

ロジスティック回帰分析を用いた 豪雨時道路事前通行規制基準雨量の設定

SET UP OF STANDARD RAINFALL FOR TRAFFIC REGULATION
DURING HEAVY RAINFALL BY USING LOGISTIC REGRESSION ANALYSIS

杉原 成満¹・岸 博史²・植野 惣³・荒木 義則⁴・古川 浩平⁵

Shigemitsu SUGIHARA, Hiroshi KISHI, Osamu UENO, Yoshinori ARAKI
and Kohei FURUKAWA

¹ 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: s.sugi@yamaguchi-u.ac.jp

² 鹿島道路株式会社 (〒112-8566 東京都文京区後楽 1-7-27)

E-mail: hkishi@kajimaro.co.jp

³ 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: n005vf@yamaguchi-u.ac.jp

⁴ 中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8501 広島市南区出汐 2-3-30)

E-mail: araki@cecnet.co.jp

⁵ 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: furukaw@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words: logistic regression analysis, standard rainfall for traffic regulation, probabilistic evaluation

1. はじめに

道路沿線で土砂災害の危険性がある場合、土砂災害の発生防止や道路交通への被害防止のための対策を施すことが必要である。しかしながら、道路防災においては、ハード対策を要する斜面を有する路線が多いことに加え1つの路線上に複数の斜面が存在することから、十分な効果を発揮するためにはすべての斜面に対策を施すことが必要となる。そのため、現状では思うように事業の進展が図れていないという実情があり、限られた財源や管理体制の下で効率的に防災対策を講じるためにもソフト対策の整備が重要な課題となる。

道路防災におけるソフト対策としては、道路の事前通行規制¹⁾(以下、通行規制)が挙げられ、豪雨時においては連続雨量と時間雨量の2つの降雨指標を用いた道路事前通行規制基準雨量(以下、基準雨

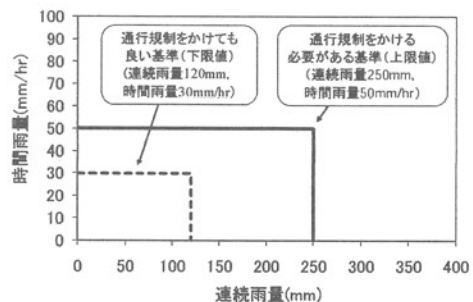


図-1 豪雨時道路事前通行規制基準雨量(山口県)

量)による災害の発生予測が広く一般的に用いられている。しかしながらその運用においては、いくつかの課題が挙げられる。その1つとしては、現在、山口県では通行規制をかけても良い基準(以下、下限値)と通行規制をかける必要がある基準(以下、上限値)の2つの基準雨量を用いて運用されているが、安全・危険の程度を定量的に表現する方法につ

いて明確に示されていないことが挙げられる。そのため、降雨が下限値を超過した後、どの時点で通行規制を実施するかという高度な判断が技術者に求められることとなるため、通行規制の実施が適切なタイミングで行えず、結果として災害発生後に通行規制が実施されることも少なくない。

このような問題に対する既往の取り組みの1つとして篠崎ら²⁾は、ロジスティック回帰分析³⁾を用いて、土砂災害警戒情報の発表基準を作成するために算出されるRBFN出力値⁴⁾と災害の発生・非発生の関係を解析することにより、実況雨量に対する災害発生の危険性を災害発生確率としてより明瞭に表現する方法を提案している。これにより、土砂災害警戒情報の発表基準を変更することなく、実況雨量に対応した災害発生確率をリアルタイムに評価することに成功している。

本研究では、ロジスティック回帰分析³⁾を用いて、基準雨量の設定に用いられている降雨指標ごとに災害発生の危険性を評価する確率モデルの構築を行った上で、現行の基準雨量の設定方法および概念に則した新たな基準雨量の設定を行った。さらには、降雨ピーク後の経過時間と災害発生時刻の関係についてロジスティック回帰分析³⁾を用いた解析を行うことにより、明確な解除指標の検討を行った。

2. ロジスティック回帰分析の概要

一般にある現象の発生する確率 P をその現象の生起を説明するために観測された変数群 $x=(x_1, x_2, \dots, x_r)$ で説明しようとする場合、 $x=(x_1, x_2, \dots, x_r)$ という状態のもとで現象が発生するという条件付き確率 $P(x)$ は、式(1)に示すとおり関数 F を用いてモデル化することが多い。

$$P(x) = (\text{発生} | x_1, x_2, \dots, x_r) = F(x_1, x_2, \dots, x_r) \quad (1)$$

ここで、 r 個の変数の影響を式(2)に示す線形な合成関数と考え、関数 F に Z のロジスティック関数を用いると式(3)のように表現される。

$$Z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_r x_r \quad (2)$$

(β : 推定値 x : 説明変数)

$$F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (3)$$

式(2)、式(3)のモデルをもとに、ある事象の発生確

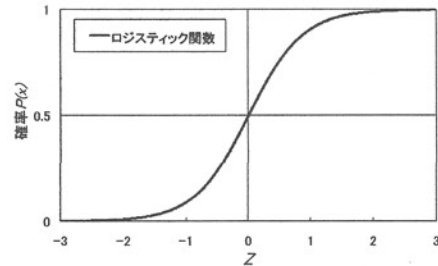


図-2 ロジスティック関数の概念図



図-3 検討対象地域

率 $P(x)$ を算出するためのロジスティック回帰モデルを式(4)で表すことができる。

$$P(x) = (\text{発生} | x_1, x_2, \dots, x_r) = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (4)$$

ロジスティック関数を表す曲線は図-2に示す通りであり、ロジスティック関数による発生確率分布のデータの傾向から導き出される災害の発生確率 $P(x)$ は0と1の間(0%~100%)の値をとる。なお、本研究では、発生、非発生データを与えて、 β を推定し、 $P(x)$ の一般式を算出する。ここで、 β の推定には最尤法を利用している³⁾。この一般式を用いて、基準雨量の各降雨指標を説明変数 x とし、土砂災害が発生する確率を求める回帰モデルの構築を試みる。

3. 使用データの概要

本研究では、山口県の中でも降雨により発生した道路災害の件数が多い岩国市を対象に検討を行う。検討対象地域を図-3に示す。

本研究における対象災害は、1989年から2000年までの11年間において通行規制の原因となった道路災害のうち、降雨により発生した災害85件(自然法面崩壊60件、切土法面崩壊1件、道路崩壊6件、路肩崩壊12件、路面陥没2件、落石4件)とした。なお、災害の発生時刻については、既往研究⁵⁾にお

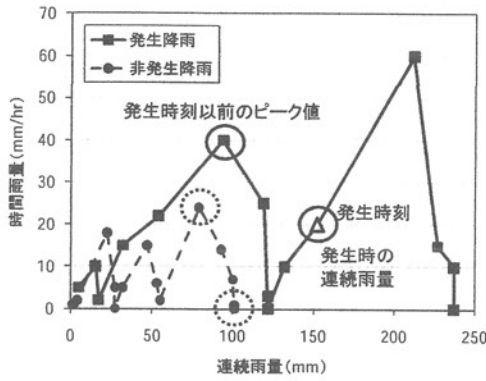


図-4 危険降雨と解析データの例

いて整理されている時刻を用いる。

また、降雨データは対象地域周辺に位置する岩国、玖珂、広瀬、大竹、長野山、羅漢山観測所（いずれも気象庁アメダス観測所）の観測データを用いる。収集した降雨データについては、現行の基準雨量の設定方法と同様に3時間の無降雨期間で区切られたひとまとまりの降雨を一連降雨として抽出した。この一連降雨の中で、通行規制の実施を伴った一連降雨を災害発生降雨（以下、発生降雨）とし、それ以外の降雨を災害の非発生降雨（以下、非発生降雨）として分類した。なお、同一の一連降雨内で複数の通行規制が実施された降雨に関しては、通行規制の実施単位ごとに発生降雨を区分して用いる。

4. ロジスティック回帰分析を用いた豪雨時道路事前通行規制基準雨量の設定

(1) 災害発生確率モデルの構築

災害発生確率モデルの構築に用いる降雨データは、発生を伴った降雨データを学習に用いる場合、災害発生に直接起因した降雨を用いて評価することから、図-4に示すように、災害発生時刻以前で最も危険な降雨として時間雨量は災害発生時刻以前でのピーク値を、連続雨量は災害発生時刻までの連続雨量を学習データとして採用する（図中実線の○）。一方災害を伴わなかった非発生降雨を学習に用いる場合、最も危険な降雨を経験しても災害が起きなかったことを評価することから、図-4に示すように時間雨量については一連降雨中でのピーク値を、連続雨量については一連降雨の総雨量を学習データとして採用する（図中点線の○）。

この学習データを説明変数 x とし、降雨ピーク以降に災害が発生した確率を目的変数 $P(x)$ として最尤推定法を用いてロジスティック回帰モデルの構築を行った。各降雨指標に関する回帰式を以下に示す。

表-1 t 値（災害発生確率モデル）

	t 値（連続雨量）	t 値（時間雨量）
β_0	-28.525	-32.540
β_1	19.130	18.242

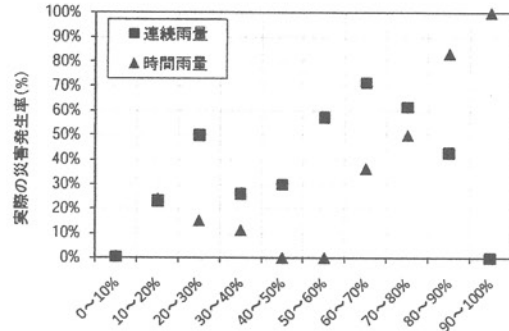


図-5 災害発生確率 $P(x)$ と実際の災害発生率の関係

$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-(-6.723 + 0.036x_{\text{連続雨量ピーク値}})\}} \quad (5)$$

$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-(-6.315 + 0.144x_{\text{時間雨量ピーク値}})\}} \quad (6)$$

回帰式に着目すると、推定値 β_1 については、両降雨指標ともに正の値となっており、雨量が大きくなるほど災害の危険性が高くなることを示すことから実現象との整合が取れており、式の成り立ちとして論理的な矛盾は生じていない。また、 t 値（推定値 β を推定標準偏差で除した値）についても表-1に示すとおり、いずれも絶対値が 1.96 以上となっていることから、説明変数 x は 95% の信頼性で採択確率に影響を与えうる要因であると判断することができる。そのため、モデルの構築に用いた要因やデータの選定は妥当であると考えられる。

また、構築したロジスティック回帰分析によって求めた災害発生確率 $P(x)$ と式(7)によって算出した実際の災害発生率の関係に着目すると、災害発生確率 $P(x)$ が増加するにつれ、実際の災害発生率も増加する傾向がみられることから、構築したロジスティック回帰モデルは、実際の災害発生状況に整合した妥当なモデルであると考えられる（図-5）。

これらのことから、モデルの構築に用いた要因やデータの選定については妥当であると考えられる。

$$\text{発生率} = \frac{\text{区間に該当する災害発生件数}}{\text{区間に該当する全降雨件数}} \times 100 \quad (7)$$

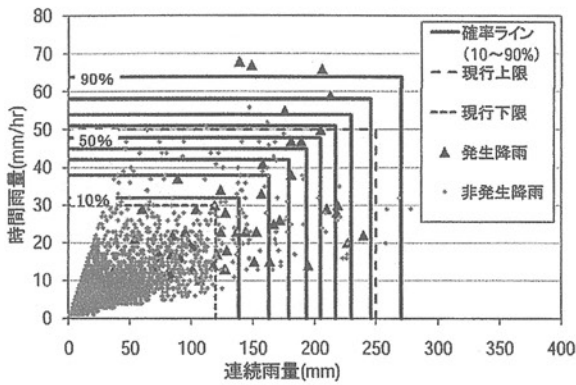


図-6 確率ラインと現行の基準雨量の関係

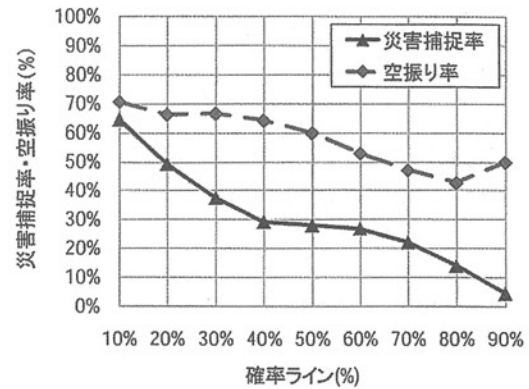


図-7 確率ラインと災害捕捉率・空振り率の関係

(2) 基準雨量への適用

前節の検討により構築したロジスティック回帰モデルは、任意の降雨値に対する災害発生確率を算出するものであるが、任意の確率値を与えることにより、その確率値となる降雨値を算出することも可能である。降雨指標ごとに災害発生確率値 10%~90% (10%刻み) となる際の降雨値を算出し、同パーセントとなる降雨値を結ぶことにより設定した任意の確率値となる雨量値を示すライン (以下、確率ライン) を図-6 に示す。なお、図-6 には比較のため、現行の基準雨量を併記した。

豪雨における通行規制の実施にあたっては、設定した確率ラインの中から、現行の上限値に相当するラインを選定することが必要となる。ここで、通行規制の運用を考えると、現行の上限値に相当するラインは、災害が発生した降雨を多数捕捉しながらも、できるだけ空振りを減少させることが可能な確率ラインを選定することが望ましい。そこで、本研究では、以下の式で定義される災害捕捉率 (式(8)) および空振り率 (式(9)) を用いて、各確率ラインの精度を算出した上で、現行の上限値に相当する最適な確率ラインの選定を行うこととした。確率ラインと災害捕捉率および空振り率の関係を図-7 に示す。

$$\text{災害捕捉率} = \frac{\text{確率ライン超過後の災害件数}}{\text{全災害件数}} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{空振り率} = \frac{\text{災害の非発生降雨数}}{\text{確率ラインを超過した降雨数}} \times 100 \quad (9)$$

図より、確率ラインと災害捕捉率に着目すると、災害捕捉率は、確率ライン 10% から 40% にかけて低下した後、確率ライン 40% から 60% で概ね一定となるが、90% にかけて再度低下することから、災害捕

捉率が低下を始める確率ライン 10% および 60% の付近で複数の災害が発生しているものと考えられる。また、この時の空振り率に着目すると、確率ライン 60% では空振り率は 50% 程度であることに対し、確率ライン 10% では空振り率は 70% と高いことに加え、その雨量値が図-6 に示すとおり時間雨量 32mm/hr、連続雨量 139mm と低いことから、確率ライン 10% を超過する降雨は確率ライン 60% を超過する降雨よりもはるかに多くなり、結果として空振りが頻発することが懸念される。また、各確率ラインと現行の基準雨量の関係に着目すると、確率ライン 10% は現行の下限値と概ね同等の雨量値となっていることから、現行の上限値に相当する確率ラインとして選定することは不適切であると考えられる (図-6)。

そのため、本研究では、確率ライン 60% を現行の上限値に相当する通行規制をかける必要があるラインとして選定することとした。

(3) 解除指標の検討

前節までの検討により、構築した災害発生確率モデルを用いることで実況の雨量に対する災害発生の危険性を災害発生確率としてより明瞭に表現することが可能となるとともに、災害発生確率を考慮した新たな基準雨量を設定することが可能となった。しかしながら、構築した災害発生確率モデルは、降雨ピーク後に災害が発生する確率を算出するモデルであるため、降雨が降り止む傾向であっても災害発生確率は減衰せず、常に降雨ピーク時と同じ値を示すこととなる。そのため、構築した災害発生確率モデルをより有効に活用するためには、新たな解除指標を検討することが必要となる。

ここで、降雨により発生する道路災害について、その発生時刻と降雨の関係を考えると、短時間の強い雨が降っている最中もしくはその直後ほど災害の

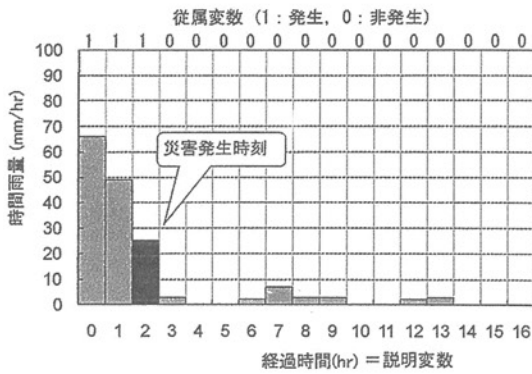


図-8 解除指標の検討に用いる学習データ の概念図

危険性が高く、降雨ピークからの時間が経過するにつれて災害の危険性は低くなると考えられる。そこで、本研究では降雨ピーク後の経過時間と災害発生時刻の関係についてロジスティック回帰分析を用いた解析を行うことにより、新たな解除指標の検討を行うこととした。

解除指標の検討に用いる学習データ の概念図を図-8 に示す。図-8 の事例では、降雨ピークから2時間後に災害が発生していることから、災害が発生する直前までは危険な降雨であったものと評価し、降雨ピーク後の経過時間0~2時間に対し「発生」という従属変数を与え、災害発生時刻以降は、危険性が解消されたものと評価し、降雨ピーク後の経過時間3時間以降に対しては、「非発生」という従属変数を与えることで、降雨ピーク後の災害発生確率 $p(x)$ を評価する回帰モデルの構築を行った。構築した回帰式を式(10)に示す。

$$p(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-(-3.726 - 1.691x_{\text{ピーク後経過時間}})\}} \quad (10)$$

回帰式に着目すると、推定値 β_1 については、負の値となっていることから、ピーク後に時間を経過するほど災害の危険性が低くなることを示している。そのため、構築した回帰モデルは実現象との整合が取れており、式の成り立ちとして論理的な矛盾は生じていない。また、 t 値は β_0 については 10.302 を示し、 β_1 については -7.495 を示していることから、説明変数 x は 95% の信頼性で採択確率に影響を与える要因であると判断することができる。そのため、モデルの構築に用いた要因やデータの選定は妥当であると考えられる。

また、降雨ピーク以降の経過時間と回帰式を用いて算出した降雨ピーク後の災害発生確率 $p(x)$ および

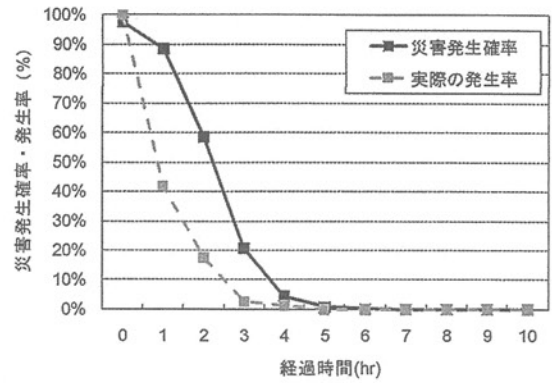


図-9 経過時間とピーク後の災害発生確率 $p(x)$ の関係

実際の災害発生率 (式(7)を用いて算出) に着目すると、降雨ピーク時および1時間後では災害発生確率 $p(x)$ は概ね 90% 以上と非常に高い値を示しているため、この時点で通行規制の解除を行うことは非常に危険であると考えられる。2時間が経過した時点では災害発生確率 $p(x)$ は約 60% まで大幅に低下するものの、災害の危険性は未だ高いままである。災害発生確率 $p(x)$ は降雨ピーク後4時間を経過した時点ではじめて 10% を下回り、5時間が経過した時点では限りなく 0% に近い値まで低下し、十分に安全な状態であると判断することができる (図-9)。

そのため、本研究では降雨ピーク後5時間を経過した時点において通行規制の解除を行うこととした。

6. 提案手法を用いた運用検証

本研究では、これまでロジスティック回帰分析を用いて道路災害の発生状況を分析することにより、新たな基準雨量および解除指標の検討を行ってきた。ここでは、提案する手法を用いた運用検証を行う。ここで検証に用いる降雨は、気象庁アメダス羅漢山観測所で観測された1992年8月8日から翌9日の降雨であり、3件の道路災害が発生した降雨である。当該降雨のハイエトグラフおよび災害発生確率 $P(x)$ の推移を図-10 に示す。

8日8時過ぎから降り始めた降雨は、同日13時に時間雨量 60mm/hr を超える短時間の強い雨を経験したことにより、新たな基準雨量 ($P(x)=60\%$) を超過するため、通行規制を開始する。規制開始時の災害発生確率 $P(x)$ は 96% と非常に高く、危険な状態であったことを示しており、当該降雨により災害が2件発生している。規制開始後も降雨は継続し、規制開始の1時間後の同日14時に更に災害が1件発生している。しかしながら、規制開始の起因となった降雨

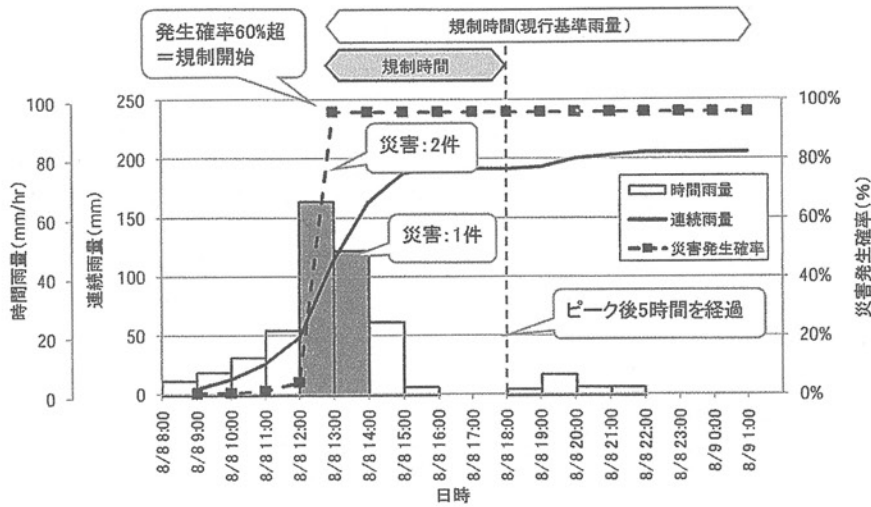


図-10 提案手法を用いた運用イメージ

ピークを超える降雨を経験することはなく、その後降雨は終息に向う。同日 18 時の時点では降雨ピーク記録後 5 時間を経過するため、通行規制は解除となる。なお、通行規制の解除後には災害は確認されていない。一方、現行の基準雨量では、通行規制の開始時刻こそ提案手法による運用と同時刻となるものの、明確な解除基準を有していないため、解除の判断を適切なタイミングで行えなかった場合、一連降雨が終了する 9 日 1 時までの 13 時間もの長い間、通行規制を実施することとなる。

これらのことから、本研究で提案する手法を用いることで、降雨による災害の危険度の変化を確率値という直接的に理解しやすい指標で表現できるとともに、危険度の変化を踏まえた適切な通行規制の実施が行えるものと考えられる。

7. まとめ

本研究ではロジスティック回帰分析を用いることにより、時々刻々と変化する実況雨量に対する災害の危険性を災害発生確率としてより明瞭に表現することを試みた上で、現行の基準雨量の設定方法および概念に則した新たな基準雨量および解除指標の検討を行った。本研究で得られた主要な結果を以下に示す。

- 1)ロジスティック回帰分析を用いることにより、時々刻々と変化する実況雨量に対する災害の危険性を災害発生確率としてより明瞭に表現することができた。
- 2)ロジスティック回帰分析を用いて算出した災害発生確率を用いることにより、技術者の主観に頼ることなく、客観的、かつ再現性の高い基準雨量の設定を行うこ

とができた。

- 3)降雨ピーク後の経過時間と災害発生時刻の関係についてロジスティック回帰分析を用いた解析を行うことにより、解除指標の設定を行うことができた。

本研究は、山口県岩国市を対象とした検討である。そのため、降雨状況や災害発生状況等が異なる他地域においては当該モデルをそのまま用いることはできず、回帰式の再構築が必要となる。今後は地域特性が異なる地域における検討を行うとともに、さらなるデータの集積・検証を進めることにより、道路通行規制の基幹をなすシステムとして活用されることを期待したい。

参考文献

- 1) 建設省道路局企画課：道路技術基準通達集 -基準の変遷と通達-, ぎょうせい, pp.1281-1284, 1997.
- 2) 篠崎嗣浩, 福田賢司, 大石博之, 杉原成満, 古川浩平：ロジスティック回帰分析を用いた土砂災害発生危険基準線の確率的評価, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.122-24, 2010.
- 3) 丹後俊郎, 山岡和枝, 高木晴良：ロジスティック回帰分析, pp.2-31, 朝倉書店, 1996.
- 4) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部：都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き, 2007.
- 5) 山田淳浩, 竹本大昭, 小林央宜, 倉本和正, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平：豪雨時の道路事前通行規制基準雨量の設定に関する研究, 砂防学会誌, Vol.57, No.6, pp.28-39, 2005.

(2010. 5. 14 受付)