

## 立体都市データを用いた空間シミュレーション方式と その火災延焼予測への適用

室 啓朗<sup>1</sup>, 伊藤永一<sup>2</sup>, 岩村一昭<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株)日立製作所中央研究所

〒185 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

<sup>2</sup> (株)日立製作所機電事業部

〒101 東京都千代田区神田駿河台 4-6

muro@crl.hitachi.co.jp, ITOEIICH@cm.head.hitachi.co.jp, iwamura@crl.hitachi.co.jp

### 概要

地理情報システムを用いて都市災害を予測することを目的に、空間シミュレーション方式について検討し、火災延焼予測に適用した。火災延焼予測では、都市の空間構造や大気状態等の環境条件に依存する火災の複雑なふるまいを記述する必要がある。このため、立体都市データを利用する予測方式を開発した。この方式では、(1)複雑な火災のふるまいを記述するため、火災延焼を、相互作用によって生成・変化・消滅する火災要素の集合として記述する。そのため立体空間を立体セルに分割し、各立体セルごとに火災要素を定義して状態変化計算を繰返し実行し、時々刻々の火災延焼を記述した。この際、(2)火災のふるまいは確定的な物理法則として記述が困難なため、実火災実験結果も総合的に利用した確率状態変化ルールで記述した。過去の実火災記録とシミュレーション結果との比較検討も合わせて行った結果、立体都市データを用いた火災延焼予測は延焼速度の記述において良好な結果を得、本方式の有効性が確認できた。

## Spatial Simulation Using 3-Dimensional Urban Data and Its Application to the Prediction of Spreading Fire

Keiro MURO<sup>1</sup>, Eiichi ITO<sup>2</sup>, Kazuaki IWAMURA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Central Research Laboratory, HITACHI, Ltd.

1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji, Tokyo, 185, JAPAN

<sup>2</sup> Industrial Processing Division, HITACHI, Ltd.

4-6, Kanda-Surugadai, Chiyoda, Tokyo, 101, JAPAN

muro@crl.hitachi.co.jp, ITOEIICH@cm.head.hitachi.co.jp, iwamura@crl.hitachi.co.jp

### Abstract

A spatial simulation method for predicting the effect of urban disasters is described, which is especially suited for the simulation of city fire. Modeling of the complex fire behavior requires to take into account the urban structures and the atmospheric conditions for precise prediction. Therefore in this study, a new simulation technique is developed by basing on the three-dimensional urban map data. First, the three-dimensional space is divided into small cubic cells. Then, "firing objects" are created based on these cells, and their states are changed in accordance with the progress of fire by interacting with other objects in the nearby space until they are finally extinguished. The simulation system calculates the state transition of each firing object by iteration, and obtains the fire spreading area. Since the physically definitive formulation of fire behavior is difficult, the behavior is represented as a stochastic state transition rule based on the theoretical as well as measured characteristics of a fire. Simulation results on spreading velocity is compared with that of a city fire recorded in the past. As a result, the reliability and the effectiveness of this three-dimensional simulation technique was confirmed.

## 1. 緒言

現在、GIS (Geographic Information System: 地理情報処理システム) の自治体への適用が進みつつある。特に、近年の相次ぐ地震災害や火災、水害等を契機に、GIS を利用した防災計画立案などが今後の重要な課題になるものと考えられる。GIS の防災利用としては、地域データや災害データの統合管理、データ分析による計画立案支援などが考えられるが、さらに災害被害を予測することによって計画立案の有効性検証を行えるようになると思われる。そのため、災害被害予測空間シミュレーション方式の検討を行い、都市火災延焼予測への適用を試みた。

これまでの火災延焼シミュレーションでは、平面地図をベースとした都市モデルに基づき、延焼の最小単位を家屋、あるいは街区を表す平面領域とし、火災延焼を過去の火災記録から導出した経験式で表現するという方式が用いられてきた[1][2]。この方式は高さに大きな変化のない住宅街のような都市環境で有効な結果を示してきた。

これに対し本方式では、更なる信頼性の向上のため、都市環境・災害現象のモデル化において次の課題を解決するよう、新たなシミュレーションモデルの構築を目標とした。

### (1) 都市環境のモデル化での課題

火災延焼は立体空間での現象であり、高さの異なる家屋間での延焼、家屋開口部位置による延焼経路の変動が延焼範囲に影響することが報告されている[3]。また最近では高層ビルと個別家屋が混在する事が多い。このため、多様な建物構造が混在する都市環境で共通に適用できるシミュレーションシステムが必要となる。従って、都市環境を立体で詳細に表現する事が課題となる。

### (2) 災害現象のモデル化での課題

従来の火災延焼シミュレーションでは、実際の火災記録から算出した経験式で延焼機構を記述していた。しかしこれは災害要因が明示的に記述されないため、パラメータの拡張が困難である。

実世界での災害は、様々な要因が複合して発生・拡大する複雑な現象である。例えば火災延焼では、炎の接炎や輻射熱などを延焼要因として発生・拡大する。延焼要因は、輻射熱のように物理式で定式化可能な要因、家屋内の火力推移のように実験式や経験式で確認される要因が混在している。発火についても、引火温度に到達した直後着火するのではなく、建物の表面、風、湿気など大気の状態によって発火温度は変動すると考えられる。これらの要因を組み込める災害現象モデルの開発が課題となる。

以下に上記課題を解決するためのモデル化方式について示す。

## 2. 都市環境のモデル化

立体空間での現象を表現するためには、(1)建物内部や大気状態の表現ができること、(2)建物内部の延焼が記述できること、がモデルに要求される。そのため、以下の方式で都市環境をモデル化した。

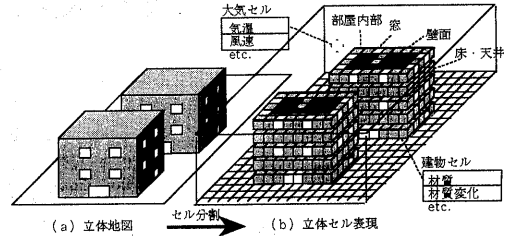


図1 都市環境のモデル化

図1のように、都市を表す立体空間を一定寸法の直方体領域(立体セル)で格子状に分割する。立体セルにはそれぞれセルの状態を示す属性値(空間変数)を格納する。建物を立体セルで表現することにより、建物形状や規模、建物間隔、内部構造(壁・窓・床・階段)がセルの組み合わせで表現できる。

例えば火災延焼では、家屋部分を示す建物セルには各セルの位置にある建物の材質、燃焼に伴う材質変化を格納する。これにより、建物内部の火災伝播や、各階毎の延焼状態が記述できるようになる。また空中を示す大気セルには、気温、風速などを格納する。これにより、建物の配置によって異なる熱や風の動きもこれによって記述できるようになる。

## 3. 災害現象のモデル化

災害現象を表現するためには、(1)災害の広がりを表す災害伝播モデル、(2)災害状況を表す状態変化モデルが要求される。以下に各モデルについて示す。

### 3.1 災害伝播モデル

様々な要因が複合して生成・拡大する災害現象をモデル化するため、以下の方式を取った。

#### (1) 災害現象の分割

災害現象を系全体で記述することは一般に困難である。そのため、災害現象を図1に示す都市環境の立体セル単位に分割し、災害現象全体をセル単位の要素現象の集合としてとらえる。各要素現象は、現在の状態を示す属性値(状態変数)と、現象それぞれに特有の状態変化ルールを持ち、周囲のセルや他の要素現象と相互作用を行い、生成・変化・消滅する。これらの要素現象をオブジェクトと呼ぶことにする。

火災延焼における例を図2に示す。火災を各セル上の局所的な燃焼の集合として表現し、これらの局所的な燃焼を「燃焼オブジェクト」と定義する。

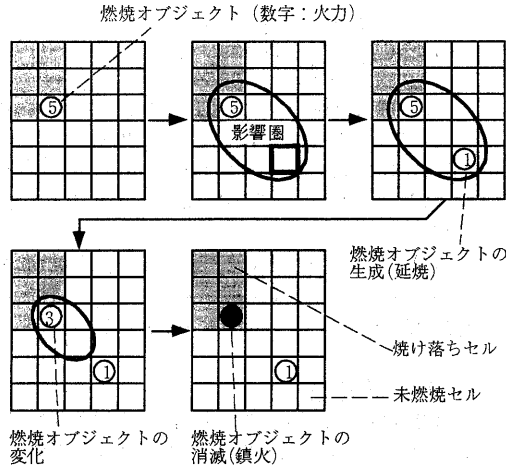


図2 オブジェクトの生成・変化・消滅

### (2) 影響圏の設定

オブジェクトが相互作用する領域として、影響圏を設定する。各オブジェクトは図2に示すように影響圏を持ち、影響圏内部のセルや他の要素現象と相互作用を行い、生成・変化・消滅をする。影響圏の形状・大きさは各オブジェクトや、その状態変数によって変化する。

各オブジェクト間の相互作用を繰り返し実行することにより、災害全体を記述する。本方式は、立体セルを用いるセルラ・オートマトンである。しかし従来のセルラ・オートマトンと異なり、影響圏がオブジェクトの状態変数によって動的に変化する点に特徴がある。

### 3.2 状態変化モデル

実世界のシミュレーション方式を構築するためには、様々な要因が複合する複雑な現象を表現しなければならない。そのため、物理法則だけでなく、実験式・経験式を統一して系に組み込まなければならない。

このため、前節の要素現象であるオブジェクトの状態変化ルールに、確率を導入した式(1)を用いる。

$$P = \prod_i P_i > \text{乱数}R(0 \leq R \leq 1) \Rightarrow \text{状態変化} \quad \dots(1)$$

ここで、要素確率  $P_i$  は、状態変化の要因となる各パラメータに対する変化確率、 $\Pi$  は積を表す。火災延焼では、燃焼火力、材質の燃えにくさ、延焼先までの距離がパラメータとなる。各パラメータによる影響はそれぞれパラメータごとの要素確率で表し、全体の状態変化確率をこの要素確率の積で表現することにより、延焼ルールを統合する。

本方式によってルール拡張も容易になる。すなわち、特定の要因のルールを変更したり、新たな要因をルールに組み入れる場合、式(1)の要素確率  $P_i$  の拡張や追加

によって実現できる。

### 4. 火災延焼シミュレーションへの適用

これまで述べてきたシミュレーション方式を火災延焼シミュレーションに適用した。

初めに、シミュレーションの舞台である都市空間を立体セルに分割した。セルの空間変数として「建物材質(木造・防火木造・耐火造・空地)」「材質変化(未燃焼, 燃焼中, 焼け落ち)」を設定した。そして燃焼状態の変化によって火災延焼の拡大状況を表現することにした。

図2に示した燃焼オブジェクトの状態変数は、オブジェクトの位置、出火からの経過時間、燃焼火力とした。燃焼火力は後述の式(4)により実験式から算出する。火災延焼シミュレーションは、図3に示す(1)影響圏判定、(2)延焼判定、(3)火力の変化、(4)鎮火判定、の四種類の計算ステップを繰り返し適用することにより延焼範囲を求めていく。シミュレーションでは全燃焼オブジェクトに対し、これらの計算ステップが順番に適用される。以下に各ステップについて詳述する。

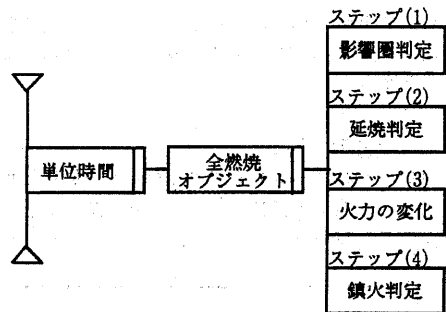


図3 シミュレーションの計算フロー

#### ステップ(1) 影響圏判定

燃焼オブジェクトの影響圏は、燃焼オブジェクトによって延焼する可能性のある領域範囲を示す。

燃焼オブジェクトの周囲にあるセルの表面温度がその材質の発火温度以上になると延焼する。そこで、発火温度での等温面を算出し、この等温面内部を影響圏と設定した。等温面は加熱された空気の上昇気流を考慮し、4.3節の図5に示す、上方向に伸びた回転楕円体で近似した。

#### ステップ(2) 延焼判定

燃焼オブジェクトと影響圏内の全未燃焼セルについて延焼確率  $P$  を計算することにより、延焼判定を行う。延焼確率  $P$  は式(2)のように、要素確率の積で表す。

$$\begin{cases} P > \text{乱数}R(0 \leq R \leq 1) \Rightarrow \text{延焼} \\ P = P_f \times P_r \times P_c \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

火力項  $P_f$  : 燃焼オブジェクトの火力に基づく延焼確率  
 材質項  $P_r$  : 延焼先セルの材質に基づく延焼確率  
 熱拡散項  $P_c$  : 熱拡散に基づく延焼確率

確率  $P_f$ , 確率  $P_r$ , 確率  $P_c$  はいずれも物理式や実験による統計式から求めることができる。

### ステップ(3) 火力の変化

燃焼オブジェクトの発する火力の経時変化を表現する。火力は、セルの材質と燃焼時間の関数であり、火力項  $P_f$  (式(4)) で表現する。火力は、延焼判定、鎮火判定で用いる。

### ステップ(4) 鎮火判定

「鎮火」は出火からある程度の時間が経過して、セル内部の物質が焼き尽くされた時点で、自然鎮火という形で起きる。火力項  $P_f$  (式(4)) がしきい値  $P_{fth}$  を下回った時点で鎮火するとした。

$$P_f < P_{fth} \Rightarrow \text{鎮火} \quad \dots\dots(3)$$

次に、ステップ(2)「延焼判定」で示した延焼確率  $P$  の要素確率 (火力項  $P_f$ , 材質項  $P_r$ , 熱拡散項  $P_c$ ) について詳述する。

## 4.1 火力項 $P_f$

火力は、燃焼による単位時間あたりの発熱量として定義される。燃焼オブジェクトの火力に基づく延焼確率を火力項  $P_f$  とする。

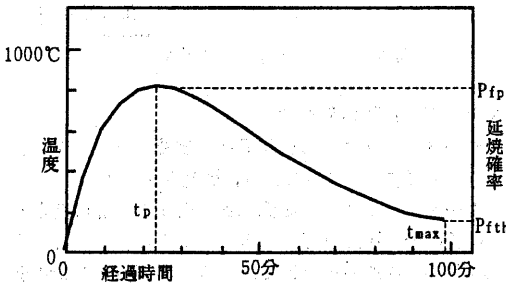


図4 燃焼家屋内の温度推移 (近似曲線)

図4に実火災実験[1]により得られる、燃焼家屋内の温度変化の近似曲線を示す。本方式ではこの温度変化が火力と比例し、また延焼確率  $P_f$  とも比例すると仮定することによって延焼確率  $P_f$  を導出した。図4の温度推移の近似曲線として式(4)を設定した。式(4)は、温度上昇部分の実験値と、温度下降部分はゆるやかな鎮火により指数関数となるという仮定に基づいて構成した。

$$P_f = P_{fp} \left( \frac{t}{t_p} \right) \exp \left( 1 - \frac{t}{t_p} \right) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $t$  は燃焼オブジェクトが着火してからの時間、 $P_{fp}$  は燃焼オブジェクトのピーク延焼確率、 $t_p$  は  $P_{fp}$  に達する時間である。燃焼実験を家屋材質ごとに行うことにより、式(4)の比例係数  $t_p$ ,  $P_{fp}$  を求めることができる。

また図4に示した  $P_{fth}$  は、ステップ(4)「鎮火判定」で用いるしきい値で、延焼確率  $P_f$  がこの値を下回った時点で燃焼オブジェクトは鎮火するとした。

## 4.2 材質項 $P_r$

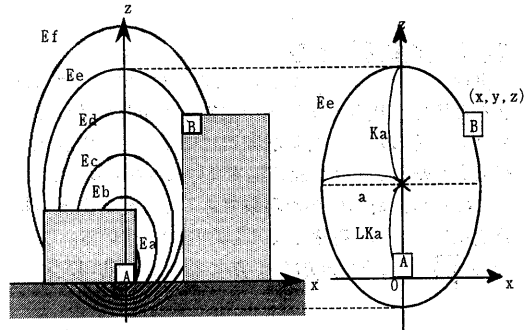
各材質の発火温度は、材質の種類、表面状態などで揺らぎを生ずる。延焼先の材質に基づく延焼確率を材質項  $P_r$  とする。この値は各材質に火炎を放射した時の着火時間や着火温度の測定結果から求める。

## 4.3 熱拡散項 $P_c$

熱拡散に基づく延焼確率を熱拡散項  $P_c$  とする。 $P_c$  は、燃焼セルから延焼先セルまでの距離の関数となる。ここで、延焼確率  $P_c$  を次の2つの仮定をすることで導出する。

**仮定1:** 燃焼オブジェクトの火力による等温面は図5(a)に示す回転楕円体となる。加熱された空気の上昇気流を考慮し、等温面を球面をZ軸方向に引き伸ばした形とおき、この形状を回転楕円体で近似する。

**仮定2:** 延焼確率  $P_c$  は、等温面上で一定の値を取り、等温面の表面積の逆数に比例する。



(a) 等温閉曲面群 (b) 閉曲面  $E_e$  の寸法  
 図5 等温面の構造

図5(a)において、燃焼セル  $A(0,0,0)$  が作る等温面を  $E_a, E_b, E_c, \dots$  とする。延焼先セル  $B(x,y,z)$  を通る等温面を表す回転楕円体  $E_e$  を次式で示す。

$$\left( \frac{x}{a} \right)^2 + \left( \frac{y}{a} \right)^2 + \left( \frac{z - LKa}{Ka} \right)^2 = 1 \quad \dots\dots(5)$$

仮定2より、延焼確率  $P_c$  は回転楕円体  $E_e$  の表面積  $S$  に逆比例し、次式で与えられる。

$$P_c = \frac{P_{co}}{S} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、式(5)の形状係数 L, K は回転楕円体の形を決める比例係数である。また、式(6)の P<sub>co</sub> は延焼確率の比例係数である。これらの係数の値は火災実験（燃焼物の周囲温度を測定し、等温面を算出する）や理論計算（温度を考慮した流体方程式を解く）などにより求めることができる。

また、風により火災形状は変化し、同様に等温面の形状も変化する。この効果をシミュレーションに組み入れるため、等温面を図 6 のように風向き方向にずらした。この等温面の変形は次式(7)で示される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \tan\theta\cos\phi \\ 0 & 1 & \tan\theta\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tan\theta\cos\phi \\ \tan\theta\sin\phi \\ 0 \end{pmatrix} z_0 \quad \dots\dots(7)$$

なお、角度 φ は風の方向 (X-Y 平面での X 軸となす角度) を示す。角度 θ は等温面の傾き (図 6(b) の X-Z 平面で Z 軸となす角度) である。これは風速に影響される値であり、風速と角度 θ との関係は、火災実験により求める [1]。z<sub>0</sub> は、等温面最下部の Z 座標である。

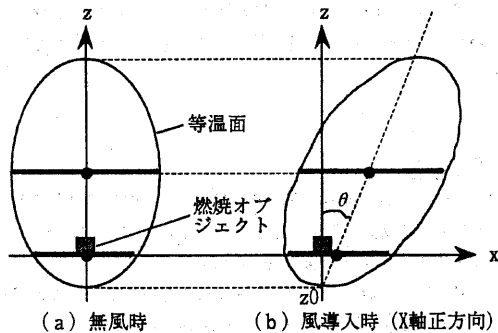


図 6 等温面の風による変形

## 5. 実験と考察

本方式を用い、立体都市空間での火災延焼シミュレーションを行った。表 1 に、シミュレーションの使用パラメータを示す。また、図 7 に、シミュレーションの実行結果を示す。それぞれ、(a)出火 1 時間後、(b)出火 2 時間後、(c)鎮火後（出火 10 時間後）に対応する火災延焼状況である。図 7 より、風向きによって指向的に火災が広がる状況が表現されていることが分かる。

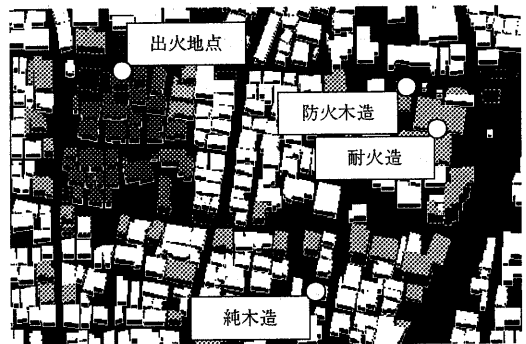
シミュレーションの有効性は、

- (1)物理法則・実験値を反映していること
- (2)過去の大火記録と合っていること

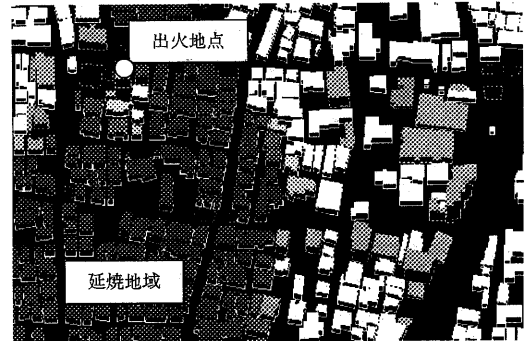
で示される。(1)については 2~4 章で説明した。そこで、(2)について本方式の有効性を確認するため、1976 年に大火が発生した山形県酒田市を例に検証実験を進め、

表 1 シミュレーションの使用パラメータ

項目	内容
領域	750m×450m 1/2500 地図よりスキャナ入力し、建物高さ・材質は手入力した。
セル寸法	縦 2m×横 2m×高 4m（一階の高さ）
セル分割数	縦 375 個×横 225 個×高さ 5 個
単位ステップ	2分
セル種類	純木造、防火木造、耐火造、空地
風速	北 11m/s、系全体で一様



(a) 出火 1 時間後



(b) 出火 2 時間後

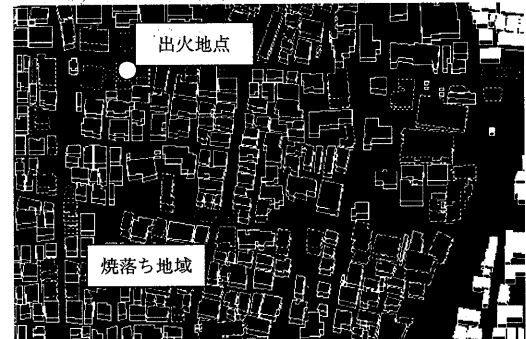


図 7 火災延焼シミュレーション結果

(1) 最終的な焼けどまり位置、(2)延焼速度に注目して評価を行った。

風横方向での広幅道路(15m)での火災の焼け止まりはシミュレーションで表現できた。しかし記録では風横方向6m 道路での焼け止まり部分があったが、シミュレーションでは表現できなかった。この原因としては、当時、道路に沿って樹木が多く植えられており、これらの樹木が延焼を遮断したと考えられる。

次に延焼速度を検討するため、延焼経路の一つに着目し、経路上の各代表点への延焼時間を比較した。図8は各代表点への延焼時間の記録を横軸に、シミュレーション結果を縦軸にプロットした結果である。

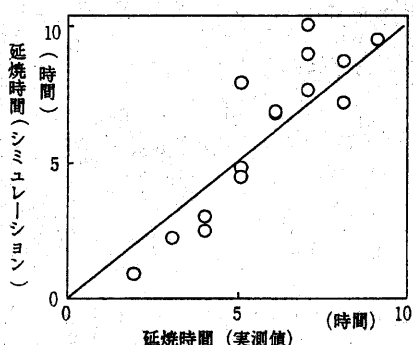


図8 延焼時間の比較

図中の実線上にプロット点があれば実際の延焼時間とシミュレーションによる延焼時間が一致することになる。従って、この実線からの乖離でシミュレーションによる延焼時間の誤差が評価できる。図8より、出火5時間以内での延焼は実測値と比較して1時間以内の誤差範囲で表現できていることが分かる。

出火5時間以降は、実際の方が延焼速度が速い。この原因としては、大火時に発生する上昇気流によって飛火が発生し、これによって実際の延焼速度が加速されたためと推測される。実際にこの時間帯に飛火が観測されている。

飛火についてモデル化することは可能であるが、飛火による延焼は予測が困難であり[1][6]、シミュレーション方式の検証に利用することは難しい。しかし飛火による火災延焼の範囲を推定する目的には利用できると思われる。

## 6. 結論

災害予測を行うために立体都市データを利用する空間シミュレーション方式について検討し、火災延焼予測に適用した。本方式の特徴は以下の通りである。

(1) 立体セル分割に基づく都市空間のセルに火災要素(燃焼オブジェクト)を配置し、燃焼オブジェクトと

セルの相互作用により複雑な火災のふるまいを表現できるようにした。

(2) 確率状態変化ルールを適用して物理法則や実験結果を導入することにより、定式化が困難とされていた火災延焼を表現できるようにした。

本方式により、多様な都市空間における複雑なふるまいを示す火災延焼が従来以上に信頼性よく表現できたものと思われる。

なお、本方式を火災延焼予測に適用し、山形県酒田市の大火(1976)の記録と比較実験を実施することにより、(1) 広幅道路による延焼遮断効果、(2) 火災初期段階での延焼時間の状況が表現できた。これにより、実際の火災延焼予測への適用に一応の見通しが得られた。

今後の課題として、延焼遮断効果を持つ樹木のモデル化、飛火のモデル化による機能複合化が挙げられる。また消防隊の消火効果予測、火災時の避難行動予測とも連携することによってトータルなシステムとして利用できるようにすることも課題となる。

本研究で検討したシミュレーション方式は、立体都市データを用いた災害予測方式の第一歩である。火災延焼と同様に、物理法則だけでなく、実験結果を利用しなければならない災害シミュレーションは多い。本方式をさらに推し進め、災害シミュレーションを行うためのフレームワークを構築していきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 糸井川栄一等；地震火災時のリアルタイム情報処理システムの開発—延焼拡大予測と避難情報処理に関する研究—、建設省建築研究所 建築研究報告 No.120 (1989)
- [2] 田村一彦；延焼シミュレーションによる市街地大火の延焼拡大予測 東京消防庁発表論文、pp.293-299 (1993)
- [3] 酒田市；酒田市大火の記録と復興への道 (1978)
- [4] 高橋一重 他4；地理情報管理システムの都市防災への応用 電子情報通信学会機能図形情報システムシンポジウム論文集、pp.61-66 (1990)
- [5] 木俣昇；大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証 JORSJ, 30-1, pp.59-87 (1987)
- [6] 糸井川栄一、塚越功；飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル 第23回日本都市計画学会学術研究論文集、pp.469-474 (1988)
- [7] 青木義次；都市火災拡大の一次元離散型確率モデル 日本建築学会計画系論文報告集第381号、pp.111-121 (1987)
- [8] 青木義次；類焼確率関数の導出とその性質 日本建築学会計画系論文報告集第402号、pp.45-51 (1989)
- [9] 東京大学先端科学技術センタ；都市と防災と地球環境/延焼&群衆避難シミュレーション '92 オープンハウス都市環境システム分野資料 (1992)