

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

ライフラインの被災による被害波及と復旧過程を記述・解析するモデルを構築することは、都市機能の防護戦略の策定、安全で迅速な機能回復過程の実現、地域防災力の向上を図るために重要である。このためには「広域連携」、「復旧調整」、「自律分散」という相互補完的な対策軸における被害軽減戦略を提案し、社会的インパクトを最小化することが必要である。

本研究では、ライフライン被害波及構造モデル、自立分散型拠点の配置モデル、広域連携・復旧調整モデルを構築し、これらをベストミックスした復旧戦略を示す。

(b) 平成23年度業務目的

平成23年度には、緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフライン（電力、都市ガス、上下水道、及び電話等）の復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化方策を修正・再検討する。それらを踏まえ、広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドラインを作成し、その内容をサブプロジェクト3全体で開発を進めているマッシュアップシステムに提供する。

1) 広域連携・復旧効率化方策の修正・再検討

緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化に係わる具体案をガイドライン掲載に向けて修正・再検討する。その際には、緊急交通路並びに緊急輸送路の空間情報を数百から数千のノードとリンクから成る大規模なネットワークとしてモデル化するとともに、各種ライフラインの応急復旧プロセスを同様な規模のネットワークとしてモデル化した上で、それらを統合したモデルに基づいて最適化数値計算を行う。当該計算には、本事業で整備する高速演算可能なPCワークステーションを用いる。

2) 広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドライン作成

上記1)の具体案を踏まえ、広域連携・復旧効率化の観点からみて、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案を作成する。なお、本ガイドライン案をサブプロジェクト3全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供する。

3) 学会への参加発表

ICASP11（11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering、平成23年8月、スイス）及び地域安全学会等の国内学会に参加発表し、道路交通インフラ網の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延に与える影響評価方法に係わる最新の研究情報の収集をはかり、上記1)の具体案を修正・再検討する際の研究情報としてフィードバックさせる。

(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23年度の成果

(a) 業務の要約

平成23年度には、緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフライン（電力、都市ガス、上下水道、及び電話等）の復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化方策を修正・再検討した。それらを踏まえ、広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドラインを作成し、その内容をサブプロジェクト3全体で開発を進めているマッシュアップシステムに提供した。

1) 広域連携・復旧効率化方策の修正・再検討

緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化に係わる具体案をガイドライン掲載に向けて修正・再検討した。その際には、緊急交通路並びに緊急輸送路の空間情報を数百から数千のノードとリンクから成る大規模なネットワークとしてモデル化するとともに、各種ライフラインの応急復旧プロセスを同様な規模のネットワークとしてモデル化した上で、それらを統合したモデルに基づいて最適化数値計算を行った。当該計算には、本事業で整備する高速演算可能なPCワークステーションを用いた。

2) 広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドライン作成

上記1)の具体案を踏まえ、広域連携・復旧効率化の観点からみて、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案を作成した。なお、本ガイドライン案をサブプロジェクト3全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供した。

3) 学会への参加発表

ICASP11（11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering、平成23年8月、スイス）及び地域安全学会等の国内学会に参加発表し、道路交通インフラ網の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延に与える影響評価方法に係わる最新の研究情報の収集をはかり、上記1)の具体案を修正・再検討する際の研究情報としてフィードバックさせた。

(b) 業務の成果

1) 広域連携・復旧効率化方策の修正・再検討

a) 広域連携・復旧効率化評価モデルの広域連携・復旧効率化モデルへの接続

緊急交通路並びに緊急輸送路（以下、緊急道路ネットワークと呼ぶ）の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化に係わる具体案をガイドライン掲載に向けて修正・再検討した。その際、平成22年度までに構築した「広域連携・復旧効率化モデル」（全体モデル）に対して、本全体モデルからのアウトプットとなる「広域連携・復旧効率化に係わる具体案」を評価・検討するための「広域

連携・復旧効率化評価モデル」を構築し、「広域連携・復旧効率化モデル」に図 1 のように接続させた。

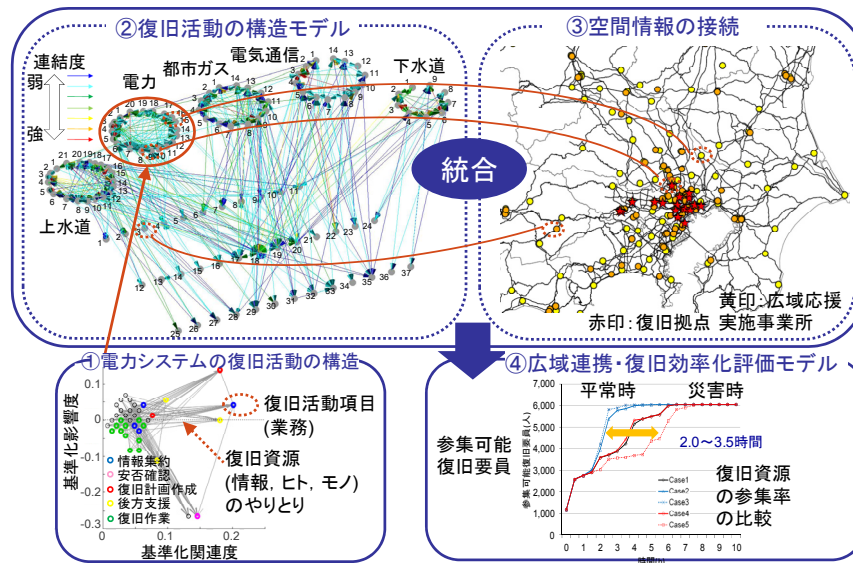


図 1 「広域連携・復旧効率化評価モデル」の「広域連携・復旧効率化モデル」への接続

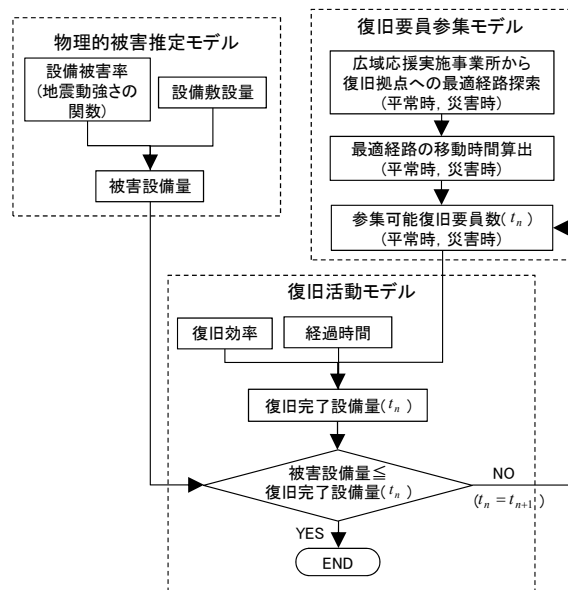


図 2 広域連携・復旧効率化評価モデルの詳細

広域連携・復旧効率化評価モデルは図 2 に示すように「物理的被害推定モデル」、「復旧要員参集モデル」、及び「復旧活動モデル」から構成される。「物理的被害推定モデル」では既往の被害推定式を用いて、対象地域における地震動強さと設備敷設量から物理的な被害設備量を推定し、応急復旧の対象となる設備量を求める。「復旧要員参集モデル」では、地震後のある時刻において被災地での応急復旧活動に従事可能な復旧要員数（以下、参集可能復旧要員数と呼ぶ）を算出する。なお、応急復旧活動における復旧要員としては、被災地の事業所に所属する要員及び被災地外の事業所から広域応援で派遣される要員（以下、広域応援要員と呼ぶ）の 2 つのタイプの復旧要員が考えられるが、ここでは後者の広域応援要員を対象とする。参集可能復旧要員数の算出手順としては、まず広域応援要員を派遣

する拠点である広域応援実施事業所から被災地における復旧拠点までの緊急道路ネットワーク上の最適経路を推定し、次に求められた最適経路に対して広域応援要員の移動時間を算出する。その際には、平常時と震災時の2通りの最適経路を想定した。その理由は、災害時には平常時と比較してどの程度経路に変化が生じ、広域応援要員の参集過程に遅延が生じるのかを明らかにするためである。平常時における最適経路の算定に関しては実距離及び、道路交通センサス^{1),2)}で示されている混雑度等の指標を参考に平成22年度に本研究において提案した混雑度重み付距離と混雑時平均所要時間を指標として用い、一方、震災時の最適経路の算出に関しては揺れや液状化による物理的被害を考慮する観点から、同じく平成22年度に本研究において提案した震度曝露距離とPL値曝露距離を指標として用いた。なお、橋梁や路線の被害確率ではなく、震度曝露距離及びPL値曝露距離を災害時における道路ネットワークの脆弱性の指標とした理由は、地震による物理的な被害の可能性をマクロに評価するためである。さらに、前述した各指標に対して求められた各最適経路に対する広域応援要員の移動時間の算出においては、道路交通センサスの「混雑時平均旅行速度」^{1),2)}を用いた。地震後の道路交通状況は平常時と異なることが予想されるが、その推定は難しいため、本研究では広域応援要員の移動に対して緊急道路ネットワークが優先的に使用できることを想定し、平常時の道路交通状況を表す指標である「混雑時平均旅行速度」をそのまま用いた。このような「復旧要員参集モデル」を通じ、広域応援要員の復旧拠点への参集に要する所要時間を推定し、道路ネットワークの機能から見た広域応援要員の最適配置等の戦略を検討することができる。以上を踏まえ「復旧活動モデル」では、地震発生から任意の時刻における復旧完了設備量を算出し、最終的に応急復旧に必要な時間を求める。その際には、「復旧要員参集モデル」で推定した任意の時刻における参集可能復旧要員数に、作業時間及び復旧効率を掛け合わせて推定する。復旧効率は1人の応援要員が1時間の作業時間当たり復旧可能な設備量であり、本研究では中央防災会議で示されている数値等を用いた。

b) 広域連携・復旧効率化に係わる具体案の修正

以下では、広域連携・復旧効率化評価モデルが組み込まれた広域連携・復旧効率化モデルに基づき、広域連携・復旧効率化に係わる具体案を修正した事例を示す。ここでは、電力の配電設備に係わる応急復旧活動の事例を示す。電力システムは、発電・送電・変電・配電設備の大きく4つに分類できるが、首都直下地震の電力システムに対する被害想定において最も被害が大きいと想定されているのは量的に膨大かつ空間的に広く分布する配電設備である。その中でも、ここでは配電設備の代表として電柱を対象に検討を行った。

まず、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「物理的被害推定モデル」に基づき、電柱の物理的被害の推定を行なった。首都直下地震（東京湾北部地震 M7.3）による地震動による影響に関して、揺れの強さを表す震度分布³⁾と液状化危険度を表すPL値³⁾、及び、火災による被害を表す焼失率の分布⁴⁾を図3および図4に示す。図3より、震度6強以上を観測する地域は東京都区部を中心に1都3県に及び、液状化危険度は東京湾沿岸や埼玉県の中川低地、荒川低地で高くなっている。また、焼失率は荒川区や葛飾区で高い値を示している。次に電柱の敷設量を図4に併せて示す。これより、東京都では世田谷区や練馬区、足立区等の23区周辺部を中心に計682,327本⁵⁾が敷設されている。

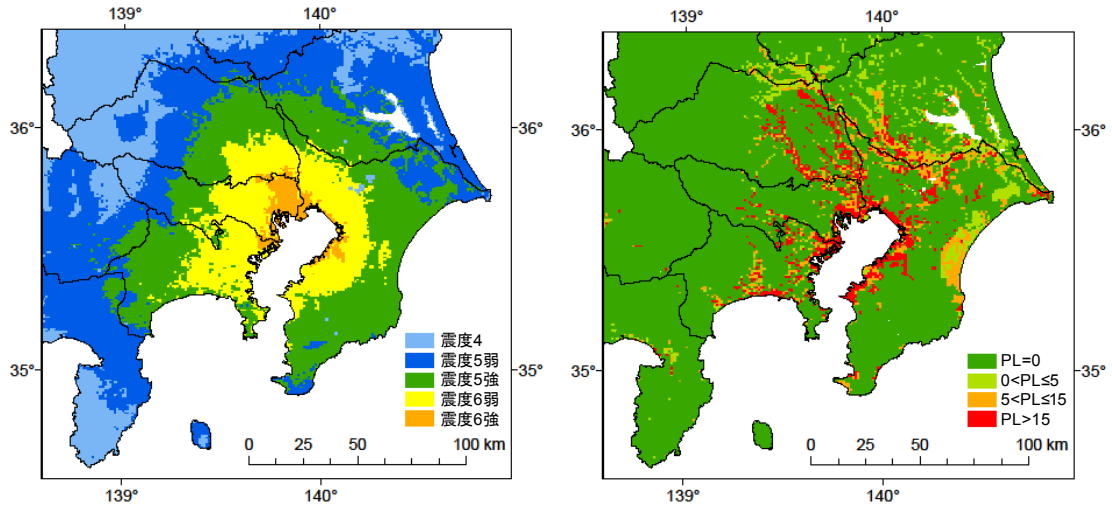


図3 計測震度分布と PL 値分布 (文献3 を基に作成)

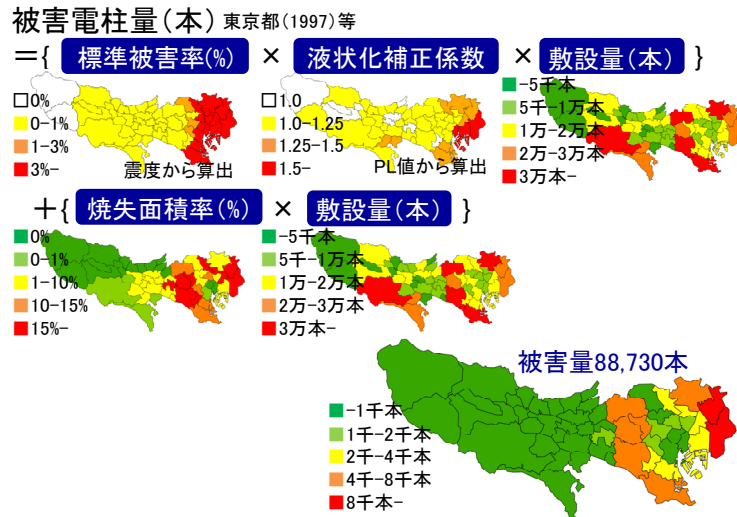


図4 電柱の物理的被害の推定

電柱の被害推定に際しては、損害保険料率算定機構⁶⁾による自治体の被害想定手法の調査結果を参考に、入手可能なデータを考慮した上で次式を採用した。以下では、図4に示す電柱敷設量データ N_{total} が市区町村単位であるため、被害量 N_{damage} も市区町村 j ($j=1\sim 52$) ごとに求める。

$$N_{damage}^j = \hat{C}^j \cdot \hat{R}^j / 100 \cdot N_{total}^j + F^j \cdot N_{total}^j \quad (1)$$

ここで N_{damage}^j は市区町村 j における電柱被害量であり、 \hat{C}^j は市区町村 j の液状化補正係数、同様に \hat{R}^j は標準被害率 (%) である。液状化補正係数 C_p と標準被害率 R_q に関しては、市区町村 j の PL 値ランク p_j と震度階 q_j によって求められるが、その際に必要な震度分布及び PL 値分布は 1km メッシュで与えられているため、各市区町村に対して PL 値ランク p と震度階 q ごとの面積 A_p^j 、 A_q^j を算出し、式(2)及び式(3)に示すように総面積 A^j に対する面積比で重みづけを行った平均液状化補正係数 \hat{C}^j 及び平均標準被害率 \hat{R}^j を各市区町村の代表値とした。また N_{total}^j は市区町村 j における電柱敷設量であり、 F^j は焼失率を表す。

$$\hat{C}^j = \sum_{p=1}^4 \left\{ C_p \cdot \left(\frac{A_p^j}{A^j} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\hat{R}^j = \sum_{q=1}^5 \left\{ R_q \cdot \left(\frac{A_q^j}{A^j} \right) \right\} \quad (3)$$

以上の手法で推定した電柱被害の分布を図4に示す。これより、東京都内の電柱被害本数 N_{damage} は 88,730 本であり、23 区でも特に葛飾区や荒川区の被害率が高くなっている。中央防災会議による被害想定では首都直下地震時による電柱被害を関東全域で 101,360 本⁷⁾としており、本研究による推定値はそれらの数値と調和的である。

次に、広域応援に関わる問題設定を行なった上で、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「復旧要員参集モデル」に基づき、地震発生後の参集可能復旧要員数を推定する。電力事業者の防災業務計画⁸⁾によると、電力システムの復旧要員としては、自社社員、協力会社等の業務上特に関係の強い事業者及び他社からの応援を想定している。本研究では地震発生後 72 時間までの応急復旧期における電柱の復旧活動を対象とするとして、兵庫県南部地震時における発災後 3 日目に相当する 1 月 19 日における実績に着目すると、関西電力社員の中でネットワーク系の応急復旧活動に従事した要員は 788 人、同様に協力会社の社員は 2,895 人、電力各社からは 284 人であり、ネットワーク系の復旧に関わった人数は総計 3,967 人であった⁹⁾。これは復旧従事人数全体 (6,137 人) の 65% であり、その中で関西電力社員の占める割合は 20%、協力会社社員の割合は 73%、他電力会社からの社員の割合は 7% であった。首都直下地震時において電力システムの応急復旧作業に投入できる復旧要員はピーク時で 12,000 人/日⁷⁾とされており、復旧要員の作業内容別及び所属別割合が兵庫県南部地震と同程度と仮定するならば、ネットワーク系の復旧に従事する人数は全体の 65% に相当する 7,755 人であり、そのうち自社社員の割合は 20% で 1,540 人、協力会社社員の割合は 73% で 5,660 人、他電力会社社員の割合は 7% で 555 人と仮定できる。

その上で、復旧要員の 9 割を占める自社社員及び協力会社社員を対象にその地理的な分布を検討した。首都圏における電力事業者の供給エリアは、東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、茨城県、栃木県、群馬県、山梨県及び静岡県 の 1 都 8 県であり、これらの地域における電力会社の事業所及び協力会社の事業所は共に 115 箇所であった。ここで先程求めたネットワーク系の復旧に関する電力会社社員数 1,540 人及び協力会社社員数 5,660 人の配置人数が各事業所で一様であると仮定すると、電力会社の事業所の復旧要員は 1 事業所当たり 14 人、協力会社の事業所では 1 事業所当たり 50 人と仮定される。

これに対し、以下の通り、広域応援の実施要件を 2 点定めた。1 点目は各事業所の管轄地域における最大震度が地震直後の被害点検や巡視を実施するための参集基準より小さいこと、また 2 点目は管轄地域で停電が発生していないことである。前者に関しては事業者の防災業務計画等を参考に、広域応援派遣が可能な震度階を「震度 5 強以下」と推定した上で、東京湾北部地震 M7.3 の震度分布と重ね合わせ、応援派遣が可能な事業所を抽出した。同じく後者に関しては、想定される停電軒数の分布¹¹⁾に基づき、上記で抽出した事業所の中からさらに管轄地域内で停電が発生する事業所からは他地域への応援派遣ができないと仮定した。以上の方針で、広域応援実施事業所を抽出した結果を図5に示す。その結果、応急復旧期において他事業所への復旧要員の派遣が可能であると考えられる地域は栃木県、群馬県、山梨県、静岡県の 4 県であり、電力会社の自社事業所は 38 箇所 で 532 人、協力会社の事業所は 28 箇所 で 1,400 人となった。また検討した広域応援要員の派遣先は電

柱の被害量を算出した東京都とし、参集に要する所要時間を推定する上での具体的な目的地は、東京都地域防災計画¹²⁾において緊急輸送ネットワークの指定拠点に挙げられている電力事業者の施設 18 箇所の中で各広域応援実施事業所から距離的に最も近い施設とした。これらの施設は、応急復旧活動に関わる復旧要員や復旧資機材が集積し、重要な復旧拠点になると考えられるためである。これらの復旧拠点の分布を図 5 に併せて示す。さらに本研究で対象とする緊急道路ネットワークとしては、平成 22 年度に本研究を通じてモデル化された 1 都 8 県の緊急道路ネットワークを用いる。緊急道路ネットワークとは、各自治体によって指定される緊急交通路や緊急輸送路を指しており、ライフラインの復旧活動を含む応急期の初動活動には特に重要な路線である。この緊急道路ネットワークを 2552 リンクと 2072 ノード(結節点)でモデル化しており、その空間的な分布は図 5 に示す通りである。

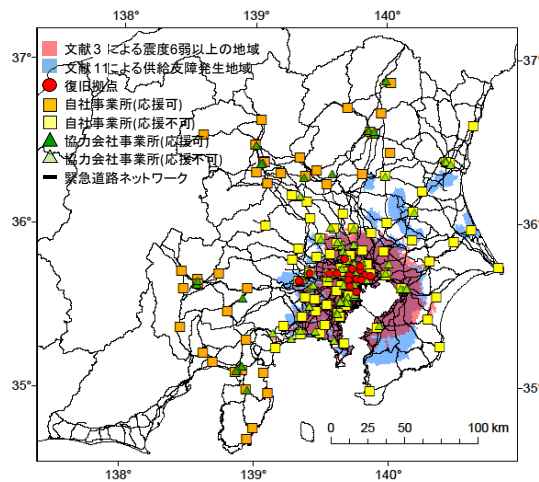


図 5 復旧拠点及び広域応援実施事業所の分布

以上の過程を通じて選定した広域応援実施事業所から復旧拠点までの最適経路及び所要時間の算定を行い、任意の時刻において応急復旧活動に従事可能な広域応援要員数を推定した。最適経路の選択にあたっては、平常時に対する地震後の道路ネットワークの機能低下による影響を考慮するため、緊急道路ネットワークを構成するすべてのリンクに対して以下に示す指標を算出し、平常時及び災害時の 2 通りの最適経路を推定した。

① 混雑度重み付距離 $d_{CL,i}$

平常時の混雑度合いを表す指標であり、リンク i に対応した混雑度 CL_i を各リンク長 l_i に掛け合わせて次式のように求める。

$$d_{CL,i} = CL_i \cdot l_i \quad (4)$$

なお、混雑度とは国土交通省の実施する道路交通センサス（平成 17 年度実施）の「平日混雑度」を指している。

② 混雑時平均所要時間 $t_{C,i}$

リンク i に対応した混雑時平均旅行速度 $v_{C,i}$ 及びリンク長 l_i を求め、次式により算出する。

$$t_{C,i} = l_i / v_{C,i} \quad (5)$$

なお、 $v_{C,i}$ は前述の道路交通センサスによって実測値より求められるものである。

③ 震度曝露距離 $d_{SI,i}$

地震動による物理的な被害の可能性を表す指標であり、リンク i に対してメッシュ単位で与えられる震度階 q に該当する区間長 $l_{i,q}$ を算出し、次式に示すように震度階 q における計測震度の代表値 SI_q で重みづけした上で積算する。

$$d_{SI,i} = \sum_{q=1}^5 SI_q \cdot l_{i,q} \quad (6)$$

④ PL 値曝露距離 $d_{PL,i}$

液状化による物理的な被害の可能性を表す指標であり、リンク i に対してメッシュ単位で与えられる PL 値ランク p に該当する区間長 $l_{i,p}$ を算出し、次式に示すように PL 値ランク p における PL 値の代表値 PL_p で重みづけした上で積算する。なお、 PL_p の値に関しては、 $PL=0$ 及び $15 < PL$ の場合には、それぞれ $0 \leq PL \leq 1$ と $15 < PL \leq 16$ の中央値である 0.5、15.5 を代表値として用い、 $0 < PL \leq 5$ 及び $5 < PL \leq 15$ の場合には各ランクに対応する PL 値の中央値を用いた。

$$d_{PL,i} = \sum_{p=1}^4 PL_p \cdot l_{i,p} \quad (7)$$

次に最適経路として、広域応援実施事業所 k からあらかじめ定められた復旧拠点までの移動コスト $Cost_{case,k}$ が最小となる経路 $Route_{case,k}$ を Dijkstra 法により探索する。ここで $Route_{case,k}$ は広域応援実施事業所 k から復旧拠点までの最適経路を構成するリンク番号 i の集合である。また、 $case$ は移動コストの種類を表す変数であり、 $case=1$ の場合は実距離 l_i 、 $case=2$ は混雑度重み付距離 $d_{CL,i}$ 、 $case=3$ は混雑時平均所要時間 $t_{C,i}$ 、 $case=4$ は震度曝露距離 $d_{SI,i}$ 、 $case=5$ は PL 値曝露距離 $d_{PL,i}$ をそれぞれ移動コストとして設定していることを示す。以上より、各ケースにおいて移動コスト $Cost_{case,k}$ は次式のように計算される。

$$case=1 : Cost_{case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} l_i \quad (8a)$$

$$case=2 : Cost_{case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} d_{CL,i} \quad (8b)$$

$$case=3 : Cost_{case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} t_{C,i} \quad (8c)$$

$$case=4 : Cost_{case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} d_{SI,i} \quad (8d)$$

$$case=5 : Cost_{case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} d_{PL,i} \quad (8e)$$

表 1 設定ケース

Case	移動コスト	選択される経路の特徴
1	実距離	実距離が最短となる経路
2	混雑度重み付距離	混雑の可能性が最小となる経路
3	混雑時平均所要時間	所要時間が最小となる経路
4	震度曝露距離	地震動による道路の物理的被害の可能性が最小となる経路
5	PL 値曝露距離	液状化による道路の物理的被害の可能性が最小となる経路

以上の最短経路の特徴を表 1 に示す。実距離を移動コストとしたケース (Case1) では各広域応援実施事業所から復旧拠点までの移動距離の総和が最短となる経路が選択される。次に混雑時重み付距離を移動コストとしたケース (Case2) 及び混雑時平均所要時間を移動コストとしたケース (Case3) では、混雑の可能性が最も低い経路及び所要時間が最短となる経路がそれぞれ選択される。混雑の程度や所要時間は通常目的地までの移動経路を選択する際に考慮するものであるため、これらは平常時に選択される移動経路と解釈する。さらに震度曝露距離を移動コストとしたケース (Case4) 及び PL 値曝露距離を移動コストとしたケース (Case5) ではそれぞれ地震動又は液状化による物理的被害の可能性が最も低い経路が選択される。これらは地震ハザードの高い地域を迂回するような経路であり、地震後の移動経路として想定できる。

このようにして求められた最適経路に対して広域応援要員が広域応援実施事業所 k から復旧拠点までの参集に要する所要時間 $T_{C,case,k}$ (以下、参集所要時間と呼ぶ) は最適経路を構成する全てのリンクの混雑時平均所要時間 $t_{C,i}$ を次式のように足し合わせて算出する。

$$T_{C,case,k} = \sum_{i \in Route_{case,k}} t_{C,i} \quad (9)$$

以上より、地震発生後の任意の時刻 t_n において被災地の復旧拠点に参集可能な復旧要員数 $M_{case}(t_n)$ は次式によって求められる。なお、 t_n は 0.5 時間刻みの離散的な値とし、 n はステップ数を表す。また $t_0 = 0$ である。

$$M_{case}(t_n) = \sum_{all\ k} B_{k,t_n} \cdot H_k \quad (10)$$

ここで B_{k,t_n} は地震発生後の時刻 t_n と広域応援実施事業所 k から復旧拠点までの参集所要時間 $T_{C,case,k}$ を比較する変数であり、次式のように定める。

$$B_{k,t_n} = \begin{cases} 0 & (T_{C,case,k} - t_n > 0) \\ 1 & (T_{C,case,k} - t_n \leq 0) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)において、参集所要時間 $T_{C,case,k}$ が地震発生後の時刻 t_n より大きい場合には $B_{k,t_n} = 0$ とし、 $T_{C,case,k}$ が t_n 以内である場合には $B_{k,t_n} = 1$ とする。また、式(10)中の H_k は 1 事業所当たりの復旧要員数を表し、広域応援実施事業所 k が電力会社の事業所である場合には $H_k = 14$ 、協力会社の事業所である場合には $H_k = 50$ となる。

以上、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「物理的被害推定モデル」及び「復旧要員参集モデル」に基づき、表 1 に示す 5 つのケースに対して選択された最適経路、参集可能復旧要員数 $M_{case}(t_n)$ 、地域別の参集可能復旧要員数 $M_{case}(t_n)$ の推移を求めると、図 6 から図 8 のようになる。ここでは、広域応援実施事業所を栃木方面、群馬方面、山梨方面、及び静岡方面の 4 つの地域に分類した。さらに復旧拠点までの移動は地震発生と同時に開始すると仮定している。参考値として、兵庫県南部地震時に関西電力が他電力会社へ応援を要請したのは発災から約 4 時間後の 17 日午前 10 時であった¹⁰⁾。

平常時において選択され得る最適経路に関して、実距離が最短となる Case1 の場合、図 6 より栃木方面では国道 4 号や東北自動車道、群馬方面では国道 17 号や国道 122 号、関東自動車道、山梨方面では国道 139 号や中央自動車道、そして静岡方面では国道 1 号や国道 135 号、東名高速道路等が主に選択されている。混雑度又は所要時間が最小となる Case2 及び Case3 においてはそれぞれ東北自動車道、関越自動車道、東名自動車道等の高速自動

車国道を走行する経路が選択される。またすべての広域応援要員の参集に要する時間は、図7より4.5～6.5時間と推定されるが、地域別に見ると、図8より復旧拠点への到着が最も早い地域は移動距離の短い山梨方面であり、すべての広域応援要員の参集が完了するまでの時間は2.5～4.5時間となる。次に参集の早い地域は栃木方面で2.5～5.0時間であった。反対に参集までに時間がかかる地域は静岡方面であり、すべての広域応援要員が参集するまでの時間は4.5～6.5時間となった。

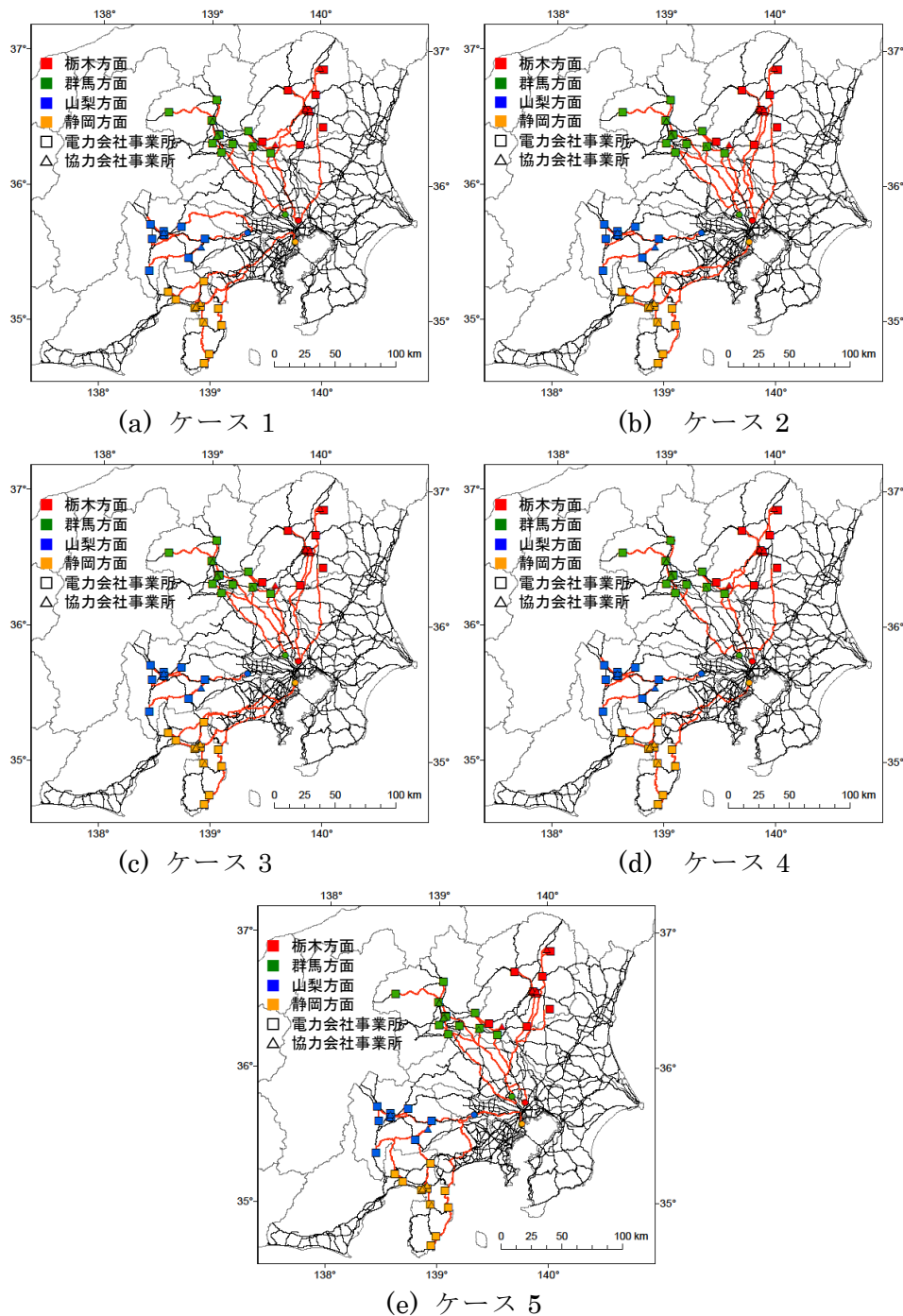


図6 各ケースにおける最短経路

次に災害時に選択され得る経路について検討する。まず地震動による道路ネットワークの物理的被害の可能性が最小となることを想定した Case4 の経路は、図6より前述した

Case1 とほぼ同様の結果となった。これは想定した地震による震度分布が都内を中心にはほぼ同心円状に広がっているため、経路を変更しても震度曝露距離にほとんど差が生じないためである。また、図 7 より、すべての広域応援要員の参集に要する所要時間は 6.5 時間であった。地域別に見ると、山梨方面は 2.5 時間と平常時の経路と比較してほとんど参集所要時間に差がないのに対し、栃木方面では 5.0 時間、群馬方面では 5.5 時間、静岡方面では 6.5 時間と平常時の経路である Case3 より 2.0~2.5 時間遅くなっている。また、液状化による道路ネットワークの物理的被害の可能性が最小となる経路として想定した Case5 では、平常時とは異なる経路が選択されている。図 6 より、特に経路の変化している地域は栃木方面、群馬方面、静岡方面であり、栃木方面では千葉県北西部を避ける経路が、群馬方面では荒川低地付近を経由する関越自動車道を避ける経路が、また静岡方面では液状化危険度の高い国道 1 号や沿岸部の経路を避け、山梨方面の国道 139 号や中央自動車道等を利用する経路が選択されている。その結果、図 7 に示す通り応援要員の参集に要する所要時間は、栃木方面では 6.0 時間、群馬方面では 7.0 時間、山梨方面では 4.5 時間、静岡方面では 8.0 時間と、平常時の経路である Case3 と比べ 2.0~3.5 時間遅くなる。

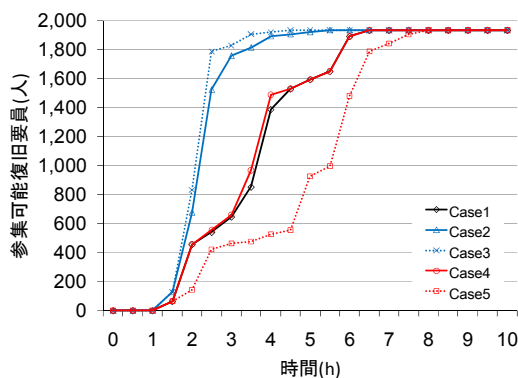


図 7 参集可能復旧要員数の推定結果

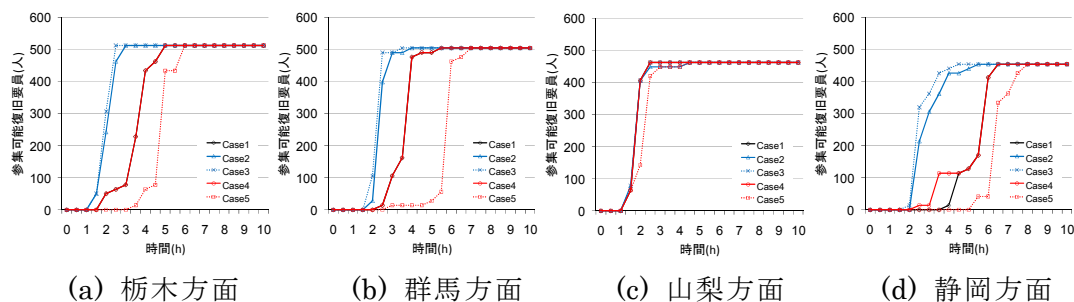


図 8 地域別の参集可能復旧要員数

本事例分析では、地震後の応急送電を確保するまでの応急復旧段階を対象としている。このような段階においては、被害を受けた電柱を従前通りに完全に復旧するのではなく、供給の継続に最低限必要な配電設備を選定し優先的に復旧する。このような考え方に基づき、一部の自治体の配電設備の被害想定においては、応急復旧の対象となる設備を被害設備の 20%としている⁶⁾。これより、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「物理的被害推定モデル」に基づいて算出した電柱被害量の 20% (17,746 本) を広域応援による応急復旧の対象と仮定した上で、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「復旧要員参集モデル」

より得られた参集可能復旧要員数を踏まえると、「復旧活動モデル」において広域応援要員の移動開始後の任意の時刻 t_n における復旧完了電柱量 $N_{restored,case}(t_n)$ は次式のように求められる。

$$N_{restored,case}(t_n) = \sum_{u=0}^n E \cdot M_{case}(t_{u-1}) \cdot \Delta t \quad (12)$$

ここで E は 1 時間当たり 1 人の復旧要員が復旧することのできる電柱の量（復旧効率）を表し、中央防災会議によって示されている 0.070 本/人・時⁷⁾ という数値を用いた。 $M_{case}(t_{u-1})$ は時刻 t_{u-1} における参集可能復旧要員数を表し、また、 Δt は計算ステップ $n-1$ から n の経過時間であり、0.5（時間）である。

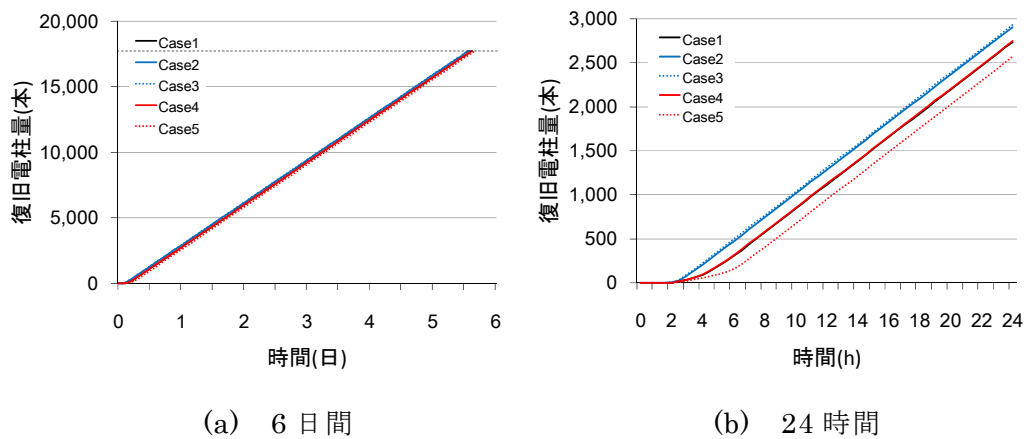


図 9 復旧完了電柱量の推定

以上の過程を経て求められた復旧完了電柱数の推移を図 9 に示す。電柱の復旧は地震発生後 2.0 時間で開始され、応急復旧完了までの時間はいずれのケースにおいても 5.6～5.7 日である。この数字は中央防災会議による復旧目標日数（6 日¹¹⁾）と調和的であると言える。地震発生後の緊急道路ネットワークの機能を反映した Case4 及び Case5 の場合は、平常時の緊急道路ネットワークの機能を想定した Case2 及び Case3 と比べ電柱の復旧完了までに最大 2.5 時間、電柱量にして 363 本の差が見られる。図 4 より、電柱被害量の多い葛飾区や江戸川区における電柱の空間に対する配置密度は平均して 590 本/km² であるため、上述した電柱量がカバーする面積は約 0.6km² となる。ここで葛飾区の 1 町丁目当たりの面積の平均は 0.22km²、同様に江戸川区では 0.25km² であることを考慮すると、2～3 町丁目の面積に匹敵する。

2) 広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドライン作成

上記 1) の具体案を踏まえ、広域連携・復旧効率化の観点からみて、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案を以下の通り 5 項目作成した。なお、本ガイドライン案に示された各項目の適用事例に関するデータや図面等については、サブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステム（以下、マッシュアップシステムと呼ぶ）に情報提供した。紙面の都合上、それらのデータや図面等については以下では割愛する。

a) 現行の広域応援実施事業所の地理的分布の精査

対象とするライフラインの各事業所の管轄地域において想定される最大震度が地震直後の被害点検や巡視を実施するための参集基準より小さいこと、及び、管轄地域において対象とするライフラインの機能障害が発生しないと想定されることの2点を考慮して、現行の広域応援実施事業所の地理的分布を精査し直し、緊急道路ネットワークとの位置関係を把握することが重要である。

なお、電力の場合に対して本ガイドライン項目 a)を適用した事例が先述した図 5 である。都市ガス、通信、上下水道についても同様に適用し、これらのデータについてサブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供した。

b) 広域応援実施事業所から復旧拠点までの平常時及び災害時における最適経路の求索

広域応援実施事業所から復旧拠点までの緊急道路ネットワーク上の最適経路を、平常時と災害時の2通りの場合に対してそれぞれ求索することが重要である。災害時には平常時と比較してどの程度経路に変化が生じ、広域応援要員の参集過程に遅延が生じるのかを明らかにするためである。平常時における最適経路の算定に際しては実距離、混雑度重み付距離及び混雑時平均所要時間を指標として用い、災害時の最適経路の算出に際しては揺れや液状化による物理的被害を考慮する観点から震度曝露距離及び PL 値曝露距離を指標として用いる。

なお、電力の場合に対して本ガイドライン項目 b)を適用した事例が先述した図 6 である。都市ガス、通信、上下水道についても同様に適用し、これらのデータについてサブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供した。

c) 広域応援実施事業所から復旧拠点に対する参集可能復旧要員数の算定

ガイドライン項目 b)の適用により求められた緊急道路ネットワークの最適経路に対して、広域応援要員の広域応援実施事業所から復旧拠点までの参集所要時間を算定し、地震発生後の任意の時刻における復旧拠点に対する参集可能復旧要員数を算定することが重要である。これより、参集可能復旧要員数の地震発生後からの時間的推移を推定することが可能となり、平常時及び災害時において各々想定される最適経路の中で広域応援要員の参集効率が高い経路と低い経路を明らかにできる。

なお、電力の場合に対して本ガイドライン項目 c)を適用した事例が先述した図 7 及び図 8 である。都市ガス、通信、上下水道についても同様に適用し、これらのデータについてサブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供した。

d) 復旧完了設備量の算定

ガイドライン項目 c)の適用により求められた参集可能復旧要員数に、作業時間及び復旧効率を掛け合わせて対象とするライフラインの復旧完了設備量を推定することが重要である。なお、復旧効率は1人の応援要員が単位とする作業時間あたりに復旧可能な設備量であり、中央防災会議で示されている数値等を参考に実情を踏まえ、適切な数値を設定する必要がある。本ガイドライン項目 d)の適用により、平常時及び災害時において各々想定される緊急道路ネットワークの最適経路の中で対象とするライフライン設備の復旧効率が高

い経路と低い経路を明らかにできる。なお、電力の場合に対して本ガイドライン項目 d)を適用した事例が先述した図 9 である。

e) 広域応援実施事業所及び広域応援要員の効率的再配置

ガイドライン項目 a)から d)を踏まえ、緊急道路ネットワークの中で復旧効率の高い経路上に広域応援実施事業所及び広域応援要員を再配置することが重要である。

なお、電力の場合について試算した結果、広域応援要員の参集効率が最も高い経路は山梨方面からの経路であり、栃木方面、群馬方面、静岡方面からの経路は平常時の経路と比較して災害時に想定される経路の効率が悪くなるため、これらの点を考慮して広域応援実施事業所及び広域応援要員を再配置し、それらの諸量を決定する必要がある。

3) 学会への参加発表

ICASP11 (11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering、平成 23 年 8 月、スイス) 及び地域安全学会等の国内学会に参加発表し、道路交通インフラ網の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延に与える影響評価方法に係わる最新の研究情報の収集をはかり、上記 1) の具体案を修正・再検討する際の研究情報としてフィードバックさせた。

Dijkstra 法による最適経路の探索に関して、実距離を移動コストとしたケース (Case1)、混雑時重み付距離を移動コストとしたケース (Case2) 及び混雑時平均所要時間を移動コストとしたケース (Case3) の 3 つのケースを平常時に選択される移動経路と解釈し、震度曝露距離を移動コストとしたケース (Case4) 及び PL 値曝露距離を移動コストとしたケース (Case5) の 2 つのケースを地震動または液状化による物理的被害の可能性が最も低い移動経路と解釈する枠組みを修正・再検討した。また、配電設備の電柱の応急復旧に関して、広域連携・復旧効率化評価モデルの中の「物理的被害推定モデル」、「復旧要員参集モデル」、及び「復旧活動モデル」を適用する際に用いる具体的なパラメータの数値を修正・再検討した。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成 23 年度には、緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフライン (電力、都市ガス、上下水道、及び電話等) の復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化方策を修正・再検討した。それらを踏まえ、広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドラインを作成し、その内容をサブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステムに提供した。

1) 広域連携・復旧効率化方策の修正・再検討

緊急交通路並びに緊急輸送路の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延の影響を最小化するための広域連携・復旧効率化に係わる具体案をガイドライン掲載に向けて修正・再検討した。その際には、緊急交通路並びに緊急輸送路の空間情報を数百から数千のノードとリンクから成る大規模なネットワークとしてモデル化するとともに、各種ライフラインの応急復旧プロセスを同様な規模のネットワークとしてモデル化した上で、それらを統合したモデルに基づいて最適化数値計算を行った。当該計算には、本事業で整備

する高速演算可能な PC ワークステーションを用いた。

2) 広域連携・復旧効率化方策に基づくガイドライン作成

上記 1) の具体案を踏まえ、広域連携・復旧効率化の観点からみて、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案を作成した。なお、本ガイドライン案をサブプロジェクト 3 全体で開発を進めているマッシュアップシステムに情報提供した。

3) 学会への参加発表

ICASP11 (11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering、平成 23 年 8 月、スイス) 及び地域安全学会等の国内学会に参加発表し、道路交通インフラ網の震災時機能支障による各種ライフラインの復旧遅延に与える影響評価方法に係わる最新の研究情報の収集をはかり、上記 1) の具体案を修正・再検討する際の研究情報としてフィードバックさせた。

以上の 1) から 3) の成果を踏まえ、今後の課題としては、地震後の緊急道路ネットワークの交通需要の変動を 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災におけるデータ等を精査することによってパラメータ同定した上で、「広域連携・復旧効率化モデル」に組み込み、モデルパラメータをアップデートする必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 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，
http://www.ktr.mlit.go.jp/kyoku/road/ir/census_h17/index.htm
- 2) 静岡県土木部道路企画室：平成 17 年度道路交通センサス報告書一般交通量調査，
<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-210/sen.html>
- 3) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」：首都直下地震対策専門調査会報告，平成 17 年 7 月
- 4) 東京都防災会議地震部会：首都直下地震による東京の被害想定(最終報告)，平成 18 年 3 月
- 5) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，平成 9 年 8 月
- 6) 損害保険料率算出機構：自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査，2006
- 7) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」：首都直下地震に係る被害想定手法について，資料 3，第 15 回資料，平成 17 年 2 月 25 日
- 8) 東京電力株式会社：防災業務計画，平成 18 年 7 月修正
- 9) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木・地盤 9 ライフライン施設の被害と復旧，社団法人土木学会，pp.381，1997
- 10) 関西電力 HP：阪神・淡路大震災～応急送電までの 7DAYS～，
<http://www.kepcoco.jp/kyousei/more/days/>
- 11) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」：被害想定結果について，資料 2，第 15 回資料，平成 17 年 2 月 25 日
- 12) 東京都防災会議：東京都地域防災計画 震災編，平成 19 年修正

(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（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
ライフラインの地震時応急復旧活動における広域応援の効率性評価～道路ネットワークを介した配電設備の応急復旧活動に対するケーススタディ～（口頭）	豊田安由美、庄司学	第3回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	2011.12	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所（雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
Modeling of Restoration Process associated with Lifeline Systems and the Interdependency due to a Seismic Disaster	Shoji, G. and Toyota, A.	Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering eds by M. H. Faber, J. Köhler and K. Nishijima, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-66986-3, pp.1867-1875	2011.8	国際
地震災害時における道路ネットワークの機能が配電設備の応急復旧活動に及ぼす影響	豊田安由美、庄司学	地域安全学会論文, No.15, pp.169-178	2011.11	国内
Function of Emergency Road Networks During the Post-Earthquake Process of Lifeline Systems Restoration	Shoji, G. and Toyota, A.	Journal of Disaster Research, Vol. 7, No.2	2012.2	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