

東日本大震災が企業の生産能力に 与えた影響に関する研究

吉村 勇祐¹・梶谷 義雄²・多々納 裕一³

¹正会員 西日本電信電話株式会社 (〒540-8511 大阪府大阪市中央区馬場町3番15号)

E-mail:yoshimura@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学防災研究所准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所)

E-mail:kajitani@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所)

E-mail:tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、国内観測史上最大規模の地震・津波災害であり、被災地内外に短期・長期の大きな影響をもたらしている。この災害では、東日本の太平洋側沿岸部を中心に尊い人命が失われただけでなく、社会基盤や家屋などの建造物の被害やライフライン停止・サプライチェーン寸断などの様々な要因によって多大な経済的損失が発生する結果となった。将来発生する災害に対する事前のミチゲーションや復旧時間短縮のための戦略を講じるうえで、東日本大震災による経済的影響の大きさを把握し、被害をもたらした要因について分析をするとともに、将来への備えとして経済的影響を含めたリスク評価モデルを構築することが重要となる。

そこで、本研究では、災害直後~数週間における各企業の生産能力の低下や復旧を推計するためのフレームワークを提案し、東日本大震災における被災地域の産業への適用を試みた。この分析では、東日本大震災の特徴である複数の外力（地震動、津波、放射能）の影響範囲とエクスポージャーとなる産業の分布状況を重ねあわせるとともに、各種災害調査のデータから得られた外力やライフライン途絶状態と生産能力の関係やなどの統計式を活用することで被災後の生産能力を推計するアプローチを行っている。

Key Words : *Industrial Sector, The Great East Japan Earthquake, Fragility Curve, Resiliency Factor*

1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃、世界有数の地震国である日本列島を、国内観測史上最大規模の巨大地震が襲った。この地震に付随し発生した大津波、余震によって引き起こされた巨大災害を日本政府は、東日本大震災と命名した。

東日本大震災によって、尊い人命が失われただけでなく、社会基盤や家屋などの建造物の被害やライフライン停止・サプライチェーン寸断などの要因によって多大な経済的な損失が発生した。将来発生する災害に対する事前のミチゲーションや復旧早期のための戦略を講じるうえで、東日本大震災による経済的影響の大きさを把握し要因について分析するとともに、経済的影響を含めたリスク評価モデルを構築することが重要となる。

これまで、経済的影響を含めたリスク評価モデルに関する研究はある程度蓄積されてきている。例えば、土屋¹⁾は、空間的応用一般均衡モデル(Spatial Computable General

Equilibrium Model)を使用し、交通の寸断を考慮した災害による経済的影響を定量化するという試みを行っている。また、その入力情報となる産業の生産能力については、企業調査をベースに研究が蓄積されてきている。例えば、Nakano²⁾によるフラジリティ曲線や梶谷ら³⁾によるライフライン途絶抵抗係数が挙げられるが、これら複数の要因を考慮して生産能力を推計し、更にその値を検証しているような研究は皆無に等しい。

そこで本研究では、それらの推計モデルを組み合わせ、災害時の複雑な状況に対応させる。また、災害直後~数週間における各企業の生産能力の低下や復旧を推計するためのフレームワークを提案し、東日本大震災における被災地の産業に適用することを目的とする。

そのため、災害直後に公表された複数部門にわたる空間的な情報や大量の経済データを統合し、ローカルな被災・復旧情報を考慮したGISを利用したシステムを構築する。このシステムには、東日本大震災の情報が集約されている。

そして、推計結果を月次統計情報である鉱工業生産指数と比較する。これは、本研究における新たな試みであり、これにより数週間以降の経済的な影響を推計できる可能性を示すことが可能となり、既往統計データによって構築された被害関数の利用可能性や要因別の生産能力への影響度を事後的に検討することが可能となる。

2. 分析モデル

まず、分析を行う上で重要な概念である災害リスクについて整理する。災害リスクの構成要素は、ハザード（外力, Hazard）、エクスポージャー（被害対象, Exposure）、バルナラビリティ（脆弱性, Vulnerability）があげられる。上で述べた地震、津波などの自然現象はハザードであり、ハザードが災害を引き起こす過程には、人口・資産の分布のうち、それらハザードに曝されるエクスポージャー（人口や資産）の存在や、個々の被害対象のハザードに対する脆弱性が影響を及ぼす。図1は、災害リスクの構成要素の概念図を示したものであるが、本研究においてもハザード、エクスポージャー、バルナラビリティの概念に基づいて、分析を実施する。

地震や津波などの自然災害による供給系ライフライン施設（電力、水道、都市ガス）の被害は、生産能力に大きな影響を及ぼすと考えられる。東北地方太平洋沖地震でも、広範囲かつ長期にわたって供給障害が発生した。

本研究では、ライフライン途絶による産業に与える影響を考慮したモデルを構築するため、ライフライン途絶抵抗係数を用いた。まず、ハザード、エクスポージャー、バルナラビリティから災害直後の生産能力の低下率を求め、次にライフラインの途絶期間とライフライン途絶抵抗係数から、地震動と津波とライフラインの影響を含めた、産業の平均生産能力低下率を求める。図2に分析のフローを示している。

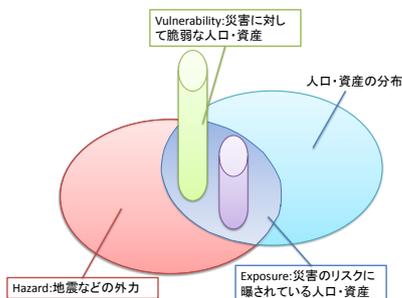


図1 災害リスクの構成要素

3. 生産設備の損傷が生産能力に与えた影響

(1) 概要説明と本章の狙い

東日本大震災は、阪神・淡路大震災や、新潟中越地震などの従来の大規模な地震とは異なり、地震動だけでなく、津波や原子力などの複数のハザードによって多大な被害が引き起こされている。本章では、これら複数のハザードやそれに伴う社会基盤の被害がどのように企業の生産能力を決定しているかをモデル化し、災害発生直後に相当する3月11日時点において、生産能力がどの程度変化したかを定量化する。

地震後の産業の生産設備の損傷による生産能力水準の低下を推計した主な既往研究として、中野 [12]らによる研究がある。これは、2004年に発生した新潟中越地震の直後に新潟県内に立地する企業に対して実施した、災害によって失われた生産能力に関するアンケート調査と地震動指標であるSI値の空間分布を対応させることで、地震の大きさと生産能力の関係を示すフラジリティ曲線を推計した研究である。このアンケートによって得られた生産能力の推計値は、主に建物や設備の被害、従業員の回復状況など、各社それぞれの生産投入資源に関する影響を含んだものであり、ライフライン停止等の外的要因は含んでいない。また、産業分類としては製造業と非製造業の二種類に分かれる。

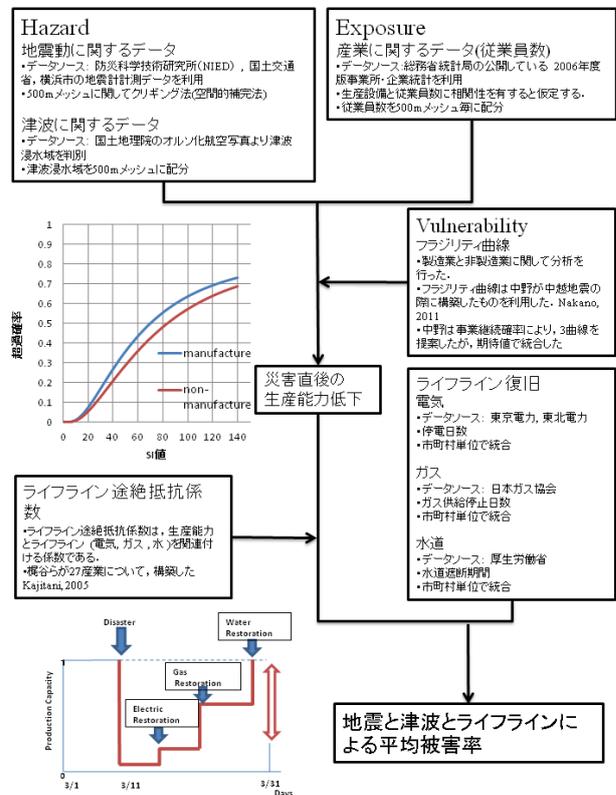


図2 分析フロー

本章では、この産業の生産能力に関するフラジリティ曲線をもとに東日本大震災発生直後の各産業の生産能力の水準を推計する。加えて、本章では、東日本大震災で発生した、津波や原子力発電所被災の影響など、地震動以外のハザードについても、対象地域の被災地生産能力をの水準を0とすることで生産能力低下の分析を行っている。

生産能力水準の低下率の分析手法としては、資産の分布のデータベースとハザードの空間的なデータベースを作成し、GIS¹上でレイヤを重ね合わせ、何らかのハザードの影響を受ける可能性のある重複部分のエクスポージャーを抽出する。次にフラジリティカーブを適用し、普段の生産能力を1に基準化した場合における、災害直後の生産能力、または生産能力低下率（1－生産能力）を0から1の範囲で示す。本章では、生産能力が、回復しないという仮定において、推計を行う。

各産業分類について、この生産能力低下率を計算し、その空間分布を市町村別、県別で集計する。最終的な本章の目的は、県別で集計した生産能力低下率が県別で公表されている月次統計情報（鉱工業生産指数）から推計された生産被害とどのような関係になっているのかを分析する事である。

(2) エクスポージャーの設定

東日本大震災の被害は、広範囲に及ぶため、東日本の大部分における人口・資産の分布がハザードの影響を受けたエクスポージャーとなる。本研究では、生産能力の推計を対象としているので、生産施設がエクスポージャーとみなされる。生産施設は土地、建屋、配管などの非構造部材、生産設備などによって構成される。生産設備としては、製造業であれば、産業用ロボットや食品製造に必要なトレイ、非製造業であれば、PCや陳列棚などの設備が挙げられる。

地盤の種類などによって局所的に変化する地震動などのハザードとの重なりを考慮すると、生産施設はより細かな空間分布で把握することが望ましいが、生産施設の生産能力に関する詳細な空間分布の情報は利用可能でない。そこで、生産施設の生産能力と従業員数に正の相関があるものと仮定し、500mメッシュ単位で整備されている産業別の従業員数の空間的な分布が生産施設（生産能力）の分布と比例するものと仮定した。従業員が所属する産業分類については、後述するフラジリティ関数の分類と合わせ、表1のように区分した。

表1 産業分類表

平成18年事業所統計の分類	本推計モデルの分類	
A 農業	農林漁業	
B 林業		
C 漁業		
D 鉱業	鉱業	
E 建設業	建設業	
F 0 9 食料品製造業	食品工業	
F 1 0 飲料・たばこ・飼料製造業		
F 1 2 衣服・その他の繊維製品製造業	衣服・その他の繊維製品製造業	
F 1 3 木材・木製品製造業	木材・木製品製造業	
F 1 4 家具・装備品製造業	家具・装備品製造業	
F 1 5 パルプ・紙・紙加工品製造業	パルプ・紙・紙加工品製造業	
F 1 6 印刷・同関連業	印刷・同関連業	
F 1 7 化学工業	化学工業	
F 1 8 石油製品・石炭製品製造業	石油製品・石炭製品製造業	
F 1 9 プラスチック製品製造業	プラスチック製品製造業	
F 2 0 ゴム製品製造業	ゴム製品製造業	
F 2 2 窯業・土石製品製造業	窯業・土石製品製造業	
F 2 3 鉄鋼業	鉄鋼業	
F 2 4 非鉄金属製造業	非鉄金属製造業	
F 2 5 金属製品製造業	金属製品製造業	
F 2 6 一般機械器具製造業	一般機械器具製造業	
F 2 7 電気機械器具製造業		
F 2 8 情報通信機械器具製造業		
F 2 9 電子部品・デバイス製造業		
F 3 0 輸送用機械器具製造業	輸送用機械器具製造業	
F 3 1 精密機械器具製造業	精密機械器具製造業	
F 3 2 その他の製造業	その他の製造業	
F 2 1 なめし革・同製品・毛皮製造業		
H 情報通信	運輸、通信、放送	
I 運輸		
P 7 8 郵便局		
K 金融保険、L 不動産、	金融保険不動産	
N 医療福祉	公共サービス	
R 公務		
O 教育学習（学習塾、音楽教授業を除く）		
Q 8 1 学術開発研究機関		
Q 9 1 政治・経済・文化団体		
Q 9 2 宗教（対家計民間非営利団体に属する）		
P 7 9 協同組合（対企業民間非営利団体）		
Q 9 3 その他のサービス業		
Q 8 0 専門サービス業		対事業所サービス
Q 8 5 廃棄物処理		
Q 8 6 自動車整備		
Q 8 7 機会等修理		
Q 8 8 物品賃貸		
Q 8 9 広告業		
Q 9 0 その他の事業サービス業		
Q 8 2 洗濯・理容・美容・浴場	対個人サービス	
Q 8 3 その他生活関連サービス業		
Q 8 4 娯楽業		
M 飲食宿泊		
J 4 9 - 6 0 卸売・小売業	卸売小売業	

¹本研究ではGISソフトとしてESRI社のArcGIS9.3を利用した。

ここで、従業員数は Sinfonica²のデータを基に作成した。このデータは、5 県³を 1 次メッシュ、2 次メッシュ、地域基準メッシュ、2 分の 1 地域基準メッシュ (500mメッシュ) に分割し、それぞれ事業所数と従業員数が存在するので、最も空間スケールの小さい 2 分の 1 地域基準メッシュに合わせて分析を行った。2 分の 1 地域基準メッシュとは緯度・経度に基づき、地域を隙間なく網の目(Mesh)の区域に分けて約 500メートル四方に区切ったものである。

(3) ハザードの設定

a) 生産設備に影響を及ぼす要因

生産施設の生産能力に影響を与える要因として、地震動と津波と原子力発電事故の 3 種類の外力について分析を行った。本研究で分析対象とする各県における生産施設に影響を及ぼしたと想定される主要なハザードを、表 2 に示す。

各ハザードの指標の値を、2 分の 1 地域基準メッシュ単位で整備し、各メッシュにおけるハザードの数で Hazard state を設定した。以下、各ハザードに関する指標とその分布状況について紹介する。

b) 地震動指標

地震動は、地震計で観測する。地震計は地震により発生した地震動を計測し、記録する機器である。地震計は、上下・東西・南北と 3 成分(UD,EW,SN)のセンサーを備え地面の 3 次元的な動きを把握している。本研究での地震計による、地震動観測の分布データは、防災科学技術研究所⁴が公開している K-NET 及び KiK-NET、港湾地域強震観測⁵、横浜市工密度強震計ネットワーク⁶の波形データから、PGA, PGV, SI 値などの地震動指標を算出したものである。K-NET274 点、KiK-net161 点、港湾 13 点、横浜市 86 点の計測データに対し、面的に補間推計を行ったものである(末富ら⁷)。

表 2 ハザードの県別分類

	地震動	津波	原発事故	Hazard State
岩手	○	○		II
宮城	○	○		II
福島	○	○	○	I
茨城	○	○		II
栃木	○			III

² 県別法人統計情報研究開発センター地域メッシュ統計：平成 18 年事業所統計

³ 5 県とは、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、青森県である。

⁴ 防災科学技術研究所強震観測網 <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

⁵ 港湾地域強震観測 <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>

⁶ 横浜市工密度強震計ネットワーク

⁷ <http://www.coty.yokohama.jp/me/anzen/kikikanri/eq/>

地震動強度を表す指標としては、SI 値を利用している。SI 値(Spectrum Intensity value)とは、アメリカのハウスマナー(G.W.Housner)によって提唱された地震動強さの指標であり、地震の揺れ方に対して、構造物がどの程度のエネルギーで揺らされているかを示す値である。地震計から得られる 3 方向加速度波形成分のうち、水平方向の 2 成分について、速度応答波形を計算し、一般的な構造物の固有周期である 0.1~2.5 秒の範囲の速度応答スペクトルの平均値が SI 値である。以下に SI 値の算出式を示す。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(h, T) dT$$

この式で、Sv は、速度応答スペクトル(cm/s)、T は固有周期(s)、h は減衰定数を表している。本研究で用いる SI 値の減衰定数は 5% に設定されている [13]。

c) 津波浸水域

津波は、一般の波と異なり、気象学的要因以外の要因により発生した高波である。東日本大震災で発生した津波は、多数の構造物が流されるなど、津波への恐怖を再認識するには十分な被害をもたらした。津波浸水範囲の判読は国土地理院⁷がオルソ補正航空写真から推計している。本研究では、東京大学生研地球環境学グループ⁸が、GIS で利用しやすい形式で公開しているデータを利用した。

浸水深と浸水被害との関係については、水害では、国土交通省の治水経済調査マニュアル [14]では、床上浸水は 50cm からとなっており、一般に浸水深 50cm から被害が大きくなると考えられる。津波については、エネルギーが大きく、また、水が少しでも工場内に入ると、すぐには生産設備は使えなくなると仮定し、浸水エリア内に立地する企業の生産能力は 0 になると仮定した。

d) 原子力発電所

東京電力株式会社福島第一原子力発電所で発生した事故に関して、産業に与えた被害は極めて大きいと考えられる。

避難区域の生産能力は生産設備、または、従業員が避難する事で、完全に失われたとみてよい。計画的避難区域と緊急時避難準備区域の脆弱性が、現在不明で検討の余地は残されているが、今回の推計では、半径 20km 以内に立地する企業への影響のみを考慮し、生産能力を 0 として分析を行った。

⁷ 国土地理院津波浸水範囲：http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohokuhtml

⁸ 東京大学生研地球環境学グループ：http://stlab.iis.u-tokyo.ac.jp/eq_data/#ishinomaki

e) ハザードの重ね合わせによる分析

これら3種類のハザードの空間的分布をエクスポージャーと同様、2分の1地域基準メッシュ毎に重ね合わせ、表示したものが図3である。これを見ると、地震動は、宮城、茨城、栃木におけるSI値大きく、津波は、沿岸部全域、特に宮城県や岩手県のリアス式海岸部分でかなり内陸部まで浸水していることが分かる。原子力発電所は、内側の円が半径20キロメートルで、外側が30キロメートルになっており、かなりの範囲が含まれていることが分かる。

f) メッシュ内の複合外力の処理

複数のハザードに関して、GISで重ね合わせをする際注意すべき点として、ハザードの存在率がある。例えば、メッシュ*i*において、地震動と津波のレイヤが重なっているとす。このとき、メッシュ内全てに津波が重なっていれば、本来であれば、地震動による影響と津波による影響を足し合わせたものとなる。しかし、本推計の津波による影響は生産能力を0にするという仮定により0となる。

津波浸水域の境界面のメッシュについては、メッシュ内の津波の影響の存在率によって生産能力は変化する。この存在率をメッシュ内の割合とし、GIS上で算出する。このメッシュ内の津波浸水域の面積割合を $T\alpha$ とすると、残りの $1-T\alpha$ は、地震動の影響を受けると考えられるため、このメッシュにおける生産能力の低下率は $T\alpha + (1-T\alpha) F(x)$ となる。

(4) ヴァルナラビリティの設定

地震動による建物などの構造物の被害予測手法については比較的多くの蓄積があり、特に地震動と構造物の破壊確率の関係を与えるフラジリティ曲線に関する研究が長い間蓄積されてきている。我が国でも、過去の被災事例を基に推計する手法⁶⁷や、地震応答解析を利用した解析的手法⁶⁹を用いて建物のフラジリティ曲線が推計されてきている。その他にも橋脚を対象としてフラジリティ曲線を推計した代表的なものとして Shinozuka et al¹⁰¹¹など、多くの先行研究が実施されている。他にも充変電機器などの建築設備¹²や、照明器具などの非構造部材¹³などについてもフラジリティ曲線の情報が蓄積されつつある

その中で、地震動と産業の生産能力との関係を関数として記述した例として、Nakano²の既往研究がある。ハザードとして新潟中越地震のSI値を用い、アンケートによって得られた企業の操業能力調査の結果をもとに、

フラジリティ曲線の推計が行われている。本研究では、この研究により推計されたフラジリティ曲線を用い、東日本大震災のSI値を適用させ産業の生産能力の低下率を推計する。

また、近年新たな試みとして、津波による構造物被害や人的被害に対する被害関数が構築されてきている。代表的なものとして、越村¹⁴のものがある。これは、浸水深や浸水高をハザードとして入力し、被災地の衛星画像、数値解析、現地調査及び歴史資料の分析によって、被害率を算出し、それらに関係づけて、構築されている。津波の産業の生産能力に対するフラジリティ曲線は未だ推計されていない。生産設備は、構造物と異なり、ごくわずかの浸水でも、操業能力は、大きく低下すると考えられるため、津波による構造物へのフラジリティ曲線を適用させると、被害が過小になると考えられる。そこで、本研究では、津波のフラジリティ関数を浸水深がどの値でも、一定であると考え、生産能力0として計算を行った。

原子力発電所については、かつて例をみない事故であり、ハザードとしての放射線がどの程度あると生産設備に影響を与えるのかを調べた既往の研究はない。少なくとも、立ち入り禁止範囲である半径20km内は、生産能力が0となっていることが予想され、原子力発電所周辺の半径20km内は災害後の生産能力を0とした。

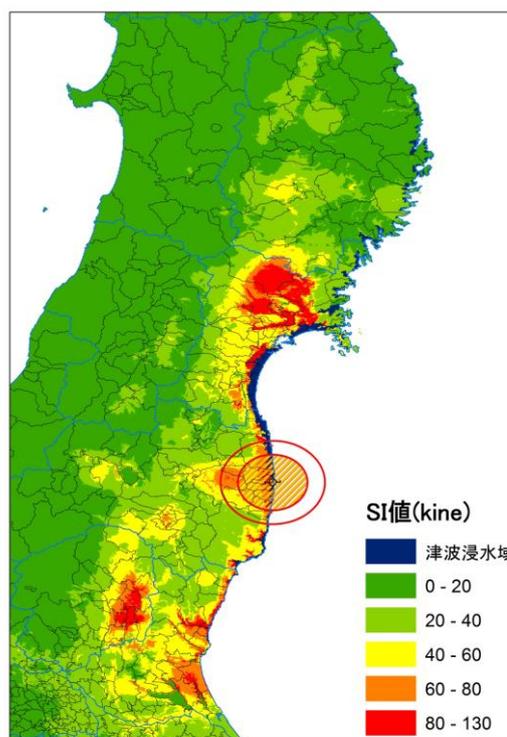


図3 東日本大震災によるハザード

(5) 生産設備損傷による生産能力低下の推計

災害直後の生産能力の低下については、Nakano²によって推計された3種類の被害モード(図4を参照)に対するフラジリティ曲線を用い、以下のように推計を行う。まず、各被害モードの発生確率と、各被害モードにおける生産能力の値の範囲をもとに、生産能力の期待値 $EF^{\xi}(x)$ を求める。各被害モードにおける生産能力の低下量の分布は一様と仮定すると、 $EF^{\xi}(x)$ は、以下のように表すことができる。

$$EF^{\xi}(x) = \left\{ \left(\frac{1-0.33}{2} \right) F_{\alpha}^{\xi} \right\} + \left\{ \left(\frac{0.66+0.34}{2} \right) (F_{\alpha}^{\xi} - F_{\beta}^{\xi}) \right\} + \left\{ \left(\frac{0.67+0.99}{2} \right) (F_{\beta}^{\xi} - F_{\gamma}^{\xi}) \right\}$$

ここで、 $\xi = \{0,1\}$ は、製造業：0か非製造業：1を表すサフィックスである。このフラジリティ曲線を使用し、メッシュ*i*における産業分類*j*の生産能力の低下率 r_i^j を施設の生産能力の大きさ(従業員数を代理指標として使用)で重みづけをし、加重平均を求めることで、各ハザードの状態に応じた各メッシュの生産能力の低下率を以下のように求めることができる。

Hazard State1

$$r_i^j = \frac{(1 - T\alpha_i - P\alpha_i)EF^{\xi}(x)T\alpha_i P\alpha_i N_i^j}{N_i^j}$$

Hazard State2

$$r_i^j = \frac{(1 - T\alpha_i)EF^{\xi}(x)T\alpha_i N_i^j}{N_i^j}$$

Hazard State3

$$r_i^j = \frac{EF^{\xi}(x)N_i^j}{N_i^j}$$

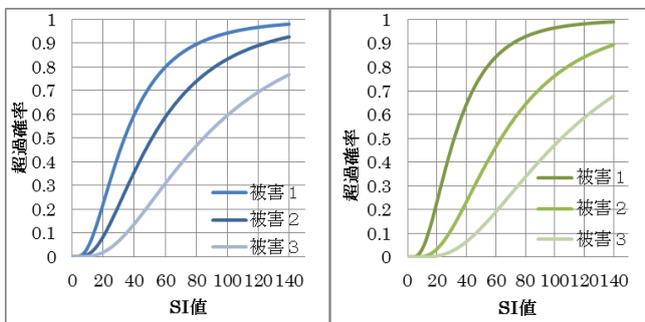


図4 製造業・非製造業フラジリティ曲線(Nakano²のパラメータを使用)

ここで、 N_i^j ：メッシュ*i*内の産業分類*j*の従業員数、 $T\alpha_i$ ：津波浸水域の面積割合、 $P\alpha_i$ ：原子力発電所半径20kmの面積割合である。

Nakanoらは、災害発生から1週間後までの平均的な生産能力の低下を対象に推計しているため、基本的に本モデルによる推計結果はその期間に対応した推計結果である。当然、ライフラインや需要の回復などのその他の要因による影響で生産能力は変化するものと考えられる。また、より長期の分析を行うためには復旧による影響を考慮する必要がある。本章では仮に他の要因や復旧による影響がないと仮定した場合に、本推計結果によってどの程度月別の統計データとして得られる生産量の変化を説明することができるかを検討する。低下率が r_i^j であるので、日数*t*で生産能力 $1-r_i^j$ を積分し、10日分の生産を考慮した補正を行うことで、3月中に確保された延の生産能力が推計できる。

(6) 生産能力の低下率

県別産業別の生産能力の低下率を表している。県別で見ると、津波浸水域の大きい宮城県の影響が大きくなっている。また産業別にみると、沿岸部に立地する企業が大きい傾向がみられる。

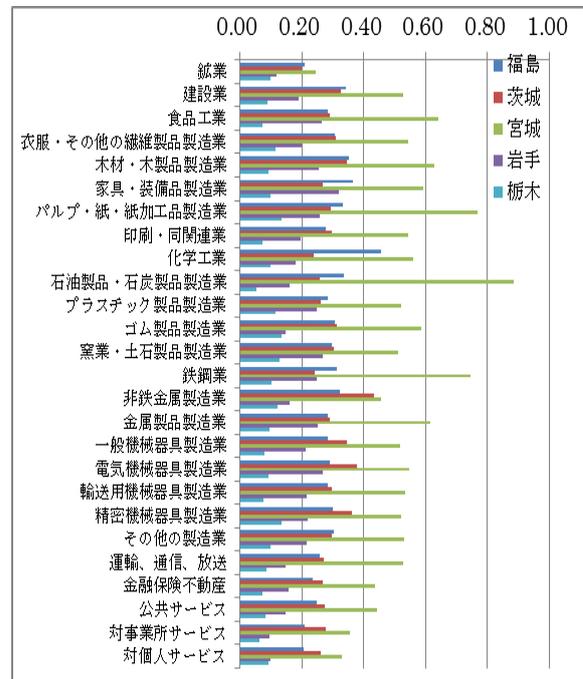


図5 生産設備損傷による生産能力の低下

(7) 推計結果と築地統計情報との比較と考察

本研究では、季節調整済みの鉱工業生産指数を使用した。以下の鉱工業生産指数は、全て季節調整済みである。また、経済産業省の鉱工業生産指数は、全国での値を集計したものである。各地方自治体によって、県単位での鉱工業生産指数も作成されている。よって県単位での鉱工業生産指数と本研究のモデルでの推計値の値を集計する必要がある。

鉱工業生産指数のデータは、各県の 2011 年の値を使用している。その為、2006 年の統計情報である従業員数の産業分類と異なる、新産業分類が使われている。旧産業分類から新産業分類への対応は、産業小分類別に集計しなければならず、計算容易のため、表 3 のような分類を行った。

県別鉱工業生産指数と比較するためにメッシュ毎の被害率を県別に集計する。

Hazard State1

$$r_i^j = \sum_{i=0}^n \frac{(1 - T\alpha_i - P\alpha_i)EF^{\zeta}(x)T\alpha_iP\alpha_iN_i^j}{\sum_{i=0}^n N_i^j}$$

Hazard State2

$$r_i^j = \sum_{i=0}^n \left\{ (1 - T\alpha_i)EF^{\zeta}(x)T\alpha_i \frac{N_i^j}{\sum_{i=0}^n N_i^j} \right\}$$

Hazard State3

$$r_i^j = \sum_{i=0}^n \left\{ EF^{\zeta}(x) \frac{N_i^j}{\sum_{i=0}^n N_i^j} \right\}$$

N は、県内のメッシュ数である。集計値を用い、月次統計情報との比較を行う。

モデルによる推計結果と鉱工業生産指数による生産量の低下量の推計値との比較を表したものが、図 6 である。石油・石炭製造工業などは、茨城県のみ鉱工業生産指数を公表しているので、1 点のみのプロットになっている。鉱工業生産指数は前月（2 月）との比較によって生産量低下率を推計している。

表 3 産業分類新旧対応表

新分類	旧分類
はん用機械	一般機械＋電気機械
産業用機械	精密機械

適合度の指標として一次関数 $y=x$ との乖離の大きさ（残差）の和の平均値

$$\frac{\sum(y - x)}{5}$$

を平均乖離度として用いる。平均乖離度が負または正であると、推計モデル全体に過小または過大のバイアスが発生していることを意味する。また、その二乗和 $\sum(y - x)^2/5$ の平均（分散の推計値）を用い、推計結果のばらつきを評価する。平均乖離度と分散の推計結果を表 4 に示す。 $\sum(y - x)$ は、負の値を取ると過小評価、正であると過大評価と解釈できる。各産業についてみると、全体的に過小評価となっており、生産施設の損傷以外の生産阻害要因も大きな影響を及ぼしている可能性が高い。

$$\frac{\sum(y - x)^2}{5}$$

は、0.04-0.18 の範囲で分布している。

衣服・繊維製品鉱業や電気機械工業は、0.04 と分散が小さく、生産施設の損傷モデルによる推計結果と被害の相関が高いことが分かる。

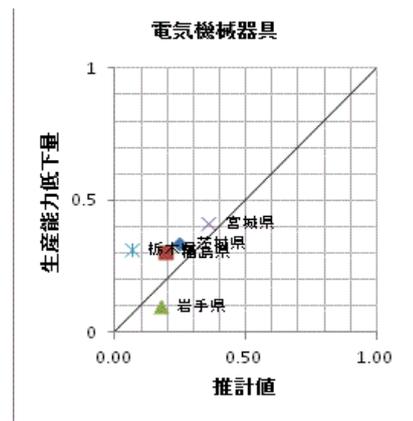


図 6 統計情報を基にした生産能力低下量と生産設備の被害によるモデルの推計値との比較

表 4 平均乖離度と分散

	平均乖離度	分散		平均乖離度	分散
鉱業	-0.264	0.480	ゴム	-0.171	0.253
食料品	-0.178	0.308	窯業・土石	-0.202	0.287
繊維工業	0.015	0.058	鉄鋼業	-0.253	0.390
木材・木製品	-0.221	0.574	非鉄金属	-0.066	0.205
家具	-0.167	0.282	金属製品	-0.175	0.162
パルプ紙	-0.182	0.211	一般機械工業	-0.195	0.308
印刷業	-0.082	0.106	電気機械器具	-0.091	0.096
化学	-0.283	0.471	精密機械	-0.069	0.174
石油石炭	-0.096	0.228	輸送機械	-0.229	0.412
プラスチック	-0.141	0.118	その他製造	-0.092	0.165

5. ライフライン途絶に伴う生産能力の低下水準の推計

(1) ライフライン途絶が産業部門に与える影響に関する先行研究

ライフライン途絶に関する影響を計量化する研究は、多く蓄積されてきている。例えば、阪神淡路大震災の電力消費量の時系列データからマクロな経済被害の定量化を試みているもの¹⁵などがある。本研究では、三種類のライフラインの復旧状況を考慮し、合計7パターンの産業別ライフライン途絶抵抗係数を推計している梶谷ら³⁴の途絶抵抗係数を用いて、産業別の推計を行った。表5に本研究で使用した途絶抵抗係数の値を掲載する。これは、電力、水道、都市ガスの途絶に応じて普段の生産能力を1としたときの値を示している。

表5 ライフライン途絶抵抗係数
梶谷ら³⁴の推計値を加工

	EMWGD	EWKGD	EWGDK	EWKDK	EMWDK	EMWGD	EMWDK
食料品	0.0429	0.4323	0.6302	0.3883	0.0372	0.0106	0
繊維製品	0.0776	0.7241	0.8276	0.7328	0.1121	0.0776	0.069
木材・木製品	0.0625	0.9063	1	0.9063	0.0625	0.0625	0.0625
窯業・土石製品	0.0345	0.4196	0.5862	0.3534	0.0862	0.0259	0.0172
紙・パルプ	0.0313	0.5938	0.7969	0.5938	0.0167	0.0156	0.0156
化学	0.0786	0.3571	0.77353	0.3286	0.0571	0.0588	0.05
石炭・石油製品	0.1818	0.7045	1	0.7045	0.1818	0	0
金属製品	0.0381	0.6519	0.7219	0.6088	0.0424	0.0216	0.0212
鉄鋼	0	0.5	0.6964	0.4107	0	0	0
非鉄金属	0.05	0.4211	0.6947	0.3684	0.0526	0.1053	0.0526
一般機械	0.0417	0.6067	0.8636	0.6113	0.0109	0	0
精密機械	0.0417	0.6875	0.9167	0.6667	0.0625	0.0208	0.0083
電気機械	0.0662	0.7353	0.8897	0.7059	0.0303	0.0441	0.0368
輸送機械	0.0313	0.5426	0.5573	0.4427	0.0208	0.0213	0.0104
その他製造業	0.0708	0.475	0.6653	0.4083	0.0833	0.0805	0.041
建設	0.25	0.6538	0.8269	0.6923	0.2115	0.1538	0.0962
卸売・小売業	0.2742	0.5726	0.7177	0.5968	0.2661	0.25	0.1935
金融・保険	0.4896	0.6771	0.6771	0.6042	0.4167	0.3646	0.3333
不動産	0.4464	0.5	0.625	0.5357	0.4643	0.3929	0.2857
運輸	0.2794	0.7647	0.8676	0.6765	0.3529	0.3529	0.1618
通信	0.3	0.775	0.875	0.75	0.3	0.35	0.125
医療	0.3917	0.5583	0.6667	0.475	0.35	0.3333	0.2167
その他公共サービス	0.5	0.75	0.375	0.625	0.25	0.5	0.25
対事業所サービス	0.2625	0.75	0.8375	0.725	0.25	0.2875	0.175
対個人サービス	0.4063	0.5156	0.6719	0.4375	0.3594	0.375	0.2344
農林水産業	0.3125	0.6563	0.6563	0.625	0.2813	0.25	0.2188
鉱業	0.75	0	1	0	1	1	0

(2) ライフライン途絶抵抗係数を用いた生産能力復旧曲線

ライフライン抵抗係数を用いた生産能力復旧曲線を推計した。結果は、市町村別、産業別にあるので、膨大な量の復旧曲線ができた。これと設備の被害を含めた包絡線の代表的な地点である青葉区についての各産業の曲線を示す。

(3) ライフライン途絶抵抗係数を用いた生産能力復旧曲線

生産能力低下量の推計結果を鉱工業生産指数と比較した。前章の推計結果と比較すると、モデルによる生産能力低下量の推計値が大きくなり、全体的にプロットの点が右にシフトし、モデルの残差が0に近づいていることが分かる。ただし、ライフラインの復旧状況については、市町村別に公開されている停電、断水、ガス供給停止情報をもとに、これら停電や断水が完全に解消される日を各市町村の復旧日数としているため、実際の影響よりも大きくなっている可能性がある。また、木材、木製品製造業や非鉄金属、精密機械を除いた多くの産業において、分散も小さくなっており、鉱工業生産指数の低下量を説明するためのモデルの適合度自体は向上しているといえる。

表6 平均乖離度と分散

	設備のみの推計結果		ライフラインを含む推計	
	残差の和の平均	残差の二乗和	残差の和の平均	残差の二乗和
食料品	-0.178	0.308	-0.005	0.123
繊維工業	0.015	0.058	0.158	0.206
木材・木製品	-0.221	0.574	-0.124	0.626
パルプ紙	-0.182	0.211	-0.032	0.024
化学	-0.283	0.471	-0.097	0.157
石油石炭	-0.096	0.228	-0.091	0.209
窯業・土石	-0.202	0.287	-0.056	0.160
鉄鋼業	-0.253	0.390	-0.098	0.114
非鉄金属	-0.066	0.205	0.076	0.268
金属製品	-0.175	0.162	-0.076	0.038
一般機械工業	-0.195	0.308	-0.054	0.113
電気機械器具	-0.091	0.096	0.023	0.090
精密機械	-0.069	0.174	0.062	0.265
輸送機械	-0.229	0.412	-0.102	0.241
その他製造	-0.092	0.165	0.049	0.142

6. まとめ

本研究では、経済影響分析に不可欠となるリスク評価モデルについてその枠組みを整理するとともに、適用性の検討を行った。今後の課題として、津波や原子力災害からの企業の復旧や移転の考慮や、ライフライン復旧日数のデータベースの空間的解像度や復旧軒数情報の利用が挙げられる。これらは分析精度の向上に役立つとともに、詳細な空間スケールで構築している本研究のデータベースをより有効に利用することにつながると考えられる。一方、生産量の推計については、間接被害推計モデルと組み合わせたより緻密な分析が必要になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 土屋 哲：地震リスク管理の為の経済被害の計量化に関する方法論的研究，2007.
- 2) K. Nakano：Economic Impact Assessment of a Natural Disaster to Industrial Sectors, Kyoto University, 2011.
- 3) 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計，自然災害科学，23-4 pp553-564, 2005.
- 4) 梶谷義雄，多々納裕一，山野紀彦，朱牟田善治：非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計，自然災害科学 24-3 pp247-255, 2005.
- 5) 末富岩雄・福島康宏：2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)における地震動分布の推定，第66回年次学術講演会，2011.
- 6) 村尾修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数日本建築学会構造系論文集，第527号 pp.189-196, 2000.A
- 7) 宮越純一，林康裕，渡辺宏一，田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価，構造工学論文集，Vol.43B, pp.269-276, 1997.
- 8) 長谷川宏一，翠川三郎，松岡昌志，“地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物軍の侵害予測例-その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例-”，日本建築学会構造系論文報告集，第505号 pp.53-59, 1998.
- 9) 宮腰淳一，林康裕，田村和夫，“被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察”，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.327-332, 1998.
- 10) M. a. N. T. Shinozuka，“Statistical analysis of fragility curves, Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, No.12, pp.1224-1231, 2000.
- 11) F. M. K. H. a. K. S. Shinozuka，“Nonlinear static procedure for fragility curve development,” Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, No.12, 2000.A
- 12) 諏訪仁，神田順，“兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線”，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.633, pp.1935-1941, 2008.
- 13) 神原浩，林康裕，田村和夫，“アンケート調査に基づく建物の日構造部材被害と地震動強さとの関係”，日本建築学会構造系論文集 mVol.578, pp.155-161, 2004.
- 14) 越村俊一，行谷佑一，柳沢英明，“津波被害関数の構築”，土木学会論文集 B, Vol.65, No.4 pp.320-331, 2009.
- 15) 高島正典，林春男，“電力消費量時系列データを利用した復旧・復興状況の定量的把握手法-阪神・淡路大震災への適用-”，自然災害科学, 18-3 pp355-367, 1999.

(?????.?.? 受付)