

文化遺産防災のための道路モニタリング地点の優先性評価に関する研究

A Study on Priority Evaluation of Road Monitoring Locations for Disaster Mitigation of Cultural Heritages

塚口博司¹・小川圭一²・安隆浩³

Hiroshi Tsukaguchi, Keiichi Ogawa, and Yoongho Ahn

¹立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

²立命館大学准教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

立命館大学研究員 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Post Doctoral Fellow, Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

There are plenty of cultural heritages in urban and suburban areas in the historical city Kyoto. Since these heritages are of great importance, it is strongly required to establish disaster mitigation measures not only for the citizens but also for the cultural heritages. However the road network is still vulnerable in this area. Therefore, it is quite important to grasp the condition of road damage in times of disasters. Here, a road monitoring system is expected to play an important role. This study proposes a way to evaluate suitable locations of the monitoring facilities.

Key Words: road monitoring system, priority of monitoring locations, entropy

1. はじめに

歴史都市京都には、後世に残すべき文化遺産が多数存在する。これらの文化遺産は歴史的価値が高く、唯一無二の存在であるから、自然および人為災害から守らなければならないが、多くは市街地の中に点在しており、災害に対して極めて脆弱である。このため、文化遺産が存在する都市の構造や市街地の状況を的確に把握した上で、文化遺産に関する防災計画を立案することが必要である。

このような脆弱な市街地に立地する文化遺産の防災性を高めるためには、災害発生時に緊急車両が文化遺産の立地場所に迅速に到達できることが不可欠であり、消防署から文化遺産立地場所に至る主要道路ネットワークを確保する必要がある。そのためには、各道路リンクの機能障害の有無を的確に把握することが必要となる。

本研究では、上記のネットワークを構成する文化遺産防災における重要な道路リンクに対する道路モニタリングシステムについて以下の検討を行う。すなわち、①文化遺産防災における重要リンクの脆弱性を把握し、次に、②道路モニタリングシステム導入における情報価値を定量化し、さらに③文化遺産防災において、特に優先すべきモニタリング地点を選定することによって、文化遺産が点在する歴史都市京都の地域防災力向上を図ることを目的とする。本研究では、数多くの文化遺産が存在している京都市東山区を対象とした。

地震などの自然災害が発生した場合、文化遺産に対する消火活動を迅速に行うためには、まず各文化遺産における自主的な消火活動等が重要であるが、続いて消防署による本格的な消火活動が不可欠である。そこで、文化遺産と消防署を結ぶ重要リンク¹⁾がどの程度機能障害を起こしているのか、つまり被害状況を迅速に把握することが必要である。そのためには、重要リンクの被害状況をリアルタイムで把握するシステムとして、カメラを用いた道路モニタリングシステムを構築することが効果的ではないかと考える。ここで、重要リンクとは、消防署から各文化遺産への経路が数多く集中する道路区間のことである。この道路モニタリングシステムは、災害時には緊急車両の経路誘導、一般車両の抑制といった交通マネジメントに活用

するとともに、平常時においても交通渋滞の把握ならびに交通管理などに一定限の情報を提供することが期待でき、利用価値が高いと考えられる。

2. 3次元CGシステムのカメラ設置候補地点の選定

(1) 3次元CGシステムの適用

筆者らは、すでにGISを用いて東山区の重要リンクにおけるカメラの設置候補地点を選定している²⁾。そこでは、GIS上で見通し距離を求めているが、GISは2次元の地図情報に基づいており、地形や建造物の高さなどが反映されていないため、建造物や街路樹などの視界を遮るものが見通し距離に及ぼす影響が考慮されていない。

そこで、道路モニタリングシステムにおけるカメラの適切な設置位置を現実により近い状況で検討するために、3次元CGシステムを用いることにした。図1には3次元CGシステム画像の例を示す。同図に示すように、建造物を高さや屋根形状(平面、傾斜など)に基づく立体形状とすることにより、都市内における建造物の大まかなボリューム分布の3次元表現が可能になる。

カメラの設置間隔は主としてカメラの見通し長によって決定される。3次元CGシステムによって、①看板や街路樹などの視野を遮るものの状況に多数のパターンを設定し、②視点場を自由に変えてカメラの設置候補地点の検討ができると考えられる。もちろん、現地にて設置場所を検討する方が望ましいが、現実には、視点場は必ずしも自由に設定できないし、街路樹の影響には季節による差も存在するから、3次元CGシステムの有用性は高いと考えられる。

(2) 3次元CGシステムを用いたカメラ設置候補地点

カメラの設置候補地点を以下の条件の下で検討した。

- ① カメラはシンプルな構造のものを選択することとし、一方向のみに固定して設置するものとする。ここでは、カメラは南から北向きあるいは東から西向きに設置するものとした。
- ② 現場にてカメラを設置する場所としては、電柱や街路灯などが考えられるため、地上から高さ5mの位置にカメラを設置するものとした。

このような考え方に基づいて、東山区の国道1号線以南の区域において3次元CGシステムを用い、1台の監視カメラが見通すことのできる限界地点に次のカメラを設置するという方法によって、カメラの設置候補地点を選定した。その結果、図2のように33箇所が抽出された。ただし、この3次元CGシステムでは、街路樹、電柱、看板、歩道橋などの道路上の構造物を考慮するには至っていない。

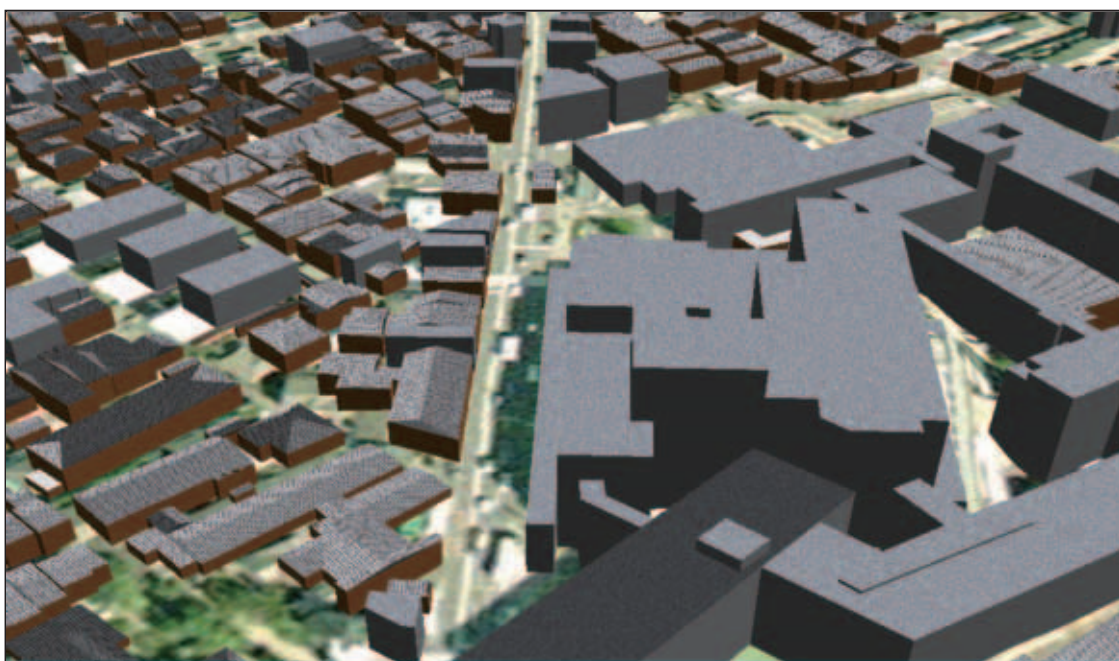


図1 東山区における3次元モデル画像の例

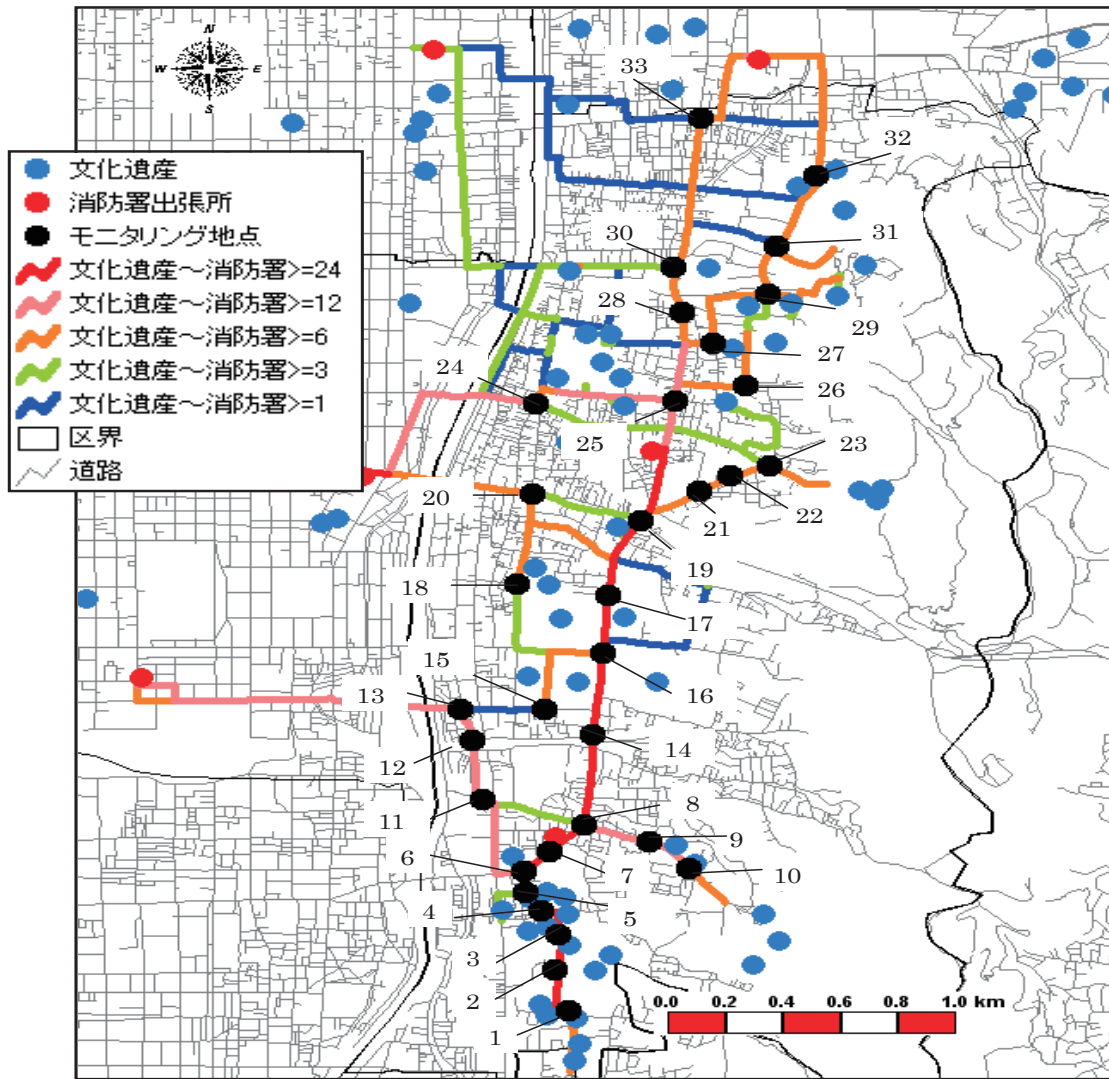


図2 京都市東山区におけるモニタリング候補地点の提案

3. 文化遺産防災における脆弱道路区間の抽出

(1) 単位道路区間

本研究における道路区間は、3次元CGシステムを用いて求めたモニタリング設置候補地点に基づいて選定する。先に述べたように、図2の地点は、1台の監視カメラが見通すことのできる限界地点に次のカメラを設置するという方法で設定されている。そこで、図2に示すモニタリング候補地点間を単位道路区間とし、単位道路区間ごとに道路閉塞確率を算出することとする。

(2) 道路区間別閉塞確率の算出方法

閉塞確率 $P(0 \leq P \leq 1)$ とは、当該道路を自動車が通行できるかどうかを表す確率である。平常通りに通行可能であり機能障害がない場合に $P=0$ 、全く通行ができず完全に閉塞する場合に $P=1$ である。道路区間別道路閉塞確率を算出するために、筆者ら³⁾が行った分析方法を用いた。そこでは、阪神・淡路大震災における灘区の道路被害状況の分析を行い、単位距離当たりが発生する機能障害個所数がポアソン分布に従うことを検証するとともに、幅員別に求めた道路閉塞確率³⁾を用いて任意のリンク長に対応する閉塞確率を推定した。本稿では図3に示すように、この方法を東山区の道路に適用し、道路閉塞確率(道路通行可能確率)を求めた。図4に算出結果を示す。なお、上記の研究では道路幅員だけでなく、沿道建物の状況も考慮しているが、本研究で対象としている道路は比較的広幅員の道路であり、この場合には幅員のみから閉塞確率を求めても大きな差は見られないから³⁾、道路幅員で表す簡便な方法を用いた。

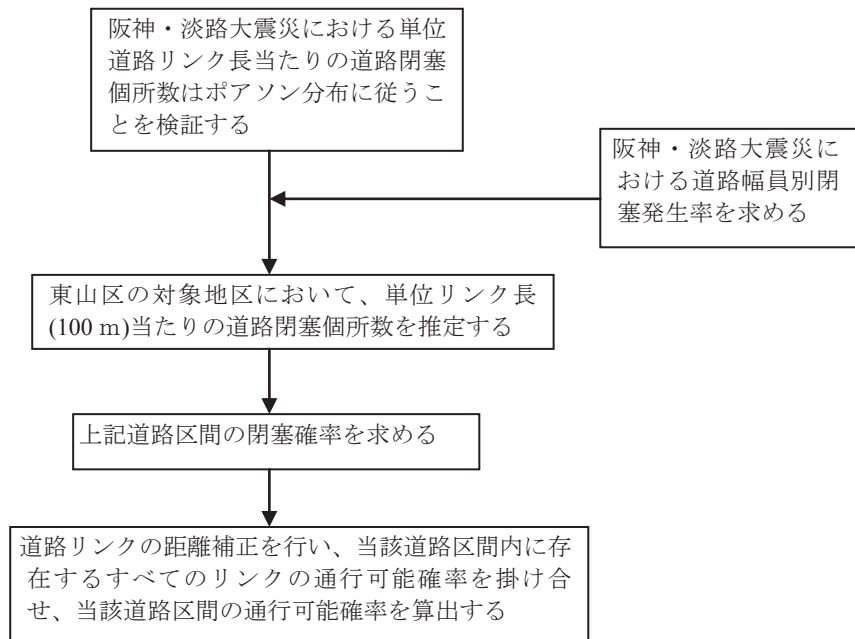


図3 道路閉塞確率の推定

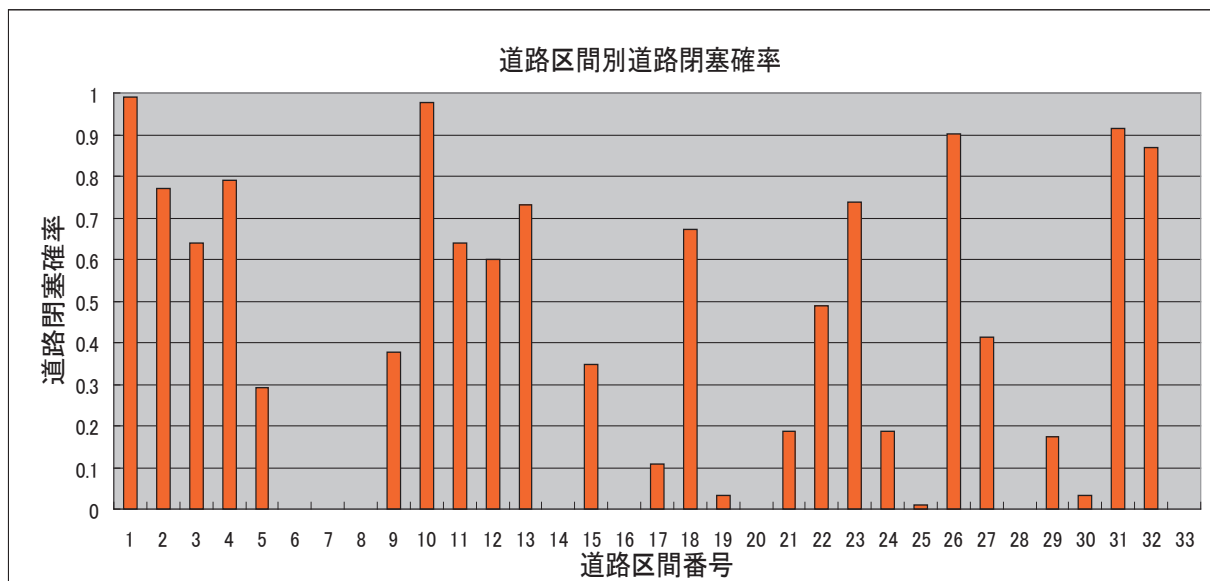


図4 道路区間別道路閉塞確率

4. 情報価値に基づいたモニタリング地点選定

(1) モニタリングシステムから得られる「情報」

本研究における「情報」は、道路上に監視カメラを設置すると仮定したとき、各々の監視カメラが受け持つ道路区間の通行可能性に関する判断を下し、ある主体が行動を起こすために必要な判断材料、または、当該道路の通行可否を判断する際の知識の不確かさを減少させるものとしている。

(2) 情報価値に基づくモニタリング地点の抽出

本研究では、モニタリングによって得られる防災情報に着目し、ある情報を提供した際に、受け手が得る「情報の価値」を算出する。それに基づき、本節では情報価値の高い道路区間からモニタリングカメラを優

先に設置していくものとする。

情報の価値を情報量 I で表し、「 A という事象が起こったことを知らせる情報量」を $I(M_A)$ 、「 A という事象の起こる確率」を P_A で表すこととする。ここで、 c を任意の正の定数とすると、

$$I(M_A) = -c \log P_A \dots \dots \dots (1)$$

と表すことができる。なお、通常 $c=1$ とすることが多い。

ここで、各道路区間の P_A を 1-道路閉塞確率と考えて、各々のカメラが持つ情報の価値を算出することとする。(1)式は、「情報の価値は、当該事象の生起確率が高いか否かだけで決まる。すなわち、起きにくい事象が起きるほど、それを知ったときの情報量は大きい」と考えるものである。図 6 には、情報価値の高い道路区間からモニタリングカメラを設置するという視点に立ち、横軸に情報価値の高い順に各道路区間をとり、縦軸に情報価値の累積値を示した。

(1)式からわかるように、道路区間の道路閉塞確率に基づいて情報価値を算出しているので、「道路閉塞確率が高い=情報の価値、モニタリングを行う価値が高い」ということになる。すなわち、災害時において、道路状況を迅速かつ的確に把握し、その情報を活用するためには、道路閉塞確率が高い道路区間ほど、情報価値が高いため、優先的にモニタリングすべきであるということとなる。図 5 を見ると、閉塞確率の高い区間をモニタリングすると情報価値は大きく増加するが、閉塞確率が小さい区間の場合には情報価値の増加が小さいことが確認できる。このため、表 1 に示すように、重要道路区間全てをモニタリングしなくとも、一定のモニタリングの効果が得られることがわかる。たとえば、当該地区の場合には、情報価値の高い 15% 程度の設置を行うだけで、全体の 53% 程度の情報量を得られ、また 75% 程度の設置を行うことができれば、ほぼすべての情報が得られていることがわかる。ただし、表 1 は対象地域での事例であり、全く閉塞の恐れがない道路区間がかなり存在するため、一般論としての情報量累積率ではないことに注意する必要がある。

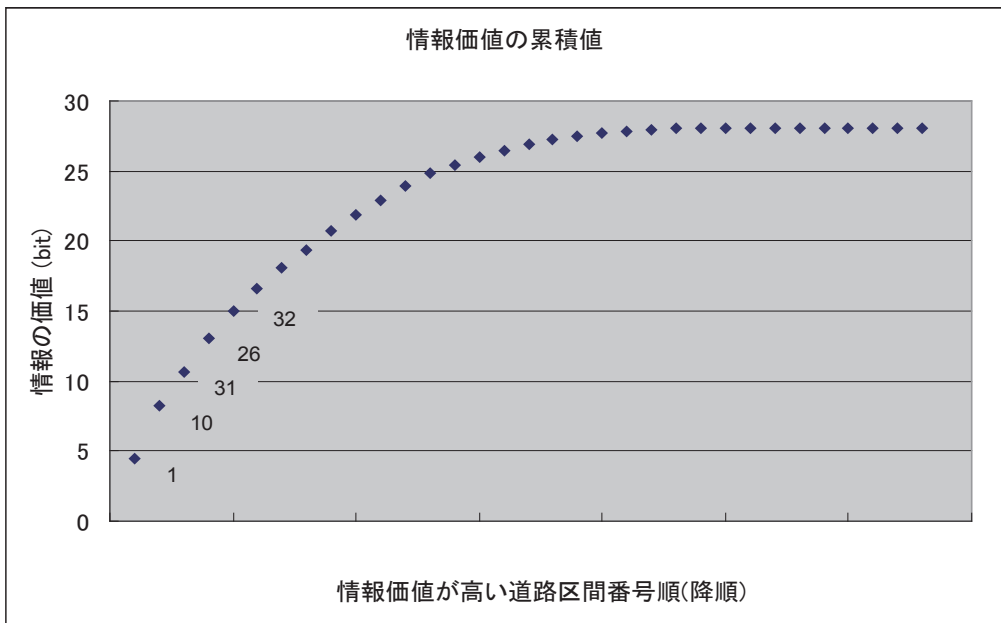


図 5 情報価値の累積値

表 1 情報量の重要道路カバー

カメラ設置割合	情報量カバー率(%)
未設置(0/33)	0%
5ヶ所(5/33=15.15%)	53.65%
10ヶ所(10/33=30.30%)	77.86%
17ヶ所(17/33=51.52%)	95.93%
25ヶ所(25/33=75.76%)	100%

5. 平均情報量 H(エントロピー)に基づいたモニタリング地点選定

(1) あいまいさの捉えかた

前章では、閉塞確率が高い区間からモニタリングを優先的に行う方向を示した。しかしながら一方で、たとえば道路閉塞確率=0.9 のような予め通行できない可能性がかなり高い道路区間の場合、当該道路をモニタリングし、情報提供を行う際の価値が果たしてどの程度あるのかという疑問も出てくる。つまり、道路が閉塞するか、あるいは通行可能かどうか判断しかねるとき、すなわち $P_A=0.5$ 付近において情報の価値は最も高いのではないかと考えられる。そこで、ある主体に情報提供を行う際、どのような状態のときに、最もその情報のあいまいさを解消することができるかを検討するために、情報の不確かさの平均値、すなわち平均情報量=エントロピーH を用いて検討する。エントロピーは、「無秩序な状態の度合い」を数値で表すものであり、無秩序な状態ほど値が大きく、整然として秩序の保たれている状態ほど値が小さい。本研究では、情報価値と平均情報量を比較することで、より効果的なカメラ設置候補地点の選定について検討してみたい。

(2) 平均情報量(エントロピー)Hに基づくモニタリング地点の抽出

n 個の事象がそれぞれ確率 p_1, p_2, \dots, p_n ($p_1+p_2+\dots+p_n=1$)で発生するものとするとき、エントロピーは次式で定義される。

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

図 6 に示すように、グラフは凸型の曲線となり、道路区間番号 22 において、道路通行可能確率 $P_A = 0.51$ のとき、最大エントロピー $H=0.69$ となる。また、道路通行可能確率 $P_A = 0.51$ から離れるほどエントロピーは小さくなる。

前章で述べた情報価値にもとづいて判断すると、通行可能確率が小さい区間を優先的にモニタリングする方向が示され、本章で述べたエントロピーに基づく、0.5 程度の通行可能確率の場合が優先されることになる。

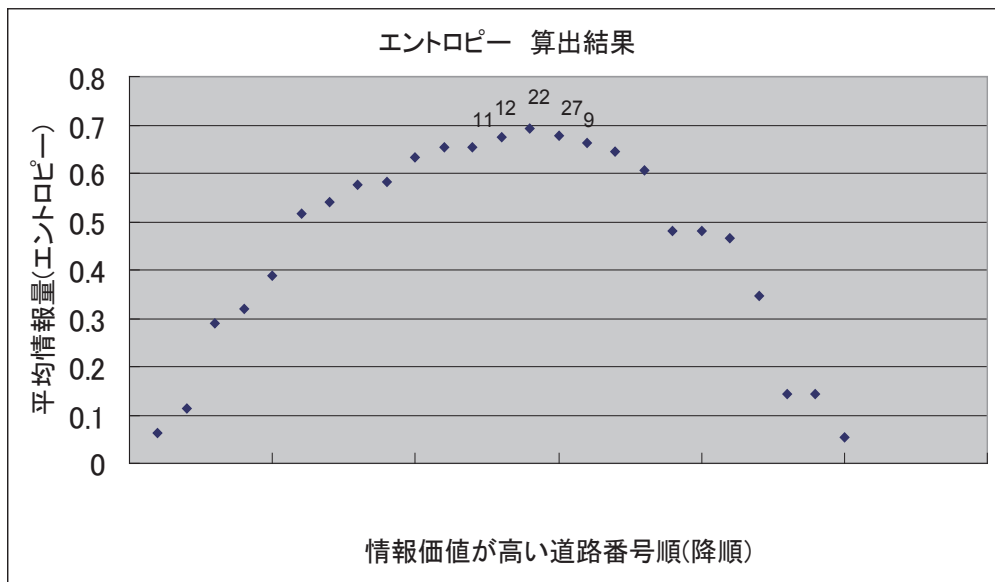


図 6 平均情報量(エントロピー) 算出結果

6. 文化遺産防災を念頭においた道路区間の区分

(1)道路区間区分の目的

平常時にも緊急災害時にも、実際の道路状況を把握できるシステムとして道路モニタリングシステムは有用であると考えられる。しかし、モニタリング用のカメラの設置数は少ない方が効率的であるから、本章ではカメラ設置点の優先性について検討することにした。

モニタリング地点の優先順位を検討するにあたり、各地点を図7のように区分することにした。図7では縦軸に通行可能性(通行可能確率)、横軸にリンク重要度(消防署から文化遺産に至る最短経路が当該リンクを通行する頻度で表す)をとっており、グラフの原点は両指標値の平均である。これによって、モニタリング地点は4つのエリアに区分されることになる。ここで、エリア1は、重要性、脆弱性共に相対的に高い道路リンクであり、道路区間1、2、3、4、11、12の6リンクが該当する。エリア2は、重要性が高いが脆弱性は低い道路リンクであり、道路区間番5、6、7、8、14、16、17、19の8リンクが該当する。エリア3は、重要性および脆弱性がともに低い道路リンクであり、道路区間9、15、20、21、24、25、28、29、30、33の10リンクが該当する。そして、エリア4は、重要性が低いが脆弱性が高い道路リンクであり、道路区間10、13、18、22、23、26、27、31、32の9リンクが該当する。

(2)モニタリング地点の優先性の検討

対象地区においてモニタリングの候補地点として挙げられた33地点のうちで、情報価値に基づいて評価した場合に優先されるべき地点は、図5に示すように道路区間1、10、26、31、32等である。一方、エントロピーに基づいて評価した場合に優先されるべき地点は、図6に示すように道路区間9、11、12、22、27等である。対象地区においては、これらの地点は図7に示すように、概ねエリア1とエリア4に含まれている。このことから、エリア2およびエリア3と比較して、エリア1とエリア4に位置する地点の優先性は高いと考えられる。また、エリア1とエリア4を比較した場合、エリア1に属する道路リンクの重要度はエリア4よりも高いから、エリア1が優先されるべきであろう。もっとも、対象地区の状況によっては、エントロピーに基づいて優先性が示された地点がエリア2やエリア3の方向に移動することも考えられるから、エリア2とエリア3に位置する地点のうちで、図7の横軸周辺の地点も念頭に置いて優先性を考えるべきであろう。

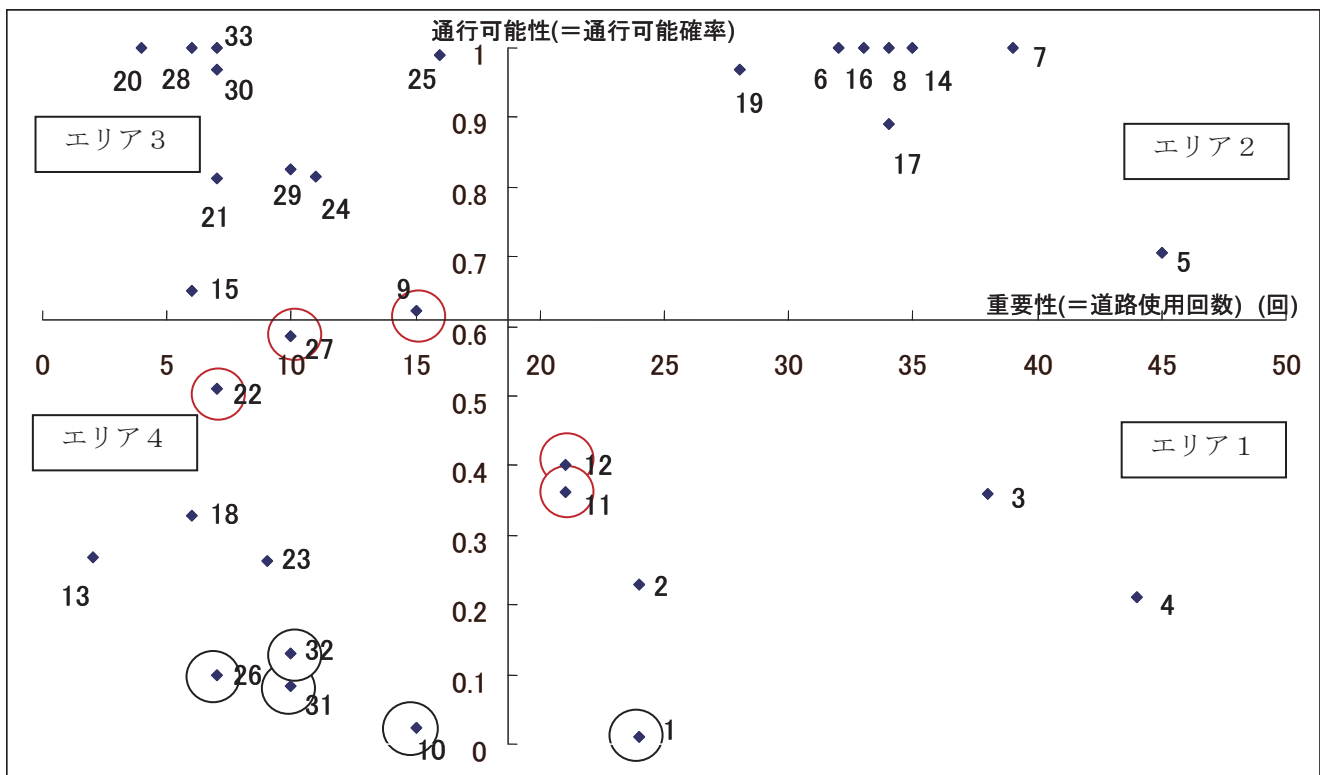


図7 文化遺産防災における重要性・脆弱性道路区間の区分

7. おわりに

本研究では、地震などの自然災害が発生した場合に、消防署から文化遺産へ至る重要リンクの被害状況をリアルタイムで把握するシステムとして、カメラを用いた道路モニタリングシステムについて検討することを目的とした。建造物や街路樹の有無による見通し距離を考慮に入れた即地的なカメラの設置候補地点を検討するために、より現実的な地理的情報を把握できる 3 次元 CG システムを用いて、カメラの設置候補地点の提案を行った。次に、モニタリングにより得られる防災情報に着目し、ある情報を提供した際に受け手が得る情報価値と平均情報量（エントロピー）からみて優先的に設置されるべき地点について検討した。なお、図 6 に基づいて示したモニタリング候補地点の優先性の検討結果は、東山区における実績値に基づくものであり、必ずしも一般性を有しているとは言えないことに留意すべきである。

本研究では、3 次元 CG システムを利用しているが、先述のように、街路樹、電柱、看板、歩道橋などの道路上の構造物を考慮していないから、3 次元 CG システムの効果を十分に活用しているとは言えない。歩道橋に関しては対象道路に存在しなかったためであり、電柱は線的な構造物であるから視線を遮る程度が少なくと考え考慮しなかったが、街路樹に関しては落葉樹がほとんどであり季節変化が大きい。これを如何に扱うかは課題として残っている。

6 章で述べたモニタリング区間の優先性に関しては、情報価値とエントロピーの 2 指標に基づいた順位づけの考え方を示したが、各地点の脆弱性の分布状況を考慮して、今後さらに吟味することが必要であろう。

本研究における課題として、モニタリングにより得られた情報を如何にネットワーク化するかが挙げられる。このシステムは、自然災害発生時においても、カメラ等の設備の被災や他のトラフィック集中の影響を受けることなく活用できるようにしなければならない。このため、カメラを画像の収集装置として用いるだけでなく、これを情報の伝達装置として活用するワイヤレスの防災情報ネットワークの構築について具体的に検討することが必要である。

本研究における 3 次元 CG システムの構築等には、林雄一氏（元立命館大学大学院学生、現三菱重工業(株)）の貢献が大きい。記して謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 小川圭一・塚口博司・中村真幸・本郷伸和：歴史都市における文化遺産防災のための重要道路区間の抽出に関する研究,土木計画学研究・論文集, No.23, 2006.
- 2) 林雄一・塚口博司・小川圭一・中村真幸：文化遺産の防災性向上のための道路モニタリングシステムに関する研究,土木計画学研究・講演集, Vol.34, CD-ROM, No.70, 2006
- 3) 塚口博司・小川圭一・田中耕太・本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定、歴史都市防災論文集 Vol. 3, 2009.