

製造装置の余剰性能を考慮した生産施設の地震時復旧曲線
**THE SEISMIC RECOVERY CURVES ESTIMATION
FOR PRODUCTION FACILITY CONSIDERING SURPLUS
PERFORMANCE OF PRODUCTION EQUIPMENTS**

中村孝明¹⁾、境茂樹²⁾、吉川弘道³⁾

Takaaki NAKAMURA¹, Shigeki SAKAI², Hiromichi YOSHIKAWA³

1) 篠塚研究所、主席研究員 工博

¹ Chief Research Engineer, Shinozuka Research Institute, Dr. Eng.

e-mail : koumei@shinozukaken.co.jp

2) ハザマ技術研究所 主席研究員

² Chief Research Engineer, Technical Research Institute, Hazama Corporation

e-mail : ssakai@hazama.co.jp

3) 東京都市大学総合研究所、教授 工博

³ Professor, Advanced Research Laboratories, Tokyo City University, Dr. Eng.

e-mail : hyoshika@tcu.ac.jp

ABSTRACT: The manufacturing process is not usually in the state of full operation, there is also a manufacturing device that has not worked according to the order situation. Therefore, the manufacturing process has generally a surplus performance. When the earthquake disaster occurs, a surplus performance contributes to the improvement of the restoration time. In this paper, the evaluation method of the recovery curve of the manufacturing process due to the earthquake was proposed considering a surplus performance of the manufacturing process and the device. The case analysis were carried out, the applicability in this method was discussed.

キーワード: BCP、復旧曲線、製造業、余剰性能、地震リスク

1. はじめに

事業継続計画 (Business Continuity Planning) ¹⁾は発災時においても事業を継続する、あるいは早期の復旧を目標としている。このため事業停止となる可能性やどの程度の期間事業停止となるのかを定量的に推計することが重要となる。地震時の復旧期間の定量評価については、システム信頼性手法をベースに建築設備の機能を対象とした研究²⁾³⁾、生産工場の製造機能に着目した研究⁴⁾、さらに道路網⁵⁾などや上水と電力の相互関連を考慮した研究⁶⁾などがある。これらは対象を構成要素が連なるシステムとして捉えると共に、システム性能の復旧期間や復旧過程を評価することを目的としている。特に文献^{2)~5)}は復旧過程を視覚的に把握する、いわゆる復旧曲線の評価に軸足を置いている。

一方、生産工程の多くは複数の工程を擁し、さらに個々の工程は複数の製造装置から構成されている。これら装置は必ずしも本来持つ100%の性能で稼動しているわけではなく、また受注状況に応じて稼動していない製造装置もある。つまり、個々の製造装置や生産能力には一定の余力があり、発災時にはこの余剰性能が生産能力を補うと共に、システムとしての冗長性を補完することになる。上記の諸研究は、

構成要素は稼動するか否かの2対応を前提としたものであり、構成要素の持つ個々の性能を考慮したものではない。そこで本研究は、生産工場のBCP実務に資することを目的に、製造装置の性能あるいは余力を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案する。事例を通じて、手法の適用性と余力を付与した際の復旧期間の改善効果について検討する。

2. 構成要素の性能を考慮した復旧曲線

復旧曲線は当初の性能が低下あるいは停止し、その後性能が完全に回復するまでの経時的なプロセスを描いた曲線と定義する。横軸は復旧に要する期間、縦軸は当初の性能を1.0とした性能回復率である。地震被害の発生や復旧期間の不確実性を考慮とすると、図1に示すように無数の曲線が予想でき、その平均値を復旧曲線として代表する。また、復旧曲線は復旧期間と性能回復率の2軸に描画されるため、それぞれの軸方向の平均値を採ると2種の曲線⁷⁾が求められる。図中太線のT曲線とD曲線がこれらに相当する。D曲線は性能回復率を確率変数に縦軸に分布する曲線群の平均値を復旧期間に対し結んだ曲線、T曲線は復旧日数を確率変数に横軸に分布する曲線群の平均値を復旧率に対し結んだ曲線である。本論では、機能が限定されるシステムの復旧過程を把握するのに優れているT曲線を復旧曲線とする。式では以下のようになる。

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt \quad (1)$$

ここに、 $R_T(r)$ は復旧曲線を表し、 $G_T(t|r)$ は性能を条件とした復旧期間の超過確率関数である。具体的には性能回復率 r で横に切断し、切断面を通過する曲線群の初通過確率分布の超過確率関数になる。以下では $G_T(t|r)$ を求める方法について示す。

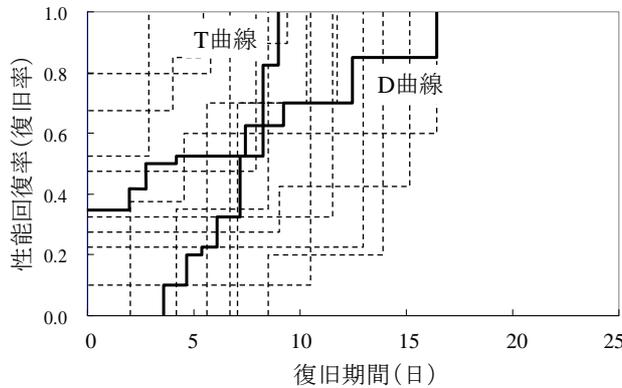


図1 復旧曲線の概念図

n 個の構成要素から成るシステムを想起し、地震による構成要素（以下要素と記す）の被災を確率事象とする。要素 i の持つ性能を r_i とし、被災により性能は0.0になるとする。先ず並列システムでは、システムの性能は要素の性能の和として得られる。

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

ここに、 R_{sys} はシステムとしての性能の確率変数を表す。 R_i は要素 i の性能の確率変数であり、具体的には図2のようになる。図中 p_i は要素の損傷確率を表しFragility Curveによって求められ、後述するシナリオ地震の発生を条件としたものである。

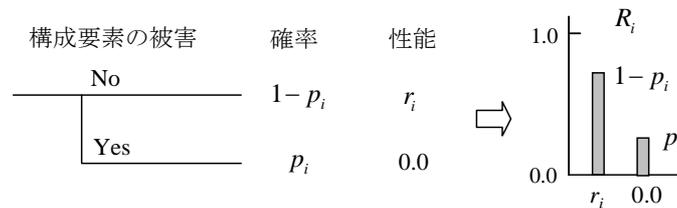


図2 構成要素*i* の損傷確率と性能の確率関数

直列システムでは要素の性能の最小値を採ることになり、以下のようになる。

$$R_{sys} = \min_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

一方、図3は直列・並列が混在するシステムの例である。図の例では(2)式、(3)式を参照し、システム性能の確率変数は以下のようになる。

$$R_{sys} = \min(R_1, \min(R_3, R_4 + R_5) + R_2, R_6) \quad (4)$$

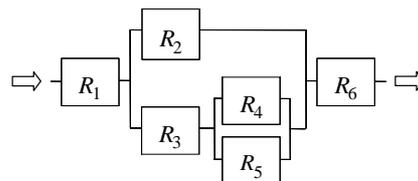


図3 並列・直列混在システムの例

(2)式は多変数の確率和により求められる。(3)式は要素間の損傷事象の独立を仮定することで、以下のようになる。

$$G_R(r) = \prod_{i=1}^n G_{R_i}(r) \quad (5)$$

ここに、 $G_R(r)$ はシステム性能の超過確率関数、 $G_{R_i}(r)$ は要素*i*の性能の超過確率関数である。

次に、要素の復旧期間は軽微や大破などの被災状況に応じて変わる。そこで、被災状況に応じた復旧期間*t*を所与とし、*t*以上になる要素の損傷確率(例えば軽微以上の確率)を求める。復旧期間*t*を条件として(2)、(3)式を計算する。これを復旧期間の数だけ繰り返し、復旧期間*t*を条件としたシステム性能の超過確率関数 $G_R(r|t)$ を求める。文献7)より、復旧過程については以下の関係が導かれている。

$$G_T(t|r) = 1 - G_R(r|t) \quad (6)$$

(6)式より、性能を条件とした復旧期間の超過確率関数 $G_T(t|r)$ が求められ、これを(1)式に適用することで復旧曲線を求めることができる。なお、構成要素は同時に復旧を行い最短で修復が完工するよう配慮されると考える。

3. 事例解析

3.1 対象施設と生産工程のシステムモデル

事例解析では、静岡県浜松市に位置した平屋建ての生産工場を想定し、製造装置の余剰性能を考慮した地震時復旧曲線を評価する。図4は、生産工程のシステムをモデル化したもので、工程はA~Dの4工程で構成されるものとする。図中の□は製造装置を表し、数値は各工程のシステムの能力を100%と

した際の装置の生産能力（性能）を表す。図の(1)のケースでは、どの工程も装置の性能の和は 100%で余剰性能はないが、(2)のケースでは、B と D の工程はどちらも 150%であり余剰性能を持っている。

また、各生産装置は工程毎に全て同じ仕様とし、被害モードとして小破、大破をそれぞれ考慮する。各装置の脆弱性は装置の寸法や重心高さから求まる転倒限界加速度⁸⁾を参考として設定し、最大加速度に換算した装置の耐力ならびに被害モードに対応した復旧日数を表 1 に示す。表中の複合偏差は装置の耐震耐力、作用地震動等の不確実性を対数標準偏差で示したものである。

本解析では、余剰性能のない図 4 の(1)のケースを基本とし、余剰性能の地震時復旧曲線に与える効果を検討する。

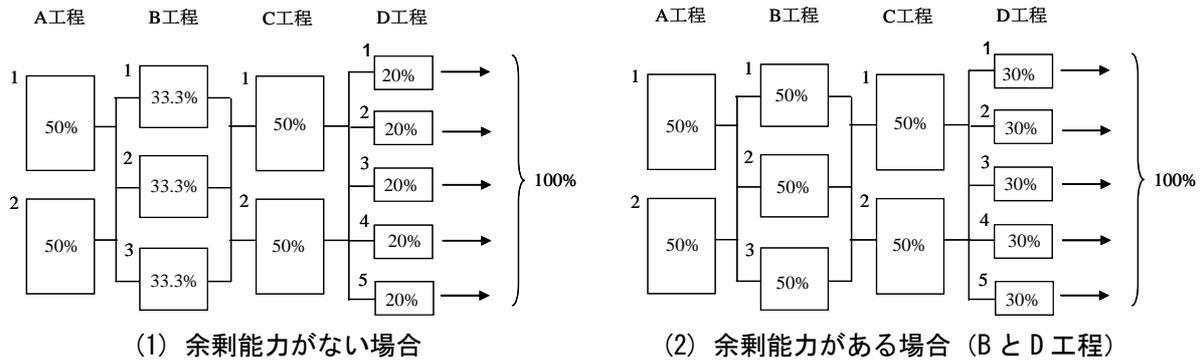


図 4 生産工程のシステムモデル

3.2 シナリオ地震による復旧曲線

想定地震としては、南海トラフ全域 (M8.6)、想定東海 (M8.0)、東海地域 (M7.2) を取り上げ、余剰性能のないケースについて、復旧曲線の評価する。図 5 は対象サイトと想定地震の震源を図示したもので、サイトの地震動は安中⁹⁾の距離減衰式を使い、工学的基盤最大加速度としてそれぞれ 478.4、393.5、317.0Gal とした。また表層地盤の増幅は考慮しない。それぞれの想定地震による復旧曲線を図 6 にまとめて示す。

南海トラフ全域 (M8.6) では、作用地震動 (478.4Gal) に比べ D 工程の装置が脆弱であり (表 1 参照)、完全復旧は最大の復旧期間である 30 日に漸近している。また、それぞれの性能の回復過程は比較的類似している。

表 1 製造装置の脆弱性パラメータ

工程	被害モード	耐力中央値 (cm/sec ²)	複合偏差	復旧期間 (日)
A	小破	980	0.4	1
	大破	1120	0.4	30
B	小破	420	0.4	1
	大破	550	0.4	30
C	小破	700	0.4	1
	大破	850	0.4	30
D	小破	400	0.4	1
	大破	450	0.4	30

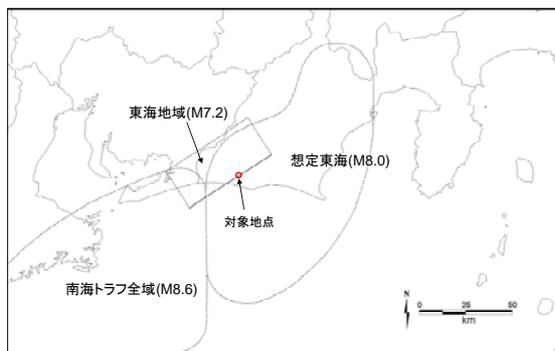


図 5 対象サイトと想定地震の震源

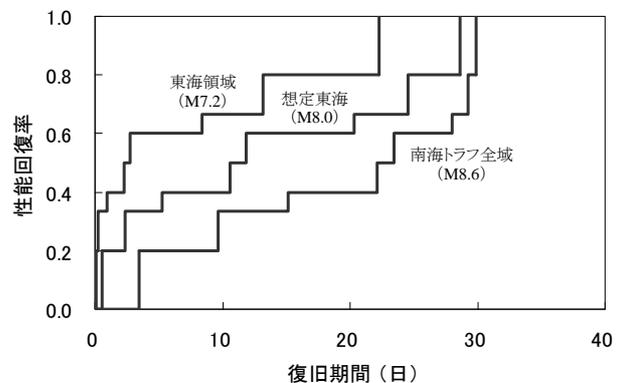


図 6 シナリオ地震による復旧曲線 (余剰性能なし)

3.3 余剰性能の復旧曲線に与える影響

余剰性能の復旧曲線に与える効果を検討する。なお、以下はすべて南海トラフ全域の地震に対する検討である。

まず、余剰性能の有無が復旧曲線に与える効果を検討するため、図4に示す2つのケース（余剰性能無し、BとD工程の余剰性能150%）について復旧曲線を評価し、これを図7に比較して示す。その結果、復旧曲線は余剰性能ありが余剰性能なしに比べて左側へシフトし、復旧期間の期待値（図中の破線）は19.295日から14.575日となり、余剰性能があることで復旧期間を短縮する効果があることが示された。これは、余剰性能による生産システムの冗長性を定量的に評価したことに他ならない。

一方、余剰性能の与え方として2通り考えられる。一つは個々の製造装置の生産能力を高める方法と、もう一つは装置の台数を増やし工程全体の生産能力を高める方法である。D工程の余剰性能を取り上げ、前者は製造装置の生産能力を1台30%で5台とするケース、後者は生産能力1台25%の装置を1台増やして6台とするケースを比較する。それぞれD工程のトータルの処理能力は150%である。検討結果を図8に示す。この結果から、両者は復旧過程に若干の差異が見られるものの、復旧期間の期待値（図中の破線）はほぼ等しく、工程の余剰性能を同じ程度付加できれば、その与え方による差はほとんどないことが分かる。

3.4 余剰性能と耐震性能の復旧曲線に与える影響

次に、余剰性能の復旧曲線に与える効果を、製造装置の耐震性能と合わせて検討する。

図4(1)の余剰性能なしのケースに対して、A、BおよびDのいずれかの工程の余剰性能を150%に高めるケース、BとDの両方を150%に高めるケースについて、それぞれ比較して図9に示す。その結果、元々耐震性の高い装置を有するA工程の余剰性能を高めても復旧曲線に与える効果は小さいのに対し、

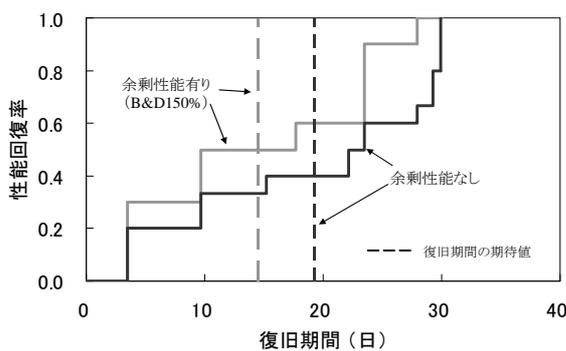


図7 余剰性能の有無による復旧曲線

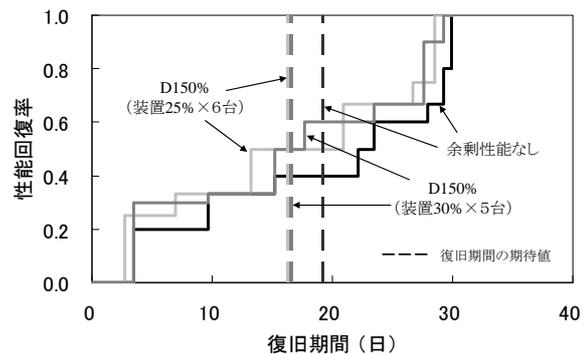


図8 D工程の余剰性能向上による復旧曲線

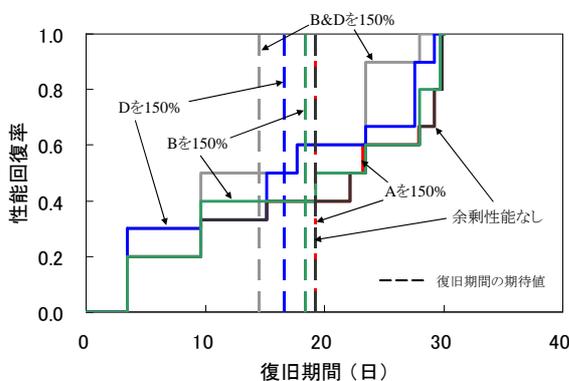


図9 余剰性能を与える工程の耐震性の違いによる復旧曲線

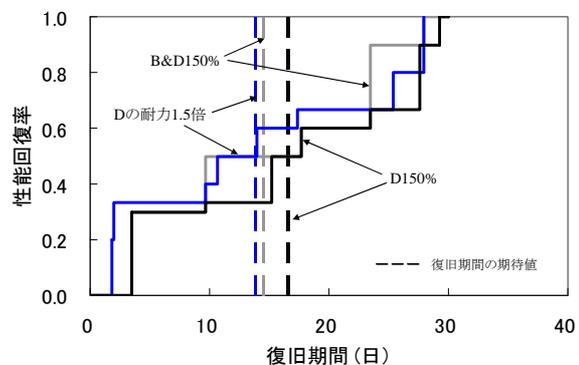


図10 余剰性能向上と耐震補強による復旧曲線の比較

耐震性能の最も低い D 工程に対し余剰性能を付加することは復旧期間を短縮する効果が大きい。このことから余剰性能は耐震性の低い工程に対して付加することがより効果的であることが示された。

さらに、耐震補強による効果を検討するため、D 工程の製造装置の脚部に固定金物を用いた補強を行い、フレンジの耐力中央値を 1.5 倍に高める。このケースと、D および B と D の工程の余剰性能を 150%に向上させるケースの復旧曲線を比較検討する。結果を図 10 に示す。図より、D 工程の耐震補強を施すケースと余剰性能を 150%に向上するケースを比較すると、補強による復旧期間の短縮効果は大きいことが分かった。さらに耐震補強のケースは、B と D 両工程の余剰性能 150%とするケースと同等以上の効果が見られた。なお、耐震補強策として、D 工程のエリアに免震床等を採用し作用地震動を 1/1.5 にする場合も、耐力を 1.5 倍にするものと同様の結果となる。

4. まとめ

生産施設を対象として、製造工程の余剰性能を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案し、事例解析によりその適用性を検討した。

その結果、提案手法により余剰性能の復旧曲線に与える効果を定量的に評価することができ、余剰性能は生産システムの早期復旧に貢献することが分かった。また、事例解析から以下のことが分かった。

- ① 余剰性能の付加は、耐震性能の低い工程に与えるほど効果的である。
- ② 耐震性能を 1.5 倍に向上させることは、余剰性能を 1.5 倍にするよりも復旧期間の短縮に与える効果は大きい。

なお、①と②は生産システムの構成、工程内の装置数や現状の耐震性能、さらに装置間の損傷相関などにも依存するものと考えられ、一般性のある結論とは必ずしも言えない。

本提案手法により、耐震性能と余剰性能の効果を同時に検討することができ、各対策の費用対効果を比較しながら最適な耐震対策を選択することができる。これは BCP の実務において非常に有益である。

また、本手法は水道や道路ネットワーク、港湾や空港等の荷役システムなどにも応用が可能であり、利用範囲は広いと考えられる。

課題としては、構成要素の損傷事象を独立としており、この点実状を反映していない。相関を考慮した評価は今後の課題としたい。

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) 境茂樹，加藤貴司：BCP を支援する建築機能の地震リスク評価手法の研究，建築学会大会，構造-I，pp.19-20, 2009.8
- 4) 中村孝明：BCP 策定支援情報としての操業停止評価と財務影響分析，土木学会第 8 回地震災害マネジメントセミナー講演集，2007.3.
- 5) 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, 2009.6
- 6) Shinozuka M, & et al. : Resilience of Integrated Power and Water Systems, Seismic Evaluation and Retrofit of Lifeline Systems, Articles from MCEER's Research Progress and Accomplishments Volumes, pp.65-86.,2004.
- 7) 静間俊郎，中村孝明：復旧曲線の理論的考察と BCP への適用，土木学会第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続性シナリオ論文報告集，pp.231-236,2009.11
- 8) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領,2003 年第 2 版
- 9) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp161-164，1997.