

## 災害発生時間による安全水準の評価について

AN EVALUATION OF SAFETY LEVEL ANALYZING  
THE PERIODS OF OCCUPATIONAL ACCIDENTS

花 安 繁 郎\*

By Shigeo HANAYASU

### 1. まえがき

戦後の復興、あるいは昭和30年以降の経済成長の基礎となり、かつ現在の不況下においては、不況対策としてその主翼を担っている建設業は、わが国経済の拡大とともに、工事の大型化、工期の短縮化、省力化など設計、施工の両面にわたって、質的にも量的にも大きく躍進、発展を遂げてきた。しかしながら一方において、建設業のこれらの発展の陰に、悲惨な労働災害により多くの労働者の生命が傷つき、失われたことを忘れるわけにはいかない。とりわけ建設工事における労働災害は、毎年発生する労働災害の3割、特に死亡災害では4割以上もの多くを占めており、また災害度数率（以下、度数率という）、強度率など、災害に関するどの指標も高い値を示していることはよく知られているとおりである<sup>1)</sup>。

建設工事における労働災害が高率かつ重篤である背景として、建設業が有するいくつかの特異性をあげると<sup>2)</sup>、  
 1) 生産場所は受注に応じて移動し、作業は屋外での業務が多く、構築物の多様性と、自然条件の影響を受けることなどから、作業条件が複雑かつ危険なことが多い。  
 2) 近年の大型工事には機械力の大幅な導入がみられるものの、依然として建設業は労働力集約型産業であり、多くの労働力を必要とする。  
 3) 労務供給、労務管理上の効率化のために、重層下請制度の導入がなされ、元請企業は設計、施工計画、施工管理業務のみに携わり、直接の作業は下請、孫請などによって実施され、また労務供給にも零細な企業が労働者を集めてくるケースが多く、管理が末端まで徹底していく場合がある。  
 4) 工事量の増大による労働力の不足は、季節労働者（出稼ぎ）や日雇い労働者などの未熟練、非技能工に労働力を頼る結果を招いている。  
 5) 受注産業であることから、発注者と受注者との間の双務関係がゆがめられ、工期、工費

などに片務的な場合が存在する。

以上のごとく、建設業はその生産様式、作業条件および作業環境、雇用形態などが他産業に比べて大きく異なっているので、労働災害防止に関する安全計画・管理についても、それぞれの工事における現場の独自性に依存せざるを得ないことが多く、統一的な安全管理法を確立し、実施することが困難な状況にある。したがって、さまざまな安全管理法についてその効果を評価することは難しく、また事業所における安全水準の評価についても、現在のところ度数率\*\*、強度率\*\*\*による評価以外有効な評価法は確立されていない。

本研究は、労働災害が発生するまでの時間を確率的に検討し、災害発生時間用いて事業所等での安全水準、ないしは災害危険性の評価を行う方法について論じたものである。従来の安全水準の評価は、度数率のように単位時間当りの発生数を基本とした評価であるが、今回着目した災害発生時間によっても評価が可能であり、かついくつかの利点を有していることを本論で明らかにした。

これまでに、災害発生時間用いて安全水準評価への応用を試みた研究には、災害発生時間用いて、災害発生率の推定や、異なる時期、事業所間の災害発生率の差異の検定を、指數分布をはじめいくつかの確率分布を用いて検討した Wynn らの研究がある<sup>3)</sup>。Wynn らの研究では、度数率とは無関係に発生時間の応用を考えられているが、ここでは、災害発生時間と度数率とを関連づけることによって、従来の安全水準評価法とも整合性をもたせるように配慮したうえで、災害発生時間による評価法を考え、度数率の変動の有意差検定、度数率が変動する区間の確率値、および信頼区間の推定につい

\*\* 1000 000 労働時間当りの災害発生数で示される 災害発生頻度指標

\*\*\* 1000 労働時間当りの労働損失日数で示される 災害強度指標

て検討した。さらに、複数個の集団全体に関する災害発生時間の分布特性についても討議を加えた。

## 2. 災害発生時間の確率分布式

実際に発生した労働災害について、その発生時間分布を調査、分析した例は、前述の Wynn らが英国の炭坑災害を分析した例を除きほとんど見当らない。したがって、なんらかの方法でその分布を推定しなければならないが、ここでは問題を簡単にするために、災害はその発生確率がどの時間帯も等しく、かつ相互に独立して発生するランダムな事象であると仮定する。この仮定のもとでは、災害のように比較的まれにしか起こらない事象の一定期間中の発生数の分布はポアソン分布に従い、また個々の災害発生間隔の分布は負の指數分布となることが知られている<sup>4), 6)</sup>。さらにポアソン分布と指數分布とは、同一事象を発生件数からみた場合と、発生時間からみた場合とに観点を変えて記述したものであるから、ある事象が一方の分布式を満足していれば、他方の分布式も同時に満足していることも知られている。ポアソン分布および指數分布（密度関数）の一般式は以下の各式で示される。

$$\left. \begin{aligned} P(x) &= \frac{(\lambda T)^x}{x!} e^{-\lambda T} = \frac{m^x}{x!} e^{-m} \\ E(x) &= m, V(x) = m \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \\ E_1(t) &= 1/\lambda, V_1(t) = 1/\lambda^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

そこで実際の災害が式(1)または式(2)を満足しているかを調べるわけであるが、まず、建設業、非建設業、および全産業の各産業ごとに、1日当りの災害発生数の分布を、昭和48年東京都で発生した死亡災害を例に調べたのが図-1であり（図中の棒グラフは実測値、実線はポアソン分布のあてはめ）、また同じく、トンネル工事、橋梁工事、道路工事など、土木工事における各業種別の1日当りの災害発生数の分布を、昭和52年発生の死亡災害（全国統計）によって調べたのが図-2である。これらの図から、産業別、あるいは各業種別での

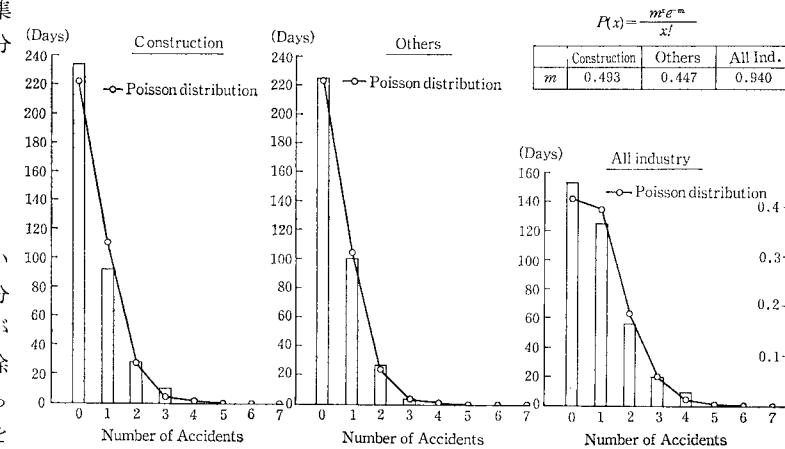


図-1 産業別死亡災害発生数分布（1973年東京都）

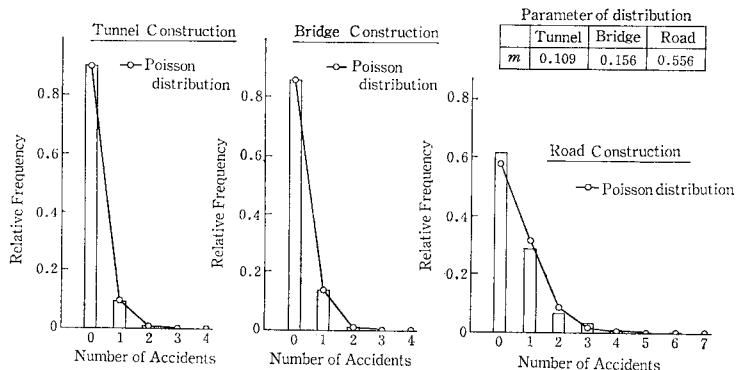


図-2 業種別死亡災害発生数分布（1977年全国）

災害発生数の分布はほぼポアソン分布となることが示され、産業別、業種別レベルでの災害発生がランダムであることが認められる。次に事業所レベルでの災害の発生過程については、前述の Wynn らが行った炭坑災害（鉱区内での労災保険給付災害）の発生間隔が近似的に指數分布であった調査例<sup>3)</sup>を除くとほとんど見当たらず、今後の多数の実態調査を待たなければならないが、筆者がこれまでに調べた例として、山陽新幹線六甲トンネルにおいて発生した労働災害の発生間隔の分布を図-3に示した。六甲トンネルは全長 16.250 km の長大トンネルで、山岳トンネルとしては現在日本で最も長いトンネルである。同トンネルは全長を 7 工区（事業所）に分割して施工され、施工工期は昭和 42 年 3 月着工から 46 年 9 月竣工まで 4 年 7 か月、全工区延月数にして約 250 か月にも及んだ<sup>5)</sup>。労働災害の資料には、各事業所より所轄労働基準監督署に報告された労働者死傷病報告を用いた。同資料によると、工事中に発生した労働災害は、全工区で 510 件（うち死亡 16 件）であった。図-3 は施工距離、工期、掘削工法、運搬システムなどの工事諸元がほぼ同一条件の 2 つの工区（事業所）での

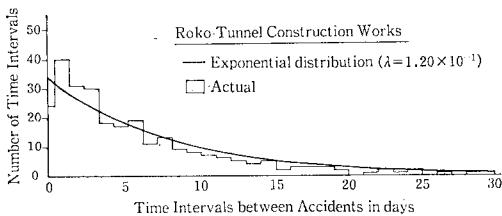


図-3 事業所での災害発生間隔の分布

災害発生間隔の分布を調べたものである。同図から、これらの事業所における災害発生間隔の分布が、比較的指数分布に近い性状を示していることがわかる。したがって、ここでは実用的な観点から、Wynn らの報告と同じく、事業所における災害発生間隔の分布が、近似的ではあるが指數分布に従うとして、以下論議を進めることとする。また、このことは、以下に述べることからも、ある程度妥当なものと考えられる。すなわち、

(1) 災害の発生頻度を示す指標の度数率などは、たとえば 100 万労働時間というかなり長期の時間数を単位として用いなければならないように、災害はまれにしか生起しない事象であること。

(2) 作業環境、安全施設などが十分整備された近年の作業所においては、災害要因の発生およびそれらに基づく災害の発生は、かなり偶然性に左右されるケースが多いと考えられる。

さて、個々の災害が発生する時間分布が指數分布とすると、複数個の  $k$  件の災害が発生するまでの時間  $T$  の分布は、指數分布の和の分布であるガンマ分布で与えられる<sup>6), 7)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} f_k(T) &= \frac{(\lambda T)^{k-1}}{(k-1)!} \lambda e^{-\lambda T} \\ E_k(T) &= k/\lambda, V_k(T) = k/\lambda^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらの分布の確率値と応用については次章で述べる。

### 3. 災害発生時間による安全水準の評価

個々の災害、あるいはより一般的な複数個の災害が発生する時間分布の確率密度関数がそれぞれ式(2)、(3)で与えられていて、災害発生時間による確率的評価を行うには、これらの式を発生時間で積分すればよい。

ところで、指數分布、ガンマ分布はともに  $\lambda$  をパラメーターとした関数式で表現されており、確率値を計算するうえで、この  $\lambda$  の決定が重要な問題となってくる。

ここではこの  $\lambda$  を、実際の災害より計算

される災害度数率 (Accident frequency rate : 以下、  $A$  と略記する) と、以下のように関連づけた。まず、度数率とは災害の発生頻度を表す指標のことである。

$$\text{度数率 } (A) = \frac{\text{災害発生件数}}{\text{延労働時間数}} \times 1000000$$

で示される、100 万労働時間当たりの災害件数であり、一方、式(2)より  $\lambda$  は平均災害発生時間の逆数であるので、単位を万時間として、 $\lambda$  と  $A$  は次式で関係づけられる。

$$\lambda = \frac{A}{100} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

この度数率の値については、毎年各産業別、業種別の調査結果が公表されている<sup>1)</sup>。図-4 には、式(3)による密度関数の値を、度数率  $A=20.0$  として、災害件数  $K=1 \sim 10$  まで求めた結果を示した。また、式(2)を積分し式(4)を代入すると、ある度数率  $A$  に対して、時間  $t$  以内で災害が発生する確率、および発生時間が少なくとも  $t$  時間以上である確率が、それぞれ式(5)、(6)で示される。

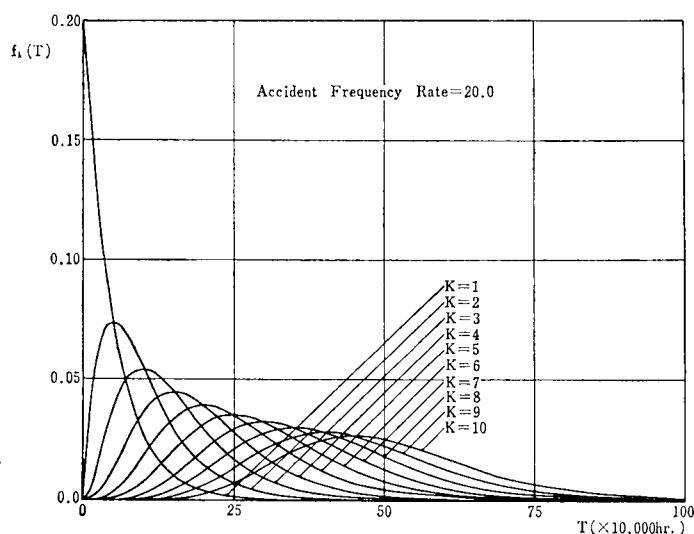
$$F_1(t) = \int_0^t f_1(t) dt = 1 - e^{-\frac{A}{100} t} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$R_1(t) = \int_t^\infty f_1(t) dt = 1 - F_1(t) = e^{-\frac{A}{100} t} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

同様に、 $k$  件の災害がある時間  $T$  までに発生する確率、および少なくとも  $T$  時間以上である確率として、式(7)、(8)が得られる。

$$F_k(T) = \int_0^T f_k(T) dT = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(\frac{A}{100} T\right)^i}{i!} e^{-\frac{A}{100} T} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$R_k(T) = \int_T^\infty f_k(T) dT = 1 - F_k(T) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

図-4 ガンマ分布確率密度関数 ( $A=20.0, K=1 \sim 10$ )

$$= \sum_{i=0}^{k-1} \left( \frac{A}{100} T \right)^i \frac{e^{-\frac{A}{100} T}}{i!} \dots \quad (8)$$

したがって、産業別、業種別、あるいは事業所なりの度数率がわかれば、上記の各式によって、ある時間内の災害の発生、非発生確率を求めることができる。図-5には、式(8)による災害発生時間が  $T$  時間以上である確率を、災害件数を  $K=5$  として、度数率を  $A=1.0 \sim 40.0$  の範囲で変化させ、 $T=0 \sim 100$  万時間まで求めた結果を示した。また逆に、度数率を  $A=5.0$  と固定させ、災害件数が  $K=1 \sim 12$  のときの、同じく式(8)による計算結果を図-6に示した。

これらの図に示されるごとく、任意の災害件数と度数率の組合せに対して、災害発生時間の確率値が求められるので、災害の発生した時間がわかれば、そのときの確率値をもとに、事業所等における安全水準の評価が可能

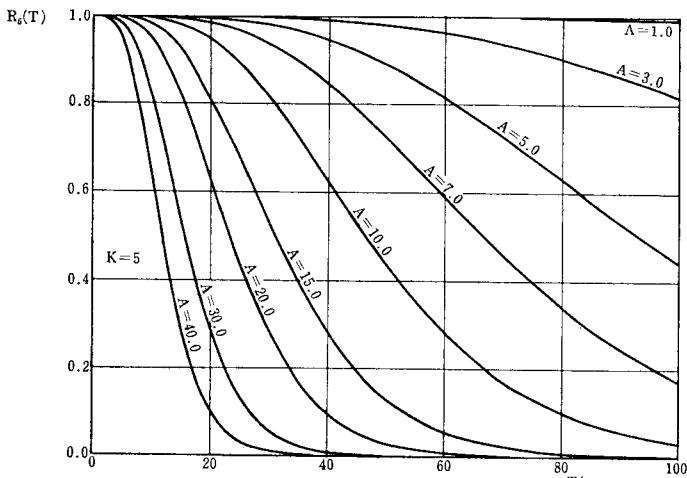


図-5 ガンマ分布確率分布関数 ( $K=5, A=1.0 \sim 40.0$ )

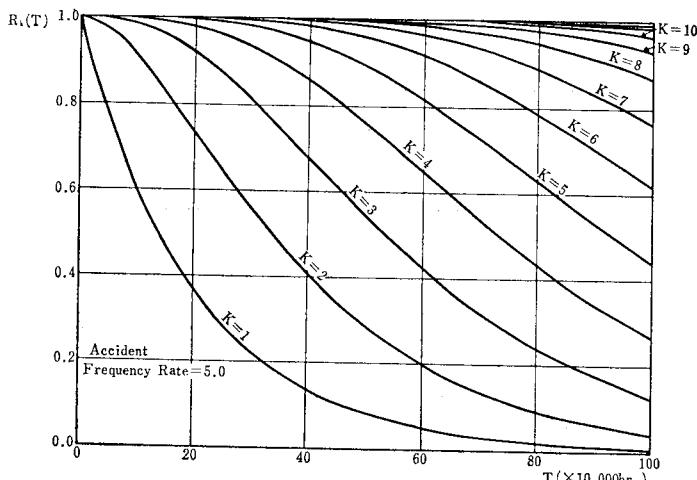


図-6 ガンマ分布確率分布関数 ( $A=5.0, K=1 \sim 12$ )

となる。たとえば、 $K=1$  の場合の式(6)は、災害発生間隔がある時間以上の確率を与えてるので、ある時間災害が発生しないいわゆる無災害時間を評価するのに有用である。そこで、式(6)の確率値  $R_1(t)$  の具体的な値に対する  $A$  と  $t$  の関係を調べたのが図-7である。

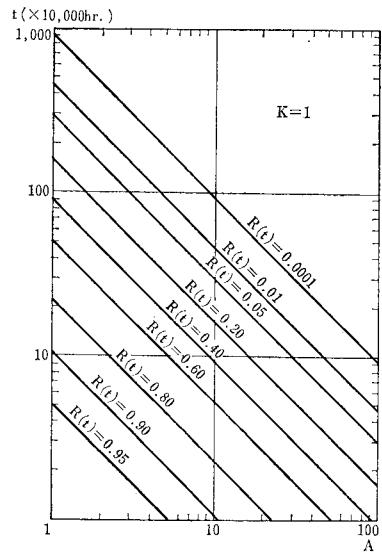


図-7  $R_1(t) \sim t \sim A$  の関係 ( $K=1$ )

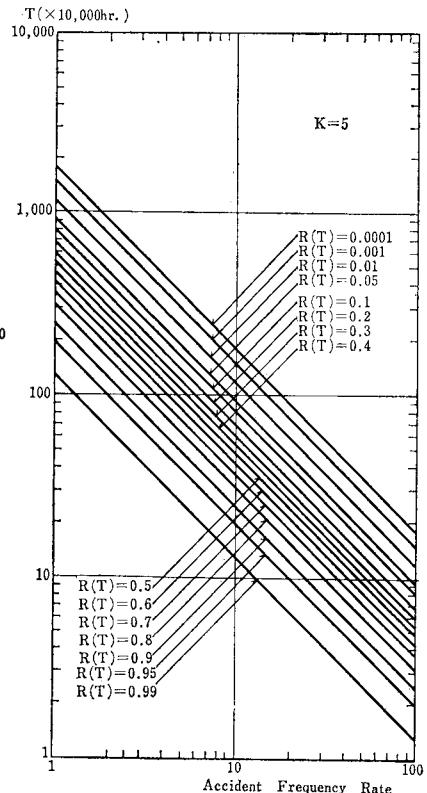
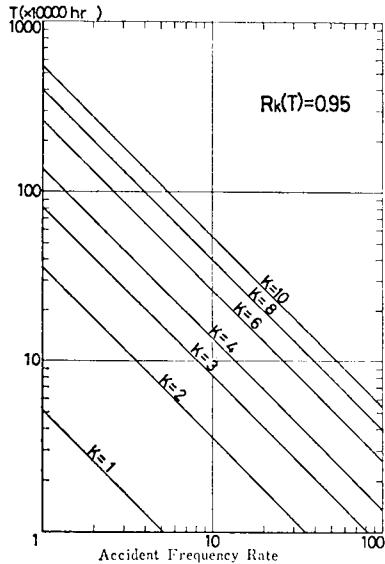
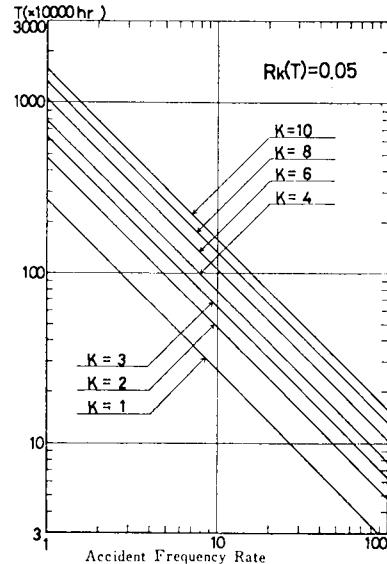


図-8  $R_s(T) \sim T \sim A$  の関係 ( $K=5$ )

図-9  $T\text{-}A$  曲線 (下側 5%)図-10  $T\text{-}A$  曲線 (上側 5%)

同図より、無災害時間数の確率値を求ることや、事業所で安全管理計画立案の際に、度数率に応じた無災害目標時間数を設定することができる。同様に複数個の災害に対して  $R_k(T)$ ,  $T$ ,  $A$  の関係を式(8)から求めることができ、図-8には、災害件数  $K=5$  のときの結算結果を示した。これら図-7 や図-8 に示される  $R_k(T)$ ,  $T$ ,  $A$  の関係を各災害件数ごとに求めておけば、災害件数に応じた発生時間が与えられたとき、それらの図あるいは表(略)によって確率値を求めることができ、さらにその確率値をもとに、当初考えていた度数率が有意に変動しているか否かを、統計的に検定することができる。いま、仮に検定水準の危険率を 10%としたときの、度数率が  $A=1.0 \sim 100.0$ までの範囲に対する災害発生時間を、災害件数  $K=1 \sim 10$ まで求めたのが図-9(下側 5%)および図-10(上側 5%)である。もし各災害件数の発生時間が、図-9で示される度数率に対応した時間数よりも小さければ(図中の直線より下側のとき)、災害発生時点における度数率は、当初の度数率に比べ有意に増加しているといえ、逆に図-10で示される時間数よりも大きければ(図中の直線より上側の場合)、その時点での度数率は、当初の度数率より有意に減少していると統計的に判断することができる。

建設工事では一般に、作業環境や作業形態のそれぞれ異なる工程の連続的な過程を通して 1 つの製品が完成されてゆく。したがって、工程の進捗に応じて、災害発生危険性も同時に変動してゆくことは十分に考えられる。この工程の進行に連動した災害危険性の変動を、より早く評価する手段として、上述した災害危険性を度数率という尺度で表現して、災害発生時間数を用いて度数

率の変動を検定するという評価法は、発生時間が災害に関する情報の中でも比較的わかりやすい情報でもあるので、1 つの有効な方法と考えられる。なお、実際に事業所で度数率の変動の有意差検定を行うにあたって、当初想定すべき度数率(パラメーター値)には、現在各業種別の調査結果が毎年公表されているので、その値を用いるのが適当と思われる。

#### 4. 複数個の集団全体の災害発生時間分布

1 つの集団(事業所)内の個々の災害および複数個災害の発生時間確率分布とその評価について、これまで検討を行ってきたが、本章では次のような問題を考える。

$n$  個の独立した集団があり、それらの集団内ではそれぞれに災害が発生しているとき、集団全体としての災害発生時間の分布はどのようになるのであろうか? これはたとえばある事業所がいくつかの独立した作業現場を有し、それぞれの作業現場内で災害が発生しているとき、事業所全体としての災害発生時間分布を求めることが同等の問題である(図-11 参照)。ただし各集団の災害はこれまでと同じくランダムに発生するものとし、また各集団はそれぞれ固有の度数率を有しているものとする。

考え方としては、まず各集団の災害発生間隔の分布を

$$f(t_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (i=1, \dots, n)$$

とし、また、ある時点を基準にして、各集団で最初に災害が発生した時間をそれぞれ  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  とおく。このとき、 $T_{\min} = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  なる時間の分布、すなわち  $n$  個の集団内で発生した災害のうち、最も早く発生した時間の分布について考える。

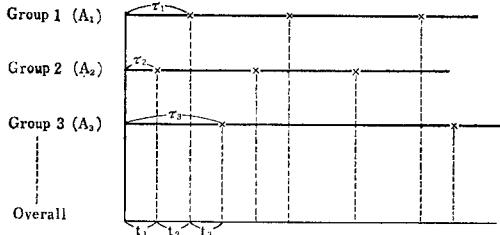


図-11 いくつかの集団の集団全体の災害発生時間の分布

まず  $n=2$  で  $\tau_1 < \tau_2$  の場合、

$$\begin{aligned} P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 < \tau_2) &= \int_t^\infty \int_{\tau_1}^\infty \lambda_1 \lambda_2 e^{-(\lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2)} d\tau_2 d\tau_1 \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \end{aligned} \quad (9)$$

また、 $n=3$  で  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$  のときは、

$$\begin{aligned} P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 < \tau_2 < \tau_3) &= \int_t^\infty \int_{\tau_1}^\infty \int_{\tau_2}^\infty \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 e^{-(\lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2 + \lambda_3 \tau_3)} d\tau_3 d\tau_2 d\tau_1 \\ &= \frac{\lambda_3 \lambda_2 \lambda_1}{\lambda_3 (\lambda_3 + \lambda_2) (\lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_1)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \end{aligned}$$

同様にして  $\tau_1 < \tau_3 < \tau_2$  のときは、

$$\begin{aligned} P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 < \tau_3 < \tau_2) &= \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_1}{\lambda_2 (\lambda_2 + \lambda_3) (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_1)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \end{aligned}$$

を得、以上を合計したものが  $n=3$  のとき  $\tau_1$  を min. とする確率分布となる。

$$\begin{aligned} P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 = T_{\min}) &= P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 < \tau_2 < \tau_3) \\ &\quad + P_r(\tau_1 > t \cap \tau_1 < \tau_3 < \tau_2) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \end{aligned} \quad (10)$$

以下、要するに、一般に集団数が  $n$  個のとき、 $\tau_j$  を min. とする確率分布は、

$$P_r(\tau_j > t \cap \tau_j = T_{\min}) = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \quad (11)$$

$\min.$  となることのできる  $\tau_j$  は全部で  $n$  通りあり、それらをすべて加えると、 $T_{\min} = \min. (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  の分布として、

$$\begin{aligned} P_r(T_{\min} > t) &= R_{\min}(t) \\ &= \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \\ &= \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

よって、

$$P_r(T_{\min} < t) = F_{\min}(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \quad (13)$$

確率密度関数は、

$$\frac{dF_{\min}(t)}{dt} = f_{\min}(t) = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \exp\left\{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right\} \quad (14)$$

以上が  $n$  個の集団が独立に災害を発生したときの、全体として最小の災害発生時間の確率分布を与えるものである。さて  $n$  個の集団内で、ある時間  $t_1$  (図-11 参照) で最初の災害が発生したとして、次の災害が起こるまでの時間  $t_2$  の分布は、最初の災害が起こった時点を新しい基準の点と考えれば、上に述べてきたことがそのまま適用でき、以下同様な繰り返しの結果、結局上記の各式は、 $n$  個の集団が独立に災害を発生しているときの、集団全体としての災害発生間隔の確率分布式であることがわかる。式 (14) は密度関数であり、式 (13) はある時間  $t$  までに災害が発生する確率を、また式 (12) は災害の発生時間が  $t$  時間以上である確率をそれぞれ与えている。

また、式 (4) より、個々の集団の  $\lambda_i$  は  $\lambda_i = A_i/100$  (ただし、 $A_i$  は集団  $i$  の度数率) とおけるので、上記の各式は、

$$f'_1(t) = S e^{-St} \quad (15)$$

$$F'_1(t) = 1 - e^{-St} \quad (16)$$

$$R'_1(t) = e^{-St} \quad (17)$$

ただし、

$$S = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{100}$$

となり、前章で示した負の指數分布とまったく同形であることがわかる。したがって各集団の度数率がわかれば、それらを合計して  $S$  を求め、 $S$  をパラメーターとした指數分布の計算を行えば、集団全体としての災害発生時間の確率値を求めることができる。また集団全体で複数個の災害の発生する時間の分布に関しても、前章同様に、

$$f_k'(T) = \frac{(ST)^{k-1}}{(k-1)!} S e^{-St} \quad (18)$$

$$F_k'(T) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(ST)^i}{i!} e^{-St} \quad (19)$$

$$R_k'(T) = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(ST)^i}{i!} e^{-St} \quad (20)$$

の各式が定義できる。これらの式による評価法は前章とまったく同様であり、グラフについても前章での  $A$  を機械的に  $S$  に置き換えればそのまま使用することができる。

## 5. 災害発生時間による度数率の推定

すでに述べたように、発生数の分布であるポアソン分

布と、発生間隔の分布である指數分布とは表裏の関係にある。度数率とは100万労働時間当りの災害数を示される、いわば発生数の分布に関連したことがらであるが、ここではこれまでの災害発生時間分布の知見を応用して、災害発生時間による度数率の推定法について検討する。

まず簡単のために  $K=1$  の場合、すなわち最初の災害が発生した時点における度数率の推定法について考える。 $K=1$  のときの災害発生時間分布の確率密度関数

$$f_1(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

において  $x^2 = 2\lambda t$  とおくと、 $\lambda dt = 1/2 dx^2$  であるから、上式は、

$$f_1(x^2) = \frac{1}{2} e^{-x^2/2} \quad \dots \dots \dots (21)$$

の自由度  $\phi=2$  の  $x^2$  分布の確率密度関数となる。したがって、

$$P_r(x_1^2 < x^2 < x_2^2) = \int_{x_1^2}^{x_2^2} f_1(x^2) dx^2 = e^{-x_1^2/2} - e^{-x_2^2/2}$$

ここで  $t$  を固定し、 $x_1^2 = 2\lambda_1 t$ ,  $x_2^2 = 2\lambda_2 t$  とおくと、

$$P_r(2\lambda_1 t < 2\lambda t < 2\lambda_2 t)$$

$$= P_r(\lambda_1 < \lambda < \lambda_2) = e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \quad \dots \dots \dots (22)$$

よって、ある時間  $t$  で災害が発生したとき、その時点での度数率  $A'$  が  $A_1 < A' < A_2$  である確率は、

$$P_r(A_1 < A' < A_2/t) = e^{-(A_1/100)t} - e^{-(A_2/100)t} \quad \dots \dots \dots (23)$$

となる。この関係は 図-12 に示される。

さて、いまある固定した度数率を考え、これを基準度数率  $A_c$  と定義しよう。災害がある時間  $t$  で発生したとき、そのときの度数率  $A'$  が  $A < A' < A_c$  、すなわち基準度数率  $A_c$  と、それよりも小さな度数率  $A$  との間にある確率は、式 (23) より、

$$P_r(A < A' < A_c/t) = e^{-(A/100)t} - e^{-(A_c/100)t} \quad \dots \dots \dots (24)$$

たとえば基準度数率  $A_c=10.0$  として、 $A_c$  よりも小さないくつかの度数率  $A$  との間にある確率を同式で調べた結果を 図-13 に示した。同図における  $A=0.0$  の曲線は、度数率が  $0 < A' < A_c$  である確率、すなわち  $A_c$  以下である確率を示している。また  $A'$  が  $A_c < A' < A$  、すなわち基準度数率  $A_c$  と、それよりも大きな度数率  $A$  との間にある確率は、

$$P_r(A_c < A' < A/t) = e^{-(A_c/100)t} - e^{-(A/100)t} \quad \dots \dots \dots (25)$$

前例と同様に基準度数率  $A_c=10.0$

として、 $A_c$  よりも大きないくつかの度数率について上式で計算した結果が 図-14 である。図中の  $A=\infty$  の曲線は、度数率が  $A_c < A' < \infty$  である確率、すなわち  $A_c$  以上である確率を与えている。また、同図で、発生時間が 60 万時間を超えると、 $A_c=10.0$  よりも大きな度数率である確率はほとんど 0 に等しく、これは 図-13 における  $A=0$  の曲線、つまり  $A_c=10.0$  以下である確率がほぼ 1 に等しいことと同等である。

以上、災害発生時間によって、任意の度数率の区間確率が求められることを示したが、一般的な推定問題としては、この関係を逆にした、ある確率（信頼水準）に対応した度数率の区間を求め、これを信頼区間とするのが通常である。今回の場合、前述の  $x^2 (= 2\lambda t = At/50)$  が、 $A$  と  $t$  に無関係に  $x^2$  分布することがわかっているので、 $x^2$  分布表を利用して所定の確率値に対応した  $x^2$  値を求め<sup>8)</sup>、これを  $A$  について解けば、所定の信頼水準に基づいた度数率の区間が求められる。信頼水準を  $(1-\alpha)$  とすると、 $\lambda$  の下限値 (LL) および上限値 (UL) よりなる信頼区間が、

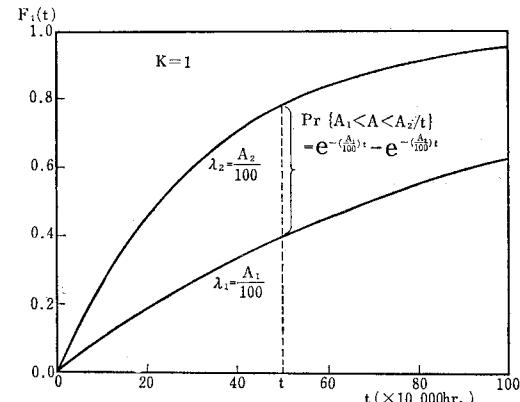


図-12 時間  $t$  で度数率が  $A_1$  と  $A_2$  の間にある確率

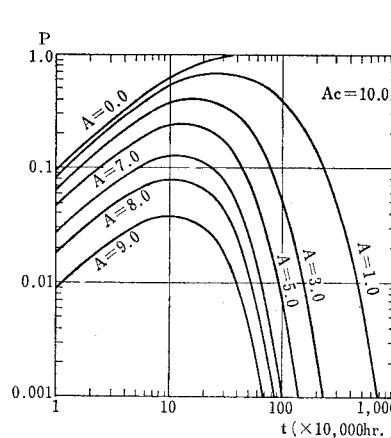


図-13 時間  $t$  で災害が発生したとき、 $A < A' < A_c$  である確率

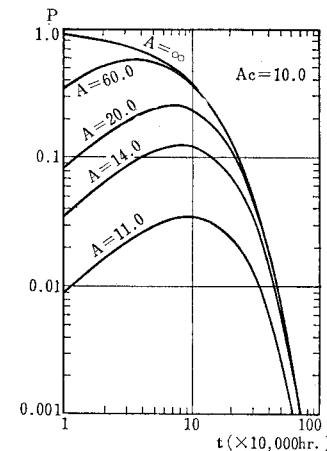
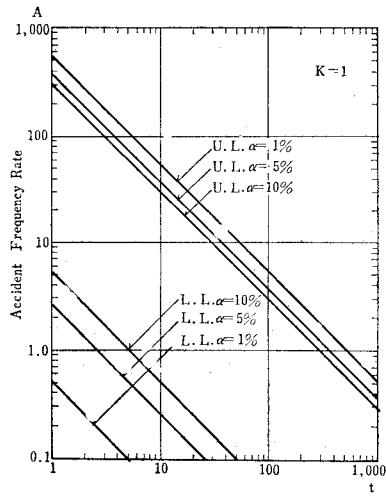


図-14 時間  $t$  で災害が発生したとき、 $A_c < A' < A$  である確率

図-15 度数率の信頼区間 ( $K=1$ )

$$(\lambda_{LL}, \lambda_{UL}) = \left( \frac{\chi^2(2; 1-\alpha/2)}{2t}, \frac{\chi^2(2; \alpha/2)^*}{2t} \right) \quad \dots \dots \dots (26)$$

で得られ、同様にして度数率の信頼区間は、

$$(A_{LL}, A_{UL}) = \left( \frac{50 \cdot \chi^2(2; 1-\alpha/2)}{t}, \frac{50 \cdot \chi^2(2; \alpha/2)}{t} \right) \quad \dots \dots \dots (27)$$

ここでは、危険率を  $\alpha=10, 5$  および  $1\%$  に設定して、自由度  $\phi=2$  の  $\chi^2$  確率値を統計数値表から調べ、災害発生時間が  $t=1 \sim 1000$  万時間までの、度数率の信頼区間を求めたのが 図-15 である。同図あるいは数表(略)より、たとえば 10 万時間で災害が発生したとき、 $\alpha=10\%$  に対する度数率の信頼区間が、 $0.51 < A < 30.0$  で与えられる。

次に複数個の災害が発生した時点における度数率の区间推定法について考える。そのためにまず、 $k$  件の災害が  $T$  万時間で発生したとして、災害 1 件当たりの平均発生時間 ( $\bar{t}=T/k$ ) の分布を求めてみると、

$$f_k(\bar{t}) = \frac{(k\lambda)^k}{(k-1)!} \bar{t}^{k-1} e^{-k\lambda\bar{t}} \quad \dots \dots \dots (28)$$

$$\left. = \frac{\left(\frac{kA}{100}\right)^k}{(k-1)!} \bar{t}^{k-1} e^{-\frac{kA}{100}\bar{t}} \right\} \quad \dots \dots \dots (28)'$$

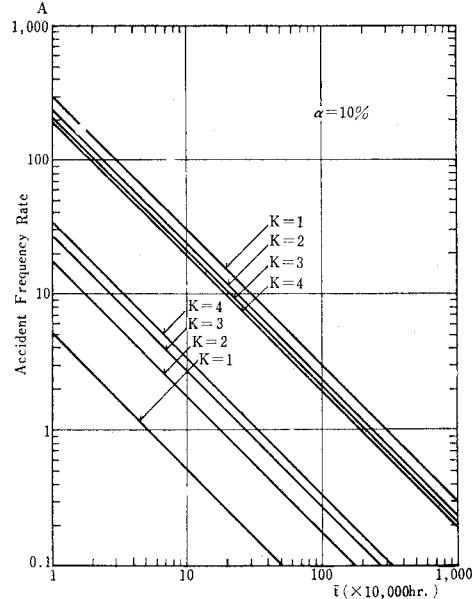
$$E_k(\bar{t}) = 1/\lambda, \quad V_k(\bar{t}) = 1/k\lambda^2$$

のアーラン分布が得られる<sup>6), 7)</sup>。上式で  $\chi^2=2k\lambda\bar{t}$  とおくと、同式は、

$$f_k(\chi^2) = \frac{\left(\frac{\chi^2}{2}\right)^{(2k/2)-1}}{2(k-1)!} e^{-\chi^2/2} \quad \dots \dots \dots (29)$$

なる自由度  $\phi=2k$  の  $\chi^2$  分布に変換される。したがって、 $K=1$  のときと同様に、信頼水準を  $(1-\alpha)$  とし

\*  $\chi^2(n; \alpha)$  を、自由度  $n$  の  $\chi^2$  分布  $f(\chi^2)$  において、  
 $\int_{\chi^2(n; \alpha)}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2 = \alpha$  を満足する  $\chi^2$  値と定義する。

図-16 度数率の信頼区間 ( $\alpha=10\%$ )

て、 $\lambda$  および  $A$  の信頼区間が、それぞれ以下の式で与えられる。

$$(\lambda_{LL}, \lambda_{UL}) = \left( \frac{\chi^2(2k; 1-\alpha/2)}{2k\bar{t}}, \frac{\chi^2(2k; \alpha/2)}{2k\bar{t}} \right) \quad \dots \dots \dots (30)$$

$$(A_{LL}, A_{UL}) = \left( \frac{50 \cdot \chi^2(2k; 1-\alpha/2)}{k\bar{t}}, \frac{50 \cdot \chi^2(2k; \alpha/2)}{k\bar{t}} \right) \quad \dots \dots \dots (31)$$

いま、危険率を  $\alpha=10\%$  として、災害件数  $K=1 \sim 4$  に対する  $\chi^2$  値を統計数値表より調べ、 $\bar{t}=1 \sim 1000$  万時間までの範囲の度数率の信頼区間を求めたのが 図-16 である。同図より、災害件数が多くなれば、災害に関する情報も増えるので、度数率の信頼区間の幅が狭くなっていることがわかる。また、同図は危険率  $\alpha=10\%$  の信頼区間であるが、他の危険率も同様にして作表、作図でき、所定の信頼水準に基づいた度数率の区間推定が行える。

## 6. 結 語

以上、労働災害の発生時間用いて安全水準の評価を行う目的で、いくつかの観点から災害発生時間分布とその応用について検討を加えたが、それらを要約すると、

(1) 災害の発生がランダムであれば、一定期間中の発生数の分布はポアソン分布となり、発生間隔の分布は指数分布となる。東京都で発生した死亡災害などを例に、産業別あるいは業種別レベルでの災害発生が、ほぼポアソン分布となることが認められた(図-1, 2)。また、具体的な事業所での災害事例として調べた、トンネ

ル工事における事業所での災害発生間隔が、比較的指數分布に近い性状を示していることがわかった(図-3)。

(2) 災害発生間隔が指數分布であれば、複数個の災害が発生するまでの時間分布はガンマ分布となり(図-4)，これらの分布のパラメーターを度数率と関係づけることによって、任意の度数率、災害件数の組合せに対して、特定時間数内での生起、または非生起確率を求めることができる(図-5, 6)。同様に、特定生起確率に対応した発生時間数と度数率の関係が、任意の災害件数に対して求められ(図-7, 8)，これらの関係を応用して、目標無災害時間数の設定や、度数率の変動の有意差検定を行うことができる(図-9, 10)。

(3) 独立した集団内で、それぞれランダムに災害が発生しているとき(図-11)，集団全体としての災害発生間隔の分布は、個々の集団の度数率を合計した値をパラメーターとした指數分布となる。同じく複数個の災害の発生時間分布も、合計された度数率をパラメーターとしたガンマ分布で示される。これらの分布の確率値とその応用については(2)での結果をそのまま準用できる。

(4) 指數分布、あるいは平均災害発生時間の分布であるアーラン分布を $\chi^2$ 分布に置き換えることによって、災害が発生した時点における度数率の区間確率を求めることや(図-12~14)，発生時間数を用いて度数率の信頼区間の推定を行うことができる(図-15, 16)。

## 7. あとがき

これまでの安全水準の評価法は、通常1年間の災害発生数を100万労働時間当たりの発生数に換算した年度度数率をもってその年を評価するように、ある期間を結果として評価する方法であった。今回取り上げた災害発生時間による評価法は、災害が起こったことを結果的に評価する点では変わりはないが、災害が発生した時点のほか、どの時点でもその評価が可能であり、度数率がある期間の発生数を集計して評価しなければならない欠点を補っているのみならず、評価時点までの発生時間を利用し

て、度数率の変動の有意差検定、および信頼区間の推定が行えるなどの利点を有している。したがって、日常的なさまざまな災害要因の変化(労働力の移動、作業環境・条件の変化、その他)を、より早く評価するのに適した評価法と思われる。また、この評価法は、さまざまな安全管理手法と結びつけることによって、安全水準ばかりではなく、安全管理手法の効果についての評価を行うことも期待できる。

今回は、災害がランダムに発生する場合について、災害発生時間による安全水準の評価法について検討したが、今後は、災害の発生がランダムでない場合の、発生時間の分布特性と、その応用についての研究を進めてゆきたいと考えている。また、今後の研究を進めるうえで基礎となる災害資料についても、災害調査を数多くの事業所で行うことにより、整備してゆきたいと考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり、死亡災害資料の提供をいただいた労働省労働基準局安全課と、死傷病報告の利用にご協力下さいました兵庫労働基準局神戸東、西宮両労働基準監督署に対し厚く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) たとえば、産業安全年鑑(昭和53年版)、中央労働災害防止協会、pp. 140~143、1977。
- 2) 前 郁夫・花安繁郎・鈴木芳美：建設工事における労働災害の動向、労働省産業安全研究所技術資料、RIIS-TN-75-4、1975。
- 3) Maguire, B.A., E.S. Pearson and A.H.A. Wynn : The Time Intervals Between Industrial Accidents, Biometrika, 39, pp. 168~180, 1952.
- 4) 花安繁郎：災害発生間隔の分布について、労働省産業安全研究所技術資料、RIIS-TN-76-2、1976。
- 5) 日本国有鉄道大阪新幹線工事局編：山陽新幹線新大阪・岡山間建設工事誌、日本鉄道施設協会、pp. 630~744、昭和47年6月。
- 6) 伊藤 学・亀田弘行訳：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善、pp. 113~126、1977。
- 7) 花安繁郎：災害発生間隔の分布に関する研究、労働省産業安全研究所研究報告、RIIS-RR-26-3、1977。
- 8) 統計数値表、JSA-1972、日本規格協会、1977。

(1978.11.10・受付)