# 災害と確率——その理論と実際——

奥山育英*

## 1. はじめに

災害には，風水害，地震，津波，火災などたくさん考えられるが，人もいないし，人の生活を営むために必要なものもない場所で，大地震が起っても，大豪雨があっても，それは災害とはいわないだろう。また，たとえ人が住んでいようとも，被害がなければ，どんなに大きな地震が起ころうとそれを災害と呼びはすまい。反面，小さい地震でも被害があれば，それは災害である。最近，一部の災害で人災とよばれているものは，本来ならば災害をひき起こさずにすんだ現象であるのに，人がその現象に対して当然考えておくべきだった安全対策を考えなかったり，気がつかなかったために生じた災害であるといえよう。

このように災害とは，厳密に論ずると，直接的に現象と結びつかないわけで，人または人の生活を営むために必要なものが介在し，それらが現象によって損害を受けたときにはじめて災害となるのである。また，同じ現象でもときと場所により，災害の大小は異なる。たとえば利根川の洪水でも江戸時代の被害と現在の被害とを比較すると，昔は田畑が侵水したくらいであるのに対し，現在では侵水家屋が数十万戸となり，災害として考えると格段の差が生ずるのである。したがって，災害を論ずるには，まず対象地域を明確にするとともに，その地域への生活の依存度をも把握してから取り組まなければならない。

しかし，現在の日本においては，国土の面積に比べて人口が多いことから，災害をひき起こすと考えられるような現象は，地域によって被害の程度は異なるにせよ，ただちに災害と結びついてしまう。したがって，各地域ごとに現象の程度に応じて被害を想定しておけば，災害の発生を論ずることは，災害をひき起こすような現象の発生を論ずることにおきかえられよう。

標題は“災害と確率”であるが，以上に述べた理由により，現象の発生——具体的には，地震の発生，豪雨の発生等——を確率的に考えることによって，災害発生の確率的取扱いとする。

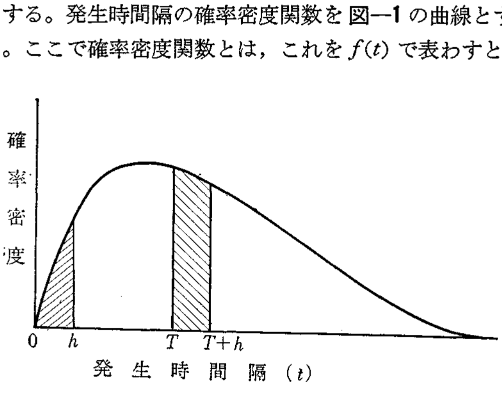
* 正会員　総理府首都圏整備委員会事務局 計画第2部第2調整官付補佐

## 2. 災害を起こすような現象の発生確率

現象の発生確率を論ずるのに2つの型が考えられる。第一の型は，おもに規模を対象とするときであり，これは最大規模の現象の確率を論ずるのに都合よく，少しの被害をもだしたくない場合に使われよう。この場合，発生確率の分布は，横軸に規模を，縦軸に頻度（密度）をとる（図—2 の型である)。第二の型は，発生の時間隔を問題にするときで，これは被害と対策のバランスをはかるのに都合がよい。すなわち，被害をなくそうとすると対策費用に多額の出費を必要とするだろうし，対策費を少なくすると被害額が増加するというときに，一体どの程度の対策費を投入したら最適かを考えるには，この型の発生確率が使われよう。この場合の発生確率の分布は，横軸にある規模以上の現象の発生時間隔をとり，縦軸に頻度（密度）をとる（図—1 の型である)。

第一の型の確率分布は，対象とする現象ごとに分布は異なるが，現象の規模を観測するときに，$n$ 回観測したうちの最大または最小観測値をもとにしてその確率分布をつくると，$n$ を十分大にとると，はじめの分布によらない結果が得られる場合がある。このようにして，第一の型で最大値または最小値を問題にするときは，上の手続きによって極値統計学の対象となり，もとの分布をくわしく調べなくとも解決されてしまうのである[1]。

第二の型の確率分布の場合は，次回の発生時刻を問題にする。発生時間隔の確率密度関数を図—1 の曲線とする。ここで確率密度関数とは，これを $f(t)$ で表わすと，




図—1　発生時間隔分布

発生時間隔が $a$ より小さい確率は $\int_0^a f(t)dt$ で与えられるような関数である。発生時間隔は必ず無限大より小さいから，$\int_0^\infty f(t)dt=1$ が成立し，このことは 図—1 で曲線の下の面積が1であることである。

いま，現象が発生した直後に時間の原点をとると，$h$ 時間以内に次の現象の発生する確率は $\int_0^h f(t)dt$ で，これは 図—1 の右上がりの斜線をひいた図形の面積であり，$T$ 時間以後で $(T+h)$ 時間以前に次の発生が起こる確率を時刻0の時点で計算すると $\int_T^{T+h} f(t)dt$ で，これは 図—1 の右下がりの斜線をひいた図形の面積となる。ここで，時刻0から時間が経過して次の現象発生がない状態のまま時刻 $T$ になったとしよう。このときから，$h$ 時間以内で次の現象発生の確率を求めてみる。まず，発生時間隔の確率密度関数は，時刻 $T$ 以後の部分（図の $T$ より右の部分）だけを考え，しかも $T$ 以後のいつかには必ず現象が発生するから，$T$ から無限大まで密度関数を積分すると，確率1に等しくなる。一方，$T$ 以後の発生時間隔 $t$ の確率密度の相互関係はもとの $f(t)$ の $t \geqq T$ なる部分の特性をもっていなければならず，結局，以上のことから現象発生後 $T$ 時間の間に新たな現象の発生がないという条件のもとでは，時刻 $T$ 以後 $h$ 時間以内に次の現象の発生する確率は

$$\frac{\int_T^{T+h} f(t)\,dt}{\int_T^\infty f(t)\,dt} \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

で表わされる。この式は，同じ $h$ 時間幅に現象の発生する確率が時間幅の始点 $T$ によって一般的に異なることを示している。

ランダムな現象とは，現象の発生確率が以前に発生した時刻とは無関係の場合をいうが，そのことは，上式が $\int_0^h f(t)dt$ に等しいことである。ここで，$\int f(t)dt=F(t)$ とし $(F(+\infty)=1, F(0)=0$ が成立している），$1-F(t)$ を $G(t)$ とおいて，等しいとおいた式に代入すると

$$G(T+h)=G(T)\cdot G(h) \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

が成立し，$T, h$ の任意の正数に対して上式が成立するような関数は $G(t)=e^{at}$ または0しかないことが容易に証明される。$f(t)$ が確率密度関数であることを考慮すると

$$f(t)=\alpha e^{-\alpha t} \quad (t \geqq 0,\ \alpha > 0) \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

いわゆる，指数分布が得られる。このことは，ランダムな現象の発生時間隔は，指数分布であることを示している。

さきに述べた，被害と対策のバランスについては，文献 2)，3)，4) 等があるが，いずれも現象発生時間隔をランダムであるとして取り扱っている。地震の発生については周期説が認められつつあるので，上述した条件付確率分布を利用した考察が出てきてもよい時期ではないかと思われる。

### （1） 耐震設計における確率

構造物の耐震設計については，建築物，橋梁，鉄道，港湾構造物等，個々に設計震度が決められているが，地域別震度および地盤種別係数より設計震度を決定するという基本的な考え方は一致している。地域別震度の決定に確率論的概念が取り入れられているが，これは河角広博士による最高震度期待値分布図[5]に若干の配慮を加えたものである。

最高震度期待値分布図とは，日本の地震史にある限りの大地震について，それらの大きさおよび震央を定め，それらによる日本国内各地の震度を推定し，最終的に，日本全国各地域における，75 年，100 年および 200 年を再来年数とする最高震度期待値を求め，同一値を等高線で表わした図である。

実際には，さらに建築物の場合のように，最低設計震度を法律的に定めたり，港湾構造物の場合のように構造物の破壊が周辺の市民生活に及ぼす影響や機能の喪失が周辺都市の震災復興に与える影響，および構造物の復旧に要する経費と期間等を参考にして施工者が定める重要度係数を取り入れたり，橋梁の場合のように安全率を考えたりして設計震度を決定している。危険率という言葉は，確率統計の用語だが，ここでいう安全率とは確率統計とは無関係である。すなわち，決定した設計震度の地震で構造物がゆすられるときの応力の $f$ 倍の力が加わったときに，初めてその構造物が破壊する場合に安全率が $f$ であるという。

ここで，気にかかることは，地震は地下のエネルギーの蓄積が許容限度に達したときに発生するという説である[6),11)]。これは，現在ではほぼ認められており，また河角博士はこれとは独立に既往データの統計的処理により東京地方の大地震について 69 年周期説を主張している[7)]。これが正しいとすると，75年再来地震の発生した直後に耐用年数 30 年の構造物をつくる場合と，過去 60 年の間に 75 年再来地震が一度も発生していないときに耐用年数 30 年の構造物をつくる場合とでは，当然設計震度をかえねばならない。逆にいえば，いつも同じ地域別震度を使用することは，地震の発生をまったくランダムであると見なしているか，または，結果的に耐用年数の異なったものを同じ耐用年数と思い込んで建造しているわけである。

実際，新潟地震後の災害復旧において，こわれにくくするための理由で設計震度を従来以上に引き上げた例があるが，耐用年数との関係を考慮しても，同規模の地震の新潟地方への再来が，100 年以上であるらしいことか

ら，最も設計震度が低くてすむ時期に引き上げたことになろう。とはいえ，周期説の不確実性および再び破壊した場合の施工責任者の立場，さらに地域住民に対する政治的配慮等々をあわせ考えると，現在の段階では，これもまた止むを得ないのかもしれない。心すべきことは，現在の構造物が耐用年数に達したときに改造するに際して，地震がこなかったという理由で設計震度を下げようとする場合に，地震発生周期を十分考慮することであろう。

### （2） 洪水流量における確率

昔は農業が基幹産業であったことから，河川の流量については比較的統計的取扱いが進んでいる[8]。したがって，流量分布についても，種々の表わし方があるが，災害復旧のサイクルおよび農業のサイクルが1年であること，さらに取り扱い易いこと等の理由から，ある流量以上の観測値をすべて使用するかわりに，年間最大流量のみを使用する方法が一般化されている。

洪水流量についても同様で，洪水分布は，ある流量以上となる洪水の再来時間隔を横軸にして頻度を縦軸にとるのではなく，横軸に年間最大洪水流量をとり，縦軸に頻度をとっている（図―2）。

図―2 で斜線を施した部分の面積が頻度曲線の下の面積の 1/100 であるような流量 $Q$ を 100 年洪水流量と呼び，このような洪水を100年洪水という。実際には，図―2 のような頻度曲線は得るのが困難なので，既往資料から得られたヒストグラムを適当な分布であてはめを行なったり，近似曲線を求める式を用いたりして分布を定め，各年確率洪水を内挿または外挿して求めている。

具体的な分布型については種々の型が提案されているが，洪水の場合は年間最大値，渇水の場合は年間最小値を取り扱う関係から，年間 $n$ 個の観測値の極値の分布を問題にし，しかも，この場合に $n$ が十分大になると特定の極限分布に漸近することが知られている。一般に極値分布とは，この極限分布を意味し，最大値についてはグンベル分布として広く実用化されている。このほかにもコーシー分布等も実用的であるとされている。

以上により，$n$ 年洪水については，再来平均時間隔が（年最大流量をとったとして），$n$ 年であるといえる。しかし再来時間隔の分布は論ぜられてはいない。この点に関しては，1年間に $n$ 年洪水の起こる確率は $1/n$ であるとしている。したがって，ある時点から $m$ 年目にはじめて $n$ 年洪水が起こる確率は $(1-1/n)^{m-1}\times(1/n)$ で与えられ，$m$ は幾何分布に従う（$m=0, 1, 2, \cdots\cdots$）。

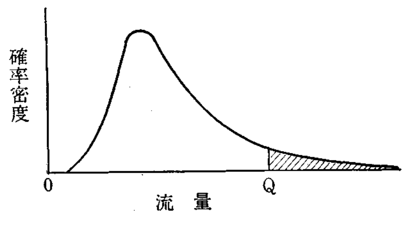
連続変量における指数分布同様，幾何分布は離散変量における唯一のランダムな分布である。

なお，中小河川の災害復旧工事の迅速化により，年2回の堤防決壊が生ずることがあり，在来の年最大流量のみでの取り扱いについて，それら河川では検討されている。

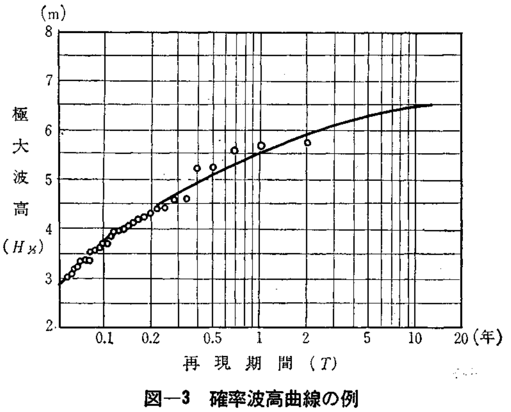
### （3） 波高における確率

波高は，地震，洪水に比べると確率的概念を取り入れたのは新しく，何年波高と呼びはじめたのも数年前からである。現在では，天端高等の設計波高をたとえば 30 年波高で 6 m というように用いている。

この場合，30 年波高とはその地域で 30 年間に観測された波高を大小順にならべて，1番目の波高を 30 年波高，2番目を，30 年間にその波高より大きな波が2回出現したということから，15 年波高，以下同様にして，3番目の波高を 10 年波高，4番目を7.5年波高，一般に $n$ 番目の波高を $30/n$ 年波高と決めるのである。途中の 20 年波高とか，25 年波高を必要とするときは，横軸を上で定めた年軸に，縦軸を波高にした適当な確率紙に観測値をプロットする。そして，曲線のあてはめを行なって途中の年における波高を決定するのである。同様の方法で過去2か年の資料から曲線をのばして 10 年波高を推定したりする（図―3）。当然であるが，大きな波高が記録される場合には，それを記録する波高計がこわれる場合があること，および対象とする地域で過去の波高データがあるのはまれなことから実用的方法として，過去の資料の揃っている天気図と，そこの地形をもとにして推算した波高を用いる場合も多い。さらに，対象地域における短期間の実測値との整合をはかり，最終的には




図―2 流量分布




図―3 確率波高曲線の例

それらを調整した値を用いている[9]。なお，オランダでは，高潮・波浪対策にほぼ同様な方法で幅を持たせた1 000 年確率潮位をも考慮している[10]。

また，防護される背後の経済価値と異常気象海象の発生確率から経済的な保全施設の規模に関する研究がなされた調査報告書[3] もある。

波高分布に関しては，河川の量と同様に，波高を横軸に，頻度を縦軸にとって波高分布をつくる場合もあるが現時点では波高の実測値が少なく，いずれの分布型が最適かは決っていない。したがって，適当な曲線をひくことになろう。

問題として残るのは，30 年波高を例にとると，これが長期間にわたったデータから決定されたならばよいが短期間のデータから決定される場合は，その短期間に極端に大きな波（たとえば100年波高以上の波）が実測されると 30 年設計波高は，本来の100年波高より高くなってしまう。また，逆の場合も考えられる。いずれにしても，このような事態の出現確率については確率論で論ずることができよう。

他の問題は，再来間隔分布である。これは現在のところ，設計条件としては最高潮位と波高が必要であることからあまり論ぜられておらず，ランダムとせざるを得ないようである[3]。

## 4. あとがき

"災害と確率" という標題で，災害を起こすような現象の発生確率について論じたが，災害と確率の関係は，災害の直前における予知の場合も考えられる。すなわち地震予知を地殻変動等の観測から[11]，豪雨による崖崩れを含水地層の電気抵抗の測定から，予知する場合などである。しかし，これらの予知が 90% の信頼度があるという確率的表現を用いても，技術のより発達した近い将来においては物理学的に決定論的に解明されると考え，あえて取り上げなかった。

反面，長期的な災害発生の予測は，たとえその発生メカニズムが完全に解き明かされようと，確率統計的接近方法以外には現状では考えられない。それは，まさに人の生命のメカニズムが解明されても，個々の人の寿命をその出生時に予測するのが不可能であることと同じであり，それにもかかわらず，全体としてみれば統計的法則が成立するのと似ていよう。

長期的な災害発生に対する重要な土木構造物の安全対策は，確率的考え方を用いても，実際には既往の最大の規模の災害を念頭において，さらにそれ以上の規模の災害までをも考慮しなければならず，より大きな災害規模を推定する以外は，確率論的方法をとらないほうが現状では理論的にすっきりするように思われる。すなわち，現象の再来発生間隔をもとにして，構造物の設計条件を決定するには，まだ多くの問題が残っており，同時に経済的最適建造費用に結びつき，あらためて人命の経済的価値を論ずる必要が生じよう。

人命を考慮の対象外とすることが可能な場合には，土木構造物はこわれるべき災害によってこわれるのが至当であり，こわれない場合はむしろ施工者の恥とする風潮が生れてくるべきではなかろうか。優秀な機械は，ある1か所がこわれる頃には，他のすべての部分もこわれはじめるものであるという言葉にあるように，構造物の場合も，災害時の緊急用に必要なもの以外は，復旧の効率化をはかるため，こわれるべき時期には，すべてが同時にこわれるという考えが生れてきてもよいように思われる。

なお，本文を書くにあたって，運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長 山下生比古氏に，参考資料の提示および有益な助言をうけたまわった。ここに，厚く感謝の意を表するしだいである。さらに，実例についての問合せに快よく応じて下さった運輸省，建設省の関係者各位，ならびに港湾技術研究所，土木研究所の研究員の方々に厚く感謝する。

### 参考文献

1) Gumbel, E.J. 著，河田竜男・岩井重久・加瀬滋男監訳：極値統計学，広川書店，昭和 38 年2月.
2) 合田良実：構造物の設計外力に関するオペレーションズ・リサーチ (1)，(ブループリント)，1965 年5月.
3) 運輸省港湾局防災課：海岸保全施設計画策定要領(試案)，昭和 38 年9月.
4) 運輸省港湾技術研究所設計基準課：設計震度の合理的決定に関する一考察，1969 年3月.
5) 河角 広：有史以来の地震活動より見たる我国各地の地震危険度および最高震度の期待値，東京大学地震研究所彙報，第 29 号第3分冊，昭和 26 年3月.
6) 笠原慶一：地震のメカニズム，地震と対策，インダストリーランドセンター，昭和 46 年9月.
7) 河角 広：東京地方の大地震 —69 年周期を主張する—，同上.
8) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，森北出版.
9) 合田良実：波浪統計に関する二，三の考察，運輸省港湾技術研究所資料 No. 39，昭和 42 年2月.
10) Wemelsfelder, P.J. : On the use of frequency curves of stormfloods, Coastal Engineering 7 th Conference.
11) 萩原尊礼：地震の予知，地学出版社，昭和 41 年.