

改良型遺伝的アルゴリズムを用いた被災ネットワーク復旧計画策定に関する研究

Restoring planning of damaged networks using improved genetic algorithm

古田均*, 中津功一朗**

Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu

*工博, 関西大学教授, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1137 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1)

** 情修, 関西大学大学院博士課程 総合情報学研究科総合情報学専攻 (〒569-1137 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1)

The purpose of this research is the early restoration of lifeline systems after the earthquake disasters. Here, such issues are focused on, the first of which is such an allocation problem that which groups will restore which damaged sites, and the second is such a scheduling problem what order is the best for the restoration. In order to solve the two problems simultaneously, Genetic Algorithm (GA) is applied, because it has been proven to be very powerful in solving combinatorial problems. Furthermore, many kind of restoring plan of lifeline systems are solved simultaneously. However, GA has some disadvantages in computation time, that is, GA requires a lot of computation time for large and complex combinatorial problems. In this study, an attempt is made to develop an efficient disaster restoration method by using the concept of Two-Step GA based on Imanishi's Evolutionary Theory. A numerical example is presented to compare the proposed method and the ordinal method in the computation time and the optimization of each restoring planning of each lifeline system.

Key Words: Improved Genetic Algorithm, Imanishi's theory of evolution, lifeline, Optimization

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, 今西進化論, ライフライン, 最適化

1. まえがき

現代の市民生活において, 上下水道, ガス等のライフライン施設は, 生活の根幹をなすものであり, これらが災害により被害を受け, 機能麻痺に陥ることによる影響は極めて大きい。また, これらのライフラインはある部分の機能の低下あるいは向上が他の部分に影響を及ぼす複雑なネットワークを形成している。そのために, これらのライフラインは自然災害に対して被害を最小とする危機管理施策が強力に展開されているが, すべてのライフラインに最新の危機管理施策がなされているわけではない。また, これらの最新の危機管理施策は単に既存施設の修復・強化を行うにとどまらず, 防災の見地からの社会基盤のあり方について検討されなければならない。そこで, 安全性がある一定の制約を越えた上で, 安全性の向上を考えると, 安全性をあげることと社会的コスト負担をさげることには密接な関係があることは明らかである。

これらを考慮して, 本研究では, 将来ライフラインは何らかの被災は必ず受け得る事を前提として, 復旧プロセス支援を行うことを目的とした。復旧計画策定において, 早期復旧を目的とするとき, 復旧班の適正配分, および適正な着工順は相互に強く関連があるので別々ではなく同時に解かれる事が望ましく, それを遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を応用することで解決することは杉本らの研究¹⁾により実証されているが, 本研究

で対象とするモデルは, 災害直後という危機的状況であり, 生活の根幹であるライフラインの復旧には時間が大きく関わってくる²⁾。そのために, 最適な復旧プロセスを探索する時間も非常に重要な課題となる。最後に, 災害後の危機的状況と, 各ライフラインの相互影響を考慮した場合, ライフライン事業者間の連携を図ることが重要となる。つまり, 他事業者間の復旧計画を参照できれば, 通電火災や復旧工事の重複による混乱を防ぐことが出来る。そのためには, 同じ道路下における各種ライフライン間の情報を一元化し, 被災箇所や復旧状況に関する情報を交換できる必要があり, そのために, ライフライン全体の同時最適化が必要である。しかし, 全体最適化を行った場合, 個々の最適化, つまり, 各事業者の復旧計画の最適化は行われなかったことがある。本研究のモデルにおいて, 各ライフラインは, それぞれが生活の根源であり, 個々の最適化も考慮する必要がある。そこで, 本研究においては, 個々の最適化を行うことで, 各事業者の復旧計画最適化を実現し, 計算負荷をシステム全体に分散することで, 処理の時間短縮を実現する, より実用的な復旧支援システムの実現を目指す。

2. 道路ネットワーク復旧計画の最適化

2.1 対象道路ネットワークモデル

杉本らの研究¹⁾では, 道路ネットワークの復旧を考えた場合,

道路上の遮断物を撤去しなければ、道路本体自身の復旧作業が行えない等を、被害の時間的階層性として表現している。本研究でモデルとした被災ネットワークも、被害の時間的階層性を含んでいる。また、当然のことながら、時間的に階層関係にない被災モデルをも含んでいる。本研究では、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を想定して、2 つの被災ネットワークモデル1、モデル2を考える。モデル1は杉本らの研究¹⁾と同じく、遮断物撤去作業、道路補修作業の2種類の復旧作業を考慮した場合のモデル、モデル2はモデル1の2つの復旧作業に加えて、本研究では、ガス管補修作業、水道管補修作業の2つの作業を追加した4つの復旧作業を考慮したモデルである。それぞれのモデルを図-1、図-2に示す。

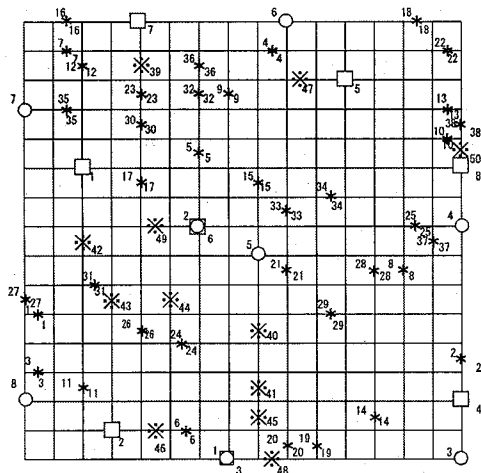


図-1 被災モデル1 (2種類)

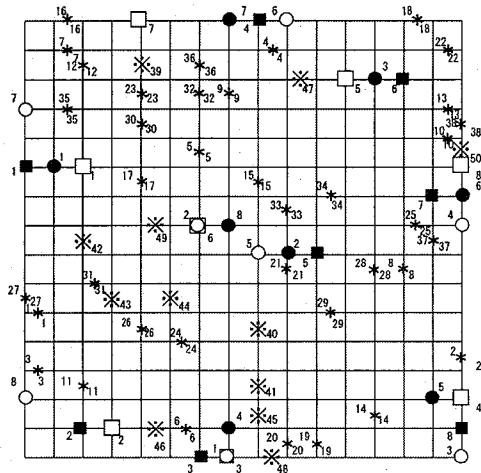


図-2 被災モデル2 (4種類)

モデル1の被災モデルでは、図-1に示すように、38か所(記号※で示す)において道路上に遮断物が倒壊し、50か所(記号※あるいは×で示す)において道路本体に欠陥が発生したとしている。遮断物が倒壊した箇所は必ず道路補修が伴うとし、※の左上に遮断物撤去作業の番号、右下に道路補修作業の番号が示されている。また、モデル2の被災モデルは、モデル1に加えて、図-2に示すように、30か所(※)においてガス管と水道管に補修の必要性があるとしている。ガス管補修作業と水道管補修作業は遮断物撤去作業と同じ箇所では被災を受けているために、それぞれの作業番号は同じとする。この時、4種類の復旧作業の時間的階層性は、遮断

物撤去作業と道路補修作業の間で、ガス管補修作業と水道管補修作業は行わなければならないものとする。また、ガス管補修作業、水道管補修作業の順は問わないものとする。このとき、道路遮断物撤去作業、道路補修作業、ガス管補修作業、水道管補修作業のそれぞれの被害量と、その被災が生じているリンクの番号、重要度をそれぞれ表-1から表-4に示す。表-1,2に関しては、杉本らの研究¹⁾において用いられたデータを引用した。杉本らの研究においては、被害量が700が最大値であるので、0から700までと定義し、その値が大きいほど、被害度が大きいとしている。また、リンクの重要度とは、被害を受けたリンクが道路ネットワークにおいてどの程度重要であるかを杉本らの研究¹⁾と同様に3段階で表わし、その数値が高いほど重要度が高いとしている。本研究においては、この重要度はライフラインが正常に機能している場合の重要度として設定しているために、重要度の値は復旧プロセスを通して一定としている。

本研究では、それぞれの被災内容に対応する復旧班は、8班ずつあるとし、図1、図2にはそれぞれの班の待機場所として、遮断物撤去作業班を○、道路補修作業班を□、ガス管補修作業班を●、水道管補修作業班を■で示す。それぞれの班の復旧能力および復旧計画が決定する前に既に着工している既着工工事箇所を表-5から表-8に示す。ここで、既着工工事がある場合には、その工事箇所の番号を記し、無い場合には0を記している。また、復旧班の能力値は、各班毎に持っている復旧機材も異なるので、復旧能力には差が出ることを考慮し、杉本らの研究¹⁾と同様に0から35までの数値で定義し、数値が高いほど能力値が高いとした。

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

表2 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
1	153	1	26	146	2
2	313	2	27	366	2
3	526	3	28	611	2
4	464	3	29	145	1
5	133	1	30	425	2
6	415	1	31	413	3
7	355	1	32	231	1
8	531	3	33	245	1
9	246	3	34	353	3
10	623	3	35	361	1
11	445	1	36	131	1
12	154	1	37	255	3
13	613	3	38	564	2
14	444	1	39	631	1
15	366	3	40	322	3
16	615	3	41	464	3
17	641	1	42	114	1
18	151	2	43	415	1
19	254	1	44	700	1
20	654	1	45	511	3
21	561	1	46	211	3
22	125	3	47	344	3
23	345	3	48	407	3
24	212	3	49	512	2
25	536	2	50	423	2

表5 道路遮断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	0	0	0	37	0	36	0	38

表6 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	0	46	48	0	47	49	0	50

表7 ガス管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	11	25	20	27	12	23	30	22
既着工工事	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 ガス管補修作業のデータ

工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度
1	242	1	16	321	1
2	423	2	17	231	1
3	625	3	18	534	3
4	312	3	19	171	3
5	554	1	20	582	3
6	514	1	21	542	2
7	311	1	22	451	2
8	453	3	23	434	2
9	600	3	24	311	2
10	321	3	25	441	1
11	656	1	26	412	2
12	410	1	27	531	3
13	501	3	28	156	1
14	302	1	29	556	1
15	312	3	30	520	3

表4 水道管補修作業のデータ

工事箇所	被害量	重要度	工事箇所	被害量	重要度
1	502	1	16	311	1
2	221	2	17	221	1
3	609	3	18	512	3
4	312	3	19	156	3
5	690	1	20	545	3
6	512	1	21	543	2
7	209	1	22	467	2
8	431	3	23	421	2
9	609	3	24	318	2
10	333	3	25	412	1
11	623	1	26	411	2
12	444	1	27	545	3
13	522	3	28	154	1
14	318	1	29	531	1
15	327	3	30	521	3

表8 水道管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	12	19	26	30	19	10	18	26
既着工工事	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2 復旧率の計算

復旧率の算定には、杉本らの研究¹⁾により提案された方法を用いる。被災を受けた各道路（リンク）の重要度を w_i ($i=1 \sim n_l$) とする。ここで、 n_l は被災を受けたリンクの総数である。復旧作業開始から q 日経過後の復旧率 $R^{(q)}$ は重要度で重みをつけたリンク距離で表すと、式(1)のように示される。

$$R^{(q)} = \frac{\sum_{i \in J^q} W_i \times l_i}{\sum_{i \in J^0} W_i \times l_i} \quad (1)$$

ここで、 l_i はリンク i の距離、 J^q は被災を受けたリンク番号の集合、 J^0 は q 日までに開通したリンク番号の集合を表している。

2.3 復旧日数の計算

復旧日数の計算においても、被害規模、復旧班の能力値、移動時間、労働時間を考慮した杉本らの研究¹⁾で提案された方法を用いる。以下にその方法を示す。各復旧工事を完了するのに要する復旧日数 d は式(2)によって求められる。

$$d = h / t_1 \quad (2)$$

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、その復旧時間は、被災の規模と担当する復旧班の能力値により求める。また、被害規模は小、中、大の3種類と定義した。小規模被害（被害量が200未満と定義）は、復旧班の能力差が出ず、一定の時間 h_t （本研究においては4時間と定義）で完了する被害と定義され、式(3a)で示す。次に中規模被害（被害量が200以上500未満と定義）は、復旧班の能力差が出るが、すべての復旧班が対処できる程度の被害と定義され、式(3b)によって求められる。ここで、式(3b)の D は被害量、 A は復旧班の能力（1時間に処理できる被害量）を示す。最後に大規模被害（被害量が500以上と定義）は、大型重機等が要求される被害であり、ある基準値以上の能力がないと対処できない被害と定義され、式(3c)によって求められる。ここで、式(3c)の A_c は大規模被害を担当できる最低能力（本研究では13時間と定義）を示している。

$$h = h_t \quad (3a)$$

$$h = D / A \quad (3b)$$

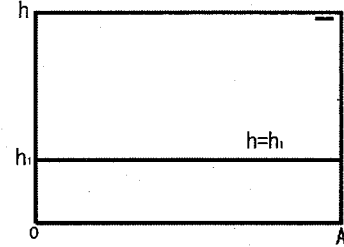
$$h = \infty (A < A_c) \quad \text{あるいは} \quad h = D / A (A \geq A_c) \quad (3c)$$

この時、被害規模毎の復旧必要時間と復旧班能力値との関係は図-3で表される。ここで、 t_0 は復旧班の1日の復旧工事のための作業時間であり、式(4)により求められる。

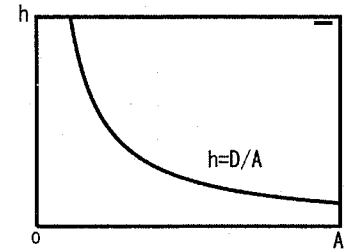
$$t_1 = t_0 - 2t_m - h_c \quad (4)$$

ここで、 t_0 は移動時間も含めた復旧班の一日にできる労働時間（本研究では、12時間と定義）、 t_m は移動に要する時間で、復旧班の常駐場所から被災場所までの最短距離を L (km)、復旧班の移動速度を v (km/h、本研究では10km/hと定義)とし、式(5)で表される。 h_c は準備等の時間であり、各工事毎に必ず必要な時間（本研究では、2時間と定義）である。

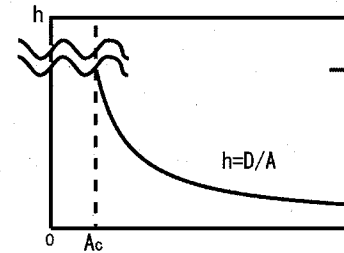
$$t_m = L / v \quad (5)$$



(a) 小規模被害



(b) 中規模被害



(c) 大規模被害

図-3 被害規模と復旧能力の関係

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた被災ネットワークの復旧

3.1 コーディング

N 種類の復旧工事がある場合、遺伝子列は、表-9のようにコーディングされる。復旧班の数字の並びは班の番号であり、それぞれ順位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。ここで、復旧班の担当工事と順序は表-10のようになる。このコーディングにより、各班への工事の配分とスケジュールは同時に決定される。ここで、時間的階層性は、目的関数の計算において考慮される。

表-9 コーディングと遺伝子列の意味

(a) コーディング

復旧作業 a									
順位					担当班				
1	3	4	5	2	1	0	0	0	1
復旧作業 b									
順位					担当班				
5	2	3	4	1	1	3	2	0	3

(b) 遺伝子列の意味

復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事 a	0 班	3 → 4 → 5
	1 班	1 → 2
復旧工事 b	0 班	4
	1 班	5
	2 班	3
	3 班	2 → 1

3.2 目的関数

本研究で、設定した目的関数は上述した復旧日数と復旧率により表される。ここで、復旧率と復旧日数の関係は図4 のようになる。そこで、本研究では、図4 にあらわされる部分、つまり、非復旧面積を最小化することを目的とした。これは、ただ単に、復旧日数を短くするのではなく、重要度の高いリンク（道路）から復旧することも重要であると考えたからである。

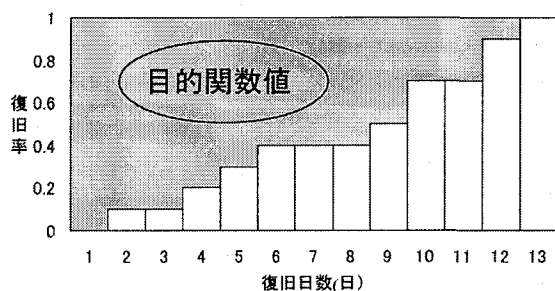


図-4 復旧率と復旧日数の関係

3.3 モデル1の被災ネットワークの数値計算例

図-1 に示した被災モデル1において、GAを用いて復旧計画を策定する。この時、GAのパラメータとして、人口サイズ 200、最大世代数 1000、交叉確率 60%、突然変異確率 5%と設定する。その結果を図-5 から図-7 に示す。図-5、6 は各工事の完了日数、および時間的階層性を考慮した日程表である。ここで、黒く塗りつぶされている部分は、何も分担していない待ち時間である。図-5

では工事番号 10、23 は被害量は小さいが、重要度の高い被災箇所であり、重要度の高いリンクを早期復旧する計画を策定することができた。また、図-6 においては、工事番号 40、42 のように遮断物撤去作業の必要の無い工事を早期に復旧することで、早期復旧を目的とした計画を得ることができた。



図-5 道路遮断物撤去作業班の日程

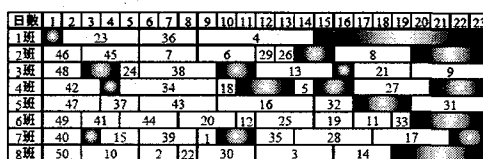


図-6 道路補修作業班の日程

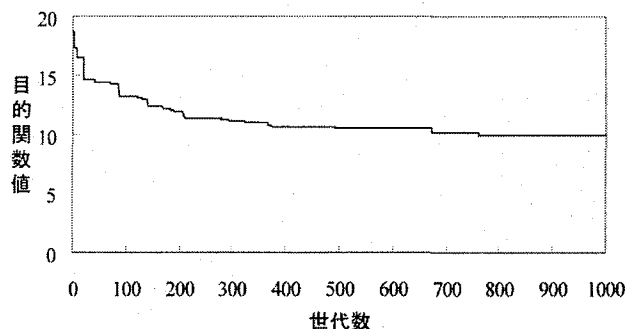


図-7 目的関数値の推移

3.4 モデル2の被災ネットワークの数値計算例

図-2 に示した被災モデル2において、前の数値計算例と同様に、GAを用いて復旧計画を求める。この時、GAのパラメータとして、人口サイズ 400、最大世代数 5000、交叉確率 60%、突然変異確率 5%と設定する。その結果を図-8～12 に示す。図-8～11 は各工事の完了日数、および時間的階層性を考慮した日程表である。ここで、4 種類の時間的階層性を考慮することで、図-8 に示す工事番号 8、16 は被害量は小さいが、重要度の高い被災箇所であり、重要度の高いリンクを早期復旧する計画を策定することができている。図-9 においては、工事番号 42、45 のように遮断物撤去作業の必要の無い工事を早期に復旧することで、早期復旧を目的とした計画を得ることができた。また、図-8 から図-11 により、工事番号 16 のように、道路遮断物撤去作業後に、ガスパ管補修作業、水道管補修作業、道路補修作業の順番に各復旧作業が時間的階層性を考慮した計画が得られたことが確認できる。

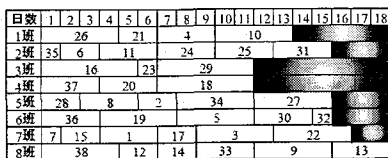


図-8 道路遮断物撤去作業班の日程

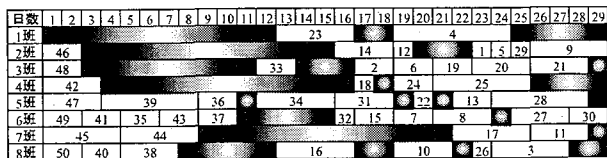


図-9 道路補修作業班の日程

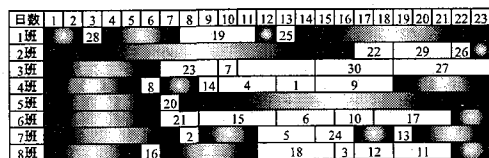


図-10 ガス管補修作業班の日程

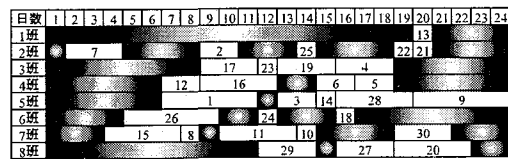


図-11 水道管補修作業班の日程

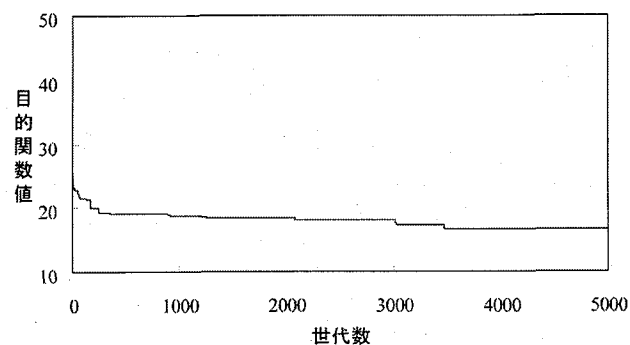


図-12 目的関数値の推移

本研究では、復旧作業が2種類の場合と4種類の場合を設定し、それぞれの場合において最適な復旧支援策を求めることを試みた。その結果、遺伝的アルゴリズムの有効性を示すことができた。

また、実用性といった面で考えると、復旧の評価の内容、つまり、目的関数の計算法が問われると考えられる。その中にどれだけ必要なものを組み込めるかが重要である。本研究では、道路ネットワークを例としてあげ、実務上考えられる被害量や担当班の

能力値、移動時間、準備時間などを評価関数の中に加えることで、より実的な目的関数として、非復旧面積を最小化することで、日数だけでなく、重要度を考慮することが出来た。

被災ネットワークの復旧において重要なことは、復旧日数だけではなく、被災したリンクの重要度も挙げられ、出来るだけ早く重要度の高いリンクを復旧することが重要である。しかし、数値計算例の設定において、目的関数の計算の短縮を実現できたとしても、大規模な探索の際には、計算資源を非常に消費する。ここで、具体的な探索時間を、表-10 に示す。本システムの実用性を考える場合、探索時間の問題は、非常に大きな課題として挙げられ、その短縮を図る必要がある。

表-10 探索時間と探索時間の増加率
Intel Pentium4 プロセッサ 2.0GHz 512MB

	復旧作業2種	復旧作業4種	増加率
探索時間	4H38m56s	20H38m32s	約5倍

4. 改良型遺伝的アルゴリズムを用いた被災ネットワークの復旧

4.1 復旧計画策定における探索時間の短縮

前章で述べたように、探索時間は復旧計画策定において、非常に大きな問題である。これまで復旧計画に関わる遮断物撤去作業、道路補修作業などの作業は相互関係が強いために、同時に最適化されることが望ましいとされてきた。しかし、現実問題を考えると、作業は2種類にとどまらず、数多くの作業を同時最適化することになる。復旧作業の数が増加するということは、組み合わせ最適化問題において、組み合わせが増大することになり、探索時間の増加に繋がる事は言うまでもない。

本研究では、作業間の相互影響を考慮した上で、この問題を解決するために、2段階遺伝的アルゴリズム (TsGA : A Two-Step Genetic Algorithm) を提案する。

4.2 今西進化論に基づくGA

田川らが提案した今西進化論に基づく GA (A Genetic Algorithm based on Imanishi's Evolutionary Theory)³⁾では、集団内の各個体は種を代表し、新たに生まれた個体の同種が存在する場合、より優れた個体を種の代表とする。一方で、集団内に同種が存在しない場合、新たな個体は新種となり、集団内でもっとも劣る個体が淘汰される。ここで、多様性維持を目的とした種の棲み分けによる世代交代のモデルを以下に示す。

STEP1: ランダムにP個の個体を生成して初期集団P(0)を作り、世代t=0とする。ただし、P(0)内に表現型の距離が0となる同値な個体群は存在させない。

STEP2: 集団内P(t)からランダムに両親Aと両親Bを選択し、交叉によって子C,Dを作る。

STEP3: 子個体Dと親個体Eの間の $\delta([D],[E])$ が最短となる親世代の個体 $E \in P(t)$ を選ぶ。ここで、 $\delta([D],[E])$ は個体Dを表わす遺伝子[D]と個体Eを表わす遺伝子[E]の距離である。

STEP4: $\delta([D],[E]) > L$ ならば、 $P(t)$ の最悪個体をDで置き換え、STEP6へ進む。 $\delta([D],[E]) \leq L$ ならばDとEは同種と判断する。

STEP5: DがEより優れていれば、EをDで置き換える。そうでなければ、Dを淘汰する。

STEP6: 世代 $t=T$ ならば、集団 $P(t)$ で種毎の最良の個体を全て出力して終了する。 $t \neq 1$ のとき、 $t=t+1$ としてSTEP2に戻る。

4.3 個体間の距離

個体間の距離は、遺伝子間のハミング距離で測るのが一般的であるが、本研究では、順序をコーディングしているために図-13のように個体間の距離を測ることとした。図-13に個体間の距離の測定法を示す。図-13では、基本となる工事3に対してその後に施工される工事5が親個体、子個体の両方で存在する。また、他のすべての工事を基本とした場合には、親個体、子個体の両方で存在するような工事はない。この場合、子個体Dと親個体Eの距離は1とする。

子個体D

復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事 _a	0班	3→4→5
	1班	1→2

班	基本となる工事	その後に施工される工事
0班	3	4
	4	5
1班	1	2

親個体E

復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事 _a	0班	3→5→2
	1班	1→4

班	基本となる工事	その後に施工される工事
0班	3	5
	5	2
1班	1	4

個体間の距離 : 1

図-13 個体間の距離

4.4 2段階遺伝的アルゴリズム(TsGA: A Two-Step Genetic Algorithm)

本研究で提案するTsGAの流れを以下に示す。

STEP1: 今西進化論に基づくGAにより、図-14のようにコーディングし、並列的に遮断物撤去作業、道路補修作業などの復旧作業毎に複数の多種多様な準最適な復旧計画を探索する⁴⁾。

STEP2: 復旧作業毎に探索した複数の多種多様な復旧計画をGAの遺伝子の構成要素として図-15のようにコーディングし、GAを用いて相互関係を考慮しながら復旧計画全体の最適化を目指す。

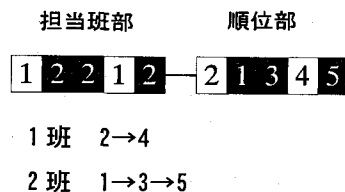


図-14 STEP1(IEGA)のコーディング

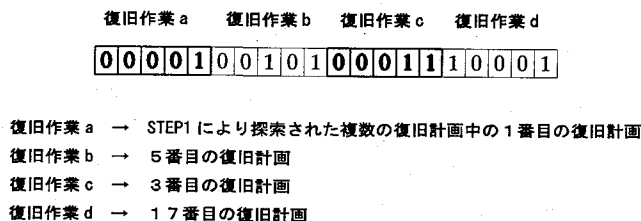


図-15 STEP2のコーディング

STEP1において、各復旧作業の復旧計画を並列的に探索することで、探索時間の短縮が期待できる。また、個々で最適化を行うために、全体の最適化を重視しすぎて、ある復旧作業だけが最適化されていないなどの問題が解消される。

STEP2において、復旧作業毎に探索した複数の多種多様な復旧計画の中から、全体の相互関係を考慮した上で、最適な復旧計画が探索され、全体の復旧計画が得られる。

ここで、個々の最適化をSTEP1として行うことが全体の最適化においてはスケジュールが重なるなど、不利になる事が考えられる。しかし、復旧計画の良否は、重要度の高い被災箇所を出来るだけ早く復旧することにある。本研究における方法論では、日程ではなく、復旧順序をコーディングすることにより、全体の復旧計画を最適化する際に、日程が重なったりするような問題点は解消される。また、復旧作業毎に最適化を行うことで、それぞれの復旧作業で重要な被災箇所をできるだけ早く復旧することが期待できる。

4.5 モデル1の被災ネットワークの数値計算例2

図-1に示した被災モデルにおいて、提案したTsGAを用いて復旧計画を計算する。この時、STEP1の今西進化論に基づくGAのパラメータは、人口サイズ200、最大世代数100、交叉確率60%、突然変異確率5%であり、STEP2のGAのパラメータは、人口サイズ200、最大世代数200、交叉確率60%、突然変異確率5%であり、図-16、18は各工事の完了日数、および時間的階層性を考慮した日程表である。表-11において、STEP1の今西進化論に基づくGAにおいて探索された各復旧作業の32の準最適復旧計画の目的関数値の平均とその例を挙げた。この結果から、目的関数値の最小値と数値的にほとんど変わらない準最適解を探索できたといえる。STEP2における結果として、Simple GAにおける探索と同様に、図-16では工事番号10は被害量は小さいが、重要度の高い被災箇所であり、重要度の高いリンクを早期復旧する計画を策定することができた。また、図-17においては、工事番号40、42のように遮断物撤去作業の必要の無い工事を早期に復旧することで、早期復旧を目的とした計画を得ることができた。

表-11 モデル1におけるSTEP1における探索された準最適解

復旧作業	探索された32の準最適解における目的関数値の		
	最小値	平均値	例
道路遮断物 撤去作業	4.771	4.824	4.771
			4.789
			4.819
			4.863
			4.871
道路補修作業	7.987	8.021	7.987
			7.991
			8.047
			8.091
			8.123

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1班	32		27				6											
2班	21	29		28		25		15				18						
3班		14	23			17			20									
4班		37		16			4			12					8			2
5班		35		26			13			32					22			
6班		36			9					11								
7班		10		24			34			30				5				
8班			38			31		19		7		3						

図-16 道路遮断物撤去作業班の日程

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1班	42		29					31															
2班	46		45		26		43		19				3							2			
3班	48		41		37		44			27			17										
4班			32											20						22			
5班		47			14		9			7				18		1					11		
6班		49		10	24		16			28		33		30			13					8	
7班		40		36		23		35			25			21									
8班		50					38			39		34		12		15							

図-17 道路補修作業班の日程

4.6 モデル2の被災ネットワークの数値計算例2

図-2に示した被災モデル2に対して、前の数値計算例と同様に、提案したTsGAを用いて復旧計画を求める。この時、分散モジュールのGAのパラメータは、人口サイズ200、最大世代数100、交叉確率60%、突然変異確率5%であり、協調モジュールのGAのパラメータは、人口サイズ300、最大世代数500、交叉確率60%、突然変異確率5%である。図-18～21は各工事の完了日数、および時間的階層性を考慮した日程表である。表-12において、モデル1の場合と同様に、STEP1の今西進化論に基づくGAにおいて探索された各復旧作業の32の準最適復旧計画の目的関数値の平均とその例を挙げた。この結果から、目的関数値の最小値と数値的にほとんど変わらない準最適解を探索できたといえる。また、表-13はSimple GAとTsGAの探索時間の比較を示した結果である。ここで、4種類の時間的階層性を考慮する中で、SimpleGAにおける探索と同様に図-18では工事番号3、16は重要度の高い被災箇所であり、重要度の高いリンクを早期復旧する計画を策定することができた。図-19においては、工事番号42、45のように遮断物撤去作業の必要の無い工事を早期に復旧することで、早期復旧を目的とした計画を得ることができた。また、図-18から図-21により、工事番号16のように、道路遮断物撤去作業後に、ガスパ管補修作業、水道管補修作業、道路補修作業の順番に各復旧作業が時間的階層性を考慮した計画が得られたことが確認できる。

表-12 モデル2におけるSTEP1における探索された準最適解

復旧作業	探索された32の準最適解における目的関数値の		
	最小値	平均値	例
道路遮断物 撤去作業	4.771	4.824	4.771
			4.789
			4.889
			4.923
			4.981
道路補修作業	7.987	8.021	7.987
			7.991
			8.047
			8.091
			8.121
ガスパ管補修 作業	3.991	4.031	3.991
			3.998
			4.054
			4.067
			4.088
水道管補修 作業	3.989	4.028	3.989
			3.997
			4.019
			4.032
			4.038

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1班		16			30				29						4				
2班	33	7	6		27			19											
3班	20		14					26											
4班	37		15		32	21		35						28					
5班	3				22	13													
6班	36		13		10		18												
7班	9			1			31		24		25								
8班	38		12	17		5	11	8	2		34								

図-18 道路遮断物撤去作業班の日程

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1班				36																											
2班	46	40			43													3	18												
3班	48	41											35				39	22	24				7	34							8
4班		45															12					2									
5班	47				44				33								13				9	23									
6班	49		37					31			27		21		11		19	5		20				32							
7班	42																30			29		17									
8班	50					38		16			14		10		26							25		28							6

図-19 道路補修作業班の日程

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1班						3	13															
2班							14		21	19						28		1		5		25
3班										17					15				29		7	8
4班						20							11			18						
5班							6					12				19		26				
6班										22												
7班									10		27		23					9				
8班										30				24								

図-20 ガス管補修作業班の日程

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1班														18		12		24				
2班								27		10						25		28				
3班									13		29				20							
4班							16		1		9		17	23	3			4				
5班										21	22			5		15						
6班							7						30									
7班												14			11			19				
8班													6		26			8				

図-21 水道管補修作業班の日程

表-13 探索時間

Intel Pentium4 Processor 2.0GHz 512MB		
	SimpleGA	TsGA
探索時間	4H38m56s	25m4s (STEP1) + 24m49s (STEP2)
復旧作業 2 種		49m53s
探索時間	20H38m32s	25m4s (STEP1) + 1H56m50s (STEP2)
復旧作業 4 種		2H21m53s

本研究では、復旧作業が2種類の場合と4種類の場合を設定し、提案したTsGAを用いることにより、最適復旧計画案の探索を試みた。その結果、提案したTsGAの有効性を示すことができた。また、数値計算例2の結果から考えると、大規模で計算が膨大になればなるほど、提案したTsGAが有用であることが考えられる。これは、システムの規模・複雑性が増大すると集中管理的な制御では、通信時間、通信量、計算時間の増大、処理の複雑性などの理由から、柔軟に対処することが困難になったと考えられる。一方、TsGAでは、負荷がシステム全体に分散されることから、処理の時間短縮が可能となり、より複雑で大量の計算が可能となったためである。

本研究で提案したTsGAでは、まず、復旧作業毎に今西進化論に基づくGAにより、復旧計画を自律分散的に並列で探索することで、計算時間の短縮を図る事ができた。また、今西進化論に基づ

くGAにより、Simple GAでは得ることの出来ない、復旧作業毎の目的関数における多種多様な複数の準最適解を探索することで、各復旧作業の莫大な組合せ数の復旧計画の中から絞り込むことが出来た。それを利用することで、Simple GAが、単なる組合せの探索となり、遺伝子列がSimple GAにおける探索よりも大幅に短くなり、計算時間の短縮につながったと考えられる。結果として、Simple GAによる探索に比べて、大幅な計算時間の短縮が可能になった。TsGAとSimple GAによる探索の組合せ数の比較を表-14に示す。

表-14 組み合わせ数の比較

	Simple GA	TsGA	Simple GA/ TsGA
組み合わせ数	4.4775E+123	4096	1.0931E+120
復旧作業 2 種			
組み合わせ数	8.8674E+202	1.6777E+07	5.2854E+195
復旧作業 4 種			

表-15 作業毎の目的関数値の比較

		Simple GA	
	作業種類	目的関数値	完了日数
復旧作業 2 種	遮断物撤去	7.444	21
	道路補修	9.901	25
	全体	9.901	25
復旧作業 4 種	遮断物撤去	7.203	18
	ガス管補修	14.196	23
	水道管補修	14.370	24
	道路補修	16.631	30
	全体	16.631	30
		TsGA	
	作業種類	目的関数値	完了日数
復旧作業 2 種	遮断物撤去	6.796	18
	道路補修	9.907	23
	全体	9.907	23
復旧作業 4 種	遮断物撤去	6.981	19
	ガス管補修	12.462	22
	水道管補修	12.185	23
	道路補修	16.633	31
	全体	16.633	30

また、多種の復旧作業全体の最適化を行った場合、時間的な問題と同様に、重要な課題となる各復旧作業の最適化についても、Simple GAとTsGAを比較を行い、その結果を表-15に示す。全体の目的関数値に関しては、Simple GAで探索した場合の解の目的関

数値の方が数値的には良い値を表している。しかし、その違いは、現実問題上、それほど有意なものではないのに対し、他の作業の目的関数値に関しては、TsGAの方がより良い解を得ている。例えば、復旧作業2種の数値計算例において、遮断物撤去作業のみの目的関数値を比較すると、Simple GAより、TsGAの方が最小化されていることがわかる。同様に、復旧作業4種の数値計算例においては、遮断物撤去作業だけでなく、ガス管補修作業、水道管補修作業において、上と同様の事が言える。これにより、本研究で提案したTsGAでは、全体の最適化と復旧作業毎の最適化を同時に行っていることがわかる。

5. あとがき

本研究では、実用性が問われると考えられる評価の内容に、実務上考えられる様々な事項を考慮し、復旧計画策定を行った。また、復旧計画策定において、Simple GAにおける探索とTsGAにおける探索の比較を行い、TsGAの有用性を示した。GAにおけるライフライン被災ネットワーク復旧として、従来のGAを用いて、復旧作業が2種類、4種類の場合に、それぞれ復旧箇所の重要度を考慮し、作業期間が最小となる復旧計画策定を行った。その結果、それぞれの場合において、作業期間が最小となる復旧プロセスの傾向をつかむことができた。また、遺伝的アルゴリズムの目的関数の計算部分において、重要度と作業期間を同時に評価することができ、複数の作業内容や担当班のスケジュールを最適に組み合わせる復旧プロセス支援に対して、遺伝的アルゴリズムが有効であることが検証された。しかし、大規模な探索の際には、計算資源を非常に消費するという問題が重要な課題として挙げられた。また、複数の種類の作業を同時最適化する際に、各作業の最適化は全体最適化を目的とすることにより、軽視されるという問題に陥った。

そこで、TsGAによる復旧計画策定を提案し、Simple GAの探索における計算資源の問題と、複数作業の同時最適化による問題を解決した。第一に計算資源の問題に対して、本研究で提案したTsGAは、以下の2点により問題解決が可能となった。

1. 復旧作業毎に今西進化論に基づくGAにより、復旧計画を自律分散的に並列的に探索することで、計算時間の短縮を図る事ができた。
2. 今西進化論に基づくGAは、Simple GAでは得ることの出来ない、多峰性の解、つまり、復旧作業毎に考えられる複数の多種多様な準最適解を探索することをいくつも探索することができるため、各復旧作業の莫大な組合せ数の復旧計画を絞り込むことが出来た。それにより、Simple GAが、単なる組合せの探索となり、遺伝子列がSimple GAにおける探索よりも大幅に短くなり、計算時間の短縮につながった。結果として、Simple GAにおける探索に比べて、大幅な計

算時間の短縮が可能となった。また、対象問題が大きくなればなるほど、つまり、組合せ数が膨大になればなるほど、Simple GAにおける探索は計算資源を非常に消費し、TsGAが有用であることが検証できた。

第二に作業全体の最適化と各作業の最適化の問題においては、今西進化論に基づくGAにより、各作業毎に最適化を行い、その後全体最適化を行うといった2段階の最適化を行うことで解決できた。しかし、その分散モジュールにおいて、今西進化論に基づくGAが、多峰性の解を探索することで、膨大な組合せを絞り込むことに有用であることを得たものの、より大きく複雑な問題に適用する場合に、組合せの絞り込みの評価こそが、本研究で提案した本手法の鍵であり、更なる改良が必要となる。さらに、復旧の評価に関して、総合的な防災システムを考えた場合には下記に示す事柄の考慮が必要になる。第一に、被災に備えた事前の準備やライフラインネットワークの補強方法の決定、次に、被災ネットワーク内のリンクの重要度は、復旧プロセス内において一定ではなく、他の場所の復旧により影響されるものであるため、重要度の変化も今後考慮する必要がある。また、被災ネットワークは2次災害などによる動的環境下にある。実用性を考えた場合には、静的環境下における探索結果では、環境の変化に対応し難い。今後、動的な環境下に対応した復旧プロセスの構築についての検討していく予定である。

謝辞

本研究の遂行に、私立大学学術研究高度化推進事業（学術フロンティア事業）「合意形成のための認知的・数理的情報処理システムの構築」の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉本博之、片桐章憲、田村亨、鹿汗鹿：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, pp517-524, 1997.
- 2) Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu & Dan M Frangopol: Optimal restoration scheduling for earthquake disaster using life-cycle cost, Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructures System, pp47-54, 2005
- 3) 田川聖治、水谷浩二、若林昇、羽根田博正：今西進化論に基づく遺伝的アルゴリズムの構成と評価、システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 Vol.45th, pp69-70, 2001.
- 4) 水谷浩二、田川聖治、羽根田博正：今西進化論に基づくGAによる多様な最適解の発見、計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集 Vol.2000, pp114-117, 2000

(2005年9月10日受付)