降雨土砂災害時の災害情報提供がオオカミ少年現象に与える影響

Effect of disaster information provision on crying wolf syndrome in case of landslide

内田　賢悦
Kenetsu Uchida

北海道大学大学院工学研究院

本研究では，災害情報の発令基準がオオカミ少年現象に与える影響に関する解析を行った．対象とした災害は，降雨時の土砂災害である．情報管理者は，災害情報を発令していないときに,被害が起こる場合を嫌うものと考えられる．そのため，災害情報発令基準は，一般的に緩和されるものと考えられる．こうした場合，住民は，災害情報が発令されても，実被害が生じない場合が多くなるため，避難行動をとらなくなる傾向にある．いわゆる，狼少年現象が起こると考えられる．本研究では，こうした関係をモデル化することにより，最適な災害情報発令基準の検討を行った．その結果，住民の避難行動に関する長期的な期待満足度（期待効用）を最大化する災害情報を提供することによって，災害による期待被害額が小さくなることが示された．

In this study, the effect of disaster information provision on crying wolf syndrome is analyzed. The disaster assumed in this study is the landslide caused by heavy rain falls. Information administrator tends to avoid the situation where the damage caused by the disaster happens when no disaster information is provided. As a result, the criteria of disaster information provision may be generally relaxed. Under this circumstance, habitants tend to ignore the disaster information since the information is not correct. Thus, so called crying wolf syndrome will appear. In this study, a mathematical model which expresses both behaviors of the information administrator and the habitants has been developed. By carrying out a simulation based on the proposed model, it is shown that if the disaster information which maximizes the expected long-term utility of habitant is provided, the expected long-term damage caused by disaster is reduced.

1. はじめに

災害情報提供は，住民の避難行動を促すために重要である．一方，情報管理者は，一般的に，災害情報未発令時に災害が発生することを回避したいと考える．その結果，災害情報発令基準が緩和される傾向にあると考えられる．その場合，住民は災害情報を軽視するようになり，いわゆる，狼少年現象が起こると考えられる．なぜなら，緩和された災害情報発令基準下では，実際に災害が発生する確率が低くなり，はじめは，災害情報を信じて避難していた住民であっても，実際に被害が生じないため，避難に要する心理的・物理的費用が増大するようになるためである．

本研究では，上述した情報管理者と住民の災害時行動をモデル化することによって，最適な災害情報発令基準の検討を行うことを目的とする．最適化の基準としては，住民の長期的な避難行動に関する期待効用を用いることにする．

2. 長期シミュレーションの定式化

（1）シミュレーションの定式化

本研究では，モデルを構築するに当たり，以下に示す4つの仮定を設けた．

- 日降雨量qが$q_0$mm以上q_{max}以下となる日のみを対象とする．
- 日降雨量qがq_0に達したときに警戒情報(r_0)を発令する．
- 日降雨量qがq_1($q_1 > q_0$)に達したときに避難勧告(r_1)を発令する．
- 日降雨量qがq_2($q_1 < q_2 \le q_{max}$)に達したときに避難指示($r2$)を発令する．

はじめに，日降雨量の状態を表わす変数をfと表わすことにする．また，日降雨量qが$q_0$mm以上となる場合に$f = y$，それ以外の場合に$f = n$と表現する．また，日降雨量が$q_0$mm以上となる確率をp_yと表わし，以下では，そうした日のみを対象に考えることにする．日降雨量qが降雨強度$q_0 \le q < q_1$となる確率を$p_{r_0|y}$と表現し，この降雨量の範囲では災害情報r_0が発令される．同様に，降雨強度が$q_1 \le q < q_2$，$q_2 \le q \le q_{max}$となる確率をそれぞれ$p_{r_i|y}$($i = 1, 2$)と表現し，そこでは災害情報r_iが発令されるものとする．ここでq_{max}は，小さな値$\varepsilon > 0$を所与として，$p_{q_{max}|y} = \varepsilon$となる降雨量である．$\varepsilon$が所与のため$q_{max}$も所与となるが，さらに$q_0$も所与であることを仮定する．したがって，考える必要のある降雨量範囲が与えられた上で，災害情報r_iが発令される状況を想定する．$f = y$のとき，降雨量qがq_i($i = 0,\ldots,2$)以上となる確率$p_{q_i|y} = \mathrm{Pr.}(q \ge q_i)$ where $p_{q_0|y} = 1$を定義すると，$p_{q_i|y}$($i = 0,\ldots,2$)は式(1)で与えられる（図1）．

$$p_{r_i|y} = \begin{cases} p_{q_i|y} - p_{q_{i+1}|y} & \text{if } i = 0,1 \\ p_{q_i|y} & \text{if } i = 2 \end{cases} \tag{1}$$

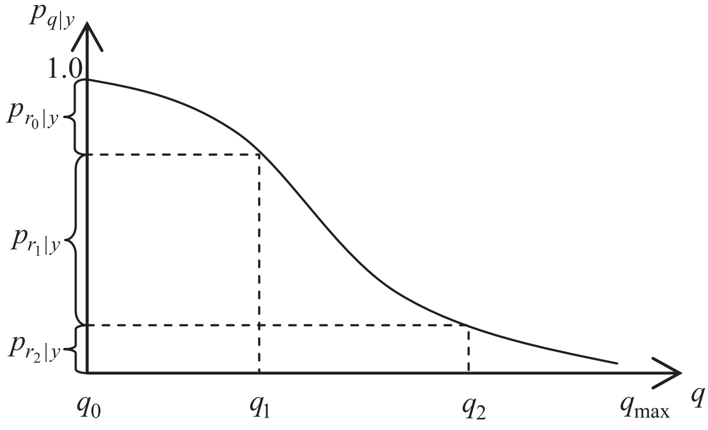

図1．降雨量の分布関数

さらに，災害情報$r_i(i=0,\cdots,2)$が発令されたときに，被害強度$m_j(j=0,\cdots,2)$の災害が起こる確率を$p_{m_j|r_i}$と表わすことにする（ここでm_0は，被害なし）．$f=y$のとき，降雨量の関数として表現される被害強度$m_j(j=0,\cdots,2)$の災害が起こる確率$p_{m_j|y}(q)$を定義すると，$p_{m_j|r_i}$は式(2)で与えられる（**図2**）．

$$p_{m_j|r_i}=\begin{cases}\int_{q_j}^{q_{j+1}} p_{m_j|y}(x)\,dx \Big/ (q_{j+1}-q_j) & \text{if } j=0\\ \int_{q_j}^{q_{j+1}} \left(p_{m_j|y}(x)-p_{m_{j-1}|y}(x)\right)dx \Big/ (q_{j+1}-q_j) & \text{if } j=1\\ 1-\int_{q_j}^{q_{\max}} p_{m_{j-1}|y}(x)\,dx \Big/ (q_{\max}-q_j) & \text{if } j=2\end{cases} \tag{2}$$

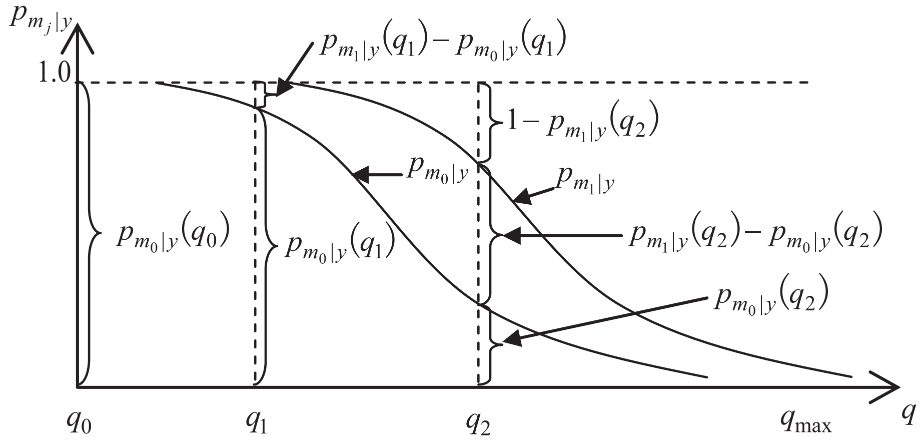

図2．災害発生確率の関係

一方，被害強度$m_j(j=0,\cdots,2)$の災害が起こった場合，避難をしていない住民が被る期待損失額をl_{m_j}と表現する．ここで，災害が起こった場合，避難を完了している住民が被る期待損失額は0となるが，避難に要する心理的・物理的費用l_eを損失として捉えることにする．住民は，発令された災害情報$r_i(i=0,\cdots,2)$を入手し，避難する(e)か否か(s)の意思決定を行うが，それらを選択する初期確率はそれぞれ$p_{e|r_i}(0)$，$p_{s|r_i}(0)=1-p_{e|r_i}(0)$と表現する．住民は，事後的に，自分が決定した行動が正しかったか否かについて<u>近視眼的</u>な評価を行うものとする．その結果に基づいて，災害情報に対する避難確率を修正する．ここでの評価は，避難したときは災害強度m_1以上の災害が起こった場合，避難しなかったときには災害強度m_0の災害が起こった場合に正しかったと判断し，それ以外の場合は正しくはなかったと判断することを仮定する．d日において避難情報r_iが発令された場合に避難する確率を$p_{e|r_i}(d)$と表現する．この状況で避難した住民は，事後的に明らかになった災害強度m_jを所与として，避難情報r_iに対する$d+1$日に避難する確率$p_{e|r_u}(d+1)$を式(3)に従って修正するものとする．

$$p_{e|r_i}(d+1)=\begin{cases}\alpha\cdot p_{e|r_i}(d)+(1-\alpha) & \text{if } m_j\,(j=1,2)\\ \alpha\cdot p_{e|r_i}(d) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{3}$$

ここで$\alpha(0\leq\alpha\leq1)$は，直前の意思決定に対する学習強度であり，この値が小さいほど学習強度が高いことを表わす．同様に，避難情報r_i発令下で避難しなかった住民は，事後的に明らかになった災害強度m_jを所与として，避難情報r_iに対する$d+1$日に避難する確率$p_{e|r_i}(d+1)$を式(4)に従って修正するものとする．

$$p_{e|r_i}(d+1)=\begin{cases}\beta\cdot p_{e|r_i}(d)+(1-\beta) & \text{if } m_j\,(j=1,2)\\ \beta\cdot p_{e|r_i}(d) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{4}$$

ここで$\beta(0\leq\beta\leq 1)$もまた，学習強度である．ここでは，避難した場合とそうでない場合の学習強度が異なることを仮定している．ここで，災害情報が発令されない場合には，避難確率の修正は行われないものとする．

以上の関係を整理すると，ある日に災害強度m_jの災害が発生する確率は，式(5)で与えられることになる．

$$p_{m_j}=\sum_i p_y\cdot p_{r_i|y}\cdot p_{m_j|r_i} \tag{5}$$

さらに，d日に災害強度m_jの災害が発生した場合の期待被害額は，式(6)で与えられる．

$$E\left[g_{m_j}(d)\right]=p_{m_j}\cdot\left(p_{e|r_i}(d)\cdot l_e+p_{s|r_i}(d)\cdot l_{m_j}\right) \tag{6}$$

ここでl_eは，前述した避難に要する心理的・物理的費用である．したがって，d日の災害による，期待被害額は式(7)で与えられる．

$$E\left[g(d)\right]=\sum_j p_{m_j}\cdot\left(p_{e|r_i}(d)\cdot l_e+p_{s|r_i}(d)\cdot l_{m_j}\right) \tag{7}$$

同様に考えると，t年目の災害による，期待被害額は式(8)で与えられる．

$$E\left[g(t)\right]=\sum_{d=365\cdot(t-1)}^{365\cdot t}\sum_j p_{m_j}\cdot\left(p_{e|r_i}(d)\cdot l_e+p_{s|r_i}(d)\cdot l_{m_j}\right) \tag{8}$$

最終的に，T年間の災害による期待被害額は，式(9)で与えられる．

$$G(T)=\sum_{t=1}^{T}E\left[g(t)\right] \tag{9}$$

T年間の災害による期待被害額は，日々の経験から災害情報に対する避難確率が変動するため，解析的に求めることは困難である．このことは，その分散（あるいは標準偏差）に関しても同様である．一方では，期間を通した被害額の期待値とその分散（あるいは標準偏差）を推計することは，災害情報の発令基準を決定する上で極めて重要である．発令基準が低い場合，その信頼性が低くなる可能性が高いため，住民はその情報を無視するようになることは想像に難くない．したがって，こうした状況下において，大規模な災害が発生した場合，避難しない住民が多数を占めると想定できるため，被害は甚大となる．また逆に発令基準が高い場合，災害情報が発令される前に災害が発生する可能性が高いため，この場合もまた被害額は甚大なものとなる．したがって，最適な災害情報発令基準が存在し，それを推計することは，災害情報提供による長期的な減災効果を検討する上で必要となる．本研究では，最適な災害情報発令基準を検討するために，モンテカルロシミュレーションを適用して，災害による被害額の現在価値の期待値および分散を推計することにする．次章では，住民にとって最適な災害情報発令基準を考えることにする．

（2）災害情報発令基準の設定

ここでは，災害情報発令基準の検討を行うことにする．いかなる災害情報発令基準を設定したとしても，前節で説明したように，住民は自己の災害経験を踏まえ，避難するかどうかの判断を決定する（避難確率を変更する）．ここでは，どのような災害情報発令基準を採用することが住民にとって有益であるかについての検討を行うことにする．災害情報r_0の発令基準となる降雨強度q_0は所与とするが，情報管理者は，災害情報r_1, r_2の発令基準となるそれぞれの降雨強度q_1, q_2を住民の期待最大効用を最大化するように制御しようと試みるものとする．ただし，住民が実際に有している災害情報$r_i(i=0,\cdots,2)$が発令された

場合の避難確率$p_{e|r_i}$, $p_{s|r_i}$はわからないものとする．したがって，情報管理者は，これらの避難確率を推計する必要がある．以下では，情報管理者が降雨強度ベクトル$\mathbf{q}=(q_1, q_2)$を決定したとして，議論を進める．設定した降雨量以上の降雨が観測された場合，災害情報r_i(i=1, 2)が自動的に発令されることになる．情報管理者が設定した$\mathbf{q}$に対して，被害強度m_j($j=0,\cdots,2$)の災害が起こる確率$P_{m_j|r_i}$は，過去の災害発生データより推計可能である．したがって，以下では，これらを$p_{m_j|r_i}=p_{m_j|r_i}(q_i, q_{i+1})$ where $q_3=q_{\max}$と表わすことにする．情報管理者は，災害情報r_i($i=0,\cdots,2$)が発令された場合に住民が避難することによって得られる効用$u_{e|r_i}(q_i, q_{i+1})$，および避難しないときに得られる効用$u_{s|r_i}(q_i, q_{i+1})$をそれぞれ式(10)，式(11)に従って推計するものとする（**表1**）.

$$u_{e|r_i}(q_i, q_{i+1}) = -l_e + \sum_{j=1}^{2} p_{m_j|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_j} \tag{10}$$

$$u_{s|r_i}(q_i, q_{i+1}) = -\sum_{j=1}^{2} p_{m_j|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_j} \tag{11}$$

表1．災害情報提供下における避難行動による効用の関係

災害情報	r_i下での被害強度確率	避　難	期待損失額
r_i	$p_{m_0|r_i}(q_i, q_{i+1})$	Yes	$-p_{m_0|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_e$
		No	0
	$p_{m_1|r_i}(q_i, q_{i+1})$	Yes	$-p_{m_1|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_e + p_{m_1|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_1}$
		No	$-p_{m_1|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_1}$
	$p_{m_2|r_i}(q_i, q_{i+1})$	Yes	$-p_{m_2|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_e + p_{m_2|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_2}$
		No	$-p_{m_2|r_i}(q_i, q_{i+1}) \cdot l_{m_2}$

はじめに，災害が起こったときを考えよう．このときに，避難を行う場合，避難行動に要する心理的・物理的費用がかかるため，これが負の影響として効用に働くが，避難しない場合に被るであろう損失を回避できるため，その損失分は正の影響として効用に働くことになる．逆に，避難を行わない場合，災害による損失を受けることになる．次に，災害が起こらなかったときを考えよう．このときに，避難を行う場合，避難行動に要する費用がかかる．逆に，避難しない場合には損失は0となる．**表1**は，以上の関係を示しており，式(10)，式(11)に示した効用は，これらの関係から計算される．ここで，効用の誤差項に互いに独立なガンベル分布を想定するランダム効用理論を適用すると，避難行動に関する確率$p_{e|r_i}(q_i, q_{i+1})$, $p_{s|r_i}(q_i, q_{i+1})$は以下で推計される.

$$p_{e|r_i}(q_i, q_{i+1}) = \frac{1}{1+\exp\left(u_{s|r_i}(q_i, q_{i+1}) - u_{e|r_i}(q_i, q_{i+1})\right)},\ p_{s|r_i}(q_i, q_{i+1}) = 1 - p_{e|r_i}(q_i, q_{i+1}) \tag{12}$$

そこで，情報管理者は住民が認知する期待最大効用を最大化するように$\mathbf{q}$を決めると仮定すると，情報管理者が解くべき問題は，以下で与えられる.

$$\max S(\mathbf{q}) = \sum_{i=0}^{2} p_{r_i|y}(\mathbf{q}) \cdot S_{r_i}(q_i, q_{i+1}), \tag{13}$$

$$\text{s.t.} \qquad q_0 \leq q_1 < q_2 \leq q_{\max},$$

where

$$S_{r_i}(q_i, q_{i+1}) = \ln\left(\sum_{c \in \{e,s\}} \exp\left(u_{c|r_i}(q_i, q_{i+1})\right)\right). \tag{14}$$

避難する場合しない場合に住民が感じる効用は，それぞれ確率変数として与えられている．そこで住民は，避難する場合の効用が避難しない場合の効用よりも高くなる確率を避難確率と捉え，それに基づき避難するかどうかの判断を行うことになる．期待最大効用とは,前述した2つの確率的効用から構成される最大値分布の期待値を意味しており,住民の避難行動に関する満足度を表わしている．上記の問題は,この住民の満足度を最大化するように災害情報発令基準を設定するものであり，これは，必ずしも期待損害額を最小化するものではないことに注意が必要である．また，**図1**からも明らかなように，$p_{r_i|y}$は$\mathbf{q}$の関数となるため，$p_{r_i|y}(\mathbf{q})$と表現していることに注意が必要である．情報管理者は，一般的に，災害情報未発令下における災害発生を最も忌諱するものと考えられる．その場合，災害情報発令基準を下げることにより，そうした状況は回避することは可能である．しかしながら，災害情報発令基準を下げた場合，災害情報を信じなくなる住民が多くなり，そうした状況で一度災害が起こると甚大な被害が発生することが予想される．上記の定式化では，このような，責任回避のため，情報管理者が意図的に災害情報発令基準を下げるモラルハザードは起こらない構造となっている．なぜなら，災害が発生したときに避難しない場合の期待損失額は，一般的に，避難行動に要する心理的・物理的費用よりも大きいため，災害情報発令基準を厳しくすると$S_{r_i}(q_i, q_{i+1})$はより大きな値をとる．しかしながら，災害情報発令基準によって，$p_{r_i|y}(\mathbf{q})$も同時に変化するため，基準を上げすぎても目的関数$S(\mathbf{q})$は最大化されない構造となっている．その逆の関係も成立するため，災害情報発令基準を下げすぎても目的関数は最大化されない．こうしたトレードオフの関係から，目的関数$S(\mathbf{q})$を最大化する発令基準が求められることになる．

次に問題の解の一意性についての検討を行うことにしよう．定式化から$u_{e|r_i}(q_i, q_{i+1})$，$u_{s|r_i}(q_i, q_{i+1})$は，それぞれq_iとq_{i+1}に関する増加関数，減少関数となることは明らかである．したがって，$S_{r_i}(q_i, q_{i+1})$ $(i=0,\cdots,2)$はq_i, q_{i+1}に関する増加関数となることが容易に確認できる．また，$p_{r_i|y}$ $(i=0,\cdots,2)$に関して,以下に示す関係が成立する．

$$a \cong \frac{\partial p_{r_0|y}(q_1)}{\partial q_1} = -\frac{\partial p_{r_1|y}(q_1, q_2)}{\partial q_1} (>0) \tag{15}$$

$$b \cong \frac{\partial p_{r_2|y}(q_2)}{\partial q_2} = -\frac{\partial p_{r_1|y}(q_1, q_2)}{\partial q_2} (<0) \tag{16}$$

以上の関係を踏まえ，$\mathbf{q}^*=(q_1^* \ q_2^*)$において$p_{r_i|y}$に1次のテーラー展開を施すと以下に示す関係が得られる．

$$p_{r_0|y}(q_1^* + \Delta q_1) \approx p_{r_0|y}(q_1^*) + \left.\frac{\partial p_{r_0|y}(q_1)}{\partial q_1}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_1 \tag{17}$$

$$p_{r_1|y}(q_1^* + \Delta q_1, q_2^* + \Delta q_2) \approx p_{r_1|y}(q_1^*, q_2^*) - \left.\frac{\partial p_{r_0|y}(q_1)}{\partial q_1}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_1 - \left.\frac{\partial p_{r_2|y}(q_2)}{\partial q_2}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_2 \tag{18}$$

$$p_{r_2|y}(q_2^* + \Delta q_2) \approx p_{r_0|y}(q_2^*) + \left.\frac{\partial p_{r_2|y}(q_2)}{\partial q_2}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_2 \tag{19}$$

さらに，$S_{r_i}(q_i, q_{i+1})$ $(i=0,\cdots,2)$ に対し，q_0, q_3 が定数となることに注意して，$\mathbf{q}^*=(q_1^* \ \ q_2^*)$ において1次のテーラー展開を施すと以下に示す関係が得られる．

$$S_{r_0}\left(q_1^*+\Delta q_1\right) \approx S_{r_0}\left(q_1^*\right)+\left.\frac{\partial S_{r_0}(q_1)}{\partial q_1}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_1 , \tag{20}$$

$$S_{r_1}\left(q_1^*+\Delta q_1, q_2^*+\Delta q_2\right) \approx S_{r_1}\left(q_1^*, q_2^*\right)+\left.\frac{\partial S_{r_1}(q_1,q_2)}{\partial q_1}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_1+\left.\frac{\partial S_{r_1}(q_1,q_2)}{\partial q_2}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_2 , \tag{21}$$

$$S_{r_2}\left(q_2^*+\Delta q_2\right) \approx S_{r_2}\left(q_2^*\right)+\left.\frac{\partial S_{r_2}(q_2)}{\partial q_2}\right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}^*} \cdot \Delta q_2 , \tag{22}$$

where

$$c_1^1 \cong \frac{\partial S_{r_1}(q_1,q_2)}{\partial q_1}(>0),\ c_1^2 \cong \frac{\partial S_{r_1}(q_1,q_2)}{\partial q_2}(>0),\ d_0 \cong \frac{\partial S_{r_0}(q_1)}{\partial q_1}(>0),\ d_2 \cong \frac{\partial S_{r_2}(q_2)}{\partial q_2}(>0). \tag{23}$$

したがって，$\tilde{\mathbf{q}}^*=\left(q_1^*+\Delta q_1 \quad q_2^*+\Delta q_2\right)$ における $S\left(\tilde{\mathbf{q}}^*\right)$ は，以下で近似できる．

$$\begin{aligned}
S\left(\tilde{\mathbf{q}}^*\right) &\approx p_{r_0|y}\left(q_1^*+\Delta q_1\right) \cdot S_{r_0}\left(q_1^*+\Delta q_1\right) \\
&\quad + p_{r_1|y}\left(q_1^*+\Delta q_1, q_2^*+\Delta q_2\right) \cdot S_{r_1}\left(q_1^*+\Delta q_1, q_2^*+\Delta q_2\right) \\
&\quad + p_{r_2|y}\left(q_2^*+\Delta q_2\right) \cdot S_{r_2}\left(q_2^*+\Delta q_2\right) \\
&= \left(p_{r_0|y}\left(q_1^*\right)+a \cdot \Delta q_1\right) \cdot \left(S_{r_0}\left(q_1^*\right)+d_0 \cdot \Delta q_1\right) \\
&\quad + \left(p_{r_1|y}\left(q_1^*, q_2^*\right)-a \cdot \Delta q_1-b \cdot \Delta q_2\right) \cdot \left(S_{r_1}\left(q_1^*, q_2^*\right)+c_1 \cdot \Delta q_1+c_2 \cdot \Delta q_2\right) \\
&\quad + \left(p_{r_2|y}\left(q_2^*\right)+b \cdot \Delta q_2\right) \cdot \left(S_{r_2}\left(q_2^*\right)+d_2 \cdot \Delta q_2\right) \\
&= A \cdot (\Delta q_1)^2+B \cdot (\Delta q_2)^2+C \cdot \Delta q_1 \cdot \Delta q_2+D \cdot \Delta q_1+E \cdot \Delta q_2+F
\end{aligned} \tag{24}$$

where

$$A=a \cdot \left(d_0-c_1^1\right), B=b \cdot \left(d_2-c_1^2\right).$$

ここで，$d_0-c_1^1<0$，$d_2-c_1^2>0$となることから，A, Bは正の定数となることがわかる（煩雑ではあるが難しくはないので証明略）．一方，C～Fは定数である．以上から，$S\left(\tilde{\mathbf{q}}^*\right)$は$\tilde{\mathbf{q}}^*$の値に関係なく，$\Delta q_1, \Delta q_2$に関する狭義の凹関数として表現されていることが確認できる．したがって，$S(\mathbf{q})$は狭義の凹関数でなければならない．さらに，制約条件は凸集合となることは明らかであるため，式(13)，(14)に示した問題は唯一の解をもつことが示された．

3．計算例

ここでは，定式化した避難行動に関係する確率を与え，一様分布からのランダムサンプリングを行うことにより，損失額を推計するシミュレーションを行った．シミュレーション期間Tは 50+10年，サンプリング数Sは10,000として，損失額の平均と分散を推計した．q_0以上の降雨がある確率は$p_y=0.005$とした．学習に関するパラメータ値は，$\alpha=\beta=0.5$，避難に関係する費用は，$l_e=0.05$，$l_0=0$, $l_1=10$, $l_2=20$と仮定した．また，以下に示す関数形を採用し，関係する確率を表現した（**表2**）．

$$p_{*|y}(q)=\frac{1}{1+\exp\left(\theta \cdot \left(a \cdot (q-\varphi)+b\right)\right)} \tag{25}$$

表2. 確率分布のパラメータ値

*	a	b	φ	θ
q	1.5	−100	110	0.05
m_0	1.0	−150	0	1
m_1	1.0	−150	70	1

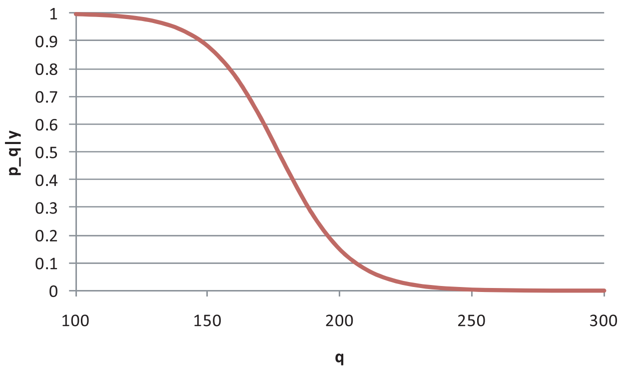

図3. 降雨量分布

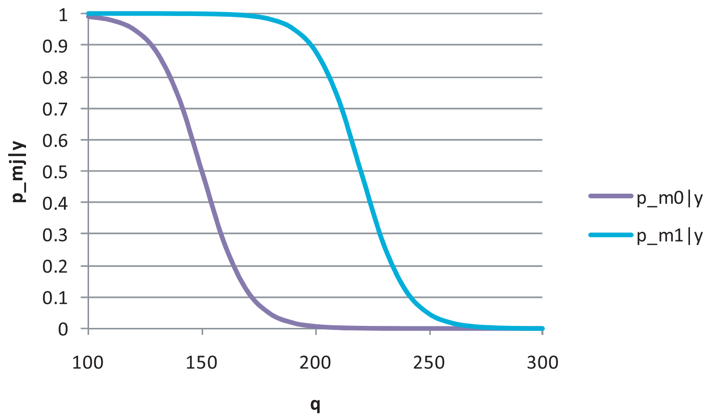

図4. 災害発生確率

初期避難確率は，設定した災害情報発令基準を用いて式(12)によって便宜的に決定されるものとした．はじめに，10年間のシミュレーションを行い，初期避難確率の影響が結果に反映されない状態になってから，さらに50年のシミュレーションを行った．以下に示す結果は，初期避難確率の影響が取り除かれた後の50年間のシミュレーションのものを示している．図5にシミュレーションにフローチャートを示す．

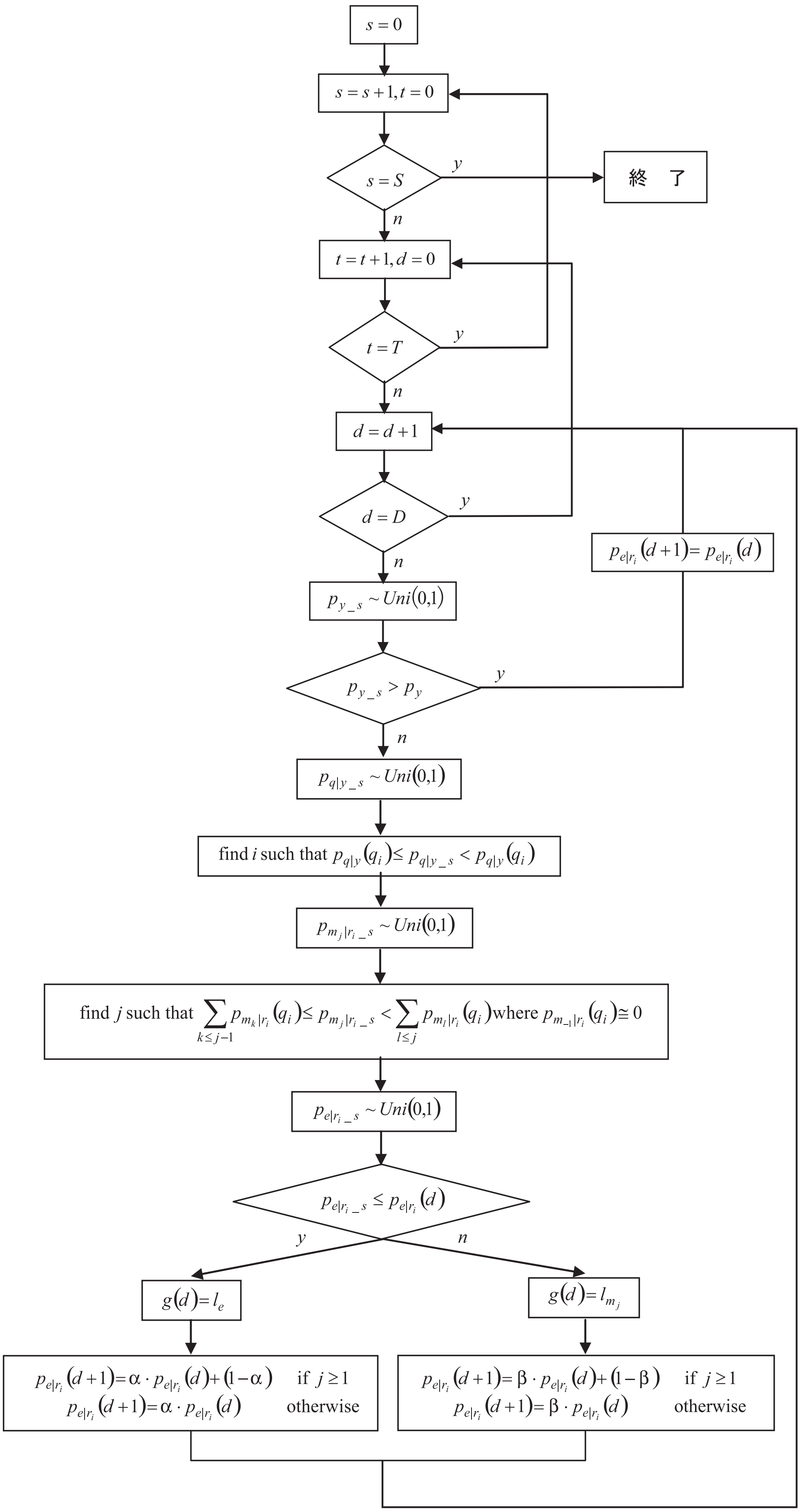

図5. シミュレーションのフローチャート

図6に，$q_0 = 100, q_1 = 150, q_2 = 200$（発令基準1とする）と設定した場合の損失額の結果を示す．この場合，損失額の期待値は，4.72，その分散は12.12と推計された．図6において，一番左側の山は，災害強度がm_1以上となる災害による被害を1度も受けない場合の損失額の分布を示している．その右側の山は，災害強度m_1の災害による被害を2度，あるいは災害強度m_2の災害による被害を1度受けた場合の損失額の分布を示している．図7には，$q_0 = 100, q_1 = 120, q_2 = 130$（発令基準2とする）と設定した場合の結果を示す．この場合，損失額の期待値は，6.43，その分散は18.03と推計された．図6に示した結果と比較して，先述した2つの山の度数が減少し，その代わりに損失額15付近に新たな山が発生していることがわかる．この山は，災害規模m_1の災害による被害を1度受けた場合の損失額の分布を示している．発令基準2は，発令基準1よりも低い基準であるため，災害情報を発令する前に災害が発生する確率は低い．前述した通り，災害情報発令前に災害が発生することを嫌う情報管理者が採用したいと考える基準であるかもしれない．しかしながら，この基準では，災害情報が発令されても災害が発生しない確率も高いため，住民はこのような災害情報を軽視するようになる可能性がある．そのことが影響して損失額15付近に新たな分布が出現したものと考えられる．図6と図7に示した結果は，災害情報発令気分が低すぎても，損失額の期待値を最小化できないことを示した結果と解釈される．それでは，最適な発令基準はどのようになるであろうか．図8に，災害情報発令基準の最適化を行った場合の結果を示す．この場合，災害情報発令基準の最適値は $q_1 = 137, q_2 = 152$，その時の損失額の期待値は4.67，その分散は5.13と推計された．発令基準1による結果と比較すると，損失額の期待値はわずかに減少している程度ではあるが，その分散に関しては大きく減少していることがわかる．このことは，損失額が20と30の間にある山が小さくなっていることが影響していると考えられる．

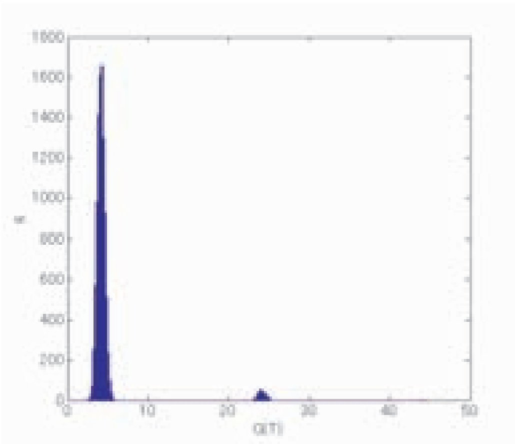

図6．発令基準1における損失額分布

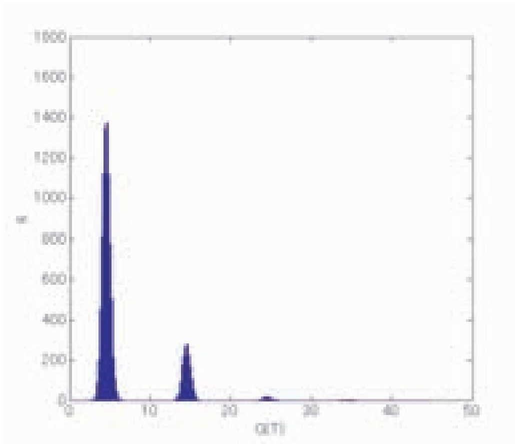

図7．発令基準2における損失額分布

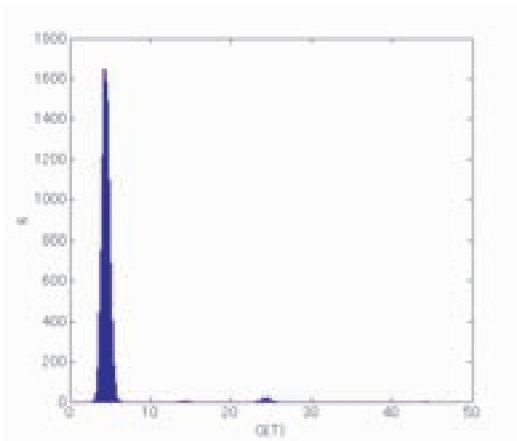

図8．発令基準最適化後の損失額の分布

図9は，災害情報発令基準1において学習強度を$\beta = 0.1$とした場合の損失額の分布を示している．損失額の平均は4.70，その分散は12.10と推計された．一方，図10は，学習強度を$\beta = 0.1$として災害情報発令基準の最適化を行った場合の損失額の分布を示している．損失額の平均は4.65, その分散は5.06と推計された．図9に示した結果は図6に示した結果とほとんど同一であり，さらに，図10に示した結果は図8に示した結果とほとんど同一であることが示された．αの値を変化させて同様の数値実験を行ったが，上記と同様な結果が得られた．このことは，長期的な避難行動を考える場合，学習強度の変化が損失額に与える影響はほとんどないことを示した結果といえる．

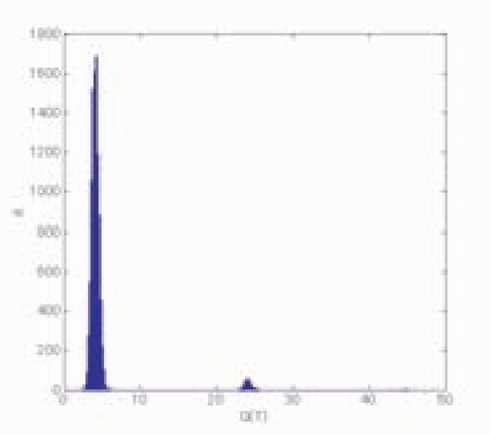

図9．発令基準1での損失額の分布（β = 0.1）

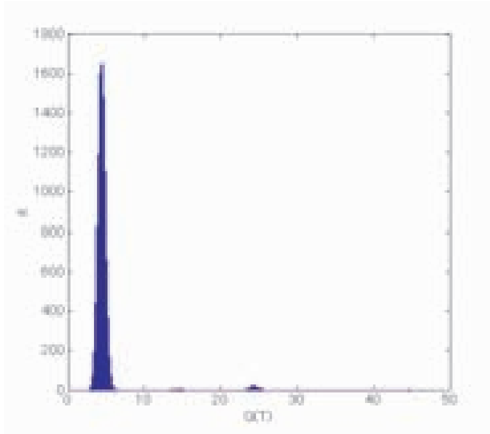

図10．発令基準最適化後の損失額の分布（β = 0.1）

4．まとめ

本研究では，災害情報管理者と住民の災害時行動を表現することによって，狼少年現象を表現可能な数理モデルの構築を行った．モデル内では，情報管理者のとる行動（災害情報発令基準の変更）による住民の避難行動の変化が内生化されており, こうした関係を踏まえた上で, 期待被害額が推計される．すなわち，確度の低い災害情報は，住民に無視されるメカニズムを採り入れることによって，本モデルでは，災害時の本質的な問題点の1つであると考えられるオオカミ少年現象を表現している．さらに，同モデルを適用することにより，最適な災害情報発令基準の検討を行った．その結果，住民の長期的な期待最大効用最大化（満足度最大化）するように災害情報の発令基準を設定することは，必ずしも期待被害額を最小化するものではないが，一般的に，長期的な期待被害額を小さくする傾向があることが示された．さらに，被害額の分散も小さくなる傾向があることも示された．このことは，災害情報発令基準の緩和が被害を増大させる可能性があることを示唆した結果と捉えられる．

筆者は，災害情報，たとえば，避難勧告が発令された時点で，すべての住民が避難行動を開始すれば，人的被害は生じないと考えている．それでも人的被害が生じるのは，避難行動開始の遅れであり，それに対して狼少年現象が少なからず影響しているものと考えている．本研究は，こうした問題に対応するための一助となることを念頭に行われたものであることを記して本稿のまとめとしたい．