

地震による経済被害推計に関する研究 ～ 福島県沖の地震を対象とした操業能力の回復過程のモデル化に関する検討～

清水 智*
shimizu-satoshi@oyonet.ryo.co.jp
山崎 雅人*
yamazaki-masato@oyonet.ryo.co.jp
井出 修*
ide-osamu@oyonet.ryo.co.jp
劉 歆**
huan.liu.b05@kyoto-u.jp
梶谷 義雄***
kajitani.yoshio@kagawa-u.ac.jp
多々納 裕一****
tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

応用地質株式会社 共創 Lab
〒101-8486 東京都千代田区神田美土代町 7 番地

* 応用地質株式会社 共創 Lab
** 京都大学防災研究所 特定助教
*** 香川大学創造工学部 教授
**** 京都大学防災研究所 教授

共創 Lab ワーキングペーパーは、応用地質株式会社 共創 Lab の職員および外部研究者の研究成果をとりまとめたものです。研究成果については、内外の研究機関や研究者・実務者等から幅広くコメントを頂戴することを意図しています。ただし、本論文に記載された内容や意見は、応用地質株式会社の公式見解を示すものではありません。本ワーキングペーパーに対するご意見・ご質問やお問い合わせは、執筆者までお願いします。商用目的を含めて転載・複製を行う場合は、予め応用地質株式会社の共創 Lab までご相談下さい。転載・複製を行う場合は、出所を明記して下さい。

地震による経済被害推計に関する研究 ～福島県沖の地震を対象とした 操業能力の回復過程のモデル化に関する検討～¹

清水 智 山崎 雅人 井出 修 劉 歆 梶谷 義雄 多々納 裕一

2025年4月

【要　旨】

地震に対する備えは、地震が発生した場合の個人の生命の安全、財産の保全だけでなく、地域の社会・経済活動を担う産業部門に対する地震の影響を考えることが重要である。そのためには地震による経済被害推計が必要となる。地震による経済被害の推計ができれば、被災地の社会・経済活動へ与える影響や被災地外への波及の可視化、地震被害がもたらす財政への影響のほか、減災策を実施した場合の経済的効果等、事前・事後の様々な場面での利活用が考えられる。

地震による短期的な経済被害推計の基本的な枠組みは梶谷ほか(2013)¹⁾やTatano and Kajitani(2021)²⁾により示されている。本研究では、これら経済被害推計の枠組みの中の企業の操業能力のリカバリーカーブ(発災からの経過時間と復旧確率の関係)を、2022年福島県沖の地震の被害データから推定した。具体的には、セミ・マルコフ過程を利用してライフライン復旧期間を考慮した操業能力のリカバリーカーブを推定した。本手法の特徴は、停電・断水・断ガスの復旧期間が反映可能な点にある。なお、本稿はセミ・マルコフ過程の滞在時間分布を状態毎に独立に推定してリカバリーカーブをモデル化した清水ほか(2023)³⁾に関し、滞在時間分布のパラメータを同時推定することによりモデルの改善を図ったものである。

本手法を適用することで得られるリカバリーカーブは、地震による経済被害推計のほか、事業中断リスクの定量化、事業継続計画における目標復旧時間の設定、水道管の耐震化による事業所の操業能力のリカバリーの早期化等の評価が可能であり、企業・自治体の様々な場面におけるリスクマネジメントへの活用が期待される。

¹本稿で示されている見解は、応用地質株式会社の公式見解を示すものではない。但し、あり得べき誤りは筆者個人に属する。

1. はじめに

我が国では、1923年の関東大震災、1995年阪神・淡路大震災、2011年東日本大震災に代表されるように地震によって度々大きな被害を受けてきた。大きな被害を受ける度、構造物の耐震基準が制定・改訂され、地震に対する脆弱性は改善されてきたものの、南海トラフの地震に代表される大規模な海溝型地震や首都直下地震等の発生が懸念されており、今後も地震に対する備えを充実させておくことは重要である。

地震に対する備えは、地震が発生した場合の個人の生命の安全、財産の保全のみならず、地域の社会・経済活動を担う産業部門への影響を考えることが重要である。地震による産業部門への影響は経済被害（特にフロー被害）で測ることが望ましい。地震による経済被害の推計ができれば、被災地の社会・経済活動へ与える影響や被災地外への波及の可視化、地震被害がもたらす財政への影響のほか、減災策を実施した場合の経済的効果等、事前・事後の様々な場面での利活用が考えられる。

地震による経済被害推計の方法論を提示した研究に梶谷ほか(2013)¹⁾や Tatano and Kajitani(2021)²⁾がある。これらの研究では短期的な経済被害推計の枠組みが示されている。これらの先行研究^{1,2)}に基づく地震による経済被害の推計フローを図1-1に示す。

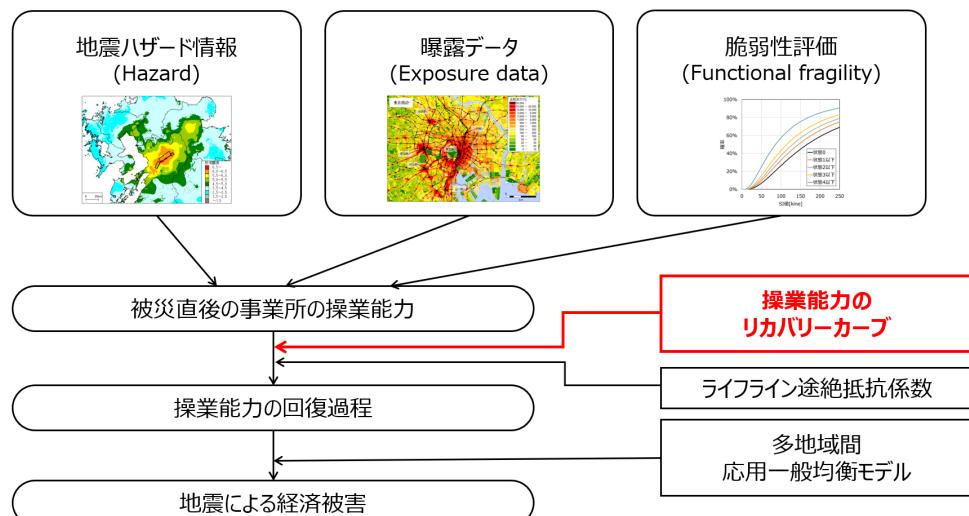


図 1-1 地震による経済被害の推計フロー

(赤字は本研究の検討範囲を示す)

地震による経済被害は被災直後の生産水準の低下とその回復状況の推移に基づき推計される。被災後の生産水準の推移は、被災地域の事業所群の操業能力、ライフラインの被害・復旧状況、ライフライン途絶抵抗係数、部品・材料等の不足、需要の変化等の様々な要因に基づき決定され、被災地の事業所の被害状況から単純に決まるものではない。このため、多地域間応用一般均衡モデルを利用して地震による経済被害を推定する手法が提案されており、Kajitani and Tatano(2018)⁴⁾や Tatano and Kajitani(2021)²⁾では東日本大震災による経済被害の推定例が示されている。

一方、応用一般均衡モデルで経済被害を推計しようとした場合、モデルの初期（入力）条件として、被災直後の操業能力（以降「初期操業能力」と称す）やその回復過程が必

要となる。被災事業所の操業能力の回復過程の模式図を図 1-2 に示す。

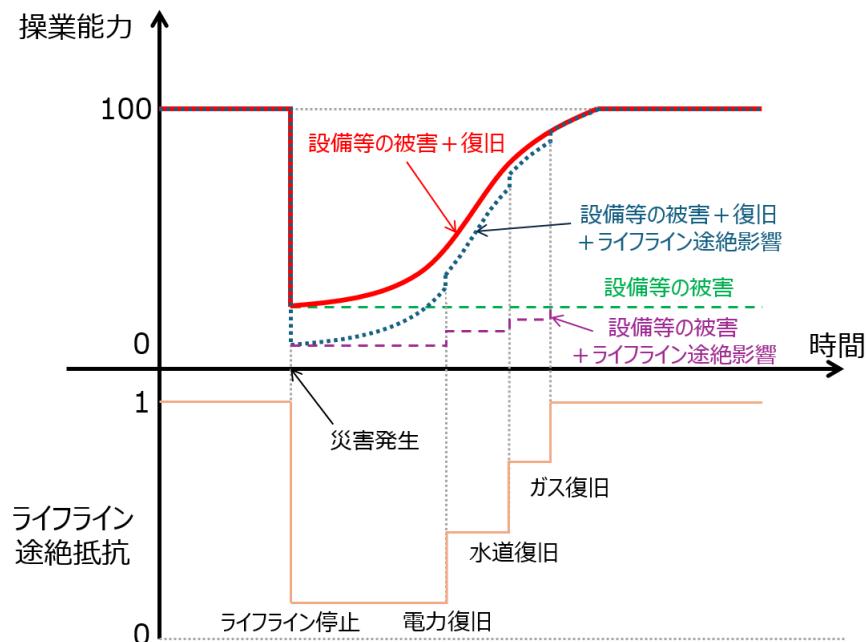


図 1-2 設備等の被害、復旧、ライフライン途絶影響を考慮した操業能力の回復過程
(Tatano and Kajitani (2021)¹⁾ を加筆修正)

操業能力の回復過程は、土地・建物・設備の被害や従業員の出勤支障等（以降、単に「設備等の被害」と称す）の状況、被災事業所の復旧活動による操業能力の復旧状況（以降「復旧」と称す）、電気・水道・ガス等のライフライン途絶・復旧状況（以降「ライフライン途絶影響」と称す）により規定される¹⁾²⁾。

設備等の被害は初期操業能力の水準を規定しており、地震ハザード情報、曝露データ、地震動強さと操業能力の関係を示す機能的フラジリティカーブにより推定される²⁾。もし、被災事業所が復旧活動を実施しない場合は図 1-2 の緑色破線で示されるように、時間が経過しても操業能力は回復しない。被災事業所が復旧活動を行うと図 1-2 の赤線で示されるように操業能力は被災前の水準に向けて回復する。しかし、被災事業所が実際に発揮できる操業能力は、電気・水道・ガスといったライフライン途絶影響を考慮する必要があり、ライフライン復旧状況に応じて図 1-2 の青破線で示されるような回復過程を辿る。ライフライン途絶影響はライフライン途絶抵抗係数により算定される³⁾。

地震による経済被害推計を考える場合、図 1-2 の赤線で示される操業能力の回復過程のモデルが担う役割は重要で、経済被害推計の結果にも大きく影響する。操業能力の回復過程のモデル（以降「リカバリーカーブ」と称す）は、発災からの経過時間と操業能力の関係によりモデル化されている。地震後の操業能力のリカバリーカーブに関する既

²⁾ 操業能力の機能的フラジリティカーブに関する既往研究としては、2004 年新潟県中越地震や 2011 年東日本大震災を対象とした Nakano et al.(2021)⁵⁾ や、2016 年熊本地震や 2022 年福島県沖の地震を対象とした清水ほか(2025)⁶⁾ がある。

³⁾ ライフライン途絶抵抗係数に関する既往研究としては、梶谷ほか(2005a)⁷⁾、梶谷ほか(2005b)⁸⁾、Liu et al.(2021a)⁹⁾ がある。

往研究としては、東日本大震災を対象に生存関数を利用してモデル化した梶谷ほか(2013)¹⁾、熊本地震を対象にセミ・マルコフ過程を利用してモデル化した Liu et al.(2021b)¹⁰⁾などがある。これらの研究により過去の被害地震における操業能力の回復過程が明らかになってきた。一方、機械設備等を修復し操業能力を回復しようとした場合、電気・水道・ガスの確保が必要となる。実際、被災企業における初期の操業阻害要因にライフラインの機能停止が占める割合は大きいことが報告されている¹¹⁾。また、被災工場から操業再開する際の体験談等でも電気・水道といったライフラインの早期確保に尽力している^{12), 13)}。このような実態を考えると、リカバリーカーブの構築にはライフラインの復旧期間を考慮する必要があると考えられる。このような観点から、清水ほか(2023)³⁾では、セミ・マルコフ過程を利用してライフラインの復旧期間を考慮したリカバリーカーブを構築した。ただし、清水ほか(2023)³⁾ではセミ・マルコフ過程の滞在時間分布を推定する際、状態毎に独立にパラメータ推定を行っている。本研究では、これを同時推定しモデルの改善を図ったものである。

本資料は以下の内容で構成される。

1. 本研究で用いるデータ（第2章）
2. リカバリーカーブの作成方法（第3章）
3. 操業能力の回復時間に影響を与える要因分析（第4章）
4. リカバリーカーブの作成（第5章）
5. まとめと課題（第6章）

2. 本研究で用いるデータ

本研究では 2022 年 3 月に発生した福島県沖の地震における企業の被害実態に関するアンケート調査結果¹⁵⁾を利用した。同調査の概要を表 2-1 に示した。

本研究ではアンケート調査の回答データを整理し、回答企業の事業所毎に表 2-2 に示す形で復旧時間に影響を与える要因分析に使用するデータ項目、操業能力の低下・回復実態やライフラインの被害状況・復旧日数等に関するデータセット（以降、「データセット」と称す）を作成した。データセットの事業所数は 870 件、このうち地震により操業能力が低下した事業所数は 222 件であった。

表 2-1 アンケート調査の概要

| | |
|-----------|--|
| 調査期間 | 2022 年 8 月 1 日～9 月 2 日 |
| 調査対象地域 | 福島県浜通り・中通りの中北部から宮城県南部 にかけての地域 |
| 対象企業 | 【製造業】従業員数 4 人以上の企業 【非製造業】従業員数 6 人以上の企業 |
| 調査内容 | (a)回答企業の属性、(b)被害状況、(c)初期操業能力及びその復旧実態 (d)対策の実施状況とその効果、(e)その他 |
| 送付数 / 回答数 | 6,294 件 / 722 件 |
| 実施主体 | 京都大学防災研究所 |

表 2-2 作成したデータセットの内容

| | | | |
|---|--------------------------|----|------------------------------------|
| 1 | データ No. | 9 | ガス供給停止日数 |
| 2 | 事業所区分 (本社 or 本社以外) | 10 | ライフゲイン停止日数 (停電、断水、ガス供給停止日数の最大値) |
| 3 | 業種 | 11 | 発災直後の操業能力（被災前を 100 とする） |
| 4 | 建物被害有無 | 12 | 操業能力が 25 に回復するのに要した日数 |
| 5 | 設備被害有無 | 13 | 操業能力が 50 に回復するのに要した日数 |
| 6 | 2020 年に対する 2021 年の売上比 | 14 | 操業能力が 75 に回復するのに要した日数 |
| 7 | 停電日数 | 15 | 操業能力が 100 に回復するのに要した日数 |
| 8 | 断水日数 | | |

今回利用するアンケート調査においては、操業能力の時間的推移に関するデータは特定の操業能力の水準まで回復するのに要する時間が取得されている（図 2-1）。このため、以降では表 2-3 に示した 0～4 の 5 段階の「状態」を使って操業能力を示す。加えて、被災直後の状態を「初期状態」と称す。

表 2-3 操業能力と状態の関係

| 状態 S | 操業能力 PCR の範囲 ※被災前を 100 とする |
|--------|-------------------------------|
| 0 | $0 \leq PCR < 25$ |
| 1 | $25 \leq PCR < 50$ |
| 2 | $50 \leq PCR < 75$ |
| 3 | $75 \leq PCR < 100$ |
| 4 | $PCR = 100$ |

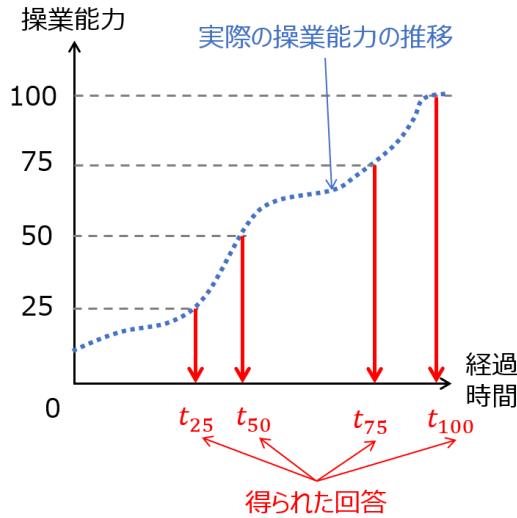


図 2-1 操業能力の回復状況に関するアンケート調査の回答データと実際の操業能力の推移
(図の操業能力 k まで回復するのに要した時間 t_k を取得)

3. リカバリーカーブの作成方法

セミ・マルコフ過程は再生過程とマルコフ過程の両方の性質を有する一般化された確率過程で信頼性の分野で多く適用されている¹⁶⁾。本研究ではセミ・マルコフ過程を地震後の操業能力の回復過程に適用した。図 3-1 に概念図を示す。セミ・マルコフ過程は連続時間 $t \geq 0$ 上で定義される離散状態の確率過程である。本研究で使用するアンケート調査データにおいては、操業能力は表 2-3 に示す 5 つの状態に区分されおり、発災からの時間の経過に伴う操業能力の回復過程は操業能力の状態の推移により表現される。以降では、状態の推移確率、滞在時間分布、リカバリーカーブのそれぞれのモデル化の方法について示す。

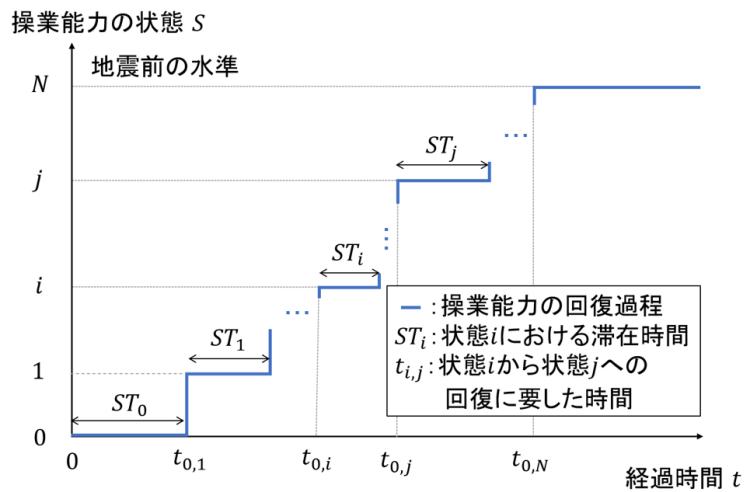


図 3-1 セミ・マルコフ過程を利用した操業能力の回復過程のモデル化

3.1. 推移確率

状態*i*から状態*j*への推移確率 p_{ij} は式(1)で表される。なお、本研究では先行研究⁹⁾を参考に推移確率は定常と仮定した。

$$p_{ij} = \text{Prob}(S(t^+) = j | S(t) = i) = \frac{\text{Prob}(S(t^+) = j, S(t) = i)}{\text{Prob}(S(t) = i)} \quad (1)$$

ここで、 p_{ij} ：状態*i*から状態*j*への推移確率、 t^+ ：状態*j*へ推移した時間（ただし $t^+ > t$ ）、 $S(t)$ ：経過時間*t*における状態、を示す。

なお、一般的なセミ・マルコフ過程では経過時間*t*における状態 $S(t)$ が回復する方向だけでなく低下する方向にも推移する。しかし、地震後の操業能力の回復過程を考えた場合、需要の減少や材料の供給不足等の外的要因に起因する稼働率の低下は発生するが、大規模な余震でもない限り操業能力自体が低下することは考えにくい。このため、任意の状態*i*からの推移は操業能力が回復する方向にのみ推移するものと仮定した。よって、状態*i*から状態*j*への推移確率 p_{ij} は式(2)により算出される。なお、推移確率 p_{ij} は式(3)を満足する。

$$p_{ij} = \begin{cases} N_{ij}/N_i & \cdots i < j \\ 0 & \cdots i \geq j \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_j (p_{ij}) = 1 \quad (3)$$

ここで、 p_{ij} ：状態*i*から状態*j*への推移確率、 N_{ij} ：状態*i*から状態*j*へ推移した事業所数、 N_i ：状態*i*に滞在した事業所数、を示す。

3.2. 滞在時間分布

セミ・マルコフ過程で操業能力の回復過程をモデル化した場合、回復速度を決める要因に各状態の滞在時間がある。本研究では、この滞在時間をアンケート調査で得られた操業能力の回復期間のデータから確率分布でモデル化する。滞在時間の確率分布は、ワイブル分布と指数分布のうち、最も適切な（AICが最も小さくなった）確率分布を滞在時間分布として用いた。確率分布のパラメータ推定には最尤法を用いた。尤度関数を式(4)に、対数尤度関数を式(5)に示す¹⁰⁾。

$$L = \prod_{K=1}^N \prod_i \prod_j [f_i(ST_i^{(K)}) p_{ij}]^{\delta_{ij}^{(K)}} \quad (4)$$

$$\ln(L) = \sum_{K=1}^N \sum_i \sum_j \delta_{ij}^{(K)} [\ln(f_i(ST_i^{(K)}) p_{ij})] \quad (5)$$

ここで、 L : 尤度、 $ST_i^{(K)}$: 事業所 K の状態*i*の滞在時間、 $f_i(ST_i)$: 状態*i*の滞在時間の確率密度関数、 p_{ij} : 状態*i*から状態*j*への推移確率（式(2)）、 $\delta_{ij}^{(K)}$: 事業所 K の指標（事業所 K が状態*i*から状態*j*へ推移する場合は1, そうでない場合は0となる）を示す。

式(6)(7)には候補とした確率分布の確率密度関数を示す。

- ワイブル分布
$$f_i(t) = \frac{\lambda_i}{\varphi_i} \left(\frac{t}{\varphi_i}\right)^{\lambda_i-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\varphi_i}\right)^{\lambda_i}\right\} \quad (6)$$

- 指数分布
$$f_i(t) = \lambda_i \exp(-\lambda_i t) \quad (7)$$

ここで、 λ_i 、 φ_i : 状態*i*の滞在時間を表す確率分布のパラメータ、を示す。

3.3. リカバリーカーブ

滞在時間の確率分布が得られれば、推移確率を利用し経過時間*t*において状態*i*から状態*j*以上への回復確率 $R_{i,j}(t)$ が得られる。

状態*i*から状態*j*以上への回復に要した時間 $t_{i,j}$ は状態*l*の滞在時間 ST_l を利用し式(8)で表される。また、状態*i*の滞在時間の確率密度関数、累積分布関数は式(9)(10)で表される。

$$t_{i,j} = \sum_{l=i}^{j-1} ST_l \quad (8)$$

$$f_i(ST_i) = \text{Prob}(ST_i = t | S(t) = i) \quad (9)$$

$$F_i(ST_i) = \text{Prob}(ST_i \leq t | S(t) = i) = \int_0^t f_i(ST_i) d(ST_i) \quad (10)$$

ここで、 $f_i(ST_i)$: 状態*i*の滞在時間の確率密度関数、 $F_i(ST_i)$: 状態*i*の滞在時間の累積分布関数、 $S(t)$: 時刻*t*における状態、を示す。

時刻*t*における状態*i*から状態*j*以上への回復確率 $R_{i,j}(t)$ は、図 3-1 から式(11)で表され、さらに式(8)から式(12)のように書き換えられる¹⁰⁾。

$$R_{i,j}(t) = \text{Prob}(S(t) \geq j, t_{i,j} \leq t | S(t_s) = i) \quad (11)$$

$$R_{i,j}(t) = \text{Prob}(\sum_{l=i}^{j-1} ST_l \leq t | S(t_s) = i) = \int \cdots \int_{\sum_l ST_l \leq t} \prod_{l=i}^{j-1} f_l(ST_l) d(ST_l) \quad (12)$$

ここで、 ST_l : 状態*l*の滞在時間、 S : 操業能力の状態、 t_s : 任意の操業能力の状態の開始時間、 $f_l(ST_l)$: 状態*l*の滞在時間 ST_l の確率密度関数、 N : 操業能力が 100%回復した状態 (= 4)、を示す。

時刻*t*と $R_{i,j}(t)$ の関係を示す曲線が本研究におけるリカバリーカーブとなる。

4. 操業能力の回復時間に影響を与える要因分析

福島県沖の地震のアンケート調査結果より作成されたデータセットから滞在時間に影響を与える要因について分析した。分析の主目的は、ライフラインの復旧日数が操業能力の回復に要した時間に影響を与えているかどうかを確認することである。加えて、他の要因が回復時間に影響を与えた可能性についても確認する。具体的には、状態*i*の滞在時間 ST_i を被説明変数とした重回帰分析を行い、説明変数が有意であるか否かを確認した。なお、滞在時間 ST_i は被災直後だけでなく推移後のデータも含むこと、滞在時間は被災前の水準まで回復する時間とは異なることに留意されたい。ここでは、データセットのうち操業能力が状態*i*となった時点においてライフライン（電気・水道・ガス）の全てが使用可能な「タイプ1」と、いずれかが使用不可能でライフラインの復旧が必要な「タイプ2」の2種類実施した。回帰式を式(13)(14)に示す。

■ タイプ1 $\ln(ST_i) = \beta_{0,i} + \beta_{1,i}D_{bldg} + \beta_{2,i}D_{fcl} + \beta_{3,i}DM + \beta_{5,i}R_s$ (13)

■ タイプ2 $\ln(ST_i) = \beta_{0,i} + \beta_{1,i}D_{bldg} + \beta_{2,i} + \beta_{3,i}DM + \beta_{4,i}\ln(R_{ewg,i}) + \beta_{5,i}R_s$ (14)

ここで、 ST_i ：状態*i*の滞在時間[日]、 D_{bldg} ：建物被害有無(有：1, 無：0)、 D_{fcl} ：設備被害有無(有：1, 無：0)、 DM ：地震による需要減少有無(有：1, 無：0)、 $R_{ewg,i}$ ：操業能力が状態*i*となった時点におけるライフライン残復旧日数[日]、 R_s ：2020年に対する2021年の売上比率、 $\beta_{k,i}$ ：状態*i*の回帰係数($k = 0, 1, \dots, 5$)、を示す。なお、ライフライン残復旧日数は、電気、水道、ガスの復旧日数で最も長いものを用いた。

ここでの「ライフライン残復旧日数」とは、発災時からライフラインが復旧するまでの期間を表しているのではなく、図4-1に示すように操業能力が状態*i*となった時点におけるライフラインの残復旧日数を示している点に注意が必要である。

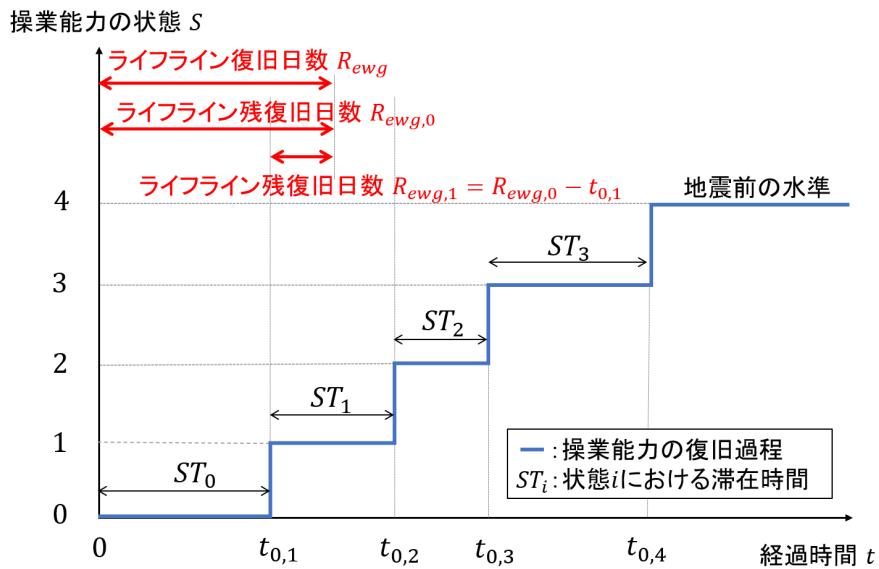


図4-1 ライフライン残復旧日数 $R_{ewg,i}$ の考え方

得られた回帰係数を表 4-1 に示した。タイプ 2 では、操業能力が状態*i*となった時点におけるライフライン残復旧日数 $R_{ewg,i}$ の回帰係数は正で、*p*値も 5%未満であり、滞在時間の長さと正の相関が認められた。また、設備被害有無 D_{fcl} は状態 1 (ST_1) のみ有意水準 10%未満となった正の係数が求まったものの、それ以外の状態では有意な係数は求まらなかった。また、建物被害有無 D_{bldg} については有意な係数は求まらなかった。これは、2022 年の福島県沖の地震は建物被害が比較的軽微であり、今回用いた調査データ¹⁴⁾に操業能力に大きな影響を与えるようなデータが十分に含まれていないためと考えられる。

以上より、以降ではセミ・マルコフ過程における滞在時間の確率分布をライフライン復旧日数で表現するモデルを作成することとした。

表 4-1 重回帰分析の結果

(a) タイプ 1

| | | ST_0 | ST_1 | ST_2 | ST_3 |
|-----------|------------|----------|--------|----------|----------|
| β_0 | 定数項 | 1.265 | 0.517 | 0.919 | 0.972 * |
| β_1 | D_{bldg} | 0.502 | 0.210 | -1.164 * | -0.227 |
| β_2 | D_{fcl} | 0.535 | 0.222 | 0.362 | 0.211 |
| β_3 | DM | -0.999 * | -0.232 | 0.518 | 0.694 ** |
| β_5 | R_s | -0.491 | 0.578 | 1.185 | 0.970 * |
| データ数 | | 25 | 28 | 61 | 156 |

(b) タイプ 2

| | | ST_0 | ST_1 | ST_2 | ST_3 |
|-----------|------------------|-----------|---------|----------|----------|
| β_0 | 定数項 | -0.743 | -0.768 | 0.924 | 2.112 * |
| β_1 | D_{bldg} | -0.229 | -0.405 | -0.189 | 0.393 |
| β_2 | D_{fcl} | 0.286 | 0.879 * | 0.054 | -0.051 |
| β_3 | DM | 0.239 | 0.814 * | 0.603 | -0.247 |
| β_4 | $\ln(R_{ewg,i})$ | 0.775 *** | 0.556 * | 0.654 ** | 0.916 ** |
| β_5 | R_s | 0.620 | 0.880 | -0.354 | -1.522 |
| データ数 | | 29 | 20 | 34 | 47 |

※ 回帰係数の右肩の記号は *p* 値の範囲を示す。

*** : $p < 0.001$ 、** : $0.001 \leq p < 0.01$ 、* : $0.01 \leq p < 0.05$ 、* : $0.05 \leq p < 0.1$

5. リカバリーカーブの作成

5.1. 滞在時間分布のモデル化

リカバリーカーブの作成にあたっては、状態*i*の滞在時間の確率分布を推定する必要がある。本研究では、操業能力が状態*i*となった時点で「電気・水道・ガスの全てが使用可能な場合」(タイプ1)と、「いずれかが使用不可能な場合」(タイプ2)に分け、滞在時間分布をモデル化した。

5.1.1. タイプ1

福島県沖の地震のアンケート調査結果¹⁵⁾から作成されたデータセットのうち、操業能力が状態*i*となった時点で電気・水道・ガスの全てが使用可能な事業所のデータのみ利用しモデル化した。表5-1に得られた確率分布のパラメータ、対数尤度 L_1 、AIC(赤池情報量規準)の値を、図5-1には得られた確率分布と実データとの比較を示した。

その結果、指数分布よりもワイブル分布のほうがAICの値が小さく、実データとモデルが比較的整合していることが確認できた。以降、タイプ1についてはワイブル分布を滞在時間の確率分布として用いることとした。

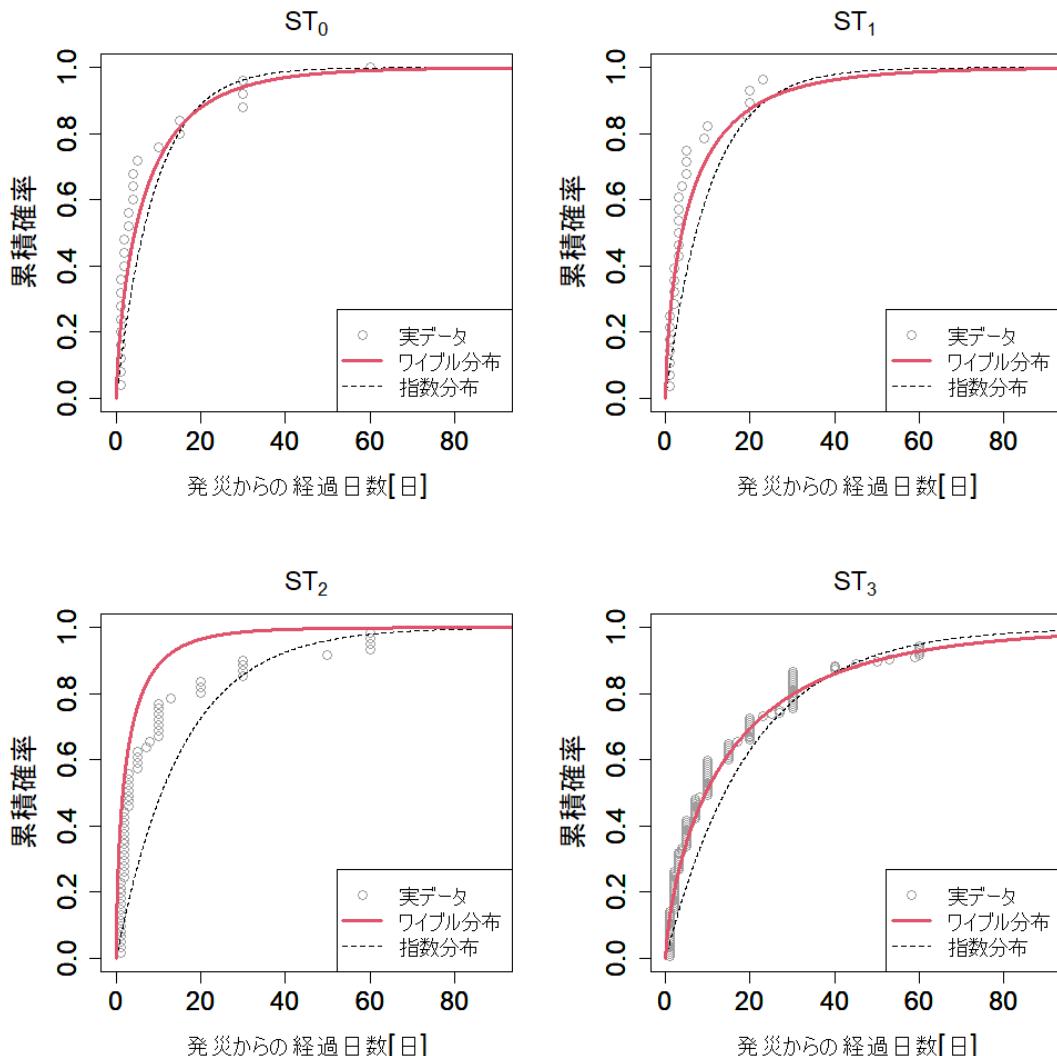


図5-1 推定された滞在時間分布と実データの比較（タイプ1）

表 5-1 滞在時間分を示す確率分布のパラメータ（タイプ 1）

| | | ワイブル分布 | 指数分布 | データ数 |
|-----------------|----------------|------------|-----------|------|
| ST ₀ | φ ₀ | 7.189 ** | | 132 |
| | λ ₀ | 0.730 *** | 0.110 *** | |
| ST ₁ | φ ₁ | 6.644 ** | | 132 |
| | λ ₁ | 0.664 *** | 0.097 *** | |
| ST ₂ | φ ₂ | 2.818 ** | | 132 |
| | λ ₂ | 0.616 *** | 0.065 *** | |
| ST ₃ | φ ₃ | 15.766 *** | | 132 |
| | λ ₃ | 0.726 *** | 0.050 *** | |
| L | | -782.63 | -851.62 | |
| AIC | | 1579.25 | 1709.30 | |

※ パラメータの右肩の記号は p 値の範囲を示す。

*** : $p < 0.001$ 、** : $0.001 \leq p < 0.01$ 、

* : $0.01 \leq p < 0.05$ 、. : $0.05 \leq p < 0.1$

5.1.2. タイプ 2

表 4-1 の重回帰分析の結果から、任意の状態 i となった時点でのライフライン残復旧日数が滞在時間と正の相関があることが確認された。このため、タイプ 2 では一般化線形モデルを用いた。以降では、一般化線形モデルに用いる被説明変数 ST_i の確率分布、被説明変数の変動を説明する系統的部分（線形予測子）、リンク関数について示す。

被説明変数の確率分布はタイプ 1 と同様にワイブル分布と指数分布の 2 種類（式(6)(7)）を使ってパラメータ推定を行い、最もあてはまりの良い分布を最終的に用いることとした。線形予測子は状態 i のライフライン残復旧日数 $R_{ewg,i}$ を説明変数として用いた線形関数を設定した。

$$\mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}_i = \beta_{i,1} + \beta_{i,2} \ln(R_{ewg,i}) \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{x} : 説明変数、 $\boldsymbol{\beta}_i$: 状態 i のパラメータ、で太字はベクトル、T は転置を示す。

それぞれの確率分布のリンク関数（パラメータと線形関数の関係）は式(16)(17)で示される。

■ ワイブル分布 $\varphi_i \Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda_i}\right) = \exp(\mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}) \quad (16)$

■ 指数分布 $\frac{1}{\lambda_i} = \exp(\mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}) \quad (17)$

以上で示した確率分布とリンク関数を利用し、確率分布毎に最尤法によりパラメータを推定した。表 5-2 にパラメータ推定結果一覧と AIC の値を示した。

表 5-2 滞在時間分を示す確率分布のパラメータ（タイプ 2）

| | | | ワイブル分布 | 指數分布 |
|-----------------|---------------|-------------|-----------|-----------|
| ST ₀ | λ_0 | | 1.647 *** | |
| | $\beta_{0,1}$ | 定数項 | 0.311 | 0.258 |
| | $\beta_{0,2}$ | ライフライン残復旧日数 | 0.687 *** | 0.714 *** |
| ST ₁ | λ_1 | | 1.067 *** | |
| | $\beta_{1,1}$ | 定数項 | 1.995 *** | 1.994 *** |
| | $\beta_{1,2}$ | ライフライン残復旧日数 | -0.005 | -0.005 |
| ST ₂ | λ_2 | | 0.695 *** | |
| | $\beta_{2,1}$ | 定数項 | 2.697 *** | 2.831 *** |
| | $\beta_{2,2}$ | ライフライン残復旧日数 | 0.022 | 0.034 * |
| ST ₃ | λ_3 | | 0.647 *** | |
| | $\beta_{3,1}$ | 定数項 | 3.017 *** | 3.146 *** |
| | $\beta_{3,2}$ | ライフライン残復旧日数 | -0.019 | -0.012 |
| L | | | -701.85 | -733.81 |
| AIC | | | 1427.69 | 1483.62 |
| データ数 | | | 90 | |

※ パラメータの右肩の記号は p 値の範囲を示す。

*** : $p < 0.001$ 、** : $0.001 \leq p < 0.01$ 、* : $0.01 \leq p < 0.05$ 、· : $0.05 \leq p < 0.1$

2 つの推定結果の中で、AIC が小さくなったワイブル分布をタイプ 2 の滞在時間分布として採用した。なお、本研究ではワイブル分布が採用されたが、異なる地震の被害データの利用やモデル選択の考え方の変更した場合、滞在時間の確率分布は異なる可能性がある。被災データを継続的に収集し分析事例を増やしながら、確率分布の妥当性の検討を進めていく必要があり、この点は今後の課題である。

また、ライフライン残復旧日数のパラメータは状態 0 では有意な正の係数が得られた。このことは被害データに基づくと、被災直後の操業能力が 25%未満となる被害が大きい事業所においてライフライン残復旧日数が操業能力の回復に大きな影響を与えていたことを示している。実際、地震等により操業能力を喪失した企業では、復旧作業にあたり電力や水道供給の確保に努めていることからも、得られたパラメータは概ね実態を反映しているものと考えられる。

得られたパラメータを利用してライフライン残復旧日数が変化した場合における発災からの経過時間と滞在時間の累積確率の関係を図 5-2 に示した。状態 0 では得られた滞在時間分布モデルはライフライン残復旧に時間をするほど滞在時間が長くなるとともに、状態 1~3 ではライフライン残復旧日数が変化しても滞在分布はほとんど変化しないモデルが得られた。

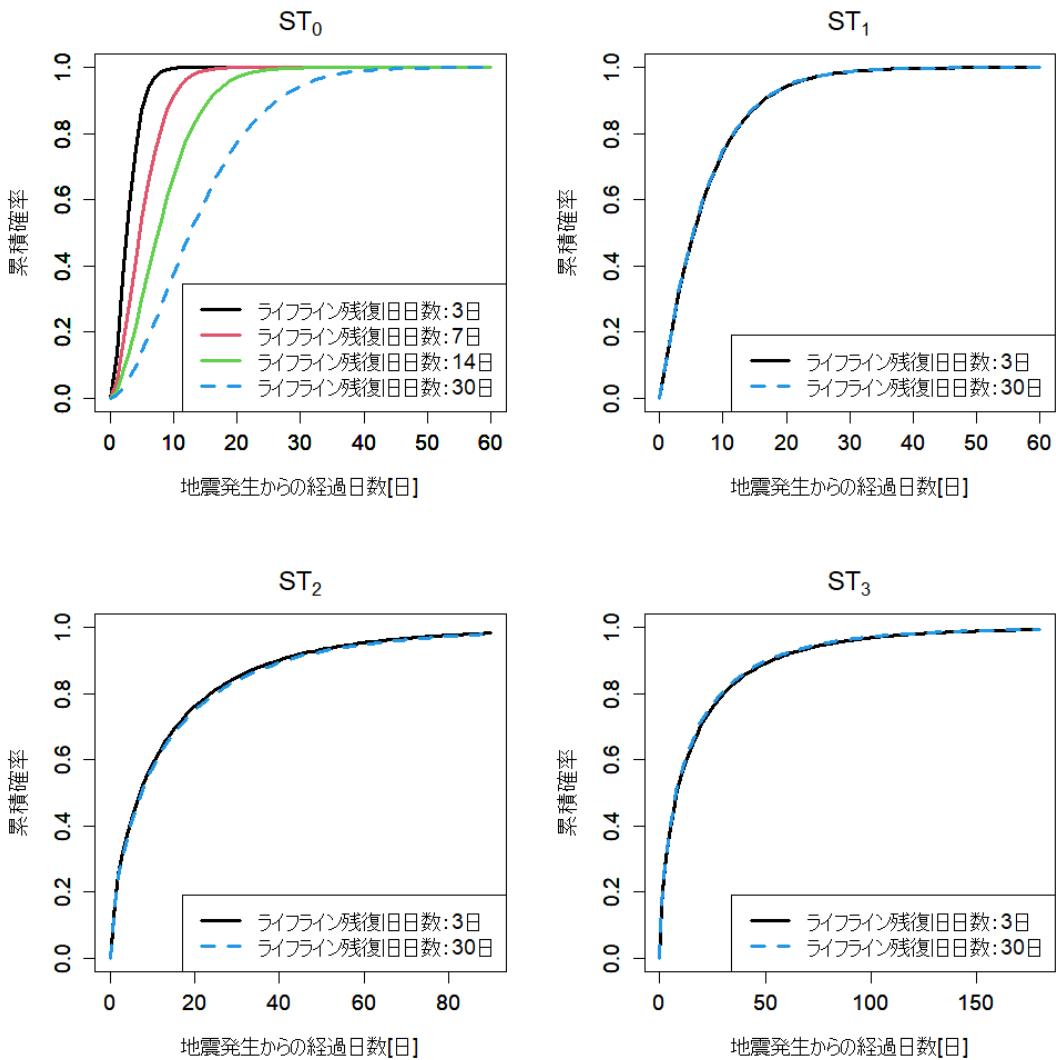


図 5-2 ライフライン残復旧日数に応じた滞在時間の累積分布（タイプ 2）

福島県沖の地震において電気・水道・ガスのいずれかが使用不可能な場合（タイプ 2）の状態*i*の滞在時間は、任意のライフライン残復旧日数の発生確率を用いて式(18)で算出することができる。

$$F_2(ST_i) = \sum_m \{ F_2(ST_i | R_{ewg,i} = m) \text{Prob}(R_{ewg,i} = m | S(t_s) = i) \} \quad (18)$$

ここで、 ST_i : 状態*i*の滞在時間[日]、 $R_{ewg,i}$: 状態*i*のライフライン残復旧日数[日]、 $F_2(ST_i)$: モデル 2 による状態*i*の滞在時間の累積分布関数、 S : 操業能力の状態、 t_s : 任意の操業能力の状態の開始時間、を示す。

福島県沖の地震の調査データ¹⁵⁾からライフライン残復旧日数や設備被害の発生確率を設定し、実被害データと式(18)により推定された滞在時間の累積確率の推定結果を比較した（図 5-3）。その結果、本手法によるタイプ 2 の滞在時間分布は概ね実被害データを再現できることを確認できた。

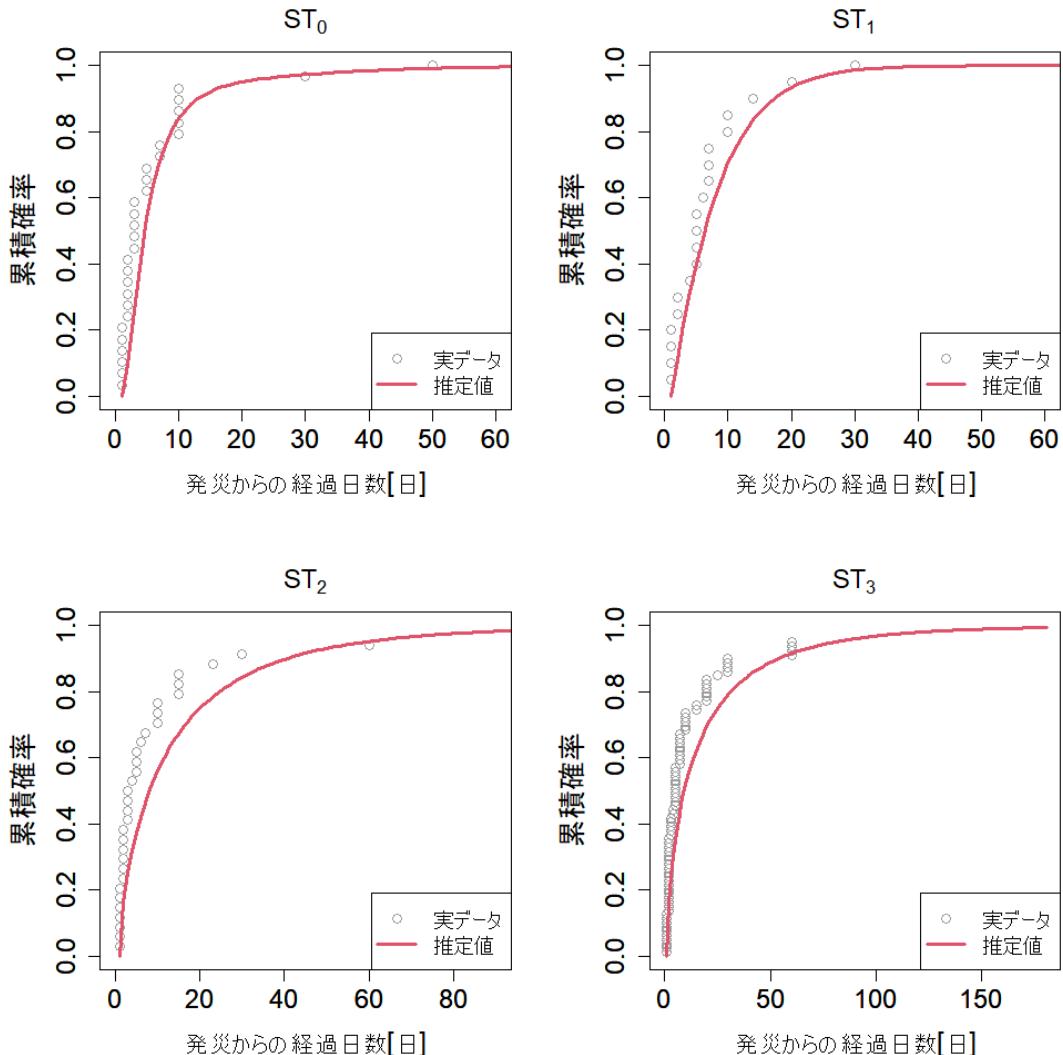


図 5-3 推定された滞在時間分布と実データの比較（タイプ 2）

5.1.3. 全体

地震発生後に「ライフラインが全て使用可能な場合」と「いずれかが使用できない場合」の両方のケースを考慮した滞在時間分布は、タイプ 1 とタイプ 2 の滞在時間の累積分布関数とライフライン被害の発生確率を利用し式(19)で算出される。

$$F(ST_i) = \text{Prob}(LS_{all}|S(t_s) = i)F_1(ST_i) + \text{Prob}(LS_d|S(t_s) = i)F_2(ST_i) \quad (19)$$

ここで、 $F(ST_i)$ ：状態*i*の滞在時間の累積分布、 $F_j(ST_i)$ ：タイプ*j*(=1,2)の状態*i*の滞在時間の累積分布、 t_s ：任意の操業能力の状態の開始時間、 S ：操業能力の状態、 LS_{all} ：ライフラインが全て使用可能な状態、 LS_d ：ライフラインのいずれかが使用不可能な状態、を示す。

福島県沖の地震の再現性確認のため、同地震の調査データ¹⁵⁾からライフラインの状態別発生確率を設定し（表 5-3）、式(19)から得られた滞在時間分布の推定結果と実データを比較した（図 5-4）。その結果、本手法はライフライン全てが使用可能な場合も含め、

概ね実データを再現できることを確認できた。

表 5-3 操業能力水準別のライフラインの状態別発生確率

| | ライフライン全てが 使用可能な場合 LS_{all} | ライフラインのいずれかが 使用可能な場合 LS_d |
|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| $S(t_s)=0$ | 0.4630 | 0.5370 |
| $S(t_s)=1$ | 0.5833 | 0.4167 |
| $S(t_s)=2$ | 0.6421 | 0.3579 |
| $S(t_s)=3$ | 0.7685 | 0.2315 |

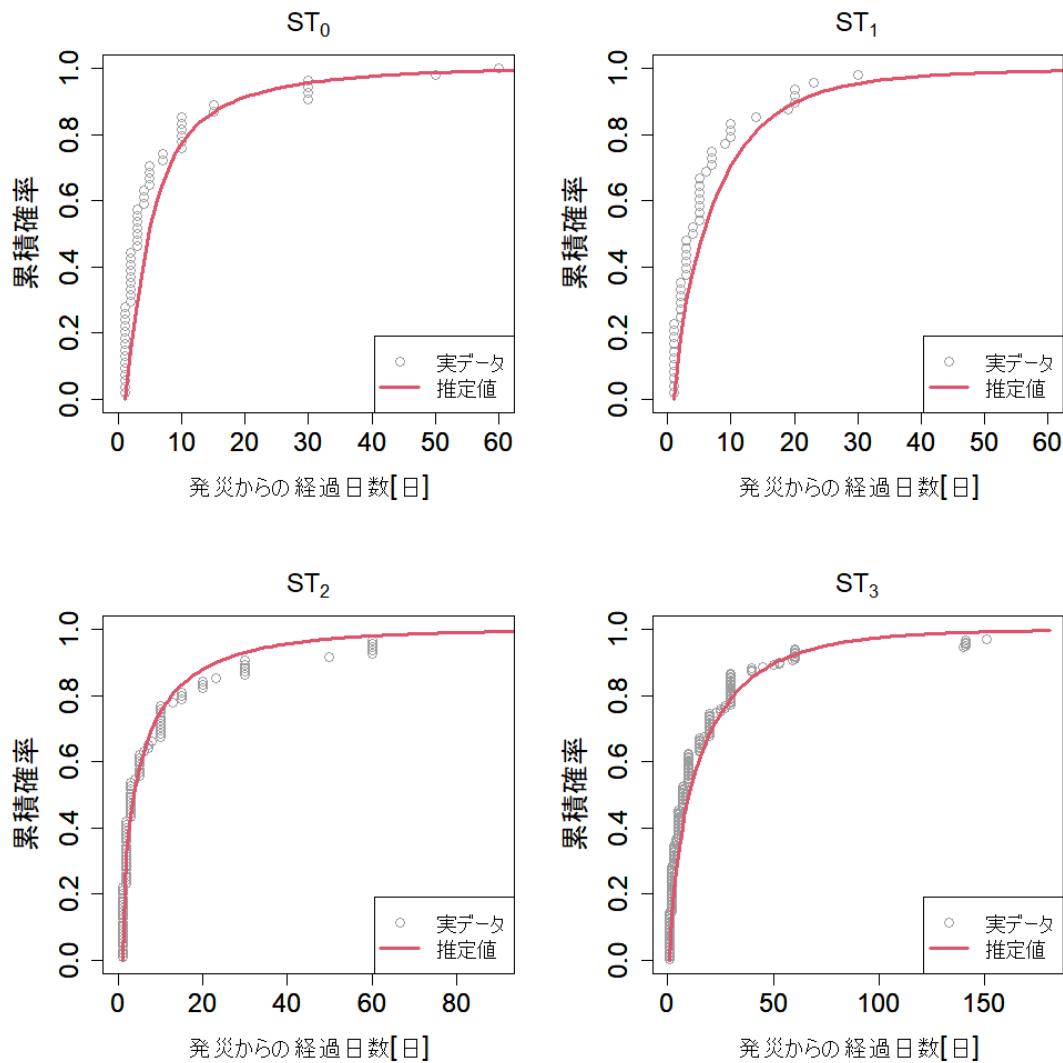


図 5-4 推定された滞在時間分布と実データの比較（全体）

5.2. 推移確率

推移確率は既往研究¹⁰⁾に従い製造業と非製造業に分けてデータセットから式(2)(3)により算出した。推移確率を行列形式で表した推移確率行列を式(20)(21)に示した。

$$P_M = \begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.11 & 0.11 & 0.11 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 & 0.87 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$P_N = \begin{pmatrix} 0 & 0.70 & 0.13 & 0.08 & 0.10 \\ 0 & 0 & 0.88 & 0.06 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 & 0.94 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

ここで、 P_M ：製造業の推移確率行列、 P_N ：非製造業の推移確率行列、を示す。

5.3. リカバリーカーブの作成

推移確率と滞在時間分布を利用し式(12)により製造業・非製造業のリカバリーカーブを作成した（図 5-5）。得られた製造業のリカバリーカーブでは、操業能力の状態が 0 から 4 に回復するのに要する時間の 50%タイル値は製造業で 28 日、非製造業で 29 日、90%タイル値は製造業で 79 日、非製造業で 81 日となった。なお、2022 年の福島県沖の地震の場合、推移確率マトリックスに大きな違いがなかったこともあり、製造業も非製造業もリカバリーカーブに大きな違いが見られない結果となった。また、得られたリカバリーカーブは、発災からの経過日数の小さい範囲では一部で逆転が見られるものの、初期の操業能力の状態 S が小さいほど復旧に時間を要するモデルが得られた。

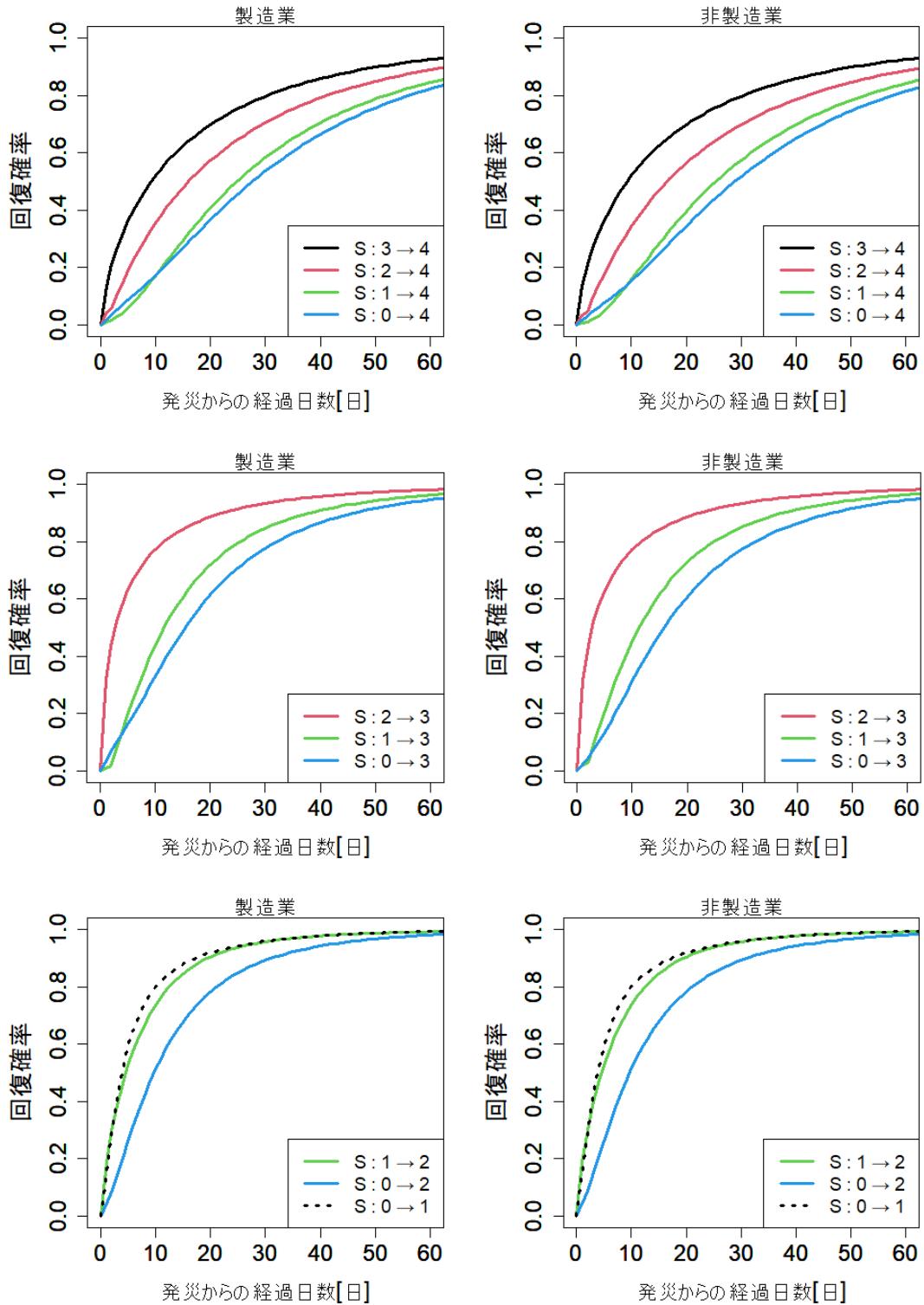


図 5-5 推定された福島県沖の地震のリカバリー曲線

6. まとめと課題

本研究では、2022年に発生した福島県沖の地震における被災事業所に対するアンケート調査データからセミ・マルコフ過程を利用してライフライン復旧日数を考慮した事業所の操業能力のリカバリーカーブを作成した。本研究は、セミ・マルコフ過程の滞在時間分布のパラメータを同時推定し、清水ほか(2023)³⁾のモデルの改善を図ったものである。

本研究で構築したリカバリーカーブのモデルは事業所の操業能力の回復期間に影響を与える要因としてライフライン復旧日数をリンク関数の説明変数に組み込んだ点に特徴がある。リンク関数の説明変数にライフライン復旧日数が含まれたことにより、停電・断水・断ガスの期間をモデル化することができれば、「モデルの元となった福島県沖の地震の実績値に基づく」という条件付ではあるが、想定される地震への適用も視野に入ってきたようにも思われる。ただし、被災規模が大きくなると復旧資材・人員の確保困難という問題により事業所の操業能力の回復が遅れると考えられるが、その点が本研究のリカバリーカーブには含まれていない点に注意が必要である。

また、本研究で作成したリカバリーカーブは、①地震による経済被害の推計を行う際の推計モデルへの入力条件としての利用、②事業所の事業中断リスクの定量評価、③電力・水道・都市ガス事業の耐震化による民間事業所の事業中断リスク低減効果の推定、④事業継続計画への適用（実績に基づいた目標復旧時間の設定）といった形での利活用が考えられる。

一方、技術的課題も残されており、①他の地震の被害調査データの収集・分析を通じたモデルの精度向上、②交通インフラの復旧状況の考慮、③業種分類の細分化や特徴ある業種（例えば「電子部品・デバイス製造業」など）のモデル化、④長期的なリカバリーカーブの作成、⑤事業所が実施した地震対策の考慮、⑥被災前の経営状況の反映、等の課題が残されており、今後もモデルの高度化に取組む必要がある。

謝辞

本資料の作成にあたっては、京都大学名誉教授岡田憲生先生に有益なご助言をいただいた。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 梶谷義雄, 多々納裕一, 吉村勇祐 : 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, 自然災害科学, Vol.31, No.4, pp.283-304, 2013.
- 2) Tatano, H., Kajitani, Y.: Methodologies for Estimating the Economic Impacts of Natural Disasters (Integrated Disaster Risk Management), Springer, 2021. (ISBN: 9811627185)
- 3) 清水智, 山崎雅人, 井出修, 劇歎, 梶谷義雄, 多々納裕一 : ライフラインの復旧期間を考慮した地震後の操業能力に関するリカバリーカーブ－2022年福島県沖の地震を例に－, 土木学会論文集, Vol.79, No.20, 論文ID: 23-20019, 2023.
- 4) Kajitani, Y. Tatano, H.: Applicability of a spatial computable general equilibrium model to assess the short-term economic impact of natural disasters, Econ. Syst. Res., 30(3), pp13-38, 2018.
- 5) Nakano, K., Kajitani, Y., Tatano, H.: Functional Fragility Curves for Production Capacity, Methodologies for Estimating the Economic Impacts of Natural Disasters, Integrated Disaster Risk Management, pp.11-25, 2021.
- 6) 清水智, 山崎雅人, 井出修, 梶谷義雄, 多々納裕一 : 地震後の初期操業能力に基づいた産業部門の耐震安全性の評価－東北地方太平洋沖地震からの進展－, 土木学会論文集, Vol.80, No.20, 2025. (投稿中)
- 7) 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田義治 : 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, pp.247-255, 2005.
- 8) 梶谷義雄, 多々納裕一, 山野紀彦, 朱牟田義治 : 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.3, pp.553-564, 2005.
- 9) Liu, H., Tatano, H., Kajitani, Y.: Estimating lifeline resilience factors using post-disaster business recovery data, Earthquake Spectra, 37(2), pp.567-586, 2021.
- 10) Liu, H., Tatano, H., Kajitani, Y., Yang, Y.: Modelling post-disaster recovery process of industrial sectors: A case study of 2016 Kumamoto earthquakes, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 61, 2021.
- 11) 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, pp.161-168, 2008.
- 12) 日経BP社:地震からの復活 三洋に学ぶ半導体工場のリスク管理, Nikkei microdevices, 第245号, pp.31-45, 2005.
- 13) 伊東維年 : 熊本地震に伴う大手半導体メーカーの被害状況と復旧過程, 松山大学論集, 第29巻, 第4号, 2017.
- 14) 黒田望, 梶谷義雄, 多々納裕一 : 平成30年7月豪雨後の産業部門における売上回復過程の統計分析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, No.1, pp.48-62, 2022.
- 15) 清水智, 山崎雅人, 井出修, 梶谷義雄, 多々納裕一 : 2022年3月に発生した福島県沖の地震における企業の被災実態に関するアンケート調査結果, 日本地震工学会第17回年次大会梗概集, TS20220029, 2022.
- 16) 日本信頼性学会 : 新版 信頼性ハンドブック, 日本科学技術連盟, 2014.

OYO 應用地質株式会社
共創 Lab