避難シミュレーションによる レジリエントな対応の避難信頼性評価の試み†

有友 春樹*井面 仁志**白木 渡***

Evaluation of Evacuation Reliability of Resilience Response Using Evacuation Simulation

by

Haruki ARITOMO*, Hitoshi INOMO**and Wataru SHIRAKI***

In recent years, now words "resilience engineering" paid attention to by many people. The function (four capability: responding, monitoring, anticipating, and learning) is needed for resilience engineering, and then quantitative evaluation becomes important to measure its effect. However, the definition of resilience response is difficult, therefore the establishment of quantitative evaluation method is difficult.

In this study purpose, we reproduce resilience response using participatory evacuation simulation. And, We try quantitative evaluation using the evacuation reliability evaluation method. Specifically, targeted for the office floor, The human evacuation behavior at the time of the accident equipped with resilience response ability is assumed and the quantitative value of the resilience response is considered using refuge completion time.

Key words:

Evaluation of evacuation reliability, Resilience response, Evacuation simulation

1 緒 言

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、マグニチュード、震源域、津波高、広域被害等いずれの観点からも想定を遙かに超える事態が発生し甚大な被害をもたらした。この事態を受けて政府は、平成 25 年 12 月に制定した「国土強靱化基本法」において、今後発生が予想されている大災害に対して、「国土強靱化」を推進するという基本方針を示した。この考え方は、起こりうる最悪の事態を事前に想定してハードおよびソフトの両面から被害軽減（減災）対策を実施し、「人命保護」、「国家、社会の重要機能維持」、「国民の財産、公共施設被害最小化」、「迅速な復旧・復興」を目標に、「強さ」と「しなやかさ」を持ったレジリエントな国土・地域・経済社会の構築を基本としている¹⁾。その中で想定外の事態に対しては、ソフトな取り組みを主体とした仕組みづくりを推進するとしている。

近年、災害によって生じる想定を超えるような被害に対して、適応的に対応して安全を確保するための新しい手法として「レジリエンスエンジニアリング」という考え方が注目されている²⁾⁻³⁾。レジリエンスエンジニアリングでは、レジリエントな対応には 4 能力「予見能力」、「注意能力」、「対処能力」、「学習能力」が必要であると定義されており³⁾、その効果を測るために定量的な評価が重要となる。しかし、レジリエントな対応（行動）を様々な

災害状況において、画一的な定義が難しく、レジリエントな対応の定量的な評価方法が明確に定まっていない。

そこで本研究では、災害時の避難行動に着目し、避難に関するレジリエントな対応（行動）を定量的に評価するために、構造物における避難信頼性評価という考え方を活用し、レジリエントな対応（行動）を確率による数値で評価することを試みる。避難信頼性評価とは、構造物における信頼性評価の考え方を応用し、構造物に対しての避難に関する信頼性を評価するものである。M. Dehne らは、避難時間のバラツキを考慮して避難信頼度算出方法を提案している⁴⁾。災害時の安全な避難を検討する場合、指標として避難時間が用いられる。避難時間の算出には、地震や火災等の様々な災害状況および避難状況が模擬できるコンピュータシミュレーションが多く用いられる。人間の避難行動を考慮したシミュレーションによって避難時間が確率量として定量的に表現できる。

そこで本研究では、著者らがこれまで開発してきた避難行動を可視化できる避難シミュレーション⁵⁾を活用して、避難に関するレジリエントな対応（行動）を再現し、避難信頼性評価により定量的な評価を試みる。具体的には、オフィスフロアを対象として、レジリエントな対応に不可欠な 4 能力（対処・注意・学習・予見）を備えた災害時の人間の行動を想定する。そして、避難人数および避難時間等を指標として避難信頼性評価の算出を行い、

† 原稿受理 平成 29 年 7 月 10 日 Received July 10, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 日本ミクニヤ(株) 東京支店 〒213-0001 川崎市高津区溝口

Division of Environmental and Disaster prevention, Mikuniya Co., Ltd., Takatsu, Kawasaki 213-0001.

** 正 会 員 香川大学工学部 電子・情報工学科 〒761-0396 高松市林町

Electronics and Infomeation Eng, Kagwa University, Hyashi-cho, Takamatsu 761-0396.

*** 正 会 員 香川大学危機管理先端教育研究センター 〒761-0396 高松市林町

Crisis & Security Management Research Center, Kagwa University, Hyashi-cho, Takamatsu 761-0396.

レジリエントな対応（行動）の定量的な評価方法を検討する。

2 災害時のレジリエンスの考え方

災害によって生じる想定を超えるような被害に対して、適応的に対応して安全を確保するための新しい手法として、E.Hollnagelらはレジリエンスエンジニアリングという考え方を提唱している²⁾⁻³⁾。この考え方では、「レジリエンスは、環境の変化や外乱の発生前・発生中・発生後で、社会のなかで活動が続ける組織や技術システムがその機能を調整し、想定内・想定外いずれの状況でも必要な行動・動作を維持できる能力である。」と定義している。

想定を超える災害に対しては、最悪の事態を回避するレジリエントな対応が重要であり、想定内・想定外いずれの状況でも必要な行動・動作を維持するため、下記に示す4つの能力を備えておく必要がある⁶⁾⁻⁷⁾。

【対処能力（現実的要因）】：平常時または異常時の混乱や外乱に対して、事前に準備した対策を実施すること。また、平常時の機能を調整することで対策を実施すること。

【注意能力（決定的要因）】：近いうちに何が脅威である（または脅威になる）のかをモニターできること。このモニター能力は、該当環境で起こること、システムの動作能力に生じること、これら両方をモニターできること。

【学習能力（事実的要因）】：経験から何を学ぶべきか知っていること、特に、適切な事例（成功も失敗も含む）からどのように適切な教訓を学ぶか知っていること。

【予見能力（可能性要因）】：事象の進展・兆し・見込みや、より未来についての変化・混乱・困難などの可能性とそれらの結果を予見できること。

これらのレジリエントな対応の能力は、災害時の減災のために重要なものとなる。災害時に想定内・想定外いずれの状況でも必要な行動・動作を維持するためこれら4能力を備えたレジリエントな社会構築に資する人材、即ち「レジリエンスリーダー」等の存在が今後必要であると考えている。

災害時のレジリエンス能力評価の重要性は様々な文献においても議論されている⁸⁾⁻⁹⁾。しかしながら、レジリエントな対応（行動）ができればどれほどの減災の効果があるのか等の定量的な評価方法はまだ確立されていない。本論文では、レジリエンスエンジニアリングにおいて重要な要素である人的能力に焦点をあて、人的能力であるレジリエントな対応力の有無とそれらの減災への効果について定量的な分析を行う。

3 避難信頼性評価とは

3・1 構造物における信頼性評価の考え方

構造物の材料強度を R 、荷重作用を S とし、荷重も強度もある確率特性に従う確率変数とする。荷重 S が強度 R を上回った場合に構造物が破壊すると定義すると、構造物の安全余裕 M （限界状態関数）は、次式(1)で表される。

$$M=R-S \quad (1)$$

強度 R と荷重 S は統計的に独立である（ $\mu_R \cdot \sigma_R$ ：強度の平均値・標準偏差、 $\mu_S \cdot \sigma_S$ ：荷重の平均値・標準偏差）とすると、 M （安全余裕）の μ_M （平均値）および σ_M （標準偏差）は、それぞれ次式(2),(3)で表される。

$$\mu_M=\mu_R-\mu_S \quad (2)$$

$$\sigma_M=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2} \quad (3)$$

また、構造物の信頼度は次式(4)で定義される β （信頼性指標）を用いれば、確率分布の平均と標準偏差により評価できる。

$$\beta=\mu_M/\sigma_M \quad (4)$$

このように、 β （信頼性指標）は構造物における信頼度を定量的に算出できることから、構造物における信頼性の評価尺度として多く用いられている¹⁰⁾⁻¹²⁾。

3・2 構造物における避難信頼性評価の考え方

M. Dehneらは、3.1節で述べた構造物における信頼性評価法と同様な方法で避難信頼性を評価する方法を提案している⁴⁾。ここでは、 $T_{available}$ （避難限界時間）、 T_{escape} （避難時間）と定義する。

式(1)と同様、避難安全余裕（限界状態関数） Z を次式(5)として定義する。

$$Z=T_{available}-T_{escape} \quad (5)$$

この避難に関する安全余裕 Z が $Z>0$ となる確率が避難信頼度、 $Z\leq 0$ となる確率が避難危険度を表すことになる。

本研究では、 T_{escape} （避難時間）が正規分布に従うと仮定し、 P_{risk} （避難危険度）を次式(6)として算出する。

$$P_{risk}=\Phi^{-1}(-\beta') \quad (6)$$

※ $\Phi^{-1}(\cdot)$ は標準正規分布関数の逆関数

β' （避難信頼性指標）は、式(4)で定義される構造物の β （信頼性指標）と同様に次式(7)で定義できる。

$$\beta'=\mu_Z/\sigma_Z \quad (7)$$

ここに、 Z （避難安全余裕）の μ_Z （平均値）は、 $\mu_{T_{available}}$ を $T_{available}$ の平均値、 $\mu_{T_{escape}}$ を T_{escape} の平均値とすると次式(8)となる。

$$\mu_Z=\mu_{T_{available}}-\mu_{T_{escape}} \quad (8)$$

また、 Z （避難安全余裕）の σ_Z （標準偏差）は、 $\sigma_{T_{available}}$ を $T_{available}$ の分散値、 $\sigma_{T_{escape}}$ を T_{escape} の分散値とすると次式(9)となる。

$$\sigma_Z=\sqrt{\sigma_{T_{available}}^2+\sigma_{T_{escape}}^2} \quad (9)$$

本研究では、 T_{escape} （避難時間）の確率特性（平均値および分散値）を、避難シミュレーションを使用することによって算出する。避難シミュレーションでは、人間の行動（避難行動判断等）等が不確定なパラメータとして考慮する。一方、 $T_{available}$ （避難限界時間）については、火災等の災害が発生したと考慮して確定量として算出する。

4 避難シミュレーションシステムの特徴

3.2節で定義した式(5)の Z （避難安全余裕）を構成する T_{escape} （避難時間）を求めるために、本研究では、レジリエントな対応において、想定外の事態を議論するために著者らがこれまで開発してきた、避難状況を可視化

し、防災に携わる多様な組織が、様々な視点で避難などに関しての意見交換が可能な機能を備えている、参加型避難シミュレーションを活用する¹³⁾⁻¹⁴⁾。

この避難シミュレーションの特徴は、迅速かつ適切な災害対応を実現させるための意見を創発するために、様々な場所において、想定被害や地域の状況等をシミュレーション可能とし、シミュレーション実行中においても条件変更・付加をリアルタイムで対応可能な点である。具体的には、住民参加型で地域の防災・減災について自由な意見交換を行うために、シミュレーション途中で、以下の操作が行えるように工夫をしている。

- 障害物、ハザード等の発生条件を変更することができる。
- 避難者の避難経路を変更することができる。
- 表示画面を拡大・縮小、スクロールすることができる。
- 表示画面の更新時間を変更することができる。

このシミュレーションを用いて、災害時におけるレジリエントな対応能力を備えた「レジリエンスリーダー」を定義し、再現を試みる。それにより、レジリエントな対応(行動)における避難信頼性評価に必要な T_{escape} (避難時間)の確率特性(平均値・分散値)を算出する。

5 レジリエンスリーダーを想定した

避難信頼性評価の事例

5・1 レジリエントな対応の定量的な評価方法

本研究では、レジリエントな対応(行動)能力を有し、レジリエントな社会構築に資する人材として「レジリエンスリーダー」を定義する。そこで、レジリエントな対応の定量的な評価方法として、避難シミュレーションを用いてレジリエンスリーダーの行動を再現し、その有効性・有用性を検討して、避難に関する定量的な評価を試みる。具体的には、著者らが開発してきた避難行動を可視化できる避難シミュレーションを活用して、レジリエンスリーダーの割合(そのフロアにリーダーが何%いるか)により避難行動にどう影響するかを検証する。避難に関するレジリエンスリーダーを育成し、レジリエントな対応ができる人材がその避難空間に存在する場合の避難行動への影響を避難信頼性評価により定量的に評価する。

5・2 レジリエンスリーダーの定義

本研究において、レジリエンスリーダーとは「災害時に想定内・想定外いずれの状況でも必要な行動・動作を維持するためレジリエントな対応の4能力を備えたレジリエントな社会構築に資する人材」とであると定義する。起こりうることを事前に学習(学習能力)しており、危険を認知(注意能力)し、行動を先読み(予見能力)し、対応できる(対処能力)人材とする。

レジリエンスリーダーに類似するものとして、従来から「防災リーダー」という考え方が存在する。内閣府(防災担当)の防災に関する地域防災リーダー育成事業において、「防災リーダー」は、平常時は地域で防災に関して中心的な活動を実施し、災害時には地域住民の先頭に立って、地域の防災活動を主導する人材と定義されてい

Table1 The assumed location and number of people.

location	An office floor is assumed. (9rooms)
size	About 40m * 20m
number of people	Various scenes are assumed. (1 to 100people)

Fig.1 Office floor of target.

(left) A few case

(right) A lot of case

Fig.2 A use number of people example.

る¹⁵⁾。

本研究におけるレジリエンスリーダーは、従来の防災リーダーを基礎とし、レジリエンスの4能力を備えており、事前に学習し、災害時に地域住民の先頭に立って予見能力等を発揮し、活動を停止することなく、想定内・想定外いずれの状況でも必要な行動・動作を維持していく存在であるとする。

5・3 事例概要(オフィスフロア)

本研究における避難信頼性評価事例の想定する場所と人数の概要を Table1 に示す。Fig.1 に示すような一般的なオフィスフロアとし、フロアには複数の部屋が存在し、共有スペースや会議室等を有している空間を想定する。図中には、[○] (フロア出口) と[→] (避難方向) を示している。

この一般的なオフィスフロアは利用時間・利用形態により人々の利用状況が異なる。例えば、会議中であれば大勢の利用者が存在し、昼休憩や退社時間以降であれば利用者は少なくまばらである。このようなオフィスフロアの利用状況の変化を不確定要素として、避難シミュレーションに反映して T_{escape} (避難時間)の確率特性(平均値・分散値)を評価する。

本研究では、オフィスフロアからの避難を考える際の不確定要素として、フロア利用人数と各避難者初期位置のみを考慮する。その不確定要素を考慮するためにフロアにランダムに人々を配置し、その場所から地震および火災等の災害が発生したと想定して一斉に避難を開始させ、避難時間を算出する。具体的には、対象とするオフィスフロアには最大100名の利用者が見込めるとし、利用人数および配置をプログラム上でランダムに決定し、突然災害が発生した場合の避難状況を再現する。異

なる利用状況を再現するために、1名から100名までをオフィスフロアにランダムに配置し、Case1-3において1000回のシミュレーションを実施する。

また、シミュレーション1回の計算(step)に避難者が移動する距離は、0.5mと設定しており、約0.6秒で移動すると仮定している。そのため、本シミュレーションでは、100step = 60秒 = 1分と想定している。

シミュレーションする対象者として、レジリエンスリーダーおよび一般避難者を想定する。オフィスフロア内にいるレジリエンスリーダーの割合によりどれほど避難行動に効果があるかを検証するため、下記に示す3つのCaseを想定し、シミュレーション結果を比較し考察する。出口または階段等により対象者すべてがオフィスフロア外に出た場合に、避難が完了したものとする。

【Case1】：事前に教育を受けたレジリエンスリーダーがすべて存在する(100%)場合(すべて事前に防災教育を受けた学生および教員がいると想定)

【Case2】：事前に教育を受けたレジリエンスリーダーが半分存在する(50%)場合(事前に防災教育を受けていない学生が約半数いると想定)

【Case3】：事前に教育を受けたレジリエンスリーダーが存在しない(0%)場合(すべて事前に防災教育を受けていない学生がいると想定)

5・4 避難シミュレーションにおける行動規則

(1) レジリエンスリーダー

レジリエンスリーダーは、事前に訓練等の学習を実施し、避難に関するレジリエントな能力を身につけている人材を想定する。下記にレジリエンスリーダーが有している避難に関するレジリエントな4能力を示す。

【対処能力(現実的要因)】：危険情報等を入手した後、事前に避難訓練等で実施した適切な対応ができる能力があるかないか。

【注意能力(決定的要因)】：建物内の警報装置等から火災発生や出口通行不可等の危険情報を入手できる能力があるかないか。

【学習能力(事実要因)】：訓練等による経験により起こる事象を学んでおり、適切な知識があるかどうか。

【予見能力(可能性要因)】：学習能力および注意能力により起こる事象を認知しており、避難の妨げになる起こりうる被害の予見することができるかどうか。

本シミュレーションにおけるレジリエンスリーダーの想定行動定義を示す。

《レジリエンスリーダーの想定行動定義》

避難に関するレジリエントな4能力を有しており、避難に関する危険を認知し、迷いなく避難することができる。一般の避難者を導くことができる。

- 出入り口を見つけると出口に向かって冷静に避難できる。
- フロアレイアウト(非常口等)を熟知しており、標識に従って避難できる。
- 一般避難者を導くことができる。

(2) 一般避難者

一般避難者は、レジリエンスリーダーとは対比的に、事前に訓練等を受けておらず避難に関するレジリエントな能力を身につけていない人材と想定する。以下に本シミュレーションにおける一般避難者の想定行動定義を示す。

《一般避難者の想定行動定義》

避難に関するレジリエントな4能力を有しておらず、避難に関する危険の知識がなく、判断に迷いながら避難を行う。誘導者を見つけると追従して避難する。

- 出入り口を見つけると出口に向かって避難できる。
- パニックを起こしており標識を見ても判断に時間がかかる。
- レジリエンスリーダー(誘導者)がいると追従した行動をとる。

レジリエンスエンジニアリングの考え方に基づいて、上記の対象者を想定して、シミュレーションを実施し、レジリエンスリーダーの割合を変更し、レジリエントな対応(行動)がどれほど避難行動に影響するのかを定量的に検討する。

5・5 シミュレーション結果

オフィスフロアの異なる利用状況を再現し、1名から100名までフロアにランダムに配置し、各Caseにおいて1000回の避難シミュレーションを行った。

(1) T_{escape} (避難時間)(step)の比較

Table2にフロア人数を10人単位で集計し、Case1～Case3の[1～10名]、[11～20名]、・・・、[91～100名]の10パターンの T_{escape} (避難時間)の $\mu_{T_{escape}}$ (平均値)および $\sigma_{T_{escape}}$ (標準偏差値)の結果を示す。各パターンのデータ数は確率的にシミュレーション回数約100回の値となる。

Table2 Average and the standard deviation value of 3 cases.

number of people	Case1		Case2		Case3	
	Ave (step)	SD (step)	Ave (step)	SD (step)	Ave (step)	SD (step)
0 ~ 10	66.54	19.10	109.06	44.89	140.87	39.00
11 ~ 20	81.09	9.95	146.44	24.25	171.05	26.84
21 ~ 30	86.97	9.03	170.43	22.23	195.12	26.65
31 ~ 40	89.82	8.24	182.19	25.04	207.98	22.89
41 ~ 50	96.59	9.89	197.26	22.57	223.47	30.24
51 ~ 60	101.16	9.80	203.11	23.28	235.37	22.77
61 ~ 70	107.90	12.62	213.56	26.20	245.60	25.38
71 ~ 80	110.16	10.83	219.80	24.96	255.68	22.86
81 ~ 90	115.50	10.89	223.17	25.15	270.44	25.17
91 ~ 100	120.11	10.97	237.09	23.30	279.70	27.60

Table2から明らかなように、どのCaseにおいてもフロアの利用人数が増加するほど T_{escape} (避難時間)の $\mu_{T_{escape}}$ (平均値)は増加している。

$\sigma_{T_{escape}}$ (標準偏差値)は[1～10名]のパターンにばらつきが多く見られ、それ以外のパターンではばらつきの値の差はあまり見られない。Case1のばらつきは、10(step)前後であるのに対して、Case2およびCase3のばらつきは、25(step)前後であり、一般避難者の行動のばらつきが影響していると推察できる。

さらに、避難人数と避難時間 (step) の関係を Fig.3 に示す。Fig.3 より当然のことながら先ほどの Table2 と同様にフロアの利用人数が増加するごとに避難時間 (step) が増加していることが分かる。また、フロア人数毎にかなり避難時間がばらついていることも分かる。このばらつきは、利用者の配置が異なることおよび避難者の行動判断が原因で発生していると思われる。

なお本研究では、このフロアの $T_{available}$ (避難限界時間) を火災等の災害が発生した場合を想定し、200 step (120 秒) の確定量と仮定する。(Fig.3 の Line) Case1 ではすべての避難時間が避難限界時間内なのに対して、Case2 および Case3 では、避難限界時間を越えている避難時間が存在していることが分かる。

Fig.3 Relation between the floor number of people and evacuation time (step).

(2) 避難信頼性評価結果の比較

5.5 節(1)で示したフロアの利用人数の違い (10 パターン) について得られた T_{escape} (避難時間) の確率特性 (平均値・標準偏差分散) (Table2) の結果を用いて、式(6)で定義される β' (避難信頼性指標) および P_{risk} (避難危険度) を算出する。本研究では、上述したようにこのフロアの $T_{available}$ (避難限界時間) を 200 step (120 秒) の確定量と仮定して算出している。

Table2 の結果と式(5)~(7)を用いて 10 パターンの β' (避難信頼性指標) を計算した結果を Table3 の【Case1】【Case2】

【Case3】に示す。信頼性指標と併せて、 T_{escape} (避難時間) が正規分布に従うと仮定した場合の P_{risk} (避難危険度) も示している。

Table3 の【Case1】から、Case1 のフロアの利用人数が[1~10 名]から[91~100 名]の β' (避難信頼性指標) の間には 11.95~6.99 まで大きな差があり、レジリエントな対応 (行動) のできる Case1 においてもフロアの利用人数において評価が大きく変わることが分かる。当然のことながらフロアの利用人数が多くなると避難信頼性指標は減少し評価が下がっている。このフロアの $T_{available}$ (避難限界時間) を 200 step (120 秒) の確定量と仮定した場合という限定条件の下において、 P_{risk} (避難危険度) を比較すると、このフロアに設計上想定された最大利用人数 100 名

Table3 β' and P_{risk} calculation result of 3 cases.

Case1	evacuation safety margin(Z)		evacuation reliability index (β')	evacuation dangerous degree (P_{risk})
	number of people	Ave (μ_z) SD (δ_z)		
0 ~ 10	133.46	19.10	6.99	1.41E-12
11 ~ 20	118.91	9.95	11.95	3.27E-33
21 ~ 30	113.03	9.03	12.52	2.84E-36
31 ~ 40	110.18	8.24	13.38	4.01E-41
41 ~ 50	103.41	9.89	10.46	6.64E-26
51 ~ 60	98.84	9.80	10.08	3.27E-24
61 ~ 70	92.10	12.62	7.30	1.45E-13
71 ~ 80	89.84	10.83	8.30	5.24E-17
81 ~ 90	84.50	10.89	7.76	4.24E-15
91 ~ 100	79.89	10.97	7.28	1.61E-13

Case2	evacuation safety margin(Z)		evacuation reliability index (β')	evacuation dangerous degree (P_{risk})
	number of people	Ave (μ_z) SD (δ_z)		
0 ~ 10	90.94	44.89	2.03	2.14E-02
11 ~ 20	53.56	24.25	2.21	1.36E-02
21 ~ 30	29.57	22.23	1.33	9.17E-02
31 ~ 40	17.81	25.04	0.71	2.39E-01
41 ~ 50	2.74	22.57	0.12	4.52E-01
51 ~ 60	-3.11	23.28	-0.13	5.53E-01
61 ~ 70	-13.56	26.20	-0.52	6.98E-01
71 ~ 80	-19.80	24.96	-0.79	7.86E-01
81 ~ 90	-23.17	25.15	-0.92	8.21E-01
91 ~ 100	-37.09	23.30	-1.59	9.44E-01

Case3	evacuation safety margin(Z)		evacuation reliability index (β')	evacuation dangerous degree (P_{risk})
	number of people	Ave (μ_z) SD (δ_z)		
0 ~ 10	59.13	39.00	1.52	6.47E-02
11 ~ 20	28.95	26.84	1.08	1.40E-01
21 ~ 30	4.88	26.65	0.18	4.27E-01
31 ~ 40	-7.98	22.89	-0.35	6.36E-01
41 ~ 50	-23.47	30.24	-0.78	7.81E-01
51 ~ 60	-35.37	22.77	-1.55	9.40E-01
61 ~ 70	-45.60	25.38	-1.80	9.64E-01
71 ~ 80	-55.68	22.86	-2.44	9.93E-01
81 ~ 90	-70.44	25.17	-2.80	9.97E-01
91 ~ 100	-79.70	27.60	-2.89	9.98E-01

に近いパターン[91~100 名]では、 β' (避難信頼性指標) は 7.28 (P_{risk} (避難危険度) $1.61 \times E^{-13}$) であるのに対して、最大人数の約半分に近いパターン[41~50 名]では、 β' (避難信頼性指標) は 10.46 (P_{risk} $6.64 \times E^{-26}$) となり P_{risk} (避難危険度) は約 E^{-13} 減少していることが定量的に評価できる。

Table3 の【Case2】【Case3】を【Case1】と比較すると、明らかに β' (避難信頼性指標) が減少し、 P_{risk} (避難危険度) が増加していることが分かる。特にこのフロアの $T_{available}$ (避難限界時間) を 200 step (120 秒) の確定量と仮定した場合において、【Case2】では[フロア人数 51 名以上]、【Case3】では[フロア人数 31 名以上]の際に、 β' (避難信頼性指標) がマイナス(-)に転じており、避難に関して危険な状況であると定量的に評価できる。

このような数値を用いることによって定量的にレジリエントな対応（行動）の評価が可能となると考えている。まだ、この分野の研究は試行段階であり、目標とする β' （避難信頼性指標）や許容できる P_{risk} （避難危険度）を幾らにすべきかの議論は十分なされていないため、今後根拠を明確にした検討が必要となる。

6 結 言

災害によって生じる想定を超えるような被害（想定外の事態）の対応には、レジリエントな対応が不可欠である。本研究では、想定を超える被害の災害への対応可能な安全確保の新しい「レジリエンスエンジニアリング」の考え方をを用いて、災害時の避難に関する行動を習得している人材（レジリエントな対応ができる人材）をレジリエンスリーダーとして定義した。そして、避難行動を可視化できる避難シミュレーションを活用して避難時間等を算出し、避難信頼性評価という考え方を活用して避難に関するレジリエントな対応の定量的な評価を試みた。

結果として、避難に関するレジリエントな対応の4能力（対処・注意・学習・予見）を備えたレジリエンスリーダーが存在した場合とそうでない場合を比較し、レジリエントな対応（行動）に対して避難信頼性評価を用いて定量的に評価することができた。このことにより、避難シミュレーションを用いることで、避難行動における災害時のレジリエントな対応（行動）を定量的に評価することができると考えている。

しかしながら、本研究におけるシミュレーション結果は、多くの仮定・想定の上に計算しているため、避難信頼評価における数値的な結果において意味をなしていない。レジリエントな対応（行動）において、定量的な評価の可能性を示せたにすぎない。

今後、以下に示す課題等を明確にし、具体的な活用方法の議論が必要であると考えている。

- レジリエントな対応（行動）とは何かが明確になっていない。本研究におけるレジリエントリーダーの定義は著者自らが定義づけたものであり客観的な根拠がない。

⇒過去の事例からレジリエントな対応（行動）の整理が必要である。

- $T_{available}$ （避難限界時間）を確定値としている。研究では、このフロアの $T_{available}$ （避難限界時間）を火災等の災害が発生した場合を想定し、200 step（120秒）の確定量と仮定している。

⇒ $T_{available}$ （避難限界時間）についても確率量での算出が必要である。

- 目標となる β' （避難信頼性指標）の値が決まっていない。

⇒どの数値以上が信頼性を確保できるものか議論が必要である。

- 許容できる P_{risk} （避難危険度）の値が決まっていない。

⇒どの数値まで危険度を許容できるものか議論が必要である。

参 考 文 献

- 1) Hp of Cabinet Secretariat, <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kyoujinka/>
- 2) E.Hollnagel,D.D.Woods , N.Leveson and M. Kitamura,“Resilience engineering concept and percepts”,Union of Japanese Scientists and Engineers,(2012).
- 3) M.Kitamura, “Prevention and mitigation of natural disaster by means of resilience engineering”,Journal of JES, Vol.48.No.3,(2012).
- 4) M. Dehne and D. Kruse, “Design of escape routes by simulation evacuation dynamics in conjunction with a probability safety concept”, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, pp.213-223, (2007).
- 5) H.Aritomo,H.Inomo,W.Shiraki, “Considering of using a participatory evacuation simulation system for resilience correspondence in emergency” , Journal of JSCE F6, vol.71,ppI_27-I_32,(2015).
- 6) S.Hatakeyama,A.Sakata,A.Kawamoto,N.Ito,W. Shiraki,“A proposal of BCP and disaster mitigation as well as disaster prevention for local government based on resilience concept” , Journal of JSCE F6,vol.70 No.2,pp.I_81-I_86, (2015).
- 7) S.Hatakeyama,A.Sakata,A.Kawamoto,N.Ito,W. Shiraki,“Proposal concerning effectiveness mortgage of enterprise BCP based on Resilience idea” , Journal of JSCE F6, vol.70 No.2,pp.I_87-I_92, (2015).
- 8) Y.Hasegawa,A.Kawamoto,A.Sakata,E.Satou,N. Ito,W.Shiraki,“The protection against disaster vonscious grade in the area community and inspection of the validity of the resilience evaluation technique” , Journal of JSCE F6, vol.71 No.2,pp.I_13-I_18, (2016).
- 9) T.Nakakubo,A.Tokai,“Review and classification of quantitative assessment methods of resilience intended for infrastructure” , Journal of JSCE F6,vol.71 No.2 .pp.I_33-I_40, (2016).
- 10) Y.Murotsu , M.Yonezawa , S.Shao , “System reliability engineering” , kyoritsu-pub,(1996).
- 11) W.Shiraki,H.Inomo,M.Arakawa,Y.Imai,H.Ishikawa,“A proposition on LRFD formats for standard type of transmission towers” , Journal of Structural Engineering 46A, pp.395-401,(2000).
- 12) A.Matsuho, “Efficient hit-or-miss monte carlo methods simulaiting relevant events for structural reliability evaualuation”,Journal of JSMS,vol54No.3,pp.314-319,(2005).
- 13) H.Aritomo,W.Shiraki,H.Inomo,“Development of participatory evacuation simulation system for Live Design” , Safety issue study collected papers vol.1, pp.13-18, (2006).
- 14) H.Aritomo,C.Isouchi,W.Shiraki,H.Inomo,“Evaluation of evacuation reliability of building structures using evacuation simulation system” , Safety issue study collected papers vol.4, pp.47-52, (2009).
- 15) Hp of Cavinet Office,http://www.bousai.go.jp/kyoiku/keigen/gensai/pdf/leader_guide.pdf, (2015).