

(22) 制限供用を考慮したGAによる被災道路ネットワーク復旧計画

THE RECOVERY PLANNING OF DAMAGED ROAD NETWORK BY GA USING FULL AND PARTIAL RESTORE OPTIONS

植竹 聡*・佐藤尚次**

Satoshi UETAKE, Naotsugu SATO

*京都大学大学院 情報学研究科社会情報学専攻(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

**工博 中央大学教授 理工学部土木工学科(〒122-8551 文京区春日 1-13-27)

In this paper, the planning system of restoration process of lifeline network suffered from natural disaster is proposed, in which Adaptive Range Genetic Algorithms is adapted. Even if the same level of the damages is struck, the method of restoration to be applied is different depending on where the damages take place and on whether traffic congestion occurs or not. In foregoing study, restoration is only full restore operation. In this study, full and partial restore operations are newly defined. As an example, the proposed method is applied to the road network. Results show the possibility to solve the optimum allocation of restoration resource and time schedule.

Key Words: Full and Partial Restore Options, Genetic Algorithms, Recovery Planning

1. まえがき

1995年1月17日の兵庫県南部地震は、阪神・淡路地域のライフラインシステムに壊滅的な被害をもたらした。それとともに、復旧過程や緊急対応においても多くの問題が生じ、事態を悪化させたことの衝撃は大きく、防災対策のあり方の再検討を促す結果となった。

これまでの研究では今回起こった地震のデータを、次回以降の地震災害軽減への材料とするオフライン的研究が中心であった。今回の兵庫県南部地震では、地震発生直後から各種の処理をリアルタイムに行うことの重要性が改めて認識された。

リアルタイム地震情報の利用技術の進歩、地理情報システム(GIS)を用いた人的・物的被害予測法のリアルタイム化やマルチメディア情報通信システムの普及などを背景として、新しい地震防災システムの構築は今や社会的要請である。

広域的な大災害時においては、限られた人員と資機材のもとで、多くの被災施設をどのように復旧すればよいのが重要になる。すなわち、被災した多数の施設に対して、地震後の機能停止をなるべく早く復旧するためにとるべき最適な戦略は何か、という研究である。

被害発生位置やその程度を予測するという手段はできるだけ避け、それらの実際の情報を用いたリアルタイム復旧戦略システムを考えることが重要である。人・物などの情報は逐次入力できる。そこで、どのような手順で、どこから復旧していくのが最適かをリアルタイムで計算

し、その結果に基づいて、復旧を行うのである。すなわち、現時点までの情報に基づき、次の時点の復旧行動の最適解を計算する。ただし、このとき重要になるのは、客観的判断基準のもとで、復旧過程を最適に制御する方法論が採用されなくてはならない点である。このようにすれば、将来の復旧の予測ができる。もちろん情報が加わるたびにフィードバックし、予測型復旧方策を逐次更新する必要がある。

また、今回の阪神・淡路大震災では、生活への影響として救助物資供給の遅れが指摘された。これは、避難所までの道路渋滞や被災地情報と物流制御の不連動などにより、避難所への救援物資が十分に届かなかったことが原因となっている。それとともに、消防部隊・緊急救援隊の遅延も明らかになっている。この原因として、地域内道路寸断や断水による消防水利の不足などが挙げられる。

本研究では、あるライフライン系ネットワークの複数箇所が被災し、本来の機能を発揮できなくなった状態を想定し、それらを元の状態に復旧(機能回復)するための作業において、限られた人資材を効率良く配分すること、および適正な復旧スケジュールを、遺伝的アルゴリズムを応用して同時に決定することを試みるものである。また、リアルタイム復旧戦略への適用として、ある地点から目的地まで物質・情報を伝達するという作業を考え、復旧の進展によって得られた新しい情報が入るたびに計算し、更新を行うことを試みた。

震災を受けた時間的階層をもつ道路ネットワークの復旧問題に GA を応用した杉本らの研究¹⁾があるが、本研究として組み込んだ点として、

- ① ボランティアや消防・自衛隊などのマンパワーと復旧資材や消防水利などの復旧・救援物資などを一つの集合体と考え、その限られた人・資材をいつどこに被災箇所のように配分するかという問題。
 - ② 様々なグレードの被害が起これ、被災のダメージの大きさが同じであっても、復旧方法が異なる場合がある。その場所と状況による復旧方法の考慮。
 - ③ ランダムに発生する交通渋滞(輻輳)の考慮。
- が挙げられる。

2. 災害のモデリング

ライフラインシステムには、電気・上下水道などのエネルギー・供給系と電話・道路などの通信・交通系がある。それらが地震などにより被害を受けた場合、様々な箇所に様々なグレードのダメージを受ける。そのとき、特に一方の供給系ではなく、双方のやり取りが生じる通信・交通系の場合、場所によって時間がかかっても完全復旧したほうが良い場合と、流量に制限をしても早急に復旧したほうが良い場合がある。本研究では数値計算例として道路ネットワークの復旧を取りあげているが、その場合使われている言葉として、前者を「修復専念」の状態、後者を「制限供用」の状態と呼ぶ。

次に、構造物の破壊グレードを考える。橋梁や盛土、トンネルなどの道路の一部をなすものが被災を受けた場合、制限供用はできず 100% 修復しなければ機能は回復しない。このような破壊グレードを「全壊」と呼び、ランクを「A」とする。容量は 0 である。次に、一般の道路で道路本体が破壊された場合、このような破壊グレードを「半壊」と呼び、ランクを「B」とする。容量は 0 となる。半壊に対する復旧作業が終わったあと、修復専念と制限供用を選べる状態になる。そして、道路そのものには被害がないが、周辺の構造物等が道路上に倒壊しその撤去が必要な場合などは、破壊グレードを「要制限」と呼び、ランクを「C」とする。倒壊物撤去の仕方によってははじめから修復専念と制限供用の選択ができるものとする。ただし、供用されているときには容量が 1/2 になるとする。

また、人・資材の上限を定め、それを超えないように復旧箇所に適正に配分することを考える。

以上のことを用いて問題を次のように定義する。ある地域に災害が発生し、その地域のライフラインネットワークに被害が発生した。ここでは道路ネットワークを取りあげる。被害は各グレードごとに多数発生している。ある地点から目的地(避難所)まで毎日、緊急救援物資を一刻も早く届けたい。そのため、限られた人・資材を適正に配分し、避難所までのロスが最も少なくなるように被災箇所を復旧する必要がある。このことから、問題

はある地点から目的地までの時間距離が最短になるように、各被災箇所の人・資材を配置し、復旧を行うということになる。

この最適配分、最適スケジュールの問題ではそれを評価する目的関数が必要となる。本研究では最短距離(時間)を取りあげている。ここでは、単に復旧を評価する目的関数があり、それを最小化あるいは最大化するように、被災箇所を復旧したり、人資材を配分することを決められるものとする。

3. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムはスケジューリング問題や組み合わせ最適化問題に威力を発揮する。本研究では従来の simple GA ではなく、荒川の提案する領域適応型(Adaptive Range)遺伝的アルゴリズム²⁾を使用する。ここでは簡単なビットだけ述べることにする。まず致死遺伝子が発生しないこと。またデコードの際バイナリ表現からの整数表現を直接用いないため、ビット数を多く設定する必要がないこと(メモリ容量の軽減)。そして、初期的な探索領域の設定に無関係であること(初期的な設定の範囲外に解があっても求められる)。それとグレイコーディングなどのオプションが容易であることなどである。

本研究を GA に適用するにあたって以下のようにコーディングを行った。それぞれのランクごとにリストを作りそれらを A から順にをつなげる。GA の線列には、リストの順に被災箇所を並べ、その中に何日目に復旧を行うかを定める数値を入れる。ただしランク B の場合、B の復旧後何日目に C の復旧を行うかを定める数値も入れる。

コーディングの例として、図 1 に示すネットワークを考える。ランク A の被災箇所(x)は 3 箇所、ランク B の被災箇所(▲)が 7 箇所、ランク C の被災箇所(■)は 5 箇所である。その GA 線列とその意味を説明する。

← A →← B →← C →
[3 7 1 4 9 2 6 8 5 3 1 6 2 6 9 1 7 5 3 1 8 4]
← a →← b₁ →← b₂ →← c →

ここで、a, b₁, c は被災後何日目に復旧を行うかを表す数字であり 1 以上の整数である。b₂ については、ランク B の復旧が終わった後何日目に完全回復に向けての復旧を行うかを表す数字である。1 以上の整数であり、1 のときは修復継続であり、完全復旧 6 のときは 5 日後まで供用を続け 6 日目から復旧を行うという意味である。

これで、スケジューリング問題はコーディングできたことになる。しかし、このままでは 1 日あたりの復旧人資源の上限を超えてしまう可能性がある。そこで、超えてしまった場合、導かれた目的関数にペナルティーを与えることにする。これによって GA の評価の際に淘汰されやすくなる。ただし、これでは最適解に近い場合に少

し上限を破ってしまったときでも淘汰されてしまう可能性がある。本研究では上限をオーバーしたときに、許容範囲ならば小ペナルティー、大きくオーバーした場合は大ペナルティーを与えるものとする。

以上のようなコーディングにより、復旧のスケジュールと人資源の配分が同時にできることになる。

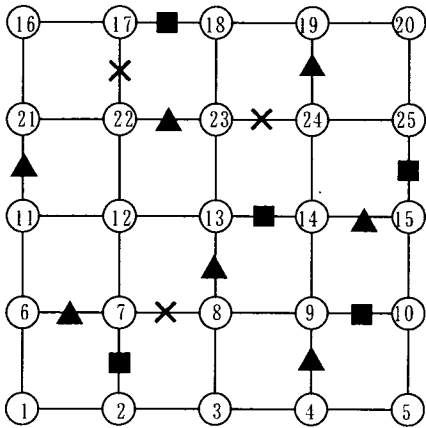


図 1：被災モデル

4. 道路ネットワークへの適用

4.1 道路ネットワークの信頼性

道路ネットワークの信頼性は大きく分けて2つの方法で定義できる⁵⁾。1つは連結信頼性であり、もう一つは時間信頼性である。連結信頼性とは、ある一定の期間中、ネットワークの任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義される。時間信頼性とは、ある一定の時間で目的地へ到達できる確率あるいは、ある確率で到達可能な走行所要時間の上限値（最大許容所要時間）である。本研究では後者の時間信頼性を対象にしている。

4.2 道路ネットワークの復旧と目的関数

本研究のライフラインネットワークの復旧問題は、4章で述べたようなコーディングを行うことによって、復旧スケジュールの最適化と人資材の適正配分ができることを示した。また、ある復旧作業が終わった後、別の復旧作業が行われるような場合もモデル化できることを示した。そして、以上のようなことを具体的に評価する関数が必要になる。ここで、本研究の目的関数を定義する。スケジュールに基づいて復旧を行い、一日ごとに道路の開通状況が変化する。救援物資を目的地に運ぶための最短時間経路も日ごとに変化し、常に最短時間経路を通して目的地に行くものとする。この例では、その日のかかった時間から 100%復旧しているときにかかる時間を引いた値、すなわち時間のロスを計算する。この時間のロスと復旧日数の関係を図 2 に示す。

この図において、色付きの部分の面積、つまり時間のロスの合計を目的関数とする。よってこの例では、この目的関数を最小化することを考える。

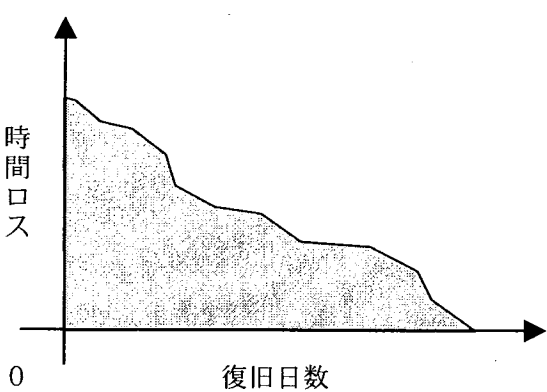


図 2：時間ロスと復旧日数の関係

4.3 最短時間経路の計算

本研究では最短時間距離を計算する。ここで、時間距離というのは、リンクの重みをノード間の距離と考えるのではなく、ノードからノードまで移動するのに費やす時間と考えるものとする。

復旧状況は毎日変化するので、隣接行列に毎日新しい情報を入れて計算を行う。

また、ランダムに交通渋滞が発生することも組み込んだ。各リンクごとに 50%の確率で渋滞が起こるものとし、その場合渋滞が起きたノードの時間コストは通常の 2 倍の時間がかかるものとする。

4.4 設計変数

復旧をモデル化する上で具体的に必要な設計変数について述べる。復旧中の容量は当然 0 となる。時間ユニットを Δt とする。まず「A」について、修復に必要な資源を Δt あたり k_A かかるとする。期間は $N_A \cdot \Delta t$ で3つの中で最も長い。復旧が終わったあと容量は0から1となる。同様に「C」も資源は Δt あたり k_C かかり、期間は $N_C \cdot \Delta t$ で一番短いとする。容量ははじめ 1/2 だが復旧が終わると1になる。「B」については、資源は Δt あたり k_B で、期間は $N_B \cdot \Delta t$ とする。そしてそれが終わると修復専念（工事継続）と制限供用（容量 1/2 のままでダメージは回復しない）の選択ができる。すなわちランク「B」が「C」に変化すると考えることができる。容量は $0 \rightarrow (1/2) \rightarrow 1$ と変化する。容量が 1/2 のとき、時間コストは通常の 2 倍かかると考える。また、 Δt あたりの資源の最大数（Limit） k_{lim} も設定する。作業の期限を T と定め、 $T \cdot \Delta t$ 以内にできるだけ作業を行うものとした。本研究では Δt を 1 日としている。

表 1:被災モデルの設計変数データ

復旧資材	data	復旧期間	data
k_A	9	N_A	10
k_B	5	N_B	5
k_C	3	N_C	3
k_{lim}	20	T	32

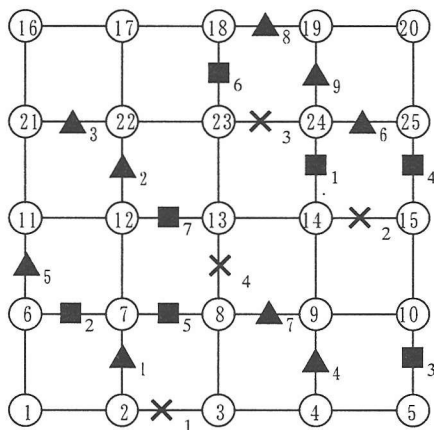


図 3: シミュレーションモデル

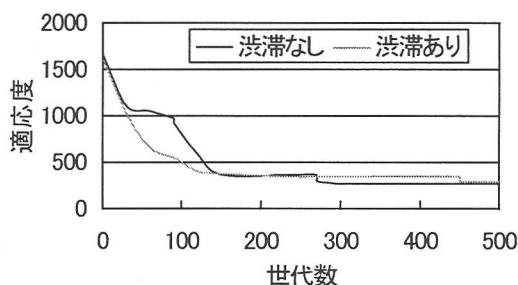


図 4: 適応関数

4.5 数値計算例

計算の例として、図 3 に示す 25 ノード 40 リンク上に多数の被害が発生したことを想定する。リンク間の時間コストはすべて 1 とする。被災モデルはランク「A」(X) が 4 箇所、ランク「B」(▲) が 9 箇所、ランク「C」(■) が 7 箇所と想定する。各ランクごとの番号を右下に表した。各設計変数データは表 4 に示す。出発地点をノード 1、目的地をノード 25 とする。

GA の各設計変数について説明する。線列の各変数はそれぞれ 4bit とした。母集団は 80 個体、最大世代数 500、50%の交叉率、1%の突然変異率を与えた。また、中間エリート優先戦略にするため 8 個体の交換を行った。

図 4 に適応度関数の様子を示す。

得られた結果によると、渋滞がある場合でもない場合でも比較的良好な解を与えていることが分かる。渋滞なしの時の最良値は 271 であったが、そのときの復旧スケジュールを図 5 に示す。まず一番コストのかかる「A」は 4 箇所であるが、うまく重ならないように配置されている。「B」は全体的に分散されており、早い時期に復旧されるものが、優先すべき箇所であることが分かる。「C」は 1 日目から復旧するところと中盤まで供用するところで二極化しており、場所による優先度がはっきりしている。また、一日あたりの資源の合計も大きく over するものは無く、平均的に分散されていた。以上により、GA を利用して被災を受けたネットワークの復旧計画を行うことを示すことができたと思われる。

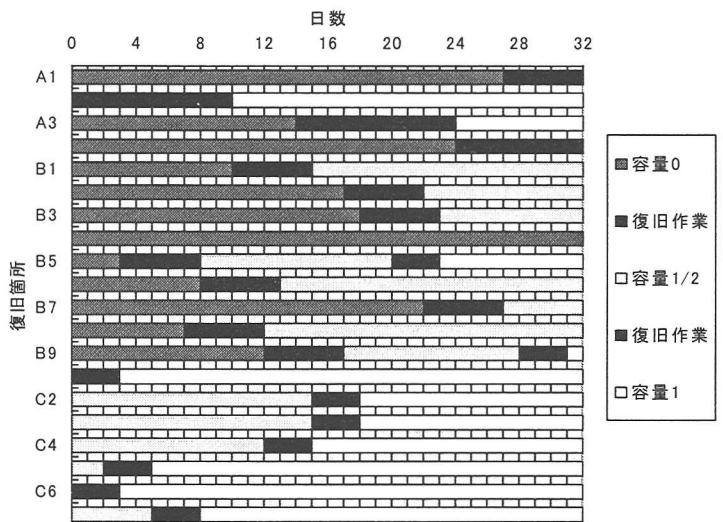


図 5: 復旧スケジュール

5. あとがき

GA を用いて被災したライフラインネットワークにおける復旧計画の一手法を示した。

地理データベースの整備によりコンピュータ上で作られるネットワークモデルは実世界モデルに近づいていくことが予測される。GIS の発展とともにネットワーク解析も高度化していく。しかし、重視されるのは復旧方策であり、そのための評価関数の中に必要な要素を組み込むことが重要である。本研究では道路ネットワークの復旧を例にとって、実際に考えられるいくつかの事項を評価関数の中に組み入れて解を示した。また、GA はランダムに発生する渋滞のような外乱が入っても、比較的良好な解を与えることが分かった。以上により、GA の有効性が示されたと思われる。

今後はより実際のモデルに適用し、災害時のリアルタイム復旧戦略として使えるような研究を行いたい。将来的には、GIS などの技術を用いて、災害時に対応できるリスク対応型情報システムの構築を目指し、総合的な防災システムを研究していきたいと考えている。

最後に温かく見守っていただいた佐藤先生、メールでの確なアドバイスをいただいた荒川先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・Lu Bianli, 「GA によるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究」, 構造工学論文集, Vol.43A, 1997
- 2) 荒川雅生, 「領域適応型遺伝的アルゴリズムの開発」, ISSMO, 1997
- 3) 野田茂, 「電気・ガス・通信システムの被災とその影響」, 日本計算工学会第 18 分科会配布資料, 1995
- 4) 亀田弘行, 「兵庫県南部地震をふまえた大都市災害に対する総合防災対策の研究」, 文部省緊急プロジェクト報告書, 1995
- 5) 若林拓史, 「阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価」, 日本計算工学会第 18 分科会配布資料, 1996