

# 建物の避難信頼度算定に関する一考察

A consideration of reliability of evacuation in buildings

保田敬一\*, 白木 渡\*\*, 井面仁志\*\*\*, 堂垣正博\*\*\*\*

Keiichi Yasuda, Wataru Shiraki, Hitoshi Inomo and Masahiro Dogaki

\*博(工), 株式会社ニュージェック, 道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

\*\* 工博, 香川大学教授, 工学部 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\* 博(工), 香川大学准教授, 工学部 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\* 工博, 関西大学教授, 環境都市工学 部都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

After Great Hanshin Earthquake, the way of thinking of the soft disaster prevention becomes important. In this study, we tried to evaluate a function to belong to safety to be included in the demand performance of the institution. The evacuation reliability calculates it after we take evacuation, and having simulated it. The method of the calculation compared a method to calculate from a frequency total of evacuation completion time (1), a method to use the mean of the distribution system that we estimated from histogram in evacuation completion time (2) for, a method to calculate from the mean in evacuation completion time and the ratio (3).

*Key Words: reliability of evacuation, multi state system, performance based design, simulation of evacuation*

キーワード: 避難信頼度, MSS, 性能設計, 避難シミュレーション

## 1. はじめに

我が国では、高度成長期に社会基盤施設の整備が急速に進み、多くの施設が建設された。これら膨大な社会基盤施設は生活や社会経済活動になくてはならないものとなっている。しかし、1995年の兵庫県南部地震は市民生活や経済活動を支える社会基盤に多大の被害を与えた。この地震では、構造物の倒壊などの1次災害に加え、火災などの2次災害によって多くの人的被害が発生した。その原因として、情報通信システムの麻痺によって被害状況の把握が遅れたことや、交通網の麻痺によって消火作業や救助活動が十分に行えなかったことなどが考えられる。

これらの事実を受け、近年の防災に関わる研究は、耐震設計の根本的な見直しなどのハード面の対策だけでなく防災システムの構築など、ソフト面の対策も重視されつつある。しかし、地震予測、被災予測、被災後のライフラインの確保および住民の防災に対する意識強化などといったソフト面の対策に関する研究では、まだ十分な成果はあがっておらず、都市防災のためのソフト面の対策に関する研究が急務である。さらに、国の公共施設の耐震性向上策を取り上げてみても、高速道路などは比較

的進んではいるが、学校などは進捗が遅く、施設の種別によって差があることも事実である。このようにハード面での対策が遅れている施設については、短時間でしかも少ない予算で対応可能なソフト面の対策が求められる。

以上、施設に要求される性能の多様化とハードプラスソフト防災の動きという背景から、本研究では、施設の要求性能の中の安全性に属する機能を評価する試みとして、ハード面での保有性能とソフト面での保有性能の両面を考慮した避難信頼度を算定する。MSS (Multi State System)<sup>1)</sup>の概念を導入した多段階の信頼性評価手法を検討する上で、避難信頼度を算定する方法を複数検討した。避難信頼度は避難シミュレーションを行った上で算定するが、(1) 避難完了時間の頻度累計から算定する方法、(2) 避難完了時間の分布系の平均値から算定する方法、(3) 避難完了時間の平均値と比率から算出する方法について比較・検討を行った。

## 2. 避難信頼度

避難信頼度も性能設計体系のもとに整理されるのが望ましい。2001年4月に土木学会から刊行された「環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン」<sup>2)</sup>は、設計にお

いて経済性や安全性、使用性、施工性、環境負荷、景観などの要求機能や要求性能を階層構造で定義したものである（図-1参照）。

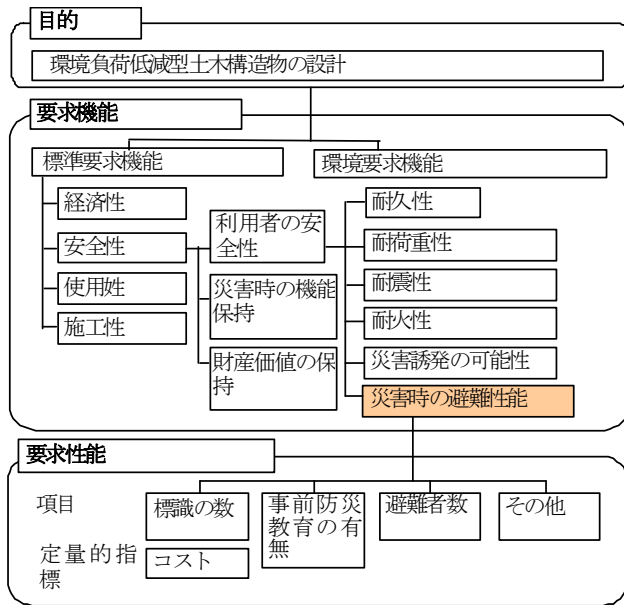


図-1 階層構造（要求機能と要求性能）

避難に関わる信頼性は前述の安全性（図-1の安全性）に属すると考えられるが、この安全性は主にハード面での性能、例えば、地震の大きさに対する設計のレベルなどを示すものであり、防災教育により避難時間が短くてすむ、あるいは事前の防災対策により緊急対応がうまくいくなどのソフト面での性能は含まれていない。そこで本研究では、要求すべき性能として図-1に避難信頼性を付加した対応を検討する。

本来、安全性に関する性能（ $R_s$ ）は、式(1)に示すように、ハード面の性能（ $R_1$ ）とソフト面の性能（ $R_2$ ）の両者により議論されるべきであると考ええる。

$$R_s = f(R_1, R_2) \quad (1)$$

ハード面の保有性能、例えば耐震性が高ければ避難に対して要求される時間が長くなり、避難信頼度が向上する。また、ソフト面での性能、例えば、緊急時対応の充実、防災教育・訓練の実施などが高ければ避難時間を短くできるので避難信頼度が向上する。このように、ハード面での信頼性が高くない場合でもソフト面での信頼性を向上させることによって施設の安全性を確保できるし、重要な施設はハード面の性能のみならず、ソフト面でも高い性能を確保することで施設のより高い信頼度が確保できる。

今、多状態を許容するシステム（例えば、MSS：Multi State System）を考えた場合、例えば、ハード性能に関するものとして、建物の一部が損傷を受けても、他の構成部材で機能を補完できるならば保有性能の低下を20%程

度に抑制できると考える。また、ソフト性能に関するMSSでは、例えば、高速道路走行時、緊急時に車両通行用に1車線空けても車両誘導を効果的に実施すれば、車両通行性能の低下を30%程度に抑制できる、あるいは防災の事前教育などを実施することで避難がスムーズに進むなどが考えられる。

避難信頼度（避難信頼性）の定義では、ソフトな性能とハードな性能の両方を考慮する。避難信頼度  $P_e$  は、避難完了時間  $T$ （確率変数）が避難要求時間  $TR$  以下になる確率として、式(2)で定義される。

$$P_e (T < TR) = FT(TR) \quad (2)$$

ここに、 $FT(\cdot)$ ： $T$ の累積分布関数で、避難シミュレーションにより求める。

避難安全検証法<sup>3)</sup>では、排煙設備や排煙窓の有無、扉の防煙性能、天井高さ、給気口、内装仕上げ材の種類、床面の段差なども避難時間に影響するとしている。また、避難信頼度を避難完了時間で定義した理由は、以下の通りである。

- ・緊急時は人命保護が最優先と考える場合、全員の避難が無事完了した時点で避難信頼度は100%とする考え方は受容されやすい。
- ・ハード面での対策、例えば施設の耐震化が図られ、耐震性能が向上すれば、部材が損傷を受けても倒壊するまでの時間が長くなり、避難に費やすことができる時間（避難要求時間）が長くなる。
- ・事前に防災教育を実施する、あるいは出口までの標識の設置などを行えば、避難がスムーズに進行し、避難完了時間が短くて済む。一方、施設に存在する人数が極端に多くなった場合は、避難がスムーズに進行しない可能性が高くなり、避難完了時間は長くなる。このように、避難完了時間を用いれば、量化が困難とされてきたソフトな防災対策についてもその効果を量化できる。

### 3. CAによる避難シミュレーションモデル

避難シミュレーションは、ソフトコンピューティングの1つであるセル・オートマトンによる方法で行った。セル・オートマトンとは、セル自身とその周辺（隣接するセルの状態）により決められたルール（局所ルール）に従って自身のセルの状態を変化させていく、一種の創発システムである<sup>4)</sup>。創発システムとは、「部分間の局所的な相互作用の結果、全体が現れ、その全体が部分に対する環境となり、結果、新しい秩序が形成される現象」である。最大の特徴は、様々なパターンの位相構造を簡単に表現できること、自然界の不規則性や複雑性を再現できることである。

#### 3.1 セル・オートマトンの条件設定

セルの状態は、以下の(1)～(5)の状態を設定した。各状

態は1つのセルに1つの状態しか存在しないものとする。

### (1)避難者

避難者は、メッシュの1つのセルに1人の人間が存在できるようなモデルとする。一般に、人体の平面図は人間楕円とよばれる楕円で表され、その寸法は縦45cm×横60cmである。しかし、セルは正方形の格子状で表現するため一辺の寸法を人間楕円に近い50cmと設定した。さらに、避難者に方向の情報を付加し、その方向に合わせて視野を設定した。

### (2)ハザード

設定したルールで拡散していくハザードを想定する、

### (3)壁

避難者の視野が届かず、かつ、避難者が移動できない空間を表している。

### (4)障害物

避難者が移動できない空間を表している。

### (5)歩行可能空間

歩行可能空間は、障害物等が何もない空間や扉などの避難者が移動できる空間を表している。そして、避難誘導のための標識は歩行可能空間内に指定している。

## 3.2 避難シミュレーションの原則

### (1)空間：立体空間

平面の2次元空間を組み合わせ、階段等で高さ方向に移動した場合を想定する。

### (2)避難者：局所的なルールに従う

全ての避難者は決められたルールに従って行動する。

### (3)避難者の目的：空間からの脱出

全ての避難者の目的は、現在いる空間からの脱出で統一する。

### (4)避難者の移動：隣接する8つのセル

時間  $t$  が1step進むごとに、避難者は時間  $t$  において存在するセルに隣接する8つのセルから1つのセルを選択して移動する。

## 3.3 時間のモデル化

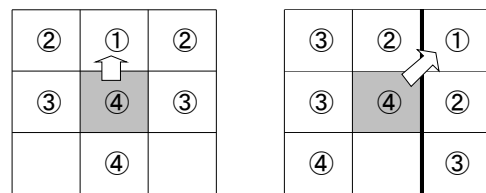
3.2 に記述したシミュレーションの原則をもとに時間のモデル化を行う。避難者は時間  $t$  から時間  $t+1$  の間に隣接する8つのセルまたはその場のセルに留まるという行動をとる。その時間間隔を1stepと設定した場合、避難者は1stepの間に1歩動く状態となる。避難している避難者のスピードを普通の早歩きのスPEEDとし、時速5kmと仮定する。本研究では、1つのセルの大きさは一辺50cmと設定していることから、避難者が1歩動くスピードは、1step=0.36秒と設定した。

## 3.4 基本ルールの設定

### (1) 避難者の回避行動

本来、避難者の対人回避行動は、自身と衝突の可能性がある時に相手の行動を予測した上で行われるが、本研

究ではシミュレーションの単純化を図るため、次に移動するセルに他の避難者や障害物が存在している時に回避行動を行うものとした。回避の行動に関しては実際には様々な状況が考えられるが、現実の対応に関する検証は行っていない。回避行動は、避難者の周り8セルのすべてに対して設定した。各避難者の方向の情報をもとに8つのセルから1つを選択して移動する。避難者の回避行動の例を示す。図-2の(a)、(b)共に9つのセルの中心「灰色セル」を現在避難者がいるセルとする。避難者の回避行動は、①、②、③、④の順番に選択され行われる。それぞれ(a)は避難者が上を向いている場合、(b)は右上方向を向いている場合の例を示している。



(a)上方向

(b)右上方向

図-2 避難者の回避行動例

### (2) 避難者の視野

各避難者の方向情報をもとに、避難者の視野を設定した。視野は避難者の持つ8方向すべてに設定した。避難者の視野の例を図-3に示す。視野の設定に関して、避難者の身長(子供等)は考慮していない。図-3では、避難者が上方向で視界がnセルの場合である。なお、壁などの高い障害物がある場合には、障害物背面は見えないように設定した。

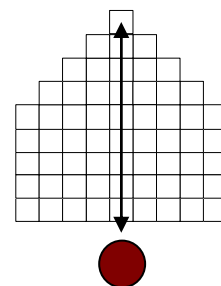


図-3 避難者の視野

### (3) 避難者の目的行動

避難者は周りのセルの状況に応じて動く方向に違いが生じる。そこで、上記に示した視野をもとに、避難者が自らの視野の中に目的物を確認した場合、確認した目的物の種類ごとに目的行動を行うように設定した。本研究では、以下の6つの目的行動を設定した。

(I) 視野の中に出口を確認すると出口に近づく動き

(II) 視野の中に要救助者を確認すると要救助者を助ける動き

(III) 視野の中にハザードを確認するとハザードを回避する動き

(IV) 視野の中に標識を確認すると標識に従う動き

(V)視野の中に人を確認すると人に追従する動き  
 (VI)視野の中に何もなければ向いている方向に進む動き  
 なお、何か大事なものを取りに戻るなどの行動パターンも考えられるが、今後の検討課題としたい。

#### (4) 避難者の種類

避難者の種類は、表-1に示す5つのパターンを設定した。

表-1 避難者の種類

避難者の種類	行動規制
通常型	通常の大人の行動を想定（冷静に目的物を確認）
追従型	人に追従して動く人を想定（あまり周りが見えていない）
遅延型	子供やお年寄りを想定（通常型に比べて速度が半減）
乱型	パニックに陥った人を想定（ランダムに行動する）
要救助者	怪我人や病人を想定（通常型の助けが必要）

#### (5) ハザードのルール

地震発生時の火災における炎拡散のルール化を行う。炎も避難者同様に時間ごとに、その範囲が変化するため炎の拡散のルールを設定した。実際の炎の拡散は複雑である。例えば、炎の回りに燃えやすいものがあれば延焼範囲は急激に拡大する。さらに、炎の温度により燃え方も様々に変化する。このような現象を詳細に反映したシミュレーションを行う場合は、これらを踏まえてルールを設定しなければならないが、ここではシミュレーションの簡略化のために、燃え広がりやすさを確率で設定し、燃え広がるなら上下左右に一定の確率で炎が拡散していくようなルールを設定した。

まず燃え広がりやすさを確率で設定した。3段階に設定した確率を表-2に示す。この燃え広がりやすさの情報をシミュレーションに加えて実行する。

表-2 燃え広がりやすさの確率例

確率	燃えやすさ	建物内	地域
確率1	燃えやすい	紙、机等	木造の建物
確率2	やや燃えやすい	プラスチック等	非木造の建物
確率3	燃えにくい	壁等	道路等、その他

次に、燃え広がる方向のルールについて示す。表-2で燃え広がりやすさの確率の判定で、燃え広がると判断された場合、上下左右のセルのどちらに燃え広がるかを決定する。上下左右の拡散は、一定の確率（25%）で設定している。拡散が一定確率の場合は、無風の場合を設定している。風向きを考慮する場合は、炎の拡散確率を変動させる。

#### 4. 避難シミュレーションによる避難信頼度の算定

本研究では、大学内の実験棟3階（図-4）を対象にして、災害が発生した場合の避難完了時間をシミュレーションにより算出した。その結果から避難信頼度を算定

する。なお、図-4ではA,B,Cを出口、すなわち、階段としている。シミュレーションにおいては、この場所（出口）まで到達した避難者が避難を成功させたものとした。なお、標識の種類は表-3に示す3種類を考慮した。

表-3 標識の種類

1~3	出口の場所を示す標識
4~7	曲がり角で出口の方向を示す標識
8~10	通路の途中にある標識

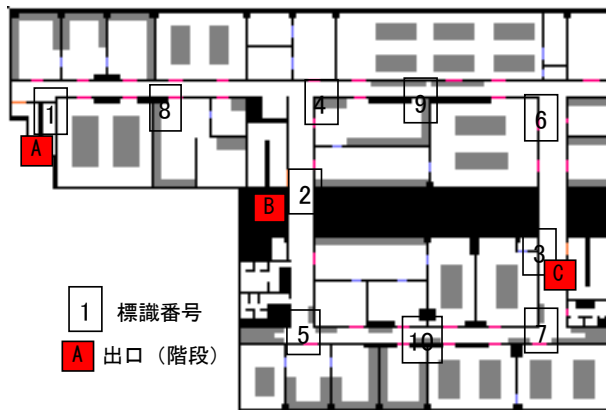


図-4 実験棟平面図と標識位置図

#### 4.1 避難完了時間の頻度累計分布から算定する方法

変化させた条件は、設置する標識の数と避難者数である。図-5に避難完了時間のヒストグラムを示す。避難完了時間は各ケースで100回のシミュレーションにより図-6に示す累積頻度分布を作成し、避難完了時間が避難要求時間以下になる確率を求めた（表-4）。例えば、避難要求時間が180秒の場合、図-6での避難完了時間が180秒の頻度累計をみると92となり、これが求める避難信頼度になる。

概ね、人数が増える、あるいは標識数が少なくなると避難信頼度は低下する傾向にある。避難要求時間が5分でも避難信頼度は91%であるのが、避難要求時間が10分になると避難信頼度は100%に上がる。一方、避難要求時間が2分しかなく、標識数7で人数が150名の場合、避難信頼度は39%と極端に悪くなる。避難要求時間が5分であっても人数や標識数によらず90%以上を確保できるし、避難要求時間が10分以上あれば人数や標識数に関係なく避難信頼度は100%を確保できる。

表-4に示す避難要求時間は階避難安全検証法<sup>5)</sup>により求めるが、これは各階の様々な条件により算出される。例えば、避難用の出口を更に設ける場合、通路が通常より広い場合、防火壁が設置されている場合、耐震対策が施されている場合、天井自体の落下防止対策が施されている場合、天井の配管や配管支持材などの非構造部材の落下防災対策が施されている場合などが条件になる。避難安全検証法では、排煙設備や排煙窓の有無、扉の防煙性能、天井高さ、給気口、内装仕上げ材の種類、床面の段差なども避難時間に影響するとしている。

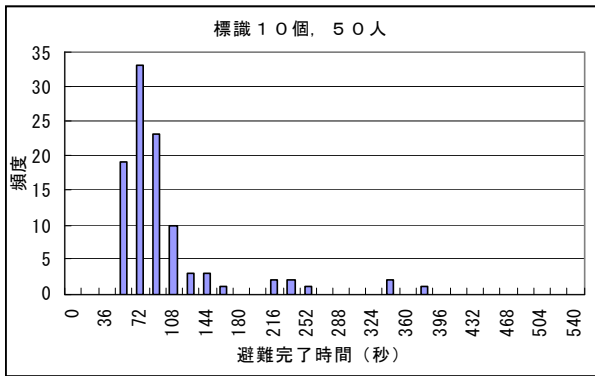


図-5 避難完了時間のヒストグラム

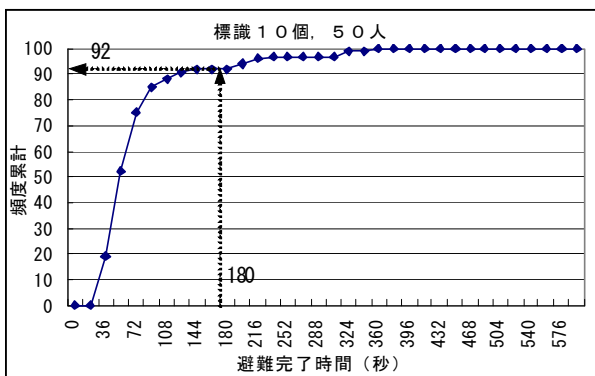


図-6 避難完了時間の頻度累計

表-4 避難完了時間が避難要求時間以下になる確率:Pe(%)

避難要求時間 (TR)	人数			
	標識数	50	100	150
2分 (120秒)	10個	87	76	51
	7個	87	72	39
3分 (180秒)	10個	92	86	83
	7個	96	92	69
5分 (300秒)	10個	97	97	98
	7個	99	99	91
10分 (600秒)	10個	100	100	100
	7個	100	100	100

#### 4.2 避難完了時間の分布系の平均値から算定する方法

避難完了時間の分布系の平均値から避難信頼度を算定する方法を示す。4.1 に示す方法は、ヒストグラムおよび頻度累計により求めるため、シミュレーションを実施したケースでしか用いることができない。より汎用性を持たせる意味で、ヒストグラムの分布系を仮定し、その平均値を用いることでより一般的に使用することが可能となる。

避難完了時間のヒストグラムは前述の図-5のようになるが、このヒストグラムの分布系を対数正規分布と仮定し、カイ二乗検定により検定し、その分布系の平均値を用いて避難信頼度を算定する。算出した避難完了時間の平均値を表-5に示す。

表-5 避難完了時間の平均値 (秒)

標識数	人数		
	50	100	150
10	113.76	128.16	168.84
7	122.04	139.32	186.76

避難信頼度は式(3)で算出する。結果を表-6に示す。

$$Pe = TR/T * 100 \quad (3)$$

ここに、T: 避難完了時間 (平均値) とする。なお、 $TR/T > 1.0$  の場合は  $TR/T = 100$  とする。

表-6 避難完了時間の平均値を用いた避難信頼度

避難要求時間 (TR)	人数			
	標識数	50	100	150
2分 (120秒)	10個	100	93.632959	71.073205
	7個	98.328417	86.132644	64.253587
3分 (180秒)	10個	100	100	100
	7個	100	100	96.380381
5分 (300秒)	10個	100	100	100
	7個	100	100	100
10分 (600秒)	10個	100	100	100
	7個	100	100	100

4.1 と同様に、概ね、人数が増える、あるいは標識数が少なくなると避難信頼度は低下する傾向にあるが、平均値を用いているので、表-2の信頼度よりは値は高くなっている。ここでは避難完了時間の平均値だけを用いたが、今後の課題として、分散も考慮してある信頼度区間として計算することで表-2の結果に近づけることができると考える。

#### 4.3 避難完了時間の平均値と比率から算出する方法

著者らは、既に大学内の建物を対象にして、災害が発生した場合の避難完了時間をシミュレーションにより算出している<sup>6)</sup>。ここでは、文献6)の結果を用いて避難時間の比率から避難信頼度を算定する方法を示す。本来、沢山の条件を変えたケースを検討する場合、一つのパラメータだけを変化させ、あとのパラメータは固定するため、組み合わせの数が多くなり、膨大な計算時間が必要となる。避難信頼度を求めるだけなら、条件を変えた場合の避難時間の比率が分かれば算定が可能となり、多くの組合せをシミュレーションしなくてもよいと考えた。文献6)のように、パラメータを変えたシミュレーション結果が全て算出されていない場合などのように、シミュレーションの回数が確保できない場合などに有効である。

シミュレーションの条件は、設置する標識の数、事前防災教育の有無、避難者数である。表-7の避難時間は文献6)から引用し、比率は、各避難時間の全体に対する割合を示す。なお、表-7における防災教育での災害時の設定は、避難者のタイプとして遅延型やパニック型、要救助者の避難者が通常時より増加するという設定にしている。また、防災教育を実施した後は、設定した避難者タイプにおける避難者の比率が変化するとしている。

表-7 避難完了時間と避難要求時間の比率

		避難完了時間:T(秒)	避難要求時間:TR(秒)	TR/T
標識数	5	294	120	0.40816
	7	224	120	0.53571
	10	165	120	0.72727
	5	294	180	0.61224
	7	224	180	0.80357
	10	165	180	1.09091
	5	294	300	1.02041
	7	224	300	1.33929
	10	165	300	1.81818
人数	5	294	600	2.04082
	7	224	600	2.67857
	10	165	600	3.63636
	100	184	120	0.65217
	200	294	120	0.40816
	300	331	120	0.36254
	100	184	180	0.97826
	200	294	180	0.61224
	300	331	180	0.54381
事前防災教育の有無	100	184	300	1.63043
	200	294	300	1.02041
	300	331	300	0.90634
	100	184	600	3.26087
	200	294	600	2.04082
	300	331	600	1.81269
	なし	331	120	0.36254
	あり	218	120	0.55046
	なし	331	180	0.54381
あり	218	180	0.82569	
なし	331	300	0.90634	
あり	218	300	1.37615	
なし	331	600	1.81269	
あり	218	600	2.75229	

表-8 避難信頼度

避難要求時間		避難者数	標識数		
			5	7	10
120	事前防災教育なし	100	0.0965	0.1267	0.1720
		200	0.0604	0.0793	0.1076
		300	0.0536	0.0704	0.0956
	事前防災教育あり	100	0.1465	0.1923	0.2611
		200	0.0917	0.1204	0.1634
		300	0.0815	0.1069	0.1451
180	事前防災教育なし	100	0.2171	0.2850	0.3869
		200	0.1359	0.1784	0.2421
		300	0.1207	0.1584	0.2151
	事前防災教育あり	100	0.3297	0.4327	0.5874
		200	0.2063	0.2708	0.3677
		300	0.1833	0.2405	0.3266
300	事前防災教育なし	100	0.6032	0.7916	1.0747
		200	0.3775	0.4955	0.6726
		300	0.3353	0.4401	0.5974
	事前防災教育あり	100	0.9158	1.2020	1.6318
		200	0.5732	0.7523	1.0213
		300	0.5091	0.6682	0.9071
600	事前防災教育なし	100	2.4126	3.1666	4.2989
		200	1.5099	1.9818	2.6904
		300	1.3412	1.7603	2.3897
	事前防災教育あり	100	3.6632	4.8080	6.5272
		200	2.2926	3.0091	4.0850
		300	2.0363	2.6727	3.6284

避難信頼度 Pe は式(4)で算出する。

$$Pe = Tsr \cdot Ter \cdot Tnr \quad (4)$$

ここに、Tsr：標識の数による信頼度 (=避難完了時間/避難要求時間)、Ter：事前防災教育の有無による信頼度 (=避難完了時間/避難要求時間)、Tnr：避難者数の数による信頼度 (=避難完了時間/避難要求時間) である。表-7 に

より算出した Tsr, Ter, Tnr をもとにして、式(4)にて計算した避難信頼度を表-8 に示す。

避難要求時間が 180 秒以下では避難信頼度が 1.0 を超えることがないが、避難要求時間が 300 秒となると標識数を十分に確保できれば信頼度は 1.0 以上を確保できる。また、避難要求時間が 600 秒となると 1.0 以上の十分な避難信頼度を確保できることがわかる。また、事前防災教育を実施するかしないかでは約 1.52 倍の避難信頼度の差が生じる。表-8 で最も小さい値である 0.05365 と最も大きい値の 6.5272 とは約 122 倍の差がある。

#### 4.4 考察

表-9 に各方法の長所と短所を示す。

表-9 各手法の特徴

	長所	短所
(1)	累計から算出しているのわかりやすい(最大値が100)。	パラメータの数だけ計算時間がかかる。 シミュレーションしたケースしか使えない(汎用性がない)。
(2)	ヒストグラムを分布系に置き換えることで汎用性が高くなる。	分布系の仮定と検証が必要。 分散を考慮していない。
(3)	パラメータを変えたケースの計算だけあれば算出が可能。	分散を考慮していない。 信頼度を積で計算しているため、多くのケースを考慮すると差がより大きくなる傾向にある。 信頼度の最大値が100%を超える。

#### 5. おわりに

本研究では、大学内の実験棟を対象にして、セル・オートマトンを用いた避難シミュレーションを行った。その結果を用いて避難信頼度を算定する方法を(1) 避難完了時間の頻度累計から算定する方法、(2) 避難完了時間の分布系の平均値から算定する方法、(3) 避難完了時間の平均値と比率から算出する方法について比較・検討を行った。今後の課題は、避難要求時間の設定方法、より結果を汎用化するための分布系の設定などである。

#### 参考文献

- 1) A.Lisnianski, and G.Levitin, Multi-state System Reliability - Assessment, Optimization and Applications -, World Scientific, 2003.
- 2) 土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン, 2001.4.
- 3) 建設省：階避難安全検証法に関する算出方法等を定める件, 平成12年建設省告示第1441号, 2000.
- 4) 加藤恭義, 築山 洋, 光成友孝：セルオートマトン法－複雑系の自己組織化と超並列処理, 森北出版, 1998.11.
- 5) <http://www.avoid.jp/hinan/index.html>
- 6) 森本愉美子, 白木 渡, 井面仁志, 保田敬一, 伊藤則夫, 堂垣正博：防災教育のための避難シミュレーションの在り方, 安全問題研究論文集, Vol.2, pp.77-82, 2007.11.

(2009年8月7日受付)