津波に対する海岸保全施設整備計画のための
技術ガイドライン

令和３年６月

土木学会　減災アセスメント小委員会

ガイドライン発刊にあたって

2014 年 10 月に土木学会の海岸工学委員会と土木計画学研究委員会が協働で減災アセスメント小委員会の活動を開始してから，6 年半が経過しました．この間，参加メンバー個々の研究成果を反映しつつ，数々の会合と現地視察などの活動を通じて，様々な視点から「減災アセスメント」を論じて来ました．津波防災・減災という限定的なテーマながら，こうしてガイドラインという形でその成果をまとめることができましたのは，各メンバーの努力と海岸四省庁を含めた関係各所からのご支援の賜であると感じています．

津波に限らず減災まちづくりの目的は，単にまちを災害から守る・ねばり強くするということではなく，豊かな暮らしを実現することにあります．本小委員会で目指したのは，将来にわたって「豊かで安全なまちづくり」の具体的な手順を提供することであり，即ちその評価の手法を提示することでもあります．何が豊かでどの程度が安全なのか，それぞれに尺度があるとは思いますが，地域内での合意形成やあるいは地域間での社会公平性も考えると，様々な要素を一つのものさしに落とし込むことが必要となります．本ガイドラインでは，一般の公共事業との整合性も考慮し貨幣化という手法を取りつつも，直接，貨幣価値化がしにくい環境や景観などの検討については，複数選択肢（組合せ）の感度分析に取り込む工夫を試みました．

また，最終的な合意形成の手順についても，本ガイドラインでは定量評価の提示というところまでの議論で終わっており，それから始まる具体的な合意形成の手法には触れていません．何が豊かでどの程度が安全かは，最終的には住民の個々判断に委ねられる部分でもあり，そのプロセスにおける合意形成の重要性はまちづくり本体より自由度が大きい分重要かもしれません．

防潮堤の高さや配置，高台移転や避難所の整備，それらを含めたまちの機能の再構成など，多くの複合的な対策が取り得る中，一つの組み合わせを選択するというのは難しいことだと思います．さらに，まちの将来予測まで含めて検討する必要が認識される中，具体的ツールとしての本ガイドラインは，内容としてまだまだ不十分なところがあると考えています．今後さらに内容を充実させ，新たな知見を加えつつ，実例も参考により使いやすいガイドラインに修正していく作業を続けていく必要があろうと思います．

令和３年６月

岡安章夫・北野利一・多々納裕一・井上智夫

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	北野利一	名古屋工業大学
小委員長	多々納裕一	京都大学防災研究所
顧　　問	岡安章夫	東京海洋大学
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	国土交通省水管理・国土保全局
委　　員	牛木賢司	株式会社　建設技術研究所
委　　員	宇野喜之	株式会社　エコー
委　　員	尾野　薫	宮崎大学
委　　員	越村俊一	東北大学災害科学国際研究所
委　　員	小島　優	国土交通省水管理・国土保全局
委　　員	齋藤博之	国土交通省水管理・国土保全局
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	田中敬也	国土交通省水管理・国土保全局
委　　員	内藤正彦	国土交通省水管理・国土保全局
委　　員	中園大介	株式会社　建設技術研究所
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	京都大学防災研究所
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

はじめに **1**

第 1 編　手順編 **7**

1.　津波リスクを対象とした海岸保全施設整備計画の代替案設計手順 **8**

1.1. 海岸保全施設整備計画の策定手順 8

1.1.1. 津波に対する地域防災力の総合アセスメント 8

1.1.2. 整備計画で達成を目指す物理的な防御レベルの設定 9

1.1.3. 海岸防災・減災対策決定プロセスにおける「最適堤防高」の定式化 12

2.　整備区間のリスク分析・評価 **14**

2.1. 津波リスクアセスメント 14

2.2. 海岸堤防整備の影響評価 15

3.　地域海岸の整備計画の候補案（代替案）の設定 **16**

3.1. 整備計画案 16

3.2. 建設・維持管理費用等の算定 18

3.2.1. 海岸堤防の整備コスト 18

3.2.2. その他のコスト 21

3.3. 便益の算定 22

3.3.1. 最大浸水範囲及び最大浸水深の推定 23

3.3.2. 背後地の土地利用状況の推定 24

3.3.3. 浸水深に応じた被害軽減期待額の推定 26

4.　総合評価に基づく整備計画 **28**

第 2 編　方法編 **31**

5.　確率的津波水位の設定 **32**

5.1. 津波水位の確率分布の推定方法 32

5.1.1. 推定方法の概要 34

5.1.2. ランダムフェーズモデル 35

5.1.3. ロジックツリーアプローチ 40

5.1.4. coRaL 法（a method of incorpolating Random phase model into Logic tree） 44

5.2. 認識論的不確定性の幅と不確定性を取り込んだ頻度と浸水深の関係 56

6. 津波浸水シミュレーション.....57
6.1. 津波浸水シミュレーション手法の概要.....57
6.2. 越流計算手法の選定.....58
6.2.1. 越流計算手法の概要.....58
6.2.2. 非線形長波理論における越流計算（従来法）.....59
6.2.3. 非線形長波理論における粘り強さを加味した越流計算.....60
6.2.4. レベル湛水法.....64
6.2.5. 3 次元津波浸水シミュレーション.....67

7. 被害計算.....68
7.1. 被害計算の概要.....68
7.2. 将来の土地利用の推計.....69
7.2.1. 将来の資産データの推計手法.....69
7.2.2. 将来の土地利用を推計するための係数値.....71
7.2.3. 避難率と死亡率.....77
7.3. 被害軽減期待額の算定.....86
7.3.1. 被害軽減期待額の概要.....86
7.3.2. 本ガイドラインで対象とする資産.....90
7.3.3. 死亡リスク軽減の経済価値.....91
7.3.4. 公共土木施設・公共事業等被害額の算定.....95
7.3.5. 浸水深に応じた被害率.....96

8. 経済効率性照査.....105
8.1. 最適堤防高 H*を評価するための検討フロー.....105
8.2. 経済性の評価方法.....106
8.3. 社会的割引率.....107

9. その他の考慮すべき事項.....109
9.1. 景観・利用・環境に関する外部性.....109
9.1.1. 外部性の類型とその特徴.....109
9.1.2. 東日本大震災からの復興で採られた外部性緩和策.....112
9.1.3. 南海トラフ対応を考慮した津波防災力強化のパターン.....116
9.2. リスクプレミアムと曖昧性プレミアム.....120
9.2.1. はじめに.....120
9.2.2. 確率論的津波ハザード解析と経済評価.....121
9.2.3. リスクプレミアム.....123
9.2.4. 曖昧性プレミアム.....124

9.2.5. 津波対策の便益評価におけるリスク・曖昧性プレミアム.....126
9.2.6. まとめ.....128

第 3 編 実施編.....131

10. ケーススタディ.....132
10.1. 生起確率.....132
10.1.1. 地震の平均発生間隔.....132
10.1.2. ロジックツリー分岐とその重み.....132
10.2. 浸水計算方法.....134
10.2.1. 計算条件.....134
10.2.2. フラジリティモデル.....135
10.2.3. 対象地形.....136
10.3. 確率論的津波ハザード評価.....138
10.3.1. 津波ハザードカーブ.....138
10.3.2. 確率論的津波浸水深分布評価.....138
10.3.3. 平均浸水深，最大浸水体積の超過確率の比較.....140
10.4. 津波規模毎の人口・企業の将来変化と想定被害額.....141
10.4.1. 将来の土地利用の推計.....141
10.4.2. 津波による人的被害の推計.....144
10.4.3. 被害軽減期待額の算定.....146
10.4.4. 整備コストの試算.....148
10.4.5. 便益の算定.....149
10.4.6. 最適堤防高の試算結果.....150
10.5. 外部性の評価と外部性を低減する代替案の設定.....154
10.5.1. 基本案がもつ外部性の定性的評価と課題抽出 「既存堤防の補強」.....154
10.5.2. 代替案のもつ外部性の定性的評価と課題抽出 リアス式海岸地形―住居・商業地区を「よせる」.....156
10.5.3. 外部性の評価と外部性を低減する代替案の設定に関する留意点.....158

付録 A 「設計津波の水位の設定方法等について」（海岸関係省庁課長通知）.....1

付録 B 確率論的津波ハザード評価手法の比較.....4

付録 C 差分の差分法の導出.....9
C.1. 差分の差分を用いた企業立地変化分析モデル.....9
C.2. 差分の差分を用いた住宅立地変化分析モデル.....12

付録 D 差分の差分法による土地利用変化の分析結果.....13

付録 E 各市町の地域特性を把握するための基礎データ 18

付録 F 統計的生命価値に関する補足事項 31

F.1. 死亡リスク軽減の経済価値を統計的生命価値で算出できるための仮定 31

F.2. 世界各国で用いられている統計的生命価値 33

F.3. 日本の統計的生命価値のメタ分析 33

付録 G リスク・曖昧性プレミアムに関する補足事項 37

G.1. リスク・曖昧性プレミアムの簡単な例 37

G.2. リスクプレミアムと効用関数の形状 37

G.3. 相対リスク回避度とリスクプレミアムの推定事例 39

G.4. 曖昧性プレミアムの推定事例 41

G.5. リスクプレミアムを無視できる条件 41

はじめに

東日本大震災は従来の防災対策に新たな考え方をもたらした．

すなわち，東日本大震災以降，比較的発生頻度が高い外力（L1）と，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外力（L2）の２つのレベルの外力を想定し，前者に対してはハード対策を基本として被害の防止に取り組み，後者に対してはなんとしても人命を守るという考え方（「二段階の外力レベルの設定」）に基づき，施設整備，土地利用，避難を組み合わせた多重防御により被害を最小化させ（「津波防災地域づくり」），また設計条件（L1）を上回る外力に対しても減災効果を目指す構造上の工夫を施した，いわゆる「粘り強い堤防」を推進することとなった．

このような新たな防災対策の考え方を社会実装するためには，適切なリスク評価のもと多重防御の方策を社会的公平性や経済的効率性等の観点から総合的に評価する手法や，合意形成の進め方に関して，防災・減災対策の特徴を踏まえた具体的な管理手法を開発する必要がある．本ガイドラインは，この課題に対して海岸工学委員会と土木計画学研究委員会とが協同して検討し，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域における合意形成を促進する手法として，その成果をとりまとめたものである．

本ガイドラインでは，津波に対する代表的海岸保全施設として海岸堤防，その中でも特に“堤防の高さ”について焦点を当てている．海岸堤防の高さは，津波に対する海岸保全施設を計画・設計する上での数ある諸元のうち最も重要な要素であると同時に，海岸の利用・景観・環境の観点からも重要であり，まちづくりや地域社会に与える影響が大きいものである．東日本大震災以前は，海岸堤防の高さの決定にあたっては，施設の計画規模を特定する津波・高潮といった災害をもたらすハザードを原則として既往最大主義から設定し，全国一律の安全性を求める手法，いわば「海側からの論理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，背後地の状況はもっぱら人口・資産が多い地域・地区の整備が優先されるという形で考慮されてきた．一方，災害リスクは住民の避難行動や，避難施設と個々人の住まい方といったまちづくりにも依存するものであり，上述のように東日本大震災以降，施設整備，土地利用，避難を組み合わせた「津波防災地域づくり」により津波防災対策が進められるなかで，この堤防の高さの決定の考え方については，「設計津波の水位を前提として，環境保全，周辺環境との調和，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」[1]とされた（**図0.1**）．これは海岸堤防の高さについて「海側と陸側の両方からの論理で決定するプロセス」への転換である．この新たな考え方を踏まえて海岸堤防を設計するプロセスを社会実装するには，一定の耐力（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

[1] 「設計津波の水位の設定方法等について」（平成二十三年七月八日付 海岸関係四省庁課長通知）

備するという，これまでの海岸工学における設計法のみでは対応できない．まず，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必要がある．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．避難体制や土地利用の状況を踏まえたハード対策を検討する必要があるとともに，その逆に設定したハード対策の効果の限界を前提として避難体制の構築やまちづくりを進める必要がある．全国一律の最低限度の安全性を求めるだけでなく，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ことも必要であろう．さらに，沿岸域は日常生活や漁業等の経済活動，観光資源としての景観や砂浜の利用にとって高い堤防は障害となるため，災害時の安全性と平常時の地域振興という異なる側面からの利害の調整という問題にも取り組まなければならない.

このような海岸工学に加えて土木計画をはじめとした社会工学の知見を統合して津波に対する減災対策を可能とする方法論を構築するためには，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景観，環境等への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あたっては,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．これらの評価によって，地域固有の事情を反映した効率的な整備も可能となる.

本ガイドラインではこの方法論として新たに「海岸防災・減災対策決定プロセス(案)」を提示する（図 **0.2**）．この新たなプロセスのポイントは，ハザードの発生確率をもとに地域のリスクを算定し，海岸堤防，避難計画，土地利用計画のそれぞれの限界を認識して適切な組み合わせを提示し，土地利用と避難との関係性のなかで堤防高さを決定することにある．避難，土地利用といった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ため，本ガイドライン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併せて分析していくための手法も提示する.

本ガイドラインの構成は以下のとおりである（**図 0.3**）.

第１編では，本ガイドラインで示す海岸防災・減災対策決定プロセスの基本的な考え方と整備計画案の設定の手順を示す.

第２編では，海岸防災・減災対策決定プロセスで必要となる，確率的津波水位の設定，津波シミュレーション及び被害額の算定手法を示す.

最後に，第３編では，第２編の方法論に従って実施したケーススタディを紹介する.

本ガイドラインで示した手法は，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津波防災に対す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．また，気候変動に伴う高潮災害の頻発化・激甚化が懸念されるなか，今後，全国的に海岸保全基本計画の見直しが予定されているが，本ガイドラインで示した津波対策のプロセス･手法は高潮対策の検討に際しても活用可能なものである．さらには，近年，激甚な水害が頻発するなか，避難対策や氾濫域での住まい方の工夫も含め河川管理者のみならず流域全体で行う治水対策である「流域治水」の考え方が打ち出されたが，これは防災施設の整備と土地利用，避難を組み合わせる「津波防災地域づくり」の考え方と同基軸にあるものであり，本ガイドラインで取り組んだ防災施設の計画・設計に関するプロセス・手法の構築は，今後この流域治水の展開においてもその活用の可能性が期待されるものでもある．

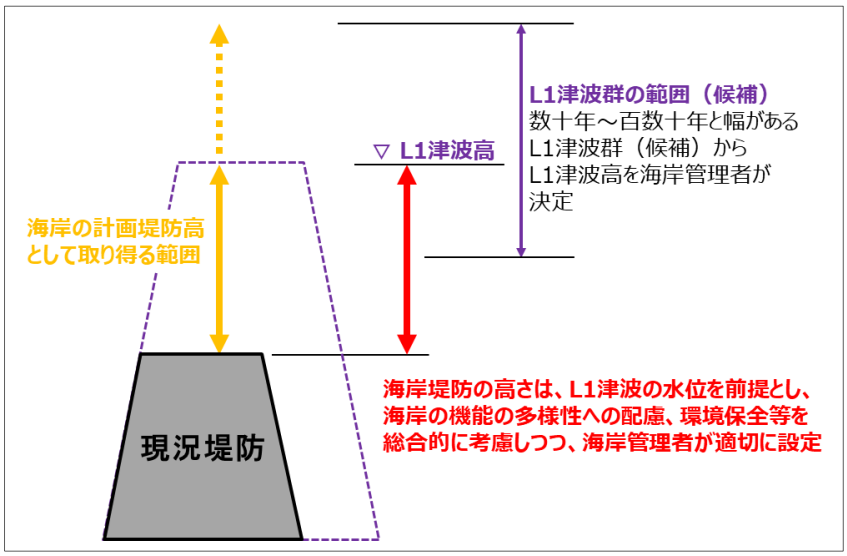


図 0.1　津波に対する海岸堤防の取りうる高さの範囲

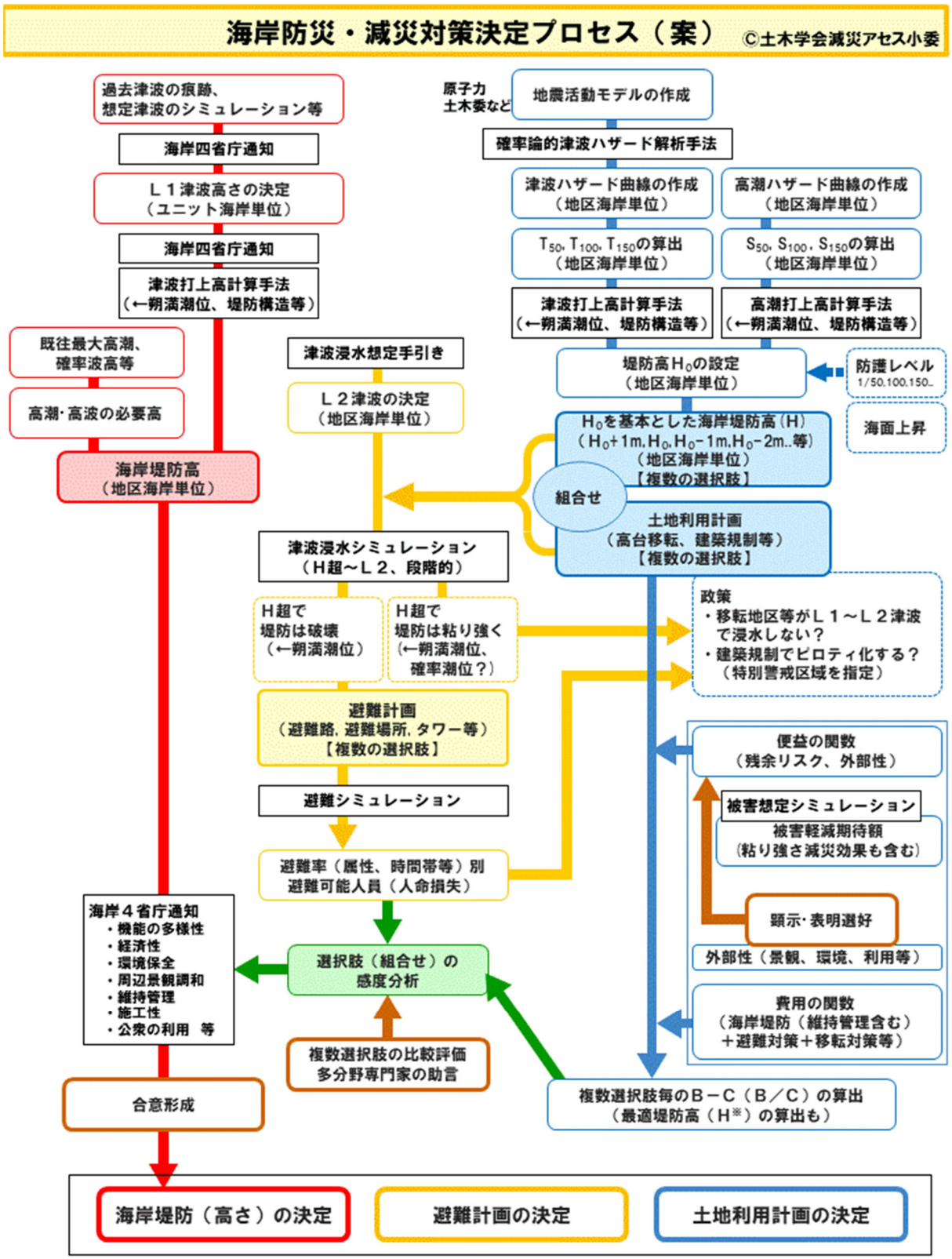


図 0.2　海岸防災・減災対策決定プロセス（案）

（第 1 編　手順編）*※本ガイドラインの基本的な考え*
1. 整備区間のリスク分析・評価
2. 地域海岸の整備計画の候補案（代替案）の設定
3. 総合評価に基づく整備計画

（第 2 編　方法編）*※具体的な最適堤防高の算定方法*
1. 確率的津波水位の設定
2. 津波浸水シミュレーション
3. 被害計算
4. 経済効率性照査
5. その他の考慮すべき事項

（第 3 編　実施編）*※第 2 編の方法編に従って実施した具体例*
1. ケーススタディ

図 0.3　本ガイドラインの全体構成

第1編 手順編

1. 津波リスクを対象とした海岸保全施設整備計画の代替案設計手順

1.1. 海岸保全施設整備計画の策定手順

本編では，海岸保全施設の整備計画の策定にあたって，想定される津波高及び津波到達時間，浸水範囲，浸水深等を推算し，津波によって起こりうる人的被害や資産被害を把握した上で，防災・減災対策の検討や対策実施区間の設定及び優先順位の設定等を行うための手順とその概要を示すものである．そのプロセスは原則として以下の手順による．

1．整備区間のリスク分析・評価
2．地域海岸の整備計画の候補案（代替案）の設定
3．総合評価に基づく整備計画の決定

（解説）

1.1.1. 津波に対する地域防災力の総合アセスメント

図 1.1 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．本ガイドラインでは，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．

津波防護に関する法定計画としては，海岸管理者が策定する「海岸保全基本計画」と市町村が策定する「津波防災まちづくり推進計画」が挙げられる．本ガイドラインで示す「最適堤防高さ」は海岸保全基本計画もしくは，海岸保全基本計画を踏まえた具体的な事業計画として海岸管理者が任意に策定する整備計画（以下，本ガイドラインで「整備計画」という場合は，海岸保全基本計画と任意に策定される整備計画の両者を指す）における堤防高の決定プロセスでの活用されるものであるが，津波に対する地域防災力の総合アセスメントの内容は「津波防災まちづくり推進計画」において位置付けられる対策を含むものであり，整備計画と津波防災まちづくり推進計画は相互に整合を図る必要がある．

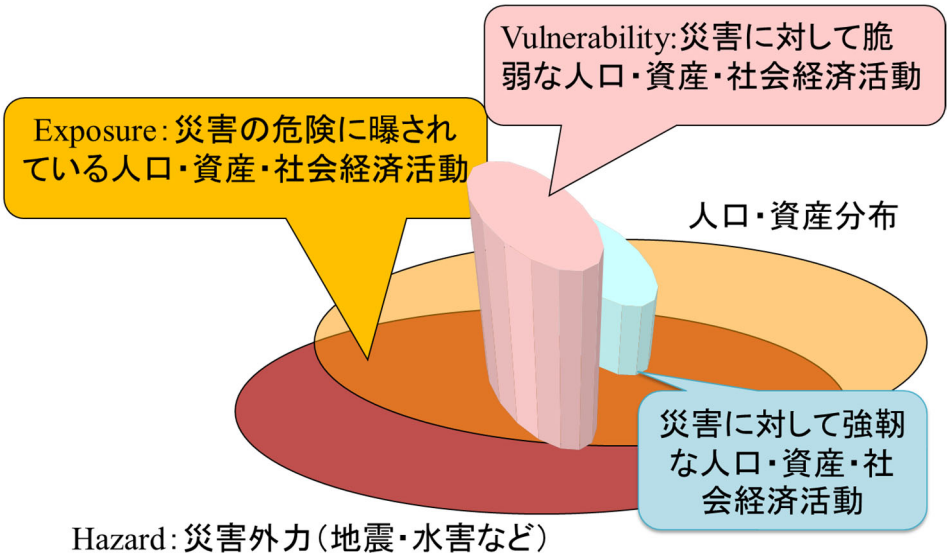


図 1.1　災害リスクの構成要素：災害外力であるハザード，災害の危険に曝される人口・資産・経済活動であるエクスポージャ，及び，災害に対するエクスポージャの脆弱性であるヴァルナラビリティ

1.1.2.　整備計画で達成を目指す物理的な防御レベルの設定

堤防の高さは，全国の海岸の防護水準は国土交通大臣が策定する海岸保全基本方針において，一定の頻度（数十年から百数十年に一度程度）で到達すると想定される津波，いわゆるL1津波に対して防護することが目標とされている．海岸保全基本方針に基づき各海岸管理者毎に策定する海岸保全基本計画においては，この目標のもと，海岸保全施設の整備に関して骨格となる事項の一つである個別箇所の堤防高決定の概ねの目安となる代表堤防高を定めることとなる．海岸堤防の天端高さは，海岸管理者である都道府県等が過去の記録や数値計算等により定めた設計外力の水位を前提として，海岸の持つ多様な機能への配慮，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つつ，海岸管理者が適切に定めることとされている[2].

このように，L1 津波を防護するという海岸保全基本方針の目標のもと海岸保全基本計画もしくは海岸保全基本計画を踏まえた任意計画としての整備計画を検討する際には，L1 津波以下で当面達成を目指す物理的な防御レベルを設定することが適当な場合がある．

例えば，南海トラフ沿いの地域を考えると，L1 津波に対応した海岸堤防を計画したとしても，必要とされる事業規模に対して予算上の制約から計画を達成するまでにはかなりの年月を必要とすることも想定される．一方で，昭和南海地震津波から 74 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ず，

[2] 「設計津波の水位の設定方法等について」（平成二十三年七月八日付 海岸関係四省庁課長通知）

このような場合は，警戒避難体制を充実させることとセットで暫定的な堤防高さでの堤防整備を進めることが適当であろう．また，東日本大震災の復旧においては，景観や利用・環境等に関する地域での議論を踏まえ多くの地域で堤防の高さを設計津波の水位より下げる見直しが行われた．津波外力を対象とした海岸堤防の高さは，L1 津波の高さで計画・整備されるもの以外に，このように予算制約等の理由から L1 津波の高さで計画しつつ暫定形で整備されるもの，環境保全や周辺環境との調和の観点等から L1 津波の高さよりも低い高さを整備目標として設定されるものに分類できる（**図 1.2**）．

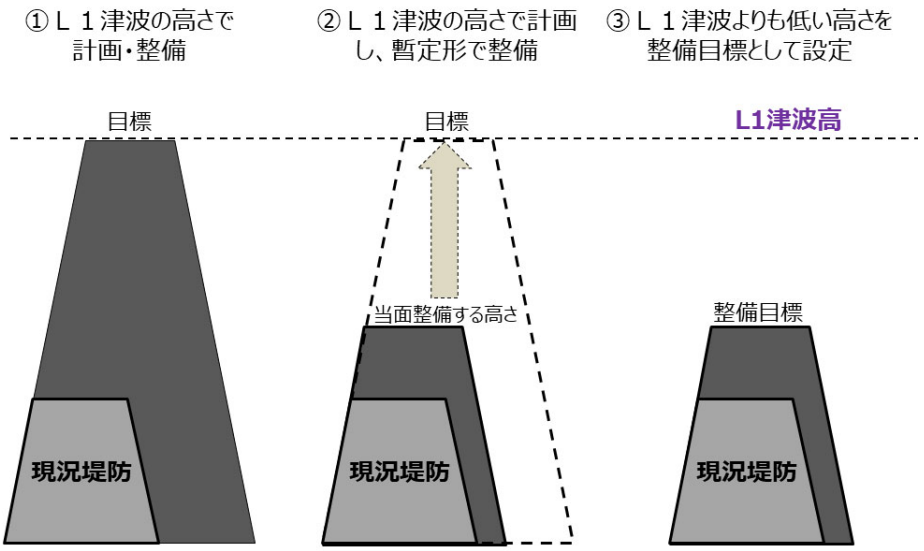


図 1.2　海岸堤防の高さのパターン

本ガイドラインでは，このような物理的津波防御レベルとしての堤防の高さの設定を行うにあたって，純便益指標（B-C）を用いた方法論を提示するものである．**図 1.2** に示すように，L1 津波の再現期間には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．

このように複数の物理的防御レベル（堤防高さ）を想定し，その高さによる堤防整備と土地利用による対策の組合せに対して経済性照査を行うとともに，避難対策も加えた感度分析を行ったうえで最終的な堤防高さを決定する手順が「海岸防災・減災対策プロセス」である．本ガイドラインの各編・章・節と「海岸防災・減災対策プロセス」の対応関係を**図 1.3** に示す．

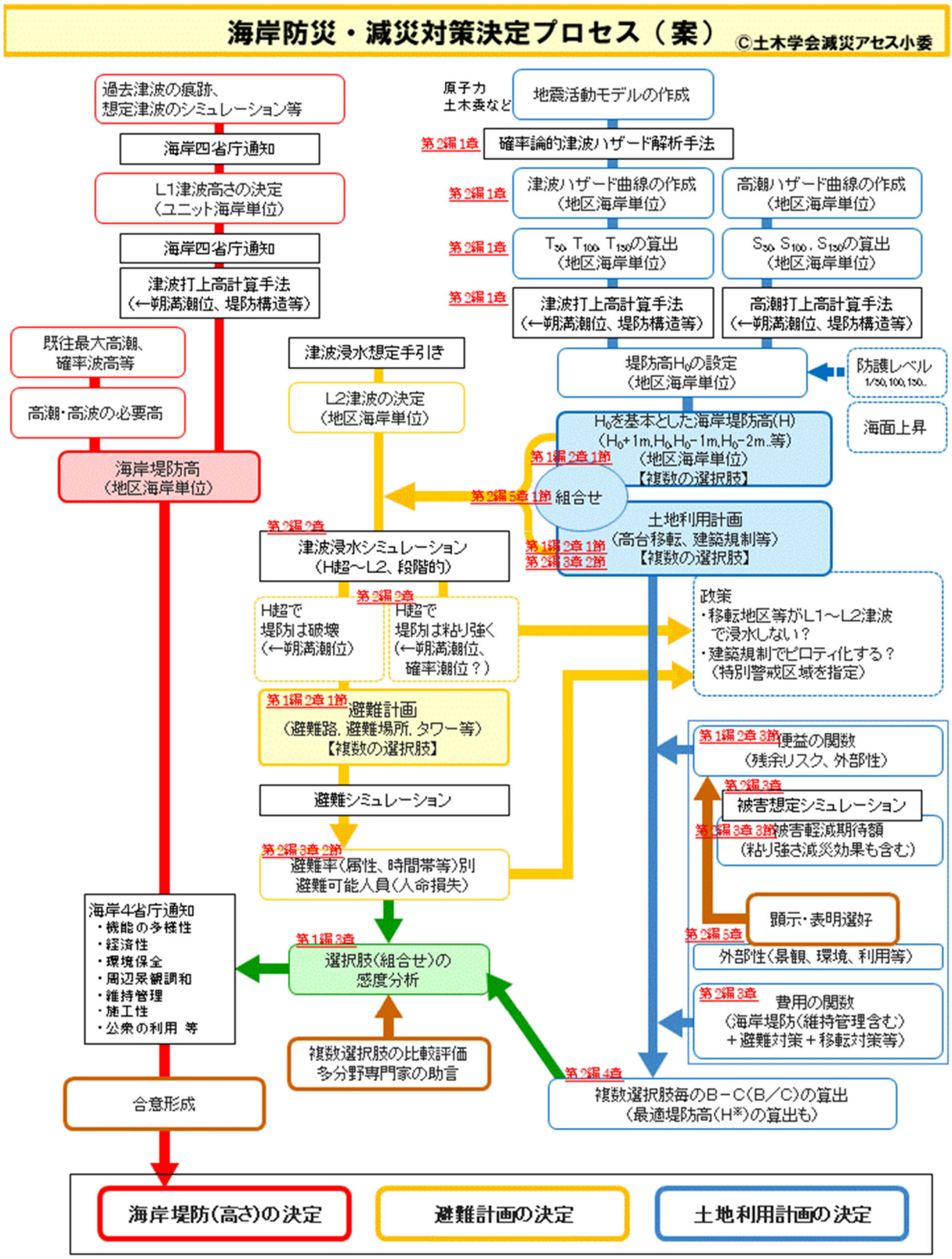


図 1.3　海岸防災・減災対策決定プロセス（案）

1.1.3. 海岸防災・減災対策決定プロセスにおける「最適堤防高」の定式化

図 1.3 で示した海岸防災・減災対策決定プロセスは，堤防整備計画と土地利用計画，避難計画の三者を一体的に考えながらそれぞれの計画を決定するプロセスである．本ガイドラインの基本的な考え方は，このプロセスのうち堤防整備計画で決定される堤防の高さを他の２つの計画と関連付けながら最適な堤防整備計画（堤防高さ）を決定しようとするものであり，以下のとおり定式化される．

ある確率で発生するハザードに対する対策の効果（便益: B）は，堤防高さの関数として表現することができ，コスト（C）も同様に堤防高さの関数として表現できる．堤防の高さを横軸に B，C を縦軸にとると，一般的に純便益 B-C は**図 1.4** のように凸型の形状を示し B-C が最大になる堤防の高さ H を本ガイドラインにおいては，効率的高さ 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．

$$H^* = \arg\max_H \int_0^\infty B_n(H, f(S); X) f(S) dS - C(H) \tag{1.1}$$

ここで，$B_n(H, f(S); X)$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，補助金等が挙げられる．

$C(H)$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，

$$B_n(H, f(S); X) = \int_{t=0}^\infty e^{-it} b(H, f(S), t) dt \tag{1.2}$$

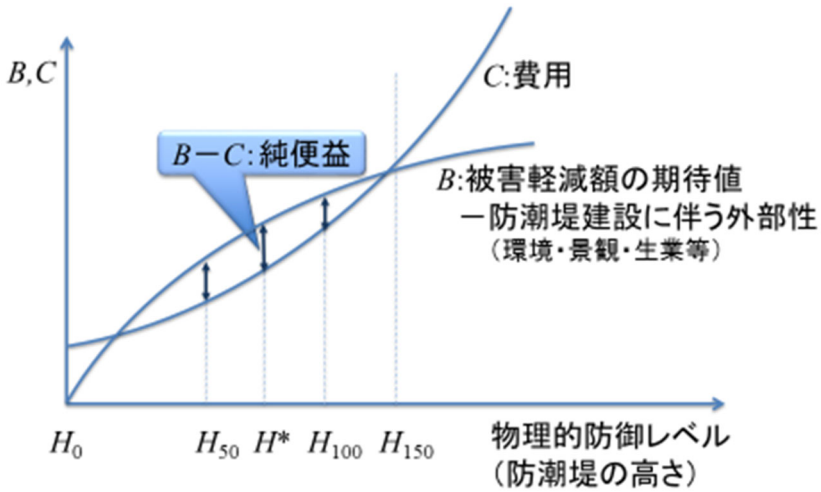


図 1.4　防潮堤の高さとその便益と費用

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．

$$b(H,f(S),t)=b\big(L(H,X,f(S)),K(H,X,f(S)),E(H,X,f(S)),t\big) \tag{1.3}$$

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については要検討である．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．

上記 H^*は理論的に定式化を行ったものであり，効率的高さの実際の評価に当たっては，景観等その定量的評価が困難な項目があること，B-C 曲線は技術的に相当の誤差を含みうるものであること，また B-C 曲線の形状から明らかに H^*が近傍の H に比べて明らかな優位を示さない場合があることを踏まえ，本ガイドラインでは景観等は別途定性的評価を行うとともに，計算上 B-C が最大となる H^*のみならず B-C が正となる範囲内で複数の堤防高 (H_n)も代替案として選定したうえで，総合的に評価を行い最終的な堤防高さを決定することとしている．なお，このように「“最適”堤防高」はその高さで最終的な堤防高さが決定されるものではないという点において便宜的な名称であり，合意形成等においてこの名称を利用することは誤解を招くおそれがあることに留意されたい．

2. 整備区間のリスク分析・評価

2.1. 津波リスクアセスメント

津波リスクアセスメントとは，想定される津波高及び津波到達時間，浸水範囲，浸水深等を推算し，津波によって起こりうる人的被害や資産被害を把握した上で，防災・減災対策の検討や対策実施区間の設定及び優先順位の設定等を行うことである．

津波リスクアセスメントは以下の手順により行う．まず，津波が引き起こすハザードとその生起確率を算定し，現状の整備水準における整備区間における津波リスク（被害の発生確率）を算定する．この際，区間背後地において，津波リスクにさらされる人口・資産等の分布の将来変化を想定し，概ね 20～30 年後までに生じる変化も取り込んで，リスクの変化を予測する．そのうえで，区間内の期待被害額等の分布の時間変化を把握することで，整備計画として優先的に取り組むべき区間を選定する．

（解説）

津波のリスクアセスメントにあたっては，まず，どれくらいの確率でどのような被害が発生するかの評価を行うことがその第一歩となる．ハザードの確率的な評価としては，「洪水」では，X 年間に平均 1 回の降雨量は○mm といった評価を行い，施設整備等の計画を策定しているが，「津波」に対してはこれまでこのような評価方法は確立していなかった．本ガイドラインでは，津波に対して積極的にランダム性を取り入れた頻度の評価を行い浸水深の確率分布を求める手法を第２編で示しており，この手法を用いてハザードである津波の不確定性を評価することとする．

また，津波リスクの評価にあたっては，評価期間内の時間の経過に応じたリスクの変化を推定することとする．このため，リスクの変化の推定のためには将来当該地域における人口・資産がどのように変化するかを予測する必要がある．人口予測については，国立社会保障・人口問題研究所が推計した市区町村ごとの将来人口や，国土交通省国土政策局が試算した将来人口メッシュデータ（国土数値情報ダウンロードサービスにおいて公表）等を利用できる．人口・資産等の将来変化は，都市計画のマスタープランの目標期間等も考慮して，20～30 年後までは社会増減・自然増減を予測し，それ以降は不確定性に配慮し人口変化を考慮しないことを基本とする．リスクの変化の推定にあたっては，堤防整備は建設後ただちに効果を発揮する，土地利用による対策は長期間を要する，避難対策は比較的速やかに効果を発揮しやすいものの効果の持続が難しいといった，それぞれの対策毎の効果の発現状況の特徴について留意する必要があり，整理しておくこととする．

2.2. 海岸堤防整備の影響評価

海岸堤防整備等の施設整備（ハード対策）は，津波や高潮，高波から背後の資産を守ることができるというメリットだけでなく，景観の悪化や，海岸の利便性の低下等のデメリットを有する場合もある．そのため，海岸堤防整備等が及ぼす影響をメリット，デメリットも含め総合的に評価することとする．

（解説）

海岸堤防等の施設整備は，津波や高潮，高波から背後地の人命・資産を守る一方，海岸の景観の悪化や，砂浜へのアクセスなどの利便性の低下させる場合がある．特に景観そのものが地域の財産となっている場合等背後地が観光地のような地域では，このような問題が重要となる．

上記のような海岸堤防等の施設整備によって引き起こされる影響を踏まえた上で，対策メニューや対象実施区間等の整備計画を定める必要がある．

3. 地域海岸の整備計画の候補案（代替案）の設定

3.1. 整備計画案

L1 津波を含む複数の津波高（H_n）を想定し，それに対応する被害の生起確率に基づいて整備計画の候補案を作成する．この際，代替案ごとに得られる被害軽減額の期待値を便益として算定し，整備に伴う費用との比較により経済効率性を評価する．この段階では，景観や環境など便益や社会的費用とし定量化が困難な項目に関しては，定性的な検討にとどめ，各案の特性として列挙するにとどめておく．

（解説）

整備計画案は，地域海岸毎に策定する．なお，地形条件や背後地の土地利用等が類似する場合は，考えられる対策も同じになることが考えられるため，その場合は，複数の地域海岸にまたがって対策等を考えても良い．

一般に海岸堤防がもたらす景観，環境，利便性等への外部性の大きさは，その位置・線形によって大きく変わる．そうした外部性が大きく軽減できるのであれば堤防位置や海岸保全区域を設定し直すことも含めて検討し，「河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き（平成 23 年 11 月 国土交通省水管理・国土保全局）」等を参照しながらより外部性の小さい代替案を設定する必要がある．

このような基本的な配慮に加え，整備計画の検討にあたっては，**表 3.1** に示すような高台移転や道路盛土の整備等，海岸管理者が実施する対策ではないものも含めた津波対策の中から，複数のメニューを組み合わせた候補案（代替案）検討した上で決定する必要がある．このため，整備計画の検討にあたっては，津波防災まちづくり推進計画等他の関連計画の検討と一体的もしくは相互に連携しながら進める必要がある．

表 3.1 津波対策の例

項目	対策メニュー
海岸からの津波の浸水防護・軽減対策	・海岸堤防整備（直立堤，傾斜堤） ・海岸堤防背後への盛土 ・陸閘の整備
河川からの津波の浸水防護・軽減対策	・水門・樋門の整備 ・河川堤防の嵩上げ ・背水堤の整備
地域一体となった被害防護・軽減対策	・居住エリアの高台移転 ・道路盛土の整備（二線堤） ・津波避難タワー，避難路の整備 ・津波災害（特別）警戒区域の指定

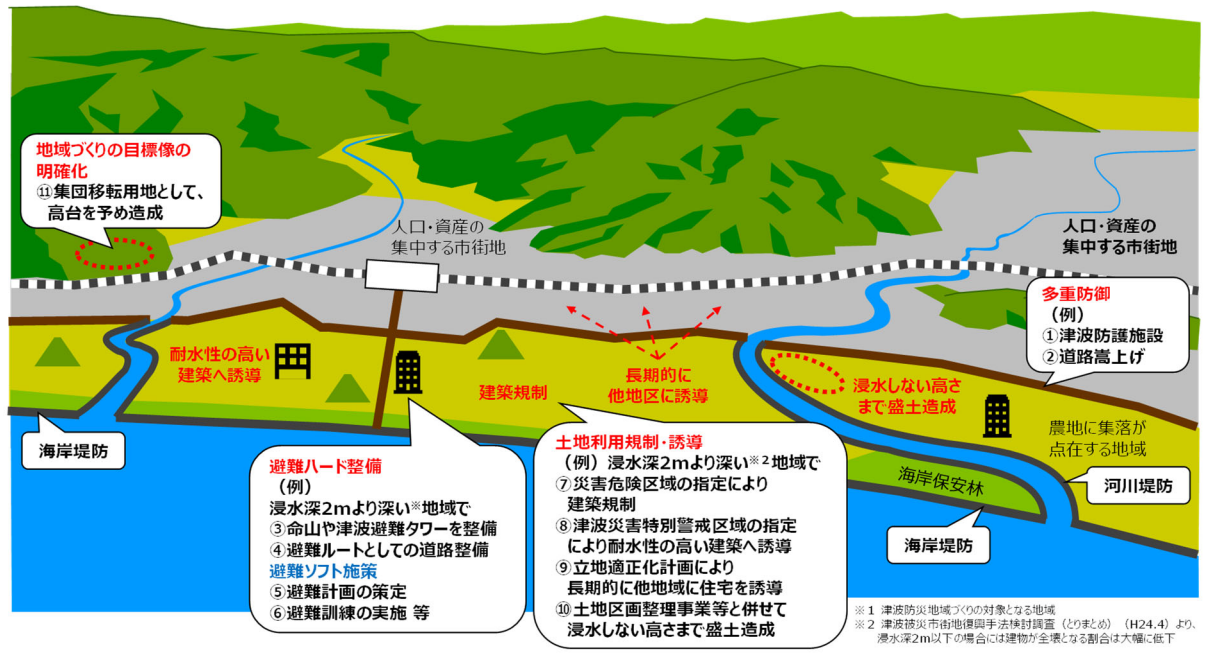


図 3.1　津波防災対策メニューのイメージ

3.2. 建設・維持管理費用等の算定

海岸保全施設の建設・維持管理費用は，近隣地域又は条件が類似している他地域の過去の実績等より算定することを基本とする．

（解説）

3.2.1. 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

工事費については，工事諸量に単価を乗じて積算することとする．

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 3.2**）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 3.2**），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．

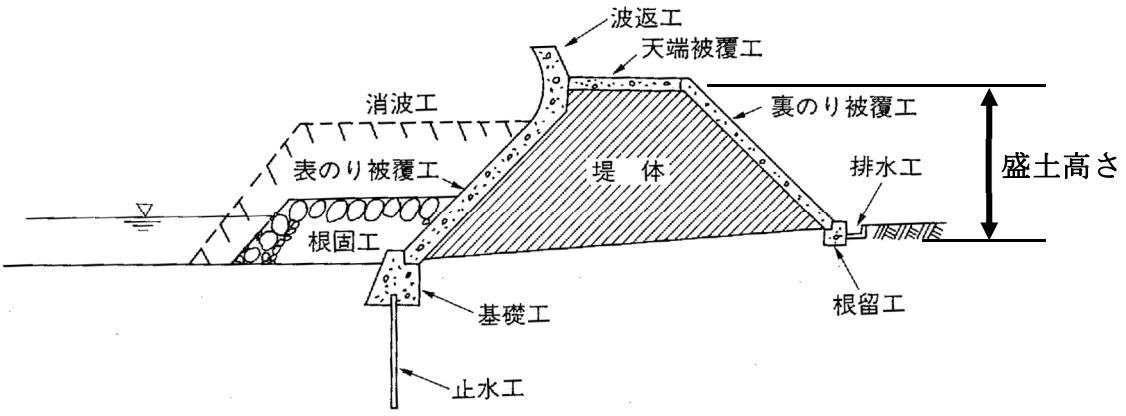


図 3.2　コンクリート三面張り構造の海岸堤防

表 3.2　調査対象海岸の堤防諸元

県名	海岸名	天端高 （T.P. m）	盛土高さ （m）	主な施工条件
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

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 3.3**）．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 4 m 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．

$$y = 6.4477x^2 + 10.726x \tag{3.1}$$

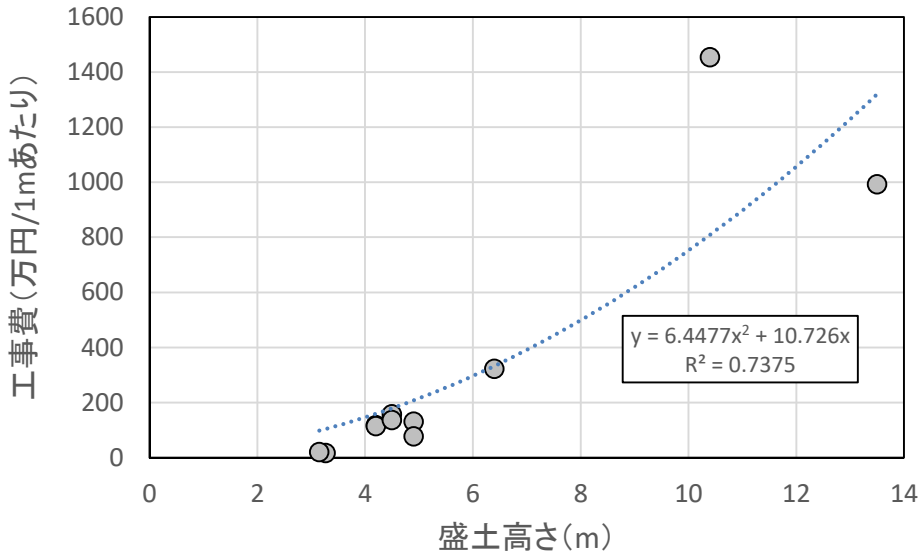


図 3.3　海岸堤防の盛土高さと工事費の関係

ここで，y は工事費（万円/m），x は盛土高さ（m）である．

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．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．

堤防以外の水門や樋管等の構造物については，その形式や地盤条件などで費用が大きく変わることから，それぞれの環境に応じて,概算費用を算出する必要がある．水門等の概算工事費の算出の事例をみると，過去の施工実績等から部材ごと（扉体，戸当たり，開閉装置，電気設備，附帯工事など）に算出した単価と，概略数量をもとに算出している事例が多い．

(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．

3.2.2. その他のコスト

海岸保全施設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と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．

また，避難体制の整備にあたっては，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．

一般的に，計画策定に要する経費やソフト施策に要する経費については，海岸保全施設の整備に要する費用に比べて小さいため，特段の理由がなければ考慮する必要はないが，避難路や避難施設等ハード対策に係る費用については．近隣地域又は条件が類似している他地域の過去の実績等から単価を設定して費用を算定することを基本とする．

3.3. 便益の算定

整備計画で定めた津波被害軽減対策によって，防護・軽減することが可能な被害額（被害軽減期待額）を，その対策による便益と見なす．なお，将来の土地利用も踏まえて，被害軽減期待額を算定することを基本とする．

（解説）

整備計画で定めた津波被害軽減対策によって，防護・軽減することが可能な被害額（被害軽減期待額）を，その対策による便益と見なす．算定方法等の詳細については，「第 2 編 方法編の第 3 章」に記載するが，将来の土地利用も踏まえて，被害軽減期待額を算定することとする．なお，貨幣価値化できない便益も可能な限り考えることが望ましい．

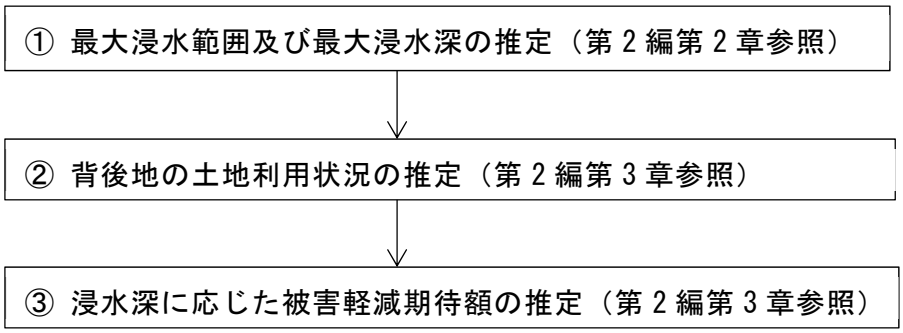


図 3.4 被害軽減期待額の算定フロー

3.3.1. 最大浸水範囲及び最大浸水深の推定

浸水地域の設定は，現状の海岸保全施設等の津波に対応した施設に対し，確率年毎に，津波の想定外力が来襲した場合の背後地の浸水範囲及び浸水深を津波シミュレーション等により算定して推定する．

越流計算手法の原則は，「津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.10」に準拠した非線形長波理論に基づく津波浸水シミュレーションモデルに破堤を考慮した計算を行うことであるが，構造形態が複雑な場合などにおいては，3 次元津波浸水シミュレーションモデルを用いることも想定されるが計算負荷は大きい．

現時点においては，適用範囲は不明瞭であるものの，その精度が確保された場合においては，各自治体等が実施した既存の津波浸水想定区域図から越流量比により浸水範囲・最大浸水深を算定する「簡易モデル(レベル湛水法)」で推定することも可能とする．

(1) 想定する地震津波

「海岸保全施設の技術上の基準」等では，海岸堤防の高さを定めるための設計津波（レベル 1 津波）は，過去の実績津波より原則として数十年から数百年に一度程度発生する比較的発生頻度の高い津波が対象とされている．

ここでは，津波高としてのハザードだけではなく，その発生確率と発生する具体的な災害リスクを定量化するため，複数の確率的津波水位を設定することとする．推定方法は，ランダムフェーズモデル, ロジックツリーアプローチ, コンポジットモデル（coRaL method）等があり，各手法の詳細は第 2 編第 1 章を参照されたい．

(2) 浸水シミュレーション

津波シミュレーションは，「津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.10」に準拠した非線形長波理論に基づく手法を基本とし，現況の施設高さを複数段階かさ上げしたケース，海岸堤防等の粘り強さ(フラジリティ)を考慮したケースを組み合わせた複数ケースを実施し，発生確率を考慮した津波浸水分布を評価する．

一方で，発生確率を考慮した津波シミュレーションは，一義的に津波外力が決定するものではないため，計算ケース等における負担が大きい．そのため，設計に用いるための施設高さを算定する目的ではなく，リスク評価段階ではより簡易的なレベル湛水法で推定することもできる．レベル湛水法は，陸域において物理的な氾濫計算は行わず，沿岸部に襲来する津波高さを基に算定する手法であり，概略的な計算には適している．

3.3.2. 背後地の土地利用状況の推定

従来の治水事業や海岸事業の費用対効果分析では，浸水想定範囲における現状の資産分布を対象に想定被害額を算定することとされている．しかし，東日本大震災を契機として，沿岸部の土地利用の見直しが進められており，津波浸水想定区域図が公表され，津波リスクが周知されることによって，人や企業は内陸部へ転出の活発化や，新たに沿岸部への転入の減少などによって，沿岸部の土地利用が変化することが想定される．また，地域の取組により高台移転や建築規制等も進むことで，沿岸部の土地利用は大きく変わる可能性がある．そのため，今後，整備する海岸堤防は，背後地の土地利用も踏まえた上で堤防高や，整備優先順位を設定する必要がある．

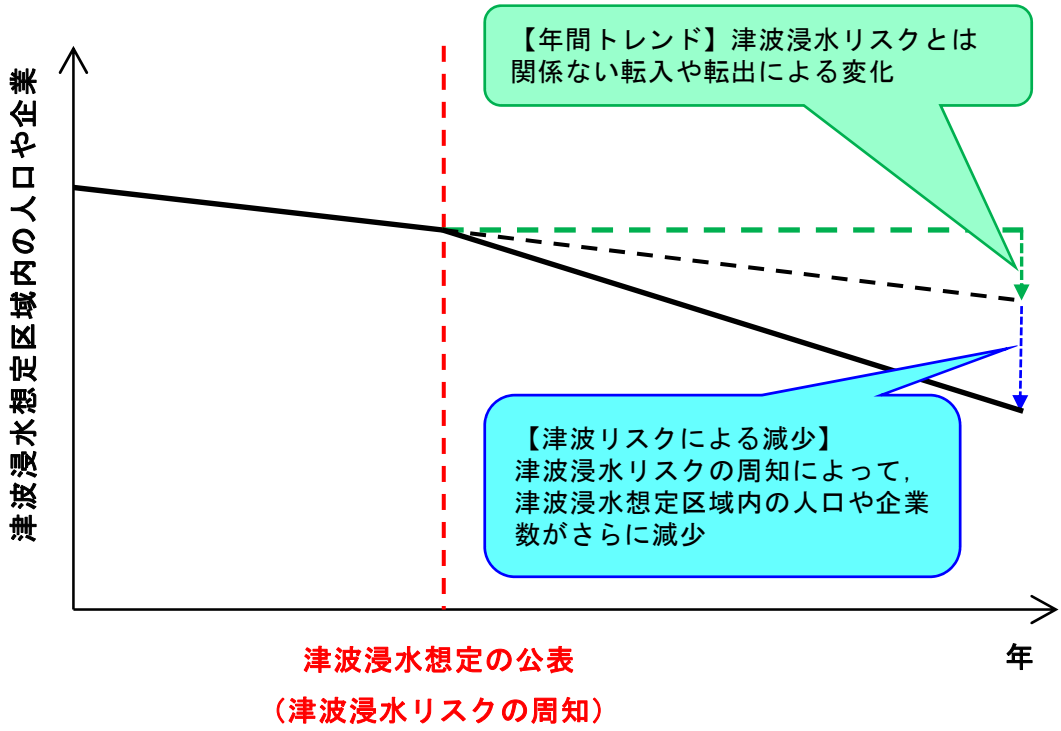


図 3.5 津波浸水想定区域内の人口や企業数の変化のイメージ

【対象資産】

土地利用状況として次の資産について，将来の変化数量を推定する．

・家屋（床面積）
・家庭用品（世帯数）
・事業所償却・在庫資産（従業者数）
・農漁家償却・在庫資産（農漁家世帯数）

計算条件（初期水位，堤防高）ごとの最大浸水範囲及び最大浸水深のデータを用いて，下記の式により各メッシュの人口や企業数を推計することとする．

$$N_{rt} = a + b_r + c_t - e \cdot D_{rt} + \varepsilon_{rt} \tag{3.2}$$

ここで，N_{rt}：t 時点の r 地点の人口あるいは企業数，a：定数，b_r：地域の固有効果（個別効果），c_t：時間項，e：津波リスクによる変化を示す係数値，D_t：t 時点における r 地点の主観浸水深（浸水深の値もしくは，浸水ありなしなどの 1，0 のダミー変数），ε_{rt}：誤差項で正規分布に従うと仮定する．

南海トラフ沿いの各県について，平成 13 年～17 年の津波浸水想定図の公表について企業立地の変化について分析を行った結果，以下の傾向が見られる．

- 【建設業】，【製造業】，【卸売・小売業】，【宿泊業・飲食サービス業】，【生活関連サービス業・娯楽業】において，浸水リスク公表の結果，企業数が減少傾向にある．これらの浸水リスクに対する立地変化の感度が高い産業は比較的広いエリアの需要に対して成立している産業であり，浸水リスクを避けるため移転，あるいは操業の取りやめを行ったことが想定される．
- 【学術研究・専門・技術サービス業】，【教育・学習支援業】，【医療・福祉】は，浸水深公表に対する影響はほぼない．これらの感度の低い産業は，比較的狭い近隣エリアの需要を対象とした産業であり，地域住民が利用しているため立地を維持していると考えられる．

3.3.3. 浸水深に応じた被害軽減期待額の推定

資産被害額や人的被害額を浸水深に応じた被害率を用いて算定するものとし，公共土木施設等は一般資産被害額との比率や単位面積当たり被害額を用いて算定するものとする．

本ガイドラインでは，被害軽減期　待額を算定する際に使用する資産データは**表 3.3** を基本とする．

表 3.3　被害軽減期待額を算定する際に使用する資産データ等

No.	資産データ	データの入手先の例	備考
①	延床面積	基盤地図情報（国土地理院）	「建物被害」の算定に使用
②	家屋 1m^2 当たりの単価	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「建物被害」の算定に使用
③	世帯数	「国勢調査結果」を現況とし，浸水リスクに伴う人口変化を反映して設定	「家財被害」，「家庭における応急対策費用」の算定に使用
④	家庭用品評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「家財被害」の算定に使用
⑤	1 世帯当たりの応急対策費用	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「家財被害」の算定に使用
⑥	被災事業所従業者数	「経済センサス」を現況とし，浸水リスクに伴う企業立地変化を反映して設定	「事業所在庫資産被害額」，事業所償却資産被害額」，「営業停止・停滞損失額」の算定に使用
⑦	従業者 1 人当たり在庫資産評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「事業所在庫資産被害額」の算定に使用
⑧	従業者 1 人当たり償却資産評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「事業所償却資産被害額」の算定に使用
⑨	浸水深別の 1 事業所当たりの代替活動費	「水害以外推計手法の高度化に関する研究，多田直人　博士論文 2014」	「営業停止・停滞損失額」の算定に使用

津波対策により人々が津波によって亡くなるリスクを減少させることができる．人的損失の定量的評価については，浸水深や避難率等を用いた被災者の推定により，異なる想定条件の相対的評価を行うことができるが，これに加え「統計的生命価値（Value of Statistical Life）」を用いて死亡リスクの軽減の経済価値を算出することもできる．ある津波対策の死亡リスク軽減の経済価値は下式で求められる．

$$B = S \times \Delta n \tag{3.3}$$

S：統計的生命価値

Δn：津波対策によって減少する死者数の期待値

統計的生命価値は，死亡リスクの微小な減少（例：10 万分の 1 の減少）に対する支払意思額を，減少リスクが 1 となるまで集計（例：10 万人で集計）した金額である．統計的生命価値は一人の命の経済価値を示すものではなく，死亡リスク（すなわち確率的事象）の軽減に対する評価値を示すものである．

本ガイドラインでは，国土交通省(2009)「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」に従い，内閣府(2007)で推定された 2.26 億円を調査実施年である 2006 年の統計的生命価値とする．

事業評価時には，この 2006 年の統計的生命価値を，物価上昇と実質所得の成長を考慮して事業評価を行う年に調整する．

4. 総合評価に基づく整備計画

複数の整備計画の候補案（代替案）を，算定した費用と便益に基づく経済的効率性のみならず，海岸の持つ多様な機能への配慮，環境保全，周辺景観との調和，維持管理の容易性，施工性，公衆の利用，避難体制及び土地利用等を総合的に考慮して整備計画を定める．

（解説）

代替案毎の経済性評価や，施設整備が及ぼす景観や利用等への影響，避難体制及び土地利用の状況を総合的に評価した上で，地域の合意形成を図りながら最終的な整備計画を策定することとする．整備計画には実施箇所や海岸堤防等の高さに加えて，目標とする整備期間などを明記した上で，5 年程度の間隔で実績と比較して評価し，整備計画の見直しを行うことが望ましい．

整備計画の策定にあたって地域の合意形成を図る上では，①確率的ハザード解析の分析には不確実性があること，②景観や利用等は定量化が難しいこと，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，最適堤防高さ H^*を一義的に推奨するのではなく，不確実性のあるパラメータを変動させたり，定量化が難しい内容については定量化を行わずに代替案の中で定性的に示すことなどにより，客観的・合理的な代替案を示し堤防高の設定が行われることが重要である（**図 4.1**）．

総合的な評価にあたっては，それぞれの対策が実現・完了し効果が発現するまでの時間には対策によって差があることに留意する必要がある（**図 4.2**）．例えば，海岸堤防の整備には予算的な制約もあることからその実現には 10 年を超える期間を要することがある．避難対策は海岸堤防等の整備に比べて早期に効果が発現する可能性はある一方，住民への教育・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．また，既成市街地の住居の高台等への移転や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期間を要することもある．設定された高さの海岸堤防が整備されたとしても，避難体制や土地利用の状況によってリスクが残ることを住民に周知すべきことに留意する必要がある．

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。

	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			R_T	高潮被害想定			R_S	建設管理 C	外部性 E	移転改築 L	避難対策 V	津波被害想定		
	T_{50}	T_{100}	T_{150}		S_{50}	S_{100}	S_{150}						T_{150}	T_{200}	T_{500}
選択肢① 堤防高：H_0＋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_0 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_0－1m 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_0－2m 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_0－2m 高台移転：100軒	300	400	500		200	250	300		60	5	100	30	30	50	100

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_T、R_S）、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 4.1　堤防高・土地利用・避難の総合的評価（感度分析）のイメージ

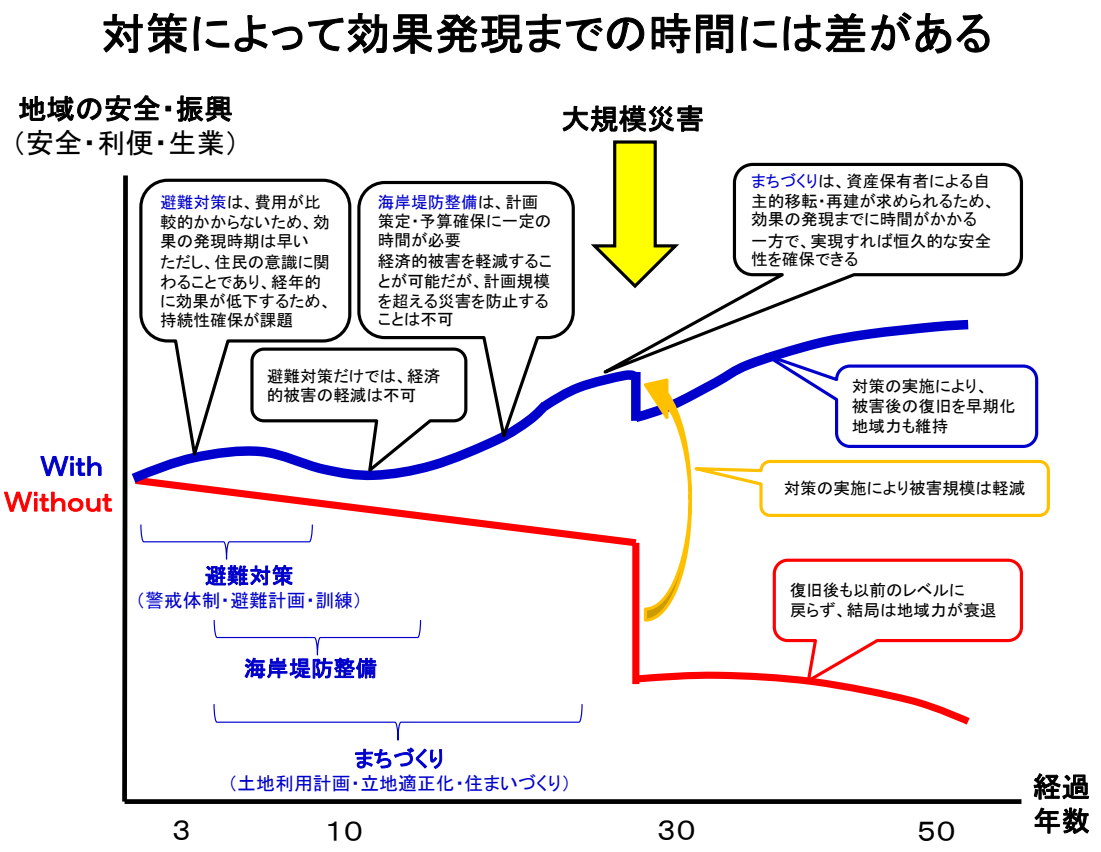


図 4.2　対策の実現・完了による効果の発現までの時間差のイメージ

第2編 方法編

5. 確率的津波水位の設定

5.1. 津波水位の確率分布の推定方法

津波水位の確率分布は，地震によるすべり分布を確率的に生成して，津波の伝播計算を行なって求めるランダムフェーズモデルと，認識論的不確定性を含めるためのロジックツリーアプローチ等が知られる．ランダムフェーズモデルで生成されるシミュレーション結果は，偶然的不確定性そのものであるため，本ガイドラインでは，ランダムフェーズモデルで得られるマグニチュード毎の津波水位の確率分布をロジックツリーアプローチに組み込んだ手法，すなわち，coRaL 法（a method of incorpolating Random phase model into Logic tree）を提案する．

（解説）

本ガイドラインで提案する coRaL 法の利点は，偶然的不確定性として，ランダムフェーズモデルによる津波のアンサンブルシミュレーションの結果を用いることにより，認識論的不確定性を含めたロジックツリーアプローチをより合理的なものへと再構築できるためである．このことは，単純に，ロジックツリーの分岐の１つを置き換えるようなものではなくて，偶然的不確定性と認識論的不確定性を整理し，発生頻度と津波高の関係を表す曲線を，従来は想定する地震毎に与えていたものを，coRaL 法では，マグニチュードの階級毎に与える点が大きく異なる．

ランダムフェーズモデルによる津波のアンサンブルシミュレーション，ロジックツリーアプローチならびに，これら 2 つを融合させた新しい手法（coRaL 法）の要点を **5.1.1** に整理し，既往の手法として，**5.1.2** にはランダムフェーズモデルの詳細を，**5.1.3** にロジックツリーアプローチの詳細をまとめ，**5.1.4** には，ランダムフェーズモデルによる偶然的不確定性の評価をロジックツリーアプローチに組込むことにより，より合理的な手法となる coRaL 法を具体的に紹介する．以下では，そのポイントのみを紹介しておく．

coRaL 法では，偶然的不確定性をランダムフェーズモデルの結果を用いることにより，分岐の本数が大幅に減ることで，得られる結果の意味が明解となり，より論理的になると言える．すなわち，分岐は，平均発生間隔とマグニチュードの階級の 2 段のみとなり，これを津波高毎のパーセンタイルで，来襲頻度を求めることになる．そのため，設定したパーセンタイルに対し，来襲頻度に対応する津波の最頻となる条件が，どのような平均発生間隔とマグニチュードの階級の組み合わせに相当するものか，という確認も可能となる．なお，このことは，ランダムフェーズモデルでのアンサンブルシミュレーションのサンプルサイズの議論にも関わるところとなる．従来のロジックツリーアプローチで，パーセンタイルは，50%（再現期間の中央値），16%や 84%（再現期間の対数値のとりうる範囲を正規分布と仮定したときの 1 シグマ），5%，95%などにとっており，coRaL 法でも，これを踏襲することとする．また，場合によっては，パーセンタイルではなく，超過確率の総和を使う場合もある．すなわち，不確定性の幅を検討する場合には，パーセンタイルを用い

るが，その不確定性を考慮して，超過確率をツリーの枝で総和をとって，津波高と発生確率（頻度）の関係を 1 つの曲線で表したものが，不確定性を内包したハザードカーブとなる．

ロジックツリーアプローチで偶然的不確定性として扱われてきたものは，津波の伝播計算に伴う不確定性があり，これは相田 (1977) の κ を用いた対数正規分布で与えられている．これを踏まえ，coRaL 法では，マグニチュードの階級毎のランダムフェーズモデルで生成される津波高の経験超過確率分布(単調減少するステップ関数)の各々のステップに，打切りありの対数正規分布を適用することで，津波の伝播計算に伴う不確定性を取り込んでいる．なお，ランダムフェーズモデルで生成されるすべり分布のうち，地震調査研究推進本部 (2020) にならって，深部領域の大すべり域を設定しないものとして除外し，より現実的な扱いとなるようにしていることも付記しておく．

平均発生間隔には，南海トラフ域での地震発生の単純平均発生間隔，次に起こる地震の時間を予測できると仮定した発生間隔，そして，GR 則に基づく発生間隔の 3 つを用い，地震階級毎の重みについては，GR 則による各階級に占める割合を用いる．GR 則のパラメータ a と b には，さまざまな提案があるが，その違いについては，それらを置き換えたことによる感度分析にとどめ，GR 則の違いによるものはツリーの分岐に加えない．coRaL 法において，分岐数を増やさないことは，結果の理解にとって重要と考える．

5.1.1. 推定方法の概要

ここで検討するランダムフェーズモデル，ロジックツリーアプローチ，またこれらモデルのメリットを採用し，デメリットを克服した本ガイドラインで提案する coRaL 法（a method of incorpolating Random phase model into Logic tree）の各手法の概要，メリット，デメリットを**表 5.1** に示す.

表 5.1　各手法の概要

推定方法	概要	メリット	デメリット
ランダムフェーズモデル **(5.1.2** 節**)**	・地震断層のアスペリティ分布および M_w を乱数によりランダムに生成するモデル	・地震断層のアスペリティ分布および M_w を人為的に設定することなくランダムに生成できる	・地震断層のアスペリティ分布および M_w の変動以外の不確定性を考慮するのが難しい
ロジックツリーアプローチ **(5.1.3** 節**)**	・津波ハザード評価に伴う認識論的不確定性，をロジックツリーにより補足して評価するアプローチ	・津波ハザード評価に伴う多様な不確定性を考慮できる	・国内で採用される手法では主に，１つの津波波高の解析値を，モデル化誤差を表現する対数正規分布の中央値として扱う仮定を置いてハザード曲線を生成するため，数値計算による多数の解析値，一つ一つの情報が薄れてしまう
coRal 法 **(5.1.4** 節および付録 B**)**	・ランダムフェーズモデルで生成された地震断層のアスペリティ分布を利用し，その他の認識論的不確定性はロジックツリーにより評価するモデル	・地震断層のアスペリティ分布および M_w を人為的に設定することなくランダムに生成できる ・数値計算による多数の解析値をそのまま経験分布関数として取り扱うことで，解析結果を効果的に利用できる	

5.1.2. ランダムフェーズモデル

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り，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．設計津波の水位の設定方法は，実績・想定津波高から L1 津波群を設定して，海岸管理者が経済性や環境保全，周辺景観との調和等を総合的に考慮して決定するとされているが，防災面を重視した結果，決定論的に L1 津波群の最大値が採られる傾向にある．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いる．防潮堤による被害軽減額の期待値を計算するためには，津波の確率評価が必要である．確率論的アプローチを用いて，丸山ら (2017) は Goda et al. (2016) によるランダムフェーズモデルに地震規模も変数として捉え，地震のスケーリングを考慮し，静岡県を対象に 0.2 刻みで Mw 7.8 から 9.0 の範囲において, 津波高の確率評価を行った．安田ら (2020) は，ランダムフェーズモデルを用いて津波計算をし，徳島県沿岸の確率津波水位を推定するとともに，すべり分布の個数が津波の超過確率分布に及ぼす影響を評価し，再現期間を算出して，設計津波水位・津波浸水想定と比較した．また，地震調査委員会 (2020) は，2017 年に策定した津波レシピ「波源断層を特性化した津波の予測手法」に基づいて確率論的な津波評価を行い，今後 30 年以内の津波高の超過確率を示した．今後の津波対策の議論は，決定論から確率論に変わっていくと期待できる．

ランダムフェーズモデルは，Goda et al. (2016) によるスケーリング則を用い，ランダムにすべり分布を生成し，Okada (1985) により初期水位分布を求め，津波伝播計算を行う一連のモデルである．

(1) モデルパラメータ

確率すべり分布を生成する際に考慮するモデルパラメータは, 大きく分けて 4 種類ある．

i) 断層パラメータのスケーリング特性である断層長 L (m)，断層幅 W (m)，および面積 S (m^2),
ii) すべり統計パラメータである平均すべり量 D_a (m)，最大すべり量 D_m (m)，Box-Cox パラメータ λ,
iii) 空間すべり分布パラメータである傾斜方向の相関長 A_z (km)，走行方向の相関長 A_x (km)，ハースト指数 H,
iv) 力学的パラメータである破壊伝播速度 (m/s)，ライズタイム (s),

である．これらのパラメータは，不確定性を表すためにランダム変数として扱う．

(2) スペクトル解析

確率すべり分布を生成するためには，空間相関性を考える必要がある．波数スペクトル解析を行うことで，空間的相関性を考慮する．スペクトル解析は，逆解析すべり分布毎に行う．すべり分布に対して二次元フーリエ変換を行い，傾斜・走行方向の波数パワースペクトル分布を推定する．そして，中心から放射状にパワースペクトルの平均値をとり

(circular average)，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，この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ハースト指数の関係式を示す．

$$P(k) \propto \frac{A_z A_x}{(1+k^2)^{H+1}} \tag{5.1}$$

ここで，P は波数スペクトル，k は波数 $(=A_z^2 k_z^2 + A_x^2 k_x^2)^{0.5}$，$A_z, A_x$ は傾斜・走向方向の相関長，H はハースト指数である．circular averageの理論式への適用に関しては，H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とAの値の組み合わせを模索して決定する．また，circular average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理論式を採用する．

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換し，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．

$$y = \frac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} \tag{5.2}$$

ここで，x は変換前のすべり量，y は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．定められた λ を用いれば，Box-Cox 変換およびその逆変換が可能となるため，すべり分布における正規分布と非正規分布の相互変換操作を行うことができる．

(3) すべり量の確率的合成

合成されたすべり分布が望ましいアスペリティ特性を確実に有するように，複数の候補すべり分布が生成され，パターンマッチングの基準を満たしているかどうかを評価して，1つのすべり分布を生成する．そして，物理的基準に基づいて，非現実的に大きいすべり値を再サンプリングする．

(4) 動的断層破壊プロセス

断層破壊点は，Mai et al. (2005) により経験的に求められた確率モデルに従って決める．震源位置の確率密度関数も，Mai et al. (2005) によって開発された統計モデルに基づいて定義する．震源位置の予備PDFは，断層の大きさと平均すべり率，最大すべり率に基づいて決める．

(5) スケーリング則

Goda et al. (2016) は，地震規模（マグニチュード）との関係性を調べ，線形回帰分析を行うことで，地震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．このスケーリング則を用いて，M_w に応じた相関長，ハースト指数，最大すべり量，平均すべり量を設定し，確率すべり分布を多数生成する．

(6) 確率すべり分布の作成

表 5.2 GR 則による各 M_w の地震発生頻度の密度

M_w	発生頻度の密度
8.0	0.1175
8.2	0.0682
8.4	0.0396
8.6	0.0230
8.8	0.0134
9.0	0.0078

M_w = 7.9～9.1の範囲で0.2刻み毎に6つのM_wそれぞれに対して確率すべり分布を生成する．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 (GR則) が主に用いられる．丸山ら(2017) は，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・リヒター式を求めた．信頼データを考慮して1976年～2016年の約40年間，地震の最小M_w は5.0で，海溝型地震に限定して分析を行い，次式を得ている．

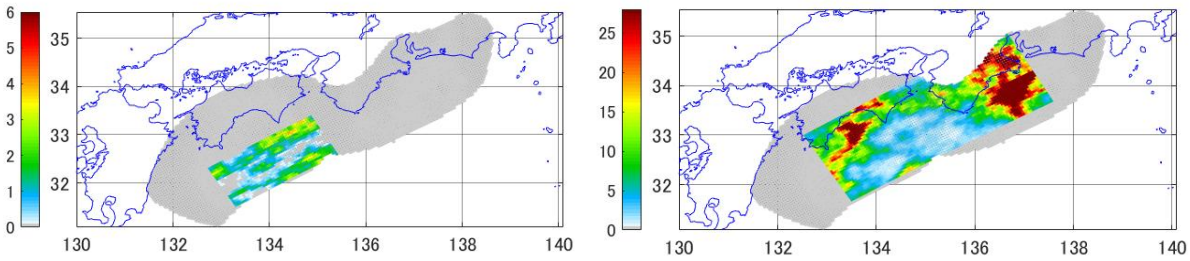
$$\log_{10} f = 6.31 - 1.03 M_w \tag{5.3}$$

ただし，この式は，Gutenberg, B. and C. F. Richter (1941) と同様に，M_w 0.1刻みの地震の発生数で求められている．この式を地震の発生頻度の密度 n で表すと次式となる．

$$\log_{10} n = 8.51 - 1.18 M_w \tag{5.4}$$

ランダムフェーズの M_w 0.2 刻みに合わせるように，式(5.4)を M_w 0.2 刻みで積分した発生頻度は**表 5.2** のようになる．

すべり分布の断層幅，断層長を変化させ，アスペリティ領域に関しては，ケースごとにランダムに位置するように定める．**図5.1**に生成された確率すべり分布の例を示す．左のカラーバーはすべり量を表しており，地図上の灰色の部分は，中央防災会議 (2012) が公表している南海トラフ巨大地震の想定震源断層域である．**図5.1 (a)**と**(b)**より，M_w 毎にアスペリティ領域の位置，断層長，断層幅がランダムな値を取っていることが確認できる．



(a) M_w 8.0　　(b) M_w 9.0

図 5.1.1 確率すべり分布の一例（カラーバーの単位：m）

(7) 津波伝播計算

各震源の断層パラメータから Okada (1985) を用いて初期水位分布を計算する．そして，初期水位分布を用いて，非線形長波理論に基づく計算コードで津波伝播計算を行う．ネス

ティングもしくはアダプティブメッシュで沿岸での津波水位時系列を計算する．ここでは，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．

(8) ハザードカーブの作成

ある地点を対象に，すべり分布の数を全 M_w で 300 ケースとした場合の解析結果を，一例として示す．津波水位の正規化した確率密度分布を**図 5.2** に示す．M_w が大きくなるにつれて分布が広がり，出現頻度のピークが津波水位の高い方に移動しており，大きな M_w ほどより高い津波が来る確率が高くなっていることが示されている．

津波ハザードカーブの作成手順は，まず，正規化した各 M_w の確率密度分布を津波水位方向で積分する．そして，各 M_w の地震発生頻度の密度（**表 5.2** 参照）から発生頻度を求め，超過確率分布を求める．この超過確率分布を津波ハザードカーブ（**図 5.3**）と呼び，横軸は津波水位，縦軸は超過確率を表す．この津波ハザードカーブを用いることにより，その地点における，ある再現期間で発生する津波水位を求めることができ，沿岸の津波ハザードを確率的に解釈することに有用となる．

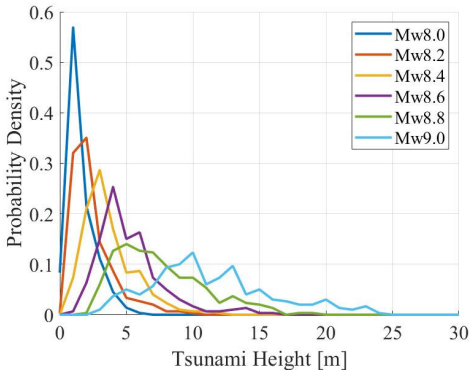


図 5.2　津波水位の確率密度分布

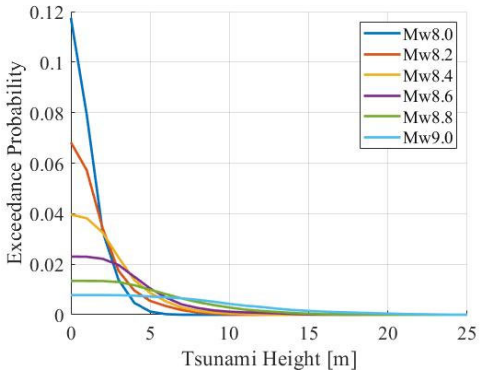


図 5.3　津波ハザードカーブ

(9) 確率津波水位の推定

確率津波水位を推定するために，正規化した確率密度分布に地震発生確率を掛け，得られた確率密度関数をM_w方向で積分し，津波水位の発生確率を求める．その確率分布を津波水位方向に積分した値が，M_w8.0～9.0の年発生確率になるように調整する．式(2.1.4)のGR則を用いて，M_w8.0以上の地震発生確率とM_w9.0以上の地震発生確率を求め，前者の値から後者の値を引けば，M_w8.0以上M_w9.0以下の地震発生確率は0.0404と計算できる．調整後の確率密度分布から求めた超過確率分布を**図5.4**に示す．この地点での100年確率津波水位は約 4.2 m，1000年確率津波水位は

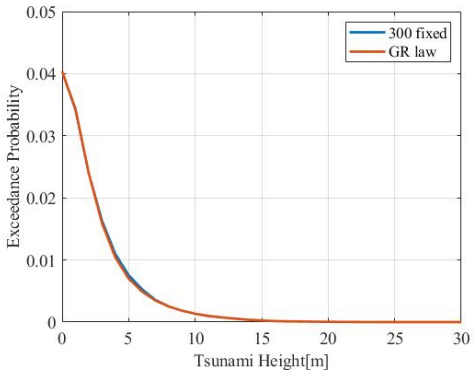


図 5.4　津波水位の超過確率分布

約 10.9 mと推定できる．また，表**5.2**のGR則による発生頻度の密度に応じて，各M_wでの確率すべり分布を3200，2000，1200，800，500，300ケースとした場合と，全M_wで300ケースで固定とした場合の違いはほとんどないことがわかる，

(10) 設計津波水位との比較

図5.5に，設計津波水位が公開されている地点で推定した再現期間を示す．現況堤防高の幅も併せて示す．1-I では再現期間が約3000年と極端に大きくなったため，図示されていない．全般的に，再現期間の推定結果は200～500年程度で，レベル1津波の定義よりやや大きくなった．県中部や南部の現況堤防高が不足している地点（中部: 1-K, 1-L; 南部: 1-W ~ 1-Y）の再現期間はかなり長いという結果が得られ，地域海岸のレベル1津波群の最大値を採ることで，設計津波水位が高めに設定された可能性が示唆される．

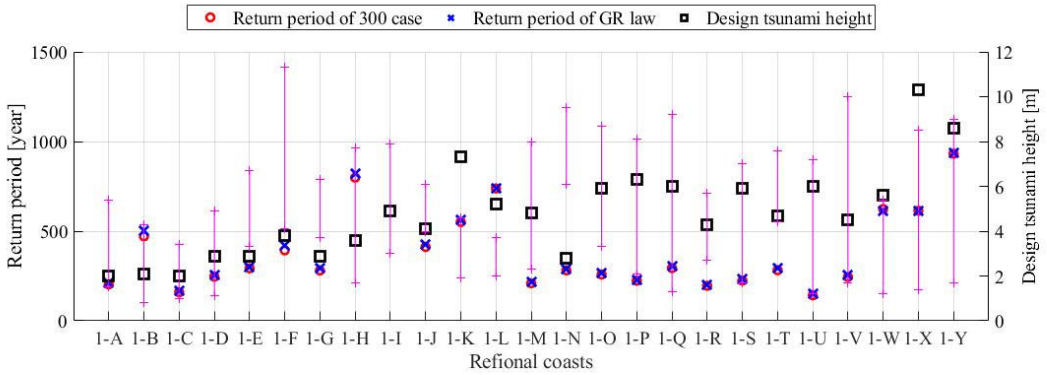


図 5.5 ランダムフェーズモデルによる津波の再現期間および設計津波水位と現況堤防高の関係（赤：全 Mw 300 ケース，青：GR 則に基づくケース数，黒：設計津波水位，ピンク：現況堤防高の幅）

5.1.3. ロジックツリーアプローチ

確率論的津波ハザード評価研究の黎明期である 2000 年初頭には，Geist (2002, 2005), Geist & Parsons (2006)，Annaka et al. (2007) 等の研究があり，津波ハザードの考え得る不確定性の要素を認識論的不確定性（Epistemic uncertainty）と偶然的不確定性（Aleatory variability）に分類して評価する枠組みが提案された．この枠組みは，Cornell (1968) 等に代表される 1900 年代半ば頃から進展してきた確率論的地震動予測（PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Analysis）の議論に端を発している．United States Nuclear Regulatory Commission (2002) では，認識論的不確定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定性であり，偶然的不確定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定性である，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，**図 5.6** に示す通り，認識論的不確定性をロジックツリーにより評価し，偶然的不確定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. 2020 年には，地震調査研究推進本部 (2020) が，南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価を実施し，同様に，ロジックツリーを用いた手法が採用されている．本節では，これまでの土木学会原子力土木委員会が提案するロジックツリー手法を踏襲し，ランダムフェーズモデルで生成された多数の断層を認識論的不確定性の一つとして考えた場合の津波ハザードを確率論的に評価することを目的とする.

まず, 南海トラフ巨大地震を対象として構築したロジックツリーを**図 5.7** に示す. 以下，ロジックツリーの各分岐の概要を記載する.

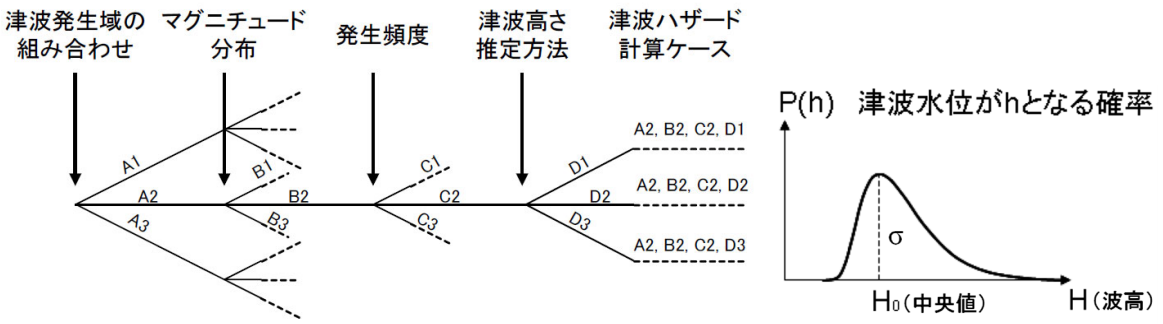


図 5.6 (a)認識論的不確定性のロジックツリーによる評価と(b)偶然的不確定性の確率分布による評価．土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)より抜粋，一部，改変．

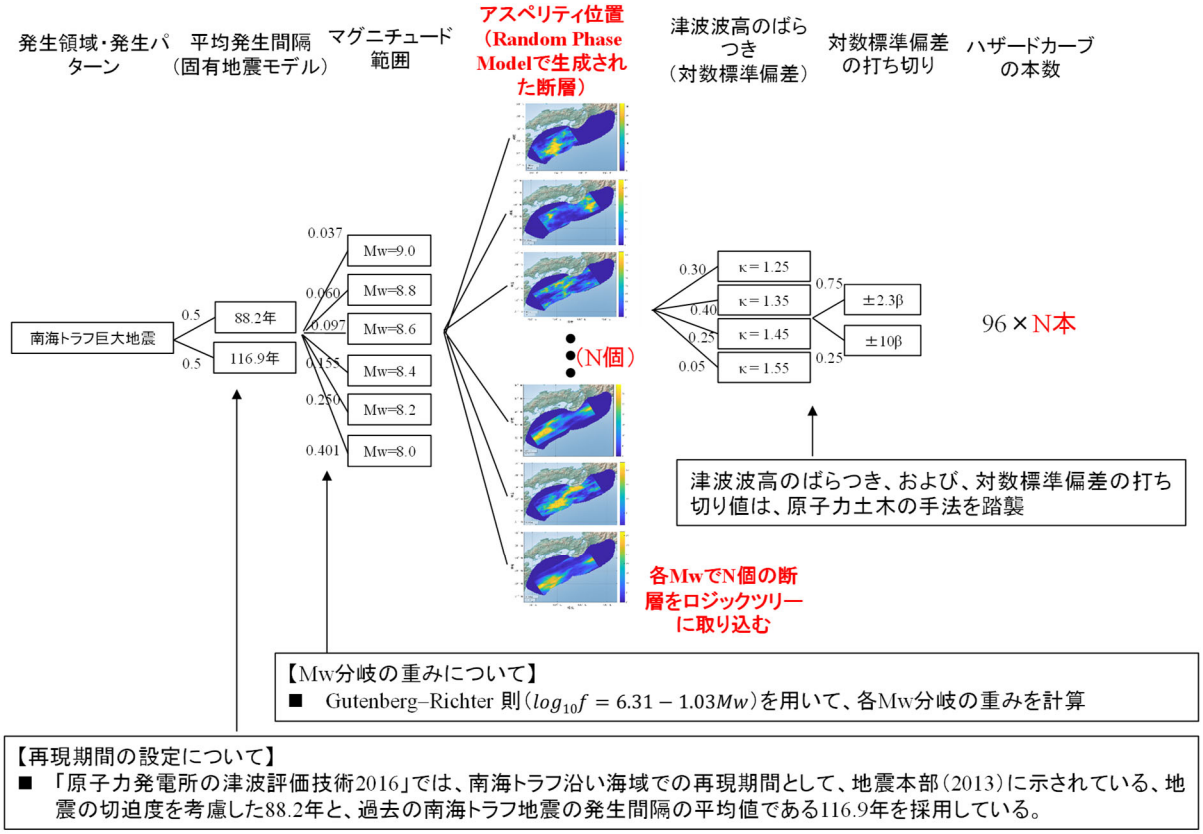


図 5.7 南海トラフ巨大地震を対象として構築したロジックツリーアプローチ

- 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とした．
- 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．南海トラフ域で発生した過去の地震の発生間隔の単純平均を計算すると 116.9 年となる．一方，前回の地震の規模（すべり量）から，次の地震までの発生間隔が予測できると仮定し，高知県室津港における南海地震時の隆起量と地震発生間隔との関係から評価された 88.2 年をもう一つの分岐として設定した．前者を「単純平均モデル」，後者を「時間予測モデル」と呼ぶ（地震調査研究推進本部, 2013）．

- マグニチュード範囲については，M_w 8.0～M_w 9.0 を M_w 0.2 刻みにした 6 つの分岐を設定した．
- アスペリティ位置については，各 M_w でランダムフェーズモデルから生成されたアスペリティ分布を N 個取り込むように設定した．別途，N の違いによる結果への影響を考察したが，150 年確率波高で，N=100 と N=50 の比較では最大 0.15m，N=100 と N=10 の比較では最大 0.6m 程度の誤差が出ることが分かった．
- 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した．

以上の設定により，ハザードカーブの本数は全部で 2×6×N×4×2＝96N 本となる．次に，各分岐の重みについて記載する．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．

- 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（1/2）とした．
- マグニチュード範囲の重みについては，Gutenberg-Richter 則に基づき，それぞれ 0.401 (M_w 8.0)，0.250 (M_w 8.2)，0.155 (M_w 8.4)，0.097 (M_w 8.6)，0.060 (M_w 8.8)，0.037 (M_w 9.0) とした．
- アスペリティ位置の重みについては，ランダムフェーズモデルで生成されたランダムなアスペリティ分布を用いているので，等分の重み（1/N）とした．
- 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も，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た．

ランダムフェーズモデルで生成された地震断層モデル（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，徳島県沿岸部を対象として津波数値計算を実施した．津波数値計算結果から，偶然的不確定性を表現する対数正規分布を用いて，鳴門市沿岸を対象として各ロジックツリー分岐で評価した津波ハザードカーブを**図 5.8** に示す．ここではランダムフェーズモデルでの断層数 N=100 としたので，ハザードカーブの全ての本数は 96×100＝9,600 本となる（**図 5.8** 右上図参照）．これより，ロジックツリーの各分岐の重みに基づき，各パーセンタイル点でのハザードカーブを抽出したのが**図 5.8** 右下図となる．

図 5.9 に県沿岸部での各地点における 150 年確率の津波波高を， 5 パーセンタイル値，50 パーセンタイル値（中央値），95 パーセンタイル値で推定した結果，および，設計津波水位（L1 想定）の比較を示す．1-A～1-N の北部地域に掛けては，設計津波水位は，95 パーセンタイル値と比較しても，平均して 1.9 倍程度高く，150 年確率で考えるなら，かなり

高めに設定されている状況である．1-O～1-Y の南部地域は太平洋側に直接面しており，波高の不確定性が特に大きい．設計津波水位は，1-X・1-Y を除き，概ね 95 パーセンタイル値の中に入っているものの，50・84 パーセンタイル値と比較しても，高く設定されている状況である．

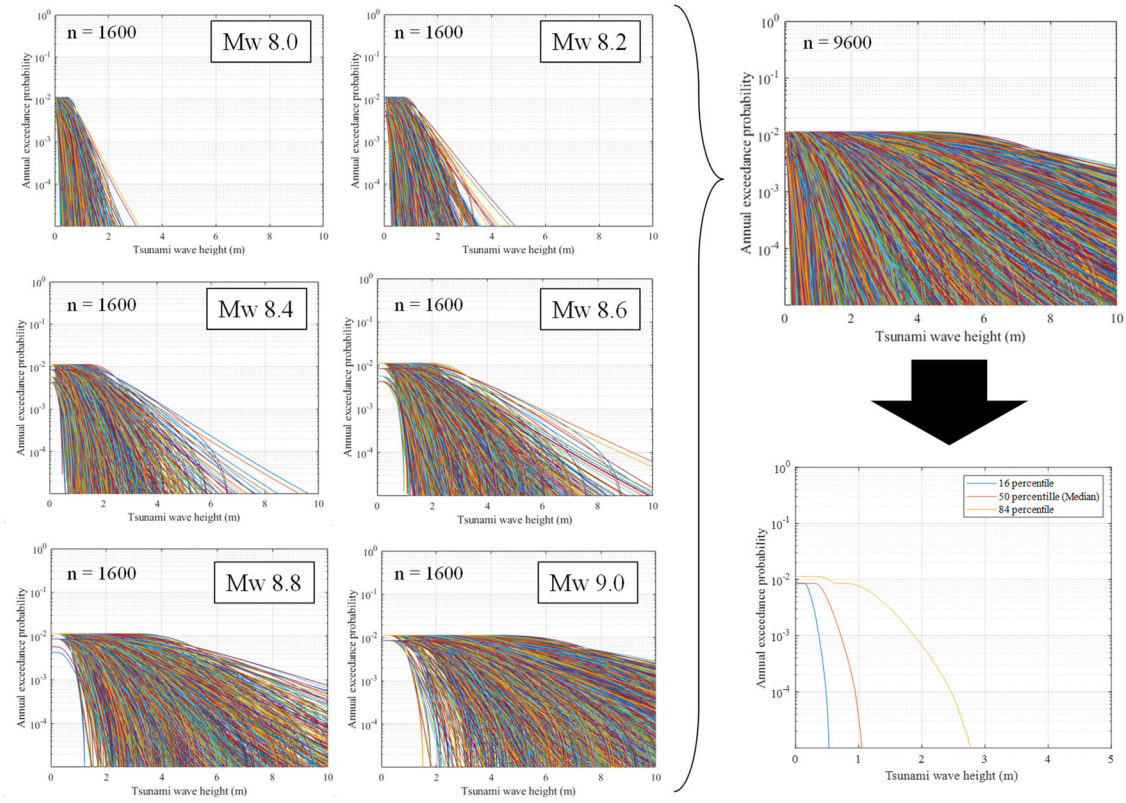


図 5.8　沿岸の一地点を対象として各ツリーの分岐で評価した津波ハザードカーブ

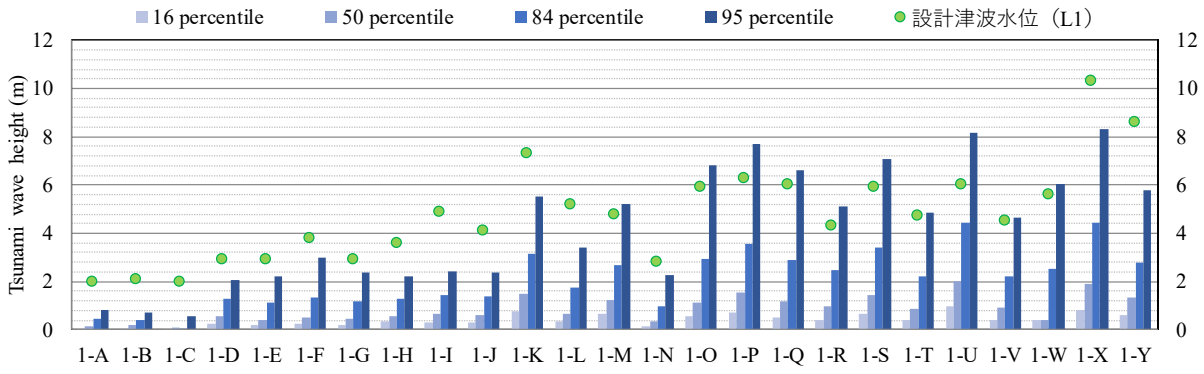


図 5.9　設計津波水位と 150 年確率波高の比較（青系色：各パーセンタイル点での 150 年確率波高，緑色：設計津波水位（L1 想定））

5.1.4. coRaL 法（a method of incorpolating Random phase model into Logic tree）

本節ではまず，ランダムフェーズモデルによって，ランダムに多数生成された地震断層のうち，地震学的観点から発生し得る地震断層の特定を行う方法を概説した後，coRaL 法の基本的考え方と具体的な計算手法を概説する．

(1) 南海トラフ域で発生し得る断層の特定

ランダムフェーズモデルで多数生成された地震断層上の滑り分布は，過去の巨大地震の滑り分布のデータから，空間相関を評価し，平面の滑り分布をランダムに決定している．しかしながら，南海トラフで発生する巨大地震の震源領域は，プレート境界の固着状態等によって，ある程度限定されることが想定できる．**図 5.10** は，地震調査研究推進本部（2013）が示す南海トラフで発生する地震の震源域の類型化である．これによると，南海トラフ域を浅部（0 km-10 km），中部（10 km-25 km），深部（25 km-）の 3 領域に分割し，浅部は滑りが生じると大きい津波が発生する領域，中部は従来大地震の震源域になると評価されてきた領域，深部は深部低周波地震の発生領域である，と示している．このような類型化のもとで，地震調査研究推進本部（2020）では，深部領域は深部低周波地震の発生領域として，ひずみが解放されていることが有り得ると考え，大滑り域を設定しないこととした，としている．本研究においても，この設定を踏襲し，ランダムに生成された地震断層の滑り分布から，断層深部（25 km 以深）に平均すべり量の 2 倍を超えるすべり域（大すべり域）があれば，それを除外して，評価することとした．これにより，完全にランダムな地震断層ではなく，地震学の知見を活用して，より現実に近い地震断層のみを利用して評価することで，信頼性の高い確率津波ハザード解析を実施することができる．

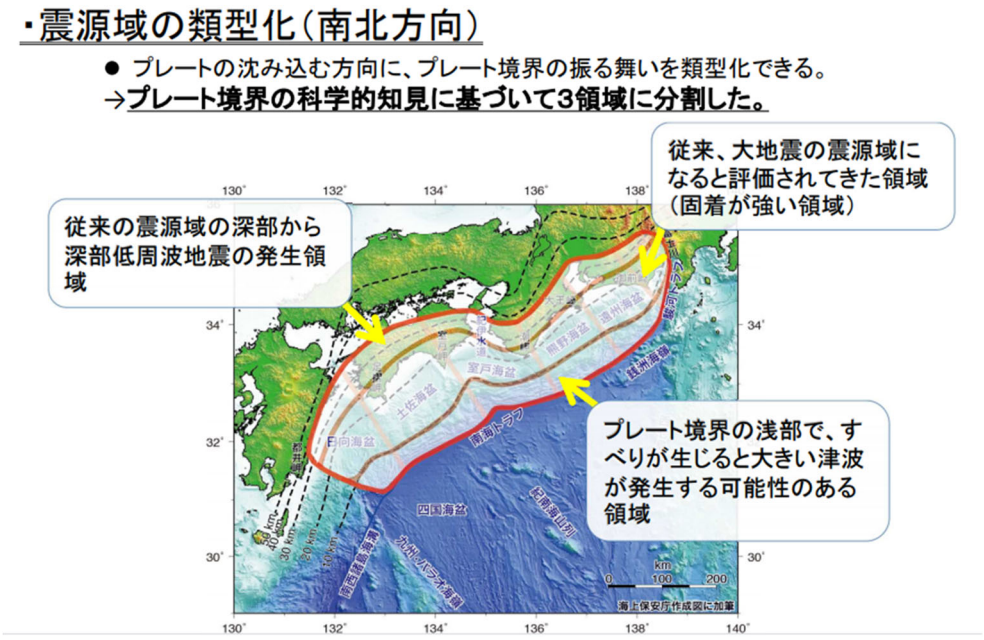


図 5.10 南海トラフ巨大地震領域の類型化（地震調査研究推進本部, 2013）

対象となる地震断層は以下の手順で評価した．まず，断層の M_w を確認し，次式により，断層全体の平均すべり量を算出した．

$$\log M_0 = 1.5Mw + 9.1 \tag{5.5}$$

$$D = \frac{M_0}{\mu S} \tag{5.6}$$

ここで，M_0: 地震モーメント，μ: 剛性率，S: 断層全体の面積である．同じ M_w でも，断層面積が変化するため，平均すべり量も変化する．次に，断層パラメータの情報から，断層深部（25km 以深）に平均すべり量の 2 倍を超えるすべり域（大すべり域）があれば，その面積を計算した．

ランダムに生成した M_w9.0 の 300 ケースの地震断層に対して計算した結果を，**図 5.11** に示す．横軸は，深度 25 km 以深にある大滑り域（アスペリティ）面積の当該断層全体の面積に占める割合，縦軸は，該当する大滑り域をもつ地震断層ケースの全体 300 ケースに対する割合である．これを見ると，深度 25 km 以深に大滑り域が 1%存在する断層は全体の 20.0%，3%存在する断層は全体の 3.7%，5%存在する断層は全体の 0.3%程度となった．ランダムに生成した地震断層の中から，上記手順により特定された地震断層の例を**図 5.12** に示す．図中の黄色がアスペリティ領域であり，南海トラフの深部領域に大滑り域が発生していることが分かる．

以上の手順により，南海トラフ域のプレートの固着状態等を考慮した巨大地震断層の特定を行い，必要に応じて，ランダムに生成した地震断層の中から，特定した地震断層を除外して評価することで，より信頼性の高い，確率津波ハザード解析が可能になると考えられる．

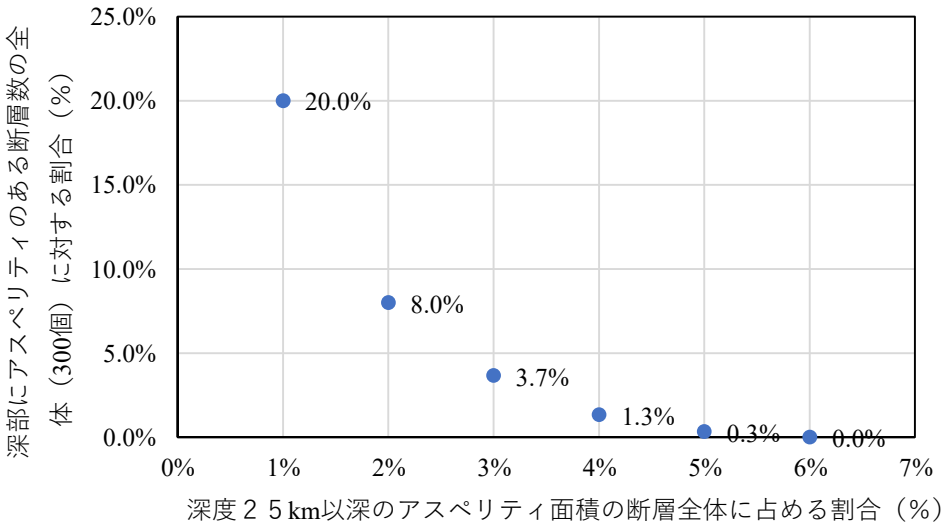


図 5.11　大滑り域（アスペリティ）の面積割合と当該断層の個数割合の関係

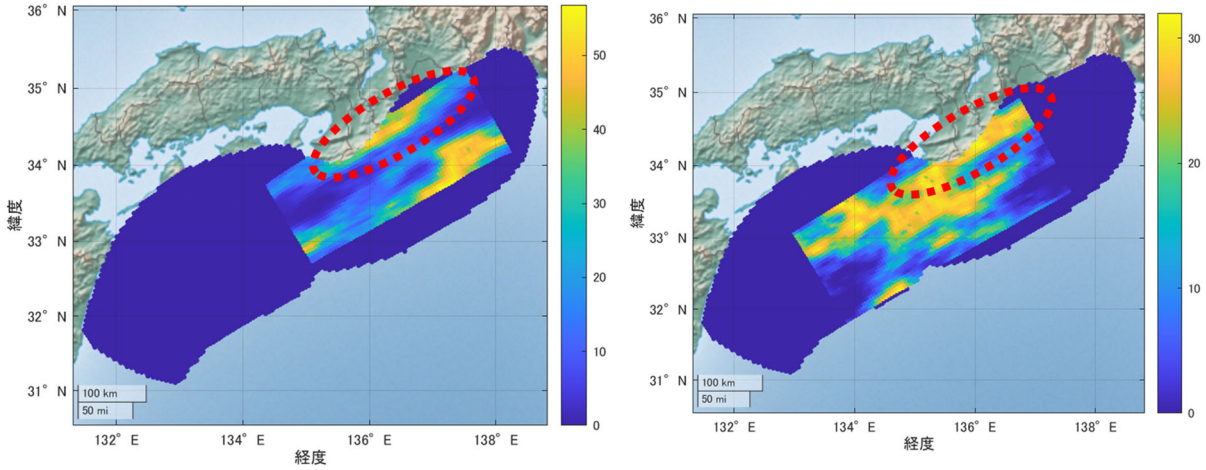


図 5.12　選別された地震波源の例．濃い青色の範囲が南海トラフ巨大地震の全領域．この領域の中で地震断層の滑り分布（アスペリティ分布）がランダムに生成される．青～黄色の範囲はアスペリティの分布を表す．

(2) 確率論的津波ハザード評価手法（coRaL 法）の構築

提案手法は，前述のランダムフェーズモデルにより生成したモーメントマグニチュード（以下，M_w）毎の地震断層を用いて計算した津波浸水深の結果を，認識論的不確定性を捕捉するロジックツリーに組み込むという手法（a method of incorporating Random phase model into Logic tree approach）で評価するため，coRaL 法と名付けた．coRaL 法による確率論的津波ハザード評価の流れを**図 5.13** に示す．

まず，ランダムフェーズモデルにより M_w 毎に考え得る多数の地震断層を生成し，非線形長波方程式を用いて，対象地域の津波浸水深分布を得る．M_w 毎で浸水深の経験分布関数を生成した後，偶然的不確定性を表す切磋対数正規分布を適用し，平滑化する（次節で詳述）．さらに，想定する地震断層の考え得る平均発生間隔を複数設定し，平滑化した経験分布関数と合わせて，津波浸水深と年超過確率の関係である津波ハザード曲線を得る．確率規模毎に浸水深を取得する操作を平面の全メッシュで行うことにより，確率規模毎の津波浸水深分布を得ることができる．

認識論的不確定性であるロジックツリーの分岐として，地震断層の M_w，および，平均発生間隔の変動を考慮し，ツリーの各分岐に重みを与えることで，パーセンタイル毎の浸水深を評価することが可能となる．

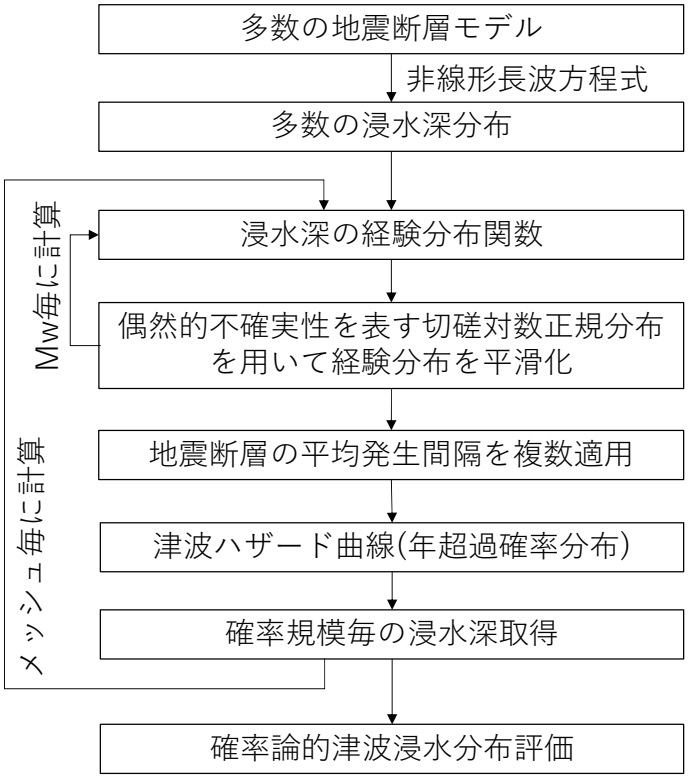


図 5.13　coRaL 法による確率論的浸水ハザード評価の流れ

(3) 偶然的不確定性の考え方

これまで国内で提案されてきたロジックツリーアプローチでは，津波波高の偶然的不確定性として，対数正規分布を仮定する．この対数正規分布の標準偏差は，過去の巨大地震による津波の数値計算値と観測値の誤差，つまり，モデル化誤差を表現する相田の κ の評価値 (Aida, 1978) に基づいている．そして，津波数値計算による解析値を中央値と仮定して，対数正規分布の超過確率曲線を得ることで，津波ハザード曲線を得る．したがって，多数の数値計算による解析値があれば，各解析値に対応する多数の超過確率曲線を得る．しかし，この評価手法では，多大な計算コストをかけて評価した数値計算による多数の解析値，一つ一つの情報が薄れることになり，解析結果の有効性の低下に繋がる．また，解析値 1 つのみで分布関数全体を決定する仮定など，改善すべき点が残っている．さらに，既往研究では，空間的ばらつきと時間的ばらつきが等しいとするエルゴード仮定を置くため，空間的ばらつきを表現する相田の κ に基づく対数正規分布を用いて生成した超過確率曲線が，超過発生確率と津波ハザード値の関係である津波ハザードカーブであると考えるが，この仮定の妥当性についても未だ議論の余地がある．

coRaL 法では，既往手法の問題点を解決するため，この偶然的不確定性の考え方を刷新する．まず，多数の数値計算による解析値の情報を最大限に活用するため，解析値をそのまま利用する経験分布関数を生成し，その関数に対し，次式を用いてモデル化誤差を表す相田の κ による対数正規分布を適用し，平滑化した関数$Q(x)$を得る．

$$Q(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i\left(1-\Phi\left(\log(x);\log(x_i),\sigma^2\right)\right) \tag{5.7}$$

ここで，$\Phi(x;\mu,\sigma^2)$は，浸水深x，平均μ，標準偏差σの正規分布の累積確率分布関数，i は浸水深の刻み，n は計算上限の浸水深，w_i は各浸水深に付与する重みを表す．標準偏差に相田の κ を適用する．既往研究では，対数正規分布の両端の裾の打ち切りを考慮しているが，この場合，次式を用いることで同様に計算できる．

$$Q'(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i\left(1-\Phi'\left(\log(x);\log(x_i),\sigma^2\right)\right) \tag{5.8}$$

ここで，$\Phi'(x;\mu,\sigma^2)$は，浸水深x，平均μ，標準偏差σの両端打切り有りの切磋正規分布の累積確率分布関数であり，分布の裾の打ち切りを考慮して全確率が 1 になるように処理する．

図 5.14 に，例として，数値計算により得られた陸域のあるメッシュでの浸水深の値が 4 個の場合に，(2.1.6)式を適用する概念図を示す．各解析値P_i（$i=1$~4）周りに対数正規分布のばらつきが存在すると考え，各解析値の対数正規分布のある浸水深を超過する確率（1-Φ($\log(x)$; $\log(x_1)$,σ^2)）を，各解析値の条件付確率を考慮して，解析値の個数分すべて合計する操作を，浸水深をずらしながら計算を実行する．(2.1.7)式を適用するためには，両端の裾を打ち切った対数正規分布を用いて同様な計算をすることで実現できる．

以上の操作により，これまで解析値毎に設けていた分布関数を与える対数正規分布を，経験分布関数全体を構成する多数の解析値 1 つ 1 つに局所的に平滑化する形で適用することが可能となる．

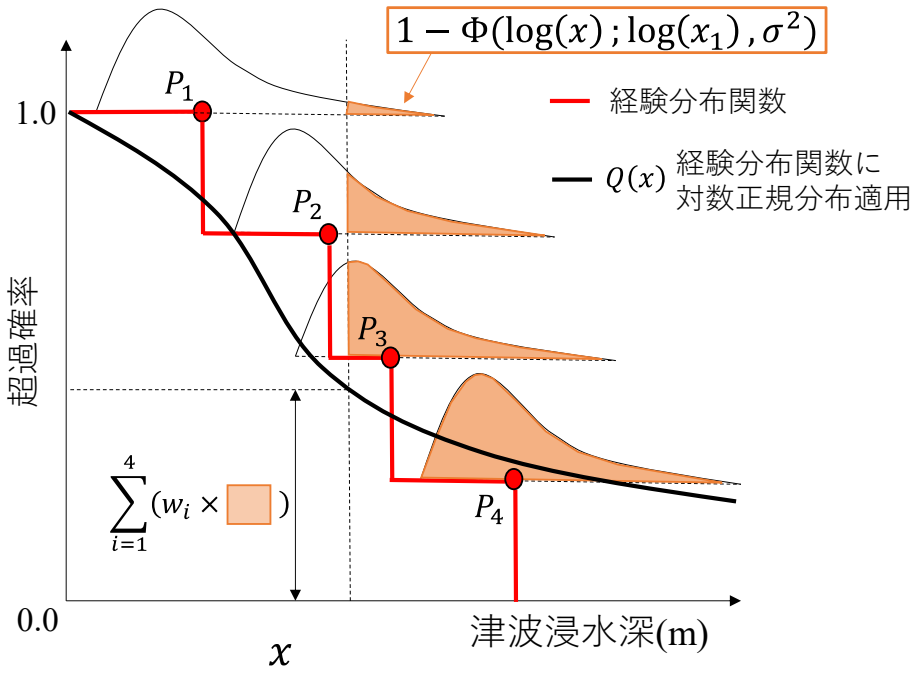


図 5.14　解析値（浸水深）の個数が 4 個の場合の経験分布関数に(2.1.6)式を適用する概念図

図 5.15 に評価対象地域のある一地点を対象とした計算結果を示す．標準偏差 σ として，地震調査研究推進本部 (2020) で偶然的不確定性として使用されている自然対数標準偏差 0.35，両端打ち切り幅 $\pm 3\sigma$ を用いた．赤太線は，M_w9.0，M_w8.6，M_w8.2 の各ケースにおけるランダムフェーズモデルから得られる津波浸水深の経験分布関数である．破線は，経験分布関数に対数正規分布を適用した超過確率曲線（(2.1.6)式），実線は，経験分布関数に切磋対数正規分布を適用した超過確率曲線（(2.1.7)式）を表す．**図 5.15**(a)を見ると，経験分布関数は，解析値をそのまま描画しているため階段上の関数となっているが，これらに対数正規分布，および，切磋対数正規分布を適用した超過確率曲線は平滑化されていることがわかる．いずれのケースでも，超確確率の最大値の 7 割程度の箇所で，経験分布関数と平滑化曲線が交差している．なお，各 M_w の計算結果で超過確率の最大値が 1 とならないのは，浸水深 0 m となる解析値が存在するためであり，当然，M_w が小さくなる程，そのようなケースが多く存在するため，超過確率の最大値は小さくなる．**図 5.15**(b)は，縦軸の超過確率を対数軸として示しており，これにより，分布の両端を打ち切る効果が明瞭になる．今回，各 M_w で 60 ケースの解析を行ったため，経験分布関数（赤線）の超過確率の最小値は，1/60 ≒ 0.0167 となる．破線が対数正規分布を適用した曲線であり，裾が長く，超過確率の小さい領域まで滑らかに伸びている一方，実線が切磋対数正規分布を適用した曲線であり，分布の両端打ち切りの効果により，超過確率が小さく津波浸水深の大きい領域まで伸びず，浸水深に上限のある傾向が見られる．興味深いことに，M_w9.0 の結果で顕著であるが，元の経験分布関数には浸水深の頭打ちの傾向が見られるため，通常の対数正規分布ではなく，切磋対数正規分布による平滑化が妥当であると言える．M_w9.0 の結果ほど明瞭ではないが，M_w8.6 や M_w8.2 の結果でも，同様に元の経験分布関数に頭打ちの傾向が見られるため，分布の打ち切りを考慮した平滑化が必要であると考えられる．

以上の手続きが，本ガイドラインで，津波数値解析結果に対して偶然的不確定性を付与する考え方である．

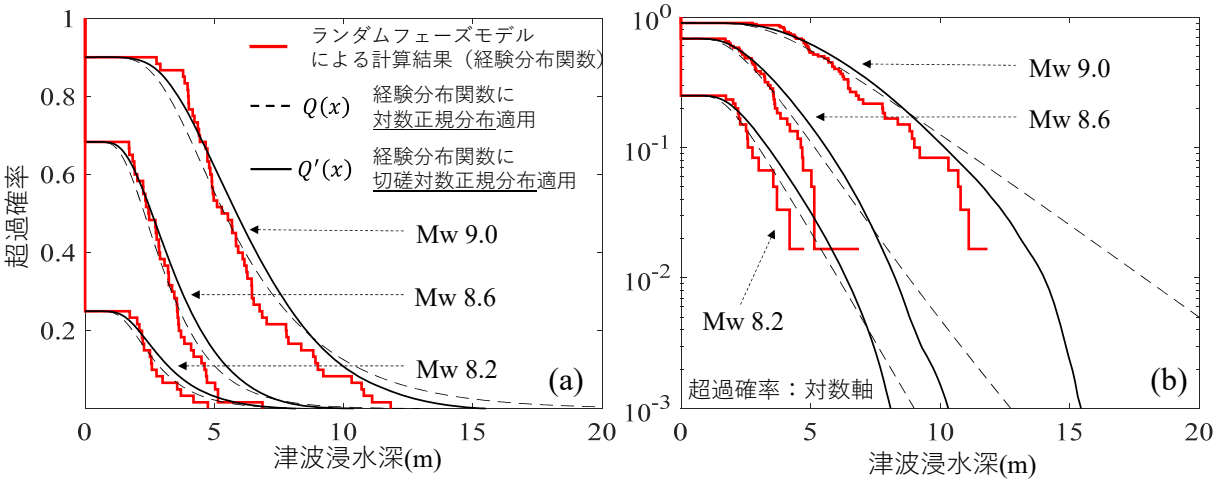


図 5.15　ランダムフェーズモデルによる経験分布関数（赤太線），経験分布関数に対数正規分布を適用した超過確率曲線（破線），経験分布関数に切磋対数正規分布を適用した超過確率曲線（実線）．縦軸の超過確率：(a)通常軸，(b)対数軸．

(4) 地震の平均発生間隔

地震にはある平均的な発生周期が存在するという仮定の下，想定地震の平均発生間隔の設定方法がこれまで多く提案されている．これらは認識論的不確定性であるため，ロジックツリーの分岐として取り扱うことが望ましい．例として，南海トラフ巨大地震領域の平均発生間隔を 3 分岐設定した．88.2 年や 116.9 年は，いずれも推本(2020)が公表する南海トラフ巨大地震領域を対象とした平均発生間隔の評価値であり，88.2 年は高知県室津港における南海地震時の隆起量と地震発生間隔との関係から評価された値，116.9 年は南海トラフ域で発生した過去の地震の発生間隔の単純平均値である．一方，地震の規模に対する地震の発生数の関係は Gutenberg-Richter 則（G-R 則）で説明できることが古くから知られており，G-R 則から計算された平均発生間隔をもう 1 つの分岐とすることが考えられる．

図 5.16　南海トラフ巨大地震の平均発生間隔に対するロジックツリーの分岐

(5) 津波ハザードカーブ

津波浸水深と年超過確率の関係である津波ハザードカーブは，各 M_w での津波浸水深の経験分布関数に偶然的不確定性の考え方を適用し，**図 5.16** に示す地震の平均発生間隔を乗じることで得られる．例として，**図 5.17** に，地震の M_w 6 ケース，平均発生間隔 3 ケース

の場合に，陸域のある地点を対象に生成したロジックツリーの分岐毎の津波ハザードカーブを示す．ロジックツリーの本数は 6×3＝18 本となる．ロジックツリーの各分岐に重みを設け，各浸水深の年超過確率の小さい方から重みを積み上げ，各パーセント点の年超過確率を取得していくことで，各パーセント点の津波ハザードカーブを構築する．図には，16 パーセンタイル曲線（青線），50 パーセンタイル曲線（赤線），および，84 パーセンタイル曲線（緑線）を示した．また，以下の(2.1.8)式により，ロジックツリーの各分岐の重みを考慮した加重平均値を計算すれば，不確定性を内包したハザードカーブ（紫線）を求めることができる．

$$H(h_i)=\sum_{k=1}^{n} w_k P_k(h_i) \tag{5.9}$$

ここで，i：対象地域におけるメッシュ番号，h_i：メッシュiでの浸水深，n：ロジックツリーの本数，w_k：ロジックツリーの分岐kに対する重み，P_k：ロジックツリーの分岐kでの偶然的不確定性を考慮した津波浸水深のハザードカーブである．

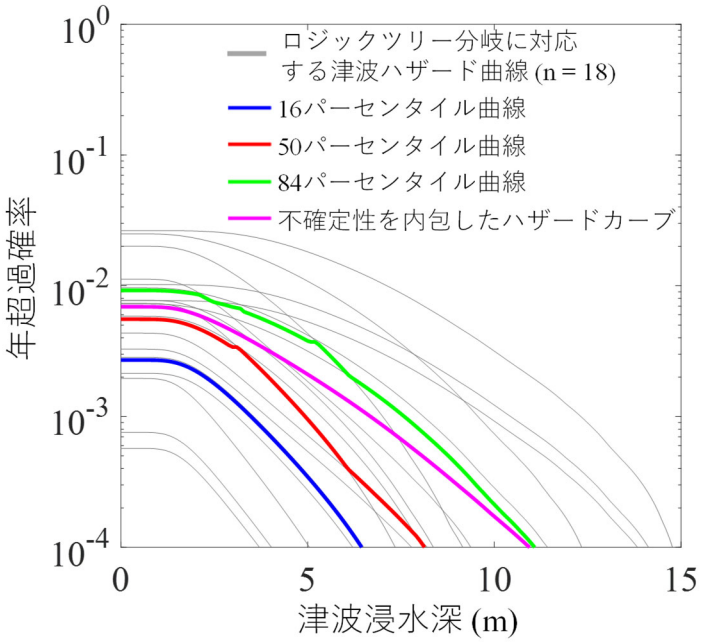


図 5.17　陸域のある地点での津波ハザードカーブ（津波浸水深と年超過確率の関係）

平面の全メッシュで同様な計算を実行し，津波ハザードカーブから確率規模毎（150 年・500 年・1000 年・2500 年等）の浸水深を取得することで，確率論的に津波浸水深分布を評価した．**図 5.18** に，50 パーセント点の年超過確率を取得して評価した対象地域での計算結果を示す．当然ながら，確率規模が大きくなると，津波浸水領域が拡大していることが分かる．**図 5.18**(d)の 2500 年に 1 度の確率規模の津波は，ASCE (2017) では Maximum Consid-

ered Tsunami (MCT) と呼ばれ，考え得る最大クラスの津波と定められている．決定論的評価であるハザードマップに示される浸水領域に加え，このような確率論的評価に基づいた浸水領域を，要避難区域として設定することも考えられる．**図 5.19** は同様に，84 パーセント点の年超過確率を取得して評価した対象地域での計算結果である．**図 5.18** の 50 パーセンタイル値の結果と比較すると，浸水深が大きく，浸水領域が拡大していることがわかる．このように，ある確率規模の浸水深分布であっても，各パーセント点の評価結果を見ることで，その不確定性を考慮できる．

最後に，平均発生間隔の算出で用いる G-R 則の変化が結果に与える影響を見る．これまで様々な切り口からの G-R 則が多数提案されており，これらは認識論的不確定性の一種であると言える．G-R 則の切片は *a* 値，傾きは *b* 値と呼ばれ，例えば，南海トラフ地震領域を対象として解析した Nanjo and Yoshida (2018) によれば，*b* 値がすべり欠損速度の関数として表現され，概ね 1.0 未満となっている．そこで，一例として，丸山ら (2017) が提案する G-R 則の *a* 値は固定し，*b* 値を 0.95 とした場合の結果を確認する．*b* 値の低下は，G-R 則の勾配が小さくなることを意味し，各 M_w の地震の生起率が高く見積もられる．**図 5.20** に同様な手法で評価した確率規模毎の津波浸水深分布（50 パーセンタイル値）を示す．G-R 則の *b* 値 1.03 である**図 5.18** と比較すると，浸水領域が拡大しており，また，G-R 則の *b* 値 1.03，84 パーセンタイル値である**図 5.19** と同程度の浸水領域となっている．このように，設定する G-R によっては評価結果に影響を及ぼすため，複数の G-R 則を用いて評価した複数の結果を比較検討し，最終的に利用する結果を選択していく必要があると考えられる．

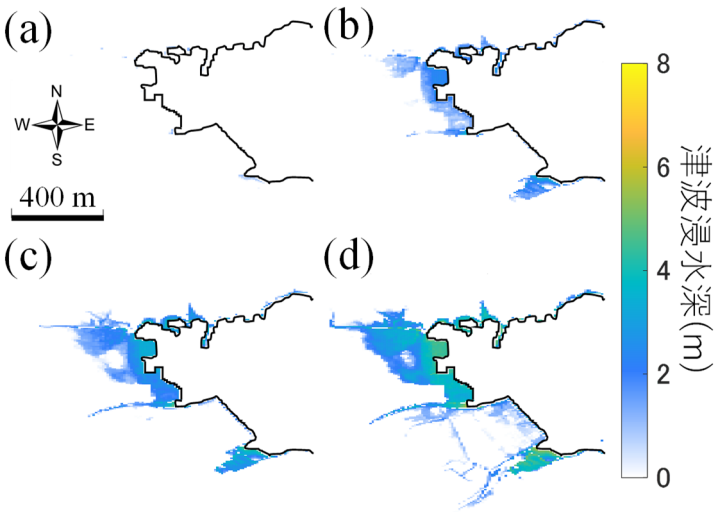


図 5.18 確率規模毎の津波浸水深分布（50 パーセンタイル値）(a) 150 年, (b) 500 年, (c) 1000 年, (d) 2500 年

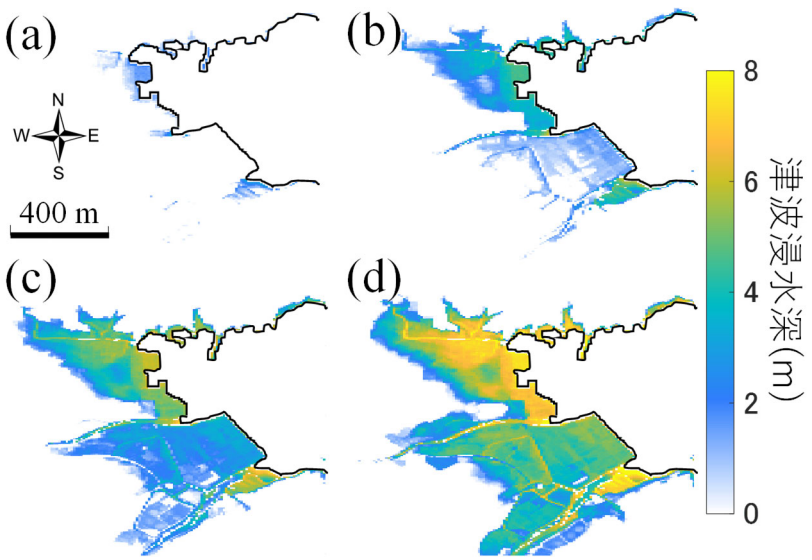


図 5.19 確率規模毎の津波浸水深分布（84 パーセンタイル値）(a) 150 年, (b) 500 年, (c) 1000 年, (d) 2500 年

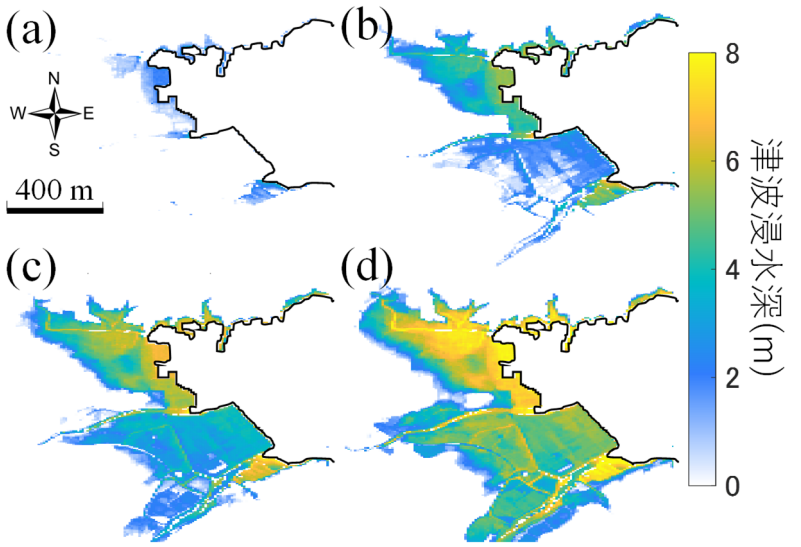


図 5.20 G-R 則の b 値を 0.95 に変更した場合の確率規模毎の津波浸水深分布（50 パーセンタイル値）(a) 150 年, (b) 500 年, (c) 1000 年, (d) 2500 年

【参考文献】

地震調査研究推進本部：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，2013.

地震調査研究推進本部：南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価，80p, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf，2020.

防災科学技術研究所：南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価－第一部本編－, 5-7 章，2020.

中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），2012.

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

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

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

福谷陽，Suppasri Anawat，安倍祥，今村文彦：確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70，No.2，pp.I_1381-I_1385，2014.

福谷陽, 北野利一, 安田誠宏, 有川太郎, 山中亮一 : 確率論的津波ハザード評価手法（coRaL 法）の構築とそれによる津波浸水評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.77，No.2，2021（投稿中）.

丸山拓真，安田誠宏，Katsuichiro GODA，森　信人，間瀬　肇：地震のスケーリング則を考慮した津波高の確率評価に関する研究－南海トラフ地震を対象とした静岡県沿岸のケーススタディー，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.73，No.2，pp.I_421-I_426，2017.

宮下卓也，森　信人，Katsuichiro GODA：Random Phase と Logic Tree を用いた確率論的な津波波高評価の比較，土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_427-I_432, 2018.

安田誠宏，田中晴規，繁田航平，谷口純一，北野利一: ランダムフェーズモデルを用いた徳島県沿岸の津波水位の確率評価に関する研究, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vo.76, No.2，pp.I_367-I_372，2020.

Annaka, T., K. Satake, T. Sakakiyama, K. Yanagisawa, and N. Shuto: Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts, Pure and Applied Geophysics, 164(2)-(3), 577-592, 2007.

American Society of Civil Engineers (ASCE): ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, Reston, VA, USA, 2017.

Cornell, C. A.: Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606, 1968.

Geist, E.: Complex earthquake rupture and local tsunami. Journal of Geophysical Research, 107, ESE2-1–ESE2-15, 2002.

Geist, E. and Parsons, T.: Probabilistic analysis of Tsu-nami Hazards, Nat. Hazards, Vol.37, pp.277-314, 2006.

Goda, K., Mai, P.M., Yasuda, T., Mori, N.: 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, 20pp., doi: 10.1186/1880-5981-66-105, 2014.

Goda, K., Yasuda, T., Mori, N., Maruyama, T.: New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulations, Coastal Engineering Journal, Vol.58, No.3, pp.1650010-1-40, 2016.

Gutenberg, B. and C. F. Richter: Seismicity of the earth, Geol. Soc. Am. Sp. Pap., 34, 131pp, 1941.

Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bull. Seimol. Soc. Am., Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.

Mai, P.M., Spudich, P., Boatwright, J.: Hypocenter locations in finite-source rapture models, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.95, No.3, pp.965-980, 2005.

Miyashita, T., N. Mori and K. Goda: Uncertainty of probabilistic tsunami hazard assessment of Zihuatanejo (Mexico) due to the represent

ation of tsunami variability, Coastal Engineering Journal, VOL. 62, NO. 3, 413–428, doi.org/10.1080/21664250.2020.1780676, 2020.

Nanjo, K.Z., Yoshida, A.: A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. Nature Communications, Vol.9, 1117, 2018.

Okada, Y.: Surface deformation due to share and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1135–1154, 1985.

Tanioka, Y. and K. Satake: Tsunamigeneration by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., 23, 861-864, 1996.

United States Nuclear Regulatory Commission: Guidance for Performing Probabilistic Seismic Hazard Aalysis for a Nuclear Plant Site: Example Application to the Southeastern United Steates, NUREG/CR-6607, 138p, 2002.

5.2. 認識論的不確定性の幅と不確定性を取り込んだ頻度と浸水深の関係

認識論的不確定性は，ロジックツリーの分岐に対して，浸水深（あるいは津波高）を固定して得られるパーセンタイルを幾らにとるのかで，その浸水深に対する発生頻度を決定することに関わる．そのパーセンタイルを 16%，50%，84%にとることが標準的であり，その範囲で，不確定性を検討することになる．なお，その不確定性を含めて，１つの値にする場合には，超過確率の和を求めて得られる発生頻度カーブを用いる．

（解説）

不確定性の幅については，津波高そのもので検討するよりも，発生頻度で検討するのが考えやすい．なぜなら，津波高を横軸にとれば，その縦軸に発生頻度をとることになり，両者の関係が，その縦軸と横軸の対応関係となるためである．偶然的不確定性は，それぞれの分岐毎の津波高と発生頻度の曲線となることに対し，認識論的不確定性は，津波高を固定した際に，その分岐毎の重みを累計することで，パーセンタイルが定まり，そのパーセンタイルでの範囲で，所与の津波高に対する発生頻度の（不確定性の）幅を表すことができる．

coRaL 法では，偶然的不確定性は，1) ランダムフェーズモデルより得られる津波高のアンサンブルのサンプリング誤差と，2) 津波の伝播計算の不確定性の２つがある．1) については，アンサンブルの生成に必要なサイズの議論（北野ら,2020）では，倍半分ルール，すなわち，200 年に 1 回の頻度を，100 年に 1 回や 400 年に 1 回と見誤らないように，帰無仮説と対立仮説を設け，必要な有意水準（目安 95%）と検出力（目安 80%）を定めて，有効なサンプルサイズを決定している．すなわち，サンプリング誤差に伴う偶然的不確定性の幅は，発生頻度の幅でコントロールしている．2) の津波の伝播計算に伴う不確定性については，ランダムフェーズモデルより得られる経験分布に，２次確率として，津波の伝播計算の不確定性を与え，それらを積分することにより加味される．このことは，従来では１つ１つの津波毎に，再現期間と直接に結びつく発生確率分布を与えていたように見えることを解消するものである．

認識論的不確定性の幅は，ツリーの分岐により生じるため，これについても，ある津波高を与えて，パーセンタイルのとりうる範囲を定めれば，発生頻度の幅が定まる．多くの場合，偶然的不確定性の幅よりも，認識論的不確定性の幅が広くなると考えられる．両者の不確定性を含めるために，分岐の重みに超過確率を乗じたものの和をとれば，浸水深（あるいは津波高）と頻度の関係，すなわち，不確定性を内包したハザードカーブが得られる．これにより認識論的な不確定性も取り込んだことになる．

【参考文献】

北野利一，安田誠宏，福谷　陽：確率津波シミュレーションに係るサンプルサイズの決め方，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vo.76，No.2，pp.I_361-I_366，2020.

6. 津波浸水シミュレーション

6.1. 津波浸水シミュレーション手法の概要

津波浸水シミュレーションは，津波の伝播・地震の断層モデルから計算された津波の発生プロセスを踏まえた初期水位のもとで，①外洋から沿岸への津波の伝播・到達，②沿岸から陸上への津波の遡上，の一連の過程を連続して数値計算を行うことを基本とする．

津波浸水シミュレーションは，地域海岸毎に行うことを基本とし，堤防高を複数パターン想定した上で浸水計算を行う．堤防等の決壊条件については，整備状況や整備予定を踏まえて決めることを基本とする．

津波が堤防等を越流してもすぐに倒壊しない構造形式（粘り強い構造等）についても，最新の知見や実験等を踏まえて決壊条件を極力反映するものとする．

（解説）

「津波浸水想定の設定の手引き」[1] に，原則は従って計算を行う．計算格子サイズについては，「陸域においては，斜面勾配 α，周期 T，重力加速度 g を用いた(6.1)式によって，格子間隔（Δx）を設定してもよいが（土木学会「原子力発電所の津波評価技術」，局地的な地形も再現されていることが必要となることから，最小計算格子間隔は 10 m 程度より小さくすることを目安とする．」とあり（同手引き p.30），できる限りそれにならうものとすることが，整合性を考えても望ましい．

$$\frac{\Delta x}{\alpha g T^2} \leq 7 \times 10^{-4} \tag{6.1}$$

一方で，Yasuda et al.(2021)[2]は，モデル地区による実験と，種々の平面 2 次元シミュレータとの比較を行っており，その結果，街路幅の 1/4 程度の格子間隔以下であると，浸水計算の精度に大きく影響しないことを示しており，今後もそのような知見を蓄積していくことで，格子間隔と，精度のバラツキが議論できるようになれば，計算コストに見合う計算格子間隔にしても構わない．

【参考文献】

1) 津波浸水想定の設定の手引き ver2.10，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，2019 年 4 月，https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kaigan/tsunamishinsui_manual.pdf.

2) Yasuda, T., K. Imai, Y. Shigihara, T. Arikawa, T. Baba, N. Chikasada, Y. Eguchi, M. Kamiya, M. Minami, T. Miyauchi, K. Nojima, K. Pakoksung, A. Suppasri, and Y. Tominaga, Numerical Simulation on Detailed Urban Inundation Processes and Their Hydraulic Quantities − Tsunami Analysis Hackathon Theme 1, Journal of Disaster Research, 2021 (submitted).

6.2. 越流計算手法の選定

6.2.1. 越流計算手法の概要

本報告では，堤防高さを決めるものであり，堤防に対する越流計算手法の選定は，背後地の浸水評価を行う重要な鍵となる．

越流計算手法の原則は，「津波浸水想定の設定の手引き　Ver.2.10」に準拠した非線形長波理論に基づく津波浸水シミュレーションモデルに破堤を考慮した計算（従来法）を行うことであるが，粘り強さを加味した計算を行う場合には，破堤条件にフラジリティ法を用いる．一方で，構造形態が複雑な場合などにおいては，3 次元津波浸水シミュレーションモデルを用いることも想定されるが計算負荷は大きい．

また，現時点において，適用範囲は不明瞭であるものの，その精度が確保された場合においては，既存の津波浸水想定区域図から越流量比により浸水範囲・最大浸水深を算定する「レベル湛水法」で概算の推定を行うことは可能である．

（解説）

各手法の概要を表 6.1 に示す．

表 6.1　各手法の概要

モデル名	概要	メリット	デメリット
(1) 非線形長波理論における越流計算（従来法）		計算負荷が小さい	特に砕波・段波や先端部や越流においてモデル化が必要
(2) 非線形長波理論における堤防の粘り強さを加味した越流計算（フラジリティ法）	堤防の粘り強さを考慮する．	計算負荷が小さい	特に砕波・段波や先端部や越流においてモデル化が必要
(3) レベル湛水法	既存の津波浸水想定の浸水範囲及び浸水深をベースに，越流量比に応じて浸水範囲及び浸水深を算定する．	計算負荷が小さい	・津波の進入角等が厳密には考慮できない． ・時間的な浸水の広がりが分からない． ・適用条件が不明
(4) 3 次元津波浸水シミュレーション	ナビエストークス方程式を解く．	砕波・段波や先端部や越流においてモデル化が不要	計算負荷が大きい

6.2.2. 非線形長波理論における越流計算（従来法）

津波による堤防からの越流を計算するためのものであり，越流量を計算する方法は，2 通りが用いられる．また，越流後に堤防を無くすようにプログラム上で工夫されたモデルもあるが，物理的な整合性については検討されていない．

（解説）

堤防を越流する際の計算方法として，相田モデルならびに本間モデルがあり，津波の浸水計算の手引きにも記載されている.また,越流後に堤防が破堤することを考慮するため，越流すると同時に堤防高さを下げるように，プログラム上で工夫されたモデルもあるが，その下げ方は，各プログラム設計者に依存しており，プログラムコードの統一や公開はなされていないことが多い．また，その妥当性は検証されていない．一方で，堤防の効果がほとんどないような，堤防の高さに対して津波がかなり大きい場合（たとえば最大クラスの津波）には，有効であると考えられる．しかし，津波の高さが堤防高と変わらない場合などは，**6.2.3** で示すような手法など何らかの工夫が必要になると考えられる．

6.2.3. 非線形長波理論における粘り強さを加味した越流計算

防護施設の破堤条件を計算格子ごとに取り扱おうとした場合，波源のケース数に加えて防護施設の条件を計算格子数に応じて組み合わせて計算しなければならず，計算ケース数が膨大になるという問題がある．加えて，従来の方法のように，越流後倒壊するようなモデルで一律に取り扱った場合，防護施設を粘り強くする効果を検討することができない．

そこで，防護施設の損傷率に応じて越流量を変化させるモデル（フラジリティモデルと呼ぶ）を導入し，津波による防護施設の脆弱性を考慮でき，かつ防護施設の破堤条件によるケースを本モデルのみとし，計算ケースの大幅な削減を図るものである．本ガイドラインにおいては，この手法を活用することを推奨する．

フラジリティモデルとは，津波高と防護施設の損傷率の関係と，損傷に応じて変化する越流量の関係を用いて，防護施設の防護機能を評価する手法である [1)]．フラジリティカーブの一例を次式に示す．

$$P(\alpha) = \phi\left[\frac{\ln\alpha - \mu}{\sigma}\right] \tag{6.2}$$

$$\alpha = \frac{\eta}{H_D} \tag{6.3}$$

ここで，P：防護施設の損傷率，ϕ：対数正規分布関数，η：防護施設の前面水位，H_D：防護施設の高さ，μ, σ：対数正規分布の平均値および分散に対応するパラメータである．

連続的に越流量を補正するため，ある計算ステップにおける防護施設の最大損傷率$P_{\max}$，前面水位と天端高の比 α の 2 パラメータの状態により以下の場合分けを行う．

1. 最大損傷率が 0 であり，かつ，前面水位が天端高を超えない場合：越流が生じない．
2. 最大損傷率が 0 であり，かつ，前面水位が天端高を超える場合：越流が生じる．
3. 最大損傷率が 1 未満であり，かつ，前面水位が天端高を超える場合：非損傷部での越流と，損傷部での通過流量が発生する．
4. 最大損傷率が 1 未満であり，かつ，前面水位が天端高を超えない場合：損傷部での通過流量が発生する．
5. 最大損傷率が 1 である場合：通過流量が発生する．

図 6.1 に流入量イメージ図を示す．なお，今回は，工区の一部損傷を仮定し，歯抜けのように一部が破壊されることをイメージしてモデル化している．上部工だけが流されるというモデル化も可能であるが，**図 6.1** のようにするほうが理論的には流量が大きくなる．

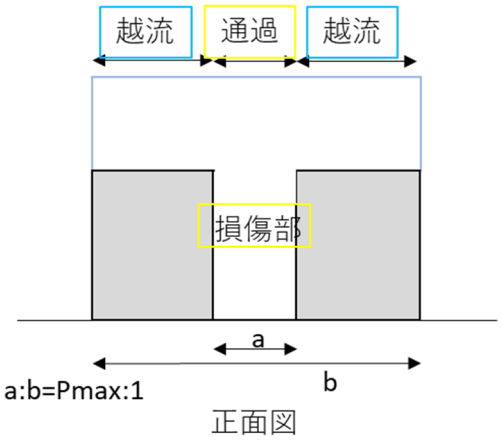


図 6.1　$0 < P_{\max} < 1$での流入量イメージ

以上 5 つの場合分けに応じて，それぞれ以下の様に流量を補正する．

1.の場合

流量を補正しない

2.～4.の場合

非損傷部については本間の越流公式を用いて越流量M_1を，損傷部については長波の波速を用いて通過流量M_2をそれぞれ決定する．その上で計算メッシュ幅全体の流量M_uについて，最大損傷率$P_{\max}$によりM_1,M_2で重み付けして算出する．

$$M_2 = \sqrt{g * \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}} * \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} \tag{6.4}$$

$$M_u = M_1 * (1 - P_{\max}) + M_2 * P_{\max} \tag{6.5}$$

ここで，g：重力加速度，η_1：堤防位置標高に対する前面水位，η_2：堤防位置標高に対する背面水位である．

5.の場合

堤防なし条件にした上で，流量を補正しない．

表にまとめると**表 6.2** のようになる．

簡易地形にてフラジリティモデルを適用した計算を行い，他の堤防条件との比較を行う．比較する条件は，堤防なし，越波で破堤，破堤しない (健全)，の 3 ケースである．

表 6.2

損傷なし，かつ，前面水位＜天端高 （P_{max}=0.and.$\alpha \leqq 1$）	浸水なし
損傷なし，かつ，前面水位＞天端高 （P_{max}=0.and.α>1）	越流あり
一部損傷，かつ，前面水位＞天端高 （P_{max}<1.and.α>1）	損傷部からの通過あり，越流あり
一部損傷，かつ，前面水位＜天端高 （P_{max}<1.and.$\alpha \leqq 1$）	損傷部からの通過あり
倒壊（完全に損傷） （P_{max}=1）	防潮堤なし

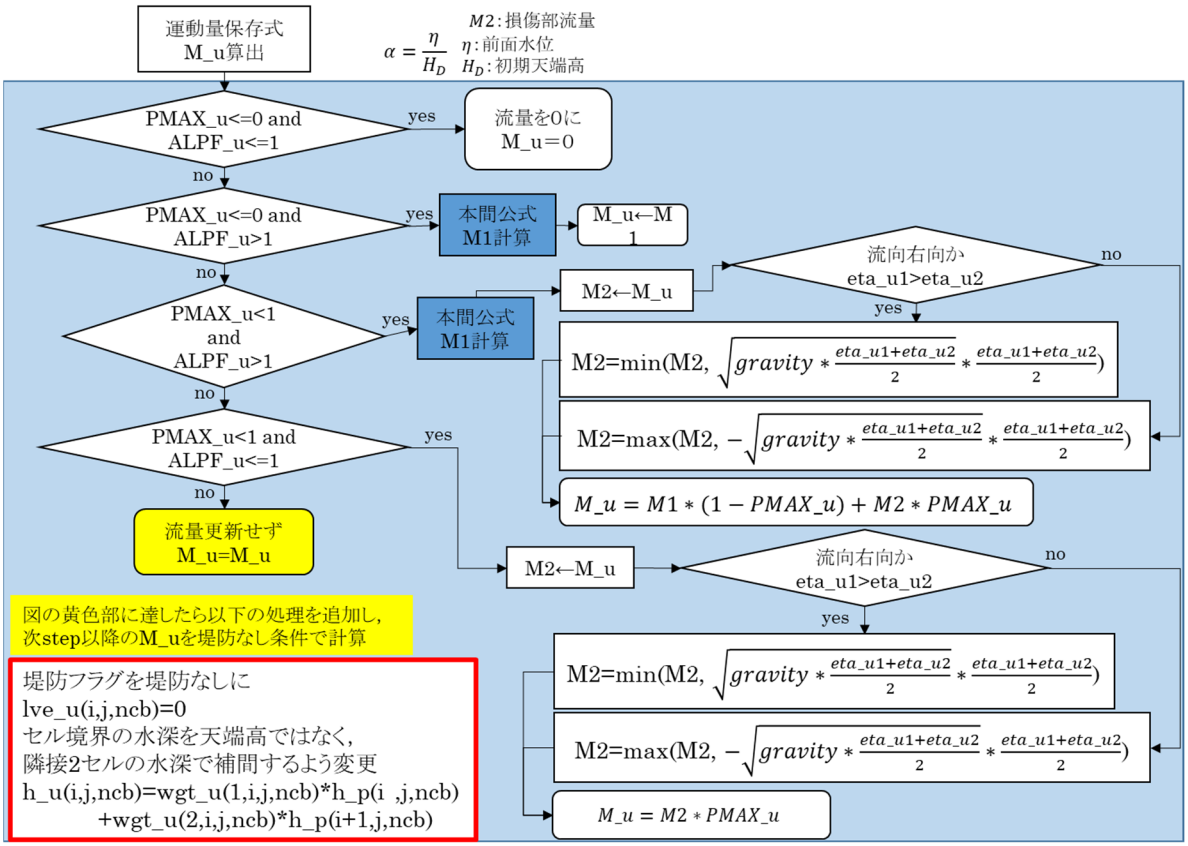


図 6.2　フラジリティモデルの詳細フロー

図 6.3 に計算に用いた簡易地形を示す．メッシュサイズは X 方向，Y 方向ともに 0.1m とし，沖側境界より波高 0.5m の孤立波を造波した．堤防高さ(Hc)は，0.3m，0.7m，0.8m とした．

図 6.4 に，堤防高さを 0.8m とした場合における，堤防条件の違いによる堤防前後での水位の比較を示す．フラジリティモデルを適用したものは，越波で破堤した場合と比べ，堤内での水位上昇開始が遅れ，かつ，水位も低く抑えられていることがわかる．

一方，破堤しない条件(健全)と比べるとかなり背後水位が高いことがわかる．

【参考文献】

1) 有川太郎，宮内俊晴，北野利一，福谷陽，渡部真史:防護施設の脆弱性の違いによる背後地域の津波浸水確率への影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, 2021（投稿中）.

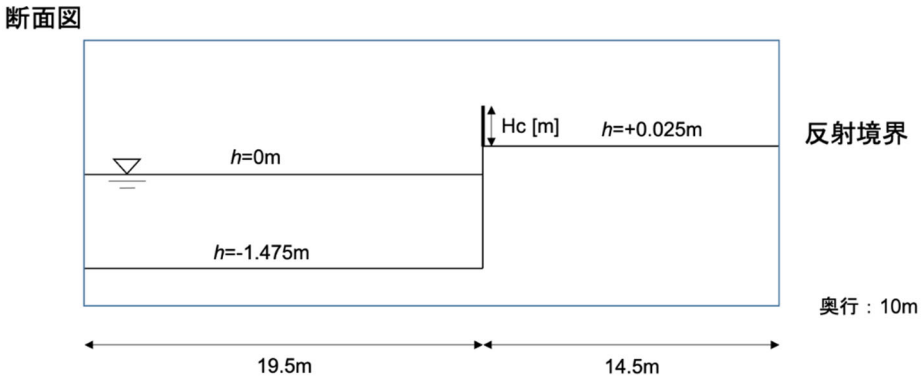


図 6.3　計算断面図

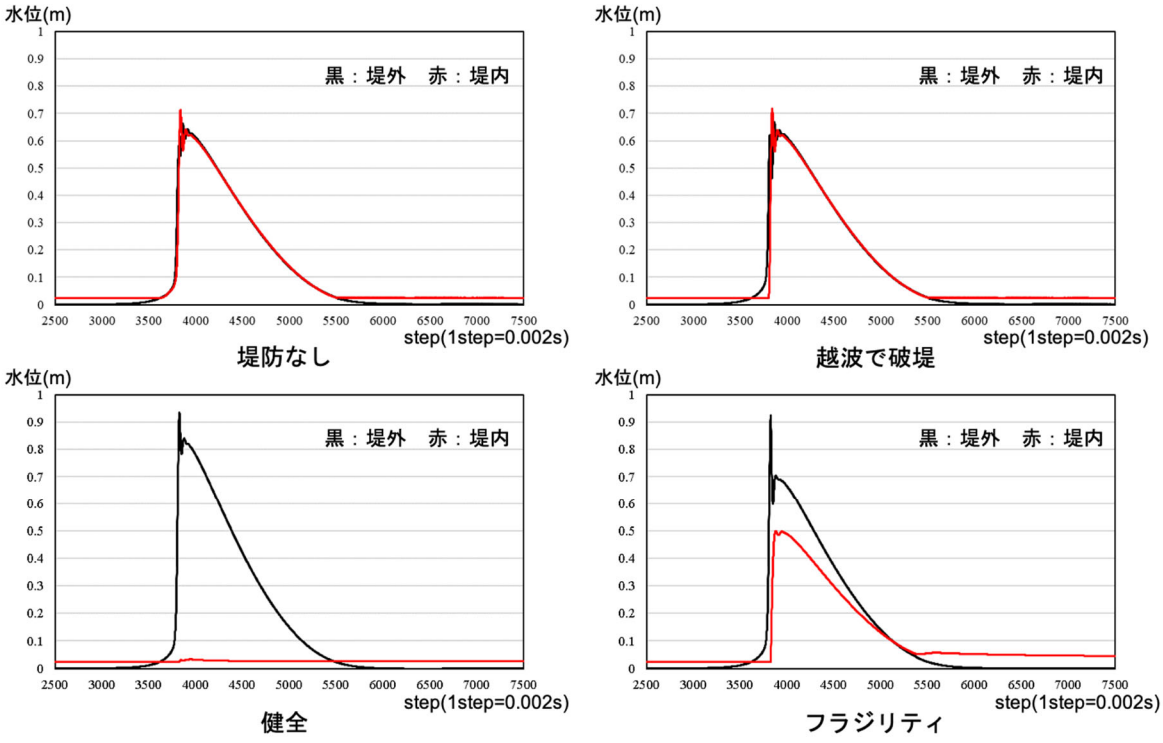


図 6.4　堤防高さ(Hc)を 0.8m としたときの堤防条件の違いによる堤外，堤内水位の比較

6.2.4. レベル湛水法

既存の津波浸水想定の浸水範囲・最大浸水深をベースに，越流量の比率に応じて計算条件（初期水位，堤防条件）ごとの浸水範囲・最大浸水深を推定する．

なお，越流量は，本間の越流量公式で算定し，浸水範囲はレベル湛水法により推定することを基本とする．

本手法は，適用範囲が不明瞭であるため，その精度が確保された場合のみ，概算の推定に用いることができる．特に平野部においては，その適用は難しいことが想定される．

（解説）

(1) 計算フロー

計算手法の手順を下記に示す．本手法では，越流量比により各条件での総越流量を算定し，レベル湛水法により浸水範囲及び最大浸水範囲を推定するものである．

本手法のメリットとしては，津波が広がる物理現象を直接解く必要がなく，数値計算に関する専門的な知識を有さない場合でも推定が容易な点である．

詳細な計算手法については，0 に記載する．

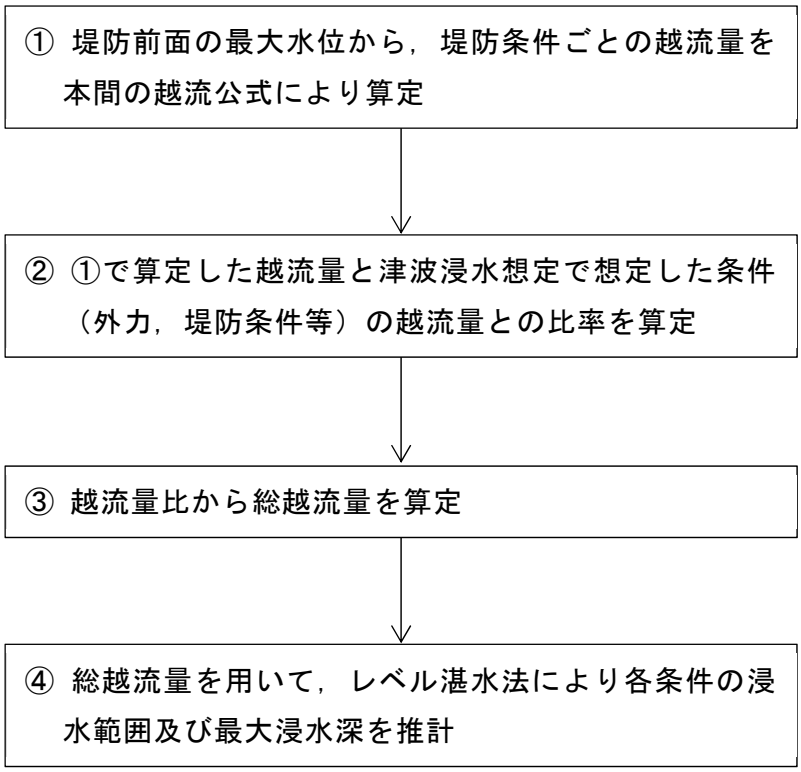


図 6.5 簡易モデル（レベル湛水法）の計算フロー

(2) 計算に必要な入力データ

本手法で各計算条件の津波浸水範囲を推計するためには，下記に示す入力データが必要である．

表 6.3　計算に必要な入力データ

No.	必要なデータ	使用目的
①	津波浸水想定の浸水範囲及び最大浸水深	・　計算条件（初期水位，堤防条件）ごとの浸水範囲及び浸水深の算定の際のベースとして使用
②	津波浸水想定の沿岸の最大水位	・　津波浸水想定の越流量を算定に使用
③	津波発生確率規模ごとの最大水位	・　各計算条件での越流量を算定する際に使用
④	各設定堤防高	・　各計算条件での越流量を算定する際に指標

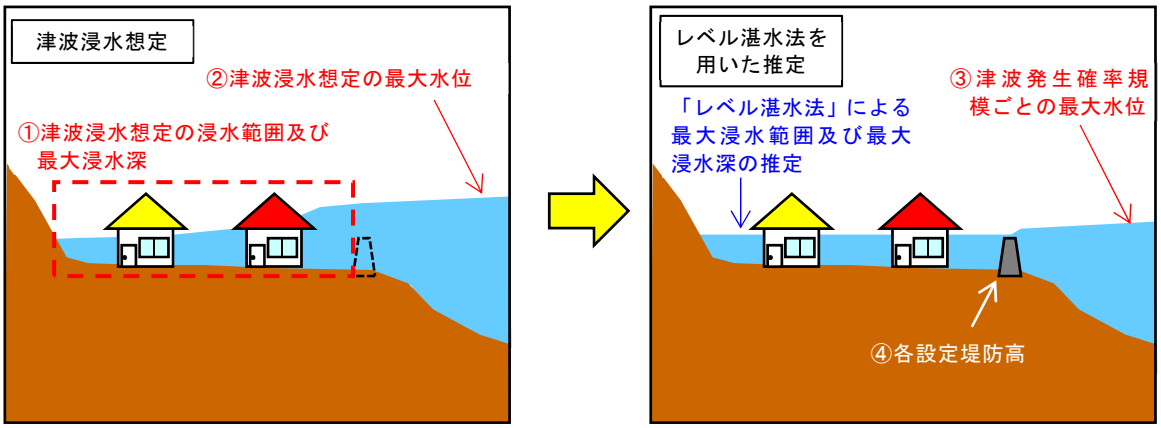


図 6.6　想定浸水範囲及び浸水深の算定のイメージ図

(3) 計算手法の概要

本手法は，津波浸水想定等の既往検討における総越波流量に対し，下記の本間の越流公式（完全越流を基本とする）で算出した堤防高さごとの越流量の比率を乗じることで，各条件での総越流量を算定する手法である．

算定した総越流量を用いて，レベル湛水法により浸水範囲及び最大浸水深を推計する．「レベル湛水法」とは，浸水レベルに大きな差がないものとし，総越流量がそのまま背後地に湛水すると仮定して浸水範囲及び浸水深を推定する簡易的な手法である．

（本間の越流公式）※完全越流（$h_2/h_1 < 2/3$）のみとする．

$$q = 0.35 \times h_1 \sqrt{2gh_1} \tag{6.6}$$

ここで，h_1 は海側の天端高基準の水位，h_2 は陸側の天端高基準の水位を表す．

総越流量は，下記の通り，越流量の比率により算定する．

$$Q_K = Q_0 \times q_k / q_0 \tag{6.7}$$

ここで，Q_K：堤防高 K のときの堤防背後の総越流量(m^3)，Q_0：堤防高 K_0 のときの堤防背後の総越流量(m^3)，q_K：堤防高 K のときの越流量(m^3/s)，q_0：堤防高 K_0 のときの越流量(m^3)

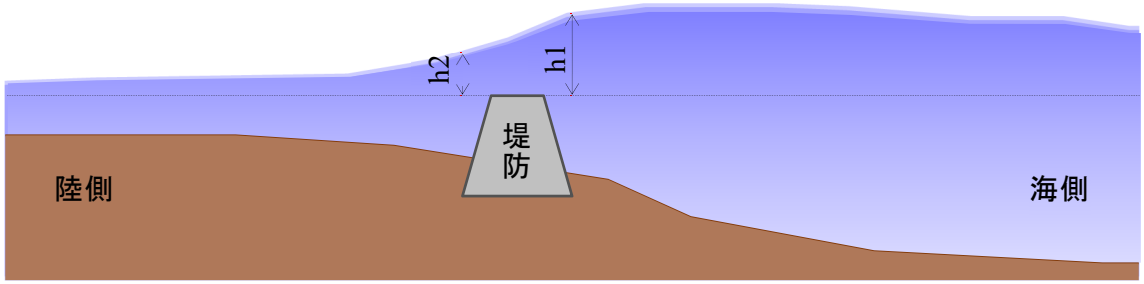


図 6.7　本間の越流公式の補足図

【浸水地域の設定手順（レベル湛水法）】

1. 背後地の地盤高を用意する．
2. 総越流量がそのまま背後地に湛水するものとして，総越流量と湛水量がほぼ等しくなるまで湛水位を変える（この際，0.1m 刻みにトライアルをすることを基本とする）．
3. 上記で算定した湛水位よりも低い地盤高の範囲を「浸水範囲」，湛水位から各メッシュの地盤高を差し引いた値を「浸水深」とする．この際，津波浸水想定の浸水域内を対象とする．

※ 極端に飛んで浸水が発生している箇所がないか確認する．ある場合は，そのような箇所が対象外となるように算定方法を修正する．

6.2.5. 3 次元津波浸水シミュレーション

3 次元津波解析は，計算コストはかかるものの，精緻に建物の波力や浸水流速などを調べる際に用いることが望ましい計算手法であり，3 次元の Navier-Stokes 方程式を基にした数値計算を実施する．3 次元の流体計算手法，境界条件の取り扱いや，堤防等の構造物の取り扱いから，計算手法は分類される．

（解説）

3 次元数値流体解析コードとしては，OpenFOAM，CADMAS−SURF/3D，SPH，MPS，RANS など様々あるが，それらを用いた津波波力に関するブラインドコンテストでは，その精度が評価されている [1)].

境界条件の取り扱いとしては，波浪を入射境界として与える方法，2 次元計算と接続する方法 [2)]などが考えられる．

堤防等構造物の取り扱いについては，あらかじめ堤防が倒れることを想定して，堤防の破堤過程を与えておく計算方法 [3)]，もしくは，構造物と連成させて計算する方法 [4)]のいずれかが考えられる．

いずれの計算も技術的には可能であり，その精度は流体場の精度に起因するところが多い．一方で，計算コストの面からの工夫が必要なこと，計算格子の大きさの決定方法などが現段階においては不明瞭であることなどが課題としてあげられる．有川 [5)]によると，およそ実時間の 1000 倍程度の計算時間が必要であることがわかる．

【参考文献】

1) Arikawa, T., N. Kihara, M. Watanabe and C. Tsurudome : Summary of Technical Report, https://drive.google.com/file/d/1sTwcPrmc5tTwHhngiRBdcqRHz0eUNdRJ/view?usp=sharing, 2020.
2) Taro Arikawa and Takashi Tomita, “Development of High Precision Tsunami Runup Calculation Method Based on a Hierarchical Simulation,” J. Disaster Res., Vol.11, No.4, pp. 639-646, 2016.
3) 大家隆行, 有川太郎: CADMAS-SURF/3D を用いた防潮堤背後の建屋に作用する津波力の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No. 2, pp.I_801-I_805, 2014.
4) Taro Arikawa, Yu Chida, Katsumi Seki, Tomohiro Takagawa, and Kenichiro Shimosako, “Development and Applicability of Multiscale Multiphysics Integrated Simulator for Tsunami,” J. Disaster Res., Vol.14, No.2, pp. 225-234, 2019.
5) 有川太郎: 階層型連成シミュレータを用いた釜石湾における防波堤破堤と浸水範囲，津波工学研究報告，第 37 号，pp.81-92，2020.

7. 被害計算

7.1. 被害計算の概要

被害額の計算は，現在や将来の背後地の土地利用状況も踏まえた上で行うことを基本とする．

（解説）

被害計算（被害軽減期待額の算定）は，図 **7.1** に示す流れにて行う．津波浸水想定範囲及び最大浸水深は，6 章を参照に推定する．

想定浸水域内の資産（人口や企業等）は，現在のみだけでなく，将来の土地利用変化も加味して推定することを基本とする．下記に将来推計パターンを示す．

将来推計パターン A：20-30 年間人口・資産変化，整備による立地変化あり
将来推計パターン B：20-30 年間人口・資産変化，整備による立地変化なし
将来推計パターン C：2050 年の人口（9,515 万人）※・資産
※国立社会保障・人口問題研究所の予測値

被害軽減期待額については，「海岸事業の費用便益分析指針（改訂版）」に準拠し，想定浸水域内に存在する一般・農地資産被害額等を個別に積み上げる方法により算定することを基本とする．

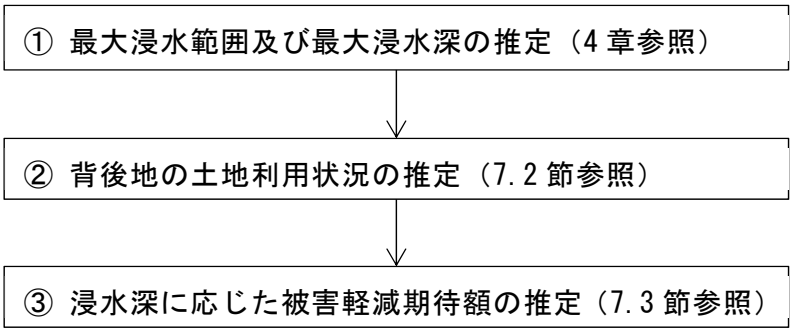


図 7.1　被害軽減期待額の算定フロー

7.2. 将来の土地利用の推計

7.2.1. 将来の資産データの推計手法

将来の土地利用（人口，企業）は，「差分の差分法」を用いて推計することを基本とする．

（解説）

津波浸水想定区域図が公表され，津波リスクが周知されることによって，人や企業は内陸部へ転出の活発化や，新たに沿岸部への転入の減少などによって，沿岸部の土地利用が変化することが想定される．また，地域の取組により高台移転や建築規制等も進むことで，沿岸部の土地利用は大きく変わる可能性がある．

上記のようなことから，今後整備する海岸堤防は，背後地の土地利用も踏まえた上で堤防高や，整備優先順位を設定する必要がある．

ここでは，将来の土地利用の推計手法を記載する．

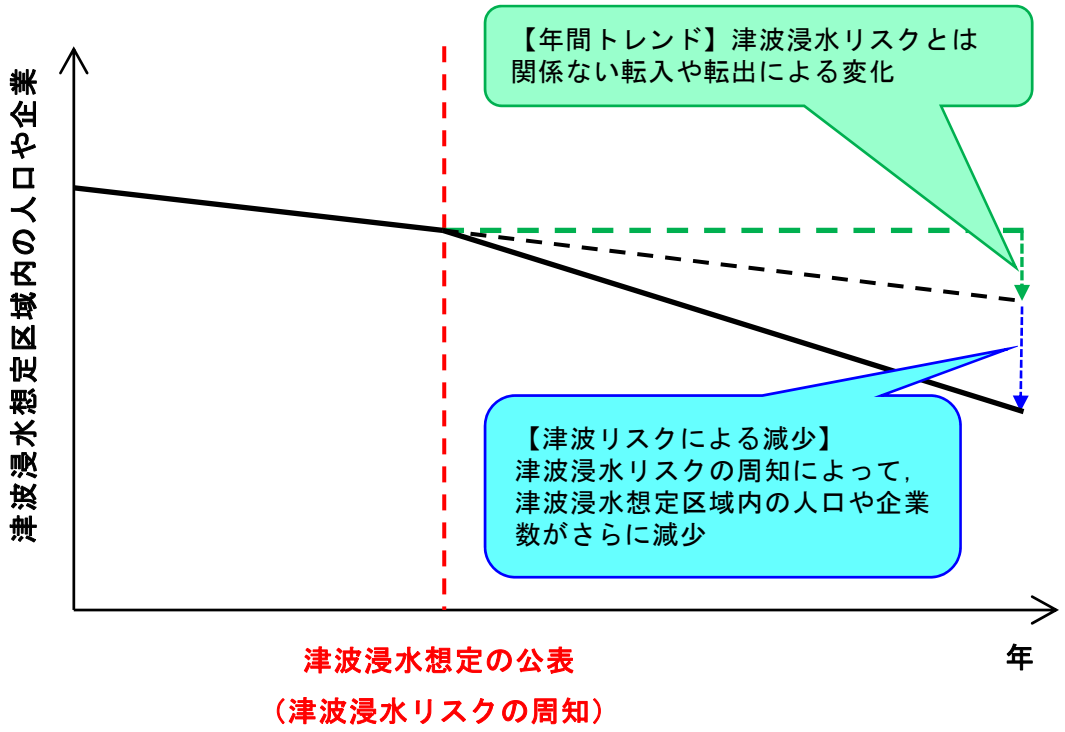


図 7.2 津波浸水想定区域内の人口や企業数の変化のイメージ

将来の土地利用の推計方法のひとつとして，「差分の差分法（Difference in Differences）」があげられる．差分の差分法の詳細については，付録 G に記載している．差分の差分法とは，施策等を導入した「処置群」と「それ以外」について，時間変化と処置有無の差を施策導入による効果として計測する手法である．**図 7.3** のイメージ図においては以下と解釈できる．

◆時間の差：政策導入ありの時間変化（A2-A1）

政策導入なしの時間変化（B2-B1）

◆政策導入による効果：（A2-A1）-（B2-B1）

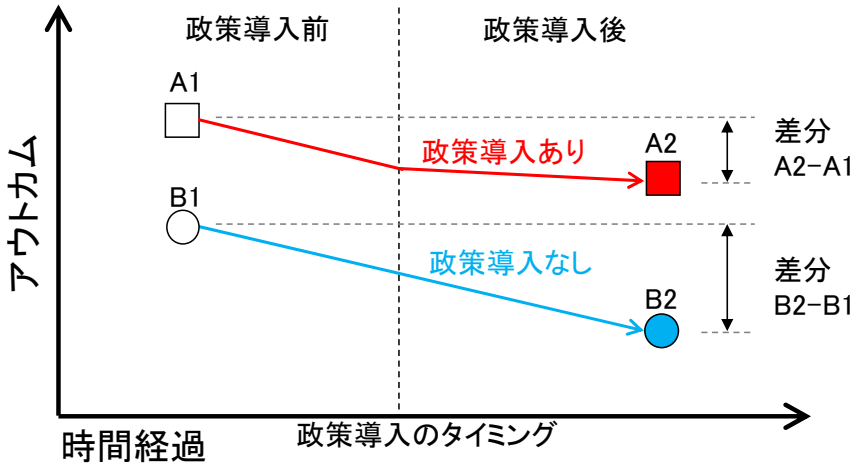


図 7.3　差分の差分法のイメージ

実際に効果を計測するためには，式(7.1)のようにモデル化し，重回帰分析の処置による効果を示す係数 α を算出することとなる．本ガイドラインでは，津波リスクの周知による影響を把握するため，D_{st} は「津波浸水想定区域図の公表」を示すダミー変数とした．

$$y_{ist} = \gamma_s + \lambda_t + \alpha D_{st} + \varepsilon \qquad (7.1)$$

地域差（固有効果）　時間経過　処置有無（ダミー）　誤差項

y_{ist}：被説明変数，i：個人，s：地域等，t：時間

γ_s：地域等に依存する項，λ_t：時間に依存する項，ε：誤差項

D_{st}：処置状態を示すダミー変数（施策実施の有無を 0 or 1 で示す）

α：処置による効果を示す係数

7.2.2. 将来の土地利用を推計するための係数値

将来の土地利用を推計するための係数値は，**7.2.1** に示す手法で算定することが望ましいが，本ガイドラインに掲載している各県の係数値を使用することも可能とする．

なお，本ガイドラインに掲載している係数値を用いる場合は，産業特性や立地条件，年齢構成等を踏まえて用いること．

（解説）

(1) 将来の土地利用（人口，企業）の推計の考え方

6 章で推計した，計算条件（初期水位，堤防高）ごとの最大浸水範囲及び最大浸水深のデータを用いて，下記の式により各メッシュの人口や企業数を推計する．

$$Y_{rt} = Y_r + \lambda \cdot time + \alpha D_{rkt} \tag{7.2}$$

ここで，Y_{rt}：t 時点の r 地点の人口あるいは企業数，Y_r：地域の固有効果（個別効果），λ：時間項の係数値，$time$：時間項，α：津波リスクによる減少を示す係数値，D_{rkt}：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（浸水深の値もしくは，浸水ありなしなどの 1，0 のダミー変数）．

(2) 各係数値の推計

「時間項の係数値」とは，津波リスクによらない人口や企業数の変化を表した係数値である．式(7.1)では，λt の時間経過に該当する．また，「津波リスクによる減少を示す係数値」とは，津波リスクに応じる人口や企業数変化を表した係数値である．式(7.1)では，αD_{st} の処置有無に該当する．

本ガイドラインでは，自治体ごとに差分の差分法を用いて推計することを基本とする．ただし，減災アセスメント小委員会が推計した係数値の利用も可能である．各係数値については，付録 D に示す．

なお，本ガイドラインでは，20-30 年後の土地利用変化を推定するため，変化率で考慮可能な対数型の推計式を採用することを基本とする（付録 C の特定化２）．また，浸水深については，浸水深の低減効果も考慮するため，浸水深を m 単位とした場合の係数値を用いることを基本とする．各県の係数値を**表** 7.1～**表** 7.4 に示す．

表 7.1　津波リスクに応じた事業所の減少率（西暦年）

産業分類	回帰係数　西暦年						
	神奈川県	静岡県	愛知県	三重県	和歌山県	徳島県	高知県
C鉱業，採石業，砂利採取業	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
D建設業	0.006	-0.009	-0.004	-0.010	-0.011	-0.015	-0.011
E製造業	-0.013	-0.015	-0.021	-0.010	-0.010	-0.011	-0.008
F電気・ガス・熱供給・水道業	0.000	0.008	0.010	0.000	-0.021	0.000	0.000
G情報通信業	0.011	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H運輸業，郵便業	0.000	0.005	0.000	0.007	0.005	0.000	0.000
I卸売業，小売業	-0.005	-0.012	-0.007	-0.010	-0.012	-0.020	-0.012
J金融業，保険業	0.000	-0.003	0.000	0.000	-0.008	0.000	0.000
K不動産業，物品賃貸業	0.011	0.006	0.013	0.004	0.000	0.011	0.000
L学術研究，専門・技術サ-ビス業	0.021	0.005	0.005	0.005	0.000	0.005	-0.006
M宿泊業，飲食サ-ビス業	-0.022	-0.017	-0.019	-0.015	-0.016	-0.009	-0.009
N生活関連サ-ビス業，娯楽業	-0.009	-0.003	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006
O教育，学習支援業	-0.006	-0.009	-0.005	-0.012	-0.009	-0.011	0.000
P医療，福祉	0.035	0.022	0.025	0.018	0.019	0.018	0.020
Q複合サ-ビス業	-0.009	-0.011	-0.011	-0.011	-0.014	-0.013	-0.016
Rサ-ビス業（他に分類されないもの）	0.012	0.005	0.006	0.000	0.000	0.006	0.000

※P 値が 0.05 未満で，有意性が確認された係数値のみを採用

表 7.2　津波リスクに応じた事業所の減少率（浸水深）

産業分類	回帰係数　浸水深						
	神奈川県	静岡県	愛知県	三重県	和歌山県	徳島県	高知県
C鉱業，採石業，砂利採取業	0.000	0.000	0.000	-0.017	0.000	0.000	0.000
D建設業	-0.045	-0.066	-0.019	-0.023	0.000	-0.009	-0.007
E製造業	0.000	0.000	0.000	-0.016	0.000	0.000	0.000
F電気・ガス・熱供給・水道業	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
G情報通信業	0.000	0.000	-0.036	0.000	-0.120	-0.040	0.000
H運輸業，郵便業	0.000	-0.012	0.000	-0.009	-0.024	0.000	0.000
I卸売業，小売業	-0.006	-0.004	-0.051	-0.031	-0.023	0.000	-0.036
J金融業，保険業	-0.034	-0.083	0.000	-0.011	0.000	-0.027	0.000
K不動産業，物品賃貸業	-0.029	-0.036	-0.031	0.000	-0.042	0.000	0.000
L学術研究，専門・技術サ-ビス業	-0.024	-0.024	0.000	0.000	-0.050	-0.026	0.000
M宿泊業，飲食サ-ビス業	0.000	-0.027	0.000	-0.012	-0.006	0.000	-0.003
N生活関連サ-ビス業，娯楽業	-0.014	-0.038	0.000	-0.019	-0.007	0.000	-0.004
O教育，学習支援業	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.066
P医療，福祉	-0.031	0.000	-0.084	0.000	0.000	0.000	-0.041
Q複合サ-ビス業	-0.052	-0.043	0.000	-0.015	0.000	0.000	0.000
Rサ-ビス業（他に分類されないもの）	0.000	-0.053	-0.013	-0.008	-0.007	0.000	-0.004

※P 値が 0.05 未満で，有意性が確認された係数値のみを採用

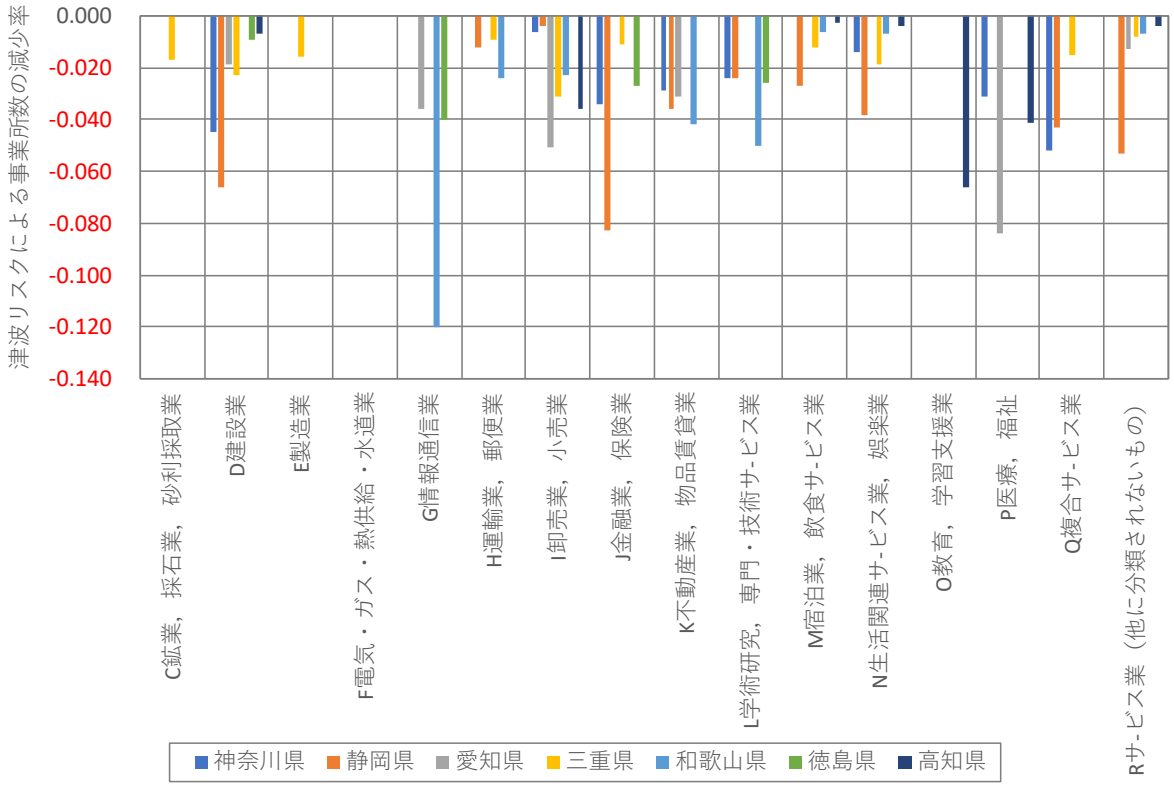


図 7.4　事業所の 1 年当たりの変化率（プラス：増加，マイナス：減少）

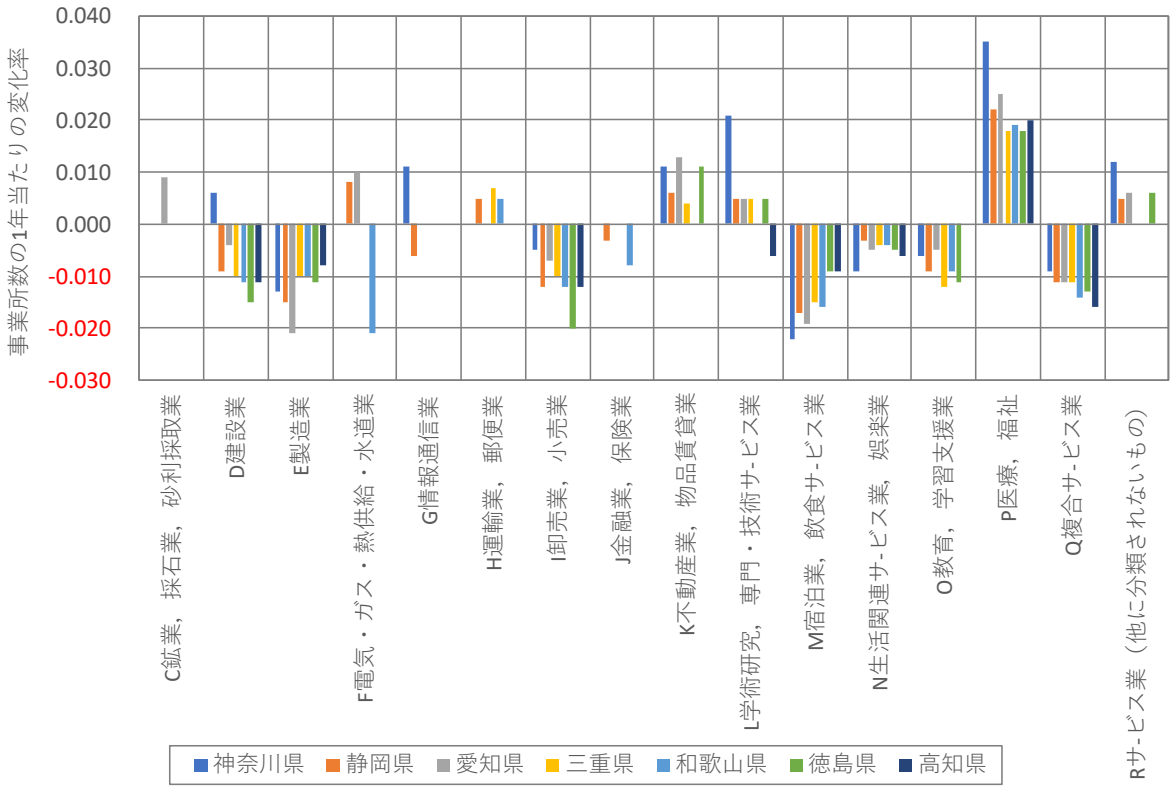


図 7.5　津波リスクに応じた事業所の減少率

表 7.3　津波リスクに応じた人口の減少率（西暦年）

	回帰係数　西暦年						
	神奈川県	静岡県	愛知県	三重県	和歌山県	徳島県	高知県
15～49歳	-0.004	-0.009	-0.056	-0.018	0.000	0.000	0.000
50歳～64歳	-0.005	-0.006	-0.025	0.000	0.000	0.000	0.000
65歳以上	-0.066	-0.030	-0.045	-0.036	-0.014	-0.009	-0.008

※P 値が 0.05 未満で，有意性が確認された係数値のみを採用

表 7.4　津波リスクに応じた人口の減少率（浸水深）

	回帰係数　浸水深						
	神奈川県	静岡県	愛知県	三重県	和歌山県	徳島県	高知県
15～49歳	-0.002	-0.008	-0.003	-0.010	-0.010	-0.013	-0.014
50歳～64歳	-0.009	-0.011	-0.011	-0.014	-0.012	-0.014	-0.015
65歳以上	-0.050	-0.062	-0.057	-0.066	-0.068	-0.071	-0.072

※P 値が 0.05 未満で，有意性が確認された係数値のみを採用

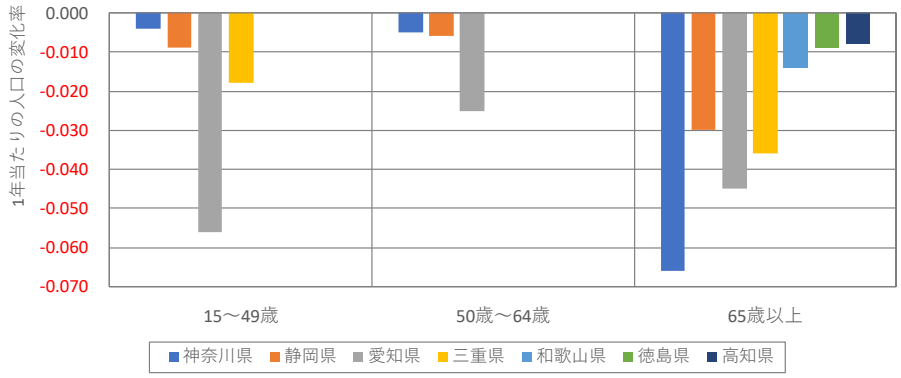


図 7.6　人口の 1 年当たりの変化率（プラス：増加，マイナス：減少）

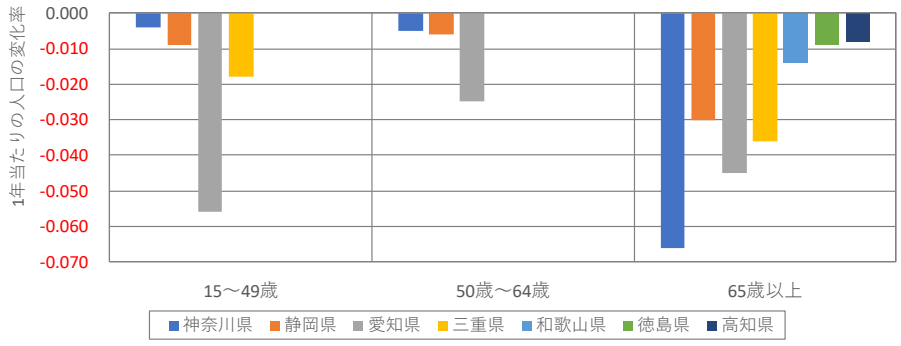


図 7.7　津波リスクに応じた人口の減少率

(3) 企業立地・人口の将来推計をする際の留意点

企業立地・人口の将来推計をする際には，**表** 7.5 に示す事項に留意する必要がある．なお，各市町の地域特性を付録 E に示す.

また，分析の結果，有意性が確認されていない係数値は採用しないなどの留意が必要である（一般的に P 値が 0.05 より大きい係数値は，有意性がないものと判断し，採用しない）.

～減災アセスメント小委員会の推計結果より分類～

①影響が大きい産業（影響大）

【卸売・小売業】【宿泊業・飲食サービス業】【生活関連サービス業】

需要が狭い範囲で成り立つ地場産業であり，津波リスクによる人口減少等も影響を受けやすい産業．また，観光産業でもあり，沿岸部の景観・眺望などの需要に対して成り立つ産業である．そのため，観光産業が主な地域では，津波リスクにより地域経済への影響が甚大となる可能性がある．

②影響が比較的ある産業（影響小）

【建設業】【製造業】【医療・福祉】

需要が比較的広範囲であり，事業所の立地は需要に対して必ずしも限定的である必要はない産業．また，医療・福祉等の公共性の高い事業所については，各自治体が津波浸水範囲外に移転を推進している．

③その他産業（影響極小）

津波リスクによる減少は，統計的に有意なものではない産業．ただし，地域によっては重要な産業である可能性もあり，無視することはできない.

表 7.5　企業立地・人口の将来推計をする際の留意点

地域特性	概要	留意点
産業特性	各地域の産業特性を考慮する.	**津波リスクの影響が大きい産業の割合が高い地域 (50%以上等)** ・沿岸部の漁村地域や観光地が多い. ・漁村地域の場合は生活圏であるため, 高齢化に伴う減少（若者が転入してこない）が主要因となり, 企業立地と人口減少を合わせて総合的な判断が必要である. ・観光地の場合は, 宿泊・飲食業の減少は地域経済への影響が甚大となる可能性がある. 地域の将来構想や事業者ヒアリングに基づく適切な判断が必要である. **津波リスクの影響が大きい産業の割合が中程度地域 (20%以上等)** ・特化した産業はなく様々な産業が立地している地域が多い. ・地域ごとに沿岸部の浸水エリアに立地する産業を抽出した上で, 適切に推計する必要がある. **津波リスクの影響が大きい産業の割合が低い地域 (20%未満等)** ・近隣に港湾が立地するなど, 製造業に特化した地域が多い. ・津波リスクによる企業立地数の減少は限定的であるものの, 津波浸水による被害額は甚大となる可能性がある. 例えば, 港湾区域内の製造業については, 個別に津波対策を実施するなどの対策が必要となる.
年齢構成	各地域の年齢構成を考慮する.	**高齢者の割合が高い地域(30%以上等)** ・過疎地域が多い. ・転入による増加が少ないと地域社会の形成に影響が大きくなる. 津波リスク低減を含め, 都市計画等と合わせて適切に推計する必要がある. **高齢者の割合が高くない地域(30%未満等)** ・地域ごとに転入と転出のバランスを確認した上で, 適切に推計する必要がある.
立地条件	平地や山地の浸水特性（広がりや浸水深）を考慮する.	**平地であり浸水範囲が広がりやすい地域** ・浸水範囲が広がりやすいが, 浸水深は小さい傾向である. そのため, 被害が出ても半壊等のすぐに復旧可能な状況となる可能性が高い. **山地であり浸水範囲は狭いが浸水深が大きくなる地域** ・山地では, 浸水範囲が広がりにくいが, 浸水深は大きくなる傾向になる. そのため, 被害件数は少ないが, 全壊となるため復旧が困難となる可能性が高い.

7.2.3. 避難率と死亡率

堤防高さが変わることで，浸水範囲や浸水深が異なるため，背後地の死亡者数に違いが出る．また，浸水開始時間も変わるため，避難の状況に応じて死亡者数が変わる可能性がある．したがって，人的被害を適切に評価することが重要となる．

死亡率の算出には，過去の津波事例に基づく方法や南海トラフ巨大地震モデル検討会で議論された津波浸水計算結果を与条件とする方法がある．これらに避難シミュレーションを用いた方法を加えると，算出方法は 3 つに分類でき，それぞれ算定に必要な与条件や比較できる施策の種類が異なるため，目的や与条件に合った算定方法を選択することとなる．

概算評価を行う場合，現状では，浸水解析結果を与条件とし，適切な避難行動別の比率を組み合わせたもので算定することを推奨する．

（解説）

上記の基本方針に加え，避難率と死亡率の算定においては以下に留意する必要がある．

- 検討する施策や対象地域の津波浸水，避難の地域特性に応じて，死亡率の算定方法や考慮する指標を選択する．目的に合わせて浸水計算方法や出力する浸水データを選択する必要もある．
- 適切な避難行動別の比率を組み合わせについては，**7.2.3** (2) b)を参照のこと．
- 3 種類の被害率算定において，a)過去の津波被害事例に基づく算定法は，津波の浸水深や浸水域分布の結果があり浸水開始時刻が入手できない，あるいは評価が難しい場合に用いる．b)浸水解析結果を用いる手法は，浸水開始時刻や死亡・負傷に起因する浸水域の時空間分布の情報がある場合の評価手法である．c)避難シミュレーションを用いる手法は，避難施設や避難経路等の避難行動に影響を与える様々な条件を変化させ，ボトルネック等による影響や対策の効果を計測するために用いる場合に有効である．
- 堤防高さが避難行動の選択意思等の避難者心理にも影響する可能性について，既往研究で指摘されている (有川ら，2016)．現段階では堤防高さと避難行動選択率の定量的な評価は難しいものの，避難対策などのソフト対策の効果比較として避難者心理による避難行動条件を変化させた感度計算を実施することが考えられる．
- 人命の経済価値を用いて，人的被害を資産被害と同じ天秤に乗せることは可能になる．沿岸市街地のまちづくりや産業立地の状況，効果的かつ選択可能な施策オプションを踏まえ，被害軽減期待額への包含をせず，施策オプションの比較データとして用いることが考えられる．詳細は，「**7.3.3** 死亡リスク軽減の経済価値」や「**7.3** 被害軽減期待額」を参照のこと．

(1) 算定方法の比較

表 7.6 に，3 つの人的被害算定手法の特徴を整理する．

同じ波源であっても津波波源から発生し伝播，沿岸部へ浸水するまでの過程が地域毎に異なる．「津波浸水の地域特性」は，浸水深分布や浸水開始時刻といった避難率に影響を与える要素の地域特性を指す．「避難特性」は，避難開始時刻等の避難群衆の行動特性や避難場所分布，避難経路形状等の避難対策の地域特性を指す．

表 7.6　3 つの人的被害算定手法の比較表

手法	概要	メリット	デメリット
a) 経験的手法	過去の津波被害調査で得られた浸水深毎の死亡率を人口分布に乗じて被害者数を算出する．	津波浸水の発生確率を用いた推計が可能である．	津波浸水の地域特性が十分考慮できない．避難特性も考慮できない．
b) 津波浸水解析結果を用いた手法	人口と浸水深分布，浸水開始時刻の平面分布の分析により被害者数を算出する．	a)のメリットに加え浸水開始時刻や避難者行動特性をある程度考慮することができる．	各津波ケースの津波浸水データが必要になる． 避難経路特性は考慮できない．
c) 避難シミュレーションによる手法	津波浸水と群衆避難のシミュレーション結果を重ね合わせて被害者数を算出する．	b)のメリットに加え避難路整備等の対策効果を考慮することができる．	計算負荷が大きい． 避難シミュレーションに必要な情報を収集する必要がある．

(2) 各算定方法の概要

a) 過去の津波被害事例に基づく算定法

宍戸・今村は，3 つに算定式を整理した．式(7.3)は，1944 年に発生した東南海地震で被害が顕著だった三重県志摩半島以南の地域の家屋被害数と死亡者数の関係式に基づく，宮野・呂（1992）の提案式である．式(7.4)は，静岡県が第三次地震被害想定報告書（2001）で用いた北海道南西沖地震の調査結果に基づく推定式である．式(7.5)は，内閣府中央防災会議の東南海・南海地震等に関する専門委員会で用いた推定式であり，建物被害ではなく浸水深 h をパラメータとしている（**図 7.8**）．式(7.3)中の大破棟数 L および中破棟数 M，式(7.4)中の大破棟数率 l および中破棟数率 m について，浸水深 h を変数とする推定式が提案されており，3 つの算定式はいずれも浸水深 h から死亡率を算出することができる．

浸水計算にレベル湛水法を用いる場合，通常浸水開始時間を与えることができないため，本算定法を用いる．津波到達時間を考慮するため，**図 7.9** に示す補正率を乗じる手法を内閣府が提案している．また，同補正方法により避難意識の高さを考慮することが可能であることも説明している．

$$D = 0.072 \times \left(L + \frac{1}{2} M \right)^{1.018} \tag{7.3}$$

$$D = 0.0424 \times \exp\left[0.1763 \times \left(l + \frac{1}{2} m \right) \right] / 100 \times P_{op} \tag{7.4}$$

$$D = 0.0282 \times \exp(0.2328 \times h) \times P_{op} \tag{7.5}$$

ここに，D：死者数（人），L：大破棟数（棟），M：中破棟数（棟），l：大破棟数率（%），m：中破棟数率（%），P_{op}：人口，h：浸水深（m）である．

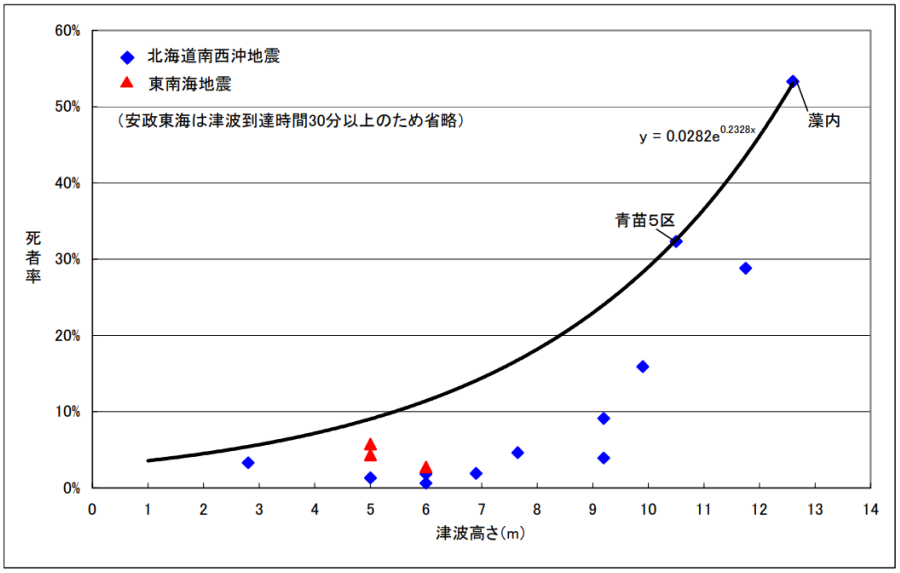


図 7.8　内閣府が提案する死者率算定式（式(2.3.5)）

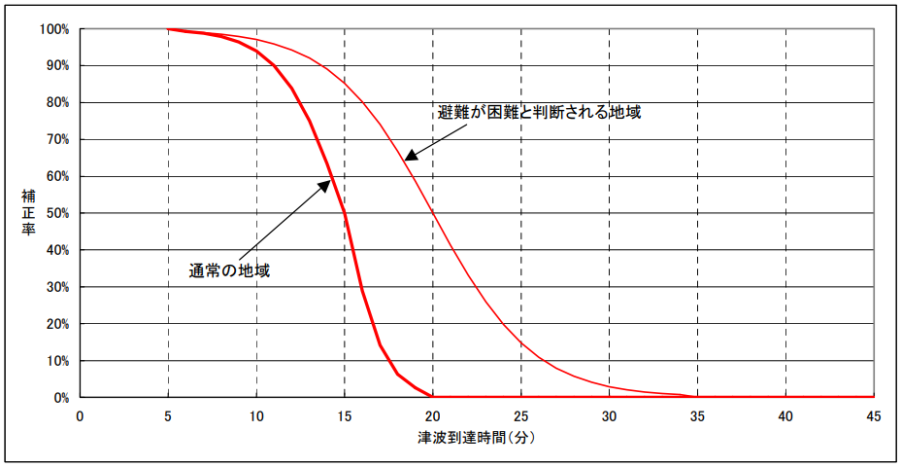


図 7.9　内閣府が提案する津波到達時間による死者率の補正法

b）津波浸水解析結果を用いた算定法

本手法は内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会の算定方法であり，津波の発生から浸水に至る過程や避難行動開始時刻などの影響を考慮するものである．避難シミュレーションの避難経路や避難者行動を単純化した推計手法と考えることでき，本算定法では津波浸水深と浸水開始時刻を指標として取り入れ，避難者の避難行動選択意思や避難開始を設定する必要がある．

内閣府に記載される本手法の基本的な考え方を以下に箇条書きにする．

- 津波浸水域において津波が到達する時間（浸水深 30cm 以上）までに避難が完了できなかった者を津波に巻き込まれたものとし，そこでの浸水深をもとに死亡か負傷かを判定する．
- ①避難行動（避難の有無，避難開始時期）（**表 7.7**），②津波到達時間までの避難完了可否（**図 7.9**），③津波に巻き込まれた場合の死者発生度合（**図 7.10**）の 3 つに分けて設定する．
- 内閣府は，避難行動（避難の有無，避難開始時期）の設定パターンとして，**表 7.7** に示す 4 パターンを挙げ，それぞれの避難行動別の比率を提示した．被害推定には，避難訓練実施の状況や震源地との距離等の実情を踏まえ，早期避難率高＋呼びかけケース，早期避難率高ケース，早期避難率低ケースのいずれかを用いる．一方，避難開始迅速化ケースは，避難に関する取り組みが少ない地域において避難行動の重要性を示す目的で行われるものと考えられる．避難行動の減災効果を明示する方法として，全員が避難をしない場合の人的被害を算出し，これらの避難行動パターンと被害率を比較することが挙げられる．
- 揺れによる建物倒壊に伴う自力脱出困難者は，津波からの避難ができないものとする．
- 今後，東日本大震災の結果を整理し，実地に即した比率を提案する必要がある．

表 7.7　避難行動別の比率（①避難行動の設定法）

	避難行動別の比率		
	避難する		切迫避難あるいは避難しない
	すぐに避難する（直接避難）	避難するがすぐには避難しない（用事後避難）	
全員が発災後すぐに避難を開始した場合（避難開始迅速化）	100 %	0 %	0 %
早期避難者比率が高く，さらに津波情報の伝達や避難の呼びかけが効果的に行われた場合（早期避難率高＋呼びかけ）	70 %	30 %	0 %
早期避難者比率が高い場合（早期避難率高）	70 %	20 %	10 %
早期避難者比率が低い場合（早期避難率低）	20 %	50 %	30 %

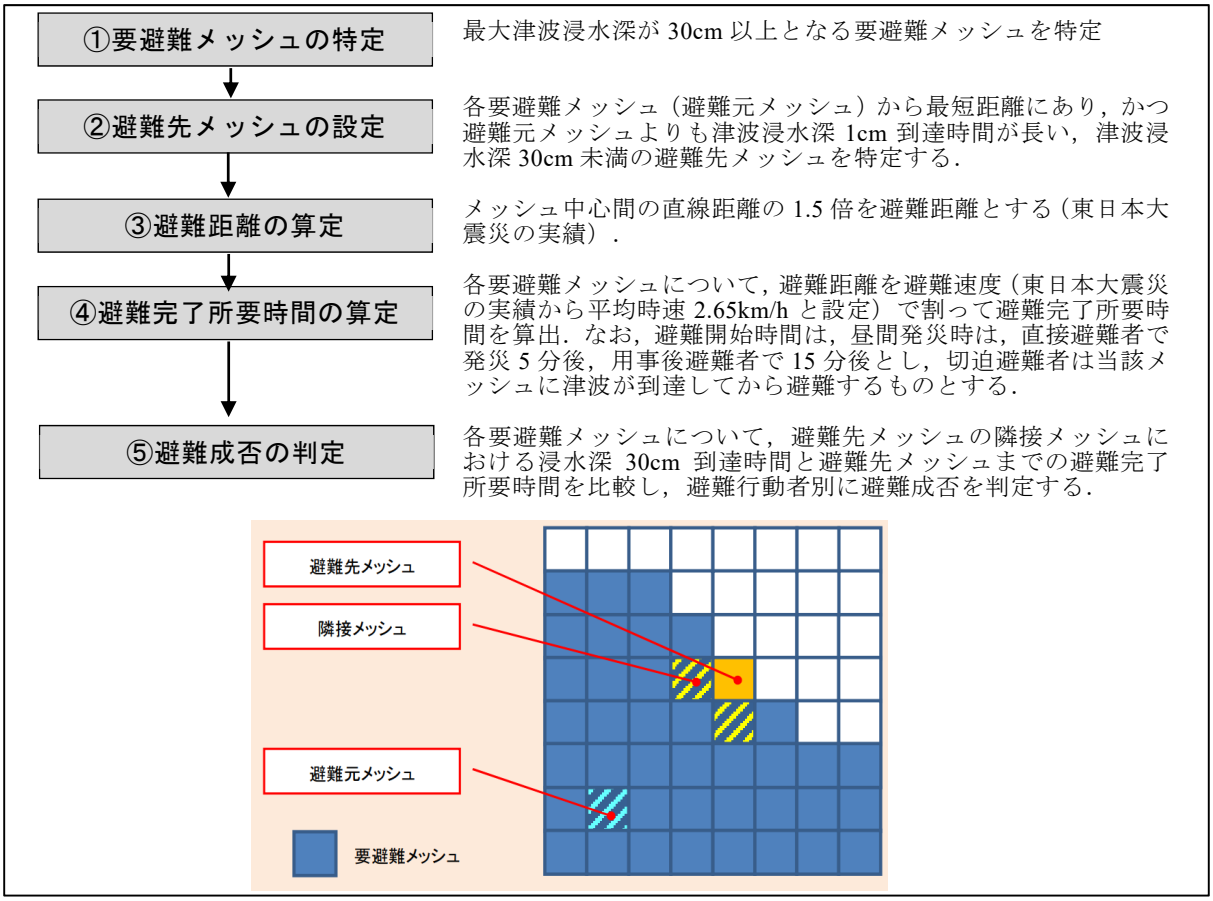
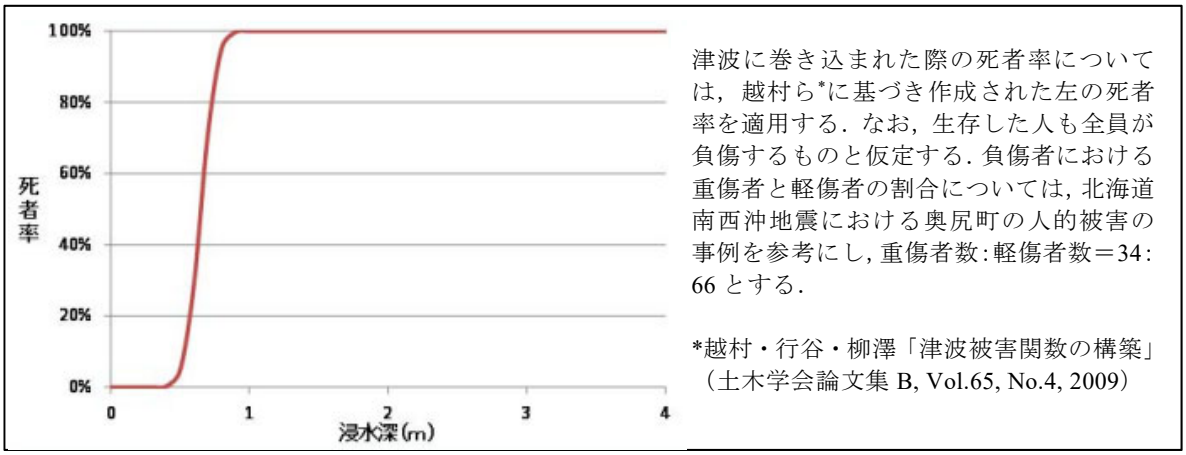


図 7.9　②津波到達時間までの避難完了可否の判定フロー



津波に巻き込まれた際の死者率については，越村ら*に基づき作成された左の死者率を適用する．なお，生存した人も全員が負傷するものと仮定する．負傷者における重傷者と軽傷者の割合については，北海道南西沖地震における奥尻町の人的被害の事例を参考にし，重傷者数:軽傷者数＝34:66 とする．

*越村・行谷・柳澤「津波被害関数の構築」（土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, 2009）

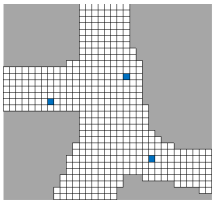
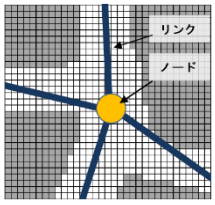
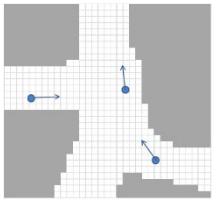
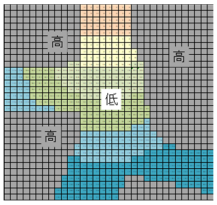
図 7.10　死亡判定に用いる判定③浸水深別死者率

c）避難シミュレーションを用いた算定法

避難シミュレーションには**表 7.8** に示す種類があり，避難経路の形状や避難者の移動方向を決めるなどの機能が異なり，組み合わせて用いる場合もある．例えば，個別要素型モデルとポテンシャルモデルのハイブリッド型モデルは，避難者の挙動の自由度が高く詳細な避難路の設定も可能である．避難対策等のソフト施策の効果を考慮するには，効果的な手法であると考えられる．

図 7.10 に，津波浸水計算と避難シミュレーションの結果から被害率を算出した一例を示す．近年多用されているマルチエージェントモデル（例えば有川ら，宇野ら，牧野嶋ら）について，堀らは計算手法の妥当性の確認方法を提案している．

表 7.8　避難シミュレーションの種類

種類	モデルの概要	モデル化の対象等	備考
セルオートマトンモデル 	避難者はセル空間に配置され移動は今いるセルに隣接するセルに移動する．	避難経路 グリッド	
ノード･リンクモデル 	避難経路をノードとリンクで表現し，リンク上を避難者が移動する．	避難経路	
個別要素型モデル 	避難者を様々な属性をもつ要素として移動させる．衝突回避を要素間の反発力で表現する．	避難経路（壁面を要素で表現，避難者同士の衝突回避）	
ポテンシャルモデル 	避難路空間をポテンシャル値で表現し，避難場所に向かって移動させる．	避難方向 グリッド／ノード・リンク	

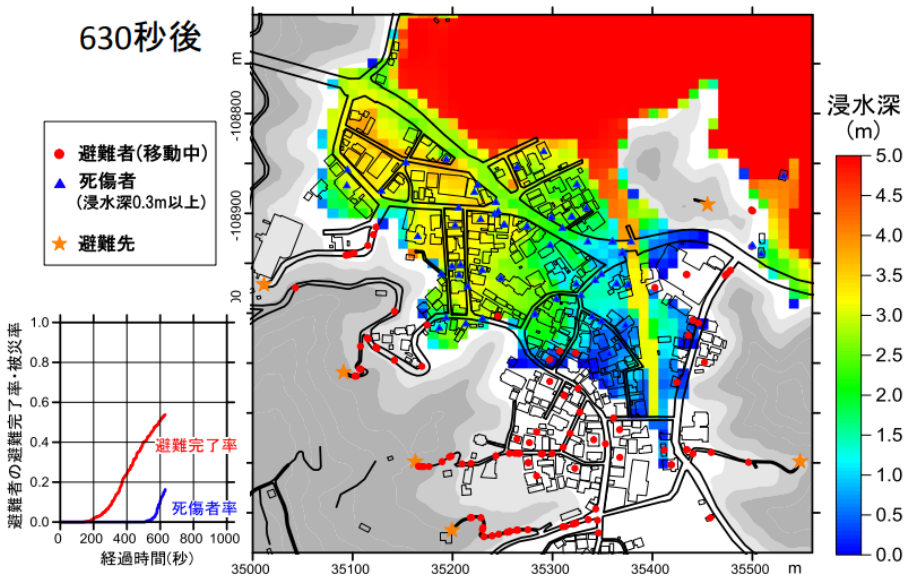


図 7.10　避難シミュレーションにおけるスナップショット（宇野ら，2015）

(3) 人的被害に影響を与える避難行動や津波浸水の因子

越村ら（2009）は，人的被害は津波高さのみならず津波の到達時刻や避難者の行動意識によっても変化することを指摘しており，被害推定においては影響する因子を必要に応じて考慮する必要がある．**表 7.9** に，津波による人的被害に影響を与える主な影響要因と被害算定手法における考慮の可否，設定方法を整理する．

また，堤防高さが人的被害に与える影響として，背後住民の津波から防護する安心感へとつながるメリットがある一方で，避難行動意思へ影響を与えることが指摘されている．避難者の心理的作用の影響の定量的評価は現時点では難しいが，ソフト対策検討においては感度計算を行い，施策決定者や住民の理解を促す情報として整理することが望ましい．

表 7.9　津波による人的被害の影響要因と被害算定手法における考慮の可否

要因	設定方法等	考慮の可否		
		a	b	c
浸水深分布	・津波浸水計算結果を用いる．波源や堤防高によって変化する．	○	○	○
浸水開始時刻	・津波浸水計算結果に用いる．波源や堤防高によって変化する．	－	○	○
人口分布	・国土地理院や市販の地図の建物情報を設定する． ・日中と夜間で人口分布に違いがあることを踏まえた詳細な検討をする場合には，従業地・通学地データ（国勢調査）や学校規模等に関する自治体の公表データに基づき設定する． ・施策として，高台移転や土地利用計画を踏まえた推計が可能になる．	○	○	○
避難行動の選択意思	・内閣府は，**表 7.7** に示す条件設定を提案している，また，アンケートや過去の事例から設定する方法も提案されている． ・避難者の心理を考慮した ・防災教育による効果として検討することができる．	－	○	○
避難開始時刻	・内閣府は，**表 7.7** の設定方法を提案している．アンケートや過去の事例から設定する方法がある． ・夜間は睡眠中から動き出すため，避難開始が遅れる．激しい揺れが継続する場合や，揺れが感じられない場合にも避難の判断が遅れる可能性がある．一方，防災計画や防災情報発信等の施策により，初動を早くする取り組みにより避難行動が早まる可能性がある． ・避難者毎に開始時刻が異なると考えられることから，ばらつきを考慮した設定方法が提案されている．	－	○	○
避難時移動速度	・提案式が様々ある．たとえば，内閣府は，東日本大震災発災時の状況のアンケート結果に基づき，徒歩での避難速度は平均 2.54 km/h，さらに歩行困難な同行者がいた場合に 1.88 km/h となることを提案している． ・移動開始時刻と同様に，避難者毎に異なると考えられることから，ばらつきを考慮した設定方法が提案されている． ・高齢者や避難時要援護者の移動速度は，一般的に健常者に比べて小さい．マルチエージェントモデルでは個別設定が可能である． ・夜間，特に停電が発生した場合には，避難路が見にくく移動速度が遅くなる．また，地震時の強い揺れによって障害物が発生する場合にも，移動速度が遅くなる可能性がある．	－	○	○
鉛直避難（避難タワー・ビル）	・自治体が作成する津波ハザードマップや避難計画，国土地理院 HP の指定緊急避難場所データに基づき設定できる． ・鉛直避難については，避難場所が近い場合でも海側等の避難	－	△	○
避難のしやすさ	・避難シミュレーションでは，街路形状を取り込み評価する．また，内閣府では，メッシュ中心間の直線距離の 1.5 倍を避難距離として考慮している（**図 7.9** 参照）． ・算定方法 c では，避難場所等の避難対策を評価できる．避難場所までショートカットするための階段設置等の避難路整備による避難行動の円滑化や促進を図る施策についても評価が可能である． ・危険個所（ブロック塀崩壊等）を考慮することもあり，その場合には津波ハザードマップや現地踏査等を参考に設定する．	－	△	○

【参考文献】

有川太郎・野地徹・平野弘晃・遠藤雅人 (2016)：防護施設の津波避難に及ぼす影響に関する考察，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.72，No.2，pp.I_1561-I_1566.

宇野喜之・鴫原康子・岡安章夫 (2015)：津波人的被災リスク評価のための群集避難シミュレーションの開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71，No.2，pp.I_1615-I_1620.

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.

佐藤太一・河野達仁・越村俊一・山浦一保・今村文彦 (2008)：認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発：避難シミュレーションへの心理的要素の導入，地域安全学会論文集，10 巻，pp.393-400.

宍戸直哉・今村文彦 (2009)：津波リスクマップ作成のための人的被害評価手法の検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65，No.1，pp.1346-1350.

内閣府：東海地震対策，東海地震に係る被害想定手法について，http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/taisakusenmon/soutei2/pdf/sankou.pdf，2021-05-08 閲覧

内閣府：南海トラフ巨大地震モデル検討会，http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf，2021-05-08 閲覧

堀宗朗・末松孝司・荒木秀朗・奥村与志弘・土肥裕史 (2015)：避難シミュレーションにおける品質保証の現状と今後の展望，日本地震工学会論文集，第 15 巻，第 5 号(特集号)，pp.144-157.

宮野道雄・呂恒倹 (1992)：既往の被害調査資料に基づく地震時の人的被害に関する検討，地域安全学会論文報告集，No.2，pp.127-135.

7.3. 被害軽減期待額の算定

7.3.1. 被害軽減期待額の概要

被害軽減期待額は，「海岸事業の費用便益分析指針（改訂版）」に準拠し，想定浸水域内に存在する一般・農地資産被害額等を個別に積み上げる方法により算定することを基本とする．

（解説）

(1) 算定手法

6 章で推定した最大浸水範囲及び最大浸水深と，**7.2** に基づく将来資産の推計結果より，確率年ごと・海岸堤防高さごと (with) の被害額を計算し，海岸堤防を整備しない場合 (without) の結果との差より被害軽減期待額を計算する．

表 7.6 想定される浸水被害

（出典：多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究，東京大学博士論文，275pp.，2014.）

表-4 被害額として考えられる定義

	(a)水害により損傷した物的資本の評価額を貨幣換算したもの	(b)復旧にあたり被災者が当面必要とする資金額	(c)被災者の効用を全て被災前に戻すための費用（治水の費用便益分析の便益として見込むべき費用）	(d)被災者の生活水準、被災事業所の財務水準を従前の状態に戻すために必要な費用	(e)現行マニュアルの対象
建物被害	時価評価額	復旧費用	復旧費用	復旧費用	建物全体の再調達価格を被災部位の被害相当分に按分したもの
家財被害	時価評価額	再調達価格	再調達価格	再調達価格	再調達価格
家庭における応急対策費用					
清掃費用		○	○	○	いずれかを計上
自宅解体費用		○	○	○	
代替活動支出費用		○	○	○	○
代替住居費		○	○	○	
代替車両費		○	○	○	
事業所の在庫資産被害	○		○	○	○
事業所の償却資産被害	時価評価額	再調達価格	時価評価額	時価評価額	時価評価額
営業停止・停滞損失額			○	○	
事業所における応急対策費用					
代替活動支出費用		○	○	○	○
取引先への連絡費用		○	○	○	
データ復旧費用		○	○	○	
仮設事業所費用		○	○	○	
被災者の精神的被害			○		
被災者への寄附、ボランティア活動、政府による所得再配分等			○		

(2) 家屋・家庭用品被害

家屋・家庭養浜被害は，**表 7.7** に示す算定式で算定することを基本とする．

表 7.7 家屋・家庭用品被害の算定式

No.	項目	算定式
1	建物被害	「①延べ床面積」×「②家屋 1 ㎡当たり単価」×「被害率」
2	家財被害	「③世帯数」×「④1 世帯当たり家庭用品評価額」×「被害率」
3	家庭における応急対策費用	「③世帯数」×「⑤1 世帯当たり応急対策費用」

※丸数字は**表 7.11** に示す資産データの No.を示している．

※被害率は **7.3.5** を参照

(3) 事業所関連被害推計方法

事業所関連被害推計は，多田（2014）を参考に推計することを基本とする．

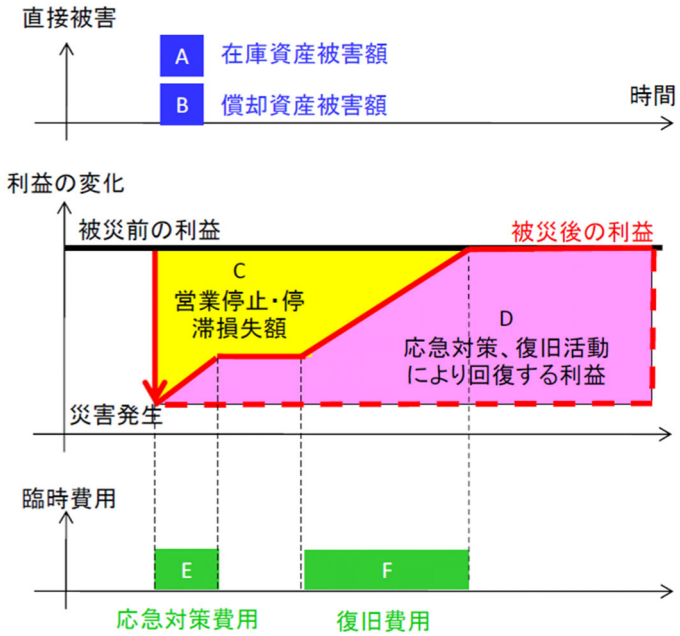


図 7.8 事業所被害を構成する項目

（出典：多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究，東京大学博士論文，275pp.，2014.）

表 7.8　応急対策費用の算定方法

（出典：多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究，東京大学博士論文，275pp.，2014.）

	現行マニュアル	本研究における改善点
全般	・郵送アンケート調査	・事前郵送アンケート調査 ・訪問調査 ・地盤高からの浸水深で表現
在庫資産被害額	・①製品又は商品在庫、②仕掛品、③原材料・貯蔵品の毀損額を産業別従業員1人あたりで原単位化	・対象項目はそのままであるが、項目毎の被害実態を調査することで回答漏れを防止
償却資産被害額	・被災した償却資産の割合を被災事業所に調査 ・被災前の償却資産総額（税制の減価償却率を適用した評価額）を100%として、浸水深に応じた被害率を乗じる。	・被災前の資産評価額については、実使用年数調査に基づいて減耗（償却）させている国民経済計算（SNA）の統計値を採用
営業停止・停滞損失額	・営業停止及び停滞日数に被災前の付加価値額を乗じて被害額を計上 ・付加価値額には法人企業統計の統計値を採用 ・浸水深別の停止期間・停滞期間を設定 ・営業停滞期間は営業停止期間の2倍と設定	・付加価値額には国民経済計算（SNA）の統計値を採用 ・付加価値額の構成項目に、被災していない償却資産の減価償却費を追加 ・停止期間とは独立に停滞期間を設定
応急対策費用	・清掃費や原材料費の高騰等を計上 ・浸水別事業所1箇所あたりの費用を原単位化	・清掃費等に加え、仮設事業所設置費用、データ復旧費用等を計上 ・浸水深別従業員1人あたりの応急対策費用として原単位化

表 7.9　家屋・家庭用品被害の算定式

No.	項目	算定式
1	事業所在庫資産被害額	「⑥被災事業所従業者数」×「⑦従業者 1 人当たり在庫資産評価額」×「被害率」
2	事業所償却資産被害額	「⑥被災事業所従業者数」×「⑧従業者 1 人当たり償却資産評価額」×「被害率」
3	営業停止・停滞損失額	「浸水深別営業停止日数」＋0.5×「浸水深別営業停滞日数」×「従業者 1 人あたり付加価値額」×「⑥被災事業所従業者数」
4	事業所における応急対策費用	「⑥被災事業者数」×「⑨浸水深別の 1 事業所当たりの代替活動費」

※丸数字は**表 7.11** に示す資産データの No.を示している．

※被害率は **7.3.5** を参照

表 7.10　従業者 1 人あたり付加価値額及び償却資産評価額

		現行マニュアル		新たな統計値 SNA付加価値(国内総生産)	
日本産業分類コード	産業	1人1日あたり付加価値額（円/人日）	1人1日あたり減価償却費（円/人日）	1人1日あたり付加価値額（円/人日）	1人1日あたり減価償却費（円/人日）
C	鉱業、採石業、砂利採取業	83,696	13,897	19,987	15,298
D	建設業	20,155	1,357	18,738	1,645
E	製造業	28,561	5,401	28,768	7,860
F	電気・ガス・熱供給・水道	110,016	62,507	20,629	56,529
G	情報通信業	37,305	7,979	48,413	9,653
H	運輸業，郵便業	22,382	3,448	19,275	7,243
I	卸売り業・小売業	24,978	1,608	22,704	2,209
J	金融業、保険業	19,600	5,449	45,665	8,380
K	不動産、物品賃貸業	50,576	13,124	131,528	9,957
L～R	サービス業	20,228	1,363	16,899	3,948
	就業人口別加重平均	24,491	3,208	24,829	5,079

（1 日 1 人当たり付加価値額＋（100%-償却資産被害率）×1 日 1 人当たり減価償却費）

7.3.2. 本ガイドラインで対象とする資産

本ガイドラインでは，被害軽減期待額を算定するに当たり，「家屋・家庭用品被害」，「事業所関連被害」，「人的被害」，「公共土木施設・公共事業等」を考慮することを基本とする．

（解説）

本ガイドラインでは，被害軽減期待額を算定する際に使用する資産データは**表 7.11** を基本とする．

表 7.11 被害軽減期待額を算定する際に使用する資産データ等

No.	資産データ	データの入手先の例	備考
①	延床面積	基盤地図情報（国土地理院）	「建物被害」の算定に使用
②	家屋 1m^2 当たりの単価	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「建物被害」の算定に使用
③	世帯数	「国勢調査結果」を現況とし，浸水リスクに伴う人口変化を反映して設定	「家財被害」，「家庭における応急対策費用」の算定に使用
④	家庭用品評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「家財被害」の算定に使用
⑤	1 世帯当たりの応急対策費用	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「家財被害」の算定に使用
⑥	被災事業所従業者数	「経済センサス」を現況とし，浸水リスクに伴う企業立地変化を反映して設定	「事業所在庫資産被害額」，事業所償却資産被害額」，「営業停止・停滞損失額」の算定に使用
⑦	従業者 1 人当たり在庫資産評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「事業所在庫資産被害額」の算定に使用
⑧	従業者 1 人当たり償却資産評価額	「治水経済調査マニュアル（案）各種資産評価単価及びデフレーター」	「事業所償却資産被害額」の算定に使用
⑨	浸水深別の 1 事業所当たりの代替活動費	多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究, 東京大学博士論文, 2014	「営業停止・停滞損失額」の算定に使用

7.3.3. 死亡リスク軽減の経済価値

津波対策により人々が津波によって亡くなるリスクを減少させることができる．津波による死亡リスクの軽減の経済価値は「統計的生命価値（Value of Statisitical Life）」を用いて算出する．ある津波対策の死亡リスク軽減の経済価値Bは次式で求められる．

$$B = S \times \Delta n$$

S：統計的生命価値

Δn：津波対策によって減少する死者数の期待値

統計的生命価値は一人の命の経済価値と誤解されることが多い．そうではなく，統計的生命価値は，死亡リスクの微小な減少（例：10 万分の 1 の減少）に対する支払意思額を，減少リスクが 1 となるまで集計（例：10 万人で集計）した金額である．

本ガイドラインでは，国土交通省（2009）「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」に従い，内閣府（2007）で推定された 2.26 億円を調査実施年である 2006 年の統計的生命価値とする．

事業評価時には，この 2006 年の統計的生命価値を，物価上昇と実質所得の成長を考慮して事業評価を行う年に調整する．その調整式は以下の解説に示す．

（解説）

7.3.3.1. 死亡リスク軽減の経済価値の算出方法

津波対策の経済価値には，津波により人が亡くなるリスクを軽減する価値が含まれる．ここで評価されるべきなのは，人の命の経済価値ではなく，津波による死亡確率が軽減されることの経済価値であることに注意が必要である．ある死亡リスク軽減の経済価値は，そのリスク軽減のために各個人が支払ってもよいと思う最大額である「支払意思額」(WTP: Willingness To Pay）を，そのリスクに晒されている人々で集計したものとなる．

例えば，N人の住民が津波リスクに晒されており，防潮提を嵩上げすることで津波による個人i（$= 1, \cdots N$）の死亡確率がΔp_iだけ軽減されるとする．また，各個人iは死亡確率をΔp_iだけ軽減するために最大で$WTP_i(\Delta p_i)$円を支払ってもよいと考えているとする．このとき，防潮提を嵩上げの死亡リスク軽減の経済価値Bは下式で表される．

$$B = \sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p_i) \tag{7.6}$$

Δp_i：防潮堤嵩上げによる個人iの死亡確率の減少量

$WTP_i(\Delta p_i)$：個人iが死亡確率をΔp_i軽減するために支払ってもよい最大額

上記が死亡リスク軽減の経済価値Bの正しい算出方法であるが，各個人について堤防嵩上げによる死亡確率の軽減Δp_iとそのための支払意思額WTP_iを推定することは実務上難しい．そのため，「統計的生命価値」という概念を用いることで，死亡リスク軽減の経済価値Bを求めることが一般的である．個人iの統計的生命価値S_iの定義は下式である．

$$S_i = WTP_i(\Delta p_i) \times \frac{1}{\Delta p_i} \tag{7.7}$$

例えば，ある人にとって死亡確率を 10 万分の 1（0.001%）減少させるために最大で 1,000 円支払ってもよいと考えるなら，その人の統計的生命価値は 1 億円（=1,000÷0.001%）となる．

評価対象となるN人の住民の統計的生命価値の平均値をSとすると，いくつかの仮定を置くことによって，(7.6)式で示した死亡リスク軽減の経済価値Bは下式でも求められる．

$$B = S \times \Delta n \tag{7.8}$$

S：統計的生命価値の平均値（$S = \sum_{i=1}^{N} S_i/N$）
Δn：堤防嵩上げによって減少する死者数の期待値

上式が成立するための仮定と証明は付録 E.1 で解説する．ある政策の死亡リスク軽減の経済価値を算出するために，対象とするリスクに対する統計的生命価値を全員について調べるのは時間と費用がかかりすぎるため，過去の研究で既に推定されている統計的生命価値を利用することが一般的である．

統計的生命価値は，その名称の印象から，一人の命を経済評価したものと誤解されることが多い．その本当の意味は，死亡リスクの微小な減少（例：10 万分の 1 の減少）に対する支払意思額を，減少リスクが 1 となるまで集計（例：10 万人で集計）した金額である．つまり，死亡リスク軽減の経済価値の算出を簡単にするために用いられる便宜的な金額であり，その額自体について意味のある解釈を与えることは難しい．これまで統計的生命価値という名称は誤解を招くと批判され，いくつかの新しい名称も提案されている．しかし新しい名称で定着したものはないため，ここでも慣例に従い統計的生命価値という名称を用いる．

7.3.3.2. 統計的生命価値

(1) 統計的生命価値の推定法と推定値

世界各国の様々な政策評価において，死亡リスク軽減の経済価値を算出するために統計的生命価値が用いられている．統計的生命価値の推定方法には顕示選好法と表明選好法の

大きく二つある．前者は，職業ごとの死亡確率と賃金のデータを使うなど人々の実際の選択データを用いる方法であり，主に米国で採用されている．後者は，ある仮想的な死亡確率の軽減政策に対する人々の最大支払意思額をアンケート調査によって尋ねる方法であり，欧州各国やカナダ，オーストラリアで用いられている．各国で用いられている統計的生命価値は付録 E.2 で示す．

日本では，内閣府（2007）が表明選好法を用いて統計的生命価値を 2.26 億円と推定している．国土交通省（2009）「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」は，この推定額の使用を推奨している．日本における統計的生命価値の推定値についてメタ分析を行ったところ，各研究の推定額には大きなばらつきが見られたものの，メタ分析に利用可能な研究の推定値を統合した結果は同程度の金額となった．このメタ分析については付録 E.3 で簡単に説明する．

(2) 年度調整

政策評価に統計的生命価値を用いるときには，それが推定された年での金額をインフレーションと実質所得の成長を考慮して政策評価を行う年に調整する必要がある．その調整は下式で行う．

$$S_T = S_t \times \left(\frac{P_T}{P_t}\right) \times \left(\frac{I_T}{I_t}\right)^{\varepsilon} \tag{7.9}$$

S_T：政策評価する年Tでの統計的生命価値
S_t：推定された年tでの統計的生命価値
P_T：政策評価する年Tでの物価指数
P_t：統計的生命価値が推定された年tでの物価指数
I_T：政策評価する年Tでの実質所得
I_t：統計的生命価値が推定された年tでの実質所得
ε：統計的生命価値の所得弾力性

7.3.3.3. 本マニュアルで使用する統計的生命価値

(1) 年度調整済み統計的生命価値

政策評価に用いる統計的生命価値を算出するために，本ガイドラインでは下記のデータを用いる．統計的生命価値の所得弾力性は，米国環境保護庁や米国運輸省のガイドラインに従って 1.0 とする．

統計的生命価値：2.26 億円（調査実施年の 2006 年基準）
物価指数：全国消費者物価指数（2015 年基準）

実質所得：実質国民総所得（GNI）（2015 年基準）
所得弾力性：1.0

上記データを(7.9)式に代入してインフレーションと実質所得成長を調整した統計的生命価値を下表に示す.

表 7.12 年度調整済み統計的生命価値

年度	物価指数	実質所得（兆円）	統計的生命価値（億円）
2006（元データ）	97.1	545.4	2.26
2015	100.0	562.5	2.40
2016	100.0	566.9	2.42
2017	100.7	574.4	2.47
2018	101.4	573.2	2.48
2019	102.0	572.7	2.49

(2) 仮想的な死亡リスク軽減の経済価値の試算例

ここで，仮想的な例で統計的生命価値による死亡リスク軽減の経済価値の算出方法を説明する．ある地域において，津波による死亡者数の期待値は年間 10 人であり，防潮堤嵩上げによって，死亡者数の期待値は年間 5 人まで減少したとする．このとき，2019 年を基準年として防潮提嵩上げによる死亡リスク軽減の経済価値を算出すると，下式により 12.45 億円となる．

$$B = S \times \Delta n = 2.49 \times (10 - 5) = 12.45 \tag{7.10}$$

上記のように，統計的生命価値と津波対策による死亡者数の期待値の減少量が得られれば，その死亡リスク軽減の経済価値は簡単に求められる．

7.3.4. 公共土木施設・公共事業等被害額の算定

想定浸水域内の公共土木施設（橋，道路，公園等），公共事業等被害額（電機，ガス，水道）は，想定浸水域内に存在する資産額を積み上げることにより算出することを基本とする．ただし，積み上げ式が困難な場合は，過去の一般被害額との比率を用いて算定することも可能とする．

（解説）

防護地域内の公共土木施設（橋，道路，公園等），公益事業等（電気，ガス，水道等）の被害額は，防護地域内に存在する資産額を積み上げることにより算出することとする．被害率は適切な根拠を明示し，使用することとする．被害率に関するデータがない場合には，その旨明記し，前述の浸水被害における各資産被害率一覧表の家屋の被害率を流用するなどして，算出することとする．また，道路，鉄道等の交通遮断，上下水道施設等の停止等による被害額についても，適切な根拠を明示し，算出するものとする．

積み上げ方式による算出が困難な場合は，やむなく以下の方法によることとする．水害統計に記載されている水害のうち，海岸災害（波浪，津波，高潮）による一般資産被害額と農作物被害額との合計値と，公共土木施設被害額，公益事業等被害額（営業停止額を除く）の間の過去 26 年間（1976～2001）の平均比率を便宜的に使用し，公共土木施設被害額，公益事業等被害額を算定する．なお，従来は，各地方別の平均比率を用いてきたところであるが，地方別の比率の有意性がないことから，今後は，全国の比率を用いるものとする．また，過去 5 年間（1997～2001）について，人口 30 万人以上の都市における平均比率と，それ以外の地域での平均比率を比較すると，前者は後者の 3 分の 1 程度となった．このように，人口や資産が集中している都市部において，全国平均から求めた平均比率を用いて算定すると，過大評価になる可能性があることに留意する必要がある．

なお，水害統計では，公共土木施設に，農地等に関するデータは含まれていないことにも留意する必要がある．

表 7.12 被害額の比率【全国】（過去 26 年間の平均値）

一般資産等被害額	公共土木施設被害額	公益事業等被害額
100	180	3

注 1. 一般資産被害額を 100 とした場合の各資産被害額の比率（%）
2. 被害額は，公共事業のデフレーターを用いて補正

（「海岸事業の費用便益分析指針（改訂版） 平成 16 年 6 月」引用）

7.3.5. 浸水深に応じた被害率

浸水深に応じた被害率や営業停止・停滞日数は，「治水経済調査マニュアル」や「海岸事業の費用便益分析指針（改訂版）」，既往文献を基に適切に設定する．

（解説）

(1) 津波被害予測式の変遷と津波被害関数

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，例えば，浸水深が 2-4 m 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採られている．

現地調査から被害予測式の構築手法を確立したのは，松冨らの一連の研究である．特に，飯塚・松冨（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，例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 2 m 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．

そこで，越村らによる「津波被害関数」が提案された．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)．2011 年東北地方太平洋沖地震津波における津波被害関数について紹介する．これらの関数の構築に関しては，越村・郷右近（2012）を参照されたい．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 2 m を境として流失率が急増し，6 m で流失

率はおよそ 8 割に及ぶことが分かる．また，Banda Aceh の事例と比較した場合には，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．例えば，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．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できていないことに注意が必要である．

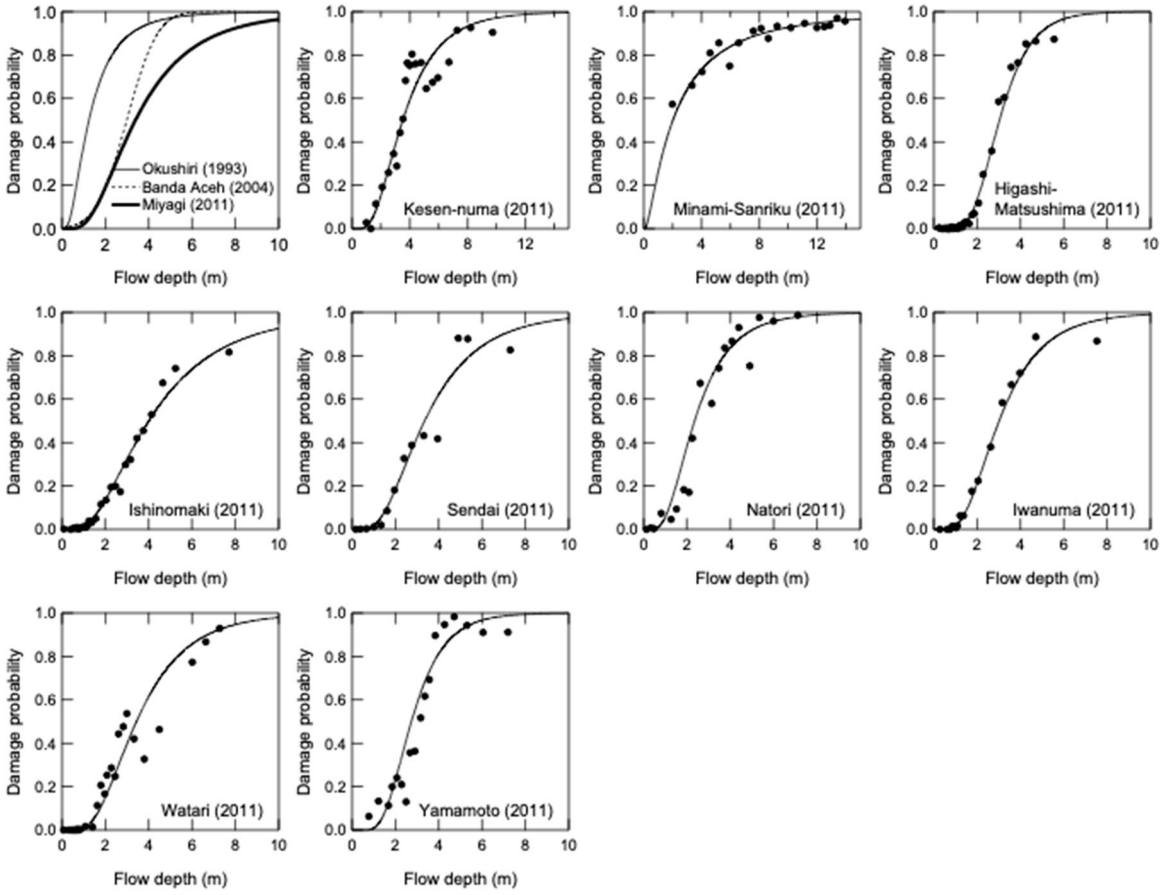


図 7.9　東日本大震災で得られた津波被害関数（建物の流失率）

(2) 治水経済調査マニュアルの例

「治水経済調査マニュアル」の例を以下に示す.

表 7.13 浸水深別被害率（家屋）

浸水深 / 地盤勾配	床下	床上					土砂堆積（床上）	
		50cm 未満	50～99	100～199	200～299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
Ａグループ	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834	0.43	0.785
Ｂグループ	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870		
Ｃグループ	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888		

Ａ：1/1000 未満、Ｂ：1/1000～1/500、Ｃ：1/500 以上

注：１．平成 5 年～平成 8 年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。（ただし、土砂堆積は従来の被害率）

２．家屋の全半壊についても考慮した数値である。

表 7.14 浸水深別被害率（家庭用品）

浸水深	床下	床上					土砂堆積（床上）	
		50cm 未満	50～99	100～199	200～299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
被害率	0.021	0.145	0.326	0.508	0.928	0.991	0.50	0.845

注：平成 5 年～平成 8 年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。（ただし、土砂堆積は従来の被害率）

表 7.15　浸水深別被害率（事業所償却・在庫資産）

浸水深 / 資産	床下	床上					土砂堆積（床上）	
		50cm 未満	50～99	100～199	200～299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
償　却	0.099	0.232	0.453	0.789	0.966	0.995	0.54	0.815
在　庫	0.056	0.128	0.267	0.586	0.897	0.982	0.48	0.780

注：平成 5 年～平成 8 年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。（ただし、土砂堆積は従来の被害率）

表 7.16　浸水深別被害率（農漁家償却・在庫資産）

浸水深	床下	床上					土砂堆積（床上）	
		50cm 未満	50～99	100～199	200～299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
償　却	0.0	0.156	0.237	0.297	0.651	0.698	0.370	0.725
在　庫	0.0	0.199	0.370	0.491	0.767	0.831	0.580	0.845

表 7.17　浸水深別被害率（農作物）（単位：%）

事項 / 冠浸水深 / 浸水日数 / 作物種類		冠浸水 0.5m 未満				冠浸水 0.5～0.99m				冠浸水 1.0m 以上				土砂埋没 地表からの土砂堆積深		
		1～2	3～4	5～6	7以上	1～2	3～4	5～6	7以上	1～2	3～4	5～6	7以上	0.5m未満	0.5～0.99m	1.0m以上
田	水稲	21	30	36	50	24	44	50	71	37	54	64	74	70	100	100
畑	陸稲	20	34	47	60	31	40	50	60	44	60	72	82			
	甘しょ	11	30	50	50	27	40	75	88	38	63	95	100			
	白菜	42	50	70	83	58	70	83	97	47	75	100	100			
	蔬菜	19	33	46	59	20	44	48	75	44	38	71	84			
	根類	32	46	59	62	43	57	100	100	73	87	100	100			
	瓜類	22	30	42	56	31	38	51	100	40	50	63	100			
	豆類	23	41	54	67	30	44	60	73	40	50	68	81			
	畑平均	27	42	54	67	35	48	67	74	51	67	81	91	68	81	100

注）1.「蔬菜」は、ねぎ、ほうれん草、その他、「根菜」は、大根、里芋、ごぼう、人参、「瓜類」はきゅうり、瓜、西瓜、「豆類」は小豆、大豆、落花生、たまねぎ等である。
2. 土砂埋没の被害率は、河川の氾濫土砂によるものであるので、「土石流」の場合は実情に応じて修正すること。

表 7.18　浸水深別被害（営業停止損失（日数））

浸水深	床下	床上				
		50cm 未満	50～99	100～199	200～299	300cm 以上
停止日数	3.0	4.4	6.3	10.3	16.8	22.6
停滞日数	6.0	8.8	12.6	20.6	33.6	45.2

注：平成 7、8 年災を対象に実施した「水害に関するアンケート調査」より

表 7.19　浸水深別被害（家庭における応急対策費用：清掃延日数）

浸水深	床下	床上				
		50cm 未満	50～99 cm	100～199 cm	200～299 cm	300cm 以上
日数	4.0	7.5	13.3	26.1	42.4	50.1

注：平成 7、8 年災を対象にした「水害に関するアンケート調査」による。

表 7.20　浸水深別被害（家庭における応急対策費用：代替活動等支出（千円／世帯））

浸水深	床下	床上				
		50cm 未満	50～99 cm	100～199 cm	200～299 cm	300cm 以上
単価	82.5	147.6	206.5	275.9	326.1	343.3

注：平成 7、8 年災を対象とした「水害に関するアンケート調査」による。

表 7.21　浸水深別被害（事業所における応急対策費用：代替活動等支出（千円／営業所））

浸水深	床下	床上				
		50cm 未満	50～99 cm	100～199 cm	200～299 cm	300cm 以上
単価	470	925	1,714	3,726	6,556	6,619

注：平成 7、8 年災を対象とした「水害に関するアンケート調査」による。

(3) 水害被害推計手法の高度化に関する研究例

「多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究，東京大学博士論文，2014」での設定例を下記に示す.

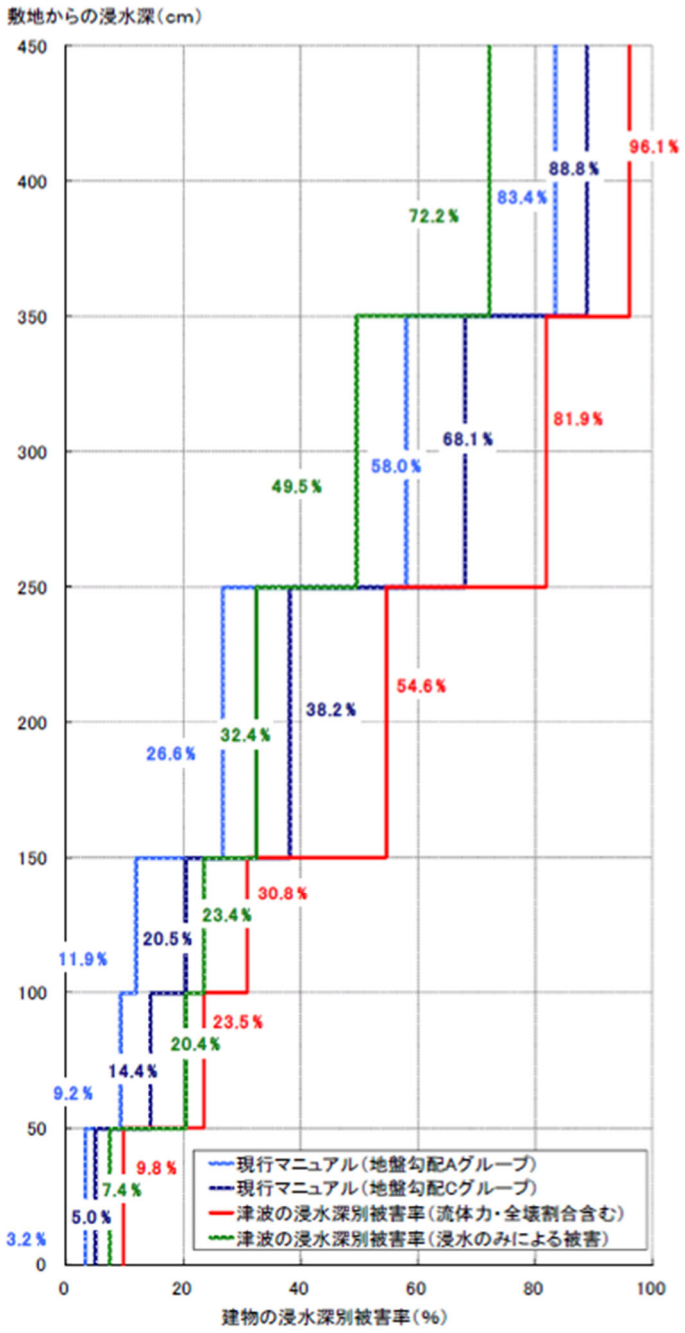


図 7.10　津波の浸水深別被害率（建物）

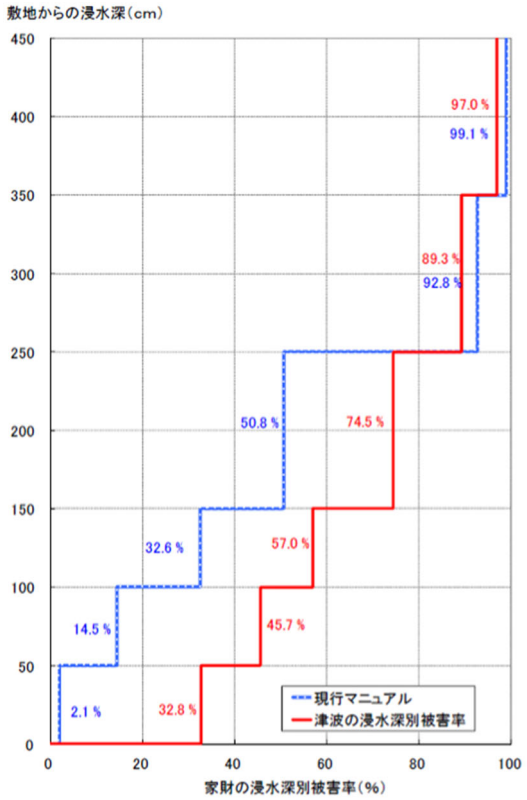


図-62　家財の浸水深別被害率

図 7.11　津波の浸水深別被害率（家財）

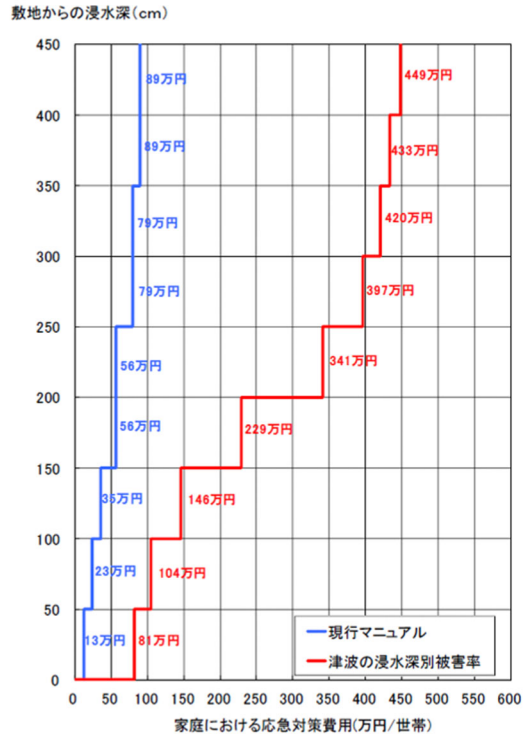


図-74　浸水深別の家庭における応急対策費用（万円／世帯）

図 7.12　津波の浸水深別の応急対策費用（家庭）

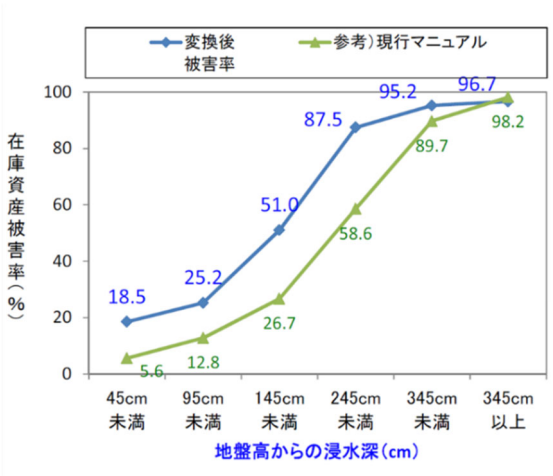


図 7.13　浸水深別の在庫資産被害率

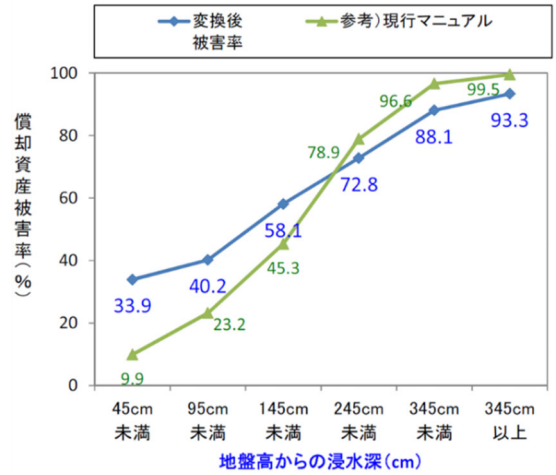


図 7.14　浸水深別の償却資産被害率

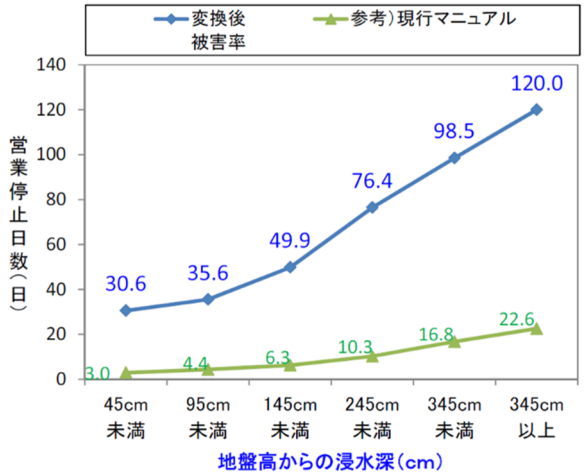


図 7.15　浸水深別の①営業停止日数

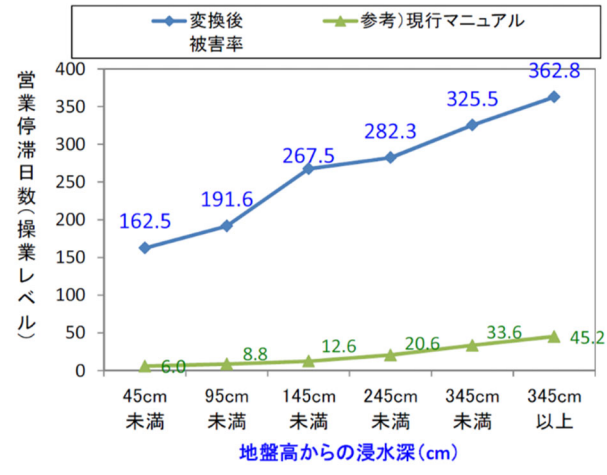


図 7.16　浸水深別の②営業停滞日数

【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.

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), 第 68 巻, 第 2 号, 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.

多田直人：水害被害推計手法の高度化に関する研究, 東京大学博士論文, 275pp., 2014.

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.

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.

8. 経済効率性照査

8.1. 最適堤防高 H*を評価するための検討フロー

最適堤防高 H*は，現在や将来の背後地の土地利用状況や経済性を考慮して決めることを基本とする．

（解説）

下記の検討フロー図に従い，海岸堤防高さごとの被害軽減額を現在および将来について算出した上で，各海岸堤防高さの場合の整備コストから経済性を評価する．

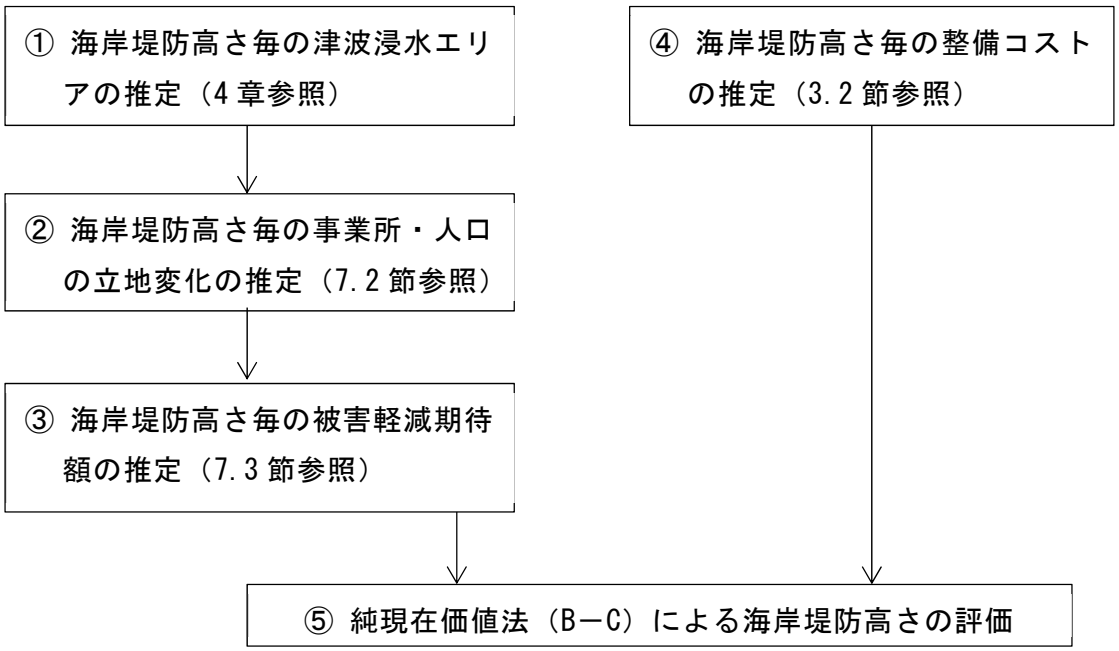


図 8.1　検討フロー

8.2. 経済性の評価方法

経済性の評価を行う際は，純現在価値法（NPV 法）B-C で行うことを基本とする．

（解説）

便益と費用の差により評価する方法（純現在価値法 : Net Present Value Method）であり，海岸事業による便益の大きさを純便益額として直接的に表す指標である．この値が大きいほどその地域に適している海岸堤防高さであると評価できる．

$$NPV = B - C \tag{8.1}$$

ここで，B（Benefit）は便益，C（Cost）は費用である．

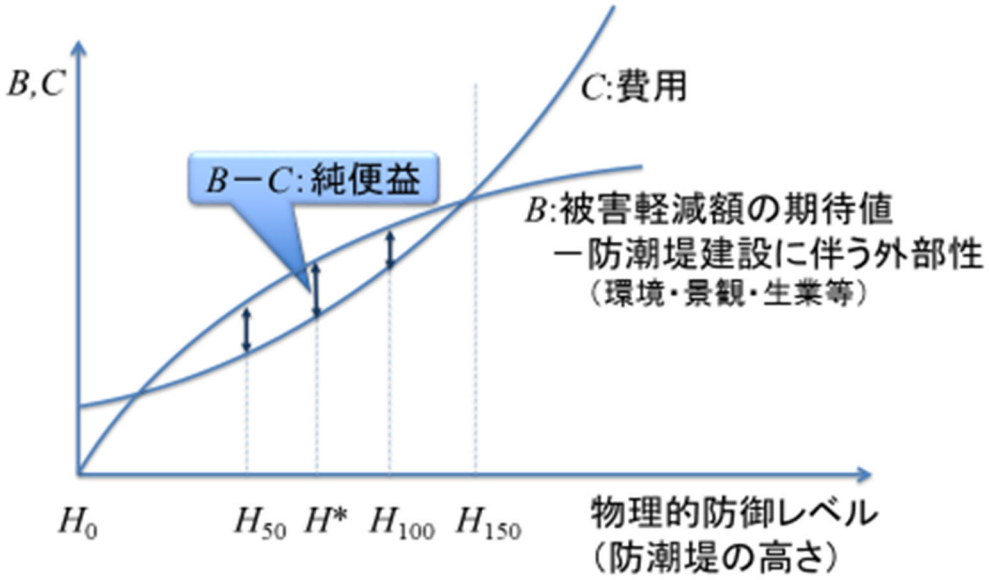


図 8.2 防潮堤の高さとその便益と費用

8.3. 社会的割引率

（基本事項の記載）

将来時点の便益および費用を現在価値で評価する必要がある．その現在価値換算を行うための社会的割引率として 4%を使うことを基本とする．ただし，必要に応じて，社会的割引率を設定して計算することも認められる．

（解説）

海岸保全施設整備の費用や便益は長期間にわたる．さらに，建設費用は比較的短期に集中する一方，便益は建設後長期にわたり発生する．したがって，将来の便益や費用を現在価値に換算する社会的割引率の設定値は大変重要である．

2020 年現在，我が国の公共投資分析マニュアルで採用されている社会的割引率は 4%である．費用便益分析は，プロジェクト間の効率性の比較も行うことにも使われる．その観点からは，他の公共投資分析にも用いられている 4%を使うことを基本とする．

しかしながら，社会的割引率は，人々の将来財と現在財の交換比率を示すもので，時代とともに変わりうる．社会的割引率は，同じ大きさの便益や同じ量の財・サービスに対して，現在時点と比較して将来時点における評価を割り引く比率を意味する．これは，将来時点の財・サービスの価値は，現在時点と比較して，低く評価されるためである．

現在の公共投資分析マニュアルで採用されている 4%も含めて，社会的割引率は長期国債の実質利子率を根拠に設定することが多い．そこで近年の我が国の長期国債（10 年）の実質利回りの平均値をみてみると，1990～2014 年については 2.5%，1998～2017 年については 1.8%と減少傾向にある．そのため，今後のプロジェクト評価についてはこれらの値を用いることも考えられる．具体的に，将来財と現在財間の評価を消費と貯蓄・投資の２側面から以下で見てみる．

（１）消費

消費者は，通常，同じ財であれば，将来において消費するより現時点で消費する方を選好する．これは，良いものは早めに消費したいという心理的な影響や，死亡の確率があることが要因として考えられる．つまり，消費者は，１単位の現在財と $(1+\rho)$ 単位の将来財を無差別と考えていると想定できる．また，より長期的にみると，将来世代より自分の世代や次世代など直近世代の方が将来世代より重要となる面もある．

（２）貯蓄・投資

１単位の現在の財を貯蓄すれば，$(1+r)$ 単位の将来財が得られる．つまり，現在の財は将来の財に対して，$(1+r)/1$ 倍の価値を持っている．この価値比率は，投資において１単位の現在の財を投資すれば，$(1+r)$ 単位の将来財が得られる場合でも同様に成立する．

ここで，現在と将来を仲介する市場が完全である場合，消費における割引率 $(1+\rho)$ と，貯蓄・投資における割引率 $(1+r)$ は等しくなり，社会的割引率 $=(1+\rho)=(1+r)$ が成立す

る．社会的割引率は各国で設定されている．一般的には，この考え方を用いて，長期（20年以上）国債の利回りを参考に設定される．

9. その他の考慮すべき事項

9.1. 景観・利用・環境に関する外部性

9.1.1. 外部性の類型とその特徴

海岸堤防の高さ・位置・線形が決定されると以下の計量が難しい外部性が発生する．そうした外部性にも十分留意して，最終的な海岸堤防の高さ・位置・線形・構造を決定することが望ましい．

1）自然環境とその利用価値への影響
2）表層的景観への影響
3）深層的景観への影響
4）利便性への影響
5）他の災害に関連する安全性への影響

（解説）

(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，「河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き」（平成 23 年 11 月国土交通省水管理国土保全局）（以下，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，海域の自然環境に甚大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保全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繋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) 他の災害からの安全性

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津波に対する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．

9.1.2. 東日本大震災からの復興で採られた外部性緩和策

東日本大震災からの復興で採られた外部性緩和策は，災害後という条件で行われたものであり，災害前の対策としての海岸堤防整備においては必ずしも現実的では無いものも含まれることに留意しつつ，海岸堤防の計画設計にあたっては，外部性を緩和する方策を最大限採用することが望ましく，参考にされたい．

（解説）

5.1.2.1. 計画段階での外部性緩和策

前項で解説した外部性に関して，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，海岸堤防の天端高さ（標高）については経済評価を含めた設定が，計量的に行われることを前提に，緩和策として本項では考慮しないが，位置，線形の工夫によって，地表面からの立ち上がりの高さを抑えることは各緩和策の中で採られるべきものであることを付言しておく．いずれにせよ，各緩和策の内容を考えると，計画段階における対応が極めて重要である．

(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設定す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．

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，海沿いの道路を守るケースが多いと思われる．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，全面的な矢板による工法を採用しない限り，

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工されることはほとんどないからである．とはいえ，影響は念頭におき，構造，地盤改良方法を検討する必要がある．

(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，海岸堤防の位置・線形の工夫により，比較的地盤が高いところに海岸堤防を設置し，見かけ上の高さを軽減する方策は十分考えられる．

(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肝要である．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 ず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ほぼ確実に 2 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）のが理想的と考えるが，現実の高台移転地で 3 m 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）等により，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えを同時に考慮し，漁港海岸であるにもかかわらず傾斜堤を採用しつつ，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．なお，この例のように，港湾海岸は特殊堤，漁港海岸は直立堤，建設海岸は傾斜堤といった従来の標準的な構造に囚われることなく，人口減少下における将来的な港湾・漁港区域の土地利用を考慮し，柔軟に構造を選定していくことも重要である．

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．

(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．

5.1.2.2 設計段階での外部性緩和策

以上のように，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．なお，詳細については，「河川・海岸構造物の復旧における 景観配慮の手引き」（平成 23 年 11 月国土交通省水管理国土保全局）を参照されたし．

(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，手引きに示されたように，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．

9.1.3. 南海トラフ対応を考慮した津波防災力強化のパターン

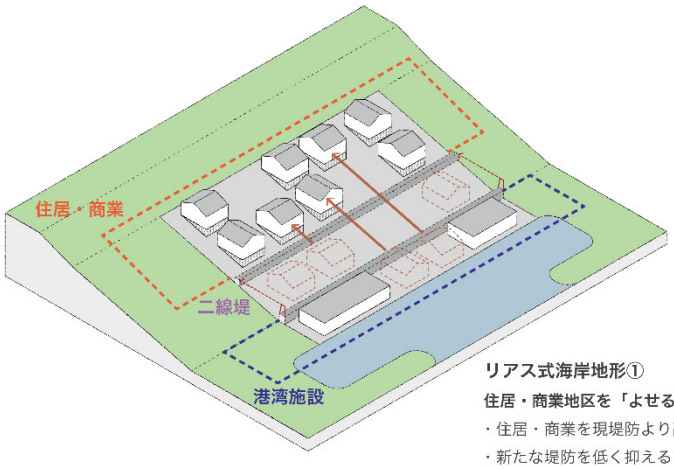
海岸堤防の外部性を含めて総合的に街の持続可能性を維持しつつ防災力を強化する方法にはいくつかのパターンがある．海岸堤防は津波防災力を高めるための一つの手段と位置付け，それ以外の防災力を高かめる方法も含めて総合的な検討をすることが望ましい．

（解説）

南海トラフ地震津波による被災が懸念されている地域が持つ課題は，決して津波防災だけでは無い．人口減少下における地域の持続性を高めるために，観光的・産業的な魅力の向上や，それを活用した交流人口の増加なども同時に取り組んでいかなければならない．地域の将来像を見据えて，津波防災以外の観点も大切にしながら，防災力強化を考えていく必要がある．ここでは，中長期的な対策も含めて，地域の利便性や環境・景観を大切にした防災力強化の方向性について解説する．

(1) リアス式海岸地形①（住居・商業施設をよせる）

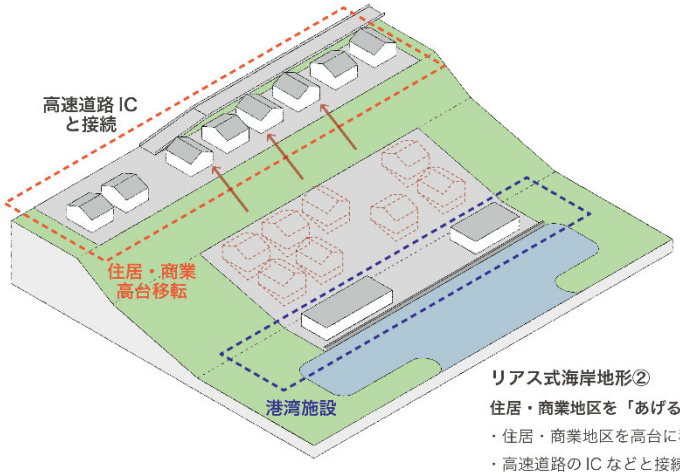
リアス式海岸部の平野は山が近いこともあり，扇状地的な地形で比較的勾配を持っていることが多い．そのような地形を持つ地域では，市街地内にある空家，空地を活かして，より標高の高い箇所へ移転を促進していくことで，市街地のコンパクト化を進めつつ津波の影響を低減する方策となりうる．こうした地形の市街地では，鉄道駅や高速道路も山側に設置されていることが多く，交通利便性的にも向上が見込まれる．さらに，転居の促進により，港湾・漁港周辺に空地を帯状に作り，そこに建設費・維持管理費が比較的安い傾斜堤を整備する方向性も当然考えておく必要がある．もちろん，思ったように転居が進まない場合においても，特殊堤などの整備もオプションの一つである．



リアス式海岸地形①
住居・商業地区を「よせる」
・住居・商業を現堤防より高い地区に集約
・新たな堤防を低く抑える
・海際には港湾施設を集約

(2) リアス式海岸地形②（住居・商業地区をあげる）

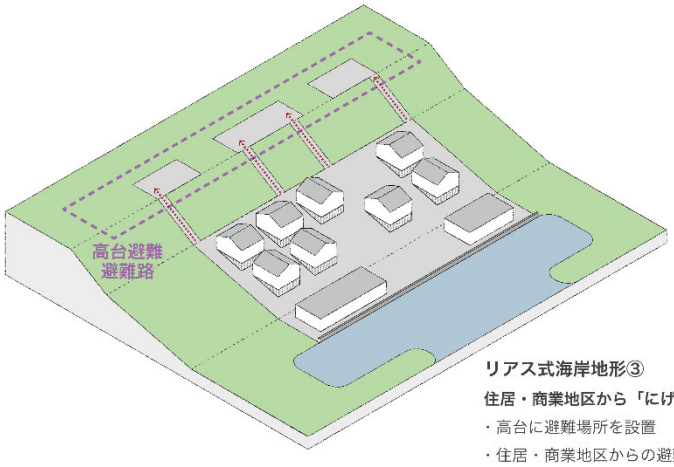
南海トラフ地震津波が想定されている地域では，山側に高速道路が供用・計画されている地域が多い．尚且つ，山側の地形が比較的急峻で無い場合は，インターチェンジとセットで高台への移転開発を行うことで，街の利便性を現状より向上しつつ，津波防災力を高める方法である．この場合，高台開発や移転のための費用，さらには実現までの時間など様々な課題があるが，平地が狭小であるなどの理由で，既に高速道路計画地周辺に施設移転が行われている地域や，水産業，水産加工業が中心で，高速道路との接続メリットが高い地域では，検討する価値のある方法である．なお，和歌山県串本町ではこの方法が採られ，インターチェンジ周辺の高台への主要施設の移転が徐々に行われている．



リアス式海岸地形②
住居・商業地区を「あげる」
・住居・商業地区を高台に移転・集約
・高速道路の IC などと接続
・海際には港湾施設を集約

(3) リアス式海岸地形③（住居・商業地区から逃げる）

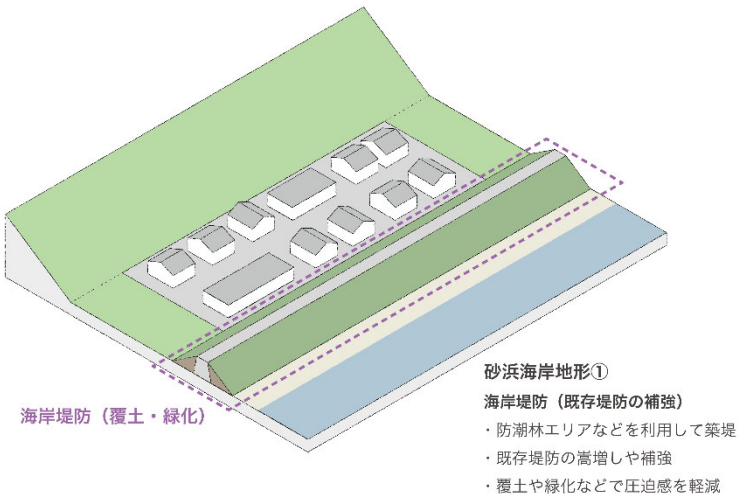
比較的地形が急峻で，十分な空家・空地も存在しないような場合は，短期的にはまず避難路の整備が重要である．地域周辺の地形が急峻な場合は，避難路を整備しなければ避難は不可能である．比較的費用も掛からないことから，各地域で最低限，実施すべき対策である．特に，津波到達時間が短いことが想定される地域では，多数の避難路整備が望まれる．また，当然ながら，他の対策と組み合わせて実施すべき内容でもあることを付記しておく．



リアス式海岸地形③
住居・商業地区から「にげる」
・高台に避難場所を設置
・住居・商業地区からの避難路を設置
・日常の生活を維持

(4) 砂浜海岸地形①（既存堤防の補強）

海岸沿いの観光施設利用が少ない砂浜海岸地形では，なるべく砂浜を残す線形で既存堤防を補強していくことが重要である．陸側の土地利用にもよるが，**(1)リアス式海岸地形①（住居・商業施設をよせる）**のように，後背地に空家・空地が多い場合は，海岸沿いの住居の移転も併せて行い，コンパクト化を進めつつ，なるべく砂浜海岸を保全する方向とすることが，地域の交流人口増大などのオプションを多く残す，防災力と地域の持続可能性を両立させていく方向性であることを付記しておく．

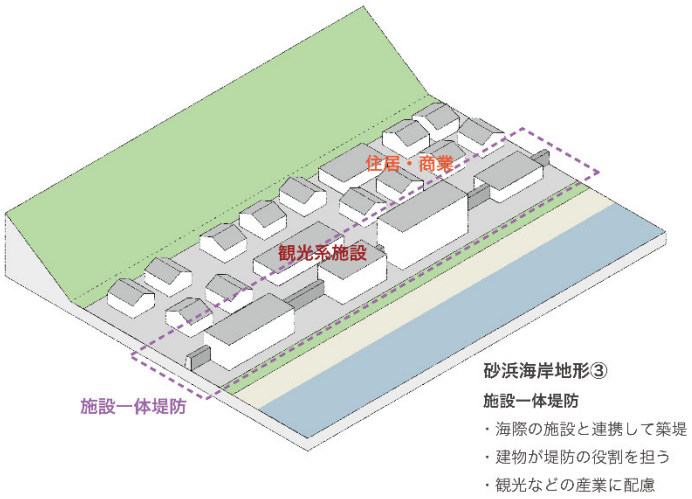


(5) 砂浜海岸地形②（二線堤）

海岸沿いの土地が観光施設利用されている場合，海岸線にある既存堤防の嵩上げや補強は，ともすれば観光施設の死活問題となる．このような場合，観光施設と，津波リスクを含め，よく協議し合意をとった上で，例えば宅地の背割り線に沿って直立壁型の特殊堤を二線堤として建設することで，海岸の魅力を生かした観光施設と，街の安全性の両立がある程度可能である．当然ながら，二線堤の建設，維持管理のためのスペースが限られるが，観光施設がその魅力を保持したまま存続する効果と比較検討し，総合的な判断によって実施を検討すべきパターンである．

(6) 砂浜海岸地形③（施設一体堤防）

海岸沿いの土地が観光施設利用されており，その施設が RC 建築であるなど，津波防御の効果もある程度期待できる場合は，施設間の隙間だけを特殊堤でつなぎ，街全体の津波防災力を高めることも検討に値する方法である．この場合，観光施設の開口部からの逸水，海岸堤防としての法的位置付けなどの諸問題が発生するが，建物間に整備する海岸堤防を，あくまで暫定的・部分的な堤防建設と位置付けることで，地域の観光価値と防災力の向上の両立が図られるものと考える．当然ながら，将来観光施設が建て替えなどを行う場合は，気仙沼内湾地区，石巻中心市街地などで実施された，堤防と一体化した建築物とすることで，適切な海岸堤防としての性能を担保していくという長期的な視点も重要である．



9.2. リスクプレミアムと曖昧性プレミアム

津波被害の予測には大きな不確実性が伴う．不確実性は評価対象の従う確率分布が特定可能な状況である「リスク」と，そうした確率分布が特定できない状況である「曖昧性」に分けられる．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，期待被害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である．これらのプレミアムを無視した費用便益分析は下記の特徴をもつ．

①津波対策については，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，対策の便益を過小評価することにつながりやすい．

②上記①の場合，リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを考慮しない費用便益分析は，社会厚生を増大させる津波対策でも却下してしまう可能性がある．

③上記①の場合，リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを考慮しない費用便益分析でも，社会厚生を低下させる津波対策を却下する基準としては有効である．

（解説）

9.2.1. はじめに

津波被害の予測には大きな不確実性が伴うため，津波対策の便益評価はそうした不確実性の下で行う必要がある．不確実性下における政策の便益評価は，政策前の期待被害額から政策後の期待被害額を差し引いた額として求められることが一般的である．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．しかし，期待被害額を用いた経済評価には，人々の不確実性を嫌うという態度が考慮されていないという問題がある．

経済学では，不確実性を「リスク」と「曖昧性（ambiguity）」に区分して扱うことが多い．確率分布によって表せる不確実性がリスク，そうでない不確実性が「曖昧性」である（付録 F.1）．大多数の人はリスク回避的であることが知られている．例えば，10%の確率で 10 万円を失うリスクを，その期待値である 1 万円を確実に失うより嫌う．そのため，リスク軽減の経済価値は，期待被害額の減少額だけではなく，「リスクプレミアム」という追加的な価値を含む．もし，ある人が 10%の確率で 10 万円を失うリスクを避けるために最大で 1 万 5000 円まで支払ってもいいと考えたとすると，損失の期待値である 1 万円との差額である 5000 円がリスクプレミアムとなる．

また，大多数の人は曖昧性回避的でもあることも知られている．曖昧性は確率が特定されない状況である．例えば，0%～20%の確率で 10 万円を失うという曖昧性下の状況と，10%の確率で 10 万円を失うというリスク下の状況では，大多数の人が前者を嫌う．もし前者の状況を後者の状況にする（損失確率を特定する）ために最大 2000 円支払ってもいいと考えるなら，その 2000 円が曖昧性プレミアムとなる．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 6900 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が 1/22 に対応する．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．

不確実性下で津波対策の適切な経済評価を行うには，期待被害額だけでなくリスクプレミアムや曖昧性プレミアムも考慮する必要がある．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．

9.2.2. 確率論的津波ハザード解析と経済評価

津波対策の経済評価における重要な論点を解説するために，**図 9.1 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 9.1**）．

(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，一本の 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

上記の手順において，(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．認識論的不確実性と曖昧性はほぼ同義である[3]．曖昧性回避的な人は複数の 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．EP カーブを平均して集約することで，その曖昧性回避の影響が無視されている．(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ており，リスク回避の影響が無視されている．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，リスクプレミアムと曖昧性プレミアムを経済価値に含める必要がある．

[3] 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．

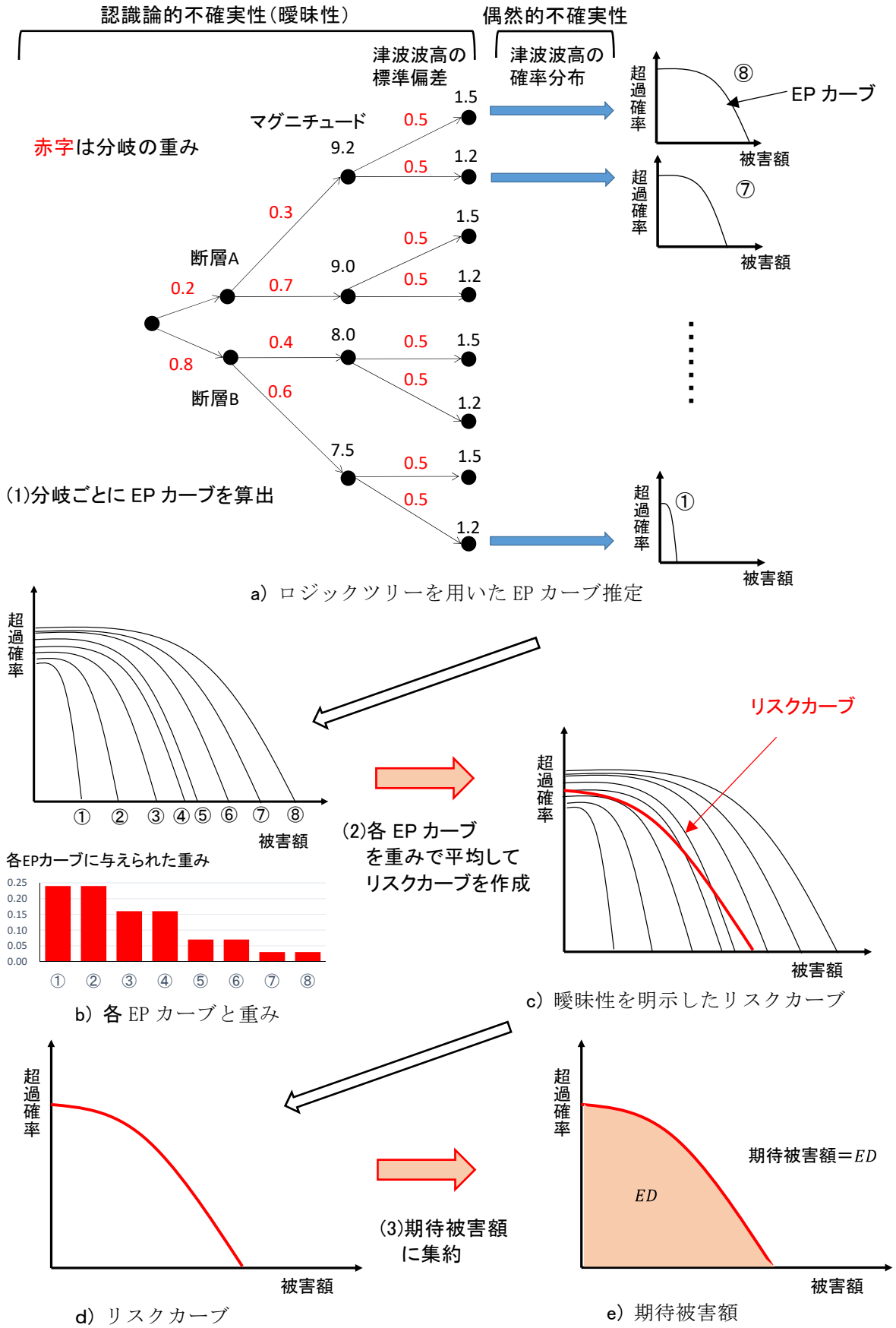


図 9.1　津波による期待被害額の算出プロセス

9.2.3. リスクプレミアム

(1) 期待効用理論

経済学では，人は財・サービスから得られる「効用」によって意思決定するという効用理論が用いられる．リスクの状況下では，この効用理論が拡張され，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想定する「期待効用モデル」が標準的なモデルとなっている．この小節では，津波被害が確率的に予測できるリスク下の状況を検討する．

期待効用モデルにおいて，津波対策前の資産状況fより津波対策後の資産状況gを好むことは下式で表される．

$$\int u\big(f(\omega)\big)dp_f(\omega) < \int u\big(g(\omega)\big)dp_g(\omega) \tag{9.1}$$

u ：効用関数
$f(\omega)$：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）
$g(\omega)$：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）
$p_f(\omega)$：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）
$p_g(\omega)$：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下式となる．

$$E_{p_f}[u(f)] < E_{p_g}[u(g)] \tag{9.2}$$

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

(2) リスクプレミアム

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_f，RP_gは，期待効用モデルに基づいて下式で定義される．

$$E_{p_f}[u(f)] = u\left(E_{p_f}[f] - RP_f\right) \tag{9.3}$$

$$E_{p_g}[u(g)] = u\left(E_{p_g}[g] - RP_g\right) \tag{9.4}$$

これらから津波リスクをfからgまで削減する津波対策の便益Bは下式で求められる．

$$B = \underbrace{E_{p_g}[g] - E_{p_f}[f]}_{\text{期待被害額の減少額 (期待資産の増加額)}} + \underbrace{RP_f - RP_g}_{\text{リスクプレミアムの差額}} \tag{9.5}$$

(3) リスクプレミアム推定の困難性

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（付録 F.2）．その指標として最も広く用いられているのは「相対リスク回避度」である．相対リスク回避度rは下式で定義される．

$$r = -x\frac{u''(x)}{u'(x)} \tag{9.6}$$

$u(x)$：効用関数

x：資産

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．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（付録 F.3）．しかし，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．

9.2.4. 曖昧性プレミアム

(1) 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標準的なモデルは存在しない. ただし，そのなかで Klibanoff, Marinacci and Mukerji (2005)の提案した 2 次確率モデル（以下，KMM モデル）が応用研究でよく用いられている．5.2.2 節での例でいえば，一本一本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 モデルにより下式で表される．

$$\int_{p\in C_f}\phi\{\int u\big(f(\omega)\big)dp(\omega)\}\,d\mu_f(p) < \int_{p\in C_g}\phi\{\int u\big(g(\omega)\big)dp(\omega)\}\,d\mu_g(p) \tag{9.7}$$

u ：効用関数

ϕ ：曖昧性態度関数

$f(\omega)$：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）

$g(\omega)$：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）

$p(\omega)$：（1 次）確率測度（事象ωが生じる確率）

C_f ：津波対策前の（1 次）確率分布の集合

C_g ：津波対策後の（1 次）確率分布の集合

$\mu_f(p)$：津波対策前の 2 次確率測度（pに与える重み）

$\mu_g(p)$：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下式となる．

$$E_{\mu_f}\left[\phi\left[E_p\{u(f)\}\right]\right] < E_{\mu_g}\left[\phi\left[E_p\{u(g)\}\right]\right] \tag{9.8}$$

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

(2) 曖昧性プレミアム

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_f，AP_gは，期待効用モデルに基づいて下式で定義される．

$$E_{\mu_f}\left[\phi\left[E_p\{u(f)\}\right]\right] = \phi\left[u\left(E_{\mu_f}\left[E_p\{f(\omega)\}\right] - RP_{\bar{p}f} - AP_f\right)\right] \tag{9.9}$$

$$E_{\mu_g}\left[\phi\left[E_p\{u(g)\}\right]\right] = \phi\left[u\left(E_{\mu_g}\left[E_p\{g(\omega)\}\right] - RP_{\bar{p}g} - AP_g\right)\right] \tag{9.10}$$

ここで$RP_{\bar{p}f}$と$RP_{\bar{p}g}$は，それぞれ確率測度$\bar{p}_f = E_{\mu_f}[p]$と$\bar{p}_g = E_{\mu_g}[p]$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は下式で求められる．

$$B = \underbrace{E_{\mu_g}\left[E_p\{g(\omega)\}\right] - E_{\mu_f}\left[E_p\{f(\omega)\}\right]}_{\text{期待被害額の減少額（期待資産の増加額）}} + \underbrace{RP_{\bar{p}f} - RP_{\bar{p}g}}_{\text{リスクプレミアムの差額}} + \underbrace{AP_f - AP_g}_{\text{曖昧性プレミアムの差額}} \tag{9.11}$$

曖昧性回避は曖昧性関数ϕ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標準的モデルが存在しないため，曖昧性プレミアムの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（付録 G.4）．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．

9.2.5. 津波対策の便益評価におけるリスク・曖昧性プレミアム

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．これらの詳細については付録 F.5 で説明している．

(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も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

リスクプレミアムや曖昧性プレミアムを無視すると，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[4]．この状況は図 2.5.2 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[5]．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

[4] 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．

[5] $G(x)$が$F(x)$に第 1 次確率優位であるとき，$G(x)$が$F(x)$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$RP_f \geq RP_g$が成立する．

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．

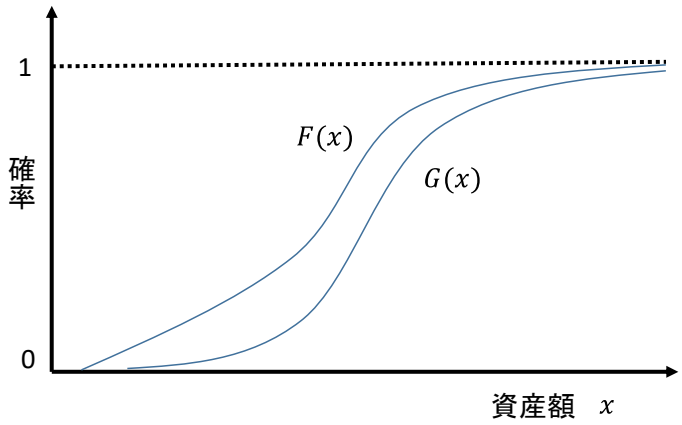


図 9.2　第 1 次確率優位

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 μ_gも対策前のμ_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 μ_gが対策前のμ_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 9.1** 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．

表 9.1 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

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	$RP_f - RP_g$	成立	便益の過小評価
		成立しない	不明
曖昧性	$RP_{\bar{p}f} - RP_{\bar{p}g} + AP_f - AP_g$	成立	便益の過小評価
		成立しない	不明

9.2.6. 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，期待被害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を明らかにした．

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津波対策については，対策後の 1 次確率分布，2 次確率分布ともに対策前の各分布に対して第 1 次確率優越の条件が成立する可能性が高いと考えられる．

④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くれば，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．

【参考文献】

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.

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.

第3編 実施編

10. ケーススタディ

本編では，第２篇の手法に従って実施したケーススタディについて紹介する．

10.1. 生起確率

10.1.1. 地震の平均発生間隔

本ケーススタディは，南海トラフ巨大地震領域を対象としており，平均発生間隔に対する分岐を 3 つ設定した．88.2 年や 116.9 年は，いずれも地震調査研究推進本部 (2020) が公表する南海トラフ巨大地震領域を対象とした平均発生間隔の評価値であり，88.2 年は高知県室津港における南海地震時の隆起量と地震発生間隔との関係から評価された値, 116.9 年は南海トラフ域で発生した過去の地震の発生間隔の単純平均値である．また，対象とする南海トラフ域では様々な G-R 則が提案されているが（例えば，丸山ら(2017)），今回は，日本近海周辺を対象として提案した $\log_{10} n = 7.0 - 1.03M_w$ を用いた．ここで，n は年間の地震発生頻度の密度である．これにより計算すれば，M_w 7.9～9.1 の地震の平均発生間隔は約 34.1 年となった．

図 10.1.1　南海トラフ地震領域に対する平均発生間隔の分岐

10.1.2. ロジックツリー分岐とその重み

ロジックツリーの分岐は，平均発生間隔の 3 分岐に対して，想定断層の M_w 8.0 から 9.0 までの間，M_w 0.2 刻みの 6 分岐があるため，計 18 分岐となる．平均発生間隔の 3 分岐は，それぞれ相違する観点から導出された平均発生間隔であり，分岐により重みを変化させることは困難と判断し，等重みとした．M_w 毎の分岐の重みは設定した平均発生間隔により変化させた．すなわち，GR 則から計算した各 M_w の生起率を，M_w の大きい方から順に和をとり，その逆数が，対象の平均発生間隔となるように重みを定めた．**表 10.1.1** に結果を示す．

表 10.1.1　各平均発生間隔に対する M_w 毎の分岐の重み

	平均発生間隔 88.2年	平均発生間隔 116.9年	GR則によるM_w 8.0以上の 地震の平均発生間隔 34.1年
M_w 9.0	0.097	0.128	0.037
M_w 8.8	0.155	0.206	0.060
M_w 8.6	0.250	0.331	0.097
M_w 8.4	0.401	0.335	0.155
M_w 8.2	0.097	0	0.250
M_w 8.0	0	0	0.401

10.2. 浸水計算方法

10.2.1. 計算条件

津波解析シミュレータ Q-Wave[1)]を用いて計算を行った．Q-Wave は基礎方程式に非線形長波方程式を用いており，地理座標系（緯度・経度・高度）を採用している．

対象領域については M 県沿岸部とした．計算領域と計算格子を**図 10.2.1** に示す．基本的に水深の大きい海上ではキューブは最も粗いレベル 0 であり，遡上域にてレベル 2 となるよう設定される．ただし，日本海側や琉球諸島等，影響が小さいと判断した地域は手動でレベルを 0 に設定している．また，計算対象である M 県沿岸部の黄枠内については，レベルを 7 とした．キューブレベルと計算格子間隔の関係を**表 10.2.1** に示す．

各キューブ内は 20×20 の計算格子に分割される．波源はランダムフェーズモデルを用いて作成した，南海トラフ地震を想定した Mw8.0 から Mw9.0 の間，Mw0.2 刻みの 6 段階の地震規模各 60 ケースずつ，計 360 ケースの断層パラメータを用いた．堤防条件は，堤防が a)常に健全，b)フラジリティモデルに従い破堤，c)越波で破堤，d)無い場合の 4 ケースとした．

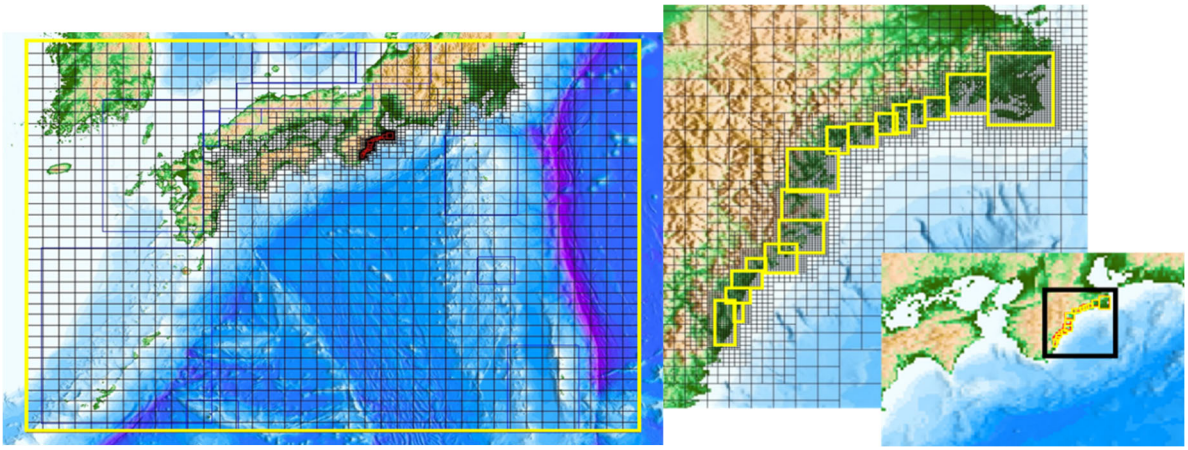


図 10.2.1　計算領域と格子分割（左図黄枠内が計算領域，右上図は右下図黒枠内の拡大，右上図黄枠内が最小計算格子領域）

表 10.2.1　キューブレベルと計算格子間隔の関係

キューブレベル	経度方向サイズ	緯度方向サイズ	おおよその計算格子間隔 (m)
0	1’30”	1’	2000
1	45”	30”	1000
2	22.5”	15”	500
3	11.25”	7.5”	250
4	5.625”	3.75”	125
5	2.813”	1.875”	63
6	1.406”	0.938”	32
7	0.703”	0.469”	16

10.2.2. フラジリティモデル

津波による防護施設の被災状況を考慮するため，フラジリティモデルを導入する．これは，津波高と防護施設の損傷率の関係と，損傷に応じて変化する越流量の関係を用いて，防護施設の防護機能を評価する手法である [2)].

津波高と防護施設の損傷率は，式(10.2.1),(10.2.2)で示す通り，対数正規分布で表すものとする．

$$P(\alpha) = \Phi\left[\frac{\ln\alpha - \mu}{\sigma}\right] \tag{10.2.1}$$

$$\alpha = \frac{\eta}{H_D} \tag{10.2.2}$$

ここで，P : 防護施設の損傷率，Φ : 対数正規分布関数，η : 防護施設に対する前面水位[m]，H_D ：初期天端高[m]，μ，σ ：対数関分布の平均及び分散に対応するパラメータである．ここでは，**図 10.2.2** の黒線のフラジリティカーブを用いた．

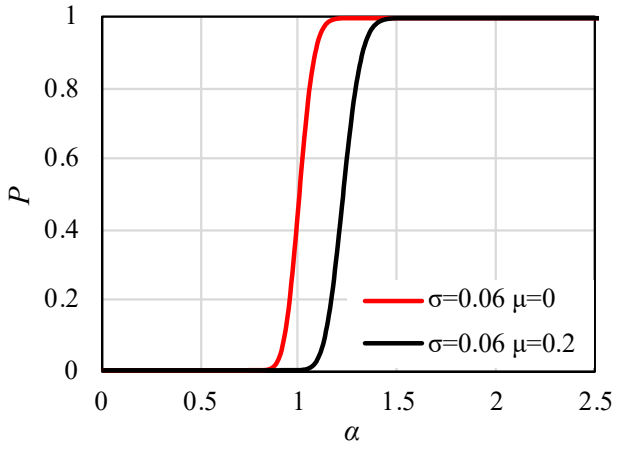


図 10.2.2　フラジリティモデルの例（ここでは，黒線を用いた）

10.2.3. 対象地形

ケーススタディで対象とした A 町ならびに B 町の地形を**図 10.2.3** に示す．これをみると B 町は A 町に比べて平野部が広いことがわかる．まず，計算の妥当性について検証した．M_w 8.0 と M_w 9.0 の各 1 ケースについて，堤防あり条件では，a)破堤無し，b)フラジリティモデルによる破堤，c)越流後倒壊の 3 つの条件と，d)堤防無しの条件の 4 つの条件による浸水深の違いを A 町で比較したものが**図 10.2.4** である．M_w 9.0 のものは M_w 8.0 と比べ，堤防条件による違いが小さいことがわかる．これは天端高に対し波高が大きくなり，かつ，背後地が狭いため，損傷率の影響が無視されるからであり，妥当な計算結果が得られたと考えられる．

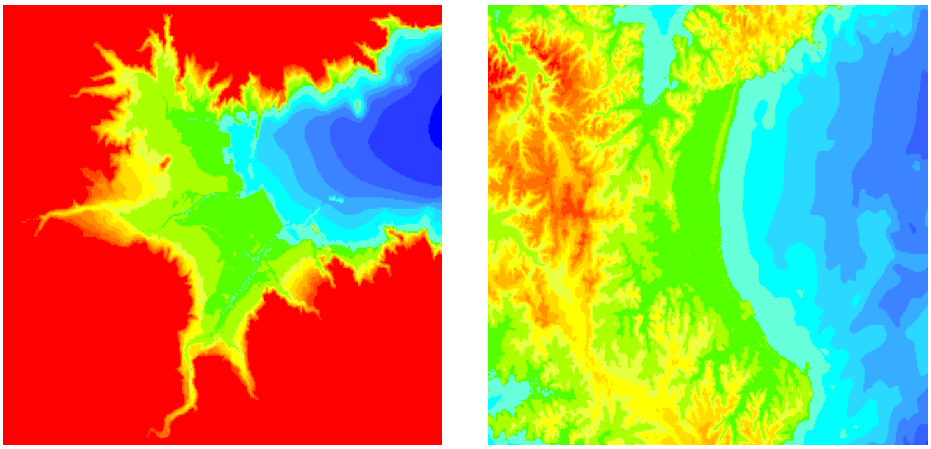


図 10.2.3　A 町（左）ならびに B 町（右）の標高

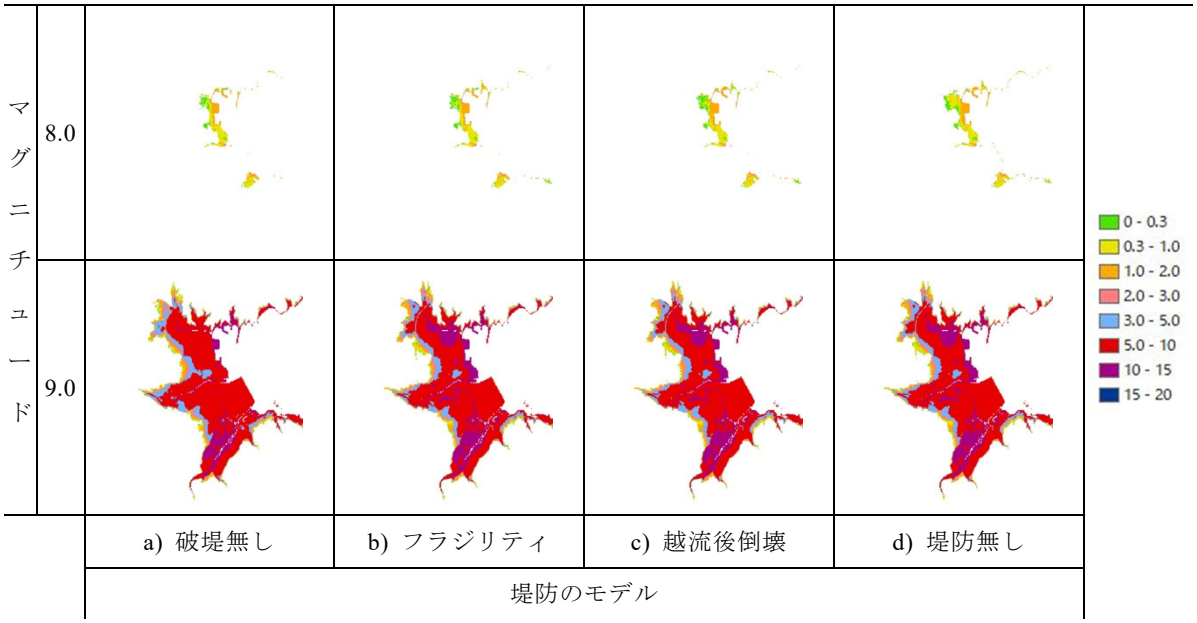


図 10.2.4　A 町における Mw8.0 と Mw9.0 の各 1 ケースについて，堤防条件による浸水深の違い

【参考文献】

1) 荒木和博，筧 雅行，秋山 実：BCM を用いた津波解析シミュレータ，みずほ情報総研技報，Vol.8，2016.
2) 有川太郎，関 克己，下迫健一郎，高川智博，千田 優：フラジリティカーブによる防護施設の被災状況を考慮した津波浸水計算手法の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 73，No.2，pp.I_337-I_342，2017.
3) 有川太郎，宮内俊晴，北野利一，福谷陽，渡部真史:防護施設の脆弱性の違いによる背後地域の津波浸水確率への影響，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.77，No.2，2021.（投稿中）

10.3. 確率論的津波ハザード評価

10.3.1. 津波ハザードカーブ

津波ハザードカーブは，**10.2** で得られる津波浸水深の経験分布関数に偶然的不確実性の考え方を適用し，**10.1.1** の地震の平均発生間隔を乗じることで得られる．例として，**図 10.3.1** に，対象地域のある地点を対象に生成したロジックツリーの分岐毎の津波ハザードカーブ（18 本）と，各津波ハザードカーブの重みを考慮して得られる不確定性を内包したハザードカーブとして，浸水深と年超過確率の関係（赤線）を算出する．

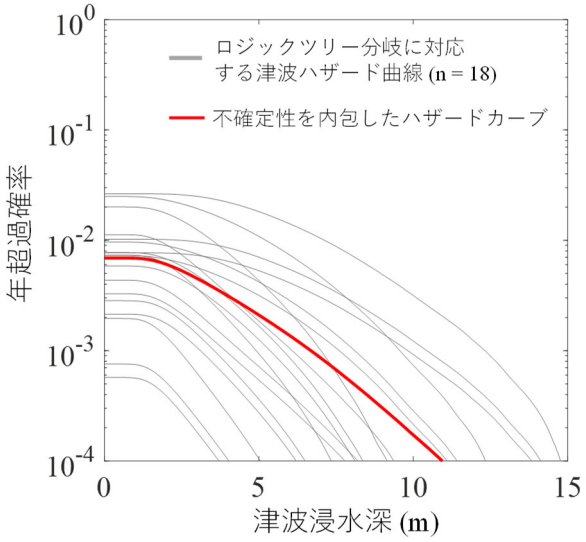


図 10.3.1　対象地域のある地点での津波ハザードカーブ

10.3.2. 確率論的津波浸水深分布評価

各堤防条件に対しそれぞれ 360 ケースの津波浸水計算結果を用いて，A 町ならびに B 町における，堤防モデルの違いによる確率規模毎の浸水深への影響を検討する．確率規模の計算は，coRaL 法に基づいて計算した (第 2 編 **5.1.4.**).

これをみると，A 町，B 町ともに，浸水深は，a)＜b)＜c)となっており，物理的にも妥当な結果と言える．他方，A 町では，ほとんど堤防による差異は見受けられないが，B 町では，その効果を視認できる程度の差がある．これは，背後地域が狭ければ狭いほど，また津波が堤防に比して高いほど，その効果がなくなることを意味している．

一方で，B 町のように平野部が広がっている場合，1000 年確率程度で c)よりも b)のほうがかなり小さくなっていることがわかる．また，2500 年確率においても b)のほうが小さく，堤防を粘り強くする効果が現れている．

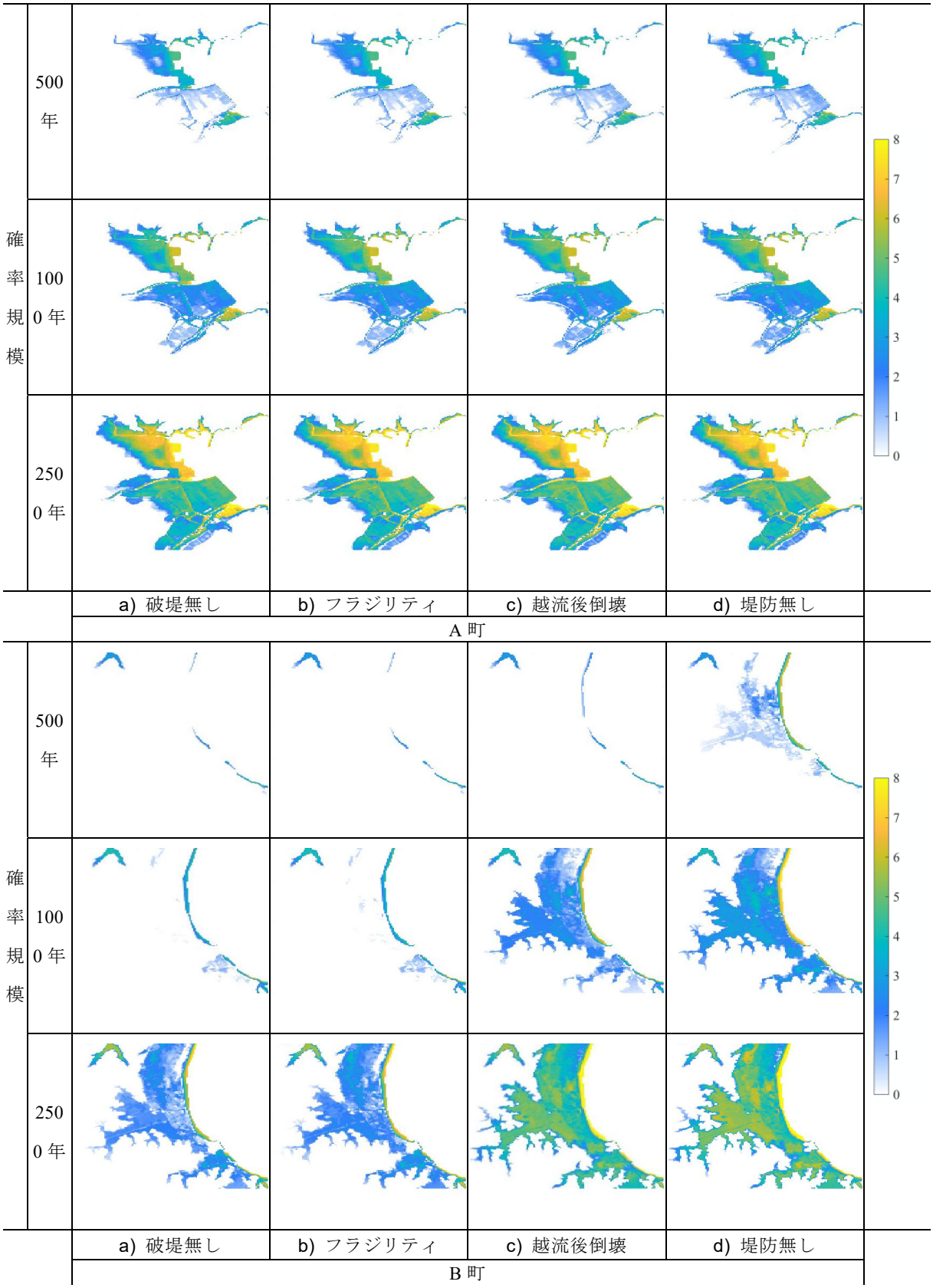
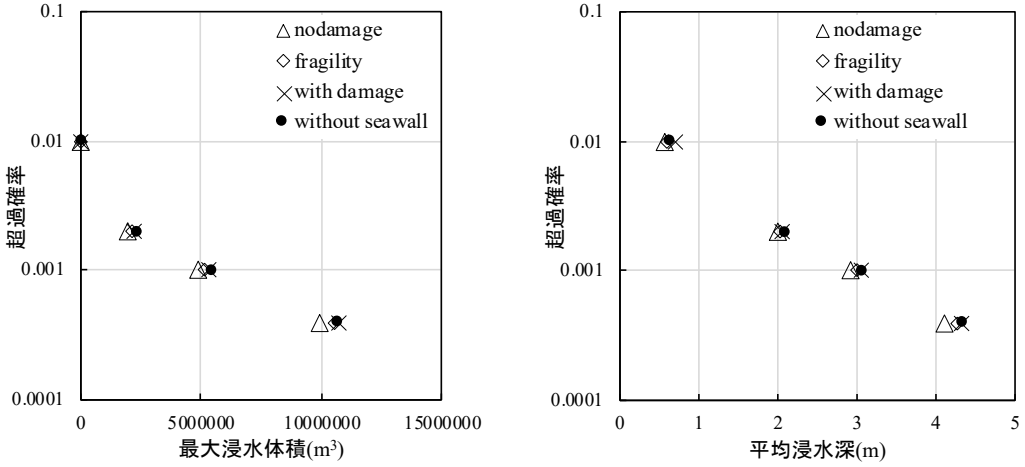


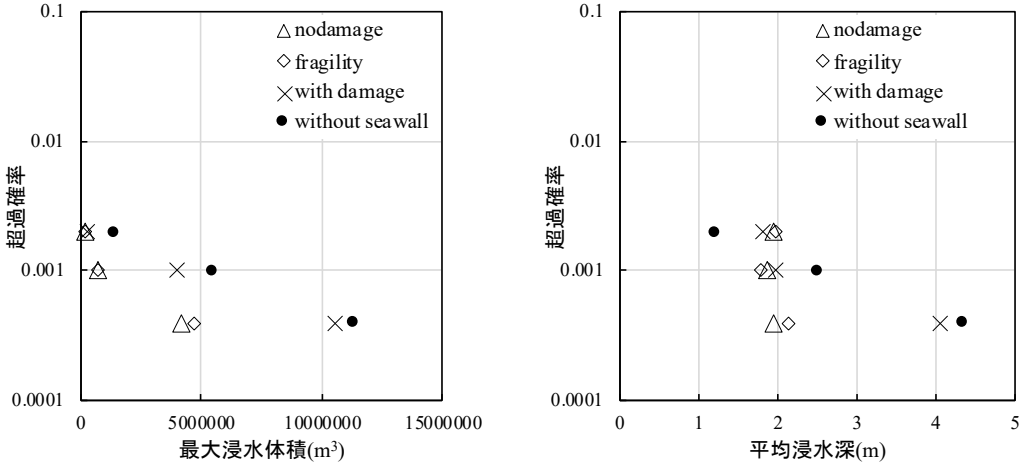
図 10.3.2 堤防の破堤条件の違いによる確率規模毎の浸水深分布の検討．a)～c)までは現況堤防高さに対して，a)では，越流しても倒壊しない場合，b)では，堤防の損傷率に応じた越流量を与えた場合(フラジリティモデル)，c)では，越流後すぐに倒壊する場合，となる．一方で，d)は堤防そのものを初期から無い状態としている．

10.3.3. 平均浸水深，最大浸水体積の超過確率の比較

各町の浸水域内の平均浸水深ならびに最大浸水体積の超過確率を比較したものを**図 10.3.3** に示す．ここで，平均浸水深は浸水した場所での平均をとったものであり，最大浸水体積は，最大浸水深に面積を掛けて総和としたものである．これをみると，浸水面積がどのケースもほとんど変わらない A 町では，平均浸水深において，堤防の破堤条件の差はほとんどみられないことがわかる．一方で B 町では，平均浸水深にすると，浸水域が小さい場合にうまく表現することができず，最大浸水体積とすることで，その堤防の効果を示すことができており，フラジリティモデルが機能していることがわかる．今後は，より多くの地域でその差異を調べ，堤防の粘り強さと効果の関係を定量的に示すことが課題となる．



(a) A 町



(b) B 町

図 10.3.3　堤防の破堤条件の違いによる浸水域内における平均浸水深と最大浸水体積の超過確率
（凡例 nodamage: 破堤無し，fragility: フラジリティモデル，with damage: 越流後破堤，without seawall:堤防無し）

10.4. 津波規模毎の人口・企業の将来変化と想定被害額

10.4.1. 将来の土地利用の推計

津波規模毎の人口・企業の将来変化の推計は，**表 10.4.1** に示す 3 ケースの浸水計算結果を対象とした．ここで，整備前の破堤条件については，2011 年東北地方太平洋沖地震津波によって被災した防潮堤が約 3 割であったことから，越流破堤 30%・フラジリティ 70%とした．整備後の破堤条件は，堤防の粘り強さが強化されたものとして，全てフラジリティとして設定した（第 3 編 **10.2.2.**参照）．嵩上げ高さについては，後述の「**10.4.6.** 最適堤防高の試算結果」において，+3m 嵩上げ以上は純便益（B-C）がマイナス値となったことから，+3m 嵩上げまでとした．

表 10.4.1　将来推計の対象ケース

	整備前	整備後	
防潮堤高さ	現況高さ	+1m 嵩上げ	+3m 嵩上げ
破堤条件	越流破堤　30% フラジリティ　70%	フラジリティ 100%	フラジリティ 100%

推計方法は「第 2 編 **7.2** 将来の土地利用の推計」の手法とした．現況の人口・資産分布は，平成 27 年国勢調査，平成 26 経済センサス調査の地域メッシュ統計データ（約 500m メッシュ）を基本とし，浸水計算のメッシュにそれぞれ割り当てて設定した．また，将来推計は，下記の通りの方針とした．

- 社会増減・自然増減を推計する．
- 20 年後の土地利用変化を推計し，その後は一定と仮定する．
- 人口はメッシュ毎に年齢階層別に算定する
- 企業はメッシュ毎に産業分類別に算定する

図 10.4.1 に A 町における人口・企業の現況・将来推計した結果の平面分布の例を示す．将来推計は整備前の条件として，現況堤防高，フラジリティモデルによる浸水分布により算定した結果である．また，**表 10.4.2** 及び**表 10.4.3** に対象エリア内の総人口・総企業数を集計した結果を示す．

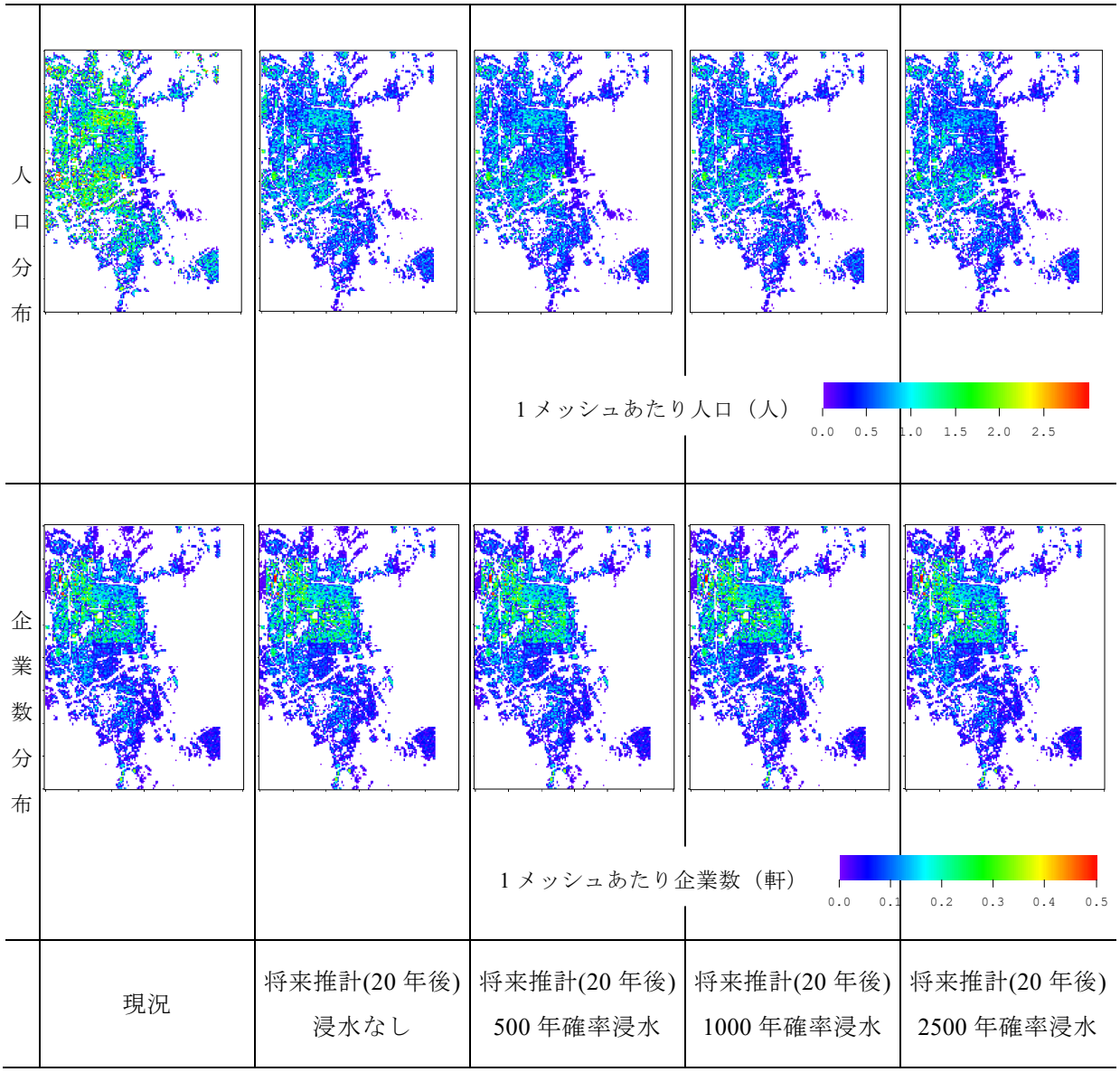


図 10.4.1　A 町における人口・企業の分布の将来推計（将来推計は現況堤防高，フラジリティモデルによる浸水分布により算定した例）

表 10.4.2　対象エリア内の人口の将来推計値（人）

	整備前			整備後					
				+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	9,408	減少数	減少率	9,408	減少数	減少率	9,408	減少数	減少率
浸水なし	5,331	▲ 4,078	43.3%	5,331	▲ 4,078	43.3%	5,331	▲ 4,078	43.3%
500年	5,303	▲ 4,106	43.6%	5,310	▲ 4,098	43.6%	5,314	▲ 4,095	43.5%
1000年	5,228	▲ 4,181	44.4%	5,242	▲ 4,166	44.3%	5,264	▲ 4,145	44.1%
2500年	5,076	▲ 4,333	46.0%	5,089	▲ 4,319	45.9%	5,141	▲ 4,268	45.4%

表 10.4.3　対象エリア内の企業の将来推計値（軒）

	整備前			整備後					
				+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	925	減少数	減少率	925	減少数	減少率	925	減少数	減少率
浸水なし	925	0	0.0%	925	0	0.0%	925	0	0.0%
500年	921	▲ 3	0.3%	922	▲ 3	0.3%	923	▲ 2	0.2%
1000年	914	▲ 11	1.2%	915	▲ 10	1.0%	917	▲ 7	0.8%
2500年	898	▲ 26	2.8%	900	▲ 25	2.7%	905	▲ 20	2.1%

10.4.2. 津波による人的被害の推計

人的被害は，「第 2 編 **7.2.3** 避難率と死亡率」の**表 7.6** の 3 つの人的被害算定手法のうち，b)津波浸水解析を用いた手法により推計した．本ケーススタディでは，**表 7.7** に示す 4 パターンのうち 3 パターンについて推計することとし，用事後避難については各パーセンテージの 1/2 ずつ避難可・被災に振り分け，以下の避難率を設定した．具体的に避難率 80%の例では，各メッシュ人口の 80%は完全に避難し，残りの 20%の人口に対して，浸水深別死者率（**図 10.3.10**）を乗じて，各メッシュの死者数を計測し，全メッシュの総計により人的被害数を推計した．

- 避難率 100%　（人的被害なし）
- 避難率 80%　（直接避難 70%＋用事後避難 20%／2）
- 避難率 45%　（直接避難 20%＋用事後避難 50%／2）

表 10.4.4，**表 10.4.5** に避難率 80%，45%の人的被害（500 年，1000 年，2500 年確率を抜粋）を推計した結果を示す．また，**図 10.4.2** に確率規模毎の人的被害及び人的被害軽減数を示す．浸水が発生する 200 年確率から人的被害が発生し 1000 年確率程度までは急激に増加し，それ以降は緩やかな増加となっている．人的被害軽減数については，200～1000 年での軽減数が多く，それ以降は漸減となっている．

表 10.4.4　津波による人的被害の推計値【避難率 80%】（人）

	整備前		整備後					
			+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	9,408	死亡率	9,408	減少数	死亡率	9,408	減少数	死亡率
500年	88	0.9%	74	▲ 14	0.8%	64	▲ 25	0.7%
1000年	191	2.0%	172	▲ 19	1.8%	155	▲ 35	1.7%
2500年	247	2.6%	241	▲ 6	2.6%	217	▲ 30	2.3%

表 10.4.5　津波による人的被害の推計値【避難率 45%】（人）

	整備前		整備後					
			+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	9,408	死亡率	9,408	減少数	死亡率	9,408	減少数	死亡率
500年	243	2.6%	205	▲ 38	2.2%	175	▲ 68	1.9%
1000年	525	5.6%	473	▲ 51	5.0%	427	▲ 97	4.5%
2500年	679	7.2%	663	▲ 16	7.0%	598	▲ 81	6.4%

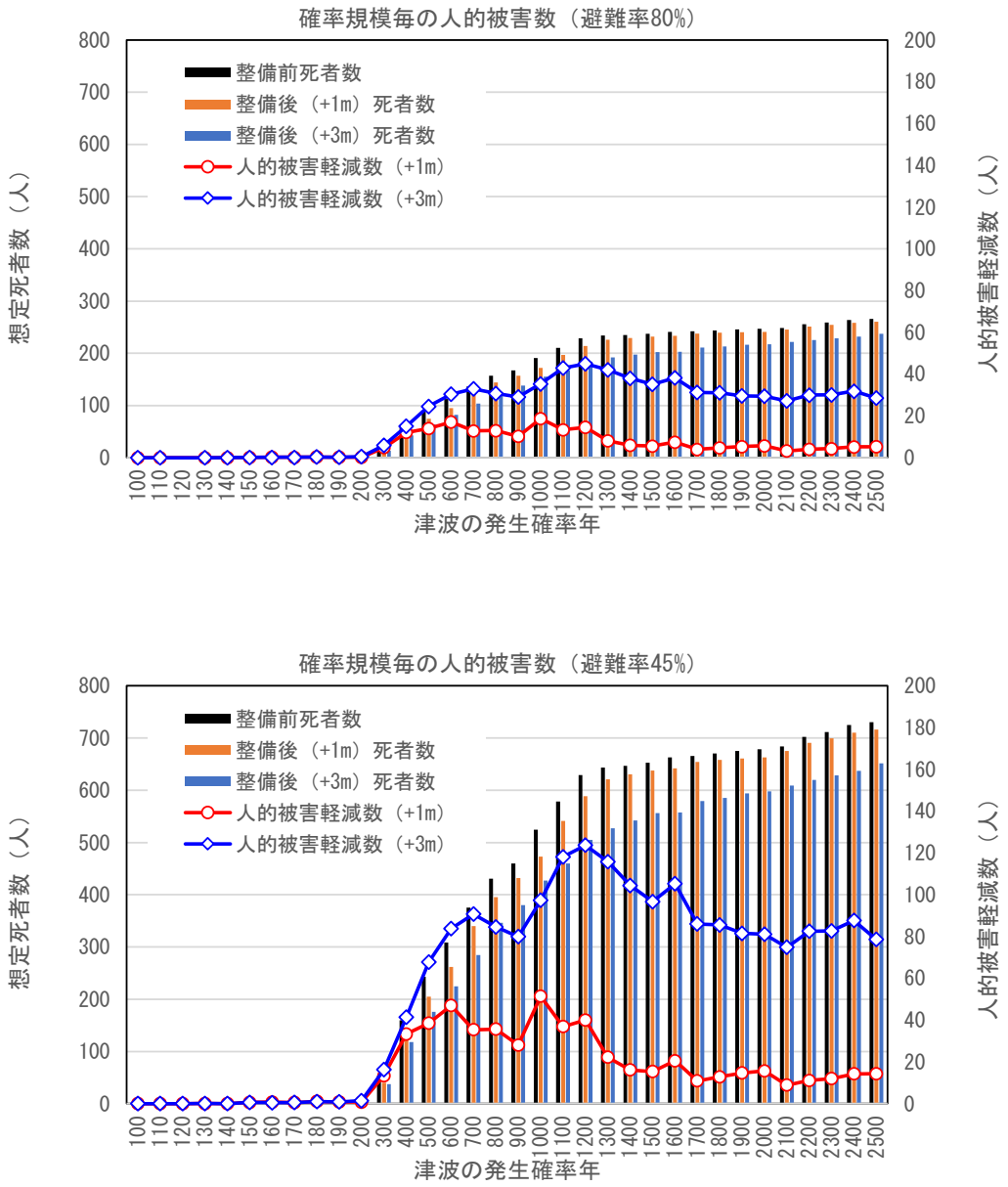


図 10.4.2　A 町における津波による人的被害の推計値

10.4.3. 被害軽減期待額の算定

被害軽減期待額は「第 2 編 **7.3** 被害軽減期待額」の手法で算定した．浸水深分布及び推計した人口・企業数より，海岸堤防高さごと (with) の被害額を**表 10.4.6** の各項目で算出し，海岸堤防を整備しない場合 (without) との差より被害軽減額を算出した．また，被害軽減額は平成 23 年の東日本大震災における被害実態を調査した「水害被害推計手法の高度化に関する研究」（多田, 2014）より，各係数を設定した．

表 10.4.6　浸水深別の被害額の計測方法

被害項目	被害額計測方法	計測対象
建物被害	建物の浸水深別被害率を乗じる	推計人口より世帯数換算
家庭被害	浸水深別被害率を乗じた家財被害 浸水深別の家庭における応急対策費用	推計人口より世帯数換算
事業所被害	浸水深別被害率を乗じ在庫・償却資産被害 浸水深別の営業停止・停滞損失額 浸水深別の応急対策費用	推計した企業立地
公共土木施設・公共事業等被害	公共土木施設（橋，道路，公園等），公益事業（電気，ガス，水道等）	一般資産被害との比率
人的被害	避難率，浸水深別死亡率を考慮し，統計的生命価値を乗じて人的被害を算出	推計した人口

被害額を算定した結果の内訳例を**図 10.4.3** に示す．資産被害では営業停止・停滞の被害が大きく，次いで事業所償却資産や建物被害が大きくなっている．また，人的被害は全体の半分程度を占める割合となっている．

図 10.4.4 に避難率毎の被害額及び被害軽減額の推計結果を示す．何れのケースも 1000～1500 確率に被害軽減のピークがあり，それ以降は漸減となる傾向である．

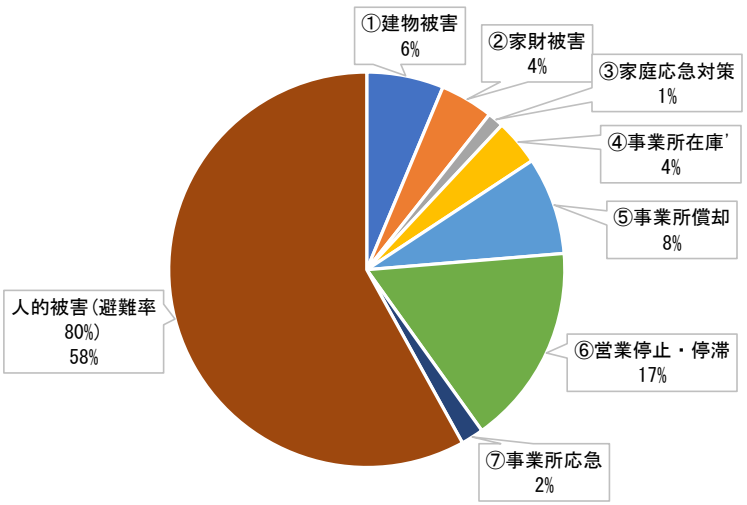


図 10.4.3　想定被害額の算定結果（現況堤防高，フラジリティ，確率 1000 年確率の例，公共土木等を除く）

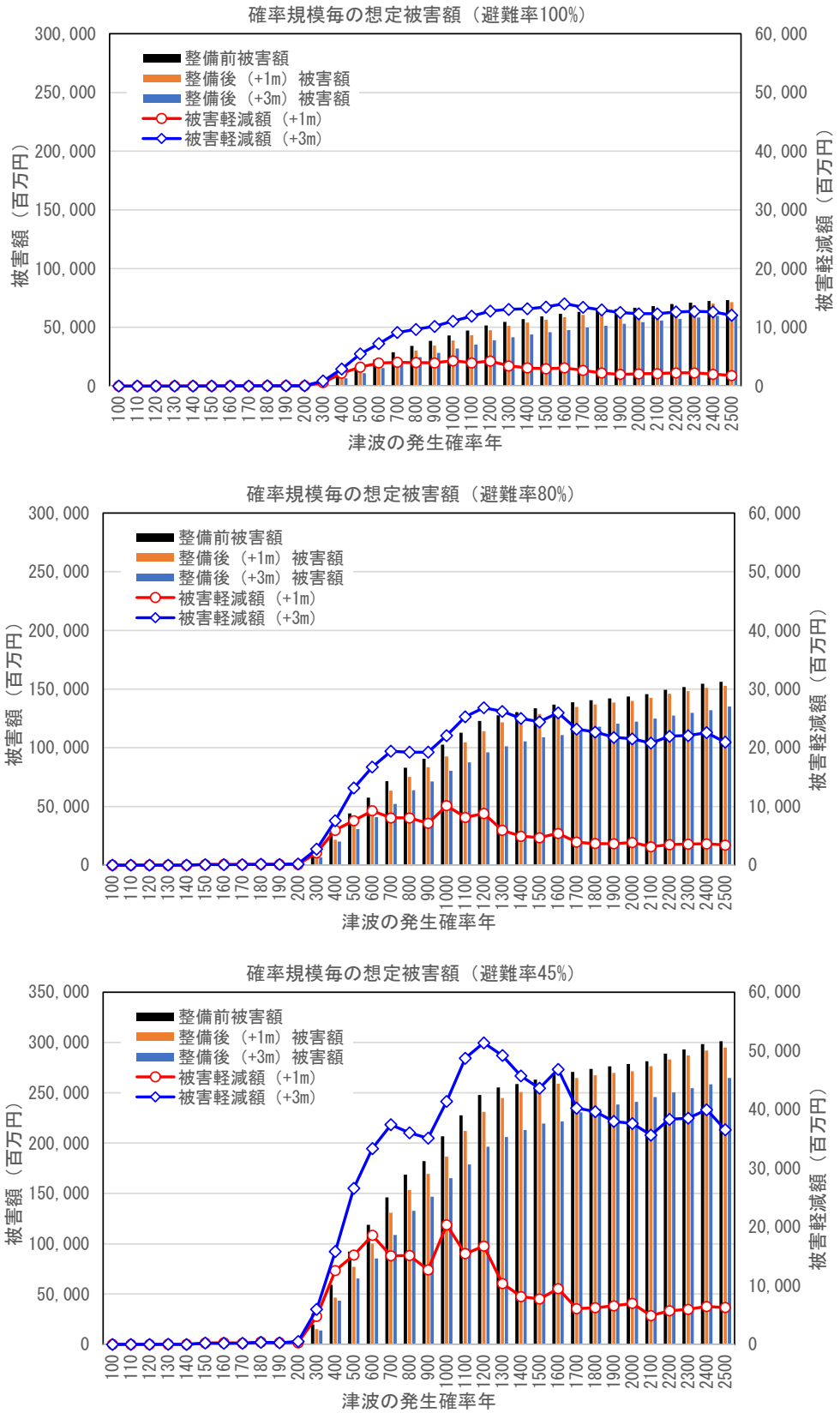


図 10.4.4 避難率毎の**被害額及び被害軽減額の推計結果（公共土木等を除く）**

10.4.4. 整備コストの試算

海岸堤防・盛土の整備コストは，「第 1 編 **3.2** 建設・維持管理費用等の算定」より試算した．類似事例による単価に A 町の防潮堤等の防護ライン延長の約 3km を乗じて設定した結果を**図 10.4.5** に示す．本ケーススタディでは+1m，+3m の嵩上げを対象とするため，整備コストは下記とした．

+1m 嵩上げ整備コスト：515 百万円

+3m 嵩上げ整備コスト：2,706 百万円

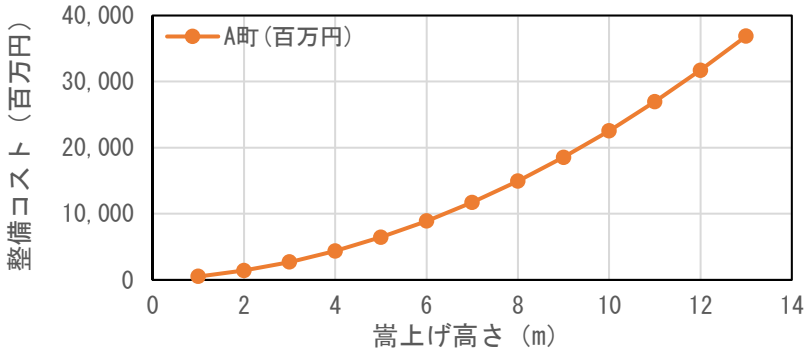


図 10.4.5　嵩上げ対策による整備コスト

10.4.5. 便益の算定

(1) 評価期間

評価期間は，評価を単純化するため単年で整備完了すると想定し，整備完了から 50 年間を評価期間とする．なお，現実的には単年で整備完了は困難であり，予算等を勘案した整備期間を設定し，整備の進捗に応じた効果発現等の便益算定を実施することが望ましい．

(2) 年平均被害軽減額

確率規模毎の発生確率を考慮するため，下表の方法で年平均被害軽減額を算出した．

滞水流量規模	年平均超過確率	滞水流量に対応する想定被害額	Q_n～Q_{n+10}の年平均超過確率	Q_n～Q_{n+10}の同左平均被害額	超過確率×平均被害額
Q_1	$N_1=1$	$L_1(=0)$	N_1-N_{10} $(=1-1/10)$	$\frac{L_1+L_{10}}{2}$	$\frac{(N_1-N_{10})\times(L_1+L_{10})}{2}$
Q_{10}	$N_{10}=1/10$	L_{10}	$N_{10}-N_{20}$ $(=1/10-1/20)$	$\frac{L_{10}+L_{20}}{2}$	$\frac{(N_{10}-N_{20})\times(L_{10}+L_{20})}{2}$
Q_{20}	$N_{20}=1/20$	L_{20}	$N_{20}-N_{30}$ $(=1/20-1/30)$	$\frac{L_{20}+L_{30}}{2}$	$\frac{(N_{20}-N_{30})\times(L_{20}+L_{30})}{2}$
Q_{30}	$N_{30}=1/30$	L_{30}	$N_{30}-N_{40}$ $(=1/30-1/40)$	$\frac{L_{30}+L_{40}}{2}$	$\frac{(N_{30}-N_{40})\times(L_{30}+L_{40})}{2}$
Q_{40}	$N_{40}=1/40$	L_{40}	$N_{40}-N_{50}$ $(=1/40-1/50)$	$\frac{L_{40}+L_{50}}{2}$	$\frac{(N_{40}-N_{50})\times(L_{40}+L_{50})}{2}$
Q_{50}	$N_{50}=1/50$	L_{50}			

出典）「海岸事業の費用便益分析指針（改訂版）令和 2 年 4 月一部更新」P17

(3) 現在価値化

現在から将来にかけての各年度の金額のままでは，同じ金額であっても価値は同一ではないため，単純には合算できない．そのため，社会的割引率を用いて各年度の便益を現在価値へ変換することが必要となる．社会的割引率は「第 2 編 **8.3** 社会的割引率」より，4%と 2.5%の 2 パターン設定した．

10.4.6. 最適堤防高の試算結果

上記の整備コスト及び便益の算定結果より純便益（B-C）を試算した結果を示す.

(1) 一般資産のみの試算結果（避難率 100%）

各自治体の防災計画等では，避難所整備や避難訓練等を実施し，人的被害ゼロ（避難率 100%）を目指している．ここでは，家屋や企業等の一般資産被害を対象とした最適堤防高の試算結果を**図 10.4.6**，**図 10.4.7** に示す.

社会的割引率 4%では，現況（0m），嵩上げ（+1m）ともに B-C≒0 であり，嵩上げ（+3m）では B-C がマイナスとなっている．整備コストに対して十分な効果がないことがわかる．また，社会的割引率 2.5%では，嵩上げ（+1m）の B-C が約 150 百万円であり嵩上げ（+3m）では，B-C がマイナスとなっている.

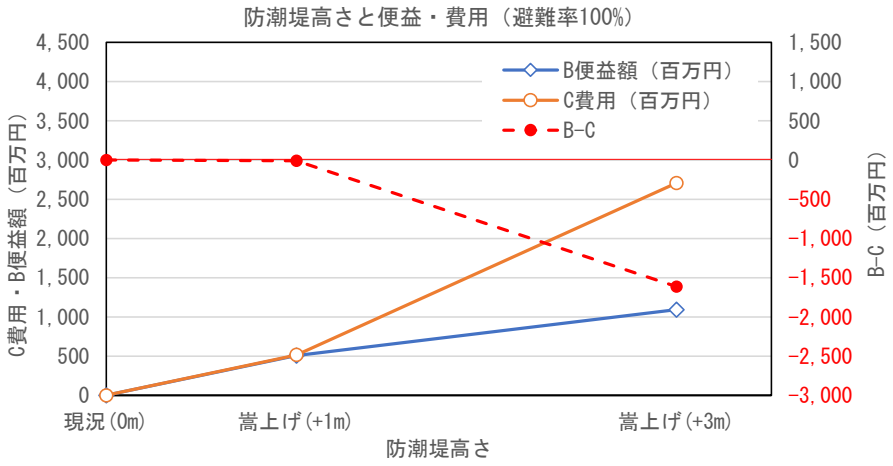


図 10.4.6　費用便益分析結果（社会的割引率 4%）

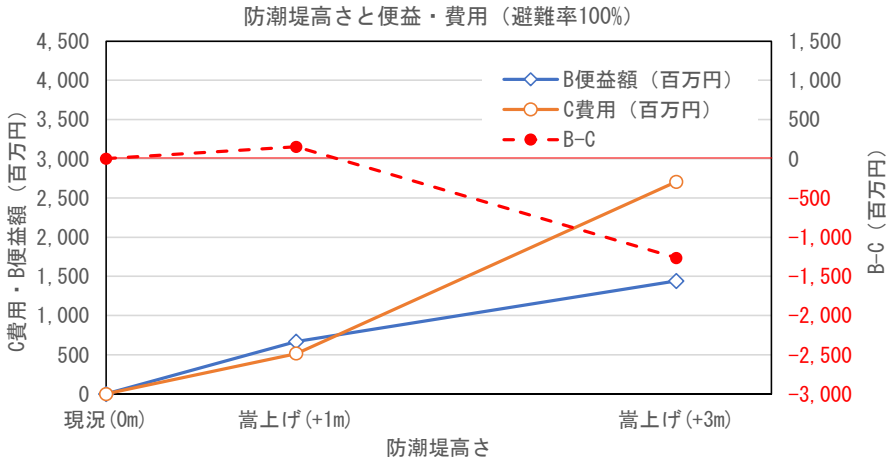


図 10.4.7　費用便益分析結果（社会的割引率 2.5%）

(2) 人的被害を含む試算結果（避難率 80%，避難率 45%）

東日本大震災では多くの人命が失われたことから，人的被害を軽減することは最も重要な課題である．「逃げ遅れ」の可能性を考慮すると，**表 10.4.7**，**表 10.4.8** のような人的被害軽減の推計値も重要な指標であり，最適堤防高は，このような数値も勘案して総合的に判断する必要がある．

表 10.4.7　津波による人的被害の推計値【避難率 80%】（人）（再掲）

	整備前		整備後					
			+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	9,408	死亡率	9,408	減少数	死亡率	9,408	減少数	死亡率
500年	88	0.9%	74	▲ 14	0.8%	64	▲ 25	0.7%
1000年	191	2.0%	172	▲ 19	1.8%	155	▲ 35	1.7%
2500年	247	2.6%	241	▲ 6	2.6%	217	▲ 30	2.3%

表 10.4.8　津波による人的被害の推計値【避難率 45%】（人）（再掲）

	整備前		整備後					
			+1m嵩上げ			+3m嵩上げ		
現況	9,408	死亡率	9,408	減少数	死亡率	9,408	減少数	死亡率
500年	243	2.6%	205	▲ 38	2.2%	175	▲ 68	1.9%
1000年	525	5.6%	473	▲ 51	5.0%	427	▲ 97	4.5%
2500年	679	7.2%	663	▲ 16	7.0%	598	▲ 81	6.4%

上記の人的被害軽減を含めた B-C の算定結果を**図 10.4.8**，**図 10.4.9** に示す．何れのケースについても嵩上げ（+1m）の B-C 値が最も高い結果となった．

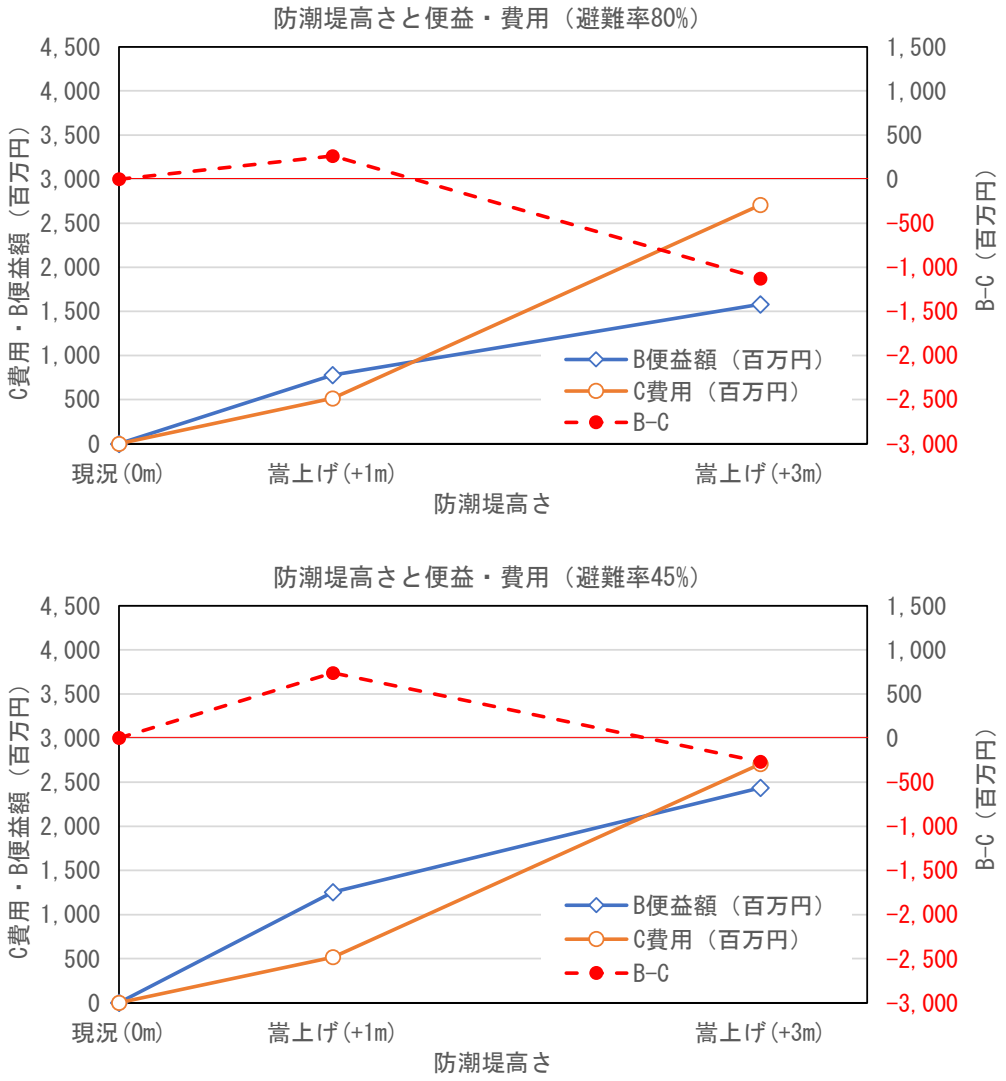


図 10.4.8　人的被害軽減を含めた費用便益分析結果（社会的割引率 4%）

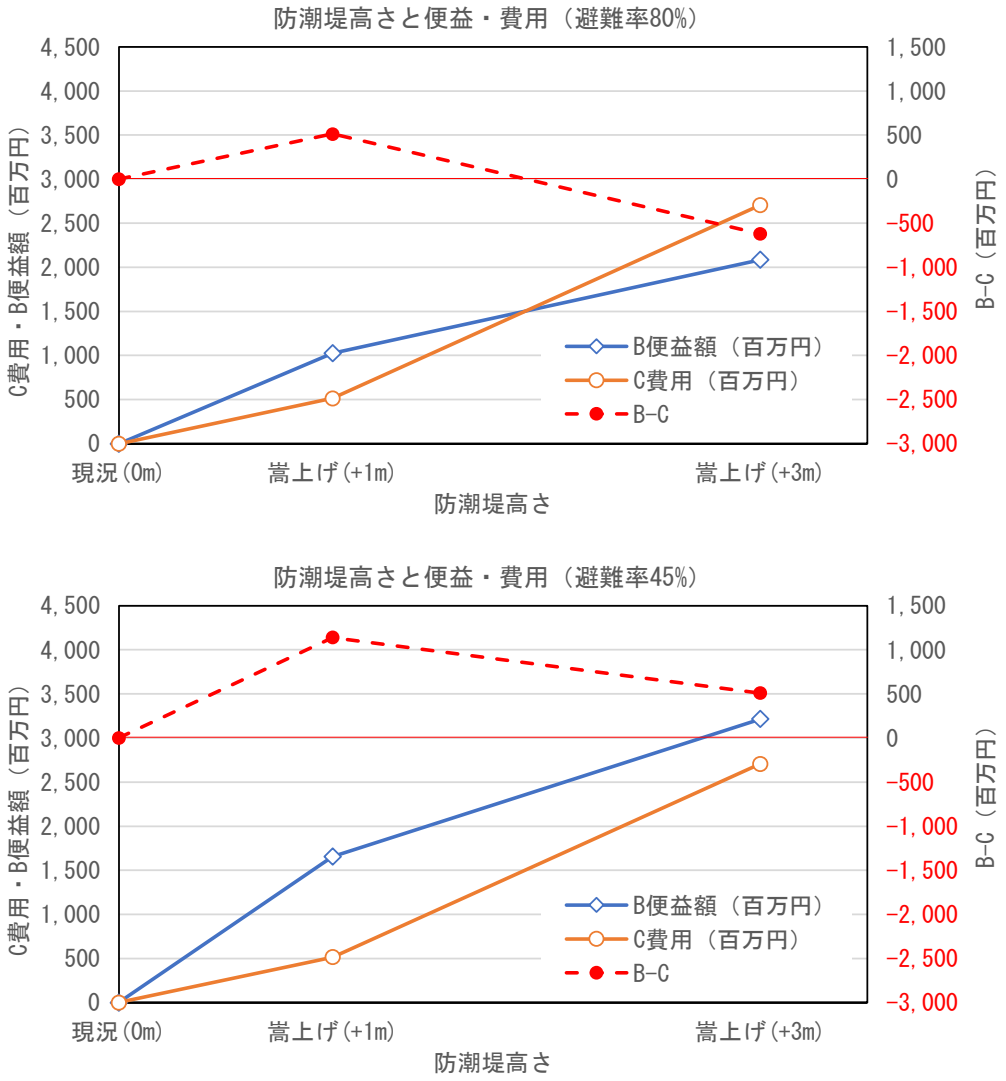


図 10.4.9　人的被害軽減を含めた費用便益分析結果（社会的割引率 2.5%）

10.5. 外部性の評価と外部性を低減する代替案の設定

前節より，現況の堤防に対し 1m 嵩上げするとともに，7 割以上の住民が避難行動をした場合，人的被害を抑えることができる結果となった．本節では，【第 2 編 方法編】「**9.** その他の考慮すべき事項」における「**9.1.** 景観・利用・環境に関する外部性」に基づき，シミュレーション結果によって考えられる複数の対策案について，景観・利用・環境に関する外部性の評価，抽出を行い，「**9.1.2.** 東日本大震災からの復興で採られた外部性緩和策」に基づいた外部性の緩和策について検討していく．ただし，本ケーススタディでは漁港海岸を想定しており，「自然環境」のうち「a)砂浜海岸」と「b)岩礁海岸」は該当しない．よって，今回は「自然環境 c)陸域と海域のつながりの確保」「表層的景観」「深層的景観」「利便性」「他の災害に関連する安全性」について定性的評価と課題抽出を行う．

本節では，堤防の位置を変更することなく嵩上げを行う「既存堤防の補強」を実施する場合を基本案としてまず設定し，外部性の評価，課題抽出を行った上で，代替案について検討を行うこととする．

10.5.1. 基本案がもつ外部性の定性的評価と課題抽出　「既存堤防の補強」

(1) 自然環境とその利用価値

c) 陸域と海域のつながりの確保

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，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．

既存堤防の補強を行う場合，嵩上げする高さに見合う強度を担保するために，地盤改良や矢板による補強などが生じると考えられる．その場合には，山・川・海のつながり，伏流水に対する影響についても検討項目に加えることが求められる．

(2) 表層的景観

美しいリアス式海岸の風景は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．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ことで，美しいリアス式海岸の風景に溶け込むよう，影響を抑えることができる．

仮に 2m の既存堤防に対して 1m 嵩上げを行う場合，地盤からの高さは 3m となり，主要な道路などから遠景として海岸堤防の輪郭線が強調され，長大感・圧迫感が増大するという課題が発生するだろう．長大感については，「河川・海岸構造物の復旧における 景観配慮の手引き」（平成 23 年 11 月国土交通省水管理国土保全局）を参考に，「山付き地形を

活用」するという解決策もあるが，位置・線形は現状のままになるため，応用することはできない．そのため，認知特性を逆利用して，長大感・圧迫感を低減する対策を検討することが重要である．具体的な手法については，「河川・海岸構造物の復旧における 景観配慮の手引き」や【第 2 編 方法編】「**9.** その他の考慮すべき事項」における「**9.1.2.2** 設計段階での外部性緩和策」を参照し，施工における技術的工夫と共に検討することが重要である．

(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.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.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．

仮に 2m の既存堤防に対して 1m 嵩上げを行う場合，地盤からの高さ 3m 程度を超えると 2 階からでも海が見えづらくなり，近景としての海への眺望の遮断は避けられないだろう．この課題を解決するためには地盤の高さを上げるしかないが，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を念頭に置いた事前復興の考え方も必要である．地盤の高さを上げる，市街地や高台から海が日常生活の中で眺められる環境を設けるなど，解決策を人口減少下における将来的な都市像とともに議論していくことが大変重要になる．

(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く，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．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ため，そうした施設の従業員等々の動線の確保も同様に考慮する必要がある．

既存堤防の補強の場合，既に陸閘が設置されている場合が想定されるため，動線の確保はできていると考える．ただし，陸閘の高さの更新を行う必要はあるだろう．

(5) 他の災害からの安全性

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．

既存堤防の補強では，既に陸閘の設置が行われている場合が多く，安全性に影響を与える可能性は低いと考える．しかし，流域治水や事前防災，人口減少下における市街地のコンパクト化など，気候変動や将来的に起こりうる他の災害に対する対策など，様々な視点を統合し，議論することが重要である．

10.5.2. 代替案のもつ外部性の定性的評価と課題抽出　リアス式海岸地形–住居・商業地区を「よせる」

以上のように,海岸堤防の外部性の緩和策は,大部分が計画段階で決まると言ってよい.この時，海岸堤防の線形や形状の計画として考えるのではなく，人口減少下における将来的な都市像，市街地のコンパクト化，交通計画など，町全体の課題を同時に解決していくための計画として捉え，災害後を念頭に置いた事前復興の考え方や流域治水のような他の災害に関する考え方などを総合的に組み合わせていくことが重要である.

総合評価を踏まえると，そうした外部性の低減策は，【第 2 編 方法編】「**9.** その他の考慮すべき事項」の **9.1.2**，**9.1.3** から可能性のある低減策を参照すると「住居・商業施設をよせる」と「二線堤」などが該当する．本来は，代替案として複数考えることが望ましいが，当該地区は海沿いに観光施設があることを想定していないため，本ケーススタディでは「住居・商業施設をよせる」の 1 案のみを代替案として提示する．また，複数代替案について浸水計算をやり直し，被害を再算定すること，このような複数代替案から，総合的に検討し，適切に実施し整備計画とすることが望ましい.

人口減少下における将来的な港湾・漁港区域の土地利用を考慮し，港湾・漁港周辺から行政機関や駅，現堤防よりも高くなる地区へ移転を促進し「住居・商業施設をよせる」ことで，市街地のコンパクト化を進めつつ津波の影響を低減する方向性を代替案として提案する．「よせる」の考え方については，【第 2 編 方法編】「**9.** その他の考慮すべき事項」の **9.1.3** で示した概念図を再掲する.

山側に向かって比較的勾配を持った扇状地的な地形を有する典型的なリアス式海岸地形にある市街地では，道路や鉄道，高速道路，駅，行政機関などが山側に設置されていることが多い．この交通利便性に着目し，新たな住居・商業施設を現況よりも高くなる地区へと移転を促進し，よせるのである．これは，人口減少下における市街地のコンパクト化に基づく利便性の向上とともに，他の災害リスクも含めた安全性を高める上でも有効な代替案であると考えられる.

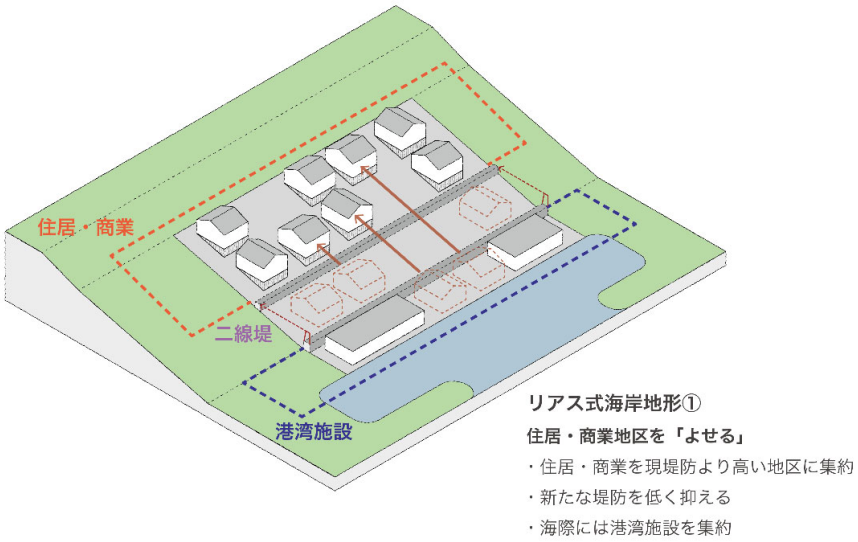


図 10.5.1 代替案「住居・商業地区をよせる」 概念図

海岸堤防の輪郭線については，地形と現状の町割に基づいて決定することが望ましい．既存の道路線形に併せていくことも一つの方法として考えられるだろう．近景の課題である圧迫感については，海岸堤防沿いの居住者たちとの合意形成が必要であるが，もし標高の高い市街地側へと海岸堤防を引堤することができれば，海岸堤防の高さを低く抑えることができ，圧迫感の軽減にもつながる．仮に 2m の既存堤防に対して 1m の嵩上げが必要となる場合，現況堤防の標高よりも 2m 高くなる地点に堤防を引くことができれば，堤防の高さは 1m に抑えることができる．これは，深層的景観の課題でもある海岸堤防後背地から海への眺望遮断の解決にもつながる．海岸堤防の高さを低く抑えることができれば，住宅から海への眺望を確保でき，身体化した日常かつ生業空間との視覚的隔絶も回避することができるからである．海岸堤防の形式についても，傾斜堤や特殊堤，二線堤，施設一体堤防など，様々な形式で検討することも必要である．いずれにせよ，海岸堤防の輪郭線をどこにするか，という計画段階において，堤防の高さを抑えつつ，海への眺望の確保，圧迫感の抑制，市街地のコンパクト化などの課題解決の両立を目指し，地形と現状の町割を活かしながら最適解のラインを合意形成によって導き出すことが重要である．

この時，海側へ広がった空地は海岸区域や漁港・港湾区域として指定し，堤防の後背地を堤防高程度に盛土して，観光交流拠点となるべき地区の形成や，漁港・港湾関連施設の集約を行うと，漁港・港湾・海浜と町との分断を緩和することにも繋がるだろう．

この代替案を実際に計画した場合のイメージパースを，以下に示す．

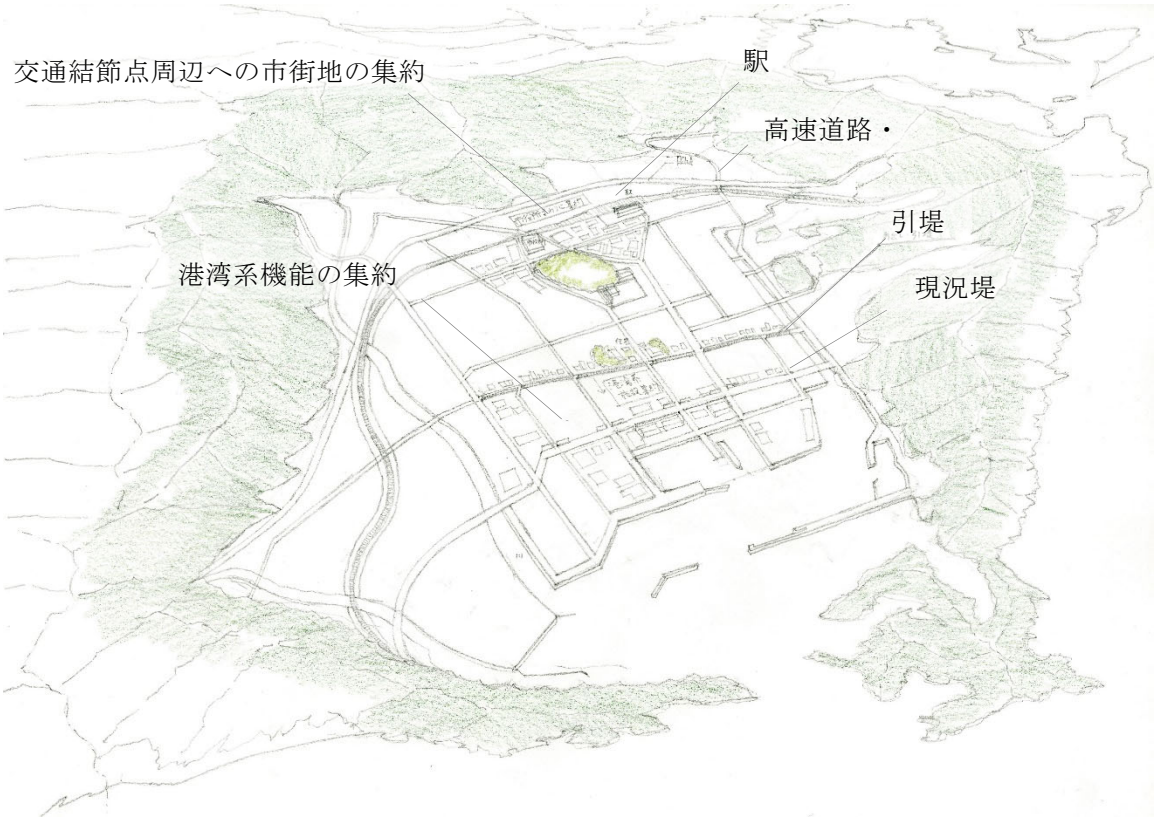


図 10.5.2 代替案　リアス式海岸地形―住居・商業地区を「よせる」　イメージパース

10.5.3. 外部性の評価と外部性を低減する代替案の設定に関する留意点

提案した基本案と代替案の総合評価について，比較表として整理する．代替案は，人口減少に対応したまちづくり政策と防災対策を一致・総合的に実施できる点に良さがあり，本ケーススタディでは「**住居・商業施設をよせる**」ことで市街地のコンパクト化を進めつつ津波の影響を低減する代替案が有力であると考えられる．しかし，事業として実施する上での課題として，「よせる」ための時間が必要となること，新たな海岸堤防建設に対する合意形成が難しい可能性があることが挙げられる．市街地のコンパクト化を促進するためには，引堤により新たに漁港・港湾区域となる地区に現在居住している住民に対する市街地への転居促進のための合意形成や，立地適正化計画，防災集団移転促進事業，漁業集落防災機能強化事業，津波防災地域づくりに関する法律に基づく区域指定等を活用した居住制限等による居住誘導，市街地の空家・空地を利活用するための所有者との合意形成など，様々な合意形成が必要であり，市街地のコンパクト化が実現するには時間がかかる可能性が高い．代替案にも，合意形成の問題や市街地のコンパクト化の実現にかかる時間の長期化という課題はあるが，街の魅力など防災以外の重要なポイントや，人口減少下における都市の将来像，事前復興の姿を見据えた時には，人口減少に対応したまちづくり政策と防災対策を一致・総合的に実施していくことができるというこの代替案の良さは評価できるのではないだろうか．

以上のように，基本案とともに複数代替案について，住居・商業地区の移転場所や移転規模，移転費用，海岸堤防の建設費の変動等のコストだけではなく，地域の利便性や環境・景観，都市の将来像のように計量が難しい外部性にも配慮した防災力強化の方向性について総合的に検討し，中長期的な対策も含めて適切に実施し整備計画を立て，合意形成をしていくことが望ましい．

表 10.5.1　本ケーススタディにおける基本案と代替案の総合評価比較

	表層的景観	深層的景観	利便性	安全性
基本案	海岸堤防の輪郭線が強調される	海への眺望の遮断 身体化した日常かつ生業空間との視覚的隔絶 圧迫感の増長	陸閘の高さの更新 将来的な港湾・漁港区域の土地利用を考慮した動線の見直し	気候変動や将来的に起こりうる他の災害に対する対策など，様々な視点を統合し，議論する
代替案	地形と現状の町割に基づいた線形計画	海への眺望の確保が可能	交通結節点を核とした住居・商業地区の集約による利便性向上	高台への移転促進による安全性向上
	新たな海岸堤防建設に対する合意形成が難しい可能性		住居・商業地区を「よせる」ためには時間がかかる	

付録 A　「設計津波の水位の設定方法等について」（海岸関係省庁課長通知）

23 農振第 1154 号
23 水港第 1068 号
国水海第　2 号
国港海第　58 号
平成 23 年 7 月 8 日

各都道府県農林水産主管部長
土木主管部長
各地方農政局整備部長
北海道開発局建設部長
港湾部長
各地方整備局河川部長
港湾空港部長
沖縄総合事務局農林水産部長
開発建設部長
あて

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

設計津波の水位の設定方法等について

本通知は、海岸保全施設の技術上の基準を定める省令（平成一六年三月二三日農林水産省・国土交通省令第一号。以下「省令」という。）第二条第三号及び海岸保全施設の技術上の基準について（平成一六年四月一二日一五農振第二五七四号、一五水港第三一六八号、国河海第六九号、国港海第五五六号）二・四の適用に関し、平成二三年東北地方太平洋沖地震に起因する津波災害を踏まえ、下記のとおり設計津波の水位設定の考え方を示すことにより、東北地方太平洋沖地震により発生した津波による被害を受けた地域における速やかな海岸保全施設の復旧計画の策定に資することを目的とするものである。

今後、設計津波の水位を設定し、又は見直す場合には、留意されたい。

（※）なお、下記については、地方自治法（昭和二二年法律第六七号）第二四五条の四第一項に規定する技術的な助言となるものである。

ついては、貴管内の市町村、一部事務組合及び港務局の海岸管理者に対しては、貴職から周知されたい。また、必要があれば貴管内の沿岸市町村にも情報提供されたい。

（注）地方支分部局の各部長あての通知については、（※）以下を、「また、各都道府県農林水産主管部長（土木主管部長）には別途通知したので申し添える。」とする。

なお、東北地方太平洋沖地震により被災を受けた海岸保全施設の災害復旧計画は、下記に示す方法により求めた設計津波の水位を踏まえ、策定するものとする。

記

第一　用語の定義

この通知において、次の各号に掲げる用語の意義は、それぞれ当該各号に定めるところ

による。

一　津波高さ　海岸線付近における地盤高に津波による浸水深を加えた標高をいう。当該津波高さは東京湾平均海面（T．P．）等基準面を明らかにしたうえで用いる。

二　設計津波の水位　海岸保全施設の設計を行うため、当該海岸保全施設に到達するおそれが多い津波として、海岸管理者が省令第二条第三号に基づいて定める設計津波の高さをいう。

三　地域海岸　一の海岸保全基本計画を作成すべき一体の海岸の区分（沿岸）を「湾の形状や山付け等の自然条件」、「文献や被災履歴等の過去に発生した津波の実績津波高さ及びシミュレーションの津波高さ」から、同一の津波外力を設定しうると判断される一連の海岸線に分割したものをいう。

第二　設計津波の設定単位

設計津波は、地域海岸ごとに設定することを基本とする。

第三　設計津波の水位の設定方法

設計津波の水位は、次の各号に掲げる手順により設定する。

一　過去に発生した津波の実績津波高さの整理

過去に発生した津波の実績津波高さは、各機関により実施された痕跡高調査並びに歴史記録及び文献等に津波による痕跡高の記録が残されているものを用いることとし、次の各号に掲げる措置により整理するものとする。なお、過去の痕跡高の記録を整理する際には、極力海岸線付近における記録を用いることとし、その痕跡高地点における津波の形態（重複波、進行波、不明）を区分する。

イ　痕跡高調査については、土木学会海岸工学委員会における現地調査マニュアル等に基づき行われたものを収集整理すること。

現地調査マニュアル等に基づく独自の調査成果が無い又は不足する等の理由により他機関が実施した調査結果を用いる場合は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループに現地調査結果として登録してあるデータ等信頼できる津波高さを用いること。

地形の改変等により、海岸線付近での痕跡高調査結果を得られない場合は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ調査結果等信頼できるデータにおける緯度経度を参照の上、出来うる限り海岸線近くの痕跡高を収集すること。

ロ　歴史記録及び文献等の資料を使用する際は、中央防災会議等において過去に整理した津波高さを用いることとし、津波高さのデータを補う必要がある場合は、「日本被害津波総覧」等の公表資料や地方整備局、都道府県及び気象庁等の調査結果等公的な調査資料を用いること。

ハ　歴史記録及び文献等に地震発生の記録はあるが、津波高さのデータが無い場合は、津波堆積物等の調査結果から浸水範囲等を明らかにしたうえで、可能な範囲でシミュレーション等により津波高さを想定するよう努めること。

二　シミュレーションによる津波高さの算定

過去に発生した津波の実績津波高さについて、海岸線付近における痕跡高など、設計津波の水位を設定するための十分なデータが得られないときは、過去に発生した地震による津波高さのシミュレーションを行ってデータを補完する。その際、中央防災会議等におけるシミュレーション結果が公表されているものについては、当該結果を活用する。

なお、中央防災会議や地震調査研究推進本部において、発生の可能性が高いとされた想定地震がある場合には、当該地震による津波高さのシミュレーションを用いて設計津波の水位を設定するためのデータとすることができる。

今後、中央防災会議等において検討が進み、過去に発生した地震の地震動推定における規模や対象範囲の見直し等が行われた場合（マグニチュードや連動型発生等の大きな地震）は、そのシミュレーションによる津波高さも適宜検討に加え、適宜見直すものとする。

三　設計津波の対象津波群の設定

地域海岸ごとに、第一号及び第二号で得られた過去に発生した津波の実績津波高さ及びシミュレーションにより求めた津波高さを収集したうえで、横軸に津波の発生年（想定地震の場合には右端）、縦軸に海岸線における津波高さをとり、グラフを作成する。グラフには、一の津波に対して最も大きな津波高さの値をプロットし、重複波、進行波、不明の別も合わせて記述する。作成されたグラフから、原則として一定の頻度（数十年から百数十年に一度程度）で到達すると想定される津波の集合を、設計津波の水位設定のための対象津波群として選定する。その際、進行波及び不明に区分された津波が含まれるよう留意する。

四　設計津波の水位の設定

対象津波群の津波を対象に、地域海岸において堤防位置における津波の侵入の防止を条件とした津波シミュレーションを行う等により地域海岸内の津波水位分布を算出し、当該水位分布に基づき、隣接する海岸管理者間で十分調整を図ったうえで、設計津波の水位を設定するものとする。

一の地域海岸に対しては、一の設計津波の水位を設定することを基本とするが、設計津波の水位が当該地域海岸内の海岸線に沿って著しく異なることとなると判断される場合は、理由を明らかにしたうえで、地域海岸を分割して複数の設計津波の水位を定めることができるものとする。

第四　堤防等の天端高

堤防等の天端高は、上記により設定された設計津波の水位を前提として、省令第三条第一項及び第三項並びに第五条に定められた基準に従い、海岸の機能の多様性への配慮、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つつ、海岸管理者が適切に定めるものであることに留意する。

第五　河川整備との整合性の確保等

設計津波の水位の設定に当たっては、当該地域海岸に流入する河川についても、整合的な津波対策が必要とされることから、河川管理者との連絡に努められたい。

堤防等の天端高の設定に当たっては、河川整備計画等との調整を図るよう努められたい。また、港湾及び漁港の利用者への配慮にも努められたい。

以上

付録 B　確率論的津波ハザード評価手法の比較

津波をその発生確率と規模から確率論的に評価する確率論的津波ハザード評価 (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: PTHA) は，西暦 2000 年以降，とりわけ，2004 年インドネシア・スマトラ島沖地震津波，2011 年東北地方太平洋沖地震津波による被災経験を経て，急速に発展してきた (e.g., Geist, 2002; Geist and Parsons, 2006; González et al., 2009; Grezio et al., 2017; Mori et al., 2017)．PTHA では一般的に，津波ハザード評価において考え得る不確定性の各要素を認識論的不確定性と偶然的不確定性に分類して評価する．認識論的不確定性をロジックツリーの分岐として評価する研究は，国内外で盛んに行われてきた (Geist and Parsons 2006; Annaka et al., 2007; Bommer, J.J. and Scherbaum, F., 2008; Hon kei Thio, 2010; Fukutani et al., 2015; Selva et al., 2016; Park et al., 2017; ASCE, 2017)．認識論的不確定性のうち，地震発生のシナリオは，PTHA に最も大きな影響を及ぼす要素の一つであり，近年，多数の地震断層をランダムに生成する評価手法が多く提案されている (Goda et al. 2014, 2016; Mueller et al. 2015; Goda and Song 2016; LeVeque et al., 2016; Sepulveda et al. 2017; Rohmer et al. 2018).

本付録では，coRaL 法，ランダムフェーズモデル，および，ロジックツリーアプローチの各確率論的津波ハザード評価手法を, 複数の項目で比較する. **表 B.1** にその概要を示す. **表 B.1** では，左から，本報告書で提案する coRaL 法，ランダムフェーズモデル，ロジックツリーアプローチの順に記載している．coRaL 法は，ランダムフェーズモデルとロジックツリーアプローチの利点を組み合わせ，確率津波波高，および，浸水深を合理的に算出する手法として提案する．ロジックツリーアプローチについては主に国内や ASCE で提案されている手法に限定して，その概要を記載している．

各項目については，PTHA での評価項目を大きく「地震断層の設定」と「確率津波の計算」に分け，「地震断層の設定」については，地震波源の設定（巨視的パラメータ），および，破壊電波速度やライズタイム（微視的パラメータ），「確率津波の計算」については，津波伝播の基礎方程式，潮位設定，最小メッシュサイズ，偶然的不確定性，確率津波遡上計算手法などに分類した．これらのうち特に重要な，地震波源の設定，および，偶然的不確定性について以下に詳述する．

地震波源の設定について，ランダムフェーズモデルでは，SRCMOD と呼ばれる世界で発生した地震のデータベースに基づき地震断層上の滑り分布（アスペリティ）の相関長を用いて空間相関を評価し，それを利用して，地震断層上の滑り分布をランダムに生成する理論が用いられている．一方，国内で提案されているロジックツリーアプローチでは，地震調査研究推進本部 (2017) の波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）に基づき，M_w に応じた段階的な滑り分布を設定する場合が多い．津波レシピによれば，最大で 3 段階のすべり域を設置する. 超大すべり域のすべり量は, 断層全体の平均すべり量の 4 倍，面積が断層全体の 10%，大すべり域のすべり量は，断層全体の平均すべり量の 2 倍，面積

が断層全体の 20%であり, この範囲内で地震断層上のアスペリティを生成することとなる．後者の設定方法では，地震断層上のアスペリティの設定位置について人為的な判断が入ることになる．なお，地震波源の設定はアスペリティ分布の設定だけではなく，その他に，断層深さ，すべり角，走行，傾斜角などのパラメータがあるが，ランダムフェーズモデルではこれらの不確定性については考慮できない一方，ロジックツリーアプローチではこれらを断層設定の不確定性の一分岐として加えることで考慮できる．

偶然的不確定性について，ランダムフェーズモデルでは，そのような概念を示してはいないが，地震断層上のアスペリティをランダムに生成するモデルであることから，アスペリティ位置の変化に起因する不確定性を偶然的不確定性として捉えていると考えることができる．一方，国内で提案されているロジックツリーアプローチでは，津波数値計算値と観測値のモデル化誤差を偶然的不確定性として考える. 具体的には, 津波波高の計算値を，偶然的不確定性を表現する対数正規分布の中央値として扱う仮定が置かれている．対数正規分布の標準偏差は，過去の地震津波を対象とした津波数値計算と観測値の誤差を評価して決定している．後者の設定方法では，ある地震断層から計算した津波波高一つの値（ロジックツリーの一分岐）に対して，一つのハザードカーブが対応することになる．この偶然的不確定性を表現する対数標準偏差の設定によっては，評価値が大きく変動することが指摘されており，改善が望まれる項目であると考えられる．

最後に，**表 B.1** には示していないが，PTHA では対象地震の発生確率を付与する必要がある．ランダムフェーズモデルを用いる研究では，Gutenberg-Richter 則が適用されることが多い．一方，国内で提案されているロジックツリーアプローチでは，南海トラフ地震や相模トラフ地震など，過去に同様な領域で複数発生していることが分かっている固有地震については，その地震の発生間隔の平均値とばらつきを用いた時間依存モデルである BPT (Brownian Time Passage) 分布，その他の背景領域の地震については，M_w から Gutenberg-Richter 則により決定される発生確率を平均値としたポアソン分布が適用されることが多い．地震の発生確率についても様々な考え方があり，これらも認識論的不確定性の一つと言える．

表 B.1 ランダムフェーズモデルとロジックツリーアプローチの詳細比較

			Random Phase Model + Logic Tree Approach	Random Phase Model	一部 Random Phase Model + Logic Tree Approach	Logic Tree Approach				
			減災アセスメント小委員会 coRaL method	Goda et al.	Fukutani et al.	Annaka et al.	原子力規制庁（JNES), 杉野ら	原子力土木委員会	地震調査研究推進本部（J-THIS2020)	アメリカ土木学会（ASCE）
			2021	2014, 2015, 2016他	2015, 2018	2007	2014	2016	2020	2017
地震の設定	地震波源の設定手法		SRCMODのデータに基づきアスペリティをランダムに生成（ランダムフェーズモデル）		2011年東北地震に基づきアスペリティをランダム生成後、数ケースのみ抽出	矩形・一様すべりモデル	Mwに応じて段階的な滑り分布を設定（津波レシピ(2017)とほぼ同様）		Mwに応じて段階的な滑り分布を設定 津波レシピ(2017)の手法	過去の記録に基づきセグメントを分割
	破壊伝播速度 ライズタイム		一定値（中央防災会議の設定と同一）			×	多数	一定値	波源断層全体のすべりが同時かつ瞬時に生じると仮定	不明
確率津波の計算	評価対象地点	沖合・沿岸域	○	○	○	○	○	○	○	○
		遡上域	○	○	○	×	○	×	×	○
	津波伝播の基礎方程式		非線形長波理論							沖合：グリーン関数・線形長波理論 内陸：非線形長波理論
	マニングの粗度係数		0.02-0.04（中央防災会議の設定と同一）			不明	0.025	0.03	0.025	0.025
	潮位		一定値			不明	一定値	事例解析では一定値を用いているが、確率分布を考慮することも提案	一定値	確率分布
	最小メッシュサイズ		270m（沿岸域） 約16m（遡上域）	10m（遡上域）	10m（遡上域）	240m（沿岸域）	5.6m（遡上域）	50m（沿岸域）		約1km（沿岸域） 10m（遡上域）
	沖合・沿岸域での波高評価地点		汀線に対応するメッシュ		水深50m地点（沖合）	汀線に対応するメッシュ	水深50m地点（沖合）	汀線に対応するメッシュ		水深100m地点（沖合）
	偶然的不確実性		■ランダムフェーズモデルによる津波波高の経験分布	–	■津波波高のモデル化誤差 ■破壊伝播速度・ライズタイムによるばらつき（対数正規分布）	■津波波高のモデル化誤差（津波波高を対数正規分布の中央値として設定）				■Magnitude ■Slip distribution ■Tides ■Modeling uncertainty (bathymetric errors and additional source
	確率津波遡上計算手法		非線形長波理論による計算結果から得られる確率分布		沿岸の確率波高を決定し、その波高を生成する断層を特定し、非線形長波理論により再度遡上計算	–	沿岸の確率波高を決定し、確率波高毎の模擬津波波形を作成し、それを入力値として再度遡上計算	–	–	沿岸の確率波高を決定し、その波高を生成する断層を生成し、非線形長波理論により再度遡上計算

【参考文献】

ASCE (2017) ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 800 pp.

Bommer, Julian J. and Scherbaumb Frank (2008) The Use and Misuse of Logic Trees in Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Earthquake Spectra, 24(4):997. https://doi.org/10.1193/1.2977755.

Fukutani Y, Suppasri A, Imamura F (2015) Stochastic analysis and uncertainty assessment of tsunami wave height using a random source parameter model that targets a Tohoku-type earthquake fault. Stoch Environ Res Risk Assess 29:1763–1779.

Geist, E. L. (2002) Complex earthquake rupture and local tsunamis, J. Geophys. Res., 107, ESE2-1–ESE2-15, https://doi.org/10.1029/2000JB000139.

Geist, E. L. and Parsons, T. (2006) Probabilistic analysis of tsunami hazards, Nat. Hazards., 37, 277–314, https://doi.org/10.1007/s11069-005-4646-z.

Goda K, Mai PM, Yasuda T, Mori N (2014) Sensitivity of tsunamiwave profiles and inundation simulations to earthquake slip and fault geometry for the 2011 Tohoku earthquake. Earth Planets Space 66:105.

Goda K, Song J (2016) Uncertainty modeling and visualization for tsunami hazard and risk mapping: a case study for the 2011 Tohoku earthquake. Stoch Environ Res Risk Assess 30:2271–2285.

González, F. I., Geist, E. L., Jaffe, B., Kâno˘glu, U., Mofjeld, H., Synolakis, C. E., Titov, V. V., Arcas, D., Bellomo, D., and Carlton, D. (2009) Probabilistic tsunami hazard assessment at seaside, Oregon, for near and far field seismic sources, J. Geophys. Res. Oceans, 114, C11023, https://doi.org/10.1029/2008JC005132.

Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M. A., Behrens, J., Costa, A., Davies, G., Geist, E. L., Glimsdal, S., González, F. I., Griffin, J., Harbitz, C. B., LeVeque, R. J., Lorito, S., Løvholt, F., Omira, R., Mueller, C., Paris, R., Parsons, T., Polet, J., Power, W., Selva, J., Sørensen, M. B., and Thio, H. K. (2017) Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple Sources and Global Applications, Rev. Geophys., 55, 1158–1198, https://doi.org/10.1002/2017RG000579.

LeVeque, R. J., K. Waagan, F. I. González, D. Rim, and G. Lin (2016) Generating random earthquake events for probabilistic tsunami hazard assessment, Pure Appl. Geophys., doi:10.1007/s00024-016-1357-1.

Mori N., Goda K., Cox D. (2018) Recent Process in Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (PTHA) for Mega Thrust Subduction Earthquakes. In: Santiago-Fandiño V., Sato S., Maki N., Iuchi K. (eds) The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 47. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58691-5_27.

Mueller, C., W. Power, S. Fraser, and X. Wang (2014) Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example, J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, 488–502, doi:10.1002/2014JB011301.

Park, H., & Cox, D. T. (2016) Probabilistic assessment of near-field tsunami hazards: Inundation depth, velocity, momentum flux, arrival time, and duration applied to Seaside, Oregon. Coastal Engineering, 117, 79-96. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.011.

Rohmer, J., Rousseau, M., Lemoine, A., Pedreros, R., Lambert, J., Benki, A. (2018) Source characterisation by mixing long-running tsunami wave numerical simulations and historical observations within a metamodel-aided ABC setting, Stoch Environ Res Risk Assess, 32, 967–984, https://doi.org/10.1007/s00477-017-1423-y.

Selva J, Tonini R, Molinari I, Tiberti MM, Romano F, Grezio A, Melini D, Piatanesi A, Basili R, Lorito S (2016) Quantification of source uncertainties in seismic probabilistic tsunami hazard analysis (SPTHA). Geophys J Int 205:1780–1803.

Thio, H.K.; Somerville, P.G.; Polet, J. Probabilistic Tsunami Hazard in California; College of Engineering, University of California: Los Angeles, CA, USA, 2010.

Sepúlveda, I., P. L.-F. Liu, M. Grigoriu, and M. Pritchard (2017) Tsunami hazard assessments with consideration of uncertain earthquake slip distribution and location, J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, 7252–7271, doi:10.1002/2017JB014430.

原子力規制庁（旧：(独法)原子力安全基盤機構）(2014) 確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, JNES-RE-Report Series, JNES-RE-2013-2041.

地震調査研究推進本部(2017) 波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ），38pp. https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf

地震調査研究推進本部 (2020) 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価, 80p, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf

杉野英治, 岩渕洋子, 阿部雄太, 今村文彦 (2015) 確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響，15 巻 4 号, p. 4_40-4_61.

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.

付録 C　差分の差分法の導出

C.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(C.1)のように r 地域で得られる利潤 $\pi_r(t)$ の関数と考えることが一般的にできる．

$$N_r(t)=f(\pi_r(t)) \tag{C.1}$$

ここで，$\pi_r(t)\equiv\pi(\mathbf{X_r},\mathbf{Y_r},t,D_{r1}(t),D_{r2}(t),...,P_1,P_2,...)$，

$\mathbf{X_r}=[X_{r1},\ldots,X_{ri},\ldots,X_{rI}]$，$\mathbf{Y_r}=[Y_{r1},\ldots,Y_{rj},\ldots,Y_{rJ}]$ とする．

ここで，$\pi_r(t)$ 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 $\pi_r(t)$ は，

$$\pi_r(\mathbf{X},\mathbf{Y},t,,D_r,P)=(1-P)\pi_{r0}+P\pi_{r1} \tag{C.2}$$

と一般に表せる．ここで，$\pi_{r0}(t)$ は t 年について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 $\pi_{r1}(t)$ で表すこととする．

ここで，π_{r0} を次のように特定化する．

$$\pi_{r0}=\alpha+\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{X}}\cdot\mathbf{X}_{\mathbf{r}}+\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{Y}}\cdot\mathbf{Y}_{\mathbf{r}}+\gamma t \tag{C.3a}$$

なお，δ_t は t 時点の時に 1 でそれ以外の時点を 0 とするダミー変数を示す．
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 $\lambda_{Zi}\ (Z=X \text{ or } Y)$ で表す．すなわち，

$$\pi_{r0}(t)=\lambda_\alpha\alpha+\sum_{i=1}^{I}\lambda_{Xi}\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{j=1}^{J}\lambda_{Yj}\beta_{Yj}Y_{rj}+\lambda_t\gamma_t\delta_t \tag{C.3b}$$

$\lambda_{kZi}\ (Z=\alpha,X,Y,\text{or } t)=1$ であると，津波時でも平常時と同様にその要素が利潤に寄与するという意味になる．なお，λ_{kZi} も，その要素は一般的には 1 以下の値となる．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 λ_{kZi} が決定すると仮定して式(C.2)に代入すると

$$\pi_r(t)=(1-P)\pi_{r0}(t)+P\pi_{r1}(t)$$

$$
\begin{aligned}
&=(1-P)[\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{j=1}^{J}\beta_{Yj}Y_{rj}+\gamma_t\delta_t]\\
&+P[\lambda_\alpha\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\lambda_{Xi}\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{j=1}^{J}\lambda_{Yj}\beta_{Yj}Y_{rj}+\lambda_t\gamma_t\delta_t]\\
&=\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{j=1}^{J}\beta_{Yj}Y_{rj}+\gamma_t\delta_t\\
&\quad+P[(\lambda_\alpha-1)\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}(\lambda_{Xi}-1)\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{i=1}^{I}(\lambda_{Xi}-1)\beta_{Xi}Y_{ri}+(\lambda_t-1)\gamma_t\delta_t]\\
&=\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{j=1}^{J}\beta_{Yj}Y_{rj}+\gamma_t\delta_t\\
&\quad-P[\kappa_\alpha(D_r)\alpha+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\kappa_{Xi}(D_r)\beta_{Xi}X_{ri}+\sum_{i=1}^{I}\kappa_{Yi}(D_r)\beta_{Xi}Y_{ri}+\kappa_t(D_r)\gamma_t\delta_t]
\end{aligned}
\qquad \text{(C.4a)}
$$

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

$$
\begin{aligned}
&\pi_r(t)=\alpha+B_r+\textstyle\sum_{j=1}^{J}\beta_{Yj}Y_{rj}+\gamma_t\delta_t\\
&\quad-[\kappa_\alpha(D_r)\alpha'+\textstyle\sum_{i=1}^{I}\kappa_{Xi}(D_r)\beta'_{Xi}X_{ri}+\sum_{i=1}^{I}\kappa_{Yi}(D_r)\beta'_{Yi}Y_{ri}+\kappa_t(D_r)\gamma'_t\delta_t]
\end{aligned}
\qquad \text{(C.4b)}
$$

なお，$\alpha'\equiv P\alpha$，$B_r\equiv\sum_{i=1}^{I}\beta_{Xi}X_{ri}$，$\beta'_{Xi}\equiv P\beta_{Xi}$，$\beta'_{Yi}\equiv P\beta_{Yi}$，$\gamma'_t\equiv P\gamma_t$ である．なお，$\kappa_\alpha(D_r)$，$\kappa_Y(D_r)$，$\kappa_t(D_r)$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．

$$\kappa_\alpha(D_r)=\mu_\alpha D_r,\quad \kappa_{Xi}(D_r))=\mu_{Xi}D_r,\quad \kappa_{Yi}(D_r)=\mu_{Yi}D_r,\quad \kappa_t(D_r)=\mu_t D_r$$

$\kappa_{iZ}(D_r)$に関する特定化２．

$D_r=0$のゾーン，$\kappa_\alpha(D_r)=0$，$\kappa_{Xi}(D_r))=0$，$\kappa_{Yi}(D_r)=0$，$\kappa_t(D_r)=0$

$D_r=0\text{m}-0.5\text{m}$のゾーン，$\kappa_\alpha(D_r)=\mu_{\alpha1}$，$\kappa_{Xi}(D_r))=\mu_{Xi1}$，$\kappa_{Yi}(D_r)=\mu_{Yi1}$，$\kappa_t(D_r)=\mu_{t1}$

$D_r=0.5\text{m}-$のゾーン，$\kappa_\alpha(D_r)=\mu_{\alpha2}$，$\kappa_{Xi}(D_r))=\mu_{Xi2}$，$\kappa_{Yi}(D_r)=\mu_{Yi2}$，$\kappa_t(D_r)=\mu_{t2}$

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，X_{ri}，Y_{rj} と t すべてデータそのまま　(C.5a)

特定化２．$N_r(t)=\theta\pi_r(t)$ なお，X_{ri}，Y_{rj} と t すべてデータの対数　(C.5b)

特定化３．$N_r(t)=\theta\exp\pi_r(t)$なお，$X_{ri}$，$Y_{rj}$ と t すべてデータの対数　(C.5c)

なお，θ は回帰分析のときに式(4)のパラメータにかかるのみなので，ここでは θ=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．なお，$\kappa_{iZ}(D_r)$の特定化をした時のパラメータ μ_Z とパラメータ β_{Zi} 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．

C.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

$$N_r(t)=f(U(X_{r1},\ldots,X_{ri},\ldots,X_{rI},D_{r1}(t),D_{r2}(t),P_1,P_2)) \quad (C.6)$$

ここで，U は一年間の利潤，X_{ri} は効用に影響する立地要因 (リスク以外)，$D_{rk}(t)$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．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，

$$U(X_{r1},\ldots,X_{ri},\ldots,X_{rI},D_{r1}(t),D_{r2}(t),P_1,P_2)=(1-P_1-P_2)u_0+P_1u_1+P_2u_2 \quad (C.7)$$

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_a から t_b 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_a で 20 代の人口をとった場合，t_b を 10 年後とすると 30 代の人口を用いるべきである．

付録 D　差分の差分法による土地利用変化の分析結果

南海トラフ巨大地震津波が発生した際に，甚大な被害が想定される神奈川県，静岡県，愛知県，三重県，和歌山県，徳島県，高知県を対象に，差分の差分法による土地利用変化について試算した．試算結果を次頁に示す．

表 D.1　特定化１（企業）

企業ext_pt1_711浸水深(線形)

分類			001_ A～R全産業（S公務を除く）	002_ 第2次産業	003_ 第3次産業	101_ C鉱業，採石業，砂利採取業	102_ D建設業	103_ E製造業	104_ F電気・ガス・熱供給・水道業	105_ G情報通信業	106_ H運輸業，郵便業	107_ I卸売業，小売業	108_ J金融業，保険業	109_ K不動産業，物品賃貸業	110_ L学術研究，専門・技術サービス業	111_ M宿泊業，飲食サービス業	112_ N生活関連サービス業，娯楽業	113_ O教育，学習支援業	114_ P医療，福祉	115_ Q複合サービス業	116_ Rサービス業（他に分類されないもの）
																			分析期間H13～H27		
回帰係数	01神奈川県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.187	-0.107	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.147	-	-	-	-	-0.335	-	-	-	-0.393	-	-	-	-0.063	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.073	-	-	-	-	-	-	-0.052	-	-	-	-	-	-	-
P値＜0.05	02静岡県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-0.214	-	-0.327	-	-0.131	-0.286	-	-0.271	-	-0.425	-0.214	-	-0.201	-	-0.164
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.078	-0.086	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.034	-	-	-	-0.025	-	-	-0.078	-	-	-0.038	-	-	-	-
	03愛知県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.401	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.054	-	-	-	-	-	-	-0.112	-	-	-	-	-	-	-0.069
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	04三重県	浸水深_m(H17公表)	-0.368	-0.130	-0.294	-	-0.064	-0.082	-	-	-	-0.184	-	-	-	-	-0.043	-	-0.055	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-0.220	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.177	-	-0.149	-	-	-0.091	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-0.074	-0.018	-0.055	-0.025	-0.023	-	-	-	-	-0.062	-	-	-	-	-0.022	-	-	-	-0.018
	05和歌山県	浸水深_m(H17公表)	-0.479	-0.101	-0.418	-	-0.037	-0.082	-	-	-0.057	-0.323	-	-	-	-	-0.063	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-0.317	-0.090	-	-	-0.084	-	-	-	-	-0.203	-	-0.208	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-0.101	-	-0.093	-	-0.019	-	-	-	-	-0.080	-	-	-	-	-0.023	-	-	-	-0.025
	06徳島県	浸水深_m(H17公表)	-	-0.100	-	-	-	-0.118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.058	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-0.277	-0.059	-0.268	-	-0.052	-	-	-	-	-0.339	-0.153	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.032	-	-	-	-
	07高知県	浸水深_m(H17公表)	-0.440	-0.120	-0.360	-	-0.067	-0.072	-	-	-0.057	-0.272	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.106	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-0.050	-	-	-	-0.016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.024	-0.030	-	-

表 D.2　特定化２（企業）

企業ext_pt1_712浸水深(対数)

分類			001_ A～R全産業（S公務を除く）	002_ 第2次産業	003_ 第3次産業	101_ C鉱業，採石業，砂利採取業	102_ D建設業	103_ E製造業	104_ F電気・ガス・熱供給・水道業	105_ G情報通信業	106_ H運輸業，郵便業	107_ I卸売業，小売業	108_ J金融業，保険業	109_ K不動産業，物品賃貸業	110_ L学術研究，専門・技術サービス業	111_ M宿泊業，飲食サービス業	112_ N生活関連サービス業，娯楽業	113_ O教育，学習支援業	114_ P医療，福祉	115_ Q複合サービス業	116_ Rサービス業（他に分類されないもの）
																			分析期間H13～H27		
回帰係数	01神奈川県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.031	-0.029	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.026	-	-	-	-	-	-0.034	-0.020	-0.024	-	-0.014	-	-	-0.023	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.010	-	-	-	-	-0.006	-	-0.009	-	-	-	-	-	-	-
P値＜0.05	02静岡県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-0.056	-	-	-	-	-	-0.083	-	-	-0.027	-0.032	-	-	-0.043	-0.046
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.023	-0.024	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.009	-	-	-	-0.012	-0.004	-	-0.013	-	-	-0.006	-	-	-	-0.007
	03愛知県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.051	-	-	-	-	-	-	-0.084	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.019	-	-	-0.036	-	-	-	-0.031	-	-	-	-	-	-	-0.013
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	04三重県	浸水深_m(H17公表)	-0.023	-0.026	-0.025	-	-0.015	-0.016	-	-	-	-0.022	-	-	-	-0.012	-0.012	-	-	-0.015	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-0.005	-0.005	-0.006	-0.017	-0.008	-	-	-	-0.009	-0.009	-0.011	-	-	-	-0.007	-	-	-	-0.008
	05和歌山県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.024	-0.015	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-0.120	-	-	-	-0.033	-0.040	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.008	-	-0.009	-0.010	-0.006	-0.007	-	-	-	-0.007
	06徳島県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.027	-	-0.026	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.009	-	-	-0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	07高知県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-0.011	-	-0.011	-	-	-	-	-	-	-0.017	-	-	-	-	-	-0.051	-0.032	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-0.009	-	-0.011	-	-0.007	-	-	-	-	-0.008	-	-	-	-0.003	-0.004	-0.015	-0.009	-	-0.004

表 D.3　特定化３（企業）

企業ext_pt1_721浸水ダミー1段階(線形)　　分析期間H13～H27

分類			001_ A～R全産業（S公務を除く）	002_ 第2次産業	003_ 第3次産業	101_ C鉱業，採石業，砂利採取業	102_ D建設業	103_ E製造業	104_ F電気・ガス・熱供給・水道業	105_ G情報通信業	106_ H運輸業，郵便業	107_ I卸売業，小売業	108_ J金融業，保険業	109_ K不動産業，物品賃貸業	110_ L学術研究，専門・技術サービス業	111_ M宿泊業，飲食サービス業	112_ N生活関連サービス業，娯楽業	113_ O教育，学習支援業	114_ P医療，福祉	115_ Q複合サービス業	116_ Rサービス業（他に分類されないもの）
回帰係数	01神奈川県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.666	-0.504	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.523	-	-	-	-	-2.106	-	-	-	-2.236	-0.451	-	-	-0.172	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.528	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P値＜0.05	02静岡県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-0.384	-0.489	-	-	-0.219	-1.360	-0.628	-0.376	-	-1.415	-0.712	-	-0.422	-	-0.254
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.286	-	-	-	-	-0.478	-	-0.457	-	-	-0.385	-	-	-	-0.175
	03愛知県	浸水深_m(H17公表)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.851	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-0.242	-	-	-0.749	-	-	-	-0.286	-	-	-	-	-	-	-0.207
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	04三重県	浸水深_m(H17公表)	-1.829	-0.587	-1.461	-	-0.315	-0.407	-	-	-	-1.016	-	-	-	-0.303	-0.309	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-1.129	-0.253	-0.971	-	-0.174	-0.193	-	-	-	-0.883	-	-0.303	-	-1.056	-0.434	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-0.115	-	-	-0.103	-	-	-	-	-0.355	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.094
	05和歌山県	浸水深_m(H17公表)	-3.118	-0.643	-2.730	-	-0.181	-0.595	-	-	-	-2.055	-	-	-	-0.888	-0.386	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-1.849	-0.471	-1.464	-	-0.273	-	-	-	-	-1.135	-	-0.698	-0.409	-	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-1.380	-0.168	-1.249	-	-0.185	-	-	-	-	-1.094	-	-0.267	-	-0.453	-0.243	-	-	-	-
	06徳島県	浸水深_m(H17公表)	-1.005	-0.434	-0.713	-	-0.169	-0.394	-	-	-	-0.691	-	-	-	-	-	-	-	-0.228	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-0.208	-	-	-0.139	-	-	-	-	-0.629	-	-	-	-0.834	-	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-	-	-	-	-0.138	-	-	-0.532	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	07高知県	浸水深_m(H17公表)	-3.041	-0.546	-2.865	-	-0.321	-0.364	-	-	-0.340	-1.766	-0.441	-	-0.433	-2.023	-0.301	-	-	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水ゼロ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.718	-	-	-0.372	-0.344	-	-
		浸水深_m(H24公表_H17浸水あり)	-1.724	-0.167	-1.663	-	-0.299	-	-	-	-	-0.830	-	-0.449	-	-	-	-	-	-	-

表 D.4　特定化１（人口）

人口変化　回帰分析結果

		02静岡県						04三重県						07高知県					
		分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27		
年齢階層		壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期
	H12時点	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～
	H17時点	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～
	H22時点	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～
R2=		0.9542	0.9450	0.9256	—	—	—	0.9426	0.9303	0.9061	0.9440	0.9300	0.9001	0.9493	0.9424	0.9223	0.9486	0.9394	0.9148
N=		22,149	22,197	22,020	—	—	—	15,153	15,186	15,042	20,036	20,072	19,664	10,107	10,152	10,140	13,060	13,072	12,936
(Intercept)		27	28	115	—	—	—	31	34	125	23	31	136	43	37	137	28	32	146
西暦		-0.0107	-0.0118	-0.0554	—	—	—	-0.0141	-0.0154	-0.0609	-0.0103	-0.0141	-0.0660	-0.0205	-0.0176	-0.0673	-0.0134	-0.0151	-0.0717
回帰係数　P値＜0.05																			
浸水深（m）		-	-	-	-	-	-	-0.011	-	-	-0.008	-0.004	-0.011	-	-	-	-0.003	-	-

表 D.5　特定化２（人口）

人口変化　回帰分析結果

		02静岡県						04三重県						07高知県					
		分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27		
年齢階層		壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期
	H12時点	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～
	H17時点	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～
	H22時点	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～
R2=		0.9810	0.9883	0.9454	0.9775	0.9856	2.0010	0.9698	0.9828	0.9348	0.9657	0.9803	0.8874	0.9870	0.9913	0.9529	0.9849	0.9879	0.9079
N=		22,149	22,197	22,020	29,268	29,312	109,997	15,153	15,186	15,042	20,036	20,072	19,664	10,107	10,152	10,140	13,060	13,072	12,936
(Intercept)		1,952	2,082	6,780	1,620	2,140	–	1,730	1,664	5,445	1,347	1,620	5,246	1,752	949	3,957	1,485	1,141	4,598
西暦		-0.8229	-0.9878	-3.3378	-0.6659	-1.0150	–	-0.8524	-0.8225	-2.6911	-0.6614	-0.7997	-2.5900	-0.8699	-0.4698	-1.9654	-0.7366	-0.5661	-2.2810
回帰係数　P値＜0.05																			
浸水深（m）		-5.274	-	-10.487	-8.034	-2.654	-	-5.251	-1.502	-7.466	-6.210	-2.650	-11.302	-3.712	-3.594	-13.413	-2.356	-	-

表 D.6　特定化３（人口）

人口変化　回帰分析結果

	02静岡県						04三重県						07高知県					
	分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27			分析期間：H12～H22			分析期間：H12～H27		
年齢階層	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期	壮年期	中年期	老年期
H12時点	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～	15~49歳	50~64歳	65歳～
H17時点	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～	20~54歳	55~69歳	70歳～
H22時点	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～	25~59歳	60~74歳	75歳～
R2=	0.9810	0.9883	0.9455	0.9775	2.2467	2.0010	0.9698	0.9828	0.9348	0.9657	0.9803	0.8874	0.9870	0.9913	0.9530	0.9850	0.9879	0.9079
N=	22,149	22,197	22,020	29,268	200,018	109,997	15,153	15,186	15,042	20,036	20,072	19,664	10,107	10,152	10,140	13,060	13,072	12,936
(Intercept)	1,952	2,081	6,773	1,583	–	–	1,730	1,665	5,447	1,297	1,611	5,225	1,751	948	3,956	1,485	1,141	4,598
西暦	-0.8229	-0.9878	-3.3378	-0.6460	–	–	-0.8524	-0.8225	-2.6911	-0.6374	-0.7955	-2.5803	-0.8699	-0.4698	-1.9654	-0.7366	-0.5661	-2.2810
回帰係数　P値＜0.05																		
浸水ダミー_2.0m未満	-5.471	-1.994	-14.426	-3.973	-	-	-5.452	-2.026	-9.592	-	-2.028	-9.885	-7.403	-6.364	-17.479	-6.365	-	-
浸水ダミー_2.0m以上	-	-	-	-13.311	-	-	-5.092	-	-5.790	-8.752	-3.097	-12.314	-	-2.642	-12.017	-2.019	-	-

付録 E　各市町の地域特性を把握するための基礎データ

地域特性を把握するため，「産業特性」，「立地条件」，「年齢構成」に着目した基礎データを次頁以降に示す．なお，基礎データの整理は，「南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域」を対象に行った．

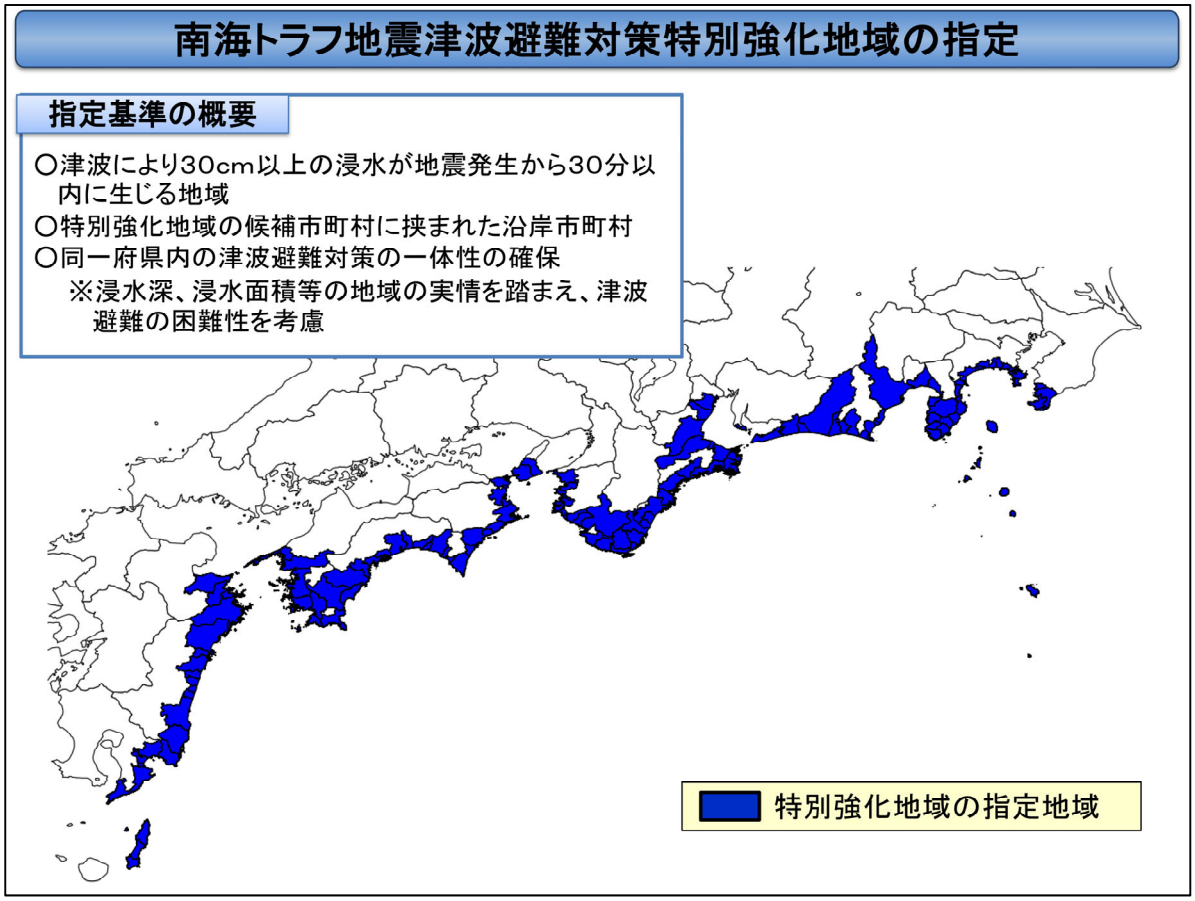


図 E.1 (1)　南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域

南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域指定市町村一覧

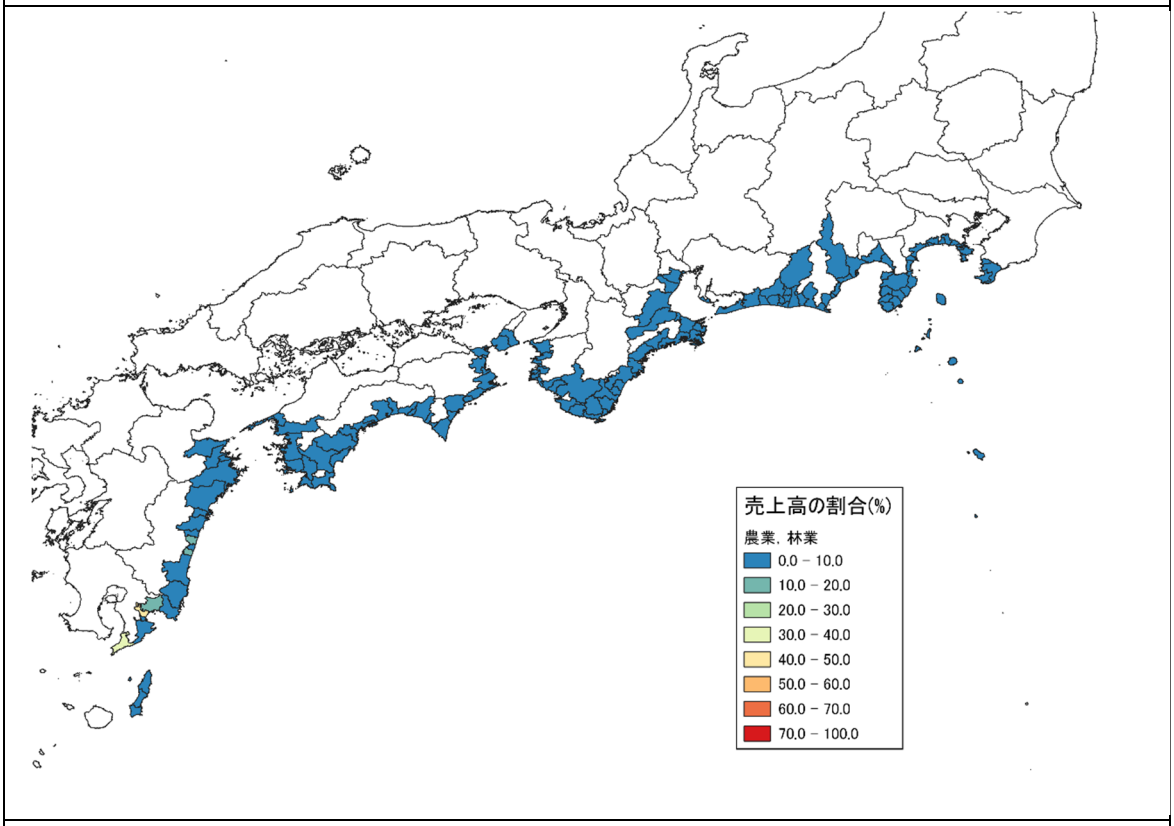
千葉県	館山市、南房総市、安房郡鋸南町
東京都	大島町、利島村、新島村、神津島村、三宅村、御蔵島村、八丈町、青ヶ島村
神奈川県	横須賀市、平塚市、鎌倉市、藤沢市、小田原市、茅ヶ崎市、逗子市、三浦市、三浦郡葉山町、中郡大磯町、同郡二宮町、足柄下郡真鶴町、同郡湯河原町
静岡県	静岡市、浜松市、沼津市、熱海市、伊東市、富士市、磐田市、焼津市、掛川市、袋井市、下田市、湖西市、伊豆市、御前崎市、牧之原市、賀茂郡東伊豆町、同郡河津町、同郡南伊豆町、同郡松崎町、同郡西伊豆町、榛原郡吉田町
愛知県	豊橋市、田原市、知多郡南知多町
三重県	津市、四日市市、伊勢市、松阪市、鈴鹿市、尾鷲市、鳥羽市、熊野市、志摩市、三重郡川越町、多気郡明和町、度会郡大紀町、同郡南伊勢町、北牟婁郡紀北町、南牟婁郡御浜町、同郡紀宝町
兵庫県	洲本市、南あわじ市
和歌山県	和歌山市、海南市、有田市、御坊市、田辺市、新宮市、有田郡湯浅町、同郡広川町、日高郡美浜町、同郡日高町、同郡由良町、同郡印南町、同郡みなべ町、西牟婁郡白浜町、同郡すさみ町、東牟婁郡那智勝浦町、同郡太地町、同郡古座川町、同郡串本町
徳島県	徳島市、鳴門市、小松島市、阿南市、海部郡牟岐町、同郡美波町、同郡海陽町、板野郡松茂町
愛媛県	宇和島市、八幡浜市、西予市、西宇和郡伊方町、南宇和郡愛南町
高知県	高知市、室戸市、安芸市、南国市、土佐市、須崎市、宿毛市、土佐清水市、四万十市、香南市、安芸郡東洋町、同郡奈半利町、同郡田野町、同郡安田町、同郡芸西村、高岡郡中土佐町、同郡四万十町、幡多郡大月町、同郡黒潮町
大分県	大分市、佐伯市、臼杵市、津久見市
宮崎県	宮崎市、延岡市、日南市、日向市、串間市、児湯郡高鍋町、同郡新富町、同郡川南町、同郡都農町、東臼杵郡門川町
鹿児島県	西之表市、志布志市、曽於郡大崎町、肝属郡東串良町、同郡南大隅町、同郡肝付町、熊毛郡中種子町、同郡南種子町

※　平成２６年３月２８日現在

計　１都１３県１３９市町村

図 E.1 (2)　南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域

売上高の割合（A 農業，林業）



売上高の割合（B 漁業）

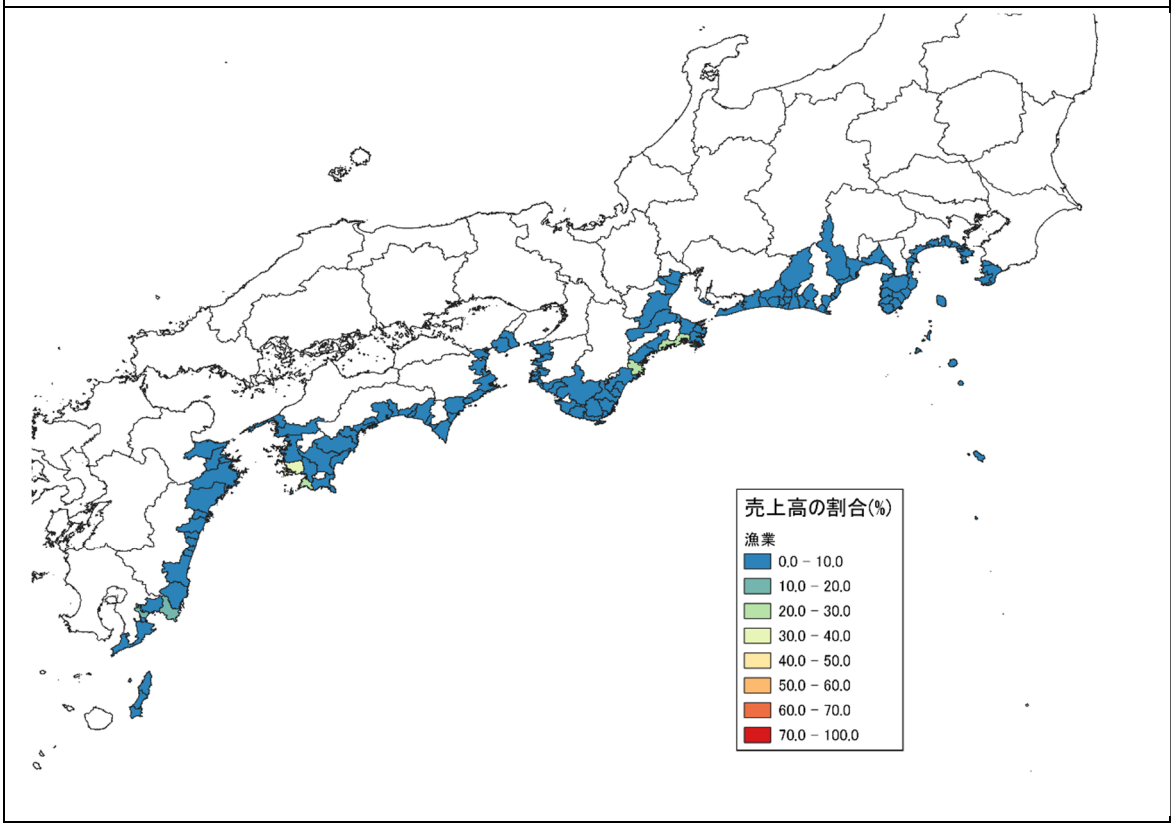
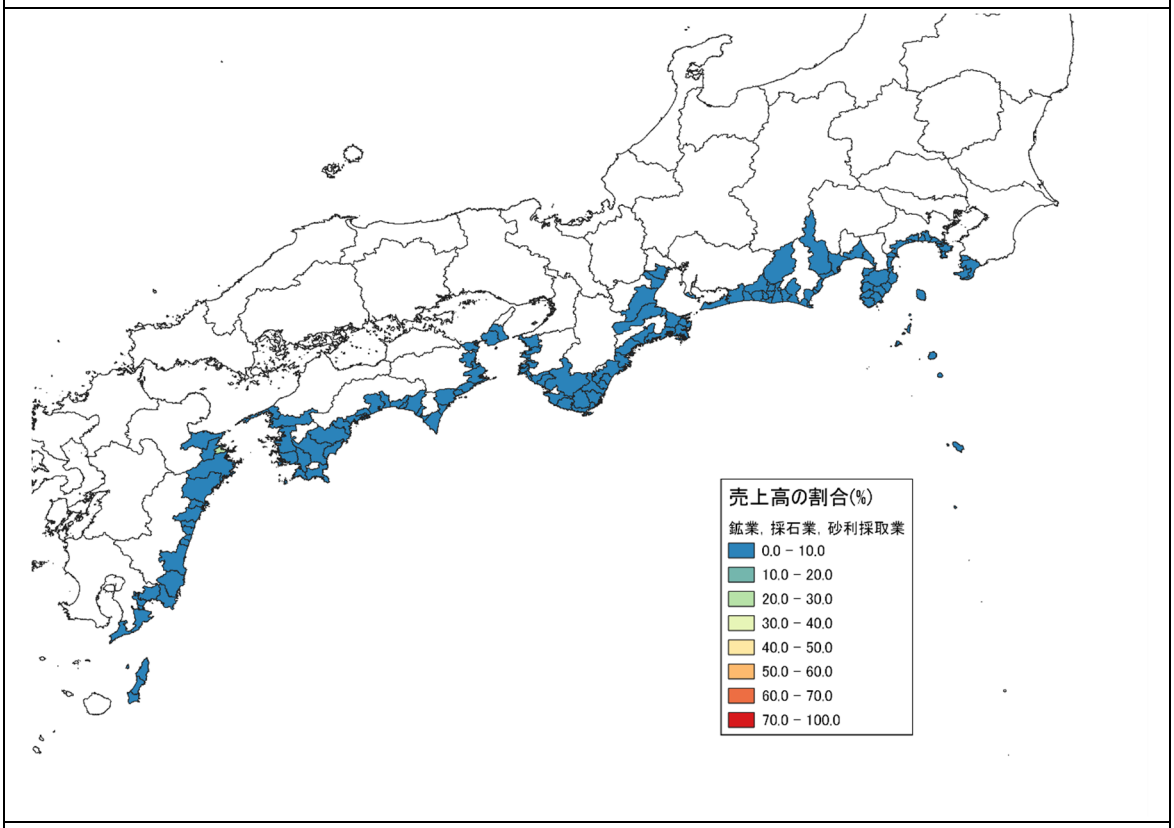


図 E.2 (1)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（C 鉱業，採石業，砂利採取業）



売上高の割合（D 建設業）

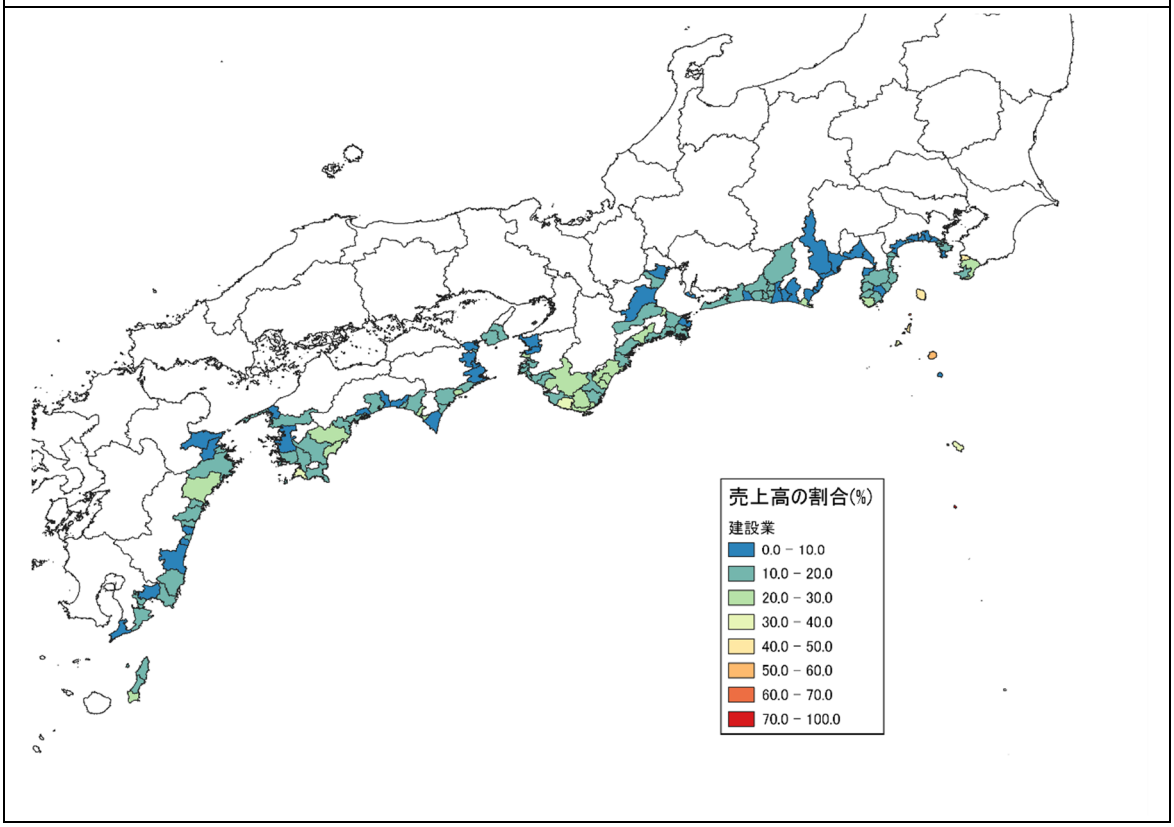
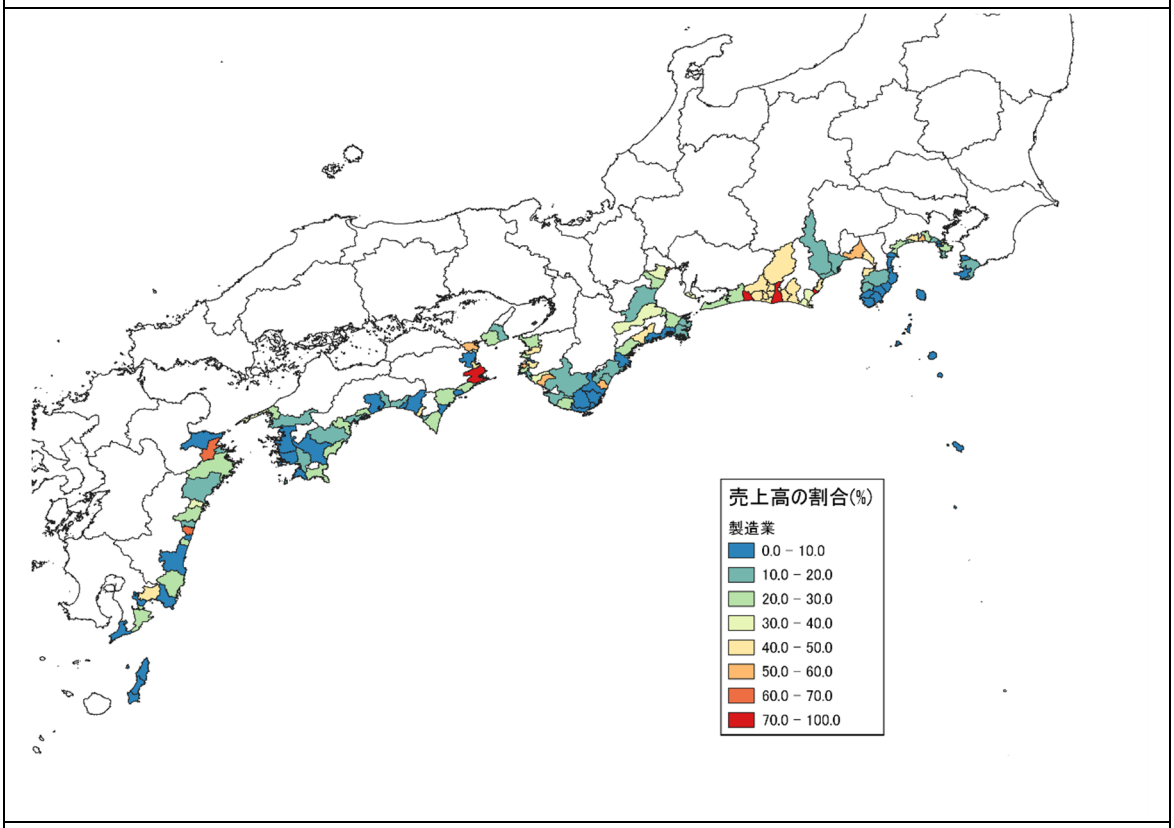


図 E.2 (2)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（E 製造業）



売上高の割合（F 電気・ガス・熱供給・水道業）

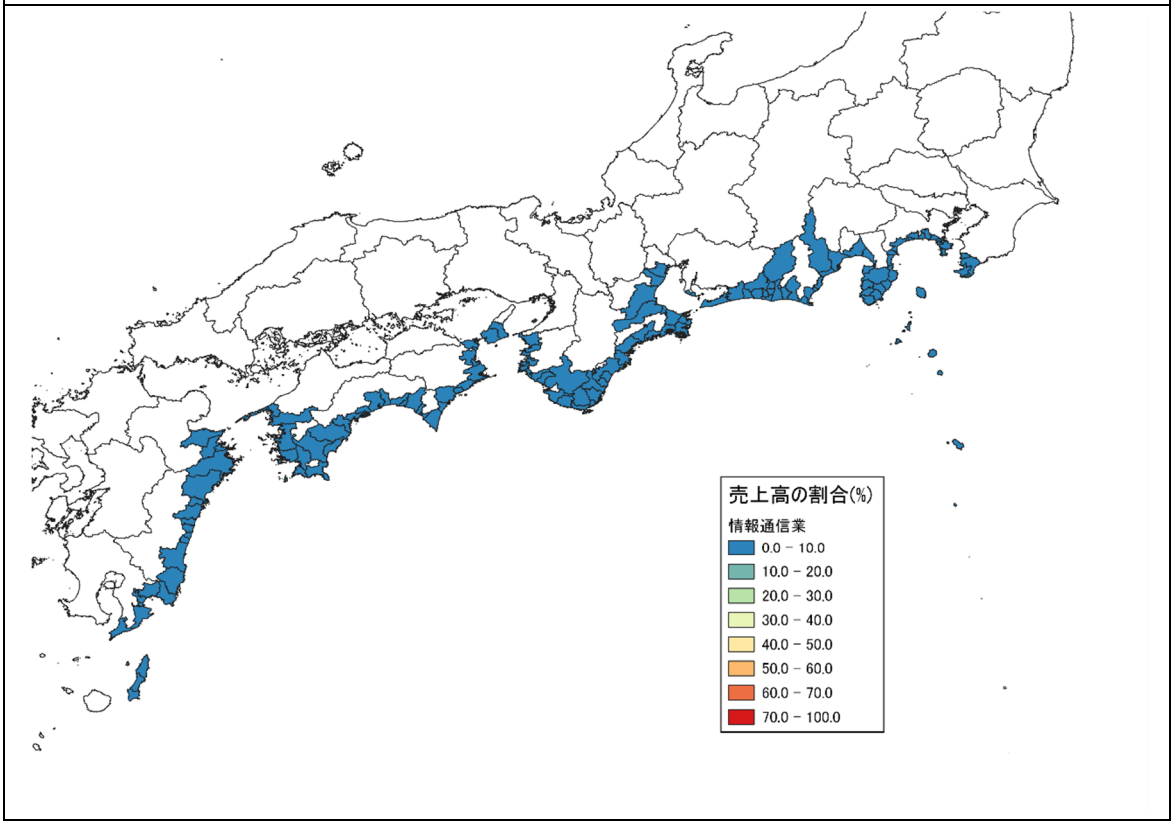
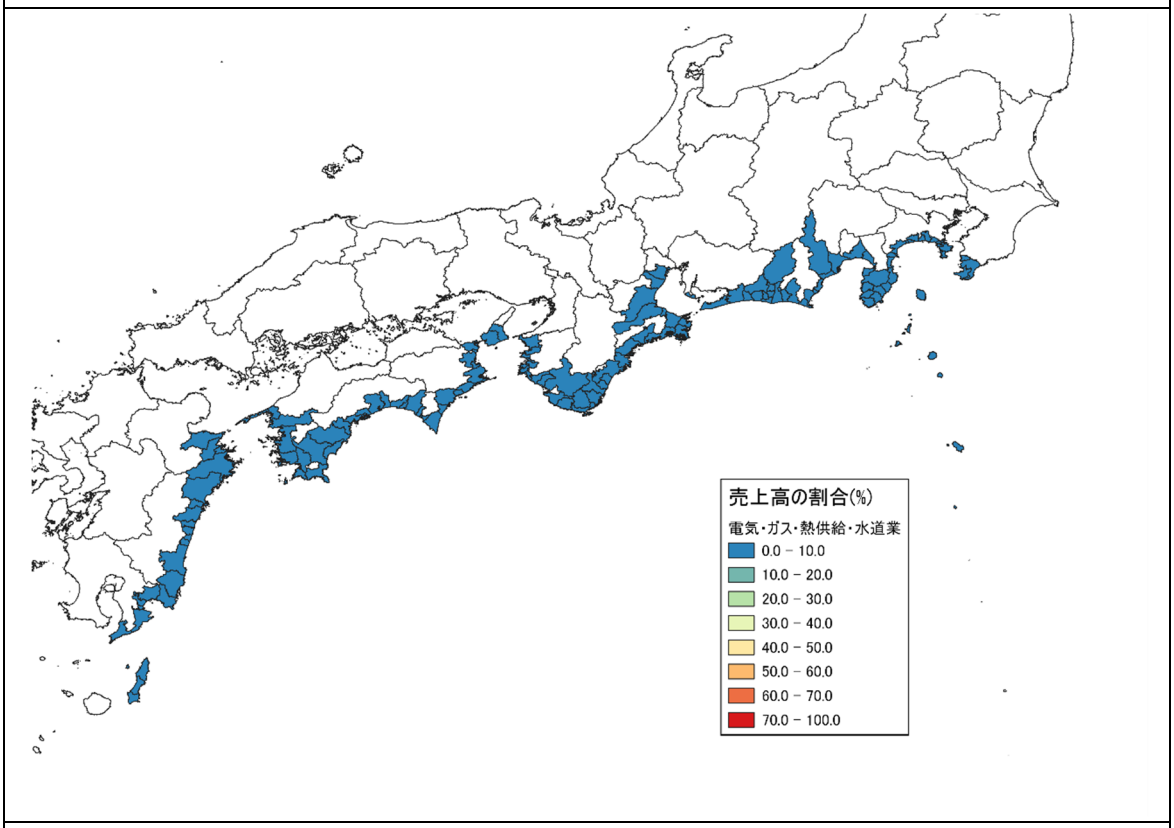


図 E.2 (3)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（G 情報通信業）



売上高の割合（H 運輸業，郵便業）

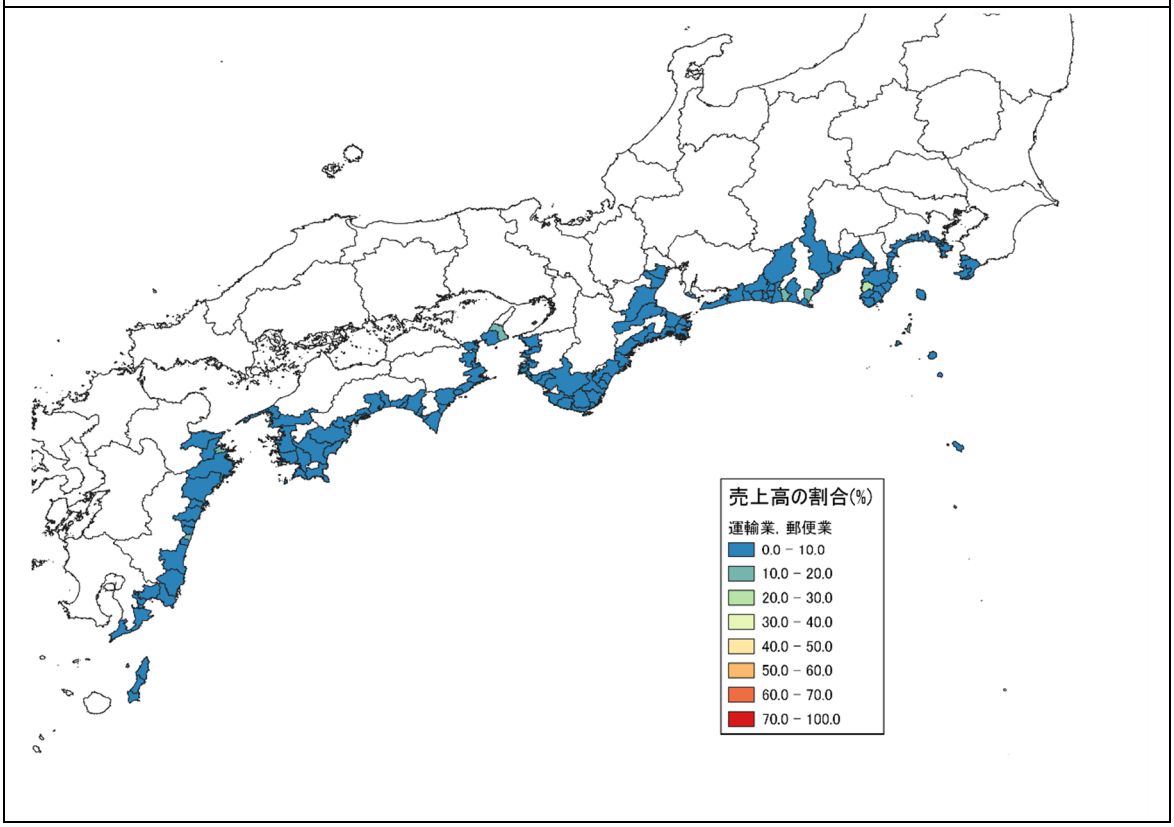
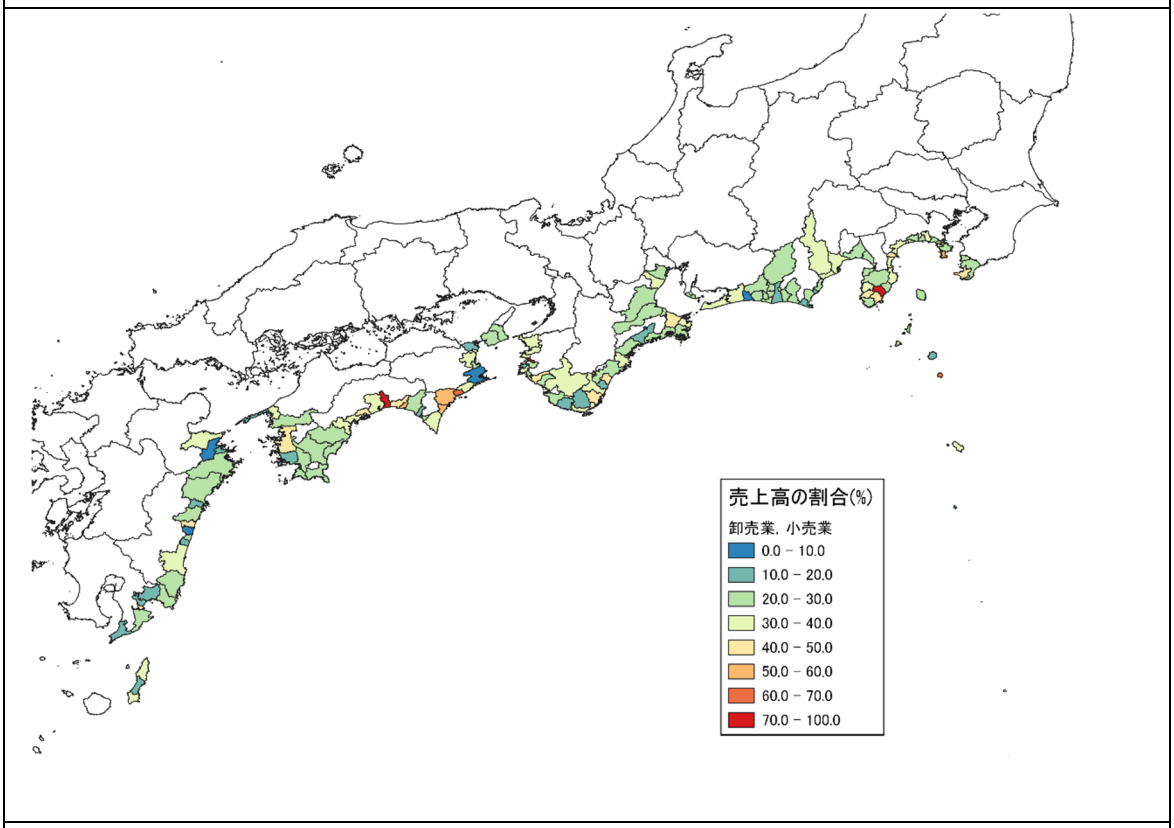


図 E.2 (4)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（I 卸売業，小売業）



売上高の割合（J 金融業，保険業）

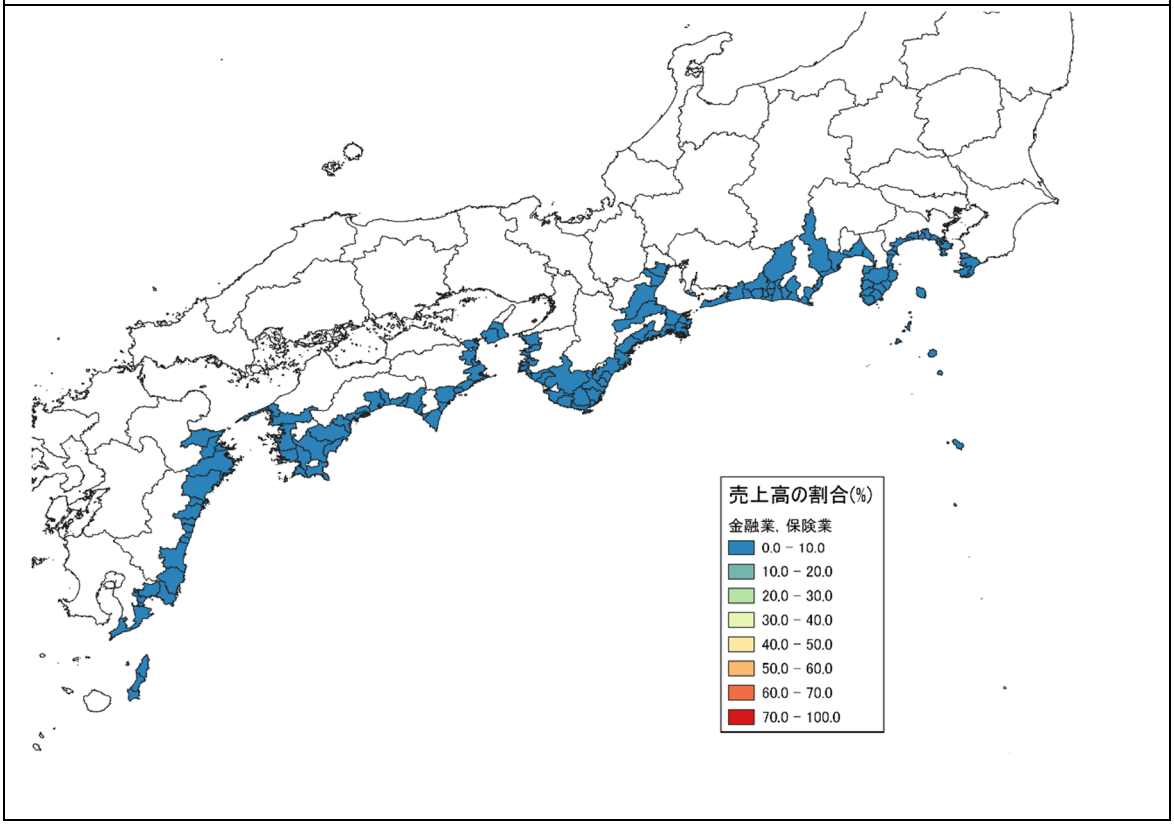
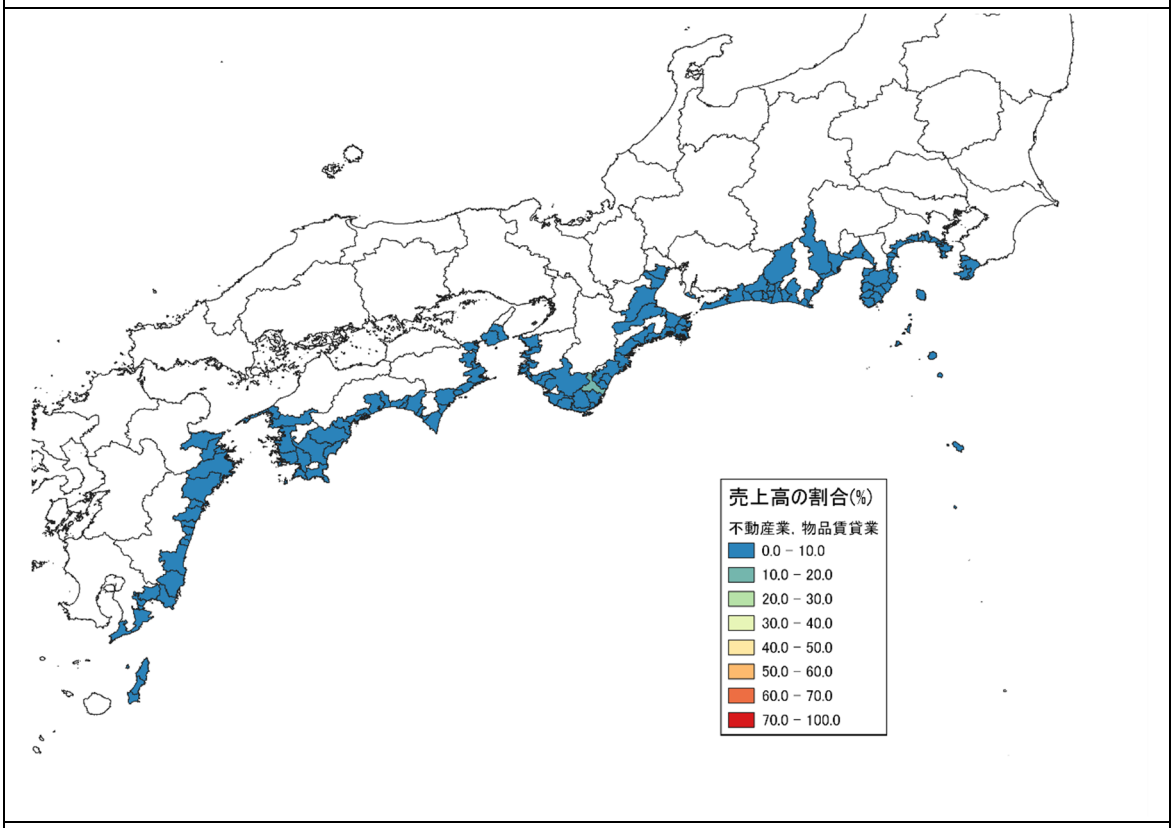


図 E.2 (5)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（K 不動産業，物品賃貸業）



売上高の割合（L 学術研究，専門・技術サービス業）

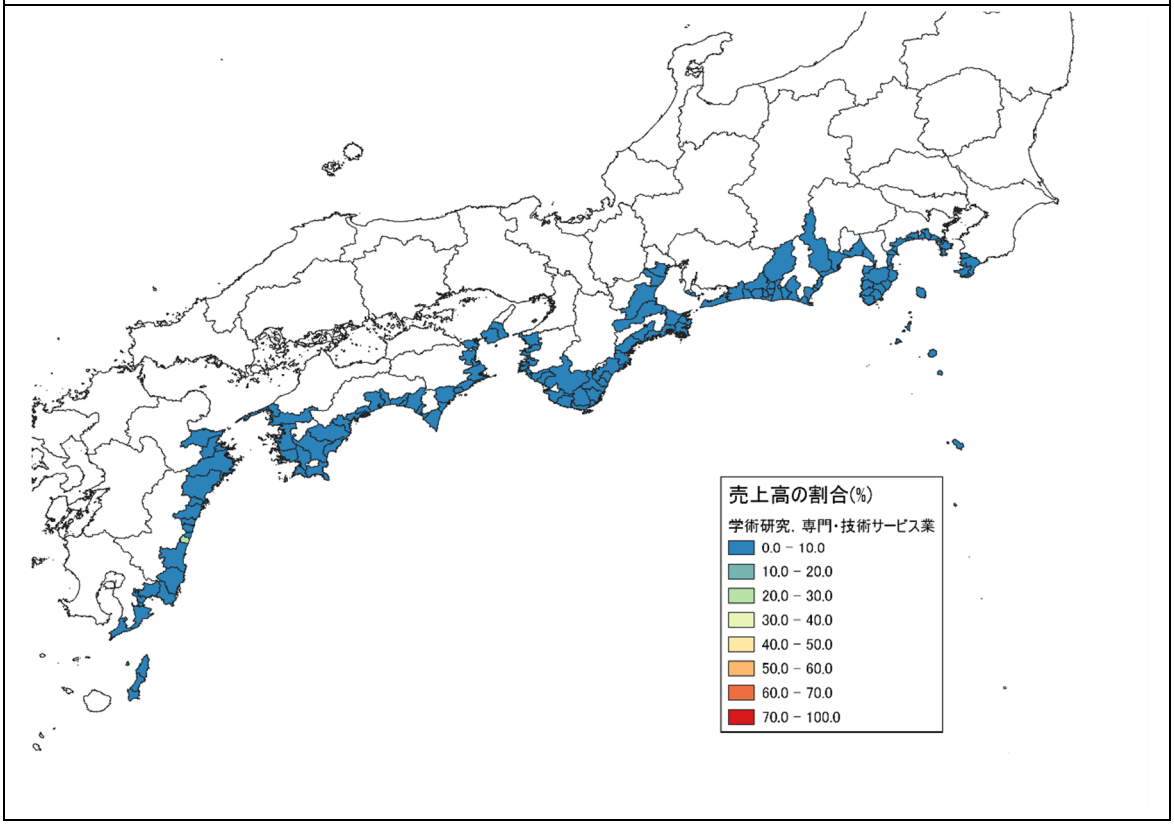
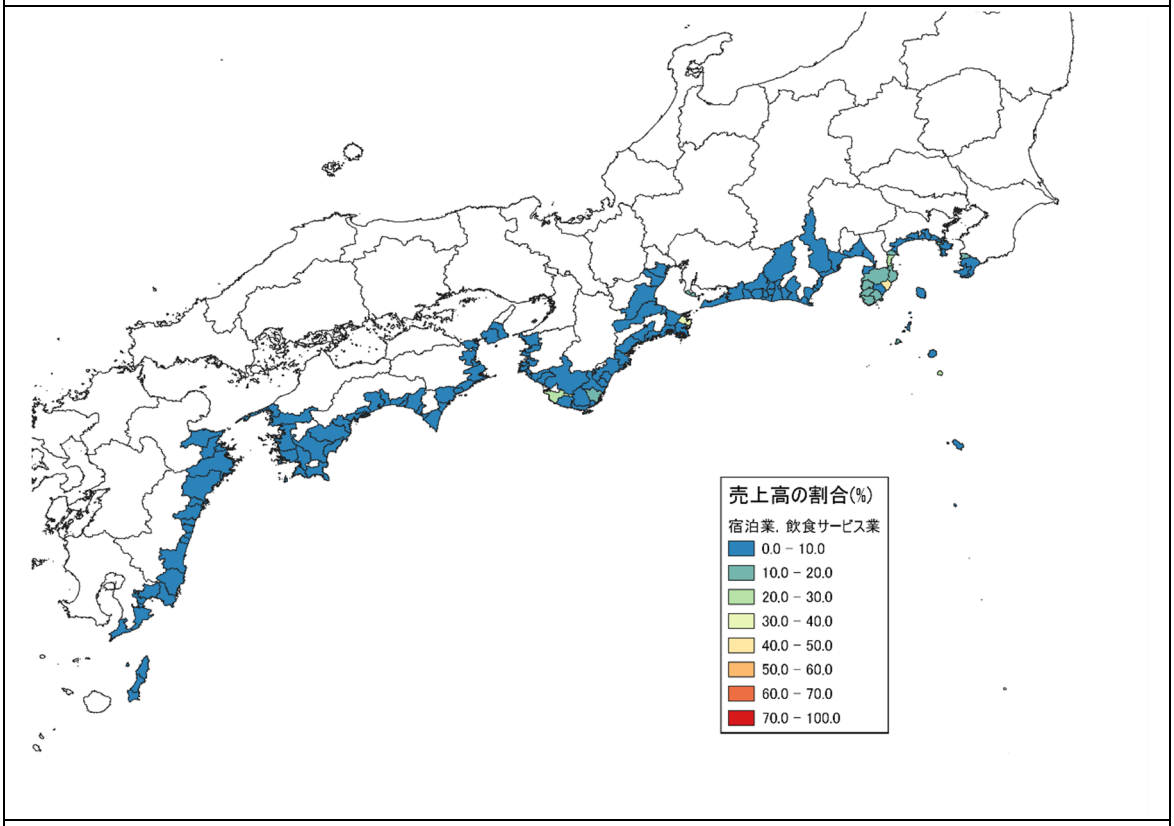


図 E.2 (6)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（M 宿泊業，飲食サービス業）



売上高の割合（N 生活関連サービス業，娯楽業）

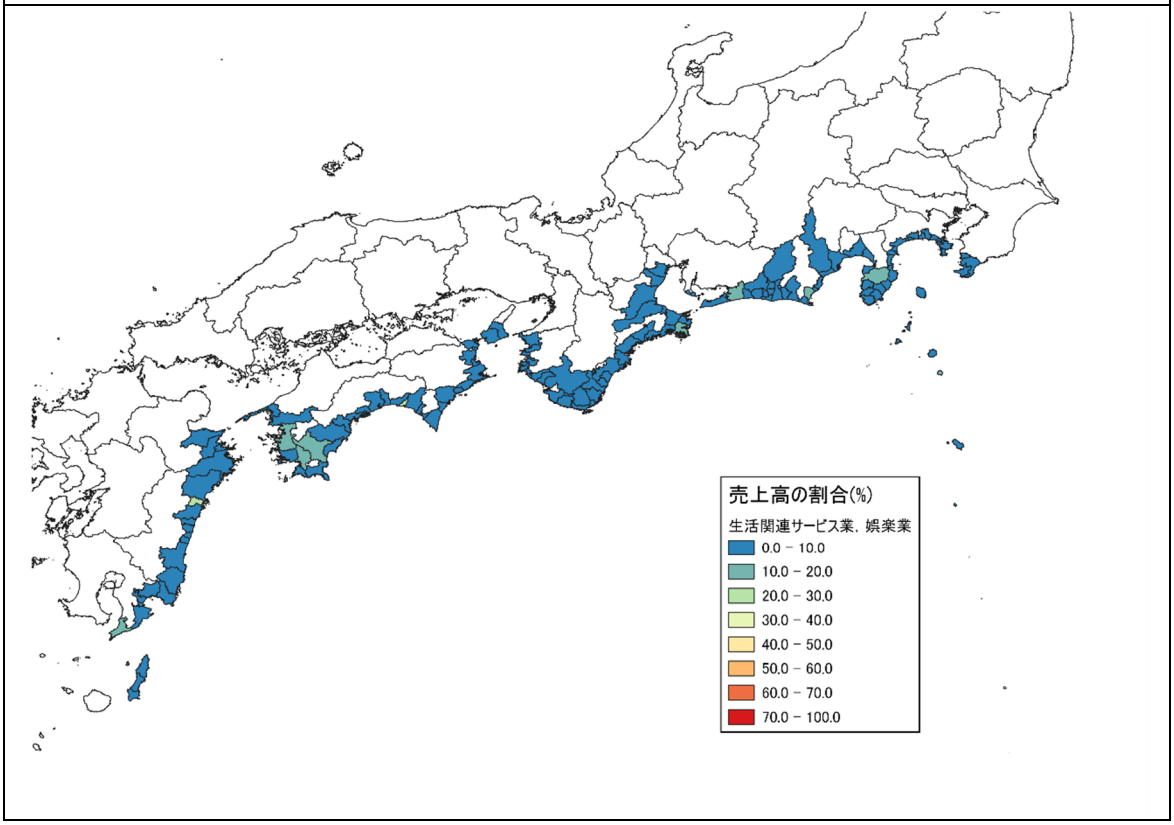
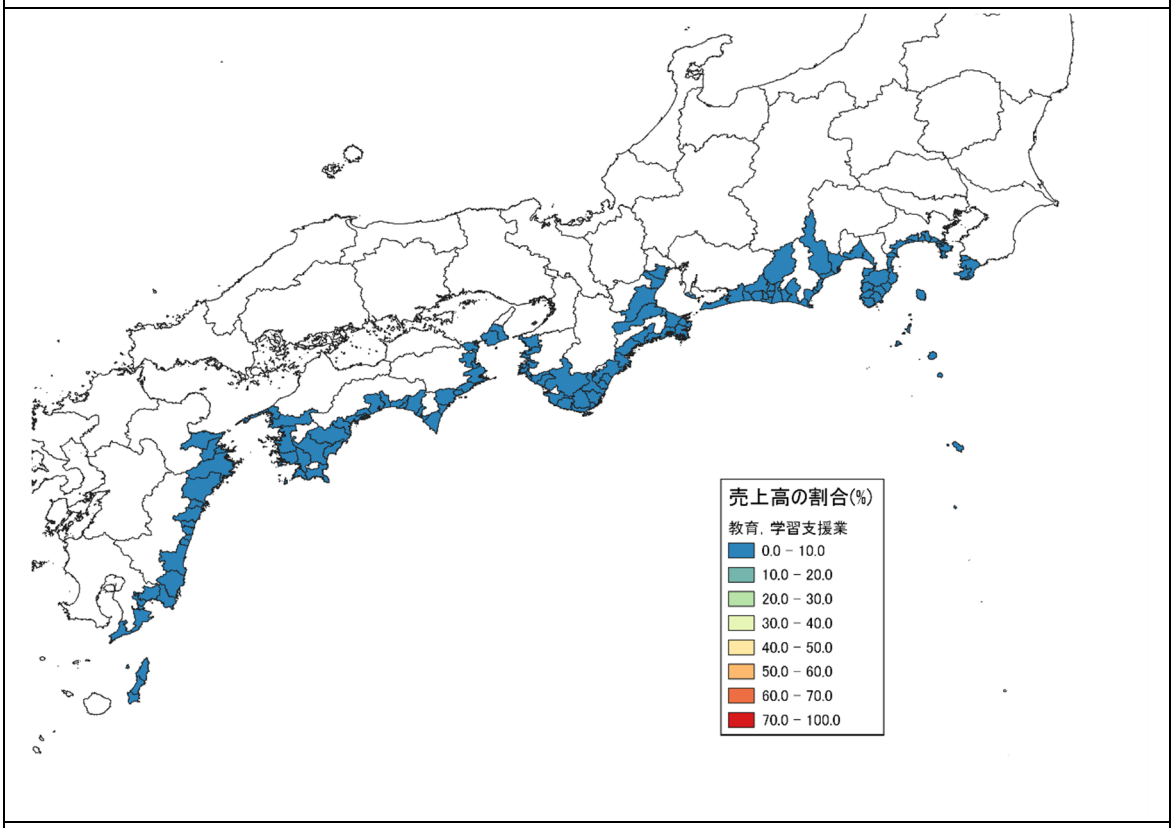


図 E.2 (7)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（O 教育，学習支援業）



売上高の割合（P 医療，福祉）

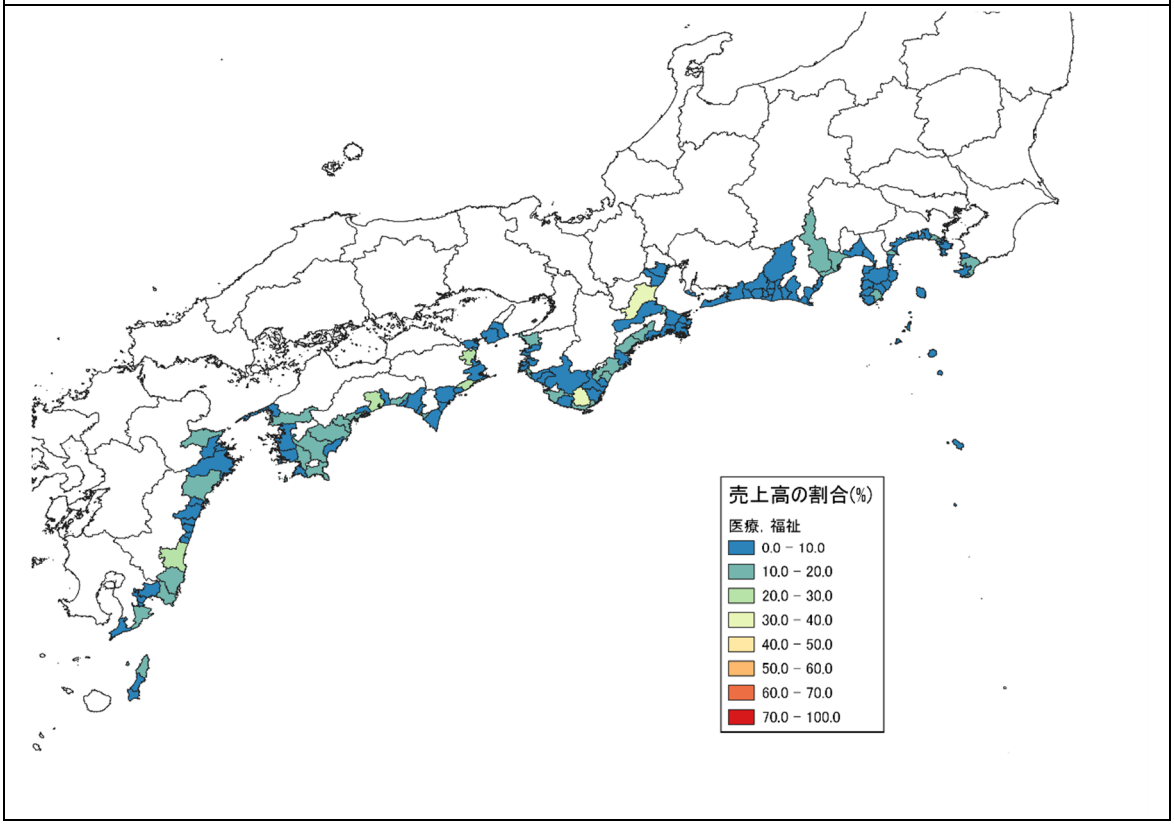
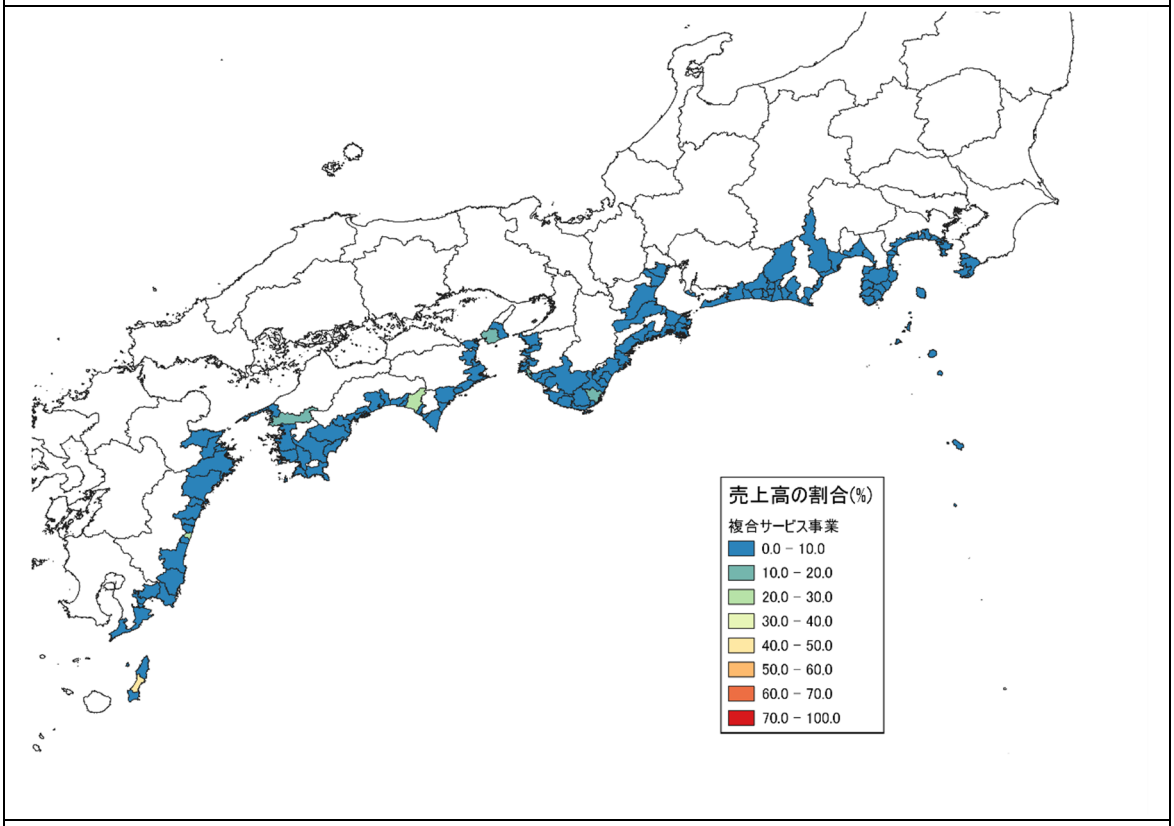


図 E.2 (8)　産業特性（各産業の売上高の割合）

売上高の割合（Q 複合サービス事業）



売上高の割合（R サービス業（他に分類されないもの））

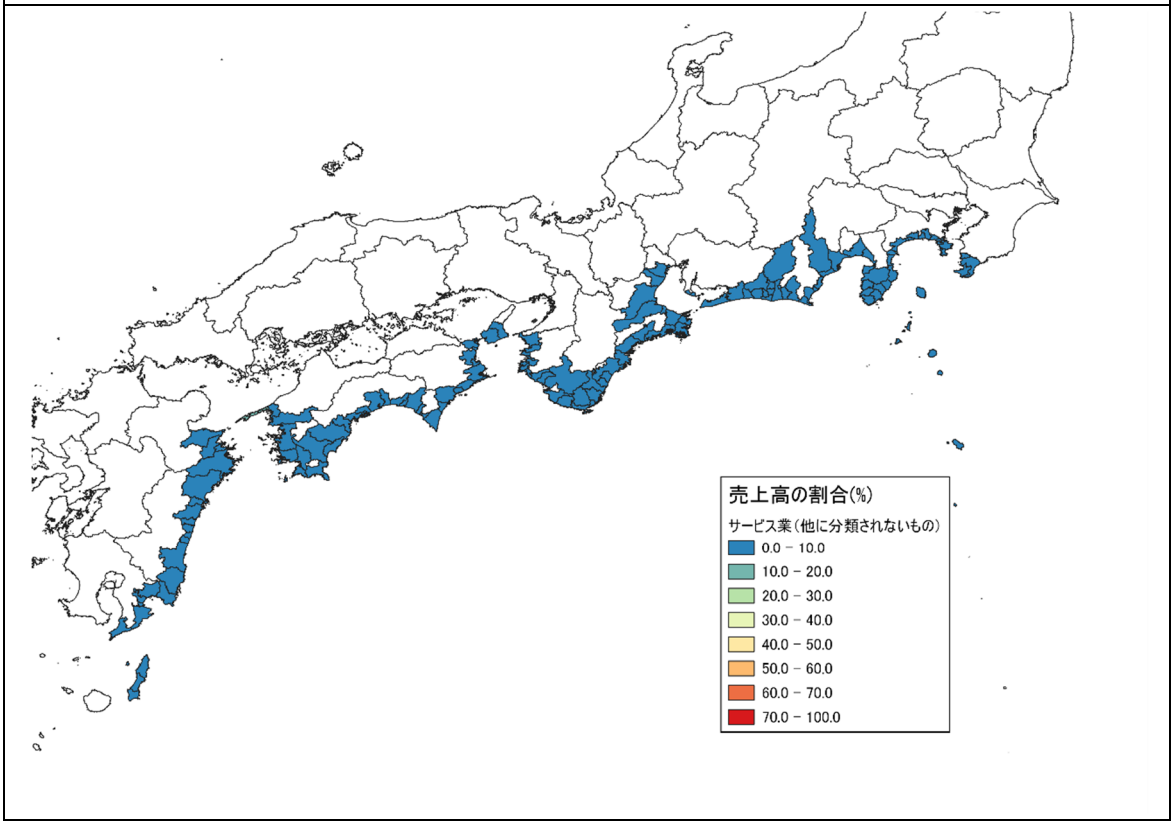
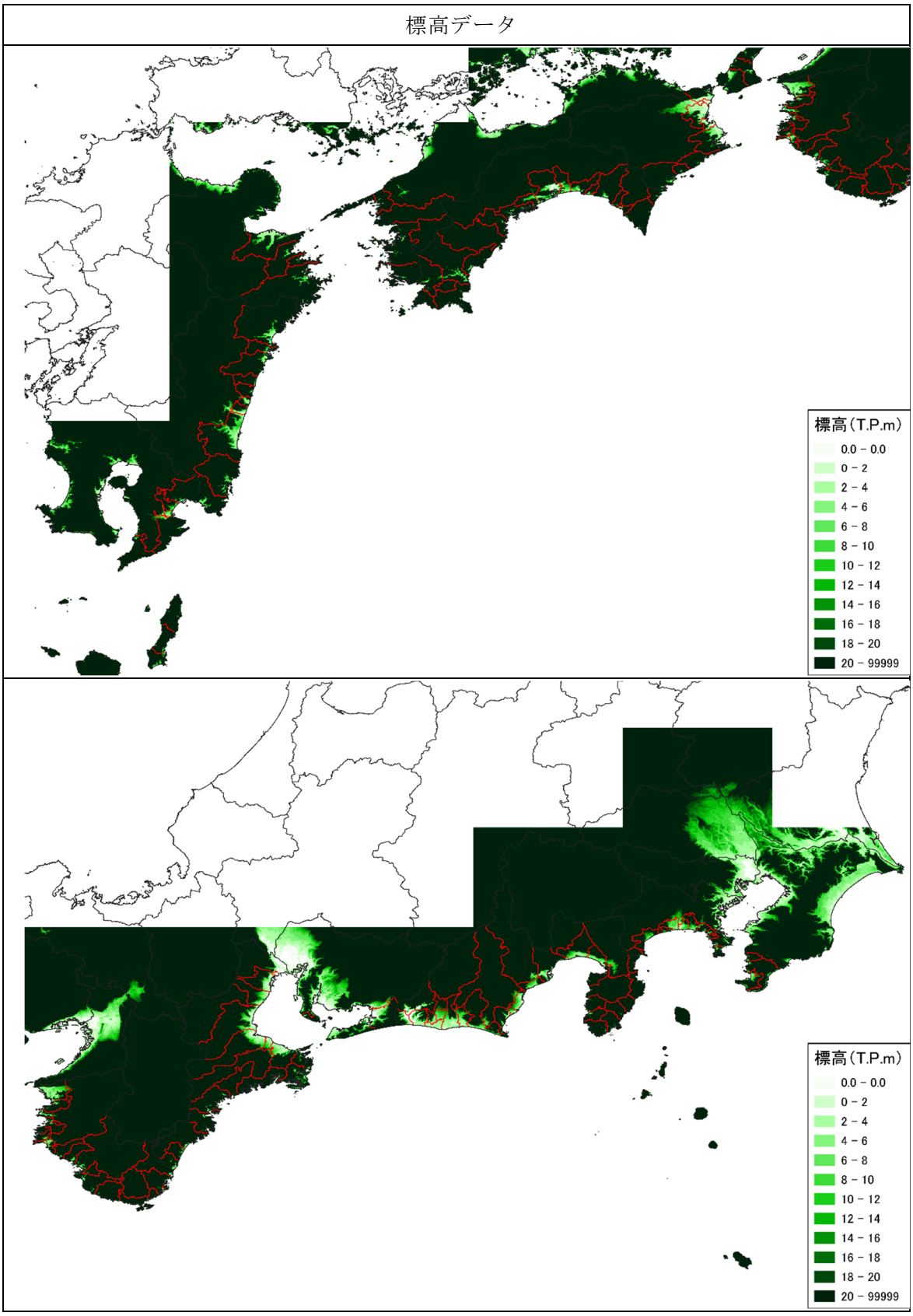


図 E.2 (9)　産業特性（各産業の売上高の割合）



※赤枠は「南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域」に該当する市区町村を示している.

図 E.3　立地条件（標高データ）

65 歳以上の割合

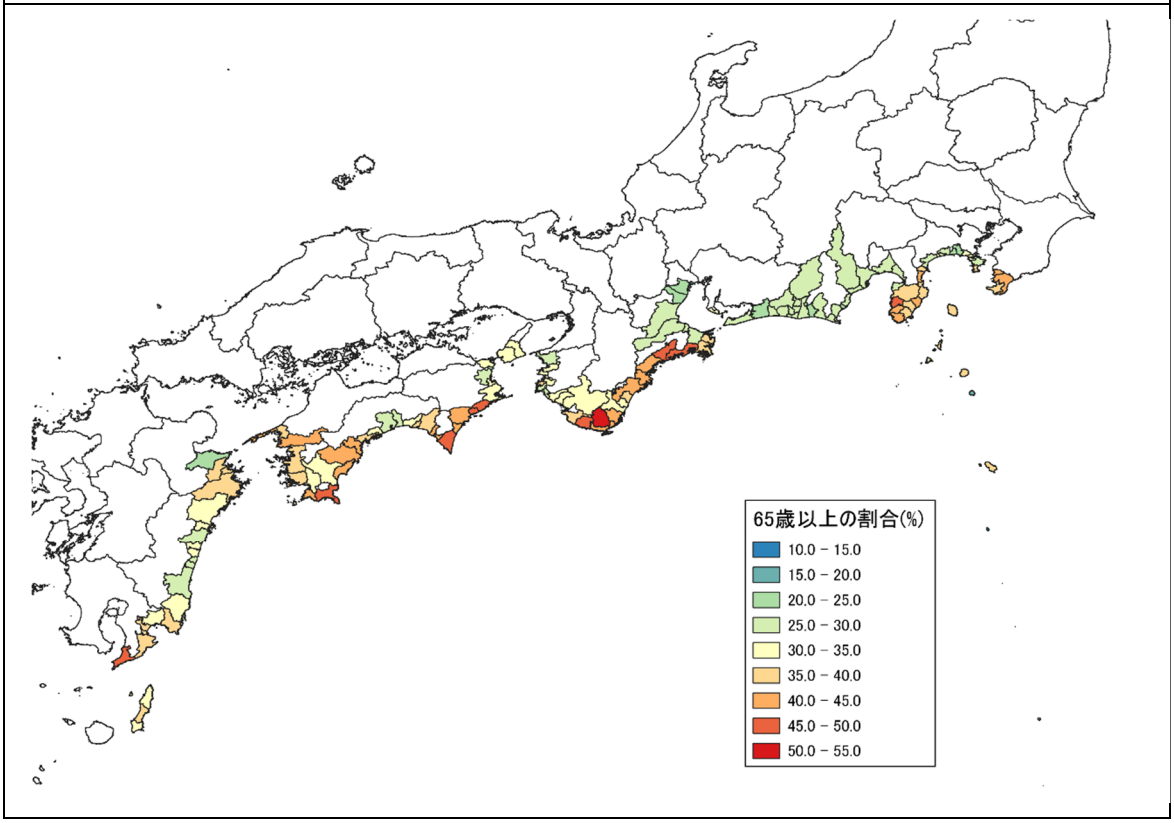


図 E.4　年齢構成（65 歳以上の割合）

付録 F　統計的生命価値に関する補足事項

F.1. 死亡リスク軽減の経済価値を統計的生命価値で算出できるための仮定

死亡リスク軽減の経済価値B を統計的生命価値Sと減少する死者数の期待値Δnの積で求められるためには，下記の仮定①が成立するのに加え，仮定②A または仮定②B が成立すればよい．

仮定①

死亡リスク削減への支払意思額は，死亡確率の減少量に比例する．

$$WTP_i(a\Delta p) = aWTP_i(\Delta p)$$

ここで，Δpは任意の死亡確率の減少量であり，aは任意の定数である．■

仮定②A

どの個人iについて死亡確率の減少量は同じである．つまり，$a_i = a \ for \ i = 1, \cdots, N$ ■

仮定②B

死亡確率の減少量が同じなら支払意思額は人によらず等しい．つまり，$WTP_i(\Delta p_i) = WTP(\Delta p_i)$ ■

（証明）

仮定①より，堤防嵩上げによって軽減される個人iの死亡確率はΔp_i，ある共通の確率単位Δpと個人ごとに決まる数値a_iを使って$\Delta p_i = a_i \Delta p$と表せる．(2)式の左辺は下式となる．

$$B = \sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p_i) = \sum_{i=1}^{N} a_i WTP_i(\Delta p)$$

堤防嵩上げによって減少する死亡者数の期待値は$\Delta n = \sum_{i=1}^{N} \Delta p_i$となることを利用すると，(2)式の右辺は下式となる．

$$S \times \Delta n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i \times \Delta n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{a_i WTP_i(\Delta p)}{a_i \Delta p} \times \Delta p \sum_{i=1}^{N} a_i = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i \times \sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p)$$

これらの式より，$B = S \times \Delta n$となるには下記の二つの仮定のいずれかが成立すればよい．仮定②A が成立するなら下式が成立する．

$$S \times \Delta n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a \times \sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p) = a\sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p) = B$$

また，仮定②B が成立するなら下式が成立する．

$$S \times \Delta n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i \times \sum_{i=1}^{N} WTP_i(\Delta p) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i \times N \times WTP(\Delta p) = \sum_{i=1}^{N} a_i \times WTP(\Delta p) = B$$

（解説）

仮定①については，対象とする死亡確率の減少量が 1 万分の 1（0.01%）以下であれば成立するとみなしても問題ないと考えられている．

$S \times \Delta n$は，ある一定の死亡リスク減少量Δpに対する各個人の支払意思額$WTP_i(\Delta p)$と，政策による各個人の死亡リスク減少量Δp_iを別々に集計して，最後にそれらを掛け合わせるという演算を行っている．しかし一般的には，そられは個人iの中で結びついているため，それらを分離して別々に集計することはできない．そのため，それらを分離できるようにする条件が必要である．

そうした（十分）条件は少なくとも二つ考えられる．その一つが仮定②A である．この仮定のものでは，死亡リスク減少量$\Delta p_i (= a_i \Delta p)$が定数となるため支払意思額$WTP_i(\Delta p)$の個人間の変動と独立になり，それらを分離して集計できるようになる．もう一つが仮定②B である．こちらは$WTP_i(\Delta p)$が定数となり，リスク減少量$a_i \Delta p$の個人間の変動と独立するため，それらを分離して集計できる．

仮定②A は，大気汚染の規制のように，人や場所によって死亡リスク削減量が大きく変化しないような場合には適しているかもしれない．しかし，津波リスクのように人や場所に大きく左右される場合に想定することは難しい．仮定②B が意味するのは，リスクの種類や年齢や性別，所得などの社会経済属性によらず，死亡確率の減少量が同じであれば誰にとっても支払意思額が等しいことである．こちらも厳しい仮定である．本来はこれらの要因の影響も考慮すべきであるが，この点については既往研究で十分に信頼できる結論が得られていない．そのため，統計的生命価値による政策評価では仮定②B が置かれることが一般的である．

F.2. 世界各国で用いられている統計的生命価値

世界各国で政策評価に用いられている統計的生命価値を表 E.1 に示す．ここでは年度調整していない推定額を掲載している．

表 F.1　世界各国で用いられている統計的生命価値

ガイドライン	評価年	統計的生命価値 (億円)			評価手法
		推定値	下限	上限	
米国環境保護庁	2006	8.1	3.0	13.3	顕示選好法
米国保健福祉省	2014	10.2	4.8	15.6	顕示選好法
米国運輸省	2015	10.6	5.9	14.7	顕示選好法
OECD	2005	3.3	1.7	5.0	表明選好法
日本・内閣府（2007）	2006	2.26	－	－	表明選好法

Note: Robinson, et al. (2019) の Table 1 を改変．1 ドル 110 円で換算．

F.3. 日本の統計的生命価値のメタ分析

日本の統計的生命価値を推定した既往研究が少なからず存在する．ここでは，それらのメタ分析の結果を簡単に紹介する．特に，本ガイドラインで採用する内閣府（2007）と同じ手法（仮想市場評価法，WTP 中央値）で得られた統計的生命価値に焦点を当てる．

(1) 文献収集と選出

まず，CINI により関連研究の検索を行った．検索キーワードは「統計的生命」，「生命価値」，「死亡リスク」，「確率的生命」，「Value of statistical life」，「VSL」である．それにより 36 件の研究がマッチした．さらに，これらの研究の引用文献から 17 件の関連研究を発見し，計 53 件の研究を収集・精読した．

このうち，日本国内の統計的生命価値を対象として独自に推定している研究であり，調査対象が一般市民

，調査標本数が 50 以上の研究を選出した．また，複数の研究で同一データを使用している場合は．①行政のガイドライン，②学術研究論文，③学術報告論文集，④報告書やワーキングペーパー，の優先順位で一つの研究を選出した．その結果，仮想市場評価法 15 件，コンジョイント法 3 件，ヘドニック法 4 件の計 22 件の研究が選出された．

ここでは，内閣府（2007）と同様に，仮想市場評価法を用いて WTP 中央値の推定結果から統計的生命価値を算出した研究に焦点を絞る．また，メタ分析により各研究の結果を統合するため，統計的生命価値の推定値の 95%信頼区間が記載されているか，95%信頼区間が算出可能なデータを記載している研究を選出した．最終的に，7 件の研究が選出された．

(2) 統計的生命価値の推定結果の整理

最終的に選出された 7 件の研究には，全標本を複数に分割し，それぞれの部分標本において異なるリスク軽減量に対する WTP を尋ねることで，複数の統計的生命価値を推定しているものがある．このように，同じ研究内でも，異なる部分標本で推定された統計的生命価値はメタ分析に採用する．他方，同一の標本に対して，複数のシナリオ提示や異なる統計モデルの適用によって複数の統計的生命価値を推定している場合もある．この場合，内閣府(2007)の方法と整合性を取るため，最初に回答者に提示したシナリオに対する WTP 回答を用い，定数項と提示額のみを含むモデルで推定された結果を一つだけ採用した．以上により，21 個の統計的生命価値の推定結果が選出された．95%信頼区間の推定は，内閣府（2007）と同様に，モデル推定で得られるパラメータの分散共分行列を使用して 1000 回のモンテカルロシミュレーションで行った．これらの結果を 2018 年基準に年度調整して**図 F.1** にフォレスト・プロットで示す．

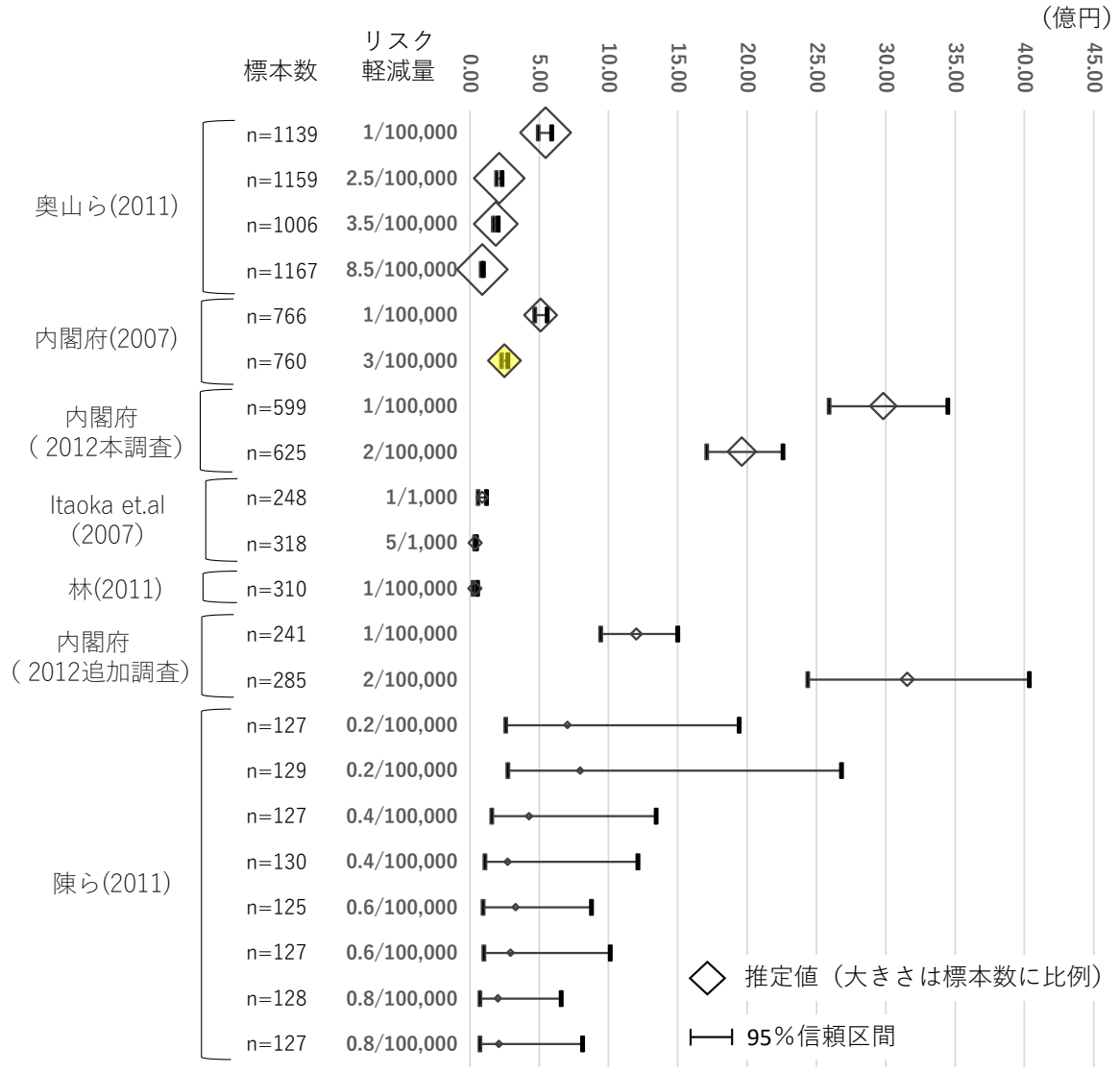


図 F.1　統計的生命価値の推定値と 95%信頼区間

上図の黄色の菱形で示した値が，本ガイドラインで採用した内閣府（2007）の推定値を2018 年基準に年度調整した金額（2.5 億円）である．それ以外の推定値も，内閣府（2012）の本調査と追加調査の結果を除けば，内閣府（2007）の推定値を中心におよそ 0～6 億円の範囲で散らばっている．内閣府(2012)の推定値が大きくなった理由については，その報告書の中でも詳細に検討されているものの，明らかになっていない．これを除外する合理的な理由がないため，メタ分析による統合においても含めることにする．

(3) 統計的生命価値の統合

上記の 27 個の推定値をメタ分析の手法を用いて統合する．まず，統計的生命価値が対数正規分布に従うと仮定して変量効果モデルを用いて統合した．また，統計的生命価値の対数値を目的変数，リスク削減量の対数値とリスク種類ダミー変数を説明変数としたメタ回帰分析を行い，推定された回帰式を用いて統計的生命価値の予測値を求めた．これらの結果を下表に示す．

表 F.2　メタ分析で統合された統計的生命価値の推定値（2018 年基準）

（億円）

	統合された推定値	95%信頼区間	
		下限	上限
変量効果モデル	3.77	2.53	6.04
メタ回帰モデル	1.61	0.91※	2.90※
参考：内閣府（2007）	2.48	2.28	2.74

※メタ回帰分析における 95%信頼区間の下限と上限は推定モデルの分散共分散行列から 1 万回のモンテカルロシミュレーションで算出

表 F.2 より，変量効果モデルとメタ回帰モデルで統合した結果は，本ガイドラインで採用した内閣府（2007）の推定値と近いことが分かる．また，メタ分析の結果から，統計的生命価値は 1 億円～6 億円の幅にあることが推察される．そのため，津波対策のよる死亡リスク軽減の経済価値の算出において，統計的生命価値を 1 億円と 6 億円としたケースの試算も有益であると考えられる．

引用資料

ltaoka, K. Saito, A. Krupnick, A. Adamowicz, W. and Taniguchi, T. (2006) The effect of risk characteristics on the willingness to pay for mortality risk reductions from electric power generation, Environmental and Resource Economics, 33(3), 371-98.

Robinson, L. A., Hammitt, J. K. and O'Kee, L.(2019) Valuing mortality risk reductions in global benefit-cost analysis. ***Journal of Benefit-Cost Analysis***, 10(S1):15–50

OECD. 2012. Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. Paris: OECD Publishing.

U.S. Department of Health and Human Services. 2016. Guidelines for Regulatory Impact Analysis.

U.S. Department of Transportation. 2016. “Guidance on Treatment of the Economic Value of a Statistical Life (VSL) in U.S. Department of Transportation Analyses – 2016 Adjustment.” Memorandum to Secretarial Officers and Modal Administrators from M. J. Moran, Acting General Counsel, and Carlos Monje Assistant Secretary for Transportation Policy.

U.S. Environmental Protection Agency. 2010a. (with 2014 update). Guidelines for Preparing Economic Analyses.

奥山忠裕, 野原克仁, 林山泰久, 稲垣雅一 (2011) 「道路整備による死亡リスク削減便益の計測--交通事故および心停止に対する統計的生命の価値」, 高速道路と自動車, 54(11), 20-28.

国土交通省（2009）「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」

キャス・サンスーティーン（山形浩生 訳）「命の価値－規制国家に人間味を」2017 年, 勁草書房

陳玲, 佐尾博志, 大野栄治, 森杉雅史 (2011) 「死亡リスク削減のための支払意思額に基づく統計的生命価値の計測」, 都市情報学研究 (16), 33-38.

内閣府(2007)「交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究」

内閣府 (2012)「交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査」

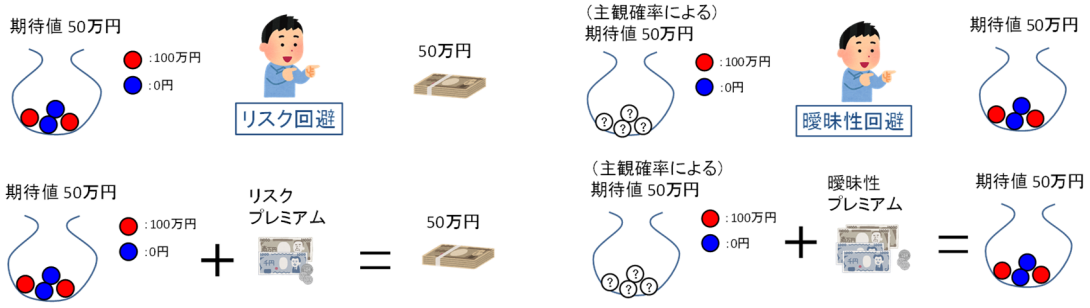
林承煥 (2011)「統計的生命価値の理論と実際」, 公益事業研究 63(2), 53-60.

付録 G　リスク・曖昧性プレミアムに関する補足事項

G.1. リスク・曖昧性プレミアムの簡単な例

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 G.1**(a)）．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，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．

曖昧性回避と曖昧性プレミアムについても同様に簡単なクジの例を用いて説明する（**図 G.1**(b)）．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．



(a) リスクプレミアム　　(b) 曖昧性プレミアム

図 G.1　リスクプレミアムと曖昧性プレミアム

G.2. リスクプレミアムと効用関数の形状

本付録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（$u' > 0$），上に凸の形状（$u'' < 0$）になる．この上に凸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じる．

この点を確認するため，簡単な例を考えよう（**図 G.2**）．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 F.2 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 F.2 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，下式で求められる．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．

$$u(1000 - OP) = 0.5\,u(0) + 0.5\,u(1000)$$

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，上式は下式のように書き直せる．

$$u(1000 - 500 - x) = 0.5\,u(0) + 0.5\,u(1000)$$

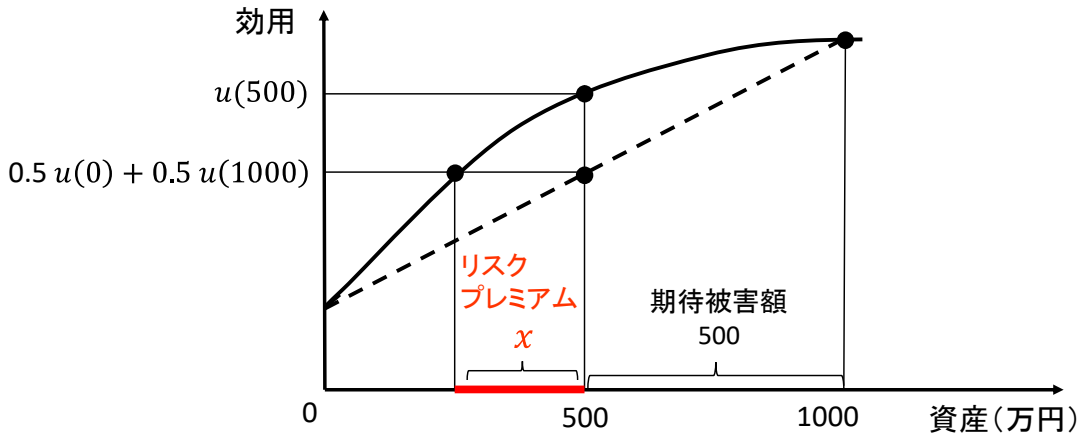


図 G.2　津波対策のリスクプレミアム

図 G.2 からわかるように，効用関数が上に凸である限り，リスクプレミアムは正である．効用関数が直線（**図 G.2** 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．

G.3. 相対リスク回避度とリスクプレミアムの推定事例

数多くの研究で相対リスク回避度が推定されてきた．その結果を**表 G.1** に示す．また，実験室において客観クジを使用してリスクプレミアムを推定した結果を**表 G.2** に示す．

表 G.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

著者	相対リスク 回避度の推定値	使用データ
Fiend & Blume (1975)	2 以上	危険資産・安全資産の比率データ
Weber (1975)	1.3 ～ 1.8	消費のマクロデータ
Hansen & Singlton (1982)	0.68 ～ 0.97	消費と株利益のマクロデータ
Hansen & Singlton (1983)	0.6 ～ 2.7	消費と株利益のマクロデータ
Mankiw (1985)	2.4 ～ 5.3 1.8 ～ 3.2	耐久財の消費のマクロデータ 非耐久財の消費のマクロデータ
Szpiro (1986)	1.2 ～ 1.8	財物損壊責任保険の購入データ
Barsky et al. (1997)	0.7 ～ 15.8	仮想的な資産選択のアンケートデータ
Halek & Eisenhauer (2001)	平均値 3.8 中央値 0.89	生命保険の購入データ
Chiappori & Paiella (2011)	平均値 4.2 中央値 1.7	リスク・安全資産の選択パネルデータ
下野（2000）	1.5 前後	消費需要関数
須藤（2000）	1.7 ～ 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 ～ 7.3	消費・金利スワップデータ
森平・神谷（2007）	0.2 ～ 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～ 38.4 平均値 10.3	危険資産・安全資産の比率データ 1965 年～2012 年の各年で推定
吉川（2015）	0.5～25.1 平均値 2.3	危険資産・安全資産の比率データ 1970 年～2013 年の各年で推定

※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．

表 G.2　実験室におけるリスクプレミアムと曖昧性プレミアムの推定結果

著者	被験者数	金銭的 動機付け	リスクプレミアム ÷期待値	曖昧性プレミアム ÷期待値
Abdellaoui et al. (2011a)	66	あり	-13.2%	2.8%
	66	あり	3.5%	5.6%
Abdellaoui et al. (2011b)	64	あり	1.9%	17.3%
Akay et al. (2012)	93	あり	50.3%	6.4%
Borgahans et al. (2007)	347	あり	6.8%	12.3%
Chew et al. (2013)	56	あり	32.5%	15.5%
Chow & Sarin (1987)	42	あり	-6.9%	30.1%
Choen et al. (1987)	134	あり	2.4%	22.8%
Cubitt et al. (2014)	88	あり	11.9%	7.1%
Eisenberger & Weber (1985)	54	あり	56.8%	8.1%
	67	あり	38.9%	5.5%
Fox & Tversky (1995)	67	なし	51.3%	19.0%
	52	あり	2.6%	12.1%
	53	あり	-12.3%	9.8%
Fullbrunn et al. (2013)	20	あり	9.5%	6.5%
	12	あり	3.4%	4.7%
Halvey (2007)	104	あり	-6.0%	18.0%
	38	あり	16.3%	17.1%
Keck et al. (2011)	90	あり	8.2%	16.1%
Kellen et al. (2007)	90	なし	52.5%	25.1%
Maffioletti & Santoni (2005)	25	あり	3.8%	23.3%
Sutter et al. (2013)	487	あり	12.6%	13.4%
Trautmann & Schmidt (2012)	90	なし	38.0%	32.0%
	88	なし	4.0%	20.0%
Trautmann et al. (2012)	59	なし	52.6%	17.6%
	74	あり	46.2%	21.9%
	63	なし	28.8%	26.9%

	79 89	あり なし	38.2% 2.1%	6.8% 9.6%
Qiu & Weitzel (2011)	208 208 208	あり あり あり	14.4% 2.0% 24.7%	18.6% 14.0% 10.2%
Vieider (2013)	47 47	あり あり	15.7% 1.1%	1.5% 0.4%

Trautmann & van de Kuilen (2015)の Table 3.4 を一部切り出して改変

G.4. 曖昧性プレミアムの推定事例

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．既往研究において実験室での曖昧性プレミアムの推定結果を**表 G.2** に，現実問題を対象とした曖昧性プレミアムの推定結果を**表 G.3** に示す．後者の結果は，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．

表 G.3　現実問題に対する曖昧性プレミアムの試算結果

著者	被験者	対象リスク	意思決定モデル	曖昧性 プレミアム ÷全価値
Kunreuther, et al. (1993)	保険 引受人	対象なし（客観クジ） 地震 地下タンクの漏出	なし （曖昧性下とリスク下の直接比較）	34.9% 15.7% 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 & Tatano (2013)	一般市民	地震による家屋倒壊	平均-分散モデル	17.0%
Watanabe & Fujimi (2015)	一般市民	野生動物による傷害	αマキシミン期待効用モデル	12.7%

G.5. 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できる下記の 3 つの条件について詳細に検討する．

①リスク中立性

G.2 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．

③Arrow-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$x(n)$は下式で表される．

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

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．（証明は本節末に記載）

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．津波リスクに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が独立であることが不可欠であるためである．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．

※〔Arrow-Lind の定理の証明〕

まず，$\lim_{n\to\infty} x(n)=0$は下式により示される．

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

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$W(s)$は下式で表される．

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

ここで，$W(s)$を 1 回微分して 0 を代入すると下式が得られる．

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

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，下式が成立する．

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

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

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

前々式を前式で割ると，下式が得られる．

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

よって，

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

■

引用文献

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., 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, *Econometrica*, 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.

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.

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.

Trautmann, S. T., van de Kuilen, G. (2015) “Ambiguity Attitudes.” In Gideon 9 Keren & George Wu (eds.), The Wiley Blackwell Handbook of Judgment and 10 Decision Making (Ch. 3), 89–116, Blackwell, Oxford, UK.

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.