

論文

供給制約の産業連関分析 —首都直下型地震を例にとって—

Input-Output Analysis of Supply Constraints:
Taking the Case of an Inland Earthquake in the Tokyo Metropolitan Area

下田充^{*}、渡邊隆俊[†]、藤川清史^{††}

SHIMODA Mitsuru, WATANABE Takatoshi, FUJIKAWA Kiyoshi

要旨

南関東を震源とするマグニチュード7規模の首都直下地震は、30年以内に70%の確率で発生すると予測されている。その直接の被害規模は2011年の東日本大震災を上回ると想定されているが、経済的間接被害（資本設備の損壊等による経済活動の縮小）の推計手法は必ずしも確立されていない。そこで本稿では、経済的間接被害の推計方法として、いくつかの分析モデルを紹介し、それらモデルの妥当性を評価した。本稿での試算の結果、各モデルで震災の間接被害額推計の差異が確認され、各モデルの特徴が明らかになった。加えて、経済的間接被害の推計方法として、従来型の産業連関分析（生産量を内生変数とするモデル）ではなく、生産物の供給制約を念頭においた（生産量を外生変数とする）新しい分析モデルを提案した。

Abstract

A 70% probability exists that an inland earthquake of magnitude seven will occur in the South Kanto region within the next 30 years, and the scale of direct damage caused due to it is expected to exceed that of the Great East Japan Earthquake of 2011. However, a method for estimating the indirect economic damages (reduction of economic activity) due to damage to capital facilities has yet to be established. This study employs several analytical models to estimate the indirect economic damage of an earthquake and estimates the validity of those models. Based on the preliminary calculations in this study, we have

^{*} 株式会社日本アプライドリサーチ研究所主任研究員 Applied Research Institute, Incorporated
shimoda@ari.co.jp

[†] 愛知学院大学経済学部教授 Aichi Gakuin University
twata@dpc.agu.ac.jp

^{††} 愛知学院大学経済学部教授 Aichi Gakuin University
fujikawa@dpc.agu.ac.jp

confirmed the differences in the indirect earthquake damage estimated by each model and clarified each model's characteristics. Additionally, we propose a new analytical model that considers the supply constraints of products as a method for estimating indirect economic damage. Thus, production is considered an exogenous variable in this model while production is considered an endogenous variable in the conventional input-output model.

キーワード

首都直下地震、需要型モデル、供給型モデル、投入制約モデル、資源配分モデル

Keywords

Tokyo inland earthquake, demand model, supply model, input constraint model, resource allocation model

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災から12年になる。人間は自然から多くの恵みを受けているが、同震災は日本を地震国であることを改めて認識させる事象となった。東日本大震災は約2万の人命を奪い、約20万の人々が家を失った。また、インフラや建物の損壊による直接被害額は15兆円以上に達すると推計されている¹。一方、被災地の事業所は被災し交通も分断されたので生産活動が停止し、被災事業所から産業連関の川下にある事業所でも生産活動が制約を受けることになった。このような供給制約による大規模な間接被害の発生が東日本大震災による経済被害の大きな特徴の1つである。

さて現在、発生が懸念されているのは関東地方南部（首都圏）での直下型地震である²。関東地方は日本の物流と情報の要であるので、この地域で大きな地震が発生した場合には、極めて広範囲での供給制約が起き、日本経済に甚大な影響が及ぶであろうことは想像に難くない。

ところで、首都直下型の地震にはマグニチュード8（M8）前後の巨大地震グループとマグニチュード7（M7）前後の大地震グループの2種類のグループがあることは意外と知られていない³。直近でいうと、M8の巨大地震は1703年の「元禄関東地震」（M8.2）と1923年の「大正関東地震（関東大震災）」（M7.9）に発生している。それより以前も、「明応関東地震」（1495年）、「永仁関東

¹ 直接被害の推計としては、内閣府（2011）による約16.9兆円、日本政策投資銀行（2011）の約16.4兆円などがある。

² 地震のタイプには、プレート境界面で起こる「海溝型」とその圧力が内陸の地殻を押し、断層を動かすことで起きる直下型がある。本稿が対象にしているのは後者の地震である。

³ マグニチュードとは地震のエネルギーの大きさを示す指標である。地震のエネルギーを E （ジュール）、マグニチュードを M 、 \log を常用対数すると、 $\log(E) = 4.8 + 1.5M$ の関係がある。マグニチュードが1の差は常用対数で1.5の差であるので、約30倍の差になる。一般にマグニチュード7を超えるものを大地震、マグニチュード8を超えるものを巨大地震と呼んでいる。日本で観測史上最大の地震は東日本大震災のマグニチュード9.0である。関東大震災はマグニチュード7.9、1995年の阪神・淡路大震災はマグニチュード7.3であった。マグニチュードが7程度であっても、都市の直下で起これば大きな被害が出るのがわかる。

地震」(1293年)がM8巨大地震に相当するだろうといわれている。このようにM8巨大地震は約200年周期で発生している。もう一つのグループがM8巨大地震の間で起こるM7大地震で、1703年「元禄関東地震」と1923年「大正関東地震」の間には、次の8つのM7大地震が発生している。①1782年「天明小田原地震」(M7.0)、②1853年「嘉永小田原地震」(M6.7)、③1855年「安政江戸地震」(M6.9)、④1894年「明治東京地震」(M7.0)、⑤1894年「東京湾付近の地震」(M6.7)、⑥1895年「茨城県南部の地震」(M7.2)、⑦1921年「茨城県南部の地震」(M7.0)、⑧1922年「浦賀水道付近の地震」(M6.8)。ただ、この8つの地震は等間隔で起こっているわけではない。図1は元禄関東地震と大正関東地震の間の地震の間の200年を前半と後半に分けて、その中に、8つの大地震を書き込んだものである。その結果、前半に起こったのは天明小田原地震のみで残りの7つの地震は巨大地震の発生から150年程度たってから起きていることが分かる。

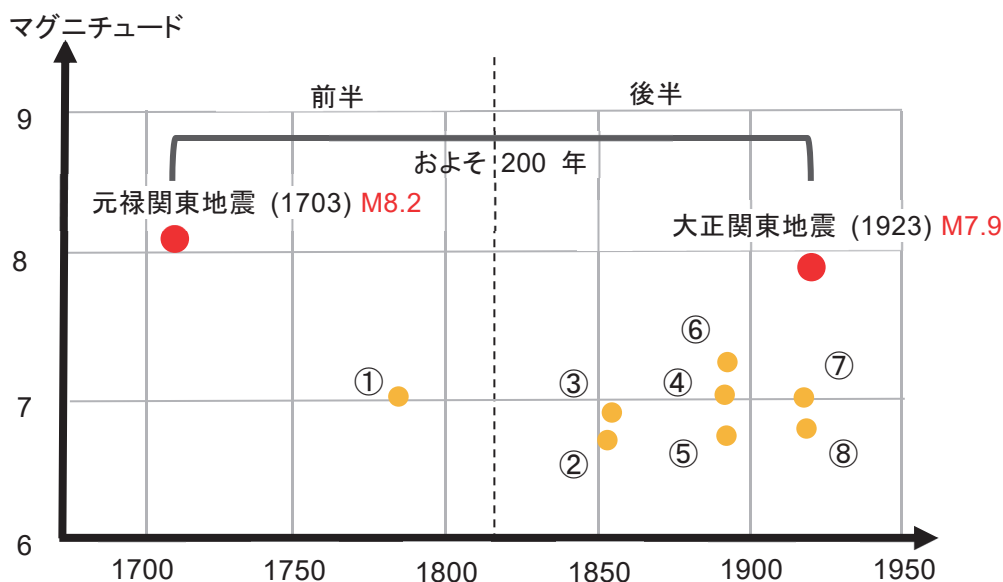


図1 元禄関東地震と大正関東地震間の関東での地震

出所：NHK ニュース Web 「首都直下地震「今後30年で70%」の根拠は」(2019.11.25)
https://www3.nhk.or.jp/news/special/saigai/natural-disaster/natural-disaster_14.html

関東大震災が1923年に起こってからまもなく100年が経とうとしているが、これからの100年が200年間隔のM8巨大地震の中間期の後半にあたり、M7大地震の活動期に入ることになる。こうしたことを鑑みて、首都直下地震が今後30年に起こる確率が70%程度といわれているのである。

震災の経済被害という意味では、既存の構築物(インフラ・建物)の損壊という資産の減少が最も目に見えるものであろう。しかしこれは情報を持っている政府機関の仕事であろうと考え本稿では扱わない。本稿では、既存の構築物(インフラ・建物)の損壊に伴う供給制約による間接波及被害に焦点を当てることにする。本研究の当面の目的は、間接被害推計において選択すべき各種の分析モデルの特徴や妥当性を検討することである。ただし将来的には、首都直下型地震による間接被害額の推計を提示することを念頭においている。

本稿の分析では東京都産業連関表を用いる。産業連関表は、産業ごとの中間投入の連関構造を記録した統計表である。こうした特徴を生かして開発された手法が産業連関分析の均衡生産量モデルであり、典型的には、オリンピックや万博といったビッグ・イベントの経済波及効果の分析に用いられてきた。後に述べるように、均衡生産量モデルでは、「需要されるものは供給可能である」という想定、つまり、サプライチェーンでのボトルネックはないものと想定される。しかし、東日本大震災の影響でクローズアップされたのは、被災地域での「需要の減少」というよりむしろ被災地域での生産がストップすることによる「供給制約」であった。本稿では、そうした供給制約をどのようにモデル化するかについて、幾つかの試算を行いながら検討する。

本稿の構成は次の通りである。第2節では災害の分析に関する先行研究を紹介する。第3節では、災害による間接的な経済被害を計測するための4種類のモデルを示す。第4節では、第3節のモデルに基づき、震災直後の経済被害の波及効果をシミュレーションし、各モデルの特性を実証的に検討する。第5節は、まとめと今後の課題である。なお、補論として、供給制約に対して需要量の調整で対処するモデル（資源配分モデル）を示す。

2. 先行研究

災害による間接被害の推計については、災害未発生時点における「被害想定」と災害発生後の推計とがある。前者の事例としては、内閣府の中央防災会議による被害想定や長谷部（2002）などがあり、後者の事例としては、国土交通省中国地方整備局（2005）などが挙げられる。

内閣府の中央防災会議は、東海地震、東南海・南海地震、首都直下地震など、想定される震災ごとに「被害想定」や対策の検討を重ねてきた。例えば、「東南海、南海地震等に関する専門調査会」では、中部圏・近畿圏の内陸地震に関する経済被害を約74兆円（上町断層帯の地震のケース）と推計しており、内訳は直接被害が約61兆円、間接被害が約13兆円となっている⁴。間接被害の推計方法を大まかに述べると、第1段階として被災地域の生産関数を推計し、生産要素（資本と労働）の減少にともなう生産額の減少を産業別に計測する。次に生産関数から得られた生産額の減少を経済産業省の地域間産業連関表の最終需要にあてはめ、自地域及び他地域への波及を計算するという手順を経ている。波及効果の計算に用いられたのは、通常のリオンチェフ逆行列であり、ここでの波及の試算は、震災による生産停止の後方連関効果を計測していることになる。

東日本大震災後に設置された中央防災会議の「防災対策推進検討会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ」では、首都直下型地震の間接被害を生産関数アプローチにより推計し、全国での被害額を約47.9兆円と推計した。

長岡（1976）は、日本が石油ショックによる供給制約に直面した時代に書かれたものである。当時の経済予測モデルの多くは需要牽引型であったが、それが必ずしも有効ではなくなっているという問題意識に立っている。このモデルは産業連関分析の生産量決定モデルを使うものの、通常の決定

⁴ 中央防災会議（2008）を参照。

関係とは反対になる。通常のモデルでは最終需要を外生変数とし、その需要を充足するための供給量を計算する。しかし、その計算では原材料や生産要素が十分に供給・動員可能であるということが前提になっている。しかし石油ショックにより、現実にはその前提は必ずしも成立しないことが明らかとなった。そうした状況で各産業への最適な資源配分はどうなるのかを試算した研究である。

長谷部（2002）では、東京都産業連関表に基づき、首都圏直下型地震災害が引き起こす生産減少額を推計している。その手順は、生産関数により東京都内の生産減少率を産業別に求めた上で、「調達不可能期間」を考慮した低下率を算出し、東京都外への被害額を推計するというものである。長谷部（2002）による生産波及モデルは、レオンチェフ型生産関数を前提としつつ、供給制約を考慮するために、生産要素の減少率、他地域・他国からの当該財の流入状況、部門間の配分に関するパラメータを組み込んでいる点に特色がある。

国土交通省中国地方整備局（2005）は、2004年9月に中国地方に上陸した台風18号をモデルケースとして、間接被害を中心とした地域経済への影響を計測している。ここでの被害推計は、広島県内事業所へのアンケート調査を基礎としているが、間接被害については、広島県産業連関表を用いた産業連関分析により推計している。ここでの間接被害波及の推計は後方連関効果に限定されており、前方連関効果については「推計手法の確立が困難であったため」として推計は行われていない。

下田・藤川（2012）では、需要型モデル、供給型モデル、需要型・供給型ハイブリッド型モデル、ボトルネックモデルの4種類のモデルを用いて、東日本大震災における東北地域外での間接被害の大きさを試算し、各モデルの特徴を検討した。試算の結果からは、前3者のモデルはいずれも震災後に実際に発生した生産減少を説明するには力不足であること、ボトルネックモデルが比較的生産の落ち込みを説明できること、一方で同モデルは乗用車の生産減少などはよく追跡しているが、非製造業において、必ずしも生産活動に必須かつ代替不可能と思われぬ投入品目がボトルネックとなり、生産の減少幅が過大に推計されることなどが明らかとなった。本研究は、下田・藤川（2012）の延長線上にあり、東日本大震災で検討した間接被害の推計手法を首都直下地震に適用し、分析手法の検討を試みつつ、将来的には間接被害推計の試算を提供することを目指すものである。

3. 分析モデルの検討

3.1. 需要型モデル

本稿では、被災による生産減少の需要側への波及を計測するために、被災地の東京を外生化したモデルを用いる。いま、 r 、 s の2つの地域からなる経済を考え、地域 s を被災地とする。ここで地域 s を「外生」地域とすれば、地域 r の需給均衡式は次のようにならわされる。

$$\mathbf{x}^r = \mathbf{A}^{rr}\mathbf{x}^r + [\mathbf{A}^{rs}\mathbf{x}^s + \mathbf{f}^r] \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{A}^{rs} は地域 r から地域 s への投入係数行列であり、需要モデルではこれを固定と仮定する。

\mathbf{x}^r は地域 r の生産ベクトル、 \mathbf{f}^r は地域 r 産品に対する最終需要ベクトルをあらわす。(1) 式を \mathbf{x}^r について解くと、均衡生産量

$$\mathbf{x}^r = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{rr})^{-1}[\mathbf{A}^{rs}\mathbf{x}^s + \mathbf{f}^r] \quad (2)$$

を得る。ここで震災により、地域 s の生産量が $\Delta\mathbf{x}^s$ だけ減少したとすると、地域 r の生産量の変化は、次式で求められる。

$$\Delta\mathbf{x}^r = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{rr})^{-1}\mathbf{A}^{rs}\Delta\mathbf{x}^s \quad (3)$$

(3) 式の $\mathbf{A}^{rs}\Delta\mathbf{x}^s$ は、地域 s による地域 r 産品への需要の減少額であり、(3) 式は被災地の生産減少がもたらす後方連関効果を計測している。

3.2. 供給型モデル

レオンチェフモデルでは需要が供給を決定するが、供給が需要を決定するとの想定に立つモデル化も可能である。本稿では、Miller and Blair (2009) に倣い、これをゴーシュモデル (Ghosh Model) とよぶことにする。このゴーシュモデルでは、付加価値額が外生的に与えられ、生産は投入物 (中間財と付加価値) の総和として決定される。このモデルで固定的であると考えるのは、ある産業から他産業への配分係数 \mathbf{G} である⁵。

本稿では、被災による生産減少の供給側への波及を計測するために、被災地の東京を外生化したゴーシュモデルを用いる。需要モデルと同様の2地域から成る経済を考え、地域 s を外生とする。ここで配分係数を固定と仮定すると、地域 r と地域 s の生産は次式で与えられる。

$$\mathbf{x}^{r'} = \mathbf{x}^{r'}\mathbf{G}^{rr} + [\mathbf{x}^{s'}\mathbf{G}^{sr} + \mathbf{v}^{r'}] \quad (4)$$

ただし、 \mathbf{G}^{rs} は地域 r から地域 s への配分係数行列であり、 \mathbf{v}^r は地域 r の付加価値ベクトルである。(4) 式を $\mathbf{x}^{r'}$ について解くと、

$$\mathbf{x}^{r'} = [\mathbf{x}^{s'}\mathbf{G}^{sr} + \mathbf{v}^{r'}](\mathbf{I} - \mathbf{G}^{rr})^{-1} \quad (5)$$

が得られる。震災により、地域 s の生産が $\Delta\mathbf{x}^s$ だけ減少したとすると、地域 r の生産量の変化は、次式で求められる。

⁵ 通常は「産出係数」とよばれることが多いが、本稿では、「配分係数」で統一する。

$$\Delta \mathbf{x}^{r'} = \Delta \mathbf{x}^{s'} \mathbf{G}^{sr} (\mathbf{I} - \mathbf{G}^{rr})^{-1} \quad (6)$$

(6) 式の $\Delta \mathbf{x}^{s'} \mathbf{G}^{sr}$ は、地域 s による地域 r 製品の投入の減少額であり、(6) 式は被災地の生産減少がもたらす前方連関効果を計測している。

上で示したゴーシュモデルは、どこまで現実妥当性を有するであろうか。モデルの考案者である Ghosh 自身は、このモデルが適用可能なケースとして、政府が配分を統制する、超過需要が生じている計画経済を念頭においていた⁶。しかしこれは特殊なケースであり、一般的な市場経済にはあてはまらない。長谷部 (2002) は、ゴーシュモデルの問題点として、1) 配分係数を一定と仮定しているがこれは非現実的、2) 生産関数に完全代替性を仮定していることになり、理論的に産業連関論と相容れない、という2点を指摘している。また、Oosterhaven (1988) は、投入係数と配分係数の数学的関係を基に生産の成長率が部門間で均一であるならば、投入係数が安定的であるとき配分係数も安定的であることを示しつつも、需要が完全に供給サイドから決定されることの非現実性を指摘している。

3.3. 需要型・供給型ハイブリッド型モデル

需要型モデルでは中間財の投入構造を固定係数とし、供給型のモデルでは中間財の販路構造を固定係数とする。しかし、販路のシェアは、中間財の生産時の技術的な関係と異なり、調整が可能であると考えられるので、(6) 式で表された波及効果のステップが、長期にわたって続くことは現実的ではないという考えは一定の妥当性を有するであろう。そこで以下では、最初のステップにおいてゴーシュモデルで表現される前方連関効果が作用し、以後においてはレオンチェフモデルによる後方連関効果が働くモデルを考える。

これまでと同様に、地域 s を外生とした2地域モデルを例にその考え方をみていこう。いま震災により地域 s の生産が $\Delta \mathbf{x}^s$ だけ減少したとする。ここで最初のステップにおいて、ゴーシュモデルによる前方連関効果が働くとなると、地域 r の生産の減少は $\mathbf{G}^{sr'} \Delta \mathbf{x}^s$ となる。ゴーシュモデルでは、同様の(前方への)波及プロセスが更に持続すると考えた。しかしここでは、次のステップからはレオンチェフモデルによる後方連関効果が働くものと想定する。このとき地域 r の生産減少は、 $\mathbf{G}^{sr'} \Delta \mathbf{x}^s$ に逐次投入係数を乗じてそれらを累計した(7)式により求められる。

$$\Delta \mathbf{x}^r = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{rr})^{-1} \mathbf{G}^{sr'} \Delta \mathbf{x}^s \quad (7)$$

本稿では、(7)式によるモデルを「需要型・供給型ハイブリッド型モデル」、あるいは単純に「ハイブリッド型モデル」とよぶことにする。

⁶ Ghosh (1958) による。

3.4. 投入制約モデル（ボトルネックモデル）

第1節で述べたように、東日本大震災で現実起きたことは、東北・北関東の製造工場の被災が全国の自動車生産をストップさせるというような、ボトルネックが強力に作用する完全非代替のイメージに近い現象であり、これまでに示した3.1から3.3のモデルではこのような現象を適切に扱うことができない。そこで、以下では、長谷部（2002）を参考に、生産要素に関する完全非代替の考え方を導入したモデルを考える。ただしここでは、同じ生産要素であれば、それを産出する地域については「完全代替」を想定する。

2地域と2財からなる世界を考え、各地域・部門の取引額は表1のようにあらわされるとする。完全非代替型の生産関数を想定すると、地域*r*と地域*s*の各財の生産関数は次のように表すことができる。ただし、*a*は投入係数、*τ*は付加価値係数である。

表1 2財2地域の地域間表

		地域 <i>r</i>		地域 <i>s</i>	
		財 1	財 2	財 1	財 2
地域 <i>r</i>	財 1	x_{11}^{rr}	x_{12}^{rr}	x_{11}^{rs}	x_{12}^{rs}
	財 2	x_{21}^{rr}	x_{22}^{rr}	x_{21}^{rs}	x_{22}^{rs}
地域 <i>s</i>	財 1	x_{11}^{sr}	x_{12}^{sr}	x_{11}^{ss}	x_{12}^{ss}
	財 2	x_{21}^{sr}	x_{22}^{sr}	x_{21}^{ss}	x_{22}^{ss}
付加価値		v_1^r	v_2^r	v_1^s	v_2^s
生産		x_1^r	x_1^s	x_1^s	x_2^s

出所：筆者作成

$$x_j^r = \text{Min} \left[\frac{x_{ij}^{rr} + x_{ij}^{sr}}{a_{ij}^r}, \frac{v_j^r}{\tau_j^r} \right] (i = 1, 2) \tag{8a}$$

$$x_j^s = \text{Min} \left[\frac{x_{ij}^{rs} + x_{ij}^{ss}}{a_{ij}^s}, \frac{v_j^s}{\tau_j^s} \right] (i = 1, 2) \tag{8b}$$

いま、地域*r*において災害が発生し、労働や資本の投入が減少したとする。これにより、地域*r*の第1財と第2財の付加価値がそれぞれ、 α_1 、 α_2 の率で減少したとすると、地域*r*の付加価値の投入はそれぞれ $v_1^r(1 - \alpha_1)$ 、 $v_2^r(1 - \alpha_2)$ となる。地域*r*の生産は同率で減少し、それぞれ $v_1^r(1 - \alpha_1)/\tau_1^r$ 、 $v_2^r(1 - \alpha_2)/\tau_2^r$ となる。地域*r*による生産の減少は、これを中間財として投入する地域*s*の生産に影響を与えるが、その変化の大きさは、地域*r*による生産物がどのように配分されるかに依存する。仮に配分比率が災害前と同じであるとするならば、地域*s*の生産はそれぞれ、

$$x_1^s = \text{Min} \left[\frac{b_{11}^{rs} v_1^r (1 - \alpha_1) / \tau_1^r + x_{11}^{ss}}{a_{11}^s}, \frac{b_{21}^{rs} v_2^r (1 - \alpha_2) / \tau_2^r + x_{21}^{ss}}{a_{21}^s}, \frac{v_1^s}{\tau_1^s} \right] \tag{9a}$$

$$x_2^s = \text{Min} \left[\frac{b_{12}^{rs} v_1^r (1 - \alpha_1) / \tau_1^r + x_{12}^{ss}}{a_{12}^s}, \frac{b_{22}^{sr} v_2^r (1 - \alpha_2) / \tau_2^r + x_{22}^{ss}}{a_{22}^s}, \frac{v_2^s}{\tau_2^s} \right] \quad (9b)$$

とあらわすことができる。ただし、 b は配分係数であり、

$$b_{ij}^{rs} = x_{ij}^{rs} / x_i^r \quad (i, j = 1, 2) \quad (10)$$

として定義される。本稿では、このモデルを「ボトルネックモデル」とよぶことにする。なお、シミュレーションでは、初期の生産減少額を $v_1^r(1 - \alpha_1)$ または $v_2^r(1 - \alpha_2)$ に置き換えて計算を行う。

4. シミュレーション

4.1. 試算の想定

前節で示した各モデルに基づき、首都直下型地震による間接被害の試算を行う。はじめに試算の想定について述べておく。

間接被害の推計対象地域は、東京都外の 46 道府県とし、試算には平成 27 年（2015 年）東京都産業連関表（統合大分類）を使用する⁷。東京都産業連関表は他県の産業連関表にはない特徴を有している。具体的には、本社部門が独立して表章されており、また、東京都内と都外の 2 地域間表の形式による取引額表が公表されている。

本試算では、まず被災による東京都内の生産減少額を推計し、次に都内の生産減少が都外への生産に与える影響を各モデルにより計算する。ここで外生的に想定する東京都内の生産減少については、生産関数による推計がしばしば行われている。例えば、中央防災会議の試算では、資本、労働の生産要素及び「首都中枢性」とよばれる生産性指標から構成される生産関数を推計し、それぞれの生産要素と生産性の減少を想定した上で、都内における生産の減少額を推計している。本研究においても、最終的には直接被害の想定から都内の生産減少額を推計する手順を目指す。本稿執筆時点においては、試算を行う（数字を作る）ことを優先し、簡便な方法により東京都内の生産減少額を推計する。

東京都内の生産減少額の推計は、本社と本社以外の部門に分けて行う。まず本社以外の部門については、県民（市民）経済計算より阪神・淡路大震災における神戸市の産業別市内総生産の 1993 年度から 1994 年度の変化率を求め、これと全国の変化率の差分を震災の影響による変化と仮定する。本稿では、この変化率を東京都の県内生産の減少率として適用した。この様子を図 2 に示す。なお、建設業などの差分がプラスの部門は、都内生産の減少率はゼロと想定した。

⁷ 通常の 37 部門に本社を加えた 38 部門から構成される。

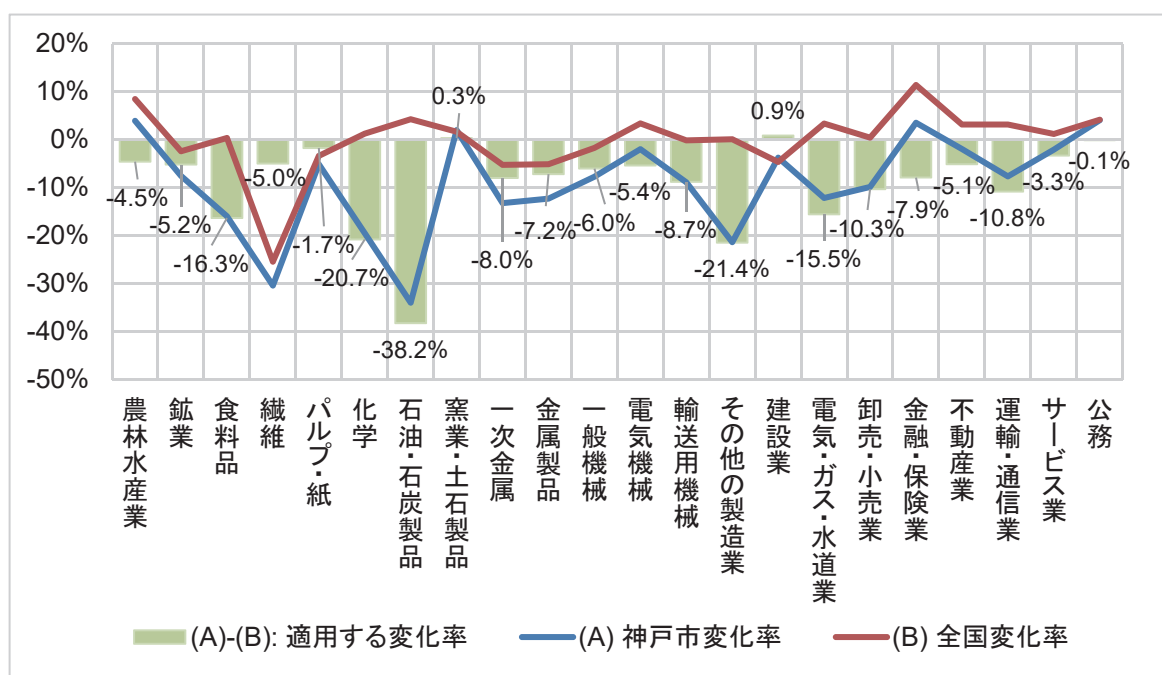


図2 産業別域内総生産の変化率（93～94年度：神戸市、全国、両者の差分）

出所：内閣府「県民経済計算」より筆者作成

本社部門の生産減少については、本社機能が全損するが、1年後には復旧するケースを想定する。このケースにおいては、バックアップ拠点の稼働も考慮し、大まかに10%の生産が減少すると想定する。平成28年（2016年）経済センサス-活動調査によれば、東京都内の本社事業所に勤める従業員が全国の本社従業員に占める割合は27.1%であり、本社従業員の3割弱が東京に集中している。このことから、本社機能は東京都における主要産業の一つと位置付けることができる。国土交通省による2021年の調査によれば、本社事業所の部門・部署における災害時の代替・バックアップ拠点を整備済の企業は31%であり半数以上が未整備とされている。一方で企業規模別には、従業員1,000人以上の企業では5割以上が整備済みとされており、活動量の点からはバックアップに関する一定の整備が進んでいるとも評価できる。前記の年間で10%の生産減少は、このような背景を念頭に設定した想定である⁸。

以上の想定から算出した、東京都内における各産業の被災による生産減少額を表2に整理する。数表1列目の都内生産額は平成27年（2015年）東京都産業連関表から取得した生産額、2列目の想定減少率は阪神・淡路大震災時の経験に基づき想定した減少率、3列目は計算された都内生産の減少額である。減少率は石油・石炭製品など素材系製造業で高いが、額としては商業や情報通信業などサービス産業で大きくなっている。

⁸ ただし10%の減少は、本稿執筆時点で明確な根拠を伴うものではなく、仮置きでの想定である。

表 2 想定した都内の生産減少額

(単位：100 万円)

番号	統合大分類	都内生産額	想定減少率	生産減少額
1	農林漁業	101,716	- 4.5%	- 4,622
2	鉱業	9,548	- 5.2%	- 493
3	飲食料品	1,161,930	- 16.3%	- 189,235
4	繊維製品	82,896	- 5.0%	- 4,123
5	パルプ・紙・木製品	285,064	- 1.7%	- 4,905
6	化学製品	511,175	- 20.7%	- 106,055
7	石油・石炭製品	29,668	- 38.2%	- 11,333
8	プラスチック・ゴム製品	200,508	- 21.4%	- 42,956
9	窯業・土石製品	163,138	0.0%	0
10	鉄鋼	166,037	- 8.0%	- 13,237
11	非鉄金属	74,632	- 8.0%	- 5,950
12	金属製品	231,285	- 7.2%	- 16,547
13	はん用機械	268,519	- 6.0%	- 16,101
14	生産用機械	358,661	- 6.0%	- 21,506
15	業務用機械	543,459	- 6.0%	- 32,587
16	電子部品	306,774	- 5.4%	- 16,423
17	電気機械	671,171	- 5.4%	- 35,932
18	情報通信機器	564,268	- 5.4%	- 30,209
19	輸送機械	1,939,116	- 8.7%	- 169,640
20	その他の製造工業製品	1,298,640	- 21.4%	- 278,212
21	建設	8,346,040	0.0%	0
22	電力・ガス・熱供給	1,393,182	- 15.5%	- 216,147
23	水道	652,770	- 15.5%	- 101,275
24	廃棄物処理	459,197	- 15.5%	- 71,243
25	商業	24,142,943	- 10.3%	- 2,480,830
26	金融・保険	11,151,638	- 7.9%	- 877,757
27	不動産	14,788,359	- 5.1%	- 753,522
28	運輸・郵便	7,550,317	- 10.8%	- 815,329
29	情報通信	22,538,640	- 10.8%	- 2,433,859
30	公務	6,669,910	- 0.1%	- 4,957
31	教育・研究	7,041,641	- 3.3%	- 230,537
32	医療・福祉	7,279,542	- 3.3%	- 238,326
33	他に分類されない会員制団体	589,560	- 3.3%	- 19,302
34	対事業所サービス	25,682,677	- 3.3%	- 840,830
35	対個人サービス	10,032,750	- 3.3%	- 328,464
36	事務用品	289,843	0.0%	0
37	分類不明	750,413	0.0%	0
38	本社	30,707,469	- 10.0%	- 3,070,747
	合計	189,035,096	- 7.1%	- 13,483,190

出所：筆者作成

4.2. シミュレーション結果の検討

表2の最右列に示した金額だけ都内の生産が減少した場合、都外の実産額はどのように変化するかを第3節で示した各モデルにより試算する。ここでは、本社と本社以外の実産減少の影響を識別するために、本社の被災だけを考慮した試算結果と本社以外の実産への被災だけを考慮した試算結果をそれぞれ示したうえで、両者への被災を考慮した試算結果を提示する。

表3は本社の被災だけを考慮した試算の結果である。表側は都内（上段）と都外（下段）の実産であり、紙幅の都合によりそれぞれを7つの部門に集計している。表頭の実産前生産額は、平成27年（2015年）東京都実産連関表から得られる都内及び都外の実産額、右の4列が各モデルから導出した実産減少額である。いずれのモデルでも東京都内の実産額は外生としているため、表3においては、本社実産額の10%に相当する30.71億円が実産減少額として計上されている。

表3 本社の被災だけを考慮した試算結果

（単位：10億円）

		被災前 生産額	被災による実産減少額			
			需要型 モデル	供給型 モデル	ハイブリッド モデル	ボトルネック モデル
都内	農林・鉱業	111	0	0	0	0
	製造業	8,857	0	0	0	0
	建設業	8,346	0	0	0	0
	電力・ガス等	2,505	0	0	0	0
	商業	24,143	0	0	0	0
	サービス	114,365	0	0	0	0
	本社	30,707	-3,071	-3,071	-3,071	-3,071
都外	農林・鉱業	13,624	-1	-36	-45	-422
	製造業	292,489	-43	-947	-932	-9,064
	建設業	52,491	-1	-178	-99	-1,627
	電力・ガス等	31,576	-32	-82	-125	-858
	商業	71,336	-5	-541	-547	-2,211
	サービス	397,975	-155	-1,470	-1,452	-11,149
	本社	51,543	-13	-46	-233	0
A. 東京都合計		189,035	-3,071	-3,071	-3,071	-3,071
B. 東京都外合計		911,034	-250	-3,301	-3,433	-25,330
C. 全国計		1,100,069	-3,320	-6,372	-6,504	-28,401
A. 減少率			-1.6%	-1.6%	-1.6%	-1.6%
B. 減少率			0.0%	-0.4%	-0.4%	-2.8%
C. 減少率			-0.3%	-0.6%	-0.6%	-2.6%

出所：筆者作成

はじめに東京都外の生産減少額を需要型モデルと供給型モデルで比較すると、需要型モデルでは2,500億円の減少に対して、供給型モデルでは約3.3兆円の減少であり、供給型モデルから推計した間接被害額は需要モデルの10倍以上となっている。この違いは、都内の本社活動が相対的に川下に大きく影響し、川上への影響は限定的であることを示している。言い換えれば、都内の本社活動は、都外においては前方連関効果が強く働き、後方連関効果は弱いと考えることができる。

この点について、具体的に考察しよう。例えば製造業においては、需要型モデルが430億円の減少、供給型モデルが9,470億円の生産減少となっている。都内の本社は、その活動を行うにあたり都外から製造品（オフィスの備品など）を中間財として購入しているが、被災による都内本社活動の停止は、都外で生産される製造品への需要を減少させる。その需要減少による直接・間接の川上への影響が需要型モデルによる減少額として計測された2,500億円である。他方、供給型モデルにおいては、都内本社活動の停止が、都外の事業所の生産活動に与える影響を分析の出発点とする。例えば、本社機能の喪失により業務管理や情報収集活動が混乱をきたし、都外での生産活動が従来通りに行えなくなるといったイメージである。ここでの（本社機能の棄損による）都外での生産活動の低下を出発点として、直接・間接の川下への影響を製造品について測ったのが、供給型モデルによる減少額の約3.3兆円である。二つのモデルによる相違を産業ごとに比較すると、定義上移出入が存在しない建設業を除けば、商業において両者の差は最も大きい。具体的には、需要型モデルでは50億円の減少、供給型モデルでは5,410億円の減少であったので、両者の差は、倍率にして約100倍以上である。これは、都内の本社活動は都外の商業活動に大きくかかわる（本社機能によるサービスを都外の商業部門に供給する）一方、都内の本社活動は、都外の商業部門にあまり依存していないことを反映している。商業とは反対に、両者の差が比較的小さいのは電気・ガス・熱供給（以下「電力等」とする）であり、倍率は3倍未満にとどまっている。これは、都内本社は都外で生産された電力等を多く需要しているため、都外への後方連関効果が比較的大きいことが原因と考えられる。

ハイブリッド型モデルによる計算では、産業により相違はあるものの、総じて供給型モデルよりも間接被害が大きく推計されている。これは、ハイブリッド型モデルでは、カウントする波及のステップが1段階多いことによるが、本社については後方連関効果が小さいことから、その差はわずかにとどまっている。

4列目に示したボトルネックモデルでは、東京都外での生産減少額は約25兆円であり、これまでに見た三つのモデルとは群を抜いて間接被害が大きく推計されている。ボトルネックモデルの想定では、生産要素は完全非代替であり、例えば本社機能の投入が半分になると生産も半減し、投入がゼロになると生産もゼロになる。ただし、地域間の代替は認めているため、仮に都内の本社機能が全損しても、都外にも（バックアップとしての）本社が存在する場合には、都外での生産がゼロになることはない。前項でみたように、都内への本社の集積は従業者数ベースで3割弱となっており、一定のバックアップは機能することが伺える⁹。しかし都外の本社が都内の本社機能を代替すると想定しても、都

⁹ この点に関連して本稿で未整理なのが、本社機能の特異性に対する扱いである。通常の財・サービスであれば、それを供給する主体が同一企業であるか他企業であるかは問題とする必要はない。しかし本社機能については、そのサービスが提供されるのは傘下の事業所に限定されるという特徴がある。本社は東京都内にも都外にも存在するが、都内に所在するある企業の本社機能を都外に所在する別の企業の本社が代替（代行）

内の本社生産額の10%が減少することによる影響は、ボトルネックモデルでは非常に大きく計測され、都外の生産は被災前の2.8%減少している。

次に、本社以外の産業の被災だけを考慮した場合の試算結果を表4に示す。都内の生産は外生変数であることから、都内の各産業の生産減少額は4つのモデルで同じ値となっており、合算すると約10.4兆円となる。この10.4兆円の都内の生産減少が都外の生産に与える効果は、需要型モデルで約2.4兆円、供給型モデルとハイブリッド型モデルでは約3.6兆円、ボトルネックモデルでは約33.9兆円となる。

表4 本社以外の産業の被災だけを考慮した試算結果

(単位：10億円)

		被災前 生産額	被災による生産減少額			
			需要型 モデル	供給型 モデル	ハイブリッド モデル	ボトルネック モデル
都内	農林・鉱業	111	-5	-5	-5	-5
	製造業	8,857	-995	-995	-995	-995
	建設業	8,346	0	0	0	0
	電力・ガス等	2,505	-389	-389	-389	-389
	商業	24,143	-2,481	-2,481	-2,481	-2,481
	サービス	114,365	-6,543	-6,543	-6,543	-6,543
	本社	30,707	0	0	0	0
都外	農林・鉱業	13,624	-78	-44	-60	-522
	製造業	292,489	-1,021	-1,257	-1,256	-12,549
	建設業	52,491	-10	-226	-144	-1,415
	電力・ガス等	31,576	-120	-93	-138	-1,507
	商業	71,336	-175	-239	-222	-2,313
	サービス	397,975	-508	-1,526	-1,456	-13,349
	本社	51,543	-533	-204	-343	-2,242
A. 東京都合計		189,035	-10,412	-10,412	-10,412	-10,412
B. 東京都外合計		911,034	-2,445	-3,590	-3,618	-33,897
C. 全国計		1,100,069	-12,858	-14,002	-14,030	-44,310
A. 減少率			-5.5%	-5.5%	-5.5%	-5.5%
B. 減少率			-0.3%	-0.4%	-0.4%	-3.7%
C. 減少率			-1.2%	-1.3%	-1.3%	-4.0%

出所：筆者作成

することは考えられない。本来はこのような本社の特異性を考慮したモデルを構築すべきと考えられるが、本稿においては、本社を通常の財・サービスと同列に扱っている。

本社の被災だけを考慮したケースと比べると、需要型モデルと供給型モデルによる都外の生産減少額の差は縮まっている。前方連関効果が強く作用する本社活動に比べて、本社以外の産業は、平均的には後方連関効果も働くことを示している。産業別には、製造業において需要型モデルと供給型モデルの生産減少額が近い値となるのに対して、サービス業では供給型モデルが需要型モデルの約3倍となっている。サービス業は製造業に比べて川下に位置することが、このような相違を生じさせていると考えられる。この他に、農林・鉱業と本社では、需要型モデルの方が生産減少額は大きくなっている。ボトルネックモデルによる都外の生産減少額は、表3のケースと同様に、他の3つのモデルの10倍程度の大きさである。続いて、全ての産業の被災を考慮したケースの影響を表5に示す。

表5 全ての産業の被災を考慮した結果

(単位：10億円)

		被災前 生産額	被災による生産減少額			
			需要型 モデル	供給型 モデル	ハイブリッド モデル	ボトルネック モデル
都内	農林・鉱業	111	-5	-5	-5	-5
	製造業	8,857	-995	-995	-995	-995
	建設業	8,346	0	0	0	0
	電力・ガス等	2,505	-389	-389	-389	-389
	商業	24,143	-2,481	-2,481	-2,481	-2,481
	サービス	114,365	-6,543	-6,543	-6,543	-6,543
	本社	30,707	-3,071	-3,071	-3,071	-3,071
都外	農林・鉱業	13,624	-79	-80	-105	-529
	製造業	292,489	-1,064	-2,204	-2,188	-12,549
	建設業	52,491	-11	-405	-243	-1,627
	電力・ガス等	31,576	-152	-175	-263	-1,507
	商業	71,336	-180	-781	-768	-2,313
	サービス	397,975	-663	-2,996	-2,908	-14,193
	本社	51,543	-546	-250	-576	-2,242
A. 東京都合計		189,035	-13,483	-13,483	-13,483	-13,483
B. 東京都外合計		911,034	-2,695	-6,891	-7,051	-34,960
C. 全国計		1,100,069	-16,178	-20,374	-20,534	-48,443
A. 減少率			-7.1%	-7.1%	-7.1%	-7.1%
B. 減少率			-0.3%	-0.8%	-0.8%	-3.8%
C. 減少率			-1.5%	-1.9%	-1.9%	-4.4%

出所：筆者作成

ここで計算される生産減少額は、ボトルネックモデル以外のモデルでは、本社への被災のみを考慮した結果（表3）と本社以外の産業への被災のみを考慮した結果（表4）の合計に一致する。例えば都外製造業の需要型モデルの生産減少額は表3が430億円、表4が1兆210億円であり、この合計は表5の1兆640億円と一致する。通常の産業連関分析では、最終需要と生産誘発額は線形の関係にあるため、別々の最終需要から計算した生産誘発額の合計と予め最終需要を合算してから計算した生産誘発額は等しくなる。一方、ボトルネックモデルについては、このような関係は成立しない。ボトルネックモデルでは、投入比率の変化が最大の財のみが生産に影響するが、投入比率の変化が最大となる財は本社の被災のみを考慮したケースと本社以外の産業の被災のみを考慮したケースで異なるためである。

ここまでで、4種類のモデルによる間接被害推計の試算を示した。本研究の最終目標は、説得力のある間接被害の推計を提示することにあるが、本稿においてはまだそこまでの段階に至っていない。このことを承知の上で、参考までに、中央防災会議の首都直下地震対策検討ワーキンググループ（以下、「首都直下WG」とする）による間接被害の試算と比較を行う。表6はその結果である。

首都直下WGは間接被害の総額を47.9兆円と推計している。本稿の試算でこれに近いのはボトルネックモデルによる推計であり、集計対象に本社を含めると48.4兆円、本社を除外すると43.1兆円となる。産業別の比較では、表6に示すように、卸売・小売、金融・保険、不動産業で首都直下WGの被害額がより大きく、運輸・通信業、サービス業では本稿による被害額がより大きい。また輸送機械において、首都直下WGと本稿の試算は近い値となっている。

表6 中央防災会議による間接被害推計との比較

(単位：兆円)

	防災 会議	本研究											
		需要型モデル			供給型モデル			ハイブリッド モデル			ボトルネック モデル		
		都内	都外		都内	都外		都内	都外		都内	都外	
農林水産業	0.5	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.5	0.0	0.5
鉱業	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
建設業	3.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.4	0.2	0.0	0.2	1.6	0.0	1.6
卸売・小売業	12.5	2.7	2.5	0.2	3.3	2.5	0.8	3.2	2.5	0.8	4.8	2.5	2.3
金融・保険業	4.8	0.9	0.9	0.0	1.2	0.9	0.3	1.2	0.9	0.3	1.9	0.9	1.0
不動産業	6.9	0.8	0.8	0.1	1.0	0.8	0.2	1.0	0.8	0.2	2.8	0.8	2.0
運輸・通信業	1.9	3.6	3.2	0.4	3.9	3.2	0.7	4.0	3.2	0.8	5.8	3.2	2.6
電気・ガス・水道業	2.2	0.5	0.4	0.2	0.6	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	1.9	0.4	1.5
サービス業	2.8	1.9	1.7	0.2	3.5	1.7	1.8	3.3	1.7	1.6	10.2	1.7	8.6
輸送機械	2.6	0.3	0.2	0.1	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.3	2.5	0.2	2.4
輸送機械以外の 製造業	10.5	1.8	0.8	0.9	2.6	0.8	1.8	2.7	0.8	1.9	11.0	0.8	10.2
本社		3.6	3.1	0.5	3.3	3.1	0.3	3.6	3.1	0.6	5.3	3.1	2.2
合計（本社を除く）	47.9	12.6	10.4	2.1	17.1	10.4	6.6	16.9	10.4	6.5	43.1	10.4	32.7
合計（本社を含む）		16.2	13.5	2.7	20.4	13.5	6.9	20.5	13.5	7.1	48.4	13.5	35.0

出所：中央防災会議（2013）及び筆者による試算

5. 結びにかえて

本稿では、震災による供給制約の間接被害を計測するための4種類のモデルを提示し、それぞれのモデルの特性を検討しつつ、首都直下型地震における間接被害額の試算を行った。手法は東日本大震災を対象とした下田・藤川（2012）に準拠していることから、試算から検出されるモデルの特性は、概ね下田・藤川（2012）と同じ傾向であった。一方で、東京都は前方連関効果の大きい本社機能が重要な「産業」として存在することから、需要型モデルよりも供給型モデルの方が被害額は大きく計算されるなど、東日本大震災とは異なる傾向も確認された。また、東日本大震災では相対的に製造業による供給制約がクローズアップされたが、首都直下型地震では、本社機能や情報通信機能などのサービス分野の供給制約がより重大な問題になると予測される。本稿はこのような問題を定量的に検討する第一歩と位置付けられるが、よりリアリティのある被害推計を行うために、多くの課題が残されている。以下では、下田・藤川（2012）で言及していない課題について述べ、本稿の結びとする。

第一に、前提となる産業毎の被害想定に阪神・淡路大震災後の神戸市の県内総生産の減少率を利用したが、これは作業を先に進めるための仮置きである。言うまでもなく、神戸市と東京都では産業構造が異なり、阪神・淡路大震災当時と首都直下型地震発生時では耐震化等の備えも異なる。今後の方向性としては、中央防災会議に倣い、産業毎の生産関数を推計するなどの方法が考えられるが、データ整備という観点から、息の長い作業になると考えられる。また、都内の生産を考える上では、復旧のスピードに関する想定も重要であり、この観点からの検討も求められる。

第二に、下田・藤川（2012）及び本稿の試算から、合計でみて最も現実の被害を説明する可能性があるのはボトルネックモデルであることが示唆されたが、現実を反映させた改良が必要である。例えば、本稿のボトルネックモデルでは、輸入または移入による代替調達を考慮していない。東北地域の生産が止まった場合であっても可能なものは他地域から代替調達するというのが東日本大震災後に起こったことであり、その場合の影響を組み込んだモデルを開発する必要がある。

第三に、本社機能の扱いに関する検討が必要である。第4節でも述べたように、本社機能は異なる企業で代替できるものではなく、この点は通常の財・サービスと性格が大きく異なる。本稿では、本社サービスを他の財・サービスと同列に扱ったが、本来東京都内に本社を持つ企業が、都外にある他企業の本社サービスを購入して代替することは不可能である。このような特殊性を反映したモデルを構築することが求められる。また、本社機能が停止した場合の影響について、ケーススタディを行うつつ、本社サービスを完全非代替の生産要素として扱うことが適切であるかの検討も必要であろう。

補論 資源配分モデル

A1. はじめに

本論では中間財投入にボトルネックが発生したときの生産量の減少を推計することで震災の被害を推計したが、この補論では、需要量を調節することで供給制約に対処する分析手法について論じる。本稿では、これを「資源配分モデル」と呼ぶ。

ある経済社会が選択することができる需要メニューを需要可能領域と呼ぶとすれば、震災等による中間財の供給制約がおこるということは、需要可能領域が小さくなるということである。この場合、小さくなった需要可能領域のどの部分を選択するのか、言い換えれば中間財資源をどの生産物の生産用に配分するかは政策判断、つまり、政策判断の基準（目的関数）に依存する。

このモデルは線形計画法に代表される数理最適化の応用問題である。目的関数の例としては、GDPの最大化、消費者効用の最大化、あるいは現状からの変化の最小化といったものが考えられる。伝統的な産業連関分析では最終需要量を外生変数としてそれを供給するための生産量を求めるが、この資源配分モデルでは生産量を外生変数としてそれが供給できる最終需要量を逆算するという関係になる。

本稿では、この目的関数として、「GDP 最大化」と「最終需要変化の最小化」を取り上げる。以下、このモデルと計算結果について論じていこう。

A2. 分析手法の特徴

A2.1. 外生変数の設定

本稿での分析手法は、先に記したように、伝統的な産業連関分析手法と大きく異なっている。伝統的な産業連関分析（均衡生産量決定モデル）では、最終需要 f を外生変数、国内生産 x を内生変数としている。分析者は、何らかの最終需要 f の変化を想定し、レオンチェフ逆行列を用いて、この最終需要を満たす国内生産 x を計算する。

他方、本稿では、震災によって国内生産に制約が生じたことを想定し、この生産制約の下で、最終需要を求める。これらの様子を図 A1 に示す。

すなわち、本稿では、震災による制約を受けた生産を所与（外生変数）として、レオンチェフ逆行列を用いて、最終需要を内生変数として求めている。

このように、本稿と伝統的な産業連関分析手法との大きな違いは、外生変数の扱いである。

A2.2. 政策判断（目的関数）の想定と最適化

震災によって生産制約が生じた場合、政府は何らかの政策を講じて、その対応を行う。その政策オプションは、例えば、「震災後の GDP を最大化する」、「震災前後の GDP の変化を最小化する」、「家計の効用を最大化する」あるいは「輸入を最小化して国内生産を増加させる」など、さまざま想定することができる。

本稿では、政策判断を目的関数として想定し、上記の生産制約の下で、数理最適化モデルを解く。これより、目的関数の最適解として最終需要を求める。

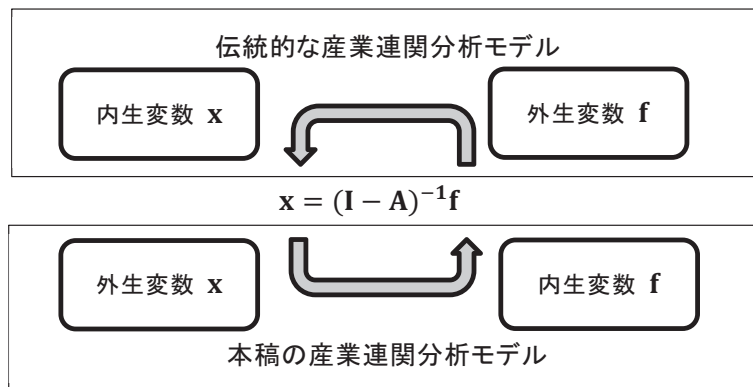


図 A1 本稿と伝統的な産業連関分析手法の違い

出所：筆者作成

A2.3. 震災による被害額の推計方法

震災前の生産額を x 、震災後の生産額（生産制約後の生産額）を x' とする。上記のように、数理最適化モデルを解くことにより、政策判断、すなわち、目的関数の最適解に基づいた最終需要 f' が求められる。この最終需要 f' は、「どの産業部門にどれだけの最終需要を配分すれば良いか」という情報を提供してくれる。つまり、生産制約の下で、目的関数の最適解として最終需要の配分が決定されることから、これを「資源配分モデル」と呼ぶことができる。本稿での震災の被害額は、生産制約の条件下で政策判断に基づく最終需要の減少額として評価する。

以上が、本稿での分析手法と伝統的な産業連関分析手法の相違点である。先に記したように、目的とする政策オプションは多々あるが、本稿では、(1) GDP の最大化、(2) 最終需要変化の合計の最小化、の2つのケースを想定し、各ケースの条件を満たす最終需要量を数理最適化モデルによって求める。以下、これら2つの政策オプションについて説明しよう。

A2.4. GDP 最大化

政策判断の一つの選択肢として、震災後の GDP を最大化することを仮定しよう。被災後、供給制約によって、国内生産は減少する。この減少した国内生産の下で、各部門の最終需要量をどの程度とすれば、GDP が最大になるかを計算する。

この様子を2部門からなるモデルで説明しよう。 f を最終需要額、 x を生産額、 $[I-A]^{-1}$ をレオンチェフ逆行列とする。被災後の減少した国内生産額の制約の下で、GDP (=GDE) を最大にする数理最適化モデルは、以下のようになる。

$$\text{Max. GDE} = f_1 + f_2 \tag{A1}$$

$$\text{st. } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \geq [I - A]^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \tag{A2}$$

この数理最適化モデルを2次元のグラフで表すために、以下のように変形しておこう。(A1)式は付加価値額の合計、すなわちGDPであるが、これは最終需要 f の合計のGDEとして定式化できる。(A3)式では、投入係数 a_{ij} とし、レオンチェフ逆行列の要素 b_{ij} として表している。

$$[\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & 1 - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

上記の(A1)、(A2)式からなる数理最適化モデルは、次の(A4)、(A5)式として表すことができる。

$$\text{Max. } GDE = f_1 + f_2 \quad (\text{A4})$$

$$\text{st. } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

さらに、(A5)式を以下の(A6)式と(A7)式のように書き換える、

$$x_1 \geq b_{11}f_1 + b_{12}f_2 \text{ より、} f_2 \leq -\frac{b_{11}}{b_{12}}f_1 + \frac{x_1}{b_{12}} \quad (\text{A6})$$

$$x_2 \geq b_{21}f_1 + b_{22}f_2 \text{ より、} f_2 \leq -\frac{b_{21}}{b_{22}}f_1 + \frac{x_2}{b_{22}} \quad (\text{A7})$$

つまり、(A6)式および(A7)式の制約条件は、連立方程式で表せば、以下の(A8)式となる。

$$\text{st. } \begin{cases} f_2 \leq -\frac{b_{11}}{b_{12}}f_1 + \frac{x_1}{b_{12}} \\ f_2 \leq -\frac{b_{21}}{b_{22}}f_1 + \frac{x_2}{b_{22}} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

次頁の図A2は、(A4)式の目的関数と(A6)、(A7)式の制約条件に基づいて、最適化モデルを示したものである。

当初の均衡点を E_1 とする。この点は、当初(震災前)の国内生産量を実現する最終需要 f_1 と f_2 の組み合わせを示している。その後、震災が発生し、第1部門の生産額 x_1 が Δx_1 だけ減少した場合、投入係数 a_{ij} が不変であれば、(A6)式の制約式は点線で示すように下方にシフトする。他方、(A7)式は不変、すなわち投入係数 a_{ij} と第2部門の生産額 x_2 に変化がないとする。すると、震災後の消費可能集合は影を付けた部分になり、新たな均衡点は、シフト後の(A6)式と(A7)式の交点 E_2 となる。この新たな均衡点は、GDPを最大化する最終需要 f_1^* と f_2^* の組み合わせで実現されている。ただし、これら2つの制約式で示された「各部門の震災後の生産額は、それぞれ震災前の生産額を超えない」という制約のもとでGDPが最大化されている。

直感的に言うならば、以下のようなになる。赤色線で囲った領域が震災前の需要可能領域、青色の

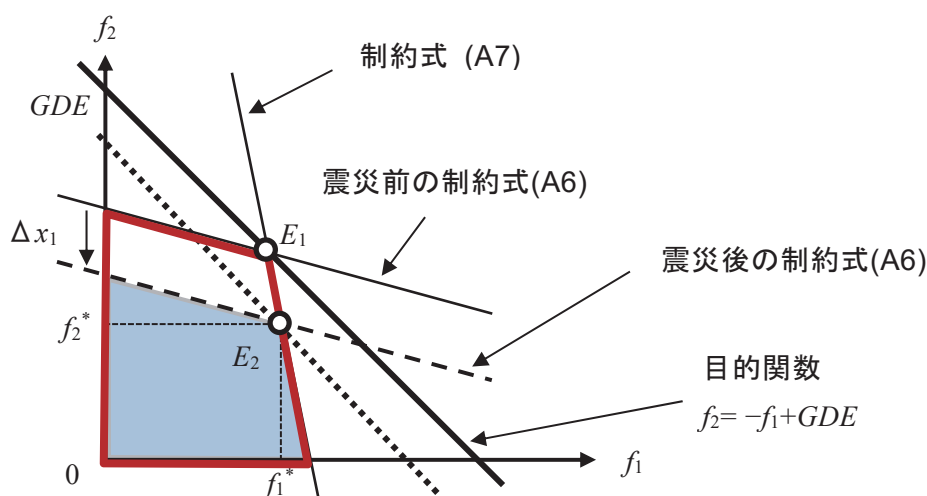


図 A2 GDP 最大化の線形計画モデル例

出所：筆者作成

網掛けの領域が震災後の需要可能領域である。震災によってその領域は狭くなるが、GDP を最大化する最終需要 f_1^* と f_2^* の組み合わせとなるように、目的関数が下方にシフトすることで、最適解が得られることになる。

A2.5. 最終需要変化の最小化

次に、政策判断の一つの選択肢として、震災前後の各部門の最終需要の変化の合計を最小化することを仮定しよう。被災後、供給制約によって、国内生産は減少する。この減少した国内生産の下で、震災の前と比べて、最終需要変化の合計が最小となる各部門の最終需要を求める計算を行う。最終需要の合計は、GDP であるので、この仮定は、震災による GDP の変化のショックを最小とする政策判断とも解される。

この様子を、先の A2.4 項と同じ変数を用いて、2 部門からなるモデルで説明しよう。被災後の（減少した）国内生産額の制約の下で、被災前の最終需要と被災後の最終需要の差の合計が最小となる数理最適化モデルは、以下のようなになる¹⁰。

$$\text{Min. } r^2 = (f_1 - f_{10})^2 + (f_2 - f_{20})^2 \quad (\text{A9})$$

$$\text{st. } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A10})$$

ただし、 f_1 および f_2 は、それぞれ被災後の第 1、2 部門の最終需要、 f_{10} および f_{20} はそれぞれ被

¹⁰ 実際の計算では、それぞれの産業の生産額で割り算することで標準化している。

災前の第1、2部門の最終需要を意味する。(A10)式は先の(A5)式と同一である。

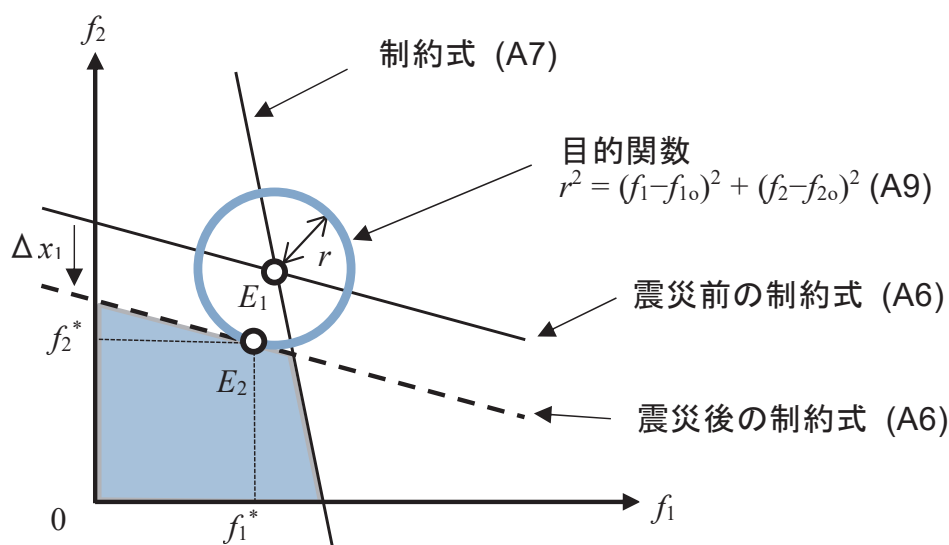
図A3は、(A9)式の目的関数と(A10)式の制約条件に基づいて、最適化モデルを示したものである。当初の均衡点を E_1 とする。この点は、当初(震災前)の国内生産量を実現する最終需要 f_1 と f_2 の組み合わせを示している。その後、震災が発生し、第1部門の生産額 x_1 が Δx_1 だけ減少した場合、投入係数 a_{ij} が不変であれば、(A6)式の制約式は点線で示すように、下方にシフトする。他方、(A7)式は不変、すなわち投入係数 a_{ij} と第2部門の生産額 x_2 に変化がないとする。ここでの目的関数(A9)式は、被災前の最終需要と被災後の最終需要の差の合計が最小となることを円の方方程式で定義しているため、この円の半径 r を最小化することと言い換えることができる。

新たな均衡点は、シフト後の(A6)式と最小化された半径 r の円の接点 E_2 となる。この新たな均衡点は、被災前の最終需要と被災後の最終需要の差の合計が最小となる最終需要 f_1^* と f_2^* の組み合わせで実現されている。ただし、これら2つの制約式で示された「各部門の震災後の生産額は、それぞれ震災前の生産額を超えない」という制約のもとで、最終需要変化の最小化が実現されている。

A3. シミュレーション

今回のシミュレーションにおいては、本論と同様に東京都に首都直下型地震が発生し、東京都内の生産額が減少することを想定した。使用した産業連関表と想定した都内の震災被害額は、本稿の本論と同様である。技術的なことではあるが、エクセルの「ソルバー」を用いており、初期値は産業連関表の最終需要額とし、最適解には非負条件を付けた。

そして、(A) 本社のみ被災、(B) 本社以外被災、(C) 本社と本社以外被災(全産業被災)の3つの被災パターンを想定した。このような生産額減少の被害想定に基づいて、先に記した「GDP



図A3 最終需要変化の最小化の最適化モデル例

出所：筆者作成

最大化」および「最終需要変化の最小化」の2つのシミュレーションを行った。以下、これらの結果を簡単に示す。

A3.1. GDP 最大化

政策判断として「GDPの最大化」を想定した場合の計算結果を以下の表A1に示す。この結果は、「最適化後の国内生産額は被害想定国内生産額以下」という生産制約の下で、GDPを最大化するように最終需要額を求め、間接的経済被害額を最終需要額の減少として求めている。この計算結果から読み取れることを以下にまとめて行こう。

(1) 最終需要額の減少

最終需要変化額の順位は、減少額が大きい順に、「全産業計」、「本社のみ」そして「本社以外」であった。「全産業計」は、被害想定した生産減少額が最も大きいので、最大の最終需要減少額であることは、妥当な結果と言える。しかし、最小の被害想定である「本社のみ」が、「全産業計」に次いで大きな最終需要減少額になっていた。これは、東京都内にある本社の被災が、都内の最終需要額の減少に大きな影響を及ぼすことを示唆している。「全産業計」の最終需要の変化率は、 -3.5% として計算された。これは、今回の被害想定と供給制約の下でGDPを最大化しても、間接的経済被害として、GDPが 3.5% 失われることを意味する。

(2) 地域別の最終需要額の減少

「本社のみ」、「本社以外」そして「全産業計」の3つのケースで共通していることは、「都内」の最終需要額を減らす一方で、「都外」の最終需要額を増加させていることである。これは、東京都が被災した場合、GDPを最大化する政策は、「都内」での最終需要額の減少と「都外」の最終需要の増加で実現されることを意味している。今回の想定では、間接的経済被害は、東京都へ集中する結果となった。

(3) 産業部門別に見た最終需要額の減少

「商業」は、「全産業計」において、最終需要額の減少額が最も大きく、寄与率も最大の産業部門であった。この「商業」の「本社のみ」と「本社以外」の生産額に注目すると、「本社のみ」の被災では、「商業」は大きく最終需要を減少させるが、「本社以外」の被災では、その減少は比較的軽微にとどまっている点が興味深い。「サービス業」は、「都内」において最大の最終需要額シェアを占める産業部門である。「サービス業」は、「全産業計」において、「商業」に次いで大きな最終需要減少額となっていた。「サービス業」は最終需要額シェアが高いので、その減少額も大きくなるが、変化率で見ると 12% 減にとどまっていた。最終需要額の減少は、「全産業計」で見れば、約22兆円であるが、寄与率をみると、これら「商業」と「サービス業」がその減少に大きく貢献していることがわかる。以上をまとめると、首都の被災は、「都内」の最終需要額の減少をもたらす一方で、「都外」の最終需要額を増加させていた。また、「都内」での最終需要額の減少は、「商業」と「サービス業」によってもたらされていたことがわかった。

表 A1 GDP 最大化の計算結果

	被災前 FD 額 (10 億円)	震災後の FD 変化額 (10 億円)				震災後の FD 変化率 (%)				寄与率 (%)								
		本社のみ	本社以外	全産業計	本社のみ	本社以外	全産業計	本社のみ	本社以外	全産業計								
都内																		
農林・鉱業	52	29	-2	9	56.4	-3.9	18.1	0.2	0.0	0.0								
製造業	4,770	-1,073	-3,483	-3,092	-22.5	-73.0	-64.8	-5.6	-33.3	-14.3								
建設業	7,730	44	-1,181	72	0.6	-15.3	0.9	0.2	-11.3	0.3								
電力・ガス等	850	476	-439	-51	56.0	-51.6	-6.0	2.5	-4.2	-0.2								
商業	15,659	-15,659	-2,258	-15,659	-100.0	-14.4	-100.0	-82.2	-21.6	-72.2								
サービス	61,290	-7,022	-6,965	-7,383	-11.5	-11.4	-12.0	-36.9	-66.6	-34.0								
本社	0	0	1,070	0	-	-	-	0.0	10.2	0.0								
農林・鉱業	3,610	396	65	225	11.0	1.8	6.2	2.1	0.6	1.0								
製造業	134,025	600	1,005	891	0.4	0.8	0.7	3.1	9.6	4.1								
建設業	49,407	4	5	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
電力・ガス等	8,911	360	203	333	4.0	2.3	3.7	1.9	1.9	1.5								
商業	47,281	620	357	479	1.3	0.8	1.0	3.3	3.4	2.2								
サービス	283,901	422	529	724	0.1	0.2	0.3	2.2	5.1	3.3								
本社	0	1,751	636	1,760	-	-	-	9.2	6.1	8.1								
A. 東京都合計	90,351	-23,204	-13,257	-26,104	-25.7	-14.7	-28.9	-121.8	-126.8	-120.4								
B. 東京都外合計	527,135	4,155	2,800	4,418	0.8	0.5	0.8	21.8	26.8	20.4								
C. 全国計	617,486	-19,050	-10,457	-21,686	-3.1	-1.7	-3.5	-100.0	-100.0	-100.0								

(注) 寄与率は、その合計がー100 になるように計算している。

出所：筆者作成

A3.2. 最終需要変化の最小化

「最終需要変化の最小化」を想定した場合の計算結果を以下の表 A2 に示す。この想定は、被災前の GDP と被災後の GDP の差の合計を最小化すること、すなわち震災の GDP へのショックを最小化する政策を想定している。この計算結果から読み取れることを以下にまとめて行こう。

(1) 最終需要額の減少

最終需要変化額の順位は、減少額が大きい順に、「全産業計」、「本社のみ」そして「本社以外」であった。しかし、「本社のみ」と「全産業計」の差は、わずかである。これは、東京都にある本社の被災が全国の生産減少に大きな影響を及ぼすことを示唆している。この結果は、先述した「GDP の最大化」の計算結果と同じ傾向であった。

(2) 地域別の生産額の減少

「本社のみ」、「本社以外」そして「全産業計」で共通していることは、「都内」のみならず「都外」の最終需要額が減少している点である。これは、震災による間接的経済被害を東京都内で受け止めた「GDP の最大化」とは大きく異なっている。全国の「全産業計」で見れば、最終需要の減少額は約 47 兆円であった。この減少額は、22 兆円として計算された「GDP の最大化」と比較して、大きな間接的経済被害額として計算されている。さらに、「都内」の最終需要の減少額に注目すると、「最終需要変化の合計の最小化」では 16 兆円、「GDP の最大化」では 26 兆円となっていた。つまり、全国的に見れば、「最終需要変化の合計の最小化」は、「GDP の最大化」よりも多額の最終需要額の減少をもたらすが、「都内」への影響は限定的であるとも言えることができる。

(3) 産業部門別に見た生産額の減少

「全産業計」の寄与率で見ると、「製造業」および「サービス業」が最終需要額の減少に大きな影響を及ぼしていることがわかる。他方で、「GDP の最大化」において間接的経済被害が顕著であった「商業」に注目すると、その影響は極めて限定的であることが対照的な結果と言える。また、先に述べたように、最終需要額の減少は、「都内」および「都外」のすべての産業部門で生じている。寄与率で見ると、「製造業」と「サービス業」が最終需要額の減少大きく寄与していることが特徴的である。

まとめると、この政策判断によれば、都内の被災は、「都内」と「都外」双方の最終需要額の減少をもたらす結果となっている。また、「都内」の被災にも関わらず、「都内」に比べて、「都外」の最終需要額の減少が顕著となることが読み取れる。

表 A2 最終需要変化の最小化の計算結果

	被災前 FD 額 (10 億円)	震災後の FD 変化額 (10 億円)			震災後の FD 変化率 (%)			寄与率 (%)		
		本社のみ	本社以外	全産業計	本社のみ	本社以外	全産業計	本社のみ	本社以外	全産業計
都内										
農林・鉱業	52	-6	-13	-10	-10.6	-25.2	-18.4	0.0	-0.1	0.0
製造業	4,770	-604	-1,177	-801	-12.7	-24.7	-16.8	-1.3	-4.5	-1.7
建設業	7,730	-518	-1,007	-949	-6.7	-13.0	-12.3	-1.1	-3.9	-2.0
電力・ガス等	850	-111	-362	-296	-13.1	-42.6	-34.8	-0.2	-1.4	-0.6
商業	15,659	-3,257	-2,019	-2,953	-20.8	-12.9	-18.9	-7.0	-7.8	-6.3
サービス	61,290	-8,286	-8,536	-11,118	-13.5	-13.9	-18.1	-17.9	-32.8	-23.7
本社	0	0	0	0	-	-	-	0.0	0.0	0.0
農林・鉱業	3,610	-376	-135	-328	-10.4	-3.8	-9.1	-0.8	-0.5	-0.7
製造業	134,025	-11,063	-8,384	-11,061	-8.3	-6.3	-8.3	-23.8	-32.2	-23.6
建設業	49,407	-1,921	-916	-1,860	-3.9	-1.9	-3.8	-4.1	-3.5	-4.0
電力・ガス等	8,911	-894	-422	-906	-10.0	-4.7	-10.2	-1.9	-1.6	-1.9
商業	47,281	-4,776	-519	-3,894	-10.1	-1.1	-8.2	-10.3	-2.0	-8.3
サービス	283,901	-14,575	-2,534	-12,638	-5.1	-0.9	-4.5	-31.4	-9.7	-27.0
本社	0	0	0	0	-	-	-	0.0	0.0	0.0
A. 東京都合計	90,351	-12,782	-13,113	-16,126	-14.1	-14.5	-17.8	-27.6	-50.4	-34.4
B. 東京都外合計	527,135	-33,604	-12,912	-30,687	-6.4	-2.4	-5.8	-72.4	-49.6	-65.6
C. 全国計	617,486	-46,386	-26,024	-46,813	-7.5	-4.2	-7.6	-100.0	-100.0	-100.0

(注) 寄与率は、その合計が-100 になるように計算している。

出所：筆者作成

A4. 結びに代えて

本稿は、震災による供給制約に対処する方法として、需要量を調整する資源配分に注目して分析を行った。この分析方法の特徴は、伝統的な産業連関分析とは異なり、供給制約（生産制約）を外生変数として、それが供給できる最終需要を内生変数として計算する点である。また、震災による供給制約に対処するための政策判断（目的関数）を想定し、数理最適化モデルを解くことで、内生変数である最終需要を求めている。

さらに、震災の被害額（間接的経済被害額）は、この数理最適化モデルによって計算された被災前後の最終需要額の差で求めている。供給制約として直接的な被害想定額を設定するものの、それに対処する政策判断に基づいて間接的経済被害額が計算される点も大きな特徴である。

本稿での政策判断の想定は、「GDPの最大化」と「最終需要変化の最小化（震災前後のGDP変化の合計の最小化）」の2つであった。この2つの政策判断は、対照的な震災の間接的経済被害結果を導いている。「GDPの最大化」を政策判断とした場合、最終需要への影響は、「都内」に限定された。他方、「最終需要変化の最小化」は、「都内」と「都外」、つまり全国に最終需要額減少の影響を及ぼす結果となった。

これらの結果から、政策的インプリケーションを導くとすれば、「GDPを最大化する最終需要の資源配分は、被害をほぼ都内に限定できる」こと、「震災前後の最終需要変化の合計を最小化（震災前後のGDP変化の最小化）する最終需要の資源配分は、都内のみならず都外にも被害を及ぼす」と言える。

震災に対処する政策は、さまざま考えられる。本稿の分析手法を用いれば、供給制約の下で、さまざまな政策判断を想定し、それに基づいた最適化問題を解くことによって、どのような間接的経済被害の影響が生じるかを明らかにできる。

最後に、残された課題について述べておこう。一つ目は投入係数の変化を考慮していない点である。本分析においては、震災前後ともに、投入係数は固定されている。本来であれば、震災前後では、投入産出構造は変化すると考えるのが自然であろう。二つ目は、輸入の扱いである。本稿での最終需要は、国内需要であり、輸入を考慮していない。輸入を考慮した最終需要とすること、また輸入係数を変化させることで、より現実的なシミュレーションに近づくと考える。今後は、これらの課題を考慮しながら、「家計効用の最大化」や「価格上昇を抑えるモデル」をはじめとするさまざまな政策オプションによる分析を行いたいと考えている。

謝辞

本稿は、愛知学院大学経済研究所における研究プロジェクト「供給制約の経済分析」の成果をとりまとめたものである。同研究所より研究資金援助を受けたことに感謝する。加えて、本研究は、2021年9月に開催された「マクロモデル研究会」（事務局：日本経済研究センター）、同年12月

に開催された「日本経済政策学会第54回中部地方大会」そして2022年8月に開催された28th International Input-Output Association Conference（マレーシア、ランカウイ）における研究報告に基づいている。本報告に対して、討論者ならびに参加者からコメントを頂いたことにも謝意を表す。

参考文献

- 国土交通省中国地方整備局（2005）「災害の社会経済的影響に関する調査－2004年・台風18号をモデルケースとして－」。
(<http://www.cgr.mlit.go.jp/saigai/cyousa/keizaieikyo/index.htm>)（最終閲覧 2022/07/31）
- 下田充・藤川清史（2012）「産業連関分析モデルと東日本大震災による供給制約」『産業連関』, 第20号第2号, pp.133-146. (<https://doi.org/10.11107/papaios.20.133>)（最終閲覧 2022/07/31）
- 中央防災会議（2008）「中部圏・近畿圏の内陸地震に係る被害想定結果について～経済被害～」中央防災会議「東南海、東海地震等に関する専門調査会（第34回）資料」。
(https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/34/pdf/siryou6.pdf)（最終閲覧 2022/07/31）
- 中央防災会議（2013）「首都直下地震の被害想定と対策について」中央防災会議 防災対策推進検討会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ, 最終報告別添資料3。
(http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_siryo03.pdf)（最終閲覧 2022/07/31）
- 内閣府（2011）「東日本大震災における被害額の推計について」平成23年6月24日記者発表資料. (<https://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/pdf/110624-1kisyu.pdf>)（最終閲覧 2022/07/31）
- 長岡貞夫（1976）「供給制約問題への産業連関・数理計画によるアプローチ」『オペレーションズリサーチ』, 11月号, pp.629-633.
(http://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/bul/Vol.21_11_629.pdf)（最終閲覧 2022/07/31）
- 日本政策投資銀行（2011）「東日本大震災資本ストック被害金額推計」DBJ News, 2011年4月28日. (http://www.dbj.jp/ja/topics/dbj_news/2011/html/0000006633.html)（最終閲覧 2022/07/31）
- 長谷部勇一（2002）「災害の経済的評価－産業連関表による供給制約型モデル－」『環太平洋産業連関分析学会13回大会報告集』, pp.8-13.
- Ghosh, A. (1958), "Input-Output Approach in an Allocation System," *Economica*, Vol.xxv, No.97, pp.58-64.
- Miller, R. E. and Blair, P. D. (2009), *Input-Output Analysis second edition*, Cambridge University Press.
- Oosterhaven, J. (1988), "On the Plausibility of the Supply-Driven Input-Output Model," *Journal of Regional Science*, Vol. 28, No. 2, pp.203-217.