

2023/05/17

理論談話会#09

# An Evacuation Decision Model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty

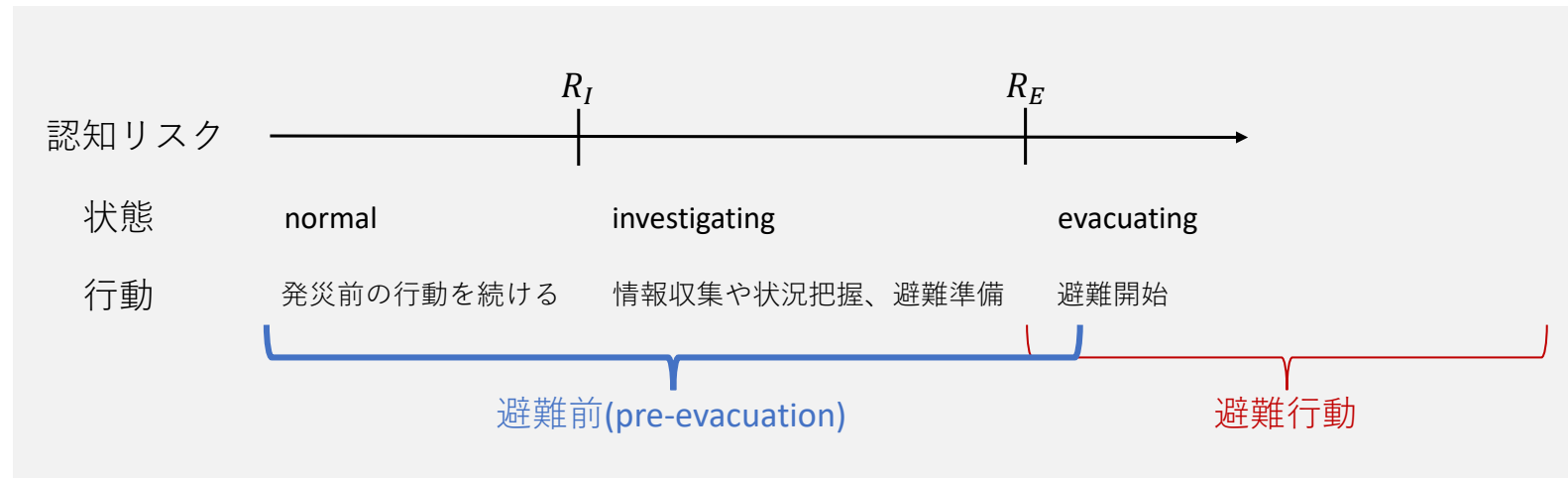
Lovreglio, R., Ronchi, E., & Nilsson, D. An Evacuation Decision Model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.66, pp.226-242, 2016.

---

M2 近藤愛子

安全な避難のためには、避難前行動(=**pre-evacuation behaviour**)も重要

様々なcue (きっかけ) により  
高まる**認知リスク**から状態  
(=normal, investigating, evacuating)  
を予測する  
cue; environmental, social



## ■良かった点

シンプルな定式化で、拡張性が高い

## ■課題点

定式化で挙げられた変数のうち、実証分析で用いられたのは一部

## ■新規性

既往研究において、避難移動そのものに比べ pre-evacuation の言及は少ない上、pre-evacuation の時間自体は input とするモデルが多い

数少ない、時間を予測するアプローチをとった Reneke(2013)[22] に

- Behavioural uncertainty
- Social interactions

を加えて拡張した

\*これらの存在自体は、他研究（uncertaintyは[25][30]、socialは[26][27][28]）で指摘されている

## ■有用性

- Social interactions のリスク認知への影響
- 変数間の相互作用（Aの効果+Bの効果 $\neq$ A $\wedge$ Bの効果）

は参考にできそう

## ■信頼性

- 実証分析では一部の変数しか取り入れられていない
- 初期尤度のモデル仕様の説明が不十分

の2点は課題

1. 概要
2. モデルの仮定
3. 定式化
4. 実装時のデータセット準備の課題  
実験ではcueはよりコントロールできるけど、本当に起こすであろう行動を示すか不明  
RP調査（おそらくアンケートとかより、動画やモバイルデータ等の解析を想定）では、個人属性等を得るのが困難
5. 実証分析

非常時発生から、避難開始までのpre-evacuation behavioursも重要なのに既往研究が少ない

→そこも予測したい！

→EDM(Evacuation Decision Model; 避難開始選択モデル)

の構築

cue（きっかけ）を受けたり，個人属性によって  
認知リスクが変動

ある閾値を超えると，状態が変わる  
(normal→investigating→evacuating)

状態ごとにそれに対応する行動をとる

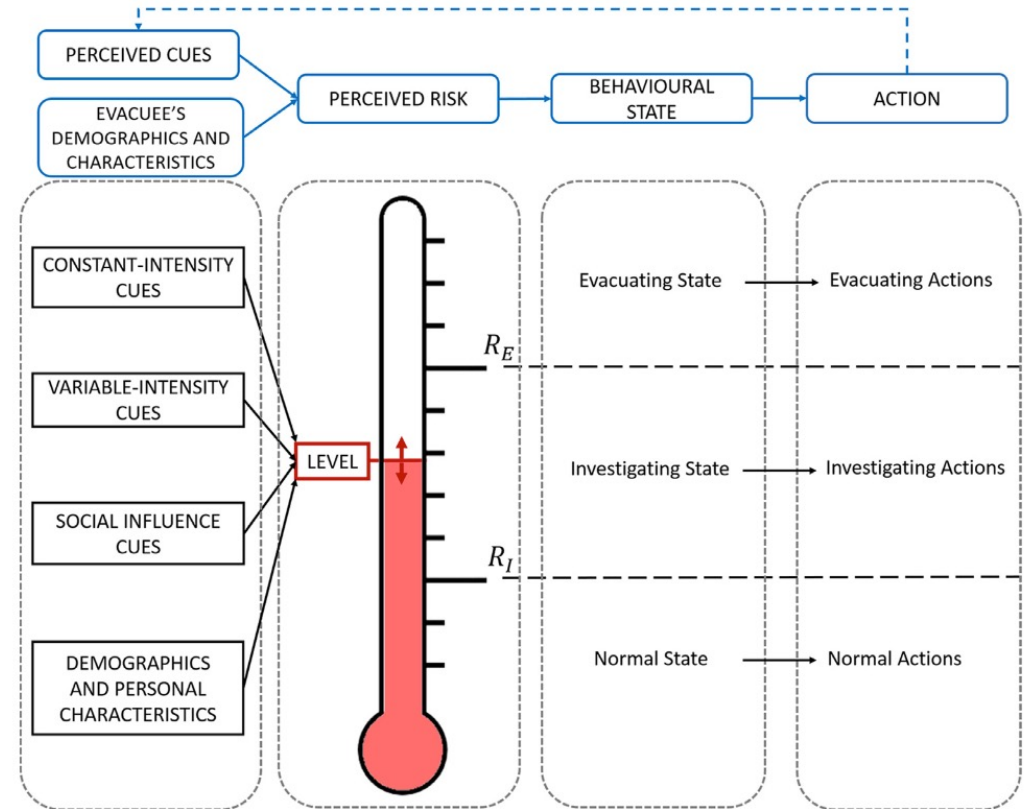


Fig. 1. Conceptual model describing how the perceived cues and agents' demographics and personal characteristics affect evacuees' actions.

避難に至る機構

以降， evacuee と agent は異なる概念：

**Evacuee:**

実際の避難や， 避難実験に参加した， 実在の避難者

**Agent:**

避難モデル上でのシミュレートされる避難者

また， 定式化では火災避難を想定している

(定式化は， 火災に限定されないが， 各cueの例は火災避難に対するもの)

## 2. モデルの仮定 (Reneke(2013) に準ずる)

1. EDMの目的: 防御行動(≡避難行動) をとる決定をした時刻を予測する
2. 認知リスクが避難時刻の決定に寄与するkey factor
3. Agentの認知リスクレベルによって状態が, 状態によって行動が決定
4. Agentの状態は3種類
  - a) Normal: 発災前の行動を続ける
  - b) Investigating: 情報収集をする
  - c) Evacuating: 防御行動をとる

5. 認知リスク変化は, 現在の認知リスクと受け取るcueの強度に比例

$$\dot{R}_i(t) = f(\mathbf{X}) \cdot R_i(t)$$

認知リスクの時間微分 cues  $\mathbf{X}$ の関数 時刻 $t$ の認知リスク

6. 過去の経験により, cueを受け取った時の認知リスク変化具合が変わりうる
7. 他者の状態が, 認知リスクに影響する

## 2. モデルの仮定（本研究の新しい仮定）

8. 他者からの影響度は、役割(role)や同じグループに属するかで変わる  
例えば、ビルのスタッフの影響度は大きい(role rule theory), や  
家族や仲間の影響度が大きい(affiliative theory)
9. Agentの個人属性によって影響が変わる（6.の拡張）  
過去の影響だけでなく、身体能力とか
10. 認知リスクに影響を与えるcueの効果は相加的である  
Reneke (2013)には書いていないが、実際は用いられている仮定  
尚、 $X_i$ の線形和である必要はなく、cue:  $X_1, X_2$ としたとき、  
$$f(\mathbf{X}) = \beta_1 g_1(X_1) + \beta_2 g_2(X_2)$$
11. Behavioural uncertaintyがある
  - a) Intrinsic behavioural uncertainty: 非観測項の存在と、同じ個人でもばらつきがあるかも
  - b) Perceptions and Preferences Behavioural Uncertainty: 個人ごとに、同じ要素に対する評価が違うかも



### ■ 基本的な設定

$i$	Agent
$t$	時刻
$R_i(t)$	Agent $i$ の時刻 $t$ における認知リスク
$\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$	時刻 $t$ における cues

また, 5. 認知リスク変化は, 現在の認知リスクと受け取るcueの強度に比例 の通り

$$\dot{R}_i(t) = f(\mathbf{X}) \cdot R_i(t) \quad (2)$$

ただし,  $f(\mathbf{X})$ はcues  $\mathbf{X}$ のリスクへの影響を示す一次関数 ( $x_i$ 自体の線形和とは限らない) によって,

$$R_i(t) = R(t_0) e^{\int f(\mathbf{X}(t))dt} \quad (3)$$

▷  $R(t_0)$ を定め、 $f$ の関数形と、 $\mathbf{X}$ の時刻 $t$ までの推移がわかれば計算できる。  $R(t_0) = 1$ とする。

### 強度が変わらないcue

例: 火災報知器のアラーム

\*論文本文では、 $f(t)$ のように書かれているが、わかりやすさのため、 $f(t), R_i(t)$ のうちconstant intensity cueを構成するものを $f_c(t), R_{ic}(t)$ と書く。今後別のcueでも同様。

Cue  $j$ は、時刻 $t_j$ に開始する。複数のconstant intensity cueがある時、

$$f_c(t) = \sum_j c_j^c(t) C_j^c(t) \quad (5)$$
$$C_j^c(t) = \begin{cases} 0, & t < t_j \\ 1, & t \geq t_j \end{cases}$$

$c_j^c$ はパラメータ、 $t$ の変数の場合も（段々効果が減衰する場合等）

$C_j^c$ はcueの有無を表すダミー変数

# 3.1 Constant intensity cues(2)

例えば2つのconstant intensity cue A,Bがあり、  
Aの開始時刻を $t_a$ 、  
Bの開始時刻を $t_b$   
とすると、

$$R_{iC}(t) = \begin{cases} 1 & t_0 \leq t < t_a \\ e^{c_a^C(t-t_a)} & t_a \leq t < t_b \\ e^{c_a^C(t-t_a)+c_b^C(t-t_b)} & t_b \leq t \end{cases} \quad (6)$$

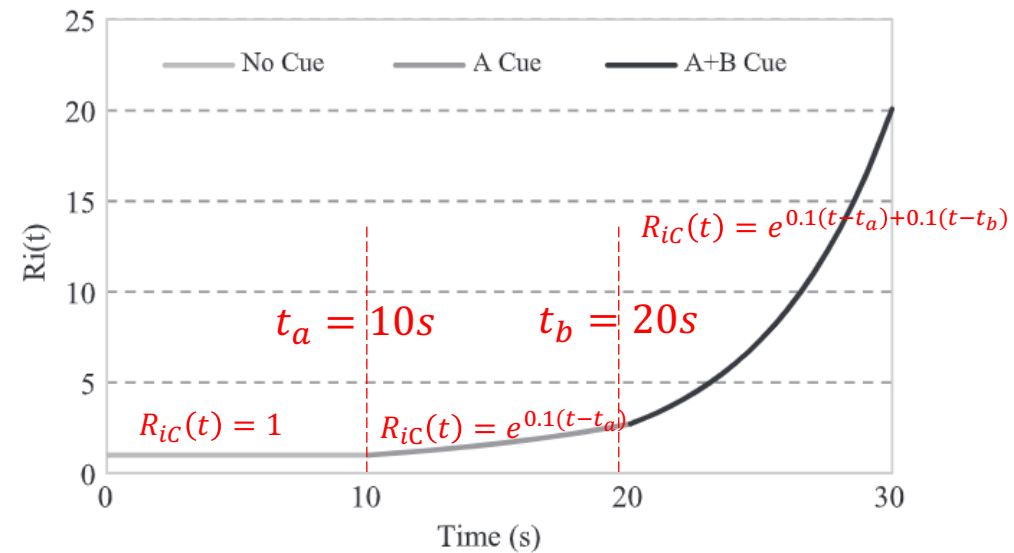
となる。 \*c.f.を元に積分するだけ

例えば、 $t_a = 10s, t_b = 20s, c_a^C = 0.1, c_b^C = 0.1$ とすると、  
 $R_{iC}(t)$ は右図のようになる。

c.f.  $R_i(t) = R(t_0) e^{\int f(x(t))dt} \quad (3)$

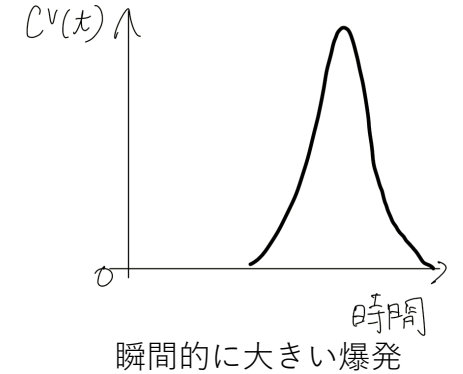
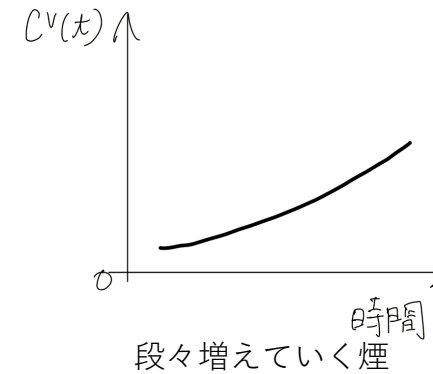
$$f_c(t) = \sum_j c_j^C(t) C_j^C(t) \quad (5)$$

$$C_j^C(t) = \begin{cases} 0, & t < t_j \\ 1, & t \geq t_j \end{cases}$$



### 時間によって、強度が変わるcue

例：煙や，爆発



Constant intensityと同様，

$$f_V(t) = \sum_j c_j^V(t) C_j^V(t) \quad (7)$$

と書く．

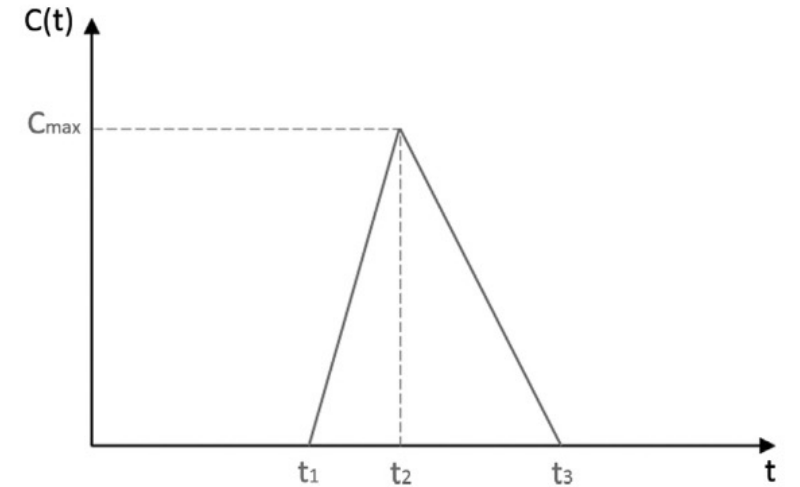
$c_j^V(t)$ がcue  $j$ に対するパラメータ

$C_j^V$ は右上の図の例のように，cueの強度を表す説明変数

## 3.2 Variable intensity cues(2)

例：右図（下の式）のような強度分布をもつcue:  $C_{\text{exp}}^V(t)$ （爆発）を考える

$$C_{\text{exp}}^V(t) = \begin{cases} 0 & t_0 \leq t < t_1 \\ \frac{C_{\text{max}}}{t_2 - t_1} (t - t_1) & t_1 \leq t < t_2 \\ C_{\text{max}} - \frac{C_{\text{max}}}{t_3 - t_2} (t - t_2) & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 \leq t \end{cases} \quad (8)$$



$C_{\text{exp}}^V(t)$ が定数とすると，リスク $R_{iV}(t)$ は以下になる。

\*右のc.f.を元に積分するだけ

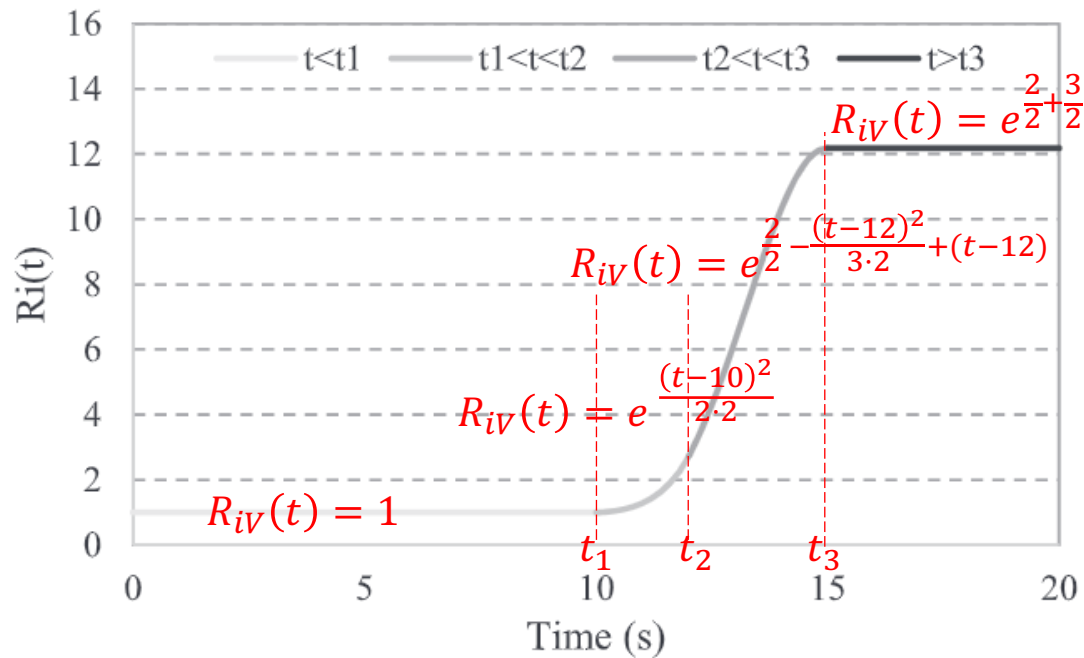
$$R_{iV}(t) = \begin{cases} 1 & t_0 \leq t < t_1 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}} (t-t_1)^2}{t_2-t_1} \right)} & t_1 \leq t < t_2 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}}(t_2-t_1)}{2} - \frac{C_{\text{max}} (t-t_2)^2}{t_3-t_2} + C_{\text{max}}(t-t_2) \right)} & t_2 \leq t < t_3 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}}(t_2-t_1)}{2} + \frac{C_{\text{max}}(t_3-t_2)}{2} \right)} & t_3 \leq t \end{cases} \quad (9)$$

c.f.  $R_i(t) = R(t_0) e^{\int f(x(t))dt} \quad (3)$

$$f_V(t) = \sum_j c_j^V(t) C_j^V(t) \quad (7)$$

## 3.2 Variable intensity cues(3)

例えば,  $c_{\text{exp}}^V = 1, C_{\text{max}} = 1, t_1 = 10\text{s}, t_2 = 12\text{s}, t_3 = 15\text{s}$  とすると,  
 $R_{iV}(t)$  は下図のようになる.



式(9) 再掲

$$R_{iV}(t) = \begin{cases} 1 & t_0 \leq t < t_1 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}}}{t_2 - t_1} \frac{(t - t_1)^2}{2} \right)} & t_1 \leq t < t_2 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}}(t_2 - t_1)}{2} - \frac{C_{\text{max}}}{t_3 - t_2} \frac{(t - t_2)^2}{2} + C_{\text{max}}(t - t_2) \right)} & t_2 \leq t < t_3 \\ e^{c_{\text{exp}}^V \left( \frac{C_{\text{max}}(t_2 - t_1)}{2} + \frac{C_{\text{max}}(t_3 - t_2)}{2} \right)} & t_3 \leq t \end{cases}$$

## 他agentの行動が及ぼすリスクへの影響

- 7. 他者の状態が、認知リスクに影響する
  - 8. 他者からの影響度は、役割(role)や同じグループに属するかで変わる
- より、他agentから影響を受けるが、他agentの属性との関係性によって影響度は変わる

他agentの属性 $p$ は、

- $PG$ : personal group, 家族や友達など
  - $SM$ : staff members, 施設のスタッフ等
  - $PE$ : peer evacuees, その他認知できる避難者
- Affiliation theory  
Role rule theory

に分類される

$N_{N,p,i}(t), N_{I,p,i}(t), N_{E,p,i}(t)$ を、

agent  $i$ が認知する、時刻 $t$ における、Normal, Investigating, Evacuatingそれぞれの状態の属性 $p$ の人数とする

Socialな影響は、各属性の人々の集合からの影響の和（ $p$ に関する和）として表す

$$f_S(t) = \sum_{p=PG,SM,PE} c_p^S C_p^S (N_{p,i}(t)) \quad (10)$$

$$N_{p,i}(t) = N_{p,i} \left( N_{N,p,i}(t), N_{I,p,i}(t), N_{E,p,i}(t) \right)$$

属性 $p$ の、各状態にある人数を引数とする

$N_{p,i}(t)$ は様々な定式化が考えられる。一例はReneke(2013)[22]を参考に（見にくいので $t$ 省略）,

$$N_{p,i}(t) = \left( \frac{N_{E,p,i} + N_{I,p,i}}{N_{E,p,i} + N_{I,p,i} + N_{N,p,i}} \right)^A \quad (11)$$

$A$ は、  
 $A < 1$ であれば、初期に避難・準備を始めた人は影響力が大きく、  
 $A > 1$ であれば、遅く始めた人びとに影響を強く受けることを示すパラメータ

解釈

属性 $p$ の人全員がnormalだったら、 $p$ の人々からは影響を受けない  
 避難や準備を始めた人の割合が多いほど、認知リスクに強く影響する



## 複数のcuesがあるときの、相乗効果

例えば、火災警報と音声警報が同時に鳴ったら、聞こえづらく効果が、それぞれが一個ずつ鳴る効果の和よりも薄まるかも

3.1-3.3と相乗効果をあわせた式 $f(t)$ は、

\*論文では、相乗効果の関数はcombinationの意味で $f_c$ だったのですが、constantで $f_c$ としてしまったため、mergedの $f_m$ としました

$$\begin{aligned}
 f(t) &= f_c(t) + f_v(t) + f_s(t) + \text{[相乗効果項]} \\
 &= \sum_j c_j^c(t) C_j^c(t) + \sum_j c_j^v(t) C_j^v(t) + \sum_{p=PG,SM,PE} c_p^s C_p^s(N_{p,i}(t)) + \sum_{j_1, j_2 (j_1 \neq j_2)} f_m(\mathbf{c}_c | C_{j_1}^{a_1}, C_{j_2}^{a_2}) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$a_1, a_2$ はC, V, Sのどれか

## 個人による違い

Agent  $i$ の属性を $k$ としたとき，各パラメータ $c_j^C, c_j^V, c_p^S$ が $k$ により異なる，と設定が可能

また，Reneke[22]の 6. 過去の経験により，cueを受け取った時の認知リスク変化具合が変わりうる により，過去の経験項( $PK_i$ ; prior knowledge)を考えることも可能

$$f(t) = \sum_j c_{j,k}^C(t) C_j^C(t) + \sum_j c_{j,k}^V(t) C_j^V(t) + \sum_{p=PG,SM,PE} c_{p,k}^S C_p^S(N_{p,i}(t)) + \sum_{j_1, j_2 (j_1 \neq j_2)} f_m(\mathbf{c}_c | C_{j_1}^{a_1}, C_{j_2}^{a_2}) + PK_i \quad (16)$$

$$PK_i = \begin{cases} 0 & Q_j(t) = 0 \\ pk_i & \text{else} \end{cases}$$

$Q_j(t)$ はcueのうちのどれか． $pk_i$ は $pk_i > 0$ なら用心深く避難しやすい人， $pk_i < 0$ なら無関心な人  
本来なら， $pk_i$ のモデル化が必要だが，本研究ではそこまでは行わない

### Intrinsic behavioural uncertaintyの存在

観測者は全ての変数を観測できるわけではないので、

「似ている」ように見えるagentも、異なるリスクを認知している

▷ 誤差項の導入

$$\bar{R}_i(t) = R_i(\boldsymbol{\beta}|t) + \varepsilon \quad (17)$$

ただし、 $\boldsymbol{\beta}$ はパラメータベクトル

### Perceptions and Preferences Behavioural Uncertaintyの存在

Agentごとに、各変数に対する評価（パラメータ）が異なる

▷  $\boldsymbol{\beta}$ に確率分布 $pdf(\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{\theta})$ を仮定

ただし、 $\boldsymbol{\theta}$ は確率分布の形を規定するパラメータ

\*logit型のモデルであれば、mixed logit modelということ

## Calibrationとはつまり、推定方法

$NS_{i,t}, IS_{i,t}, ES_{i,t}$  を、時刻  $t$  の agent  $i$  の状態がそれぞれ normal, investigating, evacuating のときに 1 をとるダミー変数とする

右図のように、閾値が  $R_I, R_E$  のとき、

$$\begin{aligned} P(\boldsymbol{\beta} | NS_i = 1) &= P(-\infty < \bar{R}_i(t) < R_I) \\ P(\boldsymbol{\beta} | IS_i = 1) &= P(R_I < \bar{R}_i(t) < R_E) \\ P(\boldsymbol{\beta} | ES_i = 1) &= P(R_E < \bar{R}_i(t) < \infty) \end{aligned} \quad (19)$$

誤差項にガンベル分布を仮定すれば、おなじみのlogit型

Evacuee  $i$  が観測行動と同じ行動をとる確率は、

$$\bar{P}_i = \prod_{t=1}^T \left( NS_{i,t} \cdot P(\boldsymbol{\beta} | NS_i = 1) + IS_{i,t} \cdot P(\boldsymbol{\beta} | IS_i = 1) + ES_{i,t} \cdot P(\boldsymbol{\beta} | ES_i = 1) \right) \quad (21)$$

\*ただの尤度です

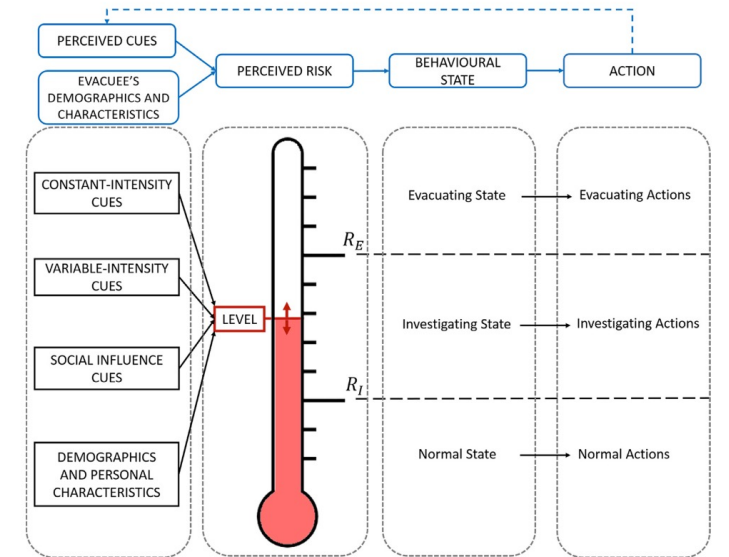


Fig. 1. Conceptual model describing how the perceived cues and agents' demographics and personal characteristics affect evacuees' actions.

3.6のPPBUを考える時,  $\boldsymbol{\beta}$ の分布も考慮すると式(21)は

$$\overline{MP}_i = \int \bar{P}_i(\boldsymbol{\beta}) pdf(\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\beta} \quad (22)$$

Closed-formじゃないので, モンテカルロsimulationでsimulation of  $\overline{MP}_i = \overline{\overline{MP}_i}$ を求める

→  $pdf(\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{\theta})$ からR回引いたうちの1つを $\boldsymbol{\beta}_l$ をとすると,

$$\overline{\overline{MP}_i} = \frac{1}{R} \sum_{l=1}^R \bar{P}_i(\boldsymbol{\beta}_l) \quad (23)$$

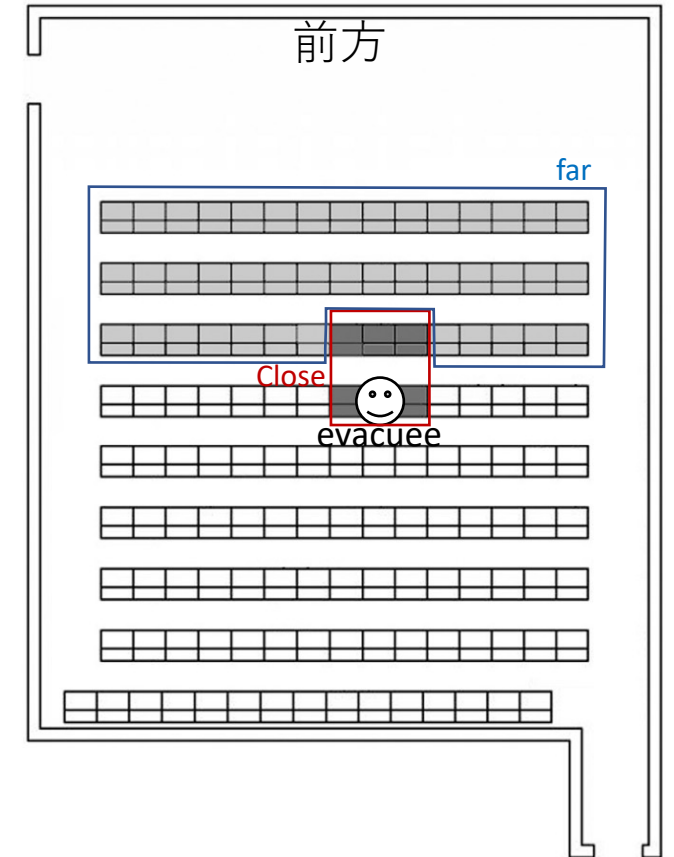
対数尤度 $\log(L)$ は

$$\log(L) = \sum_{i=1}^N \log \overline{\overline{MP}_i} \quad (24) \quad \triangleright \text{これを最大化}$$

## 映画館での火災避難訓練に適用

- データは動画解析によって得た
- Evacueeは全員normalで開始し、服や持ち物の整理をはじめたらinvestigatingに移行、立ち上がったたらevacuating
- 1秒ごとに認知リスクを更新し、状態が決まる
- 音声による警報(constant intensity cue)の開始時刻が $t = 0$
- Social influence cuesは、peer evacuees who are far, peer evacuees that are closeと、personal group

\*Variable intensity cue(3.2), 相乗効果(3.4), 個人属性(3.5), mixed logit(3.6のPPBU)は実装なし



認知リスクの確定項を以下と設定

$$R_i(\boldsymbol{\beta}|t) = e^{c^C(t)} + c_{PE,F}^S \left( \frac{N_{PE,F,E} + N_{PE,F,I}}{N_{PE,F,E} + N_{PE,F,I} + N_{PE,F,N}} \right)^A + c_{PE,C}^S \left( \frac{N_{PE,C,E} + N_{PE,C,I}}{N_{PE,C,E} + N_{PE,C,I} + N_{PE,C,N}} \right)^A + c_{PG}^S \left( \frac{N_{PG,E} + N_{PG,I}}{N_{PG,E} + N_{PG,I} + N_{PG,N}} \right)^A$$

音声警報
Peer Evacuee, Far
Peer Evacuee, Close
Personal group

## 推定結果

**Table 2**  
Estimated model.

Parameter	Value	p-value
Total number of observations = 9972		
Lo = -12,882		
LM = -1825		
AdjR <sup>2</sup> = 0.86		
R <sub>I</sub>	5.558	0.000
R <sub>E</sub>	5.953	0.000
c <sub>a</sub> <sup>S</sup>	0.343	0.000
c <sub>PE,F</sub> <sup>S</sup>	0.245	0.000
c <sub>PE,C</sub> <sup>S</sup>	1.020	0.000
c <sub>PG</sub> <sup>S</sup>	0.177	0.000
A	0.100	0.000

L<sub>0</sub>は、constant-only モデルとあるが、なんのconstantか、R<sub>I</sub>, R<sub>E</sub>の設定か等が不明

## 考察

認知リスクは1で開始する為、R<sub>I</sub> = 5.558, R<sub>E</sub> = 5.953の結果より、一度investigatingに遷移し、警戒態勢に入ったら、すぐ避難することがわかった  
→避難遅れへの対策として、まず警戒させるような政策が必要？Normalの時だけ影響がある項を考慮してもよかったかも。

他者がinvestigate/避難していると、自分のリスクも上がり、近い人の影響が大きい

A < 1より、初期の人の与える影響が大きい

- 各cueに対し，パラメータを仮に設定したときのリスク等をグラフで示していたのがわかりやすかった
  - 初期尤度はベンチマークなので，説明が不十分なのは少々問題では，，？
  - 実証分析では一部の変数しか取り入れられていない．特に $PK_i$ とか見てみたかった
  - 推定後配分をして，Personal groupsの人数の感度を見たい
- 
- **Social**項は，「見える」人からの影響のみを取り入れる簡単な仮定を導入している．動画解析だけでモデル化ができるのは利点！  
ただ，避難時間がもう少し長いと\*右図参照，電話とかありもう少し複雑化するはず．だけど小さいコミュニティこそrule role theoryは生きそう．
  - このような定式化で，動的モデルに組み込むとしたら，将来効用の計算ではsocialは組み込まなくて，物理的な危険度とかのみで判断するけど，次の意思決定の判断では入れる，みたいにするといいのかも．

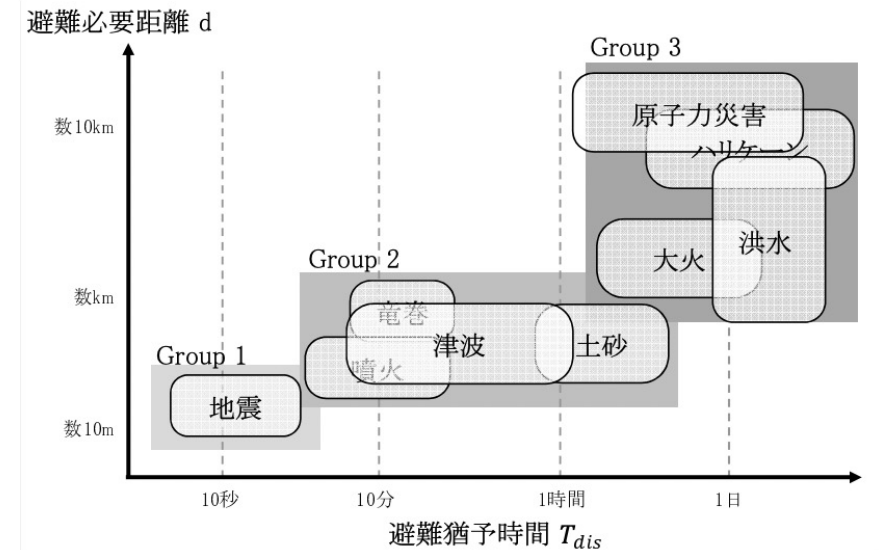


図 1.1 災害種別と避難猶予時間，必要距離の整理  
浦田さんのD論より



- [22] P.A. Reneke, Evacuation Decision Model, 2013 <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.7914>
- [25] E. Ronchi, P.A. Reneke, R.D. Peacock, A method for the analysis of behavioural uncertainty in evacuation modelling, *Fire Technol.* 2013.
- [30] R. Lovreglio, D. Borrim E. Ronchi, A. Fonzone, L. Dell'Olio, The need of latent variables for modelling decision-making in evacuation simulations, *in: IX Intl. Workshop on Planning and Evaluation, Bari, 2015.*
- [26] D. Canter, J. Breaux, J. Sime, Domestic, multiple occupancy, and hospital fires, *Fires and human behaviour* 8, 1980. pp.117-136.
- [27] D. Tong, D. Canter, The decision to evacuate: a study of the motivations which contribute to evacuation in the event of fire, *Fire Safety Journal*, Vol.9(3), 1985. pp.257-265.
- [28] J.D. Sime. Affiliative behaviour during escape to building exits, *Journal of environmental psychology* Vol.3(1), 1983. pp.21-41.