

# リスク論に基づくレジリエンス・アセスメント 手法の開発

東海 明宏<sup>1</sup>・中澤 暦<sup>2</sup>・中久保 豊彦<sup>3</sup>・山口治子<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 大阪大学大学院 教授 工学研究科環境・エネルギー工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)  
E-mail:tokai@sec.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 大阪大学大学院 特任研究員 工学研究科/現・滋賀県立大学 環境科学部  
E-mail:nakazawai@em.sec.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 大阪大学大学院 助教 工学研究科環境・エネルギー工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)  
E-mail:nakakubo@sec.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 大阪大学大学院 特任研究員 工学研究科環境・エネルギー工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)  
E-mail:h.yamaguchi@em.sec.eng.osaka-u.ac.jp

都市に内在する様々なリスクへの対応が求められてきている。このような複数のリスクへの対処方策の備えには、前もってリスクを評価し計画的な視点で戦略を用意する必要がある。そこで本研究では、階層的なアプローチ、すなわち、まずマルチプルリスクの様相を把握し、ついでより優先度の高い事象に対するインパクト評価を行うという評価枠組みを構築し、都市への実装化について検討した。兵庫県、大阪府下で事務事業評価書を公表している自治体を例に、抽出した21種のリスクのうち自然災害、エネルギー自立、生態系破壊、気候変動に注目しレジリエンス性をリスク論に基づき評価可能とするプロトタイプモデルを構築した。さらに、ライフライン・サプライチェーンで重要な化学物質をとりあげ、回復期間を推定する評価手法を構築した。

**Key Words :** *resilience, assessment, risk, AHP, tiered approach*

## 1. 序論

レジリエンスの概念は、気候変動の文脈では「社会・生態システムが同じ構造や機能を維持できるように混乱を吸収する能力、自己組織化の能力」(IPCC, 2007)とされている<sup>1)</sup>。ここでいう混乱とは、望ましくない影響(Unwanted outcome)に拡張しうることから、リスク論による具体的評価が望まれる。本研究では、既往のレジリエンスの概念を拡張し、「多様なリスクに対応しうる能力」と定義し、とりわけ、リスク論に依拠した評価法の構築とその適用可能性について述べる。

これまで、技術のリスク評価においては、個々のリスク源に対するリスク管理を念頭におき進められてきた。マルチプルリスクへの対応は、多様なリスクを扱うリスク評価手法や管理原則が個別のリスクアセスメントの蓄積に基づいて導き出されてきた<sup>2), 3), 4), 5), 6)</sup>。しかし、多様なリスクに同時に曝されているのが都市環境の実態であるにもかかわらず技術リスク評価の応用は限定的であったため、個別のリスクアセスメントに基づく評価法の確立には限界があった。都市環境の実態をふまえ、都市の

マルチプルリスクに対応することを第一義に考えた実用的評価手法が必要とされている。そこで、本研究では、主に技術リスク研究に立脚した都市のマルチプルなリスクに対するレジリエンス評価のプロトタイプモデルの提案と、その適用可能性を検討した。関連分野では同様な研究が進められており<sup>11)</sup>、ここではリスク論に基づくことと、自治体で利用可能なデータ・知見をくみわたせることで評価可能な方法という観点を重視した。本論文の第2章では、本研究の対象範囲を整理するとともに、階層的なアプローチ、すなわち、まず多属性からなるマルチプルリスクの様相を把握し、ついでより優先度の高い事象に対するインパクト評価を行うという評価枠組みを構築した。第3章では、マルチプルリスクの観点から見たレジリエンスの包括的評価、第4章では、すでに各セクターでBCP (Business Continuity Planning) といった形式で用意されている対策の効果分析や実行可能な範囲の把握を目的とした応答評価について述べ、第5章では得られた結論をまとめた。

## 2. 対象範囲と評価の枠組み

リスク評価に関わる主要な研究としては、技術のもたらす社会的便益とリスクに関する古典的な技術のリスクの受容性評価としてなされた Chauncey Starrの研究<sup>3)</sup> さらに、Paul Slovicらによって汎用化された知覚レベルでの評価手法<sup>4)</sup>、そして、対策発動原則の樹立という観点から、個人の生涯リスクレベルと暴露人口による整理<sup>5)</sup>、そして、リスク対策の効率性の視点から、Cost/life year savedによる分野横断評価が行われ<sup>7)</sup>、技術リスクの管理原則が構築されてきた。これらは、リスク事象や管理対策導入の事後評価に基づいて新たなリスクに対する備えの示唆を得ようとしたものであった。

本研究で扱う範囲は、リスクの文脈でレジリエンスを理解するために図-1のように設定した。図-1に示すように、災害被害、気候災害影響、エネルギー消費、温室効果ガス排出といった複合的なマルチプルリスク、都市と外力の組合せで発生するリスク、対応策間の相互関係が含まれる。

また、図-2に既存の関連研究に基づいてリスクの波及構造を整理した。これは、リスク（の懸念）レベルの増加とともにそれに対する政府・自治体が担うべき対策の類型が変容（進化）すること、それが外力の変容（平常、非平常）をもたらし、そして、その外力が引き金となってリスクレベルを変化させること、というリスクと社会の流動性を表したものである。図-2の第一象限は、政府・自治体が認めたリスクレベルに対する対策の充足状況をしめす領域である。これまで政府・自治体（ついで産業界）は次から次へと認められたリスクに対し、緩和、予防、といった対策を発動してきたといえる。第二象限は、それらの対策によってどれほどリスク発現の外力が抑えられるかを示した領域で、この領域の知見には、OECDのNatec研究などが該当する<sup>8)</sup>。外力によってリスクが発現する第三象限では、平常時のみならず非平常時でとくにライフラインをあつかう網羅的な研究として、ライフラインの途絶研究がある（電気、ガス、水道）<sup>9)</sup>。また、ライフラインの途絶を前提として与えられたリスクの推定が第四象限に位置付けられ、平常時との比較、平常時までの回復時間の推計に分けられる。

これまでのリスクへの対応を踏まえ今後のマルチプルリスクへの対応戦略を考えると、まず、多種類のリスクの空間特性自体を明らかにし、そのうえで、懸念されるリスクの位置を把握するというスクリーニング段階を経ることが重要である。その上で、地域ごとに重要なライフラインとサプライチェーンにおいてかけがえない損失をうむ評価対象を選び、対応策の応答評価をすることで、自治体のレジリエンスに向けた自己診断を支援することが可能となる。

以上の考察に基づき、本研究で提案するレジリエンス評価枠組みを示したのが図-3である。左下に位置する自治体を出発点として、内側のループに沿って進めるのが都市におけるマルチプルリスク評価であり（詳細は第3章を参照）、次いで外側のループに沿って進めるのは、自治体間で共通性の高いと思われるライフライン・サプライチェーンに関わるフロー・ストック由来のリスクの評価である（詳細は第4章を参照）。その結果を他都市との比較評価などを通じて自己診断を行うという構成となっている。

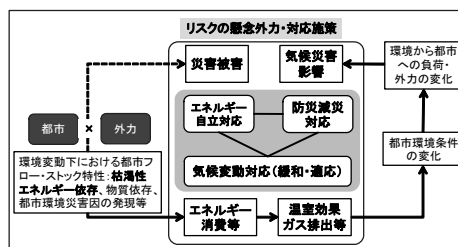


図-1 本研究でレジリエンスを議論する範囲

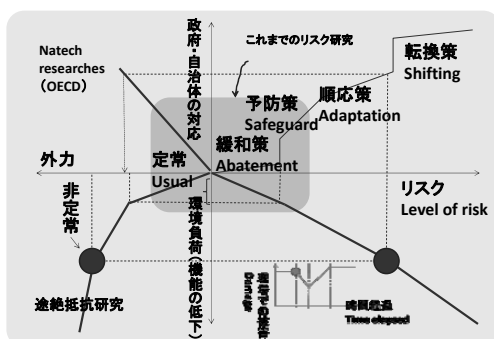


図-2 レジリエンス評価におけるリスクと社会の波及構造

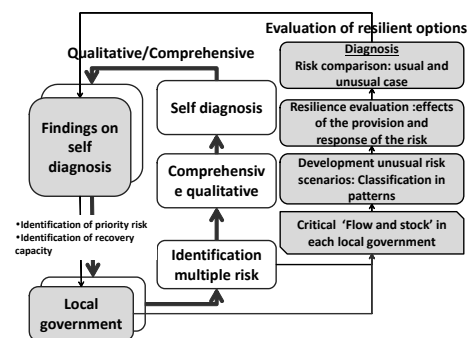


図-3 2段階からなるレジリエンス評価手法

### 3. マルチプルリスクからみた都市リスクの類型化と自己診断

#### (1) 手順

都市におけるマルチプルリスクの類型化は次の手順に沿って実施した。まだ予備的検討の段階であるため、筆者らならびに研究室の大学院生の協力の下で進めたワークショップを基にしているが、順次、適切な関係者の参加の下で進めてゆく予定である。

- 関係者・専門家でキー文献を精査・共有した後、ワークショップを開催し、都市のリスクを抽出する。
- DEMATELなどの構造分析を利用し、抽出された複数のリスクの波及構造を解析し、リスク間の連結・影響（被影響）関係を分析する。
- 主成分分析を用い、リスクの様相を解析する。
- 以上を通じて、都市のレジリエンスを脅かすより優先度の高いリスクを抽出する。
- 自治体のレジリエンスに関わる対策を整理する。ここでは、自治体が公表している事務事業評価書を用い、主要なリスクに対して、レジリエンスに関係する4種類の対策を抽出する。
- 関係者へのヒアリングを通じ、レジリエンスに対する複数のリスクごとに、リスク間、およびリスクに対する4種類の対策間の相対的重みを決定する。

#### (2) 抽出されたハザード

技術、社会、自然の3つの区分から、筆者らでワークショップを行い、都市において重要なリスクとして図-4に示す合計21のリスクを抽出した。このとき、それらが相互に作用しあうことで生まれる複合事象も考慮した。なお、抽出した21のリスクには、一部内容的に重複するものもあるため、引き続き関係者へのヒアリング、ワークショップを通じて精査を行う予定としている。

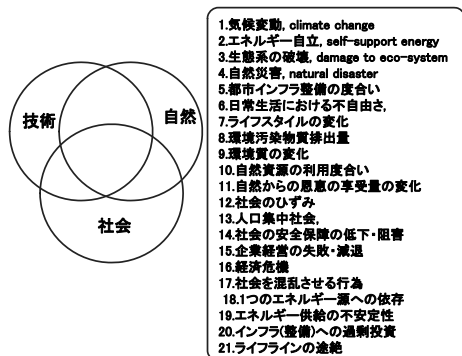


図4 抽出されたマルチプルリスク

#### (3) マルチプルハザードの様相

抽出された21のリスクについて、Slovicの方法に従って主成分分析により得られたリスクの様相を図-5に示した。ここで、第一主成分（横軸）は、Slovicらによる解析と同様に Dread（恐ろしさ）を反映する合成変数となり、第二主成分（縦軸）は、Uncontrollability（制御不能）（Slovicらによる解析では Unknown であった）が抽出された。なお、この調査結果は、Educated lay people とみなし、大阪大学大学院工学研究科大学院生(n=11)を対象として実施した。

図-5に示すとおり、21のリスクの位置関係が明らかになった。ここで、1. 気候変動、2. エネルギー自立、3. 生態系の破壊、4. 自然災害に着目すると、エネルギー自立が Dread に対して原点に近いのに対して、気候変動、生態系の破壊、自然災害は Dread のレベルが高い。さらに、自然災害は、他のリスクと比較して Uncontrollability のレベルが極めて高い。後者に関して考察すると、エネルギー自立、気候変動、生態系の破壊は、自然災害に係るリスクと比較して、政府・自治体で方針を選択可能である管理可能な問題であり、自然災害は、予測に幅があることや、そもそも想定しきれない予測範囲外のことが起こることへの懸念の強さが表れたものとも理解できる。なお、ここで得られた、第一主成分である横軸 Dread の評点を以降の AHP の解析に活用した。以後、Dread をリスク懸念 (Concern of risks) と呼ぶ。

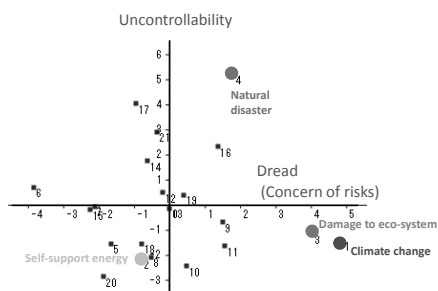


図5 主成分分析で得られたリスクの様相

#### (4) AHPによる診断

図-6にAHPで用いた階層図をしめした。ここでは、自治体が行っている対策を整理し、レジリエンスの視点から大胆に簡略化し、対策の充足状況を評点づけた。対策は自治体の事務事業評価書から抽出した（自治体、n=10）。重みづけに際しては、研究室大学院生と自治体の職員（n=3）に面談ヒアリングを実施して得た値を使用した。

結果として、レジリエンスは、エネルギー自立、自然災害が他の2つのリスクに比べて2倍以上に重要であることが得られ、各リスクに対する4種類の対策の相対的

重要度には顕著な差が認められなかった。

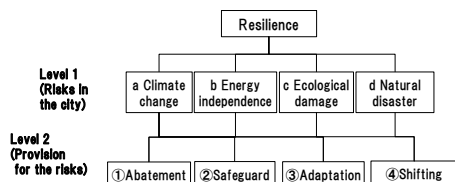


図-6 AHPの階層図

図-7は、縦軸にレジリエンス度、横軸に各リスクの懸念レベル（図-5、横軸、Dread）を図示したものである。レジリエンス度は、レジリエンス対策の充足レベルとして、重み付けの結果から得られた各対策の重み係数に、実施している各対策の数を通算した。対策数は全対策数で基準化した。横軸の左から順に、2. エネルギー自立、4. 自然災害、3. 生態系の破壊、1. 気候変動となっている。縦軸に示すレジリエンス度は、自治体内、自治体間のばらつきがあるものの、およその傾向として、ほとんどの自治体では、自然災害対策に力を入れていることが示され、その一方で、気候変動への対策は緒に付いたばかりであるということが示された。また、リスクの懸念レベルと対策の実施が連動していないことが示された。都市の構造物やインフラなどに対する自治体のハードな対策はその効果が得られるまでかなりの時間の経過が必要であることをふまえると、リスク懸念に応じ適時に対策を講じるには、ハードな手段を導入する前に、NPO、NGO、市民ができる方策を知らせるといったリスクコミュニケーションなどのソフトな手段がより重要な役割を担うと考えられる。

以上、多数のリスクが存在している中で、自治体においてプライオリティの高いと評価されたリスクに対するレジリエンス度を自己診断する手順を提示した。

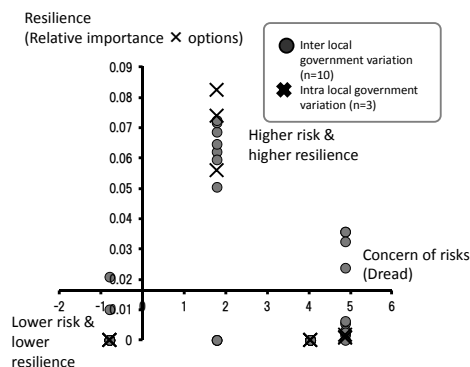


図-7 リスクレベルと対策：自治体の自己診断結果

#### 4. 水システムを取り上げた応答評価

##### (1) 基本的な考え方とその手順<sup>1)</sup>

応答評価は図-3に示した2段階からなるレジリエンス評価のうち外側のループに相当する評価である。図-1に示したように、都市におけるマルチプルリスクの発生は都市活動と（その空間構造）と外力の相互作用による。また、平常時と非平常時との比較や外力がかかった際の非平常時のリスクからの回復をみるためには、平常時すなわち通常作業時におけるリスク評価結果との比較が可能であることがもめられる。我が国で大規模にかつ先行的に進められてきた化学物質のリスク評価は、環境省、経済産業省で進められているものであり、その成果を活用することでリスク評価とつながりをもった評価可能となり、このことは、OECDのNatec研究においてもすでに取り組まれている<sup>8)</sup>。ここでの化学物質は産業のサプライチェーンで必要不可欠な物質で、それらの水系での挙動を見ることでライフラインへのインパクトを評価することになる。以上を踏まえてここでは、ライフライン（水循環）とサプライチェーン（化学物質管理）を対象とした環境レジリエンスの対策効果分析が2段階目のレジリエンス評価の目的となる。これは、自治体における重要なフロー・ストックの代表例という位置づけである。前述したように、すでに環境省、経済産業省で平常時を対象としたリスク評価が行われているので、それらとの比較も可能となる。

手順として、ここでは日本国内で再利用の頻度の最も高い水利用システムである、淀川水系を対象として、用水供給（ヒト健康リスク、生活用水）をとりあげ、磯島地点（大阪府水道の取水点）での評価をおこなった。被害応答の算出に際しては、（独）産業技術総合研究所で開発された水系曝露評価モデルAIST-SHANEL<sup>12)</sup>の宇治川の瀬田洗堰以降を対象として、図-8に示すようなシナリオで京都府地震被害想定をし、工場・事業所からの化学物質の流出事象を取り上げ推定をおこなった。なお、図-8に示すように、流出事象以外は平常作業を仮定しているため限定的な試算であることを断っておく。PRTR制度のデータを活用し、工場・事業所からの化学物質の排出特性を検討した結果、トルエン、ホルムアルデヒド、フッ素、ホウ素が他に比べて排出量が懸念されることが判明したため、これらの物質を評価対象とした。なお、AIST-SHANELによる解析では、物性が関与するパラメータ以外の流量等のデータは予め組み込まれたデータを使用した。

結果として、図-9のように、所与の想定外力下での非常流出によって発生する水質悪化を考慮すると地震発生後約2日で平常時に回復すると推定された。

なお、流出地点近傍の水域に対しての水生生物への影

響はヒト健康よりも高いことが懸念される。ここでは検討の範囲外としているが、別途、レジリエンス評価の枠組みへの据え方については検討する必要がある。

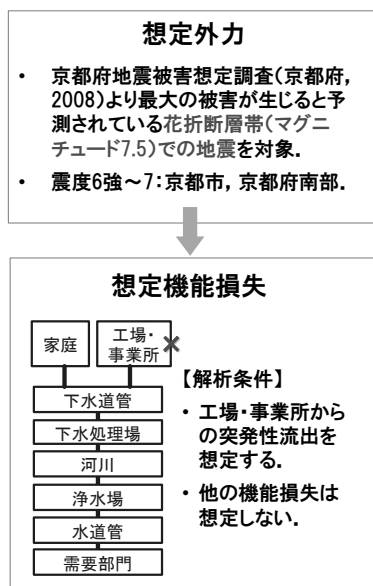


図-8 想定シナリオ

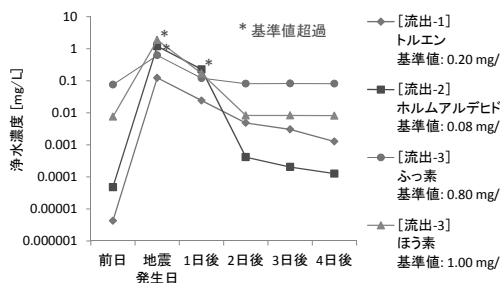


図-9 推算結果

## (2) レジリエンス評価における活用の方途

ライフライン、サプライチェーン、需要部門・家計では、それぞれ、緩和、予防、順応、転換に関わる対策が準備されてきている。とりわけ、ライフライン、サプライチェーンに関しては、一例をあげれば、BCPに代表される対策、耐震化にむけた設計基準やガイドラインの策定などが進められてきている。

そこで得られた評価結果の活用の方途としては、大別すると、2つ考えられる。一つは、すでに整備してきたライフライン、サプライチェーンシステムの維持を前提としたレジリエンスの向上に向けた対策導入の評価に組み込むことである。もう一つは、すでに整備してきたシステムの組み替え(転換)を念頭においたレジリエンスの向上があげられる。

前者でいえば、緩和、適用、転換にいたる対策をインクリメンタルに積み上げていくことで増加する費用と回避できるリスク(金銭価値化)の総和で、レジリエンスに関わる選択肢空間を限定していくことも必要と思われる。いずれにしても、それぞれの主体がとりうる対策の組合せを地域全体としてのレジリエンスの事前評価として行うことに組み込むことができる。

後者については、現状のシステムとの比較におけるシステムの転換策そのものの評価である。この評価結果は、将来のライフライン、サプライチェーンを転換策導入にすみやかに移行することを示唆するものである。このために利用可能な評価指標としては、例えば対策の導入の費用が想定でき、図-10はその概念図を示している。

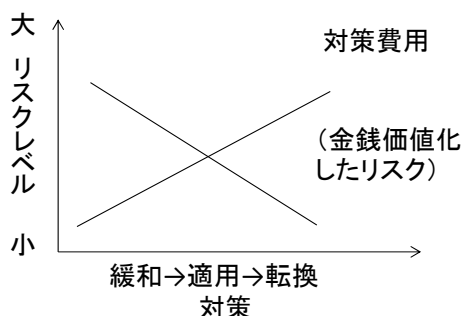


図-10 レジリエンス対策の評価の考え方

## 5. 結論

本研究で得られたこと以下にまとめる。

### (1) 手法開発

本研究では、階層的なアプローチとして、まず多属性からなるマルチプルリスクの様相を把握し、ついでより優先度の高い事象に対するインパクト評価を行うという評価枠組みを構築した。兵庫県、大阪府下で事務事業評価書を公表している自治体を例に取り上げ、抽出した21種のリスクの中で、自然災害、エネルギー自立、生態系破壊、気候変動に注目しレジリエンス性を評価する方法を提案した。さらに、ライフライン・サプライチェーン上重要な化学物質をとりあげ、回復期間を推定する手法を構築した。以上より、リスク論に基づくレジリエンス評価のプロトタイプモデルを構築するとともに、リスクと自治体で実施している対策(種類)に関してレジリエンスの観点で自己診断を行う枠組みを示した。

### (2) 適用可能性

手法の実装化にむけた課題として、評価の枠組みは概ね構築できたと考えているが、都市におけるマルチプルリスクは、工場・事業所の立地状況、人口集団の居住状況等に関連するため、リスクの抽出は継続して行うこと

が必要である。また、自治体職員を対象としたAHPにおいては、リスクの相対的重要度は、直感よりもむしろ事実ベースで各リスクの重みを推定することも可能となってきたので、そういった定量的推計値と自治体としての方針（総合計画等に反映した内容）を組みこんでいくことで手法としての一般性の改善に必要であると考えている。

**謝辞：**本研究は、平成25～27年度 環境省環境研究総合推進費（1－1304）「『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」（代表 名古屋大学 竹内恒夫）の分担課題（レジリエンス・アセスメント手法の開発と政策効果分析）として実施した。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001 - Complete online versions, [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/?src=/climate/ipcc\\_tar/wg2/301.htm](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg2/301.htm).
- 2) Chauncey Starr (1969) Societal benefit and technological risk, Science, No. 165, pp. 1232-1238.
- 3) Paul Slovic (1987) Perception of risk, Science, Vol. 236, pp.281-285.
- 4) Paul Milvy (1987) De Minimis Risk in Contemporary Issues in Risk Analysis Volume 2, edited by Chris Whipple (Energy Study Center, EPRI, California), Plenum Press, pp.75-86.
- 5) John Graham and Jonathan Wiener(1995) Risk vs. Risk - Tradeoffs in Protecting Health and the Environment, Harvard University press.
- 6) Jonathan Wiener (2002) Precaution in a Multi-Risk World in Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice edited by DJ Paustenbach, pp.1509-1531.
- 7) Tammy O. Tengs, et als. (1995) Five hundred life saving interventions and their cost effectiveness, Risk Analysis, 15(3), pp.369-390.
- 8) OECD(2013) REPORT OF THE WORKSHOP ON NATECH RISK MANAGEMENT, [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono\(2013\)4&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2013)4&doclanguage=en)
- 9) 梶谷義雄, 他 (2005) 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, 24(3), pp.247-255.
- 10) 梶谷義雄, 他 (2005) 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, 24(3), pp.553-564.
- 11) 中久保豊彦, 他 (2014) 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, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.42. (印刷中)
- 12) (独) 産業技術総合研究所, 産総研水系暴露解析モデル, <http://www.aist-riss.jp/projects/AIST-SHANEL/>.

(2014. 7. 11 受付)

## DEVELOPMENT OF PROTOTYPE OF RESILIENCE ASSESSMENT METHOD BASED ON THE THEORY OF RISK

Akihiro TOKAI, Koyomi NAKAZAWA, Toyohiko NAKAKUBO  
and Haruko YAMAGUCHI

The relative increase over the last two decades in the number of large-scale disasters, people have been trying to avoid or/and minimize these damages caused from various disasters. Therefore, concept of 'resilience' has become much focused on these days. However, there are few resilient city assessment method which is tackled the multiple risk in urbanized area. In this presentation, we proposed and evaluated its applicability particularly emphasized in connection with the clarification of resilience concept.

The method comprised of two phased approach first is screening phase in which multiple urban risk characterization and then quantitative response evaluation is carried out. As a case study, we employed local government located in Kansai area and . Multiple urban risk were identified through workshop and characterized through statistical analysis. In addition to this, based on Analytical hierarchy process (AHP) method, countermeasures such as moderation and precaution, adaptation and guard, adaptation and acceptance, and translation and evacuation were scored from the viewpoint of resilience. Finally, the proposed method was evaluated feasibility.