

大規模災害時における産業部門の 生産能力の推計—東日本大震災を 対象として

梶谷 義雄*・多々納 裕一*・吉村 勇祐**

Estimation of Production Capacity Losses in Industrial Sectors Due to a Large-scale Disaster: A Case of the Great East Japan Earthquake

Yoshio KAJITANI*, Hirokazu TATANO*
and Yusuke YOSHIMURA**

Abstract

This research aims at proposing an estimation method of production capacity in the industrial sectors damaged by a natural disaster and applying it to the case of the Great East Japan Earthquake. The production capacity is fundamental information to capture the economic loss due to a supply shock. Focusing on the fact that past disasters revealed that main reasons of capacity losses were damages of production facilities and disruption of lifeline systems, this paper proposes the capacity estimation method considering these two causes. To achieve the quantitative estimation of production capacity, “functional fragility curves” of production capacity against earthquake ground motion and “lifeline resilience factor” are adopted taking account of different types of hazards and actual recovery curves mainly for the damaged facilities. Through the application of the method to the disaster, production capacities in industrial sectors are estimated and the estimated capacities in the manufacturing sectors are compared with the index of industrial production. The result demonstrated that the estimated values are close to the actual production indices in the overall manufacturing sector and many of individual sectors.

キーワード：東日本大震災，生産能力，経済的影響，企業，被害推計

Key words：the Great East Japan Earthquake, Production Capacity, Economic Impact, Business, Loss Estimation

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

** 西日本電信電話株式会社
Nippon Telegraph and Telephone West Corporation

本論文に対する討論は平成25年8月末日まで受け付ける。

1. はじめに

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戦略を講じるうえでも、東日本大震災による経済的影響の大きさを把握し、その要因を分析することが重要となる。

そのための第一の課題として、災害によって失われた企業の生産能力（あるいは操業能力）を推計することが重要となる。基本的に、生産能力の被害は、主に各企業の設備の被害や機能停止等の生産要素の不足・不具合に起因する当該企業の最大生産能力の低下を意味する。そして、企業が生産能力の低下は、生産量やサービスの低下を招き、地域経済に大きな影響を及ぼす。また、東日本大震災では被災地の生産能力の低下による供給不足が、サプライチェーンを通じて広域の企業の生産に波及する影響がみられた。

既往の災害の経済的影響評価の研究分野¹では、サプライチェーン被害に関する分析手法として、主に産業連関表を活用した分析アプローチが数多く実施されているが、その分析において重要な入力情報となる企業の生産能力を推計するための研究はほとんど行われてないのが実情である。一部の研究において、ライフライン途絶時の生産能力の低下を求めるための調査結果の利用や地震動による設備の機能水準を対象とした統計モデルが提案されているが、特定の災害を対象にしているなどの限られた条件での推計結果であり、その検証については十分に行われていない。

そこで、本研究では、既往の調査研究をベースに、災害直後～数カ月における各企業の生産能力の低下を推計するための手法を提案し、東日本大

震災への適用を通じて分析手法の検証を行う。具体的には、まず、地震動、津波、原子力の複数の外力の影響を考慮し、既往災害から得られた各種統計モデルを利用することで、災害後の生産能力を推計する方法を示す。分析方法の適用対象地域としては、東日本大震災による被害影響の大きな東北3県（福島県、宮城県、岩手県）ならびに栃木県、茨城県を取り上げる。各県の製造業の生産能力の推計結果と、鉱工業生産指数と比較することで分析手法の適用可能性について考察する。

2. 東日本大震災における産業被害と本研究のアプローチの概要

2.1 東日本大震災における産業被害

東日本大震災では広い範囲の企業が被害を受けている。たとえば、3月15日付けの日経新聞⁵では、自動車や電機、素材などの幅広い分野で生産の停滞状況が紹介されている。建物の倒壊は免れたものの天井の崩落、導水管や貯蔵タンクの損傷などの付帯設備の損傷によって生産が阻害されている企業が多く、これらは地震動による影響とみられる。また、津波被災地域では建物への浸水による設備の冠水だけでなく、瓦礫や土砂などの流入による復旧活動への影響も記載されている。さらに、物流の停滞、原材料の調達困難、周辺道路の崩壊、従業員の安否確認の必要性など、様々な要因によって生産が阻害されている。

一方、原子力発電所の事故の産業への影響も大きいものと考えられる。原発事故はその後の電力不足や出荷制限という形で産業へ影響を及ぼしている。また、生産能力の低下という観点では、原発周辺地域の産業の生産能力はほぼ失われた状態にある。地域の活動制約の状況を見ると、総理指示として2011年3月12日には半径20km圏内の住民の避難が通知され、16日には同総理指示として半径20～30km圏内の住民の屋内待機が通知されている⁶。その後、放射線量の計測値に応じる形で周辺の自治体も含む「計画的避難区域」が設定され、1カ月程度を目途として別の地域へ移転す

¹ 自然災害の経済的影響評価に関する既往研究は数多く存在し、代表的な文献を全て掲載するのは困難であるが、国内の文献に限れば、例えば高橋ら¹⁾、萩原²⁾、小池ら³⁾、土屋ら⁴⁾などが挙げられる。

ることが求められた。

電力、水道、ガスなどのライフライン停止が産業活動に与えた影響も大きいと考えられる⁷⁻¹⁰⁾。電力の供給停止でみると、東北電力管内における延べ停止戸数は486万戸（4月7日16時時点）を数え、東京電力管内でも約405万戸の停電が生じている（3月11日15時30分時点）。東北電力管内では、1週間後の18日には約32万戸が未復旧となるが、これらは津波による影響のため復旧が未着手となっている地域の戸数と同数であるため、実際には1週間程度で復旧がなされたことになる。また、水道についても最大187万戸、のべ226万戸以上が復旧対象となった（第116報）。4月1日には約24万戸が復旧対象となっており、水道に関しては、約3週間で大部分が復旧したことになる。一方、都市ガスについては、整備されている地域が少ないことから、ガスの停止件数は最大約46万件（3月13日11:00時点）となっており、電力、水道に比べて件数自体は少ない。しかし、3月31日時点においても、復旧率は32%と極めて小さい。宮城県では、330499戸の復旧対象戸数があり、最も大きな被害を受けているが、復旧が行われているのはわずか66918戸となっている。

以上のように、東日本大震災では様々な被害が発生しているが、被害をもたらしたトリガーとなる外力としては、大きく3種類（地震動、津波、原子力事故）に分類される。各外力がもたらす企業の設備への影響や復旧活動へ与える影響は異なることが予想され、産業部門の生産能力を評価するためには、これら複数のハザードを考慮した分析が必要となる。また、長期・広域にわたるライフライン被害の影響が企業活動に影響を及ぼしたと考えられ、設備の被害や復旧状況とともにライフライン被害の影響についても考慮した分析が求められる。その他、通信、道路など企業の生産能力に影響を与える要素が存在するが、これらについては、分析への適用において現時点ではさらなる整理が必要となるため、本研究では対象としていない。以降では、この点を踏まえた分析手法を検討し、実際に東日本大震災によって影響を受けた生産能力の推計を行う。

2.2 本研究のアプローチ

図1は、災害リスクの構成要素となる外力、被害客体、脆弱性の概念図を示したものである。たとえば、本研究で対象とする津波などの自然現象は外力であり、被害客体はこの外力と空間的重なりをもつ企業となる。被害の大きさは、各被害客体が曝される外力の大きさに対する脆弱性によって決定される。図の中において、たとえば耐震性が低い設備を有するなど、脆弱性の大きな企業数が脆弱性の小さな企業数よりも多く分布していることが示されている。一方、ある物理的・機能的な被害が発生した状況においても損失の発生を可能な限り抑え、被災前の状態に回復する特性は、レジリエンス（抵抗・回復力）と定義できる。ライフライン途絶下での生産能力の確保や設備の復旧などはこのレジリエンス特性に依存することになる。すなわち、被害の大きさは外力、被害客体とその脆弱性に加えて、レジリエンス特性に影響を受ける。

以上のような分類やリスク評価の考え方は、本研究における分析の手順を整理するうえでも有用となる。たとえば、本研究では、外力の設定として、地震、津波、原子力の避難指示（警戒）区域を想定する。被害客体は企業であり、各外力に対する脆弱性を設定することで、主として設備被害などの生産要素の不足に伴う生産能力の被害を推計する。本研究では、外力に対する脆弱性を示す関数であるフラジリティカーブを用いるが、生産能力という機能に着目したフラジリティカーブを

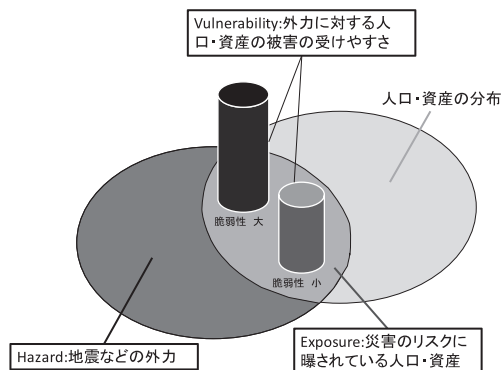


図1 災害リスクの構成要素

利用する¹¹⁾。さらに、レジリエンスの観点から、ライフライン（電力、ガス、水道）の停止や設備被害からの回復を考慮した生産能力の復旧状況を分析する。ライフラインの停止の影響は既往研究で推計されたライフライン途絶抵抗係数^{12,13)}を用い、生産能力の回復については東日本大震災の被災地域の一部において実施した企業調査結果¹⁴⁾を用いる。以上のプロセスの概略を図2に示す。最終的には、設備とライフラインの被害・復旧を考慮した産業別の生産能力が推計される。実際に利用するデータを含めた各要素の分析手法については、次節において説明を行う。

3. 生産能力の推計方法

3.1 外力の設定と被害客体の推計

図2で示した分析のプロセスでは、最初に外力を推計し、被害客体の分布を把握することが必要となる。前述したように、外力として地震動、津波と原子力発電所事故の影響を考慮する。まず、地震動については、末富ら¹⁵⁾によって面的に補間推計された250mメッシュ単位で整備されたSI値を用いる。このデータソースとしては、防災科学技術研究所が公開しているK-NET及びKiK-NET、国土交通省の港湾地域強震観測、横浜市高密度強震計ネットワークの観測データのうち、K-NET274地点、KiK-net161地点、国土交通省13

地点、横浜市86地点の合計534地点の計測データが用いられている。

津波浸水範囲については国土地理院¹⁶⁾がオルソ補正航空写真から推計した結果が公開されている。本研究では、東京大学生研地球環境学術研究グループ¹⁷⁾が、この浸水範囲図を参考にしつつ津波到達ラインの判読を行い、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。このデータをもとに、各メッシュに含まれる津波浸水エリアの面積を算出している。また、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の影響については、少なくとも避難指示区域（20km圏内）における産業活動は完全に停止していたことを考慮する。

以上の3種類の外力を地図上に重ねたものが図3になる。また、図4には、宮城県と岩手県を中心に津波の浸水エリアの一部を拡大したものを掲

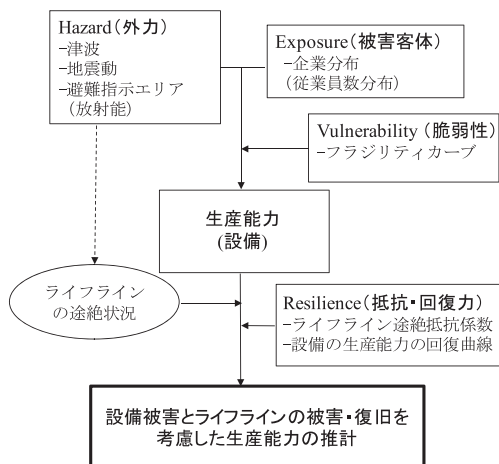


図2 本研究における分析のプロセス

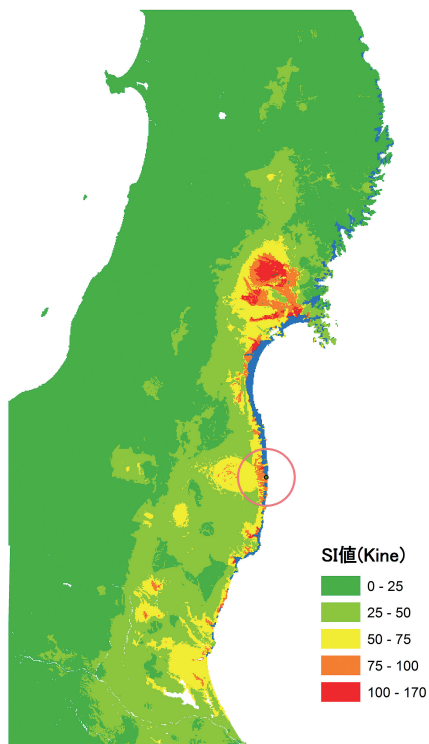


図3 地震動 (SI 値)、津波浸水域 (青塗りの地域)、ならびに避難指示エリア (赤丸のエリア)

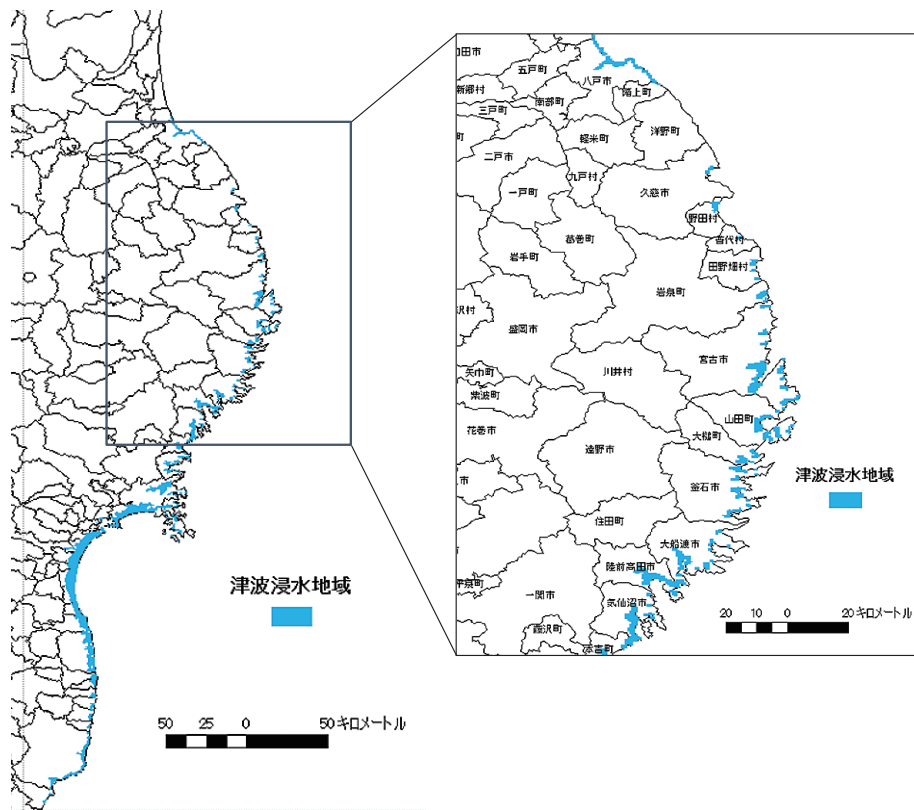


図4 津波浸水地域

載している。宮城県，福島県内陸部，栃木県内陸部，茨城県沿岸部において80Kine以上のSI値の大きな地域が見られる。津波浸水エリアは岩手から茨城まで広範囲に広がっているが，特に宮城県南部の浸水範囲が大きくなっている。

被害客体としては，生産施設の空間的分布とその生産能力についての情報が必要となるが，このような情報は整備されていない。そこで，本研究では，産業被害の推計に関する既往研究¹⁸⁾でも仮定されているように，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分布¹⁹⁾を生産施設（生産能力）の空間分布の代理指標として利用する。すなわち，生産施設（資本ストック）の限界生産力は常に一定と仮定していることに等しい。

従業員が所属する産業分類については，後述す

るライフライン途絶抵抗係数や鉱工業生産指数の分類と合わせ，表1のように区分した。例として宮城県周辺における全事業所の空間分布を図5に示している。また，この被害客体に関する500mメッシュ単位のデータが本研究で分析可能な最小の

表1 本研究で用いる産業分類

鉱業	電気機械
建設	情報通信機械
食料品	電子部品・デバイス
繊維製品	輸送機械
木材・木製品	精密機械
紙・パルプ	その他製造業
化学	通信
石炭・石油製品	運輸
窯業・土石製品	卸売・小売業
鉄鋼	金融・保険
非鉄金属	不動産
金属製品	医療
一般機械	その他サービス

空間スケールとなるため、外力の情報についても各500mメッシュ内に位置する250mメッシュで得られたSI値の平均値や500mメッシュに占める浸水エリアを推計することで、この空間スケールに統合している。

3.2 産業施設の脆弱性の分析

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(例えば、Shinozuka²⁰など)。その中で、地震動と産業の生産能力との関係について分析が行われた事例として、Nakano¹¹のフラジリティ(機能的フラジリティ)に関する研究がある。2004年に発生した新潟県中越地震を対象に、ハザードとして

SI値を用い、アンケートによって得られた企業の生産能力の調査結果をもとに、機能的フラジリティ曲線が推計されている。ここで用いられている生産能力の回答値は、主に建物や設備の被害、従業員などの自社の生産要素の回復状況に起因するものであり、原材料の不足やライフライン停止等の外的要因は含んでいないサンプルから得られたものである。調査結果から、主として設備被害の影響を大きく受けているため、本研究では自社の生産要素の被害に伴う生産能力の機能低下を「設備被害」として記述している。また、産業分類としては製造業と非製造業の二種類に分類されている。

この機能的フラジリティ曲線は、図6に示されているように被害モードが等間隔の被災率の範囲を持つ3種類の関数に分類される²。この関数を、

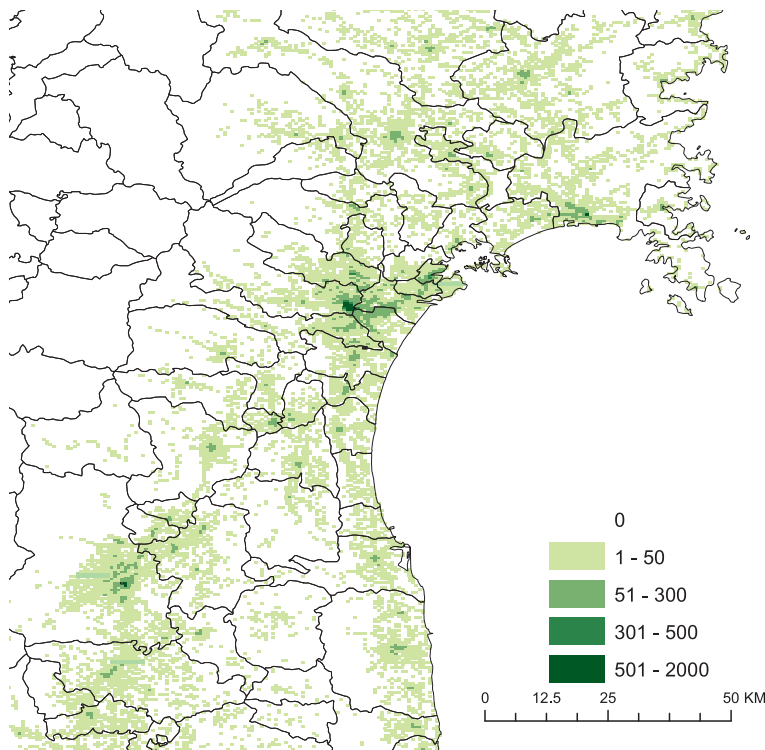


図5 宮城県周辺における事業所数の分布

² データ数に制約があるため、被害モードが3種類までの分類となっている。被害事例データを追加することで、より被害率の間隔が小さなフラジリティカーブや被害率の信頼区間の幅を評価する関数の作成が可能になる。

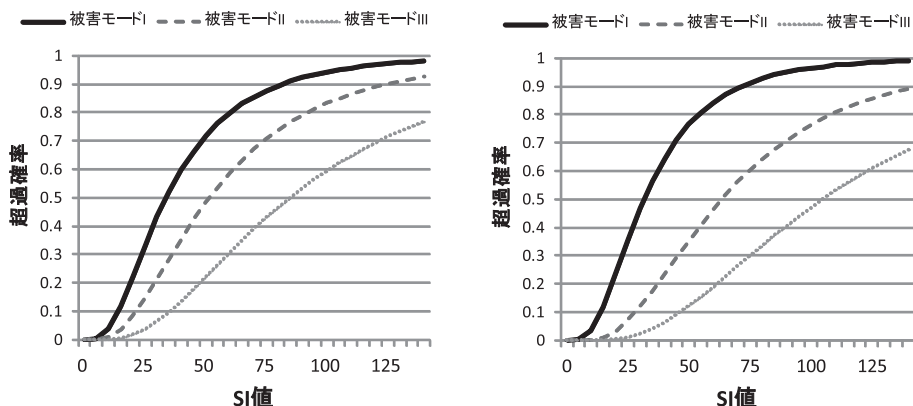


図6 製造業(左)と非製造業(右)の機能的フラジリティ曲線

ある地震動 SI が発生した場合における被害モード $d \in \{I, II, III\}$ が発生する超過確率 $F_d(SI)$ として表す。ここで、各被害モードは被災率 D_d の範囲で表され、そのとりうる値は、 $0 < D_I \leq 1/3$, $1/3 < D_{II} \leq 2/3$, $2/3 < D_{III} \leq 1$ で定義している。各被害モードにおける被災率は同程度に起こりうるものと仮定すると、ある地震動 SI が発生した場合の被害率と累積分布との関係は図7のような形で表され、その面積の大きさが生産能力の被害の期待値となる。つまり、被害率 $F(SI)$ は、以下の式で表される。

$$F(SI) = \frac{1}{6} F_I(SI) + \frac{1}{3} F_{II}(SI) + \frac{1}{3} F_{III}(SI) \quad (1)$$

一方、生産能力を $C(SI)$ とすると、 $C(SI) = 1 - F(SI)$ となる。

津波の場合は、2.において述べたように、浸水深が浅く、たとえ建物の倒壊を免れたとしても土砂や瓦礫の撤去、安否確認などの様々な要因で操業が不可能であったものと予想される。したがって、津波の浸水範囲に立地する産業の生産能力についても単純に0を仮定する。また、原子力発電所の事故に関しては、前述したように、少なくとも避難指示区域(20km圏内)における産業活動は完全に停止していたことが予想され、それら地域に立地する産業の生産能力は0になるものと想定する。

以上、外力に対する被害客体の脆弱性に関する

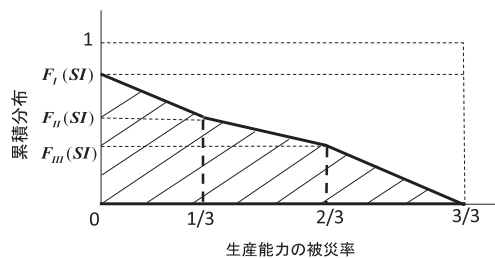


図7 生産能力の被災率と累積分布の関係

設定を行ったが、複数の異なる種類の外力に曝される地域に立地する企業の生産能力の取り扱いと集計作業を行う地域については、若干の整理が必要である。そこで、本研究では以下のような集計方法によって、地域別産業別の被害の大きさを推計する。

まず、分析の最小単位とする小地域(メッシュ)を $i \in \Omega^s$ とする。ここで、 Ω^s は集計対象とする地域 s 全体における各小地域の集合を表す。各地域 i における産業 k の地震動 SI_i による被災率を $F^k(SI_i)$ 、津波の浸水域の面積割合を TA_i 、原子力発電所半径20km圏内に含まれる面積割合を PA_i とすると、各地域 i における産業 k の生産能力 C_i^k は、

$$C_i^k = 1 - \{1 - \max(TA_i, PA_i) F^k(SI_i) + \max(TA_i, PA_i)\} \quad (2)$$

となる。すなわち、脆弱性の仮定より、津波の浸

水域、原子力発電所の影響範囲以外において地震動の影響が発生することとなる。厳密には津波と原子力発電所の空間的な和集合を求める必要があるが、そのような作業が必要となる地域が極めて少ないため、本研究では単純に、ある一つの小地域において、地震動以外に原子力または津波のどちらかの外力のみを考慮している。

次いで、各地域*i*における産業*k*の被害客体の分布（従業員数）を N_i^k とする。このとき、集計対象地域*s*全体の産業*k*の生産能力 TC_s^k を以下のように定義する。

$$TC_s^k = \frac{\sum_{i \in \Omega_s} N_i^k C_i^k}{\sum_{i \in \Omega_s} N_i^k} \quad (3)$$

すなわち、各地域の生産能力をウェイトとして、平常時を1で基準化した地域全体の生産能力を推計していることになる。

3.3 レジリエンス（抵抗・回復力）の分析方法

(1) ライフライン途絶に伴う生産能力の低下水準の推計

ライフライン途絶状況下においてもその途絶パターンや生産活動の種別に応じて企業は何らかの対応を行い、可能な限りの生産能力を確保することで被害を軽減する行動をとる。こうした企業のライフライン途絶に対する耐性はライフライン途絶抵抗係数（Lifeline Resilience Factor）として、我が国では梶谷ら^{12,13)}による推計が行われている。この研究では、電力、水道、都市ガスの三種類を対象に、平常時の生産能力を1としたときの、各ライフライン途絶パターンの組み合わせそれぞれにおける生産能力が推計されている。

本研究では、ライフライン途絶抵抗係数によって各産業の生産能力への影響を評価するが、その際にライフラインの途絶・復旧に関するデータ整備を行う必要がある。2.で触れたようにライフラインの途絶は広範な地域に及んでおり、現時点では、調査の余地が多く、残念ながら外力や被害客体で設定した空間スケール（500mメッシュ）でライフラインの機能回復の状況を把握することができない。したがって、今後もこの種のデータ

の整理が必要と考えられるが、本研究におけるライフラインの復旧情報は以下のような方針で作成している。

まず、データソースとしては、電力：東北電力⁷⁾、東京電力⁸⁾、水道：厚生労働省⁹⁾、都市ガス：日本ガス協会¹⁰⁾を用いる。これらのレポートの公表内容から判断し、可能な限り小さな空間スケールとして、市区町村単位でライフラインの停止情報を集約している。複数の市区町村を含む表現がある場合は、含まれる全ての市区町村単位で該当するライフラインが停止しているものと仮定する。実際に市区町村の一部のみでライフラインが停止している場合もあるが、そのような情報だけは利用が困難であり、本研究では対象となる市区町村全域のライフラインが停止しているものと仮定する。したがって、そうした市町村におけるライフライン途絶による企業への生産能力への影響は過大な推計結果となる。一方、一部の市町村のみであるが、ライフラインの停止情報が設定できなかった地域も存在する。それら地域では、ライフラインの停止日数を0としているため、生産能力の推計値は過少評価となる可能性がある。

作成した電力、水道、都市ガスの市区町村別の復旧日数を図8～図10に示す。津波によって被災を受けた沿岸部を中心に復旧日数が大きな地域が存在していることが分かる。沿岸部以外の地域では、電力では5～10日以内、水道では10～30日以内に復旧している地域が多い。都市ガスについては部分的にしか供給エリアが存在していないが、それら地域では復旧に30日以上かかっているケースが多くみられる。

(2) 生産能力（設備）の復旧過程の分析

災害直後だけでなくその後の復旧期間も含めて生産能力を推計する場合、各企業でどのような復旧が行われるかを想定することが必要となる。しかし、既往研究において、災害後の標準的な生産能力の回復モデルに関する検討は十分に行われていない。そこで、本研究では東日本大震災における生産能力の回復に関して実際に行われた中野ら¹⁴⁾の調査データを用いることとする。

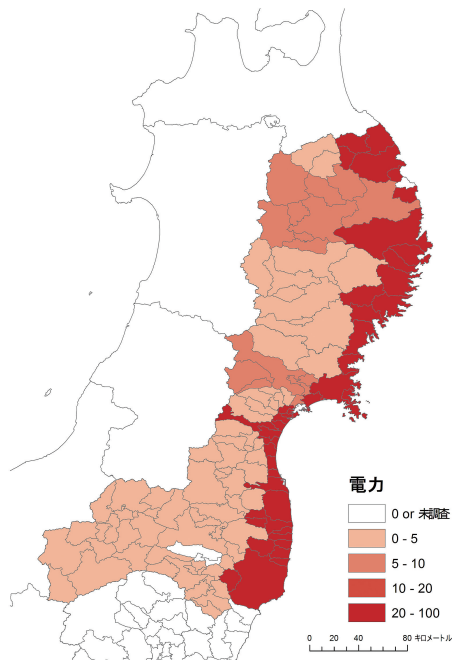


図8 電力の復旧日数

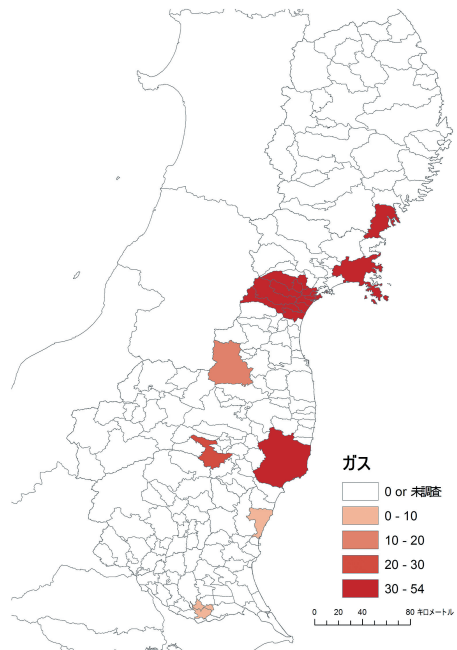


図10 都市ガスの復旧日数

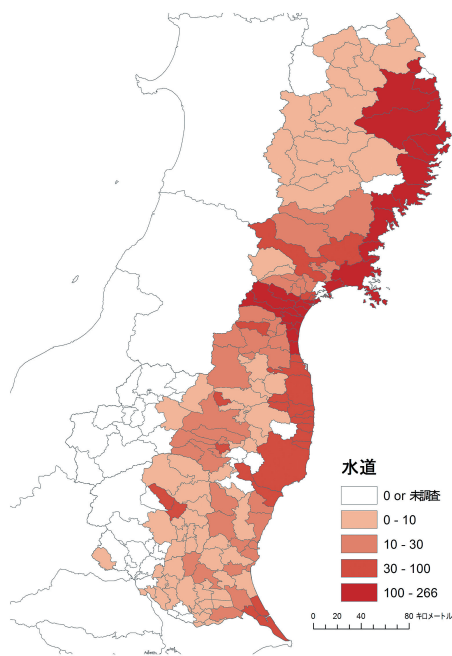


図9 水道の復旧日数

本調査データは、宮城県、岩手県に立地する2,669社（製造業777社、非製造業1,892社）からの回答を得たものである。津波による被害を受けたエリアや原子力事故の影響による避難指示地域は含まれていない。すなわち、主として地震動による影響を受けたエリアからの回答となる。また、本調査における生産能力には、ライフラインの影響を含まず、主に自社の土地、設備、従業員の状態から決定されるものである。これは、本研究で用いる脆弱性曲線で用いられている定義（自社要因による生産能力）と整合的である。

図11に製造業、非製造業に分類した各企業の生産能力の平均値を示す。災害直後は、製造業で40%強、非製造業で60%弱の生産能力が確保されている。製造業の方が落ち込みは大きい但回復は早く、1カ月経過後には非製造業を上回る生産能力に戻っている。このデータを基に、各企業の生産能力の復旧過程を定義するが、最初の落ち込みの大きさとその後の回復過程の関係を明確にするために、以下のハザード関数を用いた。

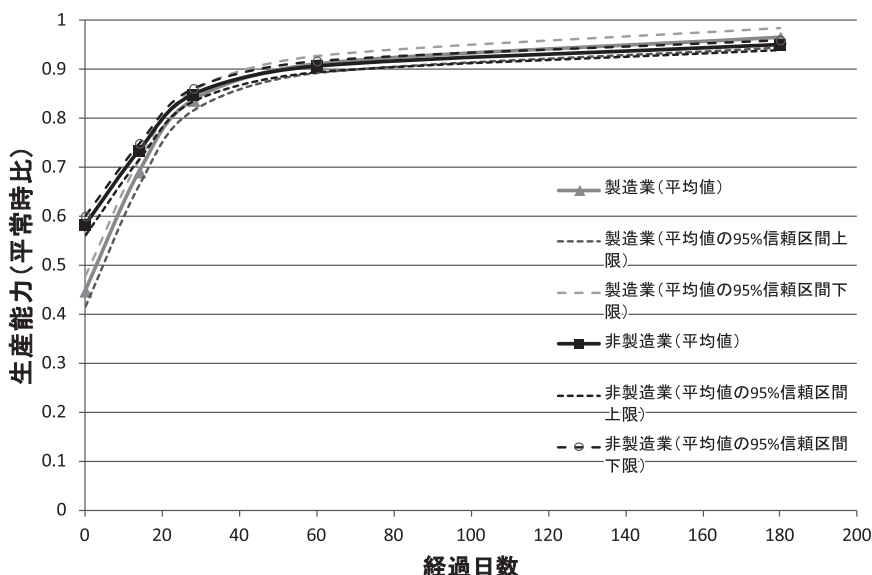


図11 生産能力の復旧データ

$$C_i^k(t) = C_i^k(0) + \frac{(1 - C_i^k(0)) \exp(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 C_i^k(0)t)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 C_i^k(0)t)} \quad (4)$$

ここで、 $C_i^k(0)$ ：地域 i に立地する産業 k の災害直後の操業能力、 t ：災害発生からの経過時間（日）、 $\beta_0 \beta_1 \beta_2$ ：説明変数のパラメーターである。この式では、災害直後の落ち込み $1 - C_i^k(0)$ が時間の経過時間 t の影響を受けて単純に回復していくが、災害直後の落ち込みの大きさにも影響を受けるモデルとして表現されている。すなわち、時間の経過とともに回復するための復旧資源がより多く投入され、また初期の被害の状態がその後の復旧速度に影響を及ぼすことを想定している。パラメーターの推計の結果、製造業では、 $\beta_0 = -2.493(-10.47)$ 、 $\beta_1 = 0.089(27.96)$ 、 $\beta_2 = 0.012(1.80)$ 、非製造業では、 $\beta_0 = -2.463(-14.54)$ 、 $\beta_1 = 0.083(32.99)$ 、 $\beta_2 = 0.023(4.96)$ を利用する。ここで、括弧内は t 値を表し、製造業の β_2 は10%の有意水準で有意となるが、それ以外の変数は1%以下の有意水準でも有意な変数となった。 β_1 と β_2 の値から、時間が経過するほど生産能力が回復し、また初期の被害が小さいほど回復が早いことが分かる。より

詳細な産業の特性や被害の状況によって回復状況は異なると考えられ、異なる分布関数による分析なども検討する必要がある。また、本研究の分析では5月末までの生産能力の推計を対象としており、この期間において津波の浸水地域と原子力発電事故の影響エリアの回復は行われたいものと想定している。津波については浸水深によって、回復への影響が異なると考えられるが、これらの詳細な分析については今後の課題としている。

(3) 生産能力とライフライン復旧の関係

本研究では、自社の生産要素の被害（「設備被害」）に起因する生産能力とライフライン途絶ならびにそれらの復旧の影響を考慮して災害時の生産能力を推計することが必要となる。設備被害とライフライン停止の複合的な影響については、相乗効果的な被害パターンが発生するものと考えられるが、本研究では図12の想定に基づいて分析を行うこととする。

まず、図の上段は、回復を考慮しない設備被害のみのケースである「設備被害」、「設備被害」にライフライン途絶影響を考慮した「設備被害+ライフライン途絶影響」、「設備被害」にその復旧過

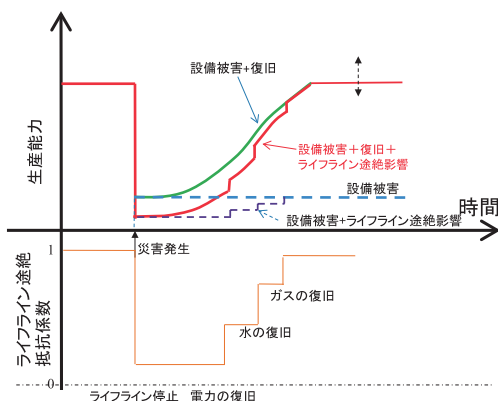


図12 設備被害と復旧，ライフライン途絶影響を考慮した生産能力の回復過程

程を考慮した「設備被害+復旧」，全ての要素を考慮した「設備被害+復旧+ライフライン途絶影響」の4種類の被害影響パターンを示している。ライフライン途絶影響は，下段にあるライフラインの途絶・回復パターンに応じたライフライン途絶抵抗係数の値に依存している。

「設備被害」は，生産能力が低下したまま回復しない青の点線の過程をたどる。紫の点線で示す「設備被害+ライフライン途絶影響」は，残存する生産能力に対してライフライン途絶の影響が働くため，いずれかのライフラインの供給が停止している場合の生産能力はさらに低くなる（生産能力×途絶抵抗係数）。ライフラインの途絶が解消すると，「設備被害」と同じ過程をたどる。「設備被害+復旧」は，「設備被害」における生産能力低下状態からの回復過程を含んだ緑線で示す生産能力曲線になる。さらに被害の影響を含むケースが赤線で示されているが，ライフライン停止状態が回復すると，「設備被害+回復」曲線に一致する。

全ての要素を含んだ「設備被害+復旧+ライフライン途絶影響」のケースが，本研究における最終的な生産能力の推計値となる。この場合における生産能力の低下量の推計値（累積）は，図13における斜線の部分に相当し，少なくともこの生産能力に相当する生産量は減少するものと推定される。

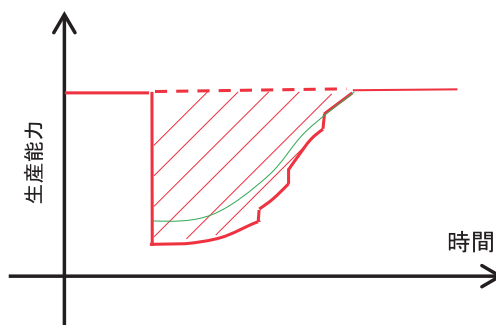


図13 生産能力の低下量（推計値）

4. 推計結果と鉱工業生産指数による検証

4.1 産業別の災害直後の生産能力減少

ケーススタディでは，被災の大きかったとされる福島県，岩手県，宮城県，茨城県，栃木県を対象に分析を行う。特に，本節では，図2に示すフローの中で，災害直後の生産能力（「設備被害」）の推計結果について紹介する。ここでは，初期の産業の被害として各外力がどの程度の影響を及ぼした可能性があるかを把握することを目的とする。生産能力の検証自体は，対応する実際のデータが整備されていないため，今後の課題となる。後述する鉱工業生産指数との比較において，ライフライン途絶の影響や復旧活動の影響を含めた総合的な生産能力の推計結果を検証する。

推計結果として，全ての外力を考慮した場合の業種別の生産能力の「減少量」の推計結果を図14に，津波ならびに原子力のみ影響による生産能力の減少量の推計結果を図15，図16にそれぞれ示している。生産能力自体は1からこの値を引くことで得られる。図から明らかなように，宮城県における被災率が全ての業種において大きな値を取っている。中でも石油・石炭産業，鉄鋼，紙・パルプの順に被害が大きい。これら産業では沿岸部に立地している企業が多く，図15からも分かるように津波による影響が大きい。宮城県の食料品産業も被害が大きい，この産業は，岩手県においても同様に大きな被害を受けている。宮城，岩手では水産加工産業が沿岸部に立地しており，そのシェアも大きいことが予想されるため，食料品産業の被害も大きくなったと考えられる。岩手県

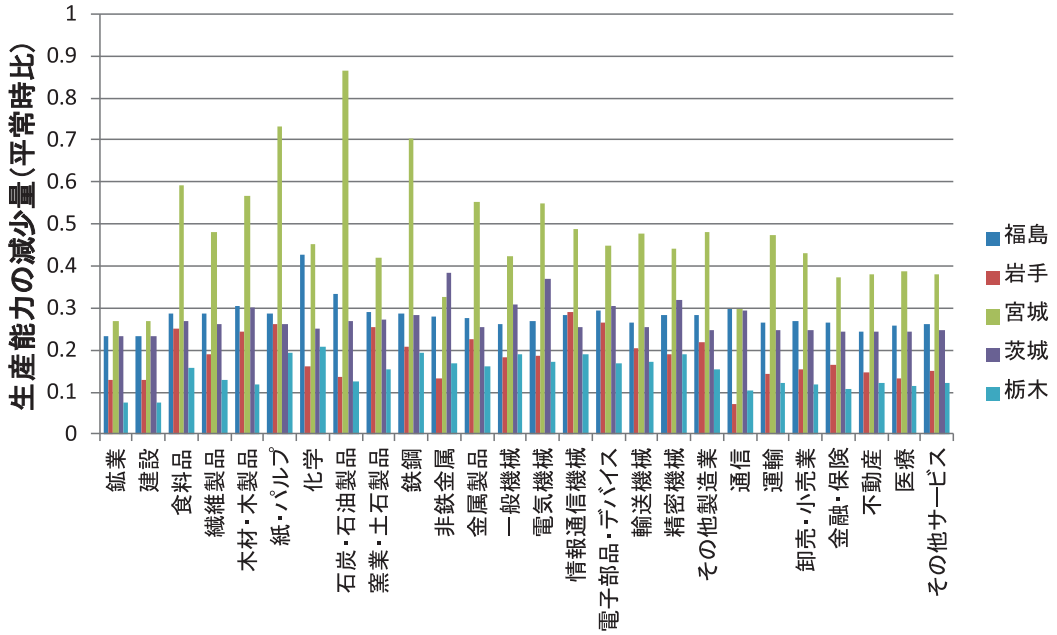


図14 全ての外力を考慮した場合の生産能力の減少

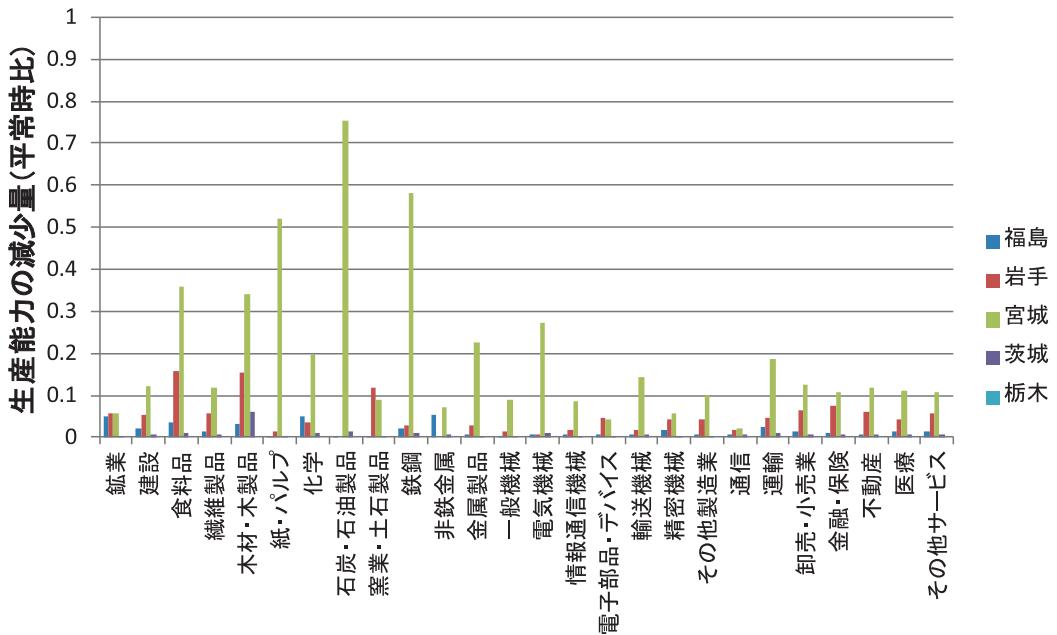


図15 津波の影響のみを考慮した場合の生産能力の減少

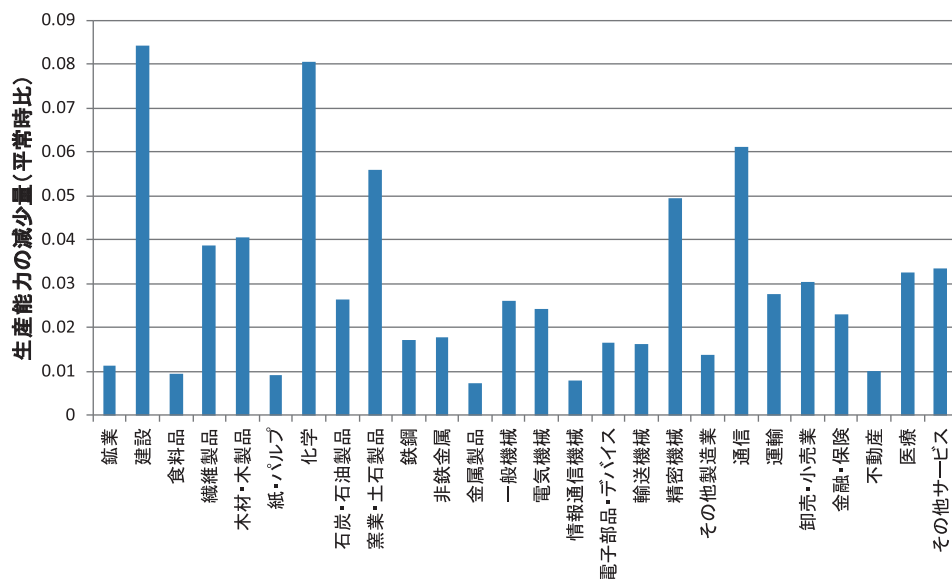


図16 原子力事故（指示避難区域）のみを考慮した場合の生産能力の減少

ではそのほか木材・木製品産業も被害が大きく、大船渡市のような木材・木製品産業の集積地が被害を受けたことが影響していると考えられる。

一方、福島県において被害が大きな産業として化学が挙げられる。生産能力の低下は40%以上と推計されているが、そのうち約8%は原子力発電所から20km圏内に企業が立地している影響となっている。なお、今回の想定では福島以外の県において原子力発電所事故の影響は発生していない。関東の2県でも被災の様相は異なっている。茨城県では非鉄金属や電気機械産業、精密機械、一般機械などの機械産業系の被害が大きい。また、栃木県の実産能力の被災率は各産業においておよそ20%未満と他の地域と比べて被災率が小さく、化学製品だけ20%を若干上回っている。

4.2 月別の生産能力の推計結果と鉱工業生産指数との比較

本節では、2011年の3、4、5月の3カ月を対象に生産能力の推計結果と鉱工業生産指数とを比較分析する。ここで、生産能力は、生産の実現値である鉱工業生産指数と異なることに注意が必要である。すなわち、生産能力は最大限生産した場合

の想定値であるのに対し、需要やサプライチェーンの影響を受ける鉱工業生産指数は生産能力以下の生産量を反映した指標である。しかし、被災地において、サプライチェーンの途絶影響のような本研究では考慮していない要素の影響が小さく、できる限り事業継続を続けようとする企業が行動していれば、鉱工業生産指数と生産能力は近い値をとることが予想される。

また、自社要因による生産能力減少、ライフライン途絶の影響とそれぞれの回復の影響の度合いや分析精度への貢献度合いを把握することも重要となる。そこで、図12に従い、「設備被害」、「設備被害+ライフライン途絶影響」、「設備被害+復旧」、「設備被害+復旧+ライフライン途絶影響」の4種類の被害影響パターンについて、生産能力の推計を行った。図17は、例として福島県の輸送産業を対象として、各被害パターンを推計した結果を示している。3月11日には10%程度であった生産能力が主にライフラインの回復によって数日のうちに30%程度まで回復している。その後は、設備の復旧が全く行われない仮想的なケースでは、6月の初旬に70%強の生産能力まで回復する。一方、式(4)に基づく設備の復旧モデルを

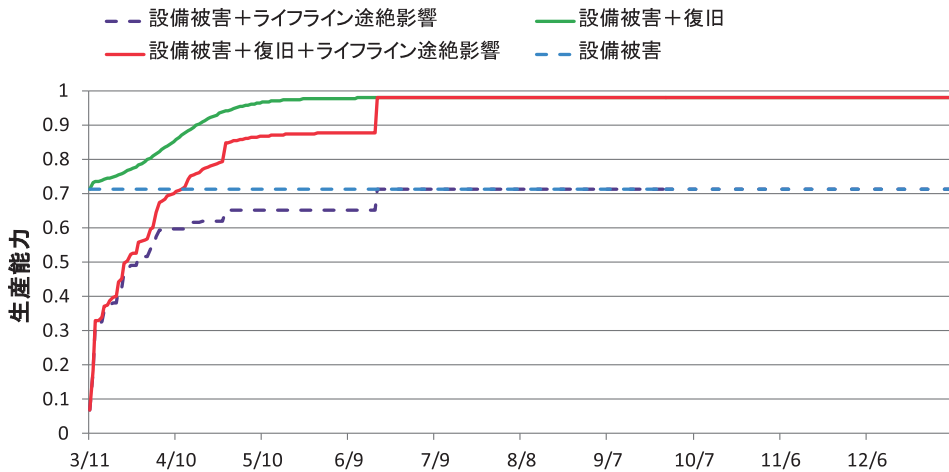


図17 生産能力曲線の例（福島県の輸送産業）

適用すればライフラインの途絶影響が解消したときに生産能力がほぼ元の状態に戻る形となる。なお、生産能力が100%に戻らないのは津波浸水地域ならびに原子力事故の影響範囲に立地する企業の生産能力が回復しない影響である。

図17のような推計を各産業、各市町村において実施した。本節では、より容易に生産能力へ影響を及ぼす各要素の影響や鉱工業全体への影響を分析するために、産業分類を集約した分析を行い、次節において産業分類別の比較を行うこととする。産業分類の集約にあたっては、図18に示す各県の鉱工業生産指数に用いられている付加価値指数をウェイトとして用いる。

2011年3月～5月の生産能力の推計結果と鉱工業生産指数との比較を、図19～図21に示す。鉱工業生産指数は季節調整済みのデータを用い、震災前の2011年2月における鉱工業生産指数を1として、基準化を行っている。3月のケースでは、3月10日までは、平常通り生産ができていたものと仮定し、その分の補正（3月中の生産能力＝ $10/31 + (21 \times \text{震災後の生産能力の推計値})/31$ ）を行っている。

まず、3月のケースをみると、「設備被害」のみによる生産能力の推計は、各県において実際の実現生産量に比べて0.1～0.2程度過大な推計となっているが、生産可能量の最大値であるという条件については満たしている。一方、「設備被害+ライフラ

イン途絶影響」では、若干の過少推計となる県も発生するものの、各県ともより生産量の実現値により近い値となることが分かる。最終的な推計結果となる設備の「復旧」を考慮して推計を行ったケースは、「設備被害+ライフライン」のケースとあまり変わらず、設備の復旧活動の影響はそれほど顕著にみられない。設備の回復を考慮しても若干の過少推計となる理由の一つとして、前述したように停止日数が過大推計になるライフラインの復旧データの作成方法が挙げられる。

県別にみれば、栃木県がどのケースにおいても最も過大推計となっている。これは、その他地域と比べて、設備被害やライフライン被害の影響が少ないが、実際の生産量自体は落ち込んでいることを意味している。この理由としてはいくつか考えられ、その検証は本研究の範囲外であるが、仕入先、納入先の被災や計画停電の影響などがその要因として考えられる。4月、5月の推計結果については「設備の復旧」の影響が大きくなっていく。特に5月では「復旧」を含めたすべての要素を考慮することで、実際の生産量に近い値が推計されていることが分かる。また、岩手県、宮城県では、若干過少推計になっているが、その他の県では生産量と同等あるいは高めの推計値となっており、最大可能生産量という条件に近い結果が得られている。

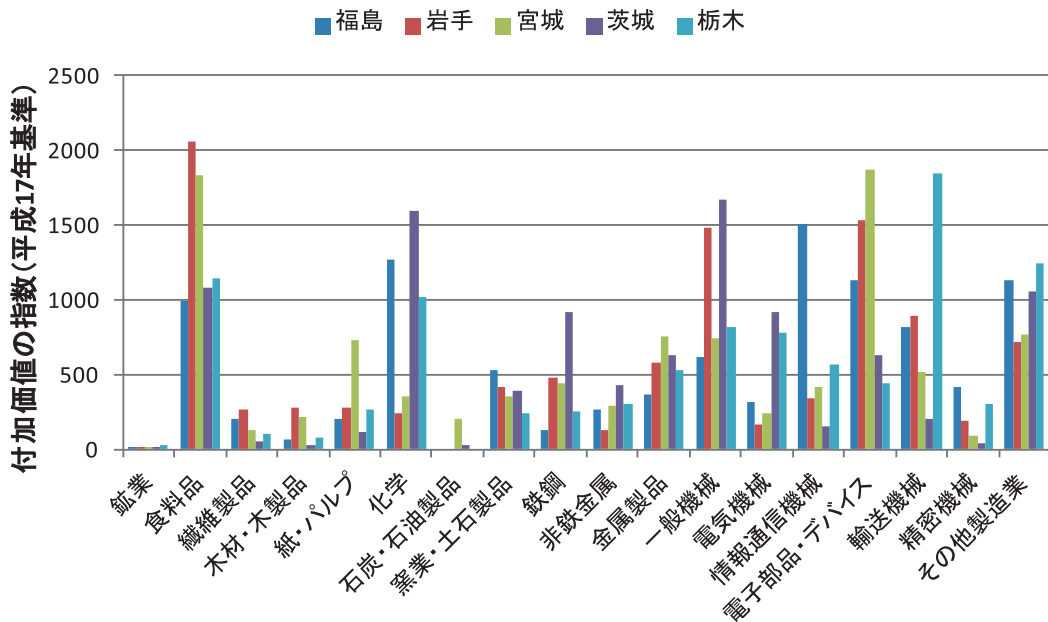


図18 鋁工業生産指数の付加価値指数

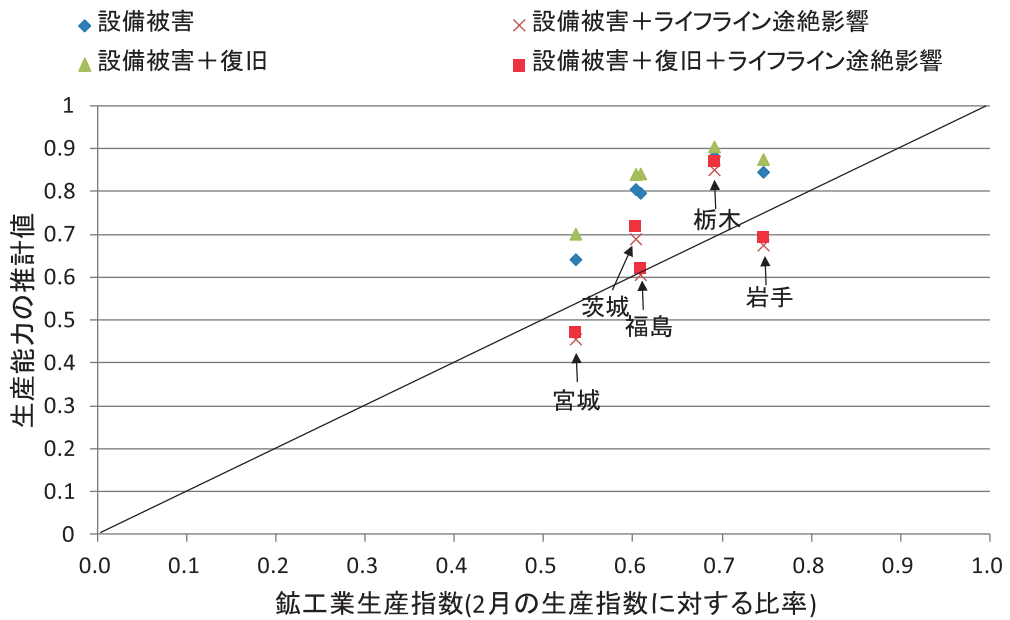


図19 2011年3月の生産能力の推計値と鋁工業生産指数の比較

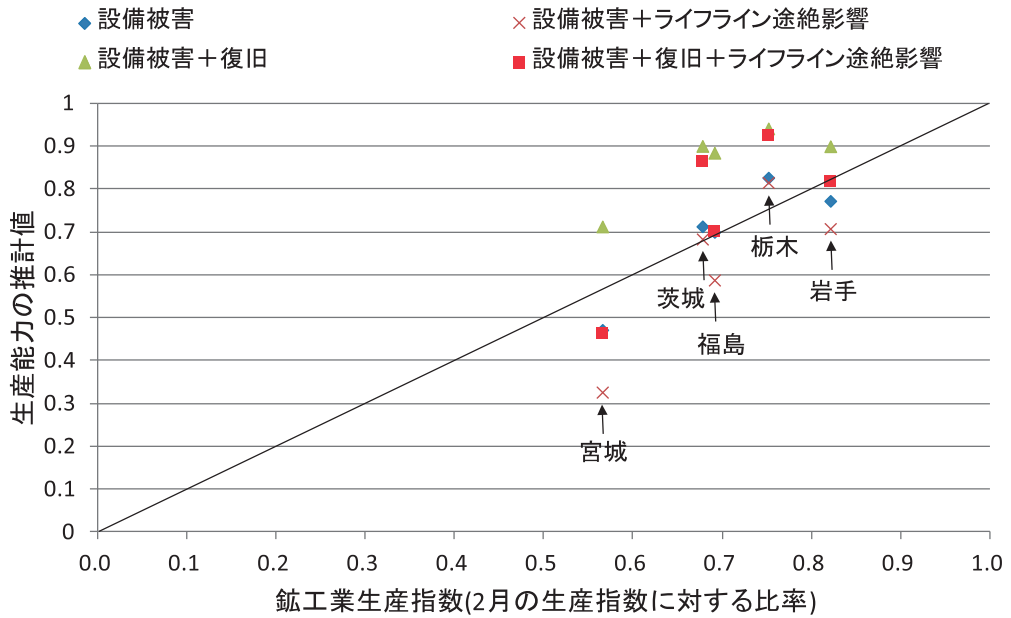


図20 2011年4月の生産量の推計値と鉱工業生産指数の比較

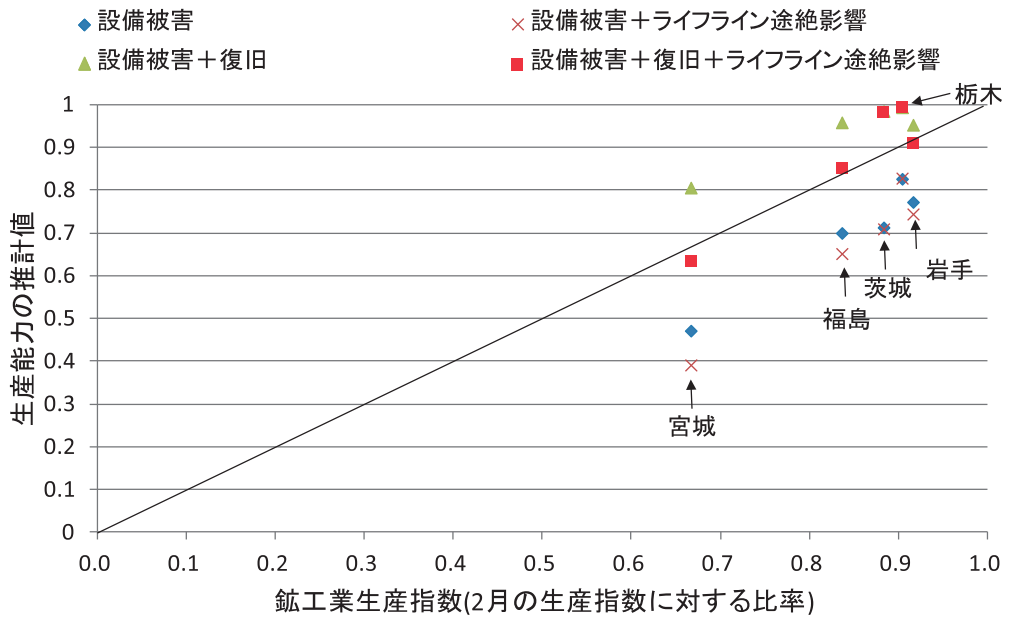


図21 2011年5月の生産量の推計値と鉱工業生産指数の比較

4.3 産業別の鉱工業生産指数との比較

図22に業種別の生産能力の推計結果（3, 4, 5月分）と対応する鉱工業生産指数（対2月比で基準化）をプロットした結果を示す。ここでは、最終的な推計結果となる「設備被害+復旧+ライフライン途絶影響」のケースを対象としており、各点は県単位に集約した結果を示している。平均値と分散は以下のようなモデルの想定のもとで算出したものである。まず、推計値を \hat{x} 、基準化した鉱工業生産指数を y とする。このとき、残差項を ε とすると、 $y = \hat{x} + \varepsilon$ と表現される。図では、45度線から上下への乖離部分が ε に相当する。この残差項の平均値と分散が図中に示されている。 ε が0または負の値をとれば、生産能力の条件（最大生産量）を満たす。図22では18業種中11業種において平均値が負の値を取っている。また、分散が小さければ推計値と鉱工業生産指数が全般的に近い値をとり、モデルの説明力が高いことを示している。

まず、明らかに分散が大きく説明力の低いものをあげると、石油石炭（宮城県、茨城県のみ）、鉱業が挙げられる。これらの分散は0.2以上となっている。石油・石炭産業は、石油石炭産業は火災による被害など、被害のモードが他と著しく異なっており、復旧のパターンもその他の製造業と大きく異なっている。また、鉱業についてもその他製造業と異なる設備仕様や被害状況になっている可能性が高く、ライフライン途絶抵抗係数に関しても推計に用いられている調査サンプルは1件だけで、信頼性は低い。

一方、金属製品や一般機械、電気機械、精密機械などの機械系において、分散が小さく推計値の精度が高いと思われる産業が多く存在する。新潟の中越地域においても多くみられる産業であり、フラジリティカーブの推計においてもこの種の加工産業が多く反映されているものと推測される。また、付加価値の大きな産業分野であり、鉱工業全体の推計精度にも反映されたものと考えられる。ただし、機械系のなかでも輸送機械の推計値は鉱工業生産指数との関連がそれほど大きく見られない。輸送機械は、サプライチェーンの影響が

大きく発生する産業であり、生産能力の推計値に比して生産量が小さくなる理由として、様々な部品の供給停止による影響を受けている可能性があげられる。

食料品、紙・パルプ、化学なども推計値と鉱工業生産指数の値が近く、分散が小さい。これら産業は沿岸域に立地し、前述したように津波による被害が大きいと推計された産業であるが、石油・石炭産業のような特殊な事情は大きくなかったものと考えられる。津波による影響を受けた地域の生産力をゼロにする仮定と復旧を見込まない仮定の影響を受けての結果でもあり、本研究で対象としている期間では、この種の想定もある程度の妥当性を有していると考えられる。

以上、解釈が十分にできない産業もあるが、基本的に設備の構造が製造業全体の平均的な設備の構造と明らかに異なるような産業への適用は困難である。特に、本研究で用いているフラジリティカーブは製造業、非製造業と大きく2分したものであり、その範囲での分析となる。また、需要やサプライチェーンの影響を大きく受けるような産業については、適用性の検証は別のアプローチによって行う必要がある。こうした制約の中での分析ではあるが、機械産業などの加工系の産業をはじめ、いくつかの産業では、本研究の枠組みや利用データである程度説明ができることが示されており、フラジリティカーブの業種別の推計やデータベースの継続的に発展させることが重要となる。

5. まとめ

本研究では、災害時における企業の実生産能力を推計するための手法を検討し、東日本大震災のケースへの適用を試みた。生産能力の推計は、経済的影響を評価する上で必要不可欠な情報であり、その推計方法や検証についてはこれまで十分な研究が行われていなかった。特に、災害時の企業の実生産能力には様々な要素が複雑に影響を及ぼしており、その要素の整理や分析手法の適用プロセスと評価結果の検証が重要な課題であった。また、東日本大震災は、全世界的にみても既往最大

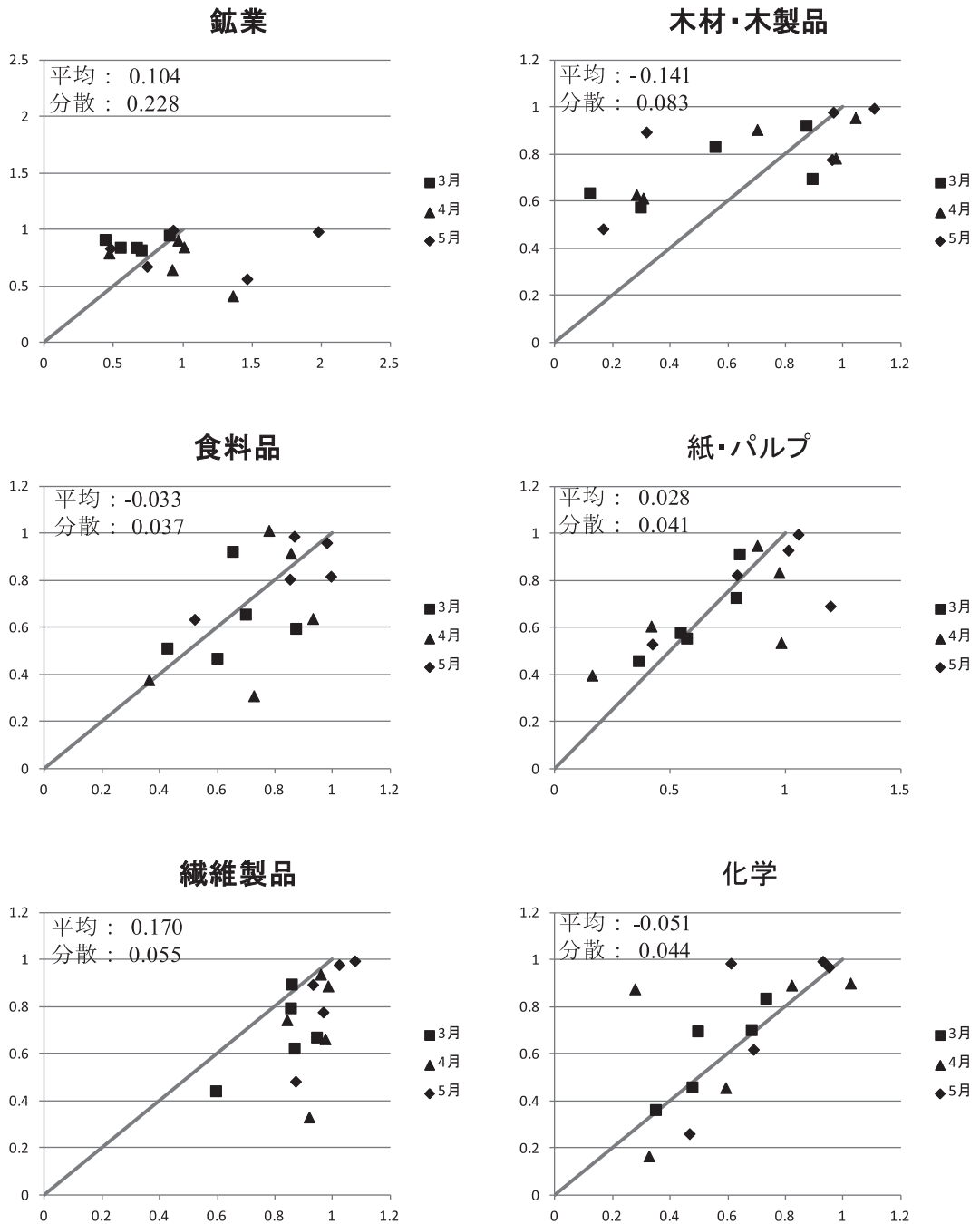


図22-1 鉱工業の業種別の生産能力の推計結果（縦軸）と各月の鉱工業生産指数の2月比（横軸）のプロット（各点は県単位の推計値と鉱工業生産指数の実績値を示す。）

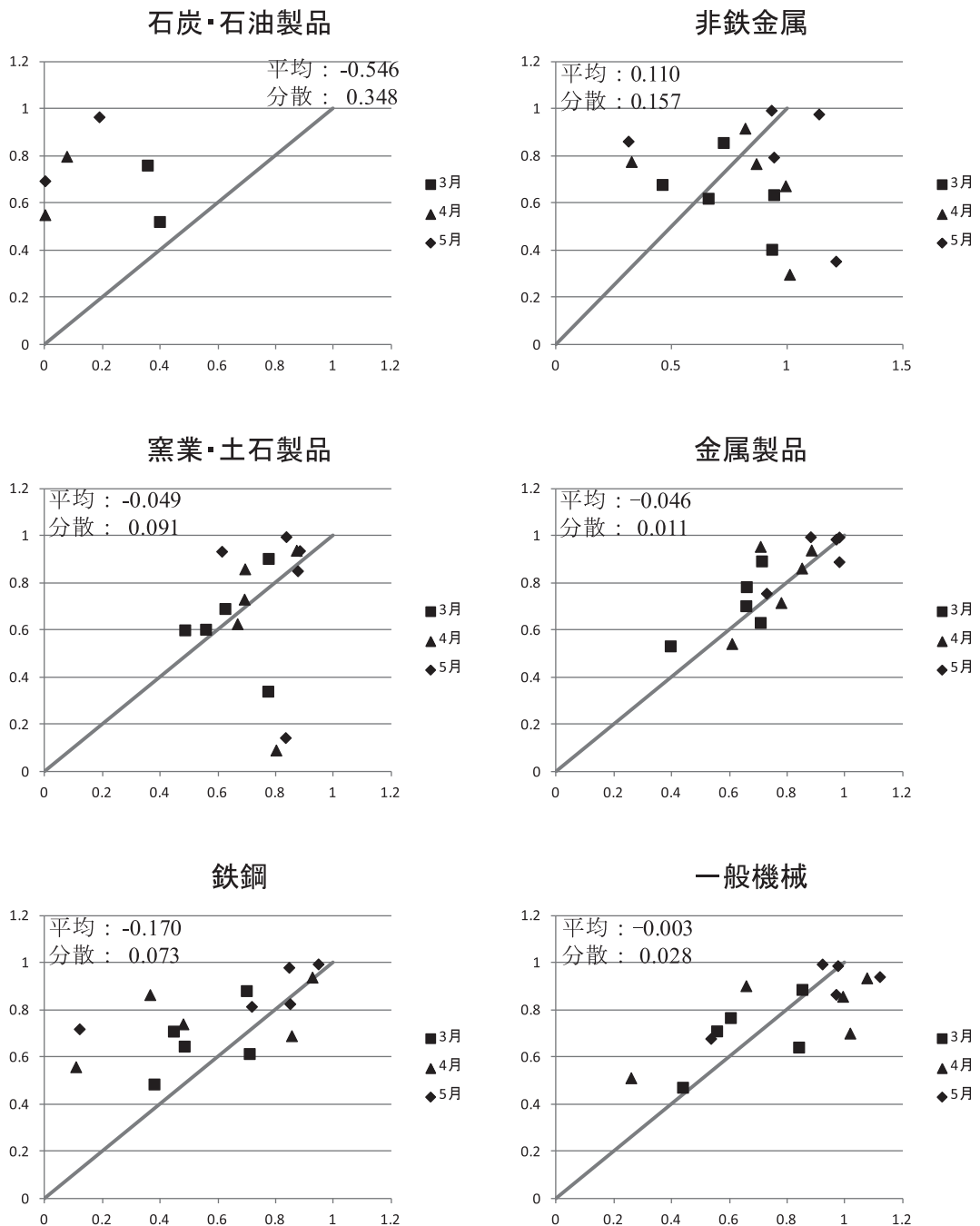


図22-2 鋳工業の業種別の生産能力の推計結果（縦軸）と各月の鋳工業生産指数の2月比（横軸）のプロット（各点は県単位の推計値と鋳工業生産指数の実績値を示す。）

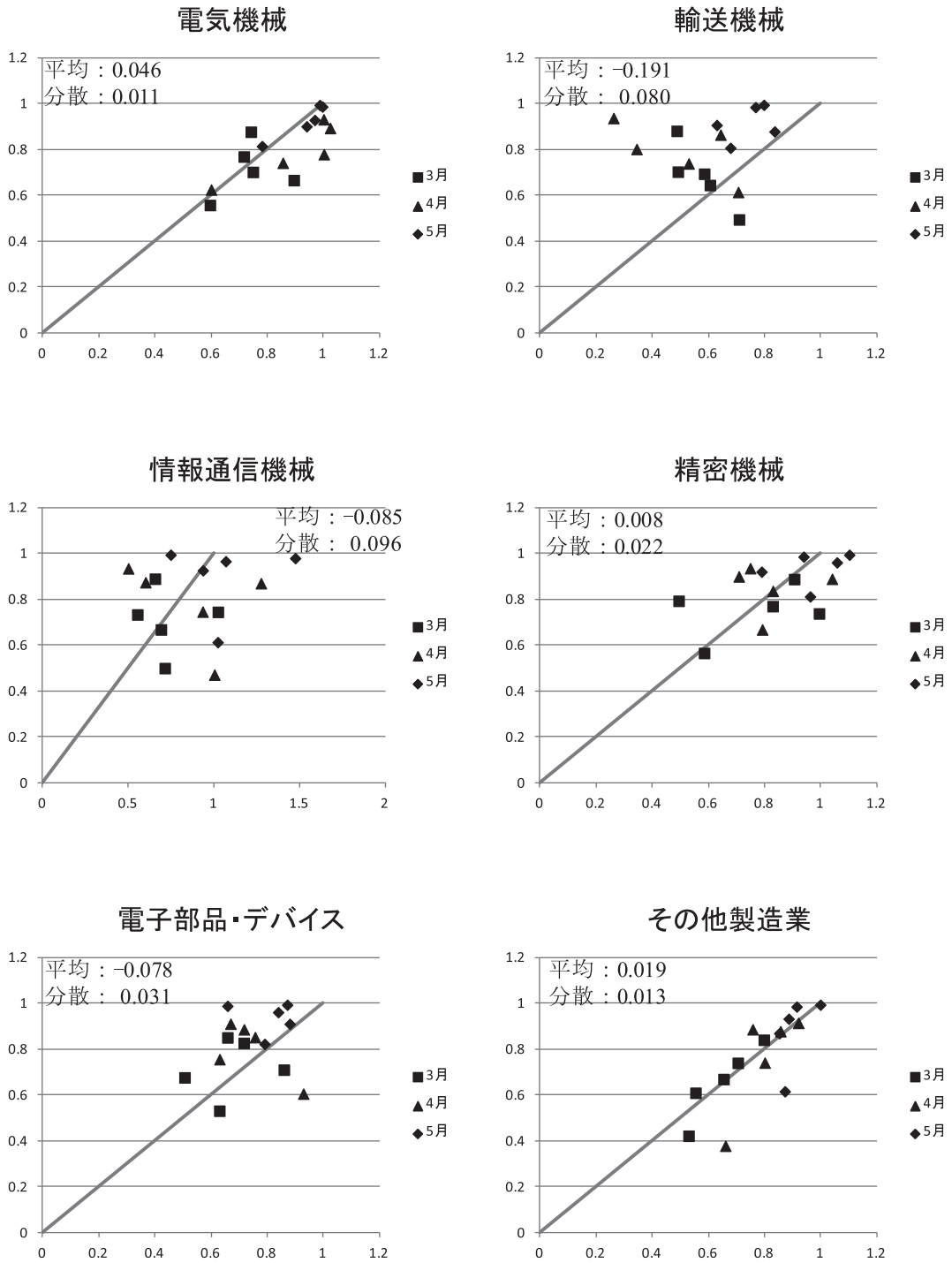


図22-3 鋳工業の業種別の生産能力の推計結果（縦軸）と各月の鋳工業生産指数の2月比（横軸）のプロット（各点は県単位の推計値と鋳工業生産指数の実績値を示す。）

級の経済的影響をもたらしている災害であり、その要因の分析は、今後の企業防災を考慮する上でもきわめて重要な課題となっている。

そこで、これまで実施されてきた災害影響に関する企業調査では、主として設備被害とライフライン停止の影響が主要な生産能力低下の要素になることに着目し、ライフラインの復旧状況や設備の回復状況に応じた生産能力を推計する方法について検討を行った。設備被害に起因する生産能力の低下を分析するために、東日本大震災の特徴である地震動、津波、原子力事故の複数の外力を考慮した。この際、地震動の影響を評価するために、地震動の大きさと主として設備の被害に起因する生産能力の低下を関係づけた機能的フラジリティの適用を行った。設備の被害からの復旧については、実際の企業調査データを利用している。また、既往の調査研究であるライフライン途絶抵抗係数を用い、ライフライン途絶状況に応じた生産能力の評価を実施した。

分析の結果、特に被害の大きかった福島県、岩手県、宮城県、茨城県において、生産能力の推計結果と生産量の間に正の相関がみられ、これら地域では設備被害とライフライン被害が主要な生産制約要因となっている可能性が高いことが示された。また、産業別の分析を通じて、本分析手法の適用が見込まれる業種を明らかにすることを試みた。その結果、食料品、金属、機械などの加工産業や化学、パルプ・紙などの津波による被害影響の大きな産業において生産能力の推計値と鉱工業生産指数が近い値となった。この要因として、被害分析の元となるベンチマークデータに多く含まれる産業や設備とライフライン以外の要因となる取引先への依存度、津波被害に対する企業の低い脆弱性等がこの種の業種別分析にも影響を及ぼしている可能性があることが示された。

このように、企業の生産能力の評価手法について一定の知見を得られたと考えられるが、今後も検討すべき様々な課題があると考えられる。まず、この種の経験的な手法を発展させるためには、企業の被害・復旧状況に関するデータの蓄積が不可欠である。企業の防災対策は日進月歩であ

り、被害分析のためのベンチマークデータを常に更新していく必要がある。本研究では、検証のためのデータである鉱工業生産指数の集計単位の制約もあり、全てのハザードを含めた推計結果を検証に用いている。今後、フラジリティカーブ自体の検証や被害モードの細分化など、ハザード別にその精度を検証し、更新することが重要となる。

また、本研究では対象にしなかったが、被災規模等に応じた設備の復旧に関する検討も重要な課題である。東日本大震災の分析に関しても、いくつもの課題がある。まず、外力、ライフライン復旧などの分析用データの精緻化があげられる。データの制約のために実施できなかった非製造業の生産能力の推計結果の検証も重要な課題となる。さらに、本研究で対象としなかった被災地域の経済分析が重要となる。これは生産能力の低下の分析だけでなく、間接的被害の帰着状況を見る上でも重要であり、本研究のような生産能力の評価と融合した様々な経済影響評価モデルによる分析が必要になる。

参考文献

- 1) 高橋顕博, 安藤朝夫, 文 世一: 阪神・淡路大震災による経済被害推計, 土木計画学研究・論文集, No. 14, pp. 149-156, 1997.
- 2) 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, Vol. 183, No. 1, pp. 71-78, 2001.
- 3) 小池淳司・上田孝行・秋吉盛司, 社会資本ストック崩壊による経済的被害の空間的把握—空間的応用一般均衡モデルによる計量厚生分析—, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 367-374, 2004.
- 4) 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.
- 5) 日本経済新聞: 「生産の停滞 長期化」, 2011年3月15日朝刊.
- 6) 経済産業省: 「過去の避難指示について」 http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hinan_history.html, 2012年7月19日.
- 7) 東北電力: <http://www.tohoku-epco.co.jp/emergency/9/index.html>, 2012年7月19日.

- 8) 東京電力：プレスリリース2011年 <http://www.tepco.co.jp/cc/press/index1112-j.html>, 2012年7月19日.
- 9) 厚生労働省報道資料, “平成23年東北地方太平洋沖地震の被害状況及び対応について 11報-108報”, 2011.
- 10) 日本ガス協会, “東北地方太平洋沖地震による都市ガス供給の停止状況について 第1報-第61報”, 2011.
- 11) Nakano, K.: Economic Impact Assessment of a Natural Disaster to Industrial Sectors, PhD Dissertation, Kyoto University, 2011.
- 12) 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, Vol. 23, No. 4, pp553-564, 2005.
- 13) 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, Vol. 24, No. 3, pp247-255, 2005.
- 14) 中野一慶, 梶谷義雄, 田頭直人, 人見和美, 多々納裕一: 東日本大震災の経済影響と復旧状況に関する実態調査-岩手県・宮城県に立地する企業を対象として-, 電力中央研究所報告 (Y11022), 2012.
- 15) 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, (CD-ROM, 2 pages), 2011.
- 16) 国土地理院津波浸水範囲: http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html, 2012年7月1日.
- 17) 東京大学生研地球環境学研究グループ: http://stlab.iis.u-tokyo.ac.jp/eq_data/#ishinomaki, 2012年7月1日.
- 18) 陳 光輝: 阪神大震災による神戸市の事業所被害: メッシュデータによる推計, 国民経済雑誌, Vol. 174, No. 4, 1996年, pp. 89-96.
- 19) 財団法人統計情報研究開発センター: 平成18年事業所統計, <http://www.sinfonica.or.jp/datalist/index.html>, 2012年7月1日.
- 20) Shinozuka, M.: Statistical analysis of fragility curves, Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, No.12, pp.1224-1231, 2000.

(投稿受理:平成24年9月24日
訂正稿受理:平成24年12月17日)