

リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究*

A Basic Study on the Design Method of a Redundant Highway Network

南 正昭** , 高野伸栄***, 佐藤馨一****

By Masaaki MINAMI, Shin'ei TAKANO and Keiichi SATOH

1. はじめに

阪神・淡路大震災の発生に伴い、道路や鉄道をはじめとして交通網が各地で寸断された。このため災害発生直後から救助活動、避難活動、消防活動等に支障が生じ、長期にわたり生活物資、復旧資材の運搬や広域的な経済活動等に甚大な影響が生じた。この震災を教訓とし、災害に強い交通網を確立することが、今後の社会基盤整備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きた¹⁾。

特に道路施設に注目し、途絶に対応力のある施設整備を実施するには、災害時に破壊しにくい道路構造物を構築することとともに、たとえ道路構造物等に破壊が生じても効率よく速やかに復旧できること、あるいは道路途絶が発生した場合でも代替ルートが確保できるように道路網をあらかじめ多経路化・ネットワーク化しておくこと、という観点が重要である。

近年、道路途絶の発生を道路網のネットワークとしての性質を考慮して評価・分析する試みは、たとえば若林・亀田²⁾、高山・石井³⁾、朝倉・柏谷・為広⁴⁾、梶谷⁵⁾らにより進められている。

著者らは、道路に途絶を生じるような災害時においても生活活動や都市機能を維持するには途絶経路をバックアップする代替ルートが不可欠であるとの認識に立ち、途絶の発生時においても任意のODペア間について経路が確保できる道路網のネットワーク構造を、いくつかの仮定の下で評価あるいは構成する方法につい

て研究を続けてきた^{6) 7)}。

本稿は、都市間を連結する道路に途絶が発生した場合においても、代替ルートを確保できるリダンダントな道路網の構成方法について、基礎的な研究の成果をまとめたものである。本研究ではこの問題を、道路網が都市間に有するリダンダンシーをあらかじめ設計条件として与え、その制約を満たし、かつ必要となる総道路整備費用が最小となるネットワークを構成する問題として取り扱った。この問題の実用的な解法として、遺伝的アルゴリズムを応用した計算手法を開発し、実際の道路網での計算事例を提示した。

2. リダンダントな道路網の構成問題

(1) 問題の明確化

災害等により道路途絶が発生した場合においても、その区間を迂回する代替ルートが存在すれば、途絶による損失を軽減することが可能である。そこで道路網の整備計画を立案するにあたり、道路途絶の発生をあらかじめ考慮に入れ、着目する都市ノードペア間の経路に途絶が生じたとしても代替ルートが存在するように、道路のネットワークを構成することができれば、途絶に対して有効だと考えられる。

しかし、このように複数の都市ノードペア間について、複数の経路を用意するには、道路の新規整備や拡幅等の改良に伴い、多くの整備費用を必要とする。そこで道路網のネットワークとしての性質を考慮し、あらかじめ着目する各都市ノードペア間に有すべき代替ルートの条件を与え、それを満たす範囲において代替ルートとして確保する経路を選定することにより、なるべく整備コストの小さい道路リンクを複数の都市間で相互に利用することで対象地域全体の総整備費用が最小となる整備計画を立案することを考えた。

* キーワード：交通網計画、道路計画

** 正会員 工修 山口大学助手工学部社会建設工学科
(〒755 宇部市常盤台2557

tel.0836-35-9111 fax.0836-35-9429)

*** 正会員 学術修 北海道大学助手工学部土木工学科

**** 正会員 工博 北海道大学教授工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

これにより地域を覆う道路網上に整備事業費を適切に配分することで、途絶に対応力をもつ道路網の効率的な整備を実現しようとするものである。

(2) リダンダンシーの評価指標

本研究では、対象道路網上の着目する各々の都市ノードペア間 (i, j) に有すべきリダンダンシーの評価指標を、式 (1 a) に示す経路代替性指数 $R I_{ij}$ によって与えることとした。

経路代替性指数 ($R I_{ij}$) は、所与の道路網上の任意の都市ノードペア間について、その間を連結する代替ルートを含めた経路の整備水準を、経路数と所要時間を評価要因として式 (1 a) に基づき簡明に表現することを目的に考案した指標である。この指数の計算アルゴリズムや適用性に関する詳細は文献6) に述べられる。以下に、本稿との関連において必要な限りについて説明を加える。

対象道路網を、交通の確保を目的とする都市ノードの集合 U を含むノード集合 V と、整備計画の選択肢となる道路リンクを含むリンク集合 E からなるグラフ $G = (V, E)$, ($U \subseteq V$) でモデル化するとき、着目する都市ノードペア間 (i, j) の経路代替性指数 ($R I_{ij}$) は、次式で与えられる。

$$R I_{ij} = \min_{l_j} L R I_{l_j} \quad (l_j = 1, \dots, l_{j \max}) \quad (1a)$$

$$L R I_{l_j} = T(P_{0,ij}) / T_{S,l_j}$$

$$1 / T_{S,l_j} = \sum_{k_{lj}} (1/t(l_j, k_{lj})) \quad (k_{lj} = 0, 1, \dots, k_{\max})$$

ここで、 $R I_{ij}$: 都市ノード ij 間経路代替性指数、 $T(P_{0,ij})$: 都市ノード ij 間基準ルートの所要時間、 $t(l_{ij}, k_{lj})$: 都市ノード ij 間基準ルートの l_{ij} 番目構成リンク途絶時の k_{lj} 番目経路の所要時間、 $k_{\max}$: 代替ルートの最大経路数、である。

$R I_{ij}$ は、着目する都市ノードペア間を連結し、代替ルートの整備水準を知りたい任意の経路について計算する。このとき注目する経路を「基準ルート」とよんでいる。基準ルートの構成リンクを1つずつ切断することで途絶を想定し、代替ルートとなる経路を仮定した規則にしたがって探索する。この各経路の所要時間をもとに式 (1 a) を計算する。式から明らかなように、その基準ルートについての代替ルート整備水準の評価値として、代替ルートの経路数が少なく、その

所要時間が基準ルートの所要時間に比して大きくなる構成リンクについての計算値を採用している。ここで、代替ルートとしての役割を果たすのは、その所要時間が基準ルートの所要時間の m 倍以下のものと仮定している。

(3) リダンダントな道路網の構成問題

道路網 G 上の着目する複数の都市ノードペア間について、複数の経路を確保する問題を考える。確保されるべき経路は、各都市ノードペア間について事前に設定したリダンダンシーの制約条件を満足するものとする。

すなわち、着目する複数の都市ノードペア間 (i, j) について算出される経路代替性指数 $R I_{ij}$ が、事前に制約として与えた経路代替性指数 $R I^*_{ij}$ を少なくとも上回るようにネットワークを構成する。

このような経路の選定が可能ならば、そのために必要となる G 上の道路リンクの集合は、 G の部分グラフを構成する。本稿では、この部分グラフを $G' = G' (V', E')$, ($V' \subseteq V, E' \subseteq E, U \subseteq V'$) と表す。ただし V' および E' は、各々 V および E の部分集合である。

ここで対象とする道路網 G の全道路リンク E の内には、都市間を連結する主要幹線道路等の構成リンクに相当し整備事業費の大小に関わらず E' に含むものとして取り扱う道路リンクの集合が存在してもよいものとした。本稿では、この道路リンクの集合を ADL , ($ADL \subseteq E'$) と表し、 ADL の構成するネットワークを「基幹ネットワーク」とよぶ。また本稿で、前項に述べた基準ルートを、この基幹ネットワーク上で設定することとした。

また道路整備水準が低く、かつ幅幅等の新たな整備事業が困難なため E' に含まないものとして取り扱う道路リンクの集合についても存在してもよいものとした。この道路リンクの集合は ANL , ($ANL \not\subseteq E'$) と表す。

したがって問題は、 ADL と ANL 以外の全ての道路リンクを選択肢集合 AAL ($AAL = E - (ADL \cup ANL)$) とし、 $R I^*_{ij}$ の制約条件を満足する部分グラフ G' を探索することといえる。

本稿では、着目する複数の都市ノードペア間の各々について、リダンダンシーの制約を設定することとし、対象道路網全体での総道路整備費用が最小になる予算案を導くという問題設定をとることとした。

この総道路整備費用が最小となる対象道路網 G の部分グラフ $G^*=G^*(V^*, E^*)$, ($V^*\subseteq V, E^*\subseteq E, U\subseteq V^*$)を導く問題は、式(1b)に示す組み合わせ最適化問題として表すことができる。ここで整備事業費の道路リンク単位での配分、および各道路リンクに必要な整備費用 C_{ij} の算定が可能であるものと仮定している。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } TC &= \sum_{(i,j) \in E'} C_{ij} \\ &= \sum_{(i,j) \in ADL} C_{ij} + \sum_{(i,j) \in AAL} C_{ij} X_{ij} \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \text{Subj. to } RI(X)_{ij} &\geq RI^-_{ij}, \quad \forall (i,j) \in PU \\ X_{ij} &\in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in AAL \\ C_{ij} &\geq 0, \quad \forall (i,j) \in E \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} RI(X)_{ij} &= \min_{l_{ij}} LRI(X)_{l_{ij}} \\ (l_{ij} &= 1, \dots, l_{ij \max}) \end{aligned}$$

TC ；総道路整備費用、 E' ；部分グラフ G' を構成する道路リンクの集合、 C_{ij} ；ノード ij 間の道路リンクに必要な整備事業費、 ADL ； E' の要素となることが確定している道路リンクの集合、 AAL ； E' の要素となる道路リンクの選択肢集合、 X_{ij} ； ij 間道路リンクが E' の要素になるとき1、 E' の要素にならないとき0とする2値変数、 X ； X_{ij} を要素とするベクトル、 $RI(X)_{ij}$ ； G' 上での都市ノード ij 間リダンダンシーの実現値、 RI^-_{ij} ；都市ノード ij 間リダンダンシーの事前設定値、 PU ；リダンダンシーの確保を目的とする都市ノードペア集合、以下は式(1a)に同じである。

3. 計算アルゴリズム

(1) 計算アルゴリズムの目的

本稿で求めようとする道路網は、複雑なネットワーク構造を有している。著者らは既に類似の問題について、ヒューリスティックなアプローチを用いて解を探索する方法を考察してきた⁷⁾。しかしこの方法では、制約条件を満たし総整備費用の小さなネットワークを膨大な組み合わせの中から探索するプロセスを、コンピュータとの対話型システムにより設計者自身の認識に基づいて繰り返し試行することで実現していた。そ

のため対象とするネットワークが大きくなると、適用が困難になることが課題であった。

そこで本稿では、ネットワーク規模が大きな問題に対して求解が可能なように、遺伝的アルゴリズム(GA)を応用した実用的な解法を開発することとした。

一般に GA は解の大局的な探索に有効な一方で、局所的な探索に弱点をもつことが指摘されている。この短所を補う目的で、局所的探索を行うヒューリスティックやエキスパートシステムを GA に組み込むハイブリッド化が提案され、その有効性が示されてきている⁸⁾。本研究では、簡単な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開発した。

対象道路網 G は、2章3節に述べたように基幹ネットワークを構成する道路リンク ADL 、選択肢集合をなす道路リンク AAL 、および ANL から構成される。この中で ADL および AAL 内から選定される道路リンクにより G' が構成される。

着目する各都市ノードペア間に設定したリダンダンシーの事前設定値 RI^-_{ij} を制約とし、ハイブリッド GA を用いて AAL 内の道路リンクの組み合わせを逐次更新し、 G' の再構成を繰り返し、総道路整備費用が最小となる G^* を探索する。

(2) 計算プロセス

図1に、本研究で開発したハイブリッド GA の計算プロセスの模式図を示した。

ハイブリッド GA に用いる線列は、選択肢集合をなす道路リンク AAL を要素として作成した。すなわち AAL の各要素について、その道路リンクを選定し E' に含むとき1、含まないとき0とする(1, 0)情報を設計変数とした。この AAL 内の選定された道路リンクと ADL から G' を構成し、経路代替性指数の事前設定値として与えた制約条件を満たすことを確認しながら総道路整備費用が小さくなるように線列の更新を続ける。

計算の出発点は、選択肢集合 AAL の全ての道路リンクが G' の構成リンクに含まれる場合とする。すなわち AAL に相当する全ての要素が1の線列を N 個用意する。まずこの時点で G' が経路代替性指数の事前設定値として与えた制約条件を満たすことを調べ、解

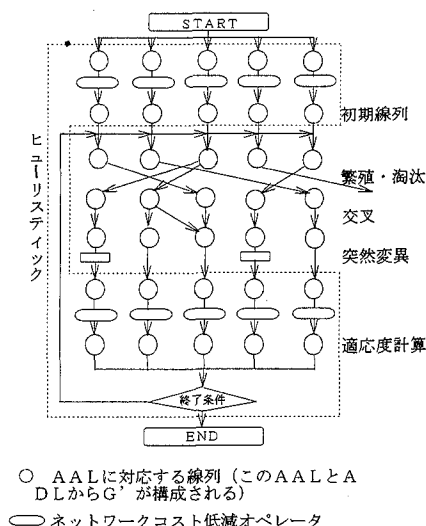


図1 計算プロセスの模式図

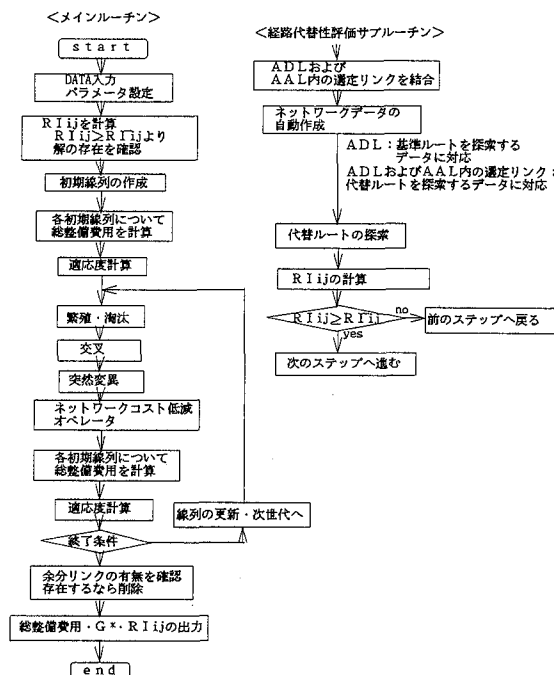


図2 計算フロー

が存在することを確認した上で以下の探索過程に入る。

このN個の各々の線列について、選択肢集合AAL内の道路リンクをランダムに削除する操作を行い、制約条件を満たすN個の線列を作成する。これは各線列のAALに相当する要素に、次項に説明するネットワークコスト低減オペレータを作用することでを行い、これらを初期線列とする。

このN個の初期線列に、繁殖・淘汰、交叉、突然変異さらにネットワークコスト低減オペレータを作用し、 G' 上の総整備費用が低下し適応度が高くなるように線列の更新を続ける。このプロセスを終了条件に至るまで繰り返し、最適解 $G^* = G^* (V^*, E^*)$ を得ようとするものである。

(3) 計算アルゴリズムの内容

本問題の計算アルゴリズムは、図2に示す2つの部分から構成される。一つはネットワークと線列とを対応させながら最適解を探索するハイブリッドGAに相当するメインのルーチンであり、いま一つは最適解の探索過程で作成される各ネットワークについて制約を満足するか否かを評価し目的関数を算出するルーチンである。ここで前者を「メインルーチン」、後者を「経路代替性評価サブルーチン」とよび、以下に具体的な内容を述べる。

<メインルーチン>

(a) データ入力：道路リンク所要時間、道路リンク

整備費用(C_{ij})、選択肢道路リンク集合(AAL)、対象道路網のノード間接続行列、リダダンダンシーの制約を与える都市ノードペア、リダダンダンシーの事前設定値($R I_{ij}^*$)、評価対象都市ノード数、評価対象代替ルートの最大経路数(k_{max})を入力。

ハイブリッドGAのパラメータとして最大世代数、集団サイズ(N)、交叉確率、突然変異確率、等を入力。

(b) 線列のコーディング：3章2節に前述したように選択肢集合をなす道路リンクAALを要素として線列を作成する。

(c) 解の存在の事前確認：最適解の探索に入る前に、着目する各都市ノードペア間について、経路代替性指数を計算し、制約として与えた事前設定値 $R I_{ij}^*$ を満足する解が少なくとも存在することを確認する。本稿では、このとき算出した経路代替性指数を $R I_{0,ij}$ と記す。もし解が存在しない場合は、この段階で計算を終了する。必要に応じて $R I_{ij}^*$ の再設定の後、改めて計算を開始する。

したがって全ての計算の後、導出された最適解 G^* 上における $R I_{ij}$ は、事前設定値 $R I_{ij}^*$ 以上であり、 $R I_{0,ij}$ 以下になる。

(d) 初期線列の作成：AALの全ての要素が1の線列を用意し、(h)に後述するネットワークコスト低減オペレータを作用することで作成する。

(e) 繁殖・淘汰：適応度が平均値より高い線列を優先して次世代へ残し、残りはモンテカルロ・モデルを用いて交配プールを作成する。

(f) 交叉：交叉法には、One Point Crossover を用いた。

(g) 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。

(h) ネットワークコスト低減オペレータ：初期線列の作成時点および交叉・突然変異を終えた時点で、各線列についてこのオペレータを作用する。

新たに作成される線列から計算されるG'上の総整備費用が、このオペレータを作用する直前より必ず小さくなるようにリンクの入れ替えおよび削除を繰り返すことに相当する。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、リンクの入れ替えおよび削除回数については線列の規模に応じて事前に与える。

(i) 適応度計算（目的関数・適応関数）：目的関数は、総道路整備費用の最小化である。総道路整備費用は、線列とリンク整備費用から計算される。適応関数は、目的関数をスケールリングして求めた。

(j) 終了条件：次の3つの条件の内、いずれか1つに達した場合とした。

- ・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。

(k) 計算結果の評価・修正：対象道路網が大きい場合は、解がほぼ収束した後も整備費用の小さな道路リンクが1部残ることが生じたため最終的にネットワークの構成上 unnecessaryな道路リンクについては、確認の上、削除するプロセスを付加した。

(l) 出力：RI_{0,ij}とRI_{ij}の計算値、最適解G*、総道路整備費用を出力。その他の変数については必要に応じて適宜出力する。

なお上記(e)(f)(g)の具体的作成について、田村ら⁹⁾を参考にしている。

<経路代替性評価サブルーチン>

最適解を探索する過程で、更新される線列に対応するG'について着目する都市ノードペア間のRI_{ij}を

計算し、事前設定値を満足するならば適合度を計算し次世代交叉の対象とする。制約条件を満たさない場合は、その線列は致死遺伝子として淘汰する。

このプロセスを行うのが「経路代替性評価サブルーチン」である。計算手順は以下のものである。各世代で作成されるN個の各々の線列について、以下のプロセスを適用する。

(m) AALの中で選定された道路リンクおよびADLからG'を構成する。

(n) このG'について、ノードのラベリングおよび所要時間データの作成を行う。RI_{ij}の計算アルゴリズムは、最短経路の探索アルゴリズムを基本として作成しているが、各計算段階で逐一全リンクと全ノードを対象に経路探索を行うと計算量が大きくなる。したがって、各計算段階で構成されるG'についてデータを自動作成することとし、計算時間の短縮化を図った。

基幹ネットワーク上で基準ルートを設定しRI_{ij}を計算するために、ADLに相当する道路リンクのデータで基準ルートの設定ができ、ADLおよび選択肢集合をなす道路リンクAAL内の選定リンクで基準ルート途絶時の代替ルートが探索できるようにデータを対応させて変換している。

(o) RI_{ij}を計算する。

(p) RI_{ij}を満たすならば、次のプロセスへ。満たさないならば、1つ前のプロセスに戻り線列を作成し直す。

4. 計算事例

(1) モデル計算

図3に示す9ノードのネットワークモデルを用いて、計算例を提示する。このモデルは、(n1,n2)のリンク長が、(n1,n4)の2倍となる形状をしている。

基幹ネットワークを構成する道路リンク(ADL)は、図中に実線で示したリンクとした。また道路整備の対象となる選択肢集合をなす道路リンク(AAL)は破線で示した。

着目する都市ノードペアは、図中に示した2つを設定した。この都市ノードペア間について、リダンダンシーの制約条件を経路代替性指数を用いて与え、この制約を満たし、かつ総整備費用が最小となるAAL内の道路リンクの組み合わせを探索する。

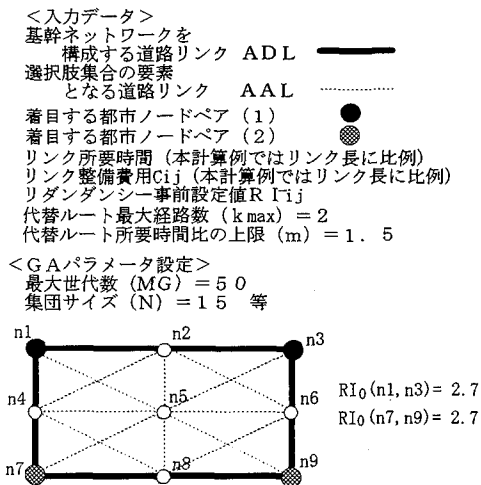


図3 ネットワークモデルの計算例 (入力)

リンク所要時間は、リンク長に比例して与えた。

リンク整備費用 (C_{ij}) についても、リンク長に比例して与えている。ただし、リンク整備費用の大小により導出される解が異なる様子を示した計算例3については、後述する。

代替ルートの最大経路数 (k_{max}) を2経路とし、代替ルートの所要時間は、基幹ネットワーク上に選定する基準ルートの1.5倍をこえないものとした。

ハイブリッドGAのパラメータ設定は試行錯誤により設定したが、選択肢集合となる道路リンクの数が12リンクと少ないため最大世代数、集団サイズとも比較的小さく設定した。ネットワークコスト低減オペレータについても、局所解に落ち込むことを避けるため、比較的小さく与え徐々に収束させた。

着目する各都市ノードペア間について、AALの全道路リンクを考慮したときの経路代替性指数の事前確認をした結果 $RI_0(n1, n3) = RI_0(n7, n9) = 2.7$ と計算された。たとえばノードペア (n1, n3) について、基準ルートは、基幹ネットワーク上の最短経路として n1-n2-n3 に選定される。 $RI_0(n1, n3)$ によって、このノードペア (n1, n3) 間の基準ルートの各構成リンクの途絶時に少なくとも2経路の代替ルートが存在すること (基準ルートを含め3経路) が示される。したがって、経路代替性の制約 RI^-_{ij} が、これ以下で与えられるならば、解をもつことが確認される。

<計算例1 (図4)>

図4は、都市ノードペア (n1, n3) についてのみ

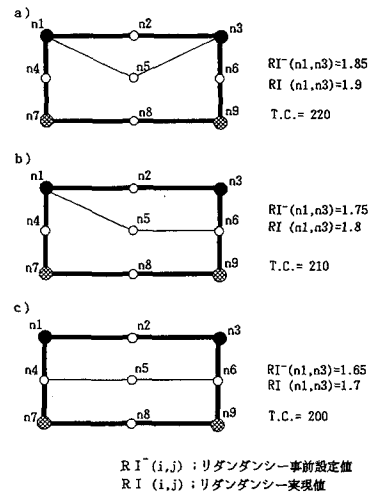


図4 ネットワークモデルの計算例

(1つの都市間に RI^- を指定した場合)

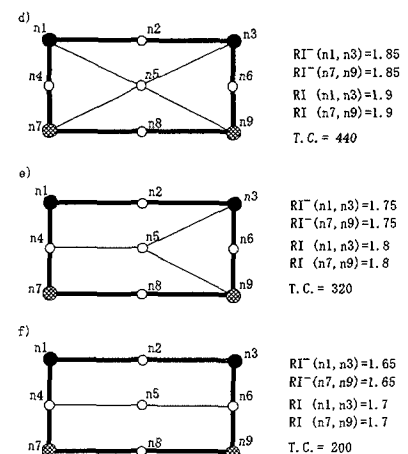


図5 ネットワークモデルの計算例

(複数の都市間に RI^- を指定した場合)

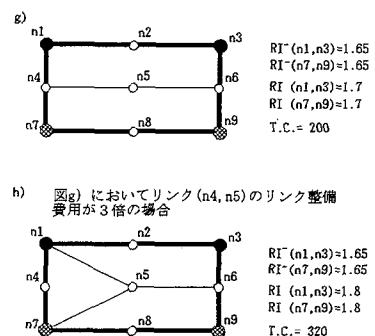


図6 ネットワークモデルの計算例

(整備費用の大きなリンクが存在する場合)

$R I^{-}_{ij}$ の制約条件を与えた場合の計算例である。この例では、 $R I^{-}_{(n1, n3)}$ をa)で1.85、b)で1.75、c)で1.65と徐々に低く与えた。c)で与えた1.65という値は、代替ルートが1経路のみ存在し、その所要時間が上限として仮定した基準ルートの1.5倍を要する場合に相当する。

a)では、基準ルート途絶時の代替ルートの所要時間が比較的短くて済むが、総費用が大きくなる。c)は逆に代替ルートの所要時間は大きくなるが、総費用が比較的小さくて済むことになる様子を表している。一般に、遠回りする代替ルートを許容するならば、リンク整備費用の小さな経路を探索できる可能性が大きくなるため、総費用は小さくなり得るといえる。a)からc)の各ケースでは、10から20世代で解が収束している。

<計算例2(図5)>

図5は、2つの着目する都市ノードペア間について、それぞれ計算例1と同様な制約条件を与えた場合の計算例である。d)からf)の順に代替ルートの所要時間を比較的大きくすることを許容したため、共通の道路リンクを代替ルートとして利用することが可能となり、総整備費用が小さく抑えられる様子を示した。

複雑な構造を有する現実の道路網で、最小費用の整備計画案を探索する際に、このネットワークとしての性質が重要な意味をもっている。

<計算例3(図6)>

図6は、AAL内に特に整備費用の大きな道路リンクが存在する場合の例である。

g)は図5のf)と同じケースであり、h)はその中の1つの道路リンク($n4, n5$)のリンク整備費用が3倍の場合を仮定した。トンネル部や橋梁部が多く整備費用の高い道路を想定している。

この場合、 $R I^{-}$ の制約を満たす中で最も総整備費用が小さくなったh)が解として探索された。

このように複数の都市ノードペア間について、 $R I^{-}$ 満たす限りにおいて、総費用が小さくなる道路リンクの組み合わせを探索することができる。

(2) 適用事例

(a) 問題設定

都市域全体に被害の及ぶような比較的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。本節では、山口県南西部の道路網を対象とし、以下のような問題を仮定し、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都市ノードペアは、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に設定する基準ルートは、各々の2都市間についての最短経路により選定し、それらの経路を構成する道路リンクが、ADLの道路リンクに相当するものとする。

C) A)に述べた各隣接主要都市間について、B)に述べた基準ルートに加え、所要時間が最大でもその1.5倍以内の代替ルートが1経路存在することをリダンダンシーの制約条件($R I^{-}_{ij}$)を用いて設定する。すなわち $R I^{-}_{ij}=1.65$ とする。

D) 各道路リンクを確保するのに必要な道路整備費用は、道路の新設・橋梁やトンネル部の補強・土砂崩れ対策等に要する費用から算定する必要がある。本稿では、現段階で入手が可能であった平成4年度山口県道路整備計画(中期1次)に基づき、道路改良や橋梁整備のための事業費を各道路リンクについて算出した値を用いた。

E) 道路の所要時間は、道路時刻表(山口県編集)を用いて与えた。

F) 道路の新設については考慮していない。

G) 道路種別および高速道路料金は考慮していない。

(b) 対象道路網

対象道路網は、山口県南西部の道路網を図7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、宇部-防府、山口-防府、徳山-山口、防府-徳山の7つとした。

(c) 入力データ

図8上段に、ADLとAALに相当する道路リンクを示した。またこの図は、計算の初期状態に対応する。

図中の太線が7つの隣接主要都市間に選定された最短経路であり、整備費用の大小に関わらず確保するこ

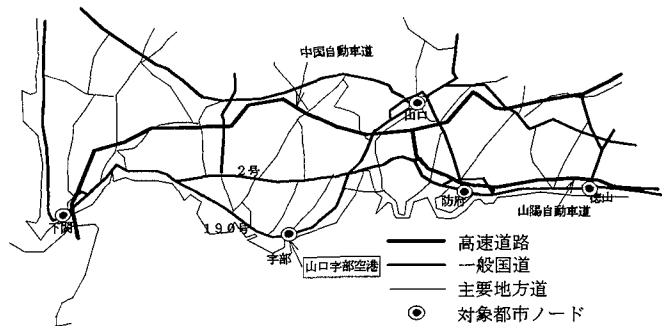


図7 対象道路網のネットワークモデル

<入力データ>
 基幹ネットワーク (ADL) 各主要都市間最短経路: (下図・上段)
 選択肢集合道路リンク (AAL): (下図・上段)
 リンク所要時間
 リンク整備コスト C_{ij} (下図・下段)
 リダンダンシー事前設定値 RI_{ij} (表1参照)
 代替ルート最大経路数 (k_{max}) = 1
 代替ルート所要時間比の上限 (m) = 1.5

<GAパラメータ設定>
 最大世代数 (MG) = 200
 集団サイズ (N) = 15 等

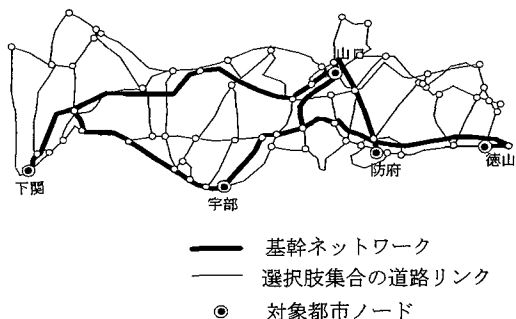


図9 適用事例計算結果

表1 適用事例計算結果 RI の計算値

対象都市間	事前確認	事前設定値	実現値
	RI_0	RI^-	RI
下関-宇部	1.9	1.65	1.9
下関-山口	1.9	1.65	1.7
山口-宇部	1.8	1.65	1.8
宇部-防府	2.0	1.65	1.7
山口-防府	1.8	1.65	1.8
徳山-山口	2.7	1.65	1.8
防府-徳山	1.9	1.65	1.8

リンク整備コスト (C_{ij}) (単位: 百万円)

..... 1000未満
 ——— 1000以上2000未満
 ——— 2000以上3000未満
 ——— 3000以上4000未満
 ——— 4000以上

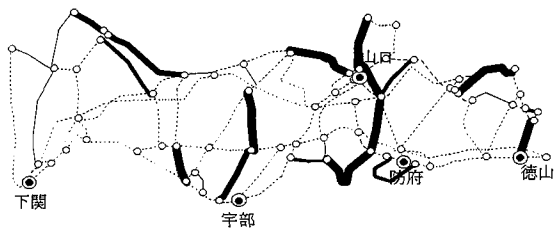


図8 適用事例入力データ

とを前提とした基幹ネットワークを構成する道路リンク（ADL）を示している。また、細線で表した上述の経路以外の道路リンクは、すべて選択肢集合をなす道路リンク（AAL）を示す。

また下段に各道路リンクに必要な道路整備事業費の概算を示した。

（d）計算結果

図9および表1に計算結果を提示する。

図9は、103世代目に探索された最適解である。7つのどの主要都市間をみても、基準ルートに途絶が生じた際に代替ルートが存在することが確認される。

表1に経路代替性指数の事前確認 RI_0 、事前設定値 RI^* 、実現値 RI を記した。

選択肢集合をなす道路リンクを全て考慮した場合、全ての主要都市間について基準ルート途絶時に代替ルートの存在することが RI_{ij} により示される。この結果、 $RI^*_{ij}=1.65$ と設定した場合、全ての主要都市間でこの制約を満たす代替ルートが少なくとも存在し、解の存在が確認される。

また最適化計算の結果得られた RI_{ij} の実現値は、全てこの制約を満たしていることを確認できる。

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整備費用を最小化している。

ここに求められた解の総整備費用は260億円程度となった。この地域の道路網の整備水準が比較的良好であり、国道や高速道路等の整備済み区間が経路選定においても多くの路線に相当することになったため、比較的小さく抑えられる結果となった。

5. おわりに

本稿では、道路途絶の発生時に代替ルートを確保できるリダンダンな道路網を、ネットワーク上への効率的な費用配分を行うことで構成することを課題とし、いくつかの仮定の下で総整備費用を最小とする整備計画路線を導くことが可能となった。

本稿の方法により、リダンダンシーの設定値と総整備費用の関係あるいは予算制約下でリダンダンシーが最大となる道路網を知りたいときは、リダンダンシーの事前設定値に変動を与え総整備費用の変動を感度分析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、最適解か否かは、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。

本研究においては、道路途絶時の経路の確保を目的とした道路網の構成に焦点をあてた。特に都市圏において、途絶時においても平常時の交通や避難交通を確保するという観点に立つとき、交通需要を考慮したモデル化が必要であろう。また、本稿でのモデル化においては、2都市間で基準ルートの途絶時に最も大きな時間損失を生じる道路区間の途絶を想定している。複数の道路区間で同時に多数の途絶が発生するような場合についても、今後さらに研究を進めたい。

参考文献

- 1) 土木計画学研究委員会：阪神・淡路大震災復興に向けての緊急提言、1995
- 2) 若林拓史・亀田弘行：ロマ・ブリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の交通サービスの被害分析と交通運用策の評価、土木計画学研究論文集, No. 10, pp. 103-110, 1992
- 3) 高山純一・石井信通：GAによるグラフ分割を用いた部分グラフ集約化による全点間信頼度の近似解法、土木計画学研究論文集, No. 12, pp. 295-304, 1995
- 4) 朝倉康夫・柏谷増男・為広哲也：災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル、土木計画学研究論文集, No. 12, pp. 475-483, 1995
- 5) 榎谷有三：震災時における道路網の機能性能の評価法、交通工学vol. 19, No. 5, pp. 3-17, 1984
- 6) 南正昭・高野伸栄・佐藤馨一：道路網における代替ルートの整備水準の一評価法に関する研究、土木学会論文集, No. 535/IV-30, pp. 67-77, 1996
- 7) 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, No. 16(1), pp. 387-394, 1993
- 8) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993
- 9) 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No. 48 2/IV-22, pp. 37-46, 1994

リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究

南 正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一

本研究は、途絶の発生を考慮したリダンダントな道路網を構成するための整備路線の選定方法を考案したものである。災害等による道路途絶に対応するには、途絶時においても代替ルートを確保できるように道路の新規整備や拡幅等を適切に実施し、あらかじめ道路網を多重化・ネットワーク化することが有効である。本研究ではこの問題を、道路網が都市間に有するリダンダンシーをあらかじめ設計条件として与え、その制約を満たし、かつ必要な総道路整備費用を最小化するネットワーク構成問題として取り扱った。この問題の実用的な解法として、遺伝的アルゴリズムを応用した計算手法を開発し、実際の道路網への適用事例を提示した。

A Basic Study on the Design Method of a Redundant Highway Network

By Masaaki MINAMI, Shin'ei TAKANO and Keiichi SATOH

The purpose of this paper is to present the design method of a redundant highway network considering the investment cost on the network. This problem is to design a highway network which has some alternate routes available between pairs of cities with minimum investment cost.

The hybrid type genetic algorithm is developed to design the network practically. This method leads to an optimum solution which satisfies a prespecified redundancy criterion.
