

## 途絶の発生を考慮したリダンダントな道路網の評価と構成

*A Review of the Development of a Method for Estimation and Design  
of a Redundant Highway Network*

南 正昭\*\*、高野伸栄\*\*\*、加賀屋誠一\*\*\*\*、佐藤馨一\*\*\*\*\*

*By Masaaki MINAMI, Shin'ei TAKANO, Seiichi KAGAYA and Keiichi SATOH*

*This paper reviews our recent research of the redundant highway network. The approach of this research is network analysis, development computer algorithm, and the application of empirical study. Redundancy Index is defined between pairs of city-nodes. The index aims to estimate the level of service of the highway network in the viewpoint of availability of alternate route when the network is damaged. By using this index as prespecified performance criterion, the design method of a redundant highway network is developed. This method leads to a minimum investment network which satisfies the constraints. Some application on highway networks in Yamaguchi prefecture are shown.*

*keywords: highway network design, redundancy*

### 1. はじめに

本稿は、途絶への対応力を有するリダンダントな道路網の評価および構成方法に関し、これまで行ってきた既発表の研究成果を一部まとめたものである。

阪神・淡路大震災によって各地で交通網が寸断され、その後長期間にわたり甚大な影響が生じた。この震災を教訓とし、災害時あるいは災害後においても交通が確保できるよう、交通施設の整備を進めておくことの重要性が再認識されてきた。

本研究の目的は、「どのような道路網を用意しておけば、いざという災害時に被害を小さく抑えられるか」という課題について、道路網のネットワーク構成の側面から接近することにある。たとえ途絶が発生しても、

必ず代替ルートが存在し同一の目的地あるいは目的施設への到達を可能とする、「切れても切れない道路ネットワーク」を計画・立案することを目標においてきている。

アプローチとしては、主としてネットワーク解析技術を用いての理論構成、計算アルゴリズム開発、現実道路網への適用・考察という手順をとっている。

以下、2章では、本研究で取り組んできた問題設定、計算アルゴリズムの開発等の方法についてまとめた。2都市ノード間について、代替ルートの存在を評価する簡便な指標を提案するとともに、実際の道路網上でその指標を計算するための計算手順を示している。次にこの指標を用いて、あらかじめ複数の都市ノード間についての代替ルートの整備水準を所与とし、この制約を満たす最小投資の道路整備計画案を導く手順を示した。さらに応用として、広域防災拠点等の最寄り施設へのアクセスを確保するための緊急輸送ルートの整備計画案を提示する可能性について検討している。3章では、これらの方法を山口県南西部の道路網を対象に適用した計算事例を列挙し、その適用性について考察を加えている。

\* キーワード：道路網計画、リダンダンシー

\*\*正員 工修 山口大学工学部（山口県宇部市常盤台2557  
tel. (0836)35-9111 fax. (0836)35-9429)

\*\*\*正員 工博 北海道大学工学部（札幌市北区北13条西8  
丁目 tel. (011)706-6213 fax. (011)726-2296)

\*\*\*\*正員 学博 同上  
(tel. (011)706-6210 fax. (011)726-2296)

\*\*\*\*\*正員 工博 同上  
(tel. (011)706-6209 fax. (011)726-2296)

## 2. リダンダントな道路網の評価と構成のための一手法

### (1) 代替ルートの評価指標の作成

本研究では、道路網のリダンダンシーを表す一つの指標として、式(1a)に示す経路代替性指数 ( $RI_{ij}$ ) を提案している。この指標は、道路網上の任意の2都市ノード ( $i, j$ ) に着目し、その間の代替ルートを含めた道路網の整備水準を、経路数と所要時間を用いて簡明に表現することを目的に作成したものである。

$$RI_{ij} = \min_{l_j} LRI_{l_j} \quad (1a)$$

$$LRI_{l_j} = T(P_{0,i,j}) / T_{S,l_j}$$

$$1 / T_{S,l_j} = \sum_{k_{ij}} (1/t(l_{ij}, k_{ij}))$$

$$(l_{ij} = 1, \dots, l_{ij\max})$$

$$(k_{ij} = 0, 1, \dots, k_{ij\max})$$

$RI_{ij}$  ; 都市ノード  $ij$  間経路代替性指数

$T(P_{0,i,j})$  ; 都市ノード  $ij$  間基準ルートの所要時間

$t(l_{ij}, k_{ij})$  ; 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  $k_{ij}$  番目経路の所要時間

$k_{ij\max}$  ; 代替ルートの最大経路数

都市間の任意の経路に着目し、これを基準ルートとよぶ。基準ルートに途絶が生じた際に、この経路をバックアップする代替ルートがどの程度存在するかを表現している。ここで評価対象として選定される経路は、経路の所要時間が基準ルートの所要時間の1.5倍以下のものと仮定している。計算の結果得られる指標値は、都市間が同等の所要時間の2経路で連結されるとき  $RI_{ij}=2.0$ 、あるいは同等の所要時間の3経路で連結されるとき  $RI_{ij}=3.0$  のように表され、経路数に一致し直感的に理解しやすいという性質をもっている。

経路代替性指数  $RI_{ij}$  の計算手順は、図1のようである。都市間 ( $i, j$ ) において基準ルートを設定の後、その基準ルートの各構成リンクに途絶を想定する。このとき代替ルートとなる経路数が最も少なく、遠回りを要することになる構成リンクに関する計算値を、評価値として採用している。

この指標は、新規の道路が整備される前後、あるいは

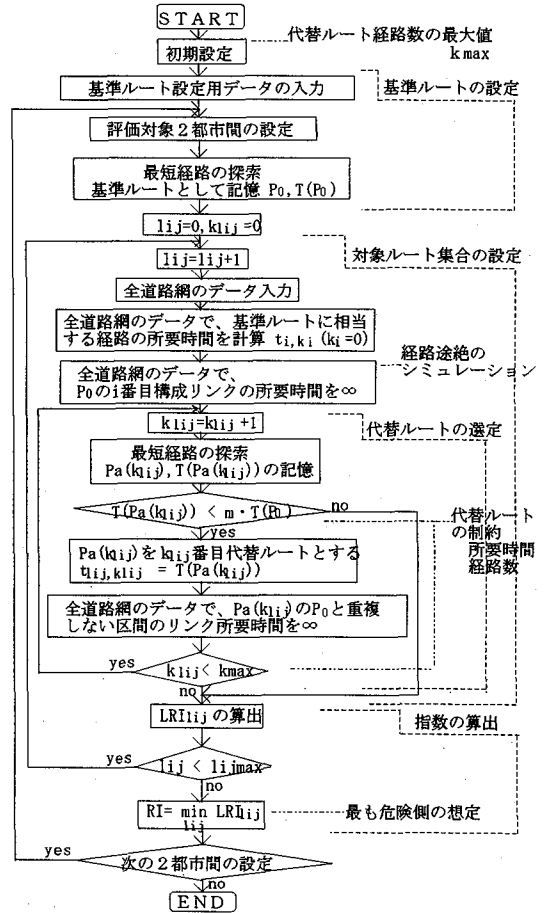


図1 経路代替性指数の計算手順

道路に通行止め区間が生じる前後等の、比較についても適用できるよう工夫している。このことは式(1b)(1c)に示される。

$$RI_{ij,bf} = \min_{l_j} (T(P_{0,i,j})_{bf} / T_{S,l_j,bf}) \quad (1b)$$

$$RI_{ij,af} = \min_{l_j} (T(P_{0,i,j})_{af} / T_{S,l_j,af}) \quad (1c)$$

$bf$  ; ネットワーク構成に変化の生じる以前

$af$  ; ネットワーク構成に変化の生じる以降

$RI_{ij,bf}$  ; 時点  $bf$  での経路代替性指数

$RI_{ij,af}$  ; 時点  $af$  での経路代替性指数

その他、式(1a)と同様

基準ルートを道路網のネットワーク構成に変化の生じる前後に関わらず、同一の経路として設定することで比較が可能になる。計算アルゴリズム上では、基準ルートを設定するためのネットワークデータと代替ルートを探るネットワークデータを別途に用意することで対応している。

## (2) リダンダントな道路網の構成問題

前節では、現状道路網、新規計画路線、あるいは通行止め区間等、道路網のネットワーク構造を所与としたときに、道路網が途絶に対してどの程度の対応力を有するかを指標化することを目標としてきた。

本研究では次にこの指標を用いて、あらかじめ複数の都市間に対し代替ルートの整備水準に関する評価値が与えられた場合に、その制約を満たす道路網を構成する問題を扱った。

これにより途絶の発生に対し、代替ルートが存在することで途絶の影響を小さくするためには、どの道路リンクあるいは路線を整備すべきかを提示することを目標としている。

目的関数は式(2a)に示す総道路整備費用の最小化とし、式(2b)に示す経路代替性指数で表した代替ルートの整備水準を制約 $RI^{-ij}$ に、これを満足する整備計画路線を決定する。この問題は、整備代替案道路リンクを含む全道路網をグラフ $G$ で表すとき、制約を満たし最小コストとなる部分グラフ $G'$ を導く問題として整理される。

### 目的関数

$$\begin{aligned} \text{Minimize } TC &= \sum_{(i,j) \in E'} C_{ij} & (2a) \\ &= \sum_{(i,j) \in ADL} C_{ij} + \sum_{(i,j) \in AAL} C_{ij} X_{ij} \end{aligned}$$

### 代替ルートの整備水準に関する制約

$$\begin{aligned} RI(\mathbf{X})_{ij} &\geq RI^{-ij}, \quad \forall (i,j) \in PU & (2b) \\ RI(\mathbf{X})_{ij} &= \min_l LRI(\mathbf{X})_l \\ & \quad (lij = 1, \dots, lij_{\max}) \end{aligned}$$

$TC$  ; 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

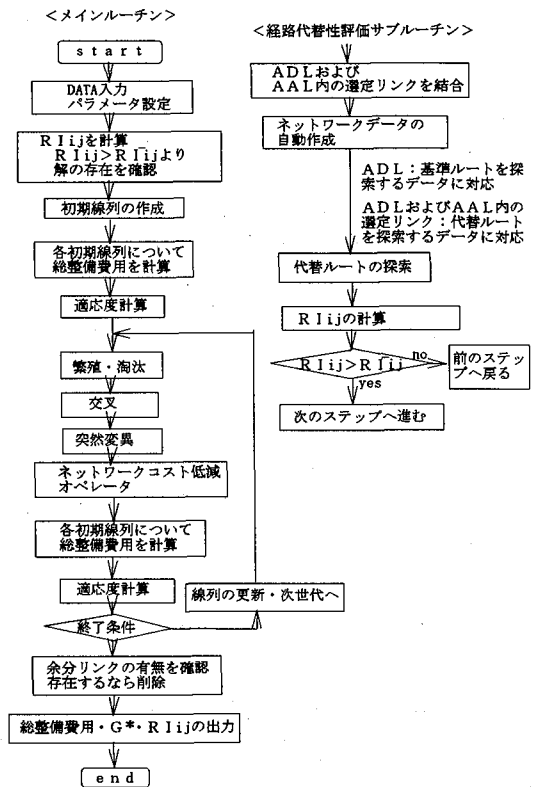


図2 構成問題の計算手順

$ADL$  ;  $E'$ 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

$\mathbf{X}$  ;  $X_{ij}$ を要素とするベクトル

$RI(\mathbf{X})_{ij}$  ;  $G'$ 上での都市ノード $ij$ 間経路代替性指数の実現値

$RI^{-ij}$  ; 都市ノード $ij$ 間経路代替性指数の事前設定値

$PU$  ; 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

幹線道路等に相当し整備費用の大小に関わらず整備することを前提とする道路リンクが存在してもよいも

のとし、これらの構成する道路網を基幹ネットワークとよんでいる。基幹ネットワーク以外の道路リンクを整備代替案道路リンクとし、解を探索する。

この問題を解くための計算手順は図2に示される。複雑なネットワーク構造を有する $G'$ を導き出すために、ヒューリスティックなプロセスを付加した遺伝的アルゴリズムを開発している。整備代替案となる各道路リンクを整備するか否かを設計変数、所与とした経路代替性指数の事前設定値を制約とし、目的関数である総整備費用を最小化する道路リンクの組み合わせを探索する。総整備費用がより小さくなるように探索を方向付けることを試み、一定の探索力が期待できることを計算事例により確認している。

これにより事前に設定した $RI^{-ij}$ を満たす限りにおいて遠回りする代替ルートを許容し、整備費用の小さい整備計画路線を求めることができる。

### (3) 防災拠点への緊急輸送ルートの確保への応用

拠点都市あるいは医療施設等への輸送ルートの確保を目的とした場合は、複数の都市ノード間が複数の経路で連結されていることよりも、最寄りの施設ノードへのアクセスの保証が課題となる。最寄りの施設ノードへの経路に途絶が生じた場合、施設利用者はその施設を含めた全ての同様な施設の中で、最も早く到達できる施設を選択することを仮定している。

次善の施設ノードへのアクセスに関する評価指標は、いくつか考えることができるが、本研究では、その一つとして既往の研究との継続性を考慮し、式(3a)に示す $RIDi$ を評価指標として用いている。

$$RIDi = \min_{l,j} LRID_{l,j} \quad (3a)$$

$$LRID_{l,j} = 1 + \frac{t(P_{0,i,j1})}{t(P_{a,i,j2})_{ij1}}$$

$$t(P_{0,i,j1}) = \min_j t(SP_{i,j})$$

$$t(P_{a,i,j2})_{l,j1} = \min_j t(SP_{i,j})_{l,j1} \\ (l_{i,j1} = 1, \dots, l_{i,j1} \max)$$

$j1$ ; 1番目に選択される施設の存在する目的地となる都市ノード

$j2$ ;  $j1$ への経路途絶発生時に2番目(次善)に選択される施設の存在する目的地となる都市ノード(ただし $j1$ と $j2$ は同一目的地であることもあり得る)

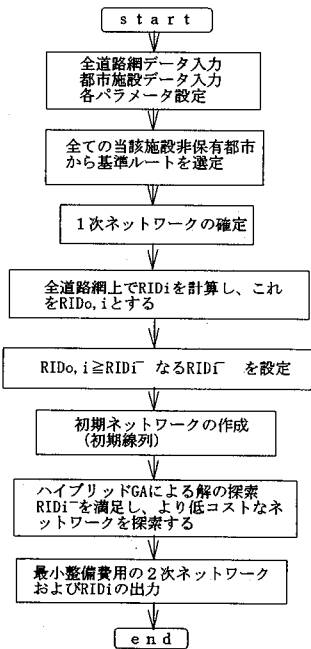


図3 目的地変更を考慮した場合の構成問題の計算手順

$SP_{i,j}$ ; 都市ノード $ij$ 間の最短経路

$P_{0,i,j1}$ ; 目的地 $j1$ への最短経路すなわち $j1$ への基準ルート

$(P_{a,i,j2})_{l,j1}$ ;  $P_{0,i,j1}$ の $l_{i,j1}(l_{i,j1}=1, \dots, l_{i,j1} \max)$ 番目構成リンク途絶時における $j2$ への最短経路

$t(P)$ ;  $P$ の所要時間、交通フローが所要時間に与える影響は考慮していない。

式(1a)に示した経路代替性指数 $RI_{ij}$ において、評価対象とする経路を2経路に限定し、目的地に相当する都市ノードを当該施設の存在する最寄りの都市ノードとすると、式(3a)が導かれる。ただし、ここでは次善の施設ノードへの所要時間について、1番目経路に対し1.5倍以内というような制限は設けていない。

前述した経路代替性指数 $RI_{ij}$ は、所与の都市ノード間について算出するのにに対し、 $RIDi$ は所与の都市ノード自身について算出する。したがって計算手順は、各都市ノードから最寄りの施設ノードへの経路探索を基本とし作成している。

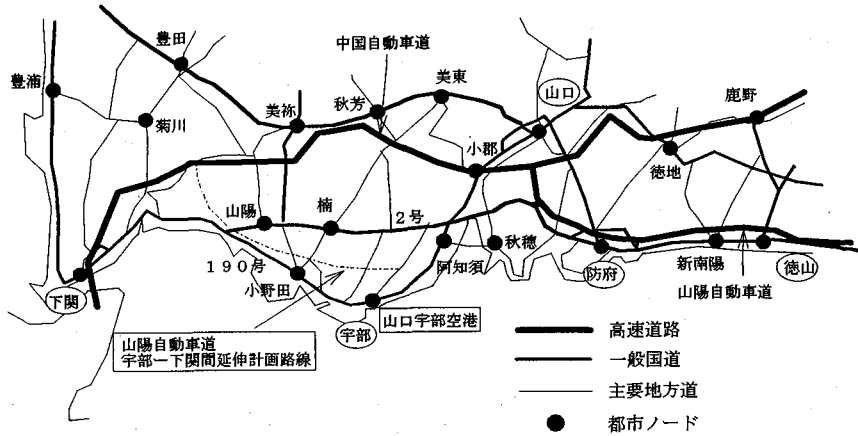


図4 対象道路網

次に前節と同様、複数の都市ノードについて制約  $RID_i^-$  を与え、それを満足し総道路整備費用を最小とする道路整備計画案を求めることを考える。

この場合の計算手順を、図3に示した。まず制約  $RID_i^-$  を与えた各都市ノードから、最寄りの施設ノードへの最短経路を求める。その道路リンクの構成する道路網を1次ネットワークとよび、整備費用の大小に関わらず整備を要する道路網と仮定している。道路種別を考慮したい場合、前節のように1次ネットワークを全道路網内の限定された道路網上で設定することも可能である。

この1次ネットワークに途絶が発生した場合を想定し、 $RID_i^-$  を満たす範囲で、次善施設への到達を確保できる整備計画路線を決定する。

解を求めるために、前節に述べた遺伝的アルゴリズムに本問題の条件を入れ改良している。

### 3. 適用事例

#### (1) 概要

図4に示した山口県南西部の道路網を対象に、2章に述べた方法を適用した計算事例を列挙する。

道路リンクの所要時間は、道路時刻表(山口県編集)を用いて与え、交通フローの影響は考慮していない。

各道路の整備費用は、山口県道路整備計画において

表1 山口宇部空港へのアクセスにおける経路代替性指数  $R_{ij}$  の計算結果

	山口宇部空港
山口	1.8
防府	2.0
徳山	2.0
下関	1.9

表2 山口宇部空港-下関間経路代替性指数  $R_{ij}$  の計算結果

		山口宇部空港	
		現状道路網	宇部一下関間山陽自動車道延伸計画路線を付加
下関	LRI1	2.0	2.3
	LRI2	2.6	3.0
	LRI3	2.9	3.5
	LRI4	2.8	3.5
	LRI5	2.8	3.5
	LRI6	2.7	3.4
	LRI7	2.7	3.4
	LRI8	1.9	3.3
RI	1.9	2.3	

算定されている事業費を、各道路リンクについて算出した値を用いている。

#### (2) 代替ルート整備水準の評価例

現況の道路網および高速道路延伸計画路線を考慮し

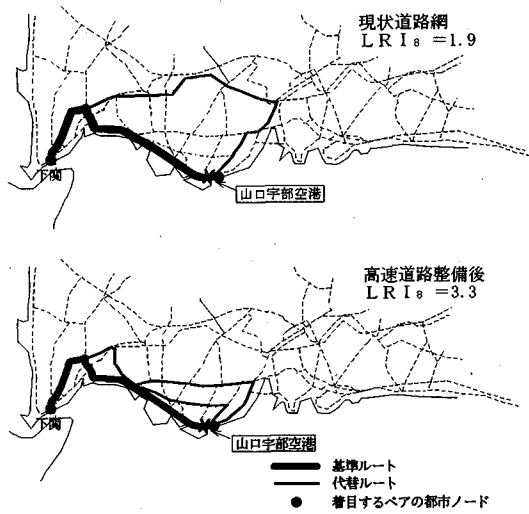


図5 山口宇部空港—下関間で評価対象として選定された代替ルートの例 ( $l_{ij}=8$  の場合)

た場合について、経路代替性指数  $RI_{ij}$  を用いて代替ルートの整備水準を評価した事例を表1、表2、図5に示す。

この例で基準ルートおよび代替ルートは、ともに全対象道路網上で設定している。

表1は山口宇部空港と県内主要都市の間について  $RI_{ij}$  を算出した結果である。いずれも  $RI_{ij}=2.0$  に近く、空港への経路が途絶しても、同程度の所要時間で到達できる代替ルートが用意されていることが示される。

図5および表2は、下関—山口宇部空港間での現状道路網および高速道路延伸区間整備後について  $RI_{ij}$  の計算過程を比較したものである。選定された代替ルートを具体的に例示している。どの道路リンクが途絶したときに最も大きなダメージを被るかを、この指標を用いて分析できることを示している。

### (3) 構成問題の計算事例

道路網整備計画案の策定を目標に、道路網の構成問題を解いた事例を図6、図7および表3に示した。

計算における入力としては、道路網の所要時間および整備費用データ(図6)、遺伝的アルゴリズムに必要な各パラメータを設定する。基幹ネットワークは、

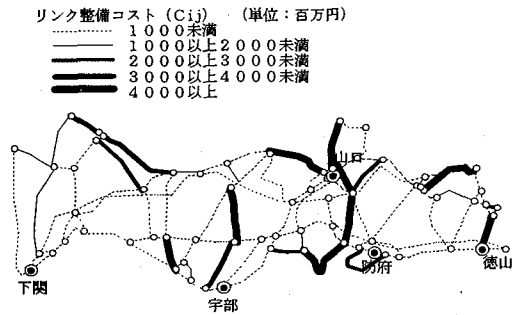


図6 道路整備費用(入力)

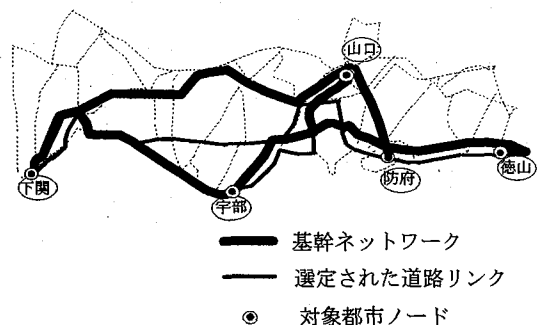


図7 構成問題計算結果

表3 構成問題  $RI_{ij}$  の計算値

都市間	$RI_{0,ij}$	$RI_{ij}$	$RI_{ij}$
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

$RI_{ij}$  の制約を与えた各都市間の最短経路とし、それ以外の道路リンクをすべて代替案道路リンクとしている。

図7が、ここで探索された最適解を図化したものである。総整備費用は、260億円程度と算出された。

表3に、各都市間の経路代替性指数の算出結果をま

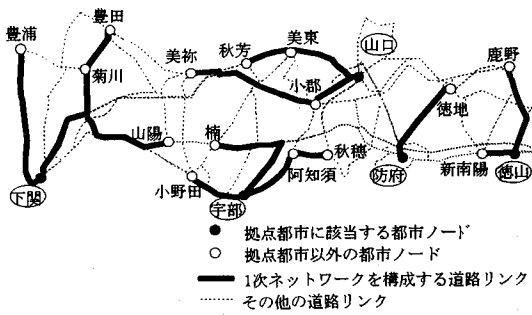


図8 拠点都市への1次ネットワーク

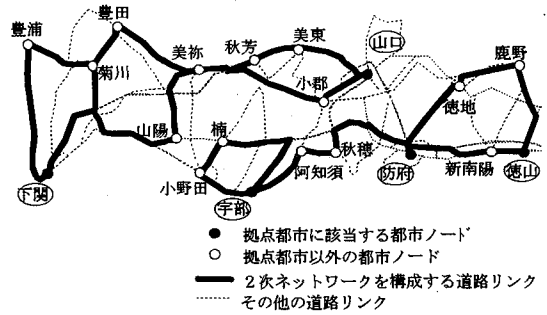


図9 拠点都市への2次ネットワーク

とめた。ここで  $RI_{o,ij}$  は、整備費用を考慮せず、すべての代替案道路リンクが整備されたと仮定した場合の指数の算出値である。 $RI_{o,ij}$  以下の  $RI^{-ij}$  を制約として設定すれば、必ずそれを満たす解が存在することになる。 $RI^{-ij} = 1.65$  とした場合、上記のような結果が得られた。導出された道路網上での  $RI_{ij}$  は、すべてこの制約を満たしていることを確認できる。

GA は、もとより近似解法であり、得られた解は必ずしも厳密な最適解であることを保証されない。しかし厳密解法の設計が困難な本問題に対し、少なくとも制約を満たし、より低コストな解を探索することが可能である。

(4) 防災拠点への緊急輸送ルートの確保についての計算事例

広域的な防災拠点へのアクセスの確保を目標に行った計算事例を以下に提示する。ここに示すのは、5つの中核都市を選定し、それ以外の市町村からのアクセスを確保することを課題としたものである。計算結果を図8、図9、表4に示した。

図8が1次ネットワーク、図9が最適化計算の結果得られた2次ネットワークを示している。

表4には、 $RID_i$  の計算結果を示した。 $RID_{o,i}$  は整備費用を考慮外とし、すべての道路リンクを利用できるものとしたときの指標値である。この場合  $RID_{o,i}$  の最小値が新南陽市における1.27となったため、すべての市町村が最低限この基準を確保できることを仮定し、 $RID_i^{-} = 1.27$  と設定して2次ネットワークを探索した。

表4 拠点都市へのその他の各市町村からの  $RID_{o,i}$  および  $RID_i$  計算結果

市町村名	$RID_{o,i}$	$RID_i^{-}$	$RID_i$
小野田	1.65	1.27	1.53
美祿	1.96	1.27	1.69
新南陽	1.27	1.27	1.27
鹿野	1.86	1.27	1.86
徳地	1.69	1.27	1.47
秋穂	1.84	1.27	1.84
小郡	1.88	1.27	1.27
阿知須	1.72	1.27	1.46
楠	1.87	1.27	1.81
山陽	1.93	1.27	1.62
菊川	1.77	1.27	1.42
豊田	1.85	1.27	1.70
豊浦	1.96	1.27	1.91
美東	1.94	1.27	1.41
秋芳	1.87	1.27	1.50

図9は、84世代目に探索された最適解である。総整備費用は、610億円程度と算出された。

選定された道路リンクが多いにも関わらず総整備費用としては比較的低くなっている。これは本計算例で選定された道路リンクには、高速道路や一般国道等の整備済み区間が多く存在したためである。

5つの中核都市のいずれかへ、それ以外のどの市町

村からも、必ず2系統のアクセスが確保されていることが確かめられる。

この地域では、高速道路を軸として中核都市へのアクセスが2系統で保証される様子が示されている。

#### 4. おわりに

たとえ途絶が生じたとしても、同一の目的地あるいは目的施設へのアクセスを可能とする道路網を構成することを目的に、道路網のネットワーク構成の側面からいくつかの試みを行ってきた。途絶の発生を前提とした道路網の現状評価、整備計画の立案、緊急輸送ルートの整備計画等への適用を通し、有用性と問題点を考察してきている。

現段階で、本稿に記した仮定の範囲において、一定の規模を有する道路網での整備計画路線を提示することが可能となっている。

しかし交通フローが考慮されていない、あるいは施設容量が考慮されていない等、課題は多い。道路網上や施設での利用者行動や容量を考慮すると、問題はさらに複雑になるものと考えられる。計算上においても、実規模のネットワークを対象とするには多大な計算量を必要とすることになるであろう。

神戸で被災された多くの方々、現在も復興に立ち向かわれている方々とともに、今後も研究を続けたいと考えている。

#### 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) 国土庁；交通システムの信頼性向上に関する調査，1996
- 3) 中央防災会議国土庁防災局編：防災基本計画，1995

- 4) 野中保雄，島岡淳：冗長系，日科技連，1990
- 5) 岡田憲夫，田中成尚：ネットワーク特性を考慮した道路機能水準の計量指標化に関する研究，土木学会論文集，No. 389/IV-8，pp. 65-74，1988.
- 6) 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へ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.
- 7) 若林拓史：阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価，土木計画学研究論文集，No. 13，pp. 391-400，1996
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 樹谷有三：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
- 11) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993
- 12) 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. 482/IV-22，pp. 37-46，1994
- 13) 嶋田喜昭・加藤哲男・本多義明：自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察，都市計画論文集，No. 30，pp. 97-102，1995
- 14) 加賀屋誠一・三木正之：アクセシビリティを考慮した医療施設利用改善への地理情報システムの適用，土木計画学研究論文集，No. 13，pp. 209-216，1996
- 15) 喜多秀行・瀧本貴仁：地方生活圏における救急医療システムの整備計画手法に関する一考察，土木計画学研究論文集，No. 13，pp. 193-200，1996
- 16) 谷口君雄，佐藤馨一，五十嵐日出夫：情報論的エントロピーによる自家用車保有意識分析と道路網計画の評価，土木計画学研究論文集，No. 5，pp. 203-210，1987.
- 17) 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. 530/IV-30，pp. 67-77，1996
- 18) 南正昭・高野伸栄・佐藤馨一：リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究，土木計画学研究論文集，No. 13，pp. 733-742，1996
- 19) 南正昭・高野伸栄・加賀屋誠一・佐藤馨一：拠点的医療施設へのアクセスを2系統で保証する道路ネットワーク構造，土木計画学研究論文集，No. 14（印刷中）