

Title	開発途上地域の洪水早期警報に対する多状態モデルを用いたレジリエンス重要度分析手法
Sub Title	Methodology of resilience importance analysis for flood early warning in developing regions with a multi-state modeling approach
Author	富田, 悠貴(Tomita, Yuki) 神武, 直彦(Kohtake, Naohiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2022
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2022年度システムエンジニアリング学 第353号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002022-0041

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2022 年度

開発途上地域の洪水早期警報に対する
多状態モデルを用いた
レジリエンス重要度分析手法

富田 悠貴

(学籍番号 : 82133468)

指導教員 神武直彦

2023 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

Methodology of
Resilience Importance Analysis
for Flood Early Warning in Developing Regions
with a Multi-state Modeling Approach

Yuki TOMITA
(Student ID Number : 82133468)

Supervisor Naohiko Kohtake

March 2023

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論 文 要 旨

学籍番号	82133468	氏 名	富田 悠貴
論 文 題 目： 開発途上地域の洪水早期警報に対する 多状態モデルを用いたレジリエンス重要度分析手法			
要 旨： 本研究の目的は、地球温暖化による局所降雨の増加により洪水リスクが増す現代において、ICT 技術が不足している開発途上地域における洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための施策決定を支援することである。これらの地域では未だなお、政府からの災害情報が届きにくく、先進国とは異なる洪水早期警報手段が求められる。近年、コミュニティベース洪水早期警報（以下、CBFEWS）と呼ばれる、情報脆弱地域でも運用性を確保し、人間中心による、低コスト技術によるタイムリーな早期警報の導入が進められているが、その持続的なパフォーマンス維持のためのレジリエンス向上に向けた施策には予算的・技術的制約から課題が残る。 そこで、CBFEWS に対するシステムズアプローチにより効果的なレジリエンス向上を図るための重要因子を見出すための分析モデルを提案する。モデルでは開発途上地域におけるコンテキストを鑑み、CBFEWS と政府からの早期警報の相互依存的な動作を考慮した上でのパフォーマンス評価を行う必要性に対して、多状態モデリング手法である多状態多値決定グラフを中心としたリスク評価モデルを構築した。さらに、本モデルおよび対象地域の動的な洪水発生タイムラインを用いて、レジリエンス喪失重要度(ResRW)、レジリエンス獲得重要度(ResAW)といった指標を定義することで、CBFEWS のレジリエンスの向上や阻害に関与の高い因子の定量的な探索を可能とする重要度分析手法を設計した。モデルの構築にあたっては、文献調査に加えて早期警報に従事する3人のキーインフォーマントに対するインタビューのもと、先行研究における早期警報の性能評価指標を CBFEWS 評価用に修正した。また、ソシオテクニカルシステムとしての性質が強いCBFEWS に対し、社会的側面としての社会的準備態度、技術的側面としてのシステムアベイラビリティに加えて、警報リードタイム、警報通知空間カバレッジなどのパフォーマンスを同時に考慮することでシステム全体を同時に見渡した評価手法を可能とした。 提案するモデルの評価として、モンスーン時期の豪雨による季節河川由来の洪水に苦しむヒンドゥクシュヒマラヤ地方において、持続的な運用を成功させている CBFEWS を対象としてレジリエンス重要度分析を行った。既存 CBFEWS に対して SysML を用いたアーキテクチャ記述を行い、また先行研究や関係者へのヒアリングから得たパフォーマンス情報を入力として本モデルを適用することで、対象とした CBFEWS では適切な社会的準備態度の維持施策がレジリエンス低下の防止策に重要度が高く、また政府による早期警報の強化が更なるレジリエンスの向上に不可欠であることを導き出した。また、本モデルを用いてCBFEWS に対して新規技術提案を行うケーススタディを通じ、新規技術提案の場面においてどのようなコミュニケーションが実施可能かのデモンストレーションを実施した。これらにより、多状態モデルを用いたレジリエンス重要度分析モデルがレジリエンス獲得に向けた施策決定に活用可能であることを示した。			
キーワード (5 語) 洪水早期警報, レジリエンス, 重要度, 多状態モデル, 開発途上地域			

SUMMARY OF MASTER’S DISSERTATION

Student Identification Number	82133468	Name	Yuki Tomita
<p>Title:</p> <p style="text-align: center;">Methodology of Resilience Importance Analysis for Flood Early Warning in Developing Regions with a Multi-state Modeling Approach</p>			
<p>Abstract:</p> <p>The objective of this research is to support policy decisions to improve the resilience of flood early warning systems in developing regions where ICT technology is poor, as flood risk increases due to increased localized rainfall caused by global warming. These regions still face difficulties in receiving disaster information from the government and require a different approach to flood early warning than developed countries. In recent years, community-based flood early warning systems (CBFEWS) have been introduced, which are human-centered, low-cost, and timely early warnings that are operational even in vulnerable areas. However, measures to improve resilience for sustainable performance remain a challenge due to budgetary and technological constraints.</p> <p>Therefore, an assessment model is proposed to identify critical factors for effective resilience improvement through a systems approach to CBFEWS. In the analytical model, a risk assessment model is built using a multi-state modeling called multi-state multi-valued decision diagram to address the need to consider the system interdependency between CBFEWS and governmental early warning systems, especially in the context of developing regions. Furthermore, using this model and the dynamic flood timeline of the target area, an importance analysis method is developed that allows quantitative exploration of factors that are highly involved in improving or reducing the resilience of CBFEWS by defining indicators such as Resilience Reduction Worth (ResRW) and Resilience Enhancement Worth (ResAW). The performance indicators of flood early warning in previous works were modified for CBFEWS evaluation through the literature review and interviews with three key informants involved in early warning system development. The performance of CBFEWS, which has a strong socio-technical system characteristic, was evaluated by considering both technical performance such as warning lead time and spatial coverage of warning notification, social preparedness and system availability.</p> <p>To evaluate the proposed model, a resilience importance analysis was conducted for a CBFEWS that has been successfully and sustainably operated in the Hindu Kush Himalayan region, which suffers from seasonal river flooding caused by heavy monsoon rains. By applying the proposed model to the existing CBFEWS, using SysML-based architecture definition and performance information obtained from previous studies and stakeholder interviews as input, it is shown that measures to maintain adequate social preparedness were highly important in preventing resilience degradation and that government early warning measures were highly important in improving resilience in the studied CBFEWS. A case study was also conducted using the model to demonstrate how risk communication can be conducted in a situation where a new technology proposal is made in the existing CBFEWS. Through these activities, it is verified that the resilience importance analysis model based on the multi-state model can be effectively used to determine the measures to implement resilience engineering in a CBFEWS context.</p>			
<p>Key Word (5 words)</p> <p>Flood early warning system, Resilience Engineering, Importance Analysis, Multi-state Model, Developing regions</p>			

目次

図目次.....	vi
表目次.....	ix
第1章 序論.....	1
1.1 動機.....	1
1.2 背景.....	2
1.2.1 洪水被害と早期警報による緩和.....	2
1.2.2 コミュニティベース洪水早期警報システム.....	10
1.2.3 レジリエンスの向上.....	12
1.3 論文の目的.....	14
第2章 コミュニティベース洪水早期警報における現状と課題.....	15
2.1 コミュニティベース洪水早期警報の現状.....	15
2.2 持続可能性獲得に向けた課題分析.....	21
2.2.1 コミュニティベース早期警報のガイドラインの分析.....	21
2.2.2 キーインフォーマントインタビューによる分析.....	25
2.2.3 課題の整理.....	31
2.3 現状と課題のまとめ.....	34
第3章 先行研究.....	36
3.1 目的.....	36
3.2 調査.....	36
3.2.1 洪水早期警報の評価.....	36
3.2.2 レジリエンスエンジニアリング.....	42
3.2.3 ソシオテクニカルシステムの評価.....	47
3.3 研究課題の範囲.....	49
3.3.1 関連研究における未解明点や課題.....	49
3.3.2 本研究で明らかにすべき点.....	49
第4章 コミュニティベース早期警報のレジリエンス向上のための提案.....	51
4.1 提案におけるコンセプト.....	51
4.2 レジリエンス向上のための評価モデル.....	52
第5章 モデルの設計.....	53

5.1	モデルの構成.....	53
5.2	レジリエンスを示すシステムダイナミクスの定義.....	55
5.2.1	因果分析.....	55
5.2.2	システムダイナミクス.....	57
5.3	評価対象システムにおけるアーキテクチャ記述.....	60
5.3.1	アーキテクチャ記述の目的と方法.....	60
5.3.2	コミュニティベース洪水早期警報の構造.....	61
5.3.3	コミュニティベース洪水早期警報の振る舞い.....	66
5.4	評価計算の手法.....	69
5.4.1	多状態多値決定グラフ.....	69
5.4.2	性能ベース信頼性評価.....	71
5.4.3	確率論的リスク評価.....	73
5.4.4	評価計算モデルの統合.....	77
5.4.5	レジリエンス重要度分析.....	81
第6章	モデルの評価.....	84
6.1	評価方針.....	84
6.2	評価の対象システム.....	86
6.2.1	ヒマラヤ地帯の災害脆弱地域における洪水早期警報.....	86
6.2.2	CBFEWSのアーキテクチャ記述.....	91
6.3	プロトタイプリング1：既存システムに対するレジリエンス重要度分析.....	94
6.3.1	評価条件.....	94
6.3.2	モデルの適用.....	95
6.3.3	出力に対する考察.....	106
6.3.4	妥当性確認.....	107
6.4	プロトタイプリング2：新規技術の導入におけるレジリエンス重要度分析.....	109
6.4.1	評価条件.....	109
6.4.2	モデルの適用.....	110
6.4.3	出力に対する考察.....	124
6.4.4	妥当性確認.....	125
第7章	考察.....	127
7.1	提案モデルの有用性.....	127
7.2	提案モデルの課題.....	128
7.3	持続可能な洪水早期警報システムに対する示唆.....	129
7.4	今後の展望.....	130

第 8 章 結論	131
謝辞	133
参考文献	136
Appendix A 予備調査における KII に対する半構造化インタビューシート	141
Appendix B CBFEWS で用いる機器外観の記録写真 (ICIMOD Knowledge Park)	145
Appendix C CBFEWS の持続可能性に関する因子を抽出するためのアンケート調査	152

目次

図 1-1. 研究の動機	1
図 1-2. 自然災害の発生報告状況（1970-2019） [8].....	3
図 1-3. 自然災害による経済被害状況（1970-2019） [8].....	3
図 1-4. 降水から洪水発生までの流出システム.....	4
図 1-5. 洪水リスクのマネジメント計画サイクル.....	5
図 1-6. 「仙台防災枠組 2015-2030」における優先行動 [14].....	8
図 1-7. 「仙台防災枠組 2015-2030」における具体的な目標 [14].....	8
図 1-8. 日本における早期警報網 [16].....	9
図 1-9. 北米における緊急警報統合プラットフォーム（IPAWS） [17].....	9
図 1-10. コミュニティベース洪水早期警報のマッピング.....	11
図 1-11. 貧困層のうち洪水リスクに晒されている人々が住む地域のマッピング [26].....	11
図 1-12. 災害被害低減に向けたレジリエンスに関連する目標（SDGS）.....	13
図 1-13. 本論文の目的と構成.....	14
図 2-1. 人間中心による早期警報システムにおける 4 つのプロセス.....	15
図 2-2. CBFEWS における上位戦略におけるニーズ（REQ: 要求図）.....	17
図 2-3. ICIMOD による CBFEWS における情報伝達フロー [2].....	19
図 2-4. ICIMOD での CBFEWS における洪水情報 [2].....	20
図 2-5. CBFEWS を取り巻くステークホルダー（BDD: ブロック定義図）.....	20
図 2-6. 研究対象のバリューグラフと方向性設定.....	35
図 3-1. 洪水被害発生に伴う SOCIAL PREPAREDNESS の動的变化 [38].....	41
図 3-2. 洪水早期警報システムの効果測定のためのパフォーマンスモデル.....	41
図 3-3. SAFETY-I と SAFETY-II の対象とするイベント確率密度 [47].....	44
図 3-4. JACKSON らによるレジリエンスの状態遷移モデル [33].....	45
図 3-5. ソシオテクニカルシステムのコンテキスト.....	47
図 3-6. 対象とする開発途上地域の洪水早期警報のレジリエンス向上におけるポイント.....	50
図 4-1. CBFEWS におけるレジリエンス設計のための提案モデルとユースケース.....	52
図 5-1. レジリエンス重要度分析モデル.....	54
図 5-2. CBFEWS レジリエンス評価のための因果分析.....	56

図 5- 3. システムダイナミクス (SD) 図の例.....	57
図 5- 4. CBFEWS レジリエンス評価のためのシステムダイナミクスの定義.....	59
図 5- 5. CBFEWS のコンテキスト定義 (BDD:ブロック定義図)	62
図 5- 6.CBFEWS コンテキストにおけるフローアイテム定義 (BDD:ブロック定義図)	63
図 5- 7.CBFEWS コンテキストにおける構造定義 (IBD:内部ブロック図)	65
図 5- 8. EARLY WARNING SYSTEM における構造定義 (IBD:内部ブロック図)	65
図 5- 9. CBFEWS コンテキストのユースケース (UC:ユースケース図)	66
図 5- 10. FLOOD LOSS REDUCTION の動作 (AC:アクティビティ図)	67
図 5- 11. COMMUNITY-BASED FLOOD DETECTION & FORECASTING の動作 (AC: アクティ ビティ図)	68
図 5- 12. COMMUNITY-BASED WARNING COMMUNICATION の動作 (AC: アクティビティ図)	68
図 5- 13. 開発途上地域の洪水早期警報における関係性.....	70
図 5- 14. 開発途上地域における早期警報の MMDD の例.....	70
図 5- 15. EVENT TREE/FAULT TREE の接続 [64].....	74
図 5- 16. CBFEWS における EVENT TREE ANALYSIS 結果.....	75
図 5- 17. CBFEWS における FAULT TREE ANALYSIS 結果.....	76
図 5- 18. CBFEWS 統合レジリエンス評価解析モデル.....	77
図 5- 19. 洪水シナリオ生成の例.....	78
図 5- 20. EVENT TREE ANALYSIS モジュール.....	79
図 5- 21. 重要度分析フローチャート.....	83
図 6- 1. ICIMOD によるコミュニティ洪水早期警報システム実装地域 (ネパール) [67].....	86
図 6- 2. ネパール災害脆弱地域における CBFEWS システム全体像.....	89
図 6- 3. RATU-REGIONAL CBFEWS のコンテキスト定義 (BDD:ブロック定義図)	91
図 6- 4. FLOOD DETECTION & FORECASTING の動作 (AC:アクティビティ図)	93
図 6- 5. WARNING COMMUNICATION の動作 (AC:アクティビティ図)	93
図 6- 6. プロトタイプ 1 の評価シナリオ.....	94
図 6- 7. プロトタイプ 1 における FTA.....	96
図 6- 8. プロトタイプ 1 : ベースラインシナリオの評価 (システムダイナミクス)	99
図 6- 9.プロトタイプ 1 : ベースラインシナリオの評価 (アベイラビリティ)	100
図 6- 10. 既存システムに対するレジリエンス喪失重要度 (RESRW) 評価結果 (抜粋)	104
図 6- 11. 既存システムに対するレジリエンス獲得重要度 (RESAW) 評価結果 (抜粋)	105
図 6- 12. プロトタイプ 2 の評価シナリオ.....	109
図 6- 13. 評価に使用した新規提案システム (QZSS の CBFEWS への統合)	111

図 6- 14. CBFEWS における EVENT TREE ANALYSIS 結果（新規システム導入後）	113
図 6- 15. プロトタイプ 2 における FTA（新規システム分）	114
図 6- 16. プロトタイプ 2：ベースラインシナリオの評価（システムダイナミクス）	117
図 6- 17. プロトタイプ 2：ベースラインシナリオの評価（アベイラビリティ）	118
図 6- 18. 新規技術導入におけるレジリエンス喪失重要度（RESRW）評価結果（抜粋）	122
図 6- 19. 新規技術導入におけるレジリエンス獲得重要度（RESAW）評価結果（抜粋）	123
図 6- 20. 提案システムのプレゼンテーションの様子	125
図 A- 1. BACKGROUND (1/2).....	142
図 A- 2. BACKGROUND (2/2).....	142
図 A- 3. SURVEY (1/2).....	143
図 A- 4. SURVEY (2/2).....	143
図 A- 5. INTERVIEW PROTOCOL	144
図 A- 6. INTERVIEW	144
図 B- 1. 洪水模擬フィールド	146
図 B- 2. CBFEWS 試験フィールド全体像.....	146
図 B- 3. 超音波方式水位計測装置と DATA ACQUISITION UNIT（太陽パネル付き）	147
図 B- 4. 浮き具方式水位計測装置	148
図 B- 5. DATA UPLOAD UNIT（アラーム付き）	149
図 B- 6. DATA UPLOAD UNIT（アラーム付き）（別装備形態）	150
図 B- 7. ALARM UNIT.....	151

表目次

表 1- 1. 災害被害低減に向けたレジリエンスに関連するターゲット (SDGS)	13
表 2- 1. 構造化インタビューにおける質問事項.....	26
表 2- 2. インタビュー#1 からの回答	27
表 2- 3. インタビュー#2 からの回答	28
表 2- 4. インタビュー#3 からの回答	29
表 2- 5. コミュニティベース早期警報の持続可能性に関する課題 (REQ: 要求テーブル)	32
表 3- 1. 洪水発生までのリードタイムと浸水深さによる資産への損害割合	38
表 3- 2. HOLLNAGEL による安全概念 [45] [46].....	44
表 5- 1. CBFEWS のアーキテクチャ記述における目的と方法.....	60
表 5- 2. CBFEWS 統合レジリエンス評価解析モデルの各モジュール説明	80
表 5- 3. 従来のリスク重要度評価計算手法	82
表 5- 4. 提案するレジリエンス重要度評価計算手法.....	82
表 6- 1. モデルに対する検証計画.....	85
表 6- 2. モデルに対する妥当性確認	85
表 6- 3. 洪水の情報を事前に受け取ることに成功した人数.....	90
表 6- 4. 洪水とそのリスクに関する情報源	90
表 6- 5. プロトタイプ 1 における入力パラメータと設定根拠	97
表 6- 6. 既存システムに対するレジリエンス喪失重要度 (RESRW) 評価結果 (全データ) ..	102
表 6- 7. 既存システムに対するレジリエンス獲得重要度 (RESAW) 評価結果 (全データ) ..	103
表 6- 8. CBFEWS 導入後の持続可能性への重要な因子のアンケート結果	108
表 6- 9. プロトタイプ 2 における入力パラメータと設定根拠	115
表 6- 10. 新規技術導入におけるレジリエンス喪失重要度 (RESRW) 評価結果 (全データ) .	120
表 6- 11. 新規技術導入におけるレジリエンス獲得重要度 (RESAW) 評価結果 (全データ)	121

第1章 序論

本章では、著者の研究動機から始め、背景である洪水被害と早期警報による持続可能社会に向けたレジリエンス向上について述べ、研究の目的を明確化し、論文の構成について示す。

1.1 動機

著者は、国際宇宙ステーション (ISS) に関するシステムデザインに携わっている。ISS 計画では、地球低軌道環境の利活用により、その価値を世界の課題解決や高度化に貢献することを目的としている。日々の願望として宇宙技術を当たり前を含む共生圏を夢見て、日々努力重ねている。一方、業務を通じて、宇宙開発の継続に二つの課題を見出した。一つに、宇宙開発の恩恵を受けるのは ISS に参加するような先進国が中心であり、これらの国々は予算的余裕や最先端技術により自国のインフラや科学技術の強化ループを継続的に回すことが可能であるものの、多くの途上国や地域は置き去りにになっていることである。二つに、宇宙開発に携わる人員の日々の豊かな生活においては、こういった途上国の状況の発見機会すら得難いことである。「誰一人取り残さない」を理念として 2015 年に国連によって採択された Sustainable Development Goals (SDGs) [1] の言葉を借りれば、レジリエンスの改善余地があると考えた。また、Sensing & Design Laboratory に在籍し、研究室が得意とする防災システムのデザイン分野と出会い、レジリエンス向上のための開発哲学や宇宙システムアセット導入の可能性が研究の興味の対象となった。特に、“The most vulnerable” [2] と称される ICT 技術の脆弱な地域社会群においては、そのレジリエンスの考えや宇宙アセットの導入により新たなレベルへの強化が可能と考えた。こうして、いかに高度技術を脆弱地域に統合し、住み続けられる街づくりに貢献できるか、またこのようなゴールに対して宇宙アセットをいかに開発途上地域に統合し、レジリエンス向上を実現できるかの設計手法を考える動機を得た。

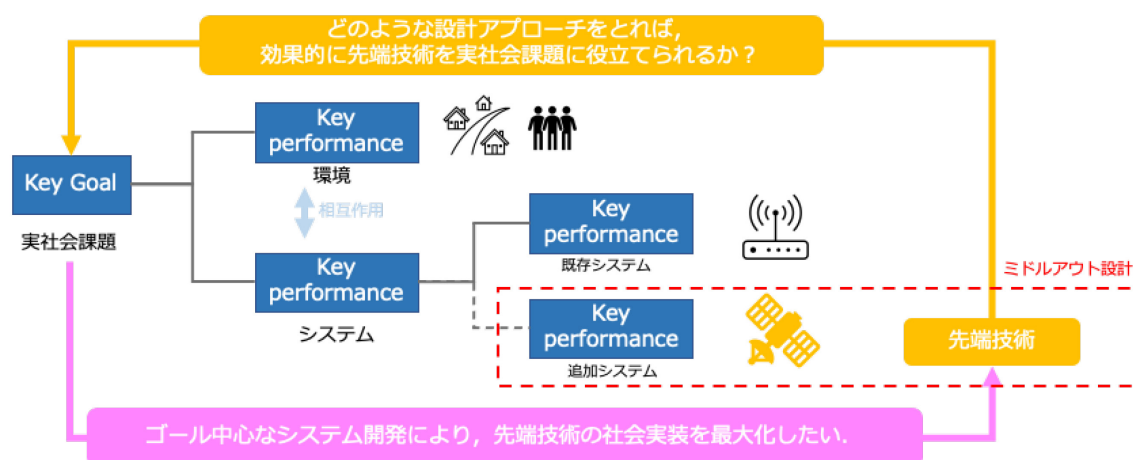


図 1- 1. 研究の動機

1.2 背景

1.2.1 洪水被害と早期警報による緩和

(1) 近年の洪水被害

20 世紀から 21 世紀現在にかけて、世界的に科学技術や政治政策の発展が進められる中、地球温暖化と相まってその脅威は止まることがないのが自然災害である。中でもその最も回数として多く報告されているのは洪水である。図 1- 2 に示すように、EMDAT (2020)の報告によれば、2019 年における 361 件の自然災害発生報告に対して、170 件が洪水を占めている。また、図 1- 3 に示すように、同様に EMDAT (2020)の報告によれば、年によって被害規模は違うが、多い年では洪水により約 70.76billions 米ドル(約 10 兆円) (2011 年)の被害が発生している。

2022 年 8 月に発生したモンスーン の影響によるパキスタンの洪水では、「全土の 3 分の 1 が水没」と気候相が報告し、復興には 100 億ドル(約 1 兆 4000 億円)以上かかると、計画相より見通しが示された [3]。同様に、2022 年 8 月に日本の東北や北陸地方で発生した線状降水帯による記録的な豪雨により、東北・北陸の 6 県 54 万人が避難対象となり、また 17 河川が氾濫した。線状降水帯は形成のメカニズムが完全にわかっていないこともあり、予測のハードルを上げており、今もなお洪水予測には完全な対策が立てられていない状況である [4]。2022 年 7 月に発生したオーストラリアシドニー を襲った今年 3 度目の洪水においても、約 5 万人が避難し、道路は寸断され、水没した家屋もあり、数千人が停電に見舞われていた [5]。

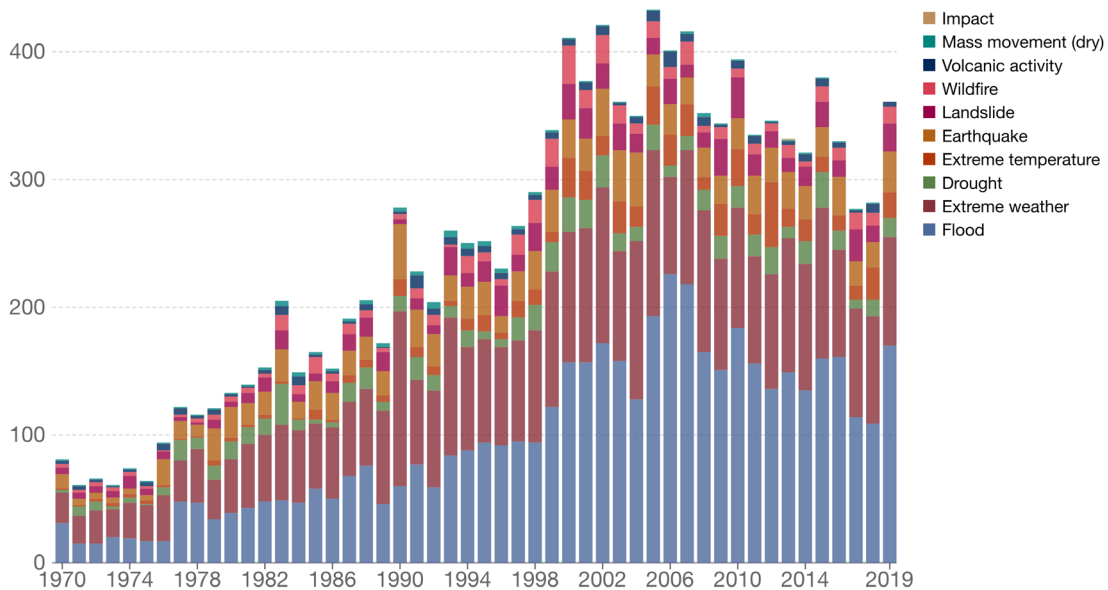
さらに深刻なことに、このような洪水被害は今後も増加傾向であることが示唆されている。国連下部組織の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)から発行された IPCC 第 4 次評価報告書 [6] [7]によれば、過去 100 年間の線形の昇温傾向は 100 年当たり 0.74℃が観測された。気候システムの温暖化は明白であり、また、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が高いとされ、21 世紀末の世界平均地上気温の上昇は、高成長型シナリオで化石エネルギー源を重視した場合、4℃(2.4~6.4℃)と予想されている。このように地球温暖化によって、主に蒸発散量の増加を一次要因とし、二次的に台風強度増加、降水量の変化、豪雨の発生頻度の増加、河川流量の増加によって、洪水発生確率は増加傾向が続くと予想される。

このように、大きな経済損失が世界中で毎年の如く生じていることは、紛れもない事実である。また、こういった被害は地球温暖化による気象変動により、その脅威は増すばかりである。そのため、被害低減に向けた対策は今世紀における急務である。

Global reported natural disasters by type, 1970 to 2019

Our World in Data

The annual reported number of natural disasters, categorised by type. This includes both weather and non-weather related disasters.



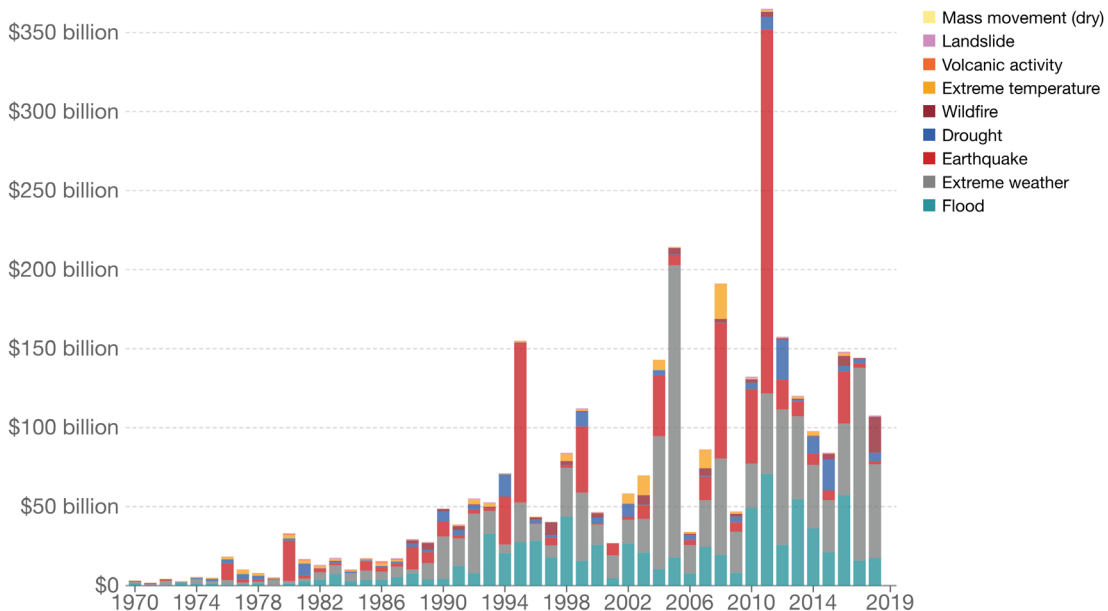
Source: EMDAT (2020): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium
OurWorldInData.org/natural-disasters • CC BY

図 1- 2. 自然災害の発生報告状況 (1970-2019) [8]

Economic damage by natural disaster type, 1970 to 2019

Our World in Data

Global economic damage from natural disasters, differentiated by disaster category and measured in US\$ per year.



Source: EMDAT (2020): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium
OurWorldInData.org/natural-disasters • CC BY

図 1- 3. 自然災害による経済被害状況 (1970-2019) [8]

(2) 洪水発生メカニズム

世界中で猛威を振るう洪水について、対策を言及するにあたり、その基本的な発生メカニズムを明確にしたい。洪水現象は一般的に、水文学(Hydrology)の学問により定量的にモデル化され、そのメカニズムが理解されている。水文学はこの地球上の水の振る舞いを科学的に扱う学問領域であるが、中でも洪水の理解には流域水文学が用いられる。水は陸面、海洋、大気間を循環しており、海面や陸地面から蒸発した水蒸気は待機中で凝結して雲となり、雨や湯に來なって地表に戻る。陸上での降水のかなりの部分は集まって河川水となるが、一部は地下水となる。このように全地球的な水の循環によって、常に水は大移動を続けている。[9] 河川水の量が台風やモンスーンなどによって生じる局所豪雨を繰り返した結果、河川の流域(その地形により降った雨が水系に集まる、大地の範囲・領域)の地表・土壌・地下水が河川に集結し、結果的に河川の水位が上昇し、溢れ出て土地をひたすことが洪水である。

このように、洪水発生に至るには、単純な地表面に対する降雨だけでなく、地表・土壌・地下水に蓄積された水がその飽和限界を迎えた際に河川へ流出することにより発生する。このような複雑な洪水被害に至る流出システムを図 1-4 に示す。このように、洪水発生においては、河川流域、斜面、地下水、河道といったシステムがそれぞれ相互作用することから、洪水把握には地球水循環システムを正確に捉えることが重要である。

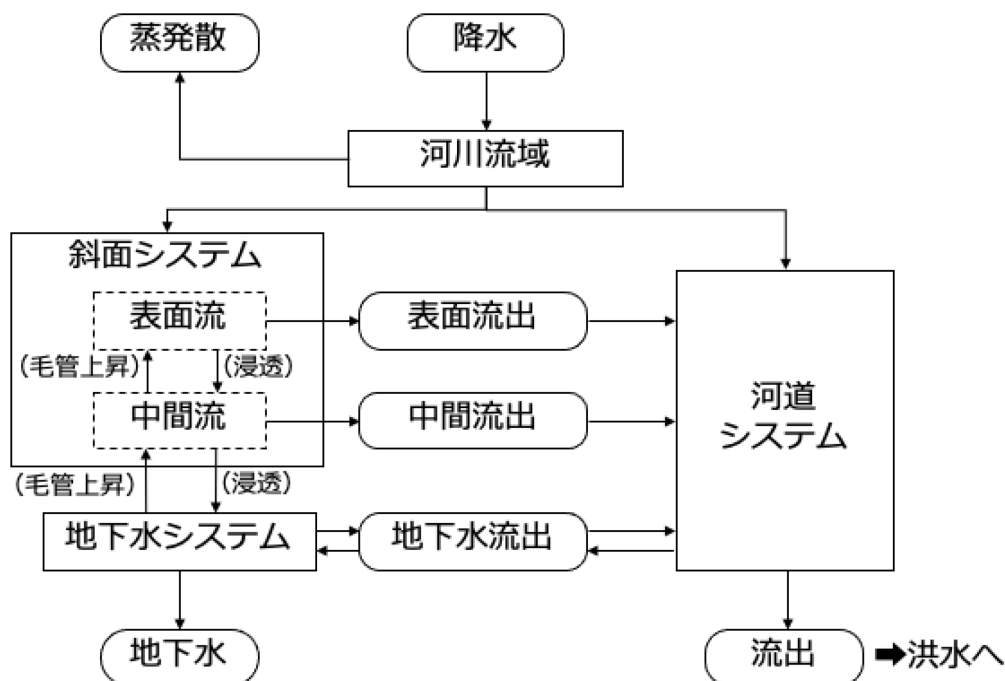


図 1-4. 降水から洪水発生までの流出システム
(参考文献 [9]をもとに著者にて作成)

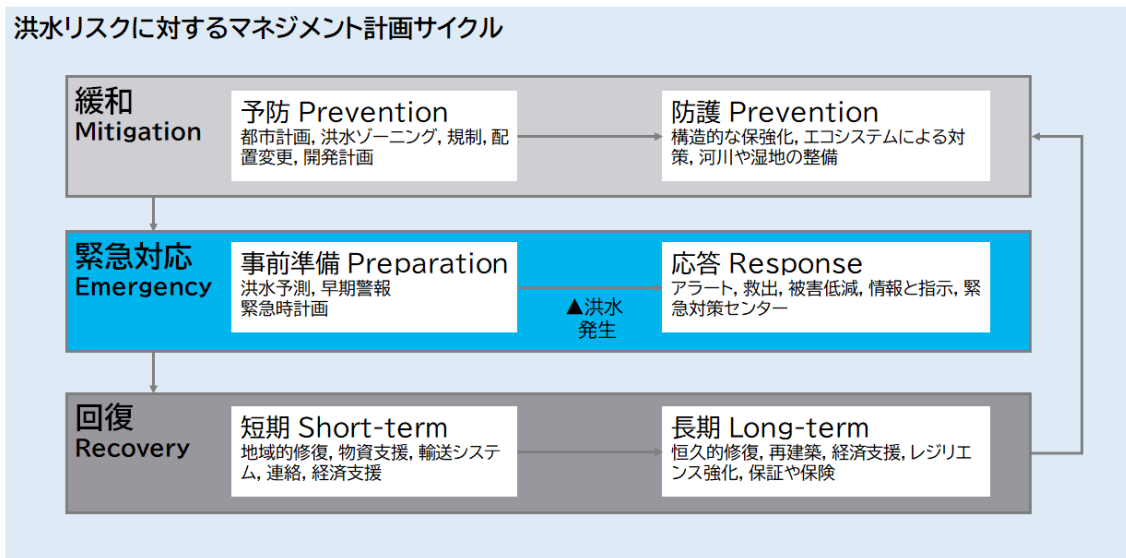


図 1- 5. 洪水リスクのマネジメント計画サイクル
(参考文献 [10]をもとに著者にて作成)

(3) 洪水への対策アプローチ

強靱な洪水対策を構築するには、洪水に特化したリスクマネジメントサイクルを計画的に実行することが重要である。図 1- 5 に Serra-Llobet らが整理した洪水リスクに対するマネジメント計画サイクルを示す。洪水のライフサイクルは洪水発生前後に分けられ、緩和 (Mitigation)、緊急対応 (Emergency)、回復 (Recovery) の 3 つの施策が考慮されるべきとある。[10]

緩和 (Mitigation) については、予防 (Prevention) と防護 (Protection) といった施策が挙げられる。予防 (Prevention) の具体例としては都市や地域の土地の使い方を洪水の備えて正しく計画することや、法律や条例といったルールによって正しく都市開発をコントロールする方法である。防護 (Protection) は、ダムや堤防による物理的な方法での洪水に対する処置や、河川のバイパスや森林開発の工夫といったエコシステムに直接手を加える方法である。[10]

緊急対応 (Emergency) については、事前準備 (Preparation) と応答 (Response) といった施策が挙げられる。事前準備 (Preparation) の具体例としては、緊急対応に向けて洪水の予測を行ない、緊急時に対象地域に対して発出する早期警報システムを整備すること、また実際に洪水が発生した場合に備えて緊急対応マネジメント計画を策定することがある。応答 (Response) としては、整備した早期警報によるアラートの発出と避難指示による損害の低減、救援活動などが挙げられる。[10]

回復 (Recovery) については、短期的施策 (Short-term) と長期的施策 (Long-term) に分けられる。短期的施策 (Short-term) については、洪水により破壊された住居や施設の暫定的修繕 (Provisional repair) の提供や物資支援や物流・通信・ファイナンスといった側面での一時処置的支援が含まれる。長期的施策 (Long-term) では、住居や施設の完全的な修繕 (Definitive repair)、継続的な物資支援や物流・通信・ファイナンスの支援、災害保険による補償、また洪水から得られた

Lessons learned を用いた洪水リスクマネジメントサイクル全体に対するレジリエンスの強化が挙げられる。[10]

Serra-Llobet らの例に述べられているような先進国では、図 1- 5 に整理された各ライフサイクルにおける洪水マネジメント計画サイクルの全体を実現できている。例えば、どちらも約 700 万人の住人をもつカタラン川流域地区(スペインカタルーニャやサンフランシスコ湾岸地域 IRWM 地域(米国カリフォルニア州)では、参考文献 [10]からライフサイクル統合的な計画が進められていることがわかる。スペインでは、1982 年にバレンシアのトスダムが決壊した後、統合的な洪水リスク管理の最初の試みが行われ、これがきっかけとなり、洪水管理の方法が根本的に変化した。これにより、土地利用計画や洪水リスク管理といった非構造的な対策、土地利用計画、洪水リスクマッピング、早期警報システム、調整された公的洪水保険制度など、非構造的な対策が初めて用いられた。保険制度が利用され、カタルーニャ地方では 2015 年より予防のための地域・都市計画対策、防御強化のための水文・河川改修を含む大規模な施策が進められ、その過程で 2015 年からの6年間の計画で約 917M ユーロの予算を確保している。米国カリフォルニア州では、洪水リスク管理サイクルのうち、洪水軽減の段階 に主眼を置いている。2016 年時点で、サンフランシスコ湾岸地域では、約 1 億 6,300 万ドル以上の債券資金を獲得している。

一方で、開発途上国では、先進国のような大規模施策は持続的ではない。バングラディッシュの例として、1988 年にバングラディッシュを襲った大洪水は、6,000 人以上の死者を出し、数百万トンの農作物を破壊し、数百万ドルの損害をもたらしたこと、また最近では 2017 年に洪水が発生し、国土の 3 分の 1 が水没したと推定される例からもわかるように、同様に洪水被害に苦しむ国である。バングラディッシュはすでに、サイクロンシェルターの建設と暴風雨早期警報システムの構築に 1000 万タカ(約 15 万ドル相当)を投資している。この中には洪水マネジメント計画における、緩和(Mitigation)、緊急対応(Emergency)の両方が含まれるが、先進国の例と比べれば非常に小さな投資額である。こういった中で、「堤防の建設(治水的アプローチ)」と「適応的アプローチ」の議論がもたらされている。米国政府によるタスクフォースによれば、限られた予算の中で河川をコントロールするのは十分ではなく、いずれ堤防は破綻して、これまでよりもさらに多くの人命が失われ、失敗した努力に投資した資本が失われることになると予測した。「適応的アプローチ」の例として、2007 年のサイクロン「シドル」では、同国の暴風雨早期警報システムの大幅な改善により、すでに数え切れないほどの人命が救われたと評価されているように、比較的低コストでありながら、肯定的な効果が現れやすい。[11] [12]このように、洪水対策には「堤防の建設(治水的アプローチ)」と「適応的アプローチ」が見出されるが、洪水対策予算が限られているような開発途上地域においては、「適応的アプローチ」が洪水被害の低減に迅速に対処可能な手段であると言える。長期的な視点では、緩和(Mitigation)のためのハード的な対策が望ましいことは明らかではあるものの、途上地域においては、緊急対応(Emergency)に挙げられる事前準備(Preparation)と応答(Response)といったソフト的な施策が効果のでやすい施策であると言える。

(4) 早期警報システムの価値

前述の通り、適応的アプローチを優先せざるを得ないような開発途上地域においては、早期警報は効率の高い災害被害の低減手段である。2015年に開催された、「第3回国連防災世界会議」では、2005年から2015年までを対象として活用されていた「兵庫行動枠組 2005-2015」[13]の運用結果からの議論により、「仙台防災枠組 2015-2030」が制定された。[14][15]本フレームワークにおいて、図1-6および図1-7に示す4つの優先行動と7つのターゲットが合意された。仙台防災枠組における重要な概念としては、災害リスクを予測し、そのために計画を立て、削減すること、それによってそれぞれの強靭性を高めることを重点的に述べられている。こういった意味でも、4つの優先行動に現れるような、災害リスクの把握や予測、または7つの目標の中の国際協力による持続的な支援や早期警報システムの利用可能性といったソフト面での提言が目立っていることから、国際協調のもとでのあらゆるハザードへの早期警報の構築というのが一つの大きなテーマであることがわかる。

現代社会において、実際にどのような早期警報が実装されているかといえは、各国の状況によって大きく異なる。例えば日本や米国のような先進国においては、統合的な早期警報システムの構築に成功している。図1-8に示す日本の例[16]では、衛星通信をベースとしたJ-ALERTや、それを補強するL-ALERT、その他にも多くの情報配信者と情報伝達手段を複数チャンネルもち、強靭なマルチハザード対応の通知システムが確立されている。図1-9に示す米国の例[17]では、IPAWS(Integrated Public Alert & Warning System)と呼ばれる緊急警報統合プラットフォームにより、同様にマルチハザード対応、複数チャンネルの情報拡散手段が確立されている。当然ながら、こういったシステムの構築には非常に大きな予算が必要であることから、国家予算の大きな国であるからこそそのシステムである。マルチハザード性や複数チャンネル性は国家予算の規模におおむね比例して低減していく傾向にある。

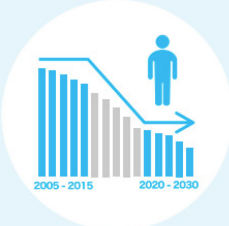
こういった状況を鑑みれば、洪水を含む災害への「適用アプローチ」を含め、先進国とは状況の異なる開発途上地域においては、限られた予算のもと異なるアプローチで効率的に早期警報を構築することが求められると考えられる。「仙台防災枠組 2015-2030」の目標にもあげられるように、こういったギャップを埋めるには国際協力が必要である。特に、2020年時点でもいまだに低いインターネット利用率である南アジア(38.6%)やサハラ以南のアフリカ(30.0%)を考慮すれば(参考:日本のインターネット普及率は90.2%)、どのようにして強靭な早期警報を構築できるかが、喫緊の課題である。[18]

優先すべき4つのこと (優先行動)


1. 災害のリスクを理解し共有すること
2. 災害リスク管理を強化すること
3. 防災への投資を進め、レジリエンスを高めること
4. 災害に十分に備え、復興時には
「ビルド・バック・ベター」を実現すること

図 1- 6. 「仙台防災枠組 2015-2030」における優先行動 [14]

7つの具体的目標




2030年までに災害による死亡者数を大幅に減らし、「2020年から2030年」の10万人あたり死亡率を「2005年から2015年まで」に比べ下げる



災害へのレジリエンスを高め、2030年までに、医療や教育などの重要なインフラへの損害や基本サービスの途絶を大幅に減らす




2030年までに災害による被災者を大幅に減らし、「2020年から2030年」の10万人あたり被災者数を「2005年から2015年まで」に比べ下げる




2020年までに、国や地方レベルの防災・減災戦略を有する国の数を大幅に増やす



2030年までに、災害による直接の経済的損失を国内総生産（GDP）との比較で減らす



2030年までに開発途上国への国際協力を大幅に強化し、この枠組を実行するための持続的な支援を行う



2030年までに、多くの人が複合災害に対応した早期警戒システムや災害リスク情報を利用できるようにする

図 1- 7. 「仙台防災枠組 2015-2030」における具体的な目標 [14]

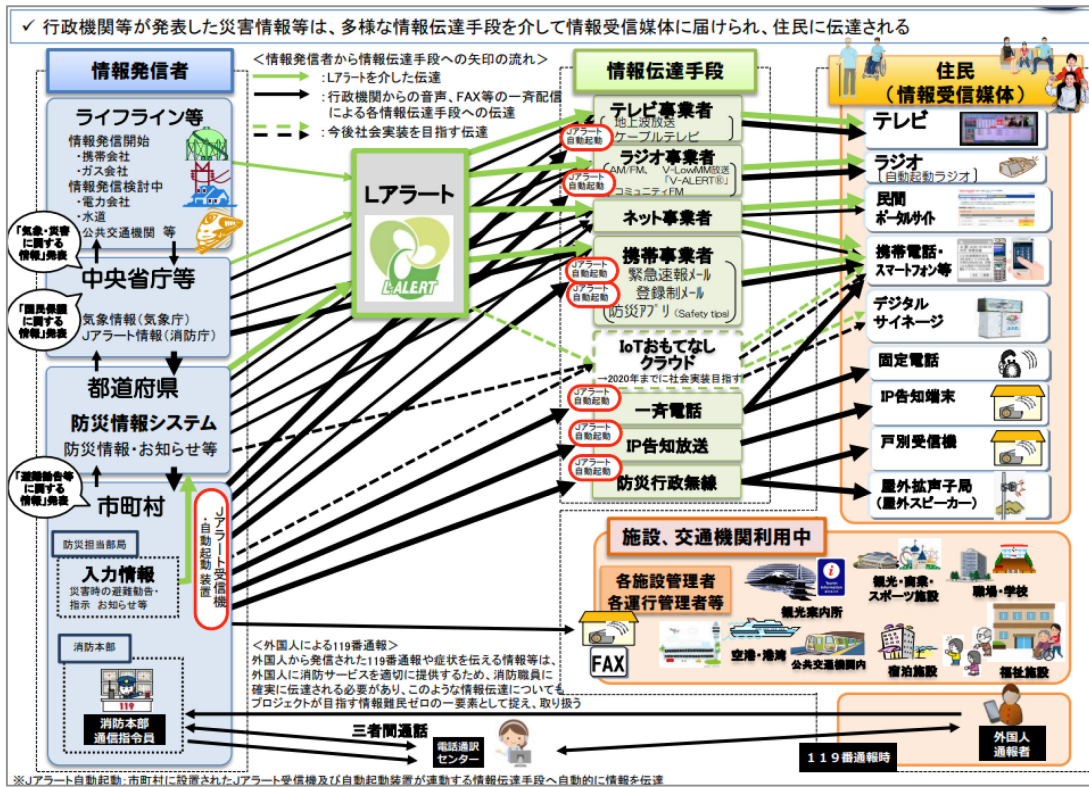


図 1- 8. 日本における早期警報網 [16]

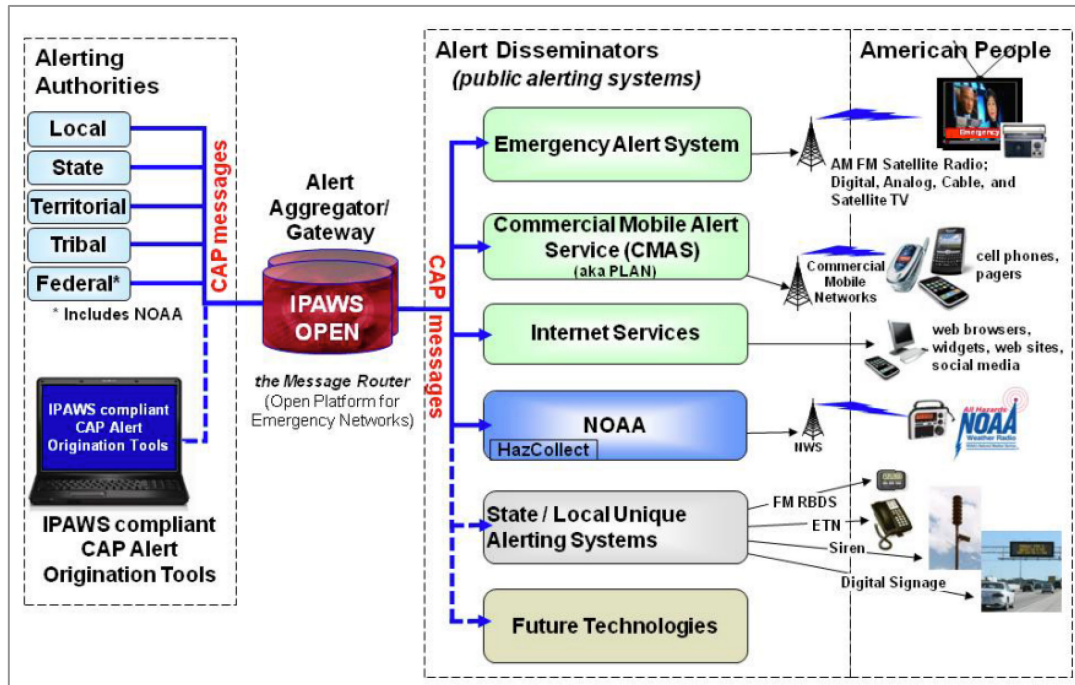


図 1- 9. 北米における緊急警報統合プラットフォーム(IPAWS) [17]

1.2.2 コミュニティベース洪水早期警報システム

開発途上地域のように、限られた予算のもと異なるアプローチで効率的に早期警報を構築することを考えれば、洪水を含む災害への「適用アプローチ」が第一手段になることが明確である。このような思想のもと誕生した考え方が、コミュニティベース洪水早期警報 (Community-based Flood Early Warning Systems: CBFEWS) である。CBFEWS は、コミュニティが管理する、コミュニティのためのツールや計画の統合システムであり、ほぼリアルタイムで洪水に関する早期警報を提供し、リスクを軽減する。CBFEWS は、人々を中心とした、タイムリーでシンプルかつ低コストの技術に基づいており、脆弱なコミュニティによる持続的な運用を可能にするものである。コミュニティ、政府機関、社会動員、ボランティア、NGO などの主要なステークホルダーのネットワークを通じて、下流の脆弱なコミュニティに情報を発信し、洪水被害低減のための準備に使用可能な時間を増加できる。[2]

南アジアのネパールの例 [19] を挙げれば、他の多くの開発途上国と同様、水文気象観測所のネットワークはまばらであり、地上計器の空間的範囲が限られていること、リアルタイムの降雨データが利用できないこと、技術・資金面での制約のため、降雨データはかなり遅れてしか利用できない。アフリカ西部にある内陸国であるニジェールの例 [20] によれば、ニジェールのような貧しい開発途上国の遠隔地の農村部で、既存の早期警報や洪水予測ツール、経験、知識を強化することによって、先進国で見られるような Kelman と Glantz の定義 [21] によるトップダウンまたはラストマイルの洪水早期警報アプローチ (早期警報において、その開発プロセスや運用プロセスの終盤に人やコミュニティを加える) ではなく、ファーストマイル (EWS 開発の初期からコミュニティを巻き込む) ことに成功している。このように、EWS の中心を最初から人々やコミュニティに置くことで、EWS は日常生活や生計に貢献することができ、それによって、ハザードが発生したときだけ起動するような独立したシステムではなく、より幅広い災害リスク軽減や持続可能な開発の努力を支援することができるのである [21]。Cools ら [22] は、EWS の設計に地元コミュニティと当局を参加させることで、早期警報プロセス全体の有効性が向上し、その結果、警報警告に対する反応が高まることを強調した。

図 1-10 に世界のコミュニティベース洪水早期警報の一例に関するマッピングを示す。コミュニティベース早期警報の成功例は、多くの支援団体によってガイドラインとして整備され、Web 上でも成果とベストプラクティスが共有されている。ネパールの例 [2]、フィリピンの例 [23]、マラウイの例 [24]、ベニンの例 [25]、いずれにおいても、人間中心でかつ低コストで実現可能なシステムの構築により、このような開発途上地域においても導入可能な早期警報システムの達成が可能であることが謳われている。こういった国々の所在地域について、世界銀行が発表した図 1-11 における貧困層のうち洪水リスクにさらされている人々が住む地域に重ね合わせてみると、これらの地理的分布は非常に類似性を見せており、コミュニティベース洪水早期警報のニーズが貧困層でかつ洪水強度の高い地域に対して集中していることがわかる。

これらゆえに、洪水被害の増加が予想される 21 世紀において、持続可能な洪水リスク低減を目標とすれば、コミュニティベースによる洪水早期警報の確立と推進が急務であると言える。

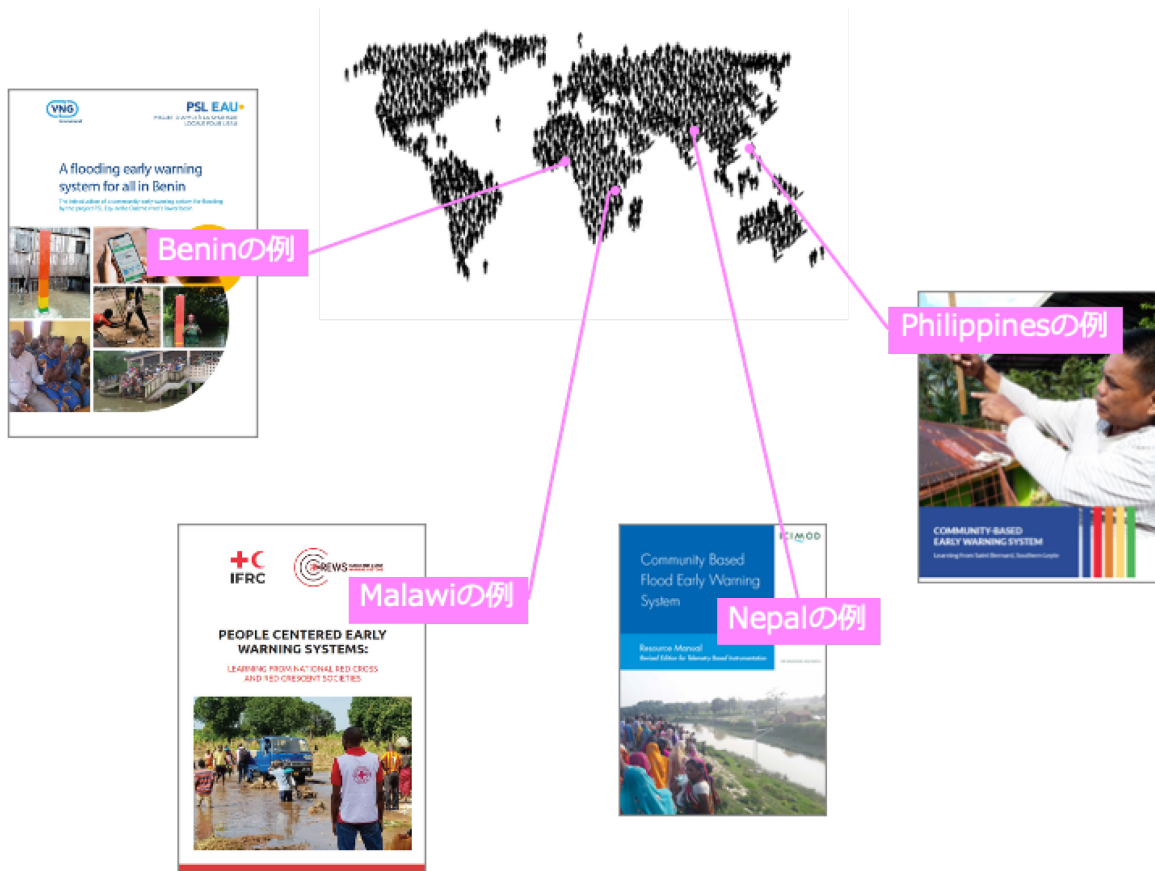


図 1- 10. コミュニティベース洪水早期警報のマッピング
 (参考文献 [2] [23] [24] [25]をもとに著者にて作成)

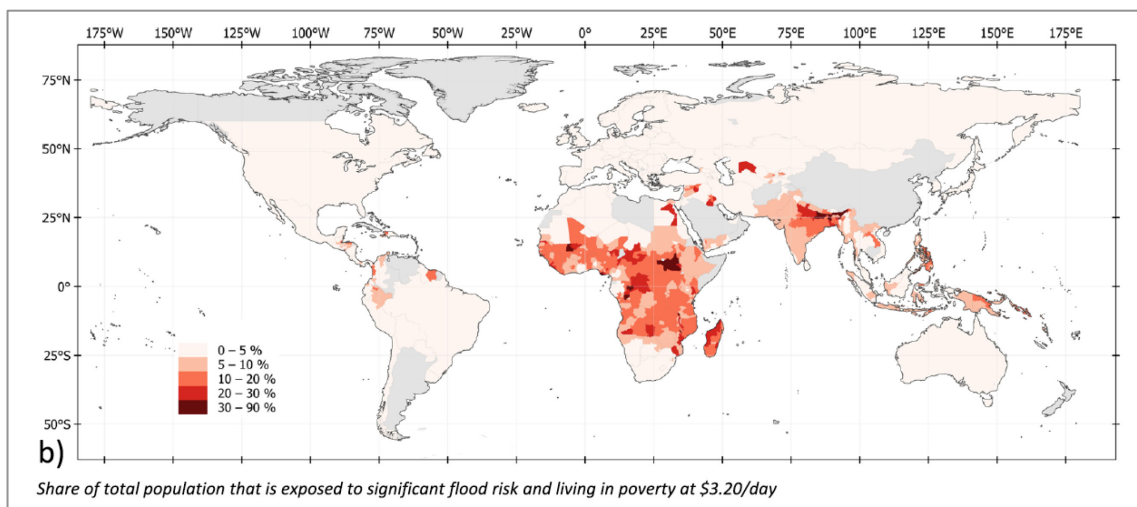


図 1- 11. 貧困層のうち洪水リスクに晒されている人々が住む地域のマッピング [26]

1.2.3 レジリエンスの向上

洪水被害と早期警報, コミュニティベース早期警報における目的や意義についての議論においてたびたび挙げられる「レジリエンス」の定義について, 本論文における立場を明確にする. 前述の通り, 第3回国連防災世界会議や「仙台防災枠組 2015-2030」において, レジリエンスという概念のもと, 持続可能な防災システムの構築について議論が進められることが多くなっている. レジリエンスが現在のように頻繁に使われるようになった起源を 2005 年の第2回国連防災世界会議に求めており, 2015 年の第3回国連防災世界会議にはレジリエンスの意味を含む Build Back Better (よりよい復興)という言葉が用いられ, 「仙台防災枠組み 2015-2030」が採択され, レジリエンスに注目が集まった [27]とされている. おおむね同時期に設定された持続可能な開発目標 (SDGs) [1] の17の目標のうち, 図 1- 12 に示す目標9 (産業と技術革新の基盤をつくろう), 目標11 (都市と人間の居住地を包摂的, 安全, 強靱かつ持続可能にする), 目標13 (気候変動に具体的な対策を) にて言及されており, また169のターゲットのうち, 表 1- 1 に示すように, 4つのターゲットでは途上地域などに対して具体的な気候変動の対策として, レジリエンスをもったインフラや災害リスク管理策定, 対応能力の強化が述べられている.

一方で, レジリエンスという概念には非常に多様な捉え方が存在することが知られている. レジリエンスは, SDGs のターゲットを見ても, 持続可能という言葉と併置されたり, 人々のレジリエンスと表現されたり, 建物やインフラの性質を示したり [27]と, 多様な使い方がされていることから, いかんにして災害被害低減のためにレジリエンスを強化するか? という問いを持った際には, そのレジリエンスの指標を定義し, 目的に沿った対応策を議論する必要がある. 目的の明確化のために, 本論文では洪水被害低減のためのレジリエンスという言葉を用いて以下のように定義の上で議論を進める.

「洪水被害低減のためのレジリエンス」(本論文での定義)

長期にわたり持続的に洪水被害のために効果を発揮し, 持続可能社会を実現するための支援を行うための能力

洪水被害の低減は, 特に開発途上地域においては適用アプローチである早期警報システムといった手法が効果的であることを述べたが, そのシステムそのものが持続的に効果を発揮しなければ, 持続可能な社会にはつながらないという点に着目した. 本論文では, 真の持続可能性を獲得するためのシステムを構築するにあたり, レジリエンスの向上のために何ができるかを探求したい.



図 1-12. 災害被害低減に向けたレジリエンスに関連する目標 (SDGs)

表 1-1. 災害被害低減に向けたレジリエンスに関連するターゲット (SDGs)

No	ターゲット
9.1	全ての人々に安価で公平なアクセスに重点を置いた経済発展と人間の福祉を支援するために、地域・越境インフラを含む質の高い、信頼でき、持続可能かつ強靱(レジリエント)なインフラを開発する。
9.a	アフリカ諸国、後発開発途上国、内陸開発途上国及び小島嶼開発途上国への金融・テクノロジー・技術の支援強化を通じて、開発途上国における持続可能かつ強靱(レジリエント)なインフラ開発を促進する。
11.b	2020 年までに、包含、資源効率、気候変動の緩和と適応、災害に対する強靱さ(レジリエンス)を目指す総合的政策及び計画を導入・実施した都市及び人間居住地の件数を大幅に増加させ、仙台防災枠組 2015-2030 に沿って、あらゆるレベルでの総合的な災害リスク管理の策定と実施を行う。
13.1	全ての国々において、気候関連災害や自然災害に対する強靱性(レジリエンス)及び適応の能力を強化する。

1.3 論文の目的

本論文では、開発途上地域の洪水早期警報(コミュニティベース早期警報)において、「洪水被害低減のためのレジリエンス」の向上にあたり、どのような施策をとることが有効かを探求することを目的とする。

図1-13に本論文の目的に対応する構成を示す。序論として、筆者の動機から始め、開発途上地域における洪水早期警報の意義と本論文の目的を定義した。本論として、2章では、コミュニティベース早期警報における現状と課題として、持続可能性獲得に向けた課題状況について論じ、本研究の扱うスコープを明確にする。次いで3章では、先行研究の分析を通して、洪水早期警報に関して、コミュニティベース早期警報におけるレジリエンスの向上のための未解決課題として、施策決定を支援する方法論について調査し、4章では、コミュニティベース洪水早期警報のレジリエンス重要度を評価するためのモデル提案について述べ、5章では、提案手法の設計を実施する。6章では設計したモデルに対する検証、妥当性確認を行う。7章では、設計、評価に対する考察をまとめ、8章にて結論として得られた成果と今後の展望について整理する。

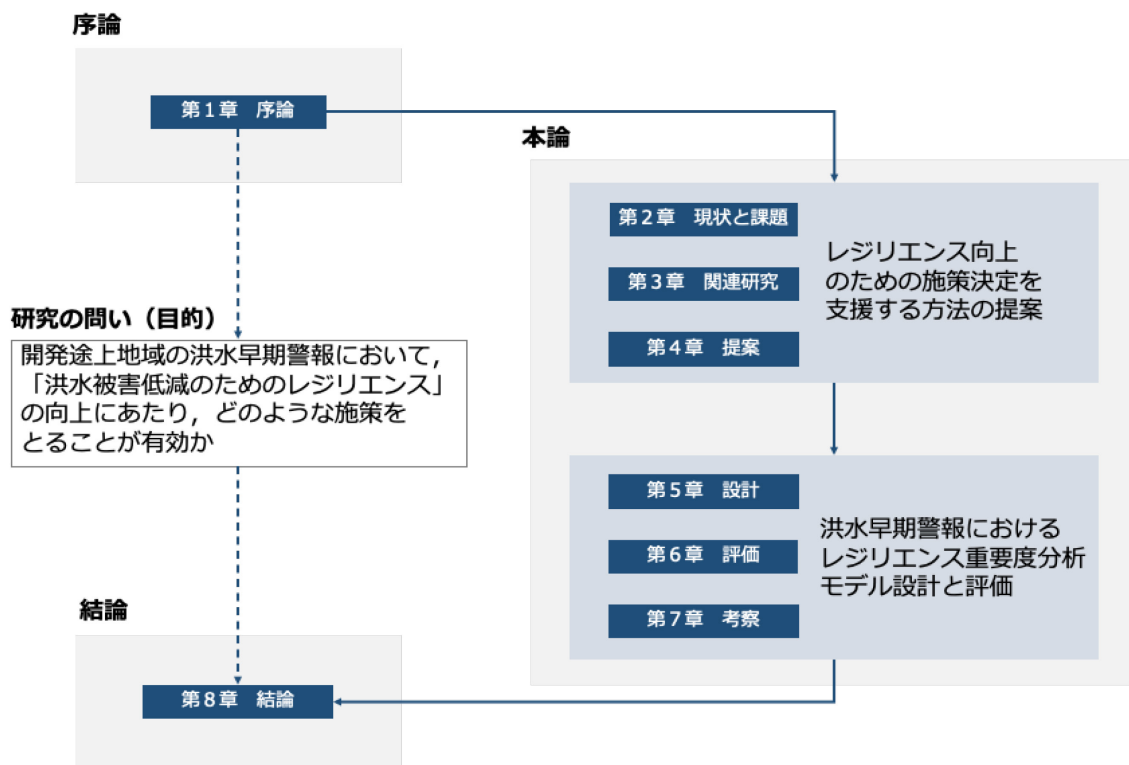


図1-13. 本論文の目的と構成

第2章 コミュニティベース洪水早期警報における現状と課題

本章では、コミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための評価方法を確立するために課題分析としてコミュニティベース洪水早期警報のガイドライン調査やキーインフォーマントに対するインタビューを実施し、本研究で対象とする課題を明確化する。

2.1 コミュニティベース洪水早期警報の現状

コミュニティベース洪水早期警報の実現には、図 2-1 に示す「リスク把握とスコーピング」、「洪水モニタと早期警報準備」、「早期警報通知と連絡」、「対応能力とレジリエンス強化」といった4つのキーエレメント [2] [28]の相互実現が重要であり、それぞれの不十分な実現が全体システムの目的達成の失敗につながることを理解する必要がある。また、先進国のそれと異なり、開発途上地域における CBFEWS としての特性や戦略を捉えることも重要である。本項では、こういった CBFEWS の運用上の概念(Concept of Operations) [29]を整理する。

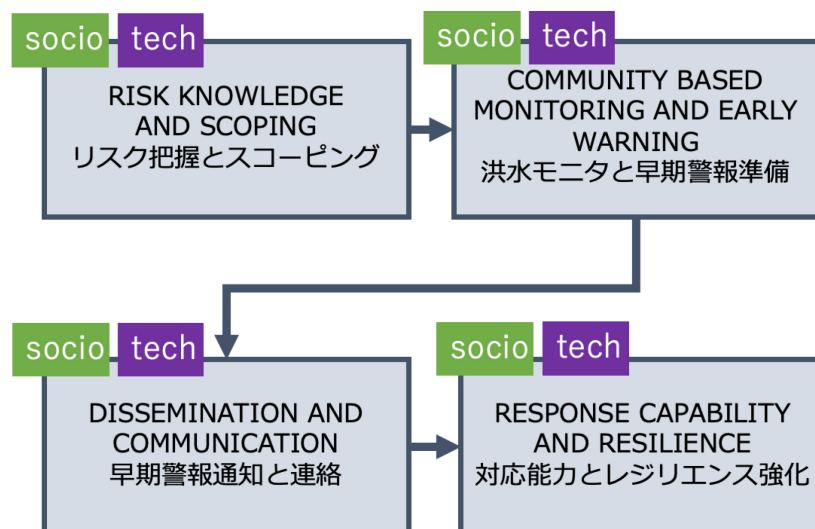


図 2-1. 人間中心による早期警報システムにおける4つのプロセス
(参考文献 [28]をもとに著者にて作成)

まず、CBFEWS の構築における上位レベルの戦略である要求を示す。CBFEWS の特性を文献に基づき要求図として整理した結果を図 2-2 に示す。ここには、「人間中心」であること、「低コスト」であること、「リアルタイム性」をもつこと、「警報の複数チャンネル化」が可能なことの4つが挙げられる。「人間中心」については、前述の通り開発途上地域においてはファーストマイル(EWS 開発の初期からコミュニティを巻き込む)ことが重要視されることに基づき、システムのオーナーシップを技術や政府に委ねるのではなく、コミュニティが担うことに持続可能な早期警報の鍵があると考えられる。「低コスト」については、途上地域であることから当然ながら低コストでなければ導入が難しい。それに加え、持続的な維持やアップグレードを考えれば、同様に低コストで実現できることが望ましい。ICIMOD による CBFEWS [2]の成功例では、対象地域におけるセットアップで USD1,000～USD3,800 であったとの報告がある。また、コミュニティでの維持を考えれば、低コストと同様に取り扱いやすさも重要なファクターとなる。「リアルタイム性」については、情報を即時的に Caretaker まで届け、洪水予知の判断のためにニア・リアルタイムなデータへアクセスが可能なことが求められる。ICIMOD による CBFEWS [2]の成功例では、5分おきに河川の水位情報がアップデートされる。「警報の複数チャンネル化」について言えば、音声通信やテキスト、インターネットベースのグループメッセージに加え、地域に設置されるサイレン・アラームなどを組み合わせることで、情報がさまざまな方式で下流の対象者へ届くように設計することで、早期警報の通知成功率を向上することが求められる。

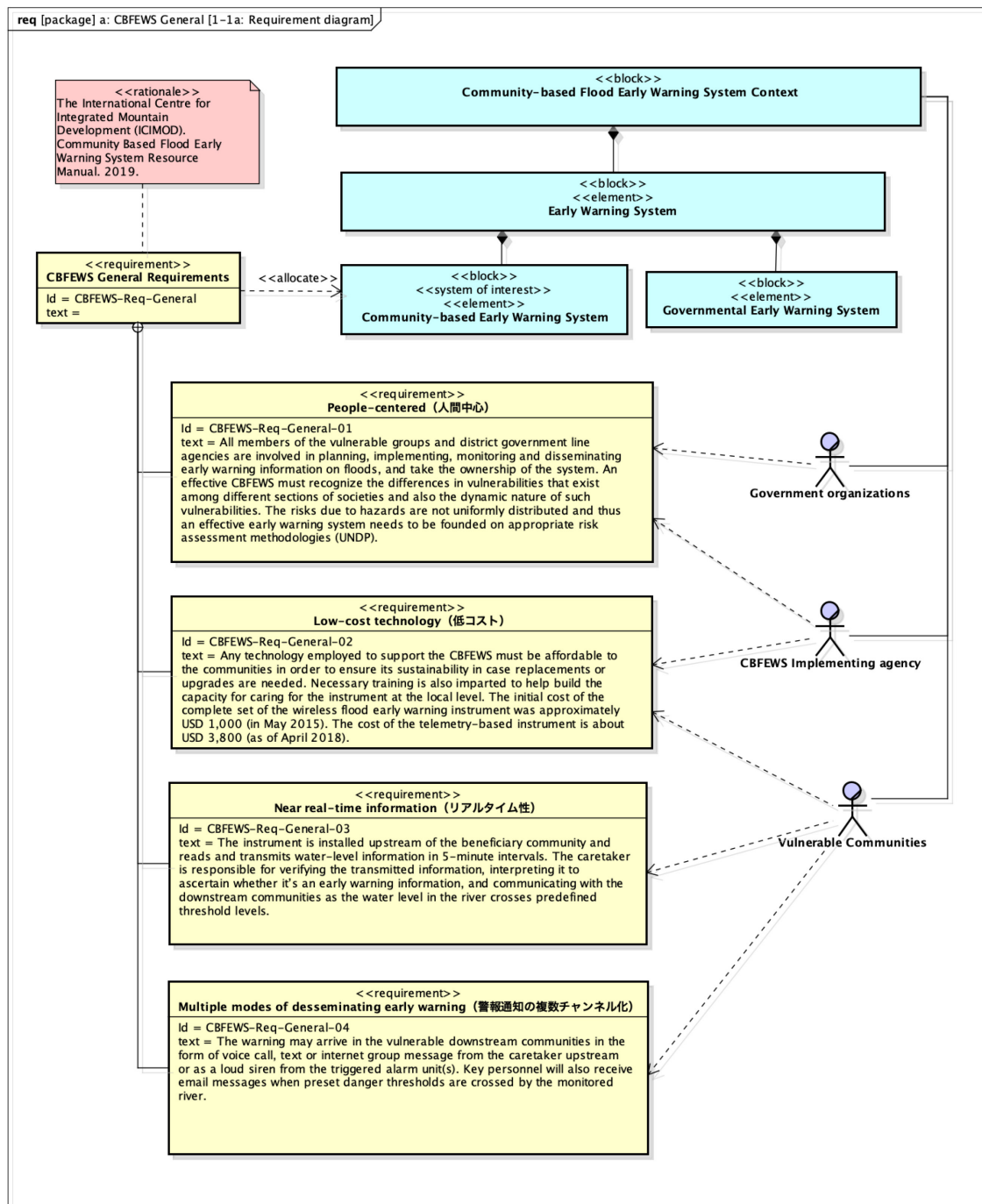


図 2- 2. CBFEWS における上位戦略におけるニーズ (req: 要求図)

次に、CBFEWS のスコープであり、また CBFEWS の上位レベルの戦略を実現するための図 2-1 に示すプロセスについて示す。ここでは国際総合山岳開発センター (ICIMOD: The International Centre for Integrated Mountain Development) による CBFEWS [2] を中心としながら、一般的な CBFEWS の特性について示す。まず、「リスク把握とスコーピング」エレメントにおいては、洪水に関して収集されたデータや解析結果、またそれに基づくハザードレベル、コミュニティごとの脆弱性、対処能力に基づきリスクレベルが算出される。ハザードレベルは対象地域における家屋や道、寺院などの社会的な建築物の配置とハザードエリアに関する情報をフィールドサーベイや衛星画像を用いたデータ解析により特定する。コミュニティごとの脆弱性評価としては、インフラの整備状況や土地の使用方法 (農地、都市、森林など)、また対象地域の人口とその構成に基づき判定される。対処能力の評価については、資産や経済的な豊かさ、対象地域に住む人々の洪水発生時の対処能力 (知識、洪水時の経験、能動的な洪水対処に向けた意識など)、社会的な人々のつながり度合い (家族間のつながり、人間中心な統治レベル、社会的ネットワークの構築度) をもとに行われる。これらは基本的に CBFEWS の導入時に実施される活動であり、この結果に基づき対象地域を選定、またどういった CBFEWS 構築戦略を取るべきかの議論がなされる。「洪水モニタと早期警報準備」エレメントは実際に洪水発生状況をモニタし、早期警報を行うために予測するシステムを構築するプロセスである。前述の CBFEWS のニーズの通り、CBFEWS は低コストでリアルタイムな情報取得により十分なリードタイムのもと洪水発生時に早期警報の必要性を判断することが求められる。図 2-3 に ICIMOD による情報伝達網の例を示す。このように、河川のモニタを行うための装置や集められたデータを管理するためのサーバーシステム、ネットワークシステムなどを構築し、こういった情報は Caretaker と呼ばれるようなモニタ役となる人物がトレーニングのもと、監視を継続することとなる。「早期警報通知と連絡」エレメントでは、河川のモニタ結果より検知した洪水の予兆に対して、情報を検証し、洪水被害を受け得る河川下流の地域に対して警報を発出するプロセスである。Caretaker に加え、Local Disaster Management Authorities の洪水予想のクロスチェックの元、下流の情報連絡役やメディアに対して情報を発信し、洪水時の応答促進に介入する。図 2-4 に、同様に ICIMOD による洪水情報の例を示す。警報レベルは Level1/2/3 に区分され、それぞれ、続報を待つ、対比に備えて準備する、直ちに逃げる、を非常に単純な信号に変換し、下流のコミュニティへ伝える仕組みが設計される。こういった情報網の構築には、CBFEWS を可動化するための団体や委員会を形成し、情報連絡網の強化を図る。「対応能力とレジリエンス強化」エレメントにおいては、対象である Vulnerable communities の回復力を高めるための対応能力の強化として、信頼できる警告の確立、災害への備え (Social Preparedness) と対応計画の策定、コミュニティの対応能力の評価と強化、国民の意識と教育の向上が挙げられる。洪水イベントの前後においても、継続的に CBFEWS を維持し、また強化を続けるようなループを作り出すことがレジリエンスの根幹であり、CBFEWS のプロセスとしても識別されている。

加えて、図 2-5 に CBFEWS の実例 [2] [23] [24] [25] からの分析により構築したステークホルダー一覧を示す。CBFEWS に関与するステークホルダーは 3 つに分けられ、Government

organizations, Vulnerable Communities, CBFEWS implementing agency である。Government organizations は主に As-is として存在していた早期警報を発出すべき団体であり、国レベルの政府や、地方レベルの政治団体が含まれる。Vulnerable Communities は実際の早期警報の対象となる情報脆弱な地域である。CBFEWS implementing agency は As-is としての早期警報に対して、CBFEWS を導入し、早期警報における能力を実装する組織を示す。この中にはローカルレベルでの団体と外部団体に分けられ、Local service としては Caretakers に加え、地域のメディア、警察などが挙げられる。External Supporter としても2種類に分けられ、実際の対象地域に対して介入を行う NGO/NGI/NPO 団体と、国外から技術提供により外交強化や人道支援を試みる Foreign government organizations に分けられるものとした。

これらの上位戦略におけるニーズを達成するプロセスである、早期警報システムにおける4つのキーエレメントの達成手段を見てもわかるように、CBFEWS は技術的側面と社会的側面を融合させたソシオテクニカルシステムであることがわかる。洪水被害の低減には複数のキーエレメントにおけるファクターを考慮しなければ、持続的な早期警報システムの維持が達成されないこともわかる。また、ステークホルダー分析のように、CBFEWS の取り巻く環境においては複数の当事者が存在しており、特段 CBFEWS implementing agency のうち、External supporter となる NGO/NGI/NPO による支援策が CBFEWS の持続可能な実現の鍵であることがわかる。これらの特性を踏まえた上で、CBFEWS のレジリエンスを強化することで、持続可能性を見出すための戦略を立てることが重要である。

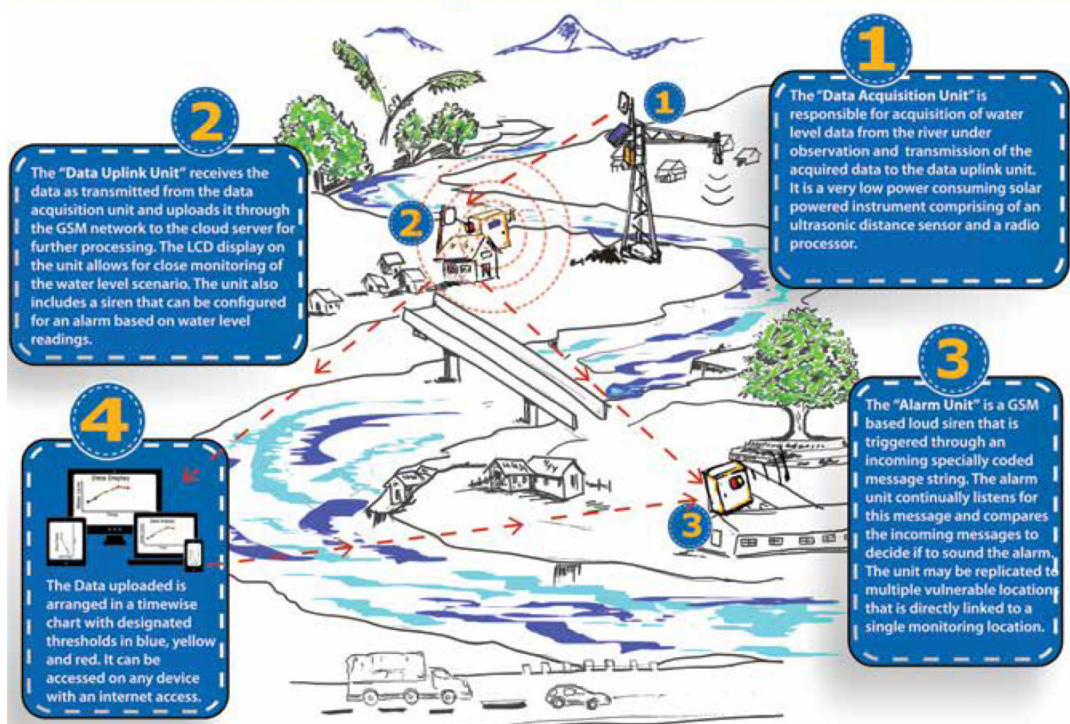


図 2-3. ICIMOD による CBFEWS における情報伝達フロー [2]

Warning Level	UPSTREAM		DOWNSTREAM	
	Color of Data indication	Siren signal	Interpretation	Action
Level 1	● (Yellow)	No siren	High probability of flood	Stay alert and on the standby
Level 2	● (Brown)	Beeping sound	Flood is inevitable in a few hours	Be prepared
Level 3	● (Red)	Continuous ringing	Flood is coming	Evacuate for safety

図 2- 4. ICIMOD での CBFEWS における洪水情報 [2]

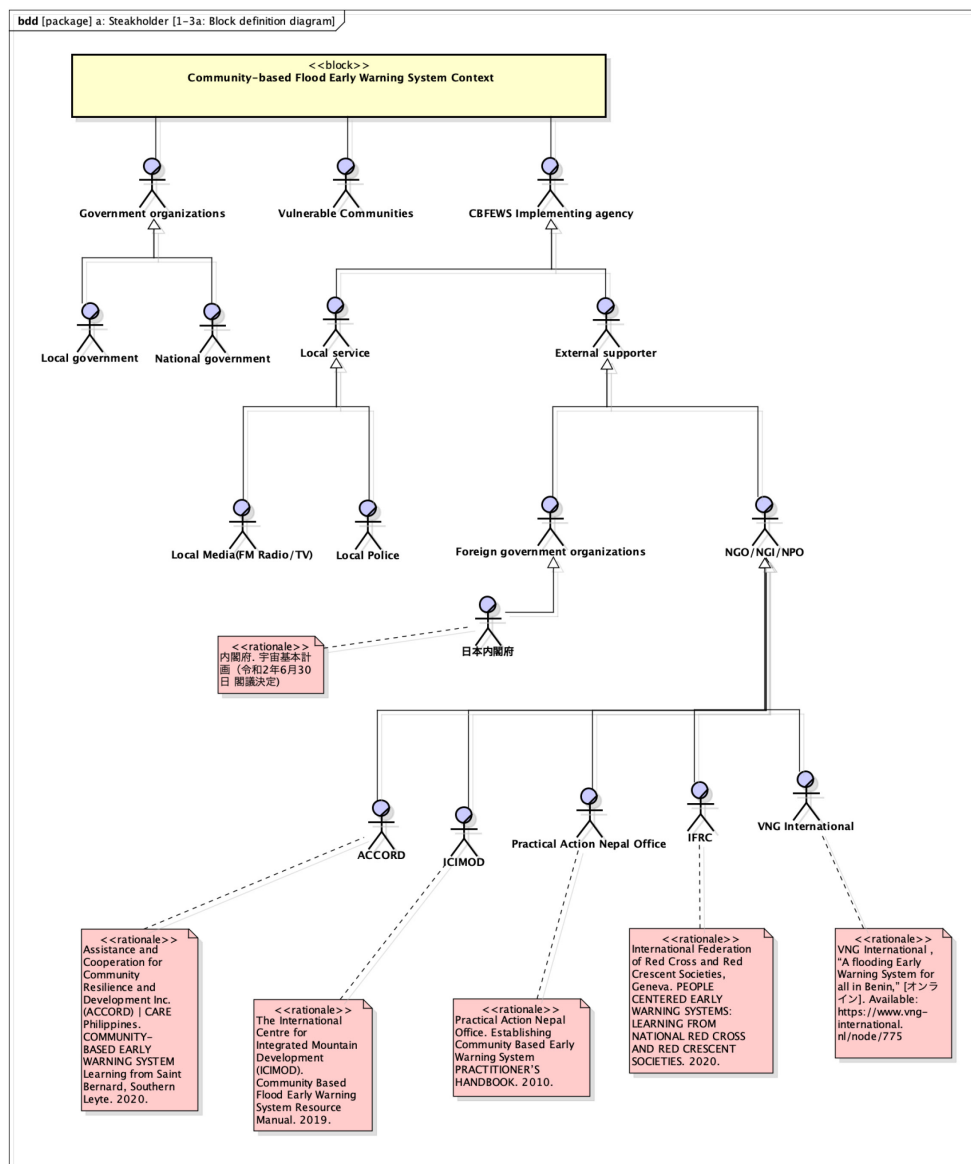


図 2- 5. CBFEWS を取り巻くステークホルダー (bdd: ブロック定義図)

2.2 持続可能性獲得に向けた課題分析

2.2.1 コミュニティベース早期警報のガイドラインの分析

ここまでの議論の上で、早期警報という手段を用いて、開発途上地域に対して適用的なアプローチによる洪水被害低減というレジリエンスの向上の必要性については論じた。一見すると早期警報を導入すれば、レジリエンス向上が図れるように見えるが、実際には課題がある。開発途上地域において早期警報を導入し、実際にその対象地域において洪水被害に対するレジリエンスを獲得するためにはどのような課題があり、克服すべき事項が内在しているかの構造を明らかにするための予備調査を実施した。

図 1- 10 としてマッピングを行ったように、既存の洪水早期警報システムにおいてすでにその運用結果と利益、またその課題について整理されたガイドラインが発出されている。また、研究論文においても、洪水早期警報の観点により、その効果がいかんにして災害被害低減に寄与するかの評価に成功している論文がいくつかある。これらの情報をもとに、一般論としての洪水早期警報のレジリエンス達成のための構造把握を試みた。

(1) コミュニティベース洪水警報の運用状況 — 成功要因側面

1.2.2 項において、コミュニティベース早期警報の運用シナリオについて定義し、またコミュニティベース早期警報の動作の仕組みについて議論を進めた。本項ではその運用による成功事例だけでなく、課題についても焦点を深めたい。

その成功例として状況が報告されているのがネパールにおいて ICIMOD が推進する CBFEWS [2] [30]である。図 2- 3、図 2- 4 として示したシステムを用いて、ネパール南部に位置する Ratu 流域に対して実装を行った結果として報告がなされている。本地域は、亜熱帯モンスーン気候であり、年間総降水量の 82%以上は、4 ヶ月間(6 月～9 月)に発生する。Ratu は雨水による季節河川であり、冬には干上がり、夏には派手になるといった特徴を持つ。Bajracharya ら [30]によれば、研究の目的は、厳密な定量的インパクト評価ではなく、変化を定性的に評価することとされていたが、他研究とは異なり、その CBFEWS の導入前後(介入前後)のフィールドデータの取得により、介入の特性を捉えることに成功している。介入前後(前:2015 年、後:2016 年)を比較した際に、モニタリングや早期警報のシステムがしっかりしていなかったが、CBFEWS 導入後は、管理人から携帯電話で洪水情報が発信され(2015 年 0%、2016 年 16.7%)、また CBFEWS ネットワークメンバーを通じて(2015 年 0%、2016 年 37.8%)、体系だったチャンネルで発信されるようになった。その結果、CBFEWS の設置により、洪水の事前情報を受け取る世帯の割合は、1 年間で 5%から 54.44%に増加した。また、対応能力とレジリエンス向上のために実施されたコミュニティの能力を構築活動においても、Ratu 川では、脆弱なコミュニティに応急手当(FA)、照明、捜索・救助(LSAR)、早期警報システム(EWS)の 3 つのタスクフォースが形成され、その結果として洪水への備えをしていない世帯

の割合は、74%から45%に減少した。さらに、洪水時に家族とともに安全な場所に避難した世帯の割合は、42%から56%に増加した。

アフリカ・ニジェール共和国の Sirba 川流域を対象とした研究 [20]では、対象地域である貧しい開発途上国の遠隔地の農村部で、既存のツール、経験、知識を強化することによって、文献に記載されている重要なポイントや指標に対応した包括的なコミュニティおよび影響に基づく EWS (CIBEWS)を設定することに成功している。ニジェールは、気候は半乾燥で、長い乾季と6月から9月の3、4ヶ月に集中する雨季があり。年間降水量は400mmから700mmである。サヘル気候は、持続的な乾季と極端な降雨現象を伴う強い降雨変動によって特徴付けられる。したがって、Sirba 川の水文学は、ネパール事例の同様に、モンスーンの季節とその時空間的な変動によって決定される。本研究では、対象地域におけるリスクマップを作成し、水文観測所から特定の観測プロトコルに従って、目盛りを読み、水位が上昇したらそれを下流地域に報告する手法を構築することで、早期警報を構築する手法を示している。また、1時間ごとにリアルタイムで観測したデータと水文数値モデルを統合することで、28時間ほどの洪水警報リードタイムを確保することができただけでなく、このような最先端の水文学・水理学の科学的成果と、地域の意思決定スキームに統合することによって、強靱なコミュニティベース早期警報の実現に成功したとの例が示されている。本結果についての介入前後のデータは存在しないものの、先進国のそれとは異なり、コミュニティと国による早期警報の連携動作を適切に実現することによる成功事例として優位な結果をもたらしている。つまり、「利用可能なリスク情報、予測システム、局と危険にさらされている住民の対応能力との間のより良いマッチング」が CBFEWS において重要であることを実証している。Cools ら [31]の研究では、成功する CBFEWS においては、先進国、途上国それぞれの技術レベルや予算によらず、「EWS の設計に地域社会や当局を参加させることによって、早期警報プロセス全体の有効性を向上させ、その結果、警報に対するより高い効果が得られる」ことを主張していることに合致する内容となっている。

(2) コミュニティベース洪水警報の運用状況 — 課題要因側面

前述の成功事例に対し、Bajracharya ら [30]によれば、一方で、地域レベルで持続可能な CBFEWS のための方法を理解し設計するためには、詳細な調査が必要であるとし、財政的安定性、制度の整備と確立、技術の強化と革新、社会的持続可能性と包括性を考慮し、EWS の 4 つの要素(図 2- 1)すべてに統合される必要があることを主張している。また、図 1- 10 においても整理した、CBFEWS に関する各ガイドライン [2] [23] [24] [25]においても、コミュニティベース早期警報の課題が示されている。

技術的側面に関して言えば、機器の故障、誤報の可能性、通信や技術の品質維持、警報散布経路やデータの冗長性の確保、警報に明確さの欠如といった観点が挙げられる。フィリピン Saint Bernard の事例 [23]では、2010 年の調査結果に基づけば、当該地域において 33%のコミュニケーション装置について、既に機能していないとの報告が挙げられていた。本装置は洪水検知のためのゲージデータの送信や、SMS 送信のために使用されるものであったが、これによって EWS のキーエレメントである情報交換に不利益をもたらす状況が発生していた。

社会的側面について言えば、技術面に対してより多くの要因項目が挙げられている。不十分な地域ニーズの理解、ハザード種類に問わない早期警報アプローチ、ツールの使い勝手といった点では、CBFEWS の導入時におけるニーズ理解への不足がもたらす課題であろう。早期警報への信頼欠如、警報経路の冗長性への認識欠如、情報散布への社会構造による障壁、村の CBFEWS への理解、長期的な成果への軽視、CBFEWS へのエンゲージメントや Preparedness といった点では、地域住民の CBFEWS に対する理解不足が中心である課題である。こういった観点ではいかにして理解やエンゲージメントを高めるための活動を推し進められるかが肝であると考えられる。そのほかに定期的な効果検証・メンテナンスといった点では、CBFEWS の技術面であるハードウェアに対するメンテナンスの継続可能性に加えて、社会面としてのソフト面に対する定期的なメンテナンスとも言え、このような作業が持続可能性の維持につながるものといえると考えられる。

Mercy Corps and Practical Action によるコミュニティベース早期警報のガイドライン [32]でも述べられるように、技術的な持続可能性とは、コミュニティがシステムの技術的な要素を維持・更新する能力を指し、社会的(組織的)な持続可能性とは、地域社会がシステム構築後の所有者として訓練し、人的資源を見直し、更新を続けていくことが必要であることが述べられている。また、このような技術的側面、社会的側面はそれぞれ二つが EWS を維持する上で同様に重要であり、どちらかが欠けると、システムの有効性が低下する自転車の二輪のような関係としてどちらかが欠けても走れないことに例えられている。こういった観点から、持続性を考える上では、これらの統合的な評価が不可欠であり、CBFEWS はいわゆるソシオテクニカルシステムであることが見受けられる。その一方で、Bajracharya ら [30]の事例からも見られるように、CBFEWS の導入後の短期的な追跡に関する研究成果が見受けられているものの、多くの研究はその後の持続可能性に関する定量ないし、定性評価が実施できているものは稀である。また、CBFEWS に関する各種ガイドライン [2] [23] [24] [25]にからも見られるように、どのような施策が持続可能性に効果をもたらすかについて言及はされ

ているものの、その時系的な評価とともに施策について言及された研究は稀である。

ここまでで、コミュニティによって維持運用される洪水検知、警報散布手法についてのみ着目していたが、情報脆弱地域においても政府からの情報が届かないわけではないことにも留意が必要である。再び、Bajracharya ら [30]の研究を見ると、CBFEWS 導入前でも SMS やラジオを通して情報を受け取っている住民は幾分か存在していた。CBFEWS 導入後のデータでもこれらの手段による情報入手経路は増えていることから、CBFEWS の導入に伴い、社会的準備態度が増加した結果から、政府からの早期警報がより有効化されたとも考えられる。また、田平ら [33]はタイやミャンマーの貧困地域を対象として調査研究を実施したが、内務省郡事務所長が関係機関との協議を経て発出の決定を下し、電話で各区長・村区長へ伝え、そこから主に広域スピーカーを通して住民に周知する洪水早期警報をもつ場合にも、対象地域では1週間ほど前から呼びかけを行ったにもかかわらず、49%の住民しか情報を入手できていなかったとの傾向もあった。いずれにせよ、政府の情報をういて洪水被害低減の行動を起こすことができる場合もあることから、CBFEWS の効果を測定しようと試みる場合にも、政府によってなされる効果を見無視することはできない。むしろ、コミュニティの洪水早期警報と政府の洪水早期警報がうまく相互作用することによって達成されるパフォーマンスがあると言える。

直接的に当該地域の課題を生んでいるわけではないが、開発途上地域以外の国が援助を進めたいと考えながらも、適切な国々とのマッチングが完結されていない点についても課題と言えるであろう。例として、我が国日本の国策 [34]を挙げてみれば、準天頂衛星などにより大規模災害によって地上通信手段が途絶した場合でも、災害情報を準天頂衛星経由で配信する「災害・危機管理通報サービス」や、避難所の被災者情報等を準天頂衛星経由で収集する「衛星安否確認サービス」を着実に整備・運用するとともに、防災・災害対応機関等における活用を進める政策を掲げながらも、当該地域への早期警報システムへの統合のためにどういったアプローチをもって進めれば良いかの考察は非常に難しい問題である。こういった課題に対して、ハッカソンの手法によりアイデアを募る方式 [35] が公的機関を中心に進められ、一部成功を成しているものの、一筋縄ではいかない様子が見受けられる。

2.2.2 キーインフォーマントインタビューによる分析

文献調査からは洪水早期警報がいかんにしてそれぞれの地域のレジリエンス向上に関与しているかの構造を把握でき、どのような施策が持続可能性に効果をもたらすかについて言及はされているものの、その時系的な評価とともに施策策定を行うことの難しさを抽出した。一方で、実際の運用の中で重視される観点についてはガイドラインのような文字情報だけでは勘所を抑えることは難しい。そこで、本項ではコミュニティ洪水早期警報の運用や開発に実際に携わるステークホルダーをキーインフォーマント(Key Informant)として選定し、課題把握を行った。

(1) 目的

コミュニティベース早期警報の長期的な持続可能性を実現するための重要因子を抽出すること。

(2) 方法論

コミュニティベース洪水早期警報の開発・運用に関わる研究者・政府関係者・運用機関に対して、持続性を向上するための成功要因・失敗要因に係る質問により、質的調査を実施した。

(3) 手法

キーインフォーマントに対する構造化インタビューを実施する。本インタビューはオンラインにて実施し、結果をテキストデータとして記録した。その後、結果をインタビュー結果サマリー表に記入し、得られた内容に齟齬がないかを対象者に確認し、記録として保管した。

構造化した質問は表 2- 1 に示す通りである。質問では、該当者がキーインフォーマントとして適切かを確認した上で、持続可能性を実現するための成功要因・失敗要因、また、持続可能性を測定に必要な事項について質問し、持続可能性に関与する因子の抽出を鑑みて設定した。また、インタビュー時に使用した説明資料は Appendix A に示す。後述の第 3 章にて調査を行った洪水早期警報システムにおけるパフォーマンスモデル(図 3- 2)を活用しながら、コミュニティベース早期警報の持続可能性に関する要因抽出のファシリテーションを実施した。

なお、本インタビューは慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 倫理審査委員会において、実施の適否について、倫理的な観点から審査を受け、承認を得た。(承認番号: SDM-2022-E050)

表 2- 1. 構造化インタビューにおける質問事項

No	日本語	英語
Q1	所属機関におけるモチベーション、バックグラウンド、コミュニティベース早期警報に関する従事年数	What is your/ your institute’s motivation to help developing countries suffering disaster? How long are you in the work for community-based early warning system?
Q2	早期警報の性能評価について重要と考える因子は？	What do you think is the important factor of EWS performance?
Q3	EWS の持続性を阻害する因子(失敗要因)は何と考えるか？(社会的, 技術的)	What do you think is the factor causing the failure of EWS sustainability (socio or tech)?
Q4	EWS の持続性を向上するためにどんな介入戦略(成功要因)が有効と考えるか？	Q4: What intervention strategy do you think is effective for obtaining more sustainability?
Q5	持続性を評価するための定量化モデルがあったとしたら, 何が考慮されるべきか？	Q5: What should be considered to measure sustainability in the quantitative evaluation model?

(4) 結果

インタビューは計三人に対して実施した。それぞれ、研究者・政府関係者・運用機関に所属するキーインフォーマントであり、異なる視点からの意見抽出を効率良く実施することができた。いずれもインタビューでは、2 時間前後を要した。インタビュー#1, #2, #3 からの回答を表 2- 2, 表 2- 3, 表 2- 4 にそれぞれ示す。

インタビューはいずれもオンラインで実施後、オフラインベースで回答表の確認を行った。それぞれの回答確認完了日および、使用言語は以下の通りである。(日付は同意書およびインタビュー結果シートのレビュー完了日である。)

- インタビュー#1(ネパール国際 NGO 所属 CBFEWS 開発運用担当): 2022.12.6, 英語
- インタビュー#2(ネパール早期警報システム研究者): 2022.12.21, 英語
- インタビュー#3(日本政府機関関係者): 2022.12.12, 日本語

表 2- 2. インタビュー#1 からの回答

No	回答
A1	<ul style="list-style-type: none"> • CBFEWS consultant working in Koshi Basin Initiative in ICIMOD providing technical support in implementation of CBFEWS to increase the resilience of the vulnerable communities to prepare against flood risks. ICIMOD as a regional intergovernmental organization for Hindi Kush Himalaya regions to enable sustainable and resilient mountain development. • Working on CBFEWS for 5~7 years
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Both the technical instrument and community engagement are important for reinforcing the CBFEWS. • Financial, Institutional, Technology and Social component is critical for sustaining the CBFEWS for long term. • Government and community ownership development is important. • The will of the government and community is necessary to maintain the CBFEWS. • Instrumentation is 20% of overall CBFEWS performance while other elements including risk knowledge and scoping, dissemination and communication, response capability and resilience and sustainability contribute to 80%. • To enforce social engagement or social preparedness, local partner discussion, training, a program planning takes an important role. • The interview is essential to identify how the instrument works and solve the problem (also monitoring the damage). The continuous monitoring of the CBFEWS is important. Therefore, the financial cost and institutional mechanism takes an important role in sustainability.
A3	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of continuous monitoring of community engagement and awareness causes failure of EWS sustainability. • Continuous inspection of the system. (e.g., no failure occurs in the installed community.) • Also, human verification of early warning detection is important to validate the warning message before dissemination since the system may have unintentional failure. (e.g., The cow cattle may interrupt the water level sensor and it results in a false positive alarm.)
A4	<ul style="list-style-type: none"> • Continuous dialogue and engagement with local government line agencies, vulnerable communities, and other relevant stakeholders. • Establish of sustainability funding model to sustain the CBFEWS system • Develop the institutional mechanism to operationalization of the CBFEWS system • Explore to improve precision of warnings • Continuous implementation of new technology based on the demand from the community or government.
A5	<ul style="list-style-type: none"> • CBFEWS financial cost need to be met annually to ensure the system's long term sustainability • Local participation and willingness to contribute of the community and the government • Accuracy of early warning • Capability and resilience of the communities • Good linkages between upstream and downstream communities

表 2- 3. インタビュー#2 からの回答

No	回答
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Researcher from Nepal, focusing on GNSS tech application such as mapping, GIS, transportation design, and QZSS-based EWS. • Mainly focusing on the region in the Asian countries such as Malaysia, Indonesia, Philippines, Nepal. • In charge of organizing the rapid prototyping events using GNSS(QZSS) technology. • Working on EWS for more than 10 years.
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor data information including the local flood status is important. • Cost needs to be less. • The system should be simple and easy to handle. • False or true alarm ratio should be considered.
A3	<ul style="list-style-type: none"> • During disaster, EWS sometimes does not work because of power failure resulting in no internet situation. The system is not working because it is destroyed. • Ealy warning message lead time can be very short when the outage occurs resulting in hazardous flood situation in communities.
A4	<ul style="list-style-type: none"> • Additional EWS must work independently even in case that local communication network does not work. QZSS-based EWS like method should be independent with the existing community-based early warning system. • It might be difficult to say the system works for long time, regardless the continuous maintenance is conducted by supporters.
A5	<ul style="list-style-type: none"> • Characteristic of “flash flood(鉄砲水)”, not only “just flood”, should be considered. • QZSS might offer additional data path (= early warning message dissemination) but need to be careful on other potion as well such as sensing flood (= early warning detection). • Lead time is important on flash flood context. But need to check how long lead time is required on the target community to show the effectiveness of the system. • Developing KPI (Key Performance Indicator) is important to explain the effectiveness of additional system if we propose to build the dissimilar data path to the existing system.

表 2- 4. インタビュー#3 からの回答

No	回答
A1	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本政府関係, 宇宙戦略全般(主にタイでの早期警報システム構築)を担当 ● QZSS を用いたコンソーシアムや実証実験を担当 ● タイ国内の実証実験, 人材育成・能力構築から始め, 森林火災への対策としての早期警報システム構築を担当 ● EWS に関する業務経験は約10年間
A2	<ul style="list-style-type: none"> ● コミュニティ内での二次災害への視点が重要であり, 避難ルートとしてどこに避難すべきかが明確になっていること, または通知できることで早期警報の効果が向上する. そのため, 状況によって違う洪水場面に, いかに対応できるかを把握することが大事. (逃げるべきか, とどまるべきか, 等.)
A3	<ul style="list-style-type: none"> ● コミュニティ内で早期警報を受け取ったあと, どう動けばいいか(どう対処したらいいか)がわからないから, 早期警報そのものの効果が薄れてしまう. ● その対策として, コミュニティごとにオーダーメイドのメッセージの生成, さらに個人レベルのオーダーメイドのメッセージの生成により, その個人に何をすべきかを伝えられることがより強固な早期警報を達成するための理想である.
A4	<ul style="list-style-type: none"> ● コミュニティの声を聴くこと. 訓練しているから災害にも対応できる, と話す現地の住民であっても, しっかり会話をすると, そのコミュニティに足りていないものが滲み出る.
A5	<ul style="list-style-type: none"> ● それぞれのコミュニティのニーズにマッチした EWS が実装されていることの評価が反映されているべき.

(5) 考察

インタビューに応じていただいた3者はいずれも異なる視点を持っており、効果的に広い視点での意見抽出が実施できた。

インタビュー#1 は、ネパール等においてすでに運用が進められているコミュニティベース洪水早期警報システムにおいて、技術・社会両方の側面から開発に携わる者であった。最も印象的であった回答としては、総合的に俯瞰した上で、コミュニティベース洪水早期警報の駆動への重要度としては、技術面が2割、社会面が8割というほど社会面に依存したシステムの開発であるということが見受けられた。2.1 項でも述べたような Care Taker やその地域におけるコミュニティの Preparedness ないし、Engagement といった面での強化によって、技術面がうまくは足りない場合においても同等のリードタイムを維持しながら下流地域に対して警報を発出できるように訓練していると言った発言もあり、コミュニティベース洪水早期警報を強靱化しているのは技術の下で構える人々であるということがよくわかった。インタビュー#2 は大学研究者として、位置空間情報をベースとして早期警報などへの技術適用を目指すものであった。ネパール出身ということもあり、ネパールの実情を交えて、技術面の構築において考慮すべき重点事項として、システムは可能な限りシンプルでありかつ低コストであることが重要との発言があった。また、停電などのリスクもあるため、一つの事象によって全ての機能を不全としないためにも、独立した異なるシステムを持つことによって、いかなる災害事象時にも早期警報を通知することを成功させられるものであるとの見解が印象的であった。一方、インタビュー#3 は、実証実験を進める中で、より対話を重視し、対話から得られた気づきとして、コミュニティ内で早期警報を受け取ったあと、どう動けばいいか(どう対処したらいいか)を知っている人数が増えるほど、システムの価値や効果が高まることに重点的に発言をされていた。具体的なアイデアとして位置情報をもとに、それぞれの個人がどのように行動するべきかをより明確に判断し、災害に対していかにうまく振る舞うかを知ることを支援するようなシステムによって、被害低減を目指すことができるのではないかという意見を受けた。

総じて、コミュニティベース洪水早期警報という技術・社会の両側面が融合することによって達成されるシステムであるがゆえに、やはり技術・社会の量面をバランス良く考慮の上設計を行うことが、コミュニティベース洪水早期警報の成功に不可欠である。しかしながら、1.2.2 項でも述べたように、ファーストマイル(EWS 開発の初期からコミュニティを巻き込む)によるアプローチを取るコミュニティベース洪水早期警報であるがゆえに、技術が必ずしもうまくいかないことを想定しながらいかにして人を支援できるかといった着眼点のもと開発・運用がなされるべきであり、こういった観点からも最後は人の応答をいかに支援できるか、といった観点で社会面を重視した運用方針を策定することが求められることを明確にした。

2.2.3 課題の整理

2.2.1 項, 2.2.2 項のそれぞれから, ガイドラインおよびインタビューの結果として抽出したコミュニティベース早期警報における課題のうち, 持続可能性の獲得に向けて課題となる事項を表 2-5 にて整理した. ここでは, 3つのカテゴリに課題を分類した. 1つ目の技術的側面の中でも, 特に機器の故障や情報散布経路の冗長化, 通信や技術の品質の維持といった因子については, 長い目で早期警報システムを見た際に, いずれかは発生する課題である. 時間的なファクターを考慮した際には, 必ず故障や品質の維持といった課題は持続可能性に直結するため, 留意が必要である. 社会的な側面については, かなり幅が広い. 一方で, 持続可能性という視点に立てば, CBFEWS へのエンゲージメントや Preparedness, 定期的な効果検証といった観点は非常に持続可能性に直結すると考えられる. このような視点を常に持ち, 継続的にモニターしてはじめて, 持続可能性への重視, 長期的な洪水早期警報の維持につながると考えられる. また, CBFEWS の開発をターゲットとしながらも, 政府から得られる洪水警報情報をうまくコミュニティへ流すための社会的構造の整備といった観点も, 洪水早期警報によって被害を低減するという上位目的を考える上では重要であることを確認した. もう1つの側面として挙げたのは外交支援の面である. 日本国においても途上国に対して支援を行うことや, ICIMOD でも開発した EWS をアフリカに技術移転するなど, 外部支援を行いたいモチベーションは存在する. 一方で, どのようにそれらの技術を他国にマッチングさせるかといった評価は難題であり, これらの支援についても一つの課題である.

表 2- 5. コミュニティベース早期警報の持続可能性に関する課題 (req: 要求テーブル)

ID	分類	持続可能性に向けた課題
CBFEWS-Req-Challenges-01	技術的側面	—
CBFEWS-Req-Challenges-01-01	機器の故障	機器の故障を防がなければならない。
CBFEWS-Req-Challenges-01-02	誤報の可能性	警報の誤報を防ぐために、ケアテイクヤーや上流の連絡人員による検証が必要である。
CBFEWS-Req-Challenges-01-03	通信や技術の品質維持	通信や技術の低品質さは改善されなければならない。
CBFEWS-Req-Challenges-01-04	警報散布経路やデータの冗長性	警報散布経路やデータの冗長性の不足により、情報信頼性確保のための追加検証の欠如や故障率の上昇が発生してしまう。
CBFEWS-Req-Challenges-01-05	警報の明確さの欠如	不明確な警報が発出されることは防がなければならない。
CBFEWS-Req-Challenges-01-06	災害発生時の共通故障	災害事象によって電力やインターネットが同時に喪失されてしまうことにより、警報が機能しなくなることはリスク低減されるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02	社会的側面	—
CBFEWS-Req-Challenges-02-01	警報経路の冗長性への認識欠如	警報経路の冗長確保がなされていること自体への認識がないことが警報効果を低減させてしまう。
CBFEWS-Req-Challenges-02-02	政府やメディア等の協力不足	メディアやプライベートセクター、政府や非政府による支援、洪水早期警報へのエンゲージメントを高めるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02-03	ツールの使い勝手	複雑でユーザーフレンドリではないツールや設備・装置は避けられるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02-04	情報散布への社会構造による障壁	社会的な構造が原因での情報散布への障壁は取り除かれるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02-05	不十分な地域ニーズ理解	脆弱地域のニーズを十分に理解していないシステムの実装は避けるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02-06	早期警報への信頼欠如	コミュニティが早期警報を信頼していない状態は避けるべきである。
CBFEWS-Req-Challenges-02-07	定期的な効果検証・メンテナンス(持続性維持)	定期的に EWS の機能性能を評価するためにドリルを行う必要がある。これを通して、知識を増やし、アウェアネスを強化することで、リスク低減を図ることができる。また、定期的な政府などからの技術的サポートの提供も重要であり、同様に経済的な支援も必要である。洪水リスクが大きい地域ではよりサポートが得られやすいという特徴があるが、基本的な装置の維持は必須である一方、非常に高額である。
CBFEWS-Req-Challenges-02-08	村の CBFEWS への理解	一般的に村の技術的な能力は低い傾向にある。例えば、多くのデバイス情報を直ちに理解し、把握できるような人員は限定的である。

ID	分類	持続可能性に向けた課題
CBFEWS-Req- Challenges-02-09	CBFEWS へのエンゲージメントや Preparedness	CBFEWS においてエンゲージメントや社会的準備態度(Social preparedness)の維持は重要である。 地域によるオーナーシップは守られ、維持されることで地域の EWS に対する参加を促す。EWS の設計から意地における全てのフェーズにおいて地域が巻き込まれることが重要である。 加えて、サーチ・アンド・レスキューや緊急時の対応計画なども常に強化を続けられるべきである。
CBFEWS-Req- Challenges-02-10	ハザード種類に問わない早期警報アプローチ	コミュニティベース警報において、複数のハザード種類に対して、共通して一貫した警報の方式をとることが効果的で持続可能な早期警報を実現する。
CBFEWS-Req- Challenges-02-11	長期的な成果への軽視	モニタリングし、実装された EWS に対する評価が十分になされていないことにより、長期的なアウトカムが得られない状態を生んでしまう。
CBFEWS-Req- Challenges-02-12	警報への反応方法の不理解	警報の通知を受けたとしても、どのように反応したら良いかを熟知していないが故に EWS としての性能が十分に効果をもたない
CBFEWS-Req- Challenges-03	外交支援	—
CBFEWS-Req- Challenges-03-01	外部支援による外交力の強化	多国間の協力枠組を積極的に活用し、裾野の広い国際宇宙協力を推進することにより、我が国のリーダーシップ及び外交力の一層の強化につなげる

2.3 現状と課題のまとめ

予備調査から得られた結果として、洪水早期警報に関する以下の周辺状況を確認した。図 2-6 にバリューグラフとして整理した結果を示す。

- 開発途上地域における洪水早期警報には、コミュニティベース早期警報が有効な手段であり、技術・組織の両側面の維持によりその有効性が保たれている。
- 開発途上地域における洪水早期警報では、対象地域のレジリエンスを獲得するための持続可能性には課題があり、適切な施策設定が求められる。
- 開発途上地域における洪水早期警報においても、コミュニティベース早期警報だけでなく、政府による洪水早期警報を有効活用できる構造となっているかの評価を除くべきではない。
- どのような施策が長期的に持続可能性に効果をもたらし、洪水早期警報に影響を与えるかは複数のアプローチがあるものの、それぞれの地域でどういった点にアプローチするべきかの判断は難しく、優劣をつけた施策決定には課題がある。
- 開発途上地域以外の地域が支援を行うにあっても、課題を捉えた適切な支援施策の立案やマッチング成功は至難の技である。

研究における目的は、様々な洪水早期警報を必要とする地域において、適切にその警報が効果をもたらす、洪水被害を低減させることである。しかしながら、事前分析に基づき、レジリエンス向上のためにとるべき手段は複数あり、その選定を行うための評価手法の構築が不十分であると考えた。また、社会・技術、政府、コミュニティが複雑に相互作用することで初めて実現されるコミュニティベース早期警報の効果測定は一筋縄ではいかないものであることを確認した。そこで、本研究においては、「どうしたら、コミュニティベース早期警報の洪水被害低減に向けたレジリエンス向上のための重点を具体的に特定できるか」を研究の方向性として定義することとした。

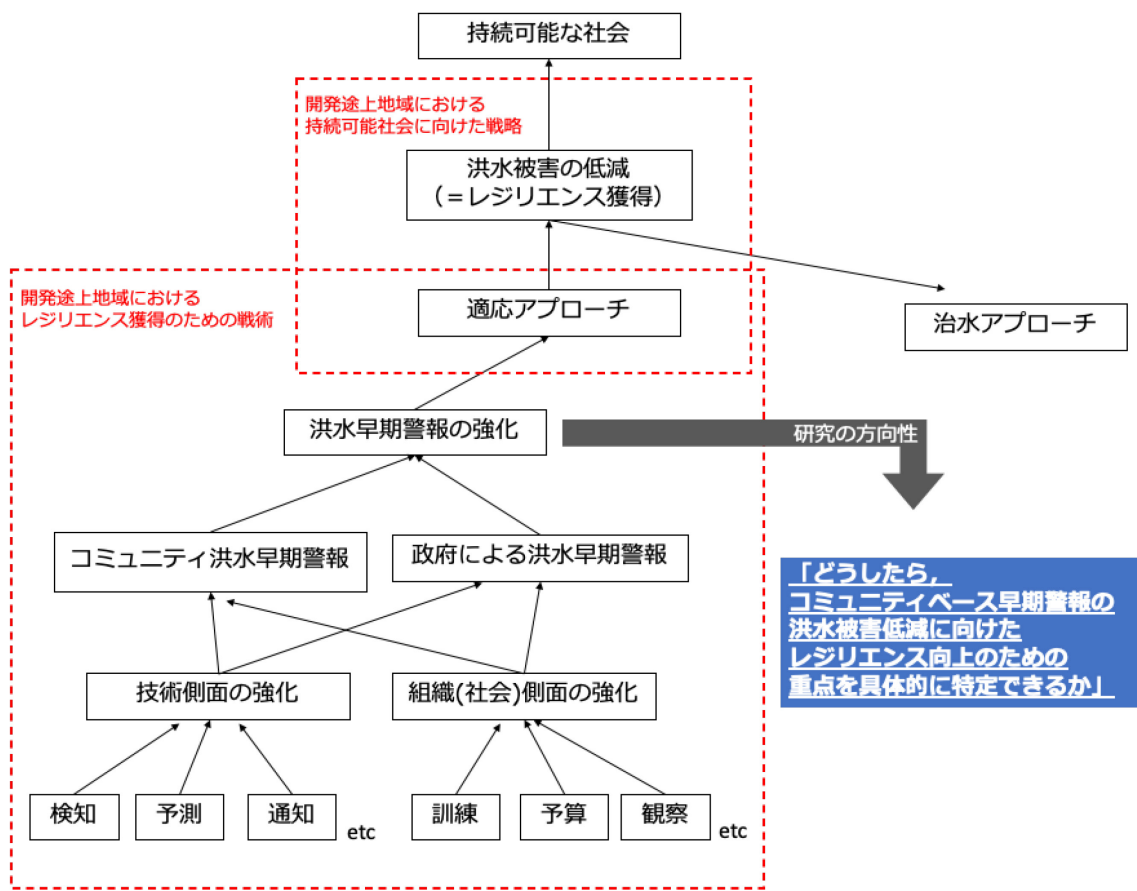


図 2- 6. 研究対象のバリューグラフと方向性設定

第3章 先行研究

本章では、コミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための重点の特定手法を確立するために、レジリエンスエンジニアリング、ソシオテクニカルシステムの評価の3つの観点から先行研究調査を分析し、手法構築に向けて、本研究で扱うべき範囲を特定する。

3.1 目的

コミュニティベース早期警報の洪水被害低減に向けたレジリエンス向上のための重点の特定を行うために、洪水早期警報の評価、レジリエンスエンジニアリング、ソシオテクニカルシステムの評価の3つの観点から先行研究調査を実施した。

洪水早期警報の評価としては、対象とするCBFEWSの特性把握に向け、既存の研究からCBFEWSをどのように評価手法が存在するかを明確にする。次に、レジリエンスの向上を目標とすることから、レジリエンスエンジニアリング手法としてその思想や方法論を洗い出す。最後に、技術・社会の両側面に対する評価が必要であるCBFEWSに対して、ソシオテクニカルシステム全般を見渡した際に、今回の研究目的であるレジリエンス向上のための重点を具体的に特定するためのアイデアを探索する。

3.2 調査

3.2.1 洪水早期警報の評価

洪水早期警報により実現されるレジリエンスやその長期にわたる持続可能性の評価にあたり、まず一般的な洪水早期警報によって達成される効果測定に関する関連研究を分析する。

Carsellら[36]は、洪水早期警報は、土地所有者や氾濫原の居住者、そして彼らの安全に責任を持つ人々に、閾値を超える前に洪水の脅威に対応するための時間を与えるものであり、この緩和時間の増加により、人命と財産が保護されることを洪水早期警報の価値を計測するための前提として設定した。また、緩和時間の増加のために取られた行動が4つのカテゴリーで利益をもたらすことを示した。第1には、直接的な有形利益として、浸水関連の被害を軽減することによって得られるものと定義した。例えば、一時的に資産を洪水対象領域から避難させることや、洪水発生までにガス栓や資源供給などの停止によって施設が洪水に耐えられる状態に設定変更することなどで、被害を低減することが挙げられる。第2に、直接的な無形便益があげられる。例えば、洪水発生によって生じる衛生環境の悪化や緊張状態に陥ることによる身体的、精神的な被害の低減を図ることができるものである。第3、第4には間接的な便益が挙げられており、これらは洪水の発生した地域

の被害によって、洪水の発生していない地域の生活に影響が波及し得ることに言及したものである。Carsell ら [36]は、この前提のうち、洪水の被害の計測可能な被害低減対象として第1の直接的な有形利益として、浸水軽減によるものであり、構造物やその他の財産の浸水による被害を軽減するものであることに着目し、定式化を行なった。

まず、 eff :洪水警報の効率は式(1)のように表され、 B_{IR} :早期警報導入による利益 (inundation-reduction benefit) は式(2)として表される。(2)(2)

$$eff = F_{rw} \cdot F_w \cdot F_c \quad (1)$$

$$E[B_{IR}] = (E[X_{without}] - E[X_{with}]) \cdot eff \quad (2)$$

ここで、 F_{rw} :警報を受けた市民の割合、 F_w :早期警報に応答する意思のある市民の割合、 F_c :早期警報に対して効果的に応答する手段を知っている(または援助する人がいる)割合、 $X_{without}$:早期警報がない場合の洪水被害、 X_{with} :早期警報がある場合の洪水被害である。 $E[\cdot]$ は期待値である。必要な構成要素をすべて備え、適切な運用と保守が行われる可能性が高いシステムは、 eff が 1.00 に近い効率を達成し、不完全で運用と保守が不十分なシステムは、効率がかなり低くなる。また、 $X_{without}$ や X_{with} は洪水強度($F_{intensity}$) (Carsellらの研究では、表 3-1 に示すように、洪水によって発生する浸水深さと表現)と洪水早期警報によって情報リードタイム(LD)の2次元ルックアップテーブルにより与えられる。この表は氾濫原管理と洪水被害の専門家 11 人に対するアンケート結果をもとに作成された。例えば、浸水深さ 1.22m に達するような洪水が発生した場合に、洪水到達までのリードタイムがない(洪水早期警報が存在しない)場合には、家財の 35%が損害を受けるのに対し、リードタイムが 6 時間与えられれば、家財の損害は 27%に抑えられるといった具合である。こういった考えのもと、 $X_{without}$ に対しては、リードタイムがない(洪水早期警報が存在しない)場合の損害割合、 X_{with} にはリードタイムがある場合の損害割合を定義し、式(1)、式(2)を用いれば、 B_{IR} :早期警報導入による利益を推定することができる。

このように Carsell の方法に基づけば、早期警報によって達成される技術的・社会的な性能や効率を考慮し早期警報によって達成される利益を算出することが可能である。しかしながら、本モデルに基づき早期警報システムによって得られる長期的なレジリエンスの評価に活用する場合、技術側面・社会側面を踏まえたモデル拡張が必要である。

表 3- 1. 洪水発生までのリードタイムと浸水深さによる資産への損害割合
(参考文献 [36]をもとに著者にて作成)

洪水強度としての 浸水深さ ($F_{intensity}$)	洪水到達までのリードタイム (LD)						
	0 hr	1 hr	6 hrs	12 hrs	24 hrs	36 hrs	48 hrs
-0.30 m	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
0.00 m	10 %	8 %	6 %	5 %	4 %	4 %	4 %
0.30 m	17 %	15 %	12 %	11 %	9 %	9 %	8 %
0.61 m	23 %	21 %	17 %	16 %	13 %	11 %	11 %
0.91 m	29 %	26 %	22 %	21 %	16 %	15 %	14 %
1.22 m	35 %	32 %	27 %	27 %	23 %	20 %	19 %
1.52 m	40 %	37 %	33 %	32 %	27 %	25 %	23 %
1.83 m	45 %	42 %	36 %	36 %	31 %	27 %	25 %
2.44 m	55 %	51 %	44 %	43 %	38 %	33 %	30 %
3.05 m	60 %	55 %	48 %	46 %	40 %	35 %	31 %
4.57 m	60 %	55 %	48 %	47 %	40 %	35 %	31 %
6.10 m	60 %	55 %	48 %	47 %	40 %	35 %	31 %

社会的側面について言えば, Aerts ら [37] や Lopez ら [38] によれば, 洪水の頻度や強度に基づき, 社会的リスク認識, 当局に対する記憶・信頼に関連する洪水経験の再来, あるいは社会と環境の相互作用といった人間の行動特性に強く紐付き, それらが早期警報の効果に影響することが述べられている. Lopez ら [38] は, このようなシステムにおける変数を Social Preparedness (E_t) と定義し, 次に示す式(3)(4)でモデル化し, Social Preparedness が洪水早期警報システムの効率に与える影響を評価した.

$$E_t = \begin{cases} E_{t-1} - \lambda E_{t-1} & \text{for } R_{QE} = 0 \\ E_{t-1} + \chi & \text{for } R_{QE} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{\tau} \quad (4)$$

ここで, λ : Social Preparedness 減衰レート, τ : Social Preparedness 半減期, χ : 洪水に対する Social Preparedness への影響マグニチュード, R_{QE} : 洪水事象の発生である. 図 3- 1 に式(3)(4)に基づくプロットの例を示す. 本モデルに基づけば, 洪水の経験が発生するたびに, Social Preparedness は増加するものの, 洪水の経験がなく, 長期間リスク認識が途絶えてしまえば, 時系的に Social Preparedness は減衰を続け, 最終的には洪水被害の低減において社会的・組織的サブシステムは何の効果も与えないこととなる.

Lopez ら [38] の研究では, Social Preparedness 以外にも早期警報における予測精度や予測の正確さもモデルの中で考慮に加えている. 早期警報が False negative (洪水検知に失敗し, 通知しない) であれば早期警報の失敗となり, 被害は低減できない. そのため, True positive (洪水検知に

成功し、通知を行う)であれば、災害の被害低減に効果のあるシステム動作が達成される。False positive(洪水発生を誤報してしまう)については、いわゆる「おおかみ少年」(cry wolf)効果としてその発生確率が与える社会システムへの影響についての研究もあり、澤田ら [39]は警報発生に至るための閾値を設定次第で、洪水早期警報の効率に影響が与えること明らかにした。一方で、予測精度や予測の正確さに対する社会的集団信頼の動態を考慮することは、洪水事象が頻繁に発生する社会よりも、洪水事象が頻繁に発生しない技術社会でより重要であることも示している。Lopezら [38]の研究においても同様に警報発令に必要な信頼度は警報効率にあまり影響を与えないことを述べており、今回対象とするような洪水の頻発するコミュニティベース早期警報の導入が求められる地域においては、警報閾値を低く設定することが望ましいと考えられ、またこれによって早期警報の持続性といった観点では感度の高い因子とはならないと考えられるため、本論文では対象外とする。

ここまでで主に社会面に関しての影響因子について議論したが、技術面としての評価も早期警報において重要な因子である。1.2.1 項の(4)早期警報システムや 2.2.1 項の(2)コミュニティベース洪水警報の運用状況において議論したように、先進国では早期警報システムは多重冗長化がなされており、故障率などはよほど議論の中心とはなり得ないが、コミュニティベース早期警報のような簡易な装置により構成されるシステムでは故障によりシステムの効果が損なわれたり、システム放棄に至ってしまう。土石流に対する早期警報システムを例とした Sätteleら [40]の提案では、重要なパフォーマンスと EWS 構成コンポーネントの信頼性を統合し、パフォーマンスベースによるシステムアシュアランス手法を構築した。この研究においても、本論文で対象とするコミュニティベース早期警報と同様な簡素なシステムを想定されており、感度の高いと考えられるコンポーネントの故障率をモデル化した良い例である。

ここまでの先行研究調査により識別した、洪水早期警報と洪水被害の低減を関連づける因子抽出の議論に基づき、直感的に早期警報の効果測定のためのシステムをとらえるために、因果分析を通じてパフォーマンスを示すパラメータ関係を図 3- 2 のように整理した。本モデルの構築における根拠を以下に整理する。

- 洪水発生地域におけるレジリエンス向上の達成度合いを、洪水被害の低減により得られた利益(Flood damage reduction benefit)の長期的な合計値の増加であると想定し、これを最終的な指標(Measurement of effectiveness)とした。(本値をレジリエンス向上の達成度合いとした理由については、3.3 項でも言及する。)
- 洪水早期警報の効率(efficiency of flood warning)は洪水早期警報の到達する人数(割合、カバレッジ)(public that receives a warning)、洪水に応答する意思のある人数(public that is willing to respond)、洪水にどう対応するべきかを知っている人数(public that knows how to respond effectively and is capable of responding)の積として表されることとした。(式(1)) (Carsellら [36])
- 洪水被害の低減により得られた利益の合計(Flood damage reduction benefit)は洪

水早期警報によるリードタイム (flood early warning lead time), 洪水早期警報の効率 (efficiency of flood warning), 洪水強度 (flood intensity) を用いて, 決定される損害割合から算出されることとした. (式(2)) (Carsell ら [36])

- 社会的準備態度 (social preparedness) は, 過去の洪水経験 (洪水強度 (flood intensity), 洪水頻度 (flood frequency)) によって決定され, 住民 (public) の意思に対して影響を与えるものとし, 洪水に応答する意思のある人数 (public that is willing to respond), 洪水にどう対応するべきかを知っている人数 (public that knows how to respond effectively and is capable of responding) に影響を及ぼすこととした. (Aerts ら [37], Lopez ら [38])
- 早期警報のパフォーマンスはシステムの信頼性 (故障率) により決定されるものであった (Sättele ら [40]) ように, 洪水早期警報の重要パフォーマンスパラメータである洪水早期警報によるリードタイム (flood early warning lead time) および水早期警報の到達する人数 (割合, カバレッジ) (public that receives a warning) に影響するものとして関連づけた.

図 3-2 のような因果分析をもとにすれば, スtockフローで表されるシステムダイナミクスモデル [41] に変換し, そのシステムの挙動を半定量的に時系列により予測することに活用できる [42]. (5.2 項にて詳細を述べる) 一方で, こういったパラメータ関係が明らかにされているにもかかわらず, コミュニティベース早期警報のような途上地域に特化したシステム分析に関する研究は稀である. それゆえに, 持続可能性やレジリエンス向上を目標とした CBF EWS の分析についても当然ながら, 探究の余地があると考えられる.

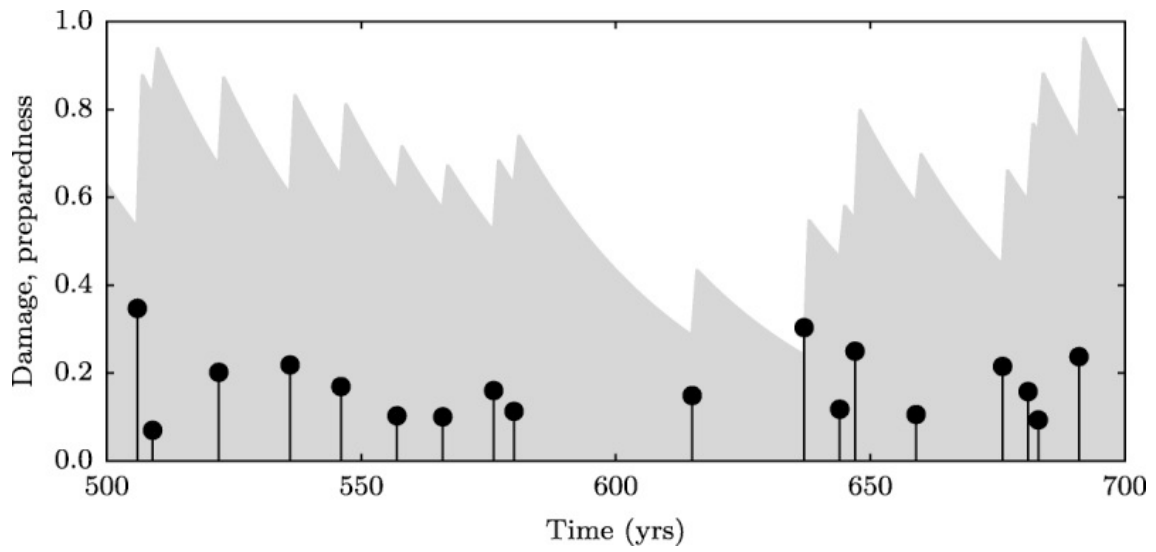


図 3- 1. 洪水被害発生に伴う Social Preparedness の動的変化 [38]

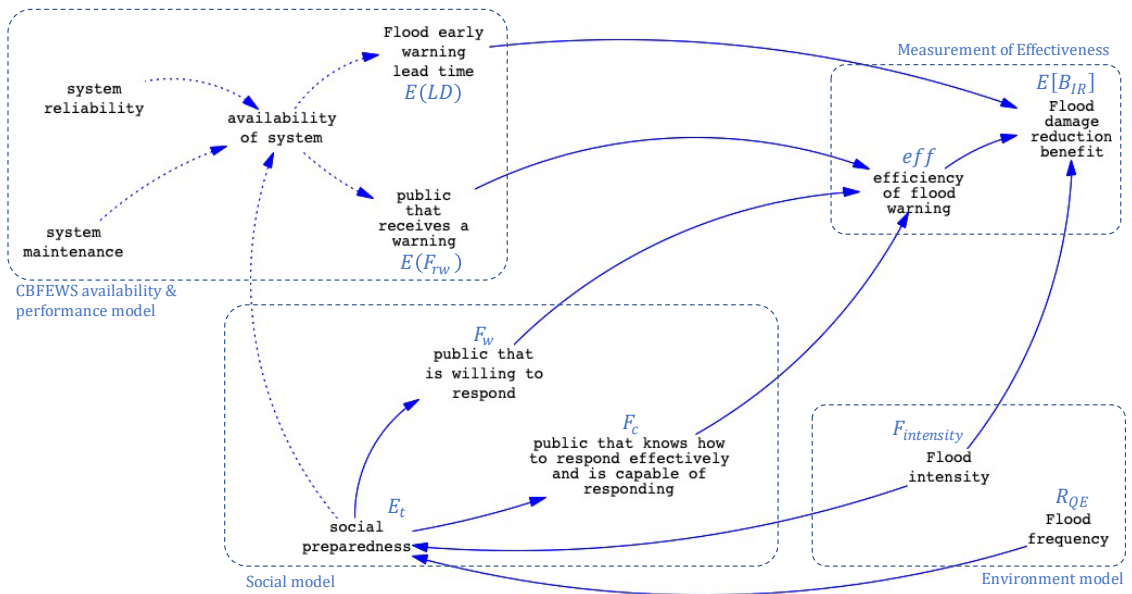


図 3- 2. 洪水早期警報システムの効果測定のためのパフォーマンスモデル

3.2.2 レジリエンスエンジニアリング

ここでは、本論文における主題としても挙げている、レジリエンスという用語について、対象とする開発途上地域への適用に向けた定義を明確にしたい。レジリエンス(日本語では、強靱性、復原力、回復力、弾性(しなやかさ)等)とは、「the ability of people or things to recover quickly after something unpleasant, such as shock, injury, etc.」(出典:Oxford Learner's Dictionaries)と記されているように、望ましくない状態からの復帰する能力であるとされる。人間組織や生態学などを含む様々な分野の観点からその考え方は発展し、防災や工学などシステムの分野においても、開発哲学として適用が進められている。一方で、レジリエンスという用語が多種多様な形で使用され続け、混乱が生じていることも指摘されている [43]。こういった点からも、レジリエンスという言葉の定義の上、議論を進める必要がある。ここでは、文献における定義をそれぞれ紹介し、コミュニティベース早期警報を対象とする本稿において目指すべきレジリエンス像を明確にしたい。

Woods [43]によれば、レジリエンスについて、次の4つの基本的な概念に整理している。

- (i) ト라우マからの回復と平衡への復帰 (= Rebound)
- (ii) 頑健性の代名詞 (= Robustness)
- (iii) 脆弱性の反対、あるいは優美な拡張性 (= graceful extensibility)
- (iv) 不測事態への対応能力を維持できるアーキテクチャ (= sustained adaptability)

「なぜ、あるコミュニティ、グループ、または個人は、トラウマとなる破壊的な出来事や繰り返されるストレス要因から、他の人々よりもうまく回復して以前の正常な機能を取り戻せるのか」という疑問から始まる(1)の Rebound に関しては、混乱や課題といった事象に対して、元の状態に復帰させられる能力のことを指す。この場合、焦点はリバウンドの期間そのものではなく、リバウンド期間以前にどのような能力と資源が存在していたかに着目される。摂動(外乱)を吸収する能力として語られる(2)の Robustness に関しては、レジリエンスという言葉としばしば混同されていると言われている。制御工学の分野でも用いられるように、ロバスト制御はリスクに敏感であり、モデルとして考慮された外乱に対して最悪の場合の性能を最適化することを言われるが、レジリエンスでの対象はむしろモデル化されていない外乱に対してであることが指摘されている。レジリエンスを脆さの対極とみなし、想定外に直面した際に適応能力をどのように拡張するか、という点に着目するのは(3)の Graceful extensibility である。似たような言葉として、コンピュータサイエンスの分野で用いられてきた Graceful degradation という概念が存在するが、検出された障害に対して、性能レベルの低下を許容しながらも、システム故障はシステム能力がある値を下回った時に発生するとし、その性能レベル低下の過程において1つ以上の故障や異常を許容するといった考え方 [44]である。これに対して、レジリエンスという文脈においては、高い graceful extensibility を持つシステムは、先のボトルネックを予測し、外乱を学習し、課題に適合するように応答を調整する readiness-to-response を持つ能力を持つとされる。さらに、将来の不測の事態に対応する能力を維持できるネットワーク・アーキテクチャーと称される(4)の Sustained adaptability では、持続的な適応性を生み出すように管理／

制御する能力について議論しており、このような能力を提供するためにはどういったアーキテクチャ原理を維持することが必要かを中心とするものとされている。このように、レジリエンスという言葉が用いられる文脈では、それぞれの議論の中心が何かを捉えなければ、誤った解釈を取り得ることに注意が必要である。

レジリエンスエンジニアリングという思想を発展させた Hollnagel [45] [46]によれば、対象システムにレジリエンス特性を持たせるためには以下の四つの主要な能力が決定的に重要であるという提案がなされている。

- (i) 対処できる (responding)
- (ii) 監視できる (monitoring)
- (iii) 予見できる (anticipating)
- (iv) 学習できる (Learning)

また、Hollnagel [45] [46]は「安全とは望ましくない事態が起こらないこと」といったように、従来型の静的概念や非定型で定義される安全を Safety-I と名付け、また「システムが大きな外乱などによって通常時の動作状態を維持できない場合、性能は低下させても動作 (operation) を継続できる」、「破局的な状態は回避できる」といった柔軟で回復力に優れた、つまりレジリエントな動作が可能なことを Safety-II と名付けた。この概念を整理したものを表 3- 2 に示す。つまり、安全投資を適切に実施することで、外乱発生時には当然正当なものとなることに加え、異常時には特性向上にも使われるという、いわば Graceful extensibility を明に考慮したものであると述べている。

Hollnagel ら [47]は別の文献において、確率論的視点からのアウトカム(システムから得られる応答パフォーマンス)の分類を行なっている。図 3- 3 にその概念を示す。Safety-I においては、システムが取り得るそのアウトカムについて、望ましくない状態と、それ以外(通常時、より良く実現できた時)に二分しており、日々の特性向上については述べられていない。一方で、Safety-II の考え方に基づけば、対象とするアウトカムは望ましくない状態、通常時、より良く実現できた時と全てのパフォーマンス状態が対象となる。このように、強靱なシステムを構築することを考えた際に、リスクだけでなく特性向上へのチャンスも同時に考慮に入れたシステムを構築することによって、その行為によって非安全な状態への対処能力も短期、長期にわたり確率論的に向上できるであろうといった考えである。

表 3- 2. Hollnagel による安全概念 [45] [46]

思想	外乱発生時	定常時
Safety-I	安全投資は 正当	安全投資は無駄なコスト
Safety-II		安全投資は日々の特性向上

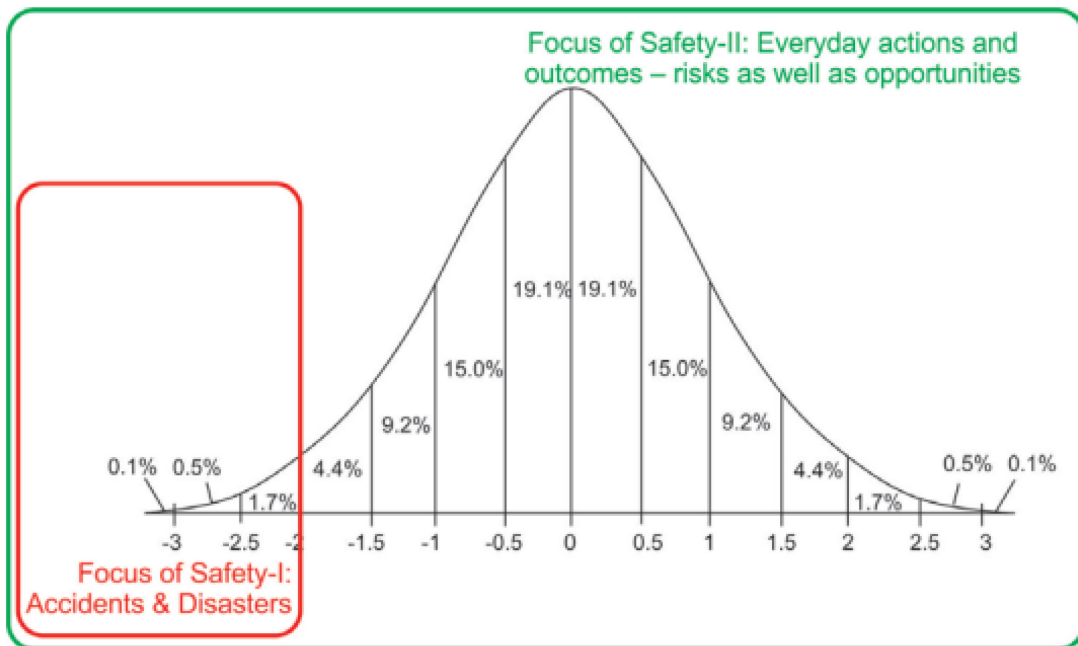


図 3- 3. Safety-I と Safety-II の対象とするイベント確率密度 [47]

Jackson ら [48]も同様に, Graceful extensibility に類する考え方の導出を行っている. 図 3- 4. Jackson らによるレジリエンスの状態遷移モデル [33]に示すように, レジリエンスは以下の7つの状態を多状態モデルとしてステートマシンにより接続し, それらが各イベントやトリガーに従い遷移し, 性能が上下することを表現している. これは, 単純なシステムのデグレードのみならず, ノミナルな運用状態からある条件下(意識の向上など)では性能が向上することもあり得ることを示唆している.

- (A) Nominal Operational State (通常運用状態)
- (B) Heightened Awareness Operational State (意識の高い状態での運用)
- (C) Non-Functional Disrupted State (非機能的な障害状態)
- (D) Partially Functional Disrupted State (一部の機能的な障害状態)
- (E) Damaged but functional (障害があるが, 機能は継続可能)
- (F) Agreed diminished State (許容された減退状態)
- (G) Decommissioned (廃止状態)

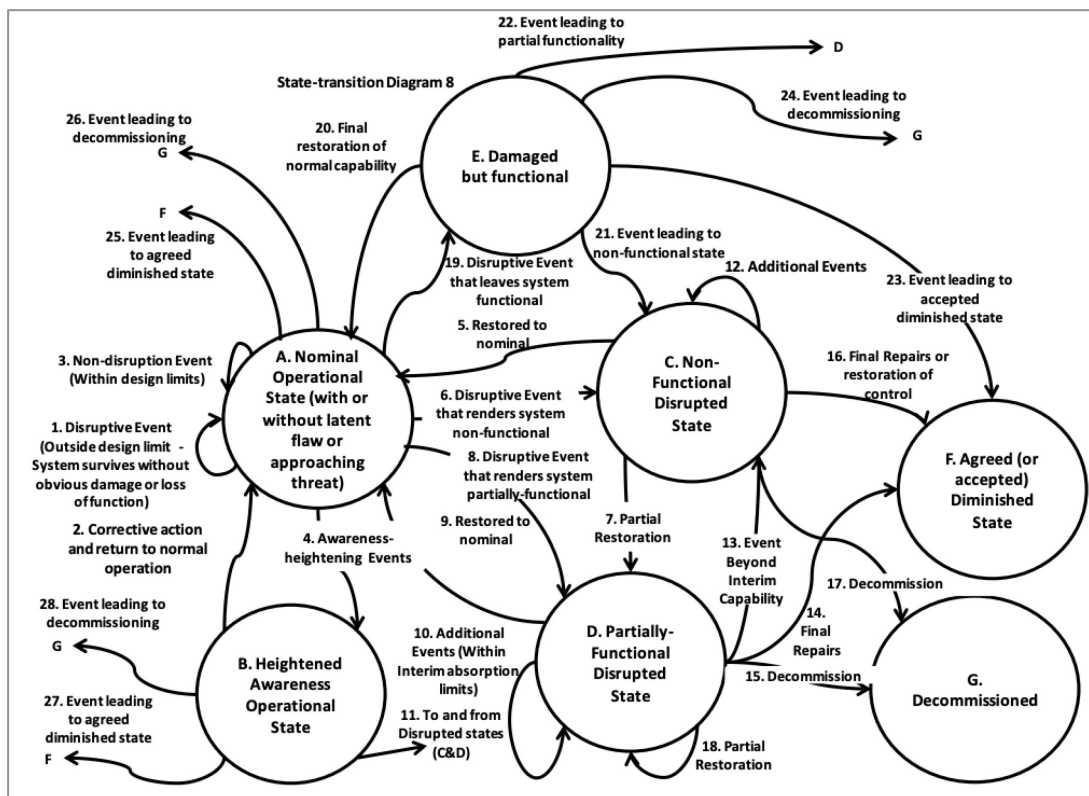


図 3- 4. Jackson らによるレジリエンスの状態遷移モデル [33]

これらのレジリエンスに関する先行研究に基づき、本論文が対象とするレジリエンスの定義を行いたい。図 3-2 にて構築した洪水早期警報のパフォーマンスモデルからも分かるように、洪水早期警報による被害低減効果は、システムの信頼性(または可用性:availability)や、社会的準備態度(Social preparedness)によって確率論的に達成可能性が時々刻々と変化し、またパフォーマンスを決定するための Social preparedness によって災害発生時に得られる早期警報の効果も変動を継続する。

レジリエンスエンジニアリングにおいて、システムのパフォーマンスの Rebound 能力や Robustness 能力の定量化を行った研究は非常に多い存在するが、Graceful extensibility 能力として上下するシステムパフォーマンスを総合的に定量化した文献は比較的少ない。レジリエンスとして、パフォーマンス変動の観点での研究として、畜産農家のレジリエンス設計の例として、Daniele ら [49]は、家畜農家を環境・経済・労働団体・社会・環境のパラメータからパフォーマンスが決定されるものとしてモデル化し、確率論的に目標とするパフォーマンスを達成するためには、どこにレバレッジポイントがあるかを算出するモデルを提案した。また、宇宙機のレジリエンス設計の例として、野本ら [50]は、宇宙機におけるアクチュエータとしてのスラストエンジンに対して、安全達成の観点における冗長系として複数の系統を投入することに対し、レジリエンスを考慮してミッション達成能力の向上にも活用しようと試み、定常時には冗長系の全てを使いながら運用し、異常時にもやはり安全かは可能とする構成を提案した。また、Sterbenz ら [51]は米国における携帯ネットワーク網について接続関係をモデル化の上、異常発生時に変動するパフォーマンスレベル間の推移に対して、どういったネットワーク構造が異常発生に対して変動が小さくできるかを表現した。

しかしながら、早期警報の分野において、特にコミュニティベース早期警報の分野では陽に取り扱った先行研究は見つけられていない。また、本研究で対象としているシステムは、先進国のそれと異なる、より技術、社会の両面のバランスによって達成されるソシオテクニカルシステムである。その観点で、技術・社会両面を考慮したレジリエンスの Gracefully extensibility を定量化し、複数のパフォーマンスレベルを推移する多状態な特性を考慮した上でシステム設計に流用した研究には新規性の余地があると考えらる。

3.2.3 ソシオテクニカルシステムの評価

ソシオテクニカルシステム(社会技術システム)とは、定義された目的を達成するために、人間が社会構造(組織)内のプロセスを通じ、ある技術を適用して作業を行うシステムのことを指す [52]. 早期警報の観点では、先進国のもの、開発途上地域のものにかかわらず、人間が社会組織のうちのプロセスを通じ、技術を適用して目的である警報を得るといった観点では、いずれもソシオテクニカルシステムと言える。しかしながら、前述のように、先進国で見られるような Kelman と Glantz の定義 [21]によるトップダウンまたはラストマイルの洪水早期警報アプローチ(早期警報において、その開発プロセスや運用プロセスの終盤に人やコミュニティを加える)ではなく、ファーストマイル(EWS 開発の初期からコミュニティを巻き込む)ことから、よりソシオテクニカルシステムとしての特性が強いと考える。こういった観点で、本章ではソシオテクニカルシステムの特性和その評価手法に関する先行研究について述べる。

Bostrom ら [53]の図 3- 5 に示すモデルに見られるように、ソシオテクニカルシステムでは、経済的パフォーマンスとある目的達成に向けた動作の満足度を達成するために技術的人工物(道具, 装置, 技術)を利用しながら組織で動作する。ソシオテクニカルシステムの内部システムとして、組織, 人から構成される Social System とハードウェアやソフトウェアといった技術的人工物, また実行対象であるタスク(Work)である Technical System が存在する。これらが相互的に作用しながら動作を行うことが特徴である。さらに、その外部システムとしては複雑な環境(Complex Environment)があり、ソシオテクニカルシステムは、外部からの入力の影響を受けやすいため、複雑な動作環境の影響を受けることになる。

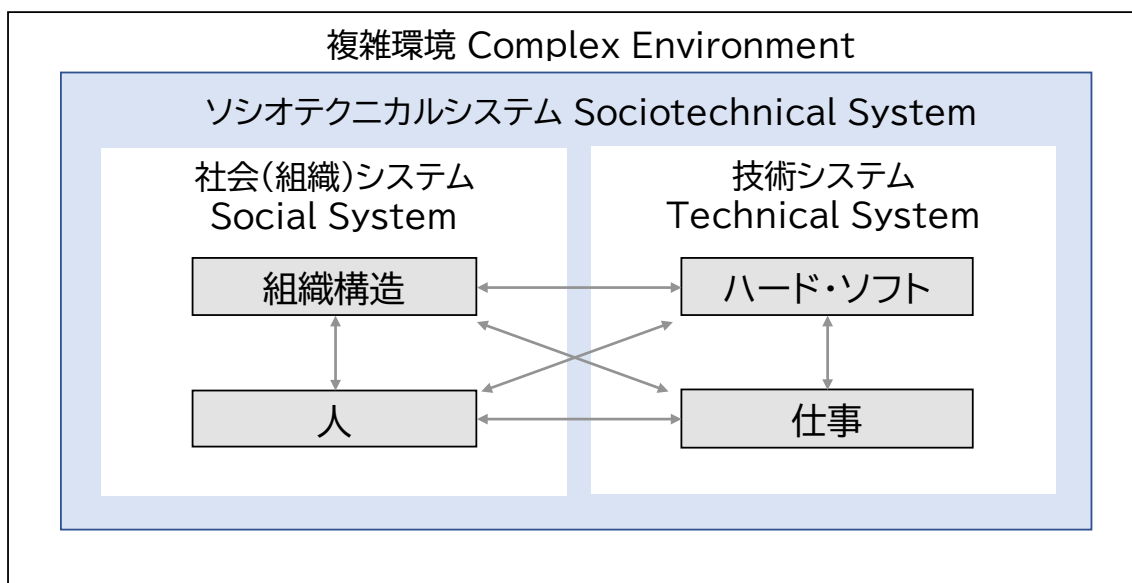


図 3- 5. ソシオテクニカルシステムのコンテキスト
(参考文献 [53]をもとに著者にて作成)

単純な社会システム、または技術システムとは異なる特殊性をもつソシオテクニカルシステムについても、そのよりよい開発に向けたレバレッジポイントを探索するための評価手法はいくつか提案されている。Oosthuizen ら [52]は、新しい技術がシステム内の人間の作業に及ぼす影響の理解を支援することを目的とし、Cognitive work analysis (CWA) および System Dynamics (SD) を統合したモデリングアプローチを提案した。CWA は、新しい技術が既存のシステム機能をどのようにサポートできるかを分析する手法として様々な分野で活用されているが、その利点にもかかわらず、システムの動的な挙動を完全に理解するための開発を支援するためには拡張が必要であり、また、革新的で新しいシステムを設計するのではなく、既存のシステムを分析するために使用されるケースが多く、本研究では SD の手法を用いて、対象として挙げられているコミュニティ・ポリシング(より効果的・効率的な犯罪管理を実現し、犯罪を引き起こす状況を変えるために、コミュニティの資源を積極的に活用するための政策・戦略)の動的なシナリオにおいて、新規技術であるウェブベースの情報共有システムによるコミュニティ・ポリシングの強化への関与について評価を行った。Pence ら [54]は、SoTeRiA (Socio-Technical Risk Analysis) フレームワークと呼ばれる組織の構造的側面(安全対策など)と行動的側面(安全文化など)を理論的に結びつけ、機器の故障とヒューマンエラーの相互作用から生じるリスクを推定するため手法として知られる確率論的リスクアセスメント(PRA) / 確率論的安全性評価(PSA)をベイズ型ベリフネットワーク(BBN)という確率的手法とSDによる決定論・動的シミュレーションの手法とイベントツリー(ET)やフォルトツリー(FT)という従来のPRA法と組み合わせたハイブリッドアプローチを構築した。本手法によって、原子力発電所の安全な運用に向けた訓練手法をテーマとし、技術・社会の両面の相互作用および、両面の総合的な評価と感度解析による、レジリエンス向上のための優先的に性能を向上すべき研修項目の導出が試みられている。このように、ソシオテクニカルシステムという複雑なモデルに対しても、高度なモデリング手法の組み合わせによって、複数の因子を動的に扱い、適切な安全性やシステムの特性向上に活用する事例は存在する。一方で、本論文で対象とするようなコミュニティ中心でかつ早期警報をテーマとした、コミュニティベース早期警報については、このようなアプローチにより半定量化し、どういった戦略がシステムの持続性やレジリエンスの向上に役立てられるかの分析を行った研究は見受けられない。

3.3 研究課題の範囲

3.3.1 関連研究における未解明点や課題

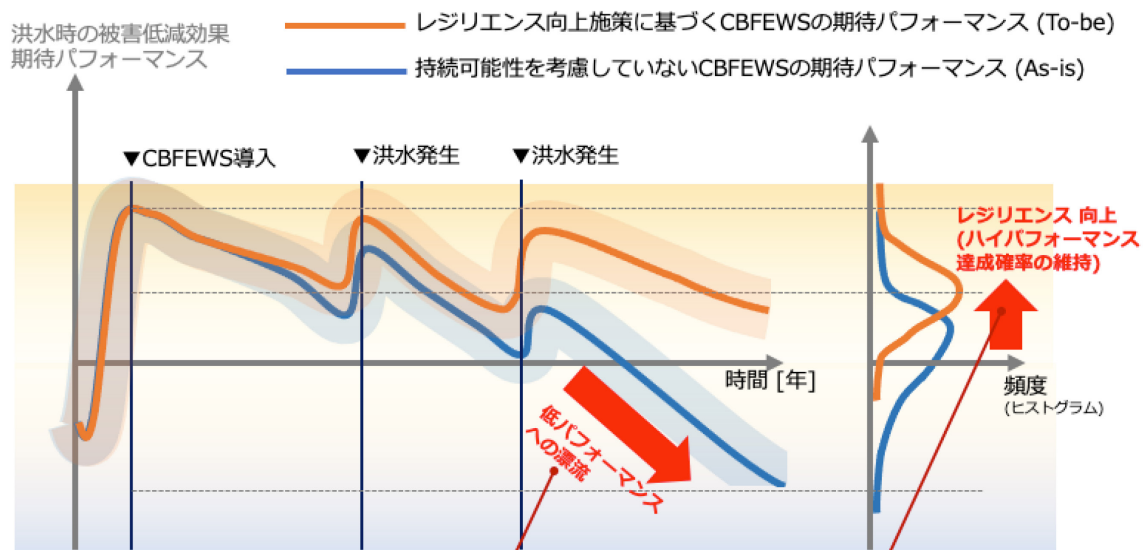
関連研究調査に基づき、「どうしたら、コミュニティベース早期警報の洪水被害低減に向けたレジリエンス向上のための重点を具体的に特定できるか」という研究の方向性と照らし合わせ、以下の未解決点や課題を抽出した。

- 洪水早期警報の被害低減効果向上に向けたレバレッジポイント評価手法は考案されているものの、コミュニティベース早期警報という社会・技術の両特性(ソシオテクニカルシステム)、さらには政府の早期警報との相互作用を考慮した、多様なパフォーマンス状態をとりえる早期警報システムのレジリエンス評価手法は未着手分野である。
- ソシオテクニカルシステムという複雑なモデルにおいて、システム導入後の時系列的なレジリエンス変動(Gracefully extensibility)を考慮し、システムの持続可能性に関する考察を与える分析出力やシステム設計・運用におけるインサイトを与える手法の研究は稀であり、詳細化の余地がある。

3.3.2 本研究で明らかにすべき点

関連研究における未解決点や課題に対し、対象とする開発途上地域の洪水早期警報のレジリエンス向上におけるポイントを図 3-6 に示す。洪水早期警報の観点で、先進国に限らず、開発途上地域においても、その地域に特化したコミュニティベース早期警報が構築を進められている。複数の文献調査からも明らかであるように、コミュニティベース早期警報はすでにその成果を実現し、社会に貢献を始めているようである。一方で、いくつかのコミュニティベース早期警報はシステムの維持に失敗、放棄に至ってしまったものもある。コミュニティベース早期警報のガイドラインでは、概念的な持続可能性の獲得に向けた注意点が述べられているものの、具体的な計画手法や施策は述べられていない。また、より具体的なレジリエンス向上のための測定手法が確立すれば、それに基づき、どのようなシステム改善提案が持続可能性に利益を与えるかといった議論も容易になると考える。そこで、本研究では、実現されるコミュニティベース早期警報に対する効能として以下を掲げ、議論を進めた。

- ① 長期的な洪水被害低減を実現するためのレバレッジポイントを抽出し、よりより CBFEWS の運用・維持設計において活用する。
- ② 半定量的な分析手法を活用し、レジリエンス向上に優位に働く新規提案を促進する。



本研究で明らかにすべき点①：
 ソシオ・テクニカルシステムという複雑なモデルにおいて、システム導入後の時系列的なレジリエンス変動（Gracefully extensibility）を考慮し、システムの持続可能性に関する考察を与える分析出力やシステム設計におけるインサイトを与える手法を構築する。

本研究で明らかにすべき点②：
 洪水早期警報の被害低減効果向上に向けたレバレッジポイント評価手法は考案されているものの、コミュニティベース早期警報という社会・技術の両特性（ソシオ・テクニカルシステム）を考慮したレジリエンス評価手法を構築する。

図 3- 6. 対象とする開発途上地域の洪水早期警報のレジリエンス向上におけるポイント

第4章 コミュニティベース早期警報のレジリエンス向上のための提案

本章では、コミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための提案として、コミュニティベース洪水早期警報の持続的な運用に向けた、技術・社会両側面を考慮した重要因子の抽出・評価を行うことを目的としたモデルのコンセプトについて述べる。

4.1 提案におけるコンセプト

第2章では、既存のガイドラインやキーインフォーマントに対するインタビューを通して、コミュニティベース洪水早期警報が抱える持続のための課題を明示した。既存のCBFEWSにおいても、すでに成功を収めているシステムもいくつかある一方で、持続可能性を得るための手段や、レバレッジポイントについてはガイドラインにおいて明確な指針が示されていないことがわかった。また、第3章では、先行研究を通して、持続可能性を実現するためのレジリエンス要因を分析する手法を調査した。結果的に、現状ではCBFEWSのレジリエンスを向上することに関して、経験に頼っており、どのようなアプローチをもってすれば、長期的な洪水被害低減を実現するためのレバレッジポイントを選定することができるかが明確となっていないこと、またどのような分析を行えば、対象地域に対してどのような新規提案がレジリエンス向上に優位に働くかを明確にすることが未解決課題であることを示した。これらをもとに、CBFEWSのレジリエンス向上のための評価モデルの提案において、以下のコンセプトを定義した。

<CBFEWS-RESILIENCE-CONCEPT-01>

- 本提案を用いることで、コミュニティベース洪水早期警報の持続的な運用に向けて、技術・社会両側面を考慮した重要因子の抽出・評価を行うことで、レジリエンス向上のために適切なアクションをとることができる。

<CBFEWS-RESILIENCE-CONCEPT-02>

- 本提案を用いることで、既存のコミュニティベース洪水早期警報アーキテクチャに対して、追加の改善設計を行う際に、レジリエンス向上の度合いを事前評価することでよりよい提案策定を実施できる。

4.2 レジリエンス向上のための評価モデル

前述のコンセプトに対し、提案するCBFEWSにおけるレジリエンス設計のための提案モデルとユースケースを図 4-1 に示す。CBFEWS 導入直後は通常、コミュニティのエンゲージメントは高く、機能・性能は維持され、洪水被害低減は維持されやすいと考えられる。一方で、低コスト技術や社会側面に頼る CBFEWS では、機体性能の経時的な劣化に対抗する必要がある。そこで、本研究では、レジリエンス強化ループとして、初期運用ステージにおける運用状況をモニタし、またそのCBFEWS のアーキテクチャ(構造・振る舞い)をインプットとして、動作状況を評価するモデルを構築する。本モデルを用いた重要度評価に基づき、また長期的な動作の劣化や向上を考慮した上で、持続化に向けた成功要因や失敗要因を予測することにより、CBFEWS の運用・支援団体は定常運用・後期利用ステージにおいていかに災害脆弱地域における CBFEWS 運用を支援できるかの立案に用いる。加えて、新規提案を行うことを試みることを考えた場合にも、このモデルを用いて、自身の提案を事前に評価することで、どのような追加システムが有効的に洪水被害低減に長期にわたり効果をもたらすことができるかの要求分析、早期妥当性確認に用いることができる。

第 5 章より、本提案における技術面・社会面の両方を同時に考慮したモデルについての設計について説明する。第 6 章では、提案モデルを用いて重要度分析を実施し、提案コンセプトを実現できるかの検証を行うとともに、モデルを適用した際の出力がコミュニティベース洪水早期警報の実際の設計・運用の観点で通用するものとなっているかの妥当性確認も実施する。

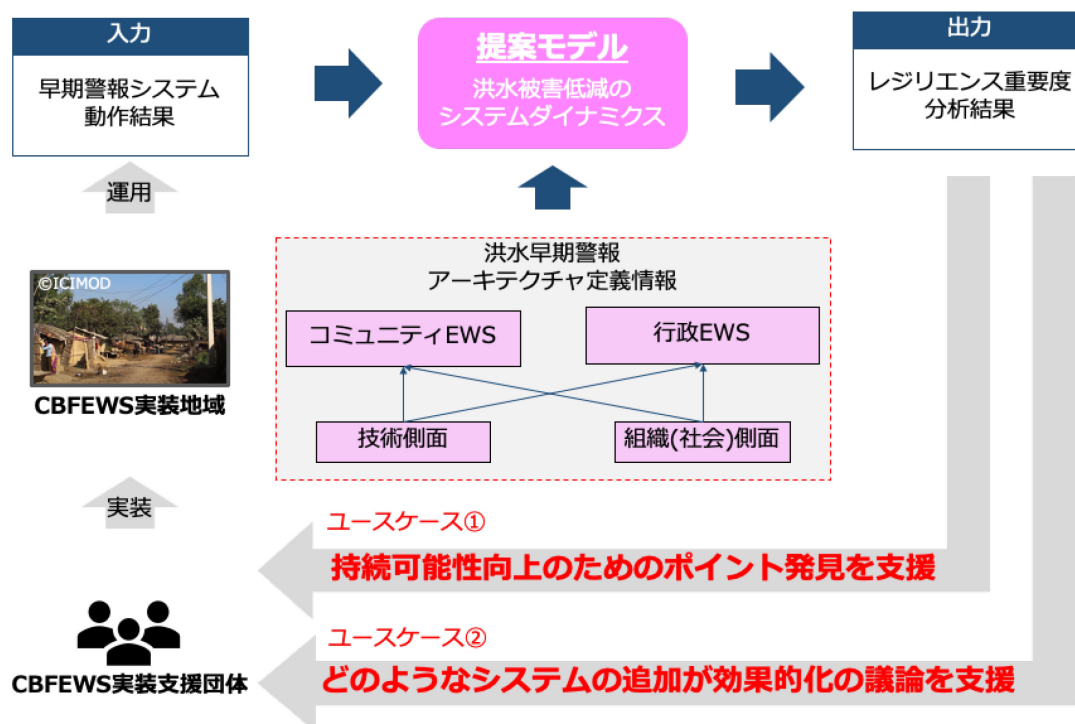


図 4-1. CBFEWS におけるレジリエンス設計のための提案モデルとユースケース

第5章 モデルの設計

本章では、コミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための評価モデルの設計について述べる。はじめに全章の提案コンセプトに対応するモデルの構成を明確にし、システムダイナミクス構築や洪水早期警報のアーキテクチャ分析を通してモデルの材料を揃え、評価計算手法の中心である多状態モデル手法を用いたレジリエンス重要度分析を設計する。

5.1 モデルの構成

前章における提案に基づき、レジリエンス強化を目指すためのループを構成するために導入するモデルについて論じる。レジリエンス設計のためのモデルでは、まず対象とするシステムの評価が可能であることが必要である。また、その対象システムがレジリエンス測定の対象である長期的な洪水被害低減に対してどのように影響を及ぼし、効果を示すかといったことに本モデル構築の関心がある。

そのため、図 5-1 に示すように CBFEWS アーキテクチャ情報および、CBFEWS のパフォーマンス情報を示す入力を受けて記述される「CBFEWS アーキテクチャ記述モデル」部分と、洪水被害低減に関与するシステムダイナミクスを定義し、またそれをアーキテクチャ記述モデルによって出力されるパフォーマンス期待値を統合し、重要度分析を実施する「レジリエンス推定モデル」部分の 2 つにより構成した。

「CBFEWS アーキテクチャ記述モデル」部分は、最終的にパフォーマンスベース信頼性評価モデルを通して、確率的な期待値に基づくパフォーマンスをレジリエンス測定モデルに入力する。このシステムの状態ごとにパフォーマンスを定義し、確率論的に評価した多状態モデリング手法の一つが多状態多値決定グラフであり、その概念は 5.4.1 項にて述べる。パフォーマンスレベルをシステムがとる状態ごとに設定し、それぞれの状態に存在する確率を総合的に見ることで、期待値としてパフォーマンスを得るものである。これによって、条件によって経時的に変動し得るパフォーマンスのレベルを動的に算出し、災害被害低減システムダイナミクスにて活用することができる。各状態をとる確率とパフォーマンスを同時に考慮した期待値評価については性能ベース信頼性と称される手法を用いた。これについては 5.4.2 項にて述べる。本手法は確率論的リスク評価モデルと称する PRA (Probabilistic Risk Assessment) モデルに概念としては近いものであるが、パフォーマンスを決定するためのそれぞれの状態に遷移する確率を算出する点で異なるものの、手法としては共通性があるため、5.4.3 項にて詳細を述べる。PRA はイベントツリー解析、およびフォルトツリー解析から構成され、定量的なフォルトツリー解析によって得られたシステム動作の達成可能確率をもとに、CBFEWS が動作するために必要なシーケンスの実行成功率を算出し、実行可能なシーケンスの組み合わせごとに、CBFEWS が取り得る状態を定義する。

「レジリエンス推定モデル」では、洪水被害低減システムダイナミクスおよび、「CBFEWSアーキテクチャ記述モデル」を統合し、それに対して動的な解析を施すことによって、将来的にシステムによって達成されることが予測される洪水被害低減効果を算出し、また重要度分析を行うことによって、どういった CBFEWS アーキテクチャ内部のパラメータ因子が洪水被害低減に大きく、または弱く関与しているかを半定量的に見積もることができる。重要度分析については 5.4.5 項にて述べる。ここで半定量的とした理由は、システムダイナミクスの挙動にある。統合されたモデルのうち、CBFEWS の技術側面については故障率や早期警報のパフォーマンスなど、定量化しやすいものであることに対し、社会的側面はいずれも正規化された値によって表現されていることから、出力された値そのものに対しては、大きな意味をもたないが、システムの挙動として大きな傾向を掴むことができるのがシステムダイナミクスの特徴 [42]である。

Oosthuizen ら [52]が試みたように、ソシオテクニカルシステムの経時的で動的な評価においては、システムダイナミクスによる手法が有効である。一方で、より技術的な側面も取り込むためには、Pence ら [54]の手法のように確率論的リスク評価手法の導入によって、CBFEWS のような社会と技術の両側面が強く影響し合うようなシステムの評価には最適と考えた。

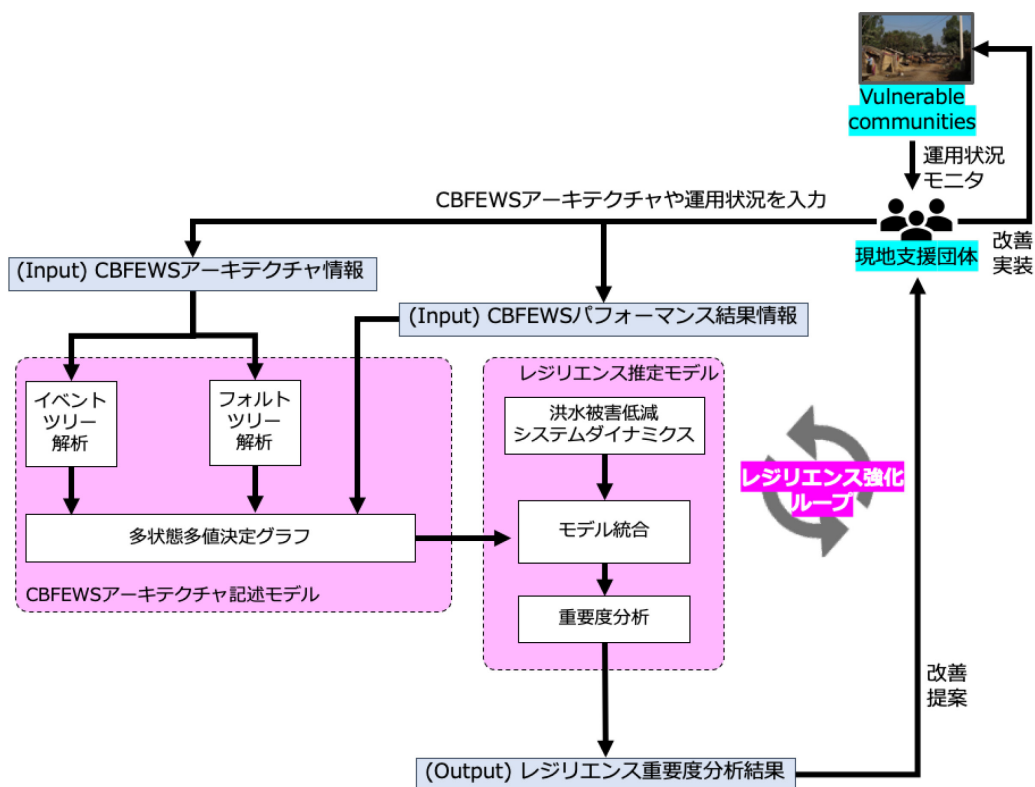


図 5-1. レジリエンス重要度分析モデル

5.2 レジリエンスを示すシステムダイナミクスの定義

5.2.1 因果分析

本項では、まず文献調査とキーインフォーマントに対するインタビューの両アプローチから得た開発途上地域における早期警報の運用状況と課題の把握結果を用いて、洪水早期警報によって達成されるレジリエンス評価のためのシステムダイナミクスを把握するために因果分析を通じてパラメータの関係性を明確にする。本研究では、洪水早期警報におけるレジリエンスの定義を、洪水被害低減の積算であると定義し、それが CBFEWS によってどのように実現されるかを定義した。

図 3- 2 にて示した洪水早期警報システムにおける因果分析に対して、2.2.2 項におけるキーインフォーマントインタビュー結果を含めて、コミュニティベースの早期警報におけるコンテキストでの因果分析として再定義する。コミュニティベース早期警報に関する従事者へのインタビューから、以下の因果関係を追加した。

- インタビュイー#1 からのインサイトにより、コミュニティベース早期警報では継続したモニタリングと維持のための施策が必要であり、これらは CBFEWS を駆動する技術システムそのもの、ソーシャルエンゲージメントを高めるための活動、それぞれに予算が必要であることを Financial funding として追加した。
- インタビュイー#3 からのインサイトにより、コミュニティベースの EWS ではシステムによって、いかにして”Public that knows how to respond effectively and in capable of responding”を増幅させられるかといった点についてもシステムの性能として重要であることとし、availability of CBFEWS system からの線を追加した。

これらをもとに再構成した因果分析結果を図 5- 1 に示す。本研究では CBFEWS における持続可能性獲得によって継続的に洪水被害低減を実現できることをレジリエンスの指標として検討するために、図 3- 2 にて示した”Flood damage reduction benefit”をさらに時間積算することによって、得られる”Cumulative flood damage reduction benefit”を追加した。

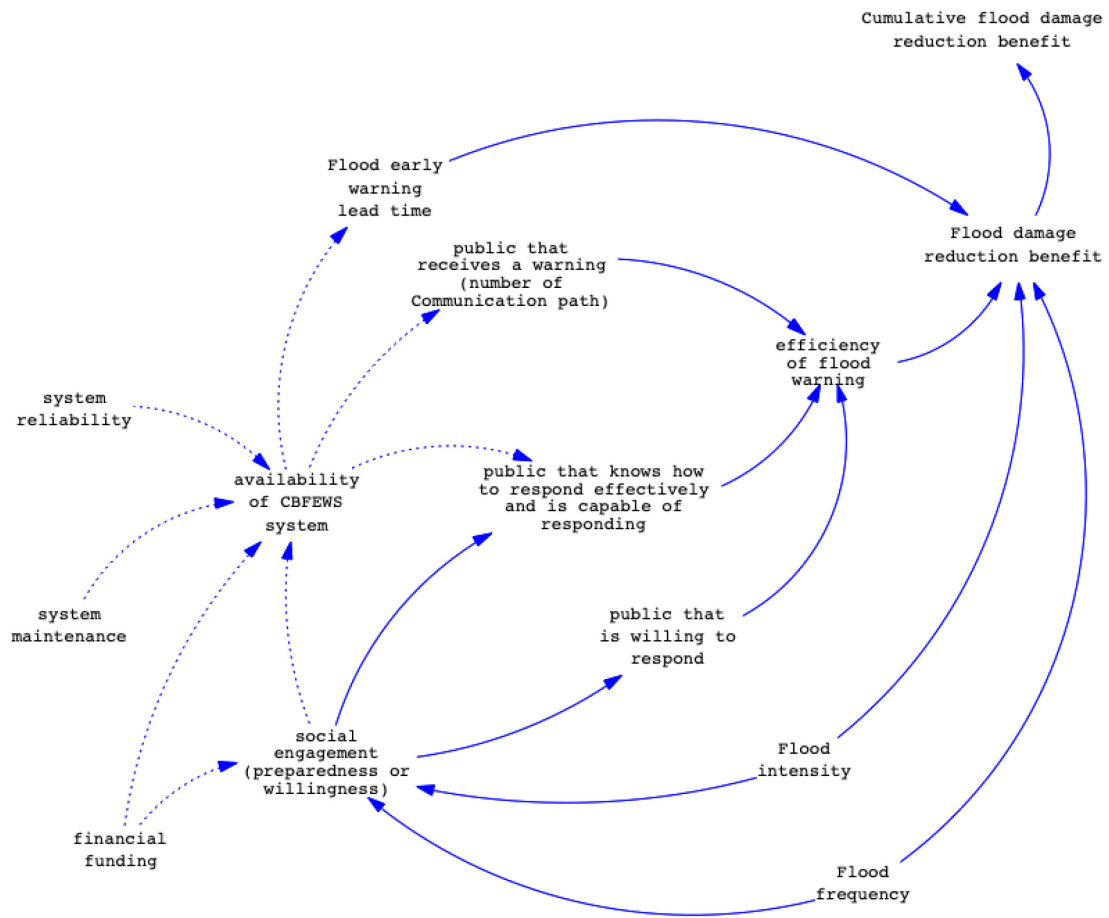


図 5- 2. CBFWEWS レジリエンス評価のための因果分析

5.2.2 システムダイナミクス

対象とする評価事項について、そのシステム特性の時系列的な特性を表現する有効な手法としてシステムダイナミクス(SD)図 [41]がある。システムダイナミクスとは、1956年にマサチューセッツ工科大学の Jay Wright Forrester により開発されたシステム特性を動的に解析するための手法である。簡単なモデルを図 5-3 に示す。本手法では、複雑性を持つシステムに対して、因果ループ図のようにパラメータの関係を矢印で繋ぎ、それぞれの相互依存関係を明示し、動的なシミュレーションの実行のために活用するものである。パラメータを変数(variable)、ストック(stock)、イン・フロー(in-flow)、アウト・フロー(out-flow)に分けて表現をすることが特徴である。変数は、その入力として与えられた別の変数やストックを用いて、自身の値を算出するものである。ストックは、イン・フローとアウト・フローの差分に対する積分値や和など、演算を伴う変動を示す蓄積結果として与えられる。類似のモデルである因果ループ図では変数のみを用いてストック、イン・フロー、アウト・フロー(を同様に表現していることに対し、変数、ストック、イン・フロー、アウト・フローを区別してモデル化を行う SD 図では、定量的なシミュレーションモデルの構築の目的でも活用が可能である。そのため、大枠の構造を因果ループ図で捉え、SD 図に変換し、システムの持続可能性の評価に用いられる [55]。本論文における目的である持続可能性の獲得に向けて、図 5-2 にて定義した因果分析結果を用いて、SD 図として変換し、レジリエンスの評価のためのモデル設計を行う。

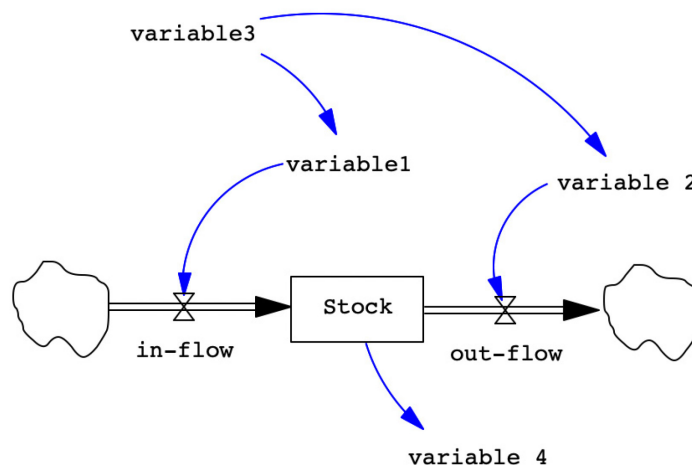


図 5-3. システムダイナミクス(SD)図の例

図 5- 2 に示す変数のうち、ストックとして表されるものを抽出すると、cumulative flood damage reduction benefit (累積洪水被害低減利益), social preparedness (社会的準備態度), availability of CBFEWS (CBFEWS のアベイラビリティ) であると考えられる。cumulative flood damage reduction benefit は、Flood damage reduction benefit として、1回あたりの洪水発生イベントに対する発生損害の低減成功金額に対する合計値を示すため、その単純な和を示す。社会的準備態度 (social preparedness) は、3.2.1 項でも示したように、過去の洪水被害経験や訓練による向上、または経時的な Decay (減衰) を伴うストックである。availability of CBFEWS は、洪水早期警報が正しく動作する確率を示す。信頼性は故障を考慮した場合に、ある時間においてそのシステムが利用可能かどうかを示す指標である。一方、システムの機能を正常な状態に維持するために行う活動が保全 (maintenance) であるが、この保全活動を考慮した上で、システムが稼働可能な状態にある確率をアベイラビリティである。さらに、ある時刻 t においてシステムが利用可能な状態にある確率を瞬間アベイラビリティ (instantaneous availability) と呼ばれる [56]。アベイラビリティは単純な積分や和で表されるものではないが、概念として保全度・修理率を用いてそのシステム利用可能確率を in-flow として与えるとともに、時間経過とともにシステムの利用可能率が減っていくことを out-flow として捉えることで、availability of CBFEWS をストックとして表すこととした。本論文では、cumulative flood damage reduction benefit の期待値を導出することが目的である。その算出に当たり重要な変数である Flood damage reduction benefit は、Flood early warning lead time, public that receives a warning, public that know how to respond effectively and is capable of responding に依存するが、同様にこれらの期待値を算出することが必要である。瞬間アベイラビリティとしてシステムの使用可能確率を定義することで、5.4.1 項にて後述する性能ベース信頼性評価と組み合わせ、Flood early warning lead time, public that receives a warning, public that know how to respond effectively and is capable of responding といった変数の期待値の算出が可能なモデルを設計した。また、5.4.3 項にて後述する確率論的リスク評価とも組み合わせることで、単純な availability of CBFEWS として出力するだけでなく、CBFEWS の故障状態に対応する動作モードと対応する性能を紐づけることで、総合的な Flood early warning lead time, public that receives a warning, public that know how to respond effectively and is capable of responding における性能期待値を算出できるようにした。こういった概念により変換した CBFEWS におけるレジリエンス評価のための SD モデルを図 5- 4 に示す。本論文では、このモデルを用いて cumulative flood damage reduction benefit に対する感度解析を実施し、本変数を最大化するための因子を探索することで、CBFEWS における持続可能性向上のためのレジリエンス獲得に必要な影響因子の抽出や、レジリエンス獲得に向けたアプローチ方法の検討を行うためのモデルに活用する。

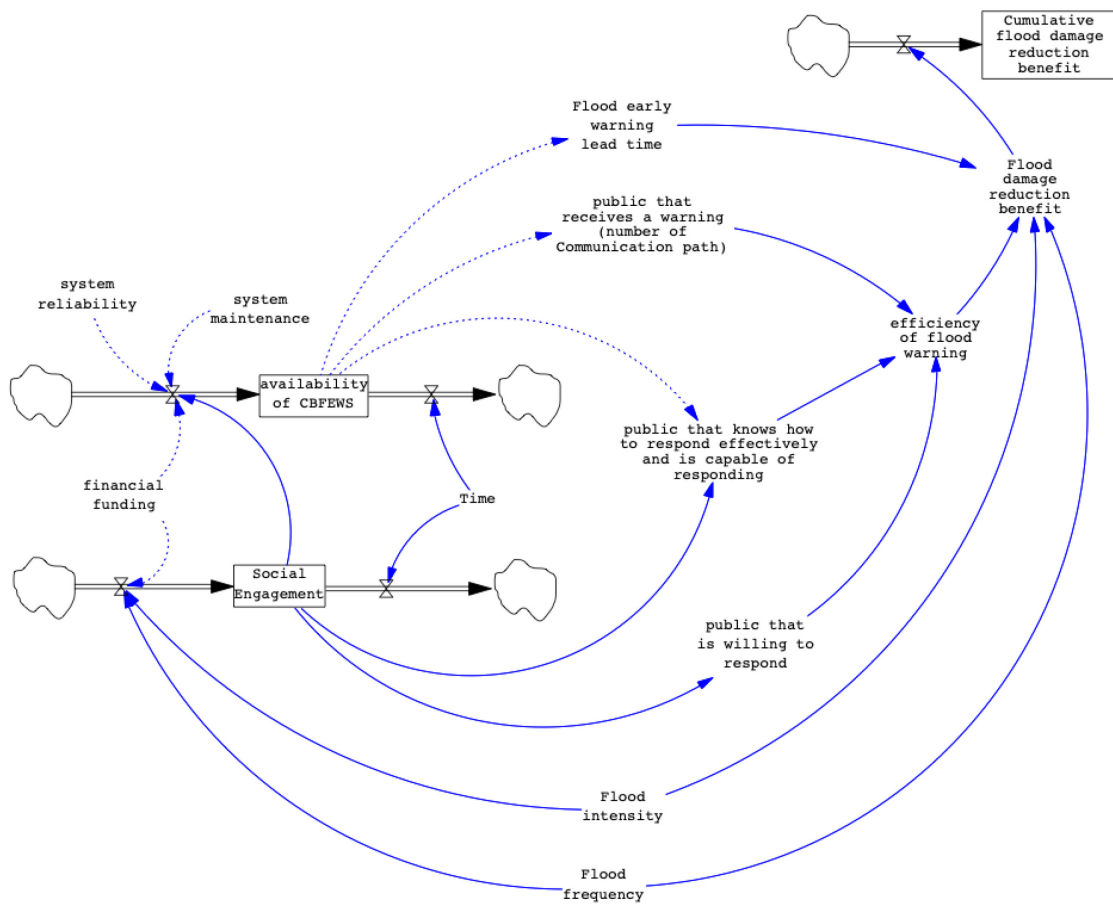


図 5- 4. CBFEWS レジリエンス評価のためのシステムダイナミクス の定義

5.3 評価対象システムにおけるアーキテクチャ記述

5.3.1 アーキテクチャ記述の目的と方法

アーキテクチャとは、システムにおける基本的な概念または特性であり、System of Interest (SoI) の設計における原理を具体化したものである。対象とするシステムはアーキテクチャを明示し、アーキテクチャ記述は対象システム、利害関係者、関心事を特定する。アーキテクチャ記述におけるビューを設定することで、利害関係者の持つ関心事に対処することができる。アーキテクチャのビューがアーキテクチャのモデルそのものを定義し、ビューポイントによって記述するモデル種類 (Model kind) を適切に選定することが必要である [57]。

表 5-1 に本論文で対象とする CBFEWS のアーキテクチャ記述における目的と方法を整理した。対照とする SoI は CBFEWS であり、利害関係者の開発・運用・利用するそのシステムのレジリエンス向上に向けた、レジリエンス設計に向けた CBFEWS のアーキテクチャ理解とシステムダイナミクスモデルの策定に関心事として捉える。そのためには、物理ビューによる構造 (確率論的リスク評価において、システムの信頼度を割り当てるための Structure 情報) および、論理ビューによる SoI の振る舞い (どのようにシステムが動作するか、部分的なサブシステムが動作しなかった場合にどのようなパフォーマンスでグレードが発生するかを把握するための Behavior 情報) を見出すために、CBFEWS を SysML (Systems Modeling Language) [58] により、記述することとした。5.4.3 項にて後述する確率論的リスク評価においては、そのアーキテクチャを定量的にリスク評価するために、構造情報としての Fault Tree Analysis (故障木解析) と振る舞い情報としての Event Tree Analysis (事象木解析) を組み合わせる。これらの作成において、モデルベースシステムズエンジニアリング (Model-based Systems Engineering: MBSE) との親和性が高いと判断し、その記述手法の一例である SysML を用いて SoI の構造、振る舞いを把握することが有用であると考えた。

表 5-1. CBFEWS のアーキテクチャ記述における目的と方法

項目	内容
System of Interest	CBFEWS (コミュニティベース洪水早期警報)
利害関係者	Governmental organization Vulnerable community CBFEWS implementing agency
関心事	レジリエンス設計に向けた CBFEWS のアーキテクチャ理解とシステムダイナミクスモデルの策定 (確率論的リスク評価の実施)
ビュー	物理ビュー, 論理ビュー
モデル種類	SysML (構造図, 振る舞い図)

レジエンス設計に向けた解析の準備として、第 2 章において分析を行ったコミュニティベース早期警報の方法論を参考に、5.3.2 項、5.3.3 項にそれぞれ、アーキテクチャの構造、振る舞いのメタモデリングを実施した。CBFEWS は各地域、各支援団体によって、それぞれ当然ながらその形を変えるが、本章では一般的なレベルでのレイヤーに留めている。それぞれの地域・支援団体によって特有のシステムとなる特有な設計に対しての定義については、第 6 章にて深掘りをする。

5.3.2 コミュニティベース洪水早期警報の構造

(1) CBFEWS のコンテキスト定義

対象システムのアーキテクチャ理解において、まずは CBFEWS のコンテキスト定義をブロック定義図として図 5-5 に示す。CBFEWS コンテキスト(Community-based Flood Early Warning Systems Context)のブロックの中には、災害の要因(Disaster Cause)、環境(Environment)、早期警報システム(Early Warning System)、また、図 2-5 でも定義したステークホルダーである災害脆弱地域(Vulnerable Communities)、地域住民(Local Residents)、CBFEWS 導入団体(CBFEWS Implementing agency)、施政団体(Government organizations)もシステム分析のためのコンテキストに含めた。災害の要因(Disaster Cause)には土砂降り(Cloud burst)が含まれるが、雲(Cloud)、雨(Rain)がそれぞれ構成として定義されている。環境(Environment)については洪水要因として、図 1-4 でも説明したように、河川(River)に加えて斜面システムや地下水システムの考慮が不可欠であることから、土地(Land)も定義している。早期警報システム(Early Warning System)として、中には施政団体による早期警報システム(Governmentall Early Warning System)と地域ベース早期警報システム(Community-based Early Warning System)の 2 つが含まれていることに注意する。情報脆弱地域に対しても、完全に地域ベース早期警報システムしか存在しないわけではなく、電力・通信インフラの不十分な整備から、洪水時に情報システムの技術レベルが満足に得られないことや、経済的な発展レベルから十分な情報通知システムが個々人に行き渡っていないことに起因し、施政団体による早期警報システムの情報が非常に届きづらいことが要因として、CBFEWS の重要さが高まっているのである。そのため、地域ベース早期警報システム(CBFEWS)を本論文における System of Interest (SoI)としておきながら、施政団体による早期警報システムもシステムのコンテキストとして定義を行っている。地域ベース早期警報システム(CBFEWS)はソシオテクニカルシステムであることを前提として、図 3-5 におけるソシオテクニカルシステムのコンテキストを用いて、下流のレイヤーにおけるシステムを Social-based System と Technical-based System に分けて分析を行うこととした。これによって明確に社会面と技術面の両側面を意識しながらシステム分析が可能となるように工夫した。

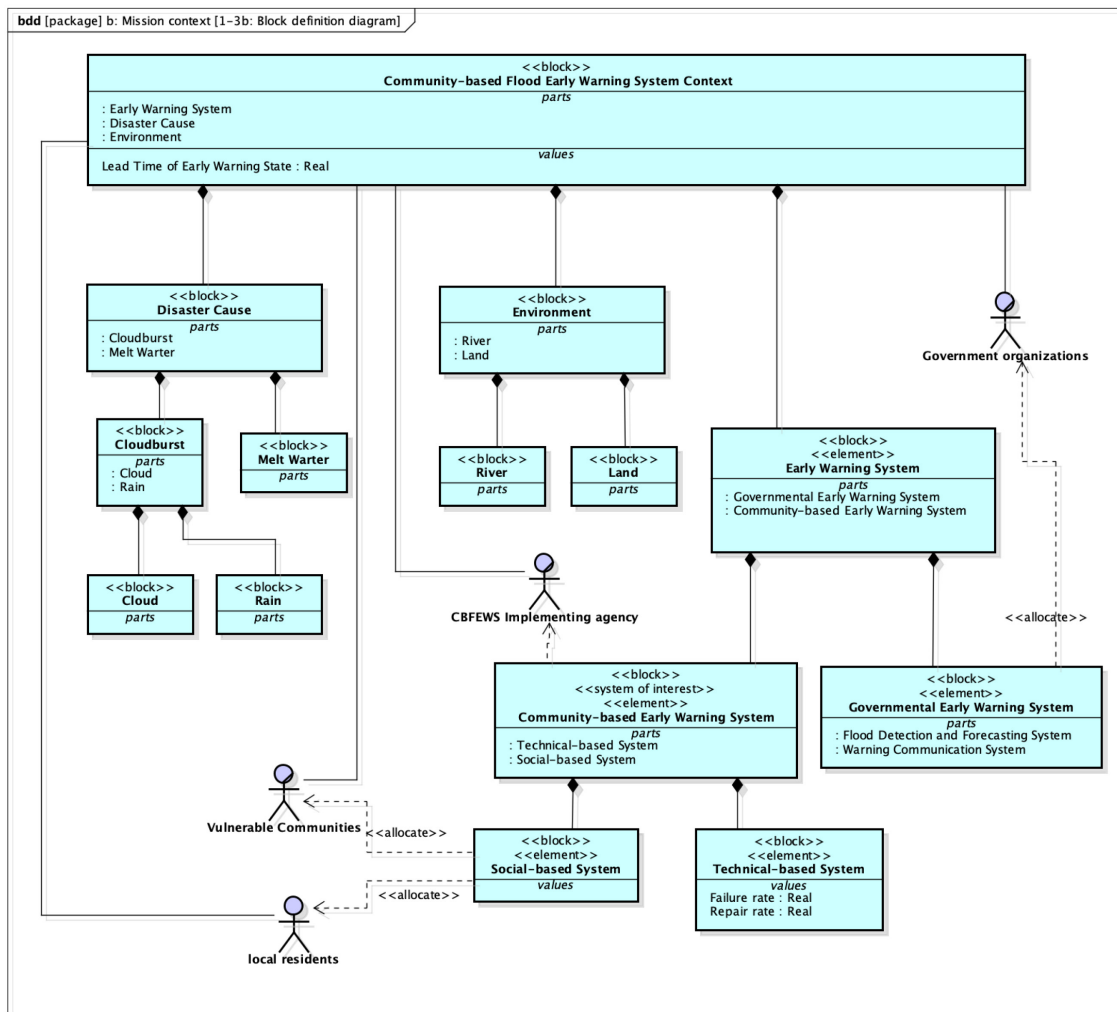


図 5- 5. CBFEWS のコンテキスト定義 (bdd:ブロック定義図)

(2) CBFEWS コンテキストにおけるフローアイテム

CBFEWS のシステム間を流れるオブジェクトであるアイテムのフローを図 5-6 に示す。ここでは自然災害の兆候 (Context of natural sign), 施政による情報 (Context of governmental data), 地域による情報 (Context of community-based data) に分けた。自然災害の兆候としては、洪水の検知に使用される情報源として降水量, 雨雲の観測, 河川の水位を設定した。施政による情報としては、施政による洪水予測, 施政による警報にわけた。同様に、地域による情報としても、地域による洪水予測, 地域による警報にわけた。施政ベースの早期警報システム (Governmental Early Warning System) と地域ベース早期警報システム (Community-based Early Warning System) のいずれにおいても、基本的に扱う情報としては同様であるが、それぞれのリードタイム, 品質, 情報信頼性, 情報の散布特性が各国, 各団体, 各地域の特性によって異なる。

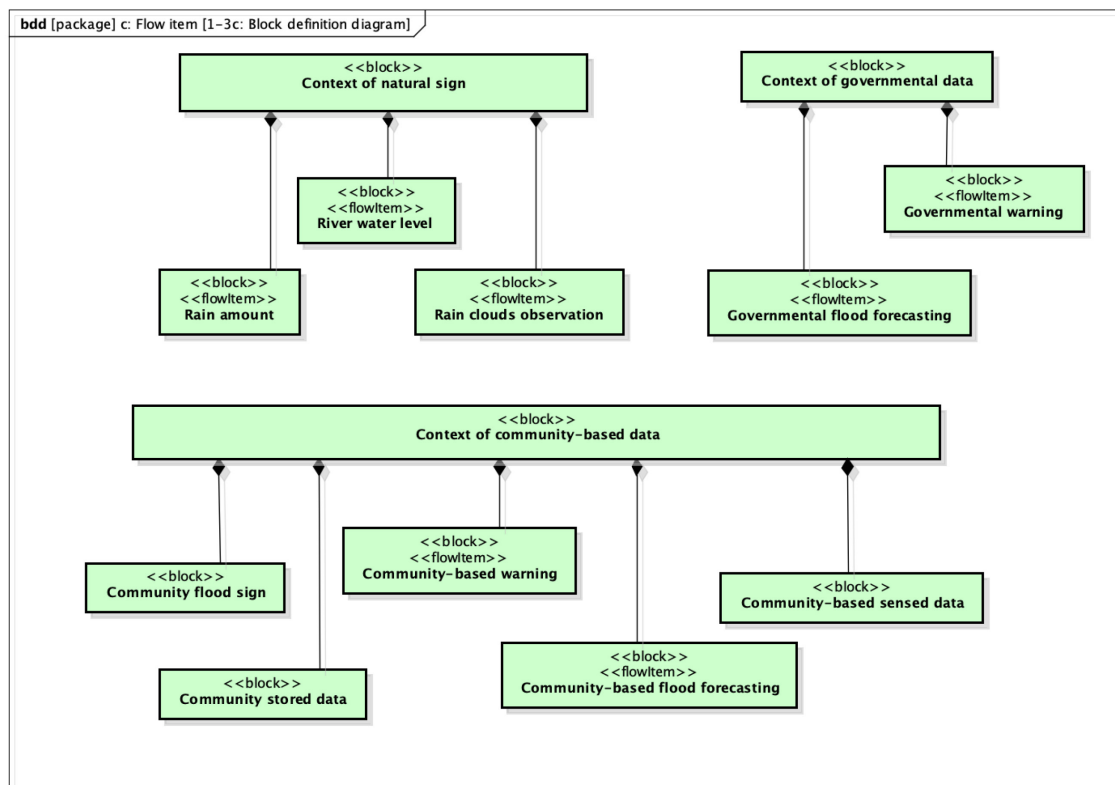


図 5-6. CBFEWS コンテキストにおけるフローアイテム定義 (bdd: ブロック定義図)

(3) CBFEWS コンテキストにおける構造

CBFEWS のコンテキストにおけるシステムの接続関係を図 5-7 示す。洪水の要因 (Disaster Cause) は当然ながら、いずれも水であり、それが土砂降り (Cloud burst) や雪解け水 (Melt water) として川に流れ、災害へと姿を変える。早期警報との接続構造について言えば、洪水要因を受けて、早期警報システム (Early Warning System) で観測として情報を受け、それを洪水予測に役立てることから始まる。場合によっては、雲の状況や降水の結果として直接洪水予測に用いる場合もあるが、環境 (Environment) として定義した、河川の水位観測結果として、情報を獲得する場合もある。雲の状況や降水の結果は河川の水位上昇に対して上位要因に当たるため、リードタイムが長く予測を行える。河川の直接観測からの予測の場合も、雲や降雨の情報を用いた場合のいずれも、予測精度は予測時間が長くなるほど劣化する [9]。早期警報システムでは受け取った情報をもとに、予測し、それを早期警報、散布 (dissemination) のための情報として形を変え、受益者である地域住民 (local residents) に届ける。

早期警報システム (Early Warning System) の内部構造を図 5-8 にて示す。雲の状況や降水、河川の直接観測といった情報を受けて、早期警報システムのサブシステムに対応する、施政ベースの早期警報システム (Governmental Early Warning System) と地域ベース早期警報システム (Community-based Early Warning System) がそれぞれ情報を活用して、予測、情報散布のために動作を行う。施政ベースの早期警報システムは、地域ベース早期警報システムに対して予測に使用する情報または、直接的な警報メッセージを送るインタフェースがある。また、直接的 (例えば、テレビやインターネットといった手法) に地域住民に警報メッセージを送る場合も想定する。System of Interest である地域ベース早期警報システムについては、施政からの情報、河川や降雨の読み取り情報を用いて、Social-based System と Technical-based System がそれぞれ連携動作を行うことで、最終的な受益者である地域住民 (local residents) に届ける。

これらの構造におけるアーキテクチャのモデリングでは、5.3.3 項における振る舞いの分析と同時に実施し、必要なインタフェース情報を適宜付与し、イタレーションしながらモデリングした。

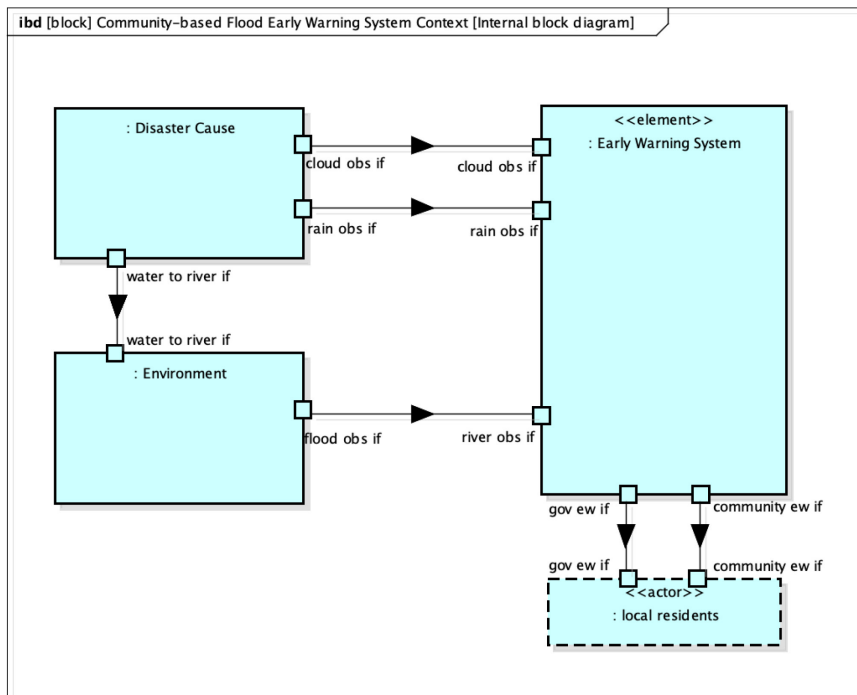


図 5-7. CBFWEWS コンテキストにおける構造定義 (ibd:内部ブロック図)

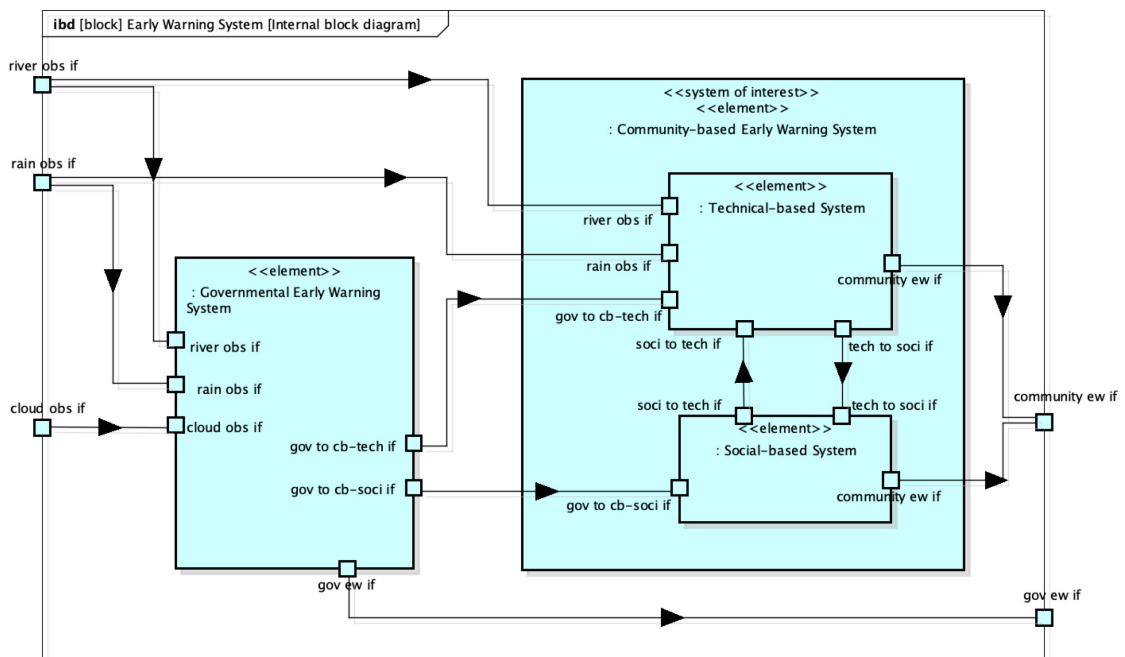


図 5-8. Early Warning System における構造定義 (ibd:内部ブロック図)

5.3.3 コミュニティベース洪水早期警報の振る舞い

(1) CBFEWS のユースケース

CBFEWS を含む、対象とするシステムのコンテキストにおける研究の対象のユースケースは洪水の被害低減である、Flood Loss Reduction のみである。特に、今回対象とするのは図 2- 6 でも示したように、治水アプローチではなく、適応アプローチ (Adaptation) における洪水早期警報である。実際には、CBFEWS の上位目的である、洪水被害の低減のための手段としては、いくつかあるが、1.2.2 項でも述べたように、開発途上地域における洪水被害の低減策としては、はじめに考える対処手段であり、導入にあたり効果の即応性が高い。そのため、本論文では、洪水早期警報のユースケースに限って議論を進める。

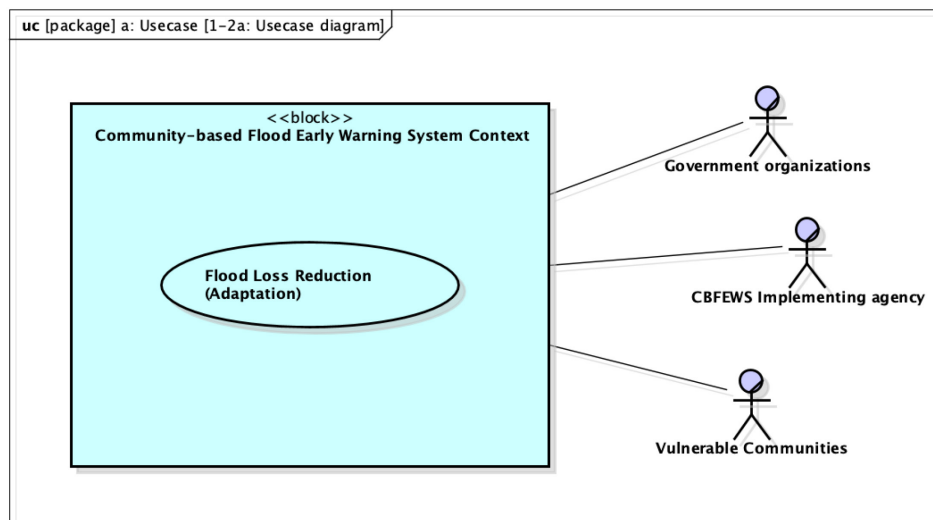


図 5- 9. CBFEWS コンテキストのユースケース (uc:ユースケース図)

(2) CBFEWS のアクティビティ

Flood Loss Reduction における洪水早期警報の動作としてのアクティビティ定義結果を図 5- 10 に示す。災害要因 (Disaster Cause) は要因となる雨雲の発達を受け、洪水につながり得る降雨を発生させ、環境 (Environment) に対して河川の水位上昇を促し、同時に、早期警報システム (Early Warning System) にも降水量 (Rain amount) の情報を伝達する。一方で、高度な技術 (例えば、衛星観測や気象予報など) を持つ施政などであれば、雨雲発生や降雨といった情報から直接早期警報に必要な情報を入手することも可能である。施政ベースの早期警報システム (Governmentall Early Warning System) では、自身が行った予測結果を直接、地域住民に伝える能力も持ちながら、地域ベース早期警報システム (Community-based Early Warning System) にさらなる情報散布や情報予測に活用できる情報も伝達する。施政ベースの早期警報システムおよび、地域ベース早期警

報システムから情報を受け取った地域住民は、それを信頼・確認し、最終的な行動に移す。

図 5- 11, 図 5- 12 では、それぞれ地域ベース洪水検知&予測 (Community-based Flood Detection & Forecasting), 地域ベース警報連絡 (Community-based Warning Communication)のアクティビティ定義を示す。地域ベース洪水検知&予測では、外部システムから受け取った河川の水位, 降雨, 施政からの情報を用いて、洪水予報を発出することが目的である。この動作において、洪水の予兆を検知し、また情報を集めることが Technical-based System に求められる。また、Socio-based System としては、その集められた情報や検知した情報から洪水発生を確認した上で、より正確で適切な洪水情報を地域ベース警報連絡のアクティビティに伝達することが求められる。地域ベース警報連絡においては、地域ベース、または施政からの洪水発生情報を受け、洪水情報を発出するか判断を行い、実際に警報を住民に伝える機能を持つ。Socio-based System は、前段から伝達された洪水発生情報を用いて直接洪水予測地域の下流の住民に伝える (例えば、SNS や口頭、手動サイレンなど) 場合もあり、また地域ベース警報連絡専用に整備された、Technical-based System としてのアラートシステムによって通知される場合もある。

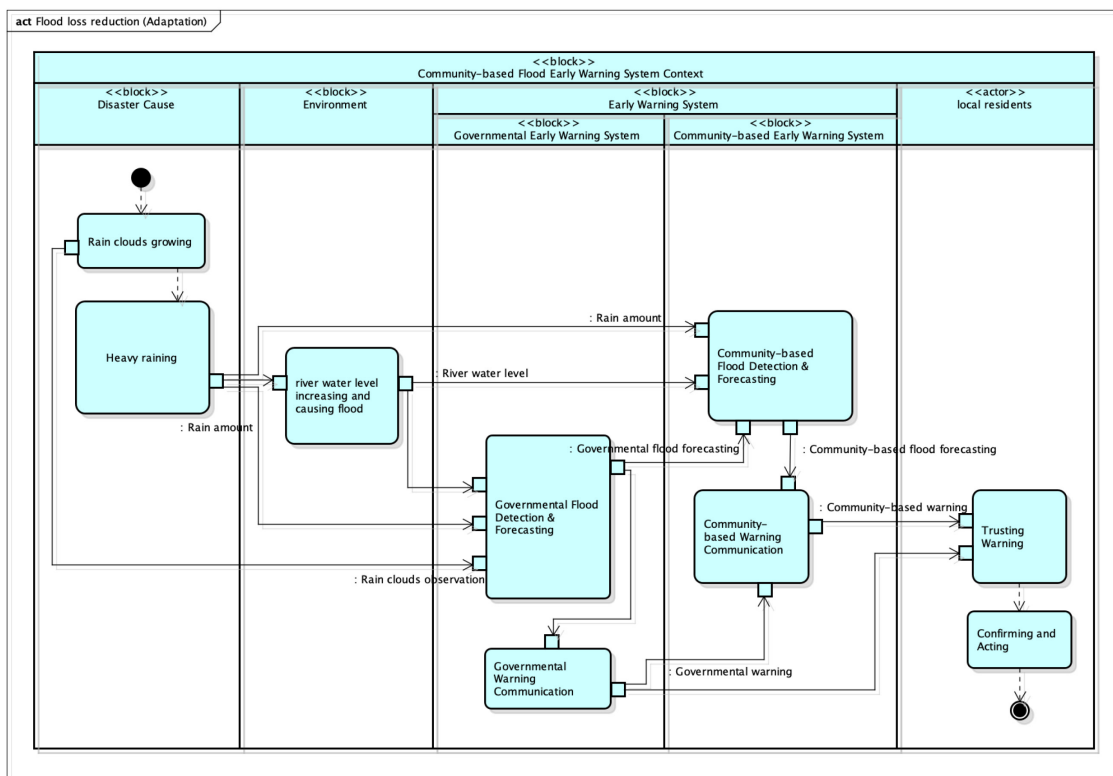


図 5- 10. Flood Loss Reduction の動作 (ac:アクティビティ図)

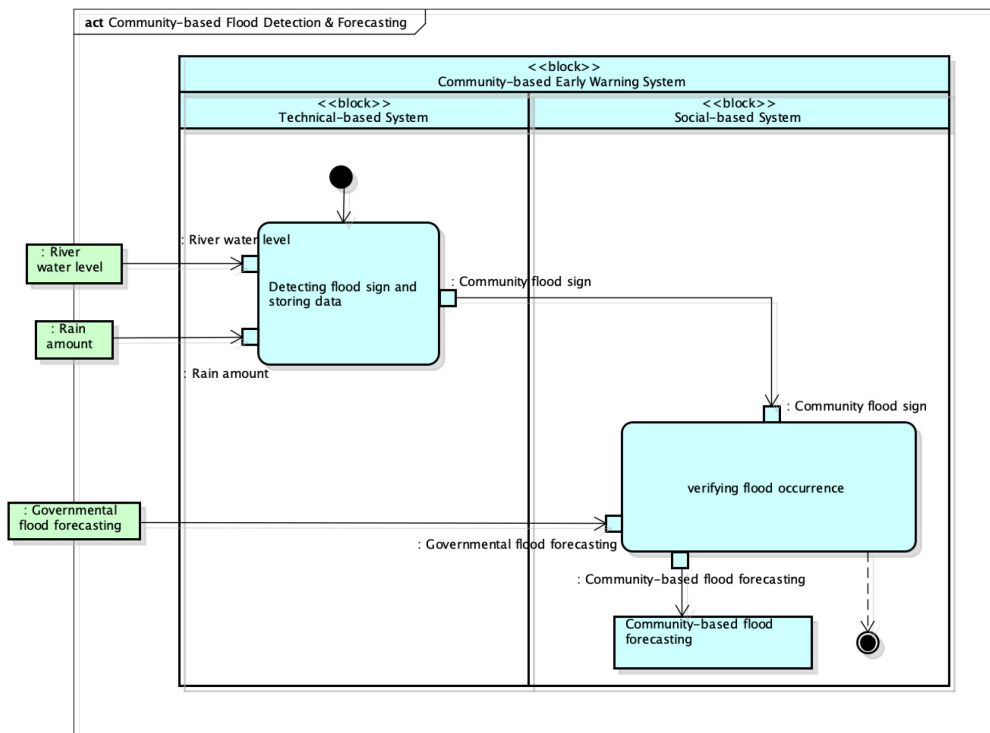


図 5- 11. Community-based Flood Detection & Forecasting の動作 (ac: アクティビティ図)

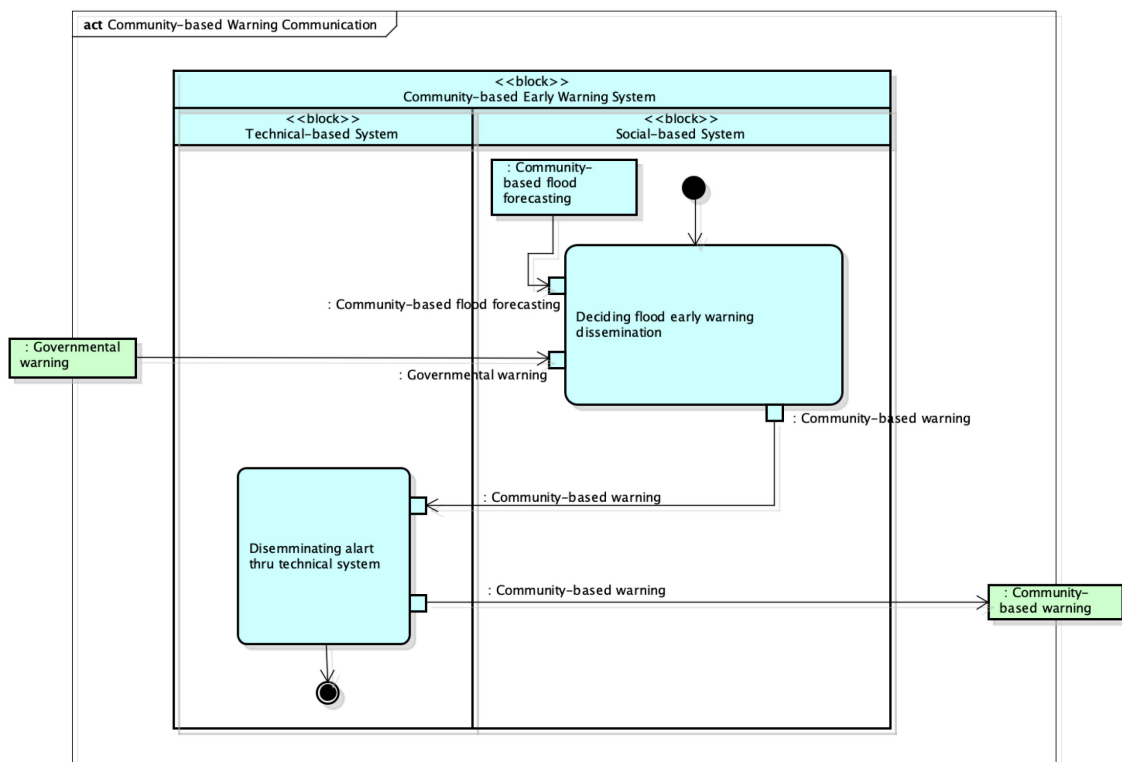


図 5- 12. Community-based Warning Communication の動作 (ac: アクティビティ図)

5.4 評価計算の手法

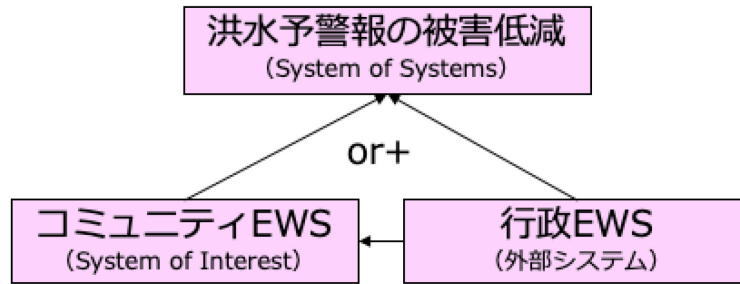
5.4.1 多状態多値決定グラフ

対象とするシステムは洪水早期警報であり、このシステムは複数のアクションの結合によって達成される。一方、一部が達成されなかったとしてもある程度のパフォーマンスは得られる。また、5.3項でもコミュニティベース早期警報のアーキテクチャを明確にした通り、実際にはコミュニティによる早期警報(ここではコミュニティ EWS と称する)、政府によって達成される早期警報(ここでは行政 EWS と称する)が相互依存的に機能し合い、警報達成に向けて機能を助け合う。つまり、どちらも存在することでよりよく実現されるアーキテクチャを持っているため、片方だけ着目しても正しい効果測定はできない課題がある。そこで本論文では多状態モデルと呼ばれる各システム利用可能状況を同時に評価している手法を用いることとした。

多状態モデルとは、多状態システムにおいて、システムおよび/またはその構成要素が、完全動作から完全故障まで様々な性能レベル(または状態)を示す可能性があるシステムに対してモデル化を行うものである。多状態システムは、負荷の共有、性能劣化、不完全な故障カバー、スタンバイ冗長性、限られた修理資源、共通原因故障などの依存関係をモデル化できる。[59]中でも多状態モデルにおいて、各状態に対してパフォーマンスを色付けしたものを多状態多値決定グラフ(Multi-state Multi-valued Decision Diagrams:MMDD)と呼ぶ。[59]

図 5-14 に本論文で対象とする開発途上地域における早期警報の MMDD の例を示す。例えば、洪水早期警報において、コミュニティ EWS による洪水検知、行政 EWS による洪水検知、コミュニティ EWS による情報散布、行政 EWS による情報散布のいずれも成功していれば、もっともよく目的は達成される。コミュニティ EWS による洪水検知も、それ以外のアクションも全てが失敗していれば、目的に対するパフォーマンスは非常に低いものになる。また、その中間状態である、いくつかのアクションがうまくいけば、ある程度のパフォーマンスが得られる。こういったシステムの様々な性能レベルをモデル化することができるのが MMDD である。本論文で対象としたい洪水早期警報の評価において、あるアクションのみ、コミュニティ EWS のみ、または行政 EWS のみといった一部に着目しても正しく効果測定ができないような、各システムの相互依存関係をモデル化できる手法が必要であった。そのため、MMDD は洪水早期警報において、特にコミュニティ EWS、行政 EWS の両側面のパフォーマンスのバランスを考慮できることから、本論文に適していると考えた。評価モデルにおいては、各状態に対して、発生確率、警報網羅率、警報リードタイム、レスポンス率などを配分し、これらの 5.4.2 項で述べる性能ベース信頼性評価を用いた性能期待値として表すことで、4.2 項におけるレジリエンスエンジニアリングの思想が示すような、優美な劣化、優美な拡張の表現を可能にした。この MMDD は、5.4.3 項に示す確率論的リスク評価でも用いられるイベントツリー図を用いて整理し、モデルに実装した。

洪水予警報の評価のもつ複雑性



どちらも存在することでより良く実現される

図 5-13. 開発途上地域の洪水早期警報における関係性
(関連研究 [60]におけるオントロジーをもとに記述)

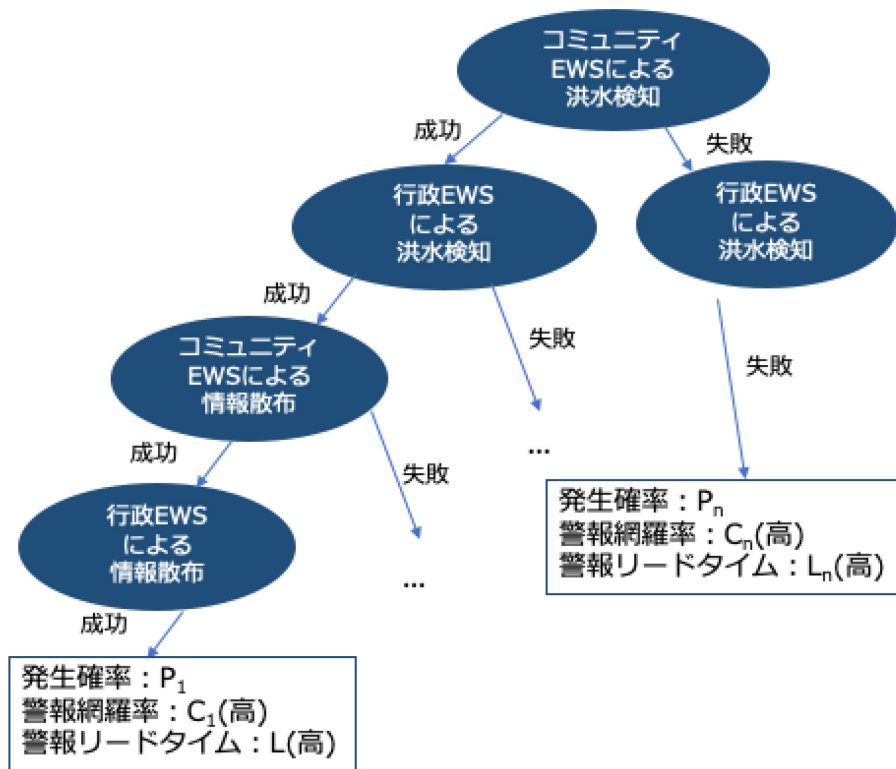


図 5-14. 開発途上地域における早期警報の MMDD の例

5.4.2 性能ベース信頼性評価

システム工学において、システムをモデル化し、システムモデルを用いてシミュレーションを行い、また、システムの目標を最大限に達成するための方策を検討することが、目的達成の観点では最初のステップである。一方で、性能の良い、ローコストなシステムを所定の期間内に計画し、設計、構築できたとしてもシステム工学の意図することは完全に達成されたとは言い難い。システム化され得た要求が質的に高度になり、恒星が量的に複雑化してくれば、その内部の部品のどれかが故障したら、システムの運用に重大な影響を与えるようになる。[61]こういった視点から、システム設計においては、その性能評価と信頼性評価の両面のバランスが重要であるとされる。こういった観点をレジリエンス設計という観点に照らし合わせた際に、3.2.2 項で述べたレジリエンスエンジニアリングの概念のうち、1970年代から性能ベース信頼性評価 (Performance-Related Reliability Measures for Computing Systems) [44]といった手法が構築された。本手法は信頼性と性能の相互作用を反映した指標として開発されたものであるが、特に従来型の冗長構成である待機システム、冗長システム(または、並列システム)といった概念のシステムではなく、優雅に劣化するシステム (Gracefully degrading system) のパフォーマンス評価を確率論的に実施するものである。Hollnagelら [47] や Jacksonら [48] のレジリエンス概念に基づけば、正常時はよりパフォーマンスを安全投資が日々の性能向上を実現させるよう、Graceful degrading なシステムを構築することが望ましく、こういった特性の評価を可能とする手法が性能ベース信頼性評価 (Performance-Related Reliability Measures for Computing Systems) [44]であると考えた。

ここでは、性能ベース信頼性評価の概念を示す。システムの故障状態の集合を F とし、システムの状態を i 、現時刻を t とすると、システムは式(5)の確率で故障していない状態にある。

$$\sum_{i \notin F} P_i(t) \quad (5)$$

ここで、 α_i をシステムの状態が i の場合のパフォーマンスと定義すれば、システムの性能ベース信頼性 α_c は式(6)により与えられる。

$$\alpha_c(t) = \sum_{i \notin F} \alpha_i \cdot P_i(t) \quad (6)$$

単純に言えば、本式は性能の異なるシステムの状態に紐づくパフォーマンスを用いて、性能の期待値を算出している。Danielle Beaudry [44] の提案における例では、 N 個の同一の処理モジュールから構成される gracefully degrading システムの状態をマルコフ連鎖によりモデル化し、それぞれの状態にパフォーマンスの紐付けを行なっている。その上で、スタンバイ冗長によって構成されるプロセッサコンピュータと、同時に動作を行う優雅に劣化するプロセッサコンピュータの信頼性評価の比較の問題のように、性能ベース信頼性指標によって、時間経過とともに期待される計算の総量を信頼性・性能の両面から評価が可能した。

本論文において対象とする洪水早期警報にこれを当てはめる。洪水早期警報システムの有効

性を示すことに重要な指標である、情報リードタイム (LD)、警報を受けた人数 (F_{rw})、警報に対してどのように対処するべきか知っている人数 (F_c) を考える。ある構築された洪水早期警報システムでは、 LD や F_{rw} 、 F_c といったパラメータが一意的に与えられるように見える。しかしながら、実際には CBEWS のように機器の故障率、社会的な Preparedness が動的に関わるようなシステムを考えれば、持続可能性の評価においては確率的な期待値を考慮することが妥当であると考えた。また、洪水早期警報のように政府から得られる情報、コミュニティから得られる情報、またそれぞれの情報が届く人数、応答方法を知っている人数は、それぞれの相互依存的な関係に基づき利用可能な状態によって決定される。そのため、利用可能なシステムや機能ごとに状態 (End State) を定義し、それぞれのシステム状態が達成されている確率を定量化した。それぞれの End State に対して見込まれる LD や F_{rw} 、 F_c を紐づけ、式(6)に基づき、確率論的可用性を考慮した性能期待値を式(7)(8)(9)に示す。

$$E(LD) = \sum_i LD_i \cdot (\text{Probability of EndState } i) \quad (7)$$

$$E(F_{rw}) = \sum_i F_{rwi} \cdot (\text{Probability of EndState } i) \quad (8)$$

$$E(F_c) = \sum_i R_{pi} \cdot (\text{Probability of EndState } i) \quad (9)$$

コミュニティ早期警報では、政府からの情報源によるリードタイム、コミュニティからの情報源によるリードタイムや、コミュニティベースによって得られる情報の警報散布カバー率、政府や地域によって整備されるラジオやテレビといった手段により得られる警報散布カバー率、警報情報とともに発出されることによってもたらされる災害への応答方法を知っている人数など、得られる情報源によって、パフォーマンスが異なる。こういった状態を EndState としてあてはめ、また対応するリードタイムや警報を受けた人数、災害への応答方法を知っている人数を掛け合わせることで式(1)にて定義した洪水警報の効率を算出することができる。次項ではこれらの EndState の定義方法や、いかにしてその確率を算出するかを示す。Molinari らの研究 [62]では、イベントツリーを用いて洪水早期警報システムの性能について評価を実施しているものの、イベントツリーのみではリードタイム等のように洪水早期警報の重要な性能を考慮し切れていない欠点を述べている。後述のイベントツリーを本項で説明した手法と組み合わせることによって、Molinari らの述べるイベントツリーの欠点を克服することを可能とした。

5.4.3 確率論的リスク評価

確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment: PRA) は現在、輸送、建設、エネルギー、化学プロセス、航空宇宙、軍隊やプロジェクト計画と金融マネジメントにいたる多くの分野で広く応用されており、安全性に対する要求の正当性を証明するためや、一層の改善の必要性を示すためにますます適用されるようになってきている。あらゆる分野において、PRA を経営上の意思決定支援道具として用いる傾向があり、リスク管理の分野においてその重要度が高まっている [63]。リスク管理においては、危険要因 (ハザード) に対してどのように対処するかを議論する。PRA においては、このハザードが実際にどのような結果をもたらすかについての不確定性を確率論によって定量化し、「何が起こり得るか?」「それはどのくらい起こりやすいか?」「それが起こったとして、その結果はどうなるのか?」を分析する手法である [63]。

PRA 手法にも幅広い手法が提案されているが、本論文ではシステム特性を構造、振る舞いの両面から分析し、シーケンシャルな動作を対象として、その目的を達成できる確率を評価することにおいて多く活用されている故障木 (Fault Tree: FT) と事象木 (Event Tree: ET) を用いたシステムの定量的な解析による手法 [64] を用いて、CBFEWS のコンテキストに対する適用・分析を試みる。

まず本論文が対象とする PRA 手法の基本的なフローを説明する。図 5-15 に Event Tree/Fault Tree の接続関係を示す。これらの Event Tree/Fault Tree を用いて次に示すフローによって、PRA 実施のためのモデルを構築する。

- ① 対象システムのシーケンシャルな動作を Event Tree を用いて分析し、それぞれの End State である動作状況を整理する。
- ② Event Tree 上で取り扱うシーケンシャルな動作に対して、それぞれ Fault Tree を作成し、各動作が実現されるために必要となる要素を分解し、それぞれの要素に信頼度を配分し、それぞれの動作の実施成功確率を算出する。
- ③ Event Tree を用いて、Event Tree 上の Initiating Event (IE) から、各 End State までの到達確率を伝搬させ、各 End State の発生確率を算出する。

図 5-15 を用いて具体化すると、まずは、IE2 として対象となる初期イベントを定義し、そこから各イベントにおいて、成功、失敗の2分岐を繰り返していき、最終的な End State に到達するまでの分岐条件を Event Tree を用いて表現する。ここでは、6つの End State が定義されているが、すべてが YES (すべてのシーケンシャルイベントの実行に成功) に働けば、OK の End State となり、すべてが No (すべてのシーケンシャルイベントの実行に失敗) に働けば、LOV という End State を得ている。Event Tree において Yes/No の分岐が発生しているポイントでは、AA、BB といったイベントにおいて Yes/No に至る確率の配分がなされることで、End State に至るまでの確率を伝搬することができる。ここでは、AA、BB というイベントを成功させるため (または、成功させられない場合) の確率を算出するために、それぞれの AA、BB というイベントを実現させるための Fault Tree が記述されている。Fault Tree は TOP 事象 (ここでは、AA、BB、CC、DD といったシーケンシャルなイベント)

を頂上において、その事象が生じるための発生要因を因果関係に従い展開し、それぞれの間を AND, OR などの論理記号で結合する。これによって、展開される図は樹木状の図となり、発生要因の直観的把握を簡単にしている(Fault Tree Analysis: FTAと呼ばれる)。さらに、FTA はシステムや機器の故障だけでなく、人間のエラーを含めた故障の解析と検討ができることに特徴がある [61]。今回の対象とする CBFEWS においても、図 5- 11, 図 5- 12 で示したように、Technical-based System と Social-based System に分かれており、とくに Social-based System においては人間のエラー確率を導入することにより、ソシオテクニカルシステムに対する評価を実施することが可能となることから、本手法は CBFEWS のシステムズアプローチによる評価に適していると考えた。

このように、PRA では、評価対象とする Event Tree および Fault Tree を用いてモデル化することで、そのアーキテクチャの評価に試することができる。また、こういったアーキテクチャ情報は、5.3 項にて示した、CBFFEWS のアーキテクチャ記述結果を用いれば、スムーズな記述が可能であり、以降より対象とする CBFEWS の Event Tree/Fault Tree への変換を試みる。

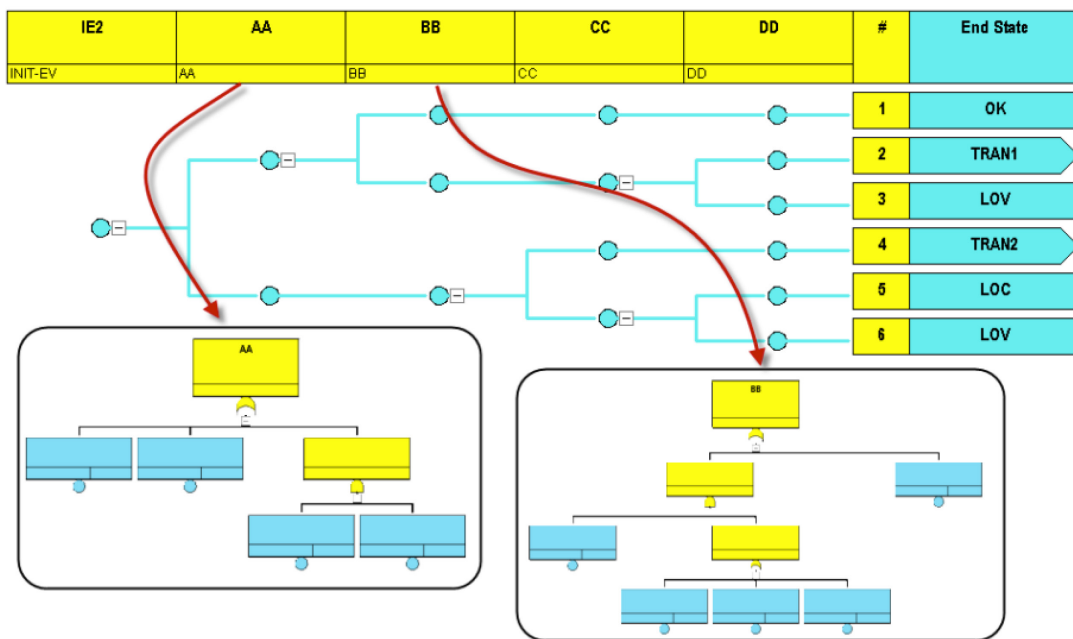


図 5- 15. Event Tree/Fault Tree の接続 [64]

(1) CBFEWS の事象木解析(Event Tree Analysis: ETA)

CBFEWS における ETA は、図 5- 10 における Flood Loss Reduction の動作をもとに行った。ETA におけるイベントはいずれも Flood Loss Reduction におけるアクティビティに対応しており、それらのアクティビティの成否に基づき success/fail の分岐を網羅的に記述している。PRA 解析上は、ETA における分岐を全て記述しても、解析は成立するが、End State 数が膨大になるため、可能な限り解析を簡素化できるよう、発生し得ない End State は削除している。ここでは、地域ベース検知、施政ベース検知の両方が fail となった場合、基本的には下流においては散布する情報も得られないことから、このケースでは地域ベース散布、施政ベース散布の success/fail を分岐することはせず、完全非動作として丸あげている。このようなイベントツリーの各ステートが多状態多値決定グラフにおける状態に対応している。さらにこれらの End State に対してパフォーマンス情報である値を割り当てすることで、多状態システムのモデリングを可能とする。

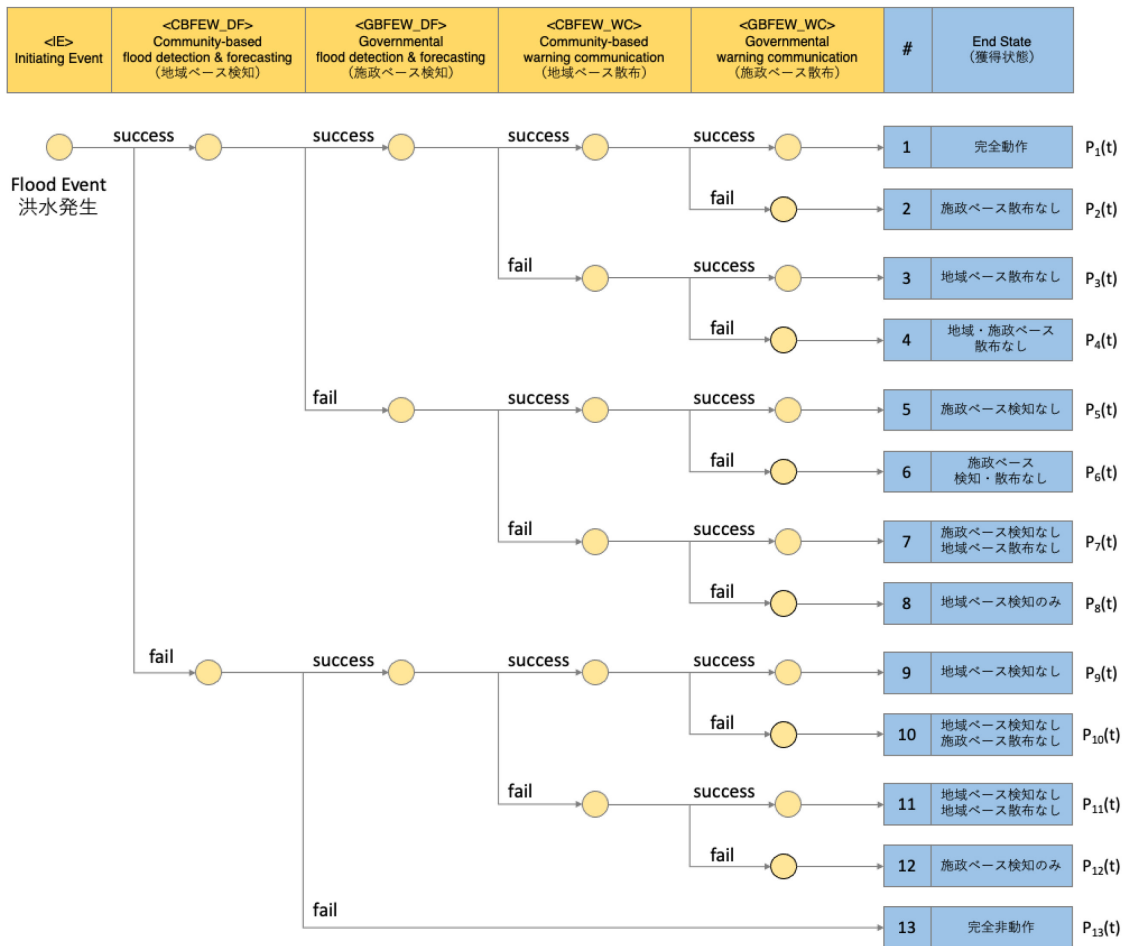


図 5- 16. CBFEWS における Event Tree Analysis 結果

(2) CBFEWS の故障木解析 (Fault Tree Analysis: FTA)

CBFEWS における FTA は, 図 5- 11, 図 5- 12 における Community-based flood detection & forecasting と Community-based warning communication に対して実施した. (なお, CBFEWS のコンテキストにおいては, Governmental-based flood detection & forecasting と Governmental-based warning communication もアクティビティとして存在するが, レジリエンス評価の対象ではないため, FTA の詳細化は行っていない.) 図 5- 11, 図 5- 12 のアクティビティ図に基づき, Community-based flood detection & forecasting の TOP 事象に対しては, OR ゲートを用いて, 洪水予兆の検知とデータ保管の失敗, 洪水検知判断の失敗を挙げている. Community-based warning communication の TOP 事象に対しては, OR ゲートを用いて, 技術システムによるアラート発出の失敗と散布判断の失敗を挙げている. これらを用いて, FTA における下流側の事象をより詳細化していくことで, システムを実現するための故障率や修理率, 人間信頼性を用いて各 TOP 事象の success を定める瞬間アベイラビリティは $A_e(t)$ (e は ETA におけるイベントを指す) (fail を定める瞬間非アベイラビリティは $1 - A_e(t)$) として導出でき, ETA における確率算出の実行に用いることができる. メタ解析時点では, いずれの TOP 事象も2つの要因のみの簡素な FTA であるが, さらに下流の事象は地域ごとの導入する CBFEWS の技術, 社会の構成によって異なり, 詳細化される. 第 6 章にて具体的なシステムへの適用を試みる.

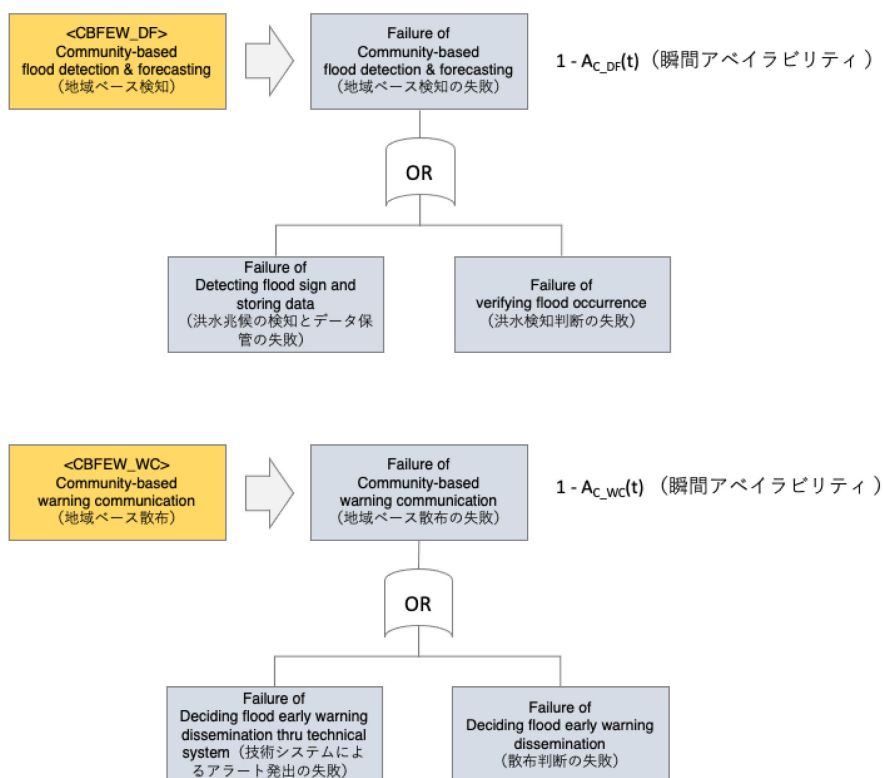


図 5- 17. CBFEWS における Fault Tree Analysis 結果

5.4.4 評価計算モデルの統合

ここまでで議論を進めた 5.2 項におけるベースとなるシステムダイナミクスモデル, 5.3 項における評価対象システムのアーキテクチャを取り込んだ 5.4.1 項, 5.4.3 項の性能ベース信頼性評価手法, 確率論的リスク評価手法を統合したモデルを図 5- 18 に示す. モデルは離散時間固定ステップによるシミュレーションとし, 最小ステップを 1 日と設定した. 図 5- 4 におけるシステムダイナミクスを MATLAB & Simulink(R2022a)により書き起こした.

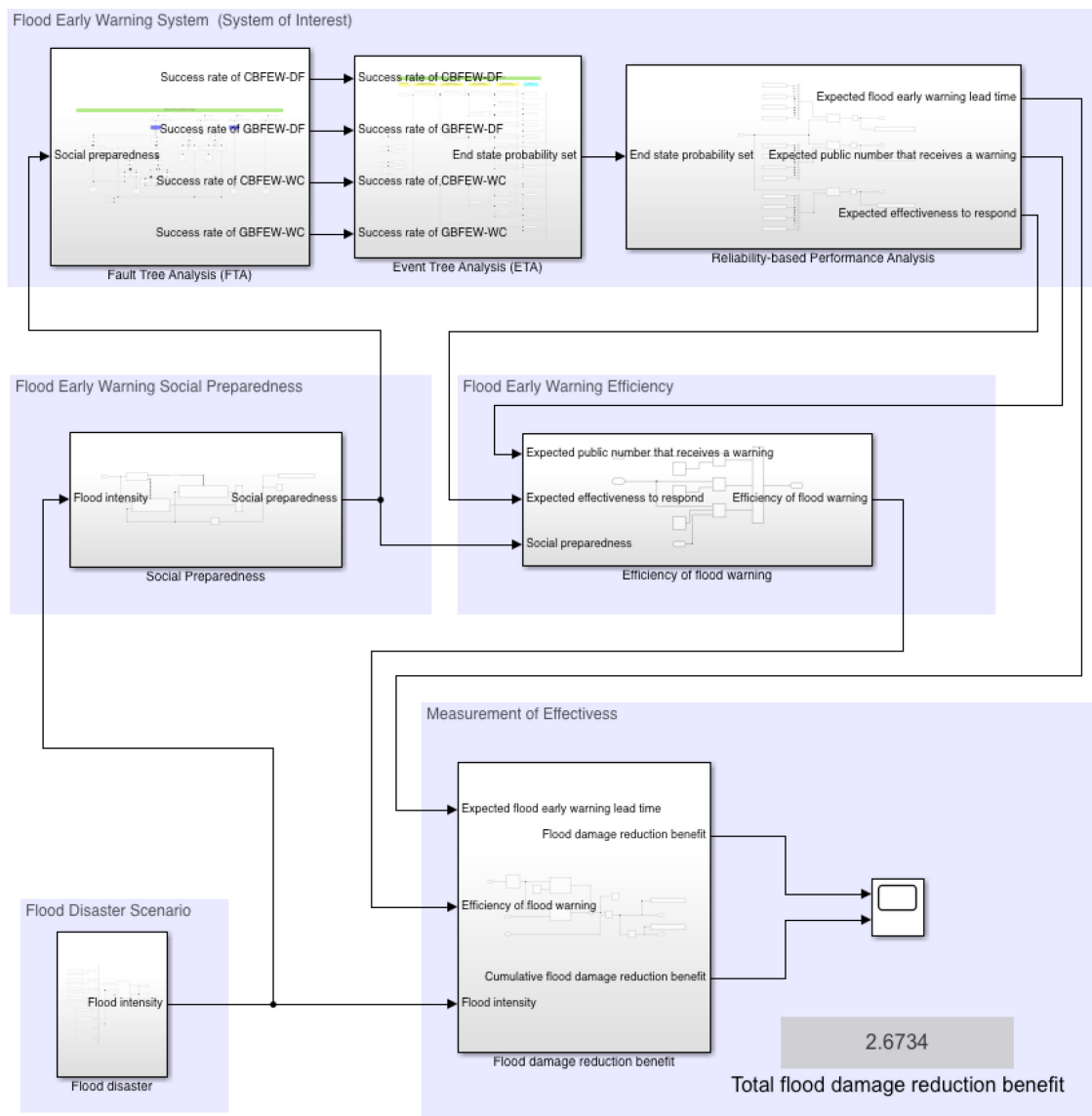


図 5- 18. CBFEWS 統合レジリエンス評価解析モデル

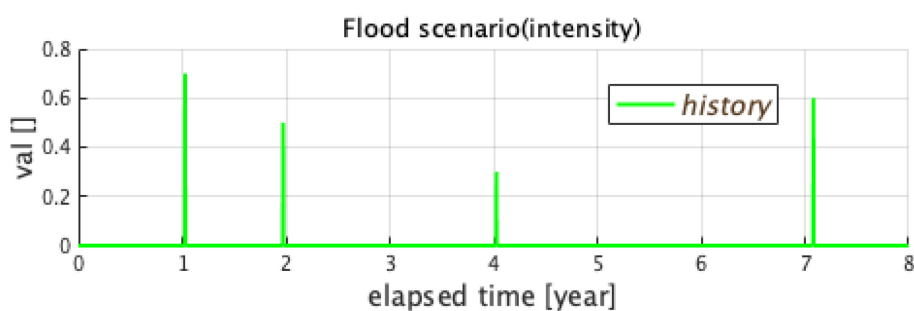


図 5- 19. 洪水シナリオ生成の例

ここでは、モデルの解析方法について説明する。各モジュールにて使用するモデルとパラメータについては表 5- 2 に示す。解析では、まず図 5- 19 に示すような洪水シナリオの生成から始まる。洪水シナリオ生成では、洪水の発生フラグとその洪水に対応する強度を生成する。その情報が Social Preparedness に伝達され、洪水発生ごとに洪水発生ごととしては Social Preparedness の向上に関与しつつ、洪水の発生していない期間では経時的に減衰を持つ。System of Interest である CBFEWS のアーキテクチャを記述している FTA, ETA モジュールが常に動作し、Social Preparedness に紐づく人間信頼性や、技術システムの故障率・復旧率をもとに瞬間アベイラビリティを算出し、それに伴う信頼性ベースパフォーマンスを算出するこれらを統合して、洪水早期警報の効率を計算の上、最終的には、表 3- 1 で示したリードタイム、洪水被害の強度をもとに 2-D ルックアップテーブルを使用して、洪水被害低減効果を算出する。図 5- 20 に ETA のモジュールの様子を示す。FTA モジュールの様子については 6.2.1 項、6.3.1 項のそれぞれのプロトタイプごとの記述に示す。各シミュレーションを数年単位で実施することで、またそのなかに複数の洪水を発生するようなシナリオを設定することで、指定の経過年数の範囲内における累積的な洪水被害低減効果を計算することで、システムの有効性の変動を考慮した上で洪水被害低減効果の期待値、つまりは本論文の定義するレジリエンスを定量的に評価できるようにモデルを設計した。算出されるレジリエンスは設定するパラメータの不確定性によって、結果が異なる。これに対しては、本モデルをモンテカルロ解析によって駆動させることで、不確定性を考慮した上で評価を実施できるように配慮している。



図 5- 20. Event Tree Analysis モジュール

表 5- 2. CBFEWS 統合レジリエンス評価解析モデルの各モジュール説明

モジュール	モデル	パラメータ
Flood Disaster	洪水強度と洪水時期パラメータに基づき, 図 5- 19 に示すような洪水シナリオタイムラインを生成する. 洪水がない時期には0, 洪水が発生した際には洪水強度を出力する.	洪水強度, 洪水時期
Social Preparedness	社会的準備態度の動的な特性をモデル化したものである. モデルは式(3), (4)に従う. Flood Disaster からの出力する洪水強度に伴い, 洪水がない時期には社会的準備態度の減衰, 洪水が発生した場合には洪水強度と洪水に対する Social Preparedness への影響マグニチュードに従い, 次の解析時刻ステップ(洪水イベント後)に, 社会的準備態度のストックを増加させる. なお, 洪水警報が発生しないような小さなイベント(洪水警報閾値以下の場合)では, 社会的準備態度は増加しない.	洪水に対する Social Preparedness への影響マグニチュード, 洪水強度, Social Preparedness 半減期, Social Preparedness 減衰レート, 洪水警報閾値
Fault Tree Analysis	図 5- 17 の FTA をベースとして, 対象イベントの瞬間アベイラビリティを計算する技術システムの場合, コンポーネントは故障率と修理率を考慮した修理系システムの瞬間アベイラビリティとし, 社会システムの場合, コンポーネントは社会的準備態度を瞬間アベイラビリティとして使用する. 評価対象は CBFEWS であることから, 施政に関するシステムのアベイラビリティは常に1とした.	各機器の故障率, 修理率(入力するパラメータは FTA の構築結果に基づく)
Event Tree Analysis	図 5- 16 の ETA をベースとした多状態多値決定グラフとして, 入力される各イベントの瞬間アベイラビリティを参照し, 各エンドステートの発生確率を算出する.	—
Reliability-based performance Analysis	Event Tree Analysis から出力された各エンドステートの発生確率および, パラメータである各エンドステートのパフォーマンス情報をもとに, 警報リードタイム, 警報応答支援率, 警報空間カバー率の各期待値を算出する. 計算手法は	各エンドステートのパフォーマンス情報(警報リードタイム, 警報応答支援率, 警報空間カバー率)
Efficiency of Flood Warning	警報空間カバー率(=警報を受けた市民の割合), 警報応答支援率(=早期警報に対して効果的に応答する手段を知っている, または援助する人がいる割合), 社会的準備態度(=早期警報に応答する意思のある市民の割合)に基づき, 洪水警報の効果効率を算出する. モデルは式(1)に従う.	—
Flood Damage Reduction Benefit	入力される洪水強度, 警報リードタイム, 洪水警報の効率をもとに, 洪水イベントが発生した場合の洪水被害低減効果を算出する. また, 解析期間における複数の洪水イベントの洪水被害低減効果の合計値を算出し, その出力を CBFEWS によって達成される長期的な被害低減効果(=本論文の定義するレジリエンス)として扱う. モデルは式(2)に従う.	洪水強度と浸水深さの対応テーブル

5.4.5 レジリエンス重要度分析

評価計算モデルの統合を完了して準備が整えば、そのモデルを用いてシステムや機器の重要度を定量的に順位付けすることが可能 [64] [65]となる。こういった手法を「重要度評価」や「Importance Ranking」と呼ぶ。このような重要度指標の本質的な意味は、対象機器や対象システムの故障確率をオリジナルの値(機器故障率データベースなどから得られる値)から1あるいは0に変えた時に、評価対象の異常発生頻度がどの程度変化するかを計算し、異常発生頻度の感度を示す。重要度指標としては、Birn Baum, Fussell Vesely, Risk Achievement Worth, Risk Reduction Worth などがあり、原子力分野や航空宇宙の分野においては、これらを使い分けて、確率論的リスク評価を用いて、リスク箇所の特定評価が実施 [64] [65]されている。

一方、本論文ではシステムの評価において、従来の故障率のみを対象としたリスク評価ではなく、3.2.2 項で示したような Safety-II, つまり特性向上(=パフォーマンス)も同時に考慮した、レジリエンスの評価を行うことが目的である。そのため、対象機器やシステムの故障確率の変化に対する重要度指標に止まらずに、その他のパフォーマンスパラメータについても同時に評価が実施できるよう、重要度指標を拡張することとした。

Risk Reduction Worth (RRW, リスク減少重要度) は、対象機器の故障確率を0とおいた時(=対象機器やシステムが絶対に故障しないと仮定した場合)に、システム異常発生頻度がどの程度低下するかを示す指標である。つまり RRW の値が大きい場合、改善対策の効果が大きいシステムである。Risk Achievement Worth (RAW, リスク増加重要度) は、対象機器の故障確率を1とおいた時(=対象機器やシステムがかならず故障すると仮定した場合)に、システム異常発生頻度がどの程度増加するかを示す指標である。つまり RAW の値が大きい場合、安全上の重要度が高い機器である [64] [65]。これらの指標を整理したものを表 5-3 に示す。R₀ はベースラインとして故障率が標準値出会った場合のシステム全体の故障率を示し、R は重要度評価対象の機器それぞれに対して一つずつ故障率を1または0に変化させることで算出した条件付き確率としての全体の故障率を示す。これらの比をとったものが RRW, RAW である。一方、本論文ではレジリエンスの評価において、R₀ として計算されるベースライン計算結果は故障確率ではなく、レジリエンス評価指標としての Res₀ として設定し、条件付き指標としても Res(xi=best (レジリエンス向上において最適なパラメータを選択) または worst (レジリエンス向上において最悪なパラメータを選択)) のように与えることで、確率論リスク評価における信頼性のみを考慮したリスク評価に対して、パフォーマンスなどあらゆるレジリエンス向上につながる因子を考慮した指標として扱えると考えた。これらの指標をそれぞれ、レジリエンス喪失重要度 (ResRW: Resilience Reduction Worth), レジリエンス獲得重要度 (ResAW: Resilience Achievement Worth) と名づけた。ここで重要度指標として RRW, RAW をもとに設計した理由は、重要度を単純な比から算出することから、各重要度の値そのものもベースラインに対するレジリエンス向上倍率として直感的にわかりやすいと考えたためである。

表 5- 3. 従来のリスク重要度評価計算手法

手法	計算式	指標の持つ意味
リスク 減少重要度 Risk Reduction Worth (RRW)	$I_{x_i}^{RAW} = \frac{R_0}{R \Pr(x_i) = 0}$	対象機器やシステムの故障確率を0と置いたときに、リスクの低下しやすさを示す。 この指標が大きいシステムは、不具合が発生した場合のシステム全体への影響が小さい。
リスク 増加重要度 Risk Achievement Worth (RAW)	$I_{x_i}^{FV} = \frac{R \Pr(x_i) = 1}{R_0}$	対象機器やシステムの故障確率を1と置いたときに、リスクの増加しやすさを示す。 この指標が大きいシステムは、不具合が発生した場合のシステム全体への影響が大きい。

表 5- 4. 提案するレジリエンス重要度評価計算手法

手法	計算式	指標の持つ意味
レジリエンス 喪失重要度 Resilience Reduction Worth (ResRW)	$J_{x_i}^{ResRW} = \frac{Res_0}{Res(x_i = worst)}$	対象機器やシステムの故障確率やパフォーマンスを取り得るベストな状態と置いたときに、レジリエンスの低下しやすさを示す。 この指標が大きいシステムは、システムパラメータ改悪時のレジリエンス改悪への影響が大きい。
レジリエンス 獲得重要度 Resilience Achievement Worth (ResAW)	$J_{x_i}^{ResAW} = \frac{Res(x_i = best)}{Res_0}$	対象機器やシステムの故障確率やパフォーマンスを取り得るワーストな状態と置いたときに、レジリエンスの増加しやすさを示す。 この指標が大きいシステムは、システムパラメータ改善時のレジリエンス向上への影響が大きい。

なお、重要度指標に対して類似の考え方をもち指標が感度解析である。感度解析の目的には、リスク決定のための施策検討も含まれるが、予測モデルのパラメータ(入力変数)に複雑さが付随するのが普通であるという立場に対して、こうした入力変数の不確実さがモデル内に伝搬されて、モデルの予測結果(出力変数)にも不確実さをもたらすことを帰納的に算出する [66]。ローカル感度解析やグローバル感度解析といった手法を用いることで、不確実性を考慮した上で評価を実施できるものの、入力因子となるパラメータ全てを分散させた状態での感度を確認するため、ある程度意味のある不確実性の範囲が決定できることが重要である。一方で、今回対象とする CBFEWS におけるレジリエンス評価では、限定的なデータにモデル化を頼ることや、人間・社会的な非常に

不確定性の範囲すら曖昧なパラメータを含むことから、あくまでベースラインシナリオ(入力パラメータ変動なし、または入力パラメータ変動に意味を持たせて設定可能な範囲で分散考慮)を設定した上で、RRW や RAW といった手法をベースとして、ある因子に対しての感度を個別で評価する手法を採用した。当然ながら、こういった感度解析により、どのパラメータは感度が大きく、モデルへの影響に現れやすいことを把握することは、モデル精度の向上を行う際に有用な手段であることに留意する。

図 5- 20 に重要度分析のフローチャートを示す。図 5- 18 にて構築したシミュレーションモデルに対して、本フローチャートに従いはじめにベースラインのパラメータによる解析を実施して Res_0 を計算した上で、評価対象である因子のパラメータをベスト値、ワースト値と変化をさせながら $Res(x_i = worst)$, $Res(x_i = best)$ を取得し、レジリエンス減少価値、レジリエンス増加価値を計算する。この処理を評価を行いたい年次ごとに複数回実行することで、年数を経るにつれて評価因子ごとのレジリエンス減少価値、レジリエンス増加価値の重要度の変化の様子を捉えることができる。

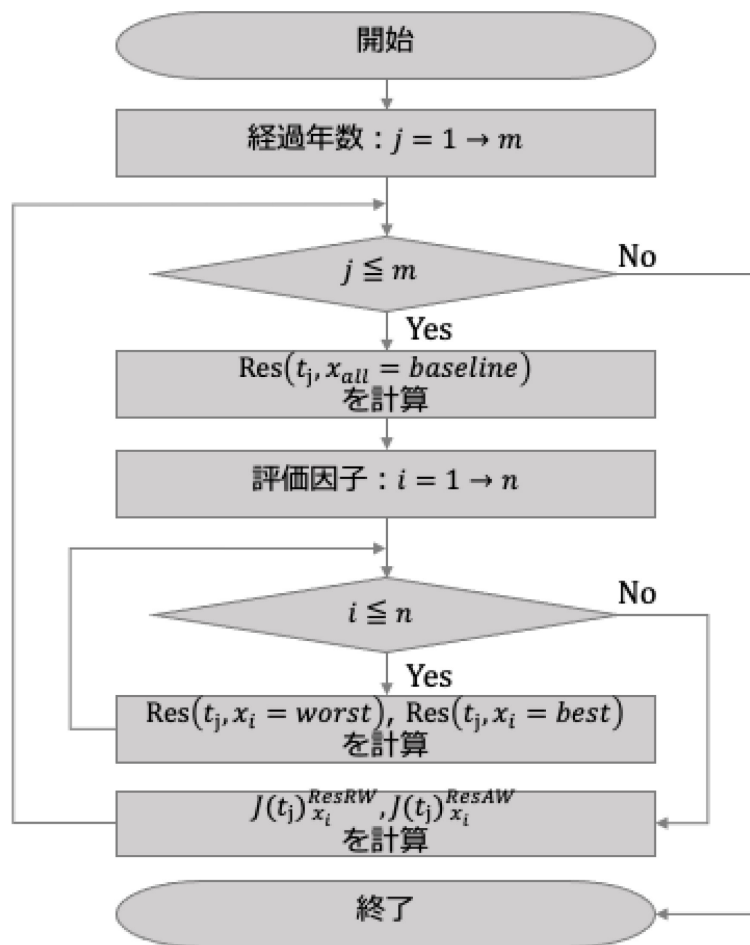


図 5- 21. 重要度分析フローチャート

第6章 モデルの評価

本章では、提案したコミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス重要度分析モデルに対する評価として実施した2つのプロトタイプングについて述べ、モデルの有効性を確認した。

6.1 評価方針

前章まででコミュニティベース洪水早期警報システムを対象とした、長期的な持続可能性を決定する要因としてのレジリエンスを測定するためのモデルを設計した。表 6- 1 にてモデルにおける検証計画、表 6- 2 にて提案モデルのユースケースに対する妥当性確認内容をそれぞれ示す。検証計画では、モデル自体の評価として、洪水早期警報による被害低減ダイナミクスの解析モデルへの変換(CBFEWS-RESIL-REQ-01)、既存の CBFEWS のアーキテクチャ記述のモデルへの取り込み(CBFEWS-RESIL-MODEL-REQ-02)、動的シナリオ評価(CBFEWS-RESIL-REQ-03)をそれぞれ実施した。また妥当性確認計画では、ツールを用いて実際に課題解決(レジリエンス評価による持続可能性獲得に向けたアクションプランの検討)として、CBFEWS 重要因子の抽出・評価(CBFEWS-RESIL-CONOPS-01)、CBFEWS 改善提案の評価(CBFEWS-RESIL-CONOPS-02)をそれぞれ実施した。

これらの評価を行うにあたり、評価の対象システムの定義(6.2 項)を行った上で、プロトタイプング(6.3 項, 6.4 項)を2つ実施した。プロトタイプング1(6.3 項)としては、既存の CBFEWS システムに対して実際にモデルを適用し、既存のコミュニティベース洪水早期警報の持続的な運用に向けて、レジリエンスを向上するために、技術・社会両側面を考慮した重要因子の抽出・評価ができることを検証した。その上で、CBFEWS に熟知するステークホルダーに対してアンケート調査を行い、その結果との比較を用いてモデル適用結果の妥当性確認を行った。また、プロトタイプング2(6.4 項)としては、既存の CBFEWS を拡張する追加の改善設計を行うシナリオを想定し、レジリエンス向上の度合いを事前評価できることを検証した。さらに、同様に追加の改善設計を関係ステークホルダーに対してプレゼンテーションすることで、その改善提案におけるシナリオの良し悪しをヒアリングし、モデルの有用性(ないし、改善事項)に関して妥当性確認を行った。

表 6- 1. モデルに対する検証計画

ID	CBFEWS-RESIL-REQ-01	CBFEWS-RESIL-MODEL-REQ-02	CBFEWS-RESIL-REQ-03
Title	洪水早期警報による被害低減ダイナミクス	評価対象アーキテクチャの取込(入力)	動的シナリオ予測の解析テスト(出力)
Requirement	モデルは、コミュニティベース洪水早期警報の被害低減におけるシステムダイナミクスを定量的な解析モデルとして変換可能なこと。	モデルは、既存のCBFEWS のアーキテクチャ記述を、定量的な解析モデルとして取り込み(入力)が可能なこと。	モデルは、CBFEWS による長期間における複数の洪水を考慮した洪水被害の低減効果を算出(出力)が可能なこと。
Verification methodology	検査(文献レビュー, インタビュー)	検査(レビュー)	テスト(解析)
Result	5.4.4 項(システムダイナミクスモデルの評価計算モデルへの統合, 第 5 章において実施済み)	6.3.2 項(プロトタイプ1における検査), 6.4.2 項(プロトタイプ2における検査)	6.3.2 項(プロトタイプ1におけるテスト), 6.4.2 項(プロトタイプ2におけるテスト)

表 6- 2. モデルに対する妥当性確認

ID	CBFEWS-RESIL-CONOPS-01	CBFEWS-RESIL-CONOPS-02
Title	CBFEWS 重要因子の抽出・評価	CBFEWS 改善提案の評価
Requirement	既存のコミュニティベース洪水早期警報の持続的な運用に向けて、レジリエンスを向上するために、技術・社会両側面を考慮した重要因子の抽出・評価ができること。	既存のコミュニティベース洪水早期警報アーキテクチャに対して、追加の改善設計を行う際に、レジリエンス向上の度合いを事前評価できること。
Validation Methodology	デモンストレーション(解析), アンケート	デモンストレーション(解析), プレゼンテーション
Result	6.3.3 項, 6.3.4 項(プロトタイプ1におけるアンケート)	6.3.3 項, 6.3.4 項(プロトタイプ2におけるプレゼンテーション)

6.2 評価の対象システム

6.2.1 ヒマラヤ地帯の災害脆弱地域における洪水早期警報

(1) 対象システムの選定

コミュニティベース早期警報が必要な地域は、総じて洪水被害が多発しており、かつ後発開発途上国といった貧困層の多い地域であることが、図 1- 10, 図 1- 11 から読み取ることができた。この中で、特にコミュニティ洪水早期警報に早くから取り組み、その実装まで成功している支援団体(ICIMOD(The International Centre for Integrated Mountain Development):国際総合山岳開発センター)の存在するネパールの災害脆弱地域におけるシステムは非常に学ぶところが多く、今回の評価対象のシステムとして選定した。選定理由は以下のとおりである。

- 2015 年より CBFEWS の導入を行い、直後の 2016 年に発生した洪水イベントにおけるシステムの動作結果(リードタイム, 通知範囲)の取得に成功している [30]。
- 2022 年現在まで、大きな洪水としては 3 年に 1 度ほど、また毎年モンスーン時期における大雨時期には早期警報アラームがトリガーされるなど、継続的な運用維持に成功している。(CBFEWS 開発関係者からヒアリング)
- CBFEWS のシステム・アーキテクチャが公開 [2]されており、モデリングに活用できるリソースが揃っている。
- 同等な CBFEWS が既に複数地域へ導入(図 6- 1)されており、関係者の持続可能性に関する知識が蓄積されていると推測した。

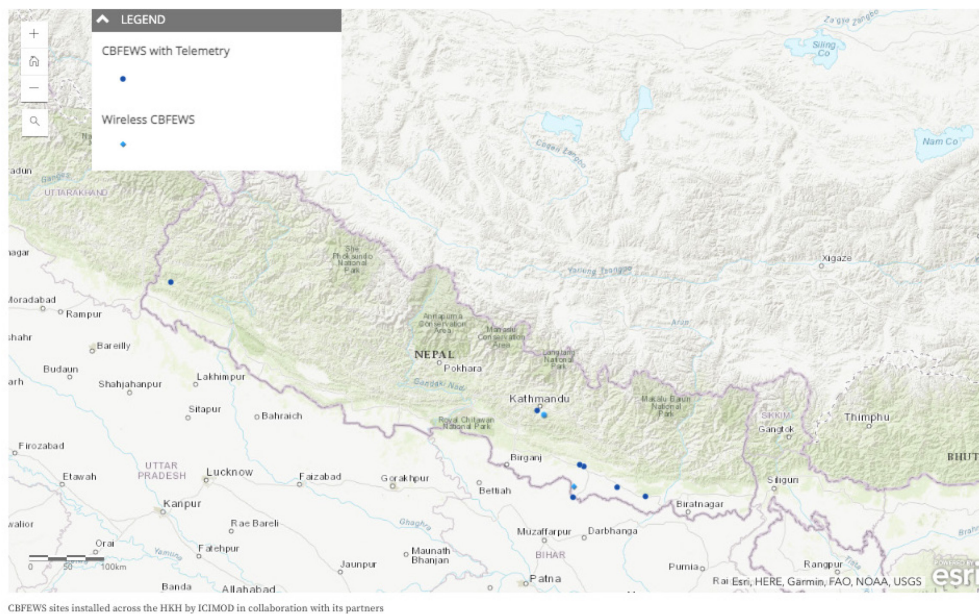


図 6- 1. ICIMOD によるコミュニティ洪水早期警報システム実装地域(ネパール) [67]

(2) 対象地域とシステムの特性

今回の提案モデル評価に用いる対象地域は、先行研究 [30]において情報脆弱地域においてパフォーマンスデータの取得に成功しているネパール南部に位置するラトゥ流域に対する CBFEWS とした。ラトゥ川は海拔 740m のシワリック山脈に源を発し、全長 82km に及ぶ。源流部の河道の勾配は高く、平野部に入ると勾配が急激に減少する [30]。中流域の水路幅は 500m にも及び、2 つの主要支流を中心に複数の水路に編入されている [30]。この流域は亜熱帯モンスーン気候で、夏の気温は 30°C を超えるが、冬の月平均気温は 15°C から 20°C である [30]。流域の年間平均降水量は 1035mm から 1609mm である。年間総降水量の 82% 以上は、4 ヶ月間(6 月～9 月)に発生する。ラトゥは雨水による季節河川であり、冬には干上がり、夏には水流が発生する。この地域では、再現期間 10 年の洪水は通常の洪水(2, 3 年ごとに発生するそれほど深刻ではない)より深刻である可能性があるという結論づけている [30]。本先行研究における介入策(モニタリングと早期警報以外の構成要素)は、ネパールの政治・行政上の最下位単位である Sarpallo と Nainhi 村開発委員会(VDC)に限定されており、当時合計 2134 世帯、人口 18279 人であった。ネパールの急流河川における初の CBFEWS 介入であり、早期警報機器が 2015 年にラトゥ川沿いの 3 つの場所(カラパニ、ラルガド、サルパロ)に設置され、川の水位を監視したとある。また、これらの場所は、脆弱なコミュニティに少なくとも 2～3 時間の準備のためのリードタイムを提供するために選ばれた [30]。

参考文献 [2] [30]をもとに作成した使用するデータのベースとなる CBFEWS システム全体像を図 6- 1 に示す。前提とする ICIMOD が開発・運用を進める CBFEWS では、大きく3つの装置が活用される。Data acquisition unit と呼ばれる、川の推移を検出し、それを近隣の Caretaker が在住する街へデータを伝送する装置、Data upload unit と呼ばれるデータを受信後、インターネット上のサーバーにデータを保管し、また同時に Caretaker に対して必要に応じてアラームやディスプレイを用いて洪水予兆を伝達する装置、さらに下流にいる災害脆弱地域の住民に対して無線通信によりアラームを発出するための Alarm unit と呼ばれる装置である。基本的には装置が情報を伝達し、下流まで通知がなされるものの、重要な Socio system となるのが Caretaker であり、Vulnerable community 内における住民である。Caretaker は装置を通して洪水予兆を検知しながら、情報の正しさを他の村人やデータそのもの、また天気などの副次的な情報を用いて検証する動作を行うよう訓練がなされている。これによって、洪水警報の必要性を吟味することで、正確さを保つ。それだけでなく、Caretaker は一時処置としてのアラーム通知を行うだけでなく、より詳細な情報を携帯通信や SNS を用いて下流地域とコミュニケーションする役割を持つ。また、Data acquisition unit は唯一の河川水位情報源となりながらも、万が一の故障時には Caretaker が自ら河川のアナログな水位系を読み取ることで、洪水予兆を検知する役割も持つことから、Technical system に対する冗長系としての機能も Caretaker に対して付与されている。(ICIMOD 関係者からのヒアリング情報に基づく。)Vulnerable community についても同様に十分な訓練がなされることで、情報の通知を受けてから適切な行動を行うことで、洪水被害の低減を行うことができる。これらは、図 2- 1 において説明した、人間中心による早期警報システムにおける 4 つのキーエレメントにおける「対応能力とレジ

リエンスの強化」によって達成される重要な Socio system の役割である。

参考文献 [2] [30]の読み取りが正しく行えたかについては、著者が実際に本システムを運用する ICIMOD のテストフィールドである Godavari の ICIMOD Knowledge Park において装置を確認することで、モデリングの妥当性を確認した。調査を行った際の写真集は Appendix B を参照のこと。この結果を反映したアーキテクチャのモデルは 6.2.2 項に示す。

地域特性の反映として、ネパール当該地域の洪水発生に関する特性を考慮した洪水シナリオを生成するモジュールにて模擬した。具体的には、再現期間 10 年の洪水は通常の洪水(2, 3 年ごとに発生するそれほど深刻ではない)より深刻であるということ、3 年に 1 度ほど影響の無視できないほどの洪水が発生することを鑑み、以下に示すように 3 年に一度大きめの洪水が発生、比較的深刻な洪水が 10 年間の中で 2 回発生する最悪シナリオを想定、それ以外には毎年被害に達しないほどの豪雨が発生するシナリオを想定した。なお、本浸水深さとリードタイムに従い、表 3-1 のテーブルを用いて資産への被害割合を求めた。

1 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
2 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
3 年目:	0.8 (浸水深さ= +0.03m相当)
4 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
5 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
6 年目:	0.4 (浸水深さ= +0.03m相当)
7 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
8 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.14m相当)
9 年目:	0.8 (浸水深さ= -0.14m相当)
10 年目:	0.25 (浸水深さ= -0.24m相当)

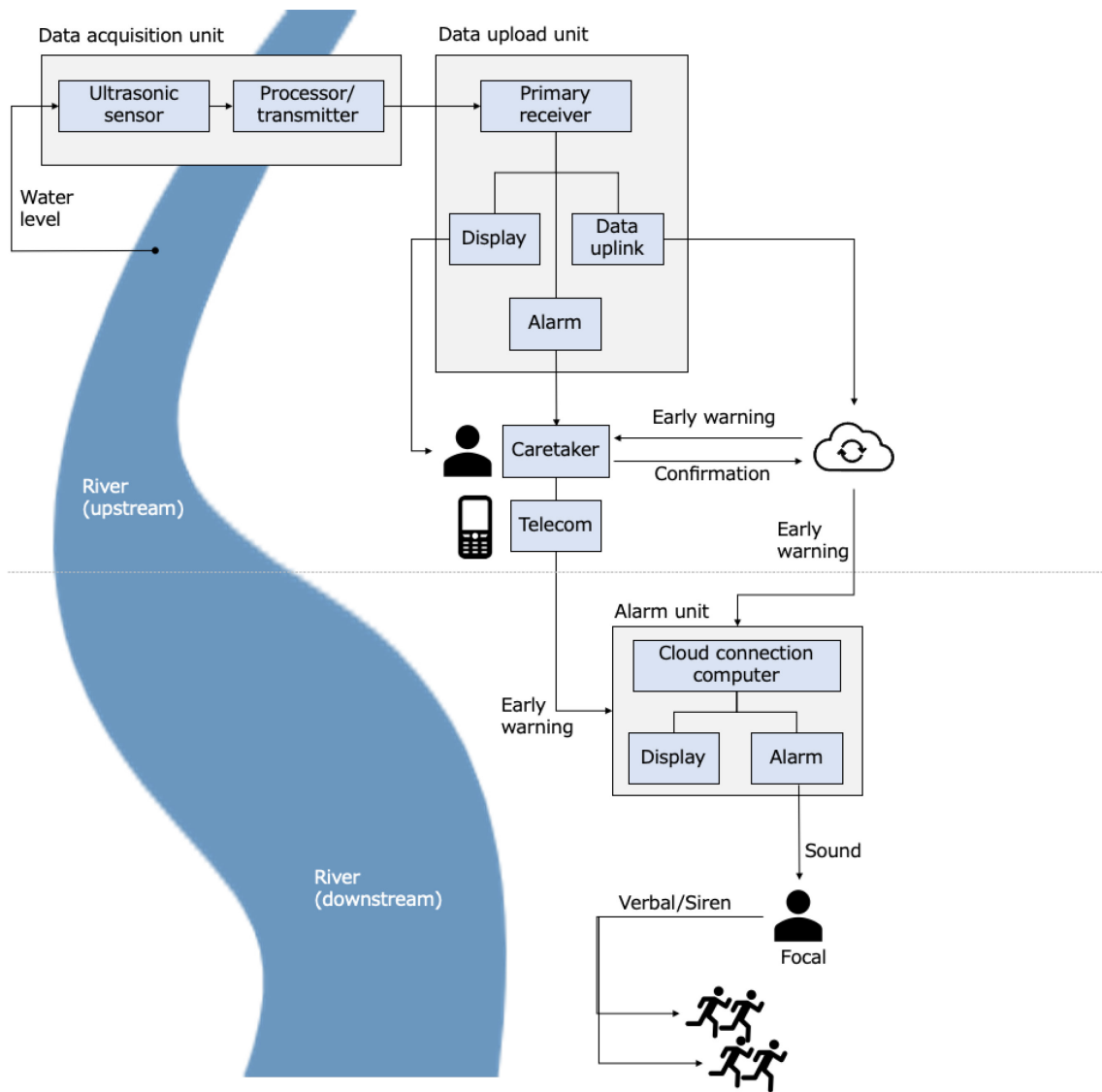


図 6-2. ネパール災害脆弱地域における CBFEWS システム全体像
 (参考文献 [2] [30]をもとに著者にて作成)

対象とする CBFEWS のパフォーマンスデータの取得結果として、先行研究 [30]では、2015 年におけるベースラインとなる CBFEWS の導入前のデータと、2016 年における CBFEWS 導入後のデータとして、洪水の情報を事前に受け取ることに成功した人数の変化、洪水とそのリスクに関する情報源が評価された。それぞれの追跡結果を表 6- 3、表 6- 4 にて示す。表 6- 3 の水の情報を事前に受け取ることに成功した人数を見ると、Before から After で 5.0%から 54.44%と劇的に改善に成功していることがわかる。つまり CBFEWS が適切に効果をもたらしている状態であれば、54.44%が情報を事前に受け取ることに成功し、CBFEWS が全く存在しない状態を想定すれば、5.0%のみの世帯が洪水発生前に事前に情報を受け取ることができていた。表 6- 4 の洪水とそのリスクに関する情報源を見ると、特に Community workers, Caretaker, EW network を用いて情報を入手することができた人数が大幅に改善していることがわかる。ここからも、CBFEWS が適切に機能することによって、情報の多経路化が達成できたことがわかる。本論文では、このデータを図 5- 1 における「CBFEWS パフォーマンス結果情報」としてモデルにインプットし、モデル有効性の評価に用いることとする。

表 6- 3. 洪水の情報を事前に受け取ることに成功した人数
(参考文献 [30]をもとに著者にて作成)

回答	Before (2015)		After (2016)	
	%	世帯数	%	世帯数
Yes	9	5.0	98	54.44
No	171	95.0	82	45.56
合計	180	100.0	180	100.0

表 6- 4. 洪水とそのリスクに関する情報源
(参考文献 [30]をもとに著者にて作成)

情報源	Before (2015)		After (2016)	
	世帯数	%	世帯数	%
Local government	12	6.7	12	6.7
National government	2	1.1	18	10.0
NGOs	9	5.0	2	1.1
Television/FM radio	39	21.7	11	6.1
CBOs	10	5.6	11	6.1
Community workers	19	10.6	47	26.1
Village head	4	2.2	3	1.7
Newspaper	1	0.6	3	1.7
Caretaker (Mobile phone)	0	0.0	30	16.7
EW network	0	0.0	68	37.8

6.2.2 CBFEWS のアーキテクチャ記述

図 5-1 において、レジリエンス向上のためのモデルのインプットとして、6.2.1 項に示した「CBFEWS パフォーマンス結果情報」に加え、「CBFEWS アーキテクチャ情報」も必要であることを示した。5.3 項でも CBFEWS に関するアーキテクチャのメタモデリングを実施したが、本項では対象とする具体的な CBFEWS として、図 6-1 としても示したネパール災害脆弱地域における CBFEWS のアーキテクチャのモデリングを行う。

(1) ネパール災害脆弱地域における CBFEWS の構造

ネパール災害脆弱地域(以降, Ratu-regional CBFEWS と称する)における構造として、まずブロック定義を行った結果を図 6-3 に示す。ここでは、図 6-2 に従い定義を行った。特筆事項として、本論文ではシステムをソシオテクニカルシステムとして分析をおこなうため、Social-based System には Upstream Caretaker, Technical-based System としては Data acquisition unit, Data upload unit, Alarm unit, Internet-based cloud server と分けている。これは、明確に Tech と Socio でそれぞれパフォーマンス維持のための内部パラメータ(Tech については failure rate, Socio については social preparedness)が異なることに起因する。

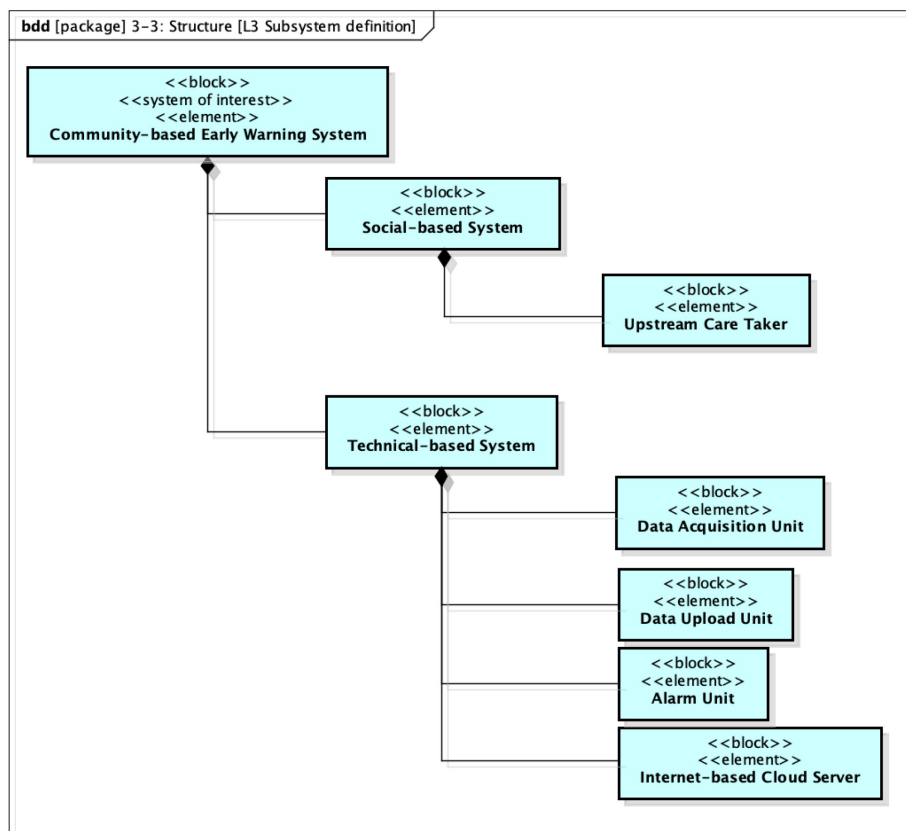


図 6-3. Ratu-regional CBFEWS のコンテキスト定義 (bdd:ブロック定義図)

(2) ネパール災害脆弱地域における CBFEWS の振る舞い

図 6- 3 において定義した Ratu-regional CBFEWS のコンテキストを用いて, Flood Detection & Forecasting の動作および, Warning Communication の動作のアクティビティ 図を Ratu-regional CBFEWS の場合のものに詳細化したものをそれぞれ, 図 6- 4, 図 6- 5 に示す. Technical-based System, Socio-based System のそれぞれのスイムレーンの中に, Ratu-regional CBFEWS の検討において詳細化されるコンポーネント(Data acquisition unit, Data upload unit, Alarm unit, Internet-based cloud server, Upstream Caretaker)を追加し, 参考文献 [2] [30]をもと, アクティビティ を詳細化した.

このように, Ratu-regional CBFEWS をベースとして 5.3 項のメタモデルを具体化, これによって具体的なコンポーネントに対して動作を割り当て, 確率論的リスク評価モデルを構築するための故障木解析 (FTA)を実施することが容易となる. 第 6 章における評価では, これらの SysML のアクティビティ 図を活用し, 提案モデルの評価を進める.

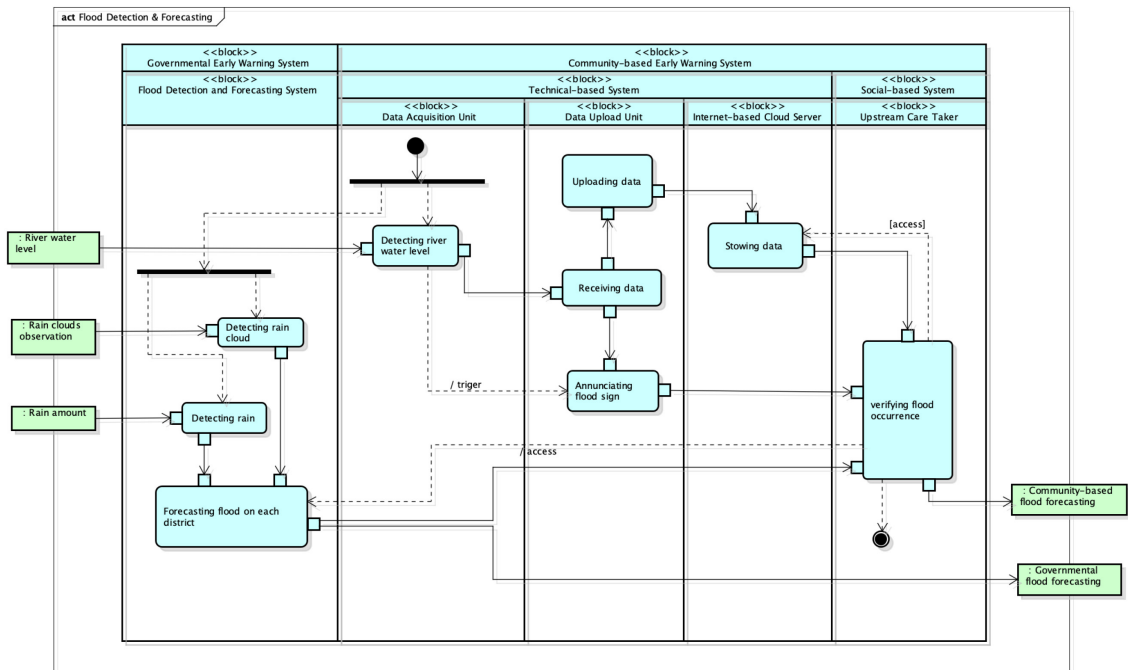


図 6- 4. Flood Detection & Forecasting の動作 (ac:アクティビティ図)

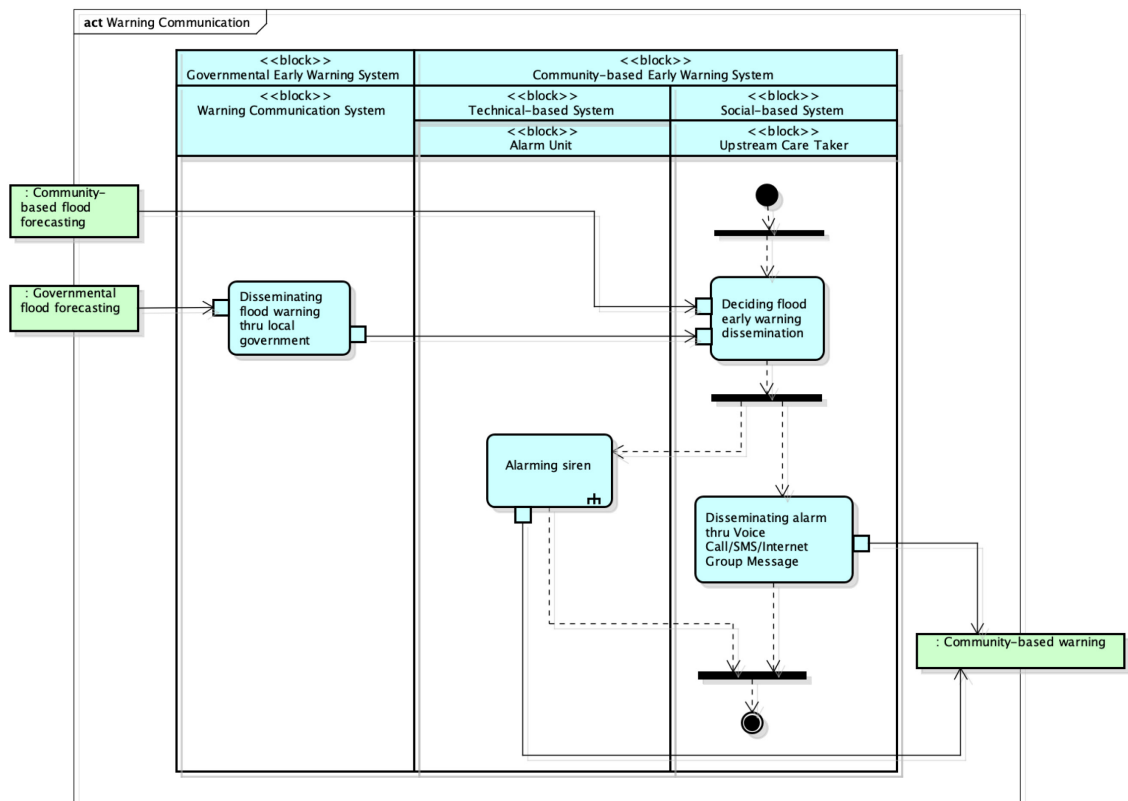


図 6- 5. Warning Communication の動作 (ac:アクティビティ図)

6.3 プロトタイピング1:既存システムに対するレジリエンス重要度分析

6.3.1 評価条件

(1) 評価目的

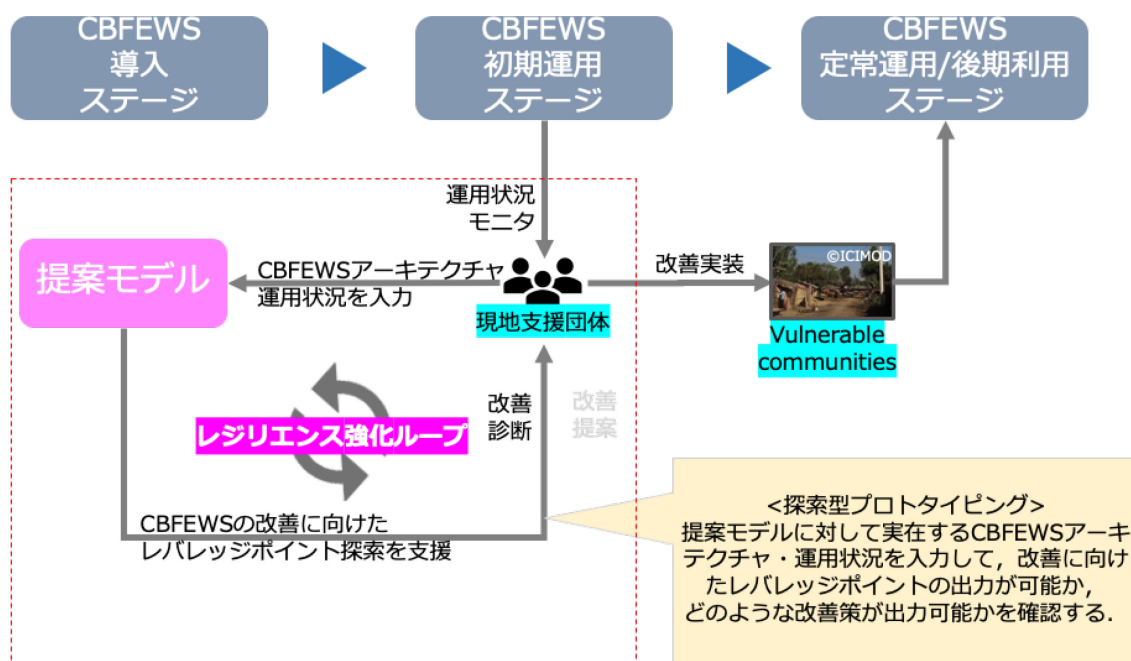
探索型プロトタイピングを実施する。プロトタイピングを通して、本提案モデルによって得られる価値を探索し、CBFEWSの持続可能性におけるレバレッジポイントの抽出に使用できるかを確認する。

評価目的は、表 6-1、表 6-2 にて示した以下の要求検証・妥当性確認に対応する。

- ① 評価対象アーキテクチャの取込(入力) (CBFEWS-RESIL-MODEL-REQ-02)
- ② 動的シナリオ予測の出力テスト(出力) (CBFEWS-RESIL-REQ-03)
- ③ CBFEWS 重要因子の抽出・評価 (CBFEWS-RESIL-CONOPS-01)

(2) 評価シナリオ

図 6-6 にプロトタイピング1の評価対象とするシナリオを示す。



6.3.2 モデルの適用

(1) 評価対象アーキテクチャの取込(入力)

プロトタイプ1での評価対象は、既存の CBFEWS におけるパフォーマンス情報と構造・振る舞い情報を入力として、長期的な性能・信頼性を動的な評価計算モデルによって予測し、レジリエンスを評価することである。既存の CBFEWS パフォーマンス情報としては、6.2.1 項にて識別した先行研究、関係者へのヒアリング結果に基づき設定した。一部パラメータ(部品故障率など)については一般的な値を今回の目的に適したものを選定した。既存の CBFEWS 構造・振る舞い情報としては、6.2.2 項にて整理した SysML ダイアグラムをもとに FTA を構築し、評価計算モデルの PRA モジュールに実装した。

図 6-7 にプロトタイプ1における FTA を示す。FTA では、図 5-16 にも示した通り、4つのイベントごとにそれぞれを達成するためのシステム構成と失敗要因をブレイクダウンする形で記述を行なった。具体的には、図 6-4、図 6-5 にて分析した、ICIMOD の CBFEWS におけるアクティビティ図のブレイクダウン結果に対して、それぞれのアクティビティが達成されないことを FTA における分岐枝として全て記述した。さらに、それぞれの分岐枝の発生確率は、いずれもアクティビティ図上のスィムレーンを示すコンポーネントのアベイラビリティを対応させ、これによって ETA における定量的な確率評価への変換を可能とした。

表 6-5 にプロトタイプ1における入力パラメータと設定根拠を示す。ここでは、ベースライン値、ベスト値、ワースト値の3つをそれぞれに設定した。ここでの目的は、ベースラインのシナリオに対する動的な長期シナリオの予測に加え、表 5-4 にて定義したレジリエンス評価のための重要度指標による計算の実行である。データ取得が十分であり、ベースラインからのばらつきが明確なパラメータが存在すれば、それを反映することも可能であるが、特にパフォーマンスに関するパラメータについては、実績が多く得られているわけではないため、システムの改善や劣化に伴い獲得しうる最適なパラメータをベスト値、取り得る最悪なパラメータをワースト値として設定した。なお、social shock magnitude および、alarm threshold については、いずれもデータが存在しなかったため、後述の 6.3.4 項における妥当性確認として実施した追加ヒアリングに一致した出力が得られるようにベースラインパラメータは調整した。

Fault Tree Analysis (FTA)

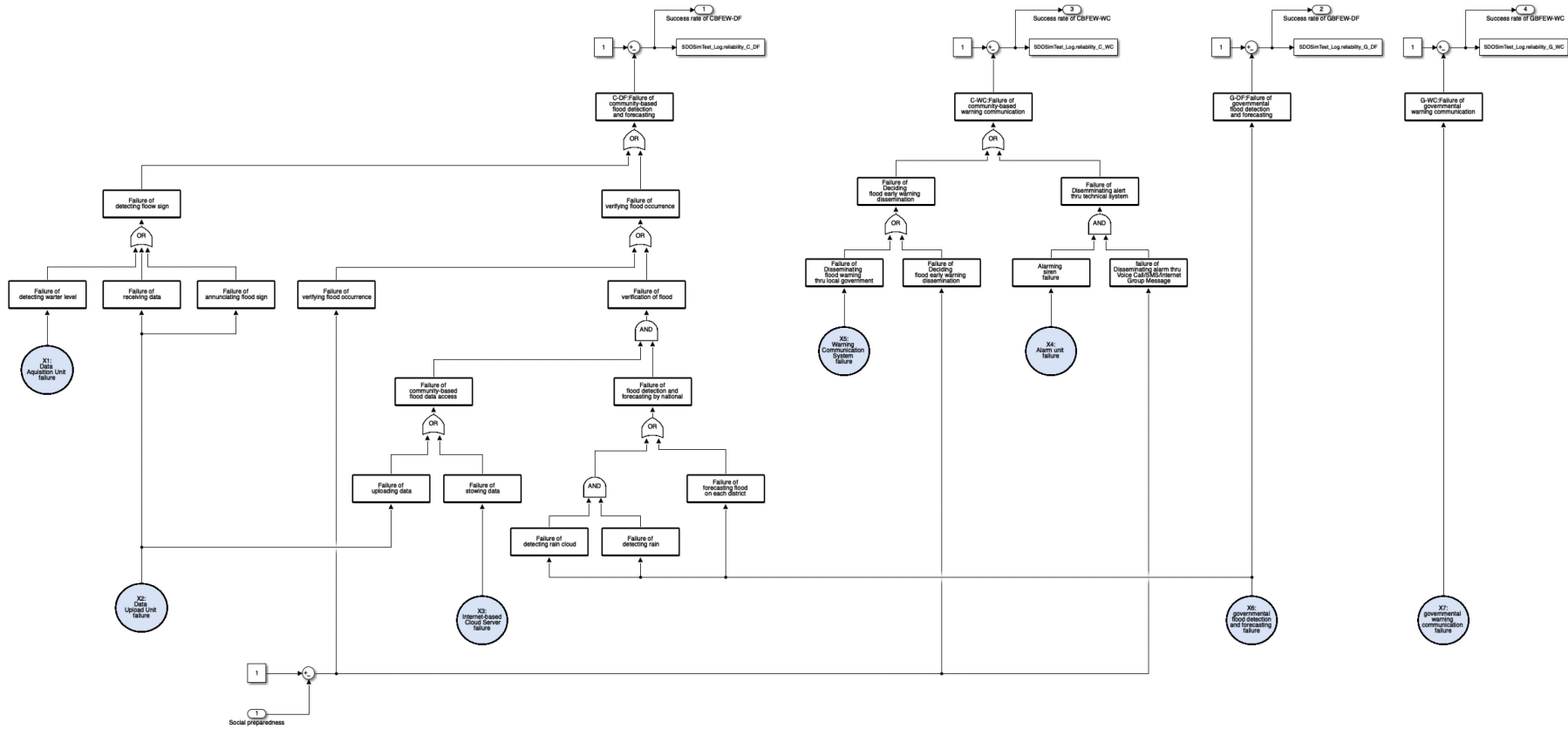


図 6-7. プロトタイプ1における FTA

表 6- 5. プロトタイプ1における入力パラメータと設定根拠

No	変数	説明	ベースライン値 (Res ₀)	ベスト値 (Res(best))	ワースト値 (Res(worst))	設定根拠
1	var_soci_prep_dec_half_life	社会的準備態度の半減期	5	100	1	先行研究 [38], ベースラインは妥当性確認における追加ヒアリング状況と一致するよう出力を調整して設定した
2	var_social_shock_mag	洪水イベントに対する社会的準備態度の改善強度	0.5	1	0	ベースラインは正規化パラメータの中間値とした
3	var_lead_time_CyGy	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の警報リードタイム [hr]	3.0	48	0	CBFEWS 導入時のリードタイム実力による [30]
4	var_lead_time_CyGn	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の警報リードタイム [hr]	3.0	48	0	CBFEWS 導入時のリードタイム実力による [30]
5	var_lead_time_CnGy	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の警報リードタイム [hr]	1.5	48	0	ベースライン値はコミュニティベース早期警報の実力値の半分と設定した.
6	var_lead_time_CnGn	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報なし, の場合の警報リードタイム [hr]	0	48	0	いずれの早期警報もない場合はリードタイム0と設定した.
7	var_coverage_CyGy	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の警報空間カバー率 [%]	54.44	100	0	表 6- 3 における追跡調査結果による
8	var_coverage_CyGn	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の警報空間カバー率 [%]	49.44	100	0	表 6- 3 における追跡調査結果による
9	var_coverage_CnGy	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の警報空間カバー率 [%]	5.0	100	0	表 6- 3 における CBFEWS 導入前の値とした
10	var_coverage_CnGn	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報なし, の場合の警報空間カバー率 [%]	0.0	100	0	いずれの早期警報もない場合はカバレッジ0と設定した.
11	var_response_CyGy	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	ベースラインは正規化パラメータの中間値とした
12	var_response_CyGn	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	ベースラインは正規化パラメータの中間値とした
13	var_response_CnGy	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	ベースラインは正規化パラメータの中間値とした
14	var_response_CnGn	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報なし, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	ベースラインは正規化パラメータの中間値とした
15	var_lambda_X1	故障率[/day] :Data Acquisition Unit	2.7×10^{-4}	0	1	故障率は部品一律で $0.1\text{FIT} * 24/10^9 \sim 15\text{FIT} * 24/10^9$ とした上で, コンポに 100 点の部品が使われているとして $\times 100$ した (故障率代表例: https://www.renesas.com/us/ja/document/oth/semiconductor-failure-rate)
16	var_lambda_X2	故障率[/day] :Data Upload Unit	2.7×10^{-4}	0	1	
17	var_lambda_X3	故障率[/day] :Internet Cloud Server	0	-	-	
18	var_lambda_X4	故障率[/day] :Alarm Unit	2.7×10^{-4}	0	1	
19	var_lambda_X5	故障率[/day] :Warning Comm System	0	-	-	
20	var_lambda_X6	故障率[/day] :Gov. flood detection and forecasting	0	-	-	
21	var_lambda_X7	故障率 [/day] :Gov. warning communication	0	-	-	
22	var_mu_X0	修復率 [/day]: 共通	0.0333	1	0.0027	30 日以内に修復可能とした
23	var_alarm_threshold	洪水強度に対する True Positive アラーム発出のための閾値	0.2(浸水深さ -0.16m 相当)	0.1(浸水深さ -0.24m 相当)	0.9(浸水深さ +0.30m 相当)	ベースラインは妥当性確認における追加ヒアリング状況と一致するよう出力を調整して設定した

(2) 動的シナリオ予測の解析テスト(出力)

(a) ベースラインシナリオ評価

図 6-8 にベースラインシナリオ評価におけるダイナミクス出力結果を示す。ここでは上から順に、洪水シナリオ、洪水による損害低減利益、社会的準備態度、洪水警報リードタイム、洪水警報カバレッジを示す。また、図 6-9 にベースラインシナリオ評価におけるシステムアベイラビリティ出力結果を示す。これらの凡例における内容は、イベントツリー図にて定義した各アクティビティの動作可能確率を示している。「コミュニティベース洪水検知」、「コミュニティベース早期警報コミュニケーション」については、いずれも機器の故障率ならびに社会的準備態度の動的な変化に伴い、そのアベイラビリティが変動していることが模擬できた。これらのアベイラビリティに基づき、パフォーマンス指標としてのリードタイムや、カバレッジについても変動していることがわかる。最終的な評価対象である洪水による損害低減利益についても、ベースラインの洪水シナリオに対して評価を行うことで、算出が可能なことを確認できた。

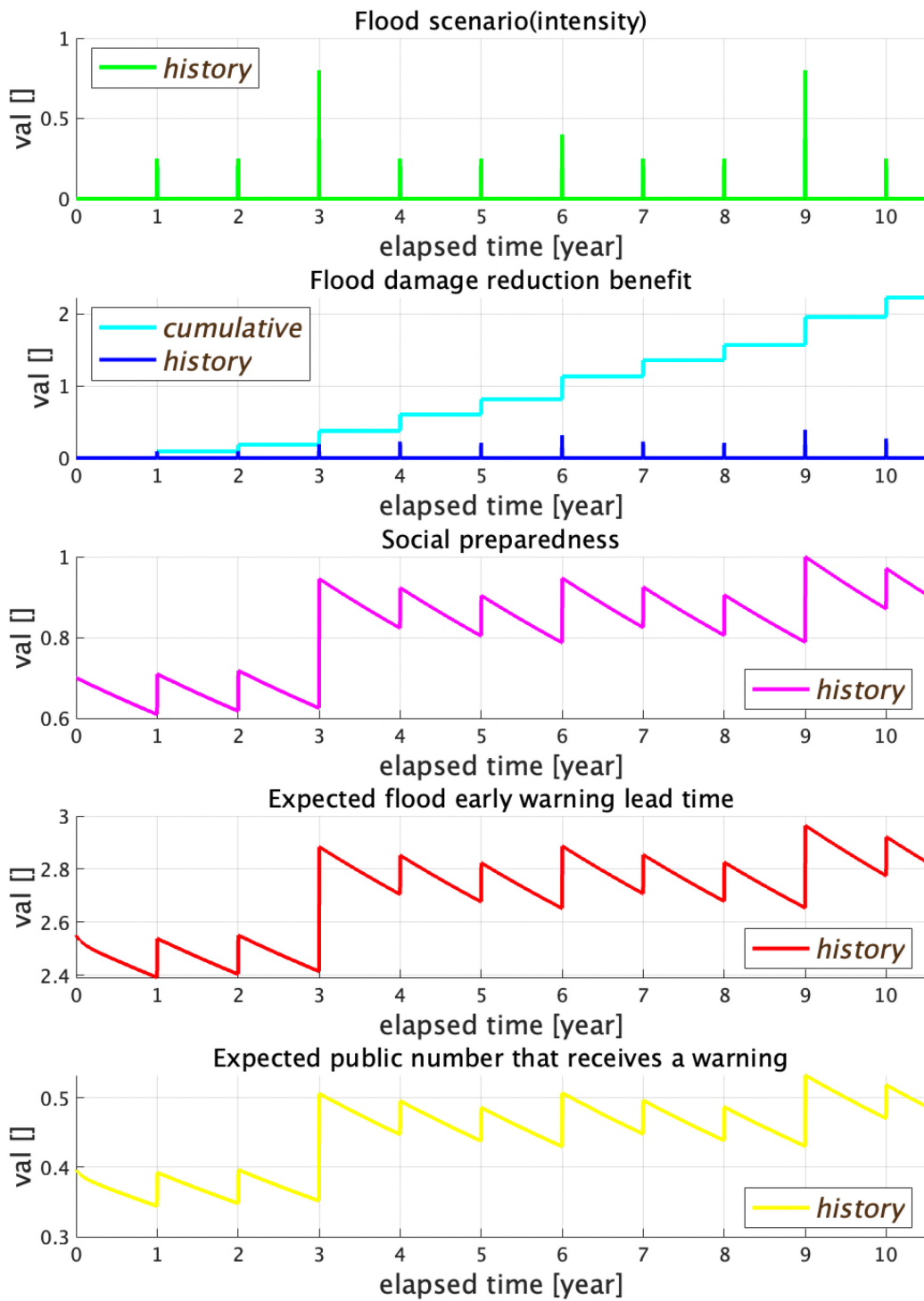


図 6-8. プロトタイプ1: ベースラインシナリオの評価(システムダイナミクス)

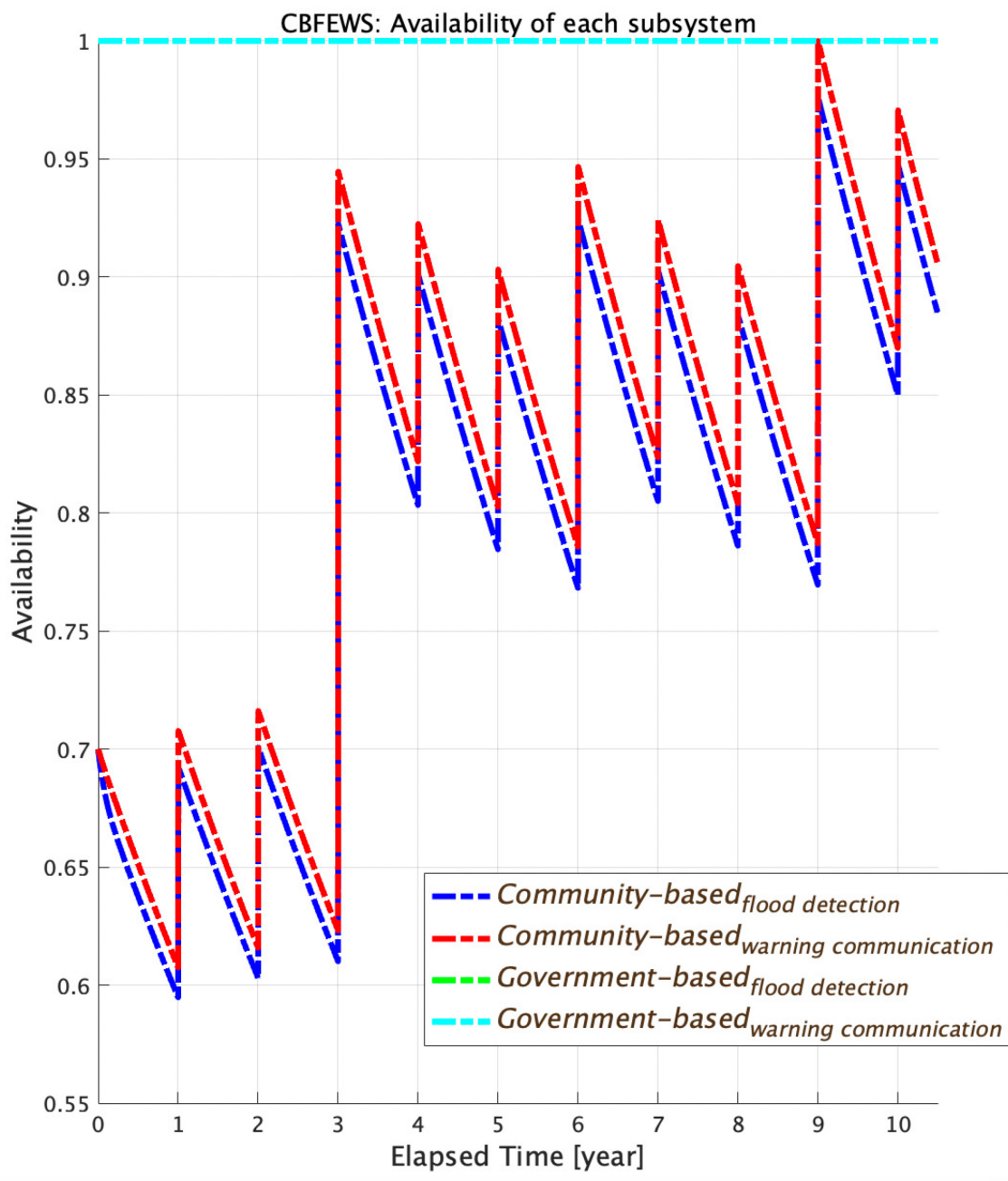


図 6-9. プロトタイプ1: ベースラインシナリオの評価(アベイラビリティ)

(b) 重要度評価

既存システムに対するレジリエンス喪失重要度 (ResRW) を表 6- 6 (全パラメータに対する重要度評価結果), 図 6- 10 (重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) に, またレジリエンス獲得重要度 (ResAW) 評価結果を表 6- 7 (全パラメータに対する重要度評価結果), 図 6- 11 (重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) に示す. ResRW, ResAW いずれについても, ベースラインパラメータに対して, パラメータを最適化できた場合, または劣化させてしまった場合を想定し, レジリエンスの評価を行うことで, 重点的に保全や注意を行うべき項目の識別を定量的に示すことができた.

表 6- 6. 既存システムに対するレジリエンス喪失重要度(ResRW)評価結果(全データ)

year	2	3	4	5	6	7	8	9	10
var social prep decrease half life	8.18	14.53	17.38	21.71	28.77	32.34	36.20	43.75	42.05
var social shock magnitude	1.30	1.87	2.73	3.52	4.72	5.48	6.25	7.76	8.55
var lead time CyGy	2.20	2.44	3.16	3.63	4.09	4.31	4.48	4.78	4.88
var lead time CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lead time CnGy	1.10	1.11	1.08	1.07	1.06	1.05	1.05	1.05	1.05
var lead time CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CyGy	18.05	19.64	26.71	31.62	36.88	39.54	41.56	44.44	45.77
var coverage CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CnGy	1.06	1.05	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
var coverage CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CyGy	2.57	2.72	3.52	4.03	4.54	4.79	4.97	5.22	5.33
var response CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CnGy	1.64	1.58	1.40	1.33	1.28	1.26	1.25	1.24	1.23
var response CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lamda X1(data aquisition unit)	6.82	7.20	7.81	8.10	8.35	8.45	8.52	8.72	8.75
var lamda X2(data upload unit)	8.15	8.65	9.56	10.01	10.39	10.56	10.67	10.95	11.00
var lamda X4(alarm unit)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var mu X0	1.21	1.25	1.28	1.29	1.29	1.30	1.30	1.31	1.31
var alarm threshould	1.30	1.88	2.73	3.53	4.73	5.50	6.26	7.78	8.56

表 6- 7. 既存システムに対するレジリエンス獲得重要度(ResAW)評価結果(全データ)

year	2	3	4	5	6	7	8	9	10
var social prep decrease half life	1.81	2.37	2.04	1.89	1.79	1.74	1.71	1.68	1.66
var social shock magnitude	1.33	1.85	1.52	1.38	1.27	1.23	1.20	1.16	1.14
var lead time CyGy	4.85	4.18	5.00	5.35	5.63	5.74	5.82	5.45	5.53
var lead time CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lead time CnGy	3.33	2.93	2.46	2.25	2.09	2.03	1.99	1.95	1.93
var lead time CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CyGy	1.79	1.79	1.81	1.81	1.81	1.82	1.82	1.82	1.82
var coverage CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CnGy	17.57	16.23	12.19	10.46	9.11	8.56	8.19	7.73	7.53
var coverage CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CyGy	1.61	1.63	1.72	1.75	1.78	1.79	1.80	1.81	1.81
var response CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CnGy	1.39	1.37	1.28	1.25	1.22	1.21	1.20	1.19	1.19
var response CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lamda X1(data aquisition unit)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
var lamda X2(data upload unit)	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
var lamda X4(alarm unit)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var mu X0	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
var alarm threshould	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

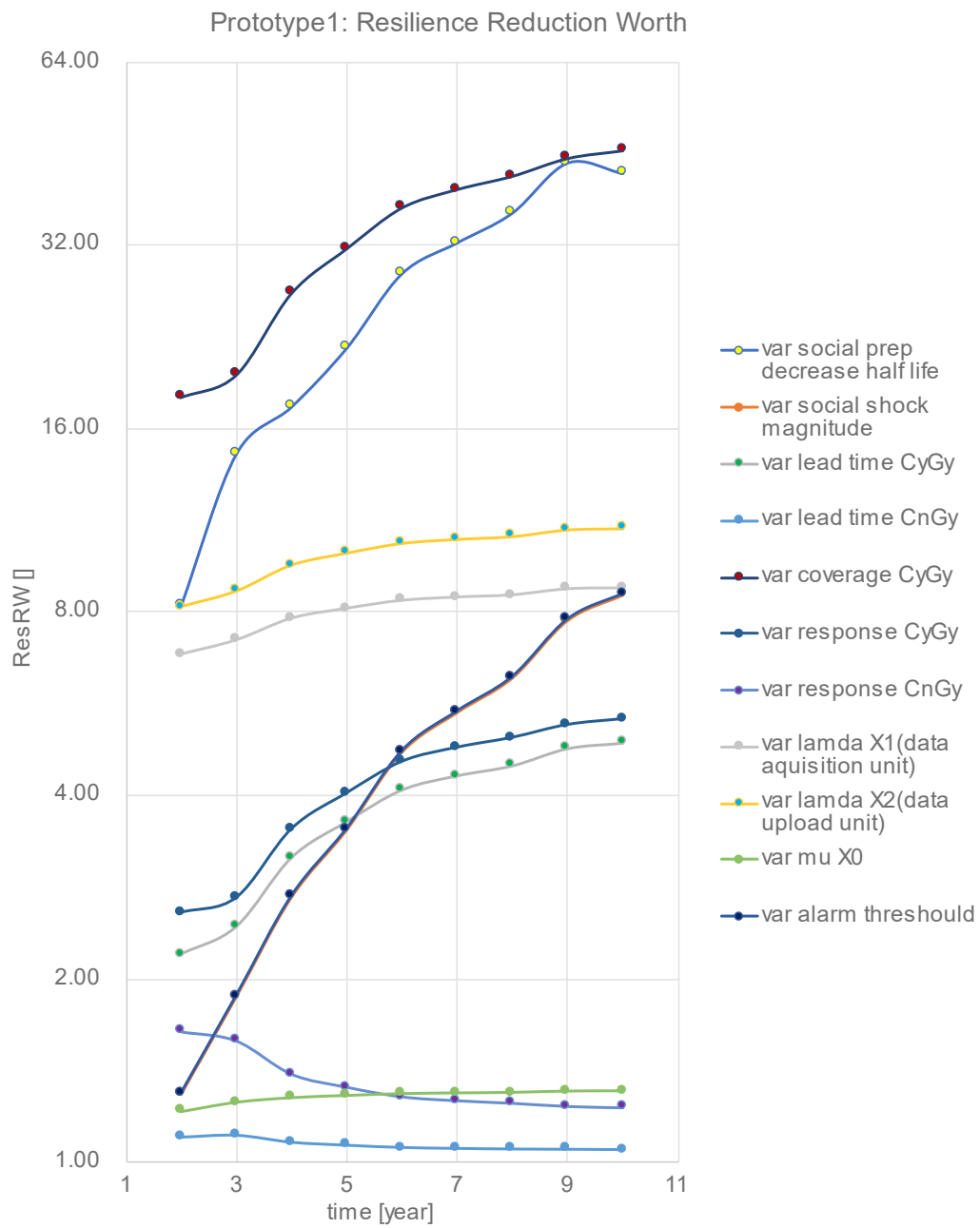


図 6- 10. 既存システムに対するレジリエンス喪失重要度 (ResRW) 評価結果 (抜粋)

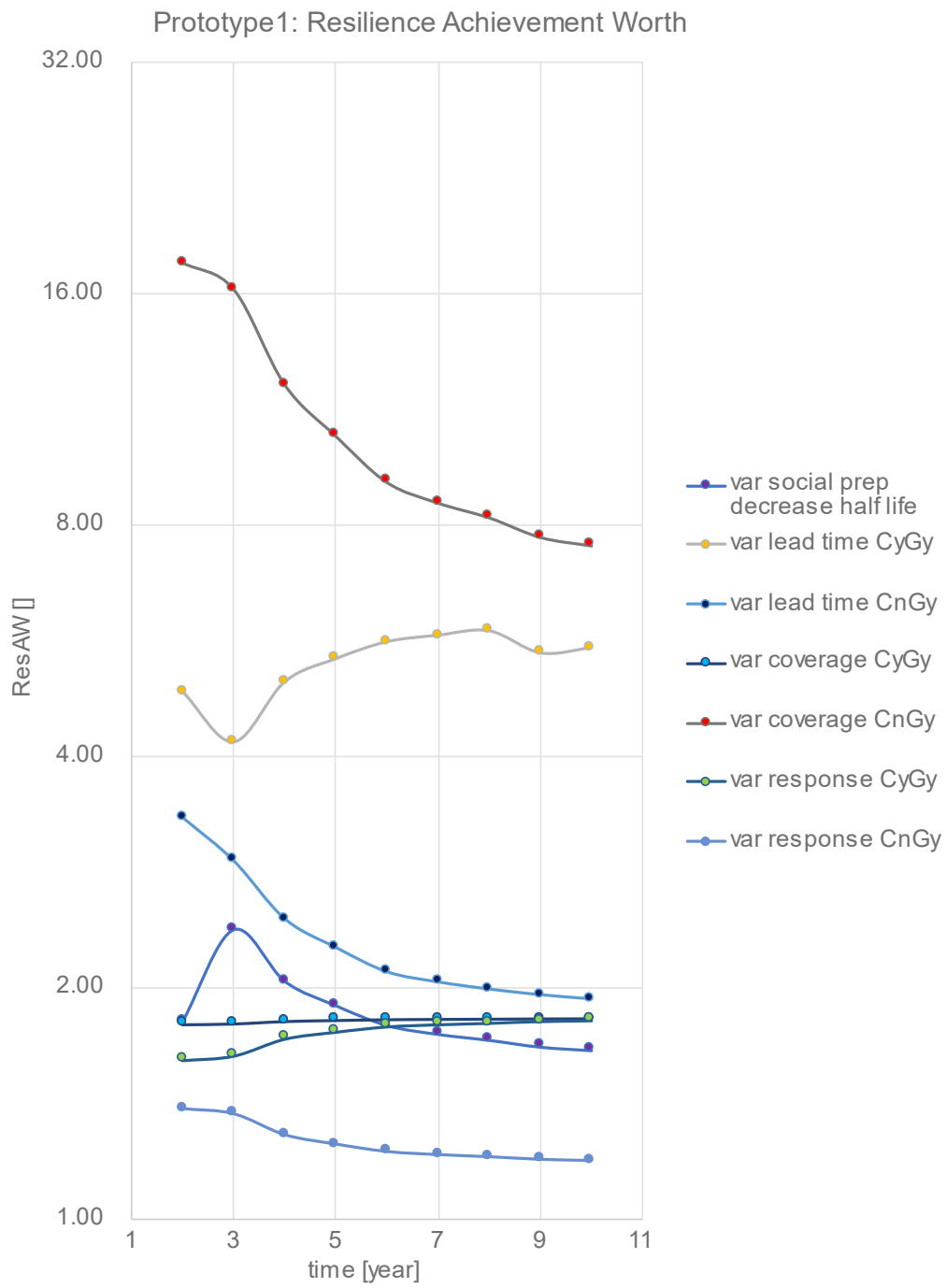


図 6- 11. 既存システムに対するレジリエンス獲得重要度 (ResAW) 評価結果 (抜粋)

6.3.3 出力に対する考察

ベースラインシナリオの評価として出力した図 6- 8, 図 6- 9 では, Aerts ら [37]や Lopez ら [38]の先行研究と同様に, 洪水イベントごとにコミュニティにおける社会的準備態度の改善が見られるような特性が確認できた. これに伴い, 期待されるリードタイムや, 警報通知のカバレッジといった CBFEWS の重要パラメータについても変動が見られた. ここからもわかるように, 洪水発生に伴い住民の防災意識の回復がなされることによって, コミュニティベース早期警報の一部のサブシステムを担うケアテーカーや警報を受け取る住民についても高パフォーマンスを達成するための準備のための心構えや思い出し活動が自動的になされる様子が見受けられたと言える.

レジリエンスに關与するパラメータを探索するために実行した重要度評価においては, レジリエンス喪失重要度 (ResRW), レジリエンス獲得重要度 (ResAW) を CBFEWS 導入後から特定の期間年数までを指定の上で計算し, それを 2 年~10 年でそれぞれ出力を行うことで, 導入された CBFEWS が持続的に災害地域に対して適応するために重要なパラメータの動的な変化特性を見積もることができた.

既存システムに対するレジリエンス喪失重要度 (ResRW) として計算した図 6- 10 (重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) では, 社会的準備態度の減衰率, コミュニティベース早期警報と政府による早期警報の両方によって達成される警報カバレッジ・リードタイム・応答指数, また警報発出のためのアラーム閾値がいずれも年数を増すごとに, レジリエンスを維持するための重要度も増すことを導き出すことができた. また, 技術システムであるデータアップロード装置やデータ取得装置の故障率についても比較的高い重要度を示した. これらの装置はアクティビティ図上においても, CBFEWS としてのデータ取得の観点でクリティカルなコンポーネントとなっているため, アラームユニットのように SNS などで代替え手段が確保されているシステムと比較して重要度が高い.

レジリエンス獲得重要度 (ResAW) 評価結果として計算した図 6- 11 では, 重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) では, より強靱な CBFEWS として重要なパラメータを抽出したものである. ここでは, コミュニティベース早期警報も政府による早期警報もある場合のリードタイム, コミュニティベース早期警報がなく政府によるコミュニティベース早期警報がある場合の警報カバレッジの2つについて非常に高い重要度を示した. また, 前者が経時的に下降傾向である一方で, 後者は上昇傾向を示した. これは, 運用前期においては比較的コミュニティベース早期警報の能力が安定して高いアベイラビリティを得られていない状況ではやはり政府に備え, 情報通知能力が高いほどレジリエンス向上に優位に働く一方, ICIMOD のシステムのように長期的に運用が成功することで, 政府に頼らずとも, コミュニティで一貫した早期警報が重要であり, その場合の性能向上が重視されることを示していると考えられることができる.

6.3.4 妥当性確認

出力の妥当性確認としては、対象とした既存システムの開発運用状況との照らし合わせのため、2.2.2項にて実施したインタビューにおけるインタビュー#2への追加ヒアリング及び、対象とした既存システムに關与する開発運用者に対するシステムの長期的な持続可能性に關与する因子のアンケート(実施内容の詳細は Appendix C に示す。)を行なった。なお、本インタビューおよびアンケートは慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 倫理審査委員会において、実施の適否について、倫理的な観点から審査を受け、承認を得た。(承認番号: SDM-2022-E050)

対象とした地域における CBFEWS は事実として、2015 年以降に導入後、2022 年現在(経過年数で約 7 年)、いまだにその持続性を維持することができている。また、関係者への追加ヒアリングによれば、大きな洪水としては 3 年に一度程度であるが、毎年被害の出ない小規模な洪水予報に対しても警報が発出されるように設定することで、適切にシステムの試運転も実施することができているとのことである。本解析においてはモデルの妥当性を問うとともに、CBFEWS 運用状況を反映して、動的な予測を行うことが目標であるため、データが存在していなかった社会的準備態度の減衰特性、早期警報の発出閾値については、前述の CBFEWS 運用状況に対して同様な傾向が図 6-8 にて得られるようにパラメータを調整した。結果的に、3 年に一度程度の洪水という特性の上で、適切にシステムが維持されていることに対して、この様子は図 6-8 の通り、モデル出力として再現することができた。また、毎年発生し得る小さな洪水に対しても社会的準備態度の改善が見られることで、システムの維持につながっていることから読み取れる。このように、アラーム発出閾値の適切な設定は、豪雨発生時に直接的に被害低減には繋がらないものの、将来的な洪水発生時に向けたトレーニングとして効果をもたらし、大きな洪水発生時に対する準備態度の向上につながる事が推測できる。

レジリエンス阻害重要度の考察でも述べたように、社会的準備態度は CBFEWS 導入後の経過年数が多いほどその重要度を増していく特性は、表 6-8 に示すアンケート結果からも見受けられた。一方で、アンケートによれば、CBFEWS 導入直後の警報カバレッジの重要度はあまり重大ではないとの結果がでたところ、提案モデルからの出力では、その逆で初期からも比較的需要度が高いとの結果を得た。その他の項目については 5 段階評価のうちいずれも 5 という回答を得ていることから、警報カバレッジの向上よりも重視すべき事項があるという観点と読み取れるが、洪水被害低減の効果の観点では、警報を受信する人数の増加が効果に直結するという事実は明らかであることから、ベースラインパラメータに対する洪水被害低減効果の倍率として算出される ResAW, ResRW といった指標は、いずれにせよ適切にその効果を指すものとして計算が成立していると考ええる。

データアップロード装置やデータ取得装置の故障率についても比較的高い重要度を示していることについて、このうちデータアップロード装置の方がデータ取得装置よりも高い重要度をレジリエンス阻害重要度にて示した。これは、コミュニティベース早期警報においてデータ取得装置が故障

してしまったとしても、表 6- 5 で示したように、ある程度の洪水警報リードタイムを達成できることに起因していると考えられる。追加ヒアリングによれば、実態としても、データ取得装置が故障してしまったとしても、ケアテーカーは水位センサが設置されたエリアに直接出向き、アナログな水位計を用いて洪水の予兆を確かめる術を用意しているとのことであった。そのため、情報を蓄えるためのデータアップロード装置についての重要度が比較的高めに出ていることと状況は一致していると考えられる。

表 6- 8. CBFEWS 導入後の持続可能性への重要な因子のアンケート結果

No	Factor	CBFEWS導入後の年数		
		3年時点	7年時点	15年時点
1	Availability/Reliability of River level data acquisition unit	5	5	5
2	Availability/Reliability of data upload unit	5	5	5
3	Availability/Reliability of alarm unit	5	5	5
4	Early warning lead time provided by community-based EWS	5	5	5
5	Early warning lead time provided by government (national) EWS	5	5	5
6	Early warning spatial coverage provided by community-based EWS	4	5	5
7	Early warning spatial coverage provided by government (national) EWS	4	5	5
8	Financial support (budget) for developing CBFEWS	5	5	5
9	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that knows how to respond effectively against flood	4	5	5
10	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that is willing to respond to flood early warning	4	5	5
11	Continuous monitoring of how CBFEWS works correctly in community	5	5	5
12	CBFEWS technical equipment renewal and/or update	5	5	5

サンプル数N=1

6.4 プロトタイピング2:新規技術の導入におけるレジリエンス重要度分析

6.4.1 評価条件

(1) 評価目的

具体化型プロトタイピングを実施する。プロトタイピングを通して、本提案モデルにおける価値の効果的な活かし方を具体化するために、既存アーキテクチャに対して追加の技術提案を行った際の事前評価が可能なことを確認する。

評価目的は、表 6- 1、表 6- 2 にて示した以下の要求検証・妥当性確認に対応する。

- ① 評価対象アーキテクチャの取込(入力) (CBFEWS-RESIL-MODEL-REQ-02)
- ② 動的シナリオ予測の出力テスト(出力) (CBFEWS-RESIL-REQ-03)
- ③ CBFEWS 改善提案の評価 (CBFEWS-RESIL-CONOPS-02)

(2) 評価シナリオ

図 6- 12 にプロトタイピング2の評価対象とするシナリオを示す。

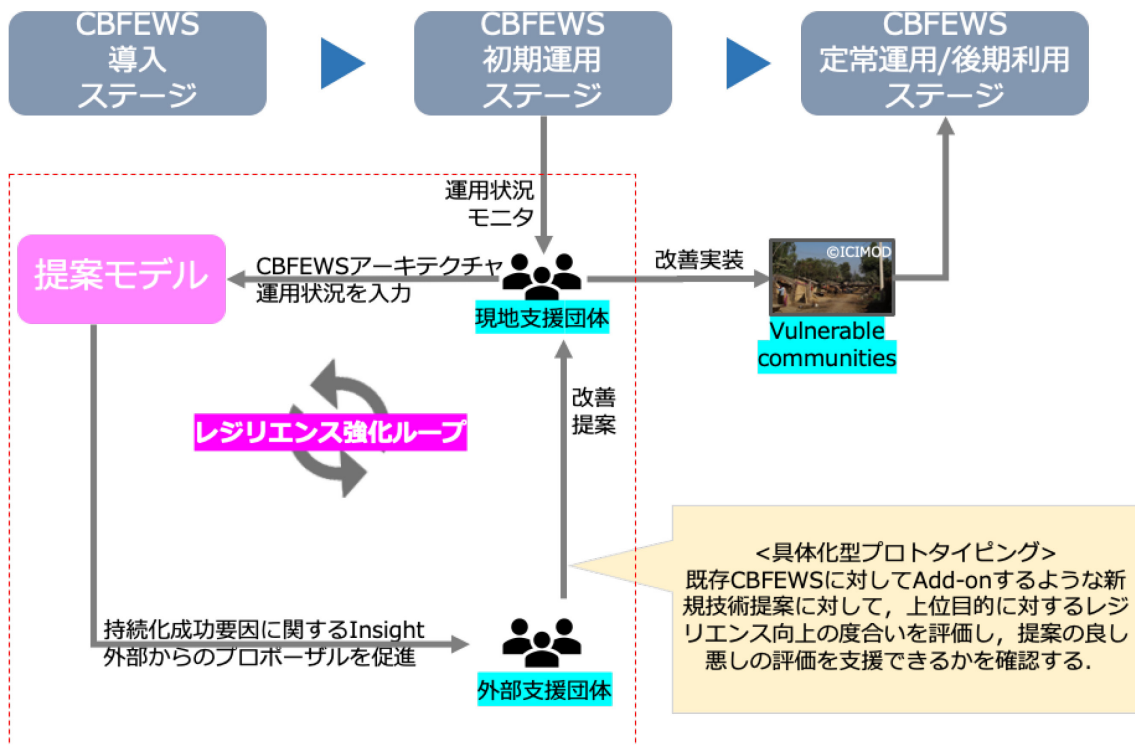


図 6- 12. プロトタイピング2の評価シナリオ

6.4.2 モデルの適用

(1) 評価対象アーキテクチャの取込(入力)

プロトタイプ2における外部支援団体からの改善提案として、本論文では日本の開発した宇宙システムベースでの災害通知システムである準天頂衛星を活用した EWS メッセージ送信を開発途上地域において適用するシナリオを想定する。

準天頂衛星(Quasi-Zenith Satellite System: QZSS) [68]とは、日本及びアジア太平洋地域向けに利用可能とする航法衛星システムであり、局地的な位置情報サービスを目的とするために準天頂軌道を周回する衛星を用いるコンステレーション衛星システムの総称である。QZSS の主目的は高精度な位置決定のための電波送信であるが、QZSS の取り扱うサブメータ級補強を送信する L1S 信号を活用した災害・危機管理通報サービス「災危通報」への展開が内閣府 [34]を中心に進められており、筆者の所属する研究室においてもアプリケーションに関する研究 [69] [70]が多岐にわたって進められている。将来的には、QZSS のみならず、Galileo といった他の GNSS 衛星との相互運用性を確保の上、全天球において本サービスの利用可能性の模索 [71] [72]が進められており、将来性の高い技術であるといえる。ここでは、「災害・危機管理通報サービス」を途上地域の洪水早期警報にミドルアウトエンジニアリング(Add-on)する新規提案シナリオに対して、本提案によりどの程度、レジリエンスの向上に寄与できるかの評価を行うとともに、ポスターを用いたプレゼンテーションを行うことによって、どのような項目に対して評価ができるか、できないかの妥当性確認を実施する。

図 6-13 に対象とする新規提案アーキテクチャである QZSS の CBFEWS への統合のシステム図を示す。システムでは、早期警報の多重チャンネル化を目論み、既存の CBFEWS のアラームユニットに対して L1S 受信用のアンテナを搭載し、これによって SMS/Internet に頼らずとも早期警報を可能とする。QZSS を通した衛星通信では、既存の Data upload unit のデータを日本にある衛星通信データサーバが読み取ることができるようにし、これによって被害発生のある洪水発生地域にいかなる電源遮断、インターネット遮断が発生しても早期警報が届けられるような設計とした。

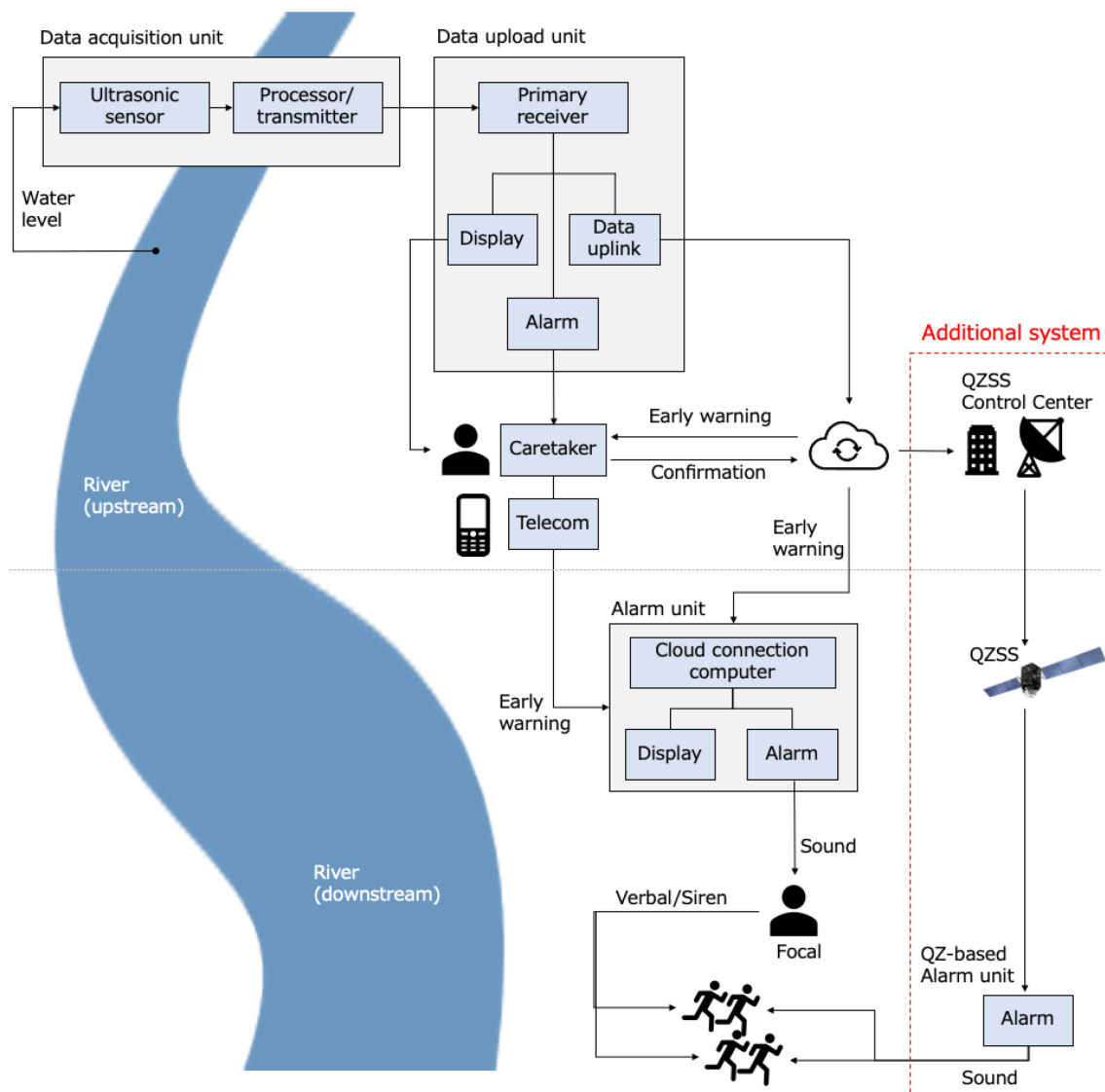
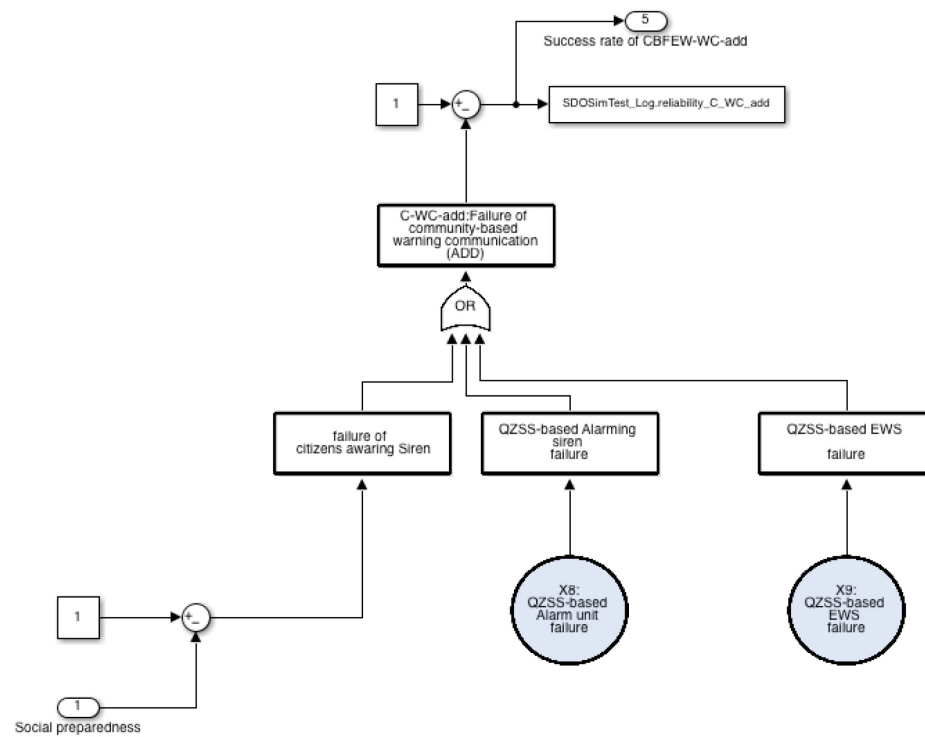


図 6- 13. 評価に使用した新規提案システム(QZSS の CBF EWS への統合)

具体的には、本提案において以下の機能性能改善を反映した。

- 新規 QZSS ベース警報システムの搭載により、これまでの地域ベース早期警報に加えて、追加の警報パスを追加した。
- QZSS ベース警報システムはケアテーカーとは異なるデータパスによって、従来の洪水警報が使用できない場合でも、インターネットの利活用が難しいようなエリアに対して衛星経由で情報を通知できるため、下流側の世話役からの情報伝達がうまくいかないような場合にも警報をトリガーすることができるため、情報伝達カバレッジの向上が見込まれると想定した。

本提案における特性を考慮し、以下のパラメータに対してパフォーマンス・信頼性の向上が図られることを想定し、ETA, FTA や入力パラメータに反映した。図 6-14 に更新した ETA を示す。従来の ETA に対して、新しい手法による地域ベース散布のイベントを追加することで、さらに新規 QZSS ベース警報の有無を考慮した獲得状態ごとのパフォーマンスの評価を可能とした。図 6-15 に新規 QZSS ベース警報における FTA を示す。新規 QZSS ベース警報では、QZSS そのものの信頼度(宇宙システムであるがゆえに非修理系として実装を想定した)、QZSS 対応のアラームユニット(地上に搭載されるものであり、修理系とした)、新しいシステムに対して市民が反応できること(社会的な準備態度によって達成されるものと想定した)を下位因子として設定した。表 6-9 にプロトタイプ2における入力パラメータと設定根拠を示す。図 6-14 の更新した ETA の獲得状態に対応するように、新しくパフォーマンス変数を設定している。また、QZSS, QZSS 対応のアラームユニットそれぞれに対しても故障率を設定した。



i

図 6-15. プロトタイプ2における FTA(新規システム分)

表 6-9. プロトタイプ 2 における入力パラメータと設定根拠

No	変数	説明	Baseline 値 (Res ₀)	Best 値 (Res(best))	Worst 値 (Res(worst))	設定根拠
1	var_lead_time_CyGy_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の警報リードタイム [hr]	3.0	48	0	var_lead_time_CyGy に同じ
2	var_lead_time_CyGn_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の警報リードタイム [hr]	3.0	48	0	var_lead_time_CyGn に同じ
3	var_lead_time_CnGy_add	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の警報リードタイム [hr]	1.5	48	40	var_lead_time_CnGy に同じ
4	var_coverage_CyGy_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の警報空間カバー率 [%]	54.44 *1.2 (設計目標)	100	0	var_coverage_CyGy (新規追加システムなし) に対して, 設計目標として 1.2 倍とした
5	var_coverage_CyGn_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の警報空間カバー率 [%]	49.44 *1.2 (設計目標)	100	0	var_coverage_CyGn (新規追加システムなし) に対して, 設計目標として 1.2 倍とした
6	var_coverage_CnGy_add	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の警報空間カバー率 [%]	54.44 /2 (設計目標)	100	0	var_coverage_CyGy の半分は達成が可能なよう設計目標を設定した
7	var_response_CyGy_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報あり, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	var_response_CyGy に同じ
8	var_response_CyGn_add	コミュニティベース早期警報あり, 行政による早期警報なし, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	var_response_CyGn に同じ
9	var_response_CnGy_add	コミュニティベース早期警報なし, 行政による早期警報あり, の場合の応答への支援率 [%]	0.5	1	0	var_response_CnGy に同じ
10	var_lamda_X8	故障率 [/day] :QZSS-based alarm unit	2.7×10^{-4}	0	1	var_lamda_X1, X2, X4 に同じ
11	var_lamda_X9	故障率 [/day] :QZSS EWS	3.0×10^{-5}	0	1	設計寿命 10 年の期間で, 衛星単体アベイラビリティが 0.95 以上となるように設定 [68]

(2) 動的シナリオ予測の解析テスト(出力)

(a) ベースラインシナリオ評価

図 6-16 にベースラインシナリオ評価におけるダイナミクス出力結果を示す。ここでは上から順に、洪水シナリオ、洪水による損害低減利益、社会的準備態度、洪水警報リードタイム、洪水警報カバレッジを示す。また、図 6-17 にベースラインシナリオ評価におけるシステムアベイラビリティ出力結果を示す。これらの凡例における内容は、イベントツリー図にて定義した各アクティビティの動作可能確率を示している。「コミュニティベース洪水検知」、「コミュニティベース早期警報コミュニケーション」に加えて、プロトタイプ2では、「新規システムによるコミュニティベース早期警報コミュニケーション」も追加で表示している。他のアベイラビリティに比べて、徐々にアベイラビリティが減っているのは、QZSS システムが非修理系であることに起因している。

これらのアベイラビリティに基づき、パフォーマンス指標としてのリードタイムや、カバレッジについても変動していることがわかる。最終的な指標としての洪水による損害低減利益についても、ベースラインの洪水シナリオに対して評価を行うことで、算出できた。

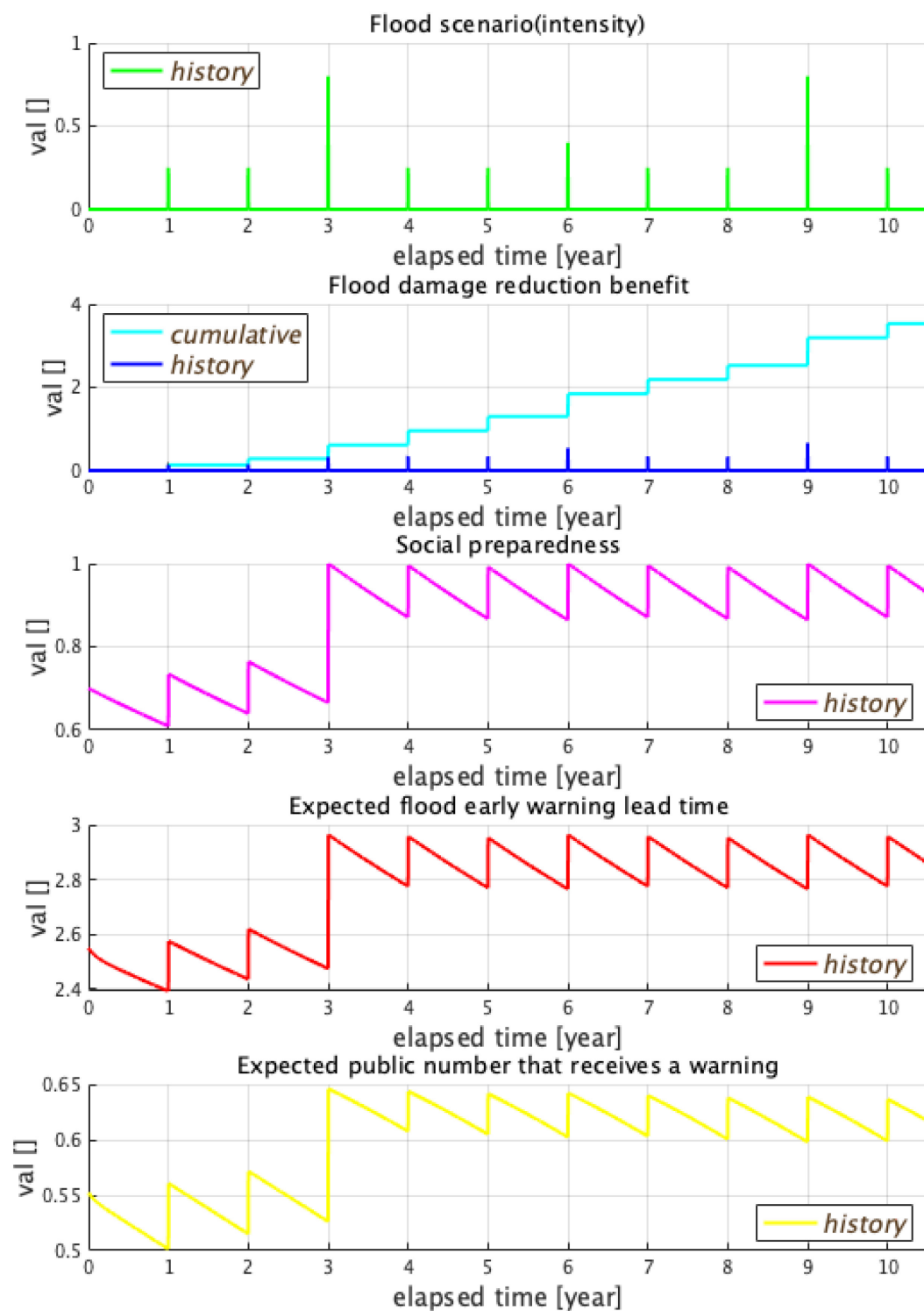


図 6- 16. プロトタイプ2:ベースラインシナリオの評価(システムダイナミクス)

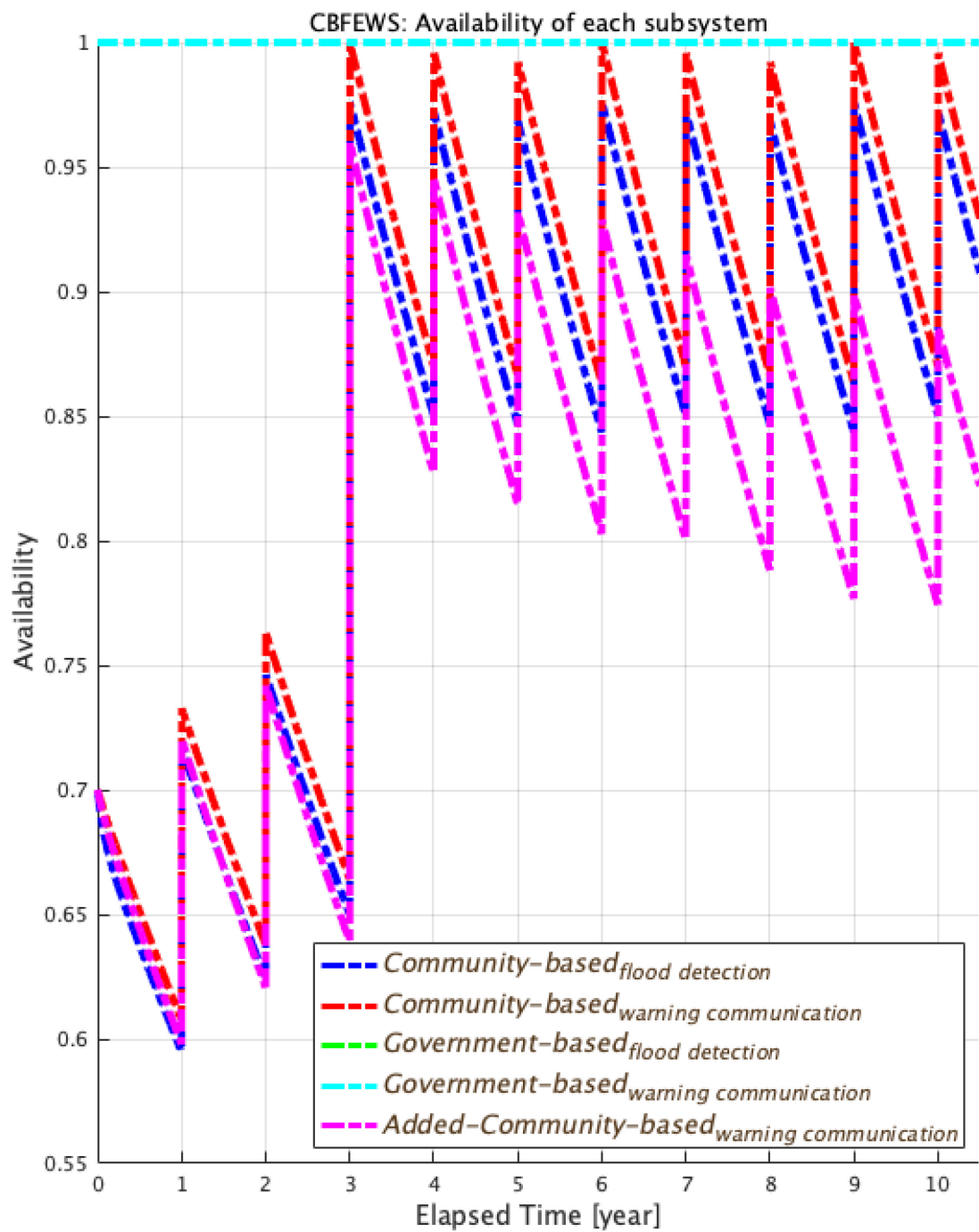


図 6-17. プロタイプ2: ベースラインシナリオの評価(アベイラビリティ)

(b) 重要度評価

新規システムを踏まえたに対するレジリエンス喪失重要度 (ResRW) を表 6- 10 (全パラメータに対する重要度評価結果), 図 6- 18 (重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) に, またレジリエンス獲得重要度 (ResAW) 評価結果を表 6- 11 (全パラメータに対する重要度評価結果), 図 6- 19 (重要度に感度が見られたパラメータのみのグラフプロット) に示す. 6.3.2 項における既存システムに対する重要度評価と比べて, 表 6- 9 におけるパラメータの数だけ重要度評価の変数を増やしている. また, レジリエンスを構成するバランスが変化したことにより, 既存のパラメータに対しての重要度も変化していることが確認できた.

表 6- 10. 新規技術導入におけるレジリエンス喪失重要度(ResRW)評価結果(全データ)

year	2	3	4	5	6	7	8	9	10
var social prep decrease half life	8.06	14.32	16.93	21.06	27.83	31.25	34.95	42.20	40.56
var social shock magnitude	1.29	1.85	2.67	3.42	4.57	5.29	6.02	7.46	8.20
var lead time CyGy	1.13	1.14	1.11	1.10	1.10	1.09	1.09	1.10	1.10
var lead time CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lead time CnGy	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01
var lead time CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CyGy	1.41	1.39	1.30	1.26	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23
var coverage CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CnGy	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00
var coverage CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CyGy	1.31	1.31	1.25	1.23	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
var response CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CnGy	1.18	1.16	1.11	1.08	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05
var response CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lamda X1(data aquisition unit)	2.66	2.76	2.80	2.82	2.85	2.86	2.87	2.92	2.93
var lamda X2(data upload unit)	2.79	2.90	2.95	2.97	3.00	3.01	3.02	3.08	3.09
var lamda X4(alarm unit)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var mu X0	1.16	1.20	1.21	1.22	1.22	1.23	1.23	1.23	1.23
var alarm threshold	1.29	1.86	2.67	3.43	4.57	5.30	6.03	7.48	8.22
var_lead_time_CyGy_add	1.21	1.27	1.48	1.58	1.65	1.68	1.69	1.72	1.72
var_lead_time_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_lead_time_CnGy_add	1.06	1.07	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
var_coverage_CyGy_add	2.21	2.30	2.89	3.23	3.53	3.66	3.73	3.81	3.84
var_coverage_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_coverage_CnGy_add	1.17	1.16	1.12	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08
var_response_CyGy_add	1.59	1.65	2.05	2.27	2.47	2.56	2.61	2.67	2.69
var_response_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_response_CnGy_add	1.31	1.30	1.23	1.21	1.19	1.18	1.17	1.17	1.16
var_lamda_X8(New alarm)	1.25	1.25	1.24	1.23	1.22	1.22	1.22	1.21	1.21
var_lamda_X9(QZSS EWS)	1.27	1.26	1.25	1.24	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22

表 6- 11. 新規技術導入におけるレジリエンス獲得重要度(ResAW)評価結果(全データ)

year	2	3	4	5	6	7	8	9	10
var social prep decrease half life	1.78	2.30	1.99	1.86	1.75	1.71	1.68	1.65	1.63
var social shock magnitude	1.31	1.81	1.50	1.37	1.27	1.22	1.19	1.16	1.14
var lead time CyGy	2.13	2.13	1.96	1.89	1.85	1.83	1.82	1.84	1.84
var lead time CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lead time CnGy	1.79	1.81	1.57	1.47	1.39	1.36	1.34	1.33	1.32
var lead time CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CyGy	1.24	1.24	1.19	1.17	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15
var coverage CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var coverage CnGy	6.11	5.54	4.08	3.44	2.95	2.77	2.64	2.49	2.43
var coverage CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CyGy	1.24	1.24	1.20	1.19	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
var response CyGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var response CnGy	1.15	1.14	1.10	1.08	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05
var response CnGn	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var lamda X1(data aquisition unit)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
var lamda X2(data upload unit)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
var lamda X4(alarm unit)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var mu X0	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
var alarm threshold	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_lead_time_CyGy_add	3.11	2.93	3.82	4.20	4.47	4.58	4.64	4.39	4.45
var_lead_time_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_lead_time_CnGy_add	2.18	2.15	1.95	1.87	1.80	1.77	1.75	1.75	1.73
var_coverage_CyGy_add	1.29	1.30	1.35	1.37	1.38	1.39	1.39	1.39	1.39
var_coverage_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_coverage_CnGy_add	1.39	1.37	1.29	1.25	1.23	1.21	1.21	1.20	1.19
var_response_CyGy_add	1.37	1.40	1.51	1.56	1.60	1.61	1.62	1.62	1.63
var_response_CyGn_add	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_response_CnGy_add	1.24	1.23	1.19	1.17	1.16	1.15	1.15	1.14	1.14
var_lamda_X8(New alarm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
var_lamda_X9(QZSS EWS)	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01

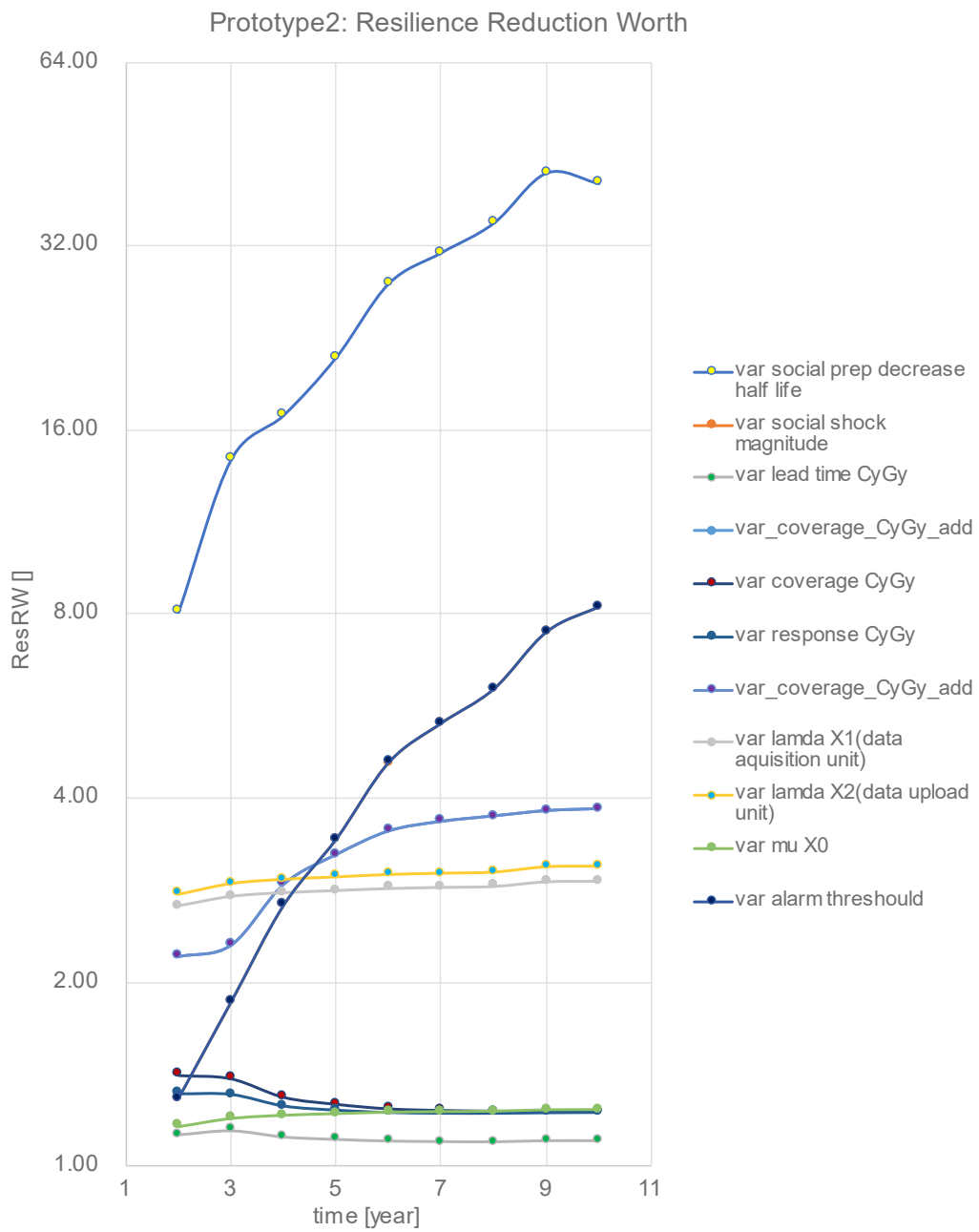


図 6- 18. 新規技術導入におけるレジリエンス喪失重要度 (ResRW) 評価結果 (抜粋)

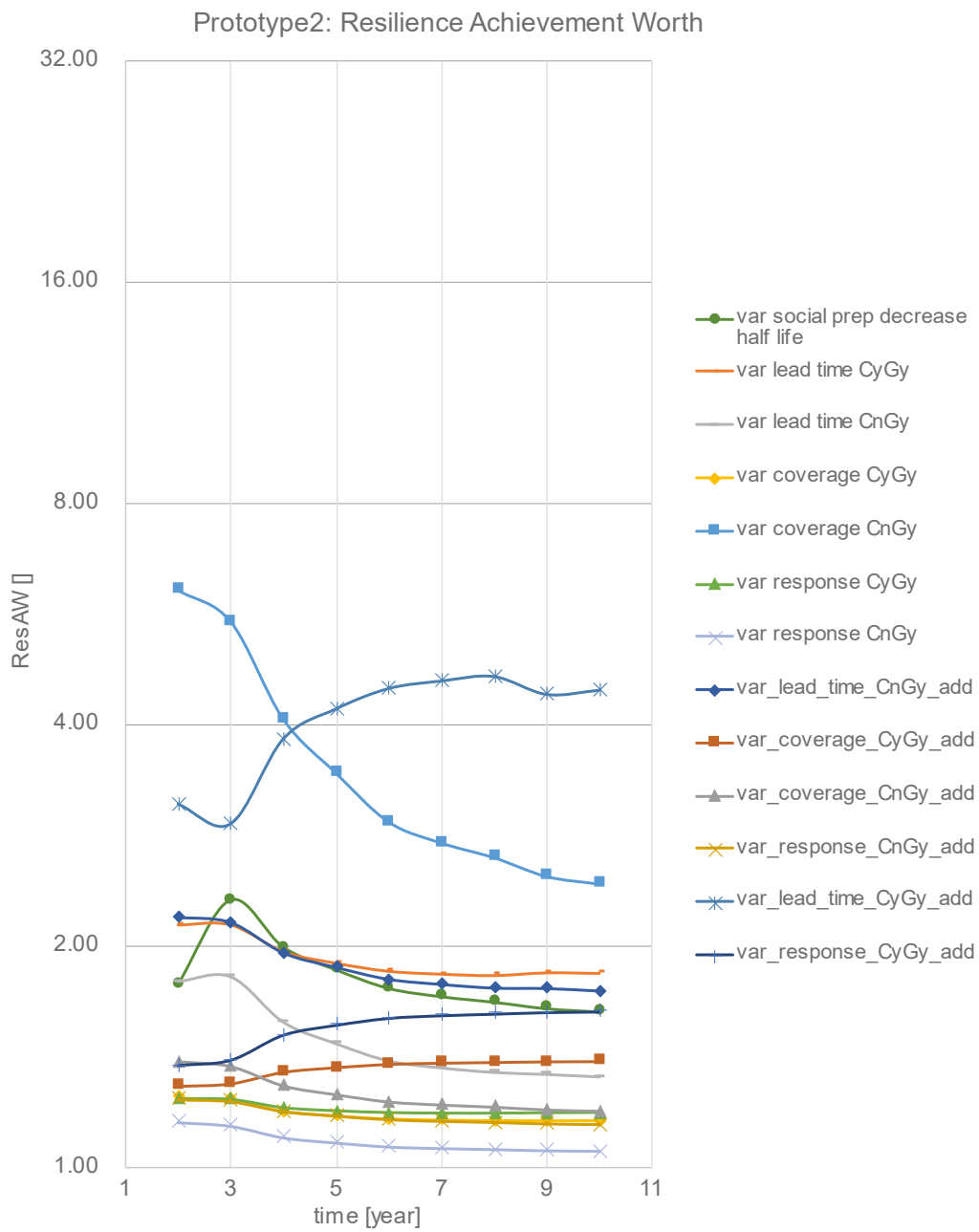


図 6-19. 新規技術導入におけるレジリエンス獲得重要度 (ResAW) 評価結果 (抜粋)

6.4.3 出力に対する考察

新規システムのベースラインシナリオの評価として出力した図 6- 18 図 6- 16 では、プロトタイプ1と同様に、動的なレジリエンス評価として洪水イベントに対応する各種変数の変化、洪水被害低減の算出が行うことができた。

新規システムの適用によって、プロトタイプ1の図 6- 8 における累積洪水被害低減効果の評価結果(10年時点最終結果:2.22)に比べて、プロトタイプ2の図 6- 16 における累積洪水被害低減効果の評価結果(10年時点最終結果:3.52)では、1.58倍の被害低減効果が想定されることが確認できた。新規システムでは警報のカバレッジ (var_coverage_CyGy_add, var_coverage_CnGy_add 等)に関する性能向上を中心にパラメータをインプットし、そこでは1.2倍の向上を設計として見込んだが、信頼性評価や、多状態の特性を同時にモデリングすることで、実際には信頼性向上の観点も踏まえて、長期的にはそれ以上の効果が見込まれるということを示した。この理由として、図 6- 19 におけるプロトタイプ1で得られたレジリエンス獲得重要度(ResAW)では、従来のコミュニティによる警報カバレッジが十分に得られない場合のカバレッジを示すパラメータ(var_coverage_CnGy)に対して ResAW の値が非常に大きく出力されていたことに対して、新規システムの追加と var_coverage_CnGy_add によるカバレッジの底上げによって、3.2.2 項で示したようなレジリエンスエンジニアリングにおける優美な劣化を実装することに成功したからと想定される。これに対応して、図 6- 19 では、従来のコミュニティによる警報カバレッジが十分に得られない場合のカバレッジを示すパラメータ(var_coverage_CnGy)の ResAW の値が非常に小さくなっており、ここからもレジリエンス化に成功していると言える。このように、優美な劣化を適切に設計することによって、最終的に得たいパフォーマンス(ここでは累積洪水被害低減効果)に対しては、投資以上の効果が得られる可能性があることを示した。

一方で、図 6- 10 や図 6- 18 の各プロトタイプにおけるレジリエンス喪失重要度(ResRW)の社会的準備態度の変数に対する重要度評価結果からも分かるように、プロトタイプ2において、はじめの数年間ではプロトタイプ1におけるシナリオに比べて社会的準備態度のレジリエンス喪失に対する重要度は低減しているものの、10年後の ResRW の値は両プロトタイプ結果においても、社会的準備態度は40強の値を示しており、新規技術導入を行ったとしても社会的準備態度の維持は長期的には最も重要な指標であり、維持改善の活動が弱めることができないことを示している。

6.4.4 妥当性確認

プロトタイプ2の妥当性確認としては、ICIMOD が開催したレジリエント・ソリューションズ・カンファレンス&エキスポ 2022(2022年12月5日～7日)に参加し、提案する新規システムをエキスポに訪れたヒンドゥクシュヒマラヤ地帯の環境保全関係者に対してプレゼンテーションを行うことで、システムの効果見込みの妥当性や課題を確認し、重要度評価モデル出力との比較を行い、モデルの有用性を評価した。図6-20にプレゼンテーション会場の様子を示す。



図6-20. 提案システムのプレゼンテーションの様子

プレゼンテーションを通して、提案した新規技術導入シナリオに対して、ブースを訪れた参加者約15人から、以下のような意見を収集した。レジリエンス向上以外の観点での質問も含めて、全てのまとめとして記述している。

- データをカスタマイズでき、多様なハザードに適用できることは興味深い。インドやバングラディッシュ、ブータンでも同様に洪水に悩まされている。また、マルチハザードに同様に使えるならば有用性と考えerの人が多かった。
- 現状の通信手段でも一定水準ではうまくいっているので必ずしも不可欠な追加システムではない。マルチハザード、様々な国で同システムを適用できることで、共通化、低コスト化が狙えることが重要。
- コストに関する質問が多い。安くなければなかなか導入ができない。レシーバー自体が五千円という価格で追加できるのであれば導入にあたって問題はない。
- ビジネスの継続性に関して、説明ができる必要がある。
- センシングの部分にインターネットに頼らなければいけないことが強靱化や導入容易性に繋がりにくいのではという意見が多かった。
- 情報伝達の信頼性や情報遅延について気にする質問者も多かった。
- 子どもの教育活動に活用できるのか？教育をレバレッジするような仕組みに活用できるのであれば、興味深い。

総じて、マルチハザードに対応できることの重要度やコスト・ビジネス成立性といった観点でのコメントが多かった。マルチハザード対応性について言えば、事実として新規提案システムが存在しなくとも ICIMOD のシステムでは、運用を問題なく達成できている。一方で、マルチハザード性については欠いていることから、システム提案時の要求として社会的準備態度を増加できるような提案であることが望ましいと考える。この観点では、本モデルが出力する重要度指標の因子の種類としては適切なものが選定できていると考えられる。また、ビジネス面について言えば、コストに関する質問も多く、これらのシステムを導入することによる費用対効果が見えるようにモデルの出力を工夫することが今後の検討事項である。一方で、本洪水被害低減効果の指標の中核は 3.2.1 項でも示したように、資産への損害をベースとしている。そのため、その地域の人口や面積などを精密に考慮することで、費用対効果の算出にも発展可能な余地があるため、費用対効果の議論においても本提案モデルは有用であり、ニーズがあると考えer。また、衛星システムを交えることから規模が大きくなりがちであるため、いかにしてスモールスタートを行い、導入を進めるかといった観点もレジリエンス評価とは別問題として検討が必要である。

第7章 考察

本章では、提案したコミュニティベース洪水早期警報システムのレジリエンス向上のための因子を識別するための重要度評価モデルに関する設計・評価を行った上での有用性と課題について述べる。加えて、課題分析やモデル設計といった研究活動を通して獲得した持続可能な洪水早期警報システムに対する示唆について述べた上で、今後の展望について論じる。

7.1 提案モデルの有用性

本論文における提案では、コミュニティベース洪水早期警報システムを対象としてその上位目的を達成するためのシステムダイナミクスを明示し、先行研究で提示された 3.2.1 項における早期警報導入による利益 (inundation-reduction benefit) を拡張し、コミュニティベース洪水早期警報のように技術・社会の両側面が重要となるシステム評価を可能とした点で本アプローチには新規性がある。また、提案手法では、システムダイナミクスを通して、システムのアベイラビリティとパフォーマンス情報を統合的に取り込むことによって、アーキテクチャを構成する各技術的・社会的な因子に対して重要度評価を可能としたことで、コミュニティベース洪水早期警報のレジリエンス獲得に向けた戦略立案を可能とした。また、コミュニティベース早期警報は、政府による洪水検知・警報、コミュニティによる洪水検知・警報、またそのほかの手段による洪水検知・警報のように複数のアクションからなり、それらの利用可能状態によってパフォーマンスが異なる多状態システムである。こういった多状態な状況が重なり合う状況下において、コミュニティベース早期警報に限って性能評価を行ったとしても、本質的に重要度の高い因子を抽出することは難しいと判断した。そこで本提案では、5.4.3 項で示したようにイベントツリーを用いて多状態システムをモデル化することで、より現実に即した評価を可能とした。

2.2 項にも示したように、レジリエンス設計においてどのような因子が関連しているかについてはガイドラインの中の知識や従事者における暗黙知として情報が蓄積されながらも、実際にはレジリエンス獲得のために行うべき施策の重要度が経時的に変化する各因子の動態を捉えて、今なにをすべきか、どのような改善を施すことが重要かを判定できていないことが課題の根幹であると考えた。そこで本提案では、時間的変化を無視した従来型の持続可能性獲得の指針ではなく、システムダイナミクスを考慮し、動的に変化し得る重要度の変化を捉えた戦略立案を支援するためのモデルを提案した。結果的に、6.3 項、6.4 項でも示したように、システムアベイラビリティや社会的準備態度のように動的に変化するストックを考慮することで、CBFEWS の導入後の年数に合わせた重要度の高い対応策を検討することを支援できるようにし、予算制約・技術的制約の大きい開発途上地域において、効率的に CBFEWS の維持に貢献できる点で有用性がある。

7.2 提案モデルの課題

提案モデルでは、システムズアプローチを用いて、上位の目的に対して関連する社会・技術の両側面を対象としてモデル化を行うことで、システムズアプローチによってより広い視点での評価を可能とした。一方で、本モデルでも考慮ができていない事項や、考慮したもののモデルを用いた実運用への適用面で課題となり得る事項を整理する。

本研究においては、3.2.1 項における早期警報導入による利益 (inundation-reduction benefit) の算出式において、表 3- 1 のように Carsell ら [36] が整理した洪水発生までのリードタイムと浸水深さによる資産への損害割合をもとにレジリエンス評価を実施した。一方で本データでは途上国や先進国の明確な区別はなされておらず、今回対象としたような情報脆弱で開発途上な地域においては若干ながら修正が必要である可能性もあり、対象地域ごとにバリデーションが必要である。また、洪水被害低減効果は正規化した警報を受けた市民の割合 (F_{rw})、早期警報に応答する意思のある市民の割合 (F_w)、早期警報に対して効果的に応答する手段を知っている(または援助する人がいる)割合 (F_c) を掛け合わせることで評価を行っているが、これらのパラメータはそれぞれの土地や住民の文化などがより反映されるパラメータと考えられるためより具体化の余地があると考えられる。例えば、警報を受ける市民の割合については、単純な割合だけでなく、その地域の地理情報、警報配置、昼夜の状況などによっても変動を受け得るものと考えられる。早期警報に対して効果的に応答する手段を知っている割合についても、単純に社会的準備態度のみで変動するようにモデル化したが、キーインフォーマントインタビュー#3 でもあったように、GNSS を用いた情報量の多いシステムのような早期警報であれば、どのように洪水から退避するべきかを知っている人数 (F_c) をさらに効果的に増やすことも可能となると考えられるため、検討の余地がある。システムがマルチハザード対応であれば、よりその警報システムから得た情報を信用し、早期警報に応答する意思のある市民の割合の向上も見込むことができると考えられる。

また、内部パラメータである社会的準備態度については、非常に定量化が難しい社会的因子である。いかなる手法を持ってしても確定的な値は出せないため、より解析信頼度を向上させるためには、パラメータに対して分散を考慮して不確定性を踏まえた検討を進める必要がある。同様に洪水発生時のショックマグニチュードについてもどの程度社会的準備態度に影響が現れるかも表現が難しいため、より多くの専門家との対話のもと決定することが望ましい。

とりわけ今回対象とした ICIMOD のネパールのケースでは、すでに実運用が進められており、運用パフォーマンスデータがある程度利用可能であった。一方で、その他の地域やシステムに対して同様の手法を流用するためには、同様にまずはシステム導入後に効果の測定を実施する必要がある。

最後に、今回の検討においてはシミュレーションにおいてばらつきの考慮はせずに、ベースラインパラメータ、ベスト値、ワースト値の3通りでのみ評価を実施したものの、他分野システムにおける PRA 評価 [64]でも適用されているように、各故障率や性能パラメータなどについても分散を考慮し

でモンテカルロ解析を実施することが望ましい。一方で、今回の論文では結果を示していないが、実際に分散を考慮したモンテカルロ解析を実施しようとすると、その分散 3σ 値の決定や、ガウスノイズや一様分布など分散タイプの決め方にも非常に困難を要することがわかった。このようなパラメータの設定の決定方法も今後の検討の余地がある。これらを適切に設定できることで、複数のパラメータ間の相関などの分析も可能となると考えられる。

7.3 持続可能な洪水早期警報システムに対する示唆

持続可能な洪水早期警報システムに対する示唆としては、第 2 章における文献調査やキーインフォーマントインタビューを通して定性的に既に明らかなものとなっていたが、本研究を通して、ICIMOD の CBFEWS 事例を用いた分析結果から獲得した経時的な特性を踏まえた示唆を以下にまとめる。既に完成しているシステムに限らず、今後開発が進められるコミュニティベース早期警報においても同様に考慮することによって、より持続可能で効果的なシステムの構築が可能になると考える。

- システム導入直後は社会的準備態度が安定していない可能性があるため、政府による要留意モニタの上、CBFEWS がうまく働かないことに備え、CBFEWS の導入とともに政府も重点的に情報提供支援を行い、レジリエンス獲得のために CBFEWS が軌道に乗ることの支援を行う必要がある。
- システム導入から安定した動作が可能となってからは、レジリエンスを喪失させないために社会的準備態度がより重要となるため、継続した CBFEWS の効果モニタリングとともに、支援団体はチュートリアルや介入活動を通して社会的準備態度の維持に努めることの重要度が高まり続ける。
- 情報伝達に用いるための機器やチャンネルの故障には留意しつつ、警報伝達のための空間カバレッジを増やすための警報通知の多チャンネル化活動は継続されるべきであり、システム導入から安定したフェーズでは特に重要度を増す。
- 警報リードタイムの増加は複数の洪水イベントを考慮すると、レジリエンス獲得のために効果が大きく現れるため、継続的な努力を惜しむべきではない。
- 洪水警報の発出閾値によって被害の小さい洪水または豪雨イベントを活用して早期警報訓練を実施し、社会的準備態度を維持することも可能であるため、閾値設定には十分留意するべきである。

7.4 今後の展望

本論文にて提案したレジリエンス重要度分析には大きく二つの発展方向性が考えられる。一つはモデルの高信頼化、高精度化による実運用に向けた実装である。もう一つは、他の類似分野における多状態モデリングとレジリエンス重要度を用いた評価の実施による、ソシオテクニカルシステムの強靱化である。

前者について、本提案では修士研究としての限られた時間内でのバリデーションとなったが、よりステークホルダーを巻き込んだパフォーマンス情報の収集や議論の継続により、より高信頼化されたモデル駆動が可能になる。これらの活動によって、継続的にモデルを更新することでより繊細な支援を行うことができると考える。モデルの詳細化の観点で例えば、Wuら [73]は地域ごとの人口密度、坂道の情報、GDP 情報、川の配置などの情報をもとにオントロジーベースのベイジアンネットワークを構築し、本研究と同様に感度解析を実施し、洪水災害のリスク管理に役立つ提案がなされている。Wuらの手法では主に洪水環境のコンテキストに着目しているが、本論文における提案と組み合わせることで、よりその土地に沿ったリスク評価に基づき、よりシステム・アーキテクチャやパフォーマンスパラメータの検討が実施できると考えられる。本論文における研究では、レジリエンス重要度分析において各パラメータは独立的なものとして評価を実施したが、ベイジアンネットワークや感度解析を踏まえることで、洪水災害に影響を与える要因間の潜在的な関係を捉え、不確実性を定量化することができる [73]。また本研究では対象外とした、早期警報の誤報がもたらす次回以降の早期警報への悪影響 [74]や早期警報を市民が受領した後に警報を信用し、確認した上で行動するといった振る舞い [75]のモデル化についても検討の余地がある。一方、パラメータが増えすぎると実用上好まれないことも容易に想像されるため留意が必要である。また、本提案では既存システムを出発点としてモデル適用をおこなったが、同様に既存システムの分析の上、実際の新規技術を用いた早期警報の導入プロジェクトにおいても本モデルの適用検討を進めていきたい。

また後者について、他の類似分野におけるソシオテクニカルシステムの最適化検討にも流用を試みたい。Levesonら [76]のレジリエンスエンジニアリングに関する文献では、スペースシャトル「コロンビア号」の事故が発生した背景をソシオテクニカルシステムとしてモデル化し、システムダイナミクスによってレジリエンスなシステムを構築するための管理方法に関する示唆を与えた。このように安全上クリティカルなシステムは洪水早期警報に限らず世の中には多く存在する一方、まだ開発が完了していないシステムに対してソシオテクニカルシステム理論を用いたモデリングシミュレーションに基づくシステム開発には未だ研究の余地があると考えられる。これから開発が進められるシステムに対して、組織特性を踏まえた上でどのような開発対象のアーキテクチャをもってすれば、レジリエンスの高い開発ができるかといった課題にも発展を心みたい。

第8章 結論

本論文は、開発途上地域に対しても災害レジリエンス、特に洪水時の早期警報システムにおけるレジリエンス向上を目標として、コミュニティベース洪水早期警報を対象とし、その長期にわたる持続可能性を獲得するための施策を適切に遂行するために、コミュニティベース早期警報の持続的・効果的運用を可能とするためのヒントを炙り出す手法構築をした。先行調査では 33%のコミュニケーション装置が使用されず廃棄されているとの報告の挙がっている地域もあり、いかに持続可能なシステム維持運用を構築するかが洪水地域におけるレジリエンス獲得において重要であると考えた。

先行研究・事例調査や、コミュニティベース早期警報に従事する3人のキーインフォーマントへのインタビューによって、コミュニティベース早期警報を獲得するためには、社会・技術の両特性(ソシオテクニカルシステム)を考慮したシステムズアプローチによるレジリエンス評価手法が必要不可欠でありかつ、未着手分野であることを明らかにし、システムの持続可能性に関する考察を与える分析出力やシステム設計におけるインサイトを与える手法の構築には詳細化の余地があると結論づけた。

提案ではシステムズアプローチを用いてコミュニティベース洪水早期警報によって達成される、本論文の定義するレジリエンスである長期的な洪水頻度低減効果の合計値を予測する手法として、システムダイナミクスを用いて、社会的準備態度、技術システムのアベイラビリティ、洪水被害シナリオといった因子を考慮し、動的に確率論的リスク評価とパフォーマンス評価を接続した実行可能モデルを構築した。一方課題として、開発途上地域における早期警報の効果を正しく測定するためにはコミュニティベース早期警報のみならず、政府により達成される早期警報との相互依存関係を考慮したモデル設計が必要であった。そこで、複数のシステムの相互作用を適切に反映するための手法として多状態モデリング手法である多状態多値決定グラフの考え方を導入することによりその評価を可能とした。また、レジリエンス重要度としてレジリエンス喪失重要度(ResRW)、レジリエンス獲得重要度(ResAW)といった新規指標を定義し、これをもとにコミュニティベース早期警報システムの技術的・社会的な構成要素のなかでどのような因子がレジリエンス喪失または獲得に大きく関与するかの重要度評価を可能とした。システムのモデリングには、SysML を用いて実施したアーキテクチャ分析に対するフォルトツリーやイベントツリーの構築から始まり、多状態モデリング手法を用いて複数の達成状態を考慮したシステムアベイラビリティから期待パフォーマンスを算出する手法を用いた。

モデルの評価として実施した情報脆弱地域におけるコミュニティベース洪水早期警報のレジリエンス評価では、システム導入から約 8 年が経過する 2023 年時点においてもレジリエンスの維持に成功しているネパール ICIMOD によって導入されているシステムを対象とし、既存システムのレジリエンス評価並びに、新規技術の導入といったシナリオにおけるレジリエンスの向上度合いを評価す

る2つのプロトタイピングを実施した。既存システムのレジリエンス評価として実施したプロトタイピング1では、レジリエンス喪失重要度(ResRW)として時間の経過とともに社会的準備態度、洪水警報発出閾値といったパラメータがその重要度を指数関数的に増大させていくことを明らかにした。また、レジリエンス獲得重要度(ResAW)として、コミュニティベース早期警報によって達成される洪水予測リードタイムの向上、コミュニティベース早期警報がうまく働かない場合に備えた代替の警報カバレッジ向上策が大きなレジリエンスをシステムにもたらすといった結論も抽出できた。こういった結論に対して、関係者からのヒアリングやアンケートを通して、社会的準備態度は技術的側面に対して持続可能性の点では8割ほどの重要度をもつといったこと、一方で社会的準備態度よりもそのほかの技術側面がシステム導入初期においては重要であること、実際にコミュニティベース早期警報の強化のためにリードタイム向上の新規技術の導入を進めているといった意見からも、本モデルからの出力は現実に即したものであり、妥当であると判断できた。これを受けて実施したプロトタイピング2では、コミュニティベース早期警報がうまく働かない場合に備えた代替の警報カバレッジ向上策を強化するための新規技術の提案として、準天頂衛星を用いたインターネットによらず、複数の地点に導入容易なアラームユニットを追加することを想定したシステムを定義し、同様にレジリエンス評価を試みた。結果、新規システムの適用によって、プロトタイピング1の累積洪水被害低減効果の評価結果(10年時点最終結果:2.22)に比べて、プロトタイピング2の累積洪水被害低減効果の評価結果(10年時点最終結果:3.52)では、1.58倍の被害低減効果が想定されることが確認できた。また、この結果から、本提案モデルの評価においては、単純なパフォーマンス特性の向上だけでなく、システムの一部異常状態といった多状態を考慮した上での期待値的なレジリエンス評価を行うことができ、システム導入における費用対効果の議論にも繋げられることを確認した。

今後の展望として提案モデルの有用性をより具体化するために、本モデルを別の地域や洪水以外のハザードに対抗するコミュニティベース警報システムに適用することを検討する。本モデルは洪水頻度だけによらず、アーキテクチャ定義次第でいかなる被害に対しても適用できる可能性を持つ。より地域的な特性を考慮した評価を行うためには、GISや衛星データに基づくハザードマップとの融合など、被害予測マップやアラーム時空間的な警報システムにアラーム伝達網羅性との関連づけによって、レジリエンス分析の精度や信頼性が向上できると考えられる。加えて、今回提案したようなパフォーマンスベース信頼性評価手法は災害警報の分野によらず、ミッションクリティカルなその欠落が致命的損害となりうる要素の評価としても、妥当なレジリエンス評価を実行できると考えられるため、そのアプリケーション先の開拓にも検討の余地がある。本研究の成果が、洪水早期警報の場面のみならず、その他の人命・財産の保護の観点でクリティカルとなるインフラストラクチャーの開発構築においても、レジリエンスを向上するための視座を与える一役となることを願う。

謝辞

本論文執筆や研究室での活動において、研究をいかに進めるか、いかに楽しむかを熱心にご指導いただいた指導教員である神武直彦教授には、根気強くご指導いただきました。昼夜問わずにいつも前向きで、学会に向けた準備や海外出張を後押しいただいた中で、研究を前に進めるために温かいご支援をいただき、心より感謝申し上げます。同じ会社の出身でありながら、分野の垣根を破り、幅広い世界でご活躍されていることに感銘した私をすぐに受け入れてくださり、これからも先生を見習って世のため、人のためになるシステムを考え、社会に貢献していけるよう精進したいと思います。修士研究にとどまらず、引き続き対外的な発表を通じて、研究室での経験を成果に変えるための努力を続けたいと考えています。

副査の当麻哲哉教授にも中間発表にてコメントをいただき、また修士研究のまとめに入ったフェーズからも詳細な計算手法やパラメータの妥当性などについて議論をさせていただいたおかげで、より研究として方法論を突き詰めるきっかけを与えていただき、感謝申し上げます。当麻先生との一対一での議論なくして、細部まで自信を持った研究に仕上がらなかったと考えております。また、個別に研究をご説明させていただきました、西村秀和教授にも感謝申し上げます。システムズエンジニアリングの観点でコメントをいただけたことが大変貴重な機会になりました。

内閣府宇宙開発戦略推進事務局の角谷陽子様には、早期警報や準天頂衛星に関しては門外漢であった私に、快くインタビューやアドバイスをいただき、また実際に宇宙技術をコミュニティへ導入されている経験を共有いただいたことが、私の修士論文の骨格ともなりました。みちびき利用ハッカソン「RPD Challenge」を力強く推進されている姿を拝見し、宇宙技術を世の中に実装していく点において、大変学ぶべき点が多くありました。大変感謝しております。JAXA 衛星測位システム技術ユニットの小暮聡様にも同様に、準天頂衛星の新しいユースケースである早期警報に関する現状や課題を共有いただき、ありがとうございました。

東京大学空間情報科学研究センターの Dinesh Manandhar 特任准教授には、研究中盤より、ネパールの洪水早期警報システムを対象とした研究において、現地の状況や洪水早期警報の持続可能性における基本的な考え方、準天頂衛星のみならず開発途上地域における早期警報の導入に関して、多くのディスカッションを実施させていただき、研究のブラッシュアップをさせていただきました。また、実際にネパールへの訪問にあたり、現地の方との下調整などのご支援までいただき、洪水早期警報の研究を実施するにあたり、多大なご支援をいただき、感謝申し上げます。引き続き、早期警報のドメインに関しての勉強も続け、先生の力になれるように精進したいと考えています。

本論文において研究の対象とさせていただいた、The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD) の洪水早期警報システムを実際に開発・運用を進められている Shailendra Shakya 氏、Neera Shrestha Pradhan 氏、Sagar Ratna Bajracharya 氏には、コミュニティ洪水早期警報の現場での実際の課題についてヒアリングなどを実施させていただき、研究のコアとな

る情報をいただきありがとうございました。加え、カトマンズ で開催された The resilient solutions conference and expo 2022 においてポスター発表、パネルディスカッションへの参加に向けた支援をいただき、大学院生活においてこの上ない貴重な経験を与えていただきました。この国際カンファレンスへの参加は早期警報の本研究にとどまらず、世界を俯瞰的にみて、持続可能な社会を考えるための基礎となると考えております。

「組込み技術とネットワークに関するワークショップ ETNET2022」のディペンダブルコンピューティング研究会 (DC) グループへ参加させていただいた際に、発表に対してコメントをいただいた拓殖大学 葦原隆教授、東京都立大学 福本聡教授にも感謝を申し上げます。大学院生活では初めての対外的発表でありながらも、温かく、そして的確なコメントをいただきありがとうございました。福本聡教授には本研究における肝となるパフォーマンスベース信頼性の論文を紹介いただいたことで、研究における独自性を際立ったものとすることができました。

神武研究室の小高暁特任准教授、西野瑛彦特任助教、博士課程の大野 友さん、駒木 亮伯さん、また修士課程における一世代上の先輩である木村由佳さん、齋藤 敦子さん、セキ ウンエイさんにも感謝申し上げます。小高先生、西野先生には特に早期警報システムのプロフェッショナルとして、毎週のラボミーティングにおけるアドバイスのみならず、研究に行き詰まったときには複数の個別ミーティングを通して、研究として仕上げるためのエッセンスや関連情報をご提供いただきました。紆余曲折しながら、テーマを確定から丁寧なアドバイスをいただいたことで、本研究を修士論文としてまとめあげることができました。大野 友さん、駒木 亮伯さん、木村由佳さん、齋藤 敦子さん、セキ ウンエイさんには毎週のラボミーティングや、夏合宿、研究室の親睦会などを通して、修士論文を仕上げるにあたるスケジュール管理やコツなどを議論させていただき、また研究室の先輩として親身になって成功に向けたご指導をいただきました。神武研究室の同期である荒井里美さん、寺廻健太さん、永井秀幸さん、本間有貴さん、森井貴弘さん、川島颯さん、竹林正豊さん、他研究室から毎週同じ仲間として神武研究室に参加いただいていた中村征史さん、金田由妃さんには、日々の研究室活動を通して、お互いの研究発表や輪講を通してよい研究を達成できるよう切磋琢磨をさせていただきました。コロナ渦で対面での会話が少なかったですが、オンラインを活用し、社会人生活との両立をこなしながら、楽しい大学院生活を彩っていただき、ありがとうございました。特に、共に輪講を進めた「世界はシステムで動く」の書籍についての議論は私のシステム開発思想に大きな影響を与え、今後もより広い視野でのエンジニアとなるための基礎となったことは間違いありません。修了後も末長く親交をもたせてください。同じく神武研究室において、修士 1 年の杉山 佑さん、中西 伸次郎さん、中村 駿さん、三輪 智史さん、岡部 祥司さん、宮崎 莉加さんとも同様に研究活動において共に鍛錬させていただきました。引き続き今後も私にできるサポートをさせていただきたいと考えています。神武研究室の仲間である、DETERA BERNADETTE さん、NDUWAYEZU GABRIEL さんには防災系のテーマを扱っていることもあり、研究室合宿などの機会ですべて親交をもたせていただきました。私は洪水早期警報を対象としていましたが、ソーシャルメディアを用いた早期被害検知や Land Slide に関する研究など、異なった視点からのインサイトをいた

だき、研究に彩を与えるきっかけをありがとうございました。修論合宿より、西野瑛彦特任助教、セキ ウンエイさん、本間有貴さんには修士論文合宿の際からも一緒に悩んでいただき、大変感謝しております。

この2年間において、職場の上司や同僚には社会人大学院に通学することに理解をいただき、仕事面において大変融通を聞かせていただきながら、その一方で変わらず仕事においてもチャンスを与えていただき、大変ありがとうございました。大学院生活で習得したシステムズエンジニアリングやプロジェクトマネジメントの手法を十分に活用して、仕事を通して恩返しをさせてください。

最後に、休日や夜間を犠牲にし、勉学に励むことを許してくれた最愛の妻、2歳の息子に心から感謝します。良き夫、父になれるよう一層精進し、生涯を通して最高の家族を目指して、ワクワクする毎日をこれからも一緒に過ごさせてください。

改めて、應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科で研究活動だけでなく、すべての課程において関わっていただいたファカルティメンバーの皆様、同期の学生の皆様、厚く感謝申し上げます。修士研究や應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科での全ての活動を糧として、世の中によりよいシステムを創り上げられるよう、システムズエンジニアリングに励んで参りたいと思います。

2023年3月 富田悠貴

参考文献

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, “THE 17 GOALS Sustainable Development,” [オンライン]. Available: <https://sdgs.un.org/goals>. [アクセス日: 10 2022].
- [2] The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Community Based Flood Early Warning System Resource Manual, 2019.
- [3] BBC NEWS JAPAN, “パキスタンの洪水、「全土の3分の1が水没」と気候相 復興には莫大な費用,” 30 8 2022. [オンライン]. Available: <https://www.bbc.com/japanese/62719691>. [アクセス日: 10 2022].
- [4] 日本経済新聞, 線状降水帯、広範囲で頻発、東北・北陸6県54万人避難対象 17河川が氾濫、浸水、台風起源の水蒸気影響か, p. 朝刊 39 ページ, 5 8 2022.
- [5] BBC NEWS JAPAN, “豪シドニーなどで洪水、約5万人が避難,” 5 7 2022. [オンライン]. Available: <https://www.bbc.com/japanese/video-62046609>. [アクセス日: 10 2022].
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2007: Synthesis Report,” 2007. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. [Accessed 10 2022].
- [7] 国土交通省, “水管理・国土保全 | 地球温暖化に伴う気候変化が水災害に及ぼす影響について (平成20年4月), ” 4 2008. [オンライン]. Available: https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/. [アクセス日: 10 2022].
- [8] P. R. a. M. R. Hannah Ritchie, “Natural Disasters,” Our World in Data, 10 2022. [オンライン]. Available: <https://ourworldindata.org/natural-disasters>.
- [9] 池淵周一, 椎葉充晴, 宝馨, 立川康人, エース水文学 (エース土木工学シリーズ), 朝倉書店, 2006.
- [10] C. E. S. K. Serra-Llobet A, “Governing for integrated water and flood risk management: Comparing top-down and bottom-up approaches in Spain and California,” Water 8, no. 10, 2016.
- [11] Association for Diplomatic Studies and Training (ADST), “Preventing and Controlling Floods in Bangladesh: Tackling an Age-Old Problem,” 10 7 2018. [オンライン]. Available: <https://adst.org/2018/07/preventing-and-controlling-floods-in-bangladesh-tackling-an-age-old-problem/>. [アクセス日: 10 2022].
- [12] L. Friedman, “How Bangladesh Is Preparing for Climate Change,” Scientific American, 31 3 2009. [オンライン]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/bangladesh-prepares-for-climate/>. [アクセス日: 10 2022].
- [13] United Nations, “International Strategy for Disaster Reduction Hyogo Framework for Action 2005 - 2015: Building the Resilience of Nations,” 2005. [オンライン]. Available: https://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf. [アクセス日: 10 2022].
- [14] 仙台市まちづくり政策局防災環境都市推進室, “「仙台防災枠組」推進に向けた取り組み | 防災環境都市・仙台,” 12 3 2016. [オンライン]. Available: https://sendai-resilience.jp/media/pdf/sfdrr_2.pdf. [アクセス日: 10 2022].
- [15] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “Sendai Framework for Disaster Risk

- Reduction 2015–2030, ” 2015. [オンライン]. Available: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>. [アクセス日: 10 2022].
- [16] 総務省, “総務省 | 報道資料 | 「情報難民ゼロプロジェクト報告」の公表,” 12 2016. [オンライン]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000456319.pdf. [アクセス日: 10 2022].
- [17] Federal Emergency Management Agency (FEMA), “IPAWS Fact Sheet,” 29 10 2011. [オンライン]. Available: https://www.fema.gov/pdf/emergency/ipaws/ipaws_factsheet.pdf. [アクセス日: 10 2022].
- [18] H. R. a. E. O.–O. Max Roser, “Internet,” Our World in Data, 2015. [オンライン]. Available: <https://ourworldindata.org/internet>. [アクセス日: 10 2022].
- [19] A. G. B. S. S. R. Shrestha MS, “Applying satellite-based rainfall estimates for streamflow modelling in the Bagmati basin,” Journal of Flood Risk Management, Nepal, 2008.
- [20] T. V. e. al., “Community and impact based early warning system for flood risk preparedness: The experience of the Sirba River in Niger,” Sustainability, 2020.
- [21] I. Kelman , M. Glantz, “Early Warning Systems Defined. In Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change,” Germany, 2014.
- [22] J. Cools, D. Innocenti , S. O’Brien, “Lessons from flood early warning systems,” Environ. Sci. Policy, 2016.
- [23] Assistance and Cooperation for Community Resilience and Development Inc. (ACCORD) | CARE Philippines, “COMMUNITY-BASED EARLY WARNING SYSTEM Learning from Saint Bernard,” Southern Leyte, 2020.
- [24] International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, “PEOPLE CENTERED EARLY WARNING SYSTEMS: LEARNING FROM NATIONAL RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES,” 2020.
- [25] VNG International , “A flooding Early Warning System for all in Benin,” [オンライン]. Available: <https://www.vng-international.nl/node/775>. [アクセス日: 10 2022].
- [26] S. M. J. B. Rentschler J, “Flood exposure and poverty in 188 countries,” Nature communications, 2022 Jun 28.
- [27] 渥美公秀, “特集 コロナ時代に考える「レジリエンス」レジリエンスについて災害研究を通して考える,” 未来共創, 2021.
- [28] United Nations(UN) International Strategy for Disaster Reduction(ISDR), “ Third International Conference on Early Warning,” March 2006. [オンライン]. Available: <https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/checklist/English.pdf>. [アクセス日: 10 2022].
- [29] “IEEE Guide for Information Technology – System Definition – Concept of Operations (ConOps) Document,” IEEE Std 1362–1998 , 22 Dec. 1998.
- [30] K. N. N. P. R. S. G. P. P. N. Bajracharya SR, “Community assessment of flood risks and early warning system in ratu watershed, Koshi basin, Nepal,” Sustainability, 2021 Mar 23.
- [31] I. D. O. S. Cools J, “Lessons from flood early warning systems,” Environmental science & policy, 2016 Apr 1.
- [32] M. C. a. P. Action, “ Establishing Community Based Early Warning System– PRACTITIONER’S HANDBOOK.,” Practival ACTION , 2010. [オンライン]. Available: <https://answers.practicalaction.org/our-resources/item/practitioners-handbook-for-establishing-community-based-early-warning-systems/>. [アクセス日: 11 2022].

- [33] 田平由希子, 川崎昭如, “東南アジアの洪水常襲地帯における住民の災害対応と支援の関係 タイとミャンマーの比較分析から,” 水文・水資源学会誌, 2017 Jan 5.
- [34] 内閣府, “宇宙基本計画の変更について 令和2年6月30日閣議決定,” 30 6 2020. [オンライン]. Available: <https://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>. [アクセス日: 11 2020].
- [35] M.-G. Asia, “RPD Challenge,” [オンライン]. Available: <https://www.rpdchallenge.com/>. [アクセス日: 11 2022].
- [36] P. N. F. D. Carsell KM, “Quantifying the benefit of a flood warning system,” Natural Hazards Review, 2004 Aug.
- [37] B. W. C. K. C. S. H. J. M. B. M.-K. E. M. J. S. S. K. H. Aerts JC, “Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment,” 018 Mar.
- [38] D. B. G. S. J. Girons Lopez M, “Impact of social preparedness on flood early warning systems,” Water Resources Research, 2017 Jan.
- [39] K. R. K. H. Sawada Y, “Impact of cry wolf effects on social preparedness and the efficiency of flood early warning systems,” Hydrology and Earth System Sciences, 2022 Aug 18.
- [40] B. M. S. D. Sättele M, “Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning,” Reliability Engineering & System Safety, 2015 Oct 1.
- [41] M. DH, Thinking in systems: A primer, chelsea green publishing, 2008.
- [42] 土金達男, シミュレーションによるシステムダイナミクス入門, 東京電機大学出版局, 2005.
- [43] W. DD, “Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering,” Reliability Engineering & System Safety, 2015.
- [44] B. MD, “Performance-related reliability measures for computing systems,” IEEE Transactions on Computers, 1978 Jun 1.
- [45] E. Hollnagel, “Safety-I and safety-II: the past and future of safety management,” CRC press, 2018 Apr 17.
- [46] 北村正晴, “レジリエンスエンジニアリングが目指す安全 Safety-II とその実現法,” 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 2014 Oct 1.
- [47] W. R. B. J. Hollnagel E, “From Safety-I to Safety-II: a white paper,” The resilient health care net: published simultaneously by the University of Southern Denmark, University of Florida, USA, and Macquarie University, Australia, 2015 Sep 7.
- [48] C. S. F. T. Jackson S, “A generic state-machine model of system resilience,” Insight., 2015 Apr.
- [49] B. S. I. B. A. G. Daniele BC, “Analysis of perceived robustness, adaptability and transformability of Spanish extensive livestock farms under alternative challenging scenarios,” Agricultural Systems, 2022 Oct 1.
- [50] 野本秀樹, 植田聡史, “レジリエンス・エンジニアリングによる新しい宇宙機冗長設計,” 第12回クリティカルソフトウェアワークショップ (12thWOCS2), 2015.
- [51] Ç. E. H. M. J. A. Q. S. R. J. Sterbenz JP, “Evaluation of network resilience, survivability, and disruption tolerance: analysis, topology generation, simulation, and experimentation,” Telecommunication systems, 2013 Feb.
- [52] P. L. Oosthuizen R, “Assessing the impact of new technology on complex sociotechnical systems,” South African Journal of Industrial Engineering, 2016 Aug 1.
- [53] H. J. Bostrom RP, “MIS problems and failures: a socio-technical perspective, part II: the

- application of socio-technical theory,” MIS quarterly, 1977 Dec 1.
- [54] S. T. Z. X. M. Z. E. M. O. C. K. E. Pence J, “Data-theoretic methodology and computational platform to quantify organizational factors in socio-technical risk analysis,” Reliability Engineering & System Safety, 2019 May 1.
- [55] 湊宣明, “systems evaluation for business sustainability and its application to regional air transportaion,” 慶應義塾大学, 2013.
- [56] 信頼性の数理モデル, 東京: 朝倉書店, p. 2019.
- [57] Iec/ieee systems and software engineering: Architecture description. ISO/IEC/IEEE 42010: 2011 (E)(Revision of ISO/IEC 42010: 2007 and IEEE Std 1471-2000), ISO I, 2011 Dec 1, pp. 1-46.
- [58] “WHAT IS SYSML?,” Object Management Group (OMG), [オンライン]. Available: <https://www.omgsysml.org/what-is-sysml.htm>. [アクセス日: 12 2022].
- [59] B. R. A. S. X. L. Akers J, “Analysis of multi-state systems using multi-valued decision diagrams,” In 2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
- [60] 小野塚祐気, “宇宙システムのレジリエンス評価のためのオントロジー構築,” 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科.
- [61] 古川正志, 機械系 教科書シリーズ 5 システム工学, コロナ社, 2000.
- [62] H. J. Molinari D, “A behavioural model for quantifying flood warning effectiveness,” Journal of Flood Risk Management, 2011 Jan.
- [63] 金野秀敏, 確率論的リスク解析：基礎と方法, 丸善出版, 2012.
- [64] H. D. Michael Stamatelatos, “Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners – Second Edition,” NASA Headquarters, Washington, DC, 2011 Dec 1.
- [65] 嶋田善夫, “確率論的安全評価による安全上重要な海外原子力発電所不具合情報抽出方法,” INSS journal, 2004.
- [66] 香田正人, 本間俊充, “感度解析について,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 2010.
- [67] The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), “Community based flood early warning system,” [オンライン]. Available: <https://www.icimod.org/mountain/cbfews/>. [アクセス日: 12 2022].
- [68] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, “みちびき(準天頂衛星システム:QZSS)公式サイト,” [オンライン]. Available: <https://qzss.go.jp/>. [アクセス日: 12 2022].
- [69] 岩泉大介, “災害時の情報空白期における防災情報配信を補完する準天頂衛星を利用した防災情報配信システムの設計と評価,” 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, 2015.
- [70] 西野瑛彦, “エリア網羅性向上のための測位衛星と公共交通車両の配信データに基づく音声警報伝達システムの設計と評価,” 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, 2022.
- [71] 平田大輔, “測位衛星を用いた防災情報配信システムにおける相互運用性向上のための設計と評価,” 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, 2014.
- [72] 富田悠貴, 神武直彦, “強靱な衛星サービス・インフラ構築に向けた状態遷移確率モデルを用いたシステム連携の評価,” システムと LSI の設計技術 (SLDM), 2022 Mar 3.
- [73] S. Y. W. H. W. M. Wu Z, “Urban flood disaster risk evaluation based on ontology and Bayesian Network,” Journal of Hydrology, 2020 Apr 1.

- [74] P. A. P. M. B. M. B. N. da Silva GF, “Dynamic modeling of an early warning system for natural disasters,” *Systems Research and Behavioral Science*, 2020 Mar.
- [75] Z. L. B. G. Salit F, “Assessment of the warning system against floods on a rural area: the case of the lower Siret River (Romania),” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013 Feb 15.
- [76] D. N. Z. D. C.-G. J. C. J. B. B. Leveson N, *Engineering Resilience into Safety-Critical Systems in Engineering resilience into safety-critical systems*, CRC Press, 2006, pp. 95-123.
- [77] 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, システムデザイン・マネジメントとは何か, 慶應義塾大学出版会, 2016, pp. 42-43.

Appendix A

KII に対する半構造化インタビューシート

インタビューでは, 研究における Background および Survey 状況を伝えた上で, 5つの質問について構造化インタビューを行い関連した情報や知見について議論を行う. 次ページよりインタビューにて使用するサポート資料を示す.

- ☒ A- 1. Background (1/2)
- ☒ A- 2. Background (2/2)
- ☒ A- 3. Survey (1/2)
- ☒ A- 4. Survey (2/2)
- ☒ A- 5. Interview Protocol
- ☒ A- 6. Interview

Background



- Local rainfall increases year by year due to global warming, which increases the risk of flooding.
- Since it is difficult for national disaster information to reach vulnerable areas, a different approach is needed in developed countries.
- Community Based Flood Forecasting and Warning System (CBFEWS), a human-centered, timely and low-cost technology, is being promoted to ensure its operability in information vulnerable areas.

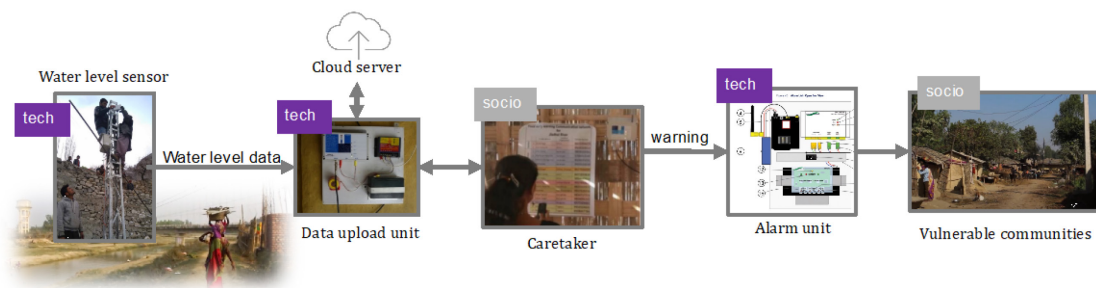
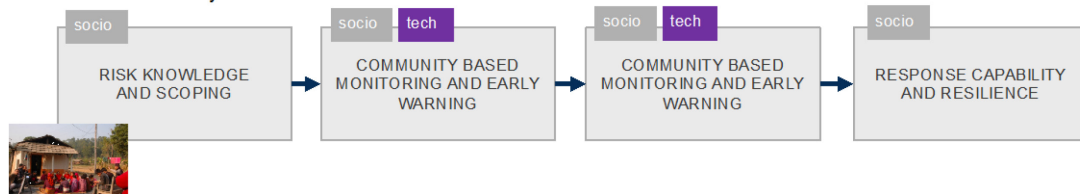


1

☒ A- 1. Background (1/2)

Background

- CBFEWS four key elements



©ICIMOD

2

☒ A- 2. Background (2/2)

Survey

■ Example of community-based flood early warning systems



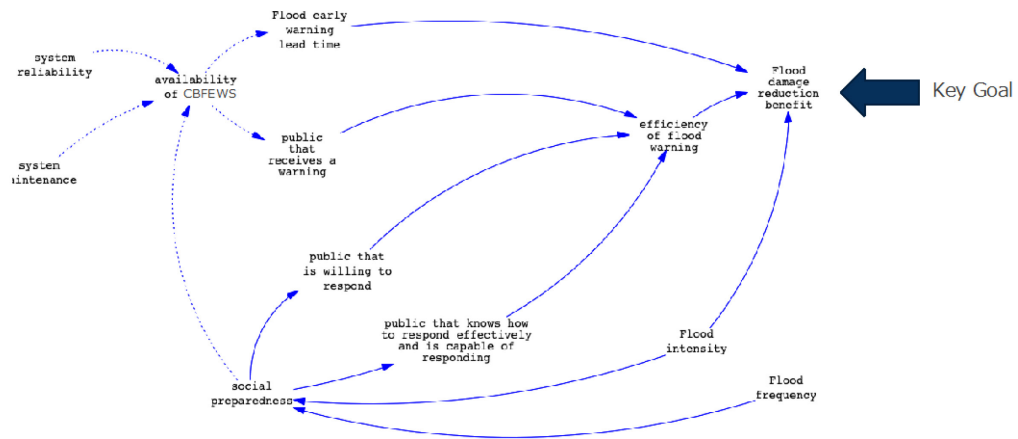
There is commonly sustainability concern mentioned.

3

☒ A- 3. Survey (1/2)

Survey

■ FEWS flood damage reduction benefit holistic evaluation model



4

☒ A- 4. Survey (2/2)

Interview Protocol

No	Item	Explanation
1	The research title and research group	Exploring Key Elements for Improving Resilience in Flood Forecasting and Warning in Developing Regions by Graduate School of System Design and Management, Keio University
2	Voluntary nature of research participation and freedom to withdraw	The interviewee is eligible to withdraw the interview anytime he/she would like to.
3	The purpose of research	In developing regions where flood damage is inevitable, community-based flood early warning systems (CBFEWS) are being introduced using human-centered and low-cost technologies to ensure their operability even in information vulnerable areas. However, there is still room for improvement in developing strategies to ensure the sustainability and resilience of CBFEWS. This study proposes a method to facilitate communication to strengthen resilience in the regular and late operational stages through a system analysis method that utilizes data from the early operational stages of CBFEWS. We model CBFEWS, a socio-technical system, using system dynamics, and develop a method to determine measures to strengthen resilience based on the model.
4	Research methodology	Key-informant-Interview (semi-structured interview)
5	Disclosure of research protocol	The protocol is defined in this presentation.
6	Benefits and Disadvantages to study participants	The interview and its result will be published only the purpose of research. No benefits and disadvantages will be expected.
7	Protection of personal information	Personal information such as your name will not be disclosed as the published sheet. The information will be communicated and agreed before its publication.
8	Disclosure of research result	The result will be disclosed as the interview result summary sheet after the interview is completed.
9	Publication of research results	Only the content which is communicated as the interview result summary sheet will be published as thesis or academic paper.
10	Attribution of intellectual property rights arising from research	The rights of the works obtained from the interviews belong to the interviewer.
11	Policy for handling materials and samples after completion of research	Only the interview result summary sheet will be stored as the data. Other intermediate products will be removed within one year of the completion of the compilation of research results.
12	Contact information (for inquiries)	Yuki TOMITA/ Graduate School of System Design and Management, Keio University

There are five questions from the next page.

5

☒ A- 5. Interview Protocol

Q1:What is your/ your job/research/institute's motivation to help developing countries suffering disaster?/How long were you involved in the work for EWS?

(対象地域への支援のモチベーションは？個人的な職種？属性？従事して何年間？)

Q2:What do you think is the important factor of EWS performance?

(EWSの性能評価について重要と考える因子は？)

Q3:What do you think is the factor causing failure of EWS sustainability (socio or tech)?

(EWSの持続性を阻害する因子（失敗要因）は何と考えるか？（社会的、技術的）)

Q4:What intervention strategy do you think is effectiveness for obtaining more sustainability?

(EWSの持続性を向上するためにどんな介入戦略（成功要因）が有効と考えるか？)

Q5:What should be considered to measure the sustainability in the quantitative evaluation model?

(持続性を評価するための定量化モデルがあったとしたら、何が考慮されるべきか？)

6

☒ A- 6. Interview

Appendix B

CBFEWS で用いる機器外観の記録写真 (ICIMOD Knowledge Park)

カトマンズ 南側に位置する Godavari の ICIMOD Knowledge Park には, ICIMOD の所有する CBFEWS のテストフィールドが存在する. ここでは, 著者が現地を訪問して撮影した, ICIMOD の所有する CBFEWS の機器外観の記録写真を次ページより示す. なお, ICIMOD Knowledge Park の全体像や CBFEWS 装置の配置全体像については, ICIMOD ウェブサイトにおける Virtual Tour においても閲覧が可能.

(<https://www.icimod.org/virtualtour/icimodknowledgepark/>) (2022 年 12 月に閲覧)

図 B- 1. 洪水模擬フィールド

図 B- 2. CBFEWS 試験フィールド全体像

図 B- 3. 超音波方式水位計測装置と Data Acquisition Unit (太陽パネル付き)

図 B- 4. 浮き具方式水位計測装置 図 B- 5. Data Upload Unit (アラーム付き)

図 B- 5. Data Upload Unit (アラーム付き)

図 B- 6. Data Upload Unit (アラーム付き) (別装備形態)

図 B- 7. Alarm Unit



図 B- 1. 洪水模擬フィールド



図 B- 2. CBFWEWS 試験フィールド全体像



図 B- 3. 超音波方式水位計測装置と Data Acquisition Unit (太陽パネル付き)



図 B- 4. 浮き具方式水位計測装置



図 B- 5. Data Upload Unit (アラーム付き)



図 B- 6. Data Upload Unit (アラーム付き) (別装備形態)



图 B- 7. Alarm Unit

Appendix C

CBFEWS の持続可能性に関する因子を抽出するためのアンケートシート

CBFEWS の持続可能性に関する因子の抽出結果の妥当性確認のために使用した、アンケートシートを示す。アンケートでは、先行研究調査や文献調査、インタビューから抽出した CBFEWS の維持に必要な技術的・社会的な因子に対して、それぞれリッカート尺度を用いて相対的な重要度をアンケートによって決定を依頼した。

持続可能性に関与する因子の評価は、3 年(短期)、7 年(中期)、15 年(長期)のそれぞれのタイミングを想定の上で解答を依頼し、それぞれの時期における相対的な重要度をランキング付するために実施した。

次ページより使用したアンケートシートを示す。

<CBFEWS resilience questionnaire: page 1/5>

This survey is conducted to identify factors that are important for improving the resilience of the CBFEWS (Community-based flood early warning system), which is achieved through various aspects of technological, social, and people engagement. The results of this survey will be used to develop an evaluation model for the long-term sustainability of the CBFEWS

Please answer this questionnaire of your own free will. Even after you have given your consent, you can withdraw the questionnaire at any time if you wish to discontinue your cooperation. If you withdraw your consent, the researcher will delete the obtained data without using them in any way. Please note, however, that any analysis results that have already been submitted cannot be discarded.

This questionnaire is part of research conducted by Yuki Tomita, a second-year master's student at the Graduate School of System Design and Management, Keio University, and the information provided will be stored and managed in an appropriate manner and will not be used for purposes other than research paper and conference presentations (only accessed by conductor and supervisor shown below). The research has been reviewed and approved by the Ethics Review Committee of the Graduate School of System Design and Management, Keio University, from an ethical point of view.

(Approval Number: SDM-2022-E050)

If you have any questions or concerns about this survey, please contact us at the address below.

Yuki, TOMITA

Graduate School of System Design and Management, Keio University

Supervisor: Dr. Naohiko, KOHTAKE

If you agree, please proceed to the next page.

Q1. What is your age?

(1) 20-29, (2) 30-39, (3) 40-49, (4) 50-59, (4) 60-, (5) No answer

Q2. How long you are involved in the development of community-based flood early warning system?

(1) 0-1 year, (2) 1-3 years, (3) 3-5 years, (4) 5-7 years, (4) 7-10 years, (5) 10+ years

Q3. What is your attribute?

(1) Government, (2) NPO/NGO/NGI, (3) Researcher, (4) Local Government, (5) Private company, (6) Other ()

Q4. What is your experience/knowledge about or relation with community-based flood early warning system?

(e.g., developer, engineer, living in the region where community-based early warning is in use, administrator, heard of it before)

Q5. How many flood event which requires early warning occurs in your target regions?

(1) once per 1 year, (2) once per 2-3 years, (3) once per 3-5 years, (4) once per 5-10 years, (5) once per 10-20 years, (6) Other ()

continued on next page.

Q5. Please select the bullet of each CBFEWS resilience influence factor based on your experience to identify which factor might be the important key to strengthen CBFEWS compared with the current one. Please answer three table in the aspect of short/middle/long term duration after CBFEWS implementation.

<Short term aspect: ~3 years duration after CBFEWS implementation>

No	Influence factor	Improvement may enforce your CBFEWS with...
1	Availability/Reliability of River level data acquisition unit	
2	Availability/Reliability of data upload unit	
3	Availability/Reliability of alarm unit	
4	Early warning lead time provided by community-based EWS	
5	Early warning lead time provided by government (national) EWS	
6	Early warning spatial coverage provided by community-based EWS	
7	Early warning spatial coverage provided by government (national) EWS	
8	Financial support (budget) for developing CBFEWS	
9	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that knows how to respond effectively against flood	
10	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that is willing to respond to flood early warning	
11	Continuous monitoring of how CBFEWS works correctly in community	
12	CBFEWS technical equipment renewal and/or update	

Any other missing factors you come up with?

continued on next page.

<middle term aspect: ~7 years duration after CBFEWS implementation>

No	Influence factor	Improvement may enforce your CBFEWS with...
1	Availability/Reliability of River level data acquisition unit	
2	Availability/Reliability of data upload unit	
3	Availability/Reliability of alarm unit	
4	Early warning lead time provided by community-based EWS	
5	Early warning lead time provided by government (national) EWS	
6	Early warning spatial coverage provided by community-based EWS	
7	Early warning spatial coverage provided by government (national) EWS	
8	Financial support (budget) for developing CBFEWS	
9	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that knows how to respond effectively against flood	
10	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that is willing to respond to flood early warning	
11	Continuous monitoring of how CBFEWS works correctly in community	
12	CBFEWS technical equipment renewal and/or update	

Any other missing factors you come up with?

continued on next page.

<long term aspect: ~15 years duration after CBFEWS implementation>

No	Influence factor	Improvement may enforce your CBFEWS with...
1	Availability/Reliability of River level data acquisition unit	
2	Availability/Reliability of data upload unit	
3	Availability/Reliability of alarm unit	
4	Early warning lead time provided by community-based EWS	
5	Early warning lead time provided by government (national) EWS	
6	Early warning spatial coverage provided by community-based EWS	
7	Early warning spatial coverage provided by government (national) EWS	
8	Financial support (budget) for developing CBFEWS	
9	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that knows how to respond effectively against flood	
10	Continuous tutorial (education) to increase the number of public that is willing to respond to flood early warning	
11	Continuous monitoring of how CBFEWS works correctly in community	
12	CBFEWS technical equipment renewal and/or update	

Any other missing factors you come up with?

----- End of Questionnaire -----