

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

分担研究報告書

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

分担研究者 花安 繁郎 独立行政法人 産業安全研究所 研究部長

Abstract This paper proposes a new statistical technique which gives a quantitative index that enable to characterize the potential risk of industrial accident occurrence in many engineering systems. An approach taken in this study is based on the concept of the risk curve, in which the relationship between exceedance frequencies and their corresponding magnitude of damage consequence of hazardous events is described in a log-log scale. The basic understanding and interpretations of risk for accident occurrence have been examined with the risk definition determined by Kaplan and Garrick, and the risk curve has been clarified to be of a useful method for characterizing the risk of hazardous events. Furthermore, based on collected various actual accident data, the risk curve can be essentially expressed with a mathematical form uniquely determined by a one parameter distribution. This distribution parameter that characterizes the risk curve can be adopted as a possible safety index for assessing risks of accident occurrence in operating systems.

## A RESEARCH OBJECTIVE

The objective of statistical analyses for industrial accident occurrences is to provide with basic information for a decision making on the policy making of loss prevention or risk managements in various engineering fields. For this purpose, a statistical analytical method should correspond to the quantitative results that characterizes and evaluates the potential risk of accident/hazard occurrences in engineering operating systems.

This paper proposes a new statistical analysis technique which can give a quantitative index to characterize the potential risk of industrial accident occurrences for many engineering systems. An approach taken in this study is based on the concept of the risk curve, in which the relationship between

exceedance cumulative-frequencies and their correspond- ing magnitude of damage consequence for hazardous events is described in a log-log scale, which should be called “Fractal analytical technique (Takayasu 1989)” in the field of statistical analysis of accidents/hazards. The representation of the risk for accident occurrences has been examined through the definition of risk determined by Kaplan and Garrick. Based on this definition of risk, a possible usefulness of the risk curve as a methodology for characterizing the risk of hazardous events will also be examined.

The industrial accidents analyzed in this study are those of serious industrial accidents that include different types of accidents such as air craft, boiler, fire, and many occupational accidents during system operations. Extensive

database covering those serious industrial accidents that occurred during a variety of industrial work sectors between different periods mainly in Japan was prepared for establishing appropriate probabilistic models to characterize the frequency-magnitude relationships

## B RESEARCH APPROACH

### B-1 THE SIGNIFICANCE OF RISK CURVE AS A RISK REPRESENTATION

In engineering fields, risk is defined as a combination of magnitude of consequence due to hazardous events and their frequency or probability of occurrences (Modarres 1993, Bahr 1997) As one of the most popular form of representation, “expected value of damage” is used in many cases A more general form is a definition of risk representation given by Kaplan and Garrick In this study, this definition will be adopted as a starting point

According to Kaplan and Garrick (1981), risk, denoted  $R$  in this study, is expressed by a set of triples shown in the following equation, provided that the  $s_i$  is an assumed hazard scenario and its total number is  $N$  and that  $p_i$  represents the frequency of arising or the probability of occurrence of accident events and  $x_i$  is the magnitude of the damage associated with the accident scenario of  $s_i$  respectively

$$R = \langle s_i, p_i, x_i \rangle \quad i=1,2, \dots, N \quad (1)$$

When statistical analysis is carried out by using accident data occurring within a certain observation period, say  $T$ , the equation (1) can be modified in the following in a broad sense, provided that  $t_i$  is the time at which an accident with the  $s_i$  scenario occurs

$$R = \langle s_i, t_i, x_i \rangle, \quad 0 < t_i < T, \quad i=1,2, \dots, N \quad (2)$$

The representation of the equation (2) does

not directly correspond to the frequency or probability as given in equation (1), however, by employing the observation period  $T$  in accordance with time passage of accident  $t_i$  and the number of events  $N$  in this schema, the concept of risk in terms of frequency or probability can be thought introduced **Figure 1** demonstrates the notional presentation described by the equation (2)

The axis of abscissa in Figure 1 represents the time series of occurrence of each accident ( $t_i$ ) within the observation period  $T$ , while the axis of ordinate presents the observed magnitude of each accident (the size of damage) ( $x_i$ ) In other words, Figure 1 shows the schematic discrete time series data by making use of magnitude of occurrence of accidents expressed as the height of pulse Hence, this figure presents exactly the same meaning as given by the equation (2), and we may consider that this is “the statistical representation of risk by showing in a figure” for the group of accident events denoted here by a “risk chart”

On the other hand, “risk curve” is defined as an exceedance frequency curve of occurrence number of accidents corresponding to the accident magnitude (size of damage), where  $x_i$  is a variable Namely, the upper cumulative frequency distribution function that is denoted here as  $C(h)=CF(X \geq h)$ , is the mathematical presentation of risk curve Based on this equation, Figure 1 or equation (2) can be interpreted as a data arrangement method of discrete time series accident damages considering accident occurrence time and its corresponding magnitude

As shown in Figure 1, a risk chart can be constructed by sorting out the same kinds of data of accidents which occurred within a certain period,  $T$ , (for example, one year within a certain length of years) In a risk chart, an appropriate range value, say  $h$ , is used for a measurement of accident magnitude,  $X$ , so that

one can analyze the summation of the number of these pulses where  $X$  is larger than  $h$ . In this case, this will be analyzed as  $CF(X \geq h)$ . The equation of  $CF(X \geq h)$  divided by the observation period,  $T$ , i.e.,  $(CF/T)$ , yields the upper cumulative frequency of accidents  $F(h)$  and the log-log relationship between  $F(h)$  and a set of damage magnitude value  $h$ , be referred as the so-called risk curve.

Based on the obtained accident data in various industrial fields and the analytical schema given above, examples of analysis of risk curves are given by Figure 2 and Figure 3 respectively.

**Figure 2** presents the risk curve obtained by the fire accident data associated with industrial activities that actually occurred in Japan in the 5 years from 1989 to 1993. The adopted risk range value,  $h$ , was the amount of damage cost ( $\times 10^4$  yen) associated with these accidents. The original risk curve analyzed is indicated by the mark of  $\bullet$  in the figure.

**Figure 3** also shows a risk curve analyzed from the occupational accident data that consist of three or more injured workers involved in an accident in the manufacture industry from 1977 to 1994 year.

The associated damage magnitude in this case is the number of injured workers involved within an accident during system operations within said period.

As shown in these figures, it is possible to construct a risk curve provided accident data consisting of the occurrence time of accidents and their corresponding magnitude of damage consequences are given as shown in a risk chart. From many accident analyses, it has already been shown that various different kinds of accident data have their own original risk curves described by the log-log scale graph (Sekine and Izumi, et al 1994, Hanayasu 1991, 1997).

Here, if we change the way of thinking or understanding of Figure 1 or a risk chart, it is

possible to assume that a risk curve obtained by a risk chart can be seen as a transformation of discrete time series pulse signals into the relationship between accident frequency (frequency) in accordance with the time passage and their corresponding amplitude (accident magnitude). Therefore, by applying a discrete Fourier expansion for the limited pulse signals numbered of  $N$  in Figure 1 or a risk chart, we can yield a risk curve by obtaining the relationship between amplitude (i.e. damage magnitude  $X$ ) and their frequency first, and then transform it into the form of amplitude-cumulative frequency relationship. In other words, one can assume that a risk chart, which is schematic representation of  $R$ , and the associated analyzed risk curve are to be essentially identical.

To prove this inference, discrete Fourier transformations of those accident data given by Figure 2 and 3 were carried out and their results are shown in the same figures together with the original risk curves.

From Figure 2 and 3, it can be seen that the original risk curves constructed by the usual method have roughly the same shape as those of risk curves that are constructed by the spectrograph obtained by discrete Fourier transformation. Hence, the representation of the risk as defined by the equation (2) and that of the risk chart are identical, and the entire figure of the risk curve constructed by the risk chart essentially represents the risk itself.

## **B-2 GENERAL REPRESENTATION OF A RISK CURVE**

Since we are able to show that a risk curve itself is a representation of risk in the preceding section, we now will try to specify a mathematical function form which can describe the risk curve in an entire region of damage magnitude domain.

Now, if the discrete time series data of a finite number of accident occurrences are arranged as Figure 1 and can be expressed in the following form,

$$F(h) \propto h^{-n} \quad (3)$$

then distribution of this data is a so-called Pareto distribution type and depends on  $n$  dimensional Fractal distribution with self-similarity (Takayasu 1989). In this analysis, the accident magnitude which is used and analyzed here is observed data obtained by a certain observational scheme. Hence, a certain location parameter, say  $\gamma$ , can therefore be introduced. In other words, the time series data in Figure 1 can be considered to be on a base line  $\gamma$ . Then, the data is arranged under  $h + \gamma (=h')$  in the magnitude range value instead of  $h$  shown in Figure 1, and will be represented as follows

$$F(h) \propto (h + \gamma)^{-n} \quad (4)$$

This equation can also be essentially considered as a same kind of Pareto type Fractal distribution as represented in the equation (3). Doing this way, **Figure 4** shows the result of rearrangement of data as given in **Figure 2** under  $h' = (h + \gamma)$ .

From this **Figure**, it can be seen that the fire accident data in Japan for over the 5 years from 1989 to 1993 followed the equation (4) almost in the entire region of damage magnitude, if we simply assume  $\gamma = 500 \times 10^4$  (yen). In addition to this, for fire accident cases, it was also verified that  $\gamma$  had the same value of  $500 \times 10^4$  (yen) in the risk curve for every each year within this 5 years period.

**Figure 5** also shows the result of analysis of Pareto plotting similar to **Figure 4** for boiler accidents in Japan for two different 5 years period from 1965 to 1969 and from 1980 to 1984 respectively. In this case, damages are accounted for the number of involved fatalities due to said accidents. Analysis in this case

indicates that a location parameter  $\gamma$ , in equation (4) is also the same value ( $\gamma = 4$  fatalities) for the different 5 years period. From these analyses, it is possible to say that a location parameter  $\gamma$  is a meaningful parameter because it is not only a location parameter, but also has a specific value peculiar to the subject accident data group.

### B-3 NORMALIZED RISK CURVE

It has been clarified that damage magnitudes due to accidents follow an inverse power law function of the equation (4) in case of location parameter of  $\gamma$  is introduced. Now, let the number of the total accident events occurred during a fixed observation period be  $N_0$ , then the statistical distribution with reference to the upper cumulative frequency distribution function will be represented as a general Pareto type distribution function expressed by the following equation

$$F(h) = N_0 / \{(h + \gamma) + 1\}^{-n} \quad (5)$$

From the equation (5), the following equation (6) is deduced

$$R(h) = F(h) / N_0 \quad (h \geq 0) \quad (6)$$

$R(h)$  will be referred to as "upper probability distribution function". The parameter of  $\gamma$  in the probability distribution function given by equation (5) is a location parameter of Pareto type distribution function in a statistical meaning as mentioned.

Now, let a new introduced random variable  $X$  be  $(h / \gamma) = X$ , then  $X$  can be defined as a standardized normalized dimensionless random variable. Hence, the probability distribution function of  $P(X)$  and the upper probability distribution function  $R(X)$  of  $X$  are given as follows

$$P(x) = Pr(X < x) = 1 - (1 + x)^{-n} \quad (7)$$

$$R(x) = Pr(X \geq x) = (1 + x)^{-n} \quad (8)$$

Here, we will call  $R(x)$  expressed by the equation (8) “a normalized risk curve” This normalized risk curve will be represented on a log-log scale graph by putting  $R(x) - (1+x)$  relation for over all  $x$  value as a linear straight curve as shown in **Figure 6** The size of damage magnitude in this risk curve graph is scaled by the normalized unit of  $\gamma$

**Figure 7** shows an example of a normalized risk curve analyzed from the actual accident data due to industrial fire accidents as already analyzed in Figure 2 and 4 From this figure, it can be seen that the actual data can be converted to the normalized risk curve in a log-log scale graph

By employing this procedure, it is possible to construct a normalized risk curve for different type of accidents as well as different operating systems

#### B-4 SAFETY INDEX BY RISK CURVE

As shown in the normalized risk curve, only Fractal dimension  $n$  of the distribution function, which is an absolute value of the gradient of the risk curve, determines the normalized risk curve Hence, it is easily considered that this parameter can be employed as a safety yardstick for a group of statistical data In other words, a normalized risk curve determined only by an index,  $n$ , represents an upper distribution function itself It is therefore assumed that a safety index,  $n$ , is naturally corresponding to “an expected value of damage” that is quite often used for risk analysis of many industrial systems (Lambert et al 1994) The upper probability distribution function having a standardized magnitude of damages as a normalized random variable  $X$  with a constant location parameter of  $\gamma$ , is represented by  $R(X)$  by the equation (8) Hence, the expected value  $E(x)$  of  $X$  is expressed as follows

$$E(x) = \int_0^{\infty} \frac{n'x}{(1+x)^{n'+1}} dx = \frac{1}{(n'-1)} \quad (9)$$

The expected value of the normalized damage is given as an inverse value of  $(n'-1)$  It can therefore be easily said that  $n$  has a meaning of a safety index It can also be understood immediately that  $\gamma$  will become a unit to scale the magnitude of damage because the expected value of magnitude of damage of  $h$  is expressed in the following equation

$$E(h) = \frac{\gamma}{(n'-1)} \quad (10)$$

From the discussion above, the degree of safety management of an operating system can be assessed quantitatively and uniformly through analyzing the gradient  $n$  of the normalized risk curve Furthermore, this  $n$  is a single parameter that determines the normalized risk curve, so that it can be confirmed that  $n$  is a quantitative index representing risk of an operating system since the risk curve represents the risk itself as before mentioned

The safety index,  $n$ , contains quantitative concepts of both “magnitude of accidents and frequency of occurrence” simultaneously and is a dimensionless value which does not depend on the absolute value of the size of damage and the unit of its measurement Thus, this index enables to make quantitative risk comparison between different types accidents and different industrial sectors by comparing their own normalized risk curves

As an example of analysis, Figure 8 shows various normalized risk curves as plotted on the same log-log scale graph by using the normalized accident data transformed from the actual accident data Analyzed data are come from industrial fire accidents (mentioned before), leakage accidents in facilities by dangerous substances, labor accidents, and

boiler accidents that occurred in Japan and aircraft accidents occurred world-wide (accident data are taken from reports by the Secretariat of the Aircraft Accident Research Committee)

Also as the summary of these analyses, **Table 1** presents the types of accident, length of the observation period, the damage unit employed, location parameter  $\gamma$  that are necessary for the analysis of normalized risk curve for each accident data

From **Figure 8**, it is possible to perform a uniform assessment for various kinds of risks with different characteristics and properties by constructing normalized risk curves on the same log-log scale graph and comparing the gradient  $n$  of each risk curve

Namely, it can be seen that the smaller the absolute value of the gradient  $n$  becomes, the higher the possibilities of occurrence of major accidents consisting of large amount of damages are more liable to be given and hence, the operating system would be identified as a more dangerous system statistically (the smallest  $n$  in **Figure 8** is the industrial fire accidents,  $n=0.33$ ) Or conversely, if the absolute value of the gradient  $n$  becomes larger, then the less possibilities of occurrence of major accidents will be obtained so that the subject systems would be identified as higher safe system from the statistical view point (the greatest  $n$  in **Figure 8** is boiler accidents,  $n=2.67$ )

The gradient  $n$  of the normalized risk curve obtained from normalized damages scaled by the unit of damage magnitude  $\gamma$ , can also easily be derived without having all accident data for a fixed observation period considered. In practical, availability of data of major accident damages that satisfy the condition of  $h \gg \gamma$  would be of enough. In the case of  $h \gg \gamma$ , the equation (4) can be approximated to the equation (3) so that the parameter  $n'$  will become almost nearly equal to  $n$ . Therefore, it

can be considered that the absolute value of the gradient  $n$  of the tail part of the original risk curve as shown in **Figure 2** will give the safety index of  $n$ . In other words, the analytical method proposed in this study has a powerful advantage that the safety index of  $n$  can be analyzed only from the tail part of the original risk curve, even if small-and medium-sized accident data are lacking for some reason, so long as important accident data are available

## C CONCLUSION

The risk curve described by a log-log scale graph shows the relationship between damage magnitude and the exceedance cumulative number of occurrence of accidents. By making use of various accident data, statistical analyses were carried out based on the newly proposed risk curve analysis method.

The followings are the summary of the results in this study

- 1 The relationship between general risk representation given by Kaplan and Garrick and the risk curve was examined. Graphical representation of accident data shown as a risk chart clarified that the risk curve essentially represents risk itself.
- 2 Normalized risk curve determined by a one distribution parameter analyzed from the original risk curve was proposed. A single parameter of  $n$  that determines the normalized risk curve can be employed as a statistical quantitative index which can uniformly assess the degree of safety of operating systems.
- 3 The parameter  $\gamma$ , which is introduced to construct a normalized risk curve, has been found to be a unit to standardize the accident damage magnitudes. Quantitative risk comparison among different types of accident as well as different industrial operating systems can be performed by

proposed statistical analytical technique

#### D REFERENCES

- Bahr, N J 1997 *System Safety Engineering and Risk Assessment A Practical Approach*, Taylor and Francis, Bristol 7-10
- Hanayasu, S 1991 Risk Analysis of Occupational Accidents in Construction Work, *Proceedings of the 6th International Conference on Statistics and Probability in Civil Engineering (ICAP6)* 1147-1154
- Hanayasu, S and Tang, W H 1997 Parameter Estimation of Prediction of Frequency-Magnitude Curve of Natural Disasters and Construction Accidents, *Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'97)*, Vol 1 549-556
- Kaplan, S and Garrick, J 1981 On the Quantitative Definition of Risks, *Risk Analysis*, Vol 1 (No 1) 11-21
- Lambert, J H , Matalas, N C , Ling, C W and Haimes, Y Y 1994 Selection of Probability Distributions in Characterizing Risk of

Extreme Events, *Risk Analysis*, Vol 14 (No 5) 731-742

- Modarres, M 1993 *Reliability and Risk Analysis*, Marcel Dekker Inc , New York 1-7
- Sekine, K , Izumi, T et al , 1994 Fractal Characteristics of Accident Occurrence Phenomena and its Application to Statistical Analysis, *Pressure Technology*, Vol 32 (No 5) 240-248 (in Japanese)
- Takayasu, H 1989 *Fractals in the Physical Sciences*, Manchester Univ Press, New York 1-58

#### E HEALTH RISK INFOERMATION

None

#### F PATENT ETC

None

Table 1 Observation period, duration and estimated  $\gamma$ -values for various types of accident

Types of accident	Period observed	Length (year)	Damage unit	$\gamma$ -Value
Boiler	1962-1995	34	fatalities	5 *
Aircraft	1977-1990	14	fatalities	50*
Industrial fire	1989-1993	5	costs	500 **
Leakage	1981-1989	9	costs	100 **
Labor accident	1977-1994	18	injuries	3 *

\*# of persons, \*\*  $\times 10^4$  yen

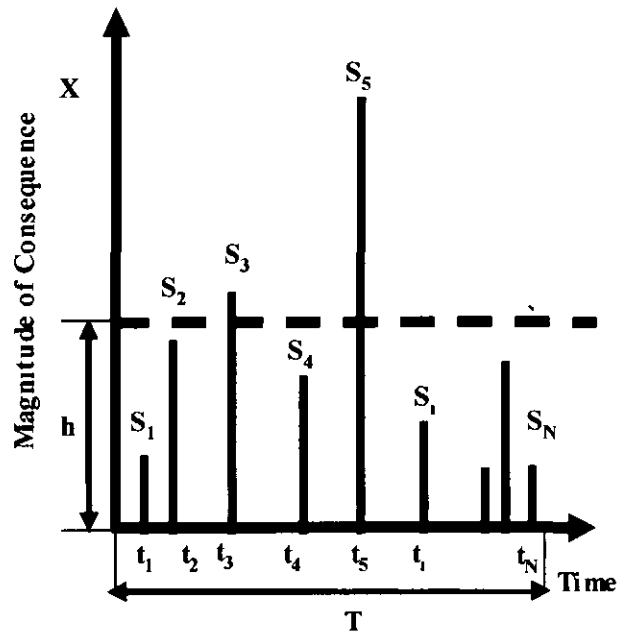


Figure 1 Schematic figure of risk chart

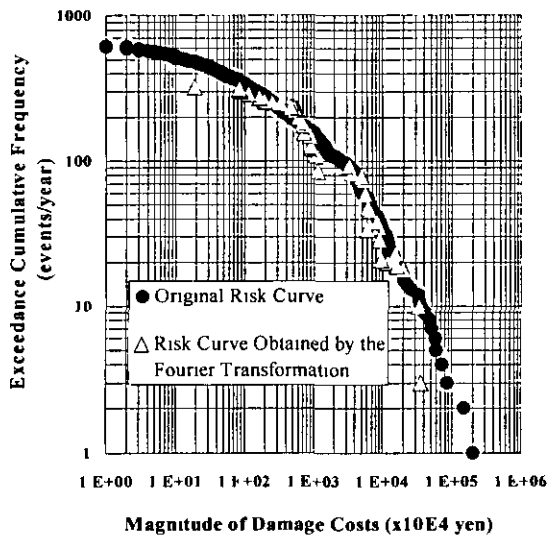


Figure 2 Original risk curve and analyzed Risk curve by Fourier expansion (Fire accidents between 1989 and 1993 year)

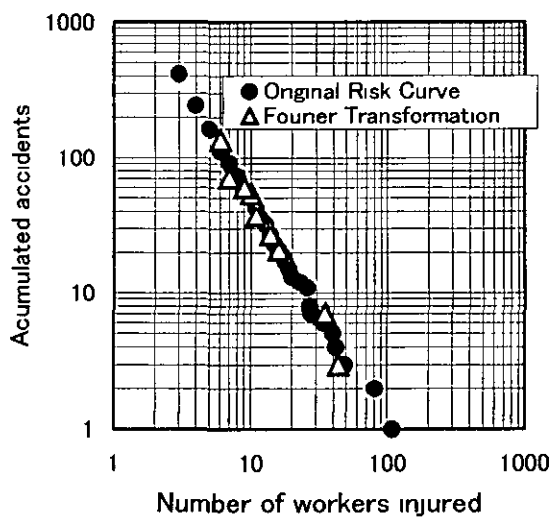


Figure 3 Original risk curve and analyzed curve by Fourier expansion (Occupational accidents in manufacture industry between 1977 and 1994 year)



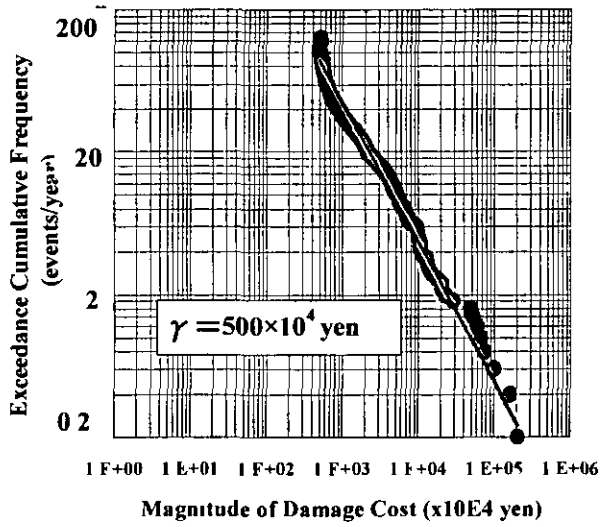


Figure 4 Modified risk curve introducing a location parameter of  $\gamma$  (Fire accidents)

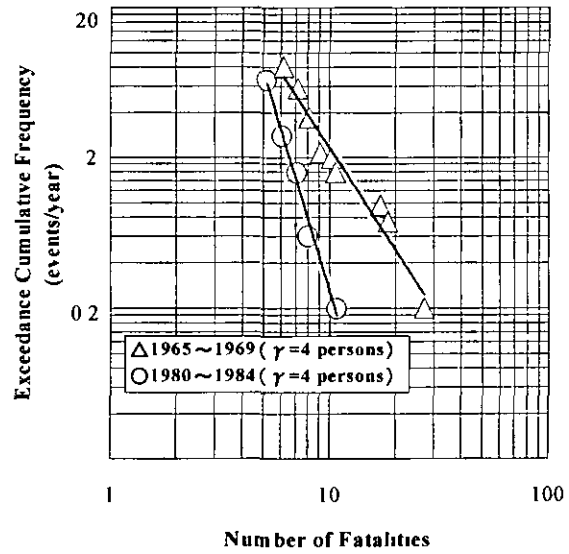


Figure 5 Modified risk curve introducing a location parameter of  $\gamma$  (Boiler accidents)

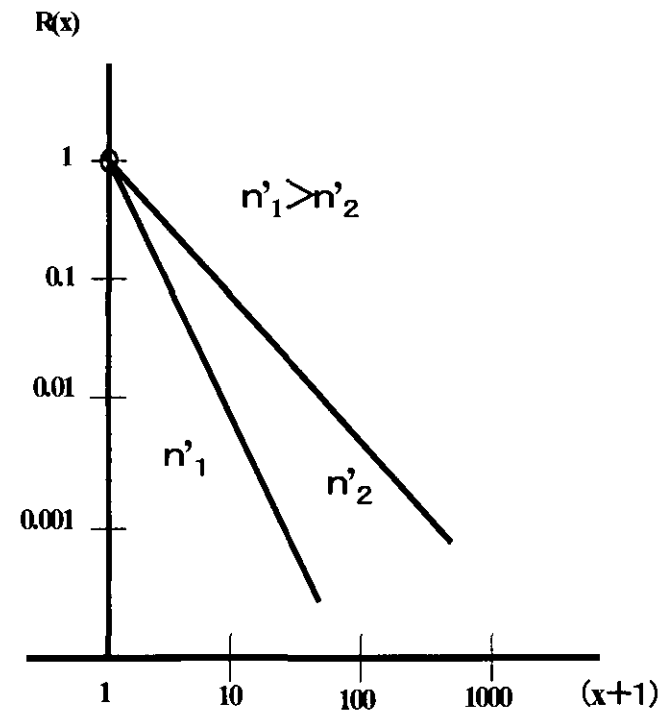


Figure 6 Schematic figure of normalized risk curve

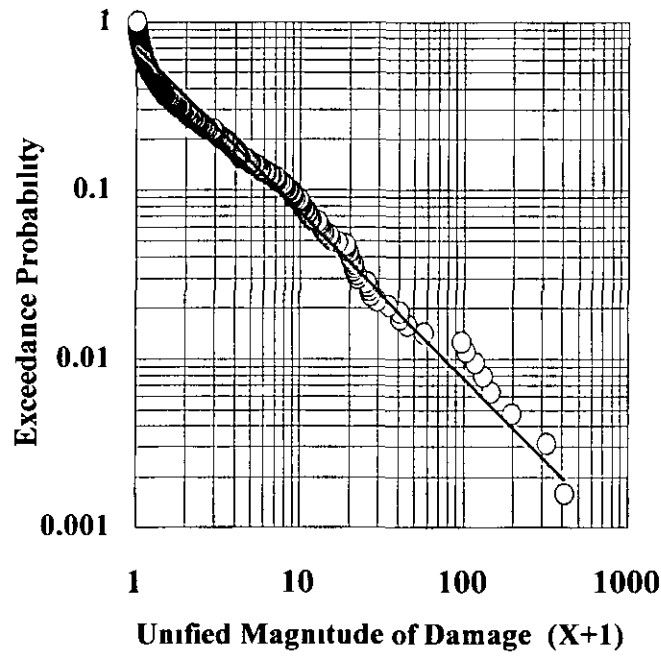


Figure 7 Normalized risk curve of fire accidents

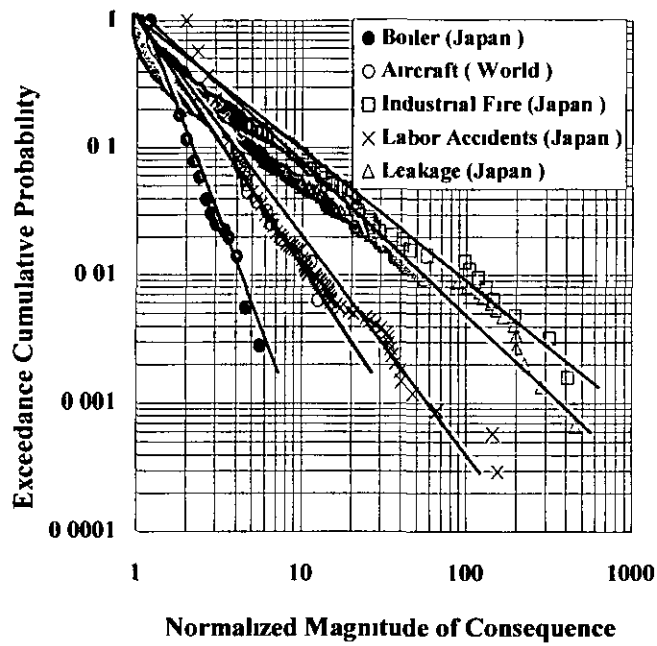


Figure 8 Normalized risk curves for various types of accidents

分担研究報告書

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

分担研究者 花安 繁郎 独立行政法人 産業安全研究所 研究部長

研究要旨 本稿では、産業活動に伴って生ずるさまざまな産業災害のうちで労働災害について焦点をあて、その発生状況をいくつかの災害データによって示したのち、リスク分析の立場から労働災害の分析を行い、そこでの特徴を明らかにするとともに、今後の産業災害・労働災害リスクマネジメントのあり方について考察を加えた。

## A 研究目的

労働災害とは、労働安全衛生法第2条によって「労働者の就業に係る建設物、設備、原材料、ガス、蒸気、粉しん等により、又は作業行動その他業務に起因して、労働者が負傷し、疾病にかかり、又は死亡することをいう」と定義されている すなわち、危険な機械類や有害物に起因した災害と、労働者の作業行動に起因した災害とを労働災害の典型とみなし、かつ労働者個人に生じた災害形態である傷害、疾病としてとらえ、また、その対象を「労働者」という社会階層、人間集団に限定したことに災害としての特徴がある

本稿は、産業活動に伴って生ずるさまざまな産業災害のうちで労働災害について焦点をあて、その発生状況をいくつかの災害データによって示したのち、リスク分析の立場から労働災害の分析を行い、そこでの特徴を明らかにするとともに、今後の産業災害・労働災害リスクマネジメントのあり方について考察を加えたものである。

## B 研究方法

労働災害による被害は、定義に従えば、

災害によって作業員が死亡したり傷害を受ける人的な損害である しかし、労働災害に伴って生ずる副次的な被害には、構造物や機械類の破壊や破損、およびこれらの復旧、修繕等に要する経済的、時間的損失、あるいは事故・災害による社会的信用の低下など、数多くの形態の損害が存在する これらのうち、構造物や機械類の破損や生産活動の停滞に伴う経済的損失の評価は、それぞれの項目を積み上げてゆけば一応可能であるが、そのための標準的な算出法は定められておらず、また社会的信用の低下に関する損失については、それをどのように推定すべきかについて十分には解明されていない 要するに、労働災害に伴って生ずる被害の多くは、その値を正確に知ることか困難であり、また得られてもその信頼度が明確であることが少ない

ここでは、労働災害リスクについて、その実態を示すために開示されているいくつかの資料を基に、その現状を明らかにする

### B-1 労働災害の発生状況の調査

#### 1) 死亡災害の発生状況<sup>1)</sup>

Fig.1 は労働災害による死亡者数の推移を全産業及び建設業について調べたもので

ある 全産業についてみると、1955（昭和30）年代後半までは増加を続け、1961年には6,712人のピークに達している以降、毎年6,000人前後で推移し、ようやく1970（昭和40年）代後半に至って減少期に入っている。しかし、1985（昭和60）年以降は減少傾向は頭打ちとなり、毎年2,400人前後で推移したのち、1998（平成10）年以後に2,000人以下となっている。

一方この間の建設死亡災害の発生状況は、全産業死亡災害の動向と軌を一にしており、また、その占める割合も1961（昭和36）年以降40%以上を保ち続けている。更に、この十数年もの間毎年1,000人前後で推移し、1997（平成9）年に1,000人以下となっている傾向も全産業のそれと同様である。後述するように、毎年発生する労働災害は減少傾向が続いているので、死亡災害を如何にして減少させるかが重要な課題である。

## 2) 労働者災害補償保険給付状況<sup>2)</sup>

労働災害によるさまざまな被害のうち、金額によって明確に示されている被害として、労働者災害補償保険（労災保険）による給付支払いに関するものがある。現在の労災保険は、1947（昭和22）年に制定された労働基準法及び労働者災害補償保険法に基づき政府所管の災害保険として運用されている。

Fig 2 は、業種別に労災保険を新規に受給された者、すなわちその年度に新たに労働災害と認定された者の数の推移である。全体では1980年度の110万人から、2001年度の60万人へとこの20年間で45%ほど減少している。とくに屋外産業である林業、鉱業、建設業での減少割合が大きく、その他（サービス）産業は変化が無くほぼ同じ数で推移している。建設業は、この間で22万人から6万7千人へと70%ほど減少し、その構成比も20%から11%へと減少している。

新規受給者を業種別に分類すると、かつては製造業が多く占めていたが、今日では受給者の半数がその他事業（サービス産業）

で占められている。

一方、Fig 3 は労災保険給付支払い金額の推移である。労災保険による給付の種類は、1)労働災害により治療を要する場合に支払われる療養補償給付、2)被災者か休業を要するときに支払われる休業補償給付、3)一定期間後も傷病が治癒しない、しん肺や脊椎損傷等に支払われる傷病補償年金、4)障害が残った者に支払われる障害補償年金、5)死亡者の遺族に支払われる遺族補償年金および葬祭料、6)労災保険年金受給者の介護に要する介護補償給付、7)二次健康診断給付、などがある。

産業別の給付状況を調べると、どの産業も保険給付額は増加しており、とくにその他事業（サービス産業）の伸び（1980年度に比し2.05倍）は著しい。全体では、給付総額は1980年度5,700億円から1996年度8,400億円へと50%近く増加し、ようやく1997年度の8,500億円をピークに以降減少に転じている。給付額の最も多い建設事業はこの間、1980年度の2,000億円から2001年度の2,700億円へと35%増加している。

同図から各年の給付種類別の支払い状況を調べると、1970年代前半までは療養補償給付が多くを占めていたが、その後それらの伸びは小さくなく、1980年度以降はほぼ一定の給付額であるのに対し、各種の年金給付額は年々増加し、遂に1982年度からは年金給付額が最多の給付割合を占め、今日（2001年度）ではその49.2%とほぼ半分を占めるに至っている。

労災保険給付額の中の年金給付が占める割合の推移を業種別に調べると、この20年ほどで全年金給付額はほぼ倍増しているが、増加率の高い業種は、建設業1.96倍、製造業2.04倍、運輸業2.22倍、その他の事業3.51倍となっている。各種年金給付額の多い産業はここでも建設事業である。

これらを要するに、労働災害の発生数そのものは総体として減少はしているものの、死亡災害に代表される重傷災害は大幅な減少は見られず、これか労災保険給付額、とりわけ各種労災年金給付額の増大を招いて

いると言うのが労災保険から見た労働災害の特徴である

労働災害の中でも死亡災害は、本人はもとより残された家族ならびに事業者にとっても悲惨な災害であるが、労災保険という社会が負担する費用という観点からみた場合でも大きな重荷となっている

従って、労働災害リスクを低減させるためには、たんに発生数を減少させる対策ばかりでなく、災害による被害の大きさ、強度を低減させる対策についても検討することが重要であり、次章でこのことをリスク分析により検討する

## B-2 労働災害のリスク（頻度－強度）分析

災害リスクの定義には、被害そのもの、災害の頻度、災害による被害の大きさ、災害の頻度と被害の大きさを掛け合わせた期待被害値などさまざまなものがある。リスク分析・マネジメントの分野では、期待被害値に代表される、災害発生頻度と被害とを同時に考慮する定義が多く用いられている。前出の災害資料、例えば死亡災害の推移についても、死亡災害という被害強度を特定した災害の頻度と考えれば、頻度と強度の同時分析を行うリスク分析の範疇として捉えられない訳ではないが、分析範囲は限定的である。ここでは、より一般的な災害頻度－被害強度解析を労働災害に適用することを試みる

### 1) 被害強度を考慮した発生時間数分布

発生頻度－強度解析を労働災害に適用するためには、まず、労働災害の発生頻度分布と発生した災害による被害の分布を調べなければならない

労働災害の発生頻度に関しては、これまでの多くの災害統計調査・分析結果から、ある期間内での災害発生数の確率分布は近似的にポアソン分布で表現でき、また、発生した災害による被災者の人数や労働損失日数などの被害の大きさはパレート分布で記述できることが明らかにされている<sup>3,4,5)</sup>

そこで、これらの知見をもとに、災害による被害強度を考慮した発生頻度分布を以下の手順によって求める。

まず、一定期間中の災害発生数の確率分布がポアソン分布であることは、個々の労働災害事象が発生するまでの時間（間隔）分布が指数分布であることと同じである。また、それぞれの災害事象が発生するまでの時間（間隔）分布が指数分布であるならば、複数件の災害が発生するまでの時間分布は、指数分布の和の分布であるガンマ分布に従うことが示される。指数およびガンマ分布の確率密度関数は以下の式で与えられる

$$f_1(t) = \lambda \exp\{-\lambda t\} \quad (1)$$

$$E_1(t) = 1/\lambda \quad V_1(t) = 1/\lambda^2 \quad (2)$$

$$f_k(t) = \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} \lambda \exp\{-\lambda t\} \quad (3)$$

$$E_k(t) = k/\lambda \quad V_k(t) = k/\lambda^2 \quad (4)$$

一方、ひとつの労働災害における被害規模（被災者数）の分布は、パレート分布に従うと仮定する。すると、ある労働災害が起これば、その（基準化した）被害が  $h$  以上である確率（上側確率分布関数）は次式で与えられる<sup>5)</sup>。式中の  $n$  は分布のパラメータである

$$R(h) = h^{-n} \quad (5)$$

従って、モデルとしては Fig 4 に示すように、時間軸上において、平均発生間隔が  $1/\lambda$ （又は単位時間当りの平均発生数が  $\lambda$ ）の割合で災害が発生し、かつ災害ごとに強度  $n$ （被害分布のパラメータを与える）のパレート分布に従って被災者が発生している事象を考えればよいことになる。同図において、ある時点で  $k$  人の負傷者を有した災害（以降  $k$  人災害と略称する）が発生し、次の  $k$  人災害までの時間数を  $t_k$  と書くと、災害による被害規模を考慮した発生時間数を求めることは、この  $t_k$  の分布を考えるこ

とと同じである。解析的には  $t_k$  の分布を以下の手順で求めることが出来る。

まず、ある災害が発生して、それか  $k$  人災害である確率を  $r$  とする。また、同図に示される、災害が発生するそれぞれの事象を統計的試行と見なせば、ある  $k$  人災害が起こったあと次の  $k$  人災害が起こるまでの試行回数  $x$  は、それぞれの試行が独立であることから、次式の幾何分布に従うことが導かれる。

$$P(x) = r(1-r)^{x-1} \quad x=1,2, \quad (6)$$

さらに、事象が発生するまでの時間分布は  $x=1$  のときは(1)式の指数分布により、また  $x \geq 2$  のときは(3)式のガンマ分布で与えられる。従って、 $t_k$  の分布は、 $k$  人災害が起こるまでの試行回数  $x$  の確率  $P(x)$  と、そのときの時間数分布の確率密度との積を求め、これを  $x$  について  $1 \sim \infty$  まで合計すれば求めることが出来る。

$$\begin{aligned} g_k(t) &= \sum_{x=1}^{\infty} r(1-r)^{x-1} \times \frac{(\lambda t)^{x-1}}{(x-1)!} \lambda \exp\{-\lambda t\} \\ &= \lambda r \exp\{-\lambda t\} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\{(1-r)\lambda t\}^{x-1}}{(x-1)!} \\ &= \lambda r \exp\{-\lambda t\} \exp\{(1-r)\lambda t\} \\ &= \lambda r \exp\{-\lambda r t\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$E_k(t) = 1/(\lambda r) \quad V_k(t) = 1/(\lambda r)^2 \quad (8)$$

かくして、被害規模を考慮した災害発生時間数の分布は、事象全体の発生頻度パラメータと被害規模の確率との積を新たなパラメータとした指数分布となっていることが分かる。(7)式において全被害を対象とすれば  $r=1$  となるので同式は(1)式と一致する。

同様に、災害の被害強度を考慮した発生頻度分布も、災害事象全体の発生頻度パラメータと被害規模の確率との積を新たなパラメータとしたポアソン分布となることが示される。

## 2) 被害強度と発生頻度の同時分析による考察

前節において、災害の被害強度を考慮した発生時間数および頻度分布を導出した。ここで、ポアソン分布の発生頻度パラメータを  $\lambda$  とし、また、基準化した被害規模  $h$  の分布のパラメータを  $n$  とする。すると、一定期間 ( $t$ ) 内における特定被害規模  $h$  以上の災害発生頻度分布は次のポアソン分布式となることが前節で得られた知見から示される。

$$P(x) = \frac{(\lambda h^{-n} t)^x}{x!} \exp\{-\lambda h^{-n} t\} \quad (9)$$

$$E(X) = \lambda h^{-n} t \quad (10)$$

ここで重要なことは、災害そのものの発生頻度パラメータ  $\lambda$  と被害規模が  $h$  以上の確率との積  $\lambda h^{-n}$  が、リスク分析の基礎である期待被害値  $E(X)$  を構成していると同時に、分布式全体のパラメータを構成していることである。すなわち、同式を用いて発生数(頻度)とその被害規模を考慮した災害分析を行い、災害対策の効果を評価するとき、災害そのものの発生防止に関する効果は発生頻度パラメータ  $\lambda$  で評価され、また被害低減の効果は被害規模パラメータ  $n$  で評価される。被害規模パラメータ  $n$  は大きくなるほど大規模災害となる確率は小さくなるので、その値が増加すれば被害低減効果があったことを示し、一方、発生頻度パラメータ  $\lambda$  は小さくなるほど災害の発生確率が少なくなるので、その値が減少すれば発生防止に効果があったことを示す。かくして、両パラメータの同時分析か、発生防止ならびに被害拡大防止に関する全体の効果を評価することとなる。

上式において  $h=1.0$  とおくと、これは基準化した被害値以上の総ての災害、すなわち全災害を対象とすることに他ならず、そこでの評価はたんに災害発生頻度パラメータ  $\lambda$  の変動を調べることに帰着する。

災害発生頻度とその被害規模との関係を調べるために、ここでは、例えば、 $t=10$  (単位期間)、 $\lambda h^n=10$ 、 $h=20$ とする。すなわち、単位期間内に $h=20$ 以上の災害が平均して1回発生するポアソン過程を有するシステムを考える。同システムで単位期間内に災害が発生しない確率は $P(0)=0.368$ 、逆に言えば1回以上発生する確率は0.632である。さてこのとき、当該システムの被害規模パラメータ $n$ が3.0から4.0へ変化したとき、 $\lambda = h^n$ であるので $\lambda$ は8.0から16.0となる。つまり、 $n$ が3.0から4.0へ変化(改善)した場合には、仮に災害発生率が2倍になったとしても、 $h=20$ 以上の災害の起こり方はこれまでと同じになる。この逆もまた成立する。すなわち、災害発生率が16.0から8.0と1/2に改善された場合、被害規模パラメータが4.0から3.0へと悪化しても全体としては同一リスクの状態にある。

この関係は被害規模が大きい災害でも同様である。例えば $h=50$ 以上の災害について、 $n$ を3.0から4.0へ改善することは、災害発生率 $\lambda$ を625.0から125.0へと1/5減少させることと同値である。このように被害パラメータ $n$ の変動と、発生頻度パラメータ $\lambda$ の変化によって当該システムのリスクレベルが定まることとなる。この関係をFig 5に示した。

問題は、従って、災害によるリスク全体を低減させるための方策として、災害発生防止の対策と被害低減の対策をとるのようによりバランスさせるかにある。

たとえば地震や台風のように、発生そのものを抑制出来ない現象によって生ずる災害に対しては、被害低減対策に努力を傾注するしか手だては無い。

一方、産業活動に伴う機械的・人為的行為によって発生するのが産業災害であり、また、その代表的な災害モードのひとつが労働災害であり、それらはいくまでも人間が行う営為によって結果として生ずることから、その対策には災害発生防止対策と被害低減対策の両者が求められことになる。

ところで、Fig 6は、我が国の建設工事に

おいて発生した身体障害を伴った労働災害について、障害等級に応じて付与された労働損失日数(災害強度)とその発生頻度(超過累積頻度)との関係を、1975年度~1996年度までの期間について年度別に調べた結果である。同図から、労働損失日数の大きさとその発生頻度との関係はおおむね両対数紙上の直線として表現でき、労働災害による被害規模の分布が近似的にパレート分布で記述されること、及び災害発生数は年度によって異なるものの、その障害程度(強度)の分布形状は、年による変動は殆ど無いことが分かる。

つまり、この間における被害強度に関する改善の程度はほぼ一定であったと言ってよい。既に、前章で示したように、労働災害の発生状況は、新規災害保険受給者(発生数)が大幅に減少しているのに比して死亡災害はそれほどの減少がみられない状況にある。要するに、我が国の労働災害リスク対策は、もっぱら災害防止対策に傾注されてきており、それなりの効果を挙げてはきたものの、被害低減対策では目立った改善は見られなかったと言えよう。このことが、労災保険の給付区分では年金部分(死亡等の障害程度が高い災害に対する給付)が年々増加し、最近では5割近くを占めるに至り労災保険制度存立そのものを脅かしている原因でもある。

### 3) 災害被害規模リスク統計的評価

労働災害による被害規模(例 一つの災害による被災者数、或いは労働損失日数など)の確率分布は、(5)式のパレート分布で示される。同式のパラメータ $n$ は、事業場での安全性を評価する際の定量的な指標として重要な役割を果たすこと知られている<sup>6)</sup>。同式で表現される災害による被害リスクの確率・統計的評価のために最も広く利用されている被害リスク評価値は、次式で示される被害分布の統計的期待値である。

$$E(h) = \frac{n}{(n-1)} \quad (11)$$

同式より、被害リスク評価値  $E(h)$  は  $n$  が1に近づく程大きくなり、逆に  $n$  が1よりも大きくなる程小さくなることか示される。すなわち、被害分布パラメータ  $n$  の大小関係が被害評価値の大小関係を規定すると考えてよい。

ここで被害規模分布のパラメータが  $n$  から  $n'$  に変化したとき、変化したあとの被害評価値は(11)式の  $n$  を  $n'$  に置き換えればよい。従って、パラメータ変化による被害評価値の変化の程度は、それぞれのパラメータの下での被害リスク評価値の比を求めればよく、結果は次式で与えられる。

$$R = \frac{(n'/(n'-1))}{(n/(n-1))} \quad (12)$$

ここで、 $R$ 、パラメータが  $n$  から  $n'$  変化したことによるリスク評価値の変化の度合い。逆に、 $n$  の下での被害評価値をある値  $R$  低減するためには、 $n'$  は下式で与えられる条件を満足しなければならない。

$$n' \geq \frac{R \left( \frac{n}{n-1} \right)}{R \left( \frac{n}{n-1} \right) - 1} \quad (13)$$

Fig 7 は  $n$  と  $n'$  との関係をいくつかの  $R$  について計算した結果を示したものである。同図から、例えば、元の  $n$  が30のとき、 $R=0.90$  (被害評価値が10%低減すること) になるためには  $n'$  は386以上でなければならない。同しく  $R=0.80$  のときは  $n' \geq 60$  でなければならない。  $R=0.75$  のときは  $n' \geq 90$  でなければならない。このように、被害リスク評価値をある目標値に向かって低減させるためには、被害規模分布のパラメータをどの程度変化させるべきかの値を定めることができる。

このようにして、リスク対策として、発

生防止対策と被害低減対策のバランスに関する重要な情報が与えられる。

## C 研究結果

産業災害のうちの代表的災害である労働災害について、いくつかの資料を基に調査しその現状を明らかにするとともに、リスク分析の基本である災害発生頻度と被害規模の同時解析手法を用いて分析し、労働災害リスク対応についての問題点を考察した。それらをまとめると以下のようなものである。

- (1) 労働災害は、1980年度では110万人であったものが、2001年度では60万人と、この20年で45%ほど発生数は減少している。
- (2) 産業別の減少割合には差があり、鉱業、林業、建設業での減少が大きく、その他の事業（サービス産業が中心）には変化が見られない。建設業は1980年度の22万4千人から2000年度の6万7千人と70%近く減少し、産業別の発生割合も20%から11%へと減少している。
- (3) 一方、死亡災害は、全産業では1980年の3,009人から2000年では1,889人へと37%減少している。建設死亡災害は全産業の40%以上を占め、かつ過去20年間は毎年1,000人前後で推移し、ようやく1997年度に至って1,000人以下となっている。
- (4) 他方、労災保険の給付金額は各産業とも軒並み増加しており、とくにその他の事業（第三次産業が中心）の増加が著しい。給付総額は1980年度の5,700億円から2000年度の8,200億円へと40%以上増加し、そのうち建設業は2,000億円から2,700億円へと35%増加している。
- (5) 労災保険給付額増大の主たる原因は年金給付の増加である。1981年度では給付額の1/3が年金給付であったが、年々増加を続け、近年ではその5割近くに及び、給付額では1980年度に比して2倍に達している。



- (6) 被害規模を考慮した災害発生時間数の分布は、事象全体の発生頻度パラメータと被害規模の確率との積を新たなパラメータとした指数分布となる。同様に、災害の被害強度を考慮した発生頻度分布も、事象全体の発生頻度パラメータと被害規模の確率との積を新たなパラメータとしたポアソン分布で示される
- (7) 災害発生頻度とその被害規模を考慮した分布式を用いて災害分析を行い、災害対策の効果を評価するとき、災害発生防止に関する効果は発生頻度（ポアソン分布）パラメータ $\lambda$ の変化で評価され、また被害低減の効果は被害規模（パレート分布）パラメータ $n$ の変化で評価される
- (8) 災害による被害（規模）そのものの評価値についても、パレート分布のパラメータ $n$ の変化で評価することができる
- (9) 労働災害に対する発生防止の努力はそれなりの効果をあげ発生数の低減につながっている。しかし、発生した災害による被害の低減対策の効果については目立った改善が見られていない。これが労災保険年金給付額、とりわけ年金給付額の増大につながっている
- (10) 労働災害リスクの低減は、災害発生防止対策と災害による被害低減対策のバランスによって成される。これまでの努力は災害発生防止に傾注されており、今後は被害拡大防止の努力をより重要視すべきである
- (11) 労働災害の発生防止および被害低減のためにどの程度の費用、資源の投入がなされ、かつその効果について検証された事例は少なく、費用-効果分析は今後の重要な課題である

## D 考察

労働災害の発生数は産業別に差異はあるものの総体として減少はしている。一方、

死亡災害に代表される重傷災害は大幅な減少は見られず、障害災害の被害規模（労働損失日数）の発生パターンには変化かみられない。災害リスクは災害の発生頻度と被害規模の積で表される。

産業災害の発生頻度と災害による被害規模の同時に表す確率分布として、発生頻度分布および被害規模分布のパラメータとの積を新たなパラメータとするポアソン分布でリスク分析を行えることを示した。

## E 結論

労働災害の発生数そのものは総体として減少はしているものの、死亡災害に代表される重傷災害は大幅な減少は見られず、これが労災保険給付額、とりわけ各種労災年金給付額の増大を招いている。

産業災害のリスク解析手法として、災害の発生頻度と災害による被害規模の同時分析法を採用し、発生頻度分布および被害規模分布のそれぞれのパラメータの変動を調べることにより、災害発生対策の効果と被害防止対策の効果を評価できることを示した。

## F 健康危険情報

なし

## G 研究発表

### 1 論文発表

- 1) 花安繁郎、関根和喜 統計学的アプローチによる産業災害のリスクマネージメントに関する研究, 構造物の安全性・信頼性, Vol 5, pp.255-260, 2003

### 2 学会発表

- 1) 花安繁郎、関根和喜 Basic Understanding and Interpretation of Risk and its Application to Risk Analysis Methodology, 第 10 回信頼性設計技術ワークショップ ノブ報告書, in print, 2003
- 2) 花安繁郎、関根和喜 リスク表現法としてのリスク曲線の特性に関する研究, 第 58 回土木

学会年次学術講演会, pp 353-358、2003

- 3) S Hanayasu, K Sekine Statistical Damage Modeling and Analysis of Industrial Accidents and its Application to Industrial Safety Problems Proceedings of the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probabilistic in Civil Engineering (ICASP9), pp 353-358、2003
- 4) 花安繁郎 統計学的アプローチによる産業災害のリスクマネージメント, 機械学会関西支部第79回定期総会基調講演, 2003

H 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

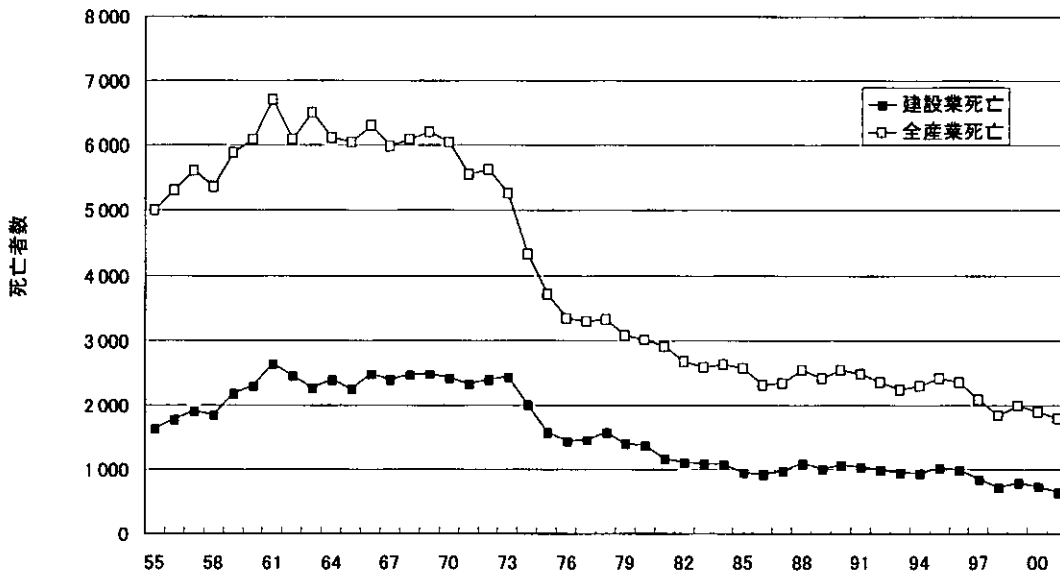


Fig 1 Year trend of fatal accidents in construction industry and whole industry in Japan

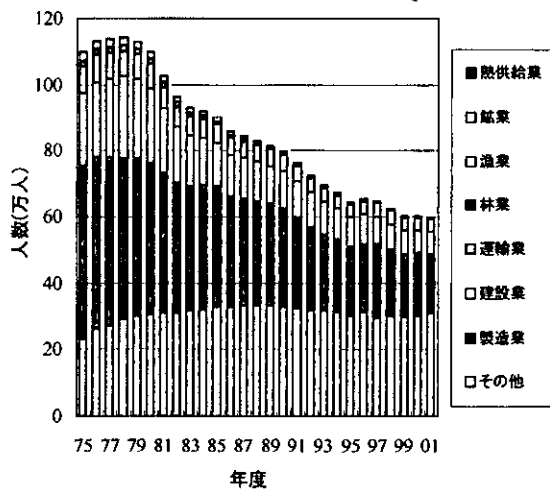


Fig 2 Number of newcomers accident insurance compensated

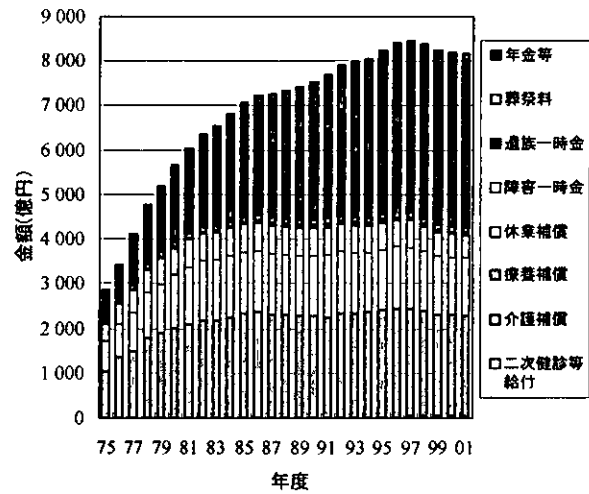


Fig 3 Amount of accident insurance costs compensated

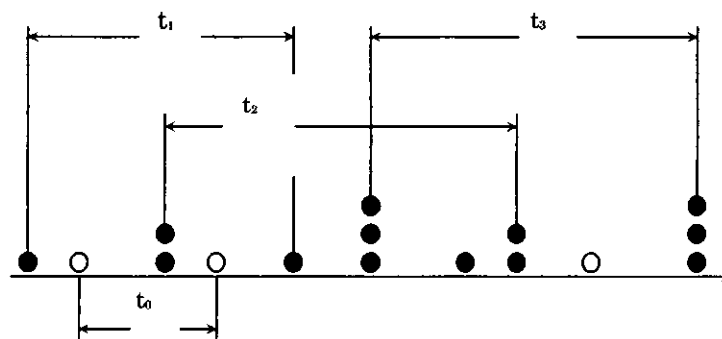


Fig 4 Time intervals between accidents considering damage magnitude of accidents

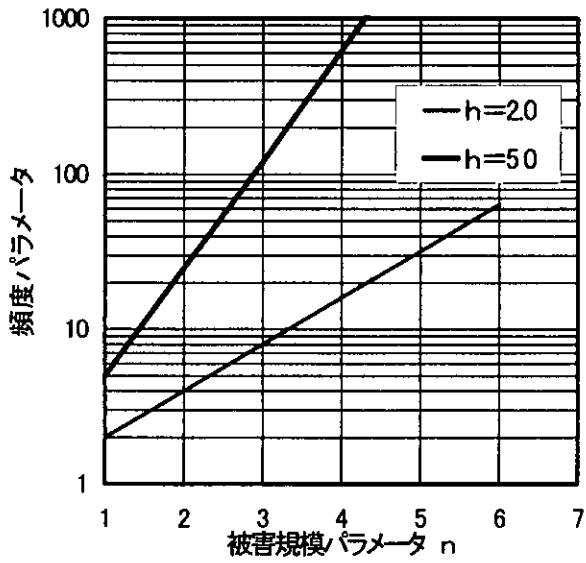


Fig 5 Relation between frequency and damage parameters

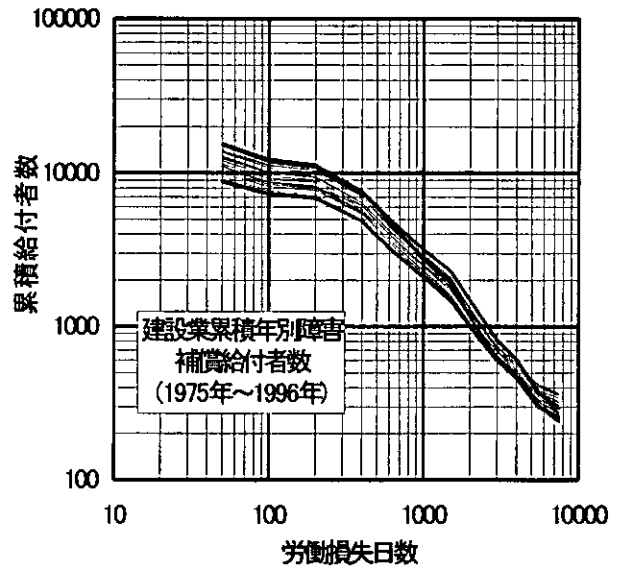


Fig 6 Frequency Magnitude curve of labor accidents

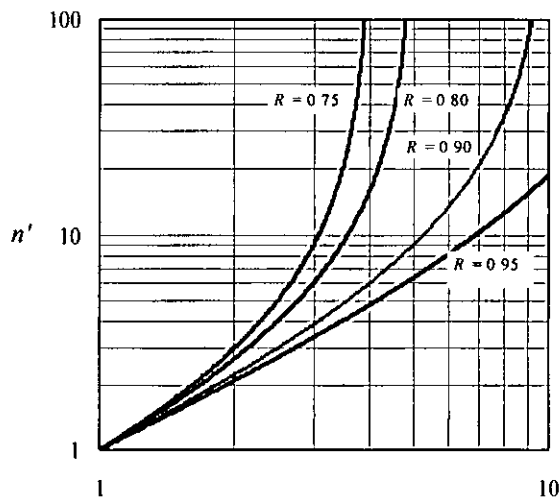


Fig 7 Relation between damage reduction rate and parameter