

ライフライン事業者が想定する地震時応急復旧シナリオ 及びその相互連関のモデル化の試み —首都直下地震を想定した場合の事例分析—

Modeling of Scenarios of the Restoration Process associated with Critical Infrastructures and its Interdependency due to a Seismic Disaster —A Case Study for the anticipated North Tokyo Bay Earthquake—

豊田 安由美¹, 庄司 学²

Ayumi TOYOTA¹ and Gaku SHOJI²

¹筑波大学大学院 システム情報工学研究科 リスク工学専攻

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

²筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

Anticipated scenarios of restoration process associated with critical infrastructures such as electric power supply systems, gas supply systems, water treatments, and communication networks due to a seismic disaster are quantitatively modeled. Current operational plans for disaster prevention offered by stakeholders associated with subject critical infrastructures distributed in the Tokyo metropolitan area, are analyzed based on the graph theory. The related interdependency is modeled and analyzed by selecting the dominant events in the restoration process and by idealizing them as a directed graph.

Keywords: critical infrastructure, restoration process, interdependency, seismic disaster

1. はじめに

現代社会における行政・経済・社会活動は、電力、都市ガス、上下水道、通信、道路等のライフラインに強く依存しており、ライフラインが停止・寸断した場合の被害は直接的、間接的な影響を含め、広範囲に及ぶ。そのため、ライフラインのシステム信頼性を確保するためには、被害の予防・抑制を目的とした事前対策と同時に、機能停止時における被害波及の阻止や早期復旧等の総合的な対策が求められる。中でも、災害発生直後のライフラインに関連した応急復旧活動はその後の社会全体の復旧活動に大きく影響を与えるため、これらの効率化は特に重要となる。

ライフラインに対する復旧活動の効率化に資する研究は数多く成されており、例として、星谷・宮崎¹⁾、Kozin and Zhou²⁾、佐藤・井³⁾、Chang *et al.*⁴⁾の研究が挙げられる。これらの研究はいずれも信頼性工学をベースとし、ライフラインネットワークの早期機能回復を目的とした復旧資源の分配及び修繕の優先順位決定等、工学的な観点から復旧戦略の検討を行っている。一方で、ライフラインの復旧活動の進捗には、他のライフラインの機能や被害状況が影響することが知られている。そのような相互連関に着目した研究としては、星谷ら⁵⁾、能島・亀田⁶⁾の研究が挙げられる。特に文献6)では、ライフラインの相互連関を物理的被害波及、機能的被害波及、復旧支障、代替機能、複合災害の5つに分類し、それぞ

れ定義づけを行っている。これらの各項目を本研究で対象とする復旧活動の観点から見ると、直接的には復旧支障と関連するが、その他の項目も復旧活動に関する情報や復旧要員、復旧資機材のやりとりとして顕在化すると考えられる。物理的被害波及の事例としては例えば、電力事業者の管理する電柱に通信線が共架されている場合、電柱の損壊が通信線の損傷を引き起こし、電力事業者と通信事業者間で復旧調整を行う必要が生じる。このような相互連関による復旧活動への影響を評価した事例としては野田・西村⁷⁾、秦・目黒⁸⁾による研究が挙げられる。これらの研究は、水道事業者の差し水による埋設ガス管の復旧支障や道路被害による人員参集への影響等、ライフラインの復旧活動における相互連関の影響を定量的・定性的に明らかにしている。

以上に示した既往研究の視点は、まず復旧要員や資機材の分配の最適化に関するものが主であり、復旧活動全体を見通し、復旧に関する情報、復旧要員、復旧資機材の流れを構造化した研究は少ない。本研究ではそれらをまとめて復旧資源と定義する。そのような復旧資源の流れはライフラインの物理的な機構や復旧態勢により異なると考えられるが、この様な観点からの考察も十分でない。さらにライフラインの復旧活動における相互連関の影響に着目した研究はわずかであり、特に前述した復旧資源の流れが相互連関の中でどのようにふるまうのかは十分に検討されていない。

そこで本研究では、各ライフラインの復旧活動に関す

地震発生	本店										各店所災害対策本部				各務・種機関災害対策支部			
	本部長	情報班	広報班	復旧班	給電班	資材班	厚生班	総務班	支店	原子力発電所	火力発電所	建設所	火力発電所	変電所	制御所	支社	営業所	
	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	※第3非常体制自動発令 ※要員参加開始	
	復旧活動項目																	
	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	情報収集 ○地震情報 情報班、報道機関	
	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	○自社被害情報(施設) 情報班	
	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	○内閣府、都本 部、区本 部、経済 産業省、 東京消防 庁、支店 (安否) ※厚生班	
1時間	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	○一般被害情報 情報班	
	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	○部本部へ 出向(本部 派遣員)	
	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	○自衛隊派 遣要請	
24時間 (72時間)																		

復旧活動項目間のやりとり
 → 地震災害・当該ライフライン施設等の被害情報のやりとり
 → 復旧要員関係のやりとり
 → 復旧資機材関係のやりとり
 復旧資源の流れ
 * → 該当項目から関連項目への流れ
 * → 関連項目から該当項目への流れ

図1 電力の場合の応急復旧シナリオ表の概略(文献9)より抜粋し、加筆

る個々の復旧活動項目を明らかにし、各項目間でやりとりされる復旧資源の流れをネットワークとしてモデル化する。その際には、ライフラインの中でも特に社会への影響力が強いシステムとして、電力、都市ガス、通信、上水道、下水道の5つを取り挙げ、復旧活動の具体的な期間としては、災害発生直後よりおよそ72時間までの応急復旧活動期を対象とした。このような復旧資源の流れに関するネットワークモデルは、復旧活動の全体像を把握する上で有効である。これらが明らかとなれば、次の段階として各項目に必要な復旧資源の質や量をモデルに組み込み、その影響や感度を分析を行うことができる。その結果、地方自治体や当該ライフライン事業者が事前に被害想定を行ったり、防災計画を立案する際において、より現実的で有用な情報を与えると考えられる。なお、本稿では上述したネットワークモデルの構築に焦点を当てており、復旧資源の質や量を考慮した評価は今後の課題である。

2. 応急復旧活動のモデル化及び定量的分析

(1) 応急復旧活動のモデル化

豊田・庄司⁹⁾は、ライフライン事業者の防災業務計画画及びマニュアルから応急復旧活動を構成する項目(以下、復旧活動項目)を抽出し、それらに関わる主体及び時系列での流れの観点から整理することで、各ライフラインの応急復旧活動のシナリオを表の形で表現している(以下、応急復旧シナリオ表)。ここでは電力の応急復旧シナリオ表を模式的に表したものを図1に示す。なお、文献9)で作成されたシナリオは首都直下地震を想定した場合の東京都に関わるライフライン事業者を対象としたものであり、具体的には東京電力株式会社、東京ガス株式会社、東日本電信電話株式会社、東京都水道局、同下水道局を取り挙げている。それらの特徴に関しては文献9)において定性的に分析されている。

図1の横軸は当該事業者の応急復旧活動に関連する全ての主体を、縦軸は地震発生直後から72時間までの時間の流れを表し、「どの主体がいつどのような応急復旧活動を行うのか」を復旧活動項目として定義し、表の形でまとめている⁽¹⁾。また、復旧活動項目間の関係は、1)地震関連情報や当該ライフライン施設等の被害情報、2)復旧要員並びに3)復旧資機材に関わるやりとりの3つに分類され、各項目の表記の下に矢印で示されている。

本研究では、地震発生直後からおよそ72時間までの復旧活動項目間の関係を1つのネットワークと見なした上で、各復旧活動項目をノード、復旧活動項目間の情報、ヒト、モノのやりとりをリンクとして抽出し、図2に示すように有向グラフでモデル化した。その結果、電力の応急復旧シナリオはノード数73、リンク数236、ガスの場合はノード数66、リンク数187、通信の場合はノード数63、リンク数149、上水道の場合はノード数82、リンク数240、そして下水道の場合はノード数56、リンク数123のネットワークとしてモデル化された。次にそれに基づき隣接行列を構築する。ここでの隣接行列とは、復旧活動項目間の直接的な関係を2次元配列で表現したものであり、復旧活動項目*i*と*j*の間にやりとりがある場合には隣接行列の(*i,j*)成分に1を、やりとりがない場合には0をそれぞれ入力し、2つの復旧活動項目間の関係を[0,1]で表現する。応急復旧シナリオから有向グラフ及び隣接行列の作成例を図2に示す。

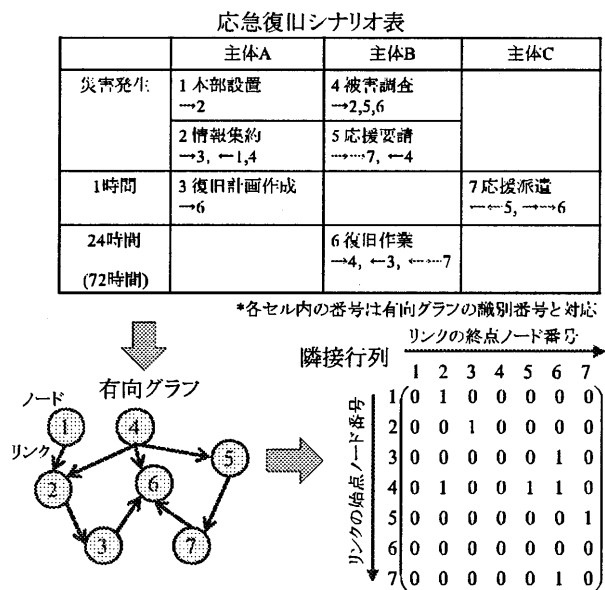


図2 応急復旧シナリオから有向グラフ及び隣接行列作成の流れ

(2) 復旧活動項目の関連度ならびに影響度の評価

本研究では、Decision Making Trial & Evaluation Laboratory method¹⁰⁾の考え方を参考として、前節の方法で構築した有向グラフの構造モデル化を行った。その際には、図2において、ある復旧活動項目*i*に着目した上で、復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目に与える影響の大きさを隣接行列の行和*X_i*で表し、また、復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目から受ける影響の大きさを隣接行列の列和*Y_i* (*j=i*)で表すことで、グラフ内における各復旧活動項目の特徴を次式より求められる関連度*R_i*ならびに影響度*I_i*の2つの指標で表現する。

$$R_i = X_i + Y_i \quad [1]$$

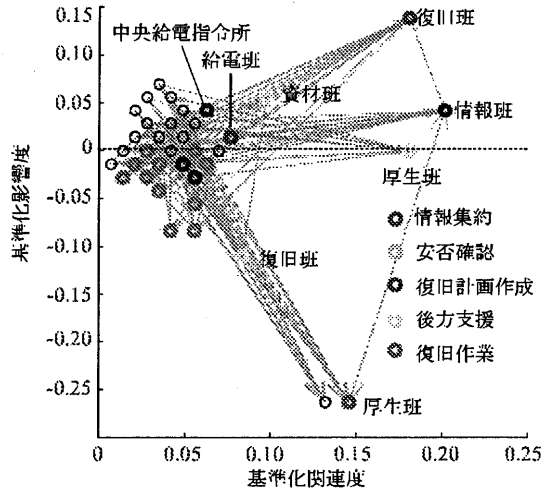
$$I_i = X_i - Y_i \quad [2]$$

ここで*R_i*は、当該復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目に与えた影響*X_i*と復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目から受けた影響*Y_i*の和であり、グラフ内における当該復旧活動項目*i*の他の復旧活動項目との関連の程度を表す。また*I_i*は、当該復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目に与えた影響*X_i*と復旧活動項目*i*が他の復旧活動項目から受けた影響*Y_i*の差であるため、復旧活動に対して実質的に与える影響を定量化できる。

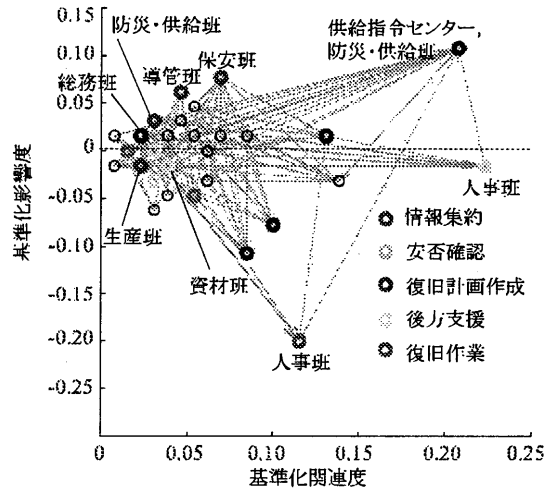
さらに本研究では、これら2つの指標を用いて各復旧活動項目に2次元座標(*R_i*, *I_i*)を定義し、これらの座標に基づいて、有向グラフを定量的にネットワークとして視覚化した。以上の手法を用いて、各ライフラインの応急復旧シナリオを有向グラフでモデル化した結果を図3に示す。なおその際には、前述した関連度*R_i*及び影響度*I_i*を基準化した値(以下、基準化関連度並びに基準化影響度と呼ぶ)である*SR_i*と*SI_i*をそれぞれ横軸及び縦軸にとることで各復旧活動項目の座標を規定し、さらに復旧活動項目間の関係を矢印で示した。関連度及び影響度の基準化に関しては、式[1],[2]で算出した*R_i*及び*I_i*を理論上考え得る最大値で除したものを*NR_i*と*NI_i*とし、式[3],[4]のように定義する。

$$NR_i = (X_i + Y_i) / 2(n-1) \quad [3]$$

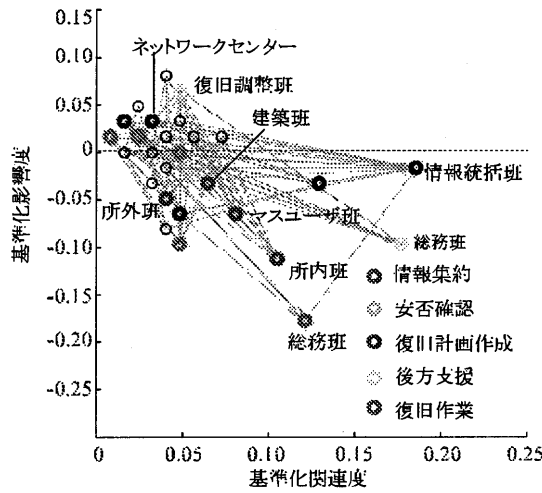
$$NI_i = (X_i - Y_i) / (n-1) \quad [4]$$



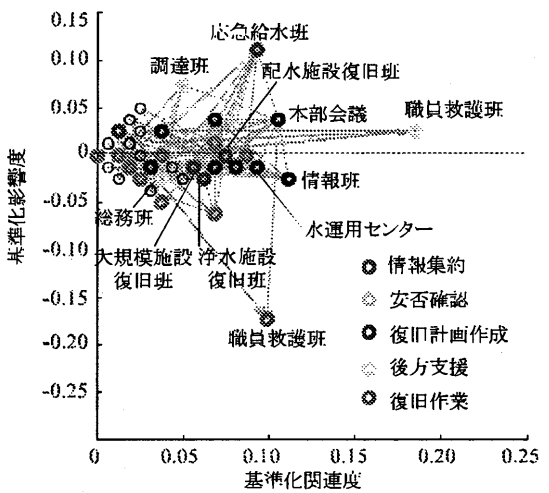
(a) 電力 ($N_n=73, N_l=236$)



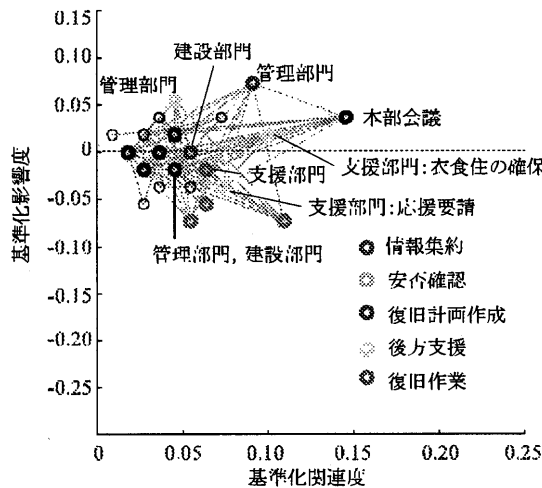
(b) ガス ($N_n=66, N_l=187$)



(c) 通信 ($N_n=63, N_l=149$)



(d) 上水道 ($N_n=82, N_l=240$)



(e) 下水道 ($N_n=56, N_l=123$)

図3 ライフライン復旧シナリオの関連度-影響度 (N_n : ノード数, N_l : リンク数)

このとき、関連度の最大値は、当該復旧活動項目を除くすべての復旧活動項目へ連結し($X_i=n-1$)、かつ当該復旧活動項目を除くすべての復旧活動項目から連結されている場合($Y_j=n-1$)であるため、 $2(n-1)$ となる。また、影響度の最大値は、当該復旧活動項目を除くすべての復旧活動項目へ連結し($X_i=n-1$)、かつ当該復旧活動項目を除く他の復旧活動項目のいずれからも連結されていない場合($Y_j=0$)であるため、 $(n-1)$ となる。当該復旧活動項目を除く理由としては、図1に示したような応急復旧シナリオでは復旧活動項目が時系列で整理され、同一項目間での情報又は復旧要員あるいは資機材のフィードバックは発生しないためである。以下、応急復旧活動において特に重要となる「情報集約」「安否確認」「復旧計画作成」「後方支援」「復旧作業」の5つの項目について、関連度と影響度の面からその特徴を考察する。

まず、各事業者の地震被害及び復旧活動に関する情報を収集する「情報集約」活動に関して、災害発生直後においては、電力の場合は給電指令所、ガスの場合は防災供給班内の供給指令センター、通信の場合はネットワークセンターそして上水道の場合は水運用センターのような、24時間体制でネットワークを監視している施設の役割が大きく、関連度は0.05~0.10、影響度は0近傍を示した。また、災害対策本部設置後では、事業者外との情

報のやりとりの窓口となる項目が電力で0.20、ガスで0.21、通信では0.19と高い関連性を示し、影響度については他の主体と相互に情報を授受するため、0付近の値を示した。具体的には、電力の場合は情報班、ガスの場合は防災供給班、通信の場合は情報統括班、上水道の場合は情報班、そして下水道の場合は管理部門及び建設部門等がこれらの活動を行う主体として挙げられる。さらに、上水道及び下水道については、局内での情報共有や応急復旧に関わる調整等を行うための本部会議が設けられ、それらに関する項目は0.10~0.15といずれも高い関連性を示した。

次に、職員の「安否確認」に係る項目は、いずれの応急復旧シナリオにおいても0.06~0.15と比較的高い関連性を示す一方で、影響度に関しては他の主体から情報を得る必要があるため、電力では-0.26、ガスでは-0.20、通信では-0.18、上水道では-0.17と負の高い値を示し、下水道についても-0.02と負の値を示した。これらの活動を担当する主体は、電力の場合は厚生班、ガスの場合は人事班、通信の場合は総務班、上水道の場合は職員救護班、下水道の場合は支援部門である。

同様に、「復旧活動の後方支援」関係の項目のうち、食糧や衣服、宿泊場所等の確保に関する活動は電力では0.18、ガスでは0.22、通信では0.18、上水道では0.19と高い関連性を示し、下水道に関しても0.10と比較的高い関連性を示した。これらの調達活動を行う主体は、電力の場合は厚生班、ガスの場合は人事班、通信の場合は総務班、上水道の場合は職員救護班、下水道の場合は支援部門である。

また、復旧作業に関する要員及び資機材の確保に関する項目については、関連度は0.03~0.09とライフラインに共通してやや低めであったことに対し、影響度については正と負の2つの傾向が見られた。まず電力においては、復旧班の場合は-0.11、資材班の場合は0.06と値が正負に別れた。その要因として、まず復旧班は各事業所と連携して復旧方針並びに必要な応援要員を決定するため、要請するまでに受け取る情報量が多く、逆に資材班の場合は復旧班の作成した復旧計画等を基に資材の配備を行うため、必要な情報量が比較的小さいためであると考えられる。次にガスの場合は総務班の0及び資材班の-0.01と値が0近傍の負を示したが、これは生産班・導管班・保安班のような、当該組織へ資機材の不足情報を与える主体数とガス協会やメーカーをはじめとする応援要請先の主体数とがほぼ同数であったためである。また通信の場合は、復旧調整班が所内班、所外班、建築班等からまとめて資機材の不足情報を受け取り、グループ会社や工事会社、輸送支援を行う事業者へ応援を要請するため、0.06と正の値を示した。上水道及び下水道については、上水道の場合は調達班が、下水道の場合は管理部門が復旧資機材の調達を行うこととなっており、上下水道関係協会をはじめ協定を結ぶ他県都市や工事会社等複数の外部主体へ応援を要請することから、共に0.07と影響度が正であった。その一方で、上水道の場合は総務班、下水道の場合は支援部門による応援要請がそれぞれ-0.02、-0.03と負の値を示したが、これらの主体は自衛隊やボランティア、東京都他局といった復旧支援要員の確保に関して、東京都へ一括して要請を行っており、情報の送り先が限られていることがその要因であると考えられる。

本社等指令系での「復旧計画作成」に係る項目についても、その影響度が正と負の2つの傾向に別れた。まず電力の場合は給電班が0.01、復旧班が0.14と共に正の値であったが、これは給電班は給電指令所や変電所等での

系統切替作業を、復旧班は配電線や被災施設の復旧作業を行う支店や現地作業班の活動を一括して指揮するため、当該組織から発信される情報量が多かったためである。一方、ガスの場合は管路や需要家施設の復旧を担当する保安班・導管班及び防災・供給班がそれぞれ0.08、0.06、0.03と正の値を示し、ガスの生産活動を担当する生産班は-0.02と負の値を示した。これは、前者が管理する管路の復旧状況を踏まえた上で、ガスの生産活動を調整する必要があるため、そのため生産班の受け取る情報が多くなるためだと考えられる。同様の傾向として、下水道の場合は管路及び処理場復旧を担当する管理部門については0.07と正の値を示したが、工事現場や建物の復旧を担当する建設部門では0であった。これは、管路や処理場といった下水道システムの復旧状況を勘案して後者の復旧が調整されるためと考えられる。また通信では、所外班の-0.06、所内班の-0.11、建築班の-0.05、マスマニューザ班の-0.03というように、関連するすべての組織で値が負であったが、これは施設ごとに復旧を指揮する班が分かれており、班の間での調整が必要となるためである。同様に、上水道の場合は応急給水班による応急給水計画の作成が0.11と正の値を示したが、浄水施設復旧班の-0.02、配水施設復旧班の0、大規模施設復旧班の-0.01のように施設の復旧作業に関連した組織では影響度が負の値を示した。

一方で、各事業所等での具体的な「応急復旧作業の実施」に係る項目については、指令系からの指示や資機材及び応援要員の受け入れという観点から、0~-0.12とほぼ一律に影響度が負の値を示した。これは、本分析で対象とした復旧シナリオが地震発生から72時間以内の応急復旧活動を対象としており、それ以降の本復旧のシナリオは考慮されていないためである。

(3) 復旧活動項目間の連結性の評価

(2)で示した関連度-影響度評価においては、各復旧活動項目が直接的に他の項目に与える影響のみを反映している。そこで、間接的な影響を含めて各々の復旧活動項目が応急復旧シナリオで果たす役割を評価するために、任意の復旧活動項目のペアを考え、それらの連結性を「最短経路の距離」ならびに「最短経路として選択された回数 S_{ij} 」を指標として評価した。ここで、「経路」とはあるノードペアを連結するリンク全体のことであり、その「距離」は通過するリンク数を示す。そのため、あるノードペアの「最短経路」とは、当該ノード間を結ぶリンクのうち、最も構成リンク数の少ないものと定義される。また、以上の作業を有向グラフ内で考えられるすべてのノードペアに対して行い、各リンクが何回最短経路を構成するリンクとして選択されたかを示す指標が「最短経路として選択された回数」である。この時、まず各ノードペアの最短経路に対して「1/最短経路の距離(最短経路の構成リンク数)」を算出し、次にこの値を当該ノードペアの最短経路を構成する各リンクに割り振る。この作業をすべてのノードペアに対して繰り返した上で、当該リンクにおけるそれらの数値を足し合わせたものを「最短経路として選択された回数」と定義した。

最短経路の距離を評価指標とした理由は、復旧活動項目間で情報、復旧要員、復旧資機材の授受が行われる際には、経由する復旧活動項目間の距離が最小である経路ほど現実的に選択され易いと考えられ、応急復旧シナリオの中でも特に重要であることが評価できるためである。また、最短経路として選択された回数を評価指標とした理由は、各やりとりがどの程度頻りに選択されているか

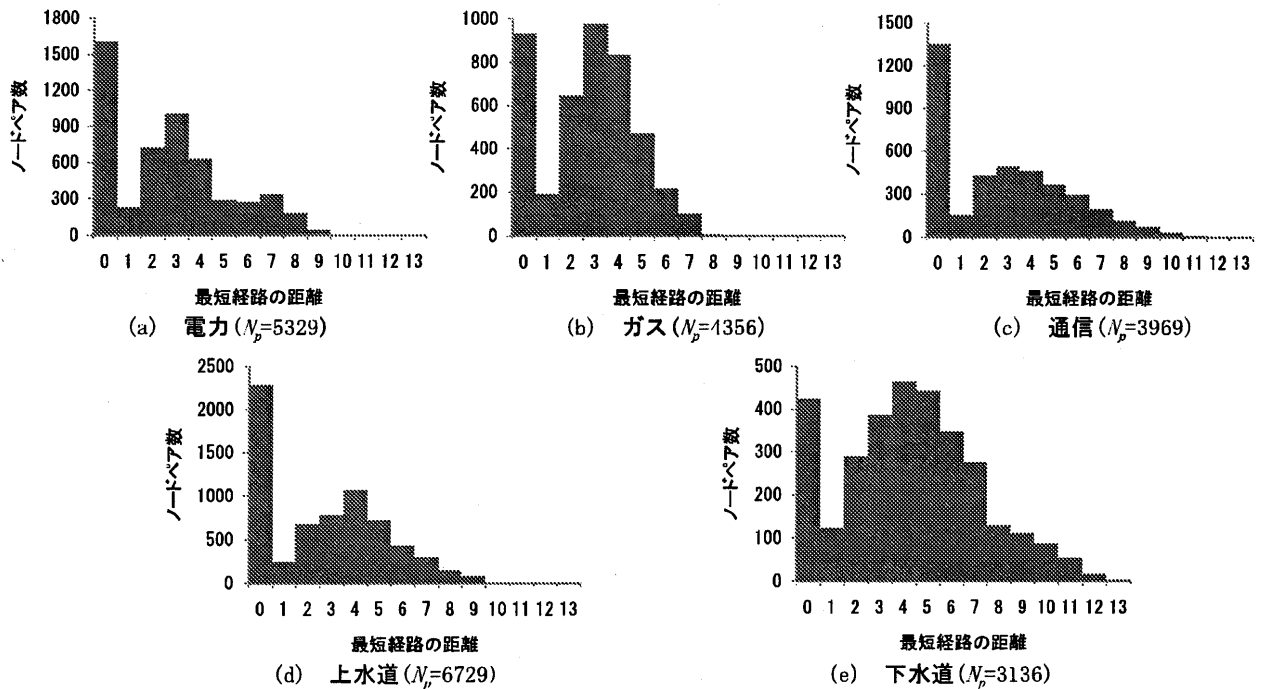


図4 最短距離の分布 (N_p : 全ノードペア数)

を定量化できるためである。以上の評価手法を用いて各応急復旧シナリオを評価した結果を示す。図4は全ノードペアにおける最短経路の距離の分布を示してあり、いずれのライフラインに関しても3~4前後の頻度が最も高い結果となった。距離が3のノードペアの例としては、電力の場合の「支社での修理依頼受付」→「情報班による問い合わせ内容の集約」→「本部での復旧計画作成」や通信の場合の「ネットワーク運営センターでの被害情報収集」→「情報統括班による情報集約」→「所外班での復旧計画作成」のように1)被害情報の集約から復旧計画の作成に至る経路の他、下水道の場合の「管理事務所での安否確認」→「管理部門での管轄施設の状況把握」→「事務局での職員再配置計画の作成」のように2)安否確認情報の復旧計画への反映経路、上水道の場合の「応急対策会議での復旧方針の決定」→「応急給水班での給水計画の作成」→「営業所での応急給水活動の実施」のように3)復旧計画の策定から作業実施に至る経路、さらにガスの場合の「IT統括班による被害調査」→「応援要請」→「日本ガス協会による復旧支援」のように4)被害調査から後方支援の要請に至る経路等がある。以上の流れを図5にまとめる。

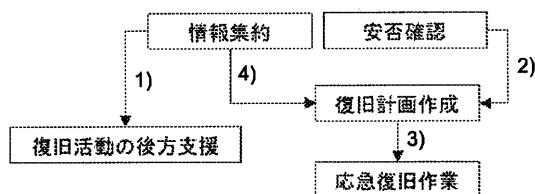


図5 復旧活動項目間の関係

なお、図4にはこのようなリンクを介して連結しないノードペアが、電力の場合30%、ガスの場合21%、通信の場合34%、上水道の場合34%、下水道の場合14%、道路の場合19%存在する。最短距離が0のペアとはリン

クを介して連結していないノードの組み合わせのことであるが、時系列を遡るノードペアの他、各ライフラインの応急復旧シナリオにおいて同時期に実施される復旧活動項目は、項目間で直接的なやりとりが行われない限り、連結しない。

次に図6に各リンクの最短経路として選択された回数の分布を示す。その際には全体の傾向を把握するため、図4の結果より、いずれのライフラインについても全ノードペアの75%以上を網羅する最短経路の距離が6以下のペアを対象に最短経路の探索を行い、各リンクの最短経路として選択された回数の算出を行った。また、図6には各リンクをライフライン事業者内部の主体間を結ぶリンク(内部×内部と表記)、事業者と外部主体を結ぶリンク(内部×外部)及び外部主体間を結ぶリンク(外部×外部)に分類して示す。

最短経路として選択された回数中央値は、電力の場合27.8、ガスの場合48.0、通信の場合32.5、上水道の場合36.1、下水道の場合42.1であった。分布の形状に着目すると、階級により頻度差があるものの、電力及び上水道は共に右下がりの分布を示しており、電力及び上水道は特に1~10回の頻度が高く、通信は他の2つと比較すると傾きが緩やかであった。一方、ガス及び下水道には明確な減少傾向は見られなかった。次に、この頻度差について詳しく見ると、各ライフラインに共通して10~20回、中央値周辺そして100回以上のリンク数が多いことがわかり、特にガス及び下水道でこの傾向が顕著であった。

次に、具体的に最短経路として選択された回数が多いリンクに着目すると、図6において青色で示される事業者内部を結ぶリンクに関しては、電力の場合の「情報班による被害・対応状況の集約」→「復旧班による復旧計画の作成」(529回)やガスの場合の「防災・供給班による被害・対応状況の集約」→「製造供給計画の作成」(129回)に代表される情報集約と復旧計画の作成を結ぶ被害情報の流れや、通信の場合の「総務班による社員安

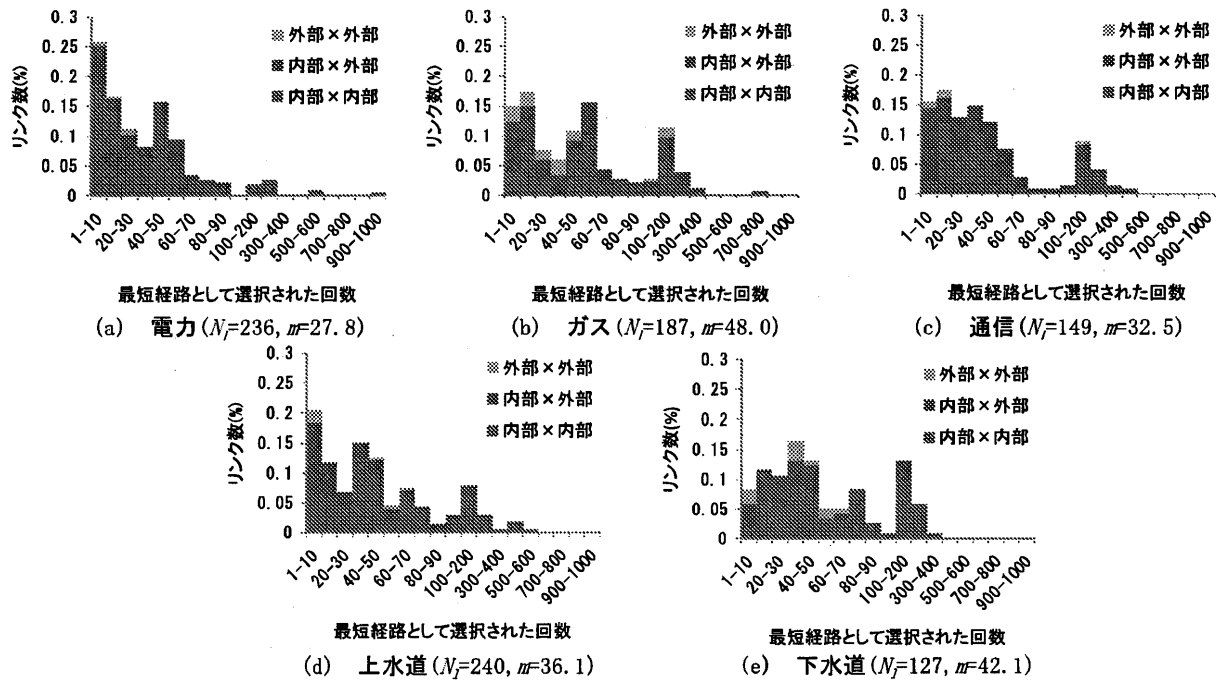


図6 最短経路として選択された回数の分布 (N_i : リンク数, m : 中央値)

否情報の把握」→「復旧調整班による情報集約」(201回)や下水道の場合の「支援部門による社員安否情報の把握」→「本部会議」(348回)のような安否情報の流れに関係するものが各ライフラインに共通して挙げられる。また復旧要員や資機材に関係するやりとりに関しては、上水道の場合の「情報班による被害情報の集約」→「職員救護班による食料、宿泊場所等の確保」(370回)のような応援要請に関連したリンクが選択される頻度が高かった。

一方、個々のライフラインに着目すると、上水道の場合の「浄水施設復旧班による管理施設の被害状況把握」→「本部会議」(236回)や「応急対策会議」→「応急給水班による給水計画作成」(149回)、また下水道の場合の「建設部門による工事現場及び構造物の被害状況把握」→「本部会議」(233回)や「本部会議」→「支援部門による復旧要員及び資機材の調達活動」(138回)のように、上水道及び下水道に関しては災害対策本部内で行われる会議に関連したリンクが最短経路として頻りに選択されていることがわかった。また、上水道の場合の「浄水管理事務所による浄水場被害の調査」→「水運用センターでの情報収集」(196回)や、通信の場合の「現地対応班の現地調査」→「ネットワークセンターでの情報収集」(415回)、電力の場合の「中央給電指令所での系統切り替え作業」→「店所給電指令所での系統切り替え作業」(211回)のように、電力、通信及び上水道に関しては、システム構成施設の現状把握や系統操作指が等、監視施設が関連したリンクが多く選択される傾向にあった。

3. ライフラインの応急復旧シナリオにおける相互連関

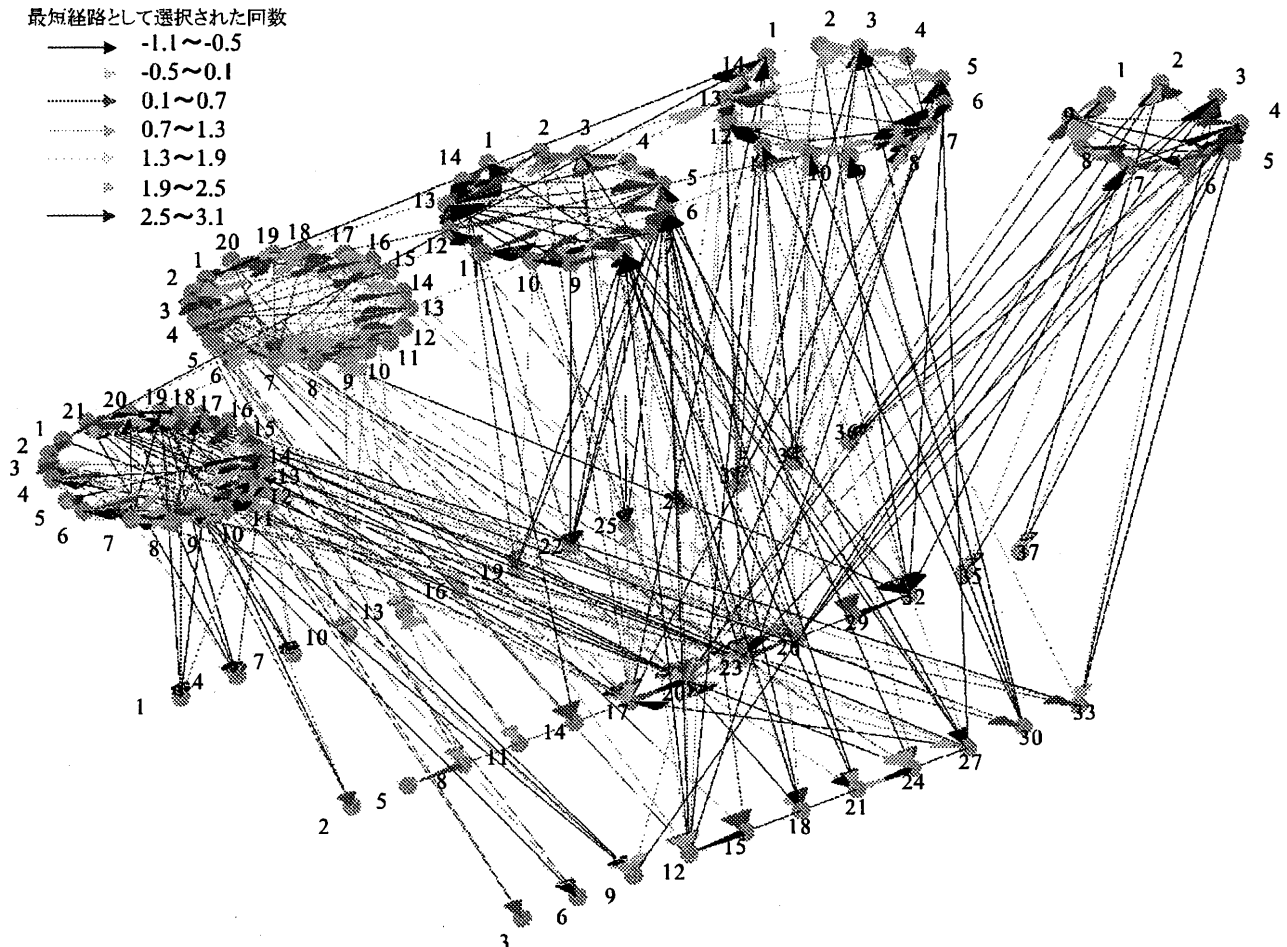
本章では、2章で作成した応急復旧シナリオのモデルにおいて、各ライフライン事業者と外部主体との関係を狭義の相互連関と定義し、図5において赤色で示されるライフライン事業者と外部主体間でのやりとりの観点か

ら主体間の関係及びその強弱をモデル化する。その際には、2章(3)の結果より、ノード i の最短経路として選択された回数 S_i に着目し、式[5]を用いて標準化した値 NS_i を用いて各リンクの連結性を評価した。

$$NS_i = \frac{(S_i - \mu)}{\sigma} \quad [5]$$

ここで、 μ は図6で示した「最短経路として選択された回数」の分布における平均値であり、 σ はその標準偏差を示す。以上の手法を用いて各ライフラインごとに評価された復旧活動項目間の連結性を、該当する項目を実施する主体間の連結性とし、ライフラインの復旧活動に関わる主体の関係を定量的に評価した結果を図7に示す。なお、その際には、 NS_i を-1.1~3.1の間で0.6刻みの7段階で表示している。

図7より、まず情報のやりとりに関しては、各ライフラインに共通して見られた傾向として、電力の場合の「東京都災害対策本部(以下、都本部)」→「情報班による情報集約」(90回)やガスの場合の「都本部」→「防災・供給班による情報集約」(302回)、通信の場合の「都本部」→「情報統括班による情報集約」(209回)、上水道の場合の「都本部」→「情報班による情報集約」(179回)、下水道の場合の「都本部」→「局長」(178回)のように、災害情報の収集に関する東京都との強い関係が見られた。特に道路関連の情報に関しては、東京都災害対策本部内に設置される道路調整会議において集約、共有されることになっており、各ライフラインの復旧調整に活用される。また、各ライフラインについて具体的にみると、災害情報の収集に関して、電力の場合は「経済産業省」→「情報班」(73回)、ガスの場合は「内閣府」→「防災・供給班」(102回)というような関係省庁との連絡も重要となっている。さらに、電力の場合の「東京消防庁」→「情報班による情報集約」(55回)やガスの場合の「女社による被害情報集約」→「道路管理者」(90回)「導管及び事業部による導管被害状況の把



電力	ガス	通信	上水道	下水道
1 本部	1 広銀班	1 本社	1 本部(本部長)	1 本部(局長)
2 情報班	2 総務班	2 ネットワーク運営センター	2 本部(副本部長)	2 事務局
3 広報班	3 人事班	3 (支店)情報統括班	3 本部会廳	3 下水道局本部会廳
4 復旧班	4 経理班	4 (支店)復旧調整班	4 応急対策会廳	4 支援部門
5 給電班	5 資材班	5 (支店)所外班	5 本部(初動要員)	5 管理部門
6 資材班	6 管材班	6 (支店)所内・専用・電力班	6 情報班	6 建設部門
7 厚生班	7 お客様保安/リビング企画班	7 (支店)建築班	7 総務班	7 管理事務所
8 総務班	8 支社	8 (支店)お客様・マスマニユーザ班	8 職員救護班	8 水再生センター
9 支店	9 管管班	9 (支店)総務班	9 調査班	9 建設事務所
10 原了力発電所	10 管管事業部	10 (支店)広報班	10 応急給水班	
11 火力事業所	11 防災・供給班(事務局)	11 (現地)情報統括班	11 浄水施設復旧班	
12 建設所	12 エネルギー生産統括班	12 (現地)故障受付班	12 配水施設復旧班	
13 火力発電所	13 工場	13 (現地)マスマニユーザ班	13 大規模施設復旧班	
14 変電所	14 IT統括班	14 (現地)総務班	14 水運用センター	
15 制御所			15 水質センター	
16 支社			16 水道特別作業隊	
17 営業所			17 水源管理事務所	
18 中央給電指令所			18 支所	
19 基幹給電指令所			19 営業所	
20 店所給電指令所			20 浄水管理事務所	
			21 建設事務所	

外部主体	9(電力)グループ企業	16 気象庁	24 東京都港湾局	31 報道機関
1 河川管理者	ボランティア(東京ボランティア・市民活動センター)	17 警視庁	25 内閣府	32 (通信)グループ会社
2 (水道)材料製造会社		18 日本ガス協会	26 自衛隊	33 燃料会社
3 水道協会		19 海上保安庁	27 道路管理庁(東京都建設局・建設事務所)	34 (下水道)協定都市
4 東京建設業協会	11 中央電力協議会	20 東京都災对本部		35 (通信)工事会社
5 厚生労働省	12 他電力会社	21 (ガス)グループ会社		36 下水道協会
6 (水道)協定都市	13 東京消防庁	22 国土交通省(国道工事事務所)	28 総務省	37 (下水道)工事会社
7 (水道)工事会社	14 経済産業省	23 区市町村災对本部	29 金融機関	
8 東地域電力技術会議	15 電力系統利用協議会		30 輸送事業者	

図7 外部主体との関連から俯瞰した相互関連モデル

握」→「警視庁」(226回)のように、被害情報収集及びそれらの周知に関して、電線の場合は消防、ガス管に関しては警察及び道路管理者と強い関係にあることがわかる。また、電力の場合はマニュアルに道路管理者との関係が記載されていなかったが、前述した道路調整会議を通して関連した情報を収集するものと考えられる。

次に、復旧要員や復旧資機材のやりとりに関係した主体に着目すると、電力の場合の「復旧班による復旧計画の作成」→「他電力会社による復旧支援」(56回)やガスの場合の「日本ガス協会による復旧支援」→「IT統括班による通信システム復旧活動」(131回)、通信の場合の「所内班による応援要請」→「工事会社による復旧支援」(51回)、上水道の場合の「配水施設復旧班による応援要請」→「協定他都市による復旧支援」(85回)や「応急給水班による応急給水計画作成」→「自衛隊による給水活動支援」(101回)、下水道の場合の「支援部門による応援要請」→「都本部による応援要員確保」(129回)のように、ライフラインごとに関係の強い主体が異なった。一方で、ガスと通信に関しては、ガスの場合の「管材班による前進基地確保」→「都本部によるオープンスペース管理」(93回)や通信の場合の「総務班による中間基地確保」→「都本部によるオープンスペース管理」(139回)に見られるよう、復旧拠点確保に関しては都本部との関係が強く、復旧活動の重複によるスペースの不足が懸念される。さらに通信に関しては、「電力関係設備復旧に関する情報及び支援」→「電力班による電力設備の復旧」(67回)や「本社による応援要請」→「水道事業者による冷却水提供」(64回)のように電力系設備の管理及び非常川発電機運用と共に関連した外部主体との協力が重要であると考えられる。

また復旧要員や復旧資機材の輸送に関しては、通信の場合の「情報統括班による応援要請」→「自衛隊による輸送支援」(156回)や上水道の場合の「都本部による緊急通行車両確認標章の発行」→「支援部門による車両管理」(上水道、95回)のように自社で所有する車両の効率的な運用だけでなく、通行証の獲得による実行力確保や、関連した主体との協力を含めた輸送体制の確立が不可欠になると考えられる。

4. 結論

本研究では、ライフライン事業者の防災業務計画及び地震対策マニュアルを基に作成された応急復旧シナリオを有向グラフでモデル化し、それらの特徴及び外部主体との関係を評価した。その際には、各復旧活動項目をノード、項目間のやりとりをリンクとして示し、関連度・影響度及び最短経路として選択された回数を指標として各ノード及びリンクの特性を定量的に評価した。さらに、ライフラインの応急復旧活動に関連する外部主体との関係から応急復旧活動の相互連関を情報、復旧要員、復旧資機材のやりとりの視点から規定した。以上より、得られた知見は以下4点である。

1) 復旧活動項目の影響度及び関連度は、「情報集約」に関する項目はいずれのライフラインでも関連度が高く、影響度が0近傍を示した。また、災害発生直後はシステム監視施設が、本部設置後は社内情報の集約を担当する組織の役割が大きかった。「安否確認」に関する項目は、情報の問い合わせ先が多いため関連度が高く、影響度が

負の方向に高い傾向となり、「応急復旧作業の実施」に関連する項目は復旧計画に基づいた指示を受けるため、ほぼ様に負の値を示した。「復旧活動の後方支援」及び「復旧計画作成」に関しては、ライフラインごとに特徴が見られ、「復旧活動の後方支援」に関しては社内情報のとりまとめ方と応援要請先の数が影響し、「復旧計画作成」に関しては施設間の復旧優先順位の影響が見られた。

2) 復旧活動項目間を結ぶ最短経路に関しては、いずれのライフラインに閉しても距離が3になる場合が最も多く、その例として、被害情報の集約から復旧計画の作成に至る経路、安否確認情報の復旧計画への反映経路、復旧計画の策定から作業実施に至る経路、そして被害調査から後方支援の要請に至る経路が挙げられた。

3) 各リンクの「最短経路として選択された回数」を指標としてリンクの重要度を評価した結果、このうち事業者内部の主体間を結ぶリンクに関しては、各ライフラインに共通して情報集約と復旧計画の作成を結ぶ被害情報や安否情報の流れ、応援の要請に関する復旧要員・復旧資機材関係の情報の流れが選択される頻度が高かった。

一方で、個々のライフラインに見られた特徴として、上水道及び下水道に関しては本部会議に関連したやりとりが、また電力、通信、上水道に関してはシステム監視施設とのやりとりが選択される頻度が高かった。

4) 同様にライフライン事業者と外部主体との関係に着目した結果、各ライフラインに共通して、災害情報の収集に関する東京都災害対策本部との強い関係が見られた。また個々のライフラインごとに見ると、電力及びガスに関して災害情報の収集に関する関係省庁とのやりとりや電線やガス管に関する被害情報収集及びその周知に関して消防・警察及び道路管理者と強い関係にあることがわかった。次に復旧要員及び資機材に関しては、ライフラインごとに関係の強い主体が異なったが、ガスと通信に関してはオープンスペースの確保に関して東京都災害対策本部への要請が重複し、いずれの場合も復旧活動全体に強い関係が見られた。さらに通信に関しては電力事業者や水道事業者のような他のライフライン事業者とも強い関係にある。また、復旧要員や復旧資機材の輸送に関しては、通信の場合の自衛隊による輸送支援や、上水道の場合の東京都災害対策本部への緊急通行車両確認標章の申請のように、車両の確保に加えた外部主体との関係が強く見られた。

補注

(1) 文献9)では、図1に示すように復旧活動に関連する主体を横軸に、時間を縦軸に示した上で、各ライフラインの地震災害時における応急復旧活動を定性的にモデル化している。時間の表記に関しては、発災から1時間以内、1時間～24時間、24時間～72時間の3フェーズに分類し、各復旧活動項目の開始時間を示している。業務の実行は、原則的に項目の記述順に行われると想定されているが、この中でも特に1時間以内のフェーズにおける復旧活動についてはほぼ同期的に開始されるため、特に記述の順序は意味をなさないとしている。また、シナリオ内の空欄は、主体により各フェーズで開始する復旧活動の量に相違があるため、生じたものである。上記の資料中に対応時間が明記されていないものに関しては筆者らが記載内容の文脈等から推測して示している。

謝辞

本研究は、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト「広域的危機管理・減災体制の構築に関する研究」（研究代表者、京都大学・林春男教授）の助成を得て実施されました。その際には、本プロジェクトにおけるライフライン研究グループ（リーダー、千葉大学・山崎文雄教授）のメンバーの方々からは貴重な御助言等を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)星谷勝, 宮崎正敏: 上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測, 土木学会論文報告書, 331号, pp.45-54, 1983.3
- 2)Kozin, F. and Zhou, H., : System Study of Urban Response and Reconstruction due to Earthquake, Journal of Engineering Mechanics, Vol.116, No.9, pp.1959-1972, 1990
- 3)佐藤忠信, 一井康二: 遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究, 土木学会論文集, No.537, pp.245-256, 1996
- 4)Chang, E. S., Shinozuka, M., Moore, E. J., : Probabilistic Earthquake Scenarios: Extending Risk Analysis Methodologies to Spatial Distributed Systems, Earthquake Spectra, Vol.16, No.557, pp.557-572, 2000
- 5)星谷勝, 大野春雄, 山本欣弥: あいまい理論によるライフライン機能の震災影響波及の構造化, 土木学会論文集, 344号, pp.323-331, 1984
- 6)能島暢呂, 亀田弘行: 地震時のシステム相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法, 土木学会論文集, 507号, pp.231-241, 1995
- 7)野田茂, 西村和之: ライフラインの復旧支援と震災対策に関するアンケート調査, 第24回地震工学発表会講演論文集, pp.1201-1204, 1997
- 8)秦康範, 日黒公郎: 兵庫県南部地震後の各種ライフラインの復旧活動と復旧阻害要因の影響について, 第25回地震工学発表会講演論文集, pp.1077-1080, 1999
- 9)豊田安山美, 庄司学: ライフライン事業者が想定する地震時応急復旧活動のシナリオとその相互依存関係—首都直下地震を想定した場合の事例分析—, 地域安全学会論文集, No.10, pp.55-65, 2008
- 10)Fontela, E. and Gabus, A.: DEMATEL Structural Analysis of the World Programatique, Battelle Report, Geneva, 1974
- 11)東京都防災会議: 東京都地域防災計画 震災編, 2007, <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/plan-sinsai.html>
- 12)東京電力株式会社 HP, <http://www.tcpco.co.jp/>
- 13)東京ガス株式会社 HP, <http://www.tokyo-gas.co.jp/>
- 14)NTT 東日本株式会社 HP, <http://www.ntt-east.co.jp/>
- 15)東京都水道局 HP, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>
- 16)東京都下水道局 HP, <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/>

(原稿受付 2009.9.04)

(登載決定 2010.1.08)