

実避難訓練と避難シミュレーションの比較に基づく集団避難行動の特徴

Behavioral characteristics of group evacuation learned from evacuation drill and its simulation

橋本佳代子¹, 大町達夫¹, 井上修作¹, 瓜井治郎²

Kayoko HASHIMOTO¹, Tatsuo OHMACHI¹, Shusaku INOUE¹ and Jiro URII²

¹東京工業大学大学院総合理工学研究科, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

²CAS リサーチ, CAS Research

SUMMARY: It is urgently needed to establish a school-wide consensus on post-earthquake evacuation procedures. As a first step to do this, an evacuation drill actually conducted in a high school in Tokyo, was simulated by using a multi-agent technique. Through comparison with the actual drill and the simulation, some characteristics of the mass evacuation were pointed out. They are, for example, average walking velocity was about 70m/min on a wide corridor which is almost the same as on a wide stair, but the velocity remarkably decreases at narrow entrances. A kind of mass concentration is likely to take place even when one or two students walk slowly. The multi-agent simulation taking into account these characteristics seems promising to suggest a procedure to maximize post-earthquake students safety.

1 はじめに

日本では、防災避難訓練はほとんどの学校で行われている。しかし多くの場合、形骸化していて、現場の教職員さえ具体的な効果を実感できないと指摘されることが多い。学校での避難行動の特徴の一つは、集団で避難する点にある。この場合、個人が最適と思う避難ルートを選んでも、全員が同一ルートに集中すれば混雑が発生し、結局安全な避難ができないこともありうる。しかし、全員で何度も避難行動を実施し、試行錯誤しながら効率的な避難方法を探すことは現実には不可能である。したがって、実現象をシミュレーションで代用し、群集的な動きを予測することが必要と考えられる。このような観点から、これまでも避難シミュレーションの研究は多数なされ、近年では、人間を個人レベルでモデル化するオブジェクト指向の、特にマルチエージェントを用いるシミュレーションなどが注目されている([1][2])。これらの研究では現実の人間行動に近づけるための複雑なモデル化も試みられているが、当初仮定した人間行動が正しいかどうかの検証がなされないと全てが崩れる危険性がある。人間行動の特徴は、例えば論文[3]のように、歩行の軌道や人と人との距離などさまざまな視点から研究が進められてきたが、目的・状況に応じてその特徴は変化するため、個人行動の特徴が集団避難にそのまま当てはまるとは限らない。集団避難の特徴は、想定と同じ状況もしくは訓練などそれに近い状況で独自に調査し検証する必要があると考えられる。

本研究では、3次元の精密な学校校舎と地面のモデル上を個々の人間が自律的に動くマルチエージェントのシミュレーションと実避難訓練との比較検討から、集団避難行動の特徴を見出すことを目的とした。

2 防災避難訓練

本研究では、東京工業大学附属科学技術高等学校で行われた防災避難訓練を研究対象とした。

この訓練は2005年11月25日15時10分から総合学習

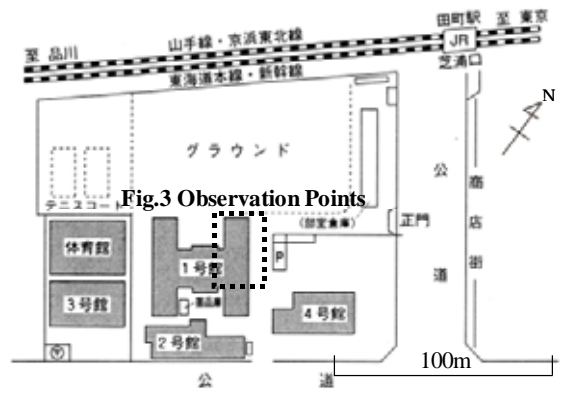


Fig. 1 School layout



Fig. 2 Snapshot of evacuation drill

の時間に実施され、約600名の生徒と各クラスの担任、その他数名の教職員が参加した。例年の避難訓練はホームルームのある4号館から避難していたが、今回は通常良く使う2号館の実習室や1号館の実験室、3号館の講義室などクラスごとに異なる場所から避難した。各建物の位置関係はFig.1の通りで、天候は晴れだったためグラウンドに集合した。Fig.2はそのときの様子である。

今回の訓練の目的は、生徒自身による自律的避難であった。そのため担任は避難誘導せず、避難の付き添いだけ行った。生徒たちは事前に避難ルートを2つ準備し、当日放送を聞き、生徒自身が1つを選択して避難した。準備したのは「火災を想定しない避難ルート」と「自分たちのいる

棟で出火した場合の避難ルート」であり、当日は「4号館で出火した」という放送が流された。期待される選択は、4号館にいるクラスは「自分たちのいる棟で出火した場合の避難ルート」、それ以外のクラスは「火災を想定しない避難ルート」であったが、いくつかのクラスは逆の選択をしていた。

当訓練は、出火場所の放送から約7分半後、グラウンドで全クラスの点呼終了が確認された。ただし約4分後には全生徒がグラウンドに集合しており、後は整理して点呼しただけである。

著者らは避難ルート作成の段階から訓練に参加した。また、訓練前に実施したシミュレーションから、集団避難行動の特徴が観察できると予想された校内5箇所でビデオ撮影し、実測値を得た。

本論文では、Fig.3とTable1に示す3箇所での避難状況に注目した。観測点では、クラスAの教室出口での出発状況、そして教室出口前の廊下での歩行状況を観察した。この5mの廊下の両端(Fig.3における-1と-2)で通過時間をカウントし、その差から廊下での歩行速度も得た。観測点では、クラスBが4階から1階に下る際の階段の歩行状況を観察した。こちらも階段の上端と下端(Fig.3における-1と-2)の通過時間から、階段での歩行速度を得た。観測点では、クラスAとクラスBを含む約400人の生徒がグラウンドに進入する様子を観察し、屋外歩行やグラウンド入口への進入状況、そして混雑の状況を把握した。ここでもFig.3における-1と-2での通過時間から屋外での歩行速度を得た。4章ではこれらの実測値をもとに集団避難行動の特徴を考察した。

3 避難シミュレーション

3.1 シミュレーションの概要

本研究で使用した避難シミュレーションシステムは、4つの独立したオブジェクト、<エージェント><シナリオ><インフラ><災害要素>で構成される(参照[4])。各オブジェクトの関係はFig.4に示す通りで、<エージェント>は個々の人間を指し、シミュレーションでは各エージェントが自律行動する。<インフラ>は、教室・廊下・階段・建物外通路など人の通過する場所をメッシュで区切っており、各メッシュがエージェントや他の物で「占有されている」もしくは「空いている」という情報で区別される。これは、セルオートマトン法([5])と類似しているが、本システムはそのセル上を個々の人間が自律的に動く3次元のマルチエージェントシステムである。この<インフラ>によって全ての<エージェント>と<災害要素>を繋ぎ、<インフラ>を介して他者の情報を得ている。<シナリオ>は、Table 1最右欄のような通過者避難ルート、つまり個々のエージェントの行動をオブジェクト化している。

各エージェントの動きは、Fig.5のフローチャートにもとづく。まず<シナリオ>から次の動きを確認し、<インフラ>から周辺情報を得る。<エージェント>はこれらをもとに次に移動するメッシュを決定する。メッシュの決定の優先順位は、Fig.5の右下の図のように、まずシナリオの方向のメッシュ(),次にその両隣(),その次は側面()として空きメッシュを探し、後退はしない。この5メッシュのどこにも空きがない場合はある一定時間(今回は0.1秒間)静止後、再び<インフラ>からメッシュ情報

を得て同じ作業を繰り返す。空きのメッシュが見つかったら、<インフラ>のメッシュ情報を「現在いるメッシュAを「空き」、見つかったメッシュを「占有」と書き換え、そのメッシュへの移動を開始する。

火災や建物被害など人間以外の<災害要素>もエージェントと同様、<インフラ>に「占有」情報を残せば、そこから<エージェント>に影響を与えることができる。

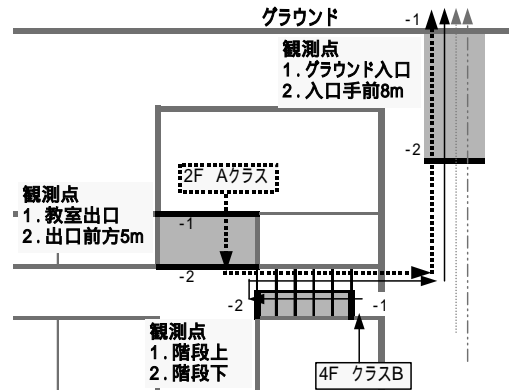


Fig.3 Observation Points ~ (see Fig.1)

Table 1 Details of observation points

観測点	注目点	通過者	通過者避難ルート
1号館 2F 教室前	教室出口, 廊下	クラスA 37人	1号館 2F 教室 廊下 1F 階段 屋外通路 グラウンド入口
1号館 2F 階段	階段	クラスB 43人	1号館 4F 教室 3~ 1F 階段 屋外通路 グラウンド入口
グラウンド 入口前	屋外, グラウンド 入口, 混雑	400人 程度	

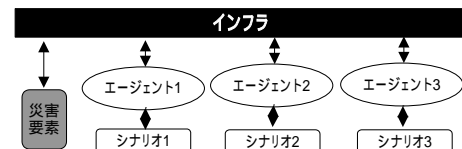


Fig.4 Objects relationship diagram

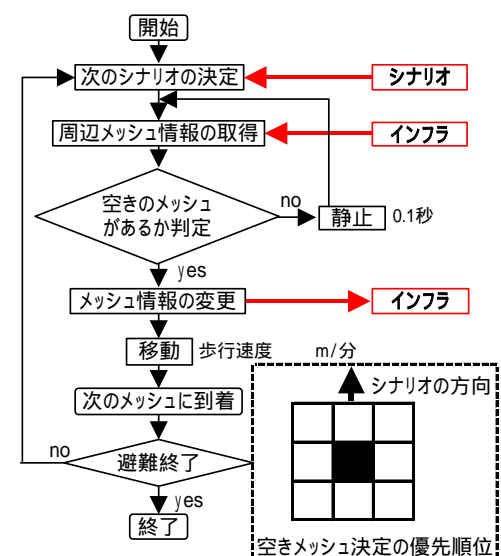


Fig.5 Movement of an agent

3.2 避難訓練モデルの設定

本研究では、実訓練で得られた実測値を元に、パラメータを最終的に次のようにモデル化した。

(1) エージェント

混雑していない場所での移動速度の実測値は平均すると毎分約 65mであり、また全ての生徒がグラウンド内に入るまでの所要時間は約 4 分であった。集団で歩くことによる遅れも多少あり、何通りかの歩行速度を試した結果、個人の歩行速度を 70m/分 ± 10% として均等に分散させたとき、実測の所要時間とほぼ一致した。

(2) シナリオ

<シナリオ>は各クラスが事前に 2 つずつ用意しており、2 章で述べたように、実際には選択を誤ったクラスもあったため、数名の生徒や担任の教職員の証言にもとづいて修正した。また、実訓練では各クラスのスタート時刻が多少異なったが詳細は不明なため、シミュレーションでは全クラス同時スタートとした。

(3) インフラ

インフラは建物平面図から校舎内の教室、廊下、階段、建物配置図から校舎外の通路、グラウンドを再現した。

人間が通常歩くとき 1m 程度は間隔をあけて歩くと考え、屋内も屋外も全て 1m × 1m メッシュとした。ただし、教室出入口は 1 メッシュ、グラウンド入口は 3 メッシュを配置した。

(4) 災害要素

訓練では、4 号館 4 階で火災発生を想定しているためシミュレーションでもここでの出火を組み込んだが、避難後に煙が拡散し、結果には影響していない。

3.3 シミュレーションの精度

Fig.6 はシミュレーションの一場面である。全校生徒の 3 分の 2 が通過する観測点での累積通過人数の、実測値とシミュレーション結果の比較を Fig.7 に示す。この地点ではグラウンド入口が狭いため、流入量（8m 手前の累積通過人数）と流出量（入口の累積通過人数）に差があり、流量が滞留しているが、最終的なシミュレーションはそれも良く再現している。

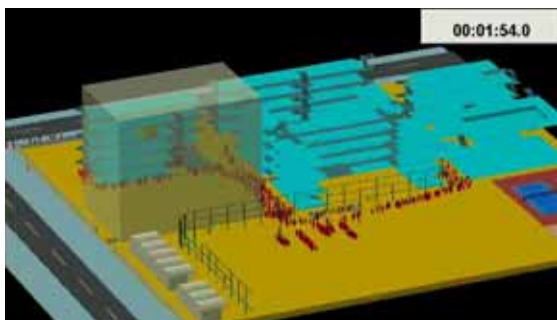


Fig.6 Snapshot of evacuation simulation

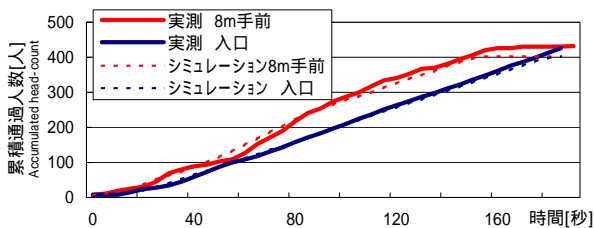


Fig.7 Accumulated head-count at the gate to the playground

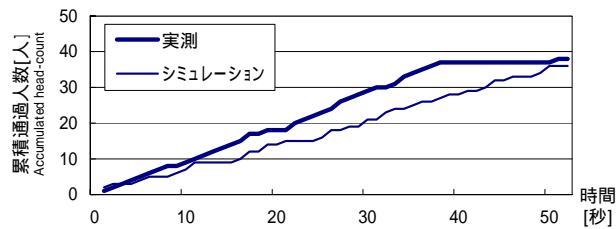


Fig.8 Accumulated head-count at the room exit

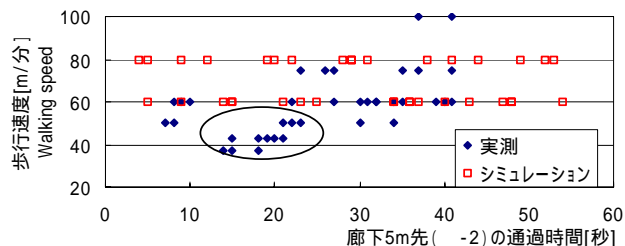


Fig.9 Walking speed on the corridor

4 集団避難行動の特徴

本章では、実訓練の実測結果と最終的なシミュレーション結果を場所ごとに比較し、集団避難行動の特徴を考察する。

4.1 観測点 教室出口

Fig.8 は教室出口部分（観測点 -1）を通過する人数の累積を比較したものであり、傾きは単位時間当たりの通過人数を示す。実測値は 1 秒間に平均 0.97 人通過するが、シミュレーションは平均 0.72 人と少ない。この値の違いには 3 つの要因、すなわち個人の歩行速度、横に並ぶ人の数、前後の人の間隔が考えられる。歩行速度が速ければ通過できる人数が増え、横に 2 列で歩けば単純に 2 倍の人数が通過でき、前後の間隔が半分になっても 2 倍の人数が通過できる。シミュレーションと実測を比較すると、歩行速度の平均は実測 55m/分、シミュレーション 68m/分であった。横に並ぶ人数は実測、シミュレーション共に 1 列で、前後の間隔は実測約 50cm、シミュレーションは一律 1m であった。よって観測点での通過人数に関する両者の違いは、教室出口付近での前後間隔の違いによると考えられる。

4.2 観測点 廊下

廊下での歩行を観察すると、横並びは 1 列もしくは 2 列で歩き、3 人の集団がいても 2 人の後ろに少しずれて 1 人が従う傾向がある。前後の人の間隔は、通常は 1m 程度、3 人の集団などの場合、1 人は 50cm 程度後方で前方の 2 人の間を歩いている場合が多かった。

また、廊下が狭いため、のろい（遅い）人の後が団子状になる状況（以後、「集団化」と仮称する）もあった。Fig.9 は 5m の廊下の両端で通過時間を計測して得た歩行速度である。横軸は教室出口から 5m の地点の通過時間で、当廊下の通過終了時間でもある。Fig.9 にも見られるように、遅い人がいても追い抜いてしまうシミュレーションでは歩行速度の変動幅が小さいが、実測では遅い集団や早い集団ができる。特に顕著なのが、12 秒から 25 秒の間に通過した遅い集団（図中 印）で、この集団の先頭にいる 2

名の生徒が2列でゆっくり歩き、後続の生徒は抜くことができず、狭い通路で集団化が発生した。また、この遅い集団は前の集団との距離が広がるのも特徴で、廊下入口では1秒差だった距離は5mの歩行で4秒差に広がった。

4.3 観測点 階段

階段では、小走りでリズム良く下る生徒とゆっくり下る生徒に二分される。Fig.10は階段の上から下まで8段下る歩行速度で、この実測値が60m/分を超えると小走りに下がっているように見えた。同図が示すように、階段部分は小走りする生徒が多く、実測値の平均歩行速度は62m/分で、廊下での歩行速度より若干早い。階段でも、45秒頃通過する一部の遅い人の影響で集団化が発生したことを同図は示している。

階段での歩行は、横に3人並ぶことが可能で、前後の人の間隔は2段から4段で、これは1m前後に相当する。シミュレーションでは、歩行速度は実測値より若干大きめで、横に並べる人数は2人で実測値より少なく、前後の間隔は実測値とほぼ等しかった。

Fig.11は階段上端(-1)での累積通過人数を示す。Fig.11の傾きは実測値もシミュレーションもほぼ等しく、1秒間当たり1.1人通過した。

4.4 観測点 屋外通路

グラウンド入口手前8mの屋外通路は、横幅は広く10人以上並べるスペースがある。そのため歩行状況は、横並びに3、4列、前後の間隔は1m強であった。混雑の影響を受けない場合、平均歩行速度は64m/分であった。混雑が発生すると、徐々に前後間隔は50cm程度となり、横の列も増えた。ただし、横の列は屋外通路いっぱいには広がらず、最大でも9列であった。

グラウンド入口部分では、教室出口の状況と似ており、前後間隔は屋外通路よりも縮まる。通常は50cm程度で、混雑してくると20cm~30cmまで近寄り、横は通常2列で混雑が酷くなるとたまに身体を斜めにして3列で通ることもあった。

Fig.12の濃い太線は、グラウンド入口部分での通過人数の15秒間の実測平均値を示している。通過人数は混雑とともに徐々に増加し、約2.5人で収束している。これは、混雑によって横並びの列数が増え、前後の間隔が狭まった影響と考えられ、1秒間に2.5人はこの場所を通過できる最大人数といえる。最終的なシミュレーションでグラウンド入口の横幅を3メッシュとしたのは、このためである。Fig.12の濃い細線はシミュレーション結果であり、薄い太線と細線は入口手前8m地点の通過人数である。シミュレーションと実測の相違点に着目すると、例えば入口手前8mでは、50秒から80秒の間にシミュレーションにはない変動がある。これは実測値では50秒頃に大きな集団が来て、その後はあまり人が来ない状況があったためである。この原因としては、実測では各クラスの避難開始時間が違うことや、他の観測点で見られたような集団化により前の集団との間隔が開くという現象の影響などが考えられる。

5 まとめ

本研究では避難シミュレーションと実測を比較することで集団避難行動の特徴を考察した。集団避難において、廊下や屋外通路と比べ、出入口付近では人の前後左右の間隔が狭まること、そして歩行速度は一律には分散せず集団

化することが見出された。また混雑によって、通路でも入口付近でも人の間隔は狭まるのが定量的に指摘できた。このような特徴は本研究の対象校のみに該当するのではなく、集団避難行動全般に共通するものと考えられる。

今後はこのような集団避難行動の特徴を考慮し、さらに災害時には平常時と異なる動きをするということも考慮した上で、「災害要素」も取り入れたシミュレーションシステムの開発を行い、それをを用いて災害時の的確な避難方法を模索し、被害軽減に役立てたい。

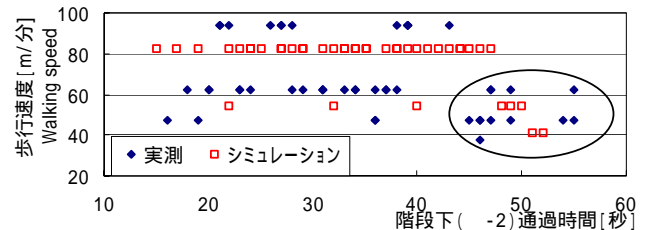


Fig.10 Walking speed on the stairways

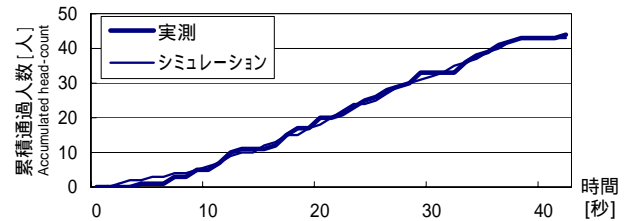


Fig.11 Accumulated head-count passing through the stairways

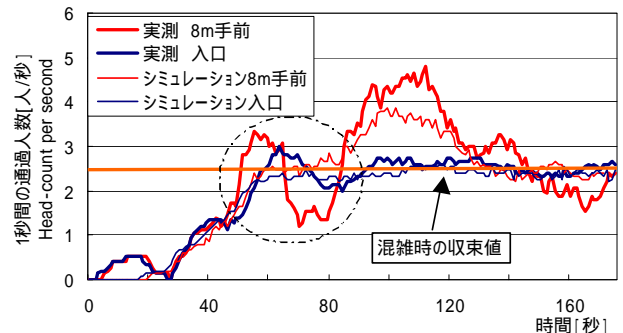


Fig.12 Head-count passing the gate to the playfield

謝辞

本研究に当たっては、東京工業大学附属科学技術高等学校には種々のご協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1]海老原学, 掛川秀史: オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル, 日本建築学会計画系論文集, No.467, p1-12, 1995
- [2]藤岡正樹, 石橋健一, 梶秀樹, 塚越功: マルチエージェント型避難モデルの特性評価, 地域安全学会論文集, No.4, p57-63, 2002
- [3]渡辺仁史: 空間と人間行動, 新建築学大系 11 環境心理, p153-234, 1982
- [4]CAS リサーチ HP <http://www.cas.fussa.tokyo.jp/>
- [5]加藤恭義, 光成友孝, 築山洋: セルオートマトン法 複雑系の自己組織化と超並列処理, 森北出版, 1998

実避難訓練と避難シミュレーションの比較に基づく 集団避難行動の特徴

橋本佳代子* (東工大), 大町達夫 (東工大), 井上修作 (東工大),
瓜井治郎 (CAS リサーチ)

Behavioral characteristics of group evacuation learned from evacuation drill and its simulation

Kayoko HASHIMOTO* (Tokyo Tech.), Tatsuo OHMACHI (Tokyo Tech.),
Shusaku INOUE (Tokyo Tech.) and Jiro URUI (CAS Research)

本研究では、集団避難行動の特徴を見出すことを目的とし、東京工業大学附属科学技術高等学校で行われた防災避難訓練と個々の人間が自律的に動くマルチエージェントシステムによる3次元のシミュレーションの比較を行った。

Fig.1 は教室出口部分の累積通過人数である。傾きは単位時間当たりの通過人数を示し、実測値は1秒間に平均0.97人通過するが、シミュレーションは平均0.72人と少ない。この値の違いには3つの要因、すなわち個人の歩行速度、横に並ぶ人の数、前後の人の間隔が考えられ、ここではシミュレーション1m、実測値約50cmという前後間隔の違いによると考えられる。

Fig.2 は廊下の歩行速度であり、遅い人がいても追い抜いてしまうシミュレーションとは異なり、実測では12秒付近で通過する遅い生徒の後に続く生徒は、追い抜くことができず集団化していたことが分かる。

今後はこのような集団避難行動の特徴を考慮し、さらに「災害要素」も取り入れたシミュレーションシステムを開発し、それをを用いて災害時の的確な避難方法を確立し、避難訓練の改善に取り組みたい。

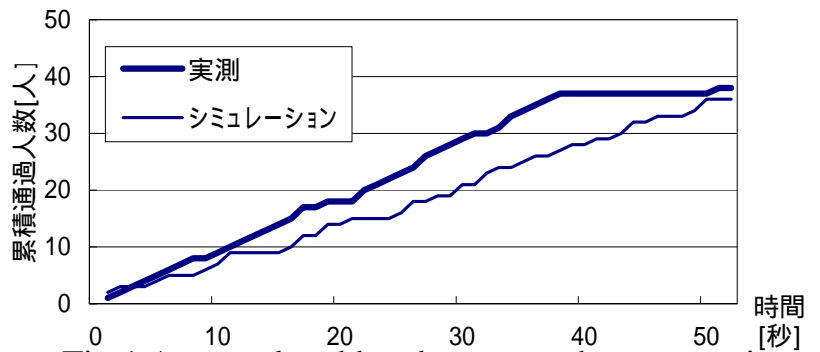


Fig.1 Accumulated head-count at the room exit

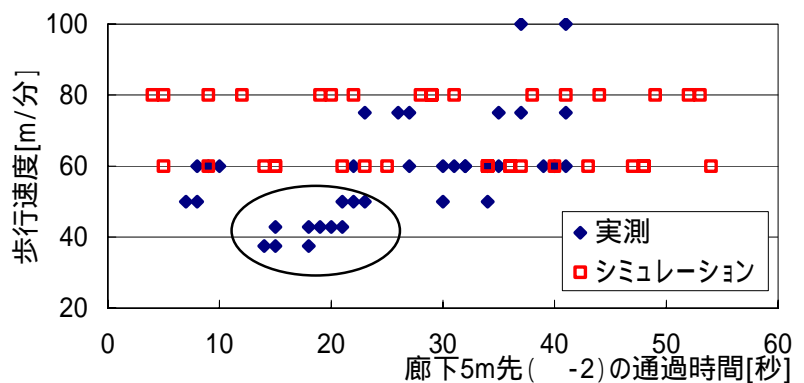


Fig.2 Walking speed on the corridor