

煙の影響を考慮したトンネル火災の避難行動シミュレーション

EVACUATION BEHAVIOR SIMULATION OF A TUNNEL FIRE DISASTER CONSIDERING THE INFLUENCE OF SMOKE

大上 俊之¹⁾, 朝山 雄介²⁾, 小山 茂³⁾

Toshiyuki OHKAMI, Yusuke ASAYAMA and Shigeru KOYAMA

- 1) 信州大学工学部土木工学科 (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: tohkami@shinshu-u.ac.jp)
2) 中外炉工業 (株) (〒 541-0046 大阪市中央区平野町 3-6-1)
3) 信州大学工学部土木工学科 (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: koyama@shinshu-u.ac.jp)

This paper treats an evacuation behavior simulation of a tunnel fire disaster by using Multi-agent model. Multi-agent modeling is a computational method that allows building an artificial environment populated with agents which are capable of interacting with each other. In this paper, we simulate an emergency evacuation behavior from a tunnel and investigate the influence of the physical environment and the properties of evacuees on the evacuation results. Through the simulation and the experimental design, it is shown that the existence of a bus vehicle and the spread of fire smoke give the influence of the evacuation behavior and the smoke exhaust equipment is effective for decreasing the number of the casualty.

Key Words: Evacuation Behavior Simulation, Multi-Agent Model, Tunnel Fire Disaster

1. はじめに

トンネルという閉鎖された空間での火災における人的災害の防止策を考える際には、火災発生時におけるトンネル内部の状況・内部空間の変化が避難行動に与える影響や、災害時の人間の行動を検討しておくことが重要である。内部の状況は構成要因同士の様々な相互作用によって変化し、その結果として人的災害が引き起こされたり、災害の規模にも大きく影響を与える。このように様々な要因から情報がボトムアップされて、1つの全体系の動きが決定される現象を解析する手法としてマルチエージェントシミュレーションがある⁽¹⁾。

本研究は、トンネルにおける火災時の避難行動についてマルチエージェントシミュレーションを行うもので、避難者の行動特性とトンネルの内部の要因が避難完了時間と被害者の数に与える影響を数値的に評価する。

避難者の行動特性として視野範囲と情報伝達範囲、移動速度を設定し、また、避難者エージェントを若年者、高齢者の2種類に分け、高齢者には視野範囲、移動速度、移動方法に制限を設けた。トンネルの内部状況の構成要因に障害物としての残留車両、避難誘導灯の有無、煙の遡上速度、排煙装置による排煙効果、バスの有無を設定した。これらの要因の条件を変化させてシミュレーションを行い、その結果を実験計

画法により分析して避難が完了する時間と逃げ遅れる被害者数への影響を検討する。

避難行動に関する研究は、CAを用いた歩行シミュレーション⁽²⁾や個別要素法を用いた避難行動シミュレーション^(3, 4)、人間の行動をポテンシャルで規定した地下街の安全性の検討⁽⁵⁾、誘導員による避難誘導を行うもの⁽⁶⁾、情報の伝達を考慮した避難行動シミュレーション⁽⁷⁾など様々な研究が行われている。既往の避難モデルでは誘導員のみ効果、標識の重要性などは述べられているものの、どの要素が避難行動により大きな影響を与えるかは記述されていないようである。

一方、高平ら⁽⁸⁾はマルチエージェントモデルを用いたトンネル火災の避難行動を扱っている。本研究では、高平らによるモデルを参考に煙の進展に伴う煙中下における避難者の視野範囲の低下、避難を考える車両としての大型バスの存在、煙に対する回避行動、排煙装置の効果を新たに取り入れたシミュレーションモデルを構築し、どの要素が避難行動に大きな影響を与えるかを検討できるようにした。シミュレーションの実行には、構造計画研究所のKK-MAS⁽⁹⁾を用いる。

2. シミュレーションモデル

2.1. 空間モデルと環境設定

本研究では2次元格子で空間をモデル化し、人体の平面図は45cm×60cm(縦×横)の大きさの人体楕円で表されるこ

とから⁽²⁾、1つのセルに1人の人間が存在するようにセルを1辺60cmの正方形と設定した。Fig.1は実行画面図で、第二東名自動車道のトンネルの幅員を参考にして空間の大きさを108m×15mとして全体を定義している。空間内には避難者、障害物エージェントの他に避難口、避難誘導灯、煙、排煙装置エージェントを配置し、それぞれのエージェントが避難行動に与える影響を検討する。

避難者と煙が行動ルールを持ち、1ステップごとに1回の行動を行う。煙エージェントがシミュレーション開始時に空間の右端から遡上を開始することとし、避難者エージェントは自身の視野内に煙を認知する、あるいは煙を発見した避難者から情報を受けたときに避難行動を開始すると設定した。シミュレーション上の1ステップを1秒とモデル化し、「トンネル内の残留避難者の数が0になる」または「300ステップ経過」時にシミュレーションを終了するとしている。後者はシミュレーションを開始してから5分経過していることになり、煙の速度を1m/sとした場合には煙が空間全体を覆ってから3分以上経過している状態であり、300ステップを超えて空間内に残り残されている避難者エージェントは自力での避難は不可能とした。

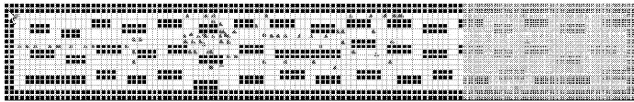


Fig.1 Example of execution display

2.2. モデルの構成要素

・避難者

避難者は避難開始時に自ら周囲を検索して目的地を決定し、避難行動を開始する。避難者の行動属性として視野範囲、災害情報を避難者で伝達しあう情報伝達範囲を与え、煙や避難誘導灯、避難口の情報に応じて行動するものとした。

・障害物

障害物は、トンネルの壁面や火災時にドライバーの避難を妨げる残留車両を想定したもので、壁と大型車は避難者の進路および視界を遮り、小型車は避難者の進路を遮るものとする。残留車両数は高平ら⁽⁸⁾の方法を参考にして算定を行う。大型車の車長を12m、小型車の車長を4.8mとし、大型車の混入率を第二東名自動車道の計画交通量⁽¹⁰⁾より45%として平均車頭間隔 L を求め、対象トンネルの車線数を3とすると火災発生時の残留車両数 K は

$$K = \frac{1000}{L} \times 3 = 300 \text{ 台/km} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L &= (12 + 2) \times 0.45 + (4.8 + 2) \times 0.55 \\ &= 10.0 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。

・避難口

避難者は避難口に到達することを目的とし、避難口に到達した時点で避難が完了したと見なす。

・避難誘導灯

避難口の位置を知らせる表示灯で、高速道路トンネルでは一般に150mごとに設置されている。避難誘導灯が避難者の視野範囲内に存在する場合、避難者は避難口の位置を認知したもとして行動する。

・煙

避難者は視野内に煙を発見した時点で火災が起きていることを認知し、緊急時の目的地を発見しようと行動に移る。本研究では煙の進行速度を0.5m/s、1.0m/sとし、煙の到達速度に応じて避難者の視野範囲、移動速度を変え、避難行動に与える煙の影響を分析する。

・排煙装置

排煙装置の前後で煙の濃度に変化するものとして、避難者が排煙装置エージェントを通過した後は煙中での視野範囲を通過前の2倍に拡大して排煙効果を表現する。

3. 避難行動のルール

3.1. 行動アルゴリズム

避難者は、まず、自分の現在位置において視野内に煙エージェントが存在するかを判定する。その後状態に応じて目的地をそれぞれ設定し、移動を開始する。移動の際、移動方向に障害物や煙を確認した場合には回避行動に入る。周囲の情報をもとに随時判断を行い、より最適な移動方向を決定して目的地へと向かう。避難者の移動速度 v は、避難者の密集による避難速度の低下を考慮して群集密度 ρ と歩行速度の関係を示した中村のモデル式⁽¹¹⁾を用いて次のように設定した。

$$v = 1.4 - 1.7e^{-2/\rho} \quad (2)$$

群衆密度 ρ は避難者エージェントの現在位置から半径4セル内の面積にいる避難者の数から決定する。Fig.2に避難者の行動アルゴリズムの流れを示す。

3.2. 煙外避難中の目的地設定アルゴリズム

火災発生後に避難者が煙の外にいる場合と煙に巻き込まれている場合では、避難者の目的地の決め方は別であると考える。それぞれ目的地の設定方法を分けて考える。煙の外にいる避難者は、Fig.3に示すアルゴリズムに従って目的地を決定し、移動する。各セクションにおける処理方法を下記に示す。

・避難開始者発見セクション

災害時に避難者は一斉に避難行動を開始するのではなく、周りの避難者と情報を交換し合いながら行動を決定している。ここでは、煙を視野内に発見して避難行動を開始しているエージェントを避難開始者とし、自身の情報伝達範囲内に避難開始者を発見できた場合に、自身も避難開始するように

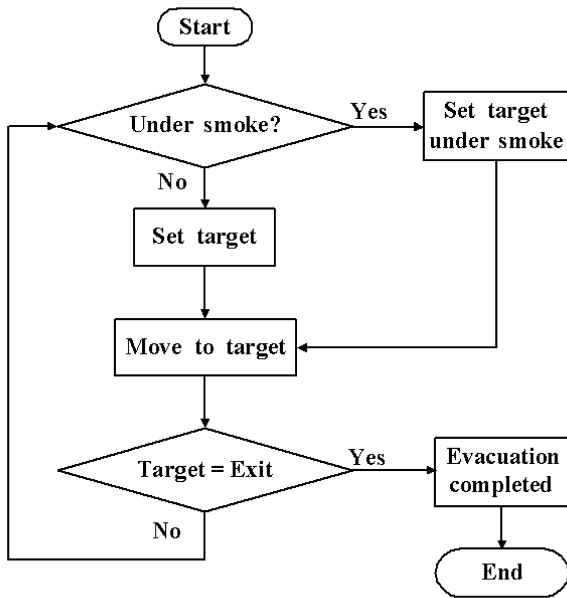


Fig. 2 Behavior algorithm

設定した。その際、避難開始者が避難口を発見しているならば自身の目的地を避難口に、発見していない場合には回避行動を行うようこととしている。情報伝達は、伝達範囲を15mとして伝達範囲内に大型車と壁の障害物が存在する場合には伝達を妨げるものとし、小型車の場合は避難者同士の情報交換は可能と設定した。

・煙発見セクション

避難者は視野内に煙を発見した時に火災が起きていることを認知し、緊急時の目的地を発見するよう行動に移る。煙はトンネル内の残留車両より高い位置にも存在するため、避難者はトンネル内の障害物に視野を制限されずに発見できるものとしている。

・避難誘導灯および避難口発見セクション

煙を発見し、避難行動を開始している避難者エージェントは、まず視野範囲内に避難口があるか、もしくは避難口の位置を示す避難誘導灯があるかを検索対象として調べていく。避難開始者発見セクションと同様に、小型車は避難者の検索範囲を妨げる要因とはせず、大型車や壁が存在するときはその方向の検索を中断すると設定した。

・最大視野線による目的地決定セクション

避難者エージェントが災害の発生を確認しておらず、避難行動を開始していない状況において、人は最も開放された空間に向かおうとする習性があることがわかっている。このセクションでは、その習性をシミュレータ上の避難者の動きに組み込んだ。Fig.4における視野番号①～⑯のすべての方向について障害物までの距離を計算した後、最も長い視野線（最大視野線）を示す方向に目的地を設定する。Fig.4はエー

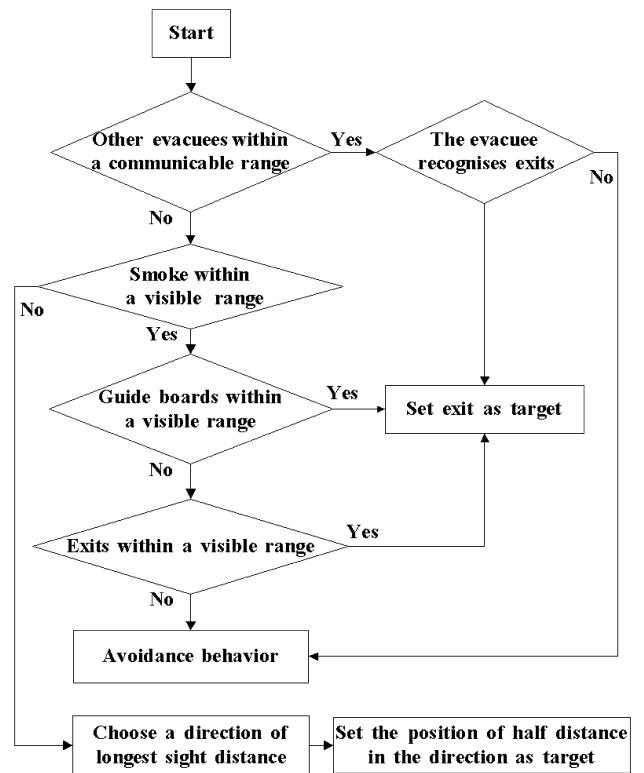


Fig. 3 Algorithm of setting target

ジェントの視野範囲が3mの場合の例を示したもので、最大視野線の半分の位置に目的地を設定している。最大視野線が複数確保される場合には、その中から視野線をランダムに選択し移動方向を決定するようにした。

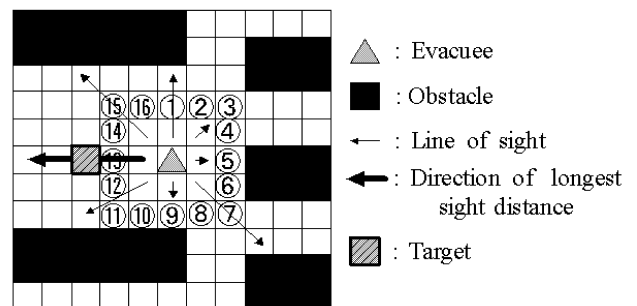


Fig. 4 Setting of target

・回避行動セクション

避難者エージェントは、煙の存在を認知した場合、回避行動をとろうとする。本研究では、煙発見セクションもしくは避難開始者発見セクションにて煙発見の情報を得た時に、回避行動に入るように設定した。Fig.5に最大視野範囲が3mの場合の回避行動の例を示す。煙は空間の右端から遡上してくるため、煙の進行方向と反対方向の視野番号⑩～⑯の方向を検索し、最も視野線が開けている方向へ目的地を設定するように処理を行う。

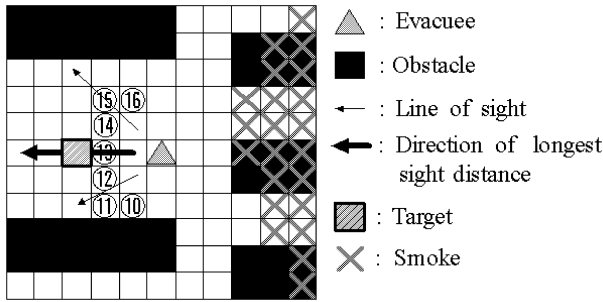


Fig. 5 Avoidance behavior against smoke

3.3. 煙中避難者の目的地設定アルゴリズムと行動ルール

火災発生時において、避難者が煙に巻き込まれてしまった場合、視野範囲の狭窄や避難速度の低下、パニックによる避難行動の乱れが生じて、避難者は緊急時の冷静な避難行動をとることが難しくなる。

本シミュレーションでは、煙に巻き込まれた避難者エージェントの視野範囲と移動速度をを低下させ、避難行動に対する影響を表現した。避難口と避難誘導灯を視野内に発見できれば目的地として設定し移動し、発見できなかった場合には、最大視野線による目的地設定セクションと同様の方法で目的地を決定するように設定した。煙中の視野範囲は、火災時における煙の濃度を示す減光係数 C_s と見越し距離 V との関係 $C_s V \approx 8^{(12)}$ から煙の先頭から煙中の避難者までの距離の長さによって Table 1 のように設定した。また、避難速度実験より煙中における避難速度が平均 0.51m/s となることから、煙に巻き込まれた避難者の移動速度を 0.51m/s とした (8)。

Table 1 Distance from evacuee to head of fire smoke and sight distance

Distance	Extinction coeff. C_s	Sight distance V	$C_s V$
< 2m	0.8	10m	8.0
2m-4m	1.3	6m	7.8
4m-6m	2.4	3m	7.2
> 6m	-	1m	-

3.4. 高齢者エージェント

災害弱者として避難者エージェントの中に一定の割合で高齢者エージェントが存在するものとする。高齢者の行動アルゴリズムは避難者エージェント(若年者)と同じであるが、煙外の視野範囲を 5m 、情報伝達範囲を 3m 、移動速度を $v = 0.9 - 1.7e^{-2/\rho}$ に制限を設けて身体的不利な状態であることを表す。避難者の行動パターンを自ら移動する自律型と、若年者の後を追うように移動する追従型の2種類に分け (13)。

若年者は自律型、高齢者は追従型とする。追従型では、自分の視野内に若年者エージェントが存在する場合、エージェントの移動先を若年者の現在位置に設定し、若年者を追従して行動するよう表現した。若年者と高齢者の行動設定の比較を Table 2 に示す。

Table 2 Behavior setting of adult and elder

	Elder	Adult
Visible range(m)	5	20 or 15
Communicable range	3	15
Moving velocity(m/s)	$0.9-1.7e^{-2/\rho}$	$1.4-1.7e^{-2/\rho}$
Behavior type	Following	Autonomous

ρ : Crowd density(people/m²)

4. 避難シミュレーション

4.1. 初期設定および実験計画法を用いたシミュレーション

Eq.(1) および大型車の混入率から残留車両を決定し、大型車では $1\sim 2$ 名、大型車以外の車では $1\sim 4$ 名をランダムにそれぞれ車の左右から避難者エージェントを発生させる。大型車のなかの 1 台をバスと想定し、バスエージェントでは 40 人の乗客数と仮定し 1 ステップ毎に車両の前後 2 箇所から避難者エージェントを 1 つずつ、計 40 個を生成するとした。高齢者エージェントは大型車では 0 、大型車以外の車では全体で 10 名、バスでは 40 人中 8 名としてシミュレーションを実行した。

被災せずに避難口に到達できた避難者エージェントの最大ステップ数を避難完了時間、 300 ステップ経過してもトンネル内に残っている避難者エージェントの数を残留避難者数として、実験計画法を用いて避難完了時間と残留避難者数に影響を与える要因を分析する。L8 直交表に従い、 8 条件について各 5 回のシミュレーションを行い、その平均値を評価値とする。要因および直交表を Table 3, Table 4 に示す。なお、要因を設定していない E, F, G 列は誤差列として扱う。

Table 3 Parameters for orthogonal array L8

	A Guide board	B Bus	C Speed of smoke	D Sight distance
1	Exist	Exist	0.5 m/s	15 m
2	No exist	No exist	1.0 m/s	20 m

Table 4 Orthogonal array L8

No.	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

4.2. シミュレーション結果

避難シミュレーションの結果を Table 5 に、シミュレーション結果を用いて算出した各要因の残留避難者数および避難完了時間に対する主効果の値を Fig.6, Fig.7 に示す。Fig.6 より、残留避難者数に最も影響を及ぼしているのは要因 B のバスの有無であり、次いで煙の速度の影響が大きいことがわかる。これは、バス周辺では避難者エージェントの密度が高くなることによって避難速度が低下し、また、煙中での視野範囲、移動速度の低下によって結果的に被災してしまうためであると考えられる。

一方、避難完了時間に対しても要因 C の煙の速度の主効果が大きくなっており、トンネル内で火災が発生した場合、煙の遡上速度を低減化させる、煙の拡散を防ぐ、煙を排出する等の換気のコントロールが必要であることがわかる。

Table 5 Results of evacuation behavior simulation

No.	Evacuation time(s)	Evacuation speed(m/s)	Casualty (person)
1	134.8	0.74	1.0
2	117.0	0.85	1.2
3	136.4	0.73	0.6
4	132.6	0.75	0.4
5	151.8	0.66	6.4
6	136.4	0.73	2.6
7	119.8	0.83	0.0
8	133.8	0.75	0.0
Mean	132.8	0.76	1.5

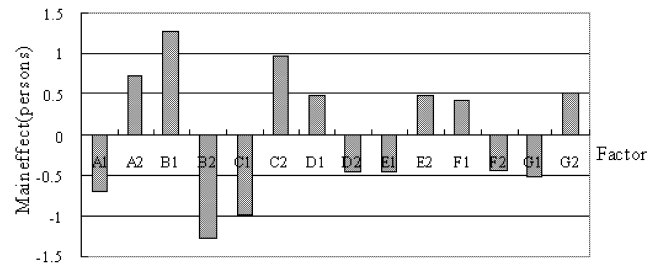


Fig. 6 Influence to casualty

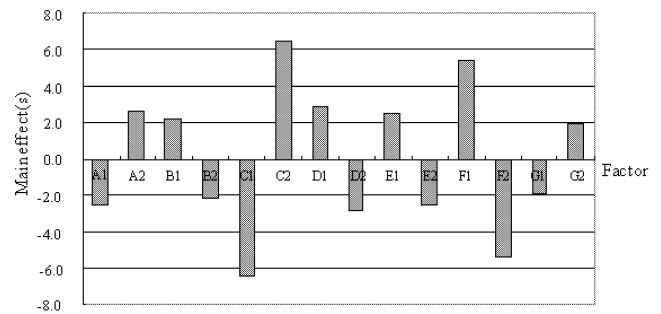


Fig. 7 Influence to evacuation time

4.3. 排煙装置の効果

前節の結果より避難効率に対して煙の影響が大きいことが示されたので、次に排煙装置エージェントを設置し、排煙による効果を検討する。煙中の視野範囲を変化させて排煙装置を表現し、前節の実験計画法における要因 B をバスから排煙装置の有無に変えて避難シミュレーションを行った (Table 6)。

Table 6 Parameters for orthogonal array L8(smoke exhaust equipment)

	A	B	C	D
	Guide board	Smoke exhaust equipment	Speed of smoke	Sight distance
1	Exist	Exist	0.5 m/s	15 m
2	No exist	No exist	1.0 m/s	20 m

残留避難者数、避難完了時間に対する各要因の主効果の値を Fig.8, Fig.9 に示す。Fig.6 と Fig.8 の主効果の値を比較すると残留被害者の数が最大 1.3 人から 0.13 人と低減しており避難行動への排煙効果の高いことがわかる。Fig.8 において要因 D の視野範囲の主効果が他の要因に比べ小さい。これは、当初の視野範囲の値よりも、煙中下での行動条件の制

謝辞

本研究の実施に当たり村本雅英氏（当時学部4年生）に計算の協力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 山影進, 服部正太編: コンピュータの中の人工社会, 共立出版, (2002)
- (2) 近田康夫, 廣瀬智士, 城戸隆良: CA を用いた歩行シミュレーションモデルの構築, 土木情報システム論文集, **9**(2000) pp. 19-30.
- (3) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, **No.591/I-43**(1998), pp. 365-378.
- (4) 清野純史, 土岐憲三, 犬飼信広, 竹内徹: 避難行動シミュレーションに基づく地下街の安全性評価, 土木学会論文集, **No.689/I-57**(2001), pp. 31-43.
- (5) 横山秀史, 目黒公朗, 片山恒雄: 人間行動シミュレーションによる地下街の安全性評価に関する研究, 地域安全学会論文報告集, **3**(1993) pp. 161-164.
- (6) 香川秀樹, 萩原将文: 人工生命的手法とファジィ推論を用いた避難行動に関する研究, 日本ファジィ学会誌, **13**, No.6(2001) pp. 643-651.
- (7) 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要因と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, **No.537/I-35**(1996), pp. 257-266.
- (8) 高平雅義, 八戸英夫: ヒューマンファクターを考慮したトンネル火災時におけるマルチエージェントシミュレーションモデルの開発, MAS コミュニティ研究報告書, (2006) pp. 1-7.
- (9) 構造計画研究所: Multi Agent Simulator ユーザマニュアル, (2002) http://mas.kke.co.jp/cabinet/KK-MAS_manual-ja.pdf
- (10) 環境影響評価書:<http://www.he-ri.or.jp/kankyo/index-m.html>
- (11) 中村和男, 吉岡松太郎, 稗田哲也: 歩行者流動モデルとそのシミュレーション, 人間工学, **10**, No.3(1974), pp. 93-102.
- (12) 神忠久: 煙中の誘導標識の見透し距離について (I), 日本建築学会論文報告集, **No.182**(1971), pp. 21-32.
- (13) 新井健, 増田浩道, 落合哲郎: 災害弱者を考慮したマルチエージェントシミュレーションモデル, 第3回 MAS コンペティション論文集, (2003) pp. 117-125.

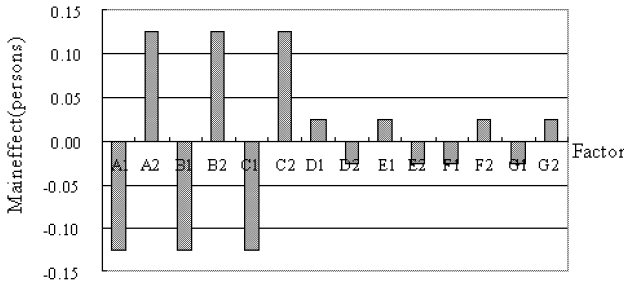


Fig.8 Effect of smoke exhaust equipment(casualty)

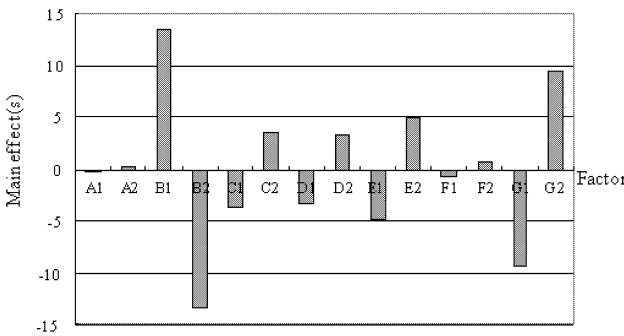


Fig.9 Effect of smoke exhaust equipment(evacuation time)

約が避難行動に大きな影響を与えるようになるためと考えられる。

一方、避難完了時間に対しては Fig.9 に示すように排煙装置の有無の主効果が突出している。排煙装置の有る場合において避難完了時間が最大値を示しているが、残留被害者数を示す Fig.8 との関連から考えると、これは避難時間が長くなっても結果的に残留被害者数を減らす排煙効果を示しているものと見ることができる。

5. おわりに

本研究では、トンネル内で火災が発生した場合の避難行動についてマルチエージェントシミュレーションを行い、避難者の行動特性とトンネルの内部の要因が避難完了時間と被害者の数に与える影響を検討した。作成した避難行動モデルを用いてシミュレーションを行った結果、避難行動に大きな影響を及ぼすのは煙の存在であることがわかった。トンネル火災時には煙の遡上速度を低減化させる制御、排煙装置の設置が必要であることが確認された。今後は、煙の濃度と移動速度の関係や火災発生時の初期対応等を考慮した、より現実の状況に近い避難モデルを作成し、実際のトンネル火災対策システムに対する検討を行っていきたいと考えている。