

都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル*

The Optimization Restoration Model Based on the Time Distance Matrix

有村幹治**・上西和弘***・田村亨****・杉本博之*****・梶谷有三*****

by Mikiharu ARIMURA, Kazuhiro JOUNISHI, Tohru TAMURA, Hiroyuki SUGIMOTO, Yuzo MASUYA

1.はじめに

本研究の背景として地方部の道路整備の現状がある。地方部では、人口5～10万人ほどの地方中心都市に、周辺地域が産業・医療・教育面等で依存する場合が多く、そのような地域社会での災害による道路寸断は、地理・時間的に孤立する地域を生み出し、社会活動の維持に多大な影響をもたらす。これらの地域社会を構成する道路網は、交通量が比較的少なく、交通量の多い都市部の道路と比べ、現実的に災害対策投資が優先されにくい。このような地方部道路網が被災した場合は、いかに都市間の連結性能を早期に回復するかが、他の地域との連携による生活圏の形成という地方部の特徴から重要となる。

ここで、事前に災害対策として考慮できるのはネットワークの多重性、代替性、回復性を高めることであるといわれている。この中で、ネットワークの回復性とは具体的には復旧班の配置、復旧能力の配分、資材の配置等の防災施策となろう。しかし、それらの施策を用いた災害後の効果的な復旧スケジュールを構築することができなければ、災害前の具体的な配置問題等の効果的な施策の決定は難しいといえる。しかし、災害後の復旧戦略を決定する場合は、復旧班の能力等、制約条件付き組み合わせ問題となり、その最適化はNP問題となる。その理由は、リスク管理を行なう際に操作すべき挙動変数と施

策決定段階で選択肢にあがる道路の復旧順位等の政策変数との組み合わせ数が莫大となり、計算時間が指数的に増大するからである。

そこで、本研究では、制約条件として復旧班数とその復旧能力が与えられた場合において、離散的組み合わせ最適化の近似解法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms 以下 GA と呼ぶ) を適用し、災害発生後の道路ネットワークの寸断を対象とした、復旧順位決定モデルを構築した。

2.最適復旧順位決定モデルへのGAの適用

本研究で構築したGAによる最適復旧スケジューリングモデルのフローチャートを図-1に示す。GAにおける基本的な流れは①初期線列の生成②淘汰③交叉④突然変異の4つである。ここで重要になる点は、いかに復旧スケジュールを遺伝子線列で表現するかということと、それに適合した交叉法の提案である。以上のGA内でのオペレーション上の工夫について説明する。

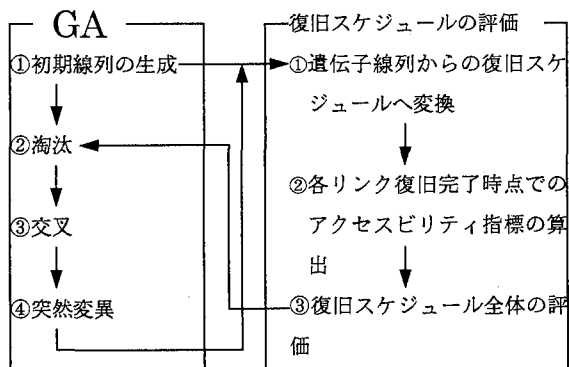


図-1 復旧スケジューリングモデル

(1) 復旧スケジュールの遺伝子表現

この項では、GA 内で生成される遺伝子線列の、

*キーワード：防災計画、交通網計画、交通管理

** , *** , **** : 学生員 正会員 工博 室蘭工業大学助教授

(〒050 室蘭市水元町 27-1 Tel0143-47-3419)

***** : 正会員 工博 北海学園大学教授

(札幌市中央区南 2 6 条西 1 1 丁目 1-1)

***** : 正会員 専修大学北海道短期大学教授 (美唄市光珠内町)

復旧スケジュールへの変換方法を説明する。本研究では、「配分型」と「巡回セールスマン型」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とを考えた。これにより、復旧班への復旧道路の配分と、配分された道路の復旧優先順位を同時に表現できる。

遺伝子線列の設計方法を以下に述べる。

①線列長

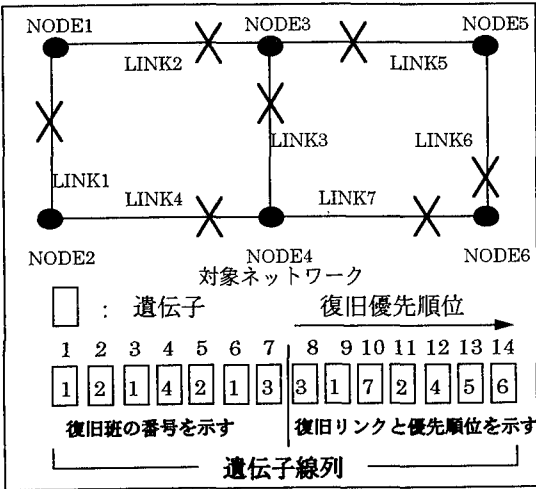
線列の長さは、「配分するリンクの番号」と、「復旧リンクの復旧班への配分」を示す遺伝子をそれぞれ用意する必要があるため、復旧リンク数の2倍の長さとした。

②設計変数（線列中の遺伝子）

設計変数は、線列前半部で「復旧班の番号」、後半部で「復旧リンク」を示すものが用意される。

③設計変数の配置

線列の前半部は復旧班の番号を示す設計変数が、後半部は復旧順番を示す設計変数が配置される。ここで、前半部の遺伝子の番地は順に後半部の復旧リンクに対応し、前半部のどの線列の番地（遺伝子座）にも、復旧班番号を示す遺伝子が自由に入る。後半部は1から復旧リンク数分の遺伝子が重なることなく配置され、右の番地から順に復旧優先順位を示す。線列の前半と後半の遺伝子の持つ情報により、各班の復旧するリンクと復旧順番が得られる。



図－2 線列設計

図－2は対象となるネットワークのリンクがすべて被災したものと、復旧リンク数が7、復旧班が4班の設定で構成した遺伝子線列である。復旧班

1班の場合は、復旧リンク3、7、5の順に復旧するスケジュールが得られる。図－3は、図－2の線列を復旧スケジュールに変換したものである。

班	復旧するリンクと順序
1	3→ 7→ 5
2	1→ 4
3	6
4	2

図－3 スケジュール構成

(2) 交叉法の工夫点

2つの遺伝子構成を持つ遺伝子線列を取り扱うため、本研究では交叉法に工夫をし致死遺伝子が生成されないようにした。配分型の遺伝子構成を持つ線列前半部は一点交叉、二点交叉、マスク法を採用し、後半部は順位交叉法、循環交叉法、部分交叉法などの巡回セールスマン型の交叉法（同じ設計変数が重ならない交叉法）のうち、順位交叉法を採用する。

交叉は前半部、後半部で対応する遺伝子座で行われ、交換される線列部分は交叉によって分断される遺伝子線列の短い方を交換するものとした。短い線列部分を交換することによって、交叉によって生成する新しい子線列は、解空間で親となった遺伝子線列の周辺に発生する。この操作によって、線列の大部分を交換することによって発生する交叉による「突然変異的なスキーマの破壊」を防ぐことができる。

3.アクセシビリティ指標¹⁾の算出

本研究で構築した遺伝子線列は、それぞれにおいて復旧スケジュールへ変換され、GAにおいて評価される。評価は各リンク復旧完了時点での復旧時のアクセシビリティ指標を用いることで、複数班の復旧スケジュール全体で行なうものとした。アクセシビリティ指標は、対象地域の道路網全体の連結性能を定量化する必要がある。本研究では John.A.Black & Conroy が提案した累積頻度分布曲線によるアクセシビリティ指標を用いる。これにより道路の交通途絶に伴って各都市間の時間距離がどの程度増大したかを把握できるとともに、対象地域全体および各都市の移動の可能性がどのように変化したかを把握

できる。すなわち、道路の交通途絶の回復に伴って、対象ネットワーク全体の時間距離がどの程度回復したかを把握することができる。

以下では、1 節でアクセシビリティ指標算定に必要な累積頻度分布曲線の作成、2 節でアクセシビリティ指標の算定法について述べる。

(1) 累積頻度分布曲線の作成

累積頻度分布曲線は、ある時間内に到達可能な活動の機会の和（累積比率）を求めることによって作成する。都市（ノード）の数を n としたとき、時間距離行列（ $n \times n$ ）の累積頻度分布曲線は、対角要素を除く $n \times (n - 1)$ 個の都市間（OD ペア）を対象に作成する。図-4 は、累積頻度分布曲線を用いて時間距離行列を視覚化した概念図である。横軸は、都市間の時間距離を、縦軸は対象とするすべての OD ペアのうちある時間内に到達可能な OD ペアの累積比率を示す。 $n \times (n - 1)$ 個の OD ペアを対象にした道路網全体に対する時間距離行列の視覚化は、対象とする都市間の OD ペアを時間距離の大小順に並び替えるとともに、並び替えられた OD ペアの順に累積比率をプロットすることによって図示できる。

図-4 から分かるように、道路網の整備により利便性が増すと、すなわち交流の機会が増大すると、累積頻度分布曲線が全体的に左にシフトすることとなる。反対に、交通途絶により利便性が減ると、すなわち交流の機会が減少すると、累積頻度分布曲線が全体的に右シフトする。

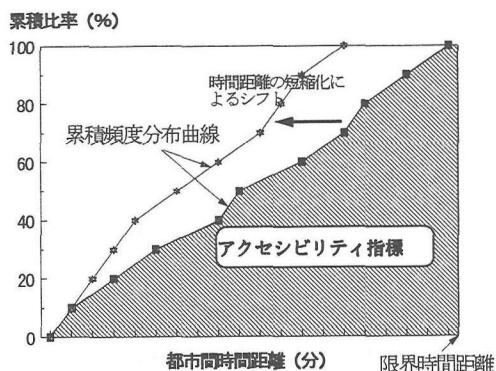


図-4 累積頻度分布曲線のシフト

(2) アクセシビリティ指標の算定

本研究で使用するアクセシビリティ指標は先の累積分布曲線を用いて作成される。図-4 を用いて説明すると、累積頻度分布曲線、横軸の時間軸においてある設定された時間距離 T の縦軸で囲まれた面積（図-4 斜線部分）を求め、これを指標とする方法である。

道路ネットワーク全体のアクセシビリティ指標の値 K は、累積頻度分布曲線 $A(x)$ と限界時間距離 T を用いて次式で算定できる。

$$K = \int_0^T A(x) dx$$

T : 限界時間距離

指標 K を算定するとき、曲線 $A(x)$ を定式化することは一般に困難であることから、実際には台形公式等を用いて求められる。

4. 目的関数

災害後の復旧の場合、最短時間での復旧や復旧早期での重要となるリンクの復旧が重要となり、目的関数となる場合が多い。本研究では復旧時間とアクセシビリティ指標を変数としてネットワークの復旧過程を定量化し、GA 内で生成される遺伝子線列についてそれぞれ計算する。各リンクが復旧される度に、更新された各ノード間の最短時間距離行列からアクセシビリティ指標を求めることにより、復旧スケジュール全体での連結性能の回復過程を把握する。

目的関数は、全ての班の復旧開始から完了まで、各リンクが復旧することによる、道路ネットワーク全体の時間距離性能の向上（累積頻度曲線の左シフトの推移）を評価する。災害前のアクセシビリティ指標と、災害後のアクセシビリティ指標の差は、その被災における道路ネットワークの時間距離性能の全体の低下量を示す。本研究ではこの全体の低下量を回復アクセシビリティ指標とした。復旧開始後のリンクの復旧完了時間での回復アクセシビリティ指標の差は、その時点でのリンク開通によるネットワークの時間距離の回復を示す。この回復アクセシビリティ指標を縦軸の最大値としたグラフに、各リンクの復旧完了時間ごとに求まる指標値をプロットす

ることで、復旧過程における道路ネットワークの時間距離性能の向上の推移が把握できる。

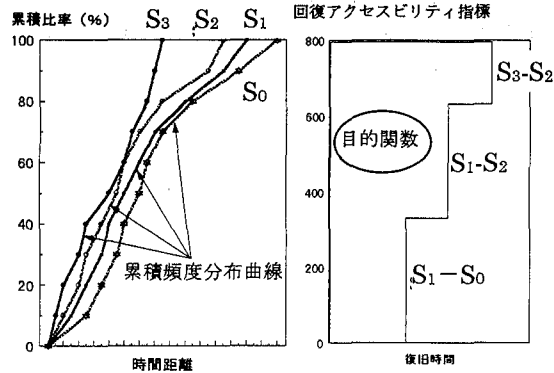


図-5 累積頻度分布曲線と目的関数の対応
目的関数を以下に示す。

$$\text{OBJECT} = \sum_{i=0}^k ((S_{i+1}) - S_i) \times \text{time}_{(i+1)}$$

i : 復旧完了リンク番号

$\text{time } i$: 復旧完了リンク i の復旧完了時間

S_i : リンク復旧完了時のアクセシビリティ指標

K : 総リンク数-1

この式中で、 $i=0$ の場合、 S_i は被災直後のアクセシビリティ指標として計算を行なう。以上の目的関数は図-5 の右グラフの左上部の面積を示す。この面積を GA の目的関数とし、 GA の中で生成される各遺伝子線列についてそれぞれ計算されるものとした。

以上の目的関数が小さい遺伝子線列ほど GA 内で評価させることによって、最終的に道路ネットワーク全体での復旧時間の短縮化と、復旧早期での時間距離性能の効果的な回復を見込める復旧スケジュールを構築できる。

5. 適応関数への変換

GA ではある一定数の遺伝子線列が世代を構成し、この線列数を人口サイズと呼ぶ。それぞれの遺伝子線列は、線列中の遺伝子情報から復旧スケジュールに変換され、それぞれの目的関数値を持つ。本研究では目的関数値が小さくなるほど GA 内で評価され

るように、以下のような変換式を設定し、目的関数値を適応関数値に変換した。各線列は、適応関数値が高いほど、次世代に生き残る確率が高くなる。

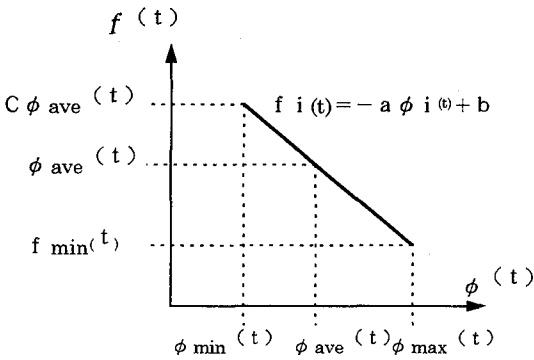


図-6 適応関数への変換
適応関数への変換式を以下に示す。

$$f_i(t) = -a \phi_i(t) + b$$
$$a = \frac{\phi_{ave(t)}(C-1)}{\phi_{ave(t)} - \phi_{min(t)}}$$
$$b = \frac{\phi_{ave(t)}(C \phi_{ave(t)} - \phi_{min(t)})}{\phi_{ave(t)} - \phi_{min(t)}}$$

ここで、

- i : 線列番号 i ($i=1 \sim N$, N : 人口サイズ)
- $f_i(t)$: t 世代、線列 i における適応関数
- $\phi_i(t)$: t 世代、線列 i における目的関数
- $\phi(t)$: t 世代の目的関数値
- $\phi_{max(t)}$: t 世代の目的関数の最大値
- $\phi_{min(t)}$: t 世代の目的関数の最小値
- $\phi_{ave(t)}$: t 世代の目的関数の平均値
- C : 淘汰係数

適応関数値の最大値を $C \phi_{ave}$ に抑えることで、世代の初期で適応関数値の低い線列は、むやみに淘汰されない。これにより初期収束を回避できる。

6. 提案する GA 手法の有効性の確認

本研究では、線列の中に「配分型」と「巡回セールスマン問題型」の2つの線列設計を取り入れている。そこで、順番と配分が変数として用いられる簡単なモデルをとおして、構築した線列設計の有効性

を確認する。

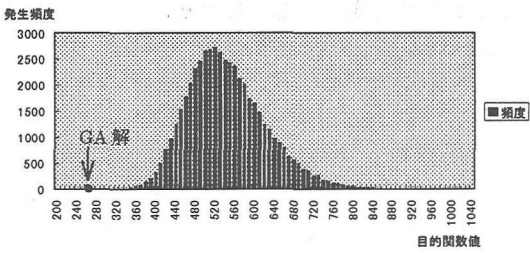
本研究で構築した線列設計を用いると、「対象の配分」と「配分された対象の順番」を簡単に記述できる。そこでケーススタディとして、2人の人間が15個の都市を重複なく訪問する場合の各人の訪問都市と訪問順位を考えた。2人の人間は都市番号0より出発し、都市番号0に戻るものとする。全ての都市は必ずどちらかの人間によって訪問されるものとする。この問題は一般的に組み合わせ数が莫大となり、物理的に最適化の計算が不可能とされている。そこでモンテカルロ法で同様な問題を計算し、GAの結果と比較を行うこととした。目的関数は2人の移動速度が等しいものと仮定し、2人で全ての都市を巡回する所要時間とした。GAでは、目的関数値が小さくなる「都市の配分」と「訪問する順番」の組み合わせを探索する。表一1に移動距離の単位として、都市の位置座標を示す。

表一1 各都市の位置

都市番号	x 座標	y 座標
0 (起点・終点)	0.0	0.0
1	10.0	10.0
2	35.0	15.0
3	80.0	20.0
4	40.0	15.0
5	60.0	30.0
6	90.0	55.0
7	40.0	60.0
8	85.0	70.0
9	30.0	90.0
10	65.0	95.0
11	60.0	70.0
12	15.0	70.0
13	50.0	50.0
14	30.0	50.0
15	70.0	70.0

GAのパラメーターは最大世代数は100、人口サイズは100、交叉確率0.7、突然変異確率0.05、淘汰係数1.5とし計算を行なった。モンテカルロ法は分析回数100000回とし、計算を行なった。その結果、GAでは261.201、モンテカルロ法では317.083の目的関数値がえられた。

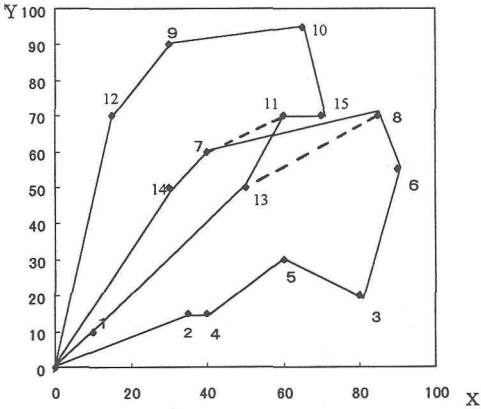
モンテカルロ法での解の発生頻度分布図を図一7に示す。



図一7 解の発生頻度分布

GAよりえられた2人の移動ルートを図一8に示す。GAが妥当な巡回ルートを探索できたことが確認できる。この図より、経験的には破線の移動が有効と考えられよう。すなわち1人目が0→2→4→5→3→6→8→13→0、2人目が14→7→11→15→10→9→12→0、という巡回である。この場合の目的関数値を求めたところ、1人目の所要時間は253.673と短くなるが、2人目の所要時間が262.252となり、結果的にはGA解より大きな値となる。

以上より、本研究で構成した遺伝子線列を用いたGA解析手法の有効性が確認できた。



図一8 移動ルート

7. 復旧問題への適用

ケーススタディとして、1993年7月の北海道南西沖地震で被害を受けた北海道後志管内の国道ネットワーク(図一9)を実際に適用し、計算を行なった。本研究で扱う適用例では実際の道路ネットワークの時間距離を考慮して計算を行なう。仮定した点は、

復旧班の能力であり、寸断箇所と被害後の被災リンクの状況は、被害の復旧実態調査をもとに値を設定した。使用した道路の寸断箇所は、北海道南西沖地震において寸断、もしくは寸断にいたらなくとも実被害のあったリンクである。

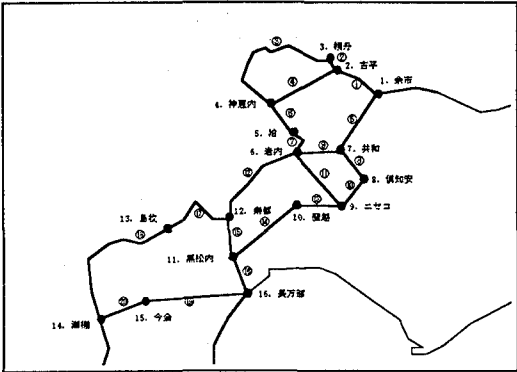


図-9 対象ネットワーク(北海道後志管内)

表-2 各リンクの時間距離

リンク	通常時時間距離	災害時時間距離	道路状況
1	23	46	片側交互通行
2	14	999	寸断
3	57	999	寸断
4	48	48	
5	41	41	
6	14	28	片側交互通行
7	16	32	片側交互通行
8	23	23	
9	11	11	
10	19	19	
11	42	42	
12	54	999	寸断
13	24	48	片側交互通行
14	47	47	
15	19	19	
16	24	999	寸断
17	16	16	
18	68	999	寸断
19	60	999	寸断
20	24	24	

表-3 各復旧班の所要復旧日数

復旧リンク	1班	2班	3班	4班
1	88	40	40	30
2	60	30	40	46
3	50	50	40	20
6	40	25	20	16
7	18	15	14	12
12	80	40	50	30
13	10	10	14	14
16	7	7	14	14
18	78	78	50	30
19	7	10	14	14

表-2 に示す各リンクの時間距離において、道路状況が寸断した場合は災害時時間距離として999

(分)を与えた。また被災後の状況により片側交互通行が可能である場合は通常時の2倍の時間距離を災害時時間距離として被害の実態調査の結果より与えた。表-3の所要復旧日数は、各班の復旧車両等の配備の差による各寸断リンクの被害の性格による復旧時間の差が存在するものとした。復旧班の初期配置は対象地域の実態によるものとした。復旧班数を4班とし、GAのパラメーターは最大世代数は50、人口サイズは20、交叉確率0.7、突然変異確率0.05、淘汰係数2.0とし、交叉法は前半部は一点交叉、後半部は順位交叉法をそれぞれ使用した。またモンテカルロ法より得られた復旧スケジュールとの比較を行なった。

図-10はGAによる復旧スケジュール、図-11はモンテカルロ法による復旧スケジュールである。また、図-12にGAによる解の収束状況、図-13にモンテカルロ法による解の発生頻度分布を示す。

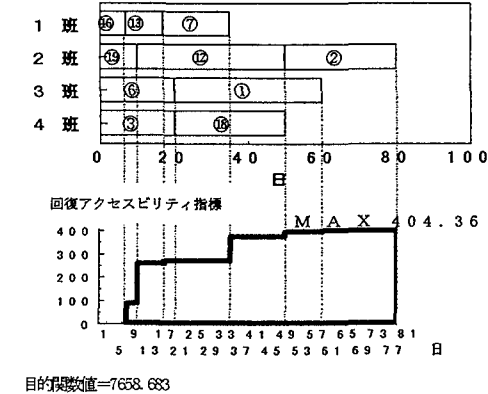


図-10 復旧スケジュール (GA)

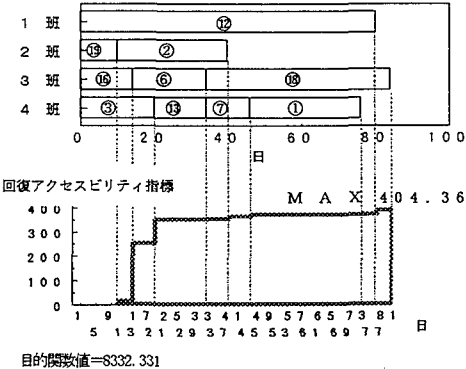
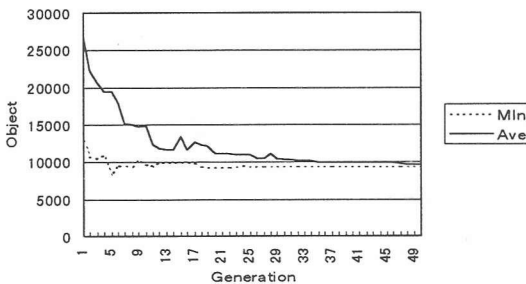


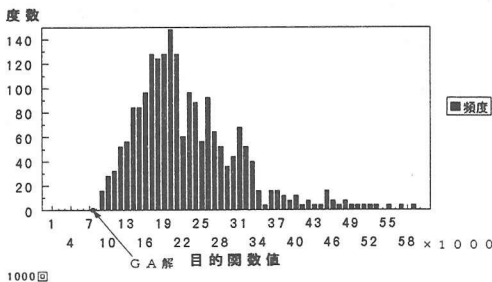
図-11 復旧スケジュール (モンテカルロ法)

図-10 と図-11 の GA とモンテカルロ法による

復旧スケジュールを比較すると、GA でえられた結果は総リンクの復旧所要日数は 80 日で、目的関数値は 7658.68 であり、モンテカルロ法では復旧所要日数 84 日、目的関数値 8332.331 であることから、GA の有効性が分かる。また GA の復旧スケジュールの分析回数は 724 回であり、モンテカルロ法での分析回数 1000 回でえられた目的関数値より少ない分析回数で良好な目的関数値を探索できた（図—13）。図—12 の GA による解の収束状況をみると GA の世代数 35 あたりで収束が始まっており、より少ない分析回数での最適化の可能性を示している。なお、図中で世代交代が進んでも目的関数が改善されず、むしろ悪くなっている場合があるのは、解が局所解に陥らないように突然変異を行なっているからである。



図—12 GA による解の収束状況



図—13 モンテカルロ法による解の発生頻度分布

本研究での適用例を、より現実の問題へと近づけていくためには、①被災後の OD ②被災後の OD から日常の OD への変化③復旧班の工期の算定の具体化、等を考慮する必要がある。しかし、これらの変数が増加することで目的関数はより複雑になることが予想される。そこで現実問題に GA を適用する場合は、経験的に明確で、かつ利用できる知識ベースを遺伝子線列の中に取り込むことが計算効率の向上

のために重要となり、これらはすべて、今後の課題である。

8. 結論

本研究では、復旧スケジュール最適化に GA を適用し、目的関数にアクセシビリティ指標を用い、最適化を行った。本研究の結論は、以下の 3 点となる。

- ① 1 つの遺伝子線列に「配分型」と「巡回セールスマン型」の 2 つ遺伝子構成を取り込み、復旧班の配分と復旧リンクの優先順位を線列表現した。また、その場合の交叉法を提案した。
- ② 復旧班数、復旧班の各リンクの復旧完了時間、ネットワーク形態、災害時の時間距離の 4 点を操作変数として扱える復旧スケジューリングモデルを構築した。
- ③ ケーススタディとして、北海道後志の道路ネットワークを用い、モンテカルロシミュレーションとの比較を行った。結果として GA を適用することにより、復旧早期での連結性の回復を期待できるスケジューリングが可能となった。

今後の課題としては、実際問題により適応しうる様にモデルを改良することである。具体的には、① 復旧作業の性格による班編成の考慮② リンク上の被災箇所単位でのモデル構築③ 防災施策として予算制約下での代替路線の最適配置への GA の適用、があげられる。

<参考文献>

- 1) 梶谷有三・田村亨・斉藤和夫：「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
- 2) 川島一彦・杉田秀樹：「広域震災を受けた道路ネットワークの復旧過程予測システムの開発」，オペレーションズリサーチ 1993
- 3) 山田善一・家村浩和・野田茂・伊津野和行：「道路交通網の最適な震後復旧過程の評価」，土木学会論文集第 368 号 1986
- 4) 能島暢呂・亀田弘行：「幹線支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後アルゴリズム」，土木学会論文集，No450，pp171~180，1992
- 5) 長尾・村上・小山田・田村・斉藤・梶谷・難波・江本田：

- 「地方部の交通途絶が地域に与える影響」, 土木学会北海道支部論文報告集, pp412~417 1996
- 6) 川上英二:「道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法」, 土木学会論文報告集第 327 号, 1982
- 7) 北海道開発局小樽開発建設部:平成 5 年度一般国道 229 号後志管内道路整備計画基礎調査 平成 6 年 3 月
- 8) 北野宏明編:遺伝的アルゴリズム:産業図書
- 9) 米澤保雄:遺伝的アルゴリズム~進化理論の情報科学 森北出版 1993

都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル

有村幹治・上西和弘・田村亨・杉本博之・榎谷有三

本研究は、地震等による広域的な地方道路ネットワークの寸断を想定し、人員・機材等の制約条件下での復旧過程に、都市間の時間距離を指標とした連結性能を定量化するアクセシビリティ指標を用い、復旧過程の定量化を行う。平常時の都市間のアクセシビリティへと、制約条件下で早急に回復する被災道路の復旧順序を GA を用い探索し、実際にケーススタディを通して構築した手法の有効性を確認した。結果として GA を適用することにより、復旧早期での連結性の回復を期待できるスケジューリングを可能とし、より変数の多い復旧モデルへの展開の可能性を示した。

The Optimization Restoration Model Based on the Time Distance Matrix

by Mikiharu ARIMURA, Kazuhiro JOUNISHI, Tohru TAMURA, Hiroyuki SUGIMOTO, Yuzo MASUYA

It is important that a road network, that establish a local community, recovers rapidly from earthquake damages. As such, the purpose of this paper is to develop a restoration model that is applicable for quantitative analysis of restoration schedule using accessible index with qualifications meeting capabilities of the personnel staff and machinery. Genetic Algorithms (GA) for non-convexities problems in design space was applied. The result suggest that GA is found to be more effective for optimizing restoration models with large number of parameters.
