

確率 統計的手法を用いた労働災害のリスク同定 評価と

その事故防止施策の意思決定への応用

—パーコレイトシミュレーションを用いた大規模災害の予測手法—

分担研究者 岡崎 慎司 横浜国立大学大学院工学研究院助手

研究要旨

本分担研究では、パーコレイトシミュレーションによって、大規模災害予測手法の実験的検証を行い、その予測手法が安全管理の程度に大きな変化がなければ、有効な手法であることを明らかにした。また、2次元ホントモデルを用いて1986年以降の労働災害をモデル化することができた。さらに、そのモデルによる労働災害の予測シミュレーションが有効な手法であることを明らかにした。

A 大規模災害の予測—パーコレイトシミュレーションを用いた実験的検証—

A1 パーコレーションについて^{1,2)}

パーコレーションは、不規則な媒質中における粒子もしくは流体のランダムな運動を統計的に扱う理論であり、具体的には砂の中に水が染み込むような現象を表している。ただし、この理論の対象は必ずしも物理的な粒子や媒質に限られるわけではなく、抽象的な概念にも適用可能である。パーコレーションが対象とするのは、系の中に存在する何らかの要素のつながりであり、ほとんどの現象にその応用を見出すことができる。たとえば火災伝播の場合には、火災を流体(粒子)、都市を媒質と解釈すれば、パーコレーションの理論を適用することができる。

パーコレーションの理論では、媒質の位

相的特質を単純なリニア・グラフによって表すことが多い。たが、有限のリニア・グラフのみを対象とする通常のグラフの理論と異なり、ある種の条件をみたす無限のリニア・グラフを主として取り扱う。さらに、リニア・グラフの点に相当するものをサイト、辺に相当するものをホントと呼び、それぞれに確率を割り当てる。ホントは2個のサイトを結んで流体を通す機能を持ち、逆にサイトはいくつかのホントを結んで流体を通す機能をもつ。両方向に流体を通しうる無向ホントのほかに、一方向にしか通さない有向ホントを考えることもある。各サイトから出るホントの平均個数 z かいわゆる配位数である。また、流体があるサイトに到達することを象徴的にそのサイトを濡らすといい、クラスターはホントでつながれた、濡れたサイトの集団としてとらえられる。

パーコレーションの問題は、ホントとサイトのどちらに確率を割り当てるかに応じて、ポント過程（ポント・パーコレーション）とサイト過程（サイト・パーコレーション）に大別される。ポント過程では、ポントが流体を通すかどうかは確率の問題であり、各ポントは他のポントと無関係に一定の確率で流体を通す。一方、サイト過程では、ポントはいつも通行可能であるか、サイトが流体を受け入れるかどうかは問題であって、各サイトは一定確率で流体を受け入れるというものである。しかし、パーコレーションの問題をこの2つのどちらかで必ずしも表現できるわけではなく、場合によってはサイト過程とポント過程を組み合わせた混合パーコレーションを用いることもある。

パーコレーションモデルは、確率試行により浸透が進むという理解しやすいモデルであるが、モデルの条件や設定により様々な特性を示す。本研究では災害の被害規模分布を模擬できるようなシミュレーションモデルを提案した。

A2 シミュレーション方法

A2.1 本研究で用いたシミュレーションモデル

本研究では、2次元ポントモデル、3次元ポントモデルを用いシミュレーションを行った。それぞれのモデルをFig 1に示す。また本研究で用いたシミュレーション条件を以下に示す。本研究では、2次元のモデルでは労働災害、3次元のモデルでは火災事故、漏洩事故のシミュレーションに用いている。

[シミュレーションモデル]

基点となる浸透サイト

正方形(50×50, 2次元ポントモデル),
立方体(50×50×50, 3次元ポントモデル)
の配列内の中心1点 浸透方向 $\pm x, \pm y$
方向(4方向, 2次元ポントモデル), $\pm x, \pm y,$
 $\pm z$ 方向(6方向, 3次元ポントモデル)

浸透確率

0.1-0.5(2次元ポントモデル),
0.20-0.23(3次元ポントモデル)

浸透ルール

隣接するサイトへの浸透確率試行は一度のみの試行によって新たに浸透したサイトがなければ終了→浸透した総サイト数を数える(Fig 2, フローチャート参照)

A2.2 浸透確率の変化によるリスク曲線への影響²⁾

浸透確率 P を決め、Fig 3 に示すような水が地中に浸透していくモデルについて確率試行していくとする。浸透を支配するのはポントであり、実線のポントは水を通し、点線のポントは水を通さない。この例は、浸透の方向が上から下へ方向に決まっており、ポントが通行可能かどうかによって浸透が支配されるので、「方向性のあるポントパーコレーション」といえる。ここで、ポントが水を通すか否か、すなわちポントが開いているか閉しているかは一定の浸透確率 P によって決定される。開いている確率はつまり P 、ポントが閉している確率は $1-P$ となる。これによりかなり複雑であるか、ある深さまで水が浸透する確率を計算することは可能である。しかし、確率 P を大きくしていくと、ある時水が無限遠方まで浸

透する。このときの確率を臨界確率という。また臨界確率近傍においてはリスク曲線のテイル部に示されるようなばらつきの大きいフラクタル性が見られることも分かっている。

本研究では、予備実験として臨界確率を求めるため、浸透確率をそれぞれ変化させ、災害の被害規模をクラスターの大きさとした時のリスク曲線を構成した。3次元ポイントモデルにおいて浸透確率を0.20, 0.21, 0.22, 0.23に設定し、クラスターを100個生成し、リスク曲線と同様に整理した。それらの一例をFig 4, Fig 5に示す。3次元ポイントモデルにおいては0.20に比べ0.22, 0.23では傾きが小さく、ばらつきが大きいことが分かった。つまり臨界点近傍においては、リスク曲線の傾きが小さくなる。これにより、シミュレーションによって、各種災害を模擬する場合、テイル部の形状を変化させるには浸透確率を臨界点近傍へ設定すればよいことが分かった。

A 2.3 サンプルサイズ(事故件数)の変化によるリスク曲線への影響

実際の災害データを用いて整理した1年間のリスク曲線と10年間のリスク曲線では、テイル部の形状、傾きは、それほど大きな変化は見られない。ここではパーコレートシミュレーションにおいても、そのような規則性が成立するかを検証した。まず、3次元ポイントモデルにおいて浸透確率をそれぞれ0.20, 0.22, 0.23とし、サンプルサイズ(事故件数)を変化させた際のリスク曲線を構成した。その結果の一例をFig 6, Fig 7に示す。またそれぞれのリスク曲線の傾き D をTable 1に示す。

サンプルサイズを100に設定した時では200以上に比べリスク曲線の傾き D はかなり小さくなることか分かった。これより3次元のモデルにおいては少なくともリスク曲線を構成する際、200のサンプル、つまり事故件数200件は必要であることが分かった。次に、各浸透確率で比較すると浸透確率0.22, 0.23では0.20に比べ、テイル部がばらついていた。つまり、浸透確率が臨界確率の近傍になると、リスク曲線はサンプルサイズが増加するにつれて傾きが大きくなることか分かった。一方、浸透確率0.20においてはサンプルサイズ200から1000くらいまでほとんど変化が見られなく、実際の災害データによるリスク曲線に類似することか分かった。

A 3 シミュレーションによる再現期間を用いた大規模災害予測の実験的検証

A 3.1 シミュレーションの手順

本年度の総括研究報告書において再現期間を用いた大規模災害の予測は、その後一定の安全管理状況が続いた時の将来の水準の指標となりうるということが明らかにされた。ここでは、その予測手法の精度を実験的に検証した。

この実験的検証では3次元ポイントモデルを用い、1年分のリスク曲線における事故件数を200件、浸透確率を0.20と設定し、200個のクラスターを生成させた。次に、それぞれのクラスターサイズ(浸透した総サイト数)を災害の被害規模とし、実際の災害データと同様にリスク曲線を構成した。

このようにして構成した1年分のリスク曲線を10年間分生成しこれを1つのデータ

セメントとした。さらに、各年度の最大値を抽出、最大値分布をプロットした。このようにして得られた分布より、再現期間5年、10年と設定した時、実際その後、実データでは得られない100、1000年後を想定した検証を行うことができる。なお、1組のデータセメントのみではデータのばらつきか生じる可能性があるため、本研究では10組のデータセメント(異なる乱数系列)を用いて検証した。

A32 シミュレーション結果と考察

浸透確率0.20において1000年経過した時の予測値との関係を再現期間5年、10年で予測した。その結果をそれぞれTable 2, Table 3に示す。再現期間5年、10年における予測結果は共に、その後の経過年数、つまり試行回数を増やすごとに収束していることが分かった。理論値(その後実際に発生したクラスター大きさ)との相対的な誤差を(予測値-理論値)/理論値(%),で示したが、2000年試行後ではほぼ20%以下の誤差範囲に収まっていた。データ系列(2)については元の10点によって構成される最大値分布が大きはずれており、このような場合には、試行回数を増やしてもほとんど収束しないことが分かった。

以上より、パーコレイトシミュレーションを用いて、安全管理の状況に大きな変化のない、つまり、リスク曲線の傾きに経年変化が生じないと仮定した時の大規模災害予測手法の妥当性と有効性を明らかにすることができた。

A4 シミュレーションによる1年間のリスク曲線での大規模災害予測の実験

的検証

A41 シミュレーションの手順

本年度の総括研究報告書において、正規化リスク曲線と最大値分布であるFrechet分布とのパラメータの関係を利用した、1年間のリスク曲線による最大被害規模予測を行った。しかし、1年間のリスク曲線による予測では、災害データは十分とはいえずその有用性を明確にすることができなかった。ここでは、パーコレイトシミュレーションによって、さらにサンプル数を増やした際の実験的検証を行った。

シミュレーションでは、1年間のリスク曲線のデータ数を200件、浸透確率を0.20に設定した。まず、10年間のリスク曲線を構成、各年度の年間最大被害規模(クラスター大きさ)を抽出し、最大値分布を作成した。これを理論値とし、1年間の正規化リスク曲線を構成し、傾きDの線を引いた。本研究では、このような1年間のリスク曲線による予測を異なる乱数系列を用い50年間分を行った。それらの10セメント(10年間)の一例をFig 8に示す。また、再現期間5年、10年と設定したときの予測最大被害規模(クラスター大きさ)が、どの程度の精度であるかをヒストグラムを用いて考察した。それぞれFig 9, Fig 10に示す。ここで、再現期間5年、10年における理論値(10点によって予測された最大クラスター大きさ)はそれぞれ、273、355であった。

(倫理面への配慮)

本研究では各種の労働災害に関するデータを収集・整理し、それらをリスク分析、評価、検証のために用いている。労働災害等のデータには個人のプライバシーや人権

に関する情報が含まれている可能性は排除できないが、それらの一次データをそのまま公開することはなく、また、データの遺漏がないように、その取り扱いには十分な配慮を払った。

A 4.2 シミュレーション結果と考察

Fig 8 より、パーコレーションシミュレーションによっても予測が行えていることが分かった。さらに、予測のばらつきが少なく、太線で示されている 10 点による推定とほとんど同一の予測が 1 年間のリスク曲線によっても得られることが分かった。これは、シミュレーションにおいて、時間経過による産業構造や安全管理の程度の変化はないと仮定しているためでもあるが、この予測手法が理論的には可能であることを示していると考えられる。それは Fig 9, Fig 10 のヒストグラムを見てもその最頻値 (median) が理論値とほぼ同一であることから示されている。特に再現期間が 5 年以下であれば、簡易的な予測が可能である。

B パーコレイションシミュレーションを用いた労働災害のモデル化と大規模労働災害の予測シミュレーション

B 1 労働災害のモデル化

B 1.1 次元が与えるリスク曲線への影響

生成されるクラスターに対しパーコレイションシミュレーションにおける次元の変化は、浸透確率や配位数に比べて、より大きな影響を与える。ここでは、シミュレーションによる次元の変化は実災害におけるどのような要素と関係があるのかを考察した。ま

ず、Fig 11 に火災事故と労働災害の正規化リスク曲線を比較した。テイル部における直線性は両者ともに見られるか、その傾きや中小規模災害の領域における形状は災害の種類により大きく異なる。一方、パーコレイションシミュレーションにおいても、次元の変化によってリスク曲線の形状は同様に大きく変化する。ここで、Fig 12 に 2 次元ポントモデル、3 次元ポントモデルにおいてそれぞれ臨界確率(2 次元ポントモデル $P=0.33$, 3 次元ポントモデル $P=0.23$)における正規化リスク曲線を示す。この図よりシミュレーションによる次元の変化は、分布の形状を大きく変化させることが分かった。3 次元におけるリスク曲線の傾きは小さく、テイル部におけるばらつきが大きい。また、Fig 11 と Fig 12 における両者の関係は非常に良く類似している。つまり、実際の災害における災害の種類、災害生起の構造に、パーコレイションシミュレーションにおける次元が対応しているためであると考えられる。従って、災害の種類(構造)に合致するようシミュレーションによって次元を変化させれば、各種災害を模擬することができると考えられる。

B 1.2 労働災害のシミュレーションモデル

火災・漏洩事故についてのリスク曲線の模擬は過去の研究で、3 次元モデルを用いることによってシミュレートすることができていることが分かっている。しかし、労働災害は火災・漏洩事故とは、実際のリスク曲線の分布の形状、傾き、被害規模のスケールが大きく異なる。従って本研究では、次元を変化させることによって労働災害をシミュレートできるようなモデルを構築した。

そのために労働災害のデータを整理した。これを Table 4 に示す。これにより、1986 年以降 2000 年までの約 15 年間については正規化リスク曲線の傾きがほぼ等しく 2.5 ~ 3.0 に収まっており、安全管理の程度かほぼ一定であることが分かった。また、事故の件数についても、1986 年以降 1 年間に約 50-80 件起きており、件数についても経年変化はほとんど見られない。従って、労働災害のリスク曲線をシミュレーションするための条件を、事故件数 50-80、傾き 2.5 ~ 3.0 と設定した。また、リスク曲線の傾きが大きいため、2 次元ポントモデルを採用し、浸透確率 0.13-0.16、臨界確率 0.33 とそれぞれ設定し、この 2 種類の方法によって実際の災害データによるリスク曲線をシミュレートした。詳しいモデルの条件は以下に示す。

- Method 1** 分布の形状、被害規模スケールを変化させず(クラスター大きさが 1→死亡者数 1 で換算)模擬する方法
- Method 2** 被害規模スケールについては、スケーリング(例えばクラスター大きさが 10→死亡者数 1 で換算等)を行い、模擬する方法

[労働災害シミュレーションモデル(2 次元ポントモデル)]

基点となる浸透サイト

正方形(50×50)の配列内の中心 1 点
浸透方向

±x, ±y 方向(4 方向)

浸透確率

0.13-0.16(Method 1), 0.33(Method 2)

浸透ルール

隣接するサイトへの浸透確率試行は一度のみ。試行によって新たに浸透したサイトかなければ終了→浸透した総サイト数を数える(Fig 2, フローチャート参照)

サンプルサイズ

50-80(労働災害の年間事故件数は約 50-80 件)

B 2 労働災害のモデル化に関する考察

Method 1 に関する考察

まず、本モデルを用いて浸透確率 0.13, 0.14, 0.15, 0.16 においてリスク曲線、正規化リスク曲線を構成し、 D' , γ を求めた。これを Table 5 に示す。傾き D' については浸透確率 0.13 と 0.14-0.16 で異なっていることが分かった。浸透確率 0.14-0.16 において傾きは約 2.8 であり、実際の労働災害のものとはほぼ同じであった。

さらに、分布全体の形状を模擬できるかを試みた。5 年間ごとの実際の労働災害のリスク曲線と各シミュレーションで得られたリスク曲線を比較した。その結果を Fig 13, Fig 14 に示す。これらより、浸透確率が 0.14 と 0.15 のものでは、中小被害規模領域においても分布の完全な模擬ができていることが分かった。従って、労働災害は 2 次元ポントモデルを用いて、モデル化できることが分かった。つまり、ある期間の労働災害のリスク曲線が構成できれば、浸透確率、事故件数を入力し、設定を調整することによって傾き、形状をそのリスク曲線に合わせたものかシミュレーションで生成することかできる。設定された条件でリスク曲線を求め、これによって労働災害の被害規模予測等が行えると考えられるか、曲線のテ

イル部においては乱数系列によって傾きが著しく大きくなってしまいうケースもあった。従って、労働災害予測シミュレーションの構築していく上で、さらにモデルの有効性を検討した。

・ Method 2 に関する考察

Method 1 において臨界確率を用いなくても労働災害の分布全体を模擬することができた。しかし、大規模労働災害をシミュレートする上では、分布テイル部の形状をフィットさせることも重要である。そこでここでは、労働災害のテイル部がばらつくことにより形状をフィットさせることが可能であると考えられるため、分布のテイル部がばらつく臨界確率($P=0.33$)を浸透確率に用いた。まず、被害規模のスケールを合わせるため、クラスターの大きさ h に対し、労働災害の被疑規模である死亡者数 $h_p = h/h_c$ となるようなスケーリング指数 h_c をシミュレーションによって求めた。サンプルサイズ 500, 800, 1000 においてそれぞれ h_c を変化させスケーリングした。サンプルサイズ 800 の結果を一例として Fig 15 に示す。サンプルサイズ 500 では $h_c=7$ 、サンプルサイズ 800 と 1000 については $h_c=10$ で、ほぼ実際の労働災害の 5 年間における総事故件数 300 件と等しくなった。Fig 15 から、サンプルサイズ 500, 1000 に比べてサンプルサイズ 800 のシミュレーションによって得られたリスク曲線では実際の労働災害リスク曲線全体を模擬できていることが分かった。さらに、サンプルサイズ 800 について、テイル部の傾き D を幾つかの乱数系列を用いて求めた。大半の傾きは 2.5~3.5 となり 実際の労働災害の傾きにほぼ一致す

ることが分かった。このようにスケーリング指数 h_c を用いることによっても、労働災害のリスク曲線全体を模擬することができた。

B3 大規模労働災害の被害規模の予測シミュレーション

前節までに 2 種類の方法(Method 1, Method 2)によって労働災害のモデル化を行うことを示した。従って、それらのモデルを利用することにより、再現期間を用いた手法で労働災害の最大被害規模を予測することか可能であると考えられる。ここでは、1986 年から 1990 年の 5 年間における労働災害のリスク曲線を用い、異なる乱数系列によってリスク曲線を構成、最大値を抽出及びその最大値分布から、その後 5 年、10 年後の予測を行った。次に、それか実情とどのくらい合致しているか検証し、予測シミュレーションの有効性を明らかにした。

・ Method 1 による大規模労働災害予測シミュレーション

本手法ではサンプルサイズ 50(年間事故件数 50 件)、浸透確率 0.16 を用いた。ここで、浸透確率 0.16 を用いたのは大規模災害領域であるテイル部の傾きが、実際のリスク曲線に近い値となっているためである。労働災害の観測期間 5 年間とし、再現期間をそれぞれ 5 年、10 年とし、その最大被害規模の予測を行った。これを Table 6 に示す。再現期間 5 年、10 年における予測では、その後実際の起きた最大死亡者数と予測値はほぼ等しく、労働災害のリスク曲線の模擬が妥当であること及び予測の精度が高いことが分かった。しかし、パーコレイトシミ

シミュレーションでは、サンプルサイズが少ない場合、分布のテイル部の形状が極端にばらつくことがあった。さらに、再現期間 20 年、30 年などにおいては、実際より著しく異なる予測をしてしまうケースも見られた。

以上より、再現期間を用いた労働災害被害規模予測シミュレーションによって、再現期間 5 年、10 年の予測であれば、十分な精度で労働災害のリスク曲線の模擬、大規模労働災害の被害規模予測が可能であることが分かった。

・ Method 2 による大規模労働災害予測シミュレーション

本手法では、5 年間のリスク曲線を基準とし、サンプルサイズ 800(年間事故件数は $800/5=160$ 件)、 $h_c=10$ (クラスター大きさ 10=死亡者数 1 人で換算)、浸透確率は臨界確率 $P=0.33$ によってリスク曲線を構成、最大値を抽出、最大値分布から再現期間 5 年、10 年による予測を行った。その結果を Table 7 に示す。この表より、再現期間 5 年における予測の精度は十分であることが分かった。再現期間 10 年ではいずれの乱数系列においても、予測値は 1991 年から 2000 年の最大死亡者数 19 人を越えることは無かったか、統計的な予測手法として十分な精度を有すると考えられる。Method 2 では Method 1 に比べよりテイル部の形状、ばらつきを模擬したものであるため、再現期間 20 年、30 年による予測も行った場合、Method 2 の予測の方がより正確な予測が可能であると考えられる。

C. まとめ

パーコレイトシミュレーションによって、大規模災害予測手法の実験的検証を行い、その予測手法が安全管理の程度に大きな変化がなければ、有効な手法であることを明らかにした。また、2 次元ポントモデルを用いて 1986 年以降の労働災害をモデル化することかできた。さらに、そのモデルによる労働災害の予測シミュレーションが有効な手法であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 小田垣孝 パーコレーションの科学, 裳華房, pp 2-29 (1993)
- 2) 今野紀雄 図解雑学・確率モデル, ナツメ社, pp 160-183 (2001)

D 健康危険情報

なし

E 研究発表

- 1 論文発表
なし
- 2 学会発表
なし

F 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

- 1 特許取得
なし
- 2 実用新案登録
なし
- 3 その他
なし

Table 1 Sample size and D for each penetrating probability

Sample size	D for each penetrating probability		
	$P=0.20$	$P=0.22$	$P=0.23$
100	1.63	0.92	2.12
200	2.62	2.50	1.83
300	2.68	1.64	1.68
1000	3.16	2.47	2.75
2000	3.15	3.48	2.77
10000	3.67	4.84	5.75

Table 2 Relation between expected maximum cluster size for return period 5 years and actual maximum cluster size for each next year

Trial	Shape parameter	Expected maximum cluster size	$\frac{\text{Expected} - \text{true}}{\text{true}} (\%)$		
			For the next 100years	For the next 1000years	For the next 2000years
(1)	4.94	179	12.3	17.1	15.6
(2)	2.40	292	43.1	35.2	37.8
(3)	3.46	242	18.6	12.0	14.2
(4)	2.79	221	8.3	2.3	4.2
(5)	3.06	255	25.0	18.1	20.3
(6)	3.91	233	14.2	7.9	9.9
(7)	3.58	201	1.5	6.9	5.1
(8)	3.46	200	2.0	7.4	5.7
(9)	4.77	228	11.8	5.6	7.5
(10)	3.46	200	2.0	7.4	5.7

Table 3 Relation between expected maximum cluster size for return period 10 years and actual maximum cluster size for each next year

Trial	Shape parameter	Expected maximum cluster size	Relative error, $\frac{Expected - true}{true}$ (%)		
			For the next 100years	For the next 1000years	For the next 2000years
(1)	4.94	208	5.9	15.4	15.8
(2)	2.40	400	81.0	62.6	61.9
(3)	3.46	300	35.7	22.0	21.5
(4)	2.79	289	30.8	17.5	17.0
(5)	3.06	325	47.1	32.1	31.6
(6)	3.91	283	28.1	15.0	16.2
(7)	3.58	248	12.2	8.1	0.4
(8)	3.46	249	12.7	1.2	0.8
(9)	4.77	267	20.8	8.5	8.1
(10)	3.46	249	12.7	1.2	0.8

Table 4 Each parameter of risk curve for labor accidents

Observed period (year)	Total of accident for each observed period	$D'(-)$	γ (person)
1981-1990 (10years)	652	1.0469	3
1991-2000 (10years)	654	2.9777	1
1981-1985 (5years)	337	1.0433	3
1986-1990 (5years)	315	2.7539	1
1991-1995 (5years)	335	2.8279	1
1996-2000 (5years)	319	3.0846	1

Table 5 Comparison of D' and γ for each penetrating probability

Penetrating probability	Trial	Total of accident for each observed period	$D'(-)$	γ
0.13	(1)	300	3.47	1
	(2)		3.76	1
	(3)		3.71	1
0.14	(1)	300	3.03	1
	(2)		2.78	1
	(3)		2.80	1
0.15	(1)	300	2.92	1
	(2)		2.89	1
	(3)		2.85	1
0.16	(1)	300	2.95	1
	(2)		2.66	1
	(3)		2.69	1

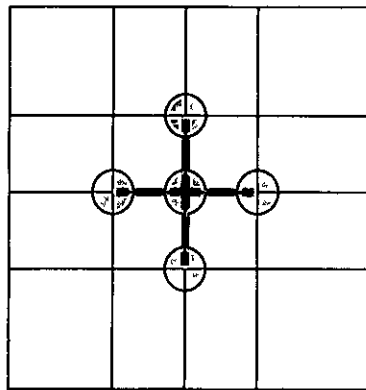
Table 6 Expected maximum fatalities corresponding to return period of each observed period using Method 1 (percolate simulation, assumed of labor accidents between 1986 and 1990)

Trial	Observed period (year)	Shape parameter, (Location parameter)	Return period (year)	Expected maximum fatalities for each return period	Actual maximum fatalities corresponding to each period
(1)	5	4.94 (1)	5	12	19 (1991-1995, 5years) 13 (1996-2000, 5years) 19 (1991-2000, 10years)
			10	15	
(2)	5	2.40 (1)	5	13	
			10	18	
(3)	5	3.46 (1)	5	12	
			10	16	
(4)	5	2.79 (1)	5	13	
			10	17	
(5)	5	3.06 (1)	5	15	
			10	20	

Table 7 Expected maximum fatalities corresponding to return period of each observed period using Method 2 (percolate simulation, assumed of labor accidents between 1986 and 1990)

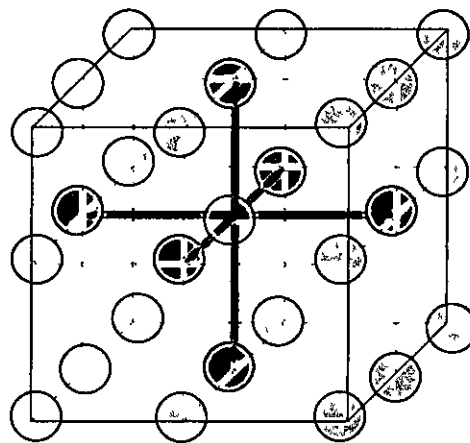
Trial	Observed period (year)	Shape parameter, (location parameter)	Return period (year)	Expected maximum fatalities for each return period	Actual maximum fatalities corresponding to each period
(1)	5	3.44 (1)	5 10	10 12	19 (1991-1995, 5years) 13 (1996-2000, 5years) 19 (1991-2000, 10years)
(2)	5	3.10 (1)	5 10	12 15	
(3)	5	4.57 (1)	5 10	8 10	
(4)	5	2.56 (1)	5 10	11 15	
(5)	5	3.40 (1)	5 10	12 16	

2次元型



2次元4配位型

3次元型



3次元6配位型

—— サイトが濡れる事が出来る経路 ○ サイト

Fig.1 Each dimensional cluster model (2 dimensional model, 3 dimensional model)

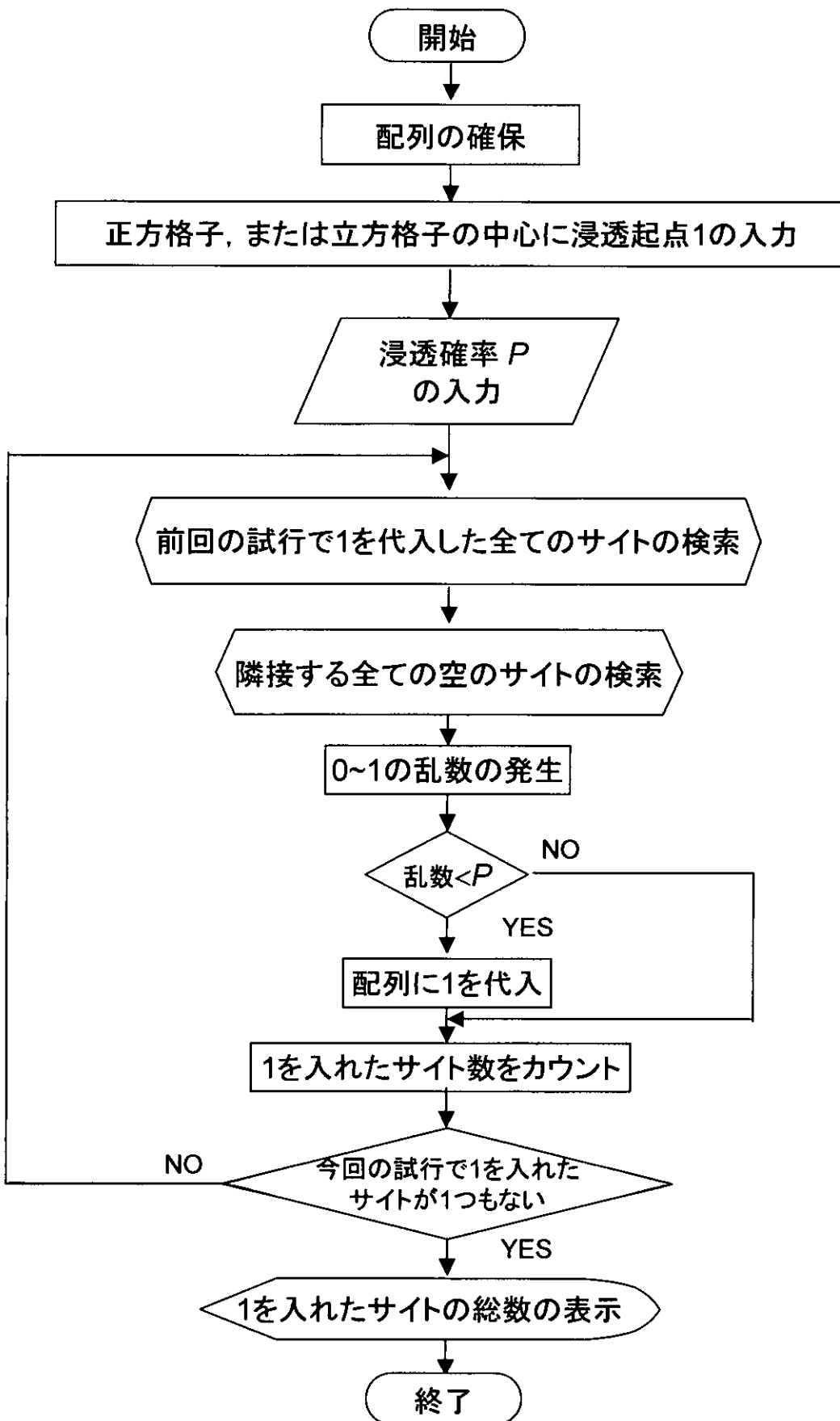


Fig.2 Flow chart of simulation

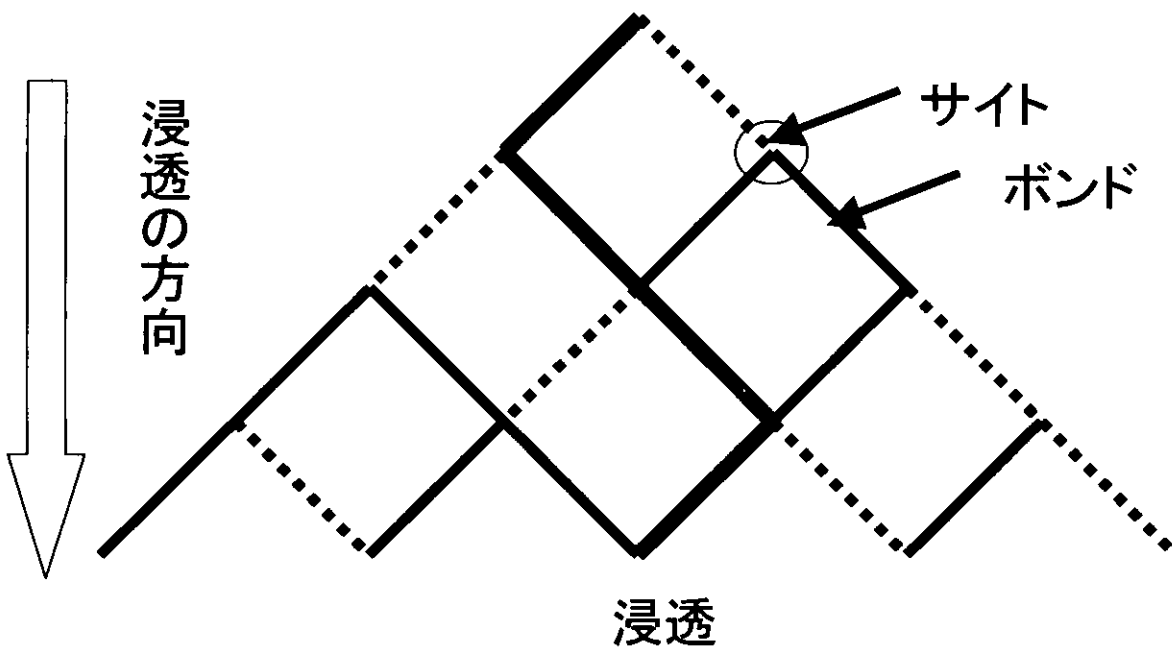


Fig.3 penetrating model of water

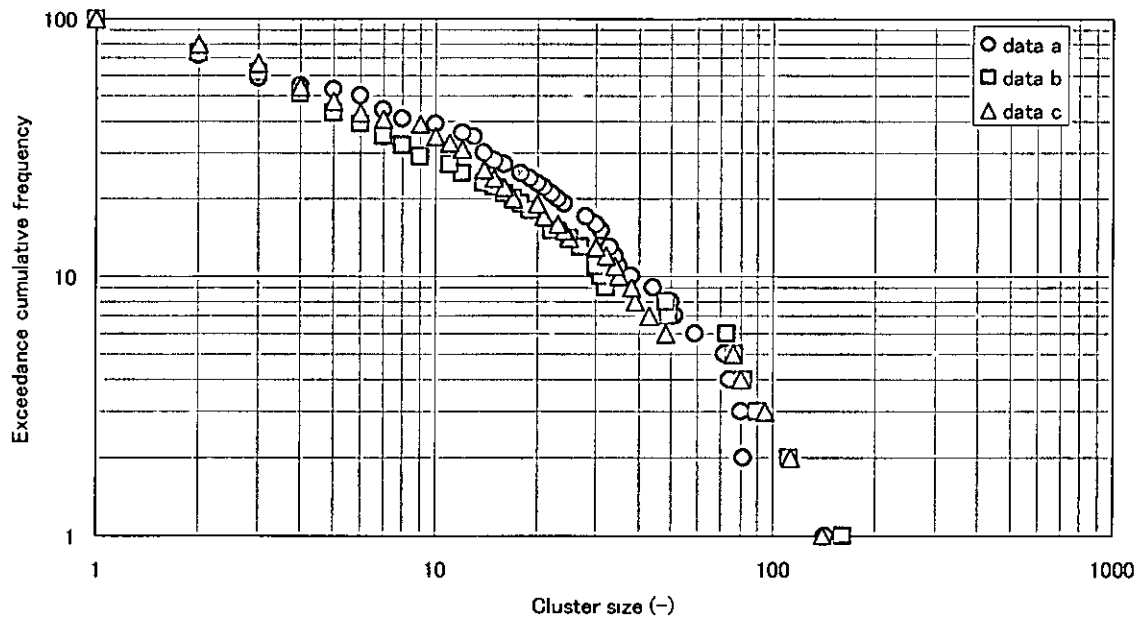


Fig.4 Risk curves by percolate simulation
(3 dimensional bond model, penetrating probability $P=0.20$)

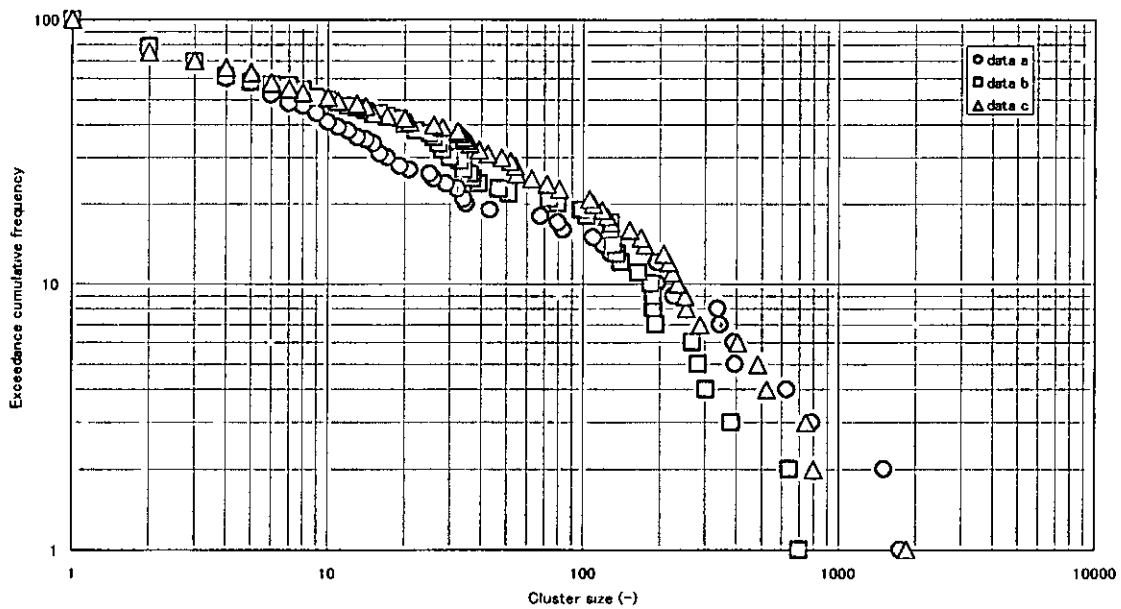


Fig 5 Risk curves by percolate simulation
(3 dimensional bond model, penetrating probability $P=0.23$)

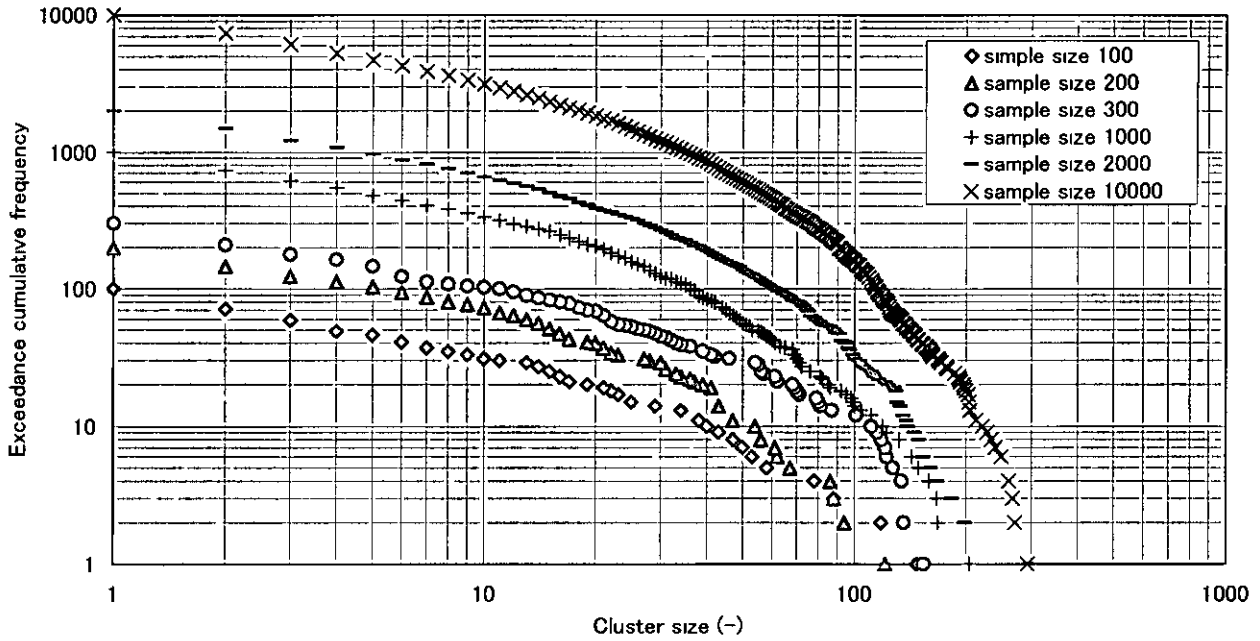


Fig 6 Risk curves for each sample size by percolate simulation (penetrating probability $P=0.20$)

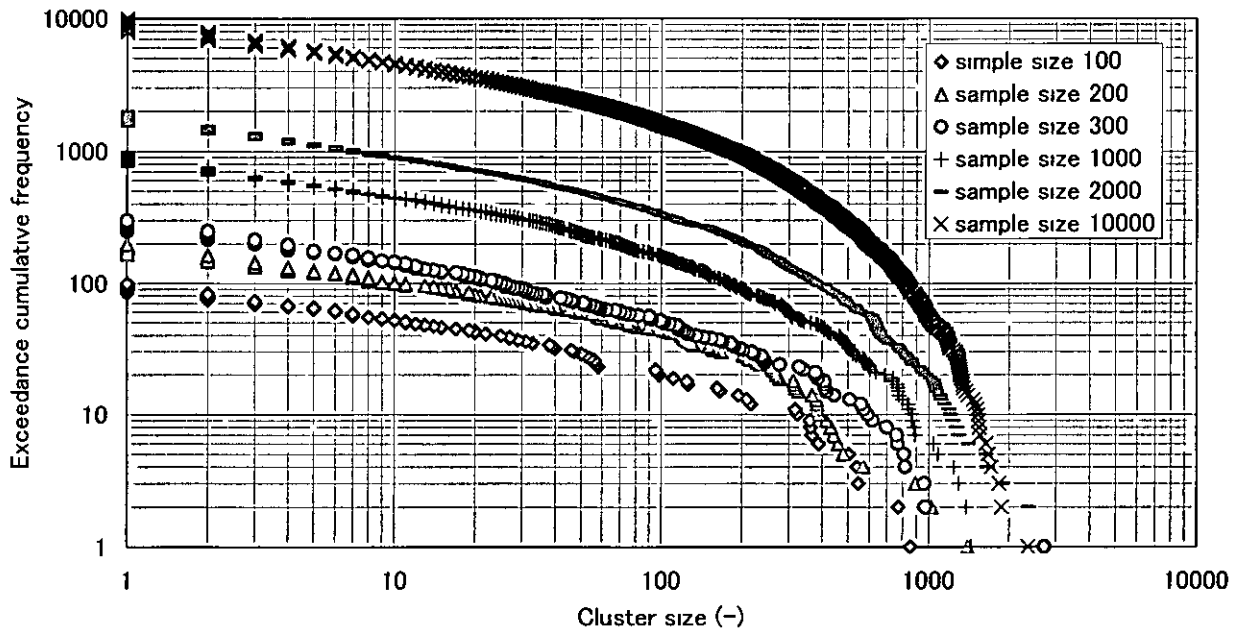


Fig.7 Risk curves for each sample size by percolate simulation (penetrating probability $P=0.23$)

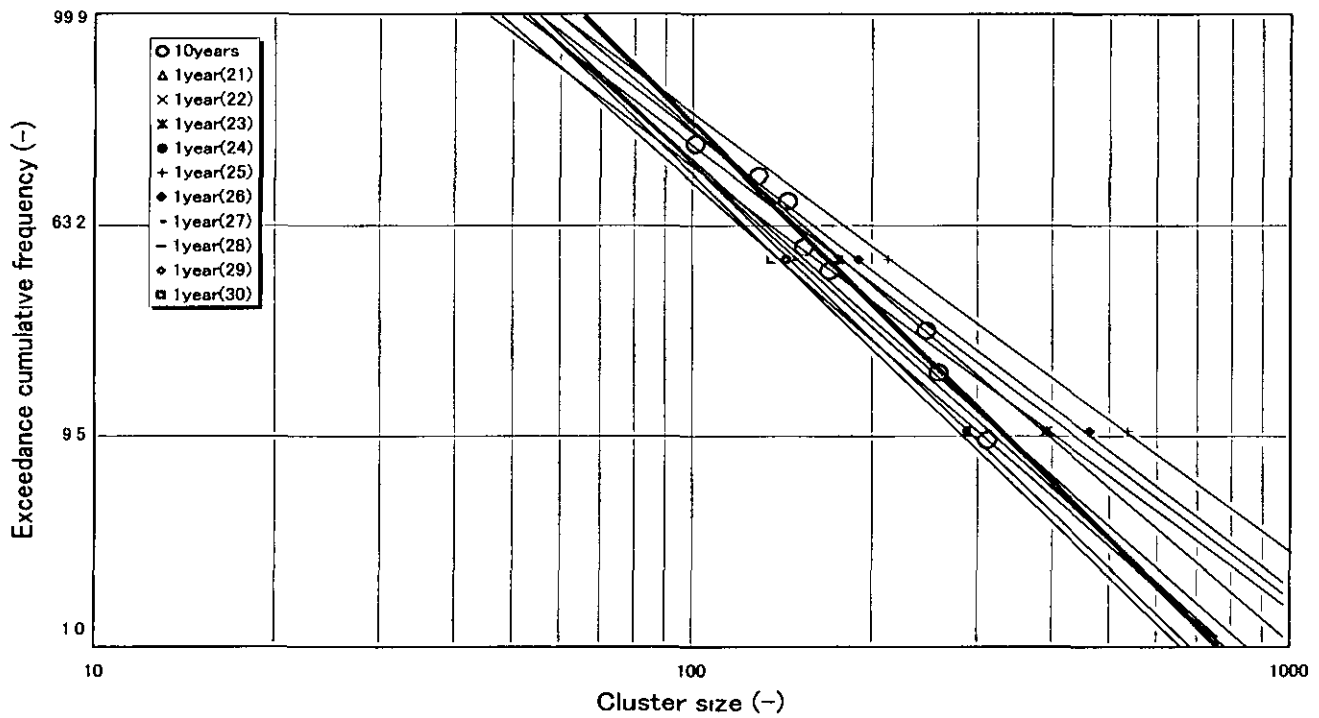


Fig.8 Expectation of the maximum cluster size by risk curve of one year
 [Percolate simulation, Trial (21)-(30)]

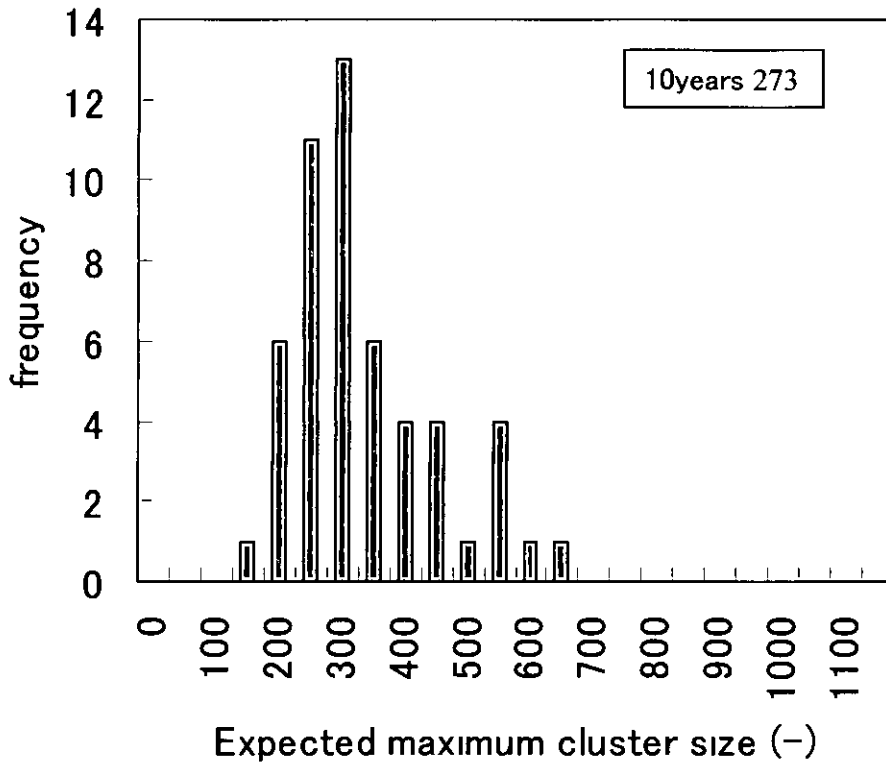


Fig 9 Distribution of expected maximum cluster size (return period, 5 year)

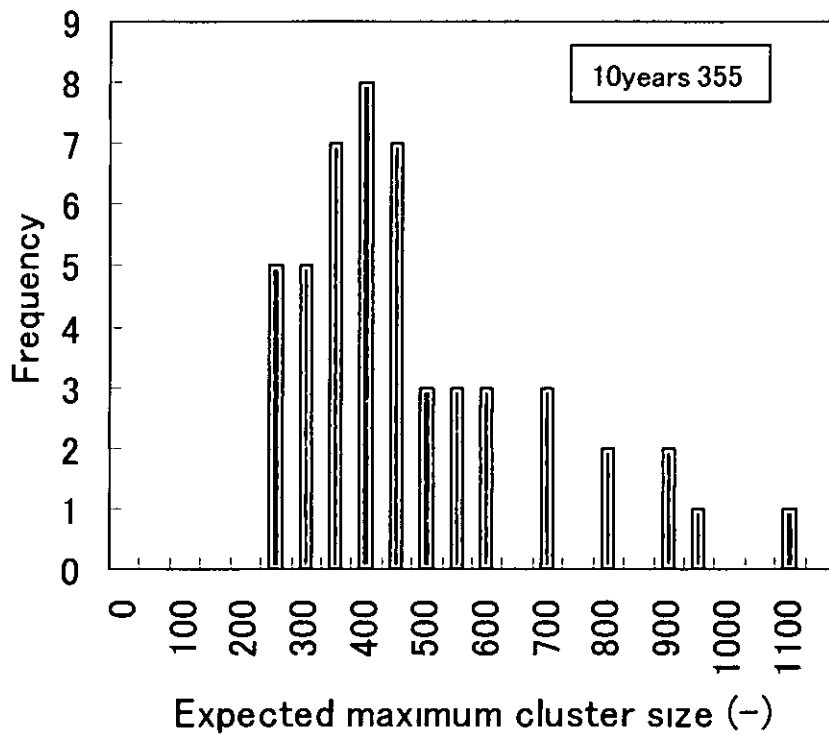


Fig.10 Distribution of expected maximum cluster size (return period, 10 year)

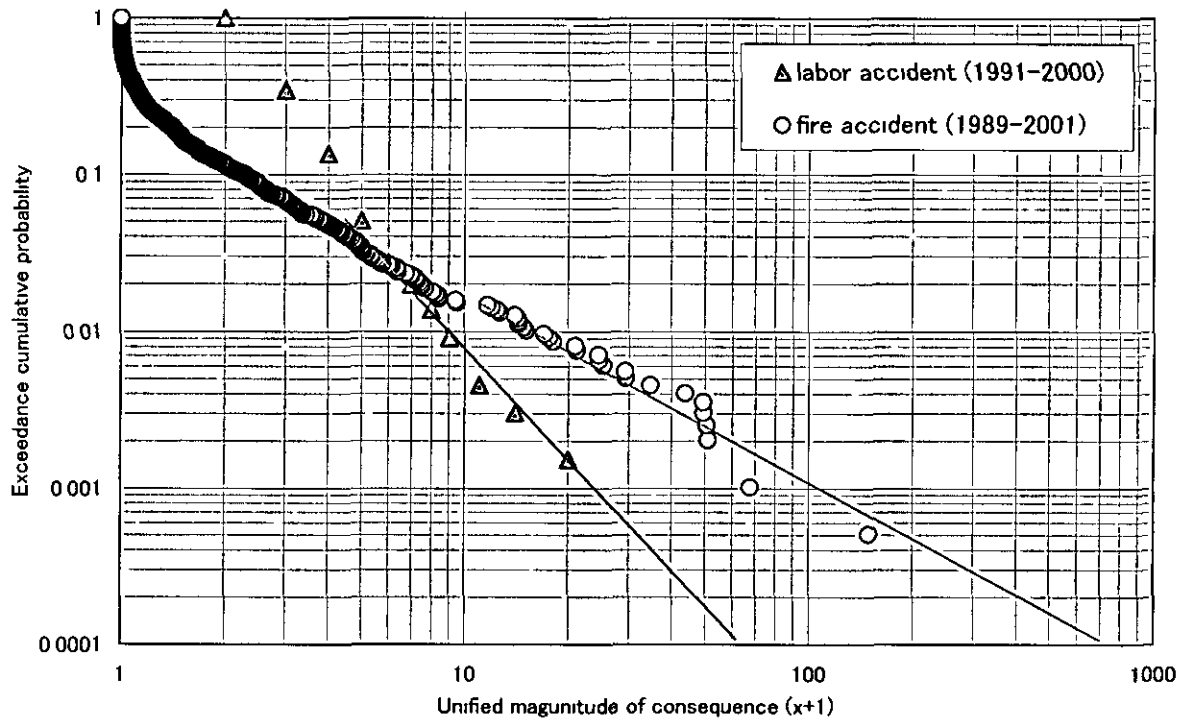


Fig.11 Comparison with risk curve for labor accident and fire accident

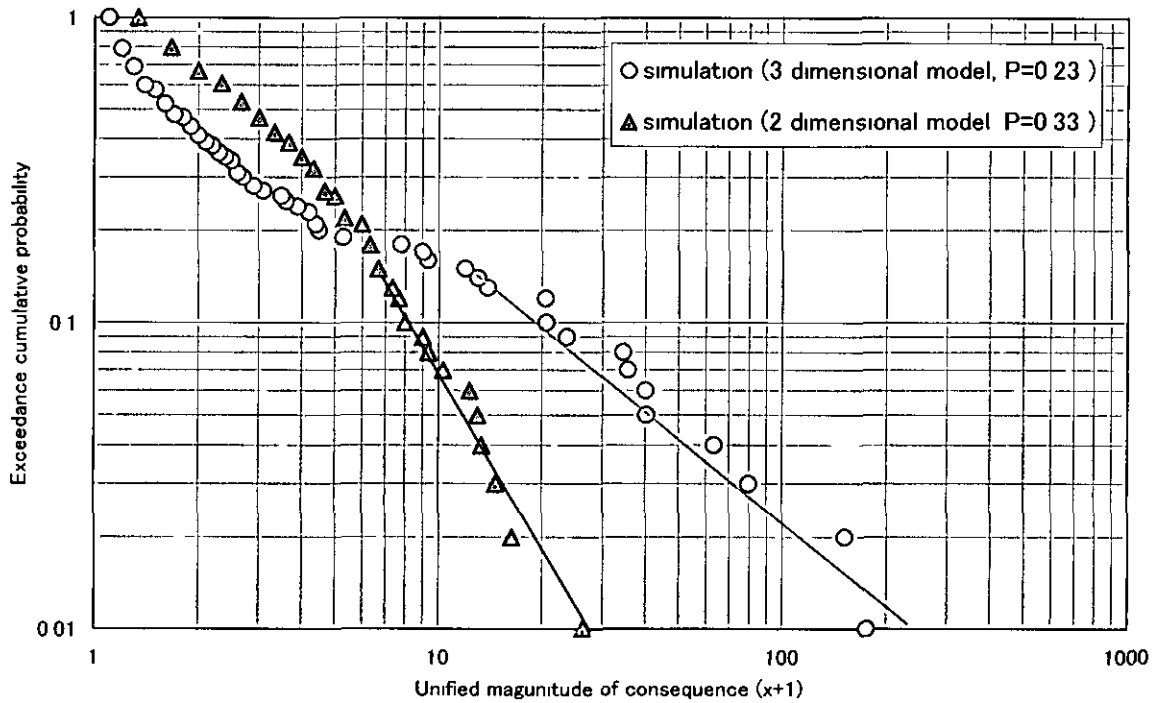


Fig.12 Comparison with risk curve by 2 dimensional bond model and 3 dimensional bond model (percolate simulation)