

松山城における非合理的避難の割合と被害の推移に関する研究 —マルチエージェントを用いた避難シミュレーション—

A Study of the Ratio of Irrational Evacuation and the Transition in the Number of Victims in
Matsuyama Castle
-Evacuation Simulation by Multi-Agent System-

中島昌暉¹・山田悟史²

Masaki Nakashima and Satoshi Yamada

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

²立命館大学講師 理工学部 建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Lecturer, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

The Matsuyama Castle is located in Matsuyama, Ehime. There are only two staircases to out outdoors from the castle. One staircase is narrow and steep, the other one is wide and gentle gradient by comparison. There is a problem that it is obscurity that how many people to conduct to the staircase when an earthquake occurs. So the purpose of this study is to research the changes evacuation time and extent of danger density by changing rate that how many people to conduct to the staircase. And suggest the appropriate evacuation conduct rate that minimizes damages when evacuation from Matsuyama Castle.

Keywords: multi-agent simulation, irrational evacuation, evacuation time, danger density, Matsuyama Castle,

1. はじめに

(1) 研究背景

都市圏の駅構内や駅前地下街、観光地など人が多く滞在する場所や狭い通路・分岐路が多い場所において大規模災害に伴う一斉避難が生じた場合、被害の拡大を防ぐための避難計画が予め策定されていることが重要である。また観光地では避難経路などの場所に対する認識が人それぞれによって異なる。特にそのような場所において適切な避難誘導がなされない場合、避難が遅れてしまうだけでなく群集密度の上昇による群集なだれなどの二次災害が発生する危険性がある。二次災害防止にはサインの設置・誘導員の派遣などが挙げられるが、「どの出口にどれだけの人を誘導すれば被害が最小化する確率が高いか」という定量的な知見が不明瞭という側面もある。

上述の背景をふまえ、本研究は観光地の中でも歴史的建造物の「城郭」に着目した。城郭には歴史的建造物の価値保全の観点から、現行法規に適合した建築物の避難計画基準とは異なる事例が存在する。そのような事例においては全館避難検証法・避難シミュレーションの原則として合理的避難と呼ばれる「避難者は最寄の出口へ向かう」に倣った避難誘導が適切であるとは限らない。つまり、シミュレーション上の非合理的避難である非最短経路避難が、実際の避難においては合理的避難である可能性がある。そのため、城郭は適切な避難誘導が特に重要な対象であると考えられる。

(2) 位置付けと目的

本研究の具体的な対象として愛媛県松山市にある松山城を選定した。係る研究には山崎らの人の歩行についての研究¹⁾があり、人の性別・年齢別の歩行速度について調査している(表1)。これは避難誘導において重要な要素であり、本研究でもこれを引用する。より本研究に近い研究には大窪らの研究²⁾がある。大窪らは、災害時の松山城を訪れた観光客の避難計画を策定するため、エージェント型の避難シミュレーションを行い、天守閣入場者数の許容人数の推定、天守閣内から避難する際の各エリアごとの階段の利用割合の最適案の導出、山林火災を想定した松山城の位置する勝山山頂からの全山避難シミュレーションによる安全性の評価を行った。しかし、二次災害防止のための群集密度に着目しているものや、複数の出口に対して避難する人をどれだけ誘導するかという誘導割合に着目しているものは見受けられない。

松山城は建造当時の計画に近い状態であるため、狭く急勾配な階段が多く存在する。そのため災害が発生し避難する際、階段周りに混雑が発生することが予想される。素早く安全に避難を行うためには現状の階段を改修する際に階段の性能を上げる必要がある。また、十分な性能を有している階段であれば、避難者全員をその階段へと誘導できる。

そこで本研究では、松山城を対象に一斉避難の際に出口への誘導割合によって避難完了時間・群集密度がどのように推移するかを確率現象として観測可能なプログラムをMulti-Agent system (MAS)を用いて開発する。それにより、被害が最小化する確率の高い避難誘導を提示すること、階段の性能差による観測項目の変化を調査すること、以上2点を目的とする。

2. 研究概要

(1) 松山城の概要

松山城は愛媛県松山市の勝山山頂に位置しており、日本で12カ所しか現存していない現存12天守のひとつで、天守を含め21棟の建造物が国の重要文化財の指定を受けている。そのため、松山城は歴史的・文化的にも観光資産として非常に貴重かつ重要な建造物であり、多くの観光客が来訪している。また、来訪者の数は年々増加している傾向にあり、平成27年の松山城の天守入場者数は498,631人で、前年の平成26年と比較すると12%増加している^{注1)}。松山城の天守閣(図1)は大天守・小天守・南隅櫓・北隅櫓とそれらを接続する廊下で構成されており、最も大きな大天守は地上3階地下1階の層塔型天守である。これらが建造当時の計画に近い状態で公開されているのも特徴の1つである。この特徴は観光誘致として大きな魅力である一方で、観光施設としての課題点でもある。その顕著な例として天守閣の階段が挙げられる。松山城天守閣内の階段はいずれも急勾配な傾向にある。これらのうち本研究では、天守閣内から屋外へ出る2箇所の階段(階段A、階段B)に着目している(図2)。階段Aは幅50cm、蹴上27cm、踏面18cmと狭く急勾配な階段で、階段Bは幅200cm、蹴上23cm、踏面25cmと階段Aと比べ相対的に避難上の性能が高い階段であると言える。来訪者数から勘案すると縦導線が不十分である可能性があるが、大規模な改変は松山城の観光的価値の元となっている歴史的・文化的価値を損なわせる可能性がある。現在松山城では災害時の対策として、避難用の縄梯子と脱出袋が設置されているが、火災などで天守閣に取り残された場合の緊急避難用であるため、実際の避難においては避難計画と同等に避難誘導が重要である。

表1 年齢別歩行速度

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

参考文献1) から引用



図1 松山城



図2 階段A(左)・階段B(右)

(2) 避難シミュレーションのモデル構築

避難シミュレーションにはMAS (artisoc) を用いた。MASとはシミュレーション空間にエージェントを配置し、エージェント毎の振る舞いをアルゴリズムとしてモデリングすることで局部作用の連鎖として全体の結果を観測する手法である。本研究では松山城の天守閣から屋外へと出る2つの出口（階段A・B）に対して一方の出口へと誘導する割合を変数として、各変数毎の「避難完了時間」と「群集密度が危険水準（4人/m²）を超えた範囲」（表2）^{注2)} を計測する。また、上記のシミュレーションに階段の性能を変数に加えたシミュレーションを行い、計測項目がどのように変化するかを調査する。

シミュレーションの設定値に関しては、既往研究である大窪ら²⁾ の研究を参考に天守閣内の人数を設定し、山崎ら¹⁾ の研究から歩行速度を引用した。

(3) アルゴリズム

今回のエージェントシミュレーションはネットワーク型とポテンシャル型を組み合わせたもので、移動経路はネットワーク型を基本とし、初期配置や干渉にポテンシャル法を用いた。シミュレーションのアルゴリズムを図4に示す。まずエージェントを配置する。配置する際は全体の来訪者（350人）を各フロア面積に比例配分（地上階「69人」、1階「186人」、2階「70人」、3階「25人」）しフロア内にランダムに配置する。結果がシミュレーション毎に異なるのはこのランダム性が要因である。エージェントは初期配置の際に、自分に最も近いwaypoint（ネットワーク理論のノード、以下waypoint）から各階層で設定してある最も近い避難先（階段や出口）への最短経路を調べ最短経路のwaypointリストを取得する。取得した後は、リストの最初のwaypointを移動先に設定して歩行速度1.1m / 秒（表1の平均値）で移動を開始する。移動開始後は移動先として設定しているwaypoint 到着しているか判定を行いながら移動先に進む。移動先のwaypoint に到着している場合はリストの次のwaypoint を移動先に設定する。これを繰り返し避難先まで移動する。階段に着いた場合は階段の性能に応じて下階に降り移動を続け、本壇の出口の場合はその段階で避難完了となる。この過程においては壁などの障害物や自分以外のエージェントとの干渉が発生する。またエージェントの階段Bへの誘導方法は、最寄の出口が階段Aとなるエージェントが階段Aに到着した際に、指定の割合で避難先を階段Bへと変更させた。

次に空間として設定を示す。階段には下階に移動できる性能を現地調査をもとに時間当たりの人数として設定した。これを上回る人数が同時に階段に到着した場合は待つことになる。階段Aは4秒当たり1人、階段Bは4秒当たり2人である。本研究が観測する「群集密度が危険水準(4人/m²)を超えた範囲」とはこの階段Aと階段B周辺に形成される範囲である。

以上のアルゴリズムをもったエージェントシミュレーションを構築し、階段Aが最寄となるエージェントを階段Bへと誘導する割合を0%から100%まで10%刻み変化させ、「避難完了時間」と「群集密度が危険水

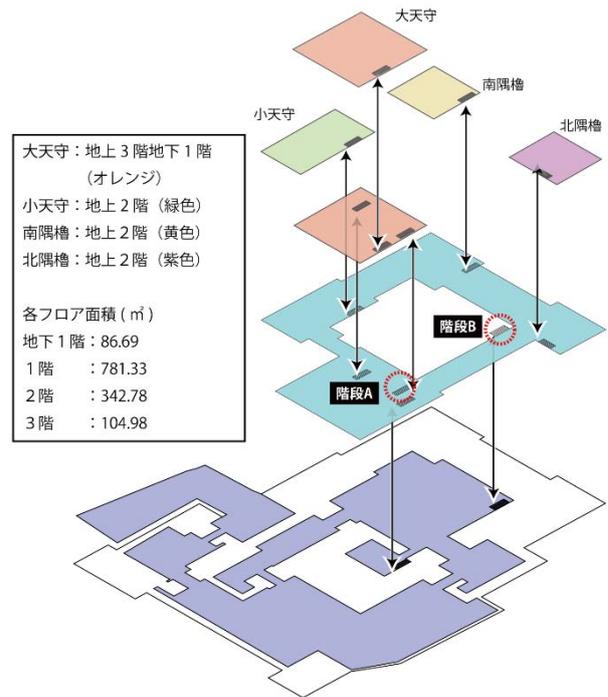


図3 松山城のフロアマップ

準を超えた範囲」を計測した。また、階段Bの性能（単位時間当たりの移動できる人数）を変数とし、階段Aと比較し2倍から5倍まで変化させ、計測項目の変化を調査した。シミュレーションの様子を図5に示す。なお各設定値におけるシミュレーション回数は1000回である。

表2 将棋倒しと群衆なだれの比較

密度(人/m ²)	将棋倒し	群衆なだれ
発生する群集密度	密度 3~5/m ² 程度でも発生	密度 10人/m ² 以上でないとは発生しない
力の作用	転倒時に力が発生	転倒前から力が作用
転倒の順序	後ろから前に	前から後ろに
転倒の形状	線状に1方向	塊状に多方向

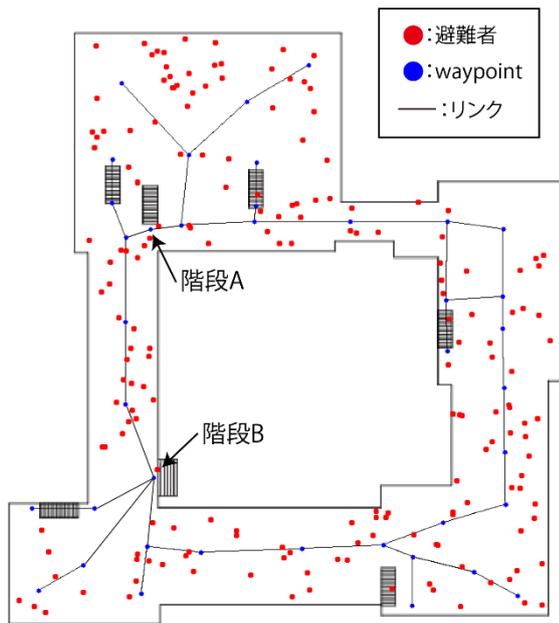


図5 シミュレーションの様子

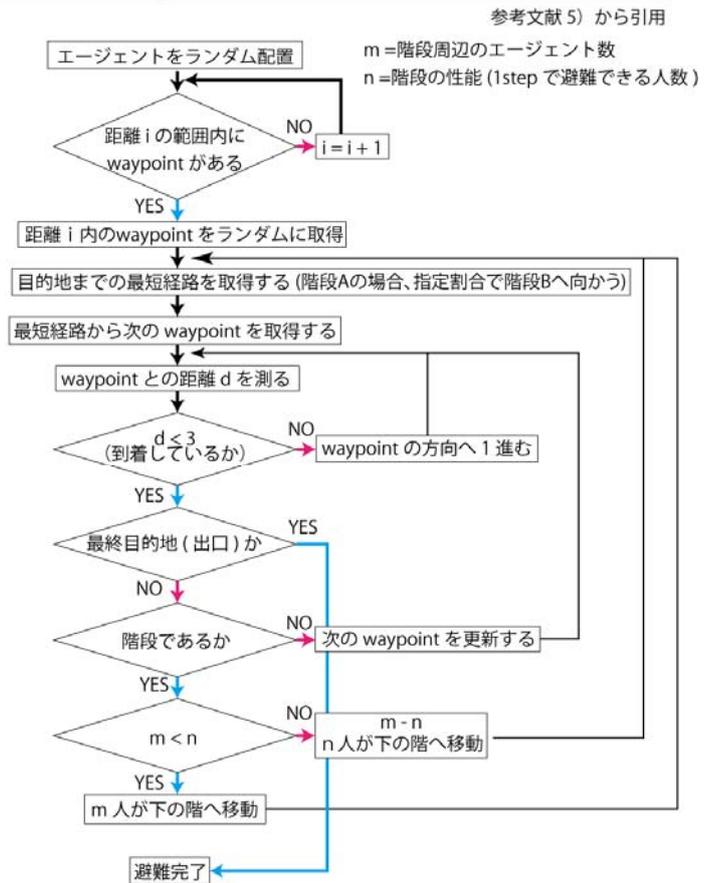


図4 アルゴリズム

3. シミュレーション結果

(1) 避難完了時間

階段Aを経由して避難を行う人を階段Bへと誘導する分配割合を0%から100%まで変化させた時の避難完了時間の推移を計測した。各割合

で1000回シミュレーションを実行した結果の確率密度曲線を図6に示す。どの割合においても正規分布の形状を示しており、期待値として代表性の高い平均値を形成している傾向にある。また、分散の大きく尖度の低い形状から尖度の高い形状へと推移していることが分かる。そこで図7に性能差ごとの避難完了時間の平均値を示す。階段Bへの誘導割合を高くするほどいずれの性能差でも避難完了時間は減少していくが、ある割合を境に跳ね返りが発生していることを確認することが出来る。性能差2倍時には閾値は60%、3倍時には70%、4倍時には80%、5倍時には90%となっており、性能差5倍時にはほとんど跳ね返りが起こっていない。跳ね返りが発生する原因としては、閾値以上の割合の人を階段Bへと誘導したときに発生する (1) 階段B付近で発生する混雑の解消時間と階段Bを経由することで発生する遠回り分の避難時間と (2) 階段A付近で発生する混雑の解消時間を比較した時に、(1) が (2) よりも大きくなってしまいうためだと考えられる。

次に、性能差間の避難完了時間の差を見ると、避難時間の減少幅は性能差と単純な比例関係ではなく、3倍以降の避難時間の短縮が緩やかになり始めることが分かる。また、分配割合が40%以下の時の避難完了時間の性能差間の差が小さいのは、階段Bへと誘導する人数が少ないため性能差の効果が小さいためであると考えられる。

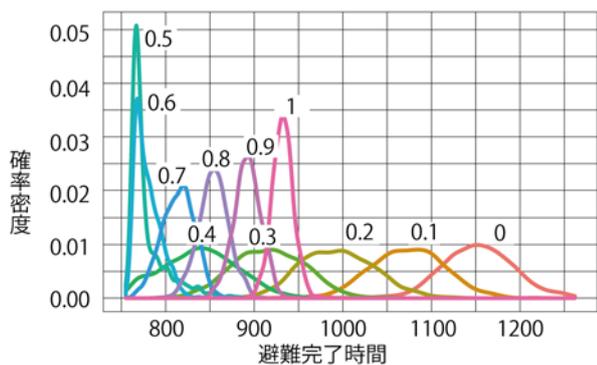


図6 避難完了時間の確率密度曲線

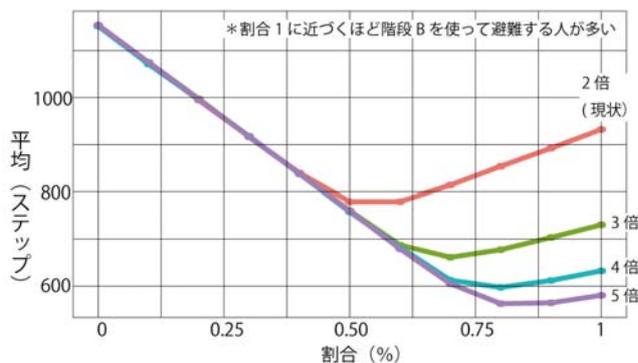


図7 避難完了時間の平均ステップ数

(2) 群集密度が危険水準を超えた範囲

上述のシミュレーションにおいて観測した危険水準 (4人/m²) 以上の群集密度が発生したエリア数 (以下エリア数) の確率密度曲線を図8に示す。階段A・階段B周辺のエリア数は両方とも誘導割合に関係なく正規分布状で大きな尖度の変化はなく、階段Bへの誘導割合を高くするにつれて、階段Aでは分布が左側 (エリア数が少ない側)、階段Bでは右側 (エリア数が多い側) へと推移している。

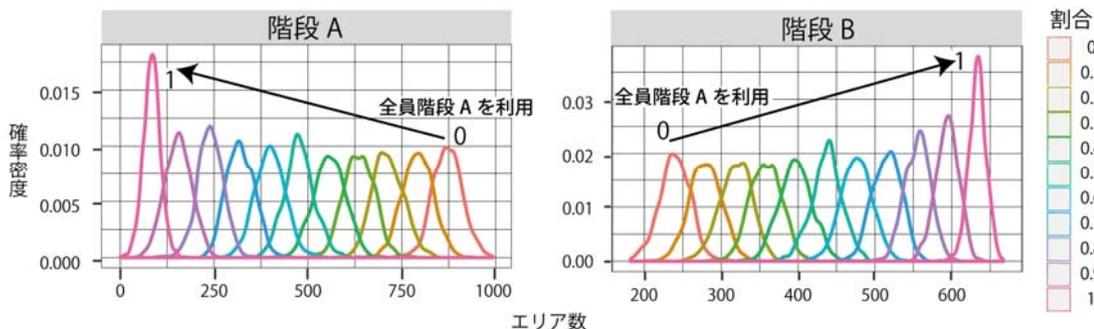


図8 階段A・Bの群衆密度の確率密度曲線

図9に性能差毎の階段A・階段Bのエリア数の平均値を示す。階段A付近のエリア数は性能差毎の変化はない。これは階段Aの性能を変数としていないためである。階段Bのエリア数は階段の性能差を広げる (階段Bの性能差を高くする) につれて減少している。また、性能差毎の階段A・階段Bのエリア数の平均の合計を図10を示す。階段A・階段Bのエリア数の合計は跳ね返りは起こらず誘導割合を高くすればするほど減少し続ける結果となった。

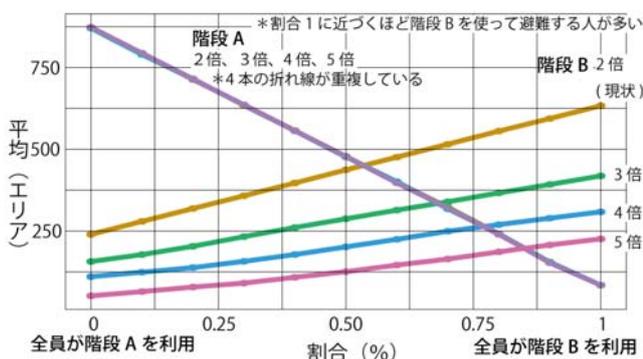


図9 性能差毎のエリア数の平均値

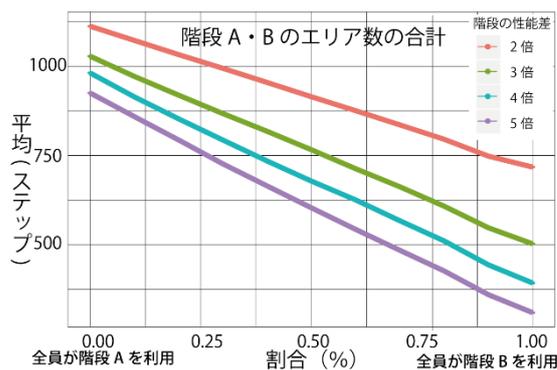


図10 性能差毎のエリア数の合計

4. 考察とまとめ

松山城の避難誘導計画において、階段Aに多くの人を誘導してしまうと階段付近で混雑が発生してしまうことは自明であるが、階段Bに多くの人を誘導し過ぎてしまうと避難完了時間が遅れてしまうことが分かった。当然ながら、実際に災害が発生し避難誘導を行う際、状況により柔軟に対応・判断することが重要であるが、予めその目安を把握しておくことは有用である。既往研究である大窪ら²⁾の研究では、より早く避難

を行うために避難者の居る場所に応じて避難先を変え最適な避難誘導割合を導出しているが、本研究では、混雑が予想される階段Aに到着した人を階段Bへと誘導し、避難完了時間と階段付近で発生する群集密度を計測し、最適な割合を導出している。群集密度が危険水準を超えたエリア数は誘導割合を100%（階段Aを経由して避難をする人全員を階段Bへ誘導する）に近づけるほど減少していく傾向にあるが、避難完了時間は60%が閾値となりそれ以降は増加していくことを把握した。また、2つの階段の最適な利用割合を大窪ら²⁾の研究と比較すると、大窪らは階段Aが44%・階段Bが56%であり、本研究では階段Aが40%・階段Bが60%となっている。シミュレーションの設定などで違いが発生しているが、このことから、目安となる適切な誘導割合を56~60%として避難計画を立案することが望ましいと考えられる。また、実際の避難誘導の方法としては、避難先のサインの設置や誘導員の派遣などが考えられる。

松山城を改修する際の階段A・階段Bの性能についても検討した。階段Bは階段Aに対して4倍の性能を持つれば以降の効果は小さいことが分かった。同時に4倍程度の性能を有することが出来れば誘導割合に留意せず階段Bに誘導するという明快な避難誘導に繋がることが分かった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、（株）構造計画研究所が提供しているマルチエージェントシミュレーター用言語のartisoを用いました。artisoを無償で提供して下さった構造計画研究所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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，pp173-180，2014.
- 3) 大窪健之・紺谷渉・金度源・林倫子：国宝松本城の震災時における観光客の避難誘導計画，歴史都市防災論文集，Vol.11，pp167-174，2017.
- 4) 山影進：人工社会構築指南 artisoによるマルチエージェント・シミュレーション入門，2008.
- 5) 兼田敏之：artisoで始める歩行者エージェントシミュレーション，2010.
- 6) 松山城ホームページ：http://www.matsuyamajo.jp/（2017年10月参照）
- 7) 中島昌暉・山田悟史・佐野友紀：歴史的建造物における非合理的避難の割合と被害の推移に関する研究-松山城を対象としたマルチエージェントシミュレーションを用いて-，第40回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，報告pp.159-162，2017.12，日本建築学会

注釈

注1) 松山城天守閣入場者数⁶⁾の詳細なデータは以下の通りである。

	平成 25 年	平成 26 年	対前年比	平成 27 年	対前年比		平成 25 年	平成 26 年	対前年比	平成 27 年	対前年比
1 月	24,883	28,765	115.6%	25,413	88.3%	7 月	23,585	28,060	119.0%	28,632	102.0%
2 月	23,268	26,482	113.8%	28,563	107.9%	8 月	45,565	52,349	114.9%	54,997	105.1%
3 月	40,720	48,839	119.9%	48,501	99.3%	9 月	31,644	37,481	118.4%	47,706	127.3%
4 月	38,169	38,494	100.9%	40,410	105.0%	10 月	34,619	36,211	104.6%	43,980	121.5%
5 月	46,734	46,922	100.4%	54,198	115.5%	11 月	37,833	46,327	122.5%	47,514	102.6%
6 月	23,228	28,433	122.4%	29,011	102.0%	12 月	25,412	26,786	105.4%	49,706	185.6%
						合計	395,660	445,149	112.5%	498,631	112.0%

注2) 群衆密度の危険水準に関する数値は以下の通りである。

密度(人/m ²)	状態
1.0	雨の日に群衆一人ひとりが傘をさしている状態。JR 新幹線のグリーン車内も密度。
2.0	床座で少し詰めた状態。ゆったりした劇場の客席の密度。長期にわたって人間を収容する場合の限界。
3.0	窮屈な映画館の座席の状態。前後左右に詰めて並んで待っている群衆の状態。
4.0	野球場のスタンドのベンチシートに並んで腰掛けた状態。混雑率 150%の通勤電車内の密度
5.0~6.0	満員のエレベーター内の状態。前後に接触はなく、触れ合う程度。週刊誌は読めるが落とすものは拾いにくい。混雑率 200%の通勤電車内の密度
7.0	肩や肘に圧力を感じる。人と人のかろうじて割り込める。手の上げ下げもできる。
9.0	人と人のかろうじて割り込むことは困難である。
10.0	周囲からの体圧を感じる。
11.0~12.0	周囲からの体圧が強くなり、あちこちから悲鳴が出る。
13.0	うめき声や悲鳴が多くなる。

参考文献 5) から引用