

統合先端科学研究

大規模自然災害時における
社会レジリエンス評価法と
危機管理の高度化

(研究概要)

令和4年3月

防衛大学校
グローバルセキュリティセンター

目 次

第Ⅰ編 大規模災害の特徴と災害レジリエンス，危機管理の関係	1
第Ⅱ編 各種大規模災害におけるリスクと評価例	3
第Ⅲ編 隔測情報収集とその利活用	9
第Ⅳ編 災害レジリエンスと危機管理の高度化	14

研究実施者

責任者	: システム工学群建設環境工学科教授	別府万寿博
研究員	: 人文社会科学群公共政策学科准教授	加藤 健
	電気情報学群情報工学科准教授	岩切 宗利
	電気情報学群情報工学科講師	鵜飼 孝盛
	電気情報学群情報工学科非常勤講師	竹之上典昭
	システム工学群機械工学科准教授	山田 浩之
	システム工学群建設環境工学科教授	香月 智
	システム工学群建設環境工学科教授	矢代 晴実
	システム工学群建設環境工学科准教授	市野 宏嘉
	システム工学群建設環境工学科准教授	堀口 俊行

謝 辞

本研究を行うにあたり，以下の方々に多大なるご支援，ご協力をいただきました．ここに記して謝意を表します（50音順，敬称略）．

第Ⅱ編

片岡新之介 防衛大学校理工学研究科後期課程 18 期
甲賀 誠 防衛大学校応用科学群応用化学科 教授
小松 喜治 防衛大学校理工学研究科後期課程 19 期
佐々木 寿 アジア航測株式会社火山防災課 課長
嶋川 理 防衛大学校理工学研究科後期課程 20 期
立山 耕平 立命館大学工学部機械工学科 助教
伊達 新吾 防衛大学校応用科学群応用化学科 准教授
永田 真 防衛大学校理工学研究科後期課程 16 期
濱田 匠李 防衛大学校理工学研究科後期課程 19 期
吉本 充宏 山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 主幹研究員（センター長）

第Ⅲ編

株式会社パスコ

國武 千人 防衛大学校理工学研究科前期課程 56 期
国土交通省国土地理院
佐久間数家 防衛大学校本科第 62 期
漆間 亮介 防衛大学校本科第 63 期
溝田 平 防衛大学校本科第 61 期
宮崎 裕輔 防衛大学校理工学研究科前期課程 57 期

第Ⅳ編

坂口 有輝 防衛大学校本科 65 期

はじめに

近年、地球温暖化や気候変動の影響を受け、災害の大規模化が進んでいる。我が国は地震大国であり、この20年間に1997年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震などマグニチュード7.0以上の地震が頻発している。また、火山活動の活発化、土石流の激甚化、豪雨による洪水、竜巻や突風の頻発など、多くの災害に囲まれている。このような大規模災害に対して、特に東北地方太平洋沖地震以降、災害に対する粘り強さを表す用語として「レジリエンス」が注目され、現在では一般的に広く用いられている。国や自治体の災害レジリエンス（災害後に復旧する能力）とは、発災前の防災計画や発災後の危機管理計画などを拡充し（リスク管理）、かつ発災後に危機対応として（危機管理）、なるべく速やかに発災前の状態に戻る能力を意味している。近年、災害レジリエンスに関する研究が精力的に行われているが、研究内容が多岐にわたることや、社会実装のためには自治体との連携が必要であることなどから、包括的な研究を行うことは容易ではないため、個別の研究分野において検討されているのが現状である。

本研究は、防衛大学校の中で文理の専門を問わず、災害レジリエンスの研究に携わっている教官が集まり、「大規模自然災害時における社会レジリエンス評価法と危機管理の高度化」について研究を行ったものである。一般的に、災害に対する備えとしては、ハザードマップの整備、避難施設の拡充、避難時物資の備蓄、応急資器材の充足、防災訓練の実施、災害情報の収集・発信能力の高度化などが考えられる。そこで本研究では、これらに関して具体的に大きく3つの内容に分類して検討を行った。まず、「各種大規模災害におけるリスク評価」について検討を行った。すなわち、各種の災害の中で地震、火山、竜巻飛来物、土石流、爆発を対象として、発災時のリスク評価あるいはハード的な補強対策について検討を行った。この中では、災害の特徴に応じてリスク評価や救助体制の在り方について検討を行うとともに、実験や数値解析を行って防災構造物の破壊メカニズムや補強方法について検討した。次に、「隔測情報収集とその利活用」について検討を行った。ここでは、近年発達してきた隔測情報技術を概説したうえで、リスク管理への適用の例として、火山噴火時に発生する噴石シミュレーションの開発やハザードマップの高度化を行った。また、危機管理への適用の例として、地理情報処理システムによる被災家屋検出とその可視化の検討を行った。さらに、「災害レジリエンスと危機管理の高度化」について検討を行った。ここでは、自治体の現状を把握するために、自治体の災害対処体制の類型化や地域防災計画を分析したうえで、自治体のレジリエンス評価項目の提案を行った。また、災害対処の運用として、発災後の資源配分、意思決定の構造化、被災地におけるトリアージについて検討を行った。本書は4つの編で構成されており、各編の概要は以下のとおりである。

第I編「大規模災害の特徴と災害レジリエンス、危機管理の関係」では、近年の大規模災害の傾向を概説し、大規模災害を時間的および空間的特徴に基づいて類型化した。そのうえで、各種災害（地震、火山噴火、竜巻、土石流、爆発）の特徴を整理した。次に、リスク管

理, 危機管理およびレジリエンスの基本的性質を概説し, 2つの管理と災害レジリエンスの関係性を分析した。最後に, 類型化した大規模災害におけるレジリエンスの考え方を提案した。

第Ⅱ編「各種大規模災害におけるリスクと評価例」では, 類型化した災害の特徴に応じて, ハードあるいはソフト対策の検討を行った。地震に対する検討では, 地震リスクの評価法として, ハザード評価, 地震被害評価, リスク管理手法について概説した。そのうえで, それぞれの具体的な研究例として, 余震を考慮したリスク評価, 建物倒壊による道路閉塞が津波避難に与える影響, 首都直下地震時における人命救助体制について説明した。火山噴火に対する検討では, 火山噴火による被害の種類を整理したうえで, 火山噴火時の降灰による道路機能支障リスクや火山避難対策について説明した。また, 火山噴石に対する木造建築物屋根の補強に関する研究を行った。竜巻飛来物に関する検討では, シェルターとして鉄筋コンクリート版と鋼板を対象として, 実験および数値解析による検討を行った。また, 竜巻飛来物による被害評価法について説明した。土石流に対する検討では, 土石流荷重や災害の特徴を分析したうえで, 土石流に対する防災構造物である砂防堰堤の模型実験や数値解析を行った。これらの成果に基づいて, 鋼製砂防堰堤の被害低減対策を提案した。爆発災害に関する検討では, 爆発災害を類型化したうえで, リスク評価手法を提案した。また, 具体的に, 爆破テロを対象として, 被害評価を行った。

第Ⅲ編「隔測情報収集とその利活用」では, 隔測技術を概説したうえで, その高度化について説明した。次に, 隔測情報をリスク管理へ適用した例として, マルチエージェントシミュレーションによる避難シミュレータを開発し, これにより避難計画を評価する方法を紹介した。また, 火山噴石シミュレータを開発し, ハザードマップの高精細化や避難施設のリスク評価を行った例を紹介した。さらに, 隔測情報を危機管理へ適用した例として, 地震後における地理情報処理システムによる被災家屋検出とその可視化および被災家屋の推定法を説明した。

第Ⅳ編「災害レジリエンスと危機管理の高度化」では, 災害レジリエンスの評価例と課題を分析した。大規模災害時における住民の避難行動を分析し, 避難しない心理的要因や研究パラダイムを考察したうえで, 葉山町を対象として避難シミュレーションを行った例を紹介した。また, 木曽町, 王滝村を対象として火山噴火対策の現状と課題を抽出した。さらに, 災害レジリエンスを社会実装するための分析として, 自治体の災害対処体制を公開データに基づいて類型化した。一般的に, 発災時の対応は, 自助, 共助, 公助に分類されるが, ここでは公助と自治体の災害レジリエンスに着目し, 自治体の災害レジリエンス評価の具体的項目を提案した。最後に, 危機管理の高度化として, 発災時の運用に注目し, 資源配分の方法や効率化, 意思決定の構造化, 被災地におけるトリアージについて検討した例を紹介した。

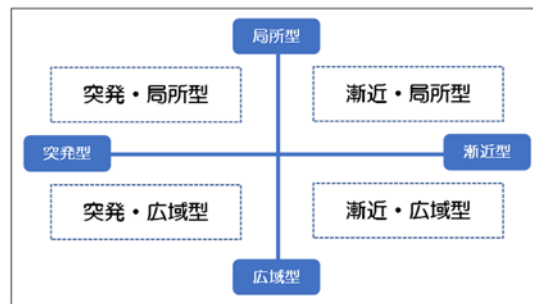


図1 自然災害の類型化

第I編 大規模災害の特徴と災害レジリエンス、危機管理の関係

第1章 近年の大規模災害の傾向と歴史

本章では、地球温暖化や気候変動の影響を受けて近年大規模化している災害の傾向と歴史について概説した。特に、日本では地震、豪雨および洪水が大規模化かつ頻発する傾向にあるため、これらの傾向について統計データに基づいて分析を行った。そのうえで、大規模自然災害の時間・空間的特徴を踏まえて図1に示すように「漸近・局所型」、「突発・局所型」、「突発・広域型」および「漸近・広域型」の4つに類型化した。

「漸近・局所型」は他の災害に比べて発災までのリードタイムが比較的長く、単一の自治体内での対処に収まる形の災害である。例を挙げると、大雨による水害や土砂災害といった災害が挙げられる。「突発・局所型」は他の災害に比べて比較的リードタイムが短く、単一の自治体内で対処可能な形の災害である。例を挙げると、ゲリラ豪雨や竜巻といった災害が挙げられる。「突発・広域型」は他の災害に比べて比較的リードタイムが短い特徴がある。また災害規模が大きく、その対処は複数の自治体にまたがるような災害である。例を挙げると、地震や火山噴火といった災害が挙げられる。「漸近・広域型」は他の災害に比べて比較的発災までのリードタイムが長い特徴がある。また、災害規模が大きく、その対処は複数の自治体にまたがるような災害である。例を挙げると、津波などの災害が挙げられる。国内では、地理条件によってこれらのタイプの災害が散在しており、各自治体が対象としている災害もさまざまである。大規模自然災害をこのように類型化することで、災害の特徴に応じて発災前の準備や発災後の対応を検討することが可能となる。

本研究では、大規模自然災害として地震、火山噴火、竜巻による飛来物（竜巻飛来物）、土石流を対象とした。また、自然災害ではないが、近年増加傾向にある爆発災害についても研究を行った。本章では、これらの災害の特徴や被害例についてもまとめた。

第2章 リスク・危機管理と災害レジリエンス

本章では、災害レジリエンスとリスクおよび危機管理の定義や基本的性質を紹介するとともに、これらの関係について概説した。レジリエンス (resilience) の概念は、元々、「跳ね返る」を意味するラテン語の「resilio」に由来する。これは「脆弱性 (vulnerability)」の反対

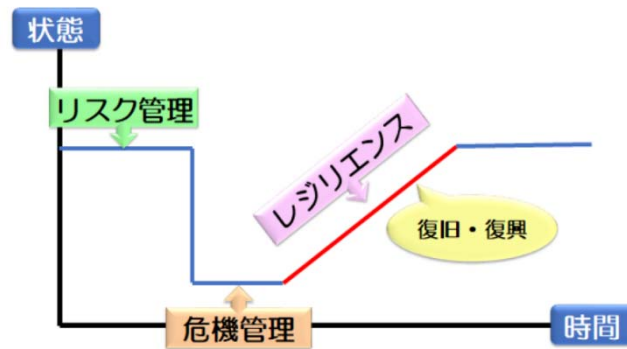


図2 「リスク管理」「危機管理」「レジリエンス」の関係

の概念に相当し、日本語では「反発性」、「弾力性」、「復元力」、「再起性」、「回復力」、「抵抗力」、「耐久力」、「しなやかな強さ」などと訳される。「しなやかな強さ」を意味するレジリエンスは、力強さ (strength) や頑強さ (robustness) の概念とは異なることを意味する。すなわち、ストレンクス (力強さ) やロバストネス (頑強さ) は、ストレスなどに屈しない「強さ」を意味するのに対し、しなやかな強さを意味するレジリエンスは、一旦、歪んだり、へこんだりするもののそこから立ち直る意味での「強さ」である。一般的に、リスクおよび危機管理と災害レジリエンスの関係は図2のように説明される。図の縦軸および横軸は、それぞれ地域の状態および時間を示している。自然災害が発生すると、構造物の損壊や人的被害が発生するため状態が低下する。その後、徐々に元の状態に戻ることを復旧、復興と称することが多い。狭義の災害レジリエンスとは、低下した状態を元の状態へ戻す過程を示す。一方で、図中のリスクおよび危機管理とは発災前後の管理であり、対象とする自然災害に対する事前対策および事後の緊急対応を意味している。広義の災害レジリエンスとは、リスクおよび危機管理を含んだ自治体の対応とされており、本研究でもこの定義に従って研究を行った。

第3章 大規模災害の種類とレジリエンス

本章では、類型化した大規模災害の特徴やこれらに対するレジリエンスの考え方を示した。具体的には、「漸近・局所型」において、「局所」とは災害による被害規模が一つの都道府県内で収まり、県内あるいは単独の市町村など自らの自治体のみで対処可能な災害である。すなわち、被害規模が比較的狭い範囲で起こり、災害の危険性も事前にある程度予測可能であり、その危険性が徐々に近づいてくるタイプの災害である。例えば、台風や河川の氾濫 (外水氾濫や内水氾濫) といった災害である。こうしたタイプの災害は、西日本豪雨のときのような、広域に跨る被害規模をもたらす場合もあるが、基本的には、単独の自治体のみで対処が可能であり、他の自治体との連携も必要としないことが多い。事前に危険性の予測が可能であるため、タイムライン等の作成により、計画的に対処することが可能である。次に、「突発・局所型」は、被害規模が比較的狭い範囲で起こるが、突然その危険がや

ってくる災害である。例えば、自然災害ではないが、爆発やテロなどがこれに該当する。近年、テロは組織的なものばかりではなく、「ローン・ウルフ型（一匹狼型）」などとも呼ばれる単独犯によるものが増えてきている。こうした突発的な災害の場合、人間は「正常性バイアス」と呼ばれるバイアスに陥りやすい。すなわち、テロによる爆発物の爆発など、一瞬何が起きているのかがよくわからない「曖昧な状況下」においては、人間は「都合よく現実を解釈する」傾向がある。またこの他にも「曖昧な状況下」においては、「集合的無知」と呼ばれる現象も生じることが知られている。すなわち、周囲の人々がどのように反応を示しているかを参照することによって、その曖昧な状況を理解しようとする。これらの結果、全員が他者の行動を手掛かりにするために、危険を感じながらも誰も逃げださない、という行動が生じてしまう。「突発・広域型」における「突発」とは、災害の危険性を事前に予測することが困難であり、突然襲ってくることを意味する。このタイプの災害は、被害が広範囲に及び、なおかつ突然その危険がやってくる特徴がある。例えば、地震や火山噴火のように予測が困難であり、一旦災害が起こるとその被害が広範囲に及ぶ災害である。こうしたタイプの災害に対しては、地震であれば自宅の耐震化や免震化といった対策があり、噴火災害に対しては登山客であれば事前に噴火警戒情報をチェックする、また噴石の衝突に対するヘルメットを用意するなどの事前準備による対策が不可欠となる。「漸近・広域型」の「広域」とは、災害による被害規模が一つの都道府県内では収まらず、複数の都道府県に被害が及ぶ（あるいは及ぶ危険性がある）ことを示す。そして、「漸近」とは、災害の危険性が事前に予測可能で、徐々に近づいてくることを意味している。例えば、被害が広範囲に及びかつその危険が徐々に近づいてくる津波災害が該当する。事前準備として、防波堤の設置、避難経路の整備および避難訓練などによって被害を最小限に抑えることができる。

第Ⅱ編 各種大規模災害におけるリスクと評価例

第1章 地震に対するリスクと評価例

本章では、リスク工学的手法の概説と地震に対するリスク評価の例を紹介した。図3に地震に対するリスク評価手法を示す。

図3(a)はハザード曲線であり、地震動の強さ（横軸）に対する超過確率（縦軸）を表したものとなる。この図から横軸で地震動強さをみると、その地震発生の間年超過確率がわかり、また超過確率からそのときの地震動強さを読み取ることができる。図3(b)は施設の損傷度曲線であり、横軸の地震動指標は地表面最大加速度や速度、計測震度、震度階級などを用いる。縦軸は破壊する確率を示しており、例えば大破、中破、小破等の被害レベルごとに発生確率を求める。この損傷度曲線から、施設の損失率（損害額/施設の再調達価格）を予測することにより、図3(c)に示す地震損失関数である「地震動の大きさ」と「施設の損失率」の関係を示したものを作成する。この地震ロス関数は、地震動を条件とした損失分布の平均値を算定したものになる。施設の地震被害に関する定量化情報であるロス関数と施設が位置する場所の地震危険度情報である地震ハザード曲線を組み合わせることにより地震リス

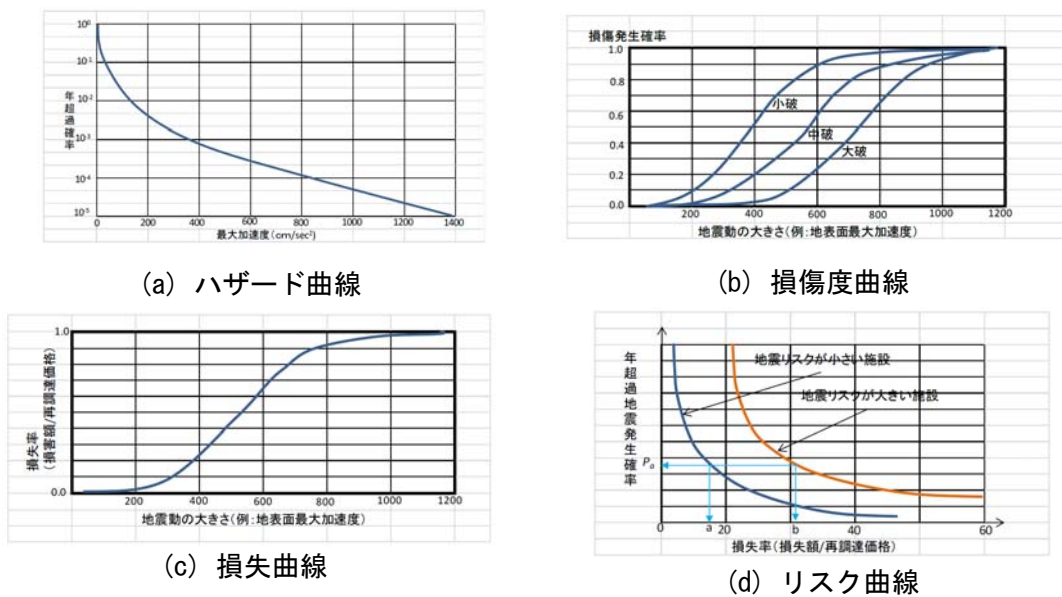


図3 地震リスク評価の概念

ク曲線を作成し、施設の地震リスクに必要な情報を得ることができる。地震リスク評価では、この地震リスク曲線が重要なデータとなる。地震リスク曲線の例を図3(d)に示す。この曲線は、縦軸に超過地震発生確率（平均損失額を超える地震がある期間に発生する確率）、横軸に平均損失率（損失額／調達価格）を示したものになる。図では2本のリスク曲線を描いており、年超過発生確率が P_a という地震に対して、地震リスクの小さい施設の損失率は a %以上になり、地震リスクの大きい施設の損失率は b %以上になることを意味している。

そのほかにも前述した手法を用いて、2016年の熊本地震のように連続して地震が発生するような場合を想定し、余震が地震ハザードと損傷度曲線に与える影響を検討した。また、地震時の建物倒壊による道路閉塞が津波避難に及ぼす影響を検討した。

第2章 火山噴火に対するリスクと評価例

本章では、火山噴火に対するリスク評価や構造物の補強対策の検討を行った。火山噴火によって生じる災害には、火山灰、噴石、火砕流、融雪型火山泥流、溶岩流、火山ガス等がある。本研究では、富士山が噴火した場合の降灰量や交通量のリスクおよび大分県鶴見岳において想定される火山噴火リスクについて検討を行った。

噴火時での広域に亘る降灰分布の確率論的評価に関する既往の研究として、過去の噴火時の降灰分布資料から分布域の形と伸びの方角のデータをまとめ、将来の降灰分布を確率論的に求める手法が検討されている。この方法を拡張し、富士山が噴火したときの広域に亘る降灰分布に基づき、降灰層厚を入力として通行不能区間および降灰によって影響を受ける交通量の確率分布を評価した。図4に、提案した手法によって得られた富士山噴火時の降灰層厚および噴火によって影響を受ける交通量の期待値マップを示す。本手法を用いることで、噴火の規模が大きくなった場合に影響を受ける車両台数の算定や降灰除去の効果的

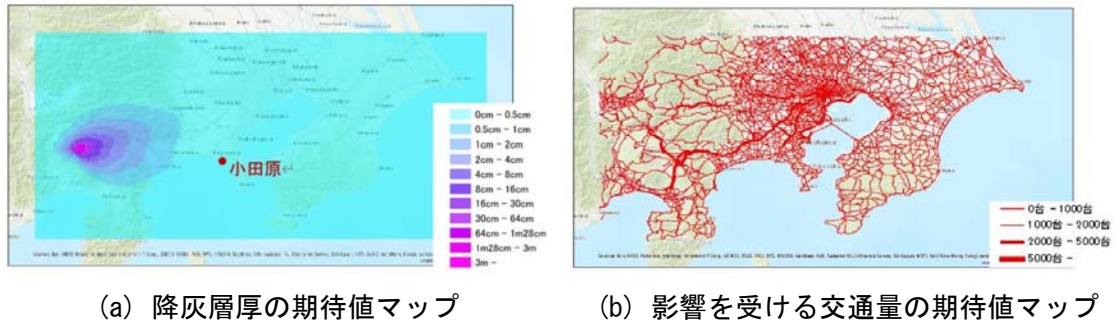


図4 富士山噴火時の降灰リスク評価の例

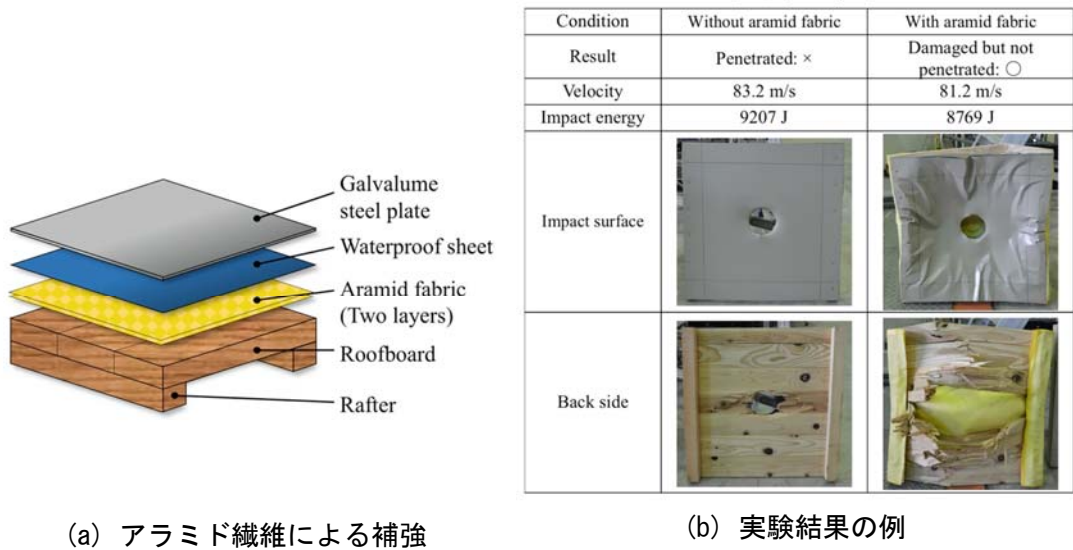


図5 火山噴石に対する木造建築物の補強対策

な計画を立案することができる。さらに、大分県鶴見岳の噴火を対象として、鶴見岳において想定される火山噴火現象ごとのハザードを分析し、各被害の曝露人口および被災面積を算出した。また避難ルートの分析を行い、避難対象者を市町村外へ大量・広域避難させる手段を検討した。

御嶽山の火山噴火では、火山噴石によって多数の犠牲者が生じたことが知られている。このため、木造山小屋の補強対策が急務であった。そこで、火山噴石に対する木造建築物の補強対策について検討を行った。実験では高速投射型衝突破壊実験装置を用いた。噴火時に最も多く飛散したこぶし大サイズ $\phi 100$ mm 程度と仮定した噴石を模擬するため、直径 90 mm の円柱状の砥石を組み合わせることで、質量 2.66 kg (直径 128 mm の球と同等の質量) の模擬噴石飛翔体 (以下、飛翔体と称する) を作製した。複数の補強対策を提案したが、最も効果が高かったアラミド繊維シートによる補強の模式図と実験結果を図 5 に示す。この補強対策では、木造屋根の上にアラミド繊維シート、ガルバリウム鋼板を積層した。実験結果から、補強なしの場合には貫通が生じたが、補強対策を施すと破壊が構造全体に拡散することで補強効果が発現され、飛翔体が貫通しないことがわかる。

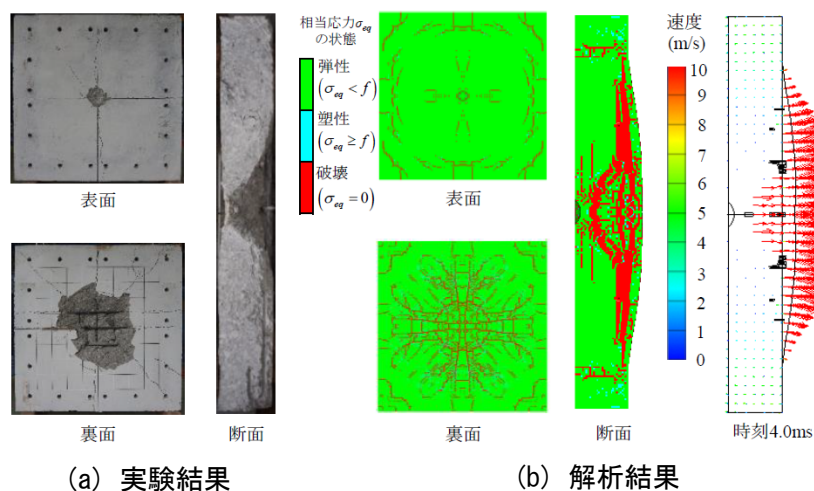
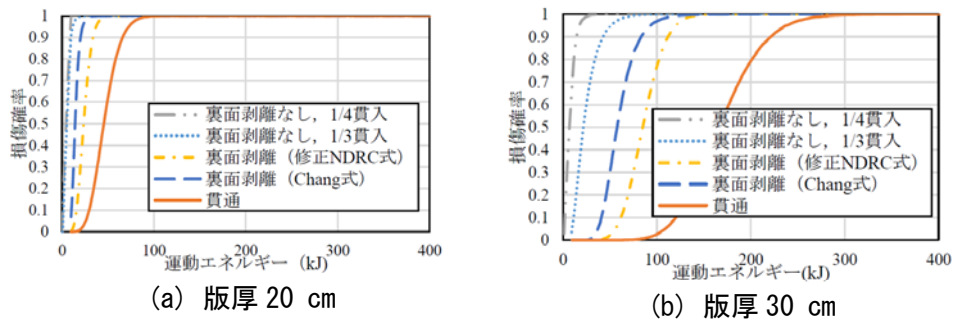


図6 飛翔体の衝突を受ける鉄筋コンクリート版の破壊

第3章 竜巻飛来物に対するリスクと評価例

本章では、竜巻に伴って発生する飛来物を模擬した飛翔体を用いて、構造物の補強対策やリスク評価を行った。実験では空気圧を利用した飛翔体発射装置を用いた。飛翔体は鋼製であり、質量4.5 kgおよび8.3 kgである。鉄筋コンクリート版の寸法は、1100 mm×1100 mmであり、版厚は9～15cmとした。また、破壊メカニズムを解明するために、有限要素法による数値シミュレーションも行った。図6に、実験および解析結果の一例を示す。図から、実験では飛翔体の衝突を受けることによって、鉄筋コンクリート版に非常に局所的な破壊（局部破壊）が発生することがわかる。数値シミュレーション結果から、適切な数値モデルを構築することで実験結果を再現できること、また衝突に伴う応力波の伝播や局所的な変形によって局部破壊が発生することがわかった。なお、鋼板についても同様の実験および解析を行っており、飛翔体の衝突による貫通発生限界や貫通メカニズムについて検討を行った。

次に、飛来物衝突を受ける鉄筋コンクリート版の損傷リスクの評価法について検討を行った。ここでは、破壊の発生に関する実験式を用いて破壊を評価した。入力値のばらつきとして、衝突速度やコンクリート強度の変動係数を考慮したうえで、モンテカルロシミュレーションを行った。本手法で得られた、飛翔体の運動エネルギーを指標とした局部破壊の損傷度曲線を図7に示す。図からわかるように、版厚20 cm 場合では飛翔体の運動エネルギーが小さい値で破壊する確率が1.0に到達しており、破壊しやすいことを示している。版厚を30cmに増加させると破壊確率が1.0となる運動エネルギーが非常に大きくなり、破壊が生じにくいことがわかる。このような評価手法を用いることにより、構造物の補強対策を定量的に検討することができる。



(a) 版厚 20 cm (b) 版厚 30 cm
 図 7 運動エネルギーを指標とした局部破壊の損傷度曲線

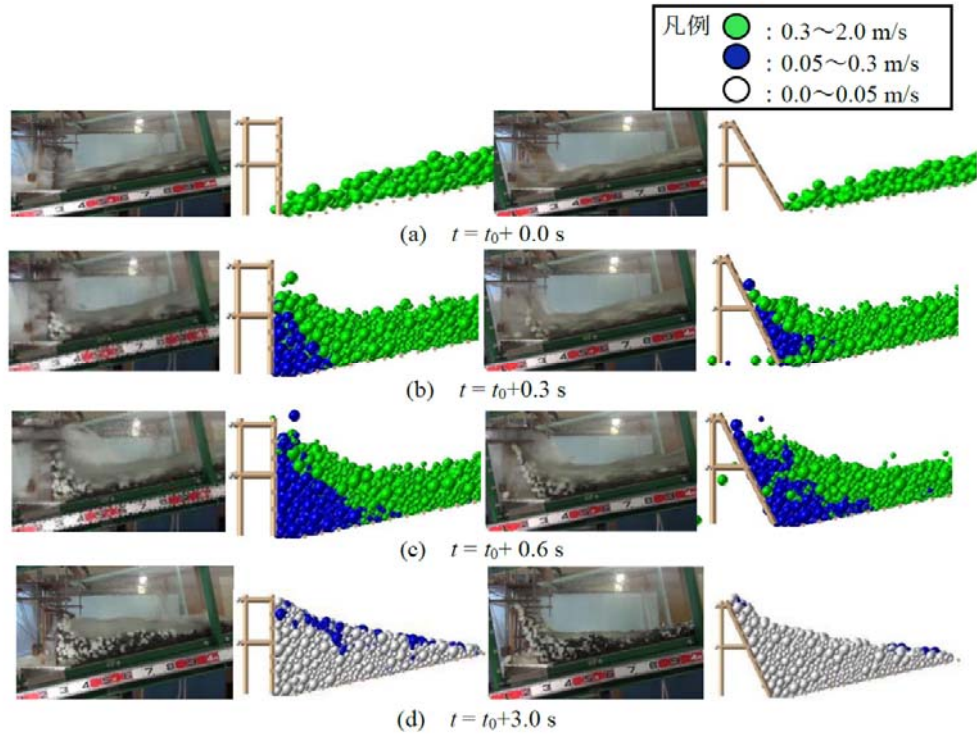
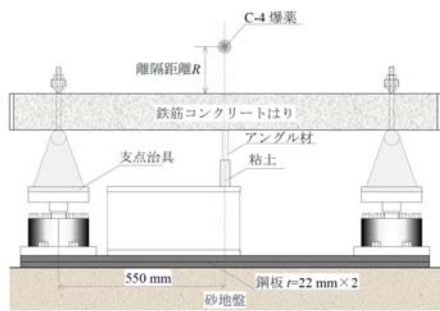


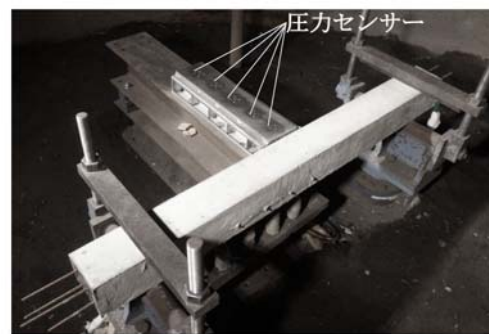
図 8 土石流を受ける砂防堰堤のモデル実験と数値シミュレーション

第 4 章 土石流に対するリスクと評価例

本章では、近年頻発している土石流に対する防災構造物である砂防堰堤の補強対策について検討を行った。土石流の縮小模型実験システムを構築し、図 8 に示すような実験および数値シミュレーションを行った。実験では、可変勾配型直線水路を用いている。水路の諸元は、水路長 4.5 m、水路幅 30 cm、深さ 50 cm であり、水路勾配は 11.3° に固定した。図 8 に示すように、土石流に対して直立するタイプおよび前面に傾斜角を有するタイプの 2 種類を作製した。実験の結果に基づいて、水と礫の混相流となる土石流モデルが砂防堰堤モデルに作用する過程を分析した。また、前面傾斜角を有する砂防堰堤に作用する最大衝撃力は、直立型よりも小さくなることがわかった。次に、個別要素法を用いて実験の再現解析を行っ



(a) 鉄筋コンクリートはりの近接爆発実験



(b) 実験の外観

図9 鉄筋コンクリートはりに対する近接爆発実験

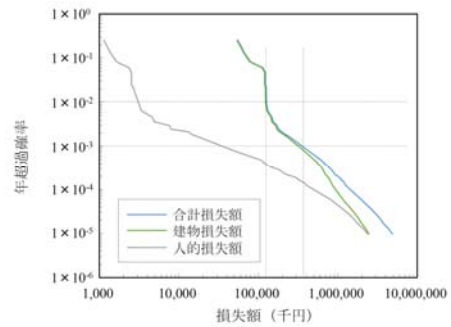
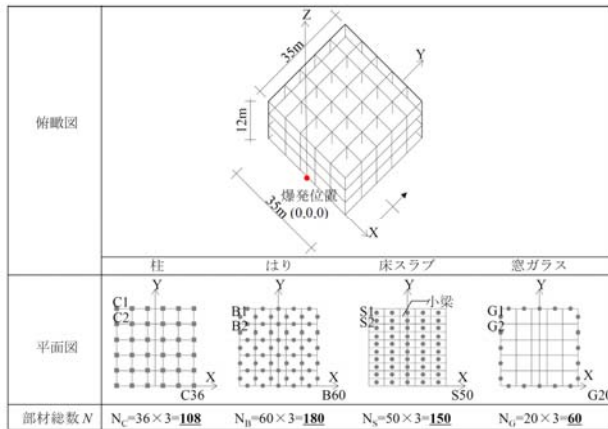
た. 土石流モデルは水と礫の混相流であるため、流速分布モデルを導入した解析を行った。解析の結果、図に示すように実験結果をよく再現し、前面傾斜角による最大荷重の低減効果も再現した。

さらに、砂防堰堤に作用する荷重を低減する対策として、砂防堰堤の前面に前置減勢工を設置することを提案した。実験では、前置減勢工の高さや設置位置を変化させて、各パラメータの効果を分析した。また、数値シミュレーションによって前置減勢工の効果や砂防堰堤に作用する最大荷重の低減メカニズムを解明した。これらの検討は、大規模化している土石流災害の減災対策へ活用できる。

第5章 爆発災害に対するリスクと評価例

本章では、近年増加傾向にある爆破テロや爆発災害を対象としてリスク評価を行った。具体的には、図9に示すように、鉄筋コンクリートはりに近い位置で爆薬を爆発（近接爆発）させる実験を行って、爆風圧の分布や鉄筋コンクリートはりの破壊を評価する手法を構築した。この実験では、スパン 1.1 m の鉄筋コンクリートはりの真上 77~231 mm の位置に Composition C-4 爆薬を設置して爆発実験を行った。実験結果に基づいて、近接爆発による非均一な圧力分布を定式化した。また、このような非均一荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの応答を評価するための一質点系モデルを提案した。

爆破テロを受ける構造物のリスク評価法を確立するため、図10(a)に示すような構造物を対象として、爆破テロのハザード曲線、損傷度曲線、損失曲線、リスク曲線を算定した。爆破テロは人為的要素を含んでいるが、既往のデータを分析することでハザード曲線を算定した。また、対象構造物ははり、柱等で構成されているため、各部材に対して一質点系モデルを作成して損傷を算定した。次に、既往の地震災害を参照することで損失を求めて爆破テロに対する損失曲線を算定した。最後に、これらを統合することで、図10(b)に示す対象構造物のリスク曲線を求めた。このような分析を行うことで、爆破テロの年超過確率に応じて、人的被害や建物の損失額を算定することが可能となり、事前の対策や補強法の選定などに反映することができる。



(a) 対象構造物

(b) 対象構造物のリスク曲線

図 10 対象構造物のリスク評価

第三編 隔測情報収集とその利活用

第 1 章 隔測技術とその情報処理技術の高度化

大規模災害を想定した訓練、避難経路を立案し、あるいは発災後の救助活動などを行うためには、情報収集技術が不可欠である。本章では、隔測情報収集技術の概説とその高度化について検討を行った。

まず、多視点画像を用いた 3 次元モデル生成手法の高度化を検討した。2 枚以上の多視点画像を用いた三角測量技術であり、SfM-MVS (Structure from Motion – Multi View Stereo) ソフトウェアを用いて映像データから 3 次元データを生成した。この技術は有人航空機を用いた写真測量などの分野で実用されていたが、最近では、デジタルカメラや空撮用ドローンの普及により、手軽な 3 次元測量技術としてその活用分野が拡大しつつある。特に、その処理を効率化するための映像フレーム選択法 (データセット作成法) を提案し、その性能について実験を行って評価した。

次に、人工衛星や航空機などによる隔測技術を用いて生成される数値表層モデル (DSM: Digital Surface Model) について検討を行った。DSM は、都市計画や農業、林業などの分野、災害発生時の被災状況分析などの幅広い分野に利用できる 3 次元情報の一種である。DSM を得るためにレーザ測量や画像測量などの手法が一般に利用されている。その初歩的な取り組みとして、航空機を用いた既存の測量成果物である空撮画像 (標高成分を含まない正射投影画像) から航空レーザ測量データと同様の高密度な数値表層情報を生成する手法を示し、それらを用いた評価実験結果により、地表面に存在する家屋の立体的な形状を空撮画像から推定できる可能性について示した。この中では、最近開発が進んでいる畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を用いて、図 11 に示すように、画像が持つ局所領域の特徴からその深度を推定する手法を適用して数値表層モデルを生成し

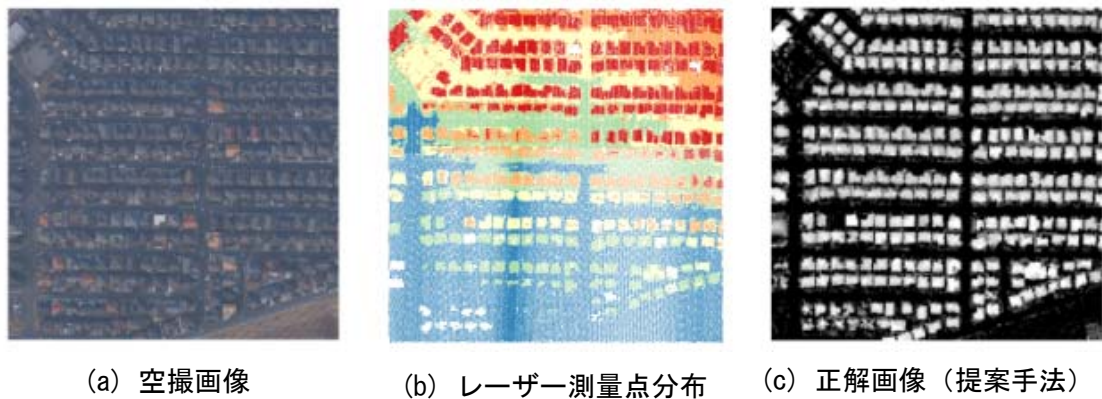


図 11 空撮画像を用いた学習結果

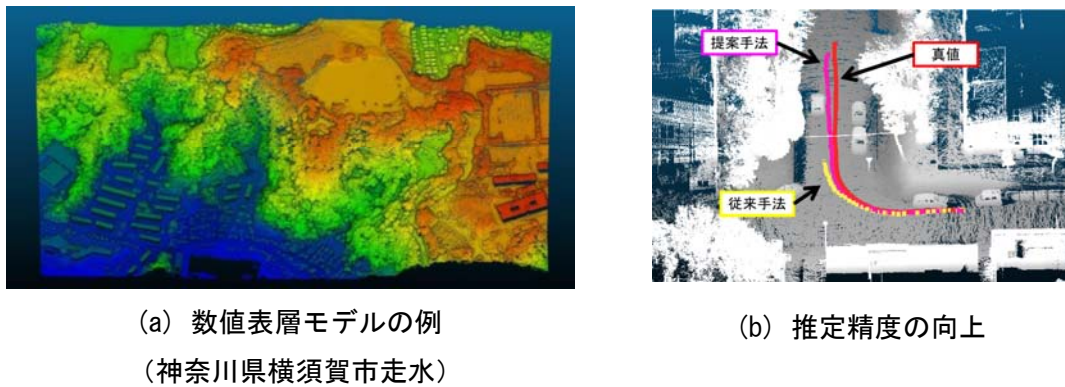


図 12 点群処理による 3 次元モデル生成

た．また，これに敵対的生成ネットワーク構造を応用した DCGAN (Deep Convolutional Generative Adversarial Networks) を適用して，推定精度の向上を試みた．

さらに，撮影した画像を点群処理することによって 3 次元モデルを生成する方法とその高度化について検討を行った．数値表層モデルは，建物や樹木を含む地上の表面形状を表したデジタルデータであり，地形分析，インフラ点検，防災，災害調査，シミュレーションなど，幅広い分野で活用されている．数値表層モデルは航空機などのプラットフォームに LiDAR (Light Detection And Ranging) などのセンサを搭載し，測量を行うことで取得できる．図 12(a) は航空レーザ測量により生成された数値表層モデルの一例である．このようなモデルは，スキャンした点群の重ね合わせ（レジストレーション）により実現できる．基本的な考え方は，過去のスキャン点群に現在のスキャン点群を重ね合わせて連結統合することである．LiDAR によるスキャンデータは，離散的で距離によって疎密差があるため，特徴点の取得が難しい．特に，トンネルのように同じ形状が続く通路や，広場のような測量対象物が少ない空間は，レジストレーションによる誤差が大きくなる．そこで，図 12(b) に示すようにレジストレーションの精度を向上する方法を提案した．



(a) 走水宿舍地区における避難経路

(b) シミュレーションの様子

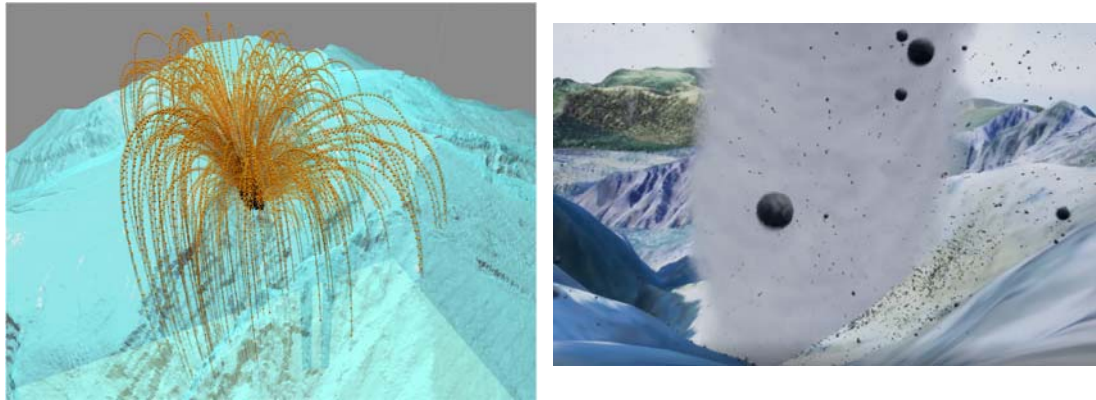
図 13 避難シミュレーション

第 2 章 隔測情報のリスク管理への応用

本章では、隔測情報をリスク管理へ応用した例を概説した。具体的には、避難シミュレーションと火山噴石シミュレーションの開発である。

避難シミュレーションでは、3次元シミュレーションとして地形や建物および避難者などのモデルを高精度に完成させ、その位置関係や動きを数値化して模擬することにより、人の流れや避難時間、地形効果などを確認し、避難計画の確立やその有効性評価などの実現を目指した。特に、今回開発した避難シミュレーションは、起伏の激しい3次元地形モデルへの対応や、人型でリアリティの高い避難エージェントの採用に特徴がある。これにより、津波のような標高情報が重要である災害や、山道のように狭い通路における渋滞の再現が可能となった。本実験では、地形モデルとして神奈川県横須賀市走水地区（走水）周辺を採用した（図 13(a) 参照）。この地区の指定広域避難地は、高台にある防衛大学校グラウンドである。走水は、海岸部の狭い平地に住宅が密集している特徴がある。走水は高台への避難経路が限られ、津波避難に課題があるため、本研究の対象災害を津波とした。本実験では、国土交通省国土地理院から提供を受けた航空レーザ測量データ及び空中写真データを使用した。航空レーザ測量データは、平面直角座標系で表現された標高データであり、概ね 0.5 m から 1.0 m 間隔に 1 点程度の計測点がある点群データである。道路（避難経路）や建物、海などは、地形を目視で確認しながら手動配置した。図 13(a) は、本シミュレーションで配置した 600 人のエージェントの初期配置範囲（走水宿舍地区）と高台にある避難場所に向かって 2 経路を示したものである。各エージェントは、図 13(b) に示すように全員が同じ避難場所に向かって前進する。避難者の歩行速度は、2.0~4.0 km/h の範囲でランダムに設定した。このようなソフトウェアを開発することで、効果的な避難計画を立案することが可能となる。

火山噴石シミュレーションでは、地形モデルの地下に噴火口を設け、地表面に存在する噴石それぞれに初速度と放出角を与える。放出された噴石は、空気抵抗と重力を受けながら飛散し、地表面などの物体に衝突する。風の影響については、噴石の質量が大きいこと、噴火時の風向風速が予想できないことから、今回開発した噴石飛散シミュレーションでは省略したが、その追加導入は可能である。各シミュレーションの地形モデルは、国土地理院が公開 (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>) している基盤地図情報の中から 5 m メッシュの



(a) 噴石飛散シミュレーションの実行結果 (b) 噴石飛散状況の映像表現例

図 14 火山噴石シミュレーション

数値標高モデルを用いて作成した。噴石の初期位置（高さ）は、地形モデルの頂点が持つ標高値の線形補間により求めた。図 14(a)に示すような 80000 点の噴石データに関する処理時間は、シングルプロセッサ処理（Intel Core i5, 3 GHz, 1 コアのみ使用）で約 45 秒である。このシミュレーションは、現在流通している汎用のノート型パソコンや携帯型端末でも動作可能である。著者らの知る限り、同一条件下での噴石飛散シミュレーションとしては世界最高水準の処理性能であり、発災時の初動対応に資するための情報分析に有用と考えている。火山噴火に遭遇した際には、速やかに避難施設などを利用して身を守ることが重要である。過去に発生した噴石被弾による受傷の原因として、危機意識欠如による避難の遅れがあると考えている。そこで本研究では、噴石飛散シミュレーションの結果を用いてコンピュータグラフィックスで可視化することにより、防災教育に役立てることについて検討した。図 14(b)は、大型スクリーンに投影することにより、多人数での視聴を可能にした火山噴火映像の作成例である。これらの映像や VR 体験装置は、高精細な映像表現が可能なゲームエンジン（Unity や Unreal Engine）による噴石飛散シミュレーションをベースに開発したものである。各ビジターセンターなどでの映像や疑似体験装置を活用した防災教育は、入山を直前とした登山客などの防災意識高揚に役立つと考えている。

第 3 章 隔測情報の危機管理への応用

本章では、発災後に迅速かつ正確に被害状況を推定する手法の確立を目指し、隔測情報を発災後の危機管理へ応用した例を概説した。すなわち、図 15(a)に示す空撮したカラー画像から図 15(b)に示す数値表層モデル（DSM: Digital Surface Model）を作成し、これを分析処理することで、地震による家屋の被害状況を自動判読する手法について検討した。

本研究では、被災家屋の被害レベルを 4 段階に区分し、健全な家屋もしくは屋内のみに被害を受けた家屋をレベル 0、外形を保ったまま一部破損した家屋をレベル 1、外形の一部に変化を伴った被災家屋をレベル 2、全体的に倒壊した家屋をレベル 3 と定義した。発災前後の写真測量により得られた DSM の差分（以降、表層差分と呼ぶ。）は、建物区画全体の変化



(a) 空撮したカラー画像



(b) 数値表層モデル

図 15 数値表層モデルの作成

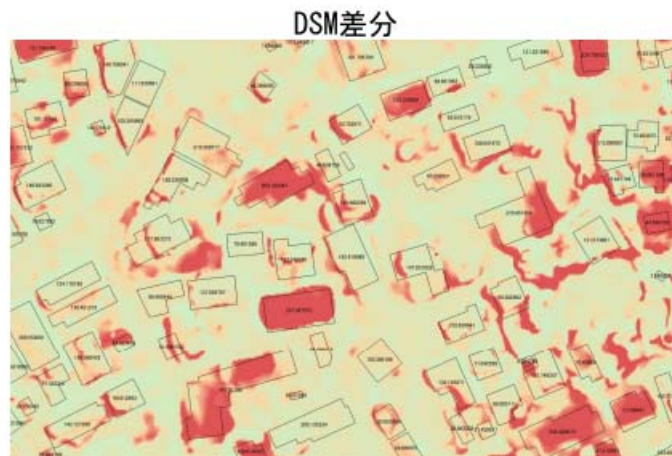
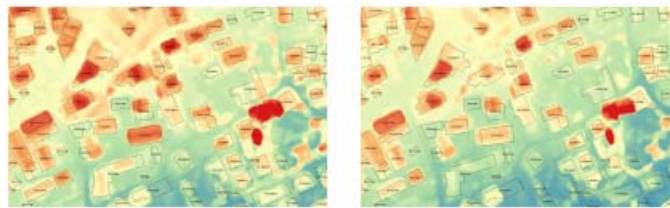


図 16 表層差分モデルの作成

量に関する数値化に利用でき、それをを用いることで被災地域の統計分析を可能にする。図 16 の上 2 つの画像は、撮影時刻の異なる（発災前後）の DSM（低：青→緑→黄→赤：高，ヒートマップ表示）の具体例であり、それらの表層差分も示している。図中の DSM 差分に含まれる黒枠は、国土地理院がオープンデータとして公開している建物区画であり、赤色が表層高の変化が大きい領域である。すなわち、赤色面積の大きい領域は、建物倒壊などにより表層高が大きく変化したものと判断できる。本手法では、レベル 1 の半壊家屋は 3 次元の高さの変化が少なく、先に述べた数値表層モデルの差分による被災家屋の検出は難しいため、破損した被災家屋に被覆されていたブルーシートを目印として、レベル 1 の半壊家屋を検出する手法を提案した。また、震災により被害を受けた家屋は、発災前後を比較すると倒壊や損壊によりその構造の高さ（家屋高）に変化が生じることがある。構造に変化を伴う程

の大きな被害を受けた家屋は、損傷評価でも重要な要素となる。そこで、発災前後の航空機レーザ測量データが取得できた場合を想定して、それぞれを比較することで家屋高情報の変化から被災家屋を容易にとらえる方法を提案した。そのほか、発災前後の画像テクスチャの変化に着目した被災家屋判別法を検討した。発災前には、がれきの情報がないため、画像を微分してもテクスチャに目立ったエッジは検出されない。家屋が被災してその領域のテクスチャが複雑化した場合、表面情報の変化する部分が増えるため画像を微分した際にがれき部分が際立つことになる。これらの変化を評価することで、被災家屋とそれ以外の家屋を判別する方法を提案した。また、より少ない特徴量で被災家屋を判別する方法や家屋の情報から共通的な部分を自動的に抽出する方法を提案した。

第IV編 災害レジリエンスと危機管理の高度化

第1章 災害レジリエンス評価の例と課題

本章では、過去の先行研究から災害レジリエンスの評価方法のレビューを行い、そこから課題を導出し、本研究における災害レジリエンスの評価方法を提案した。本研究におけるレジリエンスの評価軸としては、基本的に「自助」「共助」「公助」という3つの柱、さらに、「公助」として自治体が有する「資源」に注目した。ここで、「自助」とはいうまでもなく「自分自身の身は自分で守る」ことを意味し、「共助」とは「隣近所同士の助け合い」であり、「公助」とは「警察や消防、自衛隊あるいは行政といった公的な機関からの支援・援助」である。この「自助」「共助」「公助」がそれぞれ、自治体ごとにどの程度達成されているかによってレジリエンスの評価を行うものとする。具体的に、「自助」は、どの程度、自力で災害を乗り越えるだけの力を備えているかによって測定される。「共助」は、どの程度地域での防災に取り組んでいるか、また自主防災の組織率によって評価される。「公助」は、主として当該自治体において、どの程度の避難所を提供できるか、また避難所が確保されているかによって評価される。

また、自治体が有する公助としての「資源」に注目した。ここで「資源」とは、具体的には「ヒト」「モノ」「カネ」と呼ばれるいわゆる「人的資源」「物的資源」「財的資源」である。公助としてどの程度の「人的資源」を保有しているのか、公助としてどの程度の「物的資源」を保有しているのか、また、公助としてどの程度の「財的資源」を保有しているのか、それぞれこの3つの項目によってレジリエンスの評価を行う。

各自治体のレジリエンスについては、前述した「自助」「公助」「共助」という防災の三本柱に加え、自治体が有する「人的資源力」「物的資源力」「財的資源力」の三本柱の計6項目によって評価を行う。ここでのレジリエンス評価についての特徴としては、①公表されているデータを用いている、②各自治体において比較可能である、という大きな利点を有する。公表されているデータを用いているため、データ収集に時間を要することもなく、また誰でも用いることが可能なため、非常に客観的な評価が可能である。こうしたデータを用いて、全国的かつ統一的に評価するため、各自治体を同じ基準によって比較することが可能であ

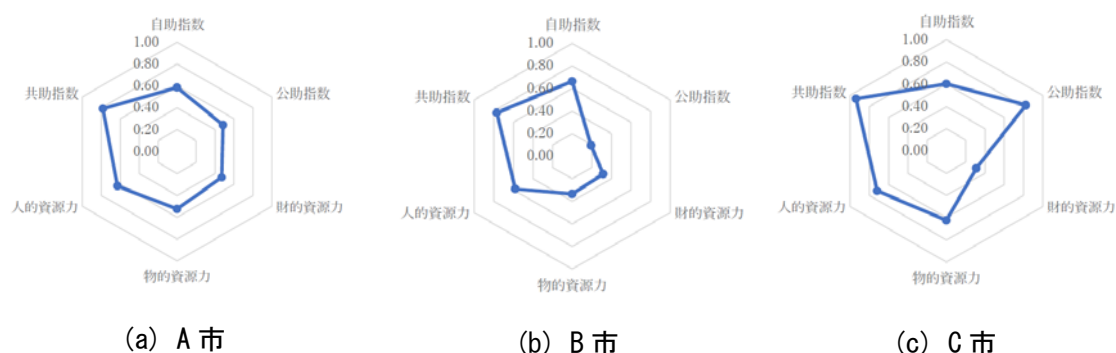
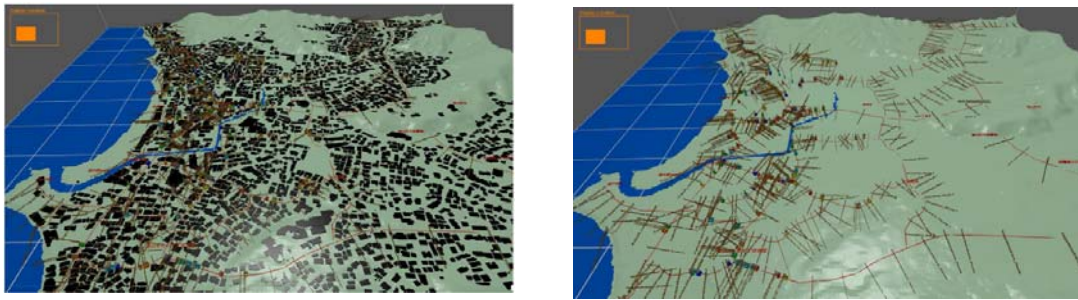


図 17 異なる自治体のレジリエンス評価

る。これら 6 項目を本研究ではレーダーチャートの形で表現した。一例を挙げると図 17 のようになる。図から、レーダーチャートの形状は、自治体によってさまざまであることがわかる。このレーダーチャートは、東京都の特別区を含めた 1,741 自治体（2021年10月1日現在）すべてのデータに基づくものであるため、国内を基準とした相対評価となる。全国的に見た場合、当該自治体のレジリエンス力のどこが強みであり、どこが弱みであるかを可視化できる点が大きなメリットである。例えば、A 市は比較的バランスのとれた自治体である。それに対して、B 市は人口が過密なため、公助指数や物的資源力において、脆弱な側面がある、という点などが可視的に理解できる。一方で、仮に自治体が総合的・平均的に高いレジリエンス力を保有していたとしても、それだけでは不十分である。なぜならば、災害のタイプは自治体によって異なるからである。例えば、日本には 111 を数える活火山が存在するが、火山を抱えた自治体では、火山噴火に特化したレジリエンスが必要となる。同様に、一級河川を有する自治体では、水害に特化したレジリエンスが必要となる。すなわち、その地域ごとに、その地域特有の災害に適合したレジリエンス力を検討していく必要がある。例えば、公助で考えた場合、その地域の災害の種類と自治体の危機管理体制とが適合しているかも検討する必要がある。

第 2 章 大規模災害と住民の避難行動

過去 30 年ほどの災害における避難率をみると、火山噴火災害を除き、津波災害、水害、土砂災害などにおいて人々はなかなか避難しないことが指摘されている。例えば、昭和 57 年の浦河沖地震による津波災害での避難率は 1.1%，同じく昭和 57 年の長崎水害では 13.1%，平成 9 年の出水市の土石流では 8.4% など、極めて避難率が低い傾向が認められる。津波災害に関しては津波常襲地域でさえ、平成 15 年の宮城県沖地震における住民の避難率は 1.7% であったとの調査結果も報告されている。これまでの先行研究において、このような避難しない住民の姿は、「正常化の偏見」、「経験の逆機能」、「オオカミ少年効果」と呼ばれる概念で説明されている。本章では、これらの事象を順に整理することによって非避難行動に共通する人間像を抽出した。



(a) ケース 1

(b) ケース 2

図 18 葉山町の避難シミュレーション

次に、人間がどのような過程を経て避難行動（あるいは非避難行動）に至るのか、その心理的メカニズムの検討を試みた。特に、人間自体を分類するのではなく、一定の人間モデルを仮定して分析を行う点が特徴である。また、単に要因を列挙するにとどまらず、それらの要因が影響を及ぼすダイナミックな過程を考察した。このような人間のリスク評価を踏まえながら、自治体と連携した取り組みについて紹介した。具体的には、津波災害時における海水浴客の避難シミュレーションを検討した神奈川県三浦郡葉山町における「津波避難シミュレーション」と、2014年に噴火した御嶽山を抱える自治体（木曾町と王滝村）のその後の取り組みである。

葉山町の事例では、大きな賑わいをみせる夏季に南海トラフ巨大地震が起これば、津波が襲来することを想定した。この場合、自治体は葉山町の地理に不案内な観光客や海水浴客約1,800人を高台まで避難させねばならない。このとき、災害時において人間にはさまざまな心理的バイアスが生じる。周囲の人が避難しなければ「たぶん逃げなくても大丈夫だろう」「危ないのなら皆きっと逃げ始めるだろう」「皆が逃げているのに自分だけ逃げるのは恥ずかしい」といった、いわゆる「集合的無知」や「同調バイアス」といった心理が作用するために、避難行動が促進されずに、かえって抑制されてしまうことがある。しかし逆に、周囲が逃げ始めている場合、「他者の反応の仕方についての知覚」が「準拠情報」となり、避難が促進される。そこで、図18に示すさまざまな条件を設けて避難シミュレーションを行った。

さらに、本研究の実施者が参加した、木曾町役場の職員、王滝村役場の職員、名古屋大学御嶽山火山研究施設の職員、そして「御嶽山火山マイスター」と呼ばれる方々との意見交換会の内容を紹介した。

第3章 大規模災害時の危機管理の問題点と課題

本章では、災害発災時における対処の中心的な役割を果たす「自治体」とその構造について注目した。特に、地方公共団体の危機管理体制について、特に組織構造の観点から実態把握を行った。

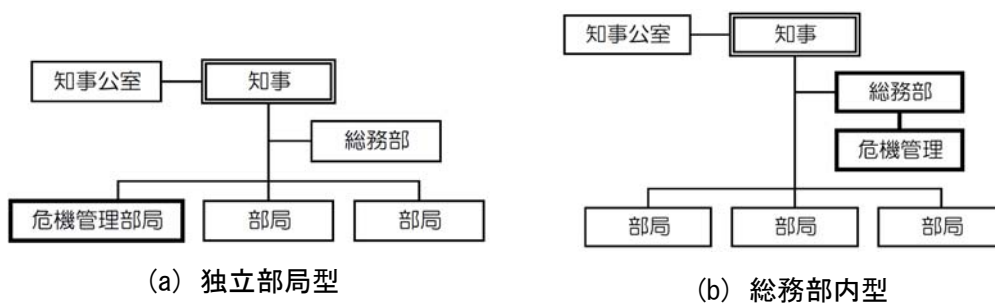


図 19 都道府県の危機管理部局の位置づけの例

本研究では、公開データに基づいて各都道府県の危機管理体制の調査・分析を行った。まず、職員録を用いて、各都道府県における「危機管理」や「防災」を担当する部署が組織図上のどの位置に設置されているかを調べ、それらを集計するとともに類型化した。次に、「地方自治体定員管理データ」を用いて、各都道府県の行政組織の中で「危機管理」や「防災」を担当する職員の数と、類型化した危機管理体制との間の関連性を分析した。図 19 は都道府県の危機管理部局のタイプの例を示している。分析の結果、知事が災害対処という意味決定の場面において、「初動」・「調整」・「実動」のいずれに重点を置くかによって、大きく 4 つのタイプ（「知事公室型」、「独立部局型」、「総務部内型」、「他部局内型」）に区分されることがわかった。また、職員数の分析に基づいて、各タイプの人的資源の割合を考察した。

次に、神奈川県内の市町村が作成した地域防災計画の特徴を考察した。神奈川県の特徴として、大規模な政令指定都市もある一方で、中核市や小規模な自治体もある。さらには、清川村といった小規模の自治体も含んでいる点が挙げられる。また、海に面する自治体もある一方で、県央地域や県西地域のように海をもたない山間部の自治体もあるため、津波や土砂災害など、多様な災害を考察することができる。災害の観点からは、火山を有する自治体もあると同時に、富士山が噴火した際には火山灰の大きな影響を受ける地域でもある。「人口密度」、「防災担当職員の数」、「地域防災計画の項目数」の階層的な媒介関係の分析（階層的重回帰分析）を行った結果、当該都市の人口や世帯、あるいは人口密度が増加するにつれて、市町村の職員数や防災担当職員の数が増えることがわかった。また、その結果、地域防災計画がより細部にまでわたって検討され、項目数が増えることがわかった。

また、前述した 4 つの危機管理体制のタイプを従属変数とした多項ロジスティック回帰分析を行った。その結果、防災職員数、市町村職員数、人口、人口密度、地域防災計画の項目数のいずれの変数も有意ではなく、危機管理体制のタイプを決定づける要因とはなっていないことがわかった。さらに、地域防災計画は当該自治体の人口や人口密度が高くなるにつれ防災担当職員も増えるため幅広い対処計画が策定される（項目数が増える）こと、危機管理体制は地域ブロックごとに近隣の自治体と類似する傾向があることを明らかにした。さらに、本章で分析した結果を統合的に整理し、表 1 および図 20 に示すような、各災害対処体制の特徴や長短所をレーダーチャートの形で整理した。今後、大規模災害の特徴と自治

表 1 災害対処体制の特徴

	知事直轄型	独立部局型	総務部内型	他部局内型
人員規模	低	高	低	低
即応力	高	高	中	中
調整力	高	中	高	中
局所・漸近型	中	中	高	中
局所・突発型	高	中	中	低
広域・漸近型	中	高	高	低
広域・突発型	高	高	中	低

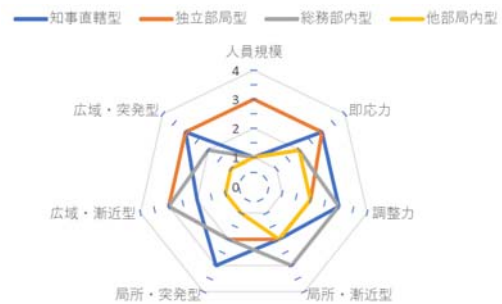


図 20 災害対処体制の比較

体の組織を詳細に分析することで、各自治体の特徴に応じた組織作りが可能になると考えられる。

第 4 章 災害対処の運用研究

本章では、大規模災害が発災した際の資源配分、資源配分過程の効率化、意思決定の構造化および被災地における医療トリアージに対して、オペレーションズ・リサーチ技術の適用を検討した。

災害時に代替経路が確保される道路ネットワークを実現するため、改良候補を探す問題に関する研究事例を紹介した。例えば、需要点のあるネットワーク上で最低限確保できる需要量を見積もるという観点から、損害が最大となる検討例および複数ある施設のうちのいくつかを選択して被害の最大値が最小となるよう補強を行うという検討例である。また、復旧に必要な予算や住民の合意に関する最適化問題についても触れ、自治体と住民が全体的なパッケージとなることの重要性を指摘した。また、自衛隊の実施する災害派遣などにおいては、自衛隊は配備されている部隊のもつ装備や地理的条件を勘案して、要請への対応を決定することになる。このような自治体からの要請とそれに対処する部隊の決定は、オペレーションズ・リサーチの分野で扱われる資源配分問題や最適マッチングとして扱うことができることを紹介した。

そのうえで、保有する資源には限りがあり、必ずしも全ての要請に対応できるわけではないため、場合によっては要請内容に対するトリアージが必要となることを指摘した。トリアージとは、災害や大事故などにより同時に多数の傷病者が発生した際、対象者の重症度・緊急度に基づいて治療の優先度を決定し、選別を行うことである。その目的は、有限の医療資源を効率的に活用し、救命の効果を高めることにある。例えば、骨折などといった傷病は治療が必要ではあるが、すぐさまに行わなければ生命の危険があるというわけではない。一方で、直ちに処置を行っても明らかに救命が不可能と判断されるものも存在する。このような対象に対して医療資源を投入し、時間を費やすことなく緊急性の高い傷病者を優先することで、総体として医療資源を有効に活用することを目指すのである。災害におけるトリアージの基準をあらかじめ設定しておくことで、こうした意思決定者による決定を円滑に行う

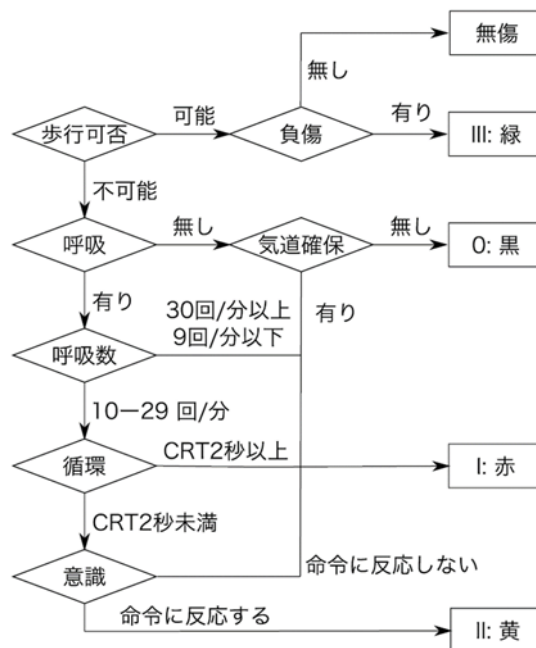


図 21 START 式トリアージのフローチャート

ことができることを紹介した。災害派遣は「要請による派遣」が主であり，自治体の首長による要請を待つことになる。このとき，首長の意思決定が遅れると，その分だけ派遣の実施が遅れることとなり，効果が減少する。また，時々刻々と変化していく状況に応じて，どのタイミングで避難等の情報を提供するかは意思決定者を悩ませる。このような問題に対してもオペレーションズ・リサーチでは「最適停止問題」として科学的に取り扱うことができることを紹介した。

前述したように，災害時や救急医療においては限られた医療資源を有効に活用することを目的として，トリアージが導入されている。そこで，災害医療・救急医療におけるトリアージを災害派遣時の派遣決定へ応用した。救急医療におけるトリアージの方式にはいくつかの種類が存在する。我が国の災害医療の現場では 図 21 に示す START (Simple Triage And Rapid Treatment) 式が取り入れられている。ここでは，あらたにフローチャート型のアルゴリズムおよびその改良アルゴリズムを提案し，その有効性について示した。提案したアルゴリズムは計算機等が利用できない状況下での運用を想定しているため，最終的にはヒトによる実験は不可欠である。しかし，効率よくアルゴリズムを評価・設計するための原理・原則を探ることで速度・精度に優れたトリアージ・アルゴリズムを作ることが可能となる。

おわりに

本研究は、防衛大学校の中で災害レジリエンスの研究に携わっている教官が集まり、「大規模自然災害時における社会レジリエンス評価法と危機管理の高度化」について研究を行ったものである。災害レジリエンスについては、国内外において、すでに多くの研究が行われているが、大きなテーマであるため自治体レベルに社会実装するには検討すべき課題が多いのが現状である。本研究では、まず、近年大規模化している災害の特徴を整理したうえで、リスク管理、危機管理と災害レジリエンスの関係を概説した。次に、大きく3つの内容に分類して検討を行った。まず、「各種大規模災害におけるリスク評価」について検討を行った。すなわち、災害の中で地震、火山、竜巻飛来物、土石流、爆発を対象として、発災時のリスク評価あるいはハード的な補強対策について検討を行った。次に、「隔測情報収集とその利活用」について検討を行った。さらに、「災害レジリエンスと危機管理の高度化」について検討を行った。

本研究で得られた成果は、各災害に対するリスク評価や防災構造物の補強方法など具体的な提案を含んでおり、防災レジリエンスの向上に対して直接的に反映できるものが多い。例えば、大地震や火山噴火を想定したリスク評価では、余震を考慮した建物群の地震リスク評価や地震時の建物倒壊による道路閉塞が津波避難に及ぼす影響など、想定されるシナリオに基づいて発災時に起こりうるリスクや対策の効果を定量的に評価可能である。火山噴火に対しては、富士山や大分県鶴見岳が噴火した際の具体的なリスクに関する検討例を紹介した。また、火山噴石に対して山小屋を効果的に防護する方法を提案した。竜巻飛来物に対しても、鉄筋コンクリート版や鋼板によるシェルター設計について提案を行うとともに、損傷や破壊のリスク評価法を提案した。近年頻発している土石流に対しては、土石流荷重の評価や土石流に対する防災構造物の破壊メカニズムを検討した。さらに、爆発災害についても、外力の評価方法や爆発を受ける構造物のリスク評価法を提案した。大規模な災害が発生した場合には、まず、人命の救助および交通網や避難施設を確保することが不可欠であるため、これらの研究成果は非常に有効であると考えられる。隔測情報技術の活用では、被災時を想定したリアリティのあるシミュレーションや被害の詳細な把握を行う方法を提案した。また、発災時における運用分析として、資源配分過程の効率化や速度・精度に優れたトリアージ・アルゴリズムを提案した。これらの要素技術は、リスク管理において検討しておくべき避難経路の設定および危機管理における被害把握や被災地での効率的な災害復旧活動の中で活用できる。これらに加えて、日本の自治体がそれぞれ有する防災組織を分析するとともに、自治体のレジリエンスを比較する手法を提案した。本研究で行った災害レジリエンスに関する技術の高度化は非常に多くの検討内容を含んでいるが、本研究で実施した上記の研究成果を融合することで、自治体の災害レジリエンスを効果的に評価し、地域防災計画の高度化へ資することができると考えている。

本研究に関して、以下の課題が残っている。まず、本研究で検討した要素技術の社会実装

である。各自治体は、それぞれの災害対処体制（災害派遣の対応）を有しているが、各自治体が対象としている災害はさまざまであり、具体的なハード・ソフト対策が十分に検討されているとは言えない。本研究で提案した各技術が自治体の災害対策の中で十分に活用されるためには、自治体の防災担当者との議論を行い、実務的な観点から実装のための課題を抽出する必要がある。次に、災害レジリエンスを評価するための項目について、長期にわたって事例や災害分析を行う必要がある。大規模な災害が発生した場合において、防災担当者は現地における運用（オペレーション）によって、各種の不測事態に対応することが多い。一方で、現場における不測事態を局限することが、災害レジリエンスを向上させることにつながると考えられる。過去に想定外であった事象を想定内として考慮するためには、長期にわたって、自治体の災害レジリエンスを評価するとともに、実際の被災時における対応や事前の対策による効果に関してデータを収集・分析し、事後評価を行うシステムの確立が求められる。

本研究の内容は未だに多くの課題を残しているが、我が国の災害レジリエンス向上の一助となれば幸いである。最後に、本研究に多大なるご配慮をいただいた防衛大学校グローバルセキュリティセンターの関係各位にお礼申し上げます。