

大震火災時における住民避難の最適化

Optimization of the Evacuation Strategy from Spreading Fires Caused by a Strong Earthquake

藤田 隆史*

Takafumi FUJITA

1. まえがき

現在の日本の大都市において大地震が発生した場合、予想される地震災害も多岐にわたり、どの地震災害モードが最も大きな人的、物的被害をもたらすものかは速断できないが、過去の経験、現在の都市の状況から、地震による同時多発延焼火災を最重要点とした防災対策が進められている。特に、東京都や神奈川県では、大震火災時の避難対策として、避難場所や各々の地区割当が指定されている。しかし、指定し得た避難場所の数が少ないため、相当困難な地区割当が余儀無くされており、避難場所近隣以外の住民にとっては、その場に応じて避難方向を選択しなければならない状況が依然として残されている。また、出火点分布や風向、風速によっては、指定避難場所の安全性に違いが生じるし、他に安全な場所を見出せる場合もある。

したがって、出火点分布や風向、風速の各場合について、避難場所の安全順位を考慮した、避難不能人を最小とする地区割当を求め、これらの避難計画を実施するための避難誘導計画、消火力運用計画が、各々の災害防御機関で事前に準備されていることが望ましい。

さらに、実際の災害現象と事前の想定との相違や事態の変化に対して、十分な対応を可能ならしめるためには、災害情報処理システムが必要となる。

本研究は、任意の出火点分布、風向、風速に対して、最適避難計画を作成する手法の開発を当面の目標とし、次に、災害情報処理システムを構成する際の基本的な情報処理機能を検討しようとするものである。なお、この課題は臨時事業第6グループとしての最適防護システムに関する研究の一環として計画されたものであるが、今後の発展には上述のような災害情報処理システムを含んだ観点から研究を進めることが望ましく、したがって、この部分については、臨時事業に続くものと考えて計画している。

2. 避難計画の最適化について

与えられた同時多発延焼火災に対して避難計画の最適化を計る場合、何を計画変数とするかは、このよう

な大規模システムにとって、特に重要である。避難計画においては、避難方向、すなわち、避難場所割当が最も基本的なものであるが、実施する場合を考えると、町丁別単位での避難場所割当を計画変数とするのが、事前の計画としては適切である。図1には、この計画変数を操作して避難計画の最適化を行う場合のブロック線図が示されている。

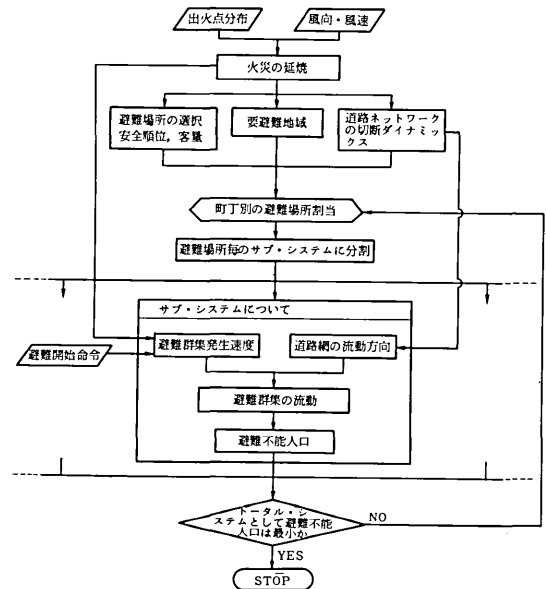


図1 避難計画最適化のためのブロック線図

避難計画の対象地域は、対象地域外との干渉を排除し得るまで、その範囲を広げる必要がある。東京都の場合には最低30km×30kmが必要とされる。しかし、火災の延焼をシミュレートする場合に地域を分割することは、その現象の性質上、決して有利な扱い方とはならず、広域での延焼をシミュレートし得る手法が必要となる。後に述べる延焼シミュレーションの手法はこの要求をかなりの程度満足するものである。図1の考え方は、火災の延焼をトータル・システムで処理し、これも後で述べるが、避難群集の流動シミュレーションは、避難場所割当によって分割された各サブ・システムで処理することを意図している。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

ところで、本来ならば、道路ネットワークの流動方向、さらには、避難群集発生速度がサブ・システムとしての計画変数となり、上部システムから与えられた拘束条件内で最適化を計るのが階層システムにおける常套手段である。しかしながら、これを行うには計画変数の数が膨大すぎるため、ここでは、道路ネットワークの切断ダイナミクスを考慮した一定のアルゴリズムにより、サブ・システム内の避難場所に向う流動方向を決定する。避難群集発生速度についても同様である。

サブ・システムでの避難群集流動の計算から各々について避難不能人口が算出され、トータル・システムとして避難不能人口が最小となるように、サブ・システムの境界を逐次移動して、最適避難場所割当を探索する。

以上が避難計画の最適化を行う際の基本的な考え方であるが、次に、火災の延焼および避難群集の流動について、そのシミュレーションの概要を述べておこう。

3. 火災の延焼シミュレーション

延焼モデルの構成には、市街地火災の延焼速度に関する浜田の経験式⁹⁾(出火後の時間、風速、純木造・防火造家屋の建蔽率、混成率の関数)がその基礎になる。これは図2の V_1, V_2, V_3 だけを与えるもので、火災の面的な拡大を記述するには不十分である。そこで同図に示すような微小火面を導入し、これらの包絡線として新しい等時延焼線が形成されるという延焼拡大機構を考える。また、微小火面と等時延焼線との接点を出火点から連ねて得られる延焼経路を火流線と呼ぶ。

この延焼拡大機構は次のようにも解釈される。すなわち、等時延焼線上の各点において任意方向への潜在的延焼速度を考えれば、可燃領域内の点の延焼時刻は、出火点からその点に到るすべての延焼経路について潜在的延焼速度より算出される延焼時刻の内の最早延焼時刻に等しく、最早延焼時刻を与える延焼経路が火流

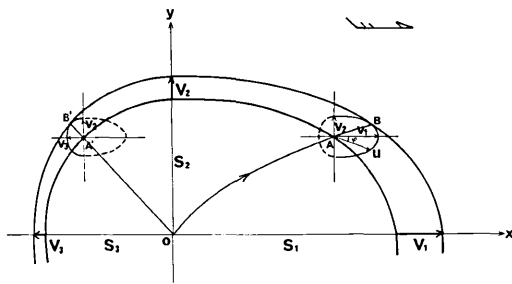


図2 等時延焼線、要素火面、潜在的延焼速度および火流線。

線である。このことが延焼モデル、さらにはシミュレーション・アルゴリズムの基本的な考え方になっている。

延焼シミュレーションはメッシュ・マップ上に表現された地域情報を用いて実行される。図3は昭和27年4月17日の鳥取大火のシミュレーション結果である。このシミュレーションは——(i)当時の市街地状況から、可燃領域を純木造、建蔽率45%と仮定する。ただし、浜田式による延焼速度は建蔽率にはあまり影響されない。(ii)風速は当日の鳥取測候所の観測値を用い、風向は火災動態図からの推定値を用いる。両者とも1時間刻みで与える、(iii)出火点として、図の黒い点で示した6ヶ所の飛び火を出火時刻の異なる出火点として指定する。——という条件のもとで行ったもので、出火後4時間程度(風下方向の延焼距離が1km程度)まではほぼ満足の行く結果が得られており、他の不満な点も消火力を考慮すれば納得いくものである。

4. 避難群集の流動シミュレーション

避難路網における群集流動を集中定数系として扱うためには、市街地を次の5つの領域——単位通路(P)、交差点(Q)、区画(R)、避難場所(O)、環境(S)——に分割し、PP, PQ, PR, PO, QSという領域間での群集流を考る。この群集流動を表現するために、図4のような、領域を頂点、群集流の考えられる領域間を弧(向きは流動方向を示す)とする有向グラフを導入し、頂点には状態変数である群集密度 ρ_p, ρ_o 、あるいは、群集数 Z_p, Z_o 、および有効面積 A_p, A_o (対角行列)、渋滞係数 K_p, K_o (対角行列)が定義され、弧には群集流量、群集流速および有効巾員 $B_{pp}, B_{pq}, \dots, B_{qs}$ (対角行列)が定義される。

ところで上述の渋滞係数とは、群集流が持ち行列の状態になる渋滞現象を、群集流がある最大群集密度 ρ_{max} に達すると非圧縮性を示すことから生じるものと考えて、常に群集密度は ρ_{max} 以下であるという条件より導びかれたもので、渋滞の度合を示すものと解釈され

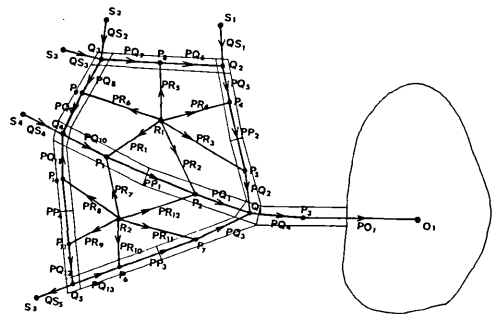


図4 避難路網における群集流動を表現する有向グラフ

る。そして、実際の群集流量は下流側の渋滞係数と上流側から流入しようとする群集流量 ($\rho \cdot u(\rho)$, $u(\rho)$ は下流側の領域が渋滞していない場合の群集流速) の積で表われ、この関係を基礎に、避難路網における群集流動の状態方程式が次のように定式化される。

$$\rho_P(t+\Delta t) = \rho_P + A_P^{-1} \left\{ \left[\Phi_{PP} B_{PP} \widehat{K}_{PP}^{(P)} \Psi_{PP}^{-1} U_P(\rho_P) - \Phi_{PQ_1}^{-1} B_{PQ_1} \widehat{K}_{PQ_1}^{(Q)} \Psi_{PQ_1}^{-1} U_P(\rho_P) - \Phi_{PR_1}^{-1} B_{PR_1} \Psi_{PR_1}^{-1} U_Q(\rho_Q) - \Phi_{PQ_1}^{-1} B_{PQ_1} \widehat{K}_{PQ_1}^{(Q)} \Psi_{PQ_1}^{-1} U_P(\rho_P) \right] \rho_P + \Phi_{PQ_2}^{(+)} B_{PQ_2} \widehat{K}_{PQ_2}^{(Q)} \Psi_{PQ_2}^{-1} U_Q(\rho_Q) \rho_Q + \Phi_{PR_2}^{(+)} \widehat{K}_{PR_2}^{(R)} \Psi_{PR_2}^{-1} X_R \right\} \Delta t \quad (1)$$

$$\rho_Q(t+\Delta t) = \rho_Q + A_Q^{-1} \left\{ \left[\Phi_{PQ_2}^{-1} B_{PQ_2} \widehat{K}_{PQ_2}^{(Q)} \Psi_{PQ_2}^{-1} U_Q(\rho_Q) + \Phi_{QS_1}^{(+)} B_{QS_1} \widehat{K}_{QS_1}^{(S)} \Psi_{QS_1}^{-1} U_Q(\rho_Q) \right] \rho_Q + \Phi_{PQ_2}^{(+)} B_{PQ_2} \widehat{K}_{PQ_2}^{(Q)} \Psi_{PQ_2}^{-1} U_P(\rho_P) \rho_P + \Phi_{QS_2}^{(+)} B_{QS_2} \widehat{K}_{QS_2}^{(S)} \Psi_{QS_2}^{-1} X_S \right\} \Delta t \quad (2)$$

$$Z_R(t+\Delta t) = Z_R + \left[\Phi_{PR_2}^{(+)} B_{PR_2} \Psi_{PR_2}^{-1} U_Q(\rho_P) \rho_P - \Phi_{PR_2}^{(+)} \widehat{K}_{PR_2}^{(R)} \Psi_{PR_2}^{-1} X_R \right] \Delta t \quad (3)$$

$$Z_O(t+\Delta t) = Z_O + \Phi_{PO_2}^{(+)} B_{PO_2} \widehat{K}_{PO_2}^{(O)} U_P(\rho_P) \rho_P \Delta t \quad (4)$$

ただし、

$$\widehat{K}_{PP}^{(P)} \equiv D \left[\Phi_{PP}^{(+)} K_P \Phi_{PP}^{(+)} \right], \quad \widehat{K}_{PQ_1}^{(Q)} \equiv D \left[\Phi_{PQ_1}^{(+)} K_P \Phi_{PQ_1}^{(+)} \right],$$

$$\widehat{K}_{PQ_2}^{(Q)} \equiv D \left[\Phi_{PQ_2}^{(+)} K_Q \Phi_{PQ_2}^{(+)} \right], \quad \widehat{K}_{PR_1}^{(R)} \equiv D \left[\Phi_{PR_1}^{(+)} K_R \Phi_{PR_1}^{(+)} \right],$$

$$\widehat{K}_{PQ_1}^{(Q)} \equiv D \left[\Phi_{PQ_1}^{(+)} K_Q \Phi_{PQ_1}^{(+)} \right], \quad \widehat{K}_{QS_1}^{(S)} \equiv D \left[\Phi_{QS_1}^{(+)} K_S \Phi_{QS_1}^{(+)} \right],$$

$$\widehat{K}_{QS_2}^{(S)} \equiv D \left[\Phi_{QS_2}^{(+)} K_S \Phi_{QS_2}^{(+)} \right]$$

$D\{M\}$: 行列 M の対角成分だけを残してその他の成分をすべて 0 とした例

$\Phi(t) (= \Phi^{(+)}(t) - \Phi^{(-)}(t))$: 有向グラフの結合行列

$\Phi^{(+)}(t)$: 入連結行列

$\Phi^{(-)}(t)$: 流量比行列 (出連結行列 $\Phi^{(-)}(t)$ を拡張して定義される。)

$X_R(t)$: 区画からの避難群集発生速度

$x_S(t)$: 環境から流入しようとする群集流量

実際の道路網での群集流動シミュレーションを行うために、図5に示す東京都太田区の一部を対象地域とし、同図に示すような対象道路網および流動方向(固定)を設定する。($u(\rho)$, ρ_{max} には駅構内の群集流の計測から得られた実験値、値をそのまま用い、各区画からの避難群集発生速度を $X_i^{(R)}(t) = Z_i^{(R)}(0) / 120$ [人/min] としたときのシミュレーション結果が図6、図7に示されている。図6は、図5の主要な避難経路に

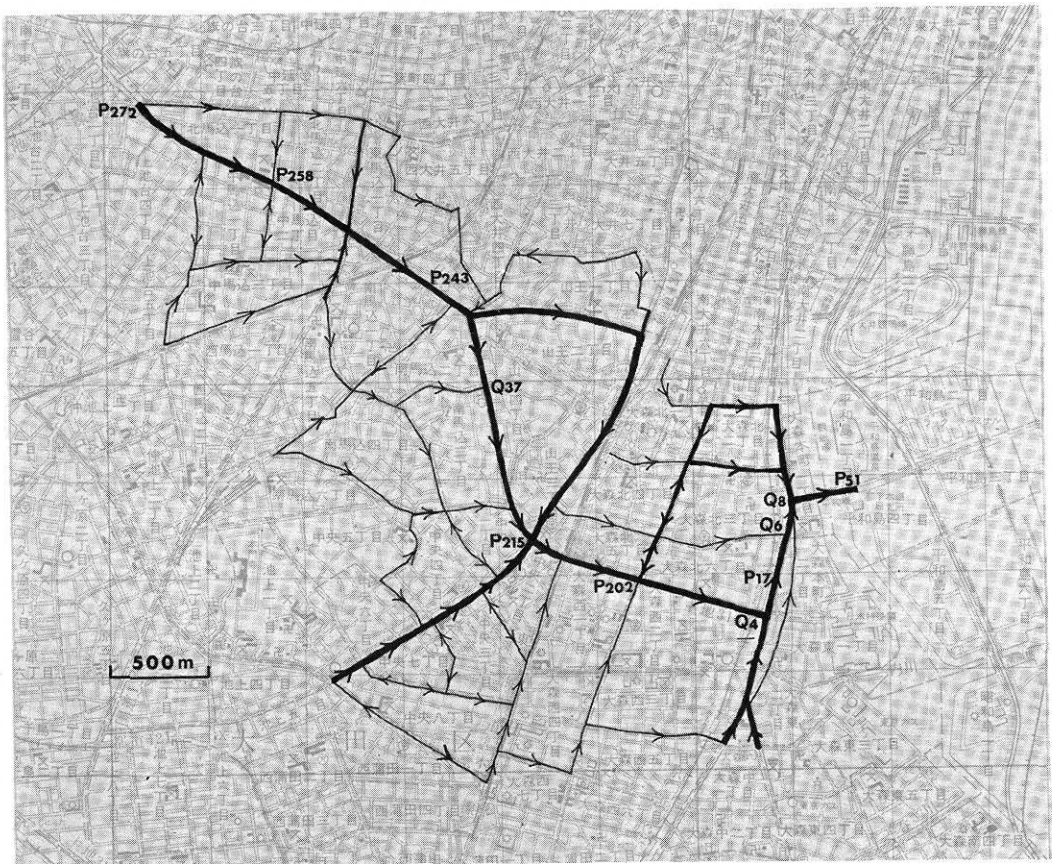


図5 東京都太田区において想定される避難路ネットワーク

おける群集密度の変化を示したものであり、図7は、上と同じ避難経路上を途中で休止したり、それたりすることなく避難場所に向う避難行動のトラジェクトリを描いたもので、その傾きが群集流速を表わしている。

5. あとがき

ここで述べた最適避難計画は、出火点分布や風向、風速の各場合について求めておかなければ、真に有用なものとはならない。出火点分布については、メッシュ単位での出火点を考えてみても、その分布の数は膨大なものとなるが、一方、相当数の出火点分布に対する最適避難計画が同一のものとなることも容易に理解される。現在のところ、この問題に対する見通しが十分でないため、有効な手法を提示できないのは残念であるが、適当な大きさのメッシュについての出火点密度で処理するのも、1つの方法かも知れない。

しかし、各場合についての最適避難計画を準備しておくことは、実施面での避難誘導計画、消火力運用計画、さらには災害情報処理システムの基礎となる点からも重要である。例えば、消火力を運用する場合でも、拘束条件内で、現在のパターンからどのパターンに移行するのが最適かという問題に還元され、容易にその解答を見つけ出すことができる。災害情報処理システムにおいても、事態の変化への対応を可能にするものと思われる。

なお、本課題に関連する研究は、科学技術庁による「大震時における被害総合予測手法および災害要因の摘出手法に関する総合研究」(委員長：藤井澄二東京大学教授)他、東京都庁、東京消防庁関係の各種研究委員会でも取り上げられており、機会あるごとに有益な御指示をいただいている諸生先方に感謝するとともに、資料提供などの御協力をお願いしている両庁の関係諸

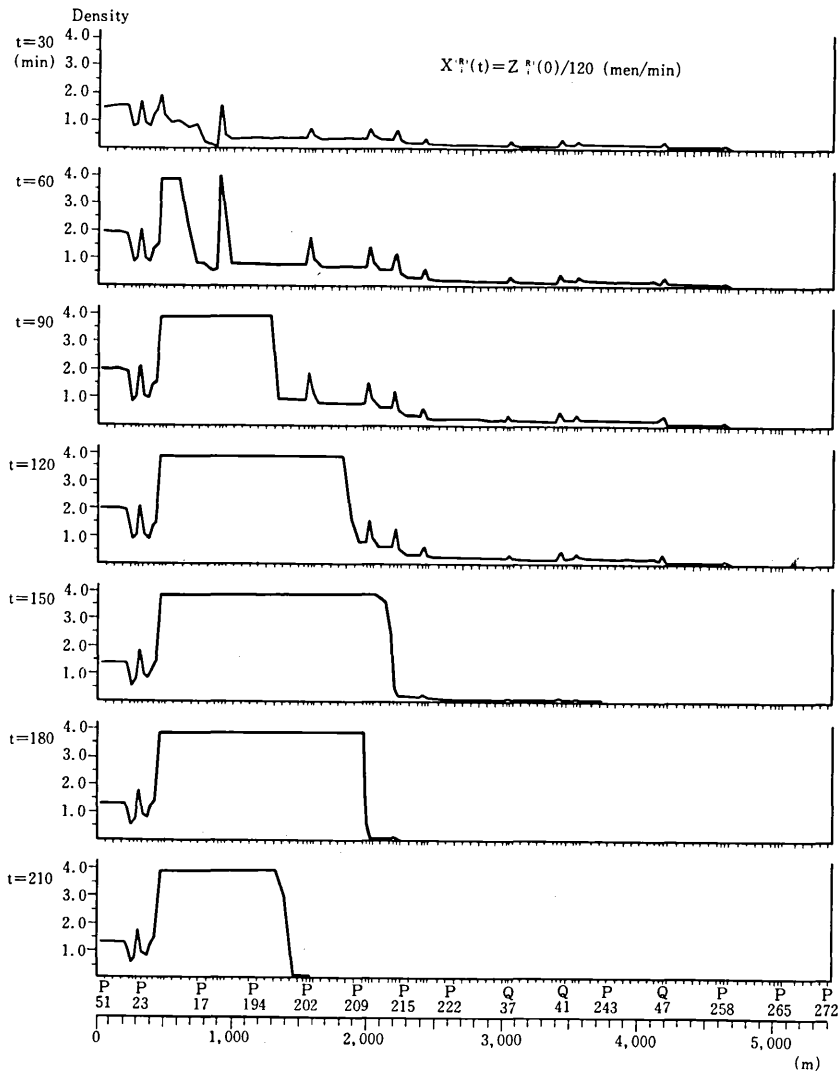


図6 主要避難経路における群集密度の変化

氏に感謝いたします。また、永らく大震災対策に御尽力された浜田稔先生が昨年、突然御逝去されたことはまことに哀惜の念に堪えず、未筆ながら、ここに謹んで御冥福をお祈りいたします。

(1975年1月23日受理)

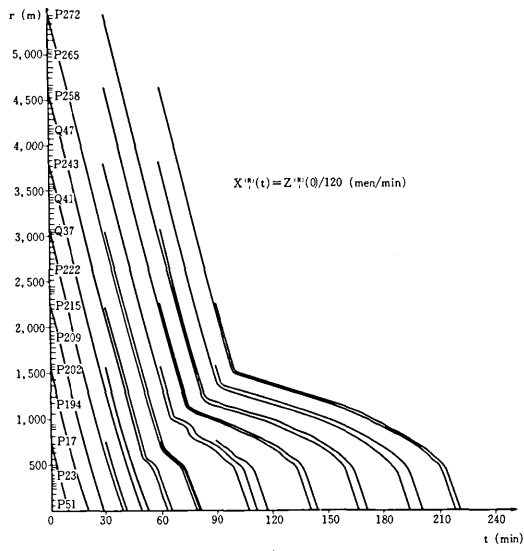


図7 主要避難経路における避難行動のトラジェクトリ

参考文献

- 1) 浜田稔：火災の延焼速度について，火災の研究，Vol. 1, pp 35-41, 1951

