

セルオートマトン法を用いた震災直後の火災シミュレーションモデルの改善

謝 孟春* 野久保 宏幸* 切通 考貴**

10年前の阪神・淡路大震災では、震災直後の家屋倒壊と家屋火災などの二次災害が引き起こしたため、被害を大きく拡大してしまった。この教訓から震災直後の火災延焼をシミュレーションするなどの情報システムが減災に重要な役割を果たすと考えられる。本研究は、これまでに提案したセルオートマトンによる火災シミュレーションの精度を向上するために、格子マップの作成方法や、延焼確率計算式などのモデル改善を検討する。さらに、シミュレーションモデルでは可燃セルの火の勢いを弱めることで、消火の延焼に対する抑止を表す方法を提案する。最後には、シミュレーション実験を用いて、改善したモデルの有効性を確かめる。

Improvement of Simulation Model of the Spread of a Fire Using Cellular Automaton

Mengchun XIE*, Hiroki NOKUBO* and Takaki KIRITOSHI**

Cellular Automata (CA) is one of the methods for simulating the spreading of fire and its usefulness has been confirmed by researches. However, conventional method has a possibility that its simulation fire spreads more broadly than real because it didn't consider distance between buildings. Moreover, it is difficult to simulate accurately because a simple formula was applied to the spread probability formula. This research aims to improve models to simulate more accurately. First, we improve cell modeling method and spread probability formula and verify its propriety with comparing conventional method for some districts which were damaged greatly by Hanshin Big Earthquake Disaster.

1. はじめに

セルオートマトン (Cellular Automaton) 法、1950年代に J. Neumann と S. Ulam が考案されたもので、今日ではコンピュータの飛躍的な進歩により、さまざまな自然現象、材料・交通・電子回路特性・画像処理、社会経済現象などに幅広く適用されている [1-3]。セルオートマトン法は解析対象を現す方程式を求めなくても、隣り合うセル間のミクロな相互作用により、複雑な現象を再現することができる。

10年前の阪神・淡路大震災では、同時多発型の都市延焼火災が発生した。この火災では、約 65ha、7000 棟を焼失した。地震火災は、様々な出火原因があるが、地震直後に消防力を上回る多数の火災が発生する場合、地震時の交通混

乱や家屋倒壊や水力の不足のため消防が効果的を發揮できない場合に広域火災に発展してしまう危険性がある。日本のほとんどの都市は大規模な木造密集地帯を抱えており、同時に、地震の危険性が高い都市が多いから、地震直後の広域火災が発生する危険性が低いとはいえない [4]。そこで、地震時火災の市街地延焼をシミュレーションするなどの情報システムが減災に重要な役割を果たすと考えられる。

火災の市街地延焼の分析方法は、「浜田式」などの延焼速度式を用いたことが多かった [4]。これらの計算式を適用するとき、均一の規模の建物が格子状に規則正しく並んでいる市街地を想定している。また、建築物が混在する場合には、構造ごとに延焼速度を求め、構造比率によりそれぞれの延焼速度に対して重み付けを行い、構成比の加重平均によるものを市街地の延焼速度とした。しかし、これらの延焼速度式が、必ずしも現状の市街地の実状を的確に表現

*和歌山工業高等専門学校,

Wakayama National College of Technology

**福井大学, Fukui University

し得ないことがある。特に、地震直後の火災は、家屋の倒壊や震災直後の混乱が発生することにより火災延焼の複雑性と偶然性が増え、単純な延焼速度式で計算することは困難である。

著者らは、自然現象を再現するために幅広く適用したセルオートマトン（CA：Cellular Automata）法を用いて火災のシミュレーションを試み、実験からこの手法の有効性を確かめた[5,6]。しかし、構築したシミュレーションでは建物と建物との間の距離が考慮されていなく、延焼確率計算式が単純であるため、正確なシミュレーションを行うことができない部分がある。本研究は、より正確な火災シミュレーションシステムを構築する目的として、セルオートマトン法を適用する時のセル化の方法や延焼確率計算式などを中心として、都市火災シミュレーションモデルの改善を検討する。さらに、シミュレーションモデルでは可燃セルの火の勢いを弱めることで、消火の延焼に対する抑止を表す方法を提案する。最後には、シミュレーション実験を用いて、改善したモデルの有効性を確かめる。

2. CA 火災シミュレーションのモデル化

2.1 セルオートマトン

セルオートマトン法は、対象とするものをセルという区分領域に分割し、有限な離散的な状態量を各セル上に定義する。その状態量を近傍のセルとの相互作用のみを考慮することで、離散時間ステップごとに状態遷移規則に従い推移させ、全体としての現象を表現する手法である[3]。

CAの特徴として、セルの状態をその内部状態と外部からの入力に依存して、内部状態を変化せて、出力するという単純なプロセスで構成されているにもかかわらず、それぞれのセルが局所近傍則に従い相互に影響を及ぼしあうので、全体の動きが非常に複雑になることである。CAは、従来の微分方程式を代替しているだけでなく、自然界の不規則性、複雑性をコンピュータ上で表現することができる。

2.2 CA 火災シミュレーションのモデル化

セルオートマトン法（CA）による火災シミュレーションは、地図情報をセル化することと、セルの状態遷移からなる。セル化とは、市街地の地図を一定の長さの2次元の正方格子で区切って、一つの正方格子を一つのセルにするということである。

セルの状態は実際の建物や空き地などの状況に応じて、

木造セル：木造建築（燃えやすい）

防火セル：防火建築（燃えにくい）

耐火セル：耐火構造建築（燃えない）

道路セル：道路や空地（燃えない）

のいずれかにする。

また、CAによる延焼の広がりを表現するために、

燃焼セル：燃えている建物

鎮火セル：燃え尽きた建物

も設定する。

燃焼セルへ変化できるセルを可燃セルと呼び、木造セルと防火セルがそれにあたる。燃焼セルは一定時間後に鎮火セルに変化し、耐火セル、道路セル、鎮火セルは他の状態に変化しないものとする。

セルの状態遷移とは、可燃セルが計算された延焼確率で燃焼セルになることと、燃焼セルが鎮火セルになる二つの状態の変化ということである。ここでは、セルの状態遷移の局所近傍則をノイマン近傍に適応する際に、その写像が一意的ではなく、確率的に出力を決定する。

可燃セルが燃焼セルに変化する確率 p の計算は式(1)で求め、一様乱数 r_f で燃焼セルへの遷移を決める。

$$p = \frac{W_e \cdot C_b \cdot C_f}{C_d} \quad (1)$$

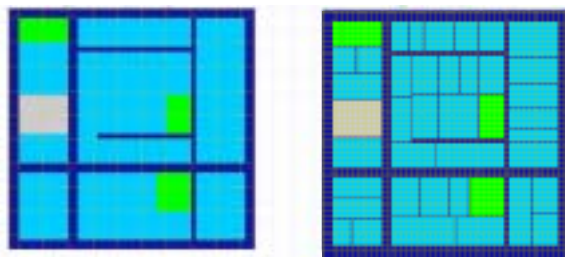
$$p \geq r_f \quad (0 \leq r_f \leq 1)$$

ここで、 W_e は風の影響を表すパラメータ、 C_b は無風状態でのセルの燃えやすさ、 C_f は燃焼セルの火の勢い、 C_d は燃焼セルと可燃セルとの間の距離に関係するパラメータである。

3. CA による火災シミュレーションモデルの改善

3.1 セル化方法の改善

市街地の地図をセル化する際に、従来方法では、一辺約 4 m の正方形で市街地の地図を区切って、格子マップを作成した。しかし、都会では多くの場合、建物間のスペースが 4 m より小さい。ここでは、格子の一辺を約 1 m の大きさで格子マップ作成することによって、実際の市街地状況をよく反映することにする。図 1(a) は従来の方法でできた格子マップで、図 1(b) は改善した方法でできた格子マップである。



(a)従来の手法 (b)改善した手法

図 1 異なる格子マップの作成

図 1(a) では、広い道路に応じた道路セル以外には、建物を表す木造セルや防火セル及び耐火セルしかない。実際の建物間には空き地を空けるのは一般であるが、従来のセル化方法はこの状況を反映できなく、セル化する時点でセル状態に大きな誤差が含んでいる。図 1(b) は、改善したセル化の手法は、建物の間隔を表示でき、現実の市街地状況をよく表した。

3.2 延焼確率計算式の改善

従来の延焼確率計算式(1)の燃えやすさ C_b は、風速 0m/s の時、延焼速度 20m/h という阪神・淡路大震災時のデータを用いて決定し、すべての建物に対して、同じ計算を行った。本研究では、改善したセル化手法で得られた格子マップに対して、建物内と建物間の延焼速度の区別を考慮した東京消防式 2001 を延焼確率計算式に基づいて、以下のような計算を行う。

建物内

木造セル

$$C_b = 0.56$$

防火セル

$$C_b = 0.28$$

建物間

木造セル

$$C_b = \frac{0.5 \cdot L \cdot C_d}{0.77 \cdot V}$$

防火セル

$$C_b = \frac{0.5 \cdot L \cdot C_d}{1.54 \cdot V}$$

ただし、 L は建物間距離[m]、 V は延焼速度[m/h]である。

3.3 消火効果の表現

消火が延焼に対して大きな影響を与える。消火には、燃えている建物を鎮火させる効果と、火の勢いを弱める効果が考えられる。本研究では、に着目し、消火を火災システムに導入する。つまり、消火されている燃焼セルは、消火されていない燃焼セルより火の勢いを弱くする。その弱くなる量を消火係数 で表す。

消火導入時の延焼確率計算を式(2)に示す。

$$p = \frac{W_e \cdot C_b \cdot (\alpha \cdot C_f)}{C_d} \quad (2)$$

式(1)と比べて、式(2)は火の勢いを表すパラメータ C_f に消火係数 をつけた。消火係数は 3 つのタイプを用意した。タイプ 1 は消火時間の経過につれて火の勢いを弱める効果が大きい。タイプ 2 は、燃焼直後は効果が大きく、時間の経過につれて効果の変化が小さくなる。タイプ 3 は、燃焼直後は効果がほとんどなく、時間が経過するにつれて効果が大きくなる。

$$\text{タイプ 1} \quad \alpha = 1 - \frac{t_i}{t_n}$$

$$\text{タイプ 2} \quad \alpha = \left(1 - \frac{t_i}{t_n}\right)^2$$

$$\text{タイプ 3} \quad \alpha = 1 - \left(\frac{t_i}{t_n}\right)^2$$

ただし、 t_i は燃焼からの経過時間、 t_n は燃焼してから鎮火までの時間である。

4. 検証実験と考察

改善したモデルの妥当性を検証するためにシミュレーション実験を行った。実験対象には阪神・淡路大震災で被害が大きかった神戸ポート前地区を用いた。図2は従来の手法で、図3は改善した手法で、2時間ごとのセルの状態遷移を示している。

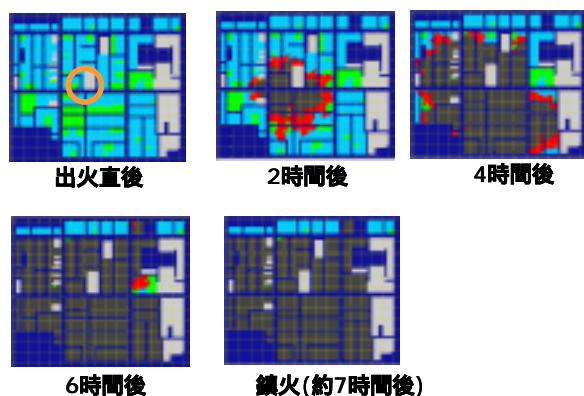


図2 従来の手法での結果

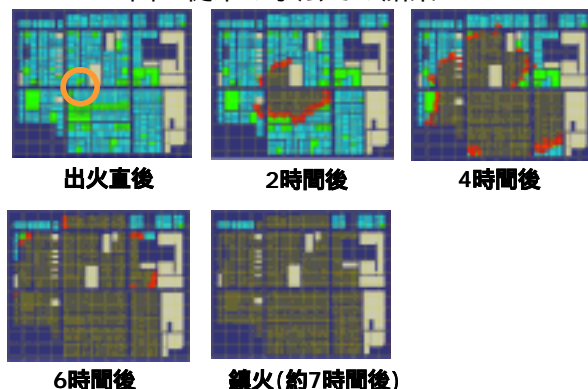


図3 改善した手法での結果

実験結果から、従来の格子マップでは、道路で囲まれた区画単位の延焼しか表現できなかったが、改善した格子マップでは、建物単位の延焼が表現できたことがわかった。また、焼失セル数は、延焼範囲が少ないとき、従来の手法と、改善した手法とは大きな差がない。しかし、延焼範囲が多くなると、改善した手法のほうがより現実に近い変化をしている。

消火を導入した火災シミュレーションの結果を図4に示す。図4は、3つのタイプの消火係数を用いた消火と、現実と、消火なしとの焼失セル数の変化を示している。この図からタイプ2の消火係数を用いた結果は焼失セル数が現実に最も近かった。

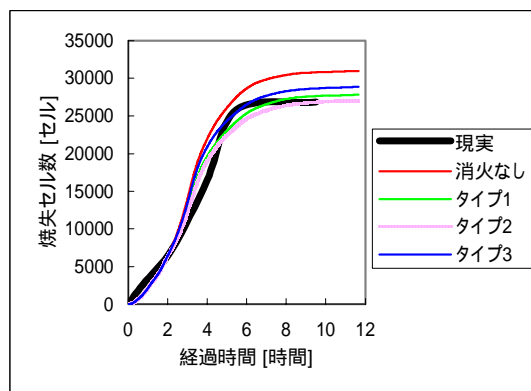


図4 消火の効果

5. おわりに

本研究では、セルオートマトンを用いた火災シミュレーションのモデルを改善し、従来のモデルの実際により延焼が広がりすぎという問題を解決した。改善したセル化手法は従来のより市街地の実状を的確に表現することができた。また、セルの燃焼やすさを計算するとき、建物内と建物間の延焼速度を異なる延焼式を用いることで、より正確な延焼動態シミュレートできた。特に、火の弱める効果から消火効果を表す手法は、現実の火災の状況に近い結果が得られた。高速・正確なセル化手法や、大規模災害に対する減災情報システムに対する取り込みなどは今後の課題となる。

参考文献：

- [1] 池辺：ニューロン MOS セルオートマトンによる機能情報処理 LSI の研究，大日本印刷（2003）
- [2] 加藤，光成，築山：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（1999）
- [3] 森下信，セルオートマトン - 複雑な具象化 - ，養賢堂発行（2003）
- [4] 日本火災学会編：火災便覧，共立出版株式会社（1997）
- [5] M.C. Xie, N. Sakamoto and H.Ogura, "Application of Cellular Automata to Simulation of the Spread of a Fire on a City Site", Proceedings of the IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA2003) pp.343-347(2003)
- [6] 謝，坂本，藤田，小倉：都市火災シミュレーションへのセルオートマトンの適用，福井工業高等専門学校 研究紀要 第 35 号 pp. 19-24（2001）