

DIG への適用を目的としたマルチエージェント避難行動
シミュレータの試験的開発

豊橋技術科学大学 2009 年度卒業論文

建設工学課程

大貝彰都市地域計画研究室

前地 一輝

目 次

第 1 章	序論	2
1-1	研究背景・目的	3
1-2	対象地区	5
1-3	研究の流れ	6
第 2 章	モデル開発	7
2-1	エージェントの種類	10
2-2	建物倒壊による道路閉塞モデル	12
2-3	風向と風速を考慮した延焼モデル	17
2-4	避難モデル	29
2-5	インターフェース	31
2-6	ビジュアル面における改良点	32
第 3 章	実証実験	35
3-1	アンケート調査方法	36
3-2	アンケート調査結果	37
第 4 章	結論	39
4-1	まとめ	40
4-2	今後の課題	42

☐ 参考文献

☐ 付録

☐ 謝辞

第 1 章 序論



1-1 研究背景と目的

防災まちづくりワークショップ (WS) の必要性

我が国は地震によって様々な被害を経験してきたが、密集した老朽木造建物のような、避難や消火活動、救出救護の困難性や延焼危険性を持つ市街地が未だ数多く存在しており、こうした市街地の安全確保が課題である。この課題解決へのアプローチの一つとして、地域住民と行政・専門家等が協働で建物や道路、空地、水利等のハード整備に取り組み、地域の物的防災性能の向上を図る。一方で、地域住民の防災意識啓発や防災訓練、自主防災組織の活性化等のソフト面の取り組みを進めるといったように、ハード・ソフト両面からの対策により災害に強い安心・安全のまちづくりを推進する「防災まちづくり」が求められており、近年全国的に取り組まれている。

この防災まちづくり推進のためには、地域住民と行政が地域の災害危険性を十分に理解し、防災まちづくりに関する共通認識を持ち、地域住民が主体的かつ継続的に防災まちづくりに取り組んでいくことが重要である。そして、市街地整備等の防災対策を実施した場合、地域の災害危険性がどのように改善されるかといった情報等を基に、防災対策について話し合い、対策をまとめ具体的な防災対策に取り組むと考えられる。このための1つの手法として近年「防災まちづくりワークショップ (WS)」が注目されており、現在全国各地で取り組まれている。

Disaster Imagination Game(災害図上訓練・以下 DIG)への注目

この WS に参加する住民は専門的知識を持たない場合が多いため、具体的な議論は難しいと考えられる。そのために、誰でも企画・運営できる参加型の簡単な手法として近年 DIG が WS にて用いられている。DIG とは、Disaster (災害) Imagination (想像力) Game (ゲーム) の略であり、1997 年 3 月に三重県津市で行われた災害救援ワークショップにおいて、自衛隊の指揮所演習をアレンジしたものである。地域での災害発生を想定し、グループで地図上に市街地や災害の状況・その対応策を書きこみながらイメージトレーニングを行う図上訓練で、地域防災力の向上に向けた取り組みとして広がりつつある。

DIG の課題 1-1)

DIG では、地図上で行う訓練のため、時間経過とともに拡大する延焼のような常に変化し続ける災害状況や地震の条件によって毎回状況が異なる建物倒壊とそれに伴う道路閉塞、あるいは風向・風速等といった自然条件を考慮することが困難であると考えられる。

シミュレーションツールの必要性

以上より、刻々と状況が変わる被災地において“どこが”“どのように”危険かといったことをリアルタイムで視覚的にわかりやすく住民に情報提供可能なシミュレーションモデルがあれば DIG における有用なツールとなり得ると考えられる。また、実際に災害が起こった場合の避難行動の想定や、ハード・ソフト整備等の課題整理、意識啓発といった面において通常の DIG よりも積極的な議論が期待される。

以上を踏まえて、本研究では住民にわかりやすいシミュレーションモデルの構築を目的として、DIG の際に避難行動をシミュレーションできるようなツールの試験的開発を試みる。

1-2 対象地区

対象地区は愛知県豊橋市の山田地区である。同地区は平成 16～18 年に行われた「防災まちづくり推進のためのアクションプランニング手法の調査研究」で、地元住民との共同で防災まちづくりの取り組みを実践していくエリアとして設定された「飽海地区」、「山田地区」、「梅藪地区」、「菰口地区」の 4 地区のうちの 1 地区である。高師石塚町、山田町、山田一番町、山田二番町、小松町の 5 つの自治体から構成されており、面積 60.3ha、人口 3,598 人と 4 地区中最も大規模な地区である。地区を 4 分割するように主要道路が通っており、南側の小松町や山田二番町は既に整備も始まっている。しかし、北西部は整備が行われていない。これは対象エリア内に高師石塚町と山田町の 2 自治会が含まれているからである。高師石塚町は物理的災害危険性の高いエリアであるが、山田町は都市基盤整備等が行われており物理的災害危険性はそれほど高くない。ハード面の問題を抱える高師石塚町とそれほど問題を抱えていない山田町の 2 つの自治会で防災まちづくりの取り組みを検討した結果、両自治会の課題の共有が難しく、どちらの地区にも共通した内容に取り組まざるを得ないため、結果的に一般的な防災まちづくりの取り組みとなってしまう、的確な取り組みが行われなかった。このような背景から、本研究では対象エリアを山田地区北西部(図 1-2)とし、モデル作成にあたった。



図 1-1 対象地区



図 1-2 対象地区_拡大

1-3 研究の流れ

本研究の流れを図 1-3 に示す。まずモデル開発にあたり、既往研究から必要とされる知見を得る。そして DIG を想定した場合、住民にとって必要と思われる機能や情報を検討し、これをシミュレーションモデルに組み込み実際の DIG で使用を試みる。その効果についてはアンケート調査から評価・分析し、今後の課題を抽出する。

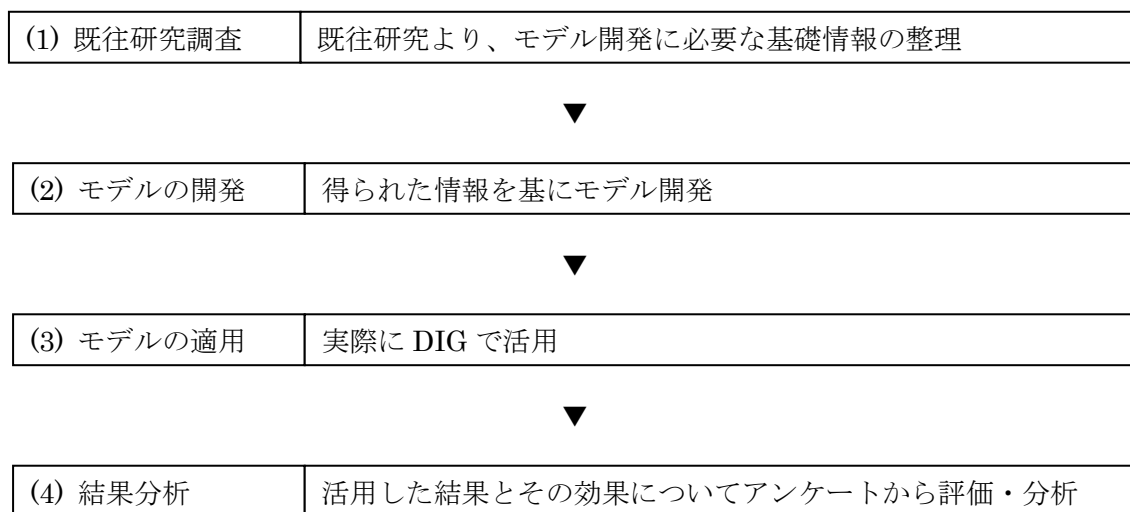


図 1-3 研究の流れ

第 2 章 モデル開発



より効果的な意識啓発や有効な情報提供を目指すのであれば、現実の現象をより忠実に、そしてビジュアルでダイナミックに再現可能なモデルを開発することが望ましい。

このようなモデル開発の手法の一つとして、人工社会という社会現象の分析や理解にとって極めて有望で、欧米の社会科学の学会などでも注目されているマルチエージェントシミュレータの活用が考えられる。

MAS の概要

本研究で使用する **MAS** とは、自立した個々の主体が多数集まって、相互に依存しあう影響を見ることができるシステムである。このシステムは、「エージェント」と「環境」から構成されており、「エージェント」は自立主体の行動モデルで、「環境」は「エージェント」が知覚したり行動したりする際に影響を与える対象地区のモデルである。

エージェントはユーザーの設定に基づいて行動し、ユーザーの代わりにシミュレーション上で自律的に行動をしてくれる。このエージェントが複数いると、エージェント同士が影響し合って、単体では見られなかった行動を起こす。また、これらは個々に様々な目的から行動を起こしているので、シミュレーション内でのエージェントをミクロで見た場合はそれぞれ異なった行動が見られるが、マクロで見た場合は何らかの法則性を見ることができる。つまり、エージェントに人間の行動規則を与えることで、予測することの難しい人間の行動をマクロ視点で見ることが可能となる。また、エージェントや環境の設定を変化させることによって現実の空間との比較が可能となるシステムである。

避難者をエージェント、周辺の空間を環境としてモデル化することで、環境が避難行動に及ぼす影響を把握することができると考えられる。そこで本研究では、本研究室で開発した、**MAS** を用いた「消火活動モデル」²⁾をベースに「風向・風速を考慮した延焼」と「建物倒壊による道路閉塞」を想定した「避難行動モデル」を開発する。

モデル改良と開発

DIG では、大規模災害を想定して議論が進められる。大規模災害では、避難活動を阻害すると思われる火災の延焼と建物倒壊に伴う道路閉塞が想定されるが、刻々と被害状況が変わる市街地の様子は住民には予想しづらい。リアルタイムで変化を見ることができるシミュレーションを用いることで、実際に災害が起こった場合の避難行動や市街地の整備などの課題整理、意識啓発といった面においては通常の DIG よりも積極的な議論が期待できるのではないかと考えられるため、これを考慮したモデル開発を試みる。

以上を踏まえ、本研究では火災がもたらす延焼モデルと建物倒壊に伴う道路閉塞モデルの開発を行う。筆者の研究室で一昨年に開発された災害時の消火活動モデル²⁻¹⁾をベースに延焼モデルと道路閉塞モデルを追加して避難行動モデルに改良する。

本研究では地震発生後、建物が倒壊し一部の道路を閉塞させ、火災が発生する。そして延焼が進む中、消火活動に向かう住民と避難活動を行う住民に分かれるまでの流れを以下のフロー（図 2-2）のように考える。

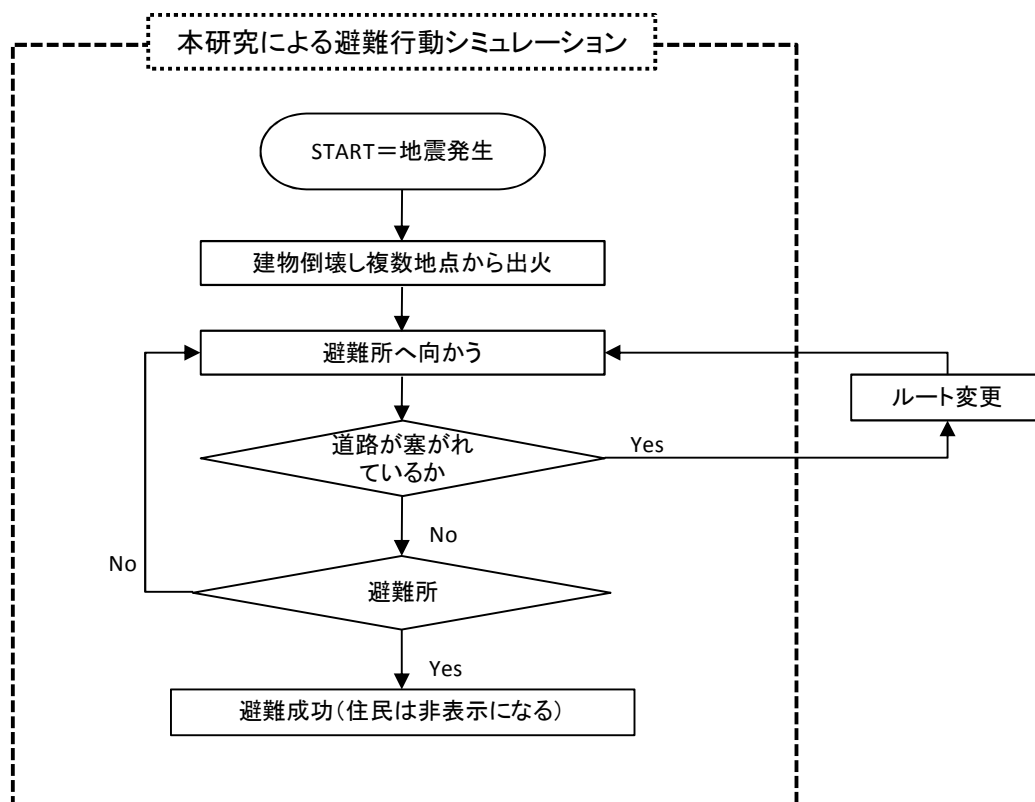


図 2-2 初期避難活動のフロー図

2-1 エージェントの種類

対象地区を構成するエージェントの種類は下記の表 2-1 に示す 6 種類であり、その使用例を図 2-3 に表す。

表 2-1 エージェントの種類

No	エージェント
1	市街地
2	住民
3	火点
4	消火器
5	瓦礫
6	一時避難地

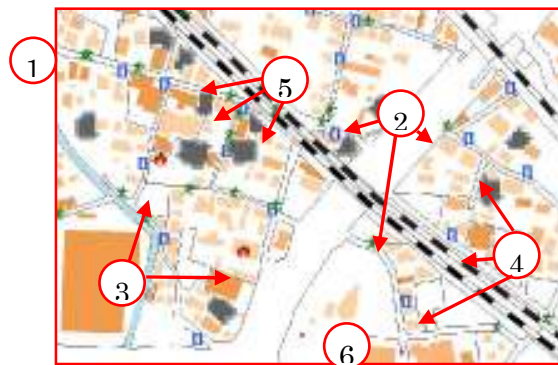


図 2-3 エージェントの例

1. 市街地

空間を構成するに当たり 2 次元格子モデルを採用した。1 つの格子を 1 セルと呼び複数集まったものをメッシュという。本モデルでは 1 セルを 3m×3m に設定し、このセルの集合で市街地を表現している。セルの 1 つ 1 つが市街地エージェントであり、それぞれに木造建物、防火木造建物、耐火造建物（RC 造・S 造）、空地、道路、線路、水路、地区外の 8 種類の属性が与えられており、これにより市街地が形成されている。

対象となるエリアが山田地区北西部 450m×372m の範囲であることから、このエリアは 18600 個（150 個×124 個）のセルで構成されているということになる。

2. 住民

住民エージェントは市街地を移動し、消火活動と避難活動を行う。住民には歩行速度、消火器を保持しているかどうか、目的地がどこか等を属性として持たせている。そして住民は道路上のみを移動し、（例外として、消火活動の場合は建物内への侵入を可能とした）また住民の人数は DIG の当初参加予定人数である 40 名とした。

3. 火点

着火前の状態から建物に着火し着火状態となり、燃焼状態を経て鎮火状態へと変化する 4 つの状態と、消火活動による鎮火状態で全 5 つの状態に変化する。火点は風向・風速に影響を受け、木造、防火木造の建物に延焼する。

4. 消火器

山田地区の防災点検マップ²⁻²⁾より、実際配置されている場所に配置した。対象地区内には 29 本の消火器が設置されており、消火器は最も消火能力の高いものとする。

5. 瓦礫

市街地エージェントが建物倒壊、瓦礫流出を判定すると現れる。瓦礫の上を住民エージェントは歩けず瓦礫を避け、道路全体に瓦礫が流出すると閉塞され住民エージェントは通行不可となる。

6. 近隣退避場所

本研究では愛知県豊橋市の山田地区北西部の市街地を再現した。一次避難地は南西に位置する栄小学校内の校区市民館であるが、この地区の住民には遠すぎるため一時避難地として定められている山田公民館に設定した。また、プログラム軽減のためシミュレーション実行時に住民が一時避難地に到達すると、避難完了と意味し住民の表示が消えるようにした。

2-2 建物倒壊による道路閉塞モデル

道路閉塞モデルは筆者の研究室で考案された「行動困難性」²⁻⁴⁾の理論を用いてモデル化を進めた。

(1) 道路閉塞モデル²⁻⁴⁾

建物倒壊可能性

建物倒壊可能性は地震規模と建物被害に関する fragility curve を基に、全壊率 P_r として下記の表 2-2 に示すように設定する。本研究のモデルでは DIG で想定している地震規模と同じ震度 6 強とした。

表 2-2 地震規模に応じた構造別、建築年別全壊率

構造	建築年	震度 6 強	震度 7
木造	～1951	0.55	0.75
	1952～1971	0.45	0.70
	1972～1981	0.20	0.40
	1982～	0.05	0.15
S造	～1971	0.35	0.50
	1972～1981	0.10	0.25
	1982～	0.05	0.10
RC造	～1971	0.10	0.20
	1972～1981	0.05	0.10
	1982～	0.02	0.05

道路側瓦礫流出確率

建物が倒壊すると判定が行われた建物のうち、道路側に瓦礫を流出させる瓦礫流出確率 $P_f[\%]$ は、建蔽率との関係を検討した結果に基づき、下式で求める。

$$P_f = (1.1753 \times B_c - 0.0541) \quad (1)$$

ここで、 B_c は建蔽率を表す。尚、建物一つ一つの建蔽率が不明であったため本研究に於いては 50[%]で全ての建物を一定にしている。プログラム上でこのような計算を行うと計算対象のセルが膨大なため動作速度の遅延を招く要因となる。よって対象セルには既に計算した値のみを付加させる。

瓦礫流出に伴う道路閉塞確率

道路側に瓦礫が流出した時の、各建物前の道路閉塞確率 P_b [%]は、下式で求める。
尚、後述するが本研究では道路閉塞確率： P_b [%]は使用せずに平均瓦礫長： a [m]のみを用いて道路閉塞を表現する。

$$P_b = \text{Exp}\left(-\frac{W_r + W_b - W_t}{a}\right) \quad (2)$$

$$a = 2.58 \times Pr^{0.379} + 0.21 \times \left(\frac{B_r}{B_c}\right)^{2.23} + 4.9 \times (B_c)^{12} \quad (3)$$

ここで、 W_r は道路幅員、 W_b はセットバック幅、 W_t はある移動主体が通行するのに必要な通行可能幅員、 a は平均瓦礫長、 B_r は容積率を表す。

しかし、各建物について容積率のデータを入手することは困難であると考えられるので、下記の表 2-3 に示すように B_r/B_c を設定する。

表 2-3 B_r/B_c の設定値

階層	構造	B_r/B_c
1 階	木造・非木造	1
2 階	木造	1.5
	非木造	2
3階以上	木造・非木造	階層数

(2) MAS に適用した建物倒壊による道路閉塞モデル

建物倒壊によるモデルのフロー

本モデルは地震発生直後の地震による建物倒壊を表したモデルである。Step:1 から Step:3 までの工程を経て、災害直後の市街地が再現される。モデルのフローを図 2-4 に示す。

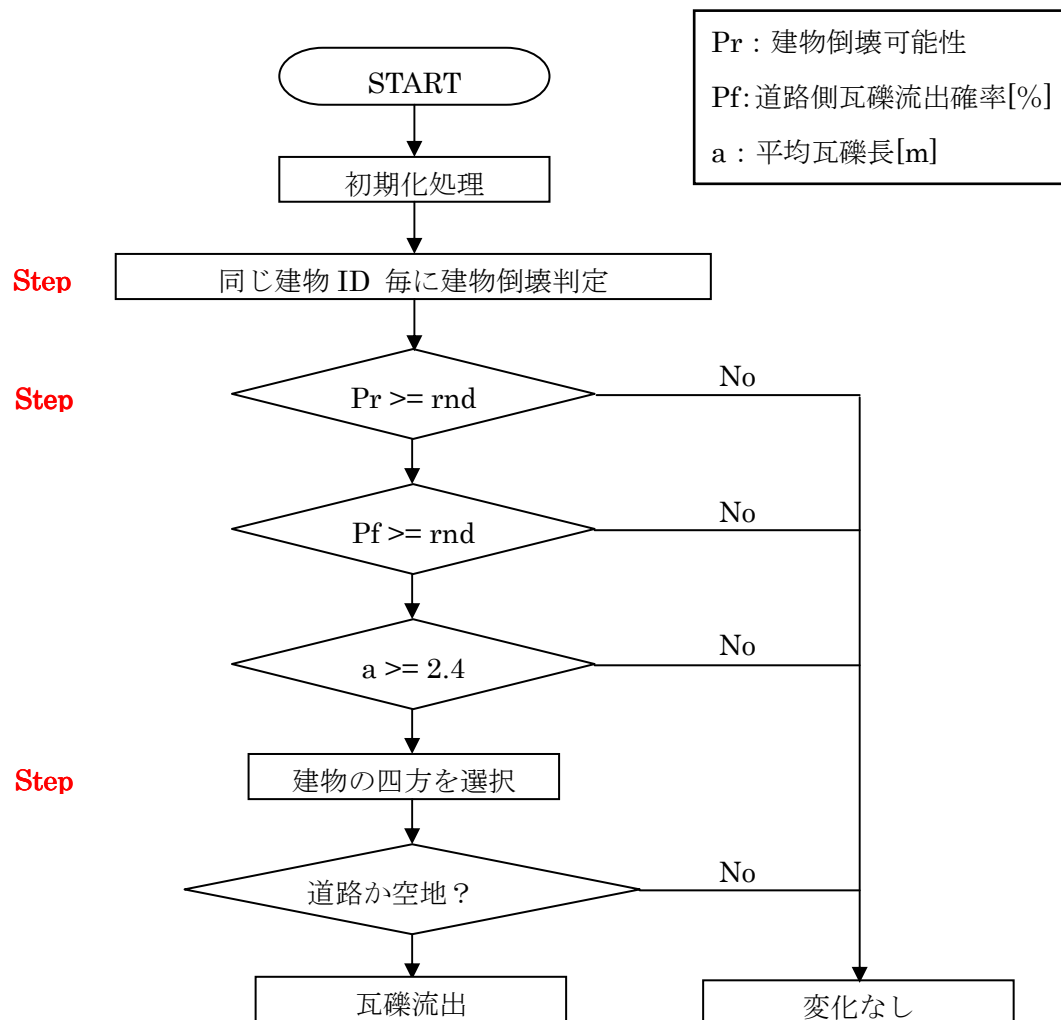


図 2-4 建物倒壊と道路閉塞のフロー図

Step:1

市街地エージェントに与えられた建物 ID から建物属性を持つセルのみを選択して表 2-2 から求められた Pr より建物倒壊判定を行う。同じ建物を含むセルには同じ建物 ID が振られており、建物には全て違う建物 ID が振られている (図 2-5)。これより、同一建物 ID における建物倒壊可能性や道路側瓦礫流出確率、平均瓦礫長等は全て同じ数値が適用される。

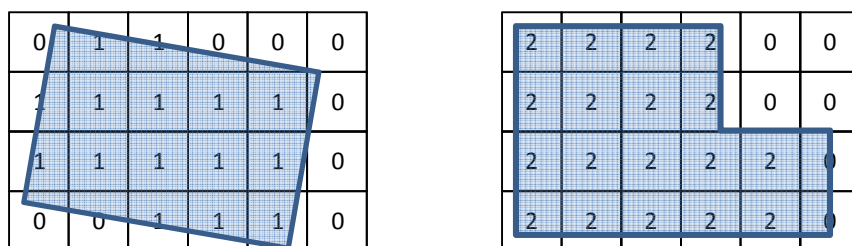


図 2-5 建物 ID の振り分けについて

Step:2

Step:1 で倒壊すると判定された建物は道路側に瓦礫が流出するかどうかを判定式 (1) より行う。本モデルはセル単位で判定を行っているため、瓦礫流出すると判定された建物は式 (2) 道路閉塞確率: P_b を使用せず、式 (3) 平均瓦礫長: a を用いて判定を行う。避難時の歩行者通行可能幅を $0.6[m]$ と設定した時、平均瓦礫長: $a > 2.4 [m]$ が成り立つと瓦礫流出と判定され 1 セル分が流出表記に変わる (図 2-6)。

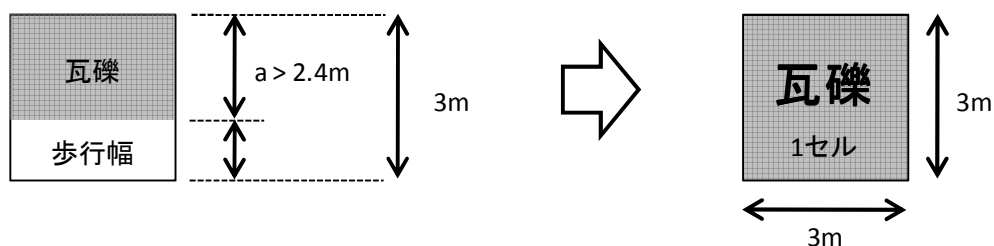


図 2-6 瓦礫流出による道路閉塞

Step:3

瓦礫が流出すると判定されたセルの辺に隣接する 4 つのセルを選択する。そのセルが道路もしくは空地であれば瓦礫流出となり、建物の場合は、瓦礫流出は阻止されると想定し視覚上の変化は見られない（図 2-7）。

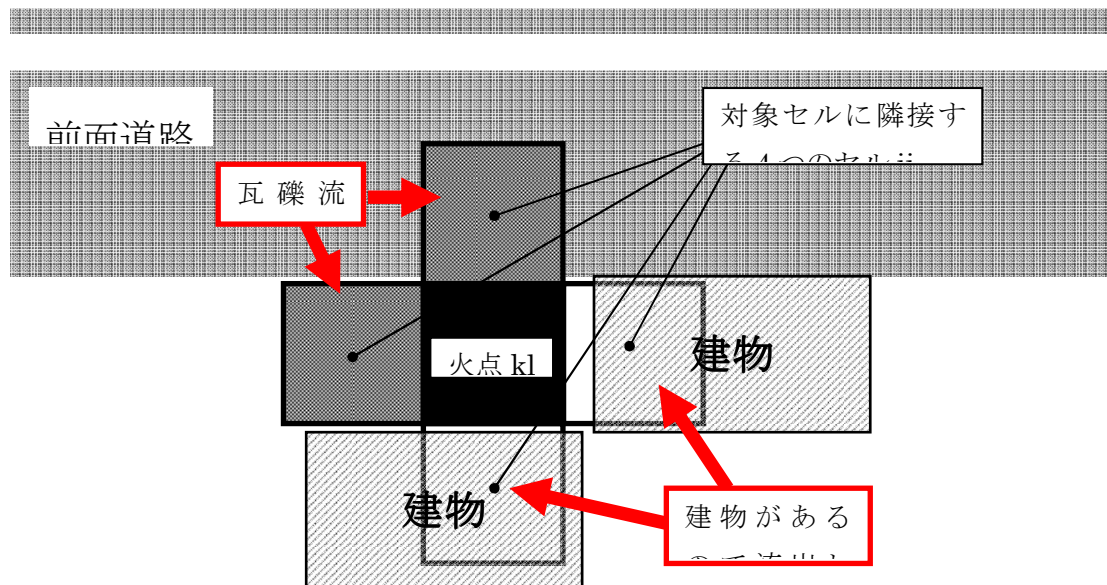


図 2-7 対象セルに隣接する 4 つのセル

2-3 風向と風速を考慮した延焼モデル

風向と風速を考慮した延焼モデルは筆者の研究室で考案された「延焼モデル」²⁻⁵⁾の理論を用いてモデル化を進めた。

(1) 延焼モデル²⁻⁵⁾

延焼の要素

延焼の要素として建物条件、気象条件、市街地条件の3つの要素を考慮することとした。建物構造、床面積、建物高さを含む建物条件は、建物の燃えやすさ関係する要因である。風向、風速を含む気象条件は、延焼の方向、範囲、延焼のしやすさに関係する。そして、空地、道路、建物隣棟間隔を含む市街地条件は、延焼の抑制に関係する。

モデルの近傍型

モデルで用いる近傍型タイプを図2-8に示す。セルklは延焼の基になるセル（火元となるセル）である。そして、セルijは延焼を受ける近傍セルである。風速が早いほど近傍の範囲は広く設定される。

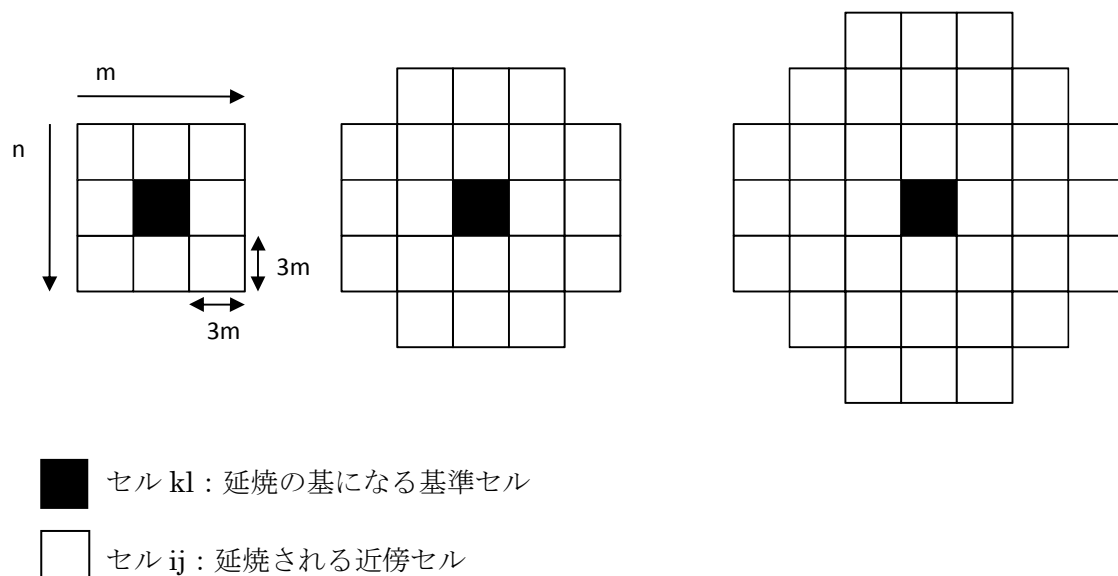


図 2-8 モデルの近傍型

セルの状態

あるセル mn の状態 n_{mn} は下記の表 2-4 のとおり設定した。状態[1]のセルはまだ燃えていない状態であるが、燃える可能性を持った状態である。状態[1]のセルは一度着火すると状態[2]に変化する。そして着火後経過時間に従って、セルの状態は状態[2]から他のセルに延焼する能力を持った燃焼中状態の状態[3]へ変化する。そして延焼する能力を持たない自然鎮火状態の状態[4]に変化する。状態[5]は住民の消火活動によって鎮火した状態を表す。

表 2-4 セル mn の状態 n_{mn} の変化

表現	意味
状態[1] ($n_{mn}=1$)	燃えていないセル＝火がつく可能性がある
状態[2] ($n_{mn}=2$)	着火＝火がついたばかりで延焼に至らない
状態[3] ($n_{mn}=3$)	燃焼中＝延焼する能力を有する
状態[4] ($n_{mn}=4$)	延焼最盛期終了＝延焼する能力を持たない鎮火状態
状態[5] ($n_{mn}=5$)	消火活動によって鎮火＝延焼する能力を持たない鎮火状態

延焼可能性指標 F_{ij}

セル : ij の状態[1]から状態[2]への変化の判定では、延焼判定指標 : F_{ij} を用いる式 (4) は

$$F_{ij} = (Pw_{ij} \times St_{ij}) \times WDIR_{ij} \times p(t_{ckl}) \quad [0 \leq F_{ij} \leq 1] \quad (4)$$

Pw_{ij} はセル ij 内における木造と防火木造建築物の面積比率であり、セル自身の燃えやすさを表している。本研究の対象は木造密集市街地であるが、市街地における建物すべてが木造と設定するのは非現実的である。そのため Pw_{ij} は、木造建築物ならば 0.5～1、防火木造建築物ならば 0.25～0.75、耐火造建築物ならば 0.5 未満の値をそれぞれのセルに与え、着火しやすいセル、着火しにくいセルを表現した。

構造別パラメータ St_{ij} は、建物の燃えやすさを表すパラメータである。木造建築物は延焼される危険性が極めて高いことから 1 に設定。防火木造建築物は壁や屋根は燃えにくい、開口部から延焼する危険性があり、密集市街地を想定しているためさらに延焼の危険性は高まるとして木造の半分以上で 0.6 とした。耐火造建築物については不燃と仮定しているので 0 である。

WDIR_{ij}は、風向と風速から決まるパラメータであり、後述する値を代入する。

p(t_{ckl})は延焼中セル kl が持つ延焼加害能力である。

燃焼中セル kl が持つ延焼加害能力p(t_{ckl})

延焼加害能力は、着火したセルが徐々に火の勢いを強めていき、周囲に延焼していく。やがて火の勢いが弱まり鎮火に至るというプロセスになると考えられる。

そこで、あるセルが「着火してから他のセルに燃え移ることができるような延焼加害能力を持ち始める時間」と、「延焼加害能力を持った状態から自然鎮火するに至るまでの時間」を表す関数を設定し、これを延焼中セル自身が持つ延焼能力パラメータp(t_c)として延焼判定指標 F_{ij}の中に取り入れることにした。

上記のような、時間によって延焼能力が変化する一次関数式を式 (5) と図 2-9 に示す。

$$p(t_{ckl}) = \begin{cases} \frac{4.0}{t_2 - t_1} \times t_{ckl} + \frac{0.2 \times t_2 - 4.2 \times t_1}{t_2 - t_1} & [t_1 \leq t_{ckl} \leq \frac{t_2 - t_1}{5} + t_1] \\ \frac{5.0}{4 \times (t_2 - t_1)} \times (-t_{ckl} + t_2) & [\frac{t_2 - t_1}{5} + t_1 \leq t_{ckl} \leq t_2] \end{cases} \quad (5)$$

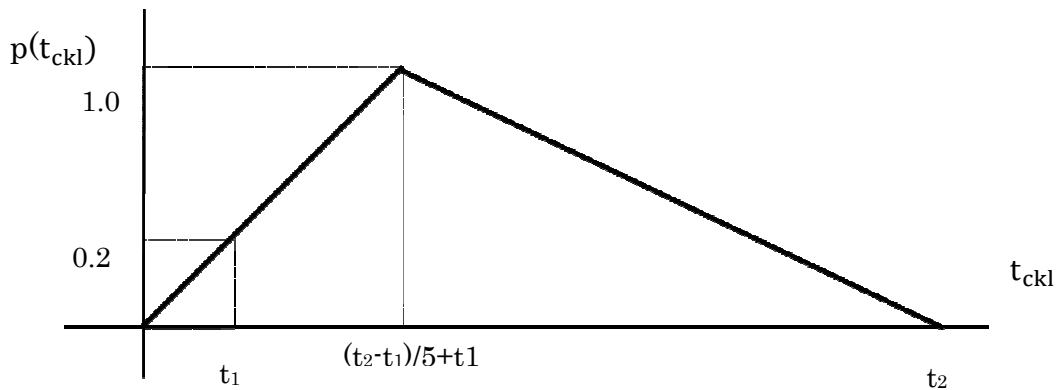


図 2-9 燃焼中セル kl が持つ延焼加害能力p(t_{ckl})

ここで、t_{ckl}[s]はセル kl の着火後経過時間である。t₁[s]は延焼中セルが延焼加害性を持ち始める時間で、t₂[s]は延焼中セルが延焼加害性を失くす(自然鎮火する)までの時間を表し、後述する固定値を用いる。

延焼中セルが延焼加害性を持ち始める時間：t₁

t₁は本来、風速によって全て異なる値が適応される。表 2-5 は風速が変化した場合の火元の着火から隣家に着火するまでの時間である。この結果を踏まえて、本モデルでは最も延焼の危険性が高いと考えられる風速 9[m/s]で風下の場合の着火から隣家に着火するまでの時間である 2.2[min]を t₁に採用した。尚、式[5]は単位を[min]としているのでシミュレーションに小数点以下は切り捨て、全てのセルの t₁を 2[min] に設定した。

表 2-5 風速が変化した場合の火元の着火から隣家に着火するまでの時間

風速 [m/s]	火下の火元の着火から隣家に着火するまでの時間[min]	風上の火元の着火から隣家に着火するまでの時間[min]	風邪側の火元の着火から隣家に着火するまでの時間[min]
0	4.1	4.1	4.1
1	3.8	4.1	4.1
2	3.4	4.1	4.0
3	3.2	4.1	3.9
4	2.9	4.0	3.8
5	2.8	3.9	3.7
6	2.6	3.8	3.5
7	2.4	3.8	3.3
8	2.3	3.7	3.1
9	2.2	3.5	2.9

延焼中セルが延焼加害性を失くす（鎮火する）までの時間：t₂

t₂[min]は式 (6) によって求められる。

$$t_2 = \frac{\left(\frac{w}{5.5}\right)}{A_w} \times \frac{\sqrt{H}}{A_f} \quad (6)$$

ここで、w：火災荷重[kg/m²]、A_w：開口部面積[m²]、A_f：床面積[m²]、H：高さ[m]を表す。

t₂はA_fによって大きく影響を受けるが本シミュレーションは3m×3mのセルサイズとしているので9[m²]として扱い、wは木造の積載火災荷重：30[kg/m²]+木造の固定火災荷重：79[kg/m²]=109[kg/m²]とした。Hは一般的に木造密集市街地では2階建ての建物が多いのでこれを用いて6[m]、A_wは(建物周囲長さ)×(建物高さ)×0.1[m²]と設定し、12×6×0.1=7.2[m²]となる。以上を式(6)に当てはめると、t₂=10.11[min]となり、t₁と同様に小数点以下を切り捨て、10[min]とした。

風向と風速を表すパラメータ $WDIR_{ij}$ について

風向と風速は、火災延焼の規模と方向に大きく関係する。浜田の延焼速度式²⁻⁵⁾より、表 2-6 に建物一変長を 3[m]、隣棟間隔は最も延焼の危険が高い場合を想定して 0[m]に設定した場合の計算結果を載せる。

表 2-6 建物一変長 3[m]隣等間隔 0[m]の時の風下・風上・風側の延焼限界距離

風速[m/s]	風下延焼限界距離[m]	風上延焼限界距離[m]	風側延焼限界距離[m]
0	5.75	5.75	5.75
1	6.33	5.98	6.04
2	6.90	6.21	6.33
3	7.48	6.44	6.61
4	8.05	6.67	6.90
5	8.63	6.90	7.19
6	9.20	7.13	7.48
7	9.78	7.36	7.76
8	10.35	7.59	8.05
9	10.93	7.82	8.34

図 2-10～図 2-15 に各風向・風速を考慮した時の WDIR 設定値と近傍型モデルを示す。

風速 0[m/s]の時の WDIR 設定

表 2-6 より、風下・風上・風側の延焼限界距離が 5.75[m]であることから、2 セル分の 6[m]を越えないことが分かる。そこで近傍を図 2-10 のように設定した。風速 0[m/s]は無風状態を意味するため風向による影響は考えない。よってどの方向に延焼するかも不確定なため WDIR_{ij} を 0.5 に設定した。

0.50	0.50	0.50
0.50		0.50
0.50	0.50	0.50

図 2-10 風速：0 [m/s]の場合の WDIR パラメータ

風速 1[m/s]の時の WDIR 設定

表 2-6 より、風下・風上・風側の延焼限界距離がそれぞれ 6.33[m]、5.98[m]、6.04[m]であることから、近傍を図 2-11 のように上下左右に 1 セル分増やした。風速 1[m/s]程度では風向がどこであっても周囲に与えるほどの影響はないとされ、風向による差をつけていない。また、基準セルから遠いセルはパラメータ値を小さく設定した。

		0.30	0.30	0.30	
0.30	0.50	0.50	0.50	0.30	
0.30	0.50		0.50	0.30	
0.30	0.50	0.50	0.50	0.30	
		0.30	0.30	0.30	

図 2-11 風速：2 [m/s]以上 5 [m/s]以下の場合の WDIR パラメータ

風速：2[m/s]以上 5[m/s]以下の場合の WDIR 設定

表 2-6 より、風下・風上・風側の延焼限界距離の中で最も広いのは 8.63[m]であることから近傍は図 2-13 のようになった。風速が 2[m/s]以上になることで風向の影響が考慮され始める。パラメータは風下側の影響を受けやすくするために数値を上げ、風上側は影響を受けにくくするために数値を下げた。また、この風速以降の風下・風上の延焼限界距離を比較すると、0.69[m]、1.24[m]、1.38[m]、1.73[m]、2.07[m]、2.42[m]、2.76[m]、3.11[m]と次第に大きくなっていることからパラメータの設定値もこれを考慮して大きく設定する。

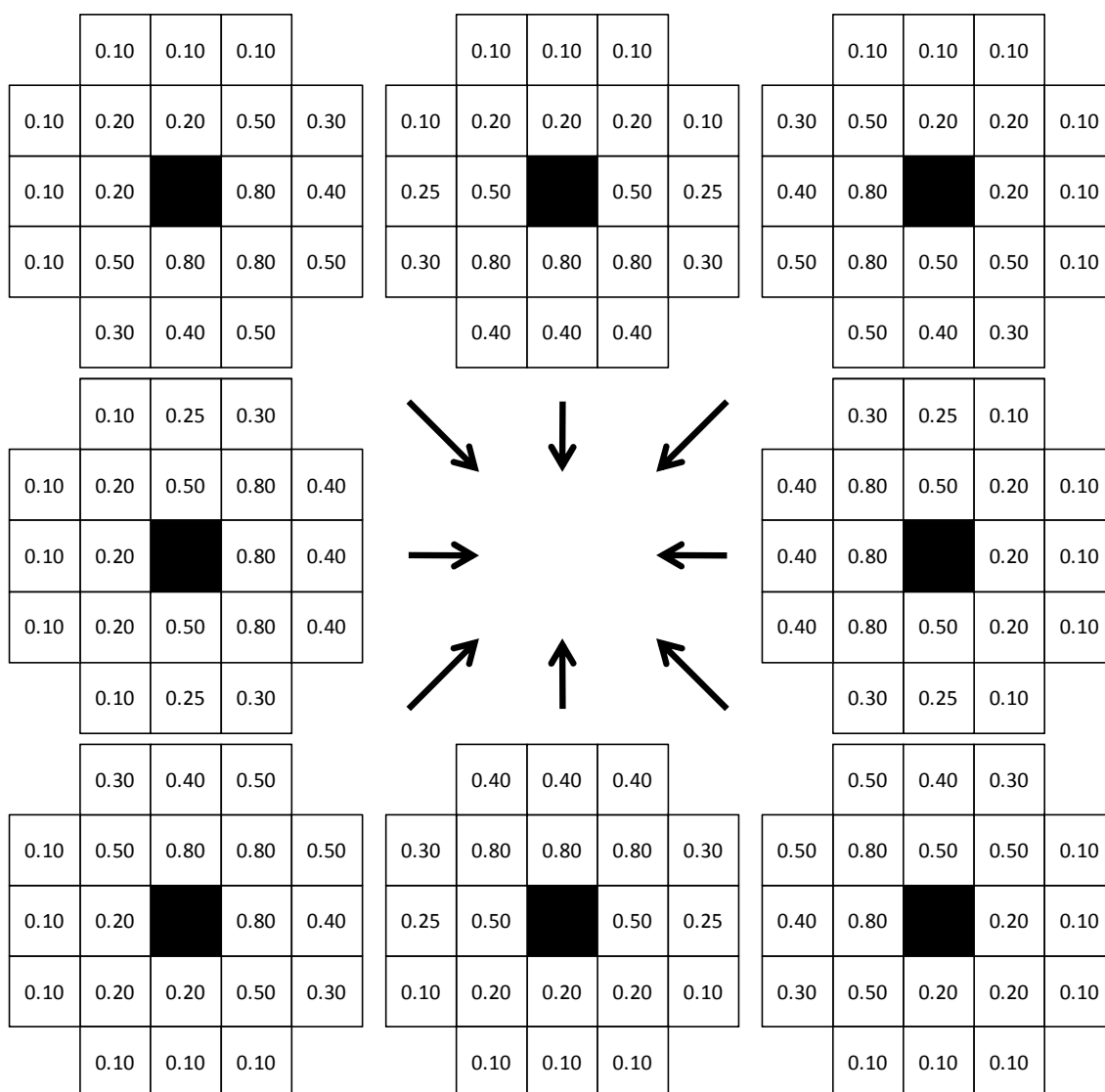


図 2-13 風速：2[m/s]以上 5[m/s]以下の場合の WDIR パラメータ

(※ 風向は上段左から：北西、北、北東、中段左から：西、東、下段左から：南西、南、南東側からの風を意味し、図中の矢印方向に風が吹く)

風速：6[m/s]以上 8[m/s]以下の場合の WDIR 設定

表 2-6 より、風下・風上・風側の延焼限界距離の中で最も広いのは 10.35[m]であることから近傍は図 2-14 のようになった。ここで風速 8[m/s]以下とした理由は風速 8[m/s]以下では延焼速度が非常に小さく、火災拡大の初期の延焼速度であり、風速 8[m/s]を越えると延焼力が大きくなり遠い距離にまで一挙に延焼するためである。よってここでの WDIR_{ij}の風下直下の最大値は 0.8 に設定した。

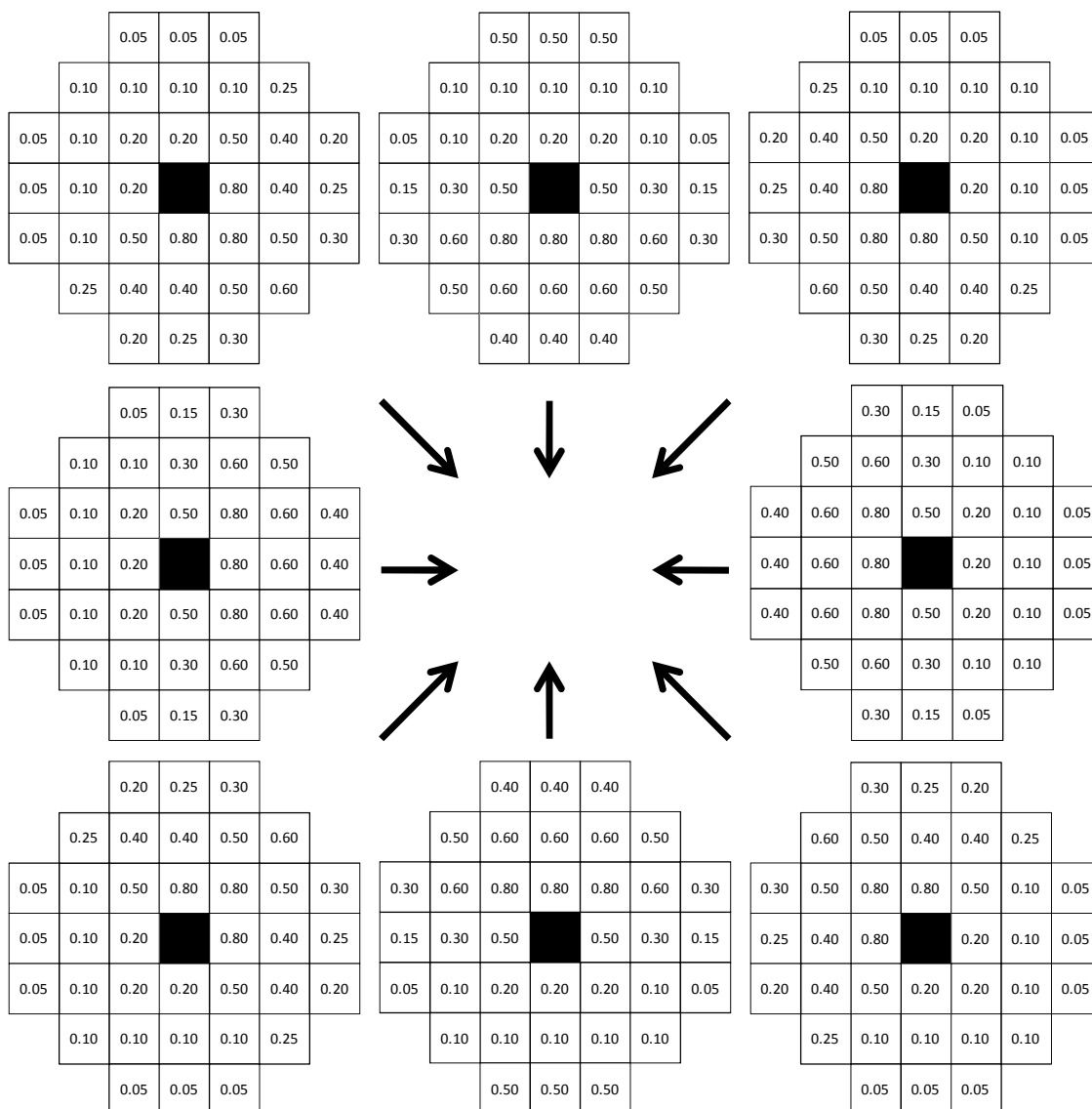


図 2-14 風速：6[m/s]以上 8[m/s]以下の場合の WDIR パラメータ

(※ 風向は上段左から：北西、北、北東、中段左から：西、東、下段左から：南西、南、南東側からの風を意味し、図中の矢印方向に風が吹く)

風速：9[m/s]以上の場合の WDIR 設定

表 2-6 より、風下・風上・風側の延焼限界距離の中で最も広いのは 10.93[m]であることから近傍は図 2-15 のようになった。風速 8[m/s]を越えると延焼力が大きくなることを前項にて述べた。よってここでの $WDIR_{ij}$ の風下直下の最大値を 1 に設定した。

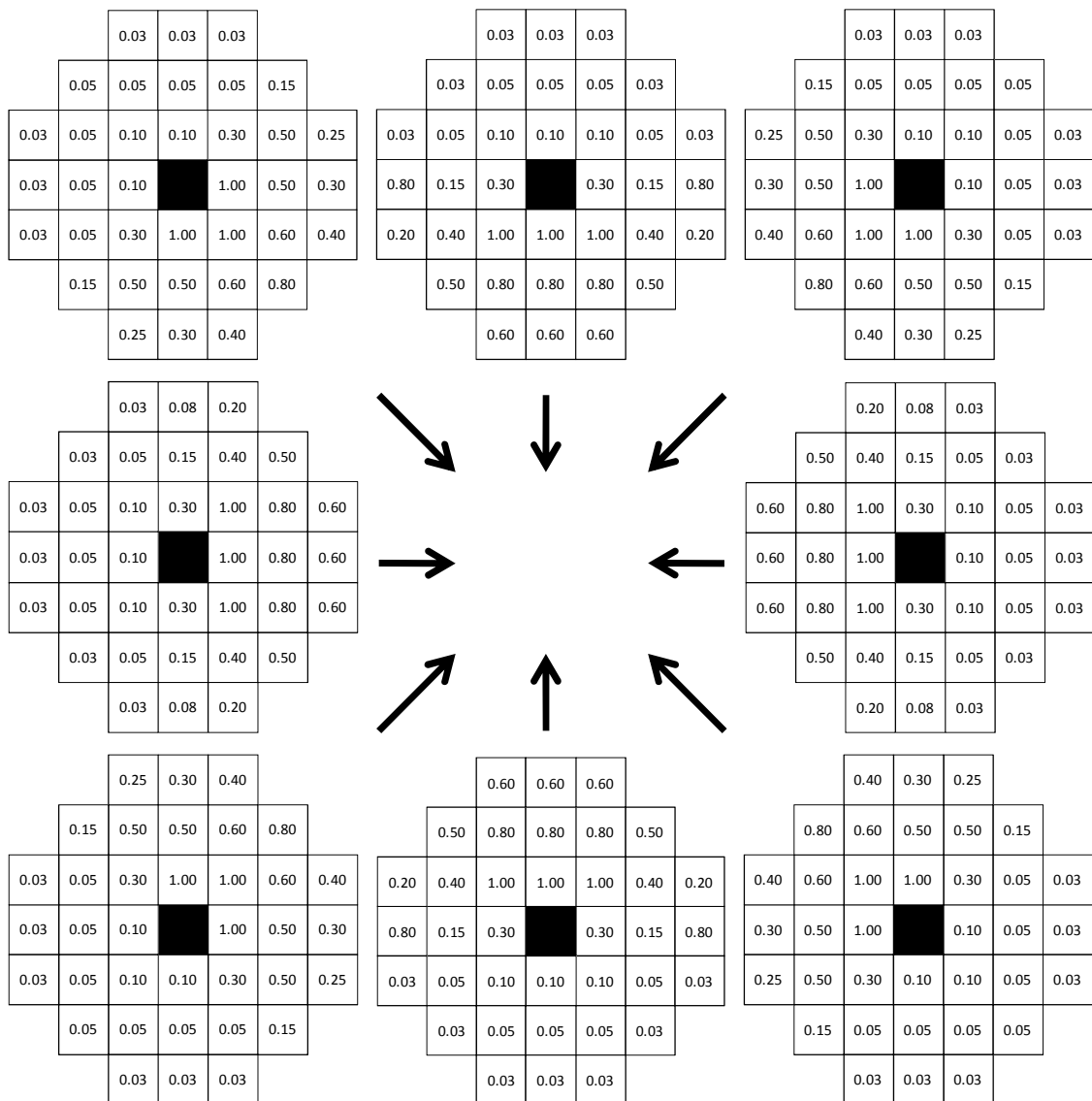
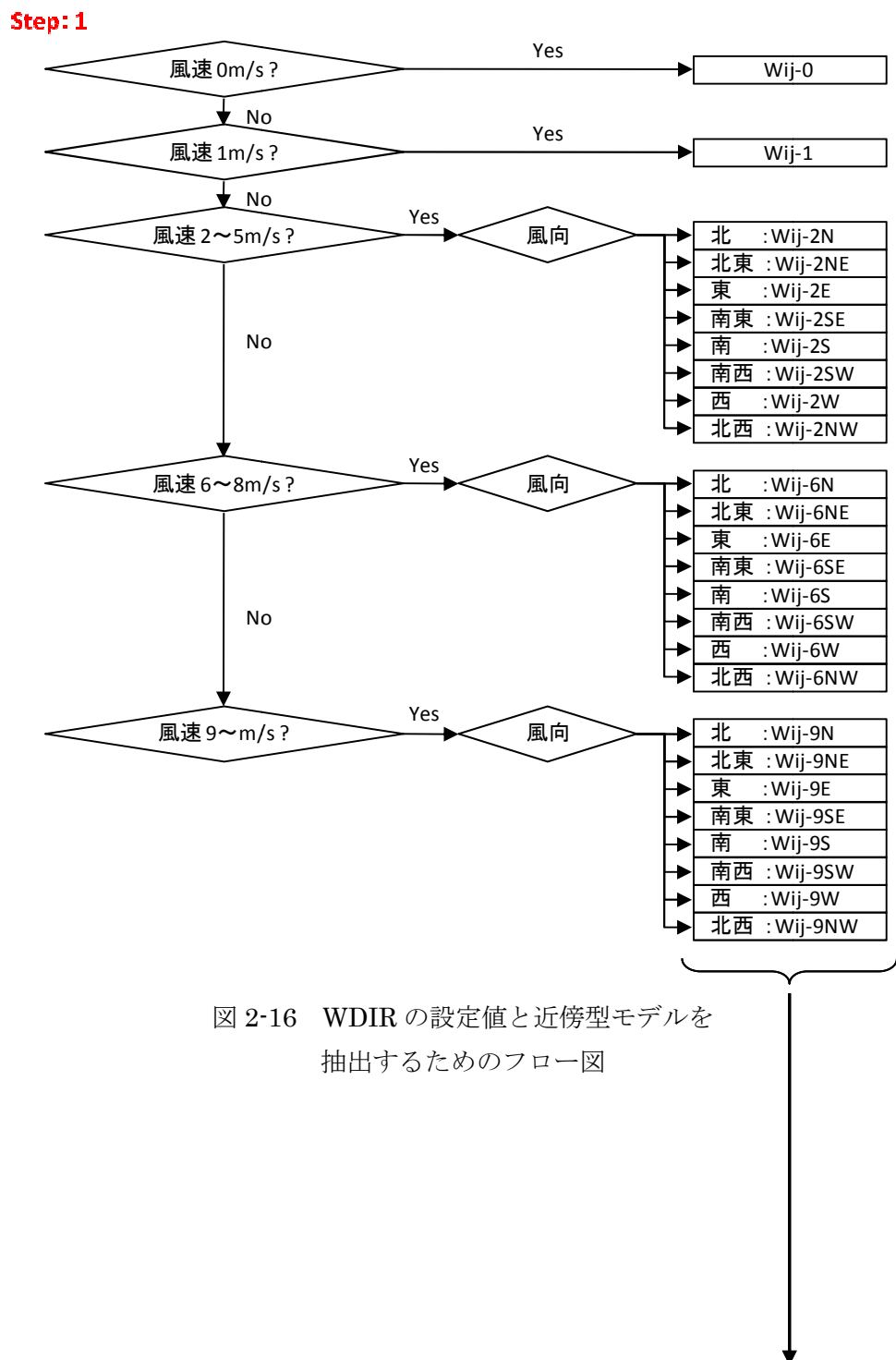


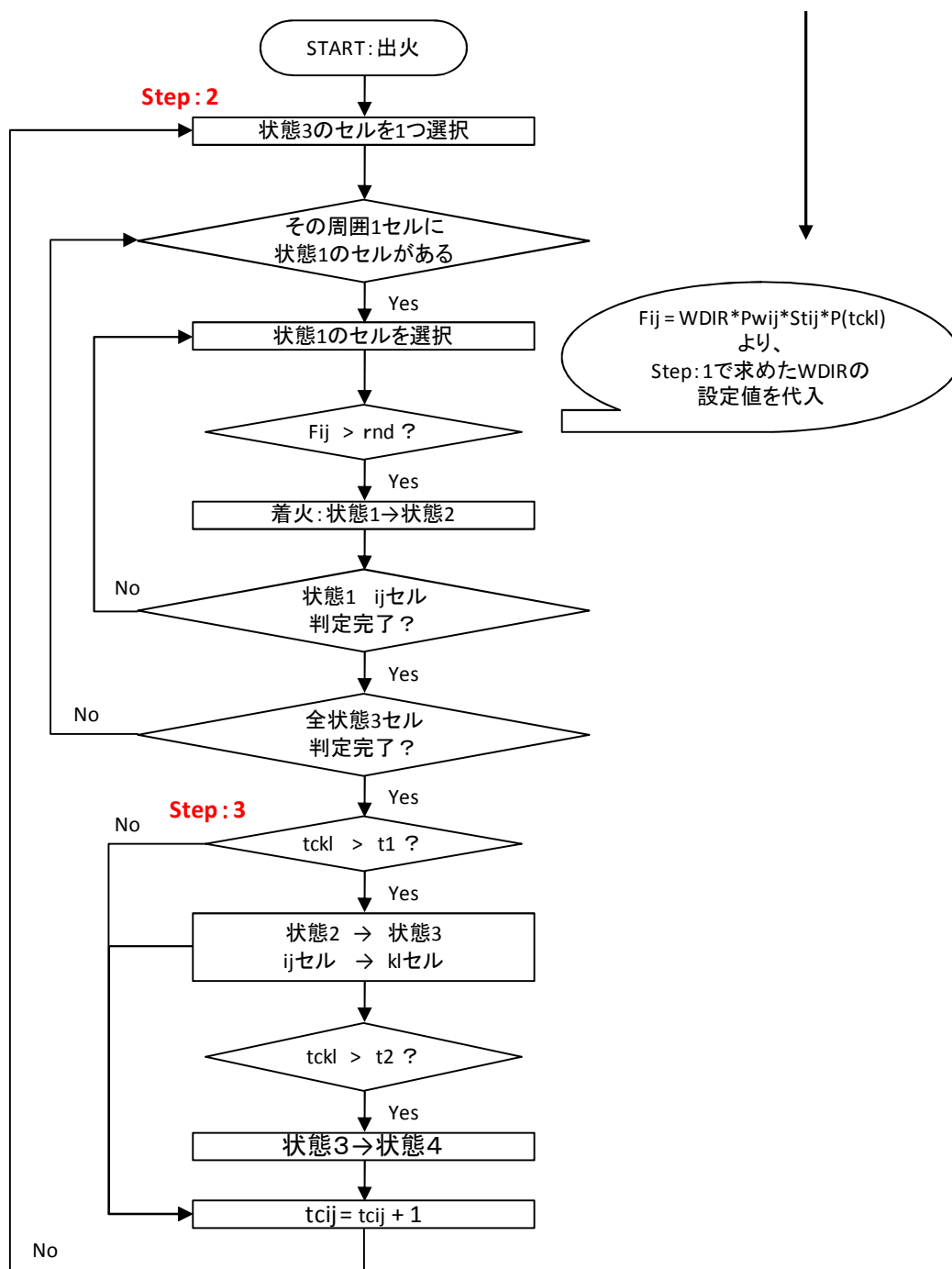
図 2-15 風速：9[m/s]以上の場合の WDIR パラメータ

(※ 風向は上段左から：北西、北、北東、中段左から：西、東、下段左から：南西、南、南東側からの風を意味し、図中の矢印方向に風が吹く)

(2) MAS に適用した延焼モデル

上記と既往研究を基に延焼モデルの流れを組み立てた。フローを以下の図 2-16、図 2-17 に示す。





F_{ij} : ij セルにおける延焼可能性指標、**WDIR** : 風向と府風速から決まるパラメータ、 **P_{wij}** : ij 内における木造と防火木造建築物の面積比率、 **St_{ij}** : 構造別パラメータ、 **$p(tckl)$** : 延焼中セル kl が持つ延焼加害能力、 **$tckl$** : セル kl の着火後経過時間、**ij セル** : 延焼の基になる基準セル、**kl セル** : 延焼される近傍セル

図 2-17 風向風速を考慮した延焼モデルのフロー図

Step : 1

風向・風速を考慮する場合の延焼判定式は風向・風速が変わる度に WDIR の値を変える必要があった。しかし、全てのパターンでの判定式を作るとソース文が非常に長くなり、失敗を招く原因にもなりかねない。よって条件に適した近傍型モデルをあらかじめ特定しておける用な判定式を延焼モデルのソース文より前に組み込んだ。(図 2-16～図 2-17 から適したモデルを選別する作業)

Step : 2

状態 3 のセル kl を 1 つ選択し、周囲 1 セルの中から状態[1]のセル ij をランダムに 1 つ選択し、延焼可能性指標： F_{ij} を用いて延焼判定を行う。 F_{ij} が式 (7) の条件を満たせば状態 2 に変化する。

$$F_{ij} = Pw_{ij} \times St_{ij} \times WDIR_{ij} \times p(t_{ckl}) > rnd \quad (7)$$

ここで、 $WDIR_{ij}$ は Step : 1 で特定された近傍型モデルの設定値を代入したものである。 $p(t_{ckl})$ は延焼の経過時間： $t_{ckl}[s]$ によって式 (5) から求められ、状態[1]から状態[2]になった時点からカウントされ始める。 rnd は F_{ij} の最大値から最小値までをとる乱数である。

Step : 2 の延焼判定はセル kl の近傍セル ij で状態[1]のセルが全て判定されるまで繰り返し、そのプロセスは、状態[3]のセル全てに対して実行される。

Step : 3

状態[2]になると $t_{ckl}[s]$ がカウントされ続ける。 $t_{ckl}[s]$ が $t_1[s]$ に到達すると、状態[2]から状態[3]へ変化し、セル ij からセル kl になる。そして $t_{ckl}[s]$ が $t_2[s]$ に到達すると、状態[3]から状態[4]へと変化する。

2-4 避難モデル

行動モデルとして津波避難シミュレーションモデル²⁻⁶⁾のアルゴリズムを参考に、本研究のモデルとして用いた。

(1) 津波避難シミュレーションモデル²⁻⁶⁾

このモデルは以下の1～3のプロセスを繰り返し実行することで避難を行っている。

図2-18はそのフロー図を抜粋したものである。

1. 自分の位置から目的地までの方向を決定する。
2. その方向に向かって、避難速度に応じた距離だけ離れた場所に障害物がないかを判断する。
3. 障害物があれば、90度向きを変え、その方向に向かって、障害物の有無を判断する。そこにも障害物があれば、90度向きを変え、同様の判断を行う。

このプロセスを繰り返し、避難地に到達すれば終了となる。

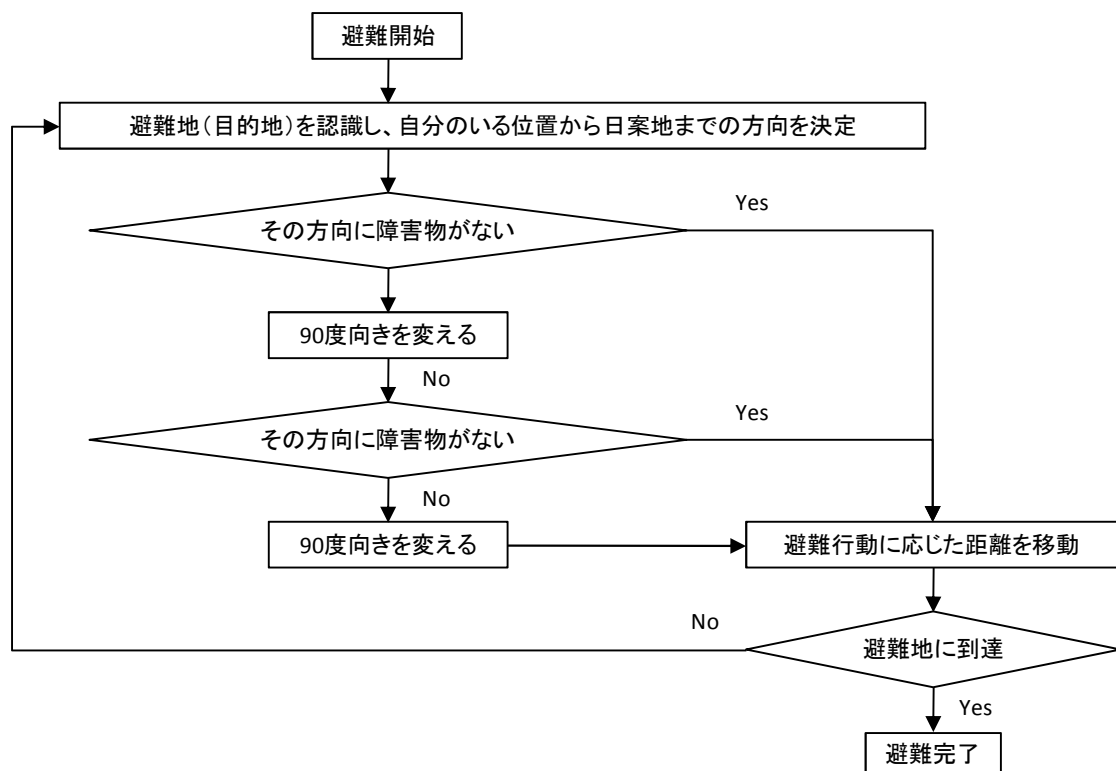


図2-18 津波避難シミュレーションモデルのフロー図

(2) 本研究における避難モデル

このモデルは火災感知時間になると住民エージェントが近隣退避場所を目指して避難行動をするというモデルである。市街地の各所にいる住民エージェントは近隣退避場所との道路上を移動する。歩行速度は火災便覧²⁻⁷⁾より緊急を伴う消火活動のため、一般的に扱われる 1.0[m/s]ではなく、若者の歩行速度の 1.5[m/s]を採用した。

津波避難シミュレーションモデル²⁻⁶⁾より、若干の修正を加えて図 2-19 のようにした。

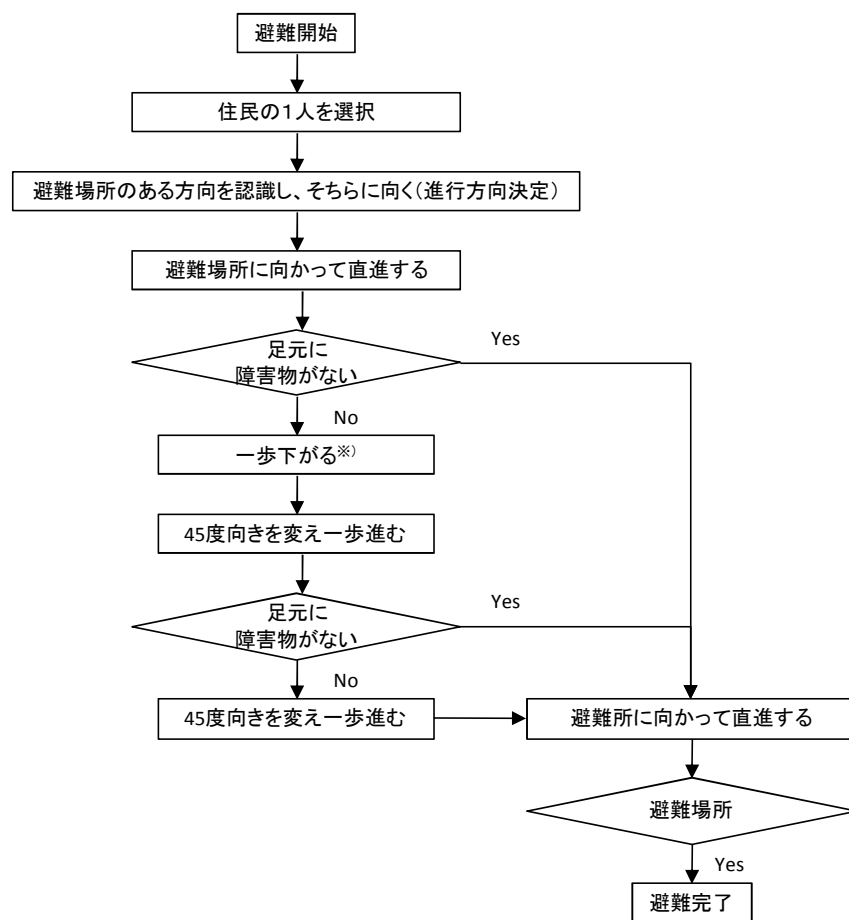


図 2-19 住民の避難フロー図

Step : 1

住民は近隣退避場所方向へ向き道路を無視して最短距離に向けて移動を開始する。

Step : 2

本研究のモデルは住民に「足元を確認し、道路なら進む」という方法で道路を移動させているため、目の前の障害物を認知できず、足元が障害物であれば一步戻るというようになっている。対象エリアである現状市街地には狭隘道路や袋小路といった複雑な道路網となっているため、方向転換の幅を 45 度に変更することで斜め方向の移動を可能にした。

2-5 インターフェース

DIG で活用するにあたって、一般住民には災害による被害状況はその時の環境によって毎回異なるということを理解してもらう必要がある。そのため、その場である程度の環境条件を変更できるような機能をツールに持たせなければならない。

以下に変更できるようにした条件を図 2-20 に示しその機能を表 2-7 に記載する。

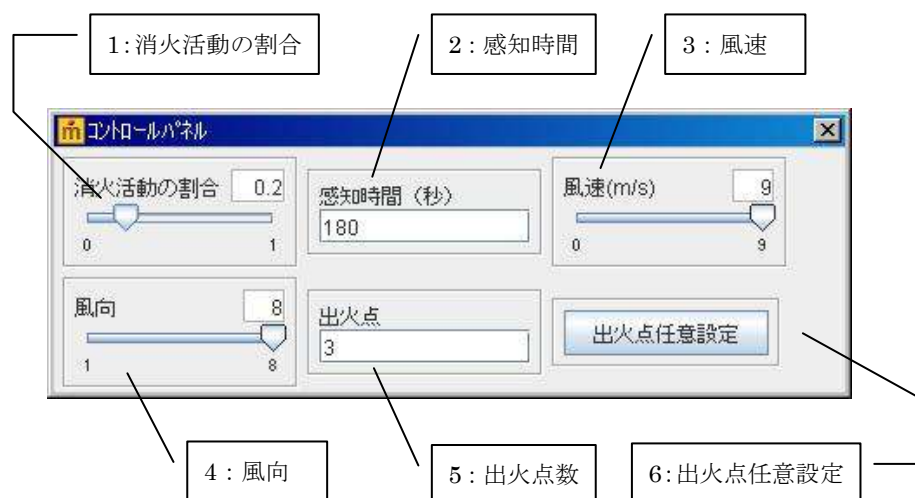


図 2-20 ツールの種類

表 2-7 ツールの説明

1	消火活動の割合	市街地における住民の消火活動の参加割合を設定できる(0.0~1.0)。
2	感知時間	住民が火災発生後に火災を感知するまでの時間を表す。 自由に設定できる。 本プログラムではこの時間になると避難行動が開始する。
3	風速	風速 0 [m/s] から 9[m/s]の範囲内で選択可能とした。 延焼判定に強く影響するため、極端な設定同士で比較すると延焼の変化に大きな差が見られる。
4	風向	1 北、2 北東、3 東、4 南東、5 南、6 南西、7 西、8 北西の 8 方向からの選択できる。
5	出火点数	プログラム開始直後の出火箇所の数を変更できる。
6	出火点 (指定)	このボタンを押している間に画面をクリックすると、そこが出火点になる。出火点はいくつでも選べる。

2-6 ビジュアル面における改良点

現時点でのモデルは全てセルでの表示になっている（図 2-21）。このまま DIG で使用するには不親切であるため、ここからビジュアルを整える。まずは画面全体の市街地を見やすくする（図 2-22）。

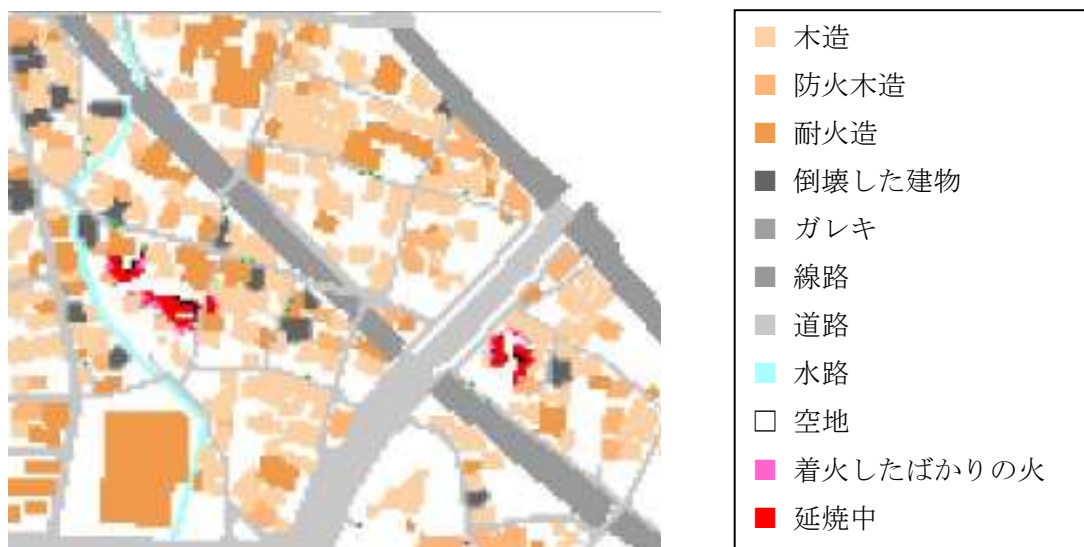


図 2-21 現状市街地

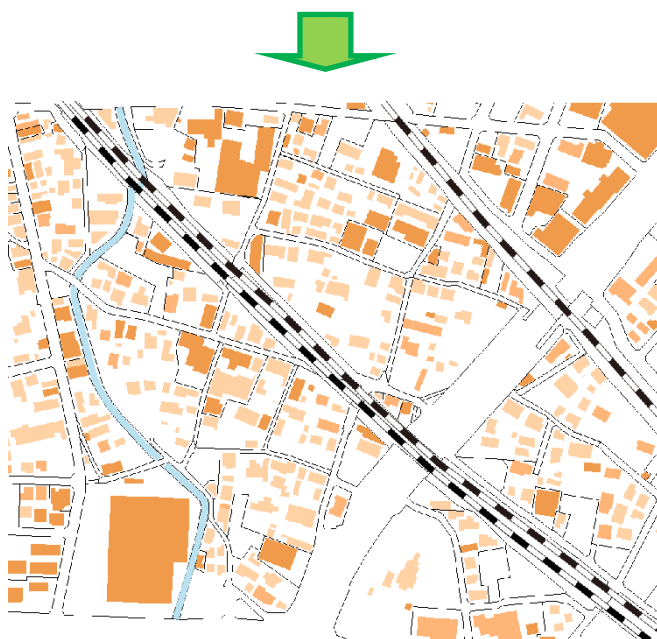


図 2-22 現状市街地ビジュアル化

図 2-21 と比較すると道路や建物の輪郭がはっきりわかり、判別しやすくなった。そして次はエージェントの表記を目立つようにしたい。現状でのエージェント表示は色のついたドットで表示されているため非常に見づらい。そこで各エージェントを下記のようなアイコン表示に変更することで視覚化した（図 2-23）。

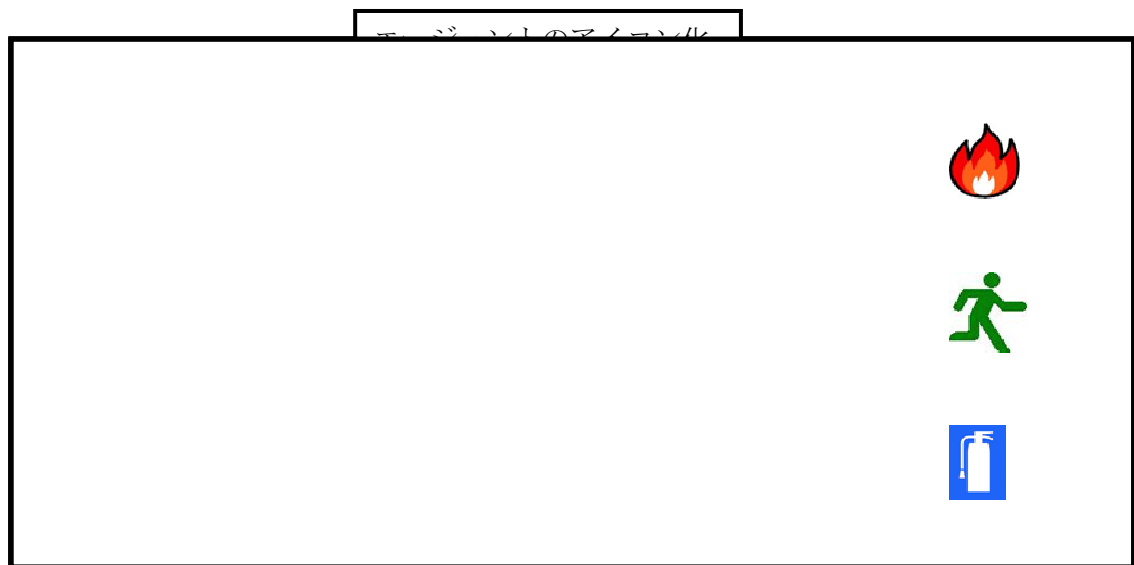


図 2-23 エージェントのアイコン化

図 2-23 より、アイコンには一目でわかるものを用いた。延焼は炎をイメージする火のアイコンにした。住民は非常事態のイメージのある非常口のマークを採用した。消火器そのまま消火器のマークを用いた。色は延焼の赤と間違わないように消火のイメージである青にした。以上で市街地のビジュアル化が整った。図 2-24 に上記のアイコンを加えた市街地図と延焼モデル、建物倒壊による道路閉塞モデルを表現した図を挙げる。

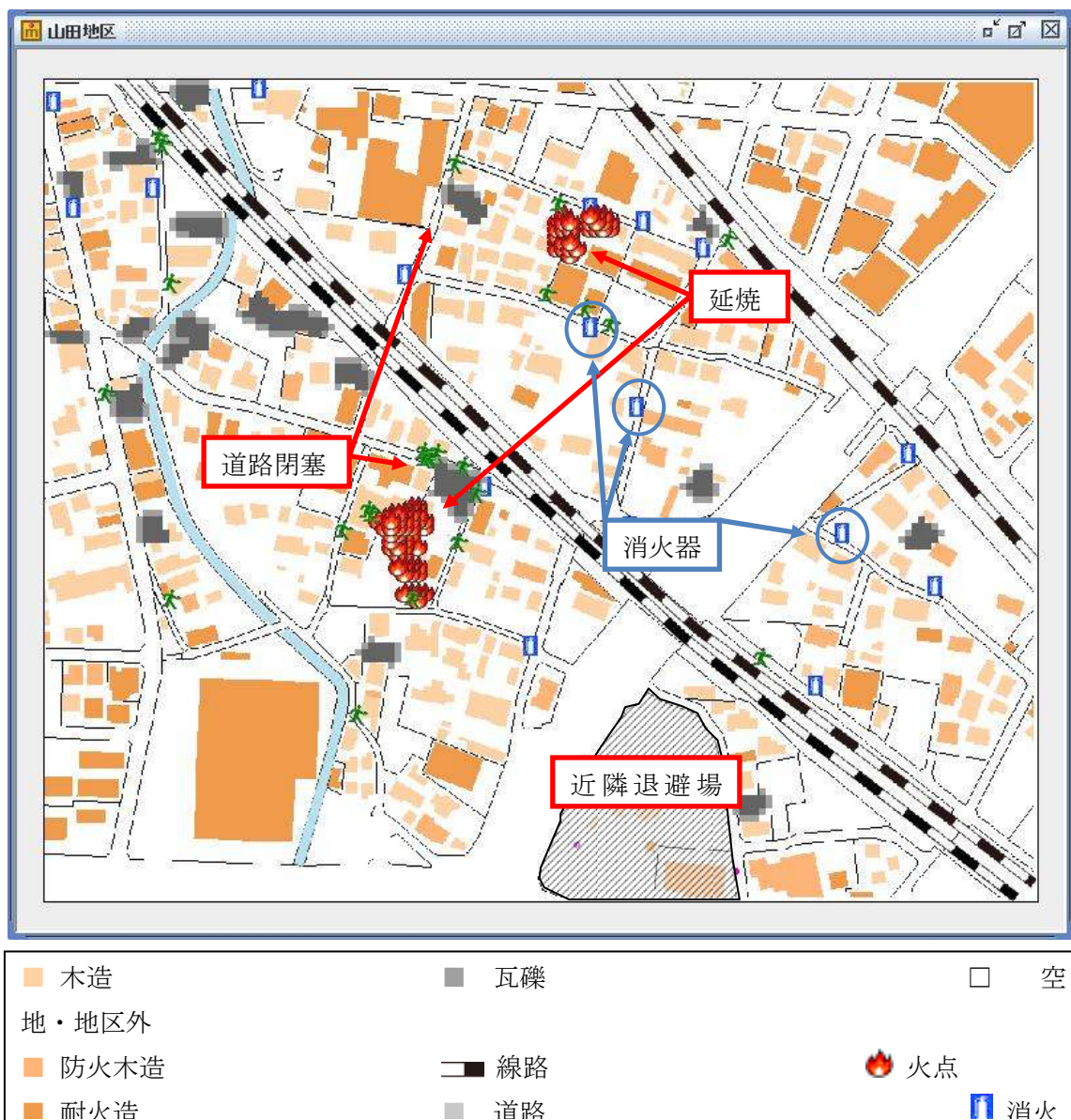


図 2-24 ビジュアル化、モデル表現

第 3 章 実証実験



3-1 アンケートの調査方法

MAS は山田地区を対象としてプログラミングを作成しており、DIG も実際に山田地区で行う。また、その DIG 内のディスカッションで MAS を用いて最後に参加者に対してアンケートを行うことで MAS の実用性を検証した。以下に、山田地区で行った DIG の概要を示す。

日時：11/21（土）9：00～12：00

対象区域：高師石塚町、山田町、山田一番町、山田二番町、山田三番町

ディスカッション内容：避難時に気をつけるべきこと

安全な避難を行うためにはどうしたらよいか

山田地区の DIG 参加者全 45 人に対して、アンケート調査を行った。アンケート内容は住民について性別、年齢、地区、パソコンの試用頻度についての質問と、MAS の評価を見るために 5 項目の質問を行った。

3-2 アンケート調査結果

アンケートでは、DIG 参加者に関する属性及びパソコンの使用頻度（図 3-1）と MAS に対する理解度（図 3-2）について調査した。

まず、住民の地区別の参加状況は、図 3-1（右上）のとおりであった。最も参加率の低い山田三番町（13%）は、防災まちづくりに近年から参加するようになったため、他の町に比べ認知が不十分であり、参加者数が少ないものと思われる。

参加者の男女比は男性が 40%、女性が 60%であった。また、年齢に関しては、50 歳以上の方が 80%以上で、その中でも 70 歳以上の方が 38%と最も多い人数であった。今回の参加者は、地区の組長の方が多く、働いている男性よりも女性の方が多い結果となっていると考えられる。

パソコンの使用頻度を見ると、参加者の 40%以上がパソコンを「使用しない」という結果がでた。また、「毎日」と回答した方は 20%であった。

以上のことより、参加者は高齢者が多いことからパソコンに慣れておらず、パソコンを使用したことがないという結果となっている。

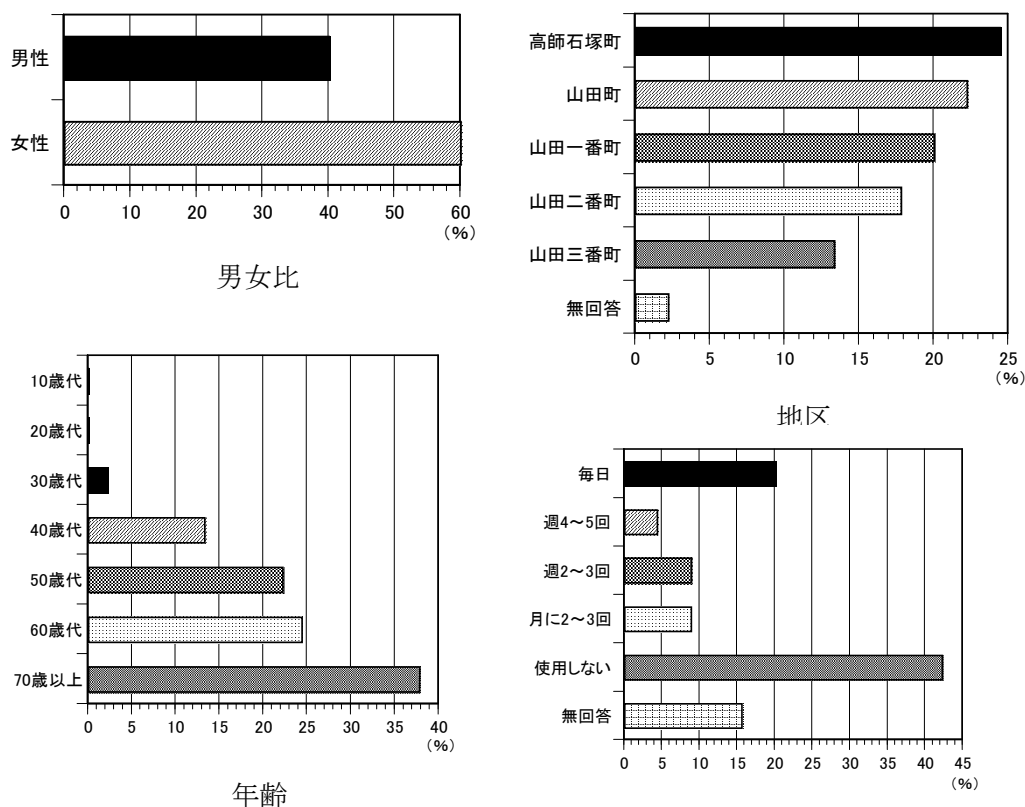


図 3-1 DIG 参加者に関する属性とパソコンの使用頻度

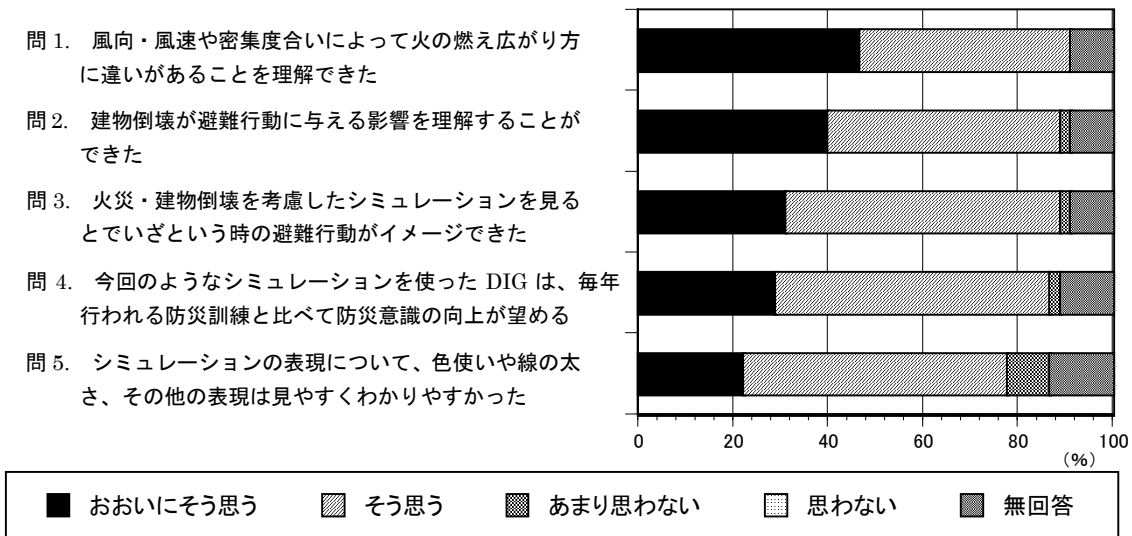


図 3-2 MAS に対する理解度

次に、MAS に対する理解度について考察する。

問 1~3 で、延焼、道路閉塞、避難モデルについての質問をしたところ、全体的に肯定的な意見が多かった。また、問 4 の全体の約 85%が「そう思う」ないし、「おおいにそう思う」という回答からも、モデル化における目的であった DIG での有用性は実証されたと言える。

問い間の理解度の差を見てみると、問 1 と問 2 では、問 1 の方が高い評価であったが、これは問 1 の延焼モデルが、それ単体で変化が見られることに対し、問 2 は単体ではわかりづらく同じく評価の若干劣る問 3 と関係しているからではないかと考えられる。問 3 は、モデル上の住民の避難行動に一部（狭隘道路などに）問題があり、うまく避難できていない部分があったことが要因であると考えられる。また、延焼モデルの評価が良かったのはインターフェースによって違いを強く見せられたことが大きいと考えられる。

しかし、上記のように高い評価ばかり得られたわけではなく、問 5 の結果では、他の問いに比べ、否定的な意見（特に「あまり思わない」）も見られた。

今後の課題としては、継続した取り組みを行う上で、シミュレーションの表現について改善する必要がある。

また、防災まちづくりに関して、情報（建物倒壊や避難経路など）というものが非常に重要であり、市街地のデータは常に最新のものであることが好ましく、定期的に更新作業を行う必要がある。

第 4 章 結論



4-1 まとめ

本研究では、DIG に役立つツールとして MAS を使った延焼モデル、道路閉塞モデル、避難活動モデルを改良、開発した。モデルは実際に山地区の DIG で運用し、アンケート調査からその有用性を検証した。以下に各章で得られたこと、及び今後の課題をまとめてこれを結論とする。

第 1 章では背景と目的に述べたように、我が国は世界有数の地震大国だが、地震被害に対する防災対策が万全とはいえない状態である。そこで、地域住民と行政や専門家等が協同で防災対策に取り組む「防災まちづくり」が進められており、この一手法として地域住民が実際に体験する参加型の「防災まちづくりワークショップ」が取り組まれている。このワークショップに、近年用いられている「災害図上訓練 (DIG)」で行われる大規模災害の想定時において、常に変化し続ける市街地の被害状況を視覚的に情報提供することができれば、積極的な話し合いを行う上での有効なツールとなると考えられる。

第 2 章では DIG を想定してシミュレーションする度に被害状況が変わる、風速と風向を変更することによって燃え広がり方に違いの見られる延焼モデル、建物倒壊とそれに伴う道路閉塞モデルを開発した。また既往研究の避難モデルを対象地区に設定し、住民に分かりやすく提供できるよう次に示す項目の条件を変更できるように改良を加えた。1. 消火活動割合を変更可能に、2. 火災感知時間を変更可能に、3. 風向の選択化、4. 風速の選択化、5. 出火点数の設定自由化、6. 火点の出現方法の選択 (ランダムモード・指定モードの 2 種類) 等のインターフェース機能の充実を試みた。さらに住民がシミュレーションモデルを見た際に分かりやすくするためにビジュアルを整え、火点、消火器、住人をアイコン表示にし、市街地をセル表示から SIS データによるよりわかりやすい画像表示とした。

第 3 章では第 2 章で改良・開発したモデルを実際に山田地区で行われた DIG で運用し、今回のシミュレーションモデルが DIG に対して実際に有効であったかどうかをアンケートによって調査した。調査結果より、MAS の有効性に対しての 5 項目の問いに対して 8 割近くが MAS に対し肯定的な意見であったことから、概ね有効であったと判断できた。

以上より、DIGの際に役立つツールとして本モデルはその有用性を実証できたと言える。また、アンケートの図 3-2 に示した問 1・2 の回答から、インターフェースによって変化の表現を伝えることができたことも確認でき、インターフェースの有用性も確かめることができた。表現に関しては、一目で燃えているイメージである火のアイコンや逃げている様子が分かりやすいように人型のアイコンにしたことなどが住民のイメージを手助けで来たのではないかと考えられる。中でも、セルで表示されている市街地のマップを地図画像に変えたことは市街地の全体イメージが飛躍的にわかりやすくなり、よりリアルな市街地を再現できたのではないかと考えられる。一方、図 3-2 の問 5 にあるように他の問いに比べ一部の住民に対しまだ見にくい、分かりにくい等の意見もある。これは狭隘道路や袋小路に捕まると抜け出せなくなる避難行動モデルのプログラムの問題が挙げられる。また、対象エリアを広げすぎたため一つ一つの表示サイズが小さくなったことが考えられ、これらの対策として、今後以下のような課題があると考えられる。

4-2 今後の課題

今後、研究を進めていく上での本研究のプログラム上の課題点は以下のとおりである。

1) 避難モデルの課題点

本研究の主題でもあったモデルの1つであるが、一歩進んで足元が「道路ならばそのまま」、「障害物なら一歩戻って45度方向転換して一歩進む」というプロセスなため、袋小路や狹隘道路に踏み込むとなかなか抜け出せなくなるという問題があった。解決策としてグラフ理論を用いて市街地の経路を検索する方法が挙げられる。

火災感知時間

2) ビジュアル

2-2-6 より、一部のエージェントのビジュアル化に成功した。これによって延焼モデルのイメージが飛躍的に上がったが、建物倒壊と道路閉塞に関してはビジュアル化には至らなかった。図3-2より、モデルが見やすかったかという質問に於いて一部で「あまり思わない」という回答があったことから、今後活用していく上でさらに改良を重ねていく必要があると言える。

参考文献

- 1-1) 財団法人 消防科学総合センター
http://www.isad.or.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=IB17&ac2=63winter&ac3=257&Page=hp_view
- 1-2) 大貝彰：防災まちづくり推進のためのアクションプランニング手法の調査研究〔豊橋市版〕
- 2-1) 河岸真広：マルチエージェントシミュレータを用いた住民による消火活動モデル開発の基礎的研究、豊橋技術科学大学 大貝彰都市地域計画研究室 2007 年度卒業論文
- 2-2) 地区の住民らが災害危険性や安全性を点検し web 上の地図に記したもの
<http://brasilia.tutrp.tut.ac.jp/SNI/Login.aspx?ReturnUrl=/SNI/Main.aspx>
- 2-3) 金井淳子、梶秀樹：市民による自主防災組織の初期消火能力に関する一考察 初期消火能力評価シミュレーションのフレームワーク、日本建築学会学術講演梗概集 F-1 都市計画 建築経済・住宅問題、Vol.2000、Page.433-434
- 2-4) 山元隆稔：地方都市市街地の防災アクティビティ評価手法の検討、豊橋技術科学大学 大貝彰都市地域計画研究室 2006 年度卒業論文
- 2-5) 郷内吉瑞：セルラーオートマタ延焼モデルを用いた防災まちづくりワークショップ支援システムの開発、豊橋技術科学大学 大貝彰都市地域計画研究室 2004 年度修士論文
- 2-6) 野沢征司、渡辺公次郎、近藤光男：津波避難予測モデルと GIS を用いた歴史的市街地における津波防災まちづくり計画支援システムの開発、土木計画学研究講演集、Vol.32、Page.ROMBUNNO.217
- 2-7) 豊橋市：豊橋市地震被害予想調査報告書、2004

謝辞

本論文を執筆するに当たり、指導教官である豊橋技術科学大学建設工学系大貝彰教授には、多大なご指導、ご指摘を頂いたことを心より感謝申し上げます。

また、忙しい中様々な面でアドバイス、プログラムの技術指導をしていただいた M2 の河岸真広さん、論文執筆の際に的確な助言をしていただきました M1 の木下龍亮さん、同じく M1 の辛島一樹さん、谷研究室の M1 の伊藤誠さん本当にありがとうございます。

そして、この 1 年間共に励まし合い研究に取り組んできた同輩の井上歩さん、横澤和也さん、ユンサーヴィンさんありがとうございます。

最後に本研究室の先輩方には様々な形で協力していただきました。心より感謝いたします。

研究に関わったすべての人へ

皆さん本当にありがとうございました。

平成 21 年 12 月 1 日

前地 一輝