

水害避難行動のマイクロモデルシミュレーション と制御に関する研究

高棹 琢馬¹・椎葉充晴²・堀 智晴³

¹正会員 工学博士 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工学博士 京都大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

³正会員 工学博士 京都大学助手 工学部土木工学科 (同上)

水害時の避難行動を、世帯レベルでそのメンタルな意思決定過程も含めてシミュレーションするモデルを開発した。モデル構築にあたっては、水害避難行動を規定する要因を、住民の水害意識や生活形態といった初期条件、浸水の危険性に対する認識や水害情報への関心といった内的要因、水害時に与えられる情報や浸水位等の外的要因の3種に分類し、これら要因及び避難行動の関係をAI技術を用いて記述している。また、設計したモデルを用いて、1982年長崎水害時の住民の避難行動をシミュレートし、水害避難マイクロモデルの適用性と問題点について考察する。

Key Words : flood disaster, refuge simulation, artificial Intelligence, fuzzy theory

1. 序論

水害時の避難行動は、洪水災害に対するソフトな対策として、特に人命保護の立場から重要なものの1つである。このような認識のもとに、水害や避難行動に対する意識の調査が行われる^{1)~7)}一方、避難行動に影響を及ぼす洪水氾濫の状況や浸水位と避難行動の関係を分析するシミュレーションモデルの開発^{8)~11)}が行われている。ところで、これら水害避難行動のシミュレーションに関する研究は、いずれも、比較的広い領域を対象とし氾濫解析と関連づけることで、住民が避難を決意してから避難場所に至るまでの行動が浸水位によって受ける影響を再現することに重点がおかれている。したがって、避難する対象としての住民は、同じ情報に対しては同じ行動をする均質な集団としてとらえられており、水害避難行動をマクロにとらえたものといえることができる。水害避難マクロモデルは浸水状況が避難に及ぼす影響の把握や指定避難場所の設定位置などを評価するには適しているが、そこで再現される住民の行動は一種理想化されたものであり、住民個々の意識や水害経験の違い等は考慮できないという欠点を持つ。ところが、水害被災地における意識調査からは、住民の水害意識や水害に対する関心の高さによって、避難行動に大きな差が生じるという事例が多々報告されている^{2),3),5)}。したがって、より現実的なシミュレーションを行うためには、現地調査の結果明らかとなった住民の水害に対する意識や生活形態、避難場所や避難経路に関する知識、避難情報に対する反応の仕方をシミュ

レーションに直接反映できるモデルが必要である。もちろん、水害に対する意識や避難に関する知識、避難勧告等を受けた場合の行動は個々の住民の被災経験や生活形態によって大きく異なっているから、実状に即した避難行動シミュレーションには、水害時の個人レベルでの行動モデルが必要となる。

一方、人間の心理面も含めた行動をモデル化するには、プロダクションシステム¹⁾やファジィ推論²⁾といった知識工学的手法が有効であろう。現在、これらの手法は、エキスパートシステムと呼ばれる意思決定支援システムを開発する際の知識表現あるいは利用手法として広く用いられているが、もともと人間の行う判断(推論)過程の一部をモデル化したものであり、人間の心理と行動の関係を記述するのに適していると考えられるからである。そこで、本研究では、これら知識工学的手法を用いて避難行動を規定する要因と行動との関係あるいは要因相互の関係を表現することを試みる。さらに、それを通じて、水害避難に関する現地調査の結果を計算機上での避難シミュレーションに反映し避難の制御方法を考察すべく、世帯レベルの水害避難行動を再現するマイクロモデルを設計する。

¹ 問題解決のための知識を IF-THEN 形式の書換規則によって表現しておき推論を行う方法¹²⁾。知識を格納する部分を知識ベース、書換により推論を進める機構を推論エンジン、推論時にデータを扱う場所をデータベース(ワーキングメモリー)と呼ぶ。

² プロダクションシステムと同じく推論のための知識を IF-THEN 形式で表現するが、条件部・後件部の記述にファジィ集合を用いる方法。ただし、推論手順については、種々の方法が提案されている¹³⁾。

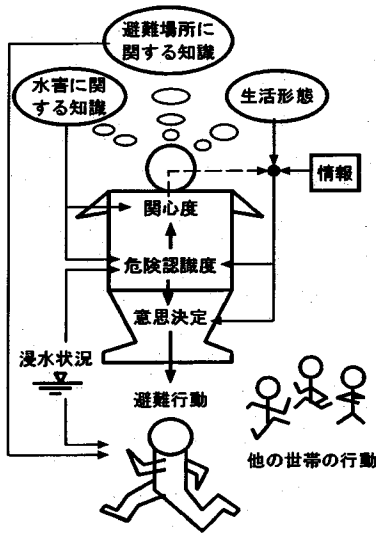


図-1 水害避難行動を規定する要因

2. 水害避難行動を規定する要因とそのモデル化

水害時の避難行動を規定する要因には、個々の流域住民が日常的に持っている水害に対する意識や生活形態および過去の水害経験や知識、水害時に提供される気象情報や避難に関する情報、さらに、避難時の雨量や浸水位などがある。実際の行動は、これら要因が有機的に絡み合った結果として現れる。例えば、個々人の水害に対する意識や過去の経験が違えば、提供される情報が同じであってもそれに対する反応の仕方は異なってくる。したがって、水害時の避難行動をシミュレーションするためには、上記要因の相互関係を明らかにし、ルール形で記述する必要がある。そこで、本モデルでは、水害避難行動を規定する要因を、

- (a) 水害経験や意識・生活形態など水害時避難行動に対する初期条件となる要因、
- (b) 水害時に提供される情報や降雨・浸水状況といった外的要因、
- (c) 情報に対する反応の基礎となる内的要因、

の3つに分類し、それぞれをモデル化する方法を考える。なお、ここで対象とする各種要因の相互関係を図-1に示しておく。

(1) 水害避難行動に対する初期条件

水害避難行動に対する初期条件とは、住民が過去の経験などに応じて日常的に持っている水害意識など水害時の情報に対する反応や行動の背景となる要因を言

い、水害に対する意識のほか、過去の水害経験や危険に対する一般的な態度・性格、生活形態なども含まれる。これらの要因は、実際に避難行動を制御する情報(例えば避難命令)を住民に与えたときその効果に大きな影響を与えると考えられ、個人レベルの避難行動をシミュレーションしその制御方法を考察する上で重要な要素である。実際、水害調査や避難行動調査でもこのような要因が避難行動に与える影響は重視され、調査の対象項目となってきた^{1),2),5)}。もちろん、一口に初期条件といってもその内容は住民の意識や思考内容に関わるものが多く、詳細に把握することは困難である。そこで、本研究では、初期条件を水害に対する意識の型と生活形態の2つに大別して考える。すなわち、過去の水害経験や危険に対する態度といった内的な条件が水害時の行動決定に及ぼす影響をすべて水害意識の型を通じて表現し、生活形態は時刻による情報の入手状況を左右するという形で避難行動に与える影響をモデル化することにする。

まず、水害意識の型については、安全視型、やや安全視型、中立型、やや危険視型、危険視型の5つに分類することにした。分類方法は、水害経験者については、過去の水害経験を重視し、水害意識調査でよく用いられている5つの項目^{2),5)}、すなわち、「最近経験した水害の程度」、「避難経験の有無」、「前回の水害での避難の有無」、「避難しなかった場合はその理由」、「自宅の安全性に関する評価」を条件として、また、水害未経験者については、過去現地で起こった水害に対する知識を中心に、「過去の水害の知識」、「避難するとしたらそのきっかけ」、「自宅の安全性に関する評価」の3項目を基準として水害意識の型を分類する。

もう一つの初期条件である生活形態については、洪水時の情報入手状況との関連でモデル化することを考え、特に、1日の生活パターンを取り上げることにする。生活パターンの表現は、1日を早朝・朝・昼・夜・深夜の6つの時間帯に分け、これらの時間帯を時刻 t を台集合とするファジイ集合で表す。この方法を用いれば、生活パターンの違いは各時間帯を定義するメンバーシップ関数の形状を変えることで表現でき、各時間帯と情報の入手し易さとの関係をファジイ推論ルール¹³⁾で表現することが可能になる。具体的には、情報の入手し易さの度合いを0~1の実数(情報入手率)で表し、情報入手率 $f(t)$ を台集合とするファジイ集合(大・中・小)と前述の時間帯を表すファジイ集合との関係を記述することになる。

また、避難場所あるいはその経路に関する知識も水害避難行動の重要な初期条件の一つである。そこで、本研究では、経路に関する知識を取り上げ、経路を良く知っているものは各自の家から避難場所に至る最短経

路を取るものとし、経路をよく知らないものは、避難場所のある方向に進むとともに、避難中の他の世帯の行動による影響を受けるという形でモデル化することにする。

(2) 水害避難行動の外的要因

水害時に住民が受け取る情報には、マスメディアから供給される洪水や気象に関する情報、行政サイドから発せられる避難勧告や避難命令、さらには、住民自身が感じたり見たりする雨量や浸水位などがある。これらの情報は、外部から与えられ住民の避難行動に関する意思決定あるいは行動そのものに影響を与えるという意味で、水害避難行動の外的要因と呼ぶことができよう。もちろん、これらの外的要因が避難行動に与える影響は、その種類・内容によって異なる。避難命令や住民同士の避難勧誘は、避難行動そのものに言及しつつ避難を促すという意味で避難行動に与える効果は直接的である。これに対し、マスメディア等から提供される気象情報は住民の洪水に対する認識に影響を与え、その後の洪水情報に対する態度や避難決意にいたる意思決定過程に間接的に影響すると考えられる。また、避難開始後の世帯の行動は、避難経路の浸水状況や降雨状況、他の世帯の行動などによって決まってくる。

そこで、避難を決意するまでの段階では、気象・水害情報は、住民の洪水の危険性に対する認識³を変化させる効果を持ち、危険に対する認識に対して避難命令や住民同士の避難勧誘といった「きっかけ情報」が作用して避難行動を決意するという形で住民の情報に対する反応をモデル化することにする。気象情報としては、「注意報」、「警報」及びこれらの「解除」の3種類を取り扱う。水害情報としては「近隣で洪水が発生した」、「河川水位が警戒水位に達した」、「破堤が起こった」、「破堤の恐れがある」、「浸水の恐れがある」、の5種類を扱うこととする。また、避難行動の「きっかけ情報」として「避難命令」と「住民同士の避難勧誘」の2種類を扱うこととする。

一方、住民が避難行動を開始した後に、実際に避難経路を移動できるかどうかは経路の浸水状況に依存する。また、避難場所や経路に関する知識が確固としたものでなければ、避難中の他の世帯の行動にも依存するであろう。そこで、避難開始後の行動に影響を与える外的要因として、避難経路上の浸水位と他の世帯の行動とを取り上げ、浸水位は移動速度を左右し、他の世帯の行動は避難経路に関する知識が明確でない世帯（避難場所に至る最短経路ではなく避難場所のある方向に進むケース）の経路選択を左右するという形でモデル化することにした。

³ 本例では、(3)で定義する危険認識度を用いて表現する

(3) 水害避難行動の内的要因

水害時に住民が避難行動を起こすまでの過程は、(1)で述べた初期条件に(2)で述べた外的要因が反応するプロセスととらえることができる。ただし、ここで注意すべきことは同じ情報であっても住民の危険に対する認識によって対応が異なってくるということである。実際、避難命令を受けたにもかかわらず避難しない世帯や避難命令を受ける以前に浸水の様子などから自主的に避難する世帯も多々みられる²⁾。そこで、住民が水害に対して危険と考える度合いを表す指標として危険認識度を定義するとともに、避難命令のように直接避難行動に言及するような情報を避難開始のための「きっかけ情報」ととらえ、危険認識度と「きっかけ情報」の相互作用により住民の避難開始決意までのプロセスをモデル化する。

まず、危険認識度 $d(t)$ は、0.0~1.0までの実数とし、この数値が高いほど世帯は危険を感じているものとする。また、各世帯の危険認識度は、降雨状況や浸水状況、水害に関する情報によって時々刻々変化するが、変化の程度は各世帯の持つ意識の型によって異なるものとする。さらに、各時刻の危険認識度を算出した後、危険認識度の大きさと上述の「きっかけ情報」とを条件部に組み合わせたルールを用いることで、住民各世帯の危険に対する判断と避難情報との相互作用を表現する。以上の方法で避難命令を受け取る以前の自主避難や避難命令を受け取っても避難しないケースをシミュレーションすることができる。すなわち、自主的な避難行動は、避難命令を受け取る前であっても一定程度以上の危険認識度を持つ世帯は自主的に避難を開始するというルールを用いて表現することになる。また、避難命令を受け取っているにもかかわらず避難しないというケースに対しては、避難命令を受け取った時点で危険認識度が非常に低ければ避難しないといったルールで表現することができる。

ところで、危険認識度の大小は避難の決意そのものに影響するほか、その世帯の情報に対する態度にも影響を与えると考えられる。情報の入手状況については既に(1)で時刻との関連を考えたが、危険認識度が高ければ深夜でも水害に対する情報を入手しようとしているケースは容易に想像できる。そこで、各世帯の危険に対する認識に基づく水害情報への態度を0~10の実数⁴で表し、関心度 $c(t)$ と呼ぶこととする(10に近いほど情報を収集しようとする態度が強いものとする)。そして、関心度が時々刻々の危険認識度と初期条件である水害意識の型に応じて変化する様子をファジイ推論ルールで記述することにする。したがって、情報の入手状況は生活パターンと時刻さらに関心度の大小によって変化することになる。

3. 水害避難マイクロモデルの設計

本章では、2.での考察を踏まえつつ、各世帯が被災時にとる行動を

- (a) 情報入手状況を取り扱う過程
- (b) 避難開始の意思決定過程
- (c) 避難場所・経路の決定過程
- (d) 避難行動過程

の4段階に分割して具体的にモデル化する。なお、水害避難行動モデルの設計には、筆者らが開発した協調問題解決型推論システム¹⁴⁾を用い、モデル記述には smalltalk-80¹⁵⁾を用いている。図-2に水害避難マイクロモデルの全体構成を示す。図中、二重線で囲った部分が推論を行う知識システムとなっている部分である。表-1に、これら知識システムの持つ知識ベースの概要を示す。

(1) 情報の入手状況を取り扱う過程

ここでは生活形態と関心度を用いて各時刻に発表されている情報が入手できたかどうかを決定する。

a) 生活形態による情報入手率を扱う知識システム

このシステムは入力変数が時刻 t 、出力が情報入手率 $f(t)$ のファジイ推論システムである。前件部については2.(1)で述べたように生活パターンを表現する方法として1日を6時間帯にわけ、それぞれ時刻 t を台集合とするファジイ集合 A_i ($i=1, \dots, 6$) で表現している。生活パターンとしては、比較的早朝から生活活動を行なう「朝型」、就寝時刻が深夜になる「夜型」、およびその中間型を想定し、それぞれに対する時間帯を定義するメンバーシップ関数の形を変化させることで表している(例えば、図-3は朝型に対するものとして仮定した時間帯の定義である)。後件部については、情報入手率を台集合とする「高い」、「中ぐらい」、「小さい」という3つのファジイ集合 B_m ($m=1, \dots, 3$) を考える。そして、前件部と後件部のファジイ集合間の対応関係を

IF t is A_i THEN $f(t)$ is B_m

の形で記述したファジイ推論ルールをもとに推論を行い、生活形態別の各時刻・各世帯の情報入手率が算出される。

b) 関心度による入手率の変更を扱う知識システム

このシステムでは、上で決定した情報入手率を、関心度に応じて変更する。変更には、前件部を生活形態による情報入手率と関心度、後件部を最終的な情報の入手率とするファジイ推論を用いる。

前件部の関心度 $c(t)$ と情報入手率 $f(t)$ については、それぞれ「高い」「やや高い」「中」「やや低い」「低い」の5つのファジイ集合に分割する。後件部の最終的な入手率の $f'(t)$ も同様に5つのファジイ集合に分割して

いる。したがって、本システムで情報入手率の変更を行うファジイ推論ルールは、

IF ($f(t)$ is A_i) and ($c(t)$ is B_m) THEN $f'(t)$ is C_n

と表される。ただし、 A_i, B_m, C_n ($i, m, n=1 \sim 5$) は、それぞれ、 $f(t), c(t), f'(t)$ のファジイ分割である。

以上2つの知識システムの推論を通じて、生活形態と関心度を考慮した気象・水害情報および避難情報の入手率が得られるので、各世帯が情報を入手できたか否かは乱数によって決定することにしている。

(2) 避難開始の意思決定過程

避難行動開始の意思決定過程は、降雨・浸水状況および入手情報をもとにした危険認識度の決定段階と、危険認識度と「きっかけ」をもとに行われる避難行動の決定段階に分けられる。

a) 危険認識度の決定段階

危険認識度は、各時刻・各世帯毎に外部状況から危険認識度を算出する知識システムと、情報内容によりその割り増し率を決定する知識システムによる推論を通じて算出される。

外部状況により危険認識度の増減を決定する知識システムでは、入力として浸水位と降雨の2つを考えている。ファジイ推論の前件部を1ステップ前の降雨量と現在時刻の降雨量の差と、1ステップ前の浸水位と現在時刻の浸水位の差とし、後件部を危険認識度の増減とする。前件部の降雨量差 Δr と浸水位差 Δl については、それぞれ、「大きく上がる」、「中ぐらい上がる」等の7つのファジイ集合 A_k ($k=1, \dots, 7$)、 B_m ($m=1, \dots, 7$) に分割する。さらに後件部は危険認識度の増減 Δd については、「大きく上がる」、「やや大きく上がる」といった11個のファジイ集合 C_n ($n=1, \dots, 11$) で表現する。この方法を用いると、メンバーシップ関数の形状を変えることにより水害意識の型の違いによる影響を表現することが可能になる。すなわち、安全視型になるほど危険認識度は増加しにくく減少しやすい形状にし、危険視型になるほど危険認識度は増加しやすく減少しにくい形状にすればよい。したがって、推論ルールは、

IF ($\Delta r(t)$ is A_k) and (Δl is B_m) THEN $\Delta d(t)$ is C_n

となる。なお、ルール作成に当たっては、住民の避難開始が降雨状況よりも浸水状況によるところがかなり大きいと考え、降雨量差よりも浸水位差に重きを置いた構造にした。

一方、気象・水害情報により危険認識度の増減を決定する知識システムでは、上で求めた危険認識度に対し、気象・水害情報の影響を付加するため、入手情報の内容に基づいて危険認識度の引き上げ(下げ)幅を算出する。ここでは、気象・水害情報が言語形式で与え

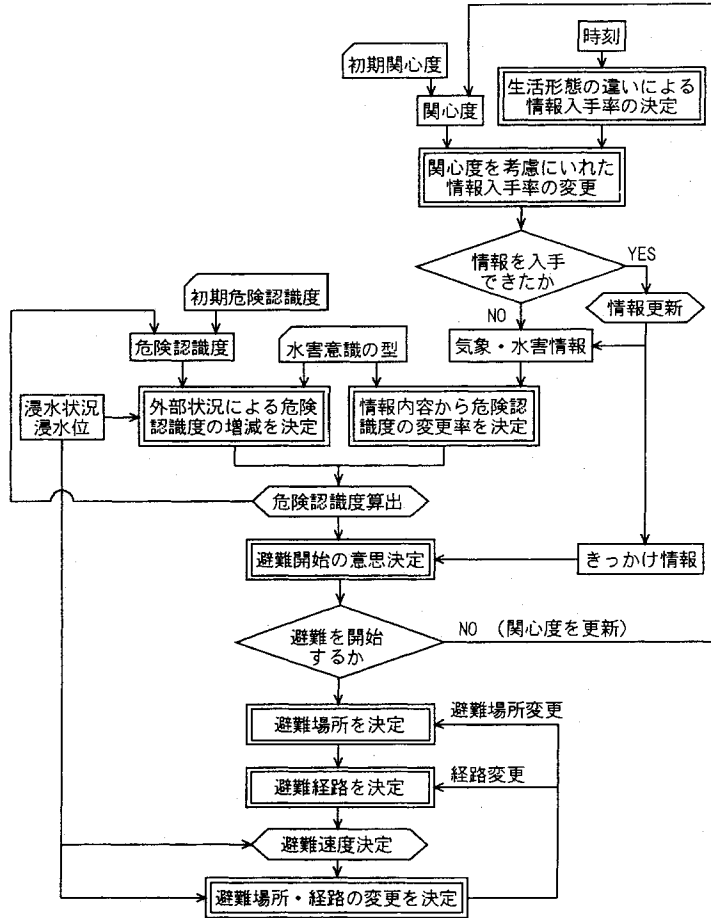


図-2 水害避難マイクロモデルの全体構成

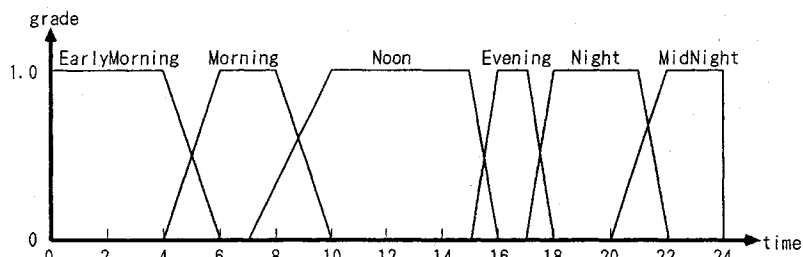


図-3 生活時間帯を表すファジィ集合

られることから、モデル化にはプロダクションシステムを用いている。プロダクションルールの前件部には、水害意識の型、入手済みの水害情報・気象情報を用いる。後件部として危険認識度の引き上げ(下げ)率を数値で与える。具体的なプロダクションルールは、例えば、「もし世帯の水害意識の型が危険視型で、入手した気象情報が「警報」で、水害情報が「破堤」なら引き上

げ率は0.4」といったように記述し、危険認識度の引き上げ(下げ)率を算出する。

b) 避難行動の決定段階

ここでは以上の2つの知識システムより得られた新たな危険認識度と「きっかけ情報」の入手状況をもとに、避難行動を決定する。避難行動決定を行う知識システムは、前件部に危険認識度、避難命令、隣人の勧

表-1 小倉避難ミシロモデルを構成する知識システムの概要

知識システム	前件部	後件部	推論法
水害意識の型 (経験者)	避難経験 前回の水害での避難経験 避難しなかった理由 自分の家の浸水状況	水害意識の型	プロダクションシステム
水害意識の型 (未経験者)	水害事例を知っているか 避難する場合のきっかけ 自分の家は浸水すると思うか	水害意識の型	プロダクションシステム
生活形態	時刻	情報の入手率	ファジイ推論
関心の高さ	情報の入手率 関心度	最終的な情報の入手率	ファジイ推論
外部状況と 危険認識	1ステップ前との降雨量差 1ステップ前との浸水位差	危険認識度の変化	ファジイ推論
気象・水害 情報の影響	水害情報	危険認識度の割増し率	プロダクションシステム
行動決定	危険認識度 避難命令 避難勧誘 準備状況	行動 関心度の変化	プロダクションシステム

誘、避難準備状況の4条件を用いている。危険認識度の値については、本来であればファジイ集合を用いて表現する方が自然であると考えられるが、危険認識度以外の条件がファジイ集合で表現できないので、危険認識度が0.0~0.4の時「低い」、0.4~0.6の時「中ぐらい」、0.6~0.8の時「高い」、0.8~1.0の時「非常に高い」の5つのクリスプ集合を用いて表現することにした。また、「きっかけ情報」については(2)でも述べたように、避難命令を受けたかどうか、隣人の勧誘を受けたかどうかの2ケースを取り扱う。

避難準備に要する時間は、吉本ら⁵⁾の調査による避難決意から家を出るまでの時間を準備時間と考え、その分布にしたがう乱数を発生させることにより決定している。ただし、避難決意以前に準備を始める者と、決意後に準備を始める者の両者が存在すると考えられるので、危険認識度が比較的低い時点でもきっかけ情報を受け取った場合には、避難を決意しないまでも準備は始めるというルールも設定している。

なお、危険認識度の大きさやきっかけ情報の有無は、避難開始の意思決定に直接関係するほか、その世帯の関心度に影響を与えると考えられる。そこで、この知識システムの後件部では意思決定と関心度の変化の両方を扱い、意思決定には「待機」、「避難準備」、「避難開始」を、関心度の変化については数値で与えることにしている。したがって、避難開始の決意を扱うプロダクションルールは、例えば、「もし住民の危険認識度は低い避難命令・隣人の勧誘をうけて避難準備ができていなければ、水害に対する関心度が上がり避難準備をする。」といった形で記述することになる。

(3) 避難場所・経路の決定過程

ここでは、避難の必要性を感じた世帯が避難場所、避難経路の決定を行う。避難場所および経路のそれぞれに1つの知識システムを用いて決定過程を表現する。

a) 避難場所の決定の知識システム

避難場所の決定は、施設の周知と施設までの距離、および避難経路に関する知識の有無の3つの要因により考えることにする。具体的な避難場所の決定は、プロダクションシステムを用いて、

- 指定避難場所を知っている世帯はそこに避難する、
 - 避難場所を知らない場合は何箇所かの候補地から最も近い場所を選ぶ、
 - 浸水により避難先を変更する場合は現在の目標避難先以外の候補地から最も近い場所を選ぶ、
- という方針でルールを記述した。

b) 避難経路決定の知識システム

避難経路の決定に際しては、各世帯が避難場所に至る経路を詳細に知っているケースあるいは避難場所のだいたいの位置はわかるが具体的な経路は知らないといったケースが考えられる。そこで本研究では、避難経路の決定にはプロダクションシステムを用い、

- 最短経路を進む、
 - 交差点で避難場所のある方角に最も近い道路を逐次選択する、
- の2通りの方針を記述している。

(4) 避難行動過程

避難行動過程では、避難時の移動速度の決定や移動中の場所・経路の変更を扱う。

a) 避難時の移動速度の決定

本研究では、避難時の避難速度を規定する要因として浸水位と世帯の構成人数を考えている。世帯の構成人数と移動速度の関係については、今本らの昭和57年の諫早での水害の際の調査²⁾を参考に、浸水のない状況での3人世帯の避難速度を45m/分とし、構成人数が1人増える毎に5m/分割り引くことにする。ただし、7人以上の世帯については25m/分としている。

浸水位と移動速度の関係には、西原の方法⁸⁾を用いる。すなわち、平常時の歩行速度を v_0 (m/min)とした時、浸水位 h (m)のときの歩行速度 $v(h)$ を、

$$v(h) = (1 - h/0.7)v_0$$

で与える。なお、速度が負となる場合は歩行不可とする。

b) 避難場所・経路の変更を決定する知識システム

避難経路を移動中の住民は、浸水状況などにより前進が不可能になった場合や、多数の人が逃げている方向と自分が逃げている方向とが違っている場合には進行方向を変えることがある。本研究では、避難場所・避難経路の変更を

- (a) 浸水がひどくてこれ以上進めない時、
 - (b) 多数の人が自分と違う道へ進んでいるとき、
- に行うことにする。

1. の場合には、避難速度が0となったとき、その世帯は避難場所を変更することにする。また、2. の場合には、避難場所に至る最短経路を知らず避難場所の方向に逐次道路を選びながら進んでいる世帯が、その世帯の進行方向と異なる方向へ2世帯以上進んでいることを認知した時点で、一定の確率でそちらに追従するという方針にした。なお、これらの方針はそれぞれプロダクションルールで表現している。

4. 適用と考察

(1) 適用対象地域の概要

ここでは、昭和57年7月23日の長崎水害を対象として避難シミュレーションを行う。適用地域は、氾濫の起こった中島川に隣接する万屋町周辺(図-4)である。この災害における気象情報については、7月23日の15時25分に大雨洪水注意報が出され、16時50分には大雨・洪水警報に切り替えられている。また、避難情報に関しては、20時30分に長崎県警より報道機関を通じて市民に早期避難の呼掛けが行われ、21時50分に長崎市災害対策本部より避難指示が発令されるという状況である。また、氾濫水の挙動の再現には、二次元一層モデル¹⁶⁾を用いており、時々刻々の氾濫状況と避難状況は画面表示システムにより図-4のようにリアルタイムで表示されるようにしている。

(2) ミクロモデルによる水害避難シミュレーション

シミュレーションの対象時間は、19時頃から長崎市内で浸水が始り23時頃に浸水位が減少し始めていることを考慮し、19時から23時としている。なお、対象地域の万屋町周辺で浸水が始まるのは20時10分である。また、避難シミュレーションの時間間隔については、避難行動を開始するまでは5分間隔とし、避難開始後は移動を詳細に把握するため30秒間隔とした。危険認識度の初期値は、全世帯0.0とした。関心度の初期値については、水害意識が危険視型の住民は関心度が高く、安全視型の住民は低いものとし、危険視型の世帯の関心度を5.0とした後、順に関心度を1.0ずつ減じて設定した。生活形態については、住民全体に「朝型」、「昼型」、「夜型」の3通りを、人数的にも地域的にも均等になるように割り当てている。

a) 水害経験のシミュレーション

ここでは、予め水害意識の型を全世帯に与えて避難シミュレーションを行い、その結果を基に水害意識の型を再設定した後、もう1度シミュレーションを行うことにより、経験による水害意識変化後の水害行動を観察する。即ち、1回目のシミュレーション終了時に各世帯の家の浸水状況、避難行動の結果、危険認識度の程度および情報の入手状況を、2.(1)で水害意識の型分類に用いたルールに対応させることにより、各世帯の水害意識の型を再設定した上で、もう1度避難シミュレーションを行う。これは、1回目の水害を経験した直後にもう1度同規模の洪水に襲われたケースに相当する。

以下に本適用での条件について説明する。

- (a) 水害意識の型...1回目のシミュレーション時には全世帯とも安全視型とした。なお、2回目のシミュレーション時の水害意識の型は1回目の結果に基づいて各世帯別に自動的に決定される。
- (b) 避難場所...すべての住民が知っているものとし、指定避難場所である磨屋小学校を設定した。
- (c) 避難経路...避難経験のある住民は最短経路選択ルールを、避難経験のない住民は避難場所の方角に向かうルールを用いることにした。
- (d) 気象情報...長崎水害では16時50分に大雨洪水警報が発令されていることから、大雨洪水警報をシミュレーション開始時刻から出した状態で適用を行う。
- (e) 水害情報...今本ら²⁾の調査によれば、長崎市では諫早市に比べて防水組織による活動が十分行われていないことが指摘されており、本適用例では水害情報は与えないことにした。
- (f) きっかけ情報...避難命令と隣人の勧誘との2つを用いる。長崎水害では、20時30分に長崎県警により報道機関を通じて避難の早期呼掛けが行わ

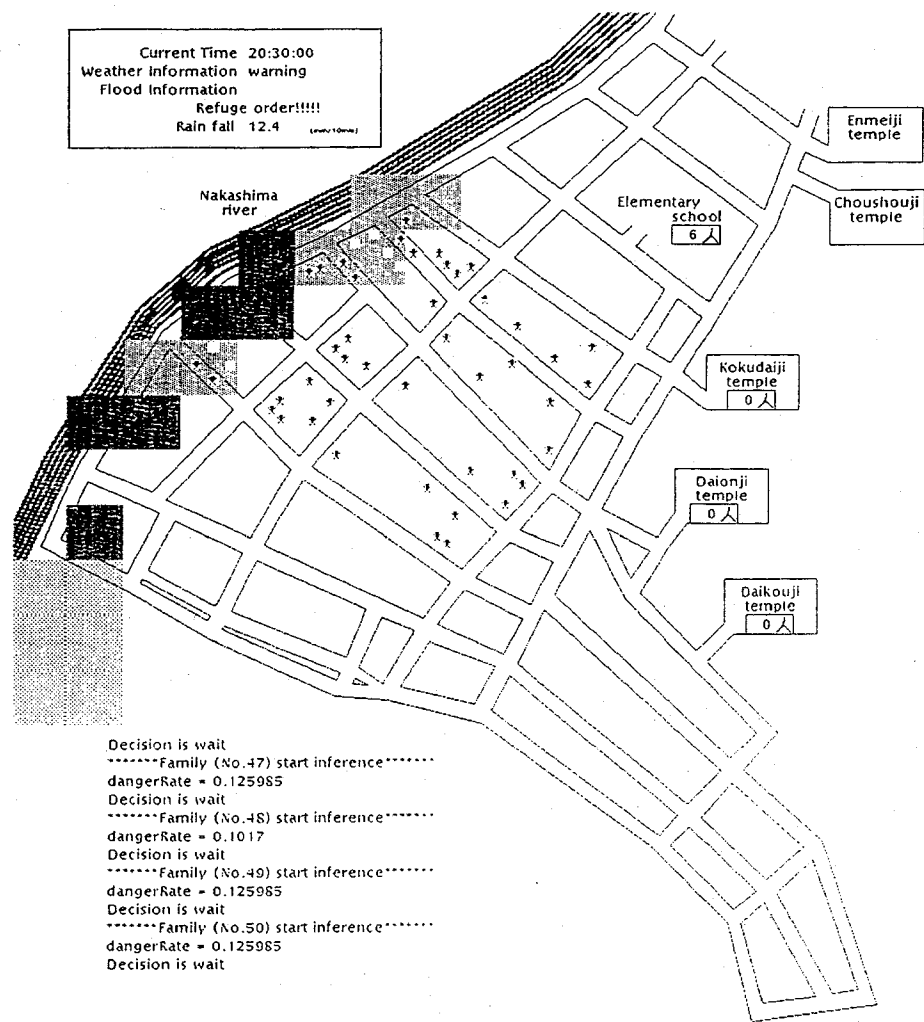


図-4 画面表示システムの出力例

れていることを参考に、シミュレーションでは避難命令を20時30分に出すことにした。また、隣人の勧誘を表現するため水害意識が危険視型の住民が避難開始を決定すると自分が住んでいる家に沿った道路に住んでいる住民を勧誘することになっている。

以上の条件のもとで行った1回目のシミュレーション結果を図-5(a)に示す。図-5(a)によれば、危険認識度が高くなったことによる自主避難はみられず、すべての世帯が20時30分の避難命令を受け取ったことにより避難を決意していることが分かる。また、21時40分以後避難している人数が一定であることは、避難開始の遅れた世帯が浸水により動けなくなっている状態を表している。最終的には、シミュレーションの対象とした50世帯のうち30%にあたる15世帯が避難行動を起こし、避難場所へ到達できた割合は22%という結

果となった。避難しなかった35世帯はどれも中島川から離れた地域の住民で、避難命令を受け取ってはいるが居住地域が浸水していないため危険認識度がそれほど上昇せず、避難しないという結果になったと考えられる。

なお、今本ら²⁾によれば、長崎での浸水避難地域での最終避難率は31%であり、今回全世帯の水害意識の型を「安全視型」として行なった図-5(a)のケースよりも9%程度高い。したがって、実際のケースとの最終避難率の差を水害意識の差ととらえると、実際の住民の意識レベルは「安全視型」から「やや安全視型」に分布していたものと推定することができる。ただし、時間別避難率については、このケースの情報の提供状況が実際と若干ことなることを考慮しても、報告されている値²⁾とは開きがある。したがって、水害避難マイクロモデルの同定に当たっては、水害意識の型だけでなく、情

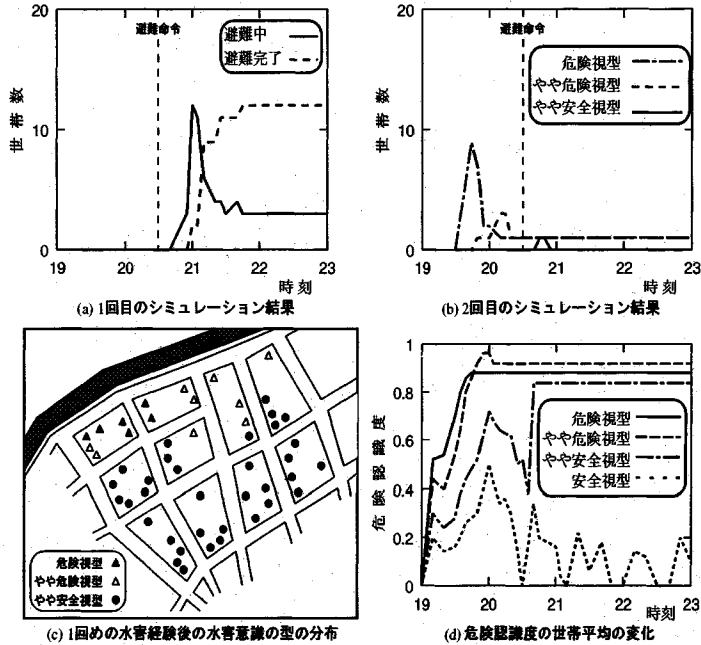


図-5 水害経験のシミュレーション

報の入手率や自主避難・指示避難の別を決定する推論ルールのパラメータ化など、モデルを構成する要素毎に評価指標を設定していく必要がある。

以上のシミュレーション結果を用いて、各世帯の水害意識の型を再設定した結果「危険視型」「やや危険視型」「安全視型」「やや安全視型」の4つの型の分類となり地理的に図-5(b)のようになった。図-5(b)でわかるように、中島川に近い世帯からほぼ危険視型、やや危険視型、やや安全視型、安全視型となっている。

次に、図-5(b)に示す意識の型を初期条件として、2回目の水害避難シミュレーションを行った。図-5(c)は各時刻に避難している人数を水害意識の型別に示したものである。図-5(c)から、危険視型の水害意識の世帯、やや危険視型の世帯は20時30分の避難命令発令以前に避難をしていることがわかる。また、やや安全視型の世帯は、避難命令発令後、ほぼ10分後に避難を開始しているが、これは、安全視型の世帯が、危険視型の世帯に比べ、水害に対する関心が低く情報の入手が遅れること、また、同じ情報でもその受け止め型が楽観的であるため避難決意に至るのが遅れることの2つの理由による。さらに、1回目のシミュレーションの際には50世帯中15世帯が避難を開始したのに対し、2回目には水害意識が安全視型の住民はまったく避難をしていないことがわかる。

水害意識の型別に各世帯の危険認識度を平均した値

の時間変化を図-5(d)に示す。危険視型、やや危険視型の住民の危険認識度が、早く上昇し、この値によって自主避難が誘発されていることが確認できる。危険視型の世帯は19時40分から、やや危険視型は20時からやや安全視型は20時30分からグラフの値が一定になっているのは各時刻に該当する意識の型の世帯が全て避難を開始したためである。また、やや危険視型の住民は20時35分ごろから急に危険認識度が上がっているが、これは避難命令の影響が現れたものと考えられる。

以上、2つの洪水を連続して経験するという水害避難シミュレーションを行ったが、本研究で提案した手法で、避難命令を受け取る以前の自主避難や避難命令を受け取っても避難しないというケースが再現できることが確認できたといえる。

b) 避難命令発令時期の違いによる避難行動の変化

ここでは、避難命令の発令時期の異なる3通りのシミュレーションを行い、住民の避難行動の違いを観察することにより避難命令の適当な発令時期について考察する。なお、避難命令の発令時期の効果を見るため、水害意識の型を(a)で与えた「安全視型」よりも意識レベルの高い「中立型」としている。その他の条件は前項の適用と同様である。ただし、避難命令の発令時期を19時30分(ケース1)、20時(ケース2)、20時30分(ケース3)とする。各ケースのシミュレーション結

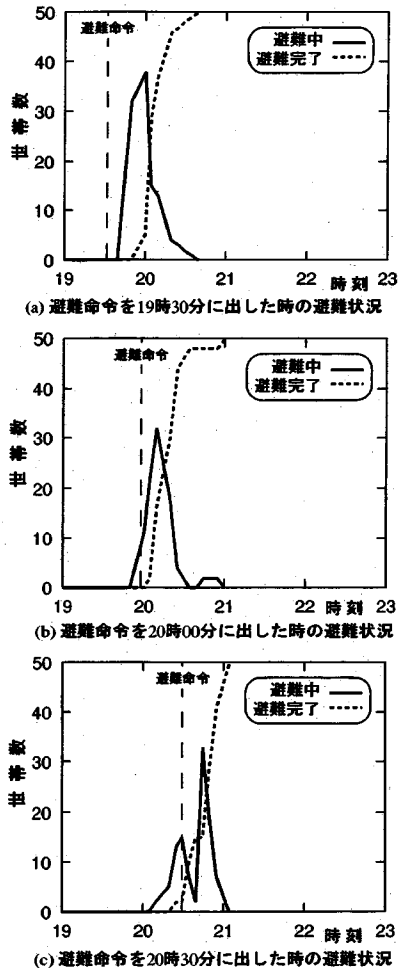


図-6 避難命令の発令時期を変えた場合の避難状況

果を図-6に示す。全世帯の意識型を「中立型」としたことにより、図-5のケースと異なり、50世帯すべてが避難行動を起こすという結果になっている。

図-6から、避難命令の発令時刻が19時30分の場合(ケース1)と20時の場合(ケース2)では、避難状況がほぼ同じであることが分かる。いずれのケースでも20時前後に大挙して避難を開始しており、20時30分にはほぼ全員の避難が完了している。両ケースとも20時00分頃まではいずれも危険認識度がほぼ等しく19時50分頃に0.6を超え、危険認識度が「高い」の状態になっている。したがって、避難命令を受け取っている世帯は危険認識度が「高い」状態になる19時50分直後に避難を開始し、ケース2においても20時以降避難命令を受け取るとすぐに避難を決意した世帯が多いため、両者の避難状況が似通ったものになったと言える。

続いて、ケース3の結果をみると、まず20時20分頃に第1陣の避難開始が観察できる。これは20時10分から浸水が始まったことにより自主避難が行われたものである。ついで、20時45分頃に第2陣の避難開始が見られるが、これは、20時30分に発令された避難命令により誘導されたものであると考えられる。全員の避難が完了した時刻は21時10分であり、これはケース1,2と比較すると約30分遅れている。ケース1,2の避難状況がほぼ同じであり、これらとケース3の避難完了の差が避難命令の発令時刻の差とほぼ等しいことから、この水害における避難命令は8時頃までに発令するのが適当であり、8時以降であると、避難命令発令の遅延が直接避難行動の遅延という形で現れてくると考えられる。このことは、避難行動の制御という観点からは、情報を受け取る住民の意識と、情報の発令時期・内容との関係が重要な要素であることを示唆している。

5. 結 語

本研究では、水害時の避難行動の制御方法や情報の伝達方法を分析するため、経験的あるいは常識的に想像される人間の行動様式や、現地調査の結果指摘されている行動パターンを、プロダクションシステムやファジイ推論といったAI手法を用いて計算機内に蓄積することにより、住民の避難行動をそのメンタルな意思決定過程をも含めてシミュレーションする概念モデルを開発した。

なお、本論文では、モデルを構築していく上での基本的な考え方やモデル構造を中心に報告したが、今後、汎用的なモデルの同定方法について考察していく必要がある。これについては、4.(2)(a)のシミュレーション結果について考察したように、例えば、シミュレーションの結果得られる最終避難率と実際の避難率とが一致するように、初期条件である水害意識の型の分布を調整するといった方法が考えられる。しかし、本モデルの最大の特徴は、各世帯が避難に至るまでの意思決定過程をシミュレーションできるところにあり、この特徴を生かした同定方法を開発しなければならない。その意味では、時間別避難率、最終避難率、避難情報入手した時刻の分布、更には、避難を決意した直接的動機(例えば、自主避難・勧誘避難・指示避難)の時間別割合などを指標として、水害意識の型を含むパラメータを同定することを考える必要がある。具体的には、同定対象地域に対して実際に行なったアンケート調査と同様なアンケートに、本モデルによって計算機上に再現した世帯に避難シミュレーション終了後に解答させることによって、両者の解答を比較しこれらが

一致するようにモデルパラメータを決定するという方法である。現在、この方向で、水害避難マイクロモデルの同定システムを開発中であり、別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 道上正規：水害時の避難行動に関する研究，鳥取大学工学部研究報告第10巻，pp. 757-780, 1979.
- 2) 今本博健，石垣泰輔，大年邦雄：昭和57.7長崎災害における住民の避難行動について，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp. 127-138, 1982.
- 3) 今本博健，石垣泰輔，大年邦雄：昭和57.8大和川水害における住民の避難行動について，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp.139-148, 1982.
- 4) 山田啓一：低平地における浸水時の避難計画に関する一考察—岐阜県安八町の事例から—，水利科学，Vol. 28, No. 3, pp. 62-81.
- 5) 吉本俊裕，須見徹太郎，永友嘉嗣：水害時の避難行動に関する調査報告書—緑川水系御船川昭和63年5月洪水における避難行動—，土木研究所資料第2862号，1990.
- 6) 吉本俊裕，笛田俊治，池田幸徳：水害時の避難行動に関する調査報告書(2)—六角川平成2年7月洪水における避難行動—，建設省土木研究所資料第3098号，1992.
- 7) 吉本俊裕，笛田俊治，池田幸徳：氾濫特性の異なる流域での避難行動，土木学会水工学論文集，第37巻，pp. 233-238, 1993.
- 8) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学博士論文，1983.
- 9) 高橋 保，中川一，東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報第32号B-2，pp. 757-780, 1989.
- 10) 伴勇二，長尾正志，増岡浩仁，高間真司：名古屋市南部における浸水水位変化を考慮した水害避難のシミュレーション研究，土木学会第43回年次学術講演会概要集，pp. 236-237, 1988.
- 11) 吉本俊裕，須見徹太郎，永友嘉嗣：避難シミュレーション—吉田川(鳴瀬川水系)を事例として—，建設省土木研究所資料第2933号，1992.
- 12) 例えば，情報処理学会編：知識工学，オーム社，1987.
- 13) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.
- 14) 高埜琢馬，椎葉充晴，堀智晴，佐々木秀紀：協調問題解決型洪水制御支援環境の設計，土木学会水工学論文集，第34巻，pp. 595-600, 1990.
- 15) Goldberg, A., and Robson, D.: Smalltalk-80 言語詳解，相磯秀夫監訳，オーム社，1987.
- 16) 井上和也：開水路非定常流れの数値計算法とその水工学への応用に関する研究，京都大学博士論文，1986.

(1993.11.22 受付)

MICRO MODEL SIMULATION AND CONTROL OF FLOOD REFUGE ACTIONS

Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Tomoharu HORI

A micro model for flood refuge activity simulation on the family level is designed here by the use of AI techniques such as production system and fuzzy inference. Control factors of individual refuge activity are classified into three categories: initial factors such as the sense of flood damage and daily life pattern, mental factors such as the extent of flood danger recognition and attention to information, and external factors such as provided information and inundation level. And interaction among these factors and refuge activity are modelled with knowledge-based systems. Consequently, the model enables us to incorporate directly the results of questionnaire researches about flood refuge activity into the refuge simulation on a computer. The whole system is implemented in Smalltalk-80 as a object-oriented model.