

北海学園大学工学部 学生員 片桐章憲 正会員 杉本博之
室蘭工業大学工学部 正会員 田村 亨 学生員 鹿 汴麗

1. まえがき

現代の市民生活におけるライフライン系の役割は、極めて重要な存在となっている。それは、直下地震によって被災を受けた都市のライフライン系のネットワークの被害により、多くの市民が日常と大きく異なる不便な生活を何か月も送ることを余儀なくされたなどの例から明らかである。

このような都市での被害は、ライフライン系ネットワークが地震の被害を直接受け、その機能が十分に働かないものだけでなく、例えば道路ネットワークの交通システムでは、水、食料、資材搬入といった平常時とは異なる需要が発生し、道路ネットワーク機能がマヒしてしまう被害もある。この被害解決には、やはり通行不可能な被害ルート of 早期復旧が必要である。

地震などにより、複数箇所 of 被災を受けて機能の低下したライフラインは、当然、機能回復のための早期復旧が要求される。その際、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、どの順番で被災箇所の復旧作業を進行していくかという問題（スケジューリング問題）が、同時に考えられ、これまでに、この問題における理論的な説明についてはすでに発表されている^{1) 2)}。

そこで本研究では、できるだけ現実に近い問題を想定し、時間的階層性のある被災の復旧作業や復旧班同士の協力も考慮した、ライフラインの復旧作業における被害箇所の最適作業順位と復旧班の最適配分の同時決定を試みた。

2. 研究目的

震災等の災害復旧問題についての研究はこれまでも多くなされている⁴⁾が、本研究では、道路ネットワークの被災モデルを例に取り上げ、①被災箇所の最適工事順位と復旧班の最適配分の同時決定、②被災による時間的階層性を考慮した復旧計画、③復旧班同士の

共同復旧の考慮といった3点が最大の特徴となる。ここで、被災による時間的階層性の考慮とは、構造物の倒壊によって道路の通行が妨げられた時の遮蔽物撤去作業と、被災による道路自体の陥没、うねりといった被害による道路補修作業を同時に考慮する場合、道路上の遮蔽物を撤去しなければ道路自体の復旧作業に着工できないという状態を意味する。また、復旧班同士の共同復旧とは、最初に与えられた復旧計画の被災箇所における復旧では、班の能力によって作業終了までの作業日数に差が生じると考えられる。この時、震災などの緊急を要する復旧作業では、自分の班の作業が終了したからといって復旧活動を終了するとは考えずらい。そこで、最初に与えられた被災箇所の作業が終了したら、事前に復旧班の拠点位置や作業能力値などから決められていた他の復旧班の復旧作業の支援を行うとして、復旧班の共同復旧を考えている。

この時の復旧評価関数である目的関数は、図-1に示す累積非復旧率の和によって表される面積とし、この面積の最小化を本研究の目的としている^{2) 3)}。これは復旧作業全体ができるだけ早急な復旧で、かつ市民に対するサービスの考慮から、復旧率の立ち上がりの早い復旧が望まれると考えたからである。

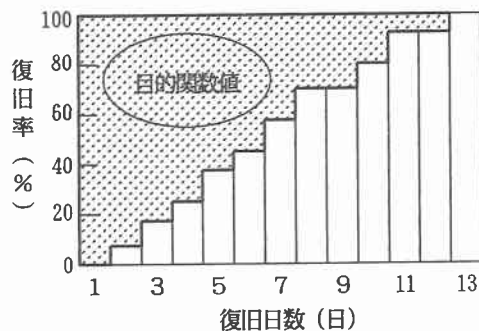


図-1 累積非復旧率による目的関数の概念図

3. 線列のコーディングとGA

これまでGAは、スケジューリング問題⁵⁾、組合せ問題⁶⁾に応用されてきたが、本研究では、被災内容の異なる2種類の復旧工事を想定し、復旧工事の最適順序と復旧班の最適配分の同時決定にGAを応用することを試みている。この時、GAで用いられる線列のコーディング方法を次に説明する。

各工事種類毎に、前半が工事順位を表し、工事番号を10進数でコーディングし、後半が前半の工事番号を担当する復旧班の番号を2進数でコーディングする。そして、工事順位の順番に班をコーディングした順番で対応させて各班が各工事箇所に配分される。

ここでは、図-2に示す25ノード50リンクのネットワークを例にとり説明する。時間的に先行しなければならない遮蔽物撤去作業5か所、その復旧班2班（ノード左上の○）、作業内容の異なる道路補修作業5か所、その復旧班4班（ノード右下の□）がある場合の線列とその意味を説明する。なお、図-2の▲が遮蔽物単独、×が道路補修単独、※が遮蔽物、道路の両方の作業を表し、各記号の左上の数字が遮蔽物の工事番号、右下の数字が道路補修の工事番号を表す。同一被災箇所に関わる両方の作業がある場合は、遮蔽物撤去作業が終了しなければ、道路補修が出来ないことになる。

この問題の線列の概念を表-1に示し、図-2における問題の線列の一例を以下に示す。

```

|← 遮蔽物撤去作業 →|← 道路補修作業 →|
[ 3 2 4 1 5 0 1 1 0 1 2 4 1 5 3 1011010001 ]
|← 順位 →|← 班配分 →|← 順位 →|← 班配分 →|
2進数の部分を10進数に直した線列は、
[ 3 2 4 1 5 1 2 2 1 2 2 4 1 5 3 3 4 2 1 2 ]
と表される。
    
```

ここで、班の配分部分は復旧班の番号を表し、それぞれの作業で順位と班配分を順に対応させることによって各工事箇所に復旧班を配分することになる。例えば、遮蔽物撤去作業の1班は、工事箇所3→1の順で担当し、2班は、2→4→5の順で担当する。これをまとめると表-2のような工事順と配分になる。この時、遮蔽物撤去作業3と道路補修作業1が同一箇所の作業なので、先に撤去作業3が終了しなければ道路補修作業1を着工できないことになる。

交叉法は、遮蔽物撤去作業の工事順位部分で1点、班配分部分で1点、さらに道路補修作業の工事順位部

表-1 線列のコーディングの概念

遮蔽物撤去		道路補修		...	上水道補修・等	
順位	班配分	順位	班配分		順位	班配分
10進数	2進数	10進数	2進数		10進数	2進数

表-2 線列の意味

復旧工事	班	担当工事順位
遮蔽物撤去作業	1班	3 → 1
	2班	2 → 4 → 5
道路補修作業	1班	5
	2班	1 → 3
	3班	2
	4班	4

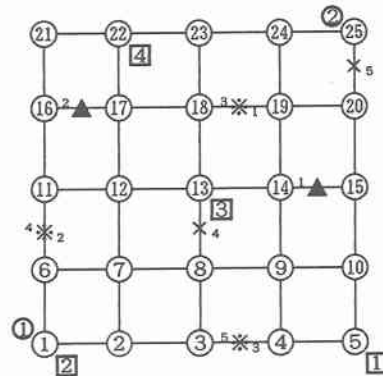


図-2 線列コーディングのための被災モデル

分で1点、班配分部分で1点となるように、線列全体で特殊な多点交叉を行う。作業内容に関係なく順位の部分では、一般のスケジューリング問題における交叉法⁵⁾が適用され、復旧班配分部分は、交叉位置の後半だけの入れ換えではなく、前半、後半を50%の確率で選択して入れ換えを行うとしている。このようにすることで、広域的な解の探査が可能となる。

突然変異は、やはりそれぞれの作業の順位、班配分部分で行い、順位側は2点の入れ替え、配分側は0なら1に、1なら0の入れ替えを行う。

4. 復旧評価関数の計算

前章で説明したように、線列のデコードから工事箇所各班の配分がされると、目的関数の計算を行う。

本研究では、道路ネットワークの震災復旧問題を例

表-3 撤去作業班の能力値と所属グループの一例

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	20	17	12	30	18	15	25	12
属グループ	A	B	B	B	A	C	C	C

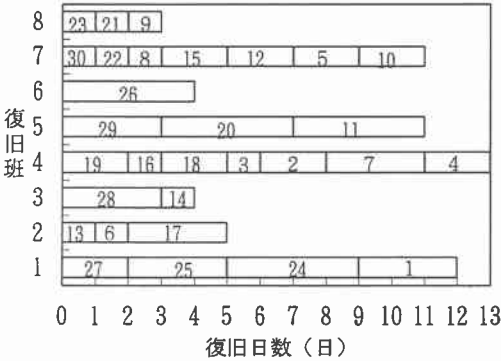


図-3 遮蔽物撤去作業の班協力前の工程表の一例

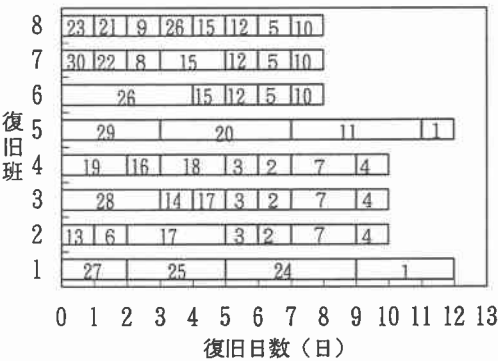


図-4 遮蔽物撤去作業の班協力後の工程表の一例

に取るが、その復旧プロセスの評価関数は、これまでも発表してきた^{2) 3)}。今回は問題を更に具体化し、本研究の解析側のポイントの一つでもある、復旧班同士の協力による復旧作業を考えている。

例えば、遮蔽物撤去作業において、表-3に示すように復旧班をグループ化する。つまり、1、5班がAグループ、2、3、4班がBグループ、6、7、8がCグループとなる。2班から成るAグループでは、どちらかの班がすべての作業を終了した時、相手の班がまだ作業進行中であれば、翌日から相手の班に合流して共同作業を行うとする。3班から成るB、Cグループでは、最初に作業が終わった班は、他の2班の内、

能力値の低い方の班を協力する。この時点でグループ内では2班に別れて作業を行う。そして、更にどちらか先に終了した方の班が、相手の班を協力するとしている。例えば、図-3のように、最初は各班が担当する被災箇所作業を順に進めていく。ここで、図-3の縦軸が復旧班の番号で横軸が復旧日数であり、各班ごとに担当した工事箇所の番号と、かかった復旧日数を表している。まず、8班が担当していた全ての被災箇所作業を終了したので、表-3から8班が所属するCグループのうち能力値の低い方、つまり6班を4日目から協力し、図-4に示すように8班は4つ目の作業箇所として26を担当する。そして、図-3、4からもわかるように6班は、工事箇所26を協力を受けて4日目で終了するので、5日目から6、8班は同グループのもう一つ班、7班を協力することになる。よって、図-4の6、7、8班は5日目から同一箇所の作業となり、結果的に図-3と比べて7班は3日早く終了し、8日目で終了していることがわかる。また、Aグループでは、5班が全ての作業終了後、1班の作業箇所1を12日目から協力していることがわかる。

このようにして、時間的階層性、復旧班同士の協力を考慮した復旧作業の復旧プロセスを考え、図-1に示す累積非復旧率によって表される斜線部分を目的関数値とし、この最小化を目指す。なお、復旧日数の計算については、文献2) 3) に詳しく書かれているので、ここでの説明は省略する。

5. 256ノード 480リンクの道路網の計算例

本研究に用いた問題の数値計算例として、図-5に示す256ノード、480リンクの道路ネットワーク上に多数の被災箇所を受けた場合の復旧プロセスの問題を説明する。

被災モデルは、図-5に示すように、道路上に遮蔽物が倒壊した遮蔽物撤去作業箇所(▲)を18か所、地震によって道路自体に欠陥が生じた道路補修作業箇所(×)を20か所、同一箇所これら両方が発生した箇所(*)を30か所としている。つまり、遮蔽物撤去作業箇所は全部で38か所、道路補修作業箇所は50か所が図-5に示されている。各記号の左上の番号は、遮蔽物撤去作業箇所の番号で、右下の番号は、道路補修作業箇所の番号が示されている。また、リンク線の太さの違いによって重要度の差を表し、太線ほど高い重要度を表す。遮蔽物撤去作業と道路補修作業箇所の被害

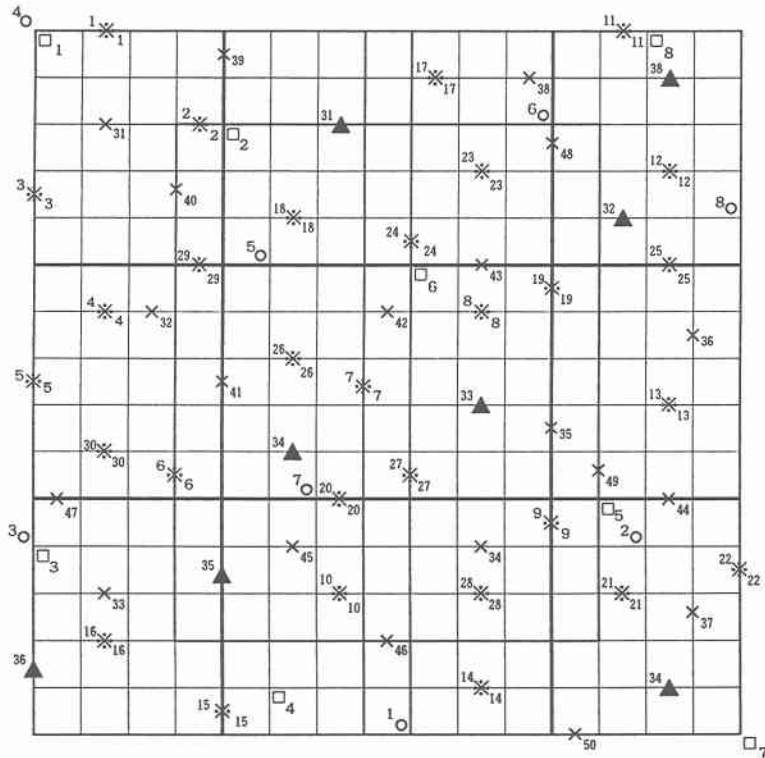


図-5 256ノード 480リンクの道路ネットワークの被災モデル

表-4 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	252(中)	2	14	604(大)	1	27	186(小)	2
2	506(大)	2	15	142(小)	3	28	211(中)	1
3	184(小)	2	16	695(大)	2	29	342(中)	3
4	628(大)	1	17	631(大)	1	30	104(小)	1
5	668(大)	2	18	301(中)	2	31	421(中)	2
6	578(大)	2	19	571(大)	3	32	355(中)	1
7	295(中)	2	20	456(中)	3	33	688(大)	1
8	425(中)	1	21	524(大)	1	34	340(中)	1
9	392(中)	3	22	126(小)	2	35	111(小)	3
10	147(小)	1	23	480(中)	1	36	275(中)	2
11	429(中)	2	24	471(中)	2	37	152(小)	1
12	609(大)	1	25	382(中)	3	38	321(中)	1
13	160(小)	1	26	432(中)	1			

表-5 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	工事箇所	被害量	重要度
1	528(大)	2	18	285(中)	2	35	666(大)	3
2	632(大)	2	19	316(中)	3	36	122(小)	1
3	579(大)	2	20	279(中)	3	37	569(大)	1
4	102(小)	1	21	694(大)	1	38	393(中)	1
5	387(中)	2	22	308(中)	2	39	407(中)	3
6	136(小)	2	23	137(小)	1	40	291(中)	2
7	504(大)	2	24	404(中)	2	41	104(小)	3
8	483(中)	1	25	518(大)	3	42	159(小)	1
9	113(小)	3	26	304(中)	1	43	225(中)	3
10	592(大)	1	27	152(小)	2	44	356(中)	3
11	551(大)	2	28	569(大)	1	45	585(大)	1
12	178(小)	1	29	339(中)	3	46	307(中)	2
13	667(大)	1	30	651(大)	1	47	373(中)	3
14	277(中)	1	31	514(大)	1	48	219(中)	3
15	416(中)	3	32	304(中)	1	49	104(小)	2
16	109(小)	2	33	252(中)	1	50	277(中)	2
17	486(中)	1	34	155(小)	1			

表-6 遮蔽物撤去作業班の能力値と所属グループ

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	18	27	12	14	23	25	14	30
協力時のグループ	A	B	A	C	C	D	B	D

表-7 道路補修作業班の能力値と所属グループ

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	12	14	18	20	25	30	14	20
協力時のグループ	A	A	B	B	C	D	C	D

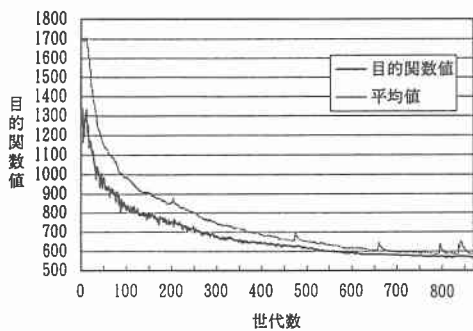


図-6 GAの解の収束図

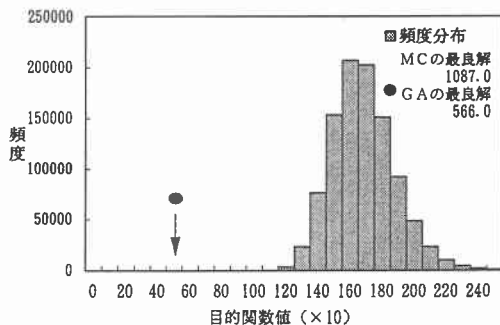


図-7 MC法による解の頻度分布図とGAの解

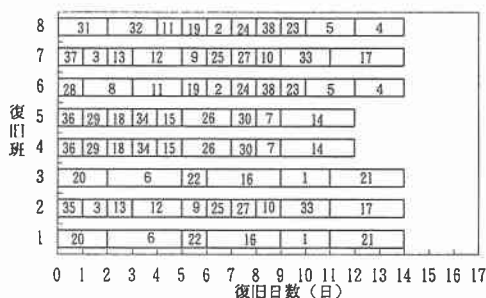


図-8 遮蔽物撤去作業の工程表 (GA解)

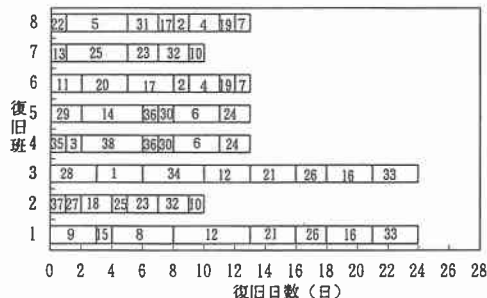


図-10 遮蔽物撤去作業の工程表 (MC解)

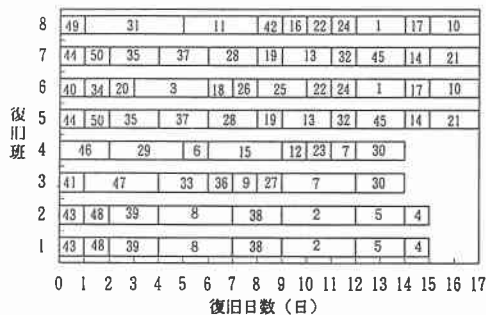


図-9 道路補修作業の工程表 (GA解)

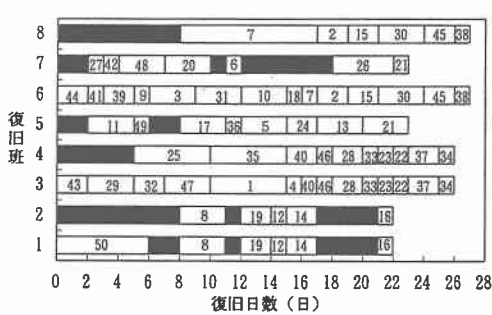


図-11 道路補修作業の工程表 (MC解)

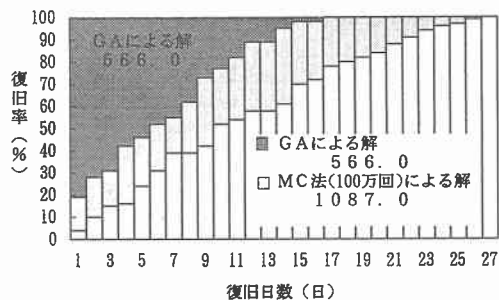


図-12 GA解とMC解の復旧過程の比較

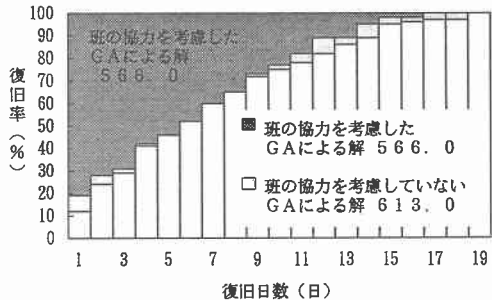


図-13 協力GAと非協力GA解の復旧過程の比較

量、ならびに、その被災が生じているリンクの重要度がそれぞれ表-4、5に示されている。被害量の大、中、小は被害規模の程度を表し、班の能力値によって担当可能、不可能の目安となる²⁾³⁾。それぞれの被災内容に対応する復旧班が8班ずつあるとし、図-5には、ノード上に遮蔽物撤去作業班が(○)で、道路補修作業班を(□)で表し、左上と右下の番号は班の番号を表している。それぞれの復旧班の能力値および協力時の所属グループは表-6、7に示されている。

GAの主なデータは、人口サイズ 200、最大世代数 1000、交叉確率60%、突然変異確率5%、大変異確率50%として計算を行っている。大変異は、ある世代で最良解を持つ線列が、人口サイズの1割以上生成された時と、解が30世代更新されない時に大変異を行って計算を継続し、最大世代内で最高5回実行している。

線列のビット数は、この問題の場合 352ビットになる。また、考えられる工事箇所順番と復旧班の組合せの総数は、 $38! \times 50! \times 8^{88}$ となる。

計算結果の検証のため、GAの計算のほかにモンテカルロ法(MC法)を100万回行い、それらの結果を図-6~12に示す。図-6は、GAの解の収束図であり、太線がGAの最良解、細線が平均値を表し、平均値の途中に入っているピークは大変異が入ったことを表している。図-7では、GAの解の検証のためにMC法を100万回行った時の目的関数値の頻度分布図とGAの解も同時に示しているが、明らかにGAは、かなり良好な解を示していることがわかる。図-8、9は、GAの結果による復旧作業工程表で、図-10、11がMC法の結果である。縦軸が復旧班、横軸が復旧日数を表し、各班が担当した工事箇所の番号とその復旧日数を表している。GAの計算結果では、黒く塗りつぶされた作業待ち時間が一つもないのに対し、MC法の結果では作業待ち時間が数か所にあることが明らかにわかる。また、作業日数もGAの結果ではMC法の結果よりも、それぞれの作業で10日も早く終了していることがわかる。更に、累積非復旧率で表された目的関数値の比較を図-12で行っているが、GAの解の目的関数値が566であるのに対し、MC法は1087で、ここからも明らかに、市民へ対するサービスの違いが明らかである。ここまで説明したGAの結果は復旧班の協力を考慮した結果であったが、非協力のGAの解との比較を図-13に示している。非協力のGAの解の目

的関数値は613で作業日数が19日であるので、復旧班の協力による効果があったことがわかると思われる。

6. あとがき

本研究では、道路ネットワーク上に複数の作業内容の異なる被災箇所が発生した時の、時間的階層性、復旧班同士の協力を考慮したより現実に近い震災復旧問題を想定したが、GA側の工夫と解析側の処理によりこのような問題も解くことができた。また、このような問題に対するGAの有効性も示されたと思われる。

さらに、道路ネットワークの被災の他に水道網の被災も同時に受けた被災モデルを想定した問題もすでに解いている⁷⁾。この場合、水道網の被災箇所までのルートが無ければ、水道網の復旧作業に着工できないといった複雑な問題になるが、このような問題も今回発表したGAの線列のコーディングと、解析側の処理により解くことが可能である。

今後は、復旧班の適切な配置の検討など、総合的な災害時における防災システムについての検討を加えていきたいと考える。

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および順位決定について、第51回年次学術講演会講演概要集I-B 372、pp.744-745、1996。
- 3) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿汗麗：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、(掲載予定)
- 4) 佐藤忠信・一井康二：遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究、土木学会論文集、No.537/I-35、pp.245-256、1995。
- 5) 田村亨・杉本博之・上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への応用、土木学会論文集、No.482/IV-22、pp.37-46、1993。
- 6) 鹿汗麗・久保洋・杉本博之：GAによる複合体の最適材料選択に関する研究、日本機械学会論文集A編、61巻、584号、pp.115-120、1995。
- 7) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿汗麗：災害復旧プロセスへのGAによる支援の試み、第1回都市直下地震災害総合シナリオ論文集、pp.295~298、1996。