

東日本大震災後の産業の 生産能力回復過程に関する研究

竹中 健太¹・梶谷 義雄²・多々納 裕一³

¹ 学生会員 京都大学工学部地球工学科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 36-1)

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

² 正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

³ 正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

本研究では、東日本大震災後の企業アンケート調査をもとに、時間的に変化する様々な要因を説明変数とする、生産能力の回復曲線の統計モデルを構築することを試みた。まず、アンケート調査から、サンプル群を様々な要因変数の値に応じて複数に分割し、それぞれの回復過程の違いについて分析を行った。この分析を通じて、いくつかの要因が企業の復旧に影響を与えている可能性が示された。次いで、企業の実績の回復経路を表現するための回復関数について検討を行った。回復曲線の有すべき形状等の条件を整理し、関数型の異なる5つの回復モデルを抽出した。さらに、利用するデータの特性を考慮し、回復関数の統計的推計手法について整理を行った。分析の結果、回復過程に有意に影響を及ぼす変数や回復関数が有すべき性質について一定の知見を得た。

Key Words : *product capacity, recovery model, the Great East Japan Earthquake, Statistical Analysis*

1. はじめに

2011(平成23)年3月11日14時46分頃、三陸沖を震源として東北太平洋沖地震が発生した。この地震の規模はMw9.0を示し、国内観測史上最大規模の地震となった。この大地震による揺れや津波は、液状化・火災・原発問題などを引き起こした。産業部門においても震災の影響は甚大であり、被災地域の各生産拠点では、機械、建築物の破損等の直接的な被害を受けた。また、ライフラインの途絶、計画停電によって、生産(操業)活動の制限や、困難な復旧活動に多数の企業が直面した。このように、東日本大震災による被害の特徴の一つとして、直接的な被害の大きさだけでなく、様々な要因によって引き起こされた間接的被害の甚大さが挙げられる。一方、政府の地震調査委員会によると、西日本においても、東海地震が今後30年以内に発生する確率は88%といわれており¹⁾、大規模な津波をとまなう地震災害に対する被害軽減、そして、被災後の早期復旧を可能にする防災対策が求められている。

自然災害に対するリスクマネジメント施策を実施する際、企業には正確なリスク評価が必要とされる。中でも、費用便益分析のような対策の効果を測るためには、

より正確な被害額の推計が重要であり、災害時の経済被害の規模を推計する研究がこれまでに数多く行われてきた。自然災害による産業部門の被害を推計する際には、一般的にその被害を、「直接被害」と「間接被害」の2種類に分けた推計が行われている。「直接被害」とは、ストック次元の損失(社屋等の建築物の倒壊・損壊、自社の操業に関わる機械・設備や商品の破損等)のことであり、一方、「間接被害」とは、フロー次元での損失(自然災害による機会損失や仕入れ先、供給先の喪失等による営業利益の損失等)のことであり、直接被害額については、復旧費用や除却費の積み上げによる推計が行われており、間接被害額については、産業連関分析²⁾や応用一般均衡モデルを用いた分析³⁾による推計が行われている。

しかしながら、自然災害一般を対象とした被害推計に関する既往の研究では、刻一刻と変化する被災後の経済の回復状況を考慮した検討が行われていない。基本的に、産業部門の回復過程は、建物や設備の被害の大きさ、産業連関性、ライフラインの供給途絶など複数の要因が複雑に絡み合っていることが予想される。一般に、これら様々な要因が回復過程に与える影響度を理論的に決定することは困難であるため、実際に被害をもたらした自

然災害を対象として、経済の回復過程の事後分析を積み重ねるアプローチが肝要となる。

こうした問題意識の下、本研究では、京都大学防災研究所と電力中央研究所が共同で実施したアンケート調査（中野ら、2012）をもとに、時間的に変化する様々な要因を説明変数とする、生産能力の回復曲線の統計モデルを構築することを試みる。この回復曲線は、地震災害の発生直後から企業の応急復旧に至るまでを対象とした経済的影響分析に活用されることが期待される。まず、自然災害による経済被害の推計や企業の復旧活動に関する既往研究をレビューする。そのうえで、本研究における企業の回復力の分析の枠組みを概説する。次に、本研究で提案する回復関数とそのパラメーターの推計方法について説明を行う。さらに、作成した回復関数モデルを実際に推計した結果を紹介する。また、得られた結果に基づき、企業の早期復旧に与える諸要因について考察する。

2. 産業部門の生産能力の推計に関する既往研究

企業の脆弱性に関する既往研究として、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く続けられてきた。さらに近年では、これら構造的な破壊を対象として発展してきたフラジリティの概念を、操業水準という「機能」を対象として拡張した研究が進められている。中野ら⁴⁾は、企業の操業水準に関して、産業特性の違いから脆弱性の評価を行っている。

産業の復旧に関する既往研究としては、経済産業省⁵⁾、梶谷ら⁶⁾、仲条ら⁷⁾により、企業毎の復旧速度に影響を及ぼす要因が分析されている。また、上記のような復旧阻害要因の研究のみならず、企業毎の復旧経路を推定する研究も行われている。水害に関しては、木村ら⁸⁾が、事業所被害の構造的性質を、地域特性と業種特性の観点から分析を行っている。しかし、経済被害波及分析の重要なインプットとなる生産能力の回復過程を検討した事例はほとんど存在していない。

3. 生産能力の回復関数モデル

(1) アンケート概要

回復関数モデルを設定するにあたり、京都大学防災研究所と電力中央研究所が共同で実施したアンケート調査（中野ら、2011）の結果を用いる。本研究においては、アンケートに回答した企業の内、製造業 777 社、非製造業 1892 社を対象とし、主に生産設備の復旧過程に関する調査結果を用いる。これは、ライフラインや中間投入などの外部要因の影響を考慮せず、通常通りに供給されていたと仮定した場合における、自社の設備被害や建屋被害等に起因する生産能力の被害、そして、震災直後か

らの時系列的な生産設備の回復に関する設問となっている。また、本アンケート調査には、地震動の大きさ・業種・ライフライン（電気・ガス・水道・通信）の途絶日数・サプライチェーン被害といった、内部ないし外部からの復旧阻害要因に関する設問も含まれている。以上を踏まえた上で、生産設備回復過程に対し、種々の復旧阻害要因の影響を含め、震災後の事業所における回復曲線のモデル設計を行う。

(2) 回復関数の特徴

アンケート調査の結果から、企業の回復曲線の特徴について説明する。図1は、電力途絶日数別に、各企業の回復率の変化を示したものである。電力途絶日数が回復速度に大きく影響を与えていることがわかる。図2からも、大きな建物被害があった企業はそれだけ復旧が遅いことが推測される。このように、回復曲線は被害の程度や種類により異なるため、これら復旧要因、また、復旧阻害要因を含めた回復関数を作成する。

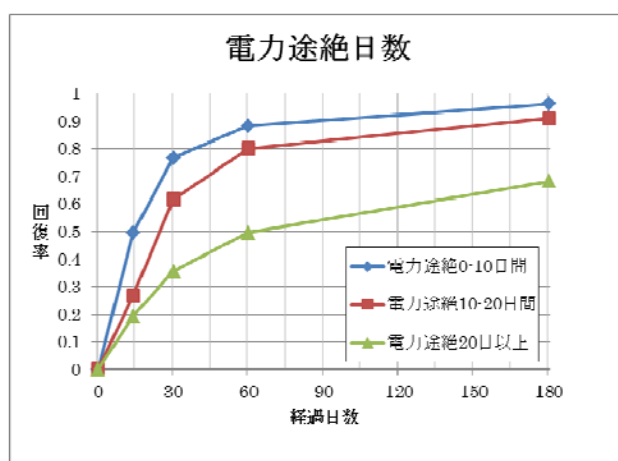


図1 電気途絶日数による回復率の違い

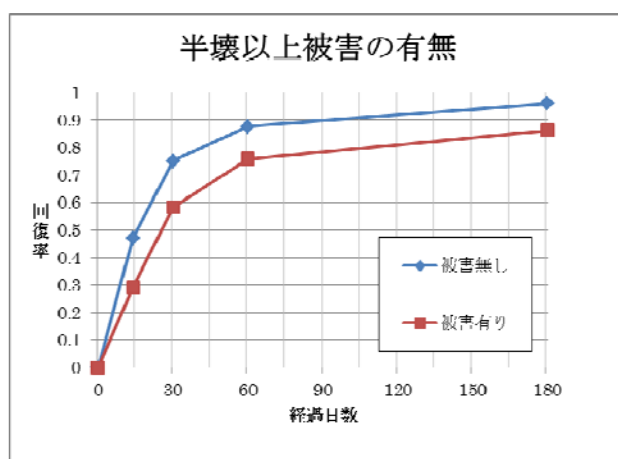


図2 建物被害の大きさによる回復率の違い

(3) 基本となる回復関数の概要

災害が発生すると、業種・被害の大きさ・ライフラインの途絶日数・事前の災害対策の有無等が原因となり、被災企業によって生産能力の回復の仕方が異なる。そこで、企業*i* ($i=1, \dots, I$) の生産能力の回復経路 R を、時刻 t 、そして回復に影響を与える要因 \mathbf{X}_{it} を説明変数に持つ回復関数 f で表現できるものとする。企業により回復経路が異なるため、回復関数は様々な型をとる。ある企業*i* の回復関数が j ($j=1, \dots, J$) 番目の関数型で表される場合、以下の式で表されるとする。

$$R_i(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j) = y_{i0} + (1 - y_{i0})f_j(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j) \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\alpha}_j$ はパラメーターベクトル、 y_{it} は時刻 t における実際の生産設備回復率となる。すなわち式(1)において、 $f_j(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j)$ は各企業の生産能力の減少分の回復率を表している。

回復関数 f の特徴として次のことが挙げられる。まず、生産設備の回復率は0%から100%の区間内で表されるので、災害直後の生産設備稼働率 y_{i0} を企業の回復開始点0 (回復率=0%) とし、災害前の生産設備稼働水準を1とすると、回復関数 f は区間[0, 1]に収まる。さらに、全ての関数型が $t=0$ の時に $f=0$ を満たす。また、企業により回復経路は異なる。そこで本研究では、これらの特徴から、企業*i* が選択する回復関数として以下の5種類の回復関数モデルを想定した

$$f_j(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j) = \begin{cases} f_1(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_1) = 1 - \exp(-\boldsymbol{\alpha}_1 \mathbf{X}_{it} t) & (2) \\ f_2(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_2) = \frac{\exp(-\boldsymbol{\alpha}_2 \mathbf{X}_{it} t)}{1 + \exp(-\boldsymbol{\alpha}_2 \mathbf{X}_{it} t)} & (3) \\ f_3(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_3) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\boldsymbol{\alpha}_3} \mathbf{X}_{it}\right) & (4) \\ f_4(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_4) = \boldsymbol{\alpha}_4 \mathbf{X}_{it} t & (5) \\ f_5(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_5) = 0 & (6) \end{cases}$$

式(2)は指数関数型、(3)はロジスティック関数型、(4)はワイブル関数型を表す。これら関数では、時間の経過とともに設備回復率が最終的には完全回復し、もとの水準1に収束することを意味している。回復経路について、式(2)は企業*i* が災害直後からの回復速度が早い場合を表し、式(3)は回復速度が遅い場合を表している。式(5)は時間に比例して回復が行われる場合を表し、式(6)は災害から時間が経過しても回復が全く行われない

場合を表している。

各関数型の回復勾配は、パラメーターベクトル $\boldsymbol{\alpha}_j$ と説明変数 \mathbf{X}_{it} によって決まる。 \mathbf{X}_{it} について本研究では、既往研究を参考にし、アンケート調査の項目に含まれる「被害規模 (全壊・大規模半壊・半壊)、各種ライフライン (電気・ガス・水道) 途絶日数、各種対策 (BCP 策定・建物の耐震化・代替電力の確保・代替調達先の確保) の有無、災害直後設備稼働率・従業員出勤率、事業所の総従業員数」を説明変数とおいた。

(4) 統計的推計方法

本研究では、回復に影響を及ぼす諸要因 \mathbf{X}_{it} を考慮した回復関数モデルの推計を試みる。以下では、本研究における企業の回復関数モデルを推定するための手法について述べる。

時刻 t において、 j 番目の回復関数を選択した企業*i* の $R_i(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j)$ が示す生産設備稼働率を $R_{it}(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j)$ 、設備回復率を $f_{jt}(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j)$ と表す。この時、企業*i* の設備回復率の実測値を Y_{it} とおくと、 Y_{it} は式(1)より、

$$\begin{aligned} Y_{it} &= \frac{y_{it} - y_{i0}}{1 - y_{i0}} + \varepsilon_{ijt} \\ &= \frac{R_{it}(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j) - y_{i0}}{1 - y_{i0}} + \varepsilon_{ijt} \\ &= f_{jt}(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j) + \varepsilon_{ijt} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。 ε_{ijt} は時刻 t における企業*i* の回復関数

$f_{jt}(t, \mathbf{X}_{it} | \boldsymbol{\alpha}_j)$ と実際の回復率 Y_{it} の誤差項である。しかし、実際には上式は、統計モデルとして[0, 1]の範囲を超える推計値が発生しうることを許容しており、Tobit 回帰を導入するなどの推計上の工夫が必要となる。一方、式(2)～(4)については、以下の誘導系を推計することで、被説明変数の範囲制約の問題を回避することができる。モデルごとに誤差項の定義が異なり、モデル間の適合度の比較は代表的な指標である AIC ではできないため、本研究では適合度の指標として、推計値と観測値の誤差に対する RMSE の比較を行うことで、モデル選択を行う。

式(2)の誘導系

$$\varepsilon_{ijt} = \log(1 - Y_{it}) - (\boldsymbol{\alpha}_j \mathbf{X}_{it}) t \quad (8)$$

式(3)の誘導系

$$\varepsilon_{ijt} = \log\left(\frac{Y_{it}}{1 - Y_{it}}\right) - (\boldsymbol{\alpha}_j \mathbf{X}_{it}) t \quad (9)$$

式(4)の誘導系

$$\varepsilon_{ijt} = \frac{1}{\log \frac{t}{\alpha}} \log \left(-\frac{\log(1 - Y_{ijt})}{\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\alpha_j X_{it}}} \right) \quad (10)$$

式(2)や式(3)は、パラメーターの線形結合で表されており、一般化線形モデルと呼ばれる統計モデルである。

4. 生産能力の回復関数モデルの推計

データの一次分析から式(5)や(6)に相当するサンプルは極めて少ないという結果が得られた。以下では式(2)、(3)、(4)を用い、産業別に復旧に影響を与えると考えられる要因を全て含んだ関数について推計を行う。さらに、各説明変数の有意性を検定し、統計的に有意な説明変数のみで構成された回復関数を推計する。表2は、製造業を対象に全ての説明変数を推計した結果を、表3は有意な変数のみを用いて推計した結果をそれぞれ示す。

製造業について、有意となった説明変数について考える。3つの関数型全てに対して有意性を示した説明変数は、「電力途絶日数」である。また、「災害直後設備稼働率」、「半壊以上の建物被害」の2つも、ロジスティック型と指数型回復関数において、有意な変数となった。「半壊以上の建物被害」については、ここでは半壊以上(全壊・大規模半壊・半壊)の建物の有無を示すダミー変数を意味する。各関数型の RMSE を比較すると、ワイブル型関数が最も当てはまりの良いモデルとなった。

非製造業について、ロジスティック型と指数型の2つの関数型で、製造業同様に「災害直後の設備稼働率」、「半壊以上の建物被害」、「電力途絶日数」について有意性が示されている。この時、各関数型の RMSE を比較すると、製造業と同じく、ワイブル型関数が最も当てはまりの良いモデルとなった。また、各関数型の RMSE は製造業で3つの関数型の RMSE を比較した時よりも小さな値を示した。非製造業における回復関数は製造業に比べ高い適合度を示す推計結果となった。

各産業について推計した結果、製造業、非製造業での推計結果と同じく、「災害直後設備稼働率、半壊以上の建物被害、電力途絶日数」の3つが主に有意性を示す説明変数となった。また、「ガス途絶日数」が有意性を示す産業も見られた。RMSE の比較による各関数型の適合度の分析結果は、ほぼ全ての産業で指数型が最も当てはまりの良いモデルとなった。また、「加工組立型産業」、「その他製造業」の2つで、ワイブル型が最も当てはまりの良いモデルとなった。

表2 製造業の回復関数の推計結果 (全ての説明変数)

サンプル数: 409		*10%有意、**5%有意、***1%有意	
ロジスティック型	パラメータ	t値	p値
定数項***	0.1149	17.111	0.000
災害直後設備稼働率	0.0001	0.680	0.497
半壊以上の建物被害***	-0.0267	-2.667	0.008
電力途絶日数***	-0.0021	-2.693	0.007
水道途絶日数	0.0000	-0.008	0.993
ガス途絶日数	-0.0006	-1.179	0.239
対策の有無	0.0077	0.836	0.404
耐震化	-0.0069	-0.481	0.631
BCP策定	0.0025	0.117	0.907
総従業員数	-0.0551	-1.047	0.296
σ	13.2234	63.953	0.000
L	-8181.895	RMSE	0.400

指数型	パラメータ	t値	p値
定数項	0.1172	28.205	0.000
災害直後設備稼働率**	0.0001	2.120	0.035
半壊以上の建物被害***	-0.0207	-3.349	0.001
電力途絶日数***	-0.0017	-3.567	0.000
水道途絶日数	0.0000	-0.187	0.852
ガス途絶日数	-0.0004	-1.393	0.164
対策の有無	0.0045	0.797	0.426
耐震化	-0.0058	-0.649	0.517
BCP策定	0.0012	0.095	0.924
総従業員数	-0.0528	-1.622	0.106
σ	8.1868	63.953	0.000
L	-7201.374	RMSE	1.281

ワイブル型	パラメータ	t値	p値
定数項***	1.5944	3.574	0.000

表3 製造業の回復関数の推計結果 (有意な変数のみ)

サンプル数: 409			
ロジスティック型	パラメータ	t値	p値
定数項	0.1176	23.269	0.000
半壊以上の建物被害	-0.0270	-2.730	0.007
電力途絶日数	-0.0027	-4.373	0.000
σ	13.2364	63.953	0.000
L	-8183.900	RMSE	0.401

指数型	パラメータ	t値	p値
定数項	0.1167	31.679	0.000
災害直後設備稼働率	0.0002	2.276	0.023
半壊以上の建物被害	-0.0211	-3.441	0.001
電力途絶日数	-0.0021	-5.463	0.000
σ	8.1985	63.953	0.000
L	-7204.317	RMSE	0.377

ワイブル型	パラメータ	t値	p値
定数項	1.7889	5.410	0.000
電力途絶日数	0.0977	2.386	0.017
スケールパラメータ	44.2583	215.793	0.000
σ	10.1898	63.953	0.000
L	-7648.969	RMSE	0.365

図3に回復曲線の推計結果の例として、基礎素材型産業を示す。中央値との乖離は最大で0.1程度となっているが、サンプルの分割方法に恣意性が残るなど、検討

の余地が多い。今後、適切な関数形、データの変換方法、説明変数などを含めサンプルの分割方法等についてもより詳細に分析を進め、代表的な回復過程を表現するための統計モデルを検討していく必要がある。

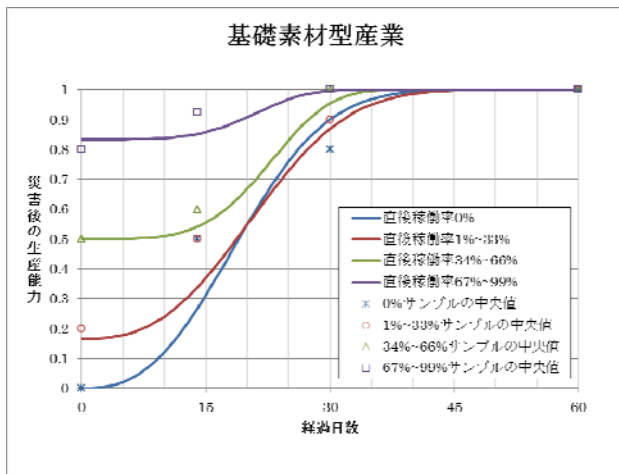


図3 災害直後設備稼働率毎に推計を行った生産能力回復曲線

5. おわりに

災害からの企業の生産能力回復過程のモデル化は、災害の経済被害を推計し、適切な対策を実施する上で重要な課題となっている。そこで、本研究では、東日本大震災後の企業アンケート調査をもとに、時間的に変化する様々な要因を説明変数とする、生産能力の回復曲線の統計モデルを構築することを試みた。この回復曲線は、地震災害直後から企業の応急復旧に至るまでを対象とした経済的影響分析を行うためのベンチマークモデルとしての利用が期待される。

まず、3. では、東日本大震災後のアンケート調査結果をもとに、被災企業の回復経路パターンを整理し、こうした生産能力の回復パターンに影響を及ぼす要因を設定した。具体的には、サンプル群をライフラインの途絶日数等の要因変数の値に応じて複数に分割し、それぞれの回復過程の違いについて分析を行った。この分析を通じて、いくつかの要因が企業の復旧に影響を与えている可能性が示された。次いで、企業の生産能力の回復経路を表現するための回復関数について検討を行った。回復曲線の有すべき形状等の条件を整理し、信頼性工学で用いられている代表的なハザード関数を参考に、関数型の異なる5つの回復モデルを抽出した。さらに、利用するデータの特性を考慮し、回復関数の統計的推計手法について整理を行った。

4. では、3. で整理を行った回復関数の推計を行った。まず、企業ごとに異なる回復関数を適用し、各サンプル

に最も適合する関数型について分析を行った。適合度の指標としてAICを比較した結果、指数型やワイブル型の時間の経過に対して非線形的に回復するモデルによって説明される企業が多く、線形に回復する企業は少ないことが示された。次に、サンプル群を製造業と非製造業、また、各産業に分類し、各サンプル群に対して適合度の高い回復モデルの推計を行った。説明変数としては、時間経過以外に各サンプルの属性や直面した被害状況などの複数の説明変数を与え、それぞれの説明変数の有意性の検討やRMSE指標による関数型間の適合度の比較を行った。これにより、産業によって、指数型関数の適合度が高い場合と、ワイブル型関数の適合度が高い場合があることがわかった。また、指数型関数については、電力の復旧日数や、建物被害の有無などの回復過程に有意に影響を及ぼす変数が特定され、符号条件を満たす結果が得られた。ワイブル型関数については、有意な説明変数が特定されなかった。このように東日本大震災の企業の回復データをもとに回復関数に関する一次分析を実施し、一定の知見が得られたが、サンプルの分割の必要性、関数形の選択、説明変数の導入方法などを含め、さらなる検討を実施していく必要がある。

参考文献

- 1) 産経ニュース：東海地震の30年確率88%に上昇,2012/1/11
<http://sankei.jp.msn.com/affairs/news/120111/dst12011119360006-n1.htm>
- 2) 芦屋恒憲,地主敏樹：震災と被災地産業構造の変化:被災地域産業連関表の推定と応用,国民経済雑誌,Vol.183,No1,pp79-97,2001
- 3) 小池淳司,大田垣聡：スマトラ沖地震の経済被害評価,土木計画学研究・論文集,Vol.23,No2,pp273-280,2006
- 4) 中野一慶,梶谷義雄,多々納裕一：地震災害後の企業調査結果を用いた産業部門の生産能力のフラジリティ曲線の推定,土木計画学研究・講演集,Vol.42,2010
- 5) 経済産業省,東日本大震災後の産業実態緊急調査,2011/4
<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110426005/20110426005-2.pdf>
- 6) 梶谷義雄,中野一慶,多々納裕一,朱佳慶：2007年新潟県中越沖地震による産業部門への経済的影響—企業の被害実態と災害対応効果—,地域安全学会論文集,No.10,2008/11
- 7) 仲条仁,藤井琢哉,長澤瑞子,石川良文,東日本大震災における被災企業(製造業)の実態把握と交通インフラ被災の影響分析,土木計画学研究・講演集,Vol.45,2012
- 8) 木村秀治,石川良文,片田敏孝,浅野和広,佐藤尚：都市型水害における事業所被害の構造的性質に関する研究,土木学会論文集D,Vol.63,No2,pp88-100,2007