

新道路研究会(2021年度第1回)

災害避難・復旧期における
行動分析・評価

2022年2月18日

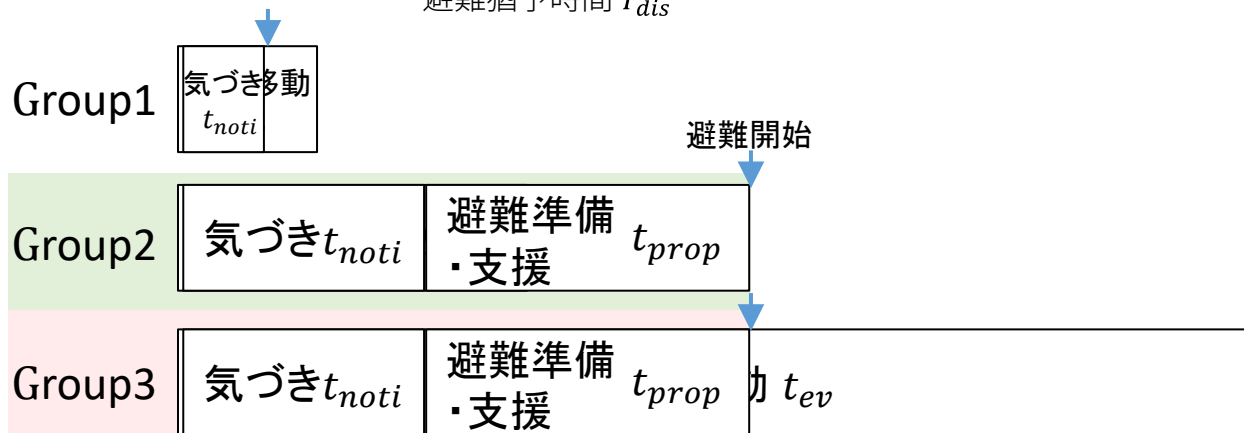
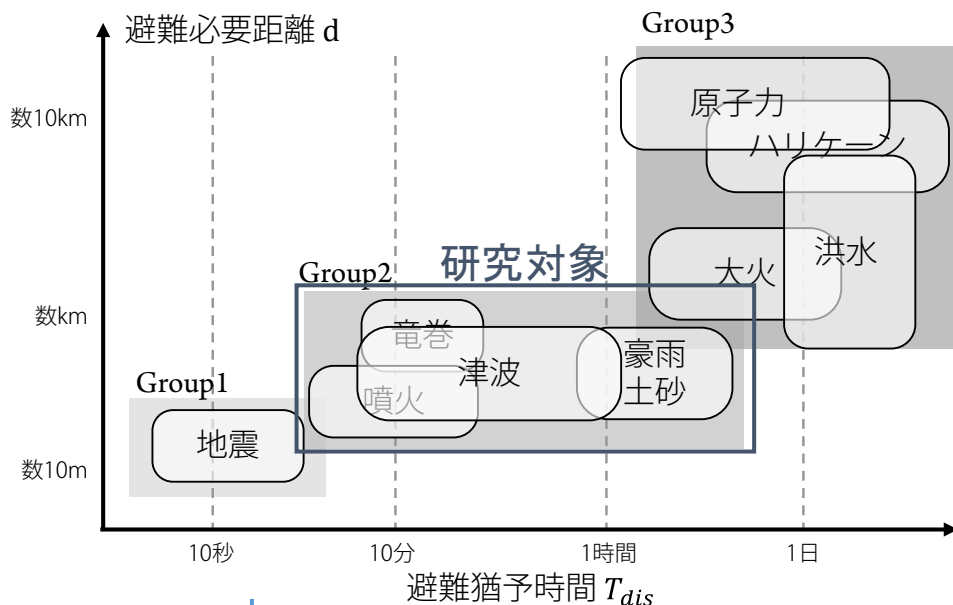
東京大学社会基盤学科／復興デザイン研究体 浦田淳司

避難行動

津波避難行動分析の目的

大きな目標：住民の避難完了の早期化

⇒避難開始までの時間短縮による影響が大きい



東日本大震災時の津波避難行動分析

津波避難を想定した避難路、避難施設の配置及び避難誘導について(H25,都市局)

○津波避難実態調査の調査結果を踏まえて、実態に即した津波避難開始までの時間を短くする措置をする

津波到達前に避難を開始した人（た、全体の50%が15:00までに避難「津波が来ると思った」人は平均人は発災後26分後であり、平均避難また、平野部は高台が近傍にあるこれらの実態を参考にしつつ津波めに重要であると考えられる。

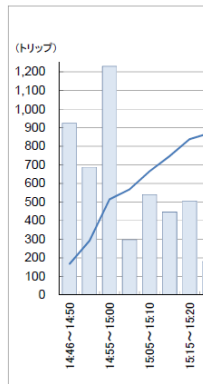


表 項目別 避難開始時間

項目	区分	対象者数	平均	50%の人が避難を開始した時間	80%の人が避難を開始した時間
全体		5,524人	22分後	14分後	34分後
津波への警戒	津波は必ず来ると思った	3,105人	18分後	14分後	29分後
	津波は来るかもしれないと思った	2,411人	26分後	24分後	42分後
	津波は来ないだろうと思った				
差			8分	10分	13分

* 分析対象 ; 津波到達前に避難を開始した人 (5,524人)

区分	項目	地域区分				(平均)
		高台近傍		平野部		
		市街地 (%)	農漁村 (%)	市街地 (%)	農漁村 (%)	(%)
1. 津波に対する警戒・危機意識	①揺れ直後、津波は必ず来ると思った	42.7	44.8	24.2	28.3	37.3
	②津波ハザードマップを見たことがある	39.2	40.0	24.0	31.6	35.0
2. 事前準備 (複数回答)	①避難場所・避難経路の確認	33.7	33.2	25.9	34.6	30.0
	②津波避難訓練に参加	30.6	31.9	15.2	28.9	25.9
	③津波ハザードマップの確認	13.5	13.8	5.2	7.8	11.0

* 分析対象 ; 津波到達前に避難を開始した人 (5,524人)

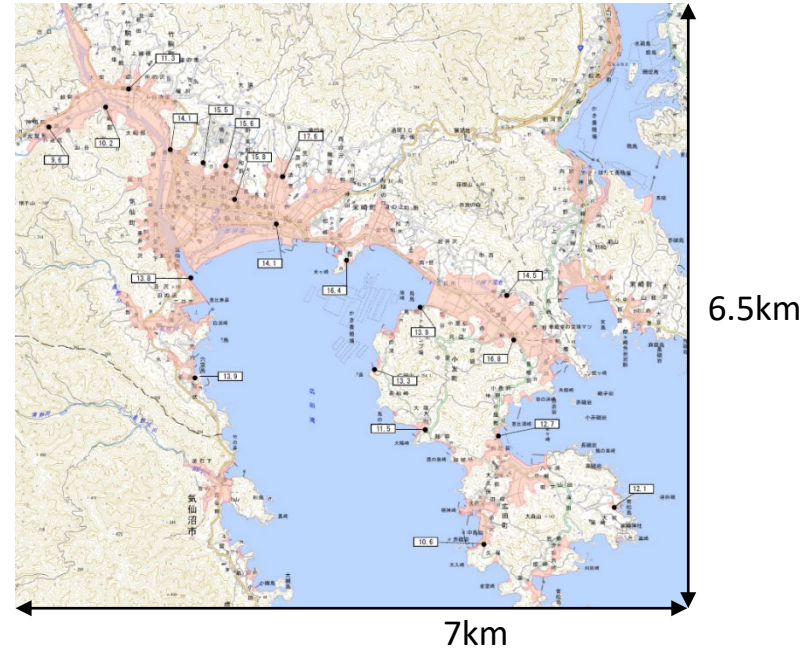
陸前高田市避難行動データ

陸前高田市の東日本大震災での被害概況等

当時の人口	24,246人
死者及び行方不明者	1,771人
津波浸水面積	13km ²
流失家屋敷数	7,912棟

陸前高田市(2014)より

浸水状況



避難行動調査

表 東日本大震災の津波被災現況調査(国交省都市局)

調査日時	2011年9月下旬～12月
調査対象	津波浸水被害を受けた青森・岩手・宮城・福島・茨城・千葉6県の太平洋側62市町村
調査方式	避難所, 仮設住宅, 自宅等への聞き取り
回答者数	10,603名(陸前高田市は227名)
調査項目	地震発生から日没までの行動, 当日・事前の津波認識, 警報等の情報入手

表 羽藤研究室避難行動・交通行動調査 概要

調査日時	2012年9月, (2013年3月)
調査対象	陸前高田市内の行政区の地理的バランスを考慮して抽出した世帯
調査方式	1)訪問聞き取り調査, 2)郵送配布回収調査
回答者数	1) 31名, 2) 342名
調査項目	地震発生後1時間の行動, 日常的な一日の過ごし方, 公共施設・公共交通への要望



避難行動調査表 1

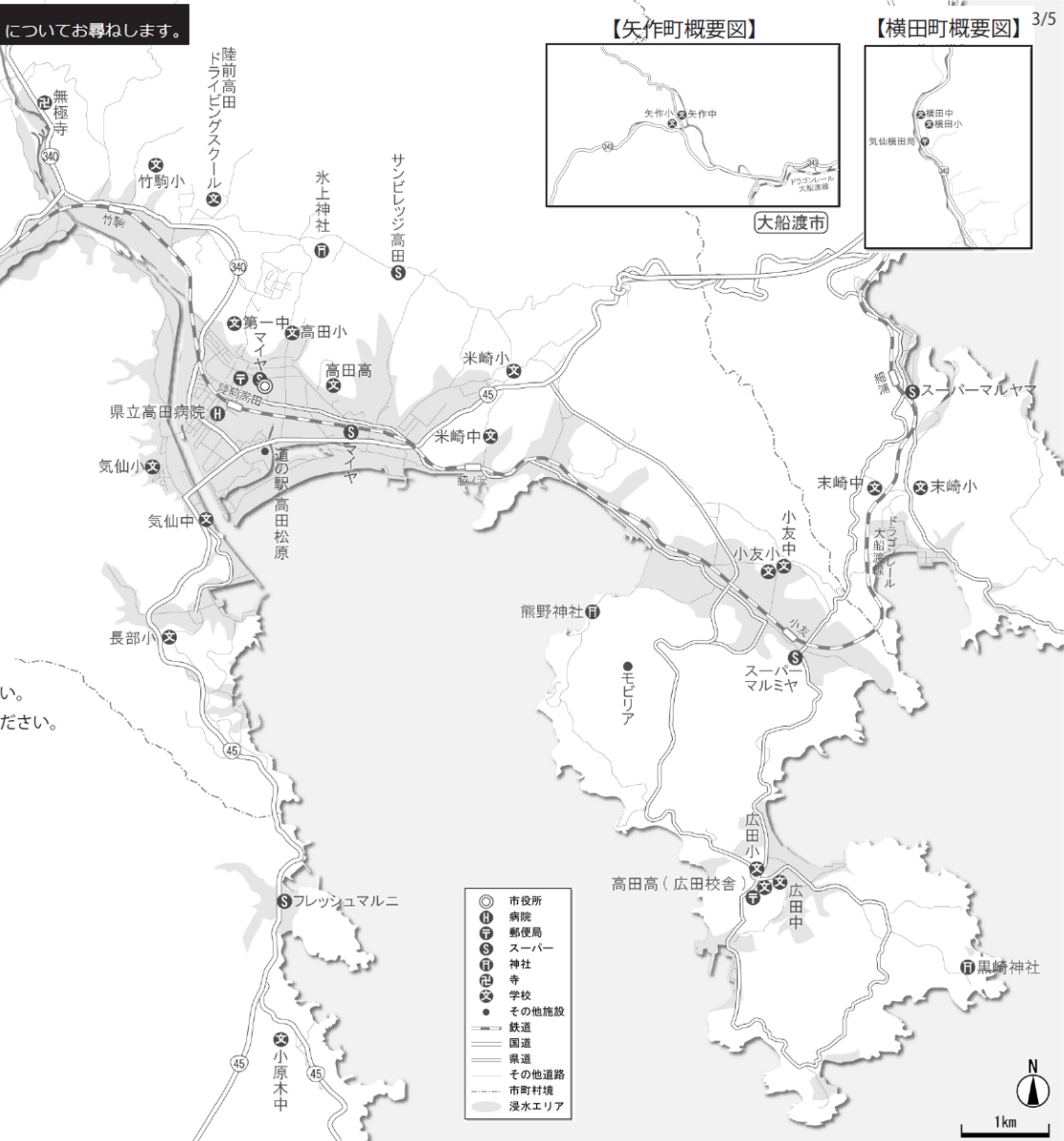
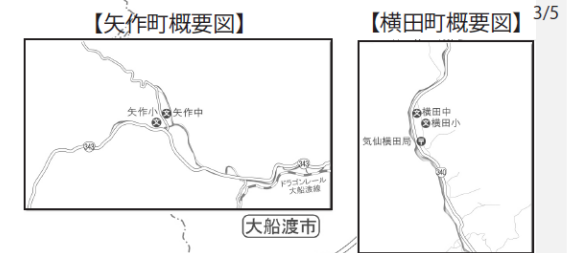
将来の防災計画に役立てるため、東日本大震災発生時の避難行動 についてお尋ねします。

問 8 :地震発生(14時46分頃)から1時間 の間に、あなたが移動した場所や行動が変化した場所(手段、目的、同行者の変化) (注) 及び移動経路について、下記の手順で覚えている範囲で地図にご記入ください。

注: 行動が変化した場所の例

- ① 目的の変化: 友人に会いに行こうとしたが、津波が見えたので避難を開始した
- ② 手段の変化: 歩いていたら、途中で知人の車に乗せてもらった
- ③ 同行者の変化: 移動している途中で、息子と合流した

※矢作町・横田町での移動は右上の【概要図】にご記入ください。
 ※地図の範囲外の場所へ移動された方は、可能なところまでご記入ください。
 ※移動距離が短く経路が記入できない場合は、移動先の番号のみご記入ください。



避難行動調査表2

将来の防災計画に役立てるため、東日本大震災発生時の避難行動 についてお尋ねします。

参考時刻	14時46分頃	地震発生
	15時23分頃	米崎港岸付近へ津波到達
	15時27分頃	姉齒橋の全橋桁流失
	15時28分頃	市役所付近へ津波到達

問 9-1：地図に記入した行動（地震発生から1時間の行動）について、あなたが移動した場所や行動変化した場所（手段、目的、同行者の変化）についてお尋ねします。下記の表のあてはまるものに ✓ をつけ、表の下の問いにお答えください。

施設の種類	最初にいた場所 地図に☆と記入	1番目に行った場所 地図に①と記入	2番目に行った場所 地図に②と記入	3番目に行った場所 地図に③と記入	4番目に行った場所 地図に④と記入	5番目に行った場所 地図に⑤と記入	
	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外	<input type="checkbox"/> 自宅 <input type="checkbox"/> 屋外
	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所	<input type="checkbox"/> 親戚・知人宅 <input type="checkbox"/> 高台・避難所
	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校	<input type="checkbox"/> 職場・学校
	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）	店舗（→店名：_____）
	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）	その他（→施設名：_____）

	(1) 出発時刻	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	
	(2) 到着時刻	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	時 _____ 分 _____ ころ	
	(3) 主な移動手段 (1つ)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 徒歩 <input type="checkbox"/> 車(運転) <input type="checkbox"/> 二輪 <input type="checkbox"/> 車(同乗) <input type="checkbox"/> その他(_____)
	(4) 移動目的 (複数回答可)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 家族・知人の安否確認 <input type="checkbox"/> 家族・知人の迎え <input type="checkbox"/> 地震・津波の情報収集 <input type="checkbox"/> 避難の準備 <input type="checkbox"/> 避難 <input type="checkbox"/> 被害確認・地震の後片付け <input type="checkbox"/> 避難の呼びかけ・手助け <input type="checkbox"/> その他(_____)
	(5) 同行者 (複数回答可)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： _____ 人 同行者の属性： <input type="checkbox"/> 家族(夫・妻) <input type="checkbox"/> 家族(父・母) <input type="checkbox"/> 家族(兄弟姉妹) <input type="checkbox"/> 家族(娘・息子) <input type="checkbox"/> 家族(祖父母) <input type="checkbox"/> 家族(孫) <input type="checkbox"/> 親戚 <input type="checkbox"/> 友人・同僚(学校・職場・ご近所等) <input type="checkbox"/> 近所の顔見知り <input type="checkbox"/> 同行者の知り合い <input type="checkbox"/> 近くにいた人(普段付き合いなし) <input type="checkbox"/> その他(_____)

問 9-2：上記で、あなたが最初に避難を目的の移動をした理由は、以下のうちのどれですか？最もあてはまるもの一つを選択してください。

一緒に避難しようと思った人と合流できたから 避難を手助けしてくれる人ができたから 津波が迫ってきたから

避難行動調査票（事前準備、リスク認知）

1. 地震発生前の事前準備、経験

- 事前準備
- 津波ハザードマップをみたか
- 津波サインをみたか

2. 地震発生時

- いた場所
- 家族がいた場所
- 揺れが収まった直後の行動
- いる場所が津波被害を受けると思ったか
- 津波がくると思ったか

3. 警報

- 警報類を聞いたか
- 聞いて、どう行動しようと思ったか

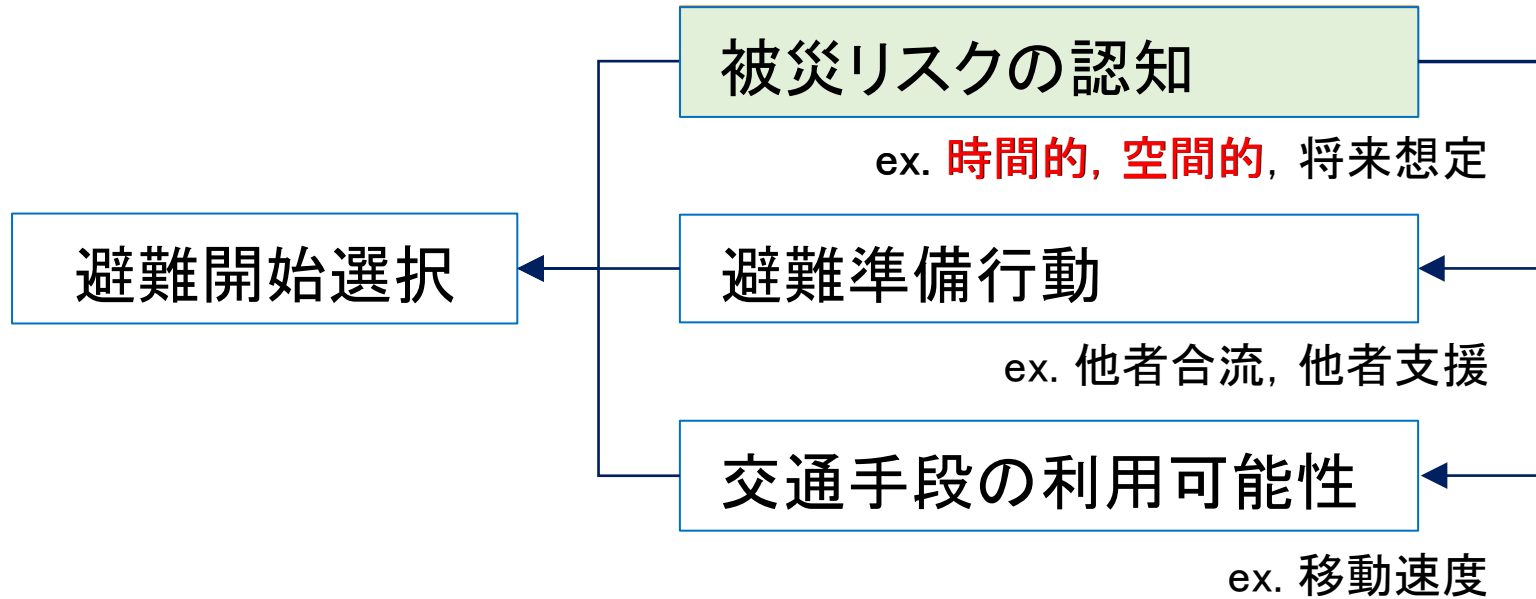
4. 避難の意思決定

- 避難が必要と思ったか
- どこに最初避難しようと思ったか

5. 避難時の交通手段、場所の決め方

- 車を使った理由
- 道路混雑の状況

避難開始選択への影響評価



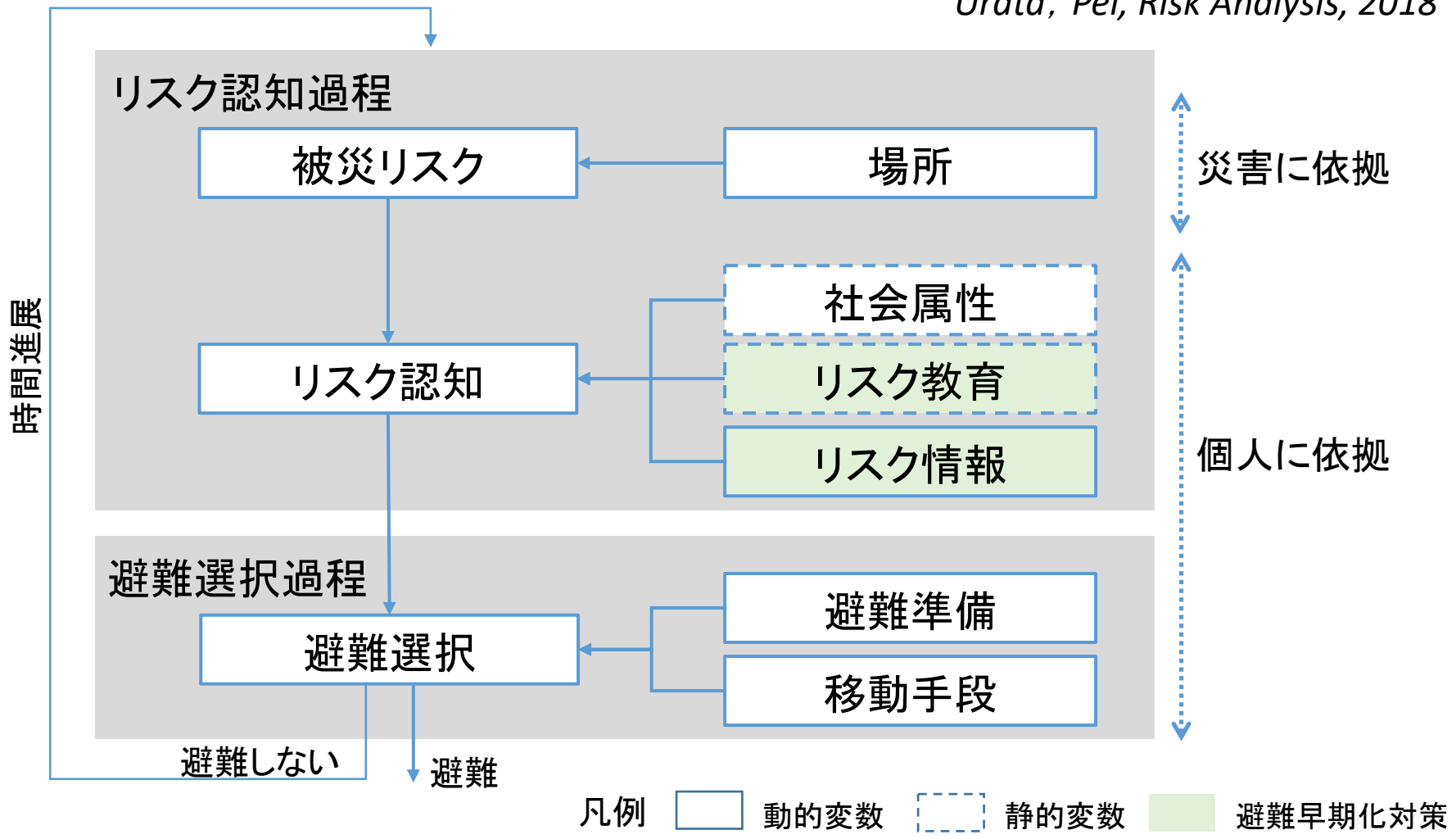
- 人は、災害の稀少性のため、真のリスクは知りえない
- 時間と滞在場所に応じたリスクを認知

研究目的

- リスク認知の影響要因と避難開始選択モデルを構築
- 避難促進対策の影響を予測・評価

モデルフレーム：リスク認知と情報・教育施策

Urata, Pel, Risk Analysis, 2018

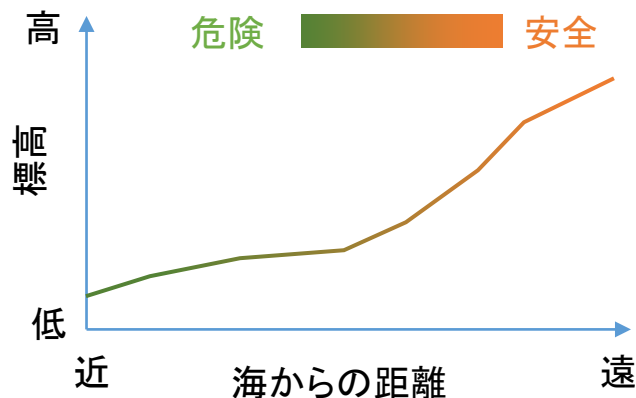


避難開始の**早期化対策**は**リスク認知への働きかけ**であり、
 リスク認知を導入することで直接的な評価が必要

リスク認知の捉え方(モデルのアイデア)

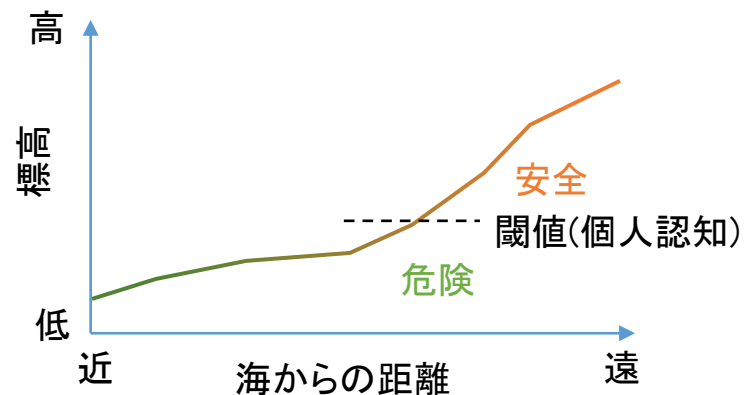
時中

空間上の被災リスク(連続量)



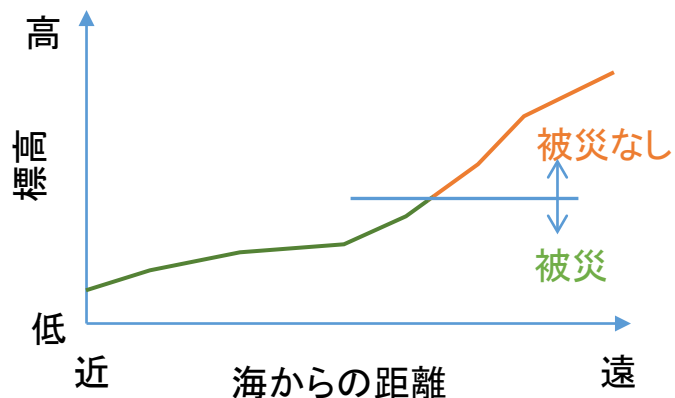
個人の認知は離散的

リスク認知(離散量)



時後

最終的な被災(離散量)



リスク認知モデルの定式化

■ オーダードロジットモデルを用いた定式化

リスク認知の確率(リスク認知クラスとなる確率)

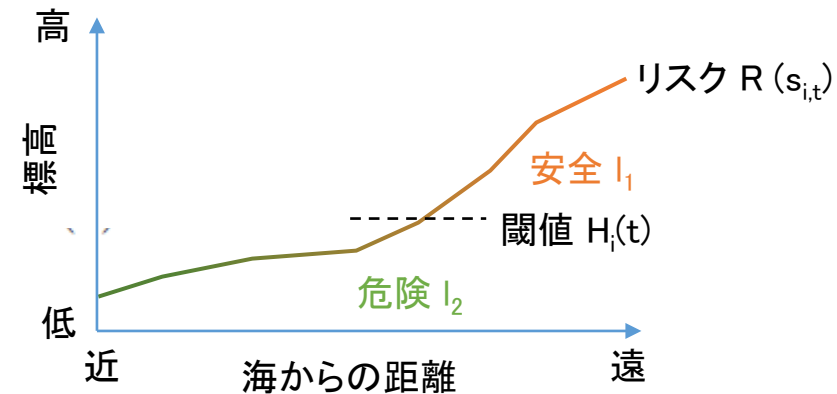
$$P_i^{l,t}(R(s_{i,t}) > H_i^l(t)) = \frac{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j)}{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j) + \exp(H_i^l(t))}$$

個人 i
時刻 t
空間 s
パラメータ β, γ

空間リスク
$$R(s_{i,t}) = \sum_j \beta_j s_{i,t}^j + \epsilon_{i,t}$$

個人の認知の閾値
$$H_i^l(t) = \sum_k \gamma_k h_{i,t}^k + \sigma_{i,t}$$

リスクに関する誤差項 ϵ : i.i.d ガンベル分布

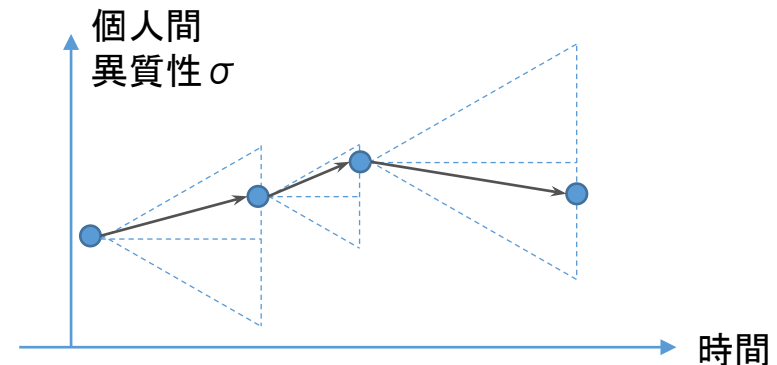


■ 個人間異質性 σ を時間累積型(ブラウン運動)として導入

$$\sigma_{i,t} - \sigma_{i,t'} \sim \mathcal{N}(0, t - t') \quad (t > t')$$

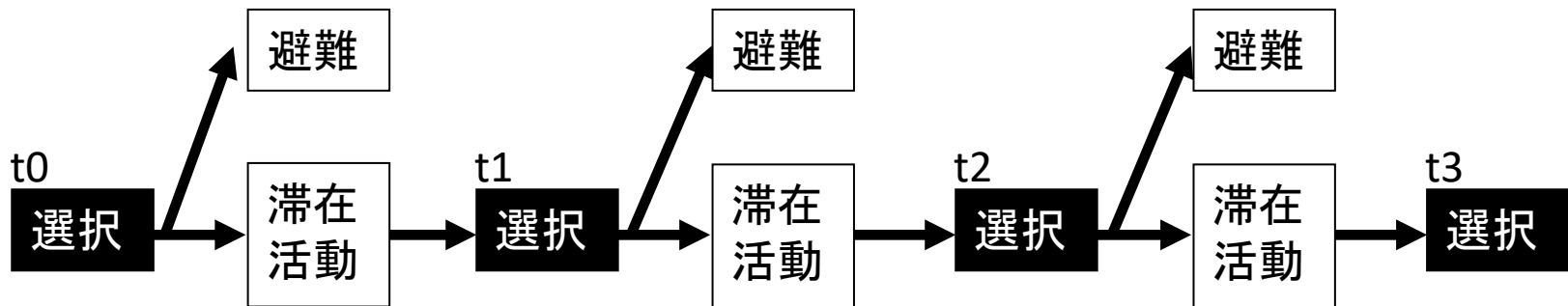
リスク認知の確率(リスク認知クラス)

$$P_{m,i}^{l,t} = \int P_i^{l,t} f(\sigma|\phi) d\sigma$$



避難開始選択モデルの定式化

■ 逐次的な避難選択を仮定 (Fu&Wilmot(2004))



■ リスク認知クラスを導入した避難選択

避難選択確率

(避難または未避難の選択)

$$P_i^{ev}(t) = \sum_l P_i(ev|l, t) P_{m,i}^{l,t}$$

リスク認知クラス l の時の
避難選択確率

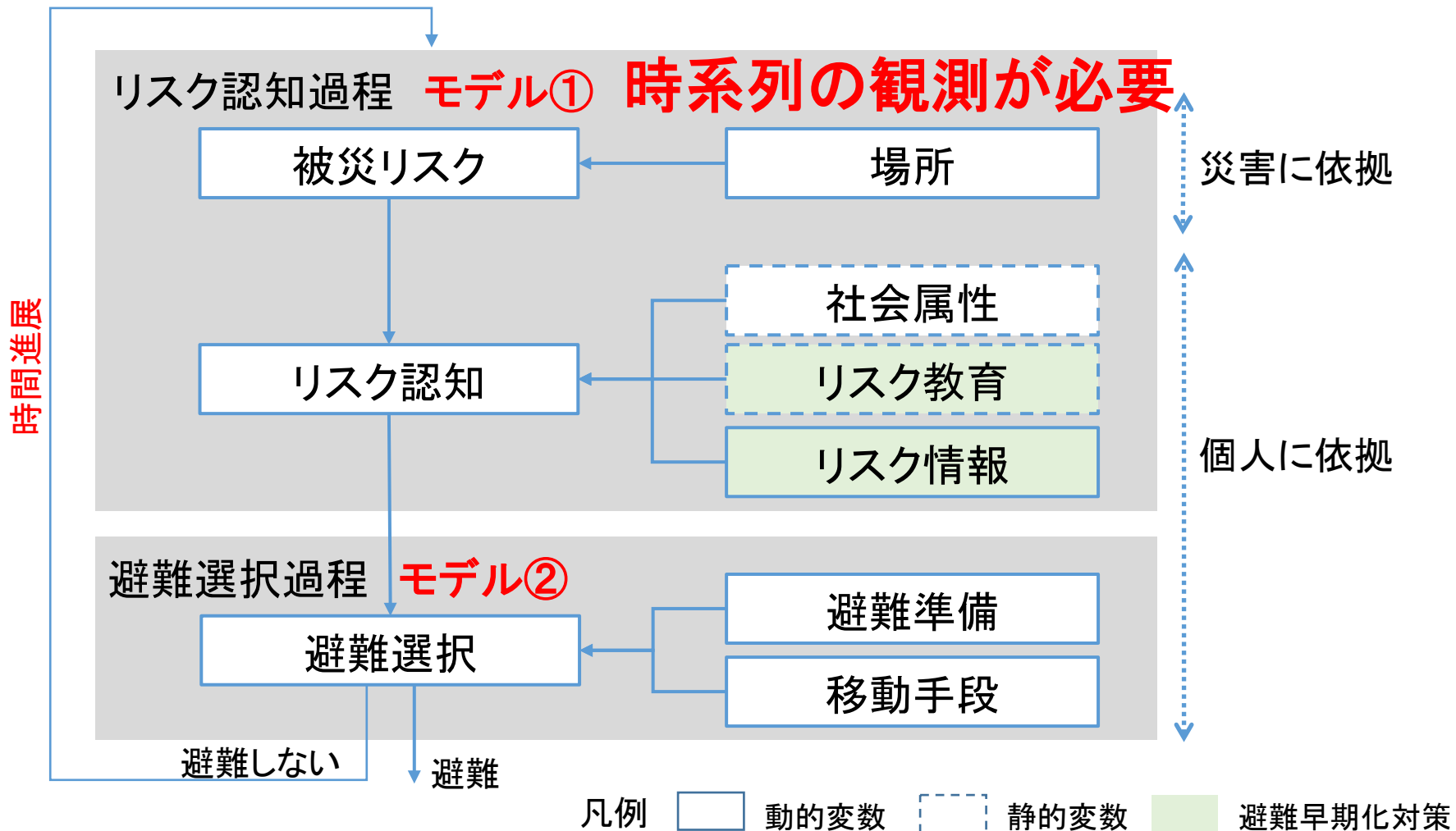
$$P_i(ev|l, t) = \frac{\exp(V_{i,l}^{ev}(t))}{1 + \exp(V_{i,l}^{ev}(t))}$$

リスク認知クラス l の時の
避難選択の効用

$$V_{i,l}^{ev}(t) = \sum_j \alpha_l^j x_{i,t}^j + \nu_{i,l,t}$$

x : 個人属性, ν : 誤差項 (i.i.d ガンベル分布)

リスク認知をモデル化するには



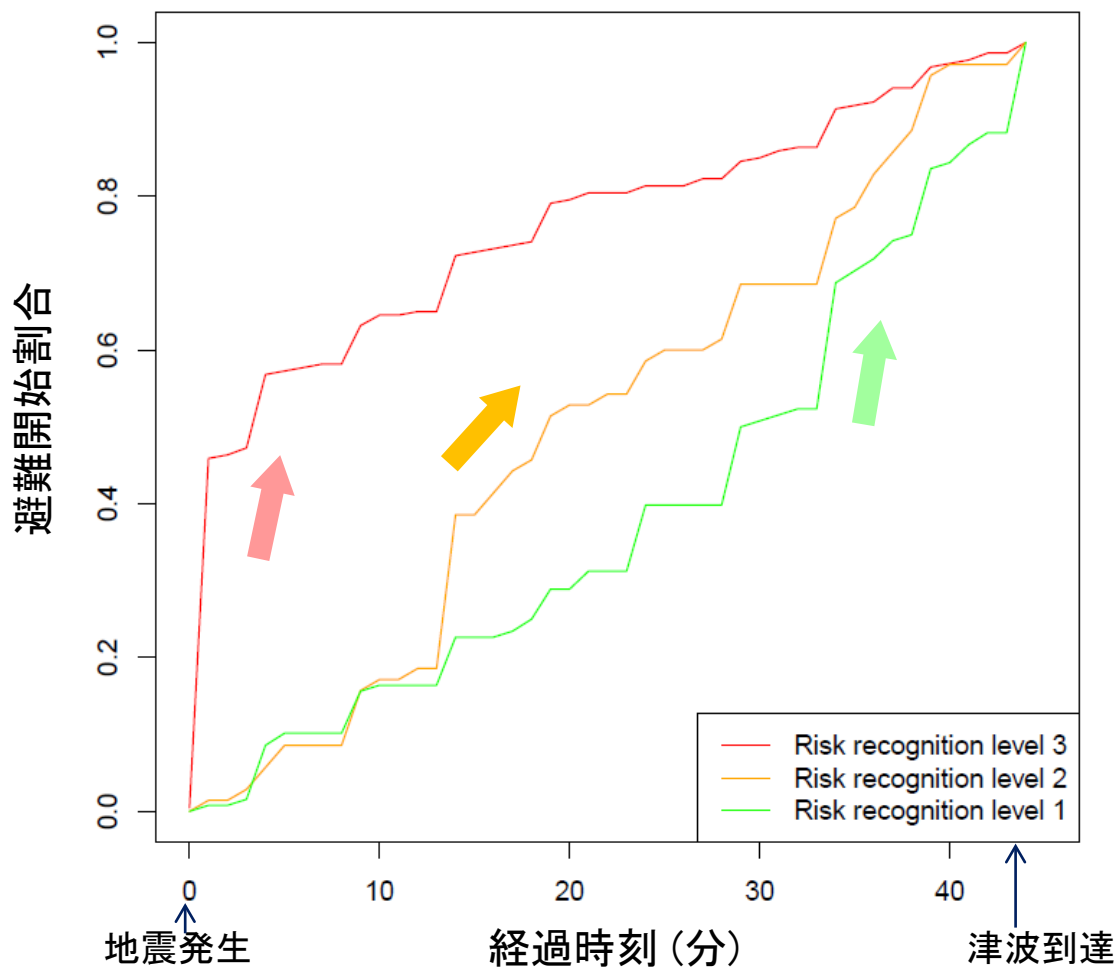
リスク認知の避難開始への影響

Q3:地震の揺れの直後、大津波警報を聞く前にあなたのいた場所に津波が来ると思いましたか。

リスク認知レベル3：津波は必ず来ると思った

リスク認知レベル2：津波は来るかもしれないと思った

リスク認知レベル1：津波は来ないだろうと思った、津波のことは考えなかった



リスク認知に関する質問項目の課題

Q3: 地震の揺れの直後、大津波警報を聞く前にあなたのいた場所に津波が来ると思いましたか。この中から1つだけお答え下さい。(14:46)

1. 必ず来る
2. 来るかも
3. 来ないだろう
4. 考えなかった

Q6:地震の直後に、岩手県・宮城県・福島県には大津波警報が出され、青森県・茨城県には津波警報から大津波警報に途中から切り替えられました。あなたは、この大津波警報をお聞きになりましたか。この中から1つだけお答え下さい。(津波警報・注意報は除きます。)

(警報発令は14:49, 無線に流れたのは15:11)

1. 聞いた
2. 聞かなかった
3. 覚えていない

1. → 1. すぐに避難すべき
2. したほうがいいかも
3. 海を見てから
4. 周囲をみてから
5. 危険なし
6. その他

Q7:地震のあと、市町村から「大津波が来るので避難するように」といった呼びかけを聞きましたか。この中から1つだけお答え下さい。(15:11/25min) ※回答選択肢はQ6と同じ

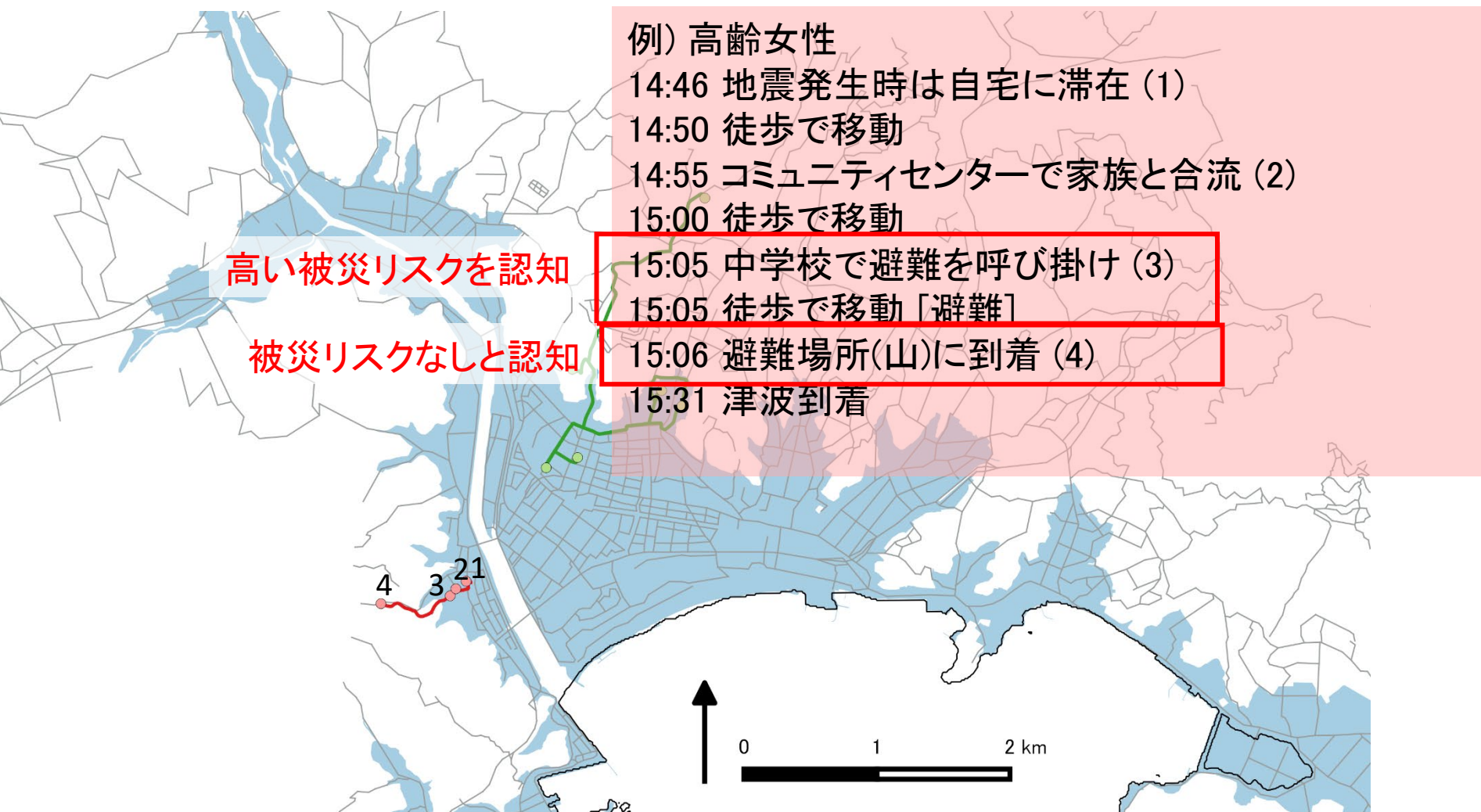
Q9:地震の後、津波が実際に押し寄せてくるまでの間、津波を警戒し避難しようと思いましたが。この中から1つだけお答え下さい。(15:23~/37min)

1. 思った
2. 思ったができなかった
3. 思わなかった

事後調査によるリスクを認知した時空間情報は不正確

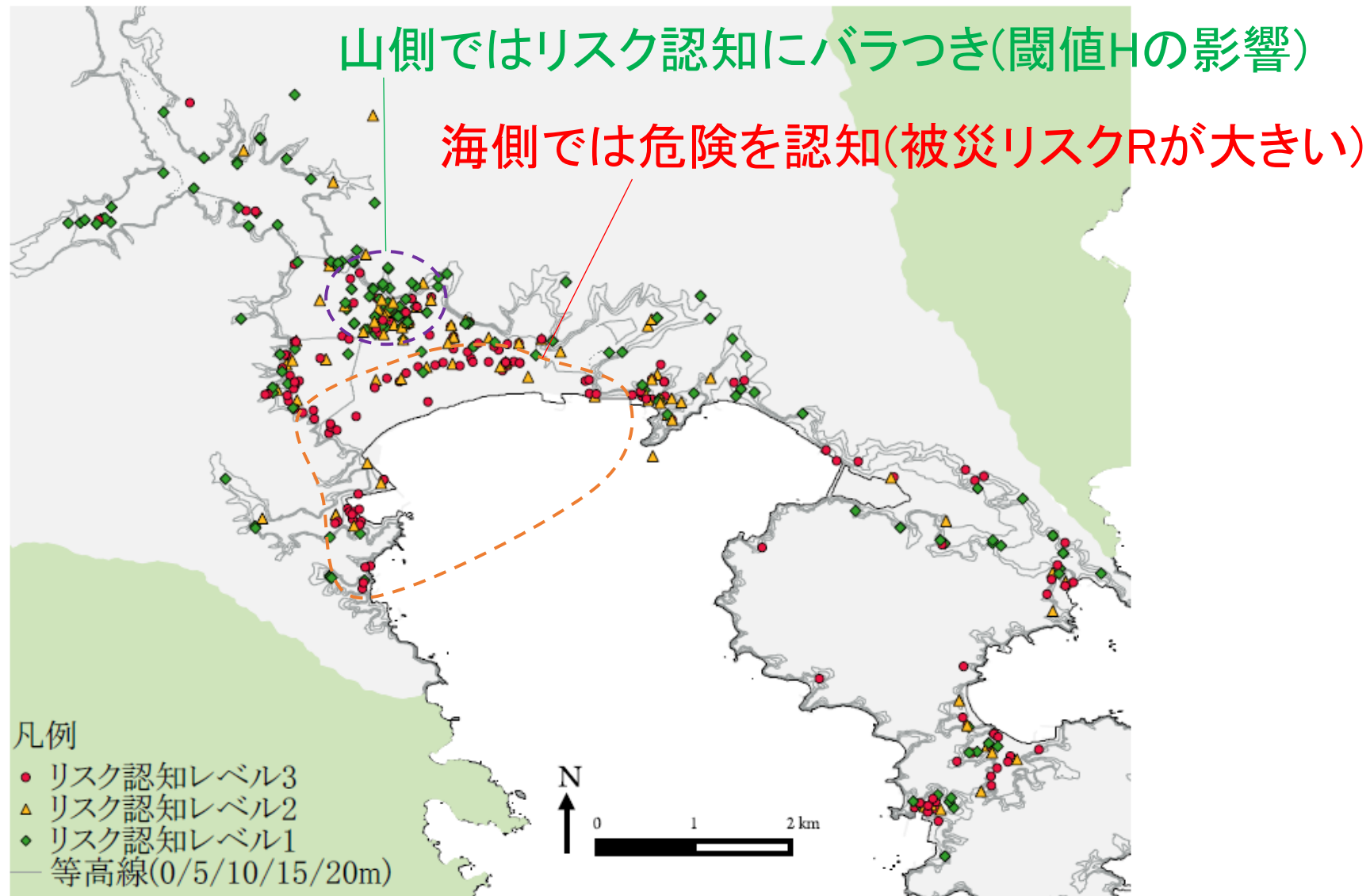
避難移動をリスク認知へと紐づけする工夫

避難トリップの発着点・時刻から避難者のリスク認知を取得



地震発生時のリスク認知の空間分布

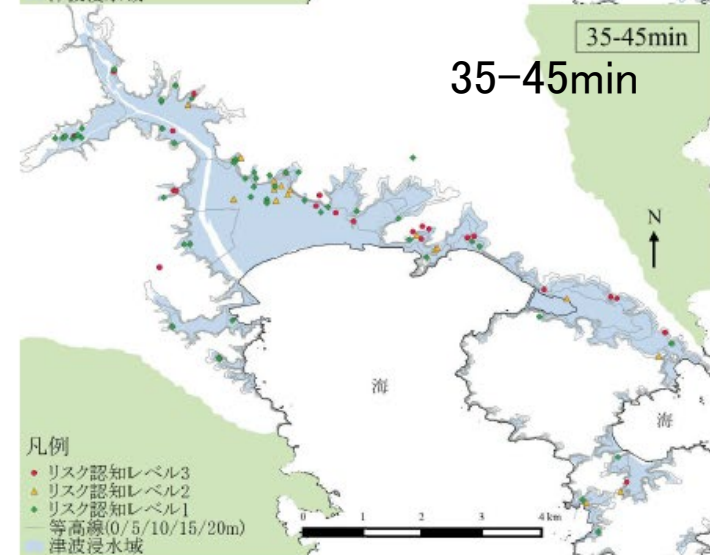
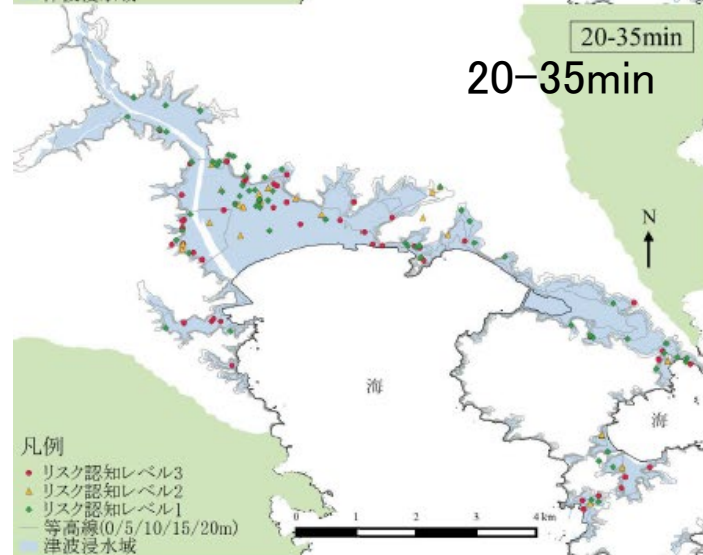
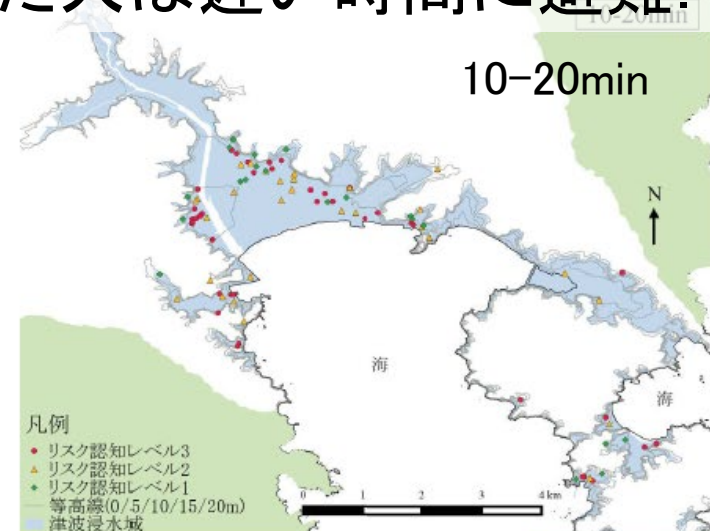
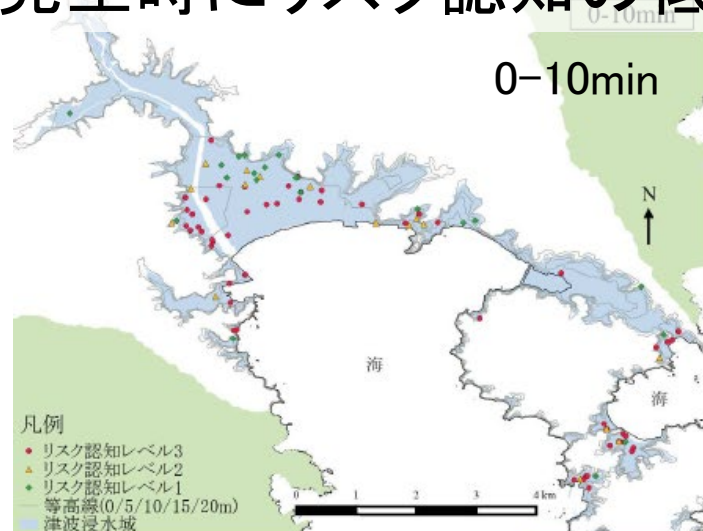
Q3(地震直後のリスク認知)を利用し、地震発生直後($t=0$)についてプロット



避難トリップの出発点の時空間分布

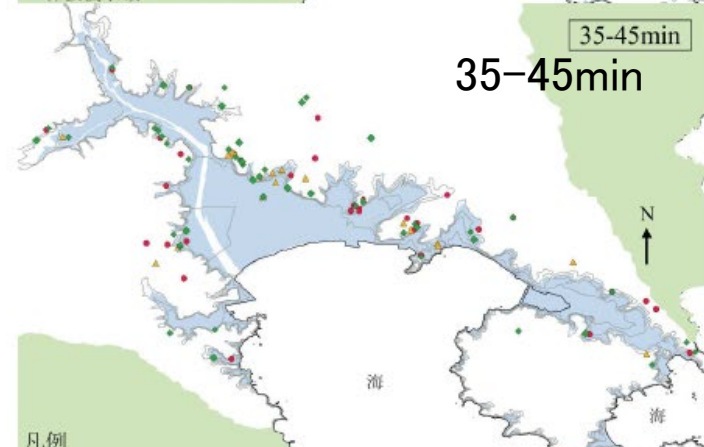
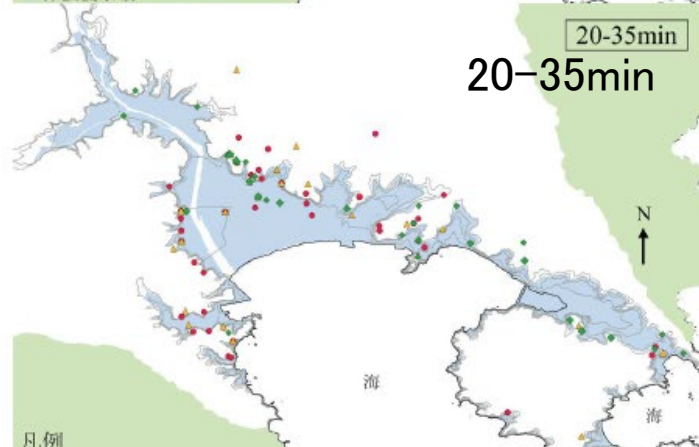
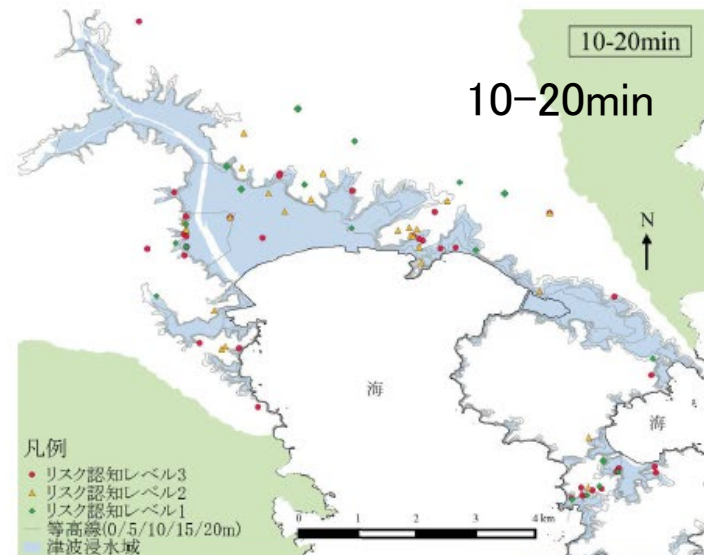
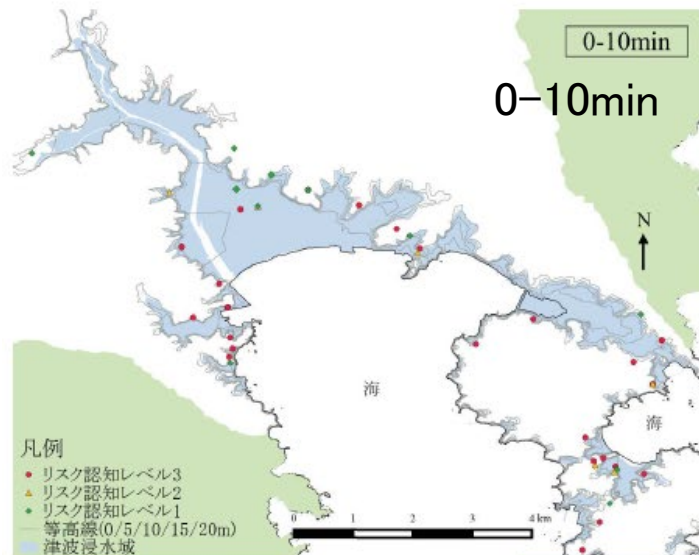
時間経過に伴って、山側に移動。

地震発生時にリスク認知の低かった人は遅い時間に避難。



避難トリップの到着点の時空間分布

早い時間帯では浸水域の内側に避難. 徐々に山側へ移動.



リスク認知の時系列変化⇔避難トリップの起終点を活用

リスク認知モデルのパラメータ推定

最尤法によるパラメータ推定

$$\max_{\beta, \gamma} \sum_i \sum_t \sum_l \log \delta_i^{l,t} P_{m,i}^{l,t}$$

$i \in$ 津波到着前に避難した人全員

$t \in$ $t=0$ (Q3より), 避難トリップ開始時, 避難トリップ終了時

l : リスク認知クラス(高・中・低)

δ : 認知クラス l の選択結果

リスク認知の確率(リスク認知クラス l)

$$P_{m,i}^{l,t} = \int P_i^{l,t} f(\sigma | \phi) d\sigma$$

リスク認知の確率(リスク認知クラス l となる確率)

$$P_i^{l,t}(R(s_{i,t}) > H_i^l(t)) = \frac{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j)}{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j) + \exp(H_i^l(t))}$$

空間リスク $R(s_{i,t}) = \sum_j \beta_j s_{i,t}^j + \epsilon_{i,t}$

個人の認知の閾値 $H_i^l(t) = \sum_k \gamma_k h_{i,t}^k + \sigma_{i,t}$

空間属性:
標高, 海からの距離

個人属性:
避難所等の知識, リスク情報入手
経過時刻

パラメータ推定結果 (リスク認知モデル)

説明変数	1. 静的 異質性なし		2. 静的 個人間異質性		3. 動的 異質性なし		4. 動的 個人間異質性		5. 動的 個人間時間異質性 ⁵	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
閾値 H (個人指標)										
避難所等の知識 ¹	0.05	0.39	0.05	0.37	-0.35	-1.96*	-0.36	-1.97*	-0.36	-2.01*
リスク情報入手 ¹	-0.42	-3.32*	-0.43	-3.35*	-0.83	-4.77*	-0.84	-4.79*	-0.83	-4.75*
経過時刻 [h] ²	-	-	-	-	-1.57	-4.10*	-1.58	-4.12*	-1.57	-4.07*
閾値の差	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*
σ (平均値)	-2.65	-10.70*	-2.62	-10.55*	-2.42	-9.26*	-2.41	-9.22*	-2.39	-9.14*
σ (標準偏差) ³	-	-	0.08	2.33*	-	-	0.07	0.65	0.14	1.85 [†]
被災リスク R (空間指標)										
標高 [m] ⁴	-1.40	-13.67*	-1.40	-13.68*	-1.50	-13.66*	-1.50	-13.66*	-1.50	-13.67*
海からの距離 [km] ⁴	-0.25	-4.66*	-0.25	-4.67*	-0.26	-4.79*	-0.26	-4.79*	-0.26	-4.79*
サンプル数	1246		1246		1246		1246		1246	
初期対数尤度	-1368.9		-1368.9		-1368.9		-1368.9		-1368.9	
最終対数尤度	-984.0		-981.2		-975.7		-975.5		-974.0	
CV 対数尤度	-990.0		-987.0		-982.8		-983.3		-981.0	
決定係数 R^2	0.281		0.283		0.287		0.287		0.289	
修正済決定係数 R^2	0.277		0.278		0.282		0.282		0.283	

Notes: * = 5% 有意, [†] = 10% 有意

¹ ダミー係数

² リスク情報未入手者のみ ³ 標高 4m ~ 20m の滞在者のみを対象

⁴ 対数値

⁵ ブラウン運動のメカニクスにより表現

リスク認知に事前知識・リスク情報が影響

避難開始選択モデルのパラメータ推定

最尤法によるパラメータ推定

$$\max_{\alpha} \sum_i \sum_t \log \delta_{i,t}^d P_i^d(t)$$

$t \in (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40)$

δ^d : $d=(\text{避難} \cdot \text{未避難})$ の選択結果

避難選択確率

(避難または未避難の選択)

$$P_i^{ev}(t) = \sum_l P_i(ev|l, t) P_{m,i}^{l,t} \quad l = (\text{高}, \text{中}) (\text{低}) \text{の2クラス}$$

リスク認知クラスIの時の
避難選択確率

$$P_i(ev|l, t) = \frac{\exp(V_{i,l}^{ev}(t))}{1 + \exp(V_{i,l}^{ev}(t))}$$

リスク認知クラスIの時の
避難選択の効用

$$V_{i,l}^{ev}(t) = \sum_j \alpha_l^j x_{i,t}^j + \nu_{i,l,t}$$

個人属性:

性別, 年齢

行動属性:

既トリップ数, 自宅滞在有無, 35分以降

パラメータ推定結果（避難開始選択）

説明変数	リスク認知なし (リスク・空間指標)		提案モデル				弾力性
	推定値	t 値	高認知クラス		低認知クラス		
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	
トリップ数	0.80	9.71*	1.17	6.90*	0.91	3.17*	1.09
同行人数 ¹	0.76	5.65*	0.96	5.86*			0.93
自宅経験 ¹	0.35	2.32*	0.48	2.72*			0.39
高齢女性 ¹	0.44	2.79*	0.48	2.03*	1.95	2.06*	0.61
35 分以降 ¹	1.62	7.05*	2.29	5.14*	(2.29) ³	(5.14) ³	2.68
定数項	-2.24	-10.47*	-2.32	-13.47*	-4.93	-4.92*	-
避難所等の知識 ¹			-	-	-	-	0.05
リスク情報入手 ¹			-	-	-	-	0.18
標高 [m] ²	-0.28	-2.82*	-	-	-	-	0.43
海からの距離 [km] ²	-0.24	-4.71*	-	-	-	-	0.02
個人間時間異質性	-	-	-	-	-	-	0.01
サンプル数		2067				2067	
初期対数尤度		-1432.74				-1432.74	
最終対数尤度		-355.26				-847.34	
CV 対数尤度		-865.00				-857.29	
定数項 R ²		0.103				0.099	
修正決定係数 R ²		0.217				0.402	

避難開始の早期化対策の評価が可能

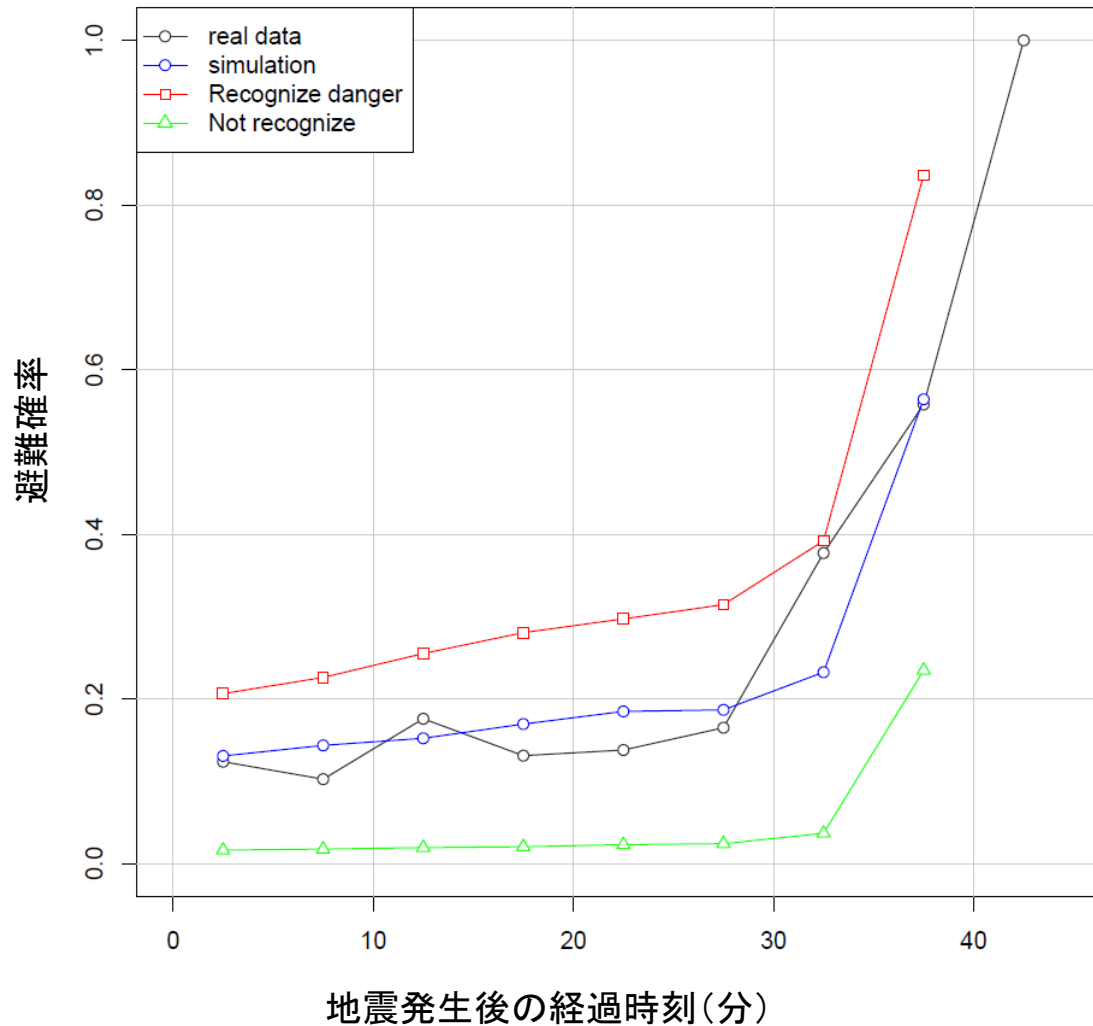
(リスク認知過程を考慮せず、避難開始モデルだけでは政策変数は有意でない)

認知クラスの考慮により、モデル精度が向上

Notes: * = 5% 有意, ¹ = 10% 有意, -: 推定なし, 空欄は有意ではないため除外

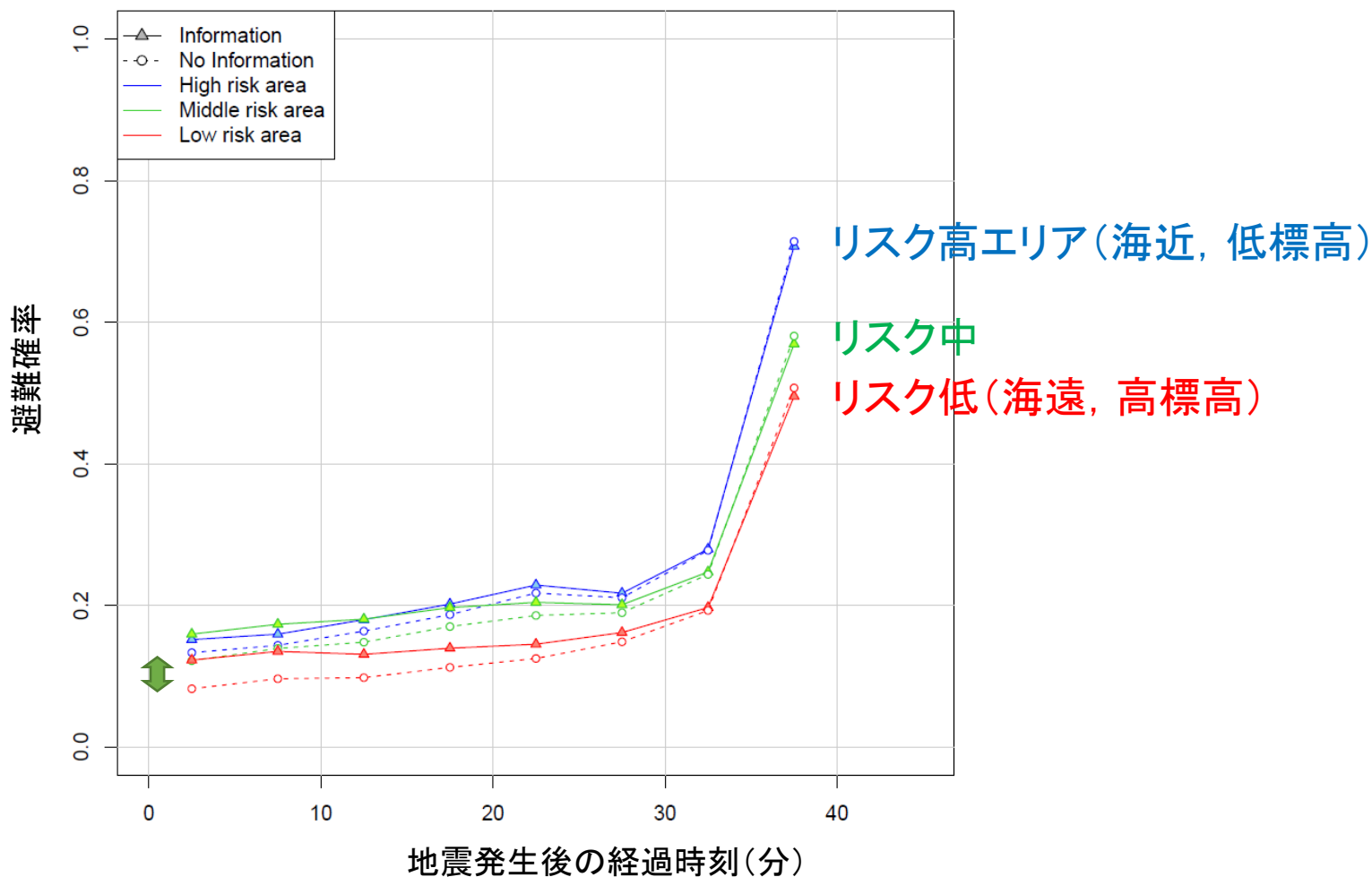
¹ ダミー変数, ² 対数値, ³ 2つのクラスで一つの推定値を算出

シミュレーション分析：避難確率の推移



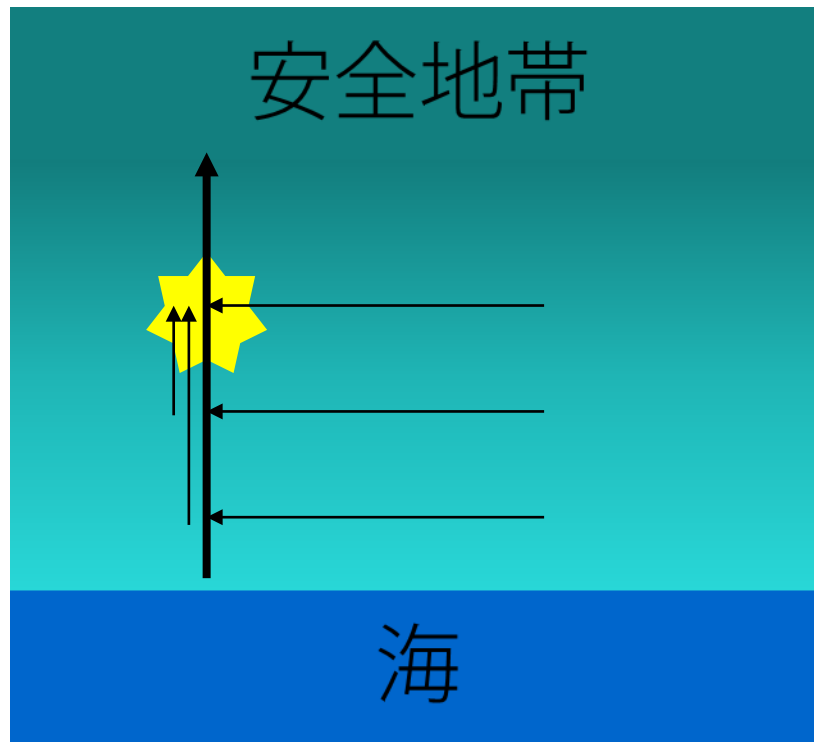
リスク認知の有無による避難確率の差は大きい

シミュレーション分析：空間による違い



- 標高・海からの距離に応じて、空間を三分割
- リスク高(海近)のエリアは避難開始が先行
- 情報発信は、特にリスク低(海遠)の地域で、効果が大きい

空間による避難開始の違いの波及可能性



沿岸地域：山に向かう主要道路は少数で集中しやすい
山側の避難者の避難開始の遅れが渋滞発生に寄与する可能性

復旧期交通シミュレータ

復旧期特有のOD予測の必要性

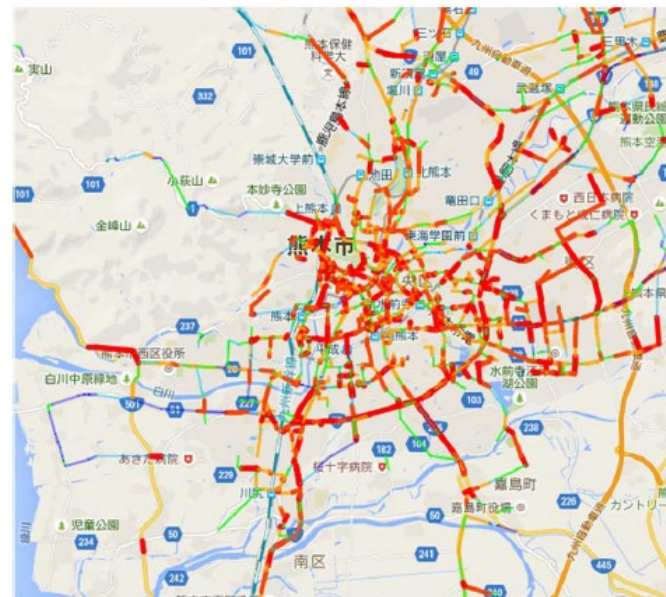
OD交通量**パターン**変化に起因する**混雑**は大きい

- リンク被災, ネットワーク途絶による混雑増加
- 被災地周辺への救援関連のOD増加
- ODパターン変化と混雑
 - **被災者特有のODパターン**の変化により旅行時間はさらに遅延
 - 平時と異なるODパターンに**道路ネットワークは未対応**であり, 大きな混雑を招く可能性

動的な需要マネジメント(始業時刻, 相乗り)による対策の検討



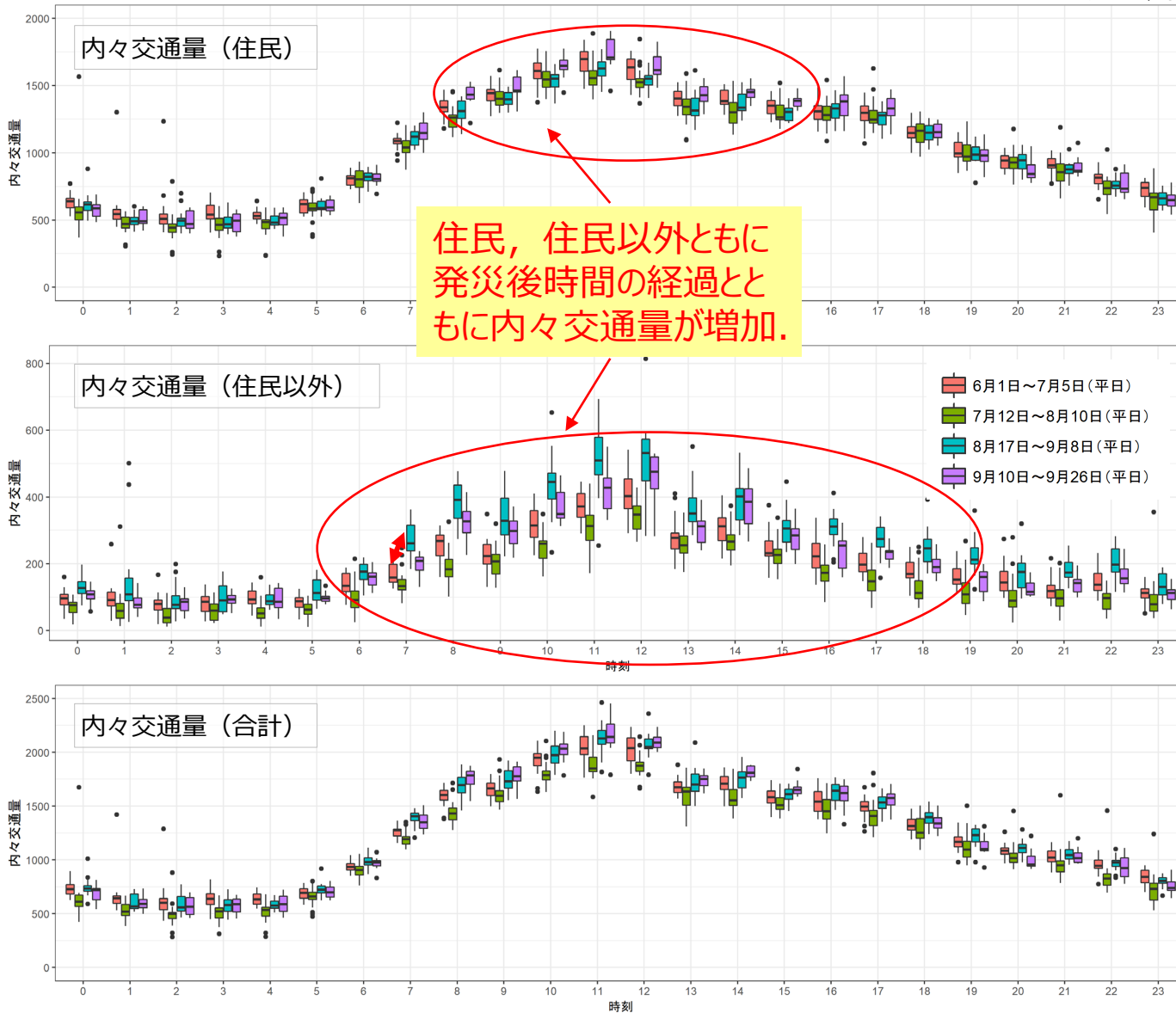
熊本市内市電通り(2016年4月22日撮影)



震災後のリンク旅行速度(4月18日18:00-18:15)(桑原ら(2016))

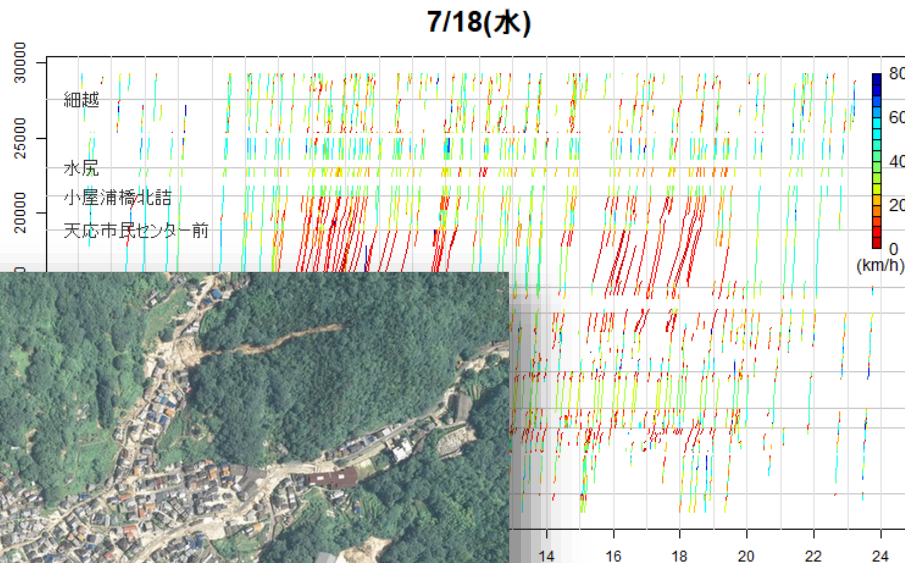
内々交通需要の交通影響 (2018年西日本豪雨)

力石、浦田、吉野、藤原、土論集、2019



内々交通需要の交通影響 (2018年西日本豪雨)

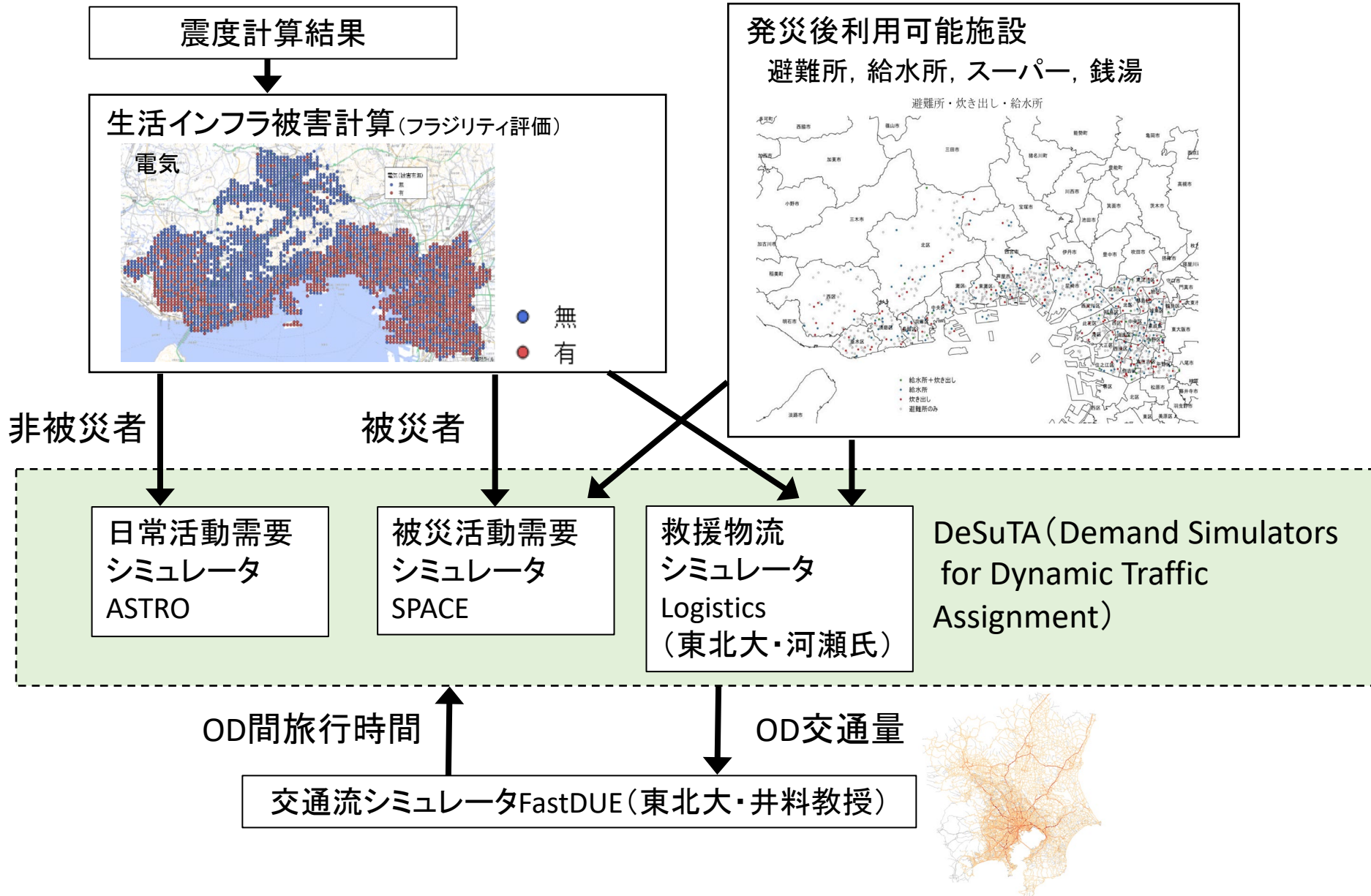
リンク旅行時間分析 (西日本豪雨／広島)



出典：国土地理院ウェブサイト (<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html>)

インフラ被害 (交通供給の変化) ではなく、交通需要
の変化 (内々トリップの急増) に起因して渋滞が発生

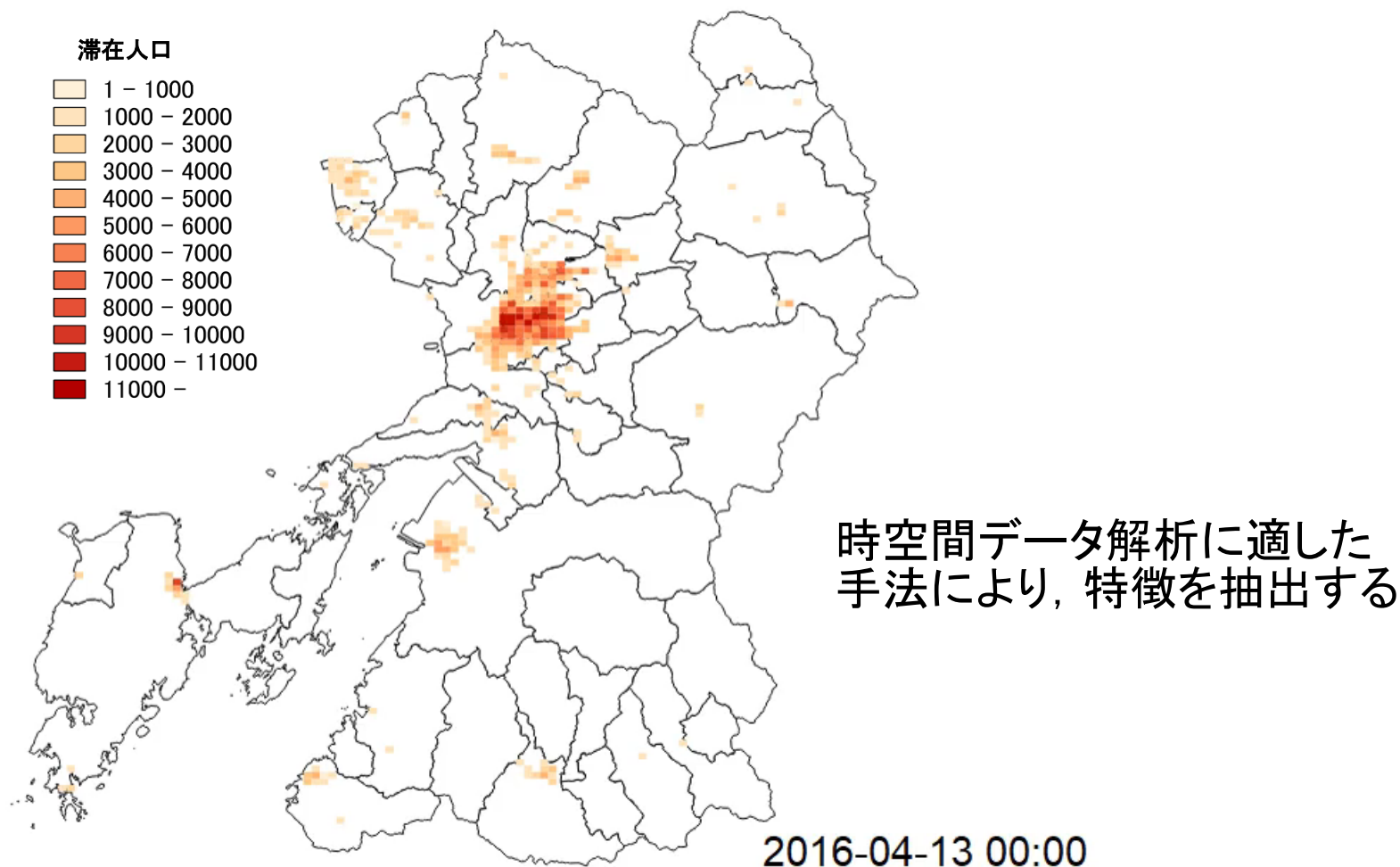
災害復旧期における交通シミュレーションの開発



ゾーン別滞在人口データによる特徴抽出

Urata, Sasaki, Iryo, IEEE ITSC 2018

本当に、**平時需要・被災者需要は同時に現れるのか？**



ゾーン別滞在人口データによる特徴抽出

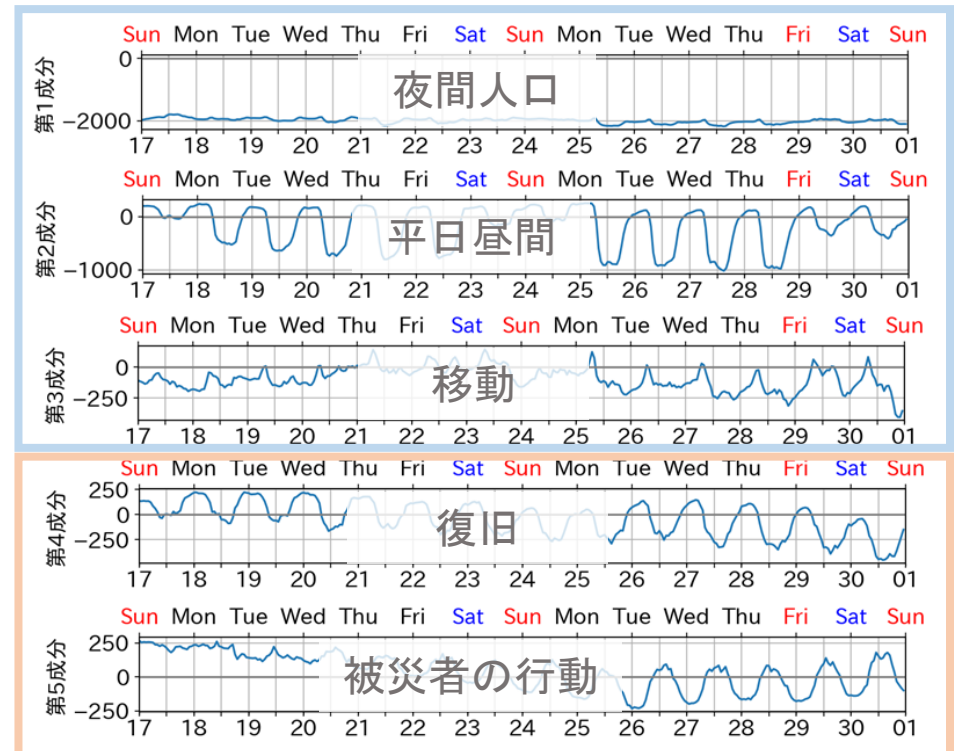
Urata, Sasaki, Iryo, IEEE ITSC 2018

ゾーン別滞在人口データ

平時の行動

災害復旧期
特有の行動

scICAの結果(震災後)

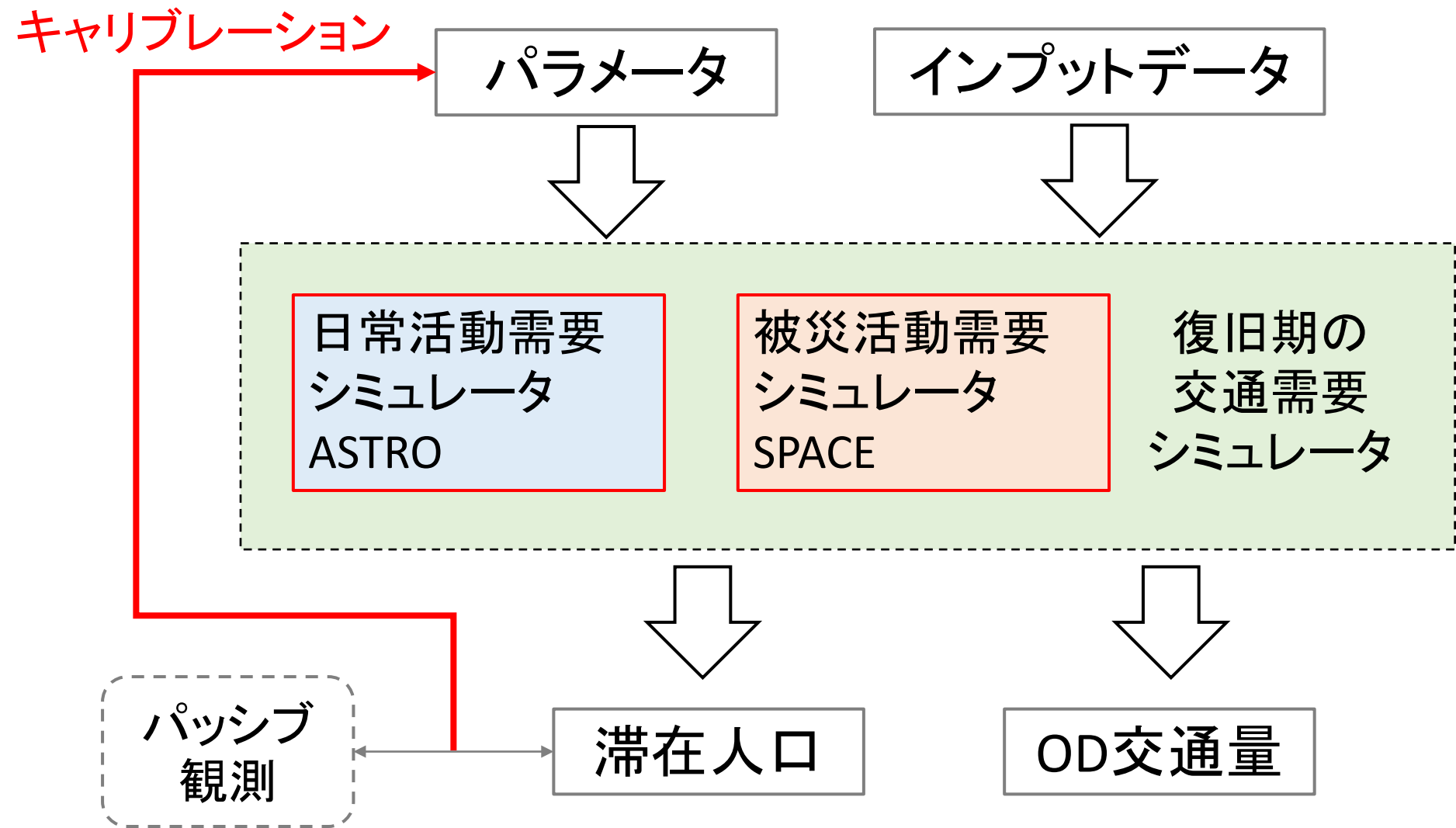


「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.

日常活動と被災活動のアクティビティモデルを構築する

復旧期需要予測の実適用に向けて

浦田, 佐々木, 井料, 土木計画学, 2020



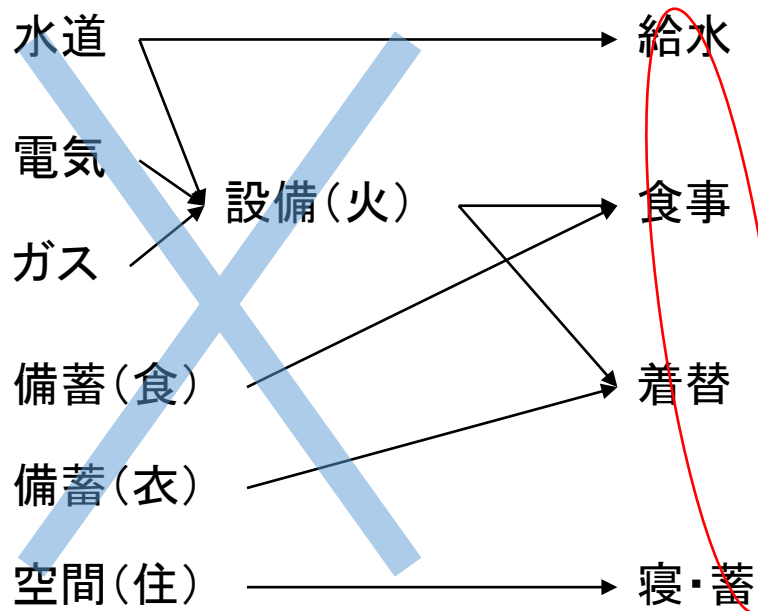
復旧期交通シミュレータの構成

- 被災活動需要 (SPACE)
 - 逐次的な必要物資の探索行動を再現
- 日常活動需要 (ASTRO)
 - PTデータ活用可能なシンプルなアクティビティモデルを活用
- パラメータキャリブレーション
 - 災害時に迅速に入手可能性があり、網羅性のある滞在人口データを活用

被災時の活動ニーズ

地震災害の間接被害(需要変化):

- インフラ(水・電気・ガス)被害 ← このための平時のトリップ量は少
- 建物(備蓄・設備)被害



救援(or販売)から、
常に調達しつづける必要

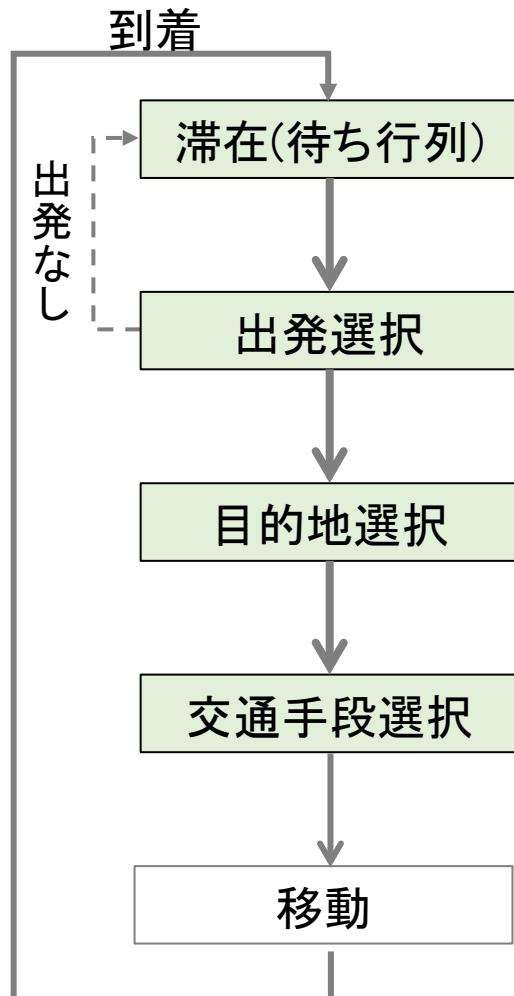


わずかなスペースで不自由な生活を余儀なくされる(東灘区本山南中学校)
[読売新聞社提供]

柏原ら(1998)

被災活動需要シミュレータSPACE

被災者アクティビティ
(逐次選択ベース)



SPACE

travel demand Simulator for Procurement Activities
Caused by Earthquake

- 物資調達のための被災者の行動を再現
- 避難所(自宅)・救援施設間の移動
- 目的地での滞在を「待ち行列」で表現
- 将来の救援施設での待ち時間や物資獲得有無を見越すことは難しいため、逐次選択型のモデルを構築

給水所, 炊き出し, スーパーマーケット, 銭湯での
物資調達を活動目的とするシミュレータを構築

被災活動需要シミュレータSPACE

避難所(自宅)

- ・ 滞在
- ・ 出発選択
- ・ 目的地選択
- ・ 交通手段選択

被災者A

水

食料

清潔度

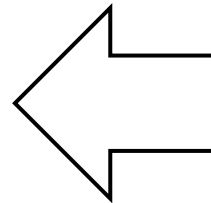
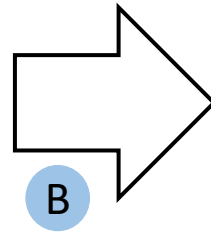
被災者B

水

食料

清潔度

水不足で出発



救援施設

- ・ 滞在(待ち行列)
- ・ 補給
- ・ 帰宅
- ・ 再出発・目的地選択

給水所



炊き出し



スーパー

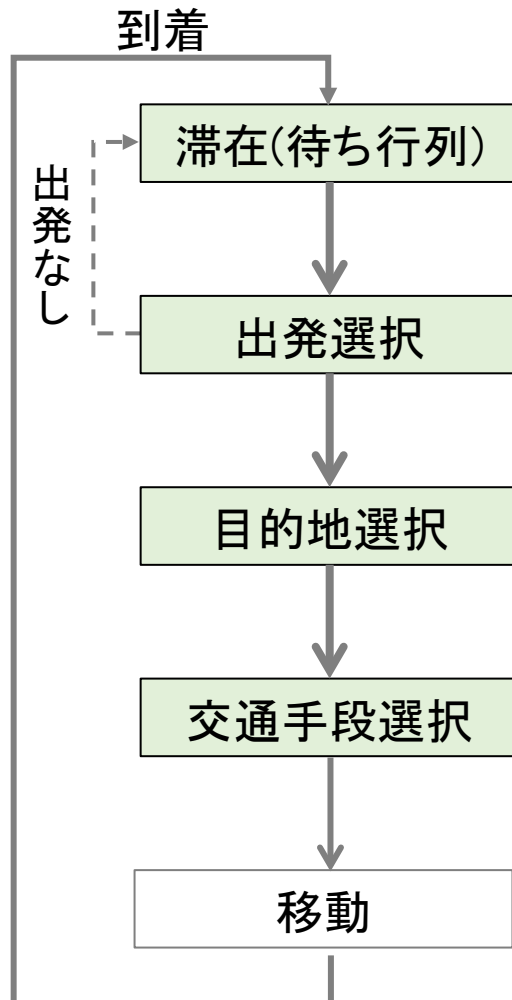


銭湯



被災活動需要シミュレータSPACE

被災者アクティビティ (逐次選択ベース)



■ 物資供給施設

物資保有量 ST_Y : 確率的な物資供給と訪問被災者により推移

■ 行動選択

出発選択: 個人 i の物資保有, 施設内情報により算出

$$V_{st,i,t}^{X,dep} = C_{dep}$$

$$V_{de,i,t}^{X,dep} = (S_{i,t}^X - a_{i,t}^X) + \nu_{shlt_i}^X(t)$$

S: 基準保有量 X: 物資 t: 時刻

a: 保有量 C: 定数項

v: 出発魅力度(施設内相関)

目的地選択: ゾーン内の営業施設数により算出

$$V_{z' \rightarrow z}^{i,t,dest} = -\beta_\tau c_{z' \rightarrow z} + \beta_g G_{z,t}^i + \eta_{z' \rightarrow z},$$

$$G_{z,t}^i = \sum_{\forall X,y_X} d_i^x \log(N_z^{yX}(t)),$$

c: 旅行時間 z: ゾーン d: 物資必要有無

G: 目的地魅力度 N: 営業施設数

η : 空間相関 β, σ : パラメータ

$$\eta_{z' \rightarrow z} = \kappa_{z' \rightarrow z} \log(c_{z' \rightarrow z}) (\kappa_{z' \rightarrow z} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\kappa^2)),$$

交通手段選択: 距離帯・時間帯別の選択割合を利用

■ 物資受け取り

待ち時間は待ち行列の捌け速度 SV_Y と待ち人数に依存
受取量は固定

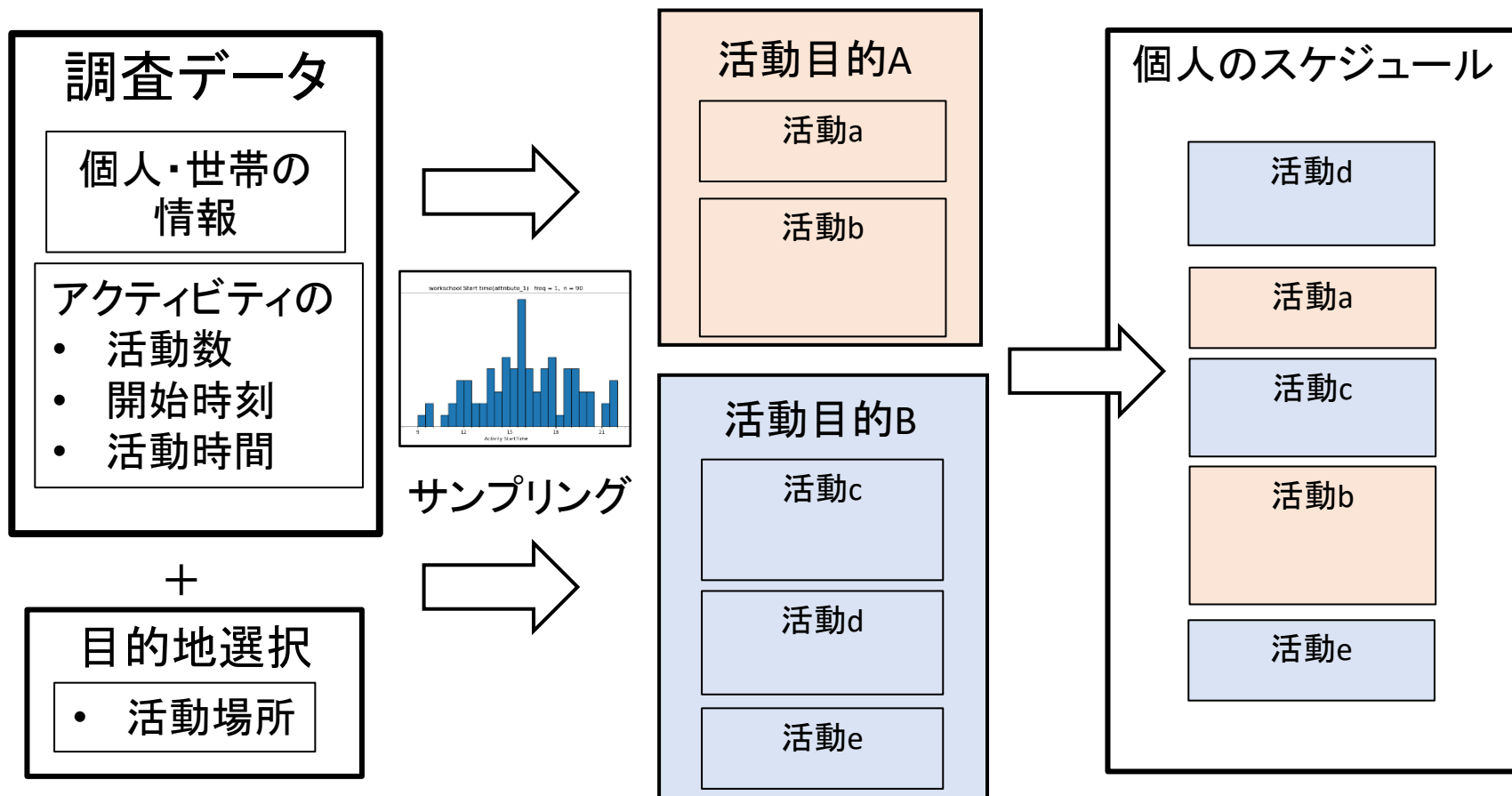
復旧期交通シミュレータの構成

- 被災活動需要 (SPACE)
 - 逐次的な必要物資の探索行動を再現
- 日常活動需要 (ASTRO)
 - PTデータ活用可能なシンプルなアクティビティモデルを活用
- パラメータキャリブレーション
 - 災害時に迅速に入手可能性があり、網羅性のある滞在人口データを活用

既往の日常活動需要シミュレータ

TASHA (Toronto Area Scheduling model for Household Agents)

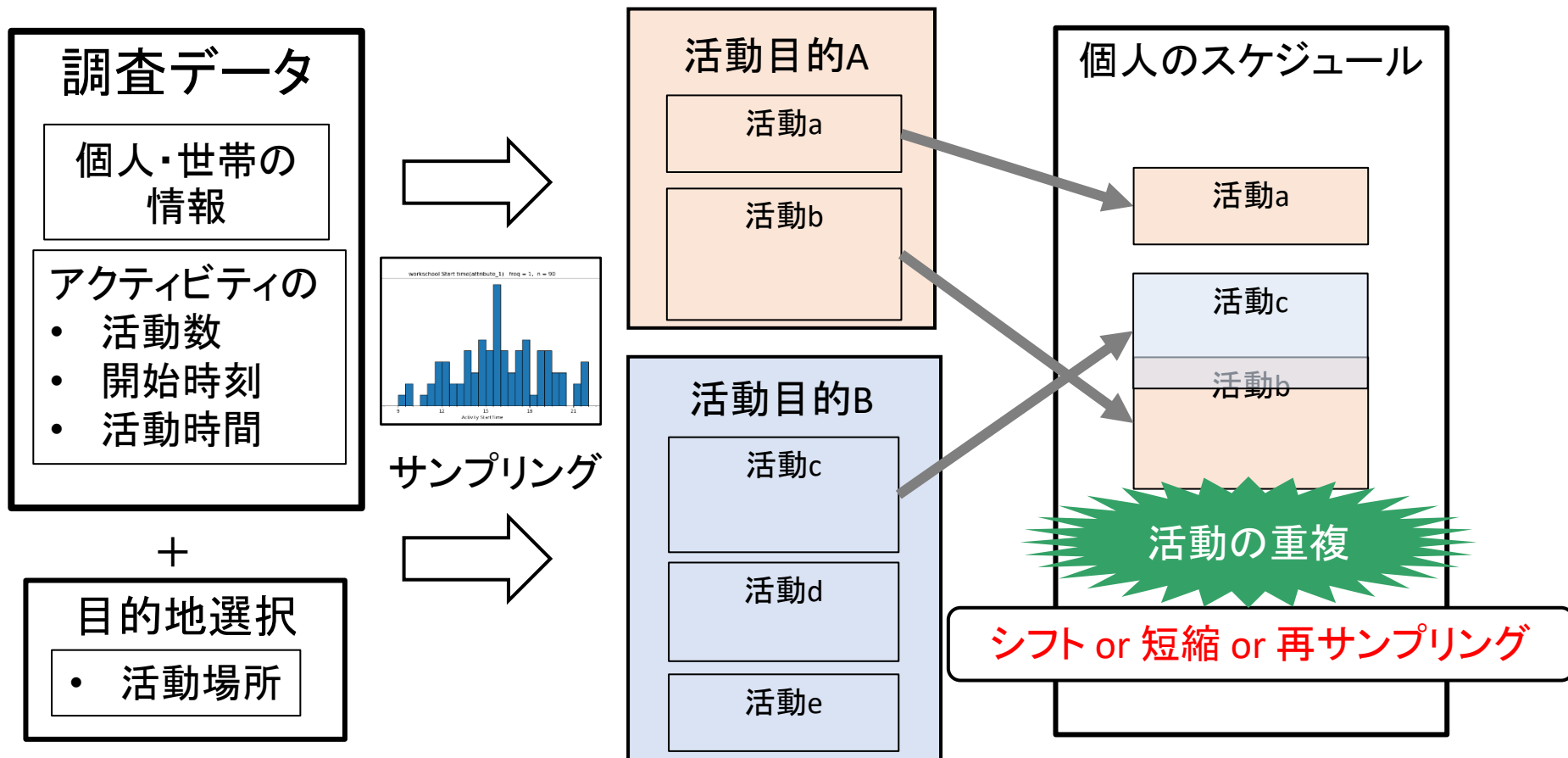
- ◆ 世帯レベルでの意思決定を考慮した個人の**アクティビティスケジュール**と**トリップパターン**を、平日の24時間について生成するモデル



既往の日常活動需要シミュレータ

TASHA (Toronto Area Scheduling model for Household Agents)

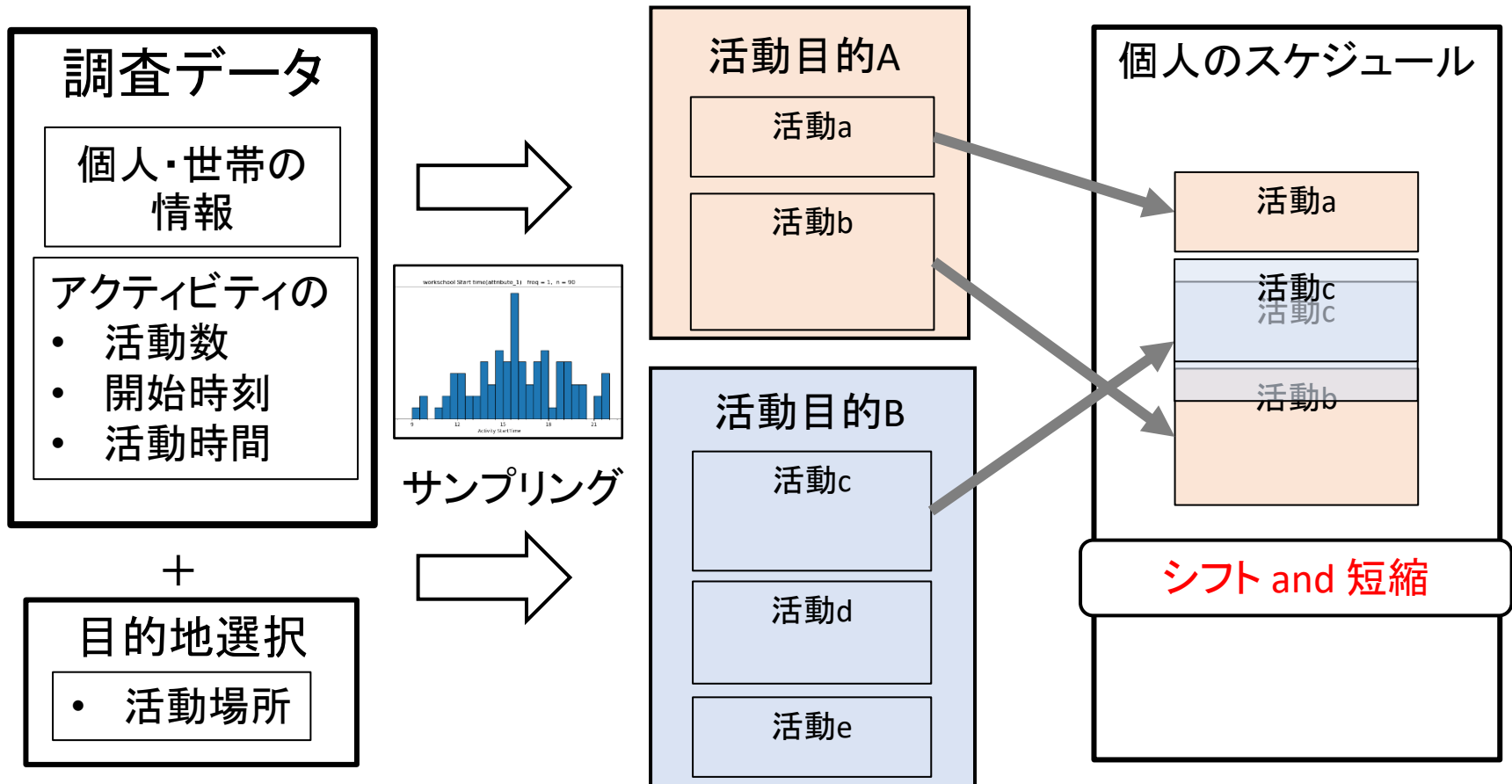
- ◆ 世帯レベルでの意思決定を考慮した個人の**アクティビティスケジュール**と**トリップパターン**を、平日の24時間について生成するモデル



既往の日常活動需要シミュレータ

TASHA (Toronto Area Scheduling model for Household Agents)

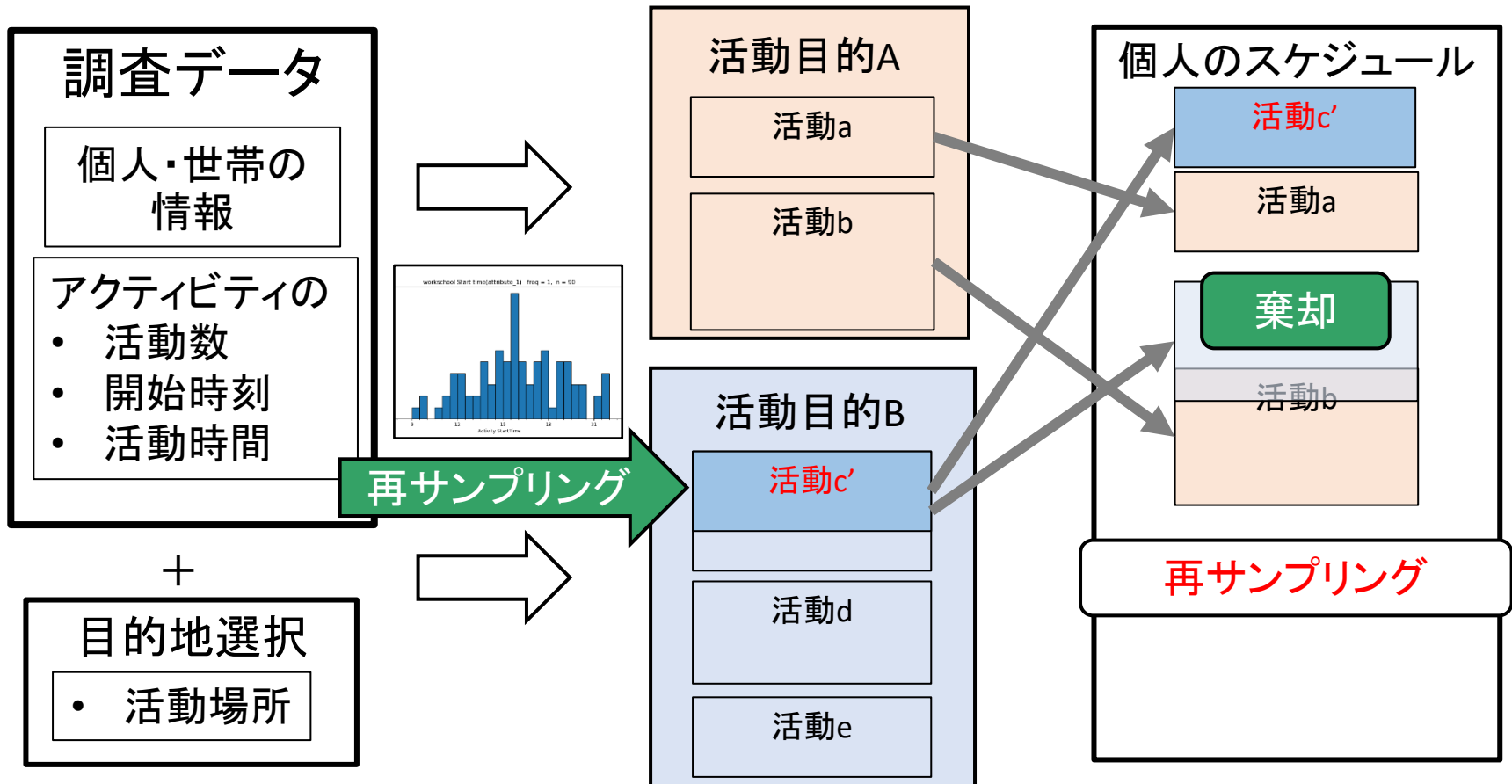
- ◆ 世帯レベルでの意思決定を考慮した個人の**アクティビティスケジュール**と**トリップパターン**を、平日の24時間について生成するモデル



既往の日常活動需要シミュレータ

TASHA (Toronto Area Scheduling model for Household Agents)

- ◆ 世帯レベルでの意思決定を考慮した個人の**アクティビティスケジュール**と**トリップパターン**を、平日の24時間について生成するモデル



日常活動需要シミュレータASTROの開発方針⁴⁷

◆ 特徴

- 調査データの活動分布を基にしており、**パラメータが少数**である。
- 移動時間を含めたスケジュール重複の評価により、**移動時間長期化によるトリップ取りやめ**を評価できる。
- 活動時間も分布から抽出しており、**細やかな時間表現**が可能

◆ 課題

- シフト・短縮導入の理論的根拠なし。
- 再サンプリング試行の回数を恣意的に設定。
- 活動削除の操作のみを行っており、活動数の過小評価に繋がる。

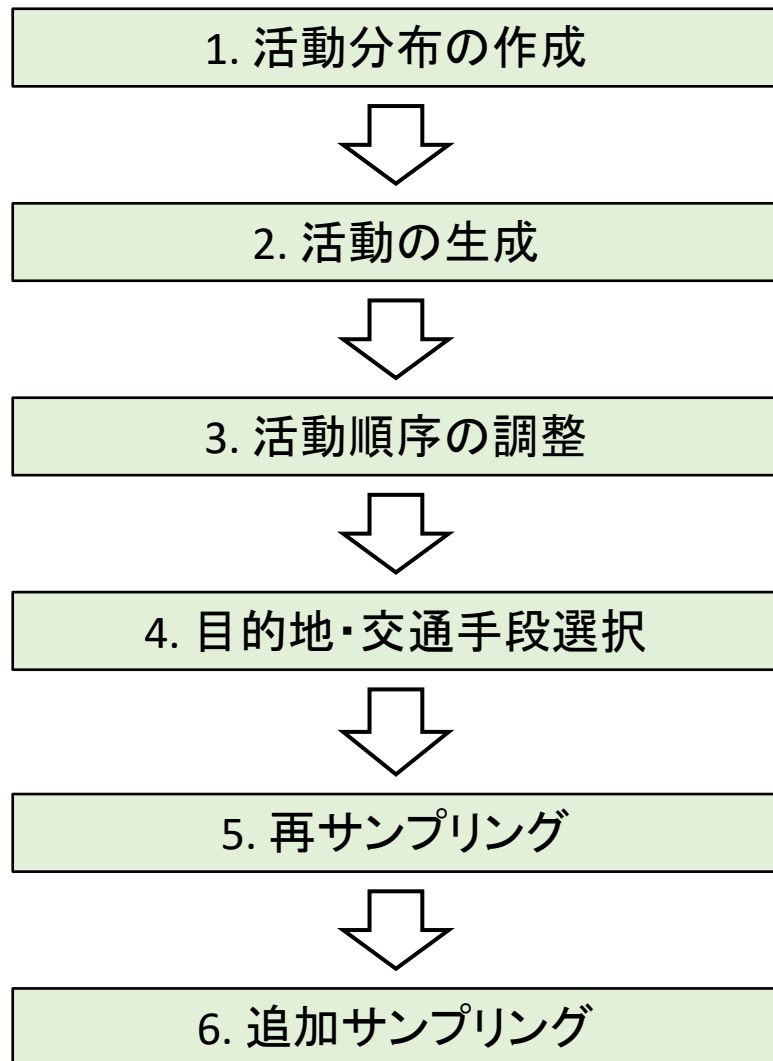


チェインルールを満たすための**再サンプリング時**
も**活動分布を生かす**アルゴリズムを導入

ASTRO:

Activity Scheduler To Reproduce Observed behavioral data with trip-chain condition

ASTROの計算フロー



- ◆ TASHAの平時活動データからサンプリングを行う構造は適用
 - 活動目的(業務, 仕事・学校, 私事, 途中帰宅, 最終帰宅)ごとに**優先度**を設定
 - 手段選択には**トリップチェーンルール**を適用
- ◆ 主な変更点
 - スケジュール重複時の再サンプリングは, **実データの分布**に従う
 - 空白スケジュールがある場合には, **活動追加**も可能

復旧期交通シミュレータの構成

- 被災活動需要 (SPACE)
 - 逐次的な必要物資の探索行動を再現
- 日常活動需要 (ASTRO)
 - PTデータ活用可能なシンプルなアクティビティモデルを活用
- パラメータキャリブレーション
 - 災害時に迅速に入手可能性があり、網羅性のある滞在人口データを活用

パラメータキャリブレーションによる精度向上

シミュレーションの再現性を担保したい

滞在人口によるパラメータキャリブレーションを実施

※滞在人口データの利用: 発災後の入手の迅速性、データの網羅性

観測値とシミュレーション滞在人口の差の和を最小化

$$\min_{\Theta} \sum_t \sum_z |TP_{z,t}^s(\Theta) - TP_{z,t}^o|$$

$TP_{z,t}^s$ シミュレーションによる
ゾーンz・時刻tの滞在人口

$TP_{z,t}^o$ 観測による
ゾーンz・時刻tの滞在人口

Θ パラメータベクトル

※ 進化的アルゴリズムDEを適用し、最適解を算出

平時simのキャリブレーション(目的地選択)

対象: 目的地選択モデル(ロジットモデル+空間相関項)

確定効用

$$V_{z' \rightarrow z}^{i,t,dest} = -\beta_{\tau} c_{z' \rightarrow z} + \beta_g G_{z,t}^i + \eta_{z' \rightarrow z},$$

旅行時間
目的地魅力度(従業者数・人口)

ODペアごとの
空間相関

$$\eta_{z' \rightarrow z} = \kappa_{z' \rightarrow z} \log(c_{z' \rightarrow z}) \quad (\kappa_{z' \rightarrow z} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\kappa}^2)),$$

キャリブレーション結果

β_t	0.010
β_g	1.802
計算時間	16 hours

- 個体数: 48
- 世代数: 100世代
- 学習データ: 8日間(4/1,4,5,6,7,8,11,12)
- テストデータ: 4/13
- 1/6の人口でシミュレーションし, 滞在人口は6倍して算出

熊本・平時のキャリブレーション結果

活動目的		am 6:00am-	mid 9:00am-	pm 3:00pm-	night 7:00pm-	不明	Total
業務	output trips	3553.3	6788.5	1993.6	2791.2	0.0	15126.6
	input trips	3350.0	8521.0	2193.0	478.0	520.0	15062.0
	output ± trips	203.3	-1732.5	-199.4	2313.2	-520.0	64.6
	output ± %	6.1	-20.3	-9.1	483.9	-100.0	0.4
仕事・学校	output trips	39100.6	8896.2	3011.2	4754.1	0.0	55762.1
	input trips	42334.0	9069.0	3111.0	1667.0	1307.0	57488.0
	output ± trips	-3233.4	-172.8	-99.8	3087.1	-1307.0	-1725.9
	output ± %	-7.6	-1.9	-3.2	185.2	-100.0	-3.0
私事	output trips	18198.3	31796.0	16292.9	14845.5	0.0	81132.6
	input trips	8406.0	41503.0	22662.0	5527.0	1727.0	79825.0
	output ± trips	9792.3	-9707.0	-6369.1	9318.5	-1727.0	1307.6
	output ± %	116.5	-23.4	-28.1	168.6	-100.0	1.6
途中帰宅	output trips	1966.4	5756.5	3643.4	885.9	0.0	12252.2
	input trips	1788.0	8595.0	5634.0	742.0	2635.0	19394.0
	output ± trips	178.4	-2838.5	-1990.6	143.9	-2635.0	-7141.8
	output ± %	10.0	-33.0	-35.3	19.4	-100.0	-36.8
最終帰宅	output trips	472.5	13930.3	47341.9	35065.7	0.0	96810.4
	input trips	349.0	11802.0	38512.0	18899.0	14815.0	84377.0
	output ± trips	123.5	2128.3	8829.9	16166.7	-14815.0	12433.4
	input ± %	35.4	18.0	22.9	85.5	-100.0	14.7
不明	output trips	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	input trips	533.0	1706.0	742.0	161.0	588.0	3730.0
	output ± trips	0.0	0.0	0.0	0.0	-588.0	-3730.0
	input ± %	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	-100.0
Total	output trips	63291.2	67167.5	72283.0	58342.3	0.0	261084.0
	input trips	56760.0	81196.0	72854.0	27474.0	21592.0	259876.0
	output ± trips	6531.2	-14028.5	-571.0	30868.3	-21592.0	1208.0
	output ± %	11.5	-17.3	-0.8	112.4	-100.0	0.5

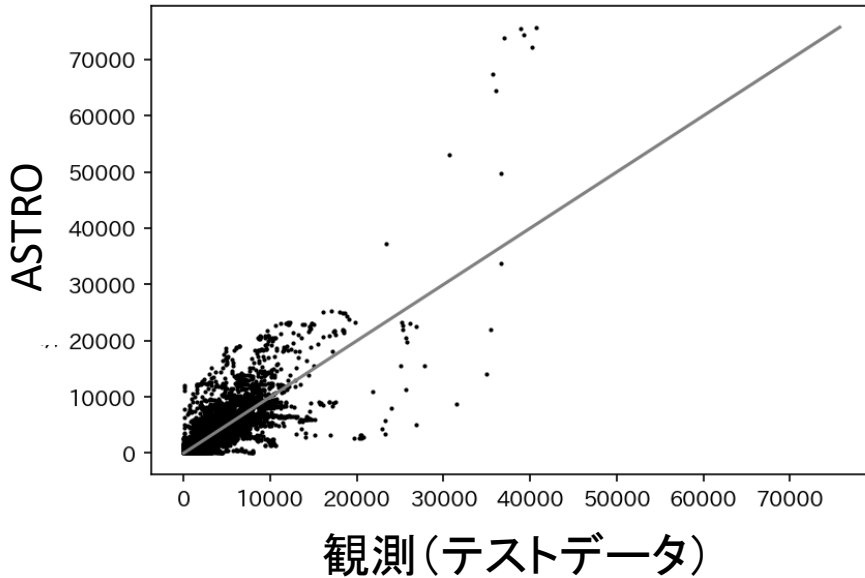
熊本PTとシミュレーションの比較

- ✓ 総トリップ数は0.5%の誤差であり、精度が高い。
- ✓ 業務、仕事・学校、私事の目的別の再現性も高い。

熊本・平時のキャリブレーション結果

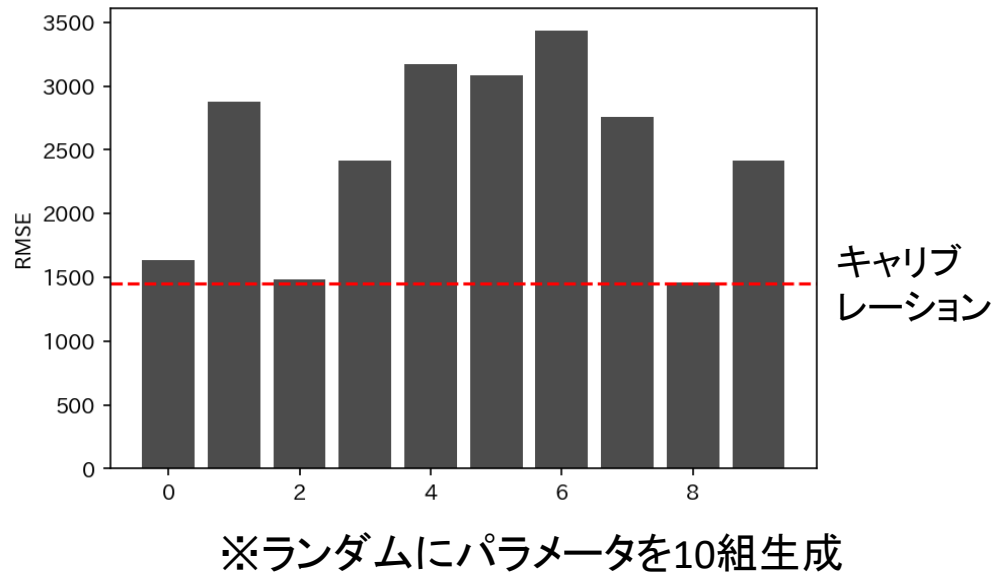
散布図

RMSE:1454.01



「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.

ランダムパラメータとの比較

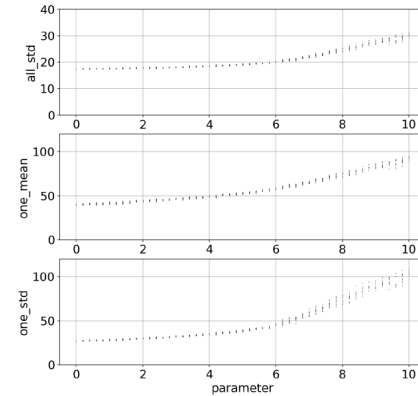


パラメータキャリブレーションによる再現性の向上を確認

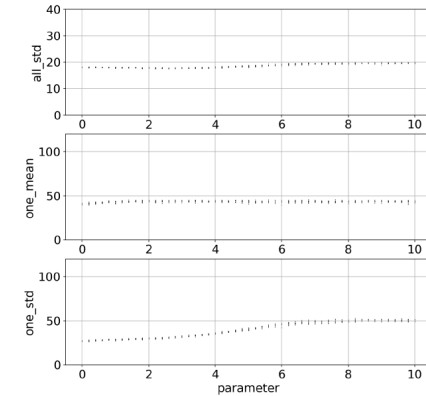
復旧期 (SPACE + ASTRO) のキャリブレーション

キャリブレーションの設定

- 27個のパラメータのうち、簡易ネットワークを用いた感度分析により、キャリブレーション対象とするパラメータを決定



個人の基準保有量 S^F



S^C

キャリブレーション結果

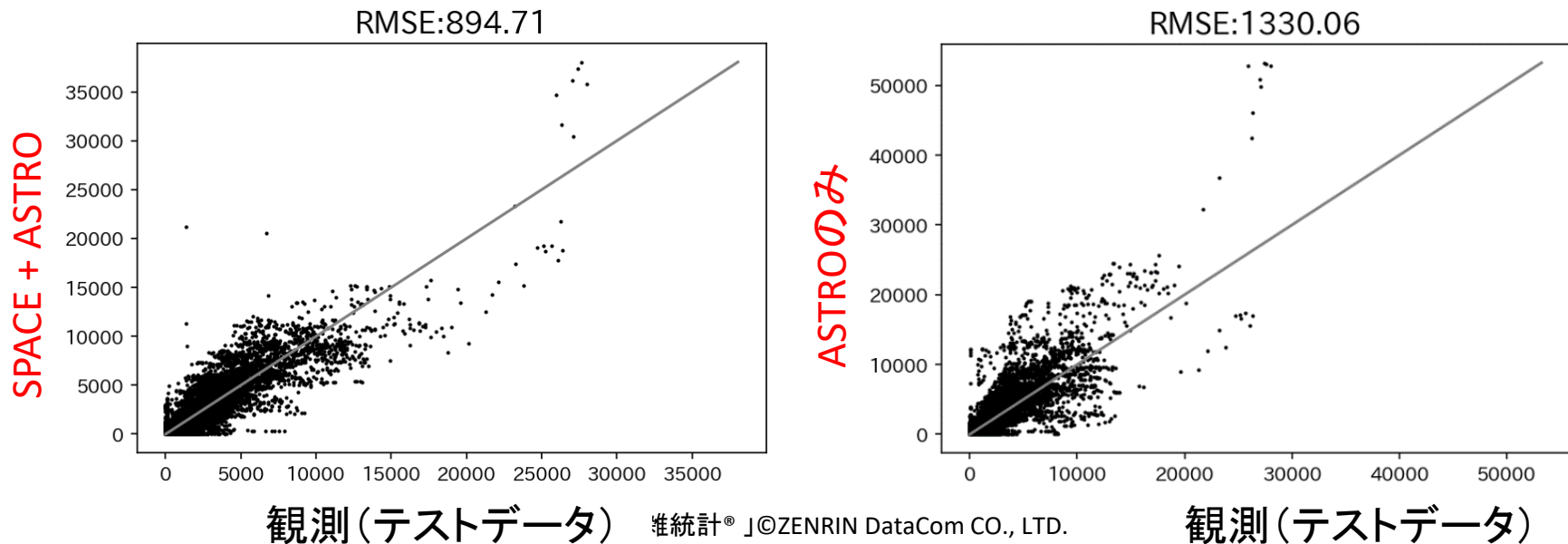
パラメータ	推定値	探索範囲
目的地・旅行時間 β_τ	1.38	0.0-2.0
目的地・空間相関 σ_κ^2	2.71	0.0-5.0
目的地・非出発効用 C_{hm}	1.37	0.0-10.0
個人の基準保有量 $S^{\{X\}}$	3.31, 0.73, 7.90	0.0-10.0
施設のサービス率 $SV_{\{Y\}}$	3.15, 6.98, 1.74	0.0-10.0
初期保有の下限量 $a_{low}^{\{X\}}$	3.63, 8.24, 3.09	0.0-10.0

$\{X\}=W,F,C, \{Y\}=ws, ms, sm$

- 個体数: 48
- 世代数: 150世代
- 学習データ: 4日間 (4/18,19,20,21)
- テストデータ: 4/22
- 1/10の人口を対象に計算し, 10倍して滞在人口を算出
- Spaceの1ステップは10分

平時よりも旅行時間のパラメータが増加 → 旅行時間を重視した目的地選択

熊本・復旧期のキャリブレーション結果



ASTRO単体よりもSPACE+ASTROのシミュレーション結果のほうが、観測滞在人口に近い。

→ 被災者需要シミュレータSPACEの導入成果あり

被災中心地周辺の総滞在人口推移

被害の大きかった益城・健軍エリアにおいて、
復旧期における総滞在人口の時間変動の波を再現

