

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

南 正昭¹・高野伸栄²・佐藤馨一³

¹正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)
²正会員 学術修 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
³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)

本研究は、道路途絶時に利用される代替ルートの整備水準を評価する一手法を考案し、実際の道路網への適用を行ったものである。経路数や所要時間を要因とした代替ルートの評価指標として「経路代替性指数」を定義し、その実用的な計算アルゴリズムを提示した。道路途絶への対応力を評価するという観点から、都市間ごとに代替ルートがどの程度用意されているかをこの指数を用いて表現するとともに、どの道路リンクが途絶したときに都市間の連結に最も支障が生じるかを指摘できることを述べた。また新規の道路整備や通行止め区間の発生により、道路網のネットワーク構成に変化が生じたときの代替ルートの整備水準の増減を調べ、道路整備計画への適用性を検討している。

Key Words: highway network, alternate route, highway network redundancy

1. はじめに

道路網は豪雨や交通事故等の道路災害によりしばしば途絶し甚大な被害を生じる。道路交通における信頼性の確保という観点からは、たとえ道路に途絶が生じても平常時に比して大幅に遅れることのないように道路網を整備することが望ましい。

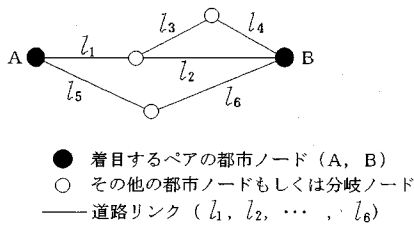
道路網は、経路の一部が途絶しても代替ルートが存在すればその利用により目的地に到達できるというネットワークとしての性質を有している。代替ルートの利用により途絶時においても平常時と同等な所要時間、もしくはアロワブルな時間損失で目的地に到達できるならばドライバーにとって途絶の影響は少ないといえる。したがって道路整備計画の中で代替ルートの存在を考慮し、途絶時の迂回交通の処理、避難路の確保、医療・救急活動等の様々な道路交通機能に支障を生じないようにネットワークを構成することが必要と考えられる。

従来より道路網の整備水準は、整備率・改良率・舗装率等の道路整備率を中心とした道路整備水準指標により評価され、将来の道路網計画が立案されてきた。しかしこれらの指標では、道路網における代替ルートの整備水準、すなわち道路途絶時に利用可能な代替ルートがどの程度整備されているかを評価することはできない。代替ルートは、道路災害による途絶ばかりではなく工事に伴う通行規制、積雪地の冬期閉鎖区間、橋梁の設置間隔、渋滞・混雑の解消等の道路網整備計画の多様な局面で重要な評価要因といえる。

道路網がネットワークとして整備されることの効果に着目した評価法に関する研究が進む中で、代替ルートの

評価法についてもいくつかの指摘がなされてきた。著者らは2都市間の道路網について、代替ルートの果たす役割を道路網の代替性とよび、その評価基準、評価指標と適用性について研究を続けてきた^{1)・2)}。本稿はその成果に進展を加え再構築したものである。また近年たとえば岡田・田中³⁾は、個々の道路の整備水準の評価が単独では行えないとの問題認識に立ち、ネットワーク特性を考慮した道路整備水準指標として経路構成重要度指数を提案し、その指数が代替不能度からみた経路構成上の重要度を表す特性があることを指摘している。戸松・西井・津島⁴⁾は、街路整備によって周辺街路にどのような交通流動上の変化が生じるかに注目し、代替性係数と補完性係数からなる密接関連性係数を定義しネットワークの形成効果を評価している。また若林・亀田⁵⁾は、地震による通行不能箇所の発生を例に、走行の保証を表現する確率指標として連結信頼性を定義し実証的な分析を行っている。

本稿は、2都市間に構成される道路網を対象に代替ルートの整備水準を評価する一手法を考案し、道路網評価への適用を試みた成果である。道路網は、OD間において任意の経路の構成リンクが途絶したときに、代替ルートがその機能をバックアップする冗長系を構成している。道路網におけるこのネットワークとしての性質を「経路代替性」とよび、まずその概念を明確化し評価基準を設定する。次にこの評価基準により代替ルートの整備水準を表現する評価モデルとして「経路代替性指数 (RI)」を定義する。本研究ではこの指数を都市間の道路網が途絶現象に対してどの程度対応力のある構造をしているかを評価する指標として用いる。指数を算出するための実



● 着目するペアの都市ノード (A, B)
○ その他の都市ノードもしくは分岐ノード
— 道路リンク (l_1, l_2, \dots, l_6)

図-1 都市間を連結する道路網の例

用的な計算アルゴリズムを示すとともに、実際の道路網で適用性を検証する。

2. 代替ルート整備水準の評価モデル

(1) 代替ルートを考慮した2都市間道路網のモデル化
道路網(G)が都市ノード(C)を含むノード(V)と道路リンク(E)からなるネットワーク $G=G(V, E)$, $V \supset C$ によりモデル化できるものと仮定する。ここでリンク長は所要時間を表す。

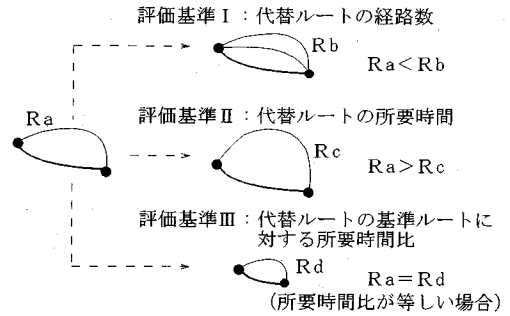
いま道路網(G)上で任意の2つの都市ノードに着目する。ここでこの都市ノードペアを(A, B)と表す。(A, B)間が連結で経路が存在するとき、その経路集合 $\{P \mid P(A, B), C \ni A, B\}$ の構成するネットワークを評価の対象とする。

図-1に、(A, B)間を連結する道路網の例を示す。図-1の道路網は、着目した都市ノードペア(A, B)以外に3つの都市もしくは分岐点を表すノード、および6つの道路リンク(l_1, l_2, \dots, l_6)から構成されている。

たとえば経路 l_1-l_2 に注目する。道路リンク l_1 が途絶したとき、経路 l_5-l_6 が代替ルートとして機能し得る。また道路リンク l_2 が途絶したとき経路 $l_1-l_3-l_4$ および経路 l_5-l_6 が代替ルートになり得る。このように使用している要素の故障時に、通常は待機状態にある予備の要素が機能を維持するシステムは待機冗長系(Stand-by Redundancy)とよばれる⁶⁾。この考え方に基づき代替ルートの整備水準を表す評価モデルの作成を行うために、以下の4つの用語を準備する。文中で、 $E(P \cdot)$ は経路 $P \cdot$ を構成するリンクの集合、 $Li(P \cdot) \in E(P \cdot)$ は経路 $P \cdot$ のi番目構成リンクを表す。

(a) 基準ルート(P_0) : 着目する2都市ノード(A, B)間が連結であり経路が存在するとき、 $P_0 \in P(A, B)$ なる任意の経路 P_0 に注目する。ここでこの経路 P_0 を「基準ルート」とよぶ。基準ルートは、次の代替ルートを明確化するための相対的な概念を表す。

(b) 代替ルート(P_a) : 本稿では、基準ルート(P_0)に1箇所の道路途絶が生じる場合を想定する。基準ルートのi番目構成リンクに途絶が生じたとき、式(1a)を満たす経路 $\{P_a \mid P_a \in P(A, B), P_0 \neq P_a, E(P_a) \not\subseteq Li(P_0)\}$ が存在するとき、経路 P_a は基準ルート P_0 のi番目構成リ



—●— 基準ルート R : 経路代替性
—○— 代替ルート

(但し、上図で経路の長さは所要時間の大きさを表す)

図-2 経路代替性の評価基準

nk途絶時の代替ルートになり得るものと仮定する。

$$T(P_a) < mT(P_0) \quad (1a)$$

$T(P \cdot)$: 経路 $P \cdot$ の所要時間

本稿では、 $m=1.5$ と設定した。これはASSHOによる高速道路建設時の高速道路への転換率曲線において、速度比1.0の時の転換率が時間距離比1.5あたりで ϵ^0 に近づくことを参考にした⁷⁾。転換率曲線は、もとより道路途絶を前提としたものではないが、現段階において参考になり得る値と考え採用した。

たとえば図-1において、基準ルートを l_1-l_2 としその構成リンク l_2 に途絶が生じたとき、経路 $l_1-l_3-l_4$ および経路 l_5-l_6 が式(1a)を満たすならば代替ルートになるものとした。ここにいう代替ルートは2都市間を連結する経路であり、構成リンク l_2 途絶時の、 l_3-l_4 のような迂回区間を指すものではない。

現実の道路網上でこの条件を満たす代替ルートは、複数存在し得る。そこで評価モデルの適用段階では、基準ルートの各構成リンクごとに評価対象とする代替ルートを最大で k_{max} 経路選定する。

(c) 対象ルート集合(S) : 基準ルート(P_0)およびそのi番目構成リンクの途絶時に評価対象として選定される最大で k_{max} 経路の代替ルートからなる経路の集合を、基準ルート(P_0)のi番目構成リンクに関する「対象ルート集合(S_i)」とよぶ。たとえば図-1において、構成リンク l_1 および l_2 に関する対象ルート集合は、各代替ルートが式(1a)を満たすとき $S_1 = (l_1-l_2, l_5-l_6)$ および $S_2 = (l_1-l_2, l_1-l_3-l_4, l_5-l_6)$ となる。対象ルート集合は、基準ルートの各構成リンクごとに確定する。

(d) 経路代替性(R) : 基準ルートの途絶に対し、代替ルートがどの程度用意されているかという2都市間道路網のネットワークとしての性質を「経路代替性(R)」とよぶ。本稿の主目的は経路代替性の評価モデルを作成

することといえる。

(2) 経路代替性の評価基準

本研究では、経路代替性を評価するためには以下の3つが評価基準になるものと考えた。図-2に並列なネットワークモデルにより評価基準の概念を示す。

- (I) 代替ルートの経路数
- (II) 代替ルートの所要時間
- (III) 代替ルートの基準ルートに対する所要時間比

(I)として代替ルートの経路数が多いほど経路代替性は高く、また(II)として代替ルートの所要時間が短いほど経路代替性は高い。基準ルートの所要時間が異なる道路網を比較する場合、(I)と(II)では相対的な比較ができない。そこで(III)として、道路網の比較を各々の代替ルートの基準ルートに対する所要時間比によって行うものとし、所要時間比が等しいとき同等の評価を得るものと仮定した。

(3) 経路代替性の指標化

a) 経路代替性指数 (RI: Redundancy Index of highway networks between pairs of nodes) の定義

評価基準 (I) から (III) を総合的に表現する経路代替性の評価モデルを以下に定式化する。この定式化は式 (2 a) に概念的に示したように「基準ルートとその代替ルートからなる対象ルート集合は、基準ルートの何倍の機能を保証しているか」という考え方に基づいて行った。

$$R = F_s / F_o \quad (2 a)$$

R ; 経路代替性
F_o ; 基準ルートの機能
F_s ; 対象ルート集合の機能

具体的には、式 (2 a) の道路の機能に交通抵抗の逆比を対応させ、式 (2 b) を定義した。これを「経路代替性指数 (RI)」とよぶ。経路代替性指数は、着目した各都市ノードペア間において選定した基準ルートについて算出される。

$$RI = \min_i LR I_i \quad (i=1, 2, \dots, imax) \quad (2 b)$$

ここで $LR I_i = T_o / T_{s_i}$

- RI ; 経路代替性指数
- T_o ; 基準ルートの交通抵抗
- T_{s_i} ; 基準ルートのi番目構成リンク途絶時の対象ルート集合の合成交通抵抗

合成交通抵抗 T_{s_i} は以下のように計算する。

$$1 / T_{s_i} = \sum_{k_i} (1 / t_{i, k_i}) \quad (k_i=0, 1, \dots, k_{imax})$$

t_{i, k_i} ; 基準ルートのi番目構成リンク途絶時の対象ルート集合を構成する各経路の交通抵抗
交通抵抗は、所要時間で代表する。

経路代替性指数は、基準ルートを構成するi番目構成リンクの途絶を想定して設定される対象ルート集合についてLR I_iを計算し、その中で代替ルートの整備水準が最も低い道路リンクについて算出される最小値を採用することとした。具体的な計算手順は後述する。

式 (2 b) 以外にも上述の3つの評価基準を満足する評価モデルを作成することは可能である。しかし、この経路代替性指数は、3章と4章の計算事例に後述するように代替ルートの整備水準を簡明に表現する性質を有している。

b) 道路網のネットワーク構成に変化が生じた場合の事前事後比較

代替ルートの整備水準を以下のような2時点間で比較し、その向上や低下を表現できれば道路網の整備計画に有用といえる。

たとえば道路網に冬期の道路閉鎖、工事あるいは異常降雨時の通行規制等がありいくつかの道路リンクに通行止め区間が生じたとき、平常時に比べて経路代替性がどの都市間でどの程度低下したか、あるいは新規の道路が建設され道路リンクが増加したとき、建設以前に比べて経路代替性がどの都市間でどの程度向上したかを評価したい。

このような場合には、式 (2 c) と式 (2 d) に示す方法で各時点での指数の増減を調べ、2時点間での経路代替性を比較することとした。式中で (bf) は道路網に変化の生じる以前の基準時点、(af) は変化が生じた以降の比較時点を表す。

$$RI_{bf} = \min_i (T_o, bf / T_{s_i}, bf) \quad (2 c)$$

- RI_{bf} ; 時点bfでの経路代替性指数
- T_{o, bf} ; 時点bfでの基準ルートの交通抵抗
- T_{s_i, bf} ; 時点bfでの対象ルート集合の合成交通抵抗

$$RI_{af} = \min_i (T_o, bf / T_{s_i}, af) \quad (2 d)$$

- RI_{af} ; 時点afでの経路代替性指数
- T_{o, bf} ; 時点bfでの基準ルートの交通抵抗
- T_{s_i, af} ; 時点afでの対象ルート集合の合成交通抵抗

比較時点での指数は、基準時点で設定される基準ルートの所要時間を分子とし、比較時点の道路網上で設定される対象ルート集合の合成交通抵抗を分母として算出する。基準ルートの基準という用語は、評価の基準時点と

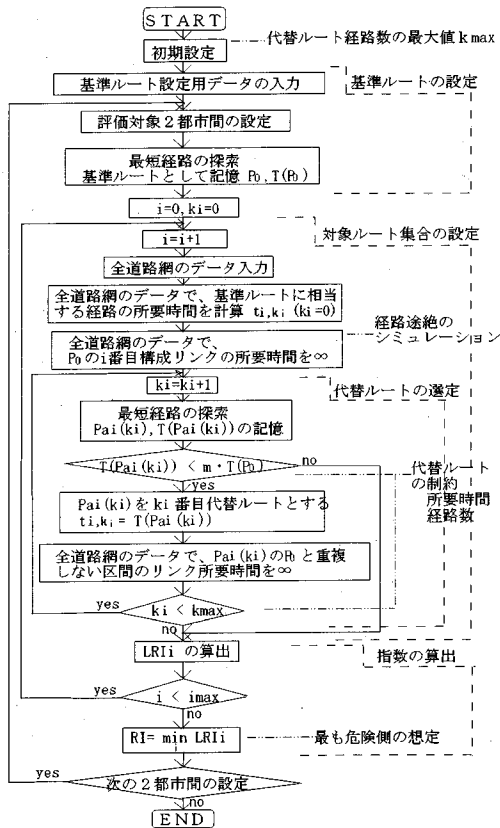


図-3 経路代替性指数の計算フロー

いう意味も含意している。

3. 経路代替性指数 (RI) の計算手順と計算例

(1) 経路代替性指数 (RI) の計算手順

経路代替性指数の算出には、現実の複雑なネットワーク上において基準ルートの設定、その各構成リンクの途絶時の代替ルートを選定し対象ルート集合を確定、指数の計算というプロセスを繰り返す必要がある。そこで以下に述べる前提のもとで、指数を効率的に算出するための計算アルゴリズムを開発した。

このアルゴリズムは、複数の都市間について経路代替性を比較分析することを目的とし、評価対象とする各都市ノードペア間に、基準ルートをそれぞれ1経路ずつ設定し、指数を1つずつ算出することとした。また基準ルートおよびその代替ルートは、所要時間の最短性に基づいて選定することとし、最短経路の探索アルゴリズムを基本として作成した。

基準ルートは、道路網を構成する全ての道路リンクの中で、あらかじめ指定した道路リンクの構成するネットワーク上で最短経路を探索し設定するという方法をとつ

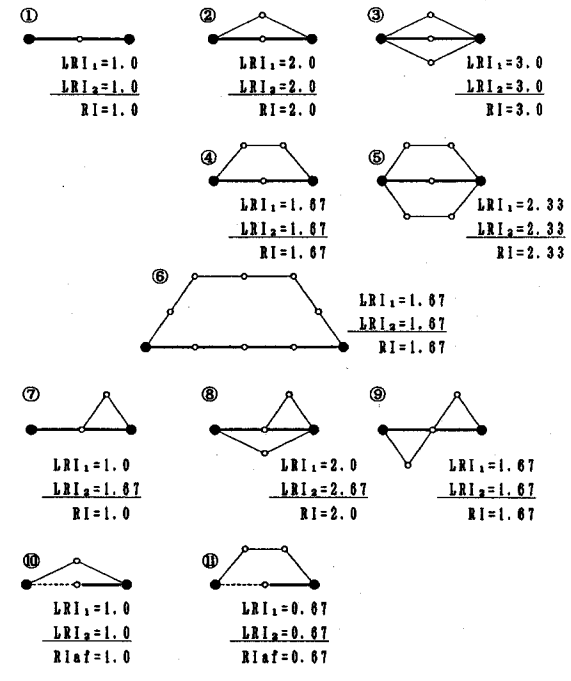
た。評価対象とする道路網が都道府県道、一般国道および高速道路からなるとき、たとえば一般国道の道路リンクをあらかじめ指定することで、全ての対象都市ノードペア間について一般国道の構成するネットワーク上で基準ルートを選定する、というように評価目的に応じて基準ルートを柔軟に設定できるようにした。

こうして設定した基準ルートの各構成リンクについて、全道路網からなるネットワーク上で逐次途絶を想定し代替ルートの選定を行い、式(2b)により指数を計算するという手順をとった。

基準ルートの設定に用いる道路リンクの所要時間データは、その代替ルートを選定し対象ルート集合を設定するために用いる全道路網のリンク所要時間データとは別に用意した。これによりネットワーク構成に変化が生じた場合の事前事後比較を行いたいときに、基準ルート設定用のデータを同一とし、全道路網のデータをネットワーク構成に変化の生じる前後について差し替えることで、式(2c)と式(2d)を同様のアルゴリズムで計算できるように工夫した。

具体的には以下のようなものである。計算フローは図-3に示した。計算結果として、各都市ノードペア間に設定された基準ルート、そのi番目構成リンクの途絶時に設定された対象ルート集合、LRIiの計算値、RIの計算値が得られる。

- ①START. 初期設定として、代替ルートの経路数の最大値(kmax)を与える。
- ②基準ルート設定用データを入力。
- ③評価対象とする2都市間の設定。
- ④基準ルート(P0)の設定。基準ルート設定用データを用い、最短経路を探索する。P0およびT(P0)(=T0)を記憶。
- ⑤ i=0, ki=0。
- ⑥ i=i+1, 対象ルート集合の設定に入る。
- ⑦全道路網のデータを入力。
- ⑧全道路網のデータで、基準ルートに相当する経路の所要時間を計算。ti, ki (ki=0)とする。
- ⑨全道路網のデータで、P0のi番目構成リンクの所要時間を∞に変更し途絶させる。
- ⑩ ki=ki+1. 最短経路を探索し、Pai(ki)とする。T(Pai(ki)) < mT(P0) (m=1.5)ならば、Pai(ki)をP0のi番目構成リンク途絶時のki番目代替ルートとして記憶。ti, ki = T(Pai(ki))とする。T(Pai(ki)) ≥ mT(P0)ならば⑫へ。
- ⑪全道路網のデータで、Pai(ki)のP0と重複しない区間のリンク所要時間をすべて∞に変更し切断する。ki < kmaxならば⑩へ。
- ⑫ i番目構成リンクに関する対象ルート集合の確定。ti, ki (ki=0,1,...,kmax)およびT0より、LRIiの算出と記憶。
- ⑬ i < imaxならば⑥へ。



● 着目するペアの都市ノード — 基準ルートの道路リンク
 ○ その他の都市ノード — その他の道路リンク
 ○ もしくは分岐ノード - - - - - 通行止め区間の道路リンク
 (但し、上図のネットワークは全て所要時間1の道路リンクからなる)

図-4 経路代替性指数の計算例

- ⑭ $RI = \min_i LRI_i$.
- ⑮ 次の2都市間を計算するならば③へ。
- ⑯ END.

連結性だけに注目すれば、基準ルートの構成リンクの途絶時に、基準ルートを除いた式(1a)を満たす全ての経路 $\{Pa \mid Pa \in P(A, B), P_0 \neq Pa, E(Pa) \not\subseteq Li\}$ が代替ルートになり得る。しかし複雑に配置したネットワークの経路を一つ一つ代替ルートとして評価対象とすることは計算過程が複雑になり困難である。そこで⑨~⑪に述べた方法で評価対象とする代替ルートを選定した。

この方法によると次のような性質をもつ経路が、各構成リンクの途絶時に、評価対象として選定される。基準ルートとその代替ルートの重複区間、代替ルート同士の重複区間、評価優先順位について以下のようなものである。

- ・代替ルートの基準ルートに対する独立性1
 基準ルートと各代替ルートは異なる経路 $(E(P_0) \neq E(Pa))$ だが、各代替ルートは基準ルートと重複する道路区間を有しても $(E(P_0) \cap E(Pa) \neq \Phi)$ よい。
- ・代替ルートの基準ルートに対する独立性2

基準ルートが、基準ルート設定用のネットワーク上ばかりではなく、全道路網上においても都市間の最短経路として成立するならば、ベルマンの最適性原理から各代替ルートが基準ルートと重複しない区間は1区間のみと

なる。
 ・代替ルート同士の独立性
 各代替ルート同士は、各々の基準ルートとの重複区間以外において、互いに重複する区間を有しない $\{E(Pa) - (E(Pa) \cap E(P_0))\} \cap \{E(Pa') - (E(Pa') \cap E(P_0))\} = \Phi$ 。

・評価優先順位
 基準ルートの各構成リンク途絶時に、所要時間の短い経路から順に最大で k_{max} 経路選定される。

(2) 経路代替性指数 (RI) の計算例

経路代替性指数 (RI) の性質を明らかにすることを目的に、所要時間1のリンクによって構成されるネットワークモデルについての計算例を図-4に示した。

図-4の例は、基準ルートを図中に太線で示した経路に設定し、評価対象とする代替ルートを最大2経路(対象ルート集合を最大3経路)とした場合である。RIとその計算過程で算出される LRI_i を図中に記した。基準ルートの左側の構成リンクを $i=1$ 、右側の構成リンクを $i=2$ としている。

以下に各ケースについて説明を加える。
 ①都市間が1経路のみで連結され代替ルートがない場合、 $RI=1.0$ となる。

②都市間がリンクを共有しない同等の所要時間の2経路で連結される場合、 $RI=2.0$ となる。このとき基準ルートの途絶時に、少なくとも1経路の代替ルートが利用できる。

③都市間がリンクを共有しない同等の所要時間の3経路で連結される場合、 $RI=3.0$ となる。このとき基準ルートの途絶時に、少なくとも2経路の代替ルートが利用できる。

①②③の例は、代替ルートの経路数が多いほど評価は高くなるという1番目の評価基準を満足する様子を表している。このように基準ルートと代替ルートが同等の所要時間で都市間を連結するとき、指数は経路数に一致し直感的に理解しやすい。

④基準ルートに比して代替ルートの所要時間が長い場合である。代替ルートの所要時間が、その上限として式(1a)で設定した基準ルートの1.5倍のとき $RI=1.67$ となる。

⑤基準ルートに対し代替ルートが2経路利用可能であり、基準ルートに対して2経路の代替ルートが各々1.5倍の所要時間をもつ場合である。このとき $RI=2.33$ となる。

②と④また③と⑤の例は、代替ルートの所要時間が短い方が評価は高くなるという2番目の評価基準を満足する様子を表している。

⑥上記の④と相似で基準ルートに対する代替ルートの

所要時間比が等しい場合である。R I = 1.67となり④のR Iに等しく、3番目の評価基準を満足する様子を表している。

⑦基準ルートの左側の構成リンクが途絶したとき代替ルートが存在しない (L R I₁ = 1.0)。また右側の構成リンクが途絶したとき1経路の代替ルートを有する (L R I₂ = 1.67)。危険側を想定し最小値をとりR I = 1.0としている。

⑧基準ルートの左側の構成リンクが途絶したとき1経路の代替ルートを有する (L R I₁ = 2.0)。また右側の構成リンクが途絶したとき2経路の代替ルートを有する (L R I₂ = 2.67)。したがってR I = 2.0となる。

⑨基準ルートの左側の構成リンクが途絶したとき1経路の代替ルートを有する (L R I₁ = 1.67)。また右側の構成リンクが途絶したとき1経路の代替ルートを有する (L R I₂ = 1.67)。したがってR I = 1.67となる。

⑩⑪は、道路網のネットワーク構成に変化が生じた後の計算例である。②と④のケースについて通行止め区間が基準ルートの左側の構成リンクに発生した場合を想定し、式(2d)により指数を計算している。⑩⑪ともに評価時点で基準ルートが成立しないが、基準時点における基準ルートの所要時間を式(2d)の分子に用いて指数を計算することで、②④との比較を明確にし経路代替性の低下を表現している。

なお本節の計算例および4章の適用事例において、通行止め区間の指定を必要とする場合は、ネットワークモデルを構成する道路リンクを単位として行った。これは通行止め区間が、道路リンクのたとえ一部分に発生した場合でも、その道路リンクの交通が確保できないことによる。

⑩基準ルートが成立しないが、それと同等の所要時間の代替ルートが1経路存在するとき、R I = 1.0となる。

⑪基準ルートが成立しないが、その1.5倍の所要時間の代替ルートが1経路存在するとき、R I = 0.67となる。

以上のように経路代替性指数は、基準ルートとその途絶時の代替ルートを、仮定したルールにしたがって選定し、それらが構成する道路網の整備水準を簡明に表現しようとするものである。

4. 適用事例

(1) 冬期閉鎖区間の発生時および都市圏と港湾間の経路代替性評価

a) 評価目的

北海道札幌市に隣接する後志地域の道路網を評価対象とし、その整備水準を経路代替性という観点から評価する。

この地域の道路網は、国道に2路線と主要道に1路

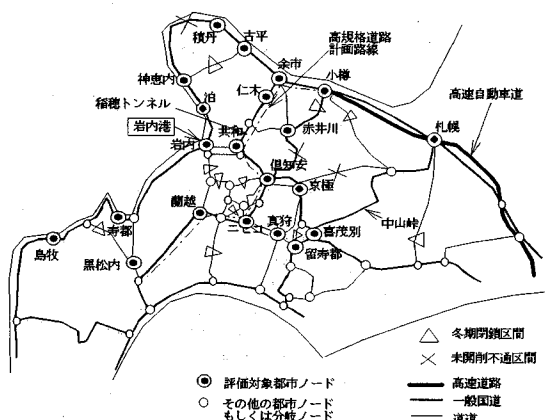


図-5 評価対象道路網(北海道後志地域)のネットワークモデル

線の不通区間をもち、冬期には積雪や路面凍結のため通行止めになる区間が数多く存在する。道路のネットワークとしての構成が十分とはいえない地域である。

そこで平常時の道路網について経路代替性を評価するとともに、冬期閉鎖区間の発生時および現在計画段階にある高規格道路整備後に経路代替性がどの程度低下あるいは向上するかをいくつかの前提条件の下で調べた。

また大型フェリーが就航し、札幌および小樽都市圏との道路交通の信頼性が近年重要視される岩内港に注目し、札幌・小樽と岩内港間の道路網の整備水準について考察した。

b) 評価対象道路網

評価対象道路網は、高速道路と一般国道に加えて市町村界を横断する道道を中心に図-5のようにモデル化して設定した。市町村内にある多数の細かな道路網を除外し簡略化している。

評価対象とする21の都市ノードは、市街地もしくは市街地近郊の交差点に設けた。また道路リンクには道路時刻表を用いて所要時間を与え、データの無い道路リンクについては距離比で推定して与えている。

基準ルートは、一般国道および道道の構成するネットワーク上で設定した。また評価対象とする代替ルートは最大2経路(対象ルート集合を最大3経路)とした。

c) 評価結果

全21市町村間について経路代替性指数(R I)を算出した結果を表-1から表-3に示す。

表-1は、現状道路網での平常時についての計算結果である。代替ルートの選定は、既設の高速道路、一般国道、道道からなる全道路網で行っている。この結果から、各市町村間について経路代替性が確保されているか否かを指摘することができる。表-1でたとえばR I = 1.0の市町村間は、基準ルート1経路のみで連結され、

表-4 札幌・小樽-岩内港間 経路代替性指数の計算結果

		岩内港		
		現状道路網 平常時	冬期閉鎖区間 を削除	高規格道路 計画路線を付加
札幌	LRI ₁	3.1	3.1	3.4
	LRI ₂	3.1	1.0	3.4
	LRI ₃	3.1	3.0	3.4
	LRI ₄	3.1	3.0	3.4
	LRI ₅	2.8	1.9	3.4
	LRI ₆	3.1	2.2	3.3
	RI	2.8	1.9	3.3
小樽	LRI ₁	2.0	1.0	3.3
	LRI ₂	2.0	1.8	3.3
	LRI ₃	2.0	1.8	3.3
	LRI ₄	1.0	1.0	2.3
	LRI ₅	2.0	2.0	2.3
	RI	1.0	1.0	2.3

(上表の計算結果は、表-1~表-3に示した札幌・小樽-岩内間の各計算結果に対応する)

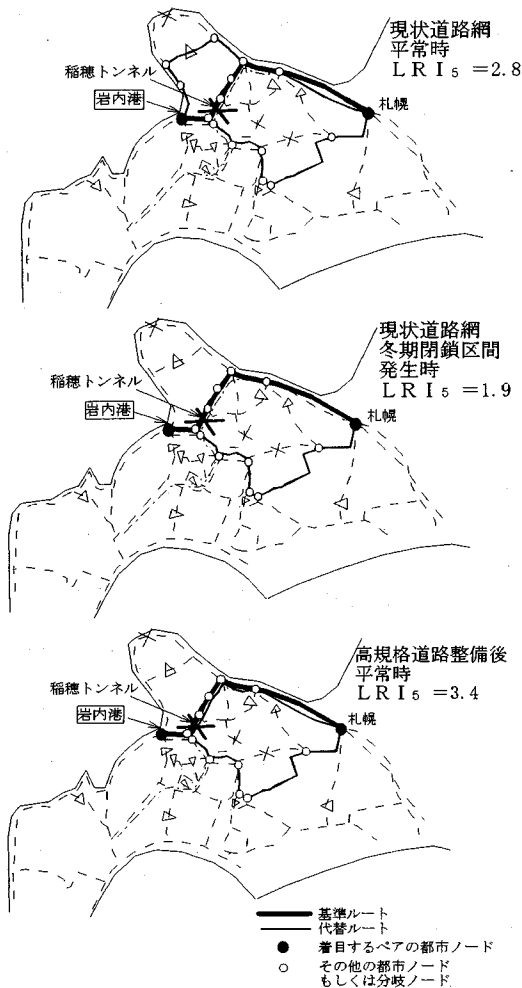


図-6 札幌-岩内港間で評価対象として選定された代替ルート例 (i=5の場合)

その途絶時に代替ルートを有しない場合である。

札幌とその他の市町村間のRIに注目すると、積丹と古平以外の市町村からは比較的高い経路代替性が確保されていることが示されている。これらの市町村からは基準ルートが途絶したとしても、代替ルートが1経路以上存在する。一般国道のネットワークが経路代替性の確保に寄与している様子が窺える。特に札幌-小樽間は、基準ルートが一般国道上に選定され、その代替ルートとして高速道路利用の経路および一般国道と道道からなる経路が選定された。合計3経路が存在し、かつ高速道路利用の代替ルートが、一般国道利用の基準ルートよりも所要時間が短いためRI=3.4と高い値を示している。

表-2は、現状道路網での冬期閉鎖区間発生時についての計算結果である。全道路網から冬期閉鎖区間に相当する道路リンクを削除したネットワーク上で、代替ルートの選定を行った。なお本分析では、積雪や降雪による所要時間の増加は考慮していない。

表-2の結果を表-1と比較することで、冬期閉鎖区間発生時に経路代替性が低下している都市間を指摘することができる。RI=0.0の市町村間は、基準ルートの途絶時に基準ルートとその代替ルートが共に成立しない場合である。また、RI=1.0の市町村間は、基準ルートもしくはそれと同等の所要時間の代替ルート1経路のみで連結される場合を表している。

札幌とその他の市町村間とのRIに注目すると、10の市町村間で指数が1.0から0.6減少している。また1経路のみで連結される市町村間が2から9へ増加していることが示される。

表-3は、高規格道路が図-5に示す計画路線に整備されたことを想定した平常時の道路網についての計算結果である。現状での全道路網に高規格道路の計画路線を加えたネットワーク上で、代替ルートを選定した。

表-3は新規の道路整備に伴う経路代替性の向上を、指数により表現した例として示した。表-1との比較により経路代替性の向上する都市間を指摘できる。計画路線は一般国道と平行するため、沿線の市町村間で特に指数が増加している。たとえば小樽とその他の市町村間のRIに注目すると、11の市町村間で指数が1.0以上増加している。その内5の市町村間は、表-1の現状道路網ではRI=1.0であり、基準ルートの途絶時に代替ルートを有さない場合のあることが指摘された都市間である。道路の新規整備により、代替ルートの不備が解消される様子を表している。

また表-4に、札幌・小樽-岩内港間のRIと、RIの計算過程でi番目構成リンクの途絶を想定して算出されるLRI_iを示した。LRI_iは基準ルートの各構成リンク途絶時の経路代替性を表している。

表-4から現状の道路網において、LRI_iの最小値

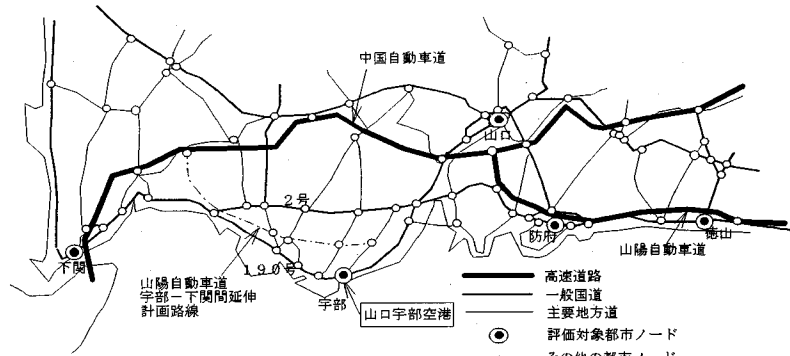


図-7 評価対象道路網（山口県南西部）のネットワークモデル

表-5 山口宇部空港へのアクセスにおける経路代替性指数の計算結果

山口宇部空港	
山口	1.8
防府	2.0
徳山	2.0
下関	1.9

(基準ルートおよび代替ルートは、高速道路、其他有料道路、一般国道、県道上で設定)

表-6 山口宇部空港-下関間経路代替性指数の計算結果

	山口宇部空港		
	現状道路網	宇部-下関間山陽自動車道延伸計画路線を付加	
下関	LRI ₁	2.0	2.3
	LRI ₂	2.6	3.0
	LRI ₃	2.9	3.5
	LRI ₄	2.8	3.5
	LRI ₅	2.8	3.5
	LRI ₆	2.7	3.4
	LRI ₇	2.7	3.4
	LRI ₈	1.9	3.3
RI	1.9	2.3	

(基準ルートは、現高速道路、其他有料道路、一般国道、県道上で設定；代替ルートは、高速道路計画路線を付加した道路網上で設定)

として定義したRIを与える構成リンクは、札幌-岩内港間で $i = 5$ 、小樽-岩内港間で $i = 4$ であることが示される。これらはともに図-5に示した稲穂トンネルがある道路リンクの途絶時に相当している。特に小樽-岩内港間では $RI = 1.0$ であり、この道路リンクが途絶したときに平常時においても代替ルートが存在しないことが指摘される。

札幌-岩内港間について、この稲穂トンネル部の道路リンクの途絶を想定したときに、評価対象として選定された代替ルートを図-6に示した。現状道路網の平常時において3経路が確保され $LRI_5 = 2.8$ となるが、冬期閉鎖区間発生時では古平-神恵内経由の道道が閉鎖とな

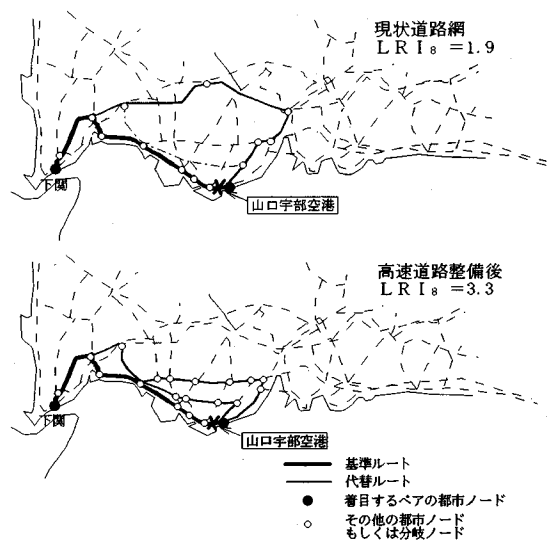


図-8 山口宇部空港-下関間で評価対象として選定された代替ルートの例 ($i = 8$ の場合)

り通行できないため2経路となり $LRI_5 = 1.9$ に減少している。この2経路の内の下側の国道は、途中で峠部(中山峠)を有している。高規格道路整備後では3経路が確保され $LRI_5 = 3.4$ となることが示される。

以上のように指数の適用により、現状道路網において都市間のどの道路リンクが途絶したときに交通の確保が困難になるか、また新規の道路整備計画がその解消に果たす役割を評価することができる。

(2) 空港アクセスの経路代替性評価

a) 評価目的

道路交通への依存の高い地域の空港を例に、周辺都市からのアクセスにおける経路代替性を評価する。

このような空港の例として、山口宇部空港を対象とした。山口宇部空港への軌道系交通は在来線が1路線のみであり、周辺都市からの空港利用は道路交通に多くを依

存せざるを得ない状況にある。

そこで山口県内で、比較的人口規模の大きな下関、山口、防府、徳山の各市から、山口宇部空港へアクセスする際の経路代替性について調べた。また山陽自動車道の延伸区間として工事実施計画が認可された下関―宇部間高速道路の整備効果について考察を加えた。

b) 評価対象道路網

評価対象道路網は高速道路、一般国道、主要地方道とし図-7のようにモデル化して設定した。

評価対象とした地域は、図-7に示した道路以外にも県道等の道路が数多く整備されているが、空港アクセスという交通目的を考慮し対象とする道路網を限定して考察した。

この例で基準ルートは、既設の高速道路、その他の有料道路、一般国道および県道の道路リンクにより構成される全道路網上で設定した。また評価対象とする代替ルートは最大2経路（対象ルート集合を最大3経路）とした。

c) 評価結果

表-5に山口県内4都市から山口宇部空港へアクセスするときのR Iの計算結果を示した。代替ルートの選定は、基準ルートの設定と同様の全道路網上で行った。

どの都市からもR Iは2.0に近く、基準ルート途絶時に最低でも同等の代替ルートが1経路用意されていることが示される。

表-6に下関―山口宇部空港間山陽自動車道延伸区間の整備前後におけるR IとLR I_iを示した。整備後の指数の計算は、現状での全道路網に高速道路計画路線を加えたネットワーク上で代替ルートを選定した。表-6よりLR I_iは現状道路網において1.9~2.9、高速道路延伸区間整備後で2.3~3.5であり、基準ルートのどの構成リンクの途絶時にも代替ルートが1もしくは2経路用意されることが示される。

図-8に現状道路網でのR Iを与えるi=8の道路リンクの途絶時に、評価対象として選定された代替ルートを示した。基準ルートとしては、一般国道(190号)を利用の中心とした所要時間75分程度を要する経路が選定されている。他の3市からのアクセスのように高速道路やその他の有料道路を十分に利用できない。この基準ルートを高速道路と一般国道(2号)がバックアップしている。

図-8上図の現状道路網では、代替ルートとして中国自動車道経由の1経路のみが選定された。一般国道2号経由の経路は、基準ルート以外でこの代替ルートと重複する区間をもつため選定されなかった。そのためLR I₈=1.9となり相対的に低くなっている。また図-8下図の高速道路整備後は新規整備路線に加え、一般国道2号経由の2経路の代替ルートが選定されLR I₈=3.3とな

っている。

このように下関―山口宇部空港間の道路網は、経路代替性という観点からみた場合、現状においても比較的高い道路整備水準が確保されているといえるだろう。現状での課題は、基準ルートあるいは代替ルートとして選定される経路の所要時間が、いずれも長いことにある。山陽自動車道延伸後は、45分程度からなる高速道路を最短経路に、それを中国自動車道と一般国道が支えるという道路網構成に改善される。

5. 成果と課題

本研究では、道路途絶時に機能する代替ルートの整備水準に着目し、その評価法を考案した。代替ルートの整備水準に関する評価基準を設定し、これに基づく評価モデルとして経路代替性指数を作成し、その計算手順を示すとともに地域道路網への適用を試みた。

経路代替性指数を都市ノード間で算出することで、代替ルートの整備水準の低い都市間を指摘することができた。また任意の都市間についての指数の計算過程から、都市間の経路のどの道路リンクの途絶時に、代替ルートの利用も含めた交通の確保が最も困難になるかを調べられることを示した。さらに道路網を構成する道路リンクに増減を加え、通行止め区間の発生や新規整備をシミュレートすることで、道路整備計画を途絶への対応力という観点から評価できることを例示した。

評価対象道路網として、対象地域の全ての道路網を考慮することはネットワークが大きくなると困難なため、簡略化せざるを得ない。この評価対象道路網が確定すれば、一定の手順にしたがって指数が算出される。したがって指数の適用にあたって、評価目的に応じた道路網を設定することにまず注意を必要とする。

また本稿で用いた指数は、まだいくつかの改善すべき点をもっている。指数の計算段階で代替ルートの所要時間は基準ルートのm倍以下と仮定した。隣接する都市間については、基準ルートが短く、代替ルートはそれに比し長くなるため、指数は比較的低くなる傾向をもつことになる。また代替ルートとして、基準ルート以外において代替ルート同士が重複区間をもたないものを選定したため、比較的短い区間で重複する場合もどちらか1経路のみが評価対象とされる。これらはいずれも実際の複雑な道路網上で評価対象とする代替ルートを確定するために設けた仮説である。この設定についてはさらに検討の余地があるものとする。道路途絶に伴う迂回交通の発生が、代替ルートの所要時間に影響を与える場合等の交通量を考慮したモデル化についても今後の課題としたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北海学園大学五十嵐日

出夫教授にご指導を賜った。また苫小牧高専高橋清助教授に有益な示唆をいただいた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 南正昭, 佐藤馨一, 五十嵐日出夫: 道路ネットワークの構成と代替性評価に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第47号, pp. 559-564, 1990.
- 2) 南正昭: 都市間道路ネットワークの代替性評価に関する研究, 土木計画学研究講演集, No. 14 (1), pp. 295-300, 1991.
- 3) 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.
- 4) 戸松稔, 西井和夫, 津島康弘: 密接関連性に着目した街路整備によるネットワーク形成に関する定量評価分析, 土木学会論文集, No. 494/IV-24, pp. 87-95, 1994.
- 5) 若林拓史, 亀田弘行: ロマ・プ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.
- 6) 野中保雄, 島岡淳: 冗長系, 日科技連, p. 38, 1990.
- 7) 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.

(1994. 11. 30 受付)

AN EVALUATION METHOD FOR MEASURING PERFORMANCE LEVELS OF ALTERNATE ROUTES ON HIGHWAY NETWORKS

Masaaki MINAMI, Shin'ei TAKANO and Keiichi SATOH

The purpose of this paper is to propose an evaluation method for measuring performance levels of alternate routes on highway networks. A mathematical model, called "Redundancy Index", is defined between given pairs of nodes. It is intended to indicate the performance levels of alternate routes which are used when some part of the highway network is damaged. An efficient algorithm is developed for its computation. Empirical studies are presented by applying this index to regional highway networks in Hokkaido and Yamaguchi prefecture and the applicability of this method is described.