

レジリエンスの定量評価手法のレビューと 都市水代謝への適用に向けた枠組みの設計

中久保 豊彦¹・東海 明宏²・山口 治子³・中澤 暦⁴

¹正会員 助教 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail:nakakubo@see.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 助教 大阪大学 大学院工学研究科

³非会員 特任研究員 大阪大学 大学院工学研究科

⁴非会員 特任研究員 大阪大学 大学院工学研究科/現・滋賀県立大学 環境科学部

極低頻度・甚大被害型リスクへの対応に向け、レジリエンスが政策の指針として注目されている。そこで本研究では、都市水代謝を対象とし、レジリエンスの視点での対策効果分析の枠組みを設計することを目的とした。社会生態システムならびに自然災害分野でのレジリエンスの概念整理を踏まえ、本研究では予防策（抵抗力、臨機応変性、冗長性）、順応策（回復力、適応力）、転換策（転換力）をレジリエンス特性として定義した。また、レジリエンスの定量評価手法のレビューし、外力を想定するか否かで、既報における定量評価手法を外力応答評価と網羅性評価の2つに分類した。以上を踏まえ、レジリエンス特性を踏まえて都市水代謝の対策を整理するとともに、外力応答評価への適用に向けた論点を整理した。

Key Words : *resilience, characteristic, quantitative assessment, urban water metabolism*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、地震・津波による1万5,884人の死者、2,633人の行方不明者（2014年3月10日警察庁発表値）を出すとともに、福島第一原子力発電所事故に代表される複合被害を引き起こす結果となった。このことは、我が国が極低頻度・甚大被害型リスク (catastrophic risk) への向き合い方を十分に身につけられていないことを露呈した。そうした中、レジリエンス (resilience) が災害分野における政策の指針として注目されている。藤井¹⁾はレジリエンスを「強靱さ、しなやかさ」と表現し、その性状を①致命傷を受けない、②被害を最小化する、③すぐに回復する、の3つと定義している。ナショナル・レジリエンスの具体化に向け、2013年3月に内閣官房で国土強靱化の推進に関する関係府省庁連絡会議が発足し、2013年12月に国土強靱化基本法が公布・施行、2014年6月に国土強靱化基本計画が閣議決定されている。

我が国の環境政策の目標は、個々の汚染物質の管理から持続可能な社会の形成へと問題の主題が広がりをみせているが、これは、安定した生活基盤、あるいは確実なライフラインの確保が前提となっている。花木²⁾は、東

日本大震災で経験した事態（従来の環境の法制対象外であった放射性物質の低線量での拡散、工場の被災や企業の消失により明らかとなった平時の厳密管理を前提とした化学物質管理の不十分さ、等）を踏まえ、前提条件が充たされない状態下での対策、平時とは異なる状態から平時の状態への復元力を持った環境の管理方策の必要性を指摘している。

そこで本研究では、ライフラインとしての上下水道とサプライチェーンとしての化学物質管理から構成される都市水代謝を取り上げ、極低頻度・甚大被害型リスクに対するレジリエンスの視点での対策効果分析の枠組みを設計することを目的とした。ここで、水代謝は水文大循環（太陽エネルギーに駆動され10日に1度の速度で海から地上に降雨として戻る水循環）から水資源を取り出して形成している水利用・排水システム³⁾と定義した。

本稿の構成を以下に示す。2章ではレジリエンス特性と対策の分類を行い、3章ではライフラインを対象としたレジリエンスの定量評価手法のレビュー結果に基づく定量評価手法の特徴を整理する。4章では、2章・3章を踏まえて都市水代謝のレジリエンスに係る対策効果分析の枠組みの設計するとともに、淀川流域圏における基礎データを踏まえ、評価の視点を論じた。

2. レジリエンス特性の体系的整理

(1) 社会生態システムのレジリエンス

レジリエンスは Holling⁴⁾ が定義した学術用語に端を発し、1999 年の Resilience Alliance の設立、同協会が編集・出版を行う学術誌 *Ecology and Society* での議論の中で洗練されていく。ここでの議論は半藤・窪田⁹⁾ によりまとめられており、システムの構成要素がシステムのレジリエンスに影響する対策として緩和 (mitigation)、適応 (adaptation)、転換 (transformation) の 3 つを挙げている。ここで、適応は外的駆動力や内的プロセスの変化に応答して現状の安定領域に戻す能力を、転換は生態・経済・社会環境の条件が現状のシステムを維持できなくなった場合に根本的に新しいシステムを創造する能力と定義される (Walker et al.⁶⁾, Folke et al.⁷⁾。

馬場ら⁸⁾ では、これらレジリエンス特性と、リスクを発生確率と被害の大きさで表現する一般的なリスクマネジメントとの関係性を踏まえ、発生確率の最小化を図る対策が緩和策、被害の大きさの最小化を図るのが適応策と位置づけている。合わせて、発生確率と被害の大きさの両方の観点からレジームシフト (regime shift ある種の革命的な事象) が発生し、既存システムが将来崩壊しうることを想定した場合に、長期的な視点で既存システムを根本的に新しいシステムに創造する対策を転換策と位置づけている⁸⁾。

(2) 自然災害に対するレジリエンス

各国政府の政策レベルにおいてレジリエンスの用語が広く普及したのは、2005 年 1 月に国連防災世界会議の成果文書として「兵庫行動枠組 2005-2015：災害に強い国・コミュニティの構築⁹⁾」が採択されたことによる。ここでは、レジリエンスは「システム、コミュニティ、あるいは社会の潜在的に曝露しうるハザードに対する適応能力であり、機能や構造が受容可能なレベルを維持するために抵抗し、変化する能力。社会システムが過去の災害から学習し、よりよい未来の防護やリスク低減の手段を自己組織化することのできる度合いによって決定される」と定義されている⁹⁾。2012 年には U.S. NRC¹⁰⁾ により災害分野におけるレジリエンスの概念整理が行われており、レジリエンスを「(実在する、あるいは潜在的に起こりうる) 不利な事態に対し、事前に準備・計画し、その影響を吸収し、そこから回復し、より巧く適応する能力」と定義している。

主に自然災害を対象としたインフラストラクチャーのレジリエンス特性について、ここでは米国の国家インフラ諮問委員会 (U.S. NIAC¹¹⁾) ならびに英国の内閣官房 (U.K. Cabinet Office¹²⁾) による提案を整理する。

U.S. NIAC¹¹⁾ では、レジリエンス特性として頑健性 (ro-

bustness)、臨機応変性 (resourcefulness)、迅速な回復力 (rapid recovery) の 3 つを挙げており、頑健性は冗長性 (redundancy) や代替性 (substitution) を含む特性であるとしている。

また、臨機応変性は、危機や途絶に巧く準備し、それが発生したときに対応・管理する能力と定義されている。

U.K. Cabinet Office¹²⁾ では、抵抗力 (resistance)、信頼性 (reliability)、冗長性 (redundancy)、反応力・回復力 (response and recovery) の 4 特性を挙げている。信頼性は、ここで、信頼性は、ある条件範囲でインフラの要素が運用するように、本質的な設計を行うことにより、事象による被害や損害を軽減することを保証する特性を指す。

U.S. NIAC¹¹⁾ は、政府による防護を前提とする戦略の継続を強調しつつも、すべてにおいて防護が最適ではなく、いくつかのライフライン (通信、送電など) では迅速かつ効率的なサービスの回復に重点をあてた戦略を採用した方が賢明である可能性に言及し、回復力を含めたアプローチの有用性を指摘している。また、U.K. Cabinet Office¹²⁾ では、レジリエンスを広義においては「壊滅的な事象からの回復能力、我々の環境におけるリスクや不確実性を理解することによる適応容量の拡張」と定義している。すなわち、レジリエンス概念下での対策は、是が非でも影響を発生させない対策 (頑健性のみを追求する対策) を意味しない。影響を可逆性影響と不可逆性影響に区別し、可逆性影響をエンドポイントとするリスクについては、その発生確率の削減と発生した状況からの回復力・適応力の両面で評価して、準備すべき対策を模索するアプローチである。

(3) レジリエンスに係る対策と特性の分類

以上を踏まえ、本研究ではレジリエンス特性を表-1 に示すとおり定義した。

予防策は、影響の発生確率の低減を主たる目標とし、抵抗力、臨機応変性、冗長性を高める対策と分類した。順応策は、影響の大きさの低減を主たる目標とし、回復力と適応力を高める対策と分類した。ただし、順応策は可逆性影響に対する対策に限定して選択可能なものとした。転換策は、既存システムへの影響が甚大なリスクを対象として、その発生頻度も踏まえ新しいシステムへ移行する対策と分類した。

3. レジリエンスの定量評価手法の類型化

(1) 定量評価手法のレビュー範囲と類型結果

本研究では、U.S. NRC¹⁰⁾ でレビューされている定量評価手法に加え、国際誌では文献検索サイト ScienceDirect ならびに Wiley Online Library を用いてキーワード “resilience, infrastructure, assessment” で、国内誌では文献検

表-1 本研究におけるレジリエンス特性の定義

対策	特性	特性の概要
予防策 (prevention)	抵抗力 (resistance)	・ 初期衝撃に対する個別要素の強度や防護性能。
	臨機応変性 (resourcefulness)	・ 危機や業務中断が現実のものとなった場合に対応・管理する能力。 ・ 平常時機能の危機時における応用的な活用能力, 危機を見据えた平常時機能に対する技術の追加や予備資材の準備。
	冗長性 (redundancy)	・ 危機を見据えて平常時から保有しておく余剰能力。 ・ ネットワーク化によるバックアップ機能。
順応策 (adaptation)	回復力 (recovery)	・ 迅速かつ効率的に機能を回復する能力。 ・ 危機対応経験を踏まえて新しい平常時機能水準に移行する能力。
	適応力 (adaptability)	・ 外的事象や内的プロセスの変化に応答する能力。
転換策 (transformation)	転換力 (transformability)	・ 既存システムが将来崩壊しうることを想定し、長期的な視点で根本的に新しいシステムを創造する能力。

素サイト J DREAM III を用いてキーワード“レジリエンス, ライフライン”で文献を抽出した。出版期間は2000~2014年とした(最終検索日 2014年4月1日)。レビューの対象は、レジリエンスの構成要素や指標の整理、形成サイクルの提案などが行われており、概念をいかに定量評価に落とし込むかが論じられている文献に限定した。

以上の選定過程に基づき、23件の論文をレビュー対象とした。結果、外力を想定するか否かで、既報における定量評価手法は外力応答評価と網羅性評価の2つに分類した(表-2)。

(2) 外力応答評価の特徴

外力応答評価の評価概念を図-1に示す(Ayyub¹³, Francis & Bekera¹⁴, Zobel & Khansa¹⁵)に基づき作成)。縦軸に機能、横軸に時間をとり、外力に対する機能の低下性の度合いと、回復までに要する時間の短かさを評価する手法である。また、復興(失敗経験を踏まえた新しい平常時機能への移行)までに要する時間も評価基準となる。事業継続計画(BCP)¹⁶や地域継続計画(DCP)¹⁷に活用されている評価概念である。

Park et al.¹⁸は、リスク評価とレジリエンス評価の相違点として、ハザードの特定と評価の目的を挙げている。

古典的なリスク評価がハザードの特定から始まるのに対し、レジリエンス評価はハザードが予期できない事象を対象として、可能性のある失敗に対して解析を行うこととしている。また、評価の目的として、リスク評価が失敗の発生確率の最小化に重点を置くのに対し、レジリエンス評価は失敗した結果生じる影響の大きさの最小化に重点を置くとしている。そこで本研究では、外力応答評価をOECDのPSRモデル(pressure, state, response)に当てはめ、潜在的に起きる可能性のある結果に対する回復能力・適応能力の評価(state-response)に重点を置いた枠組みを構築することとした。

(3) 網羅性評価の特徴

インフラストラクチャーの機能維持を対象とした評価法としてArgonne National Laboratory Resilience Index¹⁹が代表例として挙げられる。これは項目をリストアップし、各項目を高くすることにより、非平常時に機能の維持や迅速な回復ができる可能性を有するという観点での評価法である。コミュニティの評価法としてBaseline Resilience Indicator²⁰やCommunity Disaster Resilience Index²¹が代表例として挙げられ、災害マネジメントにおけるソフト対策の充実性と、災害時にソフト対策を発揮できる地域社会を平常時に形成できているかを評価する手法である。

表-2 定量評価手法の類型

	外力応答評価	網羅性評価
ハザードの想定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定の外力を想定。 ・ 特定の影響が生じた結果を想定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 想定しない。
対策項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定の施策を対象として、外力に対する応答を分析(With - Without分析、など)。 ・ 二者択一の施策の選択に係る判断に向けた検討に利用可能(インフラの集中分散性、など)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 過去の被災経験とそこからの学習を踏まえた、施策項目の抽出と体系的整理。 ・ 機能の維持や迅速な回復に必要な要素(人的体制、中間需要財、その他生産要素)を網羅的にリストアップ。
影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 可逆性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 可逆性/不可逆性
評価の目的	<ul style="list-style-type: none"> ・ リスク評価が失敗の発生確率の最小化に重点を置くのに対し、レジリエンス評価は失敗した結果生じる影響の大きさ(機能の低下度合い、回復までに要する時間)の最小化に重点を置く。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ リストアップされた対策の充実性を、ベンチマーク法を用いて診断する。 *他の事業者(自治体、施設、企業など)との比較を通して、充実性のギャップを判定し、改良を図る手法。

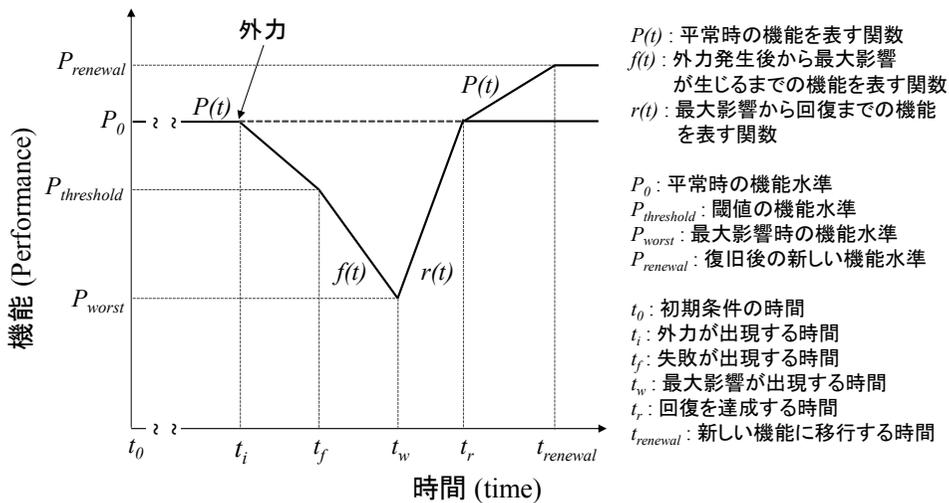


図-1 外力応答評価の評価概念

既報にみられた網羅性評価の特徴として、ハザードを想定しない点が挙げられる。これは、U.S. NRC¹⁰⁾により全ハザード的なアプローチ (all-hazards approach) として分類されている手法であり、ある1種類のハザードや事象に備える計画から他の種類の事象に対するレジリエンスも強められるという考えに基づいている。

網羅性評価は、機能の維持や迅速な回復に必要な要素を網羅的にリストアップし、ベンチマーク法により全事業体の平均得点との比較や、先進的な事業体の得点との差を解析することで、対策の充足度を評価する手法である。評価モデルの構築過程においては、施策(項目)のリストアップと、リストアップされた項目間の重み付けが必要となり、外力応答評価に基づく解析との連動が有用であることが指摘される。

4. 水代謝のレジリエンス対策効果分析の枠組み設計

(1) 水代謝に係るリスクの体系的整理

本稿では、リスクを発生確率と影響の大きさに捉えるとともに、影響の大きさをレジリエンスの観点から機能の低下性と回復までに要する時間を踏まえて整理する。

発生確率(頻度)と影響の大きさを軸とした視点での水代謝に係るリスクは、国土交通省²²⁾により図-2の通り分類されている。今まで十分に組み合わせていなかった範囲として低頻度・甚大被害型リスクへの対策を挙げており、大規模災害、ゼロ水(危機的な渇水)、老朽化に伴う大規模な事故、気候変動による深刻な事象、テロ、大規模な水質障害の6つを対象としている。

次に、影響の大きさに関する特性を表-3に示す(厚生労働省²³⁾より抜粋作成)。特筆すべき点として、水質事故やテロに伴う質的危機(河川表流水の水質障害

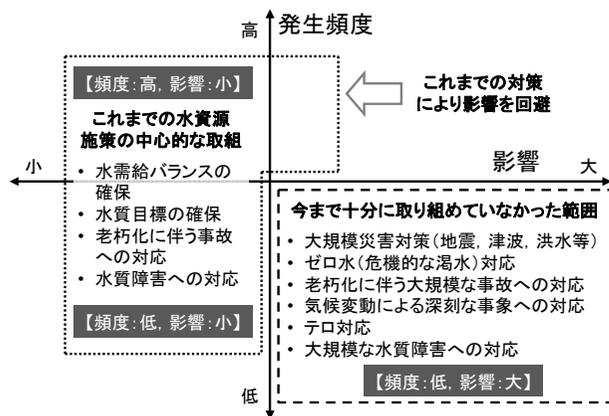


図-2 水利用の安定性に対するリスクの整理

表-3 影響の大きさに関する特性分類

		機能の低下性(規模)	回復までに要する時間
量的危機	渇水	大きい	長い
	地下水枯渇	特大	超長期
	地震	特大	長い
質的危機	テロ	特大	長い
	水質事故	特大	極短期
	地下水汚染	大きい	超長期
輸送機能	テロ	特大	短い
	富栄養化	大きい	超長期
	地震	特大	長い
水処理機能	地滑り・陥没	大きい	短い
	地震	大きい	長い

等)については、回復までに要する時間が短いとされている点である。影響の大きさを更に2軸でみることで、特性が分類できる。

(2) 都市水代謝に係るレジリエンス対策

都市水代謝に係るレジリエンスの対策を表4にまとめた。本研究では、ライフラインとしての上下水道、サプライチェーンとしての化学物質管理から構成される、水量・水質の危機管理対策を対象として対策を抽出した。また、水量・水質のフロー・ストック解析による対策効

果分析へと展開するため、人的資本(緊急対応に係る体制と人員配置等)や中間需要財の欠如(系統電源の途絶等)に関わる対策は除いた。対策は表-1に分類したレジリエンス特性に従い整理した。

(3) 淀川流域圏での対策効果分析の検討

a) 上水インフラの特性

大阪府における浄水の供給は、淀川に大きく依存している。図-3に大阪府下における主要浄水場の給水能力、1日給水量と需要量の関係を示す。淀川の表流水を取水

表-4 都市水代謝に係るレジリエンス対策の分類結果

	排出源となる事業体		供給事業体		需要部門			
	工場・事業所	下水道業	水道事業		住民生活、都市活動			
予防策 ^a	抵抗力	・防止策(流出防止蓋、緊急遮断弁、等)の強化	A	・下水処理場の耐震化	A	—		
	臨機応変性	・防護策(土のう、吸着マット、防液堤、等)の強化	B	・既設プロセスの活用(吸着マットの使用、最初沈殿池等での薬品処理や沈殿処理、予備反応槽の活用、等)	・重要拠点(病院、避難所等)につながる配水管路の耐震化	A	・民間ビル内や家庭での節水技術の普及	D
					・浄水場の耐震化	A		
	冗長性(余剰能力)	—	—	—	・浄水処理の高度処理化(オゾン処理+粒状活性炭処理、等)	D	・民間ビル内や家庭での備蓄水の活用	B
					・ダム等からの緊急放流による河川希釈	B		
冗長性(ネットワーク)	—	・仮設沈殿池や仮設塩素注入設備の設置	B	・浄水処理、塩素処理、凝集剤使用の強化	B	・建物における雨水利用の促進	D	
				・緩和措置(オイルフェンス、吸着マット、粉末活性炭)	B	・水利用の合理化(地下水、下水再生水)	F	
順応策	回復力 ^b	・汚染物質の漏洩・流出の応急措置と情報伝達	B	・本復旧までの期間(損壊のレベル)を踏まえた処理機能の段階的回復	B	—		
	適応力 ^c	—	—	—	・ポンプ車・給水船の増強	B	・節水行動(水質と用途を踏まえた水消費)	C
					・海水淡水化装置の導入	E		
転換策	冗長性(ネットワーク)	—	・下水処理場間の連結管の整備(非平常時の融通を踏まえた処理能力の平準化を含む)	G	・緊急時処理技術の導入(イオン交換、逆浸透、等)	E	・都市内水路の整備(雑用水、防火用水)	F
	転換力(一過型を前提) ^d	・工場移転(保護区域の設定)	F	・下水処理水の放流位置の再編	F	・浄水場間の連結管の整備やバックアップ水供給事業者との提携	G	
	転換力(分散型に抜本転換) ^e	・清浄水(50L/人/日、飲用水・台所用水)と多目的水(250L/人/日)の二元給水を可能とする水輸送系の構築					—	G
		・水のカスケード利用に向けた質変換系の構築(分離膜などの水処理技術、水質水量調整の環境湖、等)						

(対策分類) A: 基準(設計・維持管理指針や規制)の改定を受けて施設・設備更新時に実施される対策, B: BCPやDCPによる対策, C: デマンド・レスポンス, D: 平常時の機能改善を主目的として更新・導入を進める対策, E: 非平常時を想定した技術・設備の増設, F: 非平常時を想定したインフラの転換や産業構造転換による対策, G: 水代謝の抜本的な転換を進める対策。

(引用) ^a国土交通省^{16,22,24,25}, 厚生労働省^{23,26,27}, 大阪府²⁸。 ^b国土交通省^{16,29}, 厚生労働省³⁰, 環境省³⁰。 ^c厚生労働省³¹。

^d国土交通省²⁵, 厚生労働省²⁷。 ^e丹保³²。

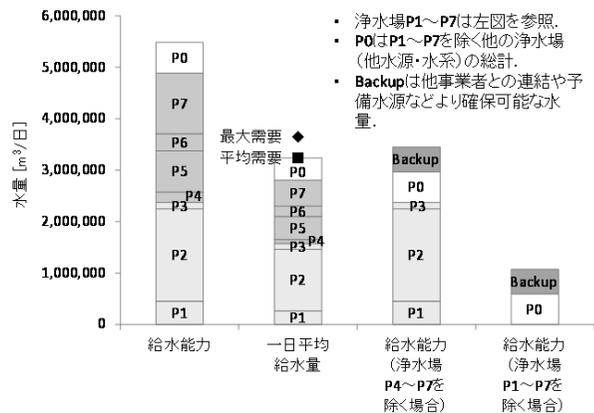
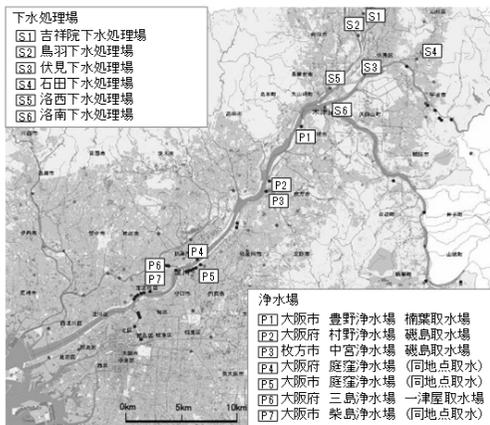


図3 大阪府の上水インフラ構造 (水道統計³³⁾に基づき作成)

源としている大阪広域水道企業団(旧大阪府)、大阪市、枚方市の7浄水場が、大阪府全域の平均水需要の約90%を給水している。以下の節では、外力応答評価(図-1)の視点で既存の影響解析結果を整理する。

b) 大阪府(下流域)での災害を想定した量的影響分析

大阪府が公表する2014年1月時点での南海トラフ巨大地震災害による上水道への影響の試算³⁴⁾では、最大で約832万人(全体の94%)が断水し、発災1日後で約45%まで断水が解消、7日後に40.6%まで、約40日後にはほとんどの断水が解消されると分析している。

大阪府沿岸域を中心とした被害を想定した場合、仮に下流域の浄水場P4~P7が被災に伴い給水が停止した場合、図-3の給水能力(浄水場P4~P7を除く場合)が危機時の給水可能量と推計される。停止期間は長期化するが、浄水場間で連結しておくことで、淀川上流に位置する浄水場P1~P3から浄水を融通でき、平常時の平均需要水準の給水能力を確保できると推算される。

c) 京都府(上流域)での災害を想定した質的影響分析

国土交通省²⁹⁾は、花折断層帯での地震(マグニチュード7.5)を想定外力とし、京都市・京都府南部に位置する下水処理場、工場・事業所からの有害化学物質の流出が淀川の取水源での原水・浄水濃度に与える影響を評価し、最大で2日、浄水濃度の基準値超過が起こる評価結果を示している。その場合、図-3の給水能力(浄水場P1~P7を除く場合)が危機時の給水可能量と推計され、大阪府下の広域において給水が途絶する。ただし、化学物質が一挙に流出する条件下では、河川水質の悪化は一時的であり機能停止期間は数日~1週間に留まる。

(4) 対策効果分析と評価の視点

ここでは、表-4で挙げたレジリエンス対策に対し、外力応答評価の枠組み(図-1)での対策効果分析を実施するにあたっての、評価の視点を述べる。

a) 回復時間に対する耐性

予防策と順応策(回復力)の両方による対策を検討するにあたり、回復時間(図-1の $t_r - t_f$)にどれだけの期間を要すれば許容水準を超えるか、機能停止に対する耐性評価を踏まえた時間($t_r - t_f$)の分析との連動が必要となる。同分析については、梶谷ら^{35,36)}による途絶抵抗係数(供給系ライフラインが途絶した状況下における各産業部門の生産水準を計量する指標:0~1の値をとり、0が生産停止、1が平常時と同じ生産レベル)が挙げられる。途絶抵抗係数は被害が顕在化する停止日数(製造業:生産計画を大幅に変更せざるを得ない生産停止日数、非製造業:倒産に至るまでの限界営業停止日数)と回帰分析され、時間($t_r - t_f$)の閾値診断に活用できる。

b) 機能の低下性に対する耐性

質的危機について、京都府(上流域)での下水処理場または工場・事業所が被災する場合、大阪府側の浄水場の給水機能が著しく低下することが想定されるが、一方で回復までに要する時間は短いとされている。こうした短期的かつ質的影響については、図-1の $P_{threshold}$ の低減が検討課題となる。表-4に示すように、既に厚生労働省³¹⁾では摂取制限等を伴う水道水の給水継続事業の検討が進められており、供給部門と需要部門の協働での対応、順応策(適応力)を危機時対応の一選択肢とするために、 $P_{threshold}$ を変容できる可能性、変容可能な幅に関する分析が求められる。

c) 転換策の選択基準

本稿では、転換策(表-4)として、一過型の水代謝を前提とした転換、分散型・カスケード利用型の水代謝への転換を挙げた。大阪府に適用した場合、前者は淀川水系における取水源や排出源の抜本転換、後者は一過型の水代謝システムからの抜本転換を指す。転換策を中長期的なインフラ更新の中で実施するか否かの検討にあたっては、既存の水代謝システムを維持し続けることで予防

策の充実に要する費用と、転換策に要する費用、回避できるリスク（効果、あるいは金銭価値化した便益）との比較に基づいた解析が必要となる。

5. おわりに

本研究では、都市水代謝を対象としたレジリエンスの対策効果分析の枠組みを設計した。

- ・ レジリエンスの定量評価手法のレビューし、外力を想定するか否かで、既報における定量評価手法を外力応答評価と網羅性評価の2つに分類した。
- ・ レジリエンス特性の分類を踏まえ、都市水代謝に係る対策の体系的整理を行った。
- ・ 外力応答評価の都市水代謝への適用に係る論点整理を行った。

提案した枠組みを踏まえた対策効果分析のケーススタディの実施と、ケーススタディを通じた枠組みの検証が今度の課題となる。

謝辞

本研究は、環境研究総合推進費「『レジリエントシティ政策モデル』の開発とその実装化に関する研究（課題番号：1-1304）」により行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤井聡：救国のレジリエンスー「列島強靱化」で GDP900兆円の日本が生まれる、講談社、2012。
- 2) 花木啓祐：環境学の視点から見た震災と復興、学術の動向、Vol.17, No.11, pp.25-28, 2012。
- 3) 丹保憲仁、丸山俊朗編：水文大循環と地域水代謝、技報堂出版、2003。
- 4) Holling, C. S.: Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecological System*, Vol.4, pp.1-23, 1973.
- 5) 半藤逸樹、窪田順平：レジリス概念論、香坂玲編、地域のレジリアンス：大災害の記憶に学ぶ、清水弘文堂書房、pp.51-74, 2012。
- 6) Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. and Kinzig, A.: Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems, *Ecology and Society*, Vol.9, No.2, Article.5, 2004.
- 7) Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. and Rockström, J.: Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability, *Ecology and Society*, Vol.15, No. 4, Article.20, 2010.
- 8) 馬場健司、増原直樹、田中充、白井信雄：「環境レジリエンス」の概念構築と評価指標の抽出に向けた一考察、環境システム研究論文発表会講演集、Vol.41, pp.255-261, 2013。
- 9) United Nations Office for Disaster Risk Reduction: Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters, 2007/07.

- 10) U.S. National Research Council: Disaster Resilience: A National Imperative, The National Academies Press, 2012.
- 11) U.S. National Infrastructure Advisory Council: Critical Infrastructure Resilience, Final Report and Recommendations, U.S. Department of Homeland Security, 2009/09.
- 12) U.K. Cabinet Office: Keeping the Country Running: Natural Hazards and Infrastructure - A Guide to improving the resilience of critical infrastructure and essential services, 2011/10.
- 13) Ayyub, B. M.: Systems Resilience for Multihazard Environments: Definition, Metrics, and Valuation for Decision Making, *Risk Analysis*, Vol.34, No.2, pp.340-355, 2014.
- 14) Francis, R. and Bekera, B.: A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.121, pp.90-103, 2014.
- 15) Zobel, C. W. and Khansa, L.: Characterizing multi-event disaster resilience, *Computers & Operations Research*, Vol.4, pp.283-94, 2014.
- 16) 国土交通省：下水道 BCP 策定マニュアル 第 2 版（地震・津波編）、2012/03。
- 17) 磯打千雅子、岩原廣彦、高橋亨輔、白木渡、井面仁志：大規模災害時における地域の機能支障に対する社会的許容限界と地域継続計画（DCP）策定指針、土木学会論文集 F6（安全問題）、Vol.69, No.2, pp.L31-L36, 2013。
- 18) Park, J., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M. and Linkov, I.: Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems, *Risk Analysis*, Vol.33, No.3, pp.356-367, 2013.
- 19) Fisher, R. E. et al.: Constructing a Resilience Index for the Enhanced Critical Infrastructure Program, *Argonne National Laboratory / Department of Energy Report*, No.ANL/DIS 10-9, 2010.
- 20) Cutter, S. L., Burton, C. G., Emrich, C. T.: Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, Vol.7, No.1, Article.51., 2010.
- 21) Peacock, W. G. et al.: Advancing the Resilience of Coastal Localities: Developing, Implementing and Sustaining the Use of Coastal Resilience Indicators, A Final Report, Hazard Reduction and Recovery Center, Texas A&M University, 2010.
- 22) 国土交通省：今後の水資源政策のあり方について 中間とりまとめ、2014/04。
- 23) 厚生労働省：緊急時の水質リスクに対応した連携方策 検討調査報告書、2006/03。
- 24) 国土交通省：有害物質等流入事故対応マニュアル、2005/11。
- 25) 国土交通省：緊急時水循環機能障害リスク検討委員会 報告書、2007/03。
- 26) 厚生労働省：水質汚染事故対策マニュアル策定指針 水質汚染事故対策、2007/02。
- 27) 厚生労働省：水安全計画策定ガイドライン、2008/05。
- 28) 大阪府：化学物質適正管理指針の改正について（緊急事態の発生の未然防止及び発生した緊急事態への対処に関する事項の追加）、2013/11。

- 29) 国土交通省：災害時における下水の排除・処理に関する考え方（案），2012/09.
- 30) 環境省：自治体環境部局における化学物質に係る事故対応マニュアル策定の手引き，2009/03.
- 31) 厚生労働省：平成 25 年度第 2 回水質基準逐次改正検討会突発的水質事故等による水質異常時の対応に関する考え方（検討状況），2013/12.
- 32) 丹保憲仁：水の危機をどう救うかー環境工学が変える未来，PHP 研究所，2012.
- 33) 日本水道協会：水道統計 平成 22 年度版，日本下水道協会 2013.
- 34) 大阪府：第 5 回南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会（平成 26 年 1 月 24 日）資料，2014/01.
- 35) 梶谷義雄，山野紀彦，朱牟田善治，多々納裕一：製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計，自然災害科学，Vol.23，No.4，pp.553-564，2005.
- 36) 梶谷義雄，山野紀彦，朱牟田善治，多々納裕一：非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推計，自然災害科学，Vol.24，No.3，pp.247-255，2005.
- (2014. 7. 11 受付)

REVIEWS OF QUANTITATIVE ASSESSMENT METHODOLOGIES OF RESILIENCE AND DESIGNING A FRAMEWORK TOWARDS ITS APPLICATION TO WATER METABOLIC SYSTEM IN URBAN AREA

Toyohiko NAKAKUBO, Akihiro TOKAI, Haruko YAMAGUCHI
and Koyomi NAKAZAWA

Japan faces how to deal with catastrophic risks (probability is very low, but damage is very large) based on experiences of the Great East Japan Earthquake Disaster, and the concept of “resilience” is noted for policy making against catastrophic risks. The objective of our study is to design a framework to analyze an effectiveness of each measure for urban water metabolism. On the basis of concept arrangement conducted in the fields of social ecological system and disaster, we defined that resilience is composed of three characteristics: prevention (resistance, resourcefulness, redundancy); adaptation (recovery, adaptability); transformation (transformability). In addition, we conducted literature review of relevant resilience quantitative assessment methods. In terms of whether external forces are assumed or not, assessment methods were classified into two types: Pressure-response assessment; Comprehensive assessment. We finally arranged measures with a characteristic of resilience for urban water metabolism, and considered how pressure-response assessment is applied to management its management.