

IV-27

復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデル

室蘭工業大学 学生員 有村幹治
 室蘭工業大学 フェロー 斉藤和夫

1. はじめに

莫大な被害をもたらした阪神・淡路大震災は、我が国の防災行政の転換点となった。これを契機として災害対策基本法が改正され、防災基本計画の抜本的修正が行われた。これにより、例えば北海開発局防災対策事務規定では、従来までの災害応急事務の処理ばかりではなく、大規模災害を視野に入れ、災害予防・災害応急対策・災害復旧・復興の処理を一元化することが制定された。防災 CALS の必要性や、地方公共団体相互の広域応援協定の法律的位置付けの議論など、緊急時の柔軟な応援体制整備の試みは、迅速なネットワーク機能の回復の為に重要な課題である。

交通分野で被災時の道路ネットワークを対象とする研究では、例えば災害事前策評価としてリンクの復旧優先順位の決定手法や、災害後の復旧過程として、ネットワークの階層性を考慮した最適復旧¹⁾などが行われている。しかしこれらの研究は緊急時の応援体制は変数として扱われなく、組織的な復旧計画の議論とは結びつきにくい。応援体制が扱われ難い理由として、復旧における組織的な復旧戦略の決定は復旧班が協力して被災したリンクの復旧にあたることを考慮する必要があることから、最適な組み合わせの決定が困難となることが挙げられる。

本研究は準最適解探索手法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms、以下 GA と呼ぶ) を用い、復旧班の協力体制を考慮できる復旧モデルを構築し、それを解くことを目的とする。実際のネットワーク規模での適用のために GA の遺伝子設計と交叉法に工夫を加える。工夫した遺伝子設計と交叉法は従来の設計方法を応用したものであるが、担当班の組み合わせ制約が明確なスケジューリング問題に効果的であると思われる。本研究で行なった GA の処理上の工夫もあわせ、ここに報告する。

2. 復旧班の協力体制のモデル化

災害復旧工事における協力効果としての具体例として、函館開発建設部、函館宮林支局、札幌防衛施設局、松山支庁、函館土木現業所、奥尻町の各機関によって結成された北海道南西沖地震奥尻島災害復旧推進連絡会議がある。会議の活動内容は、事業実施環境対策の検討、資機材使用量の情報交換と確保対策の検討、予定事業内容の把握と調整等となっていた。会議では以下に示す「事業実施予定連絡調書」を関係機関、復旧実施業者、建設協会内で提出、公開し、復旧のための需給の見通しを立てた。それぞれの機関の機械、資材、労務の所有数を把握することで、単体の復旧班のみでは対応できない被災箇所の復旧に対応できる組み合わせと投入時期の調整を行なった。

事業名	事業実施機関	建設機械	建設資材	労働力
	事業実施場所	使用期間	使用期間	必要期間
平成 年 月 ~ 年 月				

図-1 事業実施予定連絡調書

以上の例から、復旧班の協力効果とは、具体的には人員や建設機械、復旧資材等の柔軟な活用による単一な復旧班では復旧不可能な被災道路の復旧であるといえる。そこで本研究では、以下のように協力復旧問題をモデル化する。

1) 被災状況

対象となる被災状況は、①道路ネットワークは自然災害等で地方公共団体の管轄を超え広域的に被災している②被災リンクの被災の程度は復旧班単体の処理能力を超える場合がある、の2点を特徴とする。

2) 復旧班

復旧班はそれぞれに復旧能力を持つ。また、それぞれ管轄のノードを持ち、被災リンクのどちらか一方のノードが管轄のノードの場合には復旧を担当できる。復旧班の管轄範囲は他の復旧班の管轄範囲と重なって

いても構わなく、広域的な応援体制を扱うものとする。

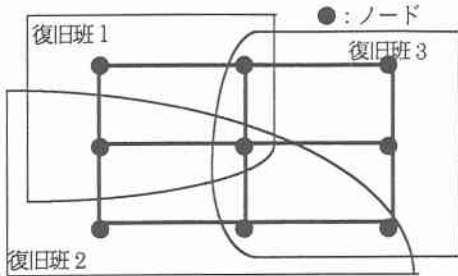


図-2 復旧班の管轄範囲

各復旧班はそれぞれ人員、建設機械、資材を持つものとする。協力時の復旧班の復旧能力は以下の式で算出する。復旧班の組み合わせ次第では人員増加による余剰の建設機械の利用等の効果がありえる。復旧能力は、被災量の単位を unit として、1 日に処理できる被災量(unit/day)で表わされる。

$$SURAi = \min (HPi / \alpha, MPi) \times \beta \quad \text{--- ①}$$

HPi: 被災リンク i 担当の復旧班の総投入人員数

MPi: 被災リンク i 担当の復旧班の総投入建設機械数

SURAi: 被災リンク i 担当の復旧班の全復旧能力 (unit/day)

α : 1 日の建設機械を扱う人員数

(本研究では 1 日 3 交代制とし、3 と設定)

β : 建設機械 1 機あたりの復旧能力 (unit/day)

(本研究では 1 と設定)

3) 被災リンクの復旧所要時間

本研究では、各被災リンクの復旧に要する日数は被災リンクの被災量を復旧に当たる復旧班の総復旧能力で除することで算出できるものとする。ただし、担当復旧班の投入人員数・建設機械数・資材数が、最低限必要とされる量に足りない場合は、その被災リンクは復旧できないものとする。また、ある程度以上の復旧能力が被災リンクに投入されても、復旧の効率は上がらないものと考えられ、その値を飽和復旧能力として各被災リンク毎に設定する。以上の関係を以下に示す。

$$OMNHPi > HPi$$

$$MNMPi > MPi$$

$MNMAi > MAi$ の条件のどれかを満たす場合

$$NRDi = \infty \text{ (計算上は充分大きな値) } \quad \text{--- ②}$$

ただし、

N: 被災リンク数

MNHPi: 被災リンク i の復旧に最低限必要となる人員数

MNMPi: 被災リンク i の復旧に最低限必要となる建設機械数

MNMAi: 被災リンク i の復旧に最低限必要となる資材量(unit)

MAi: 被災リンク i 担当の復旧班による総投入復旧資材量(unit)

NRDi (i=1-N): 被災リンク i の復旧所要日数

最低限必要となる人員、建設機械、資材量を復旧担当班が満たす場合においてのみ、復旧は可能となる。

○SURAi < RSPi の場合

$$NRDi = SAi / SURAi \quad \text{--- ③}$$

○SURAi ≥ RSPi の場合

$$NRDi = SAi / RSPi \quad \text{--- ④}$$

ただし、

SAi (i=1-N): 被災リンク i の被災量 (unit)

RSPi (i=1-N): 被災リンク i の飽和復旧能力 (unit/day)

SURAi (i=1-N): 被災リンク i を担当する複数復旧班の総復旧能力 (unit/day)

以上の関係より、各被災リンクの復旧所要日数の計算を行なう。

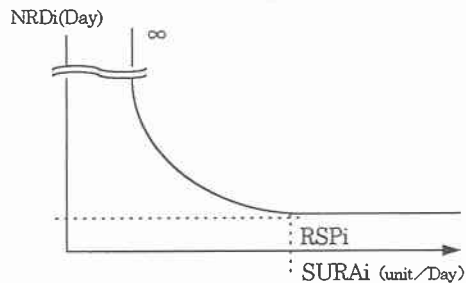


図-3 被災リンクの復旧日数と投入復旧能力の関係

以上の 3 点を協力復旧問題の枠組みとし、効果的な復旧戦略を得るために GA を適用する。

3. 協力復旧問題への GA の適用

GA に協力復旧問題を適用するためには、GA で生成される遺伝子線列での協力体制の表現と、効果的な復旧に適した目的関数の設定が必要になる。順に説明する。

(1) 遺伝子線列による復旧戦略の表現

協力復旧問題を GA に適用するためには、協力体制を遺伝子線列で表現する必要がある。具体的には①復旧班は与えられた被災リンクをどのような順番で復旧するか②各復旧班はどの班と協力するか、という情報を持つ復旧スケジュールの遺伝子線列での表現である。この項では、復旧スケジュールを表わす設計変数と遺伝子線列の構成について説明する。

1) 復旧スケジュールの遺伝子表現

線列の中に取り組み必要のある情報は、「被災リンクの復旧優先順位」と「被災リンクの復旧班への振り分け」である。本研究では、「巡回セールスマン型」と「配分型」の2つの遺伝子線列の構成方法を、1つの線列の中に同時に記述する。これにより、被災リンクの復旧優先順位と、復旧班への被災リンクの配分を1つの遺伝子線列で同時に表現できる。

遺伝子線列は、被災リンクの復旧の順番を10進法で、被災リンクの復旧班への配分を2進法で表現する。



図-4 遺伝子線列設計

図-4は被災リンク数7本の場合であり、線列前半部にはリンク番号が重なることなく配置され、左から順に被災リンクの復旧の優先順位が高いものとする。線列後半部には、複数の班が同時に1つの被災リンクを担当できるような復旧体制の情報を持つ設計変数を用意し、線列前半部の遺伝子座とそれぞれ対応させる。図-4の場合は被災リンク1は協力組み合わせ14番の協力体制で復旧される。協力体制を示す設計変数を次項で説明する。

2) 協力を表現する設計変数のコーディング

複数の班が同時に1つの被災リンクを担当する情報を持つ設計変数は、班数n班の場合、バイナリ表現ではn bitの長さとなる。例えば協力する班数が4班の場合、4bitとなり、全ての班が協力しない(復旧しない)場合を含めると、設計変数として1から16までの数を用意すると、4班まで協力した場合の組み合わせパターンをすべて記述できる。表-1に復旧班が4班ある場合の協力体制を意味する設計変数を示す。全ての班が協力しない状態はありえないので、設計変数16の情報をダミーとし、全ての復旧班が協力する情報として使用する。あらかじめ考えられる復旧班の組み合わせを、この表に記述することで、復旧班の協力体制を表現できる。

線列後半部の設計変数の情報と、線列前半部の対応する遺伝子座の復旧リンク番号と優先順位により、遺伝子線列は復旧スケジュールに変換される。図-5に図-4の遺伝子線列を表-1の情報によって変換した復旧スケジュールを示す。

表-1 班の協力を示す設計変数

設計変数	協力する班	設計変数	協力する班
1	1	9	2 4
2	2	10	3 4
3	3	11	1 2 3
4	4	12	1 2 4
5	1 2	13	1 3 4
6	1 3	14	2 3 4
7	1 4	15	1 2 3 4
8	2 3	16	1 2 3 4

表-2 班の協力を示す設計変数

班	復旧するリンクと順序
1	④ → ② → ⑦ →
2	① → ② → ⑦ → ⑤
3	① → ⑥ → ③ → ⑤
4	① → ②

○: リンク番号

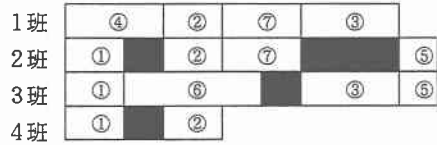


図-5 復旧スケジュール 日数

(2) 広域道路網復旧のための目的関数

道路ネットワークの最適復旧問題における代表的な目的関数としては、復旧日数や累積非復旧度等が挙げられる。本研究で扱うネットワーク規模と被災状況では、復旧は長期的に行われる。よって復旧早期の段階での道路ネットワーク性能の回復と復旧日数そのものの短縮を評価するために、累積非復旧度の観点から目的関数を設定する。復旧過程により、各被災リンクの復旧が完了する時点で、ODペア間の最短時間距離は動的に変動することを考慮し、被災リンクに固定の重要度は与えない。被災リンクが復旧される毎に、回復したネットワークの時間距離を用い、ODアクセシビリティ指標 Φ を算出する。復旧によるリンクの時間距離の回復による同指標の増加分と被災リンクの復旧完了時間を累積した値を目的関数 Θ とし、最小化する。

$$OBJ = \sum_{k=1}^N \{ (S(k) - S(k-1)) \times RT(k) \} \quad \text{--- ⑤}$$

ただし $S_0 = 0$

N : 被災リンク数

Sk : 被災リンク k が復旧した後のアクセシビリティ指標

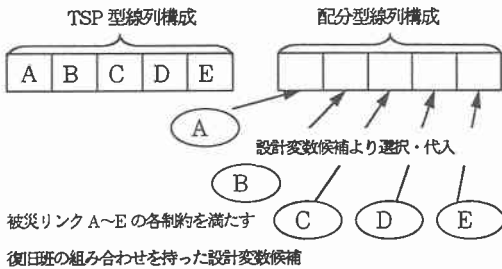
RTk : 被災リンク k の復旧完了時間

4. 知識ベースの遺伝子線列設計への導入

問題の制約条件を遺伝子線列の設計に組み込むことは、生成される遺伝子線列が常に制約条件を満たし、探索する解空間そのものが小さくなることからGAでは効果的な工夫となる。本研究の遺伝子線列は、協力する復旧班の組み合わせを設計変数とすることで協力体制を表現している。しかし、このままでは、各被災リンクで最小限必要とされる復旧能力を持たない班の組み合わせや、復旧班の管轄外の被災リンクの復旧の情報を持つ遺伝子線列を初期線列として生成する可能性がある。その線列がいずれ淘汰されるとしても、計算効率を考えると無駄である。そこで以下のような工夫を行なった。

(1) 制約条件による設計変数候補の選択

各被災リンクには、①最低限必要とされる復旧能力②管轄内であることから復旧を担当できる復旧班、が設定されている。そこで、以上の制約を満たす復旧班の組み合わせを持つ設計変数を各被災リンク毎にあらかじめリストアップし、配分型的设计変数の候補とすることで無駄な復旧班の組み合わせの発生を防ぐ。

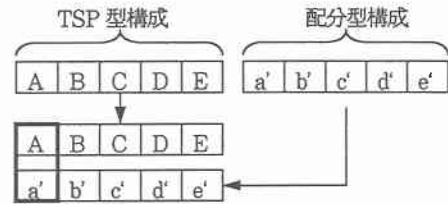


図一六 制約条件を構造的に取り入れた線列構成

初期遺伝子線列の生成では、TSP型線列部が示す被災リンク情報と対応させて、配分型線列部にリストアップされた設計変数群より協力を意味する設計変数を選択し代入する。初期世代生成時に選択されない設計変数があると、扱われない協力体制が発生する。よって設計変数は母集団より同じ割合で必ず選択されるものとした。

(2) 設計変数候補を保存する交叉法

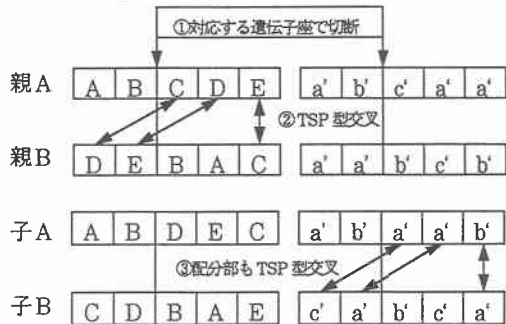
本研究では被災リンクの復旧順番とその担当班を表現するために、1本の遺伝子線列中にTSP型と配分型の遺伝子構成を同時に記述している。既存の研究では、異なる遺伝子線列構成を同時に記述する場合の交叉プロセスでは、交叉はそれぞれの交叉法を用いて独立に行われている。しかし、配分型の遺伝子線列部の設計変数がそれぞれ異なる選択候補を持っている場合は、単純に交叉を行なうと復旧不可能な組み合わせが生成され、設計変数候補をリストアップした意味が無くなる。そこで設計変数候補の情報を破壊しない交叉法上の工夫が必要となる。そこでTSP型と配分型の遺伝子線列部の「復旧順番」を示す設計変数と「担当復旧班」を示す設計変数を、常にブロック（太線で囲まれた設計変数）として操作することで交叉による制約条件を満たさない復旧担当班の組み合わせの発生を防ぐ。



図一七 設計変数のブロック化

交叉は以下の操作で行われる（図一八）。

- ① TSP型遺伝子線列部と配分型遺伝子線列部のそれぞれ対応する遺伝子座で切断する。
- ② TSP型による交叉法と同様に例えば切断され2つに分けられた遺伝子線列部の片方の設計変数を他方の親の設計変数の並びに従い入れ替える。
- ③ 他方の入れ替えられる設計変数と対応する遺伝子座にある配分型的设计変数もTSP型的设计変数と離れないように同じ並びで入れ替える。



図一八 交叉法（親線列Aについて）

(3) 突然変異

本研究での突然変異は① TSP 型遺伝子線列構成の突然変異をブロック単位で行なう②配分型線列構成部のみに対し設計変数候補の中からランダムに選択し入れ替える、の2つの方法を考案した。

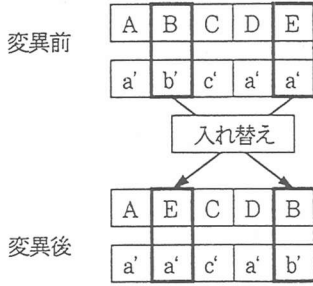


図-8 ブロックによる突然変異

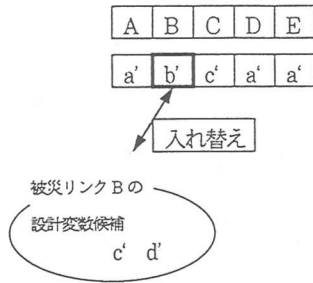


図-9 復旧担当班情報のみの突然変異

5. 国道レベルのネットワークへの適用

本研究では北海道南西部の道道を含む国道ネットワークが、何らかの自然災害によって複数のリンクが同時に被災したと想定し、実際に本研究で構築したモデルにより計算を行なった。使用したODは平成2年度道路交通センサスより設定した。被災時のノード間時間距離はランダムに与えるが、平野部の被災リンクでは何らかの迂回路があるもの、海岸部では寸断もありえるものとして適当な値を設定した。復旧班数は10班とし、それぞれの管轄範囲を設定した。対象ネットワークと被災リンクの位置、復旧班の管轄範囲を図-10に示す。被災リンク数は29本とした。被災リンクのデータを表-3に、それぞれの復旧班のデータを表-4に示す。GAの各パラメーターは人口サイズ200、最大世代数100、交叉確率0.6、突然変異確率0.05、淘汰係数2.0とした。またモンテカルロ法により制約条件を遺伝子線列に導入した場合と、しない場合の解の発生頻度の分布を比較した。

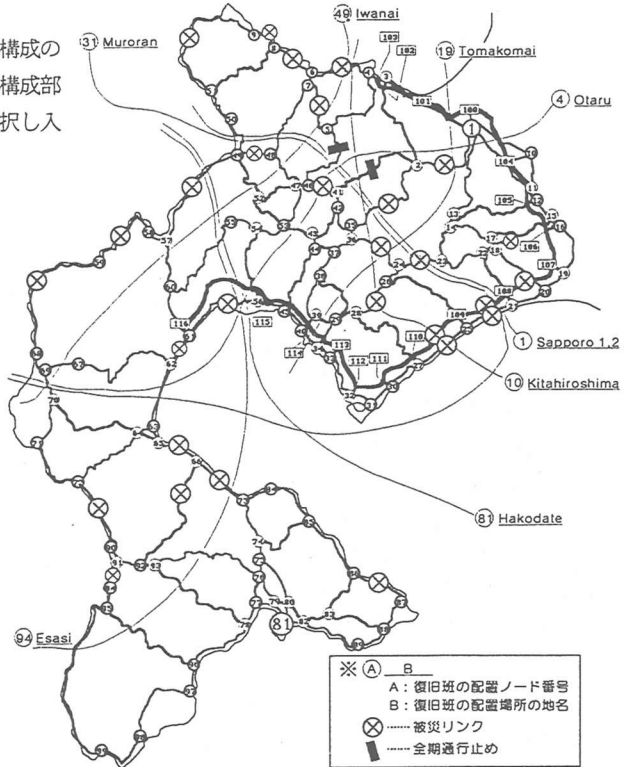


図-10 対象ネットワーク

表-3 被災リンクデータ

被災Link番号	Node-A	Node-B	被災量 (unit)	飽和復旧能力組	最低限必要な人員数	最低限必要な建設機械数	最低限必要な資材量
1	1	2	937	224	82	25	776
7	2	35	1043	109	33	9	285
14	4	6	310	47	16	3	116
19	6	8	923	80	51	15	467
21	8	9	885	160	79	24	744
23	9	51	479	135	96	30	917
38	17	18	682	203	94	29	890
40	18	22	1027	199	68	21	631
44	21	25	887	124	64	13	398
48	23	24	567	160	56	17	512
50	24	36	717	206	57	17	526
51	25	27	448	75	53	16	482
53	26	28	921	22	18	4	130
80	41	46	940	214	104	33	993
90	48	49	647	247	93	29	883
93	49	57	516	178	86	27	819
100	56	61	1183	84	25	6	209
104	58	59	983	40	34	9	296
105	59	68	613	147	87	27	820
107	61	62	933	238	99	31	949
116	65	66	622	114	80	25	751
117	66	73	715	148	46	13	411
118	66	92	481	23	16	5	50
124	72	90	479	182	89	28	848
149	86	87	1118	114	97	30	925
154	91	94	439	46	24	13	90
169	107	108	229	132	39	11	342
170	108	109	3000	56	75	45	433
171	109	110	2560	153	89	41	441

表-4 復旧班データ

復旧班	人員数	建設機械数	資材量	配置ノード
1	210	50	470	1
2	20	10	370	1
3	50	30	570	4
4	110	40	600	10
5	53	20	130	19
6	160	60	650	31
7	50	20	270	49
8	40	20	470	94
9	80	50	570	81
10	160	60	850	81

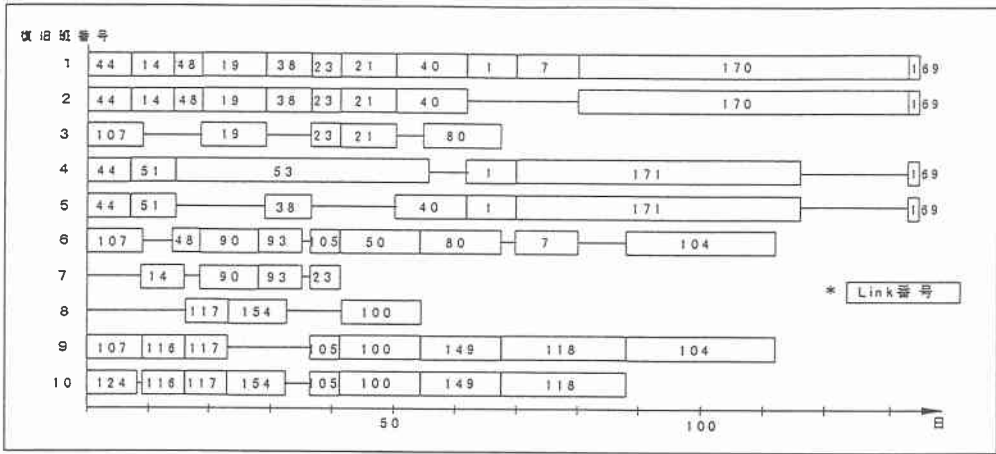


図-12 GAにより得られた復旧スケジュール

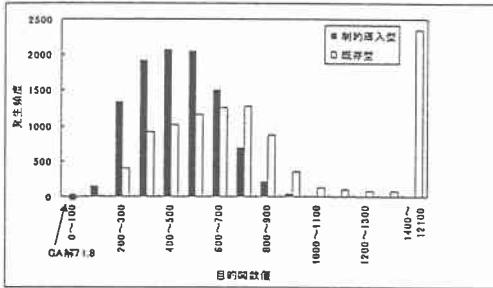


図-13 解の発生頻度分布

GAによって得られた最良な遺伝子線列をデコードした結果を図-12に示す。復旧初期段階で時間距離的な孤立の原因である被災リンク44、107を復旧している事が確認できる。図-13はモンテカルロ法10000回による解の発生頻度分布である。遺伝子線列構成に制約条件を導入することで探索する解空間が目的関数値的に良好な方へ移動したことが確認できる。またGAがモンテカルロ法に比べて良好な目的関数値を持つ組み合わせを探索したことがわかる。

6. 結論

本研究では複数復旧班の協力を表現できるモデルを構築した。構築したモデルは①復旧班の人員・建設機械・復旧資材②復旧班の管轄範囲③被災リンクの被災情報④被災ネットワーク形態、を変数として自由に扱える。またGAでの工夫点として、復旧班の組み合わせ制約を自動的に遺伝子線列に取り組み込むことで探索

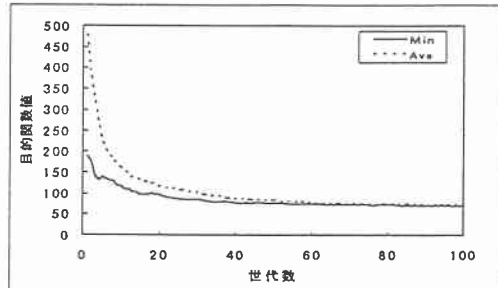


図-14 解の収束状況

する解空間を限定し、最適解の探索を効率化した。

最後に、本研究を進めるに当たり、北海学園大学教授杉本博之先生から協力を示す設計変数の概念、及び目的関数の計算の軽減化に関して御指導をいただきました。記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 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, 1995
- 2) 榎谷・田村・斉藤：「道路網を対象とした時間距離行列の視覚化」, 土木計画学研究論文集, No12, 1995
- 3) 有村・上西・田村・杉本・榎谷：「都市時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル」, 土木計画学研究論文集, No19, 1996