

姉川・高時川下流域におけるエージェントベース広域避難シミュレーションシステムの開発*

Agent-Based Flood Evacuation Simulation across Administrative Borders in Downstream Basin of Ane and Takatoki River *

枝廣篤**・畑山満則***・多々納裕一****・湯川誠太郎*****

By Atushi EDAHIRO**・Mitunori HATAYAMA***・Hirokazu TATANO****・Seitaro YUKAWA*****

1. 本研究の背景および概要

滋賀県湖北地域に位置する姉川・高時川流域は、洪水により相当な被害が生じる恐れがある河川として、滋賀県によって「洪水予報河川」に指定されている。両川とも比較的短く、またともに天井川であるため、氾濫流が大きく、洪水時の被害が甚大となる可能性が高い。

特に両川の合流点に位置する虎姫町（人口約 5800 人、面積 9.45km²）は、町の南端と西端を堤防で囲われる形となっている。そのため、破堤すれば町域のほとんどが浸水する可能性を持っており、避難所も水没する可能性がある。また、水が長期に亘って滞留すると考えられており、湖北地域の中でも特に水害リスクが高い地域である。近年では 1975 年の台風 6 号における高時川堤防決壊以来、大きな水害には見舞われていないが、2006 年 7 月には梅雨前線豪雨により姉川・高時川ともに越流寸前の状態となったことなどを受け、虎姫町では 2008 年に洪水ハザードマップ¹⁾を作成、防災訓練の実施など、町民の安全確保に向けて防災活動に積極的に取り組んでいる。このハザードマップでは、100 年確率の大雨によって両川が氾濫した場合には、町中心部でも深さ 1.0m 以上、町域のほとんどの領域で深さ 2.0m 以上の浸水被害を受けると想定されている。特に昭和中期以後に建設された新しい住宅地区は、低い土地に建設されたこともあり、5.0m 以上浸水すると想定されており、一般的な住宅では 2 階に避難してやり過ごすことは不可能である。また避難所として、町中心部にある小中高校

*キーワード：防災計画、エージェントシミュレーション

**正員、情修、西日本高速道路株式会社

***正員、工博、京都大学防災研究所 社会防災研究部門

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、Tel 0774-38-4333

E-mail: hatayama@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

****正員、工博、京都大学防災研究所 社会防災研究部門

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、Tel 0774-38-4038

E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

***** 学生員、京都大学情報学研究科

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、Tel 0774-38-4037

E-mail: yukawa@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

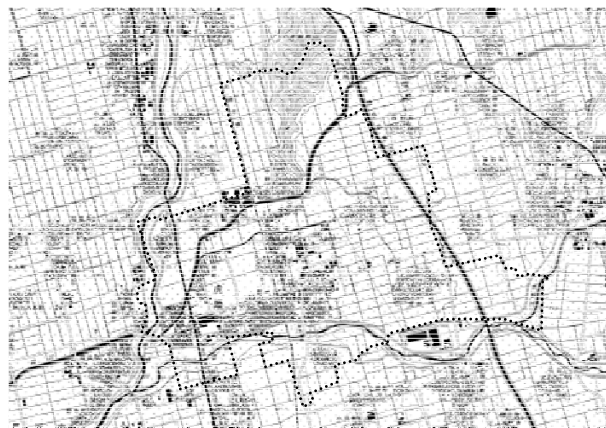


図-1 虎姫町付近の地形図（点線内が町域）

および体育館が指定されているが、避難先の一つである体育館は平屋建てであり、このような洪水が発生した場合には避難所として使用できない可能性が高い。各学校については 3 階に避難すれば大丈夫であると考えられるが、3 階のみで全町民を収容することは不可能である。このように、浸水区域想定のために滋賀県が行ったシミュレーション結果²⁾を勘案すると、住民の安全な避難先を確保するために、市町界を越えた避難（広域避難）をも念頭に入れた避難計画を検討する必要がある³⁾。

このような背景を受けて、本研究では地域間の連携を考慮した広域避難を想定し研究を行うものとする。具体的には、虎姫町における広域避難計画作成を支援する情報システムの構築を目的とする。研究の手法として、まずアンケート調査により虎姫町民の水害リスクの認知、水害時の避難行動、広域避難に対する意識と平常時の生活行動について分析した。これらの検討結果をもとに、マルチエージェントシミュレーション手法を用いた水害避難評価ツールを構築し、広域避難を含めた様々な避難計画に関して考察を行った。

2. 水害時の住民の避難行動

(1) 避難行動の特徴

水害時に住民がどのように行動するか、あるいは実際の水害時にどのような行動をとったか、といったことに関しては古くから研究が行われており、避難勧告など

が発令されても、避難をしない住民が多いことが知られている。例えば村上ら⁴⁾の調査によると、2005年9月の台風14号災害時に岩国市では、16,587世帯、41,779人に対して避難勧告ないし避難指示が発令されたが、ピーク時ですら避難者数は3,079人と、対象の1割にも満たない。過去の被害においては、避難行動を始めるタイミングが遅く、既に浸水によって移動中に立ち往生してしまう例や、自宅に取り残されて2階の窓や屋根から救助されるという例も見られた。

また中田ら⁵⁾の調査では、2006年7月の川内川豪雨災害において、過去の経験が避難行動にどのように影響したかが示されている。単に被害を受けたという経験の有無はあまり避難行動に影響しなかった一方で、過去の避難経験の有無が避難行動に関連していたことが示されている。また避難行動と事前準備との関係は、防災訓練への参加や避難所・避難経路の確認、家族との連絡方法の確認との相関が大きい。実際の避難に際しては、片田らの調査⁶⁾などによって、世帯単位で避難行動を行うことが多いことが明らかにされている。

(2) 広域避難の特性

市町界を越えた広域避難を実施するにあたっては、周辺町や県との連携が大きな課題である。例えば他市町の指定避難所を避難先とする場合、避難所の開設や運営は基本的に各自治体が担うため、避難先の市町で避難所が開設されていない状況も発生しうる。そのための連絡体制や費用負担の問題、また収容可能人数の問題など、調整を要する項目は多岐に亘る。そのような問題を受け、湖北地域では収容力の大きい長浜ドームを広域避難のための避難所として使うことが検討されている。

また市町界を越えた避難では、必然的に移動距離が長くなるため、より早いタイミングで避難行動を開始する必要や、徒歩以外の移動手段を確保する必要が生じる。移動手段の確保についても様々な課題がある。例えば各世帯が自家用車を用いて避難する場合には、交通集中による渋滞の発生が危惧される。一方、役場がバスを手配するなどして集団で避難する場合には、更に早いタイミングで避難を開始し、一時集合場所に集まる必要がある。また全町民をバスで輸送するとなると相当の延べ台数が必要であり、バスの手配に掛かる時間と全町民をピストン輸送するために掛かる時間なども見込む必要がある。

このような点から、広域避難を行う場合には相当に早いタイミングで意思決定を行う必要があると考えられる。そのため場合によっては、雨が降り始めたらず、あるいは雨が降る前から対応を開始することが求められる。しかしながら短時間の雨量予測の困難性から、洪水となるかどうかは必ずしも高い精度では予測できない。したがって、万全を期して洪水となる可能性が少しでも

あれば広域避難の意思決定を行うというようなことになれば、必要でなかった避難を行ってしまう「空振り」が続くことにもなりかねない。空振りを続ければ情報の信頼度が低下し、情報を受け取っても住民が避難しないという「オオカミ少年効果」が懸念される。

特に、災害時要援護者の広域避難には大きな困難が伴うことが予想される。例えば寝たきりの患者の場合、専用のベッドを装備した車両でなければ移動は困難であるが、そのような車両は福祉施設等にわずかに存在するのみであり、一度に多くの患者を運ぶことは難しい。また仮に避難したとしても、避難先にバリアフリートイレをはじめとした、生活に必要な諸設備が不足している可能性も高い。そもそも災害時要援護者は、自力での移動が困難なために援護を必要としている場合が多く、移動することに対する心理的ハードルは相当に高いと考えられる。にもかかわらず上述のような事情から、健常者よりも更に早いタイミングで行動を開始する必要があり、避難行動の空振りの可能性は更に高くなる。

このような事情を受けて、より多様な避難計画が求められている。すなわち、各住民の状況に応じて避難先などを分けるなどの対応が考えられる。例えば災害時要援護者は設備が整っている福祉施設や病院を避難先としたり、一時的に最寄りの高い場所（3階以上の建物や丘陵）に避難した上で、落ち着いてから受け入れ先に移動したり、といったことが考えられる。

(3) 住民の行動把握のためのアンケート調査

a) アンケートの概要

虎姫町の住民が水害発生時にどのような行動をとるのかを把握するため、アンケートを実施した。アンケートは世帯単位で回答してもらうこととし、町役場から各字経由で全戸に配布、回収は郵送によって行った。配布日は2008年12月15日であり、12月31日を期限として回収した。配布数は1837通で、回収数は237通（回収率12.9%）であった。

b) アンケート項目の内容

アンケートは大きく4部に分かれている。第1部では、現時点での水害に関する認識や対策状況を知るため、特別な情報を提供せずに水害リスクやハザードマップ、自治体等から提供される情報の認知状況について聞いた。第2部では自治体等から提供される情報について紹介した上で、それぞれの情報が提供されたタイミングでどのような行動をとるかを聞いた。世帯単位のアンケートではあるが、昼間時などで家族が別々の場所に居ることを考慮して、まず避難する際に家族の集合をどうするかを聞いた。また全世帯アンケートである点を考慮して、水防活動や要援護者の救援などについて各世帯が参加するかどうかを聞いた。洪水対応や避難開始のタイミングは

公的機関からの情報提供だけでなく、自治会や近所などの動きがトリガーとなる可能性を考慮して、声掛けや周囲の動きも選択肢に入れた。これらはエージェントのルールをより高度化する際にモデルに取り込むことも想定している。第3部では検討中の広域避難に関する意向を聞いた。まず代替案の1つである、長浜ドームを避難所として使う場合について、適切と考える移動手段を聞いた。また、各世帯が自家用車を用いて避難する場合と、町がバスを用意して集団で避難する場合、それぞれの長短を示した上で、適切と考える方策を聞いた。また避難先を自由に選べる場合にどこへ避難するかを聞いた。どちらも、町外へ避難する場合には、限られた出入口を経由することになるので、特にボトルネックとなることが想定される橋について、どの橋を経由して町から外に出るかを聞いた。最後に第4部では家族構成と、それぞれの1日の行動を聞いた。この設問は、避難行動に移る前に家族が集合する場合に、どの程度時間が掛かるかを推定するために設定した。

c) アンケート結果

虎姫町の持つ水害リスクについては201件(84.8%)が「知っていた」としており、かなり多くの住民が虎姫町が水害に対して脆弱な立地にあることを知っていることが分かる。また「知っていた」と回答した世帯のうち、約3分の2は水害の危険性を知った経緯として「過去の経験」を挙げており、水害について実感を持っていると言える。一方で図-2に示すように、水害に対する備えに関する項目では、回答があった世帯のうち約半数が「特になにもしていない」と回答している。

また、同図からは事前に「非常持ち出し袋の準備をする」、「高価な家財を2階以上に置く」等の対策を行っている家庭は極めて少ないことが見て取れる。これらの作業は避難行動の直前に行うことが可能である。実際に避難の前にする行動に関するアンケートの項目では、「何もせずすぐ避難する」世帯に比べ、「非常用品の準備」をすると回答した世帯が圧倒的に多い。しかし、避難行動直前にこれらの作業を行うことはすなわち避難行動の開始のタイミングの遅れにつながるため、避難情報の発信側の予期せぬタイミングで、住民が避難を開始する可能性を示している。

避難開始のタイミングに関する設問では、「避難勧告」の後に避難を開始するとした回答が半数近くおり最多であった。しかし実際には、避難勧告を受けてから前述の対策を取ったのちに避難する世帯、何も対策を取らずに避難する世帯が混在しているものと考えられる。避難先に関する項目では「字の集会所や町の指定避難所」

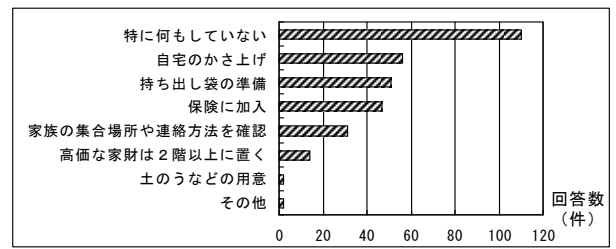


図-2 水害に対する備え (複数回答)

という回答が多く、検討課題となっていた「普段利用する福祉施設等」を挙げた回答はなかった。

3. シミュレーションの設定と実施

(1) シミュレーションの概要

本研究ではこのような広域避難について、世帯単位での避難行動を基本としてシミュレーションを行う。シミュレーションは、構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ「KK-MAS」を用いて実施した。「KK-MAS」は空間をラスタ型で扱うため、メッシュで計算されている浸水シミュレーションとの相性がよく、またセル単位で占有等のチェックが行えるため、混雑の表現が容易である。

虎姫町の各世帯をエージェントとし、それぞれのエージェントが固有の出発点から目的地を目指して移動するものとする。具体的には、各世帯エージェントの初期値として、出発ノード、目的ノード、移動開始タイミング、占有セル数を与える。また変数として、ステータス、座標、当面向すべきノード、軌跡の座標を保持する。出発ノードから目的ノードまでの経路は予め決めておく。主要なエージェントおよび変数の内容を図-3に記す。

シミュレーションの各ステップにおいて、エージェントはステータスの値に応じた行動を行う。ステータスが「未出発」のときには、ステップ数と移動開始タイミングを比較し、現在のステップが移動開始タイミングと等しくなったら、ステータスを「交差点上」に変更する。ステータスが「交差点上」のときには、次に進むべきノードを確認した上で、その方向に進む。交差点を離れたらステータスを「道路上」に変更し、引き続き移動する。ステップごとに現在座標をチェックし、目的ノードに達したらステータスを「目的地到着」に、その他のノードに達したら「交差点上」に変更する。これを繰り返して、各エージェントは目的地まで移動を行う。なお移動の際に、移動先候補となるセルに別のエージェントが居る場合、移動先候補の両隣を新たな移動先候補とする。両隣のセルも他のエージェントが占有している場合は、1ステップ休止する。

出発ノードおよび目的ノードのデータは「デジタル道路地図」のデータから、交差点ノードおよびリンク端点ノードを抽出して用いる。出発ノードは各世帯の最寄りノ

ードとする。各ノードに割り当てるエージェント数は住宅地の面積比で按分した。具体的には国土地理院1/25,000地形図のデータから住宅地に相当する画素数を求め、各画素から最近傍となるノードを決定した。このようにして各ノードに割り当てられた画素数の比によって、各ノードを出発ノードとするエージェント数を決定した。目的ノードは目的とする避難先の最寄り（町中心部の交差点や橋を渡った先の交差点など）を抽出した。

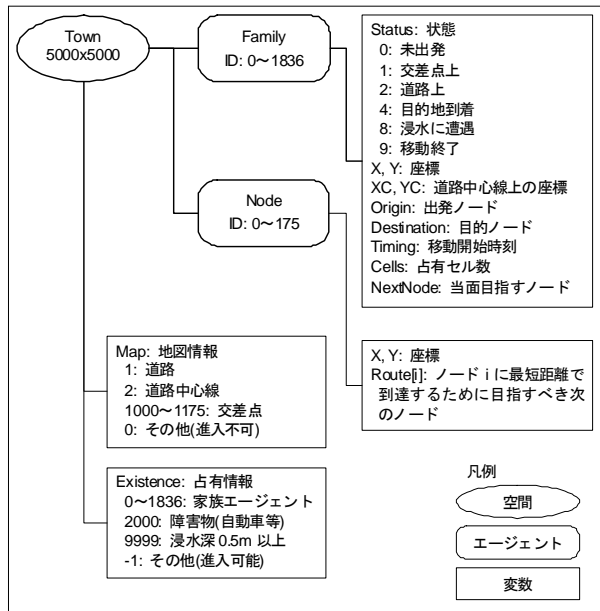


図-3 主要なエージェントおよび変数

シミュレーションの空間の設定に関しては、町の広さを考慮して、東西方向、南北方向ともに1セルが1mとなる、5,000×5,000のラスタ空間を用意した。エージェントが移動するための道路は、デジタル道路地図のデータから変換した。各エージェントは、シミュレーションの1ステップ（1秒に相当）ごとに、他のエージェントが存在しないセルに1マスだけ進行する。また、浸水深0.5m以上の浸水に遭遇すると、避難失敗とした。

(2) アンケート結果を用いたパラメータ設定

前章のアンケート結果から、避難行動の特性に強く影響する要素として、避難開始タイミング、避難前の行動とその所要時間を分析した。避難開始のタイミングと避難前に行う行動の関係を表-1に記す。所要時間は自由記入のものを、10分単位に切り上げて集計している。どちらも無回答は除外している。なお避難開始のタイミングは、表に示した選択肢以外にも「自治会などからの声掛けに応じて」および「周囲の家庭が避難しているのを見て」という選択肢もあったが、自治会は避難勧告のタイミングで声かけを行うことからここでは避難勧告に合算した。周囲の家庭をトリガーとした回答は全体で1件と少なかったため除いた。

次に、避難前の行動と所要時間の関係を表-2に記す。これらの中で5%以下の少数回答を除いた組み合わせを、1837世帯の家族エージェントに割り当てた。すなわち、避難開始タイミング、避難前の行動、その所要時間の組み合わせの割合を、虎姫町の1837世帯に乗じて、それぞれの組み合わせで行動するエージェント数を決定した。これを表-3に記す。

表-1 避難開始のタイミングと避難前の行動

回答数 (件)	避難前の行動				
	何も しない	非常用品 の準備	周囲への 声掛け	非常用品の 準備と周囲 への声掛け	
タイ ミ ン グ の 開 始	大雨洪水警報	0	8	2	2
	避難準備情報	1	19	7	3
	避難勧告	10	67	17	8
	避難指示	5	52	18	5

表-2 避難前の行動と所要時間

回答数 (件)	避難前の行動				
	何も しない	非常用品 の準備	周囲への 声掛け	非常用品の 準備と周囲 への声掛け	
所 要 時 間 (分)	10	4	28	19	3
	20	1	16	2	3
	30	0	18	5	1
	40	0	2	0	0
	50	0	0	0	0
	60	0	2	0	1

表-3 設定した各世帯の避難開始までの所要時間

避難開始の タイミング	避難前の行動 と所要時間	世帯数
避難準備情報	用品準備 10分	91
	用品準備 20分	52
	用品準備 30分	59
避難勧告	用品準備 10分	321
	用品準備 20分	184
	用品準備 30分	207
	声 掛 け 10分	181
避難指示	用品準備 10分	249
	用品準備 20分	142
	用品準備 30分	160
	声 掛 け 10分	191

(3) シミュレーションの実施と結果

以上のように設定した空間およびエージェントにおいて、シミュレーションを実施した。用いたハザードの

シナリオは、滋賀県の実施した氾濫シミュレーションⁱⁱⁱに基づいている。この氾濫シミュレーションでは水系全域に対して一様に 100 年確率の降水が生じたときの、内水氾濫および河川からの溢水による浸水深を算出している。計算範囲を 50m メッシュに区切り、ステップごとにそれぞれのメッシュに降った水量と流出量を計算し、その差を浸水量としている。なお、今回は 15 分ごとの時系列に応じた浸水深データを用いた。

勧告等の情報発令のタイミングは、町域周辺の水位観測地点（4 地点）の水位によって設定した。観測地点の水位が規定された高さに達すると避難勧告が発令されることになっているため、今回のシミュレーションでは 4 地点のうち最も早く避難判断水位に達した時点をもって避難勧告が発令されるものとした（今回は、浸水想定シミュレーションから、降雨開始後 5.8 時間で発令されるものとした）。また、避難準備情報および避難指示は、避難勧告のタイミングからそれぞれ 20 分前、40 分後に発令されるものとした。

避難行動のシナリオは 3 パターン設定した。シナリオ A は町中心部の指定避難所に全世帯が集まってくるシナリオであり、従来の避難計画で設定されているものである。シナリオ B は町東端にある北陸自動車道高架下に全世帯が集まってくるシナリオであり、協議会等で検討されてきた「北陸自動車道を活用した広域避難」に対応するものである。シナリオ C は各世帯が最寄りの橋などを通して町外の非浸水区域を目指すシナリオである。各シナリオは各エージェントの目的地が異なるのみで、他の条件は同一である。

各シナリオのシミュレーション結果を図-4 に示す。

ここでは、エージェントが町外に出れば浸水に遭遇しない設定となっているため、多くのエージェントが短い距離で町外に出ることのできるシナリオ C において、無事に避難を完了させたエージェントが多くなっている。一方でシナリオ B は、町の東端まで移動する必要があるため、町の中心部に集合するシナリオ A に比べて町西部の住民が集合するまでの時間が多く掛かり、浸水に遭遇するエージェントが増えていると考えられる。また、現行の避難計画で設定されているシナリオ A においても、150 以上のエージェントが浸水に遭遇する結果となった。

浸水に遭遇したエージェントについて分析すると、出発ノードが川に近いエージェントほど、浸水に遭遇していることが分かった。特に、行政が主に注目している姉川・高時川沿いのノードを出発するエージェントではなく、町内を流れる田川沿いのノードを出発するエージェ

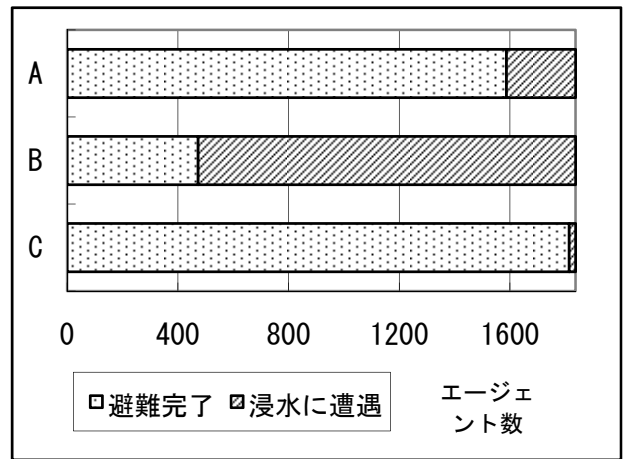


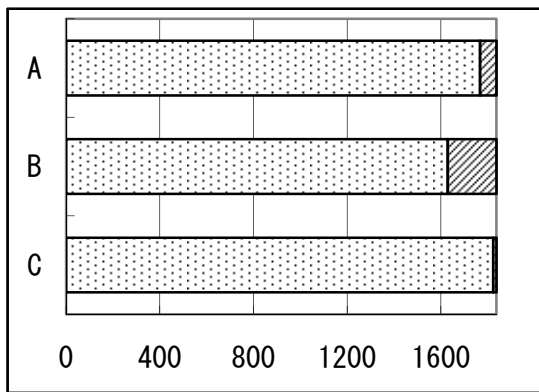
図-4 各避難シナリオの結果

ントが、シナリオに共通して避難途中で浸水に遭遇する結果となった。

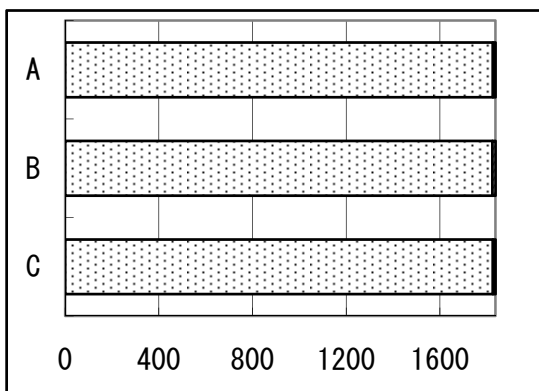
次に各避難シナリオにおいて、避難勧告等の発令タイミングを早めてシミュレーションを行った。結果を図-5、図-6 に示す。このように避難勧告等を 2 時間早めれば、ほぼ全ての住民は避難を完了することができる。また 1 時間早くするだけでも、結果が大幅に改善された。

しかし、前述でも触れたように避難情報の発信のタイミングを早めることは技術的に困難であることを勘案すると、現実的ではない。発令タイミングではなく避難開始時刻を変えるためには、むしろ住民の意識を変えることや局所的に（例えば、字ごとに）判断情報を追加し、避難情報発令のタイミングを柔軟に変えることのほうが、現実的である。本シミュレーションでは、避難準備情報と避難指示情報の発令の間には 60 分の開きがあることから、避難指示でしか避難開始しない世帯が避難準備情報をトリガーとして避難開始するように意識を変えるだけで、避難情報の発令タイミングを 1 時間の早めることと同等の効果が得られると考えられる。ただし、このような意識の変化をもたらすには、その必然性を理解してもらう必要があり、局所的にきめ細かな対応策をたてる必要があることも事実である。

また、現行の避難計画であるシナリオ A において、実際には地域内の避難所に全世帯を収容できるスペースはなく、避難所自体が浸水し被害を受けてしまう可能性も指摘されている。このような課題を克服し、より現実的で効率的な避難のためには、移動の困難な要介護者は最寄りの避難所に避難させ、車を持っている住民は車で遠方に避難させるなど、エージェントごとに用いるシナリオを変化させ、最適化を行う必要があると思われる。



図－5 勧告等発令を1時間早めた場合



図－6 勧告等発令を2時間早めた場合

4. まとめ

マルチエージェントシミュレータに空間Townを配置し、その上で移動開始タイミングと目的地が互いに異なるエージェントFamilyを動かした。それと浸水深データを重ねて評価することで、避難完了するエージェントと途中で立ち往生するエージェントに分類した。設定した目的地の違いによって、無事に避難完了するエージェントの割合は大きく異なることが分かった。特に長浜ドームへの広域避難を想定したシナリオでは、既定の避難勧告より相当早いタイミングで避難の意思決定を行わなければ全住民を安全に避難完了させられないことが分かった。

今回は町外に到達した時点で避難完了としたが、例えば具体的な施設を目的地としたり、町外に出て一定距離以上離れることを避難完了としたりすることもエージェントFamilyの持つ変数Destinationを変えることで自由に変更することが可能である。またハザードのシナリオや、避難勧告のタイミング、住民の避難行動を様々に変更することで、「無事に避難が完了する世帯の数」によって様々な避難計画を評価することが可能となる。

なお、本システムを活用してより効率の良い避難計画を検討しても、実際に住民が避難を行わなければ意味がない。そのためには検討した避難計画の意味や、避難しなかった場合の危険性などについて周知することが重要である。本研究の主旨からは逸れるが、同様のシミュレーションを避難計画の検討だけでなく、リスクコミュニケーションのツールとして活用することで、住民に対する周知にも役立てることができるのではないかと考えている。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。今回のシミュレーションでは、避難行動の途中で浸水に遭遇した場合、そこで立ち往生する設定になっているが、実際には回り道をして目的地をめざすなり、別の避難先を新たな目的地に設定するなりして、移動を続けると思われる。また広域避難のために自動車を用了した場合の渋滞や歩行者との相互作用、災害時要援護者への対応などを盛り込み、より現実 に即した避難計画の検討を行うことが必要である。

謝 辞

本稿において重要な部分を占めるアンケート調査に協力いただいた虎姫町総務課、滋賀県における治水政策の考え方や浸水区域想定などの情報を提供いただいた滋賀県土木交通部河港課の方々に感謝する。また、本研究は、京都大学防災研究所 平成20年度防災研究推進特別事業経費による研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 虎姫町：虎姫町洪水ハザードマップ，2008
- 2) 滋賀県：浸水想定区域図とは？，
<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/shinsuisou/tei/setumeishinsui.pdf>
- 3) 湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会：広域避難の連携に関する基本協定書，2008
- 4) 村上ひとみほか：台風0514号による錦川の洪水時の住民避難行動に関するアンケート調査，2008
- 5) 中田昇吾ほか：平成18年7月川内川豪雨災害における住民の避難行動と災害外力の相関分析，第27回日本自然災害学会学術講演会概要集，2008
- 6) 片田敏孝ほか：平成10年8月末集中豪雨災害における郡山市内の対応行動に関する調査報告書，
<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/modules/newdb1/detail.php?id=1>，1999