

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—

○中島昌暉*¹ 山田悟史*² 佐野友紀*³

キーワード：避難誘導，群集密度，城郭，危険水準，マルチエージェントシミュレーション (MAS)

1. はじめに

多数の人が存在する場所や狭い通路・分岐路が多い場所において一斉避難が生じた場合、被害を最小化する避難計画が予め策定されていることが重要である。都市圏の駅前地下街や観光地が顕著な例である。駅前地下街は通行者・滞在者が多く、複数の出入口が存在するため避難計画が重要である。観光地ではこれに加え、場所に対する認知度が様々である。このような場所で一斉避難が発生した際、適切な避難誘導がなされないと、避難が遅れるだけでなく群集密度が危険水準に達するなどの理由により二次災害が発生する危険性がある。各施設・地域でこのような二次災害防止を目的にサイン設置や誘導員の派遣などが検討されている。しかし不十分な側面もあり、「どの出口にどのような割合で誘導すれば被害を最小化する確率が高いか」という定量的知見が不明瞭、という例が挙げられる。

観光地の中でも歴史的建造物、特に本研究が対象としている「城郭」においては避難計画が特に重要である。城郭には、歴史的建造物の価値保全の観点から現行法規が適用された建築物の避難計画基準とは異なる事例がある。城郭はその性質から通路が複雑であり、迷いややすく、城内部においても狭い通路が多く存在する。こ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である「避難者は最寄り出口へ向かう」に倣った避難誘導が最適とは限らない。例えば、多数の人を最寄り出口に誘導した結果、最寄り出口に混雑が生じ、群集密度が危険水準に達する場合や、分散した場合と比較して避難完了時間が遅くなる場合もあり得る。このような視点もふまえて歴史的建造物を改修・復元する事例もあり、研究には大窪ら^{1) 2)}の例が挙げられる。

以上のことから本研究は「城郭」を対象に、一斉避難の際の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変化するかを確率現象として把握すること、被害が最小化する確率の高い避難誘導を提示すること、以上の2点を目的とする。

2. 研究概要

本研究の研究対象は愛媛県松山市にある松山城である(図1, 表1)。松山城は歴史的・文化的にも観光資産としても非常に貴重かつ重要な建造物である^{3), 注1)}。松山城には多くの観光客が来訪しており、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。天守閣は大天守・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

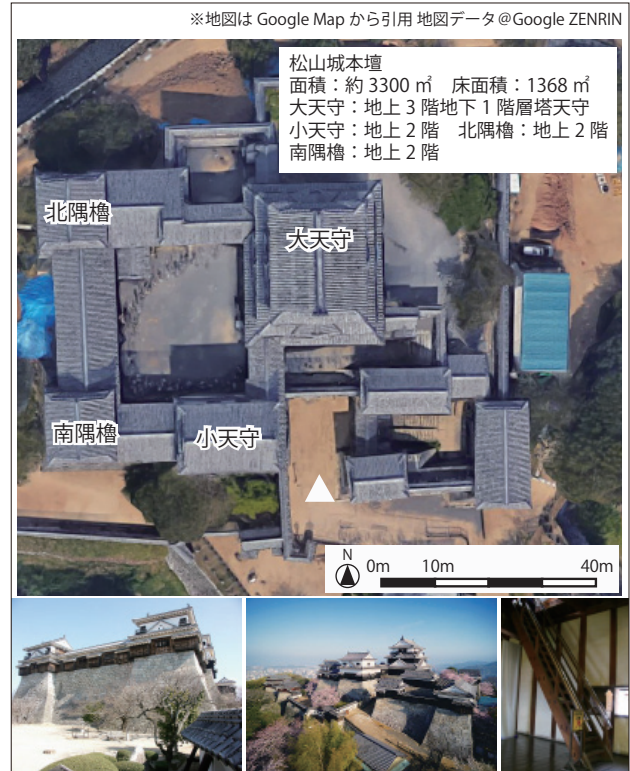


図1 研究対象(松山城)の概要

表1 松山城の来館者数

月	平成25年	平成26年	平成27年	月	平成25年	平成26年	平成27年
1月	24,883	28,765	25,413	7月	23,585	28,060	28,632
2月	23,268	26,482	28,563	8月	45,565	52,349	54,997
3月	40,720	48,839	48,501	9月	31,644	37,481	47,706
4月	38,169	38,494	40,410	10月	34,619	36,211	43,980
5月	46,734	46,922	54,198	11月	37,833	46,327	47,514
6月	23,228	28,433	29,011	12月	25,412	26,786	49,706
				合計	395,600	445,149	498,631

の層塔型の天守である。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的である。この特徴は観光誘致として大きな魅力である一方、観光施設としての課題でもある。建築計画を避難の観点からみると、松山城以外の歴史的建造物群が課題点を抱えてるように松山城にも課題・配慮が必要と考えられる箇所が見られる。顕著な例は天守閣から屋外へ出る階段である。いずれも急勾配な傾向にある。これらのうち本研究では図2に示した2箇所(階段Aと階段B)の階段に着目している^{4) 5)}。階段Aは幅50cm・蹴上27cm・踏面18cmと狭く急勾配である。階段Bは幅200cm・蹴上

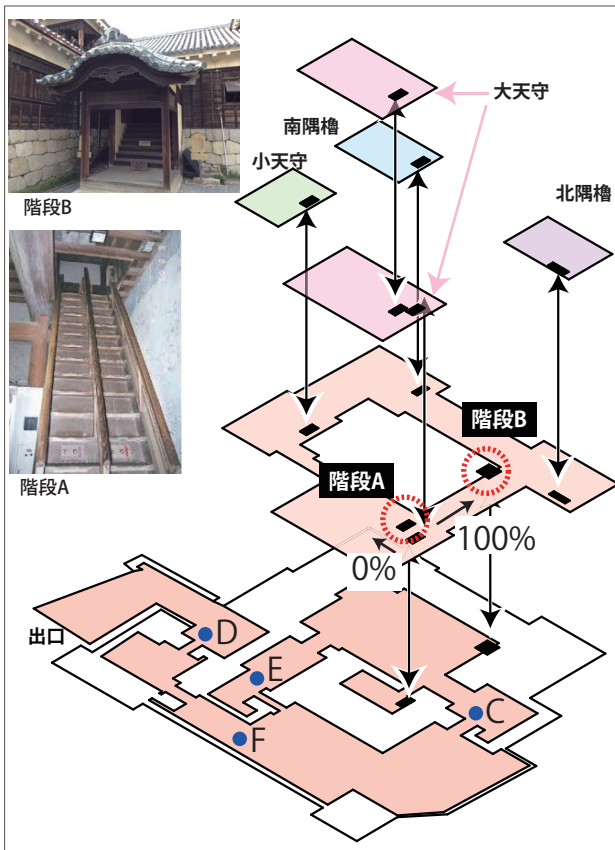


図2 松山城のフロアマップ

23cm・踏面 25cm と相対的に避難上の性能が高い。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、大きな変更は松山城の観光的価値の源となっている歴史的・文化的な価値を損なわせる可能性がある。また実際の避難においては建築計画と同等に避難誘導が重要である。

以上の研究対象の現状と背景をふまて本研究の目的を再掲すると、本研究の目的は、松山城の現状を前提とした有効な避難誘導の定量的な考察である。定量的指標は「階段 A と階段 B に誘導する人の分配割合」と「避難完了時間・基準値以上の群衆密度が発生する広さ」である。この両者の推移をシミュレーションにより把握することで適切な分配割合を考察する。なお大窪ら¹⁾も松山城を対象にしたシミュレーションを実施している。設定値を参考にしているが、シミュレーションの対象が異なり、分配割合や群衆密度を対象とはしていない。

2.2 研究方法

解析には Multi-Agent System (MAS) を用いる。MAS 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の 2 つの出口に対して、一方の出口に向かう割合を変数として、各変数毎の「避難完了時間」と「群衆密度が危険水準 (4 人 / m²) を超えた広さ」を計測する⁶⁾。

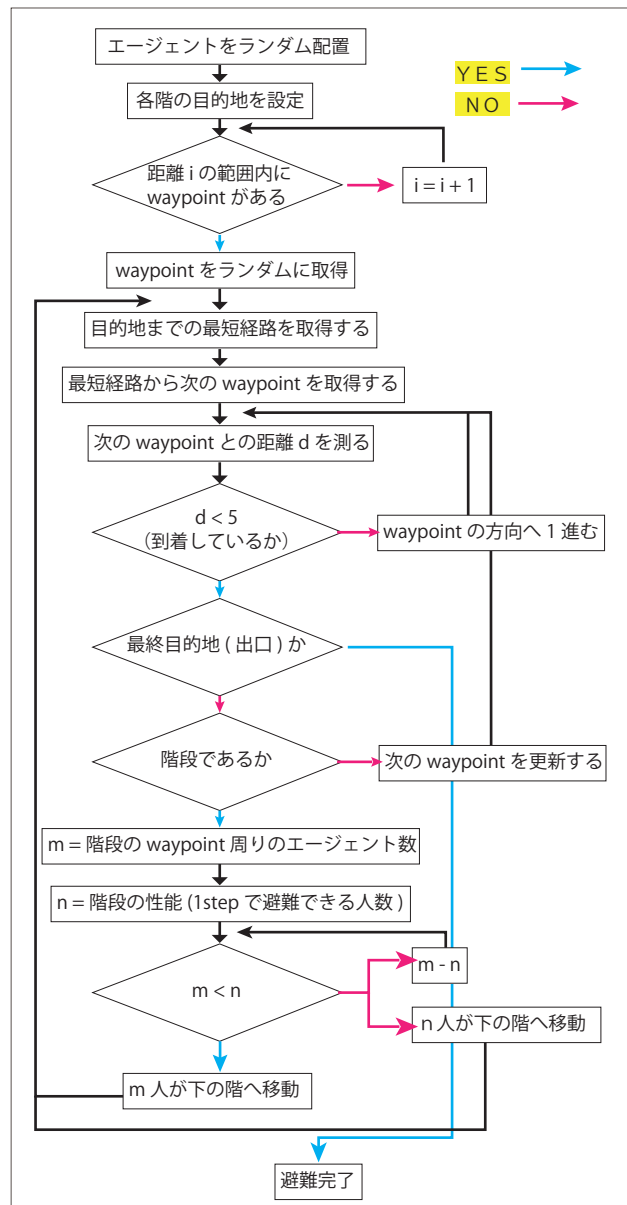


図3 アルゴリズムの概要

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3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「203 人」、1 階「95 人」、2 階「41 人」、3 階「11 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 から各階層で設定してある避難先 (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 (1.2 m / 秒) 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。この干渉ルールには名古屋工業大学の兼田研究室が開発した ASPF モデル^{6) 7)}を基本に拡張した^{注2)}。

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が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 5 秒当たり 1 人、階段 B は 5 秒当たり 3 人である^{注3)}。本研究が観測する「群集密度が危険水準 (4 人 / m²) を超えた広さ」とはこの階段 A と階段 B 周辺に形成される広がりである^{注4)}。また階段に加え通路幅の狭い城門部分や下り坂についても計測した。計測地点は図 2 の青丸の地点である。

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 を使用して下階に降りる避難誘導の割合を 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準を超えた広がりを計測した。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。

3. 解析結果

3.1 避難完了時間

階段 A を最短経路に持つ人を階段 B に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をシミュレーションした。図 4 に各分配割合の 1000 回のヒストグラムを示す。図 4 をみると分散が大きい尖度が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。これを確率密度曲線にしたものが図 5 である。図 5 でも図 4 と類似の傾向が読み取れ、シミュレーションとして得たサンプリング分布では、分配割合を高くすることで平均値 (期待値) が低くなるだけでなく、平均値が安定して低い頑健な状況に変化していることが読み取れる。分配割合が低い段階の分散がやや大きいのが代表値として平均値のプロットを示したのが図 6 である。図 6 を見ると分配割合を 100% に向かって変化させると避難完了時間は短くなるが、約 60% を閾値に減少傾向が増加傾向に反転することが分かる。一方で分散は 70% から 100% に変化することで大きくは変化していない。このことから、避難完了時間の観点からは、全ての人を階段 B に向かわせるのではなく、約 70% の人を誘導することが望ましいと考えられる。

3.2 群集密度が危険水準を超えた広がり

上述のシミュレーションにおいて観測した危険水準以上の群衆密度が発生したエリア数の累計の確率密度曲線を図 7 に示す。いずれも正規分布状で大きな尖度の変化はないまま変化している。階段 A は左側に移動しており、階段 B は右側に変化している。E 地点、F 地点は正規分布状で誘導割合を変化させてもエリア数の

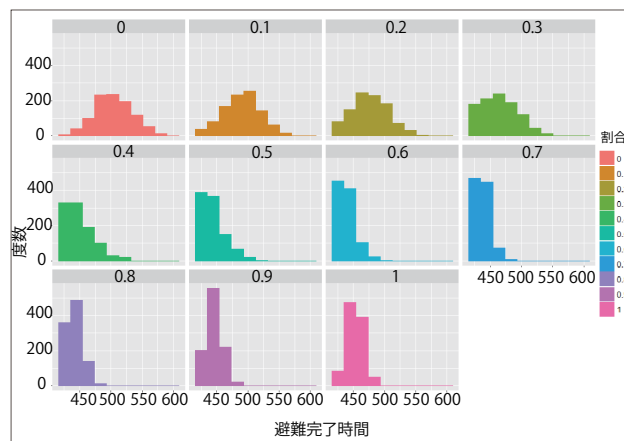


図 4 避難完了時間のヒストグラム

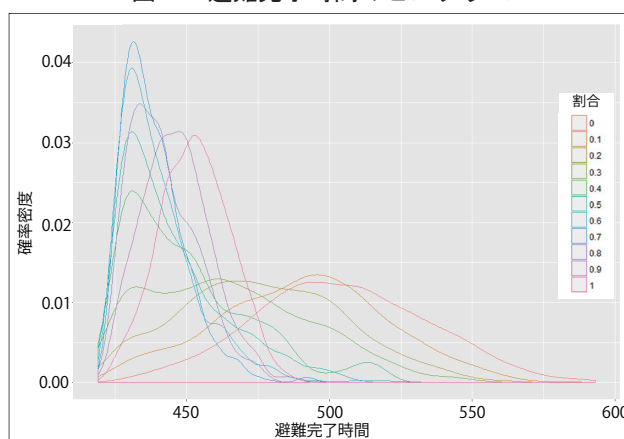


図 5 避難完了時間の確率密度曲線

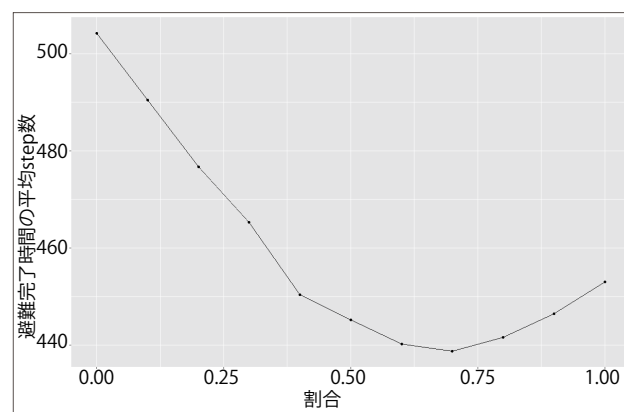


図 6 避難完了時間の平均値プロット

変化はあまり見られない。なお計測地点 C・D は掲載を省略している。これは地上階の通路幅が十分に広いため変化が生じなかったと考えられる。平均の操作のプロットを図 8 に示す。これをみると階段 A の減少幅が階段 B の増加幅より大きいことが分かる。このことから総合的に判断すると避難している人を階段 B へと誘導することが望ましいと考えられる。次に両者の累計の総和を足したプロットを図 9 に示す。これをみると総和の減少傾向が増加傾向に転じる閾値がないことがわかる。このことから、群衆密度の観点からは、全ての人を階段 B に向かわせるよう誘導することが望ましいと考えられる。

4. 考察とまとめ

松山城の避難誘導計画において、階段Aに多くの人は誘導しない方がいいことは自明であるが、階段Bに多く誘導し過ぎると避難完了時間遅くなったり基準値以上の群衆密度が発生する広がりが増えてしまう状態が予想される。しかしこの閾値としての適切な分配割合は不明瞭であった。当然ながら、実際には被災時の状況により柔軟に判断することが重要であるが、予め目安を知っておくことは有用である。本研究では群衆密度が危険水準を越える広がりには分配割合100%（全員を階段Bに誘導する）に近づけるほど安全になる傾向があるが、避難完了時間は70%が閾値となることを把握した。このことから、目安となる適切な分配割合を70%程度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^{注5)}。

今後は設定値の詳細な調査、階段の寸法に応じた性能の調査、滞在人数と階段の性能を変数とするシミュレーションを実施する予定である。

注

- ※1) 松山城のある松山市の中心部には観光地が多く訪れる観光客数も年々増加している。松山城はこれらの観光の要所の一つとして位置付けられる重要な歴史的建造物である。地理的にも、二之丸史跡庭園・愛媛県美術館・坂の上の雲ミュージアム（安藤忠雄設計）・萬翠荘（国の重要文化財）など中心部に位置する勝山の山頂付近にある。直接的な来訪者数は本文に示した天守閣訪問者数となるが、松山城のロープウェイ・リフトの利用者数は1,225,195人であり、天守入場者数以上に約2.5倍の人が松山城を訪れている。歴史的・文化的な希少性からみても松山城は日本で12カ所しか現存していない12現存天守のひとつで、天守を含めた21棟の建造物が国の重要文化財の指定を受けている。
- ※2) 人数や歩行速度も重要な設定値であるが、階段の性能は結果に与える感度が高く、また調査と引用が不十分なため本稿が抱える課題の一つである。そのため本稿の結果において、絶対値としての定量値を評価するには信頼性に課題が残る。そのため分配割合間の相対的な評価となる。
- ※3) 基本的なエージェントの所作としては、人が前方にいた場合は歩行速度を下げ、進行が出来ない場合は左右に回り込むように進行を試みるモデルである。このため進行しづらい状況の場合は塊を形成して塊としてゆっくりと進行し、徐々に崩れるように再び速度を戻しながら進行する、というモデルになっている。
- ※4) 避難時の群衆密度は本研究の危険水準を上回ることがある。しかし密度が危険水準を越えさらに高くなることに伴う危険性としての高まりは知見が不十分である。このため単位面積当たりに4人以上は入らない設定とした。このため計測された広がりとの評価にはこの設定が反映されていることを留意する必要がある。そこで本研究では絶対的として評価については言及はせず相対的な評価のみ言及する。
- ※5) 本研究で把握した分配割合70%から100%への避難完了時間の増加幅と、広がり減少幅の効果の比較は指標が異なるため比較は難しい。今後の課題である。

参考文献

- 01) 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, 7
- 02) 大窪健之, 紺谷渉, 金度源, 林倫子: 国宝松山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, 7
- 03) 松山城ホームページ <http://www.matsuyama.jp/>
- 04) http://kmimu.html.xdomain.jp/castle/sikoku/ehime_36.html

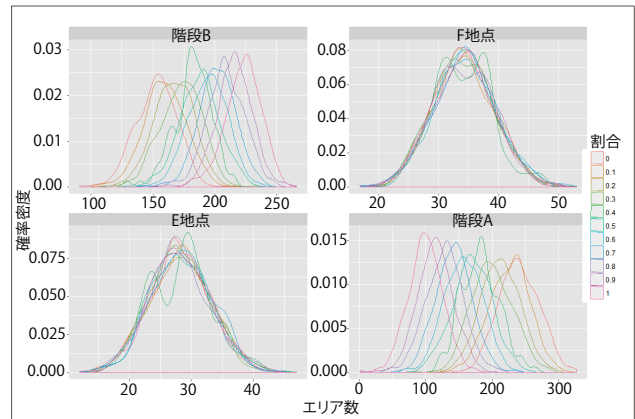


図7 危険水準以上のエリア数の確率密度曲線

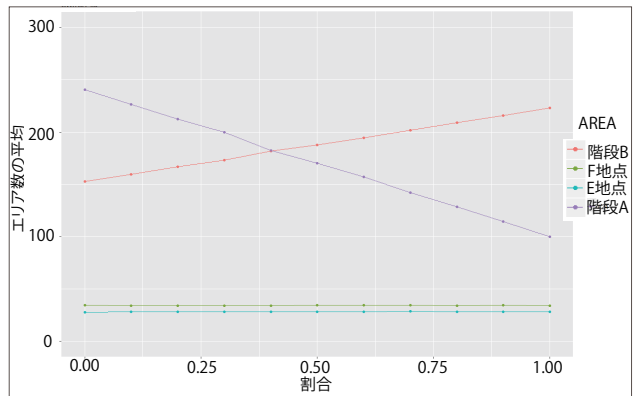


図8 危険水準以上のエリア数の累計プロット

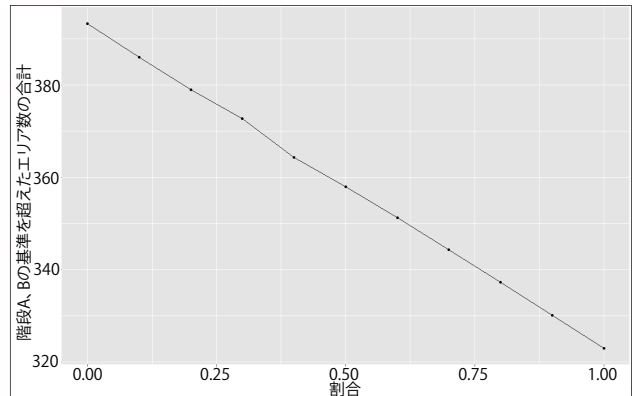


図9 危険水準以上のエリア数の合計プロット (階段Aと階段B地点の合計)

- 05) <http://blog.livedoor.jp/hokuto19760725/archives/11557784.html>
- 06) <https://mainichi.jp/articles/20170827/ddl/k38/040/368000c>
- 07) <http://www.360navi.com/photo/38ehime/02matuyama/01castle/10page.htm>
- 08) <http://www7a.biglobe.ne.jp/~r246/topics/080630.html>
- 09) 山影進: 人工社会構築指南 artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション入門
- 10) 兼田敏之: artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション
- 11) 山田悟史, 遠藤伸太郎, 宗本晋作, 小峯力: 非医療従事者の一次救命による救護環境の計画手法に関する研究, 第39回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集: 報告 pp. 205-208, 2016. 12, 日本建築学会

* 1 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科

* 2 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 講師・博士 (工学)

* 3 早稲田大学 人間科学学術院 人間環境科学学科 教授・博士 (工学)