

大震時の火災時による道路閉塞を考慮した リアルタイム避難誘導のための避難開始時刻決定に関する研究

When should evacuation warning in real time response operation be announced
under the on going spread of post-earthquake fires?

金井淳子¹, 梶秀樹²

Atsuko KANAI¹, Hideki KAJI²

¹ 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 後期博士課程

Graduate Student, Graduate School of Media and Governance, Keio University.

² 慶應義塾大学 総合政策学部 教授

Prof. Faculty of Policy Management, Keio University.

In a current evacuation master plan, the residents should start evacuation immediately when an evacuation warning to avoid an earthquake fire is requested. However, if a fire occurs, while non-inflammablization movement of the city has been progressed, it would advance very slowly until the danger will get close before the eye.

If there be such a time lag between the evacuation of the danger, residents will be able to take actions, such as to rescue for the buried people, to fight fire, and to secure people. In this study, we developed an algorithm for calculating the time when to start evacuation by using GIS system. This study will show the following results.

1) the latest time to start evacuation, 2) safety evacuation route.

Key Words : evacuation, evacuation algorithm, real time evacuation, evacuation warning, safety evacuation

避難、避難誘導、リアルタイム避難、最遅避難、安全避難

1. 研究の背景と目的

大地震の後に発生すると予想される同時多発火災から群衆をいかに安全に避難させるかは、応急対応上の大きな問題であるが、火災が徐々に拡大していく過程で被災者がどのタイミングで避難を開始するか、あるいは行政がいつ避難勧告を出すべきかについては、まだ解明すべき問題が残されている。

一般に被災者は家族または隣人の救助や怪我の救護、初期消火、あるいは家財の持ち出しなど、発災後の対応として被災現場でやるべきことが多々あり、住民は出来る限り自宅近隣に留まるという傾向が存在する。こうした自助活動は、行政側からの立場からも非常に期待されていることである⁽¹⁾。従って自由避難に任せておくと、火災接近より危険を感知した「見切り時刻」が避難開始時刻になることが知られている。しかし、この見切り時刻は避難場所までの経路の安全を考慮しないため、避難途上で行く手を断たれる危険をはらんでいる。行政による避難勧告は、従って現地でのそうした自助活動を奨励しながらも避難場所へ至る避難経路の安全が確保される限界としての「最遅避難開始時刻」として発令される必要がある⁽²⁾。

とはいえ避難開始を最遅化するということは、最短経路が早めに遮断された場合には迂回路を通ることを意味する。即ち早く避難を開始して短い距離に行くか、遅くまで残り長距離の避難をするかのトレードオフが発動し、選択的意志決定の問題となる⁽³⁾。

東京都では、それを発災後1時間程度と設定し、1時間経過時に同時一斉避難勧告を出すように定めているが、この1時間という時刻に確たる根拠はない。即ち、場所によっては1時間では早すぎ、また逆にまだ十分に現地での活動が続行出来る場合もある。

こうした火災の拡大に応じて避難勧告を発令するという考え方は、当然地震発生後のリアルタイム情報処理システムを前提とする。そのような情報伝達が被災住民の末端まで可能か否かについては一つの課題として十分に検討される必要がある。本研究は、その可能性を前提とした上で、火災の拡大に伴い道路が次々と閉塞していく状況の下で可能な迂回路が存在する限り居住地での自助・救助活動を続けるため、避難距離の増加との対比から適正な避難開始距離のあり方を求めることを目的とする。

2. 先行研究

先行研究としては、増山・梶・李らの最遅避難時刻に関する一連の研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾がある。これらの研究は、固定避難経路を前提に延焼による道路閉塞、避難群衆の混雑による歩行速度の遅れを考慮して「最遅避難開始時刻」を求めたもので、研究の背景で述べられている「最遅避難」という考え方を一番最初に提唱した研究であり、またこの問題に一つの解を与えたということで評価できる。しかし、実際には群衆は固定経路で避難するとは限らず、このモデルには限界があると言える。

リアルタイム避難誘導構想は、1980年代より建設省建築研究所において研究が進められて来た。この先行研究では、最終的問題点として、住民が最短距離にある避難地へ避難するための避難地と居住地の配置問題が問われていた。が、本研究では、逆に、住民の避難先である避難地の位置は固定であるが、そこへ辿り着く経路として火災を避ける迂回路選択制としている点に特徴がある。この先行研究では防災同胞無線での連絡法を主体としたが、その後の技術進歩により現代ではPDA等、携帯

端末機器が発達・普及をみている。本研究では、これら新技術を考慮し、決定された避難路と避難開始時刻は、避難を行う最小集団のリーダー宛に携帯端末機器を通じて配信される形式を提案している。

3. 研究の前提条件と手法

本研究は以下の前提条と研究手法を用いて行われた。

(1)大震時の広域避難場所への二段階避難を想定

現在、東京都でも採用されている居住地より小学校等一時集合場所への避難してから、集団で広域避難場所へ移動する二段階避難を想定し、本研究システムは、その二段階目の広域避難場所への避難時に対する提案である。

(2)指定避難地・可変経路ネットワーク制

各居住地ごとに、最終的に逃げ込む避難地は決まっているが、避難経路は火災進行により変化する。

(3)延焼シミュレーション

延焼シミュレーションは外部ソフトに寄るものとしており、本研究の実市街地試算では円形状の簡易型延焼モデルを採用している。

(4)システム管理者と利用者

本研究で想定しているシステム管理者は、発災後、各都道府県ごとに設置される災害対策本部において任命された職員（平時の役職は防災センターのシステム管理者を想定）であり、システム利用者は、携帯情報端末を保持する居住地ごとの自治会リーダー（自主防災組織の長など）を想定している。

(5)研究の手法

研究手法としては、ネットワーク上の最短経路計算アルゴリズムであるダイクストラ法に、いつまで道路通行が出来るのかその道路利用限界の時間軸概念を取り入れている。ダイクストラ法では、本来、避難地と居住地間の道路ネットワークを元に、単に居住地と避難地を最短経路で結ぶ経路（パス）の提示しか行えないものである。筆者らは、実際の地震火災からの避難においては道路の火災によって道路が閉塞しネットワーク構造が時刻をおって変化していくことに着目し、可変ネットワークにおけるネットワークとトポロジの変化に対応した、最遅避難時刻の算出を行っている。ネットワークに、道路閉塞時刻という時間軸の概念を取り入れたことにより、パスの表示と共にいつ出発すべきかという時刻の算出も可能となる。

4. 道路閉塞を考慮した避難路の算出アルゴリズム

本研究では道路閉塞を考慮し迂回避難を行うことを前提とする。以下、その手順を示す。

算出は避難地ノードから遡って、各ノードを通過しなくてはならない時刻を決定していく。時刻は、地震発震を0（ゼロ）時刻とする秒刻みで計測される。

- 0 発震直後（図1参照）
 - 0.1 最短ルートは計算されている。
 - 0.2 延焼シミュレーションにより道路閉塞時刻が決定される。
 - 0.3 数字は上段がルート通過のための時間距離、下段が延焼到達による道路閉塞時刻
- 1 第一段階（図2参照）
 - 1.1 避難地aに接続しているノードに着目。
 - 1.2 b、c、dに、通過必要な秒数を閉塞時刻から引いて仮の出発時刻を入れる。
 - 1.3 れb、c、dの中で最も遅い出発時刻のdに確定フラグを立てる。
- 2 第二段階
 - 2.1 確定フラグの立ったdに接続するノードに着目。今回はgのみ。
 - 2.2 左の例のように道路閉塞時刻と通過所要時間より150秒後を仮の避難開始時刻とする。
 - 2.3 gには他の未フラグ上流ノードがあるので確定はしない。
- 3 第三段階
 - 3.1 dの次に避難開始時刻が遅いbに確定フラグ。
 - 3.2 bに接続するe、fに仮の避難開始時刻を入れる。
- 4 第四段階
 - 4.1 仮の避難開始時刻が入ったノードでかつ未フラグなものの中、最も避難開始時間が遅いeを確定。
 - 4.2 eに繋がるノードfに着目。
 - 4.3 fはe経由でのルートをとることにし、260秒後を仮の避難開始時刻とする。
- 5 第五段階（図3参照）
 - 5.1 仮の避難開始時刻が入ったノードでかつ未フラグなものの中、最も避難開始時間が遅いfを確定。
 - 5.2 fに繋がるノードc、hに着目。
 - 5.3 cはf経由でのルートをとることにし、240秒後を仮の避難開始時刻とする。
- 6 第六段階
 - 6.1 仮の避難開始時刻が入ったノードでかつ未フラグなものの中、最も避難開始時間が遅いcを確定。
 - 6.2 cに繋がるノードgに着目。
 - 6.3 gはc経由でのルートをとることにし、210秒後を仮の避難開始時刻とする。
- 7 第七段階（図4参照）
 - 7.1 仮の避難開始時刻が入ったノードでかつ未フラグなものの中、最も避難開始時間が遅いgを確定。
 - 7.2 cに繋がるノードhに着目。
 - 7.3 今回、ルート付替えはしない。
 - 7.4 全てのノードの避難開始時刻が確定した。

アルゴリズムは以上の通りであり、次頁図1～4にてごく簡単なモデル図によるルート計算の例が示されている。また、このアルゴリズムに基づく算出プログラムは同じく次頁図5で示されるブロックチャートに基づいて計算される。プログラム記述にはC言語を用いた。

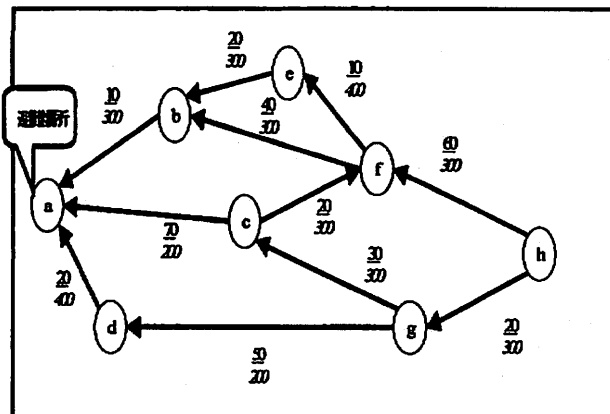


図1 発震動直後

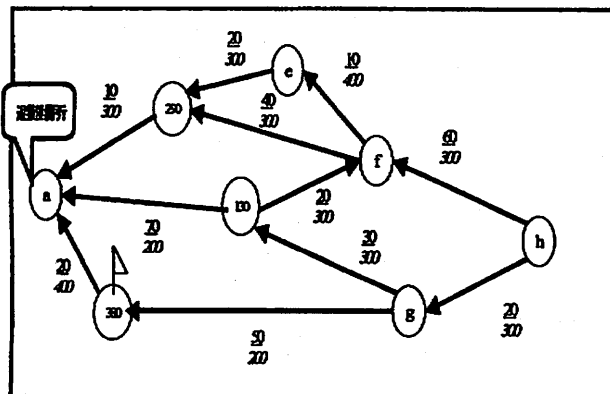


図2 第一段階

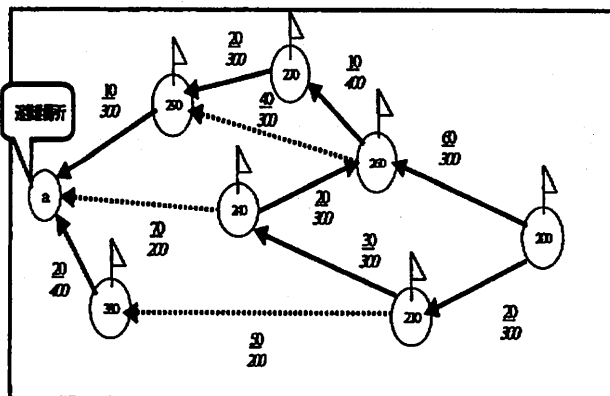


図3 第五段階

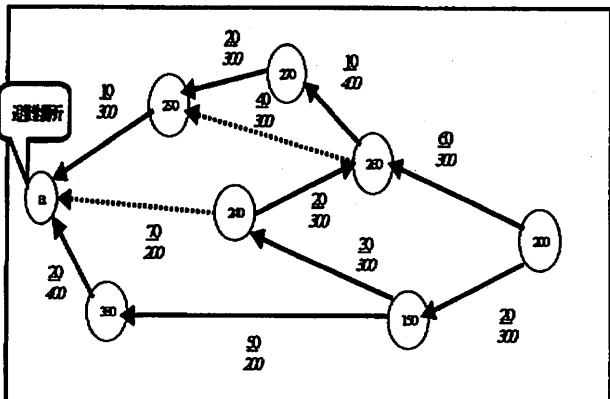


図4 第七段階

左の図 1~4 において、ルート上の数字は上が通過時間距離、下が切断時刻である。

このようなノードに対してラベルの付け替えを行い確定した箇所にはフラグを立てていくという方法はラベリング法と呼ばれ、参考文献 5 及び 6 に詳しい。

また、図 5 プログラムチャートで使用されている各変数は図中左下の囲み内にて説明されている。

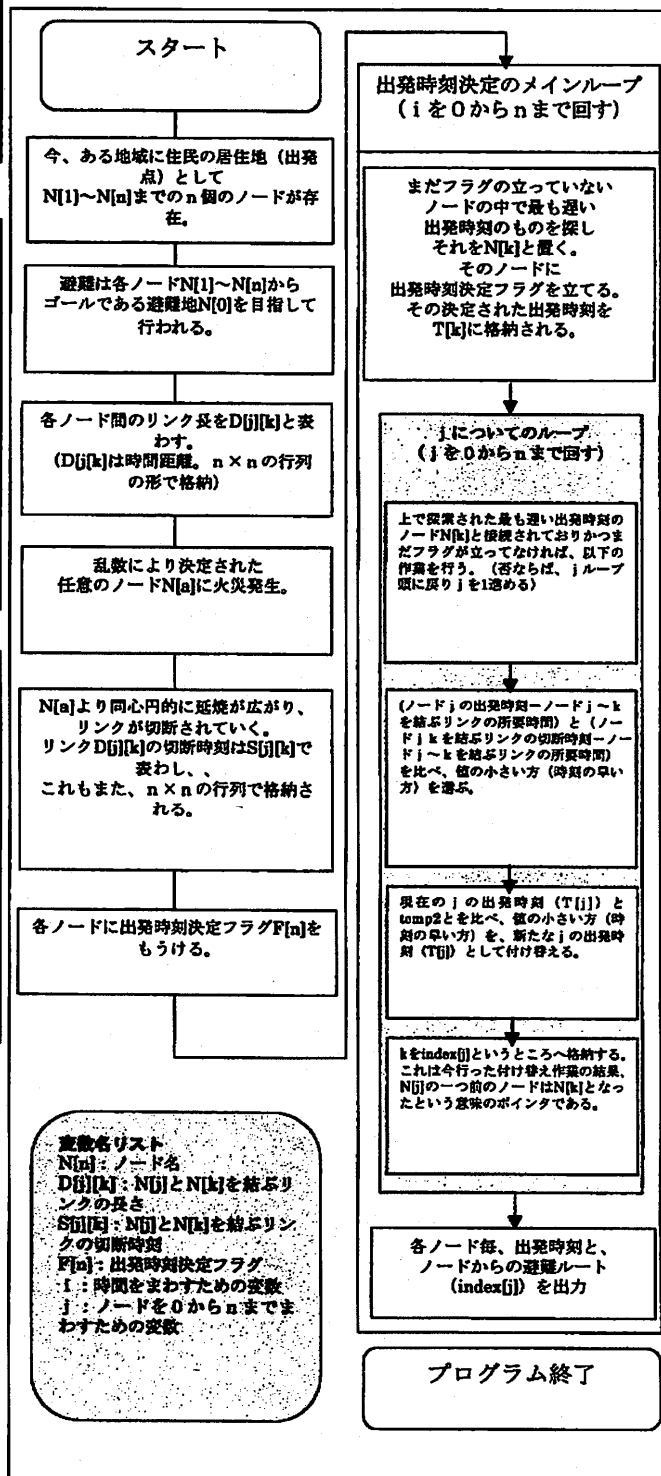


図5 プログラムチャート

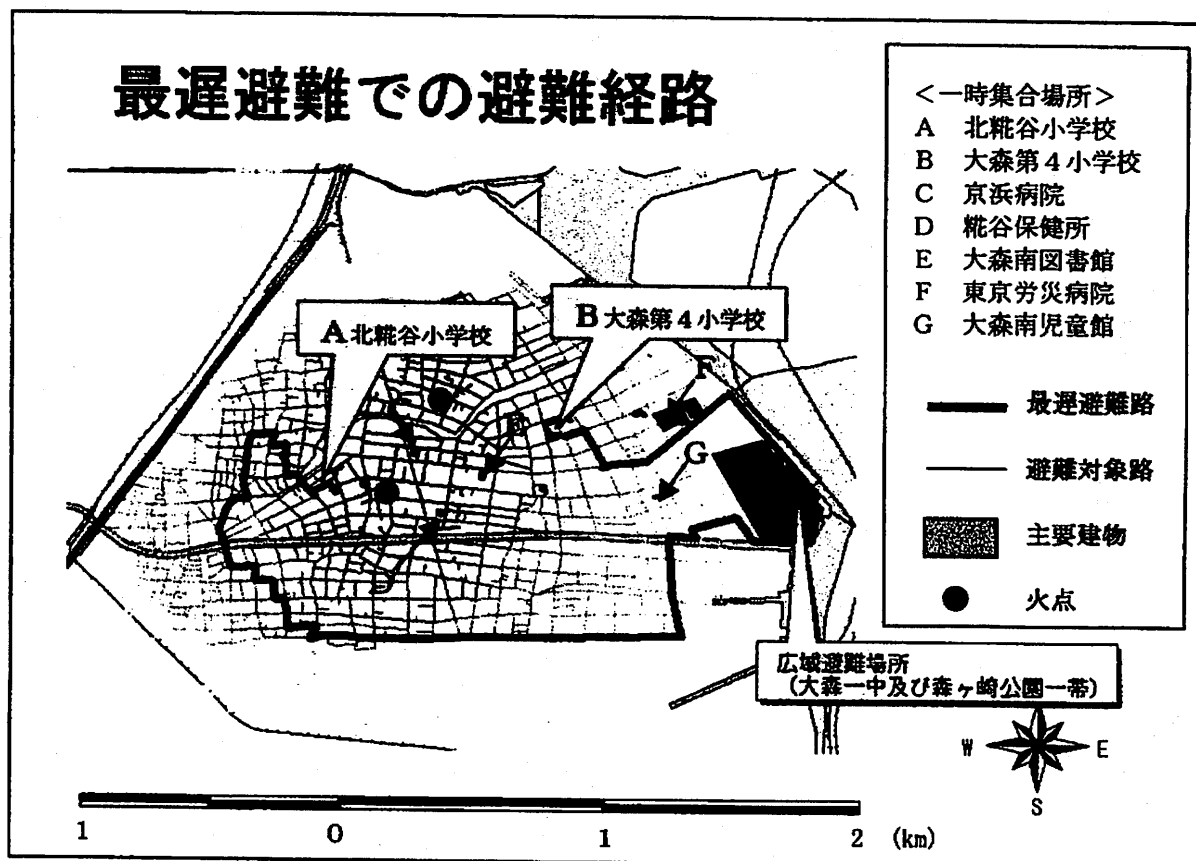


図6 モデルケースで算出された避難経路の様子
(対象避難区域：大森一中及び森ヶ崎公園一帯)

5. 実市街地での試算

試算を行うにあたってのモデル地域は大田区の北糺谷から大森にかけての地域である。ちょうど羽田空港の手前となる地域で、東京都指定の広域避難場所名では大森一中及び森ヶ崎公園一帯が指定避難地として割り当てられている。

市街地モデルの地理的情報データは、国土交通省出版の数値地図をもとにしており、これをEsri社のGISソフトArcViewを用い、必要とされる形に加工を行っている。

実市街地の概要と試算にあたっての前提条件は表1に一時集合場所の位置と名称は図6に示される通りである。図5のプログラムチャートで必要とされるノード間の時間距離は実距離を住民の歩行速度で割ったもの、切断時刻は火点からルート中央点までの直線距離を延焼速度で割ったものとなる(円形状に延焼が広がる簡易型の延焼シミュレーション)。また、迂回避難を行うにあたり、今回の試算では、避難対象区域から500m以内の区域外道路も対象としている。この区域内の道路と500m圏内道路を迂回避難路として、試算は行われている。図6に示されるように、試算例では、火点を地域内に1箇所、外部に1箇所、計2箇所設けた。

この地域内の一時集合場所は7箇所である。今回の試算では、これら7箇所全てから広域避難場所までの最遅避難及び最短距離避難での避難距離、避難開始時刻の計算を行った。その結果を表2、表3にまとめている。図6

には避難経路の例として北糺谷小学校と大森第4小学校からのルートを示した。

表1 実市街地の概要及び前提条件

広域避難場所名	大森一中及び森ヶ崎公園一帯
避難計画人口	17,300人
町丁目数	7
最遠地域の直線距離	6km
出火点数	2火点(地域内1、外部より1)
延焼速度	10m/時(都市の難燃化傾向を考慮したゆっくりとした延焼。)
住民歩行速度	障害物などを考慮して60m/分
迂回避難に使用する道路	避難対象区域内の道路及び区域より近隣500m圏内の道路

表2 避難距離の比較

		単位:m		
		最遅避難 (α)	最短避難 (β)	差分 $\alpha - \beta$
A	北糺谷小学校	2,973	1,771	1,202
B	大森第4小学校	1,143	1,143	0
C	京浜病院	4,433	1,590	2,843
D	糺谷保健所	1,349	1,349	0
E	大森南図書館	1,390	1,390	0
F	東京労災病院	782	782	0
G	大森南児童館	529	529	0

表3 避難開始時刻の比較

※避難開始時刻は全て発震時からの経過時間で表示される。

	最遅避難 (α)	最短避難 (β)	差分 $\alpha-\beta$
A 北糀谷小学校	14,344 秒後 (3時間59分4秒)	6,850 秒後 (1時間54分10秒)	7,494 秒 (2時間4分54秒)
B 大森第4小学校	21,529 秒後 (5時間58分48秒)	21,529 秒後 (5時間58分48秒)	0 秒
C 京浜病院	7,154 秒後 (1時間59分14秒)	7,073 秒後 (1時間57分53秒)	81 秒 (1分21秒)
D 糀谷保健所	8,980 秒後 (2時間29分20秒)	8,980 秒後 (2時間29分20秒)	0 秒
E 大森南図書館	10,700 秒後 (2時間58分20秒)	10,700 秒後 (2時間58分20秒)	0 秒
F 東京労災病院	35,912 秒後 (9時間58分32秒)	35,912 秒後 (9時間58分32秒)	0 秒
G 大森南児童館	41,347 秒後 (11時間29分7秒)	41,347 秒後 (11時間29分7秒)	0 秒

6. 試算の結果と考察

全般的に見ると、最遅避難で避難した場合と最短距離で避難した場合で避難開始時刻が延長されたケースはAの北糀谷小学校とCの京浜病院の一時集合場所から出発した2例のみである。この2つの場所の特徴は、避難スタート地点（一時集合場所）とゴール地点（広域避難場所）の間に火点が存在するという点にある。

しかし、A、Cの両者の最遅避難路の計算結果については、この数値を実務的に避難誘導で取り上げることが可能かどうかという点で大きな差が見られる。

表2、表3よりAの北糀谷小の地域は1.2kmの迂回によって約2時間の避難猶予時間が与えられている。この2時間の猶予時間が与えられるということは、その間に初期消火や救助などが大分進むはずであり、地域における住民の自助活動を行う上で有用な情報であると言える。

逆に、Cの京浜病院の場合は、1分半の出発の差で2.8kmの迂回をしなくてはならない結果となっている。これは、この場所が2つの火点に挟まれるような地点に位置しているため経路へ延焼が及ぶ時間がかかり早いということが理由として考えられる。このCの京浜病院を一時避難場所とする地域でこの出火パターンであった場合は、最遅避難方式は採用せずに、最短距離の避難で逃げた方が良いと言えよう。

B、E、F、Gの地域は火点よりも避難地に近い位置関係となっているため、最短経路で避難する場合と最遅避難で避難する場合とで同じ結果となっていると考えられる。

また、避難猶予時間について考えると、一番避難までの猶予時間がないCの京浜病院の場合でも7,154秒後(1時間59分)となっており、この結果は、震災後の居住地域で、とりあえずの自助活動を行うには十分に足る時間と思われる。しかし、この問題は延焼の速度に依存するため、今回は延焼速度を表1の通り10m/時という非常にゆっくりとした時間にとっているためであると考えられる。

避難距離については、一般には4km以上歩く場合を遠距離避難と呼び、現在東京都では避難地までの歩行距離が3km以下にすることを目標としている。この点からも、Cの京浜病院では最遅避難を採用した場合、4.4kmの避難距離となり不適格な数値である。次に最遅避難による補講距離が長いAの北糀谷小学校の場合は2.9kmとなるが、これは東京都基準に対しても一応、許容範囲内である。

7. 今後の研究課題と実施への方策

(1) アルゴリズム及びモデルの課題

本論文冒頭で述べた当初の目的は、既に述べたような形で達成をみている。しかし、本システムはアルゴリズムおよびモデルとして、改良・改善すべき課題がまだいくつも存在する。

a) 迂回避難距離の限界問題

現段階における最大の課題は、迂回避難路の限界をどう設けるかという点にある。理論上、本アルゴリズムでは対象とする避難路を何らかの形で限定したものとしないうと、迂回避難はどこまでも続いていってしまう。今回の試算においては、避難対象区域の近隣500m圏内の道路を使用するものとするという区切りを設けている。しかし、理想的には、避難路の合計が3km以下（あるいは2km以下）になるといった形での制限条件とする方がより実務的であると考えられる。この全体距離が一定以下になるという算出法へとアルゴリズムを改変することが当面の一番の課題であると言える。

b) 混雑の導入

現在は、道路の混雑による停滞は考えない形で算定をしている。しかし、実際の避難では必ず道路幅と混雑による停滞が起こるものであり、そもそも最遅避難という考え方が最初に提唱された増山・梶論文¹⁾では、この混雑問題から避難開始限界時刻を求めるという着眼点で研究が行われている。この混雑を考慮したアルゴリズムへの改良も、行っていかななくてはならない。

c) 避難路の重要性評価

このアルゴリズムを利用した今後の展開としては、火点位置の変化と延焼による道路閉塞のパターンを増やすことにより、どの避難路が切断されると最も避難開始時刻及び避難距離に影響するのか、各避難経路の重要性評価が可能となると考えられる。これによって避難路としてクリティカルと算出された道路には消防力の重点配置計画を行う等の応用が可能となり、行政実務上も非常に有用なものとなっていくと考えられる。

d) リアルタイムでの情報収集

現在は、延焼シミュレーションに基づく道路の閉塞時刻を採用しているが、将来的には、リアルタイムでの道路閉塞情報を入れた避難誘導へと繋がっていくことを想定する。

e) 避難猶予時間と迂回避難距離の選択的意志決定

計算された避難猶予時間に対してどの位の迂回距離までが許容範囲であるのかについては、補注(3)に示される式になるが、この式に対して解を求める方法について既存経済モデルなどの適用を考えている。

(2) 実施への方策

本システムを実際に運用していくためには、いくつかの政策的課題が存在する。

a) 避難開始参考時刻としての最遅避難開始時刻

本研究で提唱している最遅避難方式は、実際の政策現場にそのまま持ち込むには、問題がある。その問題の中で一番大きいものは、この最遅避難での避難開始時刻は、延焼シミュレーション等、外部の所与条件に依存するところが大きいという点である。延焼シミュレーションというものは、どんなに精度の高いものであっても絶対ということではなく、気象状況の急速な変化などによって延焼速度は大きく左右され、シミュレーション結果とは異

なる結果となることは容易に予想される。これはつまり、その延焼シミュレーションに拠るところが大きい最遅避難方式のシミュレーション誤差に直結する。

つまり、実際の政策現場では、本研究による最遅避難開始時刻はシステム管理者が算定を行った後に、30分ないし1時間の避難開始における「余裕時間」を上乗せした上で、避難勧告を傳達していくという方式にすることが現実的であると考えられる。つまり最遅避難時刻は、避難開始の参考時刻として算出されるということである。

また、これらの最遅避難時刻を採用するかどうかについては、地域の自主防再組織などにおいて予め意思決定を行い、採用する場合には、自治体が発令する「余裕時間」に更に上乗せした形で独自の避難開始時刻を設定するなど地域における住民の合意に基づいた形で適用することが、実務的には考えられる。

しかし、こうした避難開始参考時刻という形であっても、現在、東京都などが採用している発震後一定時間後に一斉避難を開始するという方式よりは、避難開始時刻算定に充分、蓋然性を与えていると思われる。

b) 情報伝達体制の検討

本研究では、自治会・町内会内における情報収集体制にグループリーダー制を採用し、算出された避難猶予時間を住民に効率的に伝達する方法を提案する。これは、予め10戸から15戸単位でグループリーダーを選出しておき、そのリーダーは日ごろより情報収集研修など受け、有事に備えておくものとする。その際には、昨今普及の目覚ましい情報提示機能付き携帯電話など個人用の携帯端末機器(PDA)を活用する。

1) 避難を必要とする大規模地震の発震後、行政は避難勧告を行う。この報知の行い方は従来より設置普及につとめられてきた防災同報無線を活用する。

2) グループリーダーはこの避難勧告を受け、速やかに一時集合場所に集合し、その場で最終的な最遅避難開始時刻とその際の避難路の指示を、個人携帯端末へ入力する。

3) グループリーダーは各居住地に戻り、最終的な避難開始時刻と経路の伝達を行う。この時、災害弱者の先行避難の指示も行われる。

4) 住民は、与えられた避難猶予時間内に各居住地にて初期消火活動等の活動を行う。

5) 住民はグループリーダーの指示に従い、最遅避難開始時刻までに小学校等一時避難場所に集合集合する。

6) 各グループごとに避難を開始する。

本研究で提唱する上記のような避難形式は、最遅避難時刻の伝達という面のみならず、グループリーダー育成による日頃からの防災意識の喚起にも繋がっていくものである。特に、昨今では従来型の消火器使用訓練や建物脱出訓練一辺倒であった防災訓練のあり方にプラスして情報収集訓練の重要性が問われて来ている。この方法は、これまでの自治会・町内会単位での防災訓練のあり方へ新しい風を起こすことになる。

また端末機器については、個人の使いなれたものが一番である。日頃使いなれていないものを緊急時に急遽使用を迫られても無理である。そのためリーダーへの機器貸与及び購入助成金などの形で行政援助を行う形が想定される。

また、この情報伝達体制を用いて地域住民に対しては避難路と同時に延焼拡大の様子もリアルタイム提示することなども考えられるが、延焼図を提示することによるパニックの発生を考えると積極的には勧められない。但し、一方で地元住民は近隣の避難路の様子について長

年の経験とカンを持っており、これによって突発事故の際などには機械計算では得られない機転によって危機を乗り越えるということも予想される。このあたりの情報を行政側がどのようにコントロールしていくのかという問題は、意思決定の問題と合わせ、一つの重要な研究展望である。

8. まとめ

本論文で最初に掲げた目標は、いくつかの限定条件下ではあるが、達成をみている。今後は8章で掲げたアルゴリズムのモデル的課題、及び政策実施上の課題を更に検討し、システム改善・改良を行っていくことが必要とされている。

本研究及び本論文の成果により、80年代に提唱されて以降、やや停滞気味であったリアルタイム避難誘導構想について、今後、再び議論・検討が活発に行われるようになることを願ってやまない。

補注

(1) こうした行政の期待する自助活動を住民がどの程度行えるのか、自主防災組織が消火器による初期消火を行う場合を想定した「自主防災組織の初期消火能力評価」が研究されている。

(2) これまで都心部で推進されてきた都市の不燃化・難燃化傾向がこの研究の大きな前提としてある。一箇所にて地震火災が起こった後も、それが他に燃え広がりやすい状況、燃え広がるにも時間がかかる状況となって来ている現在、他地域からの延焼による避難勧告が出された後も様々な住民活動を可能とする避難猶予時間が生じてくると考えられる。

(3) 滞在できる時間(T)と避難距離(D)について $f(T, D) = e^{-\alpha(D - D_0)}$ (一定) という制限下で、 $U = U(T, D) \rightarrow \max$ という問題となるが、今回扱わない。

参考文献

- 1) 増山格・梶秀樹：大地震時広域避難計画検討のための最遅避難モデルの開発，都市計画別冊昭和59年度学術研究論文集（第19号），pp379-384，日本都市計画学会，1984
- 2) 増山格・梶秀樹：最遅避難モデルによる大震火災時の広域避難計画の評価，都市計画別冊 昭和60年度学術研究論文集（第20号），pp67-72，日本都市計画学会，1985
- 3) 李殿吉・梶秀樹：拡張最遅避難モデルに基づく避難誘導からみた避難計画の評価，都市計画（No. 77），pp72-77，日本都市計画学会，1992
- 4) 金井淳子・梶秀樹：自主防災組織の初期消火活動能力評価に関する研究，大震火災における消火器による消火活動を想定したシミュレーション，日本建築学会計画系論文集（第552号），pp207-213，日本建築学会，2002
- 5) Dial and et.al.: A Computational Analysis of Alternative Algorithms and Labeling Techniques for Finding Shortest Path Trees, Networks, Vol.9, pp. 215-428, 1979
- 6) 日本建築学会編：建築都市計画のためのモデル分析の手法，井上書院，1992
- 7) 土木学会編：交通需要予測ハンドブック，技報堂出版，1981
- 9) 酒井善則・植松友彦：情報通信ネットワーク，昭晃堂，1999

(原稿受付 2002.6.3)