地震時リアルタイム対応行動における意思決定プロセスのモデル化

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　地震発生後の即時対応は，二次災害防止と被害波及軽減を図るための有力な手段である．特に，供給系ライフライン施設ではブロック遮断・供給停止，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，といった緊急措置を迅速に行うことが要求される．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)」の両者を同時に低減することは困難であり，いわゆる「空振り」と「見逃し」を可能な限り回避することが緊急対応の成否を決定付ける鍵となる．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られないが，時間の経過につれて細密で正確な情報が入手可能となる．従って，経過時間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．これに関して本研究では，統計的意思決定理論と情報理論を用いてリアルタイム対応行動の意思決定プロセスの数理モデルを記述し，地震観測情報の意義と価値について考察を行う．

2．不確実性下における意思決定プロセス　地震直後に入手できる情報は，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．しかし緊急を要する場合は，真の被害が不明でも地震動強度の情報に基づいて被害を推定して意思決定を行う必要がある．ここ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とから，(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１**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)観測継続か行動かの選択，からなるプロセスの全体構成を示している．以下，こ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．

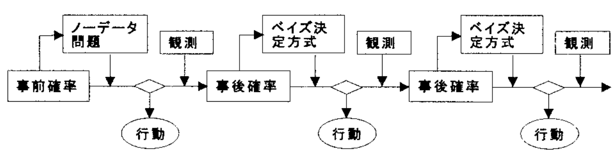

図１　情報による事後確率の更新とベイズ決定方式による意思決定プロセス

3．ベイズ決定方式と情報の価値　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[1]．

θ	：自然の状態（$\Theta=\{\theta_1,\theta_2,\cdots\}$）	$A=S(X)$	：決定方式（情報xに対する行動戦略）
x	：情報（$X=\{x_1,x_2,\cdots\}$）	$\ell(\theta,a)$	：損失関数（θとaにより決まる損失）
a	：行動（$A=\{a_1,a_2,\cdots\}$）	$e(x)$	：θに関して情報xを発する不完全情報源
$p(\theta)$	：Θ上の確率（$p(\theta)=\{p(\theta_1),p(\theta_2),\cdots\}$）	$e_\infty(x)$	：θに関して完全情報xを発する完全情報源
$p(x)$	：X上の確率（$p(x)=\{p(x_1),p(x_2),\cdots\}$）	$f(x\|\theta)$	：尤度関数（θのときeがxを出す確率）

まず，データを利用できない場合（これを「ノーデータ問題」という)，最も合理的と考えられる行動，すなわち期待損失Lを最小化する行動は，事前確率$p(\theta_j)$に基づいて次式を満たすa^*として求められる．

$$L=\sum_j p(\theta_j)\,\ell(\theta_j,a^*)\to\min$$

次に，情報源$e(x)$を利用して状態θの推定を行って行動を決定できる場合，期待損失Lは次式で与えられる．

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

情報x_iを得ると，事前確率はベイズの定理より事後確率$p(\theta_j\,|\,x_i)=f(x_i\,|\,\theta_j)p(\theta_j)/p(x_i)$にアップデートされ，

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

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

$$L_i=\sum_j p(\theta_j\,|\,x_i)\,\ell(\theta_j,a_x)\to\min$$

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[2]．ここで，情報xを得ると状態θに関するあいまいさ（エントロピー）が減少することが期待される．情報理論によるとその減少量は，エントロピー関数$H[p(\theta)]=-\sum_j p(\theta_j)\log_2 p(\theta_j)$を用いた「相互情報量」として，次式のように定量化される[1]．

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

情報源を利用することの価値について考える．完全情報源$e_\infty(x)$からの情報により状態θが既知となった場合に期待損失を最小化する行動をa_θで表すと，完全情報源$e_\infty(x)$および不完全情報源$e(x)$の事前価値は，

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

次式で与えられる[2]．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．

4．緊急遮断に関する数値計算例　震度階を情報源として施設被害の程度θを推定し，緊急遮断行動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$f(x|\theta)$が**表 1** のように与えられている．また緊急遮断行動aは「(1)完全遮断」「(2)一部遮断」「(3)供給継続」の 3 種からなり，被害の程度がθの時に行動aをとった場合の損失関数$\ell(\theta,a)$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，被災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$p(\theta_j)$が一様に 1/3 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，この時点での最適行動は「一部遮断」となる．次に震度階に関する独立な不完全情報源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計算例を**表 3** に示す．情報が蓄積されるにつれて被害の状態θの推定（ここでは被害大）に関する確信が強くなり，エントロピーが減少する過程が理解される（**図 1**，**図 2**）．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．**表 3** の最下段に示され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規範にシフトしてゆく様子が表現されている．

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

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

表 3　震度「VI 強」を連続して観測したケース

	観測前	VI強観測(1)	VI強観測(2)	VI強観測(3)	VI強観測(4)	VI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(不完全情報)	4.00	2.23	0.53	0.24	0.12	0.06
事前価値(完全情報)	10.00	7.70	4.20	2.25	1.18	0.61
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

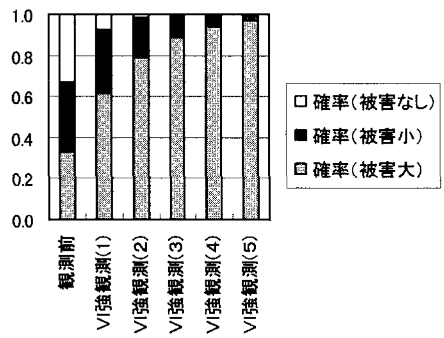

図 1　ベイズの定理による事後確率の更新過程

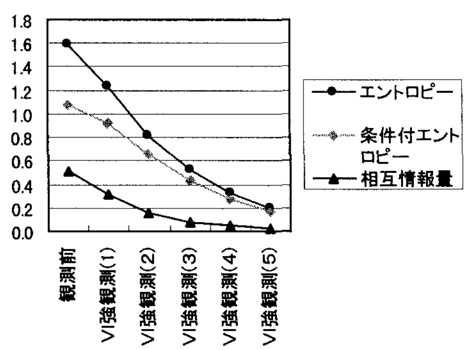

図 2　エントロピーの減少と相互情報量の変化

5．おわりに　本研究では，リアルタイム対応行動を効果的に実施することを目的として，意思決定プロセスの数理モデルを提示し，期待被害を最小化するベイズ決定方式を示すとともに，地震観測情報の価値を定量的に吟味した．ここでは震度階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，異種情報源に基づいて被害の輪郭が次第に明確化される過程の記述モデルに拡張することは容易である．この他，緊急遮断を自動処理化する際のトリガーレベルの合理的設定法への応用も可能である．

参考文献　1) 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.
2) 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.