

不確実環境下における共同作業を考慮した復旧計画策定

Optimal Restoration Schedule Considering Multiple Group Work under Uncertain Environment

中津功一朗*・古田均**・野村泰稔***・石橋健****・服部洋†

Koichiro NAKATSU, Hitoshi FURUTA, Yasutoshi NOMURA, Ken ISHIBASHI and Hiroshi HATTORI

*正会員 博士(情報学) 関西大学 総合情報学部(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

**正会員 工博 関西大学教授 総合情報学部(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

***正会員 博士(情報学) 神戸大学助教 自然科学系先端融合研究環(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

****非会員 学士 関西大学大学院 総合情報学研究科(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

†学生会員 修士(情報学) 関西大学大学院 総合情報学研究科(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

The purpose of this research is to propose an early restoration for lifeline systems after earthquake disasters. Here, two issues are focused on, the first of which is such an allocation problem that which groups will restore which disaster places, 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. However, road networks after earthquake disasters have an uncertain environment, that is, the restoring works are not progressing on schedule. The actual restoring process should be performed by considering various uncertainties simultaneously. In addition, the restoring works should be performed by not single group but multiple group in order to make the progress more effective. In this study, an attempt is made to develop a decision support system of the optimal restoration scheduling by using the improved GA to consider uncertainty.

Key Words : Restoration schedule, Genetic algorithms, Uncertainty, Delay of Schedule, Multiple Group Work

1. はじめに

日本は地震大国であり、近年、大規模な地震が多発している。今後も大規模な地震が発生する可能性が非常に高く、地震による被害を最小限に抑えるためのさらなる対策が必要とされている。

電気、水道、ガス、道路のようなライフラインが地震によって破壊され、機能麻痺に陥るようなことがあれば、人々の生活に甚大な影響を与えてしまう。このような被災を防ぐ手段として、すべてのライフライン施設に最新の技術を投じて補強することは効果的であるが、経済的に不可能である。

本研究では、将来ライフラインは何らかの被災を必ず受けることを前提として、被災後の復旧計画策定を試みる。復旧計画策定^{1),2)}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することから、これらは別々ではなく同時に解かれることが望ましく、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できることが杉本らの研究³⁾により実証されている。

これまでの研究では、古田ら⁴⁾により震災後の復旧における不確実性を復旧作業の遅延として捉えた復旧計画の策定が行われている。しかし、現実問題では、余震や火災のような二次災害の影響によって被災地の被害状況が事前調査の情報から変化し、復旧工事が計画

通りに進まない可能性がある。

また、古田らの研究^{4),5),6),7)}では、一つの復旧工事に対して一つの班で作業を行うことを前提としていた。しかし現実問題を考慮すると、復旧班の能力や数から、複数の班による共同作業を想定した復旧計画を策定することが望ましい。作業を複数班で分担することにより、大規模被害や重要度の高い作業を効率よく復旧することができ、さらに、不確実性による復旧計画への影響を抑えることが期待できる。

本研究では、より実用的な復旧計画を策定するために、複数班による共同作業を想定した復旧計画の策定を行う。そして、復旧における不確実性として、被災箇所の「被害量」と復旧作業の「遅延」を併せて「計画遅延」として考慮した上で頑健性を有する復旧計画策定を提案する。頑健性を有する復旧計画を策定するために、本研究では、不確実性を考慮したGA(不確実GA)⁸⁾を改良した改良型不確実GAを適用することで、より実用的な復旧支援システムの実現を目指す。

2. 不確実性を考慮した復旧計画の最適化

2.1 対象道路ネットワークモデル

本研究では、対象とするモデルとして、1995年阪神淡路大震災で大きな被害を受けた兵庫県神戸地区(図-

1) において、164ノード、288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、被災ネットワークモデル^{4),6),7)}を考える。なお、対象モデルの定義は、杉本らの研究³⁾に基づいて行う。

図-1に示すモデルは、遮断物撤去作業、道路補修作業の2種類の作業を想定している。38箇所(1~38)において道路上に遮断物が倒壊し、道路や橋梁本体に欠陥が発生しているために復旧作業として遮断物撤去作業、道路補修作業が必要あり、12箇所(39~50)において道路上に遮断物は見られないが、道路や橋梁本体に補修が必要な欠陥が発生しているため、復旧作業として補修作業が必要であるとした。ここで、2種類の作業は、道路補修作業は遮断物撤去作業が終了してなければ着工できないとして考慮するものとする。それぞれの作業の被災が発生しているリンク番号、被害量、重要度のデータを表-1, 2に示す。被害量は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³⁾と同様に3段階で表したものであり、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、重要度の値は復旧プロセスを通して一定である。

表-1 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	2	20	314	2
2	242	1	21	223	2
3	635	3	22	521	3
4	312	3	23	162	3
5	654	1	24	555	1
6	511	1	25	544	1
7	211	1	26	454	1
8	461	3	27	444	2
9	656	3	28	316	2
10	341	2	29	443	1
11	665	1	30	421	2
12	422	1	31	551	3
13	521	3	32	166	2
14	314	2	33	513	1
15	322	1	34	531	3
16	236	3	35	245	2
17	246	2	36	424	2
18	666	1	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	2	26	146	1
2	313	1	27	366	2
3	526	3	28	611	1
4	464	3	29	145	1
5	133	1	30	425	2
6	415	1	31	413	3
7	355	1	32	231	2
8	561	3	33	245	1
9	246	3	34	353	3
10	623	2	35	361	2
11	445	1	36	131	2
12	154	1	37	255	3
13	613	3	38	564	2
14	444	2	39	631	2
15	154	1	40	322	2
16	613	3	41	464	3
17	641	2	42	114	2
18	151	1	43	415	3
19	254	1	44	654	2
20	654	2	45	511	1
21	561	2	46	211	3
22	125	3	47	344	3
23	345	3	48	407	3
24	212	1	49	512	2
25	536	1	50	423	2

また、本研究では、それぞれの被災内容に対応する復旧班は、8班ずつあるとしている。それぞれの班の復旧能力を表-3, 4に示す。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、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。図-1にはそれぞれの班の待機場所を遮断物撤去作業班がA-1からA-8、道路補修作業班がB-1からB-8で示している。

表-3 道路遮断物撤去作業班の能力値

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	15	30	12	17	18	23	25	35

表-4 道路補修作業班の能力値

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	10	20	25	14	17	30	23	27

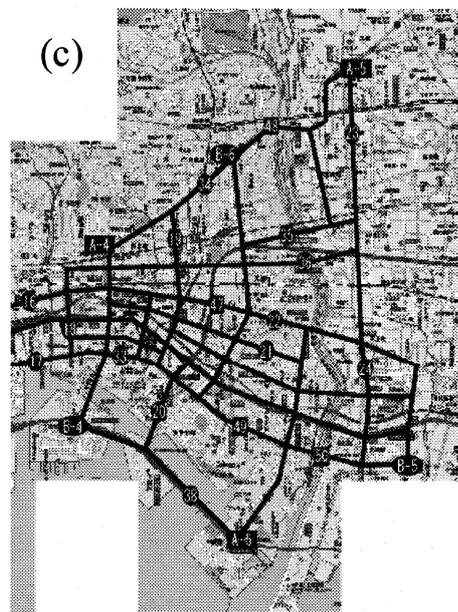
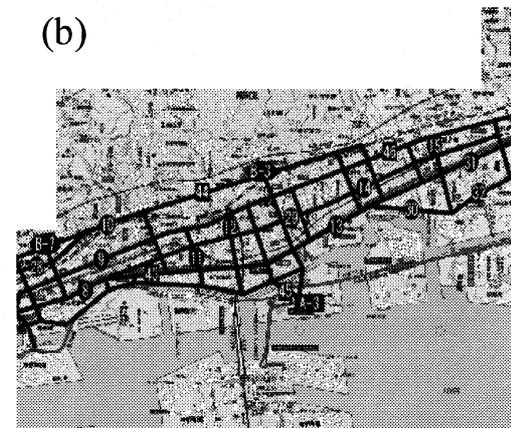
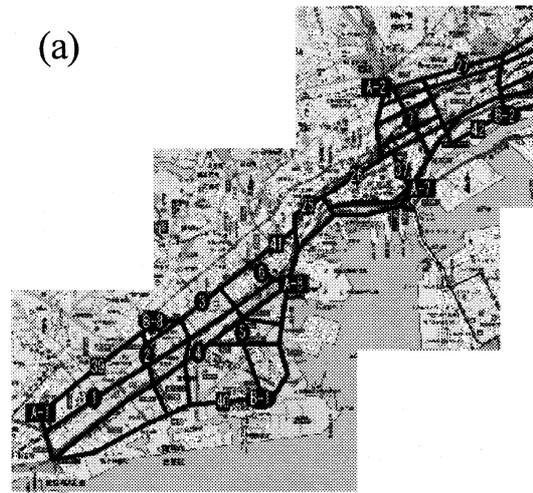
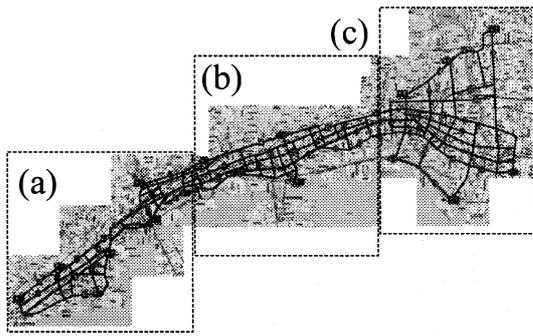


図-1 被災ネットワークモデル

2.2 復旧率の計算

復旧率の算定には、杉本らの研究³⁾により提案された方法を用いる。復旧率を算定することにより、単に復旧日数を短縮するだけでなく、道路ネットワークにおいて重要な被災箇所をできるだけ早く復旧する計画を策定することができる。被災を受けた各道路（リンク）の重要度 $W_i (i = 1 \sim n_L)$ 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 $R^{(q)}$ は重要度で重みを付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^0 は被災を受けたリンクの番号の集合、 J^q 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、稼働時間、労働時間を考慮した杉本らの研究³⁾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まる。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 3 で示される。

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

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 4 によって求められる。

$$h = D/A \quad (4)$$

ここで、 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 5 に

よって求められる。ここで、 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。

$$\begin{cases} h = \infty & (A < A_c) \\ h = D/A & (A \geq A_c) \end{cases} \quad (5)$$

この時、被害規模毎の復旧必要時間と復旧班の能力値との関係は図-2で表される。ここで、 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、式6によって求められる。

$$t_1 = t_0 - 2t_m - h_c \quad (6)$$

ここで、 t_0 は移動時間も含めた復旧班の1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7で表される。 h_c は準備などの時間であり、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。

$$t_m = L/v \quad (7)$$

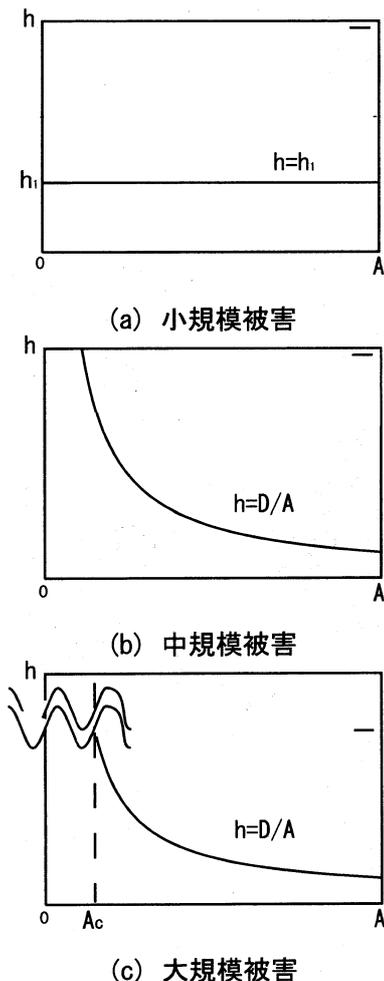


図-2 被害規模と復旧能力の関係

2.4 復旧計画策定における不確実性

震災後の被災地は、余震や火災のような二次災害により状況が変化しやすい不確実な環境下にある。そのため、復旧計画は、事前調査による情報を元に計画の策定を行うことから、復旧作業が予定通り進む可能性は極めて低い。被災地の被害量が増加した場合、その作業に要する復旧日数が増加し、作業全体へ影響するだけではなく、復旧能力の低い班が割り当てられていた作業が大規模被害に変化することによって着工不可能となり、復旧計画自体が破綻してしまうことも考えられる。また、資材不足や予期せぬ事態により、被災地の状態の変化に関わらず、復旧作業が遅延することも考えられる。

本研究では、復旧計画策定における不確実性を、被災地において二次災害等により変化する「被害量」、被害量の変化に関わらず発生する復旧作業の「遅延」の2つに分類する。そして、これらを併せて「計画遅延」として考慮した上で、頑健性のある復旧計画の策定を試みる。また、実際の工事では、着工不可能な工事が発生した場合、他の班を救援へ向かわせるというような、復旧計画の変更により対策を行う。しかし、計画を変更するためには、変更のための時間とコストが必要となることから、着工不可能な工事が発生する度に計画を変更しては、効率良く早期復旧を行うことが困難となる。本研究では、計画の変更が発生しないよう、不確実性を考慮した復旧計画を策定する際、複数班による共同作業を考え、可能な限り変更を行う必要のない計画を策定することを試みる。

不確実性の設定として、被害量の変化は、各作業毎に30%の確率で発生するものとし、被害量の変化が発生した作業の被害量を増加させることとする。増加量は、元の被害量の約30%となるよう、正規分布で発生させた乱数を用いて決定している。次に、復旧作業の遅延は、遅延日数として正規分布 $N[0, \delta^2]$ に従うものとし、 δ を2.0と設定する。ここで、遅延日数は、絶対値をとり、正の整数とした。遅延の発生は、各作業毎に20%の確率で発生させることとする。

2.5 複数班による共同作業

復旧計画において、復旧班ごとの作業量にばらつきがある計画は効率が悪く、実用的ではない。各復旧作業に復旧班を1班ずつ割り当てることは、一部の班に負担が集中する原因となる可能性がある。そのため、作業量や重要度に対して割り当てる復旧班の数も考慮した最適配分が必要であると考えられる。複数班による共同作業を行うことで、次のような効果が期待できる。

- 被害量の多い作業や、重要度の高い作業を複数班で分担する。
- 作業間の待ち時間を利用して、他の復旧作業を手伝う。

- 不確実性による計画への影響を抑える。

復旧作業を分担することで、効率の良い復旧計画を策定できるだけでなく、不確実性による影響に強い計画を策定できることが考えられる。復旧能力の低い復旧班であっても、共同作業を行うことで、被害規模の大きい工事を行うことができ、計画の破綻が起きる可能性を低くすることが期待できる。

本研究では、2班での共同作業を想定した復旧計画の策定を行うこととする。共同作業における復旧班の行動の定義は、次に担当する予定の工事が、既に補修が完了している場合、次に作業を行う予定の補修が完了していない工事に移ることとする。また、能力の低い班が次に担当する予定の工事が大規模被害である場合、既に他の班が作業を開始していれば共同作業を行い、作業を開始されていないが他の班がその工事を担当する予定があるなら、次の日からその工事に次に担当する予定の工事に移ることとした。

3. GA を用いた被災ネットワークの復旧計画策定

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、図-3 のようにコーディングされる。なお、図-3 は、復旧工事が2種類 (a, b) の場合のコーディング例である。担当班の数字の並びは工事を担当する班の番号であり、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。そして、共同作業フラグは0または1で表され、1の場合には対応する工事に対して担当班 (サブ) を共同作業班として担当させる。ここで、図-3 に示す遺伝子列の復旧班の担当工事と順序は図-4 のようになる。

復旧工事 a												
順位	担当班(メイン)			担当班(サブ)			共同作業フラグ					
1	3	4	5	2	1	0	0	0	1	0	1	0
復旧工事 b												
順位	担当班(メイン)			担当班(サブ)			共同作業フラグ					
5	2	3	4	1	1	2	2	0	1	2	2	0

図-3 コーディング例

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

図-4 遺伝子列の意味

復旧班の担当工事と順序は、図-3 の順位や担当班のそれぞれ対応した遺伝子座の値により決定される。復旧工事 a の場合、まず、1つめの遺伝子座では、共同作業フラグが1、順位が1であることから、担当班 (メイン) の1班と担当班 (サブ) の0班の両方へ工事1を

担当させる。2つ目の遺伝子座では、共同作業フラグが0、順位が3であることから、担当班 (メイン) の0班へ工事3を担当させる。この時点で、0班は1, 3の順に、1班は1というように工事を担当することになる。これを順位の最後まで繰り返すことで、図-4 に示す復旧班の担当工事の順序が決定される。図-4 の担当工事の順序で、下線の付いた工事番号は、共同作業を行うことを表す。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。

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-5 のようになる。そこで、本研究では、図-5 に色着けされた部分、つまり、非復旧面積を最小化することを目的とした。非復旧面積は、復旧完了日までの1日ごとの非復旧率の累積である。復旧率は、2.2 節で示した式1 より求められることから、重要度の高いリンク (道路) が復旧されるほど復旧率が高くなる。そのため、重要度の高いリンクが早期に復旧されるほど、非復旧面積が小さくなることから、重要度を考慮した復旧計画を策定できることが期待できる。本研究では、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から復旧することも重要であると考え、目的関数として非復旧面積最小化を検討することとした。また、2.1 節で述べた撤去と補修の2種類の作業を考慮するために、各リンクは、補修作業が終了した時点で目的関数へ反映されるものとする。

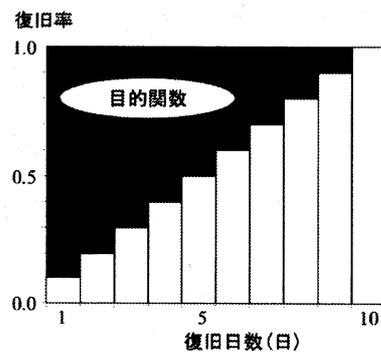


図-5 復旧率と復旧日数の関係

4. 計画遅延の不確実性を考慮した復旧計画策定

4.1 単純 GA による復旧計画策定

図-1 に示した被災モデルにおいて、単純 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 500, 最大世代数 1500, 交叉確率 60%, 突然変異率 0.5% と設定する。交叉は、順位は順序交叉、

それ以外の遺伝子は一様交叉とし、突然変異は、順位は遺伝子の位置を交換、それ以外はビット反転とした。その結果を図-6に示す。図-6は各工事の完了日数、および撤去と補修の2種類の作業の関係を考慮した日程表である。ここで、濃い灰色で塗られている部分は何も担当していない待ち時間、丸で班の番号を囲まれているのは能力の低い班（撤去作業は3班、補修作業は1班）、薄い灰色が塗られている工事は大規模被害である工事、黒枠で囲まれた工事は共同作業を行う予定の工事を表している。図-6では、撤去作業の工事番号22、34などのような被害規模の高い工事の一部を共同作業で行っていることが分かる。なお、撤去作業の工事番号23のように、黒枠で囲まれているが、共同作業を行っていない工事も存在する。これは、共同作業を行う予定だったが、1つの班のみで工事が完了したものを表している。また、各復旧班の復旧作業終了日の差として、撤去作業では最大3日、補修作業では最大1日というように、複数班による共同作業を考慮することにより、従来の適用結果⁴⁾と比較して、各班にバランス良く復旧作業を配分することで、早期復旧を目的とした計画を得ることができた。

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

評価値 6.25, 復旧日数 15 日

図-6 単純 GA の実行結果

4.2 不確実性の復旧計画への影響

図-6の計画の頑健性を測るために、不確実性を発生させながら1000回のシミュレーションを行った結果を表-5に、各班毎の平均遅延日数を表-6に示す。ここで、表-5は、不確実性として被害量の変化のみを考慮した場合、復旧作業の遅延のみを考慮した場合、そして被害量の変化と遅延の両方を考慮した場合の3パターンでシミュレーションを行った結果である。なお、平均遅延日数の数値は計画破綻となった場合を除いたものであり、計画破綻とは、復旧能力の低い班が大規模被害

害の工事を担当することになり、着工不可となることを表す。

シミュレーションの結果として、被害量の変化のみを考慮した場合、約25%の確率で計画が破綻する可能性がある。不確実性により、計画を策定する段階では、大規模被害ではなかったが、着工する段階で被害量に変化し、着工不可となった場合、単純GAでの解の探索を行う段階では、不確実性を考慮していないことから淘汰できず、不確実性を考慮しながら探索を行った場合であっても、大規模被害へ変化する可能性が低い解を淘汰することが困難である。また、本研究では、2.4節で上述したように、計画が破綻した場合の対策を行わないこととする。そのため、現実問題のような不確実な環境に対してこの計画は実用的ではない。また、表-6では、遮断物撤去作業において復旧能力の低い班の平均遅延日数が0に近い値となっている。これは、遅延による影響が小さいのではなく、担当予定の工事の被害量が増加し、着工できなくなったことから、その工事を共同作業する予定の班に任せて次の作業に移行したからである。遅延のみを考慮した場合は、計画が破綻することはないが、被害量の変化と比較して評価値と復旧日数が大きく変化するということが分かる。このような結果から、被害量と遅延の両方を不確実性として考慮した場合、計画の大幅な遅れと計画破綻の両方に対して頑健性を持つ計画を策定する必要がある。

表-5 シミュレーション結果

不確実性	被害量の変化のみ	遅延のみ	被害量の変化と遅延の両方
最悪評価値	∞	10.05	∞
最良評価値	6.76	6.45	7.11
最長遅延日数	∞	13日	∞
最短遅延日数	1日	1日	3日
平均遅延日数	3.50日	4.51日	6.72日
計画破綻数	264/1000	0/1000	273/1000

表-6 各班毎の平均遅延日数

不確実性	作業種	1班	2班	3班	4班	5班	6班	7班	8班
被害量のみ	撤去	1.94	1.54	0.18	1.86	1.66	2.01	2.00	1.39
	補修	2.74	2.40	3.11	2.80	2.86	3.00	2.86	2.23
遅延のみ	撤去	1.85	1.55	1.11	1.67	1.61	2.28	2.00	1.60
	補修	2.87	2.74	3.66	3.48	3.29	3.38	3.27	2.91
両方	撤去	3.31	2.87	1.00	3.23	3.33	3.80	3.55	3.01
	補修	4.87	4.36	5.63	5.14	5.26	5.72	5.24	4.69

4.3 頑健な解を得ることを目的とした遺伝的アルゴリズム

玉置ら⁸⁾により考案された不確実GAは、対象問題における不確実性を陽に考慮しながら、頑健性を有する解を探索することを目的とした手法である。不確実GAでは、最適値探索と並行して、形質遺伝による進化の機構を擬似サンプリング^{4),8)}と捉えることで、解候

補の評価の期待値を推定している。擬似サンプリングとは、形質遺伝により、ある個体の解空間上での近傍の解が、世代交代を通じて何度も繰り返し評価されていることをサンプリングとして捉えるものである。不確実 GA は、交叉時に、新規個体への個体情報の引き継ぎを行うことで、サンプリングに要する時間を短縮しながら、効率良く局所探索を行うことができる。ここに、不確実 GA の解の探索の流れを以下に示す。

STEP 1：初期世代発生

STEP 2：再評価+加齢（生き残っている個体のみ）

STEP 3：親の選択

STEP 4：交叉・突然変異

（新規個体の生成・近傍個体への個体情報の引き継ぎ）

STEP 5：適応度計算（新規個体の評価）

STEP 6：自然選択

STEP 2～6 を指定回繰り返す。

STEP4において、個体情報の引き継ぎは、親個体と新たに生成された個体との個体間の距離を用いて引き継ぎを行うかどうか確率的に決定される。本研究では、引き継ぎにおける個体間の距離を、図-7に示す個体間で共通する工事順序の数⁴⁾を用いて算出する。図-7(a)の場合、子個体を C、親個体を P1 とすると、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 P1、子個体 C の両方で灰色に着色されたように存在する。次に、基本となる工事を 1 とした場合には、その後に施工させる工事 4 が両個体に存在し、他の工事を基本となる工事とした場合には、両個体に存在する工事はない。この場合、子個体 C と親個体 P1 で共通する工事順序の数 $S(C, P1)$ は 2 となる。ここで、個体間の距離 $Dis(C, P1)$ は、式 8 で表される。

$$Dis(C, P1) = 1 - S(C, P1)/S(C, P1)_{max} \quad (8)$$

$S(C, P1)_{max}$ は、共通する工事順序の数の最大値である。個体間の距離は、0～1 の範囲の実数となり、値が 0 に近いほど個体間の類似度が高いことを表す。このように算出された個体間の距離を用いて、引き継ぎ率の決定を行う。

不確実 GA は、擬似サンプリングにより局所探索を効率良く行うことができる。しかし、対象問題によっては大域探索と局所探索をバランス良く行うことが困難となり、初期収束に陥りやすくなってしまふ。そのため、得られる解の精度について問題があり、実用的であるとは言い難い。

そこで、本研究では、不確実 GA を改良した改良型不確実 GA を用いて、復旧計画策定を行う。この手法は、不確実 GA の問題点を克服し、個体の密度を用いた多様性の維持を用いることで、大域探索と局所探索をバランス良く行うことができるように改良した手法である。不確実 GA の解の探索の流れとの違いは以下の通りである。

(a)

子個体		
復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事	1班	3→4→5
復旧工事	2班	1→4→2

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

親個体		
復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事	1班	3→5→2
復旧工事	2班	1→4

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

共通する工事順序の数：2

(b)

子個体		
復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事	1班	3→4→5
復旧工事	2班	1→4→2

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

親個体		
復旧工事	班	担当工事の順序
復旧工事	1班	4→3→5
復旧工事	2班	1→2

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

共通する工事順序の数：3

図-7 個体間の距離の算出

STEP 3'：親の選択

（親個体の一部を、年齢の高い個体から優先的に選択）

STEP 6'：自然選択

（評価値が同程度なら、密度に基づき個体を選択）

不確実 GA では、多様性の維持が考慮されていないため、上述のように局所解へ陥りやすいという問題がある。そのため、個体群の多様性を考慮した解の探索が重要となる。個体の密度とは、個体群中の個体の密集具合を表すもので、個体間の距離の平均値により求められる。上述のように、個体間の距離は値が 0 に近いほど個体間の類似度が高いことを表すことから、その個体の近傍に個体が密集しているほど、密度の値は小さくなる。改良型不確実 GA では、STEP 6' のように、同程度の評価値を持つ個体であれば、個体が密集していないところに分布している個体、すなわち、密度の値が大きい個体を優先して選択することで、多様性の維持を行う。また、多様性の維持の導入により、局所探索能力を損なわないために、STEP 3' で、親個体の何割かは、年齢の高い個体を優先的に選択する。

4.4 改良型不確実 GA の適用とその結果

図-1 に示した被災モデルにおいて、改良型不確実 GA を用いて復旧計画を策定する。改良型不確実 GA におけるパラメータは、単純 GA と同様に設定し、引き継ぎ率は、個体間の距離によって、図-8 に示すように確率が決定される。親個体の 30% は年齢の高い個体を優先して選択するように設定した。適用結果を図-9 に、頑健性を測るシミュレーションの結果を表-7、各班毎の遅延日数を表-8 に示す。ここで、図-9 では、図-6 の着色に加え、黒色の工事が被害量の変化により大規模被害となる可能性のある工事を表している。なお、不

確実GAでは、上述した問題により、改良型不確実GAと比較して良い結果が得られなかったことから、結果を割愛した。

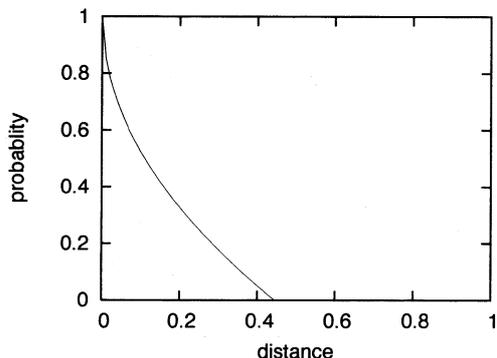


図-8 引き継ぎ率

表-7では、改良型不確実GAの評価値が単純GAより大きい値となっている。単純GAは、不確実性を考慮せず、早期復旧のみを目的として最適化を行っているからである。しかし、改良型不確実GAは、不確実性に対して頑健性を持ちながら早期復旧を目的としている。そのため、評価値は大きくなっているが、頑健性を有していることからより実用的な計画を策定することが可能となっている。図-9より、復旧能力の低い班が被害規模の大きい工事を行う場合、撤去作業は工事番号29、補修作業は工事番号4、48の大規模被害へと変化する可能性のある工事で共同作業を行っていることが分かる。また、撤去作業の工事番号27は、図-9では共同作業を行っていないが、不確実性の変化によっては、共同作業により工事を行うことになる。このようなことから、能力の低い班に割り当てられている工事が大規模被害へと変化した場合であっても、共同作業により作業を分担することで他の班が復旧工事を行い、計画破綻を防ぐことが可能となっている。これにより、被害量の変化に対して強い頑健性を持つことが可能となっている。一方、遅延による影響については、表-8で示すように、単純GAと比較して平均遅延日数が短くなっている。これは、古田らの研究⁴⁾で行われた結果と同様に、撤去作業の後に続けて補修作業を行う工事の数を少なくしているということと、補修作業班は撤去作業が終了後すぐに補修作業を開始する場合に作業を行わない待ち時間を設けているからである。しかし、表-7で示すように、最長遅延日数は単純GAと同程度の影響を受けている。図-9の計画では、計画破綻を防ぎながら能力の低い班に対して作業をバランス良く割り当てているため、遅延によって共同作業を行うことができない可能性がある。この場合、能力の低い班の負担が大きくなり作業が大幅に遅れるだけでなく、大規模被害の工事を行えないことから、共同作業を行う予定だった班への負担が増大することが考えら

れる。このようなことから、遅延に対して単純GAより頑健性のある計画を策定することはできたが、早期復旧を目的としながら被害量の変化に対して頑健性のある計画は、遅延により復旧日数が大きく変化する可能性がある。被害量の変化と遅延を同時に考慮した結果では、表-8に示すように単純GAより遅延の影響が小さく、計画が破綻することがない復旧計画を策定することができた。このような結果から、図-9に示す計画は、早期復旧を第一の目的としながら、頑健性を有する最適化がされている。

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
除去																		
1班		37								12		28						
2班	8	7																
3班			16		23													
4班				15			3					26					19	
5班		35			36						32	21						
6班			13										14		17		12	
7班				2				30						20				11
8班									4									
補修																		
1班																		
2班					48													
3班																		
4班																		
5班																		
6班																		
7班																		
8班																		

評価値 7.96, 復旧日数 18 日

図-9 改良型不確実GAの実行結果

表-7 頑健性を測るシミュレーションの結果

不確実性	被害量の変化のみ		遅延のみ		被害量の変化と遅延の両方	
	単純GA	改良型不確実GA	単純GA	改良型不確実GA	単純GA	改良型不確実GA
最悪評価値	∞	9.87	10.05	11.26	∞	12.57
最良評価値	6.76	8.27	6.43	8.1	7.11	8.72
最長遅延日数	∞	6日	13日	12日	∞	13日
最短遅延日数	1日	1日	1日	0日	3日	2日
平均遅延日数	3.50日	2.99日	4.51日	4.02日	6.72日	5.98日
計画破綻数	264/1000	0/1000	0/1000	0/1000	273/1000	0/1000

表-8 各班毎の平均遅延日数

不確実性	手法	作業種	班							
			1班	2班	3班	4班	5班	6班	7班	8班
被害量のみ	単純GA	撤去	1.94	1.54	0.18	1.86	1.66	2.01	2.00	1.39
		補修	2.74	2.40	3.11	2.80	2.86	3.00	2.86	2.23
	改良型不確実GA	撤去	2.25	0.67	-1.57	1.52	0.74	1.49	1.27	1.65
		補修	1.14	2.49	1.71	1.57	1.71	2.50	2.39	2.79
遅延のみ	単純GA	撤去	1.85	1.55	1.11	1.67	1.61	2.28	2.00	1.60
		補修	2.87	2.74	3.66	3.48	3.29	3.38	3.27	2.91
	改良型不確実GA	撤去	1.29	1.06	0.71	1.85	1.15	1.50	1.29	1.30
		補修	1.48	2.30	2.52	1.93	2.39	3.18	3.43	3.30
両方	単純GA	撤去	3.31	2.87	1.00	3.23	3.33	3.80	3.55	3.01
		補修	4.87	4.36	5.63	5.14	5.26	5.72	5.24	4.69
	改良型不確実GA	撤去	3.71	1.87	-0.75	3.10	1.81	2.58	2.55	2.84
		補修	2.55	4.49	4.25	3.41	3.90	5.02	4.89	5.31

5. おわりに

本研究では、震災後の被災地における不確実な環境を被災箇所での被害量の変化、復旧作業の遅延の2つに

分類して同時に考慮し、複数班による共同作業を行うことを想定した復旧計画策定を試みた。そして改良型不確実 GA を適用した結果、早期復旧と頑健性の両方を考慮したより実用的な復旧計画を策定し、本手法の有用性を示すことができた。以下に、本論文で得られた結論と今後の課題をまとめて示す。

1. 複数班による共同作業を想定した復旧計画策定を行った。そして、共同作業を行うことによる早期復旧への効果と復旧計画に対する不確実性の影響を明らかにした。
2. 本研究では、不確実性を考慮した上で頑健性を有する復旧計画を得るために、不確実性を考慮した GA を改良した改良型不確実 GA を適用した。
3. さらに単純 GA で得られた計画案と比較するために、不確実性を考慮しながら数値シミュレーションを行うことで両手法の比較検討を行い、改良型不確実 GA による計画案の有用性を示すことができた。
4. 単純 GA で得られた結果と改良型不確実 GA により得られた結果から、頑健性を有する復旧計画の特性を見出すことができた。
5. 改良型不確実 GA により得られた計画において、復旧能力の低い班は共同作業を行うことで被害量の変化に対して頑健性を持ちながら早期復旧を行うことができる。しかし、共同作業では、作業の遅延により能力の低い班が作業を行えなくなり、共同作業を予定していた班に対する負担が増大することから、復旧作業が大きく遅れてしまう可能性がある。早期復旧を目的としながら、被害量の変化と遅延に対してより頑健な計画を策定するためには、共同作業を行う班の数の変更などについて検討する必要がある。
6. 本研究での共同作業は 2 班で行う場合を想定した上で GA のコーディングを行っていることから、1

つの工事に対して共同作業を行う班の数を増やすことで遺伝子列が膨大となり最適化が困難となる問題がある。そのため、複数班による共同作業のためのコーディング方法について、今後検討を加える必要がある。

7. また、本研究では道路ネットワークの復旧のみを対象としているが、現実には他のライフラインの復旧も同時に考慮した計画を策定することが望ましいと考えられることから、複数のライフラインでの不確実性を考慮した復旧計画について、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 森本孝紀, 徳丸正孝, 村中得明, 今西茂, 被災道路復旧計画問題の一解法, 情処理学会研究報告, Vol.2005, No.20, pp45-48, 2005.
- 2) LIU B, 斉藤和夫, 榎谷有三, 震災道路網における復旧計画に関する研究, 都市学研究, Vol.40, pp39-46, 2003.
- 3) 杉本, 片桐, 田村, 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.
- 4) 古田均, 中津功一朗, 不確実性を考慮した被災ネットワーク復旧計画策定に関する研究, 土木学会論文集 (掲載決定済み)
- 5) 古田均, 中津功一朗, 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, 構造工学論文集 Vol.52A, pp191-200, 2006
- 6) 古田均, 中津功一朗, 築山勲, LCC を考慮した被害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, pp183-190, 2006
- 7) Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu & Dan M Fran-gopol: Optimal restoration scheduling for earthquake disaster using life-cycle cost, Proc. Of 4th International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructures System, pp47-54, 2005.
- 8) 玉置久, 荒井俊彦, 阿部重夫, 遺伝的アルゴリズムによる不確実な最適化問題の解法, システム制御学会論文集, Vol.12, pp297-303, 1999.

(2008 年 4 月 14 日 受付)