

IAA-01-IAA.6.2.03

リスク測定の単位

原 宣一
宇宙開発事業団
東京

概要

これまで、リスクはリスクそのものでなくリスク指標で評価されてきた。しかし、現行のリスク指標はリスクに正しく対応していないので適切な評価とは言えない。リスクは常に高い低いと比べられるべき対象であるから、リスクは1次元値であることが必要である。そのため、リスクは損失の期待値として定義することが適切である。さらに、我々はリスクが価値の次元を持つことを明確に認識すべきである。リスクに対しても、円、ドル、のような貨幣価値の単位を用いることによって、リスクは測られ得るのである。そして、確率を確信の度合いであることを明確に認識することも必要である。これらのことがリスクは加算的であることを保証する。このようにリスクの単位を意識すれば、リスク評価も相対比較に留まらず絶対的な比較が可能となる。絶対的評価が出来ることは定量的リスク評価の基礎を与えるものである。新しいリスク指標としてリスクの値の常用対数を採用することが極めて役に立つ。損失と発生確率の常用対数を考えることにより、リスク指標を簡単に求める事が出来るばかりかこのリスク指標はリスクに正しく対応している。同じ理由により FMEA で使われるリスク優先数 (RPN) も新しいリスク指標で置き換えられるべきである。

はじめに

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。リスクは価値を失わないための行動に必要な用語だから、重要な概念なのである。

近年、開発作業においてはリスクも資源の一つとして考えられている [1]。しかし、現時点では用語「リスク」の定義が常に唯一のものとは言い難い状況にある。用語「リスク」はしばしば懸念事項のために用いられている。これは「リスク事項」と呼ぶべきで、「リスク」概念とは区別されるべきものである。ただし、安全解析分野においては、「リスク事項」のために「ハザード」という用語が用いられている。

プロジェクトマネジャーの最も重要な業務はそのプロジェクトのリスク管理で

ある。それは開発のために最適な資源配分が要求されるからである。それ故、常にプロジェクトに関わるすべてのリスク事項を識別し、それら事項の適正なリスク評価に基づくリスク制御が必要である。しかし、これまでのところ制御されるべきリスクはその評価方法としてのリスク指標が少しばかりあいまいである。

1. 現行のリスク指標

図1はリスク指標を用いた安全解析におけるリスク評価マトリクスの典型的な例として、もはや古い文書であるが(NASDA-STD-12)を示す[2]。この例の評価マトリクスの場合では、過酷さはI破局的、II重大、III軽微、IV無視し得る、の4行に分類されている。最高得点4がIに、最低の1がIVに与えられている。しばしば、起こり易さとか頻度と呼ばれる発生確率は、Aしばしば、B合理的に起こりうる、Cときどき、Dまれに、E極めて稀に、F可能性無し、の6列に分類されている。最高得点6がAに、最低の1がFに与えられている。このマトリクスの要素は2種の得点値の数学的乗算結果、即ち、積が入れている。この積がリスク指標と呼ばれているものである。リスク評価が必要な他の局面、環境影響評価、FMEAにおけるリスク優先数、等でもリスク評価の指標は本質的に同じ「得点値の乗算」定義である。典型的な意思決定基準はこのようになる。「リスク指標の値が10以上なら許容できない。そのハザードのリスクを低減するために何らかの処置が必要である。」

総てのハザードが識別された後、個々のハザードが過酷さと起こり易さ、或いは頻度について検討される。そして、おのおのハザードのリスクはこのリスク・マトリクスの位置で評価される。リスク指標がかなり高い値の事項は明らかに許容できないものであり、逆に、十分低い値の事項は明らかに無視し得るものである。その事項のリスク指標値がボーダーラインに近い時がいつもプロジェクトマネジャーを悩ます懸念事項である。これらはしばしば実際問題として合理的に低い(ALARP)領域と呼ばれている。

		ハザード 確率					
		F	E	D	C	B	A
ハザード 過酷さ	IV	1	2	3	4	5	6
	III	2	4	6	8	10	12
	II	3	6	9	12	15	18
	I	4	8	12	16	20	24

図1 安全解析におけるリスク評価の典型的な例

しかし、ここに提起されるべき問いかけがある。このリスク指標はリスクの量に対応しているのだろうか。さらに、行列の数は任意に決められたのではなかったか。プログラム・マネジャーが処置を取るか否かの決断を下す重要な部分なのだから、我々はこの領域の決め方に神経を集中すべきである。そして我々はこの評価方法がリスク自体を用いていないということに注目しなければならない。

2. リスクの定義

世間で使われているリスクの定義は多い。しかし、それらを二つのグループに分けることができる。最初のもは、要するに、「リスクは事故が生じた時の損失の程度とその事故の起こり易さ（頻度）の組み合わせた概念である」。これは典型的に NASA 文書に見られるもので、「負傷または喪失の機会にさらされること。望ましくない事象発生に可能な頻度とよってきたる結果の可能な過酷さの関数である」[3]、または「現実的な発生の確率とプログラム全体としての成功に好ましくない結果を持つところの望まない状況または周囲環境」[4]。ESA の文書には、本質的に NASA の定義と変わらないが「一つのプロジェクトに関して潜在的な負の結果とその発生の確からしさを持つ望ましくない状況または周囲環境」[5]。

もう一方のもは、例えば、国防省の文書に見られるもので「発生確率とハザードの人や設備への影響の両方を考慮する一つの測度である。リスクは負傷、死傷、或いはドルの喪失、のような影響と同じ単位で測定される。射圏安全に関しては、リスクは惨事の期待値、またはリスク側面図として表現される。」[6]。この定義において、リスクは災害の期待値であり、影響と同じ単位で測定されうる。

もし、我々が NASA または ESA の定義を採用するならば、もう一つの用語「リスクの評価関数」を定義する必要がある。リスクは高い低いと比べることに意義があるし、比べることが出来る量は次元値のみに限られるからである。我々は次元値のみ比較できる。この事実は二つの長方形を考えてみれば容易に納得できる。我々は比較のために対角線長、周囲長、面積、或いは縦横比のような評価関数を定義しなければならないだろう。

それ故、損失の期待値がリスクの評価として最も適切な関数である。期待値とは確率を重みとする重み付き平均値である。NASA による上述の「リスク」の定義は「リスク事項」の定義にほかならない。国防省が採用しているように「損失の期待値」が「リスク」の定義に最もふさわしい。

リスクには、「安全上のリスク」、「スケジュールのリスク」、「放射線のリスク」等、様々な形容詞をつけて用いられると人は言うかも知れない。しかしこれらの総てが懸念事項であり、これらの形容詞はリスク事項の過酷さの表現に他ならない。

それ故、これらの過酷さはすべて計算されねばならない。スケジュールリスクに対してさえ、スケジュール遅延に対する損失の量が換算により価値の単位で表されねばならない。それは同じ1ヶ月の遅延であっても時と場合により全く違う影響を与えるからである。

3. 過酷さの単位

リスクは言い換えると失うかもしれない価値に対する懸念である。つまりリスクを構成する二つの要素が失う価値とこれを失う可能性である。前者が過酷さと呼ばれるもので、懸念する事故が起きた場合に被るであろう損失の大きさである。損失の内容はリスク事項の違いにより様々である。失敗しても再製作により再チャレンジが出来るものであれば、失うものは再製作費だけであろう。しかし、時期を逃すと再チャレンジ出来ないものであれば、失うものは制作費だけではない。ミッションの価値を失うことになる。有人ミッションであれば、事故で失うものは人命である場合もある。人命に対する価値も時代と社会的背景により変わりうる。しかし、どの保険会社もするようにそれは評価されねばならない。無人ミッションの場合はその損失も比較的気楽に評価し得るであろう。通常、それはコストよりずっと大きく評価されよう。これらすべて事故で失うものは常に価値であることは変わらない。

一般に「金額に換算できない価値」と言われるものも多い。人間の命は貨幣価値と同じ単位で測定できない、または測定すべきでないと言う人がいるかも知れない。しかし、この表現は少しばかり宗教的か情緒的な表現であり工学的な表現ではない。プロジェクトマネジャーはどの処置を取るべきか常に合理的にかつ冷静に判定しなければならない。リスクを考える場合には必ず失う価値を見積もらなければならない。懸念する事故が起きれば大きな損失を被るのか、軽微なものですむものかを見積もる必要があるからである。人命であっても、無限大と見て済ませてはならない。正確に見積もれないからと言う理由で無視できる、軽微、重大、破局的の4段階では足りないのである。

リスクのために、新たに価値の単位を作ることが考えられる。しかし、常に換算する事が必要なので、結局、円やドルの金額で測ることになる。従って、過酷さの単位はドルを使うことが良い。正確さは必要でなく、桁が分かれば事足りるので、大胆に過酷さを見積もれば良い。4段階では少なすぎるので10段階程度に増やすことに過ぎない。

4. 確率の定義

今日まで、工学分野における確率はフォン・ミーゼスによる定義が用いられてきた [7]、[8]。これは相対頻度の極限值とするものである。確かさは多くの事象を観察することによって形成される確信であるから、この定義は自然で統計的な確率

であるかもしれない。一方、一度しか経験し得ない事象については、現行の頻度概念の確率を適用することには無理があることも否めない。

サベッジは確率の定義を「命題が真である確信の度合い」とした [9]。確信の度合いは人間の心の状態であるから、これは主観確率とも呼ばれる。この定義による確率であってもコロモゴルフによる数学的確率のための三つの公理を満たすことが出来る [9]。従って、数学的確率理論を適用できることは頻度概念の確率と同じである。情報を得ることにより確率がどのように変わるかを客観的に表すことはベイズ流統計学者の立場でもある。主観確率は理論として確立していることである。ラプラスの確率の定義は情報が何も無いときの確率の与え方を決めるもので、主観確率の定義を補足するものとみなすことが出来る。従って、この定義は主観確率の補足と見なしうる。情報理論において最小情報量の状態はラプラスの定義に基づいて割り当てられた確率に他ならない。

図-1 の例では、頻度は「しばしば」から「可能性なし」までの6段階に分けられていた。これらの表現はあきらかに主観的であり、しかも6段階でしかない。「しばしば」という表現も人によって受け止め方が異なる。そこで、事故発生の可能性の程度は確信の度合いという主観確率であるとみなした方が良い。そうすれば、発生の確かさについても数値表現が可能になる。即ち、「しばしば」という表現の変わりに、例えば、1/10の確率であると表現することになる。

確率を見積もることは損失見積もりよりも難しい。それは我々が非常に小さな確率を把握することに慣れていないからであろう。これは、我々が10億とか1兆とかの大きな数字を訓練なしに認識することが難しい状況と同じである。しかし、幸いなことにリスク評価には損失も確率も正確な数値は必要ないのである。それら値の桁を示せばまず十分である。

5. リスクの単位

リスクは損失の期待値とする先述の定義を認識することによって、我々はリスクが価値の次元を持つことも容易に認識できる。確率は無次元であり、過酷さはそれがどのようなものであっても、損失額として円やドルのような貨幣価値の単位を用いて測定されうる。それ故、リスクは損失の期待値であるから、リスクは過酷さと同じ単位になる。過酷さのために新たな価値の単位を作る必要がなかったように、リスクのために新たな価値の単位を作ることも不要である。しかし、事項で定義する新たなリスク指標はリスク評価のための単位と考えることもできる。直接的にドルや円と言わないだけ、人々に無用な刺激を与えず受入安いと思われる。

6. 有用なリスク指標

上述のリスクの単位によって、例えば、破局的とは100億ドル以上の損失、というように過酷さに対し現実の損失額をドルという貨幣単位で与えることができる。そして確率に対しては、例えば、しばしばとは1/10の確率というように、実数値を割り当てることができる。図1で示されたマトリックスのすべての要素にリスク指標の変わりに実際のリスク値をいれることができる。実際のリスク値は上述の損失額と確率を乗じた値である。我々は例えばリスクが1万ドル以下の事項ならば許容できるかもしれない。

我々は桁を知ることをさえ出来ればよいので、確率および損失に常用対数を用いることは賢明である。それで、図1の例は図2になろう。図1の得点の積に置き換えられた数値は改訂リスク指標として記載されている。それから、ALARPの境界が前者のものと異なっていることを見るであろう。このことがリスクをリスク自体で評価すべき理由を示している。

		確率						
		F	E	D	C	B	A	
過 酷 さ	IV	4	-2	-1	0	1	2	3
	III	6	0	1	2	3	4	5
	II	8	2	3	4	5	6	7
	I	10	4	5	6	7	8	9
			-6	-5	-4	-3	-2	-1

図2 図1の改訂リスク指標での安全評価

リスク指標の-2は1セントに対応するのでそのような事項は無視すべきである。また、図2はリスク指標が4以下の事項ならば許容できるとして境界線が引かれたものである。また、過酷さの指標が4、6、8、10となっているが行を増やすことも自由である。むしろマトリックスそのものが不要であろう。

図1のマトリックスは24(4x6=24)種のハザードに対する順序づけと見ることが出来る。過酷さに1から4の得点を与え、確率に1から6を与えると、これら得点の積と定義された関数は15種の値を取る。即ち、図1は24の状態(2次元)から15の状態(1次元)への写像関数である。同様に、図2は24の状態(2次元)から12の状態への別の写像関数である。しかし、後者の関数はリスクに正しく対応しているという重要な違いがある。

図3はリスク受入の意思決定に関して、如何に写像関数が働くかを示すものである。図1の例で24種のリスク事項があった。意思決定の直前では常に2つの状態

にまで写す必要がある。

	F	E	D	C	B	A	
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
IV	4	-2	-1	0	1	2	3
III	6	0	1	2	3	4	5
II	8	2	3	4	5	6	7
I	10	4	5	6	7	8	9

2 4 (4 x 6) 種のリスク事項

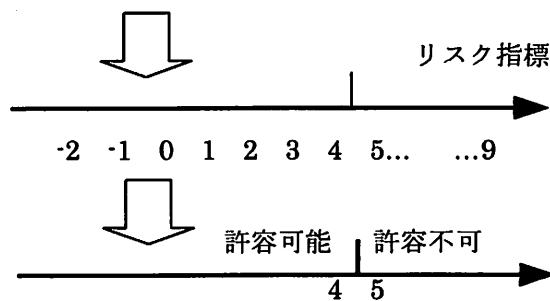


図3 写像関数と意思決定

7. FMEA とリスク優先数

環境影響評価やFMEA、等、リスクを評価する必要があることは多い。リスクは貨幣の単位で測って良いことを念頭に置くと、これらもリスク評価の主要部分が改訂されねばならない。故障モード及び影響解析 (FMEA) または故障モード、影響、及び致命度解析 (FMECA) は、これまで信頼性解析の代表的な解析であったし、今後ともその有効性は変わらないであろう。しかし、各アイテムの重要度を比べるための指標として使われているリスク優先数(RPN)はリスクに対応していない[10]。

ある部品のリスク優先数 (RPN) とは、その部品が故障した場合の影響の大きさ、故障する原因の欠陥が作られる可能性、そしてその欠陥を発見し除ける可能性の3種類の検討事項に対し、1～5、または1～10等のスコアを与え、これらを掛けあわせた数値である。RPN が大きなものは対策を取る必要があるとするものである。

故障する原因の欠陥が作られる可能性 (確率: P_i) と検査で見逃す可能性 (P_o) との関係は、故障原因が作られ、かつ検査で見逃した結果が最終的な製品の故障確率 (P_f) になるので、 $P_f = P_i \times P_o$ という関係式が成立する。ここで、 P_o は故障原因が作り込まれたという条件のもとでの条件付き非発見確率である。つまり、確率のまま掛けあわせる必要があるにも関わらず、それぞれのスコアを掛けあわせ

ているところももう一つの論理的でないところである。そして、RPN も3種類のスコアの積に過ぎないので損失の期待値と定義するリスクに対応していない。

表-1 はFMEA のRPN をリスクの常用対数(CLR)に置き換えた改訂 FMEA の主要部分を示すものである。FMEA のリスク評価の部分がどのようになるかを示したものである。数値は小数点以下一桁を取れば、リスクの絶対額で有効数字1桁を確保できる。例えば、CLR=4.3 はリスク2万ドルに対応する。

表-1 改訂 FMEA の主要部分

アイテム名称	故障モード	損失 SI	確率 PI=OI+DI	発生 OI	検知 DI	リスク指標 CLR=SI+PI
エンジン 燃焼室	焼損	10.0	-5.0	-3.0	-2.0	5.0

ここで、

SI：影響度指標 (= 損失 (ドル) の常用対数)

PI：確率指標 (= 故障確率の常用対数 = OI+DI)

OI：発生指標 (= 故障原因組み込み確率の常用対数)

DI：検知指標 (=見逃し確率の対数)

8. おわりに

最適のリスクの定義は損失の期待値である。リスクの単位は価値の単位と同じである。貨幣単位の代わりにリスクのために新たな価値の単位を創設する必要はない。それでリスクは円やドルで測られるべきである。リスク指標としてドルで測られたリスクの常用対数を採用することが有用である。リスク事項に対するリスクを価値の単位で表すことにより、リスクマトリックスは不要になるが、リスク事項の二つの要素、損失の度合いと発生確率、を常に意識することは良いことである。

通常、リスク低減または制御のために追加の費用がかかる。この追加コストはリスク低減が追加コストよりずっと大きいときにのみ支払われるべきである。シャトルの向上計画を PRA (定量的リスク解析) に準拠して進められている[11]、[12]ことは納得できることである。但し、リスク概念の基礎として本稿のリスク測定単位の単位が明確に認識されなければならない。

我々はプロジェクトが高コストであるだけでなくハイリスクであってもそれを進めるかもしれない。それはミッションの価値が十分高いときに許されることである。即ち、ミッションの価値はコストとリスクの和より大きいことが必要である。

これがすべてのプロジェクトに対する ATP (計画実行への正式認可) のための必要条件である。このような関係式を導くためにも、リスクは価値の単位で測られねばならない。

価値の概念は人間が作ったものであり、人間に依存している。それ故、損失の額もまた人間に依存している。リスクの概念は人間が作ったもので、人間に依存していることも明らかである。しかし、リスクを構成するもう一つの要素、確率はその属性に関しても主観的であることを嫌う考えが、工学分野では主流となっていることは奇妙である。

参考文献

- [1] IAA-97-IAA.6.2.06, "Risk as a Resource", M.Greenfield
- [2] NASDA-STD-12、システム安全標準、1992年6月
- [3] SSP 30309E " Safety Analysis and Risk Assessment Requirements Document International Space Station Alpha Program", October 28, 1994
- [4] "Risk Management Overview",
<http://iss-www.jsc.nasa.gov/ss/issapt/prmait/overview-01.html>
- [5] ECSS-M-00-03A "Space Project Management – Risk Management", 25 April 2000
- [6] "Eastern and Western Range 127-1", Range Safety Office, 31 Oct 1997
- [7] "Probability, Random Variable, and Stochastic Process", Papoulis, 1965, McGraw-Hill
- [8] "Probability, Statistics and Truth", Richard von Mises, Dover
- [9] "Introduction To Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint", D.V. Lindley, 1965
- [10] N. Hara, "A Proposal of Revised FMEA", 30th Symposium on Reliability and Maintainability, July 11-12, 2000, Japan
- [11] IAA-00-IAA.6.2.07, "NASA's Use of Quantitative Risk Assessment for Safety Upgrades", M. Greenfield
- [12] "Space Shuttle Probabilistic Risk Assessment", J.R. Fragola