

# 複雑系から見たハインリッヒの法則とリスクアセスメント —セルラーオートマトン法によるメタファーシミュレーション—

Heinrich's Law and Risk Assessment as Complex System:  
Metaphor Simulations by Cellular Automata

大阪大学 工学研究科

渋谷 陽二

Faculty of Engineering,  
Osaka University

Yoji SHIBUTANI

大阪大学 工学研究科

山内 賀喜

Faculty of Engineering,  
Osaka University

Yoshiki YAMAUCHI

関西大学 社会安全学部

小澤 守

Faculty of Societal Safety Science,  
Kansai University

Mamoru OZAWA

## SUMMARY

Heinrich's law has been well known as the statistical law of labor accident which suggests that one seriously injured disaster of the workplace hazard can be statistically obtained in the basis of the certain number of disasters without any injury. In this paper, the process of the labor accident is regarded as the spatio-temporal evolutionary problem from the complex system. Cellular automata (CA) method is applied to solve this process as a metaphor model under the appropriate local rule. The effects of initial existence ratio of the first level disaster without any injury and kinds of local rules employed in the CA are discussed with much emphasis. Then, the probability of each level accident as the results of the pattern dynamics was assessed, being compared with the humanistic Heinrich's law. It is found that the initial existence ratio of the first level disaster of around 60% suits this experienced law. The spatio and temporal evolution behaviors were obtained by considering the level transition probability based on the normal probability distribution. The averaging occurrence ratio of each level accident for whole the region is related to the long-term averaging similar to the statistical thermodynamic ergodic property. The magnitude of damage by each level accident was defined as the power-law scaling and then the risk assessments were finally performed for the convergent states of spatio-temporal evolution.

## Key words

Heinrich's law, Work place hazard, Pattern dynamics, Cellular automaton, Local rule, Risk assessment

## 1. 緒言

ハイリスク・ハイリターンはベンチャービジネスの代名詞であるが、ハイリターンの確率があるからこそ挑戦してみようとする動機付けが生まれる。そのかわり、事業化に失敗して多大な借金を背負わなければならない高い確率のリスクを具備している。では、そのリスクとは一体何であろうか。リスクの定義は、「人間の生命や経済活動にとって、望ましくない事象の発生の不確実さの程度およびその結果の大きさの程度」と言われている<sup>(1)</sup>。「望ましくない事象」には、病気や事故で死亡するといった比較的一個人の近距離範囲内に生じる事象から、環境が汚染されたり天災といった地球規模の事象まで、多種多様に想定できる。「その発生の不確実さの程度」と「その結果の大きさの程度」をリスクということになる。それでは、その「不確実さ」の内容は何であろうか。確率的なもの、偶発的なもの、未解明のもの、予見不能なもの、交渉条件的なもの、といったような区別ができそうであるが、いずれにしてもその程度を客観的に評価する手法が必要になる。確率論的な諸量は、統計学的手法と信頼のおけるデータベースがあれば、不確実さをある程度定量化できそうである<sup>(2),(3)</sup>。現在の生命保険や損害保険のシステムでは、人間の命や建物の資産価値の金額を見積もり、その「望ましくない事象」の発生確率に基づいた保険料の算定が行われている。一方、偶発的であったり、未解明であったり、予見不能なものは定量化の根拠が見あたらない。

定量化のためには、そのリスクの同定が必要になるが、その源泉について分類されたものが日本リスク研究学会から提案されている<sup>(4)</sup>。

- ① 自然災害のリスク
- ② 都市災害のリスク
- ③ 労働災害のリスク

- ④ 食品添加物と医薬品のリスク
- ⑤ 環境リスク
- ⑥ バイオハザードや感染症リスク
- ⑦ 化学物質のリスク
- ⑧ 放射線のリスク
- ⑨ 廃棄物のリスク
- ⑩ 高度技術のリスク
- ⑪ グローバルリスク
- ⑫ 社会経済活動に伴うリスク
- ⑬ 投資リスクと保険

生産活動を司る機械構造物の製造を使命とする機械工学の立場から、上記にあげた13分類のリスクのうち、特に③の労働災害のリスクは、機械工学の本質的な人間-機械システム(man-machine interface)の枠組の中でまずは考えなければならぬリスクである。

労働災害を考えた場合、工場で使用している機械が寿命により破壊したり、誤動作を起こすことで労働災害が発生する場合と、その機械を操作している人間のヒューマンエラーに基づく場合に、まずは分類できそうである。前者は、機械構造物の寿命予測を正確に行える評価技術の向上をめざすことで、その発生確率を大きく減少させることが可能である。

一方、後者のヒューマンエラーを定量化するためには、ある程度の客観性の指標が必要になってくる。ヒューマンエラーが確率的に発生することが証明されれば、そのリスクを頻度で判断することができる。すなわち、統計的な概念の導入によりその評価手法が可能になる。しかしながら、最近の重大な災害を見ていると、そのヒューマンエラーは確率論的に生じていると言うよりも、ある1回の行為が致命的な災害に至っており、その確率は前にも後にも（後はわからないが）0で、その1回だけの事象としてとらえるべき性質（一回性）のように思われる。すなわち、リスクを評価する際には、確率論的

な根拠に基づく側面とともに、これまで確率論では例外として捨象してきた一回性の根拠に基づく評価手法も同様に考えなくてはならない。その一方で、一回性の事象も、その一回を産み出すための環境の醸成が背景にあることも考えられる。すなわち、常日頃から、致命的なヒューマンエラーに至らない「ヒヤリハット」を多発している職場環境ほど、その一回性の事象を生じさせている駆動源とも考えられる。このことは、確率論的な環境の中で、決定論的な時間発展挙動が一回性の事象を生じさせているとも解釈できる。

そこで本研究では、まず労働災害の代表的な確率論的指標であるハインリッヒの法則<sup>(5)</sup>を取り上げて考えてみる。ハインリッヒの法則とは、「同種の仕事における労働災害は、合計330件のうち、重い災害1件、軽い災害29件、傷害のない災害300件の比率になる」という経験則である。多くの労働災害がこの比率でほぼ整理されるのは大変興味深い統計的事実である。前述した一回性にみえる事象も、その背景には330件程度のヒヤリハットがまずは存在していると解釈できる。「重い災害」（ここではシビアアクシデントと称する）が発生するにいたる経過を考えると、その災害の危険源が存在する工場などの空間的な拮がりとともに、「軽い災害」（ここではヒヤリハットと称する）からシビアアクシデントに至る時空間発展問題と考えられる。局所的な危険源が暴露（エクスポージャ）されることによりシビア化される過程において、その周辺との間に生じる相互作用を考えると、一個人のみが引き起こした可能性もあるし、その周辺の人間を含めた環境との相互作用で発展したものとも解釈できる。ただし、その周囲環境との相互作用は近距離なのか、あるいは遠距離なのかは問題に強く依存する。そのような周囲との相互作用の仕方には多様性があり一概に決定

されず、ヒューマンエラーの本質にせまる考察が必要であるが、このような数式では予測し難い挙動は一般に「複雑系」と呼ばれる。ここでは、その複雑な周囲との相互作用を、ある簡便な局所近傍則（ローカルルール）で表現し、時空間的な発展挙動を求めるセルラーオートマトン法（CAと称する）<sup>(6)</sup>により、アクシデントのシビア化過程の解析を目的とする。すなわち、分割された領域（ここではセルと称する）は、その状態量としてアクシデントにより生じる傷害の程度に応じたレベルを持つことにする。そして、その最終的なシビアアクシデントに至る時空間発展挙動をパターンダイナミクスの問題としてとらえてみることを試みる。

なお、本解析では、相互作用の具体的な内容には一切言及しないメタファーモデル（隠喩モデル）として労働災害をとらえていることに注意する必要がある。

## 2. CAによるモデリング

### 2.1 境界条件と初期条件

境界条件として、解析対象とする空間（ここでは2次元問題として扱うので境界をもつ平面となる）が無限に繰り返される周期境界条件を設定する。その解析対象となる領域（図1中の灰色領域（Target region））を有限個に分割し、その一区画をセル  $(x, y)$  と称する。ここでは、領域の縦横を  $N_1$  個と  $N_2$  個にそれぞれ等分割する（図1参照）。

なお、解析結果に対して分割数は影響を与えないが、分割幅といった幾何学的諸量は関係しない。

初期条件として、まず軽い災害、すなわちヒヤリハット（レベル1とする）のセルを一様乱数に基づき空間内に設定する。初期配置の方法であるが、1から100までの自然数を発生させて、乱数によりすべてのセルに与える。レベル

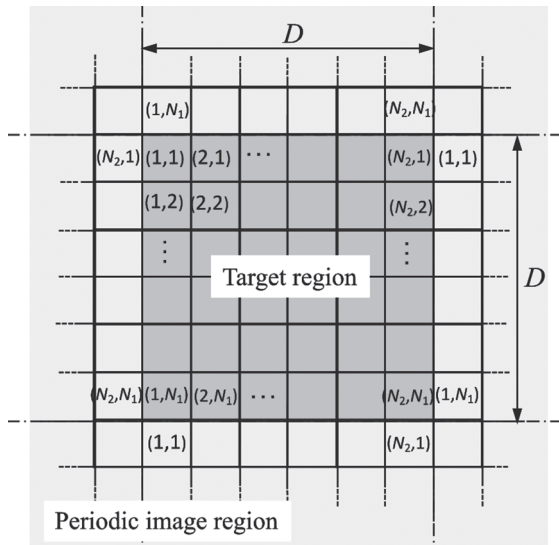


Fig. 1 Analysis region divided by  $N_1$  and  $N_2$  with periodic boundary condition.

1の初期存在割合が、例えば全体の50%の場合、1から50の自然数を持つすべてのセルをレベル1の状態にあるとし、それ以外のセルはレベル0とする。十分なセル数をもつ空間を設定した場合には、最初に配置するレベル1の配置に関する依存性を極力小さくすることができる。そのレベル1の初期存在割合による影響と、セル分割数の影響については後述する。

## 2.2 局所近傍則

まず状態量として、アクシデントのレベルを定義する。すなわち、

レベル0：無災害の平常状態

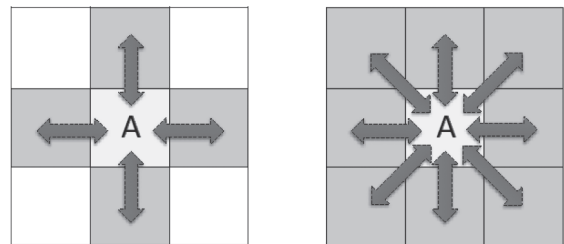
レベル1：(Disaster without injury) 傷害はないが災害として認知される事象。ヒヤリハットと称する。

レベル2：(Slightly injured) 軽い傷害ではあるが、死亡や長期入院といった災害ではない事象。

レベル3：(Seriously injured) 重大事故として公的に報告される事象。シビアアクシデントと称する。

レベル4以上：レベル3のシビアアクシデントと同じ分類に属するが、死亡や職場復帰が不可能な災害となり、事故の内容や周囲に及ぼす影響範囲等によりシビア化すると仮定する。

以上の状態量をもつセルが時間発展するための局所近傍則を下記のように設定する(図2参照)。



(a) Neumann (b) Moore  
Fig. 2 Local rules of Neumann and Moore.

まず、自分自身のセル(図2のA)の上下左右に位置する4個のセルとの相互作用を考慮するノイマン型(N型、図2(a)参照)と、上下左右および斜め前後の計8個のセルとの相互作用を考慮するムーア型(M型、図2(b)参照)を用いる。下記の条件が満足された場合についてのみ、対象としているセルの状態量をシビア化させる。すなわち、レベルを1ずつあげていく。

[1] 対象とするセルが、状態量1以上を持つ場合にのみ発展させる。したがって、レベル0は不変とする。すなわち、新たなレベル1の生成をここでは考慮しない。

[2] 相互作用の及ぼす周囲のセルの状態量が、自分自身と同じかそれよりも大きなレベルを持つ場合についてのみ、自分自身のレベルを1つあげる。

この単純なルールを繰り返し行い、すべてのセルの状態量が全く変わらない状況が生じたときに収束したと判断する。

### 3. 解析条件の影響

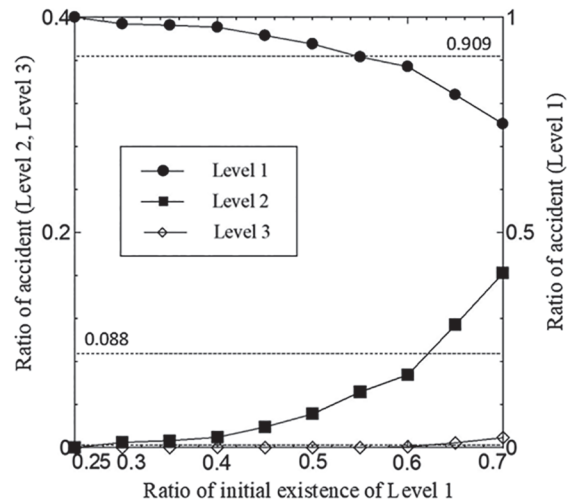
前述したハインリッヒの法則（レベル1の件数：レベル2の件数：レベル3の件数 = 300：29：1）に基づくと、総件数に対する各レベルの発生割合は、レベル1； $300/330 = 0.909$ ，レベル2； $29/330 = 0.088$ ，レベル3； $1/330 = 0.003$ となる。この値を参照値とする。

#### 3.1 レベル1の初期存在割合の影響

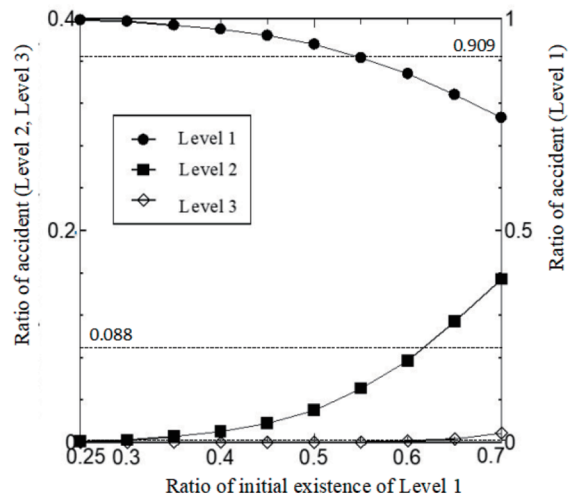
まず、初期条件としてランダムに配置するレベル1の存在割合 $p_1$ の影響について調べる。その割合を25から70%までとしたときの各レベルの発生割合を示したのが図3である。用いたセル総数は、図3(a)が $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$ ，図3(b)が $N_1 \times N_2 = 1000 \times 1000$ である。局所近傍則は後述するN型で上下左右4個のセルと相互作用するNLR4である。左右の軸は、初期に配置したレベル1の総数に対する各レベル発生件数の割合を表している。したがって、本解析ではレベル1の時空間発展挙動を求めているので、収束した時の割合が前述した各レベルの発生割合に相当する。セル数が20倍×20倍になると、曲線は滑らかになるが、収束値はほとんど変わらない。すなわち、災害の時間発展はある程度の労働者が引き起こすアクシデントの件数があれば、その規模によらないことを示唆している。

$p_1$ が30%近くになるとほとんどレベルが更新されないことを表している一方、レベル1の存在が大きくなるほどシビア化が進むことがわかる。また、完全には一致しないが、レベル1の初期存在割合が約55~65%の範囲で、ハインリッヒの法則に基づく割合とほぼ等しくなっていることは大変興味深い。すなわち、2件に1件強の割合でヒヤリハットが存在する職場が、レベル間の遷移確率を1とした時の現実的な現象

に近いことになる。また、ヒヤリハットが、例えば60%から高々10%減少しただけでも、レベル2の発生割合を半減できることがわかる。



(a)  $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$



(b)  $N_1 \times N_2 = 1000 \times 1000$

Fig. 3 Effect of initial existence ratio of Level 1 to occurrence ratio of each level.

#### 3.2 局所近傍則の影響

採用する局所近傍則の影響について調べたのが図4である。図中の標記で、例えばNLR3はN型で上下左右の周囲の4個のセルのうち任意な3セルの組合せについてのみ相互作用を持つと仮定し、MLR8はM型で周囲全部の8セルの



相互作用を考慮することを示す。セルの総数は  $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$  で、 $p_i$  は60%としている。

図4からわかるように、周囲との相互作用が減少するほど事象のシビア化が進んでおり、N型で3個(NLR3)、M型で5個(MLR5)まで減少すると、Level 7までシビア化していることがわかる。したがって、事象のシビア化は周囲との相互作用があればあるほど深刻化せず、少なくなるとより重大な災害の発生を導くことになる。このことを換言すれば、グループによる作業や異なる人間によるダブルチェックが有効であることを示唆している。

ハインリッヒの法則によるレベル3までの発展に相当するのはNLR4とMLR7になり、周囲と相互作用比較的に強い環境の中での人的事象と言える。

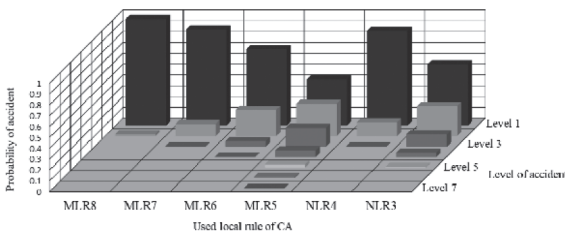


Fig. 4 Effect of the local rule of CA to occurrence ratio of each level.

#### 4. 時空間の発展様式

##### 4.1 時間方向の発展挙動

2.2で述べた局所近傍則では、条件を満足したときに当該セルのレベルが1つ確実に増加する。すなわち、レベルの遷移確率は1である。しかし、実際にはシステムが危険回避する機能を有したり、人間の適切な判断が入ったりしてシビア化しないことがある。ここでは、そのような確率過程を正規分布に従うものと仮定する。すなわち、平均値  $\mu$  に対して  $\mu \pm n\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差、 $n$  は自然数) の範囲外に存在する確率でアクシデントが発生すると考える。この時の収

束に要するステップ数と  $n$  の関係を示したのが図5である。図5では、 $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$  でレベル1の初期存在割合  $p_i$  が55%、60%、65%、そして  $N_1 \times N_2 = 200 \times 200$  でレベル1の初期存在割合  $p_i$  が65%の曲線を示している。レベル間を遷移する確率が小さくなるほど、収束するまでの時間は急増している。この解析で用いている収束判定は、すべてのセルのレベルが1回でも不変の場合に収束したと判定しているため、遷移確率が小さくなるほど準定常状態に至る時間が長くなり、かつ現在の状態を維持しやすいことになる。加えて  $p_i$  が65%で  $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$  と  $200 \times 200$  を比較すると、後者の方がより多くの時間を要している。これらのことから、危険回避システムや周囲との相互作用の場合の数を増やすことは、シビア化していくアクシデントの時間発展を大きく遅延させることのできることをわかる。

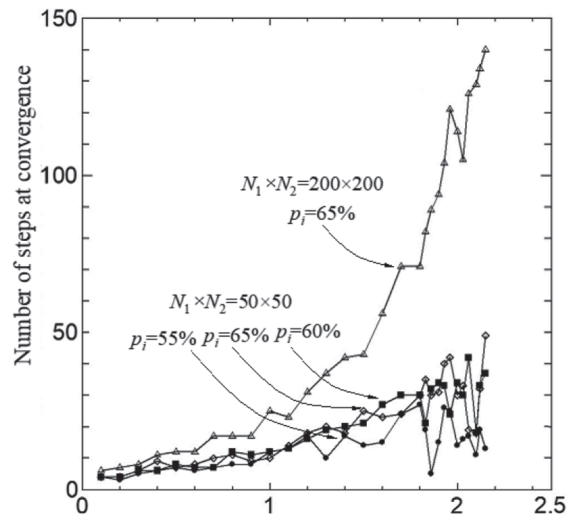


Fig. 5 Total number of steps until the system convergence.

収束した時の各レベルの発生割合と  $n$  の関係を示したのが図6である。 $p_i$  を65%として、図6(a)は  $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$  を、図6(b)は  $N_1 \times N_2 = 200 \times 200$  を示している。

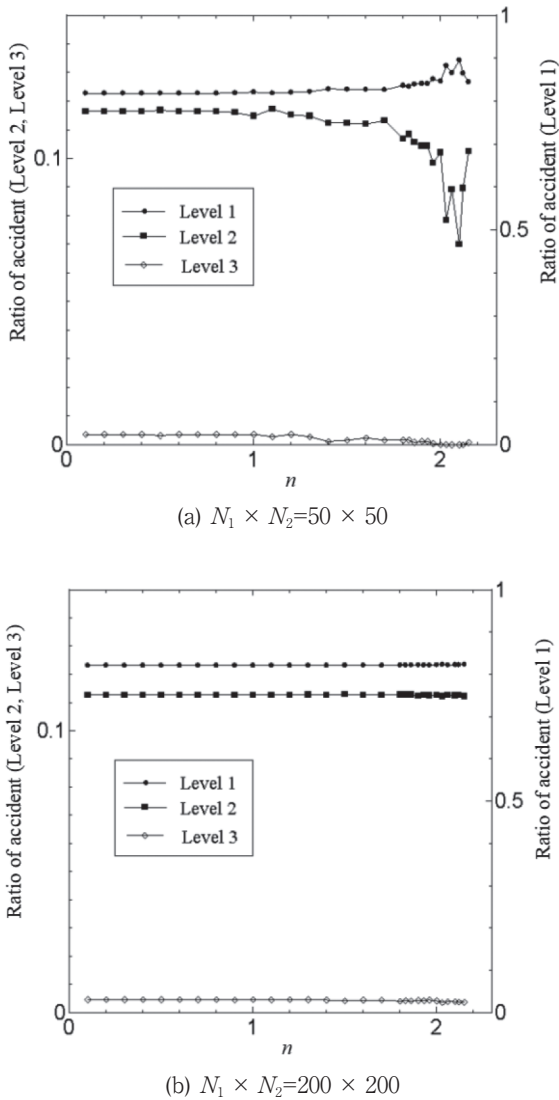


Fig. 6 Occurrence ratio of each level by changing the level transition probability.

図6の(a)と(b)を見ると特徴的なことに気づく。分割数を4倍×4倍にした図6(b)では収束した状態が、遷移確率に関わらずほとんど変化していない。遷移確率を小さくしても、領域内の相互作用の場合の数が多数になり、その結果遷移確率を1にする場合とほぼ同じ挙動を示している。これは集団平均(アンサンブル平均)の結果としてとらえることができる。図6(a)は、分割数が少なく、かつ遷移確率を小さくするとレベルの更新があまりされなくなり、収束時の

レベル2の発生割合が減少する。現在は、領域内で1回でも変化がなければ収束した条件で解析しているが、その制限を外すと、非常に長い時間を要するが、図6(b)と同様に遷移確率1の場合に漸近することが予想できる。これは統計熱力学における集団平均と長時間平均の等価性を示したエルゴード性を表している。すなわち、 $N_1 \times N_2 = 200 \times 200$ 以上の分割があれば、遷移確率をどのように仮定しても、統計学的に十分な平均場として結果を与えることを示唆している。

#### 4.2 空間方向の発展挙動

レベル1の初期存在割合を大きくすれば、より高いレベルへの移行割合が増えることはすでに3.1で述べた。その発展挙動が空間分布としての特徴を持つのかどうかについて調査したのが図7である。 $N_1 \times N_2 = 200 \times 200$ で、NLR4の局所近傍則、レベル間遷移確率を1とし、レベル1の初期存在割合が55%、60%、65%について時刻 $t = 0$ の初期配置と収束状態をそれぞれ表している。レベル0を白色、レベル1が淡灰色、レベル2が濃灰色、レベル3以上は黒色のように色区別をつけて表している。 $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$ の場合を各図の左下に挿入図として示している。200×200ではわかりづらいが、50×50ではそのレベル1の配置依存性が発展挙動に強く影響していることがわかる。図3で述べたように、領域全体としての各レベルの発生割合は分割数にほとんど依存しない一方、各レベルの空間分布にはその配置が依存する傾向を示している。

$N_1 \times N_2 = 200 \times 200$ で $p_i = 55\%$ 、60%、65%に対して、レベルごとの相対距離を調べた結果が図8である。例えば、レベル2の生じているセル間の距離を求め、図1の領域全体の対角線の長さ( $\sqrt{2D}$ )で正規化した値の平均値を求

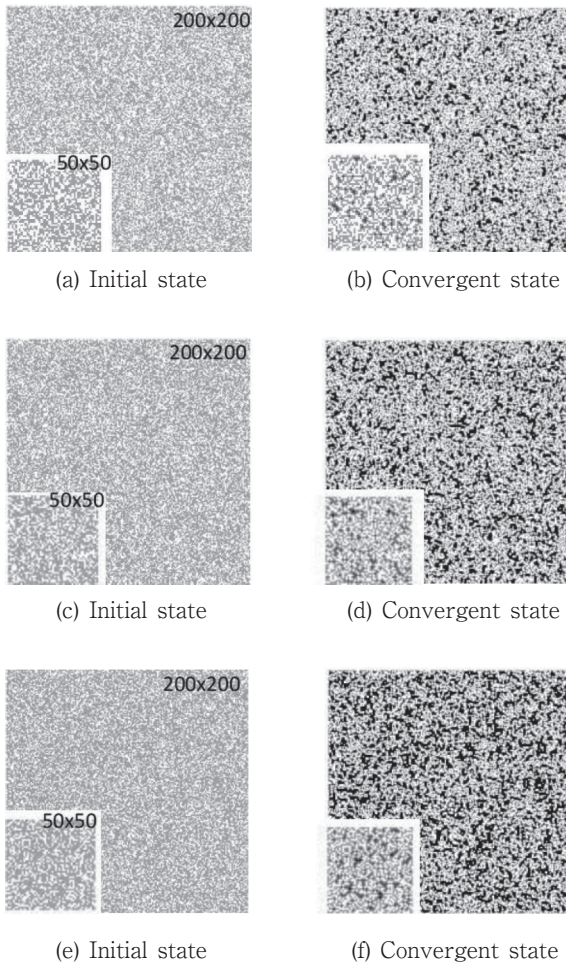


Fig.7 Spatio-temporal evolution patterns of three kinds of initial existence probabilities ;  $p_i=55\%$  for (a) and (b),  $p_i=60\%$  for (c) and (d),  $p_i=65\%$  for (e) and (f). Gray to black colors show level 1 to 3 and more.

めたのが縦軸である。したがって、1よりも小さな値になる。前述したように、収束状況がレベル1の初期配置に依存することはわかっているので、10回異なる配置に対して相対距離を求め、その平均値と標準偏差の誤差を示している。

$p_i$ が55%~65%の間で変化しても、各レベルの相対距離はあまり変化しない。また、レベル2よりもレベル3の相対距離が小さくなっていること、そしてレベル3の方が誤差範囲が大きくなっている。これは、レベルのシビア化は平均的な事象として生じるのではなく、配置に依

存した局在的な事象として発生していると考えられる。これらのことから、1.の緒言で述べた「確率論的な環境の中で、決定論的な時間発展挙動が一回性の事象を生じさせているとも解釈できる」という仮説の根拠の一つと言えるかもしれない。

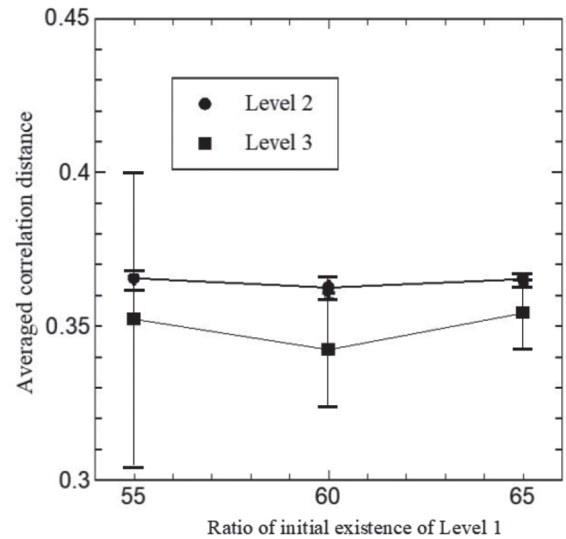


Fig.8 Averaged correlation distances according to initial existence ratio of Level 1.

## 5. リスクアセスメントの試み

1.の緒言で述べたリスクの定義にしたがって、本論文で取り上げているメタファーモデルのリスクアセスメントを試みる。

いま、レベル  $L$  の持つリスク  $R_L$  は、好ましくない事象を表すレベル  $L$  に対する結果の大きさ  $a^{L-1}$  と、その事象の発生する確率  $P_L$  との積で次式のように定義されるとする。

$$R_L = a^{L-1} \times P_L \quad (1)$$

各レベルでの結果の大きさの程度は、 $a$  を2, 10, 100の基数としてそのべき乗  $a^{L-1}$  で増加するものとする。各レベルの発生確率は、レベル1の初期存在割合に応じて収束した値を用いる。 $p_1 = 1.0$  とし、レベル1より大きなレベルでの



確率  $P_L$  は積の法則により次式で表す。

$$P_L = \prod_{k=1,L} p_k \quad (2)$$

領域を  $N_1 \times N_2 = 50 \times 50$ , レベル1の初期存在割合  $p_i$  を図3の計算点に対応させた25%から70%の範囲, 局所近傍則をNLR4として, 式(1)で定義されたリスクを示したのが図9である。レベル1では  $R_1 = a^0 \times 1.0 = 1.0$  となり, それぞれの  $p_i$  に対する平均値を直線で連結している。結果の大きさを示すパラメータ  $a$  には任意性があるが, レベルが高いからといってリスクが必ずしも大きくなることとわかる。  $a$  が10を越えた程度からレベル2のリスクがレベル1よりも大きくなることとわかる。

## 6. 結 言

労働災害の傷害の程度(レベル)に応じた発生割合に関するハインリッヒの法則について, 時空間を離散化し局所近傍則により時間発展させるセルラーオートマトン(CA)法により解析を行った。レベルを状態量に持つメタファーマodelを提案し, ハインリッヒの法則に適合する条件について考察した。その結果, レベルの遷移確率を1とした場合, レベル1(ヒヤリハット)の初期存在割合が55%~65%の範囲内でハインリッヒの法則の発生割合とほぼ同じになり, 2件に1件強のヒヤリハットの存在する職場が該当する。

また, 正規分布に従うレベル間の遷移確率を仮定した時間発展挙動から, 領域の分割を大きくし相互作用の場合の数を増やした発展挙動のいわゆる集団平均と, 遷移確率が小さくても長時間平均を取った発展挙動との類似性, すなわち統計熱力学のエルゴード性に等価な性質の存在が示唆された。

レベル遷移の過程における空間分布と同一レベル間の相対距離を調べた結果, レベル1の初

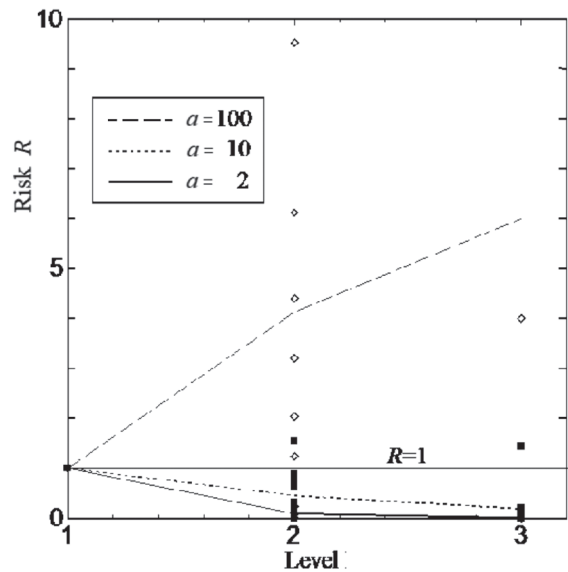


Fig. 9 Risk assessment of each level.

期存在割合にはほとんど依存せず, レベル3の平均相対距離がレベル2よりも小さくなった。このことは, レベル1の確率論的な環境の中で, 局在化したレベル1から優先的にレベルのシビア化が生じ, 比較的近距离に発生する決定論的な時間発展挙動が, 最近の労働災害に見られる一回性の事象と解釈できる。

レベルの大きさをべき乗則で表現するリスクを定義し, CA法により収束した各レベルの発生確率との積からリスクを評価した。その結果, レベルが高いほどリスクが高いという単純な論理ではなく, その程度の大きさ依存性の強いことがわかった。

## 謝 辞

本論文に関わる一連のモデルの構築には, 以下の大阪大学で実施された卒業研究の成果, 日本機械学会関西支部に設置された研究会での議論, そして科学研究費補助金による財政的支援によるものである。これらすべての支援に対して謝意を表す。

○三宅 洋平, 2005年度大阪大学工学部応用理工学科卒業研究「セルラーオートマトン法による反応拡散系モデルを用いた風評被害解析」

○日本機械学会関西支部リスクマネジメントに関

する研究懇話会（代表：小澤守，1999年～2005年）

○文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(1)  
(16208022, 代表：新山陽子，2004年～2006年)

最後にあたり、筆頭著者がリスクマネジメントの概念の重要性を強く意識・認識し始めたのは、小澤守教授との何気ない電車の中での会話、研究会や学会等の帰り道での会話を通じてである。これまで数え切れないほどの学術的、そしてその枠組みにとどまらない人生論に至るまで、これらの会話は刺激的で、ややもすれば日々の雑用でくすんで埋もれてしまう挑戦的な意識、意欲を掘り起こすものであった。この感覚は生涯忘れることはなく、これからの人生を力強く生き抜く上での糧になるであろう。

小澤守教授の長年の熱工学分野における貢献、日本の原子力発電を含めた社会安全分野における貢献、そして学生、教員を含めた人材育成に対する貢献等に、尊敬の念とともに心から謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] リスク学辞典, 日本リスク研究会編, (2000), 2, TBSブリタニカ.
- [2] 小澤守, 渋谷陽二 (1999-12), 事故・災害のリスクマネジメント 技苑 (関西大学工業技術研究所) Vol.101 pp.52-55.
- [3] 小澤守 (2002), 現在社会におけるリスクとリスクマネジメント 農業と経済 pp.36-46.
- [4] 文献 [1] の3ページ.
- [5] ハインリッヒ他 (1982), 産業災害防止論 (財総合安全工学研究所編訳 海文堂 pp.59.
- [6] Cellular Automata and Complexity, Wolfram, S.(1996). Addison-Wesley Publishing Comp.

(原稿受付日 2019年8月23日)

(掲載決定日 2019年10月17日)