

ライフライン復旧期間を考慮した産業部門のリカバリーカーブ
— 生存時間解析を利用した推定手法の検討 —

Recovery Curve for the Industrial Sector Considering Lifeline Restoration Period
— Examination of Estimation Methods Using Survival Analysis —

○清水 智・山崎雅人・井出 修・梶谷義雄・多々納裕一

○Satoshi SHIMIZU, Masato YAMAZAKI, Osamu IDE, Yoshio KAJITANI, Hirokazu TATANO

In this paper, we developed recovery curves of firm's production capacity based on survey data of the 2016 Kumamoto earthquake. Specifically, the framework of survival analysis was applied to the development of recovery curves. As a result, recovery curves were obtained that can take into account the lifeline recovery period and employee attendance difficulties. The recovery curves obtained in this paper are expected to be useful for estimating economic resilience to earthquakes.

1. はじめに

地震により大きな被害を受けた企業の多くは復旧活動を行い徐々に生産能力を回復させていく。このような発災からの経過時間と操業能力の関係を定量化したのものとして「リカバリーカーブ」がある。本研究では、今後の発生が懸念される地震に対して簡便にリカバリーカーブを適用できるように、生存時間解析を利用してライフライン復旧日数を考慮したリカバリーカーブの構築を行った。なお、本研究で扱う「操業能力」とは、稼働率とは異なり、ライフライン停止や部品・材料等の不足による影響を除いた生産機械や事業活動遂行そのものの能力のことである。

2. リカバリーカーブの作成方法

(1) 操業能力の状態の定義

操業能力は0~100の数値で表されるが、本研究では既往研究と同様に、表1で定義される状態に区分し、以降の検討に用いた。

(2) 生存時間解析の適用

生存時間解析は生存時間を指標または応答（目的）として観察・追及する研究分野の統計解析もしくはその方法論の総体である。生存時間とはある定義された基点からイベントを発生するまでの時間で、イベントにはランダム性を伴って生起するありとあらゆる現象を規定できる。本研究ではこの生存時間解析の枠組みを被災事業所の操業能力の復旧過程に適用する。具体的には、「イベント」を「着目する状態以上に操業能力が回復すること」とし、「生存時間」は「操業能力が着目する状態未

表1 操業能力の状態の定義

経過時間 t における 操業能力の状態 $S(t)$	操業能力 $PCR[\%]$ の範囲 ※被災前を100%とする
0	$PCR = 0$
1	$0 < PCR < 25$
2	$25 \leq PCR < 50$
3	$50 \leq PCR < 75$
4	$75 \leq PCR < 100$
5	$PCR = 100$

満に滞在する時間」とする。操業能力のリカバリーカーブは式(1)により算出される。

$$R_j(t) = \int_0^t f_j(z) dz \quad (1)$$

ここで、 $R_j(t)$ ：時刻 t に操業能力が最終状態 j 以上に回復する確率、 f_j ：最終状態 j 以上となる生存時間分布の確率密度関数を示す。

(3) 尤度関数の定式化

地震被害からのリカバリーを表す適切な確率分布が現時点では分からないため、生存時間分布の確率分布には指数分布、ワイブル分布、対数正規分布のうち最もAICが小さくなった確率分布を採用した。生存時間分布の尤度関数を式(2)に、候補とした確率分布の例として対数正規分布の確率密度関数を式(3)に示す。

$$L(\theta) \propto \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^n f_j(T_i; \theta)^{\Delta_i} S_j(T_i; \theta)^{1-\Delta_i} \quad (2)$$

$$f_j(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\phi_j t} \exp\left\{-\left(\frac{(\ln(t) - \lambda_j)^2}{2\phi_j^2}\right)\right\} \quad (3)$$

ここで、 L : 尤度、 T_i : 事業所 i の観測される生存時間、 S_j : 最終状態 j 以上となる生存関数、 n : 事業所数、 θ : 生存時間分布のパラメータ (λ_j, ϕ_j)、 Δ_i : 事業所 i の中途打ち切り指標 ($\Delta_i = 1$: 中途打ち切りなし、 $\Delta_i = 0$: 中途打ち切り)、 N : 被災前の状態 (= 5)、を示す。

さらに、生存時間に影響する各種要因を明示的に組み込むため、生存時間の変動の系統的部分を各種要因の線形関数で表現し生存時間の期待値と連結させた。リンク関数の例として対数正規分布に適用するリンク関数を式(4)に示す。

$$\mu_j = \alpha_j + \sum_{k=1}^{N-1} \beta_k S_k + \beta_5 \ln(R_{ewg} + 1) + \beta_6 D_{emp} \quad (4)$$

ここで、 S_k : 初期状態 k に関するインデックス (1 : 初期状態が k , 0 : 初期状態が k 以外)、 R_{ewg} : ライフライン復旧日数[日]、 D_{emp} : 従業員出勤支障有無 (1 : 支障あり, 0 : 支障なし)、 $\alpha_j \cdot \beta_k$: 回帰係数 ($k = 1, \dots, 6$)、を示す。

3. リカバリーカーブの作成結果と再現性の確認

(1) パラメータ推定結果

パラメータの推定にあたっては、2016年熊本地震における被災企業へのアンケート調査データを利用した。パラメータの推定結果を表2に示す。

(2) 熊本地震の再現性の確認

推定されたパラメータから作成したリカバリーカーブと熊本地震の実被害を比較した(図1)。そ

の結果、作成したリカバリーカーブは概ね実被害の回復過程を再現できていることが確認された。

(3) モデルの特徴

ライフライン

復旧日数はいずれの業種でも正の有意なパラメータが得られた。また、従業員出勤支障有無は「サービス(事業所訪問型A)」「建設・運輸」といった労働集約型産業で比較的大きなパラメータが得られた。また、モデルの定数項は最終状態 j が大きくなるほど大きなパラメータが得られており、最終状態 j が被災前の水準に近づくほど回復に時間を要する実態と整合したモデルが得られた。また、初期状態 k が大きくなるほど小さなパラメータが得られており、被災直後の操業能力の毀損が軽いほど回復時間が短くなるモデルが得られた。加えて、初期状態の違いが最終状態5(完全回復)への到達時間に与える影響に関する業種間の相違を表現することができた。

4. おわりに

今後は、電気、水道等の個別のライフラインの影響等についても検討を進めていく予定である。

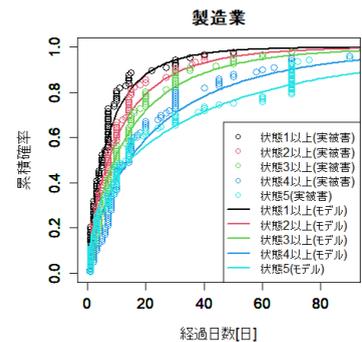


図1 熊本地震の再現性の確認

表2 パラメータ推定結果

No	業種	確率分布	最終状態	定数項	初期状態				ライフライン復旧日数	従業員出勤支障	σ	対数尤度	初期尤度	カイ二乗値	AIC	標本数
					状態1	状態2	状態3	状態4								
				α_j	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	σ	$\ln(L_1)$	$\ln(L_0)$	χ^2	AIC	N
1	建設・運輸	対数正規	状態1以上	0.411 **	-0.684 ***	-1.030 ***	-1.478 ***	-2.312 ***	0.185 ***	0.479 ***	1.077 ***	-1650.93	-1748.20	194.54 ***	3323.87	145
			状態2以上	1.255 ***												
			状態3以上	1.674 ***												
			状態4以上	2.180 ***												
			状態5	2.863 ***												
2	製造業	ワイブル	状態1以上	1.665 ***	-0.373	-0.499	-1.683 ***	-2.806 ***	0.240 ***	0.216	0.816 ***	-1875.44	-1931.48	112.09 ***	3772.87	125
			状態2以上	2.051 ***												
			状態3以上	2.359 ***												
			状態4以上	2.857 ***												
			状態5	3.370 ***												
3	サービス(事業所訪問型A)	対数正規	状態1以上	0.582 ***	-0.255	-0.549 **	-0.748 **	-2.041 ***	0.179 ***	0.575 ***	1.095 ***	-2287.90	-2379.51	183.23 ***	4597.79	182
			状態2以上	1.226 ***												
			状態3以上	1.611 ***												
			状態4以上	2.138 ***												
			状態5	2.853 ***												
4	サービス(事業所訪問型B)	対数正規	状態1以上	0.958 ***	-0.290	-0.363	-1.834 ***	-2.432 ***	0.227 ***	0.377 ***	1.145 ***	-1858.94	-1927.03	136.17 ***	3739.89	131
			状態2以上	1.458 ***												
			状態3以上	1.830 ***												
			状態4以上	2.340 ***												
			状態5	3.117 ***												

※ パラメータの右肩の記号はp値の範囲を示す。

*** : $p < 0.001$, ** : $0.001 \leq p < 0.01$, * : $0.01 \leq p < 0.05$, . : $0.05 \leq p < 0.1$

※ 業種欄の事業所訪問型Aは「卸売・小売業」、事業所訪問型Bは「対個人サービス業」「医療・福祉」「教育」を示す。

※ ワイブル分布の σ 欄の値は形状係数の値を示す。初期尤度の欄はリンク関数が定数項のみの場合の対数尤度を示す。