

機能共鳴分析手法による水害対応過程の検証- 郡山市における令和元年東日本台風への災害対 応を対象として-

戸川 卓哉¹・森田 紘圭²・辻 岳史³

¹国立環境研究所 福島地域協働研究拠点 (〒963-7700 福島県田村郡三春町深作10-2)
E-mail: togawa.takuya@nies.go.jp

²正会員 大日本コンサルタント (株) インフラ技術研究所 (〒451-0045 愛知県名古屋市区西区名駅 2-27-8)
E-mail: morita_hiroyoshi@ne-con.co.jp

³国立環境研究所 福島地域協働研究拠点 (〒963-7700 福島県田村郡三春町深作10-2)
E-mail: tsuji.takashi@nies.go.jp

本研究は、機能共鳴分析手法 (FRAM) を令和元年東日本台風に対して実施された郡山市での災害対応過程の実例に適用した。「情報伝達」「避難所開設・運営」「避難」「救助」等、地域における災害対応過程を構成する9つの機能とその連関構造を同定するとともに、各機能における時間的・精度的な変動 (ゆらぎ) が共鳴することでインシデント (今回の場合は救助要請に対する大幅な救助の遅延) が発生する状況を把握した。その結果に基づいて、「総合的な時間マネジメント」と「避難行動の実効性の向上」に関する2つの観点から施策を提案した。さらに、既存の方法と比較することで、本手法の利点と限界について考察し、特に災害対応において包括的な視点からの施策提案の重要性を示すことができた。

Key Words : *Complex adaptive system, FRAM, climate change impact assessment, SafetyII*

1. はじめに

(1) 研究背景

関東から東北地方太平洋側にかけて記録的な大雨・暴風をもたらした令和元年 10 月の令和元年東日本台風 (台風 19 号)、静岡県熱海市で土石流発生の原因となった令和 3 年 7 月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨などは記憶に新しいところであるが、近年では毎年のように大雨による洪水や土砂災害が発生している。気象庁の観測結果²⁾によると、全国の1時間降水量 80mm 以上の年間発生回数は直近の 10 年間 (2012 年から 2021 年) と「1976 年から 1985 年」を比較すると約 1.7 倍に増加している。また、全国の日降水量が 400mm 以上となる年間日数は、直近の 10 年間 (2012 年から 2021 年) と「1976 年から 1985 年」を比較すると約 1.8 倍に増加している。

また、国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 6 次評価報告書によると、気候システムの温暖化には疑う余地がないことと記載されている。温室効果ガス排出量削減のための様々な取り組み (緩和策) が進められているものの、気候変動のさらなる進展は避けること

のできない状況となっている。日本周辺における台風の発生頻度と規模の増加も予測されている^{3,4)}。そのため、緩和策と平行して気候変動への適応策を推進していくことの重要性が広く認識されている。気候変動への適応は地域特性に応じて様々であるため、地域での取り組みが必要である。さらに、地域特性をふまえた適応策を推進するためには、自治体が主導的な役割を担うことが期待されている。

(2) 既往研究と本研究の位置づけ

災害大国日本では自治体レベルにおける災害対応に関する多くの研究が蓄積されている。一つのアプローチは自治体における災害対応プロセスの標準化を試みるものであり、沼田他 (2017)⁵⁾では、東日本大震災等の事例の分析を通じて 48 種の業務からなる標準的な災害対応業務のフレームワークが提案されている。さらに、井上他 (2018) ではその 48 種の業務をフローとして再構成し、地域防災計画との比較に基づき、改善点等を検討している⁶⁾。さらに、藤原他 (2020)⁷⁾、藤原他 (2021)⁸⁾では災害時における自治体間の応援受援の関係を分析しており、その成否を自治体間の災害対応プロセスの標準化に

求めている。以上のように、災害対応の標準化という視点から、事例や地域防災計画の分析を通じて課題を見だし解決案を提示するというアプローチが取られている。これらは、災害対応プロセスやマネジメント体制の標準化を目指されており、トップダウンの視点から災害事象を管理する方法を検討するものである。そのため、コミュニティの視点から現場における対応能力の評価や事前に準備することが難しい想定外リスクへの対応に課題を残している。

一方、より実証的な視点からは被災した自治体内での災害対応の経験の活用や継承に関する検討も試みられている。秋元他（2020）⁹⁾では過去に災害対応を経験した自治体を対象とした、記録資料の整理、防災訓練・研修の実施状況等に関するアンケート調査を実施し、記録資料の整理が進められている一方でその有効活用に課題があると述べている。災害に関する多くの記録・経験を今後の対策につなげていくための方法論に課題を残している。

以上のように、既往研究の潮流は分析的なアプローチと経験の継承というアプローチに二極化している状況である。そのため、現場における災害対応の活きた知見を活用して、気候変動により多発する想定外災害（これまでに経験のない規模の災害）に対応するための枠組が確立できていない状況であると考えられる。なお、白木他（2019）¹⁰⁾では、後述するレジリエンスエンジニアリングに基づき想定外リスクに対応するという視点から避難所運営に限定した議論が実施されているが、地域レベルにおける災害対応プロセスの検討は実施されていない。

(3) 本研究の目的と手法

本研究では、社会システムの動態を分析するために提

案された機能共鳴分析手法（FRAM）により、地域レベルの災害対応過程を分析する。特に、令和元年東日本台風における郡山市での災害対応過程の実例に注目して分析する。このことを通じて、総合的な視点から地域の災害に対するレジリエンスを高めるための施策を提案する。さらに、方法論としての枠組みについて検討する。

以下、第2章でレジリエンスエンジニアリングとその実践的分析手法であるFRAMの概要について述べる。これはレジリエンスエンジニアリングという大きな枠組の中でFRAMを理解することでその意義が鮮明になると考えたためである。その上で、第3章で令和元年東日本台風における郡山市での災害対応プロセスについてとりまとめる。第4章において前章で整理した内容に対して機能共鳴分析手法を適用し、災害対応プロセスを検討するとともに、対策を提案する。第5章で分析結果に基づいて機能共鳴分析手法およびレジリエンスエンジニアリングの利点と限界について考察する。最後に第6章で本研究をとりまとめることに今後の課題について述べる。

2. レジリエンスエンジニアリング

(1) レジリエンスエンジニアリングの基礎概念

a) 創発

創発とは、元来、進化の途中で新しい形質や種類が出現することという意味で用いられ、生命や生命の起源をどう特徴づけるかという問題と密接に関係を持ちながら発展してきた概念である。これまで、他分野に展開する中で、さまざまな定義がなされてきた。本研究の枠組の中では以下の定義を押さえておく。「いくつかの成分からできているあるシステムに付随する現象で、その成分

表-1 Safety I と Safety II の比較

	SafetyI 分析的アプローチ	SafetyII 総合的アプローチ
安全の定義	失敗の数が許容できる程度に少ないこと	成功の数が限りなく多いこと
安全管理の原理	受動的で、何か許容できないことが起こったら対応する	プロアクティブで連続的な発展を期待する。
プロセスと結果の関係	リニアモデル（因果関係）	ノンリニアモデル（相互作用やフィードバック）
ヒューマンファクターへの態度	人間は基本的にやっかいで危険要因である	人間はシステムの柔軟性とレジリエンスの必要要素である
パフォーマンス変動の役割	有害であり、できるだけ防ぐべきである	必然的で、有用である。モニターされ、管理されるべきである。
注目点	・何が起こったのか ・なぜ起こったのか	・システム全体の振る舞いに何（現象）が生じているか ・それはどのように（相互作用）生じているのか

* Hollnagen (2014)¹⁾を基に改訂

や成分の組織化の性質からは演繹できないようなもの
ことである。」¹¹⁾

b) 複雑適応系

複雑適応系とは、自律的な複数の構成要素を持ち、それらが相互作用することで創発する現象により適応もしくは学習するシステムと定義される¹²⁾。環境の変化に対して適応的に自らのあり方を変更するシステムの総称である。人間が構成要素となるシステムの多くは複雑適応系として捉えることができる。後述するように、水害対応プロセスも自律的に意思決定する多くの主体による協調的な活動により支えられており、複雑適応系とみなすことができる。

なお、中島¹³⁾では複雑適応系 (Complex system) を複雑なシステム (Complicated system) と対比することで意味を明確化して説明している。複雑なシステムとは、例えば時計のような精密機器がイメージされている。状況や環境に影響を受けることなく独立して動く閉じたシステムであり、各パーツは設計された通りにパフォーマンスする。もし故障した場合には故障部位を特定し、そこを修理すれば元通りに動くようなシステムである。一方、複雑適応系とは、上述のように、生物や社会のように、動的で開かれたシステムである。

(2) 安全に対する二つのアプローチ

従来、システムの安全性を議論する際には、システムに潜むリスクを分析的に理解することが目指されてきた。背景にあるのは、システムを構成要素に分解していき、その振る舞いを理解することでシステム全体の理解が可能となるという考え方である。これは、自然科学において標準的に用いられてきた方法でもある。

しかしながら、近年多くの問題点が指摘される状況となった。これは社会経済の変化により、リスク評価の対象が単純なシステムではなく、複雑適応系と見なされるものに変化したためである。複雑適応系を対象として分析的アプローチは無効である。なぜならば、システムの価値は創発的に生み出されているため、いくら精緻に構成要素を分析し把握できたとしても、その知見を基に総体としてのシステムの振る舞いを理解することは困難であるためである。

したがって、複雑適応系を理解し制御するためには異なるアプローチが求められる。システム全体の振る舞いに着目して、創発的機能の発現を支援するような総合的アプローチである。このアプローチは近年 safety II と呼ばれ注目を集めている¹⁴⁾。表-1 にその概要を示す。safety II に基づいた、リスクマネジメントの方法論として、レジリエンスエンジニアリングが提唱されており、次節ではこれについて述べる。

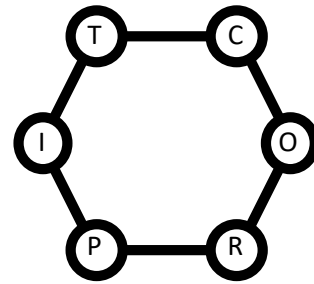


図-1 FRAM図における機能の表現

(3) レジリエンスエンジニアリング

「レジリエンスエンジニアリング」とは、safety IIの考え方に基づいて社会技術システム（社会と技術が不可分に結び着いた複雑適応系）のレジリエンスを向上させるための理論と実践に関する研究分野である。2004年にスウェーデンのSöderköpingで行われた安全マネジメント関連分野の専門家による会合において提唱された¹⁴⁾。これまで、宇宙航空システム、交通システム、医療システム、大規模プラントシステム（原子力発電所等）等を対象にした研究が実施されてきた。

レジリエンスエンジニアリングでは、どのようにすればシステムが有効に機能するのかというポジティブな側面に注目する点に第一の特徴がある。そのため、インシデントの原因を追及するのではなく、通常の世界・経済活動が広く評価の対象となる。

さらに、レジリエンスエンジニアリングでは技術社会システムがレジリエントであるために、監視、対処、予見、学習という4つの能力を重視している。短期的には状況を監視しそれに対処すること、中長期的には状況変化を予見しそれに基づいて学習（自らの在り方を適応的に変更）することで対象システムのレジリエンスを総合的に上昇させることが目指される。規則や規範を事細かに設定するわけではなく、メタレベルでの働きかけを通じて技術社会システムの自律性を重んじた対策が指向されていることが伺える。

(4) 機能共鳴分析手法

機能共鳴分析手法 (Functional Resonance Analysis Method: FRAM) は、レジリエンスエンジニアリングの考え方を体現する実践的な手法の一つとしてHollnagelによって提案された¹⁵⁾。分析対象とする社会技術システムの動態をその要素となる機能とその連関として表現し、それぞれの機能における変動（ゆらぎ）が共鳴することで、システム全体が機能不全に陥るプロセスを分析する。一方、そのゆらぎにより不確実性に柔軟に対応できる点にも注目する。以上の分析の結果に基づいて、システム全体としての課題を抽出し、その対策を検討する。なお、機能の記述においては、入力(I)、事前条件(P)、資源(R)、時

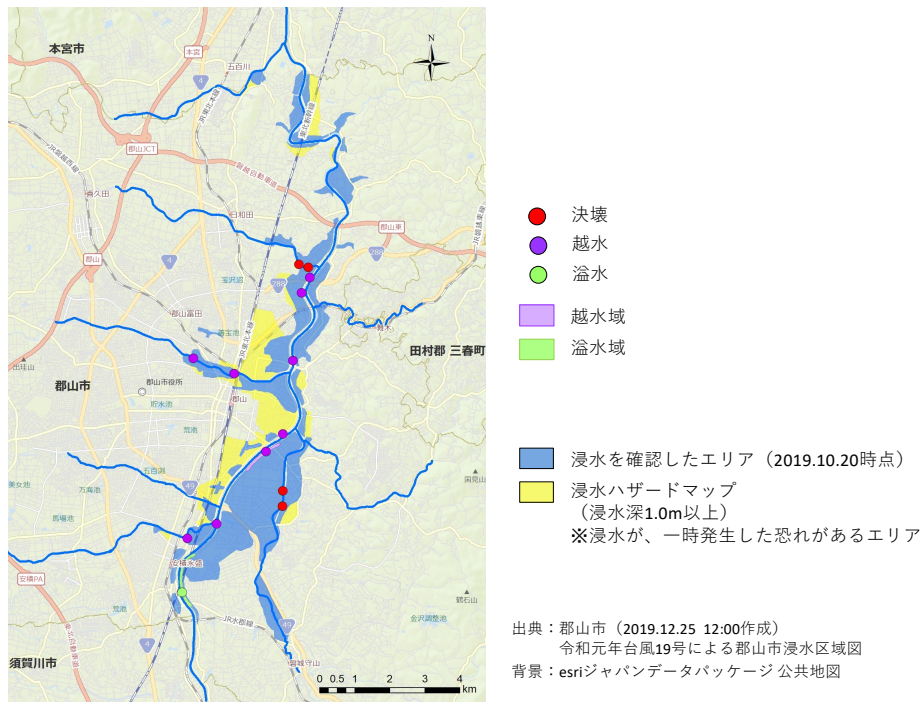


図-2 郡山市における令和元年東日本台風被災時の状況

間棒(T), 制御(C), 出力(O)の6つのアスペクトを明らかにするとともに、6つのアスペクトを通じて各機能がどのように結合するかを同定する。さらに、図-1に示すように、各機能を六角形のシンボルで表現し、それらをつなぐことでFRAM図を作成する。

3. 令和元年東日本台風の災害対応プロセス

(1) 令和元年東日本台風の概要

令和元年(2019年)10月6日に南鳥島近海で発生した台風第19号(令和元年東日本台風)は、マリアナ諸島を西に進み、一時大型で猛烈な台風に発達した後、次第に進路を北に変え、日本の南を北上し、12日19時前に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した。その後、関東地方を通過し、13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わった。令和元年東日本台風の接近・通過に伴い、広い範囲で大雨、暴風、高波、高潮となった。雨については、10日から13日までの総降水量が、神奈川県箱根で1000ミリに達し、東日本を中心に17地点で500ミリを超えた。この大雨の影響で、広い範囲で河川の氾濫が相次いだほか、土砂災害や浸水害が発生した¹⁶⁾。

これら大雨による災害及び暴風等により、人的被害(死者・行方不明者107名、負傷者384名)や住家被害(全壊3308棟、床上浸水8129棟)、電気・水道・道路・鉄道施設等のライフラインへの被害が発生した¹⁷⁾。

(2) 郡山市の特徴と被害状況

郡山市は福島県中通り中部に位置する人口32万人の中核市であり、福島県における商工業の中心機能を有している。令和元年東日本台風の接近・通過により、市内中心部を流れる阿武隈川、逢瀬川、谷田川等において越水、溢水、決壊が起こり約1,437haが浸水した。郡山市の資料¹⁸⁾をもとに郡山市における被災時の状況をまとめた結果を図-2に示す。下記に示すような懸命な災害対応がなされたものの、6名の死者を出すとともに、住家については全壊662棟、半壊4,163棟、一部破損1,997棟、住家以外については4,430棟で被害が発生した¹⁹⁾。また、農作物等被害は25億円、商工業関係の被害額は郡山中央工業団地を中心に約626億円とされる²⁰⁾。

(3) 令和元年東日本台風における郡山市の災害対応

郡山市に東日本台風が最も接近した10月12日から13日にかけての状況の進展と行政を中心とした災害対応の過程を、公開資料に基づいて整理した。主として参照した資料は郡山市に設置された災害対策本部会議の議事概要²¹⁾、郡山市により事後に実施された災害対応検証の報告書²⁰⁾である。その概要を図-3に示す。以下では、時間ごとに区切って状況について述べる。

a) 10月12日05:59まで

10月11日に気象庁が台風の接近に伴い広い地域に大雨特別警報を発表する可能性に言及したこと等のため、郡山市は15時00分に市内5箇所自主避難所を開設し、ウェブサイトなどを通じて市民への警戒と早めの避難の

呼び掛けを行った。

b) 10月12日 06:00-11:59

市役所において災害対策準備態勢が確立されるとともに、警察、消防、県、自衛隊等の関係機関との情報共有が進められた。また、報道機関や情報伝達システムを通じて市民への注意喚起がなされた。さらに、ショッピングセンターにおいて自動車避難のために駐車場が開放されるなど、警戒体制構築に向けた準備が進められた。

c) 10月12日 12:00-17:59

阿武隈川流域に対して、13時00分に避難準備・高齢者等避難開始（レベル3）が発令されたことを皮切りに15時10分に避難勧告（レベル4）、16時30分に避難指示（レベル4）が発令される。市役所においては14時00分より第1回災害対策本部会議が開催され、庁内各部署と関係機関（消防・警察・自衛隊等）の代表者が出席し情報が共有されるとともに、市長より警戒態勢の徹底が指示された。市内においても、道路冠水や倒木などの被害が出始める中、16時頃までに公立保育園の休園や公共施設の閉館などの対応がとられた。指定避難所が開設され、14時までに23箇所に80名程度が避難している状況であった。

d) 10月12日 18:00-23:59

市役所において第二次非常事態体制が取られ全員出動が指示された。19時30分より第2回災害対策本部会議が開催され、関係機関間の情報共有が実施されるとと

もに、市長より特に阿武隈川東岸の避難対策の徹底が指示された。18時頃より排水ポンプが本格的に稼働した。19時50分に大雨特別警報が発令される。特に阿武隈川東岸において消防団によるパトロールと避難の呼びかけが実施された。避難者が増加し一部の避難所においては満員となったため、避難所が増設された。このため、避難所運営のための職員の不足が懸念された。一方で、日没後で視界が悪く風雨が激しさを増していたことから、垂直避難の割合が高まった。

e) 10月13日 00:00-05:59

雨は止んだものの、河川水位の上昇により、01時08分頃に阿武隈川流域で洪水が発生した。この影響で、行政センターの地下電気設備への浸水による停電が発生するとともに、04時00分頃に一部のポンプ場が浸水し排水ポンプが停止した。救助要請等に関する119番への救急入電が急増した。消防・自衛隊等によるボートを用いた救助活動が実施された。しかしながら、出動可能な車両と人員がほぼ全て投入されており救助要請に対応できない状況が続いた¹⁹⁾。避難所は最大時には45箇所に設置され4,000名程度の避難者を受け入れた。

f) 10月13日 06:00-11:59

河川水位の高い状況が続き、市内の洪水被害が拡大した。阿武隈川流域と逢瀬川流域において災害発生発令が3件なされた。119番入電件数の多い状況はつづき、救助活動は継続している。その一方で、安全が確認された

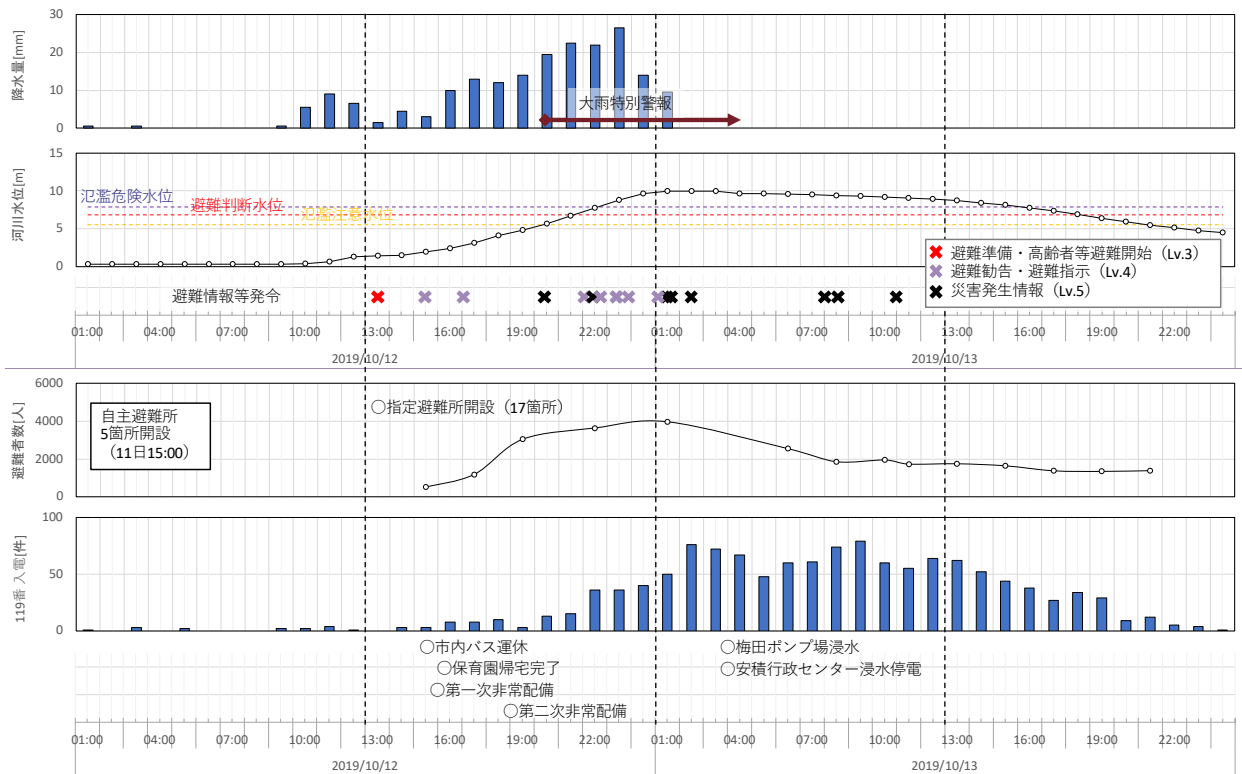


図-3 郡山市における令和元年東日本台風に関する災害対応過程

地区の住民の帰宅が進んだため避難所は 11 時 00 分時点で 32 箇所（避難者 1735 名）縮小された。

g) 10 月 13 日 12:00-17:59

13 時 00 分より第 4 回災害対策本部会議が開催され、市役所と関係機関の間で被害状況の情報共有がなされた。保健所が 6 班体制で避難所を巡回し、避難者の健康チェックが実施された。自衛隊、消防団による救助活動は日没まで継続された。（翌 14 日は 6 時 00 分より再開。）

以上のように、災害対応はさまざまな主体が関与する過程である。災害対策本部において市長より包括的な方針の指示はあるものの、それぞれの現場において状況に応じた柔軟に対応が取られ、それが分散協動的に機能することで被害の拡大を抑制している。

4. 機能共鳴解析手法（FRAM）の適用

(1) 適用の手順

まず、前章でまとめた令和東日本台風に対する郡山市の災害対応の実態および地域防災計画等の資料に基づいて災害対応過程の FRAM 図（試案）を作成する。その上で、郡山市防災危機管理課の担当者に対するヒアリング（2022 年 2 月）および郡山市環境政策課、保健福祉総務課をの担当者に対するヒアリング（2022 年 4 月）を実施した。ヒアリングでは FRAM 図（試案）を提示して、機能やその関連の妥当性や重要と考えられるポイント等に関する意見を収集した。この段階で、特に状況に応じた柔軟な対応が求められる避難から救助に至るプロセスを重点化するなど FRAM 図の修正を行った。

次に、令和元年東日本台風時の機能共鳴の分析、お

よび潜在的な機能共鳴の分析を実施し、対応策を検討した。その上で、再度、郡山市各課の担当者と意見交換を実施して、FRAM 図を修正し、機能共鳴に関する妥当性を評価する予定である。

(2) 機能の同定

上記の方法に基づいて災害対応過程の機能を抽出した。各機能の 6 つの aspekto を表-2 にまとめる。以下では各機能の概要について述べる。

a) 情報伝達

主体は市の防災危機管理課である。河川水位を基準として、自治体から市民へ取るべき避難行動を地区単位で示す情報発信がなされる。屋外スピーカーからの放送、報道機関、エリアメール等を通じて情報が伝達される。警戒レベルは 5 段階に分かれているが、自治体により発令されるものは下記の 3 段階である。（レベル 1 と 2 は気象庁により発令され、地域全体に包括的に注意を呼びかけるものである。）

- i) 警戒レベル 3：避難準備・高齢者等避難開始
- ii) 警戒レベル 4：避難勧告・避難指示
- iii) 警戒レベル 5：災害情報発生

これらは河川水位に対応して定義されているものの、実際には河川事務所等との協議に基づいて、該当レベルの水位への到達が確定的となった段階で前倒しで発令される。また、避難行動を日中に実施できるように配慮もなされている。

b) 非常態勢配備

主体は市・消防・警察・自衛隊等である。相当規模の被害の発生が予想される場合、避難所開設運営等の災害応急対策に対処する人員を確保するため、各機関において職員を動員し待機させる。待機期間に今後の勤務のロ

表-2 災害対応に関する機能一覧

	主体	入力 (i)	出力 (o)	前提条件 (p)	資源 (r)	時間 (t)	制御 (c)
情報伝達 (Lv.3)	市 (防災危機管理課)	河川水位情報	情報伝達 (Lv.3)			日没時間	
情報伝達 (Lv.4)		河川水位情報	情報伝達 (Lv.4)			日没時間	
情報伝達 (Lv.5)		発災情報	情報伝達 (Lv.5)				
非常態勢配備	市・消防・警察・自衛隊等	気象情報	人員配備				地域防災計画
避難準備	市民・市	情報伝達 (Lv.3) 周辺環境	市民が避難可能となる				
避難行動	市民	情報伝達 (Lv.4) 周辺環境	被災リスクの低減	避難経路の安全、避難準備		夜間は避難の困難性増加	ハザードマップ
避難所開設・運営	市 (防災危機管理課)	情報伝達 (Lv.3)	避難所が利用可能となる		人員、物資		地域防災計画
要配慮者支援	市 (保健福祉総務課)	情報伝達 (Lv.3)	要配慮者が避難可能となる	避難所開設・運営	人員		地域防災計画
救助	消防・警察・自衛隊	119 番通報 発災情報	救助完了	主体間調整	人員、救助資機材	夜間は救助の困難性の増加	

レーションなどが検討される。

c) 避難準備

主体は市民および市である。市民は不要不急の外出を控え、状況の進展に応じて速やかな避難行動がとれるように準備する。また、市は公共施設の閉館、保育園や小・中学校の休校等を実施し市民に対して帰宅を促し、避難準備を進めるように促す。

d) 避難行動

主体は市民である。避難指示の発令状況等に基づいて指定避難所などの安全な場所に立退き避難を実施したり、自宅建物の上階へ移動するなどの避難行動を実施する。ハザードマップの確認や避難所情報の把握が避難行動を規定する要因となる。

e) 避難所開設・運営

主体は市の防災危機管理課である。避難指示の発令の前に、指定避難所を開設する。その後は、避難所の混雑状況をモニタリングして状況に応じて増設する。避難所の運営においては、食料・水・物資の確保、避難者の健康管理など用務が発生する。

f) 要配慮者避難支援

主体は市の保健福祉総務課が中心であるが、民生委員や消防団も関わる。避難支援の内容は主に避難の呼び掛けである。避難所に到着した要配慮者については、聞き取りを通じて必要なケアの内容を確認し、状況に応じて福祉避難所を開設する。

g) 救助

主体は消防・警察・自衛隊である。119番通報に応じて消防本部・消防署による救助活動が実施される。警察・自衛隊とも連携する。夜間は視界の確保が困難になるため活動が制限される。消防本部の指令センターにより優先順位の判断がなされるなど、主体的な対応が取られる。

(3) 機能相互の関連付け

機能の定義によって示された機能の結合関係に基づいてFRAM図を作成した結果を図4に示す。水害は事前に一定の予想が可能であるため、まず、気象予報等に基づいて、警戒体制の構築が目指される。その後は、各機能は対象となる河川における水位観測に基づいて定義されている警戒レベルと関連付けられつつ、相互に関連している。

(4) 変動の同定

変動とは機能の出力における時間や精度に関するゆらぎであり、内因性と外因性のものがある。各機能ごとにどのように変動するか、変動しうるかを検討した。表3に各機能の変動の要因と特性についてまとめた。以下では、同定された各機能の変動についての概要を述べる。

a) 情報伝達

避難指示等の発令は関係者間の協議により決定されて

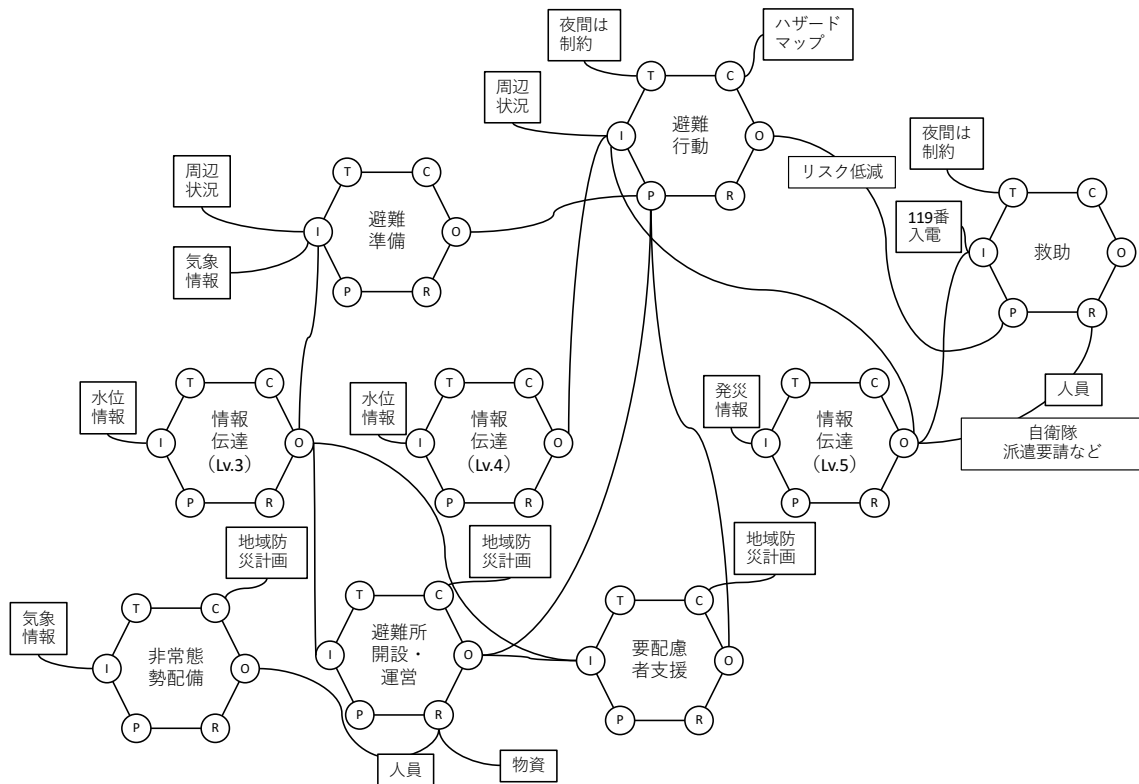


図4 災害対応のFRAM図

いる。そのため、意思決定のための調整が必要となり、時間的な変動が発生する可能性がある。また、情報の伝わり方（スピード、範囲、精度）についても、状況に依存するため変動する。

b) 非常態勢配備

非常態勢配備については、地域防災計画等で明確に定められており実態的にもそれに準じて運用されている。さらに、配備される人員も実施主体の各機関の職員に限定されるため、変動の可能性は小さい。

c) 避難準備

自治体、事業者、市民による複合的な意思決定が必要であり、実施形態についても統一的なイメージが共有されていない。そのため避難準備の達成状況について精度的な変動が生じる。

d) 避難行動

実施主体である市民は多様である。また、避難指示等が発令され避難の必要性が認識された段階で、それぞれが置かれている状況も千差万別である。このため、避難実施のタイミングおよび避難方法に変動が生じる。

e) 避難所開設・運営

実施主体は避難者数が状況に応じて変動する中で、避難所の混雑度等に応じた柔軟な運営が求められており、そのため、一部の避難所において混雑が発生することが懸念され、避難者を受け入れられない事態が発生することもありうる。

f) 要配慮者支援

多様な要配慮者の個別の状況に沿った対応が求められる。また、避難支援に関しては、その一部を実質的に民生委員や消防団が担っているという実情もあるため、支援の実施形態という意味での精度的変動が考えられる。

g) 救助

災害の規模が大きくなった場合、救助に当たる人員や車両等のリソースが限られているため、救助に遅延が生じるなど時間的な変動が生じるとともに、救助が間に合わず死傷者が出るなどという意味で精度的な変動も生じう

る。

(4) 変動の集約

a) 令和元年東日本台風の災害対応で顕在化した変動

本節では、令和元年東日本台風の災害対応において顕在化した変動に注目し、それらが集約し機能共鳴が顕在化するプロセスを示す。

まず、情報伝達のタイミングについて検討する。令和元年東日本台風では、高齢者等避難・避難準備が13:00に避難勧告が15:00に避難指示が16:50に発令されており、これは図-3に示したように、河川水位が当該基準に到達した時刻（20時から22時頃）よりもかなり早い時間である。日没時間（10月12日は17:09）も考慮されている。しかしながら、避難情報が発令された時点では市内の公共施設ではイベントも継続されており、さらに、保育所からの帰宅完了時間とも重なっており、市民が避難準備の時間が十分に確保することはできなかった可能性がある。そのため、避難準備が不完全なままで、避難行動が開始されたことになり、避難行動に影響を与えたことが考えられる。

郡山市により実施された被災地区の住民を対象としたアンケート調査結果²⁰⁾によると、避難行動に関する質問に対して「自宅の2階以上に避難した」、「避難しようと思ったが出来なかった」を選択した回答者の割合はそれぞれ16.8%、3.4%となっている。その理由としては、すでに夜間であり見通しも悪く外への避難の方が危険だと思ったことや、避難所に向かう道路の浸水、冠水などが挙げられている。また、福島県の主導によって実施された調査²¹⁾によると、日没以降は水平避難に対して垂直避難の割合が高まっていることが確認できる。さらに、上述の避難行動に関する質問に対して「避難しなかった」と回答した割合も21.1%あり、この主な理由としては「これまでの経験で被害に遭うとは思わなかった」が挙げられている。以上のように、避難行動時における周辺状況（外因）やこれまでの経験（内因）が影響し避難行

表-3 災害対応に関する機能の変動

	変動要因		変動特性	
	内因	外因	時間的変動	精度的変動
情報伝達 (Lv3)	意思決定の手続き	気象予測の不確実性	発令時刻の変動	情報伝達の精度
情報伝達 (Lv4)	意思決定の手続き	気象予測の不確実性	発令時刻の変動	情報伝達の精度
情報伝達 (Lv5)	-	発災の突発性	-	情報伝達の精度
非常態勢配備	-	-	-	-
避難準備	機能形態の曖昧さ	発令時間の不確実性	-	避難準備の不完全
避難行動	市民の多様性	発令時間の不確実性	避難時刻の変動	避難行動の変動
要配慮者支援	実施主体の多様性	要配慮者の多様性	-	実施形態の変動
避難所開設・運営	リソース制約	避難者数の不確実性	-	混雑の発生
救助	リソース制約	発災の不確実性	救助の遅れ	死傷者の発生

動に変動が生じている。

以上の結果、堤防の決壊等によって災害発生した際に、リスク低減が図れず、それが原因となって救助活動の困難さに結びついている。令和元年東日本台風において救助活動の中核を担った郡山地方広域消防組合消防本部による事後検証報告¹⁹⁾では、「司令員は次から次へと入電する119番通報を受信するも、出動可能な部隊が残っていないことや、出動させることが出来たとしても、活動危険があるため容易に現場に近づけず時間が経過してしまい、再度119番通報を受信するなど、通報者の身の危険を電話越しに感じながらも、何もできない歯がゆさなどが複雑に交錯していました。」とあり、10月13日未明から明け方にかけて市内の浸水地区において非常に危険な状況に陥っていたことが述べられている。以上の機能共鳴のプロセスを図-5に示す。

b) 潜在的な変動

令和元年東日本台風では機能共鳴としては顕在化しなかったと考えられるものの、郡山市による事後検証²⁰⁾によると下記のような事態が発生している。

避難指示の発令後にもかかわらず、特に高齢者が避難せずに自宅に留まっており、消防団により避難の呼びかけが実施されたことが報告されている。限定的ながらも要配慮者支援における変動が避難行動に影響を与えている。

また、一部の避難所においては「ごった返しの状態」

と表現される過剰定員の状況が発生したり、職員不足が懸念される事態が発生している。さらに、駐車場が満車であるため、別の避難所に行かざるを得ない避難者がいたなどの報告もあり、避難所運営と避難行動についても潜在的なリスクがあることが懸念される。

これらは近年注目度の高まっている少子高齢化や感性症対策の問題とも関連しており、今後の対策において考慮が必要であると考えられる。以上の潜在的な機能共鳴のプロセスについても図-5に示す。

(5) 対策の検討

機能共鳴に関する以上の議論に基づいてシステムのレジリエンスを総合的に高める観点からは以下の対策が導出されると考えられる。

a) 総合的な時間マネジメントシステムの構築

災害対応プロセス全体の基底は情報伝達のタイミングである。したがって、時間マネジメントシステムを構築することにより機能共鳴リスクを総合的に低下させることが期待できる。

既に、日没時間を考慮し、さらに、河川水位の予測にもとづいて先行的に警戒情報を発令する枠組が存在している。しかしながら、前節で議論したような状況が発生していることを鑑みれば、さらに踏み込んで、社会経済活動とリンクした情報発令のあり方などについての議論が必要であろう。レベルの定義についても議論の余地が

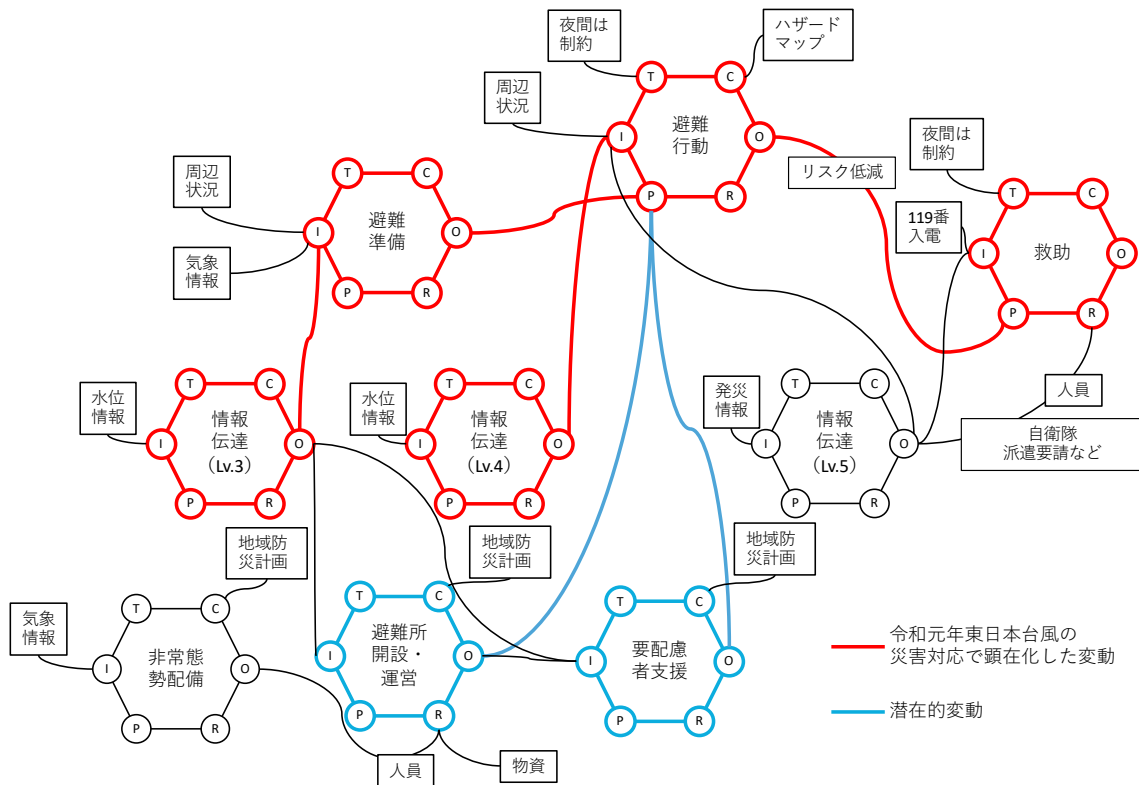


図-5 災害対応過程における変動の集約

あると考えられる。なお、郡山市では郡山市タイムライン（防災行動計画）²³⁾が定められており、時間軸・水位軸等を基準として対策が示されているが、上述の観点からは、タイムラインを動態化させるという意味で、そのマネジメントの体制を構築していく必要が示されたと考えられる。

さらに、関連して、気象予測や河川水位の予測精度の向上や、情報発信の空振りを許容するような社会的な合意をより明確にすることも重要である。

b) 避難行動を実行的に進めるための枠組の構築

FRAM 図によると、様々な変動が集中し、全体の要となっている機能は避難行動である。確実に実行を実行することができれば、前段階の変動を吸収してシステム全体の災害対応のレジリエンスを大きく向上させることが期待できる。

そのためには、総合的に避難行動を支援するための枠組を構築する必要がある。夜間においても避難を実行的に行うための枠組の検討、過去の事例を超える被害が増える中、これまでの経験に捕らわれず避難するための枠組、要配慮者避難支援の指針、自動車による避難行動の是非などに関する検討などを通じて、不確実性下における避難行動の実効性を総合的に高めることが重要である。

5. 考察

(1) FRAM と既往の災害対応検証との比較

令和元年東日本台風における郡山市の災害対応についての検証が郡山市自身によって行われている²⁰⁾。そこでは、災害対応の課題を把握・検証し、今後の施策に反映させることを目的として、関係団体・町内会との意見交換会の記録、被災者アンケート調査の結果とともにそれを踏まえて実施された（と考えられる）庁内ワーキンググループによる災害対応検証の結果が報告されている。庁内ワーキンググループによる災害対応検証では、東日本台風における教訓と課題を抽出して、その対応策が検証されている。この検証は5つの視点が設定され、さらに個別の項目に区分した上で実施されている。

この検証は課題の抽出と対応策の検討という構成になっており、safety I に基づいた分析的な方法により行われている。ただし、導出された対応策はマニュアルの詳細化と対応ポテンシャルを高めるものであるが、後者の中には、課題の対応に留まらない内容も含まれている。実態に基づいた具体的な改善策が示されている。その一方で、以下のような課題が挙げられる。

- ・局所的な議論であり全体像の把握が難しい。各対策の間の関係性や重要度の検討が十分にできていない。
- ・そのため、システムの動的な理解にもどつた対策の

提案ができない。

- ・マニュアル・規則等の詳細化を進める傾向があり、場合によっては、現場における臨機応変な対応を阻害する懸念もある。

前章では、FRAMの適用に基づき災害対応プロセスにおいて二つの対策を提案した。これは包括的な視点を維持しつつ、対策を提案するものである。これより包括的な視点から対策導入の方向性をガイドするという役割である。これは、上記のような課題に対して補完的な役割を担うことが期待できる手法であると考えられる。また、災害対応過程を包括的に把握することができることから、既存の事例分析に留まらず、同じ枠組のもとで気候変動等の将来の影響を考慮した検討を検討することも可能となっている。

(2) FRAM の課題

FRAMは技術社会システムの全体像を把握しつつ、施策を検討するための有効な手段であると評価できる。一方でその適用にはかなりの困難が伴うことも事実である。その要因としては、システム全体を同一レベルの排他的な機能として区分し、それらの連関として表現することの難しさが挙げられる。機能の記述についての一定のガイドラインなどが整備されることが望ましいと考えられる。また、6つのアспектについても、改善の余地があると考えられる。さらに、FRAM図では、時間軸の表現が曖昧になるため、その点を補完するために、図-3に示したように時系列で事象を整理した情報を併せて分析を実施することも有効であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、機能共鳴分析手法（FRAM）を用いて、都市における水害の対応過程を検証した。そのために、まず、FRAMの位置づけについて、それを包括する枠組であるレジリエンスエンジニアリングとともに確認した。次に、令和元年東日本台風時の郡山市の災害対応過程に関する実態情報を収集し時系列で整理した。その上で、災害対応プロセスに対して、FRAMを適用して分析した。その結果、以下の点が明らかになった。

- 地域における災害対応に関する機能として「情報伝達」「非常態勢配備」「避難準備」「避難行動」「要配慮者支援」「避難所開設・運営」「救助」を同定するとともに、それらの相互連関より、災害対応全体のプロセスをFRAM図として表現した。
- さらに、各機能における変動（ゆらぎ）の要因と特性を整理し、それらが集約することで生じる機能共鳴の状況を把握した。これにより、令和元年

東日本台風時における状況の一因を説明するとともに、潜在的なリスクについて検討した。

- それに基づいて、システムのレジリエンスを総合的に高める観点から「タイムライン」と「避難行動」に関する2つの施策を提案した。
- また、既存の方法と比較することで、本手法の利点と限界について考察した。災害対応において FRAMを用いることで包括的な施策提案が可能となるということの重要性を示した。

今後の課題としては、5章(2)での議論の観点から FRAMの改良を検討するとともに、今回は避難行動から救助のプロセスに限定した評価対象を、浸水対策や罹災証明書等発行業務等を含めるように拡張すること等が考えられる。

謝辞：本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20202009)により実施した。

参考文献

- 1) Hollnagel E. : Safety- I and Safety- II, 2014.
- 2) 気象庁：大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, 2022.
- 3) Yoshida K., Sugi M., Mizuta Ryo : Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, *Geophysical Research Letters*, 第44巻, 第19号, 2017.
- 4) 環境省：勢力を増す台風～我々ほどのようなリスクに直面しているのか～ [令和元年東日本台風の疑似温暖化実験], 2021.
- 5) 沼田宗純, 井上雅志, 目黒公郎：災害対応業務のフレームワークの構築～2011年東日本大震災・2015年関東・東北豪雨・2016年熊本地震の災害対応業務の分析結果を踏まえて～, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 第73巻, 第4号, pp.1_258-1_269, 2017.
- 6) 井上雅志, 福岡淳也, 大西修平, 沼田宗純, 目黒公郎：地域防災計画に基づく災害対応フロー図の作成と部署間連携の可視化, *生産研究*, 第70巻, 第4号, pp.283-288, 2018.
- 7) 藤原宏之, 佐藤史弥, 松川杏寧, 寅屋敷哲也, 高原耕平, 竹之内健介：災害マネジメント総括支援員等が執る災害対応プロセスの分析, *地域安全学会論文集*, 第37巻, pp.327-337, 2020.
- 8) 藤原宏之, 佐藤史弥, 松川杏寧, 寅屋敷哲也, 高原耕平, 竹之内健介：災害対応プロセスを通じた災害時のマネジメント業務に対する被災経験基礎自治体職員と災害マネジメント総括支援員等の比較分析
- 平成30年7月豪雨から令和元年東日本台風までの災害を対象として—, *地域安全学会論文集*, 第39巻, pp.255-265, 2021.
- 9) 秋元康男, 佐藤翔輔, 紅谷昇平：被災自治体の災害対応の課題・教訓を継承するための記録の作成及び訓練・研修の実施に関する実態把握, *地域安全学会論文集*, 第37巻, pp.279-288, 2020.
- 10) 白木渡, 石野紗衣, 泉田数佳, 土居峰, 井面仁志, 高橋亨輔：レジリエンスの観点による想定外災害時の避難所運営の課題と対応策の提案, *土木学会論文集 F6 (安全問題)*, 第75巻, 第2号, pp.1_237-1_246, 2019.
- 11) クリストフ・マラテール, 佐藤直樹訳：生命起源論の科学哲学, みすず書房, 2013.
- 12) Holland John H. : Studying Complex Adaptive Systems, *Journal of Systems Science and Complexity*, 第19巻, 第1号, pp.1-8, 2006.
- 13) 中島和江：レジリエント・ヘルスケア入門: 擾乱と制約下で柔軟に対応する力, 医学書院, 2019.
- 14) Hollnagel Erik, Leveson Nancy, Woods David D., 北村正晴：レジリエンスエンジニアリング—概念と指針, 日科技連出版社, 2012.
- 15) エリック・ホルナゲル：社会技術システムの安全分析—FRAM ガイドブック, 海文堂出版株式会社, 2013.
- 16) 気象庁：台風第19号による大雨、暴風等 令和元年(2019年)10月10日~10月13日, 2019.
- 17) 内閣府：令和元年台風第19号に係る被害状況等について, 2020.
- 18) 郡山市：台風19号による浸水区域, 2019.
- 19) 郡山地方広域消防組合消防本部：令和元年東日本台風に伴う浸水地域における活動について, 地域防災データ総覧「令和元年房総半島台風(台風第15号) 令和元年東日本台風(台風第19号) 編」, pp.89-99, 2021.
- 20) 郡山市：令和元年東日本台風における災害対応検証, 2020.
- 21) 郡山市：災害対策本部会議概要, 2019.
- 22) 株式会社サーベイリサーチセンター：福島県「台風19号等」住民避難行動調査業務報告書(即報版), 2020.
- 23) 郡山市：郡山市タイムライン(防災行動計画), 2021.