

レジリエンスの定量評価に関する研究開発

STUDY ON QUANTITATIVE EVALUATION OF RESILIENCE

森田 格*・中野 雅章*・杉本 泰亮**・師 自海***

Itaru MORITA, Masaaki NAKANO, Yasuaki SUGIMOTO and Zihai SHI

Japan has experienced large-scale natural disasters in recent years, and municipalities have listed natural disaster countermeasures in their comprehensive plans, etc., and it is necessary to steadily implement PDCA. If resilience can be evaluated quantitatively, it can be used for planning, business evaluation, etc., and useful information can be provided for the realization of the future image of the plan. In this paper, we define quantitative evaluation of resilience and introduce examples of application to the sewerage field and urban field.

Keywords : resilience, sewer, city evaluation, quality of life, natural disaster

1. はじめに

災害大国と呼ばれる我が国において、真に持続可能な社会の実現を目指すべく、レジリエンスの概念が注目されている。レジリエンスは 1973 年に Holling により、生態系システムの研究から発見した自然現象に基づく理論である。自然界のレジリエンスは社会生態システムに何らかのショックが与えられた際、それを吸収して元の機能や構造を維持する能力と定義されたが¹⁾、社会インフラ整備においては、主に災害リスク軽減を意識して“リスクが顕在化し社会システムや事業の全部あるいは一部の機能が停止しても、全体として機能を速やかに回復できるしなやかな強靱さ”として理解されることが多い。国連の 2015 年発効の仙台防災枠組と 2016 年発効の持続可能な開発目標 (SDGs) には、レジリエンス向上が明確に規定され、環境の変化や想定外の災害への対応ニーズの高まりから生態学や防災・減災、気候変動等への適応へ広い分野で応用されようとしている²⁾。Bruneau はレジリエンスを高めるために要求される能力として「4R」すなわち Robustness (頑強性)、Resourcefulness (臨機応変性)、Redundancy (冗長性)、Rapidly (即応性) を挙げ、単に頑強性を図ることでは無い概念であることが分かる³⁾。レジリエンスの概念は、不確実性やリスクに身をかがめて防御することばかりを考えるのではなく、適応力、敏捷性、つながり、多様性を促進し、次の衝撃を生き延びようとする積極的な思考である。

このように、レジリエンスの概念が注目されている一方で、その具体的な評価法については確立されていないため、レジリエンスを考慮した政策・施策等の議論が適切に出来ていない

といった課題もある。本稿では、レジリエンスに関する定量評価法について述べる。

2. レジリエンスの定量化に関するレビュー

昨今レジリエンスは、その応用のため、定量評価手法についても提案されつつある。インフラマネジメントにおいて考慮する場合は、災害に対するレジリエンスを対象とすることが多い^{4),5)}。災害を対象としたレジリエンスの場合、まず対象となるハザードが想定できる場合とそうでない場合がある。さらに、想定するハザードによっては被害が想定を超えてしまうこともあり、これらについては評価方法が異なると考えられる。また、被害からの復旧を考える場合、施設ごとの機能の復旧程度によってレジリエンスを評価することが基本となるが、災害に対してどれだけレジリエンスかを包括的 (例えばコミュニティや都市レベル等) に把握する方法は確立されていない。これらの観点からレジリエンスの定量化に関する主な論文を以下にレビューする。

中久保ら⁶⁾ は災害レジリエンスとライフラインレジリエンスを対象として、定量化手法を外力応答評価と網羅性評価に分類し、さらにそれぞれを主体 (供給部門側、需要部門) の観点を踏まえて、4 つに分類している。外力応答評価は、災害リスクを回復や適応を含めた対策戦略で管理する評価手法とし、網羅性評価は、ハザードを特定できない場合において、網羅的に対策を評価する手法としている。前者は評価において、特定の外力や被害を想定し、その機能低下や回復期間を考慮するため、許容水準と組合せることで説明性の高いレジリエンスが評価可能となる。しかし、それぞれ絶対値の評価が必要となるため、その設定が実用面で課題となる。一方、網羅性評価は対策有無といった充足性を点数化して評価するものであり、評価フレームワークにおいてどのような対策項目を設けるかが重要となる。対策有無では他の事業者や地域社会と

* コンサルティング事業統括本部 中央研究所 先端研究センター

** コンサルティング事業統括本部 中央研究所 技術開発センター

*** カイタクサイエンス

の比較を通した相対的評価に留まり、対策箇所等の優先順位を評価できないことが課題として挙げられている。

また原子力プラントについては、設計想定を超える事態に対する対応能力の指標について、外部ハザード等によって、一時的に喪失した安全上重要な機能が、アクシデントマネジメント (AM) 策の実行によって、要求される時間内に最低限必要な機能レベルまで回復する確率および裕度の総体として定義する手法が提案されている^{7),8)}。

一方、都市のレジリエンスの定量評価方法について、川久保ら⁹⁾は、都市のレジリエンスを測るための指標群を開発し、その適用可能性の検証を行うことを目的として、日本の大都市のレジリエンスの評価を実施している。都市レジリエンス性評価指標は、データの収集容易性、データの信頼性、指標の代表性、地域普遍性、政策適用性等の基準を全て満たす指標とし、最終的に18個の指標を都市レジリエンス性評価指標として選定している。そして、東京都区部および政令指定都市に関する公開統計情報を用いて主成分分析を実施し、各都市の予防力、順応力、転換力を評価するための統合評価指標を開発し、これを用いて日本の大都市のレジリエンス性評価を実施した。但し、統合評価指標は都市間の相対評価にとどまっており、時間軸でみた場合の回復力の定量的な評価には至っていない。

村ら¹⁰⁾は、環境・社会・経済のトリプルボトムラインを統合した長期的持続可能性と、自然災害へのレジリエンスの両側面の統合評価システムを開発し、実都市へ適用・評価するとともに、立地適正化計画、高リスク地域の撤退・徒歩圏への集約といったシナリオを設定し立地誘導の効果の定量化を試みている。但し、レジリエンスの評価については、地震・津波の直接被害や不安・ストレス等の間接被害を考慮して被災後の被害状況を時系列的に評価し、防災上の課題が挙げられているものの、対策効果の定量把握には至っていない。

橋本ら¹¹⁾は、高潮災害に伴う都市域の住民の生活の質 (Quality of Life; QoL) の低下と回復の過程を評価する枠組を提案し、被害軽減策を導入した場合の効果を、QoL低下抑制の観点から評価しており、QoL低下を抑える施策とQoL回復速度を向上させる施策を組合せることで大きな効果が期待できること、特定のインフラがQoL回復に大きく影響することの示唆を得ている。

これらのように、既往研究での都市レジリエンス評価では、相対比較のほか、地震・津波、高潮といった災害に対して都市レベルでのQoL等によるレジリエンス評価が行われているものの、都市レベルにおける他の災害やマルチハザードに対するレジリエンス評価は実施されておらず、これに関する対策効果の定量把握にも至っていない。

レジリエンスの概念は多くの分野で共有できるが、その指標や考慮する項目は様々である。本稿では、第3章に師ら¹²⁾が提示したレジリエンスに関する一般式を示し、第4章にそれに基づく具体的なレジリエンス評価の検討例を紹介する。

3. 構造レジリエンス理論¹²⁾

ここでは、災害に対する構造システムのレジリエンスを評価すべく、構造レジリエンス理論について概説する。ここで、システムとは下水道ネットワークといったインフラシステムを示し、下水道ネットワークの主要変数は例えば流下量、システム環境は下水道ネットワークの被害によって損失をうける経済的影響 (工場の操業停止による経済損失等) と考えられる。

システム $S(q_1, q_2, \dots, q_n)$ を考える。システムの主要変数を $[q]$ とし、これらの主要変数の影響を受けるシステム環境を V 、そして変化・攪乱を D とする。このとき、 $I(q_1, q_2, \dots, q_n)$ はシステムに作用する攪乱によるシステム環境への影響度 (インパクト) を表す。ある攪乱 (例えば地震等) が、システム S に破壊エネルギー E_d を与える時、システムに吸収される破壊エネルギーを $E_{S(1)}$ 、システムの破壊を伴ってシステム環境 V に放出されてしまう破壊エネルギー (二次災害) を $E_{S(2)}$ で示す。

この時、システム環境に生じる破壊エネルギー E_v は下式で表すことができる。

$$E_v = E_d - E_{S(1)} + E_{S(2)} \quad (1)$$

ここで、レジリエントなシステムとは以下の条件を満たすことをいう。

$$E_d = E_{S(1)} \quad (2)$$

$$E_{S(2)} = 0 \quad (3)$$

式 (1) ~ 式 (3) より、 $E_v = 0$ となる。つまり、ある変化・攪乱が発生してもそのシステムは破壊エネルギー E_d を完全に吸収でき、しかも二次災害は発生させず、システム環境 V に放出される破壊エネルギーはゼロという意味となる。このような条件下では、システム環境への影響の大きさを表すインパクト関数 I は最小値条件を満たすことになる (図-1)。

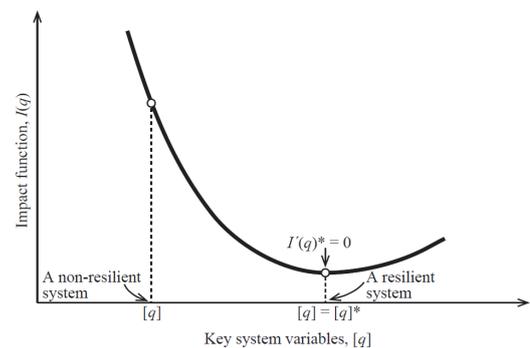


図-1 構造レジリエンスにおけるインパクト関数¹²⁾

$$I'(q^*) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $[q^*]$ はシステム変数 (例えば下水道ネットワークであれば流下量や耐荷性能等) の特性値と呼び、レジリエントなシステム設計を表す。

図-2 にレジリエンス三角形と構造損傷エネルギーの関係を示す。レジリエンスの評価においては、災害時の復旧活動に

よる機能の回復のプロセスをレジリエンス三角形と定義し、レジリエンスインデックス r は $E_{S(1)}/E_d$ で表すことができる。つまり、レジリエンスインデックスが 1 ということは、一度損傷を受けても、復旧すべき期間と復旧速度で元の機能を取り戻すことを示している。

構造レジリエンスの評価においては、システムの吸収エネルギー $E_{S(1)}$ と構造の損傷エネルギー W_{SD} から次式で表すことができる。

$$E_{S(1)} = E_d - W_{SD}$$

よって、レジリエンスインデックスは下記のように定量化することができる。

$$r = 1 - W_{SD}/E_d$$

なお、ここで示したレジリエンスインデックスはエネルギーの変数から導出したものとなるが、一方で、システム機能面からのレジリエンスインデックスは、システムの設計機能値を Q_{dsf} 、被災後の有効機能値を Q_{esf} とすると、以下の式のように比をとることで、システムが被災後に機能を取り戻す程度を示すこととなり、エネルギー面のレジリエンスインデックスと同様に扱うことができる。

$$r = Q_{esf}/Q_{dsf}$$

図-3 に構造レジリエンスにおけるシステム挙動のイメージを示す。レジリエントなシステムとは、破壊エネルギー E_d に対

し、 $W_{SD}=0$ であり、 $E_{S(2)}=0$ となる場合である。 $E_v=0$ 、 $r=1$ であり、 $I(1)=I_0$ 、ここに I_0 はシステム環境に対するインパクトとして最低値であり、 $I'(1)=0$ となることを意味する。図-3 (a) に示すように、構造の一部の損傷は避けられず、システム機能の一時低下はあるものの、早急に復旧が可能な損傷レベルとなる。

レジリエントではないシステムとは、図-3 (b) に示す通り、破壊エネルギー E_d に対し、 $W_{SD}>0$ 、 $E_{S(2)}=0$ である。ここでは、 $E_v>0$ 、 $r<1$ 、 $I(1)>I_0$ となる。レジリエントではないシステムでは、著しい構造の損傷によりシステムの機能は大きく低下し、復旧に要する時間は許容時間を超過するあるいは、完全な復旧が出来ない。

また、破綻したシステムとは、図-3 (c) に示す通り、破壊エネルギー E_d に対し、 $W_{SD}=E_d$ 、 $E_{S(2)}>0$ となり、システムは崩壊する。 $E_v=\infty$ 、 $r=0$ 、 $I(0)=\infty$ となることを意味する。破綻するシステムでは機能は完全に損失し、二次災害が生じることとなる。二次災害は $E_{S(2)}>W_{SD}$ となる場合（例えば津波により石油化学コンビナートからタンクが流出し岸壁等を損傷させるだけでなく、タンクから燃料が流出することで火災延焼も引き起こし、更に多くの施設・建物に被害が拡大する等）もあり、長期間に渡りシステム環境にダメージを与え続けることになる。

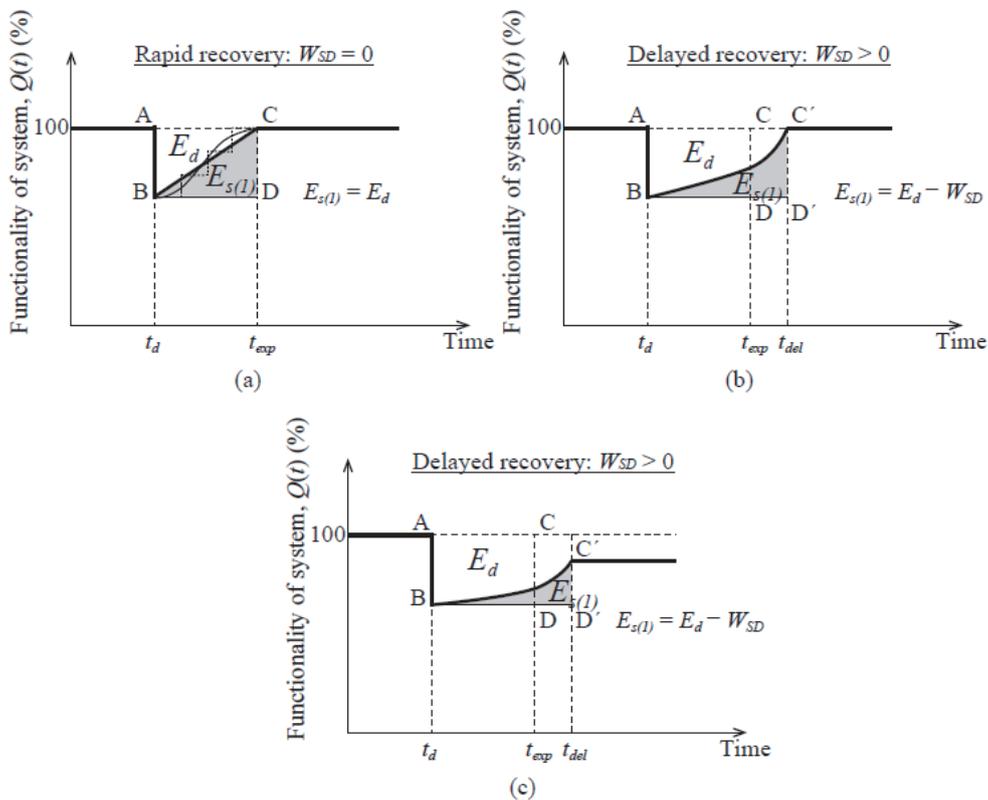
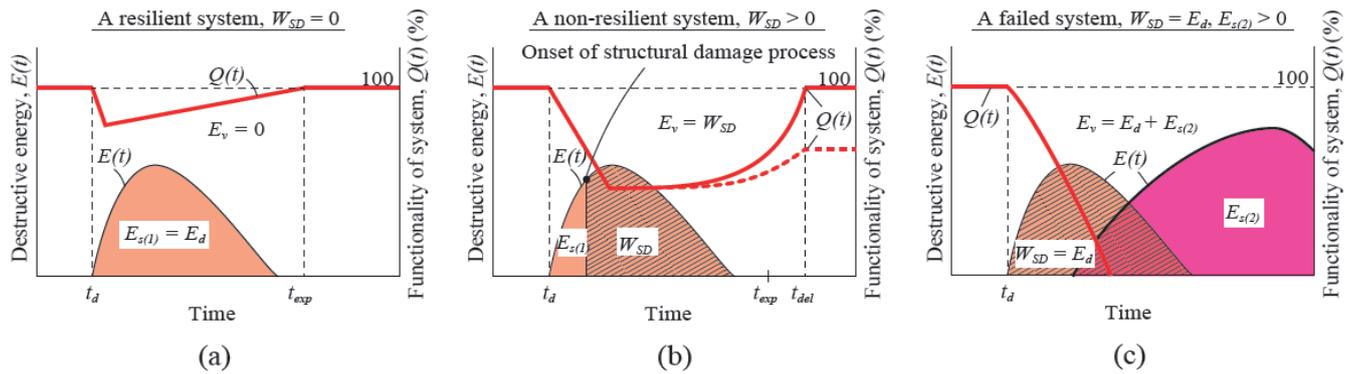


図-2 レジリエンス三角形と構造損傷エネルギー¹²⁾



図－3 構造レジリエンスにおけるシステム挙動のイメージ¹²⁾

4. レジリエンスの定量評価事例

(1) 下水道ネットワークのレジリエンス評価¹²⁾

1) 背景

高度経済成長期以降、大量に整備した下水道管が一齐に耐用年数を迎えるため、下水道管の老朽化対策は喫緊の課題となっている。

複合管の設計は既設管の残存耐荷力に期待するため、合理的であり、非線形解析により精度良く耐荷力評価を実現することが可能といえる。しかし、更生すべき老朽既設管は多く、下水道再構築事業を進めるにあたっては、更生効果を最大限にするような計画の実施が望まれる。レジリエンスは想定外の災害に対しても、しなやかにシステムの強靱性を保持しようとするものであり、機能復旧の概念を取り入れ、実現可能で効果的な老朽化対策を評価する指標として期待できる。損傷状態は流下能力や復旧速度とも連動するものであり、非線形解析による構造挙動のシミュレーションにより、管渠が吸収可能な破壊エネルギーが定量的に算出可能となれば、レジリエンスを定量評価できるものと考えた。

以下では、師らの提唱¹²⁾に基づき、下水道施設の構造レジリエンスを定式化し、管更生による再構築事業の評価や対策実施の意思決定に資する指標として、下水道ネットワークの流下機能にもとづく、合理的な維持管理マネジメントへの活用可能性を検討する。

2) 検討モデルの概要

都内の水再生センター周辺の下水道幹線網の一部をモデル化し(図－4)、管更生による管路耐震化について構造レジリエンスを評価した。対象とするのは26幹線であり、それぞれの流入先、延長、計画流量を考慮してネットワークモデルを作成した。破壊エネルギーは大規模地震動等の既設管を破壊させる規模とし、鉄筋降伏後の変形エネルギーを構造損傷エネルギーと定義する。具体的な構造損傷エネルギーは、各幹線の代表断面の埋設状況に基づき、非線形FEM解析に基づく応答解析から構造物の損傷度と合わせて算出することができる。構造物の損傷度と被災後の流下能力の低下度を同等と仮

定して検討し、流下能力を100%、75%、50%、0%の4段階で分類した。また、1日あたりの復旧延長は、過去の被災時の復旧実績より、損傷後の流下能力75%、50%、0%において、それぞれ400m、160m、80mとし、幹線の延長を踏まえて復旧日数の算出を行った。なお、復旧にあたっては、被災直後の7日間を被災調査等に要するものとし、復旧措置は8日目から実施すると仮定した。また、目標復旧日数は東京都地域防災計画の30日とした。

下水道管路ネットワークの大規模地震による構造損傷エネルギーと流下機能について説明する。なお、ここで示す損傷率は実際の損傷率ではなく、数値解析結果による耐荷力評価結果に基づき、エネルギーの概念による表現を適用するための推定値として算出している。ここでは仮に、φ1800mmの円形管と4000mm×4000mmの矩形管について、内かぶりが欠損した老朽管を想定した解析結果を基本として、その他の管群の損傷率を設定した。

すべての管路はRC構造であり、その多くは円形管と矩形管であるが、一部では馬蹄形管もある。幹線の延長は数10m～5kmまで様々である。SPR工法による更生(耐震補強)は幹線1、3、4で実施済みであり、7つの幹線で近い将来の施工が計画されている。その他の10幹線については、実施の有無が未定である。全26幹線のうち、6幹線は既に耐震化された新設管路であり、更生する計画は無い。

RC構造物である管路は鉄筋降伏が破壊の開始であることを踏まえ、 W_{SY}^i 、 W_{SD}^i をそれぞれ単位管路延長あたりの鉄筋降伏までの変形エネルギーと構造損傷エネルギーとする。非線形FEM解析の結果から、SPR更生管の W_{SY}^i は既設管の3倍以上となった。単位管路延長あたりの破壊エネルギー E_d^i は W_{SY}^i と W_{SD}^i の和により算出することができ、破壊は $W_{SD}^i = E_d^i$ となる。もし、全ての幹線が更生されれば、 $E_d^i < W_{SY}^i$ となるため本ネットワークは大規模地震時にほとんど損傷を受けないということになる。

構造損傷エネルギー W_{SD}^i と破壊エネルギー E_d^i は前述の単位延長に対するエネルギーに対して延長を乗ずることで得られる。本検討では、構造損傷率 W_{SD}^i/E_d^i は被災後の流下

能力低下率と等価としているため、流下能力は $1 - W_{SD}^i/E_d^i$ として表される。また、下水道システム全体の損傷エネルギー W_{SD} および破壊エネルギー E_d はそれぞれ W_{SD}^i と E_d^i の合計することで得られる。

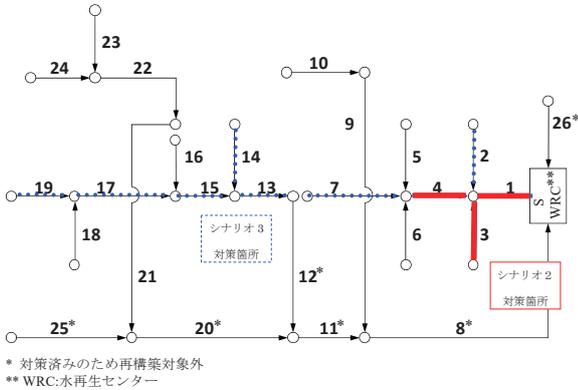


図-4 下水道管路ネットワーク¹²⁾に一部加筆

表-1 シナリオの設定

| シナリオ | 内容 |
|-------|--|
| シナリオ1 | 全幹線で耐震化対策無し |
| シナリオ2 | 一部で複合管更生工法による耐震化対策有(1, 3, 4路線耐震化) |
| シナリオ3 | 再構築計画完遂時(1, 3, 4, 7, 13-15, 17, 19路線耐震化) |

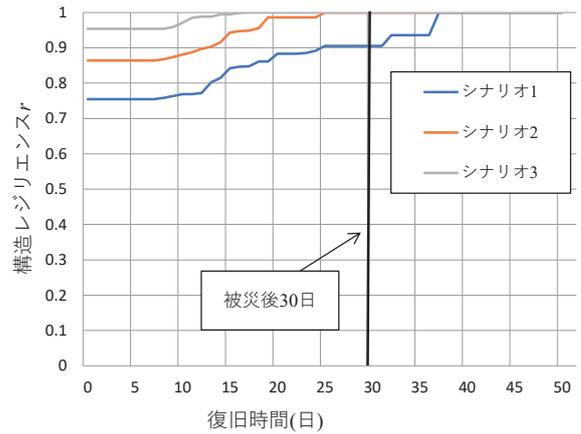


図-5 復旧における構造レジリエンスの推移¹²⁾

3) 検討シナリオと結果

本検討では管更生による耐震対策の有無に対して3つのシナリオを設定した(表-1)。それぞれについて、クリティカルパス法に基づき、被災後に水再生センターへの流入量を通常時に戻すための最小必要復旧日数を算出し、構造レジリエンスを評価した。

検討の詳細条件と検討結果を表-2および図-5に示す。シナリオ1では流下能力が20%低下し、シナリオ2では10%低下、シナリオ3では3%低下となり、シナリオ3の損傷エネルギーはシナリオ1の約1/5まで軽減される結果となった。

表-2 詳細検討条件¹²⁾

| 幹線 番号 | 路線延 長 (m) | 計画汚水量 [日平均] Q_{ef} (m^3 /日) | シナリオ1 全幹線で耐震化対策なし | | | | シナリオ2 (一部で複合管更生工法による耐震化対策有) | | | | シナリオ3 (再構築計画完遂) | | | |
|----------|-----------------|---|----------------------|-----|------------------------------------|--|--------------------------------|-----|------------------------------------|--|----------------------|-----|------------------------------------|--|
| | | | 健全レベル (流下能力) | | 被災後流量 Q_{ef}^i (m^3 /日) | 損傷エネル ギー: W_{SD}^i kN \cdot mm | 健全レベル (流下能力) | | 被災後流量 Q_{ef}^i (m^3 /日) | 損傷エネル ギー: W_{SD}^i kN \cdot mm | 健全レベル (流下能力) | | 被災後流量 Q_{ef}^i (m^3 /日) | 損傷エネル ギー: W_{SD}^i kN \cdot mm |
| | | | 複合管更 生工法に よる対策 | (%) | | | 複合管更 生工法に よる対策 | (%) | | | 複合管更 生工法に よる対策 | (%) | | |
| 1 | 950 | 49851 | × | 50 | 24,926 | 1,425,000 | ○ | 100 | 49,851 | 0 | 0 | 100 | 49,851 | 0 |
| 2 | 786 | 1814 | × | 50 | 907 | 393,000 | × | 50 | 907 | 393,000 | ○ | 100 | 1,814 | 0 |
| 3 | 1,908 | 9245 | × | 0 | 0 | 3,816,000 | ○ | 100 | 9,245 | 0 | 0 | 100 | 9,245 | 0 |
| 4 | 520 | 35250 | × | 0 | 0 | 1,300,000 | ○ | 100 | 35,250 | 0 | 0 | 100 | 35,250 | 0 |
| 5 | 1,359 | 9158 | × | 75 | 6,869 | 362,853 | × | 75 | 6,869 | 362,853 | × | 75 | 6,869 | 362,853 |
| 6 | 927 | 16070 | × | 75 | 12,053 | 154,809 | × | 75 | 12,053 | 154,809 | × | 75 | 12,053 | 154,809 |
| 7 | 1,846 | 6912 | × | 50 | 3,456 | 1,846,000 | × | 50 | 3,456 | 1,846,000 | ○ | 100 | 6,912 | 0 |
| 8 | 154 | 155,173 | 対象外 | 100 | 155,173 | 0 | 対象外 | 100 | 155,173 | 0 | 対象外 | 100 | 155,173 | 0 |
| 9 | 1,101 | 4579 | × | 75 | 3,434 | 199,732 | × | 75 | 3,434 | 199,732 | × | 75 | 3,434 | 199,732 |
| 10 | 220 | 4579 | × | 75 | 3,434 | 409,590 | × | 75 | 3,434 | 409,590 | × | 75 | 3,434 | 409,590 |
| 11 | 1,123 | 150,594 | 対象外 | 100 | 150,594 | 0 | 対象外 | 100 | 150,594 | 0 | 対象外 | 100 | 150,594 | 0 |
| 12 | 635 | 53,654 | 対象外 | 100 | 53,654 | 0 | 対象外 | 100 | 53,654 | 0 | 対象外 | 100 | 53,654 | 0 |
| 13 | 1,327 | 53,654 | × | 50 | 26,827 | 231,000 | × | 50 | 26,827 | 231,000 | ○ | 100 | 53,654 | 0 |
| 14 | 1,619 | 24,451 | × | 50 | 12,226 | 1,651,500 | × | 50 | 12,226 | 1,651,500 | ○ | 100 | 24,451 | 0 |
| 15 | 5,497 | 29,203 | × | 50 | 14,602 | 110,000 | × | 50 | 14,602 | 110,000 | ○ | 100 | 29,203 | 0 |
| 16 | 1,196 | 8,553 | × | 75 | 6,415 | 373,959 | × | 75 | 6,415 | 373,959 | × | 75 | 6,415 | 373,959 |
| 17 | 1,230 | 13,133 | × | 50 | 6,567 | 317,500 | × | 50 | 6,567 | 317,500 | ○ | 100 | 13,133 | 0 |
| 18 | 1,382 | 8,208 | × | 75 | 6,156 | 441,891 | × | 75 | 6,156 | 441,891 | × | 75 | 6,156 | 441,891 |
| 19 | 35 | 1,642 | × | 50 | 821 | 809,500 | × | 50 | 821 | 809,500 | ○ | 100 | 1,642 | 0 |
| 20 | 1,612 | 96,940 | 対象外 | 100 | 96,940 | 0 | 対象外 | 100 | 96,940 | 0 | 対象外 | 100 | 96,940 | 0 |
| 21 | 662 | 17,540 | × | 75 | 13,155 | 331,000 | × | 75 | 13,155 | 331,000 | × | 75 | 13,155 | 331,000 |
| 22 | 1,123 | 17,540 | × | 75 | 13,155 | 187,541 | × | 75 | 13,155 | 187,541 | × | 75 | 13,155 | 187,541 |
| 23 | 1,329 | 9,072 | × | 75 | 6,804 | 221,943 | × | 75 | 6,804 | 221,943 | × | 75 | 6,804 | 221,943 |
| 24 | 1,916 | 8,468 | × | 75 | 6,351 | 63,228 | × | 75 | 6,351 | 63,228 | × | 75 | 6,351 | 63,228 |
| 25 | 3,288 | 79,400 | 対象外 | 100 | 79,400 | 0 | 対象外 | 100 | 79,400 | 0 | 対象外 | 100 | 79,400 | 0 |
| 26 | 1,467 | 4,579 | 対象外 | 100 | 4,579 | 0 | 対象外 | 100 | 4,579 | 0 | 対象外 | 100 | 4,579 | 0 |
| | | $Q_{ef} = \sum Q_{ef}^i = 869,262$ | | | $Q_{ef} = \sum Q_{ef}^i = 708,495$ | $W_{SD} = \sum W_{SD}^i = 14,646,046$ | | | $Q_{ef} = \sum Q_{ef}^i = 777,916$ | $W_{SD} = \sum W_{SD}^i = 8,105,046$ | | | $Q_{ef} = \sum Q_{ef}^i = 843,320$ | $W_{SD} = \sum W_{SD}^i = 2,746,546$ |

全幹線で耐震対策が無いシナリオ1のケースでは、機能復旧（計画汚水量まで復旧）に要する日数は37日であり、レジリエントなシステムとは言えない。一方、水再生センター側近の下流側のみで対策を実施したシナリオ2では25日、再構築計画が完遂したシナリオ3では17日で復旧可能となり、レジリエントなシステムとなることが分かった。

4) まとめ

本事例では、下水道管について構造レジリエンス理論を用いることで、力学根拠に基づき、システムのレジリエンスを定量的に示すことができた。

膨大な下水道管の老朽化対策を計画的に予防保全型の対策を講じる手段や事業の効果などを説明していく上でも、有効な指標となり得ると考える。

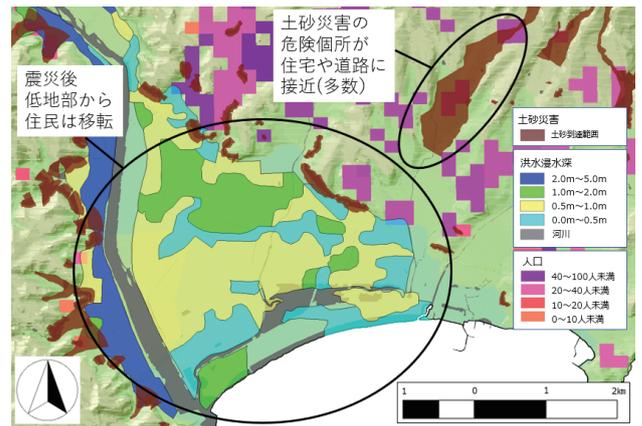


図-6 中心部の洪水・土砂災害と人口分布¹³⁾

(2) 地域住民 QoL にもとづく市町村のレジリエンス評価

ここでは、森田ら¹³⁾の陸前高田市におけるレジリエンス評価を実施した事例について紹介する。使用データ、評価手法、評価結果等については概要を記載するとともに、詳細については当該参考文献を確認されたい。

当該参考文献において、陸前高田市は東日本大震災を機に土地利用を大きく変更しており、現状（対策後）と土地利用変更前となる震災前（対策前）で、洪水・土砂災害に対して、どれだけ陸前高田市のレジリエンスが変化したか、発災後30日間の地域住民のQoLにより定量評価を行っている。

1) 陸前高田市の概要

陸前高田市は、面積約232km²で、山林が約70%を占め、宅地は約3%となっている。人口は約1.9万人で、昭和30年代から人口減少が続いており、現在の人口構造は少子高齢化の様相を呈している。

過去には、東日本大震災による津波など、大規模な地震・津波災害をはじめとして、高潮・波浪による災害、大雨・台風等による災害、大火災等が発生しており、将来的にも、地震災害、津波災害、風水害、土砂災害等の発生が想定されている。

本検討で対象とするハザードである洪水の浸水想定区域と土砂災害危険個所および人口分布を図-6に示す。洪水の浸水想定区域は70年に1回程度の大雨時の氾濫を示しており、土砂災害危険個所は都道府県が指定する土石流等の危険区域を示しているため、必ずしも洪水と土砂災害が同時に発生するとは限らない点に留意が必要である。陸前高田市は、東日本大震災後、土地利用が大きく変化し、低地部から住民が移転している。このため、洪水の浸水想定区域に住宅はほとんど無い。一方、土砂災害の危険個所は住宅や道路に接近しているところが多数ある。

2) 使用データの概要

データは以下のような公表データを用いた。

- ハザードや公共交通、避難所等は国土数値情報¹⁴⁾
- 人口は国勢調査¹⁵⁾、建物・道路は基盤地図情報¹⁶⁾
- 民間施設等については、iタウンページ¹⁷⁾の情報
- ライフラインについては、電気・水道・ガス・通信は面的一様に与え、住宅や避難所、民間施設等には全て平常時供給されていると仮定

また、各種施設等の被害・復旧は以下のように設定した。

- 建物は浸水深1.5m以上もしくは土砂到達範囲にふくまれる場合に居住不可とし、今回の評価期間30日間で復旧せず、仮設住宅も建設されないと仮定
- 道路については土砂災害を対象に、緊急輸送路の復旧は1日後、一般道の復旧は7日後と仮定
- 電気は1週間、ガスは6日間、水道は11日間、通信は30日間で復旧すると仮定し、水害指標手引¹⁸⁾や常総市水害実績¹⁹⁾を参考にこれらを設定

3) レジリエンス評価手法の概要

猪原ら²⁰⁾は、災害によって死亡・負傷していない住民を対象に、発災以降の生存・生活環境変化の動向をふまえ、被災者のQoLの低下量を用いて（図-7）、地域のレジリエンスを定量評価する手法を構築し、静岡県を対象に南海トラフ地震に適用して、地震および津波ハザードに対して検討している。

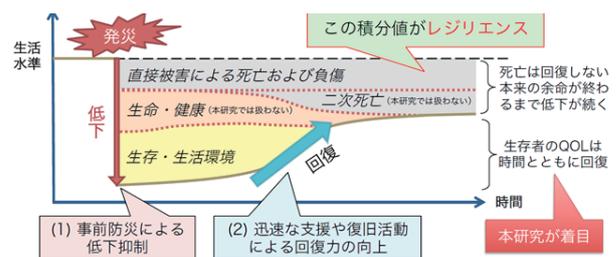


図-7 大規模災害発生後のQoL変化とレジリエンス²⁰⁾

被災者のニーズは復旧レベルによって異なっており、図-8に示すようにステージごとに QoL 構成要素を設定し、ステージの全ての要素を満たすと次ステージへ移行するとしている。なお、QoL はステージごとに設定しており、ステージ 1 が 0.4、ステージ 2 が 0.6、ステージ 3 が 0.8、ステージ 4 が 1.0 としている。時系列で変化する被災者ニーズに対して、各時点の QoL 構成要素を、人口分布やインフラの復旧状況等との関係から GIS 解析でニーズの充足状況を判定し、どの QoL ステージにあるかを特定している。そして、災害が発生しなかった場合の QoL と災害が発生した場合の QoL の差の時間積分値によって評価を行っている。

本検討では、市町村を対象としていることから、猪原らの手法をベースに以下のような手法の修正を行っている。

猪原らの手法では、小地区単位（4 分の 1 地域メッシュ単位、約 250m 四方）で、各 QoL 構成要素が「その場で充足可能」もしくは「移動（公共交通や道路等の接続性）により充足」の可否判定を行っている。本検討では、後者については同様の検討を行っているが、前者については、人口を 100m メッシュに配分し、各メッシュの 1km 圏（徒歩圏を想定）の施設等の有無を判定した。

各 QoL 構成要素の充足判定の概要を表-3 に示す。充足判定では QoL 構成要素を提供する施設等に徒歩や公共交通で到達可能かどうかを判定している。公共交通の場合、一般

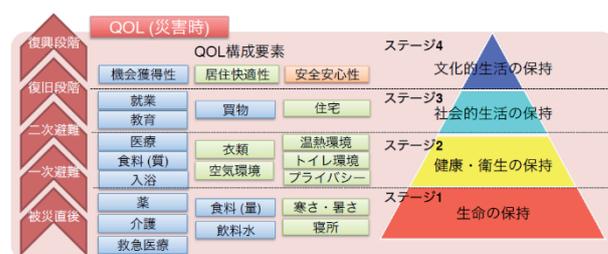


図-8 災害時の QoL 構成要素の時系列変化と概念²⁰⁾

道の復旧が発災 7 日後としており、これに準じて公共交通も復旧すると仮定している。また公共交通が復旧すれば、関連する QoL 構成要素が充足しているという仮定のもとに評価を行っている。

なお、洪水および土砂災害を対象とするが、これらによる人的被害は発生しないと仮定した。但し、浸水深が大きいもしくは土砂到達範囲に含まれる建物は居住不可とみなし、この居住者は収容人数の割合に応じて避難所へ移るとし、発災後の人口分布はこれを考慮した。

4) レジリエンス評価結果の概要

評価のタイミングは、発災直後、3 日後、1 週間後、30 日後とし、それぞれの復旧状況をふまえて QoL 値を算出した。

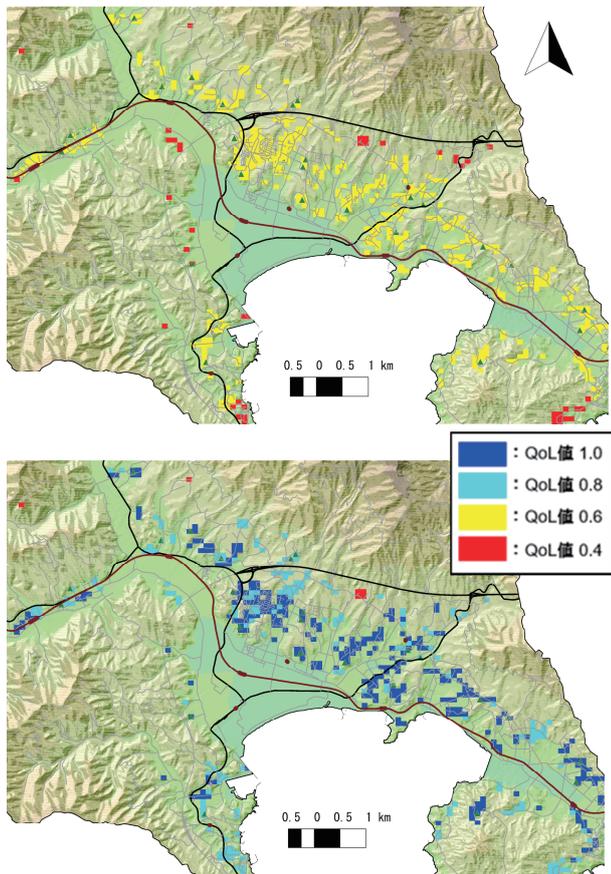
市の中心部における QoL の分布図を図-9 に示す。発災直後から 3 日後までは土砂災害等で道路が寸断された箇所がステージ 1（赤メッシュ）が点在しているが、一般道が復旧す

表-3 QoL 構成要素の充足判定¹³⁾

| QoL 構成要素 | | 充足判定の概要 | |
|----------|------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| ステージ 1 | 救急医療 | (人的被害が発生しないと仮定したので未評価) | |
| | 薬 | 徒歩圏の薬局 or 避難所 or 公共交通有無 | 公共交通復旧有無 |
| | 飲料水 | 徒歩圏の上水道施設 or 避難所 or 公共交通有無 | 水道 or 公共交通復旧有無 |
| | 食料(量) | 徒歩圏の商業施設 or 避難所 or 公共交通有無 | 公共交通復旧有無 |
| | 寝るところ | (住宅か避難所にいと仮定し未評価) | |
| | 寒さ・暑さ | 徒歩圏のガソリンスタンド or 避難所 or 公共交通有無 | 電気 or ガス or 公共交通復旧有無 |
| 介護 | (本検討では未評価) | | |
| ステージ 2 | 医療 | 徒歩圏の医療施設 or 避難所 or 公共交通有無 | 公共交通復旧有無 |
| | 食料(質) | 徒歩圏の商業施設 or 公共交通有無 | 電気・ガス・水道復旧有無 |
| | 入浴 | 徒歩圏の入浴施設 or 避難所 or 公共交通有無 | 電気・ガス・水道復旧有無 or 公共交通復旧有無 |
| | トイレ | 徒歩圏の避難所有無 | 水道復旧有無 |
| | 衣類 | 徒歩圏のコインランドリー or 避難所 or 公共交通有無 | 電気・水道復旧有無 |
| | 空気環境 | (住宅か避難所にいて問題ないと仮定し未評価) | |
| | 温熱環境 | — | 電気復旧有無 |
| プライバシー | (住宅か避難所にいて問題ないと仮定し未評価) | | |
| ステージ 3 | 教育 | 徒歩圏の公共交通有無 | 小中学校・公共交通復旧有無 |
| | 就業 | 徒歩圏の公共交通有無 | 公共交通 or 道路復旧有無 |
| | 買物 | 徒歩圏の商業施設 or 公共交通有無 | 公共交通 or 道路復旧有無 |
| | 住宅 | 居住不可と判定された建物は復旧せず仮設住宅も無いと仮定した | |

※避難所については緊急輸送路から避難所が通行可の場合機能「有」とした

※公共交通については復旧していれば沿線のどこかで関連する QoL 構成要素を満たすと仮定した



図－9 陸前高田市中心部の QoL 分布¹³⁾
(上：発災直後、下：30日後)

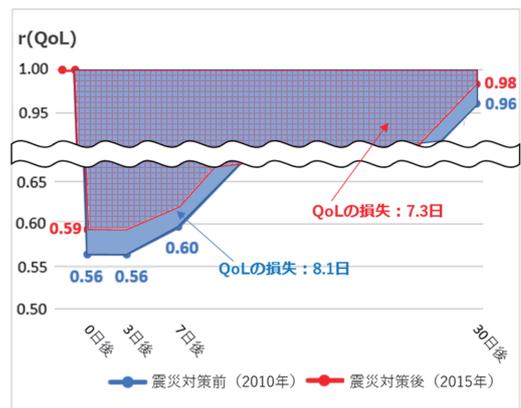
る1週間以降は、これらが概ね回復する。また、水道は約2週間で復旧することとしており、このことによって30日後には市域の多くでステージ4（青色メッシュ）に回復している。

1週間後でもステージ1（赤メッシュ）となっている地域について、山間部を中心に復旧の遅い地域が点在しており、これらの地域では徒歩圏に各種機能が存在しないため QoL が低いままである。道路復旧後には、必要に応じて車等で移動して各種サービスを受けている状況と思われるが、本検討では自動車による移動は考慮されていない状況である。

次に、土地利用が大きく変更となる前（震災対策前）である東日本大震災前の人口分布・土地利用等を用いて、現状と同様の評価を行い、陸前高田市のレジリエンスの比較を行った。

QoL について、震災対策前（2010年）と震災対策後（2015年）を比較したグラフを図－10に示す。発災直後の QoL は震災対策前で 0.56、震災対策後で 0.59 であり、QoL が 3% 程度向上したため予防力が向上したことが分かる。30日後は震災対策前で 0.96、震災対策後で 0.98 であり、QoL が 2% 程度の向上にとどまったため、回復力はほとんど変わらない。

また、どの程度通常の生活水準から低下した状態が続いているかを把握するため、時間軸を考慮したレジリエンス三角形の面積で比較する。震災対策前では30日間で1人あたり8.1日分の QoL の損失であったのが、震災対策後では 7.3 日分



図－10 住民 QoL の時間変化の震災前後比較¹³⁾

に減少している。これは一人当たりの平均値であるため、市の人口 1.9 万人を乗じて、市全体の QoL 損失を見てみると、震災対策前では約 15.4 万日分だったのが、震災対策後では約 13.9 万日分となり、約 1.5 万日分減少している。

このように、都市を対象とした場合 QoL を用いてレジリエンスを定量的に算出することで、対策有無等のレジリエンスを評価することが可能となる。

5. おわりに

本研究は、中央研究所の研究開発や技術政策として2年前から始まったばかりの研究であり、今後も検討を重ねていく必要がある。ここでは、他分野への展開、社会便益との関係、気候変動やポスト・コロナ、レジリエントな対策技術の観点から、今後の研究方針等について記載する。

(1) 他分野等への展開

今回は下水道分野および都市分野におけるレジリエンスの定量評価について紹介したが、現在地下水や道路橋梁に関する交通ネットワークのレジリエンス評価も行っている。今後は、分散型エネルギーリソースを活用した災害時の電力確保によるレジリエンス強化に関する評価や、生態系に関するレジリエンスの評価等、他分野へのレジリエンス定量評価の展開を図っていきたい。

また、本稿ではレジリエンス評価について、災害前となる PDCA での活用を想定しているが、OODA (Observe, Orient, Decide, Act) や IDA (Information, Decide, Act) といった現場で判断して行動するループの中でもレジリエンス評価は活用可能と思われる。これらは災害発生後の緊急対応や復旧時期において、リアルタイムに状況が変化していく中で活用していくことが考えられる。

(2) レジリエンス評価結果と社会便益との関係

レジリエンス評価では、主に機能面（下水道なら流下機能）の定量評価を行い、各種インフラの機能低下を最小限にする

対策等の比較結果を算出可能であるが、この結果と各種便益等への影響についても検討する必要がある。例えば下水道分野では、防災機能として雨水排水等による浸水防除があり、防災機能低下が発生した場合、建物等への直接被害や交通阻害等の間接被害が考えられる。仮に機能低下を最小限にする対策案を出せたとしても、防ぎきれない影響が発生する可能性があり、建物や交通といった社会的影響も最小限とするような検討が必要である。

(3) 気候変動やポスト・コロナへの対応

本誌で紹介した事例については、自然災害のような大きなショックを受けた後の影響をいかに小さくするかといった観点でのレジリエンス評価となっているが、将来的な気候変動に対するレジリエンスといった観点での評価も必要である。これは、気候変動によって自然災害がこれまで以上の大きなショックとなり被害が増大するという観点の他に、気温や降水量等の時間的な変化に応じた適応を図っていくといった観点も必要である。気候変動レジリエンス評価技術については、MOU を結んだスルパナジュロン社と連携することで、アジア地域への事業展開に資することができるものと思われる。

また、ポスト・コロナのレジリエンスといった観点での評価も必要である。パンデミック発生時に、いかに住民の生活の質を確保するか、地域経済の落ち込みをいかに最小限にとどめるか等の観点でのレジリエンス評価が必要と考えられる。

(4) レジリエントな対策技術の検討

これまではレジリエンスの評価技術に関する研究について記載してきたが、レジリエントそのものを実現するための技術開発も必要である。例えば、下水道機能低下に伴う内水氾濫で交通混雑が発生する可能性がある場合、これをあらかじめ予測して、内水氾濫発生情報を活用した対策技術の検討等も考えられる。

参考文献

- Holling, C.S.: Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, pp.1-23, 1973
- 内閣府、平成 25 年度版防災白書、2013
- Bruneau, Michel.: *The 4R's of Resilience and Multi-Hazard Engineering*, 2007
- US. NAS: *Disaster Resilience: A National Imperative*, The National Academies Press, 2012 NAS, The National Academy of Science
- 林春男：地殻災害軽減のための防災研究の枠組み、学術の動向、2014 年 9 月号、pp.42-47、2014
- 中久保 豊彦、東海 明弘：ライフライン分野におけるレジリエンス定量化評価手法の類型化に関する研究、土木学会論文集 F6 (安全問題)、Vol.71、No. 2、pp.I_33-I_40、2015
- 鈴木 正昭、出町 和之、村上 健太、糸井 達哉、笠原 直人、宮野 廣、中村 隆夫、荒井 滋喜、釜谷 昌幸、山口 篤憲、松本 昌昭：原子力プラントにおけるレジリエンス評価法の開発 (その 1：原子力プラントの事故時安全性評価指標としてのレジリエンス指標の提案)、保全学、pp.65-70、2016
- 鈴木 正昭、出町 和之、村上 健太、糸井 達哉、笠原 直人、宮野 廣、中村 隆夫、荒井 滋喜、釜谷 昌幸、山口 篤憲、松本 昌昭：原子力プラントにおけるレジリエンス評価法の開発 (その 3：レジリエンス指標の評価法と適用性に関する検討)、保全学、pp.83-91、2016
- 川久保 俊、田中 充、馬場 健司：公開統計情報に基づく日本の大都市のレジリエンス性評価、環境科学会誌、Vol.30、No.3、pp.215-224、2017
- 朴 秀日、加藤 博和、大野 悠貴、石川 佳治、北詰 恵一、井ノ口 弘昭、秋山 祐樹：気候変動に対応した地域のサステナビリティとレジリエンスの評価手法と実都市適用への試み、第 61 回土木計画学研究発表会・講演集、2020
- 橋本 拓実、朴 秀日、大野 悠貴、加藤 博和：気候変動に伴う高潮リスク増大への都市域の適応策の評価枠組—災害後の QoL 低下と回復に着目して—、第 61 回土木計画学研究発表会・講演集、2020
- Shi, Z. Watanabe, S. Ogawa, K. and Kubo, H.: *Structural Resilience in Sewer Reconstruction: From Theory to Practice*, Elsevier, 2017
- 森田 格、師 自海、中野 雅章：地域住民の QoL にもとづく市町村のレジリエンス評価、第 60 回土木計画学研究発表会・講演集、2019
- 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報 ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>、参照 2019-10-01
- 総務省統計局統計調査部国勢統計課：平成 27 年国勢調査 小地域集計 03 岩手県、<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200521&tstat=000001080615&cycle=0&tclass1=000001094495&tclass2=000001094498>
- 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス、<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>
- NTT タウンページ株式会社：i タウンページ、<https://itp.ne.jp/?rf=1>
- 国土交通省 水管理・国土保全局：水害の被害指標分析の手引、2013.7、https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/higaisihyou_h25.pdf
- 国土交通省 関東地方整備局：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の鬼怒川における洪水被害等について、2015.10、http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000634942.pdf
- 猪原 暁、渡邊 啓太、杉本 賢二、加藤 博和、林 良嗣：巨大自然災害発生後の生存・生活環境変化に基づく地域のレジリエンス性評価、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、Vol.72、No.5、pp. I_283-I_291、2016