

重要インフラ間の被害波及軽減のための調査

後藤 洋三¹・鈴木 猛康²・末富 岩雄³・
小路 泰広⁴・鶴田 舞⁵・片岡 正次郎⁶・鈴木 光⁷

¹富士常葉大学環境防災研究所 特任研究員 [元 独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー]

(〒417-0801 富士市大淵325) E-mail:goto@fuji-tokoha-u.ac.jp

²東京大学生産技術研究所 研究員 [元 独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー]

(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) E-mail:t-suzuki@iis.u-tokyo.ac.jp

³日本技術開発株式会社リサーチ・エンジニアリング事業部 プロジェクトマネージャー [元 独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー] (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:suetomi-i@jecc.co.jp

⁴国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 室長 (〒305-0804 つくば市旭一番地)

E-mail:shoji-y92pc@nilim.go.jp

⁵国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 研究官 (〒305-0804 つくば市旭一番地)

E-mail:tsuruta-m92ta@nilim.go.jp

⁶国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 主任研究官 (〒305-0804 つくば市旭一番地)

E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

⁷日本ミクニヤ株式会社 東京支店環境防災部 [元 独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー]

(〒213-0001 川崎市高津区溝口3-25-10) E-mail:h-suzuki@mikuniya.co.jp

地震等の災害によりインフラが被害を受けると、被害がインフラ相互に波及するとともに、社会・経済活動にも被害が波及し、大きな社会的損失が発生する恐れがある。本調査は、インフラ間の被害波及について調査を行い、影響の大きさと波及の構造を分析・整理し、さらに被害軽減対策を調査したものである。

調査結果より、被害波及による支障が全てのインフラで発生する可能性があり、特に、電力、ガス、情報通信、道路の影響する項目が多いことが示された。また、被害波及軽減対策として、自家発電機の設置、ライフラインの多ルート化・ネットワーク化が効果を上げており、早期復旧には携帯電話メールの活用、カーナビゲーションシステムの活用、海上・航空輸送の活用、関係機関との協定締結等が挙げられた。

Key Words : interdependency, infrastructure, disaster damage mitigation, earthquake, flood

1. はじめに

今日の我が国の生活・産業基盤は、道路、鉄道、電力、ガス、上下水道、情報通信等、様々なインフラに支えられている。とくに都市圏では、多種多様なインフラが高度・複合的に整備されており、このような地域に地震等による大規模災害が発生した場合、各インフラが被害を受けるだけでなく、被害がインフラ相互に波及するとともに、都市機能を支える社会・経済活動にも被害が波及し、大きな社会的損失が発生するおそれがある。例えば、平成7年の兵庫県南部地震では、信号機の麻痺による交通渋滞や、道路・鉄道橋梁の被災による添架ライフライン管の破損のほか、病院機能の低下、行政サービス機能の低下等が見られた¹⁾。したがって、近い将来に発生が予想されている首都直下地震等の都市圏大規模地震に対しては、被害波及構造をよく理解した対策が必要となる。

このような我が国のインフラ間に発生する被害波及に関する研究としては、能島・亀田等による基礎的研究²⁾、片山・佐藤等による波及構造に着目した研究³⁾、片山・山崎等による台風に伴う大規模停電の影響に関する研究⁴⁾、川島・大塚等による大都市圏における震災波及構造に関する研究^{5)~7)}、阪神・淡路大震災によるライフライン間の相互連関の調査報告¹⁾等を挙げることができる。

しかしながら、今日の都市インフラの整備状況や情報通信の急激な発達状況を踏まえた調査や対策の研究は、これまでほとんど行われていない。

そこで、独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー(川崎ラボラトリーは平成19年3月31日をもって廃止)と国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室は連携して、災害時のインフラ間の被害波及の実態について調査を行った。そして、その影響の大きさと波及の構造を分析・整理し、さらにその軽減対策を調査し

た⁸⁾。本稿では、これらの調査結果について報告する。

なお、調査にあたっては、学識者、インフラ事業者等からなる検討会を設け、助言を得ながら検討を進めた。

以下、2. で近年の災害時における被害波及の実態調査、3. で被害波及構造の整理、4. で被害波及影響の定量的評価、5. で被害軽減対策の調査について述べる。

2. 近年の災害時における被害波及の実態調査

地震、豪雨災害など、近年の災害時において見られた重要インフラ間の被害波及事例について調査を行った。また、我が国でも起こりうると思われる海外の事例についても調査を行った。ここでは、重要インフラとして、「電力」、「ガス」、「上水道」、「下水道」、「情報通信」、「道路」、「鉄道」、「港湾」、「航空」の他、社会機能である「運輸・物流、旅客」、「金融」、「医療」、「行政（警察、消防含む）」を対象とした。

(1) 地震災害における被害波及事例

兵庫県南部地震（平成7年1月）、新潟県中越地震（平成16年10月）を対象に、被害波及事例の調査を行った。調査方法は、文献調査のほか、新潟県中越地震についてはヒアリング調査も実施した。

ヒアリング調査は、新潟県内のインフラ関係10機関を対象に、平成18年11月下旬～12月上旬にかけて実施した。調査項目を下記に示す。

- ① 他インフラが被災したことにより当該インフラが受けた影響
- ② 他インフラの被害影響を防ぐために取った対応
- ③ 事前に対策がなされており、有効であったもの
- ④ 今後、他インフラに期待または協力したい取組み
- ⑤ 大都市で予想される影響について

調査結果の概要を表-1に示す。各事業者でとられている応急対応や復旧活動はおおむね有効に機能していたが、被害波及も生じていた。例えば、停電に対しては自家発電が備え付けられているケースがほとんどであったが、発電機の燃料補給輸送の面で支障が生じたケースが見られた。また事業者間での協議会による連携について復旧活動中に有効に機能しなかったとの意見もあった。

文献等から抽出した波及事例は兵庫県南部地震で127、新潟県中越地震でヒアリング調査結果も含め89事例であった。収集した事例はインフラごとに、“他のインフラから受けた影響”と“他のインフラへ与えた影響”に分類した（表-2）。

兵庫県南部地震では、電力、道路、鉄道は、他のインフラへ与える影響の項目数が多く、反対にガス、下水道は他のインフラから受ける影響の項目数が多かった。情

表-1 ヒアリング調査結果の概要

調査対象	ヒアリング結果
電力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電により変電所間でのテレコンが停止した（自家発電は1時間程度しか保たなかった） ・ 平時には他インフラ事業者と協議会で情報交換することがあるが、災害時には機能しなかった ・ 移動電源車への燃料補給に、道路渋滞等の影響が見られた ・ 復旧拠点の移動が必要であり作業効率を高めた
ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 道路が損壊したことによるガス管の破断が最も大きな被害であった ・ 破損箇所を探索するファイバースコープの電源など復旧機材の電源は車載の発電機によったため、電源の不自由はなかった ・ 上下水道との復旧の調整は当初とることができなかった
上水道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 被害としては配水施設の停電による配水停止が最も大きかった ・ 下水道管の損傷が上水道管にも損傷を与えた箇所があった（上下水道管が同じ場所に埋設） ・ ビルへの配水停止に対して、加圧式ポンプが役立った ・ 復旧に際して下水道との調整を行った
下水道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電によりポンプの遠隔操作が不能となった。また、自家発電機が作動しない事例もみられた ・ ポンプの再始動に必要なシール水が断水により確保できなくなったが、消雪井戸の水を用いて切り抜けた ・ 工業者が上水道のバルブと間違えて下水道のバルブを閉じたことで復旧に支障がみられた ・ 下水道の復旧がされてない段階で、上水道の復旧がなされ、汚水流出がみられた ・ 復電の連絡が無人のポンプ場に張り紙で行われたため、1,2日の回復ロスが生じた
携帯電話	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電により予備バッテリーへ切り替えされたが、燃料不足により停電に至った例があった ・ 復旧工事の計画に電力の復旧の見通しが必要 ・ 基地局の停電に対し移動電源車を出動させたが道路被害により到達が困難なところがあった ・ 道路、鉄道被害により中継線が切断され20カ所の基地局が停止した
道路	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電による信号機、掲示板、SA/PA サービス等への支障があった。また、上水道の断水によって、SA/PA サービス等への支障があった ・ 道路管理者の庁舎の被害、ガス・上水道の停止などによる影響があった ・ 盛土を復旧すると、（復旧工法により）もともと占有物が収められていた箇所の掘り返し等が今後できなくなるため、復旧箇所を迂回して収納することで占有者と調整した ・ 住民にとって、道路ネットワークが機能していることによる心理的安心感があったようだ(代替バス運行等)
金融	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電により ATM の停止がみられたが、すぐに自家発電への切り替えが行われ、大きな支障にはならなかった ・ 電子取引については手作業での対応が行われた ・ 日銀との手形輸送などのやりとりが、道路関係の支障で遅れることがあった
医療	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停電と上水道の断水があった ・ 建物の安全性確保ができないことから、一時的に入院患者の避難を実施した ・ 地震発生後 30 分で地域の消防・警察の応援があったため、応急給水等がスムーズに行われた ・ 自家発電の燃料や医療ガスの確保については、道路の支障による影響があった ・ 入院患者の移送にヘリコプターが活用された

報通信は、他のインフラへ与える影響と受ける影響の項目数が双方とも多かった。

新潟県中越地震では、電力、道路が他のインフラへ与える影響の項目数が多く、兵庫県南部地震と同様にガス、下水道は他のインフラから受ける影響の項目数が多かつ

表-2 被害波及事例数

	兵庫県南部地震		新潟県中越地震		豪雨・豪雪	
	他のインフラから受けた影響	他のインフラへ与えた影響	他のインフラから受けた影響	他のインフラへ与えた影響	他のインフラから受けた影響	他のインフラへ与えた影響
電力	6	21	8	29	1	14
ガス	13	2	6	1	1	0
上水道	8	16	6	7	4	0
下水道	16	1	12	4	2	2
情報通信	15	18	12	16	5	7
道路	7	38	14	24	2	13
鉄道	8	22	9	6	2	0
港湾	4	4	0	0	0	0
航空	0	0	0	0	0	0
運輸・物流、旅客	13	1	9	0	7	0
金融	11	0	0	0	1	0
医療	15	0	8	0	3	0
行政	11	4	5	2	9	1

た。一方、鉄道が他のインフラへ与える影響の項目数は兵庫県南部地震の場合に比べると非常に少なく、中山間地域での道路交通依存の傾向が相互関連特性の違いとして明瞭に現れた。また、情報通信の内訳は携帯電話に関する項目が多く見られ、兵庫県南部地震の時代における情報通信環境との違いが反映されていた。

(2) 豪雨・豪雪災害における被害波及事例

福岡水害（平成11年6月）東海豪雨（平成12年9月）、新潟・福島豪雨（平成16年7月）、台風16号（平成16年8月）、台風23号（平成16年10月）、平成18年豪雪を対象に、被害波及事例の調査を行った。調査方法は、文献調査とした。

その結果、37の事例が得られた。収集した事例は、(1)と同様に分類・整理した（表-2）。

電力、道路において他のインフラへ与える影響の項目数が多く、地震での結果と似た傾向が見られる。一方、地震災害では見られない被害形態として、冠水による電気設備や機器の停止が多く見られた。

(3) 海外の被害波及事例

海外において発生した災害等における重要インフラ間の被害波及事例に関する情報を収集し、我が国での発生可能性等について検討を行った。対象は、平成15年8月にアメリカおよびカナダで発生した北米北東部大停電、平成17年8月にアメリカを襲ったハリケーン・カトリーナとした。調査方法は、文献調査および補足のためウェブサイトのニュース記事も調査した。

北米北東部停電については21事例、ハリケーン・カトリーナについては12事例が得られた。収集したそれぞれの事例について、“影響を与えたインフラ”と“影響を受けたインフラ”を抽出するとともに、日本での発生可能性について「日本でも類似の事例がある」、「これまでに事例は見られないが日本でも発生する可能性がある」、「日本では想定し難い」の3種類に区分し、整理

した。

このうち、「日本でも発生する可能性がある」と考えられる事象として以下の6事例が得られた。

【電力→道路】停電による換気装置の停止による道路トンネルの閉鎖

【電力→航空】停電による空港の運営停止

【電力→行政】カメラと各種電子掲示板が利用できなくなり、情報収集と一般への提供に支障

【上水道→医療】水圧の低さのため患者に透析が行えない

【上水道→行政】水圧の低さで消火作業が困難

【情報通信→行政】外部との連絡に支障があり、現場への適切な指示や上部機関への応援依頼が出せない

3. 被害波及構造の整理

(1) 被害関連マトリックスによる整理

2. で調査した被害波及の事例調査結果を、被害波及の原因となるインフラと影響を受けるインフラをそれぞれ行・列に配したマトリックスの形で整理した。この被害関連マトリックスは、「地震直後の被害波及」「臨時的な応急活動への被害波及」「復旧工事への被害波及」の3つのフェーズに分けて作成した。

また、被害関連マトリックスを元に、検討会でのブレインストーミング等を実施し、首都直下地震等での発生が予想される被害波及項目の追加・見直しを行った。

作成した被害関連マトリックスを表-3～表-5に示す。

災害直後の被害波及では、被害波及の原因となるインフラが電力、道路、情報通信、ガスの順に項目が多く、大都市での波及については「住宅密集地での建物倒壊による電柱・電線の被害」、「多重回線の複数箇所切断による通信障害」、「ネットインフラ停止によるストックマーケットの停止」などが示された。

臨時的な応急活動への被害波及では、道路が他のインフラへ与える影響の項目が多く挙げられており、これに次いで情報通信の影響が大きい。大都市での波及については「復旧拠点となる基地スペースの確保が困難」、「建物・ビルの倒壊による道路空間の閉鎖による通行不能」などが挙げられた。

復旧工事への被害波及では、臨時的な応急活動への被害波及と同様に、道路および情報通信が他のインフラへ与える影響の項目が多く挙げられている。大都市での波及については、「建物・ビルの倒壊による道路空間の閉鎖による通行不能」、「仮設住宅により学校グラウンド使用不可」、「復旧基地、復旧スペースの不足」などが挙げられ、遊休地の少ない大都市の問題点が浮き彫りとなっている。

表-3 被害連関マトリックス (災害直後の被害波及)

波及先 波及元	A 電力	B ガス	C 上水道	D 下水道	E 情報通信	F 道路	G 鉄道
① 電力	架設ケーブル損傷	・マヒングシステム停止 ・電柱の倒壊によりガバナ(圧力調整器)が損傷 ・監視制御システム停止	・供給システムストップ/停止 ・ポンプの取水不能 ・配水地制御不能 ・マヒングシステム停止	・下水処理場ストップ/停止 ・マンホールストップの停止	・携帯電話基地局の停止 ・公衆電話でカード、100円硬貨が利用できる(10円硬貨は不可) ・電話交換機への給電停止による電話回線停止 ・770MHz帯の停電によるH/Wの通信停止 ・防災行政無線停止による一部通信不能 ・蓄電池の容量低下による交換 ・電話交換機・送電装置停止 ・AC100Vを使う電話機が通信不能になる	・信号機停止 ・停電によるCCTVの機能不全(被害箇所の把握困難) ・停電による表示板の制御不能 ・停電による照明(トンネル、SA等)の停止 ・電柱の倒壊による線路支障	・トンネル内の列車停止の際に、乗客避難誘導の不安 ・信号麻痺 ・電柱の倒壊による線路支障
② ガス	・発電停止(火力発電) ・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止) ・上水道によりO ₂ 電着装置が停止、電話交換機の停止による電話不通	・水質検査停止(ガス停止により実験に使用給湯ができなかった) ・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止) ・漏洩ガスの下水管浸入・滞留 ・焼却炉の燃料が不足し汚泥処理に影響	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)ことによる基地局等の一時停止	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)
③ 上水道	・発電所工業用水の不足による脱塩装置停止	・ガスを吸める湯が利用できず水温が低下	・橋梁添架管損傷	・下水処理場用水の不足		・高速道路SAでの用水(トイレ、飲料等)不足 ・水道管の破損による道路の損傷	・給水の使用不可
④ 下水道		・下水管浮上によるガス管破損	・中水道停止			・マンホール浮上による道路損傷 ・下水道破損による高速道路SAのトイレ使用不可 ・冠水でマンホールの蓋が外れることによる支障	・下水道使用停止による、駅の機能喪失、車両保守作業への支障
⑤ 情報通信		・終線ケーブル切断による遠隔制御の支障 ・床上浸水によりO ₂ 電着装置が停止、電話交換機の停止による電話不通	・通信システムの停止に伴う被害情報把握の困難 ・情報伝達機能の障害による水運用システム機能の部分停止	・機器等(ポンプ場等)の遠隔制御不能 ・管理システムの停止に伴う被害情報把握の困難	・通信ケーブル損傷による携帯電話基地局停止 ・停電による通信によるコールにより電話の輻輳 ・想定水位を超えた場合、浸水による電気通信設備の停止 ・床上浸水による電話機の使用不能	・情報通信の途絶や輻輳による職員の情報伝達の困難 ・携帯電話の不通・輻輳による現場職員間の連絡不能 ・機器等の遠隔操作不能	・業務用の通信回線の途絶による列車運行の停止
⑥ 道路	・送電施設損傷	・管路損傷 ・LNG輸送停止	・管路損傷 ・道路遮断に伴う被害状況把握の困難 ・盛土等の道路前線に伴う管路損傷	・管路損傷 ・汚泥輸送停止 ・道路遮断に伴う被害状況把握の困難 ・盛土等の道路前線に伴う管路損傷	・通信回線損傷 ・道路陥没・土砂災害による通信ケーブル・管路の被災 ・共同溝浸水による通信途絶	・定回路渋滞 ・高架下道路損傷 ・立体交差部等での落橋による道路の通行不能	・高架下鉄道損傷 ・自動車通行が被害発生させたことによる、地下鉄への浸水 ・道路を用いて行うメンテナンス業務の一部への影響発生
⑦ 鉄道		・地下鉄駅陥没による管路損傷		・地下鉄駅前線による管路損傷	・線路に敷設している通信回線損傷	・鉄道高架下橋の前線による道路損傷 ・地下駅への浸水 ・地下駅損壊による道路損傷	・高架下鉄道損傷 ・地下駅への浸水 ・広域的な列車運用が変則的となり、一部の列車が運転できなくなる
⑧ 港湾		・護岸等の損傷による工場設備への被害 ・護岸や機械の被災による船舶・荷揚げ等の不能		・護岸損壊に伴う管路の破損			
⑭ 大都市での波及	・住宅密集地で建物崩壊による電柱・電線の被害				・火災によるケーブル断線や通信設備の拡大 ・大雪による交通機能マヒ ・建物・ビルの倒壊による道路空間の閉鎖による通行不能	・大雪による交通機能マヒ ・地下鉄浸水	・大雪による交通機能マヒ ・基礎系など上流側の機器破損

波及先 波及元	H 港湾	I 航空	J 運輸・物流 旅客	K 金融	L 医療	M 行政 (警察、消防等含む)	N 大都市での波及
① 電力	・クレーン停止 ・陸揚、排水機場の運転停止による津波からの防御機能停止 ・水門操作不能による船の運航停止	・ターミナル機能麻痺 ・航空管制システムの停止 ・航空灯火の停止	・冷蔵庫の停止 ・管理システム(受発注、出荷管理等)の停止	・銀行ATM(オプテ)の停止 ・オンラインシステムの停止による決済業務の停止	・エレベーター停止 ・血液冷蔵庫の停止 ・在宅患者の人工呼吸器停止 ・空調の停止 ・照明の停止 ・電動ベッドの停止 ・食料システムの停止 ・検査機械の停止 ・手術の停止	・火災監視カメラ停止 ・通信手段停止 ・在宅患者の人工呼吸器停止 ・変電所の浸水による停電により、消防通信指令システムの停止(携帯119受信装置を数ヶ所) ・固定式無線の停止 ・電源停止による従前機能の停止 ・ホームページ等の市民サービスの低下	・火災による施設・送電先等の被害 ・基幹系など上流側の機器破損
② ガス	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)ことによる空調停止	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)ことによる空調停止 ・施設環境(飲料水、トイレ等)の低下	・ガス専焼ラインが停止、ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止、空調停止) ・施設環境(飲料水、トイレ等)の低下	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止) ・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下 ・医療機器の消毒に用いるガスの停止 ・病院給食停止	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)ことによる空調停止 ・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下 ・医療機器の消毒に用いるガスの停止 ・病院給食停止	・ガス専焼発電機が稼働しなくなる(コジェネの停止)ことによるホテル機能の麻痺
③ 上水道	・船舶への岸壁給水停止	・航空機の洗浄等ができなくなる ・ターミナルビルの運営に影響	・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下		・医療用水、生活用水の不足 ・水冷式モーターで稼働する人工呼吸器停止 ・人工透析停止 ・トイレ停止による便房停止	・水道管損壊による断水、減圧による消火栓停止	
④ 下水道		・ターミナルビルの運営に影響(トイレなど)	・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下		・トイレの使用停止	・トイレの使用停止	・管渠隆起による交通障害・汚水流出の多発
⑤ 情報通信	・水門・陸揚などの遠隔操作不能 ・港内の監視カメラ遠隔操作不能	・管制センター、無線施設の機能	・通信ストップで物流制御不能 ・管理システム(受発注、出荷管理等)の停止	・機器等の遠隔操作不能 ・オンラインシステム(ネット上決済、データ処理等)の停止	・外部との情報連絡の途絶 ・「消防庁救急情報システム」へのアクセス不能	・消防無線の輻輳 ・119番通報支障 ・浸水による交換機がショート、電話交換機の停止による電話不通 ・ネットワークプラの機能停止によるストックマーケットの停止	・重程度の輻輳の発生 ・火災等による交換機等重要施設の損傷 ・ネットワークプラの機能停止によるストックマーケットの停止
⑥ 道路	・港湾からのアクセス道路被災による荷物等輸送の停止	・空港からのアクセス道路被災による荷物等輸送の停止	・郵便・宅配便停止 ・ハズ運延 ・トラック貨物輸送停止 ・道路寸断による運輸物流の遅延 ・大雪による道路交通の寸断により、コンビニエンスストアの輸送停止	・現金輸送遅延	・陸路移動の停滞による救急医療の不能 ・救急医療機能の停止(救急車の活動停止、急患の受け入れ停止)	・消防、救急・救助の遅れ ・帰宅困難者の発生	・家屋が路上に倒壊することによる、道路の損壊、通行停止
⑦ 鉄道	・鉄道の運行停止により、コンビニエンスストアの輸送不能	・鉄道の運行停止による、荷物等輸送の停止	・鉄道貨物輸送停止	・現金輸送遅延		・帰宅困難者の発生	
⑧ 港湾			・地下駅への浸水			・荷物損傷の発生	
⑫ 医療						・負傷者等の受け入れ不能による救急搬送能力低下	
⑬ 行政			・交通情報の不足によるトラック輸送の遅延	・運行規制強化(規制道路にも一般車両が流入し渋滞が発生)による遅延 ・輸送優先順位の低下			
⑭ 大都市での波及			・地下鉄浸水	・多重化した回線の複数箇所での断線による通信支障			

【凡例】

- 兵庫県南部地震、新潟県中越地震の両方で見られた事例
- 兵庫県南部地震での事例
- 新潟県中越地震での事例
- 豪雨・豪雪での事例
- 検討会での追加項目

表-4 被害連関マトリックス（臨時的な応急活動への被害波及）

波及先 波及元	A 電力	B ガス	C 上水道	D 下水道	E 情報通信	F 道路	G 鉄道
① 電力		・電話利用不可による被害把握遅延	・電話利用不可による被害把握遅延	・自家発電用燃料補給不能(ガソリンスタンド)の給油が停電で機能しなくなる	・長時間停電した場合電気通信設備が停止(通信サービスの停止)	・電柱の倒壊による復旧の支障	・電力会社との臨時電力要電契約の取り決めの苦勞
② ガス	・(ガス漏れの場合)電力応急活動不可能		・応急給水車への給水確保が困難(ポンプが止まる)	・応急給水車への給水確保が困難(ポンプが止まる)			
③ 上水道		・差し水によってガス応急活動が遅延		・ポンプ場の操作に必要なシールの不足	・自家発電機の始動用冷却水の不足		
④ 下水道	・マンホール浮上による通行障害					・マンホール浮上による通行障害	
⑤ 情報通信	・電話不通による事務所間の被災連絡遅延 ・固定電話、携帯電話の輻輳による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通による被災連絡遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・各水道局、警察、消防と電話不通による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通による事務所間の連絡遮断 ・携帯電話、メールの輻輳、遅延による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通による事務所間の連絡遮断 ・携帯電話、メールの輻輳、遅延による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話、携帯電話の輻輳による応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通による非常時連絡の遅延 ・線路陥没により通信ケーブルが切断、列車無線停止による司令所との連絡途絶 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難
⑥ 道路	・渋滞による移動電源車への燃料補給遅延 ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・移動電源車の派遣遅延	・広域的な道路ネットワークによるガス供給体制の確保(ポンプの影響) ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・復旧用資機材、復旧要員の搬送に支障	・渋滞による応急給水遅延 ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・巡回、手動による弁操作不能	・渋滞による仮設トイレ設置の遅延 ・道路寸断による被害調査遅延	・渋滞による移動電源車、衛星無線車の遅延による電気通信設備の停止 ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・被害状況の調査に支障	・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・復旧用資機材、復旧要員の搬送に支障 ・道路上で車の乗り捨てによる除雪障害	・被災地付近で、宿泊ができず、遠方からの往復を余儀なくされたが、道路寸断等により、時間ロスが生じた ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延)
⑦ 鉄道	・交通事情の悪化による要員参集の遅延	・鉄道運行停止による職員参集の遅延	・交通機関の麻痺による初期体制(要員参集等)の遅延	・鉄道運行停止に伴う職員参集の遅延	・鉄道運行停止に伴う職員参集の遅延	・鉄道停止により、道路に交通が集中 ・災害対策要員の出社に支障	・交通機能の麻痺による社員出勤率の低下
⑧ 港湾			・船舶による応急給水の確保が困難(船の停泊が困難となるため) ・船舶による資材の運搬が困難	・船舶による応急給水の確保が困難(船の停泊が困難となるため) ・船舶による資材の運搬が困難			
⑬ 行政						・巨額・ゴミの路上集積による路面閉塞	
⑭ 大都市での波及	・復旧拠点となる基地スペース確保が困難		・火災多発による応急給水の遅延			・豪雪の場合、却金の方が対策が少なく影響が大きい ・豪雪の場合、内陸の道路の方が影響が大きい ・建物・ビルの倒壊による道路空間の閉鎖による通行不能	

波及先 波及元	H 港湾	I 航空	J 運輸・物流 旅客	K 金融	L 医療	M 行政 (警察、消防等含む)	N 大都市での波及
① 電力	・貨物の積み下ろしへの支障		・管理システム(乗降注、出荷管理)の停止 ・冷蔵庫の停止	・電話利用不可による被害把握遅延	・電話利用不可による被害把握遅延	・信号機の停止による交通整理必要箇所増大 ・電話利用不可による被害把握遅延 ・自家発電装置も浸水し、避難所周辺の停止 ・電力供給不能 ・電源停止による役割機能の低下 ・ホームページ等の市民サービスの低下	・避難所・待機所の機能(明かり、冷暖房等)低下(帰宅困難者、参集員への支援不能) ・停電による排水ポンプ等の停止による施設の排水困難
② ガス			・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下	・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下	・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下 ・医療用機械の消毒に用いるガスの停止		・地下街など閉鎖空間へのガス漏れの可能性 ・避難所・待機所の機能(炊き出し、お風呂等)低下(帰宅困難者、参集員への支援不能)
③ 上水道			・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下 ・生鮮食品等の衛生面の洗浄水としての利用不可	・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下	・自家発電装置用の冷却水の不足 ・医療用水(人工透析等)、生活用水の不足	・自家発電装置用冷却水の不足、情報システムの停止による情報収集の遅延	・避難所・待機所の機能(飲料用水等)低下(帰宅困難者、参集員への支援不能)
④ 下水道			・トイレが使用不可になり職員の活動が阻害 ・施設環境(空調、飲料水、トイレ等)の低下	・トイレが使用不可になり職員の活動が阻害	・トイレが使用不可になり職員の活動が阻害 ・医療用水の排水停止		・トイレが使用不可になり職員の活動が阻害
⑤ 情報通信	・電話不通による関連事務所との連絡遮断 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	・電話不通により、FAXを利用したが、FAXも使えなくなったことによる被災連絡遅延 ・携帯電話輻輳による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難 ・オンラインシステム(ネット決済、データ処理等)の停止	・普通回線、非常用回線不通による医療機関との連絡途絶 ・アンテナが倒壊し、災害用無線電話不通による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難 ・医薬品の入手停滞 ・他病院との連携不足 ・救命救急活動の遅延	・電話不通による被害把握遅延 ・応急活動支援などの支援体制の確保が困難	
⑥ 道路	・陸路寸断による空路、海路等への輸送シフト ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・復旧用資機材、復旧要員の搬送に支障	・高速道路一部不通による、自衛隊へ使った空路輸送へのシフト ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延) ・復旧用資機材、復旧要員の搬送に支障	・道路陥没、渋滞による救援物資輸送の遅延、空路輸送へのシフト ・道路上の放置車両による緊急輸送遅延 ・要員参集の遅延(巡回点検の遅延)	・要員参集の遅延 ・修理技術者の到着遅延	・訪問看護サービスの遅延 ・血液供給遅延 ・道路迂回により、医療が入り手の遅延 ・医薬品供給遅延 ・広域的な道路ネットワークによる緊急医療体制の確保(ネットワークの影響) ・救命救急機能の停止(救急車の活動停止、急患の受け入れ停止) ・要員参集の遅延	・道路陥没、渋滞による消防、救急活動の遅延 ・消防車両故障の多発 ・交通事情の悪化による消防車両の燃料切れ多発 ・要員参集の遅延	
⑦ 鉄道	・災害対策要員の出社に支障	・新幹線不通により、空路への輸送シフト ・災害対策要員の出社に支障	・迂回ルートに利用客が集中し、輸送能力のキャパシティ不足 ・災害対策要員の出社に支障	・交通途絶状態に伴う職員参集の遅延 ・修理技術者の到着遅延	・要員参集の遅延	・災害対策要員の出社に支障	
⑧ 港湾	・代替港へのシフト		・迂回ルートに利用客が集中し、輸送能力のキャパシティ不足				
⑨ 航空			・迂回ルートに利用客が集中し、輸送能力のキャパシティ不足				
⑩ 運輸・物流、旅客			・鉄道会社の代替バス輸送増大 ・鉄道貨物からトラックへのシフト				
⑫ 医療					・消防局内の混乱による専用電話の適切な利用ができないことによる情報把握遅延 ・浸水により消防本部機能不全(庁舎、救急車の浸水)による医療活動の遅延	・救助活動の多発による消防車、救急車の不足	
⑬ 行政							・復旧スペースの不足

- 【凡例】
- 兵庫県南部地震、新潟県中越地震の両方で見られた事例
 - 兵庫県南部地震での事例
 - 新潟県中越地震での事例
 - 豪雨・豪雪での事例
 - 検討会での追加項目

表-5 被害連関マトリックス（復旧工事への被害波及）

波及先 波及元	A 電力	B ガス	C 上水道	D 下水道	E 情報通信	F 道路	G 鉄道
① 電力		・倒壊設備等が撤去されないことによる復旧活動の不全	・バッテリーの非常電源への充電困難 ・給水の停止に伴い管路漏水所の発見が困難	・復旧現場での夜間照明の停止 ・復電の把握遅延による復旧遅延 ・バッテリーの非常電源への充電困難 ・給水の停止に伴い管路漏水所の発見が困難	・水中ポンプ用電源、照明用電源の停止 ・電力復旧遅延による携帯電話基地局復旧の遅延 ・災害対策本部の運営が困難	・電柱の倒壊による復旧の遅延 ・道路工事による渋滞 ・他事業者との道路工事の調整	・施設各棟の夜の夜間照明の停止 ・停電の長期化による地上設備の復旧遅延
② ガス						・道路工事による渋滞 ・他事業者との道路工事の調整	・ガス供給停止の長期化による地上設備の復旧遅延
③ 上水道	・道路掘削の際の調整による遅延	・管路への差し水による復旧遅延 ・工水の不足	・道路掘削の際の調整による遅延	・管渠調査用水、清掃用水の不足 ・上水道と下水道のバルブ取扱い誤りによる遅延 ・上水道早期復旧によるマンホールからの汚水流出 ・道路掘削の際の調整による遅延		・他事業者との道路工事の調整 ・道路工事による渋滞	・断水の長期化による地上設備の復旧遅延
④ 下水道	・マンホール浮上による復旧作業車の通行障害	・差し水で吸引した水の処理への影響 ・道路掘削の際の調整による遅延	・下水道復旧の遅延による上水道復旧の遅延 ・地下受水槽への汚水混入による上水道復旧の遅延 ・管路復旧時の上水道管内洗浄水の放流処分への支障	・下水道復旧の遅延による上水道復旧の遅延		・他事業者との道路工事の調整 ・道路工事による渋滞	・使用停止の長期化による地上設備の復旧遅延
⑤ 情報通信	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・一般電話回線の復旧遅延による携帯電話基地局復旧の遅延 ・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・道路工事による渋滞 ・他事業者との道路工事の調整 ・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・携帯電話バッテリー切れによる支障 ・通信の停止による関係者との相互連絡の支障 ・機能支障の長期化が地上設備の復旧（本部の後方支援等）に大きく影響
⑥ 道路	・渋滞による復旧遅延 ・道路寸断のより孤立集落が発生、復旧開始の遅延	・渋滞による復旧資機材到着の遅延 ・道路土への家屋倒壊によるガソリン洩れ調査の遅延	・渋滞による復旧工事の遅れ ・交通事故多発により、処理・管理対応による復旧活動の遅延	・渋滞による復旧遅延 ・高架道路落下による調査、復旧の遅延	・渋滞による車輪移動の困難 ・道路寸断による復旧遅延	・高架道路落下による復旧遅延 ・道路土の放置車両による復旧遅延（1台一車の渋滞巻き込まれ等） ・道路寸断による復旧遅延（除雪等）	・渋滞による部隊到着の遅れ ・被災地付近で、宿泊ができず、遠方からの往復を余儀なくされたが、道路寸断等により、時間ロスが生じた
⑦ 鉄道	・道路上の放置車両による復旧遅延 ・谷風による通行止め、進入規制等による復旧遅延 ・鉄道停止により、復旧活動要員の宿泊増加	・道路寸断による通行止めの多発により復旧活動の遅延	・道路冠水により給水車による給水の不可 ・復旧資材、人員の搬送が困難	・復旧資材、人員の搬送が困難	・復旧資材、人員の搬送が困難 ・復旧資材、人員の搬送が困難	・道路上の放置車両による復旧遅延（除雪等） ・復旧資材、人員の搬送が困難	・道路上の放置車両による復旧遅延（除雪等） ・鉄道停止による車両運用の支障 ・一部不通過区間の復旧遅延によるダイヤ全体の平常化への支障
⑧ 港湾	・復旧資機材の運搬に支障	・復旧資機材の運搬に支障 ・着船、荷揚げの不能の長期化による、船繰りへの支障	・復旧資機材の運搬に支障	・復旧資機材の運搬に支障 ・復旧人員アクセスの支障	・復旧資機材の運搬に支障 ・復旧人員アクセスの支障	・港湾施設破損による復旧支援船の停泊への支障 ・復旧資機材の運搬に支障	・復旧資機材の運搬に支障
⑨ 航空				・復旧人員アクセスの支障	・復旧人員アクセスの支障	・復旧資機材の運搬に支障	
⑩ 運輸・物流、旅客				・復旧資機材の運搬に支障	・復旧資機材の運搬に支障		
⑬ 行政	・道路情報の不足による復旧遅延						・主要道路については状況把握しているが、市町村道路の情報不足し、復旧活動に支障を与えた
⑭ 大都市での波及	・復旧基地の確保 ・建物被害、路面閉塞による作業困難	・復旧基地の確保 ・建物被害、路面閉塞による作業困難	・復旧基地の確保 ・建物被害、路面閉塞による作業困難	・復旧基地の確保 ・建物被害、路面閉塞による作業困難	・建物被害、路面閉塞による回復の遅延 ・復旧基地の確保	・被害の場合、都営の方が対策が少なく影響が大きい ・被害の場合、内陸の道路の方が影響が大きい ・建物・ビルの倒壊による道路空間の閉鎖による通行不能	

波及先 波及元	H 港湾	I 航空	J 運輸・物流 旅客	K 金融	L 医療	M 行政 (警察、消防等含む)	N 大都市での波及
① 電力	・電気が回復しないことによる貨物の積み下ろし支障		・管理システム（受発注、出荷管理等）の停止 ・冷蔵庫の停止		・会計システムの停止 ・検査機器の停止による医療行為の停止	・避難所活動の長期化 ・ごみ焼却不能	・ガソリンスタンド停止による交通機能の麻痺 ・排水ポンプ等の停止による施設の排水困難 ・復旧時に電気設備が必要
② ガス			・施設環境（空調、飲料水、トイレ等）の低下	・施設環境（空調、飲料水、トイレ等）の低下		・避難所活動の長期化	・復旧工事人員確保が困難
③ 上水道			・施設環境（空調、飲料水、トイレ等）の低下 ・生鮮食品等の衛生面の洗浄水としての利用			・避難所活動の長期化	・工業用水の停止に伴う復旧用製品の製造停止
④ 下水道			・施設環境（空調、飲料水、トイレ等）の低下				
⑤ 情報通信	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障 ・トラックのGPSの停止による到着遅延	・銀行オンライン回線切り替えの遅延 ・通信の停止による関係者との相互連絡の支障 ・ストックマーケットへの影響	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	・通信の停止による関係者との相互連絡の支障	
⑥ 道路	・道路渋滞による、物流、人員搬送等の遅延	・復旧資材、人員の搬送が困難		・オンラインシステム（ネット上決済、電子取送等）の停止 ・修理技術者の到着遅延			・道路調整依頼による対策
⑦ 鉄道	・復旧資機材の運搬に支障	・復旧資機材の運搬に支障		・修理技術者の到着遅延			
⑧ 港湾	・復旧資機材の運搬に支障	・復旧人員アクセスの支障					
⑨ 航空	・復旧資機材の運搬に支障 ・空港利用停止に伴う復旧人員アクセスの支障	・復旧人員アクセスの支障					
⑬ 行政							・復旧スペースの不足 ・帰宅困難者が多数の場合、稼働可能な職員数の減少に伴う活動力の低下
⑭ 大都市での波及						・仮設住宅により学校グラウンド使用不可	

【凡例】

兵庫県南部地震、新潟県中越地震の両方で見られた事例	豪雨・豪雪での事例
兵庫県南部地震での事例	新潟県中越地震での事例
	検討会での追加項目

(2) FTAによる整理

マイクロな波及構造についてはFTA（フォルトツリー解析）を用いて整理を行った。図-1～図-2に代表的なFTAを示す。

下水道機能に対してもガスが水質検査に、情報通信が

システム制御に影響することが分かる。また、病院の機能には上水道が多くの項目で影響することが分かる。患者搬送の機能も含めれば、道路、通信も影響項目となる。

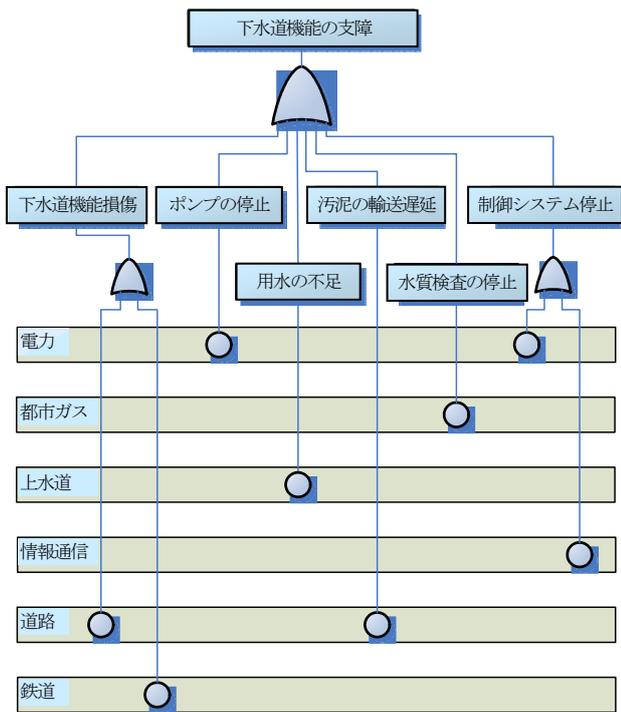


図-1 下水道機能の支障の FTA

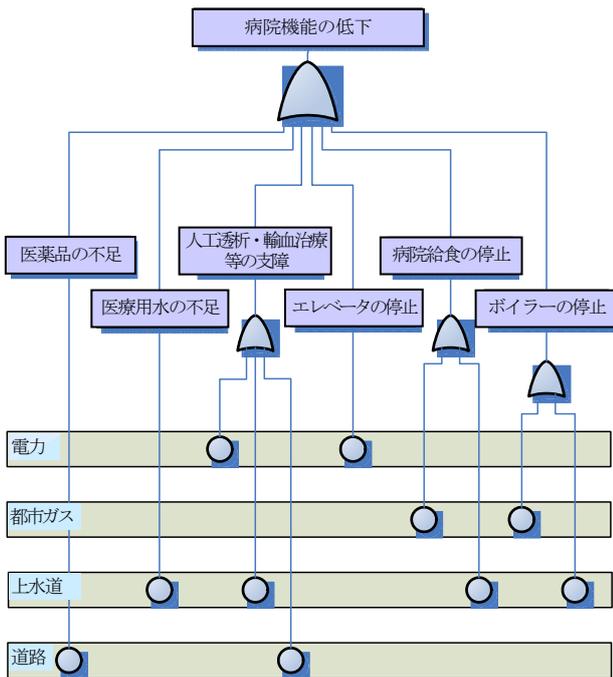


図-2 病院機能の低下の FTA

(3) インフルエンスダイアグラムによる整理

被害連関マトリックスに書かれている被害波及の発生機構は、物理的被害波及、機能的被害波及、復旧支障、代替機能、複合災害等に類型化することができる⁹⁾。このうち、機能的被害波及は、影響の時間的、空間的な拡がりやを有するという特徴がある。また、物理的機能波及は災害直後に発生する直接的な被害波及、復旧支障は復

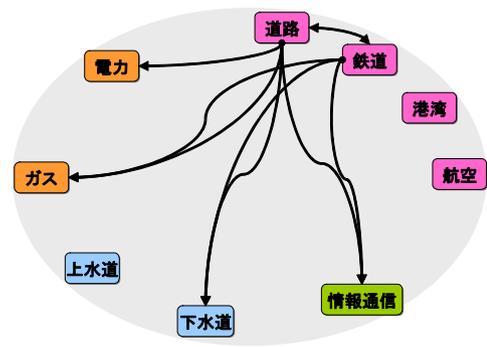


図-3 物理的被害波及のインフルエンス・ダイアグラム

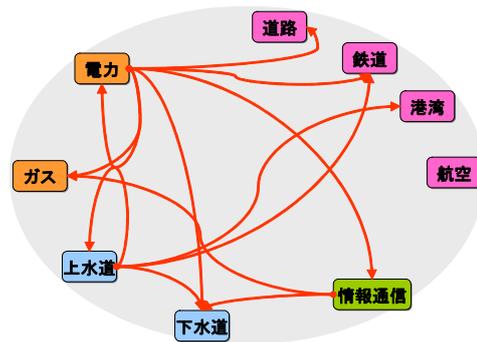


図-4 機能的被害波及のインフルエンス・ダイアグラム

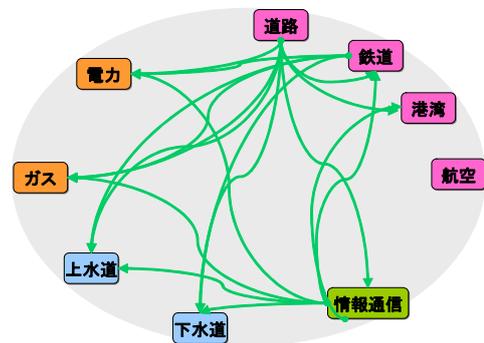


図-5 復旧支障のインフルエンス・ダイアグラム

旧に要する時間に影響を与えるものである。この3つについて、被害連関関係をインフルエンス・ダイアグラム（影響図）を用いて整理し、多くの起点、あるいは終点となっているインフラを把握した。インフルエンス・ダイアグラムとは、要素間の影響関係を矢印で連結した図であり、要素がノードとして、影響関係が有効アークとして表現される。ここでは、社会機能を除く9つのインフラを対象に、兵庫県南部地震の事例を整理した結果を示す。

物理的被害波及では、道路と鉄道が起点となっており、他のインフラに影響を与えている。一方、機能的被害波及では、電力が起点となっているものが多い。また、復旧支障では、道路と情報通信を起点とするものが多い。

各インフラのうち例えば道路に着目すると、機能的被害波及の起点となっていない点が特徴的である。一方、物理的被害波及、復旧支障については多くのインフラとの相互依存関係の起点となっている。とくに、復旧支障については、ほぼ全てのインフラとの連関がある。道路の機能回復が、他インフラの復旧の進捗に大きく影響を及ぼす可能性が示唆されている。また、道路を終点とするもの、すなわち被害波及を受ける依存関係は少ない。道路においては、物理的被害波及と復旧支障が主たる相互依存関係であることから、物理的被害波及が発生しないような事前対策を行うこと、発災後に速やかに機能を回復することがインフラ全般の早期復旧につながるといえる。

4. 被害波及影響の定量的評価

3. で整理した被害波及構造に基づき、インフラ間の被害波及の定量評価手法を検討した。また、検討結果を用いて、首都直下地震が発生した場合の被害を想定したケーススタディを行い、インフラ相互影響の様相を推定した。

(1) 基本的考え方

インフラ間の被害波及による被害拡大は、災害発生の瞬間だけでなく、数日から場合によっては数週間に及ぶ。また、復旧作業のあらゆる過程において、他インフラの被害に起因する復旧支障が発生しうる。

こうした被害拡大、復旧支障がインフラ被害波及による影響となる。この影響は時間経過と共に累積する。今回は、被害発生から1日後、1週間後、1ヶ月後などの時点で、スナップショット的にインフラ間の被害波及に起因する被害拡大の大きさを簡易に推計した。なお、累積的な影響増加の推計にはシステムダイナミクスモデルのような時間概念の入ったモデルが必要となる。

①各インフラの初期被害×②被害波及した場合の影響度
 ×③被害波及する確率×④社会的影響度
 =⑤インフラ間の被害波及による社会的影響

インフラ間の被害波及による影響の評価項目について、下記のように設定した。

ここでは、原因となるインフラが被災した場合の、影響を受けるインフラの“影響の深刻度合い” (①×②×③) までの評価とした。

推計にあたっては、行列を用いた被害波及モデル (式(1)) を利用した。ここで、入力ベクトル X (①) は、各インフラ (1~ n) が被る初期被害、相互依存構造マトリ

表-6 支障率の設定結果

	1day	1week	1month
電力	0.129	0.000	0.000
ガス	0.190	0.175	0.104
上水道	0.333	0.064	0.012
下水道	0.011	0.006	0.001
情報通信	0.093	0.052	0.000
道路	0.400	0.250	0.100
鉄道	0.500	0.300	0.100
港湾	0.448	0.445	0.411
航空	0.000	0.000	0.000

ックス C (②×③) はインフラ間の被害連関の大きさを示すものである。

$$\begin{aligned}
 & \text{相互依存構造マトリックス } C \\
 & \begin{matrix} \text{入力 (初期被害) } X \\ [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n] \end{matrix} \begin{matrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & & & \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{matrix} \\
 & \begin{matrix} \text{出力 (一次の相互影響を含む被害) } Y_i \\ = \left[\sum_j x_j c_{j1} \quad \sum_j x_j c_{j2} \quad \dots \quad \sum_j x_j c_{jn} \right] \end{matrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

なお、相互依存構造に変化がなければ、高次の波及影響の大きさは式(2)で求められる。

k 次までの相互影響を含む被害 y_k

$$y_k = \sum xc^k = xc(1-c)^{-1} \quad (2)$$

(2) 計算条件

a) 入力ベクトルの作成

首都直下地震を想定した入力ベクトル X を作成した。入力ベクトルの各項目は基本的に、各インフラの主たる機能の支障率 (1-供給率) とした。

本試算では、被災の中心地と想定される東京都を試算対象とし、域内での支障率を想定した。なお、支障率は中央防災会議の被害想定結果を参考に設定した。設定結果を表-6に示す。

b) 相互依存構造マトリックスの作成

個々のインフラ間の直接的な相互影響について記述した相互依存構造マトリックス C の定量化に当たっては、被害波及発生機構のうち、連鎖的・反復的に影響が波及していく機能的被害波及を対象として、重み付け評価を行った。重み付けは、検討会委員を中心とした専門家、関係者にアンケート方式とした。

アンケート回答者は、首都圏におけるインフラ施設を想定し、影響を受けるインフラの立場から、②、③につ

影響波及先インフラ

原因となるインフラ	②被害波及の影響度		③波及率	②×③ 21段階評価 (0~20)
	4:致命的な影響 ~0:影響なし		5:インフラシステム 全体に大きな影響 が広がる ~1:ほとんど影響 しない	
1. 災害直後 物理的被害波及	2	1		2
機能的被害波及	3	3		9
2. 仮復旧の 速度に及ぼす影響	4:致命的な影響 ~0:影響なし			② 1

図-6 重み付け評価方法(評価例)

原因となるインフラ	影響波及先(インフラ)									影響波及先(社会的機能)			
	電力	ガス	上水道	下水道	情報通信	道路	鉄道	港湾	航空	運輸・物流/旅客	金融	医療	行政
電力		1	3	8	4	9	16	12	8	12	8	12	16
ガス	1		1	2	1	0	4	1	3	1	1	6	2
上水道	2	1		4	0	0	4	3	3	4	1	16	8
下水道	0	0	1		0	0	4	1	1	1	1	4	1
情報通信	0	8	2	1		4	16	4	8	12	20	6	20
道路	0	4	2	0	12		1	8	4	16	6	12	2
鉄道	0	1	0	0	0	6		3	4	4	2	0	2
港湾	0	3	0	0	0	0	0		0	1	0	0	12
航空	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0

図-7 機能的被害波及の重み付け結果

支障率

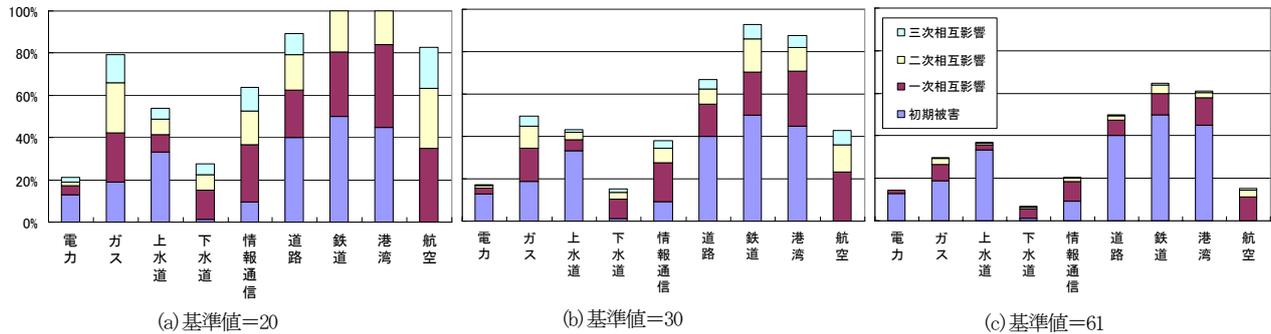


図-8 各インフラの機能支障率と波及影響(発災1日後)

いて評価した。災害直後の被害関連マトリックス(表-3)に記載されている影響波及事象のうち機能的被害波及の事象を参照し、②被害波及の影響度(インフラ個々の施設、機能に着目し、どの程度の影響を受けるか)を4~0の5段階(4:致命的な影響~0:影響なし)で、首都圏におけるインフラシステムの性質や、影響の軽減に有効となるシステム形態(施設密度、多重化、冗長性等)を勘案し、③波及率(システム全体のうち、どの程度影響が広がるか)を5~1の5段階(5:システム全体に甚大な影響が広がる~1:システム全体にはほとんど影響しない)で評価し、②×③の21段階評価とした。

なお、ケーススタディには用いないが、物理的機能波及、および復旧支障(復旧活動時の被害関連マトリックス(表-4、表-5)を参照)についても重み付け評価を行った(図-6)。

機能的被害波及に関する影響の大きさの評価結果を図-7に示す。一般的に、「電力」「情報通信」「道路」起点の影響が大きいという傾向が見られる。

次に、波及影響を収束させるために、相互依存構造マトリックスの各係数の値を正規化した。正規化の基準値は、重み付けの最大評価値~マトリックスの行和の最大値の間で下記の3通りに設定した。

- 1) 重み付け評価値の最大値 (=20)
- 2) 重み付け評価値の最大値の1.5倍 (=30)

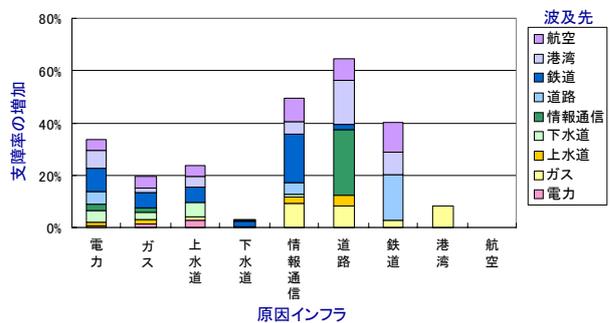


図-9 波及先インフラの内訳(基準値=30の場合)

3) マトリックスの行和の最大値 (=61)

(3) 試算結果

被害拡大について発災1日後、1週間後、1ヶ月後の時点を対象に、インフラ相互影響の寄与分を三次の波及影響まで算定した。発災1日後の結果を図-8に示す。全てのインフラに対して、インフラ間の波及影響により、設定した初期被害以上の機能支障が現れた。「航空」は初期被害を想定していないが、他インフラの影響を受けて機能支障が発生した。

図-9は原因となるインフラ別に波及先インフラの内訳を示したものである。「道路」「情報通信」「鉄道」を起点とする被害波及が大きい傾向が見られる。機能的被害波及の重み付け結果では影響が大きかった「電力」の

影響が相対的に小さくなっているが、これは首都直下地震の初期被害での支障率の設定が「道路」「鉄道」等に比べて小さいことに起因するものと考えられる。

また、相互依存構造マトリックスの正規化については、重み付け最大評価値を用いると支障率1を超え、波及影響を過大評価する恐れがあることが分かった。

なお、重み付け結果は、評価者ごとの想定する条件の相違等により、評価値の付け方にばらつきがあるように見受けられた。今後、重み付けの際の前提条件の明確化、異なる立場の複数の回答者からの評価付け等により、重み付け結果の均質性を確保する必要がある。

5. 被害軽減対策の調査

被害波及軽減対策に関して、各インフラ事業者の取り組み等を文献ならびにヒアリングにより調査した。調査結果は、各インフラで共通の取り組み、各インフラで独自の取り組みに分けて整理した。

共通の取り組みのうちハード面での対策では、「供給ルートの多ルート化、ネットワーク化」、「離れた地域へのバックアップ機能整備」、「衛星携帯電話の配備」、「業務用車両へのカーナビゲーションシステム搭載」などが挙げられていた。また、ソフト面での対策では、「携帯電話のメール活用」、「海上輸送、航空輸送の活用」、「仮設配管による仮復旧の実施」、「関連機関との協定締結」などが挙げられた。

独自の取り組みには、移動電源車の配備（電力）、導管・導水管のブロック化（ガス・上水道）、復旧支援システムの活用（ガス）、加圧式ポンプ車による高層ビルへの給水（上水道）、ポータブル発電機による中継局の電源バックアップ（情報通信）、災害用伝言サービスの活用による輻輳の緩和（情報通信）、井戸水や調整池や海水の淡水化プラントの活用（医療）、バイク便による薬の搬送（医療）、集約型のネットワークから分散型のネットワークへの切り替え（金融）、職員の最寄り店舗への参集（金融）、などが挙げられた。

6. まとめと今後の課題

本調査より、以下に示す結果が得られた。

- ① 災害直後においては、インフラ同士の影響波及がほぼ全てのインフラで発生しており、とくに電力、ガス、情報通信、道路においては、他インフラに影響を与える可能性が確認された。
- ② 首都直下地震のケーススタディでは、全てのインフラに対して、インフラ間の波及影響により、初期被害

害以上の機能支障が現れた。とくに、「道路」「情報通信」「鉄道」を起点とする被害波及が大きい傾向が見られた。なお、初期被害（支障率）の設定や、相互依存構造マトリックスの基準値は、試算結果に大きな影響を及ぼす。

- ③ 被害軽減対策のうち、各インフラ共通の取り組みとしては、停電に対する自家発電機の設置、ライフライン施設の途絶に対する、多ルート化、ネットワーク化、初動要員の事務所近傍への居住等があった。これらは、大都市での災害に対しても有効と考えられる。また、一部の取り組みであったが、今後共通した取り組みが考えられる事項として、復旧時の道路埋設物の協議、調整、復旧現場部隊の為の「前進基地」等の設置があった。

今後の期待と課題として以下が挙げられる。

- ① 本調査で作成した被害連関マトリックスは、各インフラの防災担当者等が災害対応を考える際の、被害波及事象の想定に利用できると考えられる。たとえば、各インフラ間の被害波及を想定したシナリオにより防災訓練を実施する等が考えられる。このような訓練の実施により、災害対応上の新たな課題の発見や対策の検討が行われることが期待される。
- ② これまでの被災では発生しなかったため今回は調査されなかった事象については、今日のインフラの整備状況等を踏まえたさらなる内容の充実が必要である。
- ③ 被害連関マトリックスをもとに、被害波及の重み付けを行うとともに、首都直下地震における被害波及の推定を試みたが、相互影響の大きさを定量的に評価するためには、計算手法等についてさらなる検討が必要である。とくに、多くのインフラはネットワーク構造を有しているため、ネットワークを通じて被害が波及することを考慮した評価が必要となる。
- ④ 波及影響の様相の推定や、被害軽減対策効果の評価のためには、今後、被害波及の定量的評価や、社会・経済的波及影響を定量的に評価できるシミュレーションモデルの構築が必要となる。
- ⑤ これら課題解決のため、引き続き調査研究を行っていく必要がある。

謝辞：本調査は、平成18年度内閣府災害対策総合推進調整費により実施されたものである。検討にあたっては「重要インフラ間の被害波及軽減のための調査検討会（座長：千葉大学 山崎文雄教授）」の下で、山崎文雄教授、神戸学院大学 佐藤忠信教授、岐阜大学 能島暢呂教授、ならびにライフライン企業からの委員の方々から

数々の有益なご意見を賜った。被害波及のモデル化の考え方については、(財)電力中央研究所 朱牟田善治博士にご教示頂いた。また、新潟県中越地震を経験されたインフラ関係機関からは、貴重なご経験をお話し頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 亀田弘行, 能島暢呂: 阪神・淡路大震災調査報告 土木・地盤編, 第9巻ライフライン施設の被害と復旧, 第8章ライフラインの相互連関, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 土木学会, pp.511-520, 1997.9.
- 2) 能島暢呂, 亀田弘行, 岩井哲, 北原明男: 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, 1988.4.
- 3) 片山恒雄, 佐藤暢彦, 和気忠: 都市震災の連関および波及構造の解明とその震災想定調査への利用に関する研究, 昭和63年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, 東京大学生産技術研究所Report No. 89-1(11), 1989.3.
- 4) 片山恒雄, 山崎文雄, 原田隆典, 永田茂, 目黒公郎, 他 5名: 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), 1992.4.
- 5) 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), 土木研究所資料, 第3199号, 1993.7.
- 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2), 土木研究所資料, 第3206号, 1993.7.
- 7) 大塚久哲, 鈴木基行, 佐藤貴志: 大都市圏における震災波及構造に関する研究(その3), 土木研究所資料, 第3463号, 1996.10.
- 8) 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, 2007.3.
- 9) 能島暢呂, 亀田弘行: ライフラインの相互連関, 阪神・淡路大震災-防災研究への取組み-, 京都大学防災研究所, 1996.

(2007.06.29 受付)

RESEARCH FOR MITIGATION OF DAMAGE CAUSED BY INTERDEPENDENCIES AMONG CRITICAL INFRASTRUCTURE

Yozo GOTO, Takeyasu SUZUKI, Iwao SUTOMI, Yasuhiro SHOJI,
Mai TSURUTA, Shojiro KATAOKA and Hikari SUZUKI

In this study, the interdependency among critical infrastructures during the past disasters has been investigated and arranged as matrices, FTAs and influence diagrams. And the influence of the interdependency has been quantitatively surveyed through a case study about the earthquake disaster in the metropolitan area. The results show that almost all the infrastructures are interdependent, and the electric power, telecom, and highway system have influence greater than the others. Moreover, practical use of cellular-phone mail, car-navigation system, marine and air transportation, disaster response agreement with a related organization, etc. are found to be effective for quick restoration.