

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

ON SUPPORT SYSTEM FOR RESTORATION PROCESS OF DISASTER-STRICKEN LIFELINE NETWORK BY GA

杉本博之*、片桐章憲**、田村亨*、鹿汴麗**

Hiroyuki SUGIMOTO, Akinori KATAGIRI, Tohru TAMURA and LU Bianli

- *工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)
 ** 北海学園大学博士前期課程 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)
 +工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)
 ++工修 室蘭工業大学博士後期課程 工学部情報工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

The supporting system of restoration process of disaster-stricken lifeline network by genetic algorithm(GA) is proposed. It is assumed in this study that a lifeline network suffers from natural disaster and many parts of the network are damaged not to function well. It is supposed that one link of the network suffers from the plural damages and one of the damages must be restored after the restorations of other damages are completed. This is called as time stratum of damage in this paper. The optimum order of the restoration works with the time stratum and the optimum arrangement of the restoration squads can be determined simultaneously by GA method of this paper. As an example, the road network of 256 nodes and 480 links with 88 damages and 16 squads is solved.

Key words : GA, life-line network, restoration process, time stratum damages

1. まえがき

現代の市民生活は、種々のライフラインの健全な運用のもとに成り立っており、それらのライフラインはそのある部分の機能の向上あるいは低下が他に影響を及ぼす複雑なネットワークを形成している。それらは、考えられるすべての自然災害に対して安全のように設計されるが、すべてのライフラインが最新の設計理論で設計されているわけではない。また最新の設計理論にしても、その安全性を無限に取ることは経済的に許されず、あくまでも経済論理とのトレードオフで決定されなければならないことを考えれば、今後ともライフラインは何らかの被災は受け得ることを前提にした、総合的な防災工学の確立は必要であると考えられる。

複数箇所の被災を受け機能を発揮できなくなったライフラインは、当然復旧作業が要求される。その時、どの復旧班がどこかの被災箇所を担当するかという問題(配分問題)と、どのような順番で被災箇所に手をつけるかという問題(スケジューリング問題)が発生する。担当班の配分も全体の効率に大きく影響するが、順番付けの問題もその結果によっては全体の効率に大きく影響することは、道路ネットワークの順位決定に関する研究ですでに指摘されている¹⁾²⁾。また、本研究のこれらの2種類の問題の解の最適性は、相互に強く関連するので、別々ではなく同時に解かれることが望ましい。

本研究は、あるライフライン系ネットワークの複数箇所が被災を受け本来の機能を発揮できなくなった状態を

想定し、それらをもとの状態に復旧するための作業において、複数の復旧班の適正配分、および適正な着工順を遺伝的アルゴリズム(GA)を応用して同時に決定することを試みるものである。

震災を受けた道路ネットワークの復旧問題にGAを応用した佐藤ら³⁾の研究、あるいはやはり震災を受けた電話網の復旧予測にニューラルネットワークを応用した野田らの研究⁴⁾があるが、本研究では更に、

ネットワークの復旧支援に関する一般論として、

- ①復旧班の最適配分と最適着工順位の同時決定。
- ②一つの被災箇所でも、その内容は1種類の被害ではなく複数の被害があり、それらの間には時間的に階層的な関係がある。その復旧内容の時間的階層性の考慮。がGAのコーディングにおける処理により可能であることを示している。

更に数値計算例として、道路ネットワークの復旧を取りあげているが、そこでは、

- ③ウォーシャル・フロイド法⁵⁾の応用による、復旧の進展に伴い、復旧班が被災地に到達できる時間(最短距離)を逐次更新すること。
- ④復旧工事の規模、内容と復旧班の能力の関係によっては、担当できない復旧班があることを考慮すること。
- ⑤復旧計画が完成する前にすでに着工されている被災箇所、着工している復旧班があることを考慮すること。なども容易に組み込むことが出来ることを示している。

数値計算例として、256ノード、480リンクから構成

される道路ネットワークが震災を受けたことを想定し、道路上の遮蔽物撤去作業38か所、補修作業50か所の問題を解いている。

2. 被災モデル

ライフラインには、上・下水道、ガス、通信、あるいは道路等の交通施設があるが、それらが地震等の自然災害を受ける場合、1種類の被害に限定されることは考えられず、複数のライフラインが同時に被害を受けると考えられる。それらの被害の復旧工事は、同時に着工できるものと、時間的に階層関係にあり、一つが処理できないと次の段階に進めないという場合がある。後者の状況を被害の時間的階層性とよぶことにする。例えば、下水道と道路が同時に被害を受けている場合、道路が開通しなければ下水道の被災箇所到達できないとか、あるいは、後記の計算例のように、道路網だけの復旧工事を考えても、道路本体自身の被害と、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、担当する復旧班の性格もおのずと異なり、道路上の遮蔽物を撤去しなければ道路本体自身の復旧作業は出来ない等である。

本研究が対象とする被災モデルは、この時間的階層関係にあるライフライン系ネットワークの被災の復旧である。これは、時間的に階層関係にない被災モデルをも含む概念であることは当然である。

記号を使って表現すると、以下のように定義される。

ある地域に災害が発生し、その地域の1つあるいは複数のライフラインに、N層の時間的階層関係のある被害が、各層毎に n_i ($i = 1 \sim N$) 件発生した。この被害を復旧するために、各層の被害内容に対応するN種類の復旧班が活動可能であり、それぞれ m_i ($i = 1 \sim N$) 班待機している。これらの復旧箇所と復旧班を、

$$\left. \begin{aligned} D^{i_j} \text{ (復旧箇所)} : j = 1 \sim n_i \\ R^{i_k} \text{ (復旧班)} : k = 1 \sim m_i \end{aligned} \right\} i = 1 \sim N \quad (1)$$

とすると、決めるべきことは、時間的階層性を考慮した上で、 D^{i_j} ($j = 1 \sim n_i$, $i = 1 \sim N$) をどのような順に手をつけるかということと、それらを R^{i_k} ($k = 1 \sim m_i$, $i = 1 \sim N$) にどのように配分するかということになる。

この最適順序、最適配分の問題には、その善し悪しを評価する目的関数が必要となる。それは、被害内容に依存することになり、その評価法の一般的な定義はできない。第4章で、本研究で例題として検討した道路ネットワークの復旧の問題を例に取り、目的関数の計算法を説明するが、ここでは、単に復旧内容を評価する目的関数Fがあるとし、それを最小あるいは最大にするように、式(1)の復旧箇所の着工順序と復旧班の配置が決められるとする。

3. 設計変数のコーディングとGA

GAは、組合せ問題⁶⁾⁷⁾、およびスケジューリング問

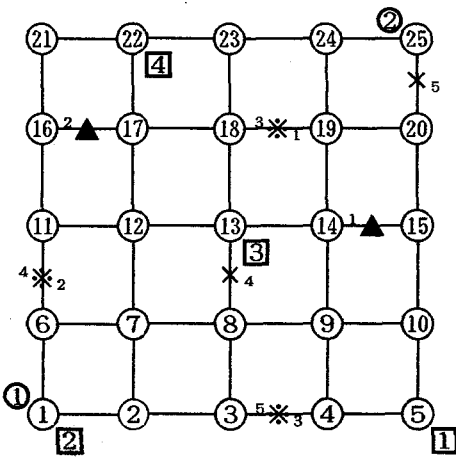


図-1 コーディングのための被災モデル

題¹⁾²⁾にそれぞれ対応して応用され、その有効性を示してきたが、本研究のようにスケジューリング問題と組合せ問題(配分問題)が混在する場合にも、コーディングおよび交叉法を工夫することにより比較的容易に応用できる。

この問題は、N種類の被災内容を持ち、それぞれ n_i ($i = 1 \sim N$) 箇所の被災箇所と m_i ($i = 1 \sim N$) の対応する復旧班がある。そこで、GAの線列(string)をまずN個のブロックに分け、各ブロック内でそれぞれ前半に工事順位を10進数で、後半に復旧班の担当工事箇所を2進数でコーディングすることにする。線列全体の概念を表-1に示した。

表-1 コーディング

復旧作業 a		復旧作業 b		...	復旧作業 N	
順位	復旧班	順位	復旧班		順位	復旧班
10進	2進	10進	2進		10進	2進

コーディングの例として、図-1に示す25ノード50リンクのネットワーク上に、時間的に先行しなければならないaという復旧工事5か所(▲と✖)、そのための復旧班2班(ネットワーク外の○)、内容的にaと異なる復旧工事b5か所(✖と✖)、そのための復旧班4班(ネットワーク外の□)がある場合の線列とその意味を説明する。なお、図-1において、▲が復旧工事aのみ単独、✖がbのみ単独、✖がa、b両方の復旧が必要な場所である。各記号の左上の数字がaの工事番号、右下の数字がbの工事番号である。同一被災箇所にa、b両方ある場合は、aを先行しなければbはかかれないことになる。この時の線列の1例を示すと以下ようになる。

| ← 復旧作業 a → | ← 復旧作業 b → |
[5 2 1 4 3 1 0 1 0 0 1 5 2 4 3 0 0 10 01 11 01]
| ← 順位 → | ← 復旧班 → | ← 順位 → | ← 復旧班 → |

上記の線列のうち、2進数で表現している復旧班を10進数で表す（2進数の0は1班に対応する）と、以下のように変換できる。

| ← 復旧作業 a → | ← 復旧作業 b → |
 [5 2 1 4 3 2 1 2 1 1 1 5 2 4 3 1 3 2 4 2]
 | ← → | ← → | ← → | ← → |
 順位 復旧班 順位 復旧班

ここで、復旧班の数字の並びは班の番号であり、それぞれ左の工事番号に対応し、対応する工事を担当することを意味する。例えば、復旧作業 a の 2 班は工事 5 と 1 をこの順で担当することになり、復旧作業 b の 2 班は、復旧作業 2 と 3 をこの順で担当することになる。

まとめると、各復旧工事毎の各復旧班の担当工事と工事順は表-2 のようになる。

表-2 線列の意味

復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事 a	1 班	2 → 4 → 3
	2 班	5 → 1
復旧工事 b	1 班	1
	2 班	2 → 3
	3 班	5
	4 班	4

これで、各班への工事の配分と工事順が決まったことになる。時間的階層性は、表-2 のもとでそれぞれの目的関数の計算で考慮することになる。上の例では、復旧工事 a の 3 と復旧工事 b の 1 は同一箇所であるので、前者を時間的に先行しなければならないから、復旧工事 b の 1 班の工事 1 は、復旧工事 a の 1 班の工事 3 が終わらなければ着工できない等である。

以上のようなコーディング法により、時間的階層性がある問題の復旧工事の順序と、担当復旧班の決定が同時にできることになる。

次に交叉法であるが、スケジューリング問題と組合せ問題が混在しているので、各設計変数のグループ毎に交叉する多点交叉法⁹⁾を用いることにする。

N 種類の復旧工事がある場合、上記に説明したように線列 i、j は下のようにコーディングされる。

線列 i

復旧作業 a		復旧作業 b			復旧作業 N	
順位	復旧班	順位	復旧班		順位	復旧班
	前 後		前 後			前 後

線列 j

復旧作業 a		復旧作業 b			復旧作業 N	
順位	復旧班	順位	復旧班		順位	復旧班
	前 後		前 後			前 後

この 2 つの線列が交叉されるとする。まず、復旧作業の内容にかかわらず、順位の部分、一般のスケジューリング問題の場合の交叉法^{1) 2)}が適用される。復旧班の部分の交叉法は、各復旧作業毎に 1 点交叉されるが、それぞれ切断点の後半だけを入れ替えては、前半の部分の関係が変わらないことになる。そこで、復旧班の部分の交叉は 1 点交叉で行うが、切断点の前を入れ替えるか後ろを入れ替えるかは 50% の確率で行うことにする。

突然変異は、該当の線列において、やはり各復旧工事内容毎に、順位の方は任意の 2 つの値の入れ替え、復旧班の方は、0 なら 1 に 1 なら 0 に入れ替える操作を行っている。

以上が、2 章で説明した本研究で対象としている被災モデルのための GA の理論的な説明である。考え方の一般性を優先させるために、問題に依存する目的関数の説明は最小限にとどめた。

次章では、本章の考え方をより深く理解するために、道路ネットワークの問題を例に取り、時間的階層性がある場合、およびその他道路ネットワークに関係する事項を考慮した場合の目的関数の計算法について説明する。

4. 道路ネットワークの復旧評価関数の計算

4.1 道路ネットワークの復旧作業

本研究のライフライン系被災ネットワークの復旧問題は、式 (1) の設計変数を表-1 のようにコーディングすることにより、無制約の最小化あるいは最大化問題に帰結できる。これにより、復旧班の適正配分と復旧工事の適性順序を同時に決定でき、また被災内容の時間的階層性も考慮できる。つまり、複数のライフライン系の相互の関係を考えた復旧プロセスの決定にも応用できるし、以降に説明するように、一つのライフラインの中に時間的階層性のある被害を受けた場合の復旧プロセスの決定にも応用できることになる。その実用性が問われるのは、第 2 章で触れた目的関数 F の内容であり、それはとどのつまり復旧の評価関数の中身が問われることに過ぎない。復旧評価関数の設定に当たっては、どのような離散性、不連続性があってもまったく問題がなく、できるだけ実用に耐え得る評価関数の設定が可能である。

これが、本研究のみならず構造設計に GA を応用する場合等においても、GA の最大の特長といえる。

一つの例として、道路ネットワークを例に取り上げ、本研究で設定した復旧プロセスの評価関数を説明する。

これは、ある地域が震災を受けたとし、その地域の道路ネットワークに 2 種類のそれぞれ程度が異なる被災が数カ所に発生した状態を想定している。被災内容は、一つは地震による道路本体自身の破壊であり、もう一つは道路上に倒壊した付近の構造物、施設等の撤去作業である。同一箇所であれば後者が終わらなければ前者は着工できない。それぞれの被災内容に対応する復旧班は地域内外に健在であるが、その能力にはばらつきがあり、大

規模な被災に対しては能力の低い復旧班は対応できないとする。また、復旧プロセスの計画が完成する前に、すでにいくつかの復旧班は独自の判断で復旧作業に入っていると。復旧の進行に伴い、道路は徐々に開通してくるが、それに伴い、各復旧班が被災地に到達する最短経路は変化し、復旧班は常に最短経路を通して現場に行くものとする。

4.2 目的関数

各道路（リンク）には、あらかじめ重要度が与えられているとする。それを w_i ($i=1 \sim n_L$)とする。 n_L は対象とする道路ネットワーク内の総リンク数である。

復旧作業が開始されてから q 日経過した時の復旧の程度を、道路重要度で重みをつけたリンク距離で表すと、復旧率 $R^{(q)}$ は次式で定義される。

$$R^{(q)} = \frac{\sum_{i \in J^q} w_i \times \ell_i}{\sum_{i \in J^0} w_i \times \ell_i} \quad (2)$$

ここで、 ℓ_i はリンク i の距離、 J^0 は被災を受けたリンク番号の集合、 J^q は J^0 のうち q 日までに開通したリンク番号の集合である。

この復旧率と復旧日数との関係は図-2のようになるが、この図において、網掛の部分の面積、つまり非復旧日面積を、この例では目的関数（最小化）とした。

これは、市民サービスを考慮すると、同じ復旧日数でも下に凸な復旧率よりも上に凸な方が良いことと、復旧日面積の最大化とすると、復旧日数が大きくなる可能性

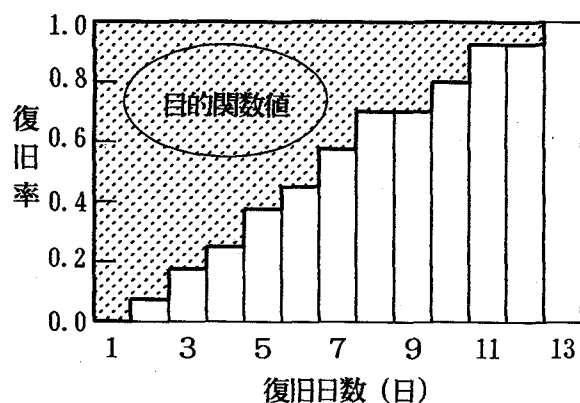


図-2 復旧率と復旧日数の関係

が考えられるためである。

4.3 復旧日数の計算

各線列は、表-2のような意味を持つから、各復旧工事間の時間的階層性を考慮して、毎日の復旧率を計算できる。この時、復旧計画ができる前にすでに開始されていた工事があれば、該当の復旧班の、線列から決められる最初の工事の前にその工事をいれて考えれば良いだけである。

各復旧工事を完了するのに必要な復旧日数 d は、次式で計算される。

$$d = h / t_1 \quad (3)$$

ここで、 h は復旧工事を完了するのに必要な復旧時間であり、図-3に概念を示すように、被災の規模と担当する復旧班の能力により次式で計算されるものとする。

①小規模被害；小規模な被害であり、復旧班の能力差が出ず、一定の時間 h_t （以下の計算例では4時間）で完了する被害。

$$h = h_t \quad (4.1)$$

②中規模被害；中規模な被害であり、復旧班の能力差が出るが、現存の復旧班はすべて対処できる程度の被害。

$$h = D / A \quad (4.2)$$

ここで、 D は被害量、 A は復旧班の能力値（1時間に処理できる被害量）である。

③大規模被害；大規模かつ大型重機等が要求され、ある程度以上の能力値がないと対処できない被害。

$$\left. \begin{aligned} h &= \infty & (A < A_0) \\ h &= D / A & (A \geq A_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

ここで、 A_0 は大規模被害を担当できる最低能力値（以下の計算例では、13/時間）である。

t_1 は、復旧班の1日の復旧工事のための作業時間であり、次式で計算される。

$$t_1 = t_0 - 2t_m - h_0 \quad (5)$$

ここで、 t_0 は移動時間も含めた、復旧班の1日の労働時間（以下の計算例では、12時間）、 t_m は移動に要する時間で、復旧班の常駐場所から工事現場までの最短距離を L (km)、復旧班の移動速度を v (km/h)、以下の計算例では10km/h)とすると、

$$t_m = L / v \quad (6)$$

となる。 h_0 は準備等の時間で、各工事毎に必ず必要な

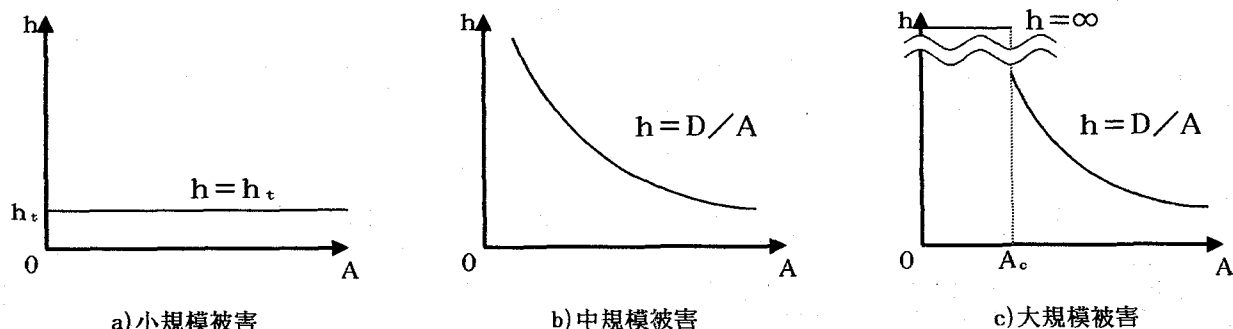


図-3 被害規模毎の復旧必要時間と復旧班能力の関係

時間（ $h_0 = 2$ 時間）である。

4.4 最短距離の計算

式（6）の L は、復旧班が道路ネットワークの特定のノードに常駐しているとし、そこから被災箇所が含まれるリンクの両端のノードまでの最短距離の短い方を取っている。最短距離は、ウォーシャル・フロイド法⁵⁾より求めている。

図-4の9ノード12リンクの道路ネットワークで、リンク1が被災を受けて通れない場合を例に取る。この場合、各リンクの距離はすべて1kmとしている。

ウォーシャル・フロイド法に必要な初期情報は、表-3に示す各ノードが接続している隣のノードまでの距離のみである。この場合、リンク1が切れているので、ノード1と2の間の距離はとりえず空白（表では網掛）となる。この初期情報をもとに、数回の繰返し表計算により、表-4のノード間最短距離が得られる。

復旧工事の進捗にともない、通れなかった道路が開通し、ノード間最短距離も改善されなければならない。しかし、どこか一つの道路（リンク）が開通する度に、ウォーシャル・フロイド法を使うのでは、計算量が膨大になる。上の例では、リンク1が開通すると、表-3の網掛の部分をもとにおき直して繰返し計算をすることを意味する。そこで、本研究では、以下のようにして1リンク開通後の最短距離の計算を簡単にした。

新しい最短距離は、次式で求まる。

$$L_{ij}^n = \min (L_{ij}^o, L_{ij}^*) \quad (7)$$

ここで、 L_{ij}^n がノード i j 間の更新された最短距離、 L_{ij}^o は更新前のノード i j 間の最短距離、 L_{ij}^* は次式で計算される距離である。

$$L_{ij}^* = L_{ii}^o + L_{jj}^o + \ell_{ij} \quad (8)$$

ここで、 I 、 J が新しく開通したリンクの両端のノード番号、 ℓ_{ij} がそのリンクのリンク距離である。図-4の場合、 I 、 J が①、②、 ℓ_{ij} が1kmとなる。 L_{ii}^o および L_{jj}^o はそれぞれ、更新前の状態の、ノード i I 、ノード j J 間の最短距離である。この考え方により、初期状態（被災直後）のノード間最短距離が得られれば、復旧作業に伴うノード間最短距離の更新は格段に楽になった。表-5に、図-3においてリンク1が開通した場合のノード間最短距離の結果を示す。

5. 256 ノード480 リンクの道路ネットワークの計算例

数値計算例として、図-5に示す256ノード、480リンクの道路ネットワーク上に多数の被災を受けた場合の復旧プロセスの問題を説明する。

ノード数が256あるので、表-3～5に対応する表は256×256になる。リンクの距離はすべて1kmである。

被災モデルは、図-5に示すように、38か所において（※）道路上に遮蔽物が倒壊し、50か所において（※あるいは×）道路本体に欠陥が発生したとしている。遮蔽物が倒壊した箇所は必ず道路補修が伴うとし、※の左上

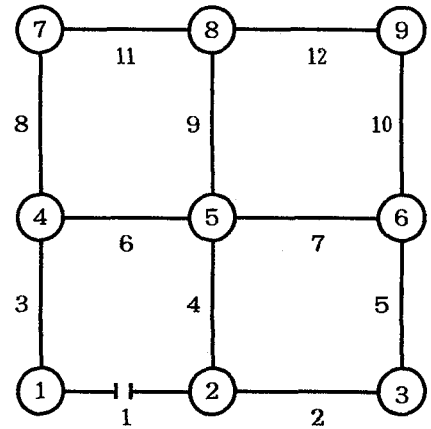


図-4 9ノード12リンクの道路ネットワーク

表-3 ウォーシャルフロイド法の入力マトリクス

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—			1					
2		—	1		1				
3		1	—			1			
4	1			—	1		1		
5		1		1	—	1		1	
6			1		1	—			1
7				1			—	1	
8					1		1	—	1
9						1		1	—

表-4 ノード間最短距離

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—	3	4	1	2	3	2	3	4
2	3	—	1	2	1	2	3	2	3
3	4	1	—	3	2	1	4	3	2
4	1	2	3	—	1	2	1	2	3
5	2	1	2	1	—	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1	—	3	2	1
7	2	3	4	1	2	3	—	1	2
8	3	2	3	2	1	2	1	—	1
9	4	3	2	3	2	1	2	1	—

表-5 リンク1-2開通後のノード間最短距離

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—	1	2	1	2	3	2	3	4
2	1	—	1	2	1	2	3	2	3
3	2	1	—	3	2	1	4	3	2
4	1	2	3	—	1	2	1	2	3
5	2	1	2	1	—	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1	—	3	2	1
7	2	3	4	1	2	3	—	1	2
8	3	2	3	2	1	2	1	—	1
9	4	3	2	3	2	1	2	1	—

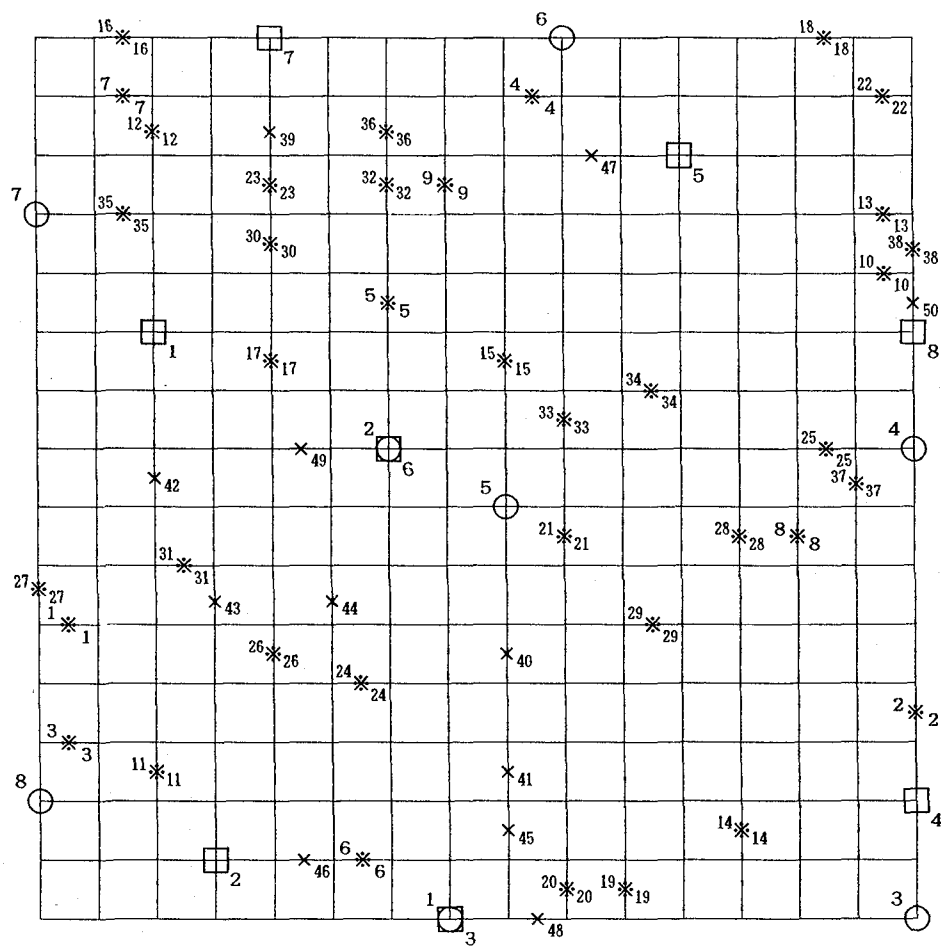


図-5 256 ノード 480リンク道路ネットワークの被災モデル

表-6 遮蔽物撤去作業のデータ

工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度
1	566(大)	1	14	314(中)	1	27	444(中)	2
2	242(中)	2	15	322(中)	3	28	316(中)	2
3	635(大)	1	16	236(中)	2	29	443(中)	1
4	312(中)	1	17	246(中)	1	30	421(中)	2
5	654(大)	1	18	666(大)	2	31	551(大)	1
6	511(大)	1	19	624(大)	1	32	166(小)	1
7	211(中)	1	20	314(中)	1	33	513(大)	1
8	461(中)	1	21	223(中)	1	34	531(大)	1
9	656(大)	1	22	521(大)	1	35	245(中)	1
10	341(中)	3	23	162(小)	2	36	424(中)	1
11	665(大)	1	24	555(大)	3	37	337(中)	1
12	422(中)	1	25	544(大)	2	38	564(大)	2
13	521(大)	1	26	454(中)	2			

表-7 道路補修作業のデータ

工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度
1	153(小)	1	18	151(小)	2	35	361(中)	1
2	313(中)	2	19	254(中)	1	36	131(小)	1
3	526(大)	1	20	654(大)	1	37	255(中)	1
4	464(中)	1	21	561(大)	1	38	564(大)	2
5	133(小)	1	22	125(小)	1	39	631(大)	1
6	415(中)	1	23	345(中)	2	40	322(中)	3
7	355(中)	1	24	212(中)	3	41	464(中)	3
8	531(大)	1	25	536(大)	2	42	114(小)	1
9	246(中)	1	26	146(小)	2	43	415(中)	1
10	623(大)	3	27	366(中)	2	44	654(大)	1
11	445(中)	1	28	611(大)	2	45	511(大)	3
12	154(小)	1	29	145(小)	1	46	211(中)	1
13	613(大)	1	30	425(中)	2	47	344(中)	2
14	444(中)	1	31	413(中)	1	48	407(中)	2
15	366(中)	3	32	231(中)	1	49	512(大)	2
16	615(大)	2	33	245(中)	1	50	423(中)	2
17	641(大)	1	34	353(中)	1			

表-8 遮蔽物撤去作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	15	30	12	17	18	23	25	35
既着工工事箇所	0	0	0	37	0	36	0	38

表-9 道路補修作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	10	20	25	14	17	30	23	27
既着工工事箇所	0	46	48	0	47	49	0	50

表-10 GAの結果による遮蔽物撤去作業の分担表

復旧班	担当工事箇所とその順序 (左→右)							
1	25	6	8					
2	24	28	12	4	31	34	17	
3	23	27						
4	(37)	10	22	19				
5	15	32	26	7	5			
6	(36)	30	18	9				
7	13	3	35	21	1			
8	(38)	2	29	20	16	14	33	11

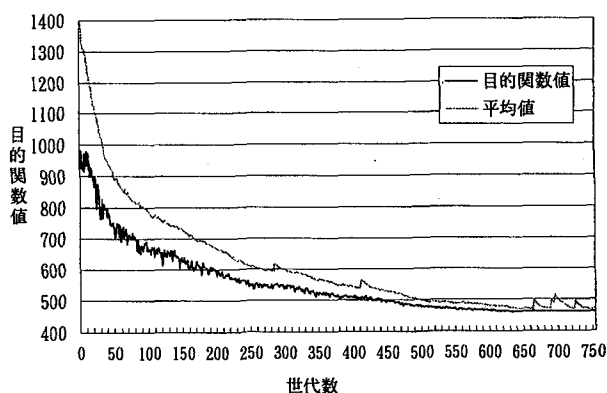


図-6 GAの収束図

表-11 GAの結果による道路補修作業の分担表

復旧班	担当工事箇所とその順序 (左→右)							
1	42	43	12	4				
2	(46)	45	44	27	6	5		
3	(48)	15	28	26	7	20		
4	40	37	2	18	34	19		
5	(47)	36	13	22	35			
6	(49)	23	10	3	14	21	11	
7	41	39	29	32	16	1	17	
8	(50)	24	38	30	25	31	9	33

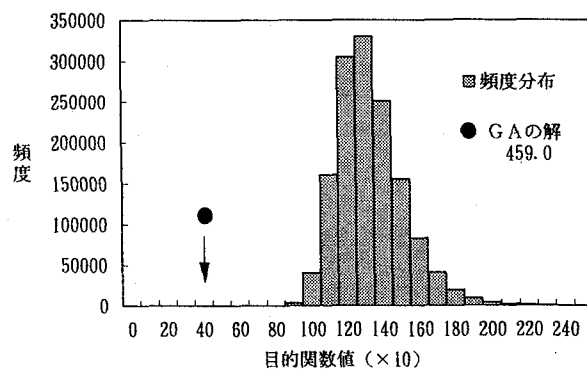


図-9 モンテカルロ法による頻度分布図とGAの解

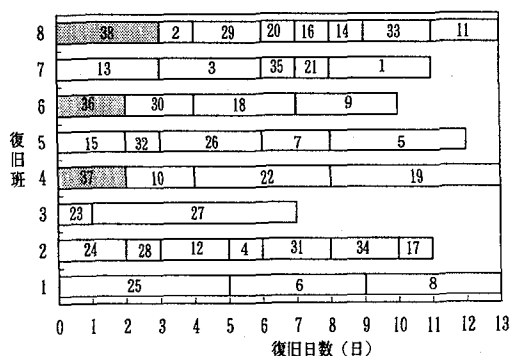


図-7 遮蔽物撤去作業班の日程 (GA解)

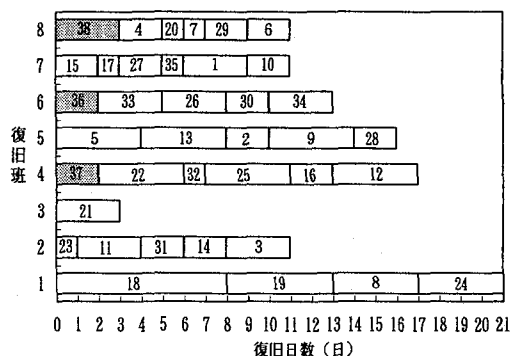


図-10 遮蔽物撤去作業班の日程 (MC解)

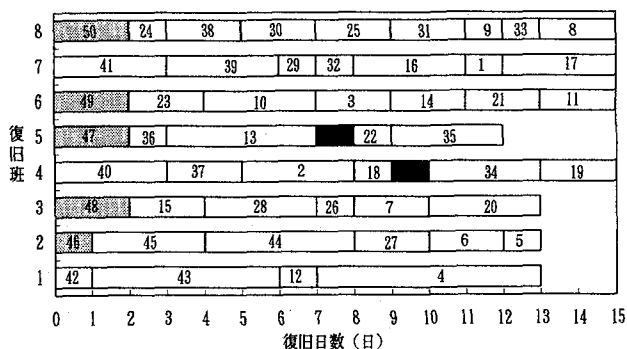


図-8 道路補修作業班の日程 (GA解)

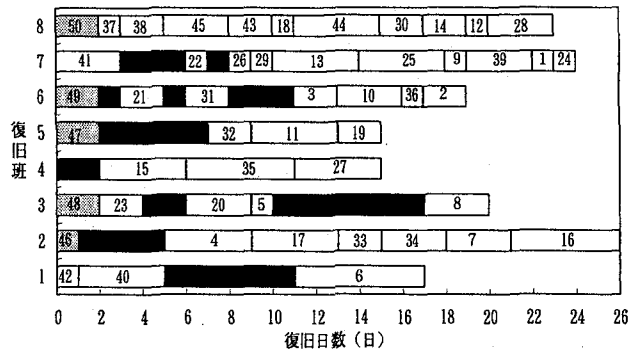


図-11 道路補修作業班の日程 (MC解)

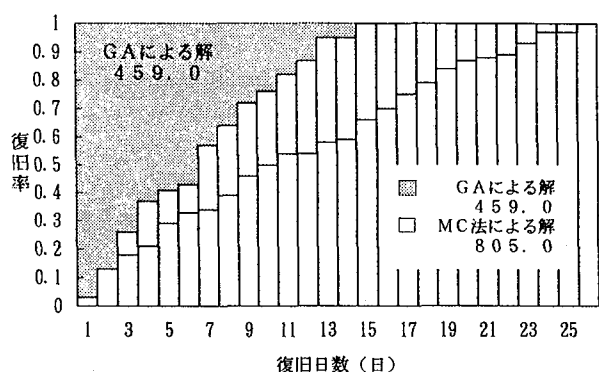


図-12 GA解とMC解の復旧過程の比較

に遮蔽物撤去作業の番号、右下に道路補修作業の番号が示されている。遮蔽物撤去作業と道路補修作業の被害量と、その被災が生じているリンクの重要度がそれぞれ表-6、7に示されている。被害量の大、中、小は図-3に対応する分類である。

それぞれの被災内容に対応する復旧班が8班ずつあるとし、図には、遮蔽物撤去作業班が○で、道路補修作業班が□で示されている。それぞれの班の能力値および復旧計画が決まる前にすでに着工している既着工工事箇所が表-8、9に示されている。

線列のビット数は、この問題の場合（遮蔽物撤去作業が38のうち3箇所が、道路補修作業50のうち5箇所がすでに着工されている）320ビットになる。また、考えられる組合せの総数は、 $35! \times 45! \times 8^{80}$ である。

GAは、人口サイズ200、最大世代数1000、交叉確率60%、突然変異確率5%、適当な間隔で大変異が入っているが、その確率は50%で実行している。

計算は、上記のGAの他に、結果を検証するためにモンテカルロ法（150万回発生）も行い、結果を比較している。それらの結果を、表-10、11、および図-6～12に示す。

GAの結果を表-2の形に書き直した分担表を、表-10（遮蔽物撤去作業）および表-11（道路補修作業）に示す。（ ）内の番号が、計画決定前に着工されていた工事番号である。図-6は、GAの収束図であり、太線が最良値、細線が平均値の履歴である。

表-10、11は結果ではあるが、このままでは相互の時間的な関係がわからないので、各工事の完了日数、およびそれぞれの時間的階層性を考慮した日程表を、図-7および8に示す。最初に出てくる網掛の工事が、既着工工事であり、黒く塗りつぶされた部分が何も分担しない待ち時間である。遮蔽物撤去作業は13日間で終わり、道路補修作業は15日間で終わっている。この場合の目的関数の値は、459である。

GAの解の検証のために、モンテカルロ法でも計算を行っている。150万回発生した場合の目的関数の頻度分布を図-9に示す。GAの解も示しているが、明らかにGAはかなり良好な解を与えていることがわかる。モン

テカルロ法の最良解の目的関数値は805であったが、その時の日程表を図-10、11に示した。工事完了が26日と10日程多くかかっており、また待ち時間が非常に多い。

GA解とMC解の、復旧日数と復旧率の関係を図-12に示す。図からも明らかにGA解の合理性がわかる。

6. あとがき

時間的階層性のある多数の被災を受けたライフライン系ネットワークの復旧プロセスの支援に、GAを用いる一手法を示した。

多種類、多数の復旧工事の順序および復旧班の配分を決めるツールとしては、GAは非常に汎用性があることを2章および3章で説明した。そこでは、時間的階層性を考慮して、配分問題と順序付け問題を同時に解くための線列のコーディング法が示された。

実用性が問われるのは、復旧の評価の内容であり、目的関数の計算の中に、どれだけ必要なものを組み込めるかにかかってくる。その例として、道路ネットワークの例を示し、実務上考えられるいくつかの事項を評価関数の中に考慮して解き、結果をモンテカルロ法の結果と比較した。GAの有効性が示されたと思われる。

今後、より大規模、複雑な問題の計算結果の分析を通して、ライフライン系ネットワークの補強方法、あるいは被災に備える事前の準備等、総合的な防災システムについての検討を加えていきたいと考える。

なお、本研究の特に被災モデルの設定において、下記の方々（訪問順）の貴重なご助言をいただいたことを付記し、謝意を表する。建設技術研究所 中田修三氏、江見晋氏、森本浩之氏、フジエンジニアリング 榎本正信氏、鹿島建設技術研究所 竹田哲夫氏、村山八州雄氏、高橋俊彦氏、釧路市役所 田中等氏、佐々木信裕氏。

参考文献

- 1) 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位決定問題への応用、土木学会論文集、No. 482/IV-22、pp. 37-46、1993。
- 2) 杉本博之・田村亨・長濱裕明：GAによる高速道路網の新設路線工事の順位決定について、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。
- 3) 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、No. 537/I-35、pp. 245-256、1996。
- 4) 野田茂・宮下仁志：電話網の最適震後復旧予測のためのニューラルネットワーク、構造工学論文集、Vol. 39 A、pp. 643-656、1993。
- 5) 樗木武・渡辺義則：土木計画学2、森北出版、pp. 158-161、1990。
- 6) 杉本博之・鹿汗麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No. 471/I-24、pp. 67-76、1993。
- 7) 鹿汗麗・久保洋・杉本博之：GAによる複合体の最適材料選択に関する研究、日本機械学会論文集(A編)、61巻、584号、pp. 115-120、1995。
- 8) Lu Bianli & H. Sugimoto: Application of GA to Simultaneous Selection of Material and Section of Structures, 2nd China-Japan Seminar on Optimization of Structural and Mechanical Systems, pp. 14-149、1995。

(1996年9月6日受付)