

# 東日本大震災のライフライン復旧にみる 災害対応オペレーション

能島 暢呂

東日本大震災のライフライン復旧における災害対応について、OR 的視点に立って紹介する。まず被害軽減のための復旧戦略の基本的考え方について述べた上で、東日本大震災と阪神・淡路大震災におけるライフライン被害と復旧過程を比較する。続いて各論として、電力供給、水供給、都市ガス供給、道路交通の各システムにおける特徴的な災害対応について概説する。事例紹介を通じて、供給源の多重化、基幹網の冗長化、末端網のブロック化といったネットワークのシステムの課題や、「迅速・正確な被害把握」と「実態に即した復旧計画の早期確立」など対応行動面での課題を指摘した。

キーワード：ライフライン・ネットワーク、復旧過程、復旧戦略、被害把握、連結性、冗長性

## 1. ライフライン復旧とオペレーションズ・リサーチ

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災では、ライフライン施設も広域にわたって甚大な被害を受けた。ライフライン機能被害は時間的な累積効果があるため、地震後の対応行動によって大きく左右されるが、復旧資源は有限であるから、どのような「復旧戦略」に基づいて復旧活動を展開するかが早期復旧の成否の鍵を握る。そこにオペレーションズ・リサーチ的な観点から「復旧過程を戦略的に最適化する」という発想が生まれる。

ライフライン施設は、拠点施設、基幹ネットワーク、末端ネットワークによって構成され、地震時には膨大な数の被害が広域に広がる。ライフライン地震工学分野では、こうした状況を数理モデルで定式化し、被災要素の復旧順序あるいは復旧資源の配分方法を探究する最適化問題が扱われてきた[1]。これまでの震災経験や一連の研究から、影響軽減のための経験的ルールとして、(1)供給ノード（発電所、浄水場・配水池、ガス製造設備など）と需要ノード（利用者）との連結性（ネットワーク的なつながり）の確保、(2)供給ノードに近い上流側から下流側へ復旧を進めること（下水道では逆向き）、(3)被害が軽微なところを優先的に復旧、

(4)医療機関や避難所など重要性の高いニーズの優先、などが明らかにされている。また被害軽減には事前のネットワーク整備も重要な役割を果たす。例えば、(1)ネットワークの多ルート化・多重化・相互連結、(2)末端ネットワークのブロック分割による被災影響の局域化ときめ細かく迅速な供給再開、といった対策が行われている。

本稿ではこれらを念頭に置き、OR 的視点に立って、東日本大震災のライフライン復旧における災害対応オペレーションの事例を紹介する。

## 2. 東日本大震災と阪神・淡路大震災におけるライフライン被害と復旧過程の比較

表1に、供給系ライフラインの停止戸数を東日本大震災と阪神・淡路大震災で比較する[2]。電気・水道・都市ガスの順に停止戸数が多いことは共通しており、停電と断水は今回が上回っているが、都市ガス停止は東北地方での普及率が低いいため下回っている。図

表1 供給系ライフラインの被災規模の比較

ライフライン	東日本大震災	阪神・淡路大震災	2011/1995
電気	約 891 万戸 (東北電力管内 約 486 万戸)	約 260 万戸	342% (187%)
水道	約 220 万戸	約 126 万戸	175%
都市ガス	約 46 万戸	約 86 万戸	53%

のじま のぶおと  
岐阜大学 工学部社会基盤工学科  
〒501-1193 岐阜市柳戸1番1

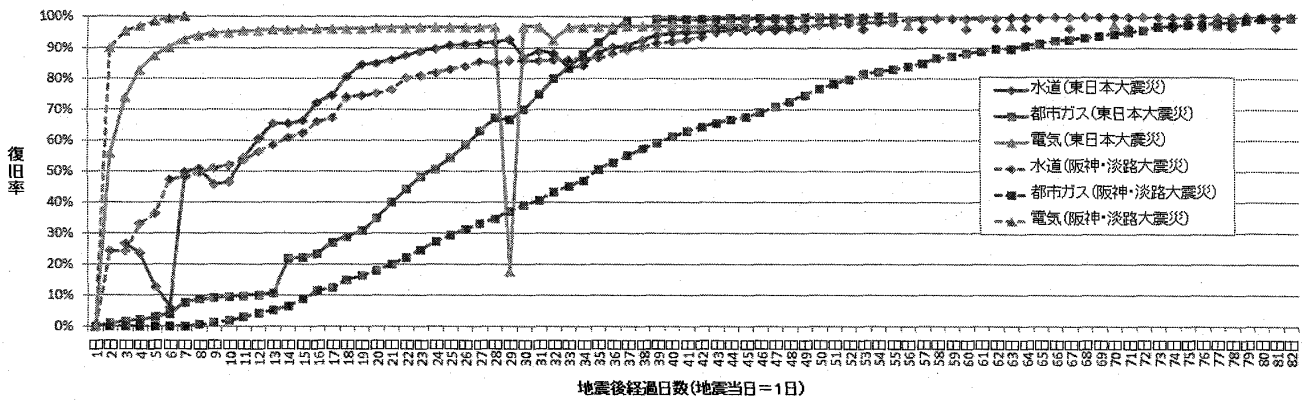
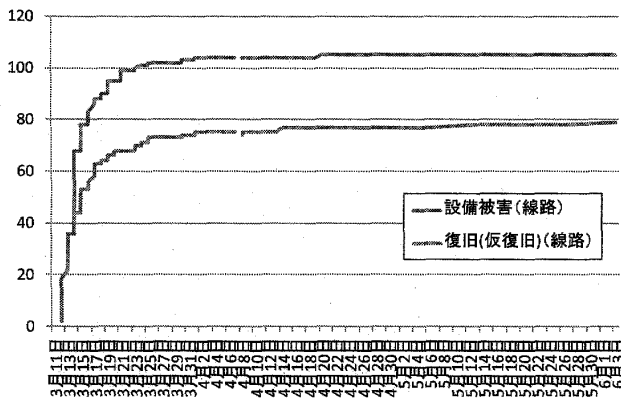
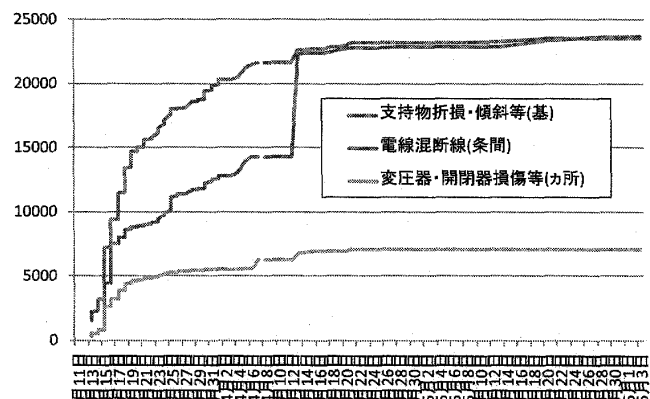


図1 電気・水道・都市ガスの復旧率の推移 (東日本大震災の電気については東北電力管内のみ)



(a) 送電設備



(b) 配電設備

図2 送電・配電設備の被害把握状況 (文献[3]より作成)

1は各地震の地震発生日を1日目として、復旧率(=復旧戸数/延べ停止戸数)の時系列を比較したものである。ともに電気・水道・都市ガスの順に復旧が早い。今回、電気の復旧は初期段階からやや遅れをとり、津波被災地域で多くの未復旧戸数が残されている。4月7日と11日の余震の影響も表れている。水道はやや早いペースであったが、4月7日の余震の影響でかなり後れが生じた。都市ガスについては今回の方が早いペースとなっている。図1は広域な被災地全体で集計したものであるから、そこに全体最適化という視点はないが、個々のシステムにおける災害対応オペレーションを反映したものである。

### 3. 電力供給システム

図1に示した東北電力管内の復旧過程には、送電系統切り替えによる機能的復旧、発電・送電・変電・配電設備の修理を伴う復旧、さらに津波等による被害甚大地域での復旧作業という災害対応が反映されている。復旧を妨げた要因としては、津波による設備の水没・

損傷、公共インフラや家屋流出、瓦礫山積、福島県内の立入制限などが挙げられる[3]。加えて、広域で甚大な被害の把握に時間を要したことも復旧遅れの一因と考えられる。図2は、送電設備および配電設備の被害把握状況の時系列を示したものである。送電設備の被害をおおよそ把握するのに約10日間を要し、同図に併記した仮復旧および図1の復旧過程とほぼ相似形である。一方、配電設備については約40日間を要し、被害甚大地域での状況把握が難航していたことを伺わせる。

### 4. 水供給システム

復旧過程の県別内訳によると、宮城県では復旧がほとんど進まない期間が約2週間続いた。これは、宮城県中南部の7市10町に水供給を行う仙南・仙塩広域水道用水供給事業と、宮城県中部の10市町に水供給を行う大崎広域水道用水供給事業の大口径送水管に被害(それぞれ16カ所, 51カ所)が生じたことが影響している[4]。図3に示すように[5]、仙南・仙塩広域

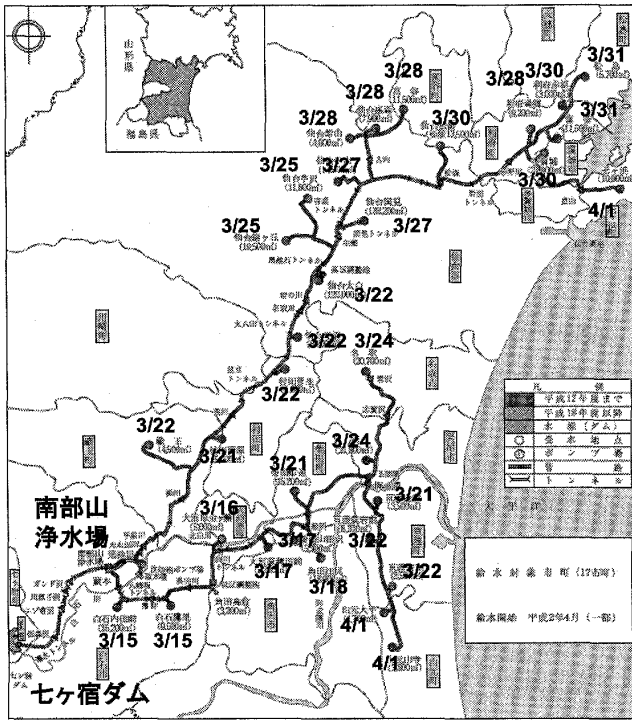


図3 仙南・仙塩広域水道の送水管網（事業概要図[5]に加筆）

水道では高区・低区の二系統の送水管（総延長 211.6 km）を通じて各市町に送水しているが、その形状はツリー状でリダンダンシー（冗長性）に乏しい。つまり一カ所でも被害を受けると下流側ではすべて影響を受ける。図中には各市町の受水タンクで受水が完了した日付を加筆している。上流側から復旧が行われて順次通水が再開されており、下流側の市町ほど復旧がずれ込んでいる。宮城県企業局公営事業課によると、今後、高区・低区の二系統を連結してループ化を図る計画である。こうした広域ネットワークは全国的にも数多く、岐阜県営水道では抜本的対策として、導・送水管を二重化する「バックアップ管整備事業」の事業化を、平成 25 年以降の 40 年計画（1 期 10 年で 4 期計画、1 年あたり 10 億円）で決定している。

なお、仙台市水道局では、茂庭・中原・国見・福岡の各浄水場を拠点として水供給を行っている[6]。中原浄水場以外の 3 系統は、中央配水幹線、将監配水幹線、およびループ化された幹線で連結され、水を相互融通することができる。配水エリアは 124 の配水ブロックで構成され、隣接ブロック間で連携が図られているが、復旧時には切り離して影響波及を遮断し、ブロック単位で作業が進められた。

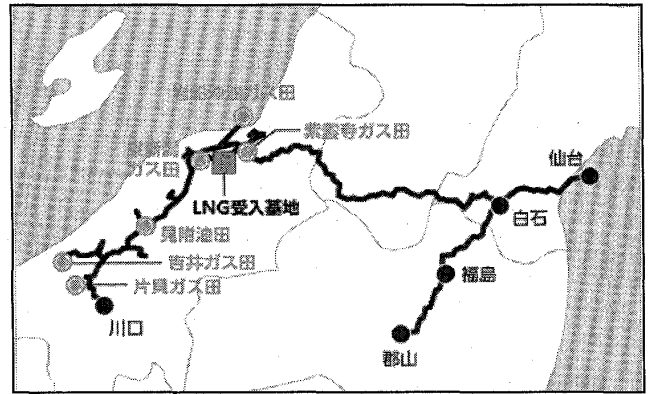


図4 石油資源開発(株)の天然ガスパイプラインネットワーク[7]

### 5. 都市ガス供給システム

都市ガスが停止した 16 事業者のうち、被災規模が最大だったのは仙台市ガス局である。LNG タンカーから受け入れた液化天然ガスを原料として都市ガスを製造する港工場が、津波で被災してその機能を失った。これにより、供給区域（3 市 3 町 1 村）全域の 35.9 万戸で供給停止した。しかし港工場では新潟～仙台間の約 260 km のパイプラインを通じて天然ガスを受け入れていた[7]。図 4 にその天然ガスパイプラインネットワークを示す。地震直後、白石分岐バルブステーション（VS）でいったん緊急遮断されたが、パイプラインと VS の安全点検後、3 月 23 日に港工場からのガス送出が可能となり、2 病院（仙台オープン病院、仙台市立病院）への供給が再開された[8]。白石 VS から港工場に至るネットワークはツリー状であり、前述の送水幹線と形態的・規模的に類似している。仮にガス輸送機能を喪失していれば、都市ガス復旧はさらに遅れていたであろう。

ガス導管の末端ネットワークの復旧作業にあたっては、供給区域を 4 つの大ブロック（C, N, S, E）、12 の小ブロック（C-1, C-2, C-3, C-4 東, C-4 西, N-1, N-2, S-1, S-2, S-3, E-1, E-2）に分割し、さらに細かい復旧セクターに分割したうえで、全国都市ガス事業者からの修繕隊・開栓隊の協力（49 事業者、延べ 10 万人）のもと進められた[8]。こうした復旧ブロックの骨格は事前計画に基づくものであるが、被災状況に応じて修正して形成されたものであり、災害対応オペレーションの典型例といえよう。

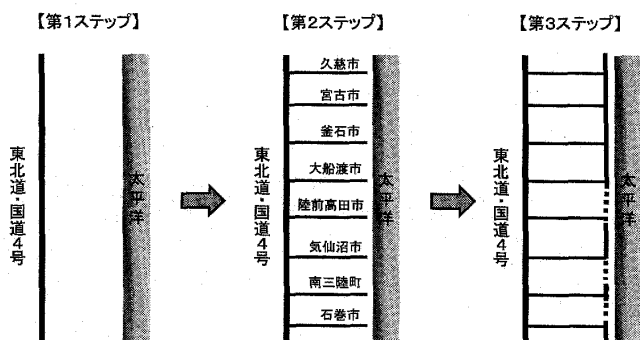


図5 くしの歯作戦の概念図（文献[9]より作成）

## 6. 道路交通システム

東日本大震災のライフライン復旧において特筆すべき災害対応オペレーションとして、国土交通省東北地方整備局の「くしの歯作戦[9]」が挙げられる。これは津波で壊滅的被害を受けた三陸沿岸部への交通アクセスを早期に確保するために行われた道路啓開戦略である。道路啓開とは「1車線で緊急車両のみでもとにかく通れるようにガレキを処理し、簡易な段差修正などにより救援ルートを開けること」とされ、最低限の道路機能として前述の「連結性」を確保するための作業と位置付けられる。図5に示すような「くしの歯型」の形状からその名前がつけられた。

第1ステップとして、内陸部の東北自動車道と国道4号線によって縦軸ラインをなす幹線機能が確保された。第2ステップとして、そこから順次横軸ラインが延伸され（3月12日までに11ルート、14日までに14ルート、15日までに15ルート）、3月16日からは一般車両通行可とされた。さらに第3ステップとして、津波被害が大きかった太平洋沿岸の縦方向の道路啓開を推進し、3月18日までに国道45号の97%が通行可能となり道路啓開は概ね終了した。その後も被災地の復旧復興を支えており、「くしの歯」を構成する横軸14ルートの平均交通量は、5～6月で前年度比21～26%増、8月で15%増となった。

一方、国土交通省四国地方整備局では「東南海・南海地震発災時の緊急輸送路確保の考え方」として、東日本大震災の教訓を踏まえた「四国版くしの歯作戦」ともいえる構想を提示している[10]。それは(1)瀬戸内側の横軸ラインの確保、(2)横軸ラインから太平洋沿岸地域に接続する縦軸ラインの確保、(3)太平洋沿岸地域の沿岸ラインの確保、の3ステップ（図5を時計回りに90°回転させるとわかりやすい）からなる。その実

現に向けて、骨格となるべき道路網の整備とその信頼性向上が課題として挙げられており、災害対応オペレーションを見越した事前対策の事例として注目されよう。

## 7. 「迅速・正確な被害把握」と「実態に即した復旧計画の早期確立」のために

実際の災害対応の現場は相当に混乱した状況に陥るのが常である。図2に見たように被災の実態が逐次的にしか判明しないことや、余震や火災・津波等の影響で被害状況そのものが変化することもあり、被害の全容を正確に把握するには長時間を要する。したがって、復旧最適化手法を数理的かつ厳密に適用できるような理想的な条件は望むべくもない。災害規模が大きいほどその傾向は強くなるため、外的支援により復旧リソースを増強しつつ、冒頭に列挙したような基本原則を念頭に置いて、最善を尽くすというのが現実的な姿といえよう。

とはいえ上述の「四国版くしの歯作戦」のように、来るべき地震災害への備えとしてOR的観点から災害対応オペレーションを検討しておくことは意義深い。事前に検討された復旧戦略を地震時に的確に実行に移すには、「迅速・正確な被害把握」と「実態に即した復旧計画の早期確立」が課題である。

解決のための一つの方向性は、進展著しいリアルタイム情報の活用である。地震動情報や緊急地震速報に基づく即時被害推定により被害把握の早期化を行ったうえで、リモートセンシング画像情報や実被害情報などを統合処理すれば、被害推定を逐次更新して一層の高精度化を図ることができ、緊急対応や復旧計画策定に効果的である[11]～[14]。もう一つの方向性は、被災実態に柔軟に対応できるように高度化したOR手法を適用することである。復旧最適化のためのモデルパラメータには不確実性があり復旧計画に大きく影響する。復旧工事の遅延はその一例であり、作業時間の不確実性を取り入れた復旧計画策定手法[15]が検討されるなど、新たな展開が見られる。

今後、東日本大震災の被災事例のさらに詳細な分析が進められ、災害対応オペレーションのあり方に関する教訓が引き出されることによって、さらに先進的なOR手法のニーズ創出が期待される。

### 参考文献

[1] 例えば、能島暢呂、亀田弘行、「幹線・支線の階層性

- を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム」, 土木学会論文集, No. 450/I-20, 171-180, 1992.
- [2] 能島暢呂, 「東日本大震災における供給系・通信系ライフラインの復旧概況」, 地域安全学会梗概集, No. 28, 97-100, 2011.
- [3] 東北電力(株): 地震発生による停電等の影響について (2011.3.11~6.18)  
<http://www.tohoku-epco.co.jp/emergency/9/index.html>
- [4] 宮城県企業局公営事業課・水道経営管理室: 東日本大震災における水道用水供給事業・工業用水事業の被害および災害対応状況について, <http://www.pref.miyagi.jp/kigyo/>
- [5] 宮城県企業局公営事業課・水道経営管理室: 送水施設について (事業概要図), <http://www.pref.miyagi.jp/ss-kousui/koumu/ko01.htm>
- [6] 仙台市水道局: ホームページ, <http://www.suidou.city.sendai.jp/>
- [7] 石油資源開発(株) (JAPEX): 天然ガスパイプラインネットワーク <http://www.japex.co.jp/business/japan/pipeline.html>
- [8] 仙台市ガス局: 東日本大震災における都市ガスの復旧状況等について  
<http://www.gas.city.sendai.jp/top/disaster/2011/09/000447.php>
- [9] 国土交通省東北地方整備局: 東日本大震災関連情報, 「くしの歯作戦について」「道路の啓開が早い理由について」, 記者発表資料 (2011.9.12) 「東日本大震災発生後6ヶ月の交通状況について」, <http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/k00360/taiheiyouokijishinn/newindex.htm>
- [10] 足立敏之: 東日本大震災の教訓と四国における巨大災害への備え, 防災通信セミナー (プレゼン資料PDF), 2011. [http://www.soumu.go.jp/soutsu/shikoku/chosa/eisei\\_inet/pdf/bosai\\_02.pdf](http://www.soumu.go.jp/soutsu/shikoku/chosa/eisei_inet/pdf/bosai_02.pdf)
- [11] 能島暢呂, 「被害情報の統合による早期被害把握の数理モデル」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 47, No. 7, 432-440, 2002.
- [12] 能島暢呂, 「緊急地震速報による予測震度の不確定性を考慮した緊急対応モデル」, JCOSSAR2011 論文集 (第7回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム), TM1-4A, 111-118, 2011.
- [13] 能島暢呂, 「被害推定の逐次更新機能を有する緊急対応の意思決定支援シミュレータの開発」, 地域安全学会論文集, No. 9, 295-304, 2007.
- [14] Matsuoka, M. and Nojima, N., "Building Damage Estimation by Integration of Seismic Intensity Information and Satellite L-band SAR Imagery," *Remote Sensing*, MDPI, Vol. 2, No. 9, 2111-2126, 2010 [doi: 10.3390/rs2092111].
- [15] 古田均, 中津功一郎, 野村泰稔, 「不確実性を考慮した被災ネットワークの復旧計画策定」, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, 434-445, 2008.