

歩行者シミュレーションを用いた大規模群集に対する 各種移動制約導入手法の評価

泉野 桂一朗^{1,2,a)} 松島 裕康² 野田 五十樹^{1,2}

概要：本研究では、群集流動に対して空間的制約だけでなく時間的制約を組み込み、様々な組み合わせの方策の効果を見える化し、人流誘導の策定を支援する仕組みを作ることを目的とする。大きなイベントや災害時の避難のような大きな群集では混雑が生じ、時間の浪費や事故の発生に繋がる。本研究では歩行者シミュレータを用い、時間的制約を取り入れた様々な方策での歩行速度や移動時間などについて定量的に評価する手法を提案する。

1. はじめに

花火大会などの大きなイベントや、災害時の避難の際には、一斉に多くの人々が移動するため混雑が生じてしまう。そのため移動に無駄な時間が掛かってしまう可能性がある上に、小さい子供や年配の人がいる場合には事故にも繋がるという可能性もある。混雑の対策として、花火大会の例ではバリケードや警備員による誘導、また車両交通規制や通路の確保といった空間的な制約はよく行われて来ているが、時間的な制約はあまり行われていない。例えば、一斉に同じ目的地に移動するような場合にはテーマパーク等で採用されているアトラクション優先入場案内システムのような時間的な制約が大きく影響するのではないかと考えられる。

本研究では、人の流れに対して従来行われて来た空間的な制約を行うだけでなく、時間的な制約を組み込むことでいろいろな組み合わせの方策の効果を見えるようにし、人流誘導の策定を支援する仕組みを作ることを目的とする。時間的制約を組み込んだ様々な設定においてシミュレーションを行い、それぞれの方策が混雑状態や移動時間のような結果にもたらす影響を可視化することで実世界における施策に役立てることができる。

人流のような実世界で大きな影響を与えるものは、効果の検証なしに施策を講じると大問題に発展する可能性があり、問題解決のための様々な施策を実地において試すこと

は難しい。その際、シミュレーションを用いて効果の検証をしておけばリスクやコストを抑えたままで効果の検証をすることができるため、この研究は非常に重要である。網羅的なシミュレーションによりさまざまな設定の特徴を可視化することで、それぞれの設定がどのようなシチュエーションに適しているのかを考察する判断材料として用いることができるようになる。

2. 問題設定と手法

本研究では災害時やイベントの開催時などに生じる群集流動を評価の対象とし、歩行者シミュレーションを行う。実際の場面で様々な施策の効果を検証することは困難であるため、ここでは歩行者シミュレータを用いて様々なパターンにおいてシミュレーションすることにより、様々な施策の効果を可視化する。

2.1 時間的制約

歩行者に対する時間的制約として、各歩行者は一斉に移動開始するのではなく、異なるタイミングで移動を開始するとした。シミュレーションとしては、マップ上に一斉にエージェントを出発させるのではなく複数のグループに分け、各エージェントグループの出発時刻をずらし、さらに各グループのエージェント数についてもいくつかのパターンでシミュレーションを行った。一斉に目的地に向かうエージェント数を制限することで混雑の軽減が予想される。

2.2 シミュレーション

2.2.1 CrowdWalk

シミュレーションには CrowdWalk (山下ら [1]) シミュ

¹ 東京工業大学大学院 総合理工学研究所 知能システム科学専攻
4259 Nagatsutacho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8563, Japan

² 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

a) izuno.k@ntt.dis.titech.ac.jp



図 1 CrowdWalk によるシミュレーションイメージ

レータを用いる。CrowdWalk は一次元空間モデルを採用しており、道路をリンクで表すことによって簡易化されたシミュレータである。よって高速にシミュレーションすることが可能となっているため、大規模広域、網羅的なシミュレーションに適している。歩行者をエージェントとみなし、ソーシャルフォースモデルを採用しており前方の歩行者との距離や密度によって歩行速度を決定する。

2.2.2 シミュレーション設定

本研究では、対象地域として鎌倉市材木座地区を取り上げる。この地域は観光客も多く、東海地震での津波被害が予想されるため、予め円滑に避難するための対策が必要である。この地域はおよそ 8000 の人口であるが、観光客も多いためそれを考慮したエージェント数においてシミュレーションを行う。また歩行者を表すエージェントは対象エリアを構成するそれぞれのリンクに均等に配置されるものとした。本シミュレーションでは、対象の地域が実際の避難所としている 3 地点をエージェントの目的地とする。

また、地震などの災害が起きた際には、建物が倒壊したりする影響により通行が困難な道路ができる可能性がある。この状態を表現するため、シミュレーションでは平時よりも狭くなっている路を導入し、この路を狭路と呼ぶこととした。狭路を避けるエージェントの割合を変えることで、災害が起きた際に安全な経路に誘導できた割合がどれだけ移動時間や混雑への影響がでるか可視化する。

図 2 は、混雑に巻き込まれたエージェント数の和について、エージェントが 2 つのグループに分かれて時間差を持って出発した場合と、全エージェントが同時に出発した場合を比較したものである。

全エージェントが同時に出発したときに比べ、2 グループに分かれてエージェントが出発した場合の方が、時間差によらず混雑に巻き込まれる数が少なくなっていることがわかった。混雑しているところに、さらにエージェントが到達すると混雑の度合いは高くなっていくが、時間差を設けることによって一度に押し寄せるエージェント数が制限されるために混雑の度合いが低くなったと考えられる。ま

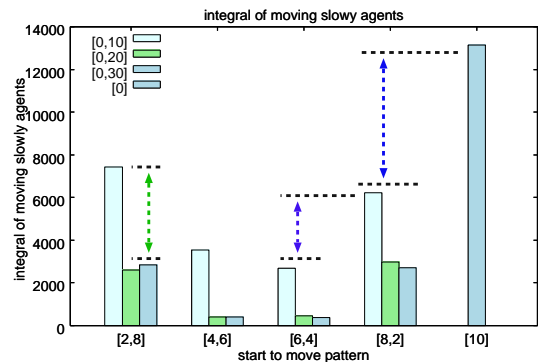


図 2 混雑に巻き込まれるエージェント数 (2 グループ)
 Fig. 2 number of agents involved in congestion

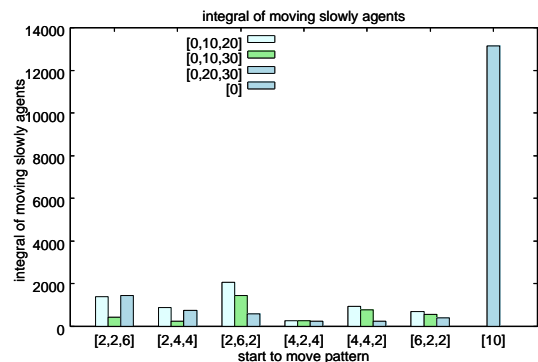


図 3 混雑に巻き込まれるエージェント数 (3 グループ)
 Fig. 3 number of agents involved in congestion

た、十分な間隔を空けなければ、先に移動開始したグループに追い付いてしまうため、効果が薄くなるということが言える。

2 つのグループに分けた設定の中でも、各グループのエージェント数の割合によって差がある。”[4,6]”や”[6,4]”の設定では、一度に移動開始するエージェント数が他の設定に比べて少ないため、混雑の度合いは低くなっている。逆に”[2,8]”や”[8,2]”では、多いときで全体の 8 割もエージェントが一斉に移動開始するので、グループ内での混雑が起きやすいため混雑の度合いは”[6,4]”などの設定と比べて高くなっている。

図 3 は 3 つのグループに分けた時の結果となっている。このとき、一つの群に含まれるエージェント数は 2 グループに分けたときと比べて小さくなるため、混雑の度合いは大幅に小さくなっている。その中でも、前と後ろのグループにエージェントが偏ったパターンにおいては、前方のグループに追い付く数がさらに少ないため、混雑の度合いも非常に低くなっている。また時間的制約によって混雑があまり起きていないため、各グループが持つエージェント数の割合による差はあまり見られなかった。図 2, 3 から、複数のグループに分けて一斉に移動するエージェントを制限し、時間差を設けることで混雑の緩和をすることができるということが言える。

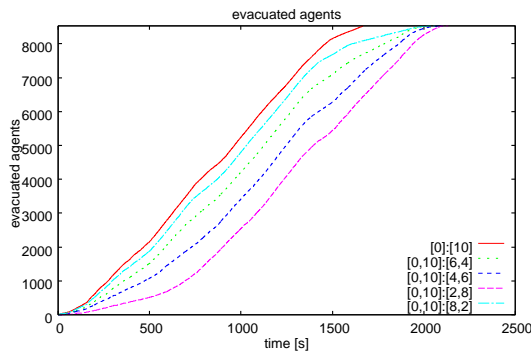


図 4 移動完了エージェント数の時系列
(シミュレーション開始から 0 秒と 600 秒に移動開始)
Fig. 4 number of agents finished moving

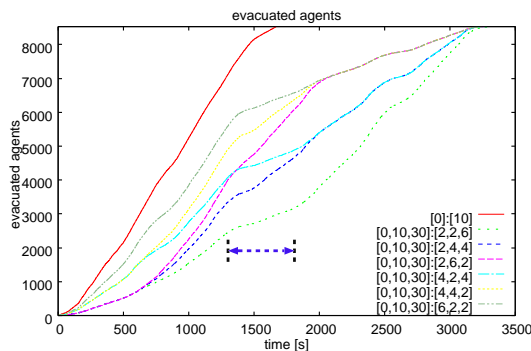


図 5 移動完了エージェント数の時系列
(0 秒と 600 秒と 1800 秒に移動開始)
Fig. 5 number of agents finished moving

2.2.3 全体の移動にかかる時間

シミュレーション開始からすべてのエージェントが最寄りの目的地に到達するまでの時間を、その設定での全体の移動にかかる時間とし、移動完了時間と呼ぶ。図 4 は、エージェントが 2 つのグループに分かれ、600 秒 (10 分) の間隔を持って出発したときの移動完了エージェント数、及び全エージェントが同時に移動開始したときの移動完了エージェント数の時系列である。どちらの設定においても、目的地付近のエージェントの列がほぼ途切れずに続いており、常に一定数のエージェントが目的地に到達するため、移動完了エージェント数はほぼ同じように増加している。特に「[8,2]」の設定においては、初めに全体の 8 割のエージェントが移動開始するため、一斉に移動するパターンと同じくらいのペースで目的地到達が進んでいる。しかし後から移動開始した 2 割のグループは、移動開始の遅れの影響で目的地到達まで時間が掛かっている。図 5 は最初のグループが出発してから 600 秒 (10 分)、そして 1800 秒 (30 分) の間隔を持って残りのグループが出発したものである。およそ 1700 秒付近から移動完了状況が変わらない時間が存在する。これは 2 番目に出発したエージェントのグループと 3 番目に出発したエージェントのグループの間隔が大きすぎるため、目的地付近にエージェントが存在し

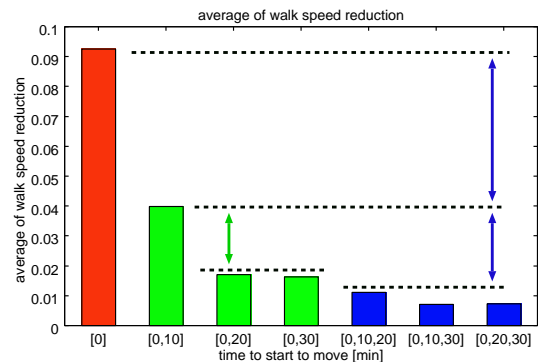


図 6 エージェントの歩行速度低減率の平均
Fig. 6 average of the rate of speed reduction

ないという無駄な時間ができてしまっているためだと考えられる。よって時間を空ければ良いというのではなく、適切な間隔にしなければ移動完了時間が長くなってしまい、例えば津波などの災害の際には逃げ遅れなどの問題にもつながる。

2.2.4 エージェントの歩行速度低減率の平均

$$reduction = (v_0 - v) / v_0 \quad (1)$$

自由歩行速度を v_0 、各タイムステップ毎の歩行速度を v としたときに上式で表される、自由歩行速度に対してエージェントの歩行速度がどれだけ制限されたかという値を、ここでは歩行速度の低減率と呼ぶ。

実世界で混雑が生じたとき、混雑に巻き込まれている人々の歩行速度は遅くなっている。本シミュレーションでは、混雑の影響で歩行速度が遅くされているこの度合いを歩行速度の低減率として表し、各設定における歩行速度の低減率がどのような特徴を持つのかを以下の図で示した。

図 6 はエージェント毎の歩行速度低減率の平均を比較したものである。複数のグループに分かれて出発した方が低減率は小さい、すなわちスムーズに移動できていることがわかった。混雑に巻き込まれるエージェント数が少ない分、スムーズに移動できたエージェント数が増加することで歩行速度低減率は小さくなったと考えられる。しかし 2 つのグループで 600 秒 (10 分) の間隔しか空いていない場合はやや低減率が大きくなっていることがわかる。3 つのグループにおいても 600 秒 (10 分) という短い間隔でエージェントが出発しているところがあるが、各グループのエージェント数は 2 グループのときと比べて小さいため低減率はあまり大きくならない。

2.2.5 歩行速度低減率の標準偏差

図 7 はエージェントの歩行速度低減率の標準偏差である。エージェントを複数のグループに分けた方が標準偏差が小さくなっており、各エージェントが受ける速度の抑制は、より平等になっている。一斉に出発した場合は、群の先頭付近で移動しているエージェントは簡単に目的地に到達す

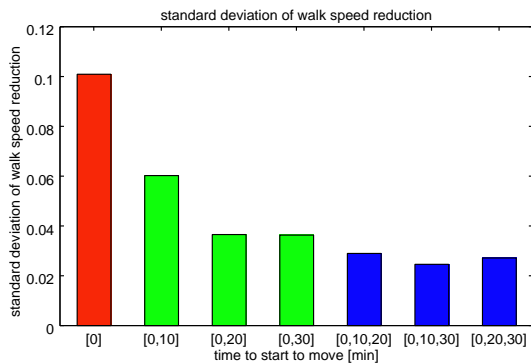


図 7 エージェントの歩行速度低減率の標準偏差

Fig. 7 standard deviation of the rate of speed reduction

ることができるが、群の後方で移動しているエージェントは混雑に巻き込まれ、なかなか目的地に到達することができないような状況が出来ている。図 6, 7 から、エージェントが複数のグループに分かれ、時間差を持って出発したときは各エージェントの歩行速度低減率が小さくなっているだけでなく、さらに平等になっていることがわかった。

実際のイベント終了後などに生じる混雑については、全体の移動を早めることよりも事故やトラブルなどの防止といった目的で混雑の緩和を優先するため、各人の移動をスムーズにしてくれる時間的制約は有効である。イベント終了後に十分な時間を空けるような別のイベントを用意しておくなどの方法が効果的だと考えられる。各人が混雑によって受ける速度の制限も時間的制約によって、より平等になる。したがって先に移動開始した人も、後から行われる別のイベントに参加したあとで移動開始した人も満足度の高いは高くなるだろう。

2.3 空間的制約を用いたシミュレーション [シナリオ 2]

災害時に建物の倒壊が起きたり道路が工事中であったりすることなどによって、道幅が狭められて通りにくい箇所ができてきたりする。そこを多くの人が通ると、その道で人口密度が高くなって歩行速度が低下し、混雑を引き起こす。最短経路で目的地に向かう途中にその道があったとき、移動距離が長くなるとしてもその道を選んで目的地に向かった方が混雑は軽減されると考えられる。メディアを通して通行困難な道の情報を発信するなどの策によって混雑を緩和できる可能性がある。空間的制約として、ある道が外的要因によって狭められている状況を想定し、道幅が狭められている道 avoider 経路を指定する形で指示を与える。ここではこのような経路を持つエージェントを迂回エージェントと呼び、全体のエージェント中で 0%, 50%, 100% という割合で用いてシミュレーションを行った。また、狭路を避ける経路点を持たずに最短経路で目的地に向かうエージェントを最短経路エージェントと呼ぶ。図 9 は、迂回エージェントの割合を変化 (0, 50, 100[%]) させ、そ

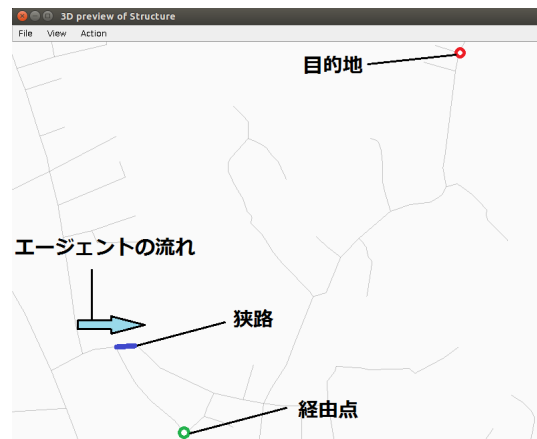


図 8 狭路を避ける経路点の指定

Fig. 8 set point in order to change route

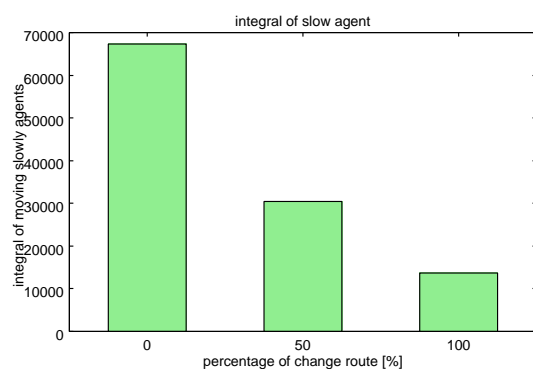


図 9 混雑に巻き込まれるエージェント数

Fig. 9 number of agents involved in congestion

れぞれのパターンにおいて混雑に巻き込まれるエージェント数を比較したものである。迂回エージェントの数が増えるほど、混雑に巻き込まれるエージェント数は少なくなっている。狭路を避けても群集流動による混雑は生じるが、狭路の部分で生じる混雑への影響の方が大きいためこのような差が生まれている。

実世界においては、道幅が狭くなっていたり通行不可となっている箇所を如何にして避けるかが重要となる。災害時に建物の倒壊で通りにくい道ができた場合は、メディアを通しての推奨経路の情報伝達や警備員による誘導などの対策例が挙げられる。イベント開催時に、会場への道中に工事などの影響で通りにくい道ができていたような場合は、最寄り駅で推奨経路を示した近辺のマップを配布したり、イベント運営のウェブサイトですべて提示しておくなどの方法が考えられる。図 10 は、上記設定における移動完了エージェント数の時系列である。迂回エージェントの数が多いほど、移動完了時間が短くなった。通行困難な道があるときは遠回りをしてでも狭い道 avoider 混雑に巻き込まれないようにしたほうが全体の移動効率は良くなるということが分かった。

実際に地震が起きて津波被害が予想されるような場合、できるだけ早く避難しなくてはならない。その際に地震に

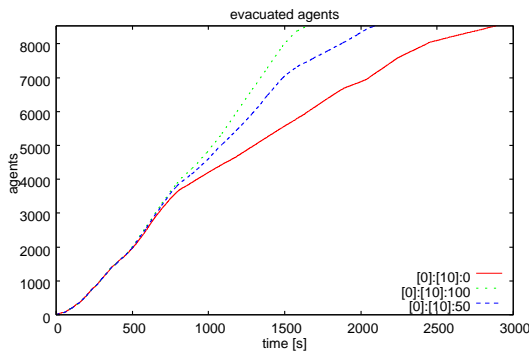


図 10 移動完了エージェント数の時系列
Fig. 10 number of agents finished moving

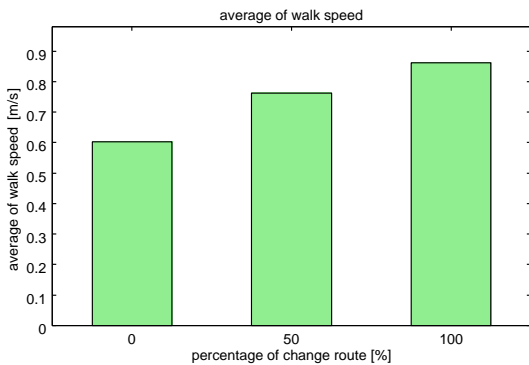


図 11 エージェントの歩行速度低減率の平均
Fig. 11 average of the rate of speed reduction

よって倒壊した建物などの影響で逃げ遅れてしまう人をできるだけ減らすためには、道路状態を即座にテレビやラジオ、スマートフォンなどのメディアから伝えたり、できるだけ早く推奨経路に誘導するような標識や警備員を配置して迂回させることが重要となる。図 11 は迂回エージェントの割合を変化させたときの、エージェントの歩行速度低減率の平均である。迂回エージェントの割合が大きいほど、エージェント毎の歩行速度低減率の平均は小さくなっている。また、割合が大きいほど標準偏差は小さくなるという結果も出ており、コストがより平等にかかっていると言える。

2.4 時間的制約と空間的制約の組み合わせ [シナリオ 3]

混雑が発生すると予測される状態に対し、シナリオ 1 とシナリオ 2 で記した時間的制約と空間的制約によってさらに混雑を緩和できるという可能性がある。時間的制約と空間的制約を組み合わせさせたシミュレーションの結果が以下となる。

2.4.1 混雑の度合い

図 12 は、この設定の中でエージェントの移動開始を 2 グループ (時間差 600 秒 (10 分)) に分ける時間的制約を加えたときの混雑に巻き込まれるエージェント数を比較したものである。エージェントの移動開始パターンに限らず、迂回エージェントの割合を大きくすると、混雑に巻き込ま

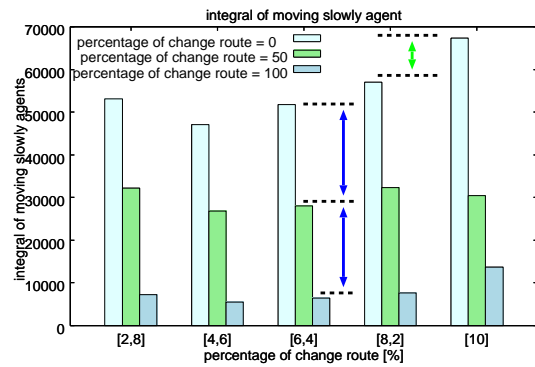


図 12 混雑に巻き込まれるエージェント数
(0 秒と 600 秒に出発、迂回エージェント 0,50,100[%])

Fig. 12 number of agents involved in congestion

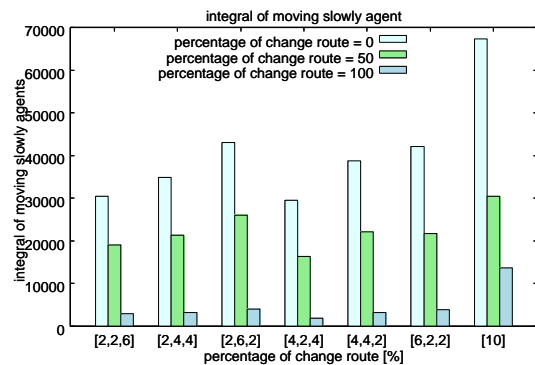


図 13 混雑に巻き込まれるエージェント数
(0,600,1200 秒に出発、迂回エージェント 0,50,100[%])

Fig. 13 number of agents involved in congestion

れるエージェント小さくなるという結果が得られた。時間的制約の効果としては、迂回エージェントの割合が 0% のときは混雑の軽減が顕著であったが、空間的制約との組み合わせにおいてはあまり発揮されなかった。迂回エージェントが多いほど混雑が生じにくくなり、時間的制約の効果あまり得られなかったためだと考えられる。

図 13 は 3 グループ (時間差 600 秒 (10 分)) に分ける時間的制約と空間的制約を用いたシミュレーションによる混雑に巻き込まれるエージェント数である。図 12 に示した 2 グループに分ける時間的制約のときと同様に、空間的制約と組み合わせることで時間的制約の効果は見られたが、薄くなった。

実世界においても、イベントなどでは予め混雑の対策を用意しておくことができる。よってシナリオ 1 でも挙げたように、移動開始時刻に差ができるような施策を行うことで時間的制約を設けたり、警備員の誘導などによる空間的制約と組み合わせることで、より混雑を軽減することができるようになるだろう。しかし全員が移動し終わるまでの時間は大幅に延びてしまう可能性があるため、状況に応じた施策をする必要がある。

2.4.2 全体の移動にかかる時間

図 14, 図 15 は、エージェントを 2 つのグループに分け、

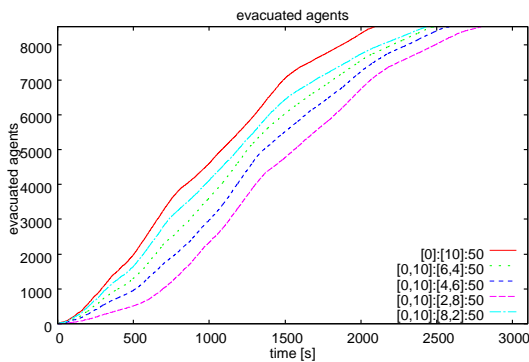


図 14 移動完了エージェント数の時系列
 (0秒と600秒に移動開始 迂回エージェント 50%)
 Fig. 14 number of agents finished moving

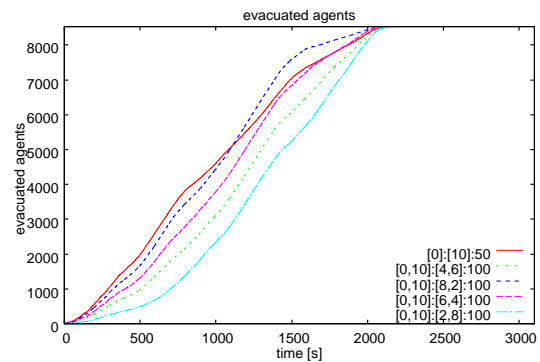


図 16 移動完了エージェント数の時系列
 (0秒と600秒に移動開始 迂回エージェント 100% & 一斉
 に移動開始 迂回エージェント 50%)
 Fig. 16 number of agents finished moving

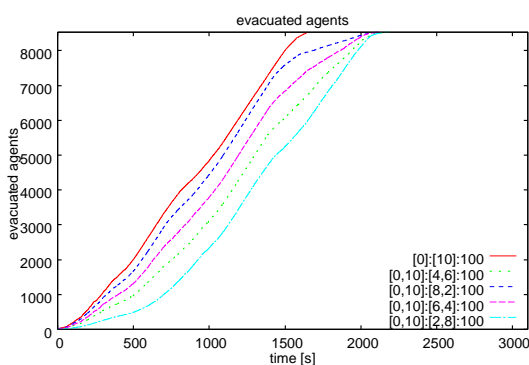


図 15 移動完了エージェント数の時系列
 (0秒と600秒に移動開始 迂回エージェント 100%)
 Fig. 15 number of agents finished moving

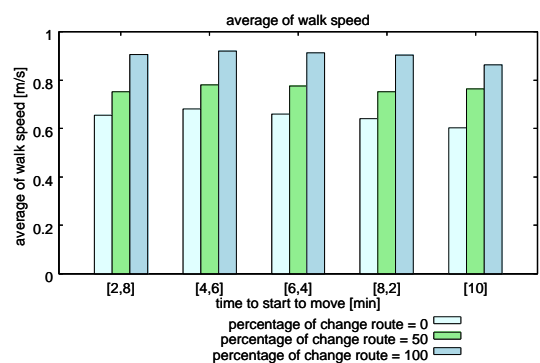


図 17 エージェントの歩行速度低減率の平均
 (2グループ 迂回エージェント 0,50,100[%])
 Fig. 17 average of the rate of speed reduction

かつ迂回エージェントの割合を50%または100%にした場合と、最短経路エージェントが一斉に移動する設定での移動完了エージェント数を比較したものである。最短経路エージェントを用いて一斉に移動した方が移動がスムーズに完了しているという結果が得られた。迂回エージェントを用いて移動時間を短縮することができても、時間的制約を加えることによって一斉に移動開始する設定よりも移動時間が長くなってしまった。

迂回エージェントが100%のときは混雑があまり生じないため、後半に移動開始したエージェントの内、目的地までの距離が遠い所から移動開始したエージェントが目的地に到達するまでの時間が移動完了時間に影響していると考えられる。よって図15では各グループのエージェント数の割合に関わらず移動完了時間はほぼ等しくなっていると考えられる。

迂回エージェントの割合が等しい場合は一斉に移動開始する方がスムーズな移動が可能という結果であったが、迂回エージェントの割合を大きくして時間的制約の際に移動時間効率の良かったパターンと複合することで、よりスムーズな移動が可能になる可能性があるということが図16からわかった。

2.4.3 歩行速度低減率の平均と標準偏差

図17は歩行速度低減率の平均である。迂回エージェントの割合が50%と100%のときは歩行速度低減率の平均は小さくなったが、時間的制約による効果は小さかった。これは空間的制約による混雑緩和への影響が大きく、混雑があまり起きない状態であるため時間的制約の効果があまり得られなかったと考えられる。

迂回エージェントの割合が0%のときは、時間的制約の影響のみを受けるため、シナリオ1でも得られた結果と同様にやや歩行速度低減率の平均は小さくなっている。これはシナリオ1でも述べたように、時間的制約により混雑に巻き込まれるエージェント数が減少することで、よりスムーズな移動ができた結果だと考えられる。

図18は、上記のシミュレーションによって得られたエージェント毎の歩行速度低減率の標準偏差である。図17の結果からもわかったように、迂回エージェントの割合が大きいつまは時間的制約の効果があまり見られず、2グループに分かれて移動開始する場合と一斉に移動開始する場合であり差はないという結果が得られた。また3グループに分かれて移動開始する設定の場合では、2グループに分かれたときよりもさらに混雑が軽減され、スムーズに移動

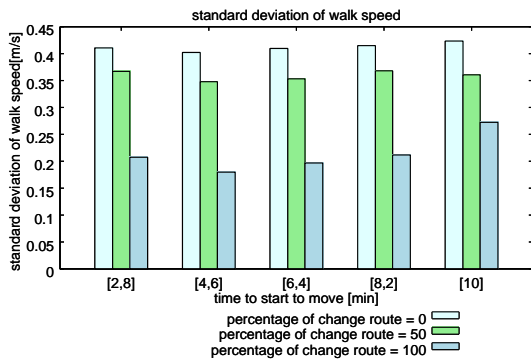


図 18 エージェントの歩行速度低減率の標準偏差
 (2 グループ 迂回エージェント 0,50,100[%])

Fig. 18 standard deviation of the rate of speed reduction

できるエージェントが増加し、標準偏差も小さくなった。

3. 考察

シナリオ 1 のシミュレーションにより、群集に対して時間的制約を導入し、エージェントが一斉に移動開始するのを回避することで、混雑の緩和をすることができるという結果が得られた。また、時間的制約として分けられた各グループが含むエージェント数は、少ない方がより混雑の軽減をすることができる。すなわち同時に移動開始するエージェントの数にできるだけピークを持たせないことが混雑軽減をする上で重要な点である。また、時間的制約によりエージェントの歩行速度の低減率が小さくなり、かつエージェント毎の偏差も小さくなった。すなわち、よりスムーズで平等な移動ができるようになったと考えられる。各グループの移動開始の間隔を大きくすることによってさらに混雑の軽減をすることができるが、配置するエージェント数に対して必要以上の間隔を持たせると、移動完了時間の遅延に直結するため、災害時の避難の際には危険度が増すことになる。

イベントの際は予め警備員を配置することで、人の移動に制約を加えることは比較的容易となる。花火大会では、花火が終わった途端に一斉に帰ろうとする人が多いため、これを分散させるためには時間的制約は有効だと考えられる。また各人の移動時間の短縮をすることにも繋がる。しかし津波が予想されるような災害などが起きたときは、全員ができるだけ早く移動し切ることを目指す必要があるため、時間的な制約をすることは逆効果となる。

シナリオ 2 で行ったシミュレーションにおいて、空間的制約として迂回エージェント一定の割合で用いたとき、その割合を大きくすることで混雑の緩和が見られた。そして全エージェントが移動完了するまでの移動完了時間も短縮することができた。

大きなイベントが開催されるようなときは、その土地の情報や参加者がどの経路を主に用いるのかある程度予想することができる。そのため、推奨経路を記した看板を立て

たり、必要な場所に警備員を配置するなどの対策によって混雑の緩和が可能となるだろう。また、災害時に建物の倒壊などによって通行が困難な道ができた場合、ここで混雑が生じる可能性がある。地震による津波被害が予想される場合、できる限り最短の経路で避難所に向かおうという心理が働く人も多いと思われるが、安全で広い経路を通った方が速やかな避難をすることができると考えられる。広くて安全な道を通る避難訓練を行ったり、たとえ近道でも狭くて危険な道を選んだ方がスムーズに移動できるという情報を予め周知しておくことによって、災害時の安全な避難のための備えをすることができるだろう。

シナリオ 3 では、時間的制約と空間的制約を組み合わせたシミュレーションを行った。結果、空間的制約の影響が顕著に出ており、時間的制約の効果は比較的小さかった。空間的制約の影響がかなり大きいいため、混雑に巻き込まれるエージェント数が少なくなったなり、時間的制約の効果あまり見られなかったと考えられる。時間的制約をさらに加え、分けるグループ数を多くしたり間隔を大きくすれば効果が大きくなると考えられるが、移動完了時間は長くなってしまふと予想される。イベントなどの際は全体の移動時間の短縮を重視する必要はないため、時間的制約は有効だと考えられる。

移動完了エージェント数としては、迂回エージェントの割合に関わらず、時間的制約を加えることによって移動完了時間は長くなるという結果が得られた。空間的制約によって混雑は起きにくくなっているため、時間的制約による移動開始時刻の遅延が移動完了時間に直接作用していると考えられる。混雑の緩和のみに注目する場合は時間的制約と空間的制約を組み合わせることによって効果の増大が期待できるが、津波被害が考えられるときなどのように全体の移動完了までの時間を考慮する場合は時間が長くなってしまふという危険性も考慮しなくてはならない。

しかし、半数が迂回エージェント、残りの半数が最短経路エージェントとして一斉に移動するのに比べ、時間的制約を受けていても全エージェントが迂回エージェントのときは、全体としてはよりスムーズに移動できるパターンもあった。これまでは一斉に移動開始すると全体の移動は早いという結果であったが、迂回エージェントを増やすことで時間的制約による移動時刻の遅れをカバーできる可能性があると考えられる。

実世界において地震が発生し、津波被害が予想されたとき、年齢層やその時に何をしていたかによって移動開始時刻は違うため、全員が瞬時に移動開始できるとは限らない。しかし安全な道の情報の伝達や、その道への誘導をすることによって、安全な経路を辿る人の割合をどれだけ大きくできるかが速やかな避難に繋がると考えられる。イベントの際には上で述べた様々な時間的制約や空間的制約をできる施策を組み合わせることによって、事故の防止や参加者

	混雑の度合い	移動完了までの時間	歩行速度の低減率	歩行コストの平等さ
時間的制約	緩和する	長くなる	小さくなる	より平等になる
空間的制約	緩和する	短くなる	小さくなる	より平等になる
時間的制約と空間的制約	とても緩和する	やや長くなる	小さくなる	より平等になる

図 19 各種移動制約の効果

Fig. 19 effectiveness of each simulation settings

の満足度の向上などにも繋がるだろう。

混雑の度合いについては、ここで用いたどの制約でも緩和することができた。空間的制約を用いた場合では移動完了までの時間が短くなるため、津波被害などが予想される時の避難などに有効だと考えられる。時間的制約も混雑の度合いを緩和してくれるため、イベントが行われる際になどに発生する混雑には有効だと言えるが、全体の移動完了までの時間が長くなってしまいうため津波からの避難などには適していない。時間的制約と空間的制約を組み合わせた場合では、混雑緩和の度合いをさらに高めることができ、さらに各人の移動もスムーズで、かつ平等にすることができるため、花火大会などのイベント時に発生する混雑などには強い効果を発揮するだろう。

実際の避難やイベントなどで多くの人々が移動する際には、自分の向かっている方向とは逆に向かってくる人がいたり、前方の人の流れに従って経路を選択するなどの心理的な要素が含まれると考えられる。特に災害時には混乱が生じやすいため、より複雑な人流となることが予想される。これらの影響を加味した上でシミュレーションをすることができれば、施策の検証方法としてさらに有効な情報を提供することができるようになるかもしれない。

4. まとめ

災害時やイベントの際には混雑が生じて様々な危険に繋がるが、その対策案の効果を検証することは難しいため、本研究では歩行者シミュレーションによって時間的制約や空間的制約を用いた様々な施策の効果を可視化する手法を提案した。

時間的制約によって混雑の度合いは緩和されるが、移動時間は長くなってしまいうというデメリットも見られた。また、空間的制約によって混雑を緩和でき、移動完了時間も短くなるという結果が得られた。時間的制約と空間的制約を組み合わせではさらに混雑の緩和ができるという結果が得られたが、空間的制約の影響によって混雑があまり起きない状況となるため時間的制約の効果は薄れた。また時間

的制約による移動時間の遅延が大きいため、同じ空間的制約下では移動完了時間は長くなってしまいうという結果が得られた。しかし迂回エージェントの割合を 50%として時間的制約をしないときよりも、迂回エージェントの割合を 100%として時間的制約を加えた方が移動がスムーズになるパターンもあり、かつ混雑緩和の度合いも大きくなるという結果も得られた。

実際の歩行者に対する時間的制約は、花火大会などのイベントのような全体の移動時間よりも混雑の緩和を重視するようなシチュエーションに適しており、混雑の緩和と同時に移動時間の短縮をするためには警備員を配置して誘導したり、予め狭路を避ける経路の情報をメディアなどを通して伝えるといった空間的制約をするのが効果的だと考えられる。花火大会などの大きなイベントの際の人流には時間的制約や空間的制約は有効であり、津波被害などが予想される災害発生時の人流には空間的制約が有効だろう。

時間的制約として人々の移動開始時間をずらすためには、例えばイベント会場で小さな催しを行ったり、空間的制約として経路地を与えるためには警備員の手配などが挙げられる。本研究で提案したシミュレーションを用いた様々な施策の検証から、実際の制約を与える方法を思案するのに役立つだろう。

参考文献

- [1] 山下倫央 et al., 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用. 情報処理学会論文 53,1732-1744 (2012)
- [2] Tomohisa YAMASHITA et al., Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-Scale Pedestrian Flow SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.2, pp.137-146, March 2013
- [3] 泉野桂一朗 et al., 時間的制御を組み込んだ歩行者移動のシミュレーションによる効率評価 人工知能学会 (2014)
- [4] 室崎益輝, 明石花火大会における群集雪崩 予防時報 208 (2002)
- [5] 伊藤悠太郎 et al., エージェントアプローチによる群集流動のシミュレーション分析 KK-MAS コンペティション (2004)