

# リスク概念の基礎

原 宣一  
宇宙開発事業団  
東京、日本

## 概要

リスク概念は、人間が価値を創造したときに、それを失う事態の可能性を認識したことに始まる。このような事態が実際に起こったら事故と呼ぶが、リスクは事故の大きさと事故発生の確率の積として定義すべきである。事故の損失は貨幣価値で測り、確率は確信の度合いの定義を採用するとリスクも加法性が保たれ合理的に定量的評価が出来る対象となる。価値も確率もそしてリスクも人間の心に属する量であることを認識する必要がある。

## 1. はじめに

人間の活動を観察すると、人間は価値を創造し、その価値を獲得し、保持しようとしているように見える。価値は人間が認めるものである故、時と場合により、また人により大きな変動があるが、人類は価値観を共有している。

人間は価値を認めると同時にこれを得られないかもしれない、または、失うかも知れないという危惧をも持つ。このような危惧を持つ理由はすべての事象に大なり小なりの不確定さがつきまとうからである。この危惧がリスク概念のはじまりである。

限られた資源の効果的な配分のため、宇宙開発分野においてはこれまで以上の合理的な活動が求められている。このためにはリスクを正しく評価する必要がある。しかし、リスクという用語はあまりにも広く使われてきたためか、現状では少なからず混乱がある [ 1 ]

本来リスクは人間の属性に依存したものであることを再認識し、その概念を漠然としたものでなく正確に定義することが必要である。これにより定量的リスク評価 (QRA) の基礎を確実なものとすると共に、リスクと密接な関連のある安全に関しても正確な表現が可能となる。

## 2. 事故の損失とその見積もり

人間が価値あるものと認める内容は広範囲に及ぶ。ダイヤモンドや土地などの実在するものだけではない。これから開発する物にも価値がある。価値を認めるからこそ開発に踏み切るのである。

しかし、ダイヤモンドや金であっても、その価値は物性として決まっているものではない。価値は人が決めるものであり、常に流動的であり、評価者によって異なる。このことから、取引が成立し、経済活動が始まる。それでもなお、大局的には人間は価値観を共有している。つまり、一般にある人にとって貴重なものは他の人にも貴重である。

一般的に、価値は貨幣単位で表される。これまでの人間の長い歴史を通して、人は価値の単位をそれぞれの国が独自に貨幣単位として決めてきた。すべての価値は貨幣単位で測りうるかということに対しては、まだ否定する人が多い。人間の命は最も貴重で文字どおり値踏み出来ない（Invaluable）ものとされる。しかし、死亡事故の賠償責任額を決める時など、事故が起きてしまえば貨幣価値で比べざるを得ない状況があることは確かである。すべての価値は貨幣単位で測定または換算することが出来る。

本稿では懸念事項として識別した望ましくない事象を一般的に事故と呼ぶ。事故が生じた場合に失う価値の大きさは、精度は次の問題として、貨幣単位を用いて見積もることができる。失う価値が物質的なものばかりでないし、人により評価額は大きく異なるのが普通である。従って、事故が起きた場合の損失額は貨幣単位を使って桁を示すことができれば十分正確な見積もりである。ところがリスク評価においては、これまでこの損失額に対する表現は、破局的、重大、軽微、無視し得る、との定性的な4区分程度の表現が使われてきた。プログラムごとに検討する相対的評価に過ぎない場合でも、定量的リスク評価として使うにはこの4区分では加法性が無いことからあまりにも不十分である。従って、損失額は貨幣単位で見積もらなければならない。

さて、貨幣単位は加法性が成立するように決められているので、事故の損失も貨幣単位で見積もる限り、加法性が成立していることは自明である。

### 3. 事故の発生確率

ある事象の生起について、それが自然なものであろうと人工的なものであろうと神ならぬ人間は経験的に100%の確信を持つことは出来ない。我々は台風の来襲や地震の発生を100%の確信を持って予測することは出来ない。人間が作ったボルトカッターの単純な作動ですら成功するとの絶対的な確信は持てないであろう。ましてロケットによる衛星打ち上げのように技術的に最先端の部分が大きいものでは、いくらかの失敗の可能性を覚悟しなければならない。

我々が出来ることはその事象の特質によりその失敗の可能性をどの程度まで下げ得たものであるかを何らかの方法で示すことが出来るに過ぎない。

リスクの評価として考えられた事故が発生する可能性の程度を表すために、定量的な確率表現が使われた時期もあった（例えば、[ 2 ]）。しかし、現在は定

性的な表現が支配的である。例えば、「しばしば」、「合理的に起こりうる」、「ときどき」、「稀に」、「極めてまれに」、「可能性なし」のような表現である。だが、これらの表現はあまりにも主観的で、人により受け止め方が大きく異なるものである。

リスクの評価には加法性が要求されることを注意する必要がある。定性的表現ではこの要求に応じられない。従って、「しばしば」とは 10 回に 1 回程度とか、「可能性なし」とは百万回に 1 回もないといった数値的表現、即ち、確率表現に戻る必要がある。

確率表現が退けられた理由には二つのことが考えられる。最初のものは、「しばしば」とは言えても「確率が 1/10 程度」とは言えないという心理的作用が働いたのではないかと思われる。この理由は、人間の感覚としてさいころ振り程度の出目確率を除き、少し小さな確率に不慣れであるからであろう。このことは、訓練なしでは億や兆の大きな数に対しても直感がわからないのと同じである。確率感覚も訓練すれば良くなると思われる。

確率表現が嫌われたもう一つの理由は工学で採用している頻度概念の確率の定義に由来する。この定義を採用してきた理由は、確率に客観性を求めてきたからであろう。確率とは物質に属した特性として客観的に捉えることが出来るのか、それとも人間の心の中だけに存在する主観的なものかももう一度考えてみる必要がある。

### 3.1 頻度概念の確率

フォン・ミーゼスによる頻度概念の確率の定義は次のようなものである。「意図する実験が  $N$  回行われるものとし、事象  $A$  が  $N_A$  回起こったとする。事象  $A$  が起こる確率  $P(A)$  は次式で定義する。

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} \quad ]$$

この定義における式が意味するものは全体を対象とした、つまり母集団全体の、内部構成比率を示すものである。確かに客観的な確率の定義になっている。しかし、この数値（確率）はあくまでも全体に対してであって、個々の実験とは全く関係がないものである。個々の実験結果は事象  $A$  が発生したか否かである。即ち、0 か 1 かである。個々の実験結果については何も定義していないことに注意する必要がある。1 機しか打ち上げないロケットの「5 号機の打ち上げ信頼度」というような場合、よく考えるとこの定義ではかなり無理があることがわかる。

この頻度概念の定義による確率はコルモゴロフの公理の条件を満たすが、データにより推定した頻度確率はもはやほとんど加法性がない。つまり「信頼水準 90% で確率 0.8 以上である」という表現の確率ではこれを基礎にしたの有意義な表現に結びつかない。(付録 1)

工学分野では暗黙の内にこの頻度確率の定義が採用されてきた。そして標本数が十分多く取れるような場合、即ち、代数の法則が成立するような場合、や全体を予測するような場合には有効な理論が展開されてきた。しかし、標本数が極めて少ない場合や、個々の事象に対する議論には使えないものである。そこで、他の確率の定義を検討する。

### 3.2 公理による確率

数学者コルモゴロフは抽象的な概念として、確率の公理を定義した。

「事象 A の確率は次の 3 つの前提条件を満たす数値  $P(A)$  である。

- 1)  $P(A)$  は正数。
- 2) 確実事象の確率は 1。
- 3) もし A と B が相互背反ならば、 $P(A+B) = P(A) + P(B)$ 。」

これら三つの条件は殆ど抵抗無く受け入れられる自明の条件である。これらを満たすものであれば、実世界での確率が何を意味しようとして、すべて確率として取り扱うことができ、数学の確率論の定理がすべて適用できる。なお、条件 2) は規格化の条件であり、3) は加法性を要求しているものである。

### 3.3 古典的確率

フォン・ミーゼスにより古典的確率とされてしまったのは、ラプラスによる確率の定義である。この定義は、「実験 E の結果が N 通りあってそれらの中で好ましい事象 A に適合するものが  $N_A$  通りあるとする。これらの事象が等しく起こりやすいときに事象 A の確率  $P(A)$  は次式で与えられる。

$$P(A) = \frac{N_A}{N} \quad \text{」}$$

これまで「等しく起こりやすい」の表現に批判があり議論があったが、情報がないと言うことは、所謂、等確率の原理と等価なのである。(付録 2)

この確率は個々の実験についての特性について言及しているので、次節で説明する確信の度合いとしての確率の特殊な場合であると考えられる。特殊な場合とは情報がまったくない場合という意味である。

### 3.4 確信の度合いとしての確率

個々の実験結果についての確かさはその実験の属性では有り得ない概念で人間側の心の状態を示すものである。人間側の心の状態が確信の度合いを示す確率である。このようにサベージは主観確率を定義した[3]。「確率 $P(A)$ とは命題が真であることについての確信の度合いとして割り当てた数値である。」

先の例であれば命題は「実験Eで事象Aが発生する」となる。また数値の割り当て方はコルモゴロフの確率の公理を満たすように割り当てる。

確信の度合いとしての確率は、常に人間側の属性値である。火工品の成功確率と言う場合でも、当該品目の火工品が成功するか否かについての確信の度合いであって、決して質量や長さのように当該品目の属性値ではない。ただし、確信の度合いとしての確率が同じ0.5であっても情報の有無により、強い確信で0.5とする場合と弱い確信で0.5とする場合がある。これらを説明するために確信密度を考え、この期待値を確率とすることが適切である[4]。

確信の度合いは人によって異なる主観であるならば、科学的に決められないのではないかと批判が出るであろう。工学の分野で客観的確率として頻度概念が採用されてきた理由である。人間は必ずしも首尾一貫した行動を取り得ないからである。

この議論を回避するために、常に首尾一貫した人造人間（アンドロイド）を想定する。このアンドロイドに科学的な方法で主観確率に数値を割り当てるように教え込んでおけば、客観的な確信の度合いをアンドロイドが答えてくれることになる。

アンドロイドに教える科学的な確率算出方法は；

：情報が無いときにはラプラスの定義により確率を与える。これを事前確率とする。

：情報が得られた後の確率はベイズの定理を利用して、事後確率として確率を計算する。

この二つの手順で確率を求めると、これは客観的な確信の度合いである。この手順で、数少ない属性試験結果からのみ得られる確信の度合いが、試験個数 $n$ と成功数 $r$ から簡単な数式： $(r+1)/(n+2)$ として求められる[4]。

リスクにおける不確かさは、確信の度合いとしての確率で表現できる。

確信の度合いとしての確率もコルモゴロフの公理を満たすことから、加法性が保証されている。

#### 4. リスクの概念とその特性

リスクは人間の活動にとって最も重要な概念の一つである。人間は価値を創造し、認識し、またそれを失わないように行動している。人間は価値を認めると同時にこれを得られないかもしれない、または、失うかも知れないという危

惧をも持つ。危惧を持つ理由はすべての事象に大なり小なりの不確定さがつきまとうからである。これがリスク概念のはじまりであり、一般にこのような懸念事項をリスクと呼んでいる。

#### 4.1 リスクの定義

リスク概念はやや漠然としたままで使われているが合理的なリスクマネジメントのためにもう少し正確に定義する必要がある。

リスクは常に高いか低いかの比較を意図して使われる。つまり、リスクは常に何らかの基準と比較するために用いられている。従って、定量的に測定可能で比較可能な量として定義する必要がある。

リスクを意識する懸念事項は常に二つの要素を持っている。これらは価値を失うかも知れないような事態が発生する確率とその事態が起こったときに失う価値である。事故の発生確率と事故の損失である。

一般に多次元量はそのままでは比較することが出来ない。比較のためには常に1次元量への写像関数、または評価関数が必要である。多次元として最も次元の少ない二次元量であっても、同じである。それ故に、懸念事項の場合も比べるためには2次元から1次元への写像関数、または評価関数、が必要である。これをリスクと呼ぶとリスクが高い低いという表現が可能になる。リスクの定義としての評価関数は二つの量の数学的乗算結果としての積を採用することが最も簡単でかつ意味がある。

このようにして、リスクはもしその事象が生じたら被る損失額とその事象の発生確率の積として合理的に定義される。損失額に対する発生確率が分布状になる場合は損失の期待値である。ここに、確率は前章で述べた確信の度合いとして定義したものである。このリスクの定義がリスク概念の基礎である。

#### 4.2 リスクの特性

損失額は価値の単位を持ち、確率は無次元数であるからリスクは価値の単位を持つ。損失額も確率も加法性があった。これらの積であるリスクも当然加法性を持つ。このことによって定量的リスク評価が可能なが保証される。また、価値は人間が決めるものであった。確率も確信の度合いであり人間（またはアンドロイド）に属するものであった。従って、これらを乗じた量であるリスクも人間に属するものである。

我々が最初に識別すべきはリスクでなく懸念事項、またはリスク事項である。次にリスクを評価し、そのリスクが許容できなければ対策を取ることになる。かように、我々はリスクとリスク事項を区別して用いた方が良い。

安全の分野ではこの懸念事項をハザードと称し、ハザードを識別することが

安全解析の第一歩である。次にリスクを評価し、リスクが許容できるほど小さければ安全であるとする。即ち、安全とはリスクが許容できるほど低い状態を言うのである。

#### 4.3 リスク評価のための常用対数

リスクの定義に基づき、我々は損失額と発生確率を乗じることによりそれを評価することができる。損失額は価値の単位として、例えばドルを用いて推定することはそれほど難しいことではないであろう。大抵の場合、損失額の推定で一桁以内の精度で推定することは可能であろう。一方、確率に数値を与えることは、我々がそれに慣れていないからずっと難しいかもしれない。10万分の1の確率と100万分の1の確率の違いを実感として認識することは難しい。

リスク概念における確率は確信の度合いであることを思い出すべきである。確率は確信の度合いの表現手段であると見なすべきである。幸いなことにリスクを評価するために正確な確率の値は必要でなく桁が合えばよいのである。

我々はリスクの絶対値を次のように評価できる。もし、ある事象が生じたら1000万ドルの損失が生じ、その事象の発生確率は0.01であるとする。そのとき、リスクはこれら二つの数値を乗じて10万ドルとなる。

リスクそのままより、リスク指標として常用対数を用いることが賢明である。上記の例では、リスク指標は $7 - 2 = 5$ と計算される。かように、リスク指標5は10万ドルの絶対リスク値を意味する。

#### 5. 結語

比較される量は如何なるものも1次元であるべきである。このことは必ずしも実世界においては正しいことでは無いかも知れない。特に、面白い、幸福な、哀しい、等のような情緒的な語彙、においては用語の定量的な定義もなく比較の度合いでこれらの用語を使うかも知れない。しかし、今のところそれらは文学的表現に留まっているのであって、工学ではない。我々がアンドロイドに情緒的な感情情報から何らかの動作表現として応答させるには、これらの情緒感覚を定量的に一次元量で表す定義が必要になる。ところがリスクは、正確かどうかは別にして、すでに定量的に表す骨格が出来ているということである。

もし、我々がリスクは価値の単位を用いて絶対的に測定されうることを認識するならば、リスク評価のためのリスク・マトリックスはもはや不要となる。しかし、リスク事項の特性を知るために、損失額と確率値の両方を知っていることは必要なことである。

工学における確率の定義は歴史的に大論争があったものである。現状は頻度

概念の確率を是とする文献が多いが、確信の度合いを確率とする一派も根強く生きながらえている。少なくとも、リスクに関して確率を述べるときは確信の度合いとする確率の定義でないと論理的な整合性が取れない。

リスク管理のための現行の文書はリスクの定義を含め、少しばかり修正の必要があると思われる。また、リスク分野に限らず、信頼性工学分野でも頻度概念の確率定義は見直した方が良いように思われる。

## 参考文献

- [ 1 ] N. Hara, “Unit for Risk Measurement”, IAA-01-IAA.6.2.03, 1-5 November 2001
- [ 2 ] MIL-STD-1629A, “Military Standard Procedure for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis”, 24 November 1980
- [ 3 ] D.V. Lindley, “Introduction to Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint”, 1965
- [ 4 ] N. Hara, “Degree of Belief with a few Data from Inspection by Attribute”, (Draft) ,



## ( 付録 1 ) 頻度概念による確率の加法性について

あるシステム S が二つの独立な要素 A と B から構成されており、S の成功は A と B の両方の成功が条件であるとする。つまり、S の信頼度ブロックは A と B の直列系で表されるものとする。



そして、A、B の成功確率が試験データからそれぞれ、「信頼水準 90 % で 0.9 以上」、「信頼水準 95 % で 0.7 以上」と推定されたものとする。試験データからの成功確率の推定に当たって A という母集団分布形状の仮定などは正しいものとして、結論はこのような表現になる。

つまり A については 10 回に 1 回は外れるような推定法であるが成功確率が 0.9 以上であると言えるということである。あくまでも A という母集団全体の性質としての成功確率が 0.9 以上だという表現である。

すると S の成功確率は、A についても B についても推定が当たっていることは  $0.9 \times 0.95 = 0.85$  であるから「信頼水準 85 % で 0.63 以上」と推定されるということになる。

信頼水準が 90 % 程度でも構成要素が増えれば、システムの成功確率に対する信頼水準はたちまち低くなり、例えば、「信頼水準 10 % で成功確率 0.1 以上」というような表現になってしまう。これは殆ど意味をなさない表現であろう。

もともと、A の成功確率推定においても信頼水準の取り方は任意であり、慣習によるものとして、99 %、95 %、90 %、60 % などが使われているに過ぎない。

これまで、構成要素 A の信頼度として、「信頼水準 90 % で 0.9 以上」という推定が得られたなら、信頼水準を除いた形で「信頼度 0.9」と暗黙の内に仮定されるか、あるいは最尤推定値が用いられる等により、1 点推定に置き換えられて以降の計算が行われていることが多い。これらのことは、確信の度合いとして A に信頼度 0.9 を割り当てたことと変わらないが、論理的でない。

( 付録 2 ) 同様に確からしいラプラスの確率

ラプラスは確率を次のように定義した。

「実験 E の結果として N 通りの状態があって、その内で望む状態 A が  $N_a$  とおりあるとき、どの状態も等しく起こり得るとき、A が起こる確率  $P(A)$  は次式で与えられる。

$$P(A) = \frac{N_a}{N}$$

」

望む状態 A を考えないときは、ラプラスの定義は次のように書き換えられる。

「実験 E の結果として N 通りの状態があって、どの状態も等しく起こり得るとき、どの状態が起こる確率  $P(A_i)$  も次式で与えられる。

$$P(A_i) = \frac{1}{N}$$

」

$P(A_1)$ 、 $P(A_2)$ 、 $\dots$ 、 $P(A_n)$  が等しく  $1/N$  の確率であると「先験的に」与えられる。等しく起こりうるということが判れば、全体が 1 であることから個々の確率は当然  $1/N$  となる。

しかし、取りうる状態の数が N 通りあるということだけで「等しく起こり易い」ということが判らない場合も、確率は全部  $1/N$  でなければならないのである。もし、一つでも確率が他と異なるものがあればそれは「判らない」ということに反する。従って、全部同じ確率でなければならない。 $1/N$  の確率は先験確率と呼ばれるが、どの状態が起こりやすいかの情報が無いときに「必然的に」 $1/N$  にしなければならないのである。

さいころは普通に作られたものであれば、目のでる場合が 6 通りあるので目の目も等しく起こり易いと考えられる。しかし、いかさまさいころであることが判っていても、どの目に細工がしてあるか判らなければ、全ての目が出る確率は等しく  $1/6$  であるとせざるを得ない。

数学は抽象上の概念として「同じ」がある。しかし、実世界における「同じ」ということは「違いが判らない」ということである。如何に同じ工程で作った二つのコインであっても微視的には必ず結晶欠陥の有無が相互に異なっている。まして、コインを投げる力のかけ方などが完全に毎回同じであることはあり得ない。人間の能力において違いが判らなければ同じと見なしているに過ぎない。

さらに、問題とする事項として表がでるか裏が出るかであれば、コインの種類が違っていても同じ実験と見なせるのである。

つまり、「同じ」とは「対象とする命題に関して違いがわからない」というこ

とを言い換えたことなのである。

このことから強い確信として「等しく起こりやすい」と言える状況は、本来「違いが判らない」状況に加えて、「等しい」という先入観が入っているものである。通常のさいころは作った時点で、「等しい筈」という先入観がもたれる。コインも作った時点で表と裏があるという先入観が与えられる。両面とも表が鑄造されたなどとは考えないだけである。

ラプラスの定義における「等しく起こりやすい」の事象の意味は、実世界においては、強い確信をもってそのように言えることは少ない。むしろ弱い確信で「等しく起こりやすい」とみなすしかない事象が多い。

情報のない最初の状態では、事前確率としてラプラスの定義を採用する必然性がある。この定義による数値は物性ではあり得ず、人間の心に属することで、やはり確信の度合いの意味をもつ。ラプラスの定義は「確率を命題の真偽に関する確信の度合いとする」定義に含まれるものである。