京都大学防災研究所 第32回公開講座
2021年10月19日（火）

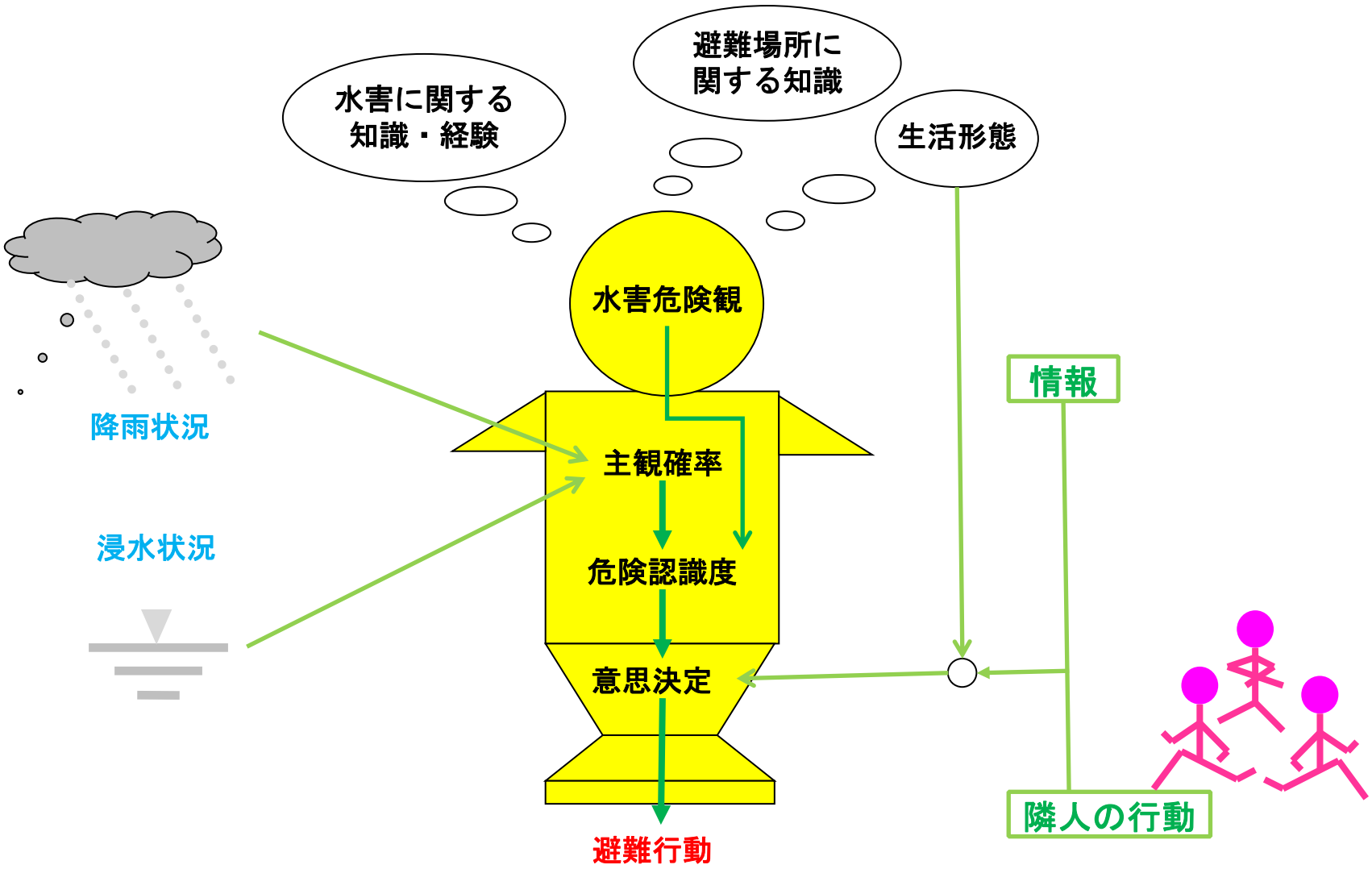
洪水が来た！

その時、経験や情報は身を守るだろうか？

－工学を使って考えてみよう－

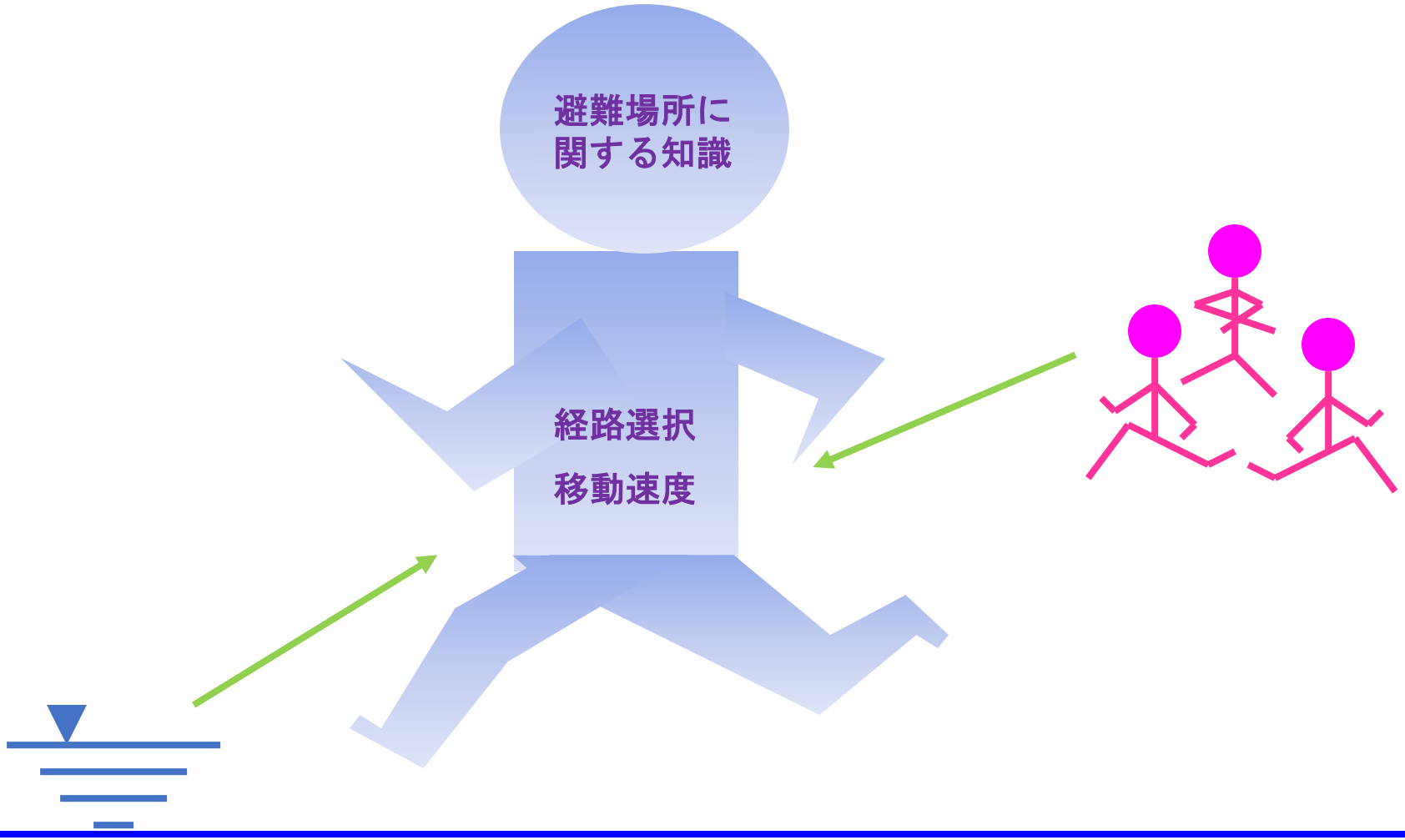
京都大学防災研究所
堀　智晴

水害避難行動を規程する要因 (1)



© T. Hori, Kyoto University

水害避難行動を規程する要因 (2)



© T. Hori, Kyoto University

経路選択ルール

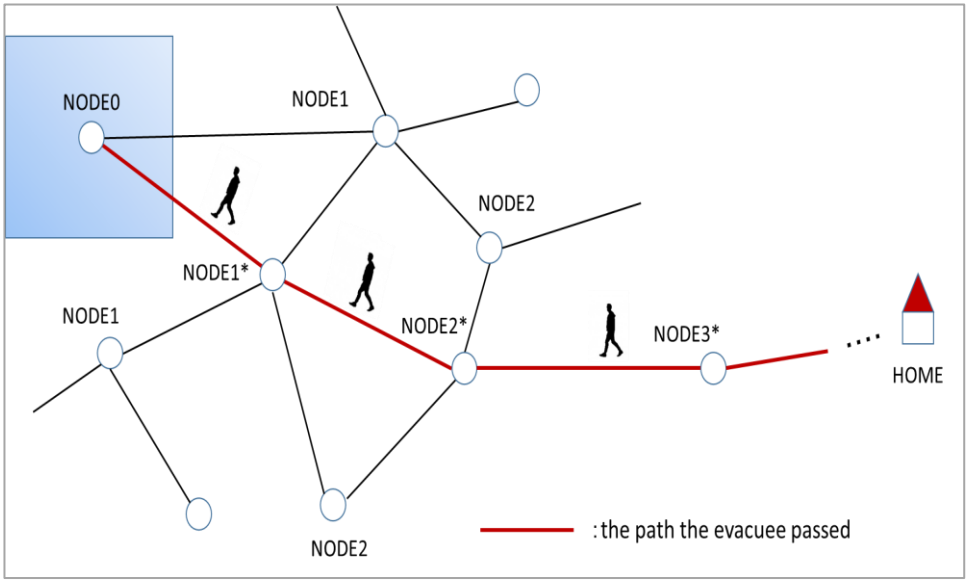
i. 自宅から避難所までの最短経路を通って、徒歩で移動する。

ii. 経路上に浸水を視認すると，直近に通過した交差点まで引き返す.

iii. 情報や自身の記憶を参照しながら，その交差点から接続している避難所までの経路の中に浸水が及んでいない経路があるかを探索する.

iv. 浸水が及んでいない経路が存在しない場合，その前に通過した交差点まで更に引き返し，同様の探索を行う.

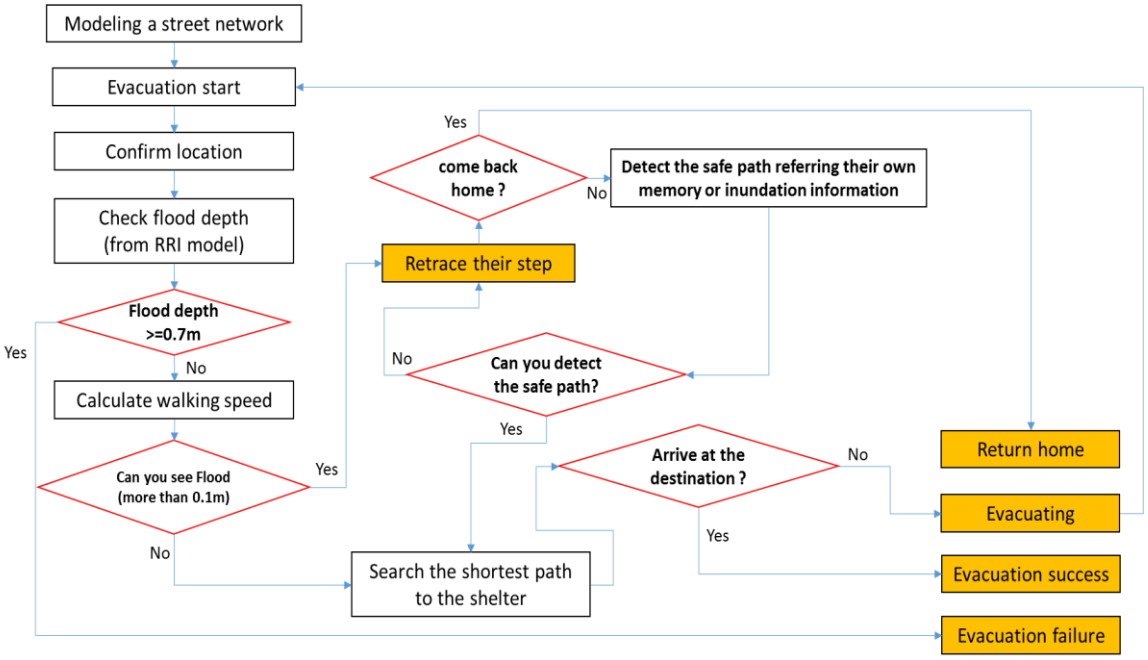
v. 自宅まで戻ってきた場合，自宅に待機する.



© T. Hori, Kyoto University

シミュレーションの流れ

- 避難者は徒歩で最短経路を利用して, 避難所に移動する.
- 避難者が0.1m以上の浸水を視認した際, 来た道を引き返しながら, 浸水が及んでいない経路を探索する.
- 自宅に戻ってきた場合, 避難者はシミュレーション終了時まで自宅に待機する(「自宅引返し者」).
- 0.7m以上の浸水に捕らえられた場合、その避難者は「避難失敗者」と判定される.
- 避難所まで移動できた避難者を「避難成功者」と判定する.



© T. Hori, Kyoto University

経路障害情報が水害時の避難行動に及ぼす影響

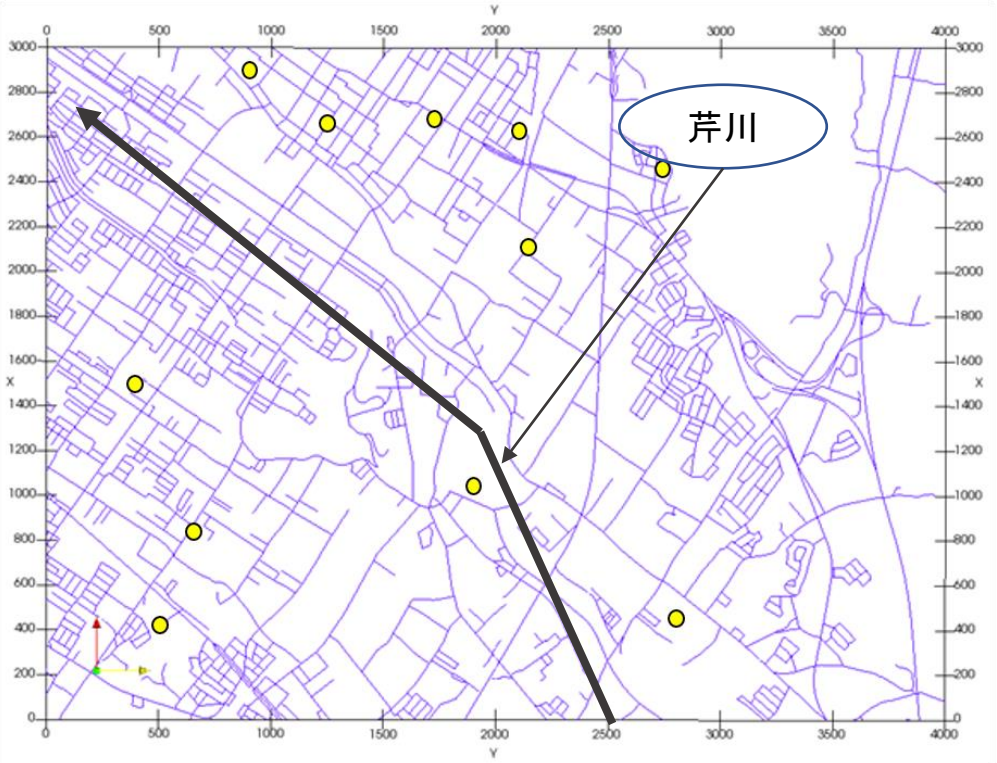
対象エリアとモデル避難者の設定

＜対象エリアについて＞

- 対象地域：滋賀県彦根市
- 対象流域：芹川
- 避難所：11箇所
  （右図の黄点）

＜モデル避難者について＞

- 総数：5962人
- 初期速度：1.1m/s
- シミュレーション時間：4時間10分

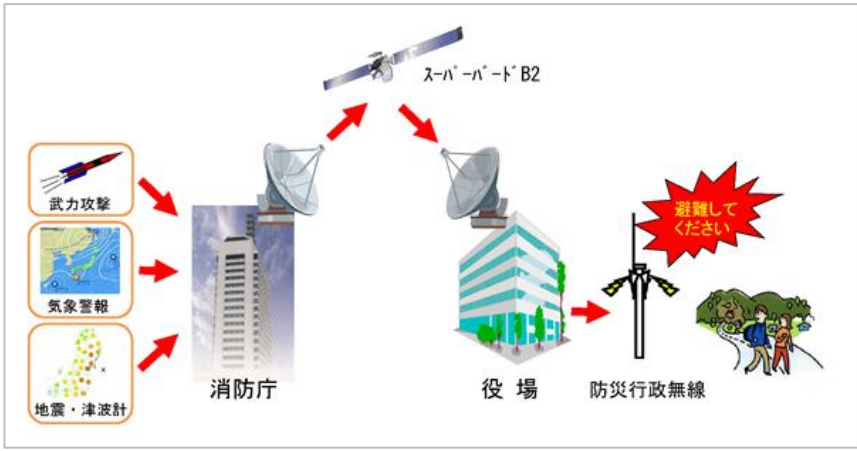


南北方向に3000m, 東西方向に4000m

© T. Hori, Kyoto University

モデル避難者への情報伝達ケース

モデル避難者は 1分毎に自身が視認した浸水箇所を他のモデル避難者と共有し合う.（情報共有型ケース）

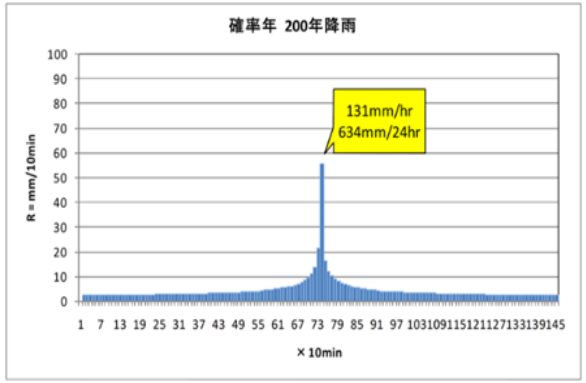


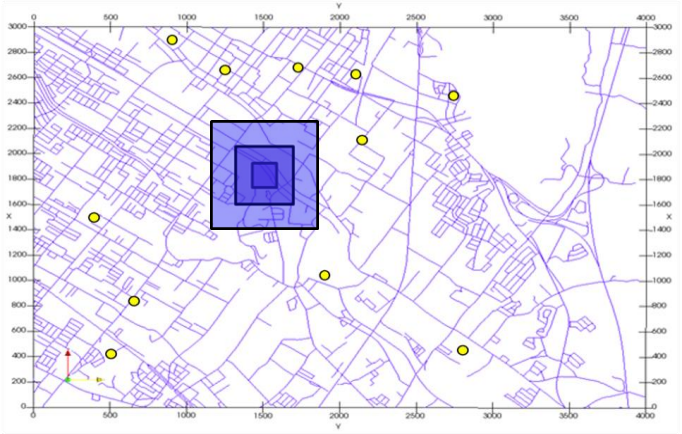
1分毎にその時刻の完璧な浸水状況をモデル避難者に提供する.（完全情報型ケース）

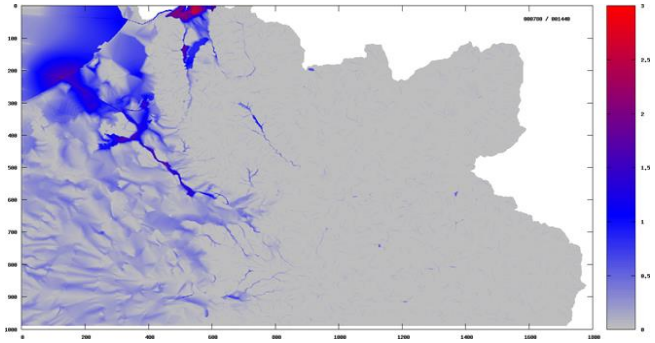
© T. Hori, Kyoto University

RRIモデルを用いた氾濫解析

＜再現期間＞
10年確率降雨
30年確率降雨
50年確率降雨
100年確率降雨
200年確率降雨







RRIモデル

水害避難ミクロモデル

© T. Hori, Kyoto University

分析ケース

1. モデル避難者に情報が提供されないケース（情報なし型）

2. モデル避難者は1分毎に自身が視認した浸水箇所を他のモデル避難者と共有し合うケース（情報共有型）

3. モデル避難者に1分毎にその時刻に浸水している箇所を完全に網羅した情報が提供されるケース（完全情報型）

上記の条件に加えて, 再現期間 10年・30年・50年・100年・200年確率降雨が引き起こす氾濫の下で水害避難シミュレーションを行う.

© T. Hori, Kyoto University

避難開始タイミングについて

(Ⅰ) 降雨開始540分後：

対象地域内に0.1m以上の浸水エリアが出現または, 急速に拡大する時刻

(Ⅱ) 降雨開始660分後：

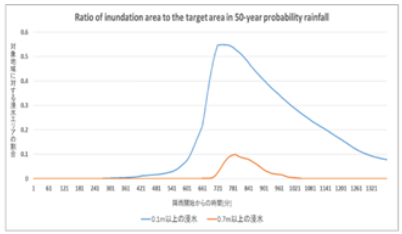
対象地域内に0.7m以上の浸水エリアが出現または, 急速に拡大する時刻

(Ⅲ) 降雨開始780分後：

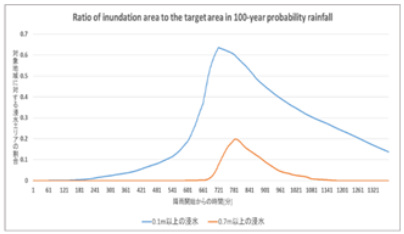
対象地域内で浸水範囲が最も広がっている時刻

(a) 10 年確率降雨

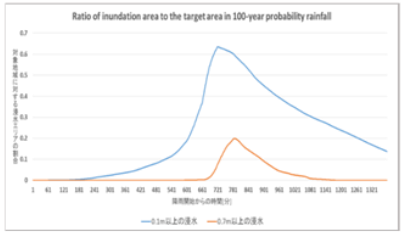
(b) 30 年確率降雨



(c) 50 年確率降雨



(d) 100 年確率降雨



(e) 200 年確率降雨

© T. Hori, Kyoto University

シミュレーションの結果と考察

© T. Hori, Kyoto University

（Ⅰ）0.1m以上の浸水が拡大する時刻に避難を開始するケース

1. 避難成功者数に関して

   →洪水の規模に関わらず、情報なし型の避難成功者数が最も多いという結果となった.

2. 避難失敗者数に関して

   →100年及び200年確率降雨がもたらす洪水では, 情報提供・共有によって避難失敗者数が数十人ほど減少している.

各確率降雨における最終ステップ時での避難成功者数と避難失敗者数[人]

		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
最終ステップ時における避難成功者数（人）	情報なし型	5623	4757	4413	1852	960
	情報共有型	5614	4617	4183	1709	873
	完全情報型	5619	4631	4258	1724	900
最終ステップ時における避難失敗者数（人）	情報なし型	0	0	0	60	26
	情報共有型	0	0	0	13	1
	完全情報型	0	0	0	3	1

© T. Hori, Kyoto University

（Ⅱ）0.7m以上の浸水が拡大する時刻に避難を開始するケース

1. 避難成功者数に関して

   →10年確率を除いて，情報なし型・情報共有型・完全情報型の間で差はほとんど存在しない．

2. 避難失敗者数に関して

   →10年及び30年確率降雨では，情報提供・共有によって100人以上の避難失敗者数が減少した．

各確率降雨における最終ステップ時での避難成功者数と避難失敗者数[人]

		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
最終ステップ時における避難成功者数（人）	情報なし型	2466	1195	494	267	200
	情報共有型	2320	1182	496	256	196
	完全情報型	2334	1193	544	270	205
最終ステップ時における避難失敗者数（人）	情報なし型	122	242	39	141	783
	情報共有型	6	15	39	146	754
	完全情報型	0	15	41	132	758

© T. Hori, Kyoto University

（Ⅲ）浸水が最も拡大している時刻に避難を開始するケース

1. 避難成功者数に関して

   →10年・30年確率降雨では，150人ほど情報なし型の避難成功者数が多い．一方，30年確率降雨よりも規模の大きい洪水では，その差は十数人程度にとどまった．

2. 避難失敗者数に関して

   → 洪水の規模に関わらず，情報なし型・情報共有型・完全情報型の間でその差はほとんど存在しない．

各確率降雨における最終ステップ時での避難成功者数と避難失敗者数[人]

		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
最終ステップ時における避難成功者数（人）	情報なし型	705	607	397	214	47
	情報共有型	559	451	380	199	37
	完全情報型	657	541	384	202	51
最終ステップ時における避難失敗者数（人）	情報なし型	38	431	1149	1881	2479
	情報共有型	63	430	1147	1878	2476
	完全情報型	63	438	1161	1904	2501

© T. Hori, Kyoto University

床上浸水の被害を受けた自宅引返し者について

1. 本研究では，浸水を避けながら移動しているうちに自宅に引き返した人を「自宅引返し者」と判定する.

2. 各モデル避難者の自宅が浸水によってどれほどの被害を受けたかを調べた上で，自宅まで引き返し，自宅に待機することを選択したモデル避難者の行動が適当であったのかを分析する.

3. 本研究では，浸水深が0.5m以上になると床上浸水とする.

4. 全自宅引返し者の中で自宅が床上浸水の被害を受けた人の割合を確率降雨ごとでまとめる.

[3]

© T. Hori, Kyoto University

自宅が床上浸水の被害を受けた自宅引返し者の割合

1. 情報の有無によって表の値（割合）が大きく異なるような結果は得られず，その差は最大で2.6%程度であった.

2. 避難開始のタイミングが遅くなると，全体の傾向として割合が減少していることが確認された. 特に，規模の大きい洪水で，その割合が大きく減少している.

		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
降雨開始540分後に避難するケース	情報なし型	0.59	15.68	38.15	37.06	47.17
	情報共有型	0.86	14.65	35.41	36.25	46.95
	完全情報型	0.87	16.53	35.86	36.69	47.09
降雨開始660分後に避難するケース	情報なし型	4.90	15.96	26.41	32.69	35.13
	情報共有型	4.76	16.03	26.40	32.61	35.42
	完全情報型	4.80	16.01	26.54	32.76	35.61
降雨開始780分後に避難するケース	情報なし型	3.68	8.55	12.25	8.63	8.25
	情報共有型	3.58	8.31	12.24	8.31	8.25
	完全情報型	3.63	8.41	12.20	8.20	8.12

床上浸水以上の被害を受けた自宅引返し者数÷全自宅引返し者数×100 (%)

© T. Hori, Kyoto University

床上浸水の被害を受けた避難成功者について

1. 自宅が床上浸水以上の被害を受けたが，無事に避難所まで到着できたという避難ケースを「クリティカルな避難」と定義する.

2. 全避難成功者の中で自宅が床上浸水の被害を受けた避難成功者の割合を確率降雨ごとでまとめる.

© T. Hori, Kyoto University

クリティカルな避難成功者

1. 情報の有無に関わらず，その割合は高々2%程度の違いしか見られず，ほとんど変わらないという結果となった．

2. 「クリティカルな避難」に最も寄与しているのはほとんどのケースで避難開始のタイミングであることが確認された．実際に，避難開始のタイミングが遅くなると，1ケースを除いて全てのケースでクリティカルな避難を行っているモデル避難者は少なくなっている．

全避難成功者の中で自宅が床上浸水の被害を受けた避難成功者の割合[%]

		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
降雨開始540分後に避難するケース	情報なし型	3.89	12.30	19.85	19.49	6.15
	情報共有型	3.88	12.50	20.01	21.71	4.58
	完全情報型	3.88	11.96	20.10	21.11	5.11
降雨開始660分後に避難するケース	情報なし型	2.11	1.00	2.23	4.12	10.00
	情報共有型	2.07	1.02	2.22	4.30	10.20
	完全情報型	2.01	1.09	2.21	5.19	9.76
降雨開始780分後に避難するケース	情報なし型	0.00	0.16	1.26	0.47	2.13
	情報共有型	0.00	0.22	1.32	0.50	2.70
	完全情報型	0.15	0.37	1.30	0.50	1.96

© T. Hori, Kyoto University

クリティカルな避難成功者と自宅被災者

[4]

床上浸水の被害を受けた避難成功者

[3]

床上浸水の被害を受けた自宅引返し者

両ケースの比較・分析

© T. Hori, Kyoto University

クリティカルな避難成功者と自宅被災者

1. 右図の割合は，左図の割合よりも1ケースを除いてすべて高く，多い時には数十倍も高いという結果となった．

→ 無事に避難所まで移動できるようなモデル避難者の自宅はそもそも浸水被害を受ける可能性が低い場所に位置している一方で，浸水の影響で避難所まで移動できずに自宅まで引き返すようなモデル避難者の自宅は低平地などの浸水の影響を受けやすい場所に位置していることが多いと考えられる．

全避難成功者の中で自宅が床上浸水以上の浸水被害を受けた避難成功者の割合[%]

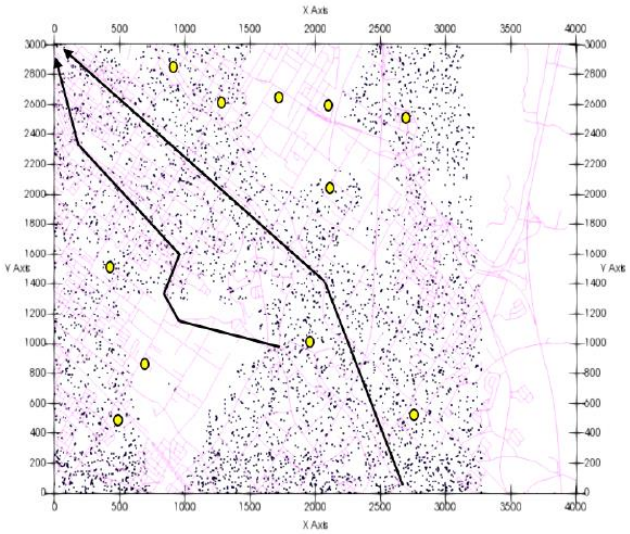
		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
降雨開始540分後に避難するケース	情報なし型	3.89	12.30	19.85	19.49	6.15
	情報共有型	3.88	12.50	20.01	21.71	4.58
	完全情報型	3.88	11.96	20.10	21.11	5.11
降雨開始660分後に避難するケース	情報なし型	2.11	1.00	2.23	4.12	10.00
	情報共有型	2.07	1.02	2.22	4.30	10.20
	完全情報型	2.01	1.09	2.21	5.19	9.76
降雨開始780分後に避難するケース	情報なし型	0.00	0.16	1.26	0.47	2.13
	情報共有型	0.00	0.22	1.32	0.50	2.70
	完全情報型	0.15	0.37	1.30	0.50	1.96

全自宅引返し者の中で自宅が床上浸水以上の浸水被害を受けた自宅引返し者の割合[%]

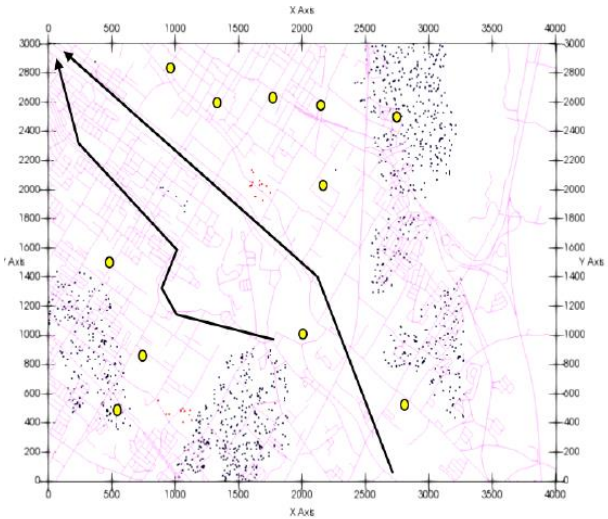
		10年確率降雨	30年確率降雨	50年確率降雨	100年確率降雨	200年確率降雨
降雨開始540分後に避難するケース	情報なし型	0.59	15.68	38.15	37.06	47.17
	情報共有型	0.86	14.65	35.41	36.25	46.95
	完全情報型	0.87	16.53	35.86	36.69	47.09
降雨開始660分後に避難するケース	情報なし型	4.90	15.96	26.41	32.69	35.13
	情報共有型	4.76	16.03	26.40	32.61	35.42
	完全情報型	4.80	16.01	26.54	32.76	35.61
降雨開始780分後に避難するケース	情報なし型	3.68	8.55	12.25	8.63	8.25
	情報共有型	3.58	8.31	12.24	8.31	8.25
	完全情報型	3.63	8.41	12.20	8.20	8.12

© T. Hori, Kyoto University

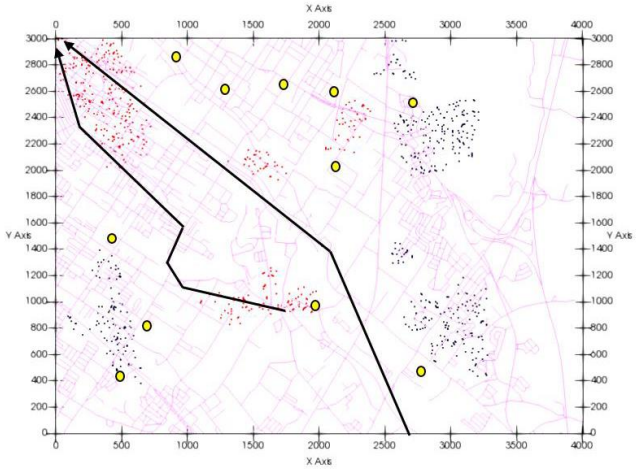
避難成功者・失敗者の初期位置



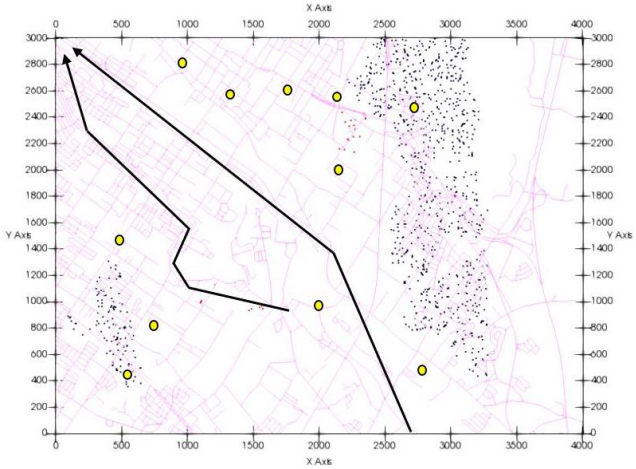
(1) 540分後避難開始



(2) 660分後避難開始



(3) 780分後避難開始



(4) 900分後避難開始

© T. Hori, Kyoto University

結 論

I. リアルタイムでの情報提供や情報共有によって，一部の避難者が九死に一生を得るようなケースが確認された.

II. ほとんどのケースでは，洪水規模や避難開始タイミングに関わらず，情報共有や情報提供によって避難成功率や避難失敗率が大幅に改善されるような事例は見られなかった.

III. 低平地など浸水の被害を受けやすい場所に住む避難者が，浸水している経路に関する情報を受け取ってから避難を開始するような状況では，避難開始のタイミングとして遅いと推測される．それゆえ，浸水被害を受けやすい場所に住む人は，周辺地域に浸水が広がる前に避難を開始することが望ましいと考えられる.

© T. Hori, Kyoto University

水害経験が避難意思決定に及ぼす影響についての強化学習を用いた解析

水害と経験

これまで経験したことのないような大雨。

○○橋の水位がここまで来たら危ない、逃げるようにという言い伝えがある。

○○年の水害の時でも、ここはつからなかった・・・。

© T. Hori, Kyoto University

経験から学べるか？

住民自身の自主的な避難「避難スイッチ」

過去の地域災害などに基づいて住民自らが河川の水位や雨脚の強さなど「独自の基準」をあらかじめ設けておき，この基準が満たされた時点で，行政側からの避難指示等が出ていなくても声をかけあって避難する（秋田県大仙市の老人ホーム，2017年など）

今まで災害が起きてこなかった地域

今いる住民の中には被災した世代がいないような地域

→基準とできるものが限られており、

具体的にどのような状況が起きればマップ上で予測されていることが起きる前兆か，

想像することは難しい

⇒機械学習の一つである強化学習を用いて，
住民が洪水経験を通じて避難判断基準を獲得していく様子を再現
河川水位を基準として様々な規模の洪水からの避難を判断させ，避難が必要になる基準
基準が空振りする頻度がどの程度影響するのかを分析

© T. Hori, Kyoto University

強化学習

生物が試行錯誤を通して未知の状況に関する知識や技術を習得していく過程をコンピュータプログラムで再現しようとするもの

学習者(エージェント)の行動選択によって結果(状態)が変化する問題において、最適な行動系列(最も多くの報酬を得られる方策)を発見する

Ex. ボードゲームAI

対戦相手の行動パターンも不確定で多岐にわたり、

勝敗が決まるまで行動の良し悪しは不明

⇒報酬に直結した行動より前の行動にも報酬を反映させる

未来に得られる報酬の期待値を組み込む

© T. Hori, Kyoto University

Q学習　←　強化学習の一種

各状況における選択肢をQ値(状態行動価値関数)という報酬の期待値を用いて評価する

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha\left(r + \gamma \max Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)\right)$$

s_t: 時刻 t での状況 : 自宅近くの河川水位　$s_t \in S = \{10\text{cm}, 20\text{cm}, \ldots\}$

a_t: 状況 s_t において選ばれた選択肢 : 自宅に留まるか避難するか

$\max Q(s_{t+1}, a_{t+1})$: 次の時刻 $t+1$ で可能な選択肢のQ値のうち最大のもの

r: 報酬

α: 学習係数 = 0.1

γ: 割引率 = 0.9

© T. Hori, Kyoto University

Q学習の避難判断問題への実装

時刻$t = 1$でstayを選んだ場合

$$Q(s_1, stay) \leftarrow Q(s_1, stay) + \alpha\left(r + \gamma \max Q(s_2, a_{t+1}) - Q(s_1, stay)\right)$$

$Q(s_2, stay)$または$Q(s_2, evac)$

s_t: 時刻 t での状況 : 自宅近くの河川水位

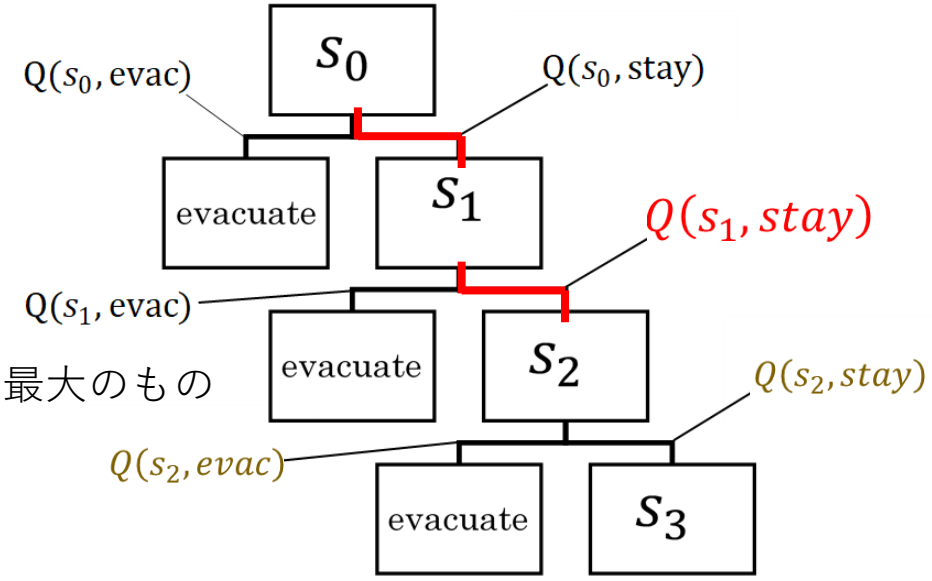
a_t: 状況 s_t において選ばれた選択肢 :
自宅に留まるか避難するか

$\max Q(s_{t+1}, a_{t+1})$:
次の時刻 $t+1$ で可能な選択肢のQ値のうち最大のもの

r: 報酬

α: 学習係数 = 0.1

γ: 割引率 = 0.9



© T. Hori, Kyoto University

避難判断基準の学習　学習データ

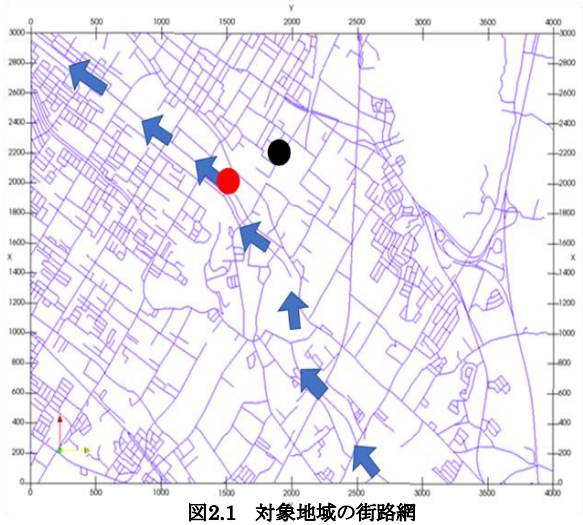


図2.1　対象地域の街路網

黒丸が避難所,
赤丸がモデル避難者の初期位置

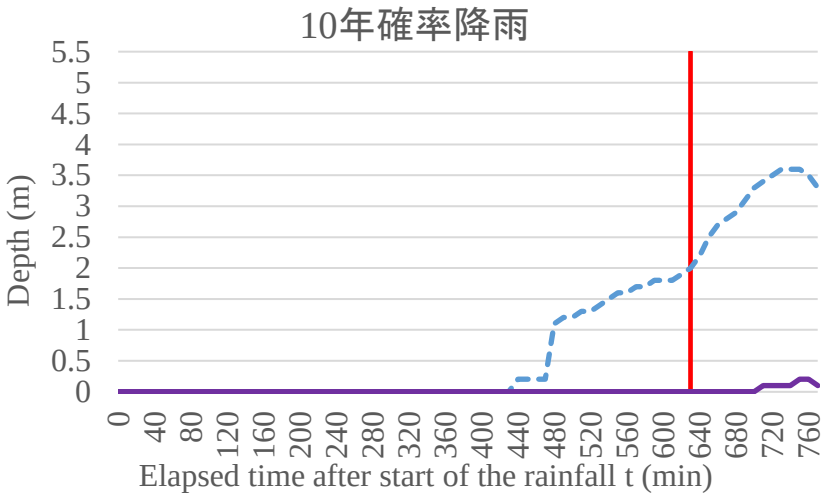
滋賀県芹川流域の一部,
南北方向に3,000m,
東西方向に4,000mの領域に
RRIモデルを用いて一様な雨を降らせ,
住民が避難できるかどうかを一分ごとに解析

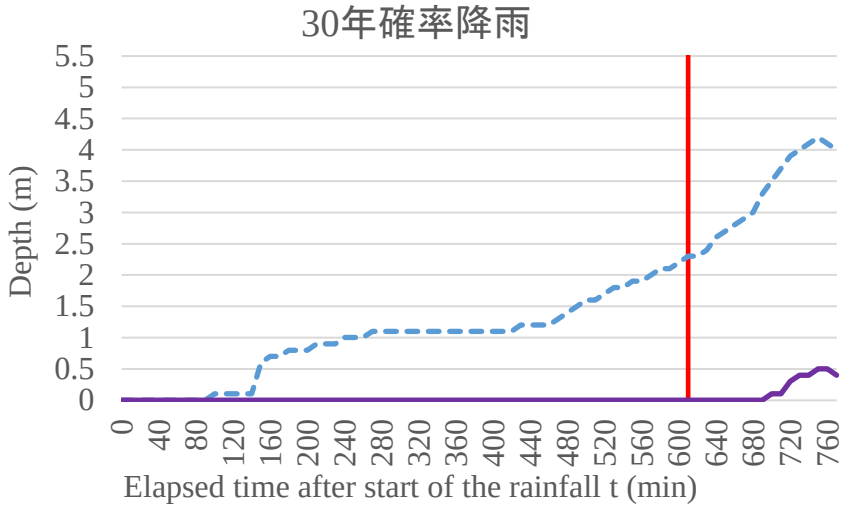
今回の学習
洪水がピークになる降雨開始後770分までを
シミュレーション時間とし，時間ステップ
を10分ごと，河川水位および自宅浸水深を
10cm単位として整理し環境のデータとした

© T. Hori, Kyoto University

避難判断基準の学習　学習データ

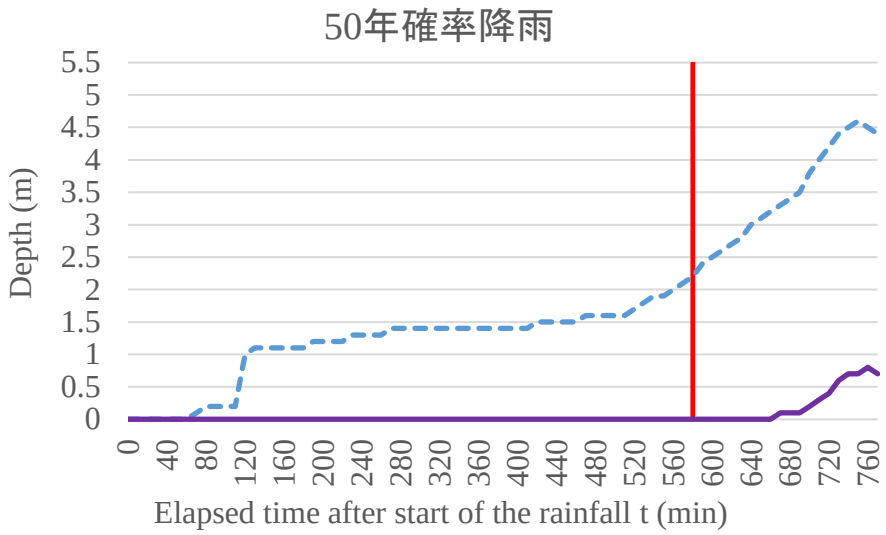
	10年	30年	50年	100年	200年
河川水位 最大値	360cm	420cm	460cm	500cm	540cm
自宅浸水 最大値	20cm	50cm	80cm	100cm	130cm
避難可能 最終時刻	630min (200cm)	610min (230cm)	580min (220cm)	530min (230cm)	490min (220cm)

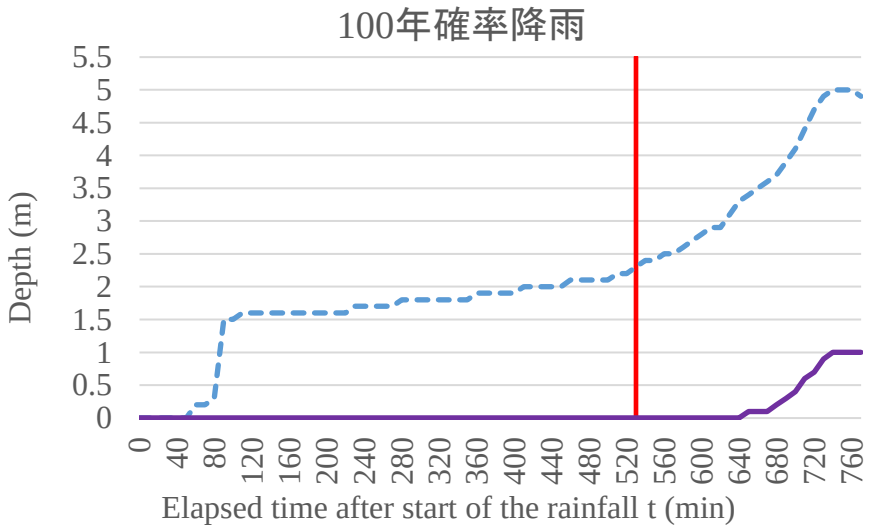


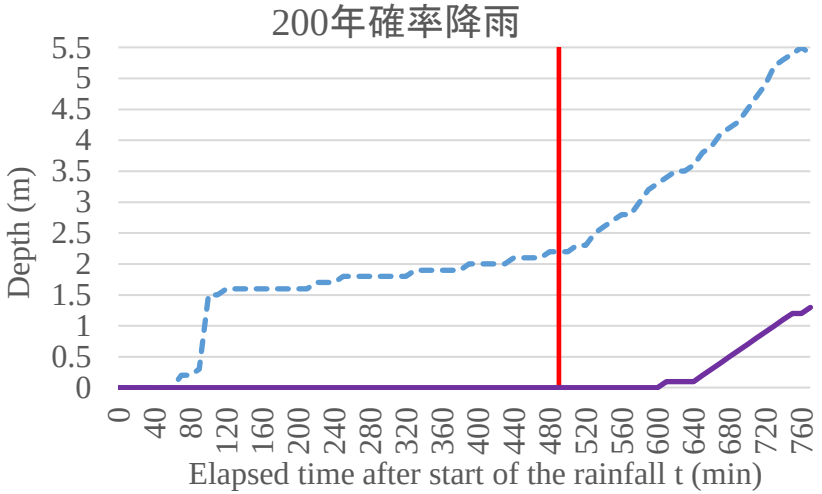


© T. Hori, Kyoto University

避難判断基準の学習　学習データ







© T. Hori, Kyoto University

方策１　Q値の比で行動選択確率を求める

状態がs（参照する水位）のとき

避難するQ値$Q(s, evac)$

自宅に留まるQ値$Q(s, stay)$

をそれぞれ設定

初期値

$Q(s, evac) = 0.1$

$Q(s, stay) = 0.9$

$$\Pr[evacuation] = \frac{Q(s, evac)}{Q(s, evac) + Q(s, stay)}$$

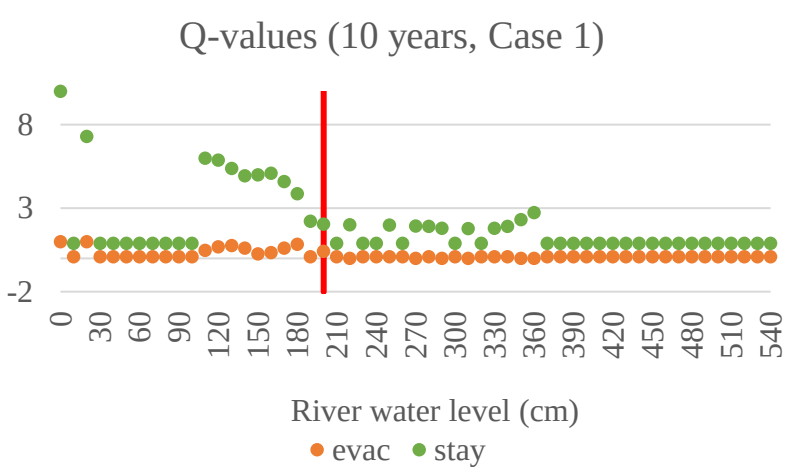
$$\Pr[stay] = \frac{Q(s, stay)}{Q(s, evac) + Q(s, stay)}$$

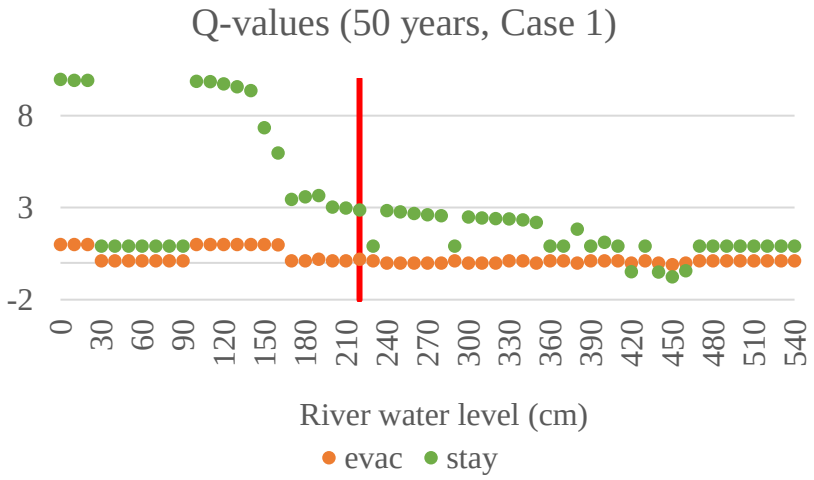
（ケース１）
避難を選択後,
避難所にたどり着ければ報酬＋1、たどり着けなければ－1

自宅に留まることを選択後,
次の時刻の自宅浸水深が50cm未満なら＋1、50cm以上なら－1を報酬として与える

© T. Hori, Kyoto University

方策１　Q値の比で行動選択確率を求める





$Q(s, stay)$は水位が上昇するにつれ低下
　→　自宅に留まることへの不安感ととらえ，自宅に留まってもよいQ値の最低値を設定するなどすれば，エージェントが避難を判断することが可能

避難の必要がない10年確率降雨でも$Q(s, stay)$の低下が見られた
　→　$Q(s, evac)$に正の報酬を与えると$Q(s, stay)$が十分更新されない？

© T. Hori, Kyoto University

方策１　Q値の日を用いる（ケース２）

状態がs（参照する水位）のとき

避難するQ値$Q(s, evac)$

自宅に留まるQ値$Q(s, stay)$

をそれぞれ設定

初期値

$Q(s, evac) = 0.1$

$Q(s, stay) = 0.9$

$$\Pr[evacuation] = \frac{Q(s, evac)}{Q(s, evac) + Q(s, stay)}$$

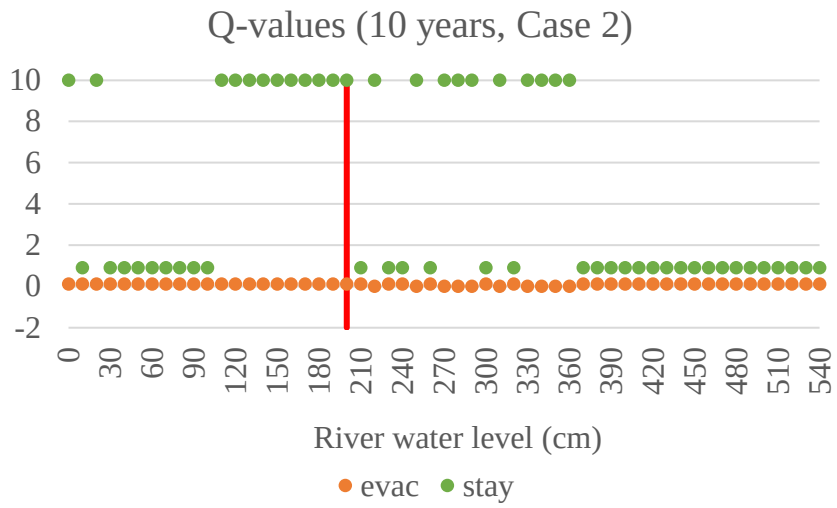
$$\Pr[stay] = \frac{Q(s, stay)}{Q(s, evac) + Q(s, stay)}$$

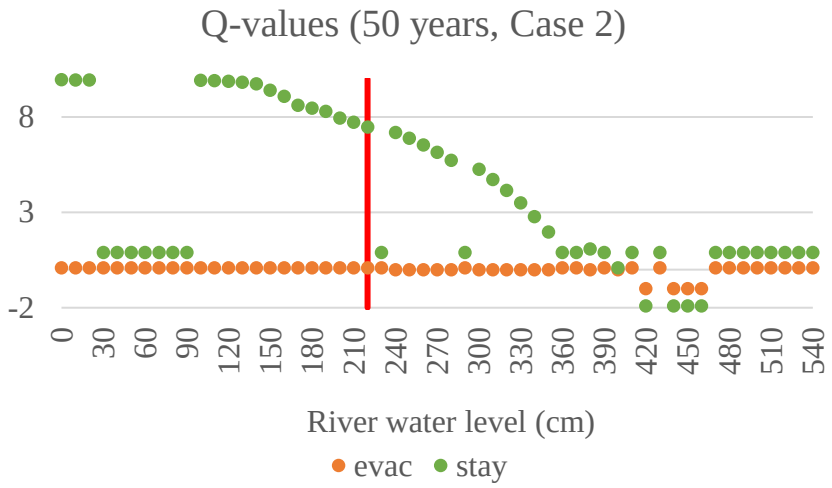
（ケース２）
避難を選択後,
避難所にたどり着ければ報酬０、たどり着けなければ－1

自宅に留まることを選択後,
次の時刻の自宅浸水深が50cm未満なら＋1、50cm以上なら－1を報酬として与える

© T. Hori, Kyoto University

方策１　Q値の日を用いる（ケース２）





$Q(s, stay)$は水位が上昇するにつれ緩やかに低下

避難の必要がない10年確率降雨で$Q(s, stay)$の低下が見られなくなった
　→$Q(s, stay)$は十分更新された

次に、浸水にあった際の負の報酬を相対的に大きく評価するケース３を設定

・
・
・

© T. Hori, Kyoto University

方策２　行動選択確率にシグモイド関数を用いる

避難のQ値$Q(s, evac)$をxとし，
避難を選択する確率を
シグモイド関数によって決定する
（避難しない選択は余事象とする）

$$\Pr[evacuation] = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$\Pr[stay] = 1 - \Pr[evacuation]$$

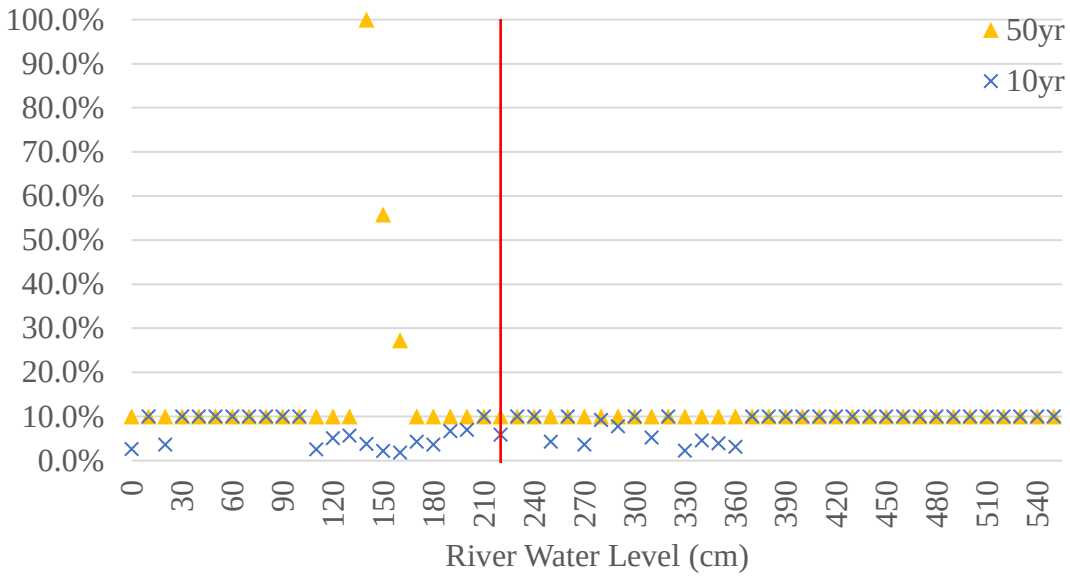
初期値
$Q(s, evac) = -2.2$（10％の確率で避難）

（学習時間：降雨開始後390分以降）
避難を選択後，
避難所にたどり着くことができ、かつ自宅が浸水した場合、報酬＋１０

それ以外－１０
（避難して失敗，家にいて浸水にあう，避難したが自宅が浸水しなかった場合）

© T. Hori, Kyoto University

方策２　行動選択確率にシグモイド関数を用いる

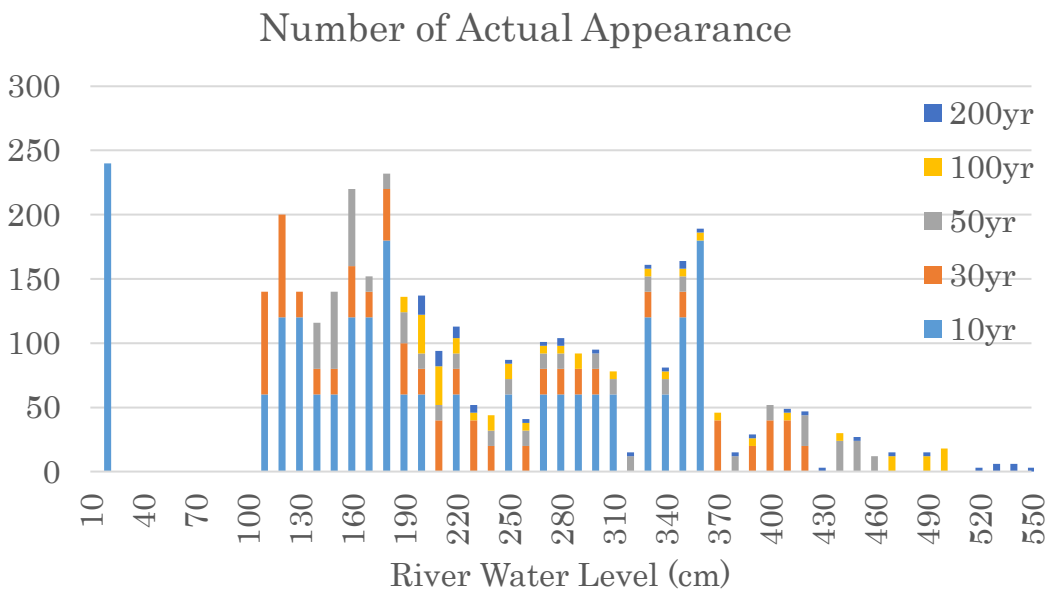


10年確率降雨で避難する確率は10％以下
50年確率降雨で避難する確率は140cm，150cm，160cmで高く，140cmでは100％

⇒住民が毎年いろいろな雨を経験することを考慮し，
10年：30年：50年：100年：200年＝60：20：12：6：3という回数の割合で学習

© T. Hori, Kyoto University

いろいろな雨を経験する

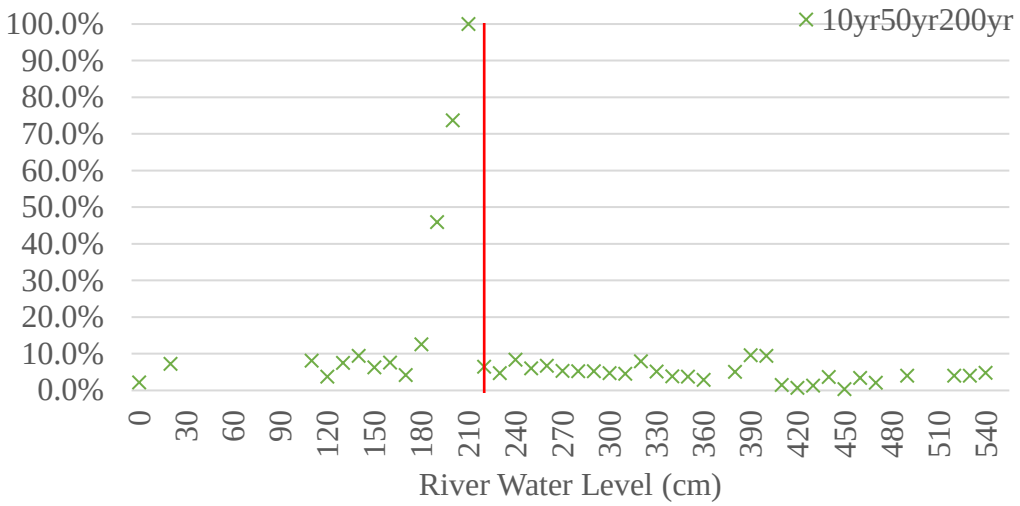


⇒住民が毎年いろいろな雨を経験することを考慮し，
10年：30年：50年：100年：200年＝60：20：12：6：3という回数の割合で学習

エージェントが参照するタイミングに現れない水位は更新されない
（水位210cmや230cmは10年確率降雨では更新されない）

© T. Hori, Kyoto University

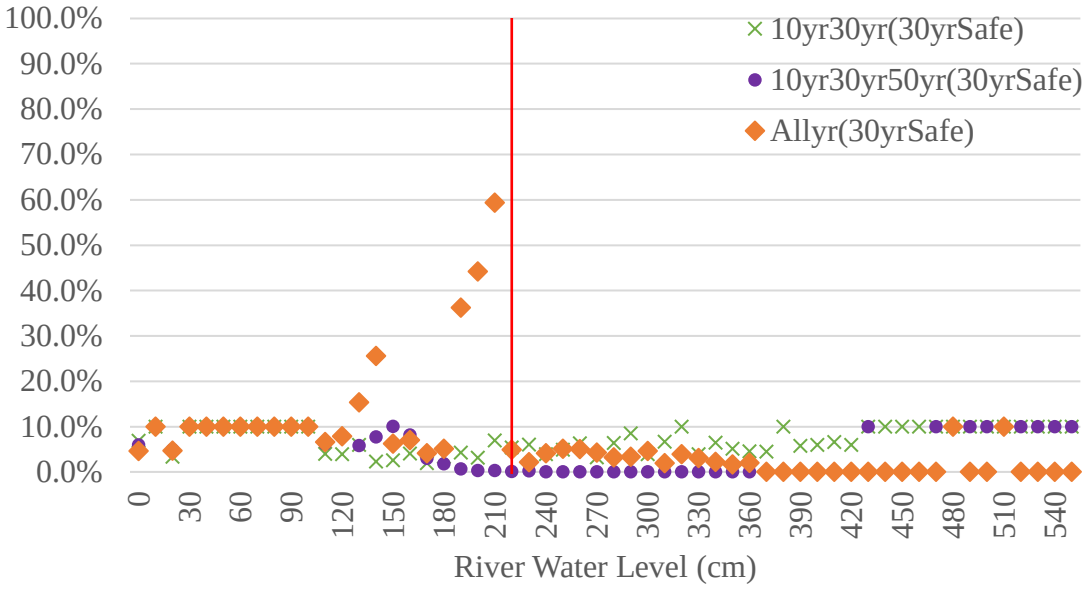
いろいろな雨を経験する（1）



・10年50年200年の三つの確率降雨
・ほとんどの水位でQ値が初期値を下回り，避難確率が10％以下となった
・50年、200年確率降雨が起きた場合に避難不可能になる直前（200cm，210cm）では確実に避難を選択する。特に，水位210cmは避難の空振りがないため，高確率となっている

© T. Hori, Kyoto University

いろいろな雨を経験する（2）



30年確率降雨までと50年確率降雨までとで学習（**30年確率降雨で避難不要**）
・遭遇確率の低い確率降雨でしか避難する必要がないため，
50年以下の確率降雨の学習ではほとんど避難しない
⇒200年確率降雨まで学習
・水位210cmで約60％の確率で避難

© T. Hori, Kyoto University

結　論

避難判断基準を経験から学ぶことを、コンピュータで模擬することはできそうだ。

いろいろな規模の降雨（水害）を経験すると、河川の水位だけに頼って判断する場合、大水害の際に逃げ遅れの無いタイミングで避難の判断ができる割合は、6割程度となった。

実際には、雨量の予測情報や、予警報、避難情報と、河川の水位を組み合わせて判断する。

人が一生かかっても、何代かかっても、経験することのできない数の災害を経験しながら学習することができる。

© T. Hori, Kyoto University

終りに

- 水害時のリアルタイムの浸水情報、経路の障害情報は、命を守ることに確かに役立つ。
- しかし、そうした情報が役に立つようになる前に逃げる、早期避難の効果がはるかに大きい。
- 水害経験から自ら避難判断基準を獲得していく過程を、コンピュータ上で模擬することは可能である。
- 膨大な数の様々な豪雨・水害を模擬的に経験し、学習することで、避難判断を支援するシステムを作ることができるかもしれない。

© T. Hori, Kyoto University