シャットオフの数理

能島　暢呂

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)

シャットオフすなわちサービスの緊急停止は，リアルタイム地震防災における情報収集・伝達・処理技術を活かし，被害の波及的拡大や事故発生を防止･軽減するための有効な手段である．しかしその操作に関しては，(1)シャットオフ対象位置（空間的側面），および(2)意思決定のタイミング（時間的側面）の両面から，適切な判断が下されなければ，対応の遅れや不要なサービス遮断につながることになる．こうした背景のもとで，本研究では，(1)システムのブロック分割形状の最適化，および(2)不確実性下におけるシャットオフの意思決定プロセス，の二つの問題に焦点を絞って数理モデルの定式化を行い，簡単な数値計算例を通じて効果的なシャットオフのあり方に関する考察を行う．

Key Words *: real-time shutoff, disaster spread, system subdivision, isolation of damage Bayes decision procedure, entropy, mutual information, value of information*

１．　はじめに

「リアルタイム地震防災」は，地震直後から発生する様々な情報を即時処理することにより，対策の初動体制を早期に確立するとともに，システムを実時間制御して被害発生・波及の防止軽減を図ることを狙いとしている．その情報処理の流れは，(1)地震動情報の収集・処理・伝達，(2)地震諸元および地震動分布の推定と逐次更新，(3)実被害情報の収集・処理・伝達，(4)被害分布の推定と逐次更新，などから構成される推論構造とフィードバック制御構造の形態をとっている．

ライフライン施設では，ネットワーク施設を介してフローが安全に伝達されるとともに，一部の被害がシステム全体に波及しないように緊急措置をとる必要がある．従って，供給系施設では供給停止・ブロック遮断，道路交通施設では通行禁止措置，鉄道交通施設では列車停止措置，といったシャットオフ操作を迅速かつ正確に行うことが要求されることから，「リアルタイム地震防災」の適用が最も期待される分野の一つである．

ところが「止めることにより回避できる損失（二次災害）」と「止めることにより生じる損失（サービス停止）」はトレードオフの関係にあり，両者を同時に低減することは困難である．従って，「いかに適切に止めるか」の見極めが緊急対応の成否を決定付けることになる．すなわち「止める必要がない場合に止めることによる損失(空振り)」と「止めるべき場合に止めないことによる損失（見逃し）」を可能な限り回避することが重要となる．これには大別すると２つのやり方がある．

まず一つは，対象システムをブロック分割しておき，安全なブロックではサービスを継続し，危険なブロックではサービスを遮断する方法である．この概念は，ガス導管網のブロック分割や配水管路網の系統ブロック化，市街地の不燃化，建物の防火区画など，多くの対策に取り入れられてきている．このブロック遮断操作が適切に行われるには，システムが適当なサイズにあらかじめブロック分割されていなければならない．ところが，被害の最小化を目的としたブロック形状のあり方を探る研究面での試みは少なく，都市のフェイルセイフ化に関する小林[1),2)]の研究や，ネットワークのブロック化に関する筆者ら[3)-6)]の研究が挙げられるに過ぎない．そこで本稿の２．では，文献 4)-6)に基づいて，シャットオフのためのブロック分割形状を数理的に最適化する試みについて紹介する．

もう一つの方法は，「止める／止めない」の意思決定を，可能な限り合理的な判断基準に基づいて行う方法である．一般に，地震後の初期段階では，粗く不確実性の高い情報しか得ることができないが，時間が経過するにつれて，徐々に細密で正確な情報を入手できるようになる．その過程で，観測された地震動強度と経験的被害関数の関係から予測された被害状況に応じて，シャットオフの意思決定が行われる．つまり，時間の経過と情報の確実性がコンフリクトする中で，難しい判断を強いられるのが現実である．そこで本稿の３．では，統計的意思決定理論と情報理論を用いて，シャットオフの意思決定プロセスの数理モデルを記述し，リアルタイム対応における観測情報の意義について考察を行う．

２．システムのブロック分割形状の最適化

２．１　概説

配水管やガス導管のように液体・気体の伝達機能を持つ構造システムでは，被害箇所で内容物が漏出するとシステム全体で圧力低下が生じる．従って，被害の影響は被害箇所にとどまらず空間的に広く波及する．空間的被害波及は，家屋が密集する市街地での延焼火災にも見

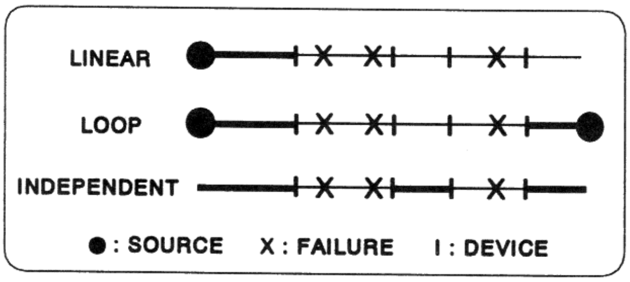


図１　ブロック分割システムの被害箇所と連結長さ

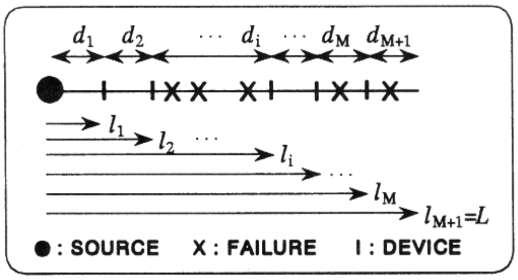


図２　分割境界の位置とブロック長さ

られる現象である．こうした被害波及を防止・軽減するには，被害箇所を迅速に遮断して健全な部分から切り離す必要がある．この制御・操作を被災時に即時的かつ効果的に行うには，あらかじめブロックバルブなどの遮断装置や，延焼遮断帯などのオープンスペースによって，施設や都市空間が適切にブロック分割されていなければならない．

ここでは，空間的に広がりを持つシステム（ライフラインネットワーク，市街地，地下街など）のブロック化や区画化が，被害の局限化と波及防止に有効であることに注目し，その空間的構成の最適化問題を，線状システムの一次元ブロック分割の問題と，面状システムの二次元ブロック分割の問題に分類して考察する．

２．２　線状システムの一次元ブロック分割

(1) 期待連結長さの定式化

図１に示す 3 種類のシステム形態を考える．図中，”LINEAR”とは，線状システムの一端を供給点とする供給系システムを意味し，以下では「直線形状システム」と呼ぶ．また，”LOOP”とは両端を供給点とするシステムや，供給点は単一であるがループ形態をとるために両端を供給点とみなすことができるシステムを意味し，以下では「ループ形状システム」と呼ぶ．一方，”INDEPENDENT”とは，供給点に依存せずに無被害区間が独立に機能するシステムを意味し，以下では「自律分散型システム」と呼ぶ．

これら 3 種のシステムがそれぞれ 5 ブロックに分割され 3 箇所に被害が生じた場合，ブロック境界を超える被害波及はないものと考えると，機能が保持される部分は図中の太線で表される．その期待値（期待連結長さ）を定式化するため，図２のように，長さ L の線状システムに M 個のブロック境界を配置して，$(M+1)$個のブロックに分割する場合を考える．図中，i 番目のブロック境界の左端からの位置を ℓ_i，i 番目のブロックの長さを d_i で表している．ここで，長さ L の全長にわたって被害が一様ランダムに発生するものとし，単位長さあたりの被害箇所数（以下，被害率と表記）を l とした場合，被害箇所数が N となる確率は lL をパラメータとするポアソン分布に従う．以上の条件のもとで，前述の 3 種のシステムの期待連結長さは，次式で求められる [4),5)]．

$$\overline{\ell}_{LINEAR} = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-l\ell_i} \cdot d_i$$

$$\overline{\ell}_{LOOP} = \sum_{i=1}^{M+1} \left\{ e^{-l\ell_i} + e^{-l(L-\ell_{i-1})} \right\} \cdot d_i - Le^{-lL}$$

$$\overline{\ell}_{INDEPENDENT} = \sum_{i=1}^{M+1} e^{-ld_i} \cdot d_i$$

(2) 一次元最適ブロック分割問題の定式化

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，できるだけ多くのブロックに分割することが望ましい．しかし実際の分割数は設置費用や維持管理などの面で制約を受けるため，限られた分割数の制約のもとで最適分割を考えねばならない．ここでは期待連結長さを最大化する分割パターンを「最適分割」とみなし，任意の M 個のブロック境界位置を決定する問題を，次のような組合せ最適化問題として定式化する [4),5)]．

find　$d^* = \{d_i^* \mid i = 1, \cdots M+1\}$

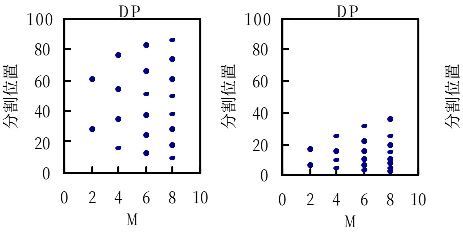
which maximize　$\overline{\ell}(M, d)$

subject to　$\sum_{i=1}^{M+1} d_i = L,\quad d_i > 0$

(3) 数値計算例

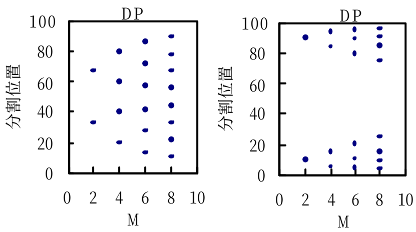
以上のモデルに基づいた数値計算例を示す．上記 3 種のシステム形態を考え，システムの全長を L=100 とする．被害率は l =0.01 および 0.10（被害箇所数／単位長さ）の 2 種類とし，全体での平均被害箇所数がそれぞれ 1 箇所および 10 箇所となる被害パターンを想定する．分割境界の候補位置の数は，全長を 50 等分するため K=49 とし，分割境界の個数は M=2，4，6，8 の 4 種類とした．

図３～５は，動的計画法（DP）を応用した方法 [4),5)] による最適解を示したものである．一般的傾向として，最適分割パターンは被害率に大きく依存し，想定被害規模によって最適方策が異なることを示唆している．直線形状システムとループ形状システムでは，被害率が低い(l =0.01)場合はほぼ均等分割が最適となるが，被害率が高い(l =0.10)場合においては分割位置が供給点に偏り，両システム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システムに共通している．一方，自律分散型システムでは，均等分割が基本的な形状となるが，被害率が大きく(l =0.10)遮断装置数が少ない(M=2, 4)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．なお被害率が全長で一様としているので，自律分散型システムでは，分割さ



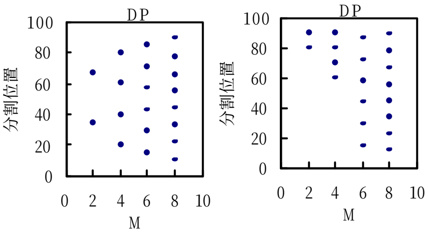
(a) l =0.01　　(b) l =0.10

図３　直線形状システムの分割パターン



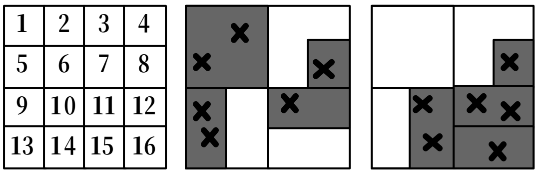
(a) l =0.01　　(b) l =0.10

図４　ループ形状システム



(a) l =0.01　　(b) l =0.10

図５　自律分散型システム



(a)小区画番号　(b)被災パターン１ (c) 被災パターン２

図６　面的広がりを持つシステムの被災時機能

れたブロックの相対的な位置関係は評価関数と無関係であり，その長さのみが意味を持つ．

なお，地盤条件などの相違によって被害率が一様と仮定できない場合には，非定常ポアソン過程による拡張が可能である．詳しくは文献 4),5) を参照されたい．

２．３　面状システムの二次元ブロック分割

(1) 二次元最適ブロック分割問題の定式化

次に，面的広がりを持つシステムの二次元最適分割への拡張を考える [6]．一次元分割問題で分割候補位置を離散的に扱ったのと同様に，ここでも分割パターンを離散的に扱う．全体システムは多数の小区画の集合体で構成されており，これらを組み合わせた形状をブロックとする．それぞれの小区画では施設量（埋設管の敷設延長や木造家屋数）と，災害発生源となるポテンシャルとしての被害率（単位施設あたりの被害発生率）が与えられ，「ブロック内では被害が波及するがブロック間では波及しない」というルールのもとで，期待無被害施設量が最大化（期待被害が最小化）されるようなブロック構成を求める問題を，組合せ最適化問題として定式化する．分割されたすべてのブロックは互いに独立に機能すると考えるので，２．２で扱った「自律分散型システム」を二次元に拡張したものと解釈してよい．

図６(a)に示す 16 の小区画からなるシステムを例にとり，ブロック分割と被害分布に応じて決まるシステム機能について説明する．図６(b),(c)のように分割数が 7 のブロック構成とした場合に，図に示す 6 箇所で被害が発生すると，被害を免れた白色の 3 つのブロックでシステム機能が保たれるものとする．

いま小区画 i 内の施設量を h_i，被害率を l_i とし，被害の発生は小区画内で一様ランダムであると仮定する．小区画を統合して構成される区画 I において，無被害となる確率は，次式で与えられる [6]．

$$P_I = \exp\left[-\sum_{i\in I} l_i h_i\right]$$

従って，ブロック分割数を J とした場合，全体での期待無被害施設量は，次式で求められる [6]．

$$\bar{h} = \sum_{I=1}^{J}\left(P_I \sum_{i\in I} h_i\right)$$

以上により，最適分割問題は，$\bar{h}$ を最大化する分割パターンを見出す問題として定式化される．

(2)数値計算例

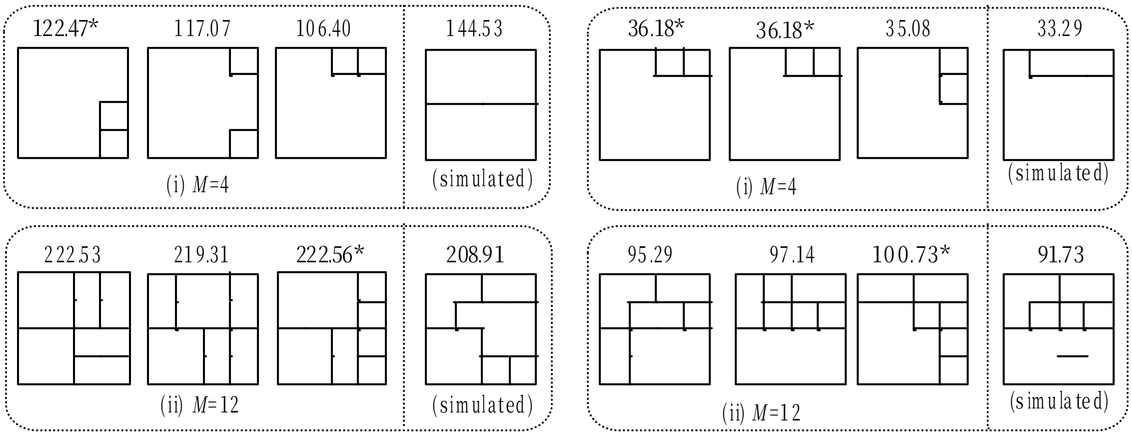
図６(a)に示したように，16 の小区画が 4×4 の格子状に配置されているシステムを考える．分割線の総数は K=24 であるが，そのうち実際にブロック分割に使用する数を M=4，12 の２種類とした．

各小区画における施設は相対的に右方に位置するほど高密度に集中したパターンとし，全体で 280 単位の施設量とした．被害発生率は相対的に下方に位置するほど高い分布とし，全体的に低いケース 1（全体での平均被害箇所数 1.4 箇所）と，全体的に高いケース 2（同 7 箇所）の 2 ケースを考えた．

２．２では DP による解を示したが，二次元分割問題では DP の適用が困難であるため，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた解とモンテカルロ法によるランダム・サーチによる解の比較を行うこととした．図７は GA による最終世代の最良個体から求められた分割パターンと，1000 回のランダムサーチによって得られた最良解による分割パターンを示す．ケース 1 とケース 2 のそれぞれについて，乱数の初期値を 3 種類与えて異なる結果が得られたので，それらすべてを図示している．各図上の数値はそれぞれの適合度（ここでは期待無被害施設量）を表す．

まずケース 1 の M=4 の場合には分割線数が少ないため，GA では隅の一部分をブロック化する解が得られた．一方，シミュレーションによるランダムサーチでは上下を二等分する分割が得られ，GA 解よりも良好な解を与えている．M=12 の場合には GA 解がいずれもランダムサーチ解を上回った．最大適合度を与える分割パターンは，施設密度が高く被害率の高い部分で細分化されている．

次に，ケース 2 の M=4 の場合には，右上方，すなわち施設密度が高くかつ低被害率の部分が細分化され，いわばシェルターのように防護されているのに対し，大きなブロックでは被災を許容するような分割パターンとなっている．M=12 では分割数が多いことから，期待被害



(a) ケース1　　(b) ケース2

図７　GA と 1000 回のモンテカルロ・シミュレーションの最良解による分割パターンの例
(数字は適合度を表し，*は GA で初期値を変えた 3 個の解のうち最良解)

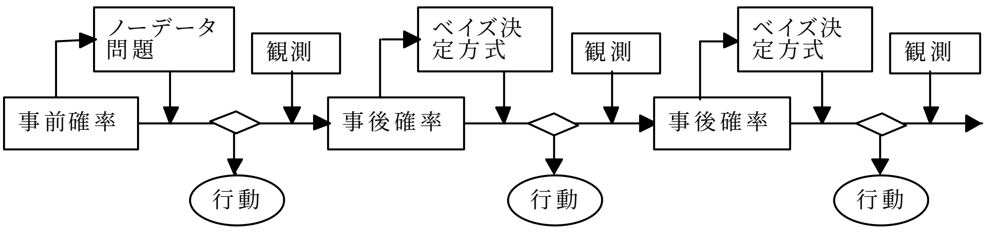


図９　情報による事後確率の更新とベイズ決定方式による意思決定プロセス

を均等化するような分割が最適となっている．ケース 2 ではすべての GA 解がランダムサーチ解より優れた結果を与えたものの，試行によって適合度のばらつきが大きく，安定した解が得られているとは言い難い．局所解からの脱出方法や，最適解周辺の局所探索方法などについても改良の余地があると考えられる．

３．不確実性下におけるシャットオフの意思決定プロセス

３．１　概説

地震直後に入手できる情報は大雑把で不確実性が高く，重大な意思決定を下す判断材料としては，不十分であることが多い．しかし，シャットオフのように緊急性を伴う対応については，そのような状況下でも迅速な意思決定を行わなければならない．「リアルタイム地震防災」の技術が有効に活かされるのはこのフェーズであろう．

図８は，「情報（地震動強度）」，「真の状態（被害の程度）」，「状態推定（被害の推定）」，「行動（シャットオフ）」，「行動の結果（損失）」の間における入出力関係を単純化して表したものである．真の被害が不明である間，地震動強度の情報に基づいて被害を推定し，シャットオフの意思決定を行うことと，実際の被害ととった行動の結果の組み合わせで損失が規定されることを示している．この図式により，損失を最小化するための対応の枠組みとして，観測・推定・行動の流れを捉えることができる．

ところで，複数の情報源を利用できたり，一つの情報源を繰り返し利用できる場合，情報の蓄積とともに被害推定をアップデートすることが可能となる．このように

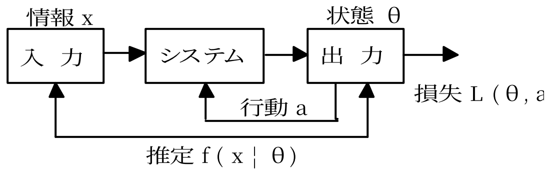


図８　情報・状態・推定・行動・損失の入出力関係

時間軸を導入すると，(1)あいまいさ（不確実性）が徐々に減少するという情報理論的なプロセス記述，(2)プロセスの各段階での最善行動を定める意思決定方式の記述，(3)意思決定のタイミングに関する逐次決定過程の記述，という３つのアプローチを考えることができる．図９はこれらをまとめて図示したものであり，(1)観測情報による状態推定の事後確率の更新，(2)各段階で期待効用を最大化（期待損失を最小化）するベイズ決定方式の更新，(3)観測継続か意思決定かの選択，からなるプロセスの全体構成を示している．

ここでは，上記(1)(2)のアプローチに注目して，シャットオフの意思決定プロセスを数理的にモデル化して，情報収集と合理的な意思決定との関連について考察する．

３．２　ベイズ決定方式の誘導

いま，以下のように定義される決定問題 (A, Θ, p, ℓ, e) を考える．

q　　：自然の状態（ $\Theta = \{q_1, q_2, \cdots\}$ ）
x　　：情報（ $X = \{x_1, x_2, \cdots\}$ ）
a　　：行動（ $A = \{a_1, a_2, \cdots\}$ ）

表１　被害と観測情報に関する尤度関数

	震度V弱	震度V強	震度VI弱	震度VI強
被害大	0.0	0.0	0.2	0.8
被害小	0.0	0.1	0.5	0.4
被害なし	0.4	0.3	0.2	0.1

$p(q)$　：Θ 上の確率（$p(q)=\{p(q_1), p(q_2),\cdots\}$）
$p(x)$　：X 上の確率（$p(x)=\{p(x_1), p(x_2),\cdots\}$）
$A=S(X)$：決定方式（情報xに対する行動戦略）
$\ell(q,a)$　：損失関数（q と a により決まる損失）
$e(x)$　：情報xを発する不完全情報源
$f(x|q)$　：尤度関数（q のとき e が x を出す確率）

まず，「ノーデータ問題」すなわちデータを利用できない場合を考えると，最も合理的と考えられる行動は，期待損失L を最小化する行動であり，事前確率 $p(q_j)$ に基づいて，

$$L=\sum_j p(q_j)\ell(q_j,a^*)\rightarrow \min$$

を満たすa^* として求められる．

次に，情報源$e(x)$ を利用して状態q の推定を行い，行動を決定できる場合について考える．状態がq_j であったときの決定方式S の危険度を，

$$R(q_j,S)=\sum_i f(x_i|q_j)\,\ell(q_j,S(x_i))$$

で定義すると，期待損失L は，

$$L=\sum_j p(q_j)R(q_j,S)$$
$$=\sum_i\sum_j f(x_i|q_j)p(q_j)\ell(q_j,S(x_i))$$

で与えられる．ここで情報x_i を得た場合の事後確率は，ベイズの定理より，

$$p(q_j|x_i)=\frac{f(x_i|q_j)p(q_j)}{\sum_j f(x_i|q_j)p(q_j)}=\frac{f(x_i|q_j)p(q_j)}{p(x_i)}$$

のようにアップデートされるので，

$$L=\sum_i\sum_j p(q_j|x_i)p(x_i)\ell(q_j,S(x_i))$$
$$=\sum_i p(x_i)\sum_j p(q_j|x_i)\ell(q_j,S(x_i))$$

と書き換えられる．従って，事後確率 $p(q_j|x_i)$ に基づいて，得られた情報 x_i ごとに項別に

$$L_i=\sum_j p(q_j|x_i)\ell(q_j,a_x)\rightarrow \min$$

を満たすような決定方式 $a_x=S^*(x_i)$ を定めると，それがベイズ決定方式となる[7]．

３．３　エントロピーによる情報量の定義

情報源eから情報xを得ると，状態q に関するあいまいさが減少することが期待される．ここでは，情報入手による不確実さの減少と情報量がエントロピーを用いて記述されることを示す[8]．

まず，$p(q)=\{p(q_1), p(q_2),\cdots\}$ に対して定義される

表２　被害と行動に関する損失関数と事前確率

	完全遮断	一部遮断	供給継続	事前確率
被害大	40	60	100	0.333
被害小	30	10	30	0.333
被害なし	20	10	0	0.333

$$H[p(q)]=-\sum_j p(q_j)\log_2 p(q_j)$$

はエントロピーと呼ばれ，不確実さの尺度として用いられている．次に，情報x_i を得た場合のエントロピーは，

$$H[p(q|x_i)]=-\sum_j p(q_j|x_i)\log_2 p(q_j|x_i)$$

となるから，確率 $p(x)$ で生じる情報xを観測できる場合の条件付エントロピーは，

$$H[p(q)|x]=-\sum_i p(x_i)H[p(q|x_i)]$$
$$=-\sum_i\sum_j p(x_i,q_j)\log_2 p(q_j|x_i)$$

これらより情報源$e(x)$ の情報量は，エントロピー（不確実さ）の減少量として，

$$I[\Theta;X]=H[p(q)]-H[p(q)|x]$$
$$=-\sum_j p(q_j)\log_2 p(q_j)+\sum_i\sum_j p(x_i,q_j)\log_2 p(q_j|x_i)$$

で定義され，相互情報量と呼ばれる．

３．４　情報源の事前価値

次に，情報源を利用することの価値について考える．状態q に関する完全な情報を発する完全情報源を $e_\infty(x)$ で表す．この情報源からの情報により真の状態q が既知となった場合に，損失を最小化する行動をa_q で表す．また前述のように，状態q に関する情報がない場合および不完全情報源 $e(x)$ により情報 x が得られた場合に，期待損失を最小化する行動をそれぞれa^*，a_x で表す．このとき，情報源$e_\infty(x)$ および$e(x)$ の事前価値は，次式で与えられる[8]．

$$V(e_\infty(x))=\mathrm{E}[\ell(q,a_q),p(q)]-\mathrm{E}[\ell(q,a^*),p(q)]$$
$$V(e(x))=\mathrm{E}[\ell(q,a_x),p(x)]-\mathrm{E}[\ell(q,a^*),p(q)]$$

ただし，$\mathrm{E}[*,p(\bullet)]$ は，確率分布 $p(\bullet)$ に関する変数$*$ の期待値を表す．

３．５　シャットオフの意思決定に関する数値計算例

震度階を情報源として被害の程度q を推定し，シャットオフ行動aの意思決定を行うことを想定した，簡単な数値計算例を示す．震度階は「V弱」，「V強」，「VI弱」，「VI強」の４種，被害の程度は「被害大」「被害小」「被害なし」の３種に分類され，尤度関数 $f(x|q)$ が表１のように与えられている．また，シャットオフ行動aは「遮断」「一部遮断」「供給継続」の３種からなり，被害の程度がq の時に行動a をとった場合の損失関数 $\ell(q,a)$ が表２のように与えられているものとする．地震直後の状況を想定し，真の状態についてまったく見当がつかない，すなわち「完全不知」のため事前確率 $p(q_j)$ が一様に 1/3

表３　震度「VI強」を連続して観測した場合の結果

	観測前	V強観測(1)	V強観測(2)	V強観測(3)	V強観測(4)	V強観測(5)
確率（被害大）	0.33	0.62	0.79	0.89	0.94	0.97
確率（被害小）	0.33	0.31	0.20	0.11	0.06	0.03
確率（被害なし）	0.33	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00
エントロピー	1.59	1.24	0.81	0.52	0.33	0.20
条件付エントロピー	1.08	0.92	0.65	0.44	0.28	0.17
相互情報量	0.51	0.32	0.16	0.08	0.05	0.03
%利得	32.14	25.88	19.33	16.08	14.68	13.94
期待損失（情報なし）	26.65	35.38	37.78	38.86	39.41	39.70
期待損失（不完全情報）	22.65	33.15	37.25	38.62	39.29	39.64
期待損失（完全情報）	16.65	27.69	33.58	36.60	38.23	39.09
事前価値（完全情報）	10.00	7.70	4.20	2.25	1.18	0.61
事前価値（不完全情報）	4.00	2.23	0.53	0.24	0.12	0.06
V弱観測時行動	3	3	3	3	3	3
V強観測時行動	3	2	2	2	2	2
VI弱観測時行動	2	2	1	1	1	1
VI強観測時行動	1	1	1	1	1	1

である状態からスタートする．

最初に，ノーデータ問題の場合，「完全遮断」「一部遮断」「供給継続」に対する期待損失はそれぞれ，29.99, 26.65, 43.29 となり，この時点で行動をとるとすれば，「一部遮断」が選択される．次に，震度階に関する独立な不完全情報源$e(x)$を継続して利用でき，「VI 強」を連続して観測した場合についての試算を示す．表３はその結果をまとめたものであり，確率$p(q)$の更新過程とともに，エントロピー$H[p(q)]$，条件付エントロピー$H[p(q)|x]$，相互情報量$I(\Theta;X)$，期待損失，情報の価値$V(e_\infty(x))$および$V(e(x))$，ベイズ決定方式$A=S(X)$を示している．

情報が蓄積されるにつれて被害の状態qの推定（ここでは被害大）に関する不確実さが低減され，エントロピーが減少する過程が理解される（図１０～１１）．また，情報が不足している段階では，相互情報量は大きな値をとり，情報は高い事前価値を有するが，両者はいずれも観測の継続とともに減少する．ベイズ決定方式は，得られた情報に応じて事前確率が事後確率に更新されて決定された方式であり，各段階で情報が新たに得られた場合にとるべき行動を示している．この例では，震度階「VI強」を続けて観測することによって，観測開始以前よりも安全側の行動にシフトしてゆく様子がわかる．

４．おわりに

「リアルタイム地震防災」の重要な要素であるシャットオフは震災経験に裏付けされながら実用化された技術であり，理論的背景が比較的乏しい面も多く含んでいるように思われる．本稿では，シャットオフを効果的に実施することを目的として，事前対策（ブロック分割）と事後対策（ベイズ決定方式）の両面から期待被害を最小化するための数理モデルを提示した．

前半に示したブロック分割問題に関しては，今後，小規模なモデル計算にとどまらず，現実的な大規模システムに応用することを検討中である．後半のベイズ決定方式に関しては，震度情報のみを情報源とする例を示したが，最大加速度，SI 値，波形情報，実被害情報など，

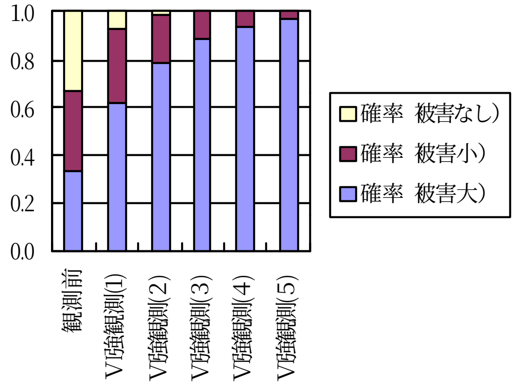


図１０　ベイズの定理による事後確率の更新過程

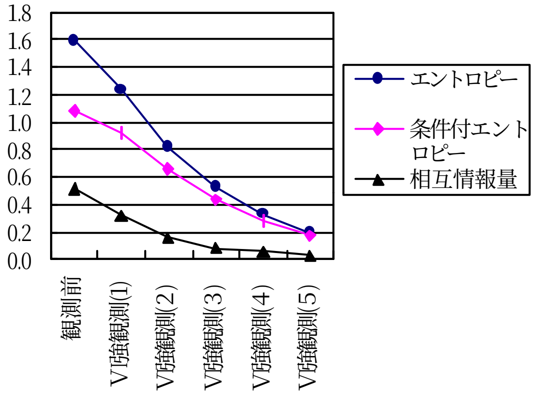


図１１　エントロピーの減少と相互情報量の変化

異種の詳細な情報源に基づいて被害の輪郭が明確化される過程を記述することも可能であろう．またシャットオフを自動処理化する際のトリガーレベルの合理的な設定法への応用も考えられる．被害関数の高精度化や情報源の多様化によって，被害予測における不確実性を低減してゆくことが，即時対応の鍵を握るものと思われる．

参考文献

1)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　−ガス，水道供給管路網のブロック化−，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.

2)小林正美：都市防災におけるフェイルセイフ設計，オペレーションズ・リサーチ，Vol.38，No.1，pp.24-28，1993.1.

3)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.171-180，1992.7.

4)能島暢呂・亀田弘行：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，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.97-109，1998.7.

5)Nojima, N. and Kameda, H. : Optimum Subdivision Control of an Extended System under Earthquake Emergency, Proc. of International Conf. on Structural Safety and Reliability '97, Kyoto, 1997 (in printing).

6)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，pp.237-244，1997.12.

7)松原望：現代人の統計 4「新版　意思決定の基礎」，朝倉書店，pp.106-146，1985.7.

8)市川惇信：エンジニアリング・サイエンス講座 33「意思決定論」，共立出版，pp.100-119，1983.7.