

論文

広域被害における水道管復旧 戦略支援システムの開発

築山 勲*・佐藤 忠信*・古田 均**・森 まゆこ***

Development of Decision Support System for Restoration of Water Supply after Large-Scale Disasters

Isao TSUKIYAMA*, Tadanobu SATO*,
Hitoshi FURUTA** and Mayuko MORI***

Abstract

In the near future, there is concern that great earthquake, in Tokai, Tonankai, Nankai and the Tokyo Metropolitan area, could cause catastrophic damage. The damage to lifelines by their earthquakes will be serious and much time is needed for restoration. Therefore, it is necessary to take measures to restore it early. The purpose of this research is to develop the decision support system to recover the damage of the water supply after large-scale disasters. The support system makes a restoration schedule to be able to minimize the restoration days from the assumed damage of the water supply pipes and the restoration workers. GA (Genetic Algorithm) is used for optimization of the restoration schedules. The restoration model of the Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes is set as a case study, it applies to this support system, and it proposes the restoration plan.

キーワード：地震災害、配水管、復旧計画、遺伝的アルゴリズム

Key words: earthquake disaster, water supply pipe, restoration plan, genetic algorithm

1. はじめに

日本列島では複数のプレート運動により地殻に大きなひずみが複雑に蓄積されるため地震が頻繁

に発生している。地震調査研究推進本部では、プレートの沈み込み地帯と、内陸の活断層の調査を行なって、わが国で発生する地震の生起確率を発

* 関西大学大学院 総合情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kansai University

** 関西大学 総合情報学部
Department of Informatics, Kansai University

*** 株式会社 ヤクルト
Yakult Honsha Co., Ltd

本論文に対する討論は平成20年8月末日まで受け付ける。

表している。この発表によれば、今後発生する確率が高く被害が大きい地震の一つに東海・東南海・南海地震がある。東海・東南海・南海地震は同時に発生する可能性があるため、3つの地震が同時に発生した場合、ライフラインにどのような被害を及ぼすかを予測し、その対策を立てておくことが、重要な課題となっている。

兵庫県南部地震では被害エリアが阪神に集中していたため、全国から派遣された復旧部隊は阪神地域の被害を集中的に復旧することが出来た。しかし、東海・東南海・南海地震などのプレート型地震では、被害を受けるエリアは多都府県に及び、その被害も甚大である。これまでの被害が集中しているような地震被害では、被害を受けた事業者が他の事業者に支援を要請し、支援活動を行ってきた。しかし、被害規模が広域で甚大である場合には、支援側の供給量が不足する事態に陥ると考えられる。このため、限られた復旧部隊を、どこの事業者に派遣すれば、効率的に復旧が行えるかという問題が生じる。さらに、被害が広域であることを考慮すれば、支援先の復旧が終わった後、次の支援先も決めておく必要がある。したがって、復旧班の支援先を一つだけ決めるのではなく、全体的な復旧スケジュールを策定する必要がある。これは復旧スケジュールの策定に関する課題であるが、前もって復旧スケジュールが策定されておれば、初動を迅速にできるため、早期の復旧につながると考えられる。たとえ、推定された被災データと実データ間に差が生じて、新しい被災データを入手する度に、計画を修正することは可能である。

本研究では、地震災害による広域的な被害に備え、東海・東南海・南海連動型地震を例に、重要なライフラインである水道管復旧計画の策定を支援するシステムを構築することを目的とする。

遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を復旧スケジュールの最適化に適用した既存研究として、佐藤・一井¹⁾はネットワーク網の復旧率に注目して、GAで復旧過程を最適化した。杉本・田村²⁾は復旧班の協力を考慮して、ネットワーク網の復旧スケジュールの最適化を行った。古田・中津³⁾は、

復旧率に補修費用と安全性を考慮して、多目的な復旧スケジュールを最適化した。これらの研究は、想定した復旧班で一つのネットワーク網を効率的に復旧する支援システムを構築したものである。本研究では、ネットワーク網の復旧最適化ではなく、広域被害の復旧と全国の支援復旧班のスケジュールの最適化を行う。そのため、既往研究における上位計画を策定することとなる。

また、大規模災害による広域支援に関する既往研究として、船木・河田⁴⁾は、既存の復旧支援体制に関して、費用負担と支援調整の問題を指摘している。支援調整の問題とは、支援者・被支援者間の要請と調整が窓口ごとにバラバラで、全体統制がとれていないことである。そのため、一元的な支援体制の確立が必要であるとしている。本支援システムにおいても、全国の復旧班の復旧スケジュールを実行するためには、円滑な協力体制と一元的な支援体制が必要不可欠である。

本論文ではまず、地震被害による水道管の復旧に関して述べる。次に、復旧スケジュールを立案するための水道管復旧支援システムを構築する。復旧スケジュールを大規模な組み合わせ問題として捉え、GAで最適化する。GAは組み合わせ問題を解くのに有用であり、膨大な組み合わせ問題でも準最適解を短時間で導き出す事ができる。GAで解くための復旧スケジュールのコーディング方法と適応度の算出方法、移動距離による付加条件について述べる。本システムのケーススタディとして、東海・東南海・南海連動型地震における復旧スケジュール評価モデルを設定する。そのため、東海・東南海・南海連動型地震による水道管の被害推定と全国の復旧班の構成、復旧能率を設定する。設定した復旧モデルを本支援システムに適用して、復旧日数を最小化できるような復旧スケジュールを立案して有効性を検証する。

2. 地震被害による水道管の復旧状況

2.1 水道施設について

水道施設とは、水道法において、水道のための取水施設、貯水施設、導水施設、浄水施設、送水施設及び配水施設の総称である。兵庫県南部地震で

は、水道施設の中で最も被害が大きかったのは導水・送水・配水の各管路システムであった⁵⁾。本研究では、これらの中でも被害箇所数の多かった配水管を対象にして、支援システムの構築を行った。

2.2 兵庫県南部地震によるライフラインの被害と復旧状況

1995年1月17日午前5時46分に阪神・淡路地域でマグニチュード7.2の都市直下地震が発生した。死者6,400人、倒壊家屋11万戸以上という戦後最大の地震災害となった。この地震は阪神・淡路地域を中心に甚大な被害を及ぼし、日常生活に不可欠な電気・水道・ガスといった各種ライフラインに壊滅的な被害を与えた。兵庫県南部地震時のライフラインの詳しい被害状況をみてみると、電気は260万戸が停電し、ガスは84万5千戸が供給停止となり、水道は130万戸が断水し、下水道は18処理場の47ポンプが被災した⁵⁾。

表1は兵庫県南部地震によるライフラインの復旧日数を示したものである⁶⁾。この表から電気は比較的早くに復旧を終えているのに対し、上水道と都市ガスは復旧に多くの時間がかかっている事がわかる。

表1 兵庫県南部地震のライフライン復旧日数

ライフライン	復旧日数
上水道	90日 (仮復旧 42日)
都市ガス	84日
電気	6日

2.3 兵庫県南部地震による水道管の被害と復旧状況

兵庫県南部地震では、地震発生直後には兵庫県下で阪神・播磨地域の9市、淡路地域の1市7町で126万5730戸が断水し、大阪府下では22市2町で2万3738戸が断水した。兵庫県下の被害市町のうち1市2町の断水被害は比較的軽微であったが、それ以外の阪神地域等で9市、淡路地域5町で断水が続いた⁵⁾。

配水管への被害は、兵庫県内には4,142件、大阪府下には488件で、計4,630件であった。特に被害が大きかった神戸市、西宮市、芦屋市、宝塚市の通水率の推移を図1に示す。

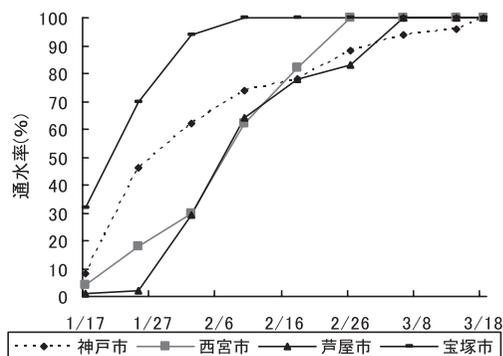


図1 4都市の通水率の推移

2.4 復旧作業の問題

兵庫県南部地震時の地震発生から復旧工事にいたるまでの大まかな流れは下記のとおりである。

- Step 1 被害状況の確認や復旧工事についての協議や調整
- Step 2 復旧工事についての資材情報などの資料作り
- Step 3 被災市町に配布
- Step 4 他都市からの派遣部隊の調整
- Step 5 復旧戦略の調整など

復旧の初期段階では、地震直後の混乱などにより体系的な復旧が実施できなかった。大きな原因として以下の3つが挙げられる。

- ・地震に対する知識不足
- ・地震を想定した防災訓練不足
- ・地震後の復旧対策不足

事前に緊急時の復旧戦略を立てていれば、よりスムーズに復旧工事が行われていたと考えられる。

3. GAを用いた水道管復旧支援システム

3.1 システム概要

本研究では、地震災害による広域的な被害に備え、復旧日数を出来るだけ早くできるような水道管の復旧スケジュールの策定を支援するシステム

の構築を行った。図2は、本支援システムのフローである。

まず入力データとして、①地震災害による被災地とその水道管の被害、②全国の復旧班とその復旧人員、③支援にかかる被災地までの距離を設定する。これらの入力データから、④復旧スケジュールのコーディングを行い、⑤目的関数を復旧日数としてGAを用いて最適化を行う。その結果、⑥復旧スケジュールの計画が探索される。計画は、⑦復旧日数と⑧総移動距離の評価値をもつ。

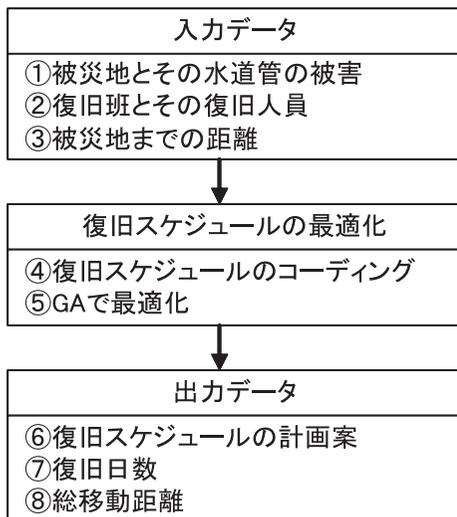


図2 支援システムのフロー

3.2 復旧スケジュールのコーディング

GAは、生物の進化の過程をコンピュータ上でシミュレートすることで、確率的に近似解の探索を行う最適化アルゴリズムの1つである。問題の設計変数を遺伝子に置き換えて1つの個体に見立て、複数の個体を生成し、淘汰、交叉、突然変異といった遺伝的操作により準最適解を求める。

GAで最も重要なことは、設計変数をGAで遺伝子型として表現することである。図3は復旧スケジュールと遺伝子の関係を示したものである。復旧スケジュールは、復旧班(M 班)と被災地(N エリア)によって二次元的に作成される。このとき、復旧班 i は被災地 A_{i1} , A_{i2} , A_{i3} ... A_{iN} のルート

をたどる。ただし、ルート過程で既に復旧が完了している被災地は省いて行動する。

復旧スケジュールをコーディングすると、総数 $M \times N$ 個の値をもつ遺伝子として表現される。このとき、 $1 \sim N$ の整数を被災地番号として割り当てておく。 $A_{i1} \sim A_{iN}$ には $1 \sim N$ の整数が重なることなく割り当てられる。

復旧スケジュール

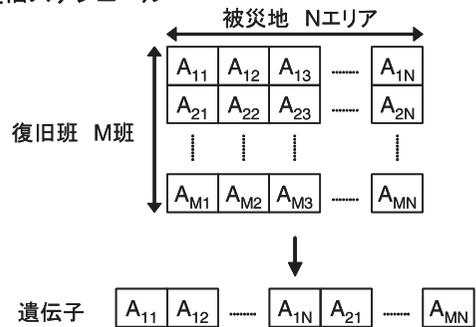


図3 復旧スケジュールと遺伝子の関係

3.3 適応度の算出

復旧スケジュールの適応度は、復旧スケジュールをシミュレートして得られる、各被災地 j の復旧が全て完了する日数 D_j の最大値 D_{Total} で表され、これをGAで最小化する。したがって、目的関数は、マックス・ミニ問題として次式で表される。

$$D_{Total} = \max_{(j=1, \dots, N)} D_j \rightarrow \min \quad (1)$$

被災地 j の復旧日数 D_j は、被害量 R_j が0になるまで要する日数である。 d 日目の被害量 R_j^d は、被災地 j にいる復旧班の全復旧人員 W_j から、次式で表される。

$$R_j^d = R_j^{d-1} - \frac{1}{\alpha} W_j \quad (2)$$

ここで、 α は復旧能率の係数とする。

3.4 付加条件

復旧日数の算出方法は上述のとおりであるが、実際には、復旧班は移動に多くの時間が必要とな

る。本来は復旧班の移動時間を目的関数である復旧日数に反映させて復旧日数を算出することが理想であるが、災害後の交通状況を推定することが難しいため、本研究では復旧スケジュールの総移動距離を算出して、目的関数の付加条件とした。復旧班 i が d 日目に移動した距離 T_{id} とすれば、総移動距離 T_{Total} は、次式で表される。

$$T_{Total} = \sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^{D_{Total}} T_{id} \quad (3)$$

最終的に最適解候補が複数得られた場合には、総移動距離 T_{Total} をそれぞれ算出し比較して、総移動距離 T_{Total} の小さい計画を最適解とした。移動距離は、被災地までの直線距離で算出する。

4. 東海・東南海・南海連動型地震における復旧スケジュール評価モデルの設定

4.1 東海・東南海・南海連動型地震による配水管の被害推定

東海・東南海・南海地震とは西日本の太平洋沿岸域を震源とし発生するマグニチュード8以上の地震である。東海沖から四国沖にかけた南海トラフには100~150年ごとに巨大地震が起こっている事は古くからの文献に記されている。

この巨大地震は、東南海地震と南海地震というように短期間に2つの地震がほぼ同時に起こることもあった。32時間の間隔をおいて発生した1854年の安政東海地震・安政南海地震、約2年間の間隔をおいて発生した1944年の昭和東南海地震、1946年の昭和南海地震がある。なお1707年の宝永地震では、中部、近畿、四国、九州の広い地域にまたがり、地震の規模がそれぞれM8.4と推定される東海・東南海・南海の巨大地震が同時に発生したと推定されている。この時の地震による建物の倒壊と津波による被害は甚大なものであった。

3つの地震が同時に発生した場合、伊豆半島から足摺岬までかなり広い範囲の日本列島沿岸が地震断層の真上に位置し、地震断層の長さは、大体600キロから700キロの長さとなり、日本列島の南海岸線沿いに大きな地震動が発生することにな

る。2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震では1,000キロぐらいにわたり地震断層が破壊したが、これに匹敵する程の大きさの地震が発生する可能性がある⁷⁾。また、3つの地震が同時に発生した場合、ライフラインの復旧には多くの時間が必要であり、上水道に17ヶ月、都市ガスに7ヶ月、電気に1ヶ月の復旧期間が必要になると推定される⁸⁾。

本研究では、東海・東南海・南海連動型地震をケーススタディとして、本支援システムに適用する。本研究で対象とする配水管の復旧スケジュールを策定するにあたり、東海・東南海・南海連動型地震が発生した場合の配水管の被害予想データを整理した^{注1)}。なお、データは最新のものであり文献⁷⁾のデータが一部修正されている。東海・東南海・南海連動型地震による配水管の被害予測データは、市町村単位で算出されているため、それらを都府県単位でまとめたものを表2に示す。

この表から、東海・東南海・南海連動型地震による配水管の総被害件数は76,007件となる。兵庫県南部地震による総被害件数は4,630件であったので、被害件数で比較すると約16倍の被害規模となる。被害件数は、静岡県の35,892件が最も多く、次に多いのが愛知県の12,694件である。

表2 東海・東南海・南海連動型地震による配水管の被害件数

	被害件数		被害件数
埼玉県	49	大阪府	1,118
千葉県	11	兵庫県	787
東京都	42	奈良県	270
神奈川県	272	和歌山県	3,873
福井県	34	鳥取県	12
山梨県	1,252	島根県	8
長野県	278	岡山県	1,207
岐阜県	708	広島県	314
静岡県	35,892	山口県	43
愛知県	12,694	徳島県	2,663
三重県	6,094	香川県	381
滋賀県	685	愛媛県	772
京都府	293	高知県	6,258

注1) データは参考文献5)のデータを保有する株式会社アーステック東洋より提供された

4.2 復旧班の構成

復旧班は、作業員となりうる水道局と管工事業者の総数のうち、復旧作業に従事できる者だけで構成されるものとする。兵庫県南部地震の復旧において、自県の復旧作業に携わる場合の総作業員に対する復旧人員の割合と他県に派遣した復旧支援の人数の割合は、大きく異なっていた。したがって、それぞれの総作業員に対する復旧人員の割合も算出する。

①水道局の技術職員の算出

水道局員は、事務職員と技術職員に分けられる。作業に携わるのは技術職員として、復旧班には各都道府県の技術職員のみが加わる事とする。都道府県ごとの技術職員数は日本水道協会発行「水道統計 ～施設・業務編～」のデータを用いた⁹⁾。

②管工事業者の従業員の算出

管工事業者の人数の算定には、全国の管工事業者およびその技術職員の人数が必要になる。全国管工事業者名簿¹⁰⁾には、全国の管工事業者が記載されているが技術職員数は記載されていない。そこで、北海道、神奈川県、奈良県の管工事業者1,194社の技術職員数を財団法人建設業情報管理センターのWebページ¹¹⁾で調べ、平均技術職員数を算出した。表3は、北海道・神奈川県・奈良県の管工事業者数と各道県の従業員の合計、管工事業者1社あたりの平均従業員数を表したものである。

この表から1社あたりの平均技術職員数を7人とし、全国47都道府県の従業員数を管工事業者数から割り出した。水道局技術職員と合わせて各都道府県の総作業員を算出した結果を表4に示す。

次に、総作業員のうち、実際に復旧に携わることのできる人数を推定する。復旧班は47都道府県に1班ずつあると想定した。復旧班は、自県を復旧する場合と他県を復旧支援する場合で人数の割合を変更する。

表3 管工事業者1社あたりの平均技術職員数

	北海道	奈良	神奈川
管工事業者数	510	186	488
技術職員数の合計	4,587	659	3,538
平均技術職員数	7		

(1) 自県を復旧する復旧班の構成

被災した都道府県の復旧班は、自県の復旧を優先し、自県の復旧が完了してから、他県へ支援復旧することとする。配水管の被害は26都府県に及ぶため、自県を復旧する必要のある復旧班は26班あることとなる。

表5は、兵庫県南部地震の復旧活動において、兵庫県内の作業員のうち県内の配水管の復旧作業に携わった人数とその割合を算出したものである。総作業員6,721人のうち1,457人が自県の復旧に携わっており、約22%の作業員が自県の復旧人員として復旧作業に携わったことが分かる。したがって、本研究においても、被災した自県の配水管の復旧には総作業員の22%を復旧作業に充てられるものとした。

(2) 他県への復旧班の構成

被災していない、もしくは、復旧の完了した都道府県の復旧班は、他県に支援活動を行う。他県へ派遣される復旧人員数は、移動コストや人員

表4 都道府県別総作業員

	人数		人数		人数
埼玉	9,991	大阪	10,381	北海道	6,073
千葉	8,849	兵庫	6,721	青森	2,351
東京	17,519	奈良	2,071	岩手	3,841
神奈川	10,591	和歌山	3,373	宮城	3,478
福井	2,018	鳥取	426	秋田	2,283
山梨	616	島根	375	山形	3,069
長野	2,999	岡山	1,848	福島	3,331
岐阜	4,668	広島	4,380	栃木	5,578
静岡	4,192	山口	1,050	群馬	769
愛知	9,311	徳島	618	新潟	5,290
三重	2,237	香川	743	富山	3,360
滋賀	1,732	愛媛	2,630	石川	2,782
京都	3,648	高知	609	福岡	5,862
茨城	4,679	大分	2,598	佐賀	1,740
鹿児島	1,369	熊本	1,389	長崎	1,621
沖縄	1,283	宮崎	2,072		

表5 兵庫県南部地震における総作業員と復旧人員の割合

	総作業員	復旧人員	割合
兵庫県	6,721	1,457	22%

数、物理的な災害地へのアクセス可能性といった要因の影響を受けるものと考えられる。ケーススタディにおいては、派遣コストの代理変数として派遣先までの距離に着目し、派遣人員の割合を設定することとした。図4は、兵庫県南部地震において、復旧に駆けつけた各県の県庁所在地から最大の被災地となった兵庫県神戸市までの距離と派遣割合をプロットしたものである。距離は県庁所在地間の直線距離である。これらのデータから、式4のような近似曲線を導いた。

$$y = 2 \times 10^{-8}x^2 - 2 \times 10^{-5}x + 0.0117 \quad (4)$$

ここで、 x は距離(km)で、 y が派遣割合である。式4を用いて、東海・東南海・南海連動型地震における他県への派遣人員を算出する。

本研究では、最も被害件数が多く、自県のみ的人员で復旧するには多くの時間がかかると推定される静岡県を被害の中心地に設定した。表6は、各都道府県の県庁所在地から静岡県静岡市までの直線距離と自県および他県への復旧人員を表している。自県を復旧する場合の復旧人員は、総作業員の22%で算出し、他県を復旧する場合の復旧人員は、距離と式4を用いて派遣割合を求め、総作業員を掛けて算出した。

4.3 配水管被害の復旧能率

配水管被害の復旧能率は、式2の α で表した係数であり、復旧スケジュールの計算過程で必要と

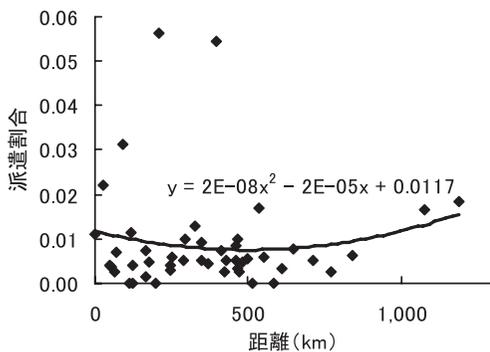


図4 神戸市までの距離と派遣割合

表6 静岡市までの距離と復旧班の人員

	距離 (km)	復旧班の人員	
		自県	他県
北海道	936	-	64
青森	683	-	17
岩手	581	-	26
宮城	429	-	24
秋田	550	-	15
山形	405	-	21
福島	362	-	24
栃木	222	-	46
群馬	169	-	7
新潟	334	-	38
富山	218	-	28
石川	236	-	23
福岡	752	-	47
佐賀	771	-	14
長崎	825	-	14
熊本	750	-	11
宮崎	730	-	16
鹿児島	819	-	12
沖縄	1,413	-	30
茨城	245	-	37
大分	653	-	19
埼玉	150	1,998	91
千葉	171	1,770	78
東京	148	3,504	161
神奈川	125	2,118	101
福井	230	404	16
山梨	78	123	6
長野	188	600	26
岐阜	157	934	42
静岡	0	838	49
愛知	137	1,862	87
三重	174	447	20
滋賀県	230	346	13
京都府	239	730	30
大阪府	267	2,076	84
兵庫県	294	1,344	52
奈良	238	414	17
和歌山	306	675	25
鳥取	383	85	3
島根	487	75	3
岡山	411	370	13
広島	547	876	30
山口	641	210	7
徳島	368	124	4
香川	405	149	5
愛媛	534	526	18
高知	475	122	4

なる。震災後の復旧活動では、被害情報の確認や現場移動など、実作業以外にも多くの時間を要する。そこで、過去の地震による配水管の被害件数を調べ、被害件数に対してどれだけの累積人数が復旧に携わったか調べた¹²⁻²¹⁾。その結果を表7に示す。この表から、配水管の被害件数の合計4,917件で、復旧作業に携わった累積復旧人員の合計109,307人を割ったところ、1件の配水管被害を修復するのに約22（人日/件）必要である事が分かる。図5は、過去の地震の被害件数と累積復旧人数の相関図である。被害件数と累積復旧人員は、おおむね比例関係にあることが分かる。

5. 提案する復旧スケジュールと考察

5.1 GAの遺伝的操作とパラメータの設定

GAに用いた遺伝的操作を表8に示す。復旧班は同じ被災地に二度訪れる事がないので、交叉は遺伝子内に同じ番号の遺伝子が存在しないように順序交叉を用いた。選択・淘汰方法は、個体の適応度を選択比率に置き換えたルーレット方式と最も適応度の高い個体を残すエリート選択を併用した。

GAのパラメータは、収束判定に用いる世代数、解候補である個体数、交叉率、突然変異率の4つである。各パラメータ値を表9に示す。

5.2 適用結果

上述した東海・東南海・南海連動型地震の復旧モデルに、本支援システムを適用し、復旧計画の立案を試みる。GAは確率的に準最適解を求める

表7 地震による配水管被害と累積復旧人員

市町村名	被害件数	累積復旧人員
神戸市	1,757	55,859
尼崎市	130	5,585
西宮市	1,019	21,298
芦屋市	408	10,641
伊丹市	58	2,356
宝塚市	254	1,876
川西市	32	860
明石市	85	4,818
三木市	35	59
淡路町	9	40
北淡町	214	500
東浦町	13	30
津名町	64	163
一宮町	64	483
大阪市	277	911
池田市	17	58
豊中市	80	1,528
吹田市	22	213
高槻市	20	109
堺市	19	192
釧路沖地震	30	862
新潟県中越地震	310	866
合計	4,917	109,307

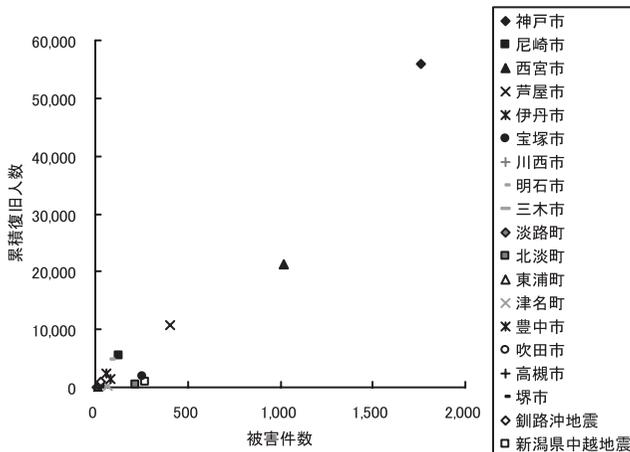


図5 被害件数と累積復旧人数の相関図

表8 GAに用いた遺伝的操作

交叉	順序交叉
選択・淘汰	ルーレット方式 エリート選択

表9 GAのパラメータ

世代数	500
個体数	100
交叉率	0.6
突然変異率	0.01

手法であるので、10回の実行を試み、その中から最も良い解を選択する。表10は、10回の実行結果である。

全10回の実行結果から、最も復旧日数の小さいものは、4回目の復旧日数385日、総移動距離26,282kmであった。図6に、4回目の実行結果の復旧日数の最良値の推移を示す。横軸はGAの進化計算過程を表す世代で、縦軸が復旧日数である。

復旧日数は初期世代の430日から始まり、世代を追うごとに減少して、350世代付近で385日に収束していることが分かる。また、他の試行結果についても300~400世代で収束していた。

GAの有効性を確かめるために、モンテカルロシミュレーションで復旧計画を5万サンプル作成した。その結果、最良値として、復旧日数426日、総移動距離50,600kmの解を得た。この値は、図6の初期世代の復旧日数とほとんど変わらない。

表11は4回目の実行結果の復旧スケジュールで

表10 実行結果

実行回数	復旧日数	総移動距離 (km)
1回目	387	28,013
2回目	386	26,732
3回目	388	24,661
4回目	385	26,282
5回目	387	21,189
6回目	387	25,689
7回目	389	29,003
8回目	387	34,950
9回目	386	24,808
10回目	386	22,627

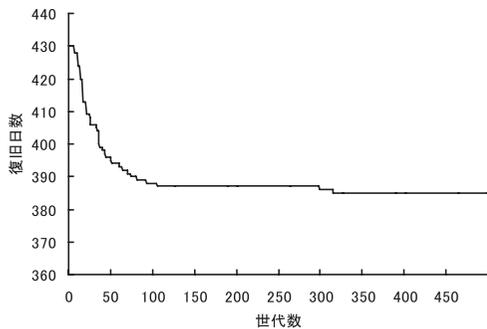


図6 目的関数の最良値の推移

表11 復旧スケジュール

班	復旧地	開始日	復旧地	開始日	復旧地	開始日
北海道	静岡	1				
青森	福井	1	高知	3	静岡	379
岩手	高知	1	静岡	379		
宮城	静岡	1				
秋田	大阪	1	高知	12	静岡	379
山形	静岡	1				
福島	静岡	1				
茨城	静岡	1				
栃木	静岡	1				
群馬	埼玉	1	静岡	2		
埼玉	埼玉	1	静岡	4		
千葉	千葉	1	静岡	4		
東京	東京	1	静岡	10		
神奈川	神奈川	1	静岡	4		
新潟	高知	1	静岡	379		
富山	静岡	1				
石川	福井	1	静岡	3		
福井	福井	1	静岡	40		
山梨	山梨	1	静岡	204		
長野	長野	1	高知	11	静岡	379
岐阜	岐阜	1	高知	17	静岡	379
静岡	静岡	1				
愛知	愛知	1	静岡	138		
三重	三重	1	静岡	274		
滋賀	滋賀	1	静岡	40		
京都	京都	1	静岡	10		
大阪	大阪	1	静岡	31		
兵庫	兵庫	1	静岡	13		
奈良	奈良	1	徳島	14		
和歌山	和歌山	1	静岡	116		
鳥取	鳥取	1	高知	53	徳島	379
島根	島根	1	静岡	204		
岡山	岡山	1	静岡	67		
広島	広島	1	静岡	9		
山口	山口	1	高知	11	静岡	379
徳島	徳島	1				
香川	香川	1	静岡	204		
愛媛	愛媛	1	静岡	31		
高知	高知	1	静岡	379		
福岡	静岡	1				
佐賀	滋賀	1	静岡	40		
長崎	奈良	1	高知	14	静岡	379
熊本	奈良	1	静岡	14		
大分	高知	1	静岡	379		
宮崎	広島	1	高知	9	静岡	379
鹿児島	高知	1	静岡	379		
沖縄	静岡	1				

ある。この表から、復旧班が何日目からどの県を支援復旧するか分かる。例えば兵庫県の場合、まず自県の復旧活動を行い、12日に復旧が完了する。自県の復旧完了後、次の復旧地である静岡県へ13日に移動し、最終復旧日である385日まで、373日間、静岡県を復旧することとなる。

5.3 考察

復旧日数は385日であり、復旧に一年以上かかることが分かる。モンテカルロシミュレーションによる最良値426日に比べて、40日近く短縮されており、本支援システムでGAが有効に機能していることが分かる。

復旧スケジュールをみると、復旧班の多くは、2つの被災地を復旧して活動を終えている。3つの被災地を復旧した班は8班である。付加条件として復旧日数が同じ計画がある場合には、総移動距離の小さいものを優先選択しているため、復旧班の移動回数が少なくなったと考えられる。

復旧に最後までかかった被災地は被害件数の多い静岡県と徳島県の2県である。一方、愛知県は静岡県に次いで2番目に被害が大きいのに関わらず、137日目で復旧が完了している。愛知県が早く復旧できた理由は、自県の復旧人員が他県に比べて大人数であるためである。

本研究の復旧モデルでは、過去の復旧活動のデータから、自県に対する復旧人員の割合を22%とし、他県に対する復旧人員の割合を1%前後に設定して計画を策定した。復旧班の人数を固定しているために、これ以上の復旧日数の短縮は難しい。仮に、他県に対する復旧人員の割合を増やすことができれば、復旧日数を大きく短縮する事ができる。他県に復旧人員を効率よく多くの復旧人員を派遣するためには、派遣先との連携が重要であると考えられる。本研究で示された復旧計画の立案支援は、支援先の情報を事前に揃えておくこと、及び、円滑な協力体制が構築されることによりはじめて可能となる。非常事態を予め想定し、その場合の計画を考えておくことが、災害に対する被害の軽減となると考えられる。

6. おわりに

本研究では、地震災害による広域的な被害に備え、水道管復旧計画の策定を支援するシステムを構築し、東海・東南海・南海連動型地震を例に、本支援システムを適用した。復旧計画の最適化にはGAを用い、GAで解くための復旧スケジュールのコーディング方法と適応度の算出方法、移動距離による付加条件を設定した。本システムのモデルケースとして、東海・東南海・南海連動型地震における水道管の推定被害と全国の復旧班の構成、復旧能率について設定した。設定したモデルケースに対して本支援システムを適用し、復旧日数を最小化できるような復旧スケジュールを立案し、有効性を示した。

今回、東海・東南海・南海地震をモデルケースとしたが、他の地震においても被害予測データ等のモデルケースを設定すれば、あらかじめ復旧スケジュールを立案することができ、事前に災害対策を立てる事が可能である。

今後の課題を列挙する。

- ・復旧作業の効率化は、復旧時の道路の状況に左右される。したがって、実行結果から得られた復旧日数で必ずしも作業を完了できるとは限らない。そのため、復旧地までの道路の最短経路などを導き出す必要がある。
- ・配水管だけでなく、水道施設全体の復旧計画の策定が望まれる。

謝辞

株式会社アーステック東洋より、東海・東南海・南海地震による被害予想データを提供して頂いたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤忠信・一井康二：遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究，土木学会論文集，537巻，I-35号，pp. 245-256，1996-4.
- 2) 杉本博之・田村 亨・有村幹治・斉藤和夫：復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発，土木学会論文集，625巻，IV-44号，pp. 135-148，1999-7.

- 3) 古田 均・中津功一朗・築山 勲：LCC を考慮した被災道路ネットワーク復旧計画策定に関する研究，構造工学論文集 Vol. 52A, pp. 183-190, 2006-3.
- 4) 船木伸江・河田恵昭・矢守克也：大規模災害時における都道府県の広域支援に関する研究—新潟県中越地震の事例から—，自然災害科学 J. JSNDS, Vol. 25, No. 3, pp. 329-349, 2006-11.
- 5) 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，日本土木学会, 520p., 1997-9.
- 6) 兵庫県，阪神・淡路大震災の復旧・復興の状況について，<http://web.pref.hyogo.jp/contents/000066327.pdf>, 2007年3月1日
- 7) 佐藤忠信：「ライフラインは大丈夫か」，比較防災学ワークショップ No. 5, pp. 61-72, 2005-1.
- 8) 河田恵昭：南海地震60年，自然災害科学 J. JSNDS, Vol. 25, No. 3, pp. 375-379, 2006-11.
- 9) 日本水道協会：水道統計—平成15年度—施設・業務編，第86-1号，日本水道協会, 1333p., 2005-3.
- 10) 全国管工事業協同組合連合会：全国管工事業者名簿—平成16年度版—，全国管工事業協同組合連合会, 765p., 2004-2.
- 11) 財団法人建設業情報管理センター，<http://www.ciic.or.jp/index.html>, 2005年9月1日
- 12) 阪神・淡路大震災被災・支援水道事業者：阪神・淡路大震災と水道—被害状況・総括・復旧工法・水運用など—，財団法人水道技術研究センター, 171p., 1997-3.
- 13) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録，神戸市水道局, 163p., 1996-2.
- 14) 西宮市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録，西宮市水道局, 140p., 1997-9.
- 15) 芦屋市水道部：阪神・淡路大震災 水道復旧の報告，芦屋市水道部, 66p., 1997-1.
- 16) 宝塚市水道局：阪神・淡路大震災 水道の被害と復旧の記録，宝塚市水道局, 104p., 1996-9.
- 17) 尼崎市水道局：阪神淡路大震災 水道復旧の記録，尼崎市水道局, 95p., 1996-3.
- 18) 川西市水道部：阪神・淡路大震災 復旧の記録資料編，川西市水道部, Vol. 16, 35p., 1995.
- 19) 明石市水道部：兵庫県南部地震 水道の記録～ライフラインの確保に向けて～，明石市水道部, 178p., 1996-3.
- 20) 新潟県中越地震水道現地調査団：新潟県中越地震水道被害調査報告書, 70p., 2005-2.
- 21) 釧路市水道部総務課：釧路沖地震による水道施設の被害と対応，釧路市水道部総務課, 1994-1.

(投稿受理：平成19年5月7日

訂正稿受理：平成19年10月31日)