

地下構造物整備のためのリスク評価に 関する基礎的検討

BASIC STUDY ON RISK ASSESSMENT FOR MAINTENANCE STRATEGY OF UNDERGROUND STRUCTURE

朱牟田善治¹

Yoshiharu Shumuta

This paper presents a basic study of risk assessment methods for the maintenance strategy of huge number of underground structures. Some actual problems associated with maintenance problems for existing underground structures such as underground pipe are illustrated to identify common risk assessment subjects. The definition of "RISK" and its assessment approach in natural and social science fields are investigated. Risk assessment methods related to the maintenance strategy are investigated in following risk assessment issues: 1) facility physical condition, 2) network system performance, 3) socio-economic impacts. Finally, the concept of a risk assessment model for the rational maintenance strategy is presented for a future project.

Keywords: risk assessment, underground pipe, maintenance strategy, subjective probability, expected utility

1. まえがき

埋設管路を代表とする地下構造物の建設は一時期に集中することが多く、膨大な量の地下構造物の更新時期が重なる都市が近年特に増加してきた。たとえば、東京都下水道局の集計によると都内下水道管渠のうち、23区内平均で13%、2000kmに及ぶ管渠がすでに50年を超えている。実際に95年度までの10年間に、管の劣化などが原因となる陥没が、年間平均約1900件も都内で発生している¹⁾。通信設備の基盤として埋設管路を膨大に抱えているNTTの場合²⁾³⁾、とう道は共同溝を含め全長約990km、管路は全長約66万kmと膨大な設備が地下空間にネットワークを形成している。既存の管路網は昭和40年代後半から50年代前半に大量に敷設され、これらの管路は年々老朽化が進んでいる。管路設備は経年とともに不通過率が增大していく傾向にあり、特に金属管路においては建設後20年以上経過すると不良率が急速に高くなる。東京電力管内には、約3000基ほどのマンホールが敷設されており、近年これらのマンホールや管路の老朽化対策が問題となっている。

埋設管路は地域全体に広域にネットワークを形成しているため、一区間の不通がシステム全体に波及する。このため、更新に関わる直接的な工事費よりもネットワークとしての機能が失われた場合に生じる間接的な損失コストのほうがはるかに大きい場合もあり、管路を更新するうえではネットワークシステム全体への影響を考慮することが重要である。同様にネットワークシステムとしての機能が失われれば、社会経済活動への影響は計り知れず、その影響も整備戦略を策定するうえでは考慮する必要がある。

「キーワード」 リスク評価、埋設管路、整備戦略、主観確率、期待効用

1 正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部

埋設管路のように数が膨大であると、地震などの災害対策において特有の問題が生じる。たとえば、膨大な数が敷設されている設備の耐震基準が改定された場合、一般に既存の設備には適用されない。このため、古い基準のまま既設設備は次に更新されるまで何の対策もされないまま利用され続けることも多い(ただし、数が膨大な設備の場合には、耐震基準は明示的にされないことが多い)。その結果、地震時には、このような古い設備に被害が集中してしまう⁴⁾。

膨大な設備が更新の対象となる場合、各設備の劣化や耐震性の状態、ライフラインネットワークシステムとしての特性、地域社会への影響などの視点から総合的に更新優先順位を決定し、合理的な整備戦略を策定する必要がある。このような多面的な観点から更新優先順位を決定するためには、不確実な情報に伴う多くのリスク要因の評価方法が重要課題となる。

本論では、既設の地下構造物を対象とした更新優先順位を検討するうえで重要な、リスク評価手法の基礎的な考察を行う。まず、リスクの定義を明確にし、自然科学と社会科学の両分野におけるリスク評価の考え方を示す。次に、更新優先順位を決定するうえで問題となる、1)劣化や耐震性に関する単体設備のリスク評価、2)個々の設備を構成要素とするシステムに関するリスク評価、および3)対象システムの機能低下に伴う社会経済活動に関するリスク評価(影響評価)の現状と課題を例示する。最後に、これらの要素技術を応用し、筆者が地下構造物の合理的な整備戦略策定支援のために現在取り組んでいるリスクアセスメントモデルの概要を紹介する。

2. 「リスク」の考え方

2.1 リスクの定義

近年広く使われている「リスク」の定義は多く、多くの概念や定義が氾濫している。本論は、リスク評価手法を整理することを目的としているため、まず、リスクの定義について簡単に述べる。

池田・盛岡⁵⁾を例として「リスク」は、一般に式(1)のように定義される：

$$|\text{リスク}| = |p: \text{事象の生起する頻度}| \cup |d: \text{望ましくない結果の大きさの程度}| \quad (1)$$

式(1)で示されるように広義に「リスク」とは、右辺2つの項の和集合($\cup$)として表現される。このため、右辺2つの項の積のみに限定されるのではなく、「事象の生起する頻度」や「望ましくない結果の大きさの程度」単独でも「リスク」として定義される。事象の生起する頻度 p が、確率分布で与えられれば、工学分野でより一般的な「期待損失」の定義を与える式(2)も式(1)の特解として与えられる。

$$r = \sum_i p_i \cdot d_i, \quad \sum_i p_i = 1 \quad (2)$$

本論で定義するリスクも一般的な定義にならい、「事象の生起する頻度」、「望ましくない結果の大きさの程度」、および両事象の積として計算できる「期待損失」のいずれかを意味するものとする。

式(1)、(2)を用いて、「リスク」を定量評価するためには、2つの不確実性を定量化する必要がある。一つは「事象の生起する頻度」に含まれる不確実性であり、もう一つは「望ましくない」という人間の価値判断を伴う不確実性である。各学問分野が対象とする不確実性の範囲は広い⁶⁾が、上述の2つの側面を定量化するうえで大きく2つの考え方がある。真理を追究する自然科学の分野では大数の法則(確率 p で起こる事象は n 回中 np 回起こることはほとんど確実である)⁶⁾を基礎定理として客観的な物理データのもとに、事象の発生する頻度を定量化しようとする。ただし、自然科学の分野で「望ましくない結果」という価値判断を伴

う不確実性は、たとえば、「故障」などのように問題設定の時点で自明のこととして深く議論しない。これに対して、人間の選択（意思決定）の問題を主に扱う社会科学の分野では、リスクは常に客観的・絶対的なものではなく、当該個人によって主観的に定義しようとする。すなわち、リスクに対する人間の選択を論理的・合理的に説明するためには、「望ましくない結果の大きさの程度」を客観的な結果の大きさだけで比較するだけでは不十分であるとし、「効用」^⑧と定義される個々人の主観的な判断のフィルターをかけて評価する立場をとる。さらに、理想的合理的人間をモデル化し、その合理的人間の判断がいくつかの前提を常に満足すれば、主観的に定量化された「事象の生起する頻度」も、コルモゴロフの公理系^⑨が適用でき、数学的な扱いが可能であるとする。ベイズ統計学では、この確率を主観確率^⑩と呼ぶ。

これら2つのアプローチは、従来、別々に議論されることが多かったが、公共性が高く、地域社会に広域的に広がる地下構造物の整備戦略を検討するためには、上記の2つの視点からリスクを多面的に取り扱うことが必要である。

2.2 主観確率の意義

大数の法則に基づき、客観的に「事象の発生する頻度」を評価することは理解が容易である。しかし、客観的に「事象の発生する頻度」を確率として表現できる事象は、実際には限定されている。等確率性^⑪や頻度論的^⑫に確率を定義しようとしても、たとえば、地震のように発生周期が人間のライフサイクルよりもはるかに長い場合などには、評価するためのデータを十分に集めることは非常に困難となる。すなわち、繰り返しの現象が十分に観測できる場合ばかりでなく、サンプル数が全くないか少ないケースで確率を推定しなければならない場合も現実には多い。主観確率は、付録1に示す前提を満たす合理的な判断を行う人間が主観的に定義できる値であり、ベイズの定理^⑬により逐次修正や整合性のチェックが可能であることが特徴である。日常的な確率判断は、そのままでは整合性を持たず主観確率として数学的に扱うには無理があるが、ベイズの定理により首尾一貫した修正を繰り返すことによって、感度解析のための第1近似的な評価や少ないサンプル数の中での帰納的推論などに十分活用できるものと考えられる。このため、地下構造物のリスク評価で想定される様々な場面で、主観確率の活用は期待できる。

2.3 人間の価値判断に着目する期待効用の意義と測定方法

経済学、経営学の分野において、しばしば期待効用理論を規範にした処方的モデルを作成して、意思決定過程を事前に分析する。これは期待効用モデルと呼ばれ、主観的にリスク評価を行う場合、現在もっとも有効なモデルとして知られている。合理的意思決定の基礎である期待効用モデルは、「リスク下（不確実性下）における合理的意思決定の規範は、期待効用を最大にする代替案を選択すべきである」という思想のもとに体系化がなされている^⑭。期待効用を測定することにより、式(2)の「期待損失」の評価だけでは測定できない人間の価値判断に伴う不確実性を評価することが可能となる。

人によって異なる効用を測定する（効用関数を構築する）ためには、一般にアンケートによりサンプルデータが収集される。その中でもアンケートの代表的な方法論としてCVM(Contingent Valuation Method: 仮想評価法)^⑮が挙げられる。CVMは仮想的な事象を回答者に示し、この事象に対する支払い意思額や補償許容額を尋ねる方法である。CVMの最大の特徴は、個人の支払い意思額や受け入れ補償額を直接尋ねることによって、非利用価値の評価をすることができる点にある。付録2に期待効用モデルの概要を示す。

以下に、地下構造物の整備戦略という視点から、自然科学と社会科学の両分野にまたがるリスク評価手法の適用例を示す。

3. 劣化や耐震性など個々設備の物理的状態に関するリスク評価例

3.1 故障時間の評価

故障率、寿命、耐久性、保全性などに代表される設備管理の指標として、信頼度という用語が通常用いられる。リスクと相反する概念である信頼度は、「部品（部材）、機器（構造物）、システムなどが規定の条件下で、意図する期間中、規定の機能を遂行する確率」と一般に定義される⁹⁾。この信頼度を定量的に評価することを専門に扱う領域が信頼性工学であり、リスクは信頼度指標の排反事象として定義される。信頼性工学では、故障という事象が本質的な議論の対象であり、「対象物が規定の機能を失った状態」を故障（望ましくない結果）として定義する。

信頼性工学では、使用を開始してから故障するまでの時間を故障時間と呼び、故障時間 T を確率変数 t として式(3)に示す故障時間分布関数 ($F(t)$) を求め、設備の的確な更新時期や更新優先順位を決定する。

$$F(t) = P_r(T \leq t), F(0) = 0 \quad (3)$$

式(3)の故障時間分布関数はワイブル分布や対数正規分布などケースごとに決まった分布関数として仮定されることが多い。サンプル数が少なく分布関数の形状を容易に決定できない場合でも、中央局限定理¹⁰⁾を根拠として、正規分布あるいは対数正規分布として仮定される。これに対し、平均値や分散など分布関数のパラメータを決定することは過去の事故統計など実データを用いる他なく、リスク評価において常に重要視される事項である。ただし、一般に式(3)を評価するために、過去の故障履歴データ等が十分にあることはまれであり、故障時間 T は確率変数を用いずに、実験、現状の劣化パラメータのモニタリング、および解析などにより確定的に評価されることが多い¹¹⁾。

3.2 設備の地震リスク評価

地下構造物の整備戦略として考慮すべき災害リスクは多くあるが、本節では地震を例として、そのリスク評価の方法論について解説する。

一般に地震リスクを評価するためには、式(4)が基本式として用いられる¹²⁾。

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(x) f_s(x) dx \quad (4)$$

ここで、 P_f は対象設備の破壊確率、 R は設備の耐力、 S は想定される地震荷重を示し、 $F_R(x)$ は、確率変数を x とする R の確率分布関数を示し、 f_s は S の確率密度関数を示す。

式(4)のうち、 S を評価するためには、特定の地域がどの程度の規模の地震に襲われ、地盤がどのように揺れるのかを評価することが必要であり、地震危険度解析と呼ばれる。 R を評価するためには、設備は地盤の揺れ、どの程度の余裕を持っているかを評価することが必要であり、設備の耐震性評価と呼ばれる。地震リスク評価に関する既往の研究例¹³⁾は多いが、特に地震荷重 S の精度は、1章で述べたようにサンプル数が極端に少なく、なかなか検証できないのが現状である。このため、自治体などが行う地震リスク想定（被害想定）¹⁴⁾¹⁵⁾では、地震シナリオ（地震の規模や位置を特定）を確定的に与えて評価するのが一般的である。

4. システムのリスク評価例

4.1 比較的小規模なシステムのリスク評価（Fault Tree Analysis: FTA）¹⁶⁾

FTA は、構造物をシステムとしてとらえ、システムの停止や破壊などの望ましくない状態を命題として設

定し（トップ事象と呼ぶ）、その原因を樹枝状図を使って探っていく方法である。具体的には、構造物の破壊の原因として、一気にある構造要素の局所的な損傷を考えるのではなく、構造物（全体システム）→特定の機能をもつ複数の要素よりなる構造物の一部（サブシステム）→個々の構造要素（部材）→構造要素を構成する部品という方向で、論理的に枝分れ図をつくりながら、順次必要なレベルまで因果関係の図を作成する。最終的に末端の事象の被害確率が与えられれば、トップ事象の発生確率が自動的に求められる。FTA は比較的小規模のシステムで、各被害モードを厳密に定義でき、生起確率が自明の場合には有効であるが、大規模システムでかつ状態数が膨大になると、樹枝状図を書くための状態を定義することさえ困難となる。

4.2 大規模ネットワークシステムとしてのリスク評価（モンテカルロ法）

ライフラインシステムのように個々の設備が構成する大規模システムの場合、FTA を用い、管路など個々の要素の状態をすべて定義して、システム全体にどう影響するかを解析することは一般に難しい。特に、地震時など同時多発的に事故が発生する場合、その状態をすべて列挙してシステム全体への影響を評価することはほぼ不可能である。このため、モンテカルロ法により近似的にシステム全体への影響（供給支障量の期待値）を評価することが大規模システムの場合には一般に行われる。システムの構成要素に被害確率を与え、その構成要素の被害確率をパラメータとして、システム全体の供給支障量の期待値を求める。試行ごとに要素群の破壊パターンを要素の被害確率と乱数を用いて仮定し、供給支障量を計算することを繰り返す。最終的に全試行回数にわたる供給支障の合計を全体の試行回数で割り、その平均値をシステム全体への影響として評価する。供給支障量の算定は、ライフラインの特性によって様々な手法¹⁶⁾が考えられているが、需給接点間の連結性を評価することが、もっとも基本的な評価法である。モンテカルロ法の欠点は、結果の精度が試行回数に依存することであり、状態を決定する要素の被害確率が小さい場合にはそれだけ試行回数を数多く必要とする。

5. 経済社会的影響に関するリスク評価

経済社会的な影響として考慮すべき要因は数多く存在するが、本章ではライフラインの地下構造物整備戦略の検討という観点から、電力ライフラインが供給支障を起こした場合の停電コストをリスク評価例として、以下にその概要を述べる。

停電コストとは、「バック・アップ電源など停電対策の水準が一定、また停電時に電力以外の生産要素および消費財への切り替えが出来ない状態で、需要家が被る経済損失」と定義される¹⁷⁾。停電コストの計測は、客観的な物理データを用いる方法として「代理変数法」、「実データ法」が、アンケートにより消費者の効用を評価する方法として「サーベイ法」がある。詳細は文献¹⁷⁾、¹⁸⁾などを参照してもらうとして、以下に各手法の概要について述べる。

5.1 入手可能な客観的なデータを用いる「代理変数法」、「実データ法」¹⁷⁾

代理変数法は、幾つかの指標を想定して、比較的簡単に入手可能なデータを停電コストの代理変数に用いる方法である。非常用電源設備の費用、各需要家の kWh あたりの生産額、電力関連の支出額、家庭の日常活動や余暇を貨幣換算した数値などが、代理変数指標として用いられる。代理変数法は、停電コストの算定が容易で部門ごとの停電コストのばらつきを評価することが可能である。ただし、指標の選定が恣意的になりがちなので、個々の指標が表している停電コストの内容を明確にし、各指標の妥当性を検討することが必要不可欠となる。

一方、「実データ法」は、負荷遮断契約などの供給信頼度の異なる電力契約に対して、需要家の実際の選択行動に関するデータから電力需要関数を推定し、これをもとに停電コストを推定する方法である。この方法

は、日本のように停電の回数が極端に少ない国では、停電コストを計測するためのデータサンプリングが困難である。

5.2 需要家の停電コストに対するリスク意識をモニタリングする「サーベイ法」¹⁷⁾

サーベイ法は、停電シナリオを想定し、需要家の意識調査を通じて、停電コストを推計する方法である。たとえば、需要家・用途・場所・費用項目ごとに、停電回数・時間・時期・事前通告の有無等の各種シナリオ別に、需要家にその損害額を回答してもらう。また、先に示した CVM を用い、信頼度向上に対しての支払う意思の最大額（支払い意志額）、および信頼度低下に対して必要な最低補償額（補償許容額）を停電シナリオごとに回答してもらう方法もある。これらのデータから期待効用関数を作成し、最終的なリスク評価を行う。表－1 に CVM の質問形式の事例を示す。

表－1 CVM の質問形式（文献 17）からの引用）

質問形式	方法	長所・短所
自由回答形式	自由に金額を記入してもらう方法。	通常、価格の存在しない物に対して価値をつけることに慣れていない場合、無回答が多くなる。また、評価額のばらつきが大きい。
付値ゲーム形式	市場のセリのようにある価格に対してそれ以上支払うかどうか尋ねて、金額を決定してもらう方法。	回答に時間を要する。最初の提示額の影響を受けやすい。
支払いカード形式	選択肢を提示して、その中から金額を選択してもらう方法。	無回答が少なくなるものの、提示した金額の幅が回答に影響する可能性がある。
2 肢選択形式	金額を回答者に 1 回提示し、支払うか支払わないか回答してもらう方法。回答者が支払うと答える確率と提示額の関係から統計的に支払意思額を推定する。	回答者が非常に答えやすく、信頼性の高い結果が得られるが、多数のサンプル数が必要とする。また、通常の購買行動などで回答者が行っていることから、バイアスが比較的小さい。

6. 既設の膨大な設備を対象としたマルチリスクアセスメントモデルの概要

筆者は、本論で検討したリスクアセスメント手法を要素技術として、膨大な既設の地下構造物を対象としたリスクアセスメントモデルを構築する検討を行っている。図－1 にマルチリスクアセスメントモデルの概念図を示す。

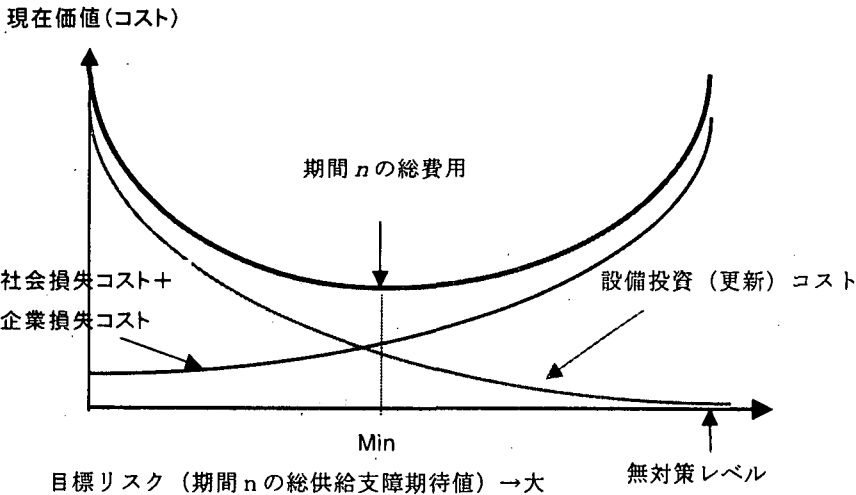


図-1 期間 n における設備投資（更新）コストと損失コストのトレードオフの関係

図-1は、マルチリスクアセスメントモデルのパラメーターとなる設備投資（更新）コストと社会損失コスト＋企業損失コストのトレードオフの関係を期間 n の総和で示している。ここでいう設備投資コストは、主に既存の設備を更新する際に必要となる費用を意味する。企業損失コストは、「事故の補修費用」や「収益減少額」を含む企業が被る損失コストを意味し、社会損失コストは、ライフラインの機能低下に伴う社会的な損失コストと定義する。図-1のうち、縦軸は現在価値を示す。横軸は、ある期間（ n 年間）内に発生する供給支障電力の期待値を示す。図中に示されている無対策レベルとは、 n 年間で何の対策（たとえば、耐震補強など）もしなかった場合のシステムの初期状態（ n 年間の総供給支障、設備投資コスト、社会＋企業損失コスト）を示す。設備投資コストの増加は、損失コストを低減させることにつながる。図-1の概念図で示したように、設備投資コストおよび損失コストを含む総費用を定量的に評価できれば、膨大な既設設備の更新優先順位を決定できるばかりでなく、総費用を最小化するシステムの状態を見つけることができる。

7. おわりに

本論では、膨大な数にのぼる既設の地下構造物を対象とした、更新優先順位の決定に不可欠なリスク評価手法の基礎的な考察を行った。リスクという概念を明確にし、客観的なデータを重視する自然科学と、主観的な人間の価値判断を重視する社会科学の両分野におけるリスク評価の考え方を示した。このリスク評価の適用例として、単体設備→単体設備からなるシステム→社会経済活動と、レベルの異なるリスク評価の事例を概観した。これらの要素技術を応用し、筆者が地下構造物の合理的な整備戦略策定支援のために現在取り組んでいる、リスクアセスメントモデルの概要を紹介した。

本研究は、電力中央研究所、NTTアクセス網研究所、東京ガスの3社をコアメンバーとする「地下構造物の整備戦略に関する私的研究会（仮名）」で進めようとしている内容を含んでいる。本プロジェクトは、主に埋設管路を対象としてライフライン業者間で共通に活用できる技術や問題点を整理し、主に埋設管路を対象とした整備戦略に関する提言をまとめることを目標としている。今後同研究会の研究成果も適宜発表していく予定である。

付録1 主観確率⁶⁾

主観確率は、不確かな世界についての観測者の認識作用にその基礎をおいている。すなわち、事象 E と事象 F について、どちらがより生じやすいか、あるいは命題 E と F について、どちらがより真である可能性が高いかという比較判断により主観確率は定義される。一般に事象 E が事象 F よりも確からしい（より確からしい）ということ、 $E > F$ と表し、その逆を $E < F$ と表す。さらに、 E と F の起こりやすさが同等であるとき、 $E \sim F$ と表す。また事象 E が F よりも起こりやすいか、あるいは少なくとも同等に起こりやすいとき $E \geq F$ と表す。

上記をもとに、主観確率を定義できる5つの前提を挙げる。

前提1 すべての事象の起こりやすさは相互に比較可能である。すなわち、任意の事象 E と F について、 $E > F$ 、 $E \sim F$ 、 $E < F$ のうちのどれか一つの関係が成立する。

前提2 E_1 と F_1 が排反事象、また、 E_2 と F_2 が排反事象であり（ $E_1 \cap F_1 = \phi$ 、 $E_2 \cap F_2 = \phi$ ）、かつ $E_1 \leq E_2$ 、 $F_1 \leq F_2$ とする。このとき、 $E_1 \cup F_1 \leq E_2 \cup F_2$ である。また、 $E_1 < E_2$ 、 $F_1 \leq F_2$ であれば、 $E_1 \cup F_1 < E_2 \cup F_2$ である。

前提3 任意の事象 E について $E \geq \phi$ が成立する。

前提4 閉区間 $[0,1]$ の内部のどの点においても同等に起こりうる可能性のある実験が存在する

前提5 ある事象の列が、 $E_1 \supset E_2 \supset \dots$ であるような単調減少列であり、かつ、すべての E_i について、 $E_i \geq F$ であれば、 $\bigcap_{i=0}^{\infty} E_i \geq F$ である。

付録2 期待効用関数⁷⁾

意思決定者が選択できる代替案の集合を $A = \{a, b, \dots\}$ とする。決定者が代替案 $a \in A$ を選択したときに、結果 x_i が得られる確率を p_i 、代替案 $b \in B$ を選択したときに結果 x_i が得られる確率を $q_i, \dots$ とし、起こりうるすべての結果の集合を $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ とする。このとき

$$E_a = \sum_i p_i u(x_i), \quad E_b = \sum_i q_i u(x_i), \dots \quad (i)$$

$$p_i \geq 0, q_i \geq 0, \dots \forall i \quad \sum_i p_i = \sum_i q_i = \dots = 1$$

ここで示した E_a, E_b を期待効用、 $u(x_i)$ を効用関数と呼ぶ。式(i)は、式(2)で定義した期待損失関数と類似しているが、 $u(x_i)$ は、客観的な物理データではなく、アンケートなどによりモニタリングした「人間が主観的に判断した望ましくない結果の大きさの程度」をもとに構築されるところが異なる。このうち、 p_i, q_i が主観確率の場合は、主観的期待効用モデル、 $\sum p_i = 1$ を満たさない場合には主観的重みつき効用モデルと呼ばれる。

参考文献

- 1) 東京/都内下水道更新工事 工事中も下水を流したまま既存の中に新たに管を築く、日経コンストラクション, pp.82-84, 1996.
- 2) 日野英則: 情報通信基盤設備のマネージメントと維持・更正技術, 第6回非開削技術講演会講演概要集, pp.25-31, 日本非開削技術協会, 1999.
- 3) 藤橋一彦, 山口祐三: 情報流通時代を支える新しい土木技術, 土木学会誌 Vol.84, pp.33-36, 1999.
- 4) 電気設備検討会: 地震に強い電気設備のために, 資源エネルギー庁編, 電力新報社, 1996.
- 5) 池田三郎, 盛岡通: リスクの学際的定義(高度技術社会のリスク), 日本リスク研究学会誌, Vol.5, No.1, pp.14-17, 日本リスク研究学会, 1993.
- 6) 繁樹算男: ベイズ統計入門, 東京大学出版会, 1985.
- 7) 田村担之, 中村豊, 藤田眞一, 効用分析の数理と応用, コロナ社, 1997.
- 8) 鴛田勇他: 環境評価ワークショップ評価手法の現状, 築地書館, 1999.
- 9) 三根久, 河合一: 信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, 1982.
- 10) 清水良一: 中心極限定理, 教育出版, 1992.
- 11) ライフサイクル保全研究会: ライフサイクル保全に関する研究, 社団法人 日本プラントメンテナンス協会, 1995.
- 12) P.トフークリステンセン・M.J.ペイカー: 構造信頼性 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1986.
- 13) 東京都: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 1997.
- 14) 神奈川県地震被害想定調査委員会: 神奈川県地震被害想定調査報告書, 1999.
- 15) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1993.
- 16) 朱牟田善治: 電力系統の地震リスク評価に基づく変電設備の耐震補強計画法に関する研究, 電力中央研究所報告, 総合報告 U33, 1998.
- 17) 栗原郁夫他: 停電コスト・供給コストを考慮した供給信頼度評価, 電力中央研究所報告, T98505, 1999.
- 18) 松川勇: 電気料金の経済分析, 日本評論社, 1995.