

準定常的な計算による都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発

地震火災時の都市住民避難性状の推定に関する研究

Development of a Simplified Model for Urban Fire Spread by Quasi-Stationary Calculation
A Study on the Estimation of the Evacuation Behaviors of City Residents in Post-Earthquake Fire

西野智研¹・円谷信一²・樋本圭佑³・田中哮義⁴

Tomoaki Nishino, Shin-ichi Tsuburaya, Keisuke Himoto and Takeyoshi Tanaka

¹京都大学 博士後期課程 工学研究科 (〒601-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Graduate Student of Engineering, Kyoto University, Graduate School of Engineering

²三菱重工業株式会社 原子カプラント設計部 (〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)

Chief Engineer, Mitsubishi Heavy Industries

³京都大学助教 次世代開拓研究ユニット (〒601-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Assistant Professor, Kyoto University, Pioneering Research Unit for Next Generation

⁴京都大学教授 防災研究所 (〒601-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Professor, Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

Evacuation of a large number of residents is conceivable in case of urban fires following a large earthquake. It is essential to implement an effective evacuation plan for ensuring residents' safety. We have been developing a simulation model based on the potential theory for the evacuation behaviors of city residents, and validated the model by comparing the predicted and the recorded evacuation behaviors of residents in the Great Kanto Earthquake Fire. In this model, fire spread was estimated based on after event field survey data of the past earthquake fire. However, in case of an evacuation simulation in a post-earthquake fire in the future, where no after event field survey data exists, it is essential to predict fire spread. In this study, a high-speed calculation model for post-earthquake fire spread in a large-scale urban area was developed based on physical knowledge achieved in the field of fire safety engineering. In this paper, we simulated the fire spread in the Sakata City Fire in 1976 for validating the model, and compared it with the Urban Fire Spread Model developed by Himoto and Tanaka in terms of fire spread behavior, computational speed and data quantity in calculation. The obtained results showed that the proposed model could simulate the fire spread qualitatively and with much less computation time and data quantity.

Key Words : *Physics-based Model, Quasi-stationary Approximation, High-speed Calculation, Evacuation Model*

1. はじめに

京都市のような国内外からの観光客で混雑する歴史都市が巨大地震に襲われた場合には、都市住民に加えて観光客も、地震に伴う延焼火災の危険性に曝されることが予想される。地震火災の危険性から人々の安全を確保するためには、事前に有効な避難安全計画を講じておく必要があるが、その有効性評価のためには、地震火災時における都市滞在者の避難性状を合理的に予測可能な手法の開発が不可欠である。これまでに筆者らは、都市域に滞在する住民のみに着目し、地震火災時の住民避難性状をポテンシャル法に基づいて定量的に予測するシミュレーションモデルを開発してきた。ここでのポテンシャル法とは、避難性状を支配する複数の要因が対象となる市街地において時間とともに変化しながら分布するポテンシャル場を考え、避難者の移動方向がポテンシャル場の勾配に応じて決定されるとするものである。さらに、モデルの妥当性を検証するため、関東大震災における住民

避難シミュレーションを行い、計算された避難不能者の分布が被災記録と定性的に類似することを確認した¹⁾。

開発した避難シミュレーションモデルでは、避難性状を支配する要因の1つに燃焼領域からの火災気流と輻射伝熱による「温度上昇」を考慮している。これまでに実施した避難シミュレーションでは、入力条件として必要となる燃焼領域の時間変化を、被災調査に基づく延焼動態図から陽に与えてきた。しかし、将来起こり得る地震火災を想定して都市滞在者の避難性状を予測するには、地震火災そのものの燃焼性状の予測手法も整備しておく必要がある。ただし、都市火災における避難では、大規模な市街地における多発火災時に最も深刻な問題が生じるものと考えられるため、燃焼性状の予測手法には次のことが求められる:1) 例えば京都市のような大規模な市街地での同時多発火災による延焼性状を高速に計算できる; 2) 予測手法の信頼性を担保するため、現象の物理的知見に基づいて定式化される。

これまでも、樋本ら²⁾によって、都市火災の拡大性状を火災安全工学の物理的知見に基づいて予測する手法が提案されている。このモデルの利点は、多様な火災安全対策の効果を合理的に評価できるという点にあるが、その反面計算に費やす時間が長く、計算可能な市街地の規模が制限されるという問題がある。

そこで本研究では、計算速度の速さと計算に必要な情報量の節約を重視し、火災安全工学の物理的知見に基づいた準定常的な計算によって、都市火災の延焼性状を簡易に予測する手法を開発することを目的とする。本稿では、この簡易予測モデルの内容について記述するとともに、酒田市大火の延焼シミュレーションを行い、モデルの妥当性について考察した。

2. 地震火災の延焼性状予測モデル

図1は本稿における地震火災の延焼性状予測モデルの概念を示したものである。本モデルでは、地震火災を複数の建物火災の集合とみなし、他の建物火災の熱的影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、都市全体の延焼性状へとつなげる²⁾。このとき、地震火災の拡大現象は以下の2つの現象に分解される: 1) 建物内部の火災現象; 2) 建物間の火災拡大現象。

まず、建物内部の火災性状を予測するにあたっては、1層ゾーンモデルの概念に基づいて火災性状の定式化を行う。1層ゾーンモデルでは、建物を構成する各室を気体の状態が一様な検査体積とみなし、検査体積ごとに定式化される質量やエネルギー等の収支式を連立して解くことで、気体温度等の物理量を時系列に予測する。この時系列解法には、オイラー法に代表される陽解法が用いられることが多いが、火災性状解析においては0.1sec程度の小さな計算時間ステップが要求され、その結果、計算に費やす時間が長くなる²⁾。これに対し本モデルでは、次のような計算の簡略化によって、計算に掛かる時間の短縮と計算に必要な情報量の削減を図る: 1) 本来は非定常的な状態である検査体積を定常的な状態とみなすことで、気体温度と化学種の濃度に関する簡易予測式を導き、それらの時系列変化を予測式を用いて計算する; 2) 本来、建物内部は複数の室に分割されているが、その空間構成を把握することは困難であるため、火災性状の計算単位となる検査体積を各階の占有体積に設定する; 3) 熱や質量の移動は検査体積と外気空間との間のみで行われ、開口部および壁体を経由して移動するものとする。

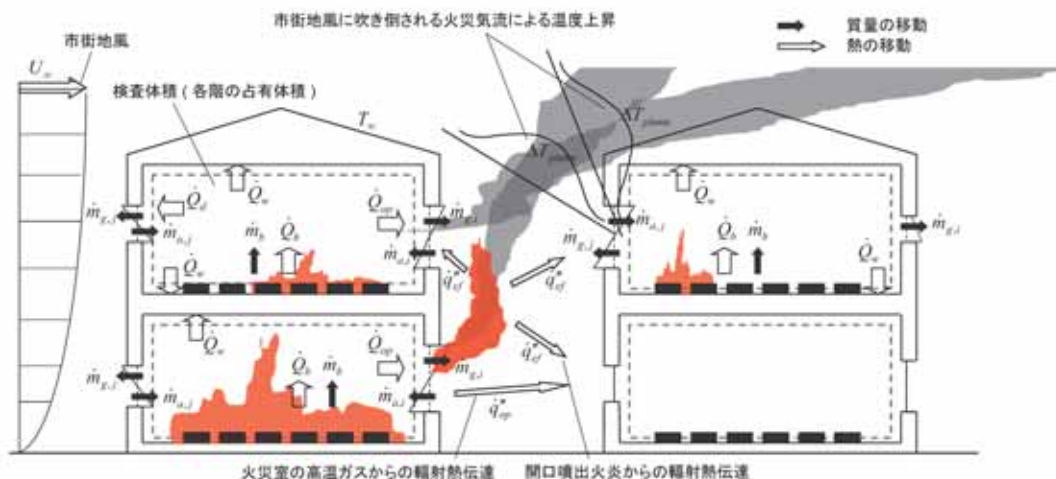


図1 地震火災の延焼性状予測モデルの概念図

次に、建物間の火災拡大現象を支配する要因として、以下の 2 つの要因を考える: 1) 火災建物内の高温ガスや開口噴出火炎からの輻射による熱伝達; 2) 市街地風によって火災建物の風下側に形成される火災気流からの温度上昇。建物間の火災拡大性状を予測するにあたっては、これらの要因の作用の結果、次のいずれかが満たされる場合に、未燃建物への延焼が起こるものとする: 1) 開口を經由して入射する熱流速が限界値を超えた場合; 2) 可燃性外装材の温度がその熱分解温度を上回った場合。

3. 建物内部の火災性状

(1) 火災性状の支配方程式

1 層ゾーンモデルの概念に基づいて、検査体積では、質量、エネルギー、化学種濃度について、以下の定常的な関係が成り立つものと仮定する。

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} = \dot{m}_a + \dot{m}_b - \dot{m}_g \approx 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(c_p \rho V T)}{\partial t} = \dot{Q}_b - \dot{Q}_w - \dot{Q}_d - \dot{Q}_{op} + c_p \dot{m}_a T_\infty + c_p \dot{m}_b T_p - c_p \dot{m}_g T \approx 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Y_X \rho V)}{\partial t} = Y_{X,\infty} \dot{m}_a + \dot{\Gamma}_X - Y_X \dot{m}_g \approx 0 \quad (3)$$

また、気体の状態方程式は

$$\rho T \approx 353 \quad (4)$$

ここに、 ρ は気体密度、 V は検査体積、 c_p は気体の定圧比熱、 T は気体温度、 T_∞ は外気温度、 T_p は可燃物の熱分解温度、 \dot{m}_b は可燃物の質量減少速度、 \dot{m}_a は検査体積に流入する空気の開口流量の総量、 \dot{m}_g は検査階から流出する気体の開口流量の総量、 \dot{Q}_b は可燃物の燃焼に伴う発熱速度、 \dot{Q}_w は壁への失熱速度、 \dot{Q}_d は開口部材への失熱速度、 \dot{Q}_{op} は開口部を經由した失熱速度、 $\dot{\Gamma}_X$ は化学種 X の生成速度、 Y_X は検査体積の化学種 X の質量分率、 $Y_{X,\infty}$ は周辺外気の化学種 X の質量分率、 t は時間である。なお、化学種 X については、酸素 O と可燃性気体 F の 2 種類を考える。

(2) 火災性状の予測式

本モデルでは、検査体積ごとに成り立つ保存式に基づいて、時々刻々の気体温度 T と化学種濃度 X を予測する。

第 $j+1$ ステップの気体温度 $T_{(j+1)}$ を予測するにあたっては、式(2)の気体のエネルギー収支式に着目し、詳細に記せば次のようになる。

$$\dot{Q}_b - \{ \varepsilon \sigma (T_{(j+1)}^4 - T_w^4) + h (T_{(j+1)} - T_w) \} A_w - 0.5 \sigma (T_{(j+1)}^4 - T_\infty^4) A_d - \sigma (T_{(j+1)}^4 - T_\infty^4) A_{op} + c_p \dot{m}_a T_\infty + c_p \dot{m}_b T_p - c_p \dot{m}_g T_{(j+1)} = 0 \quad (5)$$

ここに、 ε は壁の輻射率、 h は壁の対流熱伝達率、 σ はステファンボルツマン定数、 T_w は壁の室内側の表面温度、 A_w は壁の表面積、 A_d は開口部材の表面積、 A_{op} は開口部の面積である。式(5)は、気体温度 $T_{(j+1)}$ に関する 4 次の非線型方程式であるが、ここでは、

$$T^4 - X^4 = (T^2 + X^2)(T + X)(T - X) \quad (6)$$

が成り立つことに注意して、式(5)を式(1)を用いて気体温度 $T_{(j+1)}$ に関する 1 次関数として整理すると、次の式が求まる。

$$T_{(j+1)} = \frac{\dot{Q}_b + \phi_w A_w T_w + (\phi_{op} A_{op} + \phi_d A_d + c_p \dot{m}_a) T_\infty + c_p \dot{m}_b T_p}{\phi_w A_w + \phi_{op} A_{op} + \phi_d A_d + c_p (\dot{m}_a + \dot{m}_b)} \quad (7)$$

ただし、

$$\phi_w = \varepsilon \sigma (T_{(j)}^2 + T_w^2)(T_{(j)} + T_w) + h \quad \phi_{op} = \sigma (T_{(j)}^2 + T_\infty^2)(T_{(j)} + T_\infty) \quad \phi_d = 0.5 \sigma (T_{(j)}^2 + T_\infty^2)(T_{(j)} + T_\infty) \quad (8)$$

である。すなわち、 ϕ は前時間ステップ j における気体温度 $T_{(j)}$ が評価した輻射熱伝達率、もしくは総合熱伝

達率に相当する。

一方、第 $j+1$ ステップの化学種濃度 $Y_X^{(j+1)}$ は、式(3)を式(1)を用いて整理することで、次のように表される。

$$Y_X^{(j+1)} = \frac{Y_{X,\infty} \dot{m}_a + \dot{\Gamma}_X}{\dot{m}_a + \dot{m}_b} \quad (9)$$

4. 建物間の火災拡大性状

(1) 火災室の高温気体からの輻射による熱伝達

都市火災時には、火災室の高温気体から発生する輻射熱が隣接する未燃建物の室内へ開口部を經由して入射し、室内の可燃物が熱に曝されることで新たな出火が起こる。この入射熱量は、輻射源と隣接する建物との間の幾何学的な関係からなる形態係数に依存するが、建物が密集する市街地ではこの関係は極めて複雑であり、形態係数の計算には大きな負荷が掛かる。そこで本モデルでは、図 2 のように、火災室の開口部の重心を代表点にとり、代表点から放射される熱流束が方向によらず一様であるとみなすと、火災室の高温気体から隣接建物の内部へ入射する輻射熱流束 q_{op} は、次のように表される。

$$\dot{q}_{op}'' = \frac{\varepsilon \sigma T^4 A_{op}}{4\pi s^2} \cos \gamma \quad (10)$$

ここに、 π は円周率、 s は代表点と火災室に隣接する開口部の重心との距離、 γ は火災室に隣接する開口部の外向き法線ベクトルと輻射熱線のなす角度である。

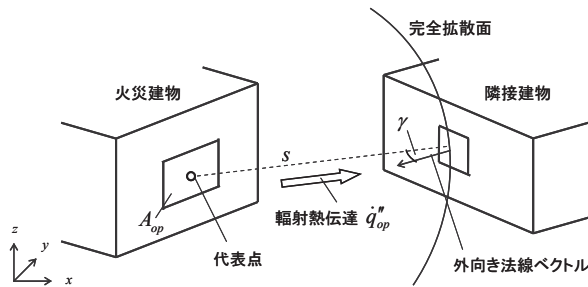


図 2 火災室の高温気体からの輻射による熱伝達

(2) 開口噴出火炎からの輻射による熱伝達

ある室で発生した火災が十分に発達すると、窓や扉のような開口部が破損し、火炎が破損した開口部から建物の外部へと噴き出る。建物の外部へ噴出した火炎は高温のため浮力によって上昇し、隣接する未燃建物や火災階より上階へ火災の拡大をもたらす。このような開口噴出火炎による温度上昇は、ある空間的な広がりをもって分布しているが、ここでは簡単のため、開口噴出火炎を図 3 のように温度が一樣な水平面に垂直な円筒形状の輻射面に近似する。また火炎からの輻射を受ける室の開口部を受熱面とみなすと、開口噴出火炎から室内へ入射する輻射熱流束 q_{ef} は次のように表される

$$\dot{q}_{ef}'' = \sigma T_{ef}^4 \cdot F_{ef} \quad (11)$$

ただし、

$$T_{ef} = T_\infty + \Delta T_m \quad (12)$$

ここに、 T_{ef} は輻射面の代表温度、 ΔT_m は開口噴出熱気流の火炎領域における気流軸上温度上昇、 F_{ef} は受熱面上の微小面積要素に対する輻射面の形態係数であり、形態係数に関する既知計算式を用いて評価する。

外気風圧の影響などにより火災室内への強制的な給気が存在する場合には、噴出熱気流の火炎域における気流軸上の温度上昇 ΔT_m は次のように表される³⁾。

$$\frac{\Delta T_m}{T_\infty} = 2.0 Q^{*2/3} \quad (13)$$

ここに、 Q^* は無次元発熱速度である。

(3) 市街地風に吹き倒される複数の火災気流による温度上昇

地震火災時には同時に複数の建物が燃焼するため、風下側の建物ではこれらの熱源から発生する複数の火災気流の重複した影響を受ける。ここでは、図4のように、それぞれの熱源からの火災気流による温度上昇を個別に評価しておき、最終的に合成することで、ある風下側の建物が受ける温度上昇を予測する。

熱源からの気流軸に沿った温度上昇 ΔT_0 は、市街地風の影響を無視し、次式のような無風時における点熱源上の気流軸上温度上昇で近似できるものと仮定する⁴⁾。

$$\Delta T_0 = 24 \left(z / \dot{Q}_p^{2/5} \right)^{-5/3} \quad (14)$$

ここに、 z は火源軸上の火源からの高さ、 \dot{Q}_p は熱気流の見かけ上の発熱速度である。なお、火災気流が市街地風に吹き倒される場合には、 z を気流軸上の火源からの長さとする。

火災気流が市街地風に吹き倒される場合の気流軸の傾き角 θ は、熱源を線熱源とみなせば、次のように表される⁵⁾。

$$\tan \theta = 0.1 \left(U_\infty / \left(\frac{\dot{Q}'g}{\rho_\infty c_p T_\infty} \right)^{1/3} \right)^{-3/4} \quad (15)$$

ここに、 U_∞ は風速、 \dot{Q}' は熱源の単位長さあたりの発熱速度、 ρ_∞ は周辺外気の密度である。

複数の火災気流が合流した場合、相互に影響を及ぼしあって火災気流の性状が変化することが予測されるが、ここでは火災気流の温度性状自体は近接する他の火災気流の影響を受けないものとみなす。このとき、複数の火災気流による風下側建物の温度上昇 ΔT_{plume} は、次式のような重ね合わせの関係で表される⁶⁾。

$$\Delta T_{plume} = \left(\sum_{i=1}^N \Delta T_i^{3/2} \right)^{2/3} \quad (16)$$

ここに、 i は熱源の識別記号、 ΔT_i は熱源 i からの火災気流による受熱建物の温度上昇、 N は熱源の数である。

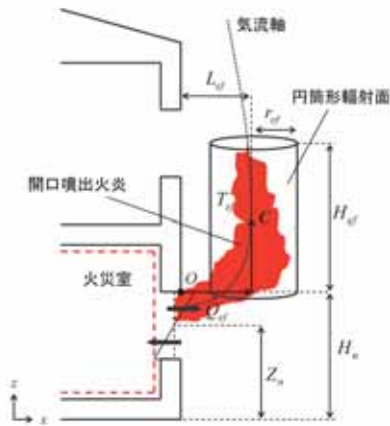


図3 開口噴出火炎の円筒近似

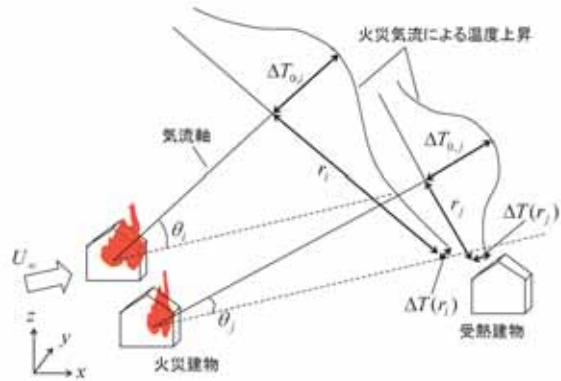


図4 市街地風に吹き倒される複数の火災気流による温度上昇

5. 酒田市大火の延焼シミュレーション

1976年10月29日の夕刻に、酒田市内の繁華街の1映画館から出火した火災は、折からの雨まじりの強風にあおられて、市街地の広範な領域を延焼する市街地大火へと拡大した。この酒田市大火では、強風に吹き倒された火災気流や飛び火による延焼が著しく、出火から翌早朝の鎮火までのおよそ12時間で、22.5haの区域と1,774棟の建物が焼き尽くされた⁷⁾。図5は当時の酒田市街地の様子を示したものである。大火時は特に風が強く、出火点に最も近い測候所では、出火から鎮火までの平均風速が11.0m/sと観測されている。当時の調査によれば、大火時の市街地風は概ね東から西へと流れており、最終的に、延焼火災は出火点からおよそ800m離れた新井田川にまで到達した。

ここでは、本モデルと樋本らによるモデルを用いて酒田市大火の延焼シミュレーションを行い、本モデルによる計算結果を、樋本らのモデルによる計算結果、および延焼状況に関する当時の調査報告と比較することで、本モデルの有用性について検証する。

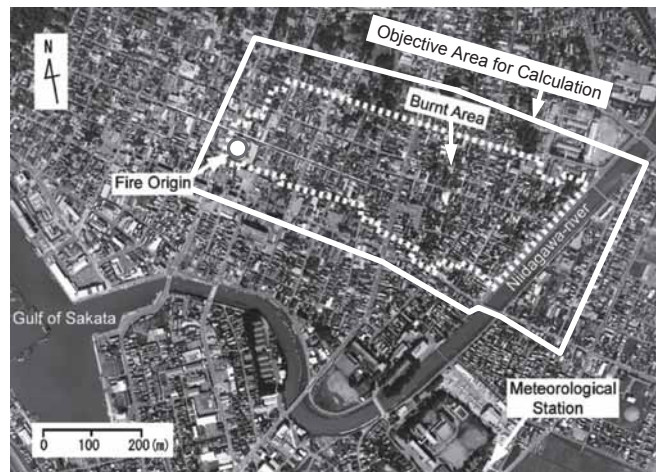


図5 酒田市街地の様子と計算領域

(1) 計算条件

表1は延焼シミュレーションにおける両モデルの計算条件を示したものである。計算時間ステップは、本モデルで30.0sec、樋本らによるモデルで0.2secと設定した。出火から鎮火までの気象条件については、酒田測候所で観測された気象記録に基づいて設定した。図5に本シミュレーションの計算領域を示す。計算領域内に建つ建物数は2,158棟であり、その形状、階数、構造に関する情報は、当時の都市計画図から読み取った。ただし、建物の構造形式は、本モデルで堅牢、非堅牢の2種類、樋本らのモデルで木造、防火木造、鉄骨造、RC造、土蔵の5種類に分類し、それぞれに異なる燃焼特性を設定した。酒田市大火では、飛び火による延焼がいくつか確認されているが、本計算では、飛び火の発生地点と時刻を計算条件として与えることで、新たな出火点として扱った。また、大火当時の公設消防や住民による消防活動、および観測された降雨が延焼火災に及ぼす影響については、考慮しないものとした。

(2) 計算結果とその考察

図6.(a),(b),(c)は、本モデルによって計算された出火から80分後、180分後、280分後の延焼状態と火災気流による未燃建物の温度上昇を示したものである。ここでは、赤い部分が燃焼中の建物に、黒い部分が焼失した建物に相当し、出火点となった建物を矢印で示してある。

図6.(a),(b),(c)から、出火点から発生した火災が隣接建物へ次々に延焼を起こし、燃焼領域を拡大していった様子が分かる。火災建物は出火点付近から順に燃え尽きたため、火災前線の近くには帯状の燃焼領域が形成された。一方、火災気流による温度上昇を受ける建物は風下側に分布しており、燃焼領域に近いほど温度上昇は大きく、反対に燃焼領域から遠ざかるほど、および風横側に離れるほど温度上昇は小さくなった。燃

表1 延焼シミュレーションにおける計算条件

	本モデル	樋本らのモデル
計算時間ステップ	30.0 sec	0.2 sec
気象条件	酒田測候所による観測記録	
計算領域(計算対象建物数)	図5 (2,158棟)	
検査体積	各階の占有体積	
建物の構造形式の分類	2種類 (堅牢, 非堅牢)	5種類 (木造, 防火木造, 鉄骨造, RC造, 土蔵)
壁面積に対する開口部面積の比率	建物の平面形状と隣接道路の関係としてモデル化	隣接する建物との距離の関数としてモデル化
飛び火の扱い	発生地点と時刻を計算条件として設定	
消防活動の効果・降雨の影響	考慮しない	

焼領域から発生する火災気流が 10m/s オーダーの強風に吹き倒されたことで、気流軸と風下側建物との距離が狭められ、その分風下側建物が受ける温度上昇は増大したものと考えられる。出火から 180 分後には風下側領域のほとんどが火災気流によって覆われ、水域を越えた地域にも気流の影響が及んだことが分かる。帯状の燃焼領域が風横方向に大きく展開したことが、気流に覆われる地域の拡大をもたらしたと考えられる。このような強風下での火災気流は延焼の拡大を促進させるだけでなく、その熱や毒性によって風下側の避難者に甚大な影響を与え、生死を大きく左右するものと考えられる。

図 7.(a)は聞き取り調査により調べられた大火時の火災前線の移動の様子⁷⁾を、図 7.(b), (c)は本モデル、および樋本らのモデルにより計算された火災前線の移動の様子を示したものである。出火点となった建物の位置を○印で、飛び火の発生した位置を●印で示してある。本モデルによって計算された火災前線の進行方向は、大火時の東から西への風の流れに対応して、風下方向に大きくなった。ただし、本モデルによる火災前線の間隔は調査報告と比較して大きく、火災の拡大速度は過大に評価される結果となった。また、本モデルによる計算結果には、延焼火災に巻き込まれた領域が調査報告に比べて過大に評価された地域と、過小に評

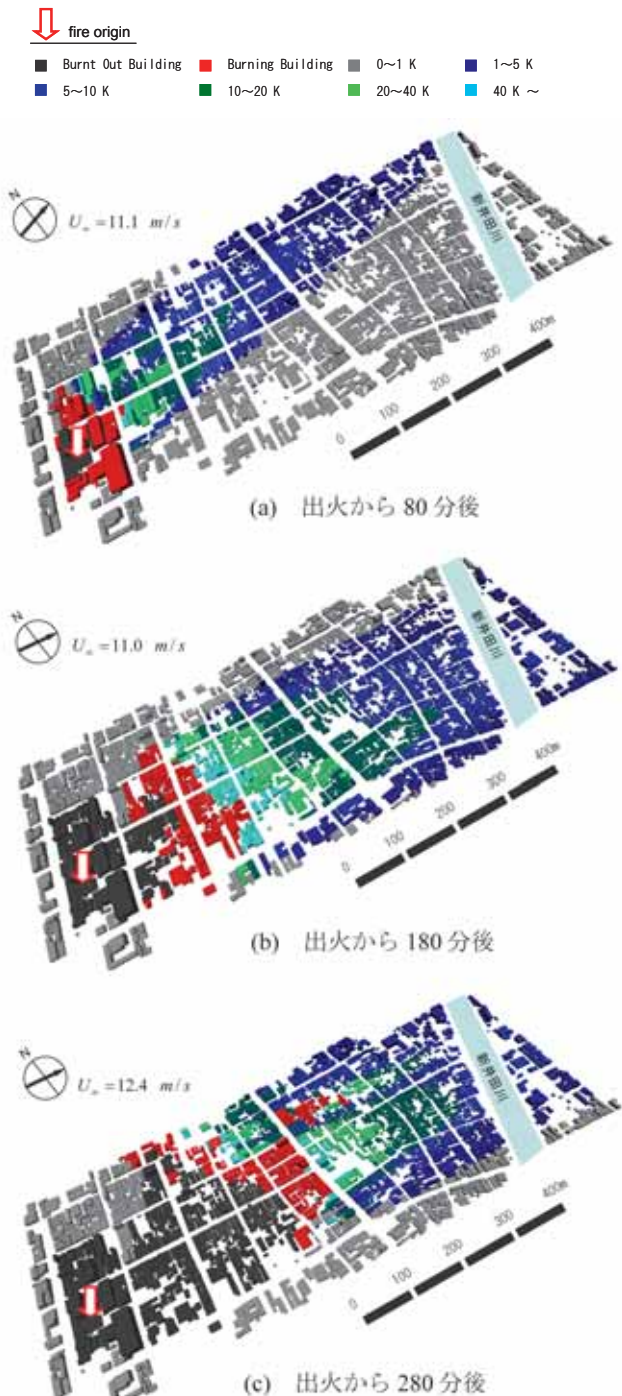


図 6 延焼状態と火災気流による未燃建物の温度上昇

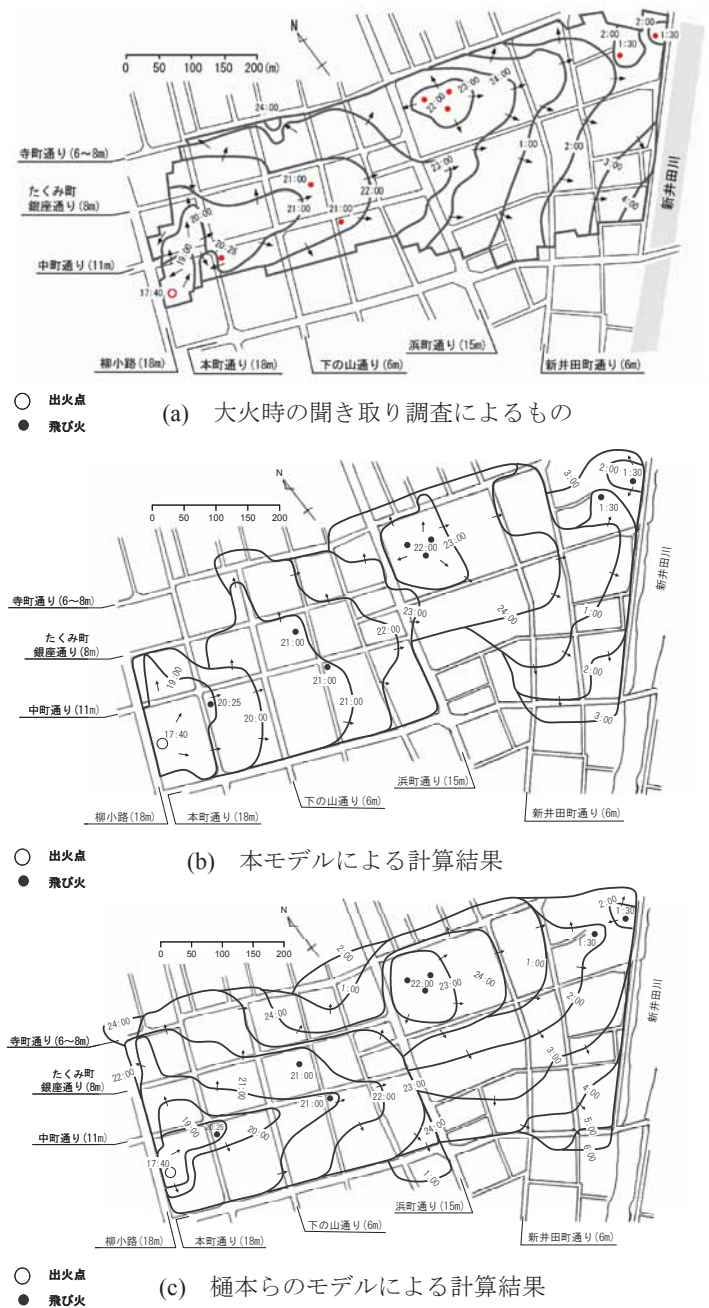


図 7 火災前線の移動の様子

価された地域が見られる。特に、浜町通り(幅員 15m)やたくみ町銀座通り(幅員 8m)の一部では、燃焼領域に通りを挟んで相対する未燃街区へ着火が起こらず、火災の拡大が遮断される結果となった。これらの要因のうち、火災の拡大を過大評価する要因として、次のことが挙げられる: (1) 火災の燃焼性状や隣接建物への拡大性状に対する消防活動の効果や降雨の影響を考慮していないこと; (2) 計算を行うにあたって設定した開口部の条件の信頼性に限界があること; (3) 建物の構造形式を堅牢と非堅牢の2種類のみで分類していること。一方、火災の拡大を過小評価する要因として、被災調査で確認された飛び火による延焼が、実際に発生した飛び火による延焼のうちの一部であった可能性が考えられる。なお、図 7.(b),(c)から、本モデルと樋本らのモデルの間で、延焼性状の定性的な傾向にはほとんど違いがないことが分かる。

表 2 は、計算に要した時間と計算を行うにあたってメモリー内に確保した情報領域のサイズについて、本モデルと樋本らによるモデルを比較したものである。ただし、ここでのメモリー内に確保した情報領域のサイズは、計算を行うにあたって宣言した変数群の情報量から推計したため、実際に確保された領域のサイズよりも小さい可能性がある。なお、本計算には、Intel Core 2 Duo Processor E6600 (動作周波数 2.4GHz)、メモリー 1,024MB のパーソナルコンピューターを使用した。

本モデルを使用した場合の計算に要した時間は 24sec であり、樋本らによるモデルのおよそ 120 倍の速度で計算できたことが分かる。さらに、本モデルを使用した場合のメモリー内に確保された情報領域のサイズは、およそ 11MB と推計され、樋本らによるモデルのおよそ 15%となった。

表 2 計算に要した時間と計算に必要な情報量の比較

	本モデル	樋本ら ²⁾ のモデル
計算時間ステップ	30.0 sec	0.2 sec
焼失建物数/計算対象建物数	1,588/2,158	1,908/2,158
計算時間(出火から鎮火までの時間)	10 hrs 2 min	13 hrs 9 min
計算ステップの合計	1,226	236,745
計算に要した時間	24 sec	47 min (= 2,820 sec)
1時間ステップの計算の平均時間	0.019 sec	0.012 sec
確保した情報領域の推計値	11.39 MB	72.52 MB

6. まとめ

火災安全工学の物理的知見に基づいた準定常的な計算によって、大規模な市街地における多発火災の延焼性状を高速に予測する簡易モデルを開発した。さらに、このモデルを酒田市大火に適用し延焼シミュレーションを行うことで、モデルの妥当性について検証した。計算結果から、本モデルが都市火災の定性的な延焼性状を妥当に予測可能であることが示されたとともに、計算速度や計算に必要な情報量の点で、既往の延焼性状予測モデルを大幅に向上した。ただし、本モデルには依然として改良の余地がある。地震火災時には、建物が地震による構造的な被害を受けることで、防火性能が低下している可能性がある。今後は、建物の構造被害が建物の火災性状や火災の拡大性状に及ぼす影響について、検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 西野智研・円谷信一・樋本圭佑・田中孝義: 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.636, pp.105-114, 2009.2
- 2) 樋本圭佑・田中孝義: 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, No.607, pp.15-22, 2006.9
- 3) 樋本圭佑・土橋常登・田中義昭・田中孝義: 給気した火災室の開口から噴出する火炎・熱気流の温度と軌跡 -開口噴出火炎・熱気流による火災拡大に関する研究 その 1-, 日本建築学会環境系論文集, No.598, pp.1-8, 2005.12
- 4) Beyler, C.L.: Fire Plume and Ceiling Jet, Fire Safety Journal, Vol.11, pp.53-76, 1986
- 5) 横井鎮男: 線熱源の風下における温度分布(熱源の高さが床上 3cm の場合), 災害の研究 7, pp.151-159, 1970.9
- 6) 土橋常登・田坂茂樹・吉田正友・田中孝義: 複数火源の火災気流に曝される受熱点の温度上昇の推定, 日本建築学会大会学術概便集, pp.13-14, 2000.9
- 7) 自治省消防庁消防研究所: 酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書, 1977.10