

避難場所の容量を考慮した梅田地下街における垂直避難計画モデルの研究 —混合整数計画法を利用したアプローチ—

○山本 遼*¹ 瀧澤 重志*²

キーワード：混合整数計画法 避難計画 梅田地下街 収容可能人数 垂直避難 マルチ・エージェント

1. はじめに

大阪梅田地下街は、東西に約 1.1km、南北に約 1.1km の範囲に広がり、複数の地下街、5つの鉄道駅、多くのビルなどと接続することで、図1のように巨大で複雑な地下空間を形成し、さらに区域によって管理者も異なっている。そのすぐ北側を淀川が流れていることもあり、近い将来に発生が予測される南海トラフ地震による津波、豪雨、高潮などによる浸水被害が懸念されており、地下街全体で統一した避難計画の策定が求められている。しかし、広大な地下街において実際に避難訓練を行うことは困難であるため、その代わりとして避難シミュレーションが行われる。

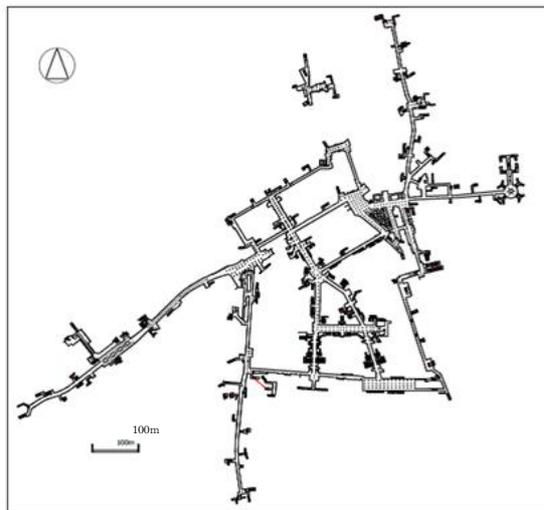


図1 梅田地下街の平面図

既往研究として、瀧澤ら²⁾は梅田地下街を対象にマルチエージェントシステム（以下、MAS）を用いて、接続ビルを利用した垂直避難を想定し、避難シミュレーションを行った。結果として地下街全体の避難完了時間は 24 分となったが、MASは避難所の収容人数を考慮できないため、避難者数が収容可能人数を超過する接続ビルがいくつか発生することがわかった。

さらに筆者らは制約考慮型ネットワークボロノイ図と呼ばれるアルゴリズムを改良し、接続する地下鉄道駅構内を除く梅田地下街全体を対象に避難領域分割を行なった³⁾。結果として収容人数を考慮した領域分割が可能となったが、計算時間が約 40 秒であった。比較的短時間ではあるものの、将来的な応用として、実際に災害が発生してから

リアルタイムで避難領域分割をすることを想定すると、さらに計算時間を短縮する必要がある。

以上の背景より本研究では、各接続ビルの収容人数を考慮した避難領域分割（以下、収容人数考慮型避難領域分割問題と呼ぶ）を定式化し、数理計画ソルバーを用いて最適解を短時間で求めることを目的とする。さらに求められた避難領域分割をもとに MAS を用いて地下街の避難完了時間を計算し、その領域分割が妥当かどうかを検証する。

2. 収容人数考慮型避難領域分割問題

本研究における避難領域分割問題について説明する。

地下街の通路を連結なグラフとして表現し、各避難者の移動距離の合計が最小となるように、グラフのエッジを避難所に割り当てることを考える。グラフのエッジとその集合を $e \in E$ 、避難所とその集合を $t \in T$ とおく。さらに、エッジ e 上に存在する避難者の人数を $p(e)$ 、エッジ e から避難所 t までの最短距離を $d(e, t)$ 、避難所の収容可能人数を $c(t)$ とする。

以上より避難領域分割問題を以下のように定式化する。

$$\text{Minimize } \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} x(e, t) \cdot d(e, t) \cdot p(e) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x(e, t) \in \{0, 1\} \quad \text{for all } e \in E, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} x(e, t) = 1 \quad \text{for all } e \in E \quad (3)$$

$$c(t) \geq \sum_{e \in E} x(e, t) \cdot p(e) \quad \text{for all } t \in T \quad (4)$$

$$x(e, t) \leq \sum_{g \in G(e)} x(g, t) \quad \text{for all } e \in E, t \in T \quad (5)$$

目的関数 (1) は各避難者の避難所までの距離の合計の最小化を表している。式 (2) の $x(e, t)$ は 0-1 変数であり、エッジ e が避難所 t に配分されるかどうかを表す。式 (3) は、各エッジは必ずただ 1 つの避難所に割り当てられることを示している。式 (4) は割り当てられた避難者の合計が避難所の収容可能人数以下となることを意味している。式 (5) は、エッジ e が避難所 t に割り当てられるとき、エッジ e に隣接し、かつ、エッジ e により避難所 t までの最短距離が小さいエッジの集合を $G(e)$ とした際に、エッジ $g \in G(e)$ のうち少なくとも 1 本は避難所 t に割り当てられることを意味

している。この制約により各避難所の領域内のグラフが必ず連結となる。

3. 最適化と検証の流れ

本研究では数理計画ソルバーの 1 つである Gurobi Optimizer 6.5.1⁴⁾を使用し、分枝限定法により混合整数計画問題の解を求める。以降、Gurobi Optimizer を単にソルバーと呼ぶ。まずソルバーで最適解をもとめるにあたって、解かせたい問題を記述した LP ファイルを作成する。グラフデータ、エッジ距離、避難者数、収容人数などの地下街のデータから、問題の LP ファイルを作成するプログラムを Visual C++ 2015 により実装する。作成された LP ファイルをソルバーに読み込ませ、その計算結果を出力し、GIS を用いて可視化する。さらに領域分割結果を元に、MAS に基づく歩行者移動シミュレーターの SimTread を用いて、避難完了時間を算出する⁵⁾。

4. 最適化

本章では最適化の実行について述べる。

4.1 問題設定

梅田地下街の通路、接続ビル、地下鉄駅構内をグラフで表現し、各ノード間の距離がおおよそ10m間隔となるようグラフを分割した結果、3270点のノードと4281本のエッジから構成されるグラフとなった。シミュレーションは2次元平面で計算されるので、図2のように、階の異なる駅構内と改札、接続ビルとその階段を距離0のエッジで接続している。また接続ビルに出口が複数個ある場合についても、同様に出口を距離0のエッジで仮想ノードに接続し、この仮想ノードに接続ビルの収容人数を与える。地下街、駅構内に分布する避難者は、過去に行われた歩行者断面交通量調査等の結果²⁾から推定し、地下街全体に避難者を14782人配置した(建物内部の利用者、電車の乗客を除く)。今回の検証において、避難所として利用する接続ビルは15か所とする。収容可能人数は大阪市危機管理室が行ったアンケートより決定し、収容可能人数の合計は21031人となった。

4.2 結果

ソルバーによる最適解の計算結果が図3のようになる。また比較対象として収容人数を考慮しない場合、つまり式(4)を除いてソルバーで計算した結果を図4に示す。表1にそれぞれの各避難所の収容人数と避難者数をまとめた。収容可能人数を考慮しない場合、5か所の避難所において避難者の超過が発生していることがわかる。対して収容可能人数を考慮した場合、避難者数が超過する避難所はないものの、収容可能人数に達している避難所が3か所あることがわかる。目的関数値と領域分割の図からわかるように収容人数を考慮した場合、避難者の移動距離が大きくなり、領域も広範囲に広がっている避難所がみられる。計算時間



図2 梅田地下街通路・接続ビル・駅構内のグラフ

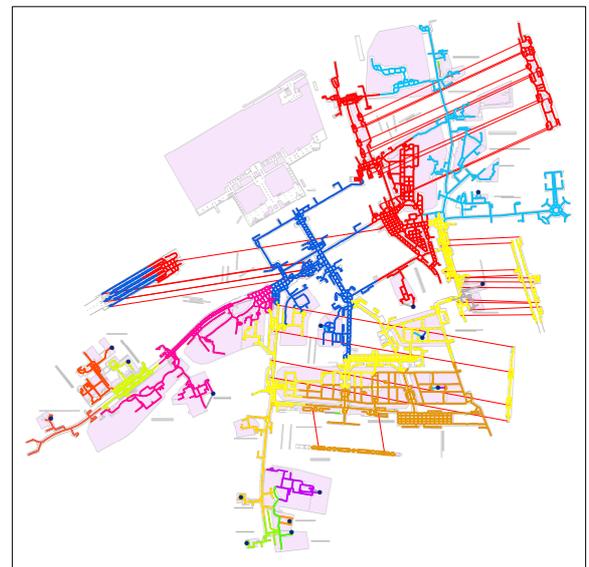


図3 収容人数考慮型避難領域分割の結果

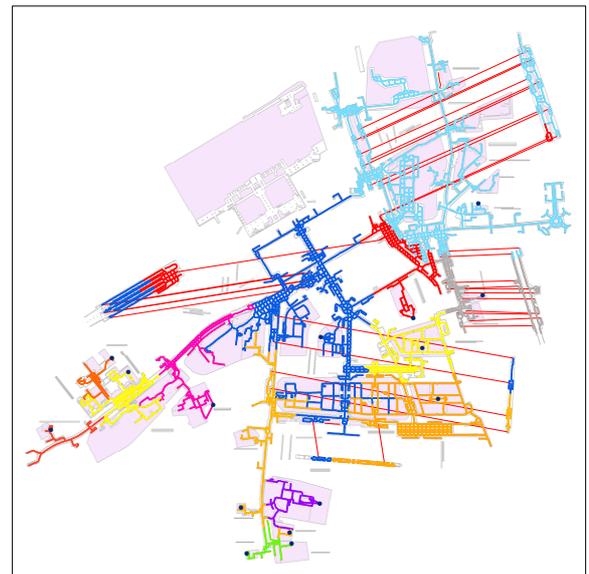


図4 収容人数を考慮しない場合の領域分割結果

については収容人数を考慮する場合、しない場合、それぞれ 13.1 秒、3.6 秒(OS: Windows 8.1 64bit, CPU: Core i7-4709K, Memory: 16GB)となった。

5. MAS による避難完了時間の検証

本章では最適化結果の検証について述べる。

5.1 シミュレーションの設定

4.2 の計算結果をもとに SimTread を用いて避難完了時間を計算する。SimTread のデフォルトの状態では、避難者は最寄りの避難所へと移動するが、目指すべき避難所を避難者ごとに設定することも可能である。本研究では図 3, 4 で示した領域分割の結果をもとに、避難者の避難先を設定した。領域分割の際に使用したデータを基に避難者の配置を行い、避難者数を最適化時と同様に 14782 人とした。歩行速度は平地では 1.0m/s, 階段では 0.45m/s とし、避難者は避難所となる接続ビルの階段を上り、避難階に到達した時点で避難完了とする。

5.2 シミュレーション結果

表 2 に各避難ビルにおける避難完了時間を、図 5 に地下街全体の累積避難者数の推移を、図 6 にシミュレーションの様子を示す。避難者 14782 人の避難完了時間は 52 分 30 秒となり、瀧澤ら²⁾のシミュレーションによる 24 分よりも大きく延びる結果となった。表 2 から、避難者数が 1000 人以下の避難ビルでは避難完了時間が 10 分以下であるが、1000 人以上の避難ビル 4 か所が他と比較して避難完了までに時間がかかっていることがわかる。図 6 のシミュレーションの画像より、10 分経過した時点で、避難者数の多い避難所の入り口にて混雑が発生している様子が見て取れ

る。このようになる理由として、収容人数考慮型避難領域分割では避難所までの距離のみを考慮して分割をしておらず、避難時間や避難者の混雑の発生を考慮していないことが考えられる。

6. おわりに

本研究では、梅田地下街を対象に、各避難所の収容人数を考慮した避難領域分割問題を定式化し、数理計画ソルバーを用いて最適解を求めた。これにより領域内のネットワークの連結を保持しながら、収容人数を考慮した領域分割が可能となった。しかし、各避難所の避難者数に偏りがあり、収容人数に達している避難所が発生した。

さらにこの領域分割の結果から、MAS に基づいた避難シミュレーションソフトを用いて避難完了時間を計算した。その結果、避難完了時間が 52 分 30 秒となった。避難者数が 1000 人以上となるような避難所において、避難所出口付近における混雑が発生し、避難完了時間が大幅に延びる様子が見られた。今後は、収容人数や避難所までの移動距離に加えて、避難完了時間をできるだけ短くするような定式化の改善を検討する予定である。

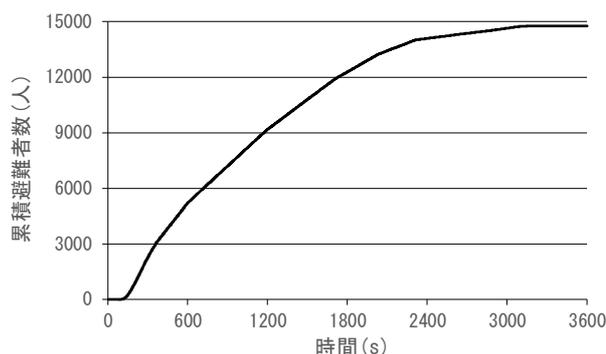


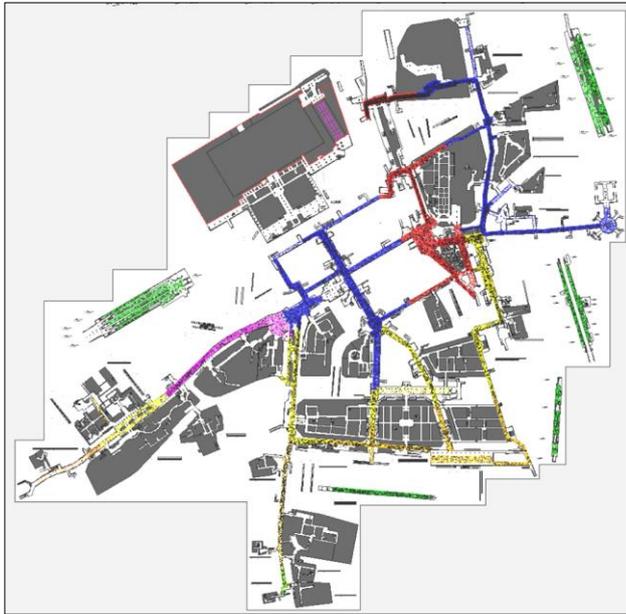
図 5 累積避難者数の推移

表 1 各避難所の合計避難者数

避難ビル	収容可能人数 (人)	合計避難者数 (人) (収容率 (%))	
		収容人数考慮型避難領域分割	式 (4) を除いた場合の領域分割
A	109	61 (56.0)	949 (870.6)
B	59	58 (98.3)	64 (108.5)
C	122	15 (12.3)	15 (12.3)
D	707	0 (0)	0 (0)
E	797	572 (71.8)	1036 (130.0)
F	406	183 (45.1)	177 (43.6)
G	549	2 (0.40)	0 (0)
H	145	57 (39.3)	57 (39.3)
I	3859	3859 (100)	981 (25.4)
J	6708	2861 (42.7)	556 (8.3)
K	2115	1485 (70.2)	1072 (50.7)
L	2477	2477 (100)	3596 (145.2)
M	130	2 (1.5)	2 (1.5)
N	860	613 (71.3)	448 (52.1)
O	2537	2537 (100)	5813 (229.1)
合計	21031	14782	14782
計算時間 (s)		13.1	3.6
目的関数値 (m)		4118430.654	3668766.591

表 2 各避難所の避難完了時間

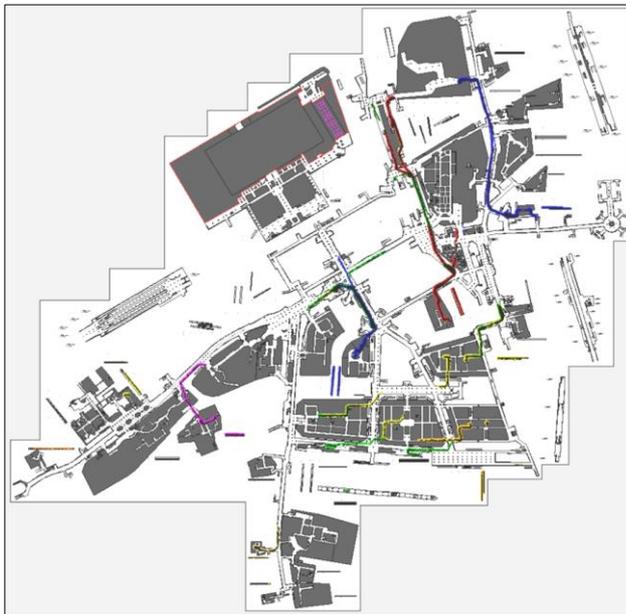
避難ビル	各避難所ビルの避難者数 (人)	避難完了時間 (s)
A	61	312
B	58	268
C	15	180
D	0	0
E	572	595
F	183	357
G	2	171
H	57	182
I	3859	2313
J	2861	3149
K	1485	1195
L	2477	2026
M	2	168
N	613	595
O	2537	1709



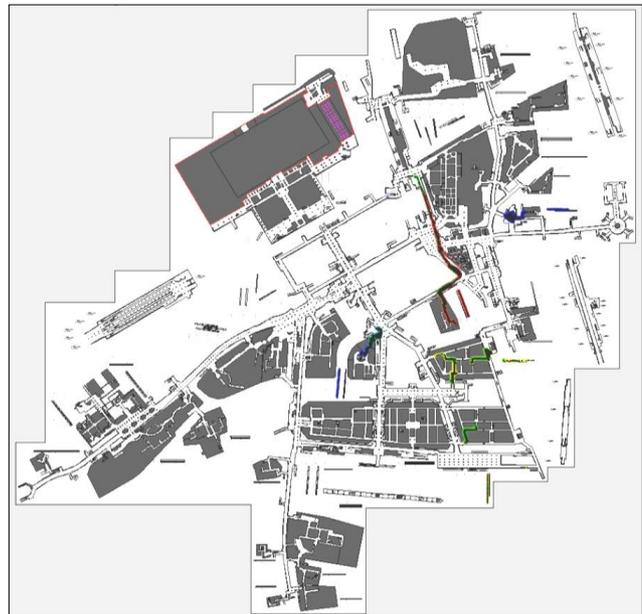
(a) 避難開始直前



(b) 30 秒後



(c) 300 秒後



(d) 600 秒後

図6 避難シミュレーションの様子

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)と JST CREST ビッグデータに向けた革新的アルゴリズム基盤の補助を受けています。

[参考文献]

- 1) 瀬尾智也：梅田地下街における最速避難計画モデルの適用に関する研究，大阪市立大学工学部都市学科卒業論文，2014
- 2) 瀧澤重志，高木尚哉，谷口与史也：浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション，大阪市立大学都市防災研究プロジェクト 都市防災研究論文集，第2巻，pp.35-38，2015
- 3) R. Yamamoto and A. Takizawa: A Study on the Evacuation Planning Model with Capacity-Constrained Network Voronoi

Diagram in Umeda Underground Mall, 11th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA 2016), Sendai, Japan, pp.275-278, 2016

- 4) October Sky Co., Ltd. “Gurobi Optimizer”
<https://www.octobersky.jp/products/gurobi.html>
 accessed Oct.2016
- 5) 木村 謙ほか：マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現：歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築，日本建築学会計画系論文集，第74巻，第636号，p371-377，2009

*1 大阪市立大学大学院工学研究科 大学院生

*2 大阪市立大学大学院工学研究科 准教授，JST CREST 博士（工）