津波発生時の一時避難所の最適配置問題に関する研究

A model determining optimal allocation problem of temporary gathering locations in the case of a water disaster

内田　賢悦
Kenetsu Uchida

北海道大学大学院 工学研究院 助教

本研究では, 水災害時の一時避難所最適配置問題の定式化を行う．すなわち，収容人員に制約のない一時避難所候補が複数存在し，その中から最適な一時避難所の組合せを選択する問題の定式化を行う．水災害のリスクがある場合，世帯は，避難しない場合に受ける期待被害額と避難に要する心理的費用から，避難するかどうかの意思決定を行うと仮定する．また各一時避難所候補は，標高と水災害発災地点からの距離によって，その安全性指標が決定され，避難する世帯は各一時避難所までの距離と一時避難所の安全性指標により，一時避難所を1か所選択すると仮定する．以上の仮定の下，本研究では，住民が負担する期待費用が最小化される一時避難所の組合せを求める問題の定式化を行った．

《キーワード：避難行動；一時避難所；最適化》

1. はじめに

災害時の一時避難所（広場，公園，空地などの一時的に避難できる場所）は，生命への危険性から住民を守るために重要な役割を果たしている．また，一時避難所の選択によって，住民の避難行動だけではなく，災害時の人的被害額も変化すると考えられる．このことは，前者に関しては，避難所までの距離が避難するかどうかの意思決定に影響し得ること，後者に関しては，災害規模によっては一時避難所に避難した場合であっても人的被害を受け得ることを考えると明らかであろう．そのため，一時避難所の配置は，住民の避難行動と災害規模の関係を考慮した上で慎重に検討されるべきである．

災害発生時の避難行動を考える際の重要な視点の1つとして, 災害規模が変化すると避難行動に関する需要としての避難者数と供給としての避難所数も変化することである．すなわち，災害規模が大きくなるにつれ，避難したいと思う人（あるいは避難しなければならない人）の人数も多くなる一方で，いくつかの避難所が災害により使用不能となり，その結果として，避難所数が減少する．その場合，避難所に入れない人や使用不能となった避難所に避難する人は大きな損害を被る可能性がある．本研究では，こうした関係を定量的に分析するため，釧路市を対象とし，災害として津波を想定した事前分析を行っている（付録1)．その結果，災害規模が大きくなると，避難しようとしても避難行動を完了できない住民が多く存在することが示された．したがって，こうした避難行動に関する需要と供給の両面を考えずして，適切な避難行動を支援することは困難であるがわかった．

本研究では，事前研究から明らかとなった知見を踏まえ，津波を想定した一時避難所の最適配置問題を考える．ここで一時避難所の最適配置とは，一時避難所候補（一時避難所となり得る複数の場所）から最適な一時避難所の組合せを選択することを意味する．したがって，新たな用地買収を伴うような一時避難所新設は想定していない（たとえば，高台にある住宅に立ち退きをせまって，そこに一時避難所を新設するような非現実的な避難所配置)．本研究で考える一時避難所最適配置問題では, 住民の避難行動（避難するかどうか）と避難する場合の避難所選択行動（どの避難所を選択するか）を内生化した上で，住民全体の期待費用を最小化する一時避難所の配置計画を考える．

本研究の構成は以下に示す通りである．第2章では, 住民の避難に関する行動選択のモデル化を行うと共に, 選択した行動に基づいた期待費用の定式化を行う．第3章では，津波発生要因である地震の発生確率の定式化を行う．第4章では，一時避難所の最適配置問題の定式化を行う．ここでは，先述したように住民の避難行動選択の関係を踏まえ，全世帯での総期待費用の定式化が行われる．さらに，総期待費用が最小化されるような一時避難所の最適配置を決定することができることが示される．

2. 問題の定式化

（1）仮定

本研究で設定した仮定は以下の通りである．

- 対象地域には，複数の一時避難所が存在する．
- 津波が発生した場合，避難所および世帯の安全性はそれらの地理的条件，すなわち，立地地点の標高と最寄りの海岸線（または河川）までの距離によって決定される．
- 避難所候補には収容人員容量のある建物が含まれ，そうした避難所は，容量を超える人員を収容できない．
- 避難所に到着しても，容量制約のため避難所に入れない住民の安全性は，避難所周辺施設の地理的条件から決定される．
- 避難所に入れたとしても，その安全性が低い場合，津波の規模によっては，被害を受ける可能性がある．
- 津波発生時に住民は，避難した場合の期待費用（避難に要する費用と期待被害額の和）と，避難し

ない場合の期待費用（期待被害額）を考慮し，避難するかどうかの決定を行う．

・避難すると決定した住民は，世帯から避難所までの（経路）距離と避難所に入れた場合の期待費用から避難所選択を行う．

上記の関係をモデル化することによって，災害時に住民が負担する総期待費用を推計する．この総費用を最小化する一時避難所の最適配置計画立案を念頭に置き，以下では避難行動のモデル化を行う．

（2）記号

$I\left(|I|\right)$： 世帯の集合（数）

$J\left(|J|\right)$： 一時避難所の集合（数）

π_j： 避難所 $j \in J$ の収容人員数

r_{ij}： 世帯 $i \in I$ から避難所 $j \in J$ までの最短経路距離

d_k： 施設 $k \in I \cup J$ から最寄り海岸線までの距離

h_k： 施設 $k \in I \cup J$ の標高

$h_{j'}$： 避難所 $j \in J$ の周辺施設の標高

$a_k(d_k, h_k)$： 施設 $k \in I \cup J$ の安全性指標（$\frac{\partial a_k(d_k, h_k)}{\partial d_k} > 0$ & $\frac{\partial a_k(d_k, h_k)}{\partial h_k} > 0$）

（$a_k(d_k, h_k) \geq 0, a_k(0,0) = 0$ を仮定）

f： 被災時の人的被害額

$P_{c|n}$： ある年に n 年確率地震が発生することによって津波が発生した場合，海岸線にいる人の被災確率

$P_{ie}(P_{c|n})$： 海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ のとき，世帯 i の住民が避難する確率

$P_{ij|e}\left(P_{c|n}\right)$： 海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ のとき，避難すると意思決定した世帯 i の住民が避難所 j を選択する確率

$P_{in|e,j}\left(P_{c|n}\right)$： 海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ のとき，避難所 $j \in J$ を選択した住民が避難所に入れる確率

$P_{c|n}(k)$： 海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ のとき，施設 $k \in I \cup J$ にいる人の被災確率

$u_{ij}\left(P_{c|n}\right)$： 海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ のとき，世帯 $i \in I$ の住民が避難して避難所 $j \in J$ に入れた場合の期待費用

$TC_{iy}\left(P_{c|n}\right)$： ある年 y において，海岸線での被災確率が $P_{c|n}$ となる地震が発生した場合，世帯 i の住民が負担する期待総費用（避難した場合の期待費用＋避難しない場合の期待費用）

（3）定式化

以下では，ランダム効用理論に基づいた定式化を行うが，その誤差項にはiidガンベル分布を適用する（ロジット型選択モデル）．問題を簡単にするため，ロジット型選択モデルの分散パラメータは全て1であると仮定する．ただし，任意の分散パラメータを設定した定式化は可能であり，上述の仮定はモデルの制約を示すものではないことに注意されたい．

はじめに被災確率が $P_{c|n}$ のとき，施設 $k \in I \cup J$ にいる人の被災確率 $P_{c|n}(k)$ を式(1)で与える．

$$P_{c|n}(k) = \frac{1}{1 + \exp\left(\beta_1 + \beta_2 \cdot a_k(d_k, h_k)\right)} \cdot P_{c|n} \tag{1}$$

ここで，$\beta_1(<0), \beta_2(>0)$ はパラメータであり，β_1 については，式(2)に示す関係を満たすものとする．

$$\frac{1}{1 + \exp(\beta_1)} \approx 1 \Leftrightarrow \exp(\beta_1) \approx 0 \tag{2}$$

式(2)は，施設$k \in I \cup J$の安全性指標が0のとき，その施設の被災確率は海岸線の被災確率と等しくなることを意味している．式(1)は，$P_{c|n}$が高い程，$P_{c|n}(k)$も高くなる一方で，施設kの安全性$a_k(d_k, h_k)$が高い程，$P_{c|n}(k)$は低くなる関係を示している．ここで，海岸線に立地する施設を0と表現し，その安全性指標値も0であるとする．海岸線の被災確率を施設0の被災確率として表現することにすると,式(3)に示す関係が成立する．

$$P_{c|n}(0) = P_{c|n} \tag{3}$$

被災確率が$P_{c|n}$のときに世帯iの住民が避難する確率を式(4)で与える．

$$P_{ie}(P_{c|n}) = \frac{\exp\left(c_i\left(P_{c|n}\right)\right)}{\exp\left(-f \cdot P_{c|n}(i)\right) + \exp\left(c_i\left(P_{c|n}\right)\right)} \quad \forall i \in I, \tag{4}$$

where

$$c_i\left(P_{c|n}\right) = \ln\left(\sum_{j \in J} \exp\left(u_{ij}\left(P_{c|n}\right)\right)\right) \tag{5}$$

式(4)において，$c_i\left(P_{c|n}\right)$は世帯iの住民が避難する場合の期待最小費用であり，式(5)から計算される．式(5)の$u_{ij}\left(P_{c|n}\right)$は，後ほど説明を加えることにする．$f \cdot P_{c|n}(i)$は世帯$i$の住民が避難しない場合の期待費用である．式(4)は，避難した場合の期待費用と避難しない場合の期待費用の関係から，避難するかどうかの意思決定がなされることを示している．

世帯iの住民が避難すると決定した場合，避難所jを選択する確率を式(6)で与える．

$$P_{ij|e}\left(P_{c|n}\right) = \frac{\exp\left(u_{ij}\left(P_{c|n}\right)\right)}{\sum_{l \in J} \exp\left(u_{il}\left(P_{c|n}\right)\right)} \quad \forall i \in I, \tag{6}$$

where

$$u_{ij}\left(P_{c|n}\right) = \beta_3 \cdot r_{ij} - f \cdot P_{c|n}(j) + s \tag{7}$$

$\beta_3 (< 0)$：パラメータ

式(7)において，$\beta_3 \cdot r_{ij}$は世帯iから避難所jまでの移動に要する心理的費用，$-f \cdot P_{c|n}(j)$は避難所jに入れた場合の期待費用，sは避難自体に起因する心理的費用を示している．式(6)は，世帯からの経路距離が短い避難所ほど，さらに，避難所に入れた場合の期待費用が小さいほど，その選択確率が高くなることを示している（**図1**）．ここで，式(8)に示す関係が成立することを仮定する．

$$P_{i0|e}\left(P_{c|n}\right) = \frac{\exp\left(u_{i0}\left(P_{c|n}\right)\right)}{\sum_{l \in J \cup \{0\}} \exp\left(u_{il}\left(P_{c|n}\right)\right)} = 0 \Leftrightarrow \exp\left(u_{i0}\left(P_{c|n}\right)\right) = 0 \quad \forall i \in I \tag{8}$$

where

$$u_{i0}\left(P_{c|n}\right) = \beta_3 \cdot r_{ij} - f \cdot P_{c|n}(0) + s \tag{9}$$

式(8)は，被災確率が$P_{c|n} > 0$のときには，決して海岸線に避難することはないことを示している．

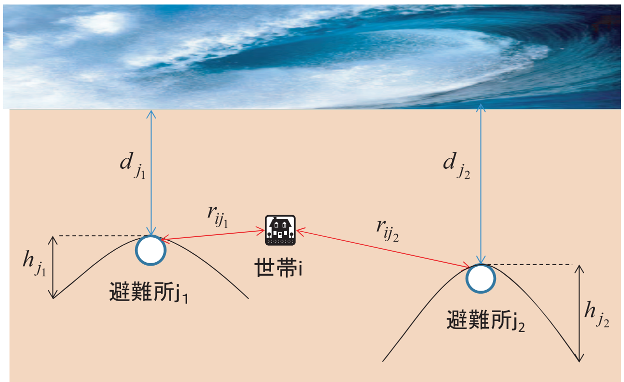


図1. 定式化における地理的条件

一方，被災確率が$P_{c|n}$のときに避難所jを選択した住民がその避難所に入れる確率$P_{in|e,j}\left(P_{c|n}\right)$を式(10)で与える．

$$P_{in|e,j}\left(P_{c|n}\right)=\min\left(\frac{\pi_j}{\sum_{k\in I}P_{kj|e}\left(P_{c|n}\right)}\quad 1\right) \tag{10}$$

式(10)は，避難所の期待避難者数が避難所容量を上回る場合，避難所に入れる確率が1を下回ることを示しており，このことによって，後に示すように避難所の容量が期待コストに影響することになる．

以上の定式化から，ある年yに海岸線での被災確率が$P_{c|n}$となる地震が発生したとき，住民がとる行動毎の期待コストは**表1**に示すように計算される．**表1**に示された関係から，世帯iの住民が負担する期待費用$TC_{iy}\left(P_{c|n}\right)$は式(11)で与えられる．

$$TC_{iy}\left(P_{c|n}\right)=\left(1-P_{ie}\left(P_{c|n}\right)\right)\cdot f\cdot P_{c|n}(i)+P_{ie}\left(P_{c|n}\right)\cdot\sum_{j\in J}P_{ij|e}\left(P_{c|n}\right)\cdot\left(\left(P_{in|e,j}\left(P_{c|n}\right)\cdot P_{c|n}(j)+\left(1-P_{in|e,j}\left(P_{c|n}\right)\right)\cdot P_{c|n}(j')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\right) \tag{11}$$

表1の5行目には，住民が避難所jを選択したときに避難所に入れない場合の期待費用が示されており，この部分において避難所の容量が期待費用に反映されていることがわかる．

表1. 世帯iiの期待コスト

避難	避難所	入れる／入れない	期待費用
する	1	両方	$P_{ie}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{i1\|e}\left(P_{c\|n}\right)\cdot\left(\left(P_{in\|e,1}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{c\|n}(1)+\left(1-P_{in\|e,1}\left(P_{c\|n}\right)\right)\cdot P_{c\|n}(1')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{i1}\right)$
	⋮	⋮	⋮
	J	入れる	$P_{ie}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{ij\|e}\left(P_{c\|n}\right)\cdot\left(P_{in\|e,j}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{c\|n}(j)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\right)$
		入れない	$P_{ie}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{ij\|e}\left(P_{c\|n}\right)\cdot\left(\left(1-P_{in\|e,j}\left(P_{c\|n}\right)\right)\cdot P_{c\|n}(j')\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\right)$
	⋮	⋮	⋮
	$\|J\|$	両方	$P_{ie}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{i\|J\|\|e}\left(P_{c\|n}\right)\cdot\left(\left(P_{in\|e,\|J\|}\left(P_{c\|n}\right)\cdot P_{c\|n}(\|J\|)+\left(1-P_{in\|e,\|J\|}\left(P_{c\|n}\right)\right)\cdot P_{c\|n}(\|J\|')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{i\|J\|}\right)$
しない			$\left(1-P_{ie}\left(P_{c\|n}\right)\right)\cdot f\cdot P_{c\|n}(i)$

ここで j' は，避難所 j の周辺施設を示しており，式(12)に示す関係を満たすものとする．

$$P_{c|n}(j') = \min(1 \quad \beta_6 \cdot P_{c|n}(j)) \quad \beta_6 \geq 1 \tag{12}$$

式(12)は，避難所 j' の被災確率は避難所 j の $\beta_6(\geq 1)$ 倍となるが，決して1を上回らないことを意味している．

3. 被災確率

ここでは，被災確率の定式化を行う．$n(n = 1,...,N)$ 年に一度の確率で起こる地震を n 年確率地震と呼ぶが，ある年に n 年確率以上の地震が発生する確率 $P_{>n}$ は式(13)で与えられる．

$$P_{>n} = \frac{1}{n} \tag{13}$$

したがって，ある年に n 年確率地震が発生する確率 P_n は式(14)で与えられる．

$$P_n = P_{>n} - P_{>n+1} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} = \frac{1}{n \cdot (n+1)} \tag{14}$$

ある年に n 年確率地震が発生したとき，海岸線にいる人が被災する確率 $P_{c|n}$ を式(15)で与える．

$$P_{c|n} = \frac{1}{1 + \exp(\beta_4 \cdot n + \beta_5)} \tag{15}$$

ここで，$\beta_4 (< 0), \beta_5 (> 0)$ はパラメータである．

以上の関係を式(11)に適用すると，ある年 y の世帯 i の住民が負担する期待費用 TC_{iy} は，式(16)で与えられる．

$$TC_{iy} = \sum_{n=1}^{N} P_n \cdot TC_{iy}(P_{c|n}) \tag{16}$$

Y 年間で世帯 i の住民が負担する期待総費用（TC_i）は式(17)で与えられる．

$$TC_i = \sum_{y=1}^{Y} TC_{iy} \tag{17}$$

したがって，Y 年間の全世帯での総期待費用（TC）は式(18)で与えられる．

$$TC = \sum_{i \in I} TC_i = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^{Y} TC_{iy} = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^{Y} \sum_{n=1}^{N} P_n \cdot TC_{iy}(P_{c|n}) \tag{18}$$

以上の定式化を適用すれば，全世帯での総期待費用（TC）を最小化するような避難所の組合せ，すなわち，避難所の最適配置計画を考えることができる．

4. 最適避難所選択モデル

ここでは，最適な避難所を世帯に割り当てる問題を考える．避難所割当ての方針としては，全世帯での総期待費用が最小化される割当てを考える．したがって，避難すると意思決定した各世帯は，事前に割り当てられた避難所の中から1つの避難所を選択することを仮定する．

はじめに，世帯 i に避難所 j を割り当てるかどうかを表現する変数 x_{ij} を導入する．x_{ij} は，任意の実数をとるものとし，x_{ij} の関数 $y_{ij}(x_{ij})$ を式(19)で与える．

$$y_{ij}(x_{ij}) = 1 + \exp(\beta_7 \cdot x_{ij}) \tag{19}$$

ここで，β_7は正の十分に大きな実数であると仮定し，式(19)に示した関数は，式(20)に示す関係を満たすものとする（**図2**）.

$$y_{ij}\left(x_{ij}\right)=\begin{cases}1 & \text{if } x_{ij}<0\\ 2 & \text{if } x_{ij}=0\\ \infty & \text{if } x_{ij}>0\end{cases} \tag{20}$$

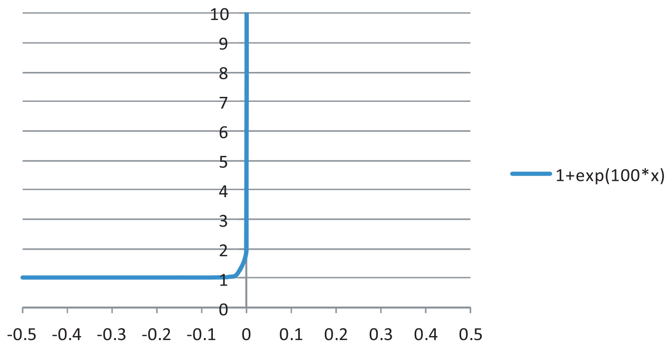


図2. $\beta_7=100$ の場合の $y_{ij}\left(x_{ij}\right)$

$y_{ij}\left(x_{ij}\right)$を用いて式(1)の係数$\beta_1$を変換した係数を$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)$と表わし，式(21)で与える.

$$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)=\beta_1\cdot y_{ij}\left(x_{ij}\right) \tag{21}$$

以下では，$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)$と$y_{ij}\left(x_{ij}\right)$を用いて計算される避難所$j$の修正被災確率$P_{c|n}^{(m)}(j)$を式(22)で定義する.

$$P_{c|n}^{(m)}(j)=\min\left(1\quad \frac{y_{ij}\left(x_{ij}\right)}{1+\exp\left(\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)+\beta_2\cdot a_i\left(d_i,h_i\right)\right)}\cdot P_{c|n}\right) \tag{22}$$

$x_{ij}=0$の場合，式(22)は以下の関係を満たす（証明は付録2）.

$$P_{c|n}^{(m)}(j)\geq P_{c|n}>P_{c|n}(k')>P_{c|n}(k)\ \forall k\in I\cup J \tag{23}$$

式(1)に示した関係から，$x_{ij}>0$の場合$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)=-\infty$となるため，そうした避難所$j$の被災確率$P_{ij|e}^{(m)}\left(P_{c|n}\right)$は海岸線での被災確率$P_{c|n}$に一致する．さらに，式(8)より，そうした避難所が選択される確率は0となる．一方，$x_{ij}<0$の場合$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)=\beta_1$となるため，そうした避難所$j$の被災確率$P_{ij|e}^{(m)}\left(P_{c|n}\right)$は$P_{ij|e}\left(P_{c|n}\right)$に一致する．したがって，修正被災確率は式(24)に示す関係も満たすことがわかる.

$$P_{ij|e}^{(m)}\left(P_{c|n}\right)=\begin{cases}0 & x_{ij}>0\\ P_{ij|e}\left(P_{c|n}\right) & x_{ij}<0\end{cases} \tag{24}$$

式(24)は，x_{ij}の関数として表現される$\beta_1^{(m)}\left(x_{ij}\right)$および$y_{ij}\left(x_{ij}\right)$を用いて，世帯$i$の避難所の選択肢集合を表現できることを示している．すなわち，$x_{ij}<0$となる避難所jは世帯iの選択肢の1つとなり，$x_{ij}>0$となる避難所は選択肢には入らないことを表現している．$x_{ij}=0$となる場合については，後ほど議論することにする.

Y年間の全世帯での総期待費用を$TC^{(m)}(\mathbf{x})$とし，最適避難所選択問題を以下で与える.

$$\min TC^{(m)}(\mathbf{x}) \tag{25}$$

$$\text{w.r.t}\quad \mathbf{x}=\left\{x_{ij}\forall i\in I,\forall j\in J\right\} \tag{26}$$

上記は，目的関数，すなわち，Y 年間の全世帯での総期待費用 $TC^{(m)}(\mathbf{x})$ を最小化する $\mathbf{x}$ を求める問題となっており，x_{ij} に関して何の制約も課されていないことに注意が必要である．また，$x_{ij}=0$ が解となる場合，特定の世帯がある避難所を選択する確率を下げることを意味し，現実的な避難所集合が得られない可能性がある．しかしながら，$x_{ij}=0$ が解となることはない．この詳細な議論については，付録3を参照されたい．

5. おわりに

本研究では，災害時における住民の避難行動選択モデルを構築した．住民の選択行動は，災害時に避難するか否か，避難する場合，どの避難所を選択するかの2段階から構成される．さらに，住民がとり得る行動から総期待費用を計算し，その最小化を目的関数とする，世帯への最適避難所割当問題の定式化を行った．最適避難所割当問題では，各避難所の容量が考慮されているため，この問題を解くことによって，避難所に向かったとしても中に入れないことによる期待費用の増分が抑えられるような解を求めることができると考えられる．

今後は，付録1に示した地域を対象とした世帯への最適避難所割当問題を設定し，構築したモデルの検証を行う所存である．

付録1

1. はじめに

一昨年起きた東日本大震災では，日本における観測史上最大規模であるマグニチュード9.0，最大震度は7を記録し，震源域は岩手沖から茨城県沖までの広範囲に及んだ．この災害で最も大きな被害をもたらしたのが波高10m以上，最大遡上高40.1mにもなる大津波であった．この災害によって死者・行方不明者を合わせて2万人にも及ぶ人々が被害にあい，今後の災害に向けた防災対策はより一層重要視されるようになった．

東日本大震災から学んだ教訓の1つとして，避難したとしても津波レベルによっては，危険な避難所も存在するということである．したがって，津波レベルに応じた安全性や避難範囲・収容人数の観点から，指定避難所の評価を行うことは重要である．いつ襲ってくるかわからない災害のために大きなインフラ投資を望むことは難しい．したがって，既存の避難施設の評価を行うことで，問題のある避難施設を抽出し，ソフト施策を中心とした対策を講じることで，津波防災力を高めることができると考えられる．

本研究では，安全性や避難範囲・収容人数の観点から，津波指定避難所の評価を行うことを目的とする．対象地域として，北海道東方沖地震や十勝沖地震など大きな地震の発生が多く，中心市街地の標高が低く，津波レベルによっては大規模な被害が発生すると考えられる釧路市をとりあげた．

2. 対象地域の現状分析

釧路市では，500年津波にも対抗できる津波災害に強いまちづくりを目標とした防災・減災の二段階防護システムを提案している．二段階防護システムでは，低レベル災害時には被害を出さず，高レベル災害時には人命尊重と早期復旧が可能な被害に抑えることを目標とした防災対策の総称である．そこでは**表a1.1**に示した三段階の津波レベルが想定されている．

表a1.1　想定津波レベル

	発生確率	津波の最大水位	最大浸水深
Lv.1規模津波	数十～数百年に一度	3m未満	1m未満
500年規模津波	500年に一度	4～13m	3m未満
Lv.2規模津波	数千年に一度	10～30m	10m

3. 研究概要

3.1 避難者数と津波一時避難所の収容人数の需給関係

本研究では避難者数を需要量，津波一時避難所の収容人数を供給量と考え，津波が発生した際の各避難所の評価を行う．需要量（避難者数）が供給量（収容人数）を上回らなければ，住民のすべての避難が可能になる．しかし，津波の規模が大きくなるにつれて，避難者数が増える一方で，水没等から避難所として使用できなくなる避難所も存在するため，収容可能人数の減少が起きる．すなわち，津波レベルが上がると需要量が供給量を超えることが想定される．そうしたケースでは，避難所周辺の住民は避難可能，すなわち，避難所に入ることができるが，避難所から離れた地域に居住する人々は避難することができなくなってしまう．

3.2 分析の前提条件

津波レベルに応じた避難所の需給関係がどのように変化するかを定量的に示すため，避難確率と避難所の収容人数を考慮したボロノイ図の作成法を構築した．基本的な考え方は，標準的なボロノイ図のも

のと同様ではあるが，津波レベルによって変化する避難率と避難所の収容人数を考慮し，津波発生時の避難所の需給関係を表現できるという特徴がある．

釧路市の防災対策立案において用いられている以下に示す仮定の下，津波一時避難所の避難範囲と避難人数が決定される．

・避難方法：徒歩避難・（車避難）
・徒歩スピード：時速2.8km/h
・避難可能時間：30分
・避難選択：居住地から最も近い避難所

3.3 定式化

徒歩による避難可能な範囲は，避難所を中心とした半径$R_{\max}$と表現すると，上記の仮定から$R_{\max}$は1.4kmと計算される．一方，避難所の需給関係を考慮した修正最大避難可能半径は以下に示すように計算できる．レベルjの津波発生時に，避難所iに避難することが可能なiを中心とした修正最大避難可能半径R_{ij}は以下で与えられる．

$$R_{ij} = \begin{cases} R_{\max} & \text{if } d_i \cdot P_{ij} \cdot \pi \cdot (R_{\max})^2 \le C_{ij} \\ \sqrt{\dfrac{C_{ij}}{d_i \cdot P_{ij} \cdot \pi}} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{a1.1}$$

C_{ij}：レベルjの津波発生時の避難場所iの容量
d_i：避難場所i周辺の人口密度
P_{ij}：避難場所i周辺に居住する住民がレベルjの津波発生時に避難する確率

以上をまとめると，修正最大避難可能半径は以下で与えられる．

$$R_{ij} = \min\left(R_{\max} \quad \sqrt{\frac{C_{ij}}{d_i \cdot P_{ij} \cdot \pi}} \right) \tag{a1.2}$$

上記で定式化を行った修正最大避難可能半径を用いてボロノイ図を作成すれば，避難所の需給関係を反映した避難可能範囲を推計することができる．紙面の制約から,ボロノイ図に関する説明は割愛する．

4. 分析結果

4.1 Lv.1規模津波における被害

津波による水没で使用できなくなる避難所はない．津波の予測浸水深も低く，予測浸水範囲も狭いため，すべての避難所において避難者数が収容人数を上回ることはなく避難住民すべての避難が可能となる．

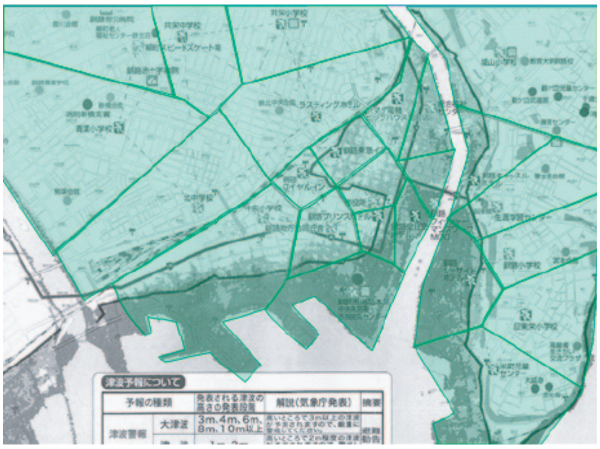
4.2 500年規模津波における被害

津波による水没で使用できなくなる避難所はない．駅南側の街の中心部においては，避難者が収容人数を上回る避難所はなかった．しかし，駅の北側や橋の東側など津波の予測浸水深は1m未満と低いが，人口が多く避難所が少ないところでは避難者数が収容人数を上回る結果となった．そのためいくつかの避難所において避難範囲の減少が起きる結果となった．

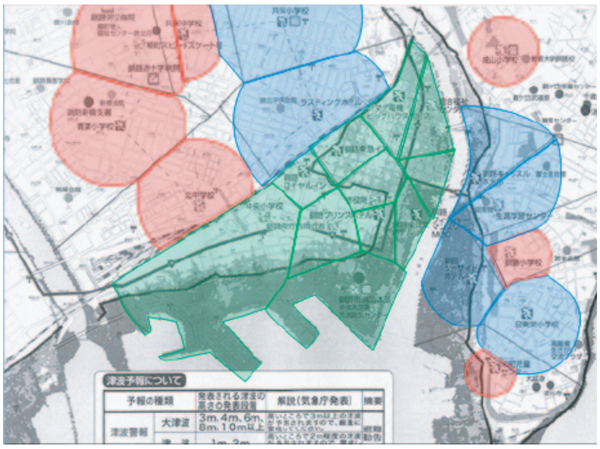
4.3 Lv.2規模津波における被害

津波による水没によって沿岸部の低層階な避難所8か所が使用できなくなり，さらに，多くの避難所に

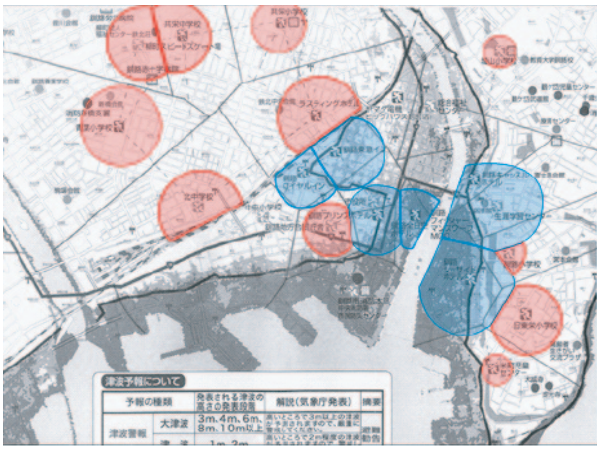
おいて，収容人数の減少が起きてしまう．避難者数も増加するため，対象地域の多くの避難所において避難者数が収容人数を上回る結果となった．その結果，避難所周辺の住民は避難可能だが，避難所から離れた地域に居住する人々は避難所に入れず，避難することができなくなってしまう．Lv.2規模津波においては，沿岸部で最大浸水10m以上，駅の北側でも最大浸水深5m以上が予測されている．そのため，避難所に入ることのできない人々は津波の被害にあってしまうと予測される．



図a1.1　Lv.1規模津波における避難範囲



図a1.2　500年規模津波における避難範囲



図a1.3　Lv.2規模津波における避難範囲

5. まとめ

本研究では，避難者数を需要，津波一時避難所の収容人数を供給と捉え，津波災害を考慮した避難所の避難範囲の変化を需給関係から分析を行った．避難所の避難範囲を表すことで，津波が起きた際にどの範囲の人が避難所に逃げることができなくなるかを地図上に示し，どの程度の被害が起きるのかを予測した．釧路市が定めている地域防災計画通りに避難が行われた場合，Lv.1規模津波においては被害が出ないという結果が得られた．しかし，500年規模津波やLv.2規模津波においては被害が出てしまうという結果も得られた．

釧路市の津波防災を考えるうえでは，沿岸部の避難所の防災対策も重要ではあるが，住宅地などの周辺地域における避難所の防災対策も重要である．また，本研究から得られた知見の1つは，津波災害のレベルによって避難所を適切に選択することの重要性である．すなわち，指定避難所に避難したから安全という訳ではなく，常により安全な避難所に向かうことの重要性である．さらに，適切な避難所選択のためには，住民への正確で迅速な災害情報の提供も重要となると考えられる．こうした点は，本研究の今後の課題である．

付録2

はじめに，いかなる発生確率の地震が起こっても安全な避難所$j*$を考える．避難所$j*$の安全性指標は，$a_{j*}\left(d_{j*},h_{j*}\right)$で与えられ，その値が任意の避難所の安全性指数の上限値であるとする．避難所$j*$の被災確率は，式(a2.1)で与えられる．

$$P_{c|n}\left(j*\right)=\frac{1}{1+\exp\left(\beta_1+\beta_2\cdot a_{j*}\left(d_{j*},h_{j*}\right)\right)}\cdot P_{c|n}=0 \tag{a2.1}$$

さらに，式(2)に示した関係から，式(a2.2)に示す関係が成立する（図a2.1）．

$$\beta_2\cdot a_{j*}\left(d_{j*},h_{j*}\right)=-2\cdot\beta_1 \tag{a2.2}$$

一方，$x_{ij}=0$のとき，避難所$j*$の修正被災確率は，式(a2.3)で与えられる．

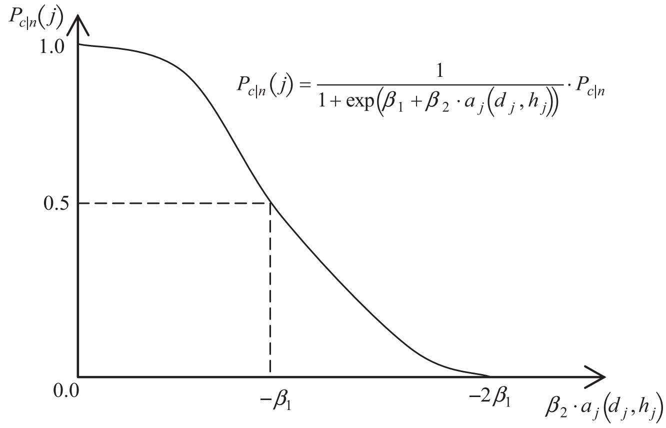
$$P_{c|n}^{(m)}\left(j*\right)=\frac{2}{1+\exp\left(2\cdot\beta_1+\beta_2\cdot a_{j*}\left(d_{j*},h_{j*}\right)\right)}\cdot P_{c|n} \tag{a2.3}$$

式(a2.2)を(a2.3)に代入すると式(a2.4)に示す関係を得る．

$$P_{c|n}^{(m)}\left(j*\right)=P_{c|n} \tag{a2.4}$$

式(a2.4)は，$x_{ij}=0$のとき，最も安全な避難所の修正被災確率は海岸線の被災確率に一致することを意味する．従って，任意の避難所$j\in J$の修正被災確率には，式(a2.5)に示す関係が成立する．

$$P_{c|n}^{(m)}\left(j\right)\geq P_{c|n} \tag{a2.5}$$



図a2.1 避難所の被災確率と安全性指標の関係

付録3

以下では，簡単化のため，$P_{c|n}$の関数であると表現した変数$g\left(P_{c|n}\right)$は，$\left(P_{c|n}\right)$を省略して単にgと表記することにする．以下では，式(25)，(26)に示した最適化問題では，$x_{ij}=0$となる解が存在しないことを示す．

もし，$x_{ij}=0$となる解が存在する場合，式(a3.1)に示す関係が成立するはずである．

$$\left.\frac{\partial TC^{(m)}(\mathbf{x})}{\partial x_{ij}}\right|_{x_{ij}=0}=0 \tag{a3.1}$$

上式左辺の総期待費用$TC^{(m)}(\mathbf{x})$をx_{ij}で偏微分すると式(a3.2)に示す関係を得る．

$$\frac{\partial TC^{(m)}(\mathbf{x})}{\partial x_{ij}}=\frac{\partial\left(\sum_{i\in I}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{n=1}^{N}P_n\cdot TC_{iy}^{(m)}\right)}{\partial x_{ij}}=\sum_{i\in I}\sum_{y=1}^{Y}\sum_{n=1}^{N}P_n\cdot\frac{\partial TC_{iy}^{(m)}}{\partial x_{ij}} \tag{a3.2}$$

式(a3.2)において，世帯iの住民が負担する期待費用$TC_{iy}^{(m)}$は，式(a3.3)で与えられる．

$$TC_{iy}^{(m)}=\left(1-P_{ie}^{(m)}\right)\cdot f\cdot P_{c|n}(i)+P_{ie}^{(m)}\cdot\sum_{k\in J}P_{ik|e}^{(m)}\cdot\left(\left(P_{in|e,k}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(k)+\left(1-P_{in|e,k}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(k')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ik}\right) \tag{a3.3}$$

したがって，世帯iの住民が負担する期待費用$TC_{iy}^{(m)}$をx_{ij}で偏微分して整理したものは，式(a3.4)で与えられる．

$$\begin{aligned}\frac{\partial TC_{iy}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=&\frac{\partial P_{ie}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\left(\sum_{k\in J}P_{ik|e}^{(m)}\cdot\left(\left(P_{in|e,k}^{(m)}\cdot P_{c|n}(k)+\left(1-P_{in|e,k}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}(k')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ik}\right)-P_{c|n}(i)\cdot f\right)\\&+P_{ie}^{(m)}\cdot\left(\begin{aligned}&\frac{\partial P_{ij|e}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\left(\left(P_{in|e,j}^{(m)}\cdot P_{c|n}(j)+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}(j')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\right)\\&+P_{ij|e}^{(m)}\cdot f\cdot\left(\frac{\partial P_{in|e,j}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\left(P_{c|n}^{(m)}(j)-P_{c|n}^{(m)}(j')\right)+P_{in|e,j}^{(m)}\cdot\frac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j)}{\partial x_{ij}}+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot\frac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j')}{\partial x_{ij}}\right)\end{aligned}\right)\end{aligned} \tag{a3.4}$$

式(a3.4)右辺それぞれの偏微分係数は，式(a3.5)－(a3.7)で与えられる．

$$\frac{\partial P_{ie}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=\frac{\partial\left(\dfrac{\exp\left(c_i^{(m)}\right)}{\exp\left(-f\cdot P_{c|n}(i)\right)+\exp\left(c_i^{(m)}\right)}\right)}{\partial c_i^{(m)}}\cdot\frac{\partial c_i^{(m)}}{\partial u_{ij}^{(m)}}\cdot\frac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=P_{ie}^{(m)}\cdot\left(1-P_{ie}^{(m)}\right)\cdot P_{ij|e}^{(m)}\cdot\frac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}<0 \tag{a3.5}$$

$$\frac{\partial P_{ij|e}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=\frac{\partial\left(\dfrac{\exp\left(u_{ij}^{(m)}\right)}{\sum_{l\in J}u_{il}^{(m)}}\right)}{\partial u_{ij}^{(m)}}\cdot\frac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=P_{ij|e}^{(m)}\cdot\left(1-P_{ij|e}^{(m)}\right)\cdot\frac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}<0 \tag{a3.6}$$

$$\frac{\partial P_{in|e,j}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=\frac{\partial\left(\min\left(\dfrac{\pi_j}{\sum_{k\in I}P_{kj|e}^{(m)}}\quad 1\right)\right)}{\partial u_{ij}^{(m)}}\cdot\frac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}=\begin{cases}0 & \text{if }\dfrac{\pi_j}{\sum_{k\in I}P_{kj|e}^{(m)}}>1\\-\pi_j\cdot P_{in|e,j}^{(m)}\cdot P_{ij|e}^{(m)}\cdot\left(1-P_{ij|e}^{(m)}\right)\cdot\dfrac{\partial u_{ij}^{(m)}}{\partial x_{ij}}>0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{a3.7}$$

以上の関係を用いると，式(a3.8)に示す関係式を得る．

$$\left.\frac{\partial TC_{iy}^{(m)}(\mathbf{x})}{\partial x_{ij}}\right|_{x_{ij}=0}=\begin{cases}\dfrac{\partial P_{ie}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\begin{pmatrix}\sum_{k\in J}P_{ik|e}^{(m)}\cdot\left(\left(P_{in|e,k}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,k}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(k')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ik}\right)\\-P_{c|n}(i)\cdot f+\left(P_{in|e,j}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(j')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\end{pmatrix}\\+P_{ie}^{(m)}\cdot P_{ij|e}^{(m)}\cdot f\cdot\begin{pmatrix}\dfrac{\partial P_{in|e,j}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\left(P_{c|n}^{(m)}(j)-P_{c|n}^{(m)}(j')\right)\\+P_{in|e,j}^{(m)}\cdot\dfrac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j)}{\partial x_{ij}}+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot\dfrac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j')}{\partial x_{ij}}\end{pmatrix} & \text{if } \dfrac{\pi_j}{\sum_{k\in I}P_{kj|e}^{(m)}}>1\\\dfrac{\partial P_{ie}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\begin{pmatrix}\sum_{k\in J}P_{ik|e}^{(m)}\cdot\left(\left(P_{in|e,k}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,k}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(k')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ik}\right)\\-P_{c|n}(i)\cdot f+\left(P_{in|e,j}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(j')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ij}\end{pmatrix}\\+P_{ie}^{(m)}\cdot P_{ij|e}^{(m)}\cdot f\cdot\left(P_{in|e,j}^{(m)}\cdot\dfrac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j)}{\partial x_{ij}}+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot\dfrac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j')}{\partial x_{ij}}\right) & \text{otherwise}\end{cases}\tag{a3.8}$$

はじめに，式(a3.8)において，$\pi_j\Big/\sum_{k\in I}P_{kj|e}^{(m)}>1$となる場合を考える．右辺第1項では，$x_{ij}=0$の場合，式(a3.9)－(a3.11)に示す関係が成立することがわかる．

$$\sum_{k\in J}P_{ik|e}^{(m)}\cdot\left(\left(P_{in|e,k}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,k}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(k')\right)\cdot f-\beta_3\cdot r_{ik}\right)>0\tag{a3.9}$$

$$-P_{c|n}(i)\cdot f+\left(P_{in|e,j}^{(m)}\cdot P_{c|n}^{(m)}(j)+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot P_{c|n}^{(m)}(j')\right)\cdot f>0\tag{a3.10}$$

$$-\beta_3\cdot r_{ij}>0\tag{a3.11}$$

上記2番目の条件式は，式(23)に示した条件から得られる．$\dfrac{\partial P_{ie}^{(m)}}{\partial x_{ij}}<0$であることを考えると，右辺第1項は負の値をとることがわかる．一方，右辺第2項においては，式(a3.12)，(a3.13)に示す関係が成立することがわかる．

$$\frac{\partial P_{in|e,j}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\cdot\left(P_{c|n}^{(m)}(j)-P_{c|n}^{(m)}(j')\right)<0\tag{a3.12}$$

$$P_{in|e,j}^{(m)}\cdot\frac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j)}{\partial x_{ij}}+\left(1-P_{in|e,j}^{(m)}\right)\cdot\frac{\partial P_{c|n}^{(m)}(j')}{\partial x_{ij}}>0\tag{a3.13}$$

したがって，右辺第2項は，正負両方の値をとり得るように思えるかもしれない．しかしながら，$x_{ij}=0$のときは，式(23)から$P_{c|n}^{(m)}(j)\geq P_{c|n}$となる．その場合，式(8)に示した関係から$P_{ij|e}^{(m)}=0$となる．したがって，右辺第2項は0となり，結局，式(a3.14)に示す関係が成立する．

$$\left.\frac{\partial TC_{iy}^{(m)}(\mathbf{x})}{\partial x_{ij}}\right|_{x_{ij}=0}<0\tag{a3.14}$$

同様の議論を適用すると，$\pi_j\Big/\sum_{k\in I}P_{kj|e}^{(m)}>1$とはならない場合においても，$x_{ij}=0$が解となることはないことがわかる．

以上の結果を式(a3.8)に適用すると，式(a3.15)に示す関係が成立する.

$$\left.\frac{\partial TC_{iy}^{(m)}}{\partial x_{ij}}\right|_{x_{ij}=0} < 0 \quad \forall i, j \tag{a3.15}$$

$P_n \geq 0$であることから，$P_n = 0 \quad \forall n$ではない限り, (a3.16)に示す関係が成立するため，$x_{ij} = 0$が解とはなり得ないことが示された.

$$\left.\frac{\partial TC^{(m)}(\mathbf{x})}{\partial x_{ij}}\right|_{x_{ij}=0} < 0 \tag{a3.16}$$