

被災後の復旧計画における不確実環境への対応

Deal against Uncertain Environments in Restoration Scheduling of Damaged Networks

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) 立命館大学助教 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目 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)

†正会員 博士(情報学) 京都大学大学院助教 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

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. In this study, the priority of an allocation that which groups will restore which disaster places is optimized under uncertain environments. So, the restoration schedules adapting to various situations can be made by using this priority. An attempt is made to develop a decision support system of the optimal restoration scheduling by using the proposed method.

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

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、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。

現実における復旧活動では、余震による二次災害や悪天候による被害状況の変化、復旧資材の不足や交通渋滞などの予期せぬ事態による作業の遅延が発生することから、復旧工事が計画通りに進まない可能性が非常に高い。このようなことから、復旧計画を実用化する

ためには、不確実環境を想定し、状況が変化しても有用性を損なうことのない頑健な計画策定が必要となる。

不確実環境下における頑健な計画を策定する方法のひとつとして、不確実性を陽に考慮しながら計画を策定することで、頑健な復旧計画を策定できることが実証されている^{4),5)}。しかしながら、この方法では、計画策定においてクリティカルとなる工事の施工前後にバッファを持たせることで遅延を抑えることから、想定する不確実性の影響が大きくなるにつれて、早期復旧を同時に満たすことが困難となる問題がある。

また、不確実性による影響が大きい計画策定問題への対応として、不確実性の影響を受けた場合に計画を策定し直す、すなわち、再スケジューリングが有効であると考えられる研究者も多く存在する^{6) - 9)}。しかしながら、復旧活動において、工事に遅れが生じる度に計画を再策定しては、計算時間や計画遂行の面で問題が生じてしまう。

本研究では、現実の復旧活動に対する適用可能性を考慮し、不確実環境への対応として、不確実性の影響に応じてフレキシブルに計画を策定する方法を提案する。提案手法では、復旧工事ごとに予め担当班を決定するのではなく、担当班の優先順位を決定する。これにより、不確実性による状況の変化に応じて、優先順位に従って随時工事を復旧班へ割り当てることから、不確実性の影響に応じた計画を策定できると考えられる。

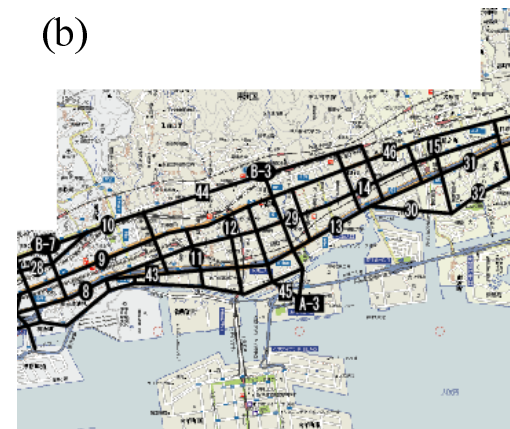
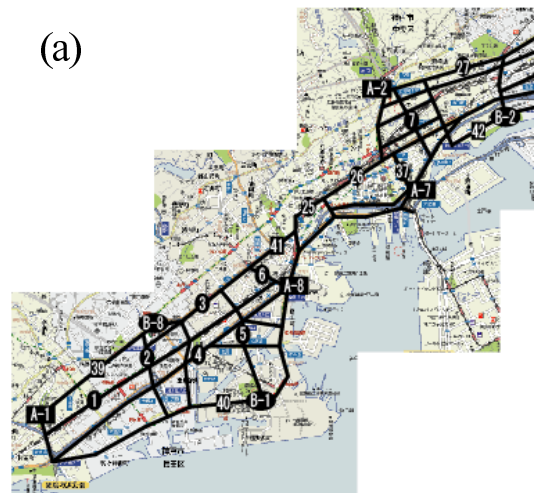
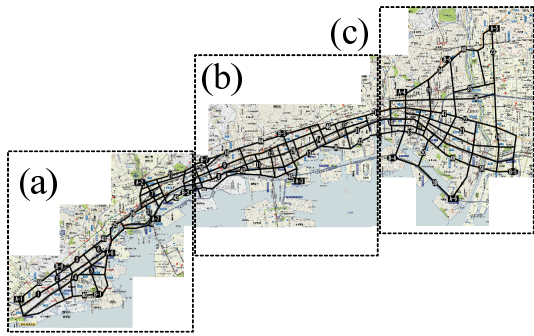


図-1 被災ネットワークモデル

また、再スケジューリングとは異なり、不確実性を考慮しながら探索されたひとつの解から、不確実環境に応じてフレキシブルに計画を策定するので、再探索など時間面での問題を解決できる。本研究では、提案手法を適用することで、復旧計画支援システムの現実問題における有用性を検証する。

2. 道路ネットワークにおける復旧計画策定

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),10),11)}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い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。

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-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

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

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

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

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、 t_1 は復旧班の1日の復旧工事のための作業時間である。まず、 h について、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。次に、復旧班の 1 日の復旧工事のための作業時間である t_1 は、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。

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

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、計画策定前に得られた被災状況についての調査による情報を元に策定されることから、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、資材不足や交通渋滞など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、復旧活動における不確実性を、被災地において二次災害などにより変化する「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

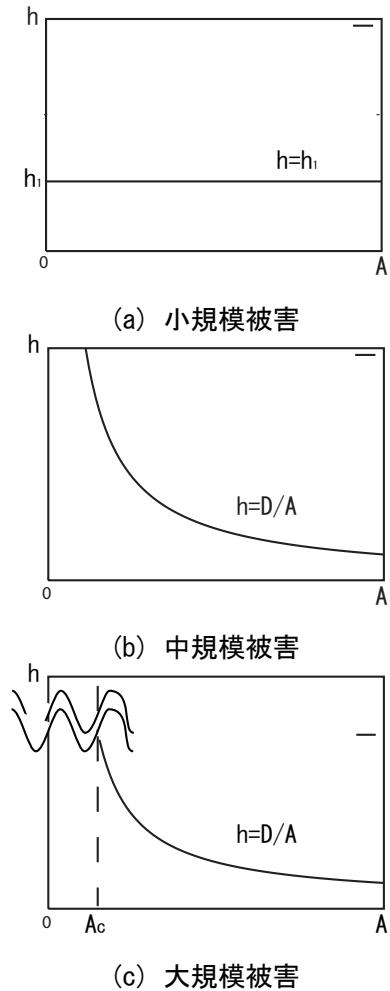


図-2 被害規模と復旧能力の関係

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、実用的な復旧計画の策定を試みる。

3. 不確実環境への対応

3.1 不確実性を考慮した計画策定方法

不確実環境下で計画策定問題を組合せ最適化問題として解く方法には、以下に示す 3 つの方法が考えられる。

- 1) 頑健な最適解の探索
- 2) 複数の準最適解を探索することで、最適な計画を状況に応じて選択
- 3) 不確実性の影響を受ける度に再探索

(1) 頑健な最適解の探索

まず、1) の方法では、不確実性を考慮しながら解探索を行うことで、不確実性による変化に対して頑健な計画を策定する。この方法により策定された計画では、遅延が発生することで後に続く計画へ影響を与える箇所の前後にバッファを持たせることで、遅延の影響を抑えている。例えば、復旧計画では、不確実性による

変化の影響を受けない場合において、ある被災箇所において遮断物撤去作業終了後すぐに道路補修作業へと移ることで早期復旧を行っていた³⁾が、ここで遮断物撤去作業に遅延が発生することにより、道路補修作業へも影響を与えることとなる。一方、この方法に基づいて策定された計画^{4),5)}においては、遮断物撤去作業が完了してから道路補修作業を施工するまでにバッファを設け、その間は他の工事を行うことで、遅延の影響を抑えるとともに、早期復旧を行うことができる。また、計画破綻に対しても、不確実性を考慮しながら解探索を行うことから、解探索時に想定した範囲内であれば破綻を防ぐことができる。しかしながら、想定する不確実性の影響が大きくなるにつれて遅延の影響を抑えるために計画に設けるバッファが大きくなるという問題がある。不確実性の影響が大きくなることで、対応しなければならない状況が増加することから、この方法では様々な状況の変化に対して頑健な計画を策定するため、全体的に復旧完了日数が増加してしまい、早期復旧を行うことが困難となる。特に、不確実性の影響が小さかった場合、早期復旧のみを目的として策定された計画と比較して計画が長くなることから、すべての状況に対応することは難しい。

(2) 複数の準最適解を探索

次に、2)の方法では、不確実性の影響により計画の最適性が損なわれることに備え、複数の準最適解を代替案として用意し、状況に応じて最適な計画案を選択する。予め計画案を複数用意することから、計画に遅延などが発生した場合、その影響に応じた計画案を採用することによって素早く対応し、影響を最小に抑えることができる。しかしながら、この方法は、計画案の変更することが効果的であると容易に判断できなければ、複数の代替案から有効な案を選択することが困難である。また、対象問題の規模や不確実性による影響の大きさによって、状況に応じた準最適解の数が膨大となる。そのため、現実問題への適用を考慮すると、有用であるとは言い難い。

(3) 不確実性の影響を受ける度に再探索

最後に、3)の方法⁶⁾⁻⁹⁾では、あらゆる状況に対応できる計画を策定することが困難なことから、予め策定した計画案に従って計画を遂行するのではなく、状況の変化が生じた際に、変化後の状況に対して最適な計画を策定し直すことで、不確実性の影響を最小限に抑えることができる。そのため、1)のように計画にバッファを持たせる必要がないことから、早期復旧を同時に満たすことが容易であるという利点がある。しかしながら、遅延が生じる度に計画を策定し直しては、計算時間などコスト面での問題が生じることとなる。復旧計画策定においては、一度の計画策定に多くの計算時間が必要であり、復旧工事はリアルタイムに行われていることから、早期復旧を満たすためには計画の再

策定に費やすことができる時間が限られてしまう。さらに、計画を再策定している間に被災地の状況が変化することも予想され、実用は非常に困難であると考えられる。

また、1)と3)を併用するとともに、遅延の影響が一定以上となるまで計画を再策定しないというような条件を設けることで、再探索の頻度を抑えることもできると考えられる。しかしながら、そのような条件設定など考慮すべき事項は多く、意思決定が容易でないことから実用的ではないと予想される。

3.2 提案手法による計画策定

本研究では、3.1節で述べたそれぞれの計画策定方法が持つ利点に着目し、不確実環境下における状況の変化に応じてフレキシブルに計画を策定する手法を提案する。3.1節で述べた手法と提案手法との関係性を図-3に示す。

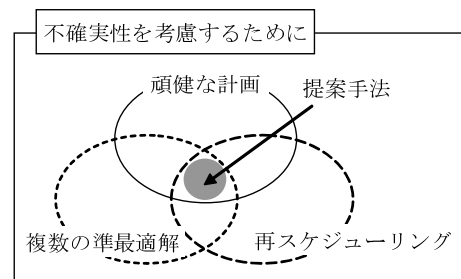


図-3 不確実性を考慮した計画策定

提案手法では、各工事に対して担当班を決定するのではなく、工事に対する復旧班の優先順位を決定する。この優先順位に基づき、被災状況の変化や計画の遅延に応じてフレキシブルに工事の担当班を決定することにより、様々な状況に対応した計画案を策定できると考えられる。

3.1節の3つの手法と比較して、提案手法は、一つの解から一つの計画が策定されるのではなく、状況に応じた計画が策定される。これは2)の利点と同様のものであり、優先順位の最適化によって状況の変化に対応した計画が策定されるという3)の利点も兼ねている。この最適化を行うために、不確実性を考慮しながら頑健な解の探索を行うことで、1)の利点である様々な状況に対応した優先順位の最適化が可能となる。このようなことから、提案手法により探索された解は、1)のように予め計画にバッファを設ける必要がなく、不確実性の影響の大きさに応じて工事の割り当てを行うことから、2)や3)のように影響を最小限に抑えるとともに、早期復旧を満たすことができると期待できる。さらに、2)のように複数の準最適解を探索する必要がなく、また、3)のように再探索を行う必要もないことから、時間的な制約やコスト面における問題も生じないと考えられる。また、2.4節で述べたように、被災地の

状況が変化することで計画が破綻する可能性があるが、提案手法では随時計画を策定することから、復旧工事の担当班を決定する際に、計画が破綻する班には割り当てないことで計画の破綻を防ぐことができる。本研究では、このような計画策定方法により、不確定環境へ随時対応できる頑健な復旧計画の策定を試みる。

4. GAによる被災ネットワークの復旧計画策定

4.1 目的関数

本研究で設定した目的関数は2.2, 2.3節した復旧日数と復旧率により表される³⁾。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に着色された部分、すなわち、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。

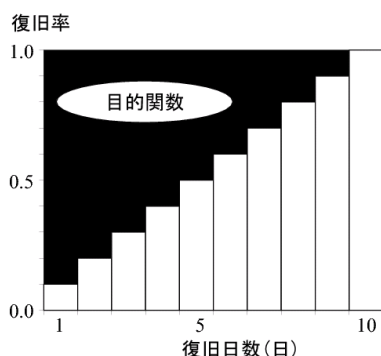


図-4 復旧率と復旧日数の関係

4.2 コーディング

N種類の復旧工事がある場合、従来手法^{3),4)}では、遺伝子列は図-5のようにコーディングされる。なお、図-5は、復旧作業が2種類(a, b)の場合の例である。担当班の数字の並びは工事を担当する復旧班の番号であり、それぞれ施工順序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。図-5に示す遺伝子列の復旧班の担当工事と施工順序は図-6のようになる。

このように、従来手法では、ひとつの遺伝子列からひとつの計画を策定することとなる。これに対して、提

案手法では、設計変数として工事の施工順序と工事に対する復旧班の優先順位を決定する必要がある。提案手法の遺伝子列の例を図-7に、その遺伝子列の復旧班の担当工事と施工順序を図-8に示す。

図-7のように、提案手法では、遺伝子列として工事ごとに復旧班の優先順位を決定することとなる。本研究において、工事の割り当ては1日の復旧活動の開始時に行われ、割り当ての際に次の担当工事が決定していない復旧班を対象として、優先順位に基づいて担当班を決定する。ただし、一度担当が決定した後は変更しないこととする。このような手順で計画が随時策定されることから、図-8のように各復旧班の最初の担当工事は一意に決定されるが、それ以降の工事は状況の変化に応じて担当班が決定される。

提案手法により探索する解は、このようにひとつの計画ではないことから、個体の評価値として目的関数を用いるだけでは、適正な評価を行うことができない。そのため、本研究では、不確定性を陽に考慮しながら解探索を行うことで、各世代ごとの目的関数値の期待値を評価値として用いることとする。

復旧作業 a									
施工順序					担当班				
1	3	4	5	2	1	2	2	2	1
復旧作業 b									
施工順序					担当班				
5	2	3	4	1	1	3	2	4	3

図-5 従来手法のコーディング例

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

図-6 従来手法の遺伝子列の意味

4.3 不確定性を考慮した遺伝的アルゴリズム

本研究では、様々な状況の変化に応じた解を得るために、不確定性を陽に考慮しながら解探索を行う手法として玉置ら¹²⁾により考案された不確定性を考慮した遺伝的アルゴリズム(不確定GA)を用いる。不確定GAの解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)
- STEP 5: 適応度計算(新規個体の評価)
- STEP 2~6を終了条件を満たすまで繰り返す。

不確定GAでは、個体に年齢構造を導入し、世代ごとに生き残っている個体の再評価を行うことで、個体の加齢を行うとともに、年齢を用いた評価値の推定を

復旧作業 a	施工順序	1位	2位		
	1	1	2		
	3	2	1		
	4	2	1		
	5	2	1		
復旧作業 b	施工順序	1位	2位	3位	4位
	5	1	2	3	4
	2	3	1	2	4
	3	2	4	1	3
	4	4	2	3	1
		3	4	1	2

図-7 提案手法のコーディング例

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

図-8 提案手法の遺伝子列の意味

行う。このようなことから、不確実 GA における個体の適応度は式 (8) により求められる。

$$g(y_i) = \frac{(d_i - 1)g(p_i) + h(f(\hat{w}, x_i))}{d_i} \quad (8)$$

式 (8) において、個体の遺伝子型 y_i について、その表現型を x_i 、年齢を d_i 、親個体を p_i とし、評価関数値 f を適応度にマッピングする関数を $h(f)$ とし、個体 y_i の適応度を $g(y_i)$ と表す。ただし、 \hat{w} は各世代で個体 y_i が評価されるときのパラメータ w のサンプル値であり、すなわち、不確実性を表す。

STEP4 において、本来の不確実 GA では、擬似サンプリングにより効率良く解の推定を行うが、そのためには、個体間の距離を定義する必要があり、また、擬似サンプリングを効果的に用いるためにはこの距離により個体間の類似性を適切に定量化できる必要がある。このような理由から、提案手法における個体間の距離として、遺伝子列の単純な一致度から算出されるハミング距離を用いることは適切ではなく、策定される計画は不確実環境によって変化することから、従来手法^{4),5)}で用いられていた距離を用いることが困難となる。そのため、本研究では、擬似サンプリングの代わりに、自然淘汰において、同程度の適応度を持つ個体に対しては年齢による淘汰を行うことで、頑健な計画策定案の探索を試みる。

5. 不確実環境下における復旧計画策定

5.1 数値実験

図-1 に示した被災モデルにおいて、提案手法による計画策定方法を用いた不確実 GA により復旧計画を策定する。この時、GA のパラメータとして、人工サイ

ズ 1000、最大世代数 1000、交叉確率 60%、突然変異率 0.5% と設定する。交叉は、施工順序は復旧作業ごとに、優先順位は工事ごとに順序交叉を用いることとし、突然変異は、遺伝子の位置を交換することとする。

また、数値実験における不確実性として、被害量の変化は工事ごとに 30% の確率で発生するものとし、被害量の変化が発生した工事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する。次に、復旧作業の遅延は、遅延日数として正規分布 $N[0, \sigma^2]$ に従うものとし、 σ 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、遅延の発生は、工事ごとに 20% で発生させることとする。

提案手法の有用性を検証するために、従来の計画策定方法に従って SimpleGA により得られた計画案³⁾との比較を行う。

5.2 適用結果

数値実験により得られた解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 に示す。

表-5 において、平均評価値は、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の工事を担当することとなり、着工不可となることを意味する。計画破綻の値は、1000 回のシミュレーション中にそれぞれが発生した回数を表しており、復旧活動を完了できなかったことを意味する。また、評価値（影響なし）とは、不確実性による遅延などの影響がなく、予定通りに計画を遂行できた場合の評価値を表す。

シミュレーション結果より、提案手法を用いることで頑健な計画を策定できることがわかる。平均評価値や計画破綻からわかるように、提案手法では、不確実性による環境の変化に応じてフレキシブルに計画を策定することから、不確実性の影響を抑えることができた。提案手法により策定された計画として、不確実性の影響を受けなかった場合に策定される計画を図-9 に、不確実性の影響により状況が悪化した場合の計画を図-10 に示す。

図-9, 10 は、各工事の完了日数、および撤去（上部）と補修（下部）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、色の塗られた班は能力の低い班（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を表している。また、図-10 において、黒枠で囲まれた工事は不確実性の影響により担当班が変更された工事を表している。

図-9, 10 からわかるように、提案手法では、不確実性による環境の変化に対して、優先順位に従ってフレ

キシブルに計画を策定することから、不確実性の影響がない場合に策定される計画と比較して、半数以上の工事の担当が変更されている。

図-10の計画では、撤去作業の工事番号3, 30, および38, また、補修作業の工事番号47の遅延が大きく、これらの工事以降に変更が生じている。これらの遅延に対して、撤去作業の3班は予定どおり作業が進んでいることから、工事番号26の作業終了後に他の班が担当予定であった工事(2と7)を代わりに行うことで、遅延の影響を抑えている。このように、提案手法による計画策定では、ある班の作業の遅延に対して、遅延の影響が少ない班が代わりに工事を担当することにより、不確実環境へ対応した計画を策定できる。

また、予定通り計画を遂行できた場合、表-5からわかるように、提案手法により策定される計画は、SimpleGAによって早期復旧のみを目的として策定された計画と同等のものである。これらの結果から、提案手法を用いることで、早期復旧を第一の目的としながら、頑健な計画を策定できたとと言える。さらに、SimpleGAにより得られる計画は、ある工事箇所において、撤去作業完了後すぐに補修作業を開始することで、早期復旧を実現しているという特徴がある。これは、提案手法により策定された計画にも言える特徴であり、不確実環境下においても同様の特徴が見られることから、状況の変化に応じた計画を策定できると考えられる。

表-5 検証結果

手法	Simple GA	提案手法
平均評価値	11.32	9.30
評価値 (影響なし)	6.48	6.66
最悪評価値	∞	12.35
計画破綻	401 / 1000	0 / 1000

6. おわりに

本研究では、震災後の不確実な環境下において早期復旧を実現するために、復旧工事の担当班を決定するための優先順位を最適化することで、様々な状況の変化に応じてフレキシブルに計画を策定することを試みた。優先順位を最適化するために不確実GAを適用した結果、早期復旧とともに様々な状況に応じた計画を策定することで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. 従来の不確実環境下における計画策定問題の解法について、それぞれの方法が持つ利点と問題点を明確にした。本研究では、それらの利点に着目し、復旧工事に対する班の優先順位を設計変数とすることで、様々な状況に応じて優先順位に従い随時計画を策定する方法を提案した。

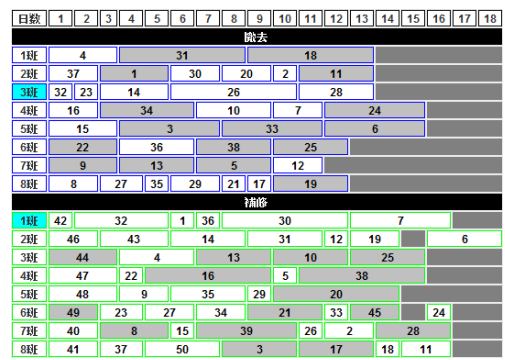


図-9 提案手法により策定された計画 (影響なし)

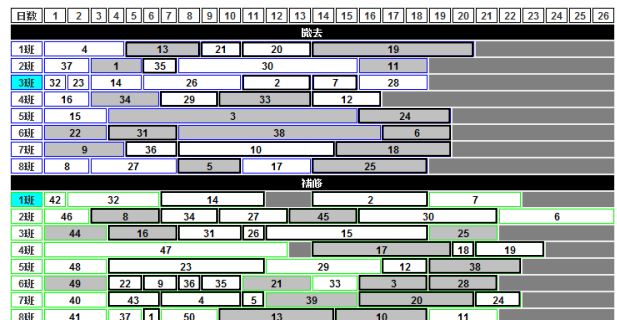


図-10 提案手法により策定された計画 (悪化時)

2. 本研究では、不確実GAを用いることで、様々な状況に対応できる計画策定案の探索を試みた。数値実験より、提案手法により得られた計画策定案に従うことで、不確実性による環境の変化に対して頑健だけでなく、遅延などの影響を受けることなく予定通り復旧を完了した場合であっても早期復旧を同時に満たす計画を策定できることを示した。
3. 提案手法により探索する優先順位を用いた計画策定案は、不確実性の影響を受けた後の計画に対して、その影響が最小となるようフレキシブルに計画を策定することができる。従来手法により計画の変更を実現するためには複数の計画案を準備する、または再スケジューリングする必要があったが、提案手法では、ひとつの解でこれを実現することができる。そのため、現実問題への適用を想定した計画策定方法として、計算時間など実用面で有用であると考えられる。
4. 提案手法のさらなる有用性の検証として、様々な状況下においても、本研究と同様の結果が得られるかどうか検証する必要がある。提案手法では、すべての工事に対して優先順位に従っての担当班を決定しており、例えば、被災箇所から離れた復旧班しか手が空いていない場合であっても工事の割り当てを行うこととなる。このような割り当ては、本来は望ましくないものであることから、さらなる実験が必要であると考えられる。

5. 本研究では、復旧活動における不確実性として、被災地の被害量の変化と復旧作業の遅延の2種類を考慮しているが、実際の復旧活動においては復旧工事を行う人員の確保など様々な不確実性が存在する。提案手法の実用化に向けて、今後はより詳細な不確実性を考慮した計画策定問題へ適用し、有用性や実問題への適用性について検証する必要がある。
6. 本研究は道路ネットワークの復旧のみを対象としているが、他のライフラインについても同様に計画策定が検討されている^{13),14)}。しかしながら、実際の復旧活動では、異なるライフライン間に施工順序など様々な関係が存在する。そのため、複数のライフラインを対象とした復旧計画策定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, 齊藤和夫, 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, 中津功一郎, 野村泰稔, 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, Vol.64, No.2, pp.434-445, 2008.
- 5) 中津功一郎, 古田均, 野村泰稔, 石橋健, 服部洋, 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, 応用力学論文集, Vol.11, pp.655-663, 2008.
- 6) 飯間等, 三宮信夫, 遺伝アルゴリズムによる再スケジューリング問題の解法, 自律分散システム・シンポジウム資料, Vol.9, pp.313-318, 1997.
- 7) 山田一穂, 中田智之, 永田守男, フライトスケジューリングへの協調分散アプローチ, 電子情報通信学会技術研究報告.KBSE, 知能ソフトウェア工学, Vol.98(238), pp.9-16, 1998.
- 8) 平井力, 列車ダイヤ乱れ時の再スケジューリング問題の解法, オペレーションズ・リサーチ:経営の科学, Vol.53(8), pp.458-463, 2008.
- 9) 石渕久生, 村田忠彦, 李揆亨, 区間加工時間を持つフローショップ・スケジューリング問題, 日本経営工学会論文誌, Vol.49(2), pp.59-70, 1998.
- 10) 古田均, 中津功一郎, 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
- 11) Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu & Dan M Frangopol: 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.
- 12) 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.
- 13) Perez-Guerrero R., Heydt G.T., Jack N.J., Keel B.K. and Castelhana A.R.: Optimal Restoration of Distribution Systems Using Dynamic Programming, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.3, pp.1589-1596, 2008
- 14) N. Xu, S.D. Guikema, R.A. Davidoson, L. K. Nozick, Z. Cagnan and K. Vaziri: Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.36, No.2, pp.265-284, 2007

(2010年3月9日 受付)