

避難交通計画における 最適化アプローチ： 変動する被災リスク、 歩車競合、要支援者を 考慮する

東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠

mokmr@m.tohoku.ac.jp

お話の前に

東日本大震災以来のご支援・ご厚誼に深く感謝します。

このたびの、西日本豪雨災害を被害を受けられた皆様に、心よりお見舞いを申し上げます。

また、県内において大きな被害が発生し、調査等で大変お忙しい中、予定通り発表の機会をいただきましたことにお礼申し上げます。

またお忙しい中、参加いただきました皆様に、心より感謝申し上げます。

この時間が「実のある」ものとなるよう、努めたいと思います。

東北大学 奥村 誠

自然災害からの避難行動

東日本震災前からの課題と新たな問題

- 地下街やビル，乗り物などの閉鎖空間からの避難では「非常口」の配置や，途中経路の混雑が問題とされ，避難経路や誘導方法が研究されてきた
- 自然災害では，避難者が殺到することはなかった！
「**避難者の割合が少ない**」ことが問題
 - 情報が伝わらないのではないか？
 - 危険性が認知されていないのではないか？
 - 避難の妨げになる条件がある？（要支援など）
- 東日本大震災で，「**多くの人**が**避難したのに，渋滞・混雑でうまく逃げられなかった**」ことが再認識された

どう避難を促すか？

避難のさせ方は？

交通を扱う災害研究者として
責任を取るべき重要なテーマ

(やむを得ない場合)車避難を容認

東日本大震災を踏まえて

徒歩では間に合わない地域が
実際に多くあることが判明した

□2012/3/8 交通の方法に関する教則の一部改正

自動車避難を原則禁止

⇒ やむを得ない場合は自動車での避難を容認

□2012/12/7 三陸沖地震

津波警報で道路渋滞が多発

車での自由な避難は危険

車を用いた津波避難計画が必要
地域の特性を踏まえ市町村ごとに作成

具体的な検討方法は未確立

2014.3の消防庁の計画策定指針は、徒歩だけを考えている



(三陸沖地震より)

□2016/11/22 福島県沖地震 津波警報で道路渋滞

車利用を含めた津波避難計画の実情

- 東日本大震災自治体は、復興計画を進めるため、前提となる津波避難計画を「急いで」作成する必要
- 宮城県亘理町では、2014年2月に避難計画を策定
 - 徒歩による避難が困難な区域に自動車利用を認める
 - 現状の道路(混雑あり)では平均速度3.9km/hを仮定、
 - 一部を避難路として整備して10.0km/hと仮定
 - 地震発生15分後避難開始、45分後の津波到来までに津波浸水想定域から全員が退避できることを確認した。
- 道路ネットワーク上の混雑や渋滞の発生場所や、所要時間などの、交通工学的検討はされていない
 - 本当に混雑・渋滞無しに、時間内に逃げられるかは、確認できていない。

車利用津波避難計画の実効性の保証

- 道路ネットワーク上の混雑や渋滞の発生場所や、所要時間などの、交通工学的検討が必要
- 被災状況・被災地アンケートに基づく行動原理を仮定し、安全に避難できるかをシミュレーションで確認
 - もし「間に合わない」結果が出た場合、「どこの地域の車をどこを通し、どの避難所に誘導すると安全になるのか？」という改善方法は、シミュレーションからではわからない
- 「数学的最適化」により、道路網を最大限うまく活用する方法を確認
 - 避難路、避難ビル、避難タワーの整備効果を確認して、効果の高い方法を知ることができる

津波避難計画への最適化研究の経緯

□ORの分野の最適施設計画モデルを用いた研究の蓄積

- 都市群に対する最適業務構造計画モデル(塚井)
- 廃棄物処理施設の配置・更新・廃止計画(大窪)
- 災害負傷者輸送・医療施設と道路の耐震化(大窪)
- マルチモーダル都市間ネットワーク計画(Tirtom)

□避難場所と避難経路の最適化は、同じLP系のモデルでモデル化できるはずと思っていた

□混雑・渋滞による旅行時間変化の扱い(2014)

- DaganzoによるCell Transmission Model
- Ziliaskopoulosの LP定式化(Many to OneならOK)

□交通工学の専門家(AK)からの批判と激論・・・

- 変動リスク考慮(2015)、歩車共存(2016)、困難者(2017)

□今年になり、遅ればせながら欧米のレビュー論文発見！

- 本日は、このレビュー論文を参考に、当グループの研究を紹介

避難交通最適化のレビュー論文 Vedat Bayram (2016)のレビュー

Surveys in Operations Research and Management Science 21 (2016) 63–84



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Surveys in Operations Research and Management Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/sorms



Review

Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review



Vedat Bayram

Department of Management Sciences, Faculty of Engineering, University of Waterloo, 200 University Ave. West, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada

HIGHLIGHTS

- We review network-based large scale emergency evacuation planning/management studies.
- Relevant literature in urban transportation and human behavior science is covered.
- Static/dynamic, and deterministic/stochastic/robust modeling approaches are covered.
- Effective supply and demand management strategies are specified.
- Optimization-based solution methodologies are reviewed, research gaps are identified.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive review of network-based large scale emergency evacuation planning and management literature. Evacuation planning and management approaches are mostly based on traffic assignment approaches. For that reason, for a complete grasp of the ideas in evacuation planning and management, the relevant literature in urban transportation is covered including traffic assignment approaches, travel time modeling to represent congestion and traffic flow propagation approaches. Correct estimation of evacuation response rates and demand distributions by human behavior studies covered in this review contribute to an efficient evacuation planning and management at a large extent. Since it is not cost effective to design the evacuation network from scratch for rare disasters, the existing road network must be efficiently used for avoiding congestion to enable the evacuation of the disaster area in a timely manner. We present studies that propose effective supply

東北大学

災害科学国際研究所

奥村 誠

Vedat Bayram (2016) のレビュー論文

Review: Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review

- Vedat Bayram : University of Waterloo, CANADA
- Surveys in Operations Research and Management Science 21 (2016) 63–84
- 2016年までの286本の論文をレビューしている

h i g h l i g h t s

- We review network-based large scale emergency evacuation planning/management studies.
- Relevant literature in urban transportation and human behavior science is covered.
- Static/dynamic, and deterministic/stochastic/robust modeling approaches are covered.
- Effective supply and demand management strategies are specified.
- Optimization-based solution methodologies are reviewed, research gaps are identified.

Vedat Bayram (2016) のレビューの範囲

- We review network-based large scale emergency evacuation planning/management studies.
建物外、車両避難：車両を個別に捉えず交通流として扱う(マクロ)
- Relevant literature in urban transportation and human behavior science is covered.
4段階推定法の：発生、分布(目的地選択)、(経路)配分、を参照
避難者の行動(選択)原理、情報獲得、制約に言及
- Static/dynamic, and deterministic/stochastic/robust modeling approaches are covered.
静的⇔動的、決定論的⇔確率論的⇔ロバスト計画
- Effective supply and demand management strategies are specified.
供給管理：一方通行化・交差点制御、
需要管理：段階化(staging)・出発時刻指定・避難所割当・経路配分
- Optimization-based solution methodologies are reviewed, research gaps are identified.
シミュレーションではなく最適化に基づく研究を対象

交通流最適化モデルの分類軸

- 個人車両 \Leftrightarrow マルチモーダル \Leftrightarrow 公共交通
 - 渋滞・混雑内生 \Leftrightarrow 時間所与 \Leftrightarrow 渋滞なし
- 静学的 \Leftrightarrow 動学的 (CTM, TENなど)
- 一階層 \Leftrightarrow 二階層
- 決定論的 \Leftrightarrow 確率論的 \Leftrightarrow ロバスト計画
- 避難先所与 \Leftrightarrow 避難先内生
- 計画目的: 所要時間 \Leftrightarrow 暴露リスク \Leftrightarrow ...
- 配分方法: UE, Nearest Allocation \Leftrightarrow SO, Constrained SO
- 不確実性を考える要因
- 求解法

User Equilibrium vs System Optimal?

災害時には、「避難者が、道路ネットワーク上の所要時間などの完全情報を所有し、冷静に最適な経路を選択できる」というUEの前提が、成立しない [42, 43].

- 災害時は、日常ではめったに起きない大量の需要発生 [14].
- 避難者は、自分の避難時間を最小化する経路についての情報を学ぶための過去の経験を持たない [44, 45].
- 複数の避難経路の所要時間を均等化させるような需要の分配が起こるとは考えにくい [46].

SOは、交通管理主体が全体の効率性を高めるよう交通量を配分.

- 一部の避難者は、自分が最適と思う経路より所要時間が長い経路に割り当てられることもある。
- SOは、モデリング的には線形計画になり、計算は容易になる。

現実的には、Nearest Allocation だが、全体目的の達成水準は低い

- 地理的な最小距離、自由走行時の最小時間の経路を選択

Constrained System Optimal

Tolerance-based user optimal

- 実現可能性と全体的最適性を両立する
 - 個人の"acceptable"な選択肢の範囲で最適化
 - 最短経路に対し τ 倍まで距離・時間を許容
- Bayram et al. [69] quick evacuation with a "fair" assignment
 - price of anarchy [70,48,49,71,50–53] measures the impact of selfishness, the lack of coordination among evacuees.
 - Koch and Skutella [72] and Bhaskar et al. [73] analyze dynamic value of price of fairness, via temporal routing games

Traffic Assignment Model

- Static evacuation models Beckmann et al. [28]より発展
 - Dynamic evacuation models based on DTA (Peeta & Ziliaskopoulos [40])
時間的な特性変化や行動原理、大規模ネットワークへの適用性は劣る
 - Merchant and Nemhauser [75]
 - CTM (cell transmission model) based DTA by Daganzo [37,38]
 - CTM developed into LP by Ziliaskopoulos [39].
高次元になり計算負荷大、link-basedで避難pathは直接的には不明
 - Dynamic network flows based evacuation models
time-expanded network (TEN) by Hamacher and Tjandra[76]
 - the dynamic maximum flow problem,
 - the earliest arrival flow problem,
 - the quickest flow or the transshipment problem
 - dynamic minimum cost flow problem
- NP-Hard で多項式時間の計算アルゴリズムがない [154,163,133]

Evacuation modeling objectives

避難計画モデルの目的関数

- minimizing the clearance time,
- minimizing the maximum latency [52],
- minimizing the total evacuation time,
- minimizing average evacuation time,
- maximizing the number of people reaching safety up to a specified critical time T . (the quickest flow prob [154])
- minimizing the time-based risk and exposure [76,150,165]
- the earliest arrival problem [162,157] within the context of dynamic network flows [158,77].

これらの問題には相互に関係がある。S. Bretschneider [77].

今後の課題 by Vedat Bayram (2016)

- 人間行動 → realistic, implementable, fair
- 避難所選定: 計算負荷大 → MS/OR研究
- 単一Hazard → 複合Hazard、確率的・ロバスト
- 現実規模netで解ける動学的最適化モデル
- 避難弱者の考慮 → マストラ、マルチモード
- 避難と災害支援・対応(逆向き)の同時考慮
- ITSなど情報提供によるリアルタイム誘導
- テロなど、自然災害以外からの避難 → 攻撃者と防衛者とのgame理論的アプローチ

津波遭遇リスクを最小化する 自動車避難最適化モデル

東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠

mokmr@m.tohoku.ac.jp

東京都建設局 片岡侑美子

(株)交通システム研究所 金 進英

交通工学の常識と津波避難での「最適」

- もし誘導をしなければ、すべての個人は最も近い避難所に最も近いルートで移動しようとする (A:最短距離) User Optimal
- 交通工学「B:最小所要時間」となる配分方法の研究
 - (通勤時間帯の)交通渋滞は無駄な待ち時間を生む
 - 道路上で待つなら出発を遅らせて自宅で待つほうがいい
 - 渋滞がない状態だけを考えればよい ⇒ **交通工学の常識**
- 避難では:危険な自宅で待つより、少しでも山側に行って安全な道路で渋滞する方がマシ
 - 渋滞を許しながら津波に遭遇する危険性を小さくする(C:最小リスク)
 - 走行中、渋滞中の車が、津波に遭う可能性を小さくしたい

本研究の目的: 最適な誘導方法とその効果を知る

- 現在の道路・避難所で車両を最適誘導した時の被害
その犠牲者が多すぎるなら, 道路・避難タワーの整備を考える
- 誘導の効果を知りたい→3ケースの比較
 - (1) 誘導しない自由な避難: 総避難距離最小化 (A)(D)
 - (2) 従来の交通工学の考え方: 所要時間最小化 (B)(E)
 - (3) 本研究で考える安全な避難: 総リスク最小化 (C)(F)
- 誘導方法による効果の違いを知りたい
 - (1) 複数経路への配分を時々刻々と変更し誘導 (A,B,C)
停電しない信号機, カーナビへの即時情報配信などハードルは高い
 - (2) 行き先, 途中経路を固定し指示(方向指定or追従) (D,E,F)
容易に実現: 交差点の矢印看板, 避難路付きハザードマップ

目的関数:総津波遭遇危険度

危険な地域にいる車両をできるだけ少なくしたい

⇒ 各セルに津波による危険度を導入, 総リスクを最小化

$$\min_{\{v_t^a, p_t^a, u_t^a\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a (p_t^a + v_t^a)$$

危険度(時刻により変化)

総リスク

交通工学研究(所要時間最小化), 誘導なし(避難距離最小化)と比較

危険度を地点、時刻によらず1と置く

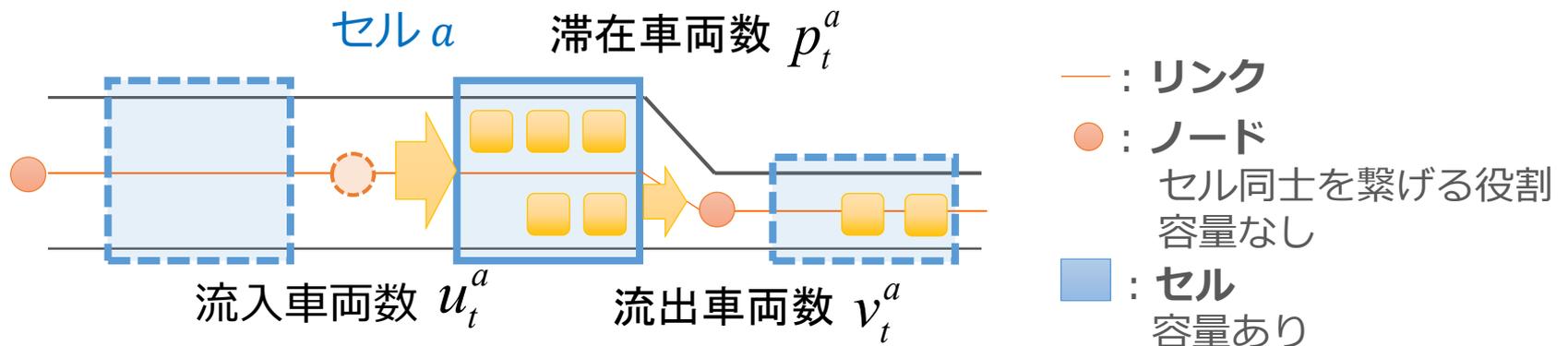
危険度を時刻によらずセルの長さとし、
移動車両数(v_t^a)との積を考える

同一のプログラムで、3つのケースを計算できる

Cell-based M-Nモデルについて

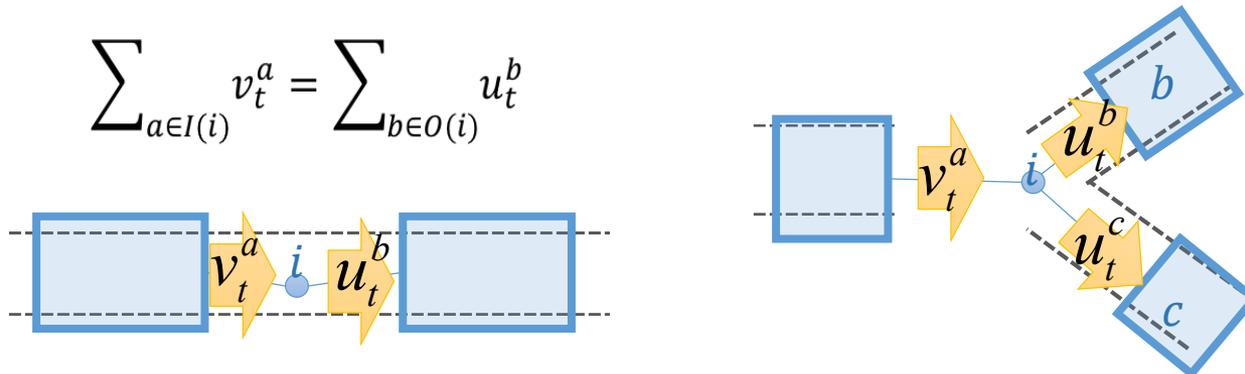
□ ネットワークはセルとノードで構成

□ 1つのセルに2つのフロー関数(流出・流入車両数)



□ 単路と分岐・合流点での交通量保存則を同様に表現

$$\sum_{a \in I(i)} v_t^a = \sum_{b \in O(i)} u_t^b$$



使用する最適交通配分モデル

Cell-based Merchant-Nemhauser モデル(Nieら)を参考

$$\min_{\{v,p,u\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a \cdot \eta(p_t^a + v_t^a) \quad (1)$$

総リスク最小化

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in \{A | (A_S \cup A_R)\} \quad (2)$$

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_S \quad (3)$$

$$p_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (4)$$

$$\sum_{a \in \mathcal{O}(i)} u_t^a = \sum_{a \in \mathcal{I}(i)} v_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A, \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_t^a \leq \delta^a (H^a - p_t^a - v_t^a) \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (6)$$

収容容量制約

$$v_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (7)$$

フロー容量制約

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (8)$$

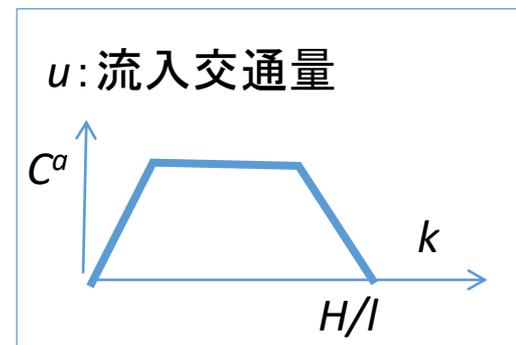
$$v_0^a + p_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad \forall a \in A_R \quad (9)$$

初期値

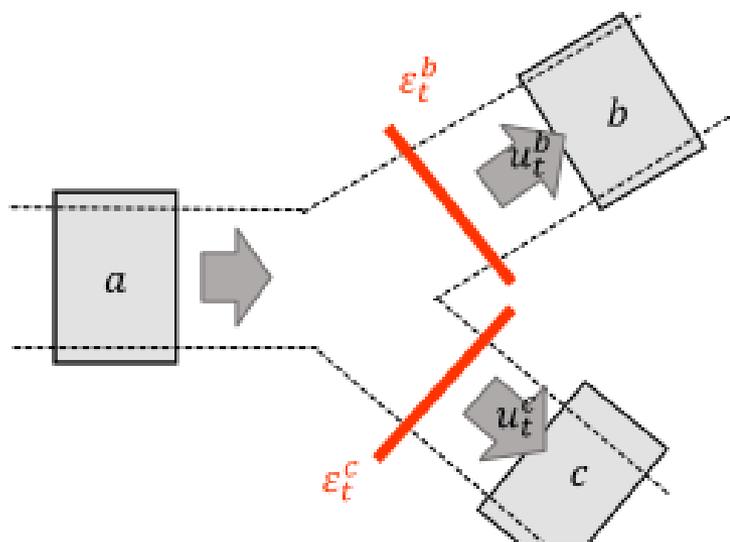
$$0 \leq u_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (10)$$

$$0 \leq v_t^a, p_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (11)$$

最適解の一意性があるLP



交差点における流出方向指定



$$u_t^a \leq L \epsilon^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A$$

$$\sum_{a \in O(i) \mid A_S} \epsilon^a \leq 1 \quad \forall i \in N$$

$$\epsilon^a = \{0, 1\} \quad \forall a \in A$$

図1 交差点における流出方向指定

交差点からの流出(進行)方向を時刻に関わらず1方向に限定
 避難所に直結する交差点: 避難所に入る or 一方向に進む

目的関数を制約条件に追加する

□ 正当な比較を行うために……

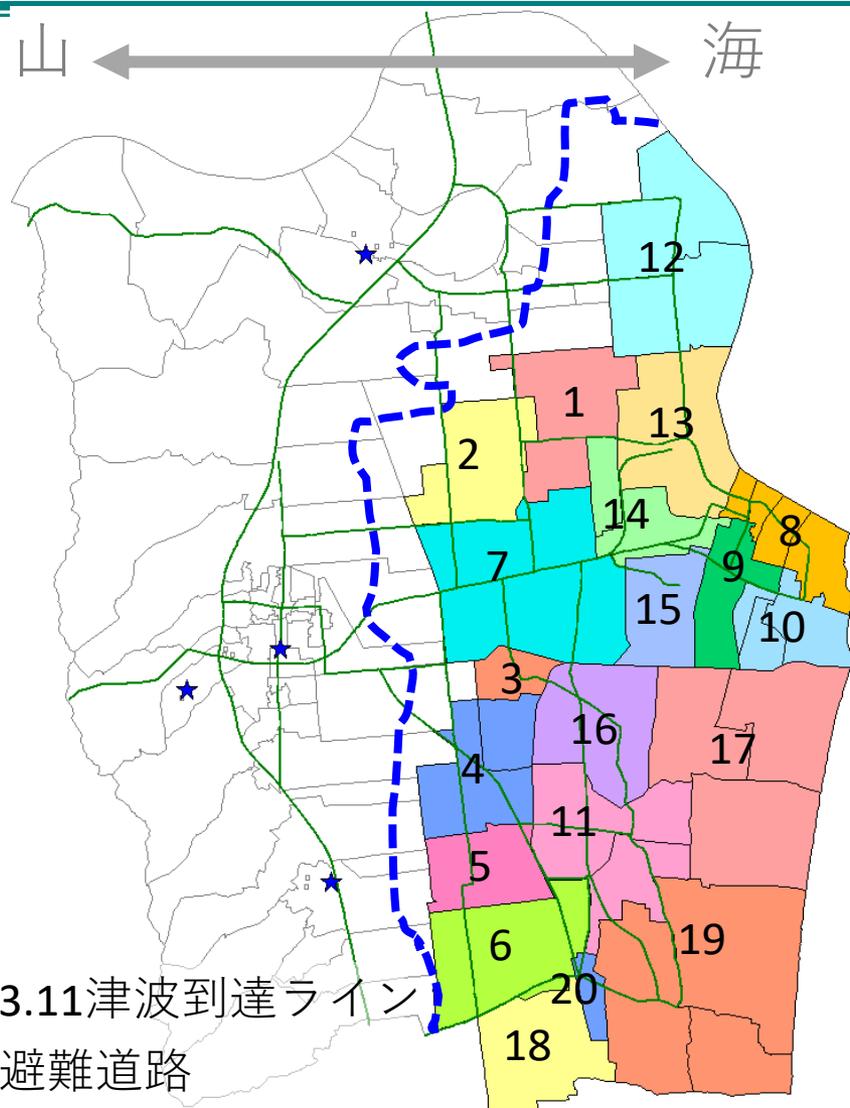
- 距離最小化の多くの解の中で、最もリスクが小さくなるものを求めて比較する
- その計算をするためのプログラムの改良
 - 目的関数: 総リスク最小化
 - 制約条件に, 避難距離 \leq 避難距離最小化の最適値 を追加

□ このプログラムを用いれば……

- 異なる総避難距離に対する総リスク最小値が計算できる
- 避難距離とリスク最小化とのトレードオフ関係がわかる

計算対象場所 -亶理町-

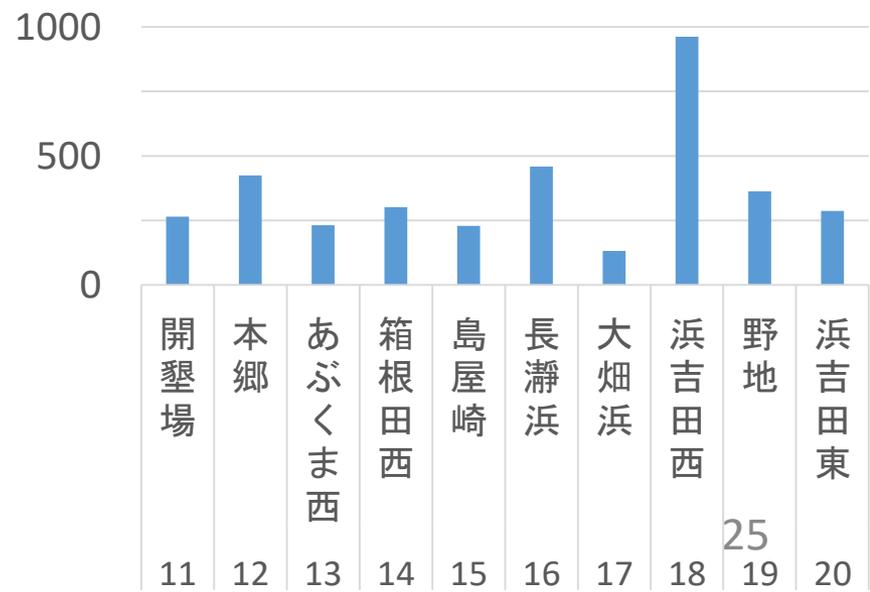
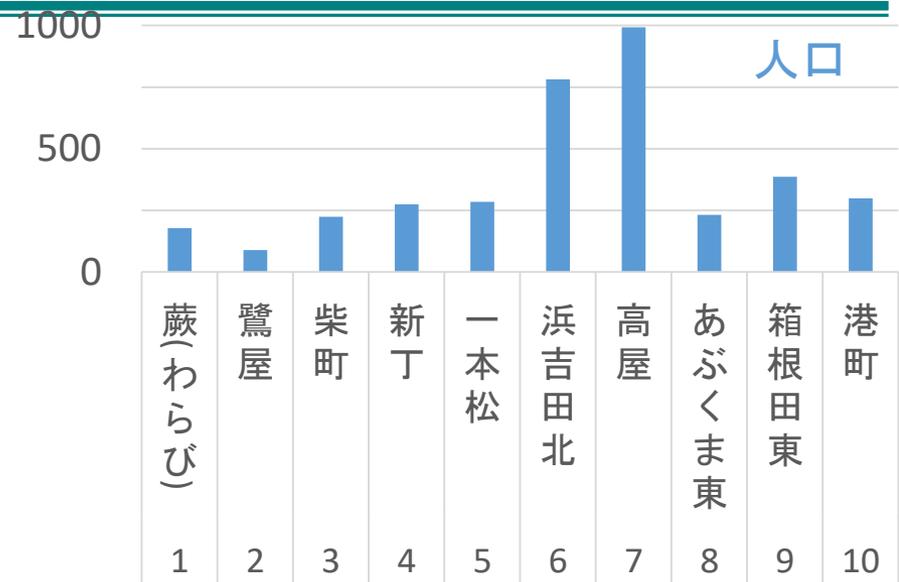
山 ← → 海



--- 3.11津波到達ライン

— 避難道路

色付きゾーン：避難対象地域



人口

25

避難車両発生地域

避難計画策定フロー（巨理町避難計画より）

① 徒歩による水平避難（避難地域No.1~6）



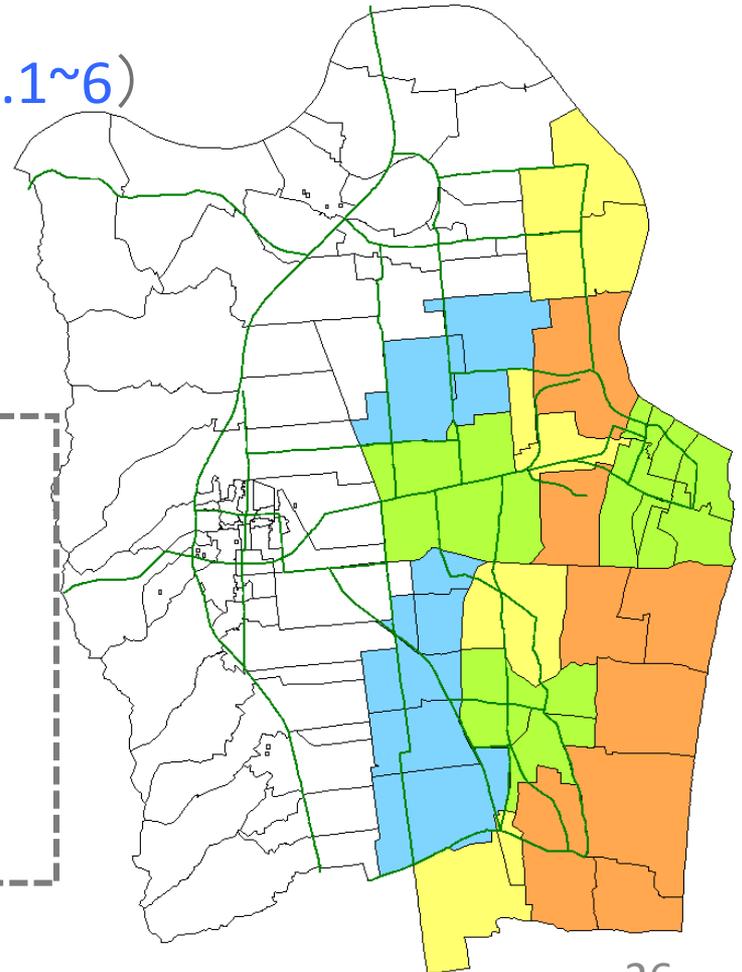
② 徒歩による垂直避難（No.7~11）



③ 自動車による水平避難
（No.12,14,16,18,20）



④ 現時点で困難（道路整備必要）
（No.13,15,17,19）



今回の計算における避難車両発生地域

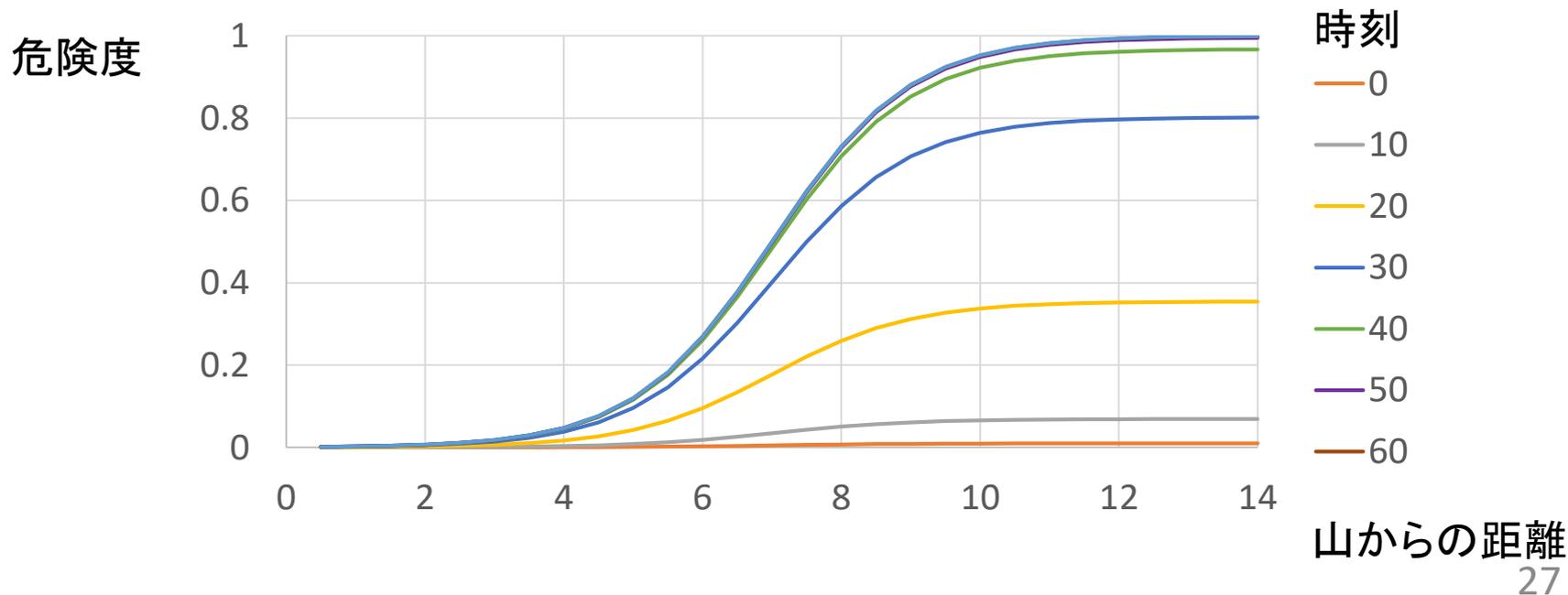
津波遭遇危険度の設定

各セルの津波による危険度を導入，総リスクを最小化

総リスク $\min_{\{v_t^a, p_t^a, u_t^a\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a (p_t^a + v_t^a)$

危険度(時刻により変化)

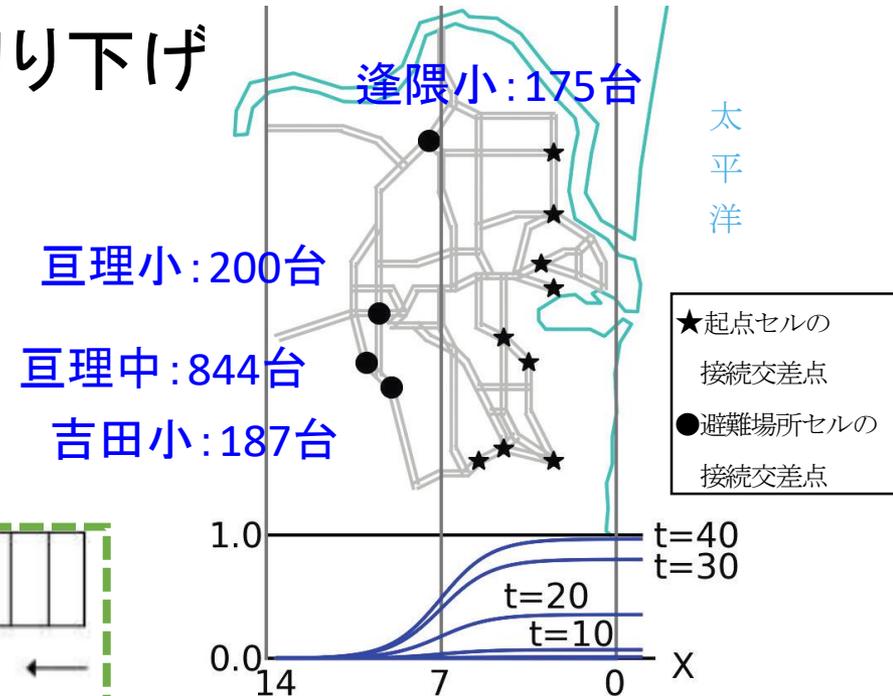
津波シミュレーションの結果により、時刻別地点別に与えるべき
今回は、滑らかな関数で与える。



避難所の駐車容量

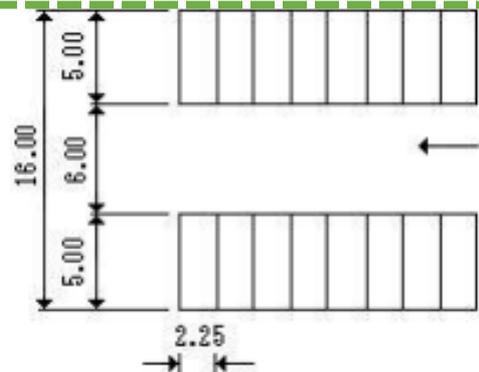
- Google mapで校庭の面積を測定
- 一台当たりの駐車所要面積は 18m^2 に設定
(草津市 駐車場施設設定基準より)
- 駐車容量算出時の端数は切り下げ

	面積(m ²)	駐車容量(台)
逢隈小学校	3150	175
亘理小学校	3600	200
亘理中学校	15200	844
吉田小学校	3375	187
合計		1406



90° 後退駐車(小型)

図:草津市 駐車場施設設定基準より



計算結果の比較(2.0人乗車の場合)

表-1 総避難距離最小化・総所要時間最小化・総リスク最小化の比較(基本モデル)

基本モデル (式(13)~(15)なし)	平均避難時間(min/veh)	津波遭遇リスク(people)	平均避難距離(km/veh)	平均速度(km/h)	平均渋滞時間(min/veh)
A)総避難距離最小 ^{A)}	47.3	221.0	4.99	6.3	7.60
B)総所要時間最小 ^{B)}	28.2	19.6	8.15	17.4	0.00
C)総津波遭遇リスク最小	29.2	16.1	8.73	17.9	0.41

A)まず式(16)の総距離を最適化し、その値を右辺とする式(17)を加えて総津波遭遇リスクを最適化した。

B)まず総所要時間を最適化し、次にその値に関する制約を加えて総渋滞時間を最適化した。

表-2 総避難距離最小化・総所要時間最小化・総リスク最小化の比較(方向指定モデル)

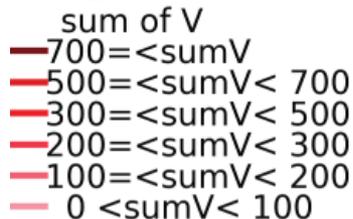
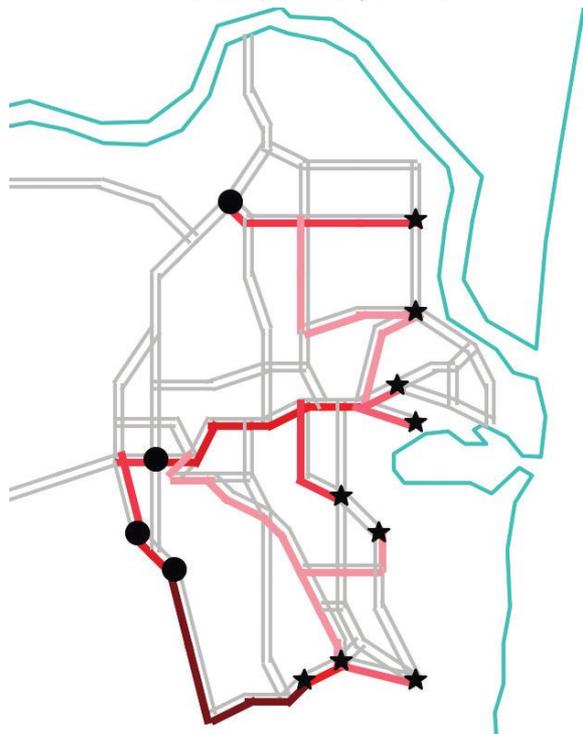
方向指定モデル (式(13)~(15)あり)	平均避難時間(min/veh)	津波遭遇リスク(people)	平均避難距離(km/veh)	平均速度(km/h)	平均渋滞時間(min/veh)
D)総避難距離最小 ^{D)}	49.7	240.6	5.08	6.1	8.23
E)総所要時間最小 ^{E)}	34.1	36.0	8.84	15.5	0.00
F)総津波遭遇リスク最小	34.8	29.7	8.83	15.2	3.11

D)まず式(16)の総距離を最適化し、その値を右辺とする式(17)を加えて総津波遭遇リスクを最適化した。

E)まず総所要時間を最適化し、次にその値に関する制約を加えて総渋滞時間を最適化した。

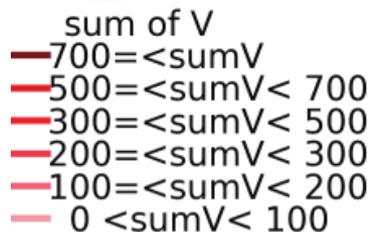
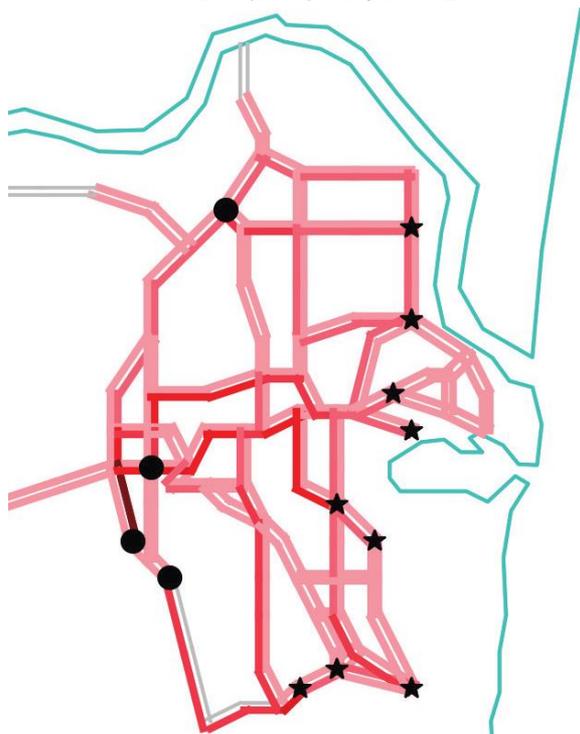
使用された道路の比較(基本モデル)

A) 総避難距離最小化



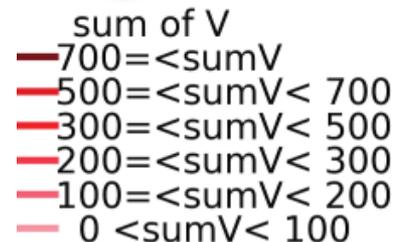
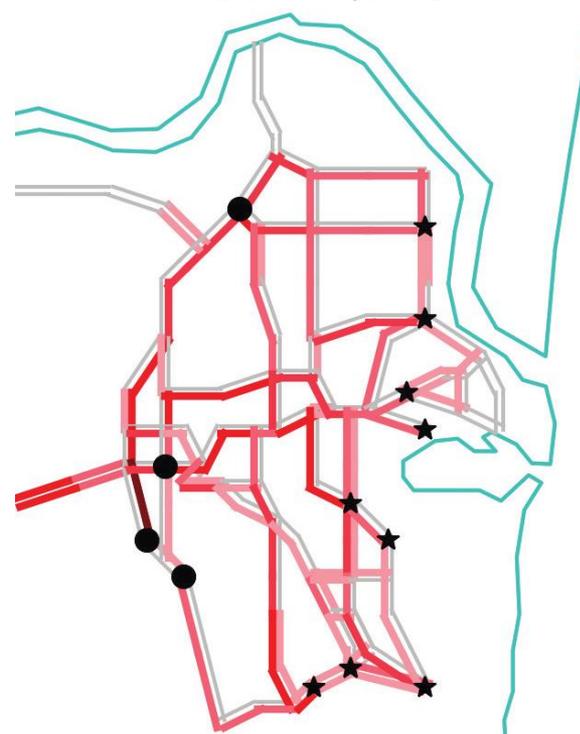
使われる道路が限定

B) 総所要時間最小化



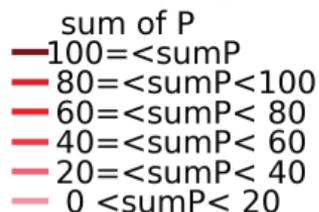
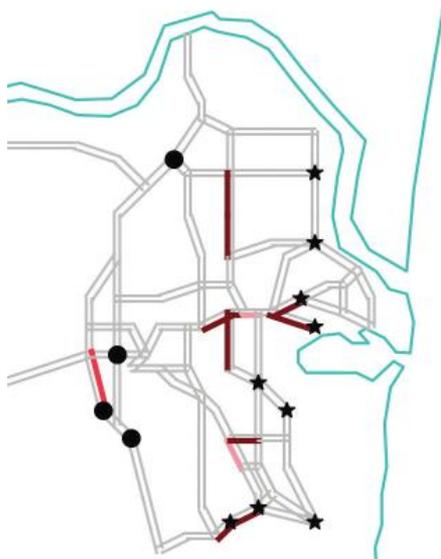
ネットワーク全体を有効活用・
使われる道路にはあまり差はない

C) 総リスク最小化



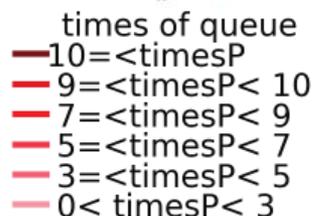
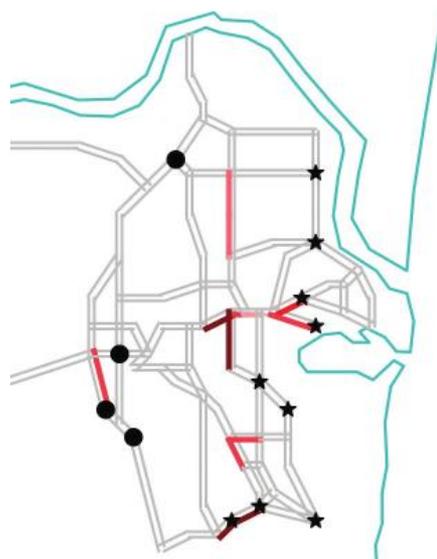
渋滞発生個所の比較(基本モデル)

A) 総避難距離最小化
(渋滞量)

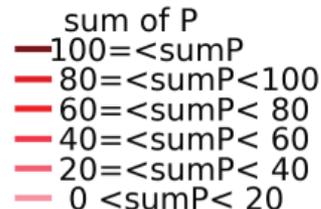


海岸に近いところで
渋滞が長時間発生

A) 総避難距離最小化
(渋滞回数)

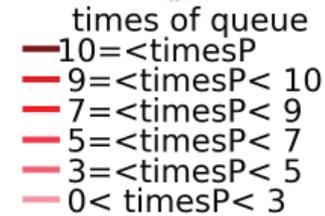
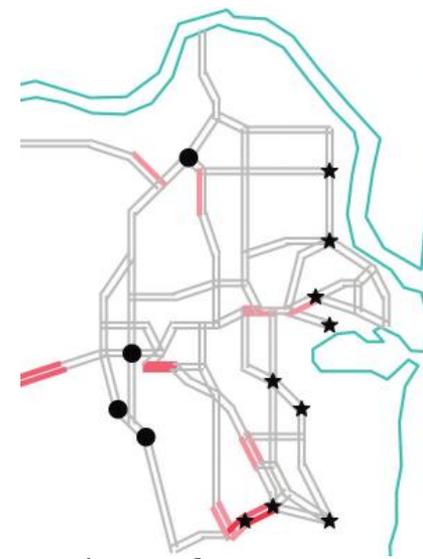


C) 総リスク最小化
(渋滞量)



渋滞発生はあまり多くない
比較的山手の合流点の手前など

C) 総リスク最小化
(渋滞回数)



総所要時間最小化の場合は、渋滞を全く発生させない方法がある

避難車両数(相乗り人数)によるリスクの変化

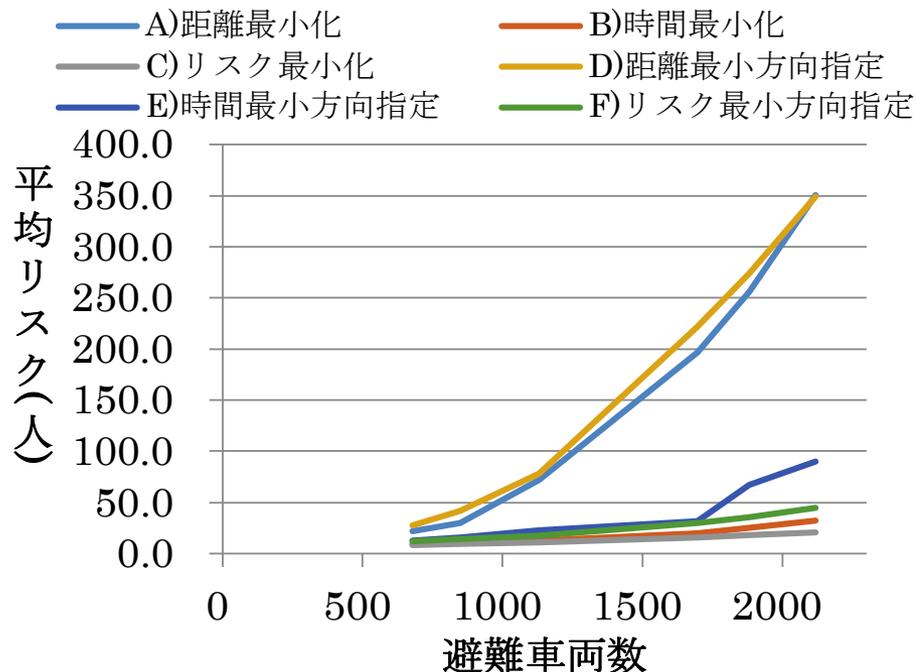


図5 避難車両数によるリスクの変化

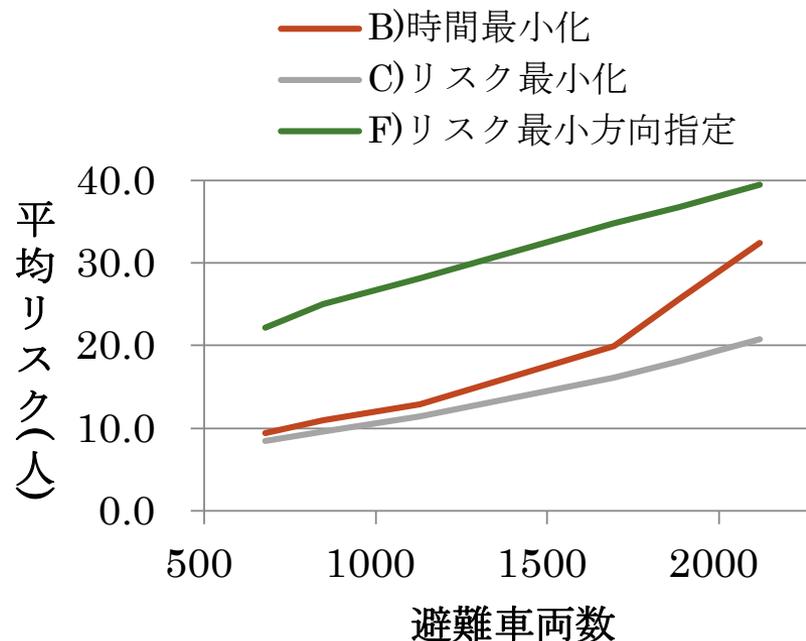


図6 避難車両数によるリスクの変化(拡大)

台数の増加で危険は増大→ 自動車避難が必要な地域でも、**徒歩避難**を基本として自動車の台数を抑えるべき

距離最小化のA),D)のケースのリスク値が極めて大きい

→**住民が最短距離経路に集中すると極めて危険**

→何らかの誘導を行う必要がある

避難車両数による所要時間・距離の変化

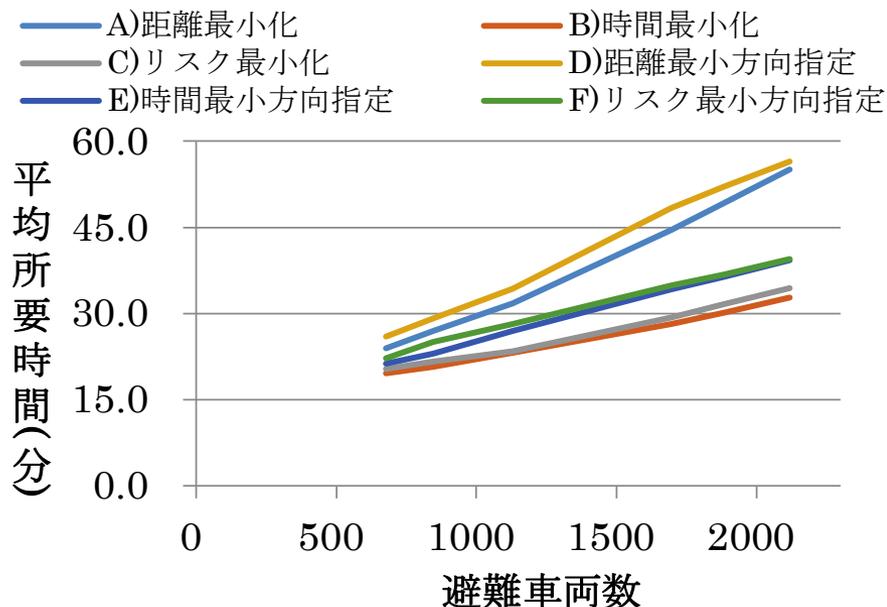


図-7 避難車両数による平均所要時間の変化

平均所要時間は、距離最小化の2つのケース(D,A)が極めて劣る動的な誘導を前提とするC,Bで小さい

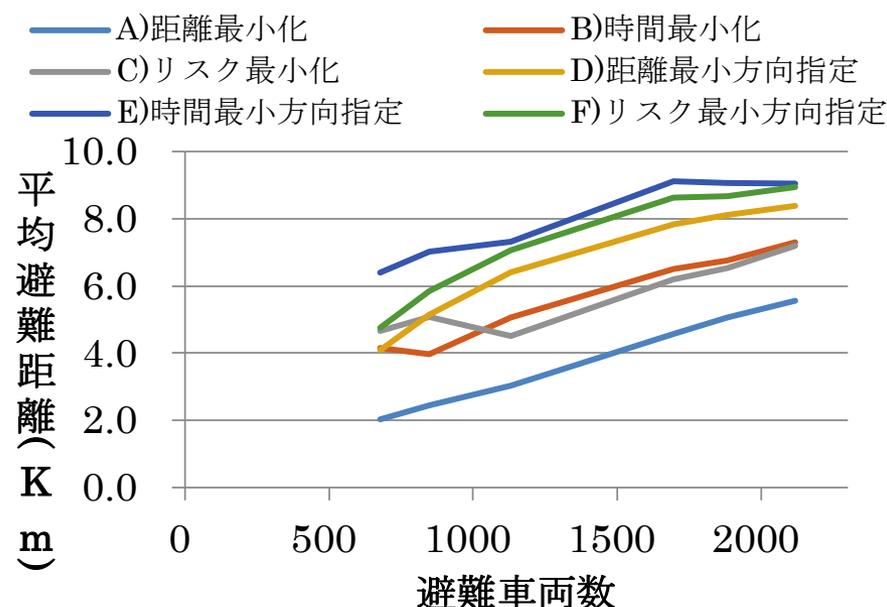
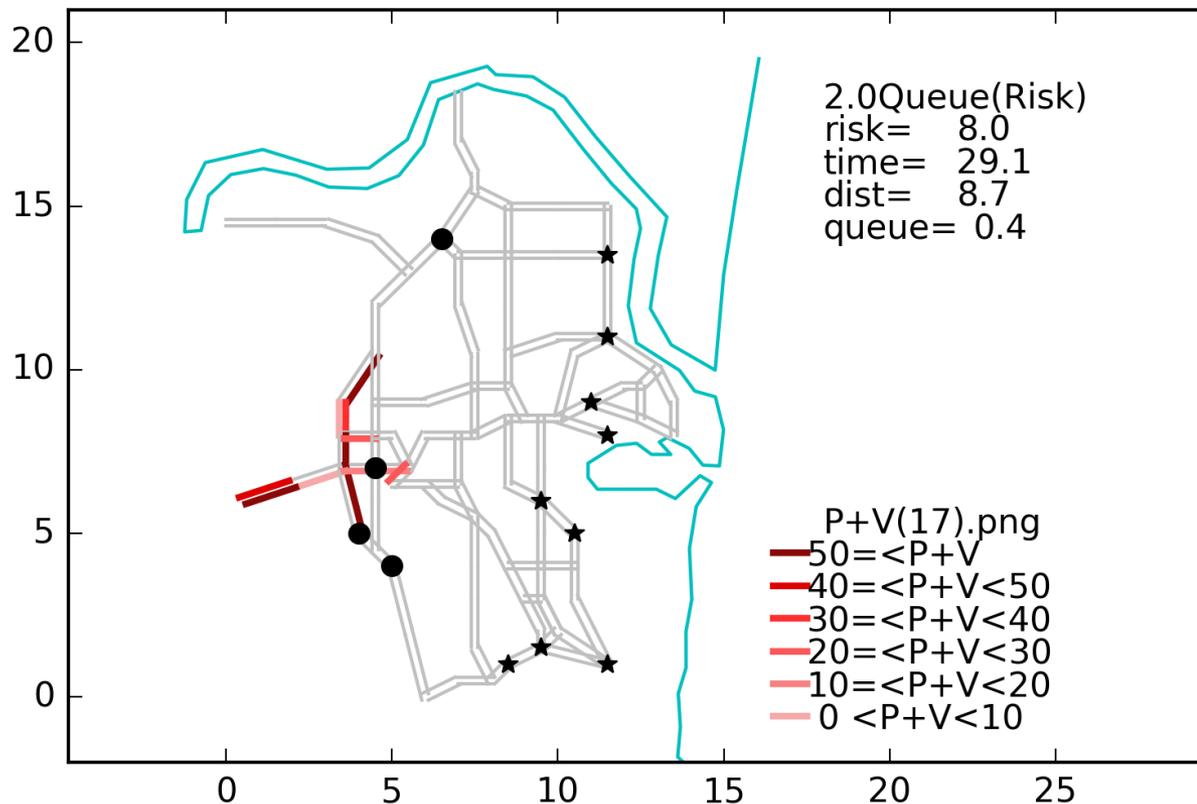


図-8 避難車両数による平均避難距離の変化

当然、A)距離最小化のケースが最も短距離となる方向指定をすると(E,F,D)、総距離は長くなる

途中段階では避難所を超え高台に



計算からわかったこと

- 津波遭遇リスクを小さくするには、**相乗りをして車両数を少なくすることが重要**
- 最近隣の避難所に**最短経路で逃げると**、渋滞が発生し、時間がかかり、**危険になる。**
- 道路網全体をうまく使う**経路への分散誘導**
 - ハザードマップで、地域ごとに別経路を指定・周知する
 - 避難所に固執せず**リスクの低い山側に向かう**ことも有効
- 自分の安全ではなく、**地域全体の安全に配慮すべき**
 - **自分より後に来る人の危険性を高めないように！**
 - 避難所入り口で渋滞するのは愚の骨頂！
- 「**避難所に逃げ込む**」のではなく「**危険場所から逃れる**」
 - 避難, evacuation の本来の意味を理解する

2017年11月5日

第56回土木計画学研究発表会・秋大会

津波避難における自動車分担率が 津波遭遇リスクに与える影響

東北大学大学院 工学研究科 竹居広樹
東北大学 災害科学国際研究所 奥村 誠

本研究の目的

背景

- ◆ 避難時の自動車利用に対するリスク認識の不足
自分が自動車を使うことによる
地域全体への外部効果



目的

- ◆ 住民に対して、**避難時の過剰な自動車利用の危険性**を説明する
- ◆ 「**原則徒歩**」避難の**重要性**を主張する

自動車分担率に関する既往研究

片田ら(2012)

シミュレーション

- ◆「リアス式海岸部」と「平野部」を対象
- ◆津波避難時の自動車利用と人的被害の関係性を分析

中川ら(2013)

最適化

- ◆総避難時間の最小化を目的として、自律避難可能者の自動車利用率、要援護者の同伴率を算出



- 文献中で、歩行者・自動車の避難経路には言及していない
- 歩車混合による影響は明示されていない

本研究の特徴とモデルの要件

◆自動車と歩行者

- ▶歩車の混合による悪影響を考慮

◆最適化モデル

- ▶津波遭遇リスクの限界値を示す

◆自動車分担率の違いによる危険度の分析が可能であること

◆ネットワークの利用形態の比較，危険箇所を検討が可能であること

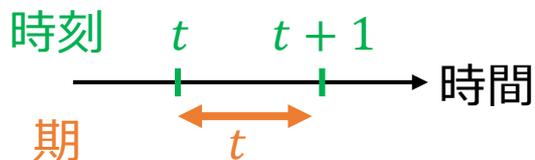
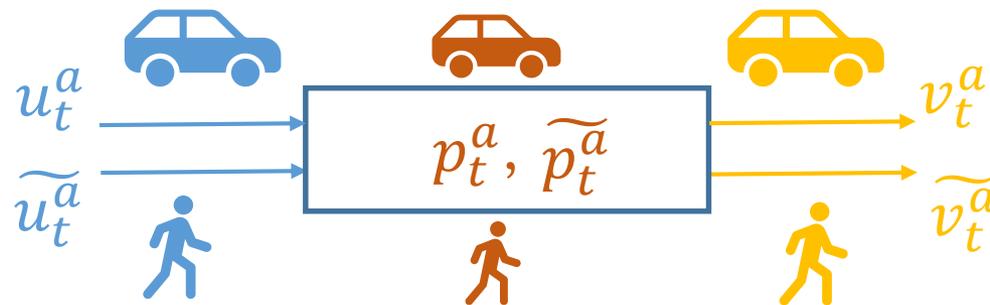
歩車混合モデルの構築

歩車の同一区間での混在をモデル化

セルベース自動車避難モデル（片岡ら, 2016）を
2つのモードに拡張

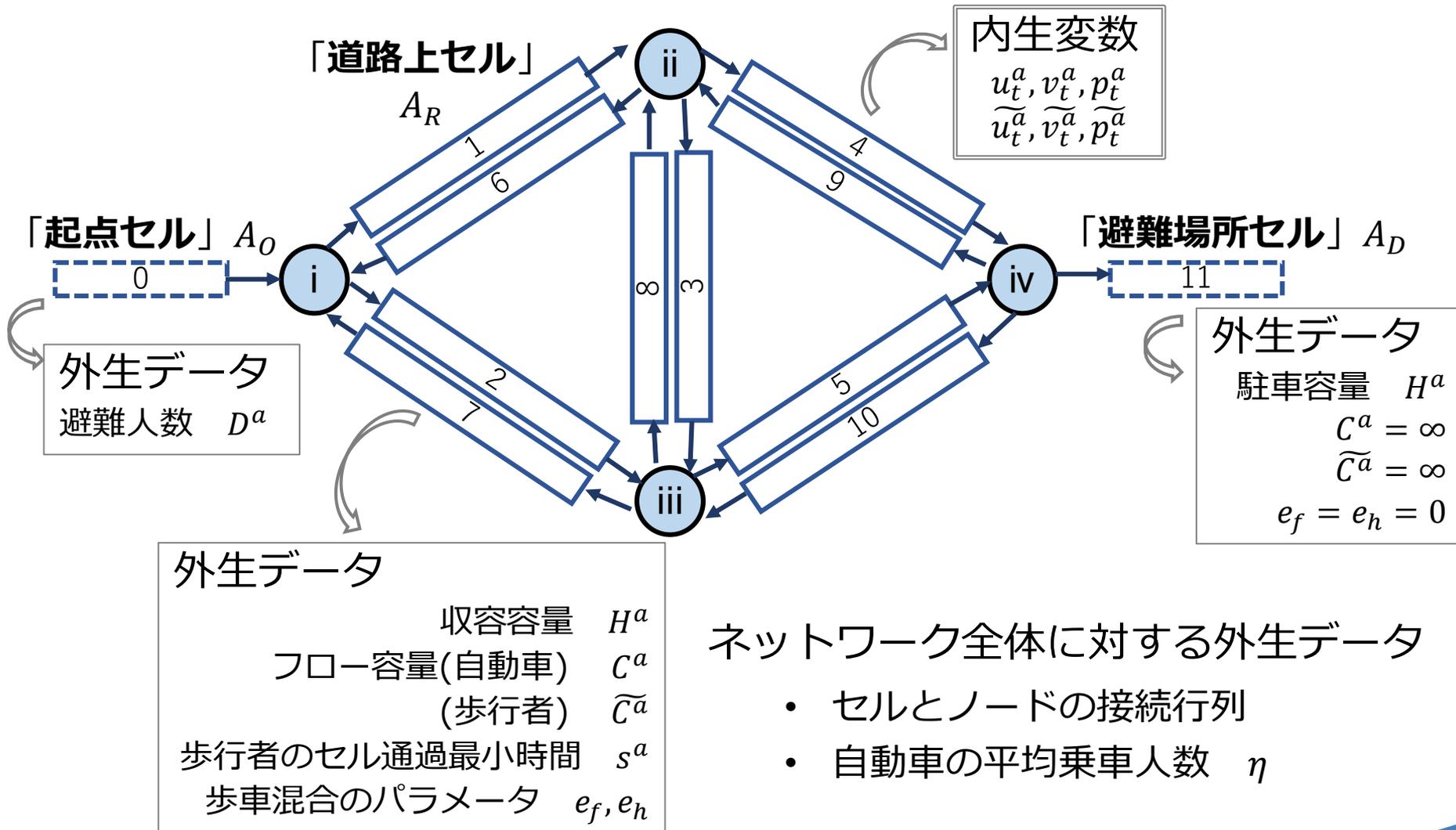
期 t のセル a に流入, 滞留, 流出する自動車台数 u, p, v

期 t のセル a に流入, 滞留, 流出する歩行者人数 $\tilde{u}, \tilde{p}, \tilde{v}$



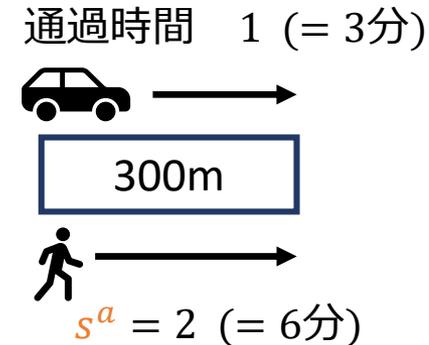
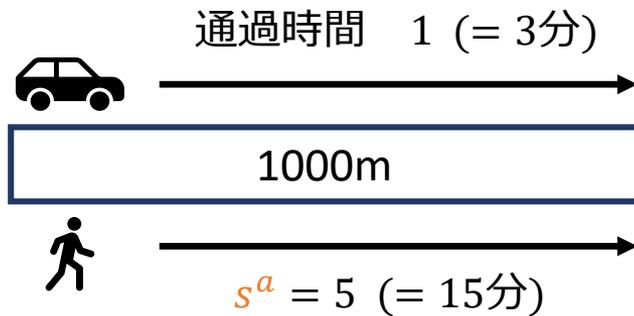
時刻 t でのセル a に存在する自動車台数 $(v_t^a + p_t^a)$
歩行者人数 $(\tilde{v}_t^a + \tilde{p}_t^a)$

モデルの構造



歩車の速度の違いの表現

歩行者のセル通過時間の制約



$$\sum_{t-s^a+1}^t \widetilde{v}_t^a \leq \begin{cases} 0 \\ \overline{p}_{t-s^a}^a + \overline{u}_{t-s^a}^a \end{cases}$$

$$\forall t \in \{0, \dots, s^a - 1\}, \forall \text{道路上セル}$$
$$\forall t \in \{s^a, \dots, T\}, \forall \text{道路上セル}$$

s^a : 歩行者のセル通過最小時間 (整数値)

期 $s^a - 1$ まで…歩行者は流出しない

期 s^a 以降 … s^a 期前にセルに流入あるいは滞留していた人数までしか流出できない

歩車混合の影響の表現 (1)

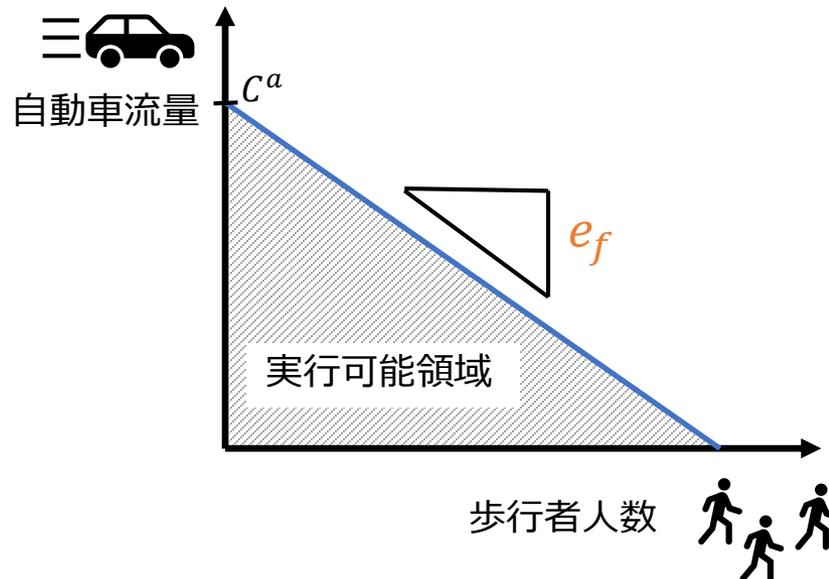
フロー容量の制約 (セルからの流出制約)

$$\boxed{v_t^a} \leq \boxed{C^a} - e_f \cdot \boxed{(p_t^a + v_t^a)}$$

自動車の流出台数 フロー容量 歩行者人数

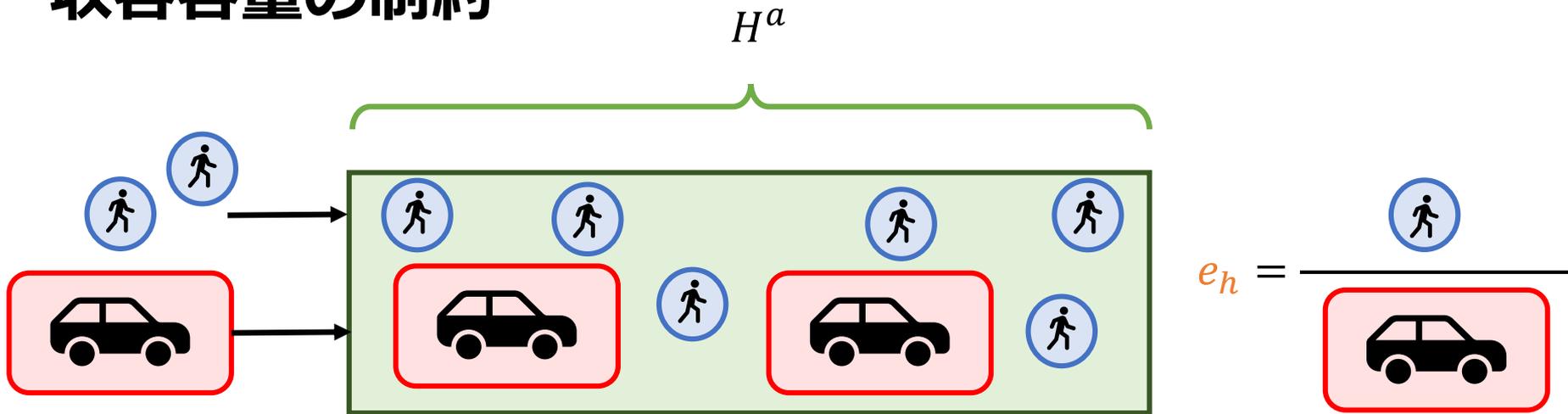
歩行者人数の増加により自動車の流量が低下

e_f : 歩行者の増加に対する自動車の流量低下の割合



歩車混合の影響の表現 (2)

収容容量の制約



$$u_t^a + e_h \cdot \tilde{u}_t^a \leq \delta^a \left\{ \overset{\text{収容容量}}{H^a} - \underbrace{(p_t^a + v_t^a)}_{\text{自動車による空間占有量}} - \underbrace{e_h \cdot (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)}_{\text{歩行者による空間占有量}} \right\}$$

収容容量のうちの空きに比例して流入できる

e_h : 歩行者と自動車の占有空間の比

津波遭遇リスクの与え方

R_t^a : 各時刻, 各セルに外生的に与える

津波遭遇総リスク

$$\sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \left\{ \eta \cdot (p_t^a + v_t^a) + (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \right\} / T$$

平均乗車人数

時刻 t にセル a に存在する避難者人数

モデルの定式化

minimize **津波遭遇総リスク**

subject to

交通量保存則

歩行者のセル通過時間の制約

フロー容量の制約

(歩車の混合により流量が低下)

収容容量の制約

(歩車の混合により収容能力が低下)

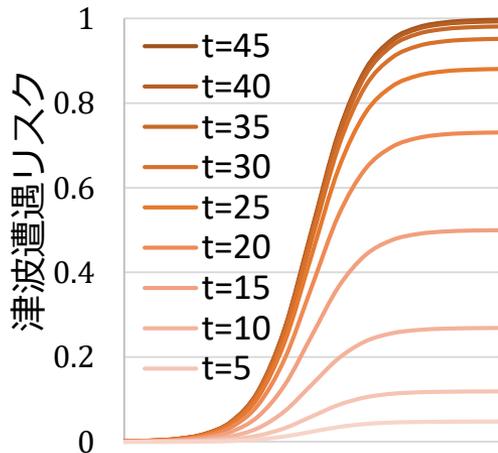
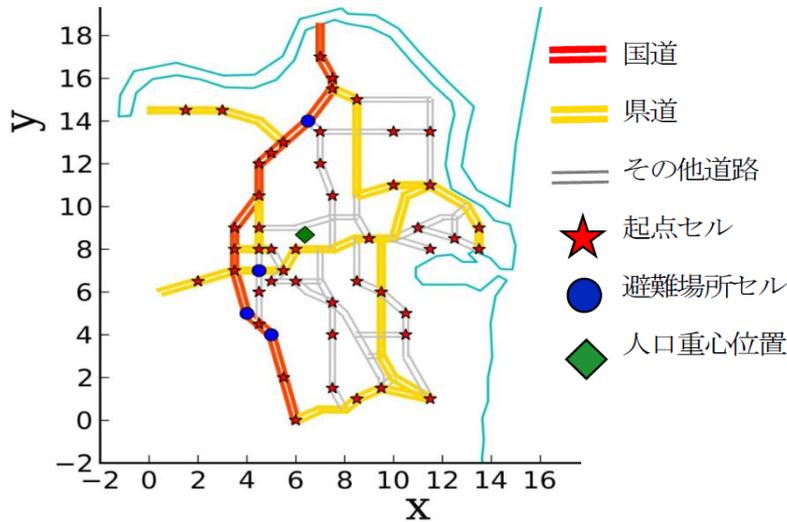
起点セルの避難者人数 (自動車と歩行者に割り当てる)

線形計画問題 (LP)

対象とするネットワーク

宮城県亶理郡亶理町

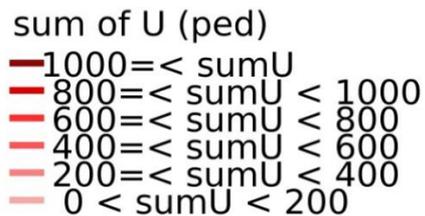
… 東日本大震災により，内陸約4kmまで津波が到達
町面積の約48%が浸水



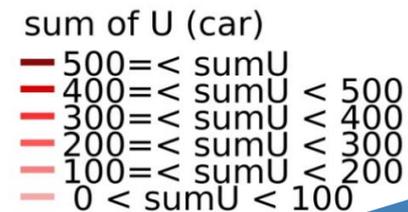
与えるデータ		値
セル総数	起点セル	67
	道路上セル	256
	避難場所セル	4
ノード総数		91
避難人口(人)		34010.0
避難場所の駐車容量の合計(台)		2251.0
フロー容量 (台/単位時間)	国道	100.0
	県道	90.0
	その他	62.5
収容容量(台/km)		133.3
自動車の平均乗車人数(人)		2.0

最適状態におけるネットワークの利用形態

歩行者

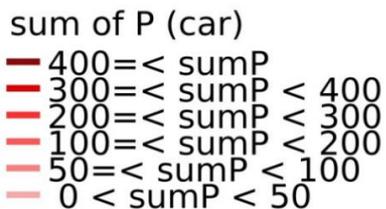


自動車

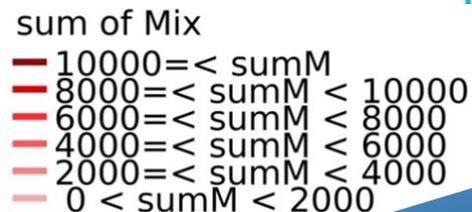


自動車の滞留と歩車混合の発生箇所

自動車の滞留



歩車混合

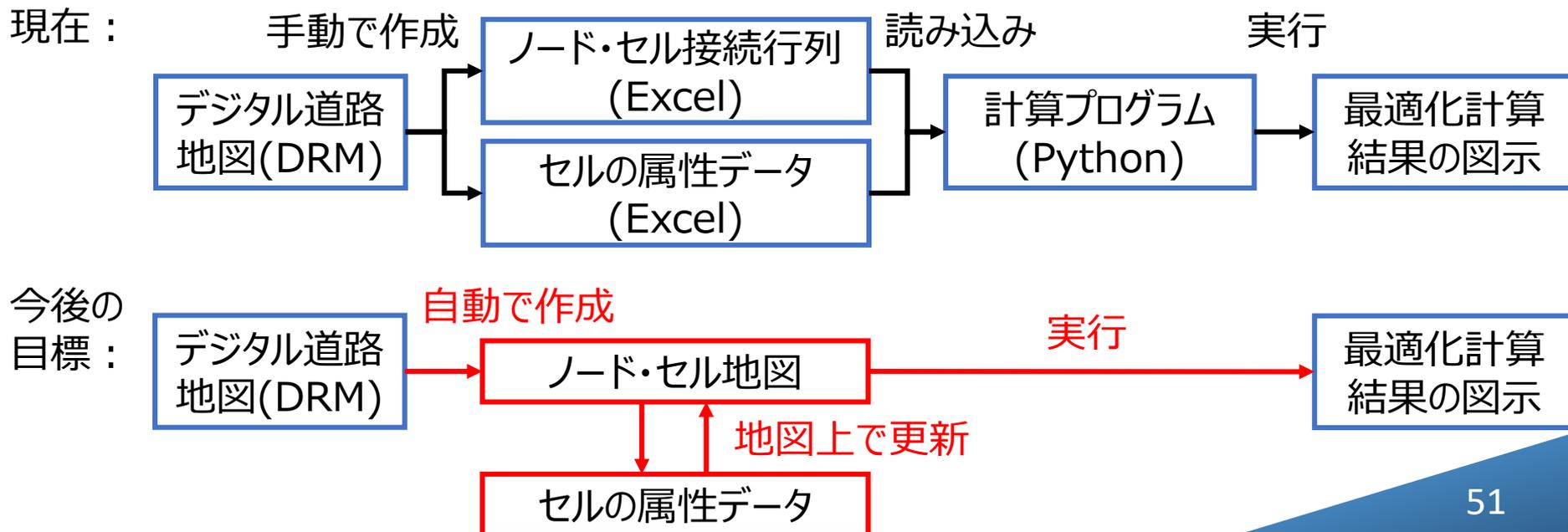


本研究の成果

- ◆歩車の混合による影響を考慮したモデルの構築
- ◆過剰な自動車利用により津波遭遇リスクが増大
→徒歩避難の原則を守る必要がある
- ◆自動車は歩行者の妨げにならないように使うべき
- ◆地域全体で渋滞、歩車の錯綜が多数発生
→道路容量の低下や事故等のリスクが懸念される

今後の課題

- ◆ 地形や標高などを反映した津波遭遇リスク値の設定
- ◆ 住民意見・自治体の要望を反映可能な避難支援ツールの開発



参考文献

- 内閣府中央防災会議：自動車で安全かつ確実に避難できる方策（平成24年4月26日）
- 東京新聞「5年前思い出した」高台目指し夜明けの渋滞（2016年11月22日 夕刊）
- 片田敏孝，桑沢敬行，渡邊寛：津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会，第14回学会大会予稿集，2012.
- 中川貴文，中村俊之，嶋本寛，宇野伸宏：自動車利用を考慮した津波避難計画モデルの構築，土木計画学研究・講演集，vol.47，CD-ROM，2013.
- 片岡侑美子，奥村誠，金進英：自動車避難計画のための津波遭遇リスク最小化モデル，土木計画学研究・講演集，vol.53，CD-ROM，2016.
- 亘理町：亘理町津波避難計画（平成26年2月）

付録: 歩車混合モデルの数式による記述

$$\text{minimize } \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ \eta(p_t^a + v_t^a) + (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \} / T \quad (1)$$

R_t^a :津波遭遇リスク
 η :平均乗車人数
 T :計算終了時刻

subject to

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (2)$$

(2) 交通量保存則

$$\widetilde{p}_t^a + \widetilde{u}_t^a = \widetilde{p}_{t+1}^a + \widetilde{v}_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (3)$$

(3) A :全セルの集合

$$u_t^a, \widetilde{u}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall a \in A_O$$

A_O :起点セルの集合

$$v_t^a, \widetilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall a \in A_D$$

A_D :避難場所セルの集合

A_R :道路上セルの集合

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{b \in I(i)} v_t^b \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall i \in N \quad (4)$$

$O(i)$:ノード*i*の下流側で繋がるセルの集合

$I(i)$:ノード*i*の上流側で繋がるセルの集合

$$\sum_{a \in O(i)} \widetilde{u}_t^a = \sum_{a \in I(i)} \widetilde{v}_t^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall i \in N \quad (5)$$

N :ノードの集合

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R, A_D\} \quad (6)$$

(6) 流入制約

$$\widetilde{u}_t^a \leq \widetilde{C}^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R, A_D\} \quad (7)$$

(7) C^a, \widetilde{C}^a :フロー容量

付録: 歩車混合モデルの数式による記述

$$u_t^a + e_h \cdot \widetilde{u}_t^a \leq \delta^a \{H^a - (p_t^a + v_t^a) - e_h \cdot (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a)\} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in \{A_R, A_D\} \quad (8)$$

$$v_t^a + e_f \cdot (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (9)$$

$$\sum_{t-s^a+1}^t \widetilde{v}_t^a \leq \begin{cases} 0 & \forall t \in \{0, \dots, s^a - 1\}, \forall A_R \\ \widetilde{p}_{t-s^a}^a + \widetilde{u}_{t-s^a}^a & \forall t \in \{s^a, \dots, T\}, \forall A_R \end{cases} \quad (10)$$

$$\eta \cdot p_0^a + \widetilde{p}_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad \forall a \in A_O \quad (11)$$

$$u_t^a, \widetilde{u}_t^a, v_t^a, \widetilde{v}_t^a, p_t^a, \widetilde{p}_t^a \geq 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (12)$$

収容能力の制約

e_h : 歩行者の自動車に対する占有空間の比

流出制約

e_f : 歩行者1人あたりの自動車の流量低減率

歩車の速度の差異

s^a : 歩行者のセル通過最小時間

初期条件

D^a : 起点セルの人口

非負制約

実ネットワークでの計算に用いた数値

$$R_t^a = \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \\ = \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-15)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}}$$

$$e_h = 1/15, \quad e_f = 1/6 \text{ (道路上セル)}$$

$$s^a = \text{セル長}/200\text{m (端数切上げ)}$$

$$\eta = 2.0$$

単位時間 3分

$$T = 70$$

(春大会発表資料)

津波避難における 途中乗車施策の効果分析

2018年7月7日

鹿島建設株式会社 東北支店

爪林康太

東北大学大学院 工学研究科

竹居広樹

東北大学災害科学国際研究所

奥村 誠

徒歩避難が困難な住民の存在

- ◆ 徒歩避難困難地域
- ◆ 災害時要援護者



自動車による避難を
余儀なくされる

起こりうる問題

- ◆ 自動車が足りない
- ◆ 運転できる人が足りない



徒歩避難が困難な住民が
危険なエリアに取り残されて
しまう可能性



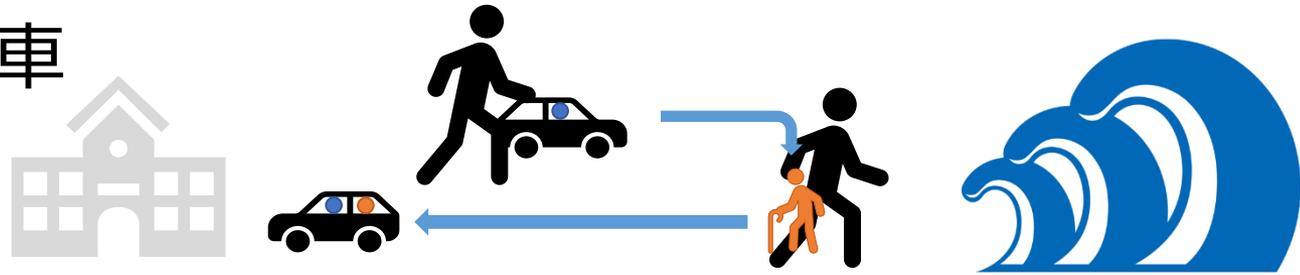
国土交通省資料，2013年6月



河北新報，2013年6月18日

途中乗車の有効性と実現上の課題

◆ 途中乗車



他の地域から自動車を送り，経路途中で乗車させて避難する政策。

- ↔ 運転者のリスクが増加せざるを得ない
- 運転者のリスク増加の程度を明らかにし，途中乗車施策が社会的に受け入れられるか議論が必要

本研究の目的

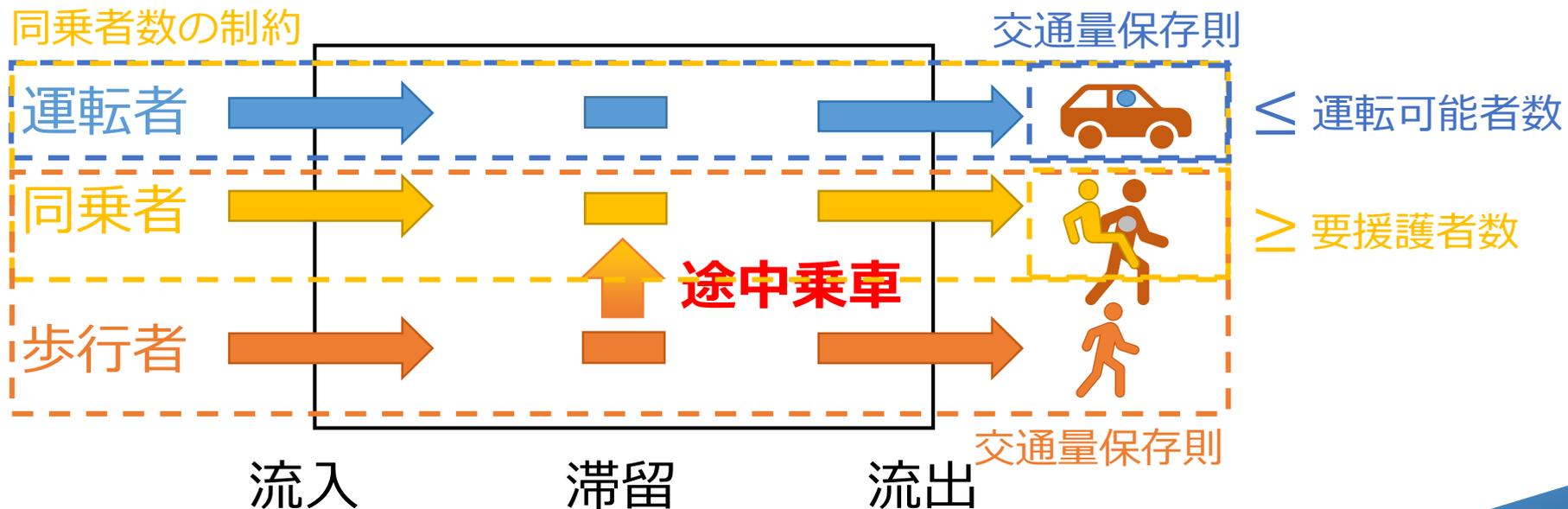
途中乗車のモデル化

→途中乗車の導入によるリスクへの影響を分析

使用するモデルと変数・途中乗車の表現

- ◆2モードのセルベース最適津波避難モデル(竹居・奥村, 2018)を3モード(運転者・同乗者・歩行者)に拡張
- ◆歩行者から同乗者へのモード遷移(途中乗車)を可能に

期 t でのセル a (:道路区間)の交通量に関する変数



拡張型最適津波避難モデル

- ◆ 目的関数：津波遭遇総リスクの最小化

$$\text{minimize } \sum_{\text{時刻}} \sum_{\text{セル}} R_t^a \cdot (\text{運転者数} + \text{同乗者数} + \text{歩行者数})$$


 津波遭遇確率 (外生)

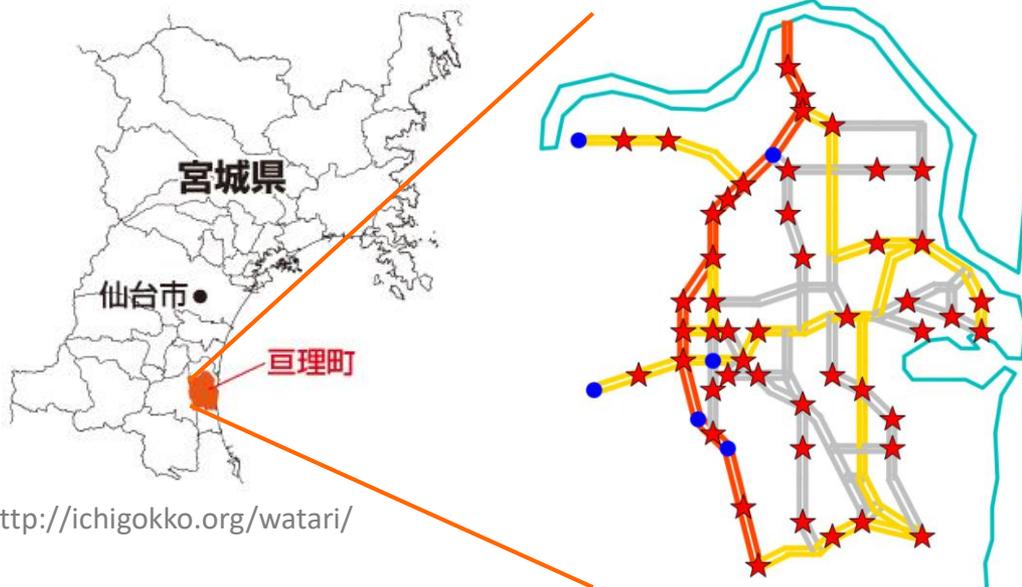
- ◆ 制約条件

- ・ 交通量保存則
- ・ 同乗者数に関する制約
- ・ モード遷移時間に関する制約
- ・ 流入・流出制約
- ・ 初期条件 (避難者人数と要援護者率・運転可能率)
- ・ 非負制約

線形計画問題(LP)として計算可能

適用ネットワークの設定

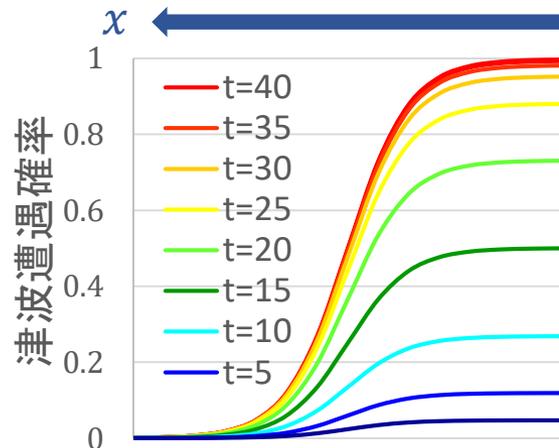
対象地域：宮城県亶理郡亶理町



<http://ichigokko.org/watari/>

津波遭遇確率 R_t^a

海からの距離 x と
経過時間 t から
外生的に津波遭遇
確率を設定



町内の2車線道路をモデル化
(国道, 県道, その他)

起点セル★

町内の67地区



避難場所セル●

4つの避難所

or

内陸の2か所の町境の峠

$\rightarrow R_t^a = 0$ と仮定

途中乗車の有無による車両の累積通過台数の比較

最大同乗者人数3.0人 要援護者率50% 運転可能率10%

途中乗車なし



津波遭遇
総リスク値
=83,553

沿岸→内陸

途中乗車あり



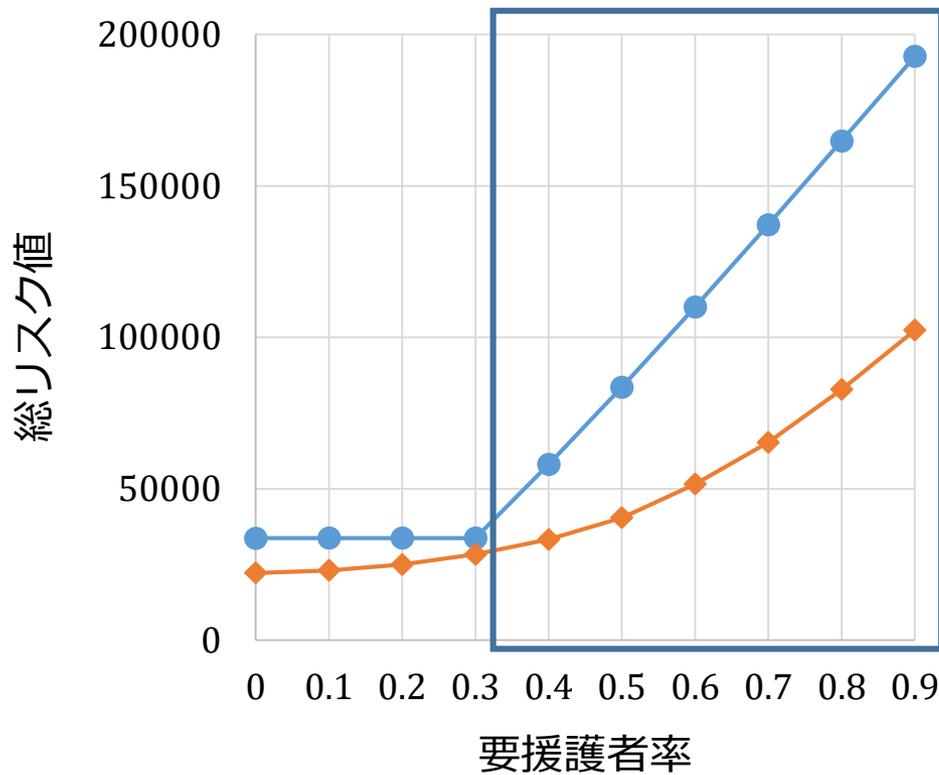
津波遭遇
総リスク値
=40,458

海に向かう交通の発生

途中乗車の有無による総リスク値の比較

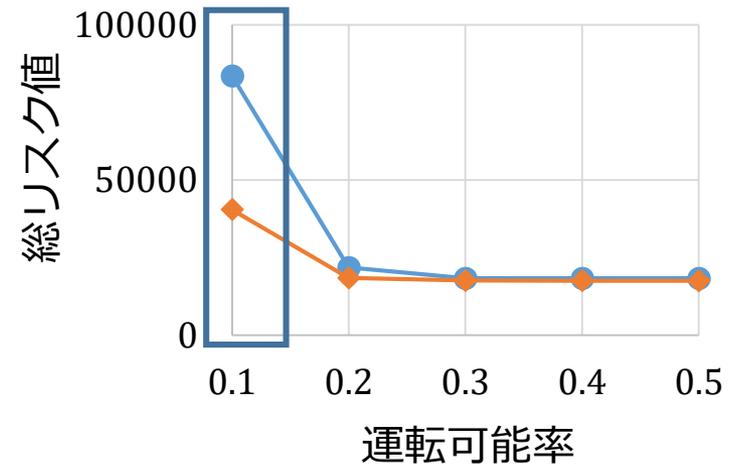
最大同乗者人数3.0人

運転可能率 = 10%



要援護者率が高く運転可能率が低い場合
途中乗車によるリスク低減効果が大きい

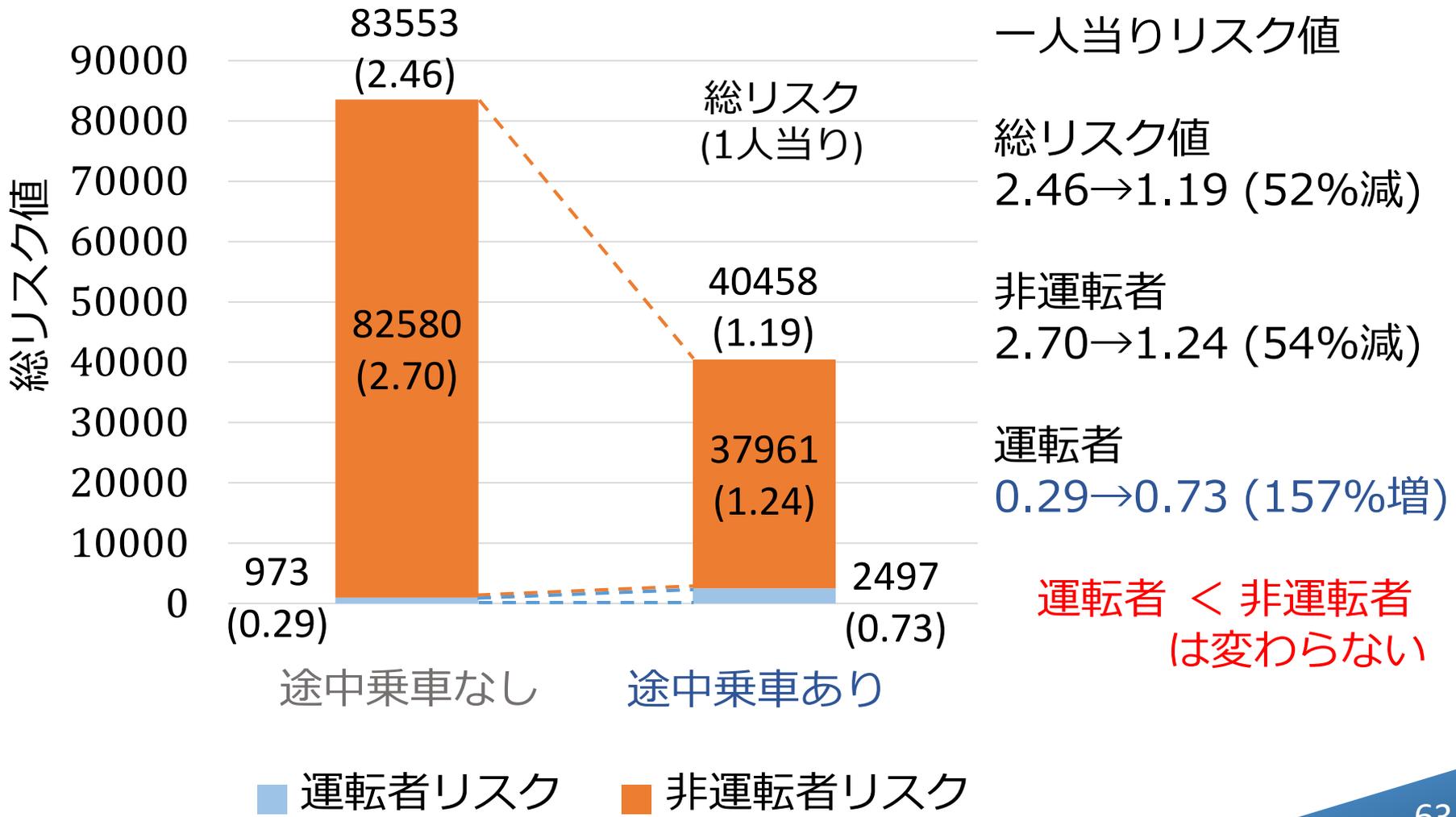
要援護者率 = 50%



● 途中乗車なし ◆ 途中乗車あり

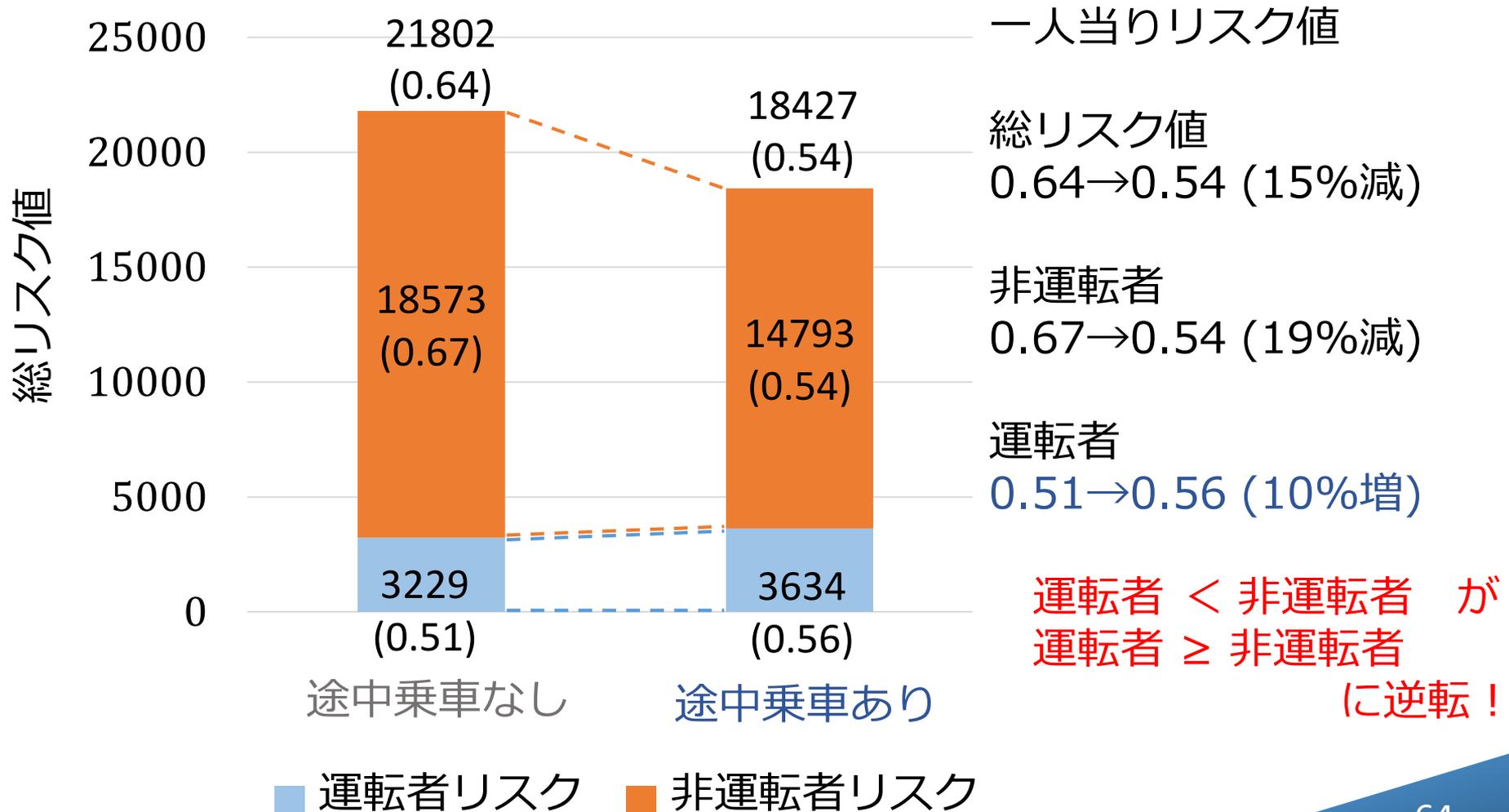
運転者・非運転者の総リスクと1人当りリスク

最大同乗者人数3.0人 要援護者率50% 運転可能率10%



運転者・非運転者の総リスクと1人当りリスク

最大同乗者人数3.0人 要援護者率50% 運転可能率20%



本研究のまとめと議論したい点

まとめ

- ◆ 途中乗車を含む総リスク最小化モデルを構築
- ◆ 途中乗車の有無による総リスク・運転者リスク・非運転者リスクの比較
 - ➡ 途中乗車により運転者1人当りのリスクは増加し、非運転者と同程度になる
 - ➡ 非運転者よりも高くなる「逆転」ケースもある

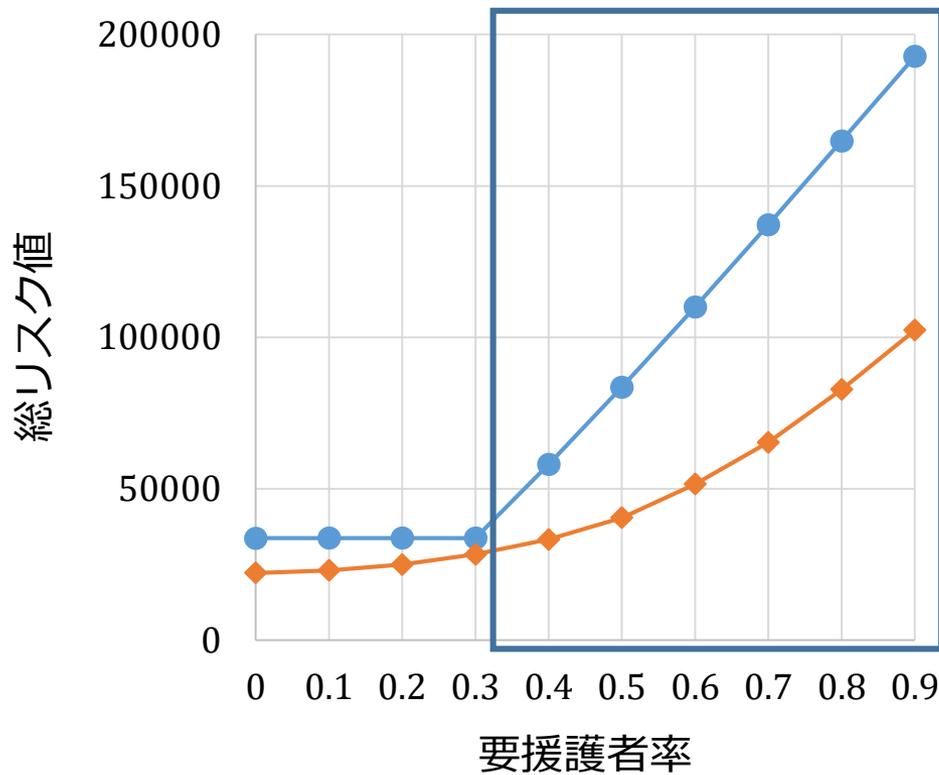
議論

- ◆ 「一人当たりリスクの逆転」という運転者への負担を強いる途中乗車施策は、社会的に許容できるのか？

途中乗車の有無による総リスク値の比較

最大同乗者人数3.0人

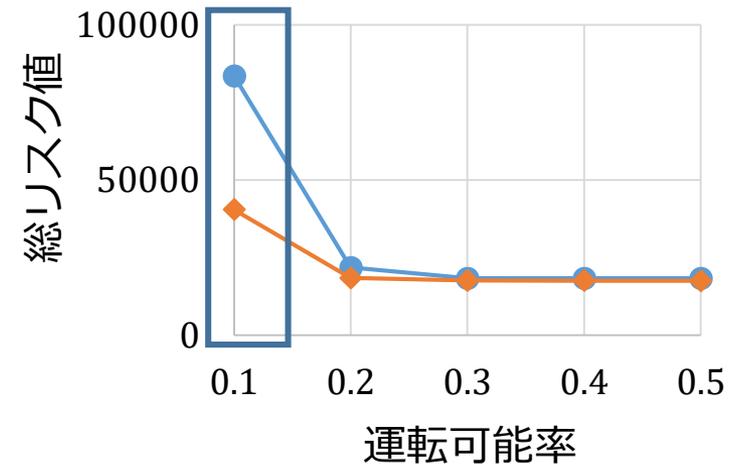
運転可能率 = 10%



● 途中乗車なし ◆ 途中乗車あり

要援護者率が高く運転可能率が低い場合
途中乗車によるリスク低減効果が大きい

要援護者率 = 50%



津波避難における コントラフロー適用区間の一考察

2018年7月7日

東北大学大学院 工学研究科 竹居広樹
東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠

コントラフロー施策の概要と注意事項

コントラフロー

- ◆ 双方向通行可能な道路を一方通行化させる施策
- ◆ 2005年ハリケーンカトリーナ災害の避難で実施

コントラフロー実施の際に注意すべき事項：

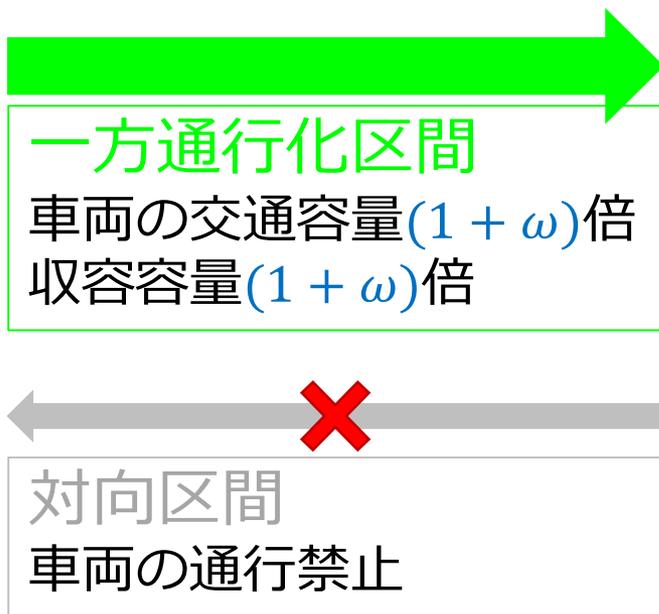
- ◆ 逆向きの交通の存在
 - ➡ 効果が確実に見込める最小限の区間に適用するのが望ましい
- ◆ 容量拡大率が不明．拡大率が小さくても実施すべきなのか分からない
 - ➡ 容量拡大率を変動できるモデルで効果を分析

本研究の目的と要件

- ◆ 3モード（運転者・同乗者・歩行者）の津波遭遇リスク最小化モデルに、コントラフロー適用区間を指定する0-1変数を加えた拡張型モデルを構築
- ◆ 容量拡大率，運転可能率，要援護者率をパラメータとして与える
- ◆ パラメータの差異によるコントラフロー適用区間の比較
 - ➡ 条件の差異による適用区間の違いを把握したい
 - ➡ 如何なる条件でもコントラフロー化すべき区間はあるか？

コントラフロー区間内生化モデル

- ◆ 一方通行化の設定の有無を0-1変数とした混合整数計画問題(MIP)
- ◆ 対象区間の交通容量を $(1 + \omega)$ 倍し, 対向する区間の車両の通行を禁止する

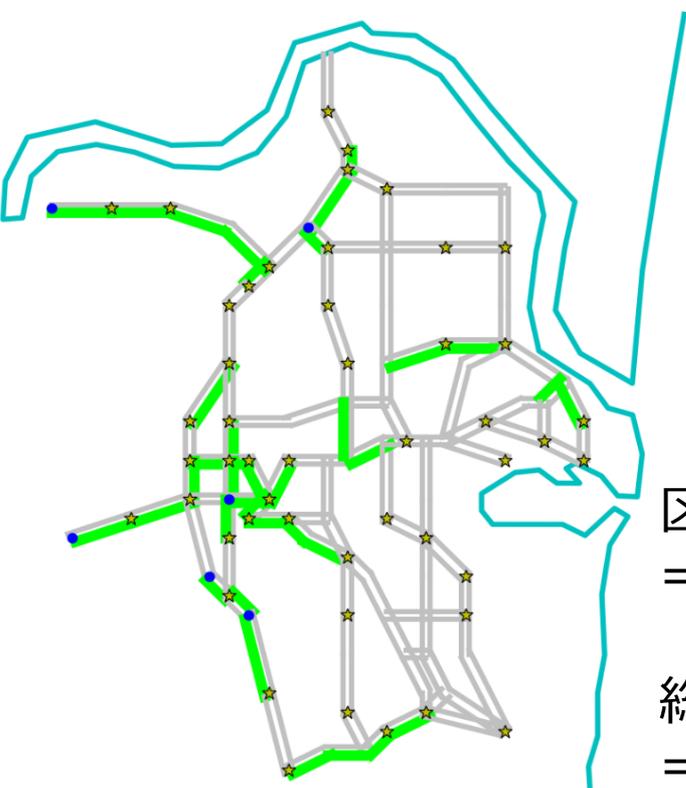


計算結果の一例
(道路は全て2車線・左側通行)

コントラフロー適用区間

全員直接避難できる

- 運転可能率 20%
- 要援護者率 10%



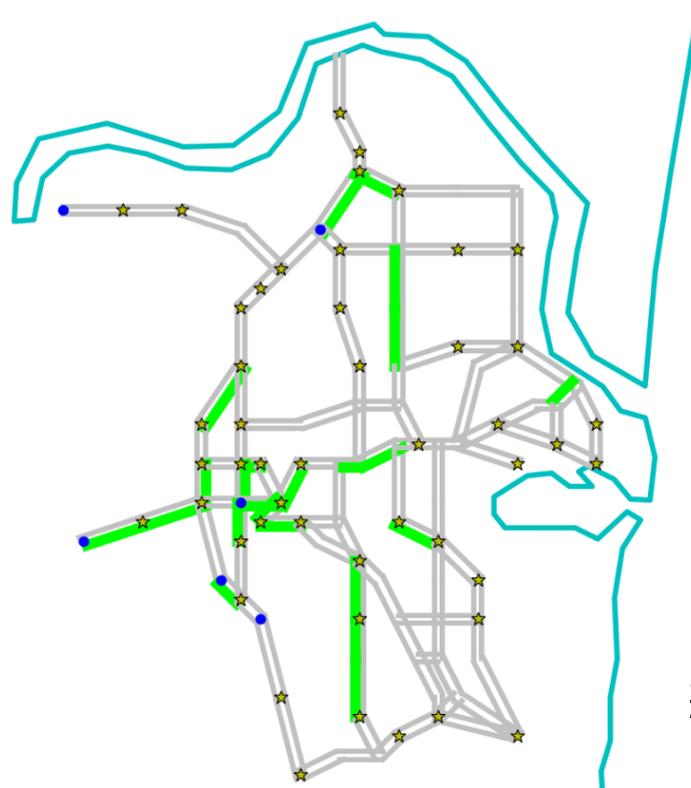
区間数
=37

総リスク値
=13580

全員直接避難できない

- 運転可能率 20%
- 要援護者率 70%

$\omega=0.5$



区間数
=23

総リスク値
=19339

- 交通が集中する避難場所付近（内陸）でコントラフロー化

コントラフロー適用区間

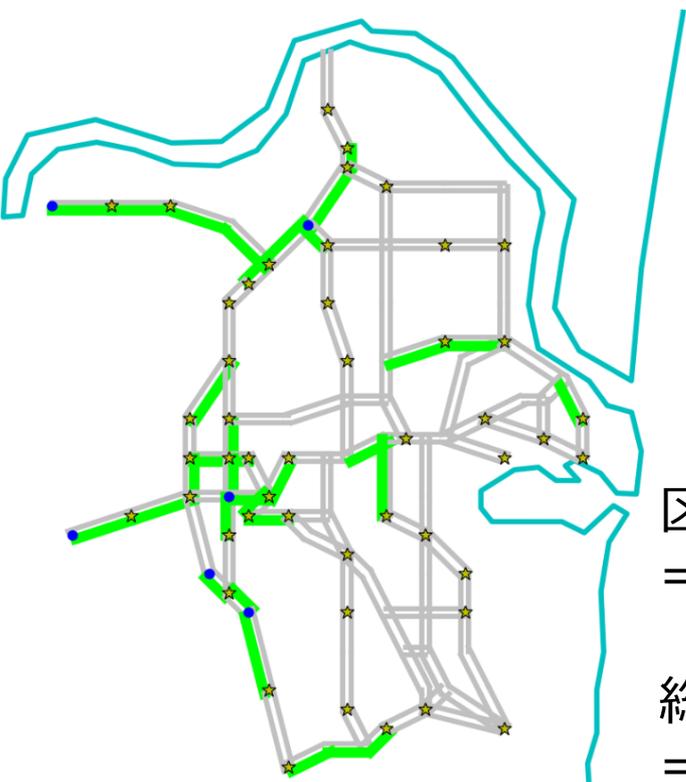
運転可能者が多い

- 運転可能率 20%
- 要援護者率 50%

運転可能者が少ない

- 運転可能率 10%
- 要援護者率 50%

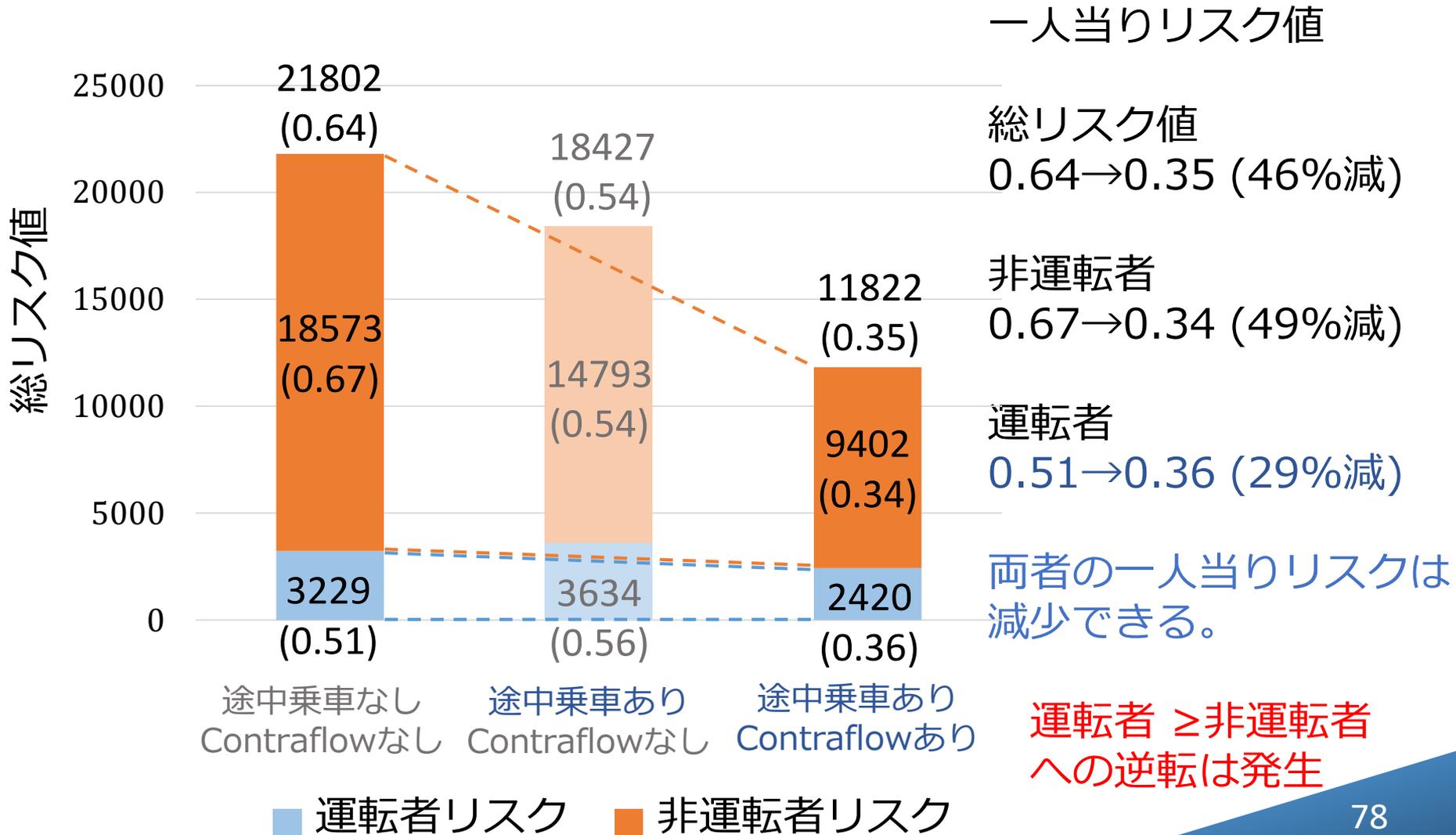
$\omega=0.5$



- 運転できる人（自動車）が少ないと適用区間が少なくなる

コントラフロー施策の追加によるリスク値の変化

最大同乗者人数3.0人 要援護者率50% 運転可能率20%



結論

- ◆コントラフロー区間を最適に定めるモデルを構築
- ◆容量拡大率の差異によるコントラフロー区間数の比較
 - ➡容量拡大率の大小に関わらず一定数の区間がコントラフロー化される
- ◆運転可能率，要援護者率の差異によるコントラフロー区間数の比較
 - ➡取り残される人の有無で適用区間が変わる
 - ➡地域ごとの運転可能者数（自動車台数），要援護者数の把握が求められる

線形計画法 (LP) というアプローチ

□安心して使える

- 大域最適解の存在
- アルゴリズムを自分で何とかしなくてよい
- 大規模化にも対応できる

□拡張性

- 計画問題を外に包む

□Multi-commodity 問題には使えない

- 行き先を区別できない (FIFO条件を侵害)
- スーパー避難先を仮定し、避難先を内生化すれば十分
- 放射線被ばく量最小化では、出発場所ごとの避難者を区別する必要がある?

□線形目的関数の限界

- 避難行動が最後まで持続する前提で途中の遭遇確率を計算
- 途中で津波に遭った車両は、その場所に停止するのでは?

現実には細かく合わせると、次元が爆発し、容易に解けなくなるが...

- 現実規模netの動学的最適化モデルが本当に必要か？
- 動学的な解がわかっても実施は不可能
 - 時間的に固定した行動・誘導ルールが欲しい
 - 空間的な安全・危険の大小関係が固定的なら、静学的計画で十分？
- 空間・時間の単純なルールで問題を分割可能では？
 - 空間的に交差する経路を使うような解は出ない
 - 分割地域への資源の割当てと内部避難計画に分解？
 - ハリケーンや原発：最大流の期間が大半
 - 静学的計画で事足りる？

今後の課題 by Vedat Bayram (2016)

- 人間行動 →realistic, implementable, fair
- 避難所選定:計算負荷大 →MS/OR研究
- 単一Hazard →複合Hazard、確率的・ロバスト
- 現実規模netで解ける動学的最適化モデル
- 避難弱者の考慮 →マストラ、マルチモード
- 避難と災害支援・対応(逆向き)の同時考慮
- ITSなど情報提供によるリアルタイム誘導
- テロなど、自然災害以外からの避難 →攻撃者と防衛者とのgame理論的アプローチ

今後の課題について奥村の雑感

- 人間行動に合わせる形で計画策定
 - × → 住民の中で計算、理解を深める → 行動の合理化
- 避難所選定の同時最適 → × 仮想終着点で十分
- 複合Hazard、確率的・ロバスト → × 複雑になりすぎる
- 現実規模netで解ける動学的最適化モデル
 - 空間・時間の単純なルールにより問題を分割可？
- 避難弱者の考慮 → マルチモード・○ 途中乗車
- 避難と災害支援・対応の考慮 → ○ 途中乗車の回送
- ITS情報提供によるリアルタイム誘導 → × 責任問題
- テロなど、自然災害以外からの避難
 - △ 事前補強(防災)と結合したgame理論的モデル

最適誘導の課題と自動運転への期待

- 最適誘導はあくまでも、利用可能な道路が健全で、避難者が誘導・指示に従ってくれることが前提
 - 自動運転車による、避難経路の通行可能性の早期確認
 - 人々の追従心理を活用し、自動運転車により先導
- (課題) リアルタイム性
 - 通行不能箇所を反映したリアルタイム再計算は容易
 - 再計算に基づく新しい誘導をどのように実現するか？
 - 危険、異常は発見できても安全性の保障は困難
- 平日の昼間のように、沿岸部に自分で運転が難しい高齢者しか居ない場合の、Pickup行動の危険性
 - 運転困難者数に見合う避難用自動運転車の配備