Dynamic Tree Network による避難完了時間を最小化する梅田地下街の垂直避難領域の分割手法

○山本 遼[*1] 瀧澤 重志[*2]

キーワード：避難完了時間最小化, dynamic tree network，垂直避難計画，梅田地下街，混合整数計画法

1. はじめに

現在，津波などによる浸水被害が懸念されている大阪梅田地下街では，地下街全体で統一した避難計画の策定が進められている [1]．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ている．既往研究として瀧澤ら [2]は，梅田地下街を対象に Multi-Agent System（MAS）を用いて，避難者が最寄りの接続ビルへ向かい垂直避難をすると想定して，避難シミュレーションを行なった．その結果，避難完了時間は約 24 分となったが，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．さらに筆者らは梅田地下街の接続ビルの収容可能人数を制約とし，避難者の総避難距離の最小化を目的関数とした避難領域分割問題（Partition problem Minimizing Total Evacuation Distance with Capacity constraint: PMTEDC）を定式化し，数理計画ソルバーを用いて垂直避難のための領域分割を求めた [3]．この研究では，懸案であった収容可能人数の超過は解消することができたが，避難計画上重要な避難完了時間の最小化を考慮するものではなかった．さらに，幾何的な広がりを持つ平面を，線的なネットワークとして抽象化した上で最適化を行う必要があり，モデル化の妥当性の検証が行われていなかった．

以上の背景より本研究では，次章で説明する Dynamic Tree Network (DTN)[4]と呼ばれる考え方を用いて，各避難場所までの避難経路を，無向木としてモデル化する．そして，各接続ビルの収容可能人数を制約としつつ，無向木上で定義される避難完了時間の推定式 [4]を用いて，避難完了時間を最小化する避難領域の分割を求める問題（Partition problem Minimizing Evacuation Completion Time with Capacity constraint: PMECTC）を定式化し，汎用の数理計画ソルバーを用いて最適な領域分割を求める．この際 MAS を用いて，計算に必要なグラフのパラメータをキャリブレーションするとともに，得られた領域分割で避難シミュレーションを行い，MAS との避難完了時間の比較と，提案手法による避難完了時間の短縮の程度を確認する．

2. Dynamic tree network の概要

いま，点集合をV，辺集合をE，無向木のネットワークを$T=(V,E)$と表すとする．さらに各エッジの距離をl，各ノード上に存在する避難者数をp，辺容量をc，避難者の歩行速度をτとしたとき，DTN は$N=(T,l,w,c,\tau)$と定義される．ここで辺容量は，単位時間当たりに辺を通行できる避難者数の上限である．

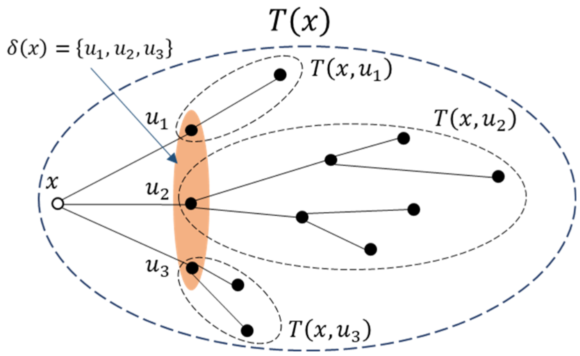

図 1 無向木$T(x)$の例

次に，避難場所となる根を$x\in V$とし，図 1 のような根をxとする無向木$T(x)$の避難完了時間$\Theta(x)$を考える．xに隣接する節点集合を$\delta(x)$とすると，$\Theta(x)$は次式で表わされる．

$$\Theta(x)= \max\{\Theta(x,u)|u\in\delta(x)\} \tag{1}$$

$\Theta(x)$を最大にする節点を$\hat{u}\in\delta(x)$とすると，$\Theta(x)=\Theta(x,\hat{u})$となることが分かる．

さらに，辺容量cが一定であるとき，木をパスに変換しても変換前後で避難完了時間は変化しないことが Kamiyama らによって知られている [5]．木からパスへの変換は，節点から根までの距離が小さいものから順にパス上へ並べることで可能である．変換後のパスにおいて，各ノードから根xに向かって避難者が移動したとする．このとき 1 秒あたりに根xに到達する避難者数は最大c人である．ノード上の避難者が残っている状態で，後ろのノードからの避難者が到達してしまうと渋滞となる．すなわち到達者数がc人となる時間が連続する 1 つのグループ（クラスタ）が発生する（図 2）．

ここで任意のクラスタの避難完了時間について考える．クラスタの先頭の避難者がノード$v\in V$に存在し，ノードvから根xまでの距離を$d(x,v)$，$d(x,v_f\in V)\geq d(x,v)$となるノードv_fの集合を$V_f(t,v)$とする．このときノードvを先頭としたクラスタの避難完了時間$\Theta_{cluster_v}$は次式で表すことができる．

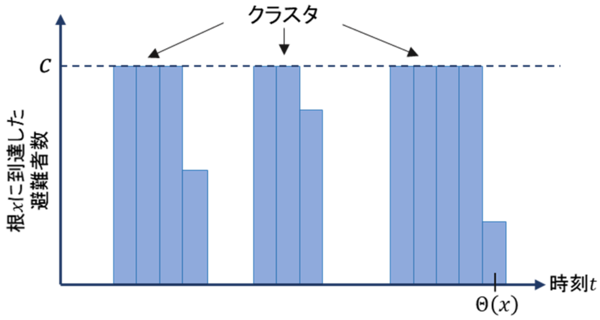

図 2 渋滞のクラスタの例

$$\Theta_{cluster\_v} = \frac{d(x,v)}{\tau} + \left\lceil \frac{\sum_{w \in V_f(x,v)} p(w)}{c} \right\rceil - 1 \quad (2)$$

上式では，歩行者密度が高いほどクラスタの時間幅が広がるので，避難完了時間がその分延びることが示されている．

$\Theta(x,\hat{u})$を求めるには，最後に到達するクラスタのみ考えればよい．すなわち式(2)が最大となるクラスタを求めればよいので，避難完了時間は

$$\Theta(x) = \max_{v \in V} \left\{ \frac{d(x,v)}{\tau} + \left\lceil \frac{\sum_{w \in V_f(x,v)} p(w)}{c} \right\rceil - 1 \right\} \quad (3)$$

となる．これがDTNにおける避難完了時間推定式である．

3. 収容人数制約付き最大避難完了時間最小化問題

以上の準備より，PMECTC の定式化について説明する．まず，地下街の通路を連結なグラフとして表現し，地下街全体の避難完了時間が最小となるように，グラフのノードを避難場所となる接続ビルに割り当てることを考える．グラフのノードとその集合を$v \in V$，避難場所とその集合を$t \in T$とおく．さらにノードv上の避難者数を$p(v)$，$p(v) > 0$であるノードの集合をV_N，ノードvから避難場所tまでの最短距離を$d(t,v)$，$d(t, v_f \in V) \geq d(t,v)$となるノード$v_f$の集合を$V_f(t,v)$，避難場所$t$の収容可能人数を$r(t)$，避難者の歩行速度を一律に$\tau$，$t$へ至る経路の平均的な辺容量を$c(t)$とする．

以上と式(3)をもとに，ノードvが避難場所tに配分されるかどうかを$x(t,v)$の 0-1 変数で表すとすると，避難領域分割問題は式(4)の混合整数計画問題として定式化できる．本式の 4 つ目の制約条件は，ノードvが避難場所tに割り当てられるとき，vに隣接し，かつ，vよりもtまでの最短距離が小さいノードの集合を$G(t,v)$とした際に，ノード$g \in G(t,v)$のうち少なくとも 1 本は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場所の領域内のグラフが必ず連結となる．さらに，6 つ目の制約条件は式(3)の条件に相当するが，同制約条件の右辺第 2 項は，最適化の都合上，整数条件を外している．

$$\begin{aligned}
\text{Minimize} \quad & \Theta_{Max} \\
\text{s.t.} \quad & x(t,v) \in \{0,1\} && \forall v \in V, \forall t \in T \\
& \sum_{t \in T} x(t,v) = 1 && \forall v \in V \\
& r(t) \geq \sum_{v \in V} x(t,v) \cdot p(v) && \forall t \in T \\
& x(t,v) \leq \sum_{g \in G(t,v)} x(t,g) && \forall v \in V, \forall t \in T \qquad (4) \\
& \Theta_{Max} - \Theta(t,v) \geq 0 && \forall v \in V_N, \forall t \in T \\
& \Theta(t,v) = \left(\frac{d(t,v)}{\tau} - 1 \right) \cdot x(t,v) \\
& \qquad + \frac{\sum_{u \in V_f(t,v)} p(u) \cdot x(t,u)}{c(t)}
\end{aligned}$$

4. 最適化

本研究では，高速な数理計画ソルバーの 1 つである Gurobi optimizer 7.5.1 を使用し，PMECTC と既報 3)で提案した PMTEDC の解を求める．これらはいずれも混合整数計画問題であり，分枝限定法により解が求められる．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求めるために，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，エッジ長さ，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 により実装した．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．計算環境は，OS: Windows 10 Professional 64 bit, CPU: Intel Core i7-4790K, Memory: 16GB である．

以下に，問題設定と結果について述べる．

4.1 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よそ 10m 間隔となるようグラフを分割した結果，図 3 に示す 3,270 点のノードと 4,281 本のエッジから構成されるグラフとなった．地下鉄ホームを含む梅田地下街は立体的だが，後述する MAS ソフト（SimTread）による計算は平面で計算する必要があるので，図 3 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．また出口が複数個ある接続ビルについて，収容可能人数が 1,000 人未満の場合は同様に出口を距離 0 のエッジで仮想ノードに接続し，この仮想ノードを目的地として接続ビルの収容可能人数を与える．対して 1,000 人以上の場合は各出口を目的地とし，それぞれに割り当てられた避難者の合計が接続ビルの収容可能人数以下となるように設定する．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 14,782 人配置した．ただし今回は電車の乗客を除いている．さらに，

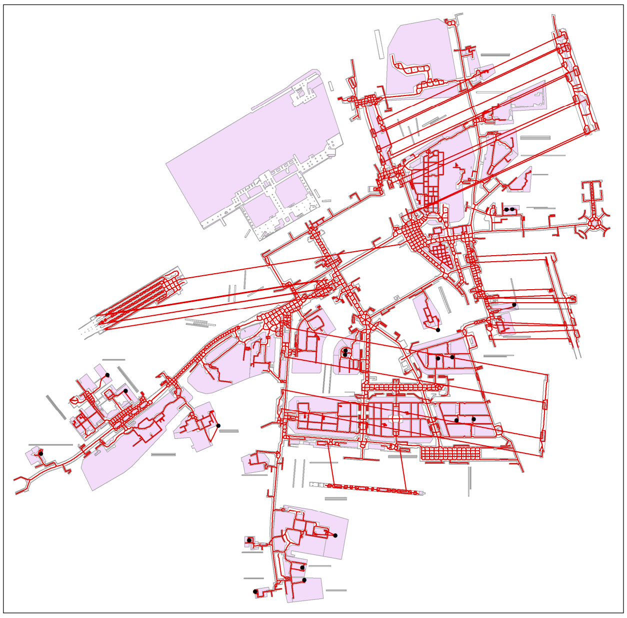

図 3 梅田地下街通路・接続ビル・駅構内のグラフ

今回の検証において，避難場所として利用する接続ビルは，大阪市危機管理室が過去に行ったアンケートより 15 棟とし，上記の出口の処理により避難階段は 19 か所となった．接続ビルの収容可能人数の合計は，同アンケートより 21,031 人となった．

式(4)では，避難者の歩行速度τを設定する必要がある．本研究では平地での歩行速度を 1.0m/s，階段でのそれを 0.45m/s と仮定するが，式(4)は歩行速度が一定という制限があるため，階段部分の長さを 1.0/0.45 倍に延長して，常に$\tau = 1.0$m/s で歩行するものとした．さらに，避難場所tへ至る経路の平均的な辺容量$c(t)$(人/s)も設定する必要がある．そのために事前に MAS を用いて，避難場所毎に 15 分以上の渋滞が発生するようシミュレーションを行い，各避難者の避難場所への避難時間を求め，次式で辺容量を決定した．表 1 左列に求められた各接続ビルの辺容量を示す．

$$c(t) = \frac{\text{避難完了 600 秒前までの}t\text{への避難者数}}{\text{600 秒}} \qquad (5)$$

4.2 結果

最適化の計算に要した時間は，PMTEDC で 19.1 秒と比較的短かった．一方 PMECTC では，5 日間計算機を動かし続けたが収束しなかったため，双対ギャップが 20.0%の時点で計算を中断した．

表 1 に各接続ビルの属性, 避難者数, 収容率をまとめた．PMTEDC ではビル I に 4,000 人近く避難者が集中していたが，PMECTC ではビル I の避難者数が 1,000 人以上減少している．また最大避難完了時間最小化のビル J において各出口の避難者数の偏りが解消していることが分かる．表 2 は各接続ビルの避難完了時間をまとめたものである．ここで，PMECTC を解いて得られる左列の式(4)の推定値に着目すると．PMECTC の最大の避難完了時間は，ビル J-2 の 27 分 13 秒となっている．

図 4，5 はそれぞれ，PMECTC と PMTEDC による領域分割結果である．前者のそれは後者のそれと大きく異なっている．例えば PMTEDC では，ディアモールの円柱の広場から大阪駅へ向かう広い通路の左右で，異なる接続ビルに

表 1 各接続ビルの属性・避難者数・収容率

接続ビル	辺容量 (人/s)	収容可能人数(人)	避難者数(人) 収容率(%) PMECTC		PMTEDC	
A	1.53	109	19 人	17.4%	61 人	56.0%
B	1.41	59	54	91.5	58	98.3
C	1.33	122	89	73.0	77	63.1
D	1.18	707	0	0.0	46	6.5
E	1.26	797	782	98.1	796	99.9
F	1.22	406	267	65.8	158	38.9
G	1.38	549	32	5.8	0	0.0
H	1.38	145	78	53.8	71	49.0
I	1.83	3,859	2,657	68.9	3,845	99.6
J-1	1.07	6,708	1,554	47.2	642	32.4
J-2	1.08	－	1,602	－	1,530	－
K-1	1.22	2,115	1,423	99.2	1,382	76.3
K-2	1.23	－	672	－	231	－
L-1	1.32	2,477	1,924	95.4	2,310	99.8
L-2	1.07	－	435	－	163	－
M	1.06	130	3	2.3	16	12.3
N	1.33	860	860	100.0	859	99.9
O-1	1.32	2,537	1,967	91.9	2,198	100.0
O-2	1.32	－	364	－	339	－

表 2 各接続ビルの避難完了時間

接続ビル	避難完了時間 (m:s) 式(4)の推定値 $\Theta(t,v)$	MAS PMECTC	MAS PMTEDC
A	02:41	02:31	03:06
B	04:27	04:20	04:26
C	04:37	04:34	04:26
D	00:00	00:00	03:14
E	12:35	13:05	12:52
F	07:11	07:07	05:37
G	03:27	03:35	00:00
H	03:11	03:09	03:03
I	27:12	27:25	38:10
J-1	27:00	26:57	14:54
J-2	27:13	27:27	25:47
K-1	22:30	22:11	21:49
K-2	11:12	11:06	05:12
L-1	27:07	26:59	34:18
L-2	09:26	09:18	05:02
M	03:20	02:50	03:10
N	14:27	14:19	14:06
O-1	27:12	26:51	29:58
O-2	06:43	06:32	06:08
最大値	27:13	27:27	38:10

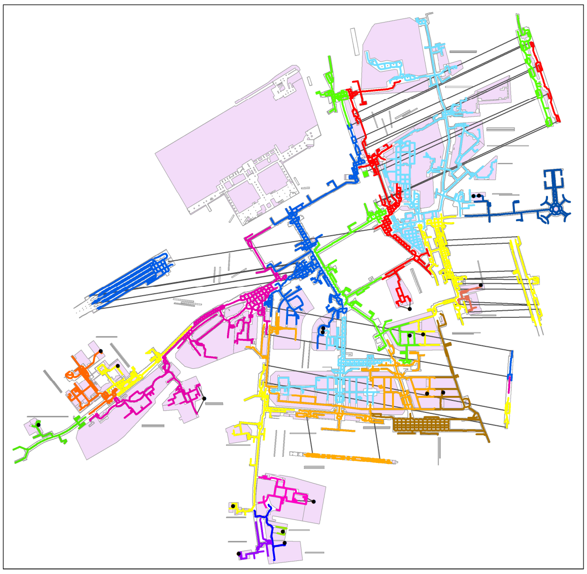

図 4 PMECTC による梅田地下街の垂直避難領域分割

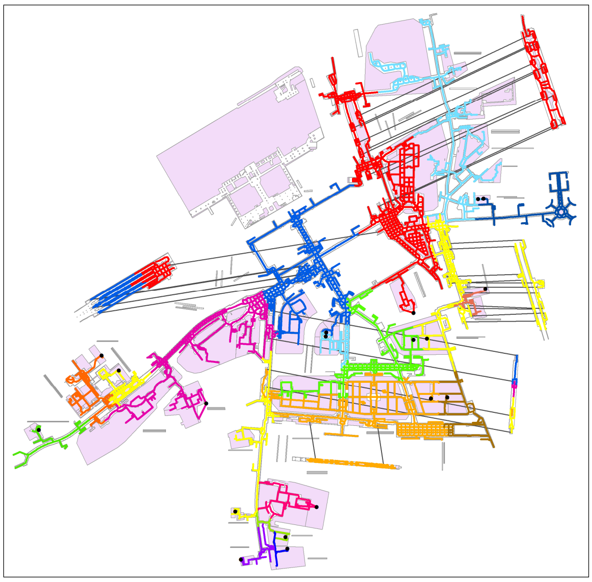

図 5 PMTEDC による梅田地下街の垂直避難領域分割

向かっていたり，御堂筋線の梅田駅の上下線のホームを経由して，それぞれ異なる接続ビルへ向かうなど，通常では思いつきにくい複雑な領域分割が得られた．

5. MAS による避難完了時間の検証

最後に，得られた領域分割結果を元に，MAS の歩行者シミュレーターSimTread v2[6)]を用いて，避難完了時間を算出する．SimTread のデフォルト状態では，避難者は最寄りの避難場所へと移動するが，目指すべき避難場所を避難者毎に設定することも可能である．本研究では図 4, 5 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，歩行速度も同じに設定し，避難者は避難場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．

表 2 の中・右列に MAS による各避難ビルの避難完了時間を示す．地下街全体の避難完了時間は，PMTEDC で 38 分 10 秒，PMECTC で 27 分 27 秒となり，避難完了時間を 10 分以上短縮することができた．PMTEDC の場合，表 1 における避難者数の最も多いビル I の避難完了時間が突出して大きかった．一方 PMECTC では，避難者数が 1,000 人以上となる接続ビルの避難完了時間が 27 分程度に抑えられていることがわかる．また，表 2 の式(4)による避難完了時間の推定値と MAS のシミュレーションによる避難完了時間の差は小さく，構築したネットワークモデルの計算の妥当性が示されたといえる．

6. おわりに

本研究では，梅田地下街を対象とした接続ビルの収容人数を制約とした避難領域分割問題について，DTN 上の避難完了時間推定式を用いた PMECTC を提案し，従来の PMTEDC の結果と比較した．MAS による検証の結果，PMECTC の避難完了時間は約 27 分となり，PMTEDC のそれと比べて 10 分以上の避難完了時間の短縮が可能であることを示した．また PMECTC による各接続ビルの避難完了時間と MAS の結果は近い値となり，定式化の妥当性を示すことができた．しかし，最適化に要する時間が長くかかっており，今後はこの短縮を図る必要がある．一つの方向性として，現在のネットワークモデルが避難誘導を行うには細かく分割されすぎていると考えらえるので，それを適切な粒度まで単純化することが考えらえる．

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（JPMJCR1402）の補助を受けています．

［参考文献］

1) 大阪市地下空間浸水対策協議会：大規模な地下空間の浸水対策の取り組み（2017 年 10 月 2 日確認）
http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000259323.html
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，2，pp.35-38，2015.
3) 山本遼，瀧澤重志：容量制約と避難完了時間の短縮を目的とした梅田地下街における避難領域分割手法，日本建築学会 2017 年度大会（中国）学術講演梗概集，11013，pp.25-26, 2017
4) Y. Higashikawa, M. J. Golin and N. Katoh: Minimax Regret Sink Location Problem in Dynamic Tree Networks with Uniform Capacity, Journal of Graph Algorithms and Applications, vol.18, no. 4, pp. 539–555, 2014.
5) N. Kamiyama, N. Katoh and A. Takizawa: An Efficient Algorithm for Evacuation Problem in Dynamic Network Flows with Uniform Arc Capacity, IEICE Transaction on Fundamentals, Vol.E89-D, No.8, 2372-2379, 2006.
6) 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，74(636)，pp.371-377, 2009.

*1 大阪市立大学大学院工学研究科 前期博士課程
*2 大阪市立大学大学院工学研究科 准教授，JST CREST，博士（工）