損傷相関を考慮したストックモデルの地震時復旧曲線

松本俊明¹⁾、中村孝明²⁾

1) 正会員 篠塚研究所、修士（工学）

e-mail : matsumoto@shinozukaken.co.jp

2) 正会員 篠塚研究所、博士（工学）

e-mail : naka@shinozukaken.co.jp

要 約

東日本大震災以降、事業継続、ならびに市場への製品供給責任を果たす目的から、一定量のストックを持つ企業が増えている。これを受け、ストックを持つことによる効果や、どの程度の量を持つのが合理的なのかなど、判断のための方法や具体的な基準が必要になっている。本論の特徴は、複数の製造工程（構成要素）からなる生産ラインの地震時復旧過程の算定法に、各工程に備えられるストックの消費量を有数量として考慮し、なおかつ、構成要素間の損傷相関の影響も取り入れた方法を提案した点にある。また、仮想に設定したストックを含む生産ラインを対象に本提案手法に適用し、その地震時復旧曲線の形状の違い等から構成要素間の損傷相関の影響があることを明らかにした。

キーワード： 復旧曲線、損傷相関、ストック、システム信頼性、地震、事業継続計画

1. はじめに

東日本大震災以降、事業継続計画の策定、ならびに市場への製品供給責任を果たす目的から、一定量の原料、中間品（仕掛品）、製品等のストックを持つ企業が増えている。しかし、ストックを持つことは設備投資や流動資産の増加、これに伴う諸経費の増加など、経済的には見合わない行為となるため、ストック量の調整には一定の合理性が必要となる。そこで、ストックを持つことによる効果や、どの程度の量を持つのが合理的なのかなど、判断のための方法や具体的な基準が必要になる。

先行研究として、土居ら¹⁾は調整池の用水をストックと見做し、水力発電所用水の地震時復旧曲線の評価を行っているが、調整池の用水量を無限としているため合理的なストック量の検討は課題としている。一方、著者^{2,3)}らは、生産機能の復旧曲線に着目し、ストックによる効果を視覚的に把握できる方法を提案すると共に、発災後に必要となる市場への製品供給量などから、合理的なストック量について検討を行った。特徴は、生産機能を製造装置が有機的に連結したシステムとしてモデル化し、システム内に位置するストックの消費量に着目した点にある。しかしながら、システムを構成する要素の損傷は独立を仮定しており、実用的には課題がある。

他方、例えば、香村ら⁴⁾は販売店の在庫量をいくらにすると利益が最大になるのかを解析する数理モデルを提案しているが、地震時等の緊急時の製品在庫評価は行っていない。

本研究は、一定の性能を持つ製造装置からなる生産ラインを対象に、損傷相関を考慮したストックモデルについて提案を行う。一方、損傷相関については、同時確率分布の領域積分^{5) 6)}やモンテカルロシミュ

ュレーション⁷⁾などの方法が一般的ではあるが、本論では取り扱いが簡便である全確率の定理を援用した文献1)の方法を使う。

本論の構成は、先ずストックを考慮した際の復旧曲線の評価方法、ならびに構成要素間の損傷相関を考慮する方法を示す。そして、複数の製造装置からなる生産ラインを例として取り上げ、損傷相関を考慮した復旧曲線、ならびに復旧期間の期待値RTE (Recovery Time Expectancy) を評価・分析すると共に、ストックの効果に対する損傷相関の影響を明らかにする。

2. 復旧曲線とストックモデル

2.1 復旧曲線について

復旧曲線とは、発災により被災したシステムが完全復旧するまでの経時的プロセスを表す曲線のことである。構成要素の性能を考慮した復旧曲線について、筆者らは性能の回復率に着目するか、復旧時間に着目するかによって2種⁸⁾の曲線を提案している。一つは、性能の確率変数の平均値を復旧時間に対し結んだ復旧曲線D (以下、「D曲線」という。)である。もう一つは、復旧時間の確率変数の平均値を性能に対し結んだ復旧曲線T (以下、「T曲線」という。)である。D曲線は、設定する損傷形態の復旧期間に依存する曲線となり、給水や送電などのように供給nodeが複数存在する比較的複雑なシステムの復旧曲線の評価⁹⁾に向いている。一方、T曲線はシステムの機能がある程度限定できる場合に有意とされ、発災後の生産量の回復とそれに対応する復旧期間を読み取ることができる。

図1に例示するように、システムが完全復旧するまでには無数の復旧曲線が想定される。しかし、実現するであろう曲線を特定できないことから平均的な曲線(図1中太実線)を採用することになる。ちなみに無数の復旧曲線の中には最悪ケースも計算されている。策定する事業継続計画における目標(例えば、発災時の目標復旧期間や目標生産量)に応じて、適切な復旧曲線を採用する必要がある。

図1 復旧曲線概念図

本論では、システム性能(生産システムが市場に供給できる一日当たりの生産量)の復旧過程を表すD曲線を用いる。理由は、複数の生産ラインが並列に存在する工場の場合、生産性能は多様となるためである。D曲線は復旧時間 t を条件としたシステムの一日常たりの生産量 r の確率密度関数 $f_R(r/t)$ より、(1)式のように求めることができる。なお、同確率密度関数 $f_R(r/t)$ は同時復旧を前提とした文献1)を参照する。

$$R_D(t) = \int_0^1 r \cdot f_R(r/t) dr \quad (1)$$

被災からの復旧は同時並行的に進めるものとする、要素の復旧時間 t は要素間においてそれぞれ独立に考えることができる。つまり、所与である要素の復旧時間に応じて、離散的にシステム性能の確率分

布を求めればよい。(1)式よりD曲線は、復旧時間 t を条件としたシステム性能の確率変数 $R_{sys/t}$ の期待値を用いて、(2)式のように書き改める。

$$R_D(t) = E(R_{sys/t}) \quad (2)$$

2.2 スtockモデルについて

図2に例示するように、システムの任意の位置に一定のストックがあるモデル（以下「ストックモデル」という。）を想起する。図2中□がシステムを構成する製造装置等で○がストックを表す。このとき、ストックの消費量に着目し、ストックの上流側システムの性能が、ストックの下流側システムの性能を下回った場合、ストックから仕掛品、あるいは製品等の供給が行われると考える。なお、ストックの被害は考慮していない。ストック消費量の確率変数 $R_{con/t}$ は下流側システムの性能と上流側システムのその差として(3)式のように求められる。

図2 スtockモデルの例

$$R_{con/t} = R_{lower/t} - R_{upper/t} \quad (3)$$

ここに、 $R_{lower/t}$ は復旧時間 t を条件とした下流側システムの性能の確率変数、 $R_{upper/t}$ は同じく上流側システムの性能の確率変数である。このとき、 $R_{con/t}$ が正の場合、ストックから供給されるものの、負の場合は上流側からの供給が勝った状態でありストックからの供給は行われない。つまりストックからの製品供給は0となる。これを条件として課す必要がある。また、供給できる1日当たりのストックの最大量を r_m と置くと、これ以上の供給はできないことになり、この条件も加える必要がある。以上より、ストック消費量の確率変数 $R_{con/t}$ の確率密度関数 $f_{R_{con/t}}(r)$ は、最終的に(4)式ようになる。

$$f_{R_{con/t}}(r) = \begin{cases} r_m & r > r_m \\ f_{R_{con/t}}(r) & 0 < r \leq r_m \\ 0 & r \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

一方、ストックを使い果せばストック機能は終了する。ストック消費量を z_c と置くと、ストック供給可能時間 t_c は(5)式のように求められる。ただし、最大復旧期間 t_{max} を超えて、ストックが消費されることはないため、 $t_c \leq t_{max}$ の条件が必要になる。

$$z_c = \int_0^{t_c} E(R_{con/t}) dt \quad (5)$$

また、ストックの残量の期待値 z_a は、ストック総量 z からストック消費量 z_c を差引くことで得られる。

ストックを考慮したD曲線は、ストックがない場合のシステムの性能の確率変数 $R_{sys/t}$ の期待値にストック

ク消費量の確率変数 $R_{con/t}$ の期待値を足せば求められる。式で表すと(6)式のようになる。

$$R_D(t) = E(R_{sys/t}) + E(R_{con/t}) \quad (6)$$

3. 損傷相関の評価^{1), 10)}

全確率の定理を用いた文献1),10)の方法を使い、損傷相関を考慮する。まず、地震 S による作用する地震動強さの下での要素の損傷確率は(7)式で求めることができる。

$$p(S) = \int_0^{\infty} p(x) \cdot dp(x|S) \quad (7)$$

ここに、 $p(S)$ は作用する地震動強さのばらつきを考慮した地震 S による要素の損傷確率である。 $dp(x|S)$ は地震 S による要素に作用する地震動強さ x が生じる微小確率を示している。 $p(x)$ は(8)式のように表される。

$$p(x) = \int_0^x f_c(\ln s; c_m, \zeta_c) ds \quad (8)$$

ここに、 $f_c()$ は耐力の対数正規確率密度関数で、 c_m 、 ζ_c はその中央値、対数標準偏差である。(7)式はそのままシステムに拡張することができ、この場合システム性能の確率関数は以下のように求められる。

$$P_R(r|t, S) = \int_0^{\infty} P_R(r|t, x) \cdot dp(x|S) \quad (9)$$

ここに、 $P_R(r|t, S)$ はシナリオ地震 S によるシステム性能の確率関数、 $P_R(r|t, x)$ は作用する地震動強さ x によるシステム性能の確率関数である。また、 $dp(x|S)$ は作用する地震動強さの確率変数 X の確率密度関数を用いて記述でき、 $f_X() = dp/dx$ の積分変数の変換を行い、(10)式のように表される。

$$P_R(r|t, S) = \int_0^{\infty} P_R(r|t, x) \cdot f_X(x; x_m, \zeta_X | S) dx \quad (10)$$

ここに、 $f_X()$ は作用する地震動強さの対数正規確率密度関数である。 x_m 、 ζ_X はそれぞれ、作用する地震動強さの中央値、対数標準偏差である。なお、(10)式の積分は陽に解けないため、数値積分を行う。

次に、要素に作用する地震動強さ X を要素間において完全相関と仮定する。そして、要素間の損傷の相関係数を所与とし、また、作用する地震動強さのばらつきと耐力のばらつきの二乗和平方根をとった複合偏差を一定とすると、損傷の相関係数 ρ_F と複合偏差 ζ_F から、(11)式のように作用する地震動強さの対数標準偏差 ζ_X を得る。さらに、(12)式より、要素の耐力の対数標準偏差 ζ_C を得る。

$$\zeta_X^2 = \rho_F \cdot \zeta_F^2 \quad (11)$$

$$\zeta_C^2 = \zeta_F^2 - \zeta_X^2 \quad (12)$$

(11)、(12)式で得られた ζ_x と ζ_c を(10)式に適用することで、損傷の相関係数 ρ_F の下でのシステム性能の確率関数を求めることができる。この方法は作用する地震動強さの不確実性を完全相関成分、構造物の耐力の不確実性を独立成分と仮定し、複合偏差 ζ_F を一定として、 ζ_x と ζ_c を制御することで任意の損傷の相関係数 ρ_F の下での組合せ事象の確率を計算するものである。ただし、損傷相関は要素間で一定とする。

4. 事例解析

製造装置を要素としたシステムモデル¹⁰⁾を解析例として取り上げる。図3にその解析モデルを示す。同図中の□は製造装置を表している。表1には各製造装置の諸元を示す。システムの生産量は日当たり最大で500（例えば、単位はtonあるいは個）であるが、A、B、C processの生産量は日当たり最大で600となり、本システムには余剰性能がある。各製造装置の損傷形態は小破、大破とし、これらに対する復旧期間は3日と30日とした。本論では、最大復旧期間は同時復旧を前提に $t_{max}=30$ とする。また、各損傷形態に対する発生確率はFragility Curveから求める。地震 S による作用する地震動強さ x の離散化数は1000として(10)式の数値積分を行い、その時の加速度中央値は400Galとした。各製造装置の耐力中央値（耐震性能）は加速度換算値で表1の通りとし、作用する地震動強さと耐力のばらつきを考慮した複合偏差は $\zeta_F=0.5$ とした。同システム性能の確率変数は(13)式のように求められる。

図3 製造装置からなる生産ラインを模したシステムモデル¹⁰⁾

表1 システムモデルの製造装置の諸元¹⁰⁾

構成要素	1日当たりの生産量	損傷形態	耐力中央値 (Gal)	復旧期間 (日)
R _A	200	小破	700	3
		大破	800	30
R _B	200	小破	440	3
		大破	600	30
R _C	150	小破	400	3
		大破	500	30
R _D	100	小破	420	3
		大破	550	30

$$R_{sys|t} = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \min(R_{A|t}, R_{B|t})_i, \sum_{i=1}^4 R_{C|t}, \sum_{i=1}^5 R_{D|t} \right\} \quad (13)$$

ここに、 $R_{sys|t}$ は復旧時間 t に依存するシステム性能の確率変数で、 $R_{A|t} \sim R_{D|t}$ は同じく t に依存する各製造装置の性能（1日当たり生産量）の確率変数を表す。

図4は図3のシステムモデルにストックを考慮したもので、○がストックを表し、 S_B と S_C には仕掛品、 S_D には製品がそれぞれストックされている。また、各ストックの消費は同時に行わず、個々に消費すると仮定する。

復旧時間 t を条件としたストック消費量の確率変数は、 S_B にストックがある場合は(14)式、 S_C にストックがある場合は(15)式のように表される。ストックが S_D に位置する場合、上流側の確率変数は(13)式と

同じとなる。なお、それぞれ(4)式の条件が課せられるので注意する。また、ストックを考慮した復旧曲線は、(6)式に示した通り、 $R_{sys/t}$ の期待値に $R_{con/t}$ の期待値を足すことで求めることができる。

図4 ストックを考慮した生産ラインを模したシステムモデル（ストックモデル）

$$R_{con/t} = \min \left(\sum_{i=1}^4 R_{Ci/t}, \sum_{i=1}^5 R_{Di/t} \right) - \sum_{i=1}^3 \min(R_{Ai/t}, R_{Bi/t})_i \quad (14)$$

$$R_{con/t} = \sum_{i=1}^5 R_{Di/t} - \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \min(R_{Ai/t}, R_{Bi/t})_i, \sum_{i=1}^4 R_{Ci/t} \right\} \quad (15)$$

5. 解析結果と考察

ストックモデルの地震時復旧曲線の評価は、ストック位置とその消費量により、表2に示す7ケースを対象に行った。また、各ケースの復旧曲線は、損傷の相関係数 ρ_F を0.0（独立）、0.5、0.8、1.0（完全相関）に変化させて、それぞれの損傷相関係数について求めることとする。ケース0_1はストックを設けない場合の解析ケースである。また、ケース1_1～1_3は1日当たりの最大ストック供給量 r_m を通常時の生産量（1日当たり500）と同等としたケースであり、ケース2_1～2_3は非常時には市場に製品を少量ずつ供給することを想定し、1日当たりの最大ストック供給量 r_m を200としている。

表2 解析ケース一覧

No.	解析ケース	ストック					
		名称	内容	ストック総量(z)	1日当たりの最大 ストック供給量(r_m)		
1	0_1	—	—	—	—		
2	1_1	S_B	仕掛品	1000	500		
3	1_2	S_C					
4	1_3	S_D	製品		200		
5	2_1	S_B	仕掛品				
6	2_2	S_C					
7	2_3	S_D	製品				

損傷の相関係数 ρ_F に対応した各ケースの解析結果（復旧曲線）を図5と図6に示す。図5（a）にストックなし（ケース0_1）、（b）にストック S_B （ケース1_1）、（c）にストック S_C （ケース1_2）、（d）にストック S_D （ケース1_3）をそれぞれ示し、図6（a）にストックなし（ケース0_1）、（b）にストック S_B （ケース2_1）、（c）にストック S_C （ケース2_2）、（d）にストック S_D （ケース2_3）をそれぞれ示している。なお、各図中の赤細破線はストックなし（ケース0_1）を表している。また、各図中の凡例には損傷の相関係数 ρ_F と、ストック残量 z_a を併記している。 $z_a=0$ はストックを使い果たしている状態である。

まず、図5の各図に着目する。図5（a）のケース0_1は損傷相関の違いにより復旧曲線は一日当たりの性能に差が生じている。それぞれの復旧曲線を見ると、相関が低く独立に近いほど、性能の低下は顕著

になる。この理由は製造設備の直列部における性能のミニマム演算によるところが大きく、文献1)にも同様の指摘がある。図5 (b) のケース1_1の復旧曲線の形状は単調増加しているという点において、ケース0_1に類似している。また、完全相関の復旧曲線は、ケース0_1における完全相関の復旧曲線と同じとなった。これは、上流側process A、Bの耐震性能がprocess C、Dのそれより勝っていること、さらに、完全相関によって上流側のみ損傷する事象が空事象になったことが原因である。その結果として、ストック消費は発生せずストックの効果は表れなかった。図5 (c) のケース1_2の復旧曲線を見ると、損傷相関が低い程ストックを使い果たす期間が短い。また、完全相関では復旧期間30日後でもストックが残っている（ストック残量 $z_d=50.56$ ）。これは、完全相関の仮定の下ではストック量が過多であることを表している。図5 (d) のケース1_3の復旧曲線を見ると、損傷相関にかかわらず、発災直後からシステムの最大性能である500を維持しているが、発災後5日未済でストックを使い果たしてしまい（同図凡例ストック残量 z_d 参照。）、それ以降はストックなし（ケース0_1）の性能に戻る。なお、図5 (d) のケース1_3における $\rho_F=0.0$ （独立）の復旧曲線は、小破の復旧期間3日より早い t_c （ストック供給可能時間）=2.98日でストックを使い果たしている。図5より、システムの後半部にストックを設けることは、総じてストック消費が多く、ストック効果による性能の回復が顕著となる。また、損傷相関が高くなると、ストック消費は減少する傾向がある。

図5 損傷相関を考慮した復旧曲線の比較（赤細破線でケース0_1を併記している。）

次に、図6 (b) のケース2_1の復旧曲線は、ストックなし（ケース0_1）と比較すると、復旧曲線が単調増加するという点において両者は類似している。また、1日当たりの最大ストック供給量 r_m を500から200に制限したことで、ストック消費が小さくなり、ストック残量が多くなっている。図6 (c) のケース2_2を見ると、損傷相関が高くなるにつれて、復旧期間中の性能は回復し、その期間は長くなる。一方、前述の通り、1日当たりの最大ストック供給量 r_m を500から200に制限したため、完全相関の復旧曲線は1日当たりのストック消費が少なくなり、ストックは半分以上残っている（ストック残量 $z_d=620.2$ ）。ケース1_2と同様に完全相関の下では、ストック量が過多であることを表している。図6 (d) のケース2_3の復旧曲線は、損傷相関が低く独立に近い程、ストック消費は多く、そのためストック供給可能時間 t_c

は短い結果となった。

図5の例では、ストックからの供給量を日当たりで最大500としているが、これはシステムモデルの最大生産量500と同じである。このため、例えば、上下流側の損傷の組合せ事象の中で、上流が100、下流が300の場合、ストックから200 ($200=300-100$) を供給することになるが、この供給によって上流側は見掛け上健全な状態と同じになる。つまり、ストックからの日当たり供給量が、システムモデルの生産量より同じかそれ以上の場合、上流側の損傷如何に関わらず、下流側の損傷状況によってのみ復旧曲線は決定する。この点を勘案し、改めて図5 (b) のケース1_1と、図5 (c) のケース1_2の発災から3日間の復旧曲線を見比べると、図5 (b) は損傷相関の影響によって4パターンの性能低下が現れているが、図5 (c) は損傷相関に関わらず性能低下は一定値である。この理由は、図5 (b) のケース1_1の復旧曲線は、(14)式の第一項によって決定することになり、式にミニマム演算があることによって4パターンの性能低下が現れた。一方、図5 (c) のケース1_2の復旧曲線は、(15)式の第一項によって決定することになるが、式は確率変数の和算であり、その期待値は相関の影響を受けない。このため、損傷相関に関わらず性能低下は一定値となった。極例として、ストック量が無尽蔵の場合、図5 (c) と (d) は損傷相関に関わりなく、曲線は一致する。実際は、ストック量は有限であるため、発災時における市場への供給量や、需要状況をリアルタイムに把握しつつ、調整する必要があるだろう。一方、図6の例では、ストックからの供給量を日当たりで最大200とした。これにより、システム後半部にストックを設けた場合でも、(13)式や(15)式のミニマム演算による影響で4パターンの性能低下が復旧曲線に表れている。

ここで、「発災3日後から市場に供給すべき製品の量を400に維持したい」との目標を設定する。これに対する最適ケースは図6 (d) に示すケース2_3が最有力であるが、ストック供給可能時間 t_c が最も長い、完全相関の復旧曲線でも $t_c=13.67$ 日であり、それ以降は性能400を下回っている。よって、設定した目標を達成できず、ストック総量 $z=1000$ (表2参照) では不足していることを表している。このように、発災時に市場に供給すべき製品の量及び期間を設定すると、必要とされる最適なストック量を明らかにすることが可能となる。

図6 損傷相関を考慮した復旧曲線の比較 (赤細破線でケース0_1を併記している。)

次に、損傷相関の違いによる復旧期間の期待値RTE（以下「RTE」という。）の比較を図7に示す。文献1),10)では、RTEは単調増加となる復旧曲線に対して定義されているが、図6等から明らかなようにストックの影響により復旧曲線は単調増加とはならない。そこで、ストックを考慮したRTEは(16)式のように表す。これは、復旧曲線の縦軸をシステムの日当たりの最大性能 $R_{max}=500$ で基準化した上で、復旧曲線の上側の面積を求めることに相当する。(16)式中の $R_D(t)$ は、(6)式で示したストックを考慮したD曲線のことである。このRTEが小さい程、性能回復が著しいことを示している。

$$RTE = \int_0^{\infty} (R_{max} - R_D(t)) / R_{max} dt \quad (16)$$

図7 (a) より、ストック消費を考慮することによりRTEは短くなりストック効果が表れている。さらに、損傷相関が高くなるとRTEは短くなる傾向が見られる。これは、損傷相関が高いと、損傷確率の高い事象に損傷確率の低い事象が含まれるためである。また、ケース0_1とケース1_1の完全相関ではRTEが一致している。これは、図5 (b) 内の凡例に示すように、ケース1_1においてストックが使われていないためである（ストック残量 $z_a=1000$ ）。さらに、完全相関を除くケース1_2とケース1_3のRTEは、それらのD曲線の形状が異なっても同じである。これは、いずれのケースも30日（最大復旧期間 t_{max} ）までの間にストックを使い果たしていることが理由である（図5 (c) と (d) 凡例内ストック残量 z_a 参照）。

図7 (b) を見ると、ストックの1日当たりの供給量を最大500から200としたことで、ストック消費が少なくなり、ケース2_1のRTEは、図7 (a) に示したケース1_1よりも若干ではあるが長くなっている。但し、完全相関では、図7 (a) のケース0_1とケース1_1の完全相関の部分と同様の理由で、ケース0_1とケース2_1のRTEは一致している。また、ケース2_2は完全相関のところで傾向が逆転している。これについても、ストックの1日当たりの供給量を最大500から200に制限したことで、ストック消費量が少なくストックが残っている（ストック残量 $z_a=620.2$ ）ためである。このように、復旧期間の期待値RTEは、設定するストック量、ならびに損傷相関に左右される。

ストック消費による復旧曲線の改善効果は、ストックの総量、日当たりの最大供給量に依存することから、ストックが余るような場合はストックの総量は過多となる。逆に早期に使い果たしてしまう場合は、ストックの総量が少ないか、あるいは日当たりの供給量が多すぎるか、のどちらかとなる。本提案手法は、これら要因の関連を定量的に把握することができる。これは、発災時に、市場に供給すべき製品の量を予め設定しておけば、その量を維持するための最適なストック量、ならびに日当たりの供給量を決定できることを表している。

図7 損傷相関の違いによる復旧期間の期待値 (RTE) の比較

6. まとめ

損傷相関を考慮したストックモデルの地震時復旧曲線（D曲線）の評価手法を提案した。また、本提

案手法を、複数の製造装置からなる生産ラインを模したシステムモデルに適用しD曲線と復旧期間の期待値RTEを評価・分析すると共に、ストックの効果に対する損傷相関の影響を明らかにした。本論で得られた結果を整理し以下に示す。

- ・ ストック消費を考慮することにより、「ストックなし」と比較して性能の回復は顕著となる。特に、システムの後半部にストックを設けることは、総じてストック消費が多く、ストック効果が顕著となる。
- ・ ストック消費を考慮しない場合、損傷相関が高くなると性能の改善は大きくなる傾向にある。よって、RTEは短くなる。
- ・ ストック消費を考慮した場合、損傷相関が高くなるとストック消費量は減少する。そのため、ストック供給可能時間 t_s は長くなる。
- ・ 復旧曲線の形状が異なっている場合、30日（最大復旧期間 t_{max} ）までの間にストックを使い果たしている場合、RTEは同じとなる。
- ・ ストック消費は装置間の損傷相関の影響を強く受けることから、損傷相関の考慮は不可欠である。

本論で得られた結果は、システムモデル、ならびにストックの総量や日当り供給量に依存するもので、必ずしも一般的な傾向を示すものではない。一方で、本提案手法はこれら要因の関連を定量的に把握することができる。これは、発災時に、市場に供給すべき製品の量を予め設定しておけば、その量を維持するための最適なストック量、ならびに日当たりの供給量を決定できることを示唆している。最適なストック量の決定などに関する議論については、本研究の今後の課題としたい。

謝 辞

3名の匿名査読者には丁寧な査読をしていただき、本論の内容を改善することができました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土居賢彦、静間俊郎、中村孝明：調整池のBuffer効果を考慮した水力発電水路施設の復旧過程に関する研究、土木学会論文集A1、Vol.69、No.3、2013年、pp.505-515.
- 2) 中村孝明、吉川弘道：ストック効果を考慮した製造業の復旧曲線、日本地震工学会年次大会-2013、2013年11月.
- 3) 松本俊明、中村孝明：地震時復旧曲線におけるストックモデルの利用性 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2014年9月、pp.49-50.
- 4) 香村俊武、福島和伸、木内正光：利益最大化のための生産販売方式の研究—Make-to-Order方式かMake-to-Stock方式か—、日本経営工学会論文誌、Vol.58、No.3、2007年、pp.173-181.
- 5) 能島暢呂：要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション、土木学会論文集A1、Vol.65、No.1、2009年、pp.776-788.
- 6) Curnow, R. N. and Dunnett, C. W. : The numerical evaluation of certain multivariate normal integrals. *Annals of Math. Stat.*, Vol.33, No.2, Sep., 1962, pp.571-579.
- 7) 福島誠一郎、矢代晴実：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価、日本建築学会計画系論文集、第552号、2002年2月、pp.169-176.
- 8) 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ンポジウム論文報告集、2009年11月、pp.231-236.
- 9) 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*, 2004, pp.65-86.
- 10) 中村孝明、境茂樹、吉川弘道：損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第76巻、第661号、2011年3月、pp.713-719.

（受理：2015年4月24日）

（掲載決定：2015年9月30日）

An evaluation of seismic recovery curve based on the stock model considering damage correlation

MATSUMOTO Toshiaki ¹⁾, NAKAMURA Takaaki ²⁾

1) Member, Shinozuka Research Institute, M. Eng.

2) Member, Shinozuka Research Institute, Dr. Eng.

ABSTRACT

After the Great East Japan Earthquake, industrial companies that store a certain amount of stocks, i.e., their finished products and unfinished products, are increasing. It is because they want to continue their business and to fulfill responsibility to supply the products to the market. Based on above-mentioned circumstances, practical method and criteria for estimating suitable amount of stocks are needed. This paper discusses evaluation method of recovery process from earthquake damage for manufacturing line consists of plural manufacturing apparatuses (components). And its points are; considering the finite amount stocks that are stored between each manufacturing process, and taking impacts of the damage correlation between components into account. In addition, using the proposed method, recovery curves for an example of virtual manufacturing line including the stocks are estimated, and the damage correlation influence is clarified through the difference among the curves shape.

*Keywords: Recovery curve, Damage correlation, Stock, System reliability, Earthquake,
Business continuity planning*