

2002/4/3

厚生労働科学研究研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

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

平成14年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 関根 和喜

平成15(2003)年3月

目 次

I.	総括研究報告書	
	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	1
	関根 和喜	
II.	分担研究報告	
1.	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 －大規模災害発生予測とベイズ方式によるパラメータ導出－	27
	花安 繁郎	
2.	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 －災害データの粗視化による整理・分析手法の提案 (リスク・チャートとそのフラクタル分析手法)－	35
	岡崎 慎司	
III.	研究成果の刊行に関する一覧表	45

厚生労働省科学研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業)
総括研究報告書

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

主任研究者 関根 和喜 横浜国立大学大学院工学研究院教授

研究要旨

本研究では、産業現場での危険事象の発生頻度とその被害規模との関係に、災害統計データの“リスク曲線 (risk curve)”に基づいた、労働災害リスクの同定・評価の新しい考え方を示すとともに、安全施策立案の評価と意思決定に関し有効なツールを提供する。災害事故データの粗視化による整理・分析手法(フラクタル分析法)を提案し、この分析法によって、災害事故の頻度特性は一般パレート型分布関数に従いリスク曲線の大規模災害領域において任意抽出された標本集団の最大値分布は、第2種の最大値漸近分布(Frechet分布)で記述できることが導かれた。また、リスク曲線と最大値分布の経年変化を比較することによって両者の相関性を導出し、より少ないデータでの災害傾向、再現期間の予測の可能性を示した。オリジナルなリスク曲線から1パラメータで規定される関数形で表現できる“正規化リスク曲線”を考案し、正規化リスク曲線は D' という単一の定量的な指数で表現でき、対象システム群の安全管理の程度を一元的に評価できる統計的指数であることが分かった。実際の労働災害データを用いて導出した確率分布式のリスク評価法としての効用性を検証した。また同評価法を準用して大規模災害の平均発生期間、期待被害値の予測法を導き、労働災害統計データを用いて大規模災害の予測を行った。さらに、災害リスク曲線を規定するパラメータについて、ベイズ方式によりその確率的推定ができることが分かった。これらの新手法により、異なる産業分野間又は質や種類の異なる労働災害間のリスクや安全管理レベルを統一的に評価・比較し得ることが可能となり、災害防止のための関連行政機関での法規立案、効率的行政指導の目標課題等に関する重要情報の提供や、産業分野における安全対策の有効性やその定量的評価に利用でき、企業の安全対策の方向づけ等に関する意思決定への有効な手段となりうることを示唆した。

分担研究者

花安 繁郎 (独)産業安全研究所境界領域・人間科学グループ研究部長
岡崎 慎司 横浜国立大学大学院工学研究院助手

A. 研究目的

近年の我が国では、産業構造の急激な変革に伴い産業現場での災害（労働災害）の質、発生特性及び災害リスクの相様といったものが大きく変化しつつある。そのため、労働災害発生防止や被害低減を図るための安全施策立案にあたっては、労働災害リスクの構造変化を的確に把握するとともに、災害リスクの同定と分析並びにその定量的評価を行うことが強く求められている。労働災害発生度数率、強度率又は災害発生頻度といった評価基準を導出するための従来型の災害統計分析では、上述のような今日的課題を解決することはできない。そこで本研究では、分析結果から各種労働災害のリスク評価や安全管理の程度が直接導出できるような新しい災害統計分析手法を提案し、災害リスクの同定と労働安全施策を実施する際の合理的な意思決定を支援するための有効な方法論を構築する。

本研究は、労働災害リスク概念を安全工学的立場から検討・定義し、労働現場での災害リスクを一元的な定量的指数として評価することを狙ったもので、この分析手法の確立によって以下のような労働安全行政上の効果が期待される。

(1)異なる産業分野間又は質や種類の異なる労働災害間のリスクや安全管理レベルを統一的に評価・比較し得ることが可能となり、災害防止のための関連行政機関での法規立案、効率的行政指導の実施あるいは目標課題等、に関する重要情報を提供できる。

(2)各企業あるいは、各産業分野において

実施されるべき安全対策の有効性やその定量的評価に利用でき、企業の安全対策の方向づけ等に関する意思決定を確実に行える。

(3)労働災害発生リスクをグローバルに評価できることを利用して、労働災害保険等のいわゆる労災補償制度の健全な運用・改善といった社会的課題に対応できる。

本研究では、災害発生モデル化及び災害データの新しい概念に基づく整理・分析手法を提案するとともに、労働現場における災害リスクの同定と定量的評価を可能とする定量的労働災害リスクの概念を定義し、それを導出できる新しい確率・統計的手法の基本的部分を確立する。提案した分析手法を基に具体的な労災データを利用し、我が国の労働災害の特性と現状を明らかにする。

B. 理論と研究方法

B.1 リスク曲線とその特徴

Kaplan と Garrick⁽¹⁾によれば、リスク R とは被害をもたらす事故に至るまでの一連の事象系列、すなわち事故シナリオ s_i と各シナリオの発生確率 p_i 、ならびにそのシナリオが発生した時の被害の大きさ x_i 、を想定され得るシナリオ数 N について

$$R = \langle s_i, p_i, x_i \rangle,$$

$$(i=1, 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

のような triplet set の形で書き下したものと定義される。この上式(1)の内容を定量的かつ図式的に表現するものがリスク曲線または災害規模特性曲線である。すなわち、被害の大きさを表す確率変数を X とし、被害の大きさが h を超える事故シナリオの発

生確率の累積値を $P(h)$ と書く。すなわち、

$$P(h) = \Pr[X \geq h] \quad (2)$$

である。

確率変数 X が連続値をとると仮定すると、 $P(h)$ は超過確率すなわち、上側累積分布関数となる。 $\log P(h)$ を縦軸に、 $\log h$ を横軸にとって、一つの曲線で近似すれば、リスク曲線が描ける。これを具体的に一定期間内で発生した同種の災害や事故のデータ群を用いて災害統計分析に利用する場合には、一定期間内の総事故件数が固定されるので、 $P(h)$ を被害の大きさが h を超える事故の「上側累積頻度または上側累積度数 $F(h)$ (exceedance frequency[events/year])」と読みかえても、本質的には等価なものとなる。

リスク曲線の典型例として、日本および世界におけるの各種の災害事故データから構成したものを示そう。使用する災害データは、1966年から2001年までの35年間における日本の工場火災事故、日本における危険物施設の漏洩事故及び1989年から1999年までの11年間における世界で起こった航空機事故であり、それぞれ危険物保安技術協会の危険物に係る事故事例データと運輸省航空事故調査委員会事務局報の航空機事故データによった。

Fig.1(a)とFig.1(b)はそれぞれ1990年と2001年の各1年間のわが国で発生した火災事故のリスク曲線である。この図では、横軸には被害の規模(magnitude of consequence)として、事故によって受けた直接的な損害額[yen]の対数を、また h 以上の損害額であった年間の工場火災事故の累積度数 $F(h)$ [events/year]の対数を縦軸にとってある。図を見ると中小規模の被害を有する領域では、リスク曲線は、その傾きの絶対値が漸増

するなだらかなカーブを描く。一方、われわれが最も関心のある低頻度かつ大規模災害、すなわち、リスク曲線のテイル部分では右下がりの直線性を示して、中小規模の領域における分布と異なるそれとなっている。

Fig.2(a),Fig.2(b)はそれぞれ1990年,2001年の各1年間で発生した危険物施設での漏洩事故を対象とし、被害の大きさを同様に損害額(yen)で整理したリスク曲線の例である。Fig.1とFig.2の各図より、母集団の種類が変化してもリスク曲線の特徴は変わらないことが理解される。またFig.3は工場火災事故に関し、1992年から2001年までの10年間のデータを総計したもののリスク曲線である。

Fig.1とFig.2の各図を見ると、テイル部分では、年度によって多少ばらついているが、各図の(a)と(b)は大体同じ曲線となっている。さらに、1992年から2001年の10年間を総合したFig.3のリスク曲線も、それぞれFig.1とFig.2にほぼ近いものが得られている。つまり、同一種の災害事故ではそれを取りまく環境に大きな異変が起こらない限り、リスク曲線は大略一定であることを意味している。しかし、災害分析にとって最も重要である低頻度・大規模災害の分布には不確定的要素が本質的に存在する。よって、大規模な災害についてはテイル部分の不確定性を考慮した分析が必要になる。そのためには、この部分の直線の分散の特徴を理解しておかなければならない。この解析については極値統計論が適用できるが、その詳細な分析結果については後述する。

以上のようなリスク曲線の特徴は工場火災や危険物の漏洩といったものばかりでな

く他の災害事故、例えば、1989年から1999年の14年間の世界の民間航空機事故に関する災害データを整理したもの、(Fig.4(a)を参照)でも認められる。また Fig.4(b)に示したように1977年から1994年の18年間の我が国での製造業における重大労働災害によるリスク曲線からも同様の直線性を有することが分かる。リスク曲線または災害規模特性曲線が全て直線で近似できるとの論文があるが、直線性があるのは大規模災害の領域のみである。

B.2 労働災害発生特性のモデル化(ハインリッヒの法則とスケーリング特性)

災害の発生頻度とその被害規模(magnitude of consequence)との間には、ハインリッヒの法則に代表される規則性があるとされている。ハインリッヒの法則とは、同じ種類における330件の災害のうち、300件は無傷で、29件は軽い傷害を伴い、1件は重傷災害となって生起するという、災害がその被害規模に応じて階層構造をもって発生することを述べた労働災害に関する統計的な経験法則である。Birdら⁽²⁾も175万件の災害分析を行った結果から、この経験則を追認している。このような労働災害に関するハインリッヒの法則を累積度数比(その被害のより大きい被害規模の総件数)に書き直すと1:30:330となるが、この経験則が主張しているところは、その数値そのものよりは労働災害が階層構造性を有して生起することにある。すなわち、この事は被害の大きさをスケールにとると、その採用するスケールの大きさによって、災害事故として数えられるものの件数がある一定の法則性をもっているという、いわゆるフラクタ

ル事象で認められる“スケーリング特性”を有している、ということの意味している。

スケーリング特性とは、スケールつまり被害の規模を測る尺度を n 倍にすると、観測される事故件数が m 倍になるということである。ハインリッヒの法則において、被害の規模をスケール比として、傷害のない災害の n 倍の規模として軽傷災害が考えられるとすると、観測される度数は、 $m=29/300 \approx 1/10$ 倍である。そして、軽傷災害の k 倍が重傷災害であるとする、同様に件数は約 $1/30$ 倍である。ここで、たとえば、 $k=\sqrt{3} \cdot n$ とすると、スケール(災害の規模)を n 倍にしたとき、常に件数は m 倍になり、スケーリング性が成立する。ハインリッヒの法則では、被害の規模が抽象的なので $k=\sqrt{3} \cdot n$ なる数値は単なる計算例にすぎないが、被害の規模を測る尺度に具体的なもの、例えば[円]、[m^2]、[人]等を採用することによりこれが確かめられる。

このスケーリング特性⁽³⁾の概念を最も良く捉えた幾何学的モデルとして考えられるのが、Fig.5のシルピンスキーのギャスケットである⁽³⁾。この図は典型的なフラクタル図形である。フラクタルとは、自己相似性を有するもののことであり、自己相似性とは、部分を拡大すると全体と同じ様な構造になる性質のことである。図の特徴は一見複雑であるが、全他の輪郭を構成する▲型の正三角形は1個であり、その中に一辺の長さがその $1/2$ である▲型の正三角形、つまりスケール比 $1/2$ をとるときに構成される小さな▲型の正三角形が3個ある(Fig.5-(b)参照)。さらにその小さな▲型の正三角形の一辺の長さを $1/2$ にした▲型の正三角形、つまりもとの大きな▲型の正三角形の一辺の

1/4 の長さである三角型の正三角形の個数は 9 個詰まっている (Fig.5-(c)参照)。同様に、一辺の長さの 1/8 のものは、27 個詰まっている (Fig.5-(d)参照)。このように、▲型の正三角形の大きさがちいさくなるとそれにもなって詰まっている正三角形の個数も増す。Fig.5 の各図の下部にはスケール比を 1/2 とした時の一辺の長さ x と、その大きさの▲型の正三角形の個数 $C(x)$ の関係を同時に示しておいた。

いま、長さ x を観測スケールとしたときの、一辺の長さが x 以上の正三角形の個数を $C(x)$ で示すと、スケールを ε 倍しても、すなわちスケール因子 ε に対し自己相似性を保つとすれば、 $C(x)$ の関数形は変化せず、

$$C(\varepsilon x) = AC(x) \quad (3)$$

(A は ε のみに関する関数)

である。この方程式を満たすひとつの関数 $C(x)$ は、

$$C(x) = x^{-D_s} \quad (4)$$

となる。指標 D_s に注目すると、

$$D_s = -\frac{\log(C(x))}{\log(x)} \quad (5)$$

が成立する。この D_s がスケーリング指数又はスケーリング・フラクタル図形における自己相似次元と呼ばれるものである⁽³⁾。このモデルでは、一つの大きな三角形の中には、それと同一形の小さなものが次々とつまっているという階層構造になっており、その階層構造性を定量的に規定するパラメータが自己相似次元 D_s である。Fig.5 の例では D_s は、 $D_s = -\ln(3)/\ln(1/2) = 1.58$ と各 x で一定値をとる。

一方、ハインリッヒの法則は、同一種類の事故を分析すると、1 件の重大災害の影には 29 件の軽微な事故があり、その影に 300 件の

事故にならない事故 (ニアミス、ヒヤリ・ハット事故) があるというもので、事故生起特性にはピラミッド構造、すなわち階層構造性があることを主張するものである。Fig.5 の同一形状の正三角形の大きさを同一種類の事故の“被害の大きさ”、そして▲型の正三角形の数を“事故件数”と見なせば、ハインリッヒの法則が主張する概念とシルピンスキー・ギャスキットの階層性を示す幾何学的概念とのアナロジーが成立する。

「事故発生の頻度の比」自体の数字は対象とする事象によって変わるものであろうが、ハインリッヒの法則が主張する階層構造性は、被害の大きさをスケールにとると、その採用するスケールの大きさによって、災害事故として数えられるものの数が、ある一定の法則性をもって変化するという、フラクタル事象におけるスケーリング性を有することと同意義である。この事故発生の階層構造性の量的特徴を明示するものが、スケーリング指数又は自己相似次元 D_s であり、この D_s はスケール変換に対し不変な量、つまり▲型正三角形の大きさや事故の規模に関する量的概念をもつが、それらの絶対値そのものには依存せず、ハインリッヒの法則における「300 : 29 : 1」というような、事故規模をスケールとしたときの相対的発生頻度比を反映する指数である。

B.3 フラクタル次元と安全性指数 (safety index)

災害事象の統計的生起特性がスケーリング・フラクタル性を有することから、その事故発生頻度分布のフラクタル次元 D は次のように定義できる。すなわち、災害の規模を測る何らかの尺度を h 、 “規模 h 以上” の災

害の発生累積度を $F(h)$ と書けば、式(4)の $C(x)$ は分布密度関数の意味をもつから、観測期間内での h の最大値を h_m とおき、Fig.5 で示した変数 x のように変数 h を (h/h_m) として無次元化すると、上側累積頻度関数は $C(x)$ に何らかの定数 A を乗じた分布密度関数 $AC(x)$ を次のように積分すれば得られる。すなわち、

$$F(h) = \int_{h/h_m}^{\infty} AC(x) dx = \frac{A}{D_s - 1} \left[\frac{h}{h_m} \right]^{-D_s + 1}$$

$$(但し, D_s > 1) \quad (6)$$

となる。いま $h=h_m$ のとき、 $F(h_m)=1$ となるように定数 A をきめると、上側累積頻度関数 $F(h)$ は以下のようになる。

$$F(h) = (h/h_m)^{-D_s + 1} \quad (7)$$

このべき型関数の指数を $D=(D_s-1)$ と書けば、 D は分布のフラクタル次元となる。よって、

$$D = D_s - 1 = -\frac{\log(F(h))}{\log(h/h_m)} \quad (8)$$

である。ここで累積度数又は累積頻度を上式(6)~(8)のようにするのは、最大の災害 ($h=h_m$) に注目すると 1 件しかないが、 h を小さくしていくと、災害として増えていくことを、ハインリッヒの法則が述べていることに対応させるためである。この式では、 h_m は定数なので、 h と $F(h)$ の対数の関係をグラフにしたとき、 D がすべての h の範囲で一定ならば直線になることを示しているが、曲線である場合に対しても適用できるように概念を拡張すると、 $F(h)$ を F で略して、

$$D = -\frac{\partial \log(F)}{\partial \log(h)} = -\frac{\Delta F / F}{\Delta h / h} \quad (9)$$

と表され、 D は $\log(F) - \log(h)$ のグラフの各部

における接線の傾きの絶対値に等しい。 $\log(F) - \log(h)$ のグラフは、この場合 F が上側累積度数又は上側累積頻度として考えているが、本質的には“上側累積確率”としてもよく、これは前述した「リスク曲線」と等価なものである。リスクの統計的表現の一手法として、災害統計データを $\log(P(h)) - \log(h)$ 又は $\log(F) - \log(h)$ の形で整理する理由がここにあり、これが本研究で示された災害統計分析上の新しい解釈の一つである。

フラクタル次元 D は、リスク曲線の接線の傾きの絶対値として定義できることを示したが、災害統計分析上我々の最も関心のある部分は、リスク曲線のテイル部、すなわち低頻度・大規模災害に見られる災害統計上の特性である。リスク曲線のこの部分では、B.1 で述べたごとく、災害の種類、被害の大きさとしてとられる物理量や尺度、データの年度などによらず、常に一定範囲で直線性が得られる。したがって、直線の傾きがフラクタル次元 D を意味することから、リスク曲線のテイル部における D が何らかの災害事象生起則を特徴づける量的パラメータとなりうるものが容易に推論できる。

では、この D は何を意味しているのだろうか。(9)式の右辺から、これはある規模の災害を基準にしてそれより一回り大きな規模の災害の起こりにくさを示していると考えられる。 D が大きければ、急激にそれより大きな規模の災害の発生頻度が低下する。つまり D は、広義のフェールセーフ機構の機能度または「安全性指数」を統計的に明示したものであると言える。すなわち、対象となるシステムの安全管理の程度、例えば工場における防災体制やその管理の程度を統計量的に表現するものといえる。広義

のフェールセーフとは、人為的に付与するもの (extrinsic な) や機構のみでなく、システム自体がもつ (intrinsic な) フェールセーフ性も含めたものである。ここで重要なことは、リスク R を被害期待値で表現する場合には、リスク R は被害の規模や強度 (severity) の絶対値やその物理的単位が直接反映した量であるのに対し、 D はスケールの変換に不変な量、すなわち被害規模・強度の量的な概念はもつが、その絶対値や単位・尺度には依存しない無次元量であることである。

以上のようなリスク曲線のテイル部の傾きの絶対値を D を、1980年～1985年までの日本の工場火災保険データを使用し、各産業種別に、一般物件と特定物件に分けて、各業種別および全業種総合のフラクタル次元 D を求めてみた。その結果を Table 1 に示す。Table 1 はデータ数の多い業種のみをまとめたものだが、これから、特定物件の D が一般物件のそれより大きい数値となっていることが判る。 D の大きい特定物件とは、一般物件にくらべ、安全設備や管理上の基準が厳しいものであり、 D の大小が安全管理の優劣を反映していることを示している。

このように、フラクタル理論の立場からの災害事象分析が、災害のフラクタル次元又はスケーリング指数を用いることによってシステムの安全性を定量的に評価できることなど、対象事故集団の安全性にかかわる質的要素の分析が可能であることを示した。ここで示された分析手法は、主として大規模災害を対象として解析するので、統計分析上で最も議論される小規模事故を含む“標本の母集団の数”という情報が不必要という特徴的な利点をもつ。また他のい

ろいろな災害事象にも同様な概念が適用できるので、フラクタル次元 D が無次元化された値であることから考えて、異種災害のリスクの比較評価を行える可能性がある。さらに概念を拡げると、複雑な材料損傷事象、例えば実機における腐食やき裂等による“腐食リスク”や“構造強度リスク”の解析にも利用できる。その一例を分担研究者 (岡崎慎司) の報告書 (p.35) にも記載した。

なお、倫理面については本研究を遂行するに当たって収集した全ての労働災害データの個人あるいは特定企業に関わる一次情報の取扱いと守密義務の十分な配慮を払った。

C. パレート型分布関数によるリスク曲線の表現

リスク曲線は災害規模 X を確率変数にとったときの超過確率、即ち上側累積分布関数と本質的に等価であり、この分布関数型の同定はリスク解析上重要である。そこで、リスク曲線の全体像がどのような関数型で表現されるかを検討した。Fig.1～Fig.4 にリスク曲線の典型的な例を示したが、このグラフからリスク曲線そのものを一つの関数形で表現することは、一見むずかしそうに見える。

災害事象の生起則において、確率変数である被害の大きさのスケールを変換しても、そこには統計的相似性が成立することを、我々は前述した。この場合の統計的自己相似性とは、変数 x の頻度密度関数 $C(x)$ について、任意の尺度パラメータ ε に対し $x \rightarrow x\varepsilon$ なるスケール変換後も、その関数形が変化しないことを意味する。即ち、

$$C(x) \propto C(\epsilon x) \quad (10)$$

が成立する。従って、(10) 式が常に成立するためには、密度関数 $C(x)$ としては x の逆べき乗型の

$$C(x) \propto x^{-D_s} \quad (11)$$

なるいわゆるパレート型関数が定義されることになる。ここで、 D_s はスケール指数である。上側累積頻度分布又は超過累積分布関数 $F(X \geq h)$ は

$$F(h) = \int_h C(x) dx \propto h^{-(D_s-1)} \quad (12)$$

となるので、 $F(h)$ も逆べき乗型である。ただし、 X は確率変数で、 $D_s > 1$ と考えた。ここで、頻度密度関数や上側累積分布関数を規定する変数 x (又は h) を、実際に観測された“被害の大きさ”を取ってリスク曲線の形で表示すれば、Fig.1~Fig.4 にみられるごとく、(12) 式のパレート型の分布関数に従う部分は、被害の大きさ h が極めて大きな大規模災害の範囲に限定されるように見られる。また、式 (11) で与えられるような頻度密度関数は、変数 x が零近傍では発散するという特性をもつ。そこで、我々は式 (11) のパレート型密度関数を拡張し、ワイブル分布などで行われているような位置パラメータ γ を定義して、

$$C(x) \propto (x + \gamma)^{-D_s} \quad (13)$$

(ただし、 $D_s > 1, \gamma > 0$)

なる密度関数を導入する。式 (13) に対応する上側累積頻度分布関数は、

$$F(h) \propto (h + \gamma)^{-(D_s-1)} \quad (14)$$

となる。式 (13) や式 (14) は分布関数の位置パラメータを負と考えるときのパレート型分布関数の一般形である。位置パラメ

ータ γ は $x=0$ 近傍での発散をさけるために導入された比較的小さな正の定数であるが、これが導入されても式 (13) や式 (14) が、災害事象の生起特性における統計的相似性やスケール不変性を有していることには変わりはない。当然ながら、 $h \gg \gamma$ の範囲では式 (12) と式 (14) は近似的に等価になる。

上側累積頻度 $F(h)$ が式 (14) のように与えられるとすると、両対数グラフのリスク曲線において、中小規模災害の範囲において曲線になるものであっても、 $(h + \gamma)$ でプロットすれば、直線で整理できるはずである。このことは Fig. 6 で示されるように、両対数上でプロットされたオリジナルなリスク曲線の各点をプラス側に γ だけ平行移動して得られる各点が直線に回帰できるということの意味する。このように平行移動して直線回帰されたものを、“一般化リスク曲線(modified risk curve)”と呼ぶことにする。そこで、Fig. 1 に示される工場火災事故データを $h' = h + \gamma$ という新変数 h' でプロットしてみた。このときの、位置パラメータ γ の推定は、ワイブル分布における位置パラメータの推定をワイブル確率紙を用いて行う方法と同様に、 $F(h)$ のいくつかの点を選び、あらかじめ予想をつけておいた γ 値で、ほぼ直線上にのるかどうかを確認し、その値をもとにさらに γ 値を修正して、正確な直線回帰を行った。1992 年~2001 年の 10 年間での工場火災事故のデータの全てを整理したリスク曲線から、位置パラメータ値 $\gamma = 300$ [万円] で直線回帰した結果を Fig. 7 に示す。いずれも、データ全体がほぼ直線上にのることが理解される。

被害の大きさとして、焼損面積だけでなく、別の物理量で整理したリスク曲線の場合

合であっても、位置パラメータ γ の導入によって同様に直線化ができる。Fig. 8は1989年～1999年の11年間の世界における民間航空機事故に関し、死亡者数を被害の大きさに取った場合におけるリスク曲線を位置パラメータ $\gamma=80$ [人]で補正し、いわゆるバレート・プロットを行った結果のグラフで、若干のバラツキがあるものの、全域に渡って直線回帰が可能であることを示している。以上から、各種の災害データから、災害発生頻度に関する規模特性は、式(13)や式(14)のような一般パレート型分布を満足するものと結論される。

D. 第2種最大値漸近分布による大規模災害発生特性の分析

前述したように、災害事象の生起特性を記述するリスク曲線(上側累積頻度分布関数) $F(h)$ は h のみで整理した分布とのちがいを、明確にするため、指数 D を D' で表記し

$$F(h) \propto (h + \gamma)^{-D'} \quad (15)$$

(但し、 $D' = D_s - 1$)

なる逆べき乗型の、いわゆる一般パレート型分布関数で表現できることがわかった。極値統計論⁽⁴⁾によれば、上側累積分布関数が式(15)に従うような母集団から、一定個数(n 個)の任抽出された標本の最大値、即ち極値、は抽出回数ごとに変わるが、その最大値の分布は、 n を増していくと、いわゆるFrechet分布と呼ばれる分布関数に漸近する。これが第2種の最大値漸近分布これを $F_{(2)}(x)$ で表され、最大値の確率変数を X とすると、下側累積表示として次式のような3母数

の分布関数型となる。

$$F_{(2)}(x) = \Pr[X \leq x] = \exp \left[- \left(\frac{x + \gamma}{\eta} \right)^{-m} \right] \quad (16)$$

ただし $0 \leq x < \infty$ で、位置パラメータ $\gamma \geq 0$ 、尺度パラメータ $\eta \geq 0$ および形状パラメータ $m > 0$ 、と考えた。

下側累積分布として式(7)が定義されれば、上側分布関数 $R_{(2)}(h) = \Pr[X > h]$ は信頼度関数と等価で、

$$R_{(2)}(h) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{h + \gamma}{\eta} \right)^{-m} \right] \quad (17)$$

となる。一方、第3種の最小値漸近分布はワイブル分布と呼ばれ、下側累積表示として

$$F_{(3)}(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t - \gamma'}{\beta} \right)^m \right\}, \quad (-\infty < \gamma' < \infty, \beta > 0) \quad (18)$$

で与えられる。ワイブル分布(18)式における位置パラメータ γ' を負と考えれば(すなわち $\gamma' = -\gamma$ とすれば)、式(17)と式(18)より、通常のワイブル確率紙を用いて式(16)のFrechet分布に乗るかどうかの確認を行える。ただし、ワイブル確率紙にデータをプロットする場合、その縦軸の数値 $F_{(3)}(t)$ は式(17)の上側累積値 $R_{(2)}(h)$ に読みかえる。このようにして得られた最大値データを直接ワイブル確率紙にプロットして、傾きが負の直線、つまり“右下がりの直線”に回帰できれば、2母数のFrechet分布(位置パラメータ $\gamma=0$ の場合)に従うことになる。各データ値に対し、位置パラメータ γ が小さい場合はこれでよいが、 γ が相対的に大きい場合は上に凸の曲線になる。この場合

も、基本データに γ 値を加えてプロットする事により直線化できれば、Frechet 分布になる。このような手順は、3 母数ワイブル分布の検定に対するものと全く同等である。

そこで、オリジナルなリスク曲線を位置パラメータ γ によって補正し、直線化した Fig.7 や Fig. 8 に示されるような“一般化リスク曲線”を、各年度毎に構成して、各年度毎の被害の大きさの最大値 h_{max} に γ 値を加算したもの ($h_{max}+\gamma$) の分布がどのようなかを検討した。 $(h_{max}+\gamma)$ を確率紙上へプロットするために、平均ランク法により上側累積頻度確率 $R_{(2)}(h)$ を計算した。すなわち、最大値データ群を昇順にソートし、それに対する i 番目のデータの累積頻度 $R_{(2)}(h_i)$ を次式により求めた。

$$R_{(2)}(h_i) = \frac{N-i+1}{N+1} \quad (19)$$

ただし、 N は最大値 ($h_{max}+\gamma$) の総データ数である。

Fig. 9 は 1989 年から 2001 年までの 12 年間の危険物に係る工場火災事故データから、被害の大きさの尺度として損害額 [万円] を取った場合につき一般化リスク曲線を構成し、火災事故の各年度毎の実際の最大値 h_{max} に位置パラメータ $\gamma=300$ [万円] を加算して補正したものをワイブル確率紙にいわゆる Frechet プロットした結果の図である。さらに 12 年間の漏洩事故データから同様に損害額 [万円] で整理した一般化リスク曲線を各年度毎につくり、各年度の最大値をワイブル確率紙に Frechet プロットした結果を Fig. 10 に示す。Fig.10 の場合、位置パラメータ γ として、 $\gamma=100$ [yen] を用いた。Fig. 9 と Fig. 10 から、最大値の分布は右下がりの直線で近似できることが理解される。

Fig. 9 と Fig. 10 の場合、実測の最大値のデータ h_{max} の値は位置パラメータの値 γ と比較して十分大きなもので、 $h_{max} \gg \gamma$ とし、 γ を省略しても近似的にはほとんど同じ直線が得られる。また、Fig.8 は、運輸省航空機事故調査委員会事務局報より 1989 年～1999 年までの 11 年間の世界の民間航空機事故のデータを整理し、 $\gamma=80$ [fatalities] で補正した一般化リスク曲線であるが、このデータをもとに各年度の事故の規模の最大値 h_{max} [fatalities]をつかって、ワイブル確率紙への Frechet プロットを行ってみた。民間航空機事故の場合は、Fig. 9 と Fig. 10 と異なり、位置パラメータ γ は相対的に大きな値となる。このような場合、 h_{max} そのものをつかって Frechet プロットをしても、直線回帰はむずかしい。しかし、位置パラメータ γ によって補正し、 $(h_{max}+\gamma)$ によってプロットすれば、Fig.11 に示されるように各年度の最大値データはほぼ右下がりの直線にのることがわかる。

以上、Fig. 1 のようなリスク曲線を有する事故シナリオの母集団から任意抽出されたシナリオの部分母集団の最大規模の事故をぬきだした極値分布は、第 2 種漸近分布 (Frechet 分布) に従うことが、実データからも証明された。このことは、極値統計論で一般的に行われている、いわゆる再帰期間 (return period) の概念を拡張することによって、ある期間内に最大どの程度の規模の災害が推定されるかという、重大災害の規模推定の可能性を示すものといえる。

また 1972 年から 2001 年まで 10 年間毎の安全性指数と Frechet プロットによる形状パラメータを Table.2 に示したが、これより経年変化につれて、リスク曲線の傾きであ

る安全性指数は増大,つまり安全管理の状態は改善されてきていることが分かり,それにつれて Frechet プロットの傾きである形状パラメータも同様に増大傾向にあった。ゆえに,2つの異なる指数は互いに何らかの相関性を持ち,安全性指数のみから,災害の最大値分布(Frechet プロット)の推定,再現期間の予測が可能ではないかと考えられた。

E. 異種災害間の risk comparison

E.1 正規化リスク曲線

いま一定の観測期間に発生する総災害事象数を N_0 とすると,式(15)の上側累積頻度分布関数に従う統計分布は

$$F(h) = \frac{N_0}{\left\{ \left(\frac{h}{\gamma} \right) + 1 \right\}^{D'}} \quad (20)$$

の一般パレート分布形として表示される。式(20)について,

$$R(h) = \frac{F(h)}{N_0} \quad (h \geq 0) \quad (21)$$

とすれば, $R(h)$ は上側確率分布関数になる。統計学的には,式(21)のべき乗分布におけるパラメータ γ は,パレート型分布関数の位置パラメータとしての意味を持つが,変数 h を $(h/\gamma) = X'$ とし,新たな変数 X' を導入すれば, X' は規格化された無次元量として定義できる。したがって X' に関する確率分布関数 $P(h)$ と上側確率分布関数 $R(x)$ は次のように与えられる。

$$P(x) = Pr(X' < x) = 1 - (1+x)^{-D'} \quad (22)$$

$$R(x) = Pr(X' \geq x) = (1+x)^{-D'} \quad (23)$$

ここで,式(23)における $R(x)$ を“正規化リ

スク曲線 (normalized risk curve) “と呼ぶことにする。この正規化リスク曲線は, Fig.12 の模式図に示すように, $R(x) = (1+x)$ を両対数グラフ上に乗せることによって,統一的な直線として表示されるものとなる。また Fig.13 には 2001 年における火災事故データから構成した正規化リスク曲線を示した。Fig.13 より,実際のデータで構成したリスク曲線は,両対数グラフ上で直線となることが分かる。

Fig.12 や Fig.13 の正規化リスク曲線グラフにおける横軸の正規化された被害の大きさは, γ をユニットとしてスケールされたもので,この手続きを経ることによって災害の種類や対象システムが変わっても災害規模を規格化又は無次元化して解析することができる。

E.2 安全性指数 D' と被害期待値の関係

正規化リスク曲線式(23)を規定するものは,この曲線の傾きの絶対値である分布のフラクタル次元 D' のみであり,これが対象となる統計データ群が持つ安全性の指標になり得ることが容易に理解される。すなわち,指数 D' のみで決定される正規化リスク曲線は上側分布関数そのものを表すので,当然ながら安全性指数 D' は,多くの産業システムでのリスク分析において使用される“被害期待値”と直接関連を持つものと推定される。被害の規模を規格化する定数 γ によって正規化された X' を確率変数とする確率分布関数は式(23)の $R(x)$ で表せるから, X' の期待値 $E(x)$ は,

$$E(x) = \int_0^{\infty} \frac{D'x}{(1+x)^{D'+1}} dx = D'Be(2, D'-1) \quad (24)$$

のようになる。ただし、上式中の $Be(\alpha, \beta)$ は、ベータ関数である。上式の場合、ベータ関数は具体的に与えられ、最終的に $E(x) = 1/(D'-1)$

$$\text{ただし } (D' > 1) \quad (25)$$

となり、被害期待値は $(D'-1)$ の逆数で与えられるので、 D が安全性指数としての意味を有することが容易に分かる。また、被害の規模 h そのものの期待値は、式(25)と $x=h/\gamma$ より $E(h) = \gamma/(D'-1)$ であるから、 γ は被害規模をスケールリングするためのユニットになることも直ちに理解できる。

以上のことより、正規化リスク曲線の傾き D' を求めることにより、対象とするシステム群の安全管理の程度を定量的かつ一元的に評価することができる。さらに、この D' は正規化リスク曲線を規定する単一のパラメータであり、また先に述べたように、リスク曲線はリスクそのものを表現していることから、 D' はリスクを表現する定量的指数といえることができる。

安全性指数 D' は“災害の規模と発生頻度”の両者の量的概念を同時に含み、かつ被害の大きさの絶対値やその尺度単位には依存しない無次元量である。このことから、正規化リスク曲線を構成することによって異なる災害間でのリスクの定量的な比較を行うことが可能となる。

Fig.14 には、工場火災事故(前掲)、危険物の漏洩事故(前掲)、航空機事故(前掲)、我が国で起こった労働災害事故(中央労働災害防止協会発行・労働安全衛生年鑑による)、ボイラー事故(日本ボイラー協会・ボイラー年鑑による)の各種災害に関する実際のデータを用いて正規化リスク曲線を同一の両対数グラフ上にプロットしたものを示した。さら

に、同図において各正規化リスク曲線を構成するパラメータ γ 、災害データの観測期間・被害尺度の単位等を Table.3 にまとめた。また Fig.14 における各種災害の正規化リスク曲線の傾きについて Table.4 に示した。Table.4 より傾きの絶対値が小さいほど(最小は産業火災事故)ほど、大規模災害発生の可能性が高く統計的に危険であることが分かる。逆に傾きの絶対値が大きい(最大はボイラー事故)ほど、大規模災害発生の可能性が低く、統計的には対象システムの安全の程度が高いことが言える。

さらに、災害規模のユニットとしての意味をもつ γ によってスケールされた正規化リスク曲線の傾き D' は、一定の観測期間におけるすべてのデータがなくても簡単に導出することができる。具体的には $h \gg \gamma$ なる条件を満たすような大規模災害に関するデータのみがそろえばよい。 $h \gg \gamma$ の場合、式(11)は式(13)と近似的に等しくなるので、 $D' \approx D$ が言える。従って Fig.1 に示されるようなオリジナルなリスク曲線のテイル部における傾きの絶対値が近似的に安全性指数 D' を与えると考えてよい。すなわち、提案する分析手法には、仮に何らかの理由で中小規模の災害データが欠落していても、重大災害データが揃っていれば、オリジナルなリスク曲線のテイル部のみから安全性指数 D' をもとめることができるというきわめて特徴的な利点がある。

F. まとめ

本研究では、まず、産業災害事故の発生頻度とその被害の大きさとの関係、すなわち「災害事故生起の規模特性」における階層

構造的についてフラクタル理論の立場から分析を加えた。

ハインリッヒの法則で示される災害事象生起則には、フラクタル理論で示される自己相似性、及びスケール特性という共通した概念が存在することを明らかにした。このような災害事象生起に関する規模特性は、いわゆる「リスク曲線」を構成することによって検証することができる。リスク曲線とは、事故の被害の大きさを表す確率変数を h とし、 h を超える被害の大きさをもつ事故のシナリオの発生頻度の累積値（すなわち、上側累積頻度）を $F(h)$ として、両対数紙上に $F(h)-h$ をプロットしたものを云う。

災害事故発生の規模特性に関する階層構造性を量的に示すパラメータであるスケール指数又はフラクタル次元 D は被害規模の大小に応じた災害の発生頻度の割合を反映するパラメータであり、模式的にはいわゆる「リスク曲線」の傾きの絶対値として示されるものである。そして、このフラクタル次元 D は、その値が大きくなるにつれて大規模な災害の発生頻度が急激に低下することから、大規模災害の起こりにくさの程度を示す指標であり、対象とするシステムの広義のフェイルセーフ機構の機能度を統計的に明示した指標、あるいは「災害事象」が生起したとき、どんな確率でどの程度の大きさの被害までになるかという対象システムの「安全管理の程度」を示す指標または「安全性指数 (safety index)」となり得ることが導かれた。

以上の事を多くの火災保険事故のデータを収集・整理して、これらを一般物件と、安全基準の厳しい特定物件とに分けて分析し、特定のフラクタル次元 D が一般物件のそれよ

りも大きい事実があることを明らかにすることによって例証した。

また、両対数グラフ上で表現されるリスク曲線は、災害規模を変数にとったときの、上側累積頻度分布関数を意味するもので、この分布関数型の同定は災害統計分析上重要である。また、リスク曲線の低頻度でかつ大規模災害の領域においては、統計的不確定性が存在する。そこで、リスク曲線の全体像がどのような分布関数で表現できるのか、さらに大規模災害範囲に着目して任意抽出された事故シナリオ群 (magnitude of consequence) 最大値がどのような分布に従うかといった統計的特性につき検討した。災害事象の発生には、被害の大きさを確率変数に取るとき、スケール不変性や統計的自己相似性とした概念が存在する。このような概念を有する一般的な分布関数として、位置パラメータ γ を含むような逆べき乗型関数を提案できた。それ故、災害事故の頻度特性は一般パレート型分布関数に従う。このことよりリスク曲線の大規模災害領域において任意抽出された標本集団の最大値分布は、第2種の最大値漸近分布 (Fréchet 分布) で記述できることが極値統計より導かれた。以上のことを各種災害データを整理・分析することによって実証した。

さらに、異種災害の risk comparison としてオリジナルなリスク曲線から 1 パラメータで規定される関数形で表現できる“正規化リスク曲線”を考案した。この正規化リスク曲線は D' という単一の定量的な指数で表現でき、これは対象システム群の安全管理の程度を一元的に評価できる統計的指数であることが分かった。また正規化リスク曲線構成の際使用するパラメータ γ は対象と

する災害の規模を規格化するユニットであるということも分かった。

労働現場における災害リスクの同定と定量的評価を可能とする定量的労働災害リスクの概念を定義し、それを導出できる新しい確率・統計的手法の基本的部分を確立した。提案した労働災害リスク分析手法を基に具体的な労災データを利用し、我が国の労働災害の特性と現状を明らかにし、労働災害発生リスクをグローバルに評価できることを利用して、労働災害保険等のいわゆる労災補償制度の健全な運用・改善といった社会的課題に対応できることが分かった。

G. 今後の展望

本研究では、リスク曲線による新たな災害統計分析手法を提案し、本分析手法を用いれば、異なる災害間でのリスクの定量的な比較ができることを示した。これによって異なる産業分野間又は質や種類の異なる労働災害間のリスクや安全管理レベルを統一的に評価・比較し得ることが可能となったので、今後、将来的には災害防止のための関連行政機関での法規立案、効率的行政指導の実施あるいは目標課題等、に関する重要情報の提供や、産業分野において実施されるべき安全対策の有効性やその定量的評価に利用できるものと推定される。そして、企業の安全対策の方向づけ等に関する意思決定への有効な手段となりうる一般的な手法の確立へと研究を展開したい。

参考文献

- (1) Kaplan, S. and Garrick, B.J. : On the quantitative definition of risks, Vol.1, No.1, p.11 (1981)
- (2) Bird, Jr. F.E. and Germain, G.L. : Practical Loss Control Leadership, Industrial Accident Prevention Association, Ontario, p.17 (1986)
- (3) Feder, J. 著, 松下, 早川, 佐藤 訳 : フラクタル, 啓学出版, p.19~27, (1991)
- (4) Gumbel, E.J 著, 河田, 岩井, 加藤 監訳 : 極値統計学, 生産技術センター新書, p.273, (1962)

H. 健康危険情報

なし

I. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
 - 1) 花安繁郎、関根和喜 : On Generalized Total Damage Distribution of Industrial Accidents Considering Individual Accident's Size Limitations、第9回信頼性設計技術ワークショップ報告書、pp.54-61、2002.
 - 2) S. Hanayasu: Accident Situation Analysis and Safety Managements of Bridge Construction、 Proceedings of the 1st International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management (IABMAS'02)、 pp.1-8(CD-ROM)、2002.
 - 3) S. Hanayasu : On Practical Applications of Probabilistic Accident Models to Industrial

Work Fields、 Proceedings of the 6th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM6)、 pp.353-358、 2002

- 4) 関根和喜、 橘川重郎、 山田實：石油タンク底板裏面腐食のフラクタル分析法ーリスク曲線によるグローバル評価ー、平成 14 年度 日本高圧力技術協会春季講演・講演概要集、 pp.11-12、 2002

- 5) 関根和喜、 橘川重郎、 山田實、 湯山茂徳、 丸山裕章：石油タンク底板の AE グローバル診断のための腐食リスク評価、平成 14 年度 第 46 回日本学術会議材料研究連合講演会・講演論文集、 pp.297-298、 2002

J. 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 各種分野の火災事故における安全性指数

Fields of industries	Metal working and processing industries	Electronics and electrical industries	Paper and pulp manufacturing	Chemical plants and chemicals manufacturing	Whole industries
Fractal dimension D in C.R.P.R.	1.87	0.81	0.78	0.96	1.68
Fractal dimension D in S.R.P.R.	2.72	2.14	1.54	1.55	2.02

* C.R.P.R. means the commercially-rating property risks (一般工場物件)

** S.R.P.R. means the schedule-rating property risks (特定工場物件)

*** 1980年から1985年までの6年間の工場火災保険データより算出

Table.2 10年間のリスク曲線と Frechet プロットによるパラメータの比較

火災事故の総計年数 (単位：10年間)	リスク曲線における 安全性指数の絶対値	最大値分布における形 状パラメータの絶対値
1972年-1981年	0.577	0.6762
1982年-1991年	0.8955	0.8252
1992年-2001年	0.9816	0.8999

Table.3 各種災害データの詳細

災害種類	観測期間	観測時間	被害の尺度	γ 値
ボイラー事故	1962年～1995年	34年	死傷者数(人)	5(人)
航空機事故	1977年～1990年	14年	死傷者数(人)	50(人)
火災事故	1977年～1989年	13年	損害額(万円)	500(万円)
漏洩事故	1981年～1989年	9年	損害額(万円)	100(万円)
労働災害	1977年～1994年	18年	死傷者数(人)	3(人)

Table.4 正規化リスク曲線による安全性指数の比較

災害種類	正規化リスク曲線の傾きの絶対値
ボイラー事故	2.67
航空機事故	1.25
火災事故	0.33
漏洩事故	0.75
労働災害	1.05

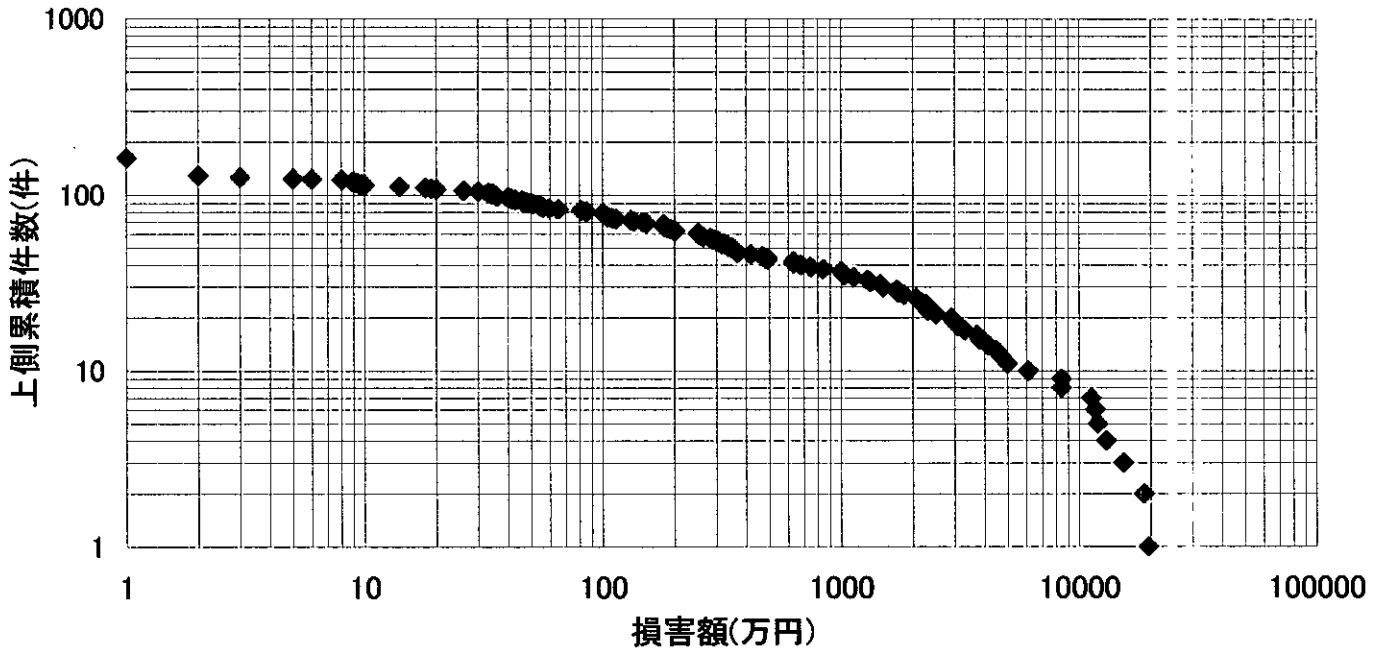


Fig.1(a) 工場火災事故において上側累積頻度分布関数 $F(h)$ と被害規模を両対数プロットしたリスク曲線(1990年)

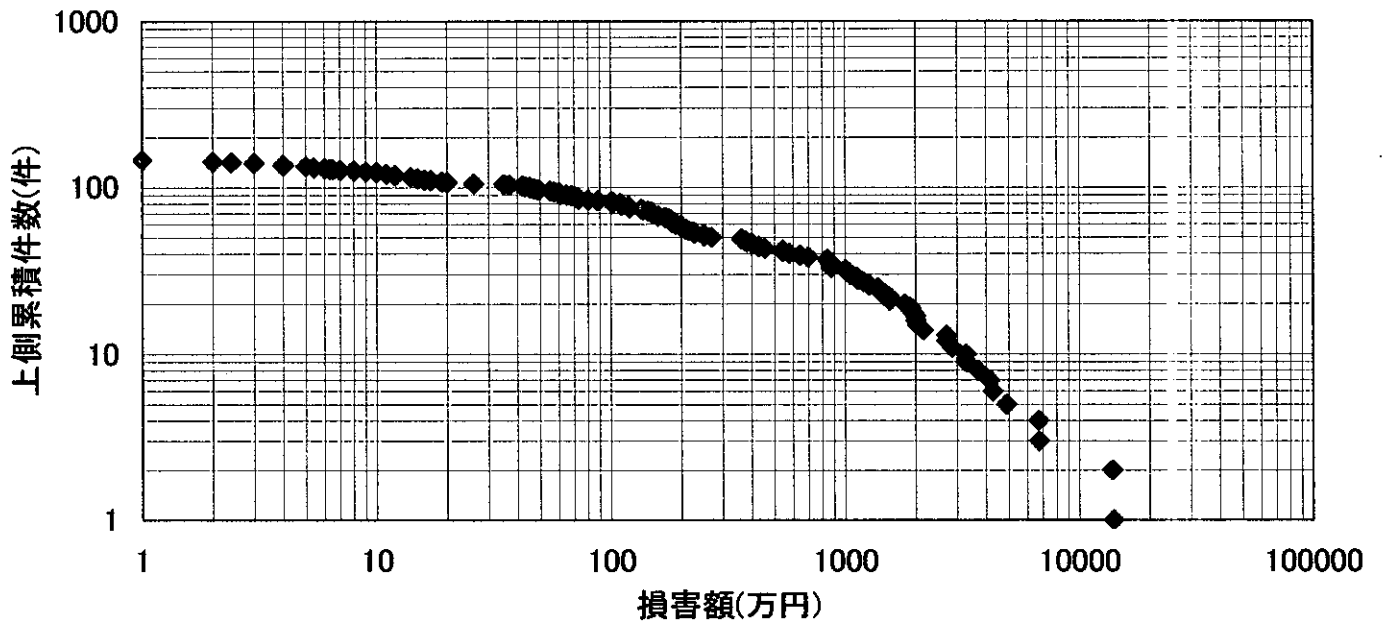


Fig.1(b) 工場火災事故において上側累積頻度分布関数 $F(h)$ と被害規模を両対数プロットしたリスク曲線(2001年)