

# 地震時リアルタイム制御のための 大規模システムの最適分割

能島暢呂<sup>1</sup>・亀田弘行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)  
<sup>2</sup>フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所総合防災研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

地震時において空間的な被害波及を最小限にとどめるためには、連続的な広がりを持つ構造物群を一時的に分割することが重要であるが、これには緊急制御用の遮断装置を適切に配置しておくことが必要である。本研究ではこれを大規模システムの最適分割問題と位置づけ、確率論的手法による定式化と解法の提案を行ったものである。まず線状構造物にランダム発生する被害位置の確率密度関数に基づいて、連続システムの期待連結長さの解析解を4種の形態について示し、各特性を比較した。さらにこれらを任意形状に分割したシステムについて期待連結長さを求め、最適分割問題を定式化した。その解法として動的計画法を応用した手法を提案し、簡単な数値計算例を掲げて最適分割形状に関与する要因について考察した。

**Key Words :** earthquake emergency, extended system, disaster spread, real-time control, optimum sub-division, system reliability, dynamic programming

## 1. はじめに

地震防災技術の高度化に伴って、地震直後から発生する様々な情報をリアルタイムに処理し、施設制御や被害予測に役立てる技術が開発されている。こうした防災対策は様々な形で実用化されているが、(1)震源情報の即時推定、(2)地震動の時空間特性の早期推定、(3)初動体制確立のための被害推定、(4)警戒発令および施設コントロール、(5)被害の実態把握と復旧支援、といった一連の流れと即時性を重視し、「リアルタイム地震防災」という理念に集約されて総合的に扱われるようになってきた<sup>1), 2), 3)</sup>。

ライフライン・ネットワークは施設が線の・面的な広がりを持つため、被害の広域波及や二次災害への発展を防止することが重要である。このため「リアルタイム地震防災」への取り組みが特に進んでいる傾向にあり、新幹線制御システム UrEDAS や、東京ガスの地震時導管網警報システム SIGNAL はその代表的な例といえる。また各ライフラインのシステム特性に応じて、フロー監視や地震計との併用によって異常を早期検知し、施設制御を行うシステムが開発されている。例としては、文献<sup>1)</sup>にまとめられているように、(1) NTT 通信ケーブルの封入ガス圧分布監視による障害点検知、(2) 関西電力の電流・電圧・位相差監視によるフォルトロケータ(故障点標定装置)、(3) 東京都水道局の流量・水圧遠隔監視による管路異常検知システム、(4) 神戸市水道局の配水池水位・流量監視および地震計に基づく緊急遮断システム、(5) ガス供給システムの各戸別感震遮

断装置であるマイコンメータ、などが挙げられる。これらはいずれも、連続した構造物群をブロック遮断することによって、広域に同時多発した被害を局所化すること、つまり連続的なシステムを一時的に分割し、被害波及を最小にとどめることを目的としたものである。その効果が発揮されるには、(a) 制御装置が適切な箇所に配置されていること、(b) 被災状況に応じて制御装置が適切に操作されること、の2点が必須であり、いずれが欠けても効果が失われる。

例えば、1978年宮城県沖地震では、ガス導管網をブロック遮断するバルブが未設置であったため、被害地域を局限化できず、供給区域全域においてガスを停止する事態となった。1989年ロマ・ブリエタ地震においては、サンフランシスコ市の消防用高圧水道システム AWSS(Auxiliary Water Supply System)において、わずか2箇所の被害の位置特定が遅れたため緊急遮断弁の適切な操作がなされず、激しい漏水によってネットワーク全体の水圧が低下し、使用不能に陥った<sup>4)</sup>。また阪神・淡路大震災における木造家屋密集地域の市街地大火は、連続的に広がる構造物群の災害脆弱性と、延焼遮断帯として機能するオープンスペースの不足を強く印象づける結果となった。

地震防災の分野では、地震動強度の空間的特性を精度よく推定するために、限られた数の強震計を都市にどのように配置すればよいか、という問題が扱われるようになってきた<sup>5), 6)</sup>。一方、施設をコントロールする装置の空間的配置については十分な研究がなされて

いるとはいいい難く、都市のフェールセーフ化に関する小林の研究<sup>7), 8), 9)</sup>や、筆者らによるネットワークのブロック化に関する研究<sup>10)</sup>などが挙げられる他にはあまり例が見られない。事後の緊急対応は、制御装置の有無や配置形態に大きく依存し制約を受けるため、その最適配置に関する研究が望まれるところである。

本研究ではこのような背景において上記(a)の側面に注目し、施設の分割方法に合理的な判断基準を提供することを目的として、基礎的検討を行ったものである。ここでは簡単のため、ライフライン施設要素に代表されるような、単純な形状の連続的な線状構造物を対象として、確率論的手法、システム信頼性解析手法、およびシステム最適化手法を用いて遮断装置の最適配置法を提案する。

以下、2.ではまず連続システムに生じる被害位置の基本的特性を把握するため、線状構造物に一樣ランダムに被害が発生する場合を想定し、被害発生位置の確率密度関数を導く。3.では、直線形状・ループ形状・二重リンク形状(OR構造、AND構造)の4種のシステム形態をとりあげ、2.に基づいて連続システムの期待連結長さの解析解を示し、各形態ごとに比較を行う。4.では、連続システムが任意の位置で分割されたシステムの期待連結長さを求め、最適分割のための準備を行う。これに基づいて5.では、遮断装置の最適配置問題を定式化し、任意の個数の最適配置を動的計画法に基づいて求める方法を提案する。さらに、被害率が一樣ではない場合への一般化を行う。6.では、簡単なモデルを用いた数値計算例を示し、システム形状、被害率、被害分布などの要因と、最適分割パターンとの関係について考察する。

## 2. 線状構造物における被害位置の分布

### (1) 被害数が $N$ に確定している場合

図-1のように長さ  $L$  の線状構造物を考え、左端からの位置を  $x$ 、被害位置の確率密度関数を  $f_X(x)$ 、分布関数を  $F_X(x)$  とする。 $N$  個の被害が発生したとして、左端から  $n$  番目 ( $1 \leq n \leq N$ ) の被害位置の分布関数は、順序統計学の理論<sup>11)</sup>から、

$$F_{X_n}(x; N) = \sum_{k=n}^N \binom{N}{k} [F_X(x)]^k [1 - F_X(x)]^{N-k} \quad (1)$$

で与えられるから、その確率密度関数は次式のようになる。

$$f_{X_n}(x; N) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)!} [F_X(x)]^{n-1} [1 - F_X(x)]^{N-n} f_X(x) \quad (0 \leq x \leq L) \quad (2)$$

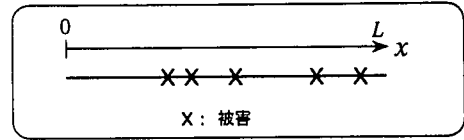


図-1 連続システムの被害箇所

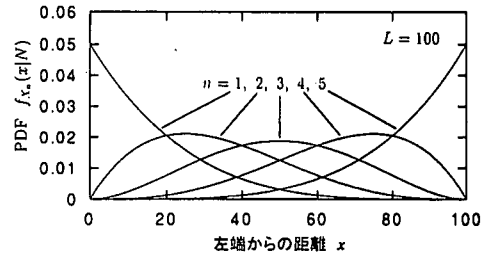


図-2 5個の被害発生という条件下での  $n$  番目被害位置の確率密度関数<sup>13)</sup>

被害の発生が長さ  $L$  にわたって一樣ランダムであると仮定すると、 $f_X(x) = 1/L$  より、

$$f_{X_n}(x; N) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)! L^N} x^{n-1} (L-x)^{N-n} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (3)$$

となる。これはベータ分布であり、 $n$  番目被害位置の期待値と分散は、次式で与えられる。

$$\bar{x}_n = \frac{nL}{N+1}, \quad \sigma_n^2 = \frac{n(N-n+1)L^2}{(N+1)^2(N+2)} \quad (4)$$

図-2に、 $N=5, L=100$  の場合について示す。このように被害数  $N$  が固定されている場合のシステム信頼性評価については、川上<sup>13), 14)</sup>によって様々な形態について考察されている。

しかし実際には、被害数を事前に知ることはできないため、被害数の確率の変動を見込んで、不確実性を考慮した分析を行うことが望ましい。従来、被害予測を行って何らかの対策を施す場合には、既往被害の統計分析などに基づく「被害率」がよく用いられてきた。こうした理由から本研究では、次の(2)のケースを専ら扱うこととする。

### (2) 被害数 $N$ が被害率 $\lambda$ (箇所/単位長さ) で規定される場合

長さ  $L$  にわたって一樣な「被害率(単位長さあたりの被害箇所数)」 $\lambda$  が与えられ、被害がランダムに発生する場合、被害数が  $N$  となる確率はポアソン分布に従い、これを  $Po(N)$  と表すと、

$$Po(N) = \frac{(\lambda L)^N e^{-\lambda L}}{N!} \quad (5)$$

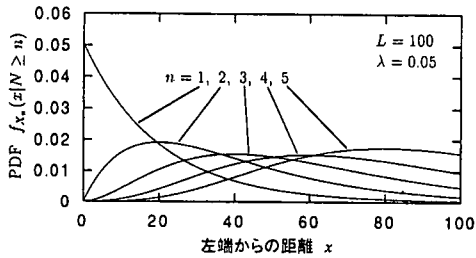


図-3  $n$  個以上の被害発生という条件下での  $n$  番目被害位置の確率密度関数

である。このとき、少なくとも  $n$  個 ( $1 \leq n \leq N$ ) の被害が生じているとして、その被害位置の同時確率密度関数は、式 (3) と (5) を用いて、

$$f_{X_n}(x; \lambda, N \geq n) = \sum_{N=n}^{\infty} f_{X_n}(x; N) \cdot \text{Po}(N) = \frac{\lambda(\lambda x)^{n-1} e^{-\lambda x}}{(n-1)!} \quad (6)$$

となる。これはガンマ分布であり、長さ  $L$  にランダム発生する被害数を一端からカウントする計数過程はポアソン過程となる。ところで式 (6) は区間  $[0, L]$  で定義され、この区間の積分値は次式に示すように、被害が  $n$  箇所以上発生する確率に相当する。

$$\int_0^L \frac{\lambda(\lambda x)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda x} dx = \sum_{N=n}^{\infty} \text{Po}(N) = \text{Po}(N \geq n) \quad (7)$$

従って、少なくとも  $n$  箇所の被害が発生しているという条件のもとでは、 $n$  番目被害位置の条件付確率密度関数は、式 (6) を式 (7) で正規化して得られ<sup>12)</sup>、次式のように区間  $[0, L]$  で定義されたガンマ分布となる。

$$f_{X_n}(x; \lambda | N \geq n) = \frac{\lambda(\lambda x)^{n-1} e^{-\lambda x}}{(n-1)!} \cdot \frac{1}{\text{Po}(N \geq n)} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (8)$$

図-3 に、 $\lambda = 0.05, L = 100$  の場合について示す。このとき、 $n$  番目の被害位置の条件付平均値と条件付分散は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{x_n(\lambda, L | N \geq n)} &= \int_0^L x \cdot f_{X_n}(x; \lambda | N \geq n) dx \\ &= \frac{n}{\lambda} \cdot \frac{\text{Po}(N \geq n+1)}{\text{Po}(N \geq n)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sigma_n^2 = \frac{n(n+1)}{\lambda^2} \cdot \frac{\text{Po}(N \geq n+2)}{\text{Po}(N \geq n)} - \left\{ \frac{n}{\lambda} \cdot \frac{\text{Po}(N \geq n+1)}{\text{Po}(N \geq n)} \right\}^2 \quad (10)$$

### 3. 連続な線状構造物の期待連結長さ

供給点を有する線状構造物に被害が発生した場合、供給点に最も近い被害箇所までの無被害区間が機能を

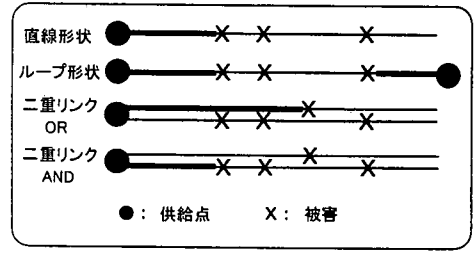


図-4 4 種のシステム形態における被害箇所と連結長さ (太線部のみ機能が保持される)

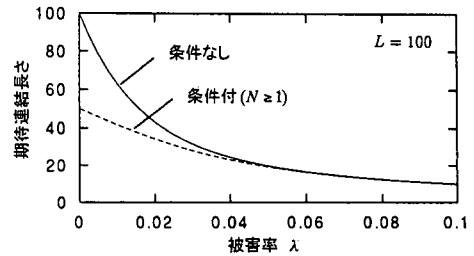


図-5 直線形状システムの条件なし・条件付 ( $N \geq 1$ ) の期待連結長さ

保つものと仮定し、その長さを「期待連結長さ」<sup>13)</sup> と呼ぶこととする。ここでは図-4 に示す 4 種のシステム形態を持つ線状構造物の期待連結長さを求め、各システム特性について考察する。

#### (1) 直線形状システム

少なくとも 1 箇所の被害が発生しているという条件下における連結長さの期待値は、式 (9) において  $n = 1$  を代入して次式で得られる。

$$\overline{x_1(\lambda, L | N \geq 1)} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda L} - \lambda L e^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda L}} \quad (11)$$

被害箇所数についての条件を付けない場合の連結長さの期待値は、

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L)} &= \overline{x_1(\lambda, L | N \geq 1)} \cdot \text{Po}(N \geq 1) + L \cdot \text{Po}(0) \\ &= \frac{1 - e^{-\lambda L}}{\lambda} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。この結果は、左端から距離  $x$  に位置する微小区間  $dx$  が供給点に連結している確率が  $[0, L]$  の区間で積分しても同様に得られる。

$$\overline{x(\lambda, L)} = \int_0^L e^{-\lambda x} dx = \frac{1 - e^{-\lambda L}}{\lambda} \quad (13)$$

図-5 に、 $L = 100$  として  $\lambda$  を変化させた場合についての条件なし・条件付期待連結長さを示す。

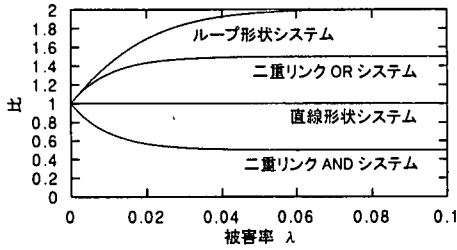


図-6 3種のシステム形態と直線形状システムの期待連結長さの比

## (2) ループ形状システム

長さ  $L$  のループ形状システムにおいては、供給点から右周りと同左周りの2通りの供給ルートが存在する。図-4に示すように、これは両端に供給点を有する直線形状システムと等価であり、被害箇所数が0と1の場合には連結長さは  $L$  となる。また被害箇所数が2箇所以上の場合には、供給点から右周りおよび左周りに現れる最初の2箇所の被害箇所までの長さの和が連結長さとなるが、これは供給点から片周りに2箇所目の被害地点までの長さと同値であるから、期待連結長さは次式で表される。

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L)} &= \overline{x_2(\lambda, L|N \geq 2)} \cdot \text{Po}(N \geq 2) + L\{\text{Po}(0) + \text{Po}(1)\} \\ &= \frac{2(1 - e^{-\lambda L})}{\lambda} - Le^{-\lambda L} \end{aligned} \quad (14)$$

左端から距離  $x$  に位置する微小区間  $dx$  が、左周りか右周りのいずれかのルートで供給点に連結している確率を区間  $[0, L]$  で積分しても同様の結果を得る。

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L)} &= \int_0^L \{e^{-\lambda x} + e^{-\lambda(L-x)} - e^{-\lambda L}\} dx \\ &= \frac{2(1 - e^{-\lambda L})}{\lambda} - Le^{-\lambda L} \end{aligned} \quad (15)$$

式(12)と式(14)の比をとって、直線形状システムをループ化することの効果を表す指標を次式で定義する。

$$E_{loop} = \frac{\frac{2(1 - e^{-\lambda L})}{\lambda} - Le^{-\lambda L}}{\frac{2(1 - e^{-\lambda L})}{\lambda}} = 2 - \frac{\lambda Le^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda L}} \quad (16)$$

これは図-6に示すように  $\lambda \rightarrow \infty$  で2、 $\lambda \rightarrow 0$  で1に収束する。すなわちループ形状システムは直線形状システムよりも信頼性が高く、被害率が高くなるにつれて、期待連結長さは2倍まで向上する。

## (3) 二重リンク OR システム

供給点から長さ  $L$  のリンクが2本並行している二重リンク・システムを考える。図-4に示すように、任意の地点が2本のリンクのいずれかが供給点に連結していればよいと考えると、2本の連結長さの長い方がこのシステムの連結長さとなる。簡単のため2本のリンク

の被害は独立・一様・ランダムであり、被害率を  $\lambda$  とする。各リンクにおいて、少なくとも1箇所の被害が発生しているという条件下での1番目被害位置の確率密度関数は、式(8)において  $n=1$  として次式で与えられる。

$$f_{X_1}(x; \lambda|N \geq 1) = \frac{\lambda e^{-\lambda x}}{\text{Po}(N \geq 1)} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (17)$$

さらに、同一の分布関数  $F_X(x)$  (確率密度関数  $f_X(x)$ ) に従う確率変数  $X$  の  $n$  個の標本の最大値  $Y$  の確率密度関数  $f_{max}(y, n)$  は、極値統計学の理論<sup>15)</sup>より、

$$f_{max}(y, n) = \frac{d}{dy} [F_X(y)]^n = n[F_X(y)]^{n-1} f_X(y) \quad (18)$$

で与えられるから、式(17)を代入して  $n=2$  とおくと、連結長さの条件付確率密度関数は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_{max}(x, N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1) &= \frac{2\lambda e^{-\lambda x} (1 - e^{-\lambda x})}{\{\text{Po}(N \geq 1)\}^2} \quad (0 \leq x \leq L) \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、上添字(1)(2)はそれぞれ1本目、2本目のリンクに関することを示す。このとき条件付期待連結長さは、

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L|N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1)} &= \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\frac{3}{2} - 2(\lambda L + 1)e^{-\lambda L} + (\lambda L + \frac{1}{2})e^{-2\lambda L}}{\{\text{Po}(N \geq 1)\}^2} \end{aligned} \quad (20)$$

被害箇所数の条件を付けない場合の期待連結長さは、2本のリンクのいずれか一方が無被害であった場合には連結長さは  $L$  となることを考慮して、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L)} &= \overline{x(\lambda, L|N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1)} \cdot \{\text{Po}(N \geq 1)\}^2 \\ &\quad + L[1 - \{\text{Po}(N \geq 1)\}^2] \\ &= \frac{3 - 4e^{-\lambda L} + e^{-2\lambda L}}{2\lambda} \end{aligned} \quad (21)$$

左端から距離  $x$  に位置する微小区間  $dx$  が、2本のいずれかのリンクによって供給点に連結している確率を区間  $[0, L]$  で積分しても同様の結果を得る。

$$\begin{aligned} \overline{x(\lambda, L)} &= \int_0^L (2e^{-\lambda x} - e^{-2\lambda x}) dx \\ &= \frac{3 - 4e^{-\lambda L} + e^{-2\lambda L}}{2\lambda} \end{aligned} \quad (22)$$

式(12)と式(21)の比をとって、直線形状システムを二重化することの効果を表す指標を以下のように定義する。

$$E_{dupl}^{(OR)} = \frac{3 - e^{-\lambda L}}{2} \quad (23)$$

これは図-6に示すように  $\lambda \rightarrow \infty$  で1.5、 $\lambda \rightarrow 0$  で1に収束する。すなわち二重リンク OR システムは直線形状システムよりも信頼性が高く、被害率が高くなるにつれて、期待連結長さは1.5倍まで向上する。

(4) 二重リンク AND システム

2本のリンクの両方が供給点に連結してはじめて機能する AND 構造について考察する. 同一の分布関数  $F_X(x)$  (確率密度関数  $f_X(x)$ ) に従う確率変数  $X$  の  $n$  個の標本の最小値  $Y$  の確率密度関数  $f_{\min}(y, n)$  は, 極値統計学の理論<sup>15)</sup>より,

$$f_{\min}(y, n) = \frac{d}{dy} \{1 - [1 - F_X(y)]^n\} = n[1 - F_X(y)]^{n-1} f_X(y) \quad (24)$$

与えられるから, 式(17)を代入して  $n=2$  とおくと, 連結長さの条件付確率密度関数は次式で与えられる.

$$f_{\min}(x, N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1) = \frac{2\lambda e^{-\lambda x} (e^{-\lambda x} - e^{-\lambda L})}{\{Po(N \geq 1)\}^2} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (25)$$

このとき条件付期待連結長さは,

$$\overline{x(\lambda, L | N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1)} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\frac{1}{2} - 2e^{-\lambda L} + (\frac{3}{2} + \lambda L)e^{-2\lambda L}}{\{Po(N \geq 1)\}^2} \quad (26)$$

被害箇所数の条件を付けない場合の期待連結長さは, 2本のリンクの両方が被害を受けた場合, 一方のみが被害を受けた場合, 両方とも無被害の場合の総和によって, 式(26),(11)などにより次式で与えられる.

$$\overline{x(\lambda, L)} = \frac{\overline{x(\lambda, L | N^{(1)} \geq 1, N^{(2)} \geq 1)} \cdot \{Po(N \geq 1)\}^2 + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{Po(N \geq 2)}{Po(N \geq 1)} \cdot 2Po(N \geq 1) \cdot Po(0) + L[1 - \{Po(N \geq 1)\}^2]}{1 - e^{-2\lambda L}} \quad (27)$$

これはリンクが1本の場合において, 被害率  $\lambda$  を2倍にしたことと等価である. 左端から距離  $x$  に位置する微小区間  $dx$  が, 2本の両方のリンクで供給点に連結している確率を区間  $[0, L]$  で積分しても同様の結果を得る.

$$\overline{x(\lambda, L)} = \int_0^L e^{-\lambda x} \cdot e^{-\lambda x} dx = \frac{1 - e^{-2\lambda L}}{2\lambda} \quad (28)$$

式(12)と式(27)の比をとって, 直線形状システムが二重化されたことによる影響を表す指標を次式で定義する.

$$E_{dupl}^{(AND)} = \frac{1 + e^{-\lambda L}}{2} \quad (29)$$

これは図-6に示すように  $\lambda \rightarrow \infty$  で0.5,  $\lambda \rightarrow 0$  で1に収束する. すなわち二重リンク AND 構造の信頼性は直線形状システムより低く, 被害率が高くなるにつれて, 期待連結長さは0.5倍まで低下する.

4. 分割化された線状構造物の期待連結長さ

3. では, 供給点から被害箇所までの機能が完全に保持される場合を想定して, 連結長さを定義した. しかし, 被害箇所を無被害部分から切り離すポイントは,

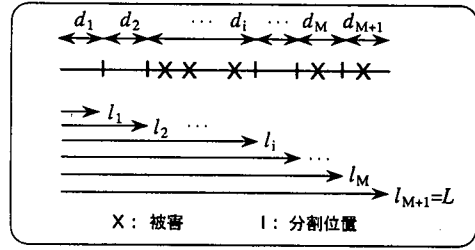


図-7 分割化された区間長の定義

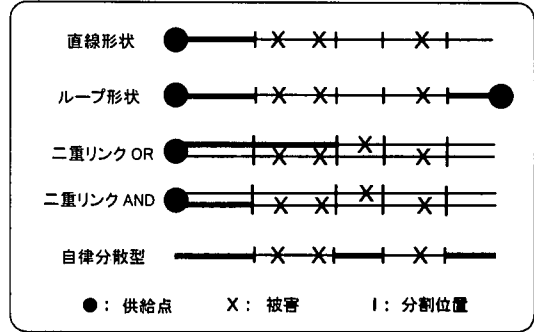


図-8 分割化されたシステムの連結長さ (太線部のみ機能が保持される)

遮断装置が配置された箇所に限られると考える方が現実的である. この場合には, 連結長さを区間ごとに離散的に考える必要がある. そこで本研究では, 3. で導いた連続システムの期待連結長さの定義式の離散化表現を導くこととした. いま図-7のように, 長さ  $L$  の線状構造物を  $M$  個の遮断装置によって  $(M+1)$  区間の小区間長さ  $d = \{d_i | i = 1, \dots, M+1\}$  に分割する場合を考え, 分割位置を  $l = \{l_i | i = 1, \dots, M+1\}$  とする. 図-8に分割化システムの連結長さの模式図を示す. ここで用いる記号には, 以下の関係が成り立っている.

$$\sum_{i=1}^{M+1} d_i = L, \quad l_i = \sum_{k=1}^i d_k \quad (30)$$

例えば, 以下に示す直線形状システムの場合には, 図-8に示すように, 供給源から  $l_i$  までは被害がなく,  $d_{i+1} = l_{i+1} - l_i$  の区間に1箇所以上の被害が発生した場合, 長さ  $l_i = \sum_{k=1}^i d_k$  だけ機能が保たれると考える. 他の形態を持つシステムについても上の考えを適用する. ただしその前提として, 1. でも述べたように, 被害箇所が迅速・確実に検知され, 適切に遮断装置が操作されることを想定している点に注意されたい.

### (1) 直線形状システム

区間  $d_i$  が供給点に連結している確率を  $P_S(d_i)$  とすると、期待連結長さは、

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} P_S(d_i) \cdot d_i = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-\lambda \ell_i} \cdot d_i \quad (31)$$

で表され、式(13)の離散化表現が得られる。次のように考えても同様の結果となる。機能が保たれる長さがちょうど  $\ell_i$  となる確率を  $P_S(\ell_i)$  と表すと、

$$P_S(\ell_i) = \begin{cases} e^{-\lambda \ell_i} - e^{-\lambda \ell_{i+1}} & (0 \leq i \leq M) \\ e^{-\lambda L} & (i = M+1) \end{cases} \quad (32)$$

であるから、期待連結長さは次式で与えられる。

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} P_S(\ell_i) \cdot \ell_i = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-\lambda \ell_i} \cdot d_i \quad (33)$$

### (2) ループ形状システム

区間  $d_i$  が左周りが右周りのいずれかのルートで供給点に連結している確率  $P_S(d_i)$  は、

$$P_S(d_i) = e^{-\lambda \ell_{i-1}} \cdot e^{-\lambda d_i} + e^{-\lambda(L-\ell_i)} \cdot e^{-\lambda d_i} - e^{-\lambda L} \\ = e^{-\lambda \ell_i} + e^{-\lambda(L-\ell_{i-1})} - e^{-\lambda L} \quad (34)$$

であるから、期待連結長さは、

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} P_S(d_i) \cdot d_i \\ = \sum_{i=1}^{M+1} \left\{ e^{-\lambda \ell_i} + e^{-\lambda(L-\ell_{i-1})} \right\} \cdot d_i - L e^{-\lambda L} \quad (35)$$

で表され、式(15)の離散化表現が得られる。

### (3) 二重リンク OR システム

供給点から距離  $x$  の地点が、いずれかのリンクで供給点に連結している確率  $P_S(x)$  は、

$$P_S(x) = e^{-\lambda \ell_i^{(1)}} + e^{-\lambda \ell_j^{(2)}} - e^{-\lambda \{\ell_i^{(1)} + \ell_j^{(2)}\}} \quad (36)$$

ここで上添字 (1)(2) はそれぞれ 1 本目、2 本目のリンクを表し、 $i, j$  は

$$\ell_{i-1}^{(1)} \leq x \leq \ell_i^{(1)} \quad \text{かつ} \quad \ell_{j-1}^{(2)} \leq x \leq \ell_j^{(2)} \quad (37)$$

を満たすように  $x$  から定めるものとする。よって

$$d_{ij} = \min \left\{ \ell_i^{(1)}, \ell_j^{(2)} \right\} - \max \left\{ \ell_{i-1}^{(1)}, \ell_{j-1}^{(2)} \right\} \quad (38)$$

とすると、期待連結長さは

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1, j=1}^{i+j=M+2} P_S(x) \cdot d_{ij} \\ = \sum_{i=1, j=1}^{i+j=M+2} \left[ e^{-\lambda \ell_i^{(1)}} + e^{-\lambda \ell_j^{(2)}} - e^{-\lambda \{\ell_i^{(1)} + \ell_j^{(2)}\}} \right] \cdot d_{ij} \quad (39)$$

で表される。簡単のため、2本のリンクの分割位置を同一位置に定めると仮定すると、式(39)は

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} (2e^{-\lambda \ell_i} - e^{-2\lambda \ell_i}) \cdot d_i \quad (40)$$

となり、式(22)の離散化表現が得られる。

### (4) 二重リンク AND システム

供給点から距離  $x$  の地点が、両方のリンクで供給点に連結している確率  $P_S(x)$  は、

$$P_S(x) = e^{-\lambda \{\ell_i^{(1)} + \ell_j^{(2)}\}} \quad (41)$$

ただし  $i, j$  は式(37)に従って定めるものとする。さらに  $d_{ij}$  を式(38)により定めると、期待連結長さは

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1, j=1}^{i+j=M+2} P_S(x) \cdot d_{ij} \\ = \sum_{i=1, j=1}^{i+j=M+2} \left[ e^{-\lambda \{\ell_i^{(1)} + \ell_j^{(2)}\}} \right] \cdot d_{ij} \quad (42)$$

で表される。簡単のため、2本のリンクの分割位置を同一位置に定めると仮定すると、式(42)は

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-2\lambda \ell_i} \cdot d_i \quad (43)$$

となり、式(28)の離散化表現が得られる。

### (5) 自律分散型システム

分割化されたシステムでは、図-8のうち最下段のシステムに示すように無被害区画の機能を活かした自律分散型のシステムを定義することが可能である。区間  $d_i$  に被害がない確率は  $e^{-\lambda d_i}$  であるから、その期待連結長さは  $e^{-\lambda d_i} \cdot d_i$  となる。従ってこの自律分散型システムの期待連結長さは次式で表される。

$$\overline{x(\lambda, L, \mathbf{d})} = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-\lambda d_i} \cdot d_i \quad (44)$$

## 5. 期待連結長さを最大化する最適分割

### (1) 定式化

事前には予測不可能な被災状況に応じてきめ細かい対応を行うためには、遮断装置をできるだけ多く設置することが望ましい。一方、装置数は設置費用や維持管理などの面で制約を受けるため、限られた設置数に応じた最適設置を考えることが必要となる。

本研究では、4.に示した分割化システムの期待連結長さを最大化する遮断装置の配置を「最適配置」とみならず、つまり「適切な遮断操作による被災箇所との隔離と被害波及の最小化」によって「期待連結長さの最大化」が実現されると考え、両者を等価と考える。長さ

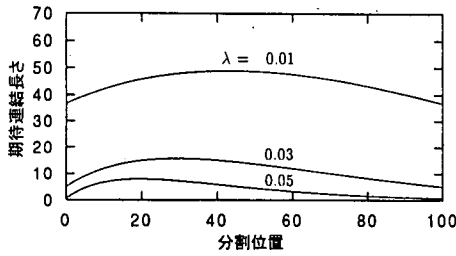


図-9 直線形状システムにおける1個の遮断装置の配置位置と期待連結長さの関係

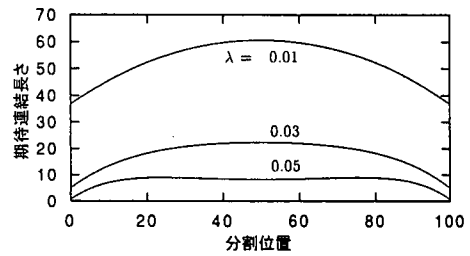


図-12 ループ形状システムおよび自律分散型における1個の遮断装置の配置位置と期待連結長さの関係

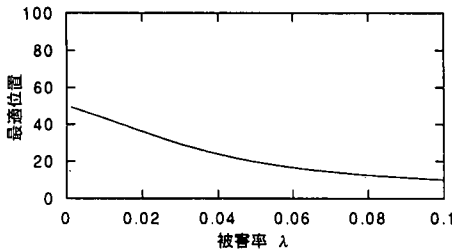


図-10 直線形状システムにおける1個の遮断装置の最適配置位置

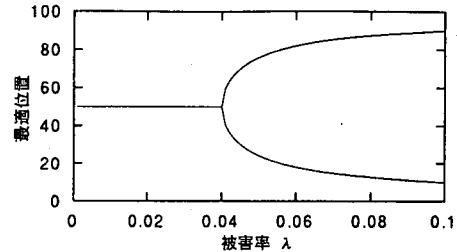


図-13 ループ形状システムおよび自律分散型における1個の遮断装置の最適配置位置

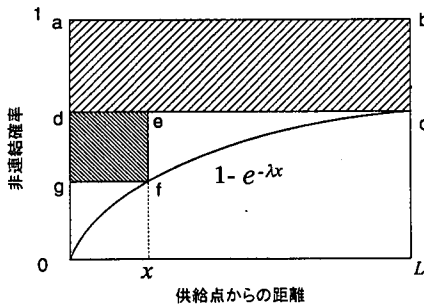


図-11 直線形状システムにおける供給点との非連結確率と期待連結長さの図解

を用いた場合と基本的に同様の傾向を示すことから、以下では図示を省略した。

## (2) 1個の遮断装置の最適配置

図-9は  $L = 100$  とした直線形状システムで、1個の遮断装置の配置位置を連続的に変化させた場合に、式(31)で表される評価関数(期待連結長さ)がどのように変化するかを示したものである。期待連結長さを最大化する最適位置は図-10に示すように、全長の中央付近から、 $\lambda$ の増加とともに供給点に近づき、図-5の条件付期待連結長さとはほぼ同様の傾向を示している。

この理由を図解したものが図-11である。横軸を全長  $L$  の構造物の位置  $x$  として、供給点との非連結確率  $(1 - e^{-\lambda x})$  を曲線  $oc$  のようにプロットすると、式(12)の条件なしの期待連結長さは、図形  $abcoa$  の面積で表される一方、式(11)の条件付期待連結長さは、図形  $dcod$  の面積で表される。ここで、位置  $x$  に遮断装置が設置され、2区画に分割された場合、式(31)の(条件なし)期待連結長さは、図形  $abcefga$  の面積で表される。このうち長方形  $abcd$  の部分は全長で無被害の場合に相当し、分割の方法によらず一定であるから、実質的には条件付期待連結長さに相当する長方形  $defg$  の面積によって規定される。このような理由により、長方形  $defg$  を最大化する最適配置位置が式(11)の条件付期待連結長さと密接に関連するのである。

$L$  にわたって任意の個数 ( $M$  個とする) の遮断装置の位置を決定する最適化問題を次のように定式化する。

$$\begin{aligned} & \text{find } d^* = \{d_i^* | i = 1, \dots, M+1\} \\ & \text{which maximize } G_M(d, L) = \sum_{i=1}^{M+1} g(d_i, l_i) \quad (45) \\ & \text{subject to } \sum_{i=1}^{M+1} d_i = L, \quad d_i \geq 0 \end{aligned}$$

ただし  $G_M(d, L)$  は期待連結長さを表す評価関数であり、システム形態に応じて、4.で導いた式(31)、(35)、(44)を用いるものとする。ここで  $g(d_i, l_i)$  は式(31)、(35)、(44)の右辺各項を一般的に表したものである。

なお式(40)、(43)を用いた場合については、式(31)

遮断装置数が  $M = 1$  の場合には、ループ形状システムと自律分散型システムにおける式 (35) および式 (44) は等価となる。図-12 は  $L = 100$  として、両システムにおける 1 個の遮断装置の配置位置を連続的に変化させた場合の期待連結長さの変化を示す。被害率が低い場合には、全長の中央で最大値をとるが、被害率が高くなると中央で極小値となり、最大値は両端付近に移動することがわかる。最適位置は図-13 に示す通りである。

### (3) 動的計画法による任意個数の遮断装置の最適配置

遮断装置の個数を任意とした場合については、上記のような最適解の探索は困難である。ここでは、Bellman による動的計画法 (Dynamic Programming) の一次元配分過程のアルゴリズムを応用した解法を示す。動的計画法とは、「最適性の原理 (初期の状態と最初の決定が何であっても、残った決定は最初の決定から生じた状態に対して最適政策を構成しなければならない)」に基づいた最適化手法である<sup>16)</sup>。動的計画法における一次元配分問題は、一種類の有限な資源を複数の配分対象に配分する場合に、得られる利得を最大化する最適配分パターンを求める問題である。その典型的な例では、配分対象  $i$  における利得は他の配分対象とは独立で、配分量  $d_i$  のみに依存する固有の効用関数  $g_i(d_i)$  によって求められ、ある配分パターンの全利得は、それらを独立に加算した総和  $\sum_i g_i(d_i)$  で定義される。

しかし本研究では、区画長さ  $d_i$  のみならずその配置位置  $\ell_i = \sum_{k=1}^i d_k$  を同時に求める必要がある。つまり式 (45) で定式化したように、効用関数は配分対象  $i$  によらず同一の  $g(\cdot)$  であるが、配分量  $d_i$  と配分量の累積値  $\ell_i$  の両方の関数  $g(d_i, \ell_i)$  であり、全利得としての期待連結長さは、それらの総和  $\sum_{i=1}^{M+1} g(d_i, \ell_i)$  で定義されている。この場合においても若干の工夫によって「最適性の原理」が成立し、動的計画法を適用可能であることを、文献<sup>16)</sup> にならって次のように証明する。

$$\begin{aligned}
 G_M(d, L) &= \max_{d_1 + \dots + d_{M+1} = L, d_i \geq 0} \left[ \sum_{i=1}^{M+1} g(d_i, \ell_i) \right] \\
 &= \max_{d_1 + \dots + d_{M+1} = L, d_i \geq 0} [g(d_1, \ell_1) + \dots + g(d_{M+1}, \ell_{M+1})] \\
 &= \max_{0 \leq d_{M+1} \leq L} \left[ \max_{d_1 + \dots + d_M = L - d_{M+1}, d_i \geq 0} [g(d_1, \ell_1) + \dots + g(d_{M-1}, \ell_{M+1})] \right] \\
 &= \max_{0 \leq d_{M+1} \leq L} [g(d_{M+1}, L) + \max_{d_1 + \dots + d_M = L - d_{M+1}, d_i \geq 0} [g(d_1, \ell_1) + \dots + g(d_M, \ell_M)]] \\
 &= \max_{0 \leq d_{M+1} \leq L} [g(d_{M+1}, L) + G_{M-1}(d, L - d_{M+1})] \quad (46)
 \end{aligned}$$

ここに  $G_M(d, L)$  は、 $M$  個の遮断装置によって全長  $L$

を  $(M+1)$  区画に最適分割したことによって得られる利得、すなわち期待連結長さを表し、 $d_{M+1}$  が求まったあとは、 $G_{M-1}(d, L - d_{M+1})$  を求める問題、すなわち  $M-1$  個の最適配置問題に帰着することを示している。すべての最適配置  $d^* = \{d_i^* | i = 1, \dots, M+1\}$  を得るには、この関係式 (46) を再帰的に適用すればよい。

### (4) 被害率 $\lambda$ が一様でない場合への一般化

ここまでは、被害率  $\lambda$  が長さ  $L$  にわたって一様と仮定したが、位置  $x$  の関数  $\lambda(x)$  で与えられる場合への一般化を行っておく。平均値関数

$$\Lambda(x) = \int_0^x \lambda(s) ds \quad (47)$$

を定義すると、区間  $[x, x+s]$  の被害数は、平均  $\Lambda(x+s) - \Lambda(x)$  のポアソン分布に従うから、非斉時ポアソン過程<sup>17)</sup> を適用することができる。このことから、式 (31), (35), (44) の評価関数において、

$$\lambda \ell_i \rightarrow \Lambda(\ell_i) = \int_0^{\ell_i} \lambda(x) dx \quad (48)$$

$$\lambda d_i \rightarrow \Lambda(\ell_i) - \Lambda(\ell_{i-1}) = \int_{\ell_{i-1}}^{\ell_i} \lambda(x) dx \quad (49)$$

と置き換え、次式で表される  $G_M^{(lin)}$ ,  $G_M^{(loop)}$ ,  $G_M^{(indep)}$  を新たな評価関数とすることにより、一様な被害率の場合と同様な扱いが可能となる。

$$G_M^{(lin)}(d) = \sum_{i=1}^{M+1} \exp \left[ - \int_0^{\ell_i} \lambda(x) dx \right] \cdot d_i \quad (50)$$

$$G_M^{(loop)}(d) = \sum_{i=1}^{M+1} \left[ \exp \left\{ - \int_0^{\ell_i} \lambda(x) dx \right\} + \exp \left\{ - \int_{\ell_{i-1}}^L \lambda(x) dx \right\} \right] \cdot d_i - Le^{-\lambda L} \quad (51)$$

$$G_M^{(indep)}(d) = \sum_{i=1}^{M+1} \exp \left[ - \int_{\ell_{i-1}}^{\ell_i} \lambda(x) dx \right] \cdot d_i \quad (52)$$

式 (50) においては、 $d_i (i = 1, \dots, M+1) \rightarrow 0$  の極限で、信頼性工学の分野でよく知られる次式の平均故障時間 (Mean Time To Failure) の定義式<sup>18)</sup> と等価になる。

$$MTTF = \int_0^\infty \exp \left[ - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right] dt \quad (53)$$

## 6. 数値計算例と考察

5. までに示した最適化手法の簡単な適用例を示し、考察を行う。

### (1) 被害率が一様な場合

まず被害率が一様な場合についての例を示す。長さ  $L = 100$  の線状システムを考え、直線形状システムでは左端 ( $x = 0$ ) に供給点があるものとした。遮断装置を



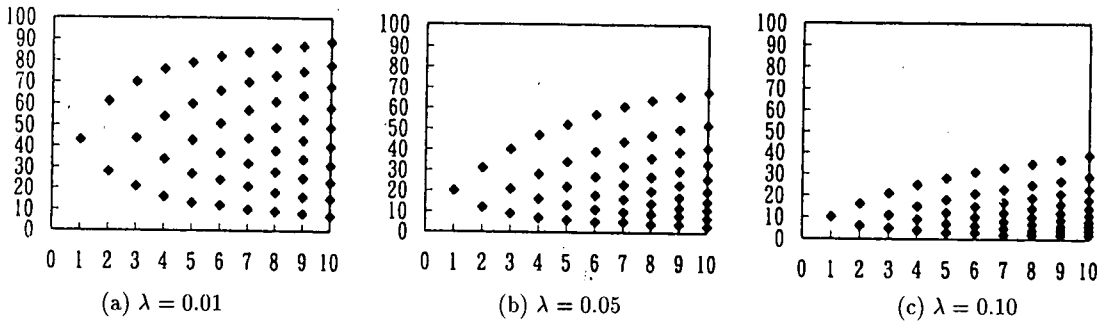


図-14 被害率が一樣な場合の直線形状システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

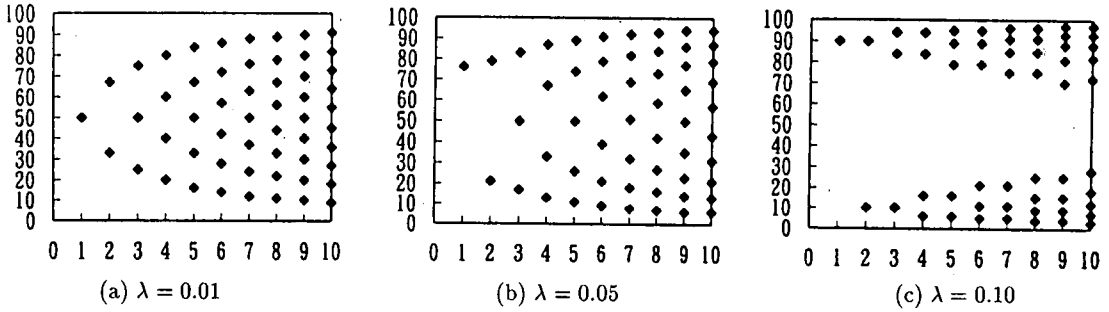


図-15 被害率が一樣な場合のループ形状システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

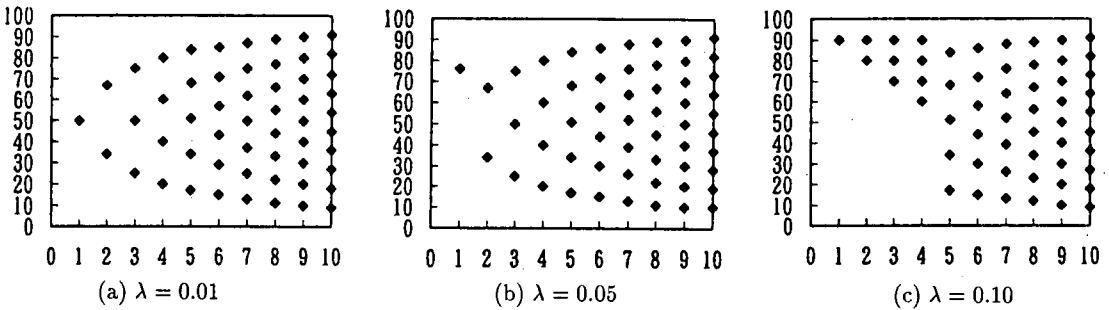
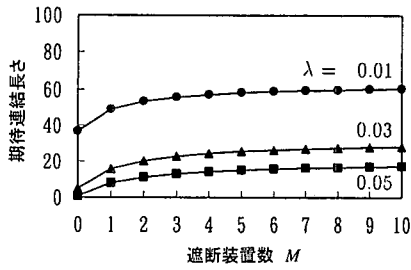


図-16 被害率が一樣な場合の自律分散型システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

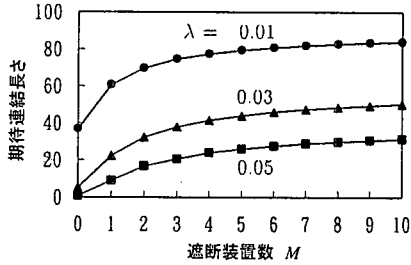
設置する候補位置は全長を 100 等分する位置とし、想定被害規模としては、小・中・大被害に相当する被害率  $\lambda = 0.01, 0.05, 0.10$  の 3 種類 (全長における期待被害数はそれぞれ 1, 5, 10 箇所) を考えた。また、遮断装置数の最大数は  $M = 10$  個とした。以上の前提条件は、いわば基準化されたモデルを示すため設定したものであり、尺度を変えれば任意の規模のシステムに適用することができる。図-14 と図-15 はそれぞれ、直線形状システムとループ形状システムにおける遮断装置の最適配置位置を示す。最適パターンは  $\lambda$  に大きく依存し、想定被害規模によって最適方策が大きく異なることを示唆している。 $\lambda$  が小さい場合はほぼ均等分割が最適となるが、 $\lambda$  の増大とともに最適配置は供給点に偏り、双方の相違が顕著に表れている。ただし供給点に近いほど密に配置する傾向は、両者に共通している。

また、図-16 は自律分散型システムの最適パターンである。均等分割が基本的な形状となるが、 $\lambda$  が大きく  $M$  が少ない場合には、短い区間の無被害化を狙ったパターンが最適となっている。なお図-16 に関しては、区画長さのみが意味を持ち、分割位置は任意である。

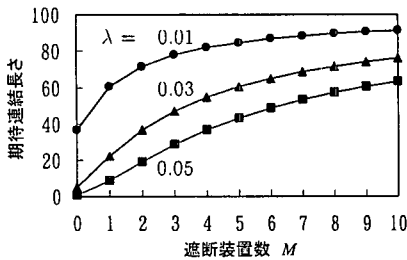
図-17 は、各システム形態において遮断装置を最適配置したうえで、遮断装置数と期待連結長さの関係を示したものである。直線形状システムとループ形状システムにおいては、それぞれが連続システムの形態をとった場合の期待連結長さが増え、被害率が低い場合には、比較的少ない分割数でも、連続システムに近い信頼性が得られることがわかる。一方、自律分散型システムにおいては、遮断装置数を増やすほど期待連結長さは全長  $L$  に近づくが、被害率が大きくなるに従って、必要な分割数が増える傾向



(a) 直線形状システム



(b) ループ形状システム



(c) 自律分散型システム

図-17 遮断装置数  $M$  (横軸) および被害率と期待連結長さの関係

がわかる。

(2) 被害率が一様でない場合

図-18のように、地盤条件が変化する場所に、 $L = 100$ のパイプラインが埋設されている仮想的な連続システムを想定する。まず、位置による被害率の相対的な変動を与えるために、文献<sup>19)</sup>などの考え方を参考にして、地盤条件とパイプの材質に応じた補正係数を次のように算定した。地盤条件として「丘陵地 0.5」、「沖積平野 1.0」、「谷 2.0」、管種として「ダクタイル鋳鉄管 0.2」、「アーク溶接鋼管 0.1」の係数を用いて、図-18に示すように、相対的な係数を0.05(区間[80,100])から0.4(区間[20,40])の範囲に定めた。ただし、この数値を被害率とするのではなく、ここでは図-14～図-16

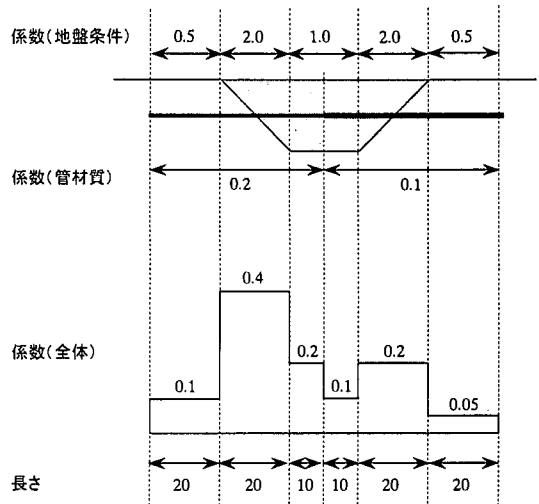


図-18 地盤条件と管種による被害率の係数

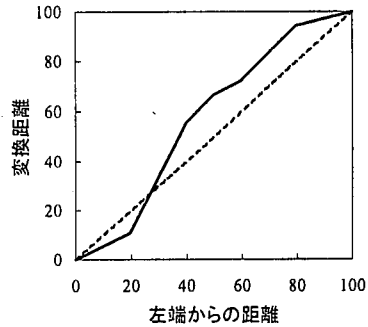


図-19 非斉時ポアソン過程を適用するための長さの変換(式(48)参照)

との比較を行うために、全長  $L$  における平均被害率

$$\bar{\lambda} = \frac{\Lambda(L)}{L} = \frac{\int_0^L \lambda(s) ds}{L} \quad (54)$$

が  $\bar{\lambda} = 0.01, 0.05, 0.10$  となるようにして、図-18に示した係数に応じて、被害率分布  $\lambda(x)$  を決定した。図-19は、被害率分布  $\lambda(x)$  をもとに、左端からの距離  $l_i$  を変換したものである。縦軸の変換距離に平均被害率  $\bar{\lambda}$  を乗じると、式(48)の右辺に相当する表現が得られ、非斉時ポアソン過程を適用できるようになる。

以上の条件のもとで、3種類のシステム形態についての最適分割を行った結果が図-20～図-22である。基本的な特性は図-14～図-16と同様であるが、被害率が図-18のように変動することにより、システム形態ごとに異なる変化の仕方を見せている。

まず左端を供給点とした直線形状システム(図-20)については、この場合、高被害率区間[20,40]が供給点付近に位置するため、平均被害率  $\bar{\lambda}$  にかかわらず、高被害率区間に遮断装置が高密度に配置される結果となっ

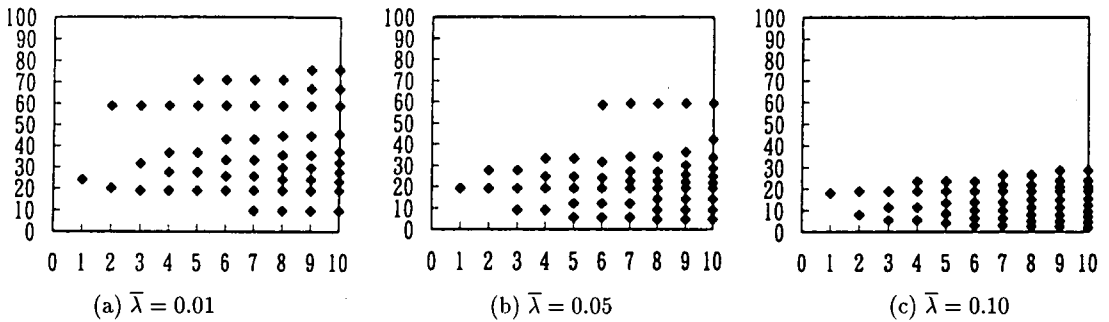


図-20 被害率が一律でない場合の直線形状システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

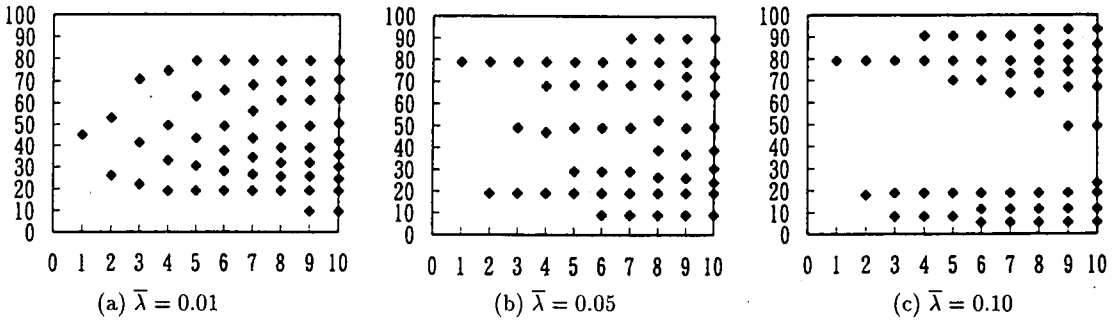


図-21 被害率が一律でない場合のループ形状システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

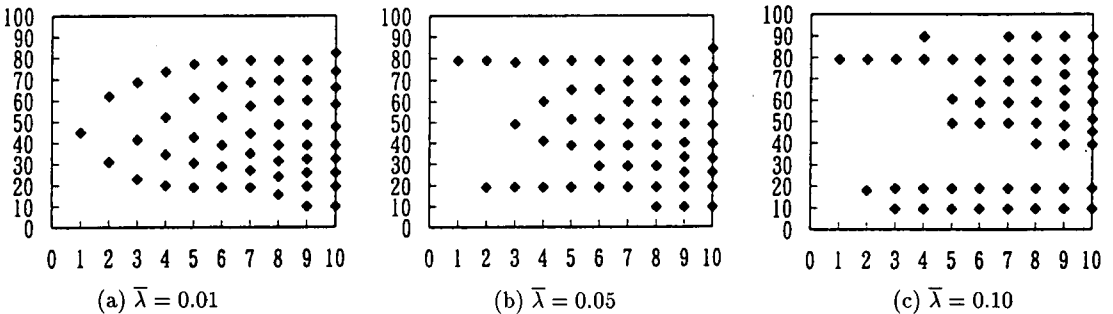


図-22 被害率が一律でない場合の自律分散型システムにおける遮断装置数  $M$  (横軸) とその最適配置 (縦軸)

た。一方、両端を供給点とするループ形状システム (図-21) において、平均被害率  $\bar{\lambda} = 0.01$  および  $0.05$  の場合は、低被害率区間  $[80, 100]$  よりも高被害率区間  $[20, 40]$  に重点が置かれるが、 $\bar{\lambda} = 0.10$  になると逆の傾向を示すことがわかる。これは、高被害区間の連結可能性が極めて低くなるため、むしろ低被害区間を細分化した方が効果的になるためである。自律分散型システム (図-22) についても、ループ形状システムと同様な傾向がより顕著に確認できる。分割長さ  $d$  の配分法のみが意味を持つ図-16 とは異なり、図-22 では配置位置そのものが意味を持つ。

### (3) 地震防災戦略に関する考察

以上の数値計算例から、総期待被害を最小化するという基準のもとでは、全体の平均被害率および被害率

の空間的分布に応じて、異なった分割方式を採用する必要があることが示された。その基本的傾向として、

- (a) 全体的に被害率が低い場合には、被害箇所は施設の一部にとどまるため、システム全体を分割し、どの部分で被災しても柔軟に局所化できるようにしておくこと、
- (b) 一方、全体的に被害率が高い場合には、被害箇所は施設全体に広がるおそれがあるため、被害を許容する部分と許容しない部分を選別し、後者を分割対象とすること、
- (c) 局所的に被害率の高い部分の扱いは、システム形状、全体的な被害率、分割数との関係によって異なること、

などが見いだされた。こうした戦略の相違について考察することは、本研究で扱ったシステム分割問題に限

らず、地震防災対策のあり方そのものを議論する際に有効であると考えられる。ここでは、文献<sup>20),21)</sup>において提示されている概念を参照して、さらに考察を進める。

石原<sup>20)</sup>は、都市河川災害への対策を、“fail-safe”と“safe-fail”の2種類の設計原理から考察している。前者は、システムの一部が故障してもバックアップ機構を働かせて、システム本来の目標に安全に到達することを目指すものである。後者は、システムの故障のために目標に安全に到達することができなくなった場合でも、特定の要素だけは安全性を保つようにするものである。本研究の数値計算結果は、総期待被害の最小化を目標とする場合、被害率の増加に従って、支配的な設計原理が“fail-safe”から“safe-fail”へと移行することを示している。

また小林<sup>21)</sup>は、耐震投資戦略について費用便益分析の観点から考察している。社会的集団リスクの管理目標として、(i) 総期待被害の最小化、(ii) 個人が直面するリスクの個人間での公平化、および(iii) カタストロフの回避（生起する被害の最小化）、の3条件を採用した場合、これらを同時に満足するような耐震投資の評価法は存在せず、何らかの優先付けが必要であると指摘している。本研究の数値計算結果は、前提条件として(i)を優先させた場合、被害率が低いレベルでは(ii)を同時に達成できるため、上記(a)の分割方式が採用されるが、被害率が高いレベルでは(ii)を達成し得ず、上記(b)の分割方式が有利となることを示している。

## 7. おわりに

本研究では、確率論的手法によって求められた被害分布特性に基づいて、連続システムを分割するための制御装置の最適配置を決定する問題を扱った。本研究によって得られた成果を、以下に列挙する。

- (1) 連続システム上の被害発生が一様ランダムと仮定したうえで、被害位置の確率分布の特性を解明した。 $n$ 個以上の被害発生という条件下で $n$ 個目の被害位置の確率密度関数が、構造物の全長 $L$ で区間定義されたガンマ分布となることを示した。
- (2) 基本となる「直線形状システム」の期待連結長さの解析解を示すとともに、「ループ形状」・「二重リンク OR 構造」・「二重リンク AND 構造」の3種のシステム形態の連結信頼性の特性を明らかにした。
- (3) (2)の4種のシステム形態に加えて、供給点に依存しない「自律分散型システム」を定義し、それぞれが任意の位置で分割された場合の期待連結長さを求めた。

- (4) 連続システムの分割により期待される効果として、連結信頼性の向上（機能的な被害波及を免れること）と、自律分散性の活用（被害を受けても部分部分が機能すること）、の2点に着目し、被災後の期待連結長さの最大化を目的とする、連続システムの最適分割のための定式化を行った。
- (5) 動的計画法の一次元配分過程のアルゴリズムを応用して、(4)の最適化問題の解法を提案した。被害率がシステム全体で一様である場合の数値計算例を示し、最適分割パターンがシステム形状と想定被害規模により大きく異なる点など、基本特性について論じた。
- (6) 被害が任意の被害率分布に従って発生する場合に対しても最適化が行えるように、非斉時ポアソン過程を用いて、定式化と解法の一般化を行った。仮想的な連続システムを数値計算例として取りあげ、最適分割パターンとシステム形状・平均被害率・被害率分布などの関連について論じた。

次に今後の課題をまとめる。

- (a) 本研究で提案した最適分割手法は被害率が既知であることを前提としており、想定する被災レベルによって異なる最適解が得られる。近年、発生頻度は極めて小さいが巨大な被害を引き起こす災害（低頻度巨大災害）に対する取り組みが課題となり、被害想定では被災レベルの異なる複数のシナリオが考慮されている。個々のレベルに応じて得られる最適解を、合理的に組み合わせる方法を検討する必要がある。
- (b) ネットワークのブロック化は、被災箇所を健全システムから分離するばかりでなく、復旧作業を効率化し早期復旧を図るうえでも意義深い。文献<sup>10)</sup>では、被災状況に応じて平均復旧時間を最短化する最適ブロック手法を示した。本研究では被災直後の連結長さを評価基準としたが、保全性をも考慮した評価基準を考える必要があろう。
- (c) 本研究では、被害発生後、必ず適切な位置の遮断装置が使用されることを前提条件としている。これは、被害の早期検知と迅速かつ適切な制御の上に成り立つものである。このような防災技術の普及と高精度化が期待される。

なお本研究では、簡単のため供給系ライフラインを想定した単純な構造を対象としたが、ここに示した概念自体は、文献<sup>7),10)</sup>で扱われているような、延焼危険度を最小化する街区のブロック化問題や、ライフライン・ネットワークのブロック化問題など、様々な空間的分割問題に応用可能であると考えている。その際には、GA(遺伝的アルゴリズム)など、適用性の高い最適化手法が有効になるものと考えられる。この点について

ては本論文の投稿後、筆者の一人が基礎的な検討を行い、別途報告している<sup>22)</sup>ので参照されたい。

最後に、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(課題番号 09780424)ならびに文部省私立大学ハイテク・リサーチ・センター整備事業による補助を得て実施されたことを付記する。

#### 参考文献

- 1) (社)土木学会関西支部：平成3年度講習会テキスト「より安全な都市を目指して」, pp.141-172, 1991年3月.
- 2) 土岐憲三：大都市における地震災害のリアルタイム制御ーリアルタイム地震防災をめざしてー, 第9回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編「自然災害と地域社会の防災」, pp.90-100, 1995年9月.
- 3) 野田茂, 目黒公郎：リアルタイム地震工学を目指して, 第22回地盤震動シンポジウムー面的・即時的評価への取り組みー, pp.95-112, 1994年10月.
- 4) 小林正美：サンフランシスコ市の地震火災とその都市の安全設計の歴史, 1989年ロマ・ブリエタ地震によるサンフランシスコ沿岸地域等の被害に関する調査研究, 文部省科学研究費突発災害研究成果(代表：亀田弘行), pp.271-300, 1990年3月.
- 5) 笠野智成, 野田茂：GAを用いた地震センサーの最適配置, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp.456-457, 1993年9月.
- 6) 高橋功, 盛川仁, 亀田弘行：都市の地震動モニタリングシステムのための観測点の最適配置に関する基礎的研究, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, 第1部(B), pp.1488-1489, 1994年9月.
- 7) 小林正美：避難計画における基礎理論, 土木学会関西支部テキスト「都市の耐震防災」, pp.153-162, 1980年6月.
- 8) 小林正美：地震に対する都市ライフラインシステムのブロック化に関する基礎的研究ーガス, 水道供給管路網のブロック化ー, 都市計画別冊, 第17回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp.547-552, 1982年.
- 9) 小林正美：都市防災におけるフェイルセーフ設計, オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.1, pp.24-28, 1993年1月.
- 10) 能島暢呂, 亀田弘行：幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム, 土木学会論文集, No.450/I-20, pp.171-180, 1992年7月.
- 11) 竹内啓：数理統計学 第13章 順序統計量の分布, 東洋経済新報社, pp.140-146, 1963年7月.
- 12) Papoulis, A. 著(平岡, 篠崎, 天野, 村田共訳)：工学のための応用確率論 基礎編, 東海大学出版会, pp.77-111, 1970年.
- 13) Kawakami, H. : Earthquake physical damage and functional serviceability of lifeline network models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.19, pp.1153-1165, 1990.
- 14) 川上英二：単純なネットワーク上に分布する需給点ペア間の連結確率の理論解, 土木学会論文報告集, No.419/I-22, pp.83-92, 1993年1月.
- 15) Ang, A. H-S and Tang, W. H. 著(伊藤, 亀田, 黒田, 藤野共訳)：土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988年.
- 16) 吉川和広：土木計画とOR, 丸善, pp.230-239, 1969年.
- 17) 伏見正則：理工学者が書いた数学の本 確率と確率過程, 講談社, pp.86-103, 1987年5月.
- 18) 三根久, 河合一：信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, pp.12-32, 1982年.
- 19) 磯山龍二, 片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集, No.321, pp.37-48, 1982年5月.
- 20) 石原英雄：都市河川防災における fail-safe と safe-fail について, 都市防災シンポジウム講演集, 土木学会関西支部, pp.223-228, 1987年10月.
- 21) 小林潔司, 秀島栄三：耐震投資に関する費用便益分析, 第2回都市直下地震総合シンポジウム論文集, 文部省科学研究費補助金 重点領域研究「都市直下地震」総括班, pp.193-196, 1997年11月.
- 22) 能島暢呂：GAを用いたブロック分割による空間的被害波及の防止・軽減について, 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.237-244, 1997年12月.

(1997. 6. 24 受付)

## OPTIMUM SUBDIVISION OF AN EXTENDED SYSTEM FOR REAL-TIME CONTROL IN EARTHQUAKE EMERGENCY

Nobuoto NOJIMA and Hiroyuki KAMEDA

Emergency control of spatially wide-spread facilities is an important measure to prevent damage spread in earthquake disaster. This study presents a probabilistic method to realize optimum subdivision of an extended system using control devices which are potentially used in emergency so that the immediate function of the system is most reliable in an earthquake emergency. Firstly, for a linear structure with random occurrence of damage, the expected length without functional interruption has been derived in continuous and discretized form. The DP(Dynamic Programming) algorithm is then employed to find optimum allocation of arbitrary number of control devices. Some illustrative examples have been demonstrated.