

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

杉本博¹・田村亨²・有村幹治³・斎藤和夫⁴

¹正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目)

²正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

³学生員 工修 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

⁴正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

被災時の柔軟な組織的復旧の実現は、迅速なネットワーク機能の回復の面において、重要な課題の1つである。しかし、組織的な復旧戦略の決定は、復旧班の協力組み合わせと被災リンクの復旧順番の同時決定問題となり、その最適な組み合わせを求めることが困難となる。本研究は、準最適解探索手法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms) を用いて、復旧班の協力体制を考慮した復旧スケジューリングモデルを構築し、実際に構築したモデルを用いて国道レベルでの復旧問題を解くことを目的とする。本研究では、最適解の探索を効率的に行うためにGAの処理上の工夫を加えて組織的な復旧スケジューリングの構築を可能とした。また実際にケーススタディとして南西北海道の道路ネットワークを対象として協力復旧スケジューリングの最適化計算を行った。

Key Words : genetic algorithms, post - earthquake restoration process, road networks, cooperation

1. はじめに

莫大な被害をもたらした阪神・淡路大震災は、我が国の防災行政の転換点となった。これを契機として防災基本計画の見直しが行われ、その一環として事故災害対策が追加された。防災予防に関する項での迅速かつ円滑な災害応急対策、災害復旧への備えとしては①情報の収集・連絡体制の整備、情報の分析整理、通信手段の確保②職員の非常参集体制の整備、防災関係機関相互の連携体制の整備等③救助・救急、医療及び消火活動のための資機材の整備、体制の整備④緊急輸送活動のための体制の整備⑤避難収容活動のための体制の整備⑥関係者等への的確な情報伝達活動のための体制の整備⑦防災関係機関の防災訓練の実施⑧災害復旧へ備えるための資料の整備⑨危険物等の大量流出時における防除活動のための体制の整備・資機材の整備、以上の9項目が挙げられている。また、災害応急対策としては大きく①発災直後の情報の収集・連絡及び通信の確保②活動体制の確立の2項目が挙げられている。被災時の迅速な復旧の為に、関係各組織間での情報交換と協力的行動が必要不可欠であり、実際に防災 CALS や地方公共団体相互の広域応援協定の法定化等の議論がある。

道路ネットワークの防災・復旧を対象とする交通工学

分野での研究は、災害事前施策と災害後施策に関する研究に分けられる。本研究は後者の観点からの研究を進める。災害復旧過程に関する研究は、主に交通とライフラインのネットワーク復旧に関するものであり、例えば、山田らは被害発生モデルと復旧モデルの2つのサブモデルからなる震後の復旧シミュレーション法を考案し、復旧タイプの違いによる復旧状況の変化をまとめ、復旧戦略上の指針を報告している¹⁾。能島・亀田は幹線・支線の階層性を考慮した上位施設の復旧最適化問題に最小木とHornのアルゴリズムによる方法を適用している²⁾。川島・杉田は孤立地点の解消の為に段階的な復旧を指摘し、総当たり法とヒューリスティックな手法の援用により広域的な被災状況の復旧過程予測を行っている³⁾。

復旧過程に関する研究上のキーワードは以下の6項目が挙げられる。それは、①被災リンクの復旧順番②機械・資材の配分③復旧班の配置場所④ネットワークの階層性⑤ネットワークが分断された孤立地点の考慮⑥復旧班の協力、の6つである。これらのキーワードの内、⑥の復旧班の協力に関する研究は今まで行われていない。その理由の1つとして、「協力体制」とは復旧班同士の組み合わせ制約や被災リンクの復旧順番等を同時に考慮する問題であり、これらの諸要件の組み合わせ数が問題となることが挙げられる。例えば、N本の被災リンクの復旧

順番を考えた場合、復旧順番の組み合わせ数は $N!$ となり、さらに被災リンクの復旧班への担当配分も考慮すると、その組み合わせ数は莫大となり、最適な復旧戦略を求めることは困難となる。

筆者らは単独復旧班へ被災リンクを配分させる復旧過程の構築^{4,5)}に、離散的組み合わせ最適化問題に効果を発揮する遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下 GA と呼ぶ) を適用し、組み合わせ数の問題に対応した。しかし、復旧班の連携等の組織的な復旧戦略の決定に GA を単純に適用すると、組み合わせ上の制約を満足しない実行不可能な解が GA の解探索プロセスで多数発生してしまい、GA では扱い難い問題であった。

GA を復旧過程の最適化問題に適用した例としては、佐藤らが震災を受けたライフライン網の復旧問題に関する研究を行っている⁶⁾。復旧班の配分問題に単体遺伝的アルゴリズム (Single Populated Genetic Algorithms) を用いて各班ごとの「被災要素の復旧優先順番」を意味するコーディングを行っている。しかし、「優先順番」である以上、実際には使用されない致死遺伝子がデコーディング時に発生する可能性があり、制約条件を充足する GA 上の処理を施しているとはいえない。

本研究は、広域的ネットワークにおける中・長期にわたる復旧班の連携復旧活動を対象とした復旧スケジューリング支援システム構築を目的とする。特に復旧班が協力する様なスケジューリング問題は、復旧班の組み合わせ制約が複雑となり、従来の単純な GA による解法でも、その組み合わせの多さに対応できない。そのため、本研究では構造的に復旧班の組み合わせ制約を取り込める GA を工夫し適用する。

本稿の構成は、第 2 章でまず、スケジューリング問題における GA 適用のアプローチについて述べ、最適化する問題に応じたコーディング法を整理する。第 3 章で工夫した遺伝子線列のコーディング、交叉・突然変異プロセスの工夫について具体的に記述する。第 4 章では実際の協力体制であった「北海道南西沖地震奥尻島災害復旧推進連絡会議」を参考に協力復旧のモデル作成を行う。第 5 章ではケーススタディとして、北海道南西部国道ネットワークを用い、構築したモデルを適用して計算を行う。第 6 章で本研究の結論を述べる。

2. スケジューリング問題への GA 適用に関する遺伝子線列の構成方法

(1) 遺伝子線列の作成 (コーディング)

土木計画分野における主な GA の適用例としては、予算制約付き最適配置問題⁷⁾や工事順番最適化問題⁸⁾等の研究が既になされている。従来、組み合わせ数の問題から解くことができなかった組み合わせ最適化問題におい

て、とりあえず実行可能な近似解を求めることが可能になった意義は大きい。また GA の適用範囲も、最適配置問題や多目的問題、逆問題への適用例としてパラメータ推定や内部構造把握問題と、その幅は確実に広がりつつある。土木計画分野における GA の適用範囲については一度整理する必要があるが、ここではスケジューリング問題への GA 適用方法をまとめる。

スケジューリング問題は、対象とする問題の特徴によって、組み合わせ要素や制約条件が様々に変化し、それに合わせて GA の適用方法も工夫がなされている。筆者らは既に、高速道路の道路整備順番決定問題^{8,9)}や震災復旧支援問題に GA の適用を行っている^{4,5)}。これらの問題は以下のように定義され、それぞれ GA で解くことが可能である。

<道路整備順番決定問題>

$$\left. \begin{array}{l} \text{○目的関数: } f(\{I\}) \rightarrow \min \\ \text{○制約条件: } g_1(\{I\}) \leq 0 \\ \text{○設計変数: } \{I\} = \{I_1 I_2 I_3 \cdots I_n\} \end{array} \right\} \quad (1)$$

この問題の場合、設計変数は n 個ある事業の順番であり、その順番を決める問題である。制約条件としては年度毎の予算制約等が考慮される。

<震災復旧支援問題>

$$\left. \begin{array}{l} \text{○目的関数: } f(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2, \cdots \{I\}_k, \{J\}_k) \rightarrow \min \\ \text{○制約条件: } g_1(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2, \cdots \{I\}_k, \{J\}_k) \leq 0 \\ \text{(各作業間の先行工事の関係)} \\ \text{○設計変数: } \{I\}_k = \{I_1 I_2 I_3 \cdots I_{n_k}\}_k \\ \{J\}_k = \{J_1 J_2 J_3 \cdots J_{n_k}\}_k \quad (k=1 \sim K) \end{array} \right\} \quad (2)$$

この問題は、先行工事関係のある複数作業内の工事順番と、担当する作業班の配分問題として定義される。各作業 k 毎に $I_1 \sim I_{n_k}$ の n_k 個の工事があり、それぞれ適当な作業班 $J_1 \sim J_{n_k}$ が復旧する。また、各作業間には、ある作業に属する工事が終わらなければ、他の作業に属する工事にかかれないという関係がある。

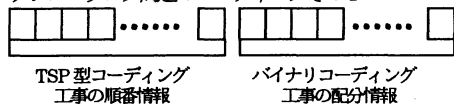
いずれの問題も、遺伝子線列の構成を工夫することが GA 適用の要となる。GA においても他のヒューリスティック手法と同様に、より良好な組み合わせ解を得るためには、GA を対象とする問題に単純に適用するだけではなく、問題の構造を GA の各プロセスの中に上手に反映させることが、効率的な解探索に繋がるといえる。

GA の解探索プロセスは基本的に、①遺伝子線列の設計・生成②遺伝子線列の目的関数値の算出③適応関数値の算出④淘汰・繁殖⑤交叉⑥突然変異によって構成される。これらのプロセスの中で最も重要なのは、GA での解探索空間を決定する遺伝子線列の設計 (コーディング) と交叉である。一般的にコーディングは、①用いる記号は少ない方がよい②無意味な個体が生成されない符号化

表-1 コーディング・交叉の評価規範

コーディングの評価規範	
完備性	問題空間上の全ての候補はGA空間上の遺伝子線列として表現されること
健全性	GA空間上の遺伝子線列は問題空間上の候補に対応づけられること
非冗長性	問題空間上の候補とGA空間上の遺伝子線列は1:1に対応づけられること
交叉の評価規範	
形質保存性	親の形質は子に適切に継承されること

① スケジューリング問題のコーディングその1



② スケジューリング問題のコーディングその2



③ 階層性を持つスケジューリング問題のコーディング

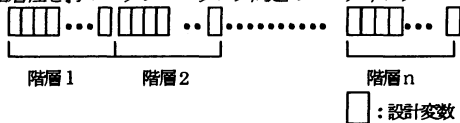


図-1 スケジューリング問題に対するコーディング

が良い¹⁰⁾、とされている。またコーディング・交叉の評価規範は表-1にまとめられる¹¹⁾。

コーディング方法は、経験に依存するといわれ、ルール化されていない。その理由は、上記指針を満たすようなコーディングと交叉方法を、適用する問題構造に合わせて適切に行う必要があるからである。

スケジューリング問題は、例えば工事を各作業班へ配分し、作業順番を決定する問題構造となる。単純に工事を各作業班に配分する問題に対して、筆者らは、バイナリコーディングと巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem, 以下 TSP と呼ぶ) 型コーディングを、1つの遺伝子線列上に同時に記述し、それぞれのコーディングの部分に対応する交叉・突然変異方法を用いている (図-1, ①)^{4), 5)}。この問題の場合、TSP 型のコーディングの中に担当作業班の区切りを示す設計変数を入れ、交叉・突然変異を行うことで同様に GA を適用できる (図-1, ②)。また、全体のスケジュールが時間的な階層性を持つ問題においては、これらのコーディングを用いて各階層についてコーディングを行い、スケジュール全体を1つの遺伝子線列として表現することで、一意に GA で最適化できる (図-1, ③)。

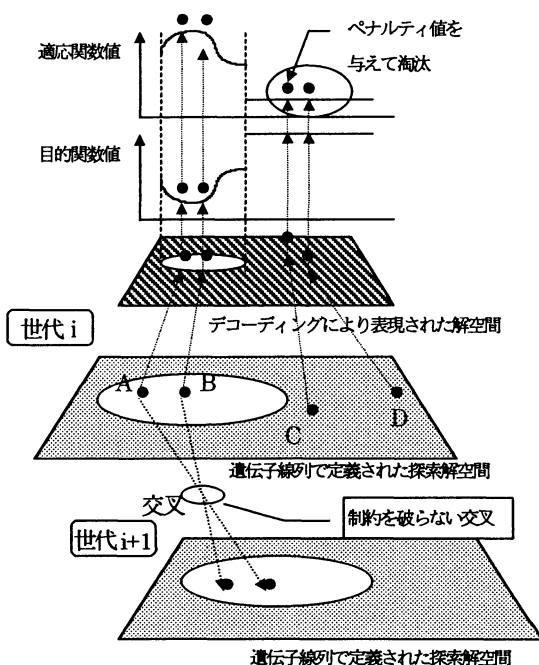


図-2 解の探索空間の世代交代による推移

(2) 制約条件の扱い

コーディングにおいて難しいのは制約条件の取り扱いである。GA に制約条件を取り込む方法は2つあり、それは、①制約条件をペナルティとして適応関数に取り込み、制約を満足しない組み合わせを淘汰する方法②コード化・交叉の工夫により制約条件を常に満足する組み合わせのみで解空間を構成する方法、の2つである¹²⁾。

①の方法は、制約を満足しない組み合わせも生成しうるコーディングを行う。遺伝子線列はデコーディングされ評価されるが、もし制約が満たされない組み合わせが生成された場合、目的関数に罰金項を設定し、適応関数に変換する際にペナルティ値を与えて淘汰する方法である (図-2, 点 C, D)。②の方法は、遺伝子線列自体の構造が問題の制約を満足するコーディングを行い、また交叉プロセス自体も制約を保存する工夫を行うことで、解探索の過程で制約が満たされない組み合わせを生成させない方法である (図-2, 点 A, B)。

①の方法は制約が多くなると実行不可能な解 (致死遺伝子) が多数生成されてしまう難点があり、GA のコーディングを困難にする場合がある。一方、②の方法は遺伝子線列によって定義される解探索空間があらかじめ制約を充足しているので、効率的に解を探索することができるが、コーディングに応じた交叉・突然変異を工夫して、制約を満たす解空間を確保する必要がある。

問題が複雑になると、制約を全て満足する遺伝子線列構造を求めることは困難となる。そこで、できるだけ②の観点から遺伝子線列の設計を行い、構造的に扱えない

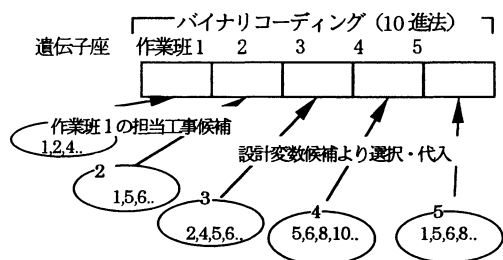


図-3 10進法コーディング

制約について①の方法を用いることになる。

スケジューリング問題においても、できるだけ制約を満足するコーディング・交叉を行う必要がある。そのためには、対象とする問題を機能的に順番を決定する問題と配分を決定する問題に分け、それぞれの部分で制約条件を満足させる必要がある。また、探索する解空間を効率良く絞り込むために、組み合わせ要素をランダムネスを失わない程度に抽出し、設計変数とすることも有効である。例えば、あらかじめ分かっている配分組み合わせのパターンをグループ化して1つの設計変数としたり、ある工事の準備に必要な「待ち」が分かっている場合、そのまま異なった設計変数とせず、その工事と合わせて1つの設計変数とすることで、意味の無い組み合わせの生成を防ぐことができる。

(3) コーディングによる制約の取り込み

コーディングによって制約を満足する場合、例えば、10進法コーディングでは、各作業班毎に担当できる工事が設定されているような問題に利用できる(図-3)。遺伝子線列の各遺伝子座を各作業班の番号と意味付けると、設計変数は工事の種類となり、それぞれの遺伝子座の設計変数候補となる。もちろん各工事毎に担当できる作業班が設定されている場合も同様である。

10進法コーディングの場合、初期線列に現れない設計変数がGAプロセスの過程で生まれる可能性は極めて低い。従って、初期線列に必ず各設計変数が現れる必要がある。その為には、人口サイズを大きく取る必要がある。

TSP型コーディングでは、いわゆるアローダイアグラムで表わされる複数の仕事の先行順番の関係を満足することが可能である。この場合、工事の先行順番の関係が全ての初期線列に現れるように生成する。交叉はTSP型の1点交叉を用い、順番関係を保持しつつ解探索を進める¹³⁾。

スケジューリング問題では、上記のコーディング方法等を単体、もしくは併用して行うことになるが、交叉・突然変異の段階で制約を保持することが重要である。その為、問題の構造によっては、全くランダムに交叉を行うのでは無く、1つの遺伝子線列内の異なるコーディン

グ間で遺伝子座を連動させて交叉を行ったり、遺伝子線列の線列の集合自体に制約を与え、集団を交換する等の工夫¹²⁾が必要になる。

(4) 本研究の位置付け

本研究では、各工事を復旧班が協力して担当することができるスケジューリング問題に対してGAを適用する。この問題は協力復旧問題として、以下の様に整理される。

<協力復旧問題>

○目的関数：

$$f(\{I\}, \{J\}_1, \{J\}_2, \dots, \{J\}_i) \rightarrow \min$$

○制約条件：

$$g(\{I\}, \{J\}_1, \{J\}_2, \dots, \{J\}_i) \leq 0$$

(各被災要素毎に設定される復旧担当機関の協力関係)

○設計変数： $\{I\} = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$

$$\{J\}_i = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_m\} \quad (i = 1 \sim n)$$

この問題は、プロジェクト内の各工事毎に担当できる作業班の制約があり、協力と称して複数の作業班へ工事を同時に配分できる場合において、工事順番とその配分を決定する問題として定義される。あるプロジェクト内に $I_1 \sim I_n$ の n 個の工事があり、適当な数の作業班があり、それらの作業班は互いに協力することが可能である。工事 I_i を担当することが可能な協力体制が m_i 個ある場合、その番号は $J_1 \sim J_{m_i}$ の値となり、各工事を担当する作業班同士の協力体制を意味することになる。各工事にはそれを担当できる作業班の組み合わせが設定され、1つの作業班では能力的に担当できない場合においても、他の作業班と協力することでその工事を担当することが可能になるという関係が存在する。

協力復旧問題における遺伝子線列の構成方法と交叉法については次章に後述するが、これまでに述べてきた分類からは、遺伝子線列の構成は、構造的に制約条件を満足するようにTSP型コーディングと10進法コーディングを用いて行い、制約を満足する交叉・突然変異を行うことになる。

3. 協力復旧問題へのGAの適用

(1) 協力復旧問題

本研究における「協力体制」とは、ある限定された復旧能力を持つ復旧班の組み合わせの考慮を意味し、これにより単独の復旧班では扱えない被災リンクの復旧と、復旧班の協力による復旧能力の相乗効果をモデルに取り込むことが可能になる。

「協力体制」における復旧班の組み合わせ制約については第4章で後述するが、①必要最低限の復旧能力を保有できる復旧班の協力組み合わせ、②被災リンクに到着できる復旧班の協力組み合わせ、の2点を設定している。

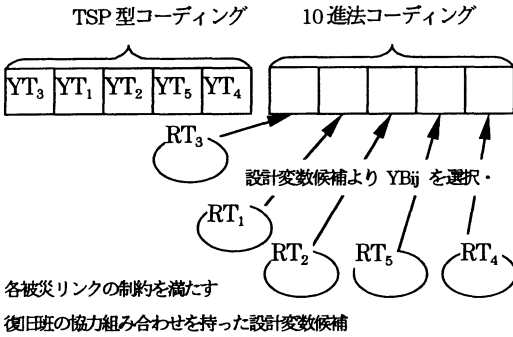


図 - 4 遺伝子線列の設計

①の制約は遺伝子線列の設計変数としてモデルに取りこみ、②の制約は、目的関数で罰金項として取りこむ。

本研究における協力復旧問題では、被災後の道路ネットワークにおいて、 N 個の被災リンク Li ($i=1 \sim N$) を M 個の復旧班 Rj ($j=1 \sim M$) に配分し、効果的な復旧スケジュールを求めることを考える。 Rj は協力する場合があります、 Li を複数の Rj に同時に割り当てる場合もある。

そこで、 Li 毎に Rj の組み合わせ集合 RTi を考えると、以下の問題設定となる。

○目的関数 : $OBJ \rightarrow \text{Min}$

○制約条件 : 被災リンク Li 毎の復旧の組み合わせ
 $RTi \in F$

$F: Rj(j=1 \sim M)$ の全組み合わせ集合 (2^M 個ある)

$RTi: Li$ を配分できる F の部分集合

○TSP 型線列構成部の設計変数:

$YTi(i=1 \sim N)$

○10 進法コーディング部の設計変数候補:

$YBik \in RTi \in F, (k \in 2^M)$

(4)

次項より順に、コーディングと交叉・突然変異について工夫した点を説明する。

(2) 遺伝子線列による協力復旧スケジュールの表現

協力復旧スケジュールを遺伝子線列で表現するために、①被災リンクをどの順番で復旧するか②復旧班はどの班と協力して配分された被災リンクの復旧にあたるか、という2つの異なる情報を遺伝子線列で表現する。遺伝子線列の中に取り組み必要のある情報は、「被災リンク Li の工事順番」と「被災リンク Li の復旧班 Rj への配分」であり、本研究では、TSP 型コーディングと 10 進法コーディングの2つのコーディング法を、1つの遺伝子線列の中に同時に記述し表現する。ここで TSP 型コーディング部分の設計変数は被災リンク Li を意味し、左側の遺伝子座から復旧優先順番が高い、10 進法コーディング部の設計変数は復旧班 Rj の協力組み合わせを意味する。

表-2 全ての班の協力体制を示す設計変数 (4班の場合)

設計変数	協力班	設計変数	協力班
1	1 班	9	2 班・4 班
2	2 班	10	3 班・4 班
3	3 班	11	1 班・2 班・3 班
4	4 班	12	1 班・2 班・4 班
5	1 班・2 班	13	1 班・3 班・4 班
6	1 班・3 班	14	2 班・3 班・4 班
7	1 班・4 班	15	1 班・2 班・3 班・4 班
8	2 班・3 班	16	1 班・2 班・3 班・4 班

表-3 各被災リンク毎の設計変数候補

被災リンク番号①	設計変数	担当復旧班の組み合わせ(RTi)
1	10 14	3 班・4 班 2 班・3 班・4 班
2	11 12	1 班・2 班・3 班 1 班・2 班・4 班
3	6 13	1 班・3 班 1 班・2 班・3 班
.	.	.
7	9 13 14	2 班・4 班 1 班・3 班・4 班 2 班・3 班・4 班

遺伝子線列長は、それぞれの情報を実数で表現するため $N \times 2$ の長さとなる。TSP 型コーディング部の設計変数を $YTi(i=1 \sim N)$ とし、 YTi に対する 10 進法コーディング部の設計変数を $YBik(i=1 \sim N, k \in 2^M)$ とすると、遺伝子線列は図-4 のように構成される。

具体的な例として、復旧班 4 班に被災リンク 7 本を配分する場合を順に説明する。まず、TSP 型のコーディング法で遺伝子線列の前半部をコーディングする。この部分では、設計変数としてリンク番号が、左から順に被災リンクの復旧の優先順番が高いものとして、重なることなく配置される。

○TSP 型 [YT_1 YT_4 YT_2 YT_6 YT_7 YT_3 YT_5]

遺伝子線列の後半部は、10 進法コーディングを用いる。複数の班が同時に 1 つの被災リンクを担当できる協力体制の情報を持つ設計変数がここでは用意される (表-2)。協力体制は、複数の班が同時に 1 つの被災リンクを担当する情報を持つ設計変数を用意し対応する。全ての班が復旧に参加しない場合を含めて、設計変数として 1 から 2^M までの数を用意すると、 M 班まで協力した場合の組み合わせパターンを全て記述できる。表-2 に復旧班が 4 班ある場合の全組み合わせ集合を、協力体制を意味する設計変数として示す。どの班も復旧に参加しない場合はありえないので、ここでは設計変数 16 をダミーとし、設計変数 15 と同じ意味 (4 班全てが協力する情報) として使用する。

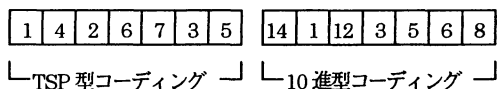


図-5 作成された遺伝子線列

表-4 復旧班への被災リンクの配分と順番

班	復旧するリンク番号と順番
1	④→②→⑦→③
2	①→②→⑦→⑤
3	①→⑥→③→⑤
4	①→②

○：リンク番号

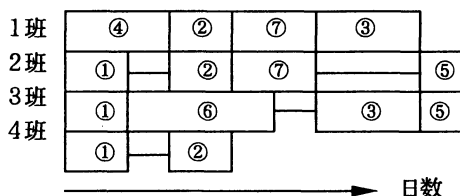


図-6 デコードされた復旧スケジュール

次に各被災リンクの復旧を担当できる復旧班の組み合わせを持つ設計変数候補をリストアップする(表-3)。TSP型コーディング部分の被災リンク番号に対応させて、リストアップした設計変数候補の中からランダムに設計変数を選択し、その被災リンク番号と同じ遺伝子座に代入する。

○ TSP型 [YT₁ YT₄ YT₂ YT₆ YT₇ YT₃ YT₅]

○ 10進型 [YB_{1,14} YB_{4,1} YB_{12,12} YB_{3,3} YB_{7,5} YB_{6,6} YB_{8,8}]

以上の操作で各コーディング部に上記のように設計変数が配置され、図-5に示す遺伝子線列が構成される。

線列前半部の復旧リンク番号と優先順番と、線列後半部の協力を示す設計変数の情報により、遺伝子線列は協力復旧スケジュールに変換できる。図-6に図-5の遺伝子線列を表-3の情報によって変換した場合の復旧スケジュールを示す。

(3) 交叉・突然変異の工夫

本研究では異なったコーディング方法を1つの遺伝子線列中に用いて協力復旧スケジュールを表現している。既存の研究では、交叉はそれぞれのコーディング部に対応する交叉法を用いて、それぞれ独立に行われていた。しかし、本研究の遺伝子線列構成の場合、単純に各コーディング部において、全くランダムに交叉を行なうと、担当復旧班の組み合わせ制約が破られ、復旧不可能な組み合わせ(致死遺伝子)が生成される。そこで設計変数候補の情報を破壊しない交叉法上の工夫が必要となる。

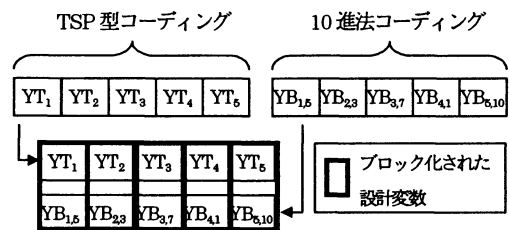


図-7 設計変数のブロック化

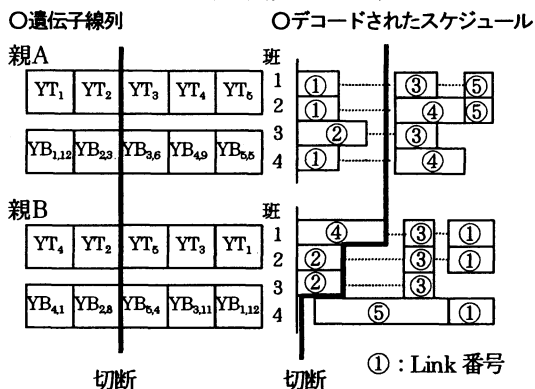


図-8 交叉による切断

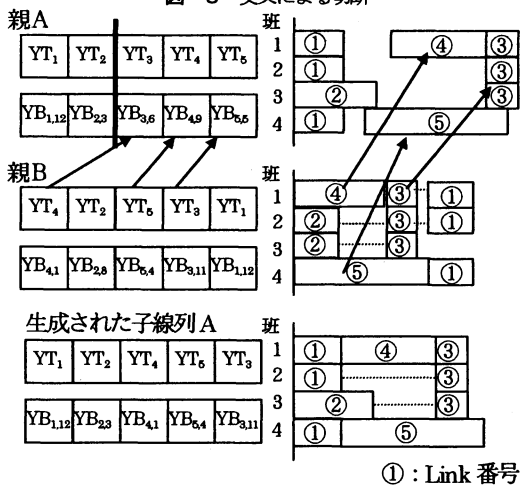


図-9 親線列Aを対象とした交叉

本研究の遺伝子線列では、TSP型コーディングと10進法コーディングの遺伝子線列部の「被災リンク」を示す設計変数と「協力体制」を示す設計変数が、同数用意されている。交叉プロセスでは、これらの設計変数の遺伝子座を連動させることで、常に分離させないように操作する。これは、復旧スケジュールを構成する「被災リンク番号」と「それを担当する担当班」という異なる情報を、1つのブロックとして利用する工夫である(図-7)。この工夫により、GAの解探索過程における、制約条件を満たさない復旧担当班の組み合わせの発生を防ぐ。

以上の概念を用いて、交叉は以下の操作で行われる。
①選択された親遺伝子線列のTSP型コーディング部と

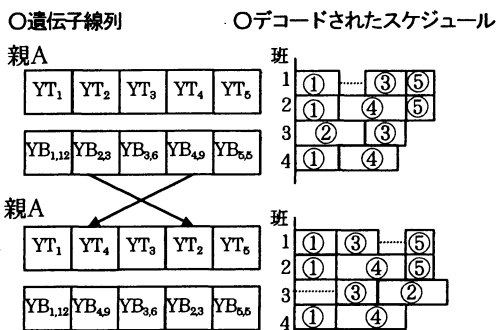


図-10 ブロック概念によるTSP型の突然変異

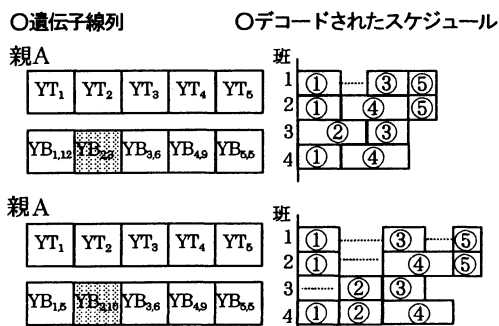


図-11 協力体制情報のみの突然変異

10 進法コーディング部をブロック化し、それぞれ対応する遺伝子座で切断する(図-8)。

②TSP型交叉法と同様に、切断されて分けられた親線列AのTSP型的设计変数と重ならないように、親線列BのTSP型的设计変数を、その含まれるブロックのまま親線列Aへ順番を変えずに入れ替える。

親線列Aを対象として説明する(図-9)。親A的设计変数YTは{1, 2, 3, 4, 5}の順番であり、{1, 2} {3, 4, 5}と切断されている。一方、親B的设计変数YTは、{4, 2, 5, 3, 1}の順番となっている。ここでは、親A的设计変数YT{3, 4, 5}を入れ替えることを考える。親Bの等しい設計変数YTは{4, *, 5, 3, *}の順番で並んでおり、この順番を崩さない様にこの設計変数{3, 4, 5}と入れ替える。その結果、親線列AのYTは{1, 2, 4, 5, 3}の並びとなる。設計変数YBも、それぞれ対応するYTと一緒に入れ替えられる。

交叉はTSP型の各交叉法を用いることができるが、10進法コーディングを用いている以上、第2章(3)の理由により、人口サイズを十分大きく設定する必要がある。

突然変異プロセスでは、①TSP型の突然変異をブロック単位で行なう②10進法コーディング部のみに対して、設計変数候補の中からランダムに設計変数を選択し入れ替える、の2つの方法を用いた(図-10, 11)。①の方法は被災リンクの復旧順番のみを入れ替える突然変異であり、復旧を担当する復旧班は変化しない。交叉の場合

事業名	事業実施機関	建設機械	建設資材	労働力
	事業実施場所	使用期間	使用期間	必要期間
平成 年 月～ 年 月				

図-12 事業実施予定連絡調書

と同様に、TSP型の突然変異をブロックを単位にして用いる方法である。②の方法は被災リンクの復旧順番は変化しないが、復旧を担当する復旧班の協力体制が変化する突然変異である。

4. 協力復旧問題のモデル化

(1) 協力復旧問題のモデル化

本章では、協力復旧問題におけるスケジュールの構築と評価に必要となる被災リンクの復旧所要日数と待ち時間、及び目的関数の算出について具体的にまとめる。問題の定式化においては、一般に数理計画問題における目的関数と制約条件として明記される。目的関数においては第2節で述べるとおりであるが、制約条件に関しては、数理計画を解く段階では与えていない。これは、GAによる離散的組み合わせ最適化問題において、遺伝子線列を生成する段階で、制約を満足する組み合わせのみが生成され、目的関数が計算されるためである。そこで、本節では遺伝子線列への制約の与え方についてのみ述べる。なお次章では、構築したモデルを用いて実際のネットワークを対象としたケーススタディを解く。

災害復旧工事における組織的な協力を行った例として、「北海道南西沖地震奥尻島災害復旧推進連絡会議」を参考にする。この連絡会議の活動内容は、事業実施環境対策の検討、資機材使用料の情報交換と確保対策の検討、予定事業内容の把握と調整等となっている。会議では以下に示す「事業実施予定連絡調書(図-12)」を関係機関、復旧実施業者、建設協会内で提出、公開し、復旧のための需給の見通しをたてた。それぞれの機関の機械、資材、人員の所有数を把握することで、単体の復旧班のみでは対応できない被災箇所の復旧に対応できる組み合わせと投入時期の調整を行なった¹⁴⁾。

以上の例から、本研究における復旧班の「協力体制」とは、復旧班の復旧能力を人員と建設機械、復旧資材に分けて取扱い、これらを効率的に組み合わせることができる復旧体制と定義する。これにより、復旧班の組み合わせによって、単一復旧班では担当不可能な被災箇所の復旧も対応できるスケジュールを構築できる。

本研究で構築した復旧スケジューリングモデルにおける「協力体制」の特徴は、①復旧班の復旧能力と管轄範囲の重なり合いの設定、②復旧班の組み合わせによる復旧能力増加の評価、③最低限復旧に必要とされる復旧班組み合わせの抽出による設計変数の設定、④復旧過程に

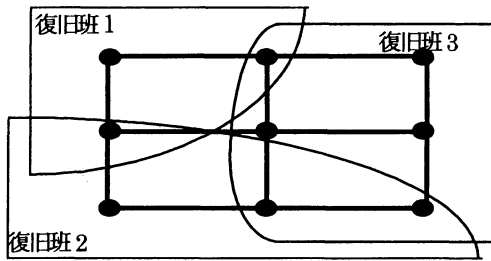


図-13 復旧班の管轄範囲の概念図

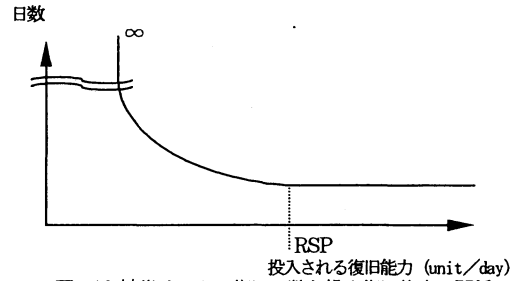


図-14 被災リンクの復旧日数と投入復旧能力の関係

おける復旧班の到達可能ノードの変化、の4点が特徴となる。①は、復旧班の能力制約と移動可能範囲という空間的制約である。②は協力による復旧能力の相乗効果の評価であり、後述する式(5)に対応する。③については復旧班の運用上の組み合わせ制約であり、式(6), (7), (8)により、GA の設計変数として抽出される。④は復旧の進行状況より時間距離的に変化する道路ネットワークに応じて、復旧班の移動範囲の更新を行い、協力する復旧班が被災リンクへ集合するのに必要となる時間を「待ち時間（式(9)に対応）」として取り扱う。第3章で説明した遺伝子線列構造を用いて、これらの要件を満たす協力復旧スケジュールに構成する。構成されたスケジュールは、各被災リンクの復旧完了時間毎の OD アクセシビリティ指標から計算される目的関数(式(11))により評価され、GA により最適化される。

本研究における協力復旧問題のフレームは、以下のよう

a) 被災状況

対象となる被災状況は、①道路ネットワークは自然災害等で地方公共団体の管轄を超えて広域的に被災している②被災リンクの被災量は復旧班単体の処理能力を超える場合がある、の2点を特徴とする。また被災リンクの時間距離は遮蔽物や迂回路等の発生により通常時に比べて長大化している。

b) 復旧班

復旧班はそれぞれに復旧能力を持つ。また、それぞれ基地と管轄のノードを持ち、被災リンクのどちらか一方のノードが管轄のノードの場合には復旧を担当できる。復旧班の管轄範囲は他の復旧班の管轄範囲と重なっていても構わず、重なった管轄範囲内では復旧班が協力して被災リンクの復旧を担当することができる(図-13)。また、各復旧班はそれぞれ人員 HP、建設機械 MP、資材 MA を持つものとする。

$HP_{i,j}$ ($i=1\sim N, j=1\sim M$): 被災リンク i の復旧に参加する復旧班 j の人員数
 $MP_{i,j}$ ($i=1\sim N, j=1\sim M$): 被災リンク i の復旧に参加する復旧班 j の建設機械数
 $MA_{i,j}$ ($i=1\sim N, j=1\sim M$): 被災リンク i の復旧に参加する復旧班 j の復旧資材数

協力時の復旧班の復旧能力は式(5)によって算出する。復旧能力は、被災量の単位を unit として、1 日に処理できる被災量、(unit/day) で表わされる。

$$SUR_{Ai} = \min \left(\sum_{j \in CT_i} HP_{i,j} / \alpha, \sum_{j \in CT_i} MP_{i,j} \right) \times \beta \quad (5)$$

N : 被災リンク数

M : 復旧班数

SUR_{Ai} ($i=1\sim N$): 被災リンク i の復旧に参加する復旧班の協力時の復旧能力 (unit/day)

CT_i ($i=1\sim N$): 被災リンク i の復旧に参加する復旧班 j の集合

α : 1 日の建設機械を扱う人員数

(本研究では1日3交代制とし、3と設定)

β : 建設機械1機あたりの復旧能力 (unit/day)

(本研究では1と設定)

以上により、復旧班の組み合わせ次第では、人員増加によって単独の復旧班では余剰となっている建設機械の利用による相乗効果を検討できる。また資材置き場等のストックは、資材や建設機械を保有するが人員は持たない復旧班として表現することができる。

c) 被災リンクの復旧所要時間

本研究では、各被災リンクの復旧に要する日数は被災リンクの被災量を復旧に当たる復旧班の総復旧能力で除することで算出できるものとする。ただし、担当復旧班の投入人員数・建設機械数・資材数が、最低限必要とされる量に足りない場合、その被災リンクは復旧できないものとする。またある程度以上の復旧能力が1つの被災リンクに集中しても復旧の効率性は上がらないものと考えられ、その値を飽和復旧能力として各被災リンク毎に設定する。最低限必要となる資材量と総復旧能力を、協力する復旧担当班が満たす場合においてのみ、復旧は可能となる。以上の関係を以下に示す。

$$OMNHP_i > \sum HP_{i,j}$$

$$MNMP_i > \sum MP_{i,j}$$

$$MNMA_i > \sum MA_{i,j}$$

のいずれかを満たす場合、

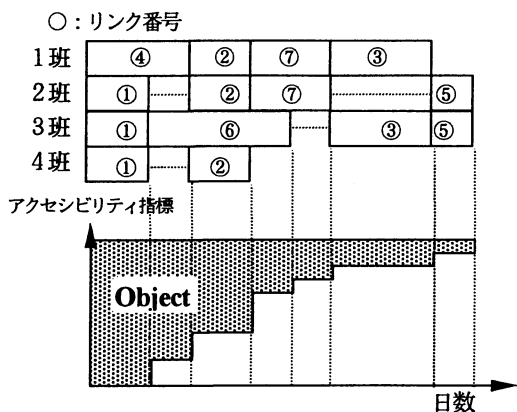


図-15 復旧スケジュールと目的関数値との対応

$$NRDi = \infty \quad (\text{計算上は充分大きな値}) \quad (6)$$

(6) の条件をすべて満たさない場合、以下のように被災リンク i の復旧所要日数が計算される。

○ $SURAi < RSPi$ の場合

$$NRDi = SAI / SURAi \quad (7)$$

○ $SURAi \geq RSPi$ の場合

$$NRDi = SAI / RSPi \quad (8)$$

SAi ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の被災量 (unit)

$RSPi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の飽和復旧能力 (unit/day)

$SURAi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i を担当する複数復旧班となる
総復旧能力 (unit/day)

$MNHPi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧に最低限必要となる
人員数

$MNMPi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧に最低限必要となる
建設機械数

$MNMAi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧に最低限必要となる
資材量 (unit)

$NRDi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧所要日数

以上の条件から各被災リンクの復旧所要日数の計算を行なう (図-14)。式(7)、(8)を満たす各被災リンクの復旧が可能となる復旧班の組み合わせが遺伝子線列の10進型コーディング部の設計変数候補として組み込まれる。

なお、本研究では問題の単純化の為に扱わないが、被災リンク毎に必要なとされる建設機械の種類が異なる場合においても、協力後保有できる復旧班の組み合わせをGA側においてあらかじめ設定することによって対応することができる (第3章(1)参照)。

d) 復旧班の待ち時間

ここでの待ち時間は、被災ネットワークにおいて時間距離的なネットワークの分断が生じている場合、その分断を超えて協力する復旧班の協力体制を含むスケジュールを評価するものである。特にネットワークが時間距離的に完全に寸断されている場合、実際には現場に到着で

きない復旧班の組み合わせが生じる可能性がある。このような組み合わせをGAに制約として取りこむことは難しく、本研究では目的関数的な罰金項により対応する。

被災リンクの復旧に参加する全ての復旧班が現場に到着するまで復旧作業は開始できないものとする。復旧開始に必要な待ち時間は式(9)によって計算される。

$SMTi$ ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧開始に必要な待ち時間 (day)
 CTi ($i=1 \sim N$) : 被災リンク i の復旧に参加する復旧班 j の集合
 MTi, j ($i=1 \sim N, j=1 \sim M$) : 復旧班 j の配置位置から被災リンク i までの最短時間距離 (hour)

$$SMTi = \max(MTi, j) / 24 \quad (j \in CTi) \quad (9)$$

本研究では、復旧班の待ち時間が1日を超えない場合、切り捨てて計算するものとした。

以上を協力復旧問題の基本的なフレームとする。

(2) 目的関数の設定

道路ネットワークの最適復旧問題における代表的な目的関数としては①復旧日数②累積非復旧度¹⁾等が挙げられる。本研究で扱うネットワーク規模と被災状況の復旧は数ヶ月から1年ほどの工期で行われる。その為、単純に復旧日数を最小化する目的関数ではなく、累積非復旧度の観点から目的関数を設定する。また本研究では、リンク重要度等と称されるリンク固有のサービスレベルの概念を用いることを避けた。これは、ノード間の最短時間距離等、復旧順番次第で容易に変動する要件があることから、被災リンクが復旧した時点でネットワーク全体を定量化し、ネットワークの回復過程全体を通して、復旧スケジュールを評価するためである。

対象ネットワークを構成する各リンクは、復旧開始時点では被災により時間距離的に増大化した状態にあり、ネットワーク全体での時間距離性能は復旧により徐々に通常時に回復する。そこで、生成された復旧スケジュールに基づき、各リンクが復旧される毎に回復したネットワークの時間距離を用い、ODアクセシビリティ指標¹⁰⁾を算出する。そして、復旧によるリンクの時間距離の回復による同指標の増加分と被災リンクの復旧完了時間を累積した値を目的関数とし最小化する。

ODアクセシビリティ指標は、対象ネットワークの時間距離マトリクスとODマトリクスを用いて、時間距離の大小順にOD累積比率をプロットすることで得られるOD累積頻度分布曲線を用いて算定する。ネットワーク全体のODアクセシビリティ指標 Si の値はOD累積分布曲線 $Ai(x)$ と限界時間距離 T を用いて算定される。

指標 S を算定するときに曲線 $A(x)$ を定式化すること一般に困難であることから、実際には台形公式等を用いて求められる。

$$S = \int_0^T A(x) dx \quad (10)$$

$\left\{ \begin{array}{l} S : \text{アクセシビリティ指標} \\ T : \text{限界時間距離} \\ A(x) : \text{OD 累積頻度分布曲線} \end{array} \right.$

$$OBJ = \sum_{i \in N} \{ (S_i - S'_i) \times RT_i \} \quad (11)$$

$\left\{ \begin{array}{l} N : \text{全被災リンク集合} \\ S_i : \text{被災リンク } i \text{ が復旧した後のアクセシビリティ指標} \\ S'_i : \text{被災リンク } i \text{ が復旧する前のアクセシビリティ指標} \\ RT_i : \text{被災リンク } i \text{ の復旧完了時間} \end{array} \right.$

なお、本研究で対象とする復旧は災害後の通常時にいたるまで継続される程度の工期で行われる。そのため、災害発生時において発生する緊急車両や物資輸送等の OD 変動は考慮していない。よって、本研究における目的関数は、災害後の緊急活動が沈静化した後の、通常の活動に回復した地域間 OD に関して効果的な復旧過程を評価することになる。

5. ケーススタディ

(1) ケーススタディの目的

本研究は、復旧班（実際には建設業者や国の機関、地方公共団体等がこれにあたる）相互の中・長期にわたる広域的な復旧活動において、協力体制を含み支援できるシステム構築を目的としている。そこで本研究で構築したモデルが、効果的な復旧の為に適切な協力を行う解を探索できるか確認するため、実際にケーススタディを解いた。ケーススタディには、復旧班が所在する複数の地方都市を含むネットワークとして、北海道南西部の国道と都道府県道を含む国道ネットワークを用い、自然災害により複数のリンクが同時に被災したと仮定した。被災箇所と被災内容の設定は、過去の被災履歴等をものに行った。復旧班は公的機関や建設会社の所在を考慮して、ある程度の大きさを持つ地方都市に配置されているものとした。なお、各班の管轄範囲は現実のものではなく、将来的な復旧体制の整備により生じる管轄範囲の重なり合いを考慮して設定している。

(2) 被害状況の設定

被災時のノード間時間距離は通常時の時間距離よりも大きくなるものとして与える。ここでは、平野部の被災リンクでは何らかの迂回路があるものとして数時間の時間距離を与えた。海岸部の被災リンクでは寸断もあるものとして、平地部に比べ大きい適当な値を与えた。これらは、過去のヒアリング調査の結果や被災履歴記録^{16), 17)}より設定しており、日本海側の被災リンクは津波や崩落による被災、平地部では陥没や落橋による迂回の発生記

表-5 被災リンクデータ

被災リンク番号	Node-A	Node-B	被災量 (unit)	飽和復旧能力量	最低限必要な人員数	最低限必要な建設機械数	最低限必要な資材量
1	1	2	937	224	82	25	776
7	2	35	1043	100	33	9	285
14	4	6	330	47	16	3	116
19	6	8	923	80	51	15	467
21	8	9	985	160	79	24	744
23	9	51	479	135	96	30	917
38	17	18	682	203	94	29	890
40	18	22	1027	199	68	21	631
44	21	25	887	124	44	13	398
48	23	24	567	160	56	17	512
50	24	36	717	206	57	17	526
51	25	27	448	75	53	16	482
53	26	28	921	22	18	4	130
80	41	46	940	214	104	33	993
90	48	49	647	247	93	29	883
93	49	57	516	178	96	27	819
100	56	61	1183	84	25	6	239
104	58	59	983	40	34	9	296
105	59	68	613	147	87	27	820
107	61	62	933	238	99	31	949
116	65	66	622	114	80	25	751
117	66	73	715	148	46	13	411
118	66	92	481	23	16	5	50
124	72	90	479	182	89	28	848
149	86	87	1118	114	97	30	925
154	91	94	439	46	24	13	90
169	107	108	229	132	39	11	342
170	108	109	3000	56	75	45	433
171	109	110	2560	153	89	41	441

表-6 復旧班データ

復旧班	人員数	建設機械数	資材量	配置ノード
1	210	50	470	1
2	20	10	370	1
3	50	30	570	4
4	110	40	600	10
5	53	20	130	19
6	160	60	650	31
7	50	20	270	49
8	40	20	470	94
9	80	50	570	81
10	160	60	850	81

録等の時間距離を考慮している。使用した OD は平成 2 年度全国道路交通情勢調査から設定した。被災リンクデータを表-5 に示す。

復旧班数は、ネットワークに含まれる地方都市数より 10 班とし、それぞれ配置される基地と管轄範囲を設定した。復旧班のデータを表-6 に、対象ネットワークと被災リンクの位置、復旧班の管轄範囲を図-16 に示す。各被災リンクは、全くランダムに配置するのではなく、時間距離的な孤立地区が発生する様に配置した。例えば、孤立地区を発生させるために、並行に配置されたリンク 105 番と 107 番を被災リンクとし、ネットワークを大きく分断させた。また、ノード番号 25 を被災リンクで囲み、局地的な孤立地区を発生させた。

(3) GA の各パラメータの設定

GA の各パラメータ設定は人口サイズ 100, 200, 300 についてそれぞれ計算を行った。また、最大世代数 100, 交叉確率 0.6, 突然変異確率 0.05, 淘汰係数 2.0 とした。収束条件は世代数が最大に達したときとした。なお、突然変異は TSP 型の突然変異をブロック単位で行なう方法（第 4 章（2）の②の方法）とした。ここでは、人口サイズ 100, 200, 300 において結果が大きく違わなかったことと、後述するモンテカルロ法との比較のために、GA での目的関数の計算回数が同程度となる人口サイズ 200 の場合を記述する。

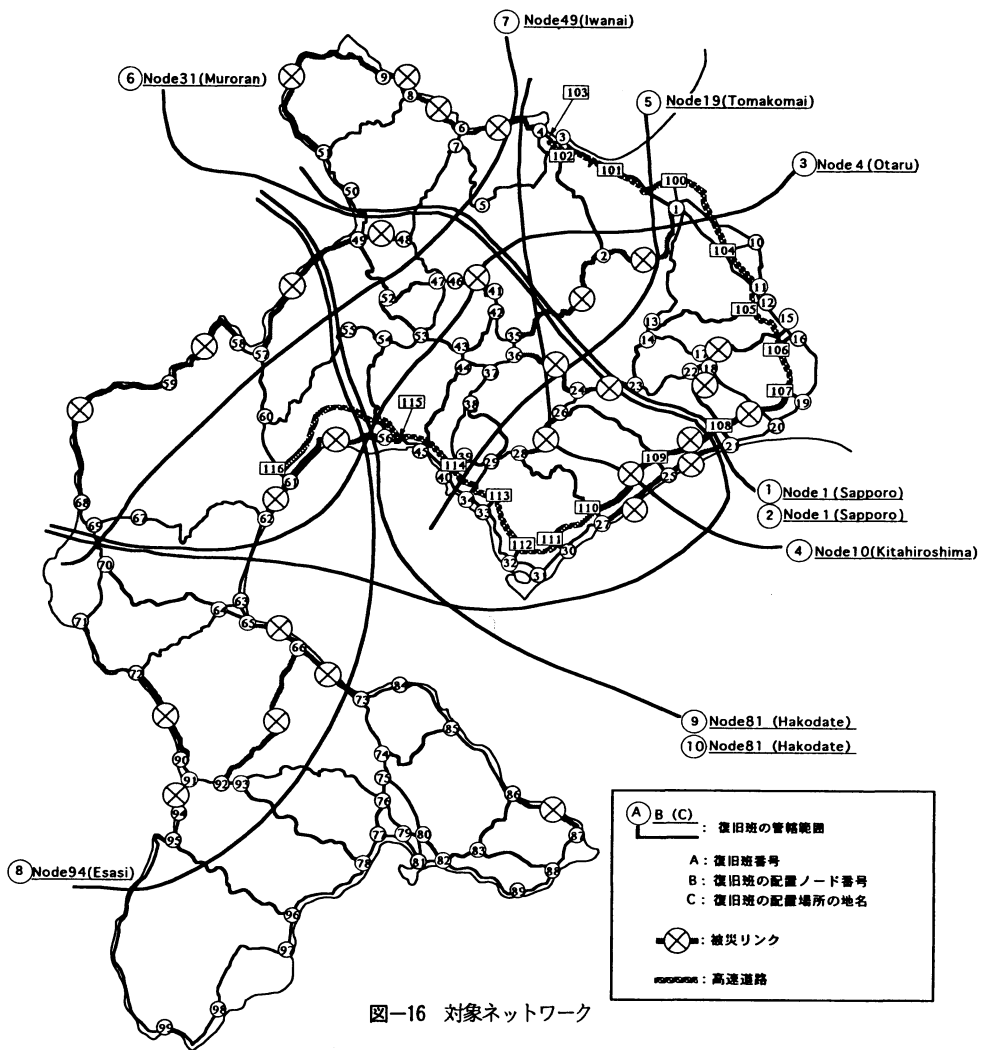


図-16 対象ネットワーク

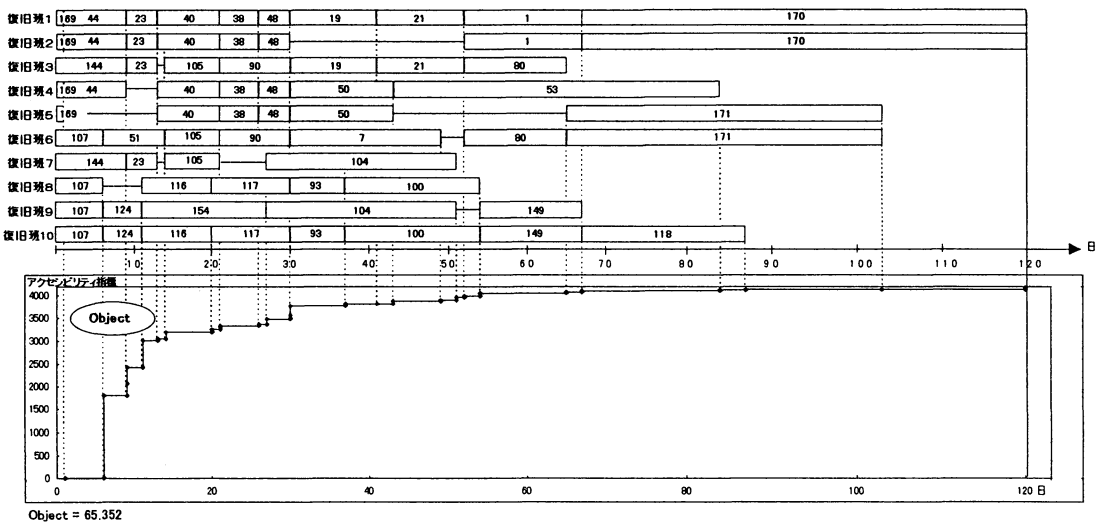


図-17 デコードにより得られた協力復旧スケジュールと目的関数の関係

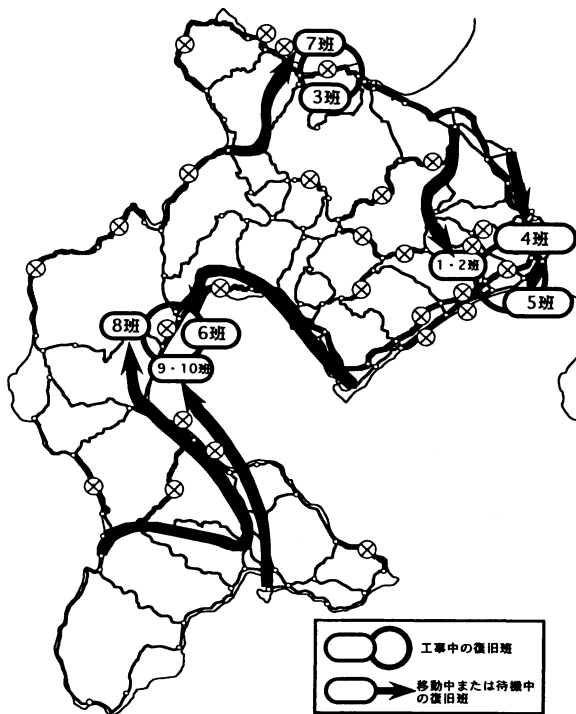


図-18 復旧開始直後の復旧状況

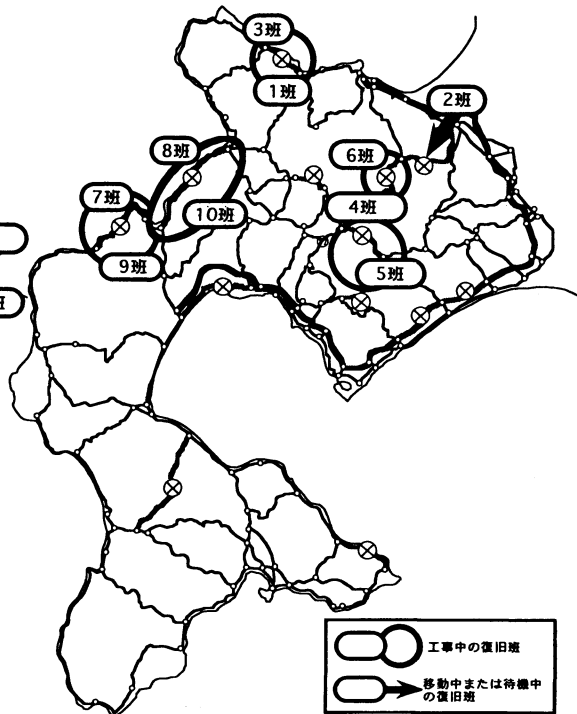


図-19 復旧30日目の復旧状況

(4) 計算結果

GA によって得られた最良な遺伝子線列をデコードして得られた協力復旧スケジュールと、OD アクセシビリティ指標の回復過程の関係図を図-17に示す。また、図-18, 19に復旧過程における各復旧班の行動を示す。

本研究では、孤立を復旧早期に解消した場合に良好な値を与える目的関数を設定している。よって、復旧開始直後は各班が協力して時間的な孤立を解消する様に被災リンクを選択している。例えば、復旧班9・10は、配置ノード81(函館)から被災リンク117, 116の迂回路を經由して、ネットワークを分断する被災リンク107を、復旧班6・8と協力して復旧している。また復旧班1・2・4・5は、被災リンク169を復旧した後、復旧2日目から局地的な孤立を解消する被災リンク44を復旧している。

復旧30日目には、各復旧班は被災リンク48, 90, 117の復旧を同時に完了している(図-17)。これにより、OD アクセシビリティ指標は、平常時の約8割程度に回復している。また、道南部のネットワークの復旧が、ほぼ完了していることが、図-19より確認できる。

図-20はGAによる解の収束状況である。80世代あたりから収束が始まっていることが確認できる。

また本研究では、GA適用の有効性と、工夫した遺伝子線列の効果を確認するために、同様の計算をモンテカル

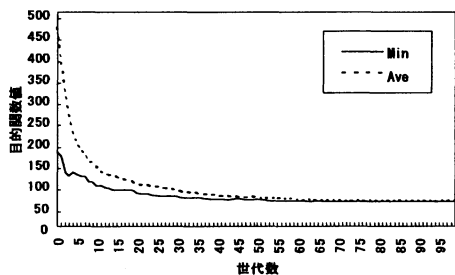


図-20 解の収束状況

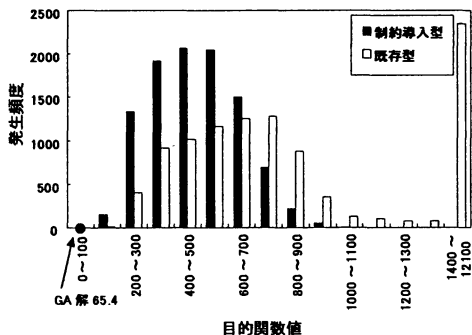


図-21 モンテカルロ法による解の発生頻度分布

ロ法で行い、結果を比較した。図-21はモンテカルロ法による解の発生頻度分布である。モンテカルロ法による分析回数はGAによる計算時間と同程度の10000回と設定した。GA解が65.4、モンテカルロ解が173.0と、GA

が明らかに良好な目的関数値を持つ組み合わせを探索したことが確認できる。また、制約条件を満足する遺伝子線列構成と満足しない既存の構成においてランダムに遺伝子線列を発生させ比較した結果、本研究の遺伝子線列の設計により、探索する解空間が目的関数値的に良好な方へ移動したことが確認できる。既存の遺伝子線列設計の解の発生頻度分布では、目的関数値が 1400 以上の場合が多く発生している。交叉や突然変異により、これらの組み合わせが容易に発生しうること考えると、本研究の遺伝子線列設計は、これらの組み合わせを生成しない点で GA の解探索を効率化させたといえる。

以上、①デコードにより得られた復旧スケジュールが妥当な組み合わせを示したこと、②GA による解の探索過程において 80 世代以降探索解が安定して収束していること、③モンテカルロ法によって探索解空間の縮小を確認したこと、によって本研究で得られた GA 解の近似解としての有用性を確認できた。

6. 結論

本研究は、協力による組織的な復旧最適化モデルを構築し、それを解くことを目的としていた。本研究の成果は以下の 4 つにまとめられる。

- ①スケジューリング問題における遺伝子線列の設計方法について整理し、複数の復旧班が協力する復旧過程の最適化問題への GA の適用を示した。
- ②協力復旧問題として、遺伝子線列が常に復旧班の組み合わせ制約を満足するコーディング・交叉・突然変異プロセスの工夫を示した。
- ③GA での目的関数の評価モデルとして「復旧班の人員」、「建設機械」、「復旧資材」、「復旧班の配置場所」、「管轄範囲」、「被災リンクの被災情報」、「被災ネットワーク形態」の 7 つを変数として自由に扱えるモデルを構築した。
- ④ケーススタディとして国道レベルの道路ネットワークを用いて計算を行い、本研究の工夫による解精度の向上を確認した。

本研究では、アクセシビリティの回復を単一の目的関数として設定し、協力復旧問題の最適化を行った。しかし現実場面では、ライフライン復旧との連携や緊急車両のルート確保等、ネットワーク規模や復旧場面に応じて復旧の目的が様々に変化するであろう。各場面での適切な目的関数と復旧を担当する諸機関の関係を明確にし、復旧過程全体を構築することが可能であれば、多目的最適化問題として GA を適用することができる。以上は今後の課題となる。

研究 (A)、及び文部省学術フロンティア推進事業による助成を受けて行なった。

参考文献

- 1) 山田善一, 家村浩和, 野田茂, 伊豆野和行: 「道路交通網の震後復旧過程の評価」, 土木学会論文集, No. 368/I-5, pp. 355-362, 1986 年 4 月。
- 2) 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アルゴリズム」, 土木学会論文集, No. 450/I-20, pp. 171-180, 1992 年 7 月。
- 3) 川島一彦, 杉田秀樹: 「広域震災を受けた道路ネットワークの復旧過程予測システムの開発」, オペレーションズリサーチ, pp. 57-61, 1993 年 2 月。
- 4) 杉本博之, 片桐章意, 田村亨, 鹿沢麗: 「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, pp. 517-524, 1997 年。
- 5) 有村幹治, 上西和弘, 田村亨, 杉本博之, 榎谷有三: 「都市時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル」, 土木計画学研究・論文集, pp. 333-340, No14, 1997 年 9 月。
- 6) 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の最適復旧過程に関する研究」土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 245-256, 1996 年。
- 7) 田村亨, 榎谷有三, 斎藤和夫: 「遺伝的アルゴリズムによる駐車場の最適配置」, 第 29 回日本都市計画学会学術研究論文集, No52, pp. 307-312, 1994 年。
- 8) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 「遺伝的アルゴリズムの道路整備順番決定問題への応用」, 土木学会論文集, No. 482/IV-22, pp. 37-46, 1993 年。
- 9) 杉本博之, 田村亨, 長濱祐朗: 「GA による高速道路網の新設路線工事の順番決定について」, 第 4 回システム最適化シンポジウム講演論文集, pp. 61-66, 1995 年。
- 10) 波多野寿昭: 「GA による最適化」, 計測と制御, 第 32 巻, 第 1 号, pp. 52-53, 1993 年 1 月。
- 11) 小林重信: 「遺伝的アルゴリズムの現状と課題」, 計測と制御, 第 32 巻, 第 1 号, pp. 2-9, 1993 年 1 月。
- 12) 山村雅幸, 小林重信, 山岸誠, 阿瀬始: 「遺伝的アルゴリズムによるナースケジューリング」, pp. 89-125, 遺伝的アルゴリズム, 北野宏明編 産業図書, 1993 年。
- 13) 古田均, 杉本博之, 井上泰具, 横田哲也, 廣瀬章則, 中谷武弘: 「中長期事業計画問題への GA の応用」, 構造工学論文集 pp. 497-502, Vol. 44A, 1998 年 3 月。
- 14) 函館開発建設部企画課: 北海道南西沖地震奥尻町復旧公共事業推進連絡会議活動の記録, 1996 年 3 月。
- 15) 榎谷有三, 田村亨, 斎藤和夫: 「道路網を対象とした時間距離行列の視覚化」, 土木計画学研究・論文集, No12, pp. 567-574, 1995 年 8 月。
- 16) 北海道開発局建設部道路維持化監修: 平成 5 年釧路沖地震道路被害記録報告書。

謝辞: 本研究は平成 10 年度文部省科学研究費特定領域

17) 北海道開発局釧路開発建設部：平成6年（1994年）10月4

日北海道東方沖地震国道災害記録

(1998.7.9 受付)

THE RESTORATION MODEL OF THE DAMAGED ROAD NETWORK BASED ON THE COOPERATION OF THE IMPROVEMENT TEAMS.

Hiroyuki SUGIMOTO, Tohru TAMURA, Mikiharu ARIMURA and Kazuo SAITO

That is one of important problem for rapidly recovering of damaged road network to decide systematic restoration by several operation teams. However, for optimization of systematic restoration, it is necessary to solve the order of improvement and the combination of restoration teams simultaneously. The purpose of this paper is to develop a restoration optimization model which can manage cooperation by several teams, and to solve a restoration process systematically in national highway network by using Genetic Algorithms(GA). GA process is customized for this cooperation problem by two coding methods in one gene string. As the case study, the road network of South-West Hokkaido is applied, and the effect of this idea is confirmed.