

地震動情報に基づく緊急対応の意思決定プロセスのモデル化

岐阜大学大学院 学生会員 内山 晃志
岐阜大学工学部 正会員 能島 暢呂
岐阜大学工学部 正会員 杉戸 真太

1. はじめに 地震発生後におけるサービスの緊急停止は、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、「空振り」の損失と「見逃し」の損失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不可能である。そこで、「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ことを目的として、ベイズ決定方式を用いて緊急停止の意思決定プロセスの数理モデルを記述する。従来の研究¹⁾では、単一の地震動情報のみが扱えるモデルを記述していたが、実際には複数の地震動情報が存在する。そこで本研究では複数の地震動情報を考慮するモデルを2つ提案した。1つは複数の情報間の相関を考慮せずに独立と仮定したモデル、もう1つは相関を考慮した場合である。それらを定式化するとともにケーススタディーを示す。

2. ベイズ決定方式を用いた意思決定の定式化

(1) 観測情報に基づく行動戦略 図1は地震発生から行動決定までの流れを、上部と下部の2つのパターンに分類して示したものである。上のパターンは、被害状態が確定的に既知の場合である。被害の状況 θ と行動の結果 $a(\theta)$ の組み合わせで規定される損失 $l(\theta, a)$ が最小となるように行動するのが最も理想的な戦略であるといえるが、被害を把握するのに時間がかかり被害拡大につながる恐れがある。そこで、図の下部のように地震動情報などの観測情報に基づいて被害関数 $f(\theta|x)$ や尤度関数 $f(x|\theta)$ を用いて被害状況 $p(\theta)$ を推定し、期待損失を最小とする行動のルール、すなわちベイズ決定方式による行動戦略に従うのが適切である。従来の研究¹⁾では、単一の地震動情報に基づく緊急対応意思決定のモデル化を行っていた。そこで本研究では、震度情報（気象庁震度階）が得られた後に地震動時刻歴から求められる情報（最大加速度、最大速度、SI値）を入手できるという状況を想定した2つのモデルを考えた。1つは、両者を独立と仮定した場合と、もう1つは、両者の情報の相関性を考慮した場合である。以下にそのモデルを示す。

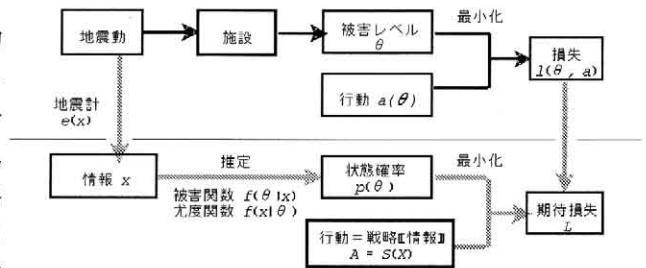


図1 観測情報による被害推定と期待損失を最小化する行動戦略

(2) 複数の地震動情報が独立な情報として利用できる場合 図2は複数の独立な地震動情報源 $e_\alpha(x)$, $e_\beta(x)$, $e_\gamma(x)$ を用いて規定する方法を表しており、入手される情報に従って被害状態の推定確率を順次更新している。例えば、情報源 $e_\alpha(x)$ から情報 x_i^α を得た場合の事後確率は、

$$p(\theta_j|x_i^\alpha) = \frac{f(x_i^\alpha|\theta_j)p(\theta_j)}{\sum_j f(x_i^\alpha|\theta_j)p(\theta_j)} = \frac{f(x_i^\alpha|\theta_j)p(\theta_j)}{p(x_i^\alpha)} \quad (1)$$

にアップデートされ、期待損失は

$$L_i = \sum_j p(\theta_j|x_i^\alpha)l(\theta_j, a_{x_i^\alpha}) \quad (2)$$

となり、これを最小にするような決定方式 $a_{x_i^\alpha} = S^*(x_i^\alpha)$ がベイズ決定方式となる。情報源 $e_\beta(x)$, $e_\gamma(x)$ から情報 x_i^β , x_i^γ を得た場合も同様である。このように、複数の異種地震動情報を独立と仮定することで事後確率を繰り返しアップデートすることが可能となる。

(3) 複数の地震動情報の相関性を考慮した場合

(2)では複数情報源を独立として扱ったが、ここでは相関性を考慮した場合の意思決定方式を考える。図3は、地震発生後最初に得られる1次情報源と、それ以降に得られる2次情報源（1次情報源より被害の推定に関する相関性が高いと仮定）の2つの情報源の相関性を考慮した場合のベイズ決定方式の規定方法を表している。図の上部は、1次情報が得られた後に2次情報が得られた場合、2つの情報には相関があるため(2)のように事後確率を繰り返しアップデートすることなく、事前確率に戻って確率を更新することを示している。これに対し、図の下部は、1次情報源と2次情報源との相関関係を用いて、1次情報から2次情報を推定することで、より

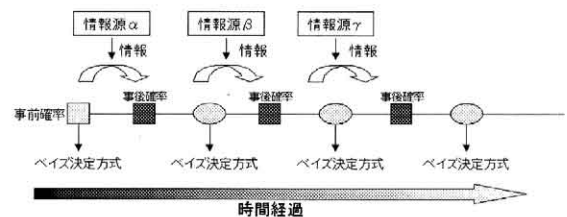


図2 複数の独立な地震動情報を用いたベイズ決定方式

被害との相関性の高い情報にすることを狙いとしている．まず，2次情報源 $e(y)$ から情報 y_k を得た場合の θ_j の事後確率 $p(\theta_j|y_k)$ は，式 (1) の x_i^* を y_k に置き換えた式となる．また，1次情報源 $e(x)$ と2次情報源 $e(y)$ との相関を表す尤度関数 $f(x|y)$ を用いて1次情報から2次情報を推定した場合の条件付確率は，ベイズの定理より，

$$p(y_k|x_i) = \frac{f(x_i|y_k)p(y_k)}{\sum_k f(x_i|y_k)p(y_k)} = \frac{f(x_i|y_k)p(y_k)}{p(x_i)} \tag{3}$$

となる．両者を掛け合わせ，あらゆる y_k について和をとると，1次情報源 $e(x)$ より被害状況 $p(\theta)$ を推定する新たな事後確率

$$p(\theta_j|x_i) = \sum_k p(\theta_j|y_k)p(y_k|x_i) \tag{4}$$

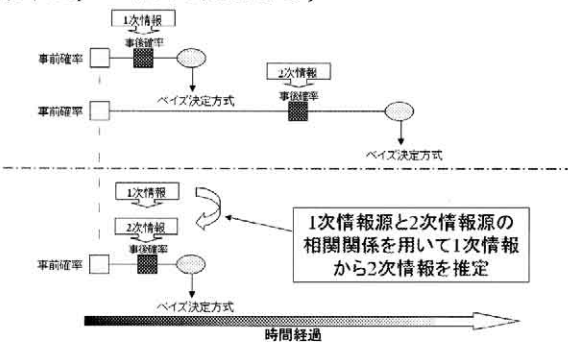


図3 地震動情報の相関性を考慮した場合のベイズ決定方式の流れ

が得られる．この関係を用いて，式 (2) に相当するような期待損失を最小とする決定方式を定めると，地震動情報間の相関を考慮したベイズ決定方式が得られる．

3. ケーススタディーと考察 1995年兵庫県南部地震におけるガス導管²⁾，水道管³⁾の被害と地震動情報の関係を調べ，例えば震度情報に関して，図4に示すように地震動情報と被害に関する尤度関数を，被害発生率が0.5(件/km)を越える場合を「被害大」，それ未満を「被害小」，被害発生率0(件/km)の場合を「被害なし」として設定した．また，被害の程度と被害額で決定される被害関数は，兵庫県南部地震の被害額^{2), 3)}をもとに，対応行動に依存しない初期損失と，緊急停止が必要であるのに停止をしない「空振り」の損失と，必要でないのに停止をする「見逃し」の損失の3つの和をとって設定した．これらを本研究の意思決定方式のモデルに適用しケーススタディーを行った．

(1) 複数の地震動情報を独立として扱った例 ガス導管の場合において，図5の横軸に示した情報（神戸大学の記録）が時間の経過とともに得られる場合では，期待損失が単調増加する傾向にある．つまり，意思決定の遅れが重大な損失につながるため，より早期的な意思決定が要求される．一方，図6の横軸に示した情報（福島県の記録）が時間の経過とともに得られる場合では，期待損失が一旦減少し，その後増加する傾向にある．つまり，少し様子を見てから意思決定を行うほうが望ましいが，過度の遅れは損失の増大を招くと考えられる．

(2) 複数の地震動情報の相関性を考慮した例 1次情報源に気象庁震度階，2次情報源にSI値を設定した場合を考える．(a)1次情報源のみを利用した場合および，(b)1次情報から2次情報を推定した場合を考え，時間の経過ごとに情報の事前価値を算出した．ただし，情報の事前価値とは，情報源を利用する前と後との期待損失の差である．そして，(b)と(a)の事前価値の差をとることで，2次情報を推定する意義を考える．図7は，時間の経過ごとの(a)と(b)の事前価値と，(b)と(a)の事前価値の差を表している．ここでは，被害が完全波及する時間を20ステップに分割し，横軸は相対的な時間の経過を表している．この図をみると，(a)と(b)の事前価値は，被害の波及が1/2ほど進むステップ13まで徐々に増加し，その後減少している．(b)と(a)の事前価値の差は，事前価値の増加に伴ってステップ13まで増加し，その後減少し，ステップ17以降で負の値を示している．このことから，2次情報を推定したほうが有意義であるといえるが，過度に被害が波及した場合は1次情報のみを用いたほうがよいといえる．

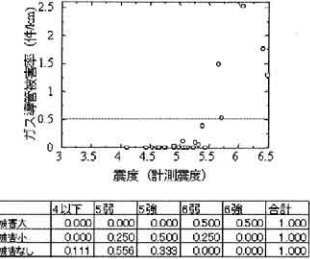


図4 地震動情報（震度）とガス導管被害の関係

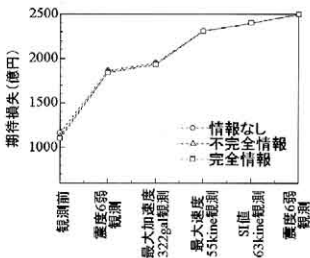


図5 期待損失の変化（神戸大学）

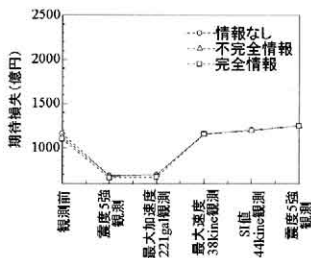


図6 期待損失の変化（福島）

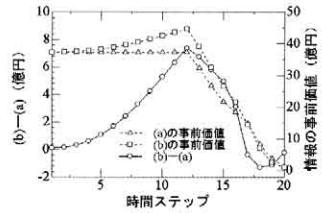


図7 (a)と(b)の情報の事前価値の変化とその差

4. おわりに 本研究では従来の研究を踏まえて，震度情報（気象庁震度階）が得られた後に地震動時刻歴から求められる情報（最大加速度，最大速度，SI値）を入手できるという状況を想定した2つのモデルを考えた．さらに，兵庫県南部地震の被害データを基にケーススタディーを行った．本研究で提案したモデルは，緊急対応意思決定を合理化するための理論的枠組みとして，有効なモデルであると考えられる．今後は，より多くの地震動情報とガス導管や水道管の被害率データを用いて，地震動情報から推定される地震被害の精度を向上させることが期待される．

【参考文献】 1) 能島暢呂，杉戸真太：地震時緊急対応における意思決定プロセスのモデル化と最適化，第25回地震工学研究発表会，pp.1125-1128，1999，2) 大阪ガス（株）：阪神・淡路大震災被害・復旧記録，1996，3) 神戸市水道局：水道復旧の記録，1996