

## 国宝松本城の震災時における観光客の避難誘導計画

Proposal of Evacuation Plan at the Time of Earthquake for  
Visitors in Matsumoto Castle as a Japanese National Treasure

大窪健之<sup>1</sup>・紺谷渉<sup>2</sup>・金度源<sup>3</sup>・林倫子<sup>4</sup>

Takeyuki Okubo, Wataru Kontani, Dowon Kim and Michiko Hayashi

<sup>1</sup>立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

<sup>2</sup>自治体職員 石川県庁 (〒920-8580 石川県金沢市鞍月1-1)

Officer, Ishikawa Prefectural Government, Kanazawa City

<sup>3</sup>立命館大学准教授 衣笠総合研究機構 歴史都市防災研究所 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Associate Professor, Kinugasa Research Organization, Ritsumeikan University

<sup>4</sup>関西大学助教 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Assistant Professor, Dept. of Civil, Environmental and Applied System Engineering, Kansai University

Matsumoto Castle is designated as a Japanese National Treasure, and about 700,000 tourists visit there in every year. There is no detailed evacuation plan in Matsumoto Castle until now, so this paper aims to develop adequate evacuation plan in the event of a serious disaster. The unique spacial structure in Matsumoto Castle is complicated with plural buildings and stairs, and there are 6 of complexed type castles in the 12 of original wooden castles in Japan. Therefore, in this study, we developed simulation model for consideration about simultaneously evacuation in the event such as an earthquake. We utilize the cellular automaton type multi-agent simulation software that can explain the interaction of peoples in complexed structure of building. This paper aims to find the rational way of operation for leading visitors in the scene of maximum crowded situation.

**Keywords :** Matsumoto Castle, multi-agent simulation model, evacuation plan, safety for visitors, disaster mitigation for cultural heritage

### 1. はじめに

長野県松本市に位置する松本城は、安土桃山時代末期-江戸時代初期に建造された天守を有する日本で唯一現存する平城五重六階の城郭建築であり、戦後昭和25年からは5年の歳月をかけて、解体修理工事が実施され、その間、昭和27年3月に文化財保護法により国宝に指定された。城跡は国の史跡に指定されており、都市公園として人々の憩いの場となっている日本のみならず世界に誇る文化遺産である。この先人の尽力によって守られてきた松本城の保存管理を万全なものとすると同時に、文化財の保存と活用の円滑な調整を図ることが重要視されている。しかし、保存管理の現状として松本城天守は昭和30年10月に解体修理工事後も必要の都度維持修理工事を重ね、概ね健全な状態を維持しているが、年間数十万人に及ぶ観覧者対策として、災害等の際の避難誘導方法の検討が急務となっている。火災対策としては、外部は土壁漆喰で木部を塗り、屋根は本瓦であるため外部からの延焼に対しては一定程度の防火性能を持っている。他方、内部からの出火要因としては火気の持ち込み、漏電等による電気火災が考えられるが、観覧者には火気使用禁止場所及び喫煙場所を明示しており、内部からの出火防止に細心の注意を払っている。そのため本研究では、特に全員が一

斉に避難を開始する事態となる震災時を想定し、エージェント型避難シミュレーションを用いることによって、観光客の迅速な避難が確保できるような避難経路の検討を行うことを目的とする。

## 2. 避難シミュレーションモデルの構築

### (1) シミュレーションに用いたソフトウェアについて

本研究の避難シミュレーションには、複雑な構造をもつ建物内において多くの人の避難や動作をシミュレートし、非常時の人々の行動を評価する必要から、エージェント型シミュレーションシステム (building EXODUS) を使用した。セルオートマトン法では、系を構成する要素間の相互作用から系全体の挙動を表現でき、単純なルールの下でも複雑な様相を創発する解析手法<sup>1)</sup> であるため、本研究において実態に近い混雑状況を再現できると考えて採用した。本システムでは図1のように個人の専有面積を50cm×50cmのノード (正方形) でモデル化し、アークと呼ばれる線で結んで人の移動可能方向を表現している。人はアークに沿って移動するが、1つのノードには同時に1人しか存在できないため、年齢や階段などによる移動速度の差で波及的に発生する渋滞等を再現できる。人はあらかじめ指定した出口を目指して移動し、誘導しない限り、混雑しても自律的な判断で動的に出口を変更することはしない設定とした。

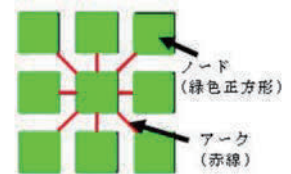


図1 空間格子の概念図

### (2) 避難モデリング対象物の概要

本丸の南西に位置する天守は本丸に現存する唯一の木造建築遺構である。天守を中心に、北に渡櫓によって乾小天守、南東に辰巳附櫓によって月見櫓を繋いでいる。天守は五重六階、乾小天守は三重四階、渡櫓・辰巳附櫓は二重二階、月見櫓は一重一階地下一階附である。天守は渡櫓に入口、月見櫓に出口を持つ。天守一階の北は渡櫓・乾小天守二階に、南東は辰巳附櫓・月見櫓の一階に接続している。天守二階の南東は辰巳附櫓二階と接続している。天守は雁行形に配された建物群が連結する複合的な性格を持つ。なお、我が国には元来の形態を保つ12の木造天守が現存し、そのうち半数は独立式と呼ばれる単純な形態である一方、残りは対象のような複合連結式で複数の避難ルートが想定できる構造のため、本研究の成果は他の複合連結式の天守にも応用可能な知見となることが期待できる。

また、城内には観光客誘導のためのスタッフが、渡櫓地階に2人、乾小天守一階に1人、天守四階に1人、天守五階に1人配置されている。城内の空間構成および城内スタッフの配置を図2に示す。

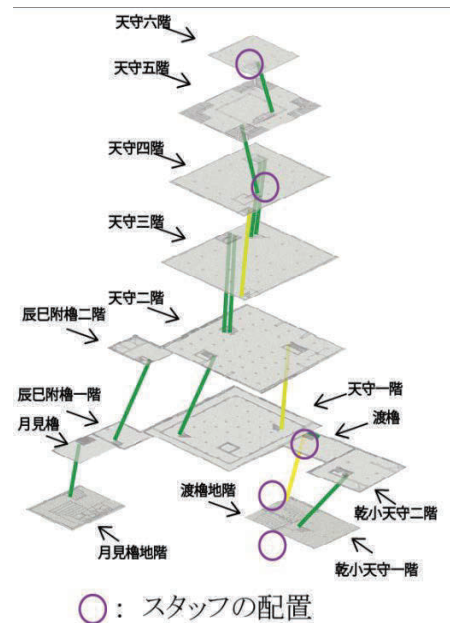


図2 城内の空間構成およびスタッフの配置

### (3) 避難シミュレーションにおけるパラメータ設定

避難者 (観光客) としてエージェントに設定するパラメータとして、男女別年齢別の身長・体重は、厚生労働省のデータ<sup>2)</sup> を使用した。男女別年齢別の身長・体重を示した表を表1・表2に示す。また、観光客の年齢層別の割合を算出するために、城内を見終えて出てきた外国人を含む観光客 286 人を対象に聞き取り調査を行った。算出した年齢層別の割合を表3・表4に示す。

表1 男性の年齢層別平均：身長(cm)・体重(kg)

年齢	身長	体重
0~9	107.7	19.1
10~19	160.7	51.5
20~29	171.0	65.2
30~39	170.8	68.3
40~49	170.9	70.3
50~59	169.5	68.7
60~69	169.9	65
70~	162.2	61.4

表2 女性の年齢層別平均：身長(cm)・体重(kg)

年齢	身長	体重
0~9	107.6	19.0
10~19	153.4	45.8
20~29	157.6	51.9
30~39	158.3	53.7
40~49	157.8	64.6
50~59	155.9	55.2
60~69	153.1	53.1
70~	148.2	50.4

表3 男性の年齢層別の人数・割合

年齢	人数	割合
0～9	18	12%
10～19	11	7%
20～29	24	15%
30～39	18	12%
40～49	28	18%
50～59	24	15%
60～69	18	12%
70～	15	10%
計	156	

観光客の性別・年齢層別の移動速度については、山崎 昌廣ら<sup>3)</sup>のデータを使用した。ただし階段での移動速度に関しては、既往研究で用いられている速度では松本城の階段の特徴である急勾配による大幅な速度低減を表現できないため、20代男性一人による各階段の昇降にかかった実測値を用いて補正を行い、移動に一定時間のかかる通路として表現した。これにより得られた年齢層・男女別の移動速度を表5に示す。

表4 女性の年齢層別人数・割合

年齢	人数	割合
0～9	8	6%
10～19	7	5%
20～29	10	8%
30～39	25	19%
40～49	26	20%
50～59	20	16%
60～69	17	13%
70～	16	12%
計	129	

表5 年齢層・男女別の平均移動速度

年齢	男性歩行速度[m/s]	女性歩行速度[m/s]
0～9	0.98	0.89
10～19	1.2	1.07
20～29	1.31	1.05
30～39	1.33	1.06
40～49	1.26	1.05
50～59	1.25	0.99
60～69	1.11	0.89
70～79	0.96	0.8

#### (4) 避難シミュレーションの条件設定について

城内の観光客や、階段に滞在する想定人数は、城内でのピーク時の人数でシミュレーションを行うために、秋の繁忙期となる11月19日(土)・11月20日(日)のうち、入城規制がかかった状態(規制の判断は現場スタッフの判断でなされている)での人数計測を実施し、各フロアと各階段内にいる観光客の合計である城内総観光客数が一番多かった11月20日15:05の人数を採用し(表6・表7)、合計で410人となる人口を各所に配置した。また、調査の結果天守二階と天守四階については、大半の人が上に上がる階段に向かうために並んでいる人であったため、天守二階の134人と天守四階の100人のうち、9割の人が上に上がる階段の列と設定した。城内に存在する各階段の名前を図3に示す。緑色で示されている階段が観光用に使用されている階段であり、黄色で示されている階段は普段観光用には使用されていない階段である。ただし階段Cと階段Dに関してはスタッフのみが普段使用している。また、観光客は入城時に靴を脱いで袋に入れて携帯の上入城しているため、出口では靴を履く時間の実測平均である14秒を考慮している。根拠として現地の任意の観光客(n=56人)の、靴を袋から取り出して履くに要した時間を計測した結果を表8に示す。

表6 各フロアの観光客数と小計

15:05～		
フロア	人数	
乾1階	12	
乾2階	18	
天守1階	0	入城規制
天守2階	134	
天守3階	5	
天守4階	100	
天守5階	15	
天守6階	56	
月見櫓	17	
辰巳1階	1	
辰巳2階	3	
	361	

表7 各階段の滞在人数と小計

階段	人数
A	5
B	2
C	0(不使用)
D	0(不使用)
E	2
F	3
G	2
H	0(不使用)
I	12
J	10
K	2
L	3
M	4
N	4
	49

表 8 靴を履くに要した実測時間 (n=56) と平均時間 (秒)

13.2	4.4	14.4	30.6
7.5	11.6	8.4	20.7
18.3	12.3	8.4	4.1
7.3	5.7	12.3	12.6
9.26	12.2	24.1	10.1
5.3	22	18	14.1
15.8	3.4	19	49
7.8	17.3	5.2	13.3
11.9	7.8	14.8	8.3
26.4	17.4	7.2	8.4
8.6	20.1	8.1	12.5
23.8	11.5	27.2	23.3
17.6	20.9	9.6	4
17.4	9.1	6	27
			平均
			14.04

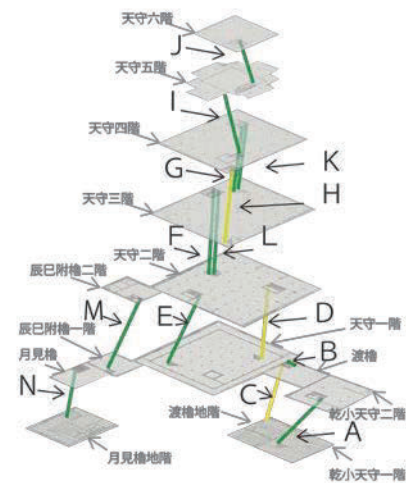


図 3 階段名

### 3. 避難シミュレーションのシナリオについて

本研究では入口である渡櫓地階、又は出口である月見櫓地階から出た時点で避難完了とみなすこととした。最短の経路を通るように避難する想定で避難シミュレーションを実行した結果、28分22秒で避難完了した。

全体のシミュレーションの過程を検証した結果、階段N、K、E、Mでの混雑が目立っていた。階段Nの混雑に関しては、月見櫓地階（出口）での混雑が波及して渋滞に繋がっていた。また、渡櫓地階（入口）から避難した観光客は、乾一階と乾二階、階段A、階段Bにいた37人の人だけで、残りの373人の観光客は最短距離を選択させた結果、月見地階（出口）から避難していた。

考察するに、天守三階より上階にいる観光客は避難距離が長くなることに加え、階段の設置場所と観光ルートの関係上、月見地階（出口）からの避難が最短となり効率が良いと推測できる。即ち低い階にいる観光客はできるだけ渡櫓地階（入口）に誘導することが望ましく、そのためには天守二階にいる観光客の誘導が重要になると考えられる。また、避難に最も時間がかかるのは、出入口から最も離れた天守六階にいる観光客となった。

そこで、天守三階、天守四階、天守五階、天守六階からの効率的な避難方針を検討した後に、天守二階の避難を検討することとした。

#### (1) 天守三階、天守四階、天守五階、天守六階からの避難

天守五階、天守六階にはそれぞれ階段が一つ（IおよびJ）しかなく、フロアの構造も各一室で複雑でないため、下に降りる階段に向かって避難する設定となる。一方天守四階では、天守五階に上がるための階段Iで渋滞する人数が多いことと、フロアが簾で仕切られており見通しの悪いことから、天守四階での誘導が重要となる。天守四階から想定される避難経路には、①階段Kを利用し、来た道に戻って渡櫓地階（入口）から避難する、②階段Kを利用し、月見櫓地階（出口）に向かって避難する、③階段Gを利用し、月見櫓地階（出口）に向かって避難する、の3通りが考えられる。①の避難は一度通った通路である為、迷わず避難が可能であると考えられるが、②と比較すると距離が約5倍もあり、効率的な避難とは言えない。また、③の階段Gは天守五階、天守六階にいる観光客が下階に避難する際にも利用するため、②が最も有効と想定される。実際に今回配置した観光客数でのシミュレーションを実行した結果、天守四階にいる観光客が階段Kを利用し、天守五階、天守六階にいる観光客は階段Gに誘導することが最も効率が良い結果となった。

#### (2) 天守二階の階段の最適利用と経路選択

上記のシミュレーションでは、天守二階の観光客が階段Eを下り、そのまま月見櫓地階（出口）に避難することで観光ルートの範囲内で最短で避難する設定としていた。しかしそれが出口付近での混雑にも繋がったと考えられる。ここではさらに天守二階にいる観光客を誘導することによって、観光ルートの範囲内で最短距離で避難する場合よりも避難時間を短くし、且つ渡櫓地階（入口）側に観光客を流す方法を検討する。

天守二階から出口に向けて避難するための階段は、階段E、階段Dの2つが存在するが、階段Dは普段観光用には利用していない。しかし階段Dを下ると約4m先に未使用である階段Cがあるため、階段Dと階段Cを利

用することで渡櫓地階（入口）に避難することが可能となり、月見櫓地階（出口）での混雑も緩和できる。

また、天守2階にはあらかじめ、最上階まで行かずに退城する観光客のための月見櫓地階（出口）に向かう途中退城（バイパス）ルートが設けられており、そのための看板も設置されている。この途中退城ルートは天守三階から下ってきた観光客と合流し、辰巳附櫓二階に向かい、階段Mを利用して月見櫓地階（出口）から出ることとなる。避難には有効と考えられるが、(1)の結果からは、天守三階より上階にいる観光客の避難による階段Mでの大きな渋滞があるため、有効性についての検証が必要である。

そこで、まず検討すべき3つのシナリオを以下に示す。

**シナリオ a)**

天守2階にいる観光客は、階段Eを利用しそのまま月見櫓地階（出口）に避難する。（図4）

**シナリオ b)**

天守2階にいる観光客は、階段Eを利用し来た道に戻り、渡櫓地階（入口）から避難する。（図5）

**シナリオ c)**

階段C、Dを開放し、天守2階にいる観光客は階段C、Dを利用し渡櫓地階（入口）から避難する。

（図6）

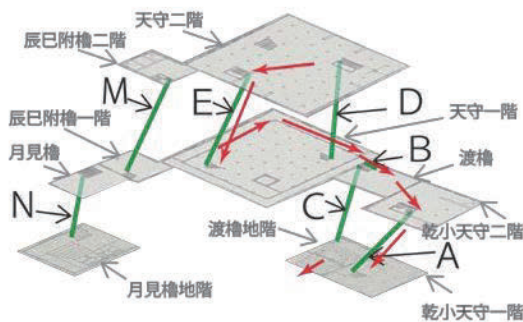


図4 シナリオ a)

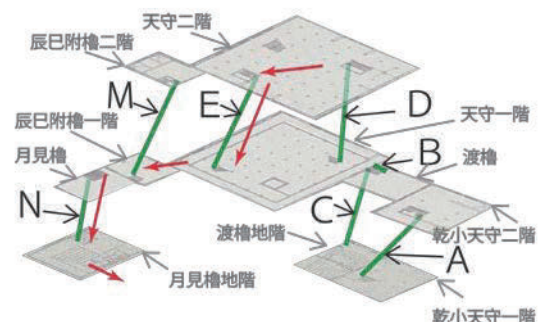


図5 シナリオ b)

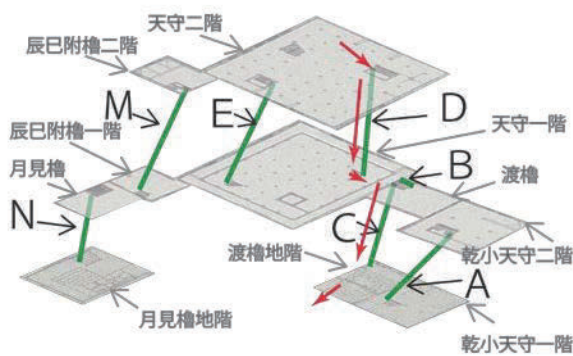


図6 シナリオ c)

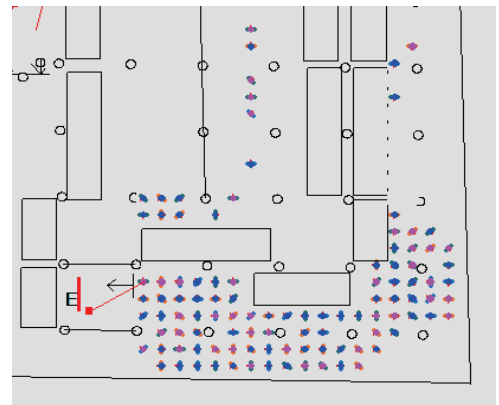


図7 階段 E での渋滞の様子 (107 秒後)

**(3) 3つのシミュレーション実施結果と考察**

**シナリオ a)**

結果：天守2階の観光客の避難時間...19分30秒

城内全体の観光客の避難時間...28分20秒

考察：このシナリオでは天守2階にいる全員が階段Eに集中することとなり、階段Eで渋滞が発生することとなった（図7）。即ち天守三階より上のフロアから降りてくる観光客と辰巳附櫓一階で合流することとなり、階段Nでさらに大きな渋滞になり、これが避難完了時間の遅れに繋がっていた。

このシナリオの検証によって、月見地階（出口）ではなく渡櫓地階（入口）側に観光客を流す必要性が明らかとなった。

#### シナリオ b)

結果：天守二階の観光客の避難時間...17分19秒

城内全体の観光客の避難時間...18分26秒

考察：a)と同様に階段Eでの渋滞が見られた。また、天守一階、乾小天守二階、乾小天守一階を通って避難するため距離が長い避難となっていた。しかし観光客を渡櫓地階（入口）に流すことができたことで、階段N付近の混雑は解消され、城内全体で見ると避難時間を短縮することが可能となった。

#### シナリオ c)

結果：天守二階の観光客の避難時間...16分32秒

城内全体の観光客の避難時間...18分26秒

考察：b)と同様に、天守二階の観光客を渡櫓地階（入口）に流すことで、階段N付近の混雑が解消されており、城内全体の避難時間を短縮することができた。しかし階段Dと階段Cは共に幅が狭く急であるため、スムーズに避難できずに階段手前で渋滞が発生していた。渡櫓地階（入口）に誘導する通路としては有効であると考えられるため、階段手前で渋滞しないよう人数を制限して誘導する必要があると想定される。

#### (4) 結果を受けたさらなる改善案の検討

以上の3つのシナリオから、避難時間の短縮には、天守2階において下階への避難経路を分流する誘導が必要という事が明らかとなった。また、天守三階より上のフロアにいる観光客の避難により、階段Mと月見櫓地階（出口）で渋滞が発生していたことから、天守二階にいる観光客全員を渡櫓地階（入口）に流す誘導の必要性も明らかとなった。

これを受け、以下では階段Mの前で滞留する渋滞の一部を、階段Eに誘導し避難させる2つの改善案を検討する。

#### 改善案 d)

天守二階にいる観光客のうちの半数は階段D、階段Cを利用して渡櫓地階（入口）から避難、残りの半数は階段Eを利用して来た道に戻り、渡櫓地階（入口）から避難するものとする。（図8）

#### 改善案 e)

天守二階にいる観光客のうちの半数は階段D、階段Cを利用して渡櫓地階（入口）から避難、残りの半数は階段Eを利用して来た道に戻り、渡櫓地階（入口）から避難する。さらに階段Mでの渋滞の一部（ここでは半数で検証）を階段Eに誘導するものとする。（図9）

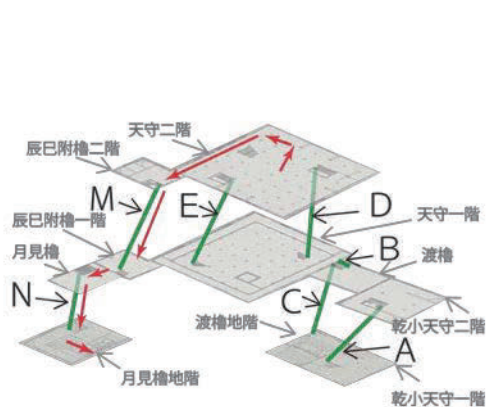


図8 改善案 d)

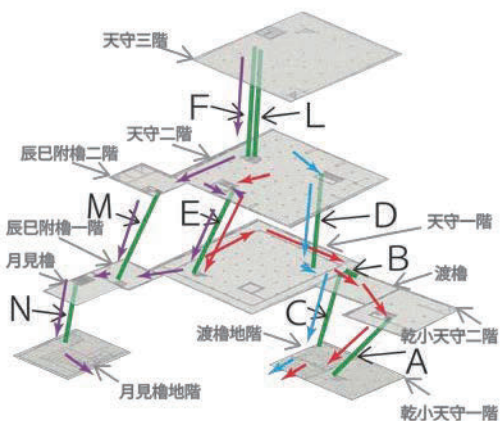


図9 改善案 e)

## (5) 改善案のシミュレーション実施結果と考察

### 改善案 d)

結果：天守二階の観光客の避難時間...10分11秒

城内全体の観光客の避難時間...18分27秒

考察：天守二階にいる観光客全員を渡櫓地階（入口）に流す誘導をし、さらに避難経路を二手に分けることによって、天守二階の観光客の避難時間と城内全体の観光客の避難時間をさらに短縮することが出来た。天守二階の誘導に関しては、この改善案が最も効率の良い避難誘導策となった。

一方で、改善の結果が現れなかった城内全体の避難時間を短縮させるためには、さらに階段Mで渋滞している観光客を階段Eに誘導して、渋滞を緩和させる必要があると考えられる。

### 改善案 e)

結果：天守二階の観光客の避難時間...10分11秒

城内全体の観光客の避難時間...16分10秒

考察：改善案d)で出された課題の改善案の検証となった。仮に階段Mでの渋滞の半分を階段Eに流す設定で検証した結果、一定の渋滞の緩和に繋がり、城内全体の避難時間を短縮することができた。

現時点では、この改善案e)が最適案に最も近い避難誘導策であると考えられる。

## (6) 階段MからEへの最適な避難誘導割合の検討

改善案e)では、階段Mでの渋滞の一部を階段Eに流し、渋滞を緩和する事で城内全体の避難時間を短縮することができた。しかし、階段Eはまず始めに天守二階の観光客の避難に利用されることとなるため、天守二階の観光客による階段Eの利用が完了した後（詳細には5分18秒以降）に、階段Mでの渋滞の一部を階段Eに誘導することが効率的となる。ここではその際に誘導する最適割合をシミュレーションを実施することで明らかにする。

計算では天守二階の観光客が階段Eを降り終えた時点で、天守二階より上階にいる観光客は154人である。この観光客を階段Mから階段Eに誘導する割合の最適値を明らかにするために、階段Eへ避難させる人数を10%ずつ増加させていき、その変化について検証した。結果（表9）より、避難完了時間が最終的に最も早くなった割合である50%が、階段Mから階段Eに誘導すべき最適割合となることが明らかとなった。

表9 階段Mから階段Eへの誘導割合と避難完了時間

階段Eへの誘導割合(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
避難完了時間	18分27秒	18分7秒	17分32秒	16分57秒	16分20秒	16分10秒	16分58秒	17分46秒	18分36秒	19分35秒	20分30秒

## 4. 結論

### (1) まとめと考察

検証の結果から、最短の避難時間となる各フロアでの避難誘導方法を以下に示す。（図10）

- 乾小天守一階、乾小天守二階、天守一階  
⇒来た道を戻って渡櫓地階（入口）から避難させる。（図10中①）
- 天守二階  
⇒半数は階段Dおよび階段Cを利用して渡櫓地階（入口）から避難（図10中②）、  
残りの半数は階段Eを利用し、来た道を戻って渡櫓地階（入口）から避難させる。（図10中③）
- 天守三階、天守四階  
⇒階段Kおよび階段Fを利用して、  
下りの観光ルートに沿って月見櫓地階（出口）に向かって避難させる。（図10中④）
- 天守五階、天守六階  
⇒下りの観光ルートに沿って月見櫓地階（出口）に向かって避難。（図10中⑤）  
階段Mで渋滞している観光客のうち二人に一人（半数）を階段Eに誘導する。（図10中⑥）

- 辰巳櫓一階、辰巳櫓二階、月見櫓

⇒月見櫓地階（出口）から避難させる。（図10中⑦）

以上から、図10中赤丸で示した2か所には少なくとも避難時に誘導員の追加配置が不可欠となり、現状の人員配置（図2）では対応が困難となることが明らかとなった。

本研究の範囲内では、複合式の構成を持つ松本城を対象に、理論上最短の避難時間となる誘導方法について検討を行ったが、複合式の構成を持ち既報となる愛媛県の松山城<sup>4)</sup>においても、避難時間を短縮するためには、複合式の特徴である複数の階段とルートを活かして、混雑するフロアや渋滞する階段から一定の割合で他のルートへと避難者を誘導することが有効となることが明らかとなった。

しかしこれを実現するためには、各フロアの誘導員が望ましい避難ルートへ誘導し、特に混雑が予想される地点にはあらかじめ誘導員を配置して、非常時には適切な割合で避難者を分割誘導する複雑な対応が求められるため、実践的な誘導マネジメントのための体制とルールを訓練等を通して確認しておく必要があることも共通の課題となった。

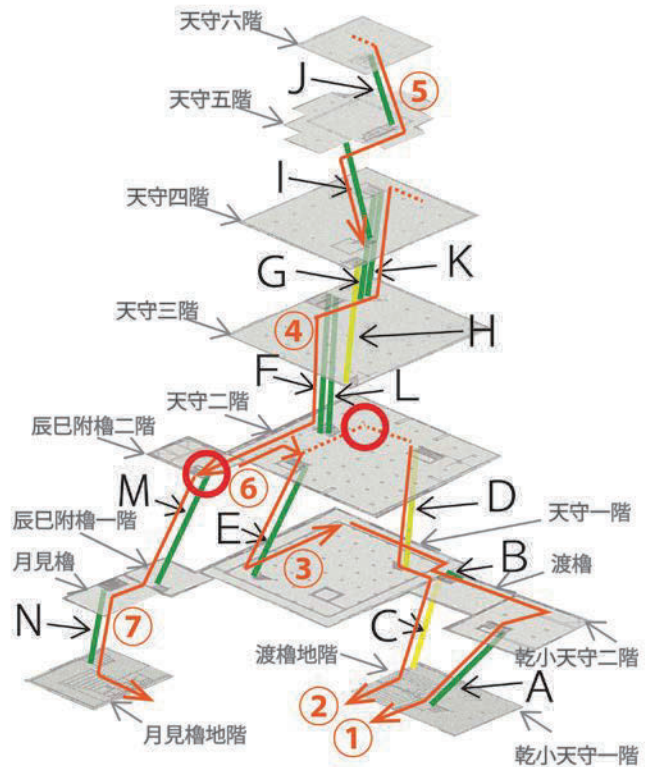


図10 避難誘導の方針

## (2) 今後の課題

今回は城内から屋外への避難のみ考慮したが、最終的には本丸から最寄りの避難所・避難場所までの避難をシミュレーションで検討する必要がある。また本研究では震災による一斉避難を想定しているが、火災等による避難ルートが一部遮断される可能性のある災害にも着目して、避難のシナリオを検討する必要がある。

さらに本論文の範囲では城内4階に既設されている緊急避難装置（脱出シューター）の使用については考慮していないため、その有効性の検証についても必要と考える。

最終的には、他の現存天守等についても検討・比較を行い、空間構成の特性別に分類した城郭建築の汎用的な避難誘導指針を導出することを目指したい。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、現地調査に多大なご協力頂きました松本城管理事務所の皆様、アンケート調査にご協力いただいた来城者の皆様方に心より感謝申し上げます。なお本研究は松本市による平成28年度委託研究「国宝松本城避難誘導計画立案のための調査研究業務」の成果です。記して謝意を表します。

## 主な参考文献

- 1) 今野紀雄：複雑系、ナツメ社、2006年3月
- 2) 厚生労働省：厚生統計要覧（平成27年度）第2編保健衛生 第1章保健 第2-6表、  
([http://www.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyk\\_2\\_1.html](http://www.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyk_2_1.html) 閲覧日2016年12月4日)
- 3) 山崎昌廣、佐藤陽彦：ヒトの歩行一步幅、歩調、速度およびエネルギー代謝の観点から一、人類誌、98(4)、pp.385-401、1990年1月
- 4) 大窪健之、福田和弘：重要文化財・松山城の避難計画に関する研究～エージェント型避難シミュレーションを用いた有効性評価～、歴史都市防災論文集 Vol.8、pp.173-180、2014年7月