

I -67

GAによる道路と水道被害の復旧支援について

北海道開発コンサルタンツ 正員 片桐章憲

北海学園大学 正員 杉本博之

1. まえがき 直下型地震だけでなく、各種の自然災害に対する備えは必要なことであり、構造物の補強等の事前対策、被害を受けた後の復旧対策等の事後対策は、いずれも大切であり、早急に体制を確立すべきと思われる。筆者らは、直下型地震のために被災を受けた市街地の復旧に遺伝的アルゴリズム（以下GAと略する）を応用する研究成果を発表してきた^{1)~6)}が、それぞれの立場により種々の議論があった。

都市構造が複雑になればなるほど、被害の状況は複雑になり、その復旧体制における意思決定問題は困難になると思われ、何らかのコンピュータの使用は不可欠と思われる。従って、関係官庁は、必要なプログラムを具備する高度な計算機を、耐震補強された建物に設置し、システムを守ることが必要があることはいうまでもない。また、計算時間が問題とされることがある。承知のように、GAのみならず一般的な最適化手法の応用においては、要する計算時間の大半は、与えられた構造あるいはシステムの解析のための計算時間で、最適化の過程にはほとんど計算時間を要しない。つまり、有効な復旧事業の指示を出すにはある程度高度なコンピュータの使用は不可欠であり、それに要する時間は、実際の問題をどの程度の精度で解析するか依存することになる。

筆者らは、すでに道路上の遮蔽物と道路本体の補修工事がある場合を中心に発表してきたが、ここでは、道路被災の他に水道網の被災がある場合を想定し、従来の解析プログラムに若干の改良を加えて解析の汎用性を若干増すことができたので、計算例と共に発表するものである。

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、上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上水道の被災箇所にも到達できない等である。

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 ($i=1\sim N$) 班待機しているとする。これらの復旧箇所と復旧班を、

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

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が、本研究では、図-1に網掛けした部分として示す累積非復旧率最小を目的関数としている。

なお、道路網の他に水道網の復旧を扱う場合は、目的関数は2つあることになるが、その場合は、下記のように加重和を取り、1目的の問題に変換して解くことにする。

$$F = F_R + \alpha \times F_w \quad (2)$$

ここで、Fは変換された1目的問題の目的関数、 F_R 、 F_w はそれぞれ道路網の復旧問題と水道網の復旧問題の目的関数である。 α は重み係数で、問題により適当にあたえられる。後記の計算例では2としている。

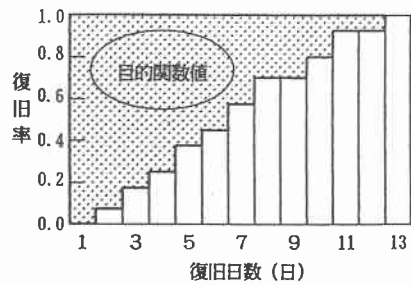


図-1 目的関数の概念図

3. 設計変数のコーディングとGA GAは、組合せ問題、およびスケジューリング問題にそれぞれ対応して応用され、その有効性が示されてきたが、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。

道路工事が2種類（遮蔽物撤去作業と道路補修作業）と水道工事がある場合の線列の例を示すと以下のようになる。ここでは、工事箇所がそれぞれ4、6、及び3か所あり、復旧班がやはりそれぞれ2、4、及び2班いるとする。

線列の例 : [3 1 2 4 1 2 2 1 : 3 5 6 1 2 4 2 4 1 1 3 2 : 2 1 3 1 1 2]
 ← 順位 ← 担当 ← 順位 ← 担当 ← 順位 ← 担当
 ← 遮蔽物撤去作業 ← 道路補修作業 ← 水道補修工事

この場合、各補修工事、各班毎の仕事の分担と工事順は、以下のようになる。

- ・遮蔽物撤去作業 : 1班 (1→4)、2班 (3→2)
- ・道路補修作業 : 1班 (3→4)、2班 (6→1)、3班 (5)、4班 (2)
- ・水道補修作業 : 1班 (2→1)、2班 (3)

このような線列に対して、交叉及び突然変異は、工事順位に対してはスケジューリング問題のための交叉法、突然変異法を、各班の担当部分に対しては組合せ最適化問題のための交叉法、突然変異法をそれぞれ用いてGAの過程が進行することになる。

4. 復旧過程の計算 本研究の復旧過程の計算は、1日毎に各復旧班の状態を求め、それにより、工事の完了、各目的関数の計算を行った。各復旧班の状態は、1：工事現場へ移動中、2：作業中、3：その日の作業を終え工事現場から移動中、4：先行工事の関係あるいは道路事情の関係で現場へ行くことができないで待機状態、5：担当の総ての工事を終えた状態、のように与え、1日毎に状態をチェックする。前節で説明したようにGAの過程で新しい線列が作られる度に各班のスケジュールが与えられ解析が要求される。そのスケジュールに対する解析の手順を簡単に説明すると、以下のようになる。

被災直後の道路状態に対する道路のノード間の連結状態、最短距離、また水道網の流出節点の配水池に対する連結の状態は、この段階に来る前にすでに計算されている⁵⁾。

①最初は総ての班が、状態1に設定される。

各班が担当する被災箇所の被災程度、及び担当する班の能力により、工事を完了させるまでに必要な実作

業時間（ T_0 ）が計算される。

- ②担当する復旧工事の状況により、移動（状態1）するか、待機（状態4）するかの判断がなされる。

待機となるのは、先行工事終了して着工できないか、道路の復旧工事が十分に進んでいない、工事箇所へ到達できない場合である。

移動と判断されれば、状態2となり移動に必要な時間及びその日の作業時間（ T_a ）が班毎に計算される。

- ③状態2の場合は、各班毎に T_0 と T_a の時間残を計算し、それが0時間以下になったら工事が完了であるから状態3に設定する。この場合、一つの道路が開通した場合は、対象としている道路ネットワーク全体の連結状態、最短距離を更新し、道路工事に関する目的関数の値が加算される。またもし、水道網の一つのリンクが復旧された場合は、水道網の連結状態が更新され、水道工事関係の目的関数が加算される。

- ④ T_0 と T_a の時間残が1時間以上の班は、状態3となり、翌日また同じ被災箇所を担当することになる。時間差が0時間以上で1時間以下の場合は、残業して残りの工事を完了することになっている。担当する総ての工事が完了すればその班の状態は5となる。

- ⑤総ての班の状態が状態5となれば、与えられた工事日程に対する復旧工事、及び目的関数の計算は終了することになる。そうでなければ、日が更新されて①からの過程が繰り返されることになる。

このように、各班の状態を分類し、1日間隔毎に状況を更新する方法により、解析過程が整理され、いくつものライフラインが複雑に関係している場合でも、解析論理の構築が容易になると思われる。

5. 数値計算例 道路網の被災モデルを図-2に、水道網の被災モデルを図-3に示した。

図-2で、▲が遮蔽物撤去作業単独、×が道路補修作業単独、※が遮蔽物撤去と道路補修作業が両方ある場所で、この場所では、遮蔽物撤去作業が終わらなければ道路補修作業には入れないことになる。また、○が遮蔽物撤去作業班（4班）、□が道路補修作業班（8班）のそれぞれ常駐場所である。

図-3では、二重線が水道管網を表す。また○付きの数字は各家庭に水を供給する流出節点で、各節点毎に配水エリアが与えられている。×が水道管の被災箇所である。図-2と図-3の関係から、例えば、水道管の被災箇所13の復旧作業は、道路が連結されておらず当初は無理で、必要な道路リンクが復旧しないと着工できないことになる。水道管の補修作業班の常駐位置は○（4班）で示されている。

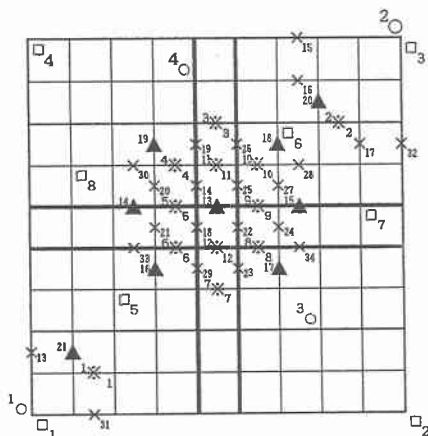


図-2 道路網の被災モデル図

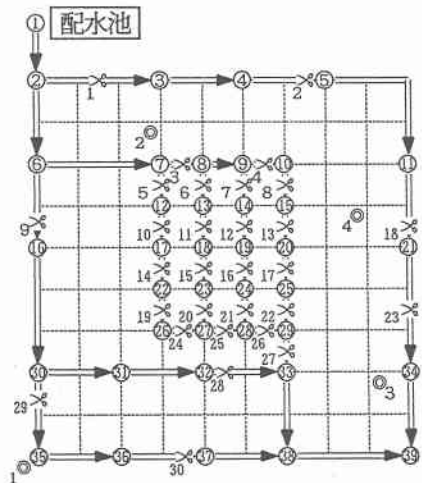


図-3 水道管網の被災モデル図

表-1 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	655(大)	1	8	235(中)	3	15	133(小)	3
2	436(中)	2	9	123(小)	3	16	412(中)	1
3	444(中)	2	10	656(大)	1	17	366(中)	1
4	626(大)	1	11	241(中)	1	18	215(中)	1
5	572(大)	3	12	522(大)	3	19	388(中)	1
6	245(中)	3	13	164(小)	3	20	466(中)	1
7	333(中)	1	14	323(中)	3	21	362(中)	1

表－２ 道路補修作業データ

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	555(大)	1	13	126(小)	2	25	443(中)	3
2	455(中)	2	14	161(小)	3	26	353(中)	3
3	266(中)	2	15	552(大)	2	27	235(中)	1
4	465(中)	1	16	222(中)	1	28	314(中)	2
5	442(中)	3	17	262(中)	1	29	456(中)	3
6	163(小)	3	18	442(中)	3	30	532(大)	1
7	651(大)	1	19	344(中)	3	31	254(中)	2
8	253(中)	3	20	555(大)	1	32	314(中)	2
9	166(小)	3	21	155(小)	1	33	480(中)	3
10	564(大)	1	22	243(中)	3	34	152(小)	1
11	643(大)	1	23	151(小)	3			
12	544(大)	3	24	622(大)	1			

表－４ 遮蔽物撤去作業班データ

復旧班	1	2	3	4
能力値	12	30	10	25
既着工事箇所	21	20	0	0

表－５ 道路補修作業班データ

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	20	10	12	25	18	10	30	12
既着工事箇所	31	0	32	0	33	0	34	0

表－３ 水道補修作業データ

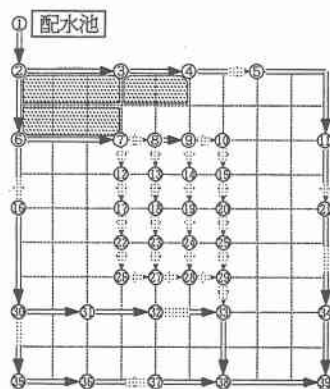
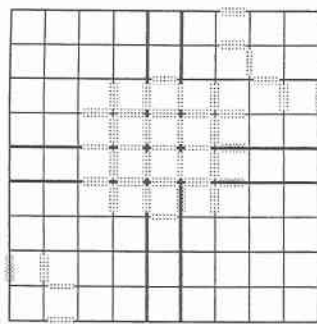
工事箇所	被害量	工事箇所	被害量	工事箇所	被害量
1	174(中)	11	249(中)	21	222(中)
2	258(中)	12	129(中)	22	116(中)
3	264(中)	13	289(中)	23	198(中)
4	125(中)	14	304(中)	24	165(中)
5	352(中)	15	190(中)	25	251(中)
6	253(中)	16	276(中)	26	278(中)
7	143(中)	17	139(中)	27	229(中)
8	223(中)	18	267(中)	28	182(中)
9	236(中)	19	281(中)	29	311(中)
10	192(中)	20	192(中)	30	266(中)

表－６ 水道補修作業班データ

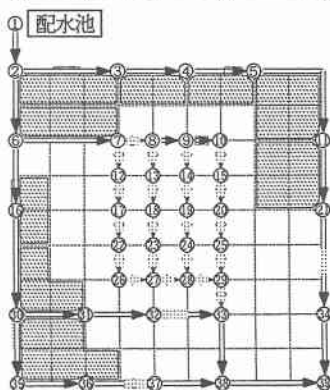
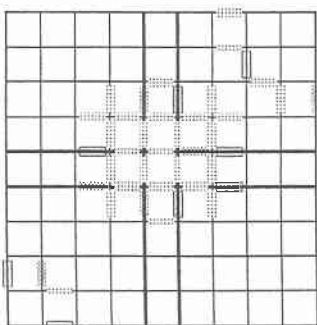
復旧班	1	2	3	4
能力値	12	16	20	14

ノード番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
配水エリア	0	0	6	4	4	0	6	2	2	4
ノード番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
配水エリア	8	6	2	2	4	4	4	2	2	4
ノード番号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
配水エリア	8	4	2	2	4	4	2	2	4	4
ノード番号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
配水エリア	0	4	4	12	8	0	8	8	0	

<復旧１日目>

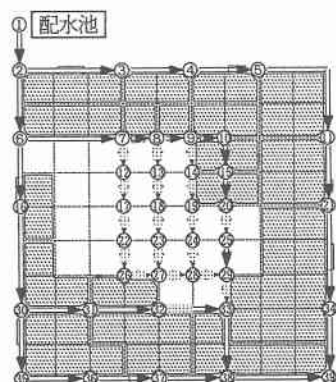
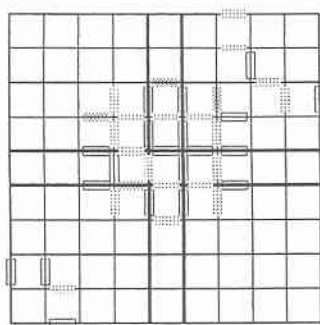


<復旧３日目>

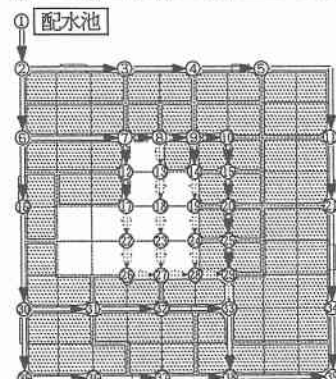
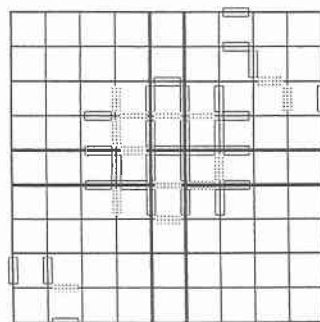


図－３ a 道路網と水道管網の復旧過程

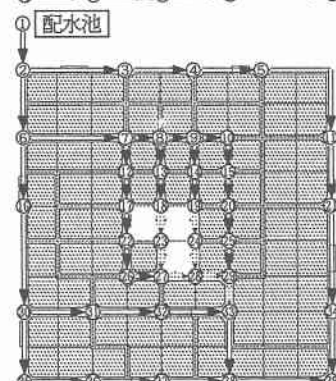
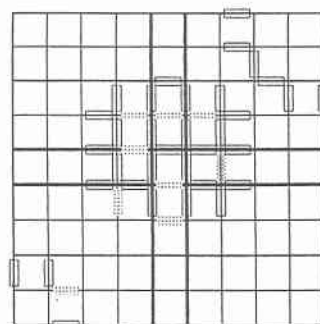
<復旧5日目>



<復旧7日目>



<復旧9日目>



<復旧11日目>

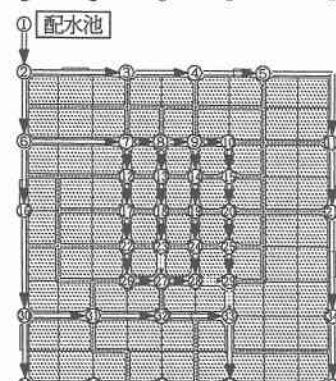
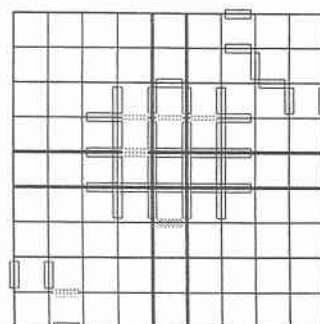


図-3 b 道路網と水道管網の復旧過程

それぞれの被災箇所、復旧班の能力値を、表－１～表－６に示した。表－６には、各流出節点から配水可能な配水エリアが示されている。各班のデータで既着工工事とあるのは、全体の復旧計画が定まる前に、当面の対応として工事が開始されたことを想定したものである。このようなことにも対応できるため、計画の進行中に状況が変わった場合でも本報告の方法は対応できることになる。

数値計算の結果、各班の担当する工事は以下のように得られた⁶⁾。下線のある数字は来着工工事である。

- | | | | |
|--------|-----------------------------|--------|----------------------------|
| ・ 遮蔽撤去 | 1 班：21→13→7→11 | ・ 道路補修 | 1 班：31→30→24→1 |
| | 2 班：20→3→18→12→5→10 | | 2 班：13→9→17 |
| | 3 班：15→9→17→16 | | 3 班：32→21→16 |
| | 4 班：14→8→6→2→19→1→4 | | 4 班：26→25→3→27→2→5→10 |
| ・ 水道補修 | 1 班：29→5→6→25→20→27 | | 5 班：33→18→7 |
| | 2 班：9→30→13→17→14→24→21→26 | | 6 班：23→22→8 |
| | 3 班：1→4→18→23→8→10→19→11→15 | | 7 班：34→29→28→15→20→12→11→4 |
| | 4 班：2→3→22→28→7→12→16 | | 8 班：19→14→6 |

また、この結果に基づいて、道路復旧と水道復旧の経過図を、図－３a、図－３bに示した。

図は、2日おきに示されており、左の図が道路復旧で未開通が点線、復旧道路が線で囲まれた実線で、被害を受けなかった道路が実線で示されている。右の図が水道網の復旧で、配水が可能になったエリアに網掛けされている。例えば、前記の水道管の被害13は、遮蔽物撤去作業15が1日目に、道路工事28が4日目に完了してから、5日目に着工しその日のうちに完了している。

結果の最適性の保証はないが、比較的合理的な結果が得られたものと考えられる。

6. まとめ

道路網と水道網の双方に被災を受けた場合の復旧計画にGAを用いる方法を、解析方法、数値計算例と共に示した。解析方法は、複雑に関係し合う複数のライフラインの場合でも容易に対応でき、かつ、常時の基本データさへ準備しておけば、最小のデータで解析できるものと思われる。

都市災害は、複雑であり、常時での準備をしておかなければ、その復旧対策はいきあたりばつりにならざるを得ず、非効率な復旧計画、しいては多くの公的私的財産、人命を失うことにつながる。

また、対象を都市と限らず、広域な領域を考えれば、被災は、直下型地震のみでなく、火山の爆発、水害等色々な可能性が考えられる。それらに対し種々の機関での早急な対策の確立が必要であり、本研究が何かの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 片桐章憲・杉本博之・田村亨：GAによるネットワーク上の災害復旧工事の順位決定について、土木学会北海道支部論文集、第52号、pp.94-99、1996。
- 2) 片桐章憲・杉本博之・田村亨：GAによる災害復旧工事の配分及び順位決定について、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、pp.744-745、1996。
- 3) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿沓麗：震災復旧プロセスへのGAによる支援の試み、第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集、pp.295-298、1996。
- 4) 片桐章憲・杉本博之・田村亨・鹿沓麗：復旧班の共同による震災復旧プロセスへのGAの応用、土木学会北海道支部論文集、第53号、pp.200-205、1997。
- 5) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿沓麗：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。
- 6) 片桐章憲・杉本博之：GAによる異種ライフラインの復旧支援について、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、pp.832-833、1997。