

流入開始時刻を考慮した地下街出入口への
最適な止水板設置順序の算出

システム最適化研究室
都 13-15 馬谷 慎太郎

目次

1	はじめに	1
2	準備	2
2.1	数理計画問題	2
2.2	ダイクストラ法	2
2.3	最適化ソルバ	2
3	研究の背景と目的	3
3.1	背景	3
3.2	本研究の目的	3
4	止水板最適設置問題の定式化	5
4.1	本研究の概要	5
4.2	本研究で扱うネットワーク	5
4.3	定式化	6
4.3.1	集合・パラメータ・変数	6
4.3.2	制約条件	7
4.3.3	目的関数	13
5	数値実験	14
5.1	計算環境	14
5.2	実験 1	14
5.3	実験 2	17
5.4	実験 3	23
5.5	実験 4	27
5.6	実験 5	33
5.7	まとめ	35
6	おわりに	36
A	本研究で作成したモデルファイル	40

1 はじめに

我が国は自然災害大国である。地震、津波、台風、噴火等災害にも様々あるが日本の災害発生率は他国よりも比較的高い。災害の中でも水害、特に集中豪雨は頻繁かつ突発的に発生する。また、我が国の 1 時間降水量が 50 mm 以上である発生回数を 1982 年から 10 年毎で比較してみると増加傾向にあり [6, 15]，地下空間における浸水の危険性は高まっている。以下に、集中豪雨の例を挙げる。

- 岡崎豪雨 [5, 8]

- 2000 年 8 月 26 日から 31 日にかけて東海地方・関東地方を中心に大雨による豪雨が発生した。岡崎市美合町では最大 1 時間降水量が 146.5 mm と短い時間に集中的な大雨を記録した。岡崎市の矢作川水系では、乙川右岸の堤防が決壊、伊賀川右岸の護岸が崩壊などの被害が発生した。また、名古屋市でも床上・床下合わせて約 11000 世帯が浸水するなどの被害が発生した。

- 東海豪雨 [8, 14]

- 2000 年 9 月 11 日から 12 日にかけて愛知・三重・岐阜などの東海地方を中心に集中的な豪雨が発生した。名古屋では総降雨量 567.0 mm という大雨を記録した。この豪雨により、名古屋市西区の庄内川水系新川などで長さ 100 m にわたる破堤があったほか、各地で河川の越流があり、愛知県を中心に 6 万棟を超える浸水被害が発生した。

このような集中豪雨による被害は多発しており、今後なお増える可能性がある。このような豪雨が都市部で発生すると、雨水が地下街に流れ込む可能性がある。雨の降り始めから浸水発生までの時間が短いことや地下空間の閉鎖性を考慮すると、人的被害を軽減するためには適切な行動を取る必要がある。例えば、先行研究 [4, 8] の結果から事前に止水活動や避難誘導が可能であることが分かっている。

そこで、本研究では水害発生時の浸水対策の 1 つとして止水板を用いる。本研究では、止水板の設置を考慮した設置計画を最適化問題として解き、最適な設置順序を算出することを目指す。

2 準備

2.1 数理計画問題

数理計画問題 [2] は以下のように表すことができる.

目的関数: $f(x) \rightarrow$ 最小 (あるいは最大)

制約条件: $x \in S$

ここでは, 変数 x は n 次元ベクトルであり, 目的関数 f は $n \in R^n$ (n 次元実ベクトル空間) 上で定義された実数値関数である. また, 制約条件を満たす x を実行可能解, その集まりである集合 $S \subseteq R^n$ を実行可能領域, 実行可能解のなかで目的関数が最小 (あるいは最大) となるもの最適解という. このような問題のことを数理計画問題 (最適化問題) という.

2.2 ダイクストラ法

本研究では, 梅田地下街の出入り口間の移動時間データを作成するためにダイクストラ法を使用する. ダイクストラ法 [2] とは, グラフ $G = (V, E)$ における枝の長さ a_{ij} に関する非負条件 $a_{ij} \geq 0 ((i, j) \in E)$ の仮定のもとで, 節点 s から各節点 $i \in V$ への最短経路の長さの上限値を常に保持しながら, それらの値を最短経路の長さとして更新していき, 最終的には全ての節点に対する長さの上限値が s から i までの最短経路の長さに等しくなるようにする反復法のことである.

2.3 最適化ソルバ

最適化ソルバとは, 最適化問題の最適解を得るためのプログラムである. 本研究で使用する最適化ソルバ GLPK, Gurobi について説明する.

- GLPK

- GLPK とは, GNU Linear Programming Kit の略で GNU が無料で配布しているソルバである. このソルバは最適化計算を行うだけでなく, GMPL で書かれたモデルとデータを用いて, LP 形式のファイルを作成することができる.

- Gurobi

- Gurobi とは, Gurobi Optimizer の略であり, 線形計画問題 (LP), 二次計画問題 (QP), 二次制約 (QCP), 混合整数計画 (MIP) を速く解くソルバの 1 つである.

本研究では, 膨大なデータを扱うため Gurobi によって計算を行っている.

3 研究の背景と目的

本章では本研究の背景と目的について説明する。

3.1 背景

我が国の 1 時間降水量が 50 mm 以上である集中豪雨の発生回数を 1982 年から 10 年毎で比較してみると増加傾向にあり [6, 15]，地下空間における浸水の危険性は高まっている。以下に，地下空間への浸水で甚大な被害が出た例を挙げる。

- 福岡水害 [1, 7]
 - 1999 年 6 月 29 日，福岡市を流れる三笠川があふれて市中心部が冠水し，博多駅や地下施設に水が流入した。地下の浸水面積は，博多駅一带と天神地区合わせて約 88000m² に上った。博多駅周辺で地下施設を持つビル 182 棟のうち，地下が浸水したビルは 71 棟であり，そのうち地下 3 階まで浸水したビルは 3 棟，地下空間が完全に水没したビルは 10 棟あった。また地下鉄については，道路の水が出入り口階段 5 ヶ所から流入し，最大 25 cm 浸水した。この水は地下鉄ホーム，線路へと流れ込み線路の冠水が発生した。
- 大阪ゲリラ豪雨 [11, 12]
 - 2013 年 8 月 25 日，大阪市で 10 分間で 27.5mm の激しい雨が降った。大阪府では，床上浸水 44 棟，床下浸水 631 棟が発生した他，道路や商店街の冠水や土砂災害が発生し，交通機関に大きな影響がでた。

近年，このような事例が増加しており，地下空間への浸水の危険性が高まってきている。そのため地下空間の水害に着目した研究が多く行われている。

例えば先行研究 [4, 8] では，梅田の地下街を対象として下水道施設を考慮した内水氾濫解析が行われている。具体的には，岡崎豪雨・東海豪雨を外力と設定し，雨水流出解析モデルとして下水道施設および地表面の氾濫解析を同時に実施した。その結果，地下空間に流入する出入り口の場所，流入順序，流入時間，流入量を推定することができ，事前に止水活動や避難誘導が可能であることが分かった。

3.2 本研究の目的

先行研究 [4, 8] により，事前に止水活動や避難誘導が可能であることが示されたが，具体的な止水方法については示されていない。一方武田氏の研究 [13] では，地下空間の浸水対策として止水板の設置が検討された。具体的には，

- 対象地区は whity（梅田大阪市北区）とする
- 止水板の配置人員を 2 人 1 組の 6 組とする
- 人の歩行スピードを時速 4 km とする
- 止水板の種類によって設置時間が異なる

などの条件の下で，止水板の設置順序や設置開始するタイミングが検討された．しかし，これでは梅田地下街全土を対象とした場合が分からないし，止水板の設置順序が本当に最適かどうか不十分である．そのため本研究では，梅田地下街の浸水対策として止水板の設置を考慮し，最適な設置順序を算出することを目的とする．ここでの最適な設置順序とは，各出入り口の流入開始時刻に間に合わなかった時間の合計が最小になるような設置順序を最適な設置順序とする．本研究では，この問題を最適化問題として定式化し，それを最適化ソルバを用いて解くことで，止水板の最適な設置順序を算出する．具体的には，梅田地下街における浸水被害の推定データを用いて数値実験を行い，止水板の最適な設置順序を算出する．

4 止水板最適設置問題の定式化

本研究では推定された各出入口への流入開始時刻を考慮した止水板の最適な設置計画を最適化問題として定式化する．具体的には，各出入口において

$$\max\{\text{止水板設置完了時刻} - \text{流入開始時刻}, 0\}$$

を算出し（すなわち，各出入口で雨水が流入している時間を求め），これらの和が最小になるような最適化問題を定式化する．

4.1 本研究の概要

本研究では，止水板設置完了時間が流入開始するまでの時間を上回っていた場合，間に合わなかった時間の合計が最小になる解を最適解とする．

4.2 本研究で扱うネットワーク

図 1 は，地下街を想定したネットワークである．

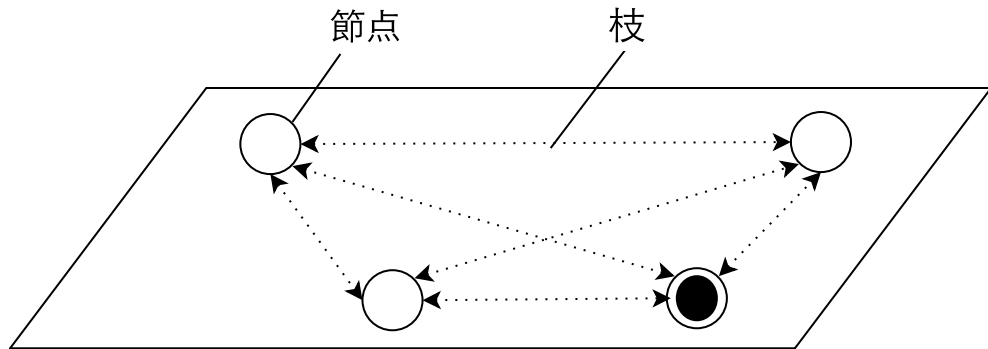


図 1: 地下街のネットワーク

地下街を想定したグラフ $G = (V, E)$ を作る．出入口に相当する節点を $v \in V$ ，出入口間の移動に相当する枝を $(v_1, v_2) \in E$ で表す．本研究で扱う最適化問題においては，止水板を設置するチームの行動を時間を追って表現する必要がある．そこで本研究では，このような問題を静的に解く手段として広く用いられている時空間ネットワーク [10] を用いる．

時空間ネットワークとは，空間的広がりと時間的広がりを持つネットワークのことである．特に，時間方向に離散化することによって問題を静的に解く方法であり，動的に問題を解くことに比べて簡単に解を得ることができる．これを利用することにより，設置チームの動きを時間的に捉えることができる．地下街を想定した時空間ネットワークを図 2 に示す．

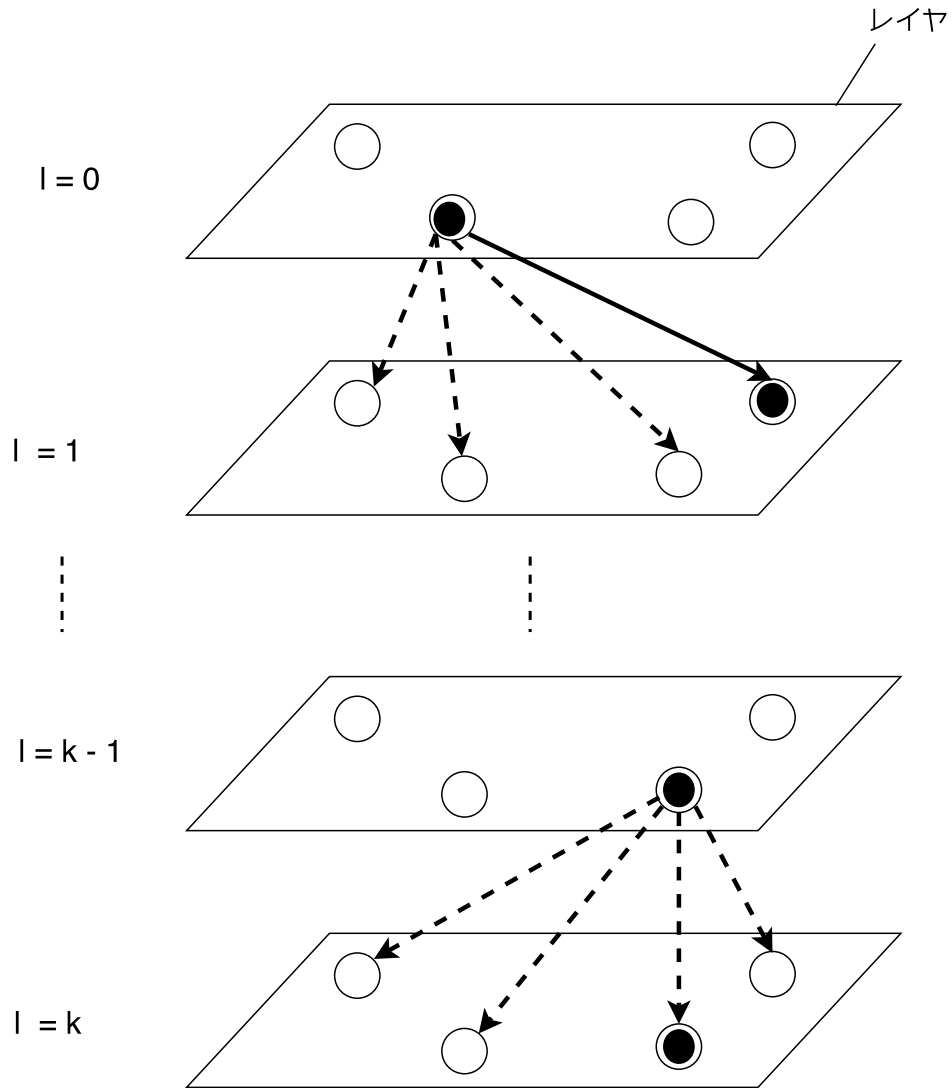


図 2: 時空間ネットワーク図

図 2 では、止水板を設置する各チームの移動回数を $l = 0, 1, \dots, k$ とし、これを時空間ネットワークにおけるレイヤに対応させる。また各レイヤ上には出入口を配置し、設置チームがどの出入口に移動して止水板を設置するかを表現できるようになっている。

4.3 定式化

本節では、本研究で提案する最適化問題の定式化について説明する。

4.3.1 集合・パラメータ・変数

- 集合

- V : 節点 (出入口) の集合

- E : 枝 (経路) の集合
- L : レイヤの集合
- P : 設置チームの集合

● パラメータ

- w_e : 枝の重み (移動時間)
- f_v : 節点の流入開始時刻
- s : スタート地点
- M : 十分大きな正の定数
- u : 止水板設置に要する時間

● 変数

- $x_{v,l,p}$: レイヤ l において, 設置チーム p が節点 v に存在するかどうかを表す 0-1 変数

$$x_{v,l,p} = \begin{cases} 1, & \text{レイヤ } l \text{ において, 設置チーム } p \text{ は節点 } v \text{ に存在する} \\ 0, & \text{レイヤ } l \text{ において, 設置チーム } p \text{ は節点 } v \text{ に存在しない} \end{cases}$$

- $y_{e,l,p}$: レイヤ l からレイヤ $(l+1)$ にかけて, 設置チーム p が枝 e を通過するかどうかを表す 0-1 変数

$$y_{e,l,p} = \begin{cases} 1, & \text{レイヤ } l \text{ から他 } (l+1) \text{ にかけて, 設置チーム } p \text{ が枝 } e \text{ を通過する} \\ 0, & \text{レイヤ } l \text{ から他 } (l+1) \text{ にかけて, 設置チーム } p \text{ が枝 } e \text{ を通過しない} \end{cases}$$

- $t_{l,p}$: レイヤ l における設置チーム p の設置完了時間
- $\bar{t}_{l,p}$: レイヤ l において設置チーム p が止水板を設置する出入口の流入開始時刻
- $d_{l,p}$: レイヤ l において設置チーム p が止水板を設置する出入口の設置完了時刻と流入開始時刻の差

4.3.2 制約条件

本節では, 本問題で用いる制約条件について説明する.

制約条件 1 全止水板設置チームはレイヤ 0 ではスタート地点に存在する

全ての止水板設置チームは, スタート地点から移動を開始することにする. この条件は式 (1) のように定式化することができる.

$$x_{s,0,p} = 1 \quad (p \in P) \tag{1}$$

制約条件 2 全出入口にはいずれかの設置チームが1度だけ存在する（＝全出入口に止水板が設置される）

$$\sum_{l \in L, p \in P, l \geq 1} x_{v,l,p} = 1 \quad (v \in V) \quad (2)$$

式 (2) は、いずれかのレイヤでいずれかの設置チームが1度だけ存在する制約式である。

式 (2) を理解するために具体例を考える: $V := \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $L := \{0, 1, \dots, t\}$, $P := \{p_1, p_2\}$ として式 (2) を v について展開してみると

$$\begin{aligned} x_{v_1,1,p_1} + x_{v_1,1,p_2} + x_{v_1,2,p_1} + x_{v_1,2,p_2} + \dots + x_{v_1,t-1,p_1} + x_{v_1,t,p_2} &= 1 \\ x_{v_2,1,p_1} + x_{v_2,1,p_2} + x_{v_2,2,p_1} + x_{v_2,2,p_2} + \dots + x_{v_2,t-1,p_1} + x_{v_2,t,p_2} &= 1 \\ \vdots \\ x_{v_{n-1},1,p_1} + x_{v_{n-1},1,p_2} + x_{v_{n-1},2,p_1} + x_{v_{n-1},2,p_2} + \dots + x_{v_{n-1},t-1,p_1} + x_{v_{n-1},t,p_2} &= 1 \\ x_{v_n,1,p_1} + x_{v_n,1,p_2} + x_{v_n,2,p_1} + x_{v_n,2,p_2} + \dots + x_{v_n,t-1,p_1} + x_{v_n,t,p_2} &= 1 \end{aligned}$$

とすることができる。例えば1番目の式は、いずれかの設置チーム $p \in \{p_1, p_2\}$ が、いずれかのレイヤ（＝設置順番） $l \in \{1, \dots, t\}$ で v_1 を訪問する（＝止水板を設置する）ということを意味する。 $n = 4, t = 2$ の場合の具体例を図3に示す。

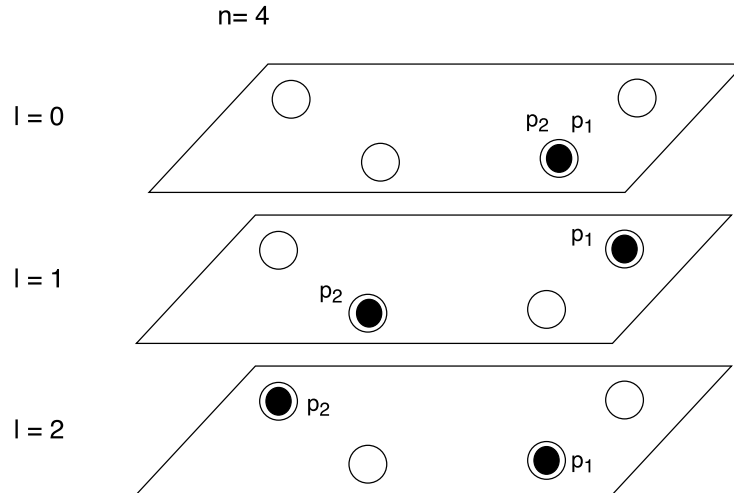


図 3: 制約条件 2 の模式図

制約条件 3 各設置チームはそれぞれのレイヤで高々1つの節点 v に存在することができる

各設置チームは、出入口を移動しながら止水板を設置する。このとき、ある設置チー

ムがそれぞれのレイヤにおいて止水板を設置できるのは高々 1 箇所のみである．制約条件 3 は式 (3) のように定式化することができる．

$$\sum_{v \in V} x_{v,l,p} \leq 1 \quad (l \in L, p \in P) \quad (3)$$

式 (3) で制約条件が定式化できていることを確認するため， $V := \{v_1, v_2\}$, $L := \{0, 1, 2\}$, $P := \{p_1, p_2\}$ とし， L, P について展開すると．

$$\begin{aligned} x_{v_1,0,p_1} + x_{v_2,0,p_1} &\leq 1 \\ x_{v_1,1,p_1} + x_{v_2,1,p_1} &\leq 1 \\ x_{v_1,2,p_1} + x_{v_2,2,p_1} &\leq 1 \\ x_{v_1,0,p_2} + x_{v_2,0,p_2} &\leq 1 \\ x_{v_1,1,p_2} + x_{v_2,1,p_2} &\leq 1 \\ x_{v_1,2,p_2} + x_{v_2,2,p_2} &\leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

とすることができる．式 (4) において $l = 0, p = p_1$ の場合に考えられる実行可能解を図 4 に示す．

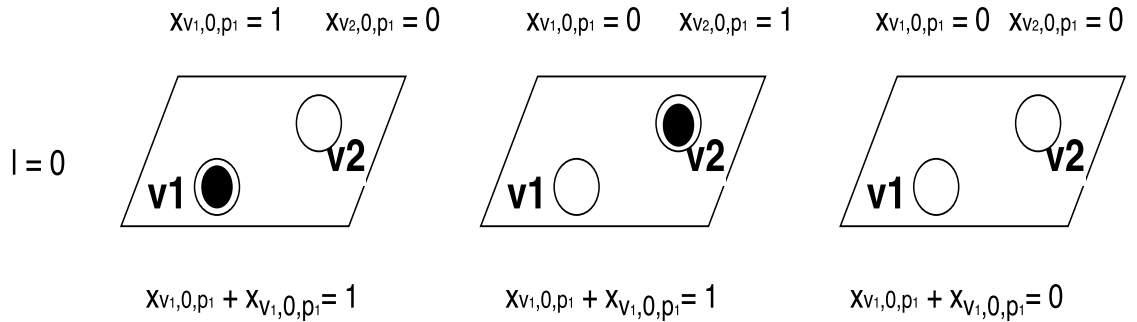


図 4: 制約条件 3 の模式図

図 4 の黒丸は設置チーム p_1 が存在していることを表している．いずれの場合も，設置チーム p_1 は 1 つのレイヤ上で 2 箇所以上に存在することはないことが分かる．

制約条件 4 いずれかのレイヤでいずれかの設置チームが 1 度だけ節点 v に移動する

本研究では複数の止水板設置チームが存在する場合を考えている．このとき，複数の設置チームが同一の節点 v について止水板を設置することがないようにしなければならない．そのためには，いずれかの設置チームが 1 度だけ節点 v に移動するようしなければならない．この条件は式 (5) のように表すことができる．

$$\sum_{(\bar{v}, v) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1} y_{\bar{v}, v, l-1, p} = 1 \quad (v \in V) \quad (5)$$

制約条件 5 枝と節点の関係性 1

本節の冒頭で述べたように、 $x_{v,l,p}$ は設置チーム p がレイヤ l 上で節点 v に存在するかどうかを表す変数、 $y_{e,l,p}$ はレイヤ l からレイヤ $(l+1)$ に掛けて設置チーム p が枝 e を通るかどうかを表す変数である。

本制約は節点と枝に関連性を持たせるための制約である。レイヤ $(l-1)$ からレイヤ l にかけて、止水板設置チーム $p \in P$ が節点 v_1 から v_2 に移動する場合を考える。移動し始める出入り口を v_1 として、 v_1 に存在する時と存在しない時で止水板設置チームの場合分けを考える（図 5）。

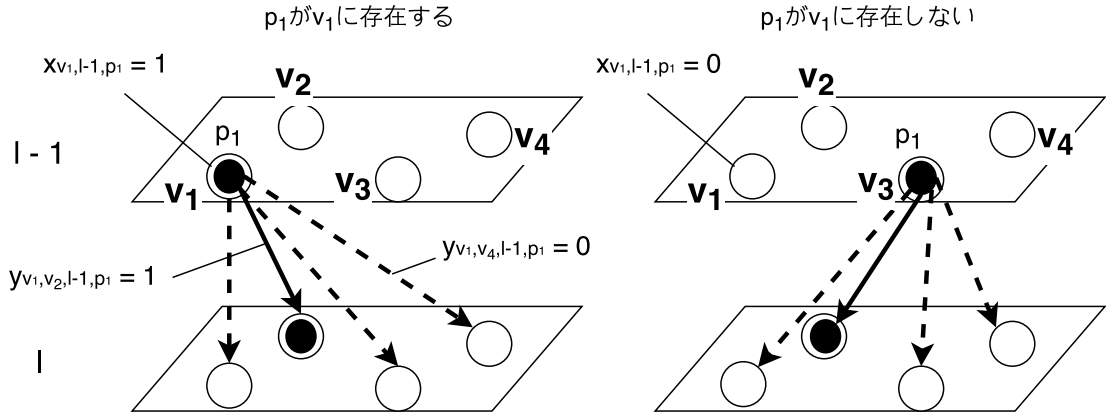


図 5: 制約条件 5

0-1 変数 $x_{v_1,l,p}$ と $y_{v_1,v_2,l-1,p}$ の組合せのうち可能なのは以下の通りである：

- 止水板設置チーム p_1 が v_1 に存在する時
 - － $x_{v_1,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合
 - － $x_{v_1,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 1$ の場合
- 止水板設置チーム p_1 が v_1 に存在しない時
 - － $x_{v_1,l,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合

これらの条件を満たすために式 (6) のように定式化を行う。

$$x_{v_1,l-1,p} \geq y_{v_1,v_2,l-1,p} \quad ((v_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (6)$$

制約条件 6 枝と節点の関係性 2

制約条件 5 では、移動開始する節点 v_1 について場合分けを行っていたのに対し、本制約では到着する節点 v_2 について場合分けを行う。 v_2 に存在する時と存在しない時の場合分けを図 6 で図示する。

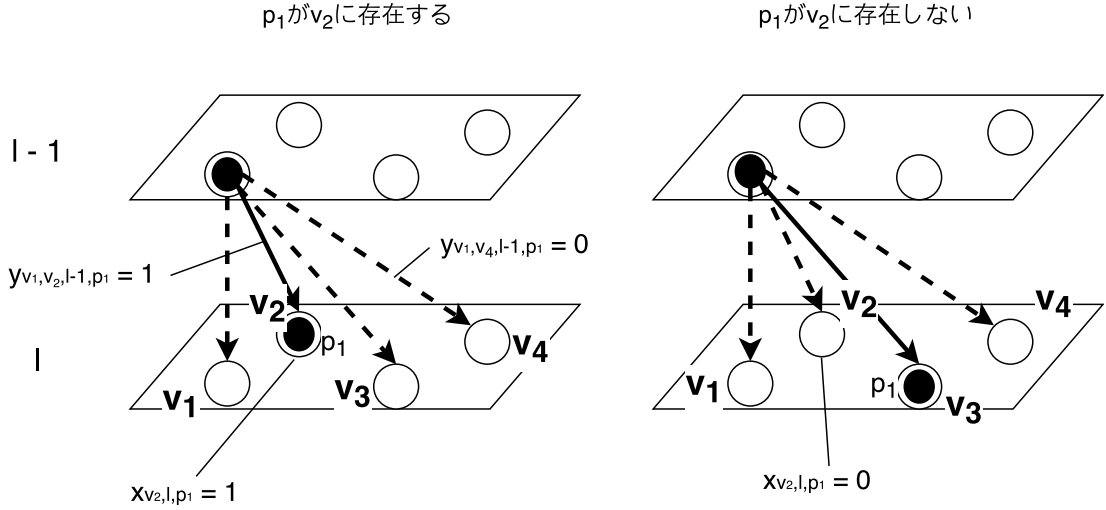


図 6: 制約条件 6

制約条件 5 同様, 0-1 変数 $x_{v_2,l,p}$ と $y_{v_1,v_2,l-1,p}$ の組合せのうち可能なのは以下の通りである:

- 止水板設置チーム p_2 が v_2 に存在する場合
 - $x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合
 - $x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 1$ の場合
- 止水板設置チーム p_2 が v_2 に存在する場合
 - $x_{v_2,l,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合

これらの条件を満たすために式 (7) のように定式化を行う.

$$x_{v_2,l,p} \geq y_{v_1,v_2,l-1,p} \quad ((v_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (7)$$

制約条件 7 枝と節点の関係性 3

制約条件 5 と制約条件 6 では, $x_{v_1,l-1,p}, x_{v_2,l,p}, y_{v_1,v_2,l-1,p}$ の 3 つの 0-1 変数が存在する. 3 つの変数を場合分けすると 8 つ考えられるが, そのうち制約条件 5 と制約条件 6 を満たす場合分けは

- $x_{v_1,l,p} = 0, x_{v_2,l,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合
- $x_{v_1,l,p} = 0, x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合
- $x_{v_1,l,p} = 1, x_{v_2,l,p} = 0, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 0$ の場合
- $x_{v_1,l,p} = 1, x_{v_2,l,p} = 1, y_{v_1,v_2,l-1,p} = 1$ の場合

の 4 つである. これらの条件を満たすために式 (8) のように定式化を行う.

$$x_{v_1,l-1,p} + x_{v_2,l,p} - y_{v_1,v_2,l-1,p} \leq 1 \quad ((v_1, v_2) \in E, l \in L, p \in P, l \leq 1) \quad (8)$$

制約条件 8 出入口間の移動時間

変数 $y_{v_1,v_2,l,p}$ を用いると、出入口間の移動時間 $t_{l,p}$ は式 (9) のように書くことができる：

$$t_{l,p} = \sum_{l \in L, (v_1,v_2) \in E, l < 1} y_{v_1,v_2,l,p} w_{v_1,v_2} / 66.0 + (l * u) \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (9)$$

ここで、枝の重み w_{v_1,v_2} は各出入口間の移動距離を表している．ここでは、各設置チームが分速 66.0m で歩行することを想定している．なお、この値は次章の数値実験の中では変更されることがある．

制約条件 9 流入開始するまでの時間

$$\bar{t}_{l,p} = \sum_{v \in V} x_{v,l,p} (f_v - 60.0) \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (10)$$

式 (10) では、設置チーム $p \in P$ がレイヤ l において止水板を設置する出入口に、雨水が流入開始する時間を求めている．ただし、降雨開始後 60 分の時点時刻 0 (= 止水板の設置開始時刻) と定めている．岡崎豪雨の地下流入ハイドログラフ [8] によると、降雨初期の時刻と地下街への流入時刻には約 60 分の差がある．これは雨が降り始めても、管内水位が上昇し始め、地下出入口の地盤高に達するまでに時間を要するためである．ここではこの時間を止水板の設置開始時刻と定めている．なお、この値は次章の数値実験の中では変更されることがある．

制約条件 10 止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差

ここでは、設置チーム $p \in P$ がレイヤ l で止水板を設置する出入口において、止水板設置完了時刻と流入開始時刻の差がどの程度あるかを求めている．これは次のように書くことができる．

$$d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p} - M(1 - \sum_{v \in V} x_{v,l,p}) \quad (l \in L, p \in P, l \geq 1) \quad (11)$$

式 (11) では、レイヤ l の時、設置チームが出入口 v に設置しているかどうかで場合分けを行う．

- $x_{v,l,p} = 1$ となるような v が存在しないとき： $d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p} - M$
 - M は十分大きな正の値であるため $t_{l,p}$, $\bar{t}_{l,p}$ がどんな値であろうと常に成り立つ．つまり、事実上意味を持たない制約となる．
- $x_{v,l,p} = 1$ となるような v が存在するとき： $d_{l,p} \geq t_{l,p} - \bar{t}_{l,p}$
 - (止水板設置チームの設置完了時刻) – (流入開始時刻) を表しており、この値が負であれば流入開始時刻に間に合っているので 0、値が正であれば流入開始時刻に間に合わなかった時間を算出する．

4.3.3 目的関数

本項では研究の目的関数について説明する．本研究の目的関数は各出入口の設置完了時刻と流入開始時刻の差の合計が最小になる値を目的関数とする．

$$\text{minimize} \quad \sum_{l \in L, p \in P, l \geq L} d_{lp}$$

5 数値実験

本章では，本研究で作成した数理計画モデルと，梅田地下街の流入データを用いて様々な状況下での止水板の設置について行った実験内容と結果について述べる．なお，本研究では梅田地下街の出入口に関するデータが必要になるが，これは [4, 8] で使用されたものと同じデータを用いた．

5.1 計算環境

本実験で用いた計算環境と使用したソルバを表 1 に示す．なお，本研究では，24 時間 (= 86400 秒) 経過しても計算が終わらなかった場合は，その時点で得られている最良の暫定解を最適解と解釈することとした．

表 1: 計算環境

OS	Microsoft Windows 10 Pro
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6950X CPU @ 3.00GHz 3.00GHz
メモリ	64.00GB
ソルバ	Gurobi Optimizer

5.2 実験 1

実験 1 で設定した条件は表 2 のとおりである．

表 2: 実験 1 で設定した条件

1 時間あたりの降雨量	60mm
排水用ポンプ	機能停止
雨水が流入する出入口の数	24 箇所
止水板設置チーム数	6 チーム (a, b, c, d, e, f)
止水板設置チームの歩行速度	66 m/分 [9]
降雨開始から止水板設置開始までの時間	60 分
止水板 1 箇所の設置に要する時間	3 分
スタート地点のメッシュ番号	15728

表 2 にあるように，この実験では雨水が流入する出入口が 24 箇所あるものと想定している．対象となる出入口を図 7 に示す．これは，関西大学・岡部史弥氏に計算によるもので，1 時間あたりの降雨量が 60 mm の時，排水用のポンプが稼働しなかったときに雨

水が流入すると推定される地下街出入口である。本実験では、これらの出入口に対し、6チームで止水板を設置することを想定する。

止水板の設置は、降雨開始直後に始めるようなものではない。そこで本実験では、降雨開始から止水板設置開始までの時間を60分と想定し、計算を行った。

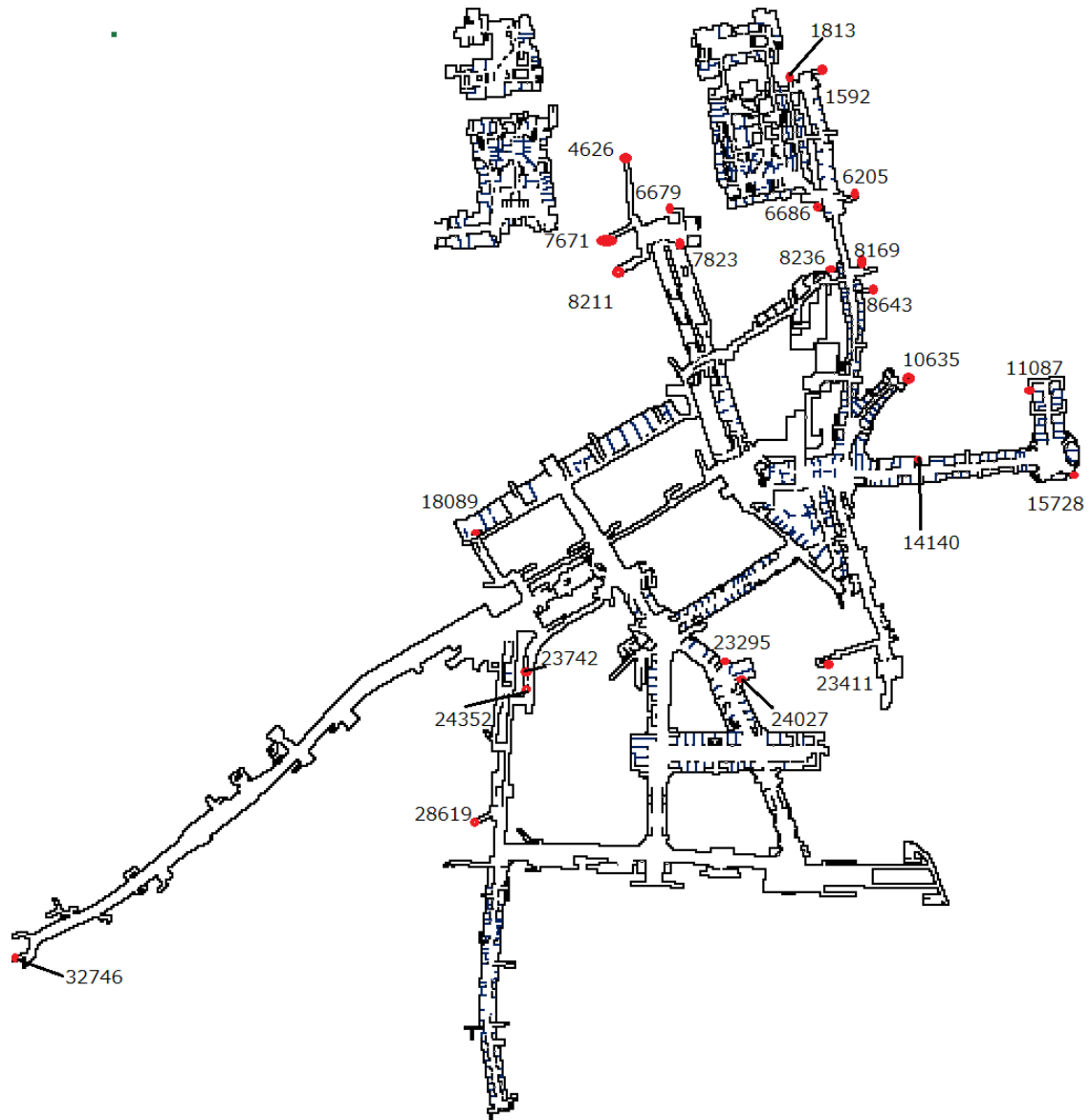


図 7: 梅田地下街 流入箇所

表 3: 実験 1 止水板設置チームの設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	6679	4626	8236	32746	6205	7671
2	23742	8211	18089	7823	6689	15728
3	28619	8643	24352	—	1813	14140
4	23295	23411	—	—	1592	11087
5	—	—	—	—	8169	24027
6	—	—	—	—	10635	—

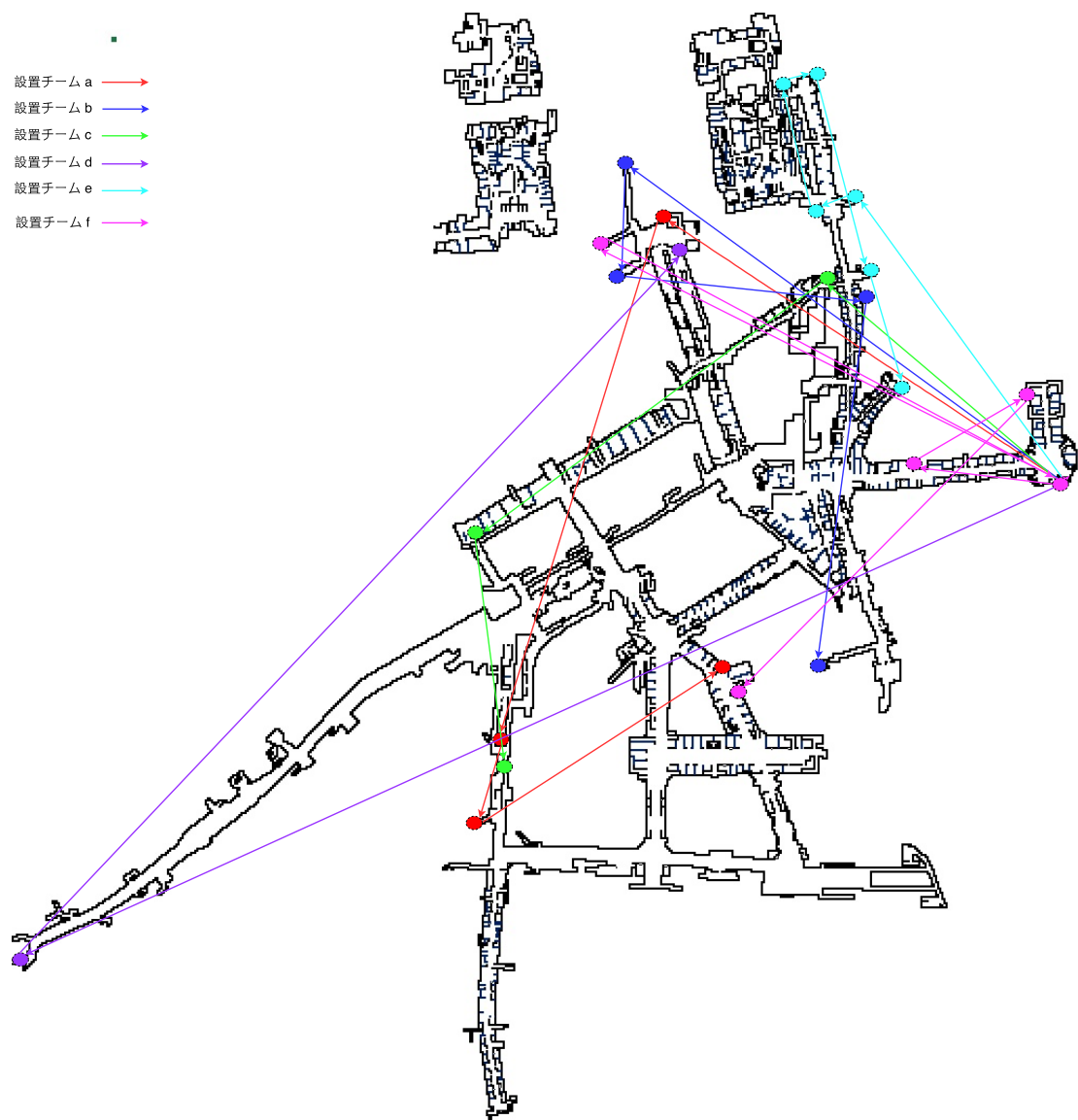


図 8: 梅田地下街 止水板設置順序

表 4: 実験 1 の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	6679	12.76
1	d	32746	25.45
1	e	6205	10.67
1	f	7671	13.48

表 5: 実験 1 の結果

移動回数	制約数	変数の数	計算時間 (s)	GAP(%)	目的関数 (分)
6	17484	33984	20875	0.03	31.36

実験 1 の結果を表 3, 4, 5, 図 8 に示す. 表 3 にあるように, 24 箇所の出入口全てに止水板が設置されていることがわかる. また各チームがどの出入口間を移動したかを示しているのが図 8 である. これを見ると, 比較的近い出入口を多く訪問している設置チームや, 遠い距離を移動しているため少数の出入口のみを設置しているチームがあることがわかる.

表 4 に, 止水板の設置が間に合わず, 雨水が流入してしまう出入口の番号を示している. いずれの場合も, 1 回目の移動で設置をしようとしたにもかかわらず設置が間に合っていないことから, これ以上の改善はできないことがわかる.

表 5 は最適化計算に関する情報である. この場合は, 雨水流入時間の合計が 31 分程度となる最適解を求めることができた.

5.3 実験 2

実験 2 では, 実験 1 の設定 (表 2) のうち, 止水板設置チームの数を 4, 5, 7 に変えて実験を行った.

以下, 各チーム数の下での実験結果を表 6 から表 11, 図 9 から図 11 に示す.

- 止水板設置チーム 4 組の場合

表 6: 実験 2 止水板設置チーム 4 組の場合の設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d
0	15728	15728	15728	15728
1	7671	6679	15728	8236
2	4626	23742	11087	6205
3	8211	24352	14140	1592
4	8643	28619	18089	1813
5	8169	7823	32746	6686
6	10635	23295	24027	23411

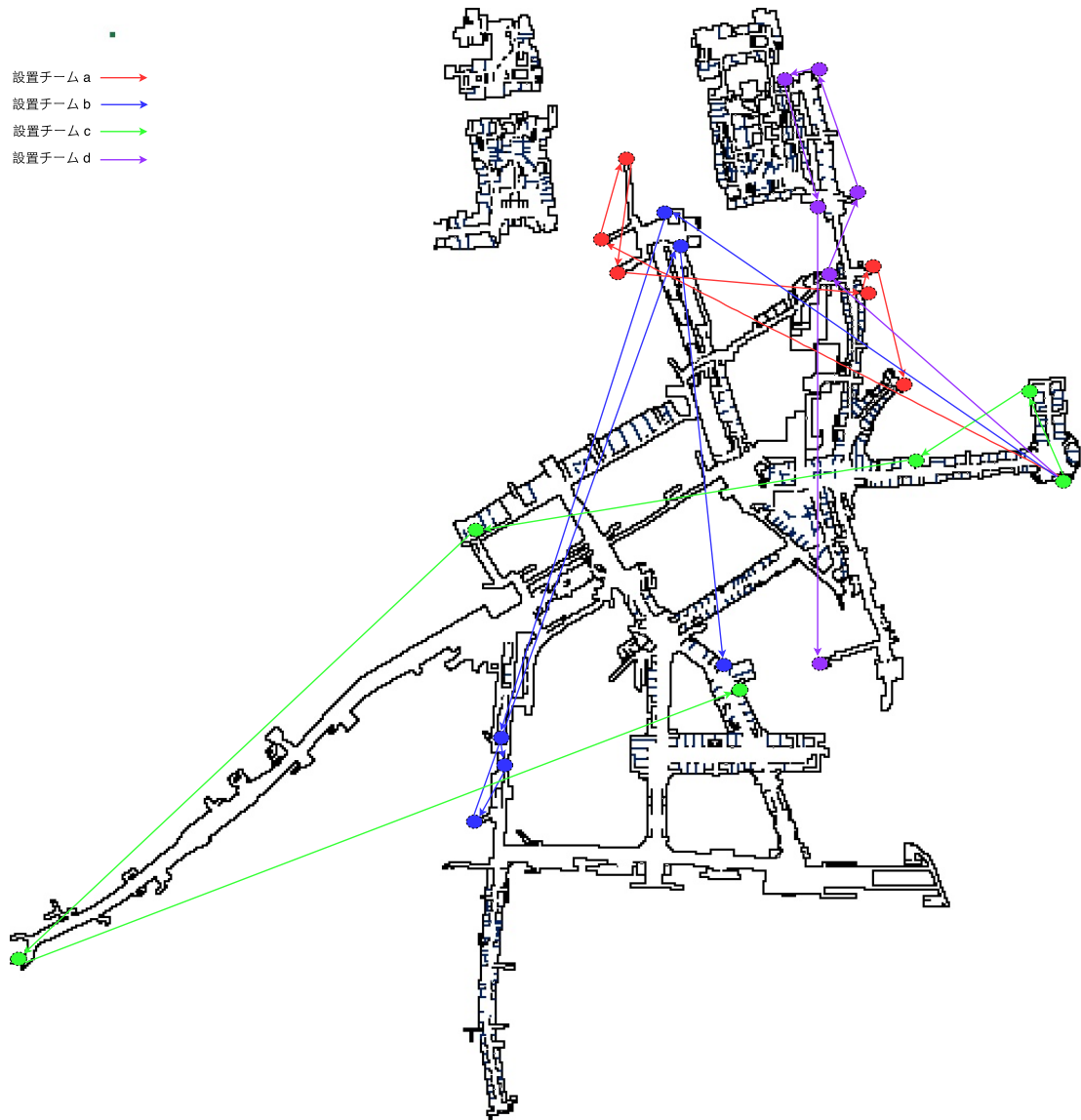


図 9: 梅田地下街 止水板最適設置順序 (4 チームの場合)

表 7: 実験 2 止水板設置チーム 4 組の場合の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	7671	5.48
2	a	4626	3.09
1	b	6679	4.76
3	b	24352	0.18
5	b	7823	0.15
4	c	18089	0.42
5	c	32746	28.55
2	d	6205	13.58
6	d	23411	0.85

● 止水板設置チーム 5 組の場合

表 8: 実験 2 止水板設置チーム 5 組の場合の設置順序

移動回数 \ チーム名	a	b	c	d	e
0	15728	15728	15728	15728	15728
1	6205	32746	15728	6679	7671
2	6686	7823	8236	18089	4626
3	1813	—	23742	23411	8211
4	1592	—	24352	24027	8643
5	14140	—	28619	23295	8169
6	11087	—	—	—	10635

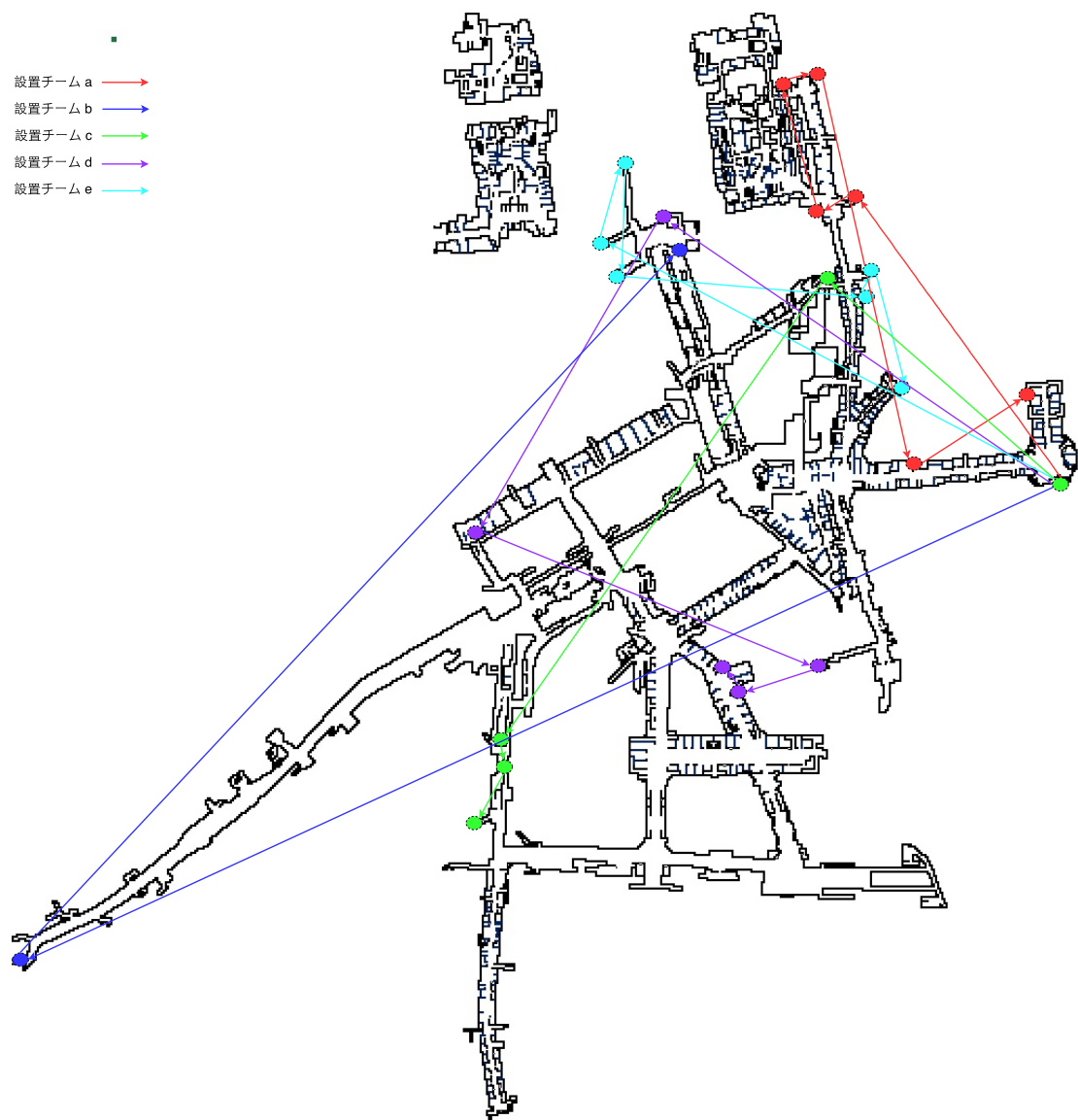


図 10: 梅田地下街 止水板最適設置順序 (5 チームの場合)

表 9: 実験 2 止水板設置チーム 5 組の場合の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	6205	9.67
1	b	32746	11.45
4	c	24352	0.09
1	d	6679	4.76
1	e	7671	5.48
2	e	4626	3.09

● 止水板設置チーム 7 組の場合

表 10: 実験 2 止水板設置チーム 7 組の場合の設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f	g
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	7671	4626	8236	32746	6679	11087	6205
2	8211	23411	18089	24027	1813	24352	15728
3	7823	—	28619	—	1592	23742	8169
4	6686	—	—	—	14140	—	8643
5	10635	—	—	—	23295	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—

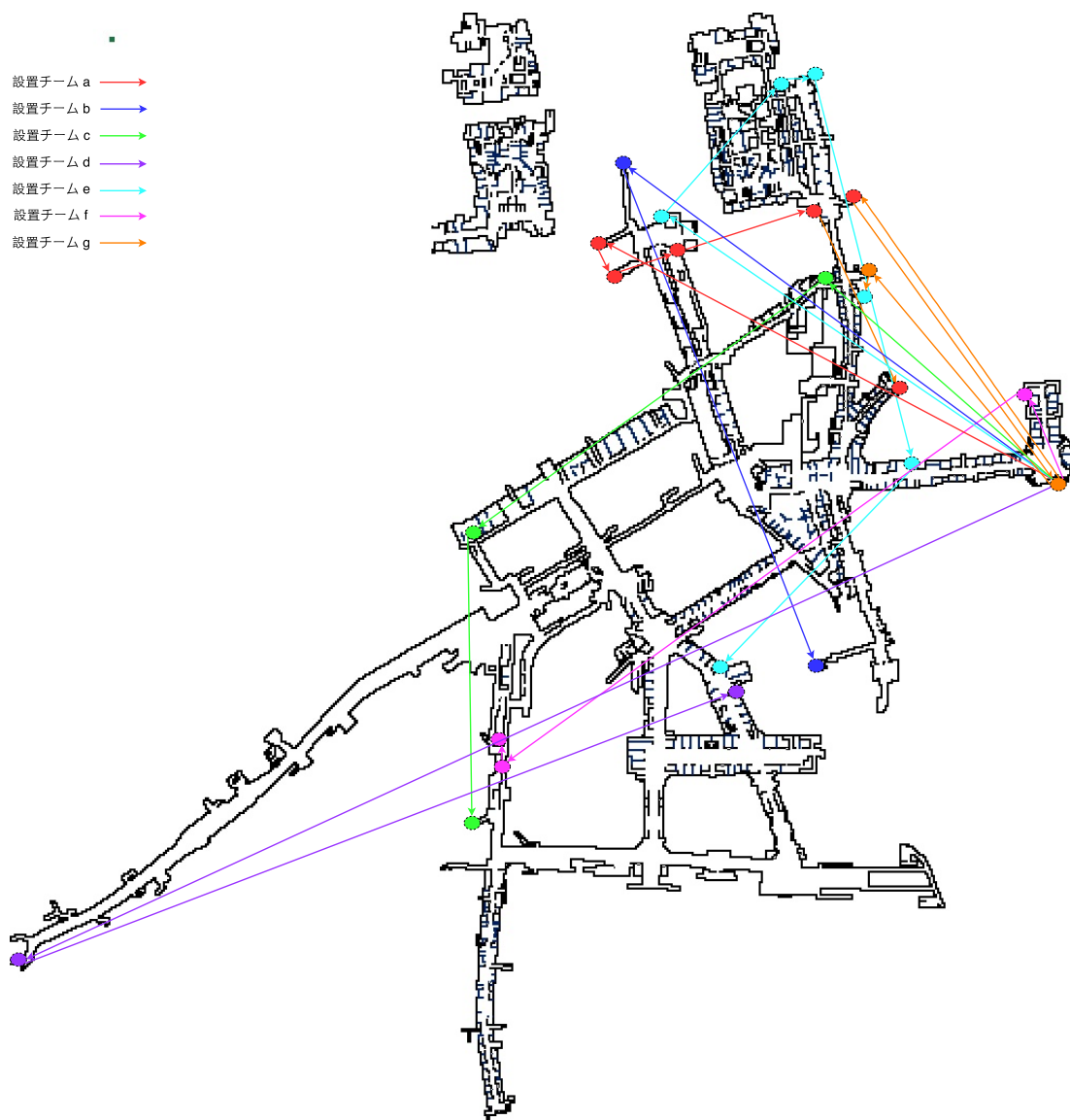


図 11: 梅田地下街 止水板最適設置順序 (7 チームの場合)

表 11: 実験 2 止水板設置チーム 7 組の場合の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	7671	5.48
1	d	32746	11.45
1	e	6679	4.76
1	g	6205	9.67

- 実験 2 の結果のまとめ

実験 2 の結果を表 12, 図 12 にまとめる.

表 12: 実験 2 結果 まとめ

止水板設置チーム	制約数	変数の数	計算時間 (s)	GAP(%)	目的関数 (分)
4	11656	22672	86402	9.14	57.06
5	14570	28328	59610	0.02	34.55
6	17484	33984	20875	0.03	31.36
7	16352	31723	1446	4.73	31.36

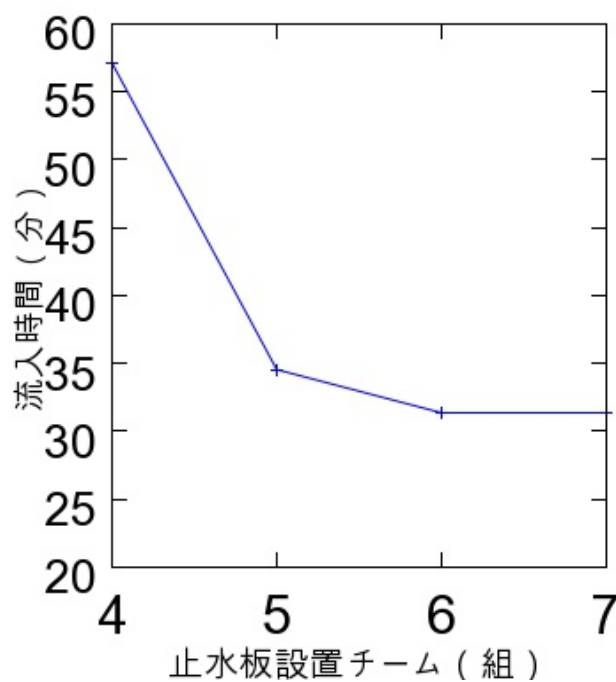


図 12: 実験 2 の結果比較

図 12 より, 止水板設置チームの数が増える度に流入開始時刻に間に合わなかった時間の合計が短くなっていることが分かる. ただし, 設置チームの数を 6 から 7 に増やして

も流入開始時刻に間に合わなかった時間の合計に変化はないことが分かった．このとき，それぞれのチーム数の最適解で流入した出入口を比較すると，どちらも同じ出入口（メッシュ番号 6679，6205，7671，3274）から流入していることが分かった．この 4 箇所にはいずれも移動回数が 1 の時に流入してきているため，設置チームが真っ先に向かっても間に合わないということである．このことから設置チームの数が増える度に流入開始時刻に間に合わなかった時間の合計は短くなるが，その効果には上限があることが推定される．

5.4 実験 3

実験 3 では，実験 1 の設定（表 2）のうち，降雨開始から止水板を設置し始めるまでの時間を 50, 70 分に変えて実験を行った．

以下，各設定での実験結果を表 13 から表 16，図 13, 14 に示す．

- 降雨開始から 50 分後に設置し始める場合

表 13: 実験 3 降雨開始から 50 分に設置開始の設置順序						
チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	6679	14140	32746	6205	18089	15728
2	7671	8169	23295	4626	28619	8236
3	6686	8643	7823	—	24352	23411
4	11087	1592	—	—	—	23742
5	10635	1813	—	—	—	—
6	24027	8211	—	—	—	—

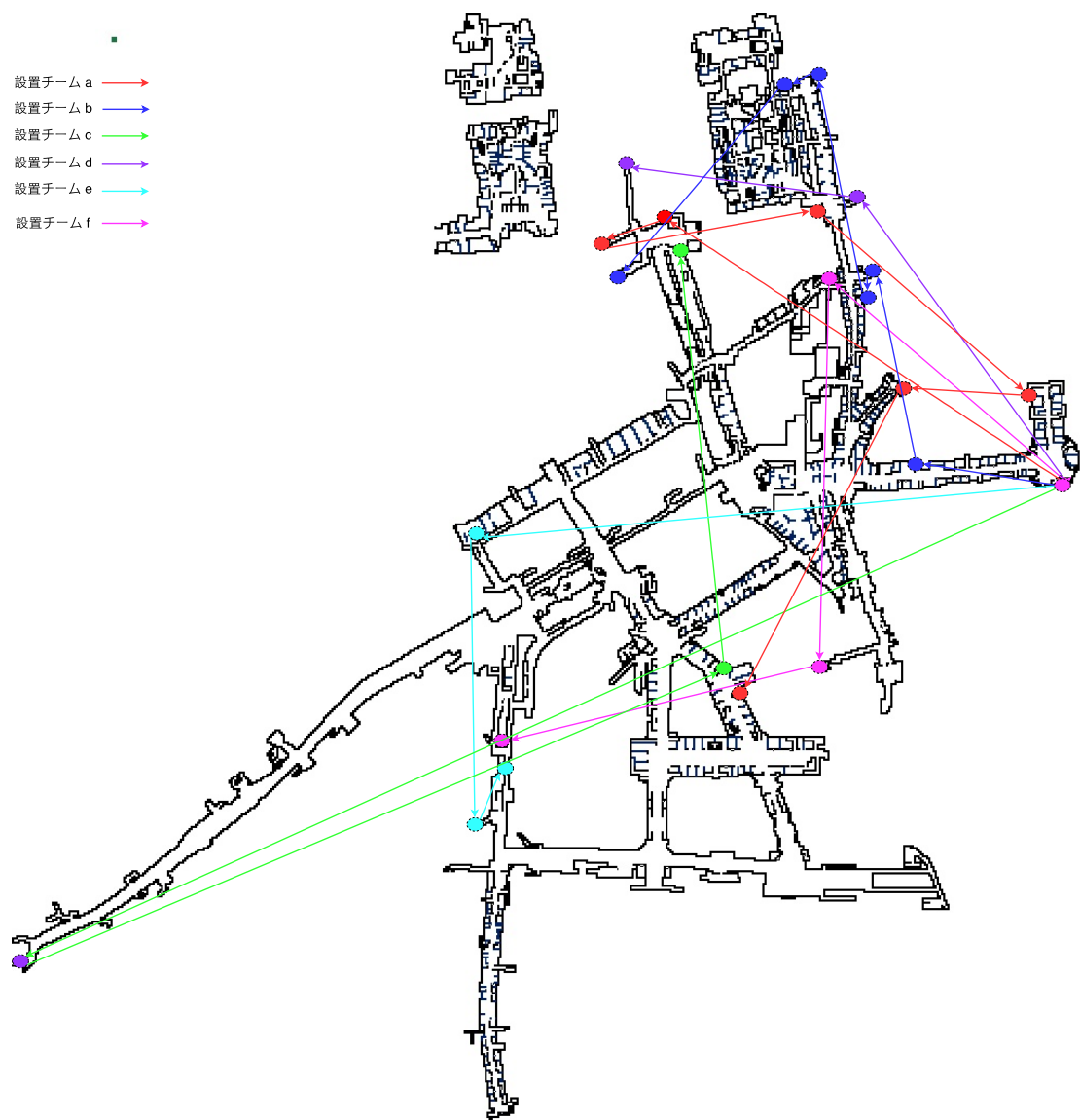


図 13: 梅田地下街 止水板最適設置順序（降雨開始から 50 分後に設置を開始する場合）

表 14: 実験 3 降雨開始から 50 分 の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間（分）
1	c	32746	1.45

- 降雨開始から 70 分後に設置し始める場合

表 15: 実験 3 降雨開始から 70 分に設置開始の設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	6205	15728	23742	6679	8236	7671
2	1592	18089	24352	8211	8169	4626
3	1813	28619	32746	23411	8643	6686
4	10635	—	24027	—	14140	—
5	7823	—	23295	—	11087	—

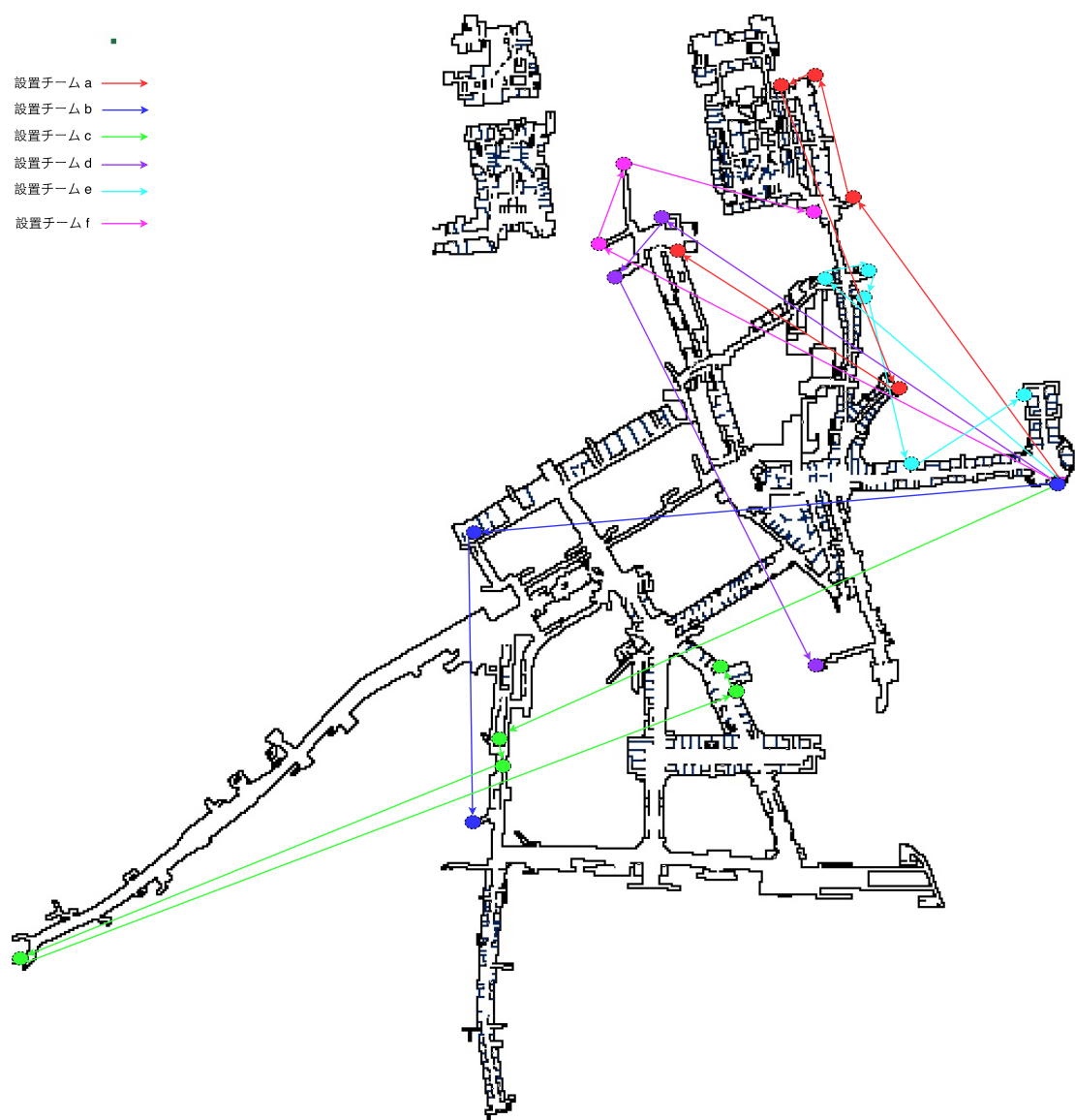


図 14: 梅田地下街 止水板最適設置順序（降雨開始から 70 分後に設置を開始する場合）

表 16: 実験 3 降雨開始から 70 分 の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	6205	19.67
2	a	1592	2.30
3	a	1813	5.00
3	c	32746	28.97
1	d	6679	14.76
2	d	8211	1.73
3	d	23411	2.03
1	e	8236	5.58
1	f	7671	15.48
2	f	4626	13.09

表 17: 実験 3 結果 まとめ

止水板設置開始 (分後)	制約数	変数の数	計算時間 (s)	GAP(%)	目的関数 (分)
50	17484	33984	306	29.2	1.45
60	17484	33984	20875	0.03	31.36
70	16352	31723	86400	22.9	110.48

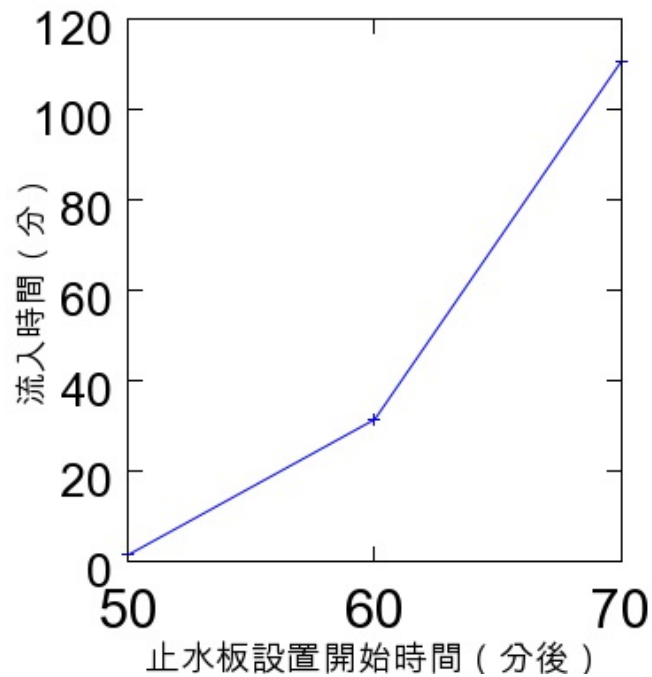


図 15: 実験 3 の結果の比較

図 15 より，降雨開始から止水板を設置し始めるまでの時間が長いほど地下街に流入する時間が増える．また，降雨開始から止水板を設置するまでの時間が遅くなると地下街に流入する時間が大幅に増える．

5.5 実験 4

実験 4 では，実験 1 の設定（表 2）のうち，設置チームの移動速度を 50m/分，60m/分，72m/分に変えて実験を行った．これは，混雑の度合いによって設置チームの移動速度が遅くなったり，あるいは地下街が比較的空いている状況であれば駆け足での移動が可能になることを想定している．

以下，各移動速度の下での実験結果を表 18 から表 23，図 16 から図 18 に示す．

- 止水板設置チームの移動速度が 50 m/分の場合

表 18: 実験 4 移動速度 50 m/分の設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	6205	8236	18089	6679	7671	15728
2	1813	1592	23742	4626	8211	14140
3	23411	6686	24352	10635	8643	32746
4	—	11087	28619	7823	8169	23295
5	—	—	24027	—	—	—

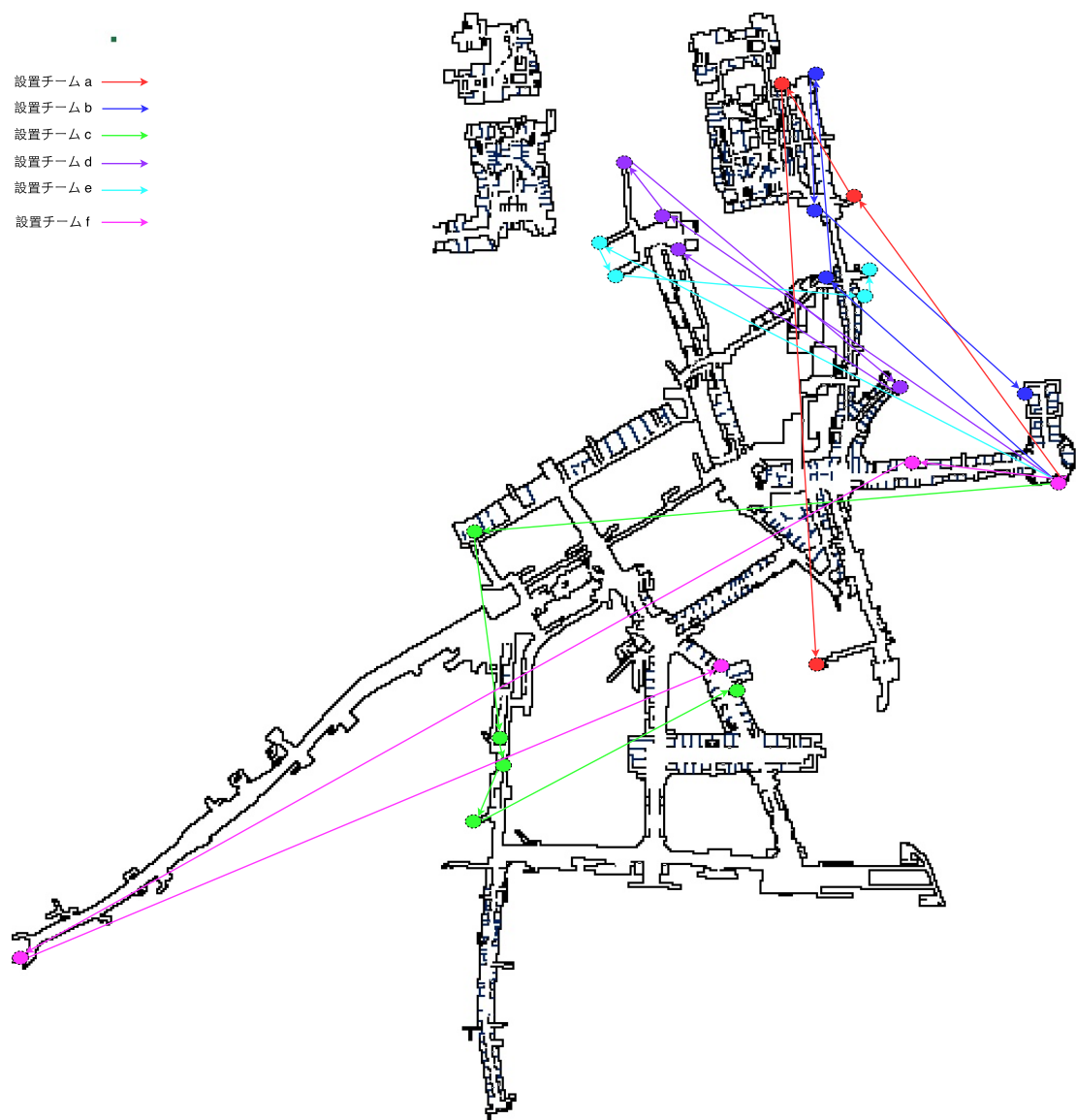


図 16: 梅田地下街 止水板最適設置順序（移動速度 50m/分の場合）

表 19: 実験 4 移動速度 50 m/分の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	a	6205	12.12
1	d	6679	7.88
2	d	4626	6.72
1	e	7671	8.84
3	f	32746	25.04

- 止水板設置チームの移動速度 60 m/分の場合

表 20: 実験 4 移動速度 60m/分の設置順序

移動回数	チーム名					
	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	32746	7671	6205	24352	6679	4626
2	24027	1592	8236	23742	1813	7823
3	23295	8169	15728	18089	14140	8211
4	—	8643	23411	11087	—	6686
5	—	—	—	—	—	28619

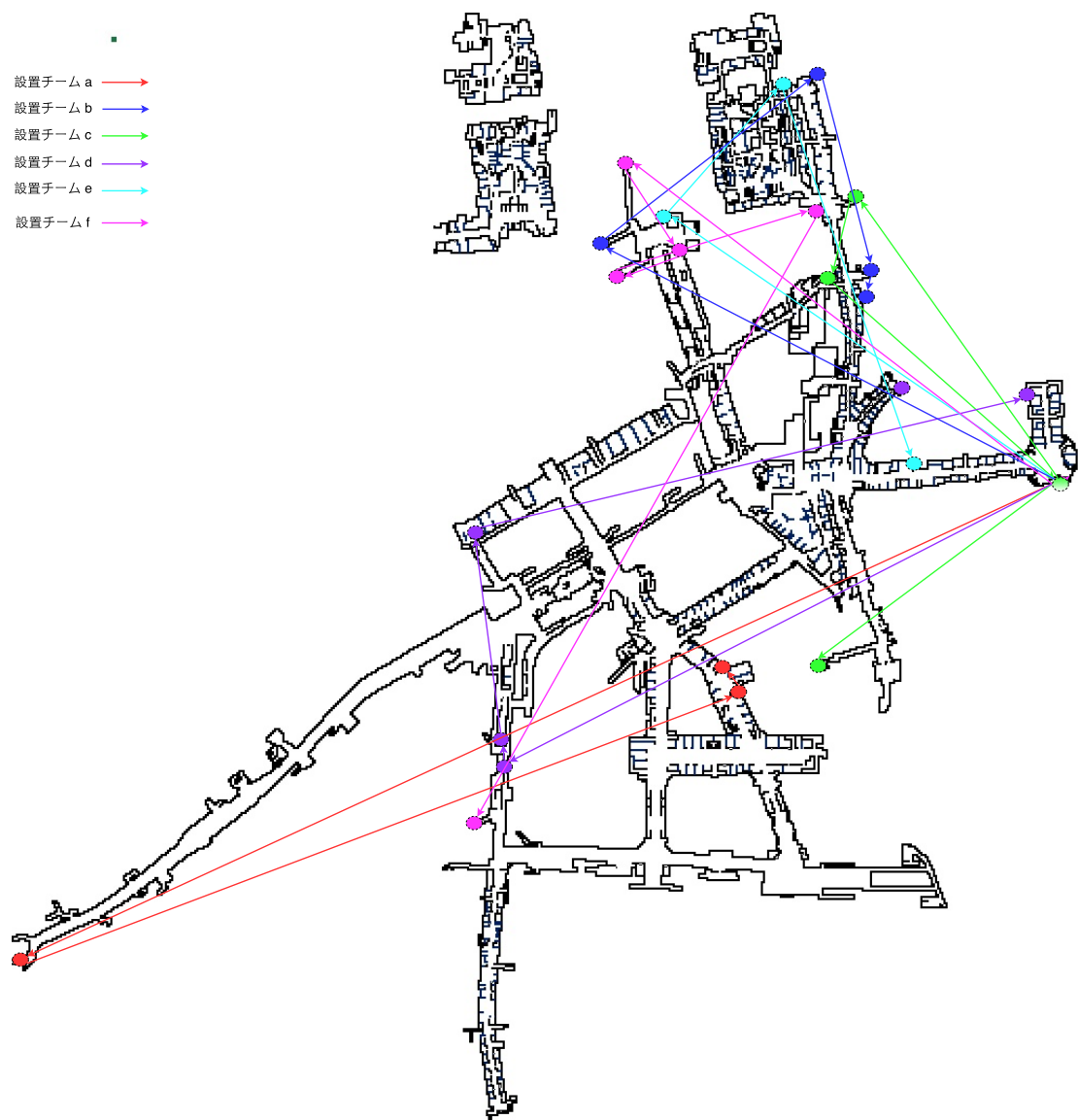


図 17: 梅田地下街 止水板最適設置順序（移動速度 60m/分の場合）

表 21: 実験 4 移動速度 60m/分の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間（分）
1	a	32746	13.70
1	b	7671	6.53
2	c	8236	2.63
1	c	6205	10.43
1	e	6679	5.73
1	f	4626	0.10

- 止水板設置チームの移動速度 72 m/分の場合

表 22: 実験 4 移動速度 72m/分の設置順序

チーム名 移動回数	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	4626	6679	6205	7671	32746	15728
2	1592	23742	6686	8211	24027	8236
3	14140	24352	1813	8169	—	18089
4	11087	—	10635	8643	—	28619
5	—	—	7823	23411	—	23295

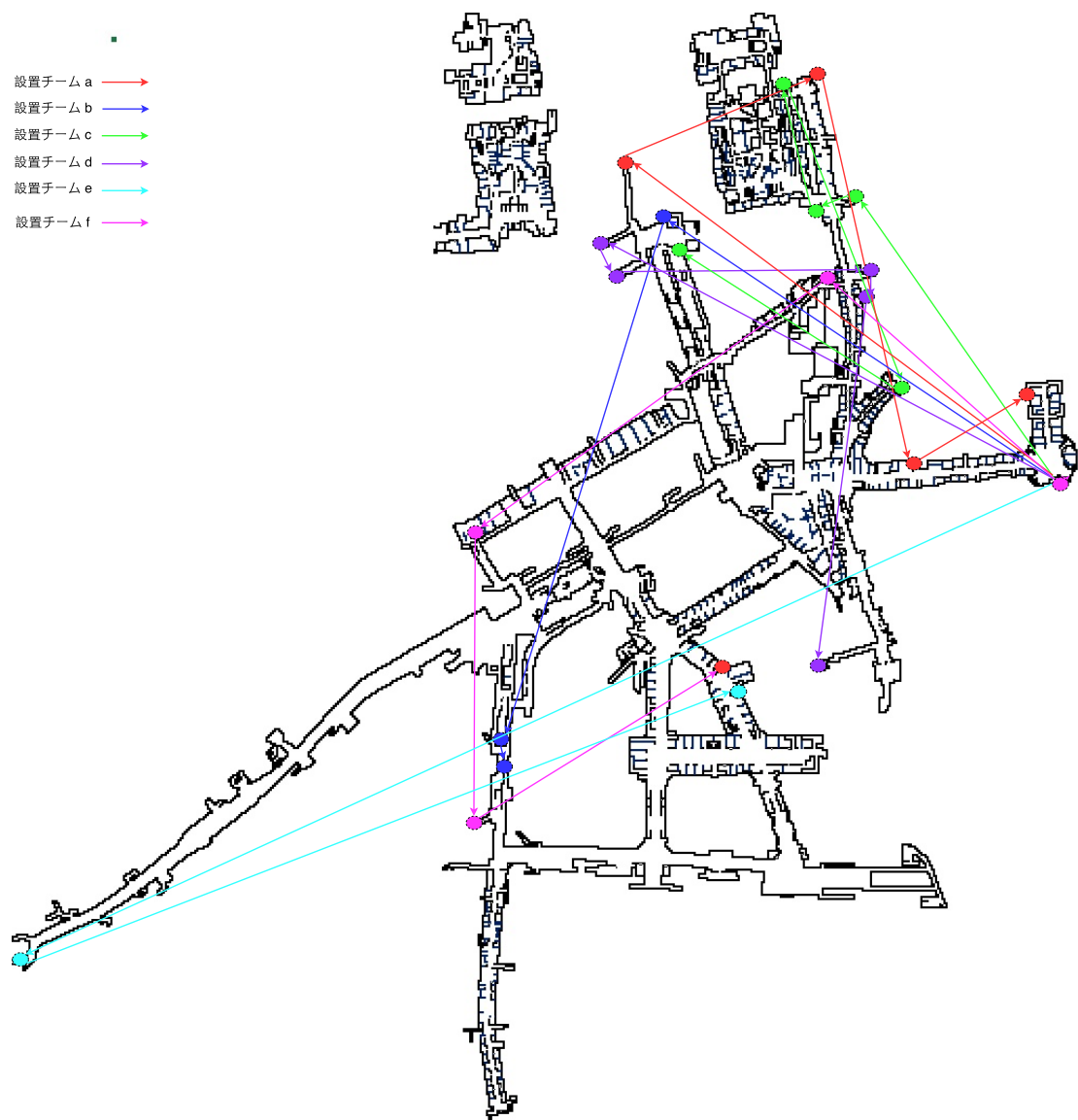


図 18: 梅田地下街 止水板最適設置順序（移動速度 72m/分の場合）

表 23: 実験 4 移動速度 72m/分の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間 (分)
1	b	6679	3.94
1	c	6205	9.03
1	d	7671	4.61
1	e	3274	9.58

表 24: 実験 4 結果 まとめ

移動速度 (m/s)	制約数	変数の数	計算時間 (s)	GAP(%)	目的関数 (分)
50	17484	33984	86400	17.5	60.60
60	14016	27198	86400	6.73	39.13
66	17484	33984	20875	0.03	31.36
72	14016	27198	615	4.53	27.17

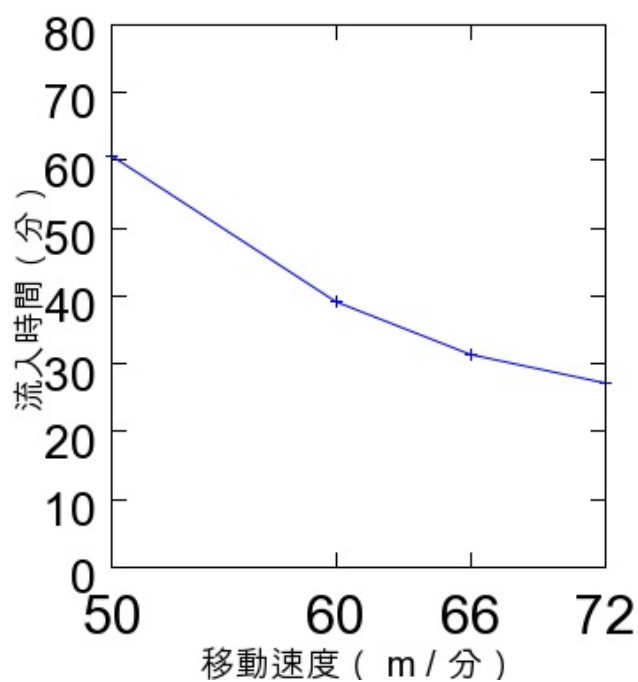


図 19: 実験 4 の結果比較

図 19 より，移動速度が大きくなるほど地下街に流入する時間は短くなる．ただし，移動速度が大きくなるほどグラフの傾きは小さくなっており，移動速度の向上が雨水流入時間の現象に及ぼす効果が小さくなっていることがわかる．

5.6 実験 5

実験 5 では，実験 1 の設定（表 2）のうち，止水板設置に要する時間を 5 分に変えて実験を行った．

以下，実験結果を表 25, 26，図 20 に示す．

- 止水板設置に要する時間が 5 分の場合

表 25: 実験 5 止水板設置に要する時間 5 分の設置順序						
移動回数	チーム名					
	a	b	c	d	e	f
0	15728	15728	15728	15728	15728	15728
1	6250	32746	4626	8236	18089	6679
2	1592	24027	8211	14140	23742	7671
3	1813	23295	23411	15728	24352	8643
4	6686	—	—	11087	28619	8169
5	10635	—	—	7823	—	—

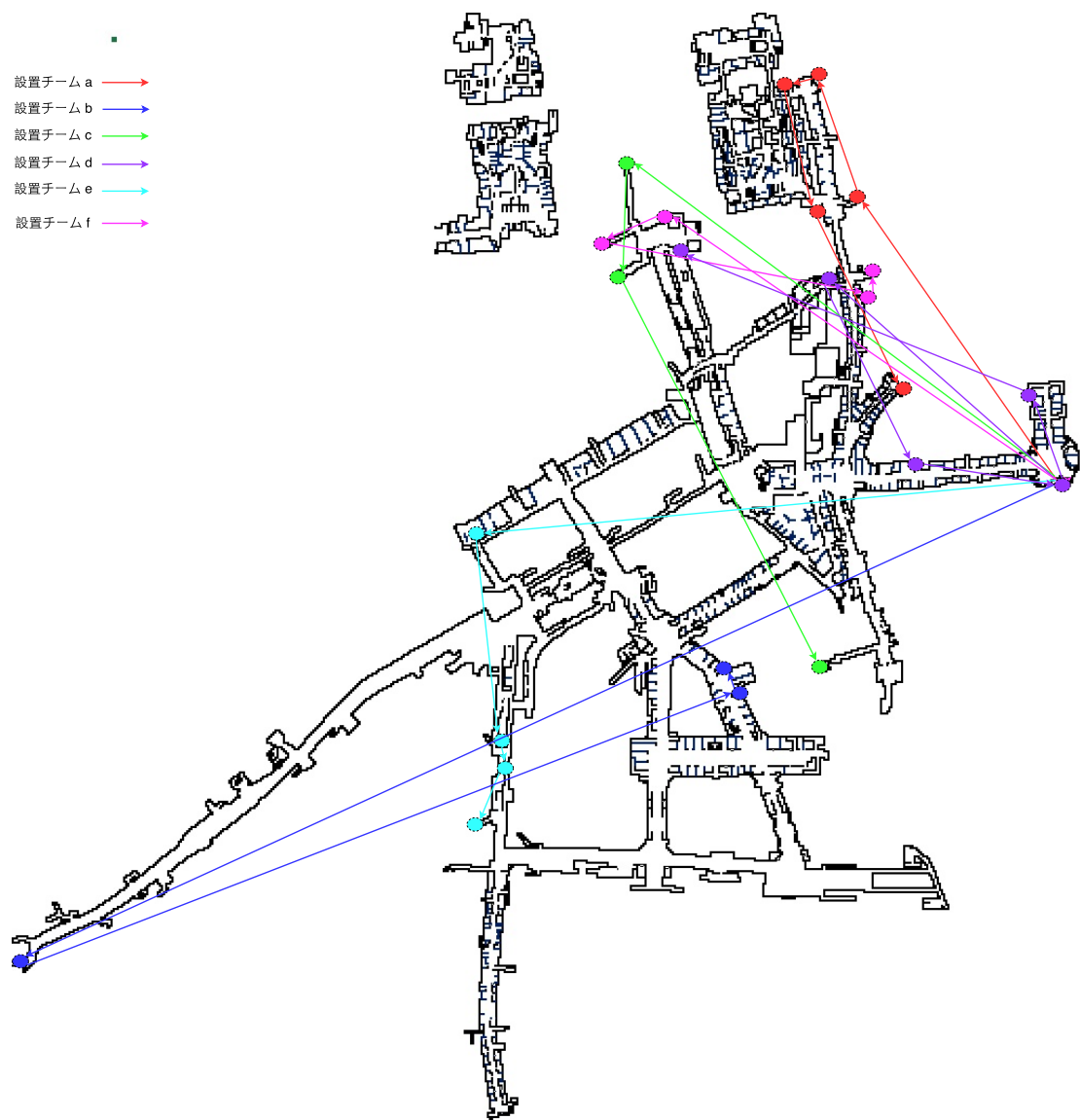


図 20: 梅田地下街 止水板最適設置順序（止水板設置時間 5 分の場合）

表 26: 実験 5 止水板設置に要する時間 5 分の流入箇所

移動回数	止水板設置チーム	出入口メッシュ番号	流入時間（分）
1	a	6250	11.67
3	a	1813	1.00
1	b	32746	13.45
3	e	24352	0.18
1	f	6679	6.76
2	f	7671	13.39

表 27: 実験 5 結果 まとめ

設置時間	制約数	変数の数	計算時間 (s)	GAP(%)	目的関数 (分)
3	17484	33984	20875	0.03	31.36
5	17484	33984	36863	0.00	47.45

表 27 より，止水板設置に要する時間が増えると地下街に流入する時間も増える．また，図 20 と図 8 より，設置チームの設置順序も設置時間の違いによって異なる動きをする．

5.7 まとめ

本節では，実験 1 から実験 5 まで行ってきた数値実験についてまとめる．

- 止水板設置チームの数が増えるほど地下街に流入する時間は短くなるが，ある一定の数まで増えると地下街に流入する時間は変化なしになる
- 降雨開始から止水板を設置し始めるまでの時間が長いと地下街に流入する時間が大幅に増える
- 移動速度が大きくなると地下街に流入する時間は小さくなるが，徐々に流入時間の変化が小さくなる

実験 1 から実験 5 まで数値実験を行ったが，目的関数の値が最小であるケースは実験 2 の「降雨開始から 50 分後に止水板を設置する」であり，その時の最適な設置順序は図 13 である．

6 おわりに

本研究では，各出入口の流入開始時刻を考慮した止水板の設置順序を最適化問題として定式化しそれを最適化ソルバで解くことで，最適な止水板設置順序を算出することができた．また，止水板設置条件を変えることで条件の比較を行うことができた．

今後の課題としては，降雨条件を変化させて検証を行う必要性がある．しかし，1 時間あたりの降雨量を増やした場合，流入する出入口のデータが増えるため計算時間が大幅に長くなる可能性がある．これをいかに抑えるか検討しなくてはならない．具体的には定式化などの見直しが必要であると考えられる．また，本研究ではいくつかある止水板の設置条件のうち 1 つだけを変更して計算し，結果の違いを比較しているが，複数の条件を変えた時の最適な止水板設置順序がどのように変わるのかを検討することができなかった．今後十分な実験が必要であると考えられる．

謝辞

本研究を進めるに当たり，ご指導いただいた檀寛成准教授に深く感謝致します．

また，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いたシステム最適化研究室の皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げて，謝辞にかえさせていただきます．

平成 29 年 2 月 9 日

参考文献

- [1] 朝日新聞, 1999 年 8 月 27 日朝刊, 地下店舗, 低い水防意識 福岡水害実態調査 (1999).
- [2] 福島雅夫, 新版 数理計画入門, 朝倉書店 (2011).
- [3] GLPK - GNU Project - Free Software Foundation (FSF),
<https://www.gnu.org/software/glpk/> (2017 年 2 月 6 日確認).
- [4] 井上知美, 川中龍児, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一, 内水氾濫による大規模地下街の
浸水過程と避難の安全性に関する検討, 水工学論文集 ,55,s973 – s978 (2011).
- [5] 一般社団法人, 中部地域づくり協会, 平成 20 年 8 月末豪雨
<http://www.ckk.or.jp/saigai/2012/208-11/208.html>(2017 年 2 月 9 日
確認)
- [6] 国土交通省, 気象庁・アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html> (2017 年 2 月 6
日確認).
- [7] 国土交通省, 大都市の無防備な地下空間を襲った集中豪雨
[https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/1999/html/
sete001.html](https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/1999/html/sete001.html) (2017 年 2 月 6 日確認).
- [8] 森兼政行, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一, 大規模地下空間を有する都市域における地
下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策, 水工学論文集 ,55,s967 – s972 (2011).
- [9] 内閣府 (防災担当), 平成 20 年 4 月 2 日, 帰宅行動シミュレーション結果について
(概要):
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/shiryo_1.pdf
(2017 年 2 月 6 日確認).
- [10] 中村幸史, 通勤電車運行スケジュールにおける遅延計算モデルの構築, 中央大学大学
院理工学研究科情報工学専攻 2003 年度 修士論文 (2004).
- [11] 日本経済新聞, 2013 年 8 月 26 日朝刊, 大阪市, 10 分間で 27.5 ミリ (2013).
- [12] 大阪管区气象台, 平成 25 年 8 月 25 日の大雨について (大阪府の気象衛星)
<http://www.jma-net.go.jp/osaka/kikou/saigai/pdf/sokuhou/20130828.pdf>
(2017 年 2 月 6 日確認).

- [13] 武田侑也，大規模地下空間における内水氾濫による浸水対策の検討，関西大学環境都市工学部 2015 年度卒業論文 (2016).
- [14] 平成 12 年 9 月の東海豪雨災害について <http://www.giroj.or.jp/disclosure/risk/risk58-1> (2017 年 2 月 6 日確認).
- [15] 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社，集中豪雨の増加傾向と水害への対応 http://www.tokiorisk.co.jp/risk_info/up_file/201306171.pdf (2017 年 2 月 6 日確認).

A 本研究で作成したモデルファイル

```
set V;          # Vertex
set E dimen 2;  # Edge
set L;          # Layer {0, 1, ...}
set P;          # Team

param f{V};     #
param w{E};     # Weight of edge
param s;        # Start
param u;        # Installing time for one waterstop
param M;        # Big-M

var x{V, L, P}, binary; #
var y{E, L, P}, binary; #
var t{L, P};     # Time
var t_{L, P};    # Ideal Time
var d{L, P}, >= 0.0; # Delay

#####

minimize Objective:
    sum {l in L, p in P: l >= 1} d[l, p];

subject to InitialPosition {p in P}:
    x[s, 0, p] == 1;

subject to AllWaterstop {v in V}:
    sum {l in L, p in P: l >= 1} x[v, l, p] == 1;

subject to OneByOne {l in L, p in P}:
    sum {v in V} x[v, l, p] <= 1;

subject to SequentialInstall {v in V}:
    sum {(v_, v) in E, l in L, p in P: l >= 1} y[v_, v, l - 1, p] == 1;
```

```

subject to UsingEdge_1 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v1, l - 1, p] >= y[v1, v2, l - 1, p];

subject to UsingEdge_2 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v2, l, p] >= y[v1, v2, l - 1, p];

subject to UsingEdge_3 {(v1, v2) in E, l in L, p in P: l >= 1}:
    x[v1, l - 1, p] + x[v2, l, p] - y[v1, v2, l - 1, p] <= 1;

subject to InstallingTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    t[l, p] == sum {l_ in L, (v1, v2) in E: l_ < l}
        y[v1, v2, l_, p] * w[v1, v2] / 66.0 + l * u;

subject to IdealInstallingTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    t_[l, p] == sum {v in V} (x[v, l, p] * (f[v] - 60.0));

subject to DelayTime {l in L, p in P: l >= 1}:
    d[l, p] >= t[l, p] - t_[l, p] - (1 - sum {v in V} x[v, l, p]) * M;

##### End of file #####

```