

震災時における歩行者と自動車の交錯を考慮した 避難行動シミュレーションの開発

Development of Evacuation Simulation Model based on Mixed System of
Pedestrians and Cars under an Earthquake Disaster

杉原 卓治*, 加賀屋 誠一**, 内田 賢悦**

Takuji SUGIHARA, Seiichi KAGAYA, Ken-etsu UCHIDA

*大阪府庁 (〒540-8570 大阪府大阪市中央区大手前2丁目)

** 北海道大学大学院工学研究科, 社会基盤計画学研究室 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

In recent years, we are anxious about the occurrence of the offing earthquake of southeast sea and south Sea. The refuge action simulation is performed about this. This time, the evacuation simulation model based on mixed system of pedestrian and car under an earthquake disaster is developed. Furthermore, in this simulation, the local characteristic which is a cold, snowy area is taken into consideration. Multi-Agent Simulation is used for this simulation. It aims at building the index for lecturing on the measure which controls a second accident.

Key Words: Multi-Agent Simulation, Evacuation, The local characteristic

キーワード: マルチエージェントシミュレーション, 避難行動, 地域特性

1. はじめに

近年、東海・東南海・南海沖地震の発生が懸念され、平成19年4月に地震調査研究推進本部地震調査委員会より公表された「全国を概観した地震動予測地図」2007年版(以後、地震動予測地図)によれば、南海トラフの地震の発生確率が高くなったことにより、太平洋沿岸の各地における今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率は軒並み上昇傾向にある。

また、平成7年1月に発生した阪神淡路大震災を例に見ても、都市部において大規模な地震が発生した際には、交通がマヒすることが予想される。これにより緊急車両の通行が阻害され、二次災害の拡大につながる恐れがある。ここで震災下の交通渋滞の発生要因として、建物やブロック塀の倒壊や、道路の陥没等による通行障害のほか、震災下において、人々が冷静な判断を下すことができるとは限らず、我先にと行動する場合には歩行者と自動車が車道上で混在する状況が予想されることから、避難所や自宅に向かう歩行者が車道を横断することも少なからず影響があるものと考えられる。これに加え、今後震災下における二次災害の軽減を講じる際に自家用車の相乗りによる帰宅困難者に対する措置等を盛り込んだ状況

を再現するためには、歩行者と自動車の両方を考慮したシミュレーションを行う必要があると考える。これに対し、地震災害に関する避難行動シミュレーションはこれまでに数多くなされているが、その多くは歩行者ないし自動車のみを対象としている状況にある^{1), 2), 3), 4)}。

ここで、南海トラフによる地震は関東南部から四国地方にかけての太平洋沿岸部においてその被害がもっとも懸念されるものであるが、平成16年10月に発生した新潟県中越地震や平成19年3月に発生した能登半島地震を例に見ると、先に述べた交通渋滞の発生要因に加えて北海道・東北・北陸地方等の積雪寒冷地においては、積雪時に車道幅員が減少することにより交通容量が低下することや、積雪により路面状況が悪化することなどから、地域特性として積雪の影響について考慮することが地震被害の軽減について議論するに当たり必要不可欠となっているものと考えられる。

さらに、震災下において人々は、刻一刻と変化する周囲の状況に応じて個々の行動を選択するものと考えられる。このとき、皆が一様に決められた行動を取ることは想像し難く、個々に異なる判断基準を持ち、それに従って行動を選択するであろうことは容易に想像できる。また、地震が発生した際に、個々の置かれた場所の周辺の地理

に詳しい場合とそうでない場合とでは、個々の行動は異なるであろうことが考えられる。

これら震災下の人々の行動を再現するため、今回シミュレーションを行うにあたり MAS (マルチエージェントシミュレーション) を用いることとする。これにより、都市部において大規模な地震が発生した場合の地震直後の交通状況を以下の 4 点、すなわち

- i. 車道を横断する歩行者の影響
- ii. 積雪寒冷地における冬期の積雪の影響
- iii. 周辺の地理に詳しいか否かによる行動の相違
- iv. 個々の判断により選択される行動

という要因として捉え、現実起こりうる状況を再現するためのモデル構築を行い、二次災害に対する減災対策を評価することを目的とする。

2. MAS (マルチエージェントシミュレーション) について

ここでまず、今回用いる MAS (マルチエージェントシミュレーション) について触れておく。MAS が一般的な交通シミュレータと異なり、最も特徴的な点は、シミュレーション内のエージェント (例えば人や車両) が、時々刻々と周囲の情報 (状況の変化) を取得し、これに対して一つひとつのエージェントが判断基準を持ち、その判断基準に従って次の行動を決定する。また個々の行動により周囲の情報が更新され、さらに行動へとフィードバックされる、というところにある。これまでも避難行動シミュレーションにおいてマルチエージェントシミュレーション (MAS) が多用されているが、大規模な地震発生時など、めまぐるしく変化する環境の中で、刻々と更新されていく周囲の情報を取得し、個々の判断に基づいて行動ルールを決定する状況を再現する上で、MAS の適用は有効であると考える。このため、今回のシミュレーションにおいても MAS を用いることとする。図-1 に、今回のシミュレーションに適合させた MAS の概要を示す。

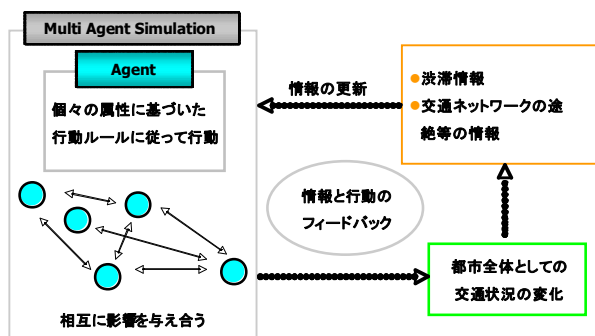


図-1 MAS の概要

3. 対象地域の選定と想定地震

都市部における大規模な地震が発生した場合を想定したシミュレーションを行うにあたって、対象とする地域をどのように選定し、想定する地震動をどのように設定するかについては十分に吟味する必要がある。

3.1 対象地域の選定

地震動予測地図によると、北海道の代表的な都市である札幌市における今後 30 年以内の大規模な地震の発生確率は、新潟市や金沢市に比べて低い値となっているが、積雪寒冷地でありながら 180 万人を超える人口を抱える、我が国唯一の大都市であること、また札幌市は北海道の経済・情報・行政の中心地であり、札幌市が甚大な被害に見舞われ、その機能が停止した場合には北海道全体へ与える影響が多大なものになること等を勘案し、同規模の地震が発生した際により深刻な被害が発生することが予想される札幌市をシミュレーションの対象地域とすることとした。

その中でもさらに、内閣府より公表されている「表層地盤のゆれやすさマップ」を参考に、札幌市内において比較的「ゆれやすい」と評価されている地域に隣接し、住宅やマンションが数多く立ち並ぶ地域であることから、札幌市北区と東区にまたがる一部の地域を選定した。図-2 にシミュレーションの対象地域として選定した地域を示す。



図-2 シミュレーションの対象地域

3.2 想定地震動と被害想定

想定地震については札幌市が想定している、石狩低地東縁断層帯による直下型地震を参考とする。この地震は、地震調査研究推進本部では「我が国の断層帯の中では発生確率が高いグループに属する」と位置づけられており、地震が発生した場合には札幌市内においても相当な被害が及ぶ可能性がある、と考えられている。また地震による被害についても同様に、札幌市が想定しているものを参考とし

た。しかし、地震による被害箇所を詳細に予測し適用することは容易ではないため、予想される地震による被害の中から、歩行者や自動車の通行の妨げとなることが予想される建物の倒壊等の被害を想定し、対象とする地域において特定の数ヶ所を通行止めとすることで被害状況を仮定する。

4. シミュレーションの概要

ここでは、シミュレーションで対象とする地域の実際の地図を基に作成したシミュレーション画面（マップ）を紹介するとともに、本シミュレーションにおける基本的な設定条件を記す。

まず、歩行者・自動車の各エージェントはシミュレーション開始直後から、予め定めた9箇所の発生地点から乱数に基づいた発生確率によってマップ上に発生する。このとき、発生と同時に各エージェントに目的地を設定する。ここで本シミュレーションの目的は地震発生直後の交通状況を把握するものであるが、シミュレーションの開始からシミュレーション内での地震発生までに、歩行者や自動車が自由に行動する時間を設けている。これは初期条件として特定の状況を与えることなくより一般的な結果を得るためであり、そのため歩行者であれば駅周辺での発生確率、駅周辺を目的地とする確率が高く、自動車であれば、幹線道路のマップ端や大規模小売店舗付近を発生地点や目的地とする確率を高く設定している。ここで、歩行者・自動車の各エージェントはマップ上に発生した後、第5章及び第6章で述べる属性別の判断基準と行動ルールに従ってマップ上を移動し、それぞれの目的地に到着した際にマップ上から消えるものとする。図-3にシミュレーション画面と、エージェントの発生地点、目的地、途絶箇所、震災時の避難所の分布を示す。

また、シミュレーションでの1ステップを1秒として扱い、シミュレーション開始から600ステップ（実時間に換算して10分）後に地震が発生することを仮定し、避難所に向かうエージェントが現れるほか、建物の倒壊等を想定した通行不可能な箇所として、マップ上に途絶箇所を設ける。各エージェントは途絶箇所に差し掛かるまでは途絶に気づくことはなく、途絶に差し掛かると各エージェントの属性別の判断基準に従って回避行動を取る。またシミュレーションは、開始から1,200ステップ（実時間に換算して20分）まで行い、地震発生からの600ステップ（10分間）について記録を取る。

5. エージェントの属性

先に述べたように、大規模な地震発生時には、歩行者や自動車の運転手は、周囲の状況に対して個々に異なる判断基準を持ち、それによって各自の行動を決定するものとする。MASにおいてはこの判断基準を、各エージェントの「属性」として、あらかじめ設定する必要がある。つまり歩行者・自動車の各エージェントは、個々の属性に従って行動を決定する。このことから、MASを用いる際にはこの属性をどのよ

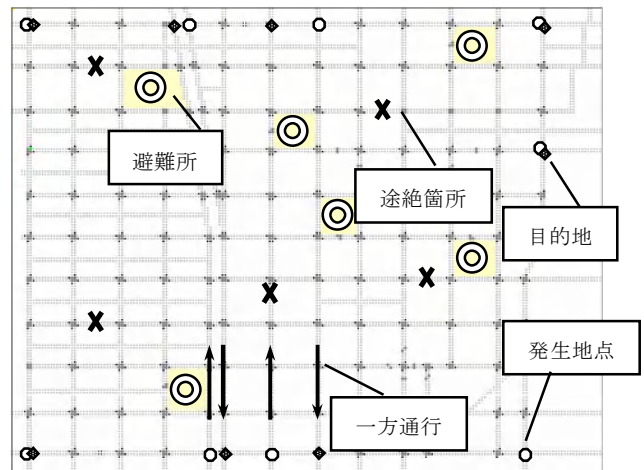


図-3 シミュレーション画面

うに設定するかが重要となる。より現実起こりうる状況を再現するためには、対象とする地域において、そこで実際に生活する住民の属性を設定する必要がある。これについてはその地域の住民に対しアンケート調査を実施し、その結果に基づいた属性を設定することが望ましい。

ここで、今回のシミュレーションは積雪寒冷地であるという地域特性を考慮すること、震災下における歩行者の存在が自動車の交通に対しどのような影響を与えるのかを再現することに着目するものであることから、対象地域の住民に対するアンケート調査は実施しなかった。

しかしながら、今回各エージェントの属性を設定するにあたり、歩行者エージェントの属性については、根岸らにより、同じく積雪寒冷地である釧路市美原地区において平成15年度に実施されたアンケート調査の結果から、クラスター分析により類型化された属性を基に設定し¹⁾、自動車エージェントについては、渡部らにより、札幌市において平成17年度に実施されたアンケート調査の結果を基に設定した³⁾。積雪寒冷地という、同じ地域特性を持つ地域の住民に対するアンケート調査の結果を基にしたことから、シミュレーションの結果については確からしさを持つものとする。

今回のシミュレーションにおいて、属性として設定する項目としては、

- i. 地震発生直後に避難所に向かうか否か
- ii. 最寄りの避難所の場所を知っているか否か
- iii. 周辺の地理に詳しいか否か
- iv. 周囲の人に対してどのような行動をとるか
- v. 渋滞回避性（自動車エージェントのみ）

主に上記の5点が挙げられ、このほかに移動速度等の、行動に関する基本的な項目を設定する。根岸、渡部らの研究により得られた、類型化された属性を基に今回構築した各エージェントの属性を表-1、表-2、表-3に示す。

本章ではこれ以降、上記の5項目について各エージェントに対してどのように設定するかを述べる。

まず、iについて、根岸らによるアンケート調査の結果を基に、本シミュレーションにおいては地震発生から10分間

のシミュレーションを行うことを考え、地震発生後に避難所に向かう確率は歩行者・自動車エージェントともに4.8%と設定する。この他のエージェントについては当初に定めた目的地に向かって行動する。

次にii, iii, ivについて、同じく根岸らによるアンケート調査の結果を基に、歩行者エージェントについては表に示すとおりに設定した。ここで、周辺の地理に詳しいか否かについてはアンケート項目になかったため、表-2中、①については詳しい、②・③について詳しくない、と設定した。また、自動車エージェントについては、避難所に向かう判断をしたものについてはすべて避難所を知っているものとし、うち①にあたる21.5%が周辺の地理に詳しいものとした。また、他の自動車に対して特別な行動は起こさないものとした。

最後にvについては、渡部らによるアンケート調査を基に、表-3に示すとおり設定した。

表-1 避難決断理由

	避難決断理由	確率(%)
①	地震直後に避難	4.8
②	家族が避難した	18.0
③	近隣住民が避難した	37.8
④	避難情報が報道された	83.4

表-2 歩行者の属性表

	避難場所	他の人に対する行動	確率(%)
①	知っている	連れて行く	21.5
②	知っている	追従する	28.0
③	知っている	考えない	31.2
④	知らない	追従する	10.2
⑤	知らない	考えない	9.1

表-3 途絶・渋滞回避開始時間

	回避開始時間	確率(%)
①	車列に入る前に回避	18.0
②	車列に入った直後から3分以内	6.0
③	3~5分	3.0
④	5~10分	8.0
⑤	回避しない	65.0

6. エージェントの行動ルール

本章では第5章で述べた、エージェントの属性別の行動ルールについて述べる。ここで歩行者・自動車エージェント共通の行動ルールを図-4に示す。

まず、全ての歩行者・自動車エージェントに共通する事項として、各エージェントはノード(交差点)上において、そのノードに隣接するリンク(道路)に関する情報を取得し、この情報を基に個々の属性に合わせて経路を選択しながら移動する。

地震発生後、避難所に向かうエージェントは属性別の行動ルールに従って移動し、避難所に向かわない場合には目的地に近づくように経路を選択しながら移動する。

6.1 歩行者エージェントの行動ルール

歩行者エージェントは地震発生後、個々の属性により目的地を変更せずに行動するか、避難所に向かうかを判断し行動する。その際、ノードにさしかかるたびに自身がいるノードに隣接したリンクについての情報を取得し、その先の経路については目的地の認知度の違いによって、次のように分類する。

- ① 避難所を認識しており、周辺の地理に詳しい場合は、現在のノードから隣接するノードまでの距離に、その隣接するノードから目的地までの直線距離を加えた距離が最短となるように経路を選択する
- ② 避難所を認識しており、周辺の地理に詳しくない場合は①における距離の他に、隣接するリンク上に存在する人の数が多い方を選好する
- ③ 避難所を認識していない場合には、周囲の情報のみを頼りに行動し、避難所の情報を持っている他の歩行者エージェントと出会ったときに追従行動をとる

歩行者が取得する情報としては、現在のノードに隣接するリンクに関する1.人の数 2.次のノードまでの距離 とし、これらが次に向かうノードを決定するための判断基準となる。また、道路の途絶に遭遇した場合にはUターンする。

6.2 自動車エージェント

自動車は発災後、避難所に向かうか、目的地を変更せずに行動するかを判断する。その際の経路の選択方法は歩行者と同様とし、その他に、渋滞に巻き込まれた場合には回避行動(Uターン)をとることを考慮する。

自動車取得する情報としては、現在のノードに隣接するリンクに関する1.車両の数 2.次のノードまでの距離 とし、次に向かうノードを決定するための判断基準とする。

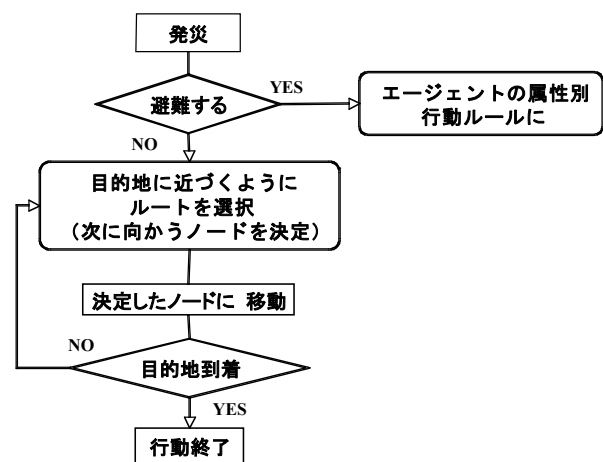


図-4 歩行者・自動車エージェント共通の行動ルール

6.3 シミュレーションにおける諸条件

ここで今回のシミュレーションにおける諸条件を整理しておく。

① 各エージェントのリンク上における移動

各エージェントのリンク上における移動について、歩行者エージェントは他の歩行者エージェントや自動車エージェントから影響を受けることなく移動する。自動車エージェントについては、歩行者エージェントから影響を受けることはなく、前方に他の自動車エージェントが存在する場合には車間距離を保つよう移動する。

② 経路選択

経路選択について、先に述べたように各エージェントの属性により異なるが、避難所までの距離が最短となるように選択する場合と、人がより多い経路を嗜好する場合、車両がより少ない経路を嗜好する場合とを設ける。

③ 途絶・渋滞回避性

各エージェントが移動中に道路の途絶や渋滞に遭遇した場合、エージェントの属性に従って回避行動をとる。

④ 歩行者と自動車の交錯

今回のシミュレーションにおいては、交差点部における交錯を考慮する。歩行者エージェントが交差点を横切ろうとするとき、そこに向かって移動する車両が存在する場合には歩行者は一時停止し、車両が通り過ぎた後に移動を再開する。また、自動車エージェントが交差点部に差し掛かる際に、前方に既に横断を始めている歩行者エージェントが存在する場合には減速し、場合によっては停止し、前方の歩行者が通り過ぎた後に走行を再開する。

⑤ 車両を置いて徒歩で避難する

自動車エージェントが渋滞や途絶に遭遇した場合、属性別の回避開始までの時間を基に回避行動をとるが、一方通行道等の影響により回避できない場合、その場に車両を置いて徒歩で避難行動をとる。

7. シミュレーションにおけるシナリオ

ここで今回のシミュレーションにおけるシナリオについて述べる。

まずシナリオ①として、積雪寒冷地である札幌市におけるシミュレーションのため、冬期積雪時の影響を考える。これについては、冬期を仮定した場合に、シナリオ②として設定する夏期を想定したものから、各エージェントの移動速度を一定割合で低減させ、さらに自動車エージェントについては、駐停車車両の脇を通行できない状況を想定した。この後のシナリオ③、④、⑤についてはすべて冬期積雪時を想定したものとする。

次にシナリオ②として、夏期を想定したものとして何ら操作を加えない場合を考える。

シナリオ③としては、地震が発生した際には自動車を利用しないことが推奨されていることから、避難所に向かう際には自動車を利用しない場合を想定した。

シナリオ④としては、大規模な地震が発生した際に、より共助を心がけた場合の効果をも想定し、歩行者エージェントの

属性のうち、他の人に対する行動について避難所を知っている場合には他の人を連れて行き、知らない場合にはついて行くように操作した。

シナリオ⑤として、歩行者と自動車の交錯の影響がない場合を想定した。

最後にシナリオ⑥として、シナリオ⑤との比較のために、夏期における歩行者と自動車の交錯の影響がない場合を想定した。

8. シミュレーション結果

各エージェントを第5章、第6章で述べた属性、行動ルールに従って行動させ、第7章で述べたシナリオについて、車両平均速度と駐停車車両数、徒歩による避難者の避難状況をそれぞれ比較した。比較結果を図-5、図-6、図-7に示す。横軸には地震発生後の経過時間(分)を、縦軸にはそれぞれ車両平均速度(km/h)、駐停車車両数(台)、避難完了歩行者数(人)をとる。ここで、図中の丸で囲んだ番号は各シナリオに対応している。また参考までに、避難所付近で渋滞が発生している様子を図-8に示す。これは冬期において避難所に向かう車両が存在する場合の、地震発生から10分後の状況であり、数台の駐停車車両のために車列が交差点部までさしかかり、渋滞が発生している様子が見て取れる。

ここで、本シミュレーションにおいては頻繁に乱数を用いてエージェントの行動を決定しているため、結果を比較する際には各々のシミュレーションを複数回(最低10回)実行したものの平均値を取った。

9. 考察とまとめ

図-5より、歩行者と自動車の交錯の影響により車両平均速度が低下し、また避難所に向かう車両がない場合には車両の平均速度が大幅に増加することがわかる。

図-6より、冬期は夏期に比べて駐停車車両が大幅に増加し、避難所に向かう車両がない場合には大幅に減少することがわかる。

図-7より、共助の割合を大きくした場合、徒歩による避難者の避難所に到着する増加率が大きいことがわかる。

また図-8に見られる結果より、自家用車で避難所に向かい避難所付近に駐停車することによって、その周辺に交通渋滞を発生させる恐れがあり、避難に際して車両を必要とする人々の避難を妨げることや、緊急車両の通行を阻害する結果を招く恐れがあることがわかる。

以上の結果をまとめると、以下の通りである。

- i. 積雪寒冷地においては、地域特性として冬期の積雪の影響を考慮した減災対策を講じることが必要であることがわかった。これは冬期における車両平均速度の低下、雪溜めによる車道幅員の減少を考慮したことから得られたものである。

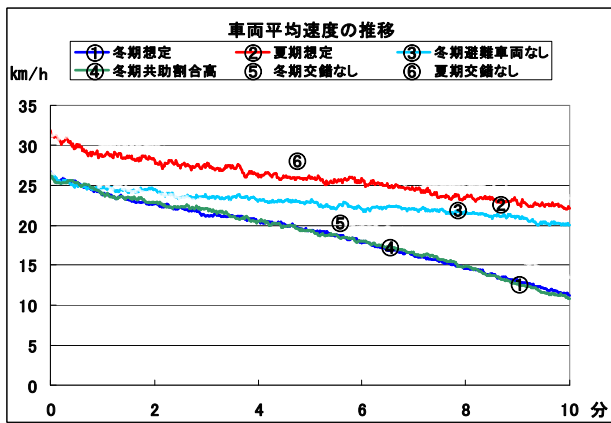


図-5 車両平均速度の比較

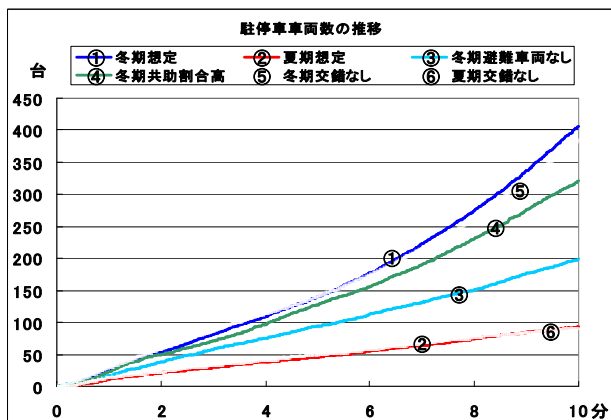


図-6 駐停車車両数の比較

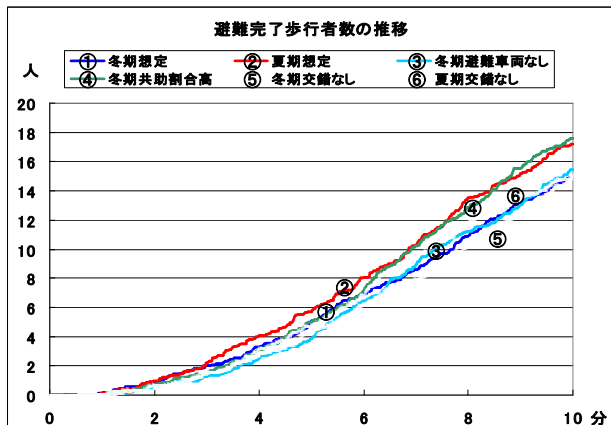


図-7 避難完了歩行者数の比較

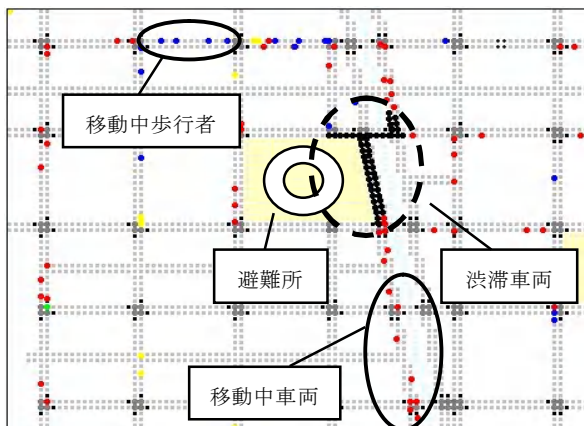


図-8 避難所付近で渋滞が発生している様子

- ii. 今回歩行者と自動車の交錯は、交差点部のみで考慮したが、実際にはそれ以外の場所でも道路を横断する歩行者が存在するであろうことから、これについて震災下の状況のシミュレーションを行う際には考慮すべき点であり、今後シミュレーションに組み込む必要があることを示すことができた。
- iii. 震災下において自動車を利用することが交通渋滞を発生させ、二次災害につながる恐れがあることが明らかとなった。さらに、冬期においては雪溜めによる車道幅員の減少の影響により、駐停車車両が大幅に増加することが示された。
- iv. 震災下において共助を心がけることで、減災につながることを示すことができた。

これらによって、今後新たなシミュレーションが必要であり、震災下での自動車利用の抑制や共助の促進といったソフト対策についての議論が今後益々必要になると考えられる。

最後に、今回のシミュレーションは積雪寒冷地である札幌を対象に構築したものであるが、シミュレーション内で用いているパラメータは任意に設定できるものであり、対象とする地域の住民の行動特性をアンケート等によって把握することにより、容易にその地域における住民の行動特性を踏まえたシミュレーションを行うことができる、という点を付け加えておく。

参考文献

- 1) 根岸 祥人, 加賀屋 誠一, 内田 賢悦, 伊橋 雅浩: 震災経験を考慮したルールベースの避難交通行動シミュレーションへの適用に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.30, 論文番号223, CD-ROM, 2004.
- 2) 合月 孝, 加賀屋 誠一, 内田 賢悦, 伊橋 雅浩: マルチエージェントシミュレーションを用いた札幌都心部の歩行者回遊行動に関する研究, 2004 年度土木学会北海道支部年次講演会講演集, IV-41, CD-ROM, 2005.
- 3) 渡部 正一, 加賀屋 誠一, 内田 賢悦, 萩原 亨: 運転者特性を考慮した避難行動シミュレーションモデルの構築に関する研究, 2005 年度土木学会北海道支部年次講演会講演集, IV-38, CD-ROM, 2006.
- 4) Seiichi KAGAYA, Ken-etsu UCHIDA, Toru HAGIWARA, Akihito NEGISHI, AN APPLICATION OF MULTI-AGENT SIMULATION TO TRAFFIC BEHAVIOR FOR EVACUATION IN EARTHQUAKE DISASTER, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, EASTS'05 BANGKOK, pp.4224-4236, 2005.

(2007年8月17日受付)