

CBR テロを想定した避難シミュレータ

副田 俊介[†] 山下 倫央[†] 野田五十樹[†]

[†] 産業技術総合研究所

あらまし 近年の CBR テロ (化学兵器, 生物兵器, 放射性物質を用いたテロ) への危機感が高まりつつある。CBR テロによる災害は従来の災害と異なり, どのような被害が起こるかの知見も少なく, 対処方も確立されていない。よって, CBR テロの被害を予測する技術への要求は高い。本稿では, 筆者らが構築している避難シミュレータについて説明する。避難シミュレータは有害物質拡散シミュレータなどと併せて用いることで, CBR テロによる被害を予測することに使用される。この避難シミュレータは多数の試行を行えるようにするため, ネットワーク型人流シミュレータとして実装されている。また, この避難シミュレータを用いた簡単な実験を行い, 単純なシナリオでもシミュレーションを行う価値があることを示した。

キーワード テロ対策技術, マルチエージェントシミュレーション, ネットワーク型人流シミュレータ

Evacuation Simulation for CBR Terrorism

Shunsuke SOEDA[†], Tomohisa YAMASHITA[†], and Itsuki NODA[†]

[†] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract Recently, there are requirements for technologies that could reduce damage done by biological, chemical, and radiational attacks by terrorists (CBR terrorism). Unlike other disasters, how to deal with CBR terrorism is not well known; what kind of attacks does, how much damage, and how to defend against it. Therefore there is a great urge for technologies that can be used against CBR terrorism. In this paper, we present an evacuation simulator, used together with other systems, that can to estimate the damage done by CBR terrorism. The simulator we have build is a network-based pedestrian simulator, that calculates the damage done to the agents. By using this simulator, we were able to show trade-offs that might happen on designing evacuation plans.

Key words Anti-terrorism technology, Multiagent simulation, Network based pedestrian simulator

1. はじめに

近年, テロリストによる生物兵器, 科学兵器, および放射能汚染による市民を対象とした攻撃 (CBR テロ) への危機感が高まりつつある。そのため, CBR テロを対象とした机上訓練 [1] などが行われているが, 対策が十分といえる状況ではない。その原因の一つとして, 実際に発生した CBR テロの件数は国内外ともに少なく, CBR テロの想定を立てたり, 被害の予測をすることが難しいことが挙げられる。このような状況に対し, 被害予測を行うシミュレータが有用であると考えられる。

従来より, 災害時の避難シミュレーションを扱った研究は行われているが [2], [3], CBR テロによる災害は通常の災害とはいくつか異なる点があるため, そのまま適用することは難しいと考えられる。まず, 通常の多くの災害の場合, 被災者を安全な地点まで誘導することが最大の目的となるが, CBR テロの場合, 被災の程度が異なる被災者が一緒になった場合, 被害が拡大する恐れがあるため, 被災の程度によって被災者を隔離す

る必要がある。また, 多くのケースでは, 災害の原因となる有害物質の濃度が下がるまでの短い時間 (数十分程度) で被害が発生するため, 対応のための時間が短い。

また, CBR テロ対策に関する研究は海外などでも行われているが [4], 想定している人口密度や避難の方法など, 日本とは条件が異なるためそのまま適用することは難しい。

筆者らは, CBR テロが発生した際の被害を予測するための避難シミュレータを開発している。本シミュレータは, 文部科学省平成 19 年度安全・安心科学技術プロジェクトの課題「有害危険物質の拡散被害予測と減災対策研究」の一部として開発されており, 有害物質の拡散シミュレータと連動して CBR テロによる被害を推定することを目標としている。本稿では本シミュレータの機能を解説するとともに, 単純なシナリオに対するシミュレーション結果を紹介し, 避難シミュレーションを行う必要性を示す。

2. CBR テロ対策

CBR テロは化学剤や生物兵器、あるいは放射性物質を散布することで起こすテロである。各々性質の異なるテロではあるが、どれも拡散する有害物質を散布することによって起こすテロであるため、対策にも共通する点があると考えられる。

CBR テロ対策への科学技術の貢献には、例えば CBR テロ発生前の抑止（散布前の有害物質の検出技術）、CBR テロ発生時の早期検出（散布後の有害物質の検出技術）、そして CBR テロ発生時の被害の予測（避難のシミュレーション）などが考えられる。本稿ではこのうち、被害の予測について扱う。

2.1 CBR テロ対策の難しさ

本研究では、避難シミュレーションを用いて CBR テロ発生時の被害の予測を行うことを考える。CBR テロ対策を含め、どのような災害の対策でも、被害を予測することは重要である。災害が発生した際、どのようにどれだけの被害が発生するかわからなければ、被害を軽減するための方法の立案も困難となる。従来の多くの災害についてはその災害についての知見があり、経験による対策を立案することが可能である。しかし、CBR テロは発生件数自体が少なく、他の災害のように経験による被害の予測が難しい。そこで、何らかの方法で被害を予測することが必要となる。このようにして、シミュレーション技術は大きな貢献を行うことが可能となると考えられる。

2.2 想定される利用方法

本研究では、避難シミュレータの利用方法をおおまかに2通り想定している。これらは組み合わせる有害物質拡散シミュレータや災害の規模（対象とする被災者の人数や災害の範囲）、そして想定する利用者による差である。1つは広域避難を対象としたシミュレーション、もう1つは屋内避難を対象としたシミュレーションである。

ただし、この区別は必ずしも厳密なものではなく、以下に述べる利用者や有害物質拡散シミュレータ以外の組み合わせも十分考えられる^(注1)。

2.2.1 広域避難シミュレータ

広域避難シミュレータは、屋外で CBR テロが発生した際の被害予測を行うシステムである。これは、大気拡散シミュレータと組み合わせ、半径数キロ程度までの範囲の屋外における、数万人から十万人程度の避難を想定している。また、想定している利用者は地方自治体などを含む、CBR テロ発生時に直接対応する機関であり、CBR テロ対応訓練立案の支援や、対応訓練を実施した後の評価、避難計画の立案を支援することを目的とする。概要を図1に示す。

まず、広域避難シミュレータに、対象とする地域に関する地図データや昼間人口データ等を、大気拡散シミュレータに気候条件や散布条件をあらかじめ入力しておく。その上で避難計画（誘導を、いつ、どのように行うか等）を様々な変化させて、被

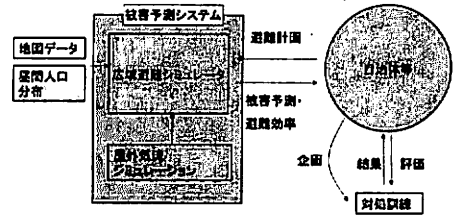


図1 広域避難シミュレータの利用方法概要

害の予測（いつ、どのように被害が発生するか）や避難効率（いつ頃までにどれだけの人が避難できたか）を出力する。

2004年に成立した「武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律」（国民保護法）[5]の枠組みでは、地方自治体も情報の伝達や実際の災害への対応などで重要な役割を占めており、そのため、地方自治体による CBR テロ対策の訓練も盛んに行われている[1]、[6]。これらの訓練は、被害が実際に発生した場所を想定しての実地訓練と、情報の伝達や災害にどのように対応するか判断の訓練を行う図上訓練とに分けられる。多くの図上訓練では訓練を企画・実行する人と、訓練を受ける人とは分けられており、訓練を受ける人は事前にどのような災害が発生するかを知らずに実際の場合と同様な情報のみを与えられ、それに基づいた判断や行動をすることを求められる。

実地訓練もある程度そうだが、図上訓練では訓練のシナリオの現実性が重要となってくる。これには、想定する CBR テロが実現可能か（散布物質の調達や散布方法が不自然でないか）ということ以外にも、災害の状況や被災者の行動、そして被害が正確か、想定した条件で最大の被害が出る可能性も考慮したか^(注2)といった要素が挙げられる。現状ではどのようなシナリオが現実的であるかということに関する知見がないため、現実性を向上させるためにはあらかじめ選んだ少数のシナリオを検討するのではなく、多数のシナリオを検討する必要がある。

また、避難計画を立案する段階でも、あらかじめ有効な避難計画は確立していないため、やはり多数の避難計画を検討する必要がある。そこで広域避難シミュレータは高速に動作する必要がある。

2.2.2 屋内避難シミュレータ

屋内避難シミュレータは、屋内で CBR テロ災害が発生した際の被害予測を行うシステムである。これは、屋内気流シミュレータと組み合わせ、通常のビル内程度の大きさまでの構造物内における、数千人程度までの避難を想定している。また、想定している利用者は建築物の設計者であり、CBR テロへの対策を行う必要があったり、行うことで付加価値を高めた建物の設計をする際に利用することを目的とする。概要を図2に示す。

屋内避難シミュレータは建築物を設計する際に用いる。建築物の設計図や CBR テロの条件（有害物質を散布する場所や量などの散布条件、屋内の人の配置に関する条件、空調機器の設

(注1)：例えば駅を対象とした CBR テロの対策には、屋内気流拡散シミュレーションと組み合わせた避難シミュレータとを公共機関が利用しつつ、避難計画を立案することが考えられる

(注2)：現実にはテロリストが何らかの理由で手加減する可能性はあるが、対応訓練では最大の被害を想定することが重要である

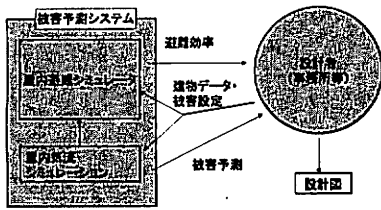


図2 屋内シミュレータの利用方法概要

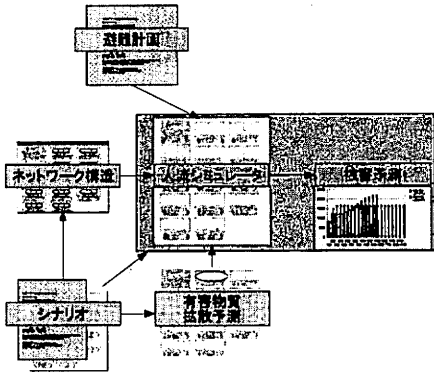


図3 CBRテロによる被害予測システム概観図

定、避難計画)を屋内避難シミュレータ、屋内拡散予測シミュレータに入力すると、被害の予測や避難効率を出力する。

屋内避難シミュレータの扱う問題は、広域避難シミュレータと比べ規模が小さいが、屋外同様に想定するシナリオを絞りこむため多数のシナリオを扱う必要があること、設計の変更のたびにシミュレーションを行う必要があることから高速に動作する必要がある。

3. 避難シミュレータ

本稿で紹介する避難シミュレータは、有害物質の拡散シミュレーション [7], [8] と組み合わせることで、CBRテロが生じた際の被害を予測する。有害物質拡散シミュレーションや、入力データ編集機能とあわせた被害予測システム全体の概要を図3に示す。

避難シミュレータの利用者は、まずシミュレーションをしたいCBRテロ災害のシナリオを準備する。ここで言うシナリオは次の要素を含む：

- シミュレーションを行う場所 (地図上の位置や建物)
- 散布された有害物質の性質
- 有害物質が散布された場所
- 有害物質が散布方法や量
- 有害物質の拡散に影響する要素^(注3)
- 被災者の人数や配置
- 個々の被災者の設定 (避難速度や避難経路への理解)

(注3)：気象条件 (広域避難シミュレーション) や空調 (屋内シミュレーション) など

第2節で述べたとおり、避難シミュレータは高速に計算する必要があるため、本研究では避難シミュレータとして、ネットワーク型の人流シミュレータを用いている。これは、避難経路を節と辺によって表現したシミュレータであり、人の流れを直線で近似することで高速に避難の様子をシミュレーションすることが可能である。本シミュレータでは1人の被災者を、対応する1つのエージェントとして表現しており、このエージェントがネットワーク構造として表現された被災地を移動することで避難の様子をシミュレーションしている。

混雑した状態では、歩行者の速度は低下する。そのことを表現するため、本研究ではエージェントが混雑に応じて速度を低下させた。どの程度速度が低下するかは太田らが提案した式1を用いた [3]。

$$v = v_0 \left(1.0 - \frac{0.8}{1.0 + \exp(c - p)} \right) \quad (1)$$

また、被災者が避難経路について、どの程度詳しいか (自信があるか) もパラメータとして持っており、接点を通過する際、一定の確率で正しい避難経路 (次に選ぶべき辺) がわからなくなるようにした。エージェントは、進むべき辺がわからなくなった場合、まわりの辺を、その辺の上を避難しているエージェント数に応じた確率で選択するようにした (追従)。

なお、ネットワーク型人流シミュレータは広場など、人の流れが直線的でない場所のシミュレーションは必ずしも正確ではないが、このような箇所では粒状の人流シミュレータを用い、ネットワーク型人流シミュレータと組み合わせることで精度を確保する方法を検討中である。

この人流シミュレータを利用するためには、シナリオから避難経路を、ネットワーク構造として作成する必要がある。これは、広域避難シミュレーションであれば、GISデータなどから半自動で作成することが可能である場合がある。一方で屋内避難シミュレーションの場合は、建築物の設計図等から利用者自身が作成する必要がある。

また、シナリオから有害物質の濃度に関する情報を得るため、有害物質拡散予測を行う必要がある。これは上で述べたとおり、状況に応じた有害物質拡散シミュレータを利用する。

これとは別に、避難計画も作成する必要がある。これは、避難経路の利用に関するポリシーや、避難誘導を行うのであればその避難誘導の内容 (方法やタイミング) を決めたものである。

上で作成したネットワーク構造や有害物質拡散予測、避難計画に加え、シナリオから被災者に関する情報や災害物質の性質を用い、人流シミュレータで災害の様子をシミュレーションを行う。各エージェントは各々の避難に関するポリシーと、避難計画にもとづいて避難を行う。その際、通過する経路における有害物質の濃度やその経路での滞在時間に応じて、有害物質を被曝する。各エージェントの被曝量を計算することで被害の予測を行う。最終的なシミュレーション結果として、被害予測や、避難にかかった時間など避難効率に関する値が出力される。

3.1 広域避難シミュレータ利用の流れ

広域避難シミュレータ利用の流れを付録の図4に示す。

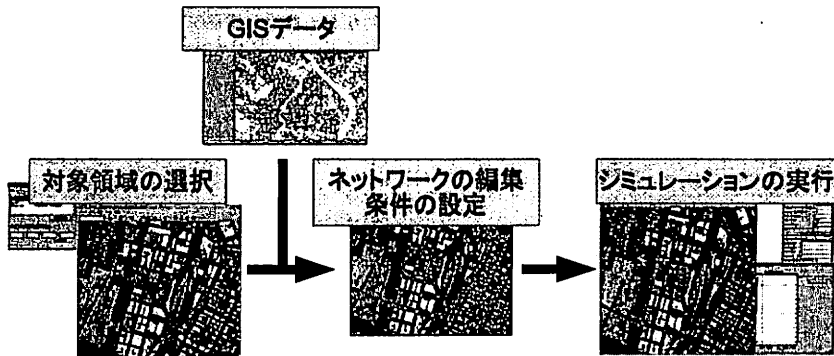


図4 広域避難シミュレータの利用の流れ

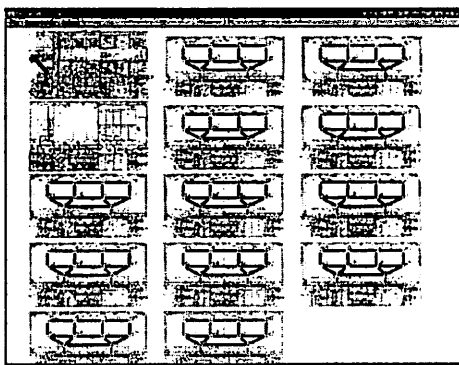


図5 屋内避難シミュレータのためのネットワーク構造の編集

利用者は、まずシミュレーションを行う対象領域を選ぶ。本システムは、この対象領域の情報(緯度・経度)を与えると、GISデータから自動的に対象領域の範囲内にある道路の情報を抽出し、そこから交差点や、範囲外へ続く道が対象領域の境界とぶつかる点を接点、道路を辺としたネットワーク構造を作成する。

そこで得られたネットワーク構造を、ネットワーク構造エディタ編集したり、被災者の配置や有害物質拡散予測の結果を入力する。その上で、これらを用いて避難シミュレーションを行うことで、被害予測が得られる。

3.2 屋内避難シミュレータ

屋内避難シミュレータを利用する場合には、まずシミュレーション対象である建物の図面を準備する。本システムは、屋内避難に関してはネットワーク構造を自動的に生成することはできない。そこで、ネットワーク構造は、ネットワーク構造エディタを用い利用者が作成する必要がある(図5)。

このネットワーク構造と被災者の配置や有害物質拡散予測の結果を組み合わせ、避難シミュレーションを行うことで、被害予測が得られる。

4. 実験：屋内避難シミュレーション

本節では屋内避難シミュレーションによる実験を用いて、避難計画のよって、被害にどのような差が出るのかの、例を示す。

表1 屋内避難シミュレーション結果

	誘導なし	誘導あり
累積被曝量(全員)	22066.7	16717.0
累積被曝量(最大)	169.2	238.8
避難完了時間	1,422	2,108

4.1 実験条件

実験は次のような条件・シナリオで行った：

- ・ 場所は、東京都千代田区にある14階建のビルがモデル
- ・ 建物内には、1,000人いるとした
- ・ 有害物質が6階に散布されが、散布直後に検知され、空調は即座に停止されたとした
- ・ 6階の部屋・廊下にいるエージェントは、1単位時間(0.2秒に相当)あたり1単位の有害物質を被曝するとした
- ・ 散布直後に避難が開始されたとした
- ・ 避難にはエレベータは使わず、非常階段のみを使う
- ・ 被災者の速度は1m/s[9]で、個体によって最大で1割増える

また、この実験では被災者に吸着した災害物質による二次災害を表現するため、次のような条件を入れた：

- ・ 被曝しているエージェントが辺に入ったら、その被曝量に比例した量だけ、その辺の有害物質濃度を上昇させる
- 避難誘導に関しては次のように二通りの条件で実験を行った：
- ・ 誘導なし 各エージェントは最短の経路で避難。
 - ・ 誘導あり 有害物質が散布された6Fにいたエージェントは右の非常階段を、他のエージェントは左の非常階段を利用して避難。

4.2 結果

これらの実験の結果を表1、図6に示す。なお、表・図ともに時間は単位時間(0.2秒に相当)で示されている。

ここで、累積被曝量(全員)は、全エージェントが合計で被曝した有害物質の量、累積被曝量(最大)は全エージェントのうち、被曝した有害物質の量が最大だった個体の被曝量を示している。避難完了時間は、最後に避難が完了した個体が避難するまでにかかった時間を示している。

今回の実験条件では誘導を行った場合と行わなかった場合で

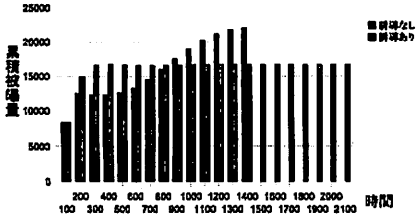


図6 屋内避難シミュレーション結果:累積被曝量

トレードオフが発生した。すなわち、誘導を行った場合では被災者全体での被曝量を減らすことができたものの、避難にかかった時間や被曝量が最大となった被災者の被曝量は誘導を行わなかった場合の方が良い結果となった。

4.3 考察

一見すると非常に単純なシナリオを用いて実験を行ったが、それでも避難計画にトレードオフが存在し、結果が必ずしも単純なものではないことが示された。また、被曝量最大の被災者に関する結果は筆者らの予想と異なるもの^(注4)であり、このような問題でのシミュレーション技術の重要性を示していると考えられる。

一方で、今回の実験は有害物質拡散シミュレーションと組み合わせただけではなく、また、用いたパラメータ等も実際の有害物質の物性などを反映したものではない。つまり、より正確な値を用いれば状況が全く異なる結果が得られる可能性があり、精密なシミュレーションを行い、結果を調べる必要がある。

5. おわりに

CBR テロ対策の現状と、それに対してマルチエージェント技術がどのように貢献できるかについて説明した。具体的には、避難シミュレーションシステムを用いて被害予測を行うことで、現状では知見の少ない CBR テロへの対策の立案を支援することが有用であると述べた。

また、筆者らが開発している避難シミュレーションシステムについて説明し、これを用いた簡単な実験を行った。その結果、単純なシナリオを対象としたシミュレーションでもトレードオフや直感に反する結果が生じることを示し、避難シミュレーションを行う重要性を示した。

本稿で紹介した避難シミュレーションシステムは必要最低限の機能だけ実装したものであり、実際に使うために次のような作業を行う予定である：

- 有害物質拡散シミュレーションシステムとの接続
- 被災者・有害物質に関するパラメータのチューニング
- 粒状人流シミュレータとの有機的な結合による、精度が高いシミュレーション
- 交通機関を併用した避難

また、本システム事態は有害物質を散布された CBR テロを主な対象として開発しているが、基本となっている技術は、ある一定の領域を通過したら、その領域の性質に応じた影響をエージェントが受けることをシミュレーションする、マルチエージェントシミュレーションである。そのため、CBR テロ以外のタイプのテロの対策(有害物質ではなく、危険度がエージェントに累積していくことのシミュレーション)や、テロ対策以外の用途も考えられる。

謝辞 本研究は文部科学省平成 19 年度安全・安心科学技術プロジェクトの援助により行われました。ここに謝意を示します。

文献

- [1] PHP・危機管理シミュレーション研究会：“新たな脅威とのたたかい”，PHP 総合研究所 (2006)。
- [2] 田所諭，高橋友一，高橋宏直，畑山満則，松野文俊，太田正幸，小藤哲彦，竹内郁雄，松井武史，桑田喜隆，兼田敏之，瀧美雅保，野邊潤，北野宏明：“ロボカップレスキュープロジェクト(解説)”，人工知能学会誌，15，5，pp. 1-9 (2000)。
- [3] 太田正幸，山下倫央，車谷浩一：“非常時における避難政策の学習による獲得(セッション 2:社会システムのモデル化)”，情報処理学会研究報告。ICS，[知能と複雑系]，20070314，26，pp. 31-34 (2007)。
- [4] V. Balasubramanian, D. Massaguer, S. Mehrotra and N. Venkatasubramanian: “Drillsim: A simulation framework for emergency response drills”, ISI, pp. 237-248 (2006)。
- [5] 内閣官房：“国民保護法とは”。<http://www.kokuminhogo.go.jp/arekore/kokuminhogoho.html>。
- [6] 東京都：“大規模テロ災害対処訓練の実施について”。<http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2007/11/20hb5300.htm>。
- [7] 大場良二：“流体・拡散方程式の環境問題への応用と高速数値解法(第 16 回年会「総合講演」)”，応用数理，17，1，pp. 53-56 (20070326)。
- [8] 奈良昌則，加藤信介，黄弘，朱晟偉：“3155 火災シミュレータ eve sayfa による火災の数値解析と精度の検証：浮力ブルームの解析(市街地火災性状，防火)”，学術講演梗概集。A-2，防火，海洋，情報システム技術，2006，pp. 317-318 (20060731)。
- [9] 日本建築学会：“建築設計資料集成-人間”，丸善株式会社 (2003)。

(注4)：誘導を行った場合の方が被曝量最大の被災者の被曝量が少なくなると予想していた