

## I-76

## 震災復旧計画支援問題のスケジューリング問題への変換と効果

杉本博之 正 員 北海学園大学 ○首藤 諭 学生員 北海学園大学  
 田村 亨 正 員 室蘭工業大学 Lu Bianli 正 員 シー・イー・サ・ビス  
 片桐章憲 正 員 北海道開発コンサルタント

## 1. まえがき

大都市が直下型の地震を受け、各種のライフラインが被災を受けたことを想定し、その復旧計画にGAを用いる試みを筆者らは発表してきた。<sup>1)~7)</sup> その場合、被災を受けたライフラインの種類毎に、被災箇所の補修順位と復旧班の担当工事の決定という問題を含み、さらに同一ライフライン内あるいは異なるライフラインの被災箇所間に、こちらを先にしなければこの工事ができないという時間的な階層性があり、問題としてはかなり難しくなる。この問題に対し、各ライフラインにおけるスケジューリング問題(補修順位)と組み合わせ問題(担当工事)に対応する線列を一つの線列のなかに連続してコーディングし、そのコーディングに適応する交叉、突然変異法を導入して問題の解決を図った。

しかしその後、セパレータの導入により、スケジューリング問題と組み合わせ問題が混在する最適化問題は、スケジューリング問題として表現できることが分かった。<sup>8)</sup> 両者混在の問題がスケジューリング問題としてのみで表現できれば、少なくとも線列の長さは半減するし、GAの適用が簡単になる。

そこで、本報告では、以前にスケジューリング問題と組み合わせ問題が混在する最適化問題として解いた復旧問題と同一の問題を、セパレータを用いるスケジューリング問題に変換し、その信頼性、効率などに関して考察を加える。

## 2. 震災復旧計画問題

本報告が対象とする震災復旧計画問題を一般的に表現すれば以下ようになる。

ある地域に災害が発生し、その地域の一つないし複数のライフライン上に、時間的階層関係のあるN層の被害が各層毎に $n_i$  ( $i=1-N$ )発生した。この被害を復旧するために各層の被害に対応する $m_i$  ( $i=1-N$ )の復旧班が待機している。これらの復旧箇所と復旧班を、

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

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、 $D^i_j$  ( $j=1-n_i$ ,  $i=1-N$ )をどのような順に手をつけるかということと、それらを $R^i_k$  ( $k=1-m_i$ ,  $i=1-N$ )にどのように配分するかということになる。

この問題を、スケジューリング問題と組み合わせ問題の混合問題として扱い、表-1のようにコーディングしてGAで解いた。表に示すように各復旧作業毎に、前半にスケジューリング問題 $D^i_j$  ( $j=1-n_i$ )を10進数で、後半に組み合わせ問題 $R^i_k$  ( $k=1-m_i$ )を2進数でコーディングする。

このようなコーディングに対し、各作業の順位部分はスケジューリング問題のための交叉、突然変異を、復旧班部分は組み合わせ問題のための交叉、突然変異を行った。

## 3. セパレータの導入によるスケジューリング問題への変更

多数の被災箇所と復旧班がある最適化問題に対し、従前は上記のようにスケジューリング問題と組み合わせ問題のコーディングを混合した形で対応してきた。ところが、セパレータを用いることにより、この問題  
 On Effect of Transportation of Support System for Restoration Process Problem to Scheduling Problem,  
 by Hiroyuki SUGIMOTO, Satoshi SUDO, Tohru TAMURA, LU Bianli & Akinori KATAGIRI

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  |
| 1 0 進数 | 2 進数 | 1 0 進数 | 2 進数 |       | 1 0 進数 | 2 進数 |

はスケジューリング問題単独として表現する事が可能になる。

今、 $n$  の被災箇所、 $m$  の復旧班があるとする。この場合、 $m-1$  のセパレータが必要になり、 $1 \sim n$  の数字の並びと、その後続く  $n+1 \sim n+m-1$  の数字の並びが設計変数となる。この場合デコードが問題になるが、 $n=10$ 、 $m=3$  の場合を例に取り説明すると以下のようになる。

次の線列が得られたとする。

$$4 \ 2 \ 6 \ 12 \ 9 \ 5 \ 1 \ 10 \ 11 \ 3 \ 8 \ 7 \quad (2)$$

この時、セパレータの数字 (11, 12) そのものは意味がないから、黒く塗りつぶすと、

$$4 \ 2 \ 6 \ \blacksquare \ 9 \ 5 \ 1 \ 10 \ \blacksquare \ 3 \ 8 \ 7 \quad (3)$$

となる。セパレータにより 3 つの部分に別れるが、こららが各班が担当する被災箇所になり、数字の並びがそれぞれの着工順となる。工事日程を表にすると、以下のようになる。

表－2 式 (3) より得られる工事日程

| 復旧班 | 担当被災箇所および着工順 |
|-----|--------------|
| 1   | 4→2→6        |
| 2   | 9→5→1→10     |
| 3   | 3→8→7        |

式 (2) は、まさにスケジューリング問題のコーディングであるから、この考え方により、スケジューリング問題と組み合わせ問題の混合問題が、スケジューリング問題のみとして表現できることになる。

次に、時間的な階層性を有する複数の被災箇所の復旧問題の場合であるが、上記の考え方を単純に適用し、順に線列をならべるだけでは矛盾が生じることになる。

例えば、 $N=2$ 、 $n_1=7$ 、 $m_1=2$ 、 $n_2=9$ 、 $m_2=3$  の場合を考える。それぞれセパレータが 1 (8)、2 (18, 19) 個あるから、単純に考えれば 1～19 を設計変数としてコーディングすれば良いことになる。例えば、

$$4 \ 5 \ 10 \ 8 \ 2 \ 1 \ 12 \ 3 \ 7 \ 18 \ 6 \ 9 \ 11 \ 19 \ 17 \ 16 \ 13 \ 15 \ 14 \quad (4)$$

を考える。上と同様にセパレータを黒く塗りつぶすと、

$$4 \ 5 \ 10 \ \blacksquare \ 2 \ 1 \ 12 \ 3 \ 7 \ \blacksquare \ 6 \ 9 \ 11 \ \blacksquare \ 17 \ 16 \ 13 \ 15 \ 14 \quad (5)$$

となる。これを単純に各班の分担に分け日程表を作成すると、表－3 のようになる。ここで、黒抜きの数字は復旧作業 1 の被災箇所番号であり、白抜きの数字は、復旧工事 2 の被災箇所番号を表す。表に示すように、

表－3 式 (5) より得られる工事日程

| 復旧作業 1 |              | 復旧作業 2 |              |
|--------|--------------|--------|--------------|
| 復旧班    | 担当被災箇所および着工順 | 復旧班    | 担当被災箇所および着工順 |
| 1      | ④→⑤→②        | 1      | ⑦            |
| 2      | ②→①→④→③      | 2      | ⑥→①→③        |
|        |              | 3      | ⑨→⑧→⑤→⑦→⑥    |

復旧作業 1 のための復旧班が復旧作業 2 の工事を担当したりして、とても使える状態ではないことが分かる。

この場合、すべての線列において、復旧作業 1 に対応する被災箇所およびセパレータは、復旧工事 2 に対応する被災箇所およびセパレータより左にある必要があることになる。つまり、

5 2 4 8 1 7 3 6 10 19 12 9 11 18 17 16 13 15 14 (6)

である。同様にセパレータを黒く塗りつぶすと、

5 2 4 ■ 1 7 3 6 | 10 ■ 12 9 11 ■ 17 16 13 15 14 (7)

となり、工事日程表は以下のようになる。

表－4 式（7）より得られる工事日程

| 復旧作業 1 |              | 復旧作業 2 |              |
|--------|--------------|--------|--------------|
| 復旧班    | 担当被災箇所および着工順 | 復旧班    | 担当被災箇所および着工順 |
| 1      | ⑤→②→④        | 1      | ②            |
| 2      | ①→⑦→③→⑥      | 2      | ④→①→③        |
|        |              | 3      | ⑨→⑧→⑤→⑦→⑥    |

この結果、矛盾なく工事日程を作成することができる。式（7）のような関係は、初期線列を作成する時から考慮する必要がある。初期線列全てに上記の前後関係を与えておけば、以降の繁殖・淘汰および交叉の過程でその関係が崩れることはなく、矛盾なく日程表を作成することができる。<sup>9)</sup> 但し、この場合突然変異は用いることが出来ない。

4. 数値計算例

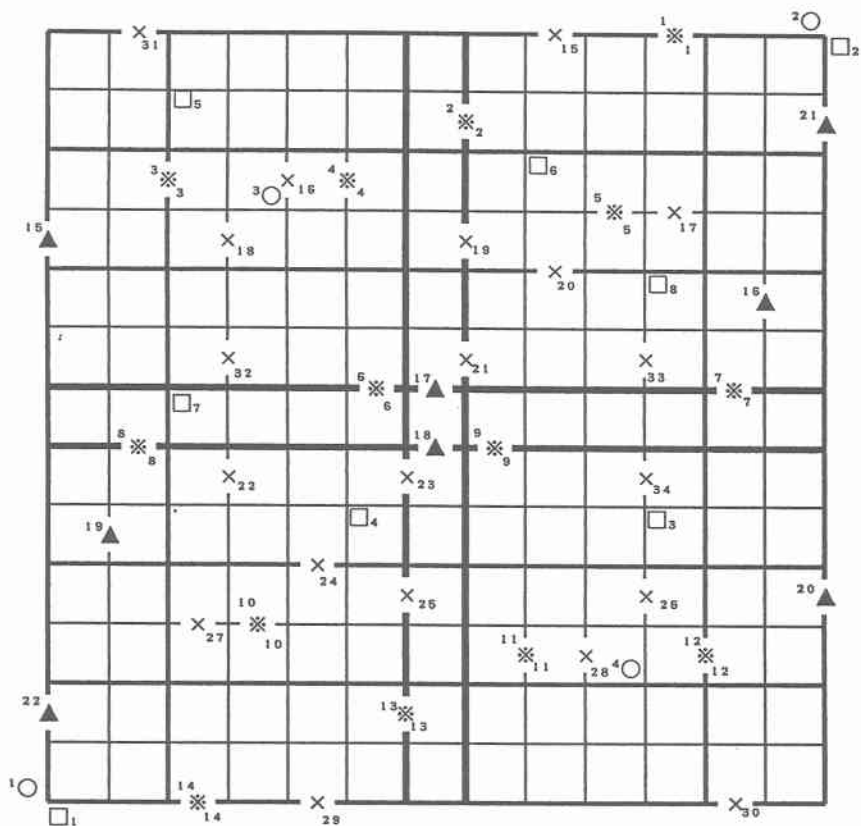
数値計算例として、図－1 に示す 196 ノード・364 リンクの被災ネットワークモデルを取り上げ、従来の方法と本報告で記述したスケジューリング問題のみへ変換した方法との結果を比較する。

図の記号で▲は遮蔽物撤去作業単独箇所、×は道路補修作業単独箇所、※は遮蔽物撤去作業箇所と道路補修作業箇所の両方被害があることを意味している。また各記号の右上の数字は遮蔽物撤去作業箇所番号であり、右下の数字は道路補修作業箇所番号を示している。その他の記号として○は遮蔽物撤去作業班（左上の数字は班番号）、□は道路補修作業班（右下の数字は班番号）を表している。

工事箇所のデータ表（表－5、表－7）では被害量が 500.0 以上の被害箇所を大災害、200.0 以下の被害箇所を小災害としており、それ以外の被害箇所は中災害としている。道路のリンクには、道路自身の重要性を表した重要度というのがありこの重要度を 3 段階に分割する。重要度 1 は重要度の低い道路で、図の細線がこれに当たる。重要度 2 は重要度 1 より多少重要性の高い道路で図の中線がこれに当たる。重要度 3 はもともと重要性が高い道路で、図の太線がこれに当たる。また上でも述べたが遮蔽物撤去作業と道路補修作業の両方の作業をする箇所がある、ここでは両方の作業をするのは当たり前だが、必ず遮蔽物撤去作業を道路補修作業より先に行う(時間的階層性)。

復旧班のデータ表（表－6、表－8）であるが、能力値が小さい（能力値 10）の班は小中災害箇所にしか作業できないとしている。従来の方法では、これは各設計変数の選択肢の設定により対応したが、本報告の方法ではそれができないので、大災害箇所に当たると大きなペナルティ（200 時間）がかかるようになっている。これで、能力が小さい班が大災害箇所を担当する工事日程を、GA の繁殖・淘汰により淘汰され则认为える。また小災害箇所の復旧作業時間は能力値に依存せずどの班でもある一定の時間で復旧が完了できるようになっている。またそれぞれの移動速度は、一定の 10km/h とする。班の中には、既着工工事箇所を担当する班があり、この場所は優先的に、担当する班が 1 番最初にする。<sup>4)</sup>

被災箇所の工事順位や復旧班の配分の善し悪しを評価する必要がある。本研究では、被災箇所の道路重要度の和を 100 とし、復旧の進展に伴う累積非復旧率の最小を目的関数としている。



図－1 被災道路ネットワーク図

表－5 遮蔽物撤去作業箇所データのデータ

| 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    | 550.0 (大) | 2   | 9    | 250.0 (中) | 3   | 17   | 350.0 (中) | 3   |
| 2    | 250.0 (中) | 3   | 10   | 550.0 (大) | 1   | 18   | 450.0 (中) | 3   |
| 3    | 300.0 (中) | 2   | 11   | 350.0 (中) | 1   | 19   | 500.0 (大) | 1   |
| 4    | 250.0 (中) | 1   | 12   | 500.0 (大) | 2   | 20   | 250.0 (中) | 2   |
| 5    | 550.0 (大) | 1   | 13   | 200.0 (小) | 3   | 21   | 300.0 (中) | 2   |
| 6    | 250.0 (中) | 3   | 14   | 400.0 (中) | 2   | 22   | 350.0 (中) | 2   |
| 7    | 350.0 (中) | 3   | 15   | 450.0 (中) | 2   |      |           |     |
| 8    | 400.0 (中) | 3   | 16   | 200.0 (小) | 1   |      |           |     |

表－6 遮蔽物撤去作業班のデータ

| 復旧班     | 1  | 2  | 3  | 4  |
|---------|----|----|----|----|
| 能力値     | 30 | 30 | 10 | 10 |
| 既着工工事箇所 | 22 | 21 | 0  | 0  |

表－７ 道路補修作業箇所データのデータ

| 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    | 550.0 (大) | 2   | 13   | 350.0 (中) | 3   | 25   | 450.0 (中) | 3   |
| 2    | 250.0 (中) | 3   | 14   | 300.0 (中) | 2   | 26   | 500.0 (大) | 1   |
| 3    | 450.0 (中) | 2   | 15   | 350.0 (中) | 2   | 27   | 250.0 (中) | 1   |
| 4    | 200.0 (小) | 1   | 16   | 500.0 (大) | 1   | 28   | 400.0 (中) | 1   |
| 5    | 400.0 (中) | 1   | 17   | 400.0 (中) | 1   | 29   | 350.0 (中) | 2   |
| 6    | 300.0 (中) | 3   | 18   | 300.0 (中) | 1   | 30   | 300.0 (中) | 2   |
| 7    | 300.0 (中) | 3   | 19   | 250.0 (中) | 3   | 31   | 300.0 (中) | 2   |
| 8    | 250.0 (中) | 3   | 20   | 200.0 (小) | 2   | 32   | 250.0 (中) | 1   |
| 9    | 400.0 (中) | 3   | 21   | 250.0 (中) | 3   | 33   | 300.0 (中) | 1   |
| 10   | 500.0 (大) | 1   | 22   | 300.0 (中) | 1   | 34   | 250.0 (中) | 1   |
| 11   | 400.0 (中) | 1   | 23   | 300.0 (中) | 3   |      |           |     |
| 12   | 550.0 (大) | 2   | 24   | 400.0 (中) | 2   |      |           |     |

表－８ 道路補修作業班のデータ

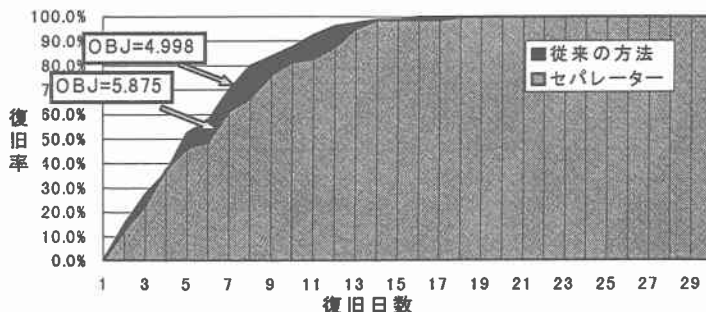
| 復旧班     | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 能力値     | 30 | 30 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 既着工工事箇所 | 0  | 0  | 34 | 0  | 31 | 0  | 32 | 33 |

表－９ 従来の方法との比較１（ランダムサイズ＝３２０５３）

| 人口サイズ | 従来の方法 | （終了日数） | セパレーター | （終了日数） |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| 200   | 5.050 | 15     | 6.925  | 終了せず   |
| 230   | 5.113 | 14     | 6.338  | 22     |
| 250   | 5.175 | 14     | 5.925  | 18     |
| 270   | 5.062 | 15     | 6.250  | 18     |

表－１０ 従来の方法との比較２（ランダムサイズ＝９２１４２）

| 人口サイズ | 従来の方法 | （終了日数） | セパレーター | （終了日数） |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| 200   | 5.100 | 15     | 5.938  | 18     |
| 230   | 4.998 | 14     | 6.075  | 15     |
| 250   | 5.088 | 14     | 6.150  | 17     |
| 270   | 5.113 | 14     | 5.875  | 17     |



図－２ 従来の方法との復旧日数－復旧率の比較

GA（汎用 GA プログラム<sup>10)</sup>）を使う主なデータとしてここでは最大世代数は300、交差確率は80%、解更新判定世代数は30とする。またランダムシーズは、32053と92142の2種類について考えている。GAの計算における主なパラメータの値を表—11に示した。

表—11 GAの主なパラメータの値

|         |                    |        |     |          |     |
|---------|--------------------|--------|-----|----------|-----|
| 最大世代数   | 300                | 交差確率   | 80% | 大変更確率    | 0%  |
| 人口サイズ   | 200, 230, 250, 270 | 交差方法   | 1   | 解更新判定世代数 | 30  |
| ランダムシーズ | 32053, 92142       | 突然変異確率 | 0%  | 淘汰係数     | 1.5 |

計算結果を、表—9と10に示した。これらの表より、現段階では、スケジューリング問題のみに変換する方法の効果は出ていなく、逆に解の値は悪くなっている。これは、従来の方法における交叉法が、各復旧作業毎に、かつ組み合わせ問題、スケジューリング問題それぞれにおいて交叉し、交叉機会が多いのに比べ、スケジューリング問題のみに変換する方法では、全体を一点交叉のみで交叉するので、交叉機会が非常に少ないことが、理由の一つと考えられる。

従来の方法と本報告の方法それぞれの計算結果の内一番良いものの復旧日数－復旧率の比較を図—2に示した。本報告の方法が若干効率の悪いのが、この図からも見られる。

### 5. あとがき

組み合わせ問題とスケジューリング問題の混合問題をセパレータを用いてスケジューリング問題のみに変換することを試み、数値計算によりその効果を検討した。結果は、必ずしも良くないが、問題の定式化を簡単にする効果はあるので、今後交叉機会を上げる工夫をし、さらに検討したいと考える。

### 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報告集，第52号(A)，pp. 94－99，1996.
- 2) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・Lu Bianli：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.
- 3) 片桐章憲・杉本博之・田村亨・Lu Bianli：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報告集，第53号(A)，pp. 200－205，1997.
- 4) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・Lu Bianli：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.
- 5) Hiroyuki SUGIMOTO, Akinori KATAGIRI, Tohru TAMURA & LU Bianli：Support System for Restoration Process of Disaster-Stricken Lifeline Networks by GA, Optimization in Industry-1997-, ASME, pp. 177－187，1997.
- 6) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・Lu Bianli：GAによるネットワーク上の震災復旧に関する研究，北海学園大学工学部研究報告，第25号，pp. 45－70，1998.
- 7) 杉本博之・田村亨・有村幹治：復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデル，第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp. 521－524，1996.
- 8) 杉本博之・Lu Bianli：スケジューリング問題のための汎用GAプログラムについて，第3回最適化シンポジウム講演論文集，日本機械学会，pp. 271－276，1998.
- 9) 古田均・杉本博之・井下泰具・横田哲也・廣瀬彰則・中谷武弘：中長期事業計画問題へのGAの応用，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 497－502，1998.
- 10) 杉本博之・Lu Bianli：工業最適設計のための汎用GAプログラムについて，北海学園大学学園論集，第96・97号，pp. 81－105，1998.