

第5章 相互依存性を考慮したインフラ災害復旧過程のモデル化に関する研究

5.1 はじめに

大規模災害時には、個々の社会インフラに被害が生じるだけでなく、これらのインフラ機能が相互に依存していることにより被害が波及、拡大することがある。特に都市圏では、多種多様なインフラが高度かつ複合的に整備されており、こうした被害の波及が顕著に現れる。例えば 1995 年兵庫県南部地震の際には、道路・鉄道橋梁の被災による添架ライフライン管の破損、信号機の滅灯（9 割以上が停電による）に起因する交通渋滞の激化や、病院、行政サービス機能の低下などがみられた¹⁾。

このようなインフラ相互の被害の波及に関する研究としては、電力・都市ガス・上水道を対象とした震災影響波及の構造化²⁾、電力・上水道を対象としたシステムダイナミクスに基づく復旧過程のモデル化³⁾、ISM(Interpretive Structural Modeling)、FTA(Fault Tree Analysis)、ETA(Event Tree Analysis)による被害波及のモデル化と分析⁴⁾、台風による大規模停電の都市機能への被害波及の実態と構造の分析⁵⁾、ブレーストローミングや FSM(Fuzzy Structural Modeling)による震災波及構造のモデル化^{6),7)}、システム間の機能的被害波及を考慮したリスク分析手法を上水道と電力システムに適用した研究⁸⁾などが行われている。また最近では、日本の地震・豪雨・豪雪災害および北米での被害波及事例を調査し、被害連関マトリクスとして整理した上で、専門家等へのアンケート調査により定量化した相互依存構造マトリクスを作成し、相互依存性によってどの程度被害が拡大するかを試算した事例がある⁹⁾⁻¹²⁾。インフラ以外の要素を含めた相互依存性も指摘され、インフラ被害による経済活動の低下が道路の混雑度を介してインフラの復旧期間に影響し、それがまた経済活動に影響するという構造を想定した相互依存性評価手法が提案されている¹³⁾。

インフラ事業者の側でも、バックアップ電源の整備や通信網の多重化など、他のインフラが途絶することの影響を排除する努力が続けられている。一方、交通インフラは、多くのインフラの復旧活動に不可欠であるが、事業者側でのバックアップが困難であることに加え、交通インフラの被災が復旧活動にどのような影響を及ぼすか、復旧の遅れがどの程度になるかが明らかにされていないこともあり、対策の方向が見えていない。インフラ関連以外の事業者についても、事業の再開が電力等のインフラに依存していることが多いと考えられるため、交通インフラの被災によりインフラの復旧がどの程度遅延する可能性があるかを知っておくことは、事業継続計画を立案する上で重要である。

本研究では、早期の社会経済活動の復旧に直接関係する通信・電力・ガス・上水道・下水道・道路・鉄道の 7 つのインフラを対象に、これらが有する相互依存性、特に道路の被災が復旧活動に及ぼす影響の時間的・空間的变化を考慮した上で、災害発生後早期の復旧過程をモデル化し、首都直下地震を想定した震災復旧シミュレーションを実施した。次の 5.2, 5.3 ではモデル化について、5.4 で震災復旧シミュレーションの条件と結果を報告する。

5.2 インフラ機能復旧モデルの構築

(1) インフラ機能構成要素の整理

まず個々のインフラの機能とその構成要素間の関係を整理する。インフラ機能の構成要素には全体の機能をブレイクダウンした部分的な機能と、それを働かせるための設備、情報、他のインフラにより供給されるユーティリティ等のリソースが含まれる。これらの機能とリソースをノードで、それらの関係を有向アークで接続して表現するインフルエンス・ダイアグラムとして、各インフラの機能と構成要素の関係を図5-1のように整理した。以下、インフラごとに作成したインフルエンス・ダイアグラムについて説明する。

① 固定電話

図5-1(a)は固定電話の通信機能と構成要素の関係^{14),15),16)}を整理したものである。機能維持のためのリソースのうち、他のインフラにより供給されるユーティリティ（電力等）を黒い太線で、震災時に大きな被害が予想され物理的な復旧が必要となるリソースを赤い太線で囲んだ。

固定電話での通話には、電話機、電話機を作動させるための電力、加入者交換機からの電話線、および音声情報が必要となる。音声情報が届くためには、加入者交換機が機能する必要がある、このためには加入者交換機設備、交換機間を結ぶ幹線、交換機動作に必要な電力、および中継音声が必要となる。さらに、加入交換機に中継音声が提供されるためには、中継交換機の設備、交換機間の幹線、交換機動作に必要な電力の供給が必要となる。

なお、交換機間の幹線は多重化が進んでおり、寸断されるとは考えにくい。また、交換機用の電力供給停止に備え、NTT内ではバックアップ電源が用意されている。

上記以外では、災害時の発信規制や輻輳の有無について留意する必要がある。固定電話の構成要素が全て維持されていたとしても、発信規制や輻輳が生じることで固定電話の機能が阻害されるためである。

② 携帯電話

図5-1(b)は携帯電話の通信機能と構成要素の関係¹⁷⁾を整理したものである。固定電話と携帯電話で大きく異なる点は、個々の端末からの音声情報が無線で送られるため、電話線が存在しない点にある。したがって、携帯電話機能の構成要素は、携帯電話機、電話機の動作に必要な電力、音声情報となる。音声情報は基地局から交換機に送られ、受信側の交換機から基地局、端末へ送られることから、基地局機能を維持するためには基地局設備、基地局への供給電力も必要となる。交換機機能を維持するための交換機設備、電力、交換機間の幹線も必要となるが、これらは通信事業者により災害時の対策が十分にとられており¹⁸⁾、大きな影響は受けなかった。

また、携帯電話機能は固定電話機能と同様に、災害時の発信規制や輻輳の有無についても考慮しなければならない。

③ 電力

図5-1(c)は電力の供給機能と構成要素の関係^{19),20)}を整理したものである。電力は供給電圧によって供給経路が多少異なっており、大口供給先となる鉄道や大工場に対しては一次変電所から直接送電線を経由して供給されているが、中工場程度の供給量の場合は配電用変電所から配電線を経由して電力が供給される。そして、一般家庭等に供給する最も電圧の低い電力は経路が最も長く、配電用変電所、配電線、トランスを経て、引込み線を経

由して供給される。また、発電設備としては火力、水力、原子力等がある。更に、電力系統の切替え等を行う集中管理機能があり、この情報を下に電力が供給される。万一、集中管理機能が停止した際の電力供給への影響には、留意する必要がある。

電力は他インフラからの依存度が高く、供給停止時の影響範囲が広い。特に変電所からの大口供給先に他インフラが含まれている。

④ 都市ガス

図 5-1(d) はガスの供給機能と構成要素の関係²¹⁾を整理したものである。ガス供給はその供給量によって供給経路が異なる。ガス製造工場からは高圧ガスが高圧導管を経由して供給され、ガバナステーションで圧力が中圧に落とされる。大口供給先については、この中圧の状態で中圧導管を経由してガスが供給される。一般の供給先については、中圧ガスがさらに地区ガバナにおいて低圧ガスとなり、低圧導管を経由して供給される。

各ガバナ（ガバナステーション、地区ガバナ）の圧力制御は中央で集中的に管理されており、この中央制御機能を維持するためには中央制御設備と電力供給が維持される必要がある。

⑤ 上水道

図 5-1(e) は上水道の供給機能と構成要素の関係^{22)、23)、24)}を整理したものである。上水は取水塔、浄水場、給水所を経て供給される。各設備間はそれぞれ導水管、送水管、配水管、給水管と呼ばれる管により結ばれている。各設備でのポンプ動作等には電力が必要となる。

各設備でのポンプ制御等の情報は集中管理されており、東京都水道局では水運用センターと呼ばれる施設で実施されている。水運用センターが機能するためには、設備およびセンターで使用される電力が維持される必要がある。ただし、水運用センター停止により上水道の供給停止とはならず、人手による代替が可能である。

⑥ 下水道

図 5-1(f) は下水道の機能と構成要素の関係²⁵⁾を整理したものである。下水道は水道、ガス、電気のように供給されるインフラではなく、各工場や家庭からの排水が最上流に位置する。したがって、下水機能のみに注目した場合は基本的に下水道管が破損していなければ機能が維持されると考えられる。

下水処理機能の構成要素としては、下水道管に加えて、ポンプ所、ポンプ汲み上げに利用する電力、下水処理施設（東京都下水道局における名称は水再生センター）の設備、設備に必要となる電力が挙げられる。

⑦ 道路

図 5-1(g) は道路の輸送機能と構成要素²⁶⁾の関係を整理したものである。道路輸送機能は道路自体が物理的に破壊されない限り、完全に停止することはない。しかし、通常の車両交通量を維持するだけの機能を保つためには、高速道路以外では信号機能が必要となる。信号は装置自体に加え、動作するための電力、信号を変えるタイミングを決定する制御情報（単独制御情報、交通管制情報）が必要である。交通管制情報は道路のモニタリング情報を元に提供されるため、モニタリングのための情報収集端末および動作させるための電力も必要となる。また、交通管制情報は信号機能だけではなく、道路状況の情報提供にも用いられる。さらに、高速道では ETC 機能が必要であり、ETC 設備や動作のための電力が必要となる。

なお、警察庁によれば全国に約 19 万基（平成 17 年度末時点）、東京都には約 1 万 5 千

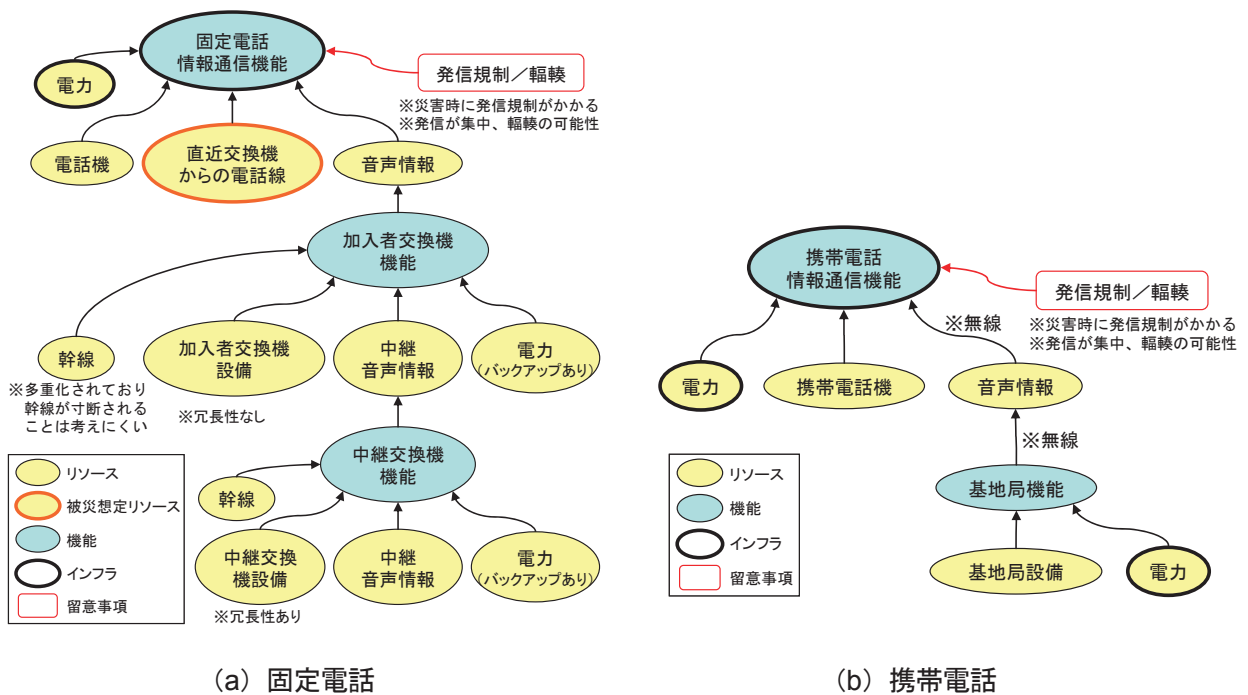
基の交通信号が設置されている²⁷⁾が、平成8～14年度の交通安全施設等整備事業では全国で約1.9万基の信号が集中制御化（車両感知器等によって収集した渋滞情報等を元に、都市内道路、幹線道路の信号機を交通管制センターのコンピュータ等により面的に制御する）されており²⁸⁾、都市部では相当数の信号機が集中制御化されていると考えられる。

⑧ 鉄道

図5-1(h)は鉄道の輸送機能と構成要素の関係²⁹⁾を整理したものである。鉄道の運行には、鉄道車両、線路、駅施設、保安設備といった設備の他に、運行要員および運行情報が必要となる。特に運行要員の確保が必須である点は、他のインフラとは異なる特徴である。

また、他インフラとの依存関係では電力への依存度が高い。したがって、災害時の鉄道運行機能のモデルを構築するためには電力供給会社との依存関係を把握しなくてはならない。そのために、電力供給会社との取決め、バックアップ電源の有無、等を確認する必要がある。鉄道の運行には運行情報が欠かせず、運行情報を提供するために必要なインフラを含めたリソースを整理する必要がある。

さらに、各鉄道事業者は災害時には一旦運行を停止し、安全確認実施後に運行を再開するためのルールを有している。この内容を加味することでさらに現実性に則したモデルを構築することができる。



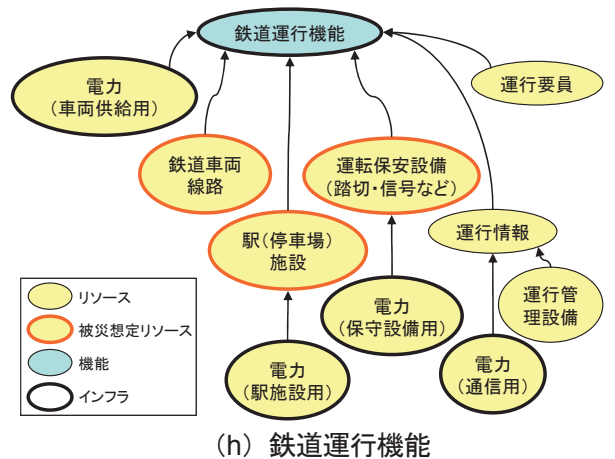
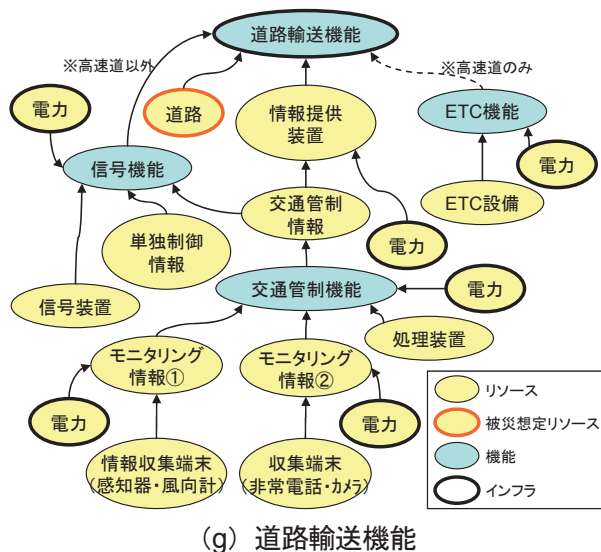
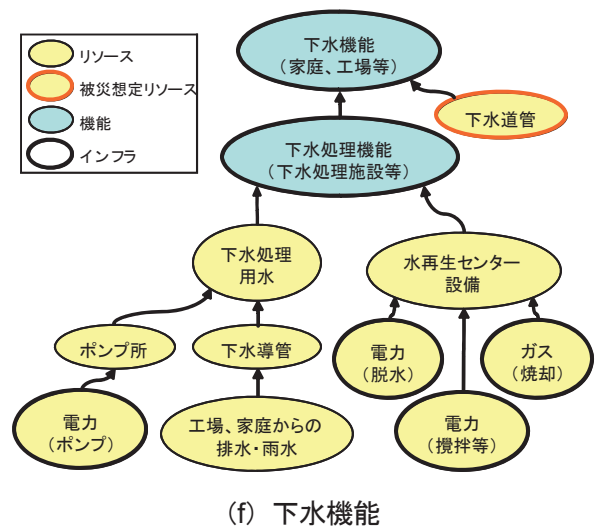
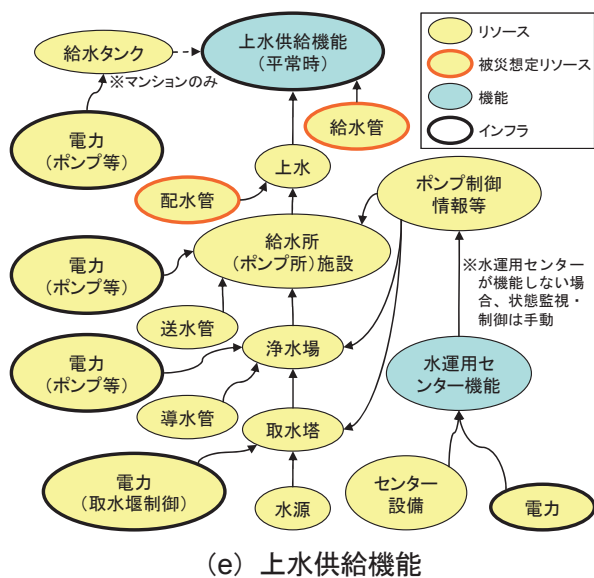
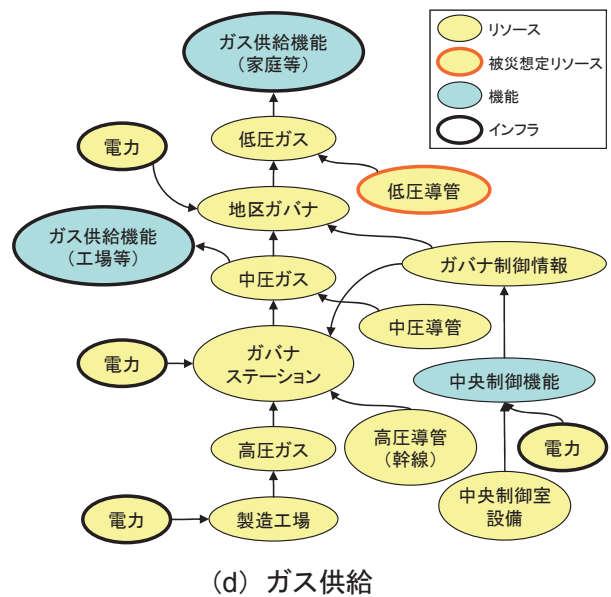
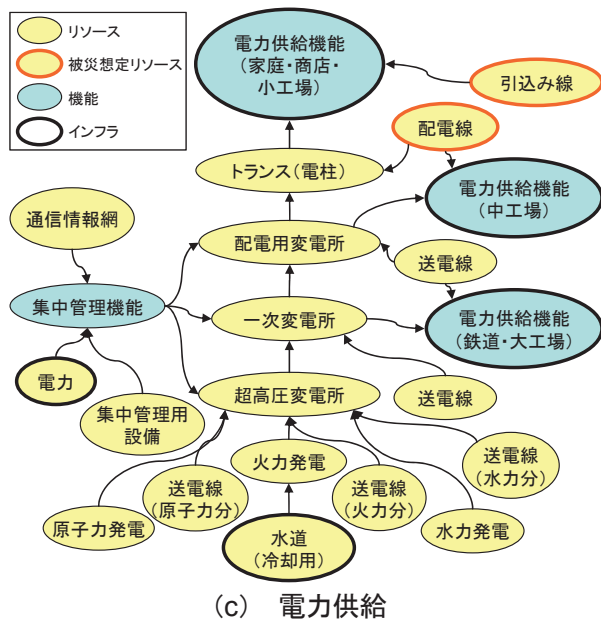


図 5-1 インフラ機能と構成要素の関係を示すインフルエンス・ダイアグラム (2/2)

(2) インフラ機能復旧モデルの構築

(1)で整理した各インフラ機能の構成要素をもとに、地震発生時を想定したインフラの復旧を記述する機能復旧モデルを構築する。インフルエンス・ダイアグラムの構成要素に、復旧要員の確保やバックアップ電源等の非常時の代替手段の有無が加わることになるため、機能復旧モデルは基本的に次の3要素により構成される。

① 設備の物理的復旧

インフラ設備の物理的復旧には要員の確保が必要となるため、緊急車両の道路輸送機能や通信機能の復旧が必要とされる場合がある。このような状況を表現するために、他インフラに支障がないと仮定した場合の地震発生後日数ごとの復旧割合（＝復旧設定値）を入力変数として与えておき、これに道路輸送機能や通信機能の復旧レベルに応じた「影響度」を乗じる。ここで、復旧割合とは1日あたりに復旧可能な件数を被災件数で除した値である。

各インフラは様々な設備を有しているが、上記のような復旧作業が生じるのは、災害時に損傷すると想定される設備のみである。ここでは、図5-1のインフルエンス・ダイアグラムで「復旧想定リソース」とした設備を対象とする。インフラ機能復旧モデルにおいて物理的復旧を必要とする設備を整理すると表5-1のようになる。インフルエンス・ダイアグラムに示した各インフラの構成要素での名称と機能復旧モデルでの記載が異なるものがあるため、名称の対応も併せて記した。

② ユーティリティ（主に電力）供給

インフラ設備が物理的に損傷していなくとも、設備の作動に必要なユーティリティが復旧しなければインフラの機能を回復することはできない。主に電力が該当する。

③ 制御情報

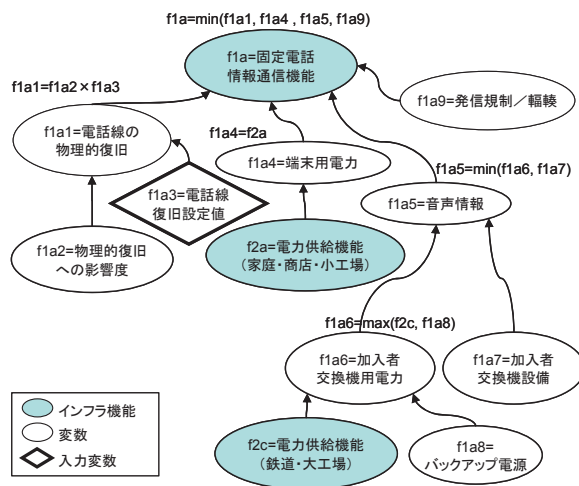
物理的な損傷がなく、ユーティリティに問題がない場合でも、入出力をコントロールする必要があるインフラについては、制御情報がなければ正常な機能は維持できない。具体的には、電力の集中管理機能、ガスの中央制御機能、鉄道の運行情報等が該当する。

上記の3要素が全て確保されていればインフラの機能が維持されるが、復旧が遅延する要素が1つでもあると、その要素がボトルネックとなって機能の回復が遅延する。これらの条件を考慮した上で作成した機能復旧モデルを図5-2に示す。ここで、道路輸送機能については、首都直下地震発生時のインフラ復旧過程での利用の違いを考慮し、幹線道路（広域交通：広域応援要員の参集等に利用）と細街路（区内の交通：被災現場での復旧活動等に利用）に区別してモデル化した。

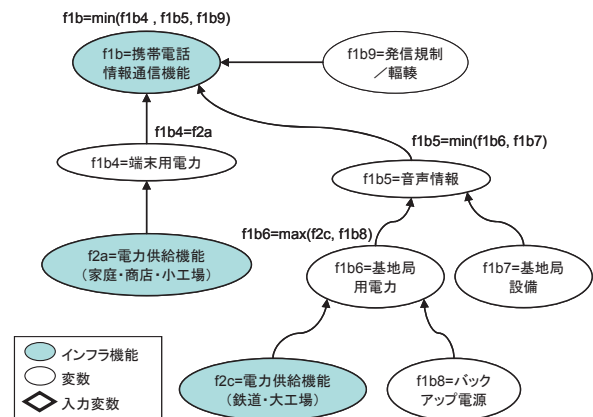
各モデルに示される「インフラ機能」は、平常時の機能を1、全く機能していない場合を0とする供給率（＝復旧率）を表しており、電話・電力・ガス・上下水道では供給件数／平常時供給件数とする。また、道路・鉄道については、1つの区を横断する程度の延長で通行止めが発生しないルート of 比率を供給率（＝復旧率）とする。

表 5-1 物理的復旧を記述する設備のリストとその名称の対応

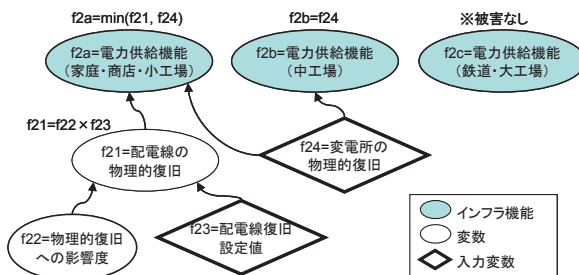
インフラ	インフルエンス・ダイアグラムでの名称	インフラ機能復旧モデルでの名称
固定電話	直近交換機からの電話線	電話線
携帯電話	—	—
電力	引込み線、配電線	左記をまとめて「配電線」
ガス	低圧導管	低圧導管
上水道	給水管、配水管	左記をまとめて「配管」
下水道	下水道管	下水道管
道路	道路	道路
鉄道	線路、鉄道車両、駅（停車場）施設、運転保安設備	左記をまとめて「鉄道」



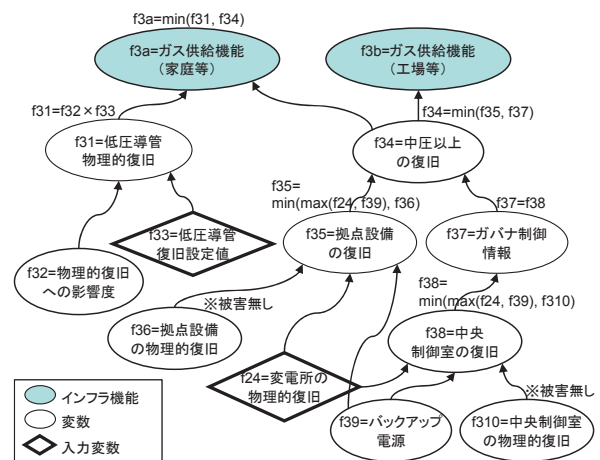
(a) 固定電話



(b) 携帯電話



(c) 電力



(d) ガス

図 5-2 各インフラの機能復旧モデル (1/2)

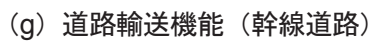


図 5-2 各インフラの機能復旧モデル (2/2)

(3) 設備の物理的復旧

表 5-1 に整理したとおり、携帯電話以外のインフラには物理的復旧を要する設備があるため、図 5-2 の機能復旧モデルでは、機能の確保に設備の物理的復旧が必要となること、設備の物理的復旧率はそれぞれの設備の「復旧設定値」に物理的復旧への「影響度」を乗じて得られることが表現されている。

「復旧設定値」は各インフラに対して想定される物理的被害の大きさ（被災件数）とインフラ事業者の復旧能力（1 日あたりに復旧可能な件数）によって定まる。首都直下地震のうち東京湾北部地震等については、通信、電力、ガス、上下水道事業者へのヒアリングに基づいて地震発生後の機能復旧推移が設定されており³⁰⁾、この結果を地震発生後日数と復旧割合の関係を表す「復旧設定値」に変換することができる（5.4(1) 参照）。

「影響度」は各インフラ事業者の物理的被害の復旧作業が通信機能や道路と鉄道の輸送機能にどの程度影響されるかによって定まる。「影響度」は、通信・輸送機能に影響を受けた場合の復旧割合を、影響を受けない場合の復旧割合で除した値として定義する。

すなわち、「復旧設定値」に「影響度」を乗じると、通信機能と輸送機能に影響を受けた場合の復旧割合が算出される。この復旧割合が図 5-2 に示した電話線、配電線、幹線道路等の物理的復旧に該当する値である。

(4) 物理的復旧への影響度

(3) で述べたとおり、設備の物理的復旧は通信・輸送機能に影響を受けており、復旧割合を算出するには通信機能と輸送機能の「影響度」が必要である。「影響度」は各インフラ事業者の物理的被害の復旧作業が通信・輸送機能にどの程度影響されるかを示すパラメータであるが、これに関する既存の資料はないため、各インフラ事業者の防災業務計画等の公表資料を調査するとともに、一部のインフラについてはヒアリングを実施した。その結果、非常用発電装置・専用通信網等の整備状況や復旧拠点箇所、広域応援体制等に違いが見られるものの、インフラ事業者が災害復旧行動をとる際の組織と必要なリソース（人、資材、情報、交通、電力等）の関係は、基本的には図 5-3 のように模式化できることが分かった。この図では、インフラの災害復旧時に必要な機能として、次の 2 つが挙げられている。

1. 通信機能：本社から現場での復旧活動を行う作業チームまで情報を行きわたらせるために必要
2. 輸送機能：復旧要員・資材の現場への輸送、計画・管理セクションの人員や広域応援要員の参集のために必要

この結果をもとに、復旧割合に影響するパラメータとして現場通信確保率、復旧要員参集率、復旧資材収集率、現場交通時間遅延率を設定し、復旧要員はさらに協力会社作業要員、支社作業要員、広域応援要員の 3 種類を考慮することにより、「影響度」を算出するためのモデルを物理的復旧が必要な設備（表 5-1 参照）ごとに構築した。例として電力設備、すなわち配電線の物理的復旧への影響度のモデルを図 5-4 に示すが、道路と鉄道によって要員と資材が復旧拠点に運搬され、道路で復旧現場に移動したのち支社等と通信しつつ配電線を復旧する過程がモデル化されている。ここでは首都直下地震のケーススタディを行うことを念頭に置き、支社作業要員は鉄道を利用して参集すると仮定しているが、対象地域によっては道路を利用して参集することも考慮する必要がある。

なお、固定電話・ガス・道路の「影響度」のモデルはほぼ図 5-4 と同じであるが、上下水

道では協力会社との連絡が一般電話回線によっている（ヒアリング結果より）ため、協力会社作業要員参集率に固定電話と携帯電話の通信機能が影響すること、また鉄道では現場付近での交通手段として道路輸送機能が不要であることが異なっている。

図 5-4 に配電線復旧について例示したとおり、物理的復旧への影響度を算出する際には、インフラ機能復旧モデルから算出される通信機能と道路・鉄道の輸送機能をもとに、現場通信確保率、要員参集率、資材確保率、現場交通時間増加率を算出することになる。これらのうち通信機能に関する値である現場通信確保率は、「flb=携帯電話情報通信機能」と「flc=災害時用通信機能」の大きい方の値 $\max(\text{flb}, \text{flc})$ で表せるとした。したがって、災害時用通信機能が確保されていない場合には flb と等しくなる。

一方、輸送機能に関する値である要員参集率、資材確保率、現場交通時間増加率については、次節 5.3 の交通モデルを用いて算出する。

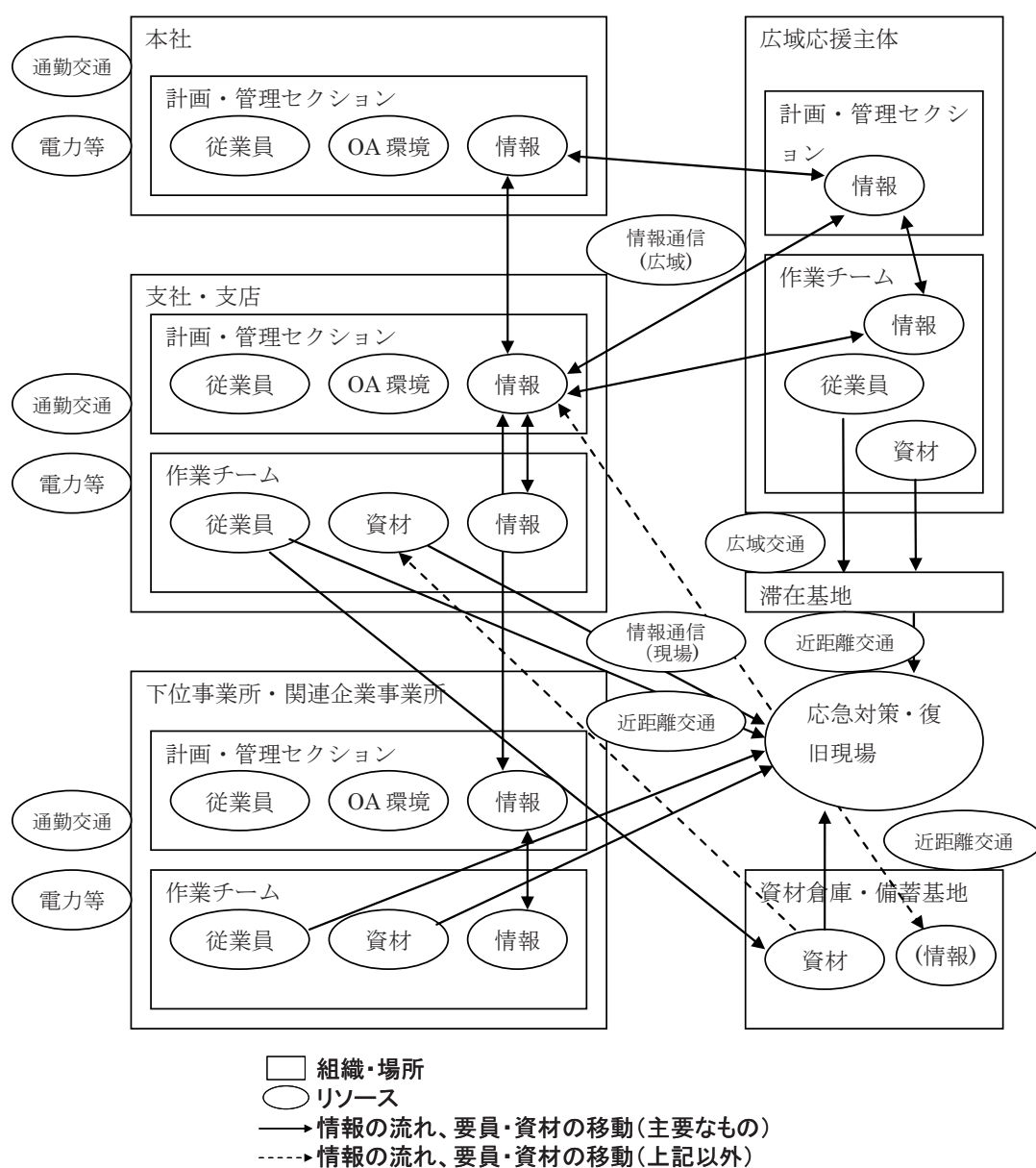


図 5-3 災害復旧行動の組織と必要なリソース

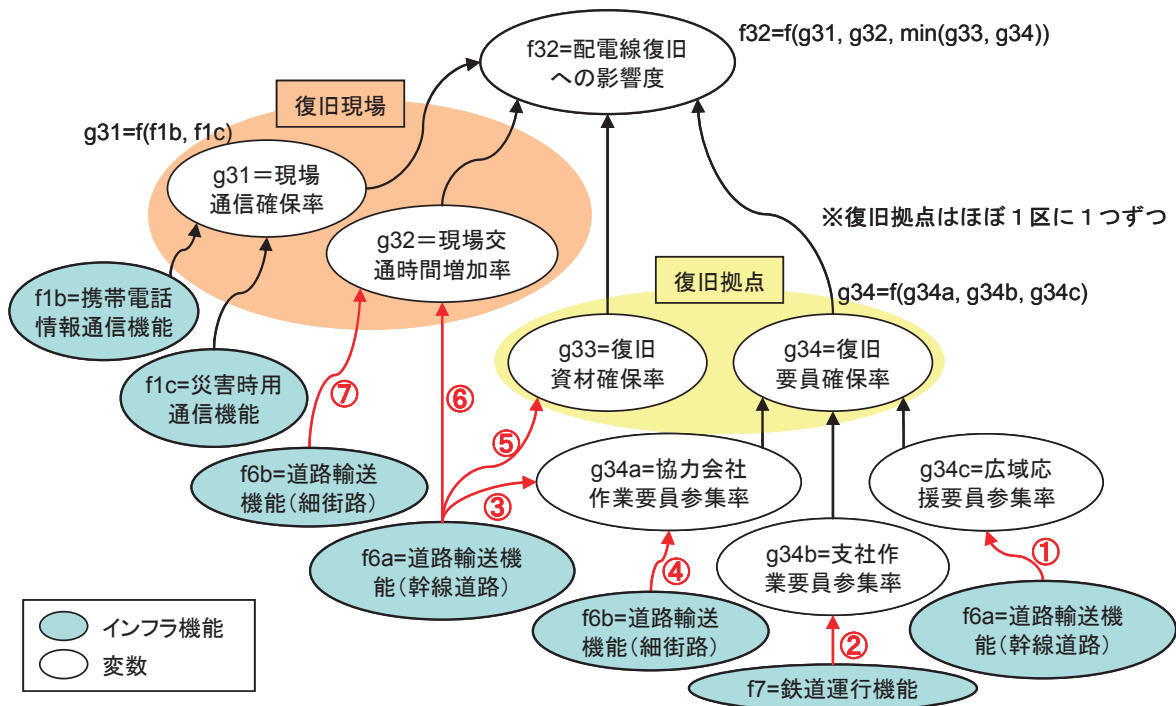


図 5-4 物理的復旧への影響度のモデル（例：電力）

赤い矢印は交通モデルを用いて算出することを、丸囲み数字は交通モデル番号を示す

5.3 交通モデルの構築

(1) 交通モデルの構成とインフラシステム機能復旧モデルとの関係

各インフラの機能復旧モデル（図 5-2）と物理的復旧への影響度のモデル（図 5-4）から、全てのインフラの機能復旧には通信・輸送機能が必要であり、これらのモデルは全て通信・輸送機能を通じて繋がっている、すなわち一つのシステムであることが分かる。そこで、全インフラの機能復旧を一つのシステムとしてとらえたモデルを、インフラシステム機能復旧モデルと呼ぶことにする。

インフラシステム機能復旧モデルで各インフラの復旧過程をシミュレートするためには、図 5-2 で入力変数とした復旧設定値およびバックアップ電源による電力供給率のほか、物理的復旧への影響度を算出するための要員参集率、資材確保率、現場交通時間増加率が必要となる。前述の通り、これらのパラメータはここで構築する交通モデルで計算されることになるが、この交通モデルの構成、およびインフラシステム機能復旧モデルとの関係を示すと図 5-5 のようになる。1 日を 1 ステップとして、まずインフラシステム機能復旧モデルから各インフラの復旧率を出力し、それをもとに交通モデルによって要員参集率、資材確保率と現場交通時間遅延率を計算、その結果をインフラシステム機能復旧モデルに入力して次の日の復旧率を計算するという流れになっている。なお、図 5-4 と図 5-5 の交通モデル番号は対応している。

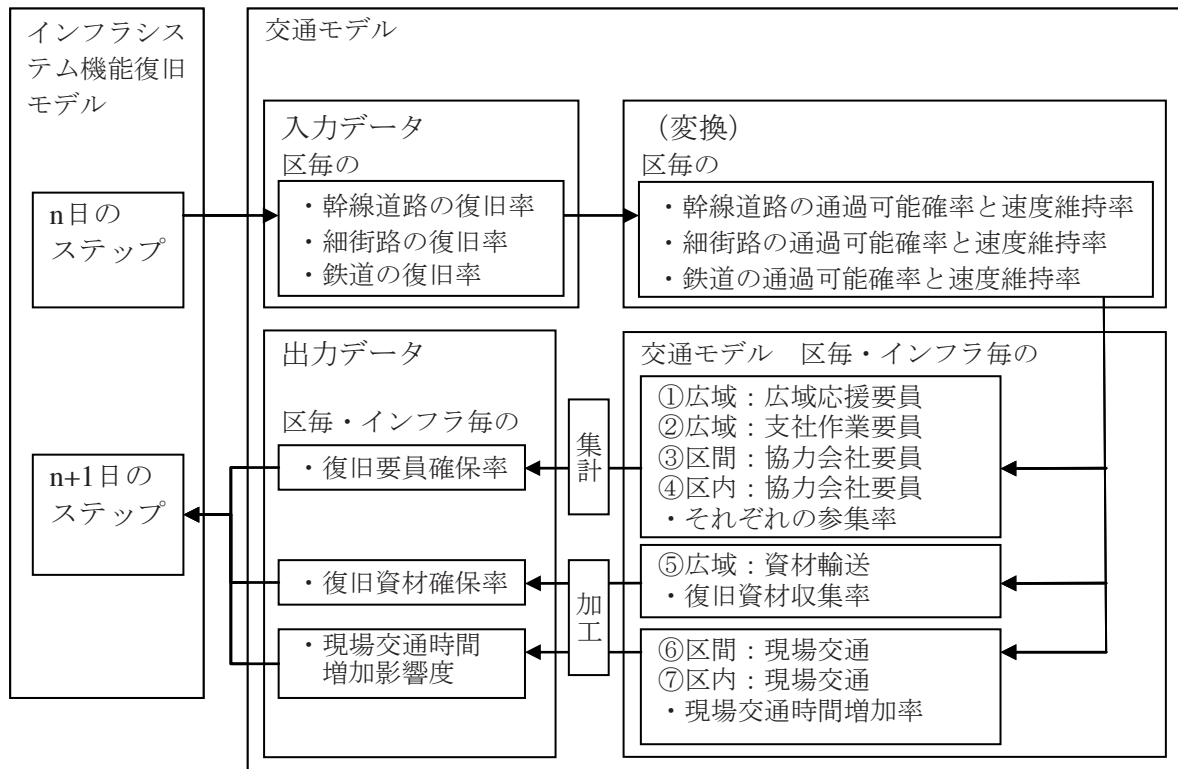


図 5-5 交通モデルの構成とインフラシステム機能復旧モデルとの関係

(2) 通過可能確率と速度維持率

図 5-5 に示されている通り、幹線道路、細街路および鉄道の復旧率は、区毎の通過可能確率と速度維持率に変換されて交通モデルに入力される。ここではこの変換について説明する。

5.2(2)で述べた通り、道路・鉄道については復旧率を「1つの区を横断する程度の延長で通行止めが発生しないルート of 比率」と定義しているが、出発地から目的地に到達するためのルートは通常複数存在するため、2点間を通過可能な確率は復旧率よりも高いと考えられる。この通過可能確率は、実際のネットワークを対象にモンテカルロシミュレーション等によって算出することが一般的であるが、ここでは簡略化したネットワークを仮定して以下のように算出する。

出発地から目的地に達する最短ルート r_1 に対して、それが不通となった場合の迂回ルートを r_2, r_3 とし、これらの迂回ルートは最短ルートの 1.3 倍の距離があるとする。このとき、最短ルートの通過可能確率は復旧率に等しく、通過可能確率がルートの距離にしたがって減少すると考えると、個々の迂回ルートの通過可能確率は復旧率を 1.3 乗した値となる。同様に、 r_2, r_3 よりも遠回りの迂回ルートを r_4, r_5 とし、これらは最短ルートの 1.5 倍の距離があるとする。最短ルートと迂回ルートを含めた全体の通過可能確率は次式で表せる。

全体の通過可能確率 = $1 - (\text{各ルートの通過不能確率の積})$

$$= 1 - (1 - \text{復旧率}) (1 - \text{復旧率}^{1.3})^2 (1 - \text{復旧率}^{1.5})^2 \quad (5.1)$$

最短ルートの 1.7 倍の距離をもつ迂回ルート r_6, r_7 を含めた場合も同様に計算し、ルート数による通過可能確率の変化を示したものが図 5-6 である。最短ルート r_1 の通過可能確率が低くとも、迂回ルートを含めた全体の通過可能確率はかなり高いことが分かる。また、迂回ルート r_5 まで含めると通過可能確率はほぼ飽和している。

一方、速度維持率（＝災害時の車両移動速度／平常時の車両移動速度）についても厳密にはシミュレーションによって算出することが考えられるが、復旧率が0の場合は車両の移動速度が0となり速度維持率は0、復旧率が1の場合は車両の移動速度は平常時と同じ、すなわち速度維持率1となることから、ここでは簡便に、速度維持率＝復旧率と仮定する。

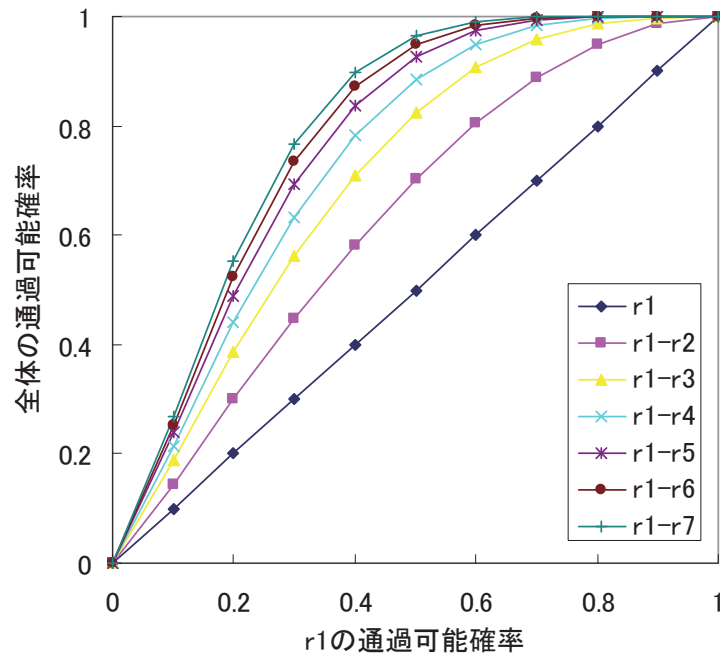


図 5-6 ルート数による通過可能確率の変化

(3) 交通モデル

本節では、図 5-4 と図 5-5 の番号①～⑦の順に、交通モデルによる要員参集率、資材確保率、現場交通時間増加率の計算手順を説明していく。なお、次の 5.4 で首都直下地震を対象とするケーススタディを実施するため、東京 23 区が主な被災エリアであることを想定したモデルとなっている。

①: 幹線道路による広域応援要員の参集率

埼玉県、千葉県、神奈川県および多摩地区の 4 方面から、幹線道路を利用して対象区内の復旧拠点に参集する広域応援要員の参集率（＝参集可能な要員数／参集予定の要員数）を次式で計算する。

広域応援要員参集率

$$= \frac{\sum \text{各方面から対象区に入るために通過する区の通過可能確率の総積} \times \text{各方面要員比率}}{\sum \text{各方面要員比率}} \quad (5.2)$$

ここで、4 方面から参集する要員の比率は各々 1/4 ずつとする。各方面から対象区に入るために通過する区を設定した上で、各区の通過可能確率はそれぞれの区の幹線道路復旧率から式(5.1)で算出する。

②:鉄道による支社作業要員の参集率

対象区外から鉄道を利用して、対象区内の支社に参集する支社作業要員の参集率（＝参集可能な要員数／参集予定の要員数）を式(5.3)で計算する．要員の参集元はパーソントリップ(PT)調査³¹⁾の主要交通手段“鉄道”による．また、固定電話、携帯電話、鉄道はPT調査の産業区分「運輸・通信業」、電力、ガス、上水道、下水道は「電気・ガス・水道業」、道路は「建設業」のデータを利用する．

支社作業要員参集率

$$= \frac{\sum \text{対象区に入るために通過する区の通過可能確率の総積} \times \text{対象区に入る鉄道利用のPT}}{\sum \text{対象区に入る鉄道利用のPT}} \quad (5.3)$$

参集元から対象区に入るために通過する区を設定した上で、各区の通過可能確率はそれぞれの区の鉄道復旧率から式(5.1)で算出する．

③④:幹線道路と細街路による協力会社作業要員の参集率

復旧拠点が複数の区にまたがるブロックの復旧を担当する場合、対象区内外から幹線道路と細街路を利用してこの復旧拠点に参集する協力会社作業要員の参集率（＝参集可能な要員数／参集予定の要員数）を次式で計算する．

$$\text{協力会社作業要員参集率} = \frac{\sum \text{各区の平均通過可能確率}}{\text{当該復旧ブロックに属する区の数}} \quad (5.4)$$

すなわち、参集率は復旧ブロック内での平均的な通過可能確率に等しいと考えていることになる．ここで、各区の平均通過可能確率は、幹線道路と細街路の利用割合を 1:1 とし、幹線道路の細街路の復旧率それぞれから式(5.1)で算出される通過可能確率の平均値とする．

なお、復旧拠点对象区内のみの復旧を担当する場合、協力会社作業要員参集率は対象区の平均通過可能確率に等しいと考え、幹線道路と細街路の利用割合を 1:1 とし同様に算出する．

⑤:幹線道路による復旧資材の収集率

対象区外から幹線道路を利用して、対象区内の復旧拠点に輸送される復旧資材の収集率（＝収集可能な資材量／収集予定の資材量）を式(5.5)で計算する．資材の発地は物資流動調査³²⁾の着地施設分類「工事現場」のデータを利用する．

復旧資材収集率

$$= \frac{\sum \text{対象区に入るために通過する区の通過可能確率の総積} \times \text{対象区に入る貨物量}}{\sum \text{対象区に入る貨物量}} \quad (5.5)$$

資材の発地から対象区に入るために通過する区を設定した上で、各区の通過可能確率はそれぞれの区の幹線道路復旧率から式(5.1)で算出する．

⑥⑦:幹線道路と細街路による現場交通時間の増加率

復旧拠点から幹線道路と細街路を利用して復旧要員が現場に入る際、通過不能なルートがあることによって交通時間が増加する。復旧拠点が複数の区にまたがるブロックの復旧を担当する場合、この交通時間の増加率（＝災害時の交通時間／平常時の交通時間）を次式で計算する。

$$\text{現場交通時間増加率} = \frac{\text{当該復旧ブロックに属する区の数}}{\sum \text{各区の平均速度維持率}} \quad (5.6)$$

すなわち、現場交通時間増加率は、復旧ブロック内での平均的な速度維持率の逆数に等しいと考えていることになる。ここで、各区の平均速度維持率は、幹線道路と細街路の利用割合を 1:1 として、幹線道路と細街路の速度維持率の平均値とする。

なお、復旧拠点が対象区内のみの復旧を担当する場合、現場交通時間増加率は対象区の平均速度維持率の逆数に等しいと考え、幹線道路と細街路の利用割合を 1:1 として同様に算出する。

(4) 復旧要員確保率の算定

復旧要員確保率は広域応援要員、支社作業要員、協力会社作業要員の参集率から算定される（図 5-4）。これらの参集率は(3)で述べたとおり交通モデルで算定される。ただし、上下水道の協力会社作業要員については、交通モデル③④で算定される参集率に固定電話情報通信機能と携帯電話情報通信機能の供給率の大きいほうの値を乗じたものを協力会社作業要員参集率とする（5.2(4) 参照）。

復旧要員確保率は、このように算定された3つの参集率に、それぞれの復旧要員構成率を乗じ、それらの和として計算する。ここで、復旧要員構成率は広域応援要員、支社作業要員、協力会社作業要員の順に 0.2, 0.1, 0.7 を標準とするが、ヒアリング結果等を踏まえ、鉄道は自社で対応することから順に 0, 1, 0、ガスは広域応援要員とそれ以外がほぼ同数であることから順に 0.5, 0.05, 0.45、細街路は広域応援がないと想定して順に 0, 0.1, 0.9 とする。

(5) 物理的復旧への影響度の算定

物理的復旧への影響度は、各インフラ事業者の物理的被害の復旧作業が通信・輸送機能にどの程度影響されるかを示すパラメータであり、通信・輸送機能に障害がない場合の物理的被害の復旧割合、すなわち復旧設定値に対する、これら機能に障害がある場合の復旧割合の比で表される。この算定には図 5-4 に示したとおり、現場通信確保率、現場交通時間増加率、復旧資材収集率、復旧要員確保率が必要である。これら 4 つのパラメータから物理的復旧への影響度を算定する考え方は以下のとおりである。

現場通信確保率は、5.2(4)でも述べたとおり、「flb=携帯電話情報通信機能」と「flc=災害時用通信機能」、それぞれの供給率の大きい方の値で表せるとするが、現場との通信が途絶していても、復旧作業が全く進まないわけではない。通信機能が完全に途絶した場合と通信機能の低下がない場合の復旧割合の比を現場通信影響率と定義し、通信機能の低下が復旧割合に及ぼす影響を次式で計算する

$$\text{現場通信確保影響度} = \text{現場通信確保率} \times \text{現場通信影響率} \quad (5.7)$$

復旧現場での作業に要する時間は、現場での交通時間と復旧作業そのものに要する時間の和である。例えば、現場交通時間増加率が 2、すなわち道路輸送機能の低下により現場での交通時間が 2 倍になったとしても、復旧割合が 1/2 になるわけではない。交通機能の低下がない場合に、現場交通時間が現場作業時間に占める割合を現場交通時間率と定義し、現場交通時間の増加が復旧割合に及ぼす影響を次式で計算する。

$$\text{現場交通時間増加影響度} = \frac{1}{\text{現場交通時間率} \times \text{現場交通時間増加率} + (1 - \text{現場交通時間率})} \quad (5.8)$$

復旧資材には、地震発生後に収集されるものと、事前に復旧拠点付近に備蓄されているものがあるため、これらを合わせた復旧資材確保率を次式で計算する。

$$\text{復旧資材確保率} = \text{復旧資材備蓄率} + (1 - \text{復旧資材備蓄率}) \times \text{復旧資材収集率} \quad (5.9)$$

以上のように現場通信確保影響度、現場交通時間増加影響度、復旧資材確保率を計算し、(4)で計算した復旧要員確保率と合わせて、次式で物理的復旧への影響度を計算する。

物理的復旧への影響度

$$= \text{現場通信確保影響度} \times \text{現場交通時間増加影響度} \times \min(\text{復旧資材確保率}, \text{復旧要員確保率}) \quad (5.10)$$

ここで新しく定義した現場通信影響率、現場交通時間率については、ヒアリングでも参考となる情報が得られなかったため、いずれも 0.5 と仮定する。また、復旧資材備蓄率は、必要量の半分程度の資材が備蓄されているとのヒアリング結果を踏まえて 0.5 とする。

5.4 首都直下地震を想定したケーススタディ

5.2, 5.3 で構築したインフラ機能復旧モデルと交通モデルを図 5-5 のように組み合わせ、首都直下地震を想定したインフラ機能復旧過程のシミュレーションを行う。ここでは中央防災会議によって想定されている首都直下地震のうち、最も被害が大きい地震の一つである東京湾北部地震(M7.3)発生時の東京都 23 区内を対象に、インフラシステムの機能復旧シミュレーションを実施した。中央防災会議首都直下地震対策専門調査会の資料³⁰⁾を参考に、通信、電力、上水道、下水道は復旧率 95%、ガスは復旧率 80%を目標値として、短期的にはこれらの目標値に達した後は復旧率が上がらないものとする。また、道路と鉄道は復旧率が 100%になるまで復旧が進むものとする。

(1) 地震発生直後の供給率と復旧設定値の設定

道路と鉄道以外の通信・電力・ガス・上水道・下水道は、東京都による被害想定³³⁾で示されている各区の被害率を地震発生直後の供給率(=復旧率)として用いる。また、復旧設定値、すなわち他インフラに支障がないと仮定した場合の復旧割合は、中央防災会議首都直下地震対策専門調査会の資料³⁰⁾で示されている東京湾北部地震(M7.3)発生時のライフライン復旧推移を、1日ごとの復旧割合に換算して用いる(図 5-7)。

被害率が示されていない道路と鉄道については、次のように地震発生直後の供給率を設定した。

①幹線道路

地震発生直後に巡視点検が開始され、安全が確認できない場合は通行規制が実施される。また、瓦礫や放置車両による機能低下も予想されることから、幹線道路の地震発生直後の供給率は、震度 6 強地域では 0.3、6 弱地域では 0.7 と想定する。すなわち、全域が震度 6 強の区については、地震発生直後にある特定のルートでその区を横断できる確率が 30%、震度 6 弱の区については 70%ということになる。

また、地震発生後 3 日間は難易度が低い復旧や啓開が進むことから復旧割合は 0.1、その後は難易度の高い復旧が残るため復旧割合は 0.05 に低下すると想定する。

②細街路

兵庫県南部地震で多くの細街路が瓦礫等の影響で通行不能となったが、23 区の状況ではこうした瓦礫の撤去等に相当時間を要する。また、細街路の啓開は比較的優先度が低いことから、細街路の地震発生直後の供給率は幹線道路よりも低く、震度 6 強地域では 0.2、6 弱地域では 0.5 とし、復旧割合は 0.05 と想定する。

③鉄道

東京都の首都直下地震の被害想定³³⁾によると、東京湾北部地震(M7.3)発生時、23 区内の一般国道では大被害の橋梁数が 1、中小被害は 11 とされているが、鉄道では大被害の橋梁数が 28、中小被害は 635 とされており、被災橋梁数では鉄道の方がはるかに多い。一方、道路の主要な機能低下要因である瓦礫や放置車両による機能の低下はないため、ここでは鉄道の地震発生直後の供給率は幹線道路と同じとする。また復旧割合も幹線道路と同じく、地震発生後 3 日間は難易度が低い復旧や啓開が進むことから復旧割合は 0.1、その後は難易度の高い復旧が残るため復旧割合は 0.05 に低下すると想定する。

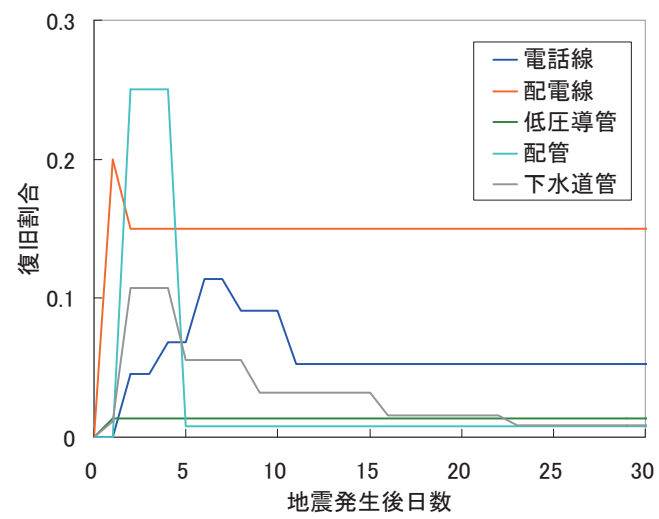


図 5-7 東京湾北部地震(M7.3)発生時のライフライン復旧推移³⁰⁾から換算した復旧割合

(2) シミュレーション結果

図 5-8 に墨田区を例として、相互連関がない場合、また相互連関を考慮した場合については交通モデルがある場合とない場合のシミュレーション結果を示す。横軸の経過日数は地震発生前日を 0、地震発生日を 1 としており、平常時の機能（＝復旧率 100%）が地震の発生により大きく低下し、その後回復していく様子を表している。

通信の被害は比較的小さい（不通率 17.6%）が、輻輳や発信規制が解除される 8 日目までは復旧が進まない。また、墨田区は全域が震度 6 強と推定されているため、道路の復旧にはある程度の日数を要しており、これが他のインフラの復旧にも影響している。特に交通モデルを導入した場合には要員と資材の輸送がさらに遅延するため、各インフラの復旧は交通モデルがない場合と比較して遅れていることが分かる。

電力、幹線道路とも地震発生当日の復旧率が 10%以下になるが、これは地震発生当日のみ変電所が停止すると仮定しているためである。仮に変電所の停止期間を延長した場合についてシミュレーションすると、延長された停止期間だけ、全てのインフラの復旧が遅延する結果が得られた。

図 5-9 は電力（家庭・商店・小工場用の小口）、図 5-10 は幹線道路を対象に、23 区の復旧率の推移を示したものである。23 区全域が 9 割以上復旧するのは、電力は 13 日後、幹線道路は 17 日後であり、特に墨田区など 23 区の東側に位置する東京低地の復旧が遅い。これは地盤が軟弱なために地震動が増幅され、震度 6 強の揺れとなり被害が大きい地区が広がっているためである。

今回のモデル化およびケーススタディでは仮の値を設定した種々のパラメータを今後調査する必要があるものの、相互連関を考慮したインフラの震災復旧過程のシミュレーションが可能であることが示された。

インフラ事業者は、このような結果も参考に、交通インフラが被災することの影響を考慮して防災業務計画や事業継続計画を立案、実行していくのがよいと考えられる。具体的には、道路管理者と連携し、途絶しにくいルートを事前に把握して資材の備蓄位置等を選定すること、災害時には通行可能なルートが迅速に把握できるよう連絡体制をとっておくことが考えられる。また、資材の備蓄率を高めたり、近距離では自転車等、交通インフラの被災状況に影響されにくい手段で参集したりすることも考えられる。

また、インフラ関連以外の事業者についても、事業の再開が電力等のインフラに依存していることが多いと考えられるため、交通インフラの被災によりインフラの復旧が遅延することを考慮した上で、事業継続計画を立案する必要がある。

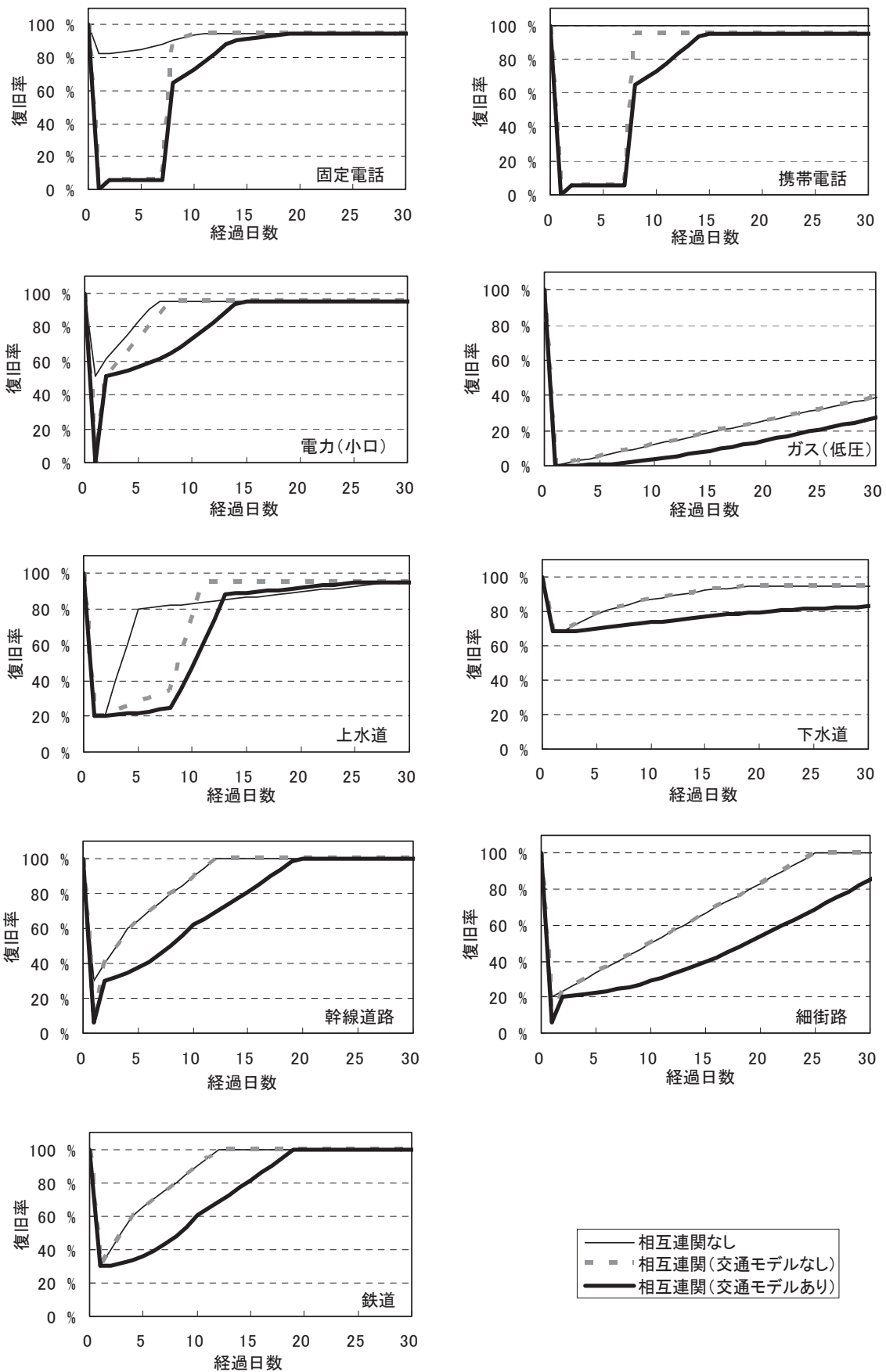


図 5-8 インフラシステムの震災復旧シミュレーションの結果（例：墨田区）

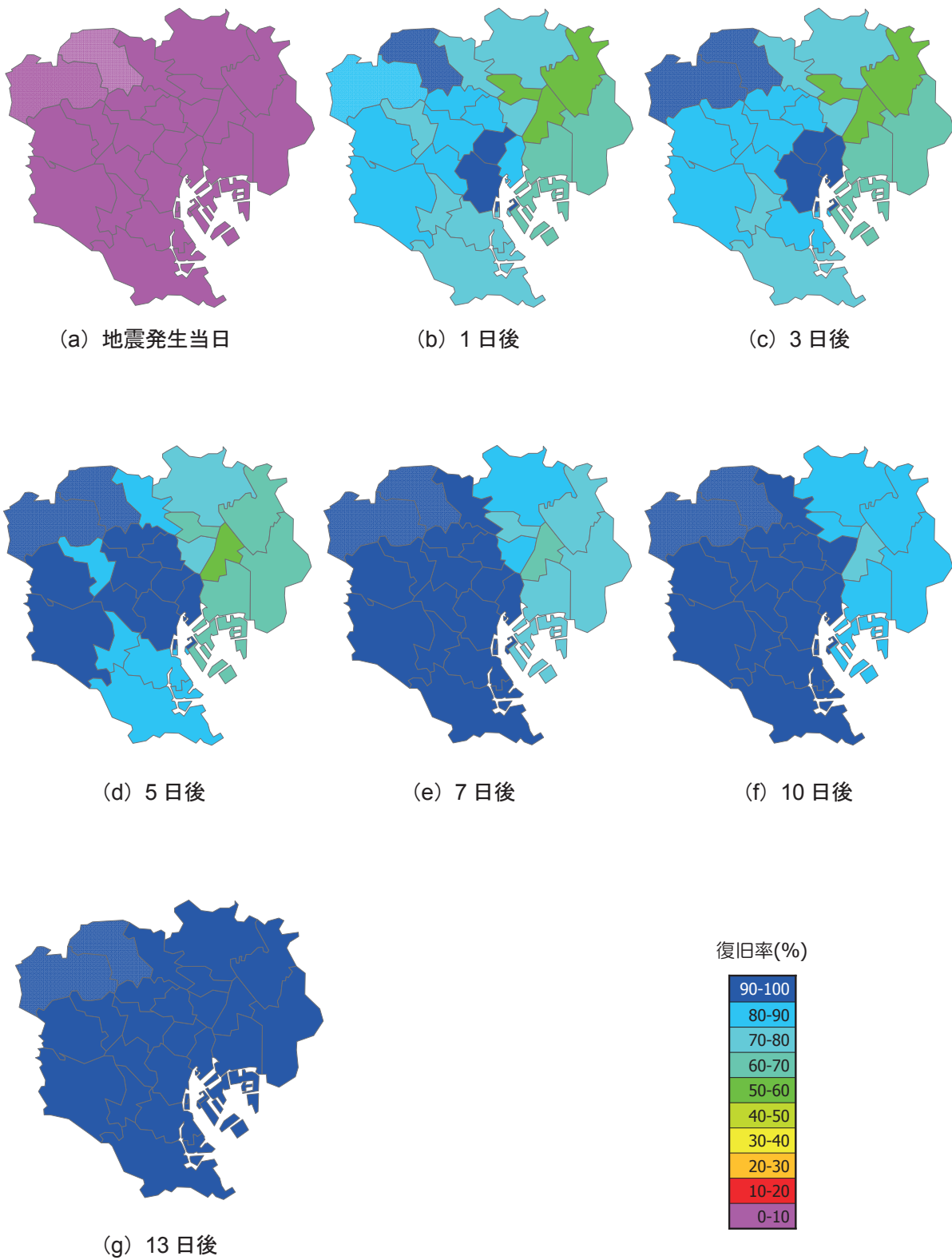


図 5-9 東京湾北部地震(M7.3)発生時の電力（小口）復旧率の推移

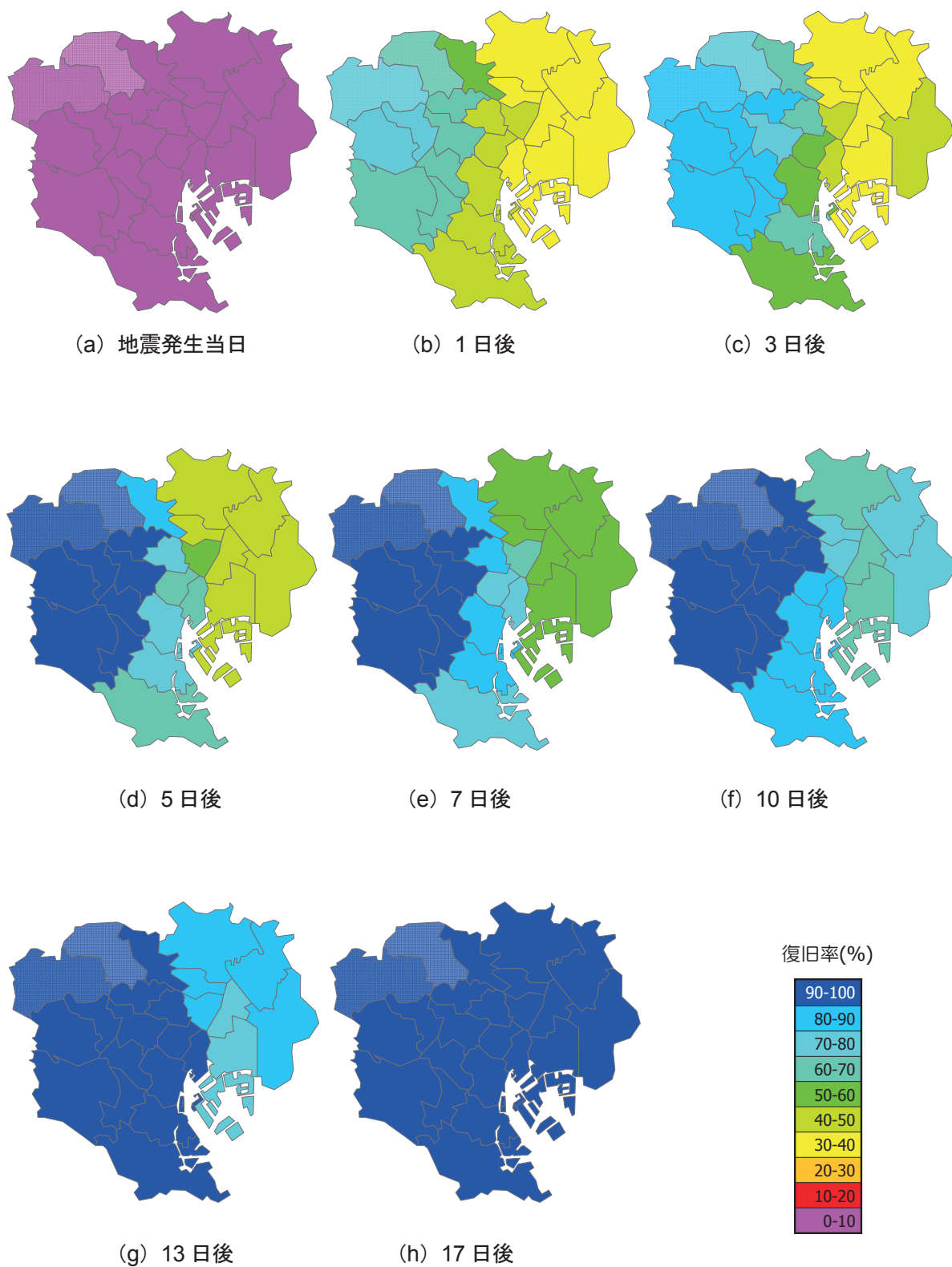


図 5-10 東京湾北部地震(M7.3)発生時の幹線道路復旧率の推移

5.5 まとめ

本研究では、相互連関を考慮した上でインフラの復旧過程をモデル化し、首都直下地震を想定した震災復旧シミュレーションを実施した。仮の値を設定した種々のパラメータを今後調査する必要はあるものの、相互連関を考慮したインフラの震災復旧過程のシミュレーションが可能であることが示された。各インフラの復旧速度は電力、情報通信、交通インフラに依存しており、これらの被災によってインフラの復旧がどの程度遅れるかを定量的に示すことができた。各事業者は今後、このようなインフラの復旧の遅れを考慮した上で、事業継続計画等を検討していく必要がある。

<謝辞>

本研究では参考文献に示すインフラ事業者が公表している資料を参考にするとともに、東京電力株式会社、東京ガス株式会社、東京都水道局にはヒアリングにご協力いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 亀田弘行, 能島暢呂: 第8章相互連関, ライフライン施設の被害と復旧, 阪神・淡路大震災調査報告, 土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, pp. 511-520, 1997.
- 2) 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, 第344号/I-1, pp. 323-331, 1984.
- 3) 星谷勝, 大野春雄: 震災時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp. 387-396, 1987.
- 4) 能島暢呂, 亀田弘行, 岩井哲, 北原昭男: 都市震害のシステム分析モデルに関する基礎的研究, 都市耐震センター研究報告, 別冊第1号, 京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター, 1988.
- 5) 片山恒雄, 山崎文雄, 原田隆典, 永田茂, 目黒公郎, 横山秀史, 立川貴重, 中里弘幸, 桑ヶ谷大二, 副島紀代: 台風9119による大規模停電の都市機能への被害波及, 東京大学生産技術研究所国際災害軽減工学研究センター耐震防災工学研究室, Report No. 92-1(16), 1992.
- 6) 川島一彦, 杉田秀樹, 中島燈: 大都市圏における震災波及構造に関する研究～(その1) 震災波及構造モデルの解析～, 土木研究所資料, 第3199号, 1993.
- 7) 川島一彦, 杉田秀樹, 中島燈: 大都市圏における震災波及構造に関する研究～(その2) FSM法による都市機能損傷の動的相互作用の解析～, 土木研究所資料, 第3206号, 1993.
- 8) 能島暢呂, 亀田弘行: 地震時のシステム間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, 第507号/I-30, pp. 231-241, 1995.
- 9) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課防災科学技術推進室, 独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー, 国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室: 重要インフラ間の被害波及軽減のための調査報告書, 2007.
- 10) 後藤洋三, 鈴木猛康, 末富岩雄, 小路泰広, 鶴田舞, 片岡正次郎, 鈴木光: 重要インフラ間の被害波及軽減のための調査, 第29回土木学会地震工学研究発表会報告集, pp. 1344-1354, 2007.
- 11) Tsuruta, M., Goto, Y., Shoji, Y. and Kataoka, S.: Damage propagation caused by interdependency among critical infrastructures, *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng.*, 2008.
- 12) 片岡正次郎, 鶴田舞, 小路泰広: 重要インフラ間の相互依存構造のモデル化と地震被害波及シミュレーション, 国土技術政策総合研究所資料, 第510号, 2009.
- 13) 梶谷義雄, 佐賀井重雄: 災害時を対象とした重要社会基盤の相互依存性評価手法の提案, 電力中央研究所報告, N08008, 2008.
- 14) 日経BP社IT PRO: 電話の仕組み(4), <http://itpro.nikkeibp.co.jp/free/NCC/denwa/20040107/1/?ST=denwa>
- 15) NTT東日本: NTT東日本の災害対策, <http://www.ntt-east.co.jp/saigai/taisaku/index.html>
- 16) NTT西日本: もしも!の時あなたの電話は?, <http://www.ntt-west.co.jp/info/saigai/index.html>
- 17) 電子通信情報学会: ケータイ研究所, <http://www.ieice.or.jp/jpn/kodomo/keitai/index.html>
- 18) NTTドコモ: 災害対策への取り組み, <http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/csr/disaster/index.html>
- 19) 東京電力: インターネット電力講座, <http://www.tepco.co.jp/kouza/gaiyou/gaiyou-j.html>
- 20) 東京電力: 環境学習ブック やってみよう! 考えよう! 資源・エネルギー 教師用, <http://www.tepco.co.jp/custom/LapLearn/teacher/index-j.html>
中部電力: 電気の旅～発電所からご家庭まで, <http://www.chuden.co.jp/manabu/shikumi/travel/index.html>
- 21) 東京ガス: 防災対策, <http://www.tokyo-gas.co.jp/safety/antidisaster/index.html>
- 22) 東京都水道局: 東京の水道, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/pp/suido/index.html>
- 23) 東京都水道局: 震災対策も万全, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/pp/banzen/index.html>
- 24) 東京都水道局: 水・新発見, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/pp/hakken/h05.htm>
- 25) 東京都下水道局: 東京都の下水道2007, http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kanko/kankou/2007_of_tokyo/2007_top.html
- 26) 安達俊朗, 渡辺泰男, 川見篤史: 高速道路交通管制システムの現状とこれから, 東芝レビュー, Vol. 57, No. 12, pp. 15-18, 2002.
- 27) 警察庁交通規制課: 都道府県別交通信号機等整備数, <http://www.npa.go.jp/koutsuu/kisei/institut/kazu.pdf>
- 28) 国家公安委員会・警察庁: 実績評価書, http://www.npa.go.jp/seisaku_hyoka/soumu2/koutsuu.pdf
- 29) 法令データ提供システム: 普通鉄道構造規則, <http://law.e-gov.go.jp/haishi/S62F03901000014.html>
- 30) 中央防災会議: 首都直下地震対策専門調査会第15回資料, 2005.

- 31) 東京都市圏交通計画協議会：パーソントリップ調査とは？,
<http://www.tokyo-pt.jp/person/index.html>
- 32) 東京都市圏交通計画協議会：物資流動調査とは, <http://www.tokyo-pt.jp/pd/index.html>
- 33) 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, 2006.