

## 津波と火災を考慮した複合災害避難シミュレーションツールの開発

○岩見達也\*1、竹谷修一\*2

キーワード：津波避難，マルチエージェント，避難時間，避難経路，避難安全性

### 1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災（東北地方太平洋沖地震、及びその後に発生した複数の地震）によって、多数の死者・行方不明者・負傷者が発生したのはまだ記憶に新しいところである。死亡原因は溺死が多くを占めたことから、津波対策の必要性が指摘されることとなった。

津波対策には様々なものがあるが、人的被害軽減という観点で考えれば、短期的には迅速かつ確かな避難誘導が求められ、中長期的には、避難を円滑化するための市街地整備（津波避難ビル、避難路、避難階段、避難場所の整備、あるいは土地利用・建築制限等）等が求められる。

また、東日本大震災では津波被害が顕著であった一方で、地震や津波に起因する火災は378件発生していることが報告されている<sup>1)</sup>。このうち、津波に起因する火災は162件、地震動による火災は110件となっており、市街地大火に至った火災は少ないものの、地震時の火災危険性が依然として残存していることが明らかになっている。

幸いなことに津波からの避難に際し、火災が発生している市街地を避けて避難するという事例は見られなかったが、石巻市門脇小学校のように、いったん逃げ込んだものの火災が迫ってきたために、校舍裏側の窓から裏山に避難したというような事例は見られた。

今後の津波時に、安全に避難できるためには、確実に避難場所まで避難できる避難路、火災に巻き込まれない避難場所の整備等が必要となる。

現在、筆者らは市街地火災の影響を考慮し、津波避難を円滑化させる市街地整備に資するために、市街地火災と津波の両方のハザードを考慮した避難シミュレータを開発中であり、本稿ではその開発状況について報告する。

### 2. 市街地火災シミュレータの開発状況

#### (1) 市街地火災シミュレータの開発経過

市街地火災の延焼拡大過程をモデル化した研究は数多くされている。これらは、マクロ的な観点に基づく延焼速度式と、内部に延焼速度を計算する過程を取り込んだ延焼シミュレーションモデルに大別される。

これらの延焼速度式や延焼シミュレーションモデルの多くにおいては、風速、建物規模や建物構造を考慮可能であったが、基本的には過去の市街地大火等から得られた知見に基づいて作成された経験式となっている。そのため、

地区施設整備等による延焼抑止効果の評価、建物の多様な防火性能の違いの評価等を行うことが出来なかった。

そこで筆者らは、平成10年度から、火災実験結果等に基づいて延焼拡大過程を対流、放射などの物理的な現象として捉え、過去の火災の経験からではなく火災実験に基づいて記述する物理モデルを構築し、これに基づく市街地火災シミュレータの開発を行った<sup>2)</sup>。これにより、建物の条件（耐火性能、開口部の性能など）の違いを考慮して評価することが可能となった。

その後、平成19年度からは、火災発生時の自宅や自宅周辺への影響、自宅や市街地の改善によってどれだけ火災安全性が向上するのかを視覚的に体感出来るものとして「市街地火災総合対策支援ツール」の開発を行った。このツールにおいて核となるのが、高度な市街地火災シミュレーション技術であり、上層階セットバック等、複雑な形状の建物の防火性能評価や、内装、床、外壁、内壁、屋根等の部材に応じたキメの細かな防火性能の評価が可能となった<sup>3)</sup>。その後さらに火の粉の影響等についてもその影響考慮するなどの改良を加えて<sup>4)</sup>現在に至っている。

#### (2) 市街地火災シミュレータの概要

市街地火災は、①火災建物内部での延焼拡大・外部への放熱、②火災建物周囲の建物での受熱・出火の2つの現象が順次繰り返されることで現れる物理現象としてとらえ、それぞれを「個別建物の火災性状モデル」及び「建物間の延焼モデル」としてモデル化している。

個別建物の火災性状モデルでは、建物の各室を検査体積としたゾーンモデルを採用しており、開口部からの流入空気量や火炎噴出、周壁への熱損失、燃焼に伴う周壁の崩壊等を考慮して、質量保存（式(1)）、化学種保存（式(2)）、エネルギー保存（式(3)）、状態方程式（式(4)）の各保存式を解いて建物内部の火災性状を詳細に計算するモデルとなっている。

建物間の延焼モデルでは、放射、熱気流、飛び火の3つの要素を考慮し、開口部からの噴出火炎の形状、熱気流の風下温度分布、火の粉の発生・飛散分布を計算し、周囲の建物の外壁表面又は室内可燃物の出火の有無を計算するモデルとなっている。図1に市街地火災シミュレータの計算内容を模式的に示す。

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = \sum_j (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) + \dot{m}_b \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i Y_{X,i}) = \sum_j (\dot{m}_{ji} Y_{X,j} - \dot{m}_{ij} Y_{X,i}) + \dot{\Gamma}_{X,i} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho_i T_i V_i) = \dot{Q}_{b,i} - \dot{Q}_{f,i} - \sum_j (\dot{Q}_{d,ji} + \dot{Q}_{m,ji}) + \sum_j c_p (\dot{m}_{ji} T_j - \dot{m}_{ij} T_i) + c_p \dot{m}_b T_b \quad (3)$$

$$\rho_i T_i = \rho_\infty T_\infty \quad (4)$$

$i, j$ :ゾーンを表すサフィックス  
 $\infty$ :外気を表すサフィックス  
 $X$ :化学種を表すサフィックス  
 $\rho, V, T, Y$ :密度、体積、温度、化学種の質量分率  
 $c_p$ :定圧比熱、 $m$ :質量流量  
 $m_b$ :熱分解ガス発生量、 $I$ :化学種生成量  
 $Q_b$ :燃焼による発熱量  
 $Q_f$ :収納可燃物の吸熱量  
 $Q_d$ :開口を通した移動熱量  
 $Q_m$ :壁等の吸熱量  
 なお、 $m_{ij}$ はゾーン*i*からゾーン*j*への移動質量を表す。  
 各記号上部の「 $\dot{\cdot}$ 」は単位時間当たりの量を表す。

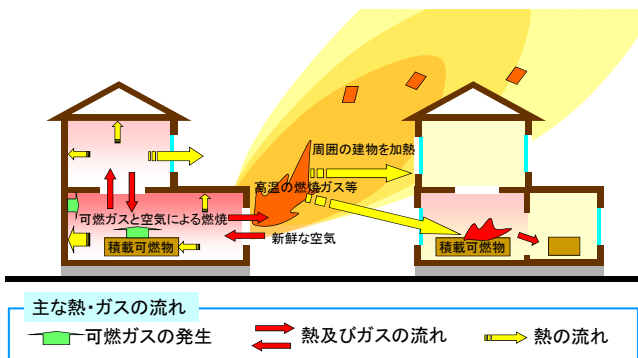


図1 市街地火災シミュレータの概要

### 3. 避難シミュレータの開発状況

#### (1) シミュレータの概要

市街地の避難安全性を計算するため、火災を考慮した津波避難シミュレータを開発中である。このシミュレータはマルチエージェントモデルを用いており、下記に示すような目的地・経路選択等の行動を起こすことを想定している。

- ・火災や津波が迫ると避難開始
- ・安全な避難地を選択
- ・安全な避難経路を選択
- ・避難地に危険が迫ると再避難
- ・一定以上の熱を受ける又は一定以上の水深になると避難失敗

#### (2) 避難行動モデル

エージェントモデルを用いているため、計算結果はエージェントの行動モデルの定義によって大きく異なることになる。現在、避難行動モデルとして表1を想定して開発を進めている。

表1 想定している避難行動モデル

選好	目的地の選好、避難開始時間、追従性等
知識	平常時の避難経路網、津波被害想定結果、既通過避難経路に関する情報（閉塞箇所、混雑状況、満員避難地）
周囲の情報	混雑状況、火災状況、津波状況、避難指示の取得
身体的特性	歩行速度、通過可能段差・傾斜等

津波避難時においては、リードタイムが短いことから、避難開始のタイミングが結果を大きく左右することが想定される。開発中の避難シミュレータにおいては、避難開始の意志決定条件として、火災からの避難については式(5)または式(6)に基づくことを想定している<sup>5)</sup>。

$$\text{MIN}_j(D_{s,j}) < d_{start} \quad (5)$$

$$Q_s > Q_{start} \quad (6)$$

$D_{s,j}$ :現在地*s*と火災建物*f*までの距離

$d_{start}$ :火災による避難意志決定距離（どの程度まで火災が迫ったら避難を開始するか）

$Q_s$ :現在地*s*における受熱流束（市街地火災シミュレータにより計算）

$Q_{start}$ :火災による避難意志決定受熱流束（どの程度まで火災による熱が高まったら避難を開始するか）

津波からの避難に関しては、下記によるものを意志決定条件として現在モデル化中である。

- ・警報等の受信
- ・周囲の住民への追従
- ・津波の接近

次に、目的地、及び、経路選択のモデルについては、津波や火災によるリスクを評価し、そのリスク評価値が最小となる目的地や経路を選択することとしてモデル化を行っている<sup>6)7)</sup>。このリスク評価値は、次式によって筆者らが定義したものである。

リスク評価値

$$= \text{目的地自体のリスク評価値（津波認知リスクと火災認知リスクの総合評価値）} + \text{目的地までの移動経路リスク評価値（津波認知リスクと火災認知リスクの総合評価値の総合評価値）} \quad (7)$$

認知リスク評価値については現在検討中であるが、仮モデルとして以下を定義して開発中である。

目的地自体の火災リスクは式(8)で、津波リスクは式(9)のように定義している。

$$P_{Fh,i} = D_{allow} / \text{MIN}_f(D_{if}) \quad (8)$$

$$P_{Th,i} = \exp(-k_1 \times \text{認知津波標高差}) \quad (9)$$

$P_{Fh,i}$  : 地点  $i$  における認知火災リスク評価値

$D_{allow}$  : 火災との許容距離

$D_{if}$  : 地点  $i$  と周囲の火災  $f$  との距離

$P_{Th,i}$  : 地点  $i$  における認知津波到達リスク評価値

$k_1$  : 標高差に関するリスク認知パラメータ

目的地までの移動コストについては火災リスクは式(10)、津波リスクは式(11)のように定義している。

$$P_{Fm,q} = \frac{d_q}{v} \left\{ \sum_{x \in q} \frac{(Q_x - 0.5)^2}{E_{allow}} + \beta' \right\} \quad (10)$$

$$P_{Tm,q} = \text{MAX}_x(P_{Tx}) \quad (11)$$

$$P_{Ti} = \exp(-k_2 \times \text{認知猶予時間})$$

$P_{Fm,q}$  : 地点  $i$  から地点  $j$  まで、移動経路  $q$  を通って移動する際の認知移動リスク評価値

$x$  : 移動経路  $q$  上の任意地点を表すサフィックス

$d_q$  : 移動経路  $q$  の歩行距離

$v$  : 歩行速度

$E_{allow}$  : 許容受熱量

$\beta'$  : 移動時間の火災リスクへの換算係数

$P_{Tm,q}$  : 地点  $i$  から地点  $j$  まで、移動経路  $q$  を通って移動する際の認知移動リスク評価値

$P_{Ti}$  : 認知津波閉塞リスク評価値

$k_2$  : 時間差に関するリスク認知パラメータ

#### 4. 複合災害避難シミュレーションツール

##### (1) ツールの概要

市街地火災シミュレータ及び避難シミュレータを用いて市街地の避難安全性を評価し、避難を円滑化するための市街地整備に活用可能なツールとして、複合災害避難シミュレーションツールの開発を実施している。ツールの概要を図2に示す。市街地データ及び計算条件を入力してシミュレーションを実行することにより、個々の避難者の避難成否や避難に要した時間が計算されるほか、様々な条件においてシミュレーションを行うことにより、下記を実現することが可能となる。

- ・避難不利地域の特定（避難失敗率の高い出発点の分布）
- ・避難失敗発生地域の特定（避難失敗発生地点の分布）
- ・市街地改善後の結果との比較による改善効果の把握

##### (2) 入力データ

表2は本ツールによる計算時に必要となるデータ項目とデータ形式を示している。本ツールでは、なるべく、公開

された入手が容易なデータをインポートする機能を開発し、計算準備にかかる労力の軽減に配慮している。ただし、道路網データ及び津波データに関しては入手容易な公開データが存在しないことから独自形式を採用している。



図2 ツールの概要

表2 入力データ項目及び入力データ形式

データ項目	データ形式	備考	実装	
市街地データ	地形	基盤地図情報 10m メッシュ標高		○
	建物	基盤地図情報建物の外周線又はシェープファイル形式	構造・用途・建物高さ等の属性データが別途必要。高さ方向の位置情報は地形に合わせて自動的に付加される。	○
	道路網	独自形式によるノード及びリンクからなるネットワークデータ	市販データを加工して作成。高さ方向の位置情報は地形に合わせて自動的に付加される。	×
	避難者	国勢調査のシェープファイル形式又はメッシュデータ形式による人口分布データ又は評価対象建物に一定割合で均一に配置	評価対象領域の建物に自動的に割り付けられる。	開発中
計算条件	避難場所	手動設定又は計算領域周囲に自動設定		-
	津波	独自形式による任意サイズのメッシュデータ形式の浸水時刻データ及び最大浸水深データ	特定の津波遡上計算プログラムによる計算結果のみインポート可能	△
	出火点	手動設定		-
	風向・風速	手動設定		-

##### (2) 計算例

現時点では、開発途上であり、計算結果について論じる段階には無いが、以下に計算例を示す。



図3及び図4は地震後の津波及び火災を想定した計算例である。図中央左より部分の住宅地は高台となっており、図右上が海側で、これらの間にある低地に立地する建物から高台への避難を想定した。低地から高台の住宅地への避難経路となる道路は図の上側からの1本と、図中央にある左右方向の1本のみである。住宅地の赤で示した部分で火災が発生し、海側となる図右上方向から津波が接近する設定とし、津波がすぐ近くに接近するまで避難を開始しない条件で計算した。

図3は地震発生後30分経過した状態である。火災は出火建物から隣棟への延焼が発生し、津波が遠方に迫りつつある(図3海側の紫青部分)が、まだ避難を開始していない(緑色で示した避難者は避難開始前を表す)。

図4はさらに30分経過した地震発生60分後を示している。一部の避難者は低地から高台への避難経路上を避難中であるが(水色で示した避難者は避難中を表す)、多くの避難者が逃げ遅れる結果となった(黒色で示した避難者は逃げ遅れを表す)。

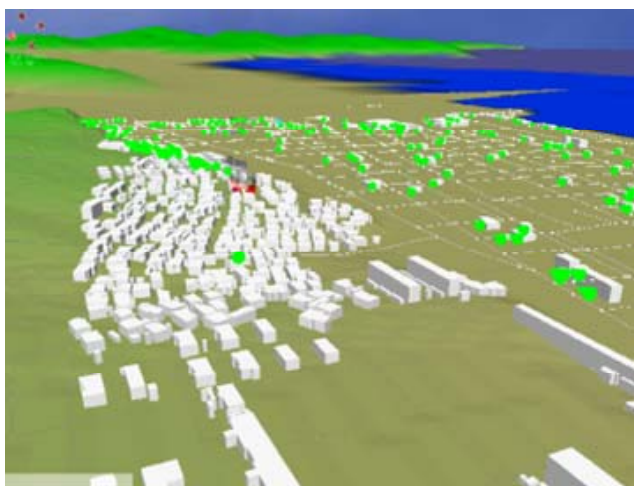


図3 計算例(地震発生30分後)

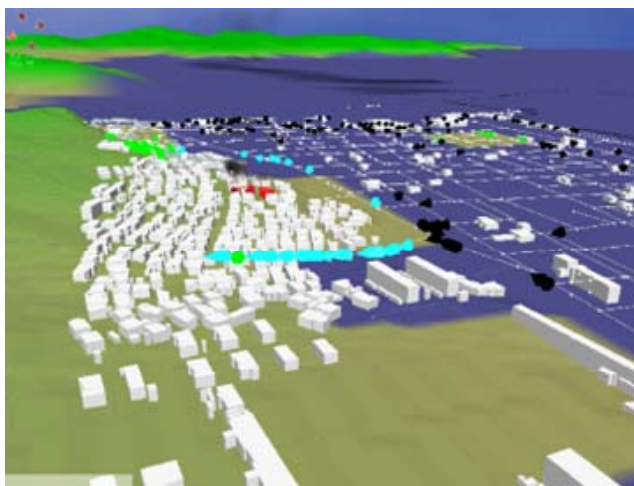


図4 計算例(地震発生60分後)

## 5. おわりに

本稿では、筆者らが開発している市街地火災シミュレータ及び津波と火災を考慮した避難シミュレータの計算モデルの概要を示すとともに、津波と火災を考慮した複合災害避難シミュレーションツールの開発状況について報告した。現時点では開発途中であり、計算結果を論じる段階では無いが、避難者が津波及び火災による危険性を避難リスク評価値という尺度で評価し、最善の避難経路及び目的地を自立的に選択して行動するマルチエージェント型の避難行動シミュレーションの計算が可能となっている。

現在、各シミュレータのモデルの精度を進めるとともに、車両を用いた避難行動を評価可能となるよう改良を実施している。また、避難シミュレーションによる結果に基づいて津波避難を円滑化させる市街地整備を進めるためのツールとして、避難を阻害する要因を抽出する分析機能等の開発を予定している。

## 参考文献

- 1)内閣府：大規模地震時の電気火災の発生抑制に関する検討会(第1回)資料2-2東日本大震災における火災の発生状況、<http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/denkikasai taisaku/1/pdf/2-2.pdf>(最終閲覧2014年10月7日)
- 2)国土交通省：循環型社会および安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発 まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発報告書、2003.3
- 3)岩見達也：シミュレーションによるH8年木造3階建共同住宅実大火災実験再現の試行、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)A-2、日本建築学会、2010.9
- 4)岩見達也、林吉彦、大宮喜文：飛火を反映した市街地火災シミュレーションの構築(その2)火災実験に基づいた飛火現象のモデル化とシミュレーションの構築、日本建築学会2011年度大会(関東)学術講演梗概集、日本建築学会、2011.7
- 5)岩見達也、竹谷修一：マルチエージェント手法を用いた広域火災時の避難シミュレーションモデルの構築、日本建築学会2012年度大会(東海)学術講演梗概集、日本建築学会、2012.7
- 6)岩見達也、竹谷修一、木内望：津波避難リスクに基づく避難安全性評価手法に関する基礎的検討、第48回土木計画学研究発表会・講演集、土木学会、2013.11
- 7)岩見達也、竹谷修一：津波と火災を考慮した避難シミュレータのプロトタイプ、日本火災学会研究発表会概要集、日本火災学会、2014.5

\*1 独立行政法人建築研究所 主任研究員 修士(工学)

\*2 国土交通省国土技術政策総合研究所 室長 博士(工学)