

◆特集：自然災害に対応する危機管理技術◆

# 土砂災害発生危険基準線に対する客観的な設定手法の有効性

野呂智之\* 倉本和正\*\* 小山内信智\*\*\*

## 1. はじめに

多数の人的被害を伴う土砂災害から人命および身体を守るための施策として、都道府県は砂防えん堤の整備等を行う、いわゆるハード対策に加え、土砂災害に関する警戒避難基準情報の市町村に対する提供や平成13年度に施行された土砂災害防止法に基づく土砂災害のおそれのある区域の設定・周知、警戒避難体制の整備、住宅の開発制限等による危険箇所の増加防止対策等のソフト対策の充実を図っている。

このような取り組みの中、平成14年度からは国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部とが連携し、それぞれの得意分野に関する知見を持ち寄りながら、共同で土砂災害の警戒に対する情報を発表するための検討を一部の県を対象に行ってきた。

土砂災害警戒情報と呼ばれるこの情報は、大雨による土砂災害発生の危険度が高まったときに、市町村長が防災活動や住民等へ出す避難勧告等の災害応急対応を適時適切に行えるよう支援するために発表するものである。また、一般的に災害発生までの時間的余裕に乏しい土砂災害の特徴を踏まえ、住民が自主避難する際の判断等にも使われることを視野に入れている。

この土砂災害警戒情報は、都道府県砂防部局が監視する土砂災害警戒避難基準雨量と地方気象台が監視する土壌雨量指数の2種類の基準を比較することによって運用を行う。ともに降水量をベースに算出するこの基準を見比べ、事前に定めたそれぞれの条件が「共に満たされた場合 (AND条件)」「どちらかが満たされた場合 (OR条件)」に発表を行うが、どちらを採用するかは、各都道府県で検討して決定することになっている。

この2種類の基準は、砂防部局・気象庁で従来運用されてきたものである。それぞれノウハウが蓄積されている一方で長所・短所があることや、災害が切迫した状況の中で2種類の基準を比較する作業の複雑さも指摘されてきたところである。

このような状況を踏まえ、本研究では砂防部局・気象台が共通して運用可能な新たな基準の設定手法の開発を目的として、従来から砂防部局で用いられている土砂災害発生危険基準線 (Critical Line: 以下、CL) の設定に関する課題を整理するとともに、その改善方法について検討を行った。

## 2. 現状のCL設定手法の課題

現在提案されているCLの設定手法<sup>1~3)</sup> (以下、従来手法) は、長期降雨指標 (たとえば、累加雨量)、短期降雨指標 (たとえば、時間雨量) をそれぞれx軸、y軸とする平面上に、過去に土砂災害を引き起こした降雨 (以下、発生降雨) と土砂災害を引き起こさなかった降雨 (以下、非発生降雨) をそれぞれプロットし、それらの境界線を探索するというものである。そのため、CLの精度および信頼性を高めるには多くの発生降雨を収集することが必要となるが、実際には発生降雨のデータ数は少なく、しかも、その中には発生時刻が曖昧なものや発生箇所と雨量観測所との距離が

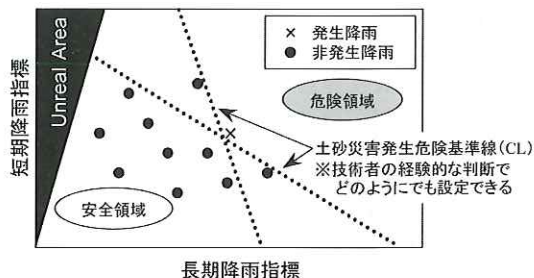


図-1 CLの設定に関する課題

Effects of Objective Setting Method on Critical Rainfall for Early Warning from Sediment-Related Disasters

離れているものも多く含まれている。そのため、全国的にみても信頼性の高い発生降雨を十分確保した上でCLを設定した例は少ない。

また、従来手法に基づいて設定されるCLは、データ数の少ない発生降雨と比較的降雨量の多い非発生降雨の分布から、技術者の経験的な判断に基づいて設定される場合が多い(図-1参照)。しかも、当該CLは直線で設定される場合がほとんどであるため、対象とする地域の降雨特性を精度よく再現することは困難である。そのため、直線のCLでは、災害発生の危険性の低い領域(図-1に示すCLの左下の領域：以下、安全領域)を過大評価もしくは過小評価することにもつながっている。

### 3. CL設定手法の改善方法

従来手法の課題を改善するためには、発生降雨が少ない地域に対しても、当該地域の降雨の発現頻度などから客観的にCLを設定できる手法の開発が必要である。そのような手法の開発にあたっては、まず発生降雨に基づいて危険領域を評価するという従来の発想を転換し、大量にある非発生降雨から安全領域を評価する(それ以外の領域は危険領域)とする考え方に移行することが重要である。また、CLの形状は、直線に固執することなく、対象とする地域での降雨の発現頻度などに基づいて検討することが望ましい。

本研究では、非発生降雨の発現頻度から安全領域を評価する手法として提案されているRBFネットワーク(Radial Basis Function Network、放射状基底関数ネットワーク：以下、RBFN)を用いたCLの設定手法<sup>4)</sup>に着目し、その有効性を検討する。

### 4. RBFNを用いたCLの設定手法

#### 4.1 RBFNの概要

RBFNは、脳や神経回路網をモデルとした階層構造で、図-2に示すとおり入力層(素子数 $n$ 個)、中間層(素子数 $m$ 個)、出力層(素子数1個)の3層からなっている。

中間層における $j$ 番目の素子の出力関数として

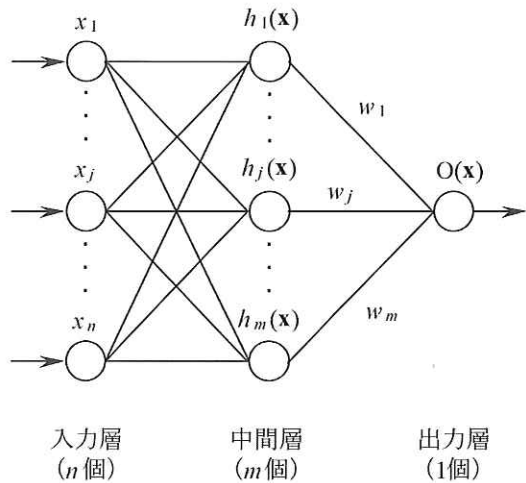


図-2 RBFネットワークの構造

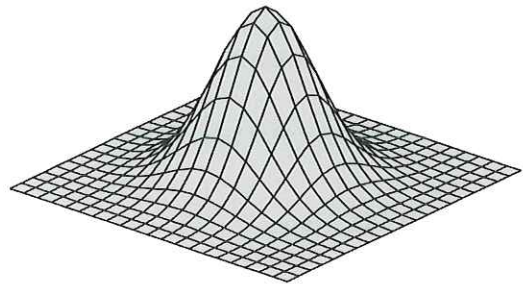


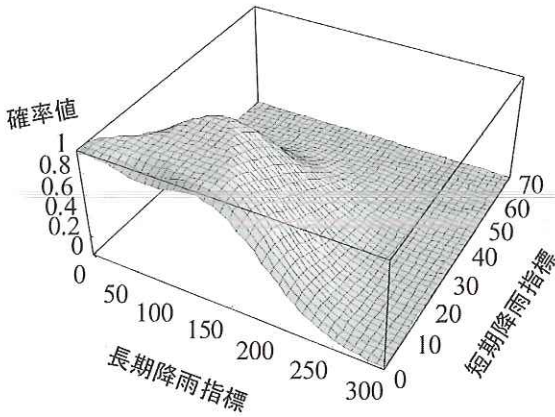
図-3 ガウス関数の形状

は、主として、図-3に示す釣鐘状のガウス関数  $h_j(x) = \exp(-\|x - c_j\|^2 / r^2)$  を用いる。出力層素子の出力は、中間層素子と結合係数  $w_j (j=1, \dots, m)$  との積の総和  $O(x) = \sum_{j=1}^m w_j h_j(x)$  として表される。

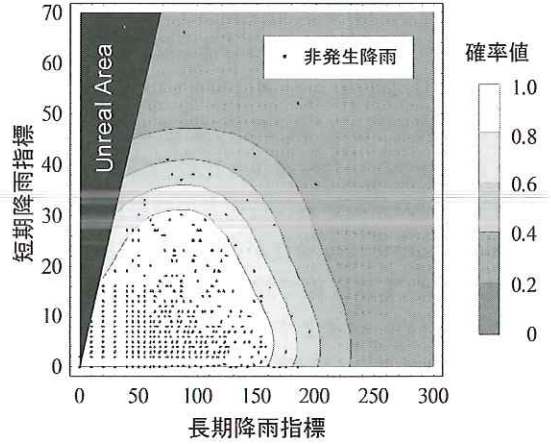
RBFNの学習は、 $p$ 個の学習データ  $x_i (i=1, \dots, p)$  と教師データ  $y_i (i=1, \dots, p)$ 、ならびに $m$ 個の基底関数を用いて教師値と出力値の差の2乗和を考え、それに結合係数の抑制項を加えた式(1)が最小となるような $w_j$ を求めることである。

$$E = \sum_{i=1}^p (y_i - O(x_i))^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j^2 \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

式(1)の右辺を $w_j$ で偏微分し、それぞれの式を0として $w$ について解くと求める $w$ が得られる。中間層の出力行列 $H$ と教師データのベクトル $Y$ をそれぞれ式(2)とすると、 $w$ は式(3)で表せる。



(a) 3次元での表示例



(b) 2次元での表示例

図-4 応答曲面の設定例

$$H = \begin{bmatrix} h_1(x_1) & h_2(x_1) & \dots & h_m(x_1) \\ h_1(x_2) & h_2(x_2) & \dots & h_m(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1(x_p) & h_2(x_p) & \dots & h_m(x_p) \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$w = (H^T H + \Lambda)^{-1} H^T y \quad (3)$$

ただし、 $\Lambda$ は $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ を対角成分とする対角行列である。

以上のことから、RBFNにおける学習は、逆行列 $A^{-1} = (H^T H + \Lambda)^{-1}$ を求めることと同等である。  
4.2 RBFを用いた応答曲面およびCLの設定

CLの設定については、まずRBFNで非発生降雨を1として学習させ、x軸、y軸をそれぞれ長期降雨指標、短期降雨指標とする平面上で任意の点の降雨量がどの程度の確率で発現するかを示す値(以下、確率値)を表現した曲面(以下、応答曲面)を設定する(図-4参照)。図-4(a)は、図中の確率値が高い(上限は1)ほど、降雨の発現確率が高く、確率値が低い(下限は0)ほど、降雨の発現頻度が低くなることを示している。また、図-4(b)は、3次元で表現している応答曲面(図-4(a))を平面上に表したものである。図中の白い領域は確率値が0.8~1の高い値を示す領域で、降雨の発現頻度が高いことを示している。また、白から灰色の領域に近づくにつれ、確率値が低下することを意味しており、降雨の発現頻度

が減少していることを示している。なお、図中の線は確率値0.2~0.8を0.2間隔で抽出した等確率値線を示している。

次にCLの設定では、当該応答曲面から任意の確率値の等確率値線を抽出し、抽出した等確率値線が実際の現象と矛盾しない(等確率値線上の任意の点で接線の傾きが正にならない)ように等確率値線を修正する(図-5参照)。ここで、実際の現象との矛盾とは、たとえば、同一の時間雨量が観測されている場合、累加雨量が大きい方が小さい場合に比べて土砂災害発生の危険度が低く評価されることをいう。

等確率値線の修正を行った上で、それらすべての等確率値線を仮にCL(案)として設定した場合、どのCL(案)が災害捕捉率、空振り率などの観点から妥当であるかを検討する。検討結果より、最も妥当であると判断されたCL(案)を最終的なCLとする。

#### 4.3 解析モデル

RBFNにおいては、基本的に各データセットに対して基底関数を設定し、それらの重ね合せによって応答曲面を設定する。しかしながら、本研究のように膨大なデータ量を取り扱う場合、すべてのデータセットに基底関数を割り当てると、行列サイズが大きくなり計算が困難になる。しかも、基底関数の分布に偏りが生じることで、実際の現象と矛盾しないような再現性のある応答曲面が設

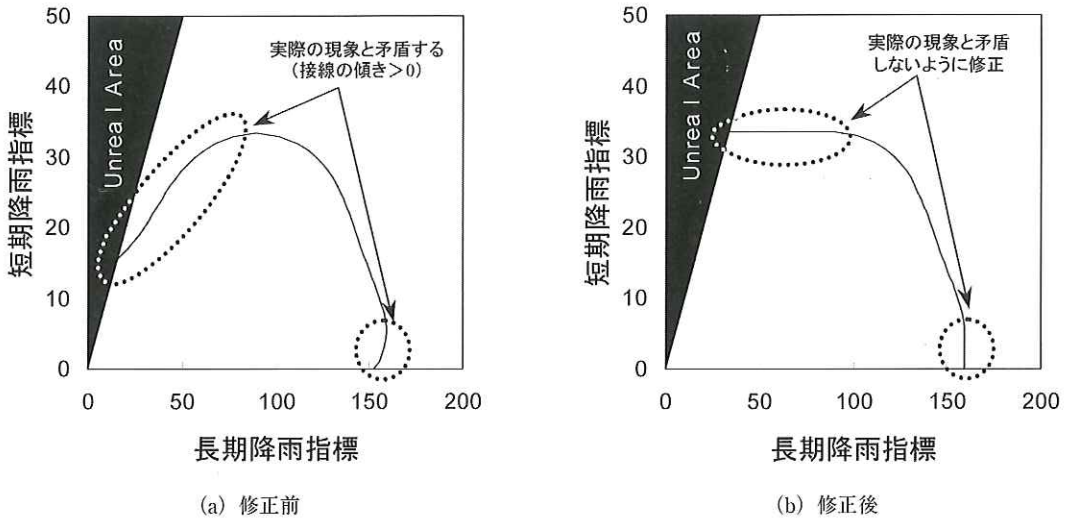


図-5 等確率値線の修正

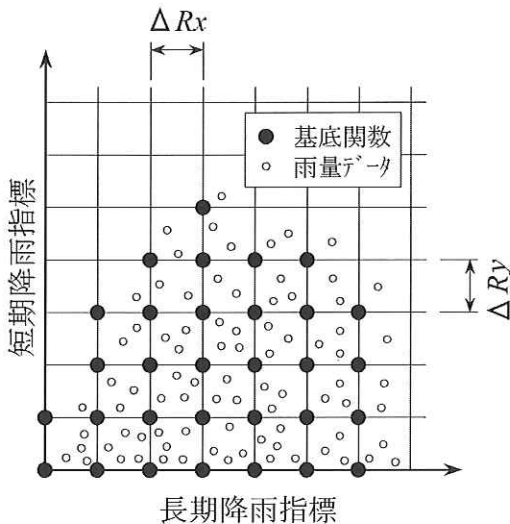


図-6 格子および基底関数の設定

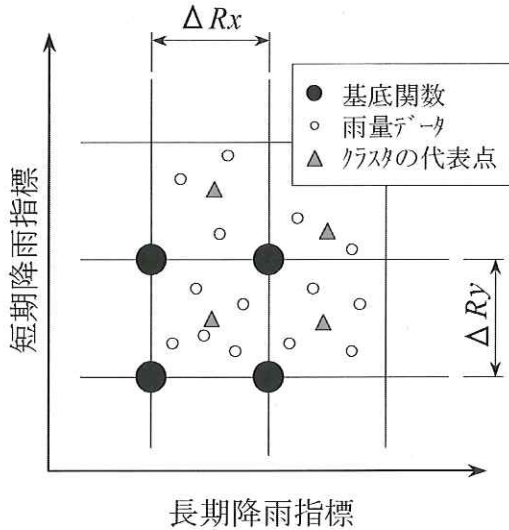


図-7 クラスタリングの概念図

定される可能性もある。したがって、RBFNを用いて効率的かつ再現性のある応答曲面を設定するためには、できる限り基底関数の数を減少させることやデータの密度を均等化させることが重要である。そこで、図-6に示すとおり、雨量データの存在する範囲内にx軸、y軸それぞれ一定間隔(ΔRx, ΔRy)の格子を設定し、設定した格子の中にデータが存在する場合に限り、当該格子の左下に基底関数を設定することとする。また、雨量データについては、格子ごとに重心法によるクラスタリングを行い、当該領域内にクラスタの代表

点を設定する(図-7参照)。当該代表点はRBFNにおける学習用のデータセットとして用いる。さらに、基底関数は、その周辺に含まれるデータ数の違いによって信頼度が異なるため、それについては各格子に含まれるデータ数に応じてそれぞれλを変化させ、信頼度をシステムに反映させる。なお、データ数に伴うλは式(4)によって与える。

$$\lambda = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{1 + \text{count}} \quad (4)$$

ここで、 $\lambda_{\max}$  :  $\lambda$  の最大値  
 $\lambda_{\min}$  :  $\lambda$  の最小値  
 $count$  : 各格子に含まれるデータ数

式 (4) の  $\lambda_{\max}$ 、 $\lambda_{\min}$  の値は  $\lambda_{\max} \geq \lambda_{\min}$  の関係を満足する範囲内であれば任意に設定することができる。

これにより、基底関数の数を効率的に減少させ、データの頻度も均等にすることが可能である。また、基底関数の信頼度をシステムに反映させることで、より客観的に降雨による危険度を表現することが可能である。

### 5. RBFN の適用結果

本研究では、4. で示した解析モデルを用いて、実際の地域で CL を設定し、当該手法の有効性について検討した。

#### 5.1 対象地域および対象データ

RBFN を用いた CL 設定手法の有効性を検討するためには、降雨特性が異なる幾つかの地域に対して CL を設定し、それらを評価する必要がある。本研究では、土砂災害が発生していない 2 地域（降雨量の少ない地域（A 市）と降雨量の多い地域（B 市））と土砂災害が発生している 1 地域（C 市）の全 3 地域を選定した。

CL の設定に用いる雨量データは、対象地域において 1991 年～2000 年（10 年間）までに観測されたすべての時刻（正時）の雨量データから、土砂災害が確認されている一連の降雨を削除したものととした。ただし、発生が確認されていない地域ではすべての雨量データを使用した。ここで、対象とした土砂災害は、土石流および同一降雨中に複数件発生したがけ崩れとした。また、一連の降雨は、前後に 24 時間以上の無降雨期間があるひと

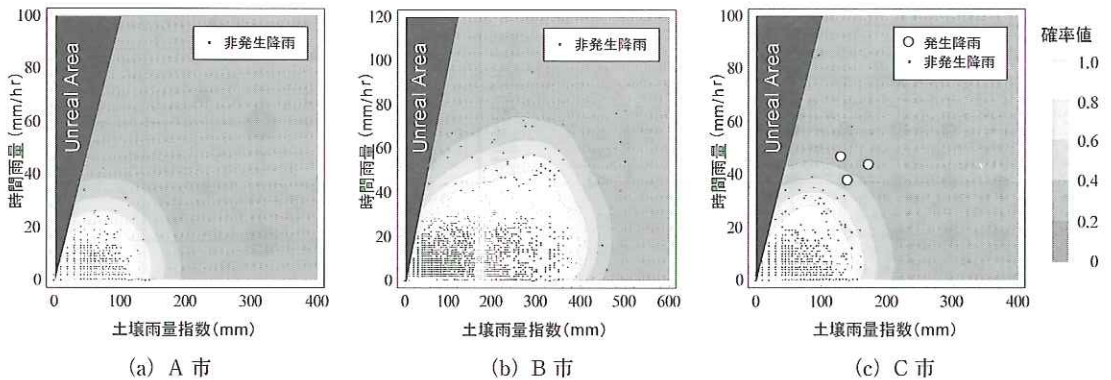


図-8 対象地域における応答曲面

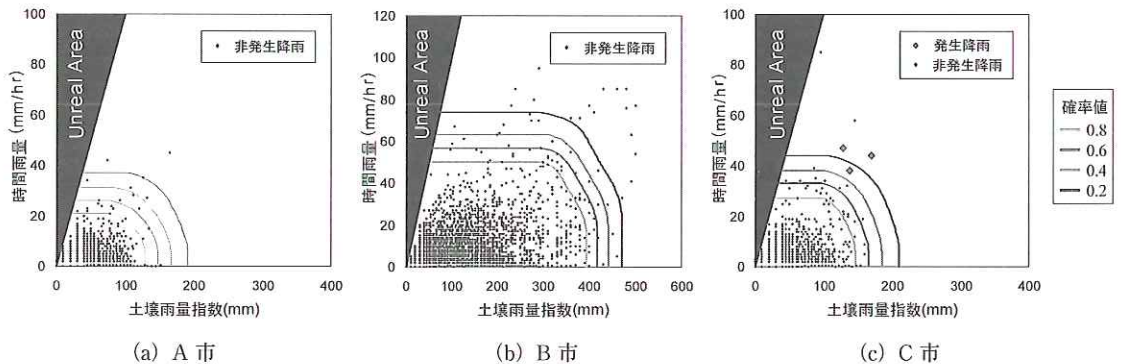


図-9 対象地域における CL

まとまりの降雨とした。なお、CLの短期降雨指標、長期降雨指標は、それぞれ時間雨量、土壌雨量指数とした

## 5.2 応答曲面およびCLの設定

前節で述べたデータを用いて、各対象地域の応答曲面を設定した。設定した応答曲面を図-8に示す。また、当該応答曲面から確率値0.2~0.8の等確率値線を0.2間隔で抽出し、4.2節で述べた方法により、当該等確率値線を修正した。その結果を図-9に示す。なお、CLの設定では、最終的にCLとなる等確率値線を1本選定する必要があるが、本研究では、RBFNを用いたCL設定手法の有効性の検討を目的としているため、等確率値線の選定方法についてはあまり言及しない。

図-8、図-9より、設定した応答曲面およびCLは、地域ごとの非発生降雨の平均的な分布を精度よく再現していることがわかる。しかも、平均的な分布から突出した幾つかの点については、異常点として応答曲面にほとんど影響を及ぼしていない。また、3件の発生が確認されているC市においては、発生降雨と非発生降雨の分離性が高く、例えば、確率値0.4の等確率値線をCLとすれば、客観的かつ精度の高いCLを設定することが可能である。

従来の設定手法に基づいて3つの対象地域にCLを設定しようとする場合、一概には言えないものの、直線で設定することは困難であり、主観的な設定になる可能性が高いと推察される。特に降雨量の多いB市については、そのような問題が顕著に表れるものと考えられる。

以上のことから、CLの設定に対してRBFNを

利用すれば、発生降雨の有無にかかわらず、客観的かつ精度よくCLを設定することが可能であると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、砂防部局・気象台が共通して運用可能な新たな基準の設定手法の開発を目的として、従来から砂防部局で用いられているCLの設定に関する課題を明らかにするとともに、その改善方法を整理した。

また、従来手法の改善方法のひとつとして提案されているRBFNを用いたCLの設定手法に着目し、当該手法の有効性について検討した。その結果、RBFNを用いることで、従来CLの設定が困難であった発生降雨のない（もしくは少ない）地域に対しても、客観的かつ精度よくCLを設定できることが明らかとなった。

今後は、RBFNを用いたCLの設定手法を土砂災害警戒情報の作成・発表基準に対して適用していく予定である。

## 参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案）、1984.
- 2) 矢野勝太郎：前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究、新砂防、Vol.43, No.4, pp.453-463, 1990.
- 3) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果、pp.29-35, 1993.
- 4) 倉本和正、鉄賀博己、東 寛和、荒川雅生、中山弘隆、古川浩平：RBFネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究、土木学会論文集、No.672/VI-50, pp.117-132, 2001.

野呂智之\*



国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 砂防研究室 主任研究官  
Tomoyuki NORO

倉本和正\*\*



国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 砂防研究室 交流研究員 博 (工)  
Dr. Kazumasa KURAMOTO

小山内信智\*\*\*



国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 砂防研究室長 博 (農)  
Dr. Nobutomo OSANAI