

生産工場のBCPを支援する復旧曲線の評価 その1：考え方と理論

正会員 中村孝明*1 川上洋介*2
非会員 吉川弘道*3

BCP 復旧曲線 生産工場
システム信頼性 早期復旧

1. はじめに

製造業における事業継続計画 (BCP) ¹⁾への関心の高まりと共に、建築施設やライフライン施設についてもBCPという観点での耐震検討が進められている^{2)~4)}。そこでは、発災時に機能が低下あるいは停止し、その後機能が完全に回復するまでの経時的プロセスを描いた、いわゆる復旧曲線が有益な情報として利用されている。予想される曲線は地震被害の発生や復旧期間の不確実性から無数にあり、予想に漏れがない限りこの中の一つは必ず実現する。しかし、実現するであろう復旧曲線を特定できないため平均的な曲線を復旧曲線として代表している。一方、復旧曲線は時間と復旧率の2軸から構成されるため基本的に2種類存在することになる。

本報は製造業を例として取り上げ、2種の曲線の評価方法を理論的に整理する。その2では復旧曲線の説明性・利用性について考察し、BCPに適した復旧曲線について示す。

2. 復旧曲線の評価

図1に示す細線は予想される無数の復旧曲線を概念的に示している。時間と復旧率に対し平均値を結ぶと図中T曲線とD曲線の2つが求められる。D曲線は縦の切断面を通過する曲線群の通過確率分布の平均値を、復旧時間に対して結んだ曲線である。T曲線は横の切断面の通過確率分布の平均値を復旧率に対して結んだ曲線である。D曲線は復旧時間 t を条件とした復旧率 r の確率密度関数 $f_R(r|t)$ (通過確率分布) より以下のように求められる。

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r|t) dr \tag{1}$$

$$= 1 - \int_0^{1.0} F_R(r|t) dr$$

ここに、 $F_R(r|t)$ は非超過確率関数である。T曲線は復旧率 r を条件とした復旧時間 t の確率密度関数 $f_T(t|r)$ (通過確率分布) より以下のようになる。

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t|r) dt \tag{2}$$

$$= \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt$$

ここに、 $G_T(t|r)$ は超過確率関数である。一方、図1に示した曲線群はそれぞれ交差するものの経過時間に対し必ず上昇する(図中右上に向かう)。これよりそれぞれの通過

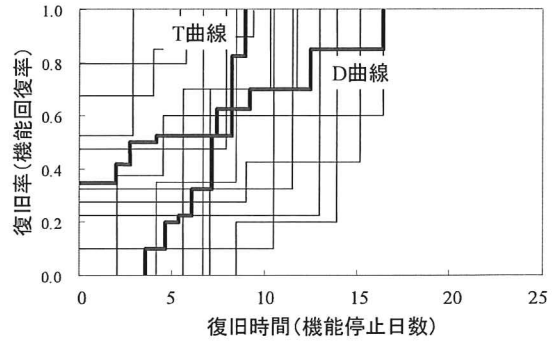


図1 復旧曲線の概念図

確率分布の非超過確率関数 $F_R(r|t)$ と超過確率関数 $G_T(t|r)$ は同じ値を取る。つまり次式が成立する。

$$F_R(r|t) = G_T(t|r) \tag{3}$$

(1)式に(3)式を適用する。

$$R_D(t) = 1 - \int_0^{1.0} G_T(t|r) dr \tag{4}$$

(2)式と(4)式より、復旧率 r を条件とした復旧時間 t の超過確率関数を求めれば、基本的にT曲線とD曲線は求められることになる。

一方、生産工場は様々な工程を経て種々の製品を製造しているが、発災による機器等の損傷が発生すると全ての製品あるいは製品の一部が生産できなくなり、工場機能は一部あるいは全てが停止する。各製品の売上を工場全体の売上を1.0とした比率 r_i で表し、製品 i の生産停止時間(復旧時間)の超過確率関数を $G_T(t|r_i)$ と表す。これを(4)式に適用すると、

$$R_D(t) = 1 - \sum_{all\ i} r_i G_T(t|r_i) \tag{5}$$

となり複数の製品を製造する工場のD曲線を得る。一方(2)式に適用すると、

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t|r_i) dt \tag{6}$$

となり各製品の復旧時間の期待値のみが計算される。そこで各製品の生産停止時間の期待値を短い順(復旧順)に並べ、対応する r_i を累積する。つまり、

$$r_k = \sum_{i=1}^k r_i \tag{7}$$

である。これを(6)式に適用する。

$$R_{TL}(r_k) = \int_0^{\infty} G_T(t|r_i)dt, \quad i=1 \sim k \quad (8)$$

(8)式は各製品の生産停止時間の期待値を短い順に、復旧率に対し結んだ曲線を表す。本報ではこの曲線を TL 曲線と呼ぶ。なお、TL 曲線は種々の製品の製造工程は分離され、仕掛品の相互利用や製造装置の余剰性能は考慮しないことを原則とする。

3. 各製品の超過確率関数の評価

生産工程は各種ユーティリティ、生産機器、製品検査機器、生産管理設備、梱包・出荷に係わる諸設備などの構成要素が有機的に連なったシステムとして構成されている。多くは冗長性のない直列システムとして構成され、1 箇所以上の構成要素の損傷によってシステムは機能停止（生産停止）する。ここで、複数の構成要素が損傷した場合、復旧は同時に行われ最短で完工するよう配慮されると考えると、システムの機能停止時間（復旧時間）は次式のように表すことができる。

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (9)$$

ここに、 $T_j, j=1 \sim n$ は構成要素の復旧時間の確率変数であり、 n はその総数である。 T はシステムの復旧時間の確率変数である。(9)式は独立を前提にブール代数の教えるところにより以下のように誘導できる。

$$F_T(t) = \prod_{j=1}^n F_{T_j}(t) \quad (10)$$

ここに、 $F_T(t)$ はシステムの復旧時間の非超過確率関数、 $F_{T_j}(t)$ は構成要素のそれである。(10)式は任意の製品 i の生産停止時間を評価するものであり、さらに超過確率関数に変換すると以下ようになる。

$$G_T(t|r_i) = 1 - \prod_{j=1}^n F_{T_j}(t|r_i) \quad (11)$$

ここに、 $F_{T_j}(t|r_i)$ は製品 i の構成要素 j の復旧時間の非超過確率関数、 $G_T(t|r_i)$ は製品 i の復旧時間の超過確率関数である。これは D 曲線ならびに TL 曲線を求める(5)式、(8)式に適用される。

4. 評価事例

5 種の製品 (A~E) を生産している生産工場を例に取り上げる。図 2 は生産工程をシステムとしてモデル化したものである。図中□は構成要素を表し、生産システムの始点は入荷した材料の検査工程であり構成要素 T_1 である。終点は梱包、出荷であり構成要素 T_{10} である。なお、便宜上工場建屋ならびにユーティリティ等は含めていない。図 3 は 5 製品の生産工程の復旧時間の超過確率関数 $G_T(t|r_i)$ を求めるために、図 2 のシステムモデルを参照し、各生産経路を直列の最小パスセットとしてモデル化した

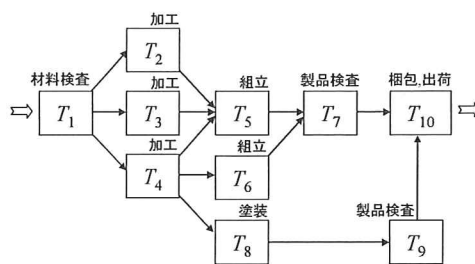


図 2 生産工程のシステムモデル

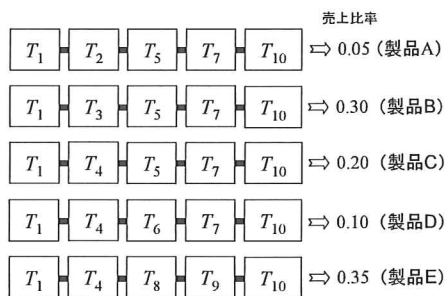


図 3 各製品の生産工程の経路

表 1 構成要素の復旧期間の確率関数

復旧日数	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
0	0.8	0.7	0.6	0.6	0.9	0.8	0.9	0.5	0.95	0.9
5	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0.05	0.1
10	0.15	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0
15	0	0.2	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0
20	0.05	0	0	0	0	0.2	0.08	0	0	0
25	0	0	0	0.2	0	0	0	0.4	0	0
30	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0

図である。また、それぞれの製品の売上比率 r_i は 0.05~0.35 であり、工場としての RTO (Recovery Time Objective) は 20 日間と仮定する。次に、各構成要素の復旧時間の確率関数を表 1 にまとめて示す。表は構成要素の損傷確率と損傷した場合の復旧日数を表している。

5. まとめ

復旧曲線の評価方法を理論的に整理すると共に、製造業を対象とした評価事例の諸元を示した。その 2 では復旧曲線を計算し、BCP の観点から説明性・利用性について考察する。

参考文献

- 1) 内閣府：中央省庁業務継続ガイドライン第一版，2007
- 2) 中村孝明，遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，建築学会総合論文誌，No.7 都市・建築に関わる安全・安心のフロンティア，pp.87-92, 2009.1
- 3) 坂本成弘：事務所ビルの地震後復旧曲線，建築学会大会，B-1, pp.65-66., 2007.8
- 4) 静間俊郎，中村孝明，吉川弘道：地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価，土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.299-309, 2009.6

*1 篠塚研究所 博士 (工学)

*2 篠塚研究所 修士 (工学)

*3 東京都市大学 総合研究所 工学博士

*1 Shinozuka Research Institute, Dr.Eng.

*2 Shinozuka Research Institute, Mr.Eng.

*3 Tokyo City University, Advanced Research Laboratory, Dr.Eng.

生産工場のBCPを支援する復旧曲線の評価 その2: 事例評価

正会員 川上洋介*1 中村孝明*2
非会員 吉川弘道*3

BCP 復旧曲線 生産工場
システム信頼性 地震リスク

1. はじめに

5種の製品(A~E)を生産している生産工場を例に取り上げ、2種類の地震時復旧曲線を評価する。それぞれの説明性・利用性について考察すると共に、BCPに適した復旧曲線について提示する。また耐震補強を実施したケースと比較する。なお、その1において復旧曲線の評価方法ならびに事例としての生産工場の諸元を記してある。

2. 復旧曲線の考察

予想される復旧曲線を総当りで計算し、復旧時間 t を条件とした復旧率 r の確率関数 $f_R(r|t)$ 、ならびに復旧率 r を条件とした復旧時間 t の確率関数 $f_T(t|r)$ を求め、それぞれの確率関数より D 曲線、T 曲線を計算し描いたものを図1に示す。

BCPを策定する上では、まず工場全体として何日で稼働できるようになるのか、といった情報が必要である。また、客先やサプライチェーン等の要請により、早期に復旧しなければならない生産ラインや、在庫調整によりある程度余裕がある製品など様々である。このため各製品の生産工程は何日で復旧するのか、といった情報も必要となる。このような観点から D 曲線を見ると、どの生産ラインが何時復旧するかは不明であり、図から読み取ることができない。また、大地震発生時には、一時的とはいえ生産が完全に停止することは明らかである。ところが D 曲線を見ると完全には停止しないと見て取れる。また、完全復旧までには40日を要することになるが、40日(その1の表1参照)は最長の停止期間であり、これが実現するように読める。この点、実感との乖離がある。一方 T 曲線は完全に停止した後、徐々に回復する状況を読み取ることができるが、どの生産ラインが何時復旧するかは不明である。

表1は各製品の生産工程の復旧時間の超過確率関数 $G_T(t|r_i)$ を求め、さらに各製品の復旧時間の期待値を計算し、短い順に列記したものである。また RTO 20日を越える確率も併記している。表より、最も早く回復するのは製品 B であり、その平均値は7.9日である。これら平均値を横軸に、生産比率の累積を縦軸に取り、描画したのが図2に示す TL 曲線である。同図には製品 A~E ラインの対応関係と90%非超過値 (TL₉₀) も併記している。なお、TL₉₀の製品 A の部分が突出し不自然な形状をしているのは、それぞれの生産工程の復旧時間の不確実性が異なることが

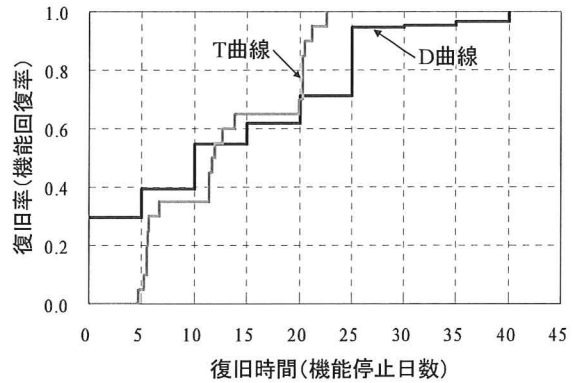


図1 復旧曲線(T曲線とD曲線)

表1 各製品の生産工程の復旧時間期待値

製品	生産比率	生産比率の累積	復旧日数の期待値	20日を越える確率
B	0.30	0.30	7.90	0.020
A	0.05	0.35	10.43	0.118
C	0.20	0.55	11.09	0.216
D	0.10	0.65	12.52	0.216
E	0.35	1.00	18.47	0.600

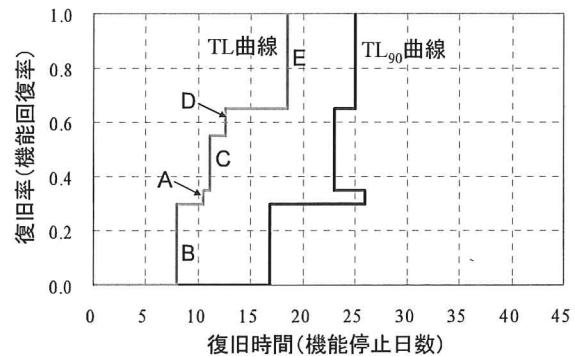


図2 復旧曲線(TL曲線とTL₉₀曲線)

原因である。図2より、TL 曲線は A~E の各製品ラインの復旧時間や復旧順位を直接読むことができる。また、曲線の左側面積は工場全体の停止期間の期待値になり、12.8日となる。この値は D 曲線と T 曲線の期待値と一致する。一方、90%非超過値を最悪のケースと解釈した場合、平均的には RTO (20日) を満たしているものの、最悪を想定した場合には RTO を超える可能性がある。その確率は、製品 B 以外は10%以上であり、特に製品 E は60%となっ

ている。また、TL 曲線と TL_{90} の隔たりから、復旧期間の推計に関わる不確実性の大きさが概ね把握でき、特に製品 A の不確実性は他と比べ大きいことが分かる。

TL 曲線の利点をまとめると、主体者の実感との乖離が少なく、各製品ラインの復旧時間が直接読めることから説明性が高い。また、生産工程毎ではあるが 90%非超過値などの最悪を想定した復旧時間を把握できること、各ラインの超過確率 $G_T(t|r_i)$ はシステム信頼性ならびに最小パスセット等の考え方をを使うことで比較的容易に計算できること、など解析上の利点もある。

3. 耐震対策の検討

補強対策を実施した場合の効果について検討する。ボトルネックとして構成要素 T_4 を特定し、この構成要素の補強を想定する。 T_4 は図 3 に示すように製品 C,D,E に関わる構成要素であり、生産比率としては工場全体の 65% に及ぶ。また補強後のコンポーネントの復旧時間の確率関数を表 2 に示す。「その 1 の表 1」と比較し、補強によって更新された部分を太枠で示している。なお、便宜上補強は完全補強とした。

補強前と補強後の TL 曲線を比較したものを図 4 に、D 曲線を比較したものを図 5 に示す。図 4 より、補強前と後の生産工程の復旧順位が B,A,C,D,E から C,B,D,A,E と、入れ替わっているのが分かる。しかしながら、図 5 の D 曲線からは、補強による改善効果は見られるものの復旧順位の変化は分からない。また、工場全体の復旧時間の期待値は、補強前は 12.8 日、補強後は 10.3 日であった。

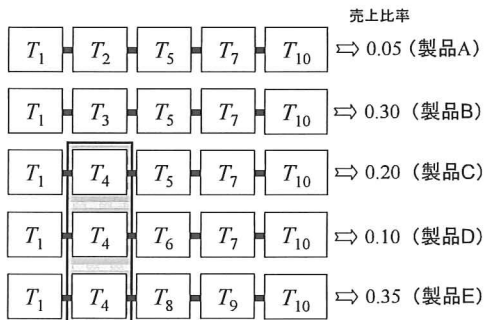


図 3 各製品の生産工程の経路と補強構成要素

表 2 補強後の構成要素の復旧期間の確率関数

復旧日数	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
0	0.8	0.7	0.6	1.0	0.9	0.8	0.9	0.5	0.95	0.9
5	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0.05	0.1
10	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0.2	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0
20	0.05	0	0	0	0	0.2	0.08	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0
30	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0

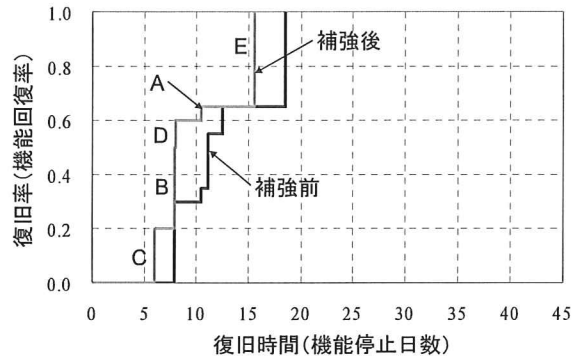


図 4 補強前後の復旧曲線(TL 曲線)の比較

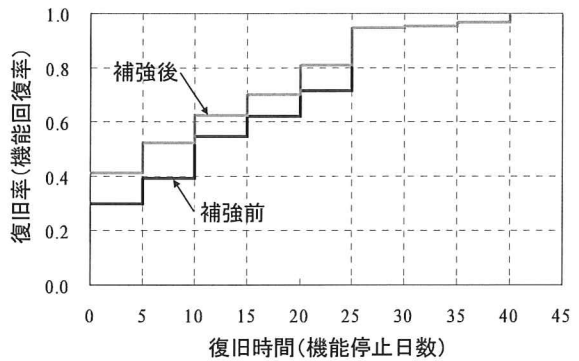


図 5 補強前後の復旧曲線(D 曲線)の比較

一方、RTO 20 日を越える確率は、製品 C が 0.02、製品 D が同じく 0.02、製品 E は 0.5 にそれぞれ改善された（表 1 参照）。C,D の改善効果は高いものの、E の効果は必ずしも高くない。この理由は、製造ライン E は比較的脆弱な構成要素 T_8 を含むからである。その他の製品 A,B の工程には、構成要素 T_4 は関与していないので変化はない。

4. まとめ

生産工場を例に取り上げ、地震時復旧曲線（D 曲線、T 曲線、TL 曲線）を評価すると共に、それぞれの説明性・利用性について考察した。結論として、D 曲線と T 曲線は、共に各生産工程が何日で復旧するかを読み取ることができないが、TL 曲線は復旧期間を直接把握できる。このため説明しやすい。また、最小パスセット等の考え方を利用できる点簡便である。以上より、製造業の BCP 支援として TL 曲線は適していると考えられる。

なお、本提案は地震損傷の独立と同時復旧を前提としている。また製造装置の余剰性能は考慮していない。これらの改善点は今後の課題とする。

謝辞：本研究の一部は東京都市大学 重点推進研究の助成を受けて実施したものです。ここに記して感謝します。

*1 篠塚研究所 修士（工学）
*2 篠塚研究所 博士（工学）
*3 東京都市大学 総合研究所 工学博士

*1 Shinozuka Research Institute, Mr.Eng.
*2 Shinozuka Research Institute, Dr.Eng.
*3 Tokyo City University, Advanced Research Laboratory, Dr.Eng.