

解説論文 工学分野におけるリスク論の基礎 地 盤工学と自然災害を例題として

著者	飛田 善雄
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	54
号	1
ページ	25-44
発行年	2020-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024153/

工学分野におけるリスク論の基礎： 地盤工学と自然災害を例題として

Fundamentals of Risk Theory in Engineering Science : Issues in Natural Disasters and Geotechnology as Examples

飛田 善雄*
Yoshio TOBITA

Abstract: The fundamentals of risk theory in the field of engineering science are reviewed and discussed in this paper. The risk theory has been studied and is used in various fields. Risks in engineering science have been principally defined as the product of probability and hazards; however, the definitions of risks in various fields are different from each other. The risk theory is currently used as a fundamental tool in the decision-making in significant projects and political issues. The fundamental knowledge on the risk theory in engineering science may be helpful to students in this field, in terms of their careers and life. Examples are selected primarily from issues pertaining to natural disasters and geotechnology, which may be common to various risks in other fields.

Keywords: Risk, Hazards, Probability, Uncertainty, Decision-making

1 はじめに

リスク、リスク論(学)、リスクマネジメントという用語は現代社会にとって必要な概念となっている。多くの啓発書が出版されている。リスク論を議論している研究分野は多岐にわたる。○○リスクの○○に相当するものとして、政治、経済、金融、テロ、戦争、健康、食品、医療、災害などが挙げられる。これらのすべての分野で、リスク論的手法が議論、研究、利用されている。

近年、リスク論に基づく手法を自然災害の減災などの大きなプロジェクトや国の政策決定の基本的道具の一つとして多くの国が位置付けている。日本も例外ではなく、原子力発電所の再稼働の基本的手法となっている。

社会問題から技術まで広範囲な問題に利用されるリスク論の基礎を学んでおくことは、技術者として有用なばかりでなく、自分自身の仕事や人生にとっても役立つものと期待できる。誰にとってもその

一生は、リスクや不確実性と無縁ではない。特に、これからの社会は、不確実性が高く、大きく変動する激動の社会である。AIが人間の雇用を奪う可能性、格差社会の一層の進展、環境問題の深刻化などが社会に不安定さをもたらすことが懸念されている。リスク論の基本的事項を身に付けることは、おそらく個々人の人生にとっても必要であり、重要なことである。

本論では、リスク論の歴史、リスクの定義、リスクをもたらす不確実性などの基本的事項、リスクの基本的性質、リスクを低減するための基本的プロセス(アセスメント、マネジメント、コミュニケーション)の役割を振り返り、リスクを低減するための制度、責任問題、さらにリスク論を取り入れることの意義について考察する。

議論の主たる対象は、工学分野に限定する。議論の発散を防ぐために、例題は筆者の専門領域の地盤工学および自然災害とする。しかし、理工学のような分野であれ、事故あるいは災害の低減に対して、共通性を見出すことができよう。

*東北学院大学工学部環境建設工学科教授

2 「リスク」の簡潔な歴史

2.1 海事保険としての発達

リスクという考え方の起源については諸説ある。ここでは、文献[1]に従い、その歴史を簡潔に述べる。

最も一般的な説明は、文明の発達とともに発展した海運業に係わるとされている。技術的に未熟な船や操船は海難事故の可能性が高い。しかし、無事であった場合に得られる利益は膨大である。紀元前4世紀のアテネの史料で、エーゲ海を航行する船舶に一種の保険が掛けられていたことがわかる。

現代の保険制度の原型として、13世紀以降にイタリアを中心に海事保険が発達した。地中海貿易から大西洋貿易に移行し、保険の中心地は阿姆斯特ダム、さらにロンドンに移動した。1688年にロンドンにロイズが設立され、以後海上保険の中心地となった。

19世紀後半から20世紀にかけて市場経済と経済学の理論形成が活発になり、利益や利潤の分配理論にも大きな関心が払われるようになった。

2.2 科学技術の発達とリスク

リスク論は「保険」を中心に経済的対処に利用されてきた。しかし、第2次世界大戦後の科学技術の大競争時代に新たな展開を見せることになる。科学技術の発達は、武器の発達によりもたらされたともいわれている。特に、核技術開発は新しい問題を提起することとなった。核兵器ばかりでなく、平和利用目的の原子力発電技術も、従来の工学技術とは異なり巨大なエネルギー制御を基本とするシステムである。一旦制御不能となった場合のハザードは計り知れないものがあり、警戒すべき技術としてリスク問題を惹起した。

米国は、1954年に原子力の商業利用の道を開いたが、損害規模の予測ができず、保険も成立しないと考えられたために、産業界は消極的な対応となった。このため、連邦政府は、事故時の事業者の賠償額に上限を定め、それ以上は政府が実質的に事故補償をする趣旨の法律を制定した。これらの過程において、様々なリスクアセスメントが実施された。その際に、最悪ケースの分析等が実施され、初めてリスク計算に事故確率計算が加えられ、確率論的リスク評価が実施された。しかし、事故確率をどのように行うべきか、その方法論(モデル化)について意見は分かれた。

科学技術の発達が生み出した化学物質も環境に大きな影響を与えた。著名なレイチェル・カーソンによる「沈黙の春」[2]の出版により、米国では大規模な環境運動がおこり、農薬の影響や化学工場の労働者の健康問題が政府の取り締まりの対象となった。化学物質については、発がん性が問題となった。また、これらの物質が大気や地下水により拡散して低濃度になりながらも、広域汚染になっている事実が示された。また、食物等を介しての体内濃縮の問題も指摘された。

これらの問題に直面した環境・保険分野では確率論的リスク評価に関心を示した。事故発生確率を暴露確率(例えば、1年あたりどの程度摂取するかの評価)に置き換え、それと化学物質の量と発がん性の関係性を評価した。この分野の研究は、リスク分析やリスクアセスメント研究を大きく発展させ、「リスク」という用語が社会的に認知されることとなった。

環境に係わる問題は、一般市民の生活と健康に直結する問題であるために、多くの訴訟があった。このため、米国政府は、科学的実証が十分でない段階で、企業側に厳しい規制基準を課すこととなった。この基準に対して、企業側が訴訟を起こし、「不十分な根拠に基づく規制」との司法の判断で敗訴となった。これを契機として、リスクアセスメントによる科学的立証に関心が集中した。これらの法廷闘争を整理するために、「リスクアセスメント」と「リスクマネジメント」を概念的に明確に分離し、前者を科学的知見に基づくプロセス、後者をその他の要因も考慮する政策決定プロセスと分離することとした。1980年代からのリスクアセスメントは、科学技術的に厳密な検討がなされるようになり、データの質も飛躍的に向上した。しかし、本質的にこの2つの概念は不可分の関係にあり、後に大きな議論をもたらすこととなった。

リスクアセスメントの質と量が充実し、信頼性が増したことにより、リスクの専門家の一部は、科学的データのみから政策決定も可能との意見を持つようになった。しかし、この意見は、非科学分野、特に、社会学系分野の専門家を刺激し反発を買うことになった。その代表的な騒動として、専門家と一般人のリスク認知のギャップが挙げられ、リスクコミュニケーションの重要性が認知された。

現代のリスクに関する議論では、科学技術的リスクアセスメントばかりでなく、心理学(リスクの認知)、社会学(リスクの拡大、メディアバイアス)、文

化理論(価値論や責任論など)の領域も加わっている。これらのすべてに配慮して、意思決定を行うことが必要になっている。

リスク論の発展については、優れた文献[3]がある。主に経済学との関連が主体であるが、パスカル、(ヤコブ/ダニエル)・ベルヌーイ、ポアンカレ、フォン・ノイマンなどの理工系ではおなじみの偉人達もリスクに興味を示し、数理的取り扱いで大きな貢献をしていることがわかる。

2.3 自然災害とリスクマネジメント

何らかの新製品や新薬の研究・開発、大規模な宅地開発などを、本論では一括して「事業」と呼ぶ。これらの事業は、様々な検討がなされ成否の予測がなされる。しかし、種々の事情により、予測(期待)から外れて、大きな損失をもたらすことがある。

科学技術の発展によりもたらされた化学物質、自動車、電気機器、工場、巨大プラントなどによる事故や災害の発生は、システムの不備、操作ミスなど人為的なものであることが多い。これらの人為的な原因から生じる物的損害や生命の喪失は人為的災害と呼ばれ、リスク分析の対象となりえる。

一方、地震、火山爆発、洪水などによる被害は、その原因が自然現象である。これらの自然災害は「天災」と呼ばれ、対抗するすべはないものとされてきた。これらの天災は人間社会への警鐘として神(あるいは天)の仕業と考えられ、治世者の不徳とされた。治世者交代の背景となった。

文明の発達とともに、自然災害に対してもある程度対策をとることが可能となった。可能となった理由は、資本の集積と建設機械の発達を理由に挙げることができる。対策がある程度可能となったため、自然災害に対しても人為的災害と呼ばれるべき被害が発生していると問題視された。

例えば、河川の氾濫に対して大きな堤防を構築したとする。この堤防により、氾濫のリスクは小さくなり、住宅や工場の建設が進められた。大雨が降り、破堤した場合には、これらの住宅や工場は大きな被害を受けることになる。このとき、「河川の計画水位の設定は適切であったか」、「住宅や工場の建設を認めた行政の責任」、「洪水の危険性の住民への周知は適切であったか」などの批判や行政訴訟が出てくる。これらの災害発生や批判にどのように対処するかもリスク論の対象となる。

自然現象である地震や洪水が、人為的構造物を破壊し、さらに大きな災害をもたらすことがある。その代表的な事例が、2011年東北地方太平洋沖地震の津波による福島第一原子力発電所の被害と放射能拡散である。その損害額は膨大なものであり、現在でもその損失金額は算定できていない。

建設段階で想定されたよりもはるかに高い津波の可能性が国より指摘され、対応策が事業者に求められた。結果として、この指摘を無視することとなり大災害となった。想定外の事態に対するシビアアクシデント(過酷事故)対策としてメルトダウンを防ぐための外部電源の確保もなされなかった。このために、事業者責任を追及するとして様々な訴訟がなされ、現在係争中である。

原子力発電所の再稼働にあたっては、リスク論的アプローチにより、より安全なシステム構築とそれに基づく事業を実施する旨の宣言が電気事業連合会より出されている[4]。

危険物質を製造する工場や保管する倉庫で事故や破壊が起こった場合に、近隣の住民を含む大きな被害になるケースは世界中で起こっている。その原因が自然現象であっても、十分なリスクアセスメントに基づく対策は不可欠なものと認識されなければいけない。また、科学技術の進歩により、当初段階では想定されなかったリスク要因が生まれることもある。これらのことに対して、適切に対処するための方法論も不可欠となっている。

効率と経済性を重視した人間社会は、その脆弱性を増加させている。これを地震や大雨などの自然現象が鋭く攻撃し、被害を甚大なものにする可能性は高まっている。

首都直下型地震では、地震により河川堤防が崩壊し、海拔ゼロメートル地帯に海水が進入し、さらに地下鉄や地下街を襲い、甚大な被害をもたらす「地震洪水」が心配されている[5]。多くの機関が当事者・関係者となる連鎖型・複合型災害であるために、その対策はなかなか進まない。

3. リスクの定義

3.1 リスクの定義の多様性

リスクの概念は、多くの分野にまたがるものであるために、その定義も多岐にわたっている。代表的なリスク論の文献[6]では、「リスク」という用語の一般的用法として、以下の5つの分類を挙げている。

1. 起こるか起こらないかわからないが、望ましくないできごと
2. 起こるか起こらないかわからないが、望ましくないできごとの原因
3. 起こるか起こらないかわからないが、望ましくないできごとの確率(頻度)
4. 起こるか起こらないかわからないが、望ましくないできごとの統計的期待値
5. 確率がわかっている条件の下で決定がなされるという事実

広い領域の問題に含まれるリスクを、共通する概念で定義しようとする、どうしても曖昧なものになってしまう。例えば、科学技術分野の広範な問題を対象とする日本工業規格では、JISQ31000[7]では、リスクを以下のように定義している。

リスク＝「目的に対する不確かさの影響(期待されていることから、好ましい方向／又は好ましくない方向に乖離すること)」

この定義は、国際的な基準 ISO31000[8]に準じて改訂されたものであり、広範囲の事象を対象としたものとなっている。

以下では、損得の両面をもつ投機的リスクは対象にせず、事故、崩壊、災害などの事象を対象とする。このため、本論では、リスクは好ましくない結果、損失に限定した議論となる。

これらの中で、科学技術の分野で最も用いられているのは、4. の定義である。リスクを、自然現象や人間の行為がもたらす負の影響に対して考えた場合には、考察の対象は被害、損害となる。これらの被害、損害の大きさをハザードと呼ぶと、リスクは次の式で定義される。

$$\text{リスク} = \text{確率} \times \text{ハザード} \quad (1)$$

文献によっては、ハザードの部分、結果(outcome)などの別の用語が用いられることがある。この式が意味するところは、次のように表現できる。

リスクを適切に把握するためには、被害の大きさ(ハザード)ばかりでなく、その起こりやすさ(確率)も同時に考慮することが必要である。

例えば、10年に一回起こる河川の洪水被害が平均して500億円であるとする。一方、500年に1回起こる巨大地震の被害が10兆円であったとする。損失の大きさ(ハザード)という点では、明らかに甚大な被害をもたらす巨大地震の対策が優先されるべきである。しかし、この2つの被害に対して、式(1)で計算してみると、小さな河川の洪水は1年換算で50億円であり、巨大地震は、1年換算で20億円となり、河川洪水の対策事業の方がリスクは高いことになる。

科学技術分野におけるリスク論の利用においては、式(1)が基本となる。しかし、適用された分野において、最も有用なリスク指標となるために、式(1)とは異なる表現方法がとられることが多い。例えば、自然災害の分野では、次の式で定義されることが多い。

$$\text{リスク} = \text{ハザード} \times \text{脆弱性} \quad (2)$$

式(2)では、確率はハザードの中に含まれることになり(この場合のハザードは被害総額を意味するものではなく、それらの期待値をあらわすことになる)、脆弱性という概念が定義式の中に明示されることになる。

このような定義が用いられる理由は、脆弱性を低下させれば、リスクの低下になるという計算結果が得られることである。つまり、新しい堤防を造るハード対策を行う、あるいは避難訓練や啓発・教育活動などのソフト対策を行えば、脆弱性は低下する。その結果としてリスクは低減するために、自然災害に対する脆弱性対策の効果をリスク指標の低減として陽に表現できることになる。

さらに、より一般的な自然災害の指標として、次の式が用いられている[8]。

$$\text{リスク} = \text{ハザード} \times \text{暴露} \times \text{脆弱性} \quad (3)$$

式(3)では、暴露という要素を独立させている。暴露は損失を被る可能性がある影響範囲の住民の数を表現している。

首都直下地震のリスクを考えたときに、前記の脆弱性を低減するハード・ソフト対策では不十分で、暴露を減らすことの重要性を主張する専門家が多い。すなわち、被害を受けるであろう地域の住民の移住がリスク低減に不可欠とされる。このような議

論を行うためには、リスクの定義に暴露の明示が有利になる。

化学物質を取り扱う分野では、式(1)の確率に相当する部分を**暴露**と表現し、化学物質を体内に取り込む可能性を表現するものとなる。汚染源からの距離や汚染物質の拡散現象などを考慮して決定される。また、ハザードに相当する部分は化学物質の被害の程度を表現するものであり、**用量/反応関係**となる。この関係はマウスなどの小動物の実験結果に基づき、安全率を見込んで決定される。

規制対象の基準値としては、生涯(70年間)毎日2リットルの摂取で10万人に1人がガンを発症する量とされる。例えば、多くの化学物質(例えば、ヒ素やカドミウム)に関しては、0.01mg/l が採用されている。

以上、いくつかの例を示したように、科学技術の分野では、式(1)の定義が基本となっていることが多い。しかし、文献によっては、対象が限定されず、リスクの定義が不明確であり、章ごとに定義が異なっているものもある。よって、リスク関係の文献を読み解く際には「この本のリスクの定義はどんなものか」のチェックが必要となる。

3.2 不確実性という用語

次の章では、物質の性質、被害をもたらすメカニズム、人の判断には不確実性があり、これらをリスクの原因として議論を進めることになる。注意しておきたいのが**不確実性**という用語の使われ方である。不確実性という用語は、リスクに対比する概念としても用いられてきたので、以下に説明する。

リスクに対する学説としては、(1)損害発生可能性や確率を問題の中心にすえる説と、(2)予測の困難さや予測とのずれに焦点をおく不確実性説、これら2つに大別できる。

リスクと不確実性の区別においては、リスクを確率と結果の掛け算と考え、確率および結果が既知とできるときを「リスク」とし、その発生確率が予測困難なときを「不確実性」としている(ナイト Knight (1921))。ナイトは、確率を利用すれば、どのような事象でもリスクを評価できるとする当時の風潮に強い批判を浴びせた。さらに、Stirling(2007)は、結果(損害)も明確に定義できない場合があることを示唆し、図1に示すような分類を行っている。

このような意味での不確実性は、経済分野を中心に今でも広範に用いられている。不確実性がど

	確率・頻度	被害の大きさ	例
リスク (Risk)	既知 (Known)	既知 (Known)	交通事故 がん 重金属
不確実性 (Uncertainty)	未知 (Unknown)	既知 (Known)	大地震 噴火 小惑星
無知 (Ignorance)	未知 (Unknown)	未知 (Unknown)	新型ウイルス 遺伝子操作作物

図1 リスク・不確実性・無知の定義

のような意味で用いられているかも注意する必要がある。

繰り返しになるが、本文では、リスクをもたらす原因が、様々なステップでの不確実性であるとし、リスクは不確実性をもたらすとす、より現代的な考え方を採用している。

4. リスクをもたらすもの：不確実性

4.1 不確実性のイメージ

不確実性という用語に対してどのようなイメージをもてばよいのか、分野によって大きく異なるようである。本論での**不確実性の定義**は、以下のように想定する。

$$\text{不確実性} = (\text{実際の状況あるいは数値}) - (\text{想定した状況あるいは数値}) \quad (4)$$

設計では、安全性を評価する指標を計算するために、必要となる物性(質量、強度など)やモデル(計算方法)、初期条件/境界条件を想定する。その想定した状況や数値は、実際の状況や数値とは異なるのが普通である。その差が大きい状態を「不確実性が高い」と表現することになる。

差として定義する必然性はなく、問題によっては、**比**として定義したほうが便利なことはある。その分野特有の問題、発展の歴史で不確実性の定義は異なることは不思議ではない。後に述べる**安全率**は比の形式の安全性に係わる指標である。本論の目的は、リスク論全体を俯瞰することであり、具体的な方法論には触れないので、式(4)のイメージで読み進めていただきたい。分野ごとに、不確実性の定義、意味するところが大きく異なるであろうことは容易に想像できる。

4.2 不確実性の重要性：一般的リスク論の視点から

以下、緒方[10]に従い、不確実性の重要性を説明する。

様々なリスクが、対象とする事象に関する様々な不確実性に起因するという事実を、数式を用いて形式的に表現すれば、次式のようになる。

$$r_i = f_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n) \quad (4)$$

ここに、 r_i は、対象とする問題における幾つかのリスク指標を表現し、 θ_i ($i=1, 2, \dots, n$) はリスクを計算するために必要となるパラメータを表現し、 f_i は計算式を意味している。リスク論では、計算式に相当する部分をモデルと呼んでいる。これらのパラメータとモデルの決定に不確実性が含まれているために、様々なリスクが発生するという考え方になる。式(4)に、どのような定義式を用いようとも、パラメータとモデルの両者に不確実性は含まれている。対象とする事象の解釈に、よいモデル、よいパラメータが選択されれば、不確実性は小さくなる。

例えば、土木分野における地盤災害の代表的事例である斜面崩壊を考える。斜面の安定性の評価は、一般的には、すべり線を仮定する古典的極限つりあい解析が用いられ、簡易分割法を用いた場合の安全率 F_s は次式で与えられる[11]。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^k \{c_i l_i + (W_i - U_i) \cos \beta_i \tan \phi_i\}}{\sum_{i=1}^k W_i \sin \beta_i} \quad (5)$$

式(5)の詳しい説明は省略する。この式で得られた安全率 F_s と呼ばれる数値をもとに、対象とする斜面の安定性を判断することになる。

これまで多くの工学分野では、安全率により不確実性への対処がなされてきたと言える。対象とする構造物に内在する不確実性が高いほど、重要度が高いほど、崩壊したときの社会的影響が高いほど、安全率は高く設定された。例えば、自然斜面の安全率は一般に 1.2 程度であるが、崩壊した際には甚大な被害を与えるアースダムの安全率は 3.0 を標準としている。

重要度と影響力が高くても、高い安全率を確保することができない航空機などは、モニタリ

ングとメンテナンス、部品交換に厳しい基準を設けることにより、安全性を確保してきた。すなわち、不確実性に対処してきた。

式(5)で定義された安全率は、多くの仮定に基づいて導入されたものである。厳密に設定された力学的問題を解いたものではなく、力のつり合いのみを考えた便宜的な計算式である。すなわち、安全率を与えるモデルに、本質的な不確実性が含まれていることになる。さらに、式(5)の中に含まれるパラメータ(土の重量、水圧、土の強さを表現する粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ) もその正しい値を入力することは難しい。特に、強度定数である c と ϕ を適切に定めるためには、かなりの知識と経験が必要となる。排水条件、圧密条件、異方性、サンプリングの際の土試料の乱れなどを勘案して決まるのが、強度定数である。様々な不確実性の処理を強度定数の決定に押し付けたものとなっている。

多くの不確実性を含みながらも、式(5)による斜面の安全性の検討がいまだに主流の計算方法(モデル)となっている。これを正当化するのは、過去の経験である。崩壊事例等を参考にしながら、特に強度定数の決定方法については、膨大な知識と経験が蓄えられ、斜面の置かれた状況に最も適切な選択方法がいわば「経験知」として整理されている。この経験知が式(5)の有用性を担保していることになる。これらの経験知に配慮しない強度定数 c と ϕ による安全率の計算が全く意味のないものになることは容易に理解できる。

地盤に係わる意思決定は、調査、設計、施工、管理のすべての段階で行われるが、いずれも大きな不確実性を有している。このために、地盤の問題に関する事前予測の精度は、ほかの材料(例えば、鋼材、コンクリート)を用いる構造物に対する予測精度と比較して、不確実なものとなる。

予測精度の不確かさは不可避のこととして、**観測工法**が提案され、大事な土構造物については、施工と同時に、変位や水圧に関する測定がなされ、その観測値を情報として取り入れ、施工中の土構造物の安定性を評価し、崩壊の傾向がある場合には、工事の中断、安定化処理、工法変更などが行われてきた。

地盤分野の技術者は、対象とする地質や地盤が大きな不確実性を含むという事実は十分に認識している。しかし、工事中の土構造物や斜面の崩壊の原因を地盤材料が有している物質的なバラツキ(不均質性、弱面の存在)によるものとして、技術

的な知識・技術者間の情報共有・必要な技術的検討の不足、については、不問に帰すという傾向がみられることは否定できない。

一般的なリスク論では、対象材料(モノ)の変動性は、不確実性の一部に過ぎず、多くのリスクにかかわる不確実性は、むしろ知的不確実性(次節で詳細に紹介する)が卓越するとされている。

4.3 不確実性の定義とその分類

文献[3]に基づいて、リスク論の最近の発展を整理する。

Walker et al.はリスクの多次元モデルを考えた。「リスクは不確実性によるもの」として、不確実性について、次の事項を明らかにすることの必要性・有用性を議論した。

- ・不確実性がどこに存在するか
- ・不確実性のレベル
- ・不確実性の本質的性質

なお、リスクの原因を不確実性に求める考え方が、今後の一般リスク論では主流になろうとしており、ISO31000でも採用されている。

(1) 不確実性の存在場所

不確実性は、文脈(シナリオ)、モデル、入力・出力、パラメータ、最終結果のあらゆる段階に存在するとしている。わかりにくいのは、文脈(シナリオ)という概念である。これは、問題を設定する際の基本的な認識や基本的な仮定における不確実性と考えることができる。

地盤工学の問題で考えれば、ある事業を行う際に、①どんな現象がリスクを伴うか、②その現象が起こった時に、被害が拡散し社会問題となるリスクがあるかどうか、といった事業を考える際に最初に考えるべき不確実性である。この段階の不確実性を適切に処理しないと、事業進行時/後に大きな問題を起こす可能性が高くなる。

(2) 不確実性のレベル

不確実性のレベルについては、6段階の区分(①秩序、②統計的、③不確実性、④シナリオ不確実性、⑤認識レベルの不確実性、⑥完全なる無知を提案している。しかし、区分の境界は明確とは言えない。また、存在場所とレベルの区別も明確で

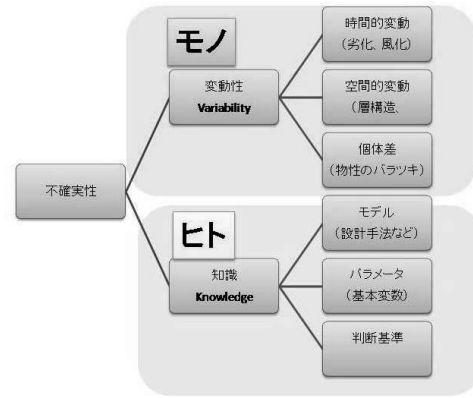


図 2 モノとヒトが有する不確実性

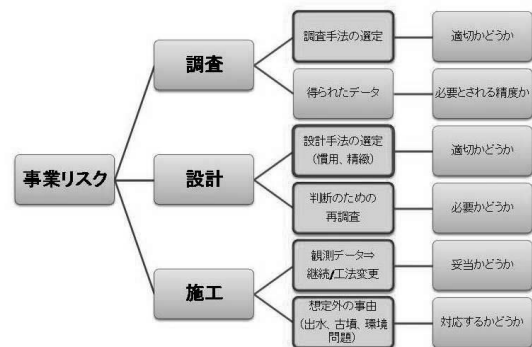


図 3 地盤事業におけるモノとヒトの不確実性

はない。

(3) 不確実性の本性と分類：モノとヒト

Van Assalet and Rotmans(2002)は、不確実性の原因を大きく2つに分類している。

① 知的不確実性

② 自然な不確実性あるいは自然の多様性に基づく不確実性

知的不確実性は知識の欠如に起因する不確実性とされる。観察結果や計測の不備、証拠の不正確さと不一致などが、その例として挙げられる。

自然な不確実性については、人の行動の多様性、価値観の多様性、自然の本質的なランダム性に基づくものが例として挙げられている。この分類は、多くのリスク事象を対象として抽象的に分類したものであり、境界も不明確であり、利用しにくい。

本研究では、不確実性の主な原因として、緒方[9]を参考にする。緒方によれば、不確実性の主な原因は、変動性と知識によるものとして分類できる。変動性と知識の不確実性は、図-2のようなさらな

る分類が可能となる。図 2 には、工学的問題に適用しようとしたときの代表的な対応関係も併せて示している。

知識の欠如により不確実性が生まれることを強く認識することは大事である。

初歩的なミスを取り上げる。ボーリングで採取された土試料サンプルは、採取時の乱れによりその表面は滑らかになり、粘土のように見える。このため、この表面部分は削り取って、サンプルを目視することが必要とされている。実際には「砂」であることもまれではない。この基本的プロセスの知識が欠けていると、土の分類として「粘土」として報告書に記載することになる。適切なチェックを受けることなく、うっかりとそのまま施工段階を迎えてしまうと、現場において用意した施工機械が役立たずとなり大きな経済的損失をもたらすことになる。

現場から得られた土試料に関する実験結果から強度定数 c と ϕ を、何らの考慮なく、安定解析に適用するのも知識不足といえる。

技術者の知識・経験不足による判断ミスは不確実性を大きくし、事業リスクを高めることになる。この問題を看過することなく、しっかりと対策を講じる必要がある。

以下では、物質のバラツキによる不確実性を、**モノの不確実性**、技術者以外の人を含む事業に携わるすべての人の知的不確実性を**ヒトの不確実性**と表現することにする。モノ、ヒトのようにカタカナ文字で表すことに必然性はないが、より客観的なイメージを与えるために、ここでは利用している。

図 3 は、地盤工学の事業リスクを対象に、モノの不確実性とヒトの不確実性のどちらが支配的になるかを試行的に検討したものである。検討の詳細は省くが、多くの段階で赤い太枠で示しているヒトの不確実性の方が事業全体のリスクにより大きな影響を与える可能性を指摘することができる。

(4) 不確実性のレベルの設定の有用性

不確実性のレベルを考えることの重要性が、特に社会現象を対象とする分野で指摘されている。文献[3]の第 2 章 不確実性のレベルを参考にして、地盤工学分野の不確実性のレベルの設定を試みる。ここで取り扱っている不確実性は、主に 4.2 における不確実性の区分においては、ヒトの不確実性に相当している。変動性に関する分類は、以下の議論では、主にパラメータの不確実性の中

に含まれることになる。

不確実性のレベルを設定する目的は、不確実性の本質を理解して適切に対処するということである。すべての不確実性について、その本性を適切に区分することなく、同じように取り扱ったのでは、混乱するばかりである。このことより、適切なレベル設定は有用である。

文献[3]の第 2 章では、5 段階の不確実性のレベルを設定している。その 5 段階は次のとおりである。

レベル 1 : 結果に対する不確実性

レベル 2 : パラメータの不確実性

レベル 3 : モデルの不確実性

レベル 4 : 問題認識の不確実性

レベル 5 : 未知の問題の不確実性

レベル 1 は、結果のみを対象に、その不確実性を取り扱うものである。どのような結果であれ、多くの不確実性に対して、様々な仮定を設けて、なんらかのモデル化を行って得られたものである。しかし、レベル 1 では、結果を導いた各ステップでの不確実性を詳細に検討することなく、得られた結果、例えば、「あるがんにかかった時の 5 年後の死亡率が 20%」という結果の 20%の不確実性が問題となる。一般的には、かなりの頻度でこのレベル 1 の不確実性が問題となる。

以下の説明は、地盤工学を例としている。他分野の方は自分の問題を題材に適宜読み替えていただきたい。

レベル 2 では、リスクを算定するモデル(計算手法)は確立されたものとして、そのモデルの基本変数であるパラメータの不確実性が問題となる。例えば、前に述べた斜面の安全率を求める式の右辺の強度定数 c がもつ不確実性が問題となる。パラメータを決定するためのデータ(ボーリング、サンプリング、室内試験、原位置試験)の数量とその質も不確実性の対象となる。

レベル 3 では、リスクを算定するモデルをどのように選択すべきかが不確実性ととらえられる。例えば、斜面安定の計算手法(簡易分割法からより厳密な手法まで様々ある)をどのように決定すべきかも不確実性の原因ととらえる。また、通常 2 次元問題として斜面安定解析は実施されるが、3 次元の斜面安定解析が必要ではないか。古典的な解析

手法ではなく、数値解析手法の一つである有限要素法を基本とするモデル化が必要ではないか。これらの解析モデルの適切な設定も不確実性と意識される。

リスクの評価に用いるどんなモデルも実際の状況とその挙動を簡略化したものに過ぎない。また、そのモデルの適用性の限界も存在する。どのモデルが最適であるかについては、専門家の間でも見解が異なることがありえる。

レベル4の問題認識の不確実性では、どのようにモデル化すべきか(どんな問題として設定すべきか)も不確実性の議論の対象となる。ある問題に対して、あるモデル化を行ってリスク評価を行うときに、次のことが不確実性の原因として詳細な検討が必要となる。

- ①現時点で、よくわからない現象が十分な根拠がないのに無視されていないか
- ②モデル化で無視した現象が、対象とする問題全体のリスクに影響を与えないか

このレベル4の問題の不確実性が適切に処理されない場合は、大きなリスクにつながる恐れがある。レベル4の代表的事例は、地球温暖化に係わる問題とされている。

例えば、新関西国際空港の大規模な埋め立ての際に、洪積粘土層は沈下しないとする前提で、空港建設後の沈下予測が、沖積粘土層のみに対してなされた。しかし、実際には、大きな自重が作用したために、洪積粘土層も沈下をもたらし、当初予測値よりも、許容範囲を超える大きな沈下が生じ問題となった。洪積粘土層の沈下は、それまでの経験からは無視できるという常識も不確実性の対象とすべきであった。

地質・地盤の問題で、科学技術の問題としてレベル5の未知の問題における不確実性が生じることは考えにくい。しかし、本論では、リスク論全体との整合性を考慮して、レベル5も設定することにする。

以上の、一般的リスク論のレベル1～レベル5の不確実性に合致するように、地盤工学分野の問題に対する対応表を、図4に示す。これは、あくまでも試行的なものであり、今後の研究の進展により、修正されていくべきものである。

これらのレベル1～5は、対象とする問題に対して固定的なものではなく、知識や経験の集積と

レベル	地質地盤事業の不確実性	一般論
1	基本的なミス	結果
2	強度定数の設定ミス、過小な地盤調査	パラメータ
3	設計・施工方法の選択ミス	モデル
4	問題認識の根本に誤り	問題認識
5	現時点では問題の存在が不明	未知

図4 地質地盤事業の不確実性のレベル

⇒一般的なレベル設定[6]にならって、地質地盤事業のレベル分けを試行的に行った

もに、より低いレベルへ移動し、かつ不確実性を低下させ、リスクを低下させることができる。

例えば、工学における事故の代表的事例として、ジェット機コメット号の墜落が挙げられる。当初は事故の原因が不明であったが、事故調査、事故後の研究の進展とともに、「疲労破壊」の問題として理解することができた。この問題については、レベル4から、レベル3あるいはレベル2の不確実性に移動したことになる。

科学技術分野の幾つかの事故を工学倫理の観点から議論した本[12]の中でコメット号の事故は紹介されている。ほかに、スリーマイル島の事故、インド・ポパールで起きた化学工場の重大事故も記載されている。このような重大事故もリスクマネジメントの中のリスクコントロール(対応)の観点からも議論できよう

4.4 ヒトの不確実性をもたらすもの

モノの不確実性すなわち自然の変動性は、理工系に属する技術者にとっては、なじみのあるもので理解しやすい。しかもモノの不確実性は、確率論的あるいは統計学的に取り扱いやすいために、ほぼ確立した手法があり、容易にパラメータの適切な処理、モデルへの組み込みがなされる[13]。

ヒトの不確実性には2つの原因がある。1つ目は知的不確実性であり、2つ目は人間の判断に係わるものである。

ヒトの不確実性をもたらす原因の一つは知識不足、経験不足である。ある仕事をするのに必要とされる知識がなく、さらに類似の仕事に携わった経験が薄いとなれば、ヒトの不確実性は大きくなり、リスクも大きくなる。この知識・経験の不足を原因とするリスクの増大はこれまでも強く認識され、教育、研修、講習などを通して、スキルアップが試みられてきた。

人の不確実性のもう一つの原因は**ヒトの意思決定（あるいは判断）の不確実性**である。この問題は、心理学、行動経済学など文系分野で多く発展してきたので、科学技術の関係者にはなじみがなく理解しにくい。以下に、ヒトの意思決定に影響を及ぼす事項について簡潔に説明する。詳しくは、文献[14,15,16,17]を参考にいただきたい。

何らかの意思決定をする際に、人は合理的判断を行うことは少ない。合理的判断を行うためには、必要となる知識の取得、データの精査など多くの時間と知識量が必要となり、よほどのモチベーションがなければ、このような合理的判断を行わない。代わりに、過去の経験や周辺環境（他者の意見、マスコミの論調）などにより、より直観的な判断を行っていることが多い。後者はヒューリスティックアプローチ（近道思考）と呼ばれ、多くの場合、後者の方法で判断を行っている。

人間の判断の多くが不合理なものであることは、特に行動経済学の分野で研究されている。得られたもののベネフィットよりも失ったもののコストの方が重く感じられるとするプロスペクト理論[16]はその代表例である。

身近な例では、追認性バイアスが大きな不確実性そして失敗をもたらすことがある。追認性バイアスとは、いったん自分の判断が決まると、自分の判断に反する現象を軽く見て、自分の判断に有利なものばかりをデータとして採用するというバイアスである。

例えば、法面（斜面）を安全にするための施工を専門とする技術者の述懐であるが、「一度、自分でこの法面は大丈夫と判断すると、湧水も、色調の変化もなんらかの兆候と思うことができずに、大きなすべり崩壊をもたらしてしまったことがある」と言っていた。これは追認性バイアスにとらわれてしまったという事例であろう。

成功体験によるバイアスも怖い。最も著名な例は、戦艦大和と武蔵の建造であったといわれている。戦術として、飛行機が主たる役割を果たす時代に、日米戦争の勝利の成功体験により、巨大戦艦の建造にこだわり、判断ミスを犯した、と言われている。当然に戦艦建造に対して否定的な立場を取り、空母優先にすべきという意見もあったが、ほとんど議論されることはなかった。

多くの会社の事業でも過去の成功体験を重視し、周辺の社会環境が変化しているという事実を軽視し、同様の事業展開を行い失敗に終わったという

事例は数多い。

個人レベルでも、過去に成功した方法と同様に行ってみたが、今度は失敗したということは数多くある。当然に考慮すべき周辺環境の変化を感知できず、軽視した結果として失敗したことになる。

様々なバイアスを是正して、適切な判断を下すのは容易ではない。このようなバイアスは、人間が小さな集落の中で賢くかつ円滑に生き抜くために、長い時間をかけて身に付けたものなのである。このため、自分自身のバイアスの存在はほとんど意識できないので、簡単には是正できない。

このようなバイアスによる人の判断ミスを防ぐ方法として、最も有効なものは、他者の意見を求め、その意見に耳を傾けて、自分のバイアスを適切に処理することである。特に、地位が上のものほど、他者の意見を聞き取る努力をすることが必要であるとされている。広義のリスクマネジメント(6章参照)では、関係者のミーティングの繰り返し、非公式のオフサイトミーティングの利用、リスクコミュニケーションの重要性を強調し、この判断ミスを低減することがシステムに内包されている。

5. リスクの常識

様々なリスクを考える上で基本となる常識の幾つかを紹介しておく。これらは事業リスクばかりでなく、一般的な生活や人間関係でも基本となる常識であろう。

5.1 リスクゼロでは生活できない

「リスクはあるんですね。ゼロにできないのなら、その薬品（農薬）の使用は止めるべきです」という意見が聞かれる場合がある。リスクをゼロにすべきという前提では、現代の生活は成り立たない。

どのような問題であれ、リスクを低減する（安全性を高める）行為は、現在のリスクがかなり低い状態をさらに下げる場合には膨大な経費がかかる。例えば、日本の水道の品質を向上させる経費は、低開発国のそれと比較して、はるかに大きな経費が必要である。

リスクのとらえ方（認知）には一貫性がない。いくつかの例を挙げる。例えば、食品関係の問題として賞味期限の切れた食品が販売されたときに、報道のありようによっては、大きな問題となる。賞味期限は、食品の安全性に係わるものではなく、味の保証であり、しかも賞味期限はかなりの安全率を見ているので、ほとんどの場合、実生活ではリスクは

ほぼゼロである。利用者の健康リスクはもたらさないが、会社の倒産に至るかもしれない社会問題になりえる。客観的にリスクが無視できる程度であっても、表示誤記、社会通念に反する行為など道義的責任がある場合には、大きな問題となる。

多くの料理に使われているジャガイモは、芽に強い毒性をもっていることはよく知られている。現代においても、低開発国で多くの死者を出している。現代の食品の安全基準を適用すれば、ジャガイモは食品としては絶対に許可されない毒性のレベルとされる。しかし、ジャガイモの利用禁止を求める運動は見られない。一般の人に毒性は認識されているが社会的に許容され、広範に食されているからである。

客観的にみると、社会的に問題となった化学物質、薬品、食品がもたらすであろう被害よりも、日常生活でのリスクの方が高い。例えば、たばこ、お酒、人間関係のストレス、サプリメント、健康食品などの健康リスクの方が高いことが知られている。

生活レベルが高くなるにつれて、リスクゼロの要求は多くなっている。しかし、より健康になろうと努力して購入する「もの」の方が、多くの場合にはリスクを高めているという事実に対処したい。

5.2 リスクのトレードオフ

トレードオフとは、「あちらをたてれば、こちらがたたず」ということである。問題の一つを解決しようとすると、別の問題が発生するということである。

代表的な例として紹介されるのは、DDTの廃棄の問題である。ハエ、ダニなどの害虫の殺虫剤として利用された DDT の中にはダイオキシンが含まれていた。ベトナム戦争の際に、ダイオキシンを含む枯葉剤が米軍により使用され、その結果として、異常な胎児が産まれたとされている。

このため、世界保健機構 (WHO) が DDT の使用を禁止した。その結果として、蚊が媒介するマラリアにより、百万人規模の人が、アジア、アフリカで亡くなったとされている。この結果を見て、WHO は壁や天井などへの DDT の噴射については容認する措置をとった。蚊は羽を休めるとき、壁や天井に張り付く、この際に壁などから水分を取るために、同時に DDT も吸入し、駆逐されることになる。この対応の結果、マラリアによる死者が激減した。

また、南米のペルーで、液体塩素による水道水の浄化はがんの発生につながるという研究報告を受けて、塩素の使用をやめた。その結果として、赤

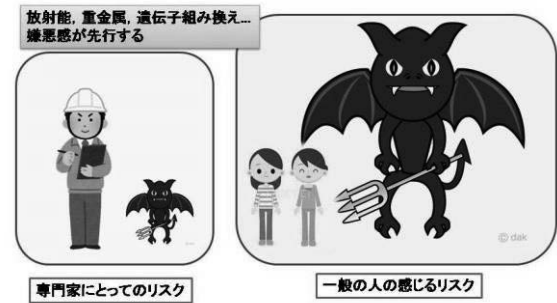


図 5 専門家と一般の人のリスク認知の差

痢などの胃腸系の病気で死亡する方が多くなった。小さなリスクを防いで、大きなリスクを呼び込むことになった。塩素消毒の停止の背景には、液体塩素を購入する予算がなかったというペルー国の経済的事情があったようである。これらのリスクのトレードオフに関しては、文献[18]に詳しい。

最近の事例として、防潮堤建設の問題を挙げる。2019年の台風19号において、岩手県の釜石市で、豪雨災害が発生した。これは、2011年の東日本大震災の際の津波被害により、住宅を守るために海側に防潮堤を建設したための水害である。この防潮堤には、山側に降った雨の排水について十分な考慮がなされていなかったため、防潮堤により住宅が浸水被害を受けることになった[19]。

このようなリスクのトレードオフに係わる事例はたくさんある。ある問題を解決する際に、その解決が何らかの別のリスクをもたらすのではないかと、ということが十分に考えられていないことを示している。当面の問題を解決する際の、問題設定の難しさ、メリットばかりでなく、デメリットも公平に考えることの難しさを示している。

5.3 専門家と一般人のリスク認知の差

一般人のリスク認知は、多くの場合専門家のそれと比較して、大きな差を生じ、過大あるいは過小評価となりやすい。すなわち、図5に示すように、専門家が小さなリスクと判断することに対して、一般人は「未知」、「怖さ」という因子が卓越する感情的な判断により、リスクを大きくとらえることが多い。放射能、農薬、遺伝子組み換えなどの用語を含む問題が代表的な例である。

反対に、専門家は大きなリスクととらえるのに、一般人はリスクを低く見積り、注意を払わないこともある。代表的なものは偏食、運動不足、生活習慣病などである。

この専門家と一般人のリスク認知の差が大きなトラブルとなることが多い。例えば、それほど客観的リスクが大きくないのに、説明者の態度や表現方法により、大きなリスクを感じさせてしまうこともある。一般の人は「生存率 90%」と「死亡率 10%」(等しい表現である)に対して、異なる反応をするという事実を十分に踏まえた説明の在り方を考える必要がある。

この差に十分に配慮して、上手に住民からの合意を取り付けた事例を紹介する。

仙台市の地下鉄工事現場で、重金属であるヒ素とカドミウムが土壌汚染基準(環境基準にほぼ等しい)を超える量が含まれていた。この土は、土取場跡地に埋め戻されることになった。跡地近隣の住民にこの事業の理解を得るために、ていねいな広報活動が行われた。その内容は、①環境基準の意味(基準量の物質を含む水を毎日2リットル 70年間のみ続けて、10万人に1人に発がんの恐れがある)をしっかりとわかりやすく説明する、②排水水の処理システムについての現地説明、③重金属を含む現地からの排水水について、モニタリングを行った。これらの事実を住民懇談会、見学会、さらに定期的な広報冊子として対象となる家庭に配布する、という活動を行った。

ヒ素やカドミウムなどの重金属が歴史的に大きな被害をもたらしてきたことを知っている住民は最初は頑なであったが、次第に排水の浄化システムやモニタリングの意義について理解を示し、最終的には理解を示すこととなった。

住民に対してリスクを説明する場合には、このリスク認知の差を十分に把握して、住民と対等な立場に立って、適切な表現を用いる必要がある。必要とされるコミュニケーションスキルを身に付けることが専門家である技術者に要求される。

5.4 リスクの相対化

リスク論は、金融、経済から薬、医療、理工学分野まで様々な事象を対象に利用される。財政資源が限られた条件では、リスクを伴う事象のうち、どれを優先的に対処すべきかが問題になる。この際には、リスク対策の優先度を決定するために、リスクの相対化が必要になる。

テロリスクと自然災害リスクなどまったく分野の異なるリスク事象を相対化するのは困難である。しかし、ある共通性を多く持った事象であれば合理的

要因	損失余命
喫煙—全死因	数年から10数年
喫煙—肺がん	370(1609mSv)
ディーゼル粒子	14日(61mSv)
ホルムアルデヒド	4.1日(18mSv)
ダイオキシン類	1.3日(5.7mSv)
カドミウム	0.87日(3.8mSv)
ヒ素	0.62日(2.7mSv)
メチル水銀	0.12日(0.5mSv)

図 6 様々な化学物質の損失余命[20]

⇒赤い矢印が、5.0mSv/年の除染(累積 34mSv に相当)を想定した時の損失余命

な相対化が可能であろう。

例えば、自然災害のうち地震と洪水のどちらの対策が優先されるべきかという課題であれば、リスクの相対化はできそうである。ある地区を対象にして、頻度、被害の大きさ、脆弱性、暴露などを計算することにより、A地区では地震対策が優先され、B地区では洪水対策が優先されるべきという結果を導き出すことができよう。

自然災害全般を対象にして、県別のリスクを算定する試みがなされている[9]。このようなリスクの相対化により、国策として、どの自治体の対策が優先されるべきかの判定が可能となる。

化学物質の分野では、例えば、重金属ごとのリスクが算出され、それが、図 6 に示すように損失余命(どの程度、生きる時間が短くなるか)というわかりやすい指標で整理されている。

この表の中の、ダイオキシン、カドミウム、メチル水銀、ヒ素、などは、過去に悲惨な被害をもたらしたものであり、その名前だけで怖れてしまう。すなわち、過大なリスクを感じてしまう。損失余命という指標でみると、化学物質以外のリスクと比較するとかなり小さい値であることがわかる。

この表中の矢印は、福島第一原子力発電所の事故を受けて、除染レベルを 5.0mSv/年としたときの放射能の影響を算定したものである [20]。

除染の放射能レベル 5.0mSv/年の除染基準で、10日程度の損失余命と計算されている。実際の放射能レベルは 1.0mSv/年と設定されたために、除染作業が大きく遅れることになり、福島沿岸部の復興を遅らせることとなった。その復興の遅れによ

り、将来を悲観して多数の自死者が出たことを考えると、適切な除染基準の設定がより合理的になされるべきであったという意見には正当性がある。なお、福島第一原子力発電所の事故のような異常事態に対しては、国際的には、事故から当分の間は 10mSv/年が目標数値とされており、発災直後はこの数値を除染目標として検討されていた。批判的にいえば、マスコミからの批判を怖れた「大衆迎合」の政府の意思決定が災害関連死の被害をもたらしたともいえる。

リスクの相対化に用いる指標として何が適切か？その指標の設定によって、どのリスクが優先されるかが決まる。この指標の設定は、人の価値観に大きく左右されることになる。

人命と資産どちらに重きを置くか、自然環境と経済発展どちらに重きを置くか、地域全体と個人のどちらを優先すべきか…これらの指標設定に係わる問題は科学技術だけでは解決できない。

先に述べた損失余命の代わりによりよい指標として、健康(的に生活できる)余命という指標が提案されたそうである。その際にも、健康的であるとは何か、体の不自由な方に対する配慮はできるのか、などの議論の末に採用は取りやめられたとされている。

リスクの相対化のために、どのような指標が適切かについても多くの議論があり、簡単に決定できるものではない。しかし、その困難を乗り越えての多くの分野のリスクを相対化する努力は、たとえ明確な結論が得られなくても続けられるべきである。この努力の結果として、得られることは大きいし、新しい問題発見にもつながる。

5.5 リスクとクライシス

リスクとクライシスは、日本語ではどちらも危険や危機と訳され、似たような語感であるために混同されやすい用語である。ここでその違いを明確にする。

リスクは予防的な意味合いをもつ用語である。ある事業あるいは災害を想定して、それに伴う損害や人命喪失を低減するために行う一連の行動に関係している。これに対して、クライシス(危機)は、**図 7**に示すように、損害を与える事象が起こった際の緊急的な対応に関係している。最近では、クライシスは広義のリスクマネジメントの災害発生後の一部を構成するとみなされることが多い。

リスクマネジメントの一部であるからと言って、クライシス管理の重要性を低く見ることは許されない。危機的対応は誰にとっても、どんな時でも難しい。救出作業、適切な医療行為、医療行為の順番に関する難しい判断(トリアージ)、食料・衣料などの供給、避難所設置などは平時とは全く異なり、迅速な判断と行動が要求される。ときには既存の法律に違反する判断・行動が被災者にとって有利になりえる。その際の当事者のジレンマは大きい。

様々な機関で危機管理マニュアルは整備されている。しかし、その内容は所轄官庁のものとはほぼ同一であることが多く、当該地の環境の差異に基づく文言の修正など真剣な検討がなされない場合が多い。危機管理官等と呼ばれる役職は高度な専門性と適格性に対する要求が高いはずであるが、平時の人事異動の方が優先されるケースが多いようである。

平時では有能とされる人材も、有事(異常事態)ではまったく無能であった、という事例は数多く報道されている。また、非常時に優れた能力を発揮した人を英雄扱いする報道も数多くある。しかし、大事なことは事前の周到な準備であることを忘れてはいけない。クライシス管理の難しさについて本音が述べられている本[21,22]を紹介する。

5.6 冗長性がリスク低減をもたらす

効率第一主義の社会システムが自然災害に対して、脆弱であることはよく耳にする。東京一極集中は効率的であり、巨大な都市を守るために、堤防、防潮堤などのインフラ整備がなされてきた。これらのインフラ整備の際に想定した雨量を超えた場合には、国の存続も危うくなるほどの甚大な被害をもたらしかねない。

多くの事象で、リスクを低減するのは冗長性である。より分かりやすい言葉で言えば「むだ」や「ゆとり」である。効率性とは対極にある言葉である。

ある町が豪雨災害により、この町に最も近い主要都市とつなぐ国道が土砂災害で通行止めになったとする。この町の復旧や復興は、大きく「迂回路」に依存することになる。迂回路は県道であったり、市道あるいは農免道路であったりする。このように、主要な道路以外の道路(いわば、冗長な道路)の存在が、けが人の緊急搬送、援助物資の搬送などで活躍することになる。

北海道の豪雨災害の際に、ある町の復興がほかの町に比べて遅れた。この町とつながる道路が

一本しかなく、迂回経路も大きく遠回りとなり、効率的な物資輸送ができなかったことが原因といわれている。このことを反省して、町と町を一本道ではなく、循環網を形成するような視点で、道路行政を見直す計画が立てられた。

どのようなシステムであっても、安全性を保障するために、「あそび」「ゆとり」が設計に組み込まれている。最も有名なのは、自動車のハンドルの「あそび」である。無反応な角度を設定することにより、安全性を高めている。回路をなすシステムにおいても、非常時に備えて普段利用しない回路を組み込んでおり、非常時に役に立つ。

この冗長性は、災害時の避難行動における時間的「ゆとり」にも関係している。自然災害での死者ゼロを目指せば、避難警報などは災害弱者（お年寄り、障害者、子供）を対象に、早い段階でゆとりをもって発信する必要がある。この早い段階での避難情報（準備、警報、指示）は、外れる可能性が高い段階での発令である。「からぶり」に終わる可能性が高い。からぶりに終わった時の住民からの批判を考えると、避難情報の発信をためらうことになりかねない。

また、少なくない経済的損失も産まれる。東海地震を想定したとき、様々な規制による経済損失は1日当たり1700億円という予測もある。1週間前の警戒宣言で、地震がからぶりに終わった場合には、1兆円を超える経済損失になる。これに対して、誰が責任を負うのか、当然に問題になる。責任問題を感じながら、危機対応をおこなうことは責任者である首長にとっては、大きな負担であり、ためらってしまう。情報伝達の遅れが致命的な損害に至ることもあり得る。

これらの問題を事前に検討し、致命傷にならないレベルの災害に低減するために、国が責任をもって、様々な方法が考えられている。

豪雨災害に対するタイムテーブルの設定がその代表例である。予め、国が設定したガイドラインに沿って、対象とする町の特性（人口、高齢者率、産業、山や川などの地形要因、道路網、排水など）を考慮して、タイムテーブル（予定表）を作成しておく。災害対策責任者である首長は、このタイムテーブルに従って、粛々と住民への避難情報をゆとりをもって発信できることになる。

このとき、かりに「からぶり」に終わっても、首長の意思決定の責任の多くは、タイムテーブル作成を指導した国の責任に転嫁されることになる。

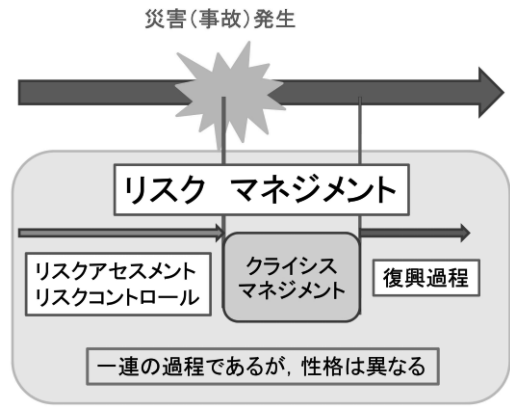


図 7 リスクとクライシスマネジメント
⇒本論では、このような関係を前提に議論を進める。

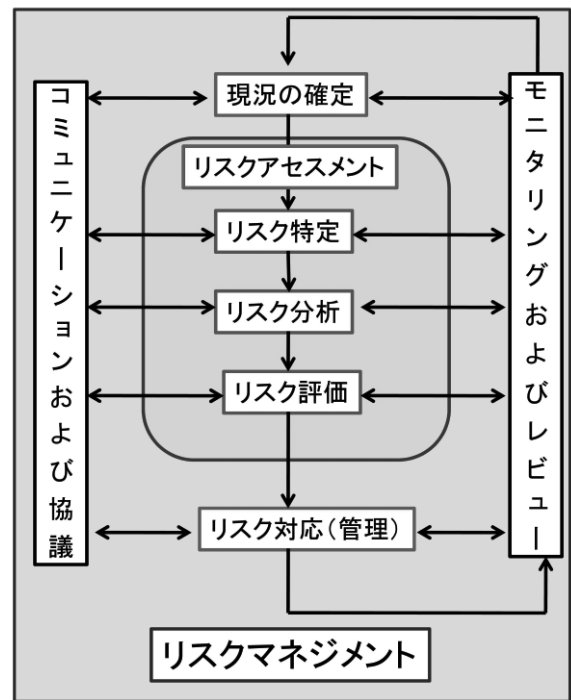


図 8 リスクマネジメントの標準的プロセス

大事故や大災害のリスクを低減するためには、冗長性が不可欠であることをすべての人が共有し、からぶりに終わった時には、責任者を責めないという心のゆとり（冗長性）をもちたい。

6. リスクマネジメントの体系

ある具体的な事業を対象として、リスク論に基づく考え方で、実際の計画、調査、実施、監視を行うためのリスクマネジメント、すなわち事業リスクを対象として、そのシステムに関する基礎的事項を説明する。事故リスクや自然災害リスクについても、表現や用語は異なることがあるが、同様の議論が

適用可能である。

6.1 リスクマネジメントの体系

リスクの定義が分野で異なるように、リスクへの対処行動の在り方も分野で異なる。ここでは、図 7 に示すように、最初から最後まですべての活動をリスクマネジメントとしてとらえる。リスクマネジメントの中身を大きく、リスクアセスメント、リスクコントロール、リスクコミュニケーションと分割する。さらに、最初に現況の確定、最後にモニタリング(観測)に基づいて、現状の確定が見直され、いわゆる PDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクルにより、リスクを低減することが標準的プロセスとなる[23]。この分け方は、JISQ31000[7]でも採用されている。

以下、それぞれの標準的プロセスについて、工学分野を念頭において、簡潔に説明する。

最も注意すべきことは、この標準プロセスはすべての段階でチェックを行い、必要があればフィードバックを行うことを前提としていることである。適切なリスク削減を行うためには、PDCA サイクルの適切な運用が前提となっている。

6.2 現況の確定:問題の設定

具体的な行動に入る前に、現在の状況を正しく認識し、リスクの高い状況を低減するために適切な問題設定を行う必要がある。この最初の部分が曖昧あるいは不適切であれば、リスクアセスメント以下の担当者の努力にかかわらず、リスクが低減される可能性は低くなる。

ある現状を解決するために、適切な問題設定を行うのは極めて難しい。どのように問題をとらえるかに際して、時間軸、空間軸の両方に注意する必要がある。

短期的に効果はあっても、長期的にはむしろリスクを高めることはよくある。工学分野の例ではないが、金融分野でのゼロ金利(あるいはマイナス金利)政策は一時的な効果はあっても、長期的には金融全体に大きな負の影響を与えるため、「禁じ手」と言われている。その政策が日本では継続している。

空間の広がり例としては、コンパクトシティの構想が挙げられよう。これは、インフラへの投資額が今後減少することを想定して、都市中心部へインフラ設備を集中して、効率的なまちづくりを行うとするものである。より広い空間で考えた場合には、都市中心部のみのインフラ整備では全く機能せず、

都市の周辺地域の正常な活動(食料供給、レクリエーション機能など)も不可欠という当然のことが十分に配慮されていない懸念がある。

問題設定に際して、価値観の異なる多様な意見を公平に反映することは極めて難しい作業である。社会的影響の大きい問題ほど、適切かつ慎重な問題設定が必要となる。最近の傾向としては、この現状確定および問題設定の段階から、第三者の意見に耳を傾ける方が、リスクマネジメント全体を円滑に実施することにつながるとされている。

6.3 リスクアセスメント(リスク評価)

問題設定を受けて、具体的な活動が始まる。最初はリスクアセスメントである。ISO31000 では、リスクアセスメントを、特定、分析、評価に細分している。この細分化は、これらの要素が明確に分離できるということを意味しているわけではない。不可分の関係にあるが、性格の異なる要素から構成されていることを強調した表現である。

リスクアセスメントでは、対象とする問題の専門家が原則的には中心的役割を果たす。

リスクアセスメントの実施に際しては、科学技術では、最も大切な客観性の保持が大切になる。客観性とは、ヒトの価値観や主観に依存しないということである。

(1) リスクの特定

対象とする問題の中で、どのようなリスクを重要視するか、その判断がリスクの特定である。この段階では、うっかりすると担当者の価値観が判断に作用することが考えられる。このため、複数の人間が議論を重ねて、できる限り客観性の保持に努めなければいけない。もちろん、この段階で、専門家以外の関係者が、結論を誘導する意図をもっての政治的関与はできないようなシステム構築が必要とされる。利益者の関与が知られた場合は、それだけでリスクマネジメントは失敗に帰す。

(2) リスクの分析

リスクの分析(あるいは解析)は科学技術の知識と客観的なデータに基づいている。対象としている物質、事業等に対して客観的な視点での分析が必要となる。

必要なデータを既往の文献あるいは実験等により収集し、それをあるモデルに基づいて分析し、リスクの評価に寄与する指標値を与えることになる。データの信頼性、客観性、不偏性、再現性には十

分に注意する必要がある。恣意的な目的によるデータの選択あるいは無視があってはならない。

どのようなモデル(関係式)や手法で、判断の指標となる数値を算出するか、そのプロセスについても、データと同様の注意が必要である。公的な機関や学会が認定したモデルあるいは手法であれば、ほぼこれらの条件を満足するものと考えることができる。しかし、これらの公的に認知されたモデル等に対しても、その適用性に関する検証は不可欠である。どのようなモデルあるいは手法であっても不確実性は存在し、適用限界がある。その限界を超えた場合には、得られた指標値はなんらの意味もない。

(3) リスクの評価

科学技術的に正当な方法で得られた数値に基づいて、リスクの評価を行う。リスクの評価に際しては、リスクの許容値との比較がある。**リスクの許容値の設定**については、リスクコントロールの小節で議論する。

リスク分析で得られた数値と公的に定められた許容値と比較し、そのほかの要因も検討に入れながら、リスクの評価を実施することになる。

リスクの評価に際しても、客観性、不偏性などについて厳しくチェックがなされるべきである。多くの視点から、また個人のバイアスを防ぐためにも、しっかりとシステムを構築して、自由な意見交換のもとに、よりよいリスク評価を実施すべきである。

システム構築については既定のマニュアルなどがあるので比較的容易であるが、そのシステムを実際に、「自由な」雰囲気のもとで運用するのは決して容易ではない。いわゆる声の大きい構成員により偏った評価結果にならないように、「運用」まで、きめ細やかに策定しておきたい。

6.4 リスクコントロール(リスク対応)

リスクコントロールは、専門家および責任者となる事業者の共同作業によって実施されるべきである。

(1) 基準値の設定

リスクコントロールを実施するために、対象とする物質、事故などに対して、基準値を設定する必要がある。この基準値の設定は、科学技術的観点が重要視されるべきであるが、それ以外の要素も加味して、実行可能で有効性のある基準値が設定されるべきである。

例えば、放射能の基準の考え方として、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) が有名である。その国のおかれた状況に応じて、合理的に達成可能な低い値を基準値とする考え方である。達成不可能な目標値を設定しても、遵守することのできない数値では基準値としての意味をなさない。

この基準値の設定は、主に事業の責任者が、専門家などの意見を取り入れたうえで、決定すべきである。どのように基準値を決定すればよいか、そのプロセスについては、様々な意見があり、多くの分野に共通して適用できるプロセスについての合意はまだ見られていない。

(2) リスク管理

リスク基準が決定されれば、この基準を満足するように、システムと運用に関する人員配置、制度設計がなされ、実施される。この部分については、これまでも実施され、多くの実績がある。広義のリスクマネジメントに沿ったシステム構築に際しても、比較的容易に設定できるものと思われる。

これまで狭義のリスク管理は実施されてきた。しかし、不祥事や事故は発生している。設定されたリスク管理の手順が守られていれば、防げたはずの事故も多い。一般に、リスク管理マニュアルは厳重に(放射能などの危険物質の取り扱いでは、多重防御の考え方も取り入れられて)作られており、プロセスを多少省略しても、すぐに事故が発生することはない。このために、作業員が必要な手順を無視し、より簡便な(しかし危険な)方法をとることが起こり得る。

対象とする事故などの怖さ、影響などについて、必要な知識を共有し、適宜作業状況をチェックすることまで、リスク管理システムに組み込み、リスク管理の「劣化」を防ぐ必要がある。管理の劣化の怖さがもたらす悲劇について、事例を中心とした優れた文献[12, 24]がある。

6.5 リスクコミュニケーション(リスク合意)

科学技術者にとって、最も不得手とするのが、リスクコミュニケーション(以下、リスコミと略記する)である。科学技術者の仕事の多くは比較的狭い領域で行われ、専門家は同じ価値観と目的を共有している。

多様な価値観をもつ一般の人、マスコミ関係者、政治家を相手としてのリスコミは、合理性よりも感性

に配慮することが必要になる。5.4 で述べた専門家と一般の人のリスクのとらえ方の差異にも配慮する必要がある。

産業革命を契機とする科学技術の進展は、人類に豊かさや幸せを与えるものとして歓迎された。しかし、2 度の世界大戦における膨大な犠牲者、大戦後の大気汚染、環境破壊、さらに冷戦後の新自由主義、グローバリゼーションによる貧富の差(格差)の拡大などにより、科学技術のさらなる発展に対しては疑問視する意見が多くなった。

専門家の立場からは比較的安全なものであっても、その使用に対しては一般の人からの合意が得られないことは多々ある。このような事態に対して、当初は「一般の人に正しく理解してもらえれば、合意形成はできるはず、正しく理解してもらうように啓発活動を進めよう」ということで、サイエンスカフェに代表される様々な試みがなされた。しかし、期待するような成果は得られなかった[25]。

正しい科学技術的話を伝えても、合意形成ができない理由については、主に社会心理学の分野で研究された(例えば、文献[26,27])

専門的な知識に基づいて合理的判断を要求する姿勢はかえって反感をもたらすことがある。卑近な例では、保険の内容をていねいに説明されて、その専門知識のレベルの高さに信頼感をもち、保険に入る人は、おそらく少ない。なんとなく、親しみやすさや信頼感で保険に入る人の方が多いであろう。また、車のセールスで最高の実績を残している人の多くは決して能弁ではなく、むしろ訥弁で実直な人であるということもよく知られている。

人は、説明者の専門知識や説明の巧みさにより他人を信頼するのではなく、価値観や感性の一致を優先して、信頼感をもちつことが知られている。

信頼感を高めるために有効な方法には 2 つあるとされている。その一つ目はリスクマネジメントのプロセスの透明性を高めることである。第三者が最初から意思決定に係わることができるようなシステムを構築し、その事実を公開していること。二つ目は、リスクマネジメントに失敗があった時の事業遂行者の責任を明示することとされている。

この二つは、一般の人に「自信があるから、透明性を大事にし、自分自身に対しても厳しい罰則を課しているのだ」という安心感そして信頼感を与えることになる[17,27]。

このような人の認知に関する事実を踏まえて、リスクに臨む必要がある。さらに、当然ながら、コミ

ュニケーションであるので、その基本的な知識は押さえる必要がある。

「自分が話すよりも、相手の話をしっかりと聞くこと」、「相手が話すことに共感を示すこと」、「常に対等の立場であることを強く意識すること」これらの当たり前のことを、特に科学技術系の専門家は、自分自身に言い聞かせる必要がある。リスクのノウハウ、事例をていねいに説明した良書[28]がある。

6.6 土木事業の既往の体系とリスクマネジメント

土木事業においても、リスクの考え方は、すでに事業プロセスの中で、「リスク」という用語が用いられていなくても、その基本は取り入れられている。

建設事業の基本的なプロセスは、事業企画⇒調査⇒設計⇒施工⇒管理とされている。土木事業においては、これらのプロセスは一方向に流れるのではなく、問題が生じたときには、必要な箇所までフィードバックされて、よりよい対処がなされる。

これらのプロセスはすべての過程に内在する不確実性を低減し、その結果としてリスクを低減する一連の作業とみなすことができよう。

近年、特に地盤や地質の有する不確実性が改めて認識され、その取扱いを体系的に行う試みがなされている[29]。調査、設計、施工がそれぞれの専門会社の技術者によってなされ分業化が進み、関係者間での不確実性に関する情報共有が十分ではなく、工法変更、許容できない変状あるいは崩壊に至ることも多々あった。全体の管理を行う行政の技術者がこれらの情報の中に含まれる不確実性を適切に処理する能力があれば、被害は最小限にとどめることができようが、きわめて困難である。理想的なリスクマネジメント(図 8 参照)では、関係者間での情報共有・意見交換に基づく、意思決定が基本装備となっている。

リスクが顕在化したときに緊急に行う打ち合わせではなく、そのような打ち合わせを予め組み込むことを基本としている点に、リスクマネジメントの優位性がある。

多くの建設事業において、住民からの合意形成が困難になることが多くなってきた。このため、リスクの重要性はよく知られるようになったが、いまだにリスクを軽視する風潮はみられる。事前に、住民に対して事業の説明がなされていなかった場合には、工事の中断あるいは住民からの差止訴訟な

どにより、完成した施設の稼働が困難になることがある。

前述した理想的なリスクマネジメントでは、リスクをすべての段階で必要に応じて実施するものとしている。リスクを前提としたシステムの中で事業を進めた方が、よい結果が得られるものと期待できる。

7. リスクと責任

リスクを議論する際に、責任問題を避けることはできない。大きな事故が発生した場合、そのような事故をもたらした原因は何か、という本質的な問題よりも、誰が責任を負うべきか、いつ責任者(トップ)が辞任するかの方が常に注目される。

大規模な事業においては、多くの人がその事業に関与している。関与した人の誰一人として、法規や指針を破ることがなく事業が遂行されたが、最終的な結果が人々の生活環境に悪影響を与える結果となってしまった。多数者が関与する問題は **Problem of many hands (PMH)** と呼ばれ、地球温暖化、砂漠化などの地球環境問題が代表例とされている[6]。

その場合、責任問題はどうなるのか。事業を実施した組織(国、県、会社…)は、明確な法律違反がなくても、組織としてのモラル(道義的)責任を有することになる。被害に応じた損害賠償の義務を負うことになる。役職者としての責任はどうなるのか、この判断は極めて難しいものとされ、現在でも学術レベルでも合意はなく、議論が続いている。

組織が損害の可能性を認識していた場合とまったく無知であり、その無知が現代の科学技術レベルと比較してやむを得ないと判断される場合では、責任の重さが異なる。当然に、認識していた場合の方が重い責任を問われる。

被害の発生可能性を認識していた場合に、その事実を被害を受けるであろう住民に事前に知らせていなかった場合は、より大きな責任が問われることになる。

例えば、1970年代には、活断層の存在は専門家は認知していても、一般の地図にはその活断層の存在が記載されていることはまれであった。しかし、現在では家屋やインフラに被害を与えるであろう活断層については、被害の可能性は低くても、その存在を積極的に知らせることが公的機関の必須事項となっている。知らせないことによるメリット(住民の安心、土地の価値維持)よりも、知らせないこ

とによる組織のデメリット、すなわち組織の責任問題の方が重さを増したためと思われる。

薬の分野でも、薬の副作用について、積極的に知らせる努力がなされている。副作用を知らせずに、効能ばかりを宣伝し、重大な副作用が発生した場合の責任の重さは、薬の売れ行きばかりでなく、製薬会社の社会的評価が著しく低下し、最悪の場合には倒産に至ることもあり得る。

発生した事故や災害に対する対処の仕方にも、責任問題が発生する。事故や災害が発生しても、そのことに対して適切な対処を実施することができない場合、責任は時間とともに大きくなる。一般に発生した事故や被害に対する対処は、図7に示すように、クライシス(危機)管理と呼ばれている。クライシス管理の失敗事例および成功事例を実務の面からわかりやすく説明した本[30]がある。

責任所在の不明瞭さが、リスクコントロールを甘くしてクライシス(危機的状況)の発生を促し、危機的状況への対処が遅れることは指摘できる。しかし、責任の所在を明確にすると、責任逃れのために前例主義がはびこり、発展性のある社会構築や危機時の適切な対応は難しくなる。

リスクマネジメントの責任問題に関する一般論の構築は極めて難しく、一つ一つの失敗・成功事例に対して慎重に検討・反省・改善を重ねる地道な努力が必要とされる。事案個々の適切な責任体制を求めるといふ姿勢の方が有用かもしれない。

8. まとめ: リスク論を踏まえることの意義

以上、リスク論の工学分野における重要性について、簡潔な紹介を試みた。リスクという概念が現在でも急速に進化し、その有用性が検証されている段階である。次第に議論が収束する傾向はみられるもののまだ統一されているとはいえない。本論での話題の選択や記述も著者の好み(偏見)が記述をゆがめ、公平さに欠けている可能性が高い。著者自身がリスク論の全体像をまだ十分には把握できていない。

最後に、様々な事業に対して、リスク論をベースに制度構築および運用を企画することの意義について考察する。

リスク論は、これまで説明してきたように、以下のことを重視している。

1. 事業のステークホルダー(関係者)に対しての配慮: 特に、専門的知識を持たないが、損

害を受ける可能性のある一般人の関与を積極的に取り入れること。

2. **リスク評価の段階の客観性の保持**: できる限り客観性の保持に努めること。政治や経済的要因などの科学技術的以外の要素を極力排除すること。

3. **リスクの原因：モノとヒトの判断の不確実性**: モノの不確実性については、決定論的手法よりも優れた手法である確率論や統計に基づく手法を積極的に取り入れること。ヒトの不確実性については、判断における科学技術的な知識の未熟さを教育・人材育成で克服し、バイアスなどの要因を排除するために、不確実性を低減する目的で、関係者間で協議を繰り返すこと。また、自由に発言できる雰囲気保持に努めること。

4. **リスクを伴う事業の信頼関係の重要性**: 「正しい知識を持ってもらえば理解してもらえる」という姿勢では一般人からの「納得」は得られない。信頼関係を築くためには、専門知識の伝達ばかりでなく、一般人の発言に耳を傾けること(姿勢としては「寄り添う」こと)。多様な価値観の存在を認めること。さらに、信頼関係の構築のためには、一般人を企画の段階から組み込むこと。事業に対する責任のありかた(被害がでたときの対処あるいは賠償方法など)を明示すること。

これらの事項は、なんらかの事業を行う上で当然に考えるべきことである。多くの事業では、「リスク」や「不確実性」という用語は用いなくても、事業を進める上での常識として考慮されているはずである。しかし、これらの事項は、しっかりとした倫理観あるいは確固たる制度を持たない場合には、往々にして軽視される。例えば、以下のような事態が考えられる。

1. 住民への事前周知が必要であると分かっているにもかかわらず、事業者内部の雰囲気に負けて、その必要性を発言できない。
2. リスクの大きさを評価すると、優先順位が高いはずの事業あるいは対策工事が、政治的な関与で後回しになる。
3. 得られたデータの解釈に、個人的なバイアスを感じても、それを指摘する機会がない。あるいは、職場環境から指摘できない。
4. 一般人に対する事業説明会で、一方的に専門的事項を話し、同意を求める。このような行為のために、客観的リスクは低いにも関わらず、一

般人からの同意を取り付けることができない。住民説明会なので、住民からの質問は受け付ける必要がないという認識の自治体がいまでも存在している。

このような事態は、正当な批判を受けた場合には、大きな損失に繋がることもある。場合によっては、社会的な評価や信頼を一挙に失ってしまうこともある。このような最悪の事態を避けるためには、事業の在り方に何らかの制度が導入されるべきであろう。その制度の理論的支柱となりえるのがリスク論であるように思われる。

近年、お題目を唱えるだけの政策案に、多くの人が右往左往して、本質的な議論がなされないままに見切り発車をするようなことが政府レベルでも頻発している。このようなことも、リスク論的思考をもてば、そしてリスク論に基づく制度を持っていれば、いずれかの段階で廃案あるいは修正案となっていたはずである。リスク論に基づく制度や事業計画の導入は煩わしいものであるが、「リスクの先送り」を防ぐ意味でも、その意義は大きい。

しかし、「リスク論を制度に導入すれば、リスクは低減できる」と断言できない。どのような問題であれ、「制度構築(Structure)」と「運用(Flow)」の両者に注意を払う必要がある。

運用上の工夫の一つとして、多くの分野で PDCA サイクルが重要視されている(6.1 参照)。大学教育の改革に対する PDCA の適用は、PdCa ではないかと、実態に基づいて疑問を投げかけている本がある[31]。すなわち、企画書と評価報告書は立派な体裁であるが、do(行動)と act(改善)には至っていないのではないかと、という見解が述べられている。大学教育改革自体が過去の事例を評価することなく、新規性を感じさせるカタカナ語の乱発であり、改革方針自体が Pdca (評価がない)ではないかとも述べられている。

おそらく、他の分野においても、PDCA サイクルの運用は、多くの場合掛け声倒れに終わっているものと推察できる。もともと PDCA サイクルは生産工程の製品の質向上などの明確な目的を有する事業で有効なものであり、品質向上運動の際の日本の技術者の発明とされている。

「国際力」、「考える力」…の育成など、言葉の意味を定義することが難しい事業に対して無批判に受け入れるのではなく、その適用性の有無は真摯に検討議論されるべきものである。

リスクをゼロにできない以上、リスクを適切に制御する必要がある。すべてのリスクを問題ないレベルまで低減する財政資源はあり得ないので、優先順位をつけることが必然となる。当然に、利害関係が発生し、争論の原因ともなりえる。

このような状況を一般の人が納得できるようにするためには、堅実な、そして公平な考え方に基づく、地道な努力が必要となる。ある意味では、住民がリスクを適切に認識し、リスクリテラシーを身に付けることが、リスクの低いより安全な社会を創るうえで、不可欠であるといえる。しかし、それを達成することは、ヒトにとって難問の一つなのであろう。

参考文献

- [1] 辛島恵美子:”言葉「リスク」の歴史と今日的課題”, 保険物理, 35(4)(2000) pp.473-481
- [2] レイチェル・カーソン:”沈黙の春”, 新潮文庫, (1974)
- [3] ピーター・バーンスタイン(青山護訳):”リスク上・下:神々への反逆”, 日経ビジネス人文庫 714, (2001)
- [4] 電気事業連合会:「リスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプラン」の公表について, (2018), https://www.fepc.or.jp/about_us/pr/oshirase/1257518_1458.html
- [5] 土屋信之:”首都水没”, 文春新書, (2014)
- [6] S.Roeser, R.Hillerbrand,P.Sandin, M.Peterson (editors): ”Essentials of Risk Theory”, Springer, (2013)
- [7] 日本工業規格 JISQ31000: ”リスクマネジメント-原則及び指針(2010)”, <https://kikakurui.com/q/Q31000-2010-01.html>
- [8] ”リスクマネジメントに関する国際標準規格 ISO31000 の活用”, (2018) <https://www.tokiorisk.co.jp/publication/report/trc-eye/pdf/pdf-trc-eye-266.pdf>
- [9] 菊本統 他5名:”我が国の自然災害に対する統合的リスク指標”, 土木学会論文集 F6Vol.63,No.1,(2017) pp.43-57,
- [10] 緒方裕光 ”リスク解析における不確実性”, 日本リスク学会誌, 19(2),(2009), pp.3-9
- [11] 例えば, 安川郁夫, 今西清志, 立石義孝:”絵解き土質力学(改定3版)”, オーム社(2013)
- [12] 斎藤了文:”テクノクラシーとは何か”: 巨事故を読む技術, 講談社選書メチエ 323, (2005)
- [13] 例えば, 岩沢宏和:”リスクを知るための確率・統計入門:理論と解法のテクニック”, 東京都書, (2012)
- [14] 多田洋介:”行動経済学入門”, 日経文庫 1315, 日本経済新聞社(2015)
- [15] ダン・アリエリー:”予想どおりに不合理: 行動経済学が明かす「あなたがそれを選ぶわけ」”, ハヤカワ・ノンフィクション文庫, 早川書房(2013)
- [16] ダニエル・カーネマン: ”ファスト&スロー(上, 下) あなたの意思はどのように決まるか?” ハヤカワ・ノンフィクション文庫早川書房(2014)
- [17] 中谷内一也:”リスクのモノサシ”, NHKBooks 1063, 日本放送出版協会(2006)
- [18] 吉田喜久雄, 中西準子 ”環境リスク解析入門”, 東京図書(2006)
- [19] 河北新報オンラインニュース https://www.kahoku.co.jp/tohokunews/201910/20191017_33008.html
- [20] 中西準子:”原発事故と放射線のリスク学”, 日本評論社(2014)
- [21] 宮林正恭:”リスク危機管理:その体系的マネジメントの考え方”, 丸善出版, (2008)
- [22] 宮林正恭:”リスク危機マネジメントのすすめ”, 丸善出版, (2013)
- [23] B.Fieschhoff and J.Kadvany: "Risk: A very short introduction", Oxford Press. (2011) p.132
- [24] 藤垣裕子(編):”科学技術社会論の技法”, 東京大学出版会,(2005)
- [25] 小林傳司:”トランス・サイエンスの時代—科学技術と社会をつなぐ”,NTT 出版ライブラリーレゾナント,(2007)
- [26] 広田すみれ, 増田真也, 坂上貴之:”心理学が描くリスクの世界, 行動的意思決定入門”, 慶応義塾大学出版会,(2002)
- [27] 中谷内一也(編):”リスクの社会心理学”, 有斐閣,(2012)
- [28] 西澤真理子:”リスクコミュニケーション”, エネルギーフォーラム新書,(2013)
- [29] 地質リスク学会/社団法人 全国地質調査業協会連合会(共編):”地質リスクマネジメント入門”, オーム社,(2010)
- [30] 國廣正:”それでも企業不祥事が起こる理由 “法令遵守”を超えるコンプライアンスの実務”, 日本経済新聞出版社,(2010)
- [31] 佐藤郁哉:”大学改革の迷走”, ちくま新書 1451, (2019)