減災アセスメント小委員会中間報告書

2018年6月

土木学会 減災アセスメント小委員会

## 概要

我が国では 30 年以内の大地震発生が高い確率で予測されている地域が多く,津波に対 する予備的対策,ならびに,津波発生後の復旧・復興の枠組みを事前に準備しておくこと が喫緊の課題である.そこで,2014 年 10 月より減災アセスメント小委員会において,津 波減災対策として防潮堤および土地利用計画について事前対策案を,津波防護に対する海 岸工学的検討のみならず,街づくりに関する土木計画学的見地から検討・議論してきた. 本研究では,その検討結果である減災対策決定プロセス案についての定量分析を,静岡県 あるいは徳島県の一都市を対象として行い,そのケーススタディを通して提案プロセスの 社会実装のあり方や実装可能性を検討する.

海岸工学における既存の設計法は、「波浪、高潮、津波等の外力に対して、耐力(ある いは許容量)の基準を定め、それに対して最適な構造物を設計、整備する」というもので あった.それに対して、本課題では、「外力に対する許容量を後背地の活動の予測・計画 を踏まえて決定していく」ための新たな方法論の構築を検討している.すなわち、津波に 対する減災を考えるためには、津波の発生や津波の浸水・遡上高予測、防潮堤による被害 軽減効果などの海岸工学の知識に加え、土地利用、避難計画、制度設計、地域の将来予測 といった、土木計画をはじめとした社会科学の知見が必要になる.本課題は、海岸工学委 員会と土木計画学研究委員会とが協働し一つのシステムを検討する、融合的な研究課題で ある.

本報告書では,減災アセスメント小委員会としてこれまで検討・整理した内容について, 中間報告としてのとりまとめを行い,海岸堤防高の検討に必要な情報の整理(2章),津 波の生起頻度の定量化(3章),高潮の確率推定手法(4章),浸水深の推定(5章), 防護施設の粘り強さの評価法(6章),減災施策の定量化(7章),プロセスの社会実装 手法(8章),などの検討結果について整理を行った.

> 2018 年 6 月 研究代表者 岡安章夫・多々納裕一

# 土木学会 減災アセスメント小委員会

## 委員構成

(50音順, 敬称略)

小委員	長	岡安章夫	東京海洋大学
小委員	ē長	多々納裕一	京都大学防災研究所
幹	事	河野達仁	東北大学大学院
幹	事	安田誠宏	関西大学
委	員	有川太郎	中央大学
委	員	井上智夫	国土交通省近畿地方整備局
委	員	宇野喜之	エコー
委	員	北野利一	名古屋工業大学
委	員	越村俊一	東北大学災害科学国際研究所
委	員	髙木朗義	岐阜大学
委	員	高橋智幸	関西大学
委	員	田島芳満	東京大学大学院
委	員	内藤正彦	国土交通省水管理・国土保全局
委	員	羽藤英二	東京大学大学院
委	員	原田賢治	静岡大学
委	員	平野勝也	東北大学災害科学国際研究所
委	員	福谷陽	関東学院大学
委	員	藤見俊夫	熊本大学
委	員	山中亮一	徳島大学
委	員	横松宗太	京都大学防災研究所

# 目 次

1. はじる	めに(岡安)	1
2. 整備	すべき海岸堤防高の検討に必要な情報と考え方の整理	3
2.1 津	波に対する地域防災力の総合アセスメント(多々納)	3
2.2 当	面達成を目指す物理的な防御レベルの設定(多々納)	3
2.3 現	在の海岸防災・減災対策決定プロセスの課題と対案(井上)	5
2.3.1	東日本大震災後に導入された海岸防災・減災対策決定プロセスの課題	5
2.3.2	東日本大震災後に導入された津波防災地域づくりの考え方と課題	8
2.3.3	新たに導入すべき海岸防災・減災対策決定プロセス	9
2.4 八	ザードとリスクの確率評価に用いられる "確率"の取扱い方(北野)	12
3. 津波の	の規模と生起頻度との関係の定量化手法についての検討	19
3.1 津	波波源の想定(高橋)	19
3.1.1	多数津波シナリオの構成	19
3.1.2	大すべり域,超大すべり域および背景領域の面積	20
3.1.3	大すべり域,超大すべり域および背景領域のすべり量	20
3.1.4	大すべり域,超大すべり域および背景領域の形状	21
3.1.5	大すべり域および超大すべり域の配置	22
3.1.6	破壞開始点	22
3.1.7	南海トラフにおける多数津波シナリオの設定	22
3.2 🗆	ジックツリーモデルを用いた確率津波水位の推定(福谷)	25
3.2.1	推定手法の背景と概要	25
3.2.2	ロジックツリーの構築 -静岡県沿岸への適用-	26
3.3.3	津波数値計算	32
3.3.4	確率津波波高の推定結果および考察	34
3.3 ラ	ンダムフェーズモデルを用いた確率津波水位の推定(安田)	39
3.3.1	想定地震モデルと初期水位の算定	39
3.3.2	確率すべり分布の生成	40
3.3.3	スケーリング則を考慮した確率すべり分布	41
3.3.4	確率津波シミュレーション	44
3.3.5	確率津波水位の推定	46
3.3.7	レベル1津波群間の比較	48
3.3.8	まとめ	50

4. 高潮	の確率的推定手法についての検討	52
4.1 全	:球確率台風モデルによる確率高潮水位の推定(安田)	
4.1.1	全球確率台風モデルから抽出した仮想台風データ	
4.1.2	高潮推算	54
4.1.3	再現期間の推定	56
4.1.4	駿河湾における台風と高潮の特性	56
4.1.5	まとめ	57
4.2 履	歴を考慮した確率台風モデルとその適用事例(田島)	58
4.2.1	履歴を考慮した確率台風モデルの構築	
4.2.2	確率台風モデルに基づく高潮および高波推定事例	67
4.3 ま	とめ	
5. 氾濫	シミュレーションによる浸水深の推定(宇野,原田)	73
5.1 氾	濫シミュレーションの計算条件	
5.1.1	地形条件	
5.1.2	波源モデル	
5.2 津	波水位および浸水範囲の時間変化	
5.3 波	源モデルおよび浸水防護施設による浸水範囲の比較	
5.3.1	波源モデルによる比較	
5.3.2	海岸防護施設別の比較	
5.4 ま	とめと課題	84
6. 防護	施設の粘り強さの評価方法についての検討(有川)	86
6.1 防	護施設のフラジリティを用いた浸水評価	86
6.1.1	防護施設の破壊を考慮した浸水評価手法	86
6.1.2	防護施設の被災による越流量の補正方法	87
6.1.3	モデル地形による検討	89
6.1.4	現地適用計算	
6.1.5	まとめと今後の課題	
6.2 粘	らり強い構造例とシミュレーションの活用	
6.2.1	粘り強い構造の例	
6.2.2	シミュレーションの活用	
6.2.3	今後の課題	

7.	減災のためのハー	・ド・	ソフ	ト施策の効果の定量化	.10	0
----	----------	-----	----	------------	-----	---

7.1 費	骨用便益分析を用いた津波ハザードと土地利用計画考慮による	
最	適海岸堤防高の考え方(河野,多々納)	100
7.2 渞	ま波リスク変化に応じた企業立地・人口の変化の把握方法(河野)	102
7.2.1	差分の差分を用いた企業立地変化分析モデル	102
7.2.2	差分の差分を用いた住宅立地変化分析モデル	104
7.3 茝	重接被害の効果計測手法	106
7.3.1	人的被害(有川,岡安)	106
7.3.2	② 資産被害 - 建物脆弱性と津波被害関数- (越村, 安田)	
7.4 間	引接被害の効果計測手法	122
7.4.1	立地均衡モデル -線形空間モデルによる分析の試み-(横松).	
7.4.2	2 都市均衡モデル -CUE アプローチー(河野)	132
7.5 U	「スクプレミアムと曖昧性プレミアム(藤見)	136
7.5.1	はじめに	136
7.5.2	確率論的津波ハザード解析と経済評価	137
7.5.3	リスク回避とリスクプレミアム	139
7.5.4	曖昧性回避と曖昧性プレミアム	144
7.5.5	リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを無視できる条件と	
	生じうるバイアス	147
7.5.6	, まとめ	150
7.6 政	な策実施コスト(内藤,井上)	155
7.6.1	海岸堤防の整備コスト	155
7.6.2	その他の関連行政コスト	158
7.7 段	5潮堤の外部性の整理とその緩和策(平野,高木)	159
7.7.1	はじめに	159
7.7.2	外部性の類型とその特徴	160
7.7.3	計画段階での外部性緩和策	163
7.7.4	設計段階での外部性緩和策	165
7.7.5	ちおわりに	166

## 8. 海岸防災・減災対策決定プロセスの社会実装における課題の整理

- 8.2 本小委員会が開発した新たな手法の現地適用に関する留意点......167
- 8.3 新たな海岸防災・減災対策を決定するプロセスを進めるための政策......171

 •••••	りに(多々納)	9. おお
 (北野)	悩ましい数理的確率	付録A
 (藤見)	不安軽減の経済評価	付録B

## 1. はじめに

(岡安)

我が国では 30 年以内の大地震発生が高い確率で予測されている地域が多く,津波に対 する予備的対策,ならびに,津波発生後の復旧・復興の枠組みを事前に準備しておくこと が喫緊の課題である.東日本大震災の復旧・復興における問題事例も一部顕在化してきて おり,このことは津波防災・減災について,防護に対する海岸工学的検討のみならず,街 づくりに関する土木計画学的見地からの検討・議論も必要なことを示している.本小委員 会では,海岸工学および土木計画学の両者の立場から,今後起こりうる巨大津波・高潮等 に対する減災システムを統合的に設計することを目指している.また,この手法を用いて 種々の対策オプションを提示することにより,社会合意を形成するプロセスを実装した計 画策定手法を提案する.

海岸工学におけるこれまでの防災・減災施設整備のコンセプトは、「波浪、高潮、津波 等の外力に対して、耐力(あるいは許容量)の基準を定め、それに対して最適な構造物を 設計,整備する」というものであった.それに対して、本小委員会では、「外力に対する 許容量を後背地の活動の予測・計画を踏まえて決定していく」ための新たな方法論の構築 を目指している.発展的なまちづくりのためには、様々な対策による災害リスク軽減と共 に、それによる地域将来像の量的予測評価を示す必要があり、津波防災・減災とまちづく りの双方の視点を生かした統合的な施策が必要である.そこで、津波に対する減災を考え るために、津波の発生や浸水・遡上高予測、防潮堤による被害軽減効果などの海岸工学の 知識に加え、土地利用、避難計画、制度設計、さらにはそれらの結果としてもたらされる 地域の将来変化予測といった、土木計画をはじめとした社会科学の知見を考慮する.

津波対策に対する総合的減災計画の方法論開発上の具体的な検討課題を,1)事前対策 と2)事後対応に区別すると,以下のように示される.

- 1) 震災前に対処すべきこととして、津波の起こる確率およびその規模の予測、その津 波頻度予測に対応した防潮堤の整備ならびに減災のための土地利用の見直し、それら 効果の事前評価、といった準備が必要である。例えば、「粘り強い構造」の防潮堤の 構造の検討やその浸水低減への有効性の検討、それらと高台移転を含む土地利用計画 整備との複合的効果の予測などが必要である。また、そういったハード面だけの対策 でなく、「避難」行動を促す防災教育や、津波災害警戒区域の設定、移住促進政策な どのソフト対策とその効果の検証も必要である。
- 2) 震災後には、早期の人命救助、その後の復旧・復興の過程を効率よく行う必要がある.災害対応、復旧、復興という一連の過程を、時間制約の中で計画し、調整し、実施していくことは容易ではない.このためには、災害発生後のこれら一連の過程を、住民合意を形成しながら、円滑にかつ効率性を保ちつつ実施していくことを可能とするような、事前の準備や制度の構築が必要である.

以上の検討を行うにあたり,東日本大震災で壊滅的な被害が生じた被災地の従前の防潮堤 および土地利用が1)の参考に,そして復旧・復興に入った現在までの取り組みが2)の 参考になる.本小委員会ではこれらの例を参考に,また南海トラフ地震津波の対象地域で の現状や取り組みも参考としながら,上記について検討していく.

ハード対策における現在の方法論では、防潮堤等の海岸構造物の設計は原則として、既 往最大主義あるいはモデル台風やモデル津波など元にした想定外力に対応するものとして おり、背後地の人口・資産の集積状況やその時間的な変化状況などによらず整備水準が決 定されている.このため、人口や資産の集積が進んでいる大都市圏でも、背後地が森林で ある場合にも、整備の目標は同程度の水準が設定されている.しかしながら、施設の設計 水準を上回る規模のハザードが発生する可能性は常にあり、加えて、そのような事態が発 生した場合の被害は、背後地の状況によって大きく異なる.このような状況を鑑みると、 最低限度の安全性能を保証するだけではなく、地域の実情に応じてより高い安全性能を付 与することを可能とするような方法論の開発が必要であろう.このためには、あらゆる規 模の外力とその発生頻度を予測し、施設規模に応じた長期被害の期待値を計量化し、防護 コストや設置による負の便益も含めた災害に関する長期総コストの最小化を評価の中核に 据えた方法論の開発が有効であると考えられる.さらに、長期コストの算定に当たっては、 社会構造や地域の将来予測もその評価に取り込む必要があるが、これらにより、地域固有 の事情を反映した効率的な整備も可能となる.

ソフト対策もハード対策の状況に依存してその効果は異なる.したがって,ハード・ソ フト対策から構成される総合的な減災施策の効果を定量化し,計画や設計に反映すること, またそれら情報を分かり易く開示して合意形成の一助とすることの重要性は論を待たない. 本小委員会では,リスク情報の提供や土地利用の規制・誘導,避難に役立つ施設整備や避 難のためのソフト施策等の効果も合わせて分析していくための方法論の開発も進めていく. そして,これらに関する学術研究・技術開発や諸制度の導入(災害事前アセスメントによ る土地利用誘導など)を学際的・分野横断的に検討を行う.

本報告書においては、研究の中間報告として、このうち、海岸堤防高の検討に必要な情報の整理(2章)、津波の生起頻度の定量化(3章)、高潮の確率推定手法(4章)、浸水深の推定(5章)、防護施設の粘り強さの評価法(6章)、減災施策の定量化(7章)、 プロセスの社会実装手法(8章)、などの検討結果について整理を行った、今後、残された課題について検討を行うと共に、「海岸防災・減災対策決定プロセス」の社会実装について、実現可能な方策をできるだけ早い時期に提案したい、なお、本報告書において、通称の「防潮堤」が使われているが、海岸法における「堤防」と同義である.

## 2. 整備すべき海岸堤防高の検討に必要な情報と考え方の整理

#### 2.1 津波に対する地域防災力の総合アセスメント

(多々納)

図-2.1 は、災害リスクの構成要素を図解したものである.災害のリスクは、災害をもた らす外力(ハザード),被害を受ける人口や資産,社会経済活動の存在(エクスポージャ), 災害に暴露される人口・資産・社会経済活動の脆弱性(ヴァルナラビリティ)によって規 定される.このような要素を明示的に考慮して津波リスクのアセスメントを実際に行った 上で、総合的な減災施策の検討や実施のためのプロセスを提案しようというところに特色 がある.津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法(津波ハザードモデル)の開発の考 え方や実行可能性に関して検討を重ねており、概ね方法論に関して合意を得つつある.



Hazard:災害外力(地震・水害など)

図-2.1 災害リスクの構成要素:災害外力であるハザード,災害の危険に曝される人口・資産・経 済活動であるエクスポージャ,及び,災害に対するエクスポージャの脆弱性であるヴァル ナラビリティ

#### 2.2 当面達成を目指す物理的な防御レベルの設定

#### (多々納)

例えば、南海トラフ沿いの地域を考えると、L1海岸堤防を計画したとしても、必要とされる事業規模に比べて予算や人材が限られることから、計画を実現するまでにはかなりの年月を必要とすることが予想される.一方で、昭和南海地震津波から 69 年が経過し、南海トラフ沿いの地震の生起確率が今後 30 年間で 70%と切迫している状況を考えれば、実際に達成すべき津波防災・減災システムを今後 30 年以内に実現する必要性には論を待たないであろう.

本小委員会では,純便益指標(B-C)を用いて物理的津波防御レベルの設定を行うための 方法に関して議論を進めている.図-2.2 に示すように,L1 津波が数十年から百数十年と幅



図-2.2 防潮堤の高さとその便益と費用

があることに着目すれば、例えば西日本では、再現期間 50 年程度(昭和南海級),100 年 程度(安政南海級),150 年程度(宝永級)等の津波(物理的防御水準)を想定し、背後地 の利用状況を考慮した上で、それぞれに対して経済的な照査を行い、効率性基準を満たす 範囲内で最も望ましい防御水準を採択するという方法が考えられる.

本小委員会においては、この効率的高さを H\*と呼んでいる.この H\*の数式による定義 は次のように示すことができる.ここでは、最初に地震生起確率の動学的変動は無視して、 定常状態を仮定する.

$$H^* = \arg \max_{H} \int_0^\infty B_n(H, f(S); X) f(S) dS - C(H)$$
(2.1)

ここで, B<sub>n</sub>(H, f(S); X)は純便益関数

Hは海岸堤防高さ

f(S)は規模 Sの津波および高潮の生起確率関数

X は政策(外生).政策の例としては、土地利用規制、税金、補助等が挙げられ

C(H)は海岸堤防建設コスト

現時点を0時点とすると、純便益関数は、

$$B_n(H, f(S); X) = \int_{t=0}^{\infty} e^{-it} b(H, f(S), t) dt$$
(2.2)

ここで, i は社会的割引率,

る.

*t* は時間

bは各年度単位の便益

便益の計測方法は一般均衡分析,ヘドニックアプローチなど様々ありうる.なお,この 便益を計測するとき,次のような関数を想定して計測することも可能である.

$$b(H, f(S), t) = b(L(H, X, f(S)), K(H, X, f(S)), E(H, X, f(S)), t)$$
(2.3)

ここで,*L*は土地利用(密度や用途)

K は景観

E は環境

これらが海岸堤防高さ H, 政策 X, 津波および高潮生起確率関数 f(s)に依存する.ただし, どこまでその内生性を考えるべきかは要検討である.例えば,景観は K(H)と考えればよい 場合が多いと思われる.

なお、地震生起確率が時間に依存して変化する場合は、上記の式をf(S)=f(S,t)と変更すればよい.

## 2.3 現在の海岸防災・減災対策決定プロセスの課題と対案 (井上)

#### 2.3.1 東日本大震災後に導入された海岸防災・減災対策決定プロセスの課題

東日本大震災までの海岸における防災・減災対策の決定プロセス,特に海岸堤防の高さ の決定プロセスとしては,既往最大の津波・高潮の高さまでの施設整備を行うという既往 最大主義がとられてきた(一部に,確率を考慮した場合もある).それまでの海岸整備に は,背後地の保全対象の有無や量によって整備の優先順位に差が生じることはあったが, 堤防高の決定にあたっては既往最大主義を採用することで再度災害防止の対策が採られて きた.

しかし、東日本大震災を経験したことで、これまでのプロセスを踏襲することが難しい ことが認識されるようになった. 平成 23 年 5 月に開催された土木学会津波特定テーマ委 員会において、次の考え方が示された.

・すべての人命を守ることを前提とし、主に海岸保全施設で対応する津波のレベルと 海岸保全施設のみならずまちづくりと避難計画をあわせて対応する津波のレベルの 二つを設定する.前者は海岸保全施設の設計で用いる津波の高さのことで、数十年 から百数十年に1度の津波を対象とし、人命及び資産を守るレベル(以下、津波レ ベル1(仮称))である.後者は津波レベル1をはるかに上回り、構造物対策の適用 限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル (以下、津波レベル2(仮称))である.

この考え方も踏まえ、中央防災会議の東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対 策に関する専門調査会では、平成23年6月に中間とりまとめを行い、次の基本的な考え 方が示された.

・今後の津波対策を構築するにあたっては、基本的に二つのレベルの津波を想定する 必要がある.一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で設定する 津波である.超長期にわたる津波堆積物調査や地殻変動の観測等をもとにして設定 され,発生頻度は極めて低いものの,発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラス の津波である.今般の東北地方太平洋沖地震はこれに相当すると考えられる.

 ・もう一つは、防波堤など構造物によって津波の内陸への侵入を防ぐ海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波である.最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、 津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波である.

さらに、中間とりまとめにおいては、頻度の高い津波に対する海岸保全施設等の高さに ついて、次の考え方も示された.

・海岸保全施設等の整備の対象とする津波高を大幅に高くすることは、施設整備に必要な費用、海岸の環境や利用に及ぼす影響などの観点から現実的ではない.しかしながら、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、引き続き、比較的頻度の高い一定程度の津波高に対して海岸保全施設等の整備を進めていくことが求められる.

これらの基本的な考え方を踏まえ、海岸4省庁においては、海岸における津波対策検討 委員会の検討を経て、平成23年7月、設計津波の設定方法について以下の内容を海岸管 理者に通知した(海岸4省庁通知).

- ・「設計津波の対象津波群」については、一定の頻度(数十年から百数十年に一度程度)で発生すると想定される津波の集合を選定する.
- 「設計津波の水位」については、設定した対象津波群の津波を対象に、隣接する海 岸管理者間で十分調整を図ったうえで、設計津波の水位を海岸管理者が設定するこ ととする。
- 「堤防等の天端高」については、設計津波の水位を前提として、環境保全、周辺景 観との調和、経済性、維持管理の容易性、施工性、公衆の利用等を総合的に考慮し て海岸管理者が適切に設定する。

この海岸4省庁通知は、東日本大震災の被災地における復旧・復興事業に適用されるだけでなく、南海トラフ巨大地震・津波に備える必要のある地域を含む全国の海岸事業にも適用されるものであり、平成23年以降、各地で海岸法に基づく海岸保全基本計画の見直しが都道府県においてなされるとともに、それにしたがって現地で海岸保全施設の整備がなされている。その過程で提起されてきた課題を、海岸4省庁通知で示された検討プロセスに照らして整理する。図-2.3に示すように、現在のプロセスにおいては、いくつかの課題が考えられる。

まず、L1 津波の設定根拠については、1) 限られた実績・想定津波で「数十年から百数十年に一度程度」発生する津波を特定することは難しいのではないか、2) 限られた実績・想定津波群の最大値をとるべきか、平均値をとるべきか等の考え方が明確になっていないのではないか、という疑問点が、さらには、3) ユニット海岸単位でL1 津波を想定するとされているが、個々の地区海岸単位で決定すべきではないか、という意見もある.



図-2.3 海岸防災・減災対策決定プロセスにおける課題

また,堤防高の決定方法については,ユニット海岸単位で決定されたL1津波高をもとに, 打上げ高,計画潮位を考慮し,高潮・高波による必要天端高と比較した上で,地区海岸毎 の海岸堤防高が設定される.その上で,海岸4省庁通知に基づき,機能の多様性,経済性, 環境保全,周辺景観との調和,維持管理,公衆の利用等を考慮して計画案が出され,住民 との合意形成がなされて,外力のみを考慮した高さとするのか,それ以外の高さとするの か,地域ごとに海岸堤防高が決定される.しかしながら,この決定プロセスにおいても, いくつか課題が考えられる.1)経済性や環境保全を考慮する必要があるが,その具体的な 手法が提示されていないのではないか,2)堤防の高さを決めるにしても,L1津波の高さ と現在の堤防高の間で何 m とすべきかを定量化する具体的手法が示されていないのでは ないか,3)本来,堤防の高さは外力だけで決まるのではなく,避難対策やまちづくりと一 体となって決められるべきではないか,といった課題が挙げられている.

加えて,堤防高を決定するプロセスにおける住民の合意形成のあり方について,海岸管 理者は,計画案について複数案を提示し,住民の意見を聞くなどの丁寧な方法で合意形成 を図るべきではないか,といった課題がある.

#### 2.3.2 東日本大震災後に導入された津波防災地域づくりの考え方と課題

東日本大震災により甚大な被害を受けた地域の復興や将来起こりうる津波災害の防止・ 軽減のためには、将来を見据えた津波災害に強い地域づくりを推進する必要がある.この ため、ハード・ソフトの施策を組み合わせた 「多重防御」による「津波防災地域づくり」 を推進するため、平成23年12月に新たに津波防災地域づくりに関する法律(津波防災地 域づくり法)が制定され、あわせてその基本指針が次のとおり示された.

・津波防災地域づくりにおいては、最大クラスの津波が発生した場合でも「なんとしても人命を守る」という考え方で、地域ごとの特性を踏まえ、既存の公共施設や民間施設も活用しながら、ハード・ソフトの施策を柔軟に組み合わせて総動員させる「多重防御」の発想により、国、都道府県及び市町村の連携・協力の下、地域活性化の観点も含めた総合的な地域づくりの中で津波防災を効率的かつ効果的に推進することを基本理念とする。

このため、津波防災地域づくりを推進するにあたっては、図-2.4 に示すように、市町村 が、津波浸水想定を踏まえて、ハード・ソフト施策の組み合わせを総合的に推進するため、 津波防災住宅等建設区の創設、津波避難建築物の容積率規制の緩和、都道府県による集団 移転促進事業計画の作成等の特別の措置の活用、津波防護施設の管理等を市町村が定める 推進計画に位置付けることができるようになっている.また、都道府県知事による警戒避 難体制の整備を行う津波災害警戒区域や一定の建築物の建築及びそのための開発行為の制 限を行う津波災害特別警戒区域の指定等を、地域の実情に応じ、適切かつ総合的に組み合 わせることにより、発生頻度は低いが地域によっては近い将来に発生する確率が高まって いる最大クラスの津波への対策を効率的かつ効果的に講ずることも求められている.

さらに,海岸保全施設等については,引き続き,発生頻度の高い一定程度の津波に対し て整備を進めるとともに,設計対象の津波高を超えた場合でも,施設の効果が粘り強く発 揮でき,施設が損傷・倒壊するまでの時間を稼ぎ,その分だけ住民が避難に要する時間を



図-2.4 津波防災地域づくりのイメージ

確保できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが求められている.

これらの施策を立案・実施する際には、地域における創意工夫を尊重するとともに、生活基盤となる住居や地域の産業、都市機能の確保等を図ることにより、地域の発展を展望できる津波防災地域づくりを推進することが重要であり、これらの施策を実施するにあたっては、国、都道府県、市町村等様々な主体が緊密な連携・協力を図る必要があるが、なかでも地域の実情を最も把握している市町村が、地域の特性に応じた推進計画の作成を通じて、当該市町村の区域における津波防災地域づくりにおいて主体的な役割を果たすことが重要である。その上で、国及び都道府県は、それぞれが実施主体となる、または所管する事業を検討することなどを通じて、積極的に推進計画の作成に参画することが重要である。

しかし,現時点においては,津波防災地域づくり法に基づく推進計画を作成している市 町村はわずかであるとともに,作成された市町村においても総合的な対策を実施するため には課題を多く抱えている.

#### 2.3.3 新たに導入すべき海岸防災・減災対策決定プロセス

東日本大震災以前は,主な海岸防災・減災対策の1つである海岸堤防の高さの決定にあ たっては,津波・高潮による災害をもたらすハザードから施設の計画規模(たとえば,既 往最大水位)を特定し,全国一律の安全性を求める手法(言い換えれば,「海側からの論 理だけで決定するプロセス」)が用いられていた.この手法において,背後地の状況は, 想定浸水区域の人口・資産が多い地域・地区の海岸堤防の整備が優先されるという形で考 慮されてきた.

東日本大震災以降は、2.3.1、2.3.2 で述べたように、背後地の状況や地域の特性をより積 極的に考慮して海岸堤防の高さを決定する手法(言い換えれば、「海側と陸側の両方から の論理で決定するプロセス」)に変換する政策が採られてきた. しかし、この政策の理念 を現地の状況に合理的に適用させるためには、津波の高さといったハザードの規模だけで なく、その発生確率と発生する具体的な人的・経済的被害をかけあわせた災害リスクを定 量化する科学的アプローチが求められる. また、その災害リスクは、住民の危険回避行動 やそれを促進させる防災訓練といった避難、避難施設や個々人の住まい方といったまちづ くりにも依存する. さらに、地方部において海岸は生業となる漁業や観光の拠点となるこ とから、災害時の安全性と平常時の地域の振興という相反する可能性の高い問題の解決に チャレンジせざるをえない. このため、合意形成や意思決定といった社会的なアプローチ も求められる.

ここ2. では、これらの課題に対処するために、総合的な海岸防災・減災対策決定プロ セスを新たに提示することし、3.から7.では、そのプロセスを支える個々の要素につ いて新たに導入すべき科学的知見とともに提示することとする.

新たなプロセスの概念は,住民の安全の確保と地域の振興を図るために,海岸堤防の高 さの決定にあたって,海岸堤防の整備によっても低減できないリスク(残余リスク)を, 背後のまちづくりによる安全度の向上,避難の確実性で担保する仕組みを用意することで ある(図-2.5参照).すなわち,1)海岸法に基づいて設定される海岸堤防の高さ,2)災害 対策基本法に基づいて定められる避難計画,3)都市計画法,都市再生特別措置法,建築基 準法等によって定められる土地利用計画,立地適正化,住まいづくり等のまちづくりの相 互関係を十分に考慮するとともに,それらを三位一体とするために4)津波防災地域づく り法に基づく津波浸水想定,津波災害警戒区域等,推進計画で担保する枠組みを活用する ことである.

新たなプロセスのポイントは、海岸堤防、避難計画、土地利用計画のそれぞれの役割と 限界を認識して適切な組合せを提示することにある.海岸堤防、避難計画、土地利用計画 の1つ1つはどれも完全ではない.海岸堤防は、その高さまでの津波に対しては確実に防 御効果を発揮するが、堤防高を超える津波に対してはその効果は不確実である.避難計画 は全員が逃げ切れることを前提に計画されるが、高齢者等の要配慮者の避難には相当の時 間を要し、また、夜間の津波の来襲に対しては要配慮者でなくとも逃げ遅れになる可能性 がある.一方で、津波が来襲して海岸堤防を越流しても直ちに壊れなければ、それまでの 時間で避難できる可能性が高まることにも留意する必要がある.高台移転に代表される沿 岸部から完全撤退したまちづくりはより確実に安全を確保できるが、一方で、生産・日常 生活の拠点となる沿岸部の活力は低下することになる.すなわち、海岸堤防、避難計画、 土地利用計画のどれか1つを強力に推進すれば他はいらないという問題ではなく、全て必

要であり、その適切な組合せを地域の実情、特性に応じていかに地域が適切に選択できる かがポイントとなる.また、それを担保する行政の役割が求められる.それを図-2.6に示 す.



図-2.6 海岸防災・減災対策決定プロセス(案)

### 2.4 ハザードとリスクの確率評価に用いられる "確率"の取扱い方 (北野)

#### (1) 土木工学における確率の導入

土木工学で扱う構造物の設計において、不確実性を導入することは、他のさまざまな技術が成熟していく中で、必然的であるが、それほど簡単なことではなかったようである. 特に、その初期段階には、現場の技術者からは「机上の理論」として無視された.数学的な概念が多い上に、計算にも手間がかかるため、無視というより、拒絶反応といえるかもしれない.そのため、現役の技術者への啓蒙のみならず、将来の技術者に向けて、確率論および統計学を大学カリキュラムに組込むなどの地道な努力から始まったようである.日本の場合、昭和34~35年頃に生まれた数理土木計画として、大学の土木教育のカリキュラムに取り入れられ、水文学や交通量の問題を紹介する形で始まった.そして、1970年ごろの米国では、一連の議論の末、構造物の設計に、安全率に代わる破壊の確率の概念も導入され始めた.このあたりの事情は、高岡・星谷(1975)の対談記録につづられている.

その一方,水文学分野では,戦後の昭和20年代には,洪水の規模を記述する立場から, 石原藤次郎, 岩井重久, 角屋 睦, 高瀬信忠らが洪水の規模を確率概念で把握することに取 組んだ.そして,河川砂防技術基準(昭和33年)では,治水計画の基本である計画高水流 量の決定は,確率洪水概念を基準とすることを明確にしている.戦前には,既往最大洪水 の流量を計画高水流量とすることを目標にしつつも、国家財政の状況で按配させられてい たことに対して、洪水規模への確率概念が導入され、一種の科学的合理性を与えるものと なった.米国では,アポロ計画で活躍したシステムエンジニアが各方面に進出したことで, 確率過程を基礎としたシステム工学的手法が流行し、水文学のみならず、水理学の力学的 な思考法や解析法が結びついた新しい「確率水文学」へと発展した.確定論的な因果律だ けでは、たとえば、流出現象の説明が難しくなってきたことに対し、確率過程としてとら えることで明瞭になる.すなわち,不確実性を含めることが現象の解明にも不可欠である. このようなことを土木学会水理委員会 確率統計水文学研究小委員会が 1977 年に行なった 討論会で論じている.また,同時期に,土木学会海岸工学委員会が開催したシンポジウム 「波のランダム特性とその予測および応用(1976 年)」では,現実の海の海面波は不規則 であり、単一周期の海面波に対する動力学の確定論的取扱いとは異なる確率論をテーマに 議論が行なわれた.波浪のスペクトル、不規則波の波高分布などは、力学的に相互に関係 し、周波数領域あるいは時系列のそれぞれで、波浪推算をはじめ、浅水変形・屈折・回折・ 反射・砕波・wave setup・沿岸流・surf beat などの水理現象は,不規則波のランダム性を適 確に扱うことが不可欠であることが結論づけられている.したがって、水工水理学分野で は、外力特性の把握の観点から、比較的に確率に馴染んできた分野である.

#### (2) 予測

「予測」という言葉は、不確実ならびに確率を考える上で、注意が必要である.予測、

予見,予知,予報,予想.類似した意味をもつ言葉を並べることができる.これらは,明確に区別しないといけない言葉である(椎貝,1984,1987).これを踏まえて,久保(1987)が,予測の手法とその信頼性について論じている.予測の方法に関しては,

- a) 重回帰分析 · 数量化理論
- b) Fault Tree Analysis 法
- c) Delphi 法
- d) 確率統計的手法

に分類している. a) では、互いに相関のある量を関係式で依存性を記述して、観測データ でパラメータをキャリブレーションして予測値を求める方法であり、b) は、因果関係を系 統樹に表して論理的に検討する方法で、データが非常に限定される場合に有効である. ま た、c) は、Delphi とは、Appollo 神が神託をしたギリシャの古都であり、住民などへのア ンケートなどに基づいた方法である. d) は、カルマンフィルタなどに用いられるベイズ統 計のことである. これらの予測手法は、いずれも、減災アセスメント小委員会で提案する 解析法にほぼ対応している. 久保 (1987) は、予測の信頼性について強調し、予測には必ず 誤差を含んでおり、用いるデータのサンプルサイズ、検討している条件に相応しいデータ かどうか、時間的な外挿のみならず、新しい材料や構造様式などの説明変数の外挿に相当 する扱いについても注意を促している. また、ヒューマンエラーがさまざまな形で介入す ることも指摘している. どのような解析法を用いるかそのものも、予測結果の判断の適否 も、人間によって左右されると厳しく指摘している. 設計で想定する外力を超える外力が 生起すれば、「想定外」となってしまうが、あえて戒めとして言うならば、広い意味で、 「想定外」もこの範疇に入ると考えられる.

#### (3) 技術基準(河川工学)

河川の治水計画では、大町 (2004) によれば、昭和 39 年に旧河川法が全面改訂されるま で、既往最大洪水を治水計画の基本に検討していた.当時の現場の施工技術の制約を考え ると、少なくとも、これまでの最大規模には耐えうるものを造ろうという考えである.新 河川法以降の治水計画では、社会経済的に重要な河川は国が直接管理し、水系全体の一貫 性が求められるとともに、計画規模の基準がそれまでの実績洪水から超過確率洪水へと切 り替わった.その際に、観測期間よりも長い再現期間の洪水ピーク流量を推定するには、 単に過去の実績ピーク洪水ピーク流量を確率評価するただけでは合理的な治水計画を検討 できないため、総雨量(もしくは2日雨量)に対して、過去の実績降雨の降雨パターンを 引き伸ばすことにより、洪水流出モデルを介して洪水ピーク流量を計算し、降水パターン 毎の総雨量に対する流量の関係を求めてから、これらを流量毎に統合して、洪水ピーク流 量の超過確率を求めるのである(これは、総合確率法とよばれる).しかしながら、この ような手順で最終的に得られる洪水流量があまりにも概念的であり、現実の降雨や洪水を 具体的にイメージすることが難しく、対外説明に困るという欠点があった.現在の多くの 河川計画で用いられている「淀川方式」は、これを改善するものとして、所与の再現期間 に対応する確率降水量を算定し、これのみに応じた過去の実績降雨の降雨パターンを引き 伸ばして、洪水流出モデルを介して洪水ピーク流量を計算して、洪水流量を求める、得ら れた洪水流量の上位の幾つかは過大になることが多いため、カバー率(実績降雨パターン の何パーセントをカバーしているかという意味)を用いて、これらを除いた最上位の流量 を計画値に決定する.しかし、このカバー率を幾らにするか次第で、治水計画が大きく変 わるため、カバー率に対する批判がある.むしろ、淀川方式の最大のポイントは、所与の 確率に対して、総雨量を予め定めることにより、流出計算を大幅に省略化しているところ にある.当時のコンピュータ処理能力を考えると、妥当な手法であると言える.また、そ の省略化の副産物として、確率降水量を定めてから、ピーク流量を求める手順となるゆえ に、確率概念が用いられているところが限定されるので、関係者への説明がすっきりとし たものになった.また、河川砂防技術基準(案)に採用され、他の河川に普及したと言え る.

淀川方式のもととなった総合確率法は,関東地方の河川計画で用いられており,椎葉・ 立川 (2013) で,その数学的な解釈を与え,また,北野ら (2014) で,その発展的な解釈も 試みている.総雨量に対して降雨パターンを変えて,流出ピーク流量を算定するという一 連の物理的な過程を,総雨量の変化による**無数の組合せで計算**することは,現在のコンピ ュータで現実的な処理が可能であり,また,淀川方式により導入された確率概念を,より 成熟させた手法であると受け止める余裕が,技術者ならびに関係者にも準備ができたと考 える.

#### (3) 技術基準(トレードオフとマトリックス)

土木学会誌 1983 年 3 月号の特集は「技術基準へのアプローチ」と題して、各分野での変 遷,諸外国の考え方、そして幾つかの視点での課題などをまとめている.その冒頭に、長 尾 (1983) は、「海岸構造物の計画は、既往最高水位とする.しかし、東京湾、大阪湾、伊 勢湾などでは、モデルの高潮計算により最大潮位偏差を求め、これを台風期の平均満潮位 に加えた水位をとるのが通例」と海岸保全施設設計便覧に記載されていることを例に取り 上げて、指針を与えるもので、土木技術者の創意と工夫を阻害し、土木技術発展の障害と なるおそれがないように強調している.その際に、図-2.4.1 に示すように、外力(または費 用)と抵抗力(または便益)の不確実性のせめぎあいに、技術基準設定の主な役割がある としている.また、土木学会誌同年 9 月号は「変ったか自然災害」という特集で、「異常 自然現象の最大規模と極値考」というサブタイトルで各分野の災害外力の極値を検討する とともに、「被災形態と災害拡大のメカニズム」を論じている.石原(1983)は、その序で 国の存亡に関わるような自然災害に対して、考えられる最大規模の自然現象を対象として 防御施設が設けられるとして、オランダの防潮堤では、その計画高潮の再現期間が 10,000 年程度であることをとりあげ、防災の目標(生命、生活、生産)と防御施設の防災規範(絶 対安全,中間,経済効果)の関係について,図-2.4.2のように段階的な対応があることを示している.これは,現在に用いられる性能マトリックス(SEAOC,1995 など)に相当するものである.防災規範に対応する再現期間(外力の超過確率)が添えられていることに注目する.また,防御施設が整備されて地域の安全性が高まると,住民の自衛的防災意識が弱体するおそれがあることを指摘しており,disaster subculture (Wenger and Weller, 1973)の育成/維持発展を図ることを盛り込むことが防災計画に重要であることを強調している.



図-2.4.1 不確実性の存在と技術基準の必要性(長尾, 1983)



図-2.4.2 防災の目標と防災規範の関係 (石原, 1983)

#### (4) 技術基準(海岸工学)

前節のとおり,設計高潮位の決め方としては,

a) 既往最高潮位を用いる.

b) 朔望平均満潮位に,既往あるいは推算の潮位偏差の最大値を加えたものを用いる.

とある.これらは,現在広く採用されている方法である.しかし,確率的な意味は薄弱で あり,不確実性の考慮に乏しい.そのため,既往や推算の最大偏差について,過去の観測 資料に基づいた(極値)統計解析から,再現期間を算出し,来襲頻度の多寡についてを参 考資料として添えることが多い.さらに発展させた方法として,以下の方法がある.

c) 既往の異常高潮位の生起確率曲線を求め、100年、1000年などの再現期間に、与えた潮 位(再現レベル)より高い潮位が平均して1回発生するように定める.

d) 異常潮位の生起確率と各潮位に対する背後地の被害額および波浪・高潮対策施設の建設 費を経済的に勘案して決定する.

これらの決め方は、合田(初版 1972、新訂版 1981、二訂版 1998)に記載されており、「津 波対策事業の場合には、その地域における既往最大の津波による最高潮位が用いられる」 として、高潮と津波の両方の来襲に備えることを前提に解説している.また、港湾の施設 の技術上の基準・同解説ならびに海岸保全施設の基準・同解説にも明記されている.国土 の約 40%が平均水面より低いオランダでは、c)の方法を用いている.過去 500 年にわたる 高潮の災害記録などに基づいて高潮の生起確率を解析し,5000年~10000年の再現期間に 対する高潮位を防波堤の設計条件として採択している.1953年の沿岸洪水の甚大被害を被 った後に,1960年から始まったデルタ計画では、当初は、主に、物理学的ならびに経済的 な視点から検討された.設計外力の再現期間を10000年とすることを法で定め、1950年当 時の統計解析手法を用いて行なわれたものの、本格的な極値統計解析は、30年後の1990 年まで待たねばならなかった(de Haan,1990).その背景には、現代的な機器を用いた信 頼できる観測記録の収集と、統計解析に用いる極値理論ならびに極値理論に基づく統計解 析手法が一定の体系としてできるまでに、開発を要したからである.1953年の以前にも、 1916年にも甚大な沿岸洪水に見舞われている.その被災後に設けられた対策委員会には、 相対性理論にたずさわった物理学者のLorentz が委員長に起用され(副委員長は、土木工 学者のWortman)、ゾイデル海の潮位計算を行なった.これについて、物理学者の視点で、 朝永(1971)が称えている.なお、1953年の沿岸洪水は、南オランダのロッテルダム地方 で発生し、ゾイデル海では被害が無かった.オランダの沿岸災害の歴史やデルタ計画につ いては、Battjes・Gerritsen(2002)、Gerritsen(2005)も参照されたい.

#### (5) 確率・統計に生じやすいパラドックス

ハザードとなる豪雨について、その生起頻度が気象分野でも議論になることがある.特に、東海豪雨や彦根豪雨のような豪雨災害が生じた時に、「この豪雨は何年に1度のことか?」とマスコミなどから問われることになる. 観測年数の不足から、極値統計解析の結果を用いると、東海豪雨や彦根豪雨の降水量に対して、何千、何万年の再現期間と推定される時に、多くの人は違和感を抱く. このような場合に、科学的な正しさを失わずに、かつ、社会の理解と信頼が得られるような説明をどうすべきか、知恵を出し合う必要があると二宮・藤部 (2011) は指摘している. このことは、Sussex パラドックス (山元、2003) として知られる極値統計に特有の不確からしさと同根の問題である. England 南部の Sussex地域で、過去50年間のデータから算出された再現期間 1000年の日降水量はたかだか 85mmであったにもかかわらず、90~133mmの日降水量が 1980年に3回も生起したことにちなむパラドックスであるが、山元 (2003) は、50年間の記録から推定される 50年確率降水量と5000年確率降水量の信頼区間(95%)が重複することを示して、観測年数が限られることに対する統計的有意性の欠如があることを指摘している.

50年間に平均1回生じる外力レベル(50年確率降水量や50年確率波高など)に対して, 実際の50年間に,その外力レベルを超える外力に遭遇する確率は,いくらになるか? その答えは,およそ0.63の確率となる.この確率値を大きいと見るか,小さいと見るか難 しいように思えるかもしれないが,遭遇しない確率に対して,遭遇する確率は約2倍もあ るので,大きいと見るべきである.遭遇確率は,「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平 成11年版)の第2編 設計条件に取り上げられ,構造物の機能の重要性や経済性などと 勘案して設計条件を検討するために,*L*年に耐用年数をとり,再現期間*R*年との組合せで, 遭遇確率を数表にして掲載されている.なお,同基準は,平成19年に改訂されて,性能設計の体系が取り入れられ,性能照査にあたり,破壊確率とともに,再現期間ならびに遭遇確率の重要性もより強調されるべきであるが,一例(*R* = *L* = 50年の場合)を示すにとどまり,遭遇確率の数表は削除されている点が残念である.

50 年確率降水量や 50 年確率波高など再現レベルは,真値が分かっていれば,単なる定数であるが,非常に限定された有限な観測記録から推定により求めるため,推定誤差をともなった不確定なものになる.これに対し,50 年間に生じる極値の最大値は,確率変数であり,神も知らない値である.この確率変数がとりうる範囲を予測区間とよび,再現レベル(確率外力)の信頼区間とは,全く異なるものであることに注意する(北野ら,2017). 遭遇確率は,このような予測と密接に関わる概念であり,将来に生起する甚大外力の不確実性を検討する上で非常に重要である.なお,これらの背景には,ポアソン分布やポアソン過程がある.これらの確率を理解するには,付録を参照されたい.

以上の(1)~(5)の項目にわたって,構造物を設計する上で不確実性をどのようにとりいれ られたのか,その契機や目的を明らかにしたつもりである.また,次章に続く減災アセス メント小委員会が提案する各種の手法が,これまでの経緯の延長上にあり,それらを発展 させたものであることも理解できるものと考える.

#### 参考文献

- Battjes, A. & H. Gerritsen: Flood risk in a changing climate, Philos Trans A Math Phys Eng Sci., vol. 360, p.1461-1475, 2002.
- De Haan, L.: Fighting the arch-enemy with mathematics, Statistica Neerlandica, Vol.44, No.2, pp.45-68, 1990.
- Gerritsen, H.: What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect, Philos Trans A Math Phys Eng Sci., Vol. 363, pp.1271-91, 2005.

SEAOC: Vision 2000 – A framework for performance based earthquake engineering, Vol.1, 1995.

Wenger, D. E.& J. M. Weller: Disaster Subcultures: The Cultural Residues of Community Disasters, Disaster Research Center, paper#9, 18p., 1973.

朝永振一郎: ゾイデル海の水防とローレンツ,自然,中央公論社,26(4),pp.243-245,1971. 石原安雄:土木技術者と自然災害,土木学会誌,Vol.68,No.10,pp.2-6,1983.

- 大町利勝:計画洪水流量決定手法に関する一考察,水文・水資源学会誌, Vol. 17, pp.170-179, 2004.
- 椎葉充晴・立川康人:総合確率法の数学的解釈,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, pp.101-104, 2013.
- 北野利一・高橋倫也・田中茂信(討議者)・椎葉充晴・立川康人(回答者):「総合確率法の数学的解釈」への討議・回答,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, pp.32-36, 2014. 北野利一・喜岡 渉・熊谷健蔵: 2つの設計潮位レベルに対する統計的解釈 -将来に生じ

うる最大値の予測と再現レベルの推定-, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, pp.I 121-I 126, 2017.

合田良実: 海岸・港湾, 彰国社, 初版 1972, 新訂版 1981, 二訂版 1998.

二宮洸三(討議者)・藤部文昭(回答者):「極端な豪雨の再現期間推定精度に関する検討」(藤部 2010)に対する質疑と回答,天気,58,143-145,146-151,2011.

久保慶三郎:予測とその信頼性,土木学会誌, Vol.72, No.2, pp.2-7, 1987.

椎貝博美:予見とは何か, Vol.69, No.9, pp.27-30, 1984.

椎貝博美:予測の定義,土木学会誌, Vol.72, No.5, pp.45-47, 1987.

高岡宣善・星谷 勝:対談 信頼性理論と確率論の土木工学への応用,土木学会誌, Vol.60, No.9, pp.61-69, 1975.

長尾義三: 技術基準を考える, 土木学会誌, Vol.68, No.3, pp.2-7, 1983.

山元龍三郎: 21世紀の課題 – 地球温暖化と気象災害 –, 風水害論(防災学講座1, 京都 大学防災研究所 編), pp.147-179, 山海堂, 2003.

## 3. 津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法についての検討

自然現象の予測には不確かさが絶えず存在する.したがって,津波外力の設定に不可欠 な津波波源の想定においても不確かさを考慮することが重要である.特に,津波波源の規 模とそれに関連した大すべり域や超大すべり域などの波源の不均質性は沿岸に来襲する津 波の高さに大きな影響を与えるため,さまざまなアプローチでの検討が必要であろう.そ こで本章では,不確かさを考慮した津波波源の想定方法について検討を行う.

従来,津波波源の想定は決定論的なアプローチで行われてきた.一般に,決定論的なア プローチは最も確からしいシナリオを選定するために用いられるが,多数のシナリオを検 討することにより不確かさを考慮することも可能である.そこで,3.1節では多数津波シナ リオを説明し,例として南海トラフに適用した.

ところで、不確かさは、自然現象が本質的に有している偶然的不確かさと、我々の知見 が不十分なことによって発生する認識論的な不確かさの2種類に分けて考えることができ る.そこで、これらの不確かさを考慮したモデルとして、3.2節では津波波高評価に関わる 複数の認識論的不確かさを論理木によって捕捉するロジックツリーモデル、3.3節ではラ ンダムフェーズモデルについて説明する.

#### 3.1 **津波波源の想**定

#### (高橋)

東日本大震災での甚大な津波被害の要因の一つは津波波源想定の過小評価であった.そのため、国や自治体では想定の見直しが行われているが、その内容は規模とすべり分布に分けることができる.規模については、プレート境界の物理的条件から保守側に想定することが可能であるが、すべり分布については断層運動の不確かさの考慮が必要であり、その考え方により結果が大きく異なる.特に、大すべり域および超大すべり域は津波初期水位において支配的なパラメータであり、沿岸に来襲する津波高分布に大きく影響するため、津波波源の想定において重要な要素となる.したがって、大すべり域および超大すべり域を設定する標準的な方法が求められているため、その方法の一つとして門廻・高橋 (2014) が提案している多数津波シナリオを紹介する.

#### 3.1.1 多数津波シナリオの構成

多数津波シナリオの概念図を図-3.1.1 に示す.津波を発生させる断層(以下,津波断層) は大すべり域(LSZ),超大すべり域(SLSZ)および背景領域から構成され,大すべり域 は津波断層内の浅部に形成され,背景領域に比べて大きなすべりが発生する領域,超大す べり域は大すべり域よりもさらにプレート境界軸に近い浅部に形成され,大すべり域より も大きなすべりを発生させる領域と定義する.大すべり域と超大すべり域の不確かさを踏 まえて,多数津波シナリオを設定するためには,各領域の面積,すべり量,形状,配置お よび津波断層における破壊開始点を決定する必要がある.

#### 3.1.2 大すべり域,超大すべり域および背景領域の面積

図-3.1.1 の左図に示すように、断層面に沿って大すべり域、超大すべり域および背景領域の面積(*S<sub>L</sub>*, *S<sub>S</sub>*, *S<sub>B</sub>*)を以下のように定義する.

$$S_L = \alpha_L S_T \tag{3.1.1}$$

$$S_{\rm s} = \alpha_{\rm s} S_{\rm T} \tag{3.1.2}$$

$$S_{B} = S_{T} - S_{L} - S_{S} \tag{3.1.3}$$

ここに、 $S_T$ は津波断層の面積、 $\alpha_L$ および $\alpha_S$ は係数である.

さらに、大すべり域と背景領域を合わせた面積 S' (=  $S_L + S_S$ ) を導入すると

$$S_L = \frac{\alpha_L}{1 - \alpha_s} S' \tag{3.1.4}$$

$$S_s = \frac{\alpha_s}{1 - \alpha_s} S' \tag{3.1.5}$$

$$S_{B} = \frac{1 - \alpha_{L} - \alpha_{s}}{1 - \alpha_{s}} S' \tag{3.1.6}$$

となる. S'に関する既往研究は多く発表されており(例えば,内閣府 (2012)),既に条件 が与えられている場合も多いため,これを用いて  $S_L$ ,  $S_S$ および  $S_B$ を一意に設定することが できる.

#### 3.1.3 大すべり域,超大すべり域および背景領域のすべり量

大すべり域,超大すべり域および背景領域のすべり量 (*D<sub>L</sub>*, *D<sub>S</sub>*, *D<sub>B</sub>*)を以下のように定義する.

$$D_L = \beta_L \bar{D} \tag{3.1.7}$$

$$D_{s} = \beta_{s} \overline{D} \tag{3.1.8}$$

$$D_{B} = \frac{1 - \alpha_{L}\beta_{L} - \alpha_{s}\beta_{s}}{1 - \alpha_{L} - \alpha_{s}}\bar{D}$$
(3.1.9)

ここに,  $\beta_L$ および  $\beta_s$ は係数である.  $\bar{D}$ は津波断層の平均すべり量で, 次式より求められる.

$$\bar{D} = \frac{M_0}{\mu S_T} \tag{3.1.10}$$

ここに、 $M_0$ は津波断層の地震モーメント、 $\mu$ は剛性率である.なお、 $M_0$ はモーメントマグ ニチュード $M_w$  (Hanks・Kanamori, 1979)を用いて次式より求められる.

$$M_{W} = \frac{\log M_0 - 9.1}{1.5} \tag{3.1.11}$$



 図-3.1.1 多数津波シナリオの概念図(門廻・高橋, 2014)(左図には、大すべり域,超大すべり 域および背景領域の面積と形状,深さ,形成点(●)が示されている.右図には、大す べり域の配置と形成点(●),津波断層における破壊開始点(★)が示されている.)

よって, *M*<sub>w</sub>が与えられれば,大すべり域,超大すべり域および背景領域のすべり量は一 意に設定することができる.

#### 3.1.4 大すべり域,超大すべり域および背景領域の形状

図-3.1.1の右図に示すように、大すべり域と超大すべり域の境界となる深さ H<sub>1</sub>に、大すべり域および超大すべり域を形成するための基準となる点(以下,形成点)をとる.

大すべり域の場合は、形成点を中心に半円を描き、 $H_1$ より深い部分の面積が $S_L$ となるように半径 $a_{L0}$ を設定する、しかし、 $a_{L0}$ が地震発生層の下限 $H_2$ に達する場合は、 $a_L$ を短半径とする楕円を描き、 $H_1$ より深い部分の面積が $S_L$ となるように長半径 $b_L$ を設定する.

同様に,超大すべり域の場合は,形成点を中心に半円を描き,H<sub>1</sub>より浅い部分の面積が S<sub>s</sub>となるように半径 a<sub>s0</sub>を設定する.しかし,a<sub>s0</sub>がプレート境界軸に達した場合は,a<sub>s</sub>を 短半径とする楕円を描き,H<sub>1</sub>より浅い部分の面積がS<sub>s</sub>となるように長半径 b<sub>s</sub>を設定する.

背景領域は H<sub>1</sub>と H<sub>2</sub>の間に、大すべり域を含まずに面積が S<sub>B</sub>となるように設定する.

#### 3.1.5 大すべり域および超大すべり域の配置

図-3.1.1の右図に示すように、津波断層内で深さが $H_1$ となる距離をLとし、以下の式から考慮すべきシナリオ数 $N_P$ を求める.

$$\sum_{i=1}^{N_p+1} a_{L_0} \le L \tag{3.1.12}$$

そして, *j* 番目のシナリオにおける形成点の位置は, 津波断層の端から以下の式で求められる距離に設定する.

$$a_e + \sum_{i=1}^{j} a_{I_0} \tag{3.1.13}$$

ここで, a<sub>e</sub>は次式から求められる.

$$2a_e = L - \sum_{i=1}^{N_p+1} a_{L_0} \tag{3.1.14}$$

なお,図-3.1.1の右図では,図をわかりやすくするため,大すべり域のみが示されているが,超大すべり域についても,形成点を基準にして同様の方法で設定することができる.

#### 3.1.6 破壞開始点

図-3.1.1 の右図に示すように,破壊開始点は津波断層の背景領域内の両端付近と中央付近の3種類を考慮する.よって,破壊開始点に関するシナリオ数は

$$N_r = 3$$
 (3.1.15)

となるため、本モデルにより合計 N<sub>P</sub>×N<sub>r</sub>種類の津波シナリオを設定することができる.

#### 3.1.7 南海トラフにおける多数津波シナリオの設定

門廻・高橋 (2014) は多数津波シナリオの適用例として,南海トラフにおける巨大地震 津波の場合を示している.

適用においては,内閣府 (2012) より提供されている小断層群を用いており,各小断層 に設定されている断層パラメータは断層端点の位置(緯度,経度),断層上端深さ,走向, 傾斜角,すべり角,断層長,断層幅,すべり量,破壊開始点から小断層までの距離,破壊 伝播速度から計算される破壊開始時間の11 種類となる.

まず、大すべり域、超大すべり域および背景領域の面積を求めるため、内閣府 (2012) に したがい、 $\alpha_L = 0.2$ 、 $\alpha_S = 0.05$ 、 $H_1 = 10$  km、 $H_2 = 40$  km を採用した.また、提供された小断 層群から S' = 108,607 km<sup>2</sup> となるため、式(3.1.4)、式(3.1.5)および式(3.1.6)より、 $S_L = 22,864$ km<sup>2</sup>、 $S_S = 5,716$  km<sup>2</sup>、 $S_B = 85,743$  km<sup>2</sup>が得られている.また、式(3.1.3)より、 $S_T = 114,324$  km<sup>2</sup> が得られている.

次に、大すべり域、超大すべり域および背景領域のすべり量を求めている. 内閣府 (2012) にしたがい、*Mw*を 9.1、 $\mu$ = 4.0×10<sup>10</sup>、 $\beta_L$ = 2、 $\beta_S$ = 4 とすると、式(3.1.10)および式(3.1.11)よ り **D**= 12.30 m、式(3.1.7)、式(3.1.8)および式(3.1.9)より *D*<sub>L</sub> = 24.60 m、*D*<sub>S</sub>= 49.20 m、*D*<sub>B</sub> = 6.56 m が得られている.

大すべり域,超大すべり域および背景領域の形状は,提供された小断層群から $a_L$ =120.65 km,  $a_S$ =60.32 km となる.大すべり域および超大すべり域の配置は,提供された小断層群からL=770 km となるため,式(3.1.12)より $N_P$ =5,式(3.1.14)より $a_e$ =25 km が得られている.図-3.1.2 に形成点を示すが,濃いグレーの領域が $H_1$ より深部,薄いグレーの領域が $H_1$ より浅部を表している.

破壊開始点を津波断層の背景領域内の両端付近と中央付近に設定するにあたり,内閣府 (2012)を参照し,北東端付近はケース1,中央付近はケース3,南西端付近はケース5の 破壊開始点を採用している.図-3.1.2には設定した3種類の破壊開始点が示されている.

以上の条件で設定した結果, Mw9.1を想定した南海トラフにおける多数津波シナリオとして 15 ケースが設定されている.一例として,高知県沖に形成点,紀伊水道の入り口に破壊開始点を設定したケースのすべり量分布を図-3.1.3 に示されている.



 図-3.1.2 南海トラフにおける多数津波シナリオの設定条件(門廻・高橋,2014)(深部と浅部の 境界(深さ10km),大すべり域,超大すべり域の形成点(●)および破壊開始点(★) が示されている。)



図-3.1.3 Mw9.1を想定した南海トラフにおける多数津波シナリオの一例(すべり量分布)(門 廻・高橋, 2014)

## 参考文献

- 内閣府中央防災会議(2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 平成 24 年 8 月 29 日, 2012.
- 門廻充侍,高橋智幸(2014):南海トラフにおける多数津波シナリオの設定方法とその応用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_351-I\_355.
- Hanks, T. and H. Kanamori (1979): A moment magnitude scale, Journal of Geophysical Research, v.84, no.B5, pp.2348-2350.

#### 3.2 ロジックツリーモデルを用いた確率津波水位の推定

(福谷)

#### 3.2.1 推定手法の背景と概要

Cornell (1968)は、地震による強震動を評価する際に考慮すべき不確実性の種類を、認識 論的不確実性と偶然的不確実性とに分類した。以来、米国や日本国の原子力分野における 確率論的強震動および津波評価の過程では、評価の不確実性を認識論的不確実性と偶然的 不確実性に分類して評価することが基本となっている。米国における原子力施設の確率論 的地震動評価において採用されている United States Nuclear Regulatory Commission (2002)で は、認識論的不確実性は科学的知識の欠如に起因するもので、データ量が増えれば将来的 に減少させ得る不確実性であり、偶然的不確実性は物理現象のランダム性に起因するもの で、データ量には左右されず将来的にも減少不可能な不確実性である、と定義している. 国内における原子力発電所を対象とした確率論的津波ハザード評価に関する技術は、土木 学会原子力土木委員会津波評価部会 (2002) (2015 年現在, 土木学会原子力土木委員会津波 評価小委員会)の「原子力発電所の津波評価技術」に端を発しており、ここでは、パラメ ータスタディという形で確率論的に津波ハザードを扱っている. その後, 確率論的な津波 評価手法に関する更なる調査研究が為され、土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2011) は、「確率論的津波ハザード解析の方法」を公表した. 「確率論的津波ハザード解 析の方法」では、基本的な津波ハザードの確率論的評価手法として Annaka et al. (2007)の評 価手法を採用している. Annaka et al. (2007)は、津波ハザード評価に関わる不確実性を認識 論的不確実性と偶然的不確実性とに分類し、図-3.2.1 に示す通り、認識論的不確実性をロ ジックツリーにより評価し、偶然的不確実性を津波波高の確率分布により評価するという 手法を用いた. さらに, 2011年の東日本大震災後, 土木学会原子力土木委員会津波評価小 委員会 (2016) では、ロジックツリーの分岐として、スケーリング則の適用方法やアスペ リティ分布の設定手法に関わる不確かさを導入する等の手法改良が行われた.本節では、 この土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会 (2016) によるロジックツリー手法を踏 襲し,静岡県沿岸を対象とした津波ハザードを確率論的に評価する.



(b) 偶然的不確実性の確率分布による評価

図-3.2.1 認識論的不確実性のロジックツリーによる評価と偶然的不確実性の確率分布による評価.
 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)より抜粋,一部,改変.

#### 3.2.2 ロジックツリーの構築 -静岡県沿岸への適用-

本検討では,静岡県沿岸での確率津波波高を評価するため,静岡県が検討対象とした地 震断層を基に,ロジックツリーモデルを構築する.静岡県が地震・津波対策の検討対象と している地震・津波のリストを表-3.2.1 に示す.

これら地震断層のうち、本検討では駿河トラフ・南海トラフ沿いで発生する地震・津波 を対象とし、南海トラフ巨大地震(内閣府,2012),5地震総合モデル(静岡県,2015),東 海・東南海・南海地震,東海・東南海地震,東海地震(中央防災会議,2003)の情報を、ロ ジックツリーに取り込む(図-3.2.2).宝永型地震,安政東海型地震については、それぞれ、 東海・東南海・南海地震、東海・東南海地震に相当すると考え、ロジックツリーの対象か ら外している.以下、ロジックツリーの各分岐の概要を記載する.

- 発生領域・発生パターンについては、前述の通り、南海トラフ巨大地震、5 地震総合モデル、東海・東南海・南海地震、東海・東南海地震、東海地震を考慮する.
- 平均発生間隔については,88.2 年と116.9 年の分岐を考慮する.図-3.2.3 に南海トラフ

領域で発生した過去の地震を示す.これらを基に地震の発生間隔の確率分布を BPT (Brownian Passage Time) 分布と呼ばれる時間予測モデルに従うと仮定すると,前回から次回までの標準的な地震の発生間隔は,88.2 年となる(地震調査研究推進本部,2013). 一方,時間予測モデルではなく,図-3.2.3 で示した地震の発生間隔の単純平均を計算すると,116.9 年となり,これをもう一つの分岐として設定する.

- マグニチュード範囲については、各地震断層の面積とすべり量から計算されるモーメントマグニチュードを基準として、基準モーメントマグニチュード±0.1の分岐を考慮する.これは、各地震断層の面積は変化させず、小断層のすべり量を一律に変化させることで実現する.
- アスペリティの位置については、地震の各発生領域によって、取り扱いが違う。
  - 南海トラフ巨大地震では、アスペリティを固定するパターンとして、内閣府 (2012)
     公表の11パターンのうち、静岡県の被害想定で使用されたケース①を設定する.
     アスペリティを固定しないパターンとして、ケース①を除く10パターンを設定する.
     (図-3.2.4)
  - 5 地震総合モデルでは、アスペリティを固定するパターンは、静岡県 (2015) 公表の断層モデルとする.アスペリティを固定しないパターンは、断層の規模が Mw8.7以上と比較的大きいため、3段階のすべり量を設定する.断層全体の Mw を変えず、深さ 10km 以浅に超大すべり域,深さ 10~20km に大すべり域を、断層の西側、中央、東側に配置する 3パターンを設定する.3段階すべりのすべり量と面積は、杉野ら (2014)の微視的波源特性に係る波源領域内の空間的すべり分布の設定手法を踏襲する.(図-3.2.5)
  - 東海・東南海・南海地震モデルでは、アスペリティを固定するパターンは、中央防災会議 (2003) 公表の断層モデルとする.アスペリティを固定しないパターンは、2段階のすべり量を設定する.同様に、断層全体の Mw を変えず、深さ15km 以浅に大すべり域を、断層の西側、東側に配置する2パターンを設定する.また、2段階すべりの設定は、杉野ら (2014) の手法を踏襲する. (図-3.2.5)
  - 東海・東南海モデルでは、アスペリティを固定するパターンは、中央防災会議
     (2003) 公表の断層モデルとする.アスペリティを固定しないパターンは、同様に2
     段階のすべり量を設定する.断層全体の Mw を変えず、断層の西側、東側に大すべり域を配置する2パターンを設定する.また、2段階すべりの設定は、杉野ら (2014)の手法を踏襲する. (図-3.2.5)
  - 東海地震のみは、断層領域が小さく、モーメントマグニチュードも小さいため、ア スペリティは配置せず、均一すべりとする.これは、中央防災会議(2003)公表の断 層モデルをそのまま利用する.
- 津波波高のばらつき(対数標準偏差),対数正規分布の裾の打ち切りの分岐については、土木学会原子力土木委員会(2016)で示されている数値を踏襲する.

夜-3.2.1   地長・佳仮刈取り使計刈家とり勾地長・佳仮(盱凹県,2	表-3.2.1	地震・	津波対策	の検討対象	とす	る地震	・津波	(静岡県、	201
--------------------------------------	---------	-----	------	-------	----	-----	-----	-------	-----

区八	駿河トラフ・南海トラフ沿いで	相模トラフ沿いで		
区分	発生する地震・津波	発生する地震・津波		
	東海地震			
	東海・東南海地震			
レベル1の	東海・東南海・南海地震	大正型関東地震		
地震・津波	<u>宝永型地震</u>			
	安政東海型地震			
	5地震総合モデル			
レベル2の	南海トラフロナ地震	元禄型関東地震		
地震・津波	用曲下ノノ巨八地震	相模トラフ沿いの最大クラスの地震		



※ロジックツリー分岐に添えられた数字は、分岐の重みを示す.図-3.2.2 構築したロジックツリー


図-3.2.3 南海トラフ領域で発生した過去の地震(地震調査研究推進本部, 2013)



図-3.2.4 南海トラフ巨大地震のアスペリティの設定パターン (内閣府, 2012)



**図-3.2.5** 5 地震総合モデル,東海・東南海・南海,東海・東南海の各地震モデルのアスペリティの設定

最後に,各分岐の重みについて記載する.発生領域・発生パターンの分岐の重み以外の 基本的な考え方は,土木学会原子力土木委員会 (2016)の設定手法に基づいている.

- 発生領域・発生パターンの分岐の重みについては、採用した重みを表-3.2.2 に示す.ま ず、南海トラフ巨大地震の重みとして、1/20 を採用した.これは、地震調査研究推進 本部 (2016) が公表する南海トラフ領域で発生し得る 15 の地震発生パターンのうち、 *Mw*9.1 の南海トラフ巨大地震相当の発生パターンに付与された重みである.次に、東 海地震の分岐の重みとして、19/20×4/9 を採用した.この4/9 は、浜岡原子力発電所4 号炉の確率論的津波リスク評価(中部電力、2014)で用いられている、東海域が破壊す る場合、および、東海域・駿河湾域が破壊する場合を考慮した重みである.5 地震総合 モデル、東海・東南海・南海地震、東海・東南海地震の各地震の重みに関しては、客 観的なデータを用いて決定することが難しく、等分の重みとする.
- 平均発生間隔の重みについては、時間予測モデルと単純平均モデルで等分の重みとする.
- マグニチュード範囲については、基準モーメントマグニチュード±0.1の分岐を等分の 重みとする.
- アスペリティの位置については、アスペリティを固定するパターンは静岡県が被害想 定で採用しているモデルであり、0.7の重みとする.独自に設定したアスペリティを固 定しないパターンは、0.3の重みとする.この重み付けは、土木学会原子力土木委員会 (2016)で示されている数値を踏襲している.
- 津波波高のばらつき(対数標準偏差),対数正規分布の裾の打ち切りの分岐の重みについては、土木学会原子力土木委員会(2016)で示されている数値を踏襲する.

地震名	分岐の重み	設定根拠
南海トラフ巨大地震	1	地震調査研究推進本部(2016)が公表する南海ト
	$\overline{20}$	ラフ巨大地震の重み
5 地震総合モデル	$\frac{19}{20} \times \frac{5}{9} \times \frac{1}{3}$	
東海·東南海·南海地震	$\frac{19}{5} \times \frac{5}{1} \times \frac{1}{1}$	南海トラフ巨大地震,東海地震の重みを決定し
	20 9 3	た後,残る重みを等しく割り当て
東海·東南海地震	$\frac{19}{20} \times \frac{5}{9} \times \frac{1}{3}$	
東海地震	$\frac{19}{20} \times \frac{4}{9}$	4/9 は中部電力(2014)の浜岡原発津波 PRA で用
		いられている東海域・駿河湾域が破壊する場
		合の重み

表-3.2.2 ロジックツリーで設定する各地震の分岐の重み

## 3.3.3 津波数値計算

前節で作成した地震断層モデル(断層パラメータ)を用い,海底地形の変動成分をOkada (1985),および,Tanioka and Satake (1996)による手法で計算し,それを地震時の海面変動 (津波初期条件)と考え,非線形長波方程式により津波数値計算を実施した.得られた津 波の初期水位分布と,静岡県沿岸における津波の最大波高分布を図-3.2.6~図-3.2.10 に示 す.各地震でアスペリティを複数の場所に設定して計算しているが,下図では,1パター ンのみ示す.



図-3.2.6 南海トラフ巨大地震モデル case1 (Mw9.1) (左:初期水位分布,右:最大波高分布)



図-3.2.7 5 地震総合モデル(アスペリティ位置:東側) (左:初期水位分布,右:最大波高分布)



図-3.2.8 東海・東南海・南海地震モデル(アスペリティ位置:東側)(左:初期水位分布,右:最大波高分布)



図-3.2.9 東海・東南海地震モデル(アスペリティ位置:東側)(左:初期水位分布,右:最大波高分布)



図-3.2.10 東海地震モデル(左:初期水位分布,右:最大波高分布)

#### 3.3.4 確率津波波高の推定結果および考察

以上の津波数値計算結果からロジックツリーの設定に基づいて、静岡県沿岸で150年お よび 1000 年確率の津波波高を, 5 パーセンタイル値, 平均値, 95 パーセンタイル値で推 定した結果を図-3.2.11 に示す. この図から,基本的には,平均的な津波波高が大きい程, パーセンタイル毎の確率波高の変化の度合いが大きくなることが分かる.周囲と比較して、 吉佐美,三坂,土肥,西浦などの海岸で確率波高が高くなっている.全般的に見ると、伊 豆半島の先端から西側にかけての地域海岸において津波水位が大きくなっている.このこ とは,前節の確率すべり分布モデルを用いた結果とも整合している.一方,今回出力した 結果の中では、焼津(番号24)において、全てのパーセンタイル値で確率波高が一番低い 結果となっている、焼津を対象として、地震毎にロジックツリーの一分岐に相当するハザ ードカーブを全て明示した結果を図-3.2.12に、それらを統計処理し、パーセンタイル毎の ハザードカーブを出力した結果を図-3.2.13 に示す.また, 150 年および 1000 年に相当する パーセンタイル毎の津波波高を表-3.2.3 に示す. 50 パーセンタイル値で見れば, 150 年確 率波高は 2.63m, 1000 年確率波高は 3.85m であり, その差は, 1.22m 程度である. しかし, 95 パーセンタイル値でみると、その差は、4.54mとなる. ロジックツリー手法に基づく評 価の場合、どのパーセンタイル値のハザードカーブを用いるかによって、確率波高が大き く変化する点に留意し、評価結果を利用する必要があるといえる.

### 表-3.2.3 焼津における確率津波波高の推定結果

再現期間	5パーセン	50 パーセン	95 パーセン	亚坎萨	
	タイル値	タイル値	タイル値	平均恒	
150 年	1.10 m	2.63 m	5.05 m	1.74 m	
1000 年	1.88 m	3.85 m	9.59 m	4.29 m	
波高差	0.78 m	1.22 m	4.54 m	2.55 m	



図-3.2.11 静岡県沿岸の代表地点における確率波高推定結果



図-3.2.12 焼津での津波ハザードカーブ ((a)-(e):各地震, (f)5つの地震の計算結果の合計)



図-3.2.13 焼津での各地震の津波ハザードカーブを統計処理した結果

## 参考文献

静岡県 (2015): 駿河トラフ・南海トラフ沿いで発生するレベル 1 地震の津波の想定, 45p, https://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/documents/201703shuusei honhen.pdf.

地震調査研究推進本部 (2013): 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版) について, 14p, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may nankai/nankai2 shubun.pdf.

地震調査研究推進本部 (2016): J-SHIS 地震ハザードステーション, http://www.j-shis.bosai.go. jp/.

杉野英治,岩渕洋子,橋本紀彦,松末和之,蛯澤勝三,亀田弘行,今村文彦 (2014): プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案,日本地震工学会論文集,第14巻,第5号,pp.1–18.

中央防災会議 (2003): 東南海・南海地震等に関する専門調査会, http://www.bousai.go.jp/ kaigirep/chuobou/senmon/tounankai\_nankaijishin/index\_nankai.html.

中部電力 (2014): 浜岡原子力発電所 4 号炉確率論的リスク評価 (PRA) について (外部事 象津波 PRA 編, 44p, https://www.nsr.go.jp/data/000035993.pdf.

土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2002): 原子力発電所の津波評価技術.

土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2011): 確率論的津波ハザード解析の方法.

土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会 (2016): 原子力発電所の津波評価技術 2016.

- 内閣府 (2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/ model/index.html.
- Annaka, T., K. Satake, T. Sakakiyama, K. Yanagisawa, and N. Shuto (2007): Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts, Pure and

Applied Geophysics, 164(2)-(3), 577–592.

- Cornell, C. A. (1968): Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to share and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1135–1154.
- Tanioka, Y. and K. Satake (1996): Tsunamigeneration by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., 23, 861–864.
- United States Nuclear Regulatory Commission (2002): Guidance for Performing Probabilistic Seismic Hazard Aalysis for a Nuclear Plant Site: Example Application to the Southeastern United Steates, NUREG/CR-6607, 138p.

## 3.3 ランダムフェーズモデルを用いた確率津波水位の推定

(安田)

津波災害評価手法には2つのアプローチがある.1つ目は、津波の最大シナリオに基づ く決定論的アプローチである.2つ目は、確率論的津波ハザード解析によるアプローチで ある.現在、南海トラフ地震による津波災害が想定される太平洋沿岸の自治体では、一定 の頻度(数十年から百数十年)で発生が想定されるL1津波群を対象に、それらの最大値の 包絡を採用する決定論的アプローチによって設計津波の水位が設定されている.設計津波 の水位の設定にあたっては、朔望平均満潮位や堤防によるせり上がりが考慮されている. 静岡県第四次地震被害想定(2015)においては、過去の5つの地震津波を基にL1津波水位 を地域海岸ごとに定めている.しかし、このL1津波の選定には、限られた過去の津波履歴 を元にしている断層すべりの多様性や、L1津波群の中の最大のものがL1津波として採用 されることの再現期間の点で議論の余地が残されており、確率論的津波ハザード解析が必 要とされている.そこで、減災アセスメント小委員会では、確率論的津波ハザード解析を 用いて津波災害評価を行う、新たな海岸防災・減災対策決定プロセスを提案した.

一方,安田ら (2015) は,Goda et al. (2014) による確率津波モデルを用いて,Mw9.0を想定した南海トラフ巨大地震津波を確率的に評価した.しかし,堤防高の設定基準を示すためには,地震規模(モーメントマグニチュード Mw) に範囲を設け,津波を確率的に評価する必要がある.

そこで本研究では、地震のスケーリング則を求め、確率津波モデルに必要なパラメータ を*Mw*に応じて推定できるようにする.そして、南海・東南海・東海地震を対象に、*Mw*に 応じて確率的にすべり分布を生成する(確率すべり分布).生成した確率すべり分布から 求めた初期水位(確率津波波源)を用いて津波伝播計算を行い、津波水位を確率的に評価 すると同時に堤防高の設定基準を示すことを目的とする.すべり分布の生成から津波伝播 計算までの一連の過程をランダムフェーズモデルと定義する.静岡県沿岸部を検討対象と する.ただし、本研究では潮位の確率やせり上がりについては検討しておらず、津波水位 についてのみ評価の対象とする.

#### 3.3.1 想定地震モデルと初期水位の算定

現在,静岡県で想定対象としている L1 津波群は,宝永地震津波(1707年)・安政東海 地震津波(1854年)・安政南海地震津波(1854年)・昭和東南海地震津波(1944年)・昭 和南海地震津波(1946年)の5つである.第4次地震被害想定においては,1707年宝永地 震の再現を目標とした「宝永型地震」,1854年安政東海地震・1854年安政東南海地震の再 現を目標とした「安政東海型地震」,上記5例の津波を総合的に検討した「5地震総合モ デル」の3つの津波断層モデルについて津波浸水等の想定が実施されている.一方,L2津 波想定に関しては,中央防災会議(2012)による南海トラフの巨大地震モデルの11ケース のすべり分布のうち,ケース⑥を対象モデルとしている.図-3.3.1にL1津波の「5地震総 合モデル」,L2津波の南海トラフの巨大地震モデルのすべり分布を示す. 津波計算は、計算条件として津波の初期水位を与え、時間経過に伴い数値的に解いてい く. その津波初期水位は、一般的に地殻変動による海底の鉛直変位として与えられる. 津 波の初期水位の算定には Okada (1985)の式を用いる. ただし、津波発生に関して地殻変動 による海底の水平変位を無視できる条件下で成り立つ. Tanioka and Satake (1996)によっ て、地殻変動による海底の水平変動が津波発生に関して影響を与えることが示されている. 初期水位への影響量 uh は以下の式で表される.

$$u_{h} = u_{x} \frac{\partial h}{\partial x} + u_{y} \frac{\partial h}{\partial y}$$
(3.3.1)

ここで, h は水深, ux は海底の x 方向への水平変位, uy は海底の y 方向への水平変位である. 南海トラフ地震は,地殻変動による水平変動が大きいと予想されるため,地殻変動による海底の鉛直変位に加えて,地殻の水平変動による影響を考慮して初期水位を与える.

#### 3.3.2 確率すべり分布の生成

観測された地震波形や津波波形の解析を行うことで推定された断層面のすべり分布を逆 解析すべり分布という.そのため、南海トラフ巨大地震を想定して中央防災会議が公表し ている決定論的なすべり分布とは異なり、空間的相関性を有したすべり分布である.確率 すべり分布を生成するために、逆解析されたすべり分布に対する空間的相関性を利用する. 本研究では、波数スペクトル解析を行うことでその空間的相関性を考慮する.

スペクトル解析は、逆解析されたすべり分布毎に行う.逆解析されたすべり分布に対し て二次元フーリエ変換を行い、走行傾斜方向の波数パワースペクトル分布を推定する.次 に、中心から放射状にパワースペクトルの平均値をとり(周方向平均)それぞれに対して、 横軸を波数、縦軸をパワースペクトルとしてプロットし、スペクトル密度の勾配の推定を 線形回帰分析により行う.以下に、線形回帰分析時の傾きとスペクトル密度の減衰勾配を 表すハースト指数(空間相関性を表すパラメータの一つ)の関係式、周方向平均の理論式 を示す.



(a) 5地震総合モデル(b) 南海トラフの巨大地震モデル(ケース⑥)図-3.3.1 想定地震のすべり分布

$$P_d(k_r) \propto \frac{a^2}{(1+a^2k_r^2)^{H_1+1}}$$
 (3.3.2)

$$H_2 = 3 - \frac{8 - s}{2} \tag{3.3.3}$$

ここで、式(3.3.2)において、P<sub>d</sub>はパワースペクトル、k<sub>r</sub>は波数、a は相関長、H<sub>1</sub>はハースト 指数、式(3.3.3)において、H<sub>2</sub> はハースト指数、s は線形回帰分析によるスペクトル密度の 傾きを表している.周方向平均の理論式への適用に関しては、H<sub>1</sub>とaの値を変化させなが ら曲線に最も合致するような H<sub>1</sub>とaの値の組み合わせを探索して決定する.また、周方向 平均の理論式に関して、様々な理論式のモデルが存在するが、描いた曲線に最も合致する としてフォンカルマンモデルの周方向平均の理論式を採用した.式(3.3.2)、(3.3.3)から求め た H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>の幾何平均値をハースト指数 H として定義する.これは、ハースト指数が走向、 傾斜に共通と仮定しているからである.次に、誤差平均は、式(3.3.2)から求めた理論値とプ ロットした値との差の平均値である.差の平均値が最小となる時の a の値を求め、走向方 向を Ax、傾斜方向を Az とする.

一方で,解析を容易にするため,逆解析されたすべり分布を変数変換し,最も正規分布 に近づける.任意の分布を持つ変数を正規分布に近づける手法として Box-Cox 変換があ る.Box-Cox 変換の式を以下に示す.

$$y = \frac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} \tag{3.3.4}$$

ここで, x は Box-Cox 変換前のすべり量, y は Box-Cox 変換後のすべり量を表す. 変換前 と変換後のすべり分布を比較し,最も相関係数が1に近づくときのλを, Box-Cox 変換の パラメータとして定める.

波数スペクトル解析手法を用いることで,空間相関性を表す3つのパラメータ,すなわち H, Ax, Az を求めることができる. それらのパラメータを用いて,フォンカルマンモデルのパワースペクトルの理論値(絶対値)を算出し,位相をランダムに変化させ,複素領域でのフーリエ変換の値を算出する. これをすべての波数領域に適切に拡張し,逆フーリエ変換から空間領域のすべり量を得る. その後,逆 Box-Cox 変換を行い,非正規化する. すべり量の平均値と標準偏差を元のインバージョンすべり分布の統計値に合わせる操作や,アスペリティ領域を設定する操作が可能になる.

#### 3.3.3 スケーリング則を考慮した確率すべり分布

震源モデルデータベース (SRCMOD) の *Mw* 7.0 以上の逆解析されたすべてのすべり分 布に対してスペクトル解析を行い, ハースト指数・走行方向の相関長・傾斜方向の相関長 を求めた.そして, *Mw* と各パラメータの関係性について分析を行った.図-3.3.2 に示すように, ハースト指数は *Mw* に関係なく独立の値をとり, そのほとんどが 0.99 であった.そ

のため、ハースト指数に関しては、Mw依存は考慮せずに、以下の式で定める.

$$HN = \min(0.75 + 0.23 \times rand, 0.99)$$
(3.3.5)

ただし、下限値0.75は経験的に定めた値である.

一方,相関長に関しては,*Mw*と線形の関係がみられた.図-3.3.3に*Mw*に対する走行方向の相関長*Ax*および傾斜方向の相関長*Az*の関係を示す.横軸が*Mw*,縦軸が相関長,赤プロットが海溝型地震,緑プロットが内陸型地震をそれぞれ表している.赤線が海溝型地震の赤プロットに対して線形回帰分析を行ったものである.青線はMai and Beroza (2002)による既存のスケーリングの式である.本研究において対象とする南海・東南海地震は海溝型地震であることから,赤線のスケーリング式を用いる.以下に,相関長のスケーリングズを示す.



図-3.3.2 ハースト指数とMwの関係



図-3.3.3 相関長 (Ax,Az) とMwの関係

$$\log_{10} Ax = 0.45 \times Mw - 1.98 + rand$$

$$\log_{10} Az = 0.36 \times Mw - 1.34 + rand$$
(3.3.6)

ここで, *Ax* (km) が走行方向の相関長, *Az* (km) は傾斜方向の相関長, *Mw* (Nm) はモーメ ントマグニチュード, *rand* はばらつきを表している.

すべり量を支配するパラメータとしては、平均すべり量と最大すべり量が重要となる. これらに関しては、本研究では既存のスケーリング式を用いた. Murotani et al. (2013) によ る平均すべり量のスケーリング式は、

$$D_a = 1.66 \times 10^{-7} \times Mo^{1/3} \times 10^{0.2148 \times rand}$$
(3.3.7)

で表され、 $D_a(\mathbf{m})$  は平均すべり量、 $Mo(\mathbf{Nm})$  は地震モーメント、rand はばらつきの考慮を 表している.

一方, Thingbaijam and Mai (2016) による最大すべり量のスケーリングの式は,

$$D_m = 10^{0.948 \times \log_{10} D_a} + 0.624 + 0.1 \times rand$$
(3.3.8)

で表され,  $D_m$  (m) は最大すべり量,  $D_a$  (m) は平均すべり量, rand はばらつきの考慮を表している.

一般に、ある地域、ある期間における地震活動のマグニチュードと発生頻度の関係を示 す法則として、グーテンベルグ・リヒター則 (1944) が主に用いられる. そこで、アメリカ 地質調査所 (USGS) のデータベースを基に、日本近海周辺におけるグーテンベルグ・リヒ ターの式を求めた.期間はデータの信頼性を考慮して 1976~2016 年の約 40 年間の海溝型 地震に限定して分析を行った.図-3.3.4 に示すように、以下の式が求められた.

$$\log_{10} y = 6.31 - 1.03Mw \tag{3.2.9}$$

ここで、*Mw* はモーメントマグニチュード、*y*は1年間の地震発生頻度を表している.ただし、図示されているとおり、*Mw* が8以上の地震はサンプル数が少なく、対象データ期間の約40年の間に1度しか発生していないため、プロットは約0.025 で横ばいになっている.仮に大規模な地震の頻度が横ばいに近い傾向にあるならば、*Mw* の大きな地震の生起頻度は低く、再現期間は短くなる.*Mw* の大きな地震の頻度が G-R 則に従っているかどうかを確かめることはできないが、本研究では、G-R 則に従うと仮定して以降の解析を行う.

各スケーリングの式を用いて各パラメータを定めれば, Mw に応じた確率すべり分布を 多数生成することが可能になる.しかし,地震モーメントを一定に保つとき,平均すべり 量に応じて,確率すべり分布の面積が変化する.地震モーメントは以下の式で示される.

$$Mo = \mu \times D \times S \tag{3.2.10}$$



図-3.3.4 海溝型地震のグーテンベルグ・リヒター則

ここで、*Mo*(Nm)は地震モーメント, µ(N/m<sup>2</sup>)は地震の剛性率(場所依存のため一定値), *D*(m)は平均すべり量,*S*(m<sup>2</sup>)はすべり分布の面積をそれぞれ表す.つまり,式(3.3.7)から 地震モーメントに応じたすべり分布の面積が計算される.ただし,平均すべり量の値には, ばらつきを考慮しているため、地震モーメントに応じたすべり分布の面積も一定値ではな く、確率すべり分布を生成する毎に変化することになる.本研究では、*Mw*=7.8~9.0の範 囲で 0.2 刻み毎に 7 つの *Mw* それぞれに対して 300 の確率すべり分布を生成した.図-3.3.1 における南海トラフ巨大地震のケース⑥のすべり分布を基本形状とし、すべり分布の断層 幅 *W*(km)を固定して、断層長 *L*(km)のみを変化させた.本研究では、静岡県沿岸部を解 析対象としているため、静岡県が危険側となるように東側からすべり分布を設けた.また、 すべり分布のアスペリティ領域に関しては、*Mw* に関わらず、海溝軸沿いに位置するよう に定めた.図-3.3.5 に、*Mw*8.2~8.8 の 300 の確率すべり分布うちの一例をそれぞれ示す.

#### 3.3.4 確率津波シミュレーション

津波の伝播シミュレーションにはネスティング手法を用い,最詳細ドメインの格子間隔 は 270m である.また,計算時間は地震発生から 4 時間とし,潮位条件は平均潮位とした. *Mw*7.8, 8.0, 8.2, 8.4, 8.6, 8.8, 9.0 の 7 つの *Mw* それぞれに対する Okada (1985) の式を用 いて計算された 300 の初期水位を用いて,津波伝播計算を行った.各出力地点における各 ケースの最大津波水位を抽出し,各 *Mw* の最大津波水位の確率密度分布を求め,考察した. 式(3.3.9)から計算される地震発生確率を考慮した確率密度分布を図-3.3.6 に示す.図中の赤 線がグーテンベルグ・リヒター式を表している.これより,最大津波水位の分布は,*Mw* ご との頻度のピーク値の変化がみられ,*Mw* が大きくなるに従って最大津波水位の分布が広 がることがわかる.



図-3.3.5 確率すべり分布の1例



図-3.3.6 最大津波水位の確率密度分布



### 3.3.5 確率津波水位の推定

*Mw*7.8 のときの最大津波水位を正規化(津波水位方向で積分したときの面積を1にする こと)した後の確率密度分布を図-3.3.7 に示す.ついで,地震発生確率,すなわち,式(3.3.9) から計算される *Mw*7.8 の地震発生確率を,最大津波水位の確率密度分布に掛け,得られた 確率密度分布から超過確率分布を求める.この一連の過程を *Mw* それぞれに対して行い, 各 *Mw* における最大津波水位の確率密度分布および超過確率分布を求める.図-3.3.8 に *Mw* ごとの超過確率分布を示す.これを津波ハザードカーブとよび,横軸が津波水位,縦軸は 超過確率を表している.これを用いることで,リスクカーブや最終的には費用便益分析に つなげていくことができる.

次に, Mw7.8~9.0 の範囲の地震を考慮した時の最大津波水位の超過確率分布を出力し, 堤防高の確率ベースの設定に有用な確率津波水位を求める.まず,図-3.3.8 の確率密度分 布に対して Mw 方向に積分する.次に,積分後の確率分布(図-3.3.9)を確率密度分布に変 換する.ここでは, Mw7.8~9.0 までの範囲の地震を考慮しているため,この確率分布に対して,津波水位方向で積分したときの積分値が Mw 7.8 以上 9.0 以下の地震発生確率になるように調整する.調整後の確率密度分布から求めた超過確率分布(図-3.3.10)から,確率 津波水位を求める.

以上の手順をもとに、静岡県沿岸部全ての出力地点で同じ解析を行い、100年、150年お よび1000年確率津波水位を求めた.図-3.3.11に100年および1000年確率津波水位の空間 分布を示す.3つの期間の確率津波波の空間分布は、全般的に、御前崎・西浦・土肥・下田 の伊豆半島先端から西側にかけての地域海岸において津波水位が大きい.各*Mw*の300の 最大津波水位の平均値分布において、これらと同地域で津波水位が大きいため、すべり分 布のばらつきではなく地形の影響が大きいと推定できる.御前崎に関しては、海溝軸に最 も近い位置にあるため、確率すべり分布におけるアスペリティ領域の影響を受けやすいか らと考えられる.また、狭い空間範囲で大きな津波水位が出力されており、地域海岸区分 以内のさらに細かい区分での評価が必要であるといえる.地域内の大きな変動は、特に、 西浦や土肥に関しては、沿岸部が湾曲状になっており、地形の影響を大きく受けているた めと考えられる.一方、100年確率津波水位と150年確率津波水位の差、100年確率津波水



**図-3.3.11** 確率津波水位(上:100年確率,下:1000年確率)(単位:m)

大きい. 100 年確率津波水位と 150 年確率津波水位の差に関しては, 土肥で特に変化が大 きく, その差は約 1m である. 沿岸部全域では, 0~1m の差を示している. また, 100 年確 率津波水位と 1000 年確率津波水位の差に関しては, 西浦で特に変化が大きく, その差は約 6m である. 沿岸部全域では, 0~7m の差を示している.

このように、100年および150年確率津波水位の空間分布が示されたことで、L1津波水位 を対象にして設計される堤防高の設定に関して、科学的根拠に基づく指標が得られたとい える.同時に、L1津波水位想定の中でも、0~1mの津波水位の差があることも考慮に入れ なければならないといえる.さらに、100年確率津波水位と1000年確率津波水位の差が特に 大きい、西浦のような地域では、津波避難対策などのL2津波に対するソフト対策がより重 要であると考えられる.

#### 3.3.7 レベル1津波群間の比較

L1 津波群である「宝永型地震」「安政東海型地震」「5 地震総合モデル」および L2 津 波である「南海トラフ巨大地震」の各津波断層モデルを用いて計算された最大津波水位の 分布(静岡県第四次地震被害想定において公表済)において,各出力地点における最大津 波水位が何年確率津波に相当するのか(再現期間)を,確率津波水位を推定した際の超過 確率分布から求めた.図-3.3.12 にレベル1津波群の津波断層モデルごとの確率津波水位分 布を示す.カラーバーの単位は「年」である.宝永型地震津波に関しては,土肥から静岡 にかけて 100 年以内の値を示す地域が多く,静岡から志太榛原にかけて 100 年以上 200 年 以下の値を示す地域が多いことが読み取れる.御前崎より西,富戸大川より東の地域では 1000 年超の値を示していることがわかる.また,安政東海型地震と5 地震総合モデルに関 しては,宝永型地震と比べても,駿河湾全体的に 200 年超の大きな値を示している.この ように,地域によって大きくばらつきがあり,特定の津波断層モデルを L1 津波想定のモ デルと定義するのではなく,イベント数を増加させて,津波水位を確率的に評価すること が重要といえる.

以上のようなL1津波を基に,静岡県は海岸堤防設計のための津波水位を地域海岸ごとに 定めている.図-3.3.13に海岸堤防設計津波の確率津波水位分布を示す.下田より東の地域 海岸では,大正型関東地震津波を基に設計津波が定められているため,0年とした.これら 以外の駿河湾内の地域に関して考察する.駿河湾内の地域では,5地震総合モデルと同じく, 200年超の値を示している.また,現在の海岸地域区間内において異なる再現期間が示され ている.したがって,現在の海岸堤防設計津波水位は,津波の再現期間という観点からは 様々な値が採用されているといえる.



(c) 5 地震総合モデル図-3.3.12 L1 想定津波による水位の再現期間(単位:年)



図-3.3.13 防潮堤の設計に用いられている津波水位の再現期間(単位:年)

### 3.3.8 まとめ

本研究では、海岸堤防高の科学的根拠に基づく設定基準を示すことを目的として、ラン ダムフェーズモデルを用いて静岡県沿岸部における津波水位を確率的に評価した.すべり 分布の空間相関性を表すパラメータとすべり量を支配するパラメータに関して、地震の発 生頻度や規模とパラメータの関係を表すスケーリング則を求めた. 南海・東南海地震津波 を対象に, 求めた各スケーリング則を適用し, Mw7.8~9.0の範囲ですべり分布を確率的に 300パターンずつ生成した.最大津波水位の確率密度分布から100年・150年・1000年の各確 率津波水位を推定した.また,静岡県が公表している,L1津波群およびL2津波の想定断層 モデルから計算された最大津波水位の再現期間を求めた.ランダムフェーズモデルにより、 L1津波相当の水位を確率的に推定する方法を示すことができた.同時に、L1津波水位を想 定する中でも、0~1mの津波水位の差が出ていることも考慮に入れなければならないこと がわかった.また,100年確率津波水位と1000年確率津波水位の差が特に大きい地域では, 津波避難対策などのL2津波に対するソフト対策がより重要であると考えられる.再現期間 に関しては、L1津波群の中の最大シナリオを採用する方法は、津波の再現期間という観点 では様々な値を取る可能性があることがわかった.特定の津波断層モデルをL1津波想定の モデルと定義するのではなく、イベント数を増加させ、津波水位を確率的に評価すること が重要といえる.

参考文献

- 静岡県(2015): 駿河トラフ・南海トラフ沿いで発生するレベル1 地震の津波の想定, 45p, https://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/documents/201703shuusei honhen.pdf.
- 内閣府中央防災会議(2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 平成 24 年 8 月 29 日, 2012.
- 安田誠宏, 丸山拓真, Katsuichiro Goda, 森 信人, 間瀬 肇(2015): 確率津波モデルを用い た南海トラフ巨大地震津波の不確実性評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I\_295-I\_300.
- Goda, K., Mai, P.M., Yasuda, T., Mori, N. (2014): Sensitivity of Tsunami Wave Profile and Inundation Simulations to Earthquake Slip and Fault Geometry for the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, 66:105, doi: 10.1186/1880-5981-66-105.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1944): Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am., 34(4), 185–188.
- Mai, P.M., Beroza, G.C. (2002): A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, *J. of Geophysical Res.*, 107, B11, 2308, doi:10.1029/2001JB000588.
- Murotani, S., Satake, K., Fujii, Y. (2013): Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~9 subduction-zone earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5070-5074, doi: 10.1002/grl.50976.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to share and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135–1154, doi:10.1016/0148-9062(86)90674-1.
- Tanioka, Y., Satake, K. (1996): Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., 23, 861–864, doi: 10.1029/96GL00736.
- Thingbaijam K.K.S., Mai, P.M. (2016): Evidence for truncated exponential probability distribution of earthquake slip, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106(4), doi: 10.1785/0120150291.

# 4. 高潮の確率的推定手法についての検討

海岸堤防等の高さを計画する際,設計津波の水位と高潮・高波の設計水位を比較し,高 い方を設計水位として設定する.港湾・海岸構造物の設計外力のうち,波浪(高波)につ いては再現期間によって確率的に設計波を求めているが,高潮については既往最大潮位偏 差を用いることが多く,再現年数との関係は明らかにされていない.高潮についても,波 浪と同様に再現期間内の事象の発生確率を考慮することが必要とされている.過去の台風 データの統計解析結果に基づき,確率的に起こり得る台風を予測するモデル(確率台風モ デル)に関する研究が行われ,高潮の再現期間の推定が試みられている(例えば,橋本ら, 2001,2003;河合ら,2005,2007;國富・高山,2005;中條ら,2011,2012,2013).

本章では、台風の来襲に伴う高潮や高波による沿岸域ハザードの確率的評価の推定手法 の構築を試みた結果を紹介する.ここで構築する手法は、モンテカルロ法に基づき、まず 確率台風モデルを用いて現在および将来の台風をランダムに発生させる.次に、高潮およ び高波の計算を行い、それぞれの台風に対する沿岸域ハザードを推定し、それらの計算結 果から対象地点におけるハザードの再現確率を推定する.全球に適用可能な確率台風モデ ルとそれに基づく高潮水位推定手法の概要を示すとともに、履歴を考慮した確率台風モデ ルの改良とそれによる適用事例をそれぞれ示す.

## 4.1 全球確率台風モデルによる確率高潮水位の推定

(安田)

本節では中條ら (2013) の全球確率台風モデルを援用し,地域海岸ごとの高潮の規模と 生起頻度を確率論的に評価する一連の方法を提示する. 駿河湾を通る 5000 年分の仮想台 風データを作成・抽出し,非線形長波モデルを用いた高潮伝播と氾濫シミュレーションを 行い,高潮の極値統計解析を行う. さらに,現行の計画高潮偏差の再現期間を推定する.

#### 4.1.1 全球確率台風モデルから抽出した仮想台風データ

#### (1) 確率台風モデルによる仮想台風の作成・抽出

中條ら (2013) の全球確率台風モデルを用いて, 駿河湾を通る5000年分の台風の経路・ 属性情報を与えた.モデル化した台風の属性情報は進行方向,進行速度,中心気圧である. 最大旋衡風速半径は,安田ら (2010) が開発した,最大旋衡風速半径 (台風半径) を中心気 圧から確率的に求めるパラメタリゼーション法を用いた.得られた5000年分の仮想台風デ ータから,駿河湾に顕著な高潮を発生させる可能性があるものとして,対象範囲を通過す る台風を抽出した.対象範囲は,中心座標北緯 34.87°,東経 138.48°から半径 100 km (経 度緯度1°) の円とした.

#### (2) 全球確率台風モデルの地域スケールでの再現性

地域スケールでの全球確率台風モデルの精度検証を行うために,観測台風資料との比較 を行った.観測資料には,国立情報学研究所が公開している台風のデータベース<sup>8)</sup>を用い



図-4.1.2 対象地域内の最低中心気圧

た. 観測期間は 1951~2015年 (65年間) である.

a) 経路比較

図-4.1.1(a) は、中心座標(北緯 34.87°、東経 138.48°)から半径 100 km (経度緯度1°)の 円を通過した観測資料の台風の経路図である.図-4.1.1(b)は、確率台風モデル50年分の経 路データである.観測台風資料の台風個数は54個、確率台風モデルは45個であった。年平 均通過個数は観測資料で 0.8個/year、確率台風モデルで 0.9個/yearであった.確率台風モデ ルで、地域スケールに来襲する台風の数を良好に再現できたといえる.

経路に関しては, 観測資料は南西から北東へ通過する経路が多くみられるが, 他に南か ら北, 西から東, 南東から北西へ通過する経路もみられる. それに対して確率台風モデル は、南西から北東へ通過する経路が多く、他に南から北、西から東、南東から北西へ通過 する経路など多様な経路を再現できている.

#### b) 中心気圧の比較

図-4.1.2(a) は、観測台風資料の対象地域内(1°範囲内)の最低中心気圧を表したヒスト グラムである. 横軸は台風の中心気圧を 10 hPa 毎に区切った階級を、縦軸は各階級に属 する台風数を全台風数で除算した確率を表している.図-4.1.2(b) は、確率台風モデル 5000 年分の対象地域内の最低中心気圧のデータを 50 年毎に分割し、それらの平均値を赤ビン で、標準偏差を青バーで表したものである.観測資料では 940 hPa の台風が少しみられ、 950~990 hPa の台風が多くみられる.確率台風モデルでは、890~930 hPa の台風も少しみ られるが、多くの台風は 970~1000 hPa に分布し、観測資料と近い傾向にあった.

#### 4.1.2 高潮推算

### (1) 経験式による最大高潮偏差の算定

今回扱う台風は非常に多いため、すべての台風を非線形長波モデルで解析するには時間 がかかる.そのため、時間が掛からない簡易的な手法として、気象庁が1998年まで用いて いた、気圧と風の効果を考えた経験式 (回帰式)を使用し、各台風の最大高潮偏差を算出 した.

$$h = a(1010 - P) + bW^2 \cos\theta \tag{4.1.1}$$

ここで、h は最大偏差 (m)、P は現地の最低気圧 (hPa)、Wは最大風速 (m/s)である. $\theta$ は 最大風速の方向が主方向となす角であり、a, b は過去の資料から求められる各地点の係数 である.気象庁はa, bの値を、主な港について実測値に基づいて計算している.清水での 値はa = 1.35、b = 0.016、主方向は $67.5^\circ$ である.

経験式による高潮偏差の算定結果を,図-4.1.3にヒストグラムで表す. 横軸は最大高潮偏差 0.1 m 毎に区切った階級,縦軸は各階級に属する個数を全個数で除した確率である. 駿河湾において高潮偏差が 1 m を超える台風は少なく,5000年間に18回しか発生しないという結果になった.

#### (2) 高潮シミュレーションによる最大高潮偏差の算定

経験式で求めた最大高潮偏差の上位100個の台風について,高潮シミュレーションを行った.高潮シミュレーションには,金ら (2007) が開発した潮汐・高潮・波浪の相互作用を 考慮した双方向結合モデル SuWAT (Coupled-nested-parallelized Surge Wave and Tide) を用 いた.基礎式には、静水圧近似を基にした非線形長波近似式を使用している.非線形長波 近似式では、高潮や津波など流速分布が一様で鉛直方向加速度が無視できる場合、実用上 十分な精度で計算できる.高潮推算では、気圧場は経験的台風モデル (Myersモデル) を用 い、風速場は藤井・光田の式で与えた.SuWATはネスティングスキームを採用しており、 解像度が低く広範囲な領域の計算結果が、より詳細な解像度で範囲の狭い領域の開境界に



図-4.1.5 経験式と高潮シミュレーションによる最大高潮偏差算定値の比較

反映される.これを順次最小領域まで行う.本研究では4段階のネスティング領域を設定し, 最小の格子スケールを 270 m とした. 潮位条件は平均潮位で一定とし, 波浪による wave setup や海面抵抗係数の変化は計算に含めていない.また, 氾濫・遡上計算を行っておらず, 河川水の流入も考慮していない.

結果の一例を図-4.1.4に示す.これは100個の台風の中から一つ選び,その台風の存在期間で高潮偏差が最大値を示したときの水位を示している.

### (3) 経験式と高潮シミュレーションの比較

経験式と高潮シミュレーション SuWAT による算定結果を図-4.1.5 に示し,比較する.横軸は中心気圧,縦軸は最大高潮偏差である.赤点は経験式,青点は SuWAT の結果である. 経験式では気圧の低い台風に関して,最大高潮偏差が低く算定されている.気圧の大きい 台風に関しては,SuWAT の算定値と近い傾向にある.したがって,経験式で求めた最大高 潮偏差のうち,上位 100 個の台風について高潮シミュレーションを行った検討方法は,妥



当といえる.

#### 4.1.3 再現期間の推定

高潮の発生がポアソン分布に従うと考えると、再現確率 P は以下のように求められる.

$$v(k) = \frac{n_k}{T} \tag{4.1.3}$$

ここで, v(k) は高潮偏差 k (m) 以上の高潮の年平均発生確率を示し, n<sub>k</sub>は T 年間における 潮位偏差が k (m) 以上の高潮の発生回数, T は観測年数を表し,本研究では T=5000 であ る.各地域海岸の高潮ハザード曲線を作成し,再現期間 50 年,100 年,150 年,1000 年程 度の値を算出した.静岡県が区分している 42 の地域海岸のうち,図-4.1.6 の青点 12~41 を 検討対象地点とした.

結果の一例を図-4.1.7 に示す. この図は志太榛原 (駿河海岸)の高潮ハザード曲線と再現 期間を示している. 横軸は最大高潮偏差,縦軸は年超過確率である. 青点は最大高潮偏差 を 0.1 m 毎に区切った超過確率であり,それらの点に対して7次の多項式の曲線近似を行 い,高潮ハザード曲線を描いた. すべての地域海岸において,再現期間 1000 年程度の値は 1 m を超えていたが,地域海岸ごとにばらつきがあった. 南東を向いた海岸線をもつ地域 は,最大高潮偏差が大きくなる傾向にあった. 現在の駿河海岸の既設堤防高の計画偏差 0.98 m (=計画潮位 1.66 m-朔望平均満潮位 0.68 m)は,再現期間 270 年程度と推定され た. ここで得られた図および近似式を用いれば,駿河湾沿岸における高潮偏差の再現期間 が推定でき,反対に,設定した再現確率に対する高潮偏差を推定することができる.

### 4.1.4 駿河湾における台風と高潮の特性

#### (1) 中心気圧と最大高潮偏差の関係

非線形長波モデルを用いた高潮シミュレーションで算定した 100 個の最大高潮偏差と, それぞれの台風の対象地域での最低中心気圧の関係を調べた.その結果,図-4.1.8 のよう に両者には比例関係を見出せた.これは,駿河湾の水深が深いため,吹き寄せの影響が小



さく,気圧低下による吸い上げ効果が支配的であったためと考えられる.しかし,中心気 圧が 930 hPa より大きくなると,最大高潮偏差のばらつきは大きくなることがわかった.

## (2) 台風経路と最大高潮偏差の関係

中心気圧が 930 hPa より大きくなると最大高潮偏差にばらつきがみられたことから,中 心気圧が 930 hPa より大きな台風を対象に,台風経路と最大高潮偏差の関係を調べた.特 に,過去に甚大な被害を受けた志太榛原 (駿河海岸) において詳しく調べた.その結果,図 -4.1.13 のような南西から北東へ進む経路では,中心気圧に左右されず,最大高潮偏差が大 きくなることがわかった.この経路は,過去に駿河湾において甚大な被害を与えた,昭和 41 年の台風 26 号の台風経路と類似していた.この経路と類似する台風は多くみられ,駿 河海岸にとって高潮が大きくなりやすい経路であることがわかった.

### 4.1.5 まとめ

全球確率台風モデルを援用し, 駿河湾の地域海岸ごとの高潮の規模と生起頻度の関係を 明らかにした.作成した高潮ハザード曲線を用いることで,各地域海岸の計画高潮偏差の 再現期間を推定できるようになった.本研究で示した一連の手法は,他の地域にも適用可 能である.

今回は駿河湾に対象範囲を絞って台風を抽出した.そのため、遠州灘に顕著な高潮を発 生させる可能性がある台風については考慮できていない.また、浸水シミュレーションで 浸水分布の傾向はとらえられたが、後背地の土地利用計画や避難計画を検討する際には、 より詳細な解析が必要となる.海岸線をより細かく分割して水位データを与えることや、 堤防の有無など詳細な条件を考慮していくことが、今後求められる.

## 4.2 履歴を考慮した確率台風モデルとその適用事例

#### 4.2.1 履歴を考慮した確率台風モデルの構築

#### (1) 既往モデルの概要と課題

台風の経路と中心気圧の変化を統計的に推定する確率台風モデルは、その値を平均値と 自己回帰式に基づく平均値からの差の和として与える Auto Regressive (AR)モデルと、直前 時刻の値に基づく確率密度関数から推定する時系列相関型に大別される.前者は河合ら (2005) や James and Mason (2005) などが採用しているが、いずれの場合も過去の履歴を考 慮しやすい反面で変化量の平均値への依存度が高く強大台風の再現性に問題が生じる.後 者 (たとえば中條ら(2013))は、前時刻の属性値の値に応じた確率分布に基づき現時刻の諸 量を推定できるため、それぞれの時刻では過去の統計値との整合性が高い一方で、個々の 履歴の影響を再現しづらいという問題がある.たとえば中心気圧 P の時間発展モデルにつ いて、その変化量ΔP の確率分布を前時刻 P の関数として与える場合、特に低緯度帯にお いて発達段階と減衰段階の台風が混在する場合には、同じ中心気圧でも変化量が正および 負の値を取る (図-4.2.1).そのため、ΔP の確率分布は正および負に二つのピークを持つ 様な分布となり、そのまま適用すると符合の異なるΔP がランダムに繰り返される様な気 圧変動を再現してしまう可能性がある.以上の課題を鑑み、本研究では南太平洋を対象に 確率台風モデルの改良を試みた.

### (2) 確率台風モデルの改良

本研究では、南太平洋(南緯5度~35度,東経135度から西経155度)を対象に既往の 確率台風モデルの時間発展モデルに関して修正を行った.既往サイクロンとして IBTrACS (NOAA)より得られた1967年から2014年までに南太平洋で発生した全サイクロンを用い た.以下,改良を試みた経路モデルおよび中心気圧モデルの概要を示す.

### a) 初期条件の設定

初期条件の設定については、中條ら(2013) に倣いモデル化した.発生位置は対象領域を 一度四方のセルに分割し、各セルにおける発生回数に応じて発生地点をランダムに決定し た.また初期の移動速度と方向についても、互いの値や発生位置とは独立に、それぞれの 発生時のデータに基づきその確率分布を定めた.

#### b) 路モデル

経路モデルの属性値について,河合ら(2005) は東西・南北方向の移動速度成分 *Vx*, *Vy*を, 中條ら(2013) は速度と進行方向角 *V*, *θ* をそれぞれ用いてモデル化している.後者の場合, 各属性値が独立に計算され,かつ,時間発展型のモデルではこれらの値が連続的に変化す るため,たとえば 2016 年の TC Winston (図-4.2.2) に見られる様な,特に低緯度帯でサイ クロンが東西方向に急激に向きを変えるような経路を再現することは難しいと考えられる. そこで本モデルにおいては,属性値に東西・南北方向の移動速度成分 *Vx*, *Vy*を用いた.



図-4.2.1 中心気圧 P とその単位時間変化量ΔPの経時変化



図-4.2.2 TC Winston (2016)の経路

 $V_x$ については特に低緯度帯での不規則な変動が顕著であるため、時系列相関型モデルを 用いた.対象領域を5度四方の領域に分割し、それぞれの領域で収集した $V_x$ 、およびその 単位時間あたりの変化量 $\Delta V_x$ のデータに基づき、以下の手順でモデルを構築した. $V_x$ を5 km/h 毎の速度帯に区切って速度帯毎に $\Delta V_x$ の頻度分布を確認したところ(図-4.2.3)、尖度 が高く左右(正負)に非対称な分布が見られた.そのため、本研究では二つのラプラス分 布を組み合わせた次式で確率密度関数を表わすこととした.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \exp(-\frac{|x - \mu|}{\phi_1}) & (x \ge \mu) \\ \frac{\phi_2}{\phi_1 + \phi_2} \exp(-\frac{|x - \mu|}{\phi_2}) & (x \le \mu) \end{cases}$$
(4.2.1)

ここで、必要なパラメータとなる期待値 µおよび分散を決めるφ1およびφ2については、 それぞれのセルで収集したデータに基づき最尤法を用いて決定した.ただし、ある速度帯 におけるデータ数が 50 以下だった場合には、同じ緯度帯および速度帯に属するデータを



用いた.そして,各速度帯の代表値間の値における確率密度関数のパラメータは各々線形 補間して与えた.また  $V_x$ の絶対値が極端に大きく同緯度帯の全データ数が 50 を満たさな い場合には,直近の速度帯の各速度帯の代表値の $\phi_1$ および $\phi_2$ を与え, $\mu$ は同じセル内にお ける $\mu$ を $V_x$ の関数として与える次式を用いて算定した(図-4.2.4).

$$\mu (V_x) = (\sinh(aV_x + b) - (aV_x + b))^3 + cV_x^2 + dV_x + e$$
(4.2.2)

次に、南北方向の速度成分  $V_y$  については、 $V_x$  に見られた不規則性は比較的小さく、 $V_x$ と同様に時系列相関型モデルの適用を試みたところ、ランダム性から低緯度帯での滞在時 間が過剰に長くなり、後述する中心気圧モデルと組み合わせた際に低緯度帯で異常発達す るサイクロンが生成されてしまうケースがみられた.以上から本研究では  $V_y$  には河合ら (2005) に倣い AR モデルの適用を試みた.ここで、河合ら(2005) のモデルでは AR による 平均値からの偏差 Z は  $V_y$  の値によらず同じ値として与えているが、実際のデータの偏差 と  $V_y$  との間には正の相関があることが認められたため、本研究では偏差 Z を各セルの  $V_y$ の標準偏差 $\sigma_{V_y}$  によって基準化し次式で  $V_y$  を定めた.

$$V_{y} = \overline{V_{y}(x, y)} + \sigma_{Vy} \overline{V_{y}} Z$$
(4.2.3)

$$Z = \sum_{k=1}^{n} a_k Z_{i-k} + \gamma$$
 (4.2.4)

ここで、 $\gamma$ は自己回帰分析をおこなった際の残差の分布に従う乱数である.また全ての式 において変数上のバーは平均値を表す.図-4.2.5上段に各セルにおける $V_y$ の平均値を示す. 図より低緯度帯から高緯度帯に向けて $V_y$ の平均値は増大している.ここで式(4.2.4)では、 それぞれのサイクロンにおける $V_y$ とその地点における $V_y$ の平均値との差の時間履歴か ら自己回帰係数を決定するが、図に見られる様にセル間で平均値が急激に変化すると、そ



図-4.2.5 各セルにおける V,の平均値 (上段:元データ,中段:フィルター後)および標準偏差



図-4.2.6 式(4.2.3)における $\sigma_{V_y}$ と $V_y$ の平均値との関係(実線はモデルによる回帰直線)

れが連続に変化する個々のサイクロンの  $V_y$ との差の値にも影響し,残差 $\gamma$ を過大にする傾向が見られた.そのため本研究では  $V_y$ の平均値に  $5 \ge 0$  ガウスフィルターを適用し(図-4.2.5 中段),この値をモデルで用いた.また式(4.2.3)で用いる $\sigma_{Vy}$ は図-4.2.5 下段に示した標準偏差が経度への依存が低いことも勘案し, $V_y$ の一次関数として表わした(図-4.2.6).最後にこれらの値に基づき自己回帰次数を定めたが,その最適な次数 n については AIC (Akaike, 1974)に基づき n=7 とした.また残差項 $\gamma$ については正規分布に基づき決定するのが一般的であるが、本モデルでは、実際のデータに見られた高い尖度を再現するためにラプラス分布を採用した.

c) 中心気圧モデル

特に,低緯度帯における中心気圧 P のモデル化を念頭におき,本研究では履歴を考慮で きる AR モデルを適用した.モデル化には過去のサイクロンにおける時々刻々の圧力 P と その単位時間変化量 *AP* のデータが必要となるが, IBTrACS ではデータの時間間隔にバラ ツキがあったため,本研究ではそれぞれのサイクロンに対して気圧変化の近似曲線を求め, この曲線およびその時間微分値から毎時の P および *AP* を抽出して用いた.

発達・消失過程のサイクロンが混在する低緯度帯では、AR モデルにおいても正負の $\Delta P$ が相殺して絶対値が小さくなる問題が生じた.そのため、本研究では $\Delta P$ を次式の様に発達 項 $\Delta P_n$ と減衰項 $\Delta P_p$ に分離し、様々な条件で変動することが想定される発達項にのみ AR を 適用した.

$$\Delta P = \Delta P_n + \Delta P_n \tag{4.2.5}$$

まず,減衰項については,気圧差によって生じる中心方向への吹き込みによって,気圧差の解消(中心気圧の増加)が起こると想定し, $\Delta P_p$ が中心気圧 P と周辺大気圧  $P_{\theta}$ との差の平方根に比例すると仮定した次式で定義した.

$$\Delta P_p = k \sqrt{P_0 - P} \tag{4.2.6}$$

ここで,比例定数 kには,収集した $\Delta P$ のデータの 99%包絡線とほぼ一致する値として k=0.4(単位:/hour)を用いた(図-4.2.7).ここで包絡線を選定したのは,得られた $\Delta P$ は負の値を与える発達項による影響も含まれており,この発達項の影響の小さい段階のサイクロンの  $\Delta P$  が,包絡線上周辺に分布すると仮定したためである.

次に,発達項ΔP<sub>n</sub>は海水温やサイクロンの発達度などの様々な要因により変動すること 想定されるため,次式の様なARモデルを適用することとした.

$$\Delta P_n = \overline{\Delta P_n(y, P)} + \sigma_{DP}(P)Z \tag{4.2.7}$$

$$Z_{i} = \sum_{k=1}^{n} a_{k} Z_{i-k} + \gamma$$
(4.2.8)



図-4.2.7  $\Delta P \ge P_0 - P \ge O$ 関係



図-4.2.8 中心気圧 P と ΔP との関係 (実線は近似曲線,上:南緯 15~20 度,下:南緯 20~25 度)



**図-4.2.9** 中心気圧 P と ΔP<sub>n</sub>の標準偏差との関係 (実線は近似曲線)

まず,式(4.2.7)に示した $\Delta P_n$ の平均値の算定式を求める. $\Delta P_n$ のデータは, $\Delta P$ と式(4.2.6) で推定した $\Delta P_p$ との差分値として与え,緯度5度毎に分類してそれぞれの緯度帯において  $\Delta P_n$ の平均値の算定式を求める.**図**-4.2.8 に,  $\Delta P$ と $\Delta P_p$ の差分値と,式(4.2.6)で得られる $\Delta P_p$ の曲線,さらに次式で定義する $\Delta P_n$ の平均値の近似曲線を示す.

$$\overline{\Delta P_n} = a + b \tanh\left(\left(\frac{P_0 - P}{c}\right)^m\right)$$
(4.2.9)

ここで、フィッティングパラメタの*a*, *b*, *c*, *m*は、それぞれの緯度帯において得られた最 適値をモデルでもそのまま用いた.次に、式(4.2.7)の $\sigma_{\Delta Pn}(P)$ は $V_y$ と同様に本研究では $\sigma$ の 大きさは中心気圧と相関があると仮定し、式(4.2.9)で得られた平均値と実際の $\Delta P_n$ との標準 偏差を, P<sub>0</sub> -P の値ごとに整理した図-4.2.9 に基づき式(4.2.9)と同じ式を用いてフィッティングした.最後に、自己回帰次数、残差項の分布については、V<sub>y</sub>と同じ手法を用いた.
 c) 消失モデル

最後に、サイクロンの消失条件は、サイクロンがデータの存在しないセルに到達した場合、また、中心気圧が 1013hPa を上回った場合とした.

#### (3) モデルの検証

a) 南西太平洋におけるサイクロンへの適用

本研究で構築した確率台風モデルを用いて IBTrACS で得られたデータ数と同じ 518 の サイクロンを発生させ、その結果として、V<sub>x</sub>および V<sub>y</sub>の平均値および標準偏差、サイクロ ン経路、各セルを通過したサイクロンの個数、中心気圧偏差の最大値の平面分布を図-4.2.10 に示して比較した.モデルでは、サイクロンの発生位置や、移動速度、方向も含めて、モ デルに基づきランダムに生成しているため、データとモデルによる再現結果は統計的には 一致するべきであるが、個々のサイクロンの挙動までは必ずしも一致するものではないこ とに留意が必要である.

まず,経度方向の移動速度  $V_x$ に着目すると,全体として概ね良好な再現性を示した.移動速度の平均値は,オーストラリア東岸沖 (南緯 30 度,東経 160 度)付近でわずかではあるものの東向きの移動速度を過小評価する傾向が見られた.これは豪州に向かって移動してきたサイクロンは,豪州の東沖合で東向きに折り返すものが多いが,モデルではこの折り返しを過小に再現していることが原因である推察される.折り返す際には  $V_x=0$ となるが,その付近では $\Delta V_x$ の頻度分布が  $V_x=0$ を中心にほぼ対称となっており,時々刻々の $\Delta V_x$ をこの分布に基づきランダムに抽出するとその期待値は0に近づく.実際に折り返すサイクロンは, $\Delta V_x$ の値が連続的に正の値となっている.以上より,この様な折り返し特性の再現性をさらに向上させるためには,ARモデルの様に履歴を考慮して $\Delta V_x$ を選定する手法が必要になると考えられる.

一方,緯度方向の移動速度  $V_y$ は式 (4.2.3)の形からもその値が平均値まわりに散らばる ように設定されることから平均値に関しては良好に再現できている.その一方で,標準偏 差については特にグレートバリアリーフ沖(南緯 15 度,東経 155 度付近)で顕著な過小評価 傾向が見られた.これは,図-4.2.6 に示した様に実際の $\sigma_{Iy}$ が大きくばらついているにもか かわらず,モデルではおおまかな傾向として回帰直線を引いたことによると考えられる. 現状の AR モデルでは,標準偏差の時間的・空間的な変化までは考慮できない.改良する ためには例えば $\sigma_{Iy}$ にも確率分布を与えてバラツキを再現し,本研究では新たに $\sigma_{Iy}$ を  $V_y$ の関数としてモデル化したが,さらに緯度によっても変化させるなどの工夫が必要になる と考えられる.

以上の移動速度成分を積分して得られたサイクロンの経路についてみると、モデルの方 が経路がやや直線的になる傾向がみられるものの、概ね良好な再現性が得られている.さ らに各セルを通過したサイクロンの数に着目すると、低緯度帯では良好な再現性が得られ


**図-4.2.10** 確率台風モデルによる再現結果(SMT)と IBTrACS データ(obs.)との比較(上段: V<sub>x</sub>および V<sub>y</sub>の平均値および標準偏差,下段:経路,各セルにおけるサイクロンの通過回数,中心気 圧).

ているのに対し、高緯度帯ではやや過大評価傾向となった.これは、既往サイクロンでは 十分に気圧が上昇しないまま消失と判断されたものが多数含まれている一方で、本モデル では中心気圧 1013hPa 以上を消失としているためであると考えられる.

最後に、中心気圧に着目するとモデルについては低緯度帯から高緯度帯にかけて連続的 に強まり弱まっていく様子が良好に再現できている.図-4.2.11に南緯 10~15 度および 15 ~20 度における IBTrACS およびモデルによる中心気圧の確率密度分布を比較する.図に 見られる様に、10~15 度における再現性は極めて良好であるのに対し、15~20 度では、 1000hPa 付近の減衰したサイクロンの頻度がやや過大評価となった一方で、図-4.2.10 の平 面分布では、15~20 度周辺における最小の中心気圧はモデルの方がやや過小に再現してい る傾向が見られた.すなわち、高緯度に移動するにつれ減衰するものと、低い気圧を保っ たまま進行するものとに分かれる傾向が見られた.

以上より本モデルでは総じて低緯度帯での再現性は良好であったが,高緯度に移動する にしたがって誤差がやや累積される傾向が見られた.ただし,本研究の対象地域である南 太平洋島嶼国は低緯度帯に属するため,このような誤差による影響は比較的小さいと考え られる.

65



図-4.2.11 モデルおよび IBTrACS による P の確率密度分布

b) インド洋北東部のサイクロンへの適用

次に、同様の確率台風モデルをインド洋北東部で発達するサイクロンに適用した.ただ し、インド洋北東部では東西方向への移動経路についても南西太平洋ほどのランダムな挙 動は見られなかったため、東西方向の移動速度成分の推定についても南北方向と同様の AR モデルを用いることとした.またモデルパラメタの抽出に用いた過去のサイクロンデ ータは、1899 年から 2014 年までインド洋東側に来襲した 199 のサイクロンのみを対象と した.インド洋西部に来襲するサイクロンについては別途モデル化が必用であることに留 意する必要がある.モデルの詳細については神原ら(2017)を参照されたい.

図-4.2.12 は河合ら(2005)の手法および本手法における経路の算定結果の例を比較している.両手法の主な違いはARモデルにおける式(4.2.3)および(4.2.4)に示したように,偏差 Zを移動速度に依存するデータの偏差で標準化したこと,さらに,偏差のランダム成分γの 推定には,通常用いられる正規分布ではなく,実際のデータにより近い船影殿高いラプラ ス分布を用いたこと,の2点である.これにより,図に見られるように不自然な発達が制 限されつつ,かつ東西方向にランダムに移動しながら北上するサイクロンの経路を妥当に 再現することができた.また,中心気圧の時間変化を比較した図-4.2.13においても,特に 強大なサイクロンの再現性において,本モデルにおける計算結果に改善が見られた.

66



図-4.2.12 確率台風モデル経路(左:河合ら(2007),右:改良モデル)



#### 4.2.2 確率台風モデルに基づく高潮および高波推定事例

最後に、構築した確率台風モデルにより台風を生成し、それぞれの台風に対して高波お よび高潮の伝搬・発達過程を再現することにより、いくつかの対象地点におけるハザード 評価を行った.ここでは南太平洋における高波およびインド洋北東部に位置するミャンマ ーデルタ地帯における高潮によるハザード評価への適用事例を紹介する.

# (1) 南太平洋島嶼国に来襲する高波の推定

改良した確率台風モデルを用いて対象領域(南太平洋)に 10,000 個のサイクロンを発生さ せ, SWANに基づく Tajima ら(2016)のモデルを用いて風況場および波浪場の推算を行った. 発生させた全てのサイクロンについて,図-4.2.14 に示した Takara, Nadi および Suva を対 象にそれぞれの海岸における風速の法線方向成分を算定し,その上位 50 ケースをそれぞ れ選定して波浪計算を行った.さらに,それぞれの地点における上位 60%の結果に対して



**図**-4.2.14 対象地点の概要(背景画像は Google Earth)



図-4.2.15 対象3地点における沖合来襲波高の再現期間

極値統計解析を実施し、それぞれの再現期間を求めた(図-4.2.15). 同様の解析を、IBTrACS による実際のサイクロンデータに対して実施し、確率台風モデルによる波浪推算結果と比 較した(図-4.2.15). 図より、確率台風モデルで生成したサイクロンによる来襲波高と、実 際のサイクロンデータに基づく来襲波高とその再現期間は、対象とした3地点すべてにお いて互いに整合する結果を得た. 島嶼北東部に位置する Takara では、南東部に位置する Suva や Yasawa 諸島の遮蔽域に位置する Nadi に比べて同じ再現期間に対する来襲波高が2 倍程度となった. 特に 2015 年にはサイクロン Pam が来襲しており、Takara 沖の有義波高 の計算結果は13.3 m となった. これは確率台風モデルによる解析結果によれば再現期間約 300 年に相当する. Secretariat of Pacific Community (SPC) によれば、Pam に伴う来襲波浪は、 観測データに基づく再現期間 100 年の波高の2 倍程度であったと報告されており、本研究 結果と整合した.

# (2) ミャンマーデルタ地帯における高潮

図-4.2.16 に本研究における高潮氾濫計算の対象領域周辺の概要を示す.既往の非線形長 波方程式を基礎方程式とし、フィリピンやバングラデシュにおける高潮氾濫解析において 適用性を検証したモデル (Hussain et al.,2016; Tajima et al., 2016) を用いて対象地点周辺に おける高潮氾濫解析を実施した.その結果、後述するようにバゴー市南東部の水路網が発 達した地域において、サイクロン Nargis による高潮の再現計算を行ったところ、ヤンゴン・ バゴー川西部のイラワジデルタにおける浸水は妥当に再現できたのに対し、東部において は浸水面積が過小評価となった.本研究で実施したヤンゴン川東部の低平地におけるヒア リング結果によれば、Nargis 来襲時における氾濫は、発達した水路網が大きく影響したこ とが推察されたため、本研究では1次元長波モデルに基づき水路網内における高潮の伝播 を、越流公式に基づき氾濫原と水路における氾濫水のやりとりを、それぞれ再現する水路 網モデルを新たに構築した.モデルの詳細は神原ら(2017)を参照されたい.

このモデルを検証するため, Nargisの再現計算を行った.ここで,計算領域は北緯15°~ 17°30', 東経93°30'~97°22', 潮位は1.5 mとした.また,水路網のデータは衛星画像から目視で読み取った.再現計算の結果を図-4.2.17 に比較する.図-4.2.17 左には,UNOSAT<sup>10)</sup>の Nargisによる高潮浸水マップから読み取った対象地点周辺の浸水域も示し比較している.図に見られる様に,図の中央やや左に位置するヤンゴン川の河口部の東側では,水路網による影響を考慮しなかった場合(図-4.2.17 中央)には浸水域を過小評価しているのに対し,水路網による影響を考慮した場合(図-4.2.17 右)には,その浸水域が有意に拡大し,Nargis 来襲時における当該地点における氾濫の特性を少なくとも定性的に再現できることが分かった.計算された浸水域の形状がUNOSAT (2008)によるマップと異なるのは,この低平地における標高分布が,実際のものとは微妙に異なることに依存していると考えられる.以上,浸水域の平面的な分布の違いについては課題が見られるものの,水路網による影響を加えることにより,浸水範囲の再現性が向上することが確認できた.

次に確率台風モデルにより生成した長期間のサイクロンデータそれぞれに対して高潮モ デルを適用して高潮の最大偏差を計算し,その極値および再現年数を推定した.



図-4.2.16 計算対象地点周辺の概要



図-4.2.17 Nargis による浸水域(左),高潮氾濫再現計算の比較(中:水路なし,右:水路あり)

#### a) 高潮最大偏差

まず構築した確率台風モデルに基づき2万個のサイクロンを生成し,経験的台風モデル (的場ら,2006)に基づき図-4.2.16に示したイワラジ川,バゴー川,シッタン川の河口周辺 の3地点における時々刻々の風速変化を調べ,これらの地点それぞれにおける瞬間最大風 速の上位100位までのサイクロンをそれぞれ選定した.次に選定した100のサイクロンに 対してそれぞれ高潮計算を行い,イワラジ川,バゴー川,およびシッタン川河口部におけ る時々刻々の高潮偏差からその最大値をそれぞれ出力した.これらの出力結果に基づき, 値統計解析の手法を用いて再現年数を求めた.確率台風の構築に用いたサイクロンは1899 年から2014年までインド洋東側に来襲した199のサイクロンであったため頻度1.73回/年 に相当する.極値解析の結果を図-4.2.18に示す.図より,最大高潮偏差は3地点の中では 最も湾奥に位置するシッタン川河口部において最も高くなった.また各地点における高潮 最大偏差の差は,再現年数の増加とともに拡大する傾向にあることがわかる.したがって, シッタン川河口部においては高潮災害の経験はないものの,確率台風モデルを用いた解析 結果によればイラワジ川デルタよりも厳しい高潮ハザードを有しているといえる.また, 同条件のNargisによる高潮のイラワジ川デルタでの高潮最大偏差の計算結果が約1mであ ったことから,この災害の再現年数が約100年であったことが推察される.

#### b) 高潮浸水面積

続いて,前述した2万個のサイクロンデータから選定したシッタン川河口部およびバゴ ー川河口部のそれぞれにおける瞬間最大風速上位100位までのサイクロンに対し,本研究 で構築した水路網による影響を考慮した氾濫解析モデルを適用し,計算領域内における浸 水面積をそれぞれ計算した.得られた浸水面積に対して同様の極値統計解析を実施し,当 該地域における高潮浸水面積の再現年数を求めた.その結果を図-4.2.19に示す.図には, シッタン川河口部およびバゴー川河口部における瞬間最大風速に基づきそれぞれ選定した 100のサイクロンに基づき実施した結果と,両者のサイクロンを合わせた場合における再 現年数の推定結果(シッタン川+バゴー川)を合わせてプロットしている.この結果から,シ ッタン川およびバゴー川河口部でそれぞれ選定したサイクロンを合わせた場合の高潮浸水



面積の再現年数は、再現年数 300~500 年以上の規模の高潮災害については、シッタン川河 口部のみで選定したサイクロンに対する再現年数とほぼ一致している.これは、再現年数 が数百年以上となる規模の高潮災害は、シッタン川周辺で瞬間最大風速が大きくなるサイ クロンによって卓越的に引き起こされることを意味している.その一方で、再現年数が百 年程度以下の規模の高潮については、バゴー川河口部で最大風速が上位 100 位となるサイ クロンによる災害の方が、同じ再現年数に対する高潮浸水面積が大きくなる傾向が見られ た.以上の本研究における解析結果より、比較的頻度の高い高潮災害については、バゴー 川からの氾濫が卓越的となり、数百年規模の高潮災害についてはシッタン川からの影響が 卓越的となるという特性を推察することができた.

## 4.3 まとめ

以上,全球確率台風モデルに基づく北西太平洋における台風の再現とそれによる高潮ハ ザードの再現確率の推定,さらに,履歴を考慮した確率台風モデルの構築と検証,さらに モデルにより再現した台風に基づく南太平洋およびインド洋北東部における高波および高 潮によるハザードの再現確率の推定事例を整理した.

#### 参考文献

河合弘泰,橋本典明 (2005): 確率台風モデルの構築とそれを用いた高潮の出現確率分布の 試算,港湾空港技術研究所, 27p.

- 河合弘泰,橋本典明,松浦邦明 (2007):確率台風モデルを用いた内湾の高潮極値と継続時間の推定,海岸工学論文集,第54巻, pp.301-305.
- 國富將嗣,高山知司 (2005):大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性,海岸工学論 文集,第 52 巻, pp.216-220.
- 神原雅宏,田島芳満,中村駿一郎,下園武範 (2017):水路網の発達したミャンマーデルタ 地帯における大規模高潮ハザードの評価,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.1.
- 金 洗列,高山知司,安田誠宏,間瀬 肇 (2007):高潮と波浪に及ぼす大潮汐変動の影響 に関する研究,海岸工学論文集,第54巻, pp.276-280.
- 中條壮大,森 信人,安田誠宏,間瀬 肇 (2011):全球確率台風モデルの開発と温暖化影響 評価への適用,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I\_1176-I\_1180.

中條壮大,森 信人,安田誠宏,間瀬 肇 (2012):クラスター分析を用いた時系列相関型の 全球確率台風モデル,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_1226-I\_1230. 中條壮大,森 信人,安田誠宏,間瀬 肇 (2013):時系列相関型の全球確率台風モデルの 開発,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.1, pp.64-76.

中條壮大,藤木秀幸,金 洗列,森 信人,澁谷容子,安田誠宏 (2015):東京湾における 高潮災害ポテンシャルの評価に関する検討,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I\_199-I\_204.

- 橋本典明・佐藤裕司・松浦邦明・市川雅史 (2001): 確率台風モデルの構築とその統計的特性,海岸工学論文集,第48巻, pp.456-460.
- 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史 (2003):港湾・海岸構造物の合理的 設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討,海岸工学論文集,第50巻,pp.176-180.
- 的場萌実,村上和男,柴木秀之 (2006): Super Gradient Wind (SGW) を考慮した台風の風の 推算と高潮数値計算,海岸工学論文集,第 53 巻, pp.206-210.
- 安田誠宏,林 祐太,森 信人,間瀬肇 (2010):地球温暖化による高潮・波浪推算に対応 可能な確率台風モデル,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.I\_1241-I\_1245.
- 安田誠宏, 岩原克仁, 平井翔太, 中條壮大, 金 洗列 (2017): 確率台風モデルを援用した 駿河湾における高潮の確率論的評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I\_253-I\_258.
- Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6), pp. 716-723, doi:10.1109/TAC.1974.1100705, 1974.
- Bosserelle, C.: Tropical cyclone Pam waves summary, SPC, available on line: http://pcrafi.spc.int/ static/pam/TropicalCyclonePamSwellSummary.pdf.
- Hussain, M.A., Tajima, Y.: Numerical investigation of surge-tide interactions in the Bay of Bengal and the Bangladesh coast, Nat Hazards, vol.86, pp.669-694, doi:10.1007/s11069-016-2711-4, 2016.
- James, M. K. and Mason, L. B.: Synthetic tropical cyclone database, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 131, No. 4, pp.181-192, 2005.
- Tajima, Y., Gunasekara, K.H., Shimozono, T. and E.C. Cruz, Study on locally varying characteristics induced by super typhoon Haiyan. Part I: Dynamic behavior of storm surge and waves around San Pedro Bay, Coast. Eng. J., 58(1), doi:10.1142/S0578563416400027, 2016.
- UNOSAT, Flood Assessment for cyclone affected Yangon capital area, obtained at http://unosatmaps.web.cern.ch/unosat-maps/MM/CycloneNargis/UNOSAT\_Myanmar\_Nargis\_Yangon\_Area \_MODISFloods5May2008\_Highres\_v1.pdf, 2008.

# 5. 氾濫シミュレーションによる浸水深の推定 (宇野, 原田)

陸域での氾濫シミュレーションは、津波や高潮による資産や人口分布の浸水過程や浸水 範囲を把握することを目的として行われ、資産被害や人的被害の被害推定に活用される. その結果に基づき、地域のハザードマップ作成や災害対策検討が行われる.

近年,計算機の発達に伴い,高度化および高精度化された津波伝播浸水計算モデルの開 発が進み,公開されたモデルもある.代表的なモデルとして,長波近似が難しい浅海域で の津波の変形を精度良く計算する非静水圧モデル STOC や,津波伝播に伴う地殻変動チリ 沿岸で発生した津波の日本沿岸までを対象とする遠地津波の計算にも適した JAGURS モ デルが挙げられる.これらのモデルは,波の分散性や非線形性を数値モデルに取り込むこ とによって,計算精度を向上させているが,基礎式の高次になるほど計算負荷が増えるこ とから,地形の解像度や対象領域の範囲や水深帯を考慮して数値モデルを選択する.

ここでは、非線形長波理論を Staggered Leap-Frog 法で差分化して解く Goto et al の計算 プログラムを用いた.本モデルには、津波によるハザードマップの作成や津波防災地域づ くりの検討を目的とした津波浸水シミュレーション手法は、国土交通省水管理・国土保全 局海岸室、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室により「津波浸水想 定の設定の手引き Ver.2.00(平成 24 年 10 月)」がとりまとめている.本章における氾濫 シミュレーションの計算の条件や手法は、概ねこれに基づいている.

本章では、ケーススタディ地区として伊豆半島西岸に位置する地域を対象とし、氾濫の 発生要因を津波とする氾濫シミュレーションを行った.規模などが異なるいくつかの波源 モデルによる津波浸水の違いや、海岸線に設置する防潮堤や水門の規模などによる違いを 比較分析した.

# 5.1 氾濫シミュレーションの計算条件

本検討で用いた非線形長波モデルの支配方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial t}$$
(5.1.1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$
(5.1.2)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 N\sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$
(5.1.3)

ここに、 $\eta$ は水位、M、Nはスタガード格子のx、y方向の線流量、 $\xi$ は海底鉛直変位分、Dは全水深(= $h+\eta$ )、hは平均水位のときの水深である.nは海底摩擦を考慮するためのマニングの粗度係数であり、陸上では遡上した津波が市街地の建築物などによって抵抗を受

けることから、一般的には土地利用状況に対応する値を用いる.

#### 5.1.1 地形条件

ケースステディ地区の計算は,格子サイズ *dx*=810m とする第1次領域(南海トラフ地震 沿岸域,図-5.2 参照)からネスティングにより浸水計算を行う *dx*=2m とする第6次領域 (対象海岸地区,図-5.1 参照)までを接続し対象とした.対象地域の海岸南側には,2つ の河川が合流した河口があり,三角州状の低地が広がっている.海岸防護ラインの背後に は、ホテルや家屋の建物が分布し、さらに内陸側の低地に小学校や村役場が分布する.

津波ハザードマップは、10~30m ほどの格子を用いて津波浸水予測を行い作成されるの が一般であるが、詳細な地形や建物の分布が影響する浸水域では計算精度を確保すること が難しい.建物の密集度を粗度として与える方法に比べ、建物の形状などを地形で与える 場合の方が精度よく浸水過程を計算できるとの報告がある.また、津波防災地域づくり計 画では、盛土地形の津波防護施設や建物の配置を津波減災対策として検討する場合がある. 本検討では、2mメッシュ地形を用いた.陸域の地形データは、国土基盤情報の標高データ を地面高とし、地図データの建物境界線に基づき建物位置にあたるメッシュを地面高より 6m 高くして作成した.海陸境界は、水涯線、海岸線データを用い、河川域については河川 の整備計画に基づき入力した.防潮堤と水門の津波対策施設は地形データとして与え、防 潮堤に関しては越流水深が 2m を越えたときに破壊する条件で計算した.



図-5.1 対象海岸の津波対策施設等の分布



図-5.2 浸水計算に用いた 2m 格子地形

# 5.1.2 波源モデル

本ケーススタディでは、4 ケースの波源モデルを与えた津波伝播・浸水計算を行った. 図-5.3 は、波源モデル毎の初期水位分布であり、(a)は「東海地震+付加断層 ABD、Mw8.0」 モデル(内閣府、2001)、(b)は、「安政東海地震、Mw8.4」モデル(例えば、内閣府、2011)、 (c)および(d)は「南海トラフ巨大地震津波モデル(内閣府、2012)」のケース①および⑥で ある.図-5.3 中の南海トラフ地震津波の2 ケースに関しては、計算中で地震発生から 300 秒までの水位変動量を10 秒毎に与えており、図に示したのはその積分量である.



図-5.3 波源モデル毎の地殻変動による水位変動量の平面分布

## 5.2 津波水位および浸水範囲の時間変化

ここでは、波源による違いを分析する.そのため、防潮堤高さは、現況海岸に設定されている T.P.6.0m とし,津波防潮堤は津波水位が天端上 2m を超過時に倒壊するものとした.また、水門に関しても現況海岸のとおり設置せずに計算した.

(1) 東海地震+ABD Mw8.0 (図-5.4)

駿河トラフ沿いで発生した津波によって,地震発生から約6分で津波が海岸前面に到達 する.8分後の浸水図で河口部や防潮堤背後で浸水しており,その後の浸水図では徐々に 浸水域が拡大している.断面図からは,海岸前面の水位は,約7分後に最も高く,8分後 には防潮堤天端よりも低くなることがみてとれる.

(2) 安政東海地震 Mw8.4 (図-5.5)

他のケースと同様に,約6分で海岸前面に津波が到達する.8分後には防潮堤から約200m 内陸まで浸水が広がり,12分後には,三角州状のエリアの全体で浸水している.東海地震 と同様に,7分後に最大水位となり,8分後には護岸天端下まで低下していることが断面図 から確認できる.

(3) 南海トラフ地震津波ケース⑥ Mw9.1 (図-5.6)

地震発生から8分後には、海岸前面の津波が10mを超過し防潮堤を超え、大きく浸水している.その後も、浸水は継続し海岸の低地に広く浸水域が広がっている.海岸前面の津 波水位は、7分後から8分後にかけて急激に高まり防潮堤天端上を越流する.浸水開始から1~2分で海岸前面水位が低下した上記の2ケースと異なり、約3分間津波の越流が継 続する.高い水位だけでなく、その継続時間が浸水エリアの拡大を助長していると考えられる.



図-5.4 津波水位および浸水深の分布図(東海地震+ABD Mw 8.0)



図-5.5 津波水位および浸水深の分布図(安政東海地震, Mw 8.4)



図-5.6 津波水位および浸水深の分布図(南海トラフ地震, Mw 9.1)

# 5.3 波源モデルおよび浸水防護施設による浸水範囲の比較

第1波による浸水深分布について,波源モデルによる比較を行う.また,津波浸水対策 ケースとして,津波浸水低減を期待した防潮堤の天端嵩上げと,水門の設置(各ケースで 天端高は防潮堤と同じ)を組み合わせて比較検討を行った.(図-5.7)

#### 5.3.1 波源モデルによる比較

比較ケースでは、地震規模の増大に伴って浸水エリアが増大する傾向がみられた.東海 地震+ABD では海岸河口部周辺で、安政東海地震津波では河口周辺および三角州で、南海 トラフ地震津波の2ケースでは海岸周辺の低地に広く浸水している.



図-5.7 波源モデル別の最大浸水深の分布

#### 5.3.2 海岸防護施設別の比較

安政東海地震津波 Mw8.4 と南海トラフ地震津波 Mw9.1 の 2 ケースについて,防潮堤高 さを T.P. 6.0m, 7.5m, 8.5m と変化させた 3 ケースと,防潮堤と同じ高さにした水門を河口 に設置した 3 ケース,合わせて 6 ケースを比較した. 安政東海地震津波 Mw8.4 のケースでは,防潮堤高さの T.P. 7.5m 嵩上げにより,防潮堤 天端が津波水位まで到達し,背後の津波浸水から防護できると予測される.しかし,水門 を設置しない場合,河口部周辺が浸水する結果となった.(図-5.8)



図-5.8 防潮堤天端高別の最大浸水深の比較(安政東海地震津波 Mw8.4)

南海トラフ巨大地震のケースでは, T.P.8.5m まで天端高を嵩上げした場合にも, 浸水域 は,低地に広く広がる結果となり,低減効果は大きくないという結果になった.これは, 全ケースで防潮堤天端上越流水深が2mを超過し破壊させたためであると推察される.(図 -5.9)





(f) 8.5m+水門

(e) 8.5m





図-5.9 防潮堤天端高別の最大浸水深の比較(南海トラフ地震⑥Mw9.1)

南海トラフ地震津波のケースで防潮堤が破壊しないケースを加えて、各ケースの浸水面 積を比較した(図-5.10).実線は水門なし、点線は水門ありのケースで、線色は波源モデ ルや防潮堤破壊の有無による比較である.防潮堤より海側の領域も含まれている.

津波規模の増大に伴って、浸水エリアが増大する傾向がみられる.防潮堤の破壊ケース と非破壊ケースでは、非破壊ケースの方が防潮堤高さによる浸水エリアの減少効果が大き い.ほとんどのケースで、水門の設置によって浸水エリアを低減する.南海トラフ地震津 波、防潮堤天端高 T.P. 6.0m のケースで、水門を設置した場合の方がしない場合に比べ浸水 エリアが大きくなった.要因として、本モデルでは陸域から排水を考慮していないため、 浸水エリアから流入した津波の水塊が、海側に流出することなく陸域に滞留するためと考 えられる.本結果により、津波の越流時に備えた排水対策の重要性が示唆されている.



図-5.10 浸水面積の時間変化のケース間比較

# 5.4 まとめと課題

本章では、氾濫シミュレーションを用いて、異なるハザード(津波規模)における浸水 新と、異なる対策による災害低減効果に関する感度分析を行った.今後、防潮堤や建物破 壊のフラジリティを考慮し浸水計算の高度化を図るとともに、災害対策などの条件の増加 に対応するため湛水法モデルを導入などによる計算コスト削減を図る必要があると考えら れる.

### 参考文献

- Goto C., Ogawa Y., Shuto, N., and Imamura, F.(1997): IUGG/IOC TIME Project, Numerical method of tsunami simulation with the Leap-frog scheme, UNESCO, pp.126.
- Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Inazawa, Y. and Kikkojin, M.(2014): Tsunami Inundation Modeling of the 2011 Tohoku Earthquake Using Three-Dimensional Building Data for Sendai, Miayagi Prefecture, Japan, Tsunami Events and Lesson Learned, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol.35, pp.89-98.
- 加藤史訓・福濱方哉・藤井裕之・高木利光・児玉敏雄(2007):堤防高を考慮した実効的な津 波被害想定手法,海岸工学論文集、第54巻,pp.261-265.
- 富田孝史・本多和彦・千田優(2016):高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析手法,港湾空港技術研究所報告,第55巻第2号,pp.7-33.
- 国土交通省水管理・国土保全局海岸室,国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 (2012):津波浸水想定の設定の手引き(ver2.00),平成24年2月,http://www.mlit.go.jp/river/shishin\_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui\_settei.pdf
- 内閣府中央防災会議(2001):東海地震に関する専門調査会,第8回資料,平成13年9月21 日, http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/8/pdf/siryou.pdf

内閣府中央防災会議(2011):南海トラフの巨大地震モデル検討会中間とりまとめ、平成23

年 12 月 27 日, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan\_matome.pdf 内閣府中央防災会議(2012):南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 平成 24

年8月29日, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829\_2nd\_report03.pdf

# 6. 防護施設の粘り強さの評価方法についての検討 (有川)

2.3 節において詳細に記載されているが、中央防災会議(2011)では、東日本大震災を受け て、今後の津波対策に際し、二つのレベルの津波を想定すると提言し、「一つは、住民避 難を柱とした総合的防災対策を構築する上で設定する津波である.超長期にわたる津波堆 積物調査や地殻変動の観測等をもとにして設定され、発生頻度は極めて低いものの、発生 すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波であり、もう一つは、防波堤など構造物に よって津波の内陸への侵入を防ぐ海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波である. 最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津 波である」とされた.

これは、「海岸保全施設等に過度に依存した防災対策には問題があったことが露呈され た」ためで、「最大クラスの津波レベルを想定した津波対策を構築し、住民の生命を守る ことを最優先として、どういう災害であっても行政機能、病院等の最低限必要十分な社会 経済機能を維持することが必要」であるからである。そのうえで、「防護施設に対して、 設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術 開発を進め、整備していくことが必要である」と提言されている。

この原点に立ち返ると、防護施設の粘り強さとは、どのような津波に対しても被災を受けない構造ではなく、たとえ被災を受けたとしても、防護施設の機能が発揮されるようにしておく構造のことであると考えられ、単なる強度増強を意味しているわけではないことがわかる.そこで、ここでは、防護施設の浸水深を減少させる機能について、防護施設が 被災を受けることを想定した場合における評価方法について検討する.

#### 6.1 防護施設のフラジリティを用いた浸水評価

## 6.1.1 防護施設の破壊を考慮した浸水評価手法

津波浸水状況を正確に予測するためには、津波来襲時の防護施設の状況・状態を正確に 把握し、浸水予測モデルに取り込む必要がある.しかしながら、現時点での科学技術にお いて、地震動による津波来襲前の防護施設の被災状況や、津波作用時の防護施設の倒壊状 況を正確に予測することは困難である.

防波堤の効果に関する研究については、伊藤ら(1968, 1969)が、大船渡港ならびに八戸 港における十勝沖地震津波に対する防波堤の効果を計算している.大船渡港では、最高水 位を半分にした効果があったと記されている.特に八戸港の計算においては、河原木防波 堤の倒壊被害に言及し、その主因を著しい内外水位差の傾向が、計算結果にも見られてい る.東日本大震災では、富田ら(2012)は、防波堤が倒壊しなかった場合、被災後の状況で 防波堤が配置された場合、防波堤が完全に無い場合の3パターンで、釜石港、大船渡港、 相馬港の計算を行い、浸水状況の違いを検討した.また、Arikawa and Oie(2015)は、釜石 港において、富田ら(2012)の検討(防波堤建設前の現地形、防波堤が完全に残った場合、 倒壊後の地形)に加え、完全に締め切った場合、開口部における潜堤ブロックのみが流された場合、浅い水深部のみ流された場合、浅い水深部と潜堤ブロックが流された場合の7 ケースの検討を行い、その防護効果を、現地の痕跡高と比較した.

海岸堤防について、国総研ら(2011)は、やはり同様の計算を行い、その効果を確認して いる.ここでは、倒壊した場合については、越流後に被災という条件で計算している.そ れぞれの研究では、倒壊に対する取り扱いが、確定的であり、越流状態を過大に計算する と考えられる.一方で、関ら(2016)は、津波来襲時の防護施設の被災状況についてモンテ カルロ法を用いて確率的に浸水範囲を評価した.この手法は、防護施設が様々な状態を考 えることができるものの、計算ケースが膨大となる.

そこで,防護施設の被災状況について被災率を用いて,その被災率に応じた越流量を算 定し,背後浸水を算定する手法を検討する.そうすることで,被災状態を現実に近い形で 表現し,かつ,モンテカルロ法のように多くのケースを行うことなく,浸水を評価する手 法について検討する.

#### 6.1.2 防護施設の被災による越流量の補正方法

防護施設の被災度を構造物の性能低下として捉え,その性能低下を越流量の増大として モデル化する.そして,その性能低下をフラジリティカーブを用いて表現する.計算フロ ーを図-6.1.1 に示す.



図-6.1.1 フラジリティモデル計算フロー図

#### (1) 越流量補正係数の求め方

越流量は本間公式に代表されるように構造物前後の水位差により定式化される.

$$Q = Ah^{3/2} (6.1.1)$$

ここで, *A* はモデルによる定数, *h* は水位差である.損傷の状態として, 1)天端高が低下した場合, 2)構造物が倒壊した場合の2種類を考える.

天端高が低下した場合,定常状態を仮定すると,天端高が低下しない場合に対する越流 量の増加率は,天端高が減少した分の水位差の増加を考慮すると以下のようになる.

$$r_{H}(p_{H}) = \frac{\{\alpha - (1 - p_{H})\}^{3/2}}{(\alpha - 1)^{3/2}}$$
(6.1.2)

ここで、*P*<sub>H</sub> は天端高の低下率、*r*<sub>H</sub> は構造物が健全な場合に対する越流量の増加比率 (以降,越流量補正係数)を表し、αは初期天端高に対する沖側水位 (つまり津波高)である. 一方、構造物が倒壊する場合、その倒壊率を*p*<sub>D</sub>とすると、構造物設置区間を単位長さと すると、構造物が健全な範囲は(1-*p*<sub>D</sub>)、倒壊した区間は*p*<sub>D</sub>で現されることになる.このケー スでは、越流量補正係数は以下のようにまとめられる.

$$r_{D}(p_{D}) = \frac{\left\{ (\alpha - 1)^{3/2} (1 - p_{D}) + \alpha^{3/2} p_{D} \right\}}{(\alpha - 1)^{3/2}}$$
(6.1.3)

式(6.1.2)および式(6.1.3)で示した越流量補正係数を図-6.1.2に示すが、この図からわかるように、倒壊させる場合のほうが越流量補正係数が大きく、また津波規模が大きい (αが大きい) ほど、補正係数は小さくなることが分かる.



**図**-6.1.2 越流量補正係数

#### (2) フラジリティカーブについて

提案されている防護施設に対するフラジリティカーブの例としては,東日本大震災の第 一線防波堤の被害調査結果に基づく,以下の式がある (PIANC, 2013).

$$F(\eta, H_{1/3}) = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{\eta}{H_{1/3}}\right) - \mu}{\sigma}\right]$$
(6.1.4)

ここで, Fは被災率, ηは防波堤前面水位, H<sub>1/3</sub>は設計波高, μ, σはパラメータで, それぞ れμ=0.0386, σ=0.279である. 図-6.1.3に式(6.1.4)の結果を示す. これを見ると設計波高の1/2 程度の水位から被災が発生し, 設計波高の2倍の水位を超えると100%に近い被害となるこ とが分かる.



図-6.1.3 第一線防波堤のフラジリティカーブ

# 6.1.3 モデル地形による検討

ここでは、防潮堤を設定した条件において、モデル地形を用いて検討を行う.本研究で 使用する津波浸水計算の数値モデルは、富田ら(2016)により開発された高潮・津波数値シ ミュレーション (以下,STOC)を使用する.STOCには、鉛直方向に静水圧近似を取り込 んだ平面2次元的なシミュレーションと、非静水圧のまま取り扱う3次元シミュレーション を取り扱うことが可能であるが、本研究の目的が、津波波源から沿岸域までを含んだ広域 計算を行うことであり、本検討内では静水圧近似モデル(以下,STOC-ML)を使用するこ ととした.STOC-MLにおいて、防護施設はラインデータとして取り扱い、その防護施設が 設定される計算格子線上に越流モデルを適用する.本検討で用いる越流モデルは、以下の 式で示す相田公式(式(6.1.5))、および段落ち公式(式(6.1.6))である.

$$q = 0.6h_2 \sqrt{g(h_1 - h_2)} \tag{6.1.5}$$

$$q = 0.544(h_1 - h_2)\sqrt{g(h_1 - h_2)}$$
(6.1.6)

ここで、gは重力加速度であり、水深h1、h2の定義は図-6.1.4に示す.



図-6.1.4 相田公式および段落ち公式の記号説明

## (1) 計算条件

有川・大家(2014)の実験を参考とし,図-6.1.5 に示すような,平面2次元的な水槽に陸上部および防潮堤を設置して検討を行った.計算格子はX方向,Y方向ともに0.1mとした. 造波条件は沖側境界より波高0.5mの孤立波を造波し,防潮堤の方の高さは+0.3mとした.



図-6.1.5 テスト計算領域断面図

今回,式(6.1.7)で示すような三角関数を用いた簡易的なフラジリティカーブを用いて検討することとした.図-6.1.6に、グラフを示す.



# (2) 計算結果の検討

まず,図-6.1.7に水位参照地点である防潮堤前面水位の時系列と前面水位に応じて変化する越流量補正係数rnの変化を示す.水位参照地点である防潮堤前面水位が上昇し,越流が始まることにより,越流量補正係数が補正されることになる.

図-6.1.8に最大浸水深の平面分布について示す.防潮堤健全,フラジリティカーブモデル, 完全倒壊という順に最大浸水深が増大しており,浸水体積は,フラジリティカーブモデル は健全に対して2.7倍程度の値となっている.



図-6.1.7 防潮堤前面水位と越流量補正係数の時系列



**図-6.1.8** 最大浸水深の比較

#### 6.1.4 現地適用計算

ここでは、本研究で開発を行ったフラジリティカーブを用いた被災度を考慮した津波浸 水モデルを現地スケールの計算に適用した.

#### (1) 計算格子·計算領域条件

本研究の対象地域は、U湾とする.図-6.1.9に最小領域の防護施設の配置状況を示す.検討に用いた波源は、内閣府による南海トラフ巨大地震のケース4(四国沖に大すべり域+超大すべり域)を使用している.計算時の潮位はT.P.0.0 mとしている.全倒壊(防護施設なし)の条件では沿岸部の津波高は10 m程度となる.



図-6.1.9 計算領域と堤防の位置(下右図)

#### (2) 最大浸水深による比較

図-6.1.10には、防護施設全倒壊、防護施設健全、フラジリティカーブモデル、3ケースそれぞれの最大浸水深の分布図を示す. 図からわかるように、フラジリティカーブモデルの 浸水範囲は、防護施設健全の場合と全倒壊の場合の間に収まっている.

図-6.1.11には、フラジリティカーブによる結果と防護施設健全の場合の結果の差分の平 面分図を示すが、差が有る領域では全体的に1m 程度の最大浸水深の増加があり、特に外 洋に面した沿岸部においてその差が大きいことが分かる.

図-6.1.12には、関ら(2016)により実施されたモンテカルロ法により検討された倒壊率と 浸水体積、平均最大浸水深、浸水範囲の結果をまとめたものを示す.水平の一点鎖線で示 しているのが本検討による計算結果であり、両者の結果を比較すると、今回設定したフラ ジリティカーブにおいては、倒壊率が30%程度に相当する結果と対応していることが分か る.防護施設前面における最大津波高からフラジリティカーブにより被害率を見ると40% 程度になっており、概ね妥当な結果となっている.



(a) 全倒壊



(b) 健全

最大浸水深

5m



--(c) フラジリティカーブモデル

図-6.1.10 各条件による最大浸水深の違い

0m



図-6.1.11 防護施設健全の場合とフラジリティモデルの最大浸水深の差分 (フラジリティモデルー健全)



図-6.1.12 フラジリティカーブモデルによる浸水結果と倒壊率の関係

# 6.1.5 まとめと今後の課題

津波来襲時の防護施設の状況について、フラジリティカーブを導入してモデル化するこ とを行った.その結果、フラジリティカーブを導入したモデルでは、計算結果は防護施設 健全および越流時倒壊の間に来ており、妥当な結果が得られることを確認した.現地適用 計算を行ったところ、今回設定したフラジリティカーブを用いると、実際に倒壊率を変化 させた計算ケースと比較して、倒壊率30%程度に相当する結果を得た.

今後の課題としては、防潮堤に対する越流量の増加のような性能低下の表現方法を様々 な種類の防護施設においても適切にモデル化して表現すること、それを踏まえて現地適用 計算の充実が挙げられる.一方でフラジリティカーブ自体の精度の検証も必要である.

#### 6.2 粘り強い構造例とシミュレーションの活用

#### 6.2.1 粘り強い構造の例

防波堤において,越流による基礎マウンドと海底地盤の洗掘対策の基本的な構造の一つ として,防波堤背後の基礎マウンドを嵩上げする腹付工が考えられる.図-6.2.1は,腹付工 を施した防波堤のイメージ図 (国交省港湾局, 2013) である.ケーソン背後に腹付工を,そ の上に洗掘防止工および被覆工を設置している.

また,ケーソンの上部にパラペットをつけたり(佐藤ら,2012),施工は困難であると考 えられるがケーソン後部にひさしをつけたりし(有川ら,2012),越流の着水方向を変化さ せたり,直接当たらないようにする方法も考えられる.いずれもケーソン背後の腹付工が 洗掘されにくくする効果を有する.

防波堤における基本的な考えは,背後の洗掘を防ぐためにどうするかというものであり, その例として腹付工法がある.また,ケーソン下部の洗掘を防ぐという意味においては, 杭式補強工法(有川ら,2015)があげられる.海岸堤防の補強例については,加藤ら(2014)を 参考にされたい.



図-6.2.1 腹付け工を施した防波堤のイメージ図(国交省港湾局, 2013)

#### 6.2.2 シミュレーションの活用

巨大な津波浸水被害を正確に予測,評価するためには,防波堤や防潮堤等の防護施設からの越流だけでなく,破壊による破堤等,防護施設の状態,さらには背後地に及ぶ影響まで正確に計算することが必要となる.

そのためには、構造物の破壊・変形まで考慮した計算を行う必要があり、三次元Navier-Stokes方程式と構造・地盤解析とを連成させたシミュレーションの開発が行われてきた (有川ら、2009).一方で、構造物の破壊・変形は、局所的な津波の高さを正確に求めること が重要であるが、波源からの距離を鑑み、津波波源域の流体計算に波動方程式を用いて、 三次元Navier-Stokes方程式と連成させる開発も行われている (Arikawa and Tomita, 2016).

ここでは、最新の事例として様々なシミュレーションを連成させ、階層的に津波の発生・ 伝播・遡上・構造物の破壊・浸水状況の再現まで計算できる手法の例を紹介する.

有川ら(2017)は、津波の波源から構造物の破壊まで一連の計算を行うため、5つの異なる シミュレーションを連成させた仕組みを構築した.まず、津波の波源から伝播までは、静 水圧を仮定した多層の非線形長波方程式 (STOC-ML)を用い、それと海表面をVOF法で計 算する単相のNavier-Stokes方程式 (CADMAS-SURF/3D)を接続させるが、間にバッファー となるよう、連続式から海表面を計算する単相のNavier-Stokes方程式 (STOC-IC)を入れて いる.さらに、気相の影響を考慮するため、単相のVOF法と気液2相のVOF法 (CADMAS-2F)を接続し、最後にFEMで計算される構造・地盤計算 (STR)と接続した.

#### (1) 物理実験との比較

物理実験との比較を行うことで、その妥当性を評価した.まず、越流による防波堤の破壊について、有川ら (2012)の物理試験と比較を行った.格子サイズはx=y=z=0.010m、ヤング率2.35×10<sup>11</sup>、ポアソン比0.333、ケーソン密度2.349 g/cm<sup>3</sup>、マウンド密度2.135 g/cm<sup>3</sup>、静摩擦係数0.6、動摩擦係数0.2である.図-6.2.2に実験および計算結果のスナップショット、図-6.2.3に水位差の時系列比較を示す.計算時間短縮のため、水位上昇速度を実験よりも早くしたことにより、ピーク発生時間に差が生じているが、実験とよく一致していることが分かる.



初期位置におけるケーソンの輪郭線 ------ 移動後におけるケーソンの輪郭線 -------

# 図-6.2.2 ケーソン滑動の比較



図-6.2.3 水位差時系列比較

## (2) 現地適用計算

対象地域は、湾口防波堤を有する K 港である. 図-6.2.4 に計算対象領域、およびネスティング領域の様子を示す.入力条件は、東日本大震災時の釜石沖の GPS 波浪計で計測された時系列の水位データを領域①の東側境界より入射させた.

図-6.2.5 に、滑動が見られたケーソンについて滑動前後のスナップショットの比較図を示す.また、図-6.2.6 には滑動したケーソン第3 函前後の港外側、港内側の水位およびそれらの水位差の時系列を示すが、ケーソン滑動時には10m 程度の水位差が発生していたことが分かる.



図-6.2.4 計算領域



(a) 滑動前

(b) 滑動後





図-6.2.6 ケーソン第3 函港内外前後の水位および水位差

# 6.2.3 今後の課題

粘り強い構造の事例と、シミュレーションの活用事例について紹介した.シミュレーションでは、津波の波源から構造物の破壊、それに伴う浸水までを異なるプログラムを連成させて計算する手法であり、物理実験との比較も良好であり、現地計算結果も妥当な結果であると考えられる.しかし、現実の構造物は、地盤や砕石なども絡み、より複雑であり、今後、さらに多くの構造形式で行えるようにし、破壊や倒壊が再現できるだけでなく粘り強い構造などの評価なども行えるようにすることが重要である.

## 参考文献

- 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(中間とりまと め), 平成23 年6月26日
- 伊藤喜行,谷本勝利,木原 力(1968):長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第4 報)-1968 十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤の効果-,港湾技術研究所報告, Vol.7, No.4, pp.55-84
- 伊藤喜行・谷本勝利・木原 力(1969):長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第 5 報)一八戸港の津波計算一,港湾技術研究所報告, Vol. 8, No.3, p.19-46
- 富田孝史,廉 慶善,鮎貝基和,丹羽竜也(2012):東北地方太平洋沖地震時における防波堤 による浸水低減効果検討,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, p. I 156-I 160
- Arikawa, T. and T. Oie(2015) : A Consideration Aimed at Improving the Resiliency of Protective Structures Against Tsunami, Post-Tsunami Hazard, Advances in Natural and Technological Hazards Research Vol. 44, pp 211-223
- 国土技術政策総合研究所,独立行政法人 土木研究所(2011):平成23年(2011年)東北地 方太平洋沖地震 土木施設災害調査速報,国総研資料,第646号

PIANC: Tsunami Disasters in Ports due to the Great East Japan Earthquake: PIANC Special Publication, Appendix to Report No.112-2010 (Mitigation of Tsunami Disasters in Ports), 2013

有川太郎, 大家隆行(2014): 防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討, 土木 学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_806-I\_810.

関 克己,有川太郎,富田孝史,千田 優(2016):防護施設の被災度を考慮した津波浸水範 囲評価手法の開発,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I\_301-I\_306.

富田孝史,本多和彦,千田 優(2016):高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析 手法,港湾空港技術研究所報告,第55巻,第2号,pp.3-34.

- 国土交通省港湾局(2013) :港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計ガイドライン
- 佐藤正勝,米山治男,長谷川巌,稲垣茂樹(2012):一般防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No.2, pp. I 252-I 257
- 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉慶善, 高橋研也(2012): 釜石湾 ロ防波堤の津波による被災メカニズムの検討 - 水理特性を中心とした第一報-, 港湾 空港技術研究所資料, No.1251
- 有川太郎,及川森,森安俊介,岡田克寛,田中隆太,水谷崇亮,菊池喜昭,八尋明彦,下迫 健一郎(2015):鋼管杭による防波堤補強工法の津波越流時の安定性に関する研究,港湾 空港技術研究所資料, No.1298
- 加藤史訓,諏訪義雄,鳩貝 聡,藤田光一(2014):津波の越流に対して粘り強く減災効果を発 揮する海岸堤防の構造検討,土木学会論文集 B2(海岸工学),vol.70,No.1,p.31-49 有川太郎,浜口一博,北川和士,鈴木智憲(2009):数値波動水槽と構造物変形計算との連成

計算手法に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.866-870.

Arikawa, T. and T. Tomita (2016): Development of High Precision Tsunami Runup Calculation Method Based on a Hierarchical Simulation, *Journal of Disaster Research*, Vol.11, No.4, pp.639– 646, doi: 10.20965/jdr.2016.p0639.

# 7. 減災のためのハード・ソフト施策の効果の定量化

7.1 費用便益分析を用いた津波ハザードと土地利用計画考慮による最適海岸堤防 高の考え方 (河野, 多々納)

本章では,減災のためのハード・ソフト施策の効果の定量分析の方法について検討する. ここでは,まず費用便益分析で利用される総余剰最大化の考え方を示す.

純便益指標(B-C)を用いて物理的津波防御レベルの設定を行うための方法に関して議 論を進めている. L1 津波が数十年から百数十年と幅があることに着目すれば,例えば西 日本では,再現期間 50 年程度(昭和南海級),100 年程度(安政南海級),150 年程度(宝 永級)等の津波(物理的防御水準)を想定し,背後地の利用状況を考慮した上で,それぞ れに対して費用と便益の計算を行い,効率性基準を満たす範囲内で最も望ましい防御水準 を採択するという方法が考えられる. 図-7.1.1 にその費用と便益のイメージ図を描いた.



図-7.1.1 防潮堤の高さとその便益と費用

本稿においては,最も効率的な高さを H\*と呼んでいる.この H\*の数式による定義は次のように示すことができる.ここでは,最初に地震生起確率の動学的変動は無視して,定常状態を仮定する.

$$H^* = \arg\max_{H} \int_0^\infty B_n(H, f(S); X) f(S) dS - C(H)$$
(7.1.1)

ここで, *B<sub>n</sub>*(*H*, *f*(*S*); *X*)は純便益関数

Hは海岸堤防高さ

f(S)は規模Sの津波および高潮の生起確率関数

Xは政策 (外生). 政策の例としては,土地利用規制,税金,補助等が挙げられる.
C(H)は海岸堤防建設コスト

現時点を0時点とすると、純便益関数は、

$$B_n(H, f(S); X) = \int_{t=0}^{\infty} e^{-it} b(H, f(S), t) dt$$
(7.1.2)

ここで, i は社会的割引率,

t は時間

bは各年度単位の便益

便益の計測方法は一般均衡分析,ヘドニックアプローチなど様々ありうる.なお,この 便益を計測するとき,次のような関数を想定して計測することも可能である.

$$b(H, f(S), t) = b(L(H, X, f(S)), K(H, X, f(S)), E(H, X, f(S)), t)$$
(7.1.3)

ここで,Lは土地利用(密度や用途)

Kは景観

E は環境

これらが海岸堤防高さ H, 政策 X, 津波および高潮生起確率関数 f(s)に依存する.ただし, どこまでその内生性を考えるべきかは要検討である.例えば,景観は K(H)と考えればよい 場合が多いと思われる.

なお,地震生起確率が時間に依存して変化する場合は,上記の式をf(S)=f(S,t)と変更すればよい.

以下では,7.2 で土地利用 (式(7.1.3)では L) での変化の予測方法,7.3 では直接被害の計 測手法,7.4 では立地均衡で決定する土地利用モデルを二つ紹介する.7.5 では政策実施コ ストについて,7.6 では外部性 (式(7.1.3)では景観 K や環境 E) について説明する.7.7 で は将来的課題として災害不安についての理論とその計測方法を示す.

## 7.2 津波リスク変化に応じた企業立地・人口の変化の把握方法 (河野)

本節では、津波リスク変化に応じた企業立地および住宅立地の変化の把握方法を検討する.また、実際に経済データをもとに計量分析を行う方法について述べる.

防潮堤整備により、津波リスクが変化する.その時、そのリスク変化は防潮堤からの距離や地形によって、空間的に異なる.そして、その津波リスク変化に応じて、企業立地が変化し、また住民の移住も起こる.これらの立地や人口変化は、空間的な均衡分析で分析できる.例えば、河野ら(2013)または Kono et al. (2016)ではこの空間的均衡分析を行っている.しかしながら、均衡分析は複雑であり、その分析を全国の沿岸地域に適用することは現実的でない.そこで、その方法に代わるものとして、統計分析手法を利用する.特に、近年注目度の高い差分の差分の方法を適用する.

### 7.2.1 差分の差分を用いた企業立地変化分析モデル

差分の差分の利点は地域固有効果を除ける点にある.例えば、 $t_a$ 時点の企業数  $N(t_a)$ と  $t_b$ 時点の企業数  $N(t_b)$ を説明するとき、それぞれの地域への立地には地域固有の要因によるものがある.しかし、 $N(t_b) - N(t_a)$ のように差分をとると、その地域固有効果が時間的に変化しないとすると、地域固有効果を分析する必要がなくなる.地域固有効果は様々な要因が考えられるため、それらを捉えるのではなく、取り除いて分析できることは計量分析において大きな利点である.

しかし、津波リスクに基づく立地を考慮した場合、通常の差分の差分と異なり、地域固 有効果がすべて推計式から除かれるわけではないことがわかった.それは、津波による被 災が実際にあったときに、その減災への対応が地域ごとに異なるためである.以下で、そ の点も含めて、厳密に推定式を導出する.

t時点のr地域の立地数を $N_r(t)$ とする.そのとき,それを式(7.2.1)のようにr地域で得られる利潤 $\pi$ の関数と考えることが一般にできる.

$$N_{r}(t) = f(\pi(\mathbf{X}_{\mathbf{r}}, \mathbf{Y}_{\mathbf{r}}, t, D_{r1}(t), D_{r2}(t), ..., P_{1}, P_{2}, ...))$$
(7.2.1)

$$\mathbf{X}_{\mathbf{r}} = [X_{r1}, \dots, X_{ri}, \dots, X_{rI}], \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{r}} = [Y_{r1}, \dots, Y_{rj}, \dots, Y_{rJ}] と する.$$

ここで、 $\pi$ は一年間の期待利潤、 $X_{ri}$ は平常時や災害時の利潤に影響する立地要因(リスクの空間的差異以外)のうち分析対象期間において変化がない要因、 $Y_{rj}$ は平常時や災害時の利潤に影響する立地要因(リスクの空間的差異以外)のうち分析対象期間において変化がある要因、tは時間トレンドを表し、例えば産業全体の需要動向を捉える. $D_{rk}(t)$ はt時点におけるr地点のkレベルの津波による主観浸水深、 $P_k$ はkレベルの津波が一年間に来る確率である.ただし、以降では、実証分析で用いるレベルは一つであるため、k=1として定式化して、kのサブスクリプトも省略する.kが複数ある場合も、まったく同様に式展開が可能である.

そうすると、期待利潤 $\pi_r$ は、

$$\pi_r(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, D_r, P) = (1 - P)\pi_{r0} + P\pi_{r1}$$
(7.2.2)

と一般に表せる.ここで、 $\pi_{r0}$ は一年間無災害時の利潤.ここで、津波が一年間のうちに来た時の年間利潤レベルを $\pi_{r1}$ で表すこととする.

ここで,  $\pi_{r_0}$ を次のように特定化する.

$$\pi_{r0} = \alpha + \beta_{X} \cdot X_{r} + \beta_{Y} \cdot Y_{r} + \chi$$
(7.2.3a)  
ここで、  $\beta_{X} = [\beta_{X1}, ..., \beta_{Xi}, ..., \beta_{XI}], \quad \beta_{Y} = [\beta_{Y1}, ..., \beta_{Yi}, ..., \beta_{YI}]$ とする、 山は内積を示す.

ここで、津波のときの操業に与える影響が属性別に異なり、その影響度合いを  $\lambda_{z_i}$  (Z = X or Y)で表す. すなわち、

$$\pi_{rk} = \lambda_{\alpha} \alpha + \lambda_{\mathbf{X}} \cdot \mathbf{\beta}_{\mathbf{X}} \cdot \mathbf{X}_{\mathbf{r}} + \lambda_{\mathbf{Y}} \cdot \mathbf{\beta}_{\mathbf{Y}} \cdot \mathbf{Y}_{\mathbf{r}} + \lambda_{t} \gamma t$$
(7.2.3b)

ここで、 $\lambda_{\mathbf{X}} = [\lambda_{X_1}, ..., \lambda_{X_i}, ..., \lambda_{X_I}], \lambda_{\mathbf{Y}} = [\lambda_{Y_1}, ..., \lambda_{Y_i}]$ とする.なお、 $\lambda_{\mathbf{X}} \in \lambda_{\mathbf{Y}} \in \lambda_{\mathbf{Y}}$ の要素は一般的には1以下の値となる.すなわち、1であるときが、平常時と同様にその要素が寄与するという意味になる.なお、例えば、操業が止められる期間が長くなれば、 $\lambda_{kZi}$  ( $Z = \alpha, X, Y, \text{or } t$ )は小さくなる.そこで、 $\lambda_{kZi} = 1 - \kappa_{iZ}(D_r)$ 、すなわち浸水深に応じて  $\lambda$ が決定すると仮定して式(7.1.2)に代入すると

$$\pi_{r}(t) = (1-P)\pi_{0} + P\pi_{1}$$

$$(1-P)[\alpha + \beta_{X} \cdot \mathbf{X}_{r} + \beta_{Y} \cdot \mathbf{Y}_{r} + \boldsymbol{\gamma}]$$

$$+ P[\lambda_{k\alpha}\alpha + \lambda_{kX} \cdot \beta_{X} \cdot \mathbf{X}_{r} + \lambda_{kY} \cdot \beta_{Y} \cdot \mathbf{Y}_{r} + \lambda_{t}\boldsymbol{\gamma}]$$

$$= [\alpha + \beta_{X} \cdot \mathbf{X}_{r} + \beta_{Y} \cdot \mathbf{Y}_{r} + \boldsymbol{\gamma}]$$

$$- P[\kappa_{\alpha}(D_{r})\alpha + \kappa_{X}(D_{r}) \cdot \beta_{X} \cdot \mathbf{X}_{r} + \kappa_{Y}(D_{r}) \cdot \beta_{Y} \cdot \mathbf{Y}_{r} + \kappa_{t}(D_{r})\boldsymbol{\gamma}]$$
(7.2.4a)

となる.

ここで、我々の分析に必要のないゾーンの固定効果を一変数として扱うと

$$\pi_{r}(t) = \left[\alpha + B_{r} + \beta_{Y} \cdot \mathbf{Y}_{r} + \gamma t\right] - \left[\kappa_{\alpha}(D_{r})\alpha' + \kappa_{X}(D_{r}) \cdot \beta_{X}' \cdot \mathbf{X}_{r} + \kappa_{Y}(D_{r}) \cdot \beta_{Y}' \cdot \mathbf{Y}_{r} + \kappa_{t}(D_{r})\gamma't\right]$$
(7.2.4b)

ここで、 $B_r \equiv \boldsymbol{\beta}_X \cdot \mathbf{X}_r$ ,  $\alpha' \equiv P\alpha$ ,  $\boldsymbol{\beta}'_X \equiv P\boldsymbol{\beta}_X$ ,  $\boldsymbol{\beta}'_Y \equiv P\boldsymbol{\beta}_Y$ ,  $\gamma' \equiv P\gamma$  である. なお,  $\kappa_{\alpha}(D_r)$ ,  $\kappa_{\gamma}(D_r)$ ,  $\kappa_t(D_r)$ の関数形としては,線形や非線形が考えられる. 二つの特定化のケースを ここでは想定する.

 $\kappa_{iZ}(D_r)$ に関する特定化1.  $\kappa_{\alpha}(D_r) = \mu_{\alpha}D_r, \kappa_{X}(D_r) = \mu_{X}D_r, \kappa_{Y}(D_r) = \mu_{Y}D_r, \kappa_{t}(D_r) = \mu_{t}D_r$  $\kappa_{iZ}(D_r)$ に関する特定化2.

$$\begin{split} D_r &= 0 \ \mathcal{O} \ \mathcal{V} - \mathcal{V}, \quad \kappa_{\alpha}(D_r) = 0, \quad \kappa_{\mathbf{X}}(D_r) = 0, \quad \kappa_{\mathbf{Y}}(D_r) = 0, \quad \kappa_t(D_r) = 0 \\ D_r &= 0m - 0.5m \ \mathcal{O} \ \mathcal{V} - \mathcal{V}, \quad \kappa_{\alpha}(D_r) = \mu_{\alpha 1}, \quad \kappa_{\mathbf{X}}(D_r) = \mu_{\mathbf{X}1}, \quad \kappa_{\mathbf{Y}}(D_r) = \mu_{Y1}, \quad \kappa_t(D_r) = \mu_{t1} \\ D_r &= 0m - 0.5m \ \mathcal{O} \ \mathcal{V} - \mathcal{V}, \quad \kappa_{\alpha}(D_r) = \mu_{\alpha 2}, \quad \kappa_{\mathbf{X}}(D_r) = \mu_{\mathbf{X}2}, \quad \kappa_{\mathbf{Y}}(D_r) = \mu_{Y2}, \quad \kappa_t(D_r) = \mu_{t2} \end{split}$$

ここで、
$$N_r(t) = f(\pi_r)$$
の関数形として次の3つの特定化を行う.  
特定化1.  $N_r(t) = \theta \pi_r(t)$ なお、 $\mathbf{Y}_r$ とtすべてデータそのまま (7.2.5a)  
特定化2.  $N_r(t) = \theta \pi_r(t)$ なお、 $\mathbf{Y}_r$ とtすべてデータの対数 (7.2.5b)  
特定化3.  $N_r(t) = \theta \exp \pi_r(t)$ なお、 $\mathbf{Y}_r$ とtすべてデータの対数 (7.2.5c)

なお,  $\theta$ は回帰分析のときに式(7.2.4)のパラメータにかかるのみなので, ここでは $\theta$ =1 としても実質的に影響がない.特定化3については $\ln N_r(t) = \ln \theta + \pi_r(t)$ である.以上のことから,式(7.2.4)を代入して,特定化1,2,3の回帰式を示すと,

特定化1.  

$$N_{r}(t) = [\alpha + B_{r} + \beta_{Y} \cdot Y_{r} + \gamma t]$$

$$-[\kappa_{\alpha}(D_{r})\alpha' + \kappa_{X}(D_{r}) \cdot \beta'_{X} \cdot X_{r} + \kappa_{Y}(D_{r}) \cdot \beta'_{Y} \cdot Y_{r} + \kappa_{t}(D_{r})\gamma' t]$$
特定化2.  

$$N_{r}(t) = [\alpha + B_{r} + \beta_{Y} \cdot Y_{r} + \gamma t]$$

$$-[\kappa_{\alpha}(D_{r})\alpha' + \kappa_{X}(D_{r}) \cdot \beta'_{X} \cdot X_{r} + \kappa_{Y}(D_{r}) \cdot \beta'_{Y} \cdot Y_{r} + \kappa_{t}(D_{r})\gamma' t]$$
ただし,  $Y_{r} \geq t$  はすべてデータの対数.

特定化3. 
$$\frac{[\alpha + B_r + \beta_Y \cdot Y_r + \gamma t]}{-[\kappa_{\alpha}(D_r)\alpha' + \kappa_X(D_r) \cdot \beta'_X \cdot X_r + \kappa_Y(D_r) \cdot \beta'_Y \cdot Y_r + \kappa_t(D_r)\gamma t]}$$

ただし、両辺の変数はすべて対数.

なお,  $\kappa_{iZ}(D_r)$ の特定化をした時のパラメータ $\mu_Z$ とパラメータ $\beta'_Z$ は, 分離できないパラ メータとして求まる.なお,本分析では分離する必要もない.

#### 7.2.2 差分の差分を用いた住宅立地変化分析モデル

住宅立地変化モデルは企業立地モデルと基本的に同じ構造である.ただし、利潤関数が 効用関数に変化し、さらにコーホートを考慮したものになる.書き換えると

$$N_r(t) = f(U(X_{r_1}, \dots, X_{r_i}, \dots, X_{r_l}, D_{r_1}(t), D_{r_2}(t), P_1, P_2))$$
(7.2.6)

ここで、*U*は一年間の利潤、*X<sub>ri</sub>*は効用に影響する立地要因(リスク以外)、*D<sub>rk</sub>(t)*は*t*時点における*r*地点の*k*レベルの津波による主観浸水深、*P<sub>k</sub>*は*k*レベルの津波が一年間に来る確率である.ここでは津波レベルを2レベルのみ考える.

そうすると, 期待効用 Uは,

$$U(X_{r_1}, \dots, X_{r_l}, \dots, X_{r_l}, D_{r_1}(t), D_{r_2}(t), P_1, P_2) = (1 - P_1 - P_2)u_0 + P_1u_1 + P_2u_2$$
(7.2.7)

と一般に表せる.これ以降,式展開は基本的に企業立地と同様である.しかしながら,企業立地と違い,意思決定者が t<sub>a</sub>から t<sub>b</sub>の時間変化において年齢が上がる.それを考慮して分析する必要がある.すなわち,人口変化は同じ主体における変化でなければいけない.そのため,t<sub>a</sub>で20代の人口をとった場合,t<sub>b</sub>を10年後とすると30代の人口を用いるべきである.

## 7.3 直接被害の効果計測手法

#### 7.3.1 人的被害

## (有川, 岡安)

津波遡上シミュレータと避難シミュレータとを連成して計算することで,原理的には, 津波による人的被害推定を行うことができる.その際,それぞれの計算精度の向上を図る ことは言うまでもないが,特に,避難シミュレータの精度については,今後も研究の余地 が多く残されている.たとえば,道幅と歩行速度,歩行者と車の解析,倒壊建物による避 難路閉塞など主として物理的な要因の影響や,避難開始の判断,避難経路選択,身内の心 配など主として心理的な要因の影響の組み込みをどうしていくかについては,最終的にと りまとめを行う予定である.そのような状況を鑑み,本報告書では,まずは,もっとも単 純な最短経路を選択する避難シミュレーションとの組み合わせによる人的被害の推定を行 う一例を紹介する.

#### (1) モデルの概要

避難者の進行方向の決定には多様な要因があると考えられるため,各要因を個別にポテンシャルとして定義し,重ね合わせることで進行方向を決定するモデルを導入した.式 (7.3.1)にポテンシャルの算出手法を示す.

$$U_{k} = a_{k,1}u_{1} + a_{k,2}u_{2} + \dots + a_{k,n}u_{n} + \dots$$
(7.3.1)

## ここで,

U<sub>k</sub>: 第 k 避難者に対する重ね合わせポテンシャル

 $u_n$ : 第n ポテンシャル

 $a_{k_n}$ : 第 k 避難者の第 n ポテンシャルに関する重み

本研究では、ポテンシャル<sub>u</sub>として(a)避難経路ポテンシャル(避難所までの最短距離), (b)群衆ポテンシャル(他の避難者に追従する心理),を重ね合わせることにより、避難行 動を表現した.また、STOC 及び CS3D と避難モデルを連成し、津波の挙動と避難行動を 同時に計算することで、津波規模と避難条件に応じた避難率の定量的な評価を可能とした (有川・大家, 2015). 図-7.3.1 に、モデルのフロー図を示す.

#### (2) 避難経路ポテンシャル

解析用メッシュの各セルについて,式(7.3.2)に示す通り地形や障害物を考慮した最寄り の避難所までの最短距離を算出し,その逆数に-1を乗じたものを避難経路ポテンシャルと する.避難所セルのポテンシャルは-10<sup>10</sup>に,避難所へのルートが存在しないセル(進入禁 止セル)のポテンシャルは-10<sup>-10</sup>にそれぞれ設定する.図-7.3.2にポテンシャルの計算例を 示す.

$$u_{shelter}(i,j) = \frac{-1}{r(i,j)}$$
(7.3.2)

ここで,

*u*<sub>shelter</sub>: 避難経路ポテンシャル

*r*(*i*, *j*): (*i*, *j*) セルから最寄の避難所までの最短距離 である.



図-7.3.1 モデルのフロー



なお、本モデルでは、歩行速度への高低差の影響を考慮して、斜面勾配Sに対する歩行速度の変化率により、あるセルaからbまでの距離を式(7.3.3)のように補正する.

$$r'(i,j) = r(i,j) \times \frac{$$
平地での歩行速度}高低差のある時の歩行速度 $= \frac{r(i,j)}{\text{slope_function}(S_{a \to b})}$  (7.3.3)

ここで,式(7.3.3)中の slope\_function には,式(7.3.4)で表されるハイキング関数を使用する. また,図-7.3.3 にこの関数のプロットを示す.



図-7.3.3 ハイキング関数のプロット

slope\_function(S) = exp(-3.5|S+0.05|)

(7.3.4)

図の横軸は避難者の進行方向の傾斜度合を、縦軸は傾斜に伴う歩行速度の補正度合を示 す.図より、歩行速度は下り勾配5度付近で最大となり、それより傾斜の絶対値が大きく なると速度が減少する.また、傾斜が50度以上になる場合、速度が0(移動不可能)とな る.

なお、本モデルでは、避難経路ポテンシャルを計算ループ開始前の一度しか計算してい ない.実際の避難時には、地震や津波により避難経路が途中で寸断されることにより、避 難者が新たな経路の選択を迫られるといった事態も想定されるが、そういった事象の反映 については今後の課題としたい.

## (3) 移動方向の決定

算出したポテンシャルを重ね合わせ,各避難者に対する重ね合わせポテンシャルを算出 する.その後,図-7.3.4 に示す通り,避難者は自分が位置するセルの周辺 8 セルのポテン シャルを比較し,最もポテンシャルの低いセルの方向へ移動する.



**図-7.3.4** 移動方向の決定方法

## (4) 歩行速度の決定

避難者は、前項で決定した進行方向 θに、式(7.3.5)に示す速度で移動する.

$$V_{k} = V_{0k} \times \text{slope\_function}(S) \times \left(1 - \frac{d}{d_{dead}}\right)$$
(7.3.5)

ここで,

V<sub>k</sub>:避難者 k の歩行速度

V<sub>0k</sub>:避難者 k の初期歩行速度(入力速度)

S:勾配

d:避難者 k が位置するセルにおける浸水深

d<sub>dead</sub>:避難者の死亡判定水深(m)

式(7.3.5)中の右辺第2項は、式(7.3.4)で示したハイキング関数による歩行速度の補正を、 第3項は水深による歩行速度の補正をそれぞれ示す.なお、式中の浸水深*d*は、STOC及びCS3Dにより計算される値を読み込むことにより設定する.

#### (5) 避難者の死亡判定

前項で示した歩行速度計算時において,式(7.3.5)中の*d<sub>dead</sub>*を超える浸水深を持つセルに 含まれる避難者を死亡と判定する.以上(3)から(5)項の検討を計算終了まで繰り返すことに より,最終的な避難成功率の検討を行う.死亡判定については,今後,流速の影響を考え, 作用力に変更することも考えられる(有川ら,2006).

#### (6) 避難開始時間による津波避難タワーの効果

実際の活用例として,津波避難タワーの効果について,シミュレータを用いて検討した. 対象地区は,N町とする.

a) 避難シミュレーションの計算条件

避難シミュレーションは,設定条件として避難者数 2700人,初期の歩行速度 1.0 m/s とし, 避難経路上にランダムに配置した. 津波避難タワー整備後を想定した津波避難タワー2 基 (図-7.3.5の2番,5番)を含む9ヵ所を避難所に設定したシミュレーションと,整備前を想 定した津波避難タワーを含まない避難所7ヵ所を設定したシミュレーションを行った. こ のとき,避難者の避難開始時間は,0s,300sと,600~1800sの間の100s毎で設定を行 った.避難シミュレーションの詳細な条件を表-7.3.1に示す.また,設定した避難経路及び 避難所の図を図-7.3.5に示す.

b) 津波避難タワーの効果

津波避難タワーの整備前後の避難を開始する場所から避難所までの最短経路の距離を, 図-7.3.6に津波避難タワーがない場合の,図-7.3.7に津波避難タワー有りの場合の図を示す. 津波避難タワーの整備によって,特に沿岸部から避難する際の,避難経路距離が大きく改 善されていることがわかる.

また津波避難シミュレーションの結果から,死亡率と避難開始時間の関係のグラフを図-7.3.8,その差を図-7.3.9 に示す. 避難開始時間が 0~600 s では,津波避難タワーの整備前後に関わらず死亡率は 0%となり,避難開始時間を 10 分以内に開始することができたら,津波避難タワーの有無に関わらず死亡者が出ないことがわかった. 避難開始時間が 700 s を超えると,津波避難タワーが無い場合に被害に遭う人が出てくるが,津波避難タワーが 有ると避難開始時間が 800 s までは死亡率は 0%であった. 避難開始時間が 900 s から 1500 s までは,津波避難タワーの有無に関わらず,次第に死亡率は高くなっていくが,津波避難タワーによって死亡率が抑えられていることが確認できる.しかし,避難開始時間が 1600 s を超えると共に死亡率は 100%となった.



図-7.3.5 避難経路と避難所の設定

項目	詳細
避難経路	図-7.3.5 参照
	避難タワー無し7ヵ所
波難市	(図-7.3.5内の2番と5番を設定しない)
DEE 关표 [7]	避難タワー有り9ヵ所
	(図-7.3.5内の2番と5番も設定する)
格子間隔	10.0m
格子数	x: 162, y: 162, z: 1
タイムステップ間隔	0.1 s
計算時間	7200 s
避難開始時間	0 s, 300 s, 600 s~1800 s 間の 100 s 毎
避難速度	全 agent 一律で 1.0 m/s
避難経路選択	最短経路
agent 数	2700 人
agent 配置場所	経路上にランダム
死亡判定水深	1.0 m

表-7.3.1 避難シミュレーションの詳細な条件



図-7.3.6 避難タワー無しの場合の避難経路距離



図-7.3.7 避難タワー有りの場合の避難経路距離



図-7.3.9 津波避難タワーの有無による死亡率の差

## (7) 今後の課題

本節の冒頭でも述べたが、物理的効果や心理的効果を加え、より現実に近いモデルにしていくことは、対象地区のもつ避難しやすさを評価するうえで、大変重要となる.一方で、 最短経路のみで行うことで、おおよその傾向をつかめると同時に、避難訓練時などにおける実際の避難行動データとの差異を考えることで、避難計画の対策の立案につながると考えられる.その両方から並行して進めることで、より実務的に有益なツールとなりえると 考えられる.

## 7.3.2 資産被害 一建物脆弱性と津波被害関数一

(越村,安田)

2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波は,我が国全体で全壊建物 127,197 棟(警察庁,2012年1月)という激甚な被害をもたらした.被災地域の復興まちづくりのために,特に津波のリスクを考慮した新たな土地利用 (ゾーニング)の観点で,浸水域内の建物流失状況の実態を把握することは極めて重要である.本研究では,建物被害状況と津波の流体力学的な諸量 (浸水深)とを関連づけ,地域が持つ津波に対する脆弱性を明らかにすることを目的とする.具体的には,建物の津波に対する脆弱性を「津波被害関数」という尺度で明らかにする.

本項では、津波被害関数の概念について、既往の津波被害予測式の変遷も含めてレビューし、その構築手法の概要を述べる.次に、2011年東北地方太平洋沖地震津波の被災地である宮城県沿岸部において得られた現地調査による浸水深と航空写真の判読による建物被害情報を統合して、津波被害関数を構築する.最後に、得られた津波被害関数から津波被災地における建物脆弱性について論ずる.

#### (1) 津波被害関数

a) 津波被害予測式の変遷

ここではまず.我が国における津波被害予測式の変遷について,その概略をレビューする.ここでいう津波被害予測式とは,特に建物被害について,その被害程度と津波の外力 (浸水深,流速,津波力)の関係を求めるものである.詳細については越村ら(2009)を参照 されたい.

津波による建物被害を破壊率に着目して、定量的な調査を最初に行ったのは羽鳥(1984) である.羽鳥(1984)は1896年明治三陸地震津波、1933年昭和三陸地震津波、1960年チリ 地震津波の3事例についての資料の分析を通じて集落における津波高(平均海面上の高さ) と家屋破壊率についてまとめた.一方、首藤(1992)は、羽鳥と同様に既往の津波事例を調 べ、報告された津波高と数値計算結果から、津波外力と家屋被害程度の関係を求めた.ま た、独自に提案した津波強度式との関連で構造別家屋被害、漁船、養殖施設、防潮林の被 害程度を整理し、津波被害想定指標としてまとめた.首藤の津波強度と家屋被害の関係で は、たとえば、浸水深が2~4mでは木造家屋は全面破壊、石造家屋は「持ちこたえる」と 評価されている.首藤の指標は我が国の津波被害評価の基準として広く利用されており、 対象とする地域の津波数値計算結果から得られた浸水深に対して浸水域内家屋の被害数を 推計する手法がとられている.

現地調査から被害予測式の構築手法を確立したのは,松富らの一連の研究である.特に 飯塚・松富(2000)は構造別,外力別 (浸水深,流速,津波力)の関連で被害発生の閾値を求 めており,たとえば木造家屋について見てみると,首藤の基準と整合する形で,浸水深 2m を超えると大破・流失といった基準が得られている.しかし,従来の津波被害予測式は, 閾値を超えた場合には一律の被害評価とならざるを得ず,建物群の被害棟数を集計して, 確率的な評価を行う場合には適用の限界があった. b) 津波被害関数

津波被害関数とは,津波による家屋被害や人的被害の程度を被害率(または死亡率)として確率的に表現し,津波浸水深,流速,津波力といった津波の流体力学的な諸量の関数として記述するものであり,津波フラジリティ関数または津波フラジリティカーブとも呼ぶ(Koshimura ら, 2009; 越村ら, 2009).

津波被害関数の構築は、以下の手順で行う.

- 衛星画像・航空写真を用いた建物被害の判読,現地調査,歴史資料等から被害情報を取得し,家屋一棟毎の被害程度や建物群の被害率を算定する.
- 2) 数値解析, 現地調査, 歴史資料等から被害評価のための津波外力 (浸水深・流速等) を 推定する.
- 3) 津波外力と建物被害率を関連づける.被害建物群の棟数を集計して被害率を算定する 場合には、被害率算定の母集団に対応した外力範囲とその代表値を決定し、被害率と 外力とを関連づける.
- 4) 津波外力と被害率の関係から回帰式を求める.外力 x に対する家屋群の被害率 PD(x) は、標準正規分布の累積確率分布関数を用いて、正規分布または対数正規分布で表せる と仮定して回帰分析を行う.

#### (2) 2011 年東北地方太平洋沖地震津波災害における津波被害関数の構築

a) 津波被害関数構築の流れ

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震津波における津波被害関数構築の手続きについて述べる.

まず,宮城県の津波浸水域内において被災前後に撮影された航空写真を使用し,建物の 屋根の有無に着目して,流失建物一棟毎の目視判読を実施する.建物被害判読結果(流失 または残存)は,建物 GIS データへの属性情報として記録し,それをマッピングする.

次に,津波浸水深の空間分布を把握する.現地調査による津波浸水深の測定値を GIS 上 にプロットし,空間補間によりその空間的な分布を明らかにする.

さらに,得られた2種類のデータ(建物被害と浸水深)の関連づけと統合分析を行う. 建物被害データと浸水深の空間分布を関連づけ,建物一棟毎の被害属性と浸水深のデータ セットを作成する.このデータセットから津波外力と家屋被害率の離散的な関係を得る.

最後に,得られた津波浸水深と建物被害率(流失率)の離散データを,標準正規分布の 累積確率分布関数を用いて対数正規分布で表せると仮定して回帰分析を行う.

この一連の手続きを、宮城県全体、沿岸部各市町において実施する.さらに、既往の津 波災害事例 (2004 年インド洋大津波のバンダ・アチェ、1993 年北海道南西沖地震津波の奥 尻島青苗地区) から得られた津波被害関数との比較を通じて、今次津波被災地の脆弱性を 論ずる.

以下では、上記それぞれの分析について詳細に述べる.

## b) 航空写真を用いた建物被害判読

国土地理院(2011)は、2011 年東北地方太平洋沖地震発生の翌日から、航空機により被災 地の撮影を開始し、正射画像 (オルソ画像)の公開を行った.本研究では、国土地理院のサ イトからダウンロードしたオルソ画像を GIS 上に展開してモザイク画像を作成し、建物被 害の判読を行った.建物データは、ゼンリンのデジタル住宅地図 (Zmap-TOWNII) を利用 した.デジタル住宅地図の shape ファイルに新たな属性テーブルを付与し、被災後画像の 屋根の有無に着目して被害判読を行った.航空写真判読による建物被害調査の結果の一例 を図-7.3.10 に示す.屋根が残存している場合には、"Surviving (残存)"、屋根が視認できな い場合には"Washed-away (流失)"として判定を行った.この方法の詳細については Gokon and Koshimura (2012)を参照されたい.

このように、GIS 上に航空写真オルソ画像,津波浸水域データ (国土地理院,2012),建 物データを重ね,浸水域内の建物データを抽出して行政区毎に集計することで、「浸水域 内建物棟数」、「流失建物棟数」、「流失率」が得られる.その結果を表-7.3.2 に示す.宮 城県全体では、浸水域内建物 148,618 棟のうち、42,557 棟の建物が流失したことが分かっ た.また、宮城県沿岸部 14 市町の浸水域内建物流失率を算出した結果、石巻市以北のリア ス式海岸での流失率は 55~86%にも達し、宮城県松島町や塩竈市のような湾口が狭く浅い



図-7.3.10 国土地理院の航空写真の判読による建物被害把握例(名取市閖上地区). (a)直下視航空写真のオルソ画像(2011 年 3 月 12 日撮影), (b)屋根の有無に着目して得られた被害判読結果(Surviving:残存, Washed-away:流失), (c, d) 名取市閖上地区の建物被害判読結果の拡大図.

市町名	浸水域内建物数	流失建物数	流失率(%)
気仙沼市	10,813	5,964	55.2
南三陸町	5,615	4,855	86.5
女川町	4,607	3,456	75.1
石巻市	62,440	12,521	20.1
東松島市	16,860	3,171	18.8
塩竈市	8,995	373	4.1
松島町	695	14	2.0
七ヶ浜町	3,253	1,120	34.4
多賀城市	6,310	226	3.6
仙台市	13,721	4,329	31.6
名取市	5,530	2,810	50.8
岩沼市	5,285	1,298	24.6
亘理町	8,143	2,059	25.3
山元町	5,373	2,802	52.1

表-7.3.2 宮城県における浸水域内建物被害判読の結果

湾の奥では数%程度に留まっていた.ただし、本解析においては、住家・非住家、建物構造についての詳細な集計は行っていない.

#### (3) 現地調査データの取得

震災発生後から,数多くの機関が津波被災地において津波浸水高・遡上高 (東北地方太 平洋沖地震津波合同調査グループ,2012),遡上限界点 (東北大学,2011),浸水深の測定を 行った.本研究では,津波被害関数を「建物流失率」と「浸水深」の関係式として求める ため,浸水深のデータが必要となる.

津波被害関数構築のためには,建物一棟毎に建物被害と浸水深とを関連づける必要があ る.現地調査では,全ての建物における浸水深を測定することは不可能であるから,得ら れたデータを空間的に補完して,浸水域内の連続的な浸水深分布を得る必要がある.その ために,越村ら (2012) による調査,国土交通省および宮城県による調査結果のうち約 2,000 地点の測定浸水深と,国土地理院による津波浸水ラインデータを点情報に変換して 浸水深ゼロとしたデータ (浸水限界点では浸水深はゼロ)を用いて,逆距離荷重法により 空間補間した.その結果を図-7.3.11 に示す.

#### (4) データの統合と被害関数の決定

次に,被害判読後の建物データ(流失・残存の属性つき)と浸水深分布のデータを GIS 上で統合し,浸水域内の建物位置における被害有無の情報と津波外力情報(浸水深)を関 連づけて流失率を算定する.具体的には,(i)浸水深と建物流失・残存を関連づけたテーブ ルを作成して,(ii)浸水深の昇り順にデータをソートし,(iii)上から一定のサンプル数(建 物数)で流失率算定のグループおよび母数を決定し,それに対応した津波外力および被害 建物棟数のヒストグラムを作成する.このとき,各外力に対応したグループのサンプル数 (建物流失率算定のための母数)ができるだけ同一になるように留意する.ここでは,建物 300~500棟毎にサンプルグループを取り,浸水深の中央値とグループ内での流失率を求め,



図-7.3.11 現地調査による津波浸水深測定結果に基づく浸水深分布.(a)測定浸水深 2000 点と国土 地理院の浸水ライン データから空間補間して得られた浸水深分布,(b)仙台平野における浸水深分 布の詳細 (実線は国土地理院 による浸水ライン,黒点は浸水深測定点).浸水深分布は,実際の測 定点における測定値と浸水ライン上の 点を浸水深ゼロとして,逆距離荷重法により 100m 毎に内 挿して求めた.

浸水深と建物流失率の離散的な関係を得る.

次に回帰分析により被害関数を同定する.詳細な方法は越村ら(2009)を参照されたい. ここでは,式(7.3.6)に回帰させることを考え,最小二乗法によりんと*そ*を求めた.

$$P_D(x) = \Phi\left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi t}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \lambda)^2}{2\xi^2}\right) dt$$
(7.3.6)

ここで、xは浸水深で、 $\lambda$ 、 $\xi$ は ln x (浸水深 x の自然対数)の平均値と標準偏差である.上記の手続きによって得られた津波被害関数のパラメータを表-7.3.3 に示す.

λ	ζ	$R^2$
1.256	0.550	0.83
0.701	1.100	0.90
1.109	0.373	0.97
1.389	0.631	0.97
1.210	0.575	0.94
0.856	0.540	0.91
1.105	0.513	0.96
1.234	0.523	0.91
1.008	0.427	0.78
	λ 1.256 0.701 1.109 1.389 1.210 0.856 1.105 1.234 1.008	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

表-7.3.3 津波被害関数の回帰式のパラメータ (R<sup>2</sup>は回帰式の決定係数)

#### (5) 津波被害関数の比較分析

本解析で得られた津波被害関数を図-7.3.12 に示す.ここでは,既往の津波災害の例として,2004 年インド洋大津波におけるスマトラ島 Banda Aceh の事例 (Koshimura ら,2009) と1993 年北海道南西沖地震津波における奥尻島・青苗地区における事例 (越村・萱場,2010) を,宮城県全体のデータを集計した得られた津波被害関数とともに示してある (図の左上). 宮城県全体の建物脆弱性を見た場合,浸水深2mを境として流失率が急増し,6mで流失率はおよそ8割に及ぶことが分かる.また,Banda Aceh の事例との比較で見た場合には,宮城県の建物の耐津波性は比較的高かったことが分かる.

宮城県下の9市町において得られた津波被害関数は、その特性に応じて、(a)宮城県全体・ 仙台市型(気仙沼市,仙台市,亘理町,岩沼市)、(b)東松島市型(東松島市,名取市,山元 町,Banda Aceh)、(c)奥尻型(南三陸町,奥尻島)と、比較的なだらかな曲線となる(d)石巻市 型(石巻市のみ)の4パターンに分類できる.これは、津波の来襲状況、海岸施設の機能、 建物群の配置といった地域の諸条件により脆弱性が異なっていることを示唆している.た とえば、東松島市型の関数は宮城県全体のものよりも立ち上がりが鋭く、浸水深4mで流 失率が8割に達している一方、隣の石巻市ではよりなだらかな曲線となっている.類似し た津波来襲状況であっても、建物配置や密度により、被害関数の特性は大きく異なること が分かる.



図-7.3.12 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の被災地(宮城県)の分析から得られた津波被害関数 (建物流失率と浸水深の関係). 図中の黒丸は被害データと浸水深の測定データの統合処理から得 られた離散データ.

このように、宮城県下の市町において、それぞれの津波被害関数が求まったものの、そ の特性と津波の来襲状況や地域の諸条件についての関連性は未だ明らかに出来ていない. 詳細な数値解析による流況解明やその土地毎の建物配置、土地利用、海岸施設の機能等も 考慮した多角的な分析が必要である.また、本解析では、沿岸各地における建物脆弱性が 分かった一方で、住家・非住家、建物種別についての情報が不十分であったため、その結 果は全ての建物が含まれた平均的なものであることに注意が必要である.建物種別や被害 程度(流失・全壊だけでなく、大規模半壊、一部損壊などの被害程度)に関連し、さらに踏み 込んだ解析が必要であることも分かった.

#### (6) フラジリティカーブを用いた建物被害の確率評価

Goda et al. (2015) は、Goda et al. (2014) によるランダムフェーズ確率津波モデルを用い て、東北地方沿岸部における津波浸水計算をし(図-7.3.13) その結果と建物(被害)分布 データ(国土交通省,2011)、フラジリティカーブ(Suppasri et al.,2013)を用いることで、 確率的津波リスクマップを求めている(図-7.3.14). 確率的津波リスクマップは、津波に 対する建物の被害確率の空間分布を示すことができ、起こり得る特定の津波シナリオに対 してだけでなく、建物の津波抵抗力の不確実性まで示すことができる. 確率論的津波リス クマップとリスクカーブの両方が、地形の影響、津波波源との近さ、および建物の特性(材 料の種類と階数)の影響を受けることが示された. 確率的津波リスク評価において異なる インバージョンすべり分布モデルを用いることは、予測不確実性の評価に重要であるとい える. 現在の限られた地震学の知識では、沈み込み帯における巨大地震の予測不確実性は 大きいため、ある特定のシナリオに基づいて津波避難と減災施策をすることは危険であり、 確率的評価が望ましいと考える.

#### (7) まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震津波の被災地における調査データの統合分析から,今次津 波に対する被災地建物の脆弱性を検討し,津波被害関数を構築した.以下に得られた結論 を列挙する.

宮城県沿岸部の市町において津波被害関数を求めた. 宮城県全体のデータを用いて構築 した津波被害関数からは,浸水深 2m を超えると建物流失率は急激に上昇し, 6m を超える と 8 割以上の建物が流失することが分かった. また, 2011 年津波において,宮城県の建物 の耐津波性はバンダ・アチェのそれよりも若干高いことが分かった.

沿岸市町各地の津波被害関数を比較した結果,その特性に応じて4パターンに分類でき ることが分かった.これは、地域の諸条件や海岸施設の機能,建物群の配置等により、建 物の津波に対する脆弱性は変化することを示唆している.この知見は、将来の津波被害想 定や、復興計画における土地利用・居住可能区域の評価の資料として利用出来ることが分 かった.

しかしながら現時点では、地域ごとの建物配置や土地利用、津波来襲状況の関連の分析 には至っていない.地域毎に得られた津波被害関数のもつ「意味」を明らかにし、我が国



水計算結果を用いた確率津波被害マップ

の津波被害予測式の高度化に向けたさらなる検討が今後の課題である.

# 参考文献

飯塚秀則・松冨英夫(2000): 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.381-385. 警察庁(2012): 東日本大震災について(オンライン), http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/ index.htm

国土交通省(2011): 東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査のとりまとめに ついて, http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkou-arkaibu.html.

- 国土地理院(2011): 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震正射画像(オンライン), http://saigai.gsi.go.jp/h23taiheiyo-zort/
- 国土地理院(2012): 2 万 5 千分 1 浸水範囲概況図(オンライン), http://www.gsi.go.jp/kikaku/ kikaku40014.html
- 越村俊一・行谷佑一・柳澤英明(2009): 津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320-331.
- 越村俊一・萱場真太郎(2010): 1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考 -津波被害関数の構築に向けて-, 地震工学論文集, 第10巻, 第3号, pp.88-101.
- 越村俊一・郷右近英臣(2012): 2011 年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性 と津波被害関数, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I 336-I 340.
- 首藤伸夫(1992): 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告, 第9号, pp.101-136.
- 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター(2011): 東北地方太平洋沖地震津波情報 共有プラットフォーム (オンライン), http://www.tohoku-tsunami.jp.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012):現地調査結果(オンライン), http://www.coastal.jp/ttjt/
- 羽鳥徳太郎(1984): 津波による家屋の破壊率, 地震研究所彙報, Vol. 59, pp.433-439.
- Goda, K., P.M. Mai, T. Yasuda, N. Mori (2014): Sensitivity of Tsunami Wave Profile and Inundation Simulations to Earthquake Slip and Fault Geometry for the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, pp.66-105, doi: 10.1186/1880-5981-66-105.
- Goda, K., S. Li, N. Mori, T. Yasuda (2015): Probabilistic Tsunami Damage Assessment Considering Stochastic Source Models: Application to the 2011 Tohoku Earthquake, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 57, No. 3, pp. 1550015-1–38, doi:10.1142/S0578563415500151.
- Gokon, H. and S. Koshimura (2012): Mapping of building damage of the 2011 tohoku earthquake tsunami in Miyagi Prefecture, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No. 1, 125006, DOI: 10.1142/S0578563412500064.
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2009): Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post--tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, Vol.51, No.3, pp.243-273.
- Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., Abe, Y., Imamura, F. (2013): Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards*, 66, 2, pp.319–341, doi:10.1007/s11069-012-0487-8.

## 7.4 間接被害の効果計測手法

減災政策の影響は,住民や企業の立地行動や市場の価格メカニズム等を通して間接的に 様々な影響を与える.これらの影響を捉えるためには,減災政策の影響を受ける地区に関 する特定の社会経済モデルが必要になる.地区に応じて減災政策が与える影響が異なり, 重要となる要素が異なったり,捉えたい間接効果が異なるため,構築すべき社会経済モデ ルも地区ごとに異なる.本節では,それらの例として二つのモデルを紹介する.7.4.1では, 防潮堤の裏に企業が立地しておりその外側に住宅が立地している状況を仮定して,その状 況における間接効果について議論を行う.次に,7.4.2では,より広範囲の住民立地行動を 想定したモデルを具体的に陸前高田市を対象に構築して,分析を行う.

## 7.4.1 立地均衡モデル ー線形空間モデルによる分析の試みー (横松)

津波に対する減災を目的とした政策は,住民の居住地選択や企業立地,地域経済に影響 を及ぼす.それらは,津波被害の減少を「減災政策の直接効果」と定義した場合には,「間 接的な影響」に位置付けられる.「間接的な影響」の分析には,統計モデルや均衡モデル が有用である.本節では後者のアプローチを試みる.減災政策としての防潮堤整備と土地 利用規制に関する「間接的な影響」の構造を分析するための立地均衡モデルを定式化し, 簡単な数値シミュレーションによる定性的な分析を行う.

本節では、津波が想定される沿岸地域の線形空間モデルを定式化する.そして防潮堤と 土地利用規制が家計や企業の立地や付け値地代に及ぼす影響について分析する.単純なモ デルを用いた定性的な問題構造の理解を通じて、津波防災における政策のベストミックス を検討するための均衡モデルの役割を示す.

### (1) 線形空間モデル

海岸線を原点とした,幅が1の線形空間を考える.空間をx座標によって表現し,海岸を x = 0,海岸線と垂直に内陸側にx軸(x > 0)を設定する.この地域では $extbf{2}$ -7.4.1.1に示すよう なゾーニングが施されているものとする.すなわち $[0, x_{00})$ の区間は立地禁止区域であり, 企業も家計も立地できない.また, $[x_{00}, \hat{x})$ の区間は業務地区(産業活動地区)であり、産 業活動のためのインフラが重点整備されている.企業が業務地区以外に立地すると、業務 地区へのアクセスコストがかかるものと仮定する.

一方, [0, x<sub>0</sub>)の区間は津波が到達する可能性があるため,家計の居住が禁止された区域と 仮定する.そして, x<sub>0</sub>よりも内陸側の領域が住宅地区に指定されているとする.1 つの企 業や1人の家計が需要する土地のロットサイズを1とする.

域経済は、企業と家計の立地に関してオープンであるとする.よって企業数と家計数は 内生変数である.一方、労働市場に関してはクローズであり、企業は地域内からのみ労働 を雇用することができるものと仮定する.よって賃金率は内生変数とする.一方、資本市 場はオープンであり、利子率は外生的に与えられると仮定する.簡単化のため、企業の資 本の所有者は、地域外に立地する主体と仮定する.また、財市場もオープンであり、財の



価格は外生変数とする.

企業数,家計数は内生変数であり,住宅地区の右側の境界はそれらに応じて決められる. 住宅地区の境界の右側には農地が広がっている.農地地代を0と基準化する.また,不在 地主を仮定する.

地震による津波の発生確率を $\mu$ とする. 津波が発生した際の各地点xの浸水深を $\psi(x)$ により表す. また津波の到達点をX(h)とする. ただしhは防潮堤の高さを表し, dX(h)/dh < 0とする.  $x \leq X(h)$ において $\psi(x) \geq 0$ である. 本モデルでは $X < \hat{x}$ とし, 住宅地区は津波が到達しない場所に割り当てられているものとする. 一方,業務地区は津波によって浸水する. 地点xに立地する企業は,保有する生産施設(資本)の $\delta(\psi(x),h)$ の割合を失うものとする. 以後, $\psi(\cdot)$ を省略して,被害率を $\delta(x,h) \coloneqq \delta(\psi(x),h)$ により表す.  $\delta(x,h)$ は以下の関係を満たすものとする.

$$0 \le \delta(x, h) \le \tag{7.4.1.1a}$$

$$\frac{\partial \delta(x,h)}{\partial x} \le 0, \frac{\partial \delta(x,h)}{\partial h} \le 0 \text{ for } 0 \le x \le X$$
(7.4.1.1b)

$$\delta(x,h) = 0$$
 for  $x > X$  (7.4.1.1c)

すなわち,海岸から遠ざかるほど,また防潮堤が高くなるほど被害率は減少する.以後,防潮堤の高さに着目した議論をしないところではhの表記を省略することとする.企業が*K*の水準の生産施設をもっているとき,津波によってδ(*x*)*K*の水準が損壊する.

## (2) 企業の付け値地代

地域の産業は、漁業のように海上や港、海岸沿いの空間で生産活動を行う「A産業」と、 それ以外の製造業やサービス業を含む「B産業」の2種類に分類されるものとする.それ ぞれの産業に属する企業を、「A企業」「B企業」のように呼ぶ.A企業は海岸近くに立地 するほど海にアクセスする費用が小さくなる.またA産業で生産されるA財の価格をpとし、 B産業で生産されるB財の価格を1に基準化する.pは地域の外の市場で決まる外生変数で ある.いずれの企業もロットサイズ1の土地を需要する.A企業とB企業の生産技術をそれ ぞれ次式のように仮定する.

$$F_a(L_a, K_a) \coloneqq \bar{A} L_a^{\alpha_1} K_a^{\alpha_2} \quad (\alpha_1, \alpha_2 > 0, \alpha_1 + \alpha_2 < 1)$$
(7.4.1.2a)

$$F_b(L_b, K_b) \coloneqq \bar{B}L_b^{\beta_1} K_b^{\beta_2} \quad (\beta_1, \beta_2 > 0, \beta_1 + \beta_2 < 1)$$
(7.4.1.2b)

ただし、 $L_a$ , $L_b$ はそれぞれA企業、B企業が雇用する労働者の人数を、 $K_a$ , $K_b$ は資本(生産施 設)を表す. $\bar{A}$ , $\bar{B}$ , $\alpha_1$ , $\alpha_2$ , $\beta_1$ , $\beta_2$ は企業の技術を表すパラメータである.以後、下付きの添え 字aとbは、それらが添えられた変数がそれぞれA企業とB企業の変数であることを示す.

また、制度的な理由により、全ての企業は災害による生産施設の損壊リスクに対する保険に入らなければならないものとする.各企業は事前に保険料 $\mu\delta(x)K_a$ あるい  $\mu\delta(x)K_b$ を支払うことにより、災害後には保険金によって施設を完全に復旧して、平常時と同水準の生産が行えるものと仮定する.それによって、本モデルでは、災害リスクは全て保険料支払いに集約されるものとする<sup>1</sup>.

地点 x に立地する企業A, Bの利潤はそれぞれ以下のように表される.

$$\Pi_{a}(x) := \max_{L_{a},K_{a}} [pF_{a}(L_{a},K_{a}) - w_{a}L_{a} - rK_{a} - \mu\delta(x)K_{a}] - \eta x - q(x) - \tilde{\iota}(x) \cdot \{x - \hat{x}\}^{\varsigma}$$
(7.4.1.3a)

$$\Pi_b(x) := \max_{L_b, K_b} [F_b(L_b, K_b) - w_b L_b - rK_b - \mu \delta(x) K_b] - q(x) - \tilde{\iota}(x) \cdot \{x - \hat{x}\}^{\varsigma}$$
(7.4.1.3b)

where  $\tilde{\iota}(x) = 0$  for  $x \in [x_{00}, \hat{x})$ ,  $\tilde{\iota}(x) = \iota(> 0)$  for  $x \in (\hat{x}, \infty)$  (7.4.1.3c)

ただし、 $w_a$ , $w_b$ はそれぞれ産業A,Bの賃金率、rは利子率を表す、 $\eta x$ は企業Aが海にアクセス するためのコストを表す、q(x)は地点xの地代を表す、また、 $\tilde{\iota}(x) \cdot \{x - \hat{x}\}$ らは、業務地区の 外に立地する企業が負担する追加的な費用を表す、 $\iota,\varsigma(> 0)$ はパラメータである、それらの 企業は、業務地区内の企業とビジネスミーティングを行う際に交通費用を負担する必要が ある、各企業は、以上の利潤を最大化する問題を解くことによって、外生的な環境パラメ ータに依存した労働と資本の最適需要水準 $(L_i^*, K_i^*)(j = a, b)$ を得る.

いま,両産業の企業が当該地域の外に立地した場合に得られる利潤をそれぞれ $\pi_a, \pi_b$ とする.このとき,地点xの土地に対するA企業とB企業の付け値地代 $Q_a(x), Q_b(x)$ は以下の大きさに決まる.

$$Q_{a}(x) = pF_{a}(L_{a}^{*}, K_{a}^{*}) - w_{a}L_{a}^{*} - \{r + \mu\delta(x)\}K_{a}^{*} - \eta x - \pi_{a} - \tilde{\iota}(x) \cdot \{x - \hat{x}\}^{\varsigma}$$
(7.4.1.4a)  
$$Q_{b}(x) = F_{b}(L_{b}^{*}, K_{b}^{*}) - w_{b}L_{b}^{*} - \{r + \mu\delta(x)\}K_{b}^{*} - \pi_{b} - \tilde{\iota}(x) \cdot \{x - \hat{x}\}^{\varsigma}$$
(7.4.1.4b)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> フルカバー保険の仮定は、モデルの計算を簡単化するための技術的理由によるものであある. そのような保険を導入せずに、企業が期待利潤最大化問題を解くとしても、本分析の本質的結論は変わらない.

#### (3) 家計の付け値地代

全ての家計はA財とB財の消費に対して同一の選好をもつものとする.効用関数をコブ= ダグラス型関数により仮定する.

$$U(c_a, c_b) := c_a^{\gamma} c_b^{1-\gamma}$$
(7.4.1.5)

効用水準vを達成するための最小支出は次式により与えられる.

$$\Phi(p, v) := \Gamma(p) \cdot v \tag{7.4.1.6a}$$

where 
$$\Gamma(p) \coloneqq \left(\frac{\gamma}{p}\right)^{-\gamma} (1-\gamma)^{-(1-\gamma)}$$
 (7.4.1.6b)

A産業, B産業で働く家計をそれぞれ「家計A」,「家計B」と呼ぶこととする.両タイプの 家計は仕事のために業務地区に通勤する.ただし通勤に費用がかかる区間は,居住地点xから業務地区の入口 $\hat{x}$ までであるとする.業務地区内は交通の便が良く,住宅地区内と比較す ると費用は無視しえるほど小さいものと仮定する.一方,家計Aは家計Bよりも,自宅と職 場を往復する回数が多いものとする<sup>2</sup>.自宅から職場まで大きな物を運ぶこともあるとす る.それらの理由によって,ある一定の期間に支出する交通費用は,家計Aの方が家計Bよ りも大きくなる.地点xに居住する両タイプの家計のそれぞれの交通費用を $\sigma_a{x - \hat{x}},$  $\sigma_b{x - \hat{x}}$ と表すと,以上の理由により,パラメータ間に $\sigma_a > \sigma_b$ の関係があると考える.以 上より,家計A,Bが地点xに居住する際に2財A,Bの消費に充てられる所得は以下のように 与えられる.

$$Y_j(w_j, x) \coloneqq w_j - \sigma_j \{x - \hat{x}\} - r(x) \quad (j = a, b)$$
 (7.4.1.7)

r(x)は地点xの地代を表す.いま、両タイプの家計が他の地域で居住した際の効用水準をvとすると、地点xの土地に対する家計A,Bの付け値地代 $R_a(x),R_b(x)$ は以下の大きさに決まる.

$$R_j(x) = w_j - \sigma_j \{x - \hat{x}\} - \Gamma(p) \cdot v \quad (j = a, b)$$
(7.4.1.8)

#### (4) 立地均衡

パラメータの大小関係によって、4 つの付け値地代の大小関係にはいくつかの場合分け がある.不必要な場合分けを避けるために、本研究ではパラメータ間の大きさの関係に幾 つかの仮定をおく.付け値曲線と立地均衡の例を図-7.4.1.2 と図-7.4.1.3 に示す.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 漁業は従来,職住近接型の産業であった.理由は,例えば,漁師が常に海や風の状態を把握しておくためで あったり,一日に複数回,養殖の管理や,漁港で天日干しをしている海苔を裏返したりするためである.よ って,職住分離がなされると,漁業従事者は頻繁に海まで通う必要が生じると考えられる.



図-7.4.1.2 立地均衡の例:企業の生産性が大きい場合(ケース1)



**図-7.4.1.3** 立地均衡の例:企業の生産性が小さい場合(ケース2)

図-7.4.1.2 は両産業の生産性が全体的に大きいケースである. ここでは業務地区の全ての 土地は企業によって需要される.企業,家計ともにA産業に属する方が海に近い側に立地 する.また,企業Bと家計Aの境界 $x_2$ が $x_0$ より右側に位置するため,居住地規制[ $0, x_0$ )の条 件が拘束的にならない. A産業の企業数は $(x_1 - x_{00})$ 社, B産業の企業数は $(x_2 - x_1)$ 社,家計 Aは $(x_3 - x_2)$ 人,家計Bは $(x_4 - x_3)$ 人に決まる.このようなケースを「ケース 1」と呼ぶこ ととする.

一方,図-7.4.1.3 は両産業の生産性が全体的に小さく,Yかつ企業Aの海へのアクセスコスト $\eta$ が比較的大きいケースである.ここでは業務地区に空き地が残る.また,居住地規制 $[0,x_0)$ が拘束的になる.すなわち,地点 $x_0$ における企業Bと家計Aの付け値が一致しない. A産業の企業数は $(x_{1a} - x_{00})$ 社,B産業の企業数は $(x_0 - x_{1b})$ 社,家計Aは $(x_3 - x_0)$ 人,家計Bは $(x_4 - x_3)$ 人に決まる.このようなケースを「ケース2」と呼ぶこととする.

ケース1の均衡条件は以下のように与えられる.

$$Q_a(x_1) = Q_b(x_1) \tag{7.4.1.9a}$$

- $Q_b(x_2) = R_a(x_2) \tag{7.4.1.9b}$
- $R_a(x_3) = R_b(x_3) \tag{7.4.1.9c}$

$$R_b(x_4) = 0 \tag{7.4.1.9d}$$

$$\int_{x_{00}}^{x_1} L_a^*(x) dx = x_3 - x_2 \tag{7.4.1.9e}$$

$$\int_{x_1}^{x_2} L_b^*(x) dx = x_4 - x_3 \tag{7.4.1.9f}$$

条件(7.4.1.9a)-(7.4.1.9c)は立地の境界において,左右に立地する主体の付け値が一致することを意味する.条件(7.4.1.9d)は空間のフリンジでの条件であり,そこでは家計Bの付け値が 農地地代と一致することを示す.条件(7.4.1.9e)(7.4.1.9f)は労働市場のクリアリング条件で ある.上記の6つの条件より( $x_1, x_2, x_3, x_4, w_a, w_b$ )が決まる.それらより,各地点xにおける  $L_a^*(x), K_a^*(x) \approx L_b^*(x), K_b^*(x)$ ,それらに従う生産水準等を得る.

社会厚生は均衡地代の総和によって測られる. すなわち均衡において各地点に立地した 経済主体が支払う地代を集計した額が社会厚生水準に相当する. 減災政策の(*h*, *x*<sub>00</sub>, *x*<sub>0</sub>)とし て表現すると,社会厚生水準*V*(*h*, *x*<sub>00</sub>, *x*<sub>0</sub>)は次式のように与えられる.

$$V(h, x_{00}, x_0) := \int_{x_{00}}^{x_1} Q_a^*(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} Q_b^*(x) dx + \int_{x_2}^{x_3} R_a^*(x) dx + \int_{x_3}^{x_4} R_b^*(x) dx$$
(7.4.1.10)

同様に、ケース2の均衡条件は以下のように与えられる.

$$Q_a(x_{1a}) = 0 \tag{7.4.1.11a}$$

$$Q_b(x_{1b}) = 0 \tag{7.4.1.11b}$$

$$R_a(x_3) = R_b(x_3) \tag{7.4.1.11c}$$

$$R_b(x_4) = 0 \tag{7.4.1.11d}$$

$$\int_{x_{00}}^{x_{1a}} L_a^*(x) dx = x_3 - x_0 \tag{7.4.1.11e}$$

$$\int_{x_{1b}}^{x_0} L_b^*(x) dx = x_4 - x_3 \tag{7.4.1.11f}$$

上記の6つの条件より( $x_{1a}, x_{1b}, x_3, x_4, w_a, w_b$ )が決まる. 社会厚生水準 $V(h, x_{00}, x_0)$ は次式のように与えられる.

$$V(h, x_{00}, x_0) := \int_{x_{00}}^{x_{1a}} Q_a^*(x) dx + \int_{x_{1b}}^{x_0} Q_b^*(x) dx + \int_{x_0}^{x_3} R_a^*(x) dx + \int_{x_3}^{x_4} R_b^*(x) dx$$
(7.4.1.12)

## (5) 数値シミュレーションによる政策分析

式(7.4.1a)-(7.4.1c)によって仮定した被害率関数を、以下のように特定化する.



$$\delta(x,h) := \theta(h) \cdot \left\{ 1 - \frac{x}{X(h)} \right\} \quad \text{for } x \le X$$

$$(7.4.1.13)$$
where  $\theta(h) \coloneqq \kappa_0 \exp(-\kappa_1 h), X(h) = \overline{X} \exp(-\kappa_2 h)$ 

上記の関数は現象を極度に単純化している.被害が、海岸からの距離xと防潮堤の高さhの減少関数となることのみを表しているに過ぎない.経済分析に適した被害率関数の精緻化は今後の大きな課題である.ここではパラメータを $\bar{X} = 13$ ,  $\kappa_0 = 0.8$ ,  $\kappa_1 = 1$ ,  $\kappa_2 = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ とする.

企業のパラメータを  $\bar{A} = \bar{B} = 12, \alpha_1 = \beta_1 = 0.4, \alpha_2 = \beta_2 = 0.3, \pi_a = \pi_b = 0, \eta = 7, \iota = 3, \varsigma = 1.5, r = 0.1, p = 2$ とする. 家計のパラメータを $\gamma = 0.5, \sigma_a = 2, \sigma_b = 0.4, \nu = 1$ とする. また,業務地区の右端を $\hat{x} = 10$ と設定し,基本ケースにおける減災政策を $h = 0, x_{00} = 2, x_0 = X = 13$ とする. 基本ケースにおける立地均衡は図-7.4.1.4 のように決まる. このケースでは居住地規制が拘束的となる.

政策分析1として,防潮堤整備によりh = 1としたときの立地均衡を図-7.4.1.5 に示す. 資本(生産施設)の被害率が減少することにより,企業の資本の投入水準が増加する.そ れによって労働の限界生産性が増加することにより,雇用も増加する.雇用機会が増える ため,住民が増加する.4つの付け値曲線は上方にシフトし,地域のフリンジx4は右側に シフトする.それによって社会厚生水準も上昇する.

次いで、政策分析2として、居住地規制の変更の効果に着目する. 基本ケースでは地点  $x_0 = 13$ において家計Aの付け値が企業Bの付け値を上回っている. そこで、はじめに居住禁 止区域 $[0, x_0)$ を狭くする、すなわち $x_0 = 12$ として規制を緩和することを考える. その結果 として得られる均衡を図-7.4.1.6 に示す. 企業が立地する空間が狭くなり、企業の総数が減 少することになり、雇用機会は増加しない. 労働市場は労働供給の増加の圧力が強まるた



**図-7.4.1.6** 政策分析 2:居住規制の強化

め、賃金は減少する.すると家計の付け値曲線は下方にシフトする.よって、家計の居住 地域の拡大を通じて家計の厚生増加を目論んだ政策は、家計の厚生の減少に帰結すること になる.ひとつの逆説的な結果となる.

政策分析 3 として、逆に居住禁止区域 $[0, x_0)$ を広くする、すなわち $x_0 = 14$ として規制を 強化すると、逆の結果が得られる。図-7.4.1.7 に示すように、企業立地を保護したことによ り雇用が増加し、賃金も上昇して、家計の付け値は上方にシフトする。家計の厚生水準は 上昇する。

政策分析4では、立地規制を緩和させる.すなわち $x_{00} = 1$ として企業立地の範囲を拡げる.この場合にも企業数は増加するが、図-7.4.1.8に示すように、雇用と家計数は政策分析











図-7.4.1.9 政策分析5:防潮堤整備と居住規制の緩和

3 ほどには増加しない.新たに企業立地が可能となったエリアでは資本の災害被害率が大きいため,資本の投資水準は低く,それに応じて,少ない労働しか雇用しないからである.

最後に政策分析 5 として,防潮堤整備と居住地規制緩和を組み合わせた場合を考える. 防潮堤をh = 1とし,居住規制のラインをx<sub>0</sub> = X(1)すなわち防潮堤整備によって前進した, 津波の到達点まで前進させる.そのような政策の組み合わせの効果を図-7.4.1.9 に示す.政 策分析 1 と同様に資本投資が増加することによって,雇用と賃金が増加する.とりわけ海 岸に近い産業Aの雇用が増加する.それによって企業と家計の双方で社会厚生が増加する. さらに,政策分析 1 と比較すると,地点x<sub>0</sub>における企業Bと家計Aの付け値の差が小さくな ることによって,社会厚生のロスが小さくなる.

### (6) まとめ

本節では、津波リスクに直面した沿岸地域における、防潮堤整備とゾーニング政策を同 時に議論するための基礎的モデルの定式化を試みた.そして簡単な数値計算事例を通じ て、減災政策の立地均衡への影響について分析した.

数値分析で得られた定性的な結果の多くは、労働市場がクローズである仮定に決定的に 依存している.よってそれらは通勤が外部地域から切り離された地域で、より起こり得る 現象といえる.一方で、政策分析2や政策分析3で示された構造は、もはや災害や減災と は関係のない話になっているように思われる.その通りであるが、それでも何かの示唆を 導くとしたら以下のようになろう.当初は減災を意図したはずの政策が、それとは直接関 係のない結果を生むことがありえる.そのような可能性を事前に把握しておくためにも、 均衡モデルを用いた、問題の構造分析が必要となるのである.

今後は、市場の開放性・閉鎖性などの設定を変更して、多様な経済環境における均衡解 の性質を分析する必要がある.また、集積の経済等の正の外部性をモデルに導入すること も重要な拡張である.それらと同時に、政策変数の妥当性について再検討する必要があ る.例えば、立地規制の現実的妥当性や正当性について、法学の観点も踏まえて検討する 必要がある.また防潮堤の位置についても政策変数として扱う必要がある.

## 参考文献

Alonso, W.: Location and Land Use, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1964.

Fujita, M.: Urban Economic Theory, Cambridge University Press, 1989.

- Stull, W.J.: Land use and zoning in an urban economy, *The American Economic Review*, pp.337-347, 1974.
- Sasaki, K.: Local public goods and their capital-gain effects, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.30, No.1, pp.45-57, 2000.
- 横松宗太:防潮堤整備と土地利用に関する線形空間モデル分析,土木計画学研究・講演 集, Vol.52, 28, CD-ROM, 2015.

## 7.4.2 都市均衡モデル -CUE アプローチー

(河野)

復興計画における防災インフラ整備において問題となりうる動学的不整合問題について 分析した河野他 (2013), Kono et al. (2016)の結果を,都市均衡モデルによる最適防潮堤計算 ならびに動学的不整合問題の定量分析の一例として示す.動学的不整合問題とは,時間や ある主体の行動タイミングの前後で最適政策が異なることである.復興計画における例と しては,津波危険エリアにおいて過大な開発計画を立案することで,過大な防災投資に繋 がることが挙げられる.なお,近年,制度化が進んだ費用便益分析を用いても,開発計画 に基づいて費用便益分析がなされる限り,この動学不整合問題を解決できない.

河野他 (2013), Kono et al. (2016)の都市モデルは,現実データにより経済モデルのパラメ ータキャリブレーションをして定量分析を行なっている.なお,当該研究はインフラ整備 における一般的な不整合問題のメカニズムとその定量分析を目的としており,実際の復興 計画の評価を意図していない.

都市均衡モデルの詳細は論文に譲り、ここでは都市均衡モデルのキャリブレーションに 必要になるデータの規模や種類を示すために、実際に河野他 (2013), Kono et al. (2016)で用 いられた出た時間価値、所得、土地・交通パラメータ、通勤・通学時間の推計およびキャ リブレーションに用いたデータ出典とその方法を順に示す.

○時間価値w (=平均労働賃金率):2000 年 NHK 国民生活時間調査 (全国編) による一人当たり拘束時間<sup>3</sup>(時間/日・人)を2005 年国勢調査より求めた年齢階層別人口(人)を用いて加重平均し、365(日)と総人口(人)をかけあわせたものを全体の年間労働時間(時間)とし、これで県民経済計算の雇用者所得(円)を割ったものを時間価値(=平均労働賃金率)とする.データの出典および単位等詳細を表-7.4.2.1 に示す.(表-7.4.2.1 の No. 1~5を参照)

○年齢階層別所得*I<sub>i</sub><sup>m</sup>*:推計した時間価値(円/時間)に一人当たり拘束時間から後で作成するゾーン別通勤・通学時間を差し引いたものをかけあわせて作成する(すなわち,

*I<sub>i</sub><sup>m</sup>* ≡ w(t<sup>m</sup> − s<sub>i</sub><sup>m</sup>)). (表-7.4.2.1 の No. 5 と 6 および表-7.4.2.2 を参照)
 ○交通パラメータα<sub>x</sub><sup>m</sup>: 交通パラメータは年あたり交通消費額 (円/年)を表す. 交通消費額
 は、時間価値に一人当たり私事トリップ (トリップ/人) × 一人あたり私事トリップ時間
 (時間/トリップ) × 365 (日)をかけあわせて作成する. (表-7.4.2.1 の No.5,7,8,9 を参照)

○土地パラメータ α<sup>m</sup><sub>l</sub>: 土地パラメータは年あたり土地消費額 (円/年)を表し、年齢階層別
 所得に住宅ローン負担率をかけあわせて作成する.(表-7.4.2.1の No. 10 と 11 を参照)

○通勤・通学時間 s<sup>m</sup><sub>i</sub>: 非高齢者および高齢者は通勤・通学を行う.通勤・通学時間は発地 ゾーン別平均時間である.ゾーン間所要時間を着地の通勤・通学トリップで加重平均し たものに一人あたり通勤・通学トリップ (トリップ/人)を乗じて作成する.(表-7.4.2.2を 参照)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 家庭や社会を維持向上させるために行う義務性・拘束性の高い行動と定義される.仕事関連,学業,家事, 社会参加からなる.

No.	項目	単位	データ出典または計算方法
1	一人あたり年齢階層別拘束時 間	時間/日・人	国民生活時間調査2000(全国編)、平日、 全体の平均時間利用、非高齢、高齢者(60 代と70歳以上の平均)
2	年齡階層別人口	人	2005年国勢調査
3	年齡階層別総年間労働時間	時間/年	1. 一人あたり年間労働時間×2. 年齢階層別 人口×365日
4	雇用者所得	円/年	県民経済計算、雇用者報酬
5	時間価値w	円/時間	4. 雇用者所得/3. 年間労働時間
6	所得 <i>I=w(t-s)</i>	円/年	5.時間価値w×(1.拘束時間t-通勤通学時間 s)
7	一人あたり私事発生トリップ 数	トリップ/人	推計私事トリップ(補遺2参照)/人口
8	私事トリップ時間	時/トリップ	発ゾーン別期待最小費用
9	$a^{m_{x}}$ (=交通消費額)	円/年	365日×5.時間価値×7.一人当たり私事発 生トリップ数×8.私事トリップ時間
10	住宅ローン負担率	%	家計調査年報、住宅ローン返済世帯(土地 家屋借金返済)の実収入に占める土地家屋 借金返済額(全年齢平均:15.5%※)
11	$\alpha^{m_l}$ (=土地消費額)	円/年	6. 所得×10. 住宅ローン負担率

表-7.4.2.1 時間価値および所得

表-7.4.2.2 通勤・通学時間

No.	項目	単位	備考
1	トリップあたりの通勤時間	時間/トリップ	ゾーン間所要時間を着地の通勤トリップで加重平均
2	トリップあたりの通学時間	時間/トリップ	ゾーン間所要時間を着地の通学トリップで加重平均
3	一人当たり通勤発生トリップ	トリップ/人	通勤発生トリップ/人口
4	一人当たり通学発生トリップ	トリップ/人	通学発生トリップ/人口
5	通勤・通学時間 <i>s</i>	時間/人	1. 通勤時間×3. 一人あたり通勤トリップ+2. 通学時間 ×4. 一人あたり通学トリップ

次に,パラメータをキャリブレーションした経済均衡モデルによるアウトプットの例と して,当該研究の定量分析結果を以下に示す.

### (1) 最適防潮堤高(動学的不整合のない社会最適ケース)

対象都市の中心市街地を守る防潮堤(延長 1997m)について, T.P. 5m~15m の高さで整 備した際の便益,整備コスト,純便益を図-7.4.2.1 に示した. T.P. 6m の防潮堤を基準とし てその防潮堤からの差分で効果を表している.便益を水色線,防潮堤整備費用を紺色線で 表し,便益から整備費用を差し引いた純便益を赤線で示している.整備防潮堤が 8m を超 えると,便益の伸びが鈍化する.これは,8m を超える津波の到来回数が少ないからである. この図に示されているように,最適な防潮堤高は T.P. 10m であり,その際の純便益は約 114 億円(現在価値)と計算された.

この最適防潮堤高 T.P. 10m という値は震災前の防潮堤高よりもかなり高い. なお,防潮 堤で防御されるエリア(市街地中心部)の人口を見ると,最適な防潮堤高 T.P. 10m の時の 人口は 8440 人と計算された. 震災前人口は 6885 人であり,不十分な防潮堤高のために居



図-7.4.2.1 社会的最適ケース結果

住人口が過小であったことを示している.

## (2) 防潮堤高決定における動学的不整合問題

当該研究の主目的はインフラ整備における動学的不整合問題の定量分析にある.また, 今後の防潮堤整備においてもこの動学的不整合問題は起こりうる問題である.そこで,動 学的不整合に関する定量分析についても簡単にここでみてみる.

対象地区について,動学的不整合がない場合の最適防潮堤高は T.P. 10m と推算された. 一方,図-7.4.2.2 に示すように,動学的不整合が起こる場合,防波堤で防御されるエリアの 人口が社会的最適の約 1.5 倍程度(震災前の 2 倍程度)の 13080 人になる可能性が十分あ り,整備される防潮堤高は T.P. 11m となることが分かった(なお,旧市街地の土地利用と して,本研究が想定した震災前と同様の住宅利用を含む利用の代わりに,現在計画が進行 中の産業・公園利用であっても,同様に動学的不整合問題は起こりうる).最適防潮堤高 10m と 11m のコスト差を,社会的割引 4%を用いて年あたり費用に直すと約 1.2 億円とな る.この額は,対象都市の毎年予算の 1%強に相当する.

本研究は、一般的にインフラ整備において費用便益分析を用いても動学的不整合問題が 起こりうることを指摘している.特に、費用便益分析の義務化により、住民が費用便益分 析に基づく公共投資政策を期待して戦略的に行動することで、動学的不整合問題により最 適規模以上のインフラ整備が行われることを示している.

## (3) 今後のインフラ整備における動学的不整合問題

防潮堤整備は、図-7.4.2.1の青線が示すように、整備規模拡大によるコスト上昇が急激な 費用逓増のインフラ整備といえる.そのため、デベロッパーによる戦略的行動によって、 多くの住民が旧市街地に最適の 1.5 倍の人口になる程度に移住してきても、便益上昇によ る防潮堤高は社会的最適の T.P. 10m から T.P. 11m へと変化するにとどまっている.一方、



図-7.4.2.2 動学的不整合結果

道路整備のように規模拡大による整備費用の上昇が緩やかなインフラ整備を想定すると, 戦略的行動に対する整備規模増加がより敏感となり,より規模の大きい動学的不整合問題 の非効率が生じるといえる.

こういったインフラ整備における動学的不整合問題を避けるためには,次の方法が考え られる.1 つ目は,費用の全額を受益者である主体が負担するという方法が論理的には考 えられる.たとえば,防潮堤整備の場合,受益を得る地区の固定資産税率を上げれば徴収 可能である.次に,顕示選好データに基づいた整備評価ではなく,住民の効用水準を直接 計測できれば,政策当局は最善投資水準を決定でき,その最適政策をコミットメントでき る.なお,投資水準でなく,人口水準を土地利用規制などで最適にコントロールしても最 善政策を達成することが可能である.ただし,ここで挙げた固定資産税率の上昇や効用水 準の直接計測,土地利用規制による人口制限は容易ではなく,動学的不整合問題の完全な 回避は一般に難しく,緩和に努めることが次善策といえる.

# 7.5 リスクプレミアムと曖昧性プレミアム

(藤見)

## 7.5.1 はじめに

津波予測には大きな不確実性が伴うため、津波被害の経済評価はそうした不確実性のも とで行われる.津波ハザードの予測における不確実性については、本報告書の3章で解説 されている確率論的津波ハザード解析によって明示的に扱うことができる.しかし、認識 論的不確実性と偶然的不確実性を区分した精緻な津波ハザードの分析結果が得られていて も、津波被害の経済評価においては、それらを平均して集約したひとつの確率分布を用い て被害額の期待値を算出することが一般的である.そして、津波対策の便益は、対策前の 期待被害額から対策後の期待被害額を差し引いた額として求められる.期待被害の削減額 によって対策の便益を算出する手法は、米国の行政管理予算局(Office of Management and Budget)の費用便益分析ガイダンス、わが国の治水経済調査マニュアルや砂防事業の費用 便益分析マニュアルなどでも用いられている.

経済学の観点からは、不確実性下における津波対策の便益を期待被害の削減額とするこ とには二つの問題がある.一つは人々の「リスク回避」の態度を考慮していない点である. 評価対象が確率分布している状況は「リスク」と呼ばれる.大半の人はリスクのある評価 対象を、確実な評価対象より嫌うことが知られている.このリスク回避により、津波被害 が確率分布している状況は、津波被害が期待値で確定している状況より嫌われる.このと き、津波被害の軽減の便益は期待被害額の削減額より大きくなり、その大きくなる額は「リ スクプレミアム」と呼ばれる.

もう一つは、人々の「曖昧性回避」の態度を考慮していない点である.評価対象が従う 確率分布を唯一に特定できず、複数の確率分布で表現されている状況は「曖昧性 (ambiguity)」と呼ばれている<sup>4</sup>.曖昧性のある評価対象は確率分布が明確に与えられる 評価対象より嫌われることが多くの実験により示されている<sup>5</sup>.こうした傾向は「曖昧性 回避」と呼ばれており、曖昧性下での評価額とリスク下での評価額の差額は「曖昧性プレ ミアム」と呼ばれている.災害リスクにおける曖昧性回避の例として、Kunreuther et.al. (1993, 1995)は、保険引受人を対象に実施した調査において、損失の規模や発生確率が曖昧な状況 では期待被害額の2倍以上の価格が保険につけられることを明らかにしている.Michel-Kerajan and Kunreuther (2018)は、9・11テロ直後のシカゴ空港に対するテロリスクの保険料 について、1.5億ドルの補償範囲に対して年間保険料が690万ドルとなったことを報告し ている.この保険料を期待値で見ると年間発生確率1/22に対応しており、テロリスクの曖 昧性が非常に嫌われていることが示唆される.また、最近の神経経済学の研究(Hsu, et.al.,

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> 複数の確率分布に直面している状況は、厳密には「客観的曖昧性」と呼ばれており、曖昧性のなかの特殊ケ ースとみなせる.客観的曖昧性は工学分野における認識論的不確実性とほぼ同義である.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> 曖昧性に関する最近のレビューとして, Etner et. al. (2012), Machina and Siniscalchi (2013), Gilboa and Marinacci (2016)がある.
2005; Huettel, et.al., 2006; Bach, et.al., 2011)では、リスク下で意思決定を求めた場合と曖昧 性下で意思決定を求めた場合では、脳の活性化する箇所が異なることが示されている.こ のことは、曖昧性回避がリスク回避とは異なるメカニズムで生じており、それらを別々に 考慮する必要があることを示唆している.

津波対策の便益を、その対策による期待被害額の減少額とするのでは、人々のリスク回 避性や曖昧性回避性が考慮されない.適切な経済評価を行うには、リスクプレミアムや曖 昧性プレミアムを期待被害額に加え、それらの合計額の対策実施前後の差額を対策の便益 とする必要がある.本節では、津波対策による被害軽減の便益に焦点を当てて上記の点に ついて検討していく.まず、ロジックツリーを用いた確率論的津波ハザード解析の簡単な 例に基づき、期待被害額を用いた便益評価においてリスク回避と曖昧性回避が無視される 状況を説明する.つづいて、リスクプレミアムと曖昧性プレミアムについて解説し、これ らのプレミアムを考慮する必要があることを示す.しかし残念ながら、これらのプレミア ムを実際に推定することは困難であり、推定手法によって結果が安定しないことが知られ ている.そのため、期待被害額のみを用いて対策の便益を評価するしかないのが現状であ る.そこで、リスクプレミアムや曖昧性プレミアムを考慮しなくてもよい条件について検 討する.それらの条件が満たされないとき、リスクプレミアムや曖昧性プレミアムを無視 することで津波対策の便益評価にどのようなバイアスが生じうるのかについて整理する.

#### 7.5.2 確率論的津波ハザード解析と経済評価

津波被害の経済評価における重要な論点を解説するために,図-7.5.1(a)で示すようなロジ ックツリーを用いた確率的津波ハザード解析の簡単な仮想例を考える.ある地震による津 波被害において,支配的なパラメータとして「断層」,「マグニチュード」,「津波波高 の標準偏差」があり,それらの認識論的不確実性はロジックツリーによって表現され,各 分岐の重みは赤字の数値で与えられているものとする.また,偶然的不確実性として津波 波高の確率分布があり,津波被害は津波波高と比例するため同形の確率分布に従うと想定 する.

この確率的津波ハザード解析の結果をもとに津波の期待被害額を算出するために、工学 分野で行われる一般的な手順は以下のとおりである(図-7.5.1).

- (1) ロジックツリーの分岐ごとに津波被害額の超過確率分布を算出する.この超過確率分 布を表す曲線を「EPカーブ」と呼ぶ.
- (2) 各 EP カーブをそれぞれの分岐の重みを用いて平均することで,一つの EP カーブを作成する.この平均 EP カーブを「リスクカーブ」呼ぶ.
- (3) リスクカーブの下の面積を計算することで、期待被害額を算出する





上記の手順では、(2) において人々の曖昧性回避、(3) においてリスク回避が暗黙のうち に無視された経済評価になっている.(2) では認識論的不確実性のために複数の EP カーブ が与えられており、評価者にとって曖昧性のある状況になっている.ここで、曖昧性は認 識論的不確実性とほぼ同義である<sup>6</sup>.多くの人が曖昧性回避的であり悲観的な立場をとる ため、複数の EP カーブが与えられたときに、より悪い予測により大きな重みを与えるこ とが数多くの実験から知られている.EP カーブを平均して集約するのでは、曖昧性回避が 考慮されず、こうした人々の態度について扱えない.(3) ではリスクカーブの形状によら ず期待被害額のみで評価される.そのため、リスク回避が考慮されず、高頻度小規模災害 リスクよりも低頻度大規模災害リスクのほうを多くの人が嫌う傾向が扱えない.期待被害 額が等しければ、どちらも同じ評価となってしまう.

リスク回避と曖昧性回避を考慮した適切な経済評価を行うには,前者については期待効 用モデルに基づいて算出されたリスクプレミアム,後者については曖昧性下の意思決定モ デルに基づいて算出された曖昧性プレミアムをそれぞれ期待被害額に加える必要がある. 以下では,リスク下,曖昧性下の状況において適切な経済評価手法について説明する.

## 7.5.3 リスク回避とリスクプレミアム

## (1) クジの例による解説

リスク回避とリスクプレミアムの大まかなイメージをつかむために,簡単なクジの例を 用いて説明する(図-7.5.2).赤玉が2個,青玉が2個入った壺があり,赤玉を引けば100 万円,青玉を引けば0円をもらえるクジを考える.ここで,このクジを引けるチケットと, 確実に50万円をもらえるチケットのどちらかを選べるとする.このとき,クジの期待値も 50万円であるが,大多数の人が確実な50万円を選ぶ.これがリスク回避である.また, 確実な50万円とクジを同じ価値にするには,クジに何円か加える必要がある.このときに クジに追加される金額が,このクジのリスクプレミアムとなる.

## (2) 期待効用モデルとリスクプレミアム

経済学では、人は金銭それ自体ではなく、金銭から得られる「効用」によって意思決定 すると考える.リスクの状況下では、効用の理論が拡張され、評価対象の選択が効用の期 待値の大小に基づいて行われると考える.これは「期待効用モデル」と呼ばれている.リ スク回避やリスクプレミアムも期待効用モデルに基づいて定義される.ここでは、期待効 用モデルの評価対象として、津波被害額の確率分布ではなく、津波対策前後の資産の確率 分布とする.これらは裏返しの関係なので実質的に同じことであるが、津波対策前後の資 産を用いることで効用関数の中の変数が大きいほど効用も大きいという関係となり、モデ ルの理解が容易になる.

<sup>6</sup> 正確には、客観的曖昧性と認識論的不確実性がほぼ同義である.



図-7.5.2 リスク回避とリスクプレミアム

津波対策前の資産状況fより津波対策後の資産状況gを好むことは、期待効用のモデルで は次式で表される.

$$\int u(f(\omega))dp_f(\omega) < \int u(g(\omega))dp_g(\omega)$$
(7.5.1)

*u*: 効用関数

f(ω):津波対策前の資産状況(津波対策前に事象ωが生じたときの資産)

g(ω):津波対策後の資産状況(津波対策後に事象ωが生じたときの資産)

*p*<sub>f</sub>(ω):津波対策前の確率測度(津波対策前に事象ωが生じる確率)

pg(ω):津波対策後の確率測度(津波対策後に事象ωが生じる確率)

期待値記号をつかって書き直すと次式となる.

$$E_{p_f}[u(f)] < E_{p_g}[u(g)]$$
(7.5.2)

ここで、 $E_{p_f}[\cdot] \ge E_{p_g}[\cdot]$ はそれぞれ確率測度 $p_f \ge p_g$ を用いた期待値である.

津波対策前の状況fと対策後の状況gについてのリスクプレミアムRP<sub>f</sub>, RP<sub>g</sub>は, 期待効用 モデルに基づいて次式で定義される.

$$E_{p_f}[u(f)] = u\left(E_{p_f}[f] - RP_f\right)$$
(7.5.3)

$$E_{p_g}[u(g)] = u\left(E_{p_g}[g] - RP_g\right) \tag{7.5.4}$$

これらを用いれば, 津波リスクをfからgまで削減する津波対策の便益Bは次式で求められる.

(期待資産の増加額)

$$B = E_{p_g}[g] - E_{p_f}[f] + RP_f - RP_g$$
(7.5.5)  
  
期待被害額の減少額  
リスクプレミアムの差額

#### (3) リスクプレミアムが生じる理由

本節の後半でリスクプレミアムを考慮しないでよい条件を検討するため、その事前準備 として期待効用モデルでリスクプレミアムが生じる理由を簡単に説明しておく.効用理論 では、「資産が多くなるほど効用は大きくなる」、「資産が少ないときに1万円入手して 得られる効用の増大分は、資産が多いときに同額入手して得られる効用増大分より大きい」 と想定される.これら二つの自然な想定を受け入れると、資産を変数とした効用関数は、 増加関数であり(u'>0)、下に凹の形状(u''<0)になる.この下に凹の形状の効用関数 をもつ個人はリスク回避的となり、この形状によってリスクプレミアムが生み出される.

この点を確認するため、簡単な例を考えよう(図-7.5.3).1000万円の資産をもつA氏が、50%の確率で津波被害を受ける地域に住んでおり、津波で被災したときには資産は0円となると想定する.また、ある津波対策の実施により被災確率を0%にできるとする.このとき、A氏にとって津波の期待被害額は500万円であり、津波対策による期待被害額の削減額も500万円となる.

A氏の効用関数は図-7.5.3の太線で表されている.津波対策の実施前は50%で資産0円, 50%で資産1000万円となるので,期待効用は0.5u(0) + 0.5u(1000)となる.A氏が500万円 支払って津波対策を実施した場合,実施後の効用はu(500)となる.図-7.5.3から,u(500) > 0.5u(0) + 0.5u(1000)がわかるので,A氏は500万円支払ってでも津波対策の実施を選択す る.

では、A氏は最大でどれほど津波対策に支払うだろうか.それは、津波対策の実施前の 期待効用と、津波対策後の効用が一致するまでである.そうした最大支払意思額はオプシ ョン価格(*OP*)と呼ばれており、次式で求められる.このオプション価格が、経済理論的 に正しい津波対策の価値である.

$$u(1000 - OP) = 0.5 \ u(0) + 0.5 \ u(1000) \tag{7.5.6}$$

リスクプレミアムは、オプション価格から期待被害額 500 万円を差し引いたものである. リスクプレミアムをxと表記すると、上式は次式のように書き直せる.

$$u(1000 - 500 - x) = 0.5 \ u(0) + 0.5 \ u(1000) \tag{7.5.7}$$



図-7.5.3 津波対策のリスクプレミアム

図-7.5.3 からわかるように、効用関数が下に凹である限り、リスクプレミアムは正である. 効用関数が直線(図-7.5.3 の点線)のとき、リスクプレミアムは0となり、オプション価格と期待便益が一致する. 効用関数が直線の個人は、リスク中立的であると呼ばれる. リスク中立的な個人は、所有する資産の額に関わらず、追加的に1万円を入手したときの効用増大分は同じであるという非現実的な性質が含意される.

## (4) リスクプレミアム推定の困難性

これまで、津波対策の費用便益分析においてリスクプレミアムを考慮すべきであること を説明してきた.しかし、実際にリスクプレミアムを推定することには多くの実践上の課 題がある.リスクプレミアムの大きさは効用関数の曲率で決まるので、その指標として様々 な「リスク回避度」が提案されている.その中で最も広く用いられているのは、Arrow (1965) と Pratt (1964)の提案した「相対リスク回避度」である.相対リスク回避度が推定できれば、 リスクプレミアムも推定できる.相対リスク回避度rは次式で定義される.

$$r = -x \frac{u''(x)}{u'(x)}$$
(7.5.8)

u(x): 効用関数

**x**:資産

これまで数多くの研究で相対リスク回避度が推定されてきた.しかし,表-7.5.1 に示す ように,その推定値には大きなばらつきがある.これは,相対リスク回避度の推定が安定 したものでなく,評価の時期や対象,手法によって異なることを示している. Halek and Eisenhauer (2001)や Chiappori and Paiella (2011)は,特に個人ごとの相対リスク回避度のばら つきが非常に大きいことを報告している. Rabin (2000)は,同じ個人でも直面するリスク規 模によって相対リスク回避度は異なるべきであることを指摘している.彼は簡単な試算に より,50%の確率で1000円失うが50%の確率で1100円得られるクジを拒否する人は,50%の確率で1万円失うなら50%の確率で100億円得られるクジも拒否するという結果になることを示した.このことは、実験室で客観クジ等を用いて推定した相対リスク回避度を、自然災害のような大規模なリスクに対しても用いることは問題であることを示唆している.

著者	相対リスク	使用データ
	回避度の推定値	
Fiend & Blume (1975)	2 以上	危険資産・安全資産の比率データ
Weber (1975)	$1.3 \sim 1.8$	消費のマクロデータ
Hansen & Singlton (1982)	$0.68~\sim~0.97$	消費と株利益のマクロデータ
Hansen & Singlton (1983)	$0.6~\sim~2.7$	消費と株利益のマクロデータ
Mankiw (1985)	$2.4 \sim 5.3$	耐久財の消費のマクロデータ
	$1.8 \sim 3.2$	非耐久財の消費のマクロデータ
Szpiro (1986)	$1.2 \sim 1.8$	財物損壊責任保険の購入データ
Barsky et al. (1997)	$0.7 \sim 15.8$	仮想的な資産選択のアンケートデータ
Halek & Eisenhauer (2001)	平均值 3.8	生命保険の購入データ
	中央值 0.89	
Chiappori & Paiella (2011)	平均值 4.2	リスク・安全資産の選択パネルデータ
	中央值 1.7	
下野(2000)	1.5 前後	消費需要関数
須藤(2000)	$1.7 \sim 5.5$	英国債の購入データ
多々納・梶谷・岡田(2002)	0.29	救命ヘリコプターに対するアンケート
松田・多々納・岡田(2005)	0.23	仮想的な地震保険に対するアンケート
白須(2006)	$3.7 \sim 7.3$	消費・金利スワップデータ
森平・神谷(2007)	$0.2~\sim~2.2$	生命保険の横断面データ
藤見・多々納(2008)	1.8	仮想的な地震保険に対するアンケート
中野・多々納・劉・畑山	0.66	地価データを用いたヘドニック法
中尾・東良 (2014)	$0.4 \sim 38.4$	危険資産・安全資産の比率データ
	平均值 10.3	1965 年~2012 年の各年で推定
吉川 (2015)	0.5~25.1	危険資産・安全資産の比率データ
	平均值 2.3	1970年~2013年の各年で推定

表-7.5.1 既往研究で報告されている相対リスク回避度の推定値

※海外の研究は Halek and Eisenhauer (2001)の文献レビューをもとに作成,国内の研究は伊藤(2008)の表 4.1 から 2000 年以降の論文・報告を選出し一部加筆・修正して作成した. 以上のことから、どのような評価対象にも適用できる相対リスク回避度の妥当な値を事 前に定めておき、費用便益分析ではそれを用いてリスクプレミアムを算出するという方法 を正当化することは難しい.リスクプレミアムを考慮するには、毎回、評価対象となる事 象について相対リスク回避度を推定するための調査を実施する必要がでてくる.また、事 業実施前に調査をする必要があるため、人々の実際の行動データを用いることができず、 仮想的な状況のもとで人々の選好を表明してもらう表明選好法によって相対リスク回避度 を推定することになる.そのため、その推定結果にどれほど妥当性があるかも問題となる. 以上のような実践上の理由により、費用便益分析においてリスクプレミアムを考慮するこ とは困難である.

## 7.5.4 曖昧性回避と曖昧性プレミアム

## (1) クジの例による解説

曖昧性回避と曖昧性プレミアムの大まかなイメージをつかむために、リスクのときと同様に簡単なクジの例を用いて説明する(図-7.5.4).赤玉が2個,青玉が2個入った壺Rと、赤玉と青玉が合計4個入っているがその割合は不明である壺Aがあり、どちらも赤玉を引けば100万円、青玉を引けば0円をもらえるとする.このとき、大多数の人は壺Rを選択することが知られている.壺Rは赤玉を引く確率が明らかであるためリスク下の状況であるのに対し、壺Aは確率に幅があり唯一に特定できないため曖昧性下の状況である.このように曖昧性を避ける傾向を曖昧性回避である.また、壺Rと壺Aを同じ価値にするには、壺Aに何万円か加える必要がある.このときに壺Aに追加される金額が、このクジの曖昧性プレミアムとなる.



図-7.5.4 曖昧性回避と曖昧性プレミアム

## (2) 曖昧性下の意思決定モデル

曖昧性下では期待効用モデルを拡張した意思決定モデルが用いられる.現在,様々なモ デルが開発されつつあり,まだ広く受け入れられた支配的なモデルは存在しない.ただし, そのなかでも主流のモデルになりつつあるのが Klibanoff, Marinacci and Mukerji (2005)の提 案した2次確率モデル(以下,KMMモデル)である.7.5.2節での例でいえば,一つ一つ の津波被害の確率分布が1次確率分布,それらの重みの分布が2次確率分布となる.ここ では,KMMのモデルに基づき曖昧性プレミアムを説明する.

津波対策前の資産状況をf,津波対策後の資産状況をgとすると、gをfより好む選択は KMM モデルにより次式で表される.

$$\int_{p\in C_f} \phi\{\int u(f(\omega))dp(\omega)\}d\mu_f(p) < \int_{p\in C_g} \phi\{\int u(g(\omega))dp(\omega)\}d\mu_g(p)$$
(7.5.9)

u:効用関数

 $\phi$ :曖昧性態度関数

f(ω):津波対策前の状況(津波対策前に事象ωが生じたときの資産)

g(ω):津波対策後の状況(津波対策後に事象ωが生じたときの資産)

**p(ω)**: (1次) 確率測度(事象ωが生じる確率)

C<sub>f</sub>:津波対策前の(1次)確率分布の集合

C<sub>g</sub>:津波対策後の(1次)確率分布の集合

μ<sub>f</sub>(p):津波対策前の2次確率測度(pに与える重み)

μ<sub>q</sub>(p):津波対策後の2次確率測度(pに与える重み)

期待値記号をつかって書き直すと次式となる.

$$E_{\mu_f} \left[ \phi [E_p \{ u(f) \}] \right] < E_{\mu_g} \left[ \phi [E_p \{ u(g) \}] \right]$$
(7.5.10)

ここで、 $E_p[\cdot] \ge E_u[\cdot]$ はそれぞれ確率測度 $p(\omega) \ge \mu(p)$ を用いた期待値である.

津波対策前の状況fと対策後の状況gについてのリスクプレミアムAP<sub>f</sub>, AP<sub>g</sub>は, 期待効用 モデルに基づいて次式で定義される.

$$E_{\mu_f} \left[ \phi [E_p \{ u(f) \}] \right] = \phi \left[ u \left( E_{\mu_f} [E_p \{ f(\omega) \}] - RP_{\bar{p}f} - AP_f \right) \right]$$
(7.5.11)

$$E_{\mu_g}\left[\phi\left[E_p\{u(g)\}\right]\right] = \phi\left[u\left(E_{\mu_g}\left[E_p\{g(\omega)\}\right] - RP_{\bar{p}g} - AP_g\right)\right]$$
(7.5.12)

ここで $RP_{\bar{p}f} \ge RP_{\bar{p}g}$ は、それぞれ確率測度 $\bar{p}_f = E_{\mu_f}[p] \ge \bar{p}_g = E_{\mu_g}[p]$ を用いたときの状況fと状況gのリスクプレミアムである。

これらを用いれば、津波をfからgまで削減する津波対策の便益Bは次式で求められる.

$$B = E_{\mu_g} [E_p \{g(\omega)\}] - E_{\mu_f} [E_p \{f(\omega)\}] + RP_{\bar{p}f} - RP_{\bar{p}g} + AP_f - AP_g$$
(7.5.13)  
期待被害額の減少額 リスクプレミアム 曖昧性プレミアム  
(期待資産の増加額) の差額 の差額

曖昧性回避は曖昧性関数¢が凹関数であることで表現されるため、曖昧性プレミアムが 生じる理由はリスクプレミアムとほぼ同様の議論で説明できる.曖昧性中立であれば、曖 昧性関数は線形になり、曖昧性プレミアムは0となる.

## (3)曖昧性プレミアム推定の困難性

曖昧性プレミアムを算出するのはリスクプレミアム以上に困難である.まず,曖昧性下 の意思決定モデルに関しては、リスク下の期待効用モデルほど支配的なモデルは存在しな い.そのため、曖昧性回避度の厳密な定義もモデルによって異なっている状況にある.ま た,曖昧性の実証研究は実験室での実験に基づいたものが大半であり、現実の問題を対象 とした実証研究は金融や環境の分野を中心に始まったばかりである.既往研究において現 実問題を対象として曖昧性プレミアムを試算した結果を表-7.5.2 に示す.これらはすべて 仮想的なシナリオを提示したもとでの表明選好データに基づいている.曖昧性プレミアム を費用便益分析に反映させるに非常に多くの課題が残されているのが現状である.

				曖昧性	
著者	被験者	対象リスク	意思決定モデル	プレミアム	
				÷全価値	
Vuprouther	保険 引受人	対象なし(数値だけ)	なし	34.9%	
Kunreuther, et al. (1993)		地震	(曖昧性下とリスク	15.7%	
		地下タンクの漏出	下の直接比較)	35.3%	
Riddel (2011)	一般市民	核廃棄物の輸送	決定荷重効用モデル	12.4%	
Fujimi &	一処市民	地雪に上る宏居岡博	亚均 八数エデル	17.00/	
Tatano (2013)	加工	地長による豕座関塚	平均切取てアル	17.0%	
Watanabe &	一般市民	野生動物に上ス復宝	αマキシミン期待効	12 7%	
Fujimi (2015)		対工動物による協合	用モデル	12./70	

表-7.5.2 既往研究における曖昧性プレミアムの試算結果

## 7.5.5 リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを無視できる条件と生じうるバイアス

これまで、リスクプレミアムや曖昧性プレミアムを無視することは適切ではないが、それらを政策決定に用いられるほど十分な精度で推定することができないという、悩ましい 状況にあることを説明してきた.現時点でこの状況に対処するには、費用便益分析では期 待被害額の削減額を津波対策の便益として用いるが、そのことが暗黙に前提としている条 件を明らかにし、その仮定が成立しない場合に生じうるバイアスについて把握しておくこ とが重要である.以下ではこの点について議論していく.

## (1) リスクプレミアムを無視できる条件

リスクプレミアムを無視して期待被害額の削減額をそのまま対策の便益としてよい条件 としては、①条件付き請求権の完全市場が存在する、②Arrow-Lindの定理が成立する環境 にある、③人々がリスク中立的である、の3つが考えられる.

#### ①条件付き請求権の市場

条件付き請求権とは、ある状況になったときある金額を受け取るという権利のことであ る.保険は災害が発生したときに保険金を受け取れる権利であり、条件付き請求権の一種 である.Arrow (1964)は、起こりうる全ての状態について条件付き請求権があり、それらを 取引費用なしで自由に売買できる完全市場が存在するなら、個々人のリスク回避度の大き さに関わらず、将来の不確実な利益や損失は全て期待値で計算してよいことを示した.そ のため、条件付き請求権の完全市場が存在していると考えるなら、津波対策の便益は、削 減される期待被害額としてよいことになる.

現実世界では、条件付き請求権の完全市場が近似的にでも成立していると考えるのは難 しい. Arrow 自身が指摘しているように、この市場が成立するには二つの現実的な問題が ある. 一つはモラルハザードである. モラルハザードとは、保険に加入した人が補償され るリスクに対して避ける注意や労力を払わなくなることである. モラルハザードが生じる と、契約時でのリスク状況と契約後のリスク状況が異なるため市場が成立しなくなる. も う一つは取引費用の問題である. 条件付き請求権の売買には専門的で複雑な契約が必要で あり、多額の取引費用が発生するため市場が成立しない.

#### ②Arrow-Lind の定理

リスク下の公共事業評価において、便益や費用の期待値のみが用いられている理論的根拠となっているものにArrow-Lindの定理がある.端的に言えば、公共事業の便益が確率的であっても、その受益者の人数が非常に多ければ、費用便益分析でリスクプレミアムは無視してよいという定理である.しかし、Kaufman (2014)が指摘しているように、この定理は公共事業が生み出すリスクについては成立しうるが、津波リスクのように元々存在するリスクについては適用できない.この点を明確にするために、まず、Arrow-Lindの定理のモ

デルを簡単に説明する.

社会にはn人存在し,各人の効用関数 $u(\cdot)$ はリスク回避型 (u' > 0, u'' < 0) であるとする. 公共事業は確率的な便益Bを社会にもたらし,各人で均等に配分される.  $\bar{B} = E(B), \varepsilon = B - \bar{B}$ とすることで,便益Bを期待値と確率項に分離して表記できる. つまり, $B = \bar{B} + \varepsilon$ となる.また,各個人は公共事業の便益Bとは統計的に独立である確率的な個人資産Aを持っている.以上の条件のもとでは,公共事業の便益が確率的でなく期待値を確実に得るために各人が支払ってもよいと考えるリスクプレミアムx(n)は次式で表される.

$$E\left[u\left(A+\frac{1}{n}\bar{B}+\frac{1}{n}\varepsilon\right)\right] = E\left[u\left(A+\frac{1}{n}\bar{B}-x(n)\right)\right]$$
(7.5.14)

簡単な計算により、個人のリスクプレミアムx(n)だけでなく、社会全体で集計したリス クプレミアムnx(n)も、社会の人数が十分に多くなるにつれて 0 に収束することが証明で きる. (証明は本小節末の補足に記載)

Arrow-Lindの定理では、公共事業が生み出しているリスクについて、リスクプレミアム を考慮する必要がないことを示していることに注意が必要である.津波リスクのように公 共事業の前から存在するリスクについては適用できない.また、公共事業の便益Bが津波 発生のときのみ発現するという形でこの定理を適用することもできない.なぜなら、津波 リスクは個人資産Aの確率変動の一部として表現されるが、この定理の証明には公共事業 の便益Bと個人資産Aが独立でなければならないからである.また、横松 (2005)が指摘する ように、リスクが人口規模から独立に与えられておらず、リスクが広く拡散されない場合 についてもこの定理は成立しない.以上の理由により、津波対策の費用便益分析の文脈に おいて、Arrow-Lindの定理を当てはめることは適切ではない.

## ③リスク中立性

7.5.3(3)節で説明したとおり、リスク中立的であれば効用関数が直線となり、リスクプ レミアムは0となる.ただし、効用関数が直線であることは金銭の限界効用が一定である ことを意味する.つまり、所有する資産の額に関わらず、追加的に1万円を入手したとき の効用増大分は同じであるという非現実的な性質が含意される.また、リスクが小さくて 効用関数が近似的に直線と見なせる範囲でしか確率変動しない場合も、近似的にリスクプ レミアムは0と見なせる.しかし、大きな被害をもたらす津波リスクについて、この近似 の議論は当てはまらない.

## (2) 曖昧性プレミアムを無視できる条件

曖昧性プレミアムについては研究が進んでおらず,それが無視できる条件について明ら かになっていない. どの曖昧性下の意思決定モデルを用いるかによっても,曖昧性プレミ アムを無視できる条件は異なると考えられる. KMM モデルについては,曖昧性中立のとき,つまり曖昧性関数φが直線であるときは期待効用モデルに帰着するので,曖昧性プレ ミアムは0となる.

## (3) リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを無視したときに生じうるバイアス

上記で述べた条件が成立しないときに、リスク下や曖昧性下の費用便益分析においてリ スクプレミアムや曖昧性プレミアムを無視するとバイアスが生じる.具体的には、津波対 策の便益にリスク下では $RP_f - RP_g$ ,曖昧性下では $RP_{\bar{p}f} - RP_{\bar{p}g} + AP_f - AP_g$ のバイアスが生 じる.このバイアスの符号は対策前後のリスクや曖昧性の状況に依存するため、一概に便 益が過小評価されるか過大評価されるかは判断できない.

ただし、リスク下において、津波対策前後の資産の確率分布にある特定の関係が成立していれば、リスクプレミアムによるバイアスの符号が決められる.その一つに第1次確率優位の関係がある.対策後の資産の確率分布G(x)が対策前の確率分布F(x)に第1次確率優位であるとは、任意の資産額xについて $G(x) \leq F(x)$ が成立することである<sup>7</sup>.この状況は図-7.5.5 で表される.このとき、対策前のリスクプレミアムが対策後のものより大きくなり( $RP_f - RP_g > 0$ )、津波対策の便益は過少評価される<sup>8</sup>.この1次確率優越の条件は一般には厳しいものであるが、津波対策については成立する可能性が高いと考えられる.なぜなら、津波対策を行うことによって、津波の被害が大きくなり、資産が減少するような事象はどのようなものも考えにくいからである.この条件が成立しているかどうかを確認するためには、人々のリスク回避についての態度を調べる必要はなく、津波対策前後のリスクカーブを工学的に算出して比較すればよい.



**図-7.5.5** 第1次確率優位

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> これまでの $f(\omega)$ や $p_f(\omega)$ とF(x)には,  $x = f(\omega)$ ,  $F(x) = p_f(f^{-1}(x))$ という関係がある.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> *G*(*x*)が*F*(*x*)に第1次確率優位であるとき, *G*(*x*)は*F*(*x*)に第2次確率優位でもあるため,後者と同値の関係で ある*RP<sub>f</sub>* ≥ *RP<sub>g</sub>*が成立する.

曖昧性下においては,津波被害の各 EP カーブから算出される資産の確率分布について, 対策後の確率分布が対策前の確率分布に第1次確率優位であり,かつ,対策後の2次確率 分布  $\mu_g$ も対策前の $\mu_f$ に第1次確率優位であるなら,  $RP_{\bar{p}f} - RP_{\bar{p}g} + AP_f - AP_g > 0$ が成立す るため,津波対策の便益は過少評価される.前者の条件については,リスク下のリスクカ ーブと同様の理由で成立する可能性が高い.後者の条件についても,津波対策を行うこと によって,ロジックツリーの分岐の重みが悪い予測に大きく与えられるように変化するこ とは稀であると考えられるため,成立する可能性が高い.大半の場合は津波対策前後で分 岐の重みは変化しないと考えられる.対策後の2次確率分布  $\mu_g$ が対策前の $\mu_f$ に第1次確 率優位であるという条件についても、それらの重みの分布関数を直接比較することで実際 に確認できる.

## (4) 費用便益分析への含意

以上の議論をまとめると表-7.5.3 のように整理できる. リスク回避や曖昧性回避を無視 したときには津波対策の便益にバイアスが生じるが,その方向は一般には不明である. し かし,上記で述べた第1次確率優位の条件が成立するなら,リスク下でも曖昧性下でも便 益は過少評価されることになる. このとき,津波対策の便益を期待被害額の減少額として 費用便益分析を行った結果,便益が費用を上回った場合には,二つのプレミアムを考慮し たとしても便益が費用を上回ると判断できる. 逆に,便益が費用より小さい場合には,二 つのプレミアムを考慮することで関係が逆転することもありうる. つまり,第1次確率優 位の条件を仮定するなら,リスク下や曖昧性下の費用便益分析で期待被害額の削減額を津 波対策の便益として用いても,必要な事業を許可しそこなう可能性はあるものの,無駄な 事業を却下する判断基準としては有効であるといえる.

状況	便益に生じるバイアス	第1次確率優位の条件	B/C への影響
リスク	PD PD	成立	便益の過小評価
	Mr Mg	成立しない	不明
曖昧性		成立	便益の過小評価
	$KF_{\bar{p}f} - KF_{\bar{p}g} + AF_f - AF_g$	成立しない	不明

表-7.5.3 リスク回避,曖昧性回避を無視したときに津波対策の便益に生じるバイアス

## 7.5.6 まとめ

本小節では、リスク下や曖昧性下において津波対策の便益を評価するには、期待費用額 の減少額だけでなくリスクプレミアムと曖昧性プレミアムを考慮すべきことを述べた.ま た、それらのプレミアムを無視しうる条件と、それらを無視することで生じうるバイアス について検討した.その結果,期待被害額の減少額のみを対策の便益した費用便益分析に は下記の性質があることが明らかになった.

- ①リスク下において、津波対策後の資産の確率分布が対策前の確率分布に第1次確率優位であるなら、期待被害額の減少額のみを対策の便益した費用便益分析は社会厚生を低下させる津波対策を却下する基準として有効である。
- ②曖昧性下において、各パラメータセットに対応する対策後の資産の確率分布が対策前のものに第1次確率優位になっており、かつ、2次確率としての重み分布について対策後のものが対策前のものに第1次確率優位であれば、期待被害額の減少額のみを対策の便益した費用便益分析は社会厚生を低下させる津波対策を却下する基準として有効である.
- ③期待被害額の減少額のみを対策の便益した費用便益分析は、リスクプレミアムや曖昧 性プレミアムを考慮すれば社会厚生を増大させると評価されるべき津波対策も却下 してしまう可能性がある。

今後、リスク回避度や曖昧性回避度に関する推定手法の開発や、それらの推定結果の事 例報告が蓄積されていくと、リスクプレミアムや曖昧性プレミアムを算出し、それらを費 用便益分析に組み入れられるようになるかもしれない.例えば、Meyer and Meyer (2005)は、 データを標準化することにより、先行研究で報告されている相対リスク回避度のばらつき は小さくなることを示している.また、Kaufman (2014)が提案するように、専門家のパネ ルを設置し、現実的に妥当なリスク回避度や曖昧性回避度の値を社会的に合意しておくこ とが考えられる.そのときは、評価対象を種類や規模でいくつかのカテゴリーに分類し、 各カテゴリーで異なったリスク回避度や曖昧性回避度の値を用いるなどの柔軟性が必要に なると考えられる.

- ※補足 [Arrow-Lind の定理の証明]
  - まず,  $\lim_{n\to\infty} x(n) = 0$ は次式により示される.

$$\lim_{n \to \infty} E\left[u\left(A + \frac{1}{n}\overline{B} - x(n)\right)\right] = \lim_{n \to \infty} E\left[u\left(A + \frac{1}{n}\overline{B} + \frac{1}{n}\varepsilon\right)\right] = E[u(A)]$$
(7.5.15)

つぎに,  $\lim_{n\to\infty} nx(n) = 0$ を示す. 配分率s (= 1/n)を用いると, 各人の期待効用W(s)は次式で表される.

$$W(s) = E[u(A + s\overline{B} + s\varepsilon)]$$
(7.5.16)

ここで、W(s)を1回微分して0を代入すると次式が得られる.

$$W'(0) = E[u'(A)(\bar{B} + \varepsilon)] = \bar{B}E[u'(A)]$$
(7.5.17)

二つ目の等式は、公共事業の便益Bと個人資産Aが独立であることから成立する.また、リ スクプレミアム、配分率、微分の定義から、次式が成立する.

$$\lim_{n \to \infty} nE \left[ u \left( A + \frac{1}{n} \overline{B} - x(n) \right) - u(A) \right]$$

$$= \lim_{n \to \infty} nE \left[ u \left( A + \frac{1}{n} \overline{B} + \frac{1}{n} \varepsilon \right) - u(A) \right] = \lim_{s \to 0} \frac{E[u(A + s\overline{B} + s\varepsilon) - u(A)]}{s} = W'(0) = \overline{B}E[u'(A)]$$

$$\lim_{n \to \infty} \frac{E \left[ u \left( A + \frac{1}{n} \overline{B} - x(n) \right) - u(A) \right]}{\frac{1}{n} \overline{B} - x(n)} = E[u'(A)]$$
(7.5.18)

前々式を前式で割ると,次式が得られる.

$$\lim_{n \to \infty} \bar{B} - nx(n) = \bar{B} \tag{7.5.19}$$

よって,

$$\lim_{n \to \infty} nx(n) = 0 \tag{7.5.20}$$

## 参考文献

- Arrow, K. J. (1964) The role of securities in the optimal allocation of risk-bearing, *Review of Economic Studies*, 31: 91-96.
- Arrow, K. J. (1965) Aspects of the Theory of Risk Bearing, Helsinki: Academic Publisher.
- Arrow, K. J., Lind, R. C. (1970) Uncertainty and the evaluation of public investment decisions. *American Economic Review*, 60(3):364–378
- Bach, D. R., Hulme, O., Penny, W. D., Dolan, R. J. The known unknowns: neural representation of second-order uncertainty, and ambiguity. *Journal of Neuroscience*, 31, 4811-4820 (2011).
- Barsky, R. B., Juster, F. T., Kimball, M. S., Shapiro, M. D. (1997) Preference parameters and behavioral heterogeneity: An experimental approach in the health and retirement study, *Quartery Journal of Economics*, 112(2):537-579.
- Chiappori, P. A., Paiella, M. (2011) Relative risk aversion is constant: Evidence from panel data, Journal of the European Economic Association, 9(6):1021-1052.
- Etner, J., Jeleva, M., Tallon, J. M. (2012) Decision theory under ambiguity. *Journal of Economic Surveys*, 26(2), 234-270.

- Friend, I., Blume, M. E. (1975) The demand for risky assets, *American Economic Review*, 65(5):900-922.
- Fujimi, T., Tatano, H. (2013) Promoting seismic retrofit implementation through "nudge": using warranty as a driver, *Risk Analysis* 33(10): 1858–1883, 2013.
- Gilboa, I., Marinacci, M. (2016). Ambiguity and the Bayesian paradigm. In *Readings in Formal Epistemology* (pp. 385-439). Springer International Publishing.
- Halek, M., Eisenhauer, J. (2001) Demography of risk aversion, *Journal of Risk and Insurance*, 68(1):1–24.
- Hansen, L.P., Singlton, K. J. (1982) Generalized instrumental variables estimation of nonlinear rational expectations models, *Economerica*, 50(5):1296-1286.
- Hansen, L.P., Singlton, K. J. (1983) Stochastic cosumption, risk aversion, and temporal behavior of asset returns, *Journal of Political Economy*, 91(2):249-265.
- Hsu, M., Bhatt, M., Adolphs, R., Tranel, D. & Camerer, C. F. Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making. *Science* 310, 1680-1683 (2005).
- Huettel, S. A., Stowe, C. J., Gordon, E. M., Warner, B. T. & Platt, M. L. Neural signatures of economic preferences for risk and ambiguity. *Neuron* 49, 765-775 (2006).
- Kaufman, D. N. (2014) Why is risk aversion unaccounted for in environmental policy evaluation? *Climatic Change*, 125(2):127-135.
- Klibanoff, P., Marinacci, P.M. and Mukerji S. (2005): A smooth model of decision making under
- ambiguity, Econometrica, 73:1849-1892.
- Kunreuther, H., Hogarth, R., Meszaros, J. (1993) Insure ambiguity and market failure, *Journal of Risk and Uncertainty*, 7:71–87.
- Kunreuther, H., Meszaros, J. Hogarth, R., Spranca, M. (1995) Ambiguity and underwriter decision process, *Journal of Economic Behavior and Organization*, 26:337–352.
- Machina, M. J., Siniscalchi, M. (2014). Ambiguity and ambiguity aversion. *Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty*, 1, 729-807.
- Mankiw, N. G. (1985), Consumer durables and the real interest rate, *Review of Economics and Statistics*, 67(3):353-362.
- Meyer, D.J., Meyer, J. (2005) Relative risk aversion: What do we know? *Journal of Risk and Uncertainty*, 31(3):243-262.
- Michel-Kerjan, E., Kunreuther, H. (2018) A Successful (yet somewhat untested) case of disaster financing: terrorism insurance under TRIA, 2002-2020, *Risk Management and Insurance Review*, 21(1):157-180.
- Pratt, J. W. (1964) Risk aversion in the small and large, *Economerica*, 32(1/2):122-136.
- Rabin, M. (2000) Risk aversion and expected-utility theory: a calibration theorem. *Econometrica*, 68(5):1281–92.

- Riddel, M. (2011) Uncertainty and measurement error in welfare models fo risk changes, *Journal of Environmental Economics and Management*, 61:341-354.
- Szpiro, G. G. (1986) Measureing risk aversion: an alternative approach, *Review of Economics and Statistics*, 68(1):156-159.
- Watanabe, M., Fujimi, T. (2015) Evaluating change in objective ambiguous mortality probability: valuing reduction in ambiguity size and risk level, *Environmental and Resource Economics*, 60:1-15.
- Weber, W. E. (1975) Interest rates, inflation, and consumer expenditures, *American Economic Review*, 65(5):843-858.
- 下野恵子(2000)「相対危険回避度の測定」,オイコノミカ,37巻1号,pp.1-14.
- 白須洋子(2006)「消費から見た金利期間構造および代表的家計についての一考察」,金融 庁金融研究研修センターディスカッションペーパ, No.22.
- 須藤時仁(2000)「国際の発行制度と市場流動性」,証券レビュー,40巻4号.
- 多々納裕一・梶谷義雄・岡田憲夫(2002)「リスクプレミアムの測定方法に関する実証的考 察」,京都大学防災研究所年報,45号,pp.11-17.
- 中尾武雄・東 良彰 (2014)「日本の危険回避度の長期的変化について-1965 年から 2012 年 の相対的危険回避度の推定-」,同志社大学創造経済研究センターDiscussion Paper, No 2014-02.
- 中野一慶・多々納裕一・劉暉・畑山満則(2010)「地価データを用いた水害リスクプレミア ムの推計」,第41回土木計画学研究発表会・講演集,323.
- 藤見俊夫・多々納裕一(2008)「曖昧性回避が地震保険の加入選択に及ぼす影響の定量分析」 日本リスク研究学会誌,18巻2号,pp.47-58.
- 松田曜子(2005)「CVM を用いた自然災害リスクに対する家計のリスクプレミアムの計量 化」, 土木計画学研究・論文集, 22 号, pp.325-334.
- 森平爽一郎・神谷信一(2007)「生命保険需要から見た危険回避度推定」,小倉厚之編著「リ スクの科学--金融と保険のモデル分析」,第4章,朝倉書店.
- 横松宗太(2005)「カタストロフリスクと経済評価」,多々納裕一・高木朗明 編著『防災の 経済分析—リスクマネジメントの施策と評価』,勁草書房.
- 吉川卓也(2015)「相対的リスク回避度による家計の金融資産保有行動の分析」,中村学園 大学・中村学園大学短期大学部研究紀要,47号,pp.93-101.

## 7.6 政策実施コスト

## (内藤,井上)

本節では、津波に対する減災を目的とした政策の実施に必要なコストを概算する方法に ついて、現場における実績をもとに提示する.減災のための施策にはハード施策とソフト 施策の2通りがあるが、7.1 で提案されている最適堤防高の考え方においては、海岸堤防 の建設コストを用いて物理的防御レベル(海岸堤防の高さ)を設定する方法が提案されて いることから、ここでは海岸堤防の整備に関連するコストについて述べる.

#### 7.6.1 海岸堤防の整備コスト

海岸堤防の整備に関連するコストを大別すると(1)工事費,(2)測量設計費,(3)用地・ 補償費,(4)維持管理費の4つとなる.(1)から(3)がイニシャルコストであり,海岸堤防 の整備コストである.例えば,海岸堤防の整備等の事業評価の費用便益分析においては, 事業費に本工事費,用地費,補償費を含むことが,「海岸事業の費用便益分析指針(改訂 版)」において定められている.

これに一定期間に要する (4) を加えたものがライフサイクルコストであり、インフラの 長寿命化の全体計画(都道府県単位の計画)を定めた上でそれぞれの海岸堤防等のインフ ラの長寿命化(ライフサイクルコストの低減)を図ることとされている.

#### (1) 工事費

海岸堤防の整備コストを概算するため、典型的な構造の一つであるコンクリート三面張 り構造の海岸堤防(図-7.6.1)について、工事費(建設に要した費用.以下「工事費」)の 実績を調査した.対象は、青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、静岡県の 7県において近年施工された海岸堤防とし(表-7.6.2)、工事の実施主体である海岸管理者 から聞き取った.なお、ここで扱った工事費には、原材料費、労務費、機械経費、水道光 熱電力料等の直接費と間接費(共通仮設費,現場管理費,一般管理費の合計)が含まれて いる.



図-7.6.1 コンクリート三面張り構造の海岸堤防

県名	海岸名	天端高	盛土高さ	主な施工条件					
		(T.P. m)	(m)						
青森県	A海岸	7.0	4.2	築堤:流用土,購入土					
				護岸:三面張り					
				地盤改良あり					
	B海岸	7.0	4.2	築堤:流用土,購入土					
				護岸:三面張り					
				地盤改良あり					
岩手県	C海岸	14.0	10.4	築堤:流用土,購入土,直					
				立堤					
				護岸:三面張り					
				地盤改良あり					
宮城県	D海岸	14.7	13.5	築堤:流用土,購入土					
				護岸:三面張り					
				地盤改良あり					
福島県	E海岸	12.8	6.4	築堤:流用土					
				護岸:三面張り					
	F海岸	7.2	4.9	CSG 堤					
				地盤改良あり					
	G海岸	7.2	4.9	CSG 堤					
茨城県	H海岸	7.0	4.5	築堤:流用土					
				護岸:三面張り					
	I 海岸	7.0	4.5	築堤:流用土					
				護岸:三面張り					
千葉県	J海岸	6.0	3.27	築堤:購入土					
				護岸:植生工					
	K海岸	6.0	3.15	築堤:購入土					
				護岸:植生工					

表-7.6.1 調査対象海岸の堤防諸元



図-7.6.2 海岸堤防の盛土高さと工事費の関係

調査で得られた工事費は,盛土高さが大きくなるほど,増大する傾向にあった(図-7.6.2). 海岸堤防の単位延長あたりの工事費は,主に盛土の構築とコンクリート被覆によって構成 される.盛土部分の断面を天端部分とそれ以外の部分とに分解して考えると,天端幅は盛 土高さとは関係なく概ね4m程度が採用されることが多いため,天端幅×盛土高で決定さ れる天端幅分の盛土材料の量は,盛土高さに比例する.一方で,法面を有する残りの盛土 部分については,盛土高さに比例して堤体の幅も大きくなることから,法面幅×盛土高で 決定される盛土量は高さの2乗に比例することになる.また,コンクリート被覆の量は, 法面(堤防斜面)の長さに比例することから,盛土高さに比例する.

これらを考慮すると、工事費と盛土高さを表す関係式は、切片を0に持つ二次多項式で 近似することが適当と考えられ、本調査で得られたデータをもとに最小二乗法によって関 係式を求めると以下のとおりとなった.

$$y = 6.4477x^2 + 10.726x \tag{(7.6.1)}$$

(7 (1))

ここで, y は工事費(万円/m), x は盛土高さ(m).

ここで示した関係式は、あくまでも概算検討のためのものであることに留意する必要が ある.実際には、三面張り構造であっても、詳細構造は多様であり、この関係式から外れ る場合も多い.例えば、C海岸の海岸堤防は重力式との複合構造であるために、上記の関 係式から算定されるよりも高い工事費用となっている(図-7.6.2).また、全く同じ構造で あったとしても液状化対策の実施の要否や、盛土材料として建設発生土と購入土のどちら を使用するか等の現場条件によって費用は変わる.盛土の原材料費や労務費は、地域の需 給動向にも依存するため、建設地や建設時期によって変動する.

## (2) 測量設計費

測量設計費としては、工事の初期段階において実施される測量、地質調査、計画策定、 設計に関する費用や、住民等との合意形成に要する費用(説明資料作成の委託,説明会の 会場確保等)が挙げられる.

## (3) 用地·補償費

用地費・補償費としては,用地の取得・使用,物件・工作物の移転,営業,特殊(漁業), 事業損失等に関する補償費等が挙げられる.

なお,工事や測量,設計,補償等の業務を民間企業に委託する費用は(1)から(3)にそ れぞれ計上されているが,工事の実施主体となる都道府県,市町村,国の職員の人件費は 計上されていない.

## 7.6.2 その他の関連行政コスト

実際の堤防整備においては、上記で示した整備コスト以外にも様々な関連行政コストが 必要となる.

海岸堤防の計画を堤防背後の土地利用計画や避難計画など整合させるためには,相互の 計画調整が必要であり,例えば,津波防災地域づくり法に基づく「推進計画」を策定する 過程で調整するためには,推進計画を策定する経費やその合意形成のための「協議会」の 運営経費などが別途必要となる.また,「推進計画」を策定するには,与条件として津波 浸水想定を作成する必要がある.

海岸堤防整備に優先して避難対策に取り組む場合には,ソフト施策としてハザードマップの作成,公表,周知などが,ハード対策として避難路や避難施設の整備などが必要となる.

## 7.7 防潮堤の外部性の整理とその緩和策

## (平野, 高木)

海岸堤防事業は,安全性を高める一方で,特にリアス式海岸部など平地が小さい箇所で 安全性以外に対する影響が大きい.本節では,その影響について表層的景観,深層的景観, 環境,利便性,安全性に整理した上で,筆者の津波被災地での経験・見聞を通じて,それ ぞれの観点から,例えば海岸堤防を地形に収める方法,まちづくり側の工夫により一体感 を維持する方法など,その影響の緩和策についてまとめたものである.

#### 7.7.1 はじめに

周知の通り、東日本大震災の津波被害からの復興において、海岸堤防事業が精力的に実施されている.海岸堤防はほとんどの場合、被災者感情からも、地域の安全性の観点から も、復興において重要な役割を果たす一方で、景観や環境に対して様々な弊害(経済学用 語では外部不経済であり、以下単に外部性と呼ぶ)も同時にもたらしている.特にリアス 式海岸部においては、平地が狭く山が迫っていることから、視点を平地に置くと、その存 在感は非常に大きなものとなる.住民から海岸堤防に対する反対意見が出たのも、ほとん どがリアス式海岸部や島嶼部であったように感じている.例えば、ある地区では当初3m の海岸堤防高が海岸管理者から示された.これは、他地区の海岸堤防に比べれば比較的低 いものであったが、背後の山を考えれば住宅の階高に匹敵する高さは、非常に強い囲繞感 を生むため、海岸堤防による安心感よりも住環境としての囲繞感悪化が上回っての反対の 声であった.地域の事情により反対の声が上がったのはほとんどが、こうした外部性によ るものであったように思う.

その一方で、仙台平野のような平野部においては、従来から非常に立派な海岸保安林の 海側に海岸堤防が整備されており、反対運動は聞こえてこない.このことは従前から、漁 業者も少なく、海岸堤防が保安林によって日常生活とは切り離された非日常的な空間での 出来事で、外部性が非常に小さいからであると思われる.こうした海岸堤防の持つ外部性 をいかに小さくして計画・設計を行うかが、津波防災まちづくりにおける最も重要な視点 であるといって過言ではない.

ところで、現在、南海トラフ地震津波対応のための海岸堤防整備が各地で検討されてい る. 幸か不幸か予算の関係上、東日本大震災津波被災地のように海岸堤防が大々的に整備 されることは現実的にはあり得ず、多くの関係自治体で、津波避難タワーなどの避難施設 を中心に防災まちづくりがすすめられている現状ではあるが、東日本大震災津波被災地で の海岸堤防事業の経験から、海岸堤防を整備する場合に検討すべき点についてまとめてお く必要性があると考える.

海岸堤防が津波・高潮に対してのリスク低減は,海岸堤防の高さで一義的に決まると言って良い.また,その外部性も海岸堤防の高さに大きく支配されていることは言を俟たない.海岸堤防の高さについては,農林水産省・国土交通省連名の2011年7月8日付け通知「設計津波の水位の設定方法等について」で,海岸堤防の高さを決める方法が示されており,

今回の海岸堤防事業の根幹をなすものである.この手順内では,選定されたL1津波から最 大のものを設計対象津波とすること,地域海岸内部で最大高さの地点に地域海岸全体で統 ーすること,さらには1mの余裕高を取ることなど,といった点で様々な不確実性に対 し,すべからく安全側に設計津波水位を取るように求めている.防災事業において,安全 側を取る発想は一般的なものではあるが,各段階での安全側が積み重なることにより,海 岸堤防は当然高くなり当然外部性も大きくなる.さらに,この考え方には外部性はおろか,

基本的に設計外力としての津波,つまりは「海側の視点」しかない.守るべき対象つまり 「陸側の視点」が欠如している.この本質的な問題に関しては,現在,土木学会土木計画 学委員会・海岸工学委員会合同による減災アセスメント小委員会で,費用便益分析などを 踏まえた方法論としての検討がすすめられているところである.

そこで本稿では、そうした費用便益分析でも簡単には計量できずに漏れてしまうと想定 される様々な外部性について、筆者の津波被災地での経験および見聞から、海岸堤防建設 により想定される外部性を整理し、津波被災地で行われているその緩和策についてまとめ ることを通じて、将来的な海岸堤防事業のための基礎資料となることを目的する.

なお、本稿の内容は、筆者も参画して制定された国土交通省水管理・国土保全局「河川・ 海岸構造物の復旧における 景観配慮の手引き」(2011年11月)(以下単に「手引き」と呼 ぶ)と重複する部分もあることを断っておく.

#### 7.7.2 外部性の類型とその特徴

まず本項で、海岸堤防によって発生していると考えられる外部性について、筆者の被災 地での経験と見聞から重要であると考えるものについて類型を示し、それぞれの特徴について述べる.

## (1) 自然環境とその利用価値

a) 砂浜海岸の場合

海岸の自然環境は大変豊かである.砂浜海岸の場合は,手引きにも示されているように, 海域の環境から,陸域の環境へグラデーションのように変化していく豊かなエコトーンが 形成される.砂浜海岸に海岸堤防を建設する場合は,そのエコトーンを阻害しないように, なるべく陸域側に作らなければ,大きな影響をもたらすことになる.一般的に砂浜そのも のに海岸堤防を建設することは多くないが,今回の東日本大震災からの復旧事業において は,機能強化復旧が行われ,堤防規模の増大に伴い用地の関係から,従前より海側に堤脚 が計画されている例も多い.

砂浜海岸が海水浴場として利用されいているケースではなおさら、この問題が大きくなる. 自然環境の価値だけでなく、海水浴場としての利用価値が大きく下がるからである. 地域の生業が成立しなくなるような海岸堤防事業は、あまりにも本末転倒である.

#### b) 岩礁海岸の場合

また、リアス式海岸部に多い岩礁海岸(磯)の場合は、磯そのものに海岸堤防が建設さ

れることは、技術的・コスト的に不利であるためにほとんどない.しかし、リアス式海岸 部では、厳しい地形条件から岩礁海岸沿いのわずかな低地を縫うようにして道路が通され ていることが多い.この道路を守る海岸堤防の規模を大きくする場合、地形的に道路を振 り変えることも難しい(それが簡単なのであれば越波等の危険がある海岸沿いではなく、 最初からそちらに道路を作っている)上に、海岸堤防の施工上も他に迂回路がなく、地域 の重要な生活道路を長期間通行止にすることもできず、道路を現位置のままやむなく海側 に海岸堤防を拡張しているケースが存外に多い.このような場合、岩礁海岸の磯そのもの に捨石を施し、その上に海岸堤防を建設することになる.言うまでもなく磯部分は海域の 生態系において、産卵や幼魚の避難場所としても大変重要でもあり、豊かな生態系が育ま れている場所である.捨石による磯の埋め立ては、海域の自然環境に大変大きな影響を及 ぼすことになると言わざるを得ない.また、同様に釣りなどにおける利用価値も、こうし た海岸堤防においては、著しく低下することが容易に想像される.

c) 陸域と海域のつながりの確保

海域の自然環境にとって、山・川・海のつながりが大切であることは言を俟たない.特 にリアス式海岸部の平地に注ぐ河川のほとんどは急流であるために、地質的に粒径も大き くなりがちで、当然伏流水が相当ある場合が多い.つまり山・川・海の物質循環の相当部 分を伏流水が担っているとも言える.

こうした条件下での海岸堤防事業を実施する際は、地盤改良、矢板などにより伏流水が 海に流入することを地下ダム的に阻害してしまうと、海域の漁場の価値や自然環境として の価値を下げるばかりでなく、陸域の地下水位も上昇し、様々な影響が発生する可能性が ある.

## (2) 表層的景観

先述の通り,特にリアス式海岸部では海岸堤防の景観的なインパクトは強い.本稿では, 海岸堤防の圧迫感など,来訪者が瞬時に認識しうる景観現象を「表層的景観」,そうした 海岸堤防が存在し続ける環境によってもたらされる住民の地域認識や,自然との関わりに もたらされる長期の影響としての「深層的景観」を分けて述べることにする.この分類は, 来訪者にとっての景観と居住者にとっての景観と読み替えることも可能であろう.何れに せよ,この両者は,緩和策も異なるため,別のものとして捉えることとする.

東日本大震災の津波被災地では、今後の持続可能性を考慮すると、漁業と水産加工業を 基軸にしつつも、いわゆるブルーツーリズムといった観光産業も重要な地域産業となって いくと思われる.これは南海トラフ地震津波が想定されている地域でも同様であろう.

美しいリアス式海岸の風景はそうした観光産業にとって重要な資源である.遠景から見 た海岸堤防の存在は、その美しい自然風景に影響を及ぼし、観光資源としての価値を下げ るものと考えられる.また、中景から見ても、地形条件から施設は低地に作られていくと 考えられるが、例えば2階からも海が見えないというように、海への眺望という良好な観 光ポテンシャルを持った場所を著しく小さくする特性を持つ.さらには、近景においても 海岸堤防は圧迫感を生み、良好な景観形成上はあまり芳しくない存在である. つまり、海 岸堤防の影響は、あらゆるスケールにおいて確実に発生してしまうものであり、地域づく りにとっては大変慎重な検討が必要な項目である.

#### (3) 深層的景観

海と一体となって暮らしているリアス式海岸部の漁村において,海が見えることの意味 は非常に重要である.時々刻々と変化する海の様子は,観光客にとっては美しい風景の構 成要素に過ぎないが,地域住民にとっては,漁の安全や好不調,養殖魚介の手当の必要性 など,生業そのものに深く関わる情報を提供し続けている存在である.漁師にとって海は 半ば身体化した存在だというのは言い過ぎであろうか.いずれにせよ,海岸堤防によって 海が見えなくなることは,そうした身体化した日常かつ生業空間との視覚的隔絶を意味す る.海との隔絶によって漁師の海に対する身体化の程度が弱くなること,すなわち海を読 む力が弱まっていくことで,漁業の生産性や漁師の安全性にさえも長期的には影響を及ぼ すのではないかと考えられる.

#### (4) 利便性

漁港や港湾に設置される海岸堤防は多くの場合,漁港区域・港湾区域の陸地側境界に設けられることが多い.つまり魚市場や製氷施設といった直接船と関わる施設は堤外側に存在することになる.それが生産性と密接に関わるからである.しかしながら,漁港や港湾では,例えば漁港区域外に立地する水産加工工場のように,陸域とも生産の動線が密接につながっていることも多い.当然ながら,そうした施設の従業員等々の動線も同様である.

こうした動線を確保するために,漁港や港湾の海岸堤防には陸閘が設けられるが,その 設置費用,維持管理費用,さらには大津波警報発令時に誰が閉めるのか(遠隔操作で確実 に閉まるのかを含め)といった問題から最小限に絞らざるを得ない.こうした状況から, 漁港区域・港湾区域への往来は海岸堤防の有無によって大きく変わることになる.

## (5) 安全性

海岸堤防は海からの津波や高潮を抑制する効果がもちろんある訳だが、その一方で、従 前、堤防が無い場所に新たに堤防を整備する場合には、陸側からの水や土砂の海域への流 出を阻害する可能性を孕んでいる.海岸堤防がなければ、小河川や排水路の想定外の降雨 があったとしても、溢れつつも地表面を一気に海まで流れ出ることが可能であり、被害が 大きくならない.海岸堤防整備においては小河川や排水路の設計流量を排出可能な水門・ 樋門を設けることになるが、それを上回る流量には当然対応できず、ダムとしての効果を 発揮してしまう.少なくとも湛水時間は長くなり、海岸堤防がない時よりも被害が大きく なる蓋然性が高い.もちろんこれは超過洪水の話であるが、こうした小河川や排水路の設 計降雨の確率年は 1/15 年といった高頻度であり、数十年から百数十年に一度という海岸堤 防整備の想定頻度に比べると著しく高頻度である.つまり、津波の頻度と超過洪水の確率 は、頻度と確率という別概念であり、安易に比較できないが、相応の頻度で海岸堤防の存 在が負の効果をもたらす蓋然性が高いということになる.こうしたことは土砂災害につい ても同様であろう.

なお,東日本大震災の復旧事業においては,既存の海岸堤防が存在していれば,その地 域は従前よりそのリスクを負っていることから,海岸堤防の機能強化復旧によって,リス クが高まるわけではないことは付言しておく.

#### 7.7.3 計画段階での外部性緩和策

以上のような外部性に関して、どのような緩和策が考えられるのか、さらに東日本大震 災における海岸堤防事業でどのような緩和策が取りえたのかについて、以降整理していく. まずは、計画段階について述べる.海岸堤防の計画段階は概ね、高さ、位置、線形、構造 を決定する段階と想定している.なお、高さについては先述の通り、「陸側からも見た」 決定方法が検討されていることから、緩和策として本稿では考慮しない.各緩和策を考え るとこの計画段階における対応が極めて重要であることを付言しておく.

## (1) 自然環境とその利用価値

a) 砂浜海岸の場合

砂浜海岸では先述の通り,海岸堤防の位置をどれだけ陸域側に作ることができるかが, 極めて重要である.

例えば、N海岸は河口域周辺で三陸屈指の豊かな生態系が形成されている海岸である. 広大な砂浜を持ち海水浴場としての利用もあった海岸であるが、津波に流されたことと、 広域地盤沈下の影響も重なり、大きく海岸線が後退した.当該海岸の海岸堤防を現位置で 復旧することは、ほぼ海中施工を意味することになり、海岸管理者は最大 200m 程度の大 胆な引き堤を行うことにしたにもかかわらず、それでも残る砂浜が必ずしも大きくないこ となどから反対運動が起こってしまった.とはいえ、状況に応じた大胆な引堤は、海岸環 境の保全と利用価値の保全のためにも、今後とも実施していくべき好例として捉えるべき であると考える.

b) 岩礁海岸の場合

岩礁海岸を捨石で埋めて海岸堤防を設置せざるを得ないケースは,筆者の知る限り海沿 いの道路を守るケースがほとんどである.これは道路事業との連携によって,山側に道路 を迂回させることができれば,海岸堤防事業そのものを回避可能である.総事業費で考え, 多少無理して道路を山側に移転させるといった総合的な検討が重要であろう.

c) 漁港・港湾海岸の場合

伏流水の遮断による環境影響については、大胆に矢板を用いない限り、問題が発生しないと認識している.なぜなら、基礎杭、地盤改良杭も地下水を完全に遮断するような密度で施行されることは技術的にないからである.したがって、影響の懸念は念頭におくべきものであるものの、特段の緩和策を講じなければならないケースは稀であると考える.

## (2) 表層的景観への影響緩和策

a) 遠景からの防潮堤の存在感の緩和策

まずは遠景から見た場合の認知科学の知見に基づけば、人間は事物を大域優先の法則に 従って認識を進めていく.つまり、人間は大きなまとまりから小さなものへと順に構造化 して認識を進めていくことを意味する.そのために、アイマークレコーダーなどの研究成 果からは、人間は大域的な輪郭線をよく注視することが知られている.

このことを逆手に取って,遠景で見た時の海岸堤防の印象を少しでも小さくしようとし ているのが,手引きにもある「山付き地形を活用」した堤防線形である.つまりは遠景で 眺めた時に大域的なまとまりとしての輪郭線は全て自然物(海岸線や山の稜線)で構成す るように仕向け,海岸堤防の輪郭線は二次的な輪郭線となるようにするというものである.

遠景から見た海岸堤防の存在感低減はこうした線形の工夫以外では実現できない.従って、位置・線形の工夫が極めて重要な役割を果たしており、主要な道路などから遠景としてどのように当該の海岸が見られるのか、丁寧な検討が必要である.

b) 中景からの防潮堤による眺望遮断緩和策

海岸堤防後背地からの海岸堤防の海への眺望遮断は,海岸堤防の高さを下げるか,地盤 の高さを上げるしかない.東日本大震災の津波被災地における復興まちづくりにおいては, 低平地が壊滅的な被害を受けたこと,高台移転地造成に伴う残土がある場合が多かったこ となどから,女川市街地,石巻市鮎川,石巻市雄勝などで,堤防の後背地を堤防高程度に 盛土をして観光交流拠点となるべき地区から海への眺望を一体的に確保している.

南海トラフ地震津波対応など災害前の対応としては,残土があるわけでもなく,建物が 密集している地区を嵩上げすることになり,事実上実行不可能であるが,災害後にはそう したやり方がありうることは念頭に置いた事前復興の考え方も必要であろう.

#### (3) 深層的景観への影響緩和策

海岸堤防の存在により海が見える生活の中で海と繋がっている機会が減ってしまうこと が問題の中心である.したがって,生業の場でもある低平地から海が見えなくなる分,他 の生活の場からより一層海が見えるように,まちづくり側の努力が大変重要になる.

そのためには高台移転先の各住宅から海が見えるようにすることがまず第一である. そ のためには、高台移転地の宅地造成は、海向きに最低でも1階階高である 3m づつ程度の 高低差を持つひな壇造成(これによって二階建てにすれば確実に二階からは海が見える) を行い、敷地割りを千鳥配置とする(これによって建物位置がずれるために一階であって も海が見える可能性が高まる)のが理想的ではないかと考えるが、現実の高台移転地で 3m の高低差を持たせることは、道路勾配から大変難しいが取り組むべき価値のある理想であ る.

各住宅敷地から海が見られるだけでなく、例えば女川市街地で作られている「眺望軸」

(歩行者専用道路であったり一般の区画道路であったりする)により,全ての市街地高台 から海が日常生活の中で眺められる環境を設けることも有効である.

こうした緩和策は、上述以外にも多く取り組まれているが、その一方で、リアス式海岸 地形は海を渡って風が地形的に集まって強くなる特性があるために、山の中腹以上は風が 強い場所が多い.地元の人はそれぞれそれを熟知しているために,眺望を確保するのか,防風のために山を切り残すのか,いくつもの浜で議論となった.防風と眺望を両立させるような知恵も必要であろう.

#### (4) 利便性

海岸堤防による漁港・港湾と町との分断を最小限にしてく努力も各地で見られる.例えば,O漁港では先述の山付となる自然な海岸堤防線形と幹線道路の海岸堤防の乗越を同時 に考慮し,維持管理等に懸念のある陸閘を用いずに堤外側へ利便性を確保している.

こうしたまちづくり側の論理と海岸堤防側の論理を調整するには時間も労力も要するものであるが、南海トラフ対応の事前復興においては、非常に重要な観点となると考える.

#### (5) 安全性

超過洪水に対して被災リスクを高めてしまう点については,水害・土砂災害等のリスク やそのための治山治水整備も同時に考慮する必要がある.こうした津波防災を考えている 時に見落としがちなリスクについて総合的に考慮して,海岸堤防事業の実施を計画するの が重要であると考える.

## 7.7.4 設計段階での外部性緩和策

以上見てきたように,海岸堤防による外部性の緩和策は,大部分が計画段階で決まると 言ってよい.そのため設計段階でできることは必ずしも多くないが,「自然環境とその利 用価値」や「表層的景観」については,海岸堤防の外部性を緩和するために取り組むべき こともある.そこで本項では,その二点に絞って,設計段階で考慮すべき点を整理してお く.

#### (1) 自然環境とその利用価値

先述の通り,自然環境に対しても海水浴場などその利用価値についても,引堤による空間確保が最も重要であるため,設計段階で考慮すべき点はあまり残されていない.しかしながら,例えば快適な海水浴場とするためには,後述する表層的景観の改善や,その利用動線と適切な階段等のアクセス施設の配置が肝要である.

#### (2) 表層的景観

設計段階においては特に近中景に対する配慮が重要である. ほぼ「手引き」と重複する が、簡単に触れておく. これらは認知特性を逆利用して,長大感を軽減する方策である. 長大感については,「手引き」に示したように,傾斜堤では,ブロック張りの場合は調整 コンクリート,現場打ちの場合は目地部分で,リブ状の突起を設け,水平方向のリズム感 を演出すると同時に,水平方向に視覚的に分節することにより,長大感を低減する方法が あろう.特殊堤(直壁型)も同様に縦リブを設けることで視覚的分節を図ることが効果的 である. また,同様に,地面との輪郭線を曖昧にすることで,存在感を低減することも可 能である.

## 7.7.5 おわりに

以上のように,海岸堤防の外部性は計画設計それぞれの段階で,工夫し緩和しうる点が 多々あることを示している.これは,物作りとしてはあたりまえのことである.たとえ災 害復旧を急ぐとしても,50年100年使う社会基盤施設である以上,あらゆる角度からの真 摯な検討が重要であることは改めて言うまでもない.もちろん本稿で触れた緩和策は,一 般的な例ではなく,ともすれば特殊解である可能性も高いだろう.しかし,この大規模災 害からの復旧においてさえ,それなりに取り組んでいる事例があることもまた確かである.

冒頭で述べた通り,東日本大震災での経験と反省を踏まえた海岸堤防の高さ設定に関し ては,「陸側の視点」を取り入れた検討が減災アセスメント小委員会を中心に進められて いる.しかしながら,そうした陸側の視点つまりは費用便益分析の発想を用いても,その 効果が計量しづらい外部性は確実に残る.そうした外部性にも配慮し,より持続可能で安 心できるまちづくりが各地で進むことを念頭に,筆者の被災地の経験・見聞をまとめた本 稿が僅かでも貢献できれば幸いである.

## 参考文献

国土交通省水管理・国土保全局「河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き」2011 年 11 月, http://www.mlit.go.jp/river/shishin\_guideline/kankyo/hukkyuukeikan\_tebiki/index. html (2017 年 9 月 5 日現在).

農林水産省農村振興局整備部防災課長,水産庁漁港漁場整備部防災漁村課長,国土交通省 水管理・国土保全局砂防部保全課海岸室長,国土交通省港湾局海岸・防災課長通知「設 計津波の水位の設定方法等について」2011 年 7 月 8 日 http://www.mlit.go.jp/report/press/ river03\_hh\_000361.html (2017 年 9 月 5 日現在).

# 8. 海岸防災・減災対策決定プロセスの社会実装における課題の整理 (井上,内藤,多々納)

## 8.1 本小委員会が開発した新たな手法の意義

本小委員会が新たに開発した手法は,海岸堤防の高さの設定にあたって,海岸堤防の防 災・減災効果や景観・環境等に与える影響,海岸背後のまちづくり(高台移転等を含む), 避難対策の相互・相反関係も踏まえた社会的公平性,経済的効率性に留意して総合的に検 討することを可能とする合理的な手法であるという点において新規性がある.

また,この手法は,海岸4省庁通知に基づく手法(津波については,過去の実績と想定 に基づくL1津波の高さを基本としつつ,経済性,環境保全,周辺景観等を考慮して海岸堤 防の高さを設定し,地元の合意を得て決定する手法)を補完し,最新の科学的知見を活用 し,より客観的・合理的な観点から地元における合意形成を促進する手法として位置づけ ることができる.

この手法は,海岸堤防の高さの設定だけでなく,海岸堤防と一体となった土地利用計画・ 避難計画を立案する際の多様な条件の下での体系を提示することができる.また,海岸背 後に既成市街地があるような海岸において事前復興計画を立案する際にも極めて有効な手 法である.

この手法は、東日本大震災の被災地における復旧・復興事業の進捗過程で得られた知見 やいくつかの海岸におけるケーススタディで得られた検証を踏まえたものであり、今後全 国で展開される津波防災地域づくりに活用されるべきものである.早急な社会実装を実現 するために、下記留意点等について、更なる検討を強力に進めていく必要がある.

## 8.2 本小委員会が開発した新たな手法の現地適用に関する留意点

本小委員会が新たに開発した手法は、海岸堤防・土地利用計画・避難計画に係る複数の 選択肢のメリット・デメリットを相互に比較検討し、合意形成を促進するものであり、そ の複数の選択肢について災害リスクや景観・環境等に与える影響を定量的に評価する必要 がある.この海岸の防災・減災対策を決定するための手法は、論理的には合理的であるも のの、検討にあたって必要な基礎データやアプリケーションが予め用意されている状況に なく、また、現地の実情や住民の意向を改めて確認する必要があること等から、直ちに現 地に適用するのには相当の困難が伴う.ここでは、現地適用に関する留意点を整理する.

## 8.2.1 東日本大震災の被災地への適用に関する考慮

この手法を東日本大震災の被災地に対して適用することについては、①被災地の災害復 旧・復興にあたっては、L2 津波に相当する東北地方太平洋沖地震・津波によって実際に被 災したという現実があること、②震災以降、堤防が破壊され津波だけでなく毎年のように 発生する高潮・高波に対しても極めて脆弱な状況となり、早急な復旧が求められたこと、 ③当時はこうした新たな手法が用意されていなかったため、合意形成にあたっては、限ら れた情報に基づいた地元住民の意向に拠らざるをえなかったこと、④現時点においても、 海岸背後地で居住・活動する者から選好を聴取する際に、依然として地元住民の中には遠 地に避難している者がいること、生業の展開が明確になっていない場合があること、当該 海岸を含む地域の人口動態が大きく変化する可能性があること等から、この手法を直接適 用することが難しいことに留意する必要がある.

#### 8.2.2 地域の選択・合意形成に関する考慮

この手法では、海岸4省庁通知に基づくL1津波高さと高潮・高波で必要とする高さの 高い方(ここではH<sub>0</sub>とする)をベースとしつつ、背後地のまちづくりや環境等を考慮し、 背後地の現状・将来を踏まえた堤防高・土地利用・避難計画の総合的判断によって堤防高 を設定することとしている.しかし、ここでは、①確率的ハザード解析の分析には不確実 性があること(海溝型地震についてはその周期性があることから確率評価に馴染みやすい が、日本海において発生する断層型地震については周期性を考慮することが難しいこと等)、 ②環境や景観の保全等の便益の計測や低頻度だが大規模な災害の影響(サプライチェーン の分断、雇用・移住等の長期的な影響等)は定量化することが難しいこと、③低頻度の事 象に対して一律の社会的割引率を適用することには限界があること等から、費用便益分析 の適用による解 H<sup>\*</sup>を一義的に推奨するのではなく、H<sub>0</sub>より堤防高が高い選択肢や低い選 択肢について、住民意見を反映しつつ不確実性のある要素のパラメータを変動させたとき の感度分析等を行うことで、地域の住民にとっても納得感のある堤防高の設定が行われる ことが重要である(図-8.1参照).

## 8.2.3 対策による効果の発現時期に関する考慮

この手法を南海トラフ地震等が懸念される地域を含む全国の海岸に適用するにあたって は、最適な対策の組合せが決定されたとしても、それぞれの対策の実現・完了による効果 の発現までの時間には差があることに留意する必要がある(図-8.2 参照). 具体的には、 避難対策は、住民への教育・訓練等によって比較的短期間に住民の意識の高揚を得られる ことができる可能性が高い一方で、防災教育の継続的実施、定期的な訓練の実施等によっ ても住民の意識レベルを長期間にわたって維持することは難しい. 海岸堤防の整備には予 算的な制約があることから、整備の実現には 10 年を超える時間を要することがある. ま た、海岸背後にある既成市街地の住居棟の高台等への移転、立地適正化計画による居住の 誘導、建築規制に合致した改築には数十年に及ぶ時間を要することもある. この合理的な 手法によって得られた高さの海岸堤防が整備されたとしても、移転、改築等が完了するま でにはリスクが残ることを背後の住民に十分に周知すべきことに留意する必要がある.

	残余リスク(経済被害)【億円】								コスト【億円】				人的被害【人】		
	津	波被害想	定		高潮被害想定			建設	外部性	移転改築	避難	津波被害想定			
	T <sub>50</sub>	T <sub>100</sub>	T <sub>150</sub>	R <sub>T</sub>	S <sub>50</sub>	S <sub>100</sub>	S <sub>150</sub>	Rs	C	E	Ľ	V	T <sub>150</sub>	T <sub>200</sub>	T <sub>500</sub>
選択肢① 堤防高:H <sub>0</sub> +1m 高台移転:なし	0	0	50		0	0	30		100	30	0	10	0	0	100
選択肢② 堤防高:H <sub>o</sub> 高台移転:10軒	0	0	100		0	0	50		80	20	10	10	0	10	100
選択肢③ 堤防高:H <sub>o</sub> -1m 高台移転:50軒	100	200	300		100	150	200		70	10	50	20	0	10	50
選択肢④ 堤防高:H <sub>0</sub> -2m 高台移転:50軒 ピロティ化:50軒	300	400	500		200	250	300		60	5	80	30	20	50	100
選択肢⑤ 堤防高:H <sub>0</sub> 2m 高台移転:100軒	300	400	500		200	250	300		60	5	100	30	30	50	100

## 堤防高・土地利用・避難の総合的評価(感度分析)のイメージ

堤防高と土地利用計画の選択肢(組合せ)について、その効果・影響(避難の可否を含む)とあわせて提示し、合意形成を支援する。

注)上記の数字は全て仮置きしたものであって、実際には、現地の状況に応じて適切に算定する必要がある。 残余リスク(R<sub>T</sub>、R<sub>s</sub>)、コストの算定にあたっては、現在価値換算する必要がある。

図-8.1 堤防高・土地利用・避難の総合的評価(感度分析)のイメージ

# 対策によって効果発現までの時間には差がある



図-8.2 対策の実現・完了による効果の発現までの時間差のイメージ



図-8.3 堤防高と効率性・公平性の照査

## 8.2.4 安全確保の社会的公平性に関する考慮

この手法は,背後地の現状・将来を踏まえた土地利用計画・避難計画を含めた総合的な 判断により海岸堤防の高さを決定するものであるため,背後地に保全すべき対象となる資 産が少ない場合には,費用便益分析を活用するこの手法の特性によって最適な堤防高も低 くなる傾向がある.しかし,保全対象が少ない海岸においても,海水浴や散策等による利 用者がいる場合があること,さらには外国を含む遠方からの訪問者には当該地域の特性を 十分に認識していないことが考えられることから,安全の確保のためには特別な措置が必 要となる.具体的には,この手法によって求められた堤防高が数十年から百数十年に一度 発生する程度の津波に対応しているかどうかを照査し,数十年に一度の高さよりも低い場 合は特に,避難等における特別な対応(地区防災計画の策定と,その計画に災害時要配慮 者,来訪者等に係る避難対応の徹底,実践的訓練の履行等),まちづくりにおける特別な 対応(津波災害特別警戒区域の指定等)を当該市町村長に求める必要がある(図-8.3 参照).

## 8.2.5 情報・データの利用可能性や技術経費に関する考慮

この手法を活用する際に必要なデータの収集や分析にあたっては、①対象となる海岸背後地で居住・活動する者から示される景観・環境・利用等に関する選好を聴取し評価する プロセスを必要としていること、②複数の選択肢に関するシミュレーションを実施する必 要があること等から、相当の費用・時間がかかることに留意する必要がある.このため、 この手法を全国各地で適用するためには、地区海岸単位の津波・高潮ハザード曲線のデー タベース、土地利用計画検討のためのデータベースを予め用意しておくこと、津波浸水・ 避難シミュレーションのアプリケーションを無料で利用可能なように用意しておくこと等 が重要である.

## 8.3 新たな海岸防災・減災対策を決定するプロセスを進めるための政策

本小委員会が新たに開発した手法を活用し社会実装するためには、この手法を活かす運 用の枠組みが重要であり、既に構築されている政策を適切に組合せるとともに、既存の政 策では解決しがたい課題に対しては新たな政策を導入することが必要である.ここでは、 現地適用を進めるにあたって強化すべき政策について整理する.

## 8.3.1 多様な関係者が協議する場の設置・運用

この手法を社会実装するためには、2.3.3 で述べたように、海岸法に基づいて設定され る海岸堤防の高さ、災害対策基本法に基づいて定められる避難計画、都市計画法、建築基 準法等によって定められる土地利用計画、立地適正化、住まいづくり等のまちづくりの相 互関係を十分に考慮するとともに、それらを三位一体とするために津波防災地域づくり法 に基づく津波浸水想定、津波災害警戒区域等、推進計画で担保する枠組みを活用すること が重要である.このため、堤防高設定に係る海岸管理者とまちづくり・住民避難に係る市 町村長が協働して適用することが求められることから、市町村が津波防災地域づくり推進 計画を作成するためには津波防災地域づくり法第 11 条に基づく協議会を、海岸管理者が 海岸事業とそれに関連する事業調整を必要に応じて進める場合には海岸法第 23 条に基づ く協議会を設置し、運用していく必要がある.

## 8.3.2 総合的に推進するための費用の負担

海岸堤防・避難・まちづくりに係る費用負担は多様である.ハードの整備については、 海岸堤防,津波防護施設については、海岸管理者である都道府県が海岸4省庁からの交付 金を、避難タワー・避難施設等については、市町村が国土交通省からの交付金を活用して 推進することができる.一方、ソフトの実施については、津波災害警戒区域指定等の基礎 となる津波浸水想定にはハードとの関連があることからハード整備の交付金を活用するこ とはできるが、まちづくりの施策は、土地・建築物の所有者による自主的な取り組みを基 本としているため、早期に効果を発現させることが難しい.その理由としては、まちづく りの施策が、私的財産の権利調整を伴う合意形成による計画づくり(防災集団移転促進を 含む)や建築規制(安全な地域における容積率の緩和を含む)による更新時の住まい方改 善対策促進等の誘導的な性格の施策が中心となっているとともに、土地区画整理事業や防 災集団移転事業については条件が整った場合に限定されていることが挙げられる.また、 避難計画、都市計画、津波防災地域づくり推進計画の作成にあたっては市町村の自主財源 によるところが大きく,国や都道府県からの特段の財政支援措置がないことから,その進 捗を図ることを難しくさせている.

本小委員会が新たに開発した手法を活用して,海岸堤防・避難・まちづくりを総合的に 進めるためには,たとえば,まちづくりや避難に係る事業は,基本的にそれぞれの費用負 担制度で実施するとしつつも,海岸位置において L1 津波の侵入を防ぐために必要と考え る高さと現況堤防高との間の高さで整備する場合には,堤防の整備に替えて,安全性をま ちづくりや避難で担保する場合(津波防護施設の有効配置を含む)の選択肢の検討,計画 の策定に係る費用(当面は,L1津波高さの堤防整備費用より総事業費が安くなる選択肢に 対して)について,「津波減災統合交付金(仮称)」という新たな制度を構築し,効果的 に運用できるようにすることを考えていく必要がある.

また,背後地の住居の数が少なく,高台移転するコストの方がそれらを守る堤防のコス トより安いような地域において,バイアウト制度を適用することも考えていく必要がある. ただし,このバイアウト制度は,私的財産の形成に国費を投入することは難しいという実 情もあることから,防災集団移転事業等に限定されているため,これを補完するためには 都道府県による市町村の財政支援等の形で推進することを考えていく必要がある.

#### 8.3.3 社会実装を推進するための体制強化

海岸堤防・避難・まちづくりを総合的に推進するにあたっては、その地域特性を十分に 調査・把握し、その地域特性にあった検討を進める必要がある.すなわち、当該海岸の災 害リスクの程度、ハード施設の整備状況、海岸のまちづくりの利用状況、住民の防災・減 災に対する意識レベル、その地域の振興の方向性等を総合的に把握し、かつ、将来の地域 の姿を描き、多様な関係者のコミュニケーションを促進できる人材や組織等の体制構築が 重要となる.海岸部の居住に関する安全確保については、高台移転という方策もあるが、 海岸沿いでも災害リスクに応じた住居構造への改善等で引き続き居住できるようにするこ と(たとえば、津波が海岸部に到達し、居住地まで氾濫してくるまでの時間と避難に要す る時間の考慮、津波災害特別警戒区域の指定や容積率を緩和した上での建築物の設計、高 台移転した場合の跡地の有効活用等を含む)を考える等のきめ細かい検討が必要となる. そのためには、東日本大震災の被災地でまちづくり等に関わってきた人材の知識・経験を、 将来津波の被災が懸念される地域のまちづくりに活用することを考えていく必要がある.

また,海岸堤防・避難・まちづくりを総合的に推進するにあたっては,行政側の財政支援に関するインセンティブも重要である.津波防災地域づくり法に基づく津波災害警戒区域等の指定,避難計画の作成に加えて,市町村による推進計画の作成,海岸管理者による既存施設等の操作の実効性の担保(特に,水門,陸閘の市町村・地元自治会への管理委託の実効性,操作員の安全確保等)が適切に行われている海岸に対してハード整備の支援を強化するとともに,そうした熱心な地域においてモデル事業として関連事業の集中的な実施により支援する等の優先的な事業展開を考えていく必要がある.
# 9. おわりに

# (多々納)

本報告書は、減災アセスメント小委員会の現在までの検討結果を中間的にとりまとめた ものである.主として、津波を対象とした総合的施策の計画・設計方策に関する新たな方 法の提示と、その社会実装のための留意点を取りまとめた.総合的施策の計画・設計のた めの個々の方法に関しては、定量評価に十分耐えうるものと、現状では理論的成果にとど まり、定性的な分析・検討への活用にとどまるものとが混在した状態にある.この点に関 しては、最終報告書において整理を加え、現状においても最低限計量化が必要な項目とそ の方法、将来的には計量化を目指すが、現状では定性的検討項目とすべき項目等を明らか にする必要があると考えている.

また、本報告書では、計画時点や、その際の地域の人口や産業の状況といった計画のフ レームに関する議論は明示的に行っていない.対象とする総合的施策を実施するまでにそ れぞれ必要となる時間が異なることが想定されるために、計画時点を明確に定めることが 必ずしも容易ではないと考えられることがその理由として挙げられるが、理想的には、目 標とすべき時点を地域で定め、その時点で「予定」される(地域が選択する)将来像をも って、計画のフレームとすべきであろう.この際には、地域における安全性の選択はもと より、生業や環境、また、将来の地域のビジョンといった様々な議論が必要であろう.

社会実装のための留意点に関しては前章で詳述したが,改めて強調してきたい点として, 本報告書で提案したプロセスは,基本的には地元の意思を計画に反映するためのプロセス, すなわち,「安全性の選択を地域に取り戻すことを意図したプロセス」を意図したもので ある.具体的には,経済的な効率性や社会的な公平性を満たす範囲で,防潮堤や避難施設・ 避難路の整備,土地利用の変更等,総合的な施策の組み合わせを求め,それらの施策がも たらす影響を定量的・定性的には把握しつつ,地域において,住民と行政とが議論を交わ しながら,最も望ましい施策を選択するためのプロセスを構成しようとした.

このために,異なる規模や頻度の津波を想定し,防潮堤等の防災施設による被害軽減効 果を計量化し,経済的に効率的な防災施設の諸元を絞り込む方法を開発した.ただし,防 災施設は,被害軽減便益をもたらすが,地域における生業の存続可能性や,景観面,環境 面への影響など,負の効果をもたらす場合もある.本報告書では,これらの項目は定性的 な分析項目にとどめている.現状においてもこれらの項目の計量化方法は存在するが,そ の方法に依拠した影響評価値にはまだ議論の余地も大きく,また,人々の価値観にも大き く影響される.このような項目に関しては,地域内で熟慮の上,選択されるべきものであ ると考えたからである.

このように、本稿報告書には、まだまだ改善の余地は大きいが、最終報告書に向けて改 善全を進めていきたいと考えている.

## 付録 A 悩ましい数理的確率

いちかばちか,やって見よう!

という表現,使ったことがない人はいないのではなかろうか.いちかばちか,つまり,一 か八か.これは,丁半の五分五分の勝負であるということだ(丁半の字の上部は,一八で ある).四分六,十中八九.意外にも頻繁に,我々は,日常会話で確率の数値を用いた表 現を使っている.日常会話では,確率評価の算定根拠が感覚的であることも多いかもしれ ないが,確率の表現の値そのものから受ける印象が感覚的であるところに,確率の取扱い の難しさがあるといえる.

確率は、たかだか0から1までの範囲の数字でしかないにもかかわらず、我々人間の直 感や冷静な理解を、おおいに惑わせるものになりがちである.心理学的な視点から、プロ スペクト理論に用いられる認知バイアスは、不確実性下における意思決定を論ずる上で必 須事項であろうが、ここで論じておきたいのは、もっと素朴な確率そのものに対する感覚 を養うことにある.たとえば、四分六の確率と言った時に、五分五分よりは有利/不利で あることは明言できても、シチサン(七三)との違いについて、それほど明確でないかも しれない.逆に言うと、五分五分のように、四分六にも、際立った特徴があることを理解 できれば、七三は、四分六よりも、相対的に頻度が高い/低いという感覚もわかるように なる.確率に対する感覚を研ぎすますためには、確率的な現象の基本問題に慣れ親しむ必 要がある.ハザードやリスクの確率評価にたずさわる人々が、共通の認識で理解しておく べき確率の基礎事項について、以下では、順に追って紹介する.

#### (1) 誕生日問題

最も有名な確率の問題の1つとして,

n人のグループにて、同じ誕生日を共有するペアがいる確率 Qn は、いくらか?

という誕生日問題が知られている.図-A.1(a)に示すとおり,例えば,*a*,*b*,*c*,...*x*,*y*,*z*の計26名の誕生日を,横軸の1年間のいずれかの日に配して,縦方向に一直線に並ぶ誕生日のペアが生じるかどうか?という玉壺の問題の1つである(各人の誕生日が玉で,1年間の各日が壺).もっとも,1年間における誕生日の分布は,現実的には,不均質であるかもしれない.また,うるう年の扱いの問題もある.ここでは,議論を単純化するために,1年を365日として,一様分布であると仮定する.

まずは、A子さんとB君の2人のグループを考える.A子さんの誕生日に、B君の誕生 日が一致する確率 *Q*<sub>2</sub> は、

$$Q_2 = \frac{1}{365}$$
 (A.1)

174



(a) 26 人のグループにおける誕生日が一致するペアが1 組いる例 (b)誕生日が一致するペアがいる確率 図-A.1 誕生日問題とその確率

となる. これをあえて複雑になるが、2人の誕生日が一致しない確率 P(A, B) (=1-1/365) を全確率1から引いて、次のように得られると解釈することもできる.

$$Q_2 = 1 - P(A, B) = 1 - \left(1 - \frac{1}{365}\right) = \frac{1}{365}$$
 (A.2)

次に、A 子さんとB 君の2人のグループに、C 君が加わった3人グループを考える.3人の誕 生日が三者三様で、一致する誕生日のペアが無い状況は、A 子さんの誕生日にB 君の誕生日 が一致していない条件の下で、C 君の誕生日が、いずれの2人の誕生日にも一致しない場合(その 確率は、 $P(C \mid A, B)$  (=1 – 2/365))が重なることで生じる.したがって、3人で生じるペア のうち、誕生日が一致するペアができる確率 $Q_3$ は、

$$Q_3 = 1 - P(C|A, B)P(A, B) = 1 - \left(1 - \frac{2}{365}\right)\left(1 - \frac{1}{365}\right)$$
(A.3)

となる.以上のように考えれば、もはや一般化は容易である.n人のグループで、同じ誕生日 を共有するペアがいる確率  $Q_n$ は、次式のように得られる.

$$Q_n = 1 - \left(1 - \frac{n-1}{365}\right) \left(1 - \frac{n-2}{365}\right) \cdots \left(1 - \frac{3}{365}\right) \left(1 - \frac{2}{365}\right) \left(1 - \frac{1}{365}\right)$$
(A.4)

図-A.1(b)では、横軸に示すグループのサイズ nの増大とともに、確率  $Q_n$ が増大することを示しており、グループのサイズ n=23 名で、同じ誕生日のペアがいる確率が 5 割を超えること ( $Q_{23} = 0.507...(>0.5)$ )を示している.この問題を興味あるものにしているのは、2 人の個人が同じ誕生日となる確率  $Q_2=0.0027...$ は、非常にわずかであるにもかかわらず、それなりに人数が増えていけば、同じ誕生日のペアがいる確率は、十分に大きくなる.すなわち、「ほとんど起こりえない」から、「十分に起こり得る」ものに、話が変ったところに意味がある.なお、丁半五分五分となる確率 0.5 は目安の1つであり、3 割であろうが、8 割であろうが、「十分に起こりえる」ことを示すには大差が無いとも言えるかもしれない.

しかし、およそ四分六の確率となる  $Q_{27} = 0.63...$  には、少し特別な意味がある. これについては、後に種明かしをしよう.

## (2) 再現期間と遭遇確率

我々が扱うハザード(自然外力)に対する確率も,「ほとんど起こりえない」から,「十 分に起こり得る」ものに変わるところに,その重要性がある.すなわち,ここで検討すべ き問題は,以下のとおり.

ある規模を超える外力は、R年に1回の割合で生じる.そのような外力に、

L年間で遭遇する確率 $Q_L(R)$ (これを遭遇確率と名付ける)はいくらになるか?

これは、前述の誕生日問題の類題であり、むしろ簡単化したものといえる.1 年間で生じる確率  $Q_1(R)$ は、

$$Q_1(R) = \frac{1}{R} = 1 - \left(1 - \frac{1}{R}\right)$$
(A.5)

となる(ここでは,直感的に結果だけを示すが,もう少しキチンと導入する必要があり, 後述する)また, *R*年間に1回の割合で生じる外力を, *R*年確率外力とよぶ. *R*年確率外力 を越える外力に*L*年間で遭遇する確率 *QL*(*R*)は,*L*年間で1回も遭遇しない確率を全確率 から差し引くことにより,次のように得られる.

$$1 - Q_L(R) = 1 - \left(1 - \frac{1}{R}\right)^L$$
(A.6)

図-A.2 は、外力の規模を示す R 年と対象期間 L 年を平面の両軸にとり、遭遇確率 QL(R) の等高線を示している.図-A.2(a)では、両軸の年数を等幅にとっており、確率 0.1 から 0.9 での 0.1 刻みの等高線に加えて、 確率 0.99 の等高線を加えていることにより、R 軸と L 軸の関係がやや非対称であることはわかるが、総じて、等高線が原点まわりに放射状に延 びていることが、この図の特徴である.式(A.6)を書き換えて、

$$1 - Q_L(R) \approx \exp\left(-\frac{L}{R}\right) \longrightarrow \log L = \log R + \beta$$
 (A.7)

となる ( $b = \log\{-\log(1 - QL(R))\}$ ) ことから, 図-A.2(b)に示すとおり, 両軸の年数を対数ス ケールでとると, 直線に対して, 多くの等高線が, ほぼ平行に, かつ集中することがわか る. これは, すなわち, 関係式を満たす付近に, 意味があることを示している両軸の年数 を対数スケールでとると, 直線 L = R に対して, 多くの等高線が, ほぼ平行に, かつ集中 することがわかる. これは, すなわち, 関係式 L = R を満たす付近に, 意味があることを 示している.

図-A.3 は、2 つの変数 R および L のいずれか一方を固定(50 年)して、他方を変化させた場合の遭遇確率(上段)と、その変化量として、確率密度で表現したものである.式(A.6)で与えられる遭遇確率は、



図-A.3 周辺分布としての遭遇確率

$$1 - Q_L(R) \approx e^{-e^{-(\log R - \log L)}} \tag{A.8}$$

と近似できる. したがって,  $\log R$  および  $\log L$  を確率変数に選べば,最大/最小値の極値分布(の1つ)である Gumbel 分布(二重指数分布)となる. 関係式 L = R を満たす点で,最頻値となり,その遭遇確率は,

$$Q_L(L) = Q_R(R) = 1 - \exp(-1) = 0.6321...$$
 (A.9)



図-A.4 期間最大値に対する再現期間の定義のためのスケッチ(ベルヌーイ試行による)

となる. この確率が、0.5 とならないのは、図-A.2 で見たとおり、R 軸とL 軸の関係がやや 非対称であることに呼応している. 結局のところ、 $Q_1(50) = 1/50 = 0.02$  であるので、1年 単位では、50 年に平均1回生起する外力レベル以上の外力に遭遇することは、「ほとんど 起こりえない」が、 $Q_{50}(50) = 0.632$  となるので、長い目で見て、50 年間に遭遇することは、「十 分に起こり得る」ものとなっていることが重要である. なお、50 年に遭遇する外力レベルとして は、 $Q_{50}(15) = 0.97$  ならびに、 $Q_{50}(1000) = 0.05$  であるので、図-A.3(a) を見ても確認できる ように、15 年に1回から、千年に1回程度の外力レベルのものと遭遇する可能性が否めな いことも注意すべき点である.

さて, R 年確率外力を基準レベルにとり, ある年を起点にして, ちょうど k 年目に, R 年 確率外力を基準レベルを超える外力に遭遇する確率は,

$$f_k = \{1 - Q_1(R)\}^{k-1} Q_1(R)$$
(A.10)

となる.変数 k は、基準レベルを超過するまでの待ち時間である.

図-A.4 のスケッチを見るとおり,離散時間の各ステップでは,超える/超えないの2 値をとるベルヌーイ試行であり,固定時間長における基準レベルを超える数 k の確率は 2 項分布で与えられ,また,その待ち時間の分布は,式(A.10)に示した幾何分布となる. その幾何分布の期待値は,

$$\sum_{k=1}^{\infty} k f_k(R) = Q_1(R) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{dx^k}{dx} \bigg|_{x=1-Q_1(R)} = Q_1(R) \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{1-x}\right) \bigg|_{x=1-Q_1(R)} = \frac{1}{Q_1(R)} = R \quad (A.11)$$

と得られる.これが,式(A.5)を導入する際に,不足していた内容である.この待ち時間の 期待値 *R* 年を再現期間と呼んでいる.

遭遇確率は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成11年版)の第2編 設計条件 に取り上げて、構造物の機能の重要性や経済性などと勘案して、設計条件を検討するために、 *L*年に耐用年数をとり、再現期間 *R*年との組合せで、遭遇確率を数表にして掲載されてい る. なお、同基準は、平成19年に改訂されて、性能設計の体系が取り入れられ、性能照査 にあたり、破壊確率とともに、再現期間ならびに遭遇確率の重要性もより強調されるべき であるが、一例 (R = L = 50年の場合)を示すにとどまり、遭遇確率の数表は削除されて いる (もっとも、数表ではなく、図-A.4 に示したような図示をしなければ、その特徴が一 目瞭然で理解できないのであるが). これらの確率の問題をとおして、重要なことは、1 つは繰り返しになるが、「ほとんど起こ りえない」から、「十分に起こり得る」ものに、話が変わるところに重要な意味があり、 この点に、確率の取扱い方を考える糸口がある.また、1 ステップ(誕生日問題では1人、 遭遇確率では1年、クーポンコレクター問題の切手については1 通など)あたりの不確実 性が均等(均質)であることは、問題の複雑さを避けるために設けた条件に過ぎないと思

われるが,それだけではない.後に示すよう に,この条件も確率を取扱う上で鍵になる.

待ち時間を扱った問題として,次の2つの 有名な確率の問題も,知っておくべき必須問 題であろう.

## (3) クーポンコレクター問題

異なる種類のアイテムを集める状況を考え る.ここでは、例えば、図-A.5のような10種 類の切手のうち、1つが貼られた封筒を受取る こととしよう.どの種類が当たるかは運任せ (ランダム)とする.10種類全ての切手を揃 えるためには、何通、受け取れば良いか?

この問題について,実際に,研究室の学生 (学生会員の請求書にも,当然,同じように記 念切手が貼ってあった)にたずねると,私も含 めて合計 15 名で,残り 2 枚の切手待ちにな った.右上から下に数えて,2 番目と 10番目 が未出になりました.

1 枚目は, 必ず初出になる. 逆を考えると, 最後の1 枚待ちの際には,10 枚中 9 枚が既出 であるので,1/10 のアタリの確率で,アタリ の待ち時間は,幾何分布にしたがう.その期待 値は 10 (= (1/10)-1) である. これは,まさに 再現期間(の式(A.10)のとおり)である. 同じ ように, m 枚が既出の際には,次の初出が出 るまでの平均待ち時間(待ち枚数)は,10/(10 - m)となるので,全てが出揃うまでにかかる 枚数の平均は,



図-A.5 10 種類の切手の例

$$\sum_{m=0}^{9} \left( 1 - \frac{m}{10} \right)^{-1} = 10 \left( \frac{1}{10} + \frac{1}{9} + \dots + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1 \right) = 29.3$$

(A.12)

となる.また,残り2枚待ちとなるまでに枚数の平均も,同様にして,

$$\sum_{m=0}^{7} \left(1 - \frac{m}{10}\right)^{-1} = 10 \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{9} + \dots + \frac{1}{3}\right) = 14.3$$
(A.13)

となる.まさに、15 枚で残り2枚は、コンプリートに必要な折り返し点となっていること がわかる.ほぼ期待値どおりで、学生皆ビックリ! なお、後日談として、総会の案内にも 記念切手が貼ってあって、私のところに来たのは、10 番目の切手.総計16 枚で最後の1 枚待ちになりました(期待値から外れる).

この問題は、朝食のシリアルの箱に入っているオマケ(野球選手のブロマイド)を揃え る問題として有名となり、そのオマケは、全種が幾つかを明らかにしていることから、全 体から切り取られた1片(クーポン)と名付けられていると思われる.全てを揃えないと 気が済まないという心理を突いた商売上の戦略でもある.

#### (4) 新記録

新記録がでるまでの平均待ち時間 T は? また,一定期間 n に現れる新記録数 Mn は?

1年に1つ記録(の数字)が出るとして, n年間に現れる新記録の期待数 Mnは,

$$M_{-} = \log n + 0.577$$

(A.14)

であり、したがって、n=100年間の新記録数は、わずか 5.2 となる.新記録はなかな難しいわけだ.

1年目の記録は必ず新記録である.次の新記録が k+1年目以降になる(つまり,2~k年目までは,新記録が出ない)確率は 1/k となるので,したがって,次の新記録が出るまでの期待待ち時間は,

$$T = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots$$
(A.15)

となり、これは無限大に発散する.新記録は、待っているだけでは、そう簡単には出ないわけである.これらの詳細については、北野(2010)の解説を参照されたい.

## (5) ポアソン過程とポアソン分布

ここまでは、時間を離散的なブロックで扱っている.データによる情報をできる限り多 く取込むために、年最大値のみならず、2 番目以降の極値も扱うには、連続時間における 極値の生起過程を導入する必要がある.離散時間のブロックの幅を小さくとり、その極限 として、連続時間とするアプローチでは、固定時間あたりのイベントのカウント数の分布 である2項分布の極限として、ポアソン分布を導くことが可能である.しかし、それだけ では、ポアソン分布の本質が見えにくい.ここでは、微分方程式を用いた導出を行う.



図-A.6 連続時間における極値の再現期間の定義のためのスケッチ(ポアソン過程による)

時間の幅 t におけるイベントの生起数を X(t)と記す. 生起数の期待値は、時間の幅に比例すると考える.

$$E\{X(t)\} = \lambda_1 t \tag{A.16}$$

ここで、その比例係数  $\lambda_1$  は、単位時間あたりの生起率である.上式は、カウント数に対する最も単純なモデルの性質の 1 つとなる「頻度の比例性」を表すものである.時間 t あたりの生起率  $\lambda_t$  (=E{X(t)}) を用いて、次式の比例式で表すと馴染み易いであろう.

$$1: \lambda_1 = t: \lambda_t \tag{A.17}$$

生起数  $X(\Delta t)$  が 0 と 1 の 2 値しかとらない程度に,時間の幅  $\Delta t$  を十分に小さくとれば,

$$E\{X(\Delta t)\} = 1 \times P\{X(\Delta t) = 1\} + 0 \times P\{X(\Delta t) = 0\} = P\{X(\Delta t) = 1\}$$
(A.18)

$$P\{X(\Delta t) = 1\} = \lambda_1 \Delta t \tag{A.19}$$

を得る(多くのテキストでは,突如として,式(A.19)からスタートするのだが,これは自明 であろうか?).そして,独立増分の仮定により,式(A.19)を次のように拡張する.

$$P\{X(t+\Delta t) = 1 | X(t) = 0\} = \lambda_1 \Delta t \tag{A.20}$$

なお, 左辺について, イベントが生起してから次のイベントが生起するまでの待ち時間 *T* を用いれば,

$$P\{X(\Delta t) = 1 | X(t) = 0\} = P\{t < T < t + \Delta t | T > t\} = \frac{P\{T > t\} - P\{T > t + \Delta t\}}{P\{T > t\}}$$
(A.21)

と表すことができて、待ち時間の超過確率を $p_0(t) = (P\{T > t\})$ と記せば、式(A.20)から、

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_1 p_0(t) \tag{A.22}$$

を得る.微小時間 Δt において,複数のイベントは同時に生起できない,すなわち,

$$P\{X(\Delta t) = k\} = 0 \qquad (k \ge 2)$$
(A.23)

という制約条件を設ける(実は、式(A.18)で既に設けている)と、式(A.20)から、

$$P\{X(t+\Delta t) = 0 | X(t) = 0\} = 1 - P\{X(t+\Delta t) = 1 | X(t) = 0\} = 1 - \lambda_1 \Delta t$$
(A.24)

となる.また,  $P\{X(t)=0\}=P\{T>t\}(=p_0(t))$ であるので,式(A.21)は,

$$P\{X(t + \Delta t) = 0\} = P\{X(t) = 0\}P\{X(\Delta t) = 0|X(t) = 0\}$$
(A.25)

と同等である.上式を一般的に拡張して,

$$P\{X(t + \Delta t) = k\} = P\{X(t) = k\}P\{X(\Delta t) = 0 | X(t) = k\} + P\{X(t) = k - 1\}P\{X(\Delta t) = 1 | X(t) = k - 1\} + \cdots$$
(A.26)

となるが、式(A.23)の制約から…部は無視される.その結果、次式の微分方程式を得る.

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = -\lambda_1 \{ p_k(t) - p_{k-1}(t) \} \quad (k \ge 1)$$
(A.27)

式(A.22)と(A.27)の微分方程式を $p_0(0) = 1$ ,  $p_k(0) = 0$  ( $k \ge 1$ ) で解いて、次式のポアソン分 布を得る.

$$p_k(t) = \frac{(\lambda_1 t)^k}{k!} e^{-\lambda_1 t}$$
(A.28)

なお, k=0 として, 次式のとおり, 待ち時間 T が指数分布となることを確認しておく.

$$P\{T < t\} = 1 - p_0(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}$$
(A.29)

以上の導出を見るとおり、ポアソン過程において、式(A.16)あるいは(A.17)に示す最も重要な特徴は、頻度(生起率)の比例性であることは言うまでもない.これは、カウント数の統計を考える上でもっとも単純かつ常識的な特性である.つまり、時間軸に沿って、均質に生起することを意味している(もっとも、具体的な問題に応用する場合に、例えば、夏と冬で生起率に変化がある場合は、その区分毎に、異なる値の生起率を用いたポアソン分布を適用すればよい).均質に生起するということは、どこで生起するのも機会均等である.ただし、その生起率が小さく、稀な生起が均質に生起するということは、神出鬼没であるというわけだ.

他の性質としては、 
$$p_0(t_1+t_2) = e^{-\lambda_1(t_1+t_2)} = e^{-\lambda_1 t_1} e^{-\lambda_1 t_2} = p_0(t_1) p_0(t_2)$$
 となることから、  
 $P\{T > t_1 + t_2 | T > t_2\} = P\{T > t_2\}$ 
(A.30)

を得る.これは,指数分布の無記憶性とよばれる性質で,式(A.19)から(A.20)に拡張した際に仮定した独立増分に由来するものである.

## (6) 誕生日問題(再び)

式(A.4)を次のように変形(近似)することができる.

$$-\log(1-Q_n) = -\sum_{i=1}^{n-1} \log\left(1-\frac{i}{365}\right) = \frac{1}{365} \binom{n}{2}$$
(A.31)

これは、単なる計算の都合による近似ではない.解釈可能な意味がある.最右辺のカッコ は2項係数であり、n人から2人を選ぶ組合せの数である.また、選ばれたペア(2人組) で、誕生日が一致する確率は、式(A.2)のとおり、1/365 である.したがって、式(A.31)の最 右辺の量は、n人のグループで、誕生日が同じとなるペアの平均数(これを $\lambda v$ と記す)を 意味しているのである. $\sqrt{(2\times365)}$ =27.0 であることから、式(A.4)に n = 27 を代入して、  $Q_{27}=0.626859$ となる.また、 $\lambda_{27}(=27\times26/2/365=0.96) = 1$ である.したがって、誕生日の ペアが平均およそ1組できる規模のグループで、ペアが少なくとも1組以上生じる確率は 0.63 となる.また、少なくとも1組以上のペアが生じるのが五分五分の状況では、 $\lambda_{23}$ =23×22/3/365=0.693、すなわち、平均0.7組のペアしかできない.式(A.28)のポアソン分布 にて、 $\lambda_1$ に $\lambda_{27}$ ならびに $\lambda_{23}$ を代入して、

$$1 - \exp(-\lambda_{27}) = 0.6177 \dots \approx 0.63$$
 (A.32)

$$\exp(-\lambda_{23}) = 0.499998 \dots \approx 0.5$$
 (A.33)

となることから、ポアソン分布で近似できることが確認できる.ポアソン分布に近似できるカウント数の分布は、2項分布のみに限らない.誕生日のペアに加えて、非常に興味深い例として、次の2つを挙げる.

## (7) 出会いの問題

クリスマスパーティでは、各人が持ち寄ったプレゼントを集めて、それを混ぜこぜにして、くじ引きのように各人に配って、プレゼント交換をするのは、楽しみの1つであろう. その時、自分が持って来たプレゼントに当たるのは、ちょっと残念.5人でパーティをして、このような残念なことが生じない確率はいくら?また、このような残念な人が生じる 確率について、その人数に対して、各々の確率を求めよ.

## (8) 空箱問題

48人のアイドルグループに対して、ファン投票を行う.この時、ファンの誰ひとりから も投票されないアイドルがいると、ちょっとした悲劇である.そのような悲劇のアイドル の生じる確率について、その人数毎の確率を求めよ.

これらの問題に現れるカウント数の分布も、ある条件のもとでの極限で、ポアソン分布 に近似できる.したがって、非常に広い範疇で、カウント数の分布が、ポアソン分布に近 似できることが知られている.これらについては、北野(2013)を参照されたい(それぞれ の問題の数学的背景に適した数のアイドルグループを例にとって、解説している).

#### (9) 3の法則と3分の1の法則

ポアソン分布の特徴は、その神出鬼没な振る舞いにある.その特徴を端的に言えば、図 -A.7 が示すととおりである(詳細は、今回は省略).その発展的な応用として、その延長 上に極値統計解析があることを以下の項目で述べる.



(a) 3の法則

(b) 3分の1の法則



#### (10) ポイントプロセス(点過程)モデル

これまでの極値統計解析を説明するテキストでは、降水量、高波、高潮などの外力の極 値データに、極値分布(やその他の統計分布)を「あてはめ」て、その適合の度合いを診 ることに注目されきた.そのため、極値分布でない分布も候補の対象にされている.しか しながら、確率的に変動する対象を転換して、外力の値そのものを確率変数と見るのでは なく、外力のレベルを固定すれば、そのレベルを超過するカウント数が確率変数となる. このように考えると、ポアソン分布を介して、極値分布に含まれるパラメータを推定する ことができる.(5)で見たとおり、ポアソン分布は、「生起率の比例性」というカウント数 を扱う上で最も根本的な原則を前提に、比較的に緩い制約のもとで導かれるカウント数の 分布である.そのポアソン分布に含まれる唯一のパラメータである生起率と極値分布のパ ラメータが、必然的な関係式(フォン・ミーゼス条件)でリンクしている.このことは、 極値分布以外の他の分布まで範囲を広げて、わざわざ検討する必要がないことを示唆して いる.したがって、外力の観測資料がある場合には、点過程モデルによる極値統計解析を 行なって、来襲外力の生起率を推定することが基本となると考える.もちろん、場合によ っては、点過程モデルにおける工夫も必要になる.また、物理的な現象モデルがある場合 には、その物理モデルに含まれるパラメータをチューニングしたものと相互比較して、両 者が整合することを確認するのが望ましいであろう.

以上では、ポアソン分布に関連する確率を取り上げてきた.

最後に、さらに少し異なる視点で、確率の問題を2つとりあげる.

(11) ドイツ戦車問題

これは, 第2次世界大戦中に生じた軍事上の問題である. 戦車には,1番から始まる通 し番号が付いている. 例えば,3人の偵察が別の地点で,それぞれ1台ずつ戦車を見た. それらが,34,11,78 だったとする. この時,戦車の総数 Nは幾らか?という問題である.

推定総数は, k 台観測した際の最大値 M<sub>k</sub> に対して,

$$\hat{N}_1 = \left(1 + \frac{1}{k}\right)M_k - 1 \tag{A.34}$$

となる.したがって, と推定される.この式の理解のため,もし,1台だけしか見なかった(それを 34 だった)とする.その場合,34 が総数のちょうど真ん中だと考えて,

 $\hat{N} = 2 \cdot 34 - 1 = 67$  (A.35)

と推定するのが自然であろう.これは、つるかめ算などの小学生の算数問題の1つである 植木算に似ている.算数の問題風に言えば、両側に壁があって、k本の木が植えられてい る.左の壁から数えて、k本目の木まで、k個の間隔があり、右の壁までを含めると、間隔 はk+1個である.ただし、その間隔は一定ではないところが小学生の問題とは異なる. 左の壁に原点をとり、k本目の木(の中心)までの距離を $M_k$ -0.5[m](木の直径を1m) とする.ここで、両側の壁の間の距離が幾らになるかを推定することが問題である(図-A.8 を参照).この時、木の直径を1mとすると、左の壁からk本目の木までの間隔の平均は であり、未知となる右の壁とk本目の木の間隔をその平均と推定すれば、式(A.34)が得ら れるのである.この答えに対して、ひょっとして、異論もあるかもしれない.すなわち、 式(A.35)は、重心に基づいていると考えて、一番右の木までの距離 $M_k$ -0.5[m]のみなら ず、左の壁から i 番目の木までの距離 $X_i$ -0.5[m]も用いて、その平均が左右の壁からの 真ん中にある(言い換えれば、左壁から重心までの距離の倍に、右壁がある)として、

$$\hat{N}_2 = 2\bar{X}_k - 1, \qquad \bar{X}_k = \sum_{i=1}^k \frac{X_i}{k}$$
 (A.36)

として推定できるだろう. *k*=1 の場合は,平均と最大値が等しいため,両者の推定は同じ 値となる. *k*=3 の例では,123/3×2 - 1=81 となる. さて,いずれの推定が良いか? それぞれの推定の誤差分散の比は,

$$\frac{V(\hat{N}_2)}{V(\hat{N}_1)} = \frac{2+k}{3} \tag{A.37}$$



図-A.9 M<sub>3</sub>のヒストグラムの例示 図-A.10 戦車の台数も確率変数に扱った場合

となる(例えば, Dekking, F.M. et al., 2005 を参照)が,.サンプルサイズの増加とともに,式(A.34)による推定が圧倒的に有利である.k = 3では,誤差の分散比が倍に届かないが,k=4で倍,k=10となると4倍(したがって,標準誤差で倍)となる.なお,N=100と固定して,疑似乱数により生成した 3000 個の $M_3$ のヒストグラムを図-A.9に示す.また,少し問題を拡張して,1人の偵察が移動中に,たまたま遭遇した戦車が3台だった(場合によっては,2台だったかもしれないし,4台だったかもしれない)と考えると,遭遇する戦車の台数を生起率3の(ゼロを打ち切った)ポアソン分布で与えて,式(A.34)による推定のヒストグラムを図-A.10に示す(この場合の誤差分散の導出は,読者にゆだねる).

ところで、k=3の例で3番目の観測値78の代わりに、96だったとする.この時、式 (A.36)による推定法では、

$$\hat{N}_2 = 141/3 \cdot 2 - 1 = 93 \quad < M_3 = 96$$
 (A.38)

となる.これは論理的に矛盾する.式(A.32)による推定の欠点は,その推定誤差が大きいだけではないのだ.

#### (12) 池の中の魚の総数

池に魚がたくさんいる.しかし,その総数(N匹)が不明である.そこで,まず,その 一部を捕獲する.捕獲された魚(X匹)に印を付けて,放流する.放流してから十分時間 が経った後に,再び,池の魚の一部を捕獲する.その際に捕獲された魚の総数(n匹)に 対して,印の付いた魚が x 匹再捕獲されたとしよう.この時,次式の比例関係が成り立つ と考えて,総数 Nの推定値を求めるのが自然であろう.

$$x: n = X: N \rightarrow \hat{N} = \frac{nX}{x}$$
 (A.39)

このことは、印の付いた魚の再捕獲数 x が、次式の超幾何分布

$$f(\mathbf{x}) = \binom{X}{\mathbf{x}} \binom{N-X}{n-\mathbf{x}} / \binom{N}{n}$$
(A.40)

にしたがい,その期待値(と分散を求めるのに必要となる r 次降下ベキ乗モーメント)が,

$$E(\mathbf{x}) = \frac{nX}{N}, \qquad E(\mathbf{x}^{r}) = \frac{n^{r} X^{r}}{N^{r}}$$
(A.41)

で表されることに加えて、さらに、 $\hat{N}$ が最尤推定となることから、式(A.39)の <sup>\*</sup>自然な推定、が裏付けられる.しかしながら、この推定に関する良し悪しは、そう簡単には言えないようである.

$$\hat{N}_{\star} = \frac{(n-1)(X-1)}{(x-1)} - 1 \tag{A.42}$$

による推定はほぼ不偏となり、バイアスがほとんどないことを Chapman (1951) が巧妙に <sup>、</sup>発見、し、真値まわりの RMS で誤差の大きさを比較して、 $\hat{N}_*$  が  $\hat{N}$  より有利となる ことを示した.

再捕獲率(detectability; Thompson, 2012) $\hat{p}$ を用いれば,式(A.39)の比例関係から導かれる <sup>\*</sup>自然な推定<sup>\*</sup>は、次式のように分解される.

$$\hat{N} = \frac{n}{\hat{p}}, \qquad \hat{p} = \frac{x}{X} \tag{A.43}$$

これは、単純である.その一方、 $\hat{N}_{\bullet}$ は複雑な表現になり、きれいに分解できない.2度目の捕獲を、広い池の複数地点で行なった際には、各捕獲地点における再捕獲率の検討も併せて、総数を推定したい.このように複雑なモデルを扱うには、最尤推定に基づく方式が、理論展開の見通しも良くなり、推定誤差の評価も可能である.他方、発見的な方法は、モデル毎に、また、検討対象毎に、"発見、しなければならないことが増える.そのため、バイアスがあっても、"自然な推定(最尤推定)、を良しとするのである.

最後の2つの例は、ポアソン過程にしたがう極値の統計理論を応用する上でも、示唆に 富むであろう.例えば、極値を閾値で切断して扱う POT 法のメリットや、生起率の比例関 係の保持など、これらは、単なる一つの論理的な道筋だけでは、その利点の理解が不十分 であり、他の論理と交錯するなかで、総合的に良し悪しを判断すべきである.そのために は、 <sup></sup> 数値的に計算すると、こうなる方式、の考察だけでは不十分で、数式の展開で得られる理論的な結果を集積させて、議論を高める必要がある.

以上,幾つかの視点で、ハザードとリスクの確率評価に用いられる確率ならびに統計の 考え方を示した.ポアソン分布に関連するカウント数や、待ち時間分布に限った基礎的な 問題に限定しているが、これらの問題を初めて知る読者にとっては、一気に理解するのは 少し無理があるかもしれない.確率・統計の問題は、いったん頭を白紙にして、じっくり と考えて、じわじわ分かってくるものである.もし、ここで論じている問題に加えて、ま だまだ確率に対する感覚を養いたいという方は、例えば、影山(2017)、桜井(2017)、Haigh (2012)、Blom et al.(1994) もよい教材である.なお、誕生日問題は、誕生日を共有するペア だけではなく、トリオやカルテットの場合に拡張したり、1 日のズレ、数日のズレを許容 したり、さまざまに拡張して楽しむ(確率に対する感覚を、さらに研ぎすませる)ことも できる(Diaconis & Mosteller, 1989; DasGupta, 2004 を参照).

本稿のエッセンスだけをまとめて、しめくくりとする.ここで焦点となるポアソン過程 は、いたるところが均等で、期待される生起数に比例関係が成り立つ.このことは、我々 の直感に適したものであるのだが、その生起が稀であるゆえに神出鬼没となり、部分を見 れば「ほとんど起こりえない」から、長い目で見れば「十分に起こり得る」ものに変わる ところに、治水計画にたずさわる全ての人が悩まされる.それゆえに、不確実性の難しさ、 すなわち、確率を語る(数値的な評価を超えた)意義がでてくるのである.また、確率そ のものだけでなく、生起率(再現期間や期待値のとり方)や推定の良し悪し(単純に誤差 の大きさの比較だけではない)などにも注意深く目を向ける必要がある.

## 参考文献

影山三平(2017): あなたのまわりのデータの不思議, 実教出版, 173p.

- 北野利一(2010): 伊勢湾台風来襲から 50 年の節目に, ほだ沖42, 名古屋港管理組合建設 技術協会.
- 北野利一(2013): 伊勢湾台風級の高潮と確率潮位,第49回水工学に関する夏期研修会講義 集(Bコース).
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成11年版),日本港湾協会.
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年版),日本港湾協会.
- 桜井 進(2017): 人生を間違えないための大人の確率ドリル, 夏目書房新社, 173p.
- 高橋倫也·志村隆彰(2016): 極値統計学,近代科学社, 262p.
- 日本郵便(2014): 「土木学会創立100周年」の発行, https://www.post.japanpost.jp/kitte\_haga ki/stamp/tokusyu/2014/h260901\_t.html
- Blom, G., Holst, L. & D. Sandell (1994): Problems and Snapshots from the World of Probability, Springer, 240p. (確率論へようこそ, 森真訳, 2005, 丸善)
- Chapman D. G. (1951): Some Properties of the hypergeometric distribution with applications to

zoological sample censuses. University of California Press, Berkeley, pp.131-160.

- DasGupta, A. (2004): The matching, birthday and the strong birthday problem: a contemporary review, Journal of Statistical Planning and Inference, Vol.13, pp.377 389.
- Dekking, F. M., C. Kraaikamp, H. P. Lopuhaä, L. E. Meester (2005): A Modern Introduction to Probability and Statistics, Springer, 486p.
- Diaconis, P. & F. Mosteller (1989): Methods for Studying Coincidences, Journal of the American Statistical Association, Vol.84, pp.853-861.
- Haigh, J. (2012): Probability: A Very Short Introduction, Oxford Univ. Press., 144p. (木村 邦博 著, 確率, 丸善, サイエンスパレット)
- Thompson, S. K. (2012): Sampling, Third Edition, Wiley, 436p.

## 付録 B 不安軽減の経済評価

(藤見)

## 1. はじめに

2011年の東日本大震災の津波による壊滅的な被害は、多くの人々に津波の恐ろしさを鮮 烈に印象づけた.近年、南海トラフ地震が起こる可能性が高まるなか、津波被害が予測さ れている地域の人々は大きな不安を感じている.津波に対する不安は人々の生活満足度や 幸福感を阻害するという形で生活の質を悪化させ、社会厚生を低下させる.そのため、防 潮堤の嵩上げや高台避難所の整備などの津波対策は、津波災害リスクを防止・削減すると いう客観的な効果だけではなく、人々の津波に対する不安を軽減するという主観的な効果 も期待される.特に、東日本大震災クラスの巨大津波については、被害は甚大でも発生確 率が極めて低いため物的な期待損失は小さくなりがちである.一方、津波に対する不安は 継続的に生ずるため、不安のもたらす厚生損失は相対的に大きくなると考えられる.

不安軽減の経済価値を明らかにすることは重要であるが,感情は主観的で個人的な現象 であり他者から観測や操作できないものであるため,広く受け入れられた経済評価手法は 存在しない.標準的な経済学では,人々の考えや感情といった観測できない内面に踏み込 まず,観測可能な選択や行動のデータだけで人々の選好を推定するという方法をとってき た.観測できない個人の内面に関する議論を避けることで,選好の推定結果の客観性を担 保するという立場である.そのため,経済学には「不安」という感情を直接的に扱う方法 論は存在しない.

一方で,不安の価値を間接的に定義して評価する枠組みは存在する.あるリスクを補償 する保険に対する支払意思額は,そのリスクの客観的な期待損失額より大きい.それらの 差額は損失に対する不安軽減の経済価値と解釈できる.経済学の観点からは,その差額は 期待効用理論に基づくリスクプレミアムとして扱われる.不安という概念は主観的で漠然 としており,客観的に測定することも現時点では不可能である.本報告書では,リスクプ レミアムを不安軽減の経済価値と見なす考え方を拡張して,不安軽減の経済価値を不確実 性下における個人の選択結果から間接的に定義して推定する方法を採用する.具体的には, 不安な心理状態において,津波対策による津波リスク軽減への支払意思額から客観的な期 待損失の減少額を差し引いたものを不安軽減の経済価値とする.この立場では,不安を構 成概念として実在するものとは捉えず,脅威に対して過剰に評価・対応しやすい心理状態 として位置づける.後述するように,この立場は近年の神経科学による不安に関する知見 と整合的である.

ここでは、不安な心理状態の意思決定を扱えるモデルとして、Tversky and Kahneman (1992)の提案した累積プロスペクト理論に基づいて不安軽減の経済価値を算出する.リス クプレミアムを不安軽減の経済価値として用いることができないのは、期待効用モデルが 不安に内在する認知的な不合理性という重要な特徴を反映させることができないため、そ の価値に系統的な歪みが生ずる恐れがあるためである.例えば、期待効用モデルは、津波

のような小さい確率で甚大な被害をもたらすようなリスクについて人々の選択を上手く説 明できないことが知られている(カーネマン,2014).また,期待効用モデルは人々の認知 的な合理性を前提としているが,不確実で甚大な脅威については,様々な認知バイアスが 観察されている(サンスティーン,2015).より本質的には,期待効用モデルのような合理 的な意思決定モデルで感情のような(認知的には)非合理な要因を扱うことは自己矛盾と なる.そのため,不安軽減効果を経済評価するためには,不安が行動に影響を及ぼすプロ セスを扱える意思決定モデルに基づく必要がある.累積プロスペクト理論は,そうした不 安特有のプロセスを適切に表現することができる.

これまで恐怖や不安などの負の感情を経済評価した先行研究は非常に少ない. Brenig and Proeger (2016) は、欧州社会調査データの「生活満足度」を従属変数、「犯罪に対する恐怖」と「所得」を独立変数として回帰分析を行い、推定されたパラメータ値から生活満足度が一定という条件のもとで犯罪に対する恐怖の経済価値を試算している. この手法は大まかな不安軽減の価値を概算するには役立つが、評価対象とする不安を明確に特定することが難しく、認知バイアスにも対処できないため、ある津波対策によって軽減された不安の経済価値を推定するには不向きである. 栗城ら(1997)と高木ら(2000)は Fuzzy Structural Method, 松島ら(2007)は共分散構造モデルを用いて水害による精神的被害構造のモデルを作成し、仮想市場評価法 (CVM) において尋ねた精神被害回避の支払意志額のデータを用いて、水害による精神的被害の経済価値を算出している. ただし、これらの研究で用いられている精神的被害モデルは心理学や神経科学の知見に基づいてないという限界がある.

本報告書では、まず、最近の研究成果により明らかにされた不安の心理学的・神経学的 なメカニズムを概観し、不安軽減の経済評価モデルに求められる要件を整理する.つぎに、 累積プロスペクト理論がそれらの要件を取り込めることを確認し、その理論に基づいて不 安軽減の経済評価を行える計量経済モデルを構築する.さらに、その計量経済モデルを推 定するための調査枠組みを検討する.

## 2. 不安に関する心理学・神経科学の知見

#### (1) 心理学の知見

不安軽減の経済価値を推定するには、不安という感情がそもそもどのようなものかについて理解しておく必要がある.感情研究は古くから行われているものの、進化論学派、身体学派、神経学派、認知学派などが独自の理論を提唱しており、そのなかで支配的な感情理論は存在しないという状況にある(鈴木,2007).不安についても様々な競合する理論が提案されているが、いくつかの根本的な見解は共通して受け入れられている.まず、不安は将来の潜在的な脅威を予期することで生ずる感情であるという点である.恐怖も不安と類似した性質をもつが、恐怖は目前の切迫した脅威に対する感情である点で異なる.『精神障害の診断と統計マニュアル第5版(DSM-5)』によると、恐怖は闘争または逃避のために必要な自律神経系興奮の高まり、危険が差し迫っているという思考、および闘争・逃

走行動とより多く関連しているのに対し,不安は将来の危険に対処するための緊張および 覚醒状態,および警戒・回避行動とより多く関連している.

もう一つ広く共有された見解として、不安には、心配性や神経質などの個人の性格に強 く依存する知覚や行動傾向の部分と、その場の状況の危険性に応じて表れる主観的、意識 的に知覚された気がかりや緊張の部分に大まかに分けられる(坂野、2015). Speilberger (1983)は、前者のパーソナリティ特性に類する性質を特性不安(Trait Anxiety)、後者の状 況に依存してあらわれる性質を状態不安(State Anxiety)として区分し、質問紙を用いて測 定する STAI 特性不安検査法を開発している.

## (2) 神経科学の知見

不安な感情のもと不確実な脅威に対応するときにリスク評価を歪める認知バイアスが 生じやすいことが神経科学の知見から裏付けられていれる. Grupe and Nitschke (2013) は, 不安に関する神経科学研究を広範囲にレビューすることにより,不安を感じている人が不 確実な脅威にどのように反応するかを下記の5つのプロセスで説明する UAMA (uncertainty and anticipation model of anxiety) モデルを提案している.

- (a) 脅威の損失と確率の過大推定
- (b) 脅威に対する注意・監視の強化
- (c) 安全性の学習の失敗
- (d) 認知的回避と回避行動
- (e) 脅威の不確実性に対する反応性向上

上記の5つのプロセスは、増大した脅威予想を中核として以下のように要約される.不 確実性下の脅威に対して不安な状況においては、脅威の損失と確率が過大推定され(a)、脅 威に対する注意・監視が強化され(b)、安全性を示すシグナルに反応して不安を軽減するこ とに失敗する(c)ことから、予想される脅威が増大する.不確実性下において、増大した脅 威予想と安全性の学習失敗は脅威に対する認知的回避や回避行動を増加させる(d).そうし た回避が行われることで、安全性の確認や脅威予想の修正がさらに困難になる.それによ り、不確実性下の脅威に対する生理的反応や行動が過剰になる(e).そうした過剰な反応や 行動は、さらなる認知的回避や回避行動につながる.

津波対策による不安軽減の経済評価において重要となるのは(a), (b), (e)の3つのプロセスである.将来の潜在的な脅威に対して,人はその発生確率と損失を過大に推定する傾向(判断バイアス)がある.特性不安の大きな人ほど過大評価の程度が大きくなる.特により損失を過大に評価する.確率推定は前頭前皮質背内側部(dorsomedial prefrontal regions),

損失推定は前頭前皮質眼窩部(orbitofrontal cortex)で行われている.また,前頭前皮質眼 窩部は推定された確率と損失を統合して期待値を算出し,競合する選択肢の期待価値の情 報を線条体(striatum)や前頭前皮質外側部(lateral prefrontal cortex),帯状皮質(cingulate cortex)などの行動選択や実行に関連する領域に伝える.不安な状態ではこれらの神経回路 が上手く機能しなくなり,脅威の損失と確率が過大推定される.また,不安な状態では、 脅威の客観的なシグナルに過大な注意を払う傾向(注意バイアス)と,不明瞭で曖昧なシ グナルを脅威に関連するものと見なす傾向(解釈バイアス)が生ずる.こうした脅威に対 する注意・監視の強化は扁桃体(amygdala)の過剰な活動と関連している.また,脅威が 不確実であるとき,その不確実性自体が負の結果を伴わなくても不安を増大させる.不安 な状態での過剰な反応は前島(anterior insula)と分界条床核(BNST)の活動と関係してい る.

## (3) 経済評価モデル構築への含意

以上の議論を踏まえて、津波対策による不安軽減の経済評価モデル構築に役立つ知見を 整理すると下記のようになる.

- ・津波リスクは目前の脅威というより長期の不確実な潜在的脅威であるため、津波対策 で解消される感情は恐怖ではなく不安が主になる。
- ・津波対策で解消されるのは、パーソナリティに依存する特性不安ではなく、状況に依存する状況不安である.
- ・脅威が不確実であるということ自体が不安を引き起こす.
- ・不安は脅威の発生確率が過大評価される心理状態である.
- ・不安は脅威の損失が過大評価される心理状態である.
- ・特性不安の大きさが損失と過大評価の程度に影響する(特に損失に影響する).
- ・これらの傾向は不安に反応する脳神経ネットワークの機能を基盤としており、アドホックで表層的なものではなく安定した構造的なものである。

#### 3. 不安評価の経済評価モデル

Tversky and Kahneman (1992) の提案した累積プロスペクト理論は上記の要件を反映させることができる.ここでは津波対策の文脈でこの理論に基づく経済評価モデルを構築する. 個人*i*は,客観確率 $p_i$ で損失 $x_i$ の津波リスクに現在直面しているとする.このとき,個人*i*は現在の津波リスクを下記の評価関数 $V(x_i, p_i)$ で評価する.

$$V(x_i, p_i) = [1 - w(p_i; h_i)]v(0; h_i) + w(p_i; h_i)v(x_i; h_i)$$
(B.1)

ここで、p<sub>i</sub>:津波被害が発生する客観確率

- $x_i$ : 津波が発生したときの被害 ( $x_i > 0$ )
- w(·):重みづけ関数
- v(·):価値関数
- h<sub>i</sub>:特性不安を含む回答者iの個人属性ベクトル

この評価モデルでは、不安による損失の過大評価は価値関数v(·),確率の過大評価は重み づけ関数w(·)の形状で表現できる.また、特性不安の大きさにより過大評価の程度が異な ることも、特性不安の指標を価値関数と重みづけ関数の形状パラメータに組み込むことで 扱える.特性不安の指標については Speilberger の STAI 特性不安検査の回答結果を用いれ ばよい.

津波対策による不安軽減の経済価値は、期待効用モデルによるリスクプレミアムを不安 軽減の経済価値と見なす枠組みを拡張する形で算出する.累積プロスペクト理論モデルに 基づく津波対策への支払意思額から津波の損失と客観確率で算出された期待被害額を指し い引いたものを不安軽減の経済価値とする.津波リスクを完全に防止する津波対策への個 人iの支払意思額yiは下式で求められる.

$$V(x_i, p_i) = V(y_i, 1)$$
 (B.2)

この支払意思額 $y_i$ を用いて、津波リスク $(x_i, p_i)$ を完全に解消する津波対策の不安軽減の価 値 $VAR(x_i, p_i)$ は下式で求められる.

$$VAR(x_i, p_i) = y_i - x_i p_i \tag{B.3}$$

同様に,津波リスクを( $x_i$ , $p_i$ )から( $x_i$ ', $p_i$ ')に減少させる津波対策の不安軽減の価値も以下のように求められる.まず,津波対策に対する支払意思額 $y_i$ 'について下記の等式が整理する.

$$V(x_i', p_i'; y_i', 1 - p_i') = V(x_i, p_i)$$
(B.4)

ここで累積プロスペクト理論より,

$$V(x_i', p_i'; y_i', 1 - p_i') = [1 - w(p_i'; h_i)]v(y_i'; h_i) + w(p_i'; h_i)v(x_i'; h_i)$$
(B.5)

である. 津波対策の不安軽減の価値 $VAR(x_i, p_i; x'_i, p'_i)$ は $y_i$ を用いて下式で与えられる.

$$VAR(x_i, p_i; x'_i, p'_i) = y'_i - (p_i x_i - p_i' x_i')$$
(B.6)

津波対策は状態不安を解消するものであり,津波対策によっては特性不安に対応する価 値関数や重みづけ関数の形状は変化しないと考えるのが自然である.そのため,この枠組 みでは客観リスクの変化を起因とした不安軽減の価値のみを推定している.ただし,津波 対策を行うこと自体が価値関数や重みづけ関数の形状を変化させると考えても,それらの 関数の変化前後の形状を特定することにより,上記と同様の手順で不安軽減の価値を算出 できる.

## 4. 計量経済モデルと CVM 調査設計

不安軽減の経済評価モデルを推定するために計量経済モデルを構築し、そのモデルを推 定するデータを得るための CVM 調査の枠組みを検討する. CVM 調査においては、回答者 が問題設定を理解しやすいように、回答者が現在直面している津波リスクとそれを完全に 防止する仮想的な津波対策を提示する. 回答者が負担する津波対策の費用をランダムに提 示し、2 肢選択方式で津波対策の実施に賛成か反対かを問う.

計量経済モデルを構築するために関数形の特定化を行う.まず、平常時を参照点として 0に基準化することにより、 $v(0;h_i) = 0$ とする.また、Prelec (1998) に従い、重みづけ関数 と価値関数を以下のように特定化する.

$$v(x) = -x^{-\alpha_i}$$
(B.7)  
$$w(p) = \exp[-(-\ln p)^{\gamma_i}]$$
(B.8)

ここで、 $\alpha_i$ :価値関数を規定するパラメータ ( $\alpha_i = \exp(\alpha_0 + \alpha h_i)$ )  $\gamma_i$ :重みづけ関数を規定するパラメータ ( $\gamma_i = \gamma_0 + \gamma h_i$ )

回答者*i*が津波被害を受ける客観確率を*p<sub>i</sub>*,その時の損失を*x<sub>i</sub>とする*.津波対策を実施に 対する最大支払意思額*y*は,津波対策を実施しないとき同じ評価関数値が得られるときの 費用負担額なので下式が成立する.

$$V(x_i, p_i) = V(y_i, 1)$$
 (B.9)

特定化した関数を用いて整理すると下式が成立する.

$$\ln\left[-\ln\frac{y}{x_i}\right] = \ln(\alpha) - \gamma_i \ln(-\ln(p_i)) \tag{B.10}$$

仮想的な津波対策を実施するための費用負担として回答者*i*にランダムに負担額*B<sub>i</sub>*を提示する.このときに津波対策に回答者*i*が賛成する確率は下式で表される

$$Prob(yes; B) = Prob[+\varepsilon_1 > G_i + \varepsilon_2]$$
(B.11)

ここで、 $G_i = \ln[-\ln(B_i/x_i)]$ であり、 $\varepsilon_1 \ge \varepsilon_2$ は誤差項である。 $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ の従う分布関数を F(·)とし、 $q_i = \ln(-\ln(p_i))$ とすると下式が成立する。

$$Prob(yes; B) = F[G_i - \ln(\alpha_i) - \gamma_i \ln(-\ln(p_i))]$$
  
=  $F(G_i - \alpha_0 - \alpha h_i - \gamma_0 q_i - \gamma q_i h_i)$  (B.12)

回答者iが負担額 $B_i$ のときに津波対策に賛成するとき 1,それ以外のとき 0のダミー変数を  $d_i$ としたとき,標本数Nのデータによる尤度関数Lは下式で与えられる.

$$L = \prod_{i=1}^{N} F(G_i - \alpha_0 - \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{h}_i - \gamma_0 q_i - \boldsymbol{\gamma} q_i \boldsymbol{h}_i)^{d_i} [1 - F(G_i - \alpha_0 - \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{h}_i - \gamma_0 q_i - \boldsymbol{\gamma} q_i \boldsymbol{h}_i)]^{1-d_i}$$
(B.13)

この尤度関数の対数をとって最大化することにより,価値関数のパラメータの推定値( $\hat{a}_0, \hat{\alpha}$ ) と重みつき関数のパラメータの推定値( $\hat{\gamma}_0, \hat{\gamma}$ )が得られる.

推定された計量経済モデルを用いて不安軽減の価値算出することができる.現状の津波 リスク(*x<sub>i</sub>*,*p<sub>i</sub>*)から津波リスクを完全に防いだときの不安軽減の価値*VAR*(*x<sub>i</sub>*,*p<sub>i</sub>*)は下式で与 えられる.

$$VAR(x_i, p_i) = \exp\left[-(-\ln p_i)^{\hat{\gamma}_i}\right]^{\hat{\alpha}_i} x_i - p_i x_i$$
(B.14)

同様に,現状の津波リスク(x<sub>i</sub>,p<sub>i</sub>)から津波対策によりリスク(x<sub>i</sub>',p<sub>i</sub>')まで削減したときの不 安軽減の価値は下式で算出される.

$$VAR(x_{i}, p_{i}; x_{i}', p_{i}') = \left[\frac{\exp[-(-\ln p_{i})^{\hat{\gamma}_{i}}]x_{i}^{-\hat{\alpha}_{i}} - \exp[-(-\ln p_{i}')^{\hat{\gamma}_{i}}]x_{i}'^{-\hat{\alpha}_{i}}}{1 - \exp[-(-\ln p_{i}')^{\hat{\gamma}_{i}}]}\right]^{\hat{\alpha}_{i}} - (p_{i}x_{i} - p_{i}'x_{i}')$$
(B.15)

## 参考文献

- キャス・サンスティーン (2015) 『最悪のシナリオ:巨大リスクにどこまで備えるのか』, みすず書房.
- 栗城稔, 今村能之, 小林裕明 (1997) 水害の精神的影響の経済的評価, 自然災害科学, 15(3), 231-240.
- 坂野登 (2015) 『不安のカー不確かさに立ち向かうこころ』, 勁草書房.
- 鈴木直人(編)(2007)『感情心理学』,朝倉書店.
- 高木朗義,大國哲,坂井宣行 (2000) 洪水による精神的被害の構造分析とその金銭的評価 に関する実証的研究,河川技術に関する論文集,6,225-230.
- ダニエル・カーネマン (2012) 『ファースト&スロー』, 早川書房
- 松島格也, 湧川勝己, 大西正光, 伊藤弘之, 小林潔司 (2007) 水害による被災家計の精神的 被害の経済評価, 土木計画学研究・論文集, 24(2), 263–272.
- Brenig, M. and Proeger, T. (2016) Putting a price tag on security: subjective well-being and willingness to pay for crime reduction in Europe, *Journal of Happiness Studies*, Vol.19, Issue 1, 145–166.

- Grupe, D. W. & Nitschke, J. B. (2013) Uncertainty and anticipation in anxiety: an integrated neurobiological and psychological perspective. *Nature Reviews Neuroscience*. 14, 488– 501.Prelec(1998) The probability weighting function. *Econometrica*, 66, 497–572.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R., Bagg, P. R. & Jacobs, G. A. (1983) Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Consulting Psychologists).
- Tversky, A. and Kahneman, D. (1992) Advances in prospect theory cumulative representation of uncertainty, *Journal of Risk and Uncertainty*, 5, 297–323.