

工学におけるリスク対応策の分類

REVIEW OF RISK MANAGEMENT IN ENGINEERING

黒田 勝彦*

By Katsuhiko KURODA

Uncertainties are unavoidable in the planning and design of engineering systems. The human history itself has been a challenge to the uncertainties. Yet, the recent increasing complexity of technologically based industrial societies has resulted in growing concern about risks imposed by man-made technology. Tools and methods managing risks has been therefore developed in various fields of sciences and technologies. The present paper reviewed those methods particularly focussing the engineering systems' planning and design.

1. まえがき

William D. Rowe¹⁾は、その著書「An Anatomy of Risk」の序文で、以下のように述べている。「・・・人間の生涯の中で唯一確実なことは、必ず死ぬということだけである。それが何時、どんな形で襲って来るかといったことは最早不確実であり、ましてや死そのものが我々にとってすべての終わりを意味しているかなどについてはもっと不確実である。人間は、死の来襲を一日でも遅らせたいと努力し、生涯の生活をより良くしたいと願望している。このような人間の欲求の前に立ちはだかっているのがリスクである。人間を取り巻くリスクには、自然的なもの、人工的なもの、また、制御不可能なものや部分的に制御可能なもの等がある。人間の平均寿命が長くなり、生活の質が向上するにしたがいますます

リスクの回避に関心が集まっている。特に、見合うだけの便益を享受出来ない人々へのリスクが問題である。・・・」ここに述べられているように、リスク問題には、本質的に二種類の問題が含まれている。一つは、「不確実性」であり、他の一つは、「誰がリスクを被るか」ということである。前者の不確実性はリスクをリスクならしめる由縁でもある。後者の「誰がリスクを被るか」については、リスクはそれを被る受け手(risk recipients)を同定しない限りリスク問題とはならない、ことを意味している。

工学が対象とするリスクは極めて広範であるが、徳谷²⁾の分類による「自然系リスク」と「人工系リスク」がその主要なものである。工学における伝統的な関心はこのようなリスクをどうして除去したり部分的に減らしたり、消去したりすることが出来るか、にあった。しかし、一般的なリスクへの対応の

* 正会員 工博 京都大学工学部 交通土木工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

歴史を振り返ると、このような伝統的工学手法以外の種々の対応策の可能性を学ぶことができる。

以下、本文は、工学分野（特に、材料・部品・装置・装置系・構造物・構造物と人から成るシステムを扱う工学分野）でのリスク・マネジメントの考え方を整理し、今後の社会・公共システムのリスク・マネジメント研究の方向に議論の題材を提供する。

2. 工学が対象とするリスクの分類

「リスク」という言葉はいろいろな意味で使われているので、まず、「リスクの定義」をサーベイし意味を混同しないようにして、工学におけるリスク分類をしておこう。

(1) リスクの定義

工学で普通「リスク」と呼ぶ時にその内容はだいたい三種類の使い方をしている。一つは、火災、爆発、衝突、破壊、崩壊、洪水、台風、地震、液状化、地滑り、といった危険事象（Peril）そのものを指す場合である。第二の使い方は、これらの危険事象が生起する確率を指す場合³⁾であり、第三は危険（Peril）の生起する確率とその危険によって引き起こされた損害または被害（Loss）との積、すなわち期待損失（Expected Loss；必ずしも経済損失だけではない）を意味する場合⁴⁾である。第一の立場は現象の生起が何等かの生命・財産に危険を及ぼすとの認識から、他の諸現象と意識的に区別しようとする場合に使われており、第二の場合は現象の生起を確率論の立場から記述しようとする立場の研究において使われている。また、第三の場合は、工学的対応の効果を研究する立場で使用されることが多い。このように現実にはいくつもの意味で「リスク」を使用

しているが、本文でも、特に紛らわしくない限り、このような三種類の使い方をする。また、紛らわしい場合は、「危険事象」、「生起確率」、「リスク」といって使い分ける。

(2) 工学的リスクの分類

工学が対象とするリスクをここでは仮に「工学的リスク」と呼ぶことにする。リスクの分類として徳谷²⁾は、危険（Peril, Hazard, Crisis）が生起する環境が、自然か、人工か、あるいは人間そのものかによって、自然系リスク、人工系リスクおよび人間系リスクに分類し、表-1を与えている。しかし、この分類では、「予想や予測と外れることによって結果的にもたらされる損害」といったいわゆる「経営リスク」あるいは「意思決定に伴うリスク」が含まれていない。生起する環境別に分類するとすればこのようなリスクは「決定（主体）系リスク」とも言うべきものである。このリスクは、さらに、意思決定者が、私的か、公的か、によって細かく分類することが出来よう。

リスクの分類上での他の視点は、その制御の程度（controlability）による分類、リスクの受け手が認識しているかどうか（Voluntary or Involuntary）による分類、等がある。

3. リスクと不確実性・対応策

工学が対象とするリスクは、表-1に示したように、極めて多様である。このような多様なリスクに対応するために人類はその英知を傾けてきた。それらは、特殊なものもあれば、普遍的なものもある。本章では、これらについて考察する。

表-1 環境別リスクの分類

系統別リスク分類	具 体 例
自然系リスク	地震、津波、雷、台風、異常気象、竜巻、豪雨、豪雪、雪崩、火山爆発、害虫異常発生、・・・
人工系リスク	火事、爆発、自動車事故、船舶事故、航空機事故、公害、労働災害、製品欠陥、コンピューター犯罪、・・・
人間系リスク	盗難、侵入、デマ、パニック、スキャンダル、殺人、癌、心臓病、狡猾人間気配り欠如、・・・
決定系リスク	取引先倒産、選好変化、競争相手、予測はづれ、技術革新、労働争議、革命

(1) リスクと不確実性

まえがきで述べたように、リスクは本質的に不確実性を原因としている。2. で述べた各種のリスク（危険）は、いずれも、その発生時期、発生場所等の発生のメカニズムが不確実である。これらの危険は物理・化学現象の他に人間の生理現象や心理現象および広範な社会・経済現象を含んでいる。これらの現象は、何等かの根元的な原因（素因）が引金となって、誘引と結びついて各種の害をその受け手に及ぼす。したがって、リスクに適切な対応をするためには、出来る限り精度高い現象の予測が必要とされる。そのために、現象を分析し、各種の予測法の開発が営々と行われてきたのである。しかし、現在の科学技術水準では、なお多くの不確実性のために、これらを確定的に予測することは困難である。そこで、リスクの原因となる不確実性を見極めて適切な対応策を採ることが効果的である。図-1⁵⁾は工学の諸分野で扱う不確実性を大きく分類したもので、これを定量的に取り扱う数学モデルと主な対応策を三角座標で対応付けたものである。工学の分野で直面する不確実性は以下のように分類される。

①ランダムネス（randomness）；現象または環境を認識する場合、仮に、認識する立場や認識の方法が一定であっても、時間的・空間的な変化が決定論的でなく、不規則であるとししか説明の方法が無いものがある。これらは一般にランダム現象と呼ばれ、人間にとってそれを確定的に予測出来ないという意味で不確実である。これをランダムネスによる不確実性と呼ぶ。量子力学における素粒子の運動、ある地点での地震の生起の仕方、ターミナルへのタクシーの到着等に代表されるように、自然現象・社会現象には本来的にランダムな現象として認識されている現象は多い。これらのランダムネスは、確率や確率過程モデルで表現されることが多い。多くの危険はこのランダムな性質を持っている。

②モデル誤差（Modelling Er-

ror）；ある現象を数量的モデルで表現する場合、モデルの構造を如何に精緻にしたとしても、現象を完全に再現記述することは不可能であり、真実からの乖離がある。これをモデル誤差と呼ぶ。モデル誤差による不確実性はモデルの構造自体に起因するもので、モデルに含まれるパラメータ値や変数値の不確かさによる誤差はモデル誤差とは呼ばない。モデル誤差は、一定の値をとる修正係数とか、あるいは確率モデルで表現されることが多い。モデルの誤差は予測の不確実性となって、「誤った手段の選択の原因」となり、決定の結果に損失をもたらす。

③不完全情報（Imperfect Information）；モデルに入力されるパラメータ値や変数値は、調査や試験・実験などによってその値を推定されるが、多くの場合、技術的・経済的制約のために完全な情報を得ることが困難で、どうしても「推定」に頼らざるを得ない。このように、情報の不完全性に起因するものを情報の不完全性による不確実性と呼ぶ。ほとんどの場合、確率モデルで表現される。

④ファジネス（Fuziness）；人間が現象や実在を認識してこれを表現する場合、曖昧でぼんやりした表現をする場合が多く、日常の行動はこのような曖昧な情報や認識によっている場合が結構ある。例えば、「朝8時頃集合」といってお互いに納得している場合でも、これは7時55分なのか8時5分なのか

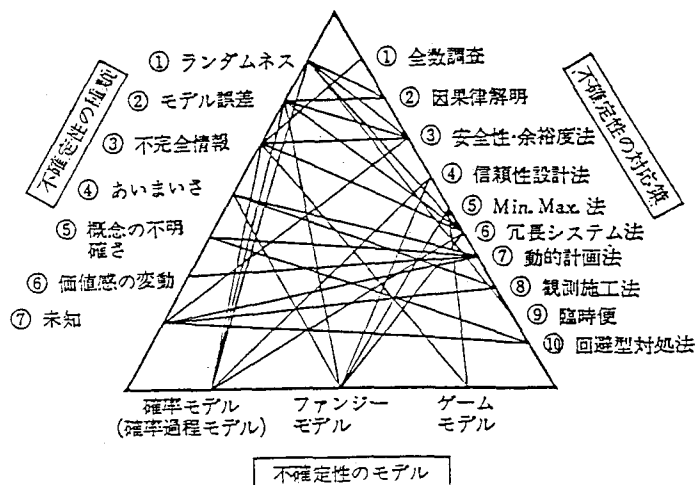


図-1 不確実性の種類・モデル・対応策

か確定的でない。このような曖昧さ（Fuzziness）は一つの不確実性として考えることが出来る。これはZadeh⁶⁾によってファジーモデルが提唱されて以来定量的な取扱が可能となり、特に制御工学の分野で著しい成果を挙げている。

⑤概念の不明確さ（Vagueness）；福祉とか幸福とかを追求することが、公共事業の目的である、と言われる。しかし、これらの概念のその実態は不確かではっきりしない。このような不確実性が原因で計画の実効があがらず、無駄な投資に終わった結果を過去に幾度も経験している。

⑥価値観の変動性（Variation of Valueness）；人間の価値観は時間とともに環境とともに揺れ動き一定不変ではない。勿論、その変動性を表現することは極めて困難で、不確実なものである。行動の選択（結果の評価）はこのような価値観に基づいてなされるので、評価が一変することによる製品の売れ残り、社会の変革、といった経験は歴史をひもとくまでもなく我々はよく知っている。これらは、ランダム効用理論に見られるように、確率モデルとして表現されることが多い。

⑦未知（Unknown）；人類は人類を取り巻く全ての環境を知覚し、想像出来るわけではない。この地球上においてすら、人類がこれまでに経験したことも無い、想像もしないような現象や実在が有るかも知れない。このような人類が知識として持ち合わせていない未知を狭義の不確実性と呼ぶ。これは、2度にわたるオイルショックによって企業が経験した各種のリスクにその例を見ることが出来る。

(2) リスクへの対応

先に述べた不確実性が、種々の現象の特質となる時、その現象は「好ましからざる結果をもたらすポテンシャル」を有していることになり、その意味で「危険事象（Peril, Hazard）」と呼ばれる。既に述べたように、

リスク＝[危険事象の生起確率]

× [事象が引き起こす結果]

である。したがって、リスク対策は「事象の生起」に注目する方法と「引き起こされる結果」に注目する方法と2種類ある。いずれの対応にも、現象や結果を精確に予測しようと努力する科学的方法と工学的対応によって、生起確率を引き下げようとしたり、結果を縮小しようとする方法がある。

表-2⁶⁾はこれらを纏めて整理したもので、大きく3つの戦略に分けることが出来る。以下、順次これを説明していく。

①回避戦略；危険事象の生起が予想される場合、リスクの発生そのものを回避しようとする考え方で“君子危うきに近寄らず”とする考え方である。この戦略に含まれる戦術は、過去に行われた安全な道をそのまま辿り、危険にはチャレンジしないトレース戦術、危険な局面そのものから逃げ出す逃避戦術、何も新しいことはせずじっとしている待機戦術、の3種類の戦術がある。トレース戦術の具体例としては、過去と条件が同じ場合、敢えて危険を冒さず過去と同一の計画・設計・施工法を採用することが考えられる。逃避戦術としては、危険を避けて移転する、迂回する、建設地点を変更する等が含まれる。

表-2 リスク対応策の分類⁶⁾

戦 略 名	戦 術 名	具 体 例
回避戦略 (aversion) (avoidance)	トレース戦術	同一計画、同一構造、同一工法
	逃避戦術	移転、迂回、計画変更、設計変更、工法変更
	待機戦術	不動待機
除去戦略 (elimination)	スパイ戦術	全数調査、実物（模型）実験、アンケート調査
	事前予防戦術	防災施設、増発、各種規制、過大計画、過大設計
	観測型戦術	観測施工、試験工事、臨時便、追いかけて投資、避難、移転、保全
軽減戦略 (reduction)	待機・冗長戦術	広域水管理、Fool-proof, Fail-proof
	分散戦術	集中規制、遊水池、財産分散、多角経営、保険
	修復・避難戦術	修理、更新、避難

待機戦術は、文字どおり新しいことは何もせず不動待機することである。

②除去戦略；この戦略の考え方は”虎穴に入らずんば虎児を得ず”という積極的なリスク対応の考え方であり、情報の不足によって起こるであろう事象や結果の予測を、事前に情報を収集することによって精度を高め不確実性を除去しようとするスパイ戦術、事前にリスクの存在を知って「悪い結果が起きないように手を打っておこう」とする事前予防戦術、事象を観測しながら悪い結果が起きないように手を打っていかうとする観測型戦術がこれに含まれる。スパイ戦術の例としては、全数調査によって不確実性を取り去る、実物実験によって危険の原因を確認しこれを取り去る、アンケート調査によって住民や消費者の希望や好みを調べてこれに合う計画・製品を企画する、といった具体例をあげることができる。事前予防戦術の典型的な例は防災施設の建設であるが、他に、便数の増発、各種規制による危険発生の防止、過大計画、過大設計等が考えられる。観測型戦術の例としては、観測的施工（情報化施工）、試験工事、臨時便、追いかけ投資、段階的避難等が挙げられる。

③軽減戦略；「ある程度のリスクは覚悟しておこう」とする考え方の戦略で、それに見合う十分な便益がある場合に採られる。これには、危険事象が発

生したとしても、結果として機能障害を起こさないようにしようとする冗長戦術、発生するであろうリスクを分担し、壊滅的被害を受けないようにしようとする分散戦術、危険事象が発生しても被害を最小限に食い止めるための保全・修復機能を備えておく保全修復戦術が含まれる。冗長戦術の例としては、フール・プルーフ、フェイル・プルーフといったシステムの採用、広域水管理によって1地域で起こった洪水にも対応出来るようにする、といった方法が考えられる。分散戦術は古くから考えられている戦術で、遊水池を設けて、下流の被害を軽減する、財産を分散する、多角経営を行う、保険をかける、等の例が含まれる。修復・避難戦術としては、危険事象が発生しても被害が拡大する前に部品を交換または修復を行う、避難して生命だけは守る、一定期間ごとに設備を更新し危険事象の発生を少なくする、といった具体例が含まれる。

4. リスク評価のシステムズアナリシス

(1) リスク評価のシステム構成

図-2は先に述べた Rowe¹⁾ によるリスク評価のシステム構成図を示している。彼は、特に工学システムを対象にはしていないが、このシステムはそのまま工学システムのリスク評価に対応している。すなわち、リスク総合評価 (Risk Assessment) とは、

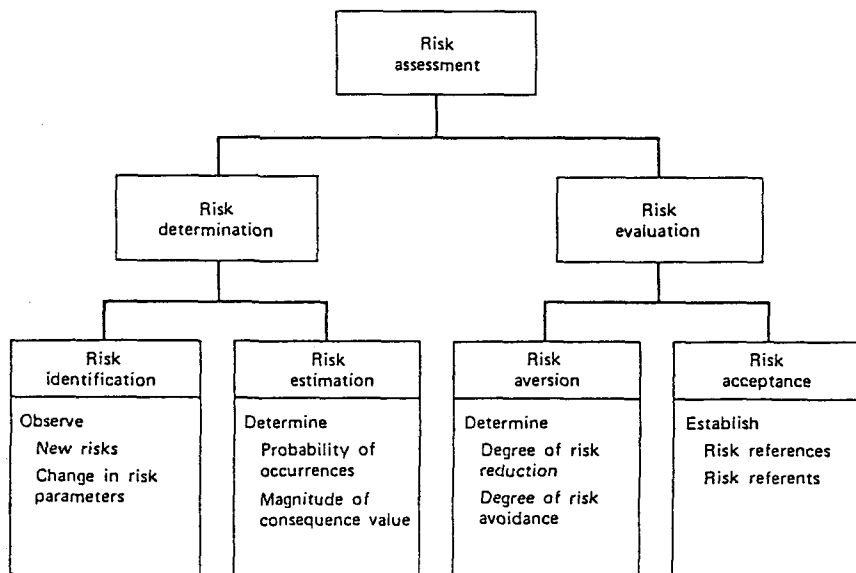


図-2 リスク総合評価のシステム (Rowe¹⁾ による)

リスクの決定 (Risk Determination) システムとリスクの評価 (Risk Evaluation) システムとから構成される。新しいシステムを設計したり、計画するとき、まず、システムに生起する各種の危険を同定 (Risk Identification) し、誰がどのようなリスクを被るかを明らかにする必要がある。しかる後、危険事象が生起する確率を推定し、危険事象によって引き起こされる結果 (Consequence) の大きさをその受け手 (Risk Reciepients) ごとに推定してシステムに含まれるリスクを計量する (Risk Estimation)。さて、リスクの同定とリスクの推定がなされれば、そのリスクは許容出来るレベル (Acceptable Risk Level) かどうか、もし、許容出来ないとすれば、リスクを回避出来るシステムに変更するか、リスクを除去する方法はあるか、リスクを軽減する方法は、といった検討 (Risk Aversion) を経て、最も効果的な方法は何かを考察しリスクへの対応策を決定する。以上の四つのシステムは総称して、リスク総合評価と呼ばれているが、リスク・マネジメント・システムとも言うべきものである。以下、リスク同定、リスク推定、リスク評価のシステムについて、工学システムの例を挙げながら説明する。

(2) リスク同定とリスク推定

ある対象システムに潜在するリスクの種類を確定することをリスク同定と呼ぶ。同定された個々のリスクの大きさ、発生過程、発生確率を推定することをリスク推定と呼ぶ。リスクは、先に述べたように危険事象の発生が直接の引き金となっている。しかし、危険事象の発生が直ちに、リスクと結び付くわけではない。一般的な過程は図-3に例を示したように、最も根元的な事象 (Causative Event) が引き金となって、いくつかの潜在的な事象 (Outcome) が生起し、いわゆる感知できる危険事象 (Exposure) が引き起こされる。この危険事象は幾種類もの経路 (Exposure Path-way) を経て危険の受け手 (Risk Reciepients) に影響 (Consequence) が及ぶ。リスクが不確実性と切り離せない点は、この内根元事象や危険事象の発生時期、発生場所が不確定であるだけでなく、その伝達経路が不確実であること、さらに、危険の受け手や引き起こされた結果の大きさも不確定である場合が多いからである。いわゆる、リスク分析と呼ばれているのはこのプロセスのうちの事象の生起確率分析の過程を主に指しており、そこでは、特に、現象を科学的 (多くは、確率統計的)

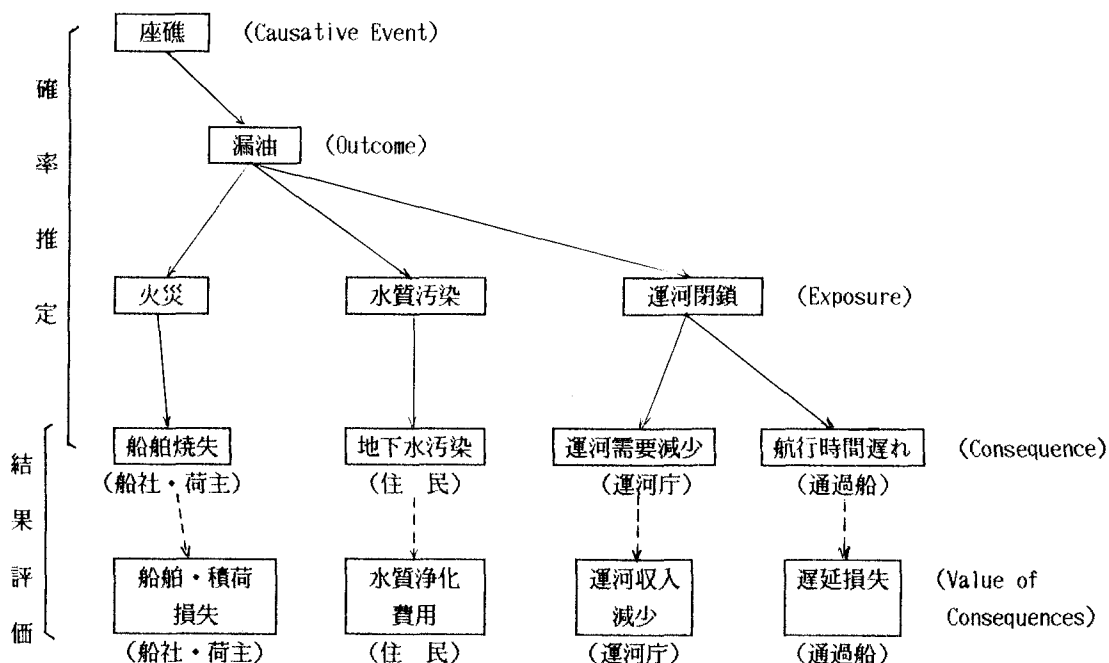


図-3 リスク推定のプロセス (スエズ運河の例) ⁷⁾

に解明することが研究の目的であることが多い。また、一方では、影響（Consequence）の分析だけに留まって、その発生メカニズムや発生確率の解明に立ち入らない研究も多く見受けられる。このような差異はリスク・マネジメントの分野が多分に学際的な分野で種々の専門家の共同で行われなければ進められないことを反映している証拠とも言える。

リスク同定には、専門家によるブレンストーミング、ETA（Event Tree Analysis）、FTA（Fault Tree Analysis）、FMEA（Failure Mode Effect Analysis）等の手法が援用されている。また、事象の確率推定にはモデル解析、FTA、ETA、FMEA等の手法が有効に援用される。

(3) リスク評価

リスクを何等かの方法で定量的に表現したとしても、当該システムの目標値、ないしは、許容値としていくらのリスクレベルでよいかを明らかにしておかなければ具体的対応策が決定出来ない。ここでは、現在使用されているいくつかの方法を纏めてその概略を述べる。表-3は、許容リスクレベルを設定するための各種の方法を整理したものである。表は許容レベルを定量的に求める方法として、経済的アプローチ、心理的アプローチ、工学的アプローチ、その他に分け、個々のアプローチにおいて、統計的データから推定する方法、何等かの仮説の下で、モデル分析を行う方法の2種類の方法があることを示した。以下、簡単にこれらの内容を説明しておく。

①社会選好行動分析（Revealed social preference analysis）；人々は昔から、ある目的を達成するために、敢えて、自然災害や人災といった

危険の存在を知りつつ、行動を積み重ねて来た。リスクを回避するために意図した行動を放棄したり、敢えてリスクを覚悟で行動を採ったりして来た。社会選好行動分析は、これらの人々の行動を、ある仮説の下で、統計的分析によって説明しようとする方法である。ある仮説とは、「一般に人々は一定の便益を享受するために、その便益の大きさに見合ったリスクを覚悟して行動している。」というものである。もし、この仮説が成り立てば、リスクの伴う行動を、そのリスクレベルと便益との相対的な比率で位置づけることができる。例えば、人々が航空機の利用によって得られる便益（時間節約等）は、航空機の事故によって死亡するリスク（年間期待死亡率と見合うと考えていると見なすのである。Starr⁸⁾やOtway & Cohenn⁹⁾は、このような考えから自己原因リスク（Voluntary Risk）と他者原因リスク（Involuntary Risk）について年間便益と年間死亡率の関係を整理している。

②心理許容分析法（Pshycometric risk acceptance analysis）；アンケート等によって、危険に対する態度を調査し、リスクレベルと人々の心理的対応をつけようとする方法。例えば、Otway & Erdmann¹⁰⁾の研究などがある。

③設計基準逆解析法¹¹⁾；現行設計法で設計された種々の構造物や部材の破壊確率を逆算し、それに基づき目標安全度を設定する方法である。この方法は、現行設計法による構造物が有する安全度へ整合する、すなわち、キャリブレーションと呼ばれ、現行の構造物の安全度が歴史的経緯から見て、社会的に十分に容認されており、経済性と安全性もバランスがとれている、と前提する方法である。

表-3 許容リスクレベルの決定法

	統計的分析	モデル分析	価値基準
経済学的方法	社会選好行動分析	費用・便益・リスク分析	経済価値
心理学的方法	心理的許容分析	行動モデル	心理的選好度
工学的方法	設計基準逆解析 事故の統計分析 (リスク比較法)		工学的実績
その他の方法	バック・グラウンド分析 リスク・バランス分析		生物としての実績

④事故の統計的分析法 (Statistical accident

Analysis) ; 事故・損害に関する統計資料に基づき事故率を推定し、これを参考として目標安全度を設定する方法¹¹⁾である。この方法は社会選好行動分析と同じ考え方で、歴史的に見てレベルが安定している事故については、一応容認されているであろうとの考えから、これと同じまたは下回る危険発生率ならば、容認されるであろうとするものである。

⑤バックグラウンド分析法 (Background analysis)

対象とするシステムで予測されるリスクレベルを、自然の中で受けるリスクレベルと同じかそれ以下であればよいとする考えで、宇宙からの放射線の強さ以下になるように、原子炉の安全性レベルを確保する、といった方法である¹²⁾。

⑥リスク・バランス法 (Balancing risk method)

得られる効用が一定でも、一方のリスクを減少させると他方のリスクが増大するといった工学システムが存在する。クスリの副作用がある場合などは、このような考えで投与量が決められる場合もある。

⑦費用・便益・リスク分析法 (Cost-benefit-risk analysis)¹³⁾ ; 費用+リスクと便益がバランスするように、リスクレベルを決定する方法である。

以上、許容リスクレベルの設定方法について整理したが、例えば、国家の威信等のように、計量し難い場合のリスク挑戦等のケースもあり、ここに掲げた以外の価値基準で決められる場合も可能性として残されていることも考慮に入れておく必要があらう。

5. おわりに

本文は、著者が土構造物の信頼性設計の研究を始めた時から、安全性追求よりももっと広範なリスク分析追求の方が、考え方、手法も多くのことを学べるであろうと、あちこち、流浪した(研究の上で)過程で得た考えを纏めたもので、もとより、未だまとめが整理出来ないものも多く残されている。今までこのような問題で互いの考えをぶつけ合える場は土木工学を専門とする研究者の中には見つけることが出来なかった所為もある。しかし、徐々にでも議論出来る仲間が増えることは、今後の研究にとって、大いに力づけられる思いである。この一文がそのような仲間の何等かの刺激になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) William D. Rowe(1977):An Anatomy of Risk, Jhon Wiley & Sons.
- 2) 徳谷 昌勇(1983):リスク・マネージャー、東洋経済新報社.
- 3) Jack R. Benjamin & C. Allin Cornell (1970):Prob., Stat. and Decision for Civil Eng., McGraw-Hill Book Co.
- 4) C. Lomnitz & E. Rosenblueth (1976): Seismic Risk and Eng. Decision, Elsevier.
- 5) 黒田 勝彦(1983):技術基準にみる今日的な課題 -不確定要素への対応-、土木学会誌3月号
- 6) L. A. Zadeh(1965): Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8.
- 7) 黒田 勝彦(1990):現場計測工法と信頼性設計、現場計測計画のたて方、土質工学会
- 8) Chauncey Starr(1969):Social Benefit versus Technological Risk, Science Vol.169.
- 9) Harry J. Otway & J.J. Cohenn(1969):Revealed Preferences--Comments on the Starr's Benefit-Risk Relationships., IIASA, Laxenburg, Austria.
- 10)Harry J. Otway & R.C. Erdmann(1970):Nuclear Engineering Design, Vol.13.
- 11)星谷 勝・石井 清(1986):構造物の信頼性設計法、鹿島出版.
- 12)環境科学センター(1981): 環境のリスク・アセスメント、産業図書.
- 13)Richard C. Schwing & Walter A. Albers, Jr. (1980): Societal Risk Assessment--How Safe is Safe Enough?--, Prentice Hall, New York.