

2.1 ダム地質におけるリスクマネジメント

研究年度：令和元年度

研究分野：地質・基礎に関する調査研究

調査研究名：ダム地質におけるリスク

研究者：脇坂安彦

【要約】

規格、書籍および論文等に記述されている一般的なリスクおよび地質・岩盤に関するリスクには様々な定義がある。双方の定義とも確率の概念を含むもの、確率の概念が曖昧なものおよび確率の概念がないものに区分される。Knight^①の枠組みによると起こる現象が確定的か、確率分布が既知か否かによって、確実性、リスク、不確実性および無知に区分されるが、応用地質学の分野では不確実性を確率で表現することが行われている。本稿では地質リスクを望ましくない地質事象の影響の大きさと望ましくない地質事象の生起確率の組み合わせと定義し、具体的な望ましくない地質事象、望ましくない地質事象の生起確率について論じた。ダム地質におけるリスクマネジメントの流れを示し、具体的なリスクマネジメントの内容について記述した。

【キーワード】

リスク、地質リスク、確率、不確実性、望ましくない地質事象、リスクマネジメント、ダム地質

【背景・目的】

最近の社会は金融リスクをはじめ自然環境に関するリスクとして環境汚染リスク、災害リスクなど様々なリスクが存在しており、リスク社会と呼ばれている。ごく最近では新型コロナウイルスの感染リスクが世界的にとても大きな社会問題となった。今田^②は、「リスク社会とはたんにリスクが増大しているだけでなく、それ以上に、リスクに対して敏感になった社会を表す」としている。

様々なリスクに的確に対応するためには、対象とするリスクの評価（リスクアセスメント）を行い、管理（リスクマネジメント）を着実に実施する必要がある。吉川^③は科学的なリスク査定（リスク評価）を行う必要性を、化学のリスク、災害のリスク、食品のリスクをすべて同一の指標で表現することができれば、その指標の高いリスクについて重点的に費用を投じてリスク削減を行うことが、政策的に合理的であるからとしている。

ダム建設事業においても地質事象に由来する様々なリスクが存在する。安全・安心なダム建設を経済的に行うにはこれらの地質事象に由来するリスクの評価、管理を的確に行うことが求められている。

本稿の目的は、ダム地質におけるリスクを定義し、リスクの評価、管理の考え方を示すことである。

【令和元年度の研究内容】

（１）一般的なリスクの定義

リスクには様々な定義がなされている。文献等に記述されている主なものをあげると次の通りである。

①規格における定義

i JIS Q 2001^③

「事態の確からしさとその結果の組み合わせ、又

は事態の発生確率とその結果の組み合わせ。ある状況では、リスクとは予想との乖離のことである。」

ii ISO/Guide 73^④

“Effect of uncertainty on objectives”

iii ISO/IEC Guide 51^⑤

“Combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm.

Note 1 to entry: The probability of occurrence includes the exposure to a hazardous situation (3.4), the occurrence of a hazardous event (3.3) and the possibility to avoid or limit the harm.”

iv JIS Z 8051^⑥

「危害の発生確率及びその危害の度合いの組合せ。発生確率には、ハザードへの暴露、危険事象の発生、及び危害の回避又は制限の可能性を含む。」この規格はISO/IEC Guide 51 (2014)を基にしている。

v ISO 31000^⑦

“Effect of uncertainty on objectives.

Note 1 to entry: An effect is a deviation from the expected. It can be positive, negative or both, and can address, create or result in opportunities and threats.

Note 2 to entry: Objectives can have different aspects and categories, and can be applied at different levels.

Note 3 to entry: Risk is usually expressed in terms of risk sources, potential events, their consequences and their likelihood .
likelihood

chance of something happening

Note 1 to entry: In risk management (3.2) terminology, the word “likelihood” is used to refer

to the chance of something happening, whether defined, measured or determined objectively or subjectively, qualitatively or quantitatively, and described using general terms or mathematically (such as a probability or a frequency over a given time period).”

vi JIS Q 31000⁽⁶⁾

「目的に対する不確かさの影響。

注記 1 影響とは、期待されていることからかい(乖)離することをいう。影響には、好ましいもの、好ましくないもの、又はその両方の場合があり得る。影響は、機会又は脅威を示したり、創り出したり、もたらしたりすることがあり得る。

注記 2 目的は、様々な側面及び分野をもつことがある。また、様々なレベルで適用されることがある。

注記 3 一般に、リスクは、リスク源、起こり得る事象及びそれらの結果並びに起こりやすさとして表される。」

ここでの起こりやすさとは、何かが起こる可能性のことであって「リスクマネジメント (3.2) では、“起こりやすさ”という用語は、何かが起こるといふ可能性を表すために使われる。“起こりやすさ”の定義、測定又は判断は、主観的か若しくは客観的か、又は定性的か若しくは定量的かを問わない。また、“起こりやすさ”は、一般的な用語を用いて表現するか、又は数学的(例えば、発生確率、所定期間内の頻度など)に表現するかは問わない。」とされている。

②単行本・報告書における定義

i Knight⁽⁹⁾

“Risk in the sense of a measurable probability and an uncertainty which cannot be measured.”

ii Harremoës et al. eds.⁽¹⁰⁾

Risk: known impacts; known probabilities.

Uncertainty: known impacts; unknown probabilities.

Ignorance: unknown impacts and therefore unknown probabilities.

iii 全国地質調査業協会連合会・技術委員会 地質リスク WG⁽¹¹⁾

事業コスト損失とその不確か性の2つの概念を含むものと定義する

iv 酒井⁽¹²⁾

「リスクに関する通常の『古い定義』を与えておくと、次のようである。

『リスクとは、人間の生活維持や社会活動にとって、《望ましくない事象》の発生する不確か性の程度、ならびに結果の大きさの程度を表わす。リスクが大きいとは、望ましくないものの蓋然性や生起確率が

大きいことや、物質的、精神的な被害が大きいことを意味する』

リスクに関する第二の『新しい定義』は、次のようになる。

『リスクとは、状態の如何によって、一つの行為から複数個の結果が生まれることを指す。それは人間の生活維持や社会経済に対して、マイナスとプラスの両面を持つ。リスクが大きいとは、複数の結果の間で変動の幅が大きく、また結果の程度が大きいことを意味する』

v 中山⁽¹³⁾

「リスクを『不確か性』や『非知』とほぼ同じ意味に用いるような、意思決定理論や組織理論に見られる用法(いわゆる広義のリスク)であり、もう一つが、統計データや確率と結びつけて理解する、工学・生物学・医学等の自然科学における用法(いわゆる狭義のリスク)である。」

vi 今田⁽¹⁴⁾

「リスク(risk)とは、一般的に、人が何かをおこなった場合、その行為にともなって(あるいは行為しないことによって)将来こうむる損害(damage)の可能性を意味する。地震・風水害・暴風などの自然現象によって起こる天災(natural disaster)や思わぬ事故など、自分自身のコントロールがおよばない損害は危険(danger)と呼ばれるのに対し、リスクは何らかの意思決定(人為的な企て)から帰結する損害を意味する。」

vii 三宅淳巳⁽¹⁴⁾

「産業災害のリスク(R)は、特定の条件下(すなわち特定のシナリオ)において発生しうる有害な事象の予測される発生確率(または頻度)と、その影響の大きさとして定義され、一般に下記のように表現される。

$$R_i = P_i \times C_i$$

ここで、 P (probability)はトラブルや故障、事故の発生確率または頻度であり、 C (consequence)はそれによる影響度、添え字の i は i 番目のシナリオを表わす。」

viii 蒲生⁽¹⁵⁾

「リスク評価にもとづく管理」は、式(1)のように、物質の有害性だけではなく物質を使用した場合に生じる暴露量(=摂取する量)も考慮してリスクの大きさを評価し、それにもとづいて化学物質の管理をおこなう考え方である。

リスク=(物質への暴露)×(物質の有害性)
(1)

「式(1)の「×(積)」の記号は、必ずしも文字通りの算術計算での積ではなく、化学物質のリスクが、暴露と有害性の2つの要素を組み合わせた概念であることを表している。」

「ちなみに、リスクという言葉はさまざまな分野でそれぞれ若干違ったニュアンスで用いられているが、次のようなものが一般的にとらえ方であろう。

リスク=(好ましくない事象の起きる確率)×(好ましくない度合い) (2)

この式の中にある確率の部分が、本来『リスク』の考え方にとって重要である。確率という考え方によって、たんに好ましくない事象が起きるか否かではなく、その確からしさを予測的に評価して対処することが可能になる。化学物質分野のリスクの概念も、化学物質を有害か否かと決めつけるのではなく、有害影響の発現する程度を予測的に評価するという点では、これに似ている。ただし、確率にかんする部分があまり明示的ではなく、リスクと呼ぶにはいささか特殊な定義であるといえる。」

③一般的なリスクの定義のまとめ

一般的なリスクの定義は、確率に着目すると表-1のように a)確率の概念が含まれている定義、b)確率の概念が曖昧な定義（含まれている場合もあるものおよび含まれていない場合もあるもの）および c)確率の概念が含まれていない定義に大別される。

(2) 地質・岩盤に関するリスクの定義

①単行本における定義

i 全国地質調査業協会連合会⁽¹⁶⁾

「標準レベル以上の地質調査が十分な技術・経験を持った技術者によって実施されたとしても、その結果には予見できない地質条件のズレやブレが含まれている。特に「わが国の自然条件は特殊である(大石・川島 1998)」という視点に立ったとき、どんなに詳細な地質調査であっても完全ということはないであろう。標準的な所定の調査数量をこなすだけでなく、与えられた課題を良く認識し、日に見える現象のみならず目に見えない現象に潜む課題を的確に見つけ出して問題点の指摘不足がないようにすることが地質技術者には求められている(『事例に学ぶ地質調査』)。そのような努力を怠らなかつたとしても、調査の結果には予見できない不確かな部分が残される。そのような地質調査結果の不確実性を地質リスク(あるいは、不確実性によって生じるコスト)と呼ぶことができる。」

ii Brown and Booth⁽¹⁷⁾

“The chance of something happening that will have an impact on objectives”

iii 地質リスク学会／全国地質調査業協会連合会⁽¹⁸⁾

「本書では、地質に係わる事業リスクを地質リスクと定義し、事業コスト損失そのものと、その要因

表-1 一般的なリスクの定義

a) 確率の概念が含まれている定義	
文献	リスクの定義
Knight ⁽⁹⁾	Risk in the sense of a measurable probability and an uncertainty which cannot be measured
JIS Q 2001 ⁽³⁾	事態の確からしさとその結果の組み合わせ、又は事態の発生確率とその結果の組み合わせ。
Harremoës, P. et al. eds. ⁽¹⁰⁾	Risk: known impacts; known probabilities.
ISO/IEC Guide 51 ⁽⁵⁾	Combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm.
JIS Z 8051 ⁽⁶⁾	危害の発生確率及びその危害の度合いの組合せ。
中山(2007) ⁽¹³⁾	狭義のリスク:統計データや確率と結びつけて理解する、工学・生物学・医学等の自然科学における用法
三宅淳巳 ⁽¹⁴⁾	産業災害のリスク(R)は、特定の条件下(すなわち特定のシナリオ)において発生しうる有害な事象の予測される発生確率(または頻度)と、その影響の大きさとして定義
b) 確率の概念が曖昧な定義	
文献	リスクの定義
ISO/Guide 73 ⁽⁴⁾	Effect of uncertainty on objectives
ISO 31000 ⁽⁷⁾	目的に対する不確かさの影響
JIS Q 31000 ⁽⁸⁾	
酒井 ⁽¹²⁾	古い定義:リスクとは、人間の生活維持や社会活動にとって、《望ましくない事象》の発生する不確実性の程度、ならびに結果の大きさの程度を表わす。
c) 確率の概念が含まれていない定義	
文献	リスクの定義
JIS Q 2001 ⁽³⁾	ある状況では、リスクとは予想との乖離のことである。
全国地質調査業協会連合会・技術委員会地質リスクWG ⁽¹¹⁾	事業コスト損失とその不確実性の2つの概念を含むもの。
今田 ⁽¹⁾	人が何かをおこなった場合、その行為にともなって(あるいは行為しないことによって)将来こうむる損害(damage)の可能性
中山 ⁽¹³⁾	広義のリスク:『不確実性』や『非知』とほぼ同じ意味に用いる。
酒井 ⁽¹²⁾	新しい定義:リスクとは、状態の如何によって、一つの行為から複数個の結果が生まれることを指す。
蒲生 ⁽¹⁵⁾	リスク=(物質への暴露)×(物質の有害性)

の不確実性を指すこととする。」

iv Van Staveren⁽¹⁹⁾

“The term risk, and the associated term hazard, have a lot of definitions, proposed by numerous experts and institutions. Hazard can be defined as threats to people and the things that they value. In the view of Carlsson et al. (2005) an uncertainty becomes a risk if a probability is assigned to it. Risk can be defined as the product of the probability and the eventual impact of a hazard (Smallman, 2000). In Other words, risk is the product of the probability or likelihood of an undesired event and the consequences of that event.”

v 地盤工学会⁽²⁰⁾

「ここでは、3.1.2 で述べた新たなリスクの定義を踏まえて、地盤リスクを次のように定義することとします。

地盤リスク：目的に対する“地盤に関連する”不確かさの影響」

vi Hudson and Feng ⁽²¹⁾

“The following definitions were included (from the Australian source AS/NZS ISO 31000: 2009):

Risk: the effect of uncertainty on objectives”

vii Ranke ⁽²²⁾

“Risk is more than just multiplying the losses with the probability of occurrence, it rather deals with uncertainty about the occurrence and the consequences.”

“The broad discussion on risk can be summarized as following the general definition as given by the United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR 2004): “Risk is the product of the exposure of a society to a hazardous natural or mankind generated hazard situation, that may result in (physical, psychological, social, financial, etc.) threats to the individual or the society and its/their living environment, juxtaposed to the capacity of the society or the individual to cope with the impact.” The general relationship of hazard and risk is given in the mathematical equation:

Risk = hazard × vulnerability: coping capacity.

There is a variety of applications on the risk formula in use, a simplified equation of risk:

risk = hazard × population × vulnerability

When the population is replaced by physical exposure:

risk = physical exposure × vulnerability

The following formula used by insurance companies generally constitutes the two components:

risk = frequency × potential maximum economic loss”

viii 全国地質調査業協会連合会⁽²³⁾

「ジオリスクとは、現場の地盤状況によって引き起こされる土木・建築工事に対するリスクである。地盤に関連したこの問題は、コスト、工期、利潤、安全衛生、品質ならびに適合性に対し不利益な方向に影響し、また環境破壊にもつながる。リスクは、一般的な用語としては以下のような意味に取られる。
●チャンスや危険、損失、傷害または他の悪影響の可能性
あるいは、

●リスクを引き起こしている人や物

施エリスクには多くの定義がある。最も簡単なものは次のようである。『リスクは、発生確率とプロジェクトの目的達成にインパクトを与える有害事象である』。

②論文等における定義

i 嘉門ほか⁽²⁴⁾

「処分場の管理において、リスクを発生／波及確率と、その結果生じる影響とで表される関数であると考え、以下の二つの戦略が有効となる。」

ii 物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ⁽²⁵⁾

「地山リスクの定義としては $R = \langle C, P \rangle$: 地山問題の大きさ、 P : 地山問題が発生する確率、とした。地山問題が発生する確率 P_i は、調査予測確信度 (1/地山予測が当たらない確率) P_i ①と工学的評価(危険度評価) P_i ②の2段階の予測が必要となる。」

iii 国吉ほか ⁽²⁶⁾

「地震などの自然災害に対して安全な居住空間を選択するには、まず不動産取得者が、不動産が潜在的に有する危険性（本研究では、地震災害に対して有する潜在的な危険性を地震リスクと定義する）を把握する必要がある。」

iv 地震リスク・マネジメント研究会⁽²⁷⁾

「地震リスク・マネジメントを、図 2-1 のように幾つかの設計案の中から意思決定者にとって最適な案を選ぶ、いわゆる意思決定問題と定義する。各設計案の将来の損失は確定的には予測できず、図 2-1 右のような確率密度関数（リスク：損失とその発生確率の組み合わせ）で表わされ、これに基づいて意思決定が行われる。」

v 陳ほか⁽²⁸⁾

「リスクは、経済・医療・環境・防災等あらゆる分野に存在し、その定義は分野によって異なるが、暴風、豪雨、豪雪、洪水、高潮、地震、津波、噴火等々を誘因とする自然災害を対象とした場合、「リスク＝発生確率×損失額」で表されることが多い。」

vi 大久保⁽²⁹⁾

生産ピークは当分来ないとする楽観論の立場か、生産ピークはすぐにやって来るとする悲観論の立場かの選択ではなく、石油が不足するというリスクに対してどのように対処するかといったリスクマネジメントに基づく行動が必要になる。

vii 平田・中島⁽³⁰⁾

「リスクは損傷の程度とその発生確率から評価されるものであり、特に、地震リスク評価においては地震の発生確率、応答、強度等の不確かさの考慮が必要となる。」

viii 野村・藤澤⁽³¹⁾

「ここで示した「リスク管理」実施フローはある広域の対象地域において土砂災害の発生確率(頻度)とその被害想定からリスクに対する適切な対応を検討するものである。」

ix 大津ほか⁽³²⁾

「このため、欧米の建設プロジェクトマネジメント分野の研究においては、この地質条件の不確実性については、建設プロジェクトに支障をきたす主要なリスク要因の一つとして位置づけられている。なお、この地質条件の不確実性に起因するリスク要因(以下地質リスクと称す)は、建設プロジェクトマネジメント分野では、予見できない地盤条件(Unforeseen ground condition あるいは、Unforeseeable geological condition)と呼ばれることが多い。」

x フィールドの達人編集委員会⁽³³⁾

「土质地質に限って言えば、リスクとは『プロジェクトにおける期待値からのはずれ量』であり、『想定地質からのはずれの程度と内容』と言い換えることができる。」

xi 脇坂⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾

「土质地質におけるリスクの定義は、土木構造物の設計・施工に反映することを考慮すれば、できるだけ定量的であることが望ましい。したがって、ここでは理想的に土质地質におけるリスクを望ましくない地質事象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせと定義する。」

xii Mousavi et al.⁽³⁶⁾

“Risk (R) is a function of the probability of a hazardous event (H) and its consequences for all the exposed elements (C):

Risk = Natural hazard × Vulnerability × Elements at Risk”

xiii Lee and Chi⁽³⁷⁾

“The landslide risk at locality is defined by Smith (1998) as the sum of the products of the probability of occurrence of landslide (P) and the loss as a result the landslide (L).

$$R = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot L_i)$$

Where R is the landslide risk, and n is the number of mutually exclusive and collectively exhausted events or scenarios that can cause a landslide; and under a given scenario, P_i is the probability of occurrence of landslide (or “occurrence probability” for short) and L_i is the estimated loss caused by the landslide.

xiv Meng et al.⁽³⁸⁾

“The final risk distribution is obtained by

overlying the impermeability distribution with the distribution of the resistance to water pressure of the coal floor, using the classification defined in Table 7.”

xv Galve et al.⁽³⁹⁾

The following expression was used to estimate risk:

$$Risk = H \times Potential\ loss$$

Where R (risk) is the expected annual economic or personal loss for each pixel (Euro/yr/pixel, fatalities/yr/pixel); H (hazard) is the annual probability of occurrence of sinkholes with different diameters in each pixel; and potential loss is the expected economic or personal losses if a sinkhole event takes place.

xvi Van Thienen-Visser et al.⁽⁴⁰⁾

“In risk assessment, risk is defined as Risk = Probability of failure * Impact.

In this study, the probability of failure was defined as the probability of gas oil leakage (the incident) and the impact was defined as the harmful effects on health, safety and environment resulting from the contamination of groundwater.”

xvii Li et al.⁽⁴¹⁾

An index of exceptional risk, demoted herein as R_e, is defined as:

$$R_e = P_R \times P_{T|R} \times P_{S|T} \times V_{P|S} \times E$$

Where P_R is the occurrence probability of an exceptional risk; P_{T|R} is the temporal probability; P_{S|T} is the spatial probability of elements at risk when a risk event occurs; V_{P|S} is the average vulnerability of elements at risk located at each spatial position; E represents the elements at risk (e.g. the number of persons or the present value of the property); and P_{T|R} × P_{S|T} × V_{P|S} × E represents the consequences of the exceptional risk.

xviii Ali et al.⁽⁴²⁾

“The risk R is defined as:

$$R = \sum_{i=1}^{nf} P_{fi} \times C_i$$

Where p_{fi} and C_i are the probability and consequence of failure mode I, and nf is the number of failures.”

xix Peng et al.⁽⁴³⁾

“The landslide dams caused by the Wenchuan earthquake were classified into four risk levels (i. e. extremely high, high, medium and low risk,

with symbols of I, II, III and IV, respectively) according to their hazard levels and consequences to the people downstream,”

xx Chen et al.⁽⁴⁴⁾

“Morgan et al. (1992) proposed a general equation to assess the individual risk, which is defined as the annual probability of loss of life of a specific individual as follows:

$$RLN = P(H) \times P(S|H) \times P(T|S) \times V(L|T) \quad (1)$$

where RLN is the annual risk to an individual; $P(H)$ is the annual probability of the landslide event; $P(S|H)$ is the probability of spatial impact given the landslide event (e.g., landslide impacting a specific location); $P(T|S)$ is the probability of temporal impact given in the spatial impact (e.g., presence of people at the specific location when the landslide reaches); $V(L|T)$ is the vulnerability of the individual given landslide intensity (e. g., fatality rate).

Morgan et al. (1992) also proposed a general equation to assess the societal risk of several hazard events:

$$RLOL = \sum_{i=1}^{m_e} [P(H)_i \times P(S|H)_i \times P(T|S)_i \times V(L|T)_i \times E_i]$$

where $RLOL$ is the societal risk, meaning the potential loss of life; n_e is the number of hazard events; L_i is event i ; E_i is the element at risk. “

xxi 太田・小島⁽⁴⁵⁾

「本稿では、トンネルの建設・維持管理における地質リスクとして、膨張性地山と高圧、多量の湧水がある地山を取り上げ、これらで発生した問題事象とそのメカニズムを概説する。なお、「地質リスク」という用語は、広義には地質予測の不正確性も含むが、ここでは地質体の諸特性に起因した工事に伴う状況変化による経済的損失を伴う危険性を意味する。」

③地質・岩盤に関するリスクの定義のまとめ

地質・岩盤に関するリスクの定義は、既述の一般的なリスクの定義と同じく表-2のように a)確率の概念が含まれている定義、b)確率の概念が曖昧な定義（含まれている場合もあれば含まれていない場合もあるものおよび含まれているか否かが曖昧なもの）および c)確率の概念が含まれていない定義に分けられる。

また、表-2のように b)確率の概念が曖昧な定義および c)確率の概念が含まれていない定義のなかには、不確実性、不確かさの用語を含むものが高頻度で認められる。不確実性そのものをリスクとしてい

表-2 地質・岩盤に関するリスクの定義

a) 確率の概念が含まれている定義	
文献	リスクの定義
Van Staveren ⁽¹⁹⁾	risk is the product of the probability or likelihood of an undesired event and the consequences of that event
嘉門ほか ⁽²⁴⁾	発生/波及確率と、その結果生じる影響とで表される関数である
物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ ⁽²⁵⁾	地山リスクの定義としては $R=<C_i \cdot P_i>C_i$ ：地山問題の大きさ、 P_i ：地山問題が発生する確率、とした。
地震リスク・マネジメント研究会 ⁽²⁷⁾	リスク：損失とその発生確率の組み合わせ
陳ほか ⁽²⁸⁾	リスク＝発生確率×損失額
平田・中島 ⁽³⁰⁾	損傷の程度とその発生確率から評価されるもの
野村・藤澤 ⁽³¹⁾	土砂災害の発生確率(頻度)とその被害想定
脇坂 ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾	望ましくない地質事象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせ
Lee and Chi ⁽³⁷⁾	$R = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot L_i)$
Van Thienen-Visser et al. ⁽⁴⁰⁾	Risk=Probability of failure *Impact
Li et al. ⁽⁴¹⁾	$R = P_R \times P_{(T R)} \times P_{(S T)} \times V_{(P S)} \times E$
Ali et al. ⁽⁴²⁾	$R = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i$
Chen et al. ⁽⁴²⁾	$RLN = P(H) \times P(S H) \times P(T S) \times V(L T)$
b) 確率の概念が曖昧な定義	
文献	リスクの定義
Brown and Booth ⁽¹⁷⁾	The chance of something happening that will have an impact on objectives
地盤工学会 ⁽²⁰⁾	地盤リスク：目的に対する“地盤に関連する”不確かさの影響 the effect of uncertainty on objectives (AS/NZS ISO 31000: 2009)
Hudson and Feng ⁽²¹⁾	Risk = hazard × vulnerability risk = hazard × population × vulnerability risk = frequency × potential maximum economic loss
全国地質調査業協会連合会 ⁽²³⁾	チャンスや危険、損失、傷害または他の悪影響の可能性
c) 確率の概念が含まれていない定義	
文献	リスクの定義
全国地質調査業協会連合会 ⁽¹⁶⁾	地質調査結果の不確実性を地質リスク(あるいは、不確実性によって生じるコスト)と呼ぶことができる。
フィールドの達人編集委員会 ⁽³³⁾	土木地質に限って言えば、リスクとは「プロジェクトにおける期待値からのはずれ量」であり、『想定地質からのはずれの程度と内容』
地質リスク学会/全国地質調査業協会連合会 ⁽¹⁸⁾	地質に係わる事業リスクを地質リスクと定義し、事業コスト損失そのものと、その要因の不確実性を指すこととする。
全国地質調査業協会連合会 ⁽²³⁾	リスクを引き起こしている人や物
大久保 ⁽²⁹⁾	石油が不足するというリスク
大津ほか ⁽³²⁾	地質条件の不確実性に起因するリスク要因
Mousavi et al. ⁽³⁶⁾	Risk=Natural hazard×Vulnerability×Elemnts at Risk The risk distribution is obtained by overlying the impermeability distribution with the distribution of the resistance to water pressure
Meng et al. ⁽³⁸⁾	
Galve et al. ⁽³⁹⁾	$Risk = H \times Potential loss$
Peng et al. ⁽⁴¹⁾	Hazard levels and consequences to the people downstream
太田・小島 ⁽⁴⁵⁾	地質体の諸特性に起因した工事に伴う状況変化による経済的損失を伴う危険性

表-3 “Engineering Geology”誌におけるリスク関連用語の関係

論文題名	論文題名および要旨												
	Ri	P	U	Re	Ri+P	Ri+U	P+U	P+Re	U+Re	Ri+P +U	Ri+P+ Re	P+U+ Re	計
risk	6				9					1	1		17
probability		7			6		21	4		1		3	42
uncertainty			3			2	5			1		1	12
reliability				6				7	2			8	23
計	6	7	3	6	15	2	26	11	2	3	1	12	94

Ri: risk, P: probability, U: uncertainty, Re: reliability

るもの（全国地質調査業協会連合会⁽¹⁶⁾、地質リスク学会／全国地質調査業協会連合会⁽¹⁸⁾）、目的（地盤）に対する不確かさの影響としているもの（地盤工学会⁽²⁰⁾、Hudson and Feng⁽²¹⁾）および不確実性をリスクの要因としているもの（大津ほか⁽³²⁾）がある。これらのうち、目的（地盤）に対する不確かさの影響としているものは、ISO 31000⁽⁷⁾に基づいている、または JIS Q 31000⁽⁸⁾に基づいているものと考えられる。

地質および岩盤に関するリスクは、「地質リスク」⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁽³²⁾、「地盤リスク」⁽²⁰⁾および「ジオリスク」⁽²³⁾と呼ばれている。

④応用地質学におけるリスクと不確実性との関係

吉川⁽⁴⁶⁾はリスクと不確実性などに関して次のように述べている。「①確実性は、何が起こるか確定的にわかっている場合をいう。②リスクは、何が起こるか確定的にはわからないが、起こりうる状態はわかっており、かつその確率分布がわかっている場合をいい、これに対して、③不確実性は、起こりうる状態はわかっているが、その確率分布がわかっている場合をいう。④無知とは、何が起こるか、どのような状態が起こりうるか、まったく予見できない場合をいう。なお、広義の不確実性とは、②リスクと③不確実性の両者をさす。」また、吉川⁽⁴⁶⁾はこのような概念的な枠組みは、1920年代に経済学者 F・H・ナイトが初めて発表したものとしている。このナイトの概念は、既述の“Risk in the sense of a measurable probability and an uncertainty which cannot be measured⁽⁹⁾”であると考えられる。Harremoës et al.⁽¹⁰⁾も吉川⁽⁴⁶⁾と同一のことを述べている。以上のような Knight⁽⁹⁾の枠組みに従うと、不確実性とリスクは同列の概念であることとなる。したがって、地質調査結果の不確実性はリスク⁽¹⁶⁾とはならず、地質の不確実性によってリスクが生じる⁽¹⁸⁾、⁽³²⁾ことにもならない。

Knight の枠組みに従うと、地質事象は確定的で

はないということは、地質事象には不確実性があるということと等価ではない。地質事象は確定的ではないということは、地質事象にはリスクがある（地質リスク）、地質事象には不確実性がある（地質不確実性）、地質事象には無知がある（地質無知）ことの総和と等価となる。

このようにリスクと不確実性との関係は、Knight⁽⁹⁾の枠組みに遵うか否かによって大きく異なっている。

そこで実際の応用地質学の分野では、リスクと確率、不確実性などとの関係は、どのようになっているかを確認することとした。応用地質学における国際的な学術誌である“Engineering Geology”の2010年～2018年に掲載された論文についてリスク（risk）、確率（probability）、不確実性（uncertainty）および確率と関連の深い信頼性（reliability）のリスク関連用語を題名に使用している論文を調査した⁽⁴⁷⁾。

表-3 は調査の結果を示したものである。表は論文の題名に使用されているリスク関連用語毎に論文題名および要旨に使用されているリスク関連用語との関係を示したものである。表のように論文題名の用語と最も関連の深い用語は、リスク：確率、確率：不確実性、不確実性：確率、信頼性：確率と不確実性の組み合わせおよび確率であった。このようにすべてのリスク関連用語が確率と最も関連が深い、なかでも確率と不確実性との関連が最も強い（表-3の計の欄を参照）。確率と不確実性との関連が強いのは、たとえば、Alvarad-Franco et al.⁽⁴⁷⁾や Ching and Wu⁽⁴⁸⁾のように不確実性を確率で表現しているためであると考えられる。

既述のように吉川⁽⁴⁶⁾によると、不確実性は起こりうる状態はわかっているが、その確率分布は不明なものであるが、調査対象範囲の“Engineering Geology”誌掲載論文では不確実性を確率で表現されていることが多く、リスク、不確実性および確率を Knight⁽⁹⁾の枠組みで扱っているものはない。した

がって、リスクと不確実性の用語を用いる場合には、Knight^⑨の枠組みに従っているのか否かを明確にしておく必要がある。

(3) 本稿における地質に関するリスクの定義

①地質リスクの定義

これまでにみてきたように一般的なリスクおよび地質・岩盤に関するリスクには様々な定義が存在する。ダム建設に関わる地質の場合、リスクはある程度、定量的に扱う必要がある。たとえば、複数の地質調査の優先順位を決定するためには、調査対象の地質に関するリスク（以降、全国地質調査業協会連合会^⑩にならって地質リスクと呼ぶ）の高いものから順に優先順位をつける必要があり、地質リスクの高低を判断するためには、定量的でなければならない。また、工事に関連する岩盤の掘削線をどの程度の調査数量で確定させるかの意思決定をするためには、任意の調査数量で掘削線を確定させた場合の地質リスクに起因する追加工事費とさらに地質調査を行った場合の調査費を比較する必要があるが、このような比較をするには、地質リスクは定量的である必要がある。

よって、本稿では地質リスクを脇坂⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾にしたがって次のように定義する。

地質リスク = 望ましくない地質事象の大きさ × 望ましくない地質事象の生起確率

この地質リスクの定義は Knight^⑨の枠組みのリスクとなる。既述のように“Engineering Geology”誌掲載論文では、不確実性を確率で表現することが行われている。そこで、本稿では Knight^⑨の枠組みによる不確実性（地質不確実性）もリスクに含めるとともに、さらに無知（地質無知）もリスクに含めるとともに、さらなる無知（地質無知）もリスクに含めるとともに、このようにこととするため、今後は必要に応じて確率で表現する地質リスクを狭義の地質リスク、地質不確実性および地質無知も含めた地質リスクを広義の地質リスクと呼ぶこととする。

②望ましくない地質事象

地質のなかでもダム地質における望ましくない地質事象とは、ダムの立地場所の変更、設計変更、施工時の施工範囲や施工方法の変更や施工後の対策などを要する事象である。このように望ましくない地質事象は、事業費の増大を伴う事象である。このことから地質リスク学会／全国地質調査業協会連合会⁽¹⁸⁾は地質に係わる事業リスクを地質リスクと呼んでいる。

望ましくない地質事象には、活断層、地すべりなどのように自然状態で望ましくない事象（自然現象）が発生するものと、ダムの存在や施工過程が望ましくない事象（人為的事象）を生起させるもの（たと

表-4 重力式コンクリートダムにおける望ましくない地質事象

対 象	望ましくない地質事象の例
立地上	大規模地すべり、活断層、やせ尾根
設計上（堤体の安定性）	大規模断層破砕帯、低角度不連続面、深層風化、熱水変質、流れ盤、未固結地盤、岩盤の緩み
設計上（止水処理）	開口割れ目、大規模断層破砕帯、深層風化、石灰岩の溶食洞、岩盤の緩み、未固結地盤
地質図作成上	メランジ、熱水変質、火山岩

えば、低角度弱層や切り土によって発生するのり面崩壊など）とがある。表-4 は重力式コンクリートダムにとっての望ましくない地質事象の例を示したものである。

③望ましくない地質事象の大きさ

望ましくない地質事象の大きさは、直接的にはその地質事象の面積、物性値などによって表される。間接的にはその地質事象が存在することによる施工に要する費用で表される。

④望ましくない地質事象の生起確率

望ましくない地質事象の生起確率（この場合の生起確率は広義の生起確率）は、存在確率と生起確率（この場合の生起確率は狭義の生起確率）に区別されると考えられる⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾。存在確率は対象地域に望ましくない地質事象が存在する確率、生起確率は存在する望ましくない地質事象が真に望ましくない地質事象となる確率である。すなわち、広義の生起確率は存在確率と狭義の生起確率の組み合わせとなる。

具体的な存在確率および（狭義の）生起確率は、次のように考えられる。

存在確率 = 任意の地層・岩体で望ましくない可能性がある地質事象が有する面積／任意の地層・岩体の総面積

生起確率 = 確実に望ましくない地質事象の個数／望ましくない可能性がある地質事象の個数

たとえば、四万十帯を対象にそのなかに分布する地すべりの広義の生起確率を求めるための存在確率および狭義の生起確率は、次のように求められる。

存在確率 = 対象地域の四万十帯に分布する地すべりの面積／対象地域の四万十帯の面積

生起確率 = 対象地域の四万十帯中の滑動中の地すべり移動体の個所数／対象地域の四万十帯中の地すべり移動体の個所数

秩父帯を対象にその中に分布する断層の広義の生起確率を求めるための存在確率および狭義の生起確率は、次のように求められる。

存在確率 = 対象地域の秩父帯中の断層の面積／

対象地域の秩父帯の面積

ここで、断層の面積は平面図上での面積（低角度断層の場合は、任意の深度以浅の断層の平面図に投影された面積）とする。

生起確率=対象地域の確実に問題となる断層の本数/対象地域の断層の本数

なお、個々の地すべりの生起確率、すなわち滑動性の確率などの外力と抵抗力の確率分布で表現される確率は、信頼性設計における破壊確率（たとえば松尾(49)）に他ならない。

既述のように不確実性も確率で表現されているが、最近ではこの確率は、ベイズ統計学(50)~(53)、モンテカルロ・シミュレーションを用いたベイズ統計学(54)(55)およびモンテカルロ・シミュレーション(56)~(67)で算出されている。

図-1はダムサイトにおける望ましくない地質事象の疑似存在確率を示したものである。疑似存在確率としたのは、上述の存在確率の式から求めたのではなく、対象としたダムサイトのうち各地質事象が存在したダムサイト数を対象とした全ダムサイト数で除した値であるからである。疑似存在確率ではあるが、ダムサイトにおける望ましくない地質事象の存在確率の傾向は示していると考えられる。

⑤なぜ広義の地質リスクは発生するのか？

Knight(9)の枠組みに従った場合、実際のダムサイトでは、望ましくない地質事象が確定的に認識されることや地質リスクとして認識されることはあまりなく、地質不確実性および地質無知であることがほとんどである。このようになる要因は、地層・岩体の分布形態にある。

地層・岩体の分布形態は均質と不均質とに大別され、不均質はさらに規則と不規則とに細分される(図-2)。多くの地層・岩体の分布形態は不均質で不規則である。このため、望ましくない地質事象の存在

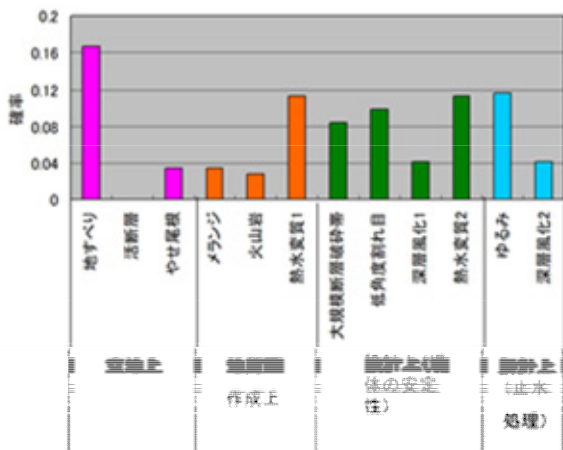
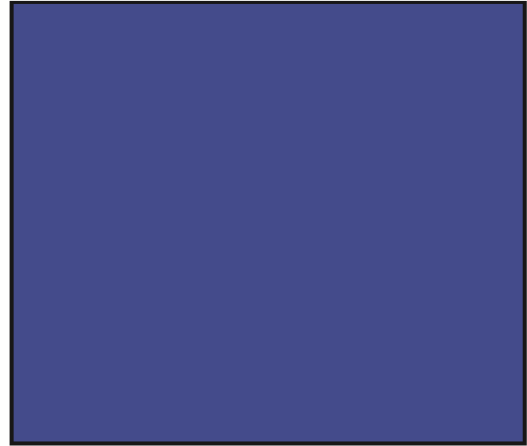


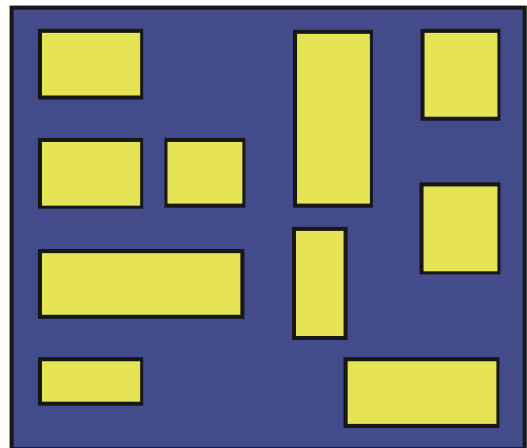
図-1 ダムサイトにおける望ましくない地質事象の疑似確率(35)

が不明または確率が想定できないのである。これが広義の地質リスクが生じる最大の要因である。

a) 均質



b) 不均質・不規則



c) 不均質・規則的



図-2 地層・岩体の均質、不均質、規則および不規則

(4) ダム地質におけるリスクマネジメント

① リスクマネジメントの流れ

ダム地質におけるリスクマネジメント（リスク管理）は一般的なリスクマネジメントにならって、図-3の流れに従って行うべきである。図の流れのうち、「リスクの算定」までがリスク分析、「リスクの評価」までがリスクアセスメント、全体がリスクマネジメントに該当する。リスクマネジメントの最終段階である「リスク対策の実施」までのリスクマネジメントをダム事業のどの段階で行うかは、リスクの高低による。すなわち、活断層や大規模地すべりなどの高リスクに対しては「回避」の対策を行う必要があるため、予備調査段階、ダムサイト選定段階の事業の初期の段階にリスクマネジメントを行う必要がある。他方、小規模高角度断層などの低リスクに対しては、「保有」、「低減」の対策が行われるため、実施設計段階から施工段階でリスクマネジメントが行われればよい（リスク対策については後述する）。

② 地質事象の洗い出しおよび望ましくない地質事象の特定

ダムサイトなどの対象地域において地質事象を洗い出し、それらの中からダムにとって望ましくない地質事象を特定する。これらのことは通常的地質調査によって行われる。地質調査を行うに当たって留意すべきは、系統的な調査を的確に実施することである。系統的な調査とは、ダムサイトなどよりも広い範囲からダムサイトの狭い範囲の調査、地表地質踏査などの概略の調査からボーリング調査、横坑調査などの詳細な調査を行うことである。系統的な調査を行うにあたっては、調査範囲、調査手法および調査数量が適切であるか否かを確認する必要がある。また、系統的な調査は望ましくない地質事象がもれなく特定できる精度となるまで、すなわち少なくとも地質無知から地質不確実性になるまで事業段階毎に複数回行う。

③ 特定された望ましくない地質事象の確率・影響の大きさの調査

特定された望ましくない地質事象の（広義の）生起確率および影響の大きさの調査も地質調査によって行う。既述のように実際のダムサイトでは、望ましくない地質事象が確定的あるいは確率的に認識できることは少なく、ほとんどの場合は確率も不明である。したがって、この段階では地質不確実性から狭義の地質リスク以上になる精度まで、すなわち望ましくない地質事象の確率が半定量的にでも求められる以上までの地質調査を行う必要がある。

望ましくない地質事象の影響の大きさを把握するには、その事象の範囲（面積）および必要に応じて

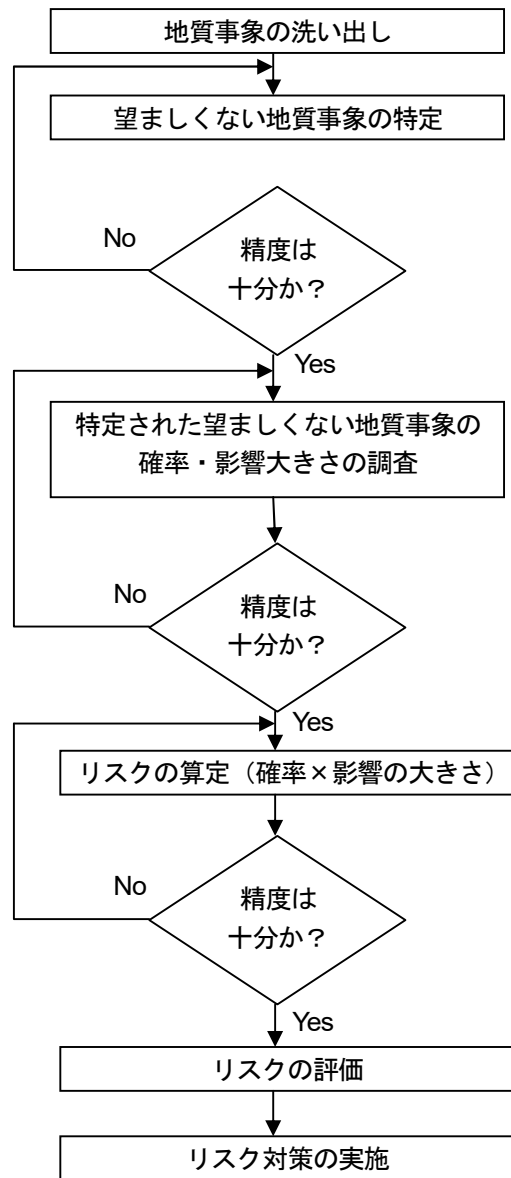


図-3 ダム地質におけるリスクマネジメントの流れ

物性値を確定するための地質調査を行う。

特定された望ましくない地質事象の（広義の）生起確率および影響の大きさを把握するための地質調査および解析では、より正確な地質図（岩級区分図、岩盤透水性区分図、ルジオンマップなども含めて）を作成することが求められる。そのためには適切な手法と数量による地質調査を実施するとともに、適切な地質解釈を行う必要がある。

地質解釈には二つの段階がある。地表地質踏査やボーリング調査によって岩石名や地質構造を特定する際には第1段階の地質解釈が行われている。この第1段階の地質解釈では、観察の理論負荷性⁽⁶⁹⁾に留意する必要がある。Chalmers⁽⁷⁰⁾によると、観察者の見るものおよび主観的経験は、網膜上の像によって決まるのではなく、観察者の経験、知識、期待にも依存し、すなわち、観察には理論負荷性、先入観

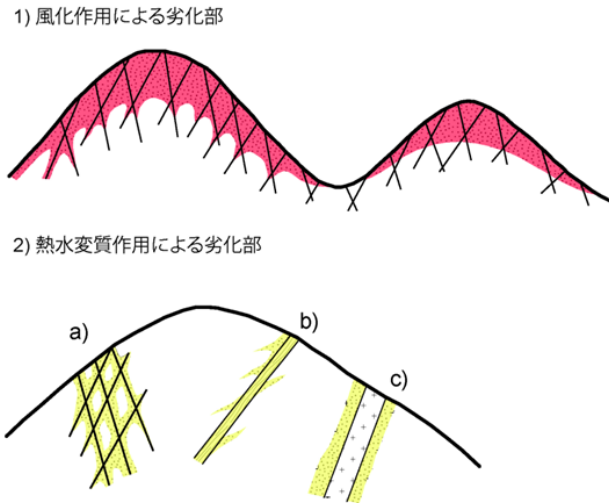


図-4 風化作用および熱水変質作用による岩盤劣化部の分布形態⁽⁴⁷⁾

を伴うとされている。観察の理論負荷性は、たとえば同じボーリングコアを観察しても、観察者の経験、知識などによって、岩石名が異なることを意味しており、一次情報であるボーリング柱状図の岩石名にも留意する必要があることを示している。

地表地質踏査やボーリング調査で得られた地質情報は点または線の情報、すなわち0次元または1次元の情報でしかない。これらの情報から2次元、疑似3次元の地質図を作成する際に地質解釈が行われている。たとえばある間隔で存在するボーリング孔間の地質境界線をどのように表示するかは、地質解釈によって行われているのである。地質境界線を引くにあたっては、地層・岩体や風化作用、熱水変質作用などに特有の産状（分布形態）が基にされ、ここに地質解釈が入る。図-4は風化作用と熱水変質作用による影響範囲、すなわち岩盤の劣化範囲を示したものである。図のように風化作用と熱水変質作用による岩盤の劣化範囲は全く異なっており、岩盤の劣化要因が風化作用であるのか、熱水変質作用であるのかの地質解釈を誤らないように留意しなければならない。

広義の生起確率のうち、望ましくない地質事象の存在確率の調査方法の一つとして、図-5のようにコンソリデーショングラウチングの中央内挿法に準じたボーリングを行うことが考えられる。図-5は低角度断層の場合を例としたものである。1次孔のうち1-1孔のみで低角度断層が確認された場合、周囲に2次孔を施工する。すべての2次孔で低角度断層が確認されなかった場合、低角度断層の最大の分布範囲は黄色着色部となる。すなわち、この着色部をとりあえず低角度断層の存在確率が100%の範囲と考えるのである。さらに存在確率の精度を上げる

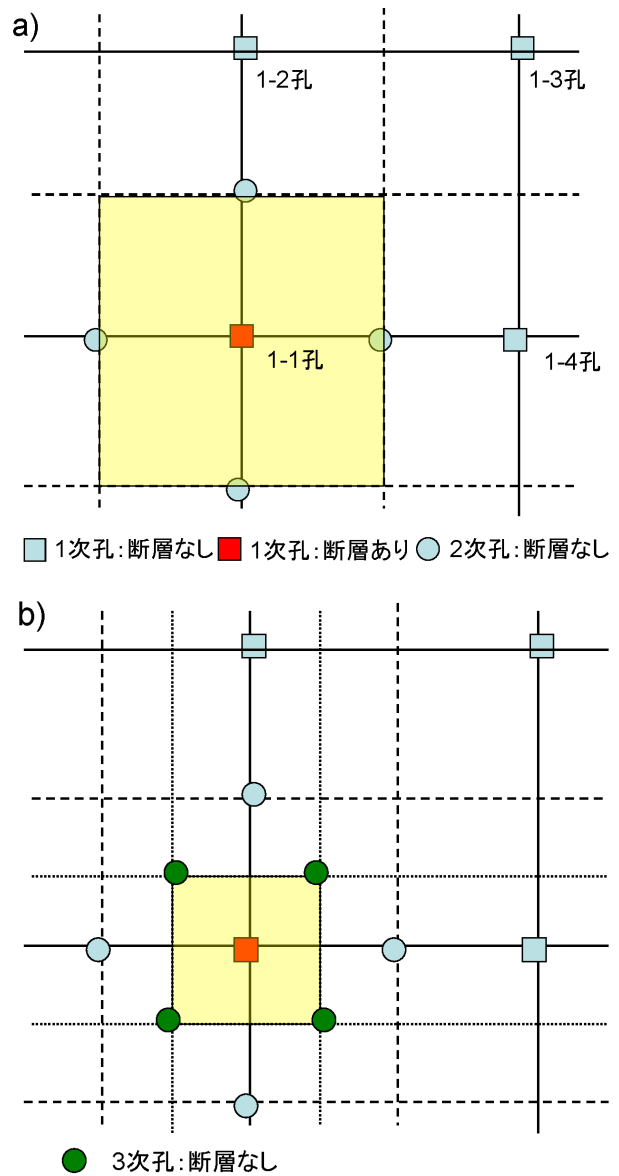


図-5 低角度断層の存在確率の調査方法

ためには、図-5b)のように3次孔を施工する。グリッドボーリングを行って、なお、この方法は望ましくない地質事象の面積の調査方法としても適用できる。

望ましくない地質事象の存在確率の調査によって、その望ましくない地質事象が存在することが明らかとなった場合（存在確率100%）、次に生起確率を調査する。生起確率は活断層のように過去の事例に基づく帰納的な推定、信頼性設計による破壊確率のように演繹的な推定によって求める。

④リスクの算定

これまでの地質調査・解析によって求めた望ましくない地質事象の広義の生起確率および影響の大きさからリスクの算定を行う。地質事象の広義の生起確率および影響の大きさを定量的、具体的な数値で表すことは困難である。そこで、生起確率および影

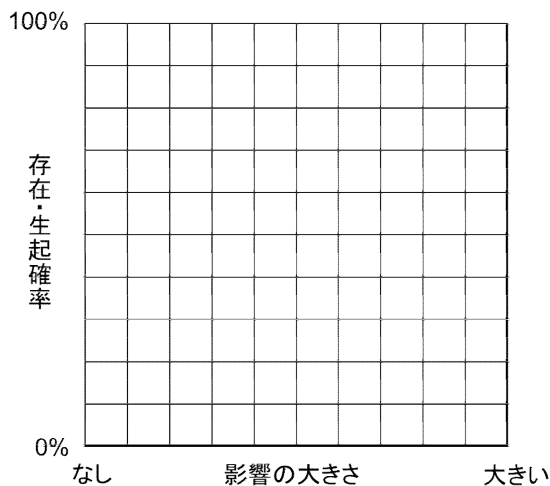


図-6 望ましくない地質事象の影響の大きさおよび存在確率・生起確率のランク区分

響の大きさを図-6 に示すようにランク分けして、リスクの算定を行う。

生起確率と影響の大きさをランク分けすることも困難な場合には、次のようにすることが考えられる。

- ・最大限のリスク（全国地質調査業協会連合会⁽¹⁶⁾の悲観的リスク）を想定する。すなわち、生起確率を 100%とし、影響の大きさを最大とする。このようにすると、ダム設計・施工に失敗はないが、不経済になることがある。たとえば、影響の大きさを最大とするため、図-7a)のような実際の岩級分布がある場合、b)のように低位岩級の CL 級の分布範囲を広く予測し、高位岩級の CH 級の分布範囲を狭く予測する。

- ・最小限のリスク（全国地質調査業協会連合会⁽¹⁶⁾の楽観的リスク）を想定する。すなわち、生起確率 100%とし、影響の大きさを最小とする、または生起確率 0%とする。このようにすると、経済的ではあるが、ダム設計・施工に問題が生じ、かえって

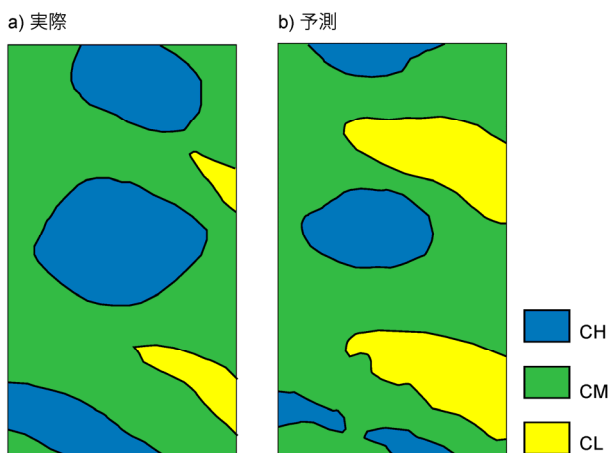


図-7 影響の大きさを最大に予測した岩級分布 b) と実際の岩級分布 a)

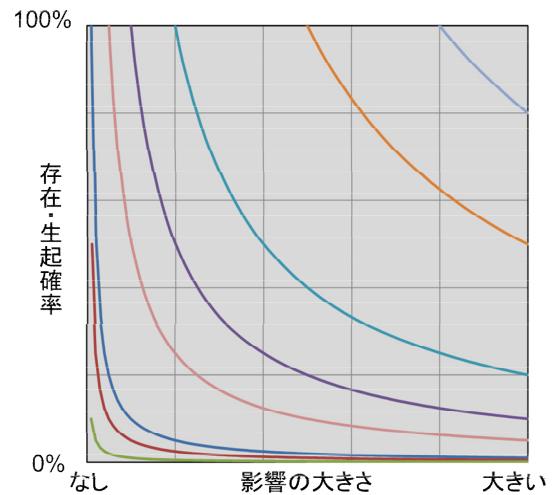


図-8 等リスク曲線

不経済になることがある。

最大限のリスクとするか、最小限のリスクとするかは工学的判断による。

⑤リスクの評価

リスクは望ましくない事象の広義の生起確率（存在確率・生起確率）と影響の大きさの組み合わせで表されるため、それらの組み合わせによる等価なリスクは図-8 の等リスク曲線で表すことができる。しかしながら、「④リスクの算定」でも述べたように、生起確率と影響の大きさを具体的な数値で求めることは困難であり、双方をランク分けしてリスクの算定が行われる。このため、リスクの評価は図-9 のような生起確率および影響の大きさのくみあわせによって、高リスク、中リスク、低リスクに区分することによって行う。図-10 は主な望ましくない地質事象の一般的なリスク評価を表したものである。

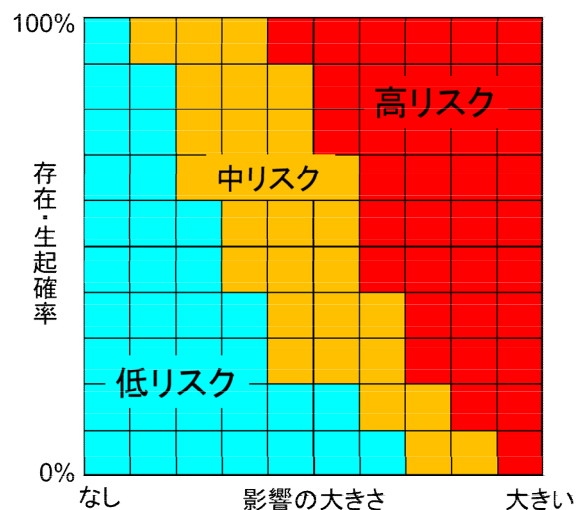


図-9 リスクの評価

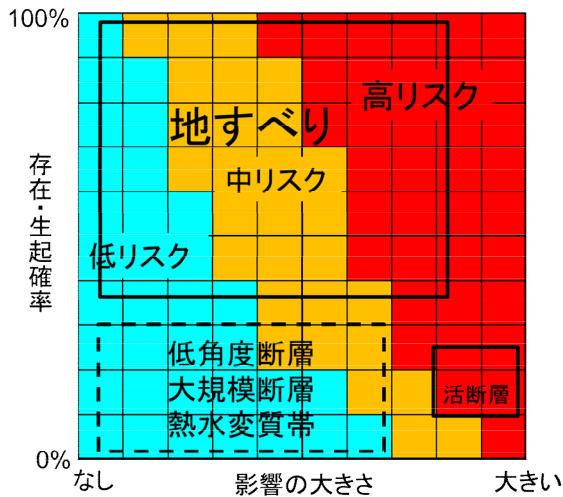


図-10 望ましくない地質事象の一般的なリスク評価

⑥リスク対策の実施

通常、リスク対策はリスクの高低によって異なる。基本的に高リスクは回避、中リスクは低減、低リスクは許容・保有の対策が取られる。「①リスクマネジメントの流れ」でものべたように、高リスクはダム事業の初期段階である予備調査・ダムサイト選定段階でリスクマネジメントを行い、回避する。中リスクはダムの設計段階および施工段階でリスクマネジメントを行い、低減させる。低リスクは対策不要で許容・保有する。

ダム事業における具体的な回避策としては、高リスクの活断層や大規模地すべりが存在する場合、ダムサイトを変更することを行う。低減策としては、生起確率および影響の大きさの双方の低減策として次のようなことが考えられる。堤敷内の低角度断層の掘削除去のような望ましくない地質事象の除去、地すべりの頭部排土のような望ましくない地質事象の一部の除去などである。影響の大きさのみの低減策として、低強度岩盤に対する重力式コンクリートダムのフィレット工法およびマット工法のような構造物による対策、ある程度の規模の断層のコンクリート置換による対策などがある。

【結果とりまとめ】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ①規格、書籍および論文等に記述されている一般的なリスクおよび地質・岩盤に関するリスクには様々な定義がある。
- ②双方の定義とも確率の概念を含むもの、確率の概念が曖昧なものおよび確率の概念がないものに区分される。
- ③Knight[®]の枠組みによると起こる現象が確定的か、確率分布が既知か否かによって、確実性、リス

ク、不確実性および無知に区分される。

④応用地質学の分野では不確実性を確率で表現することが行われており、Knight[®]の枠組みは用いられていない。

⑤本稿では地質に関するリスク、地質リスクを望ましくない地質事象の影響の大きさと望ましくない地質事象の生起確率の組み合わせと定義した。さらにKnight[®]の枠組みによる不確実性（地質不確実性）もリスクに含めるとともに、さらに無知（地質無知）もリスク（広義の地質リスク）に含めることとした。

⑥ダム地質におけるリスクマネジメントも一般的なリスクマネジメントと同じ流れで行うべきである。

⑦望ましくない地質事象の特定、影響の大きさおよび生起確率の調査は、系統的な地質調査などによって行う。

⑧望ましくない地質事象は確定的であること、その確率分布が認識できることはあまりないため、リスクマネジメントを行うには、地質調査によって地質無知から地質不確実性、地質リスク、さらに確実性にする必要がある。

⑨望ましくない地質事象の影響の大きさとその生起確率の組み合わせによって、地質リスクを高、中、低リスクに評価し、リスクの程度によって回避、低減、許容・保有のリスク対策を行う。

【今後の課題】

ダムの設計の多くは安全率設計法によって行われている。安全率の設定には破壊確率が考慮されている。他方、地質リスクにおいても望ましくない地質事象の生起確率を考慮している。したがって、今後、安全率設計法とリスクマネジメントとの関係について検討する必要がある。

【参考文献】

- (1) 今田高俊：序章 リスク社会への視点，今田高俊編，リスク学入門，4，社会生活からみたリスク，岩波書店，pp.1～11,(2007)
- (2) 吉川肇子：第6章 リスク・コミュニケーション，今田高俊編，リスク学入門，4，社会生活からみたリスク，岩波書店，pp.127～147,(2007).
- (3) JIS Q 2001：リスクマネジメントシステム構築のための指針，(2001)
- (4) ISO/Guide 73: Risk management- Vocabulary, (2009)
- (5) ISO/IEC Guide 51: Safety aspects- Guidelines for their inclusion in standards, (2014)
- (6) JIS Z 8051：安全側面—規格への導入指針，(2015)
- (7) ISO 31000: Risk management—Guidelines, (2018)
- (8) JIS Q 31000：リスクマネジメント—指針，(2019)

- (9) Knight, F. H.: Risk, Uncertainty and Profit, Houghton Mifflin Company, 381p. (1921)
- (10) Harremoës, P. et al. eds.: Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000, Environmental issue report, No. 22, European Environment Agency, 210p. (2001)
- (11) 全国地質調査業協会連合会・技術委員会 地質リスクWG: H17年度 地質に係わる事業リスク検討報告書, 全国地質調査業協会連合会, 64p. <https://www.zenchiren.or.jp/new/pdf/risk.pdf> (2006)
- (12) 酒井泰弘: 経済学におけるリスクとは, リスク学入門 1, 岩波書店, pp. 55-85. (2007)
- (13) 中山竜一: リスクと法, リスク学入門 1, 岩波書店, pp. 87-116. (2007)
- (14) 三宅淳巳: 産業災害とリスク, リスク学入門 5, 岩波書店, pp. 83-107. (2007)
- (15) 蒲生昌志: 化学物質の健康リスク評価, リスク学入門 5, 岩波書店, pp. 139-157. (2007)
- (16) 全国地質調査業協会連合会: 地質リスクに関する調査・研究, 「企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会」報告書, 61p. (2007)
- (17) Brown, T. and Booth, A.: Risk management, In Read, J. and Stacey, P. eds. Guidelines for Open Pit Slope Design, CRC Press, pp. 381-400. (2009)
- (18) 地質リスク学会/全国地質調査業協会連合会: 地質リスクマネジメント入門, オーム社, 204p. (2010)
- (19) Van Staveren, M.: Uncertainty and Ground Conditions, A Risk Management Approach, Spon Press, 321p. (2011)
- (20) 地盤工学会: 役立つ地盤リスクの知識, 地盤工学会, 192p. (2013)
- (21) Hudson, J. A. and Feng, X-T.: Rock Engineering Risk, CRC Press, 572p. (2015)
- (22) Ranke, U.: Natural Disaster Risk Management, Springer, 514p. (2016)
- (23) 全国地質調査業協会連合会: ジオリスクマネジメント—地質リスクマネジメントによる建設工事の生産性向上とコスト縮減—, 古今書院, 108p. (2016)
- (24) 嘉門雅史・玉野富雄・勝見武・小野諭: 廃棄物の埋立処分・処分場の跡地利用とリスク管理—山から海へ, そして地下へ—, 土と基礎, 47巻, 1号, pp. 19-22, (1999)
- (25) 物理探査評価研究小委員会基盤内弱層検討ワーキンググループ: トンネル地質調査におけるリスクマネジメントシステム導入の提唱, 応用地質, 44巻, pp. 36-47, (2003)
- (26) 国吉隆博・吉村美保・目黒公郎: 地震リスクを考慮した土地価格評価法に関する基礎的研究, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, 56巻, 3号, pp. 207-212, (2004)
- (27) 地震リスク・マネジメント研究会: 地震対策の普及を目的とした地震リスク・マネジメント手法の実用化, 建築研究資料, No. 103, p. (2005)
- (28) 陳光斉・善功企・諫山亜依・笠間清伸: モンテカルロ・シミュレーションによる液状化リスク分析手法, 土木学会論文集, No. 792/III-71, pp. 61-73, (2005)
- (29) 大久保泰邦: 石油減耗時代が到来?—石油枯渇に関する国際ワークショップの議論から—, 地質ニュース, 615号, pp. 14-23, (2005)
- (30) 平田和太・中島正人: 滑動変形量を考慮したフィラダムの地震リスク評価, 電力中央研究所報告, 研究報告: N05037, 21p. (2006)
- (31) 野村康裕・藤澤和範: 地すべりの運動特性を考慮したリスクマネジメントに関する考察—奈良県大塔村で発生した地すべり道路災害を例として—, 日本地すべり学会誌, 42巻, pp. 467-474, (2006)
- (32) 大津宏康・酒井悠・尾ノ井芳樹: 地質リスクがプロジェクトの事業性評価に与える影響に関する研究, 材料, 56巻, pp. 858-865, (2007)
- (33) フィールドの達人編集委員会: 土地質の達人になる, 第21回 予測できること, できないこと—地質現象とリスクの評価—, Civil Engineering Journal, 2007. 9, pp. 104-107, (2007)
- (34) 脇坂安彦: 土地質におけるリスクとその管理, 地質調査総合センター研究資料集, pp. 11-14, (2008)
- (35) 脇坂安彦: 地質のリスクマネジメント, 地盤工学会誌, 57-2, pp. 10-13, (2009)
- (36) Mousavi, S. M., Omidvar, B., Ghazban, F. and Feyzi, R.: Quantitative risk analysis for earthquake-induced landslides—Emamzadeh Ali, Iran, Engineering Geology, 123, pp. 191-203, (2011)
- (37) Lee, Y-F. and Chi, Y-Y.: Rainfall-induced landslide risk at Lushan, Taiwan, Engineering Geology, 123, pp. 113-121, (2011)
- (38) Meng, Z., Li, G. and Xie, X.: A geological assessment method of floor water inrush risk and its application, Engineering Geology, 143-144, pp. 51-60, (2012)
- (39) Galve, J. P., Gutiérrez, F., Guerrero, J., Alonso, J. and Diego, I.: Application of risk, cost-benefit and acceptability analyses to identify the most appropriate geosynthetic solution to mitigate sinkhole damage on roads, Engineering Geology, 145-146, pp. 65-77, (2012)
- (40) Van Thienen-Visser, K., Hendriks, D., Marsman, A., Nepveu, M., Groenenberg, R., Wildenborg, T., Van Duijne, H., den Hartogh, M. and Pinkse, T.: Bow-tie risk assessment combining causes and effects applied to gas oil storage in an abandoned salt cavern, Engineering Geology, 168, pp. 149-166, (2014)

- (2014)
- (41) Li, Z., Huang, H. and Xue, Y.: Cut-slope versus shallow tunnel: Risk-based decision making framework for alternative selection, *Engineering Geology*, 176, pp. 11-23, (2014)
- (42) Ali, A., Huang, J., Lyamin, A. V., Sloan, S. W., Griffiths, D. V., Cassidy, M. J. and Li, J. H.: Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes, *Engineering Geology*, 179, pp. 102-116, (2014)
- (43) Peng, M., Zhang, L. M., Chang, D. S. and Shi, Z. M.: Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake, *Engineering Geology*, 180, pp. 68-84, (2014)
- (44) Chen, H. X., Zhang, S., Peng, M. and Zhang, L. M.: A physically-based multi-hazard risk assessment platform for regional rainfall-induced slope failures and debris flows, *Engineering Geology*, 203, pp. 15-29, (2016)
- (45) 太田岳洋・小島芳之：トンネルの建設・維持管理に係わる地質リスク、*地盤工学会誌*、66巻、4号、pp. 32-33, (2018)
- (46) 吉川智教：不確実性、*日本大百科全書*、小学館、pp. 142-143, (1988)
- (47) 脇坂安彦：地質における不確実性とリスク、平成30年度研究発表会講演論文集、*日本応用地質学会*、pp. 107-108, (2018)
- (47) Alvarado-Franco, J. P., Castro, D., Etrada, N., Caicedo, B., Sánchez-Silva, M., Camacho, L. A. and Muñoz, F.: Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure due to landslides, *Engineering Geology*, 222, pp. 212-224, (2017)
- (48) Ching, J. and Wu, T-J.: Probabilistic transformation model for preconsolidation stress based on clay index properties, *Engineering Geology*, 226, pp. 33-43, (2017)
- (49) 松尾稔：地盤工学 信頼性設計の理念と実際、*技報堂出版*、407p. (1984)
- (50) Wang, Y., Au, S-K. and Cao, Z.: Bayesian approach for probabilistic characterization of sand friction angles, *Engineering Geology*, 114, pp. 354-363, (2010)
- (51) Li, S., Zhao, H., Ru, Z. and Sun, Q.: Probabilistic back analysis based on Bayesian and multi-output support vector machine for a high cut rock slope, *Engineering Geology*, 203, pp. 178-190, (2016)
- (52) Wang, C. H., Harken, B., Osorio-Murillo, C. A., H. Zhu, and Rubin, Y.: Bayesian approach for probabilistic site characterization assimilating borehole experiments and Cone Penetration Tests, *Engineering Geology*, 207, pp. 115-128, (2016)
- (53) Yazdani, A. and Kowsari, M.: A probabilistic procedure for scenario-based seismic hazard maps of Greater Tehran, *Engineering Geology*, 218, pp. 162-172, (2017)
- (54) Wang, Y. and Cao, Z.: Probabilistic characterization of Young's modulus of soil using equivalent samples, *Engineering Geology*, 159, pp. 106-118, (2013)
- (55) Ching, J. and Wang, J-S.: Application of the transitional Markov chain Monte Carlo algorithm to probabilistic site characterization, *Engineering Geology*, 203, pp. 151-167, (2016)
- (56) Park, H. J., Um, J-G., Woo, I., Woo, J. and Kim, J. W.: Application of fuzzy set theory to evaluate the probability of failure in rock slopes, *Engineering Geology*, 125, pp. 92-101, (2012)
- (57) Wang, J-P., Lin, C-W., Taheri, H. and Chan, W-S.: Impact of fault parameter uncertainties on earthquake recurrence probability examined by Monte Carlo simulation — an example in Central Taiwan, *Engineering Geology*, 126, pp. 67-74, (2012)
- (58) Cho, S. E.: Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation, *Engineering Geology*, 133-134, pp. 30-39, (2012)
- (59) Park, H. J., Lee, J. H. and Woo, I.: Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach, *Engineering Geology*, 161, pp. 1-15, (2013)
- (60) Zhang, J., Huang, H. W., Zhang, L. M., Zhu, H. H. and B. Shi, B.: Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model, *Engineering Geology*, pp. 168, pp. 129-140, (2014)
- (61) Cho, S. E.: Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability, *Engineering Geology*, 171, pp. 11-20, (2014)
- (62) Li, L., Wang, Y. and Cao, Z.: Probabilistic slope stability analysis by risk aggregation, *Engineering Geology*, 176, pp. 57-65, (2014)
- (63) Dou, H-Q., Han, T-C, Gong, X-N. and Zhang, J.: Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions, *Engineering Geology*, 183, pp. 1-13, (2014)
- (64) Sundell, J., Rosén, L., Norberg, T. and Haaf, E.:

- A probabilistic approach to soil layer and bedrock-level modeling for risk assessment of groundwater drawdown induced land subsidence, *Engineering Geology*, 203, pp. 126-139, (2016)
- (65) Park, H-J., Lee, J-H., Kim, K-M. and Um, J-G.: Assessment of rock slope stability using GIS-based probabilistic kinematic analysis, *Engineering Geology*, 203, pp. 56-69, (2016)
- (66) Alvarado-Franco, J. P., Castro, D., Estrada, N., Caicedo, B., Sánchez-Silva, M., Camacho, L. A. and Muñoz, F.: Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides, *Engineering Geology*, 222, pp. 212-224, (2017)
- (67) Sharifi-Mood, M., T. Gillins, D. T., Franke, K. W., Harper, J. N., Bartlett, S. J. and Olsen, M. J.: Probabilistic liquefaction-induced lateral spread hazard mapping and its application to Utah County, Utah, *Engineering Geology*, 237, 76-91, (2018)
- (68) 脇坂安彦：リスクマネジメントにおける地質学的解釈の重要性, *地質ニュース*, 675, pp. 52-56, (2010)
- (69) Hanson, N. R.: *Patterns of discovery*, Cambridge at the University Press, 241p. (1958)
- (70) Chalmers, A. F.: *What is this thing called science*, 3rd ed., Hackett Publishing Company, 266p. (1999)