

リダンダントな道路網整備を目的とした防災投資路線の決定問題と近似解法*

An algorithm for investment decision on highway networks for disaster prevention

南 正昭**

Masaaki MINAMI

1. はじめに

阪神・淡路大震災を教訓とし、災害に強い交通網を確立することが、国土防災の達成において取り組まなければならない重要課題として再認識されている。本研究は特に道路網について、災害等による途絶の発生時に代替ルートを確保できるリダンダントなネットワークを整備するための道路防災投資問題について考察したものである。

道路途絶時の被害の低減を目的とし、複数の経路を、複数の都市間について用意し交通を確保するためには、道路区間の新設、拡幅、橋梁部の補強等の防災投資を適切に行う必要がある。本稿ではこの問題を、道路ネットワーク上への防災投資問題として定式化し、その実用的な近似解法として開発したハイブリッド型の遺伝的アルゴリズムを適用事例とともに提示する。

2. リダンダントなネットワーク整備のための道路防災投資問題の定式化

道路網のネットワークとしての性質を利用し、総防災投資額をなるべく小さく抑えて、複数の都市間に複数の経路が確保できるように、道路網を整備することを目的とした。

防災投資は道路リンク単位で行うものとし、各道路リンクに必要な防災投資額は算定可能で所与と仮定した。また防災投資を行う道路リンクには、幹線道路等に相当しあらかじめ投資の確定している道路リンクが存在してもよいものとした。したがって問題は、防災投資の確定している道路リンク以外の全ての道路リンクを代替案として、防災投資を行う道路リンクを選定

することとなる。

また本稿では2ノード間の道路網が有するリダンダンシーを、式2に示す経路代替性指数(RI)によって与えた。この指数は代替ルートを含めたノード間の経路数を、その所要時間を考慮に入れて表現することを目的に作成したものである³⁾。

以上より本問題を、複数の都市ノード間について事前に設定したリダンダンシー(代替ルートの整備水準)を制約条件とし、総防災投資額を最小化する組み合わせ最適化問題として以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } TC &= \sum_{ADL} C_{ij} + \sum_{AAL} C_{ij} X_{ij} \\ \text{subj. to } Ri'j'(X) &> R^{-i'j'} \\ C_{ij} &\geq 0 \\ X_{ij} &\in \{0, 1\} \\ i', j' &\in U, i, j \in V, U \subset V \end{aligned} \quad \text{式1}$$

where

$$\begin{aligned} Ri'j'(X) &= RII'j' \\ &= \min_{l_{i'j'}} LRI(l_{i'j'}) \quad (l_{i'j'} = 1, \dots, l_{i'j'}^{\max}) \\ LRI(l_{i'j'}) &= T(P_{0, i'j'}) / T_{s, l_{i'j'}} \\ 1/T_{s, l_{i'j'}} &= \sum (1/T(P_{k, i'j'}, k_{i'j'})) \\ &\quad (k_{i'j'} = 0, \dots, k_{i'j'}^{\max}) \end{aligned} \quad \text{式2}$$

TC ; 総防災投資額

C_{ij} ; ij 間道路リンクに必要な道路防災投資

ADL ; 防災投資の確定している道路リンクの集合

AAL ; 防災投資の代替案となる道路リンクの集合

$X_{ij}=1$; ij 間道路リンクに防災投資をするとき

0 ; ij 間道路リンクに防災投資をしないとき

$R^{-i'j'}$; 都市ノード $i'j'$ 間リダンダンシーの事前設定値

$R(X) i'j'$; 都市ノード $i'j'$ 間リダンダンシーの実現値

V ; 全ノードの集合

* キーワード 交通網計画、道路計画、防災計画

**正会員 工修 山口大学工学部社会建設工学科

(〒755 山口県宇部市常盤台2557)

U ; 評価対象として着目する都市ノード集合
 $R I i' j'$; 都市ノード $i' j'$ 間経路代替性指数
 $T (P_0, i', j')$; 都市ノード $i' j'$ 間基準ルートの所要時間
 $T (P_0 (i', j'), k, i', j')$; 都市ノード $i' j'$ 間基準ルートの k 番目構成リンク途絶時の k 番目代替ルートの所要時間

3. 近似解法 (ハイブリッド型遺伝的アルゴリズム ; HGA) の開発

(1) HGAの開発目的

式1の問題は、防災投資の代替案となる道路リンクの数が増加するに伴って、計算量が増大する。そこでネットワーク規模が大きな問題に対しても求解可能なように、遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した近似解法を開発した。

しかしGAをそのまま適用した場合、複雑なネットワーク構造を導く本問題では、十分な収束性が期待できない。そこで局所的な探索を補う目的でハイブリッド化を行い、制約条件を満たす解が、計算の進行に伴って最適解へと漸近するアルゴリズムを設計した。

(2) 計算アルゴリズムの概要

表1にHGAの概要を示した。また図1に計算過程の模式図を作成した。以下に説明を加える。

最初に線列をN個用意する。1つの線列に、防災投資の確定道路リンクと代替案道路リンクからなる1つのネットワークが対応する。出発点は、全ての代替案道路リンクを考慮したときとし、全ての要素が1の線列となる。

このN個の線列にそれぞれヒューリスティックを実行し、制約条件を満たす線列をランダムに生成する。これを初期線列とし、繁殖・淘汰、交叉、突然変異さらにヒューリスティックを実行し、適応度が高くなるように線列の更新を続ける。

ここで重要なことは、式3より、ヒューリスティックを作用することにより新たに作成される線列から計算される総防災投資額は、作用する直前より必ず小さくなる。このプロセスを繰り返すことで1つの線列から1つの局所的な最適解へと近づけることができる。本計算手法では、局所的な探索を補う目的でこのプロ

セスを導入することとし、リンクの入れ替え回数については線列の規模に応じて設計者が事前に与える。

表1 HGAの概要

- (a) 入力: データとしてリンク所要時間、リンク防災投資コスト、リダンダンシーの事前設定値等の目的関数と制約条件の計算に用いる値と最大世代数、集団サイズ (N) 等のGAに必要な値を入力する。
- (b) 線列のコーディング: 全ての防災投資の代替案となる各道路リンクについて、その道路リンクに防災投資を行うとき1、行わないとき0とする (1, 0) 情報を設計変数とした。
- (c) 目的関数・適応関数: 目的関数は、式1の総道路防災投資額の最小化である。総投資は、線列とリンク防災投資コストから計算される。適応関数は、目的関数をスケールリングして求めた。
- (d) 制約条件: 本問題の制約条件である2ノード間のリダンダンシーは、経路代替性指数 (RI) によって与えている。この指数の計算アルゴリズムは、たとえば文献(3)による。
- (e) 交わり: 交わり法には、One Point Crossoverを用いた。
- (f) 突然変異: 線列を1つランダムに選定し、その中の2つの要素を入れ替える。
- (g) 繁殖・淘汰: 適応度が平均値より高い線列を優先し、残りはモンテカルロ・モデルを用いて交配プールを作成した。
- (h) 終了条件
- ・世代数が事前に設定した最大世代数に達したとき。
 - ・各線列の適応関数が一定値に収束したとき。
 - ・計算時間が設定したリミットに達したとき。
- (i) ヒューリスティック: 初期線列の作成時点と交叉・突然変異を終えた時点で、全線列に対し式3の条件でリンクの入れ替え、もしくは削除を行う。
- $$C_{i,j}^+ < C_{i,j}^- \quad \text{式 3}$$
- かつ $R I i' j' > R I i' j' \quad (i, j \in U)$
 ここで $C_{i,j}^+$: 付加するリンクコスト
 $C_{i,j}^-$: 削除するリンクコスト

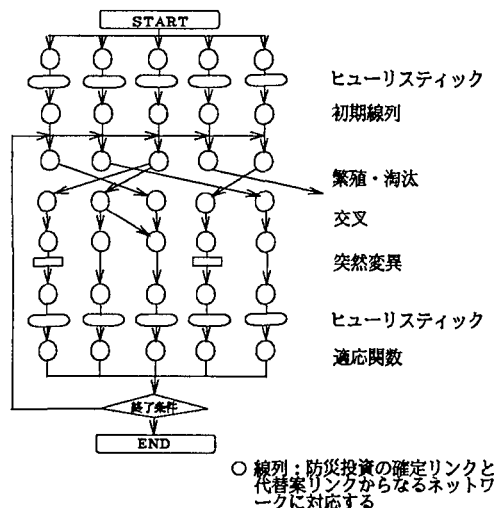


図1 計算過程の模式図

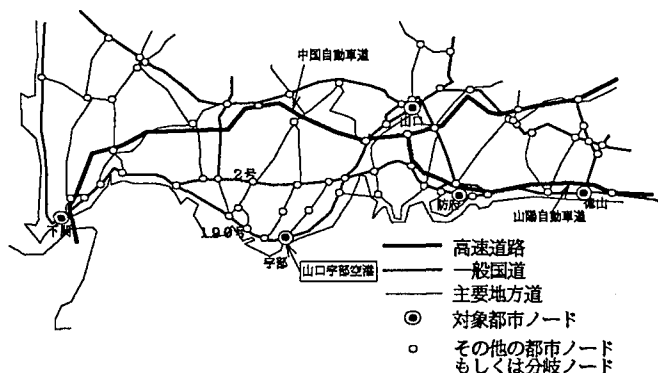
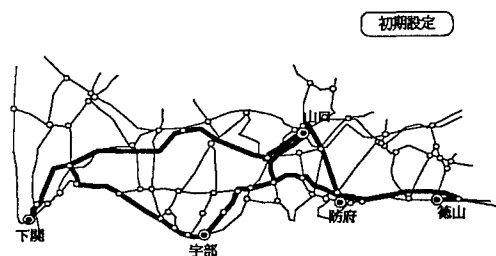
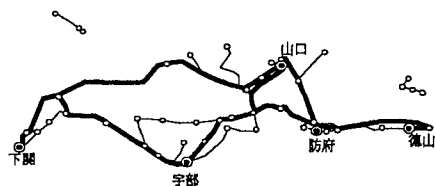


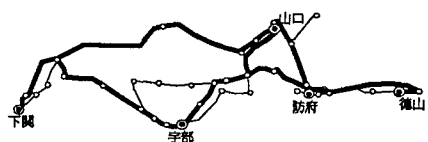
図2 対象道路網のネットワークモデル



30世代目の探索解



50世代目の探索解



- 防災投資確定道路リンク (基準ルート)
- 防災投資代替案道路リンク
- 対象都市ノード

図3 防災投資道路リンクの計算例

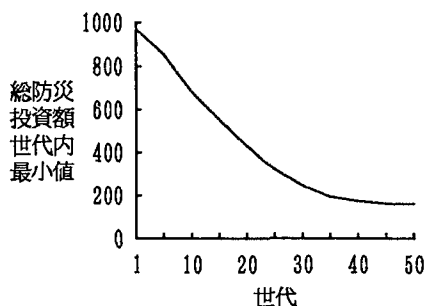


図4 計算の進行に伴う総防災投資額の世代内最小値の低減

4. 適用事例

(1) 問題設定

都区域全体に被害の及ぶような比較的大規模の大きな災害が生じたとき、隣接する都市との間が複数の経路で連結されていることは、避難活動、救急活動、物資輸送等の交通を確保する上で重要である。本稿では、以下のような道路網への防災投資問題を想定し、その計算過程と計算結果を提示する。

- a) リダンダンシーの制約条件を与えるノードペアは、隣接する主要都市間とする。具体的には次項に述べる。
- b) a) に述べた各隣接主要都市間を連結する1番目の経路(基準ルート)は、各々の2都市間について最短経路により構成し、その経路を構成する道路リンクには確定的に防災投資を行うものとした。
- c) a) に述べた各隣接主要都市間について、b) に述べた1番目経路に加え、所要時間が最大でも1.5倍以内の2番目経路(代替ルート)が存在することをリダンダン

シーの制約条件として経路代替性指数 (RI) を用いて設定した。

d) 道路の新設は考慮せず、既存の道路リンクの防災性を高めることのみを考えた。

e) 各道路リンクを確保するのに必要な道路防災投資額は、道路種別に無関係にリンク所要時間に比例して与えた。

f) 道路種別および高速道路料金は考慮しない。

(2) 対象道路網

対象道路網は、山口県南西部の道路網を図2のようにモデル化して設定した。

この対象道路網の中で、下関、宇部、山口、防府、徳山の5つの主要都市に注目し、リダンダンシーの制約条件を設定する都市間は、それらの隣接都市間である下関-宇部、下関-山口、山口-宇部、山口-防府、宇部-防府、防府-徳山、徳山-山口の7つとした。

(3) 計算結果

図3に計算結果を例示する。

上段は初期状態を示している。太線が7つの隣接主要都市間に選定された最短経路であり、確定的に防災投資を行おうとする道路リンクを示している。計算過程での線列の更新においても、この道路リンクに相当する要素は保持される。また、細線で表した上述の経路以外の道路リンクは、すべて防災投資の代替案道路リンクとして用意する。

中段は、30世代目の探索解である。防災投資を行うべき道路リンクがある程度絞られてきている様子を示した。GAは大域的な探索に優れ、ここまで絞られてくる間には、様々な形状のネットワークが探索されている。

下段が、50世代目に探索された解である。一部余分な道路リンクが残っているが、ほぼ解が収束している様子を示した。7つのどの主要都市間をみても、4章(1)節(c)に述べた条件を満たす経路が代替ルートとして用意されていることを図示している。

道路区間によっては、ある主要都市間の基準ルートが、別の主要都市間の代替ルートの役割を果たしているところが生じる。またある主要都市間の代替ルートが、他の主要都市間についても代替ルートになるところが生じる。このように道路網のネットワークとして

の性質を利用することで総投資額を最小化している。たとえばリダンダンシーの事前設定値を小さくすると、すなわち大回りをする代替ルートを許容するならば、このような傾向は強くなり総防災投資額は比較的少なくて済むことになる。

図4は、計算の進行に伴い、総防災投資額の世代内での最小値が低減し、最適解へと漸近する様子を表している。

なお本適用事例の計算時間は、山口大学情報処理センターのACOS830上でFORTRAN77を用い、約50分を要した。

5. おわりに

本稿の問題設定は、投資問題としての性格上、総防災投資額に対する予算制約の下で、目的関数として道路網のリダンダンシーを最大化すると定式化するのがより一般的であろう。しかしリダンダンシーを任意のノード間に定義するという本稿の方法では、解を求めることが難しい。そこで本稿の方法により予算制約を与えたときの道路防災投資案を導きたいときは、リダンダンシーの事前設定値に変動を与え総防災投資の変動を感度分析し、予算制約を満たす案を採択する等のさらに緻密な方法と分析が必要である。

またGAは、もとより近似解法であり導出された解が厳密な最適解であることを保証しない。導出された解が、最適投資案か否かは、計算結果を経験的に評価すること、比較的小規模な問題で厳密解法と比較しアルゴリズムの信頼性を確認すること、あるいはGAのパラメータ設定を変動し、よりよい解の存在しないことを確認すること、等の試行錯誤的な方法により判断する必要がある。

<参考文献>

- 1) 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適用、土木学会論文集No482、IV-22、pp37-46、1994
- 2) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993
- 3) 南正昭：災害時に代替性をもつ道路網の構成手法、土木計画学研究講演集 No16 (1)、pp387-394、1993