、地域 k の産業 i における付加価値投入とライフラインサービス投入に関する投入係数を表す。 $C_{V_i}^k$ は地域 k 、産業 i における付加価値の単位費用を表し、 V_i^k はその投入量を表す。 q_u^k はライフライン合成財の消費者価格を表し、 u_i^k はその投入量を表す。

中間投入、付加価値、ライフライン合成財に対する需要関数は以下のように導出される。

$$x_{ji}^k = a_{ji}^k Q_i^k, \quad V_i^k = a_{V_i}^k Q_i^k, \quad u_i^k = a_{u_i}^k Q_i^k. \quad (3)$$

Stage 2-A

図-3 で表される第二階層の左側では、第一階層で決まった付加価値の合成財の投入量を所与として、労働投入量と資本投入量を決定する。これは以下のような費用最小化問題として定式化できる。

$$C_{V_i}^k V_i^k = \min_{L_i^k, K_i^k} w^k L_i^k + r K_i^k, \quad (4)$$

$$s.t. V_i^k = (L_i^k)^{\delta_{L_i}^k} (K_i^k)^{\delta_{K_i}^k}, \quad (5)$$

ここで w^k は賃金率、 r が資本レントを表す。 L_i^k 、 K_i^k はそれぞれ労働と資本の量を表す。式 (5) は Cobb-Douglas 型の生産関数であり $\delta_{L_i}^k$ 、 $\delta_{K_i}^k$ はシエアパラメータである。式 (4) と (5) からなる最小化問題を解くことで以下のように労働、資本の需要関数が得られる。

$$L_i^k = (\delta_{L_i}^k / w^k) (w^k / \delta_{L_i}^k)^{\delta_{L_i}^k} (r / \delta_{K_i}^k)^{\delta_{K_i}^k}, \quad (6)$$

$$K_i^k = (\delta_{K_i}^k / r) (w^k / \delta_{L_i}^k)^{\delta_{L_i}^k} (r / \delta_{K_i}^k)^{\delta_{K_i}^k}. \quad (7)$$

式 (6) と (7) を式 (4) に代入することで、付加価値の単位費用は以下のように導出できる。

$$C_{V_i}^k = (w^k / \delta_{L_i}^k)^{\delta_{L_i}^k} (r / \delta_{K_i}^k)^{\delta_{K_i}^k}. \quad (8)$$

Stage 2-B

第二階層の右側では、第一階層で決まったライフラインの合成財の投入量を所与として、ガスの投入量と、

水道・電気の合成財の投入量をそれぞれ決定する。これは以下のような費用最小化問題として定式化できる。

$$q_{ui}^k u_i^k = \min_{u_{Gi}^k, u_{WEi}^k} q_G^k u_{Gi}^k + q_{WEi}^k u_{WEi}^k, \quad (9)$$

$$s.t. u_i^k = \left\{ \alpha_{Gi}^k (u_{Gi}^k)^{\frac{\sigma_{1i}-1}{\sigma_{1i}}} + \alpha_{WEi}^k (u_{WEi}^k)^{\frac{\sigma_{1i}-1}{\sigma_{1i}}} \right\}^{\frac{\sigma_{1i}}{\sigma_{1i}-1}}, \quad (10)$$

ここで u_{Gi}^k は地域 k の産業 i におけるガスの投入量を表す。 q_{WEi}^k と u_{WEi}^k はそれぞれ、水道サービスと電力の合成財の消費者価格と投入量を表す。 α_{Gi}^k と α_{WEi}^k はシェアパラメータである。

需要関数は以下のように導出される。

$$u_{Gi}^k = (\alpha_{Gi}^k / q_G^k)^{\sigma_{1i}} (\Theta_i^{1k})^{\frac{\sigma_{1i}}{1-\sigma_{1i}}} u_i^k, \quad (11)$$

$$u_{WEi}^k = (\alpha_{WEi}^k / q_{WEi}^k)^{\sigma_{1i}} (\Theta_i^{1k})^{\frac{\sigma_{1i}}{1-\sigma_{1i}}} u_i^k, \quad (12)$$

ここで Θ_i^{1k} は以下の式で表される。

$$\Theta_i^{1k} = (\alpha_{Gi}^k)^{\sigma_{1i}} (q_G^k)^{1-\sigma_{1i}} + (\alpha_{WEi}^k)^{\sigma_{1i}} (q_{WEi}^k)^{1-\sigma_{1i}}. \quad (13)$$

式 (11) と (12) を式 (9) に代入することでライフライン合成財の価格 q_{ui}^k は以下の式として導出されることが示せる。

$$q_{ui}^k = (\Theta_i^{1k})^{\frac{1}{1-\sigma_{1i}}} \quad (14)$$

Stage 3-C

第三階層では、水道・電気の合成財の投入量を所与として、水道と電気の投入量をそれぞれ決定する。これは以下のような費用最小化問題で定式化される。

$$q_{WEi}^k u_{WEi}^k = \min_{u_{Wi}^k, u_{Ei}^k} q_W^k u_{Wi}^k + q_E^k u_{Ei}^k, \quad (15)$$

$$s.t. u_{WEi}^k = \left\{ \alpha_{Wi}^k (u_{Wi}^k)^{\frac{\sigma_{2i}-1}{\sigma_{2i}}} + \alpha_{Ei}^k (u_{Ei}^k)^{\frac{\sigma_{2i}-1}{\sigma_{2i}}} \right\}^{\frac{\sigma_{2i}}{\sigma_{2i}-1}}, \quad (16)$$

ここで u_{Wi}^k 、 u_{Ei}^k はそれぞれ地域 k の産業 i における水道サービス、電力の投入量である。 α_{Wi}^k と α_{Ei}^k はシェアパラメータである。

水道サービス、電力に対する需要関数は以下のように定式化できる。

$$u_{Wi}^k = (\alpha_{Wi}^k / q_W^k)^{\sigma_{2i}} (\Theta_i^{2k})^{\frac{\sigma_{2i}}{1-\sigma_{2i}}} u_{WEi}^k, \quad (17)$$

$$u_{Ei}^k = (\alpha_{Ei}^k / q_E^k)^{\sigma_{2i}} (\Theta_i^{2k})^{\frac{\sigma_{2i}}{1-\sigma_{2i}}} u_{WEi}^k, \quad (18)$$

ここで Θ_i^{2k} は以下のように定式化できる。

$$\Theta_i^{2k} = (\alpha_{Wi}^k)^{\sigma_{2i}} (q_W^k)^{1-\sigma_{2i}} + (\alpha_{Ei}^k)^{\sigma_{2i}} (q_E^k)^{1-\sigma_{2i}}. \quad (19)$$

式 (17) と (18) を式 (15) に代入することで、水道サービスと電力の合成財の価格 q_{WEi}^k は以下の式で表されることが示せる。

$$q_{WEi}^k = (\Theta_i^{2k})^{\frac{1}{1-\sigma_{2i}}}. \quad (20)$$

b) ライフライン産業の企業の行動モデル

次にライフライン産業の企業の行動モデルを定式化する。ライフライン企業は以下のような2段階の利潤最大化行動をとるとする。

Stage 1

$$\pi_i^k = \max_{x_{ji}^k, V_i^k, u_h^k} p_i^k Q_i^k - \sum_{j=1}^{M-3} q_j^k x_{ji}^k - C_{Vi}^k V_i^k - \sum_{h \in H} q_h^k u_{hi}^k, \quad (21)$$

$$s.t. Q_i^k = \min \left\{ \frac{x_{ji}^k}{a_{ji}^k}, \dots, \frac{x_{M-3,i}^k}{a_{M-3,i}^k}, \frac{V_i^k}{a_{Vi}^k}, \frac{u_{Ei}^k}{a_{Ei}^k}, \frac{u_{Wi}^k}{a_{Wi}^k}, \frac{u_{Gi}^k}{a_{Gi}^k} \right\}, \quad (22)$$

ただし $H = \{E, W, G\}$ である。 a_{Ei}^k , a_{Gi}^k , a_{Wi}^k は各ライフラインサービス投入についての投入係数である。この最大化問題を解くと、中間財と付加価値についての需要関数が、式 (6) と (7) と同様に得られる。各ライフラインサービスへの需要関数は以下のように得られる。

$$u_{Ei}^k = a_{Ei}^k Q_i^k, u_{Gi}^k = a_{Gi}^k Q_i^k, u_{Wi}^k = a_{Wi}^k Q_i^k. \quad (23)$$

Stage 2 は式 (4) と (5) で得られる最小化問題と同じように定式化でき、需要関数も式 (6) と (7) と同様に得られる。

(4) 家計の行動

家計は予算制約の下で効用を最大化するように消費行動を決定する。この最大化行動は以下のように定式化することができる。

$$U^k = \max_{d_i^k} \left\{ \sum_{i=1}^M (\gamma_i^k) (d_i^k)^{(\sigma_H-1)/\sigma_H} \right\}^{\sigma_H/(\sigma_H-1)}, \quad (24)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^M q_i^k d_i^k \leq y^k, \quad (25)$$

ここで d_i^k は地域 k における家計の財 i への需要を表す。 γ_i^k はシェアパラメータ、 σ_H は代替弾力性を表すパラメータである。 q_i^k 地域 k における財 i の消費地価格である。ただし $i = M-2$, $i = M-1$, $i = M$ はそれぞれ電力、ガス、水道を表す。以下では、 q_{M-2}^k , q_{M-1}^k , q_M^k を特に q_E^k , q_G^k , q_W^k と表すことがある。 y^k は地域 k における家計所得、 U^k は家計の効用を表す。最大化問題を解くと、需要関数は以下のように得られる。

$$d_i^k = \frac{\gamma_i^k (q_i^k)^{-\sigma_H} y^k}{\left(\sum_{i=1}^M \gamma_i^k (q_i^k)^{1-\sigma_H} \right)}. \quad (26)$$

式 (26) を (24) に代入することで、間接効用関数が以下のように得られる。

$$U^k = \psi(\mathbf{q}^k) y^k, \quad (27)$$

ここで $\psi(\mathbf{q}^k)$ は所得の限界効用を表し、以下のように表現できる。

$$\psi(\mathbf{q}^k) = \left(\sum_{i=1}^M \gamma_i^k (q_i^k)^{1-\sigma_H} \right)^{1/(1-\sigma_H)}. \quad (28)$$

地域の家計が地域のすべての資本を所有し、かつ地域の企業を所有し配当を得るという条件の下で、家計の所得は労働所得、資本レント、配当所得、地域外からの所得移転からなる。

$$y^k = \sum_{i=1}^M (w^k L_i^k + r K_i^k + \pi_i^k) + NX^k, \quad (29)$$

ここで NX^k は地域外からの所得移転を表し、本モデルでは定数とされる。

(5) 地域間交易

地域間の交易をモデルで表現するために、本研究では Armington 仮定を置くこととする。Armington 仮定は生産地の異なる財を違う財を見なす仮定である。輸送費については輸送される財の一部が輸送中に失われると仮定したいわゆる氷塊型の費用を採用する。

輸送行動は、各地域の交易エージェントを仮定することによってモデル化される¹⁷⁾。各エージェントは、複数の地域から財を調達し、その合成財を作って地域の家計や企業に供給する。ここではそのエージェントの行動を2段階の最適化問題として定式化する。第一段階では、地域の総需要 TRD を所与として、それを輸入財と国内財によって調達し合成財を作る。Armington 仮定により、国内財と輸入財は別の財であると仮定される。その行動は以下のような費用最小化問題として定式化である。

Stage 1

$$q_i^k D_i^k = \min_{Z_i^k, IM_i^k} q_{DMi}^k Z_i^k + q_{IMi}^k (1 + \tau_i) IM_i^k, \quad (30)$$

$$s.t. D_i^k = \left\{ (\lambda_i^k)^{\frac{1}{\eta_i^0}} (Z_i^k)^{\frac{\eta_i^0-1}{\eta_i^0}} + (\bar{\lambda}_i^k)^{\frac{1}{\eta_i^0}} (IM_i^k)^{\frac{\eta_i^0-1}{\eta_i^0}} \right\}^{\frac{\eta_i^0}{\eta_i^0-1}} \quad (31)$$

ただし $\bar{\lambda}_i^k = 1 - \lambda_i^k$ ここで q_{DMi}^k は輸入品の消費者価格であり、小国モデルの仮定から定数となる。 q_{DMi}^k は国内財の合成財価格であり、 Z_i^k はその消費量である。 IM_i^k は地域 k における財 i の輸入量を表す。 τ_i は関税率である。 η_i^0 は輸入品と国内財の間の代替の弾力性を表すパラメータである。 λ_i^k はシェアパラメータである。

この最小化問題を解くことで輸入品と国内品に対する需要関数は以下のように導出される。

$$Z_i^k = \lambda_i^k (q_{DMi}^k)^{-\eta_i^0} (\Omega_i^{1k})^{\eta_i^0} D_i^k, \quad (32)$$

$$IM_i^k = \bar{\lambda}_i^k (q_{IMi}^k (1 + \tau_i))^{-\eta_i^0} (\Omega_i^{1k})^{\eta_i^0} D_i^k, \quad (33)$$

ここで Ω_i^{1k} は以下のように定式化される。

$$\Omega_i^{1k} = \left\{ \lambda_i^k (q_{DMi}^k)^{1-\eta_i^0} + \bar{\lambda}_i^k (q_{IMi}^k (1 + \tau_i))^{1-\eta_i^0} \right\}^{\frac{1}{1-\eta_i^0}}. \quad (34)$$

式 (32) と (33) を式 (30) に代入することで、国内品と輸入品の合成財の消費者価格 q_i^k は、 Ω_i^{1k} と一致することが証明できる。

Stage 2

国内品の購入量 Z_i^k を所与として、国内の各地域からの購入量を決定する。この行動は以下のような費用最小化問題として定式化できる。

$$q_{DMi}^k Z_i^k = \min_{x_i^{lk}} \sum_{l=1}^N p_{DMi}^k (1 + \phi_i^{lk}) x_i^{lk}, \quad (35)$$

$$s.t. Z_i^k = \left\{ \sum_{l=1}^N (\mu_i^{lk})^{\frac{1}{\eta_i^1}} (x_i^{lk})^{\frac{\eta_i^1-1}{\eta_i^1}} \right\}^{\frac{\eta_i^1}{\eta_i^1-1}}, \quad (36)$$

ここで ϕ_i^{lk} は地域間交易の費用を表すマークアップである。 p_{DMi}^k は財 i の生産者価格である。 x_i^{lk} は地域 l でつくられた財 i への地域 k における需要を表す。 η_i^1 は地域間の代替弾力性のパラメータであり μ_i^{lk} はシェアパラメータである。

需要関数 x_i^{lk} は以下のように表せる。

$$x_i^{lk} = \mu_i^{lk} (\bar{p}_{DMi}^k)^{-\eta_i^1} \left\{ \sum_{l=1}^N \mu_i^{lk} (\bar{p}_{DMi}^k)^{1-\eta_i^1} \right\}^{\frac{\eta_i^1}{1-\eta_i^1}} Z_i^k, \quad (37)$$

ここで $\bar{p}_{DMi}^k = p_{DMi}^k (1 + \phi_i^{lk})$ である。

次に輸出量を決定する行動を定式化する。企業が国内向け製品と輸出向け製品を区別して生産すると仮定する。この行動は以下のような CET 関数を用いた費用最小化問題として定式化できる。

$$p_i^k Q_i^k = \min_{DM_i^k, X_i^k} p_{DMi}^k DM_i^k + p_{EXi}^k X_i^k. \quad (38)$$

$$s.t. Q_i^k = \left\{ (\xi_i^k)^{\frac{1}{\eta_i^2}} (DM_i^k)^{\frac{\eta_i^2-1}{\eta_i^2}} + (\bar{\xi}_i^k)^{\frac{1}{\eta_i^2}} (X_i^k)^{\frac{\eta_i^2-1}{\eta_i^2}} \right\}^{\frac{\eta_i^2}{\eta_i^2-1}} \quad (39)$$

ただし $\bar{\xi}_i^k = 1 - \xi_i^k$ である。この最小化問題を解くと以下のような供給関数が得られる。

$$DM_i^k = \xi_i^k (q_{DMi}^k)^{-\eta_i^2} (\Omega_i^{2k})^{\eta_i^2} Q_i^k, \quad (40)$$

$$X_i^k = \bar{\xi}_i^k (q_{EXi}^k)^{-\eta_i^2} (\Omega_i^{2k})^{\eta_i^2} Q_i^k, \quad (41)$$

ここで Ω_i^{2k} は以下のように定式化される。

$$\Omega_i^{2k} = \left\{ \xi_i^k (q_{DMi}^k)^{1-\eta_i^2} + \bar{\xi}_i^k (q_{EXi}^k)^{1-\eta_i^2} \right\}^{\frac{1}{1-\eta_i^2}}. \quad (42)$$

(6) 市場均衡条件

a) 労働市場

家計は産業間で移動可能とし、地域間では移動不可能と仮定する。賃金率は各地域の労働市場の均衡から決定される。労働市場の均衡条件は以下のように書ける。

$$\sum_{i=1}^M L_i^k = L^k. \quad (43)$$

ここで L^k は地域 k における労働供給量の総和である。

b) 財市場

各地域で生産された国内向け製品の市場における供給一致条件は以下のように表現される。

$$DM_i^k = \sum_{i=1}^M x_i^{kl} (1 + \phi_i^{kl}). \quad (44)$$

式 (44) の左辺は地域 k における財 i の国内向けの供給量であり、右辺は地域 k で生産された財 i に対する国内需要の総和と輸送によって失われる量の和である。

一方、小国経済を仮定することで輸出価格は外生的に与えられる。これはすなわち、輸出財に対する国外からの需要関数が水平であることを意味している。このとき輸出量は供給関数 (41) によって決まることになる。

c) 空間価格均衡

平常時の均衡では、生産者価格と消費者価格が以下のような関係式を満たすように均衡する。これは企業の利潤がゼロとなる条件に他ならず、 $i=1, \dots, M-3$ に対しては以下のように定式化できる。

$$p_i^k = \sum_{j=1}^{M-3} q_j^k a_{ji}^k + C_{V_i}^k a_{V_i}^k + q_u^k a_{V_i}^k \quad (45)$$

同様に $i=M-2, \dots, M$ に対しては以下のように定式化できる。

$$p_i^k = \sum_{j=1}^{M-3} q_j^k a_{ji}^k + C_{V_i}^k a_{V_i}^k + \sum_{h \in H} q_{hi}^k a_{hi}^k \quad (46)$$

d) 国際収支均衡条件

均衡では以下のような国際収支均衡条件が成り立つと仮定する。式 (47) の左辺は貿易収支黒字を表す。右辺は海外への貯蓄を表す。

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M p_{EX_i}^k X_i^k - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M p_{IM_i}^k IM_i^k = S. \quad (47)$$

ただし為替レートの変動は考慮しないものとする。

4. 災害による経済被害の整合的評価手法

(1) 災害時のモデル

本研究ではライフラインサービスの投入制約と産業部門の資本の損傷という形で災害の影響を表現する。本研究では計算の複雑化を避けるため、災害が予期されないショックであると仮定し、復旧の費用などは保険によってカバーされることがないものとする。

冒頭に述べたように CGE モデルは長期的な経済の均衡状態を想定しているモデルである。そのため先行研究では、短期均衡の仮定を置くなどして災害の影響評価に適用されてきた¹⁴⁾⁶⁾。本研究では以下のような3つの仮定を置くことで災害時の均衡を表現する。(1) 生産要素は産業間・地域間で移動不可能である。(2) 災害後の短期間では資本契約は容易に破棄されず、企業が支払う家計への資本レントには変更がない(3) 災

害時においては一時的に企業の利潤が負になる可能性がある。それを原因とした企業の市場退出はないものとする。(4) ライフラインサービスの価格は被災後に変化しないと仮定する。

a) 災害時の一般産業の企業の行動

上付の添え字⁽⁰⁾, ⁽¹⁾ をそれぞれ平常時と災害後の変数であることを示すために用いる。すると地域 k , 産業 $i \in (1, \dots, M-3)$ の企業の利潤最大化行動は以下のように表せる。

Stage 1

$$\pi_i^{k(1)} = \max_{x_j^{k(1)}, u_i^{k(1)}} p_i^{k(1)} Q_i^{k(1)} - \sum_{j=1}^{M-3} q_j^{k(1)} x_{ji}^{k(1)} - C_{V_i}^{k(0)} V_i^{k(0)} - q_{ui}^{k(0)} u_i^{k(1)} - I_i^k, \quad (48)$$

$$s.t. Q_i^{k(1)} = \min \left\{ \frac{x_{ji}^{k(1)}}{a_{ji}^k}, \dots, \frac{x_{M-3,i}^{k(1)}}{a_{M-3,i}^k}, \frac{V_i^{k(1)}}{a_{V_i}^k}, \frac{u_i^{k(1)}}{a_{ui}^k} \right\}, \quad (49)$$

$$V_i^{k(1)} = (L_i^{k(0)})^{\delta_{Li}^k} (K_i^{k(0)} \omega_i^k)^{\delta_{Ki}^k}, \quad (50)$$

ここで ω_i^k は地域 k , 産業 i における資本の稼働率を表す。ただし I_i^k は復旧費用であり、本モデルでは外生的に与えられる。

Stage 2

$$q_{ui}^{k(0)} u_i^{k(1)} = \min_{u_{Gi}^{k(1)}, u_{WEi}^{k(1)}} q_G^{k(0)} u_{Gi}^{k(1)} + q_{WEi}^{k(0)} u_{WEi}^{k(1)}, \quad (51)$$

$$u_i^{k(1)} = \left\{ \alpha_{Gi}^k (u_{Gi}^{k(1)})^{\frac{\sigma_{1i}-1}{\sigma_{1i}}} + \alpha_{WEi}^k (u_{WEi}^{k(1)})^{\frac{\sigma_{1i}-1}{\sigma_{1i}}} \right\}^{\frac{\sigma_{1i}}{\sigma_{1i}-1}}, \quad (52)$$

$$u_{Gi}^{k(1)} \leq u_{Gi}^{k(0)} (1 - \epsilon_{Gi}^k). \quad (53)$$

式 (53) はガスサービス投入の制約を表す。 ϵ_{Gi}^k はその制約率を表す。

Stage 3

$$q_{WEi}^{k(0)} u_{WEi}^{k(1)} = \min_{u_{Wi}^{k(1)}, u_{Ei}^{k(1)}} q_W^{k(0)} u_{Wi}^{k(1)} + q_E^{k(0)} u_{Ei}^{k(1)}, \quad (54)$$

$$u_{WEi}^{k(1)} = \left\{ \alpha_{Wi}^k (u_{Wi}^{k(1)})^{\frac{\sigma_{2i}-1}{\sigma_{2i}}} + \alpha_{Ei}^k (u_{Ei}^{k(1)})^{\frac{\sigma_{2i}-1}{\sigma_{2i}}} \right\}^{\frac{\sigma_{2i}}{\sigma_{2i}-1}}, \quad (55)$$

$$u_{Ei}^{k(1)} \leq u_{Ei}^{k(0)} (1 - \epsilon_{Ei}^k), \quad (56)$$

$$u_{Wi}^{k(1)} \leq u_{Wi}^{k(0)} (1 - \epsilon_{Wi}^k). \quad (57)$$

ϵ_{Ei}^k と ϵ_{Wi}^k はそれぞれ電力と水道サービスの投入の制約率を表す。

(2) 経済被害の整合的評価方法

a) 家計の被害

家計に帰着する被害は補償変分¹⁸⁾(EV) で評価することができる。

$$U^k(q^{k(1)}, y^{k(1)}) = U^k(q^{k(0)}, y^{k(0)} + EV^k), \quad (58)$$

ここで $\mathbf{q}^{k(0)}$ と $\mathbf{q}^{k(1)}$ はそれぞれ事前, 事後の価格ベクトルである. 式 (27) から, EV^k は以下のように求められる.

$$EV^k = \frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})y^{k(1)} - \psi(\mathbf{q}^{k(0)})y^{k(0)}}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})}. \quad (59)$$

式 (59) は価格と所得の変化による実質所得の変化と見なすことができる.

b) 経済被害総額の評価

経済被害総額を被害の帰着側である家計側で評価するには, 各地域の家計に帰着した EV を足し合わせればよいことになる. これを以下のように OL とおくことにする.

$$OL = \sum_{k=1}^N EV^k. \quad (60)$$

一般均衡アプローチを用いた通常の被害評価の枠組みでは帰着側である家計側で被害額が評価されることが多い. 本研究では, 産業部門での被害の様相と被害総額との関係を明らかにするために, 発生側である企業側で被害総額を整合的に評価する手法について検討する.

式 (29) を式 (59) に代入することで, 式 (60) は以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} OL &= \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})} \pi_i^{k(1)} - \pi_i^{k(0)} \right) < 1 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})} - 1 \right) w^{k(0)} L_i^{k(0)} < 2 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})} - 1 \right) r^{(0)} K_i^{k(0)} < 3 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})} - 1 \right) NX^{k(0)} < 4 >. \end{aligned} \quad (61)$$

式 (61) の第一項は配当所得の変化を表し, 第二項, 第三項は価格変化による労働所得, 資本所得の価値の変化を表す. 第四項は地域外からの所得移転の価値が価格変化によって変化する効果を表す.

式 (61) はさらに以下のように整理できる.

$$\begin{aligned} OL &= \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\Psi^k p_i^{k(1)} Q_i^{k(1)} - p_i^{k(0)} Q_i^{k(0)} \right) < 5 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M-3} \left(\Psi^k q_i^{k(1)} x_{ij}^{k(1)} - q_i^{k(0)} x_{ij}^{k(0)} \right) < 6 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\Psi^k q_E^{k(0)} u_{Ei}^{k(1)} - q_E^{k(0)} u_{Ei}^{k(0)} \right) < 7 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\Psi^k q_G^{k(0)} u_{Gi}^{k(1)} - q_G^{k(0)} u_{Ei}^{k(0)} \right) < 8 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\Psi^k q_W^{k(0)} u_{Wi}^{k(1)} - q_W^{k(0)} u_{Wi}^{k(0)} \right) < 9 > \\ &- \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) w^{k(0)} L_i^{k(0)} < 10 > \\ &- \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) r^{(0)} K_i^{k(0)} < 11 > \\ &- \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \Psi^k I_i^k < 12 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) w^{k(0)} L_i^{k(0)} < 2 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) r^{(0)} K_i^{k(0)} < 3 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) NX^{k(0)}. < 4 > \end{aligned} \quad (62)$$

ただし $\Psi^k = \frac{\psi(\mathbf{q}^{k(1)})}{\psi(\mathbf{q}^{k(0)})}$ とおいた. ここで < 5 >: 産出額の変化, < 6 >: 中間投入額の変化, < 7 >: 電力投入額の変化, < 8 >: ガス投入額の変化, < 9 >: 水道サービス投入額の変化. < 10 >: 価格変化による労働賃金支払いの価値の変化, < 11 >: 価格変化による資本レント支払いの価値の変化, < 12 >: 復旧費用, である.

資本と労働所得が家計と企業の間で相殺することに着目して, 式 (61) は以下のように整理することができる.

$$\begin{aligned} OL &= \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\Psi^k \bar{\pi}_i^{k(1)} - \bar{\pi}_i^{k(0)} \right) < 13 > \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \Psi^k I_i^k < 12 > \quad (63) \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (\Psi^k - 1) NX^{k(0)}. < 4 > \end{aligned}$$

ここで $\bar{\pi}_i^k$ は産出額から中間投入額を差し引いた利益を表す. 式 (63) の第 1 項はこの利益の減少額を表す. ここでは事後の利益が所得の限界効用によって基準化されていることに注意する必要がある. 災害後の価格変化は 所得の限界効用を変化させる. それゆえ, 同じ

だけの所得でも、効用タームで評価された価値は変化することとなる。整合的評価のためには、この効果が経済被害にカウントされる必要がある。式 (63) は、災害後の利益が所得の限界効用によって基準化される必要があることを示している。

式 (63) の第 2 項は復旧費用の項を示している。同様の理由からこれも所得の限界効用によって基準化される必要がある。第 3 項は価格の変化によって生じる地域外からの所得移転の価値の変化を表している。

式 (63) から、経済被害の総額は利益減少額と復旧費用、地域外からの所得移転の価値の変化の和によって整合的に評価できることが示された。ただし所得の限界効用によって事後の値を基準化することに留意する必要がある。また価格の変化がない場合には、経済被害総額は利益減少額と復旧費用の和で整合的に評価できることも容易に示せる。こうして提案される手法は、先行研究にて示された整合的評価方法^{11) 13)}の自然な拡張となっている。

c) 経済被害の帰着構成表

式 (61), (62), (63) は経済被害総額が様々な経済主体間に波及していく様子を示している。これら経済被害の要素は、その発生と帰着の構造を表すマトリックスにまとめることができる。本研究ではこれを公共プロジェクトの費用便益分析の分野で発展してきた帰着構成表¹⁹⁾の概念に基づいて構築する。

図-4 は作成した経済被害の帰着構成表である。表中の $\langle 1 \rangle \sim \langle 13 \rangle$ は式 (61), (62), (63) における各被害項目と対応している。各列は被害を受ける経済主体を表しており、各行は経済主体が受ける被害の内訳を表している。

産業部門の列には企業の利益に関する被害項目が記載されている。企業の利潤変化の総額は項目 $\langle 1 \rangle$ で表される。家計部門の列には、家計部門の被害が労働所得の変化、資本レント、配当所得、地域外からの所得移転の変化の効果から成ることが示されている。各地域の合計の列には、労働所得と資本レントが企業と家計の間で相殺されゼロとなっていることが示されている。

各地域の合計の列の最下行には各地域の経済被害総額が式 (63) の 3 つの項で構成されることが示されている。国全体の経済被害総額は最右列の最下行に記載されている。

5. 2004 年新潟県中越地震の経済被害推計

以上で構築した手法を 2004 年に発生した新潟県中越地震に適用し、経済被害を試算する。

(1) パラメータの設定

新潟県中越地震の経済被害評価のために、日本を新潟県とそれ以外の地域の 2 つに分けた二地域の CGE モデルを設定する。産業部門は 32 部門として設定する。

CGE モデルにおけるいくつかのパラメータは地域経済のベンチマークデータから推計する。経済がベンチマークの年に均衡状態にあると仮定し、その状態での経済取引を産業連関表などの経済データが示していると考え、この経済データを CGE モデルが表現するようにパラメータの値を設定する。本研究ではベンチマークの年を 2000 年と設定し、電力中央研究所によって推計された 47 都道府県間産業連関表²⁰⁾を基準データとして用いる。

また輸送費用を表すマークアップ ϕ_i^{kl} は地域間距離 T^{kl} の関数として以下のように設定する。その上で、地域間の代替弾力性のパラメータ η_i^1 とともに、現実の地域間交易を最もよく再現するように β_i と η_i^1 を設定する。 T^{kl} については、Google Earth 上で 47 都道府県の代表点間の平均所要時間を計算し、それを交易量によって重み付け平均することで二地域間の平均所要時間を求めた。

$$\phi_i^{kl} = \beta_i T^{kl}. \quad (64)$$

その他パラメータの出典の一覧を表-1 に示す。

表-1 パラメータの出典

| パラメータ | 出典 |
|--|--------------------|
| a_{ji}^k, a_{Vi}^k | 産業連関表 |
| $\delta_{Ki}^k, \delta_{Li}^k$ | 産業連関表 |
| $\alpha_{Ei}^k, \alpha_{Gi}^k, \alpha_{Wi}^k, \lambda_i^k, \mu_i^k, \gamma_i^k, \zeta_i^k$ | 産業連関表 |
| σ_H | 市岡 ²¹⁾ |
| η_i^0 | GTAP |
| σ_{1i}, σ_{2i} | 土屋ら ¹⁵⁾ |

(2) 復旧シナリオの設定

a) ライフラインの復旧シナリオ

ライフラインの復旧シナリオは中越地震の実態を勘案し²²⁾、表-2 のように設定した。電力、水道、ガスはそれぞれピーク時には、300,000 世帯、129,750 世帯、56,000 世帯が途絶していると報告されている。なお復旧費用については各電力会社、ガス会社のウェブサイトや有価証券報告書など^{23) 24)}から得た。水道については阪神・淡路大震災の復旧費用実績から、途絶戸数によって推計をした。

b) 資本の復旧シナリオ

被災による資本の稼働率の低下については、地震動と操業低下率の相関を統計的に求め、地震動の空間分

| | 産業1 | | 産業2 | | 電力 | | ガス | | 水道 | | 企業部門計 | | 累計 | | 地域計 | | 合計 | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------------|
| | 地域1 | 地域N | 地域1 | 地域N | 地域1 | 地域N | 地域1 | 地域N | | |
| 財1 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 財2 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 電力 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| ガス | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 水道 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 労働 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 資本 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 復旧費用 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 企業部門計 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 配当 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 所得総額 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 累計部門計 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 地域計 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |
| 合計 | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | <> | Σ<> +Σ<> |

図-4 自然災害による経済被害の帰着構成表

布データ²⁵⁾から、各メッシュごとの操業低下率を産業別に推計する。工業統計から各メッシュの従業員数を産業別に求め、一人当たり生産額が同一産業内で一定と仮定することで、従業員数の比によって県レベルの

生産低下率を推計する。

資本稼働率と生産低下率についての以下の関係式を用いて、資本稼働率の低下率を求める。

$$\omega_i^k = (Q_i^{k(1)} / Q_i^{k(0)})^{\frac{1}{\delta_{k_i}}} \quad (65)$$

表-2 ライフラインの復旧シナリオ

| | ピーク時 途絶戸数 (千戸) | 復旧日数 | 復旧費用 |
|----|-------------------|------|-------|
| 電力 | 300 | 3日 | 40億円 |
| 水道 | 129 | 12日 | 55億円 |
| ガス | 56 | 30日 | 5.9億円 |

資本の復旧シナリオについては、中越地震の実態調査¹²⁾をもとに、生産設備の平均的な復旧実績を用いることとした。図-5はその集計結果を表しており、横軸に被災直後からの経過時間、縦軸に失われた稼働率に対する復旧した割合を示している。

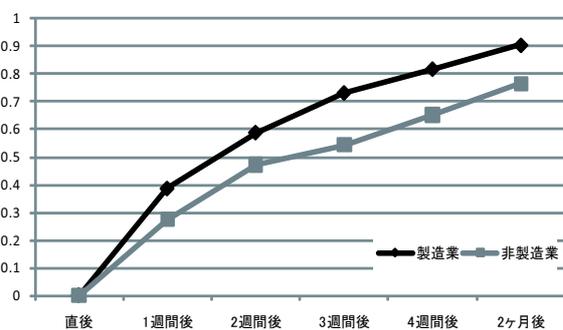


図-5 中越地震の実態調査をもとに設定した資本の復旧シナリオ

以上で設定した復旧シナリオに基づいて、新潟県中越地震で生じた経済被害を推計する。推計結果については講演時に譲る。

参考文献

- 1) 内閣府：首都直下地震対策に係る被害想定結果について，2004。
- 2) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）報告書，2007。
- 3) Kawashima, K. and Kanoh, T. : Evaluation of indirect economic effects caused by the 1983 Nihonkai-Chubu, Ja-pan, earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.6, pp.739-756, 1990.
- 4) 萩原泰治：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.71-78,2001。
- 5) 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.
- 6) Tsuchiya, S., Tatano, H., and Okada, N. : Economic loss assessment due to railroad and highway disruption, *Eco-nomic Systems Research*, Vol.19, No.2, pp.147-162, 2007.
- 7) 小池淳司，右近崇：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, 2006.

- 8) Rose, A., Benavides, J., Chang, S.E., Szczesnisk, P., and Lim, D. : The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions, *Journal of Regional Science*, Vol.37, No.3, pp.437-458, 1997.
- 9) Rose, A., and Liao, S.Y.: 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, 2005.
- 10) Rose, A. : Economic principles, issues, and research priorities in hazard loss estimation. in Okuyama, Y. and Chang, S. (eds). *Modeling spatial and economic impacts of disaster*. *Advances in Spatial Science*, Springer, pp.13-36, 2004.
- 11) Tatano, H., Isobe, W., and Okada, N. : Economic evaluation of seismic risks, *Proc. of 2000 Joint Seminar on Urban Disaster Management*, pp.36-39, Beijing, China, 2000.
- 12) 中野一慶，多々納裕一，藤見俊夫，梶谷義雄，土屋哲：2004年新潟県中越地震における産業部門の経済被害推計に関する研究，*土木計画学研究・論文集*，Vol.24, No.2, pp.289-298, 2007.
- 13) 中野一慶，多々納裕一：産業間の相互依存性を考慮した自然災害による経済被害の統合的評価方法，*土木計画学研究・論文集*，Vol.25, No.1, pp.255-266,2008.
- 14) Rose, A. and Guha,G. : Computable general equilibrium modeling of electric utility lifeline losses from earthquakes, in *Modeling spatial and economic impacts of disasters*, Okuyama,Y. and Chang,S.E. Eds. Springer-Verlag, Berlin, 2004, pp. 119-142.
- 15) 土屋哲，多々納裕一，岡田憲夫：地震災害時のライフライン途絶が及ぼす経済被害の計量化に関する研究，*地域安全学会論文集*，No.10, pp.355-364, 2008.
- 16) 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定，*自然災害科学*，Vol.23, No.4, pp.553-564, 2005.
- 17) Brocker, J.: Operational spatial computable general equilibrium modeling, *The Annals of Regional Science*, vol.32, pp.367-387, 1998.
- 18) Varian,H.R.: *Microeconomic analysis*, third edition, W.W.Norton and Company, Inc.,1992.
- 19) Morisugi, H., and Ohno, E. : Proposal of a benefit incidence matrix for urban development projects, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 25, pp.461-pp.481, 1995.
- 20) 人見和美，Pongsun Bunditsakulchai: 47 都道府県多地域産業連関表の開発- 内部・外部乗数による都道府県間生産誘発構造の分析-，*電力中央研究所 研究報告書*，Y07035, 2008.
- 21) 市岡修：応用一般均衡分析，有斐閣，1991.
- 22) 日本政策投資銀行 新潟支店：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，2004.
- 23) 東北電力：新潟県中越地震における当社被害状況について（平成 16 年 1 2 月 1 7 日現在），東北電力 H P (<http://www.tohoku-eppo.co.jp/whats/news/2004/41217b1.htm>)，2004.
- 24) 北陸瓦斯株式会社：平成 17 年度有価証券報告書，2006.
- 25) 末富岩雄，石田栄介，福島康宏，磯山龍二，澤田純男：地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と 2004 年新潟県中越地震における地震動分布の推定，*地震工学会論文集*，第 7 巻，第 3 号，pp.1-12, 2007.