

(株)NTTデータ数理システム
2024年度 学生研究奨励賞

道路の災害リスクの変化を考慮した 交通流制御手法の検討

東京理科大学 創域理工学部 経営システム工学科

石垣研究室 船越皓太

目次

1. 研究背景
2. 研究手法
3. 実験結果
4. 結論

災害時の自動車避難

◆ 自動車避難に対する考え方の変化

平成10年：地域防災計画における津波対策強化の手引き（抜粋）^[1]
自動車による避難は，原則として禁止するものとする。

平成24年：津波避難対策検討ワーキンググループ第5回会合（抜粋）^[2]
原則徒歩避難としつつも
自動車避難のあり方を検討する必要がある。

自動車で安全かつ確実に避難できる方策が必要

自動車避難の問題

◆ 自動車避難の主な問題

平成23年度東日本大震災における避難行動等に関する面接調査(住民)^[3]
自動車避難するときに障害となったこと(複数回答)

災害に伴う道路障害



車両の渋滞

車両の放置, 避難の遅れ

車両での避難の影響で, 被災者が発生する可能性あり

道路障害を避け, かつ, 渋滞を起こさない経路の導出

本研究のきっかけ

◆ 災害時の車両交通マネジメント実現には...

災害予測・モニタリング



車両交通マネジメント

相互の連携が必要不可欠！

土木・災害系

- ✓ 災害時の詳細な分析
- ✓ データ駆動の解析

× 限定的なモデルに特化



OR・情報系

- ✓ 経路の大域的な分析
- ✓ モデル駆動の解析

× 災害リスクの抜け落ち

関連研究(土木・災害系)

◆ 杉本ら(2023) [4]

アンダーパス冠水による避難経路への影響評価



図1. アンダーパス冠水 [5]

大阪府を対象に、
水害特有の道路障害が
避難距離へ与える影響を検討

- ✓ 実際のデータを参照して分析
- ✓ 災害特有の影響にも対応可能

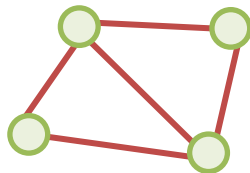
分析の関係上、特定の災害・状況へ注目しやすい

関連研究(OR・情報系)

◆ 磯貝ら(2024) [6]

地域単位の複数避難経路を想定した避難計画モデル

地域をネットワークとして
モデル化



ネットワークの構成:

- ノード: 丁, 交差点, 避難所
- エッジ: 道路
- エッジの重み: 距離と道幅

どの地域の間が, どの避難所へ, どの経路で避難するべきか?

- ✓ 問題のモデル化と最適解の導出
- ✓ 問題を解くアルゴリズムや計算量に注目

特定の災害による影響はモデルに反映されづらい

リスク対応について

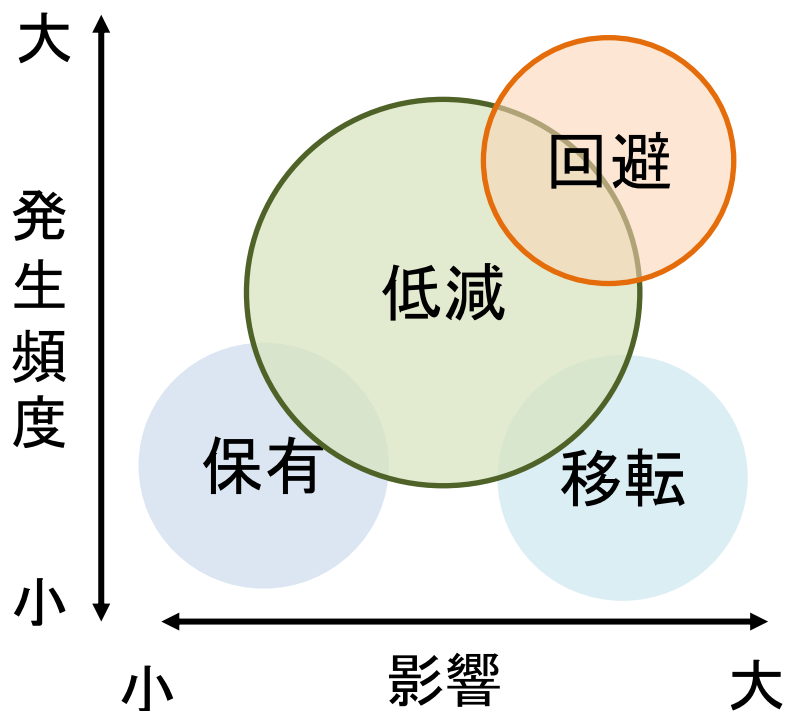


図2. リスクマネジメント [7]

◆ 災害リスク

災害に“遭遇する”リスク

➡ 時系列変化(動的変化)

◆ リスクマネジメント [7]

制御可能
回避 → リスクを避ける
低減 → リスクを減らす

制御不可
保有 → リスクを受け入れる
移転 → リスクを第三者に移す

災害リスクを回避・低減させるために
車両を動的に誘導する必要がある

研究の全体像と本研究の位置づけ

土木・災害系

交通・気象モニタリング

交通密度の観測

リアルタイム道路障害

OR・情報系

将来の災害リスクの推定

災害時の交通流制御モデル

被災車両数最小となるように車両を動的に制御

本研究では、災害を「洪水」に絞り、検証を行う

研究の全体像と本研究の位置づけ

土木・災害系

交通・気象モニタリング

交通密度の観測

浸水による通行不可道路

OR・情報系

将来の浸水リスクの推定

本研究【洪水時交通流制御モデル】

被災車両数最小となるように車両を動的に制御

研究目的

洪水時において被災車両数が最小となる交通流制御モデルの開発と、浸水リスクの評価による効果の可視化

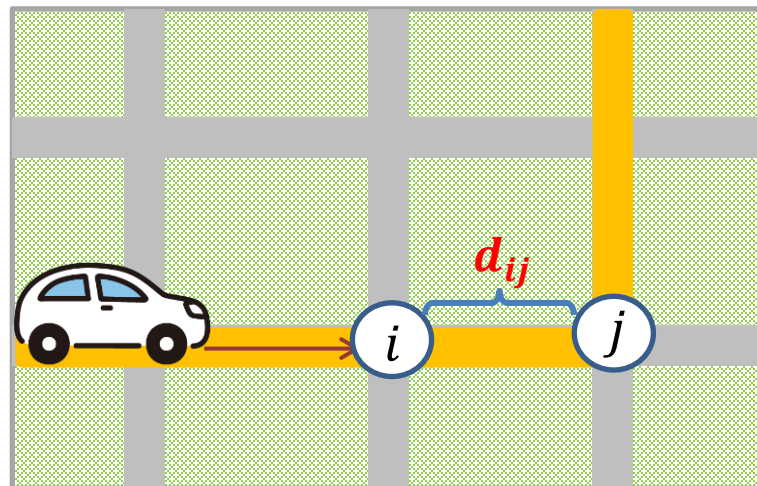
最短経路問題

【記号】

x_{ij} : 道路(i, j)の通行の有無を示す
バイナリ変数

d_{ij} : 道路(i, j)間の距離

u_i : 地点 i を通過する順序



$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} d_{ij} x_{ij}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i|(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{i|(i,j) \in E} x_{ji} = \begin{cases} -1 & j = s \\ 0 & \forall j \in V / \{s, g\} \\ 1 & j = g \end{cases}$$

$$u_i = u_j + (1 - x_{ij}) \times \text{BigM}$$

十分に大きい値

目的地(避難所等)までの
距離を最小化する経路

災害時の単純な最短経路問題（基本モデル）

【記号】

x_{ij} : 道路(i, j)の通行の有無を示す
バイナリ変数

d_{ij} : 道路(i, j)間の距離

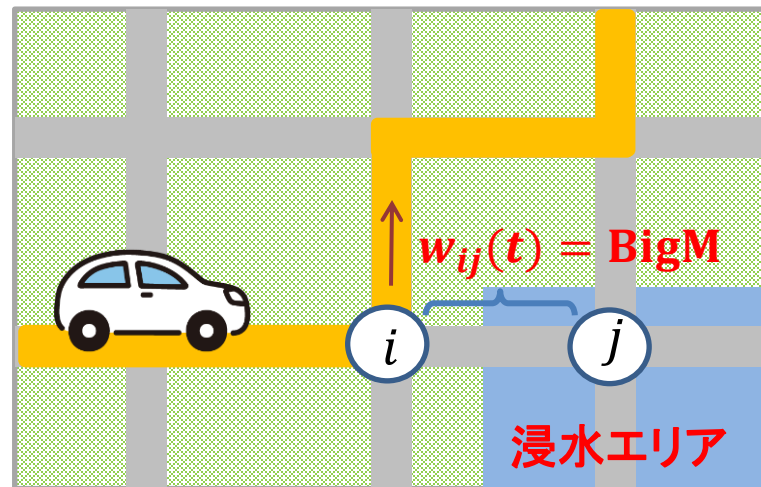
$f_{ij}(t)$: 時刻 t における道路(i, j)の
浸水の有無を示すバイナリ変数

$w_{ij}(t)$: 時刻 t における浸水による影響を
加味した道路(i, j)間の**仮想距離**

$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} w_{ij}(t) x_{ij}$$

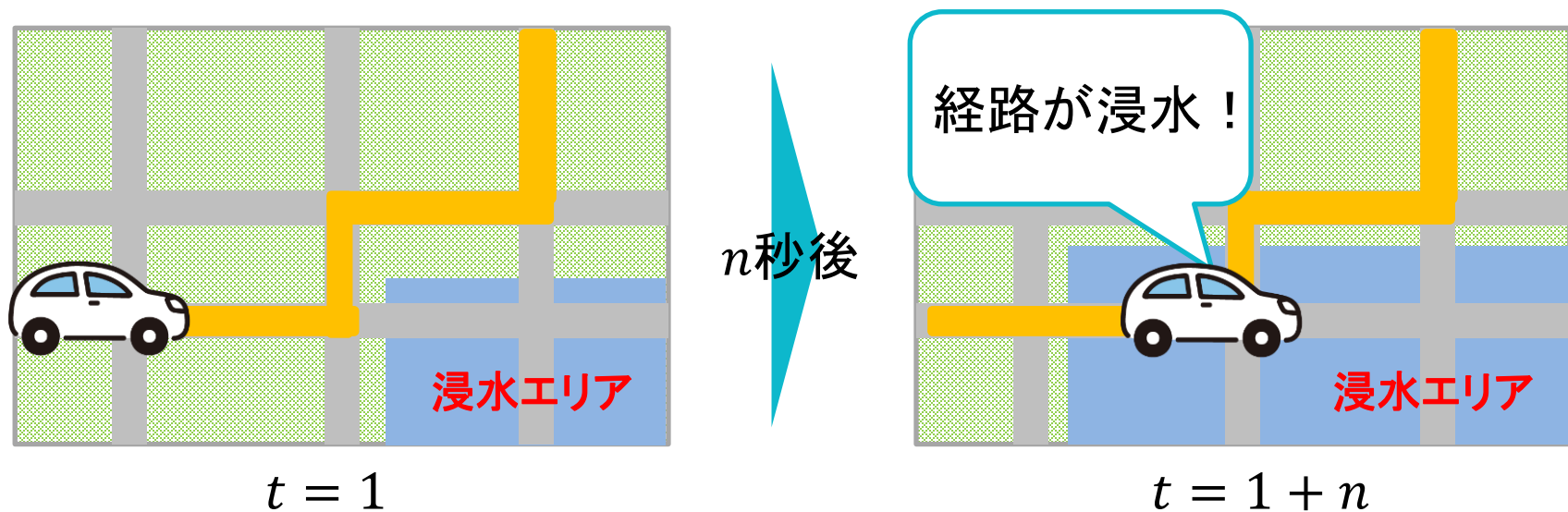
$$\text{s. t. } w_{ij}(t) = d_{ij} + f_{ij}(t) \times \text{BigM}$$

浸水あり \rightarrow $w_{ij}(t)$ を十分に大きく



浸水エリアを避けたうえで、
目的地（避難所等）までの
距離を最小化する経路

避難経路問題の欠点【時系列的な浸水リスク】



◆ 災害範囲が時系列的に変化する

洪水(浸水エリア)などは、時系列的に災害範囲が変化する



現時点の災害範囲だけでなく、
将来的な災害範囲を見越し、**動的な交通流制御**が必要

浸水リスクを考慮した最適経路モデル

【記号】

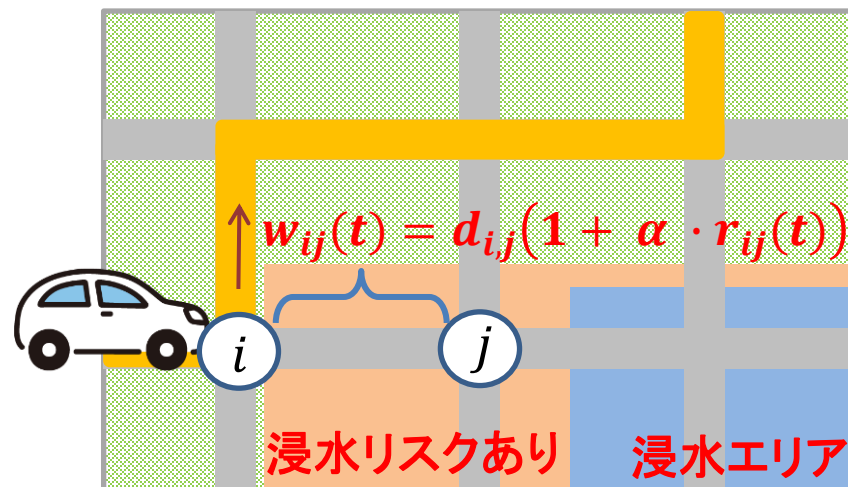
x_{ij} : 道路(i, j)の通行の有無を示す
バイナリ変数

d_{ij} : 道路(i, j)間の距離

$f_{ij}(t)$: 時刻 t における道路(i, j)の
浸水の有無を示すバイナリ変数

$w_{ij}(t)$: 時刻 t における浸水による影響を
加味した道路(i, j)間の**仮想距離**

$r_{ij}(t)$: 時刻 t における
道路(i, j)間の浸水リスク $[0, 1]$



$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} w_{ij}(t) x_{ij}$$

$$\text{s. t. } w_{ij}(t) = f_{ij}(t) \times \text{BigM} + d_{i,j}(1 + \alpha \cdot r_{ij}(t))$$

距離 $d_{i,j}$ とリスク $r_{ij}(t)$ の重み

浸水リスクの時系列変化

を踏まえた

目的地への**最適経路**

➡ **【実験】** α が変化したときの車の挙動(被災車両数)を調べる

実験の概要

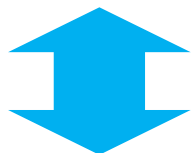
車 (数理最適化)



- 交差点到着時 **提案モデル** を用いて経路を計算
- Gippsモデルに従った挙動

道路状況・浸水リスク

- 浸水の有無 $f_{ij}(t)$ を入力
- 浸水リスク $r_{ij}(t)$ を入力



シミュレーション

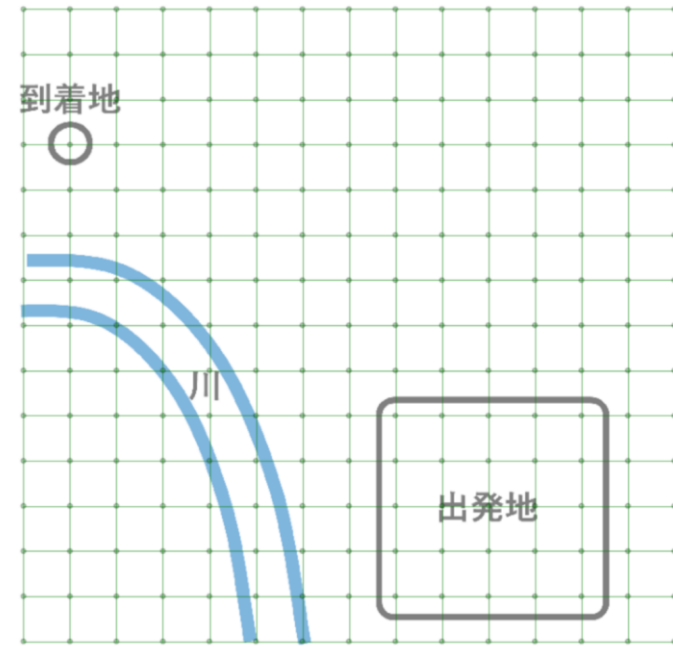
S⁴ SimulationSystem [8]
(Multi-agent simulation)

- 経路に従いシミュレーションを実施
- $r_{ij}(t)$, $f_{ij}(t)$ をリアルタイムに更新
- 浸水エリアに車両が進入 → 被災車両とする

実験の概要

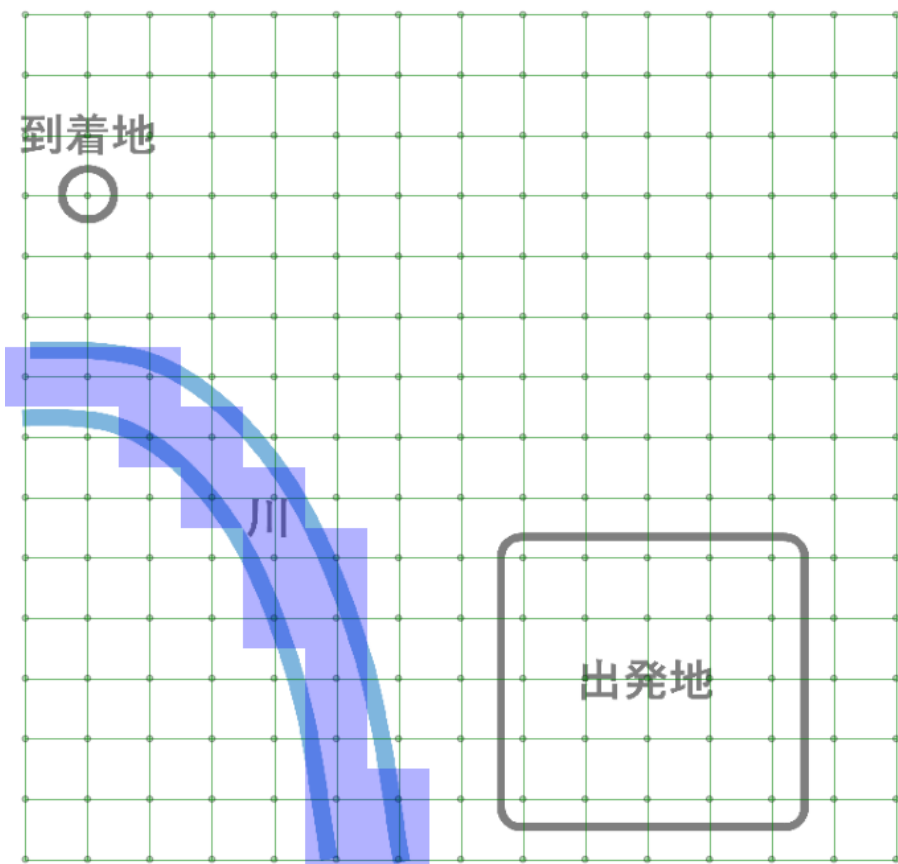
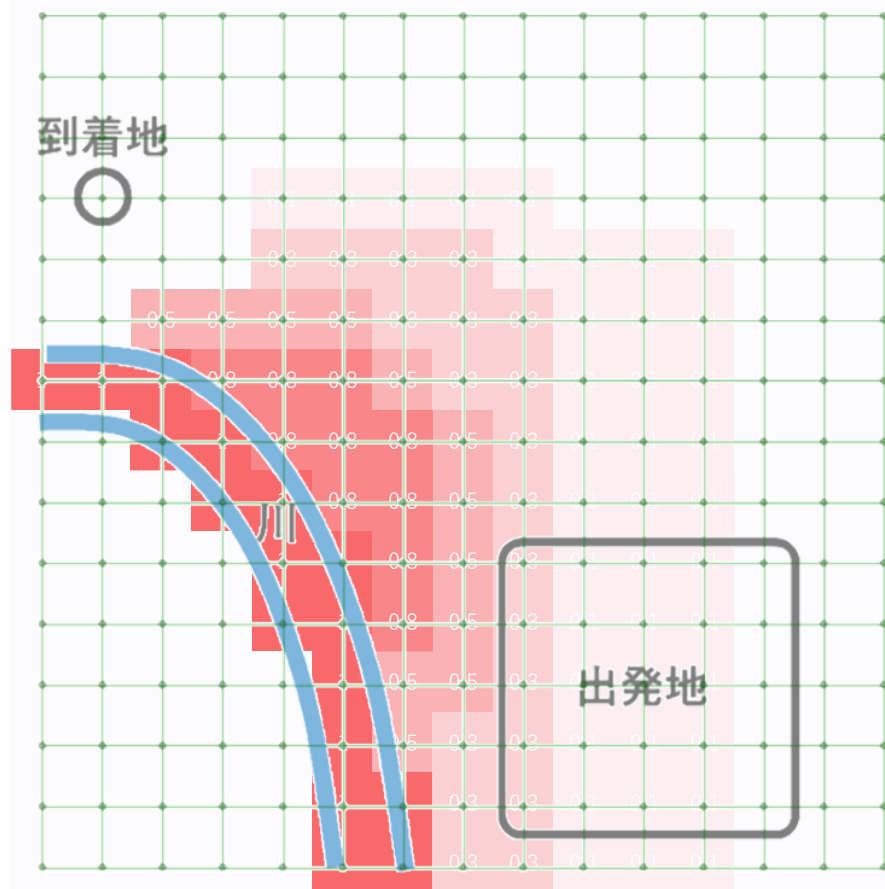
◆ パラメータ

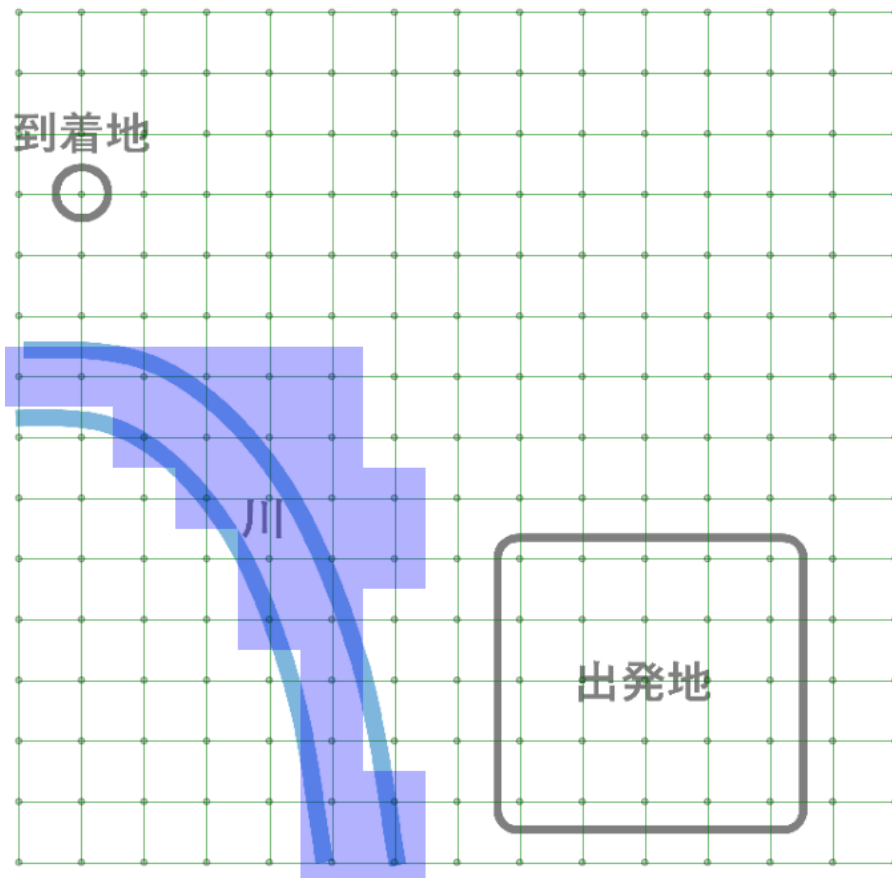
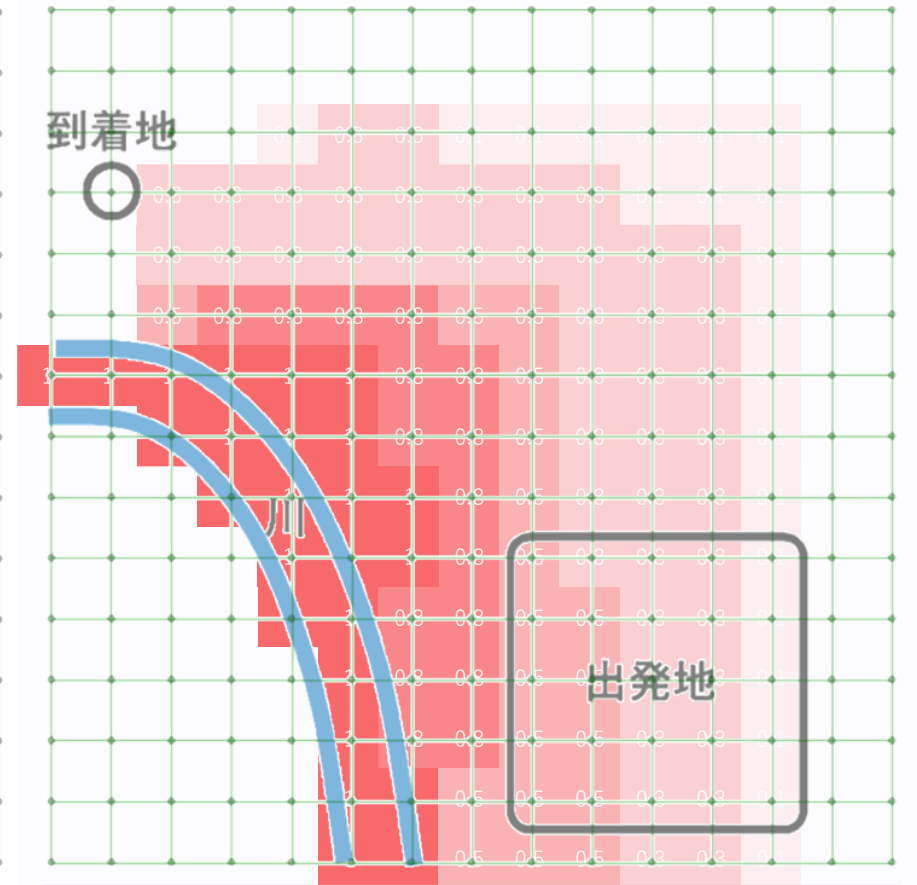
- 車両台数: 200台
- 発生場所: 出発地からランダム
- 発生間隔: 平均1の指数分布
- 交差点間隔: 200m
- 乱数シード値: 40

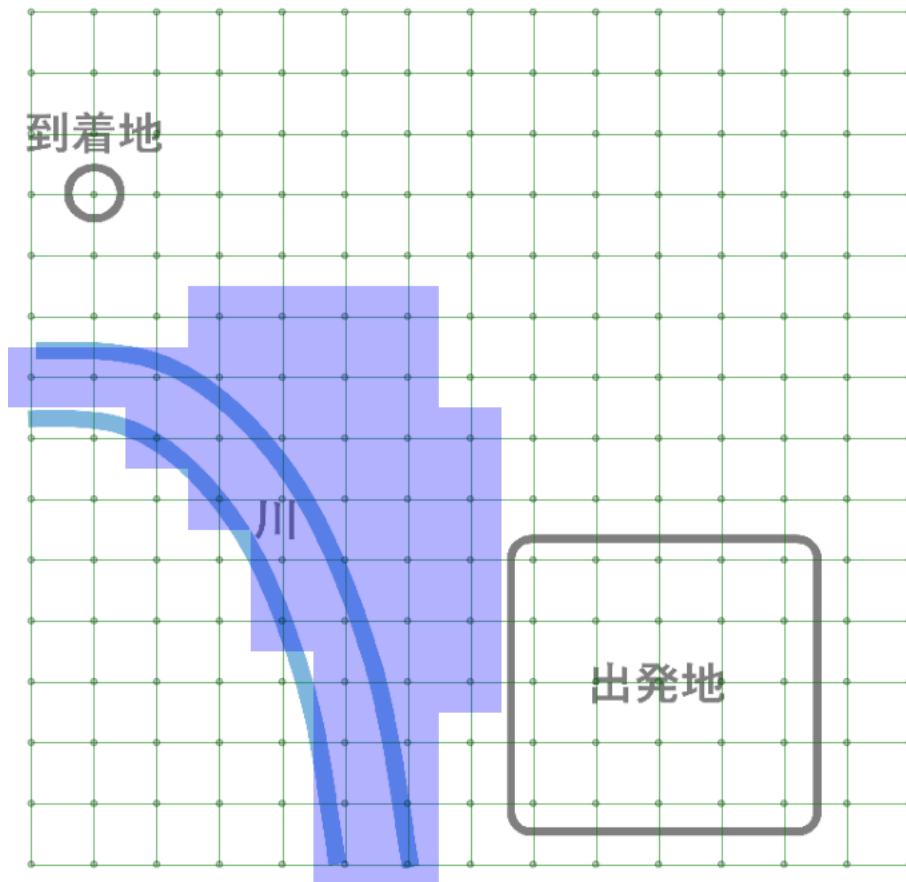
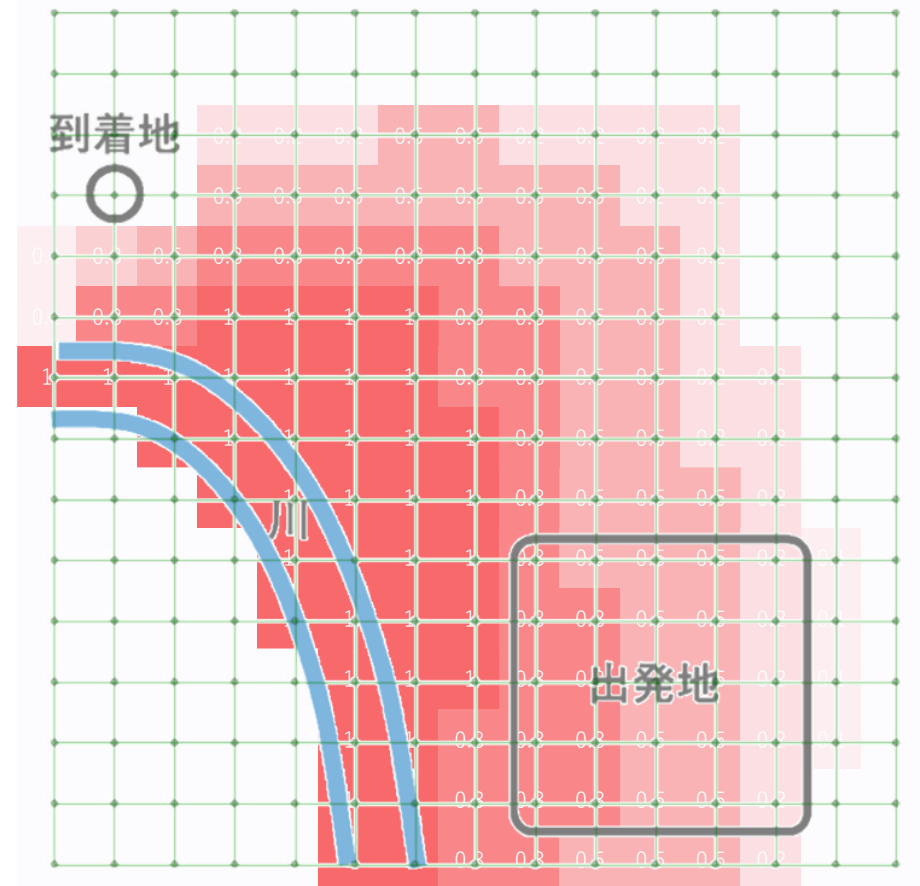


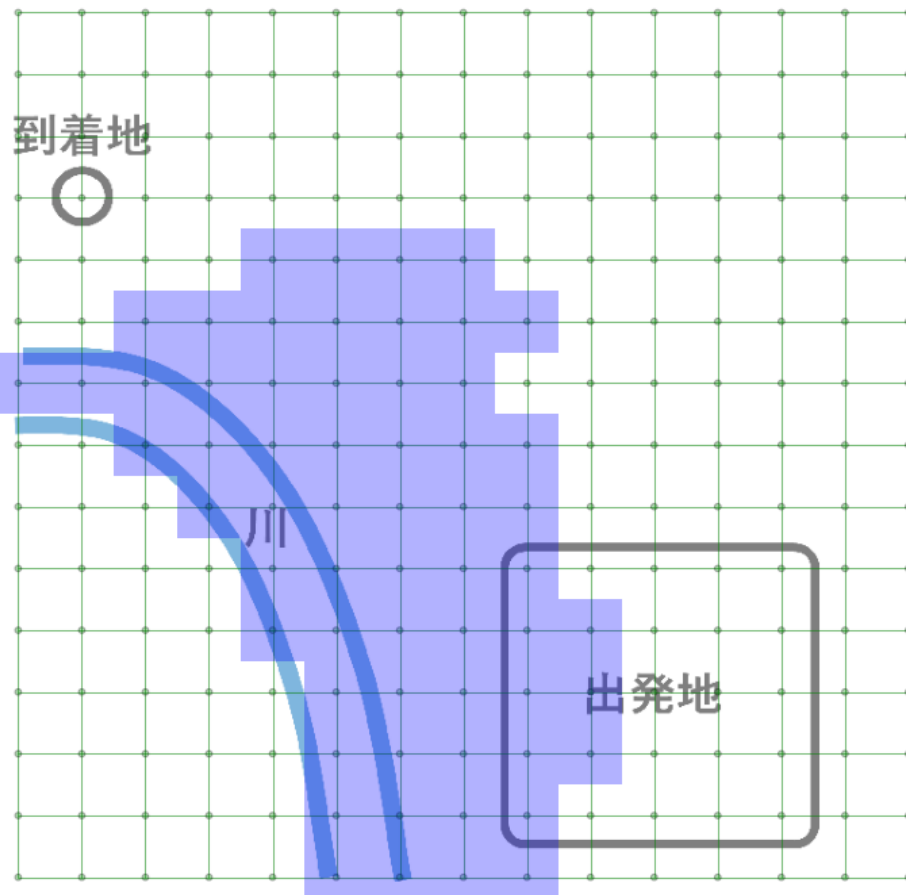
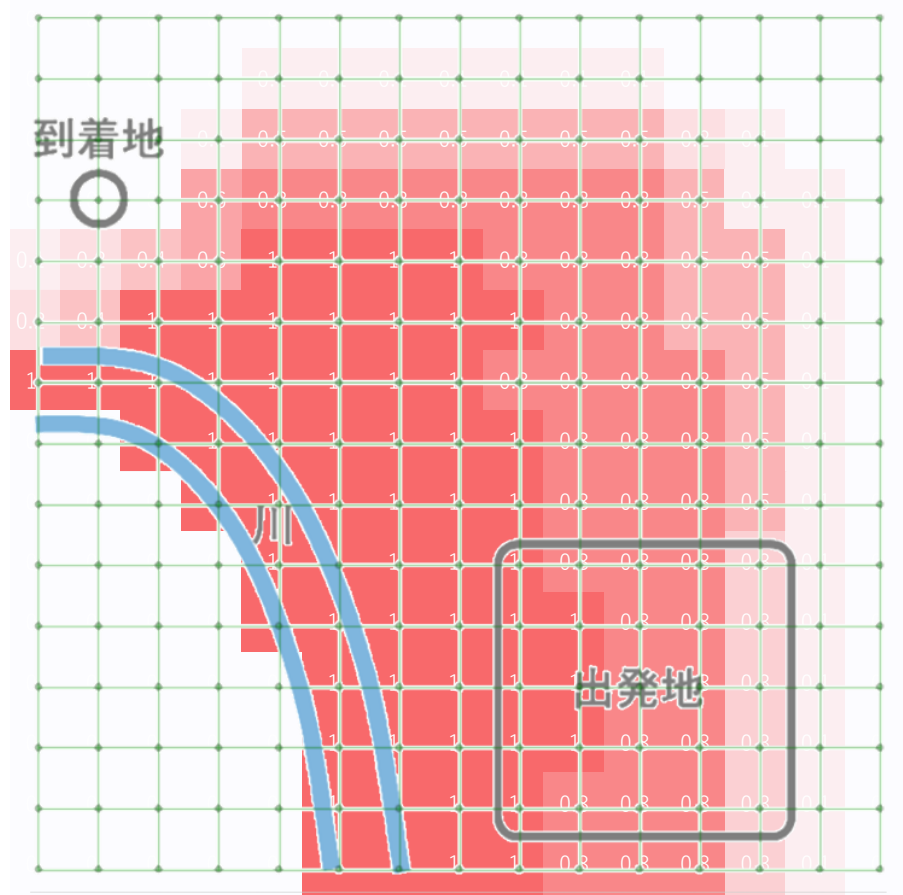
◆ 仮定

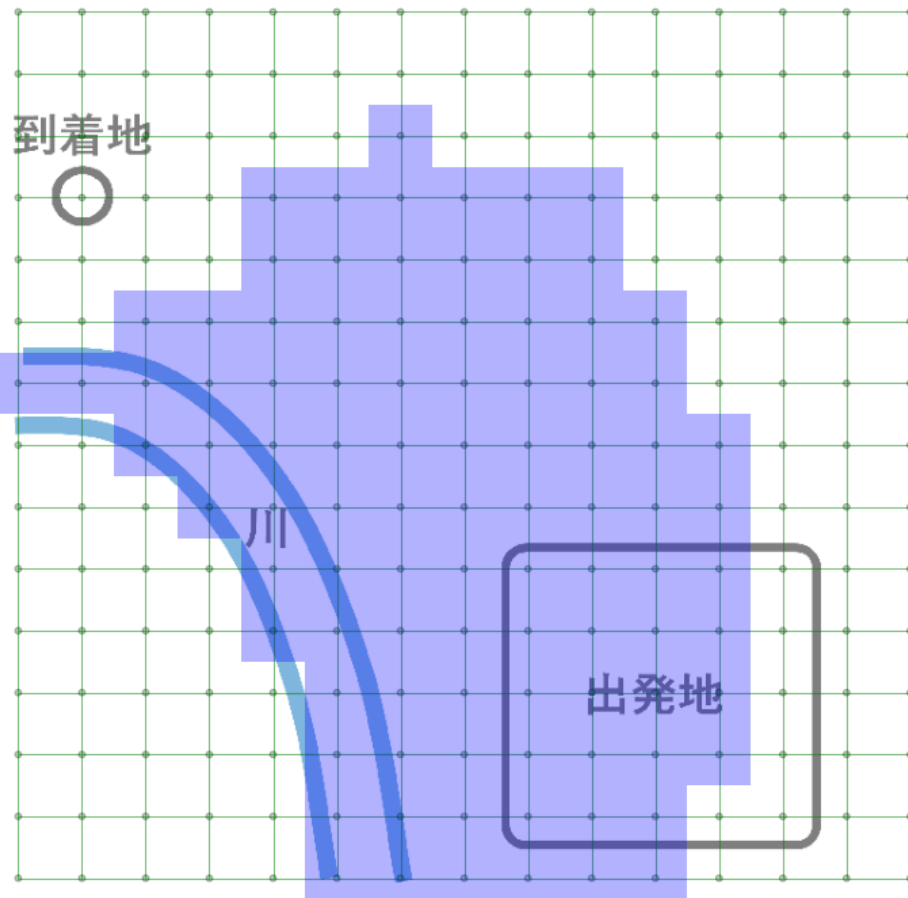
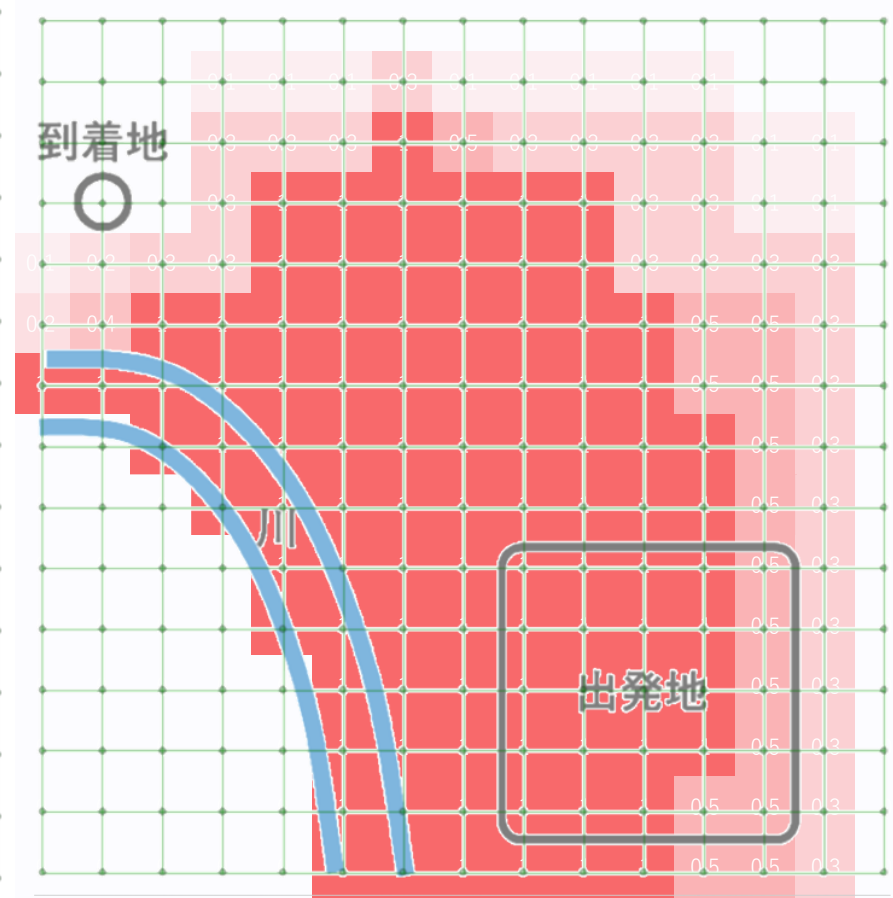
- 全ての交差点にて信号機による交通流制御が可能
- 浸水の有無 $f_{ij}(t)$, 浸水リスク $r_{ij}(t)$ が, 交差点を中心とした1辺200m四方のメッシュとして, 離散的に取得可能
- Uターンは禁止とする

浸水の有無 $f_{ij}(t)$ と浸水リスク $r_{ij}(t)$ $t = 0 \sim 180$ [s]浸水の有無 ($f_{ij}(t)$)浸水リスク ($r_{ij}(t)$)

浸水の有無 $f_{ij}(t)$ と浸水リスク $r_{ij}(t)$ $t = 180 \sim 360$ [s]浸水の有無 ($f_{ij}(t)$)浸水リスク ($r_{ij}(t)$)

浸水の有無 $f_{ij}(t)$ と浸水リスク $r_{ij}(t)$ $t = 360 \sim 540$ [s]浸水の有無 ($f_{ij}(t)$)浸水リスク ($r_{ij}(t)$)

浸水の有無 $f_{ij}(t)$ と浸水リスク $r_{ij}(t)$ $t = 540 \sim 720$ [s]浸水の有無 ($f_{ij}(t)$)浸水リスク ($r_{ij}(t)$)

浸水の有無 $f_{ij}(t)$ と浸水リスク $r_{ij}(t)$ $t = 720 \sim [s]$ 浸水の有無 ($f_{ij}(t)$)浸水リスク ($r_{ij}(t)$)

実験結果

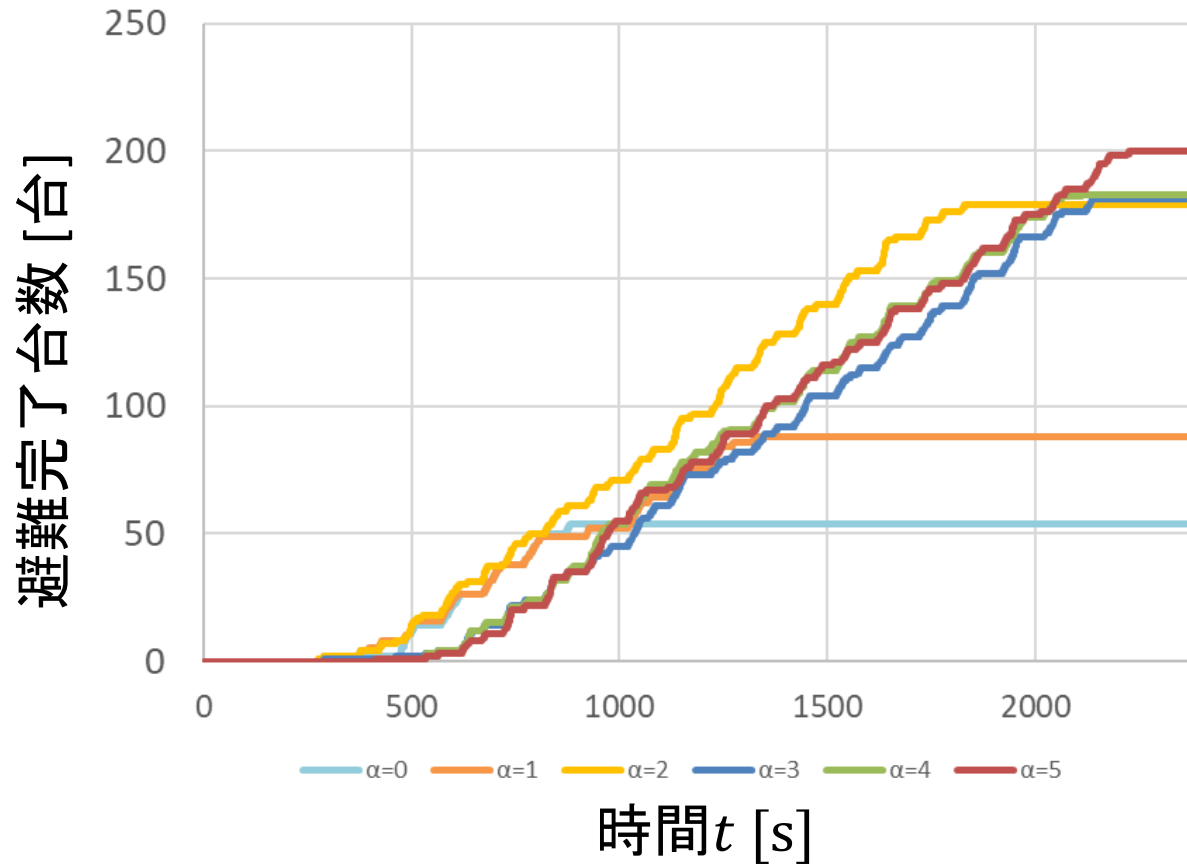


図2. 時間と避難完了台数の関係

実験結果

表1. 実験結果

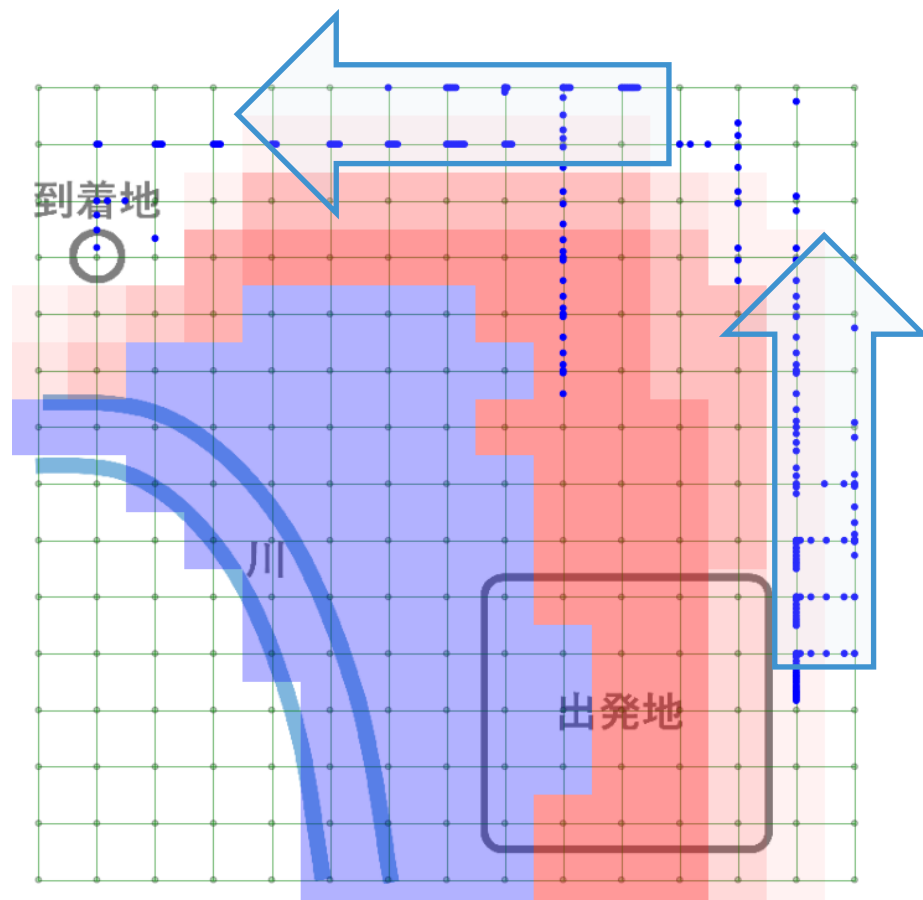
	避難完了 台数[台]	被災車両 台数[台]	平均到着 時間[s]	最短到着 時間[s]	最長到着 時間 [s]
$\alpha = 0$	54	146	559.2	185	883
$\alpha = 1$	88	112	760.5	722	798
$\alpha = 2$	179	21	1015.9	723	1829
$\alpha = 3$	181	19	1269.1	290	2136
$\alpha = 4$	183	17	1211.7	723	2113
$\alpha = 5$	200	0	1292.0	413	2225

 α を大きくした時

- 避難完了台数→増加した(被災車両台数が減少した)
- 平均到着時間→増加した
- 最短到着時間→増加した
- 最長到着時間→増加した

考察

- α を大きくするにつれて、災害リスクの重みが大きくなるため、妥当な結果である。
- α を大きくするにつれて、車両の到着が遅れるのは、最短経路を避け、安全な経路を通ったからといえる。
- 安全な経路で渋滞が発生したため、「混雑度」もモデルに考慮すると良いと考えられる。

図3. 実験結果 ($\alpha = 5, t = 620$)

結論

研究目的

洪水時において被災車両数が最小となる交通流制御モデルの開発と、浸水リスクの評価による効果の可視化

結論

洪水時において、浸水リスクを考慮すると被災車両数が減少することが示された

今後の展望

- 道路の混雑度を考慮したモデルを構築する
- 災害リスクの決定方法について
専門家の知見を踏まえて検討する

参考文献

- [1] 内閣府防災情報, 地域防災計画における津波対策強化の手引き,
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/5/pdf/sub3.pdf>
- [2] 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ, 第5回会合資料3「自動車
で安全かつ確実に避難できる方策」,
<https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/5/pdf/3.pdf>
- [3] 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会, 第9回会合資
料2「平成23年度東日本大震災における避難行動等に関する面接調査(住民)分析結果
(再追加分)」, <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/9/pdf/2.pdf>
- [4] 杉本 賢二, 谷 眞太郎, 八木 隆征, アンダーパス冠水による避難経路への影響評価, 土木
学会論文集, Vol. 79, No. 22, 22-22003, 2023.
- [5] photoAC, 写真素材:冠水した道路 2(引き返す車),
<https://www.photo-ac.com/main/detail/639581/>
- [6] 磯貝稜空, 武藤 敦子, 島 孔介, 森山 甲一, 松井 藤五郎, 犬塚 信博, 地域単位の複数避
難経路を想定した避難計画モデル, 第23回情報科学技術フォーラム論文集, A-030,
pp.123-124, 2024
- [7] 岡安 徹也, 水害リスクマネジメントの現状と展望, JICE REPORT 第31号, pp.2-7, 2017
- [8] 株式会社NTTデータ数理システム, S4 Simulation System,
<https://www.msi.co.jp/solution/s4/top.html>

本研究の実施にあたり、二瓶氏、平本氏をはじめ、
多くの助言と励ましをいただきました
マルチハザード都市防災研究拠点の皆様に
深く感謝申し上げます。