

3.5.4 交通インフラ網等の復旧を基点とした広域連携による復旧効率化に関する検討

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

広域連携による復旧効率化を目標とし、各種ライフラインの復旧関連情報伝達ならびに復旧活動の広域連携による復旧効率化モデルの提案と、そのモデルに立脚した広域連携復旧ガイドラインの策定及びガイドライン運用方策の開発・実装を行う。

具体的には、交通インフラ網の復旧効率化から得られる各種ライフラインの広域連携復旧モデルを提案し、首都圏の社会・経済機能に与えるマイナスのインパクトを最小化・最適化する広域連携復旧方策のガイドラインを作成する。

(b) 平成21年度業務目的

平成20年度に開発した広域連携・復旧効率化モデルのプロトタイプ¹⁾の修正・再検討を行い、広域連携・復旧効率化案を具体化する。

また、平成20年度の検討結果より、道路網の中でも広域連携に直結する一般国道クラスの道路網を対象を絞り、これらの被災に伴う機能不全が電力、ガス、上水、下水、通信等の各種ライフラインの復旧遅延に与える影響や、その具体的な影響に対応した広域連携・復旧効率化案を明らかにする。

また、アメリカ・オークランドで開催される TCLEE2009(ライフライン地震工学専門委員会会議)での発表および情報収集により、広域連携・復旧効率化シナリオのネットワークモデルの分析を行い、定量的指標の拡充を行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
筑波大学大学院システム情報工学研究科	准教授	庄司学	

(2) 平成21年度の成果

(a) 業務の要約

平成20年度に開発した広域連携・復旧効率化モデルのプロトタイプ¹⁾の修正・再検討を行い、広域連携・復旧効率化案を具体化した。成果としては、以下の2点に要約される。

- 適切な広域連携と復旧効率化をはかるためには、復旧活動のプロセスに関わる俯瞰的な相互関連モデル(広域連携・復旧効率化モデル)が必要となるため、そのプロトタイプモデルを定量的な感度解析が実施可能なレベルにまでアップデートした。
- 広域連携・復旧効率化モデルをベースとして、広域連携・復旧効率化案の具体化に際しては、交通インフラの中でも広域連携に直結する緊急交通路・緊急輸送路クラスの道路網を対象を絞り、これらの発災時の交通状況(混雑状況など)や発災直後の物理的被害の状況(計測震度による暴露量など)が電力、ガス、上水、下水、通信等の各種ライフラインの応急復旧活動に与える影響を定量的に明らかにした。特に、水処理系ライフラインの中の下水道については、それらの応急復旧活動時において協定都市

の拠点から東京都の災害拠点までの緊急交通路の経路選択の具体案を示した。

- ・新型インフルエンザによる渡航制約により TCLEE2009 での発表および情報収集が取りやめとなったため、土木学会全国大会、ICOSSAR、及び、土木学会「相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム」への参加によってそれらの用務を代用し、広域連携・復旧効率化シナリオのモデル分析を深化させ、定量的指標の拡充を行った。

(b) 業務の成果

1) 広域連携・復旧効率化モデルのプロトタイプの修正・再検討

a) 応急復旧シナリオの有向グラフ及び隣接行列によるモデル化

平成 20 年度においては、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、復旧活動項目と呼ぶ）を抽出し、それらに関わる主体及び時系列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た（以下、応急復旧シナリオ表と呼ぶ）。ここでは、一例として、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、作成したシナリオは首都直下地震を想定した場合の主に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¹⁾、具体的には電力（東京電力株式会社）²⁾、都市ガス（東京ガス株式会社）³⁾、電話通信（東日本電信電話株式会社）⁴⁾、上水道（東京都水道局）⁵⁾、下水道（東京都下水道局）⁶⁾を取り上げている。それらの特徴に関しては平成 20 年度において定性的に分析し、成果として取りまとめている。

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」を個々の復旧活動項目として定義し、表の形でまとめている。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。

次に、このような応急復旧シナリオ表に基づき、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。このような復旧活動のプロセスに関わるモデルに基づいて、適切な広域連携と復旧効率化を定量的に評価することが可能となるため、これ以降、本研究においてはこれらのモデルを広域連携・復旧効率化モデルと呼ぶことにする。

以上より、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、これらのモデルに基づき、定量的な感度解析を行うことができるように、それぞれの有向グラフに対応した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。

応急復旧シナリオ表

	主体A	主体B	主体C
災害発生	1 本部設置 →2	4 被害調査 →2,5,6	
	2 情報集約 →3, ←1,4	5 応援要請 →7, ←4	
1時間	3 復旧計画作成 →6		7 応援派遣 ←5, →6
24時間 (72時間)		6 復旧作業 →4, ←3, ←7	

*各セル内の番号は有向グラフの識別番号と対応

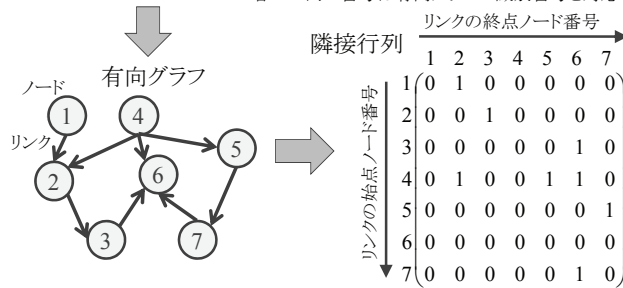


図2 応急復旧シナリオ表から有向グラフ及び隣接行列の作成までの流れ

b) 応急復旧シナリオのネットワークモデル化

本研究では、Decision Making Trial & Evaluation Laboratory method⁷⁾の考え方を参考として、作成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_j ($j=i$) で表すことで、有向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。

$$R_i = X_i + Y_j \tag{1}$$

$$I_i = X_i - Y_j \tag{2}$$

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_j の総和であり、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_j の差であるため、他の復旧活動に対して当該復旧活動項目*i*が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。

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

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

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。

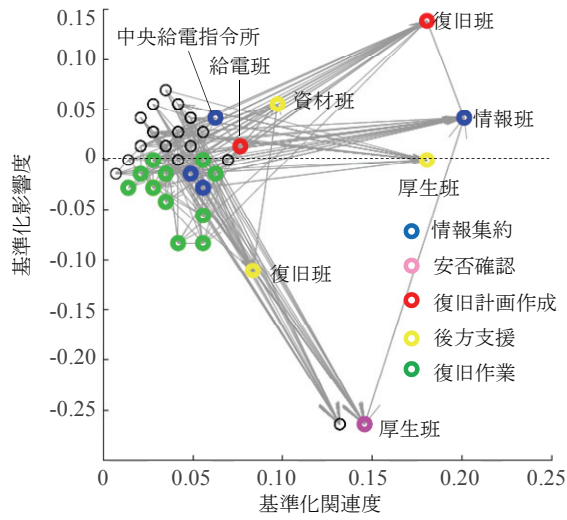
c) 応急復旧シナリオの関連度ならびに影響度に関する考察

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。

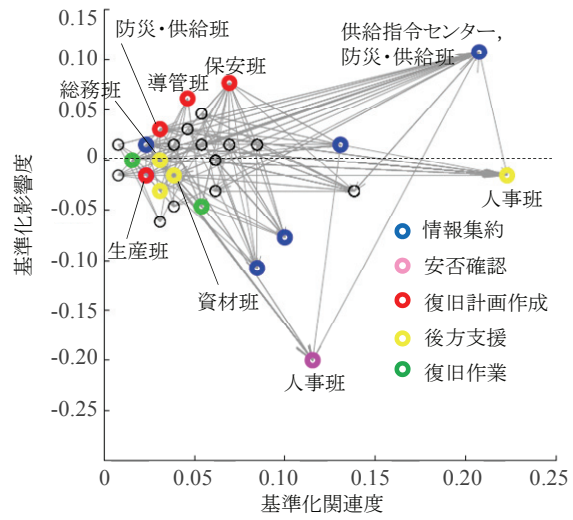
まず、各事業者の地震被害及び復旧活動に関する情報を収集する「情報集約」活動に関して、災害発生直後においては、電力の場合は給電指令所、ガスの場合は防災供給班内の供給指令センター、通信の場合はネットワークセンター、そして上水道の場合は水運用センターのような24時間体制でネットワークを監視している施設の役割が大きく、関連度は0.05~0.10、影響度は0近傍を示した。また、災害対策本部設置後では、事業者外との情報のやりとりの窓口となる項目が電力で0.20、ガスで0.21、通信では0.19と高い関連度を示し、影響度については他の主体と相互に情報を授受するため、0付近の値を示した。具体的には、電力の場合は情報班、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度を示した。

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と比較的高い関連度を示す一方で、影響度に関しては他の主体から情報を得る必要があり、他の主体から影響を受ける度合いが大きくなるので、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。

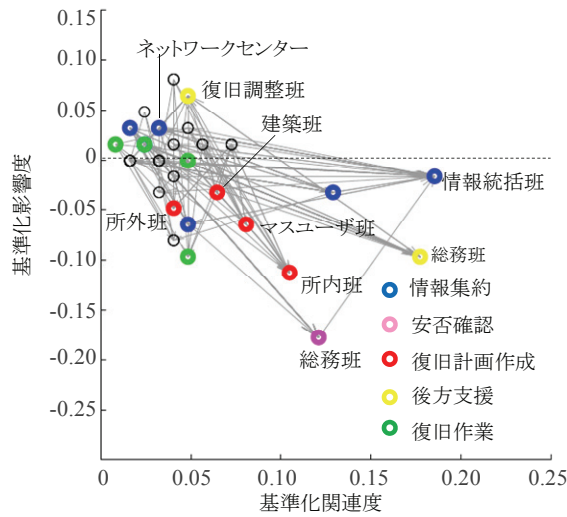
同様に、「復旧活動の後方支援」関係の項目のうち、食糧や衣服、宿泊場所等の確保に関する活動は電力では0.18、ガスでは0.22、通信では0.18、上水道では0.19と高い関連度を示し、下水道に関しても0.10と比較的高い関連度を示した。これらの調達活動を行う主体は、電力の場合は厚生班、ガスの場合は人事班、通信の場合は総務班、上水道の場合は職員救護班、下水道の場合は支援部門である。



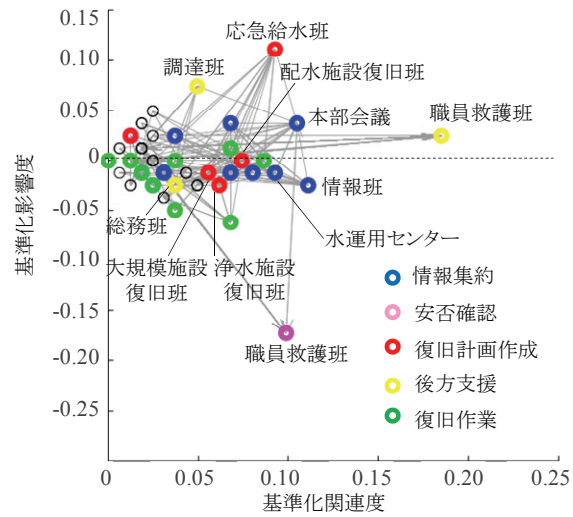
(a) 電力 ($N_n=73$, $N_l=236$)



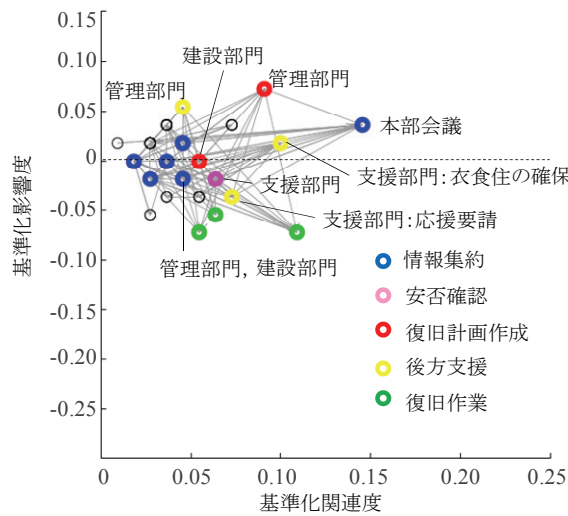
(b) ガス ($N_n=66$, $N_l=187$)



(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 応急復旧シナリオの関連度と影響度の関係 (N_n : ノード数, N_l : リンク数)

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るのに対し、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と値が正負に分かれた。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な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」に係る項目に関しても、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いためである。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り、そのため生産班の受け取る情報が比較的多くなるためと考えられる。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、マスメーカー班の-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とほぼ一様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。

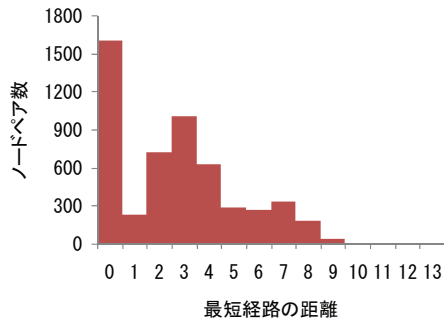
d) 復旧活動項目間の連結性の評価指標

c) で示した関連度と影響度の評価においては、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_i 」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得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。

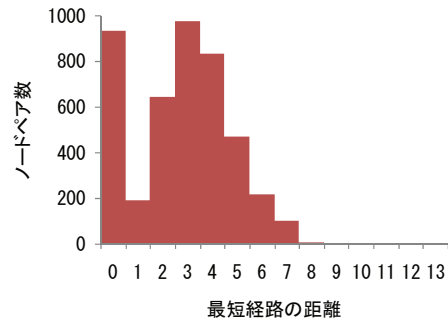
最短経路の距離を評価指標とした理由は、復旧活動項目間で情報、復旧要員、復旧資機材の授受が行われる際には、復旧活動に係わる主体が日常業務に基づいた豊富な経験を拠り所として効率的であると想定される経路を現実的には選択しやすいと考えられ、それらの経路は数理的には復旧活動項目間の距離が最小である経路とみなされ、応急復旧シナリオの中で特に重要な経路と位置付けられるためである。また、最短経路として選択された回数を評価指標とした理由は、各やりとりがどの程度頻繁に選択されているかを定量化できるためである。

e) 復旧活動項目間の連結性に関する考察

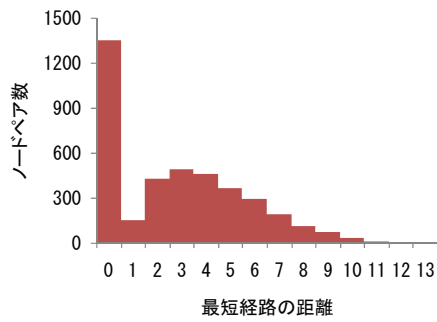
以上の評価手法を用いて各応急復旧シナリオを評価した結果を示す。図4は全ノードペアにおける最短経路の距離の分布を示しており、いずれのライフラインに関しても3~4前後の頻度が最も高い結果となった。距離が3のノードペアの例としては、電力の場合の「支社での修理依頼受付」→「情報班による問い合わせ内容の集約」→「本部での復旧計画作成」や通信の場合の「ネットワーク運営センターでの被害情報収集」→「情報統括班による情報集約」→「所外班での復旧計画作成」のように1) 被害情報の集約から復旧計画の作成に至る経路の他、下水道の場合の「管理事務所での安否確認」→「管理部門での管轄施設の状況把握」→「事務局での職員再配置計画の作成」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。



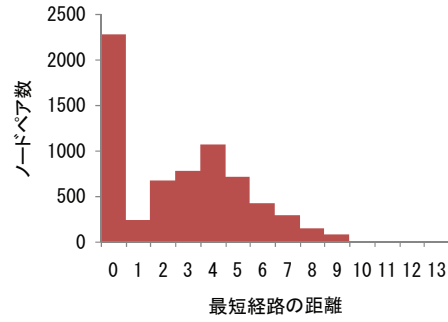
(a) 電力 ($N_p=5329$)



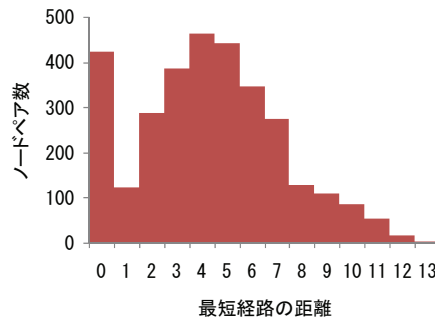
(b) ガス ($N_p=4356$)



(c) 通信 ($N_p=3969$)



(d) 上水道 ($N_p=6729$)



(e) 下水道 ($N_p=3136$)

図4 最短距離の分布 (N_p : 全ノードペア数)

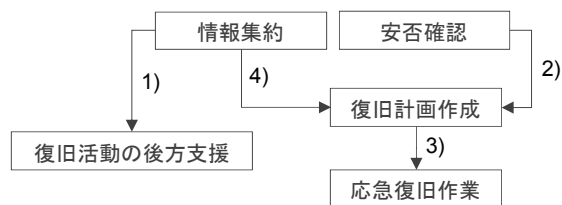


図5 復旧活動項目間の関係

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。

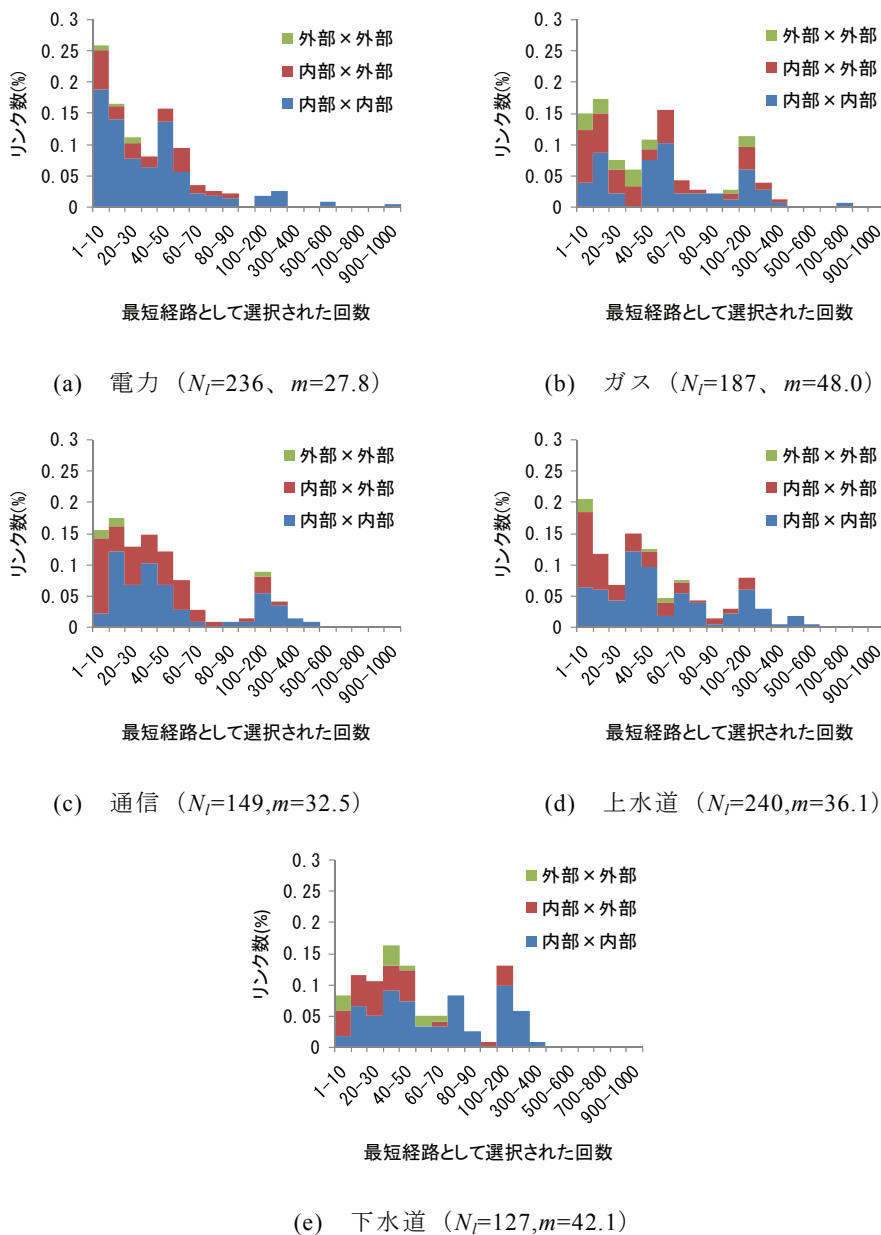


図6 最短経路として選択された回数の分布 (N_l : リンク数, m : 中央値)

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の中央値は、電力の場合27.8、ガスの場合は48.0、通信の場合は32.5、上水道の場合は36.1、下水道の場合は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、通信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の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繁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示等、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。

f) 応急復旧シナリオにおける相互関連のモデル化

以上の広域連携・復旧効率化モデルにおいて、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関連と定義し、図6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、d)、e)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。

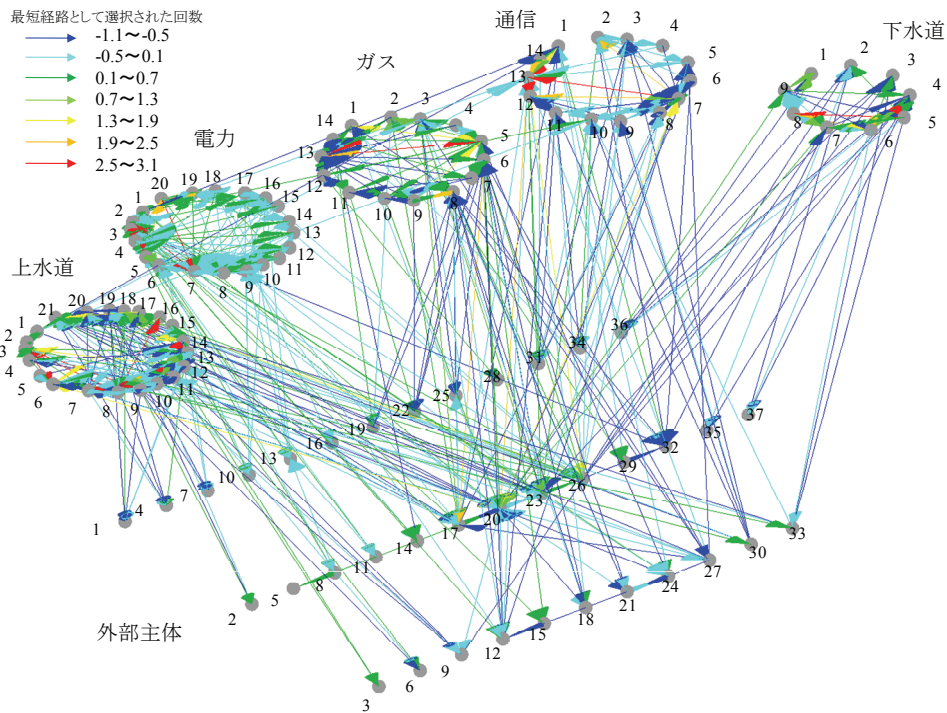
g) 相互連関を考慮した広域連携・復旧効率化モデルに対する考察

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して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」→「情報班による情報収集」(55 回) やガスの場合の「支社による被害情報収集」→「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) に見られるように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用発電機の運用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」(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。



電力	ガス	通信	上水道	下水道
1 本部	1 広報班	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 本部会議	3 下水道局本部会議
4 復旧班	4 経理班	4 (支店)復旧調整班	4 応急対策会議	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・マスマニューザ班	8 職員救護班	8 水再生センター
9 支店	9 導管班	9 (支店)総務班	9 調達班	9 建設事務所
10 原子力発電所	10 導管事業部	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)マスマニューザ班	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				
1 河川管理者	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
2 (水道)材料製造会社	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
3 水道協会	10 シンティア	18 日本ガス協会	26 自衛隊	33 燃料会社
4 東京建設業協会	11 中央電力協議会	19 海上保安庁	27 道路管理者(東京都建設局・建設事務所)	34 (下水道)協定都市
5 厚生労働省	12 他電力会社	20 東京都防災対本部	28 総務省	35 (通信)工事事務所
6 (水道)協定都市	13 東京消防庁	21 (ガス)グループ会社	29 金融機関	36 下水道協会
7 (水道)工事事務所	14 経済産業省	22 国土交通省(国道工事事務所)	30 輸送事業者	37 (下水道)工事事務所
8 東地域電力技術会議	15 電力系統利用協議会	23 区市町村防災対本部		

図7 外部主体との関連から俯瞰した相互関連モデル

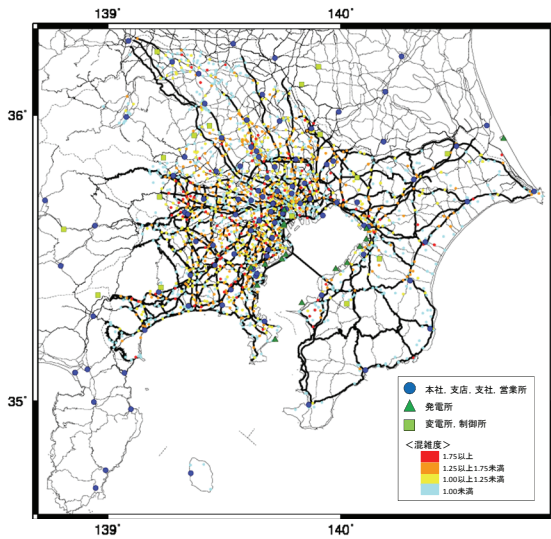
2) 広域連携・復旧効率化案の具体化

a) 復旧活動に対する道路交通インフラの位置づけ

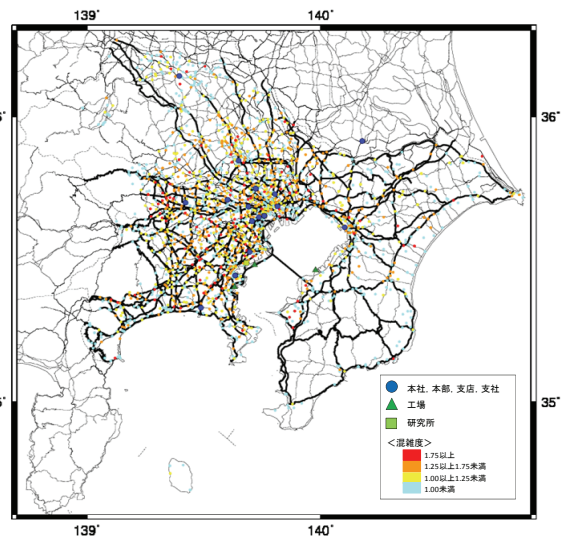
大規模な地震が発生した場合、避難・救助・消火活動をはじめとする緊急対応及び復旧活動を迅速に行うため、緊急交通路が指定されており、それらの路線においては一般車両に対する通行規制により緊急通行車両の通行確保が図られる。地震発生直後から72時間程度の応急復旧活動期においては、これらの緊急交通路が道路交通上、重要な役割を果たすと考えられる。東京都の場合、発災直後は第一次交通規制としてあらかじめ定められた緊急交通路で交通規制が行われ、その後、第二次交通規制として被害状況を勘案した規制の縮小・拡大が行われる。さらに、支援物資や復旧人員等の緊急輸送を確保するために、他県及び復旧拠点間を連絡する緊急輸送路が定められており、緊急交通路と併せてこれらの路線は他の道路に先駆け、障害物除去作業等が実施される。

緊急通行車両は、事前又は災害後に申請・発行された標章によって区別されるが、本研究で対象とするライフライン事業者の所有する車両も緊急通行車両として位置づけられているため、上記の緊急交通路の通行が可能である。東京都の場合、緊急通行車両標章の交付は、都所有の車両、及び業務委託又は協定に伴い必要となる車両に関しては東京都財務局長が、都交通局、水道局、下水道局、及び東京消防庁の管轄する車両に関してはそれぞれの局長及び総監が、その他の車両に関しては東京都公安委員会が実施することとなっている。また、交通規制の実施及び緊急車両の確認作業は警視庁によって行われる。

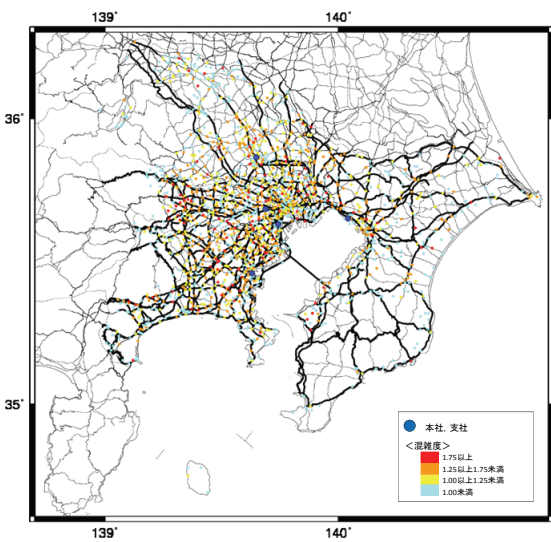
ここでは、まず、上記の第一次交通規制において緊急通行車両の交通が確保される路線を対象とし、災害発生直後の応急復旧期におけるライフラインの復旧活動と道路交通インフラとの関係について分析した。図8には、八都県市を対象とし、首都圏において大規模な地震が発生した際に想定される緊急交通路網とライフラインの復旧活動に関連した施設との位置関係を示す。これらの図の作成に当たっては、各自治体の地域防災計画^{1), 8)-12)}及びライフライン事業者の公開する情報²⁾⁻⁶⁾を参考とした。図中太線の道路が緊急交通路として指定されている路線であり、例として東京都においては、青梅街道や甲州街道等の37路線が指定されている。また、これらの路線の他、東京都においては、国道16号線以東の都県境において車両の流入・流出ともに通行が禁止され、国道16号線以西から都心方向への進入が禁止される。さらに多摩川、国道246号線及び環状7号線を結ぶ内側の区域では、緊急通行車両を除き全面車両通行禁止となる。また、神奈川県においては国道246、467、1号及び県道23号に囲まれた西側の区域が同様に車両通行禁止となる。



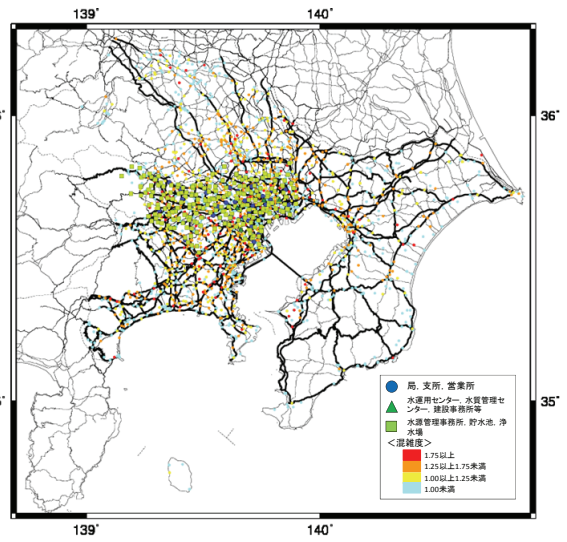
(a) 電力施設の分布



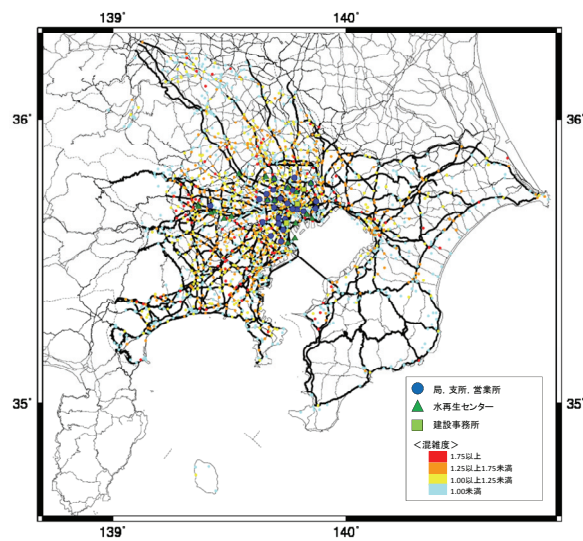
(b) ガス施設の分布



(c) 通信施設の分布



(d) 上水道施設の分布



(e) 下水道施設の分布

図8 緊急交通路網とライフラインの復旧活動に関連した施設との位置関係

b) 緊急交通路とライフライン関連施設の立地関係

以上の緊急交通路として指定されている路線は、各道路管理者の防災計画において特に重点的に耐震化等の対策が進められているが、震災後の交通確保においては放置車両等の残留交通による通行障害が懸念される。そこで、通常時の交通量を考慮するために、国土交通省関東地方整備局が提供している『道路交通センサス(平成17年度)』¹³⁾の情報に基づき、各路線の混雑度を指標として選定し、それらを図8に併せて地図上に示した。ここで混雑度とは、実交通量を乗用車換算した台数を12時間交通容量で除して算出される指標であり、混雑度の目安として、表1に示すような数値が基準として用いられている。

表1 混雑度の定義

混雑度	目安
1.75 以上	慢性的に混雑が発生
1.25-1.75	ピーク時とその周辺時間帯で混雑が生じる可能性が高い
1.0-1.25	道路混雑の可能性が1, 2時間ある
1.0 未満	道路混雑はほとんど存在しない

図8によれば、混雑度の全体的な傾向としては、区部を囲む環状7号線及び国道16号線付近においては交通量が多く、区部中心部、国道16号線以西及び16号線と環状7号線の間においては比較的混雑度が低いことが確認できる。また、他県から東京への交通の流れに着目すると、区部方面への路線に関しては、神奈川方面からは国道1号及び246号が、埼玉方面からは国道17号及び4号バイパスが、千葉方面からは国道14号及び県道1号等において特に県境を中心として混雑度が高くなっていることが確認できる。一方で、他県から東京都西部へ至る路線に関しては、比較的混雑度が低くなっている。

図8(a)には、電力関係の施設分布と緊急交通路の立地関係を示す。図より、本社、支店、営業所等の応急復旧活動において情報、ヒト、モノの移動の起点となる施設は都内に26施設立地しているが、それらのすべてが緊急交通路上またはその近辺に分布していることがわかる。一方で発電所、変電所等の電力供給上基幹となる施設は都内に5施設分布しているが、その中の2つの変電所は緊急交通路から離れた位置に立地しており、これらの施設が被災した際の復旧資源の運搬計画が重要になると考えられる。また、他県からの応援に関しては、神奈川方面においては国道1号沿いに、埼玉方面においては国道17号沿いに支店・営業所等の施設が立地しているが、これらの地域は通常時において混雑度の高い箇所であり、震災時の交通支障のリスクが高いと考えられる。

図8(b)には、ガス関連施設の分布と緊急交通路の立地関係を示す。都内においては支店・営業所等が9施設立地しているが、その中の7施設が環状7号線より内側の交通規制区域に分布している。また、ガス製造工場をはじめとするガス供給施設は、東京湾沿岸に立地しており、3つの工場の中の2つは首都高速道路湾岸線沿いに分布している。また、他県からの応援に関して、他県における施設分布を見ると、神奈川県においては国道15号等、埼玉県においては国道17号に、千葉県においては国道357号沿いに施設が分布しており、いずれも緊急交通路上に立地しているが、都内へ移動するに当たっては、混雑度の高い地域を通過

する必要がある。

図8(d)には、上水道関連施設の分布と緊急交通路の立地関係を示す。支所・営業所等復旧活動の起点となる施設は都内に45施設立地しているが、その中の43施設は緊急交通路上またはその近辺に立地している。また、都内に位置する13の浄水供給施設に関してもその中の11施設が緊急交通路上に分布している。一方で、応急給水活動の中心となる給水所は、都内にほぼ均一に分布しているが、200箇所の中の66箇所は緊急交通路から離れた場所に立地している。

図8(e)には、下水道関連施設の分布と緊急交通路の立地関係を示す。都内の27箇所の支所・営業所はいずれも環状7号線周辺及び国道20号線付近に集中して配置されており、その中の20施設は環状7号線以内に分布している。特に20号線沿いには水再生センターが集中して立地しているが、付近は通常時より交通量の多い地域であり、残留交通による通行障害が懸念される。

c) 下水道の復旧活動に係わる広域応援

以上、緊急交通路と各ライフラインの復旧活動に関連した施設との位置関係について定性的に分析したが、ここでは、ライフラインの中でも下水道を対象を絞り、道路ネットワークを介した下水道事業者の広域応援に関して道路交通支障の観点から検討した。

具体的には、東京湾北部地震 M7.3により東京都下水道局の関連施設が被災した場合を想定し、その中で東京都において緊急輸送拠点に指定される施設（9施設の中の5施設）へ広域応援を行うものとする。広域応援拠点としては「震災時の総合応援に関する協定（関東地方知事会協定）」¹⁴⁾の中から神奈川県、埼玉県、茨城県、千葉県に位置する拠点を対象とし、各県・市町村の下水道関係部局の中で管轄地域の最大震度が5強以下の施設（計72拠点：神奈川県4拠点、埼玉県35拠点、茨城県24拠点、千葉県9拠点）を対象とした。その際には、各自治体及び公安委員会の定める緊急交通路及び輸送路を活用するものとする。

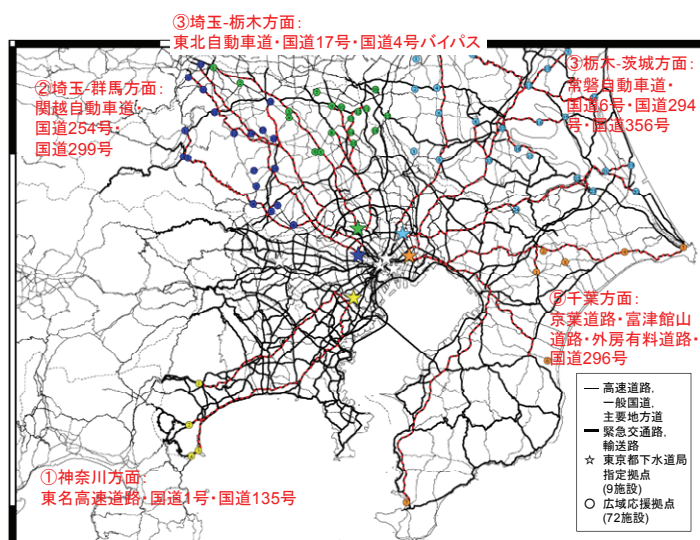


図9 広域応援拠点と緊急交通路・緊急輸送路網

図 9 には、広域応援拠点と緊急交通路・輸送路との関係を示す。これによれば、神奈川方面では東名高速道路・国道 1 号・国道 135 号、埼玉-群馬方面では関越自動車道・国道 254 号・国道 299 号、埼玉-栃木方面では東北自動車道・国道 17 号・国道 4 号バイパス、栃木-茨城方面では、常磐自動車道・国道 6 号・国道 294 号・国道 356 号、また千葉方面では京葉道路・富津館山道路・外房有料道路・国道 296 号のように主要幹線沿いに拠点が分布していることがわかる。

d) 道路交通支障の観点から見てくる広域連携・復旧効率化案

発災後の道路交通機能を評価する際には、物理的被害の状況及び渋滞等の通行支障（併せて道路交通支障と定義）を考慮する必要がある。ここでは、物理的被害を引き起こす地震ハザードとして図 10 に示す震度分布を用い、通行支障を表す指標として図 11 に示す混雑度と混雑時平均旅行速度を用いた。震度と混雑度に関しては、それぞれ次式に基づき震度曝露距離 d_s 及び混雑度重み付距離 d_c を求め、また、混雑時平均旅行速度に関しては混雑時所要時間を算出し、それぞれ実距離と比較することで交通支障の度合いを図 12 のように評価した。

$$d_s = \frac{6.25x_{6u} + 5.75x_{6l} + 5.25x_{5u} + 4.75x_{5l} + 4.25x_4}{6.25 + 5.75 + 5.25 + 4.75 + 4.25} \quad [6]$$

$$d_c = \sum_{i=1}^a a \cdot x_a \quad [7]$$

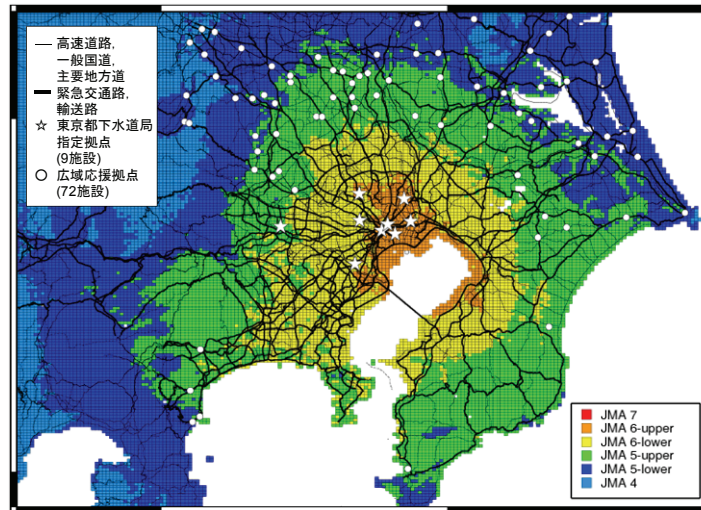
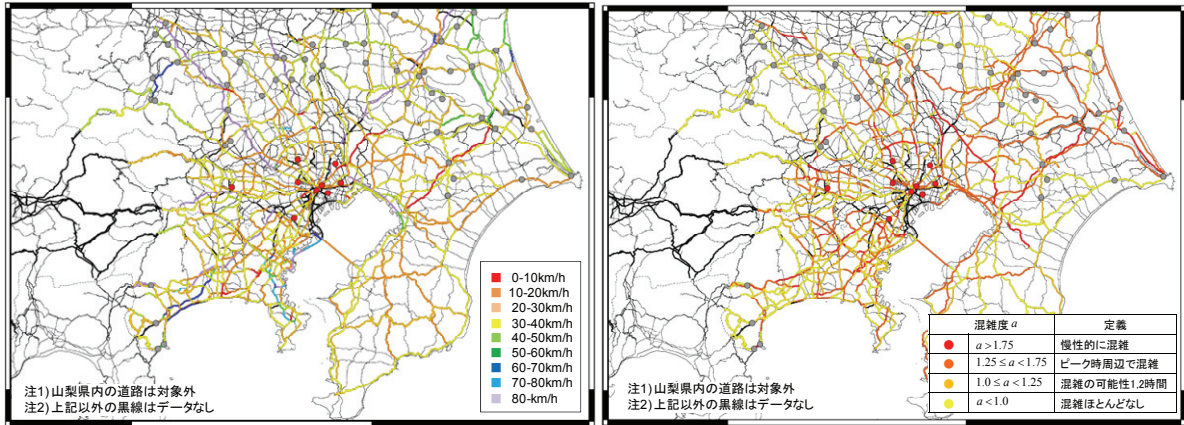


図 10 広域応援拠点と震度分布（東京湾北部地震 M7.3）の関係

震度曝露距離と実距離の関係を見ると、震度 6 強、6 弱の強い震度に曝されている路線はグラフの傾きが大きくなり、5 強以下の震度に曝されている地域では傾きが緩やかになっているが、その違いが特に顕著な例が栃木-茨城方面の路線である。具体的には、栃木-茨城方面の広域応援拠点は指定拠点から 60km～110km の位置に分布しており、先述したような路線上に位置する。震度との関係について詳しくみると、常磐自動車道・国道 6 号・国道 294 号を使用する経路は比較的弱い震度に曝されており、国道 356 号沿いは強い震度

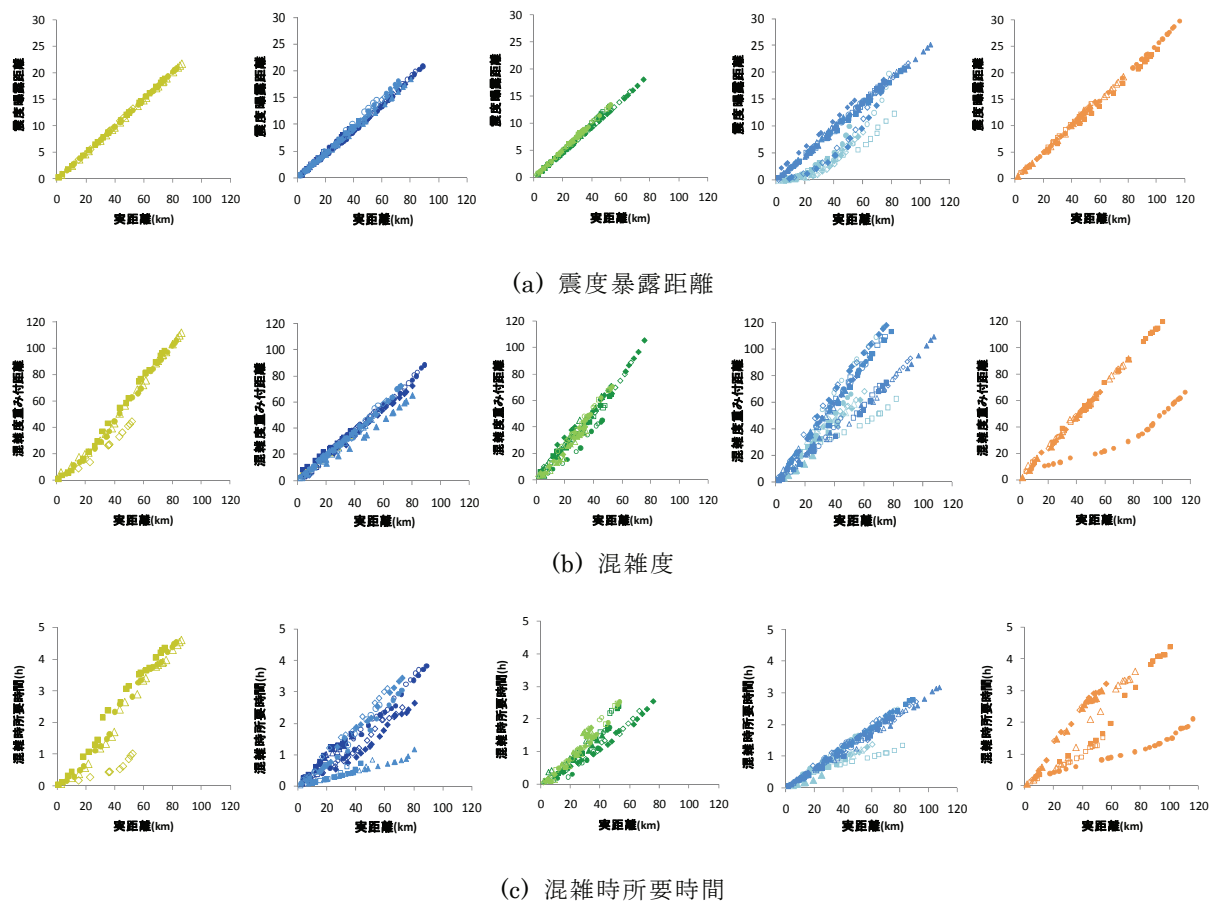
に曝されていることがわかる。また、混雑度重み付距離で比較すると、混雑度の高い路線は国道 6 号であり、国道 294 号や国道 356 号における混雑度は相対的に低い。また、混雑時所要時間の観点からは、到着までに最も早い場合で国道 294 号の 1 時間強であり、国道 6 号・国道 356 号の場合は遠方になると 3 時間程度かかることが予想される。



(a) 混雑度の分布

(b) 混雑時平均旅行速度の分布

図 11 交通支障の指標（文献 13 の観測データを主要幹線の結節点を基準に空間補正して作成）



(a) 震度暴露距離

(b) 混雑度

(c) 混雑時所要時間

図 12 実距離と各指標の関係（左段より、神奈川方面（4 拠点）、埼玉-群馬方面（19 拠点）、埼玉-栃木方面（18 拠点）、栃木-茨城方面（24 拠点）、千葉方面（7 拠点）の順）

(c) 結論ならびに今後の課題

平成20年度に開発した広域連携・復旧効率化モデルのプロトタイプの修正・再検討を行い、広域連携・復旧効率化案を具体化した。

適切な広域連携と復旧効率化をはかるためには、復旧活動のプロセスに関わる俯瞰的な相互関連モデル（広域連携・復旧効率化モデル）が必要となるため、そのプロトタイプモデルを定量的な感度解析が実施可能なレベルにまでアップデートした。

その上で、広域連携・復旧効率化モデルをベースとして、広域連携・復旧効率化案の具体化に際しては、交通インフラの中でも広域連携に直結する緊急交通路・緊急輸送路クラスの道路網を対象を絞り、これらの発災時の交通状況（混雑状況など）や発災直後の物理的被害の状況（計測震度による暴露量など）が電力、ガス、上水、下水、通信等の各種ライフラインの応急復旧活動に与える影響を明らかにした。特に、下水道については、それらの応急復旧活動時において、協定都市の拠点から東京都の災害拠点までの緊急交通路の経路選択の具体案を示した。

併せて、新型インフルエンザによる渡航制約によりアメリカ・オークランドで開催された TCLEE2009（ライフライン地震工学専門委員会議）での発表および情報収集が取りやめとなったため、本年9月2日から9月4日までの土木学会全国大会（福岡大学開催）のライフライン地震防災セッション、9月13日から9月17日までの ICOSAR（大阪開催）のライフライン防災セッション、及び、本年12月4日の土木学会「相互関連を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム」（東京開催）における情報収集等によりそれらの用務を代用し、広域連携・復旧効率化シナリオのネットワークモデルの分析を深化させ、定量的指標の拡充を行った。

(d) 引用文献

- 1) 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>
- 2) 東京電力株式会社 HP, <http://www.tepco.co.jp/>
- 3) 東京ガス株式会社 HP, <http://www.tokyo-gas.co.jp/>
- 4) NTT 東日本株式会社 HP, <http://www.ntt-east.co.jp/>
- 5) 東京都水道局 HP, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>
- 6) 東京都下水道局 HP, <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/>
- 7) Fontela, E. and Gabus, A. : DEMATEL Structural Analysis of the World Programatique, Battelle Report, Geneva, 1974.
- 8) 神奈川県：神奈川県地域防災計画 地震災害対策計画, 2005.
- 9) 千葉県：千葉県地域防災計画 震災編, 2007.
- 10) 埼玉県：埼玉県地域防災計画 震災対策編, 2010.
- 11) 茨城県：茨城県地域防災計画 震災対策計画編, 2009.
- 12) 山梨県：山梨県地域防災計画, 2008.
- 13) 国土交通省関東地方整備局：平成17年度 道路交通センサス 一般交通量調査結果
- 14) 東京都下水道局：地震対策マニュアル 応急対策編, 1998.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
下水道システムの地震時応急復旧シナリオに関する一考察	豊田安由美、庄司学	日本地震工学会大会—2009梗概集	2009.11	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
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—	豊田安由美、庄司学	地域安全学会論文集No.12	2010.3	国内
Modeling of Restoration Process associated with Critical Infrastructures and the Interdependency due to a Seismic Disaster	Shoji, G. and Toyota, A.	JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)	2010.3	国際

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成22年度業務計画案

(a) 広域連携・復旧効率化モデルの修正・再検討

平成20年度に開発し、平成21年度に修正した「広域連携・復旧効率化モデル」の修正・再検討を更に実施し、最終目標としている広域連携復旧ガイドラインの策定に資するモデルまでブラッシュアップする。

(b) 広域連携・復旧効率化案の具体化

道路交通インフラ網の中でも広域連携に直結し、インターシティ間の道路交通を担う一般国道クラスの道路網を対象に絞り、緊急交通路並びに緊急輸送路としての機能支障が電力、ガス、上水、下水、通信等の各種ライフラインの復旧遅延に与える影響を明らかにし、その具体的な影響の低減を目指した広域連携・復旧効率化案を引き続き一般化する。なお、その際には、それらの道路網を数百ノード・リンクのネットワークとしてモデル化し、大規模な数値実験を新たに行うため、新たにPCワークステーションを必要とする。