

災害レジリエンスとオペレーションズ・リサーチ

鶴飼 孝盛, 坂口 有輝, 岩切 宗利

多くの研究や経験の積み重ねにより、さまざまな災害に対する対策の高性能化、高度化を達成する技術や研究成果が産み出されている。こうした技術を実際の社会へ実装し活用するためには、それらをどのように運用するかについての検討が求められる。また、災害に対してレジリエンスな社会では、事前の対策とともに、事後の速やかな復旧・復興が求められる。本稿では、OR 的な発想やソフトウェア的な方策によって、ハードウェア的な技術を効果的・効率的に運用して、災害の被害の軽減やレジリエンスの達成のために貢献できるであろうことを書き並べるとともに、簡単な取り組みの一例を紹介する。

キーワード：資源配分, 事前対策, 発災時の意思決定, トリアージ

1. はじめに

本特集では、さまざまな災害に対する対策の高性能化、高度化を達成するための要素技術や研究が紹介されている。そこで取り扱われるモデルそのものや考え方は、多くの科学技術に共通のもので、オペレーションズ・リサーチ（以下、OR）を専門にしていようと、はたまたそうでなかろうとお読みいただけたのではないだろうか。

翻って、これらの技術を実際の社会で活用していくためには、越えねばならないハードルがいくつか存在する。それらには法律的なものもあれば、費用的・資金的なもの、社会的なものといった具合にさまざまなものがある。いずれにせよ、そうした問題点を克服し、現実社会での活用に結びつけるには、それらをどのように運用するかについての研究が必要となる。多くの方がご存知のように、技術面の研究から運用面の研究へと移行したのが、OR のはじまりとされている。本稿では、身の程も弁えず、本特集で紹介したような災害の被害を軽減するハードウェア的な技術を基にして、OR 的な発想と技術で取り組むべきこと、解決できそうなことを書き連ねていく。

2. レジリエンスな社会を実現するための資源配分

災害はいつ発生するかを予測することは困難であるがいつかは必ず発生する。そして、ひとたび発生すれば、広範囲にわたって甚大な被害を及ぼすこととなる。さまざまな方策によってその被害を軽減することはでき

きるものの、どのような力に対しても必ず耐えることのできる強化策は存在しない。また、想定しうる力に耐えうるものを構成することが、ハードウェア的に可能であったとしても、費用面から考えると現実的ではないことも多々生じうる。災害の発生頻度は、その破壊力の大きさに伴って減少すると考えられ、破壊力と発生頻度、そしてそれに耐えうる方策に要する費用を勘案して決定しなくてはならない。

選択肢となる方策には、構造強化や改修といった事前的な予防策だけではなく、被害発生を前提とした事後的な復旧策もあるということは一考に値するだろう。たとえば流れ橋は、一定の水準を超えた場合には基盤部分を残して流失することで、手間を抑えた短期間での復旧を可能にしている。構築に手間や費用のかかる部分は頑強にしておき、交換や補修などで再構築を迅速に進められるよう体制を整えることで強靱化し、元に戻ることでできるレジリエンスを獲得することを目指す。

地域内に数多ある対象のうち、どれをどの程度強化するのか。どれを速やかな復旧が可能なものにするのか。そして、どれを強化や補修の対象とせずにおくのか。こうした意思決定のための資料を OR は提供できよう。たとえば、山崎ら [1] は災害時の代替経路が確保された道路ネットワーク実現のための、改良候補を探すための問題を分析している。Church et al. [2] は需要点のあるネットワーク上で、供給量を確保する観点から損害が最大となる問題を考えている。また、Scaparra and Church [3] は、複数ある施設のうちいくつかを、被害の最大値が最小となるよう補強するという問題を取り扱っている。こうしたモデルを発展させ、あるいは組み合わせることで、利用不可能となることがあってもその損失を一定程度に抑えたいうえで、速や

うかい たかもり, さかぐち ゆうき, いわきり むねとし
防衛大学校情報工学科
〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

かに復旧できる態勢の構築を目指すことができる。

さて、上記のレジリエンスの実現には自治体などの行政が単体で行うだけではなく、住民の合意や選択も影響する。自治体が主体となって対策を施すことができるのは、自治体が管理するもののみで、住民の保有する資産については直接にはその対象とならない。しかし、助成や補助といった仕組みを通じて、間接的に住民の行動を促すことは可能である。具体的には、耐震化や不燃化・難燃化への補助といった事前的な方策や、保険や生活再建支援などの事後的な対応策が挙げられる。種々の選択肢のうち、どれを採用するかは個々の住民の判断に委ねられるが、自治体としては住民の選択を前提として施策を決定しなくてはならない。したがって、そこでは目的をやや異にする二つのプレイヤーによる、2 目的の最適化による政策の分析が必要となる。たとえば廣井ら [4] は、耐震補強工事に対する助成額の決定を、行政の期待総支出の最小化問題として解いている。そのうえで、被害量と行政による支出との 2 目的最適化問題としてパレート解を求めるなどの提案を行っている。

3. 発災時の資源配分

さて、事前にどのような対策を施したとしても、災害発生時に被害を完全に防ぐことは適わない。一度災害が発生すると、住民などは消防などによる公助を受けることになるが、こうした行政サービスは平常時の危機に対応するよう設計されている。発生する被害がその対応能力の範疇に収まれば問題ないが、それを超過する場合には近隣自治体や広域自治体からの支援を受けることになる。被災自治体自身の消防・防災が自助であるのに対して、こうした自治体間の支援-受援の関係は、住民同士の助け合いである共助に位置づけることができよう。

少なくない数の大規模災害を経験してきたわが国においては、こうした自治体間の共助を支える枠組みが次第に整えられてきており、災害時相互応援協定が多くの自治体間で締結されている。ただし、想定される災害の種類や規模が多岐にわたるため、こうした応援協定の多くは具体的な支援・受援計画を事前に立てるまでに至っておらず、発災後にアドホックに対応するものと考えられる。また、必要とする支援量に相当するだけの支援を提供可能であるか、協定を結んだ双方の自治体が同時に被災する可能性が十分に考慮されているかどうかといった点も考える必要がある。

さらに、自助、共助を超えてより大きな枠組みでの

公助として、国からの支援がある。国の行う支援には緊急災害対策派遣隊 (TEC-FORCE, 国土交通省 [5]) や緊急援助消防隊 (消防庁 [6])、災害派遣医療チーム (DMAT)[7] などがあり、これまでも機能してきている。これらの支援で派遣されるのは、非被災地での専門的業務の従事者であり、動員可能な数には限りがあることは明らかで、またその支援はそれぞれの分野に限られる。こうした中で、自衛隊による災害派遣 [8] が、動員可能な規模、支援可能な分野の双方において有効に機能する機会は少なからず存在する。

自衛隊の実施する災害派遣などには、災害派遣、地震防災派遣、原子力災害派遣があり、後 2 者は災害発生以前の警戒宣言、原子力緊急事態宣言の宣言下で実施される。災害派遣はさらに「要請による派遣」「自主派遣」「近傍派遣」の 3 種に分けられる。「要請による派遣」では、都道府県知事や海上保安庁長官などからの要請を受けて防衛大臣などが部隊を派遣する。「自主派遣」は、こうした都道府県知事などからの要請を待つ余裕がないと考えられる場合に行われるものである。最後に「近傍派遣」は、駐屯地などの近傍において災害が発生した際に、部隊の長によって行われる。

要請に基づく派遣の場合、その公共性、緊急性、非代替性に基づいて是非が決定される。要請に際しては、災害の状況や要請の自由、派遣を希望する期間、区域や活動内容といったものが必要になる。そして、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。こうした自治体からの要請とそれに対処する部隊の決定は、資源配分問題や最適マッチングとして扱うことができよう。

さて、こうした資源配分の決定は要請が生じてから行われることになる。しかし、要請が到着してから問題で必要となるデータを集めて入力していたのでは、対応の決定までに時間がかかりすぎてしまう。したがって事前に準備可能なデータは利用可能な形式で収集しておき、要請の到来ののち即座に計算を実施する体制を整える必要がある。また、入力データの中には提供可能な資源だけでなく、それを割り当てた際の成果といったものも存在する。同じだけの資源を投入しても、投入される地区の違いによりその成果は異なると考えられる。事前に自治体との間で認識を共有し、投入資源に対する成果について定量的な評価がなされてなければならない。

ところで、いかに計算機の能力を活用するからといって、必ずしも短時間に満足のいく配分が求められるというわけにはいかないことがあることは周知であろう。

投入する資源や割り当てるべき活動が増えれば、計算が煩雑となり即座によい配分を求められない可能性は高くなる。そこで、計算に時間をかけることのできる事前のうちに、災害の発生を想定し、それに対する配分を求めておくことで、この問題に対する一定の解決策を与えることができるはずである。災害が発生した際に、どこで、どのような種類の、どの程度の規模の被害が発生するかは千差万別である。災害の種類と被害規模について、それぞれ複数通りを想定してそれらに対する資源配分を準備しておくことで、実際の被害状況から最も近いものを足がかりとして短時間のうちに適した資源配分を求めることが可能となる。

このような態勢を整えている例として、災害の発生時ではないが、ドクターヘリにおける飛行計画の準備が挙げられる。ヘリコプターを用いて、医師などの医療従事者が搭乗して、傷病者との早期の接触を実現するドクターヘリでは、要請の発生する時刻や場所は事前にはわからない。しかし、ヘリコプターを含む航空機は、飛行前に飛行計画（フライトプラン）の提出が義務づけられている。そのため、あらかじめいくつかのフライトプランを準備しておき、要請の受諾時にはその中から適切なものを選択して提出することで、遅滞なく出発することを可能としている。

4. 意思決定過程の効率化と標準化

派遣の要請・実施時には、完全な情報を得ることは望むべくもなく、近いカテゴリー／資源配分計画に沿ったものを選択するだけで構わないと考えられる。発災時においては初動が特に重要であり、また前述のように災害派遣は緊急性を要件として含んでいる。このことに鑑みれば、最適性にこだわるよりむしろ、必要量を上回る程度の派遣を遅滞なく実施することに重きをおくべきと考えられる。

ところで、自衛隊のもつ資源は一般の自治体や警察・消防などと比べればはるかに多種多様な内容に対処することができ、動員可能な規模も大きい。しかし、その保有する資源には限りがあり、必ずしもすべての要請に対応できるわけではない。そのため、場合によっては要請内容に対する取捨選択が必要となる。すなわち、どの要請に対応し、どの要請には対応しないかという意思決定が強いられるのである。

この意思決定は、時間的にも情報的にも限られた状況下で行わざるを得ない。また、結果として誤った決定を下す恐れもある。そのため意思決定者に相当な精神的負荷がかかることは想像に難くないだろう。こう

したときに、一定程度の判断基準・判断フローが存在すれば、属人的な要素による判断のばらつきを減らすことができる。また、それがオーソライズされていれば、それに沿った判断をした場合には、意思決定者が個人的に責を負わされるということはない。

さて、要請の取捨選択を行うということは、各要請への対応に優先順位をつけるということである。短時間のうちに、限られた情報から優先順位をつけて、全体の効率性を高めるという仕組みとして、医療におけるトリアージがある。このトリアージとは、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、選別を行うことをいう [9]。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。たとえば、骨折などといった傷病は、治療が必要だが、すぐさま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、直ちに処置を開始しても、明らかに救命が不可能と判断されるような状態の対象も存在する。こうした多種多様な対象に対して、その場で提供可能な医療資源を勘案したうえで、総体としてより効果が大きくなることを企図するのである。

このトリアージの考え方を、災害派遣要請への対応の意思決定へ適用する。すなわち、要請のある地域からの情報を基に、それらの地域への派遣の必要性をカテゴライズする方法について考察する。

4.1 災害医療でのトリアージ

多数の傷病者が発生するような状況において、医療などの資源を効率的に運用するためのトリアージの方式は数多く提案されている [10]。我が国の災害医療の現場では START (Simple Triage And Rapid Treatment) 式 [9] が取り入れられている。これらは単に傷病者の状況判断を行う際のフローを定めるだけでなく、その判断結果を表示するタグの形式や仕様などについても定めている。以下では、おもに状況判断に焦点をあて、対象を選別・優先順位づけすることをトリアージすると書き、そのためのフローをトリアージ・アルゴリズムと記す。

さて、多くの方式では傷病者は 0 から III の 4 段階（負傷なしを入れれば 5 段階）に分類される。そして、判断結果を素早く認識・共有できるよう各段階には色が対応づけられている。重症度が最も高いものがカテゴリー 0 で黒色、以下 I：赤色、II：黄色と続き、最も低いものが III：緑色であり、黒は直ちに処置を行っても明らかに救命が不可能なものとされている。

START 式では「歩行可否」「呼吸状態」「脈」「意識

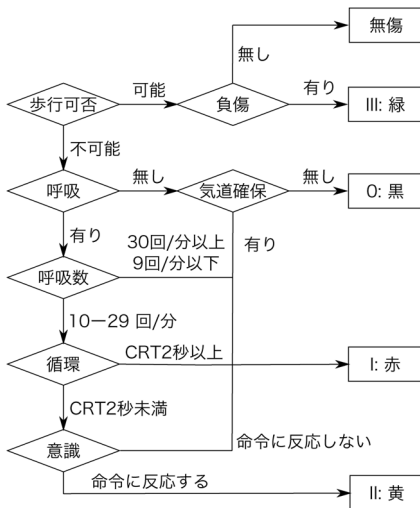


図1 START式のトリアージ・アルゴリズム

状態」の四つの観点で評価がなされる(図1)。まず、歩行の可否により低優先度の傷病者：緑を峻別し、次に呼吸状態・気道確保から黒を分ける。その後、脈、意識状態などから黄か赤をふるい分ける。このように、優先度が最高・最低のものを早期に確定させることで、トリアージにかかる時間の節約を達成しようとする。

ところで、トリアージは、限られた情報から判断を行うことから、本来の緊急度より低く見積もってしまうアンダートリアージや、その反対に高く見積もってしまうオーバートリアージが発生することは避けられない。START式では簡便ではあるがトリアージ精度という点からは完全とはいえない。こうした欠点を改善するためのものとして、Smart式が提案され[11]、ロンドン同時爆破事件(2005年7月7日)やフィラデルフィアでのアムトラック脱線事故(2015年5月12日)で用いられている。仮想シミュレータでの比較実験[12]では、トリアージに要する平均時間は、アメリカでよく用いられるSALT式で21分3秒であったものが、Smart式では11分59秒であった。また、トリアージ精度についてもSALT式では70.0%であったのに対し、Smart式では93.0%と向上が見られた。

4.2 被災地域トリアージ・アルゴリズムの試み

災害医療におけるトリアージを参考に、多数の派遣要請が到来した際の被災地域トリアージ・アルゴリズムを試作する。被災地域の評価には、熊本地震、東日本大震災、阪神・淡路大震災および関東大震災の被害分析を行い、どのような要素が致命的な被害と関連するかを調査した[13-16]。その結果、「家屋倒壊」「津波」「発電所の異常」「避難施設状況」といった要素が

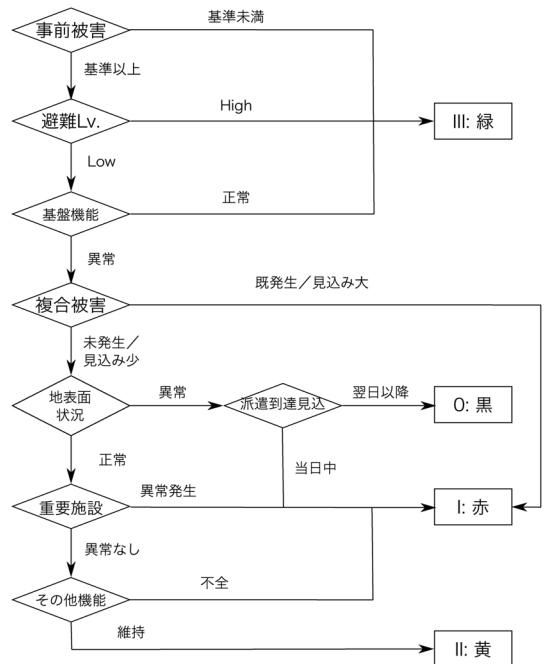


図2 試作したフローチャート

致命的な被害を与えることがわかった。

被災地域トリアージ・アルゴリズムは、医療におけるアルゴリズムに倣い、黒(0)、赤(I)、黄(II)、緑(III)の四つに分ける。具体的なアルゴリズムとして3種類を考え、実施に要する時間と精度の二つの観点について比較を試みる。

一つ目のアルゴリズムは、START式などと同様に、各項目について一定の閾値や条件を与え、それを満たすか否かという二分法的なものであり、以下ではフローチャート型と呼ぶ。図2は、試作したフローチャートの一例である。こうしたアルゴリズムは、判断が素早くできる一方、最終的なトリアージ精度が悪くなることが予想される。そこで、二つ目として、評点型のアルゴリズムを考える。すなわち、各評価項目について被害程度の基準を設けてカテゴリー分けし、評点を定め、それを合計した値と閾値を比較することでトリアージを行うものである。表1は、このアルゴリズムで用いた評価項目およびその評価内容と与えた評価点の範囲を示す。この評点型は、情報量が増えるだけにトリアージ精度の向上が期待できる。一方で、すべての評価項目について評点が必要となることから、時間がかかることが予想される。そこで、第一段階でフローチャート型の判断を行い、優先度の低いものについては振り分けたのち、第二段階の評点型へと移行する複合型についても検討する。

表 1 評点型・複合型で用いる評価項目と評価点の範囲の概要

評価項目	評価内容	評価点範囲
倒壊規模	全体に対する全壊・大規模半壊・半壊の割合	5-15
重要施設状況	発電所の種類と異常の有無	0-15
道路状況	交通結節点・構造物の被害程度	0-15
複合被害	予想される複合被害の規模と見込みの程度	0-15
事前被害	本震の前に発生した災害規模	0-10
基盤機能	各種ライフラインの障害程度	0-10
派遣到達見込	到達までに見込まれる時間	1-5

各アルゴリズムの方式について、試作と実験を行い、トライアージに要した時間と精度から、フローチャートや点数について適宜修正を繰り返し、最終的な仕様を決定した。実験にあたっては、熊本地震において被害の大きかった益城町と南阿蘇村を対象とした [14, 17, 18].

4.3 実験結果と考察

作成した3種類のアルゴリズムを前述の2町村に、比較的被害の小さかった上天草市 [19] と荒尾市 [20] を加えた4市町村を対象として適用し、トライアージにかかる時間を計測した。実験は、防衛大学の4学年の学生1名が行った。評価に要した時間は4市町村合計で、フローチャート型が3分11秒、評点型が8分50秒、複合型が6分51秒であった。また、トライアージ結果については、いずれのアルゴリズムを用いた場合でも、事前に設定したものと同様の結果が得られた。

現時点では試み段階であり、統計的な検討などは到底できようもないところであるが、事前の予想（設計）どおりの実験結果を得ることができた。事前の試作における過程からは、いずれのアルゴリズムであっても、項目の評価の順番を変更することがトライアージの所要時間に影響を与えることも判明した。また、フローチャート型・複合型においては、評価の順番がトライアージ精度にも影響を及ぼした。計算機など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ものの、効率よくアルゴリズムを評価・設計するための原理・原則のようなものを探ることが望まれる。

具体的には、フローチャート型であれば、評価項目での分岐に要する時間を計測し、これを積み上げることでフローに従ってトライアージ結果を得るまでの時間を推定する。そのうえで、適当な分布を仮定した入力例に対して、トライアージ所要時間の期待値や分散を算出できよう。また、項目の閾値や評点を適切に設定することで、トライアージの精度を向上させることもできよう。AHP/ANPなどの評価に関するOR手法や既存の統計的手法を用いることで、適切な閾値、係数を

定めることが可能と考える。

この節の最後に、こうしたトライアージ・アルゴリズムを事前に策定することの副次的な効果として、情報収集の効率化がなされることを指摘しておく。トライアージを実施するためには、定められた項目についての情報を欠かすことができない。そもそも、災害発生時には被害状況を把握するところから始めなければならない、そのために周辺地域の状況を調べるためのコストがかかる。もちろん調査にあたっては、可能な限りの情報を収集する訳だが、その中でも評価項目にあるものについては優先的に観察することとなる。いわば、収集する情報の価値を定めることができ、価値の高い情報を優先して収集することで、調査の効率化が達成されることになる。

5. おわりに

本稿では、災害レジリエンスや災害対処の方策・意思決定を高度化するために、OR的な手法の適用について思いつくままに書き並べてみた。筆者の頭が固く、OR誌の読者諸氏には当たり前としか思えないことばかりで、面白みに欠けるものとなってしまったかとも思う。一方で、こうした当たり前の問題がまだまだ世の中のそこかしこに存在しており、それを一つずつ解決していく必要があるのではないかと思う。

ご存知のとおり自然災害の頻発するわが国においては、その被害を低減し、復旧・復興を速やかに達成する仕組みづくりが求められている。この問題にORの技術や考え方が少なからず貢献することを願ってやまない。

参考文献

- [1] 山崎諭, 小市俊悟, 鈴木敦夫, “災害時の代替経路の確保を考慮した道路ネットワークの構築法,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, **56**, pp. 31-52, 2013.
- [2] R. L. Church, M. P. Scaparra and R. S. Middleton, “Identifying critical infrastructure: The median and covering facility interdiction problems,” *Annals of the*

- Association of American Geographers*, **94**, pp. 491–502, 2004.
- [3] M. P. Scaparra and R. L. Church, “A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning,” *Computers and Operations Research*, **35**, pp. 1905–1923, 2008.
- [4] 廣井悠, 小出治, 加藤孝明, “耐震補強工事に対する助成額検討手法の提案と簡易補強工事への応用,” 日本建築学会計画系論文集, **74**, pp.1569–1576, 2009.
- [5] 国土交通省, 「TEC-FORCE (緊急災害対策派遣隊)」, <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/pch-tec/index.html> (2021年6月10日閲覧)
- [6] 総務省消防庁, 「緊急消防援助隊」, <https://www.fdma.go.jp/mission/prepare/rescue/rescue003.html> (2021年6月10日閲覧)
- [7] 厚生労働省 DMAT 事務局, 「DMAT とは」, <http://www.dmat.jp/dmat/dmat.html> (2021年6月10日閲覧)
- [8] 防衛省・自衛隊, 「災害派遣について」, <https://www.mod.go.jp/j/approach/defense/saigai/> (2021年6月10日閲覧)
- [9] 山崎達枝, 『災害現場でのトリアージと応急処置』, 日本看護協会出版会, 2016.
- [10] E. Brooke Lerner, D. C. Cone, E. S. Weinstein, R. B. Schwartz, P. L. Coule, M. Cronin, I. S. Wedmore, E. M. Bulger, D. A. Mulligan, R. E. Swinton, S. M. Sasser, U. A. Shah, L. J. Weireter Jr, T. L. Sanddal, J. Lairet, D. Markenson, L. Romig, G. Lord, J. Salomone, R. O'Connor and R. C. Hunt, “Mass casualty triage: An evaluation of the science and refinement of a national guideline,” *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, **5**, pp. 129–137, 2011.
- [11] EMS World, Smart triage, world leader in MCI response, <https://www.emsworld.com/article/12089392/smart-triage-world-leader-in-mci-response> (2021年6月10日閲覧)
- [12] D. C. Cone, J. Serra and L. Kurland, “Comparison of the SALT and smart triage systems using a virtual reality simulator with paramedic students,” *European Journal of Emergency Medicine*, **18**, pp. 314–321, 2011.
- [13] 内閣府, 「1923 関東大震災報告書—第 1 編—」, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1923_kanto_daishinsai/index.html (2021年6月10日閲覧)
- [14] 消防庁応急対策室, 「熊本県熊本地方を震源とする地震 (第 121 報)」, <https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/kumamoto.pdf> (2021年6月10日閲覧)
- [15] 内閣府, 「阪神・淡路大震災教訓情報資料集【02】人的被害」, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/detail/1-1-2.html (2021年6月10日閲覧)
- [16] 内閣府, 「東日本大震災の概要」, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/suishinkaigi/1/pdf/sub5.pdf> (2021年6月10日閲覧)
- [17] 益城町, 「平成 28 年熊本地震 益城町震災記録誌」, https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji0033823/3_3823_5427_up_jihuen7n.pdf (2021年6月10日閲覧)
- [18] 南阿蘇村, 平成 28 年熊本地震 南阿蘇村災害記録誌, 2017.
- [19] 上天草市, 「平成 28 年熊本地震における上天草市の状況」, https://www.city.kamiamakusa.kumamoto.jp/dl?q=13722_filelib_5ffe08f32ffb4275854e686cc4932e0.pdf (2021年6月10日閲覧)
- [20] 内閣府, 「2016 年 (平成 28 年) 熊本地震」, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/saigaitaiou/output_html_1/pdf/201601.pdf (2021年6月10日閲覧)