

重要文化財・道後温泉本館の改修へ向けた 公衆浴場の避難計画に関する研究

Evacuation simulation for cultural heritage public bath as Dougo-Onsen main building
in the different environment before and after the renovation project

大窪健之¹・鷲尾龍之介²・金度源³・林倫子⁴

Takeyuki Okubo, Ryunosuke Washio, Dowon Kim and Michiko Hayashi

¹立命館大学教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

² (株) 新日本コンサルタント (〒930-0142 富山県富山市吉作910-1)
NiX CO.,LTD.

³立命館大学准教授 衣笠研究機構 (〒603-8314 京都府京都市北区小松原北町58)
Associate Professor, Kinugasa Research Organization, Ritsumeikan University

⁴関西大学准教授 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)
Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental and Applied System Engineering, Kansai University

If actual situation is reproduced in evacuation simulation from the closed space in the virtual space on the PC and analysis of the result obtained becomes possible, the learning effect on the disaster can be enhanced without risk.

In this research, it is important to consider the characteristics of the evacuation from the public bath (such as not to wear clothes, to escape from the bathroom with bare feet), to consider the environmental conditions at the renovation period. This paper is aimed to become one of the basic way of planning for evacuation plans in the public bath, evacuation guidelines and evacuation plans at the renovation period.

Keywords : *evacuation model, multi agent simulation, cultural heritage, public bath, disaster mitigation, Dougo-onsen*

1. 研究の背景

近年、我が国では阪神淡路大震災を始め、東日本大震災、熊本地震など大規模震災が後を絶たない。さらに今後概ね 30 年の間に南海地震の発生が危惧されており、多くの集客がある施設ではスムーズな避難が不可能となり、犠牲者を出すことに繋がる危険性が指摘されている。この状況に対応するため、閉鎖空間からの避難行動を PC 上のシミュレーションで再現し、分析が試みられている。近田ら¹⁾の研究では、避難者間の情報交換に重きを置く一方で、環境要因を考慮していない点が課題として挙げられている。

本研究の対象は、愛媛県松山市の道後温泉本館である。周辺の道後温泉地区は、日本最古の温泉と言われる歴史や文化性の高い地区である。道後温泉本館は平成 6 年 12 月に国の重要文化財に指定され、年間 100 万人を超える入浴客を誇る松山市最大の観光資源となっている。一方で、観光地間競争の激化や旅行形態の変化により地区の宿泊者数は年々減少傾向にある。そのため道後温泉本館 130 周年を迎える平成 36 年までに、道後温泉本館保存修繕工事および周辺の施設整備を行い、工事中の現場を観光資源とする等の工夫も検討しながら、安全を確保しつつ観光産業の復興に資する事業が計画されている。²⁾ しかしながら道後温泉本館は歴史上幾度も改修が繰り返されており、複雑な構造が入浴客の避難の障害となることが危惧されている。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、本研究では道後温泉本館（来館者と館内職員が滞在する1.2.3階部）を対象に、災害が起こった際の一斉避難についてシミュレーションを用いて課題を明らかにする。現状と改修後のケースで改善案を検討し、適応前後の比較により有効な避難計画の提案を行うことを目的とする。その際に公衆浴場ならではの環境条件を考慮したモデルを構築し、問題点を明らかにするとともに、少しでも効率的な避難計画の提案を行う。例えば震災で停電した浴室からの夜間避難では、混乱の中でロッカーを探しだし、着替えた上で屋外へ避難するには、多くの時間を要することが考えられる。一方改修後には浴室が耐震化される予定となっており、浴室そのものを避難場所として活用できる可能性がある。改修工事前の現状と改修工事完了後を想定し、特徴的課題を明らかにするとともに、避難時間を短縮できる方策について提案を行う。

3. 避難シミュレーションモデルの構築

(1) マルチエージェントモデルの活用

本研究の避難シミュレーションには、株式会社構造計画研究所のマルチエージェントシミュレーターである”artisoc³⁾”を使用した。各々の内部属性に関連付けられた独自の意思決定メカニズムと行動計画に基づき、自律的に行動する活動主体のことをエージェント、そしてそれらが相互関係をもつ集合体のことをマルチエージェントと呼称するが、この複数のエージェントが相互作用を及ぼすことによってシステム全体の流れが生まれ、またその全体の流れによってエージェントの個々の動きが動的に変化する特徴を有している。

(2) 前提条件および各種パラメータの設定について

① 空間格子（セル）による空間表現について

本研究では、道後温泉本館を40×40cmの間一人が存在できる大きさ⁴⁾のセルで構成される空間の集合体で表現する。人は進む方向のセルが空かない限りその場に留まることとなり、渋滞等が再現される。本館の実測図面の寸法に基づいて作成し、整数で割り切れない場合は余りを切り捨てることで実際より寸法が大きくなることを避けた。

② 各部屋の人数設定について

各部屋に滞在している人数設定については、2016年11月14日の現地調査で得た屋内各所の人口分布割合と、道後温泉事務所の調査による時間別入場者数を掛け合わせて設定した。本研究では安全側を考慮して、繁忙期（ゴールデンウィーク、お盆休み、年末年始）のピーク時間についてシミュレーションを行うこととする。（表1）繁忙期には閉館する午前6時から閉館の23時まで常時満員状態となるが、来館者数は玄関の下駄箱、各浴室のロッカーの数により制限されるため定員以上になることはない。

表1 道後温泉本館における各部屋の人数設定

1階	people1	神の湯 男湯	西浴室	40	2階	people1	神の湯2F	大広間	80
			東浴室	40				従業員	5
			脱衣所	54				計	85
		1F中央階段下	清掃作業員	5					
			計	139		people2	雲の湯2F	大広間	40
								従業員	4
	people2	神の湯 女湯	浴室	40				計	44
			西脱衣所	27					
			東脱衣所	27					
			礼拝従業員	3		people3	又神殿		20
			計	97				案内従業員	2
								計	22
	people3	雲の湯	男脱衣所	13					
			男浴室	20					
			女脱衣所	7					
			女浴室	10					
			洞の間	20					
			計	70					
			1階合計	306				2階合計	151

③ 避難者の歩行速度について

避難者の歩行速度に関しては、新・建築防災計画指針⁵⁾によると、大型施設では1.0m/sとされている。

なお、暗闇の条件下では0.56m/s (=2km/h) で歩行するとされ、一方で密度の高い (1.0人/m²以上) 条件下では0.5m/sになるとされている。また道後温泉本館には多数の階段が存在するが、35~50° と様々な傾斜があり且つ幅が狭いため、一般的な階段の歩行速度では表現できない。既往研究⁶⁾ では実測を行うことで速度の低減率を表現しており、本研究でも現場での実測に基づいて階段での移動速度を設定した。

④ 避難者の情報認識の範囲について

避難者は周囲の標識などの情報を認識する。既往研究 (近田ら¹⁾、大上ら⁷⁾) と同様に、避難者を中心とした一定距離内のセルを情報認識範囲とした。昼間の場合は前方左右で施設内の全てを認識できると設定する。夜間については、森本らの研究⁴⁾ を参考に情報認識範囲は半径3mと設定した。なお工事前の2018年現在、本館内では非常灯の設置がない場所も存在するため、その場合は夜間の歩行速度のまま標識や誘導が見つかる (非常灯が半径30mの視界に入る) まで周囲をランダムに移動する設定とした。¹⁾

⑤ 現状における階段、出口、非常灯の位置および各室の定員について (図3)

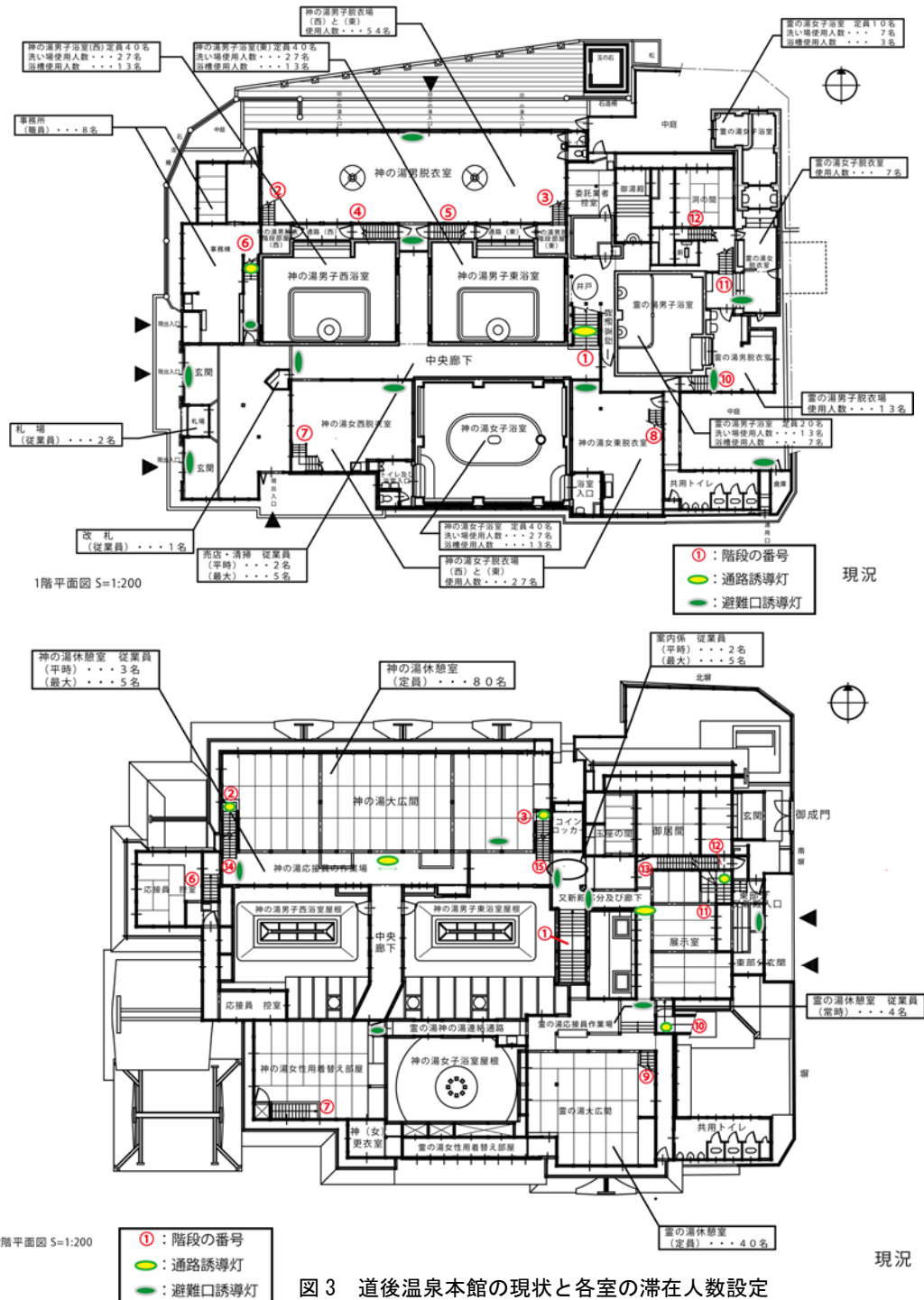


図3 道後温泉本館の現状と各室の滞在人数設定

⑥ 避難者（エージェント）ごとの条件設定

公衆浴場の特徴を踏まえ、避難開始の際の居場所ごとに、避難者の基本的な行動プロセスを設定した。

A) 浴室にいる避難者の行動

前提：服を着ていない状態から避難を開始する。

行動：各浴室から避難をスタートする→脱衣所へ出る→着替えを探す→着替える→出口へ向かう

B) 脱衣所にいる避難者の行動

前提：浴室から出た人と同条件。既に服を着て脱衣所内に居る人は、脱衣所からは出たものと仮定した。

行動：着替えを探す→着替える→出口へ向かう

C) 休憩所及び廊下等からの避難者の行動（職員も含める）

行動：服を着ているため、そのまま出口へ向かう

⑦ 脱衣所での着衣にかかる所要時間について

公衆浴場の特徴として、浴室から屋外に避難する際には着替えに要する時間を考慮する必要がある。

昼間の場合にはまず自分のロッカーに向かい、到着した時点で着替えに必要な時間が加算されることになる（図4）。実際に14人の被験者で計測した結果から最大の31.3秒と設定した。ただし夜間の場合は非常灯の明かりしかないため、情報認識範囲3mという厳しい条件でロッカーを探すこととなる。さらに混雑もある場合には避難は困難なものとなることが予測される。

これを受け、着替えに必要な時間短縮を目的として、脱衣室内に「館内用の浴衣コーナー」を配置した場合も検討することとした。併せて発光看板等の目印を付けた想定とし、避難者は昼夜を問わず浴衣コーナーを目指して向かい、その周囲で着替える時間を費やしてから出口へと向かう設定とした。（図5）

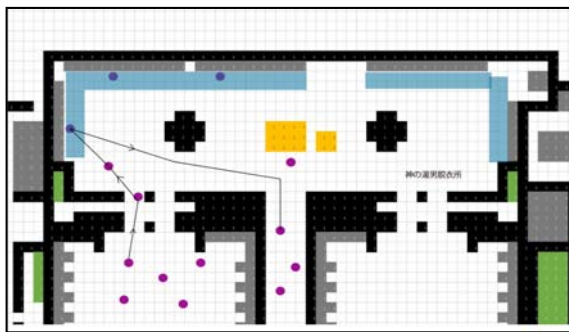


図4. 自分のロッカーを探して着衣の後に避難する場合

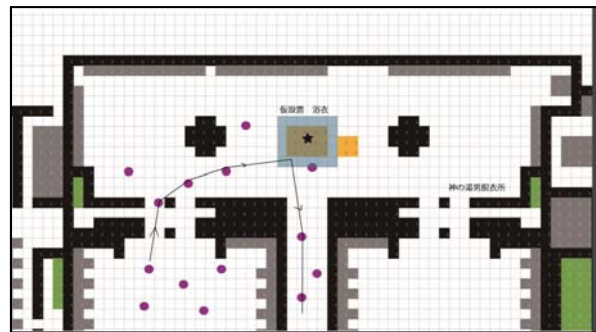


図5. 浴衣コーナーで館内浴衣を着て避難する場合

(3) 比較検討を行うシナリオについて

現状での避難計画上の課題を明らかにし、改修時に採用できれば避難時間短縮につながる可能性のある提案については、その有効性を検証・評価する。本研究ではまず昼（D）と夜（N）の2通りでの現状評価（シナリオ0）を行う。さらに道後温泉本館からの避難時間短縮につながることを期待される対策として、以下の3つの対策を想定したシナリオを設定してシミュレーションを行い、現状と比較する。

即ち、前述になる脱衣所内への館内用浴衣コーナーの設置（シナリオ1）、改修により耐震化が予定されている浴室内部への避難（シナリオ2）、不足している各浴室出口および「又神殿」横出口への非常灯の追加設置（シナリオ3）、および1階東南角にある共用トイレ横の未使用出口の活用（シナリオ4）について、シミュレーションで検証し、避難時間の短縮効果について評価を行う。具体的には以下の9通りを検証した。

① 昼間（Day）における避難の検討

シナリオD-0：昼間に、ロッカーの自分の服を探し、着替えて避難するシナリオ（図4）

シナリオD-1：昼間に、脱衣所に設置したタオルと浴衣で着替え、避難するシナリオ（図5）

シナリオD-2：昼間に、各浴室内に避難するシナリオ（浴室の耐震改修後を想定）

シナリオD-4：昼間に、一階共用トイレ横の扉を開放して、避難するシナリオ（図8）

② 夜間（Night）における避難の検討

シナリオN-0：夜間停電時に、ロッカーの自分の服を探し、着替えて避難するシナリオ（図4）

シナリオN-1：夜間停電時に、脱衣所に設置したタオルと浴衣で着替え、避難するシナリオ（図5）

シナリオN-2：夜間停電時に、各浴室内に避難するシナリオ（浴室を耐震改修し浴室入口に非常灯設置）

シナリオ N-3：夜間停電時に、各浴室出口および又神殿へ非常灯を追加して避難するシナリオ（図 6, 7）
シナリオ N-4：夜間停電時に、一階共用トイレ横の扉を開放して、避難するシナリオ（図 8）

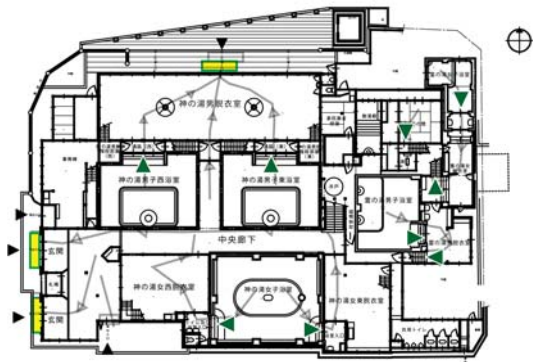


図 6. シナリオ N-3：非常灯追加の場合（1階）

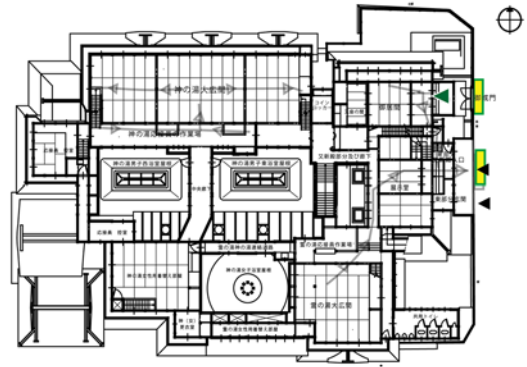


図 7. シナリオ N-3：非常灯追加の場合（2階）

4. 避難シミュレーションの結果と分析

各シナリオについて、避難完了（屋外へ向かうエージェンツがすべて屋外に到達した時点）に要した時間を計測するとともに、混雑などの発生要因について分析することで改善提案の有効性と課題について整理する。シミュレーション上の避難完了時間はあくまで相対比較のための指標に留まるが、本稿では少しでも信頼性を高めるためにシミュレーションを5回実施して得た平均値^{注)}とした。比較対象は、現状のままでのシミュレーション結果として昼間のシナリオではシナリオD-0、夜間はシナリオN-0を基準値とする。これらよりも時間と混雑がどの程度緩和されるかについて注目し、3章で検討した各提案の有効性について評価する。

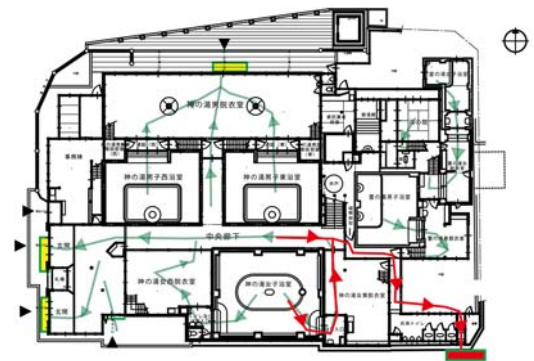


図 8. シナリオ D-4, N-4：共用トイレ横出口利用（1階）

（1）シミュレーション結果の一覧

本研究で検討したすべてのシナリオについて表2に整理した。基準値のシナリオD-0（昼間・現状）またはシナリオN-0（夜間・現状）より時間超過となった数字を赤色で、時間短縮となった数字を青色で表わした。

表 2 道後温泉本館の改善提案ごとの避難完了時間

シナリオ (コード)	改善提案 (内容)	1階の避難完了時間		2階の避難完了時間	
		秒数	時間	秒数	時間
D-0	(昼間・現状)	703	11分43秒	543	9分3秒
D-1	昼間・浴衣コーナー設置	494	8分14秒	497	8分17秒
D-2	昼間・浴室への避難	220	3分40秒	365	6分5秒
D-4	昼間・1階出口の追加	556	9分16秒	538	8分58秒
N-0	(夜間・現状)	2052	34分12秒	1018	16分58秒
N-1	夜間・浴衣コーナー設置	1054	17分34秒	1128	18分48秒
N-2	夜間・浴室への避難	436	7分16秒	772	12分52秒
N-3	夜間・非常灯の追加設置	932	15分32秒	725	12分5秒
N-4	夜間・1階出口の追加	1038	17分18秒	979	16分19秒

(2) 昼間の浴室からの避難に関する分析

昼間の災害発生時を想定し、現状では各浴室からの避難者は脱衣所へ出て、ロッカーの自分の服を探し、着替えて避難するシナリオ (D-0) となる。この場合避難完了時間は1階が11分43秒、2階が9分3秒となった。

混雑は1階では中央廊下で発生しており、原因として障害物 (ベンチやロッカー) 等による幅員の狭さが挙げられる。一方2階では「又神殿」横の出口で混雑が起きるが、避難者一か所に集中することによる現象と考えられる。(図9) この結果を昼間の避難完了時間の基準とし、改善提案との比較を行うこととする。



図9. シナリオ D-0 : 1階と2階における昼間の避難状況 (避難開始から60秒後)

① 脱衣所に設置した浴衣コーナーで着替えて避難するシナリオ (D-1)

この改善を行った場合、避難完了時間は1階が約70%に、2階が約92%に短縮した。混雑の場所は現状と変わらないが、浴室からの避難者が浴衣コーナーで着替えられるため、比較的スムーズに脱衣所を通過できたものと考えられる。現状と比較すると、1階では、「神の湯」と「霊の湯 (男湯)、霊の湯 (女湯)」ともに自分のロッカーまで服を取りに行く時間が短縮された分、避難時間が短縮された。一方で、1階の避難者のスムーズな避難に伴い2階から1階へ避難する人も時間が短縮されることを期待したが、混雑がその先の中央廊下で起きているため、大きくは時間が変わらない結果となった。

② 各浴室内に避難するシナリオ (D-2)

耐震改修後の浴室そのものを避難空間に活用することを想定した結果、1階が約31%に、2階も約67%に短縮できた。混雑の場所は2階では大きく変わらないが、1階では解消することができた。館内の避難者が浴室内に一時避難できれば、避難時間が大幅に短縮されることが明らかとなった。「霊の湯」からの避難者も2階に避難する必要がなくなったため、2階の避難者数も減少し、1階、2階ともに時間短縮が可能となった。

③ 1F共用トイレ横の扉を開放して避難するシナリオ (D-4)

南東角に位置する「共用トイレ横の出入口」は普段は施錠されているため、非常口としての利用もされていない。一方で、これまでのシナリオによる検証結果が示すように、避難時間全体を短縮するためには、男女とも1階の最深部に位置する「霊の湯」から、2階を経由して屋外まで出なければならない避難動線を如何に短縮するかが一つの鍵となっている。そのため、1階からそのまま屋外に出られるトイレ横の出入口を避難口として開放した場合に、どれほどの効果が期待できるか検討することとした。

結果として昼間の場合は、避難完了時間は1階が79%、2階が99%に短縮された。1階では「神の湯・女湯」の東脱衣所側および「神の湯・男湯」から避難する人が共用トイレ横の出入口を利用できるため、標準状態で発生していた中央廊下での混雑が軽減されることで、時間が短縮されたと考えられる。一方で2階からの避難に関しては、出口を追加しても影響がないことが明らかとなった。

(3) 夜間の浴室からの避難に関する分析

日没後に災害が発生した場合を想定すると、現状では停電の暗闇の中を手探りで避難するシナリオ (D-0) となる。この場合の避難完了時間は1階が34分12秒、2階が16分58秒となった。混雑は1階では各脱衣所、2階では昼間と同様に「又神殿」横の出入り口で起きていた。1階では暗闇の中を脱衣所に向かい着替えを行うため、脱衣所で混雑が起きていた。2階は出口が一つに集合することによる混雑と考えられる。(図10)

昼間と比較すると、避難完了時間は1階が約292%に、2階では約187%まで遅延するという極めて危険な結果となった。昼間と比べると、各浴室の出口と「又神殿」には非常灯がないため、脱衣所からは非常灯が視界に入る場所まで到達しないと避難できないことと、移動速度そのものが遅くなるのが原因と考えられる。

この結果を夜の時間帯の基準となる避難完了時間として、他のシナリオについて評価する。

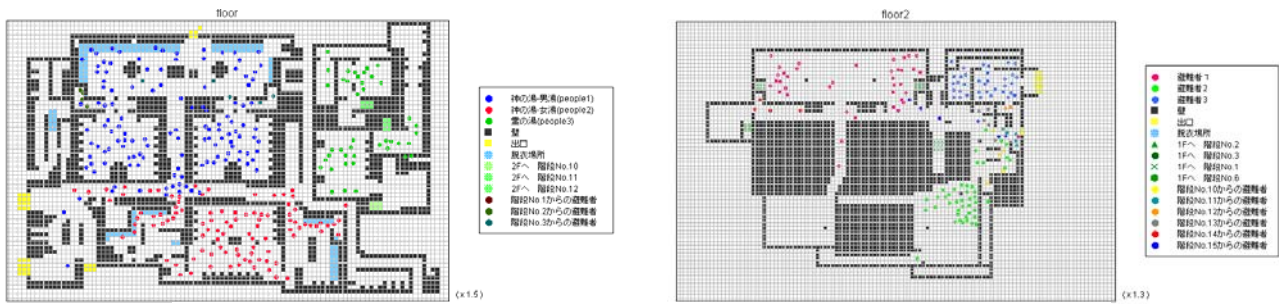


図 10. シナリオ N-0 : 1 階と 2 階における夜間の避難状況 (避難開始から 60 秒後)

① 脱衣所に設置した浴衣コーナーで着替えて避難するシナリオ (N-1)

この改善提案によって、避難完了時間は1階では約51%にまで短縮できた。一方で、逆に2階では約111%となり1割程度遅延する結果となった。混雑の場所は昼間における現状と変わらなかったが、特に2階からの避難時間に遅延が発生した原因として、浴衣コーナーの設置によって1階「霊の湯」からの避難者がより短時間で階段No.10、No.12から2階に上がってくる結果となり、2階の「霊の湯大広間」からの避難者らと合流するタイミングと重なってしまい、出口で混雑するという現象が発生したことが確認された。(図11)

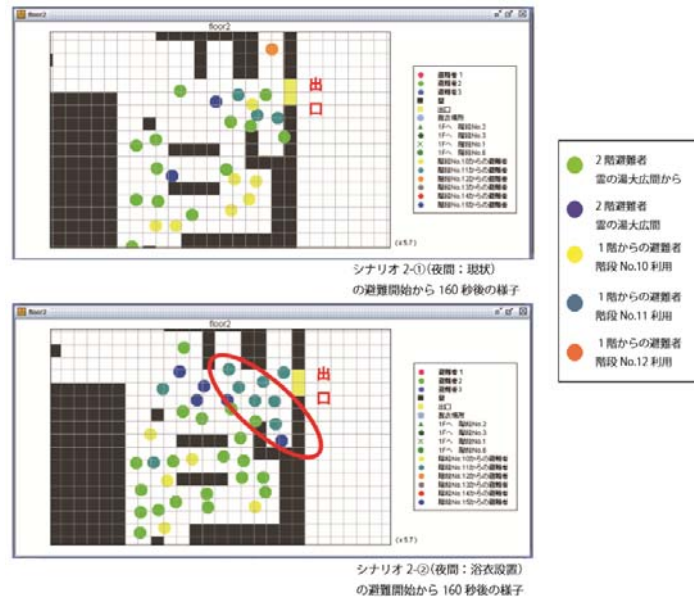


図 11. 夜間における 2 階出口での現状と浴衣設置シナリオの比較

② 各浴室内に避難するシナリオ (N-2)

耐震改修後の浴室活用を想定した提案では、1階が約21%に、2階も約76%に短縮できた。混雑の場所は昼間と同様2階では「又神殿」横で発生したが、1階では解消できた。現状 (0-N) と比較すると、1階の避難完了時間は5分の1程度にまで短縮されており、そもそも着替える必要と浴室で迷う時間が不要になることで、避難時間が大幅に削減された結果と考えられる。「霊の湯」からの避難者も、屋外へ避難するに必要な2階出口への避難が不要となるため、1階、2階ともに時間短縮が可能となった。

③ 各浴室出口および又神殿へ追加設置した非常灯を頼りに避難するシナリオ (N-3)

道後温泉本館には、現状では非常灯が設置されていないところが多く存在する。各浴室の出口にも設けられておらず、1階、2階の「又神殿」側にも非常灯がない。このため夜間停電時の視界確保を目的として、これら非常灯が不足している場所に対して非常灯を追加した場合の有効性について評価を行った。

この結果、避難完了時間は1階が約45%に、2階が約71%に短縮できた。混雑の発生個所については他のシナリオと同様に大きな変化は見られなかったが、特に1階の避難完了時間を半分以下にまで短縮できた。

④ 1F共用トイレ横の扉を開放して避難するシナリオ (N-4)

避難完了時間は1階が約51%にまで短縮できた一方、2階は約96%に留まった。混雑は現状と比較して中央廊下での混雑は軽減された。2階に関しては昼間のシナリオ (D-4) と同様に避難時間はほぼ変わらなかった。

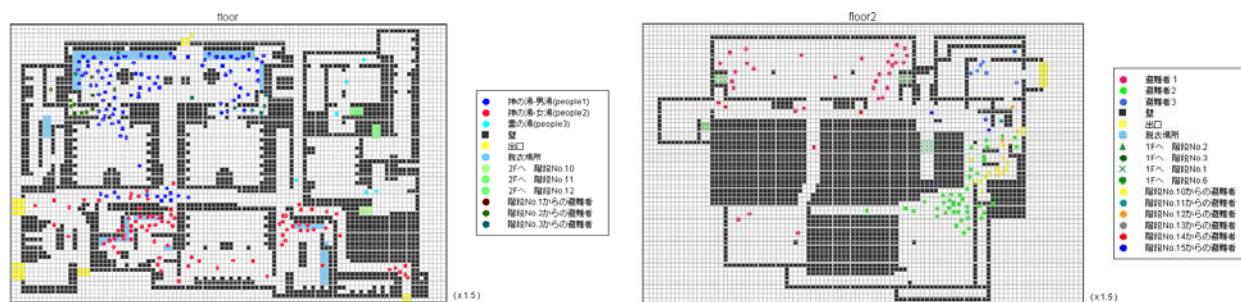


図12. シナリオ4-N：1階 共用トイレ横の扉を開放した場合

5. おわりに

(1) 結論

本研究では公衆浴場である重要文化財・道後温泉本館の避難計画について、マルチエージェント型シミュレーションモデルを援用することで改善策を検討した。その結果、館内用浴衣コーナーの設置、耐震化された浴室への避難、非常灯の追加、避難口の追加設定について効果を確認し、文化財としての価値への毀損を抑えつつ一定の有効性を示すことができた。特に浴室そのものを耐震化して避難スペースとして活用できれば、避難時間の短縮にも大きく貢献できることが示された。浴室からは裸で避難しなければならないという、公衆浴場の特性を考慮した対策が有効となる一方で、着替えにかかる時間を短縮すべく館内用浴衣コーナーを設置しても、各階からの避難者の流動バランスをコントロールできなければ、かえって避難時間が遅延する可能性があることも明らかとなった。

(2) 今後の課題

残された課題として、実際の出口への避難誘導の方法論について具体的に検討する必要があることが挙げられる。また本論の範囲では、地震などをきっかけとする全館一斉避難を前提としたが、火災など出火点によっては避難経路を阻害する可能性のある災害については、さらに詳細な場合分けによる検証を行う必要がある。さらに本論の範囲では、今後開始される改修工事中を想定した、工事中の環境要因や工事員の配置については検討することができなかった。今後は以上の点についても研究を進める必要がある。

謝辞：シミュレーションソフト“artisoc”を無償で貸与いただきました、株式会社構造計画研究所様に深くお礼申し上げます。そして本研究で対象としました道後温泉の現地調査のご承諾、ならびにデータ等の提供に多大なご協力いただきました道後温泉事務所様に心から感謝致します。また本研究は、立命館大学歴史都市防災研究所研究施設運営支援費による補助を得て実施したものです。記して謝意を表します。

注釈：各場所におけるエージェントの初期配置などのランダム性に起因して、避難完了時間に若干のばらつきが見られたが、5回以上計測しても各シナリオ間の差分に逆転現象は見られなかったため、本稿では5回の試行の平均値で避難完了時間を代表し相対比較することとした。

参考文献

- 1) 近田 康夫、濱 政洋、城戸 隆良：マルチエージェントを用いた避難行動シミュレーション、土木情報利用技術論文集vol. 17、pp. 29-38、2008年11月。
- 2) 松山市：道後温泉活性化基本計画、2015年5月、https://www.city.matsuyama.ehime.jp/shisei/machizukuri/dogokasseika/dogokasseika.files/kasseikak_eikaku-honpen.pdf、2018年6月閲覧。
- 3) 株式会社構造計画研究所：MASコミュニティ（ホームページ：<http://mas.kke.co.jp/>）、2018年6月閲覧。
- 4) 森本 陽、栗田 治、田中 健一：混雑状況下にある建築空間内の出口選択が避難効率に与える評価のモデル、公益社団法人日本都市計画学会、都市計画論文集vol. 50、No. 3、pp. 636-643、2015年10月。
- 5) 日本建築センター：新・建築防災計画指針（1995）、（一財）日本建築センター、1995年7月。
- 6) 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。
- 7) 大上俊之、朝山雄介、小山茂：煙影響を考慮したトンネル火災の避難シミュレーション、計算数理工学論文集vol. 8、pp1-6、2008年11月。