

卒業研究論文

東京メトロ永田町駅構内における
歩行者エージェントシミュレーション

中川 梨花

中央大学工学部情報工学科 田口研究室

2020年3月

概要

地下鉄駅構内では、利用客が多く通勤ラッシュの時間帯は特に混雑している。警備員が声掛けや誘導を行い、交通整理をしていることもあるが、混雑は解消されていないのが現状である。

そこで、東京メトロ永田町駅構内における人流シミュレーションを行い、混雑を視覚的に予測・分析する。シミュレーションは、実際に観察することが困難な状態を可視化し、観察できることが利点である。エージェントと呼ばれる鉄道利用客に似た動きをする対象を発生させて、仮想空間上で動かすことで、現実空間での人流を予測する。まずは、現在の駅構内における人流をモデル化して現状を把握し、それを基にして新たな誘導方法を検討し提案することで混雑緩和に活かす。また、東京オリンピック時の予想利用客のデータも使い、現在の誘導方法での状態を予測する。

キーワード：エージェントシミュレーション、東京オリンピック、地下鉄、東京メトロ永田町駅

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
第2章	地下鉄永田町駅構内への適用	2
2.1	地下鉄永田町駅	2
2.2	地図データの構築	4
2.2.1	永田町駅の可視化	4
2.2.2	MicroAVS の使用方法	5
2.2.3	研究対象範囲の決定	7
2.3	乗客データ	8
2.3.1	大都市交通センサス	8
2.3.2	時刻設定	10
2.4	施設による交通量	13
2.4.1	改札口	13
2.4.2	エスカレーター・階段	14
第3章	シミュレーション結果	16
3.1	使用するシミュレーションソフトについて	16
3.2	現状の可視化	18
3.3	迂回経路の提案と効果	23
第4章	東京オリンピック開催時の地下鉄永田町駅	27
4.1	データ作成手順	27
4.2	シミュレーション結果	28
第5章	結論	32
5.1	まとめ	32
5.2	今後の課題	32
	謝辞	34
	参考文献	35

第1章 序論

1.1 研究背景

永田町駅構内の三叉路における歩行者の流動に注目した理由は、二つある。

一つ目は、同駅での乗換で苦勞した自らの経験である。永田町駅を通る際に、東京メトロ半蔵門線から南北線に乗換えるため、その二線と有楽町線を利用する乗客が行き交う三叉路を通る。都心を通る3線であることから利用客が多く、朝や夜の通勤ラッシュ時は常に混雑している。特に、半蔵門線のホームに繋がるエスカレーターの待ち行列が長く伸び、人々の移動の妨げとなっているため、乗換時間の増大、衝突事故、人々のストレスの原因となっている状況を目の当たりにした。

二つ目は、東京オリンピック開催時も永田町駅で混雑が予想されていることである。田口 東教授の計算により、東京駅や新宿駅に次いで永田町駅でも通常の3.2倍の混雑が予想されている。それほど利用客も多いことがわかる。

交通整理のため、声掛けや誘導を行う警備員も常駐しているが、混雑は解消されておらず、根本的な問題解決に繋がっていないのが現状である。

そこで、現在とは全く異なる歩行者動線の制御が必要であると考えた。しかし動線制御の評価を行うために、実際に利用客に協力してもらい実験を行うことは不可能である。そこで、現状やオリンピック開催時の人流、新たな歩行者動線を適用した場合の人流をシミュレートしたいと考えた。エージェントと呼ばれる利用客に似た動きをする対象を発生させて仮想空間上で動かすことで、現実空間での人々の動きや流れ予測ができることが、シミュレーションの面白さだと感じる。

1.2 研究目的

利用客が多く混雑している地下鉄駅構内（永田町駅）における人流シミュレーションを行い、混雑を再現し分析することを目的とする。

まずは、現在の駅構内における人流をモデル化して現状を把握し、それを基にして新たな誘導方法を検討・提案することで混雑緩和に活かす。また、東京オリンピック時の予想利用客のデータもものせて、現在の誘導方法での状況を観察する。

シミュレーションの対象領域は東京メトロ永田町駅の地下2階にある三叉路、時刻は平日朝の通勤ラッシュ時（午前7時00分から9時46分まで）とする。

第2章 地下鉄永田町駅構内への適用

本研究では、既存のソフトウェアを使いシミュレーションを行う。それに伴い、実際の地下鉄駅構内の構造を調べ、ソフトウェアで利用できるようなデータを作成する。

2.1 地下鉄永田町駅

地下鉄永田町駅は、東京メトロ3路線が乗り入れる駅であり、東京メトロ赤坂見附駅2路線と改札内で連絡している大規模な駅である。有楽町線、半蔵門線の順で開業したのち、銀座線・丸ノ内線赤坂見附駅との乗換業務が開始した。その後、南北線が開業し、東京メトロの中では最大の路線数となる5路線が通る駅となった。

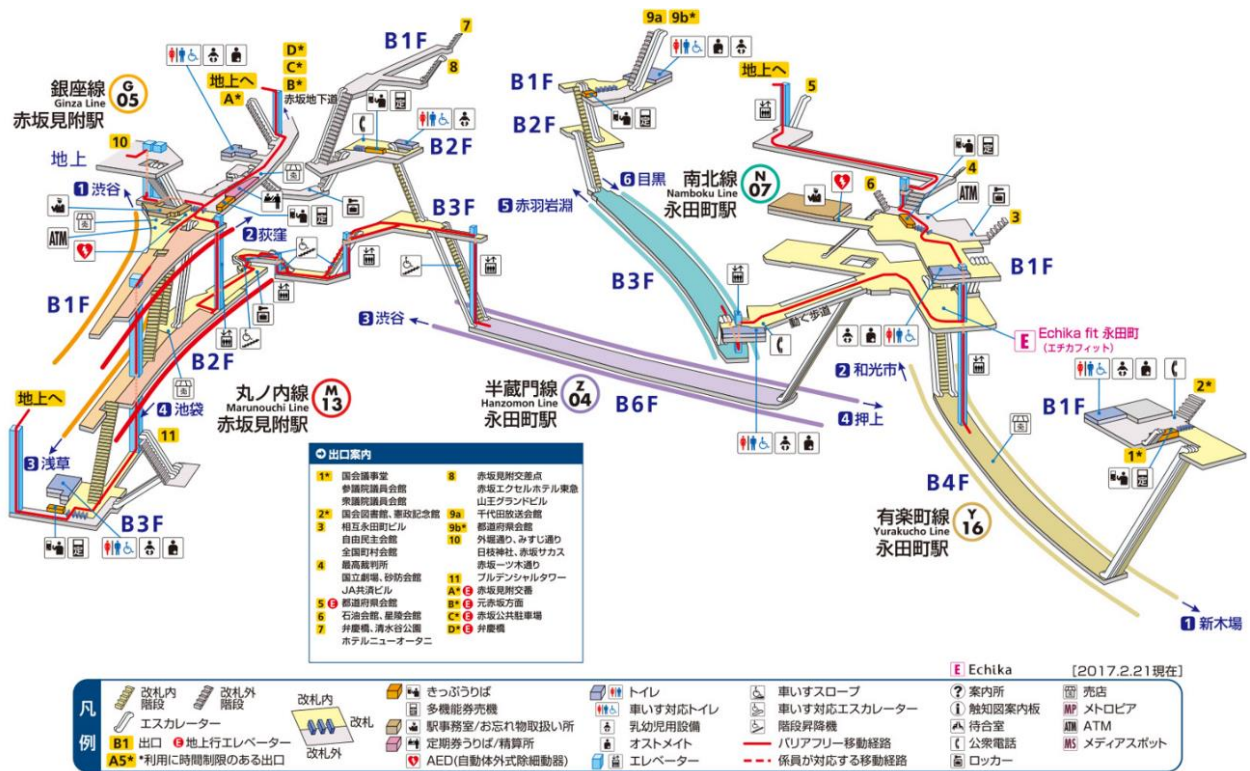


図 2.1 赤坂見附/永田町駅構内立体図[1]

図 2.1 のように、赤坂見附駅と有楽町線・南北線の乗換の際は、半蔵門線のホームを通ることになり、移動距離は 500m 以上となる。そのため、永田町駅 3 路線の利用客が通る地下 2 階は、乗換だけでなく改札に向かう人も含めて多くの人が行き交う。

1 日の平均乗降人員[2]は、平成 17 年度の 58,612 人から、平成 30 年度にはその約 1.44 倍である 84,403 人になっており、増加傾向にある。大都市交通センサス[3]によると、平成 17 年度の利用客は乗換人員

も含めて、118,436人にのぼるので、現在は1日に17万人以上が永田町駅を利用していると予測できる。また、各路線の1日平均乗車人員数をまとめたものが表2.1である。

表 2.1 年度別1日平均乗車人員数（平成17 - 29年度）[4][5]

年度	有楽町線	半蔵門線	南北線
平成17年	11,726	13,258	4,411
平成18年	11,811	13,948	4,564
平成19年	12,087	14,699	4,847
平成20年	11,567	14,630	4,871
平成21年	11,181	14,496	4,827
平成22年	11,121	15,044	5,063
平成23年	10,762	14,585	4,959
平成24年	11,151	15,290	5,221
平成25年	11,584	15,447	5,556
平成26年	11,819	15,603	5,715
平成27年	13,623	16,464	6,191
平成28年	13,304	17,529	7,244
平成29年	14,271	18,863	8,392

平成20年から21年は減少したものの、各路線とも年々利用客が増加していることが見て取れる。

永田町駅周辺は国会議事堂や様々な企業のビルが立ち並ぶため、乗降利用客の多くが通勤利用である。有楽町線沿いには豊洲駅や池袋駅、半蔵門線沿いには渋谷駅や大手町駅、南北線沿いには四ツ谷駅や飯田橋駅等があることから、通勤時の乗換にも便利な駅である。図2.2より朝のラッシュ時は改札利用者が駅利用者全体の半数を占めており、勤務地が駅周辺に存在する客が多いと考えられる。

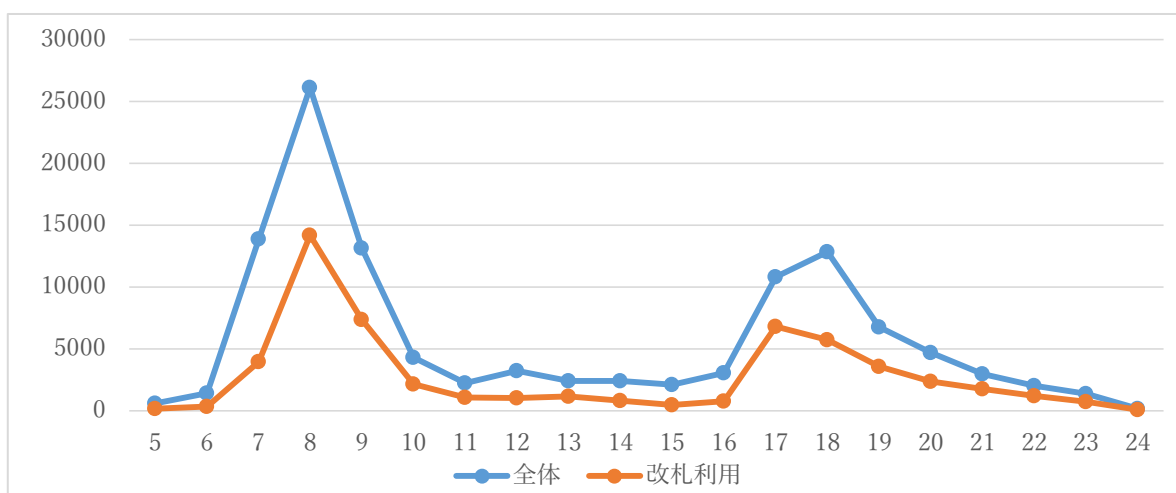


図 2.2 1日の時間帯別利用者数（平成17年度）

2.2 地図データの構築

ここでは、地下2階の地図を作成する手順や、駅の構造物や混雑時の誘導方法等について述べる。

2.2.1 永田町駅の可視化

リアルなシミュレーションを行うために、現実に近い永田町駅の地図を作成した。作成した地図は現状のものではなく、現在行われている改修工事が終了したときを想定したものである。以下が作成手順である。

手順1. タイルの数を数える。

駅構内の床は、約0.4m×0.4mのタイルが敷き詰められてできている。これを数えて通路の幅を決定する。工事中で隠されている部分や未完成な部分は、完成図から幅を予測する。予測できない部分は無視する。

手順2. 座標を決める。

手順1で得たデータを基に、原点をとり座標を決める。

手順3. 座標データを使って可視化する。

データ可視化ツールMicroAVSを使用し、駅の地下2階を可視化したものが図2.3である。青い枠が、実際の長さでは縦67m、横111mを表している。

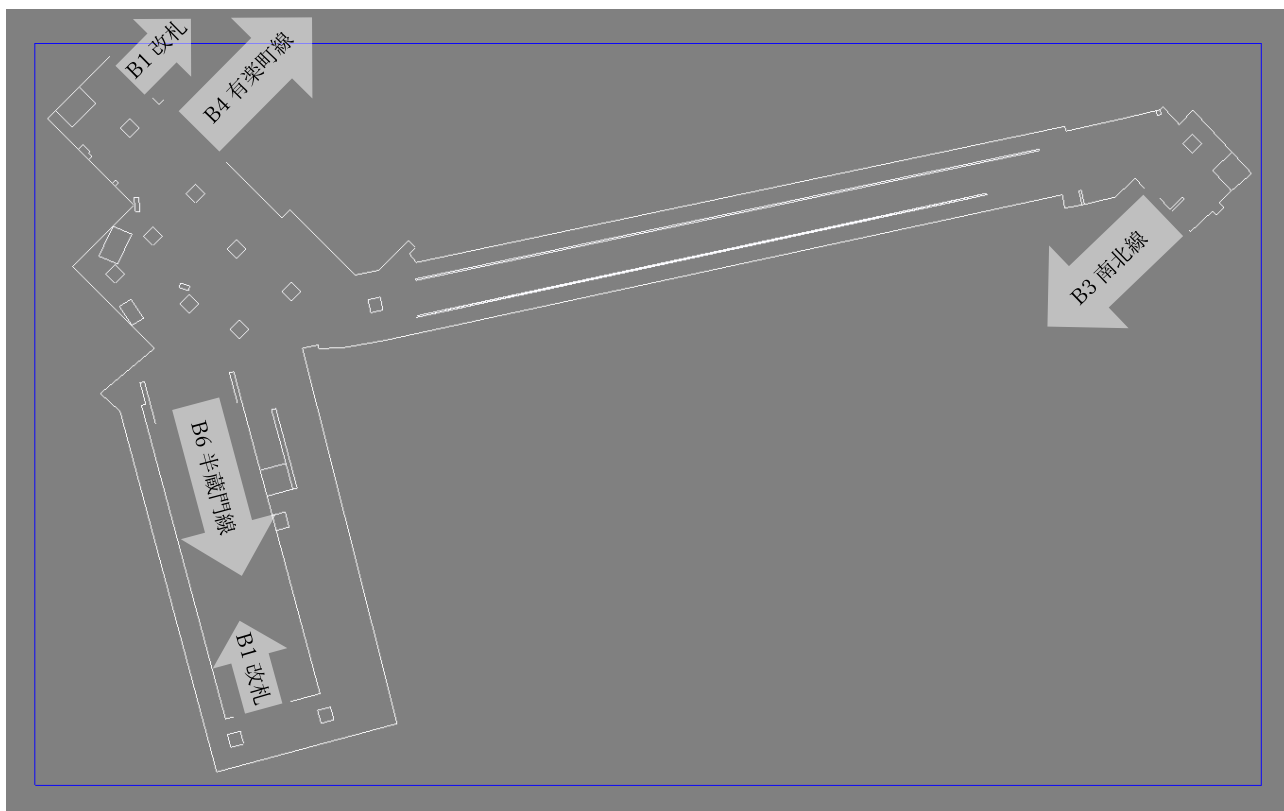


図 2.3 永田町駅地下2階の地図

図に示すように、矢印の位置が他の階への通路口となり、その上の文字が行き先の階数と名前である。通路口には、階段やエスカレーターが表 2.2 のように存在する。地下 2 階から見て左右を決定している。また、基本的に通路や階段は左側通行である。

壁以外の線は、店や柱、エレベーター、柵等であり、本研究では障害物とし、壁と同様に通行することができない。地下 2 階には他にフードコートやトイレがあるが、本研究では無視する。図の中央に長く伸びた通路には両側の壁沿いに 1 本ずつ動く歩道があり、進行方向の左側を使用する。本研究の対象時間中に、稼働方向が変わるエスカレーターがあるが、その場合は通常時の向きで稼働していると仮定してシミュレーションを行う。

表 2.2 通路口の構造物の詳細

通路口の行き先	構造物の詳細
B1 改札(図 2.3 左上)	階段をのぼった先にエスカレーター 3 機 ・左エスカレーター 常に下り ・真ん中エスカレーター 始発～10:00 上り (改札行き) 17:00～23:00 下り 他、停止 ・右エスカレーター 常に上り (改札行き)
B1 改札(図 2.3 左下)	エスカレーター 2 機、間に階段 ・左エスカレーター 常に上り (改札行き) ・右エスカレーター 常に下り
有 楽 町 線	エスカレーター 2 機、間に階段 ・左エスカレーター 始発～11:00 上り 11:00～15:00 下り (ホーム行き) 15:00～終電 上り ・右エスカレーター 通常時 上り 平日 8:20～9:10 下り (ホーム行き)
半 蔵 門 線	エスカレーター 4 機 (2020 年 3 月まで工事中のため 3 機のみ稼働) ・左 2 機 下り (ホーム行き) ・右 2 機 上り
南 北 線	左にエスカレーター 2 機、右に階段 ・左エスカレーター 下り (ホーム行き) ・右エスカレーター 上り。

2.2.2 MicroAVS の使用方法

MicroAVS とは、サイバネットシステム株式会社が取り扱うデータ可視化ツールである。座標や要素の属性などを決めることで、2次元だけでなく 3次元の可視化も可能である。

作成の手順としては、まず、可視化したいものの座標を取り、各点に番号を与える。次に辺の情報を指定するため、辺の両端点の番号と辺の番号を決定する。最後に付加情報を数字で与えることで色の指定ができる。

実際に永田町駅の地下 2 階と各線のホームの地図を作成したいとき、図 2.4 のような INP ファイル (MicroAVS 用の入力データファイル) を作成する。

```
# Nagatacho                                ←コメントアウト(英数字)
1
data_geom
step1
237 246                                     ←点の数 辺の数
1 0.0 20.0 0.0                             ←点の番号 x座標 y座標 z座標
2 0.0 40.0 0.0
3 13.5 40.0 0.0
4 15.5 40.0 0.0
5 15.5 41.5 0.0

(省略)

234 110.89 -53.8815 -26.0
235 108.7025 -55.91225 -26.0
236 107.9525 -56.60025 -26.0
237 105.765 -58.631 -26.0
1 0 line 1 2                                ←辺の番号 0 line 始点の番号 終点の番号
2 0 line 3 4
3 0 line 4 5
4 0 line 6 7
5 0 line 8 9

(省略)

243 0 line 220 234
244 0 line 219 235
245 0 line 219 236
246 0 line 147 237
0 1                                          ←一点に情報を与えるか 辺に情報を与えるか yes→1 no→0
1 1
xxx,                                        ←任意の情報名
1 20.0                                       ←辺の番号 任意の値
2 20.0
3 20.0
4 1.24
5 1.24

(省略)

243 1.26
244 1.26
245 1.26
246 1.26
```

図 2.4 MicroAVS で使用する INP ファイルの例

今回は、壁と障害物、階層と各階を繋ぐ構造物を区別するために、辺に 3 桁の数字で xxx という情報を与えた。この値により辺の色が変わり、視覚的により情報をとらえることが可能になる。

実際にこのファイルを MicroAVS で出力したものが図 2.5, 2.6 である。

2 つの図から 3 次元を表現できているということが見える。青色が永田町駅地下 2 階、水色が地下 3 階南北線ホーム、緑色が地下 4 階有楽町線ホーム、黄色が地下 6 階半蔵門線ホーム、桃色がそれらを繋ぐ階段やエスカレーター、エレベーターを描画している。壁と障害物の xxx の値の差は、各階に与えた数値の差に比べて極めて小さいため視覚的にとらえるのは難しかった。のちに INP ファイルを見れば辺や点の属性が一目でわかるという点では、役目を果たした。

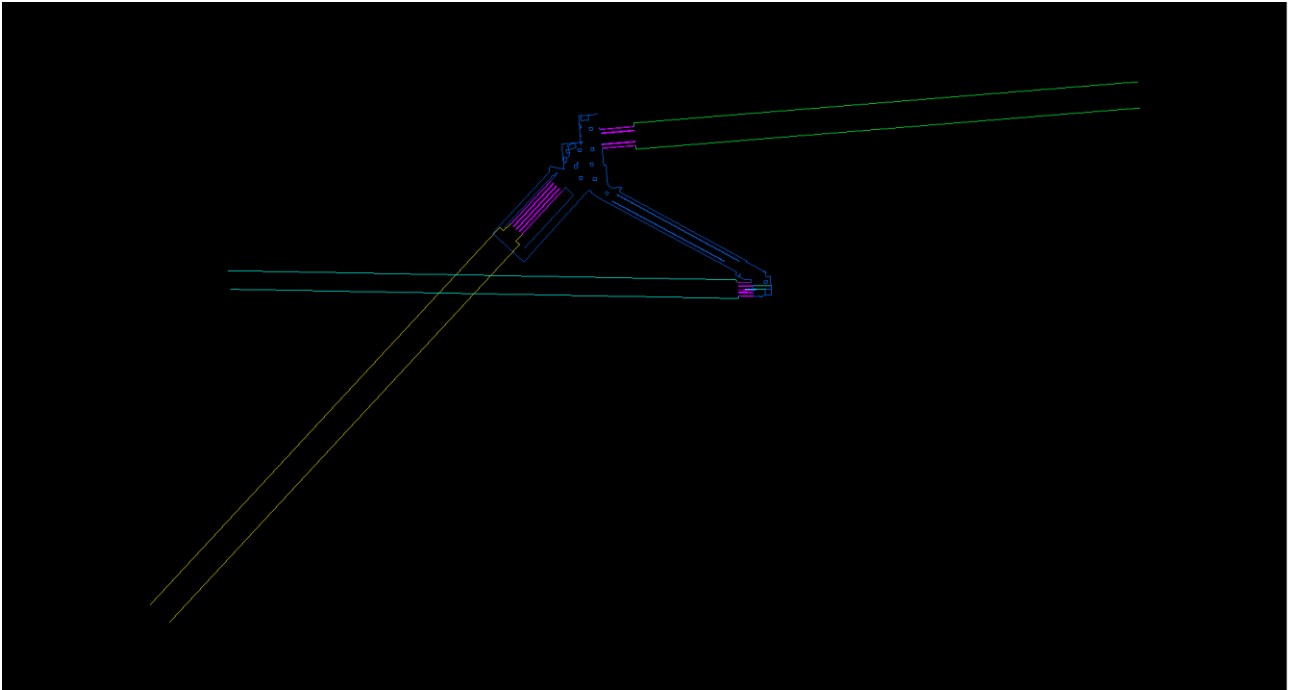


図 2.5 MicroAVS で作成した図形を z 軸上からみたもの

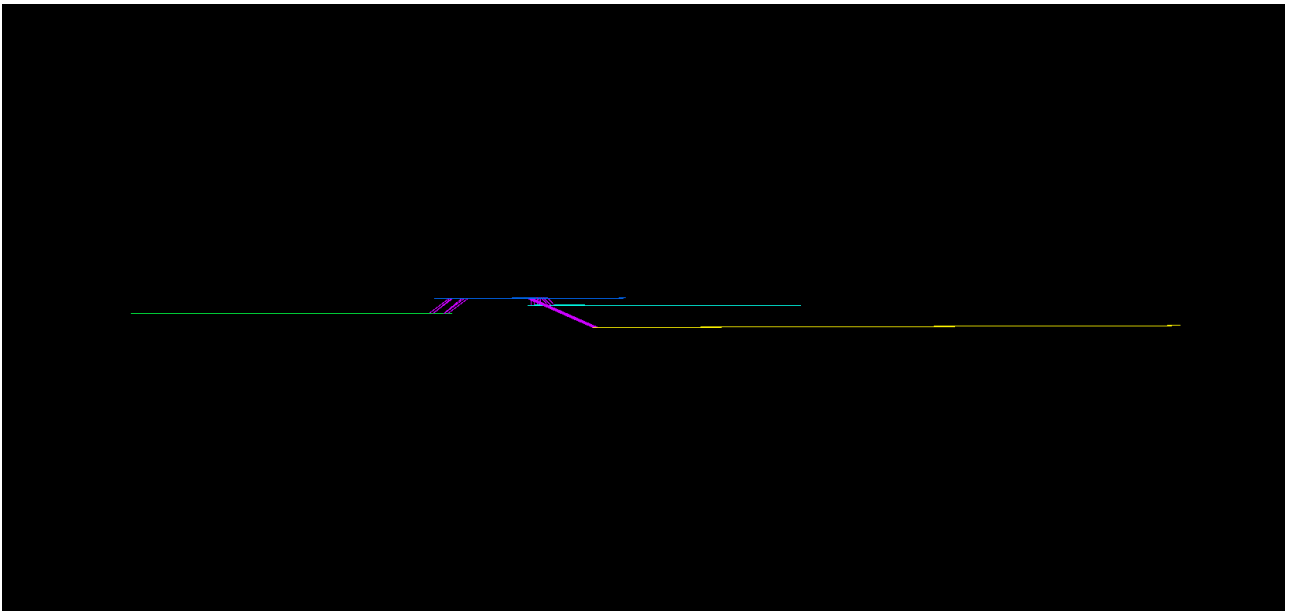


図 2.6 MicroAVS で作成した図形を z 軸沿いからみたもの

2.2.3 研究対象範囲の決定

本研究では図 2.3 の中でも特に図 2.7 の範囲を研究対象としてシミュレーションを行う。この部分を本研究では永田町駅構内の三叉路と呼ぶ。

研究を始めた段階では、図 2.5 のようなホームも含めた領域を考えていた。理由としてはホーム上の状態が三叉路の人流にも影響すると考えたためである。

今回は、使用するシミュレーションソフトに合わせ、より分析しやすいシミュレーションにするため

に研究領域を狭めた。しかし、

- ・赤坂見附駅から乗換える人をどう表現するか。
 - ・降車した客の行き先はどう配分するか。
 - ・半蔵門線のホームから三叉路に繋がるエスカレーターの混雑は考慮するか。
- 等を考え、ホーム上の状態も理論上考慮したので2.3節や2.4節にまとめる。

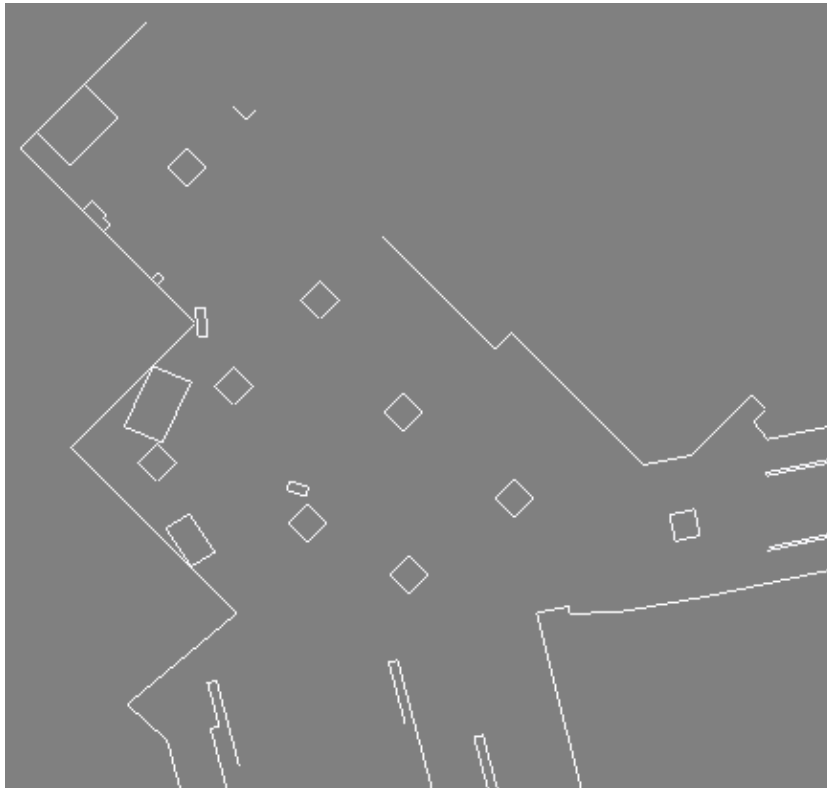


図 2.7 永田町駅構内三叉路の地図

2.3 乗客データ

ここでは、乗客データの取得方法や扱い方について述べる。

2.3.1 大都市交通センサス

大都市交通センサスとは、首都圏、中京圏、近畿圏の三大都市圏における鉄道・バス等の大量公共交通機関の利用実態を調査したものである。調査結果は、人口分布との関係等の分析を行うことで、三大都市圏における公共交通政策検討の基礎資料として活用されている。

本研究では、平成17年度における鉄道定期券・普通券等利用者調査を使用した。調査結果を見やすくしたものが、表2.3である。初め5行はデータの説明で、6行以降はそれにならってデータが連なっており、総レコード数は140,238であることがわかる。9999というデータは具体的なデータが不明であることを指し、帰宅経路が0の場合は、第2経路で既に帰宅していることを示している。

表 2.3 H17 鉄道定期券・普通券等利用者調査（一部抜粋）

```

総レコード数
レコード番号 性別 年齢 居住地ゾーン 定期券保有 種類 拡大率
(第1経路) 利用経路数 移動目的 出発地区分 出発地ゾーン 目的地区分 目的地ゾーン 乗車時刻 降車時刻 乗車駅 降車駅 列車種別:(x利用経路数)
(第2経路) 利用経路数 移動目的 出発地区分 目的地区分 乗車時刻 降車時刻 乗車駅 降車駅 列車種別:(x利用経路数)
(帰宅経路) 乗車時刻 降車時刻
total_records 140238
1 2 59 11303 1 1 39
2 1 1 11303 2 99999 716 740 1291(笹塚) 1290(新宿) 2:196(新宿) 203(駒込) 1:
2 5 3 1 9999 9999 202(巣鴨) 196(新宿) 1:1290(新宿) 1291(笹塚) 2:
0
2 1 99 11914 2 1 33
2 1 1 11914 2 11605 745 815 1688(志村三丁目) 1681(巣鴨) 1:202(巣鴨) 199(目白) 1:
2 5 2 1 1930 2010 199(目白) 202(巣鴨) 1:1681(巣鴨) 1688(志村三丁目) 1:
0
3 2 33 11410 1 1 98
2 1 1 11410 2 11611 827 842 314(東中野) 316(新宿) 1:196(新宿) 200(池袋) 1:
2 5 2 1 1800 1825 200(池袋) 197(新大久保) 1:315(大久保) 314(東中野) 1:
0
4 2 22 10704 2 1 48
4 1 1 10704 2 11308 915 940 1160(京成曳舟) 1159(押上) 1:1159(押上) 1664(浅草橋) 1:326(浅草橋) 324(御茶ノ水) 2:340(御茶ノ水) 342(新宿) 9:
1 4 2 2 1510 1515 196(新宿) 200(池袋) 1:
:1850 1940 200(池袋) 1160(京成曳舟)
5 2 48 11616 1 1 66
2 1 1 11616 2 10609 858 916 203(駒込) 210(秋葉原) 1:325(秋葉原) 326(浅草橋) 1:
2 5 2 1 1740 1759 326(浅草橋) 325(秋葉原) 1:210(秋葉原) 203(駒込) 1:
0
6 1 60 11615 1 1 21
1 1 1 11615 2 11611 750 745 202(巣鴨) 200(池袋) 1:
1 5 2 1 1830 1840 200(池袋) 202(巣鴨) 1:
0

```

この中から、乗車駅または降車駅が永田町駅であるデータを探す。その経路の情報全体とレコード番号、性別、年齢、拡大率を抜き出す。永田町駅は、

駅コード（駅名）

1611（永田町）

1622（永田町）

1637（永田町）

のいずれかで表記されており、それぞれ有楽町線、半蔵門線、南北線の永田町駅を指す。また、研究対象領域である三叉路を通り得るデータとして、

- ・赤坂見附駅（線は問わず）から有楽町線永田町駅の乗換経路、もしくはその逆経路
- ・赤坂見附駅（線は問わず）から南北線永田町駅の乗換経路、もしくはその逆経路

の4経路が考えられる。よって、乗換時の乗車駅（出発駅または目的駅でない）が赤坂見附駅かつ降車駅が有楽町線永田町駅または南北線永田町駅である、または乗降がその逆であるデータの場合も必要なデータを抜き出した。赤坂見附駅は

1543（赤坂見附）

1560（赤坂見附）

のどちらかで表記されて、それぞれ銀座線、丸ノ内線の赤坂見附駅を指す。

これらのデータを抜き出したデータの一部が表 2.4 である。

表 2.4 H17 三叉路を経由するデータ (一部抜粋)

	レコード番号	拡大率	性別	年齢	時刻(起点)	起点	終点
1	52	28	1	69	930	1622	0
2	52	28	1	69	2305	0	1622
3	80	29	1	41	805	1622	1637
4	80	29	1	41	2325	0	1622
5	102	47	1	71	9999	1622	1543
6	113	16	1	48	737	1622	1611
7	113	16	1	48	1813	1611	1622
8	124	20	1	47	736	1622	1637
9	168	16	1	44	845	1611	0
10	168	16	1	44	1755	0	1611
11	208	42	1	59	852	1611	1622
12	213	14	2	50	2020	0	1611
13	234	34	2	63	845	1637	0
14	234	34	2	63	1007	0	1611
15	234	34	2	63	1706	0	1637

このデータの起点と終点は、各線のホームと改札に繋がる通路口のいずれかである。各線のホームは大都市交通センサスの駅コードを参照し、改札口は0とする。

起点（または終点）の決定方法は、以下の2つである。

1. 永田町駅が出発地点（または目的地）の場合

起点は改札口，終点は乗車ホームとなる。（起点は降車ホーム，終点は改札口）

2. 永田町駅が乗換駅である場合

乗換時に降車ホームが起点，乗車ホームが終点となる。この場合は，どちらかが赤坂見附駅の可能性もある。

上記の方法で起点を定めたとき，起点にいる時刻を時刻（起点）として記録している。詳しくは2.3.2で述べる。

これら三叉路を経由するデータの総データ数は2,951であり，拡大率の合計は125,468である。本研究では，拡大率1を1人として考えるので，表2.4の2行目は，半蔵門線永田町駅ホームを9時半に出発し改札に向かった人が28人いる，ということを示す。

2.3.2 時刻設定

表2.4での時刻は起点に着いた時間であり，決定方法は以下3つである。

1. 目的駅が永田町駅の場合

つまり起点が永田町駅かつ終点が改札口である場合は、大都市交通センサスの降車時刻を起点の時刻とする。

2. 起点が0（改札口）である場合

つまり出発駅が永田町駅である場合は、大都市交通センサスの乗車時刻の5分前を起点の時刻とする。

3. 乗換利用のデータの場合

大都市交通センサスから参照できる時刻は、初乗りの乗車時刻と最終的な降車時刻のみである。よって、乗換駅での乗降車時刻は不明である。そこで、首都圏にある駅を鉄道で行き来したときの所要時間がまとめられたファイルである「駅間走行時間マトリックス」を使用して、起点の時刻を決定する。

レコード番号 80 番の経路を例に挙げる。この経路では、7時20分に東急田園都市線市が尾駅を出発し、永田町駅で半蔵門線から南北線に乗換え、8時28分に南北線溜池山王駅に到着している。駅間走行時間マトリックスより、東急田園都市線市が尾駅から半蔵門線永田町駅の移動時間が45分であるので、7時20分から45分経った8時5分が起点にいる時刻となる。

また、仮に初乗りの乗車時刻が不明で最終的な降車時刻はわかっている場合、上記の例でいうと、半蔵門線永田町駅と南北線溜池山王駅の駅間走行時間を調べ、降車時刻から引いた時刻を起点の時刻とする。

駅間走行時間マトリックスは、首都圏にある2,009駅の駅間の走行時間がまとめられている。表2.5のようになっており、出発駅の列および到着駅の行を読むと2駅間の所要時間がわかる。

(例) 南新宿駅から代々木上原駅の所要時間

南新宿駅の駅番号（大都市交通センサスの駅コードとは別物）は34302、よってE列
代々木上原駅は7行目なので所要時間は5分

表 2.5 駅間走行時間マトリックス（一部抜粋）

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1				1	2	3	4	5	6
2				34301	34302	34303	34304	37219	34306
3	1	34301	新宿	-1	2	3	5	5	9
4	2	34302	南新宿	1	-1	1	3	5	7
5	3	34303	参宮橋	3	1	-1	1	3	5
6	4	34304	代々木八軒	5	3	2	-1	1	3
7	5	37219	代々木上原	7	5	3	1	-1	2
8	6	34306	東北沢	8	6	5	3	1	-1
9	7	34307	下北沢	8	8	6	4	2	1
10	8	34308	世田谷代田	12	10	8	6	4	3
11	9	34309	梅ヶ丘	12	12	10	8	5	5
12	10	34310	豪徳寺	11	13	12	10	6	6
13	11	34311	経堂	11	15	14	12	6	7

時刻については、再検討が必要と考える。ここまでの段階で設定している設定は各ホームへの到着時刻であり、三叉路の出現時刻ではないので修正する必要がある。また、電車から降車した人全員が一斉に出現するわけではないので、時刻起点と時刻終点を定める必要がある。

ここで、2.2.3 で問題として挙げた「赤坂見附駅から乗換える人をどう表現するか。」について考える。赤坂見附駅で降車して乗換える客は、半蔵門線ホームを経由して三叉路に出てくるため、半蔵門線の利用客とまとめる。よって、起点は半蔵門線、時刻は乗換時間を加味して「赤坂見附駅ホーム到着時刻+6分」として、半蔵門線ホームに降車した乗換客であるようにデータを書き換える。逆に、赤坂見附駅への乗換データに関しては、時刻はそのまま、終点を半蔵門線にすることで解決する。

各点での時刻起点と時刻終点の決定方法を表 2.6 にまとめた。

表 2.6 各点での時刻起点と時刻終点の決定方法

起点	時刻起点	時刻終点
改札口	表 2.4 の起点時刻に同じ	時刻起点+4分
有楽町線	表 2.4 の起点時刻+15秒	降車人数によって変動
半蔵門線	表 2.4 の起点時刻+15秒	降車人数によって変動
南北線	表 2.4 の起点時刻+30秒	降車人数によって変動

表 2.7 H17 三叉路を経由するデータ修正版（一部抜粋）

時刻起点(起点)	時刻終点(起点)	起点	終点	人数
50500	50900	1	1611	28
50500	50900	2	1611	6
50600	51000	1	1637	4
50600	51000	2	1637	4
52900	53300	1	1611	15
52900	53300	2	1611	3
53215	53229	1611	1622	75
53230	53244	1611	1622	15
53500	53900	1	1622	5
53500	53900	2	1622	7
53615	53629	1611	1622	75
53630	53644	1611	1622	75
53645	53659	1611	1622	64

そうしてできたデータが表 2.7 である。0 としていた改札口は 2 か所に分かれるため、1, 2 という表記に変わっている。

時刻が不明なデータを除くと 118,436 人のデータが得られた。これは平成 17 年度の数字で、本研究で現状のシミュレーションを行うにあたり最近の利用客データも作成する必要がある。そこで、2.1 節で述べたように、平成 17 年度から平成 30 年度にかけて年度別 1 日平均乗降者人員数が 1.44 倍になったことを参考にす。本研究では、平成 17 年度の三叉路を経由するデータ修正版を 1.44 倍の人数にしたものを、平成 30 年度における三叉路を経由するデータと仮定して使用することにした。

2.4 施設による交通量

2.4.1 改札口

大都市交通センサスから抜き出したデータより、永田町駅での乗降者人数は 56,340 人であった。利用者全体の 48%は改札を利用することから、各出口に適当な人数配分が必要である。2.2.3 で問題として挙げた「降車した客の行き先はどう配分するか。」については、ここで考える。

配分するあたり、実際に駅員に聞き込み調査を行い、その結果を参考にした。

駅員によると、研究対象領域にある改札の利用者が一番多く、永田町の他の改札に関しては、有楽町線端より南北線端のほうが若干数多い利用客がいるとのことであった。これと表 2.8 の各線の利用者数を加味して人数配分を行った結果が、図 2.8 である。

表 2.8 各線の利用者数（人）

	有楽町線	半蔵門線	南北線
出発地・目的地	20780	27063	8497
乗換利用	47422	57080	19632
全利用者	68202	84143	28129

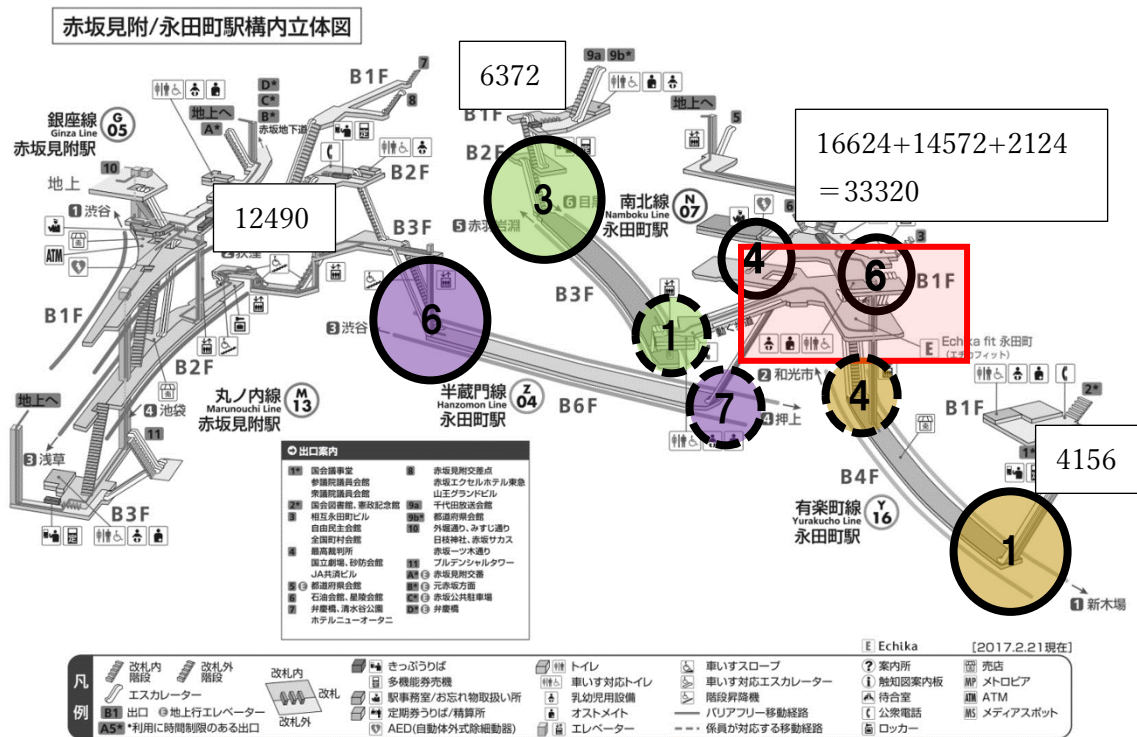


図 2.8 永田町駅、赤坂見附駅構内図

赤枠の領域が、研究対象の三叉路である。

永田町駅利用者からみて、出口として考えられる通路は5つ（実線の○）があるが、三叉路から直接繋がる出口は2つ（実線の○で背景色なし、同じ改札に繋がる）である。三叉路を経由するデータでは、右の改札口を1、左を2と呼ぶことにする。

利用客の出口の選択肢は、各ホーム2つ（背景色が同じ○）のみとし、他のホームを経由して改札口まで到達することはないと仮定する。例えば、目的地が永田町駅で有楽町線から降車した客は新木場方面にある改札または三叉路を経由する改札のどちらかに振り分ける。

図 2.7 における黒枠の四角が、各改札におけるおおよその利用客（人）/日であり、三叉路から繋がる改札が一番混む。これは駅員の観察と一致している。

また、使用するデータは、破線の○から実線の背景色なし○間を動く客（永田町駅が目的地または出発地）と、乗換利用客のデータである。改札口 1, 2 への配分は降車ホームによって変わり、総計が 6 : 4 になるようにする。具体的な配分を表 2.9 に示す。

表 2.9 降車ホームの違いによる各改札口への配分比

降車ホーム	有楽町線	半蔵門線	南北線
改札口 1	17	7	2
改札口 2	3	13	3

2.4.2 エスカレーター・階段

エスカレーターの勾配と速度・揚程（階高）に関する規定は、国土交通省告示[6]により定められており、勾配 30° ~35° の場合、30m/分以下である。よって、エスカレーター1台につき 1.66 人/秒運べるという計算になる。本研究では、時刻を 15 秒単位で区切った。15 秒間に運べる人数はエスカレーター1台につき 25 人とし、実際の稼働本数により流入量を決定した。

研究対象時刻における、各通路からの 15 秒間の流入量を表 2.10 にまとめる。流入に関する構造物とは、三叉路に向かう方向の構造物のみを指している。

表 2.10 研究対象時間における 15 秒間の最大流入量

流出元	流入に関する構造物	最大流入量
改札口 1, 2, 南北線	エスカレーター1機	25*1=25
有楽町線, 半蔵門線	エスカレーター2機	25*2=50

これに基づきデータを整理した。改札口に関しては、15 秒間の出現人数が最大流入量を超えることがなかったため、データの操作は行わなかった。各ホームにおいて、降車人数が最大流入量を超えた場合は、ホームにプールを用意し待機させるようにして、データを平坦にした。

エスカレーターは一定の速度であり、混雑度に関わらず三叉路への流入量は一定となるが、2.2.3 で問題とした「半蔵門線のホームから三叉路に繋がるエスカレーターの混雑は考慮するか。」に関して、上記のようにプールを用意したことでホームの混雑を表現できたことになる。

最大流入量を 50 としたとき、図 2.9 のように最大流入量より多い流入量があるとすると、50 を超えた

分は待ち人数として 50 以下になるように後の時刻に配分していく。7 時 00 分 30 秒の待ち人数は 75，7 時 00 分 45 秒の待ち人数は 25 人である。

また，図 2.10 のように既に待ちがある時刻に新たに降車した人が加わる場合，待ち人数の比をとって，後の時刻に配分していく。7 時 00 分 30 秒のはじめの待ち人数は 75，降車人数は 50 なので，比は 3 : 2 となる。よって，7 時 00 分 30 秒の流入量は，はじめの待ち人数のうち 30，降車人数のうち 20 となる。その後も同じように流入量を決定していく。

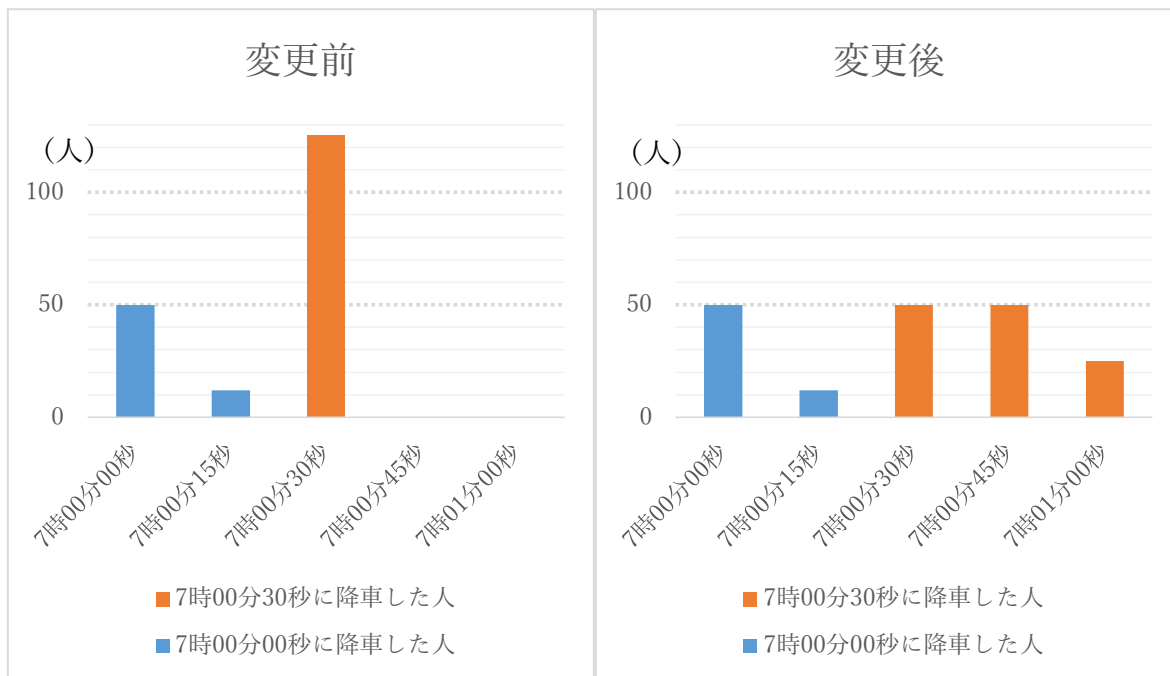


図 2.9 流入量を平坦にする方法

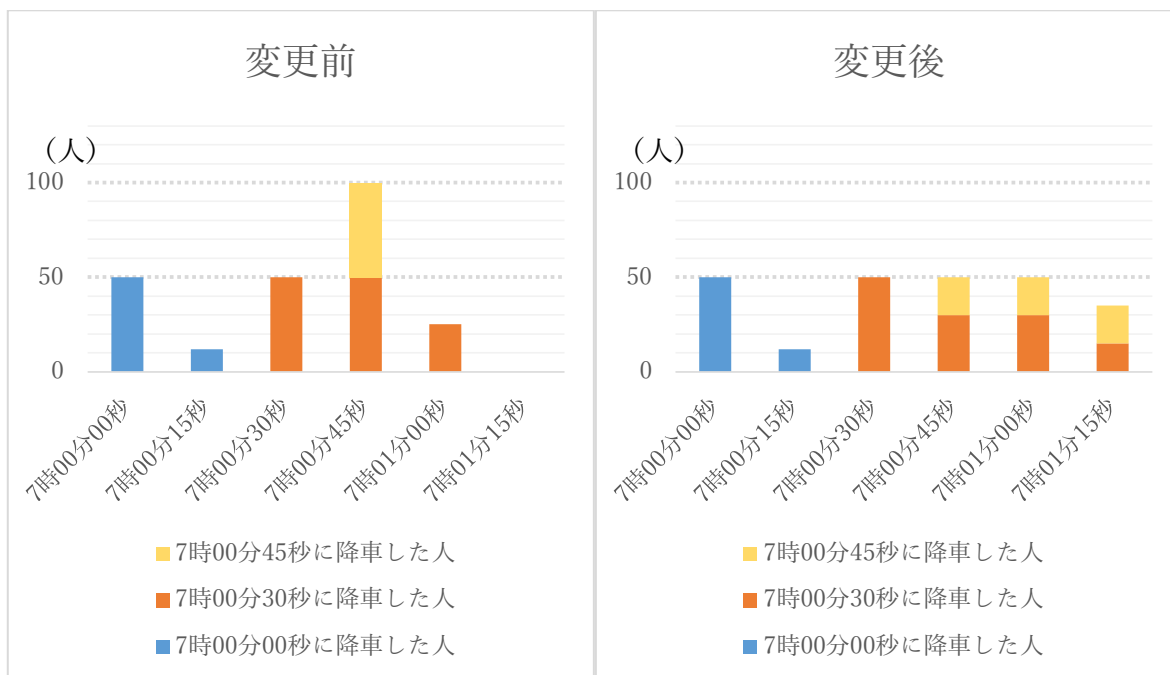


図 2.10 流入量を平坦にする方法

第3章 シミュレーション結果

3.1 使用するシミュレーションソフトについて

本研究では、株式会社 NTT データ数理システムが開発した S^4 （エスクワトロ）Simulation System を使用し、シミュレーションを行う。このソフトは、複雑なモデルを GUI 上で表現しシミュレートを行うことができる、汎用シミュレーションシステムである。離散イベントシミュレーション、連続型シミュレーション（システムダイナミクス）、エージェントシミュレーションを扱う事ができ、今回はエージェントシミュレーションを扱う。

エージェントシミュレーションは、一定のルールに従い自律的に行動するエージェントの振る舞いをシミュレーションする。エージェント同士の相互作用が起こることで、複雑な社会現象を分析・予測することができる。エージェントモデルの種類には、いくつかあるので、以下に例を挙げる。

- ・ネットワークグラフのノード上に配置されているエージェントの状態が変化
- ・ネットワークグラフのノード間をエージェントが移動
- ・連続空間上をエージェントが移動

本研究では、エージェントに始点と終点、経由点を与え、エージェントが最短経路で終点に辿り着くように経路選択をする。他のエージェントから力を受けることで、速度の低下、経路の再探索が行われる。

S^4 （エスクワトロ）Simulation System は、エージェントシミュレーションの枠組みを提供しており、「エージェント部品」、「環境部品」をユーザーが構築することで、エージェントの行動ルールや相互作用、振る舞いをモデル化する。図 3.1 の「SFM エージェント」と「永田町」がそれらを指す。プログラミングの使用言語は Python 言語である。基本画面から操作マニュアルをすぐ開けることもあり、非常に操作しやすいソフトである。

シミュレーション空間上の地図の作成は、壁や障害物、経路地点の設定により行う。外から画像をインポートすることもできる。三叉路の地図（2.2 節で作成）を使用して作成したシミュレーション空間が図 3.2 である。青色で表示された領域は、通過できない壁や障害物を示している。黒丸で示されているのが始点や終点、経由点にあたり、エージェントの出入りや通過の指標となる。経路地点には属性を与えることができ、それぞれの点に対して与えたい属性の属性値を 1 と設定する。

実際にシミュレーションを実行すると、シミュレーション時間を表示するウィンドウと、シミュレーション画面のウィンドウが開く。（図 3.3）

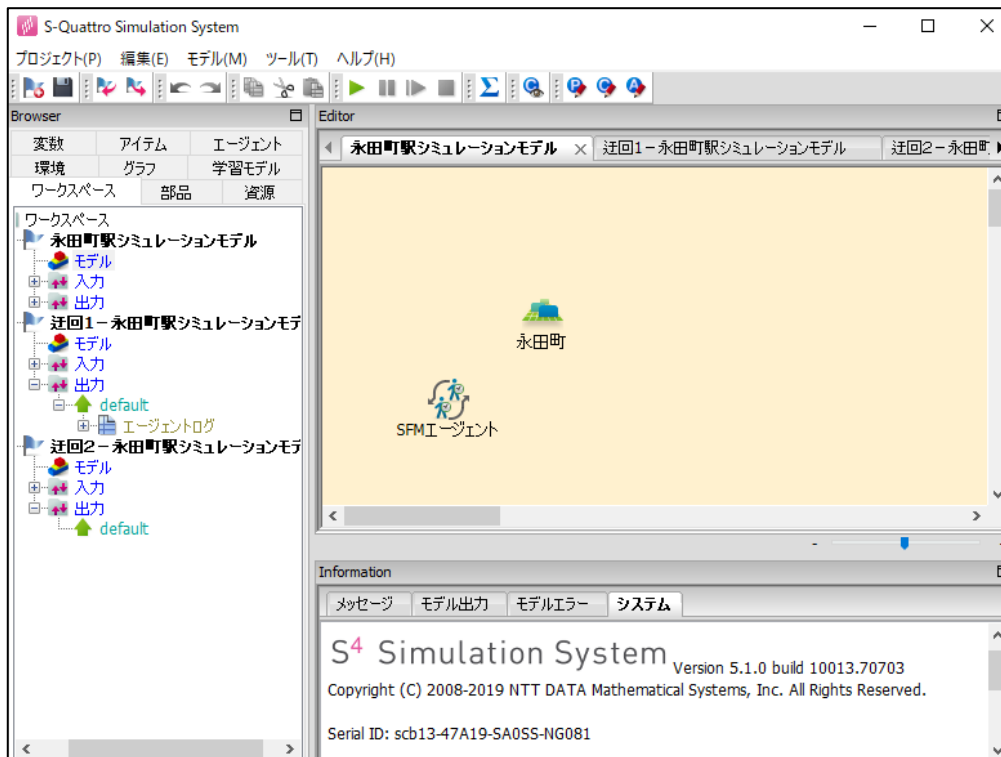


図 3.1 S⁴ (エスクワトロ) Simulation System の基本画面

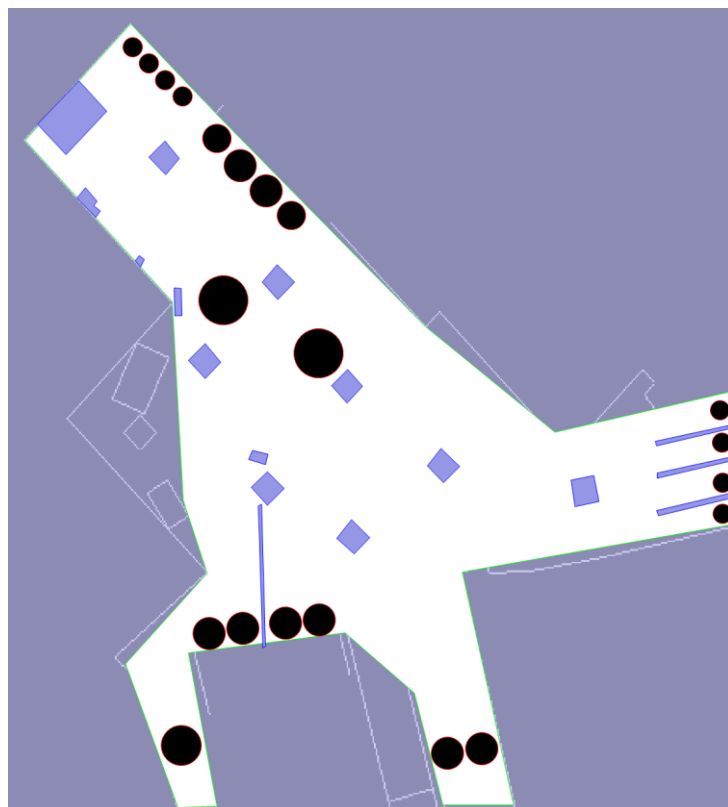


図 3.2 三叉路の地図



図 3.3 シミュレーション画面

3.2 現状の可視化

$S^4Simulation system$ では、ソーシャルフォースモデルを基にしている。

ソーシャルフォースモデルとは、群衆行動の力学ベースモデルのひとつである。各歩行者は質量をもつ質点として表され、平面上で運動する粒子とみなす。

また、目的地を持ち、他の歩行者や障害物から相互に干渉を受けながら、それぞれが運動する対象を表現するモデルである。

質量 m_i をもつ歩行者 i は、以下の運動方程式にしたがう。

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0 \vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + R \left(c, \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW} \right)$$

本研究では、プログラムの他に自分で設定できる値の中で、以下の6点に注目した。

- ・最適速度 (m/s)
- ・最高速度 (m/s)
- ・加速時間 (s)
- ・歩行者半径 (m)
- ・相互作用の強さ (N)
- ・体重 (kg)

エージェントは最適速度になるように行動しており、シミュレーション空間に出て「加速時間」で最適速度に到達する。エージェントの相互作用により、最高速度まで上がることがある。

最適速度の決定方法は、[7]の歩行速度の概要より年齢ごとの平均歩行速度 (m/s) を参考に行う。通勤利用者が多いということを考え、26-50歳の1.47と51-64歳の1.38の平均をとり、1.425と設定した。また、最高速度については、最適速度に対する最高速度の比を最高速度比 k とする。本研究では、[8]を参考に $k=1.2$ とし、最高速度は $1.425 \times k = 1.71$ となる。

加速時間は0.5と設定し、三叉路に流入してきたエージェントは0.5秒で最適速度に到達する。

歩行者半径について考える。歩行者をモデル化する場合、人の体を真上から見た形として、一般的に円や楕円などで表現する。本研究では、歩行者の体を円（人体円）で表現する。仮に、歩行者半径を人体円の半径と同値にすると、歩行者同士の体のふれあいを許すことになり駅構内で衝突が起きることになる。しかし実際は、混雑した電車内では体のふれあいがあったとしても、駅構内では混雑していても人とある程度の距離を保ちぶつからないように歩行するものである。その距離を含めた空間を、パーソナル・スペース（個人空間）と呼ぶ。よって歩行者半径は、パーソナル・スペースの半径とする。[8]を参考に、人体円の半径 R は0.225m、人体円の半径に対するパーソナル・スペースの半径の比 c は1.2、パーソナル・スペースの半径すなわち歩行者半径は0.27mとする。（図3.4）

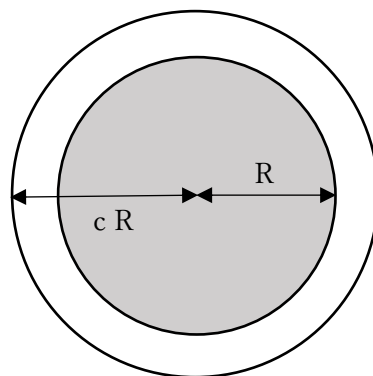


図 3.4 人体円とパーソナル・スペース

相互作用の強さは初期値 (100) から大きくすることで、一番混雑を表現できる数値すなわち移動時

間が長くなる数値を探し、3500N と設定した。体重は、成人男性の平均体重から 60kg とした。

シミュレーションを行うにあたり、改札口の番号の再設定を行う。図 3.5 のように、番号 2 であった改札口を 2, 3 に分割した。半蔵門線から降車してくるエージェンツの中で行き先が改札口 2 であったものは、全て改札口 3 に向かうと再設定した。

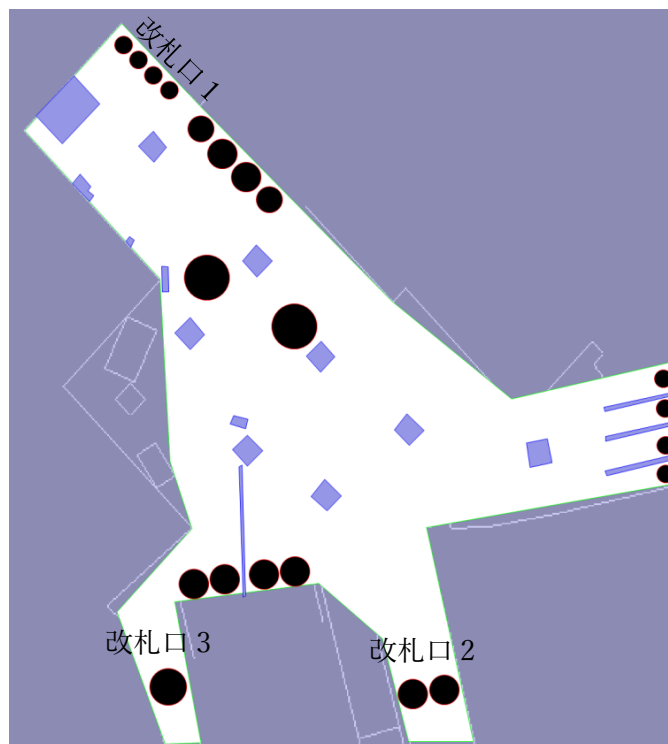


図 3.5 改札口の番号

また、エージェンツの色を行き先によって指定した。実際のシミュレーション画面（図 3.3）に対応する色について表 3.1 にまとめる。

表 3.1 エージェンツの色

行き先	色
改 札 口 1	cyan
改 札 口 2	yellow
改 札 口 3	
有 楽 町 線	red
半 蔵 門 線	blue
南 北 線	green

ここで、平成 17 年度と平成 30 年度の系内人数を比較する。（図 3.6）

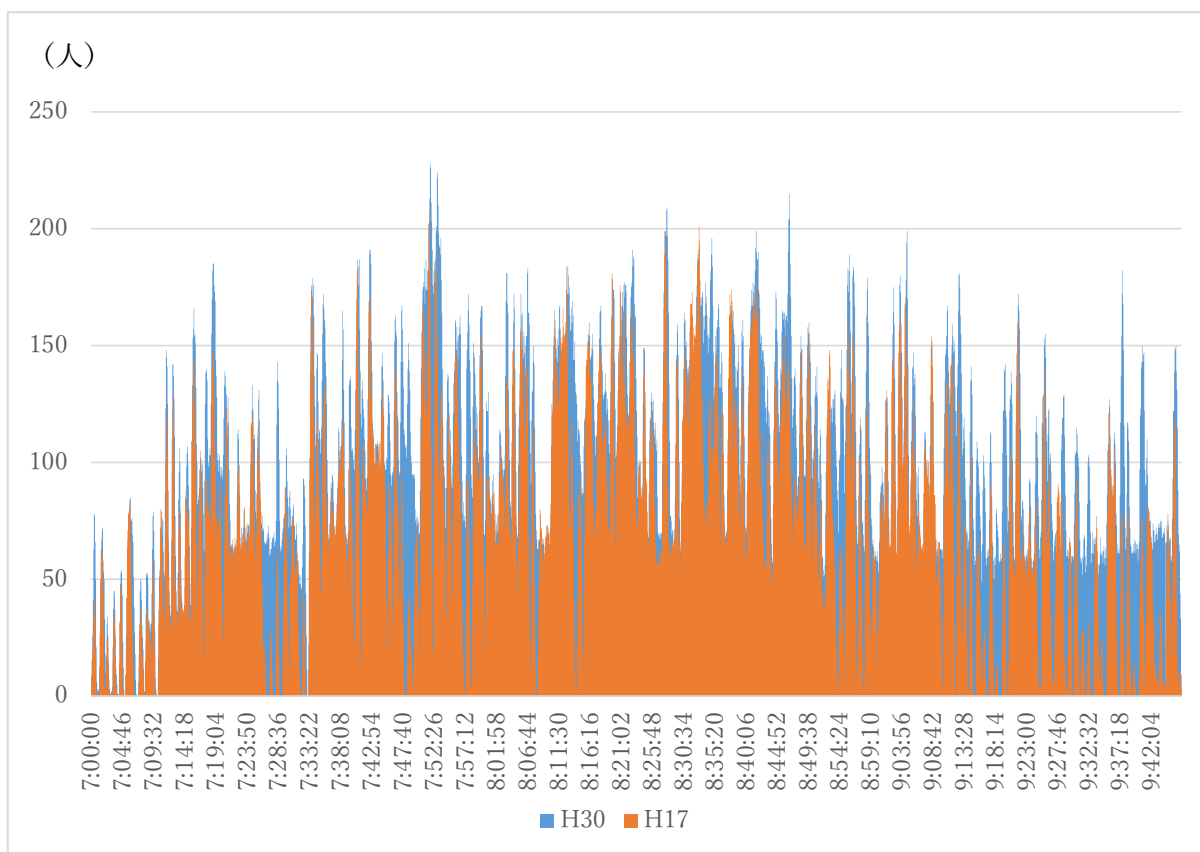


図 3.6 系内人数

8時台が常に混雑していること、平成 17 年度は人がいない時刻もあるが平成 30 年度は常に多くの客が三叉路を通過していることがわかる。1 秒間における系内人数の最大値は、平成 17 年度が 7 時 51 分 44 秒の 208 人、平成 30 年度が 7 時 51 分 52 秒の 228 人であった。

次に、各起点から各終点までの移動時間を比較していく。(図 3.7, 3.8, 3.9) 朝の時間帯は、改札口からの流入量が少ないため、今回は各ホームからの流入量をみる。系内人数に比例して移動時間が長くなっていることがわかる。乗換時間に注目してみると、特に有楽町線から南北線の乗換、半蔵門線から南北線の乗換の移動時間のばらつきが大きく、系内人数が多い時飛びぬけて移動時間がかかっているように見える。これは、歩行者動線が他の歩行者動線と重なっていることが原因だと考える。

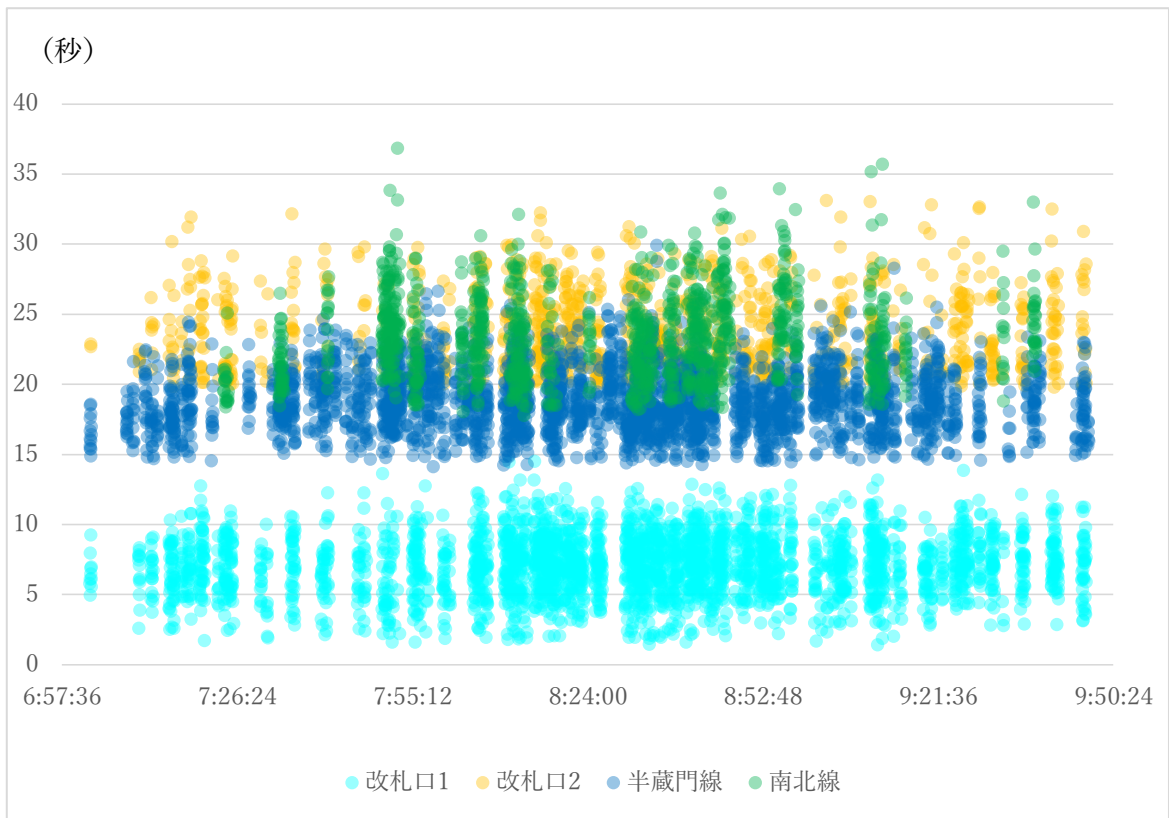


図 3.7 有楽町線を起点としたエージェントの移動時間

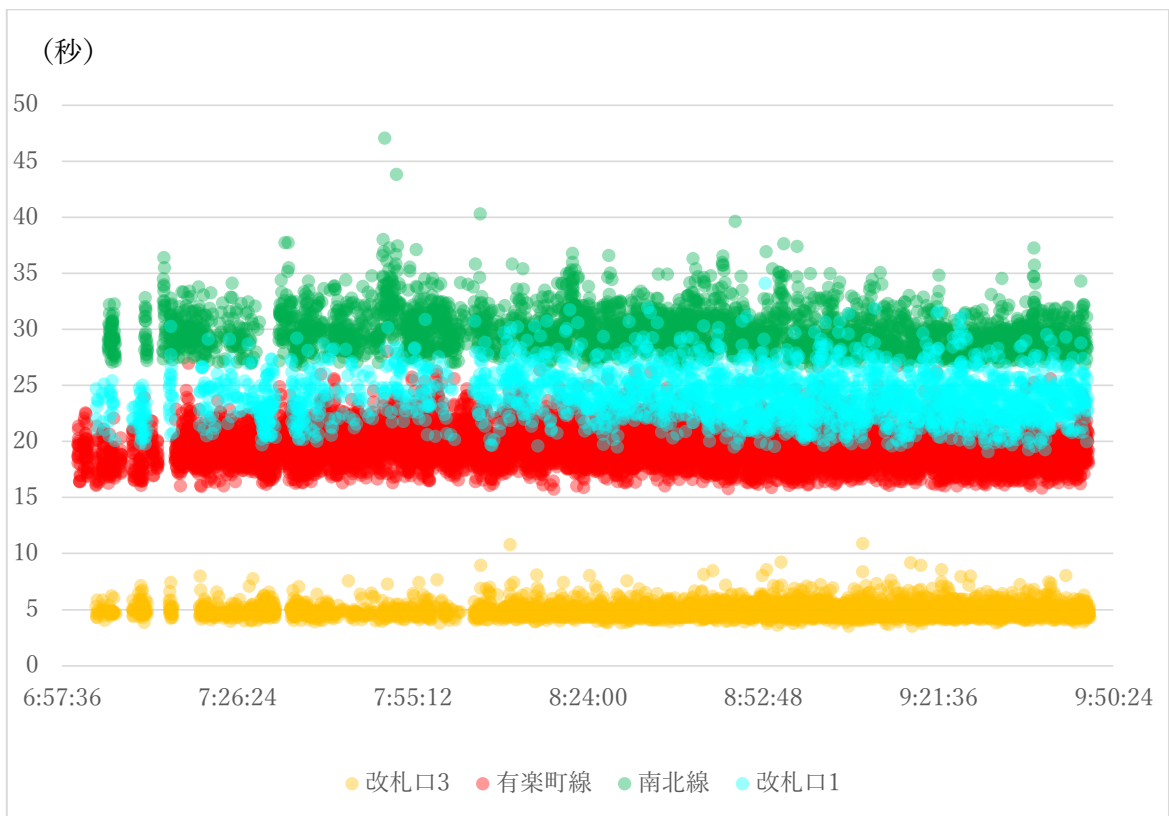


図 3.8 半蔵門線を起点としたエージェントの移動時間

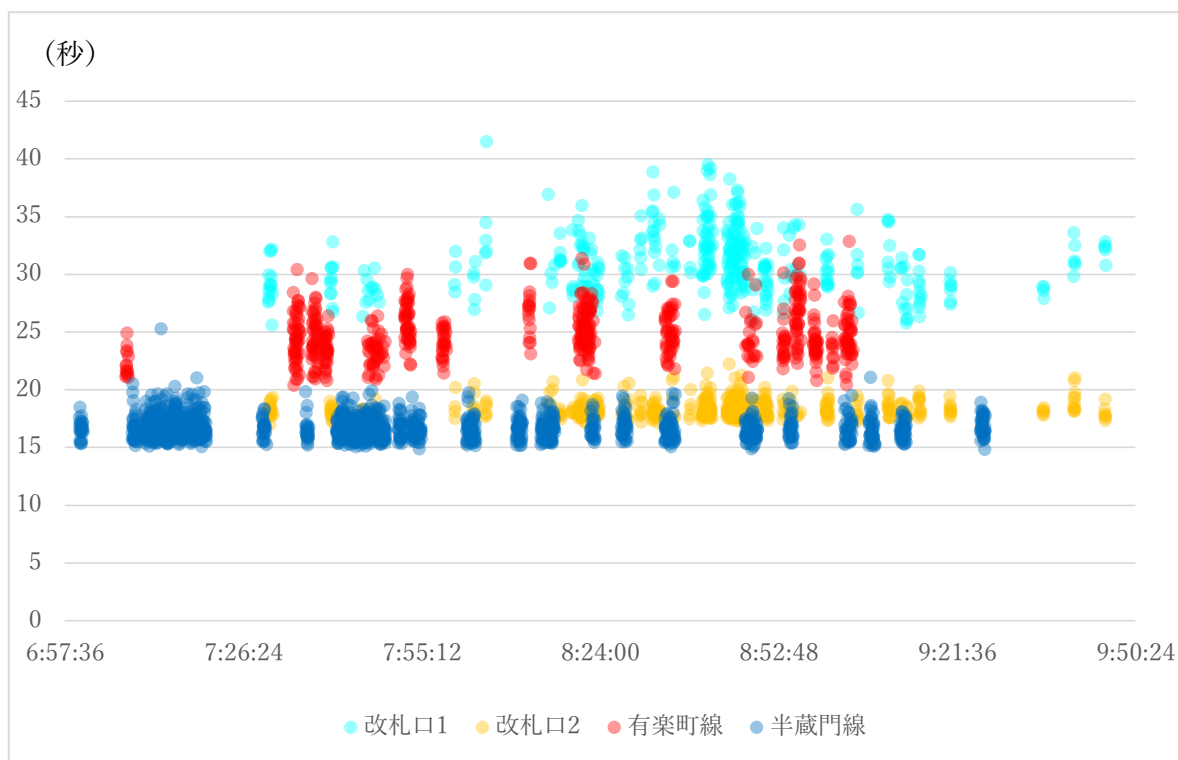


図 3.9 南北線を起点としたエージェントの移動時間

3.3 迂回経路の提案と効果

現在の誘導方法は図 3.10 に示すように、乗換時の歩行者の動線が交錯している。色が橙である矢印は有楽町線から他路線へ、黒は半蔵門線から他路線へ、緑は南北線から他路線への乗換時に通る動線である。特に、有楽町線から半蔵門線の乗換動線と、半蔵門線から南北線の乗換動線の交差部分が、スムーズな移動の妨げになっていると感じる。

そこで、動線の交錯を減らすため、半蔵門線から南北線へ乗換える客を遠回りさせた迂回経路 1, 2 (図 3.11, 3.12) を考えた。これらは現在の構造上の制約条件の下で、交錯しないように考えた経路である。迂回経路 1 は動く歩道を考慮し動線の交錯を減らした経路、迂回経路 2 は動く歩道は考えず動線の交錯をより減らすような経路となっている。

半蔵門線から南北線へ乗換える客が遠回りするときに通る経路はシミュレーション空間外のため、半蔵門線から改札口 3 に入り、半蔵門線を出た 1 分後に改札口 2 から出て南北線に向かうと仮定する。

この 2 つの経路で歩行者が歩いた時, 3.2 節に比べて移動時間のばらつきが少なくなるのか見ていく。

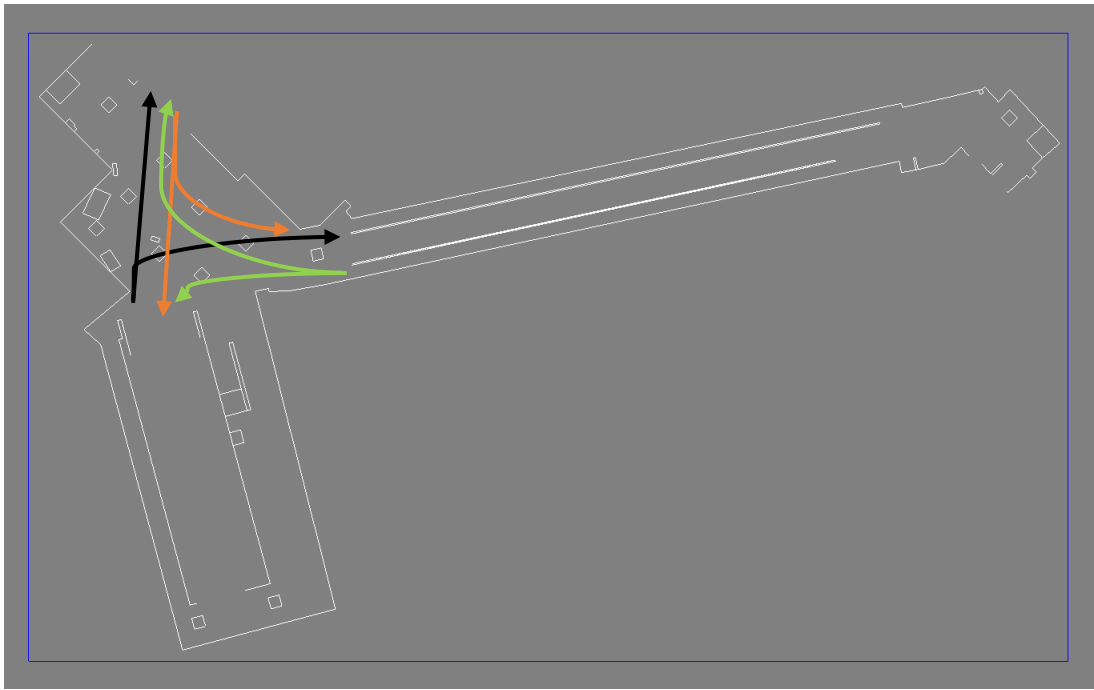


図 3.10 既存経路

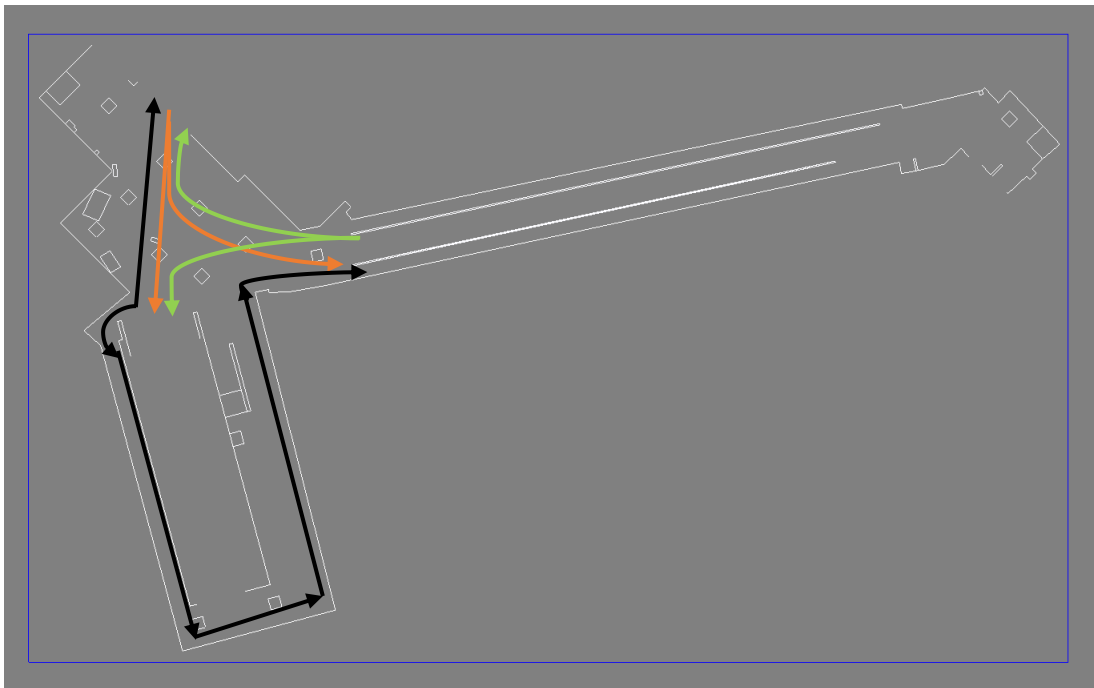


図 3.11 迂回経路 1

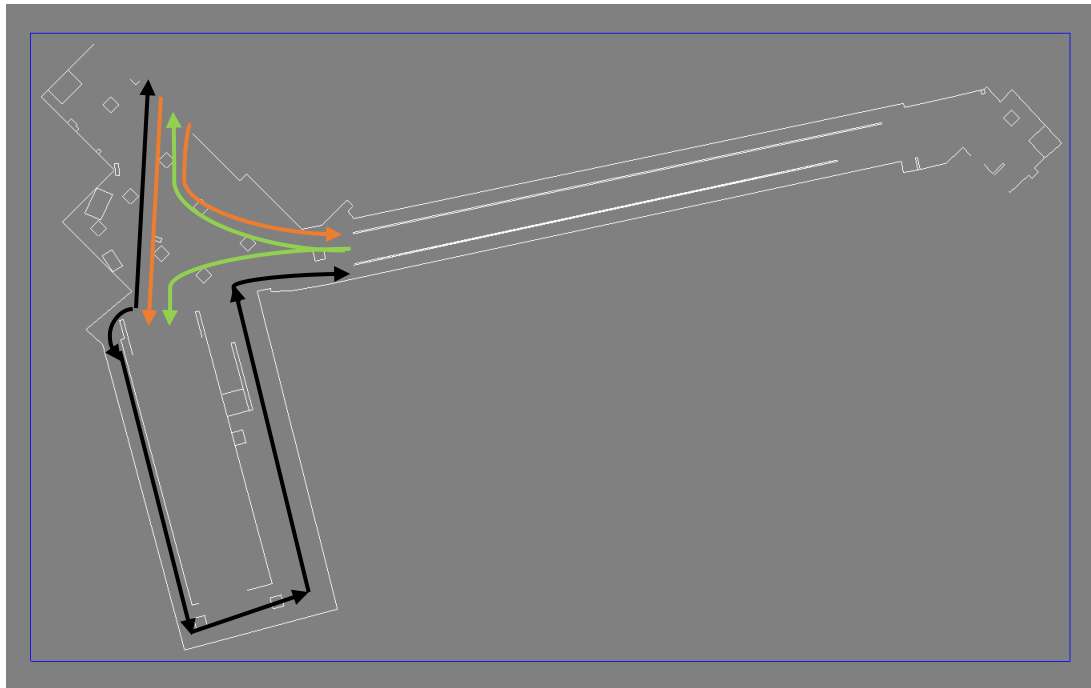


図 3.12 迂回経路 2

以下に、各乗換経路において各経路の移動時間の最大値と最小値の差、平均値をまとめる。(表 3.2 から 3.7)

表 3.2 有楽町線から半蔵門線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	16.6	19.4
迂回経路 1	16.8	19.8
迂回経路 2	15.5	19.3

表 3.3 有楽町線から南北線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	19.8	24.0
迂回経路 1	19.2	24.9
迂回経路 2	14.7	23.7

表 3.4 半蔵門線から有楽町線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	15.9	20.0
迂回経路 1	15.2	19.7
迂回経路 2	14.3	20.1

表 3.5 半蔵門線から南北線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	19.7	30.4
迂回経路 1	10.4	65.2
迂回経路 2	7.6	65.2

表 3.6 南北線から有楽町線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	16.3	25.2
迂回経路 1	14.7	23.3
迂回経路 2	16.4	24.5

表 3.7 南北線から半蔵門線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
既存経路	16.5	16.9
迂回経路 1	12.0	18.2
迂回経路 2	12.3	17.8

迂回経路の提案により、半蔵門線から南北線の乗換時間のばらつきが減った。迂回の移動時間がかなり長くなったのは現実的ではないが、変動が小さくなっているため交錯は避けることが出来ている。

迂回経路は、歩行者動線の重なりを少なくすることが目的であった。特に、有楽町線から半蔵門線、半蔵門線から南北線の乗換経路に多くの効果があると予測していた。しかし、その2経路以外の経路にも効果が見られた。

もし大きな改装が出来るのであれば、半蔵門線から南北線の乗換経路が短くなるようなショートカットを作るのが望ましい。現在の構造上の制約条件の下での解（交錯の少ない経路）を探すのは、時間が足りなかった。

第4章 東京オリンピック開催時の地下鉄永田町駅

4.1 データ作成手順

2020年夏の東京オリンピック開催時における永田町駅の混雑を予測する。2.3節で作成したデータを通常客とし、その上にオリンピック客のデータをのせる。

図4.1を見ると、永田町駅（赤丸）付近には、オリンピック競技場（黒丸）が多くある。青丸は永田町駅または赤坂見附駅から電車1本で行ける駅の一部であり、田口教授が作成したデータによると、1日に約13,500人のオリンピック客が永田町駅を通る。（図4.2）

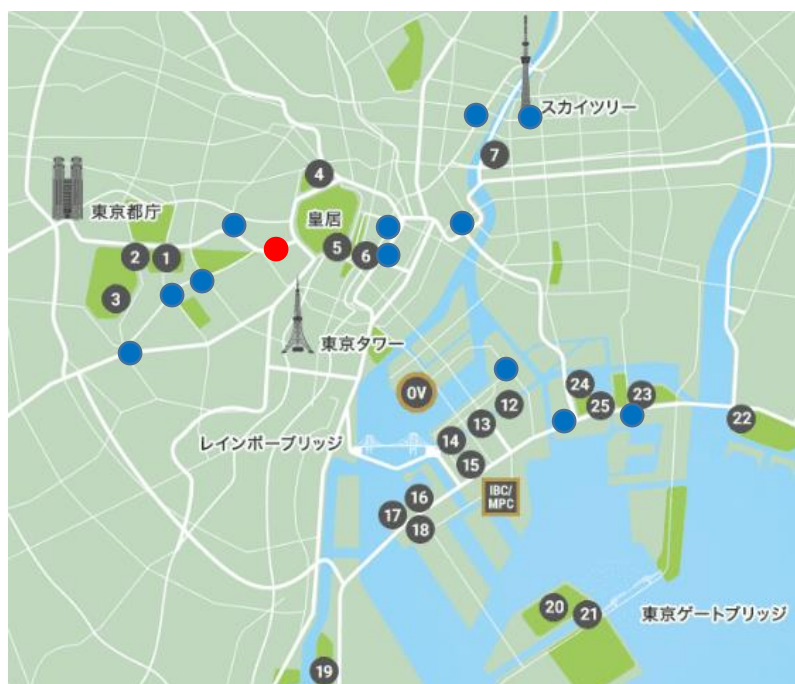


図 4.1 東京オリンピック競技会場マップ[9]

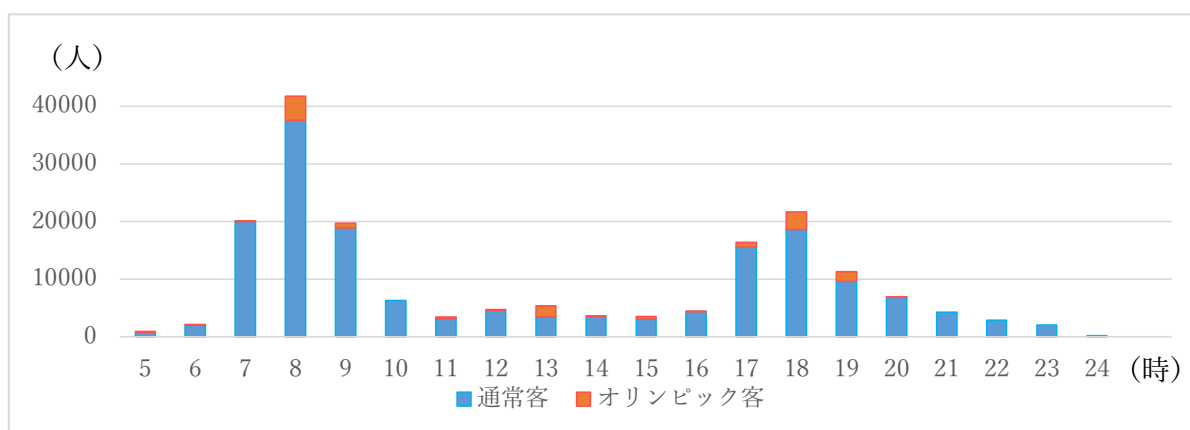


図 4.2 1日の永田町駅利用客数

通勤ラッシュ時に、オリンピック客もピークを迎え、大混雑が予想される。

4.2 シミュレーション結果

8時25分からの20分間に三叉路の系内人数が増え、通常時の1.5倍近くになることが図4.3, 4.4からわかる。これは、1.1節で述べた田口教授の混雑予想と同じデータをしたが、モデルが異なるため結果も違う数値が出た。しかし、通常よりも混雑がかなり大きくなるということは、共通している。

この混雑の移動時間への影響を調べる。通常時に全経路の中で、特に移動時間のばらつきがあった有楽町線から南北線の乗換時間に注目し図4.5, 4.6にまとめる。横軸が時刻、縦軸が移動時間である。

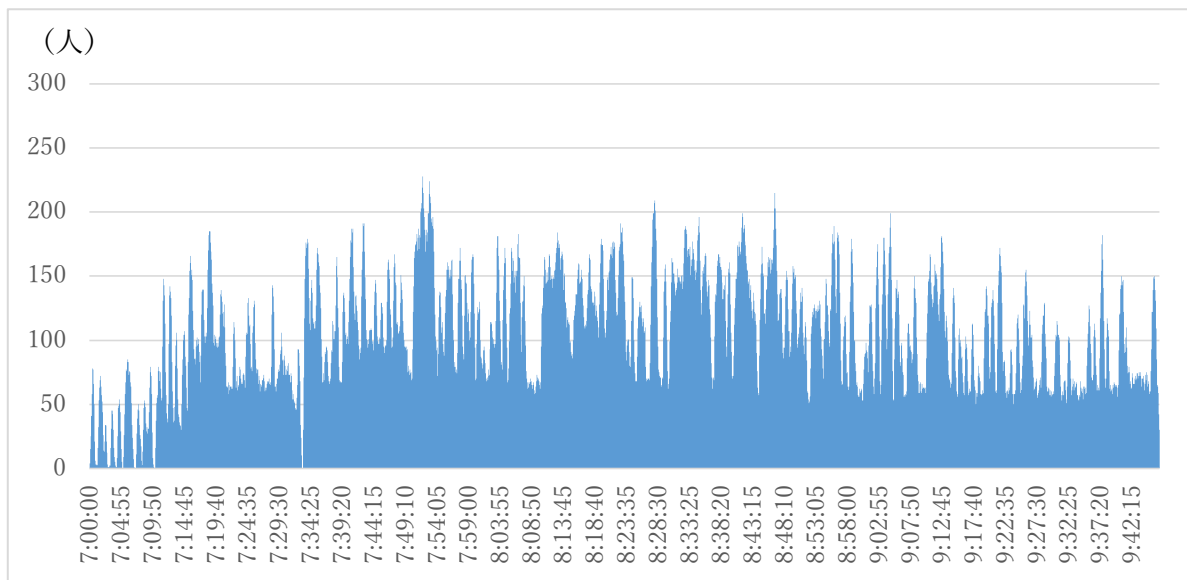


図 4.3 通常時の系内人数

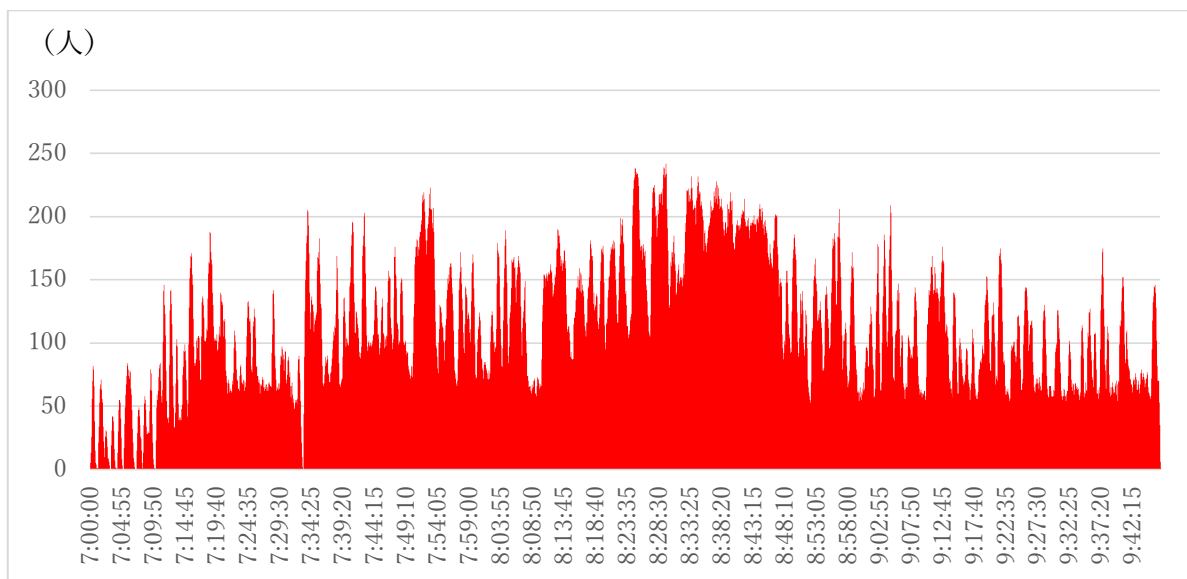


図 4.4 オリンピック開催時の系内人数

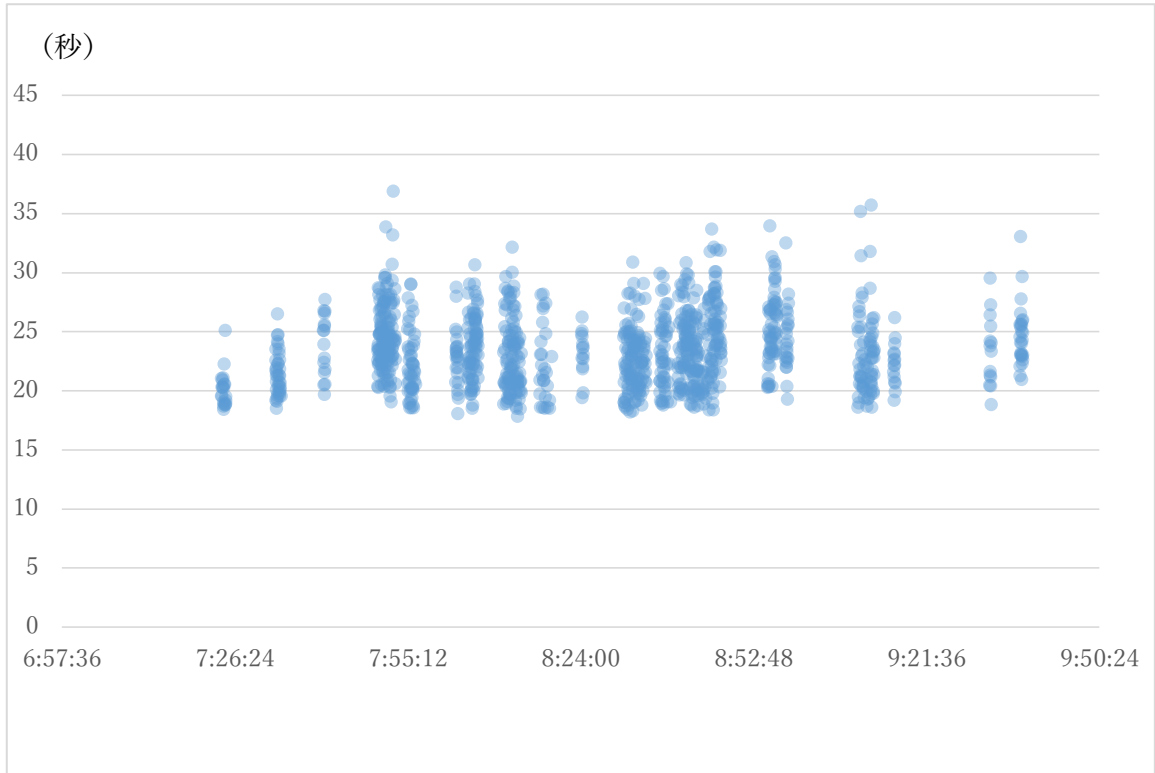


図 4.5 有楽町線から南北線の乗換時間（通常時）

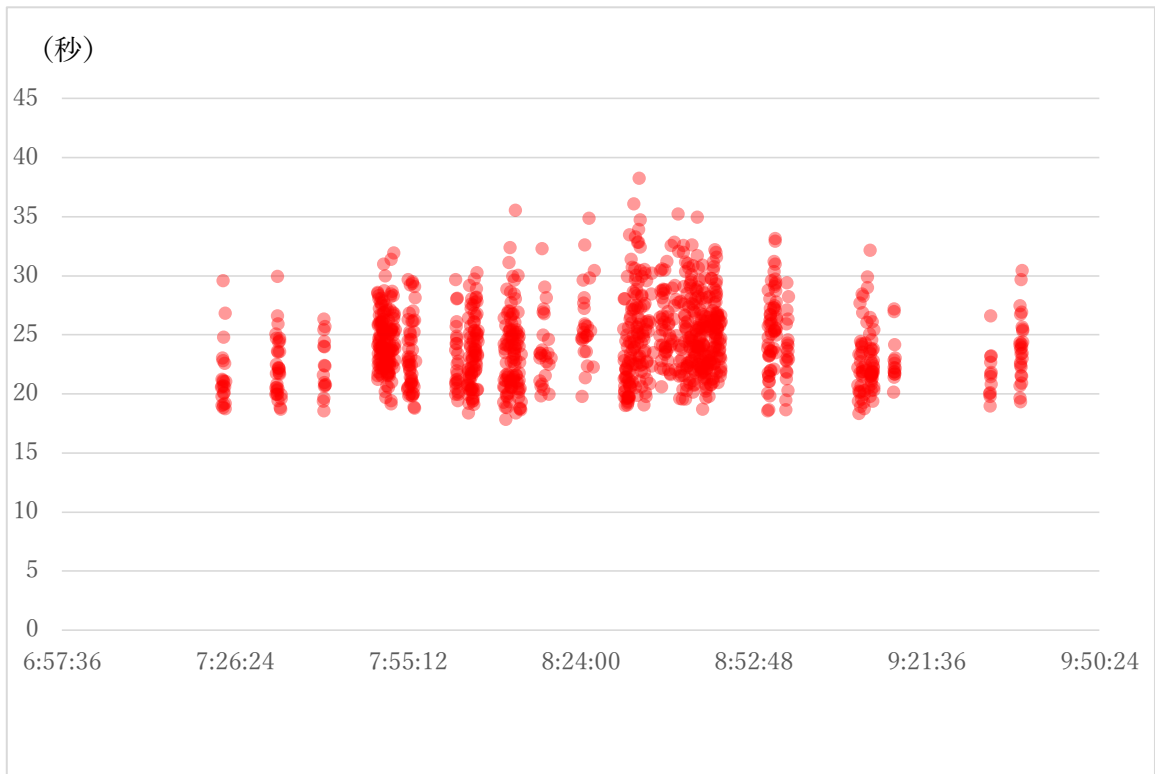


図 4.6 有楽町線から南北線の乗換時間（オリンピック時）

乗換時間についても、8時25分から8時45分の間は分散が大きいことがわかる。

図 4.7 で青いエージェントに注目する。このエージェントは有楽町線から半蔵門線の乗換をしている。通常時もオリンピック時も同じくらいの時間に降車したエージェントだと予測されるが、通常時は8時35分10秒の時点で最後尾の人が見えている一方で、オリンピック時はまだ有楽町線のホームから出現していることがわかる。電車1本あたりの利用客の増加により系内人数の増加、移動時間の増加が見てとれる。

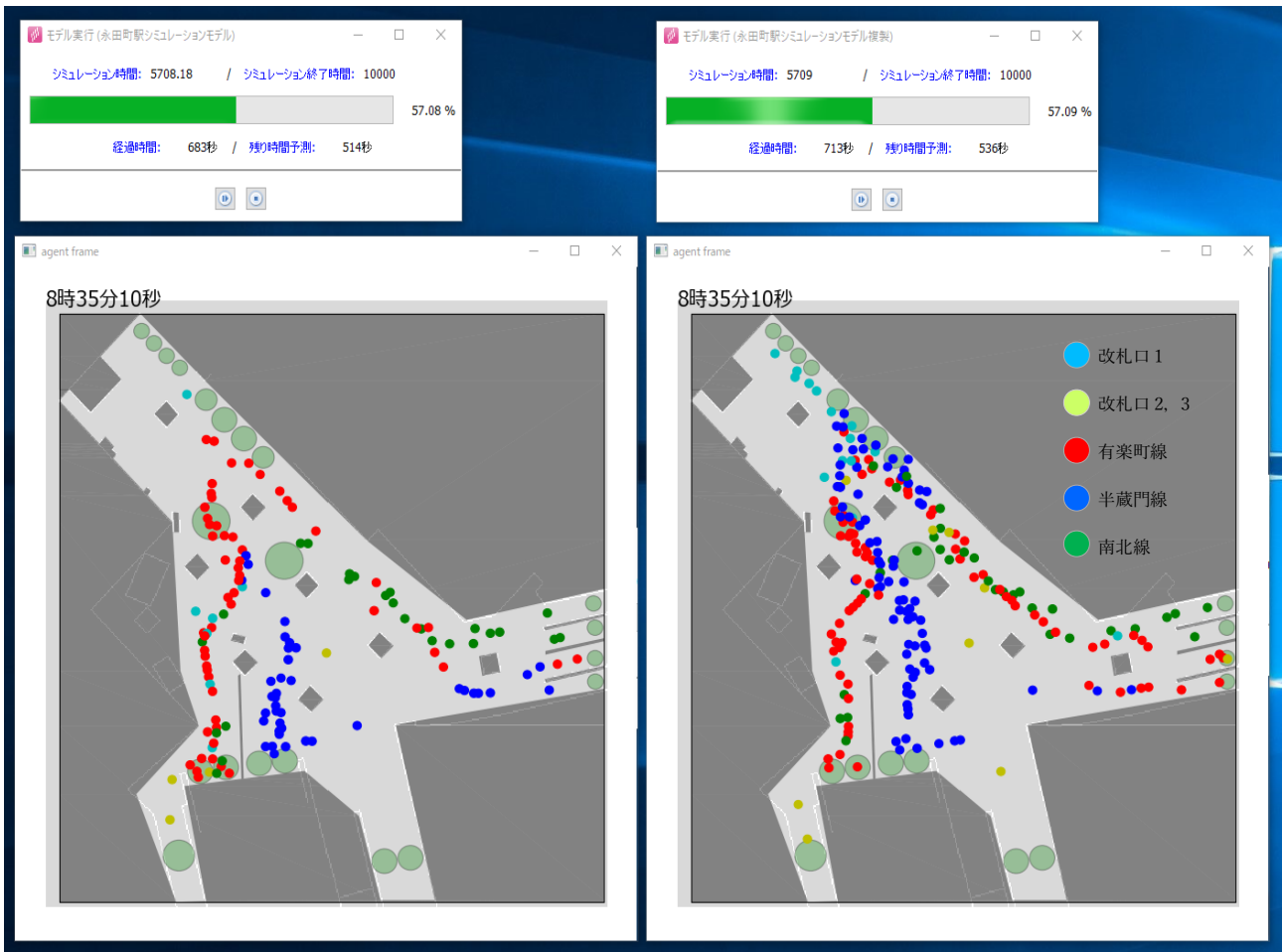


図 4.7 通常時 (左) とオリンピック時 (右) の三叉路

オリンピック時においては、特に利用客数が多い8時25分から8時45分の間注目する。この時間での各経路における移動時間の最大値と最小値の差、平均値を通常時と比較し、表 4.1 から 4.6 にまとめる。

表 4.1 有楽町線から半蔵門線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	16.1	19.4
オリンピック時	16.4	21.3

表 4.2 有楽町線から南北線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	15.9	23.3
オリンピック時	19.2	25.8

表 4.3 半蔵門線から有楽町線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	11.1	20.4
オリンピック時	17.0	21.8

表 4.4 半蔵門線から南北線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	10.4	30.5
オリンピック時	14.7	32.8

表 4.5 南北線から有楽町線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	9.8	25.5
オリンピック時	19.9	26.9

表 4.6 南北線から半蔵門線の乗換時間

	最大値と最小値の差	平均値
通常時	8.1	16.9
オリンピック時	5.1	16.7

混雑に伴い、通常時よりもオリンピック時における移動時間の平均値が長い乗換経路が多い。しかしその中で、南北線から半蔵門線の乗換のみ移動時間の平均値に変化がなかった。これは既存経路における南北線から半蔵門線の乗換経路は、他の歩行者動線に比べて重なる動線が少ないことが関係していると考えられる。この乗換経路と交錯する経路は、有楽町線から改札口2への経路、改札口2から各線のホームへ向かう経路のみであり、その2経路を通る客自体が他の経路に比べて少ない。

一方で、半蔵門線から南北線の乗換時間は、平均値が長くなった。これは有楽町線から半蔵門線の乗換経路と重なること、各経路の利用客が大幅に増加していることから、予測通りであった。

第5章 結論

5.1 まとめ

本研究では、利用客が多く混雑している永田町駅構内における人流シミュレーションを行い、混雑を視覚的に予測し分析を行った。現状の把握だけでなく、混雑緩和につながる新たな誘導方法の提案を試み、東京オリンピック時の予想利用客のデータも使用した。

永田町駅のおおまかな構造、利用客の数や系統、駅周辺の建物を知るために、東京都統計年鑑や大都市交通センサスを使いデータを収集した。また、自ら現地に赴き、駅構内地図や構造物、障害物の把握をし、MicroAVSを使用して地図データの構築を行った。大都市交通センサスと駅走行間距離マトリックスを照らし合わせ、施設による交通量を決定することで、乗客データを作成した。

S⁴ Simulation System を使い、永田町駅構内の三叉路における人流シミュレーションを行った。最適速度や歩行者半径は参考文献をもとに決定し、より視覚的に状況をとらえやすくするために、エージェントの色の設定やシミュレーション時間の表示を行った。エージェントの起点や終点、移動時間のログをとり、各点と移動時間の関係をみた。出現時刻や退場時刻のログから、系内人数を数えた。これらから、移動時間と系内人数の関係がわかった。

現状のシミュレーション結果を基に、迂回経路の提案を行い効果的な経路であるか判断した。結果として、少しではあるが移動時間が安定した。

東京オリンピック開催時の地下鉄永田町駅のシミュレーションも行い、駅構内が通常時の何倍もの人が三叉路を通ることが確認でき（図 4.3, 4.4）、移動時間にも影響した。

5.2 今後の課題

今後の課題として、以下の項目があげられる。

・流入量について

2章で述べたように、電車がホームに着いてから一定の時間が経ったのち、15秒間にエスカレーターが運べる最大人数に基づき、流入量を決定した。しかし本来は、電車から降りてくる人は不均一である。混雑時は、まずエスカレーターが運べる最大人数以下の人数の人が早めに三叉路に出現し、一定時間が経過すると最大人数で流れてくる。また、混雑していないときは、常に少人数が不均一に三叉路に出現してくるため、系内人数が0になることはかなり稀な状況だと考えられる。

・流出量について

シミュレーションのうえでは、流入量の最大値は決定したが、流出量を絞ることができなかったため、渋滞を表現できなかった。これを表現することができれば、移動時間にさらなる変化が生まれたと考える。

・エージェントの動き方について

エージェントが前のエージェントについていく（空気を読んで行動する）ことが可能になれば、迂回

経路がもっと効果的になるのではないかと考える。3章、4章で歩行者動線の交差を減らすように迂回経路を作成した。しかし、各通路口の属性は出現地点、退場地点の二つでしか設定されていなかったため、実際は図の矢印のような動線ではなく、入り乱れた動線になっていた。

- ・歩行速度について

本研究では、参考文献に基づいて歩行者速度を決定した。実際に永田町駅構内での歩行速度や移動時間を測り、それに基づいて歩行者の最適速度や最高速度を設定すれば、エージェントがさらに現実に近い動きをする。相互作用の強さの値についてもさらなる検討が必要である。

また、オリンピック利用者は永田町駅に慣れておらず、通路の選択に時間がかかることや荷物が多いことが予想される。よって、通勤利用者に比べて歩行速度は遅く、歩行者半径は大きく設定することで、本研究よりも現実的な混雑が予測できると考える。

- ・経由地点について

半蔵門線から有楽町線、南北線に向かうエージェントのために、経由点を定めた。この点の位置を変えることで、移動時間も変化し現実近づけることができると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、中央大学工学部 田口 東教授に多大なるご指導、ご助言を頂きました。本研究の成果としてこのような論文の形にまとめることができたのは、田口 東教授の熱心で適切なご指導によるものです。深く感謝いたします。

また、シミュレーションについてご指導、貴重なご助言を頂いた株式会社 NTT データ数理システムの嶋田 佳明氏、山本 晃成氏には、大変お世話になりました。心から感謝いたします。

多くの刺激や示唆を与えてくださった、土中 哲秀助教授、数理モデル研究室のメンバーにも感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 東京地下鉄株式会社, “東京メトロ,” (オンライン), 入手先<<https://www.tokyometro.jp/station/nagatacho/yardmap/>>, 2019.
- [2] 関東交通広告協議会, “レポート,” (オンライン), 入手先<<https://www.train-media.net/report.html>>, 2019.
- [3] 運輸政策研究機構, 平成 17 年大都市交通センサス, 財団法人 運輸政策研究機構, 東京, 2007.
- [4] 東京都総務局統計部, “東京都統計年鑑,” (オンライン), 入手先<<https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tnenkan/tn-index.htm>>, 2019.
- [5] 千代田区役所, “行政基礎資料集,” (オンライン), 入手先<<https://www.city.chiyoda.lg.jp/koho/kuse/toke/kisotoke/index.html>>, 2019.
- [6] 国土交通省告示, “特殊な構造又は使用形態のエレベーター及びエスカレーターの構造方法を定める件”, (オンライン), 入手先<<http://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/pdf/201703/00006470.pdf>>, 2000.
- [7] 兼田敏之 (編者代表), 構造計画研究所創造工学部, 名古屋工業大学兼田研究室 (著者): artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション: 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで. 有限会社書籍工房早山, 東京, 2010.
- [8] 阿久澤あずみ: 駅構内における 群集歩行シミュレーションモデルの研究. 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士論文, 2006.
- [9] 東京都オリンピック・パラリンピック準備局, “競技会場マップ (部分拡大図),” (オンライン), 入手先<https://www.2020games.metro.tokyo.lg.jp/taikaijyunbi/taikai/map/detail_map/index.html>, 2020.