

多拠点生産施設の地震リスク評価に関する考察

龍神 弘明^{*1}・齊藤 芳人^{*1}・嶋 登志夫^{*2}・水谷 守^{*3}

A Study of Seismic Risk Assessment for Multi Production Facilities

Hiroaki RYUJIN, Yoshihito SAITO, Toshio SHIMA, Mamoru MIZUTANI

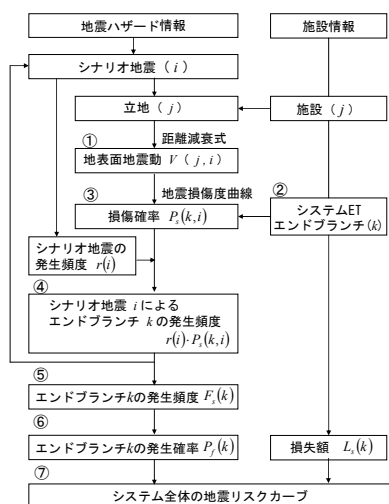


図-1 ポートフォリオ地震リスク評価フロー

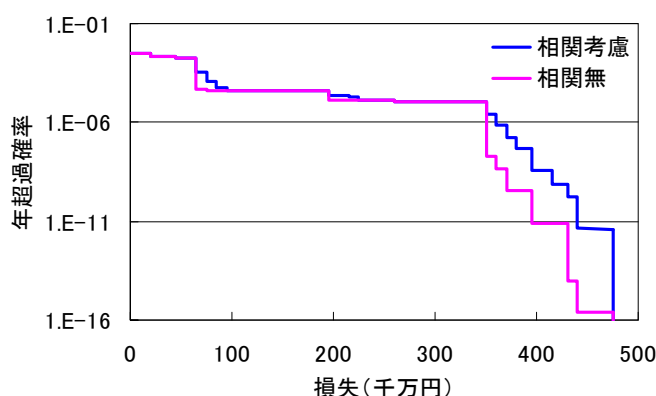


図-2 ポートフォリオ地震リスクカーブ

研究の目的

昨年の東日本大震災を経験し、事業継続性が一層注目を集めるようになった。様々な工程が存在する生産施設は、自社施設、原材料・部品の供給元なども含め、拠点が広域に散在していることが多い。事業継続を考える上で、施設単体の機能評価だけでは十分な情報とはならない。生産工程に関わる機能が相互に影響を及ぼす施設群を一つの生産システムと考え、生産システム全体の機能評価を行うことが必要である。

本論文では、システムとしての機能低下をリスクと考え、想定施設に対して、①立地条件、②耐震補強、③在庫確保、④生産設備の分散、の4つの対策を立案し、地震リスクカーブを用いて対策案によるリスク（損失額）の低減効果について考察を行った。

技術の説明

地震動の大きさの発生確率を考えると、遠く離れた地点間の地震動の発生は独立であるが、近接する地点では大きな相関がある。多拠点施設の機能評価を行う際には、地震被害の相関を考慮する必要がある。地震被害の相関を考慮したポートフォリオ地震リスクカーブを用いて対策案の効果を実定化する。

主な結論

想定した3施設による地震ポートフォリオ解析を行い、ポートフォリオ地震リスクカーブの比較より、地震被害の相関を考慮したリスク評価が必要であることを示した上で、4つの視点から地震リスクの低減対策を立案し、地震被害の相関を考慮した地震ポートフォリオ解析により対策案によるリスク（損失額）の低減効果について考察を行なった。①如何に耐震性の高い施設であっても重要な施設は、地震ハザードの低い場所に計画することの重要性、②「施設の耐震性」、「立地の地震ハザード」だけでなく「施設の重要度」を考慮することの重要性、③システム全体のリスクを低減するのではなく、例えば発生頻度の高い地震による被害を小さくする対策を選択する判断もあること、④如何に製造を停止させないかが、地震リスク低減対策で重要となること、などを示した。

*1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ

*3 株式会社モダンエンジニアリングアンドデザイン

*2 本店 建築エンジニアリング部 リニューアルエンジニアリンググループ

多拠点生産施設の地震リスク評価に関する考察

龍 神 弘 明*¹ 齊 藤 芳 人*¹
嶋 登 志 夫*² 水 谷 守*³

要 旨

昨年、東日本大震災を経験し、事業継続性が一層注目を集めるようになった。特に製造業における生産施設では、自社施設は無論、原材料・部品の供給元なども含め、拠点が広域に散在していることが多い。そのため、事業継続を考える上で、施設単体の機能評価だけでは十分な情報とは言えない。例え施設単体の機能が維持できたとしても、生産工程に関わる別の施設が被害を受け機能が停止すると、製品の生産を続けることができなくなる。そこで生産工程に関わる複数の施設を一つのシステムと考え、システム全体の機能評価を行うことが必要である。

本論文では、システムとしての機能低下をリスクと考え、①施設の立地条件、②耐震補強、③在庫確保、④生産設備の分散の4つの対策によるリスク低減効果について地震リスクカーブを用いて考察を行った。

キーワード 事業継続／リスク評価／ポートフォリオ解析／イベントツリー／地震リスクカーブ

目 次

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. ポートフォリオ地震リスク評価結果 |
| 2. ポートフォリオ地震リスク評価手順 | 5. リスク低減効果の考察 |
| 3. 想定施設 | 6. まとめ |

A STUDY OF SEISMIC RISK ASSESSMENT FOR MULTI PRODUCTION FACILITIES

Hiroaki RYUJIN
Toshio SHIMA

Yoshihito SAITO
Mamoru MIZUTANI

Synopsis:

Business Continuity came to attract attention further by the Great East Japan Earthquake last year. The production facilities where there are various processes including suppliers lie scattered in the wide area in many cases. Therefore, it does not become sufficient information to evaluation only one facility in the case of business continuity. Then, it is required to evaluate multi production facilities as one system.

In this paper, the risk reduction effect was considered using the earthquake risk curve in four viewpoints of ① location of institutions, ② seismic strengthening, ③ secure stock, ④ distribution of production facilities.

* 1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ
* 2 本店 建築エンジニアリング部 リニューアルエンジニアリンググループ
* 3 株式会社モダンエンジニアリングアンドデザイン

1. はじめに

昨年、東日本大震災を経験し、事業継続性が一層注目を集めるようになった。様々な工程が存在する生産施設は、自社施設は無論、原材料・部品の供給元なども含め、拠点が広域に散在していることが多い。そのため、災害時にある施設単体の機能が維持できたとしても、生産工程の一部を担う別の施設が被害を受け機能が停止すると、製品の生産を続けることができなくなる。事業継続を考える上で、施設単体の機能評価だけでは十分な情報とは言えない。

そこで原材料・部品の供給元などを含めた生産工程に関わる複数の施設を一つの生産システムと考え、システム全体の機能評価を行うことが必要である。システムとしての機能低下をリスクと考え、どのような対策を取れば効果的にリスクを低減することが可能か考えることが重要である。例えば、複数の散在する施設全体が、地震によりどのような被害（機能低下）を受けるかを評価することは、各施設（システムの構成要素）の地理的な配置をリスク分散の観点から計画する際に有効な情報となる。

個別施設の地震リスク評価には、地震リスクマネジメント（SRM）手法などがある。対象地点の地震危険度を確率論的地震ハザード曲線で評価し、対象物の地震被害特性を地震損傷度曲線（地震動の大きさと損傷確率の関係を表したもの：図-6）として求め、両者を総合してリスクを評価（定量化）する方法¹⁾である。一方、広域に散在する施設群を対象とした場合、SRM手法をそのまま適用することができない。確率論的地震ハザード曲線は各対象地点の地震危険度を個別に示すのみであり、そこに複数施設間の地震被害の相関を考慮することはできないなどの理由による。なぜならば、地震動の大きさの発生確率を考えると、遠く離れた地点での地震動の発生は独立であるが、近接する地点での地震動の発生に関しては大きな相関があり、複数施設の機能評価を行う際には、地震動の相関（以後、地震被害の相関）を考慮する必要がある。

このような複数施設の地震リスク評価手法には、地震保険や不動産の証券化などに用いられてきた地震ポートフォリオ解析²⁾がある。地震ポートフォリオは、異なる地点の施設をまとめて評価することによって、全体としての不確定性（ばらつき）を低減し、過大な地震損失が発生する可能性を抑えることを目的としている。

ポートフォリオにおいては、個々の要素（施設）に正の相関（ある要素の被害が大きい時には他の要素の被害も大きくなる）がある場合、リスク低減効果が低下するため相関を考慮した評価が重要である³⁾。シナリオ地震（特定の地震）ごとに損失期待値を算定し、その発生確率と関連付けて描かれるイベントカーブでは相関の作用を表現できないため、リスクカーブによる評価が望まし

い。リスクカーブは全ての震源を対象にシステム全体に発生し得る損失額の生起確率（超過確率）を示すもので、地震被害の相関を考慮した評価が可能である。このリスクカーブを参照することで、企業耐力を超える損失の発生確率を知ることが可能となり、地震対策の検討や地震保険の加入に関する検討が合理的に行えることとなる。

本論文では、まず地震被害の相関を考慮した場合と考慮しない場合のポートフォリオ地震リスクカーブの作成手順を示す（2章）。次に、複数施設で構成されている生産システムを想定し（3章）、地震ポートフォリオ解析を適用し、システム全体の機能評価を行ない、地震被害の相関を考慮した場合と考慮しない場合の地震リスクカーブ（損失額の大きさとその年超過確率の関係を示したもの）の比較より、相関を考慮する必要性を示す（4章）。最後に、①立地条件②耐震補強③在庫確保④生産設備の分散の4つの視点から地震リスクを低減させる対策案を設定し、地震被害の相関を考慮した地震リスクカーブの比較より、リスク低減効果について考察を行った（5章）。

2. ポートフォリオ地震リスク評価手順

2.1 相関を考慮した場合

地震被害の相関を考慮してモデル化しなければ、ポートフォリオ地震リスクカーブは評価できないため、ポートフォリオ地震リスクカーブを評価する際に、個々の施設の地震リスクカーブを直接利用することはできない。

その場合、地震ハザードをそのソースである多数のシナリオ地震からなる集合としてモデル化し、全ての地震について、個々の地震がポートフォリオに与える損害の確率評価を行い、その地震の発生確率を考慮して合成することによってポートフォリオの地震リスクカーブを評価する手法が提案されている²⁾。シナリオ地震を対象とすれば、地震の発生は全ての施設に共通の事象であり、その時の各地点の地震動の大きさを距離減衰式などによって確率論的に評価したとしても大きな相関を持つ。以下に相関を考慮した場合のポートフォリオ地震リスクカーブの作成手順の概要を、図-1に評価フローを示す。なお、作成手順概要は、図-1中の同じ番号の箇所の説明を記述している。

<作成手順概要>

- ① 安中ら⁴⁾の提案する工学的基盤面の最大速度の距離減衰式に筆者らが提案している表層地盤の増幅率⁵⁾を適用して、シナリオ地震ごとに各施設の立地の地表面地震動 $V(j, i)$ を評価する。ここで、 i はシナリオ地震番号、 j は施設（立地点）番号とする。
- ② イベントツリー（ET）を用いてシステム全体の地震被害特性をモデル化する（図-5）。施設単体の地震被害特性の組み合わせによってシステム全体の地震被害特性がモデル化できる。地震被害特性は、例えば無被害、部分被害、全損などの損傷モード（エンドブラン

チ) でモデル化される。

- ③ 地震損傷度曲線 (図-6) を用い、地震被害特性のエンドブランチごとに、地震 i に対する損傷確率 (損失の発生確率) $P_s(k, i)$ を算定する。なお、 $ps(k, j, i)$ は、 j 工場におけるシナリオ地震 i によるエンドブランチ k の発生確率である。

$$P_s(k, i) = \{psk(1, i), psk(2, i), psk(3, i), \dots, psk(k, i)\}$$

$$= \left\{ \prod_{j=1}^m ps(1, j, i), \prod_{j=1}^m ps(2, j, i), \prod_{j=1}^m ps(3, j, i), \dots, \prod_{j=1}^m ps(k, j, i) \right\} \quad [1]$$

ここで、 m : 施設の数

k : エンドブランチ番号

psk : システムのエンドブランチ k の発生確率

- ④ 地震 i に対する各エンドブランチの発生確率 $psk(1, i) \sim psk(k, i)$ とシナリオ地震 i の発生頻度 $r(i)$ を乗じて、シナリオ地震 i による各エンドブランチの発生頻度を算定する。

$$r(i) \cdot P_s(k, i) = \{r(i) \cdot psk(1, i), r(i) \cdot psk(2, i), \dots, r(i) \cdot psk(k, i)\} \quad [2]$$

- ⑤ シナリオ地震の結果を合算して、各エンドブランチの発生頻度 $F_s(k)$ を算定する。なお、 $f_s(k)$ はエンドブランチ k の発生頻度である。

$$F_s(k) = \{f_s(1), f_s(2), f_s(3), \dots, f_s(k)\}$$

$$= \left\{ \sum_{i=1}^n r(i) \cdot psk(1, i), \sum_{i=1}^n r(i) \cdot psk(2, i), \dots, \sum_{i=1}^n r(i) \cdot psk(k, i) \right\} \quad [3]$$

ここで、 n : シナリオ地震の数

- ⑥ ポアソン過程を利用して式 [4] により、合算した発生頻度 $F_s(k)$ を発生確率 $P_f(k)$ に変換する。

$$P_f(k) = \{1 - e^{-f_s(1)}, 1 - e^{-f_s(2)}, 1 - e^{-f_s(3)}, \dots, 1 - e^{-f_s(k)}\} \quad [4]$$

- ⑦ 発生確率 $P_f(k)$ を年超過確率に変換し、エンドブランチごとに設定した損失額 $L_s(k)$ とで地震リスクカーブを描く。なお、 $l_s(k)$ はエンドブランチ k の損失額である。

$$L_s(k) = \{l_s(1), l_s(2), l_s(3), \dots, l_s(k)\} \quad [5]$$

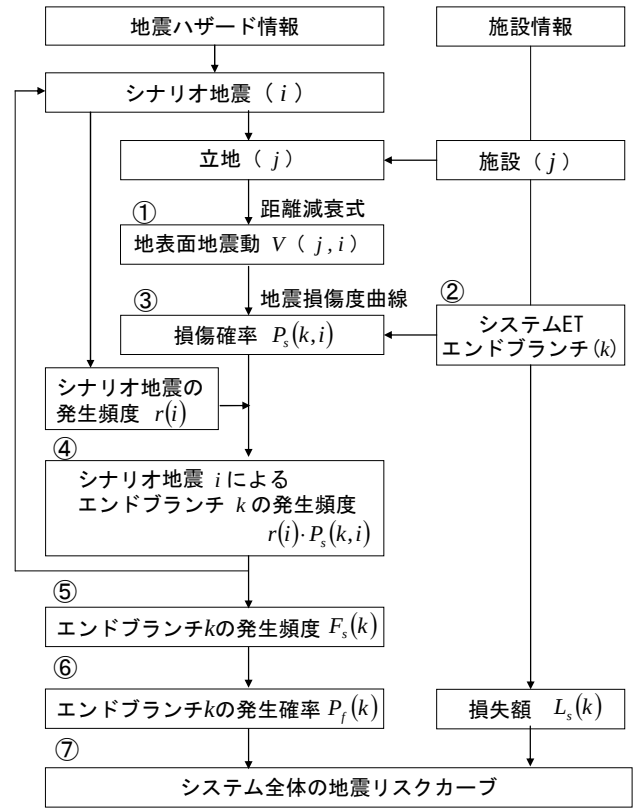


図-1 相関を考慮した場合の評価フロー

2.2 相関を考慮しない場合

以下に相関を考慮しない場合の地震リスクカーブの作成手順の概要を、図-2 に評価フローを示す。相関を考慮した場合 (図-1) と破線で囲んだ手順 (③' ~⑥') が異なる。

<作成手順概要>

- ③' 地震損傷度曲線を用い、 j 工場でシナリオ地震 i によるエンドブランチ k の発生確率 $ps(k, j, i)$ を算定する。
- ④' j 工場におけるシナリオ地震 i に対する各エンドブランチの発生確率 $ps(1, j, i) \sim ps(k, j, i)$ とシナリオ地震 i の発生頻度 $r(i)$ を乗じて、 j 工場におけるシナリオ地震 i による各エンドブランチの発生頻度を算定する。

$$r(i) \cdot ps(k, j, i) = \{r(i) \cdot ps(1, j, i), r(i) \cdot ps(2, j, i), \dots, r(i) \cdot ps(k, j, i)\} \quad [6]$$

- ⑤' シナリオ地震の結果を合算して、 j 工場におけるエンドブランチ k の発生頻度 $F'_s(k, j)$ を算定する。

$$F'_s(k, j) = \{f'_s(1, j), f'_s(2, j), f'_s(3, j), \dots, f'_s(k, j)\}$$

$$= \left\{ \sum_{i=1}^n r(i) \cdot ps(1, j, i), \sum_{i=1}^n r(i) \cdot ps(2, j, i), \dots, \sum_{i=1}^n r(i) \cdot ps(k, j, i) \right\} \quad [7]$$

⑥' ポアソン過程を利用して式〔8〕により、合算した発生頻度 $F'_s(k, j)$ を発生確率 $P'_f(k, j)$ に変換する。

$P'_f(k, j)$ は、 j 工場におけるエンドブランチ k の発生確率であり、式〔9〕によりエンドブランチ k の発生確率 $P''_f(k)$ となる。

$$P'_f(k, j) = \left\{ 1 - e^{-f'_s(1, j)}, 1 - e^{-f'_s(2, j)}, 1 - e^{-f'_s(3, j)}, \dots, 1 - e^{-f'_s(k, j)} \right\} \quad [8]$$

$$P''_f(k) = \left\{ \prod_{j=1}^m \left(1 - e^{-f'_s(1, j)} \right), \prod_{j=1}^m \left(1 - e^{-f'_s(2, j)} \right), \prod_{j=1}^m \left(1 - e^{-f'_s(3, j)} \right), \dots, \prod_{j=1}^m \left(1 - e^{-f'_s(k, j)} \right) \right\} \quad [9]$$

⑦ 発生確率 $P''_f(k)$ を年超過確率に変換し、システムのエンドブランチごとに設定した損失額 $L_s(k)$ (式〔5〕) とで地震リスクカーブを描く。

3. 想定施設

3.1 想定施設の概要および立地の地震環境

想定施設の概要および施設の地理的な配置を図-3 に示す。施設は原材料から中間部品に加工する A、B 工場と中間部品を組み立てて製品（完成品）にする C 工場から生産システムが構成されている。なお、A 工場では中間部品 a を、B 工場では中間部品 b を、それぞれ製造しており、2 つの中間部品が揃わなければ生産が停止することとする。また、組立も C 工場のみで行われているため、3 工場のうち 1 工場だけでも被害を受けると生産システムとしての機能が停止することになる。

今回、地震ハザード情報として利用したシナリオ地震には、筆者らが日本全国を対象に活断層、プレート境界地震およびバックグラウンド地震を対象に離散化モデルとして構築した 26,635 個のシナリオ地震⁶⁾の内、3 施設を結ぶ三角形の重心位置から半径 200 km 圏内に位置する 2,307 個を採用した。施設の地震ハザードは、2,307 個のシナリオ地震で構成されるものとして求めた 3 施設の確率的地震ハザード曲線を図-4 に示す。これより、A 工場が相対的に他の 2 工場より地震ハザードが高い場所に位置していることが分かる。B、C 工場は、敷地の距離が近いこともあり ほぼ同程度である。

3.2 施設の地震被害特性および耐震性

各施設のエンドブランチを単純化し、被害が無い状態（無被害）、製造が停止するが補修・修理することで再開できる状態（部分被害）、建替えが必要な状態（全損）の三つとする。なお、原材料は必ず入手できるものとし、輸送ルート被害などにより製造した中間部品を C 工場に輸送することができなくなることはないとしている。

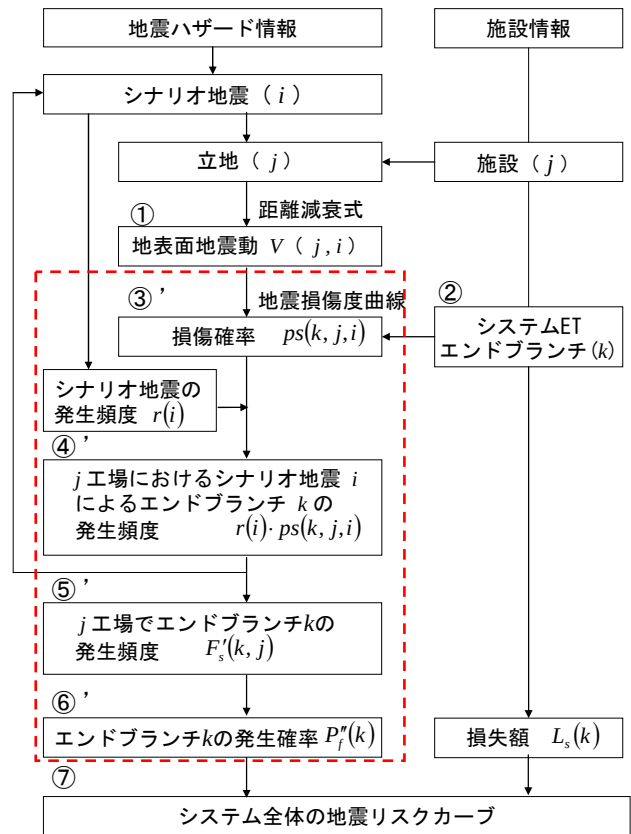


図-2 相関を考慮しない場合の評価フロー

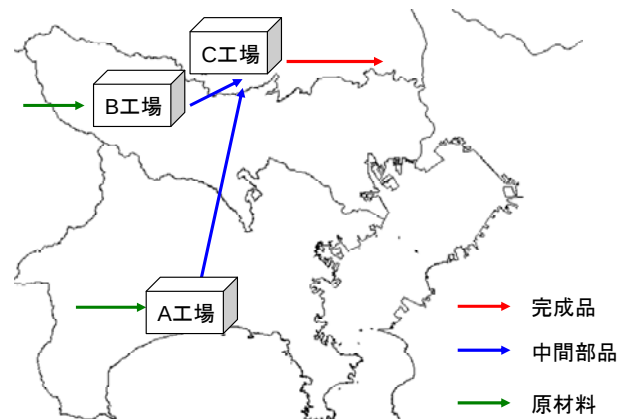


図-3 施設の概要

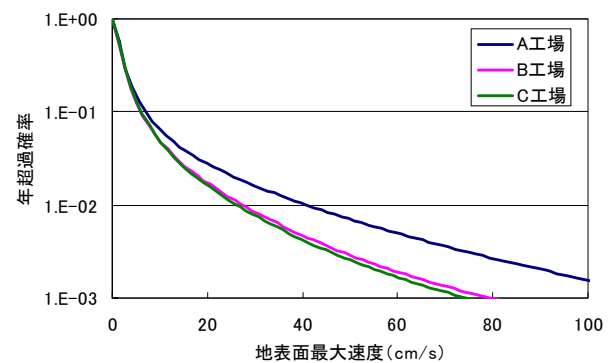


図-4 地震ハザード曲線

施設単体の地震被害特性は、無被害、部分被害、全損の三つのエンドブランチをもつ ET によりモデル化される。生産システムとしては、図-5 に示す 27 (3×3×3) 個のエンドブランチをもつ ET となる。図中の EB (1) ～EB (27) は、エンドブランチの識別番号を、「○」は無被害、「△」は部分被害、「×」は全損を示す。

システム全体として無被害「○」は EB (1) だけである。例えば、EB (2) は、A 工場、B 工場は被害が無いため中間部品の供給は可能であるが、C 工場が部分被害のため製品の製造ができなくなり、生産システムとしては部分被害「△」となる。エンドブランチの中に一つでも「△」があれば、システムとして部分被害、一つでも「×」があればシステムとして全損となる。なお、本 ET は非常に単純化したものであり、実際は対象とする施設の数、設定する損傷モードの数などによって、エンドブランチが数千から数万オーダーになる場合が多い。

A, C 工場は現行基準レベルの耐震性を有している建物、B 工場は旧耐震基準で設計された他の 2 工場より相対的に耐震性の低い建物とする。各施設の耐震性（耐力パラメタ）は、地震動強さ（地表面最大速度）に応じた損傷の発生確率を示す地震損傷度曲線として設定する。表-1 のように損傷モードごとに耐力パラメタの中央値及びばらつき（対数標準偏差）を設定することにより、図-6 に示す地震損傷度曲線が求まる。

3.3 損失額の設定

施設の損失として、地震による工場建屋や製造機器の損傷などの「物的被害」と機能損失により製品の製造ができなくて利益が得られない「機能的被害」のみを考える。この他に被災地の購買力の低下などの「社会情勢の変化」、生産を再開するのに時間がかかり同業他社へ顧客が流出するなどの「評価の低下」などがあるが、今回は考慮しない。

物的被害および機能的被害による損失額は、表-2 のように設定した。一般的に、物的被害は再調達価格より、機能的被害は復旧に必要な日数（生産停止日数）に一日の損失額（ここでは 1 千万円/日とする）を乗じて算定される。生産停止日数は、A 工場が部分被害を受けた場合 35 日間、全損の場合 250 日間、B 工場が部分被害を受けた場合 10 日間、全損の場合 150 日間、C 工場が部分被害を受けた場合 25 日間、全損の場合 180 日間と設定している。ただし、図-5 の各エンドブランチの部分被害および全損を算定する場合は、各施設の生産停止日数を単純に加算するのではなく、システムとしての生産停止日数を採用する。各施設独立で復旧が出来るものとし、例えば EB (5) の B 工場（10 日間）と C 工場（25 日間）が部分被害を受けた場合、生産システムとしてはどちらか長い期間（25 日間）を生産停止日数としている。

A工場	B工場	C工場	エンド ブランチ 番号	A	B	C	シス テム
無被害	無被害	無被害	EB(1)	○	○	○	○
		部分被害	EB(2)	○	○	△	△
		全損	EB(3)	○	○	×	×
		部分被害	EB(4)	○	△	○	△
		無被害	EB(5)	○	△	△	△
		部分被害	EB(6)	○	△	×	×
		全損	EB(7)	○	×	○	×
		部分被害	EB(8)	○	×	△	×
		全損	EB(9)	○	×	×	×
部分被害	無被害	無被害	EB(10)	△	○	○	△
		部分被害	EB(11)	△	○	△	△
		全損	EB(12)	△	○	×	×
		部分被害	EB(13)	△	△	○	△
		無被害	EB(14)	△	△	△	△
		部分被害	EB(15)	△	△	×	×
		全損	EB(16)	△	×	○	×
		部分被害	EB(17)	△	×	△	×
		全損	EB(18)	△	×	×	×
全損	無被害	無被害	EB(19)	×	○	○	×
		部分被害	EB(20)	×	○	△	×
		全損	EB(21)	×	○	×	×
		部分被害	EB(22)	×	△	○	×
		部分被害	EB(23)	×	△	△	×
		全損	EB(24)	×	△	×	×
		無被害	EB(25)	×	×	○	×
		部分被害	EB(26)	×	×	△	×
		全損	EB(27)	×	×	×	×

図-5 生産システムのイベントツリー

表-1 各施設の耐力パラメタの中央値及び対数標準偏差

地震被害特性 (損傷モード)		中央値 (cm/s)	対数標準 偏差
A, C 工場	部分被害	62	0.5
	全損	195	0.5
B 工場	部分被害	48	0.6
	全損	138	0.6

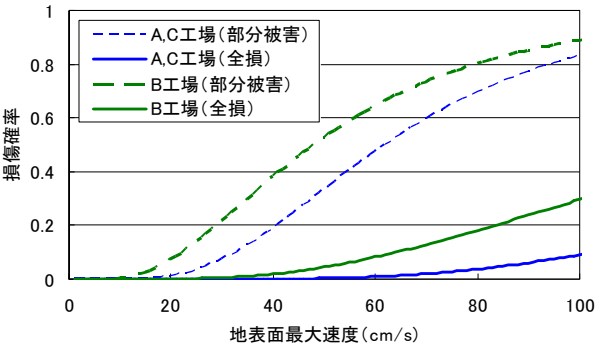


図-6 地震損傷度曲線

表-2 物的被害および機能的被害

	物的被害		機能的被害	
	部分被害	全損	部分被害	全損
A 工場	30	100	35	250
B 工場	10	45	10	150
C 工場	20	80	25	180

単位 (千万円)

4. ポートフォリオ地震リスク評価結果

図-1 の評価フローに従い、地震ごとに各施設の損失確率（被害確率）を求め、その確率和を算定し、すべての地震について、それらを合成することで、地震リスクカーブが評価される。算定したポートフォリオ地震リスクカーブを図-7 に示す。同図には図-2 の評価フローに従い、地震被害の相関を考慮しない（地震リスクが独立である）と仮定して、個々の施設の地震リスクカーブを単純な確率和によって算定したポートフォリオ地震リスクカーブも示した。

図-7 より地震被害に相関を考慮しない場合の地震リスクカーブは、大きな損失に関してポートフォリオの確率を小さく評価することが分かる。地震被害の相関を考慮した場合と考慮しない場合では、地震リスクカーブは大きく異なる。特に損失の大きな領域（以後、大被害領域）での差が大きくなり、地震被害の相関を考慮することの重要性が分かる。ただし、ポートフォリオを構成する施設の位置関係（地震被害に相関性をもたないほど互いに離れているもの）によっては上記が当てはまらないこともある。なお、損失期待値（ $\Sigma[\text{損失} \times \text{年発生確率}]$ ）は、相関の考慮の有無に関係なく原理的に等しい。

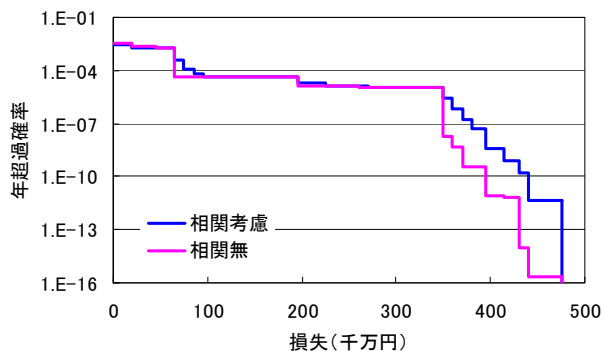


図-7 ポートフォリオ地震リスクカーブ

5. リスク低減効果の考察

5.1 検討項目

地震リスクカーブは、例えば発生確率を考慮しながら、何処までの損失の大きさまで耐えられるか（リスク保有）、どれくらい地震保険を掛けるべきか（リスク転換）などの意思決定の判断材料の一つとして利用できる。

また、リスク低減の対策案ごとの地震リスクカーブを比較することにより、対策効果を定量化、可視化することができる。その際、ポートフォリオの地震リスクカーブを用いると、システム全体に与える効果が分かり、事業継続を考える上で有効な判断材料となる。

本章では、具体的に 3 章で設定した想定施設を基本モデルとして、①立地条件②耐震補強③在庫確保④生産設備の分散の 4 つの視点からパラメタ解析を実施し、地震

リスクカーブを比較することにより、リスク低減効果について考察を行う。なお、ここで用いる地震リスクカーブは、地震被害の相関を考慮する。

5.2 施設の立地条件

耐震性が高くても地震ハザードが大きい地点に建つ建物は、地震ハザードの低い地域に建つ耐震性の低い建物より、地震リスクが大きくなることもある。地震リスクに立地条件が与える影響は大きい。

同じ耐震性能をもつ A 工場と C 工場の立地を入れ替えた場合の地震リスクカーブの比較を図-8 に示す。A 工場と C 工場の耐震性（同じ地震動に対する損傷の発生確率）は同じだが、被害が発生した場合の部分被害および全損の物的被害および機能的被害（生産停止日数）は、A 工場の方が大きい（表-2）。よって A 工場を地震ハザードの小さい敷地に設定することにより、地震リスクが低減できていることが分かる（損失期待値：0.16 千万円 $\Rightarrow$ 0.13 千万円、以下単位は省略）。

また、同図に A 工場と B 工場の立地を入れ替えた場合の地震リスクカーブをあわせて示す。この場合、耐震性の低い B 工場を地震ハザードの高い敷地に建てることになるが、比較的損失の小さい領域（以後、小被害領域）での地震リスクの低減ができているため、システム全体としての地震リスクが低減できている（損失期待値：0.16 $\Rightarrow$ 0.14）。これは B 工場が A 工場に比べ、物的被害および機能的被害とも低いためである。一方、大被害領域の年超過確率は増えている。

このように単独の施設だけの情報では判断指標としては不十分なことがある。施設の配置計画を行う際には、システム全体の地震リスクは有用な情報となる。

5.3 耐震補強の優先順位

同時に全ての施設の耐震性を上げることができれば良いが、資金面から現実的には難しいことである。他の施設より相対的に地震ハザードの高い場所に建っている A 工場から行うのか、耐震性の低い B 工場から行うのか、限られた資金で効果的に地震リスクを低減できる補強計画を選択する必要がある。

図-9 に基本モデルと A,B,C 工場の内、一工場だけ補強した場合の地震リスクカーブを比較する。ここで、A,C 工場は現状の耐力を 2 割増しに、B 工場は、A,B 工場と同じ現行基準レベルまで補強したと仮定している。なお、それぞれの補強工事費用は同額とする。

図-9 より現状モデルに比べ効果はあるが、損失期待値で比べると、A 工場補強（0.11）、B 工場補強（0.14）、C 工場補強（0.15）の順に効果があることが分かる。これは、A 工場が物的被害および機能的被害とも最も大きい施設であるためである。また、中被害領域では、B 工場を補強することが、大被害領域では、A 工場を補強する

ことが効果的であることがわかる。全体的にリスクを低減するには A 工場を、比較的頻度の高い地震を対象とするのなら B 工場を補強するのが効果的である。

このように、複数の施設の補強計画の際の優先順位を決定する際に、システム全体の地震リスクを判断指標にすることは有用である。

5.4 在庫確保の効果

在庫を保有することは保管場所の確保や管理経費など経営的に負の影響を与えることがあるが、災害時などの事業継続の面から見ると有効に働くことがある。

A 工場に 20 日分、B 工場に 10 日分の中間部品の在庫を確保した場合の地震リスクカーブを図-10 に示す。大被害領域では、在庫確保による地震リスクに変化はないが、小被害領域で、地震リスクが大幅に低減できている（損失期待値：0.16 ⇒ 0.04）。在庫を確保することは、被害が小さいが発生頻度が高い地震に対する対策に有効であることがわかる。ただし、ここでは地震により在庫の中間部品は被害を受けないとしている。また、在庫を確保しなくても、同じ中間部品を入手できる補給先を確保しておくことも同等の効果が得られる。

このように工場移転や耐震補強などの大きな費用をかけなくても在庫を保有するなど、比較的簡単な対策でも地震リスクを低減することが可能である。

5.5 生産設備の分散

基本モデルは、A 工場で中間部品 a を、B 工場で中間部品 b を、それぞれ単独に製造している設定であった。生産の効率化から考えてこのようなケースは多いが、一度被災すると必要な中間部品を入手することができなくなり、製造が停止する可能性が高くなる。

ここでは、A、B 工場にそれぞれ中間部品 a、b の生産ラインを配置し、2 種類の中間部品を各工場で分担して製造することにする。例えば ET (4) の場合、B 工場が部分被害となって 10 日間製造停止となっていたが、A 工場で作られている中間部品 a、b で、製品の製造が継続できるようになる。また、ET (13) は A、B 工場が部分被害になった場合であるが、このときは B 工場が復旧するまでの 10 日間は製造停止、11 日目以降から A 工場が復旧する 35 日目までは生産量が半分で事業継続する設定となる。ただし、生産量は両工場稼働時の半分とする。

図-11 より、生産ラインを分散配置することにより、地震リスクを低減できていることがわかる（損失期待値：0.16 ⇒ 0.12）。ここで、損失期待値で比較をすると、前節の在庫確保よりリスク低減効果が小さい。しかし、図-11 より、大被害領域で比較すると生産設備の分散配置の方が、損失の発生確率を低減できていることがわかる。即ち、大地震時における事業継続という観点からは有効度の高い対策であると考えることが出来る。

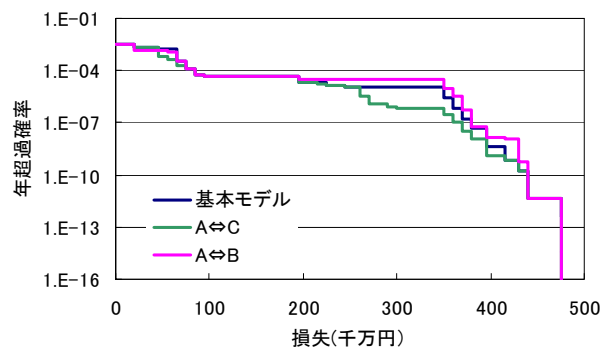


図-8 立地条件による比較

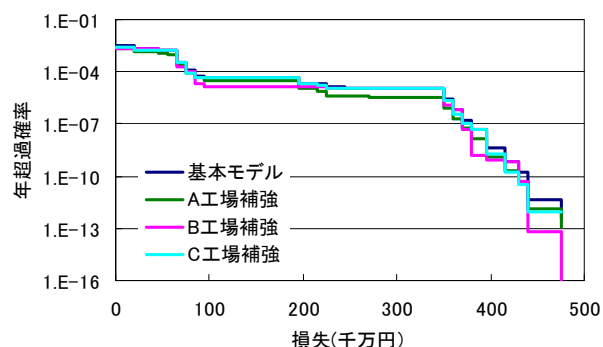


図-9 補強実施建物による比較

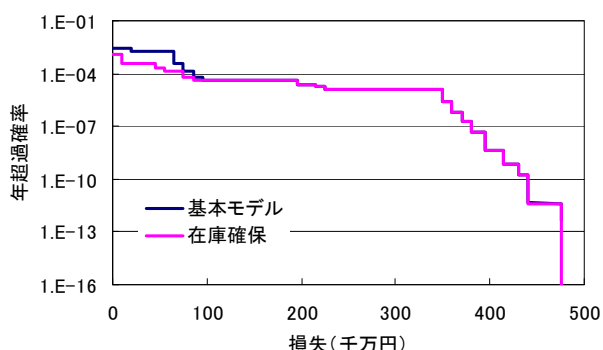


図-10 在庫確保の効果

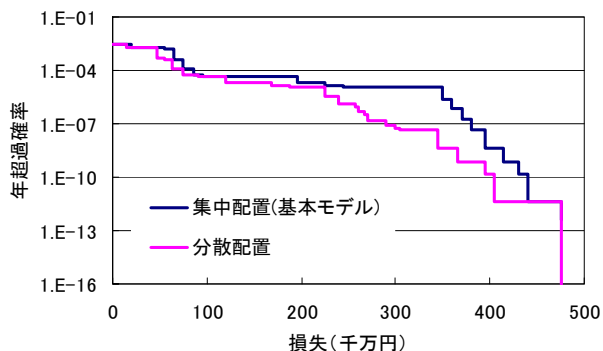


図-11 製造ラインの分散効果

このようにどの領域のリスクを低減させることのできる対策であるかは、地震リスクカーブを比較することによって明確にすることが出来る。

6. まとめ

想定施設に対して実施した地震ポートフォリオ解析において、地震被害の相関を考慮する必要があることを示した上で、4つの視点から地震リスクの低減対策を立案し、地震被害の相関を考慮した地震リスクカーブの比較よりシステム全体の損失額の低減効果について考察を行った。

- ① 如何に耐震性の高い施設であっても重要な施設は、地震ハザードの低い場所に計画することが重要である。
- ② 耐震補強を計画する際は、「施設の耐震性」，「立地の地震ハザード」だけでなく「施設の重要度」を考慮した上で効果的にシステム全体の地震リスクを低減できる施設から実施することが重要である。
- ③ 在庫の確保あるいは中間部品の補給先を確保することは、被害額が小さいが発生頻度の高い地震に対するリスクを低減することに有効である。システム全体の地震リスクの低減を目指すのではなく、対象とする地震を想定し（例えば、被害が大きくないが発生頻度が高い地震），それによる被害を小さくする対策を選択する判断もある。
- ④ 生産ラインを分散配置することで、大被害領域の損失の発生リスクが低減できている。在庫確保も同じだが、如何に製造を停止させないかが、地震リスク低減対策で重要となってくる。

なお、ポートフォリオ地震リスクカーブの評価には、常にシナリオ地震による地震ハザード評価、地震被害特性などのモデル化の不確実性が伴う。また、各種の設定条件によっては、本論文のような結果にならないことがある。

リスクの低減の有効性を判断する場合には、対策費および今後の施設の供用期間におけるリスクを含めたトータルコストを考えることが重要である⁷⁾。

参考文献

- 1) Mizutani, M.: Methodology of Seismic Risk Management (SRM) Procedures, Structural Safety and Reliability, ICOSSAR'97, Vol.3, pp.1581-pp.1588, 1997.
- 2) Mizutani, M.: Seismic Risk Assessment Procedures for a System Consisting of Distributed Facilities –Part One – Basic Method of the Procedures, Structural Safety and Reliability, ICOSSAR01, CD Rom, 2001.
- 3) 水谷守：ポートフォリオ・不確実性の低減，第4回土木学会地震リスクマネジメントセミナー 地震リスクマネジメントを考える，pp.39-44，2002年
- 4) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. 9th WCEE, II-107-II-112, 1988.
- 5) 嶋登志夫，水谷守，龍神弘明，小野一明，矢尾板啓：地表面のハザード評価に関する検討（その1）（その2），日本建築学会大会梗概集，pp327-330，2006年
- 6) 嶋登志夫，水谷守，龍神弘明，齊藤芳人，立道郁夫，小野一明，矢尾板啓：確率論的地震ハザードマップの検討（その1）（その2），日本建築学会大会梗概集，pp.579-582，2004年
- 7) 龍神弘明，水谷守，嶋登志夫，齊藤芳人：設計提案への地震リスクマネジメント（SRM）手法の活用，前田建設技術研究所所報，VOL. 52，p8，2011年