

信頼度の導入による循環路網の評価

誌名	森林利用学会誌
ISSN	13423134
著者	鈴木, 秀典 有賀, 一広 岩岡, 正博 田坂, 聡明
巻/号	25巻4号
掲載ページ	p. 195-206
発行年月	2010年10月

論文

信頼度の導入による循環路網の評価

鈴木秀典*・有賀一広**・岩岡正博***・田坂聡明**

鈴木秀典・有賀一広・岩岡正博・田坂聡明：信頼度の導入による循環路網の評価。森利学誌25(4)：195～206，2010。循環路網には，交通利便性の向上および代替路を確保する機能がある。循環路が多く形成される高密路網においても，これらの機能をより高度に発揮することが路網計画の重要な視点になる。本稿では一般道路網などの解析・評価に用いられている信頼性解析によって高密路網の代替路機能を評価した。その結果，代替経路の多少，および代替経路が最短経路に比べてどの程度延長しているかという代替路の有効性を，数値により比較することができた。また，信頼性に路線の接続構造が関係しており，ハシゴ型の接続構造が高い信頼性となることが分かった。本手法を導入することによって，高密路網のような循環路を含む路網の代替路機能をより適正に評価することができる。また，遮断の際には，車両の迂回，方向転換などを強いられ，作業の生産性や安全性が低下するため，本手法によって，このような視点からの路網計画を行うことができる。また，地域交通網の一翼を担う林道においても，本手法を適用することによって，より高い代替路機能を持つ道路網整備に貢献できると思われる。

キーワード：信頼性，循環路，高密路網，代替路

Hidehiko SUZUKI, Kazuhiro ARUGA, Masahiro IWAOKA and Toshiaki TASAKA : **Evaluation of circular road network by reliability analysis. J. Jpn. For. Eng. Soc. 25(4): 195~206, 2010.** Circular roads have two functions: improve traffic flow by shortening the route distance and provide an alternative route to a destination. High-density road networks in forests consist of many circular roads, and it is important to assess their function during route planning. We evaluated the alternative functions of a high-density road network by a reliability analysis that is used to analyze public road networks. The following results were obtained. The alternative function was evaluated qualitatively in terms of the number and efficiency of alternative routes. The efficiency increased with shorter length of the alternative routes. Further, it was found that the reliability of the network was related to its structure: a network with a ladder-shaped structure exhibited high reliability. It was confirmed that the alternative function of circular road networks can be evaluated effectively by the reliability analysis. This analysis can also be used to evaluate the productivity and safety of logging in a forest with a high-density road network, because these are guaranteed by a high reliability network in which a driver is not forced to take a detour or reverse the vehicle. The reliability analysis can also be applied to forest roads as they play an important role in local traffic systems, especially in the case of a disaster; this analysis contributes to the development of road networks with a reliable alternative function.

Keywords : reliability, circular road, high-density road network, alternative route

連絡先 (Corresponding author) : 鈴木秀典 (Hidehiko SUZUKI) E-mail : hidesuzu@ffpri.affrc.go.jp

* 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

** 宇都宮大学農学部 Fac. of Agric., Utsunomiya Univ., Utsunomiya 321-8505

*** 東京農工大学大学院農学研究院 Inst. of Agric., Tokyo Univ. of Agric. and Tech., Fuchu 183-8509

1. はじめに

素材生産コストの低減や作業の軽労・安全化のために路網を活用した作業システムが取り入れられ、各地で高密路網の開設が進められている。路網密度が高くなるに従い、路線の分岐、接続によって循環路網が形成されてくるが、循環路網の形成によって使用効率がよくなる(10)ことが期待できるため、高密路網の計画にあたっては、循環路の効果を適正に評価し、高い機能を持つ接続構造とすることが望ましい。これまで、 α 指数などを用いた循環路網の評価(12)、やホートンの法則による林道網形態の解析(9)が行われており、路網の発達度や分岐・接続構造などについて、評価、解析できるようになっている。一方、循環路網の機能には、路網内各地点間の交通便利性の向上(以下、交通機能)および切断に対する交通の確保(以下、代替路機能)(13)があるとされる。交通機能に関しては、この機能に着目した循環路網の計画手法(8, 13)や新たな評価指標の導入(17)がこれまでに検討されており、効果的な計画法や一部の機能に関する定量的な評価ができるようになってきている。一方、代替路機能に関しては、林業用路網を対象とした定量的な評価指標がないために比較検討ができず、路網配置計画などにおいても考慮されていない状況にある。そこで本稿では、一般交通網における代替路機能の評価に用いられてきた信頼性解析を導入し、林業用路網の代替路機能に関する評価を行う。また、得られた評価値から代替路機能の高い接続構造に関する検討を行う。

2. 解析対象路網および信頼性解析の方法

2.1 解析対象路網の概要

循環路網が多く形成されている高密路網を対象として解析を行った。対象としたのは、秋田県湯沢市私有林2か所、茨城県常陸太田市私有林、栃木県大田原市国有林、群馬県安中市国有林、高知県四万十町町有林3か所の計5地域8か所である(表-1, 図-1)。路網密度は169~271m/haとなっているが、図に示した対象地域外にある路線は、この密度には含まれていない。これらの路網では、間伐作業や択伐による生産が行われているが、多くの路網では作業頻度が高く、継続的に使用されているため、きめ細かな維持管理が行われている。

2.2 信頼性解析

信頼性とは「システム、機器、部品等の機能の時間的安定性を表す度合、または性質(16)」と定義され、確率としての信頼度は「システム、製品あるいは部品が、ある規定の条件のもとで意図する期間中、規定の機能を(故障なしに)遂行する確率(16)」と定義される。これまで電子工学や機械などの分野で発達してきた信頼性解

析は、近年では、耐震工学の分野などで、ライフライン系と呼ばれる電気、ガス、水道などのエネルギー供給網および交通網(5)についての解析が盛んに行われるようになってきた。道路網については、災害時の信頼性を解析した事例(1, 6)や、整備水準の一指標(18)として信頼性解析を取り入れた検討が行われている。

信頼性解析では、ネットワークにおける2点間の連結信頼性を得ることができる。道路網における信頼性とは、2点をそれぞれ始点、終点とすると、始点から終点へ到達できる可能性、あるいはその移動が遮断されない可能性として考えることができる。よって、循環路網が形成され、到達経路が複数になるほど信頼性も向上することとなる。

信頼性解析では、ある部分における遮断(故障など)が発生する確率は、他の部分の遮断に影響を受けず、完全に独立であるとの仮定に立っている。路網における遮断の原因として災害や災害に起因する路体の損壊などを考えると、ある路線で遮断が起こったとき、他の路線においても遮断が発生する確率が高くなると考えられ、互いの遮断確率が完全に独立しているとはいえない。よって従属事象として遮断確率を考える必要がある。しかし、後述するとおり近似値によって信頼度を求めており、精度の高い遮断確率を用いても得られる信頼度の精度が上がるわけではないこと、また、現実的な遮断確率についての知見がこれまでに得られていないこと、遮断の原因として、独立事象として考えられる事項、つまり作業ポイントや土場としての利用も想定していることから、各路線における遮断確率が互いに独立であるとの仮定において解析を進めている。

2.3 解析方法

2.3.1 ミニマルパス・ミニマルカット グラフにおける経路をパスとし、グラフを構成する線の集合を全体集合とすると、2点間を接続するために必要十分となる部分集合をミニマルパスと呼ぶ(14)。また、グラフにおけるパスの最初の点を始点、最後の点を終点とし、始点を含み終点を含まない点の部分集合 S を考えると、 S から出て S 以外の点に向かう線の集合をカット(7)と呼ぶ。このとき、もとのグラフから線を削除して始点終点間を非接続とするために必要十分となる削除線の部分集合をミニマルカットと呼ぶ(14)。例えば、図-2に示すようなグラフがあるとき、点 i から j へのミニマルパスは、線番号 $\{1,2\}$, $\{1,5,4,6\}$, $\{3,4,6\}$, $\{3,5,2\}$ で表され、ミニマルカットは、 $\{1,3\}$, $\{2,4\}$, $\{2,6\}$, $\{1,5,4\}$, $\{1,5,6\}$, $\{2,5,3\}$ で表される。ミニマルパスの1つが機能していれば想定する2点間の通行は確保されることとなり、逆にミニマルカットが1つでも発生すると通行不能となる。点 i から j への通行の可否は、ミニマルパス・カットを

それぞれ図-3, 4に示すような並列, 直列型回路図で示して考えることができる (14)。

2.3.2 信頼性解析のための構造関数 路網における線 a の状態を二値変数 x_a で表し, 線 a が通行可能なときに $x_a = 1$, 不可能なときに $x_a = 0$ とする。このとき, 路網の2点間の状態をベクトル $x=(x_1, x_2, \dots, x_k)$ (ただし, k は2点間の総線数) によって表すとすると, 2点間の状態 (ϕ) も, 構造関数 $\phi(x)$ によって, 通行可能な場合に $\phi(x) = 1$, 不可能な場合に $\phi(x) = 0$ と表される。

路網などのグラフは, 直列・並列経路の組み合わせで表現することができ, それぞれの構造関数は以下のように

に表せる (14)。

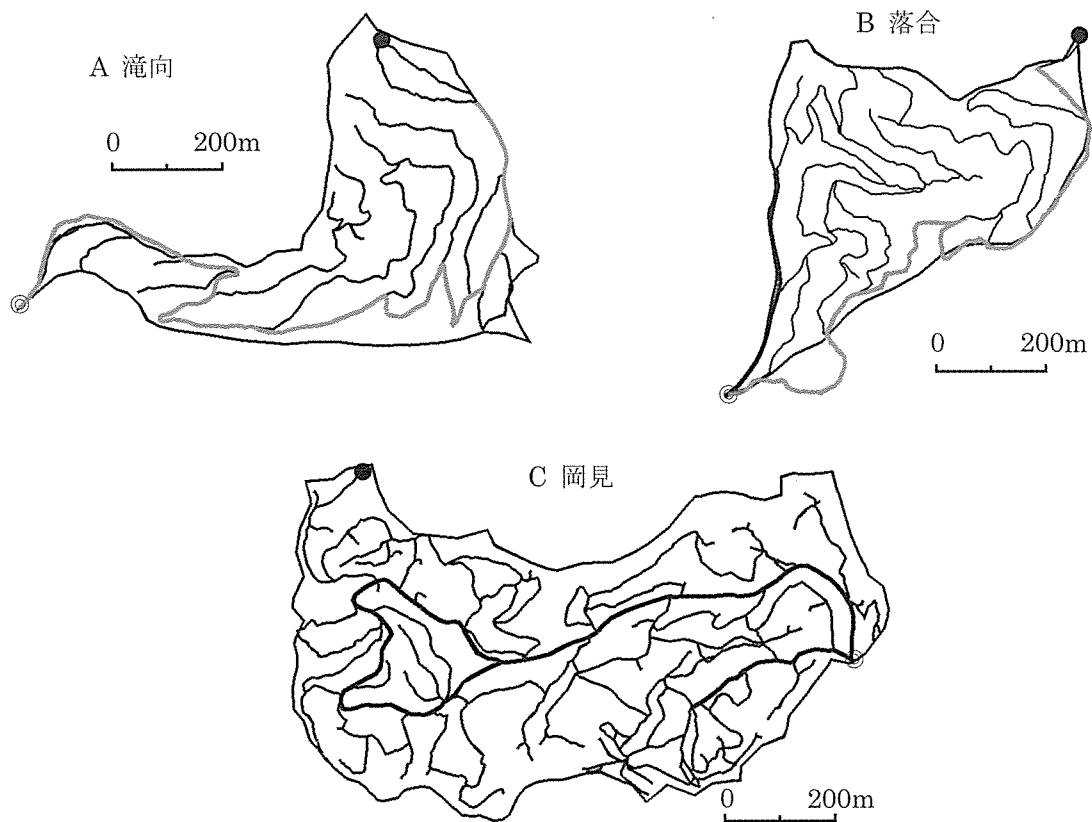
$$\phi_1(x) = \prod_{a=1}^k x_a \tag{1}$$

$$\phi_2(x) = \prod_{a=1}^k x_a \equiv 1 - \prod_{a=1}^k (1 - x_a) \tag{2}$$

このとき, $\phi_1(x)$ を直列経路の構造関数, $\phi_2(x)$ を並列経路の構造関数, x_a は線 a の状態を表す二値変数とし, Π , \cup はそれぞれ論理積 (AND結合), 論理和 (OR結合) とする。

表-1 調査地の概要

路網記号	所在地	名称	平均傾斜 (度)	面積 (ha)	路網密度 (m/ha)	巡視係数	点間迂回率	起点からの迂回率
A	秋田県湯沢市	滝向	27.1	23.1	214.4	1.58	3.0	1.9
B	〃	落合	28.0	20.5	267.1	1.45	3.4	1.4
C	茨城県常陸太田市	岡見	14.3	45.2	267.3	1.39	1.7	1.4
D	栃木県大田原市	磯上	27.2	41.3	222.3	1.73	3.3	1.9
E	群馬県安中市	増田山	22.9	29.3	169.0	1.42	2.2	1.7
F	高知県四万十町	井ノ谷山	32.1	17.4	271.1	1.38	2.1	2.0
G	〃	轟山	31.0	23.9	248.3	1.46	2.2	2.2
H	〃	重木山	31.9	35.8	215.7	1.30	2.0	2.1



黒太線は一般道・林道, 灰色線は基幹作業道, 黒細線は支線作業道を表し, ◎は路網の起点, ●は起点からの移動距離が最も大きい点を表す。

図-1a 解析対象路網

ミニマルパスの総数を p とし、ミニマルパスを P_1, P_2, \dots, P_p とすると、ミニマルパス $P_s (1 \leq s \leq p)$ の構造関数 $(\alpha_s(x))$ は直列型であるので、

$$\alpha_s(x) = \prod_{a \in P_s} x_a \quad (3)$$

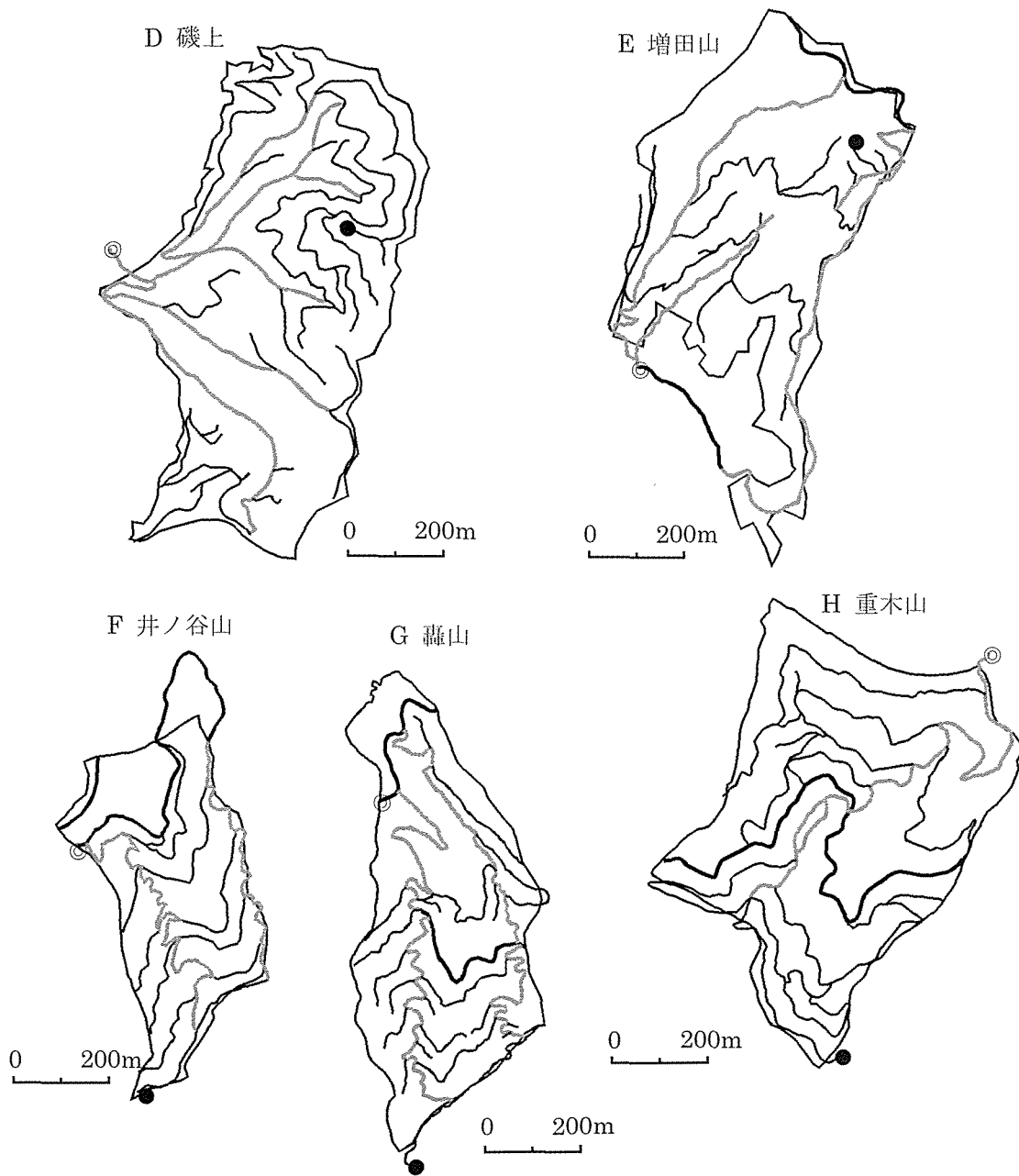
となる。グラフ全体はミニマルパス P_1, P_2, \dots, P_p の並列型であるため、システムの構造関数は、

$$\phi(x) = \prod_{s=1}^p \alpha_s(x) = \prod_{s=1}^p \prod_{a \in P_s} x_a \equiv 1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} x_a) \quad (4)$$

と表せ、図-2の例では、

$$\phi(x) = 1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_1 x_5 x_4 x_6)(1 - x_3 x_4 x_6)(1 - x_3 x_5 x_2) \quad (5)$$

となる。同様に、ミニマルカットの総数を c とし、ミニ



黒太線は一般道・林道，灰色線は基幹作業道，黒細線は支線作業道を表し，
◎は路網の起点，●は起点からの移動距離が最も大きい点を表す。

図-1b 解析対象路網

マルカットを C_1, C_2, \dots, C_c とすると、ミニマルカット $C_u (1 \leq u \leq c)$ の構造関数 ($\beta_u(x)$) は並列型であるので、

$$\beta_u(x) = \prod_{a \in C_u} x_a \equiv \{1 - \prod_{a \in C_u} (1 - x_a)\} \quad (6)$$

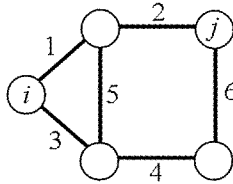
となる。グラフ全体はミニマルカット C_1, C_2, \dots, C_c の直列型であるため、システムの構造関数は、

$$\phi(x) = \prod_{u=1}^c \beta_u(x) = \prod_{u=1}^c \prod_{a \in C_u} x_a \equiv \prod_{u=1}^c \{1 - \prod_{a \in C_u} (1 - x_a)\} \quad (7)$$

と表せ、図-2の例では (8) 式で求められる (14)。

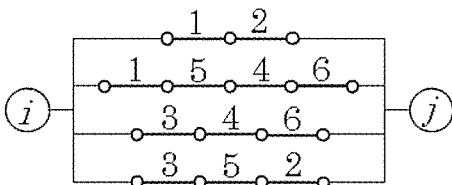
$$\begin{aligned} \phi(x) = & \{1 - (1 - x_1)(1 - x_3)\} \times \{1 - (1 - x_2)(1 - x_4)\} \\ & \times \{1 - (1 - x_2)(1 - x_6)\} \times \{1 - (1 - x_1)(1 - x_5)(1 - x_4)\} \\ & \times \{1 - (1 - x_1)(1 - x_5)(1 - x_6)\} \times \{1 - (1 - x_2)(1 - x_5)(1 - x_3)\} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3.3 信頼度 事象Aの生起する確率を $\Pr\{A\}$ で表すとき、線 a の信頼度 r_a は、(9) 式または (10) 式で表すことができる。



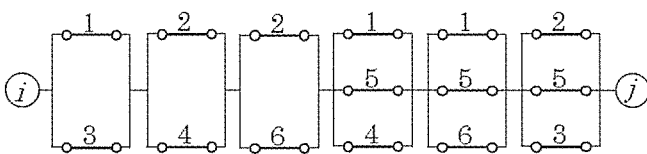
数字は線番号を表す。

図-2 グラフによる路網の表現



数字は線番号を表す。

図-3 ミニマルパスの表現



数字は線番号を表す。

図-4 ミニマルカットの表現

$$\Pr\{x_a = 1\} = r_a \quad (9)$$

$$\Pr\{x_a = 0\} = 1 - r_a \quad (10)$$

よって、(11) 式に示すとおり、 r_a は x_a の期待値 $E[x_a]$ として表すことができる。同様に、2点間の信頼度 R は、構造関数 $\phi(x)$ の期待値 $E[\phi(x)]$ で表される (14)。

$$E[x_a] = 1 \times \Pr\{x_a = 1\} + 0 \times \Pr\{x_a = 0\} = r_a \quad (11)$$

$$R = \Pr\{\phi(x) = 1\} = E[\phi(x)] \quad (12)$$

信頼度 R を計算する (12) 式中には同一の確率変数が複数現れ、この確率の重複計算を避けるために論理積に関するブール演算が必要となり (14)、ブール代数のべき等律 ($X \cdot X = X$) を用いなければならない。また、信頼度の計算には (4) 式または (7) 式に適用するための当該点間のすべてのミニマルパス・カットを必要とするため、ネットワークの規模が大きくなるとミニマルパス・カットの総数は非常に多くなり、膨大な計算が必要となる。そこで本論文では、次項に示す近似計算法により点間信頼度を求めることとした。ただし、いくつかの路網については厳密値を求め、得られた近似値の誤差についても検討することとする。

2.3.4 交点法 点間信頼度の近似解を求める方法の一つとして交点法 (2, 3) がある。この方法では、以下の式による近似計算を考える。

$$R_p = \prod_{s=1}^{p'} \prod_{a \in P_s} r_a \quad (13)$$

$$R_c = \prod_{u=1}^{c'} \prod_{a \in C_u} r_a \quad (14)$$

ここで、 R_p, R_c をそれぞれ点間信頼度の近似解とし、ミニマルパス・カットの総数 p, c の代わりに、それぞれ $p' (0 < p' < p), c' (0 < c' < c)$ を用いることとする。これらの式では、信頼度が確率変数 x_a の期待値ではなく、信頼度 r_a で与えられるため、ブール演算が不要になる。 R_p は、 p' が小さいときには信頼度の下限値を与え、 p' が大きくなるにつれ R_p の値も大きくなり、 p' が p に一致すると信頼度の上限値を与える。また、 R_c では、 c' が小さいときには信頼度の上限値を与え、 c' が大きくなるにつれ R_c の値が小さくなり、 c' が c に一致すると下限値を与える (18)。上・下限値とは、信頼度がこの値以上ではない、あるいはこの値以下ではないことを保証する数値である (2)。よって、 p' あるいは c' によって得られる各上・下限値の間に信頼度の厳密解があることとなる。このとき、

パス数 (p') を増やしていきながら信頼度の近似解を求めていくと、信頼度を与える増加曲線が得られることとなり、同様に、カット数 (c') を増やしていくと、信頼度の減少曲線が得られる。これらの曲線が交差する点を点間信頼度の近似解とするのが交点法である。当然、得られる近似解は、上・下限値の間に存在することが保証される (3)。交点法による近似解の厳密解に対する誤差は、 ± 0.05 程度以内であることが確かめられている (14)。

交点法においては、計算に選択するパス、カットを生起確率が高い順に採用していくと高精度の近似解が得られる (2)。パス P_s の生起確率 T は、線の信頼度 r_a によって、以下のように表される。

$$T = \prod_{a \in P_s} r_a \quad (15)$$

(15) 式より、線の信頼度が一定であれば、パスの距離が短いほど生起確率が高くなるといえる。

2.3.5 線の信頼度 線 a の信頼度 r_a は x_a の期待値であり 0~1 の値をとる。1に近いほど通行できる確率が高く、信頼度が高い。信頼度は1から遮断確率を引いた値として、あるいは路線の通行確率として考えられ、路線延長の増大とともに小さくなる。遮断の多くが道の被災によるものとする、被災確率に影響する斜面形状や傾斜 (21)、あるいは道の縦断勾配、降水量などによって信頼度が変わると考えられる。しかし、本研究では斜面傾斜などの影響は考慮せず、信頼度を与える要因には延長のみを考えている。路網の被災と地形要因との関係は調査事例 (4) も多いため、地形要因を入れた信頼性解析を行うと、より作業道路網の実態に即した結果が得られると思われる。

遮断確率を求めるにあたっては、山梨県内の林道規制情報 (20) を用いた。2008年11月18日現在、県内の県営林道757,381mのうち、28か所において通行が規制されていた。ただし、全国的な通行遮断の傾向とするため、地域差のある冬期間の閉鎖や、不法投棄防止といった管理上の事由による閉鎖は規制箇所から除いている。単位距離あたりの平均遮断発生数 (λ) は、約 $1/27,049(\text{m}^{-1})$ ($=3.7 \times 10^{-5}(\text{m}^{-1})$) となる。遮断の発生が平均 λ のポアソン分布に従うとすると、遮断発生数が0となって通行できる確率は以下の (16) 式で表され、この値を単位距離あたりの林道の遮断確率として与えることとする。

$$P(X) = P(0) = \frac{\lambda^0}{0!} e^{-\lambda} = e^{-\lambda} \quad (16)$$

このとき、 $P(X)$ はポアソン分布の確率密度関数である。よって、距離 $D(\text{m})$ の路線における遮断確率 r_a は (17) 式

で表される。

$$r_a = (e^{-\lambda})^D = e^{-\lambda D} \quad (17)$$

作業道における遮断確率もしくは信頼度の調査事例はないため、林道の事例から考えることとする。調査した山梨県内林道における規制の主な事由は、法面の崩壊、路肩・路側などの崩壊もしくはその危険性、路面状況の悪化、復旧などの工事であった。これらの事由を作業道において考えてみると、路肩・路側の崩壊、路面状況の悪化については、林道よりも舗装率が低いために高い発生頻度になると考えられ、逆に工事による遮断は、発生頻度は断定することはできないが、その期間については、作業道の方が低規格であるために短いと考えられる。法面の崩壊については、林道では構造物が設置されるものの、切取りの高が作業道に比べて非常に大きくなり、どちらの発生頻度が高くなるか一概に決めることはできない。作業道では、使用・未使用期間が明瞭に分かれることがあるが、使用期間中には作業による遮断が高い頻度で発生すると考えられ、総合的に見て作業道の遮断確率の方が高くなると考えた。作業道の遮断確率については今後の調査で明らかにしていかなければならないが、まず林道と作業道の遮断確率を一律として、次に幹線作業道の遮断確率を林道の2倍、支線作業道では作業による遮断がさらに高くなるものと思われることから林道の3倍として2点間信頼度を計算した。

信頼度を求める区間は、最も多くの通行量が考えられる2点間とすることが妥当である。森林内路網における木材の通行量については、一般交通とは異なって河川等の流れに類似したものであり (11)、HACKの法則を用いた推定式が考案されている (15)。よって、2点間の一方を、最も木材通行量が多くなると思われる外部路網との接点 (路網の起点) とし、もう一方を路網の起点からの路線距離が最も大きくなる点として、この2点間の信頼度を解析することとした。図-1にこの2点を示す。D磯上においては、起点から最も離れた点までの経路に循環路を含まないため、循環路を含む経路における最も離れた点をこの点とした。

2.3.6 交点法による信頼度の誤差 交点法によって得られた信頼度の誤差を明らかにするため、規模が小さい路網については信頼度の厳密値を求めることとする。厳密値の計算にあたっては、小林 (5) のアルゴリズムを使用した。この計算に必要な実行ステップ数は、路網を構成する線の数 (n) に対して 2^n となり、比較的短時間 (5) で厳密値を求めることができる。なお、計算にあたっては、農林水産研究情報総合センター科学技術計算システムの高速度メモリアクセス演算システムを使用し

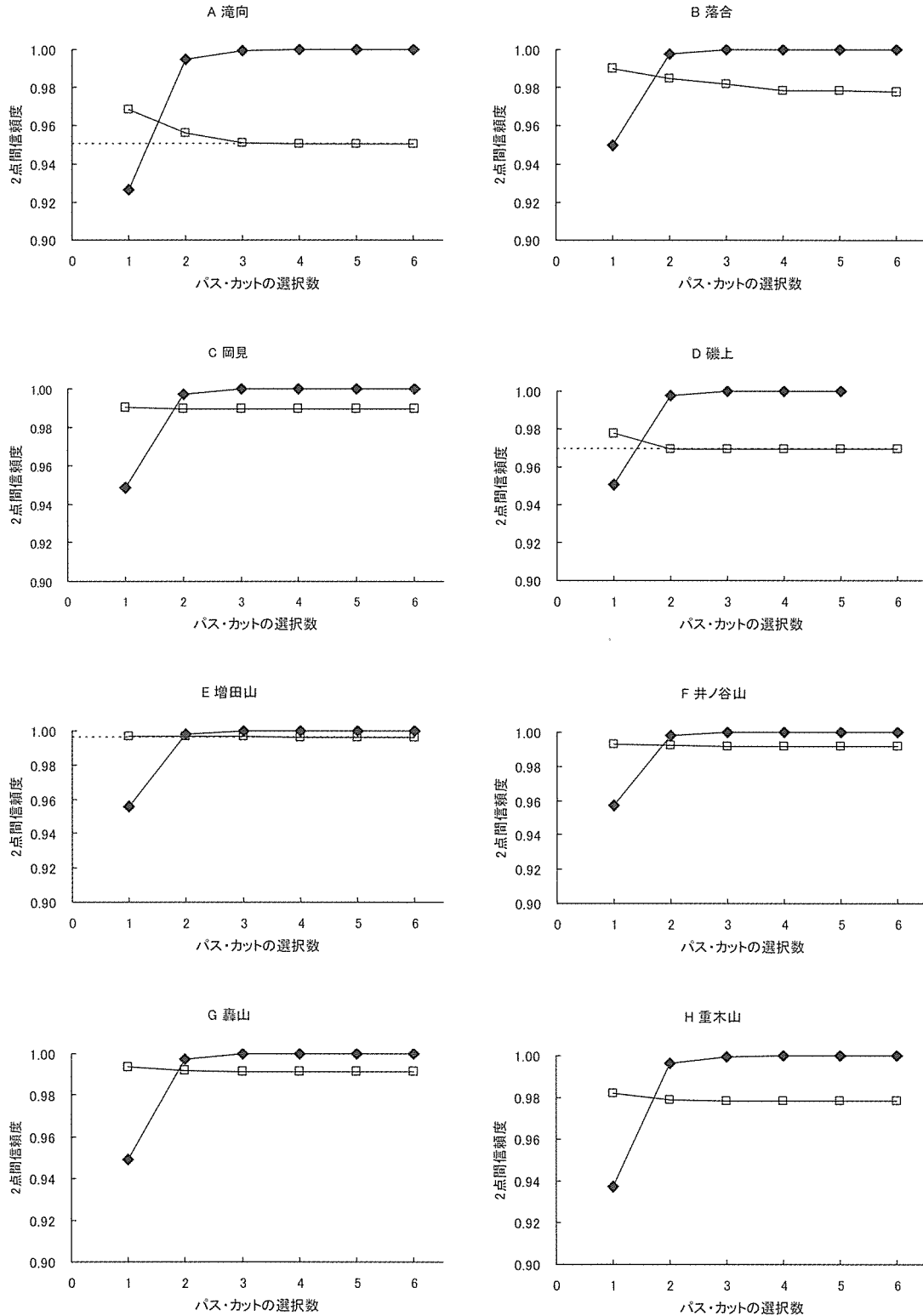
た。

3. 解析結果と考察

3.1 遮断確率を一律としたときの2点間信頼度

林道、作業道の遮断確率を 3.7×10^{-5} としたときのミニ

マルパス・カットによる2点間信頼度の計算値を図-5に示す。D磯上では、総ミニマルパス数が5つであるため、図の選択数5における2点間信頼度が上限値になる。また、交点法によって得た値の誤差を明らかにするため、厳密値を表-2、図-5に示す。佐佐木ら(14)によって指摘



◆ミニマルパスによる計算値 □ミニマルカットによる計算値 厳密値

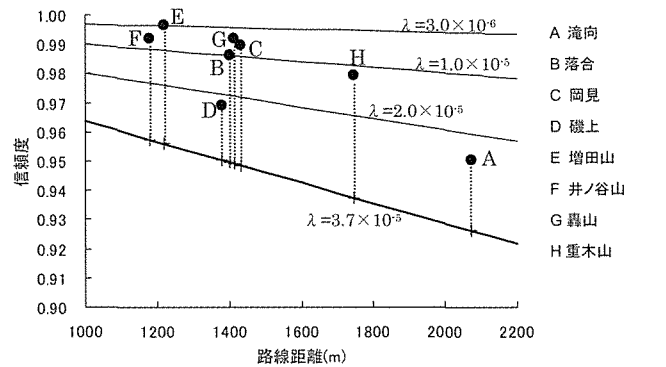
図-5 交点法による2点間信頼度の計算結果

されていた±0.05よりも小さな誤差になっている。解析対象となる路網の線の数からは(表-3)、計算のために莫大なステップ数を要することが分かり、解析対象の路網においても、規模が大きいものは実行可能な計算時間で厳密値を求められないことが分かる。

2曲線の交点から得られる2点間信頼度を図-6に示す。ただし、厳密値を得たA滝向、D磯上、E増田山については、厳密値によって以降の考察をすることとし、図-6、7にも厳密値を示す。また、2点間に代替路がなく、ただ1つの経路で接続されているときの信頼度((17)式で、Dに2点間の路線距離、 λ に 3.7×10^{-5} を代入して得られる値)をあわせて示す。2点間の信頼度は、点間の距離が長くなるほど小さくなり、また、経路中に代替路を多く含むほど大きくなる。図示した2点間の信頼度は、2点間の路線距離に依存する値であり、各信頼度の高低は、図中に示される遮断確率の等値線によって判断することができる。つまり、2点間の信頼度が最も高いのはE増田山の路網であり、この信頼度は遮断確率が 3.0×10^{-6} の単一経路で2点間を接続したのに等しい値となっている。ここで、各信頼度を統一的に比較するため、それぞれの信頼度を単一経路で得るときの、2点間の遮断確率を求めた(図-7)。遮断確率が低いほど2点間の信頼度が高いことを表す。代替路がないときの遮断確率($=3.7 \times 10^{-5}$)と比較すると、E増田山、G轟山、F井ノ谷山、C岡見の路網で信頼度の上昇が大きい(遮断確率の減少が大きい)ため、形成されている循環路の効果が高いことが分かる。逆にA滝向の路網では、対象路網の中で循環路の効果がいちばん小さくなっている。路網図(図-1)からは、信頼度が相対的に高い路網では、2点間に経路が2つあり、それらがほとんど重複していないことが分かる。F井ノ谷山やG轟山で見られるようなハシゴ型の路網が、このような接続構造の典型的な例である。一方、信頼度が低いA滝向の路網では、2点間の移動経路はほとんど1路線で構成されており、最短経路と距離が大きく変わらないような効果的な代替路が少ない。D磯上では、2点間の経路が複数あるものの、経路中に占める単一経路区間の距離が比較的大きいため、信頼度が相対的に低くなっている。また、代替路の中には路線距離が特に大きいものがあることも、信頼度が低くなった原因と考えられる。H重木山では、点間迂回率が小さく、路線の接続構造は発

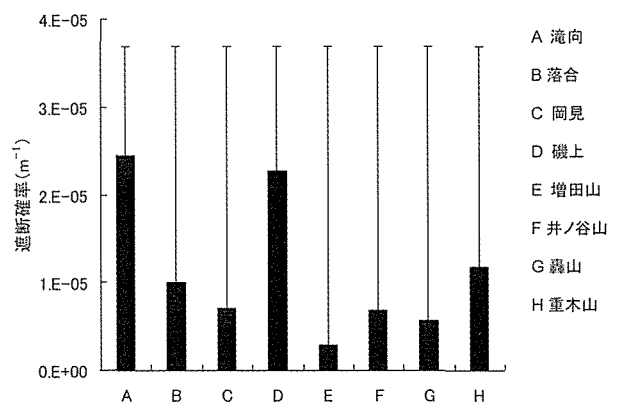
表-3 路網の規模と厳密値計算時間

路網記号	名称	点の数 m	線の数 n	実行ステップ数 2^n	計算時間 (秒)
A	滝向	12	15	3.3×10^4	15
B	落合	19	26	6.7×10^7	
C	岡見	71	106	8.1×10^{31}	
D	磯上	8	10	1.0×10^3	3
E	増田山	15	21	2.1×10^6	2,896
F	井ノ谷山	16	22	4.2×10^6	
G	轟山	17	23	8.4×10^6	
H	重木山	25	35	3.4×10^{10}	



●は2点間信頼度、+は2点間に代替路がないと仮定したときの2点間信頼度、直線は各遮断確率による距離と線の信頼度の関係を表す。線の遮断確率は 3.7×10^{-5}

図-6 2点間信頼度



棒グラフは求められた信頼度を遮断確率で表したときの値、—は2点間に代替路がないと仮定したときの遮断確率を表す。

図-7 遮断確率による2点間信頼度の比較

表-2 交点法による信頼度と厳密値の比較

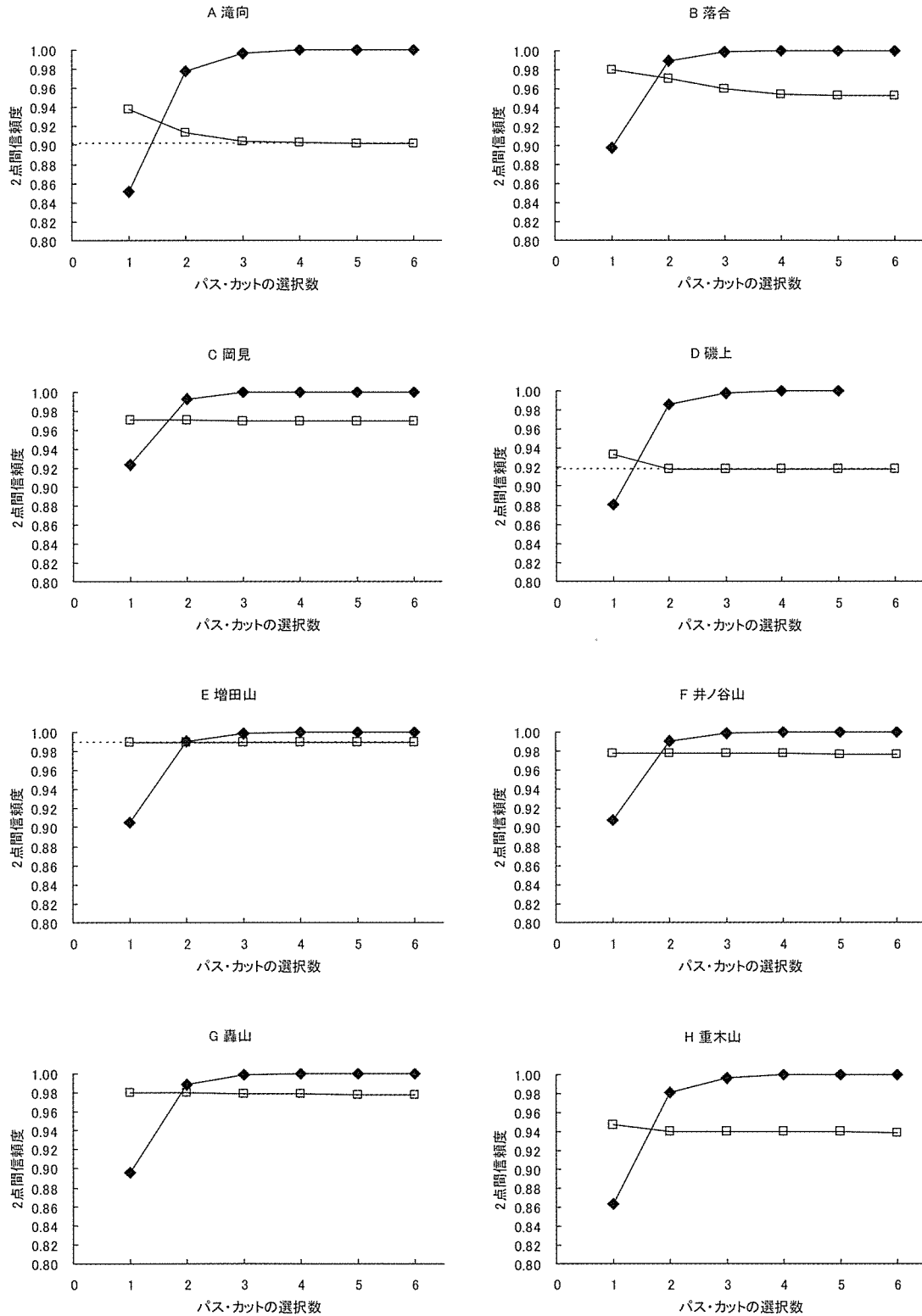
路網記号	名称	遮断確率を一律としたとき			遮断確率が異なるとき		
		交点法	厳密値	差	交点法	厳密値	差
A	滝向	0.96192	0.95032	0.01160	0.92399	0.90132	0.02267
D	磯上	0.97340	0.96914	0.00426	0.92691	0.91772	0.00919
E	増田山	0.99647	0.99640	0.00007	0.98938	0.98903	0.00035

達しているものの、幹線作業道が1本しかなく、支線作業道を経由する代替経路の距離が大きくなってしまったために信頼度はそれほど大きくない。

路網の代替路機能が高い、E, G, Fなどの路網におい

ては、巡視係数や点間迂回率 (17) などの値が小さくなっており (表-1), 代替路機能が高い路網においては、交通機能も高くなっていることが分かる。

3.2 遮断確率が異なるときの2点間信頼度



◆ ミニマルパスによる計算値 □ ミニマルカットによる計算値 厳密値

図-8 交点法による2点間信頼度の計算結果

林道、幹線作業道、支線作業道の遮断確率をそれぞれ、 3.7×10^{-5} 、 7.4×10^{-5} 、 1.1×10^{-4} として信頼度を求めた(図-8, 9, 10)。ただし、以降の考察および図-9, 10でも、A滝向、D磯上、E増田山では厳密値を採用している。厳密値との比較(表-2)では、前項よりも大きな誤差も見られるものの、 ± 0.05 以内の誤差となっている。また、信頼度が高い場合にはミニマルカットから得た値が厳密値に近づくため(19)、いずれの路網でもミニマルカットから得た値が厳密値とほぼ一致しており、図-5, 8におけるパス・カットの両曲線の交点の値とカットから得た信頼度との差が大きい路網ほど誤差が大きくなっている。厳密値を得られなかった他の路網でもほぼ同様の信頼度によって2点間信頼度を得ているため、厳密値はカットの値に近づき、誤差はA滝向より小さくなると考えられる。

遮断確率が変わったため、(11)式で得られる各ミニマルパスの生起確率が前節と異なっている。前節では各線の遮断確率が一律だったため、生起確率が最も高くな

るミニマルパスは2点間の最短経路であったが、本項では作業道の信頼度を低く設定したために、生起確率が最も高くなる経路は必ずしも最短経路とはならない。よって、図-9の横軸は2点間の最短距離ではなく、最大の生起確率を与える経路の路線距離となっており、いくつかの路網で図-6と異なっている。

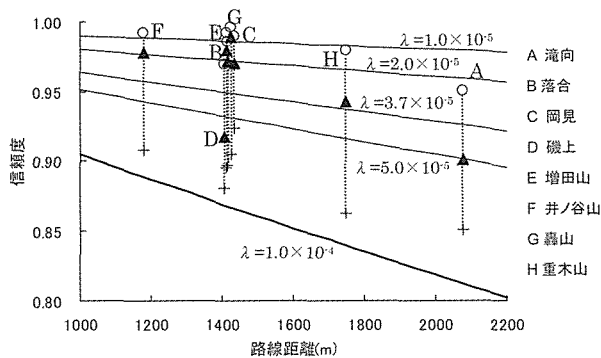
各信頼度を同一条件で比較するために、得られた信頼度を単一経路で得るときの遮断確率を求めた(図-10)。2点間の経路における林道、幹線・支線作業道の割合が異なるため、2点間に代替路がないと仮定したときの遮断確率も異なる。2点間に林道が少なく、支線作業道が多いD磯上のような路網では、単位距離あたりの遮断確率が高くなっている。C岡見では生起確率の高い経路に占める林道の割合が高い(これは、代替路がないときの2点間の遮断確率が低いことから分かる)ために、それよりも信頼度が低い支線作業道によって代替路を形成しても、2点間の信頼度がそれほど向上せず、代替路形成の効果が低くなっている。

図-10を図-7と重ねて比較すると、各路網の遮断確率の傾向はほぼ等しくなっているが、B落合とC岡見、およびA滝向とD磯上の優劣が逆転している。これは、生起確率が最大となる経路に支線作業道を多く含むほど、信頼度の低下が大きくなるためである。

D磯上では生起確率が最も高い経路における支線作業道延長の割合が、対象路網の中で最も高い44%を占めており、しかもこの支線作業道には代替路がなく、単一経路区間となっている。このように、本節で求めた信頼度は、代替路も含めた当該2点間の経路における林道、作業道などの占める割合を反映した値となっていることが分かる。また、遮断確率が高く、延長が長い路線によって単一経路区間が構成されると、2点間の信頼度が大きく減少してしまう。このような場合に信頼度を向上するには、その区間に代替路を設けなければならない。しかし、代替路を路網開設後に追加することは難しいため、現実的にはその路線の被災確率を下げ、遮断確率を低くして2点間の信頼度を低下させないことが考えられる。そのためには、丸太構造物で盛土のり面を補強したり、路面に採石を投入したりするなどして、路面、路体を災害に強い構造とすることが必要である。

4. おわりに

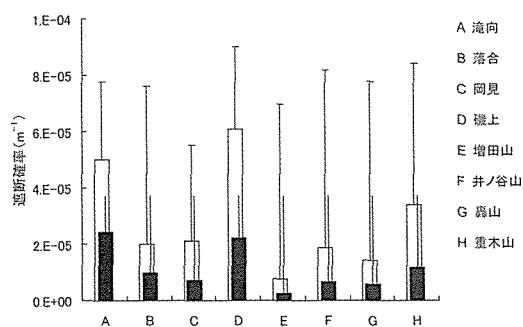
信頼性解析を高密度路網に適用し、信頼性の高い路網の接続構造および信頼性の特徴について検討した。信頼性という評価指標を用いることで、代替経路の多少、および代替経路が最短経路よりどの程度増長しているかという代替路の有効性を、数値により比較することができた。また、比較的小さい範囲に計画され、都市の一般道と比



▲は求められた2点間信頼度、○は図-6における信頼度、+は2点間に代替路がないと仮定したときの2点間信頼度、直線は各遮断確率による距離と線の信頼度の関係を表す。

林道、幹線作業道、支線作業道の線の信頼度は 3.7×10^{-5} 、 7.4×10^{-5} 、 1.1×10^{-4}

図-9 路線の遮断確率が異なるときの2点間信頼度



白抜き棒グラフは求められた信頼度を遮断確率で表したときの値、-は2点間に代替路がないと仮定したときの遮断確率を表す(図-7を重ねて表示)。

図-10 路線の遮断確率が異なるときの遮断確率

べると接続構造が未発達といえる作業道路網においては、信頼性が路線の接続構造に関係していることが示された。

循環路網の計画において計画前後に本解析を適用すれば、開設に要する費用と得られる便益との比較によって、当該計画の妥当性を判断できる。便益とは、遮断の発生による損失を小さくすることで、この算出には信頼度の考え方が適用できると思われる。また、既存の循環路網において循環路を構成する路線を切断して本解析を行い、切断前との比較を行うことで、切断による損失の増加が大きい区間、つまり循環路の形成効果が大きい区間を明らかにすることができる。林道網では、一般道の代替路となっていることが多く、代替機能が高くなる開設区間や、遮断による損害の大きい既存路線を信頼性解析によって明らかにすることで、効果的な路網計画、保守・維持管理計画ができ、高い信頼性を有する地域交通網の整備に貢献できると思われる。

一方、作業道等の路網は木材生産現場となるため、災害や損壊だけでなく、路網の利用によっても遮断が発生する。作業中の遮断においては、運材車の迂回や方向転換、後進走行が必要となり、効率的な循環路の形成によって、遮断の際にも生産性、安全性を大きく低下させずに作業することができる。遮断が起ころなくとも、循環路網が形成されることによって、複数の車両が稼働する現場においては、車両どうしのすれちがいを避けることができ、さらに、短い距離で急勾配、長い距離で緩勾配という異なる経路があれば、走行の目的に応じた経路を選択することができ、効率的かつ安全な作業を行うことができる。これまで循環路網の効果的な接続構造についての検討はほとんどされてこなかったが、本稿で検討した信頼性解析によって評価、解析することで、災害などによる遮断だけでなく、生産性や安全性の視点からの路網評価および路網計画に適用できると考えられる。

今後の課題として、各線の遮断確率を現実に即した値にすることが必要になる。自然災害に起因する遮断だけを考へても、路線の規格、構造物の有無、地形・地質条件、維持管理状況など様々な要因が関係して遮断が発生する。この確率についてより現実に近い値を得ることができれば、信頼性解析だけでなく、効率的な維持管理業務などにも応用できると思われる。また、循環路網における遮断は完全な独立事象とはいえないため、遮断を従属事象として捉えたときの遮断確率について検討していく必要がある。これらの検討から得た現実的な遮断確率によって、接続構造的な面だけでなく、規格構造や立地条件など質的な面も考慮した信頼度を得ることができ

引用文献

- (1) 深井俊英・建部英博・林寿郁 (1986) 異常気象時における道路網の信頼性評価手法について. 土木学会学術講IV41:13~14.
- (2) 飯田恭敬・若林拓史・吉木務 (1988) ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法. 交通工学23(4):3~13.
- (3) 飯田恭敬・若林拓史・福島博 (1989) 道路網信頼性の近似解析方法の比較研究. 土木学会論文集407:107~116.
- (4) 岩川治・近藤恵市・落合久徳 (1982) 林道災害に関する研究 (I) —破砕帯における林道の事例的考察—. 静大農学部研報31:27~32.
- (5) 小林正美 (1980) 道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究. 日本都市計画学会学術研究発表会15:385~390.
- (6) 小林正美 (1981) 道路交通網の地震時信頼度解析に関する研究. 都市計画別冊16:205~210.
- (7) 久保幹雄 (2000) 組合せ最適化とアルゴリズム. 164pp, 共立出版, 東京.
- (8) 仁多見俊夫 (1992) 循環路網形成のアルゴリズム. 日林論103:621~624.
- (9) 小野耕平・田坂聡明・上飯坂實 (1991) ホートンの法則による林道分岐過程の解析. 日林誌73:89~97.
- (10) 大橋慶三郎・神康一 (1989) 急傾斜地の路網マニュアル. 173pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (11) 酒井秀夫 (1987) 合理的集運材方式に基づく長期林内路網計画に関する研究. 東大演報76:1~85.
- (12) SAKAI, H. and NAYA, K. (1992) Relationships between α - and β -Indices for Measuring Network Connectivity and Relationships between the Development of Forest-Road Networks and These Indices. J. Jpn. For. Soc.74:245-250.
- (13) 酒井徹朗・鈴木保志 (1993) 交通の利便性を評価基準とした循環路網について. 日林論104:853~854.
- (14) 佐佐木綱・飯田恭敬 (1992) 交通工学. 382pp, 国民科学社, 東京.
- (15) 澤口勇雄 (1996) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第1報) —林道路線評価パラメータの特性—. 森林総研研報372:1~110.
- (16) 塩見弘 (1968) 信頼性入門. 262pp, 日科技連, 東京.
- (17) 鈴木秀典・大川畑修・梅田修史・山口智 (2002) 巡視係数を用いた交通利便性の評価. 森利学誌17:131~140.
- (18) 若林拓史 (1987) 交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論適用の考え方. 土木計画学研究・講演集10:125~132.

(19) 若林拓史 (1989) 道路網の信頼性解析に関する基礎的研究. 93~114, 京都大学学位論文.

(20) 山梨県. 林道通行規制情報. オンライン,
(<http://www.pref.yamanashi.jp/rindoujyohou/>). 2008年11月18日参照.

(21) 吉村哲彦・神崎康一 (1995) 破碎帯急傾斜地における崩壊危険度を用いた高密度路網の計画法 (I) 地形図による崩壊危険度の判定. 日林誌77 (1) : 1~8.

(2010年4月7日受付, 2010年10月2日受理)