

## 進化的計算を用いた被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究

## On Support System For Restoration Process By Evolutionary Computation

古田均\* 中津功一郎\*\*

Hitoshi FURUTA and Koichiro NAKATSU

\*工博 関西大学教授 総合情報学部総合情報学科（〒509-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1）

\*\*関西大学大学院 総合情報学研究科総合情報学専攻

This research aims at early restoration of a lifeline. Moreover, the distribution problem which restoration group takes charge of which disaster place, and the scheduling problem in what turn to restore are solved. Then, the genetic algorithm widely applied to solution of a distribution problem or a schedule problem in recent years is applied, and what it opts for simultaneously is tried. Moreover, set on such a problem. If increase of information is enhanced increasingly and it becomes a large-scale problem, the processing time for managing by one system will become large, and efficiency will become bad. The early restoration of this research is the purpose. It is a big problem that the reason to processing time becomes large. Then, a distributed cooperation type system is proposed in this research. It is because it distributes load to the whole system, and realizes time shortening of processing and a lot of work of it is attained.

Key Words : Genetic Algorithm, Early Restoration, Lifeline, Distributed Cooperation Type System

## 1. はじめに

現代の市民生活は、種々のライフラインの健全な運用のもとに成り立っており、それらのライフラインはそのある部分の機能の向上あるいは低下が他に影響を及ぼす複雑なネットワークを形成している。それらのライフライン全体が最新の設計理論により、考えられるすべての自然災害に対して設計されているわけではない。また、最新の設計理論にしても、その安全性を無限にとることは経済的に許されない。それ故、今後、大規模な地震は必ず起こり、ライフラインはそのため何らかの被害を受けること前提にした、総合的な防災工学の確立が必要であると考えられる。

本研究は、ライフラインの早期復旧を目的とし、どの復旧班がどの被災箇所を担当するかという問題（配分問題）と、どのような順番で復旧を行っていくかという問題（スケジューリング問題）を解決していく。その時、配分問題やスケジュール問題の解決に近年、広く応用されている遺伝的アルゴリズムを適用し、同時に決定することを試みる。また、このような問題において、情報はますます増大の一途をたどり、大規模な問題になると一つのシステムで管理するための処理時間が大きくなり、効率が悪くなってしまう。本研究は早期復旧が目的であり、処理時間が大きくなることは、大きな問題である。そこで、本研究においては、

負荷をシステム全体に分散し、処理の時間短縮を実現し、より複雑で大量な仕事が可能となる分散協調システムを提案し、より実用的な復旧支援システムの実現を目指す。そこで、本研究では、分散協調型システムを集中管理型システムと比較し、処理時間、効率の面で比較し、その有用性について検討する。

## 2. 集中管理型復旧プロセス支援システム

## 2.1 システム概要

本章では、集中管理型復旧プロセス支援システムの構築を行い、数値計算例からその長所短所について検討する。

本研究では、あるライフライン系ネットワークの複数箇所が被災を受け、本来の機能を発揮できなくなった状態を想定し、それらをできるだけ早くもとの状態に復旧するための作業において、複数の復旧班の適正配分、および適正な着工順を決定することを目的としている。その時、ネットワークの復旧支援に関して、

- ① 復旧班の最適配分と最適着工順の同時決定
- ② 一つの被災箇所でも、その内容は1種類の被害ではなく複数の被害があり、それらの間には時間的に階層的な関係がある。

そこで、本研究では、時間的階層性を考慮した最適施工計画について検討を行う。

本研究で定義した復旧プロセス支援は、離散変数を扱

う組み合わせ問題である。また、上記の考慮すべき 2 つの問題が遺伝的アルゴリズムのコーディングの処理により可能であることから、本研究では、最適化手法として、遺伝的アルゴリズムを適用する。本研究では、数値計算例から復旧プロセス支援への遺伝的アルゴリズムの有用性についても検討を加える。

## 2.2 数値計算例

本研究では、数値計算例として、まず、256 ノード、480 リンクから構成される道路ネットワークの復旧を取り上げている。リンクの距離は、すべて 1km とする。その時、道路上の遮断物撤去作業 38 ケ所(\*), 道路補修作業 50 ケ所(※), ガス管修復作業 30 ケ所(\*), 水道管修復作業(\*)としている。(Fig. 2.1) ここで、遮断物撤去作業と道路補修作業の先行関係のほかに、ガス管修復作業と水道管修復作業は、必ず、遮断物撤去作業と道路補修作業の間で行われなければならないといった時間的階層性の関係が成立しているものとする。

Fig.2.1 に示されている数字は、左上が遮断物撤去作業の番号、右下が道路補修作業の番号である。また、遮断物撤去作業、道路補修作業それぞれに対応する復旧班を 8 班ずつあるとして、それぞれの待機場所が、Fig. 2.1 においては、遮断物撤去作業班が○、道路補修作業班が□、ガス管補修作業班が▲、水道管補修作業班が■で示されている。

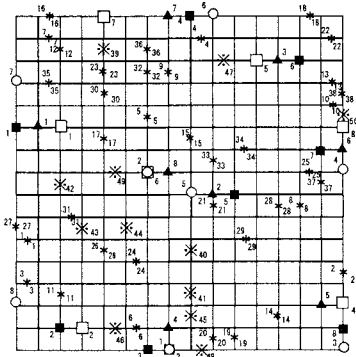


Fig. 2.1 被災モデル

### 2.2.1 目的関数

被災を受けた各道路（リンク）にあらかじめ重要度を与えておく。それを  $w_i (i=1 \sim n_L)$  とする。  $n_L$  は被災を受けたリンクの総数である。復旧作業が開始されてから  $q$  日経過した時の復旧の程度を、重要度で重みをつけたリンク距離で表すと、復旧率  $R^{(q)}$  は

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番号の集合、  $J^q$  は  $q$  日までの開通したリンク番号の集合を表している。

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、復旧率と復旧日数は Fig. 2.2 のようになる。そこで、本研究では、Fig.2.2 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。それは、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。

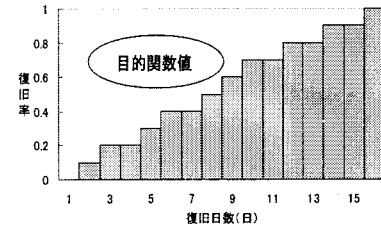


Fig. 2.2 復旧日数と復旧率の関係

$$R^q = \frac{\sum_{i \in J^q} w_i \times l_i}{\sum_{i \in J^0} w_i \times l_i} \quad (2.1)$$

### 2.2.2 復旧日数

本研究において、復旧日数は各工事毎に計算し、各工事ごとに完了するのに必要な復旧日数は式(2.2)から求められる。

$$d = h/t_1 \quad (2.2)$$

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、本研究では、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以下の方法で求める。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 Fig. 2.3 に表される。

a) 小規模被害：小規模な被害であり、復旧班の能力差が出ず、一定の時間  $h_1$ （本研究においては 4 時間と定義）で完了する被害。

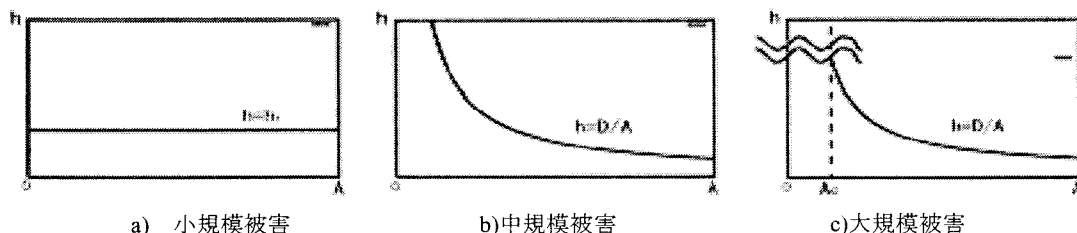
$$h = h_1 \quad (2.3)$$

b) 中規模被害：中規模な被害であり、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

$$h = D/A \quad (2.4)$$

ここで、  $D$  は被害量、  $A$  は復旧班の能力値（1 時間に処理できる被害量）を示す。

c) 大規模被害：大規模で大型重機等が要求される被害



a) 小規模被害

b) 中規模被害

c) 大規模被害

Fig. 2.3 被害規模毎の復旧必要時間と復旧班能力の関係

害であり、ある基準値以上の能力値がないと対処できない被害

$$h = \infty (A < A_c) \quad (2.5)$$

$$h = D / A (A \geq A_c)$$

ここで、 $A_c$  は大規模被害を担当できる最低能力値（本研究では 13/時間と定義）を示している。

$t_1$  は復旧班の 1 日の復旧工事のための作業時間であり、式(2.6)により求められる。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  $L(\text{km})$ 、復旧班の移動速度を  $v(\text{km/h})$ 、本研究では  $10\text{km/h}$  と定義）とし、式(2.7)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。

$$t_1 = t_0 - 2t_m - h_c \quad (2.6)$$

$$t_m = L / v \quad (2.7)$$

### 2.2.3 最短距離

復旧班の常駐場所から被災場所までの最短距離は、ウォーシャル・フロイド(Warshall-Floyd：以下 WF とする)法より求めている。

### 2.2.4 コーディング

| 復旧作業a |     | 復旧作業b |     | ..... | 復旧作業c |     |
|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-----|
| 順位    | 担当班 | 順位    | 担当班 |       | 順位    | 担当班 |
| 10進数  | 2進数 | 10進数  | 2進数 |       | 10進数  | 2進数 |

| 復旧作業a |     |    |     |   | 復旧作業b |     |    |     |   |
|-------|-----|----|-----|---|-------|-----|----|-----|---|
| 順位    | 復旧班 | 順位 | 復旧班 |   | 順位    | 復旧班 | 順位 | 復旧班 |   |
| 1     | 3   | 4  | 5   | 2 | 1     | 0   | 0  | 0   | 1 |
| 5     | 2   | 3  | 4   | 1 | 0     | 1   | 1  | 1   | 0 |
| 0     | 0   | 1  | 1   | 0 | 0     | 0   | 1  | 1   | 1 |

 (遺伝子型)

| 復旧作業a |     |    |     |   | 復旧作業b |     |    |     |   |
|-------|-----|----|-----|---|-------|-----|----|-----|---|
| 順位    | 復旧班 | 順位 | 復旧班 |   | 順位    | 復旧班 | 順位 | 復旧班 |   |
| 1     | 3   | 4  | 5   | 2 | 1     | 0   | 0  | 0   | 1 |
| 5     | 2   | 3  | 4   | 1 | 0     | 1   | 1  | 1   | 0 |
| 0     | 0   | 1  | 1   | 0 | 0     | 0   | 1  | 1   | 1 |

 (表現型)

Fig. 2.4 コーディング

N 種類の復旧工事がある場合、遺伝子列は、Fig.2.4 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、それぞれ左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、時間的階層については、目的関数の計算において考慮される。

### 2.5 適用結果

前述の数値計算例の設定で、復旧作業班が複数存在する大規模な問題に遺伝的アルゴリズムを用いて各復旧作業の時間的階層性を考慮した最適な復旧プロセスの探索を行った。なお、このときの GA のパラメータは Table 2.1 のとおりである。遮断物撤去作業、道路補修作業、ガスパ補修作業、水道管補修作業の 4 つの時間的階層性を考慮した場合の復旧計画を Fig. 2.6, Fig. 2.7, Fig. 2.8, Fig. 2.9 に、その探索時の GA の目的関数の遷移を Fig.2.5 に示す。Fig. 2.5 から分かるように、大規模な探索においても、世代が進むにつれて目的関数は順調に低下しており、探索が成功していることが分かる。

Table 2.1 GA のパラメータ設定

| Parameter                |       |
|--------------------------|-------|
| population               | 400   |
| generation               | 10000 |
| probability of crossover | 0.6   |
| probability of mutation  | 0.05  |

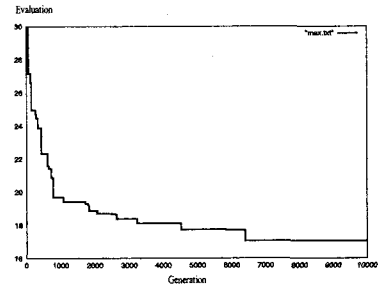


Fig.2.5 目的関数の遷移

Table 2.2 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 | 34H38m32s | 約7.5倍 |

### 2.6 考察

本章では、復旧作業が 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プロセスの構築を試みた。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、その適用の可能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にかかっていて、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、遺伝的アルゴリズムの有用性が示されたと考えられる。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、具体的な探索時間について、Table 2.2 に示す。本システムの実用性が問われる際には、探索時間の問題は、非常に大きな課題として挙げられ、解決する必要がある。

## 3. 分散協調型復旧プロセス支援システム

### 3.1 システム概要

本章では、前章で想定した問題に対して、分散協調型復旧プロセス支援システムの構築を行い、数値計算例から集中管理型と比較し、考察を行う。本章では、前章と同じようにあるライフライン系ネットワークの複数箇所が被災を受け、本来の機能を発揮できなくなった状態を想定し、それらをできるだけ早くもとの状態に復旧するための作業において、複数の復旧班の適正配分、および適正な着工順を決定していくことを目的としている。

本研究で定義した分散協調型復旧プロセス支援は、離散変数を扱う組み合わせ問題である。また、上記の

考慮すべき3つの問題が遺伝的アルゴリズムのコーディングの処理により可能であることから、本研究では、最適化手法として、遺伝的アルゴリズムを適用する。ここで、分散協調型復旧プロセス支援システムの概要を記す。復旧作業毎に分散して復旧班の最適配分と最適着工順を決定し、それを基に各復旧作業毎に時間的階層性を考慮しながら、協調し問題解決を行う。本研究では、数値計算例から復旧プロセス支援への遺伝的アルゴリズムの有用性についても検討を加える。

### 3.2 数値計算例

本章における数値計算例は、上で適用した例と同じものであり、256 ノード、480 リンクから構成される道路ネットワークの復旧を取り上げている。(Fig. 2.1) また、目的関数も、上で適用した目的関数を用いる。

#### 3.2.1 各復旧作業の復旧班の最適配分と最適着工順

本研究では、各復旧作業において分散して復旧班の最適配分と最適着工順を決定する。それにより、負荷がシステム全体に分散されることから、処理の時間短縮が期待でき、より複雑で大量な仕事が可能となる。その時、時間的階層性の考慮においては、復旧作業全体が協調する際に考慮される。ここで、各復旧作業の復旧班の最適配分と最適着工順の決定においては、種の進化を用いた今西進化論に基づいた GA を適用する。

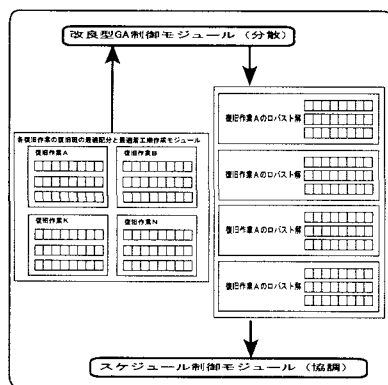


Fig. 3.1 分散協調システム

#### 3.2.2 種の進化による多様性維持

提案する今西進化論に基づく GA 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。

#### 3.2.3 復旧作業毎のコーディング

各復旧作業のコーディングは、Fig. 3.2 のようにコーディングされる。集中管理型のコーディングと同じように、復旧班の数字の並びは班の番号であり、それぞれ左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。Fig. 3.2 から分かるように、集中管理型と比較すると遺伝子長が短くなり、計算時間の短縮が期待できる。

| 復旧作業 |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |
|------|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|---|
| 順位   |   |   |   |   |   | 復旧班 |   |   |   |   |   |   |
| 5    | 2 | 3 | 4 | 1 | 0 | 1   | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

(遺伝子型)

| 復旧作業 |   |   |   |   |   |     |   |   |   |  |  |  |
|------|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|--|--|--|
| 順位   |   |   |   |   |   | 復旧班 |   |   |   |  |  |  |
| 5    | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 3   | 2 | 0 | 3 |  |  |  |

(表現型)

Fig. 3.2 コーディング

#### 3.2.4 遺伝的アルゴリズムによるスケジュール制御

各復旧作業の復旧班の最適配分と最適着工順を今西進化論に基づく GA により、種類の異なる解として複数個探索することにより、復旧作業全体の復旧班の最適配分と最適着工順をその組み合わせにより探索する。つまり、自律分散的に各復旧作業の復旧班の最適配分と最適着工順を探索し、それぞれの時間的階層性を考慮しながら、全体での協調が遺伝的アルゴリズムにより実現できることが期待される。全体のスケジュール制御における遺伝的アルゴリズムのコーディングを Fig. 3.3 に示す。スケジュール制御に関しても、遺伝子列は短くすることが可能になり、計算時間の大幅な短縮につながる。

| 復旧作業a | 復旧作業b |   | 復旧作業n |
|-------|-------|---|-------|
| 1     | 0     | 0 | 1     |
| 1     | 0     | 0 | 1     |

(遺伝子型)

| 復旧作業a | 復旧作業b |  | 復旧作業n |
|-------|-------|--|-------|
| 2     | 1     |  | 3     |
| 2     | 1     |  | 3     |

(表現型)

Fig. 3.3 コーディング

### 3.5 適用結果

Table 3.1 GA のパラメータ設定 (協調)

| Parameter                |      |
|--------------------------|------|
| population               | 300  |
| generation               | 1000 |
| probability of crossover | 0.6  |
| probability of mutation  | 0.05 |

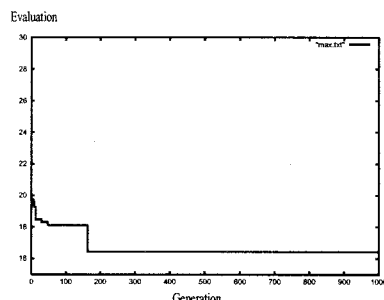


Fig. 3.8 目的関数の遷移

前述の数値計算例の設定で、復旧作業班が複数存在する大規模な問題に本研究で提案した分散協調システムを用いて各復旧作業の時間的階層性を考慮した最適な復旧プロセスの探索を行った。なお、このとき、分散モジュールである今西進化論を用いた GA のパラメータは上記のパラメータと同じであり、協調モジュールの GA のパラメータは Table 3.1 に示すものである。遮断物撤去作業、道路補修作業、ガスパ補修作業、水道管補修作業の4つの時間的階層性を考慮した場合の

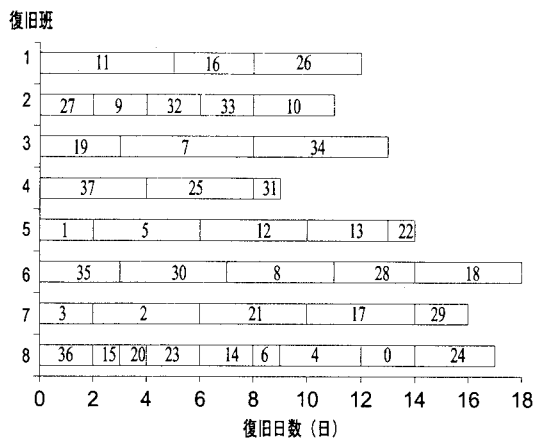


Fig. 2.6 遮断物撤去作業班の日程

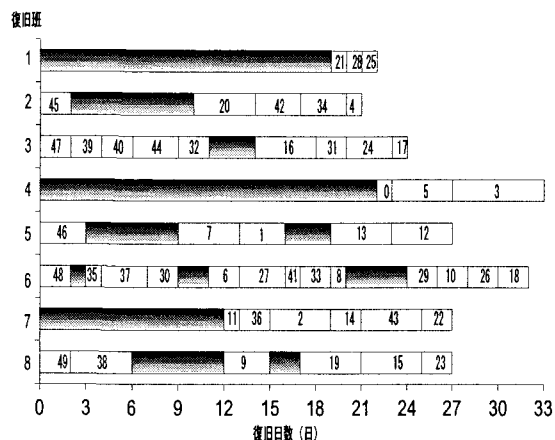


Fig. 2.7 道路補修作業班の日程

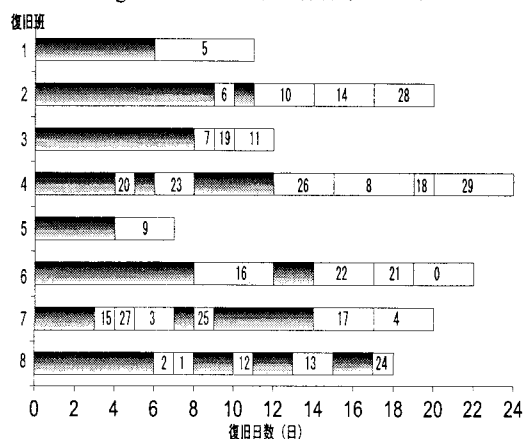


Fig. 2.8 ガス管補修作業班の日程

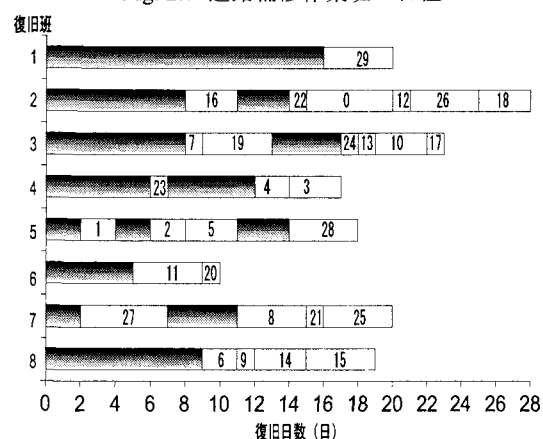


Fig. 2.9 水道管補修作業班の日程

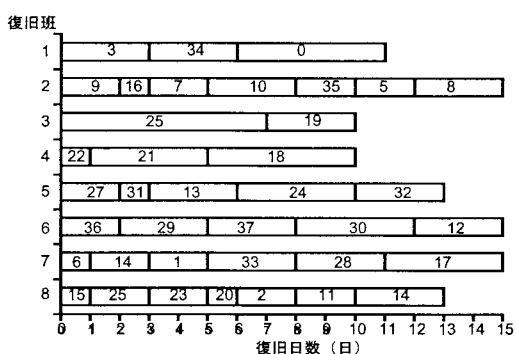


Fig. 3.4 遮断物撤去作業班の日程

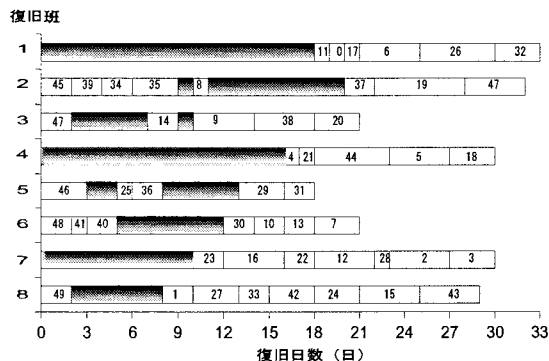


Fig. 3.5 道路補修作業班の日程

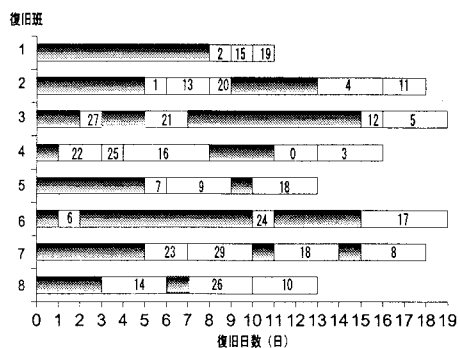


Fig. 3.6 ガス管補修作業班の日程

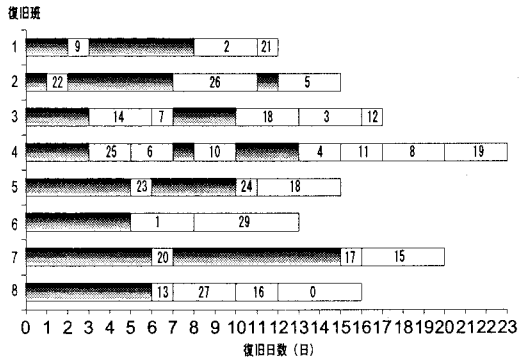
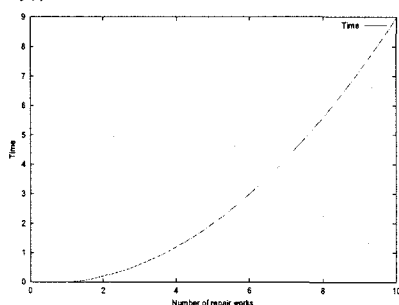


Fig. 3.7 水道管補修作業班の日程

復旧計画を Fig.3.4, Fig.3.5, Fig.3.6, Fig.3.7 に、その探索時の GA の目的関数の遷移を Fig. 3.8 に示す。

Fig. 3.8 から分かるように、大規模な探索において、世代が進むにつれて目的関数は順調に低下しており、探索が成功していることが分かる。また、以上の結果と前章の結果を比較すると、集中管理型システムの計算時間よりも短時間で同様の結果が得られた。また、GA の世代数で比較しても、集中管理型は 10000 世代であるのに対し、Fig.3.8 からわかるように 200 世代付近で収束しており、より早く探索することができるという結果が、2 種類の復旧作業の場合以上に顕著な形で確認できた。

### 3.6 考察



$$Time = xA * (x-1)B = ABx^2 - ABx$$

A: 復旧作業 1 作業単位の計算時間

B: 復旧作業間のブッキングチェックの単位時間

Fig. 3.9 復旧作業数と探索時間の関係の一例

Table 3.2 集中管理型と分散協調型の解の組合せ数の比較

|         | 集中管理型      | 分散協調型      | 集中管理型/分散協調型 |
|---------|------------|------------|-------------|
| 組合せ     |            |            |             |
| 復旧作業2種類 | 4.477E+123 | 4096       | 1.0931E+120 |
| 組合せ     |            |            |             |
| 復旧作業4種類 | 8.867E+202 | 1.6777E+07 | 5.2854E+195 |

Table 3.3 集中管理型と分散協調型の実時間の比較  
Intel Pentium4 プロセッサ 2.0GHz 512MB

|         | 集中管理型     | 分散協調型                             |
|---------|-----------|-----------------------------------|
| 探索時間    |           | 25m4s(分散モジュール)+24m49s(協調モジュール)=   |
| 復旧作業2種類 | 4H38m56s  | 49m53s                            |
| 探索時間    |           | 25m4s(分散モジュール)+3h56m50s(協調モジュール)= |
| 復旧作業4種類 | 34H38m32s | 4h31m54s                          |

本章では、復旧作業が 4 種類の場合を設定し、最適な復旧支援プロセスに対して、提案した分散協調システムを用いることにより、探索を試みた。その結果、提案した分散協調システムの有効性を示すことができ、その適用の可能性を示すことができた。

本研究で提案した分散協調システムでは、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的に探索することで、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、単純 GA では得ることの出来ない、多峰性の解をいくつも探索することで、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。それで、協調モジュールとしての GA が、単なる組合

せの探索となり、遺伝子列が集中管理型システム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、集中管理型に比べて、大幅な計算時間の短縮が可能になった、分散協調型の協調モジュールと集中管理型における組合せ数の比較を Table 3.2 に示す。計算資源を非常に消費していると考えられる復旧作業間の時間的階層性の考慮の計算を一例として、Fig. 3.9 に示した。分散協調型における分散モジュールは復旧作業数が 1 であり、復旧作業間の時間的階層性の考慮、つまり、復旧作業間のブッキングチェックを行う必要がないために、問題が大規模になっても、計算時間は 0 になる。また、協調モジュールにおいて、その計算は行いが、組合せ数が Table 3.2 から分かるように、非常に少ないために、計算資源の消費に関して問題はない。しかし、集中管理型においては、問題が大規模になるにつれて Fig. 3.9 から分かるように、指数関数的に計算時間が

増加する。また、Fig. 3.8 は単位時間における比較であり、組合せ数が膨大になればなるほど、探索に要する世代数は増加し、計算資源の消費は非常に大きな問題になる。ここで、具体的な探索時間の違いを Table 3.3 に示す。その結果から、問題が大規模になればなるほど、本研究で提案した分散協調システムが有用であることが考えられる。

### 4. 結論と今後の課題

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、復旧プロセス支援システムの構築を行った。また、復旧プロセス支援において、集中管理型システムと分散協調型システムの比較を行い、分散協調型システムの有用性を示した。本研究では、被災ネットワークの復旧プロセス支援システムを構築する上での方法論の提案を目的とし、その開発を行った。被災ネットワークの復旧プロセス支援システムの実用性における最大の課題は、復旧の評価と探索時間にある。本研究では、探索時間の短縮のために分散協調型システムを提案し、その有用性について確認した。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應する場合に、組合せの絞り込みの評価こそが、本研究で提案した分散協調システムの鍵であり、更なる改良が必要となる。

### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災誌 1995 年兵庫県南部地震 朝日新聞大阪本社「阪神・淡路大震災誌」編集委員会 朝日新聞社 1996.2.15
- 2) 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基礎的研究 杉本博之 片桐章 憲 田村亨 鹿汴麗 構造工学論文集 Vol.43A 1997.3
- 3) 進化論的計算の方法 伊庭斉志 東京大学出版会 1999.2