

災害リスクの考え方

小林 晃*

Method to evaluate the risk by disaster

Akira KOBAYASHI

1. はじめに

東日本大震災が3月11日に発生し、約2万人の方が犠牲になり、多くの資財が損失した。その復興はまだ始まっておらず、福島第一原子力発電所の災害はまだ継続している。われわれ人類はこのような災害に幾度と遭遇し、その度毎に文明が進化し、新たな文化が生まれた。謂わば、自然と共存することによって、人類の生き方が変化してきたのだ。その他には戦争という人類の間で生じた事件が大きな変化の契機になったことも多いが、第25代アメリカ大統領のウィリアム・マッキンリーは、「スペインの大軍を敵に回すよりも、西インド諸島からやってくるハリケーンの方が恐ろしい」¹⁾と言っている。遭遇を予想でき準備ができる、あるいは回避も可能な戦争と、備えることが難しく回避困難な自然の猛威では、後者の方がはるかに対処が難しいのだ。

今回の災害で「想定外」という言葉がよく使われた。これは「想定外」だから仕方がないという諦めのような意味にとらえている人もいるかもしれない。しかし、この「想定」は、構造物や施設の設計を行ったエンジニアが設定し、その「想定」以上のイベントが起きたということなのだ。実際にはその構造物に作用する最大加速度をエンジニアは想定し、それに耐えられる構造やシステムを設計・創作する。今回の震災では構造物の地震の揺れによる直接の損傷はあまり多くはなかったが、その後の津波による外力を考慮したシステムになっていなかったことが災害が大きくなった要因

である。つまり津波による外力を想定していなかったのだ。柳田邦夫²⁾は想定外を次の3つに分類している。

- 1) 本当に想定できなかったケース
- 2) 想定できたが、確率が低いとして除外したケース
- 3) 発生が予測されたが、それに取り組むと設計がだ

がかりになり、費用対効果で除外するケース
今回の震災は2)と3)が関係した「想定外」のような気もするが、筆者はもう一つ、構造物ごとの設計者が自分達の間で「常識」を作ってしまった、ということもあるように思う。つまり、建物の設計者は普通最大加速度と周波数特性だけを問題にする。津波という現象がどのような外力を構造物に与えるかの知識はあまりない。一方、沿岸部分の防波堤の設計者は津波高さばかりを問題にし、それが越流した場合の防波堤の挙動や平地に存在する構造物の耐波力を知らない。

土木建築分野の学問は行政の縦割りと平行した分野分けが多く、現状では地域全体の耐災害力を学問的に評価することが難しいように思う。それぞれの行政組織はその分野での学識経験者の助言を得て検討している。使用目的が異なるので機能が異なることは理解できるが、偶然、耐災害力の大きな施設いた人が助かり、そうでない方にいた人が被災するというのは、その地域の住民でもある被災者にとっては理解不能であろう。

「想定外」とはこのような縦割り社会の内向き志向が想像力を削減させたために起こったということもあるように思う。

100%安全というシステムは存在しないのだから、被災した後の地域の活動継続計画を最も重要な設計目的に据えた防災システムの検討が必要となろう。その場合にも、地域の産業毎に優先度をつける必要が生じ

るであろう。実はこれが非常に困難なのだ。当該地域の経済活動ばかりでなく関連した経済活動、文化活動、環境問題への影響も考慮した、地域にとって最も有益となりえるリスクマネジメントを行う必要がある。また、それに対する地域住民の同意を得る手法の開発が重要であろうと思う。

減災という概念は、資本財は損失しても人命は損失しないというものである。これは自然現象予測の不確実性のみならず災害対策の経済的制約も背景にある。したがって減災を形にするためには、上述のようなリスク勘定が必要となる。減災システムの構築も実際には解決すべき問題は多い。

まえがきが長くなったが、災害に対する準備に関する研究は、今回の震災を機に縦割り社会を横断する情報の交換、個別の構造物ではなく地域全体の災害軽減システムの構築、そして地域のリスク算定といったことが多く議論されると思う。これらには課題も多く、筆者も微力ながら貢献できるように努力する所存ではあるが、本稿で述べるべき何の成果も持ち合わせていない。本稿は学生や他学科の方に理解できる話題の提供が趣旨であるので、上記の基本となるリスクの考え方を紹介したいと思う。

2. 破壊の予測

地震やその後の津波あるいは豪雨が起きたときに、人間のコミュニティに被害が起こった場合に災害となる。被害は構造物や自然物が破壊することにより起こる。したがって、この破壊という現象をどのように予測するかということが被害の予測では重要となる。

図1は力学系の学生ならば学部で習う応力とひずみの関係である。同図の最も高い応力が材料の強度となる。これよりも大きな応力が作用すると破壊する。破壊の予測は、外力が作用したときに、構造物の内部にこの破壊応力を超えるような応力が発生することを予測することになる。

また、この応力よりも小さな応力で降伏応力という値が書かれているが、これよりも大きな応力になると応力の増加に対するひずみの増加量が大きくなっている。すなわち材料がこの応力を超えると劣化の進行が速くなる。この降伏応力よりも小さな応力の範囲では弾性的な挙動を示すと仮定されることが多い。

力学を専攻している研究者はシミュレーションにより、各構造物の挙動を予測し、この応力-ひずみ曲線を追うような解析を行い、構造物がどれだけ破壊応力より小さな応力に留まるかを解析する。しかし、自然物のように内部の状況に不確実性が高いものもあれ

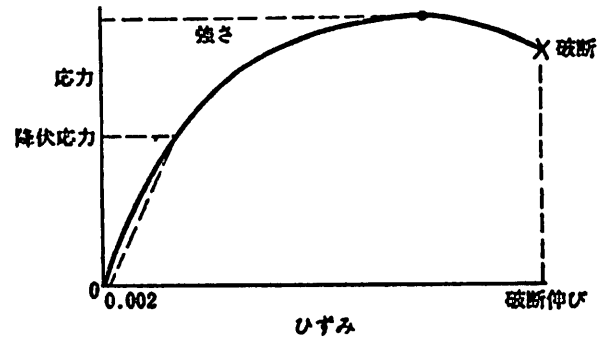


図1 一般的な応力とひずみの関係

ば、地震などの自然現象から作用する外力の方向と大きさにも不確実性が大きい。したがって、この予測の精度は実際はあまり高いとは言い難い。特にこの9月に起こった紀伊半島での土砂災害のように自然斜面の崩壊などは、どこでいつ起こるかを予測することはかなり難しい。

そこで、よく行われるのが、過去の被害結果を分析して、破壊に関する現象を組み合わせることで予測する判別分析である。表1は筆者が行った、平成16年に起こった台風23号による淡路島でのため池災害の分析に用いたデータである³⁾。データベースとあるのはため池の

表1 平成16年台風23号による淡路島のため池災害の分析に用いたデータ

説明変数	決壊予測の変数	損失予測の変数	変数の出典
天端幅 (m)	x_1	y_1	
堤高 (m)	x_2	y_2	
堤頂長 (m)			
(上) 法面勾配	x_3		
(下) 法面勾配			データ
総貯水量 (m ³)	x_4		ベース
流域面積 (km ²)		y_3	
滴水面積 (km ²)			
洪水吐能力 (m ³ /s)			
取水施設能力 (m ³ /s)	x_5		
傾斜角平均 (deg.)	x_6		2.5m
傾斜角標準偏差 (deg.)	x_7		メッシュ DEM
植生指数 NDVI	x_8		マルチ スペクトル 画像値
最大時間雨量 (mm/h)			
日雨量 (mm/day)			
72時間半減期 実効雨量 (mm)	x_9		レーダー アメダス
1.5時間半減期 実効雨量 (mm)			

機能に関するものであり、DEMは地形の情報である。マルチスペクトル画像は衛星画像からの山々の植生状況に関する情報、レーダーアメダスは降雨強度に関する情報である。各ため池で、これらのデータを用いて、そのため池の決壊・非決壊を目的変数として決壊要因を説明する変数を判別分析という手法で探すのである。これは、図1に示したような各ため池での応力の発生の経過を豪雨とともに予測するのではなく、決壊に寄与した要因を結果から逆推定することである。したがって構造物の破壊形態などは考慮していない。その結果、 $x_1 \sim x_9$ の9つの説明変数を用いたときに最も正解率が高くなった。その時の結果が表2である。この時の決壊の中率（予測決壊数/実測決壊数）は88%であった。

図2は筆者が行った中越地震におけるため池被害データを基に作成した実在ため池のfragility curveである⁴⁾。この作成に当たっては中越地震での最大地表面加速度データと各ため池の被害データ（軽微、重度、決壊に分類）を用いて統計的に求めた。fragility curveとは災害発生確率をイベント強度の関数として表したものである。

破壊予測手法が確定的であれば、あるイベント強度で損傷発生、重度の破損、決壊と明確に決めることは可能である。

表2 $x_1 \sim x_9$ のデータを用いた判別分析結果

		予測		
		決壊	非決壊	計
現実	決壊	7	1	8
	非決壊	16	38	54
	計	23	39	62

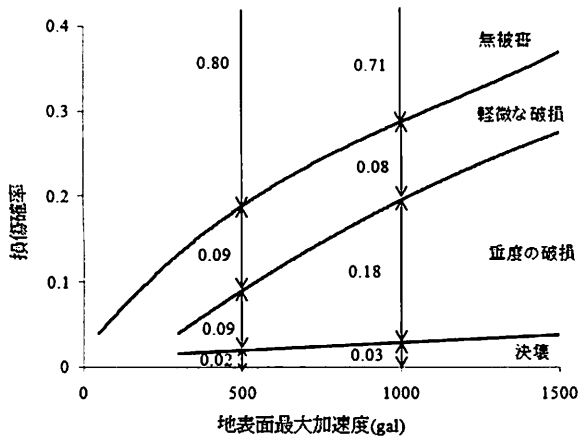


図2 中越地震データを用いたため池のfragility curveの例

3. 発生確率の予測

災害を引き起こす自然現象がどのような確率で生じるのかを知ることは、災害のリスク算定では重要な項目である。今回の震災でも1100年前に貞観地震があり、その時の津波は今回に匹敵する大きなものであったという報告もある。図3は過去二千年間の東日本太平洋側のM8以上の地震とそれに連動して起こった首都圏および西日本側での地震の記録である。これをもとにこの東日本大震災から10年以内に首都圏でも大地震が発生し、18年以内に東海・東南海・南海地震が発生する危険性があるとする研究者もいる。

東日本太平洋側と西日本太平洋側ではプレートが異なるので運動メカニズムも異なるが、現在の科学では説明できない関係があるようにも見受けられる。東南海地震でみると歴史的には100年から150年間隔で起こっており、直近の2回(安政東海・南海地震(1854)、東南海・南海地震(1944、1946))では東南海と南海は連動している。このように大地震の発生は過去の地震履歴から推定されており、これが東海・東南海・南海地震の次の発生時期が近いといわれてきた理由である。

東日本側	西日本側	首都圏
貞観地震 (M8.3-8.6) 869年	仁和地震 (M8.0-8.3) 東海・東南海 887年	相模・武蔵地震 (M7.4) 9年後 878年
慶長三陸地震 (M8.1) 1611年	慶長地震 (M7.9-8.0) 東海・南海・東南海 1605年	江戸地震 (M6.1) 4年後 1615年
明治三陸地震 (M8.2-8.5) 1896年	-	明治東京地震 (M7) 1894年
昭和三陸地震 (M8.2-8.5) 1933年	昭和南海・東南海地震 (M7.9-8.0) 1944-46年	関東大震災 (M7.9) 10年前 1923年

図3 巨大地震の過去の履歴⁴⁾

地震動の評価は、確定論的手法と確率論的手法に大別される。前者は、関東地震や東海地震など特定の地震を念頭に置き、過去の同じ地震域での記録や地震学的知見を用いた詳細な波動伝播解析や、特定の地震断層挙動をシミュレーションして波動伝播解析を行う手法である。したがって、得られる結果は、確定的な地震動の空間的な分布である。一方、後者は地震を確率的に評価するアプローチであり、プレート型あるいは直下型地震などを距離減衰式を用いることによって確率的に当該地点での地震動強さを評価する手法と、過去の歴史地震記録を用いて確率分布を統計的に推定する手法がある。

特定の地震モデルに対する確定論的地震危険度評価

解析は、地方自治体の地震被害想定および防災対策に利用されることが多い一方、確率論的地震危険度解析は建築物などの性能設計に用いられることが期待されている。

図4は筆者が新潟のある地域における1926年から2008年までの記録を用いて確率論的手法で推定した地震発生確率である。このように震央が概ね分かる地震記録は100年もないので、このようなデータを用いると大きな地震の発生確率は極めて小さい値となる。リスクの評価では図4のような事象の発生確率に関する情報が必要となるが、この情報を過去2000年のデータを用いて行うことが理想的であるが、現状では困難である。文献や地質調査をもとにした過去の地震の分析により、発生確率推定の精度を上げる研究が必要であろう。

一方、降雨に関する発生確率の評価は近年のゲリラ降雨化により、逆の意味での困難がある。最大時間雨量は局地的に増加する傾向にあり、発生確率推定に用いるデータの期間を最近のものにすることが必要である。また降雨強度は空間的ばらつきが大きくなる傾向があることより、評価地域も細分化することが必要である。これらのことから、確率的评价のための十分なデータを揃えるのが難しいのである。

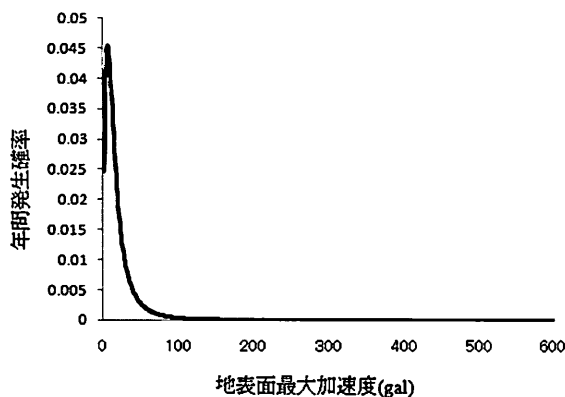


図4 地震の発生確率の例

4. リスク評価

被害が発生すると、それに伴い損失が発生する。この損失の計算も現状では定まった考えはない。ある構造物が損傷した場合、それに応じて機能の劣化が生じる。その復旧費用は損失に勘定するが、復旧までの期間に機能劣化がもたらす経済活動の低下も損失になる。さらにはその施設の被災による近隣の家屋や公共施設への2次災害損失や損傷・修復によって発生した

瓦礫や廃棄物の処理費用やCO₂発生、周辺環境に与える影響も損失に勘定するときもある。このような費用勘定の難しい項目をコストに入れることにより損失額はいくらかでも上昇する。

これは事業の費用対効果を考える場合にも言えることであり、効果はいくらでも大きく見積もることが可能である。見方を変えれば、今回の原子力発電所事故の賠償額の算出でも同様の議論がなされている。

そこには過去の事例や保険制度の事例のようなもので歯止めをかけることになる。また、現状で評価に対する同意が難しいコストは考慮しないことになる。コスト評価は世論の雰囲気とも関係があり、公正な評価法の模索が大きな課題であろう。

リスクマネジメントでは、この損失の評価が大きなウエイトを占める。それは事前にリスクを軽減させる補強工事などの選択では、損失コストの大きなものから優先順位が高くなるからだ。はじめに地域全体のリスクマネジメントが必要だと述べたが、縦割り行政がなくなると、このコスト評価が対策事業実施で決定的な要因となる。これが縦割り行政のなくなる一つの理由でもある。第1次産業や教育・文化に関連した資本財の対策はコスト面からの評価だけだと順位を下げる可能性があるのだ。

表3は中越地震のため池被害の復旧査定額から単位体積当たりの復旧費用を算出し、地表面加速度ごとに平均を出したものである。コストの考え方には議論が残るが、このようなイベント強度の関数としての損失コストの算出が必要である。

表3 単位体積当たりの復旧査定費(千円/m³)

地表面最大 加速度 (gal)	軽微な破損	重度の破損	決壊
0~300	8.0	発生しない	発生しない
300~500	8.0	8.5	39.0
500~900	9.4	17.3	39.0
900~1500	9.8	19.2	39.0

図2、表3のように、イベント強度の関数としてのコストと損傷発生確率の評価ができれば、図5のようなイベントツリーを作成することができ、あるイベント強度の場合における発生損失を見積もることが可能となる。あるイベント強度のリスクは図5の右端の各レベルのリスクを合計することで得られる。

これを整理したものが図6である。このようにリスクRはイベント強度Aの関数として表すことができるのでR(A)と書くことにする。

イベント強度の発生確率が図4で示したものであ

る。イベント発生確率 F もイベント強度 A の関数であるので $F(A)$ と書くことができる。

この $R(A)$ と $F(A)$ を用いて、年間リスクを次式で求めることが可能となる

$$R_y = \int_0^\infty R(A) \times F(A) dA \quad (1)$$

これがある構造物の年間リスクである。通常、施設の供用期間は長いので耐用年数の N 年間のリスクを次式で考える

$$R_N = \sum_{i=1}^N R_y (1 - P_y)^{i-1} \times \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^i \quad (2)$$

$$P_y = \int_0^\infty P_l(A) \times F(A) dA \quad (3)$$

ここで $P_l(A)$ は表 3 で求められるようなイベント強度 A の関数としての損失コスト P_l である。また、 ρ は割引率であり、将来の収入・支出を現在価値に割引戻す係数である。これは構造物の重要度とは関係なく、国の成長率あるいは公定歩合に連動して設定される。この割引率が大きいということは、その国の経済に不確実性が高いことを意味する。日本の場合、割引率は 4% という値を用いている。ちなみにドイツでは 3%、アメリカでは 7% という値を用いることが多く、開発途上国では 10% 以上の値が用いられる。この割引率を用いた式により、将来かかる費用を現在価値に計算していることになる。

この N 年間のリスクに、毎年の維持管理費、補強額（損失）と補強によるリスク低減（破壊確率の減少）を組み入れれば、リスクを考慮したライフサイクルコストとなる。このライフサイクルコストを小さくする

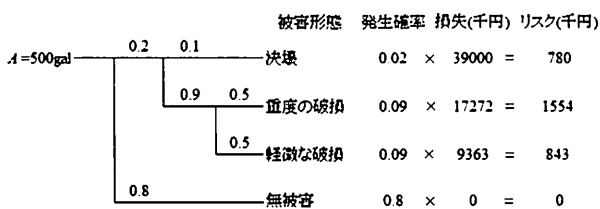


図 5 あるイベント強度におけるイベントツリー

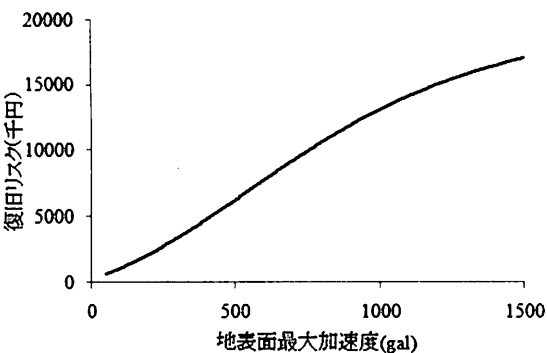


図 6 リスクのイベント強度の関数

ように維持管理計画、補強計画を立てることをアセットマネジメントと呼ぶ場合がある。

5. ま と め

災害リスクの考え方というタイトルで述べたが、リスクというのは、災害が起こる前に災害の大きさを評価する指標である。したがって、ここで述べたような過去の経験や論理的思考により推定するという作業となり、事前に時間をかけて科学的に行うことが必要である。本稿で述べた手法はその基本的な手順を実際のデータを用いて行ったものである。エンジニアは全ての施設に対して、このリスクを最小にするように努力すべきであるが、実際には本稿で述べたような基本的な検討が施設の企画・設計でなされている例は少ない。現状ではリスク（損失発生確率×損失）を計算することはしない。多くは想定される外荷重に対して構造物が安全であることを力学的に確認しているだけである。その想定荷重も根拠が明確でない場合が多く、公には内部資料という立場にしかない指針、マニュアルに則って設計されており、多分に政治的な要素がある。この辺りの議論は、今後非常に活発になることが予想される。それは各施設の設計およびアセットマネジメントに関する国際標準化が徐々に進んでいるからである。TPP は公共施設の設計施工の門戸も開くものでもあり、締結されれば、国内の縦割り行政の内的志向では通用しない国際標準が標準となる可能性がある。合理的な説明が見つからない企画・設計では国内でも通用しない時がくるかもしれない。

実際に災害が生じた場合はどのようにマネジメントするのか、それは危機管理（クライシスマネジメント）、復旧復興計画となる。危機管理とは災害が生じた状況に応じて適切な対応を取ることである。想定していない機器の故障や人員の負傷、天候状態などに応じて、被害が拡大せず事態が収束すると思われる行動を短時間で選択する。これも事前に、ある想定のもとでシミュレーションしておくことが必要であるが、どこまでどれぐらい対応を検討しておくのかということには正解はない。そして、危機管理で最も大事なことは、その時における人員の安全状況、機器などの機能状況を迅速に正確に把握することである。その状況によりその後の対応が異なってくる。この状況は戦時と似ており、日本人はこの危機管理があまりうまくないように思える。その改善は教育とも関連しており、議論が今後多いにされることが期待される。

はじめに述べたように、本来ならリスクマネジメントで、広範囲なイベントについて、ここで述べたような論理的なリスク評価を行うべきであるが、現状は

個々の施設が伝統的に関連してきた学問分野の学識経験を
用いて行っているにとどまっている。また、損失の算定では、
個々の施設が復旧するまでの損失は考慮するが、復旧後の
地域の雇用状態、関連業界の経済状態、その他の施設の復
旧過程とそれが関連業界の経済に与える影響などを考慮
した例はない。リスクマネジメントに関する研究課題は複
合災害の取り込み、個々の施設ではなく地域システムと
してのリスク評価、事業継続計画も念頭に置いたリスク
評価の技術の開発であると思う。

危機状態の予測には論理的な現象予測による演繹的
手法と過去のデータの分析による帰納的手法に大きく分
けることが可能であろう。どちらも経験で検証するしか
なく、予想が的中するというを事前に科学的に検証する
ことは不可能である。実際に構造物を含め地域が危機的
状態になる状況を被災時に観測した例は極めて少ない
ので、地震や豪雨によるシステムの破壊メカニズムに関
して、我々の知識は十分とは言えないかもしれない。ま
た、被災によりどのようにその地域の文化、経済が変
わったのかを分析した経験も少ない。したがって、安全
性の実質レベルの議論も被災尤度が如何ほどか検証す
ることは現状の科学レベルでは非常に難しい。つまり、
将来の現象に対して、我々の現在の知識では、「十分安全
とはどれくらい安全なのか？」という問いに明確に答
えることはできないのである。

さらには、「安全」という意味も現状では曖昧なところ
がある。生命ばかりではなく、被災後の生きる手段につ
いても安全でないと生活の継続は困難である。被災後
の生活継続まで考えた災害リスクマネジメントは課題山
積であるように感じている。

参考文献

- 1) フロリン・ディアク、科学は大災害を予測できるか、文芸春秋、2010
- 2) 柳田邦夫、「想定外」か、文芸春秋5月号、2011
- 3) 小林晃、山本裕介、岡敬人、青山咸康、豪雨によるため池決壊を対象としたライフサイクルコストの算定法、土木学会論文集、C、Vol. 63、No. 4、pp. 954-962、2007
- 4) Kobayashi A. , Hayashi T. , Yamamoto K. and Kiyama S. : Seismic Risk Management of Irrigation System in an Earthquake— Based on Data from the Mid Niigata Prefecture Earthquake 一, Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering, No. 269, pp. 13-23., 2010.
- 5) 藤井聡、「復興基本法」と共に「強靱化基本法」