

局地的豪雨探知システムについて

上野 和也¹・松田 政裕²

¹近畿地方整備局 河川部 水災害予報センター (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1) .

XバンドMPレーダについては、人口、試算が集中している政令指定都市等の大都市や、近年、甚大な水害、土砂災害等が発生し、被災リスクの高まっている地域を重点に整備を進めてきたところである。XバンドMPレーダの特徴は、既存レーダに比べ降雨に関する詳細情報を図ることを可能にし、しかも短い時間間隔で観測更新できる（というこで、降雨監視体制を強化することができる）。そこで、急激に発達する局地的な豪雨による災害を防止するために、XバンドMPレーダを使って豪雨となる可能性がある積乱雲を数分から10分程度先予測する試験システムを検討・整備していくこととした。

キーワード XバンドMPレーダ, 豪雨のタマゴ, 予測

1. 背景と目的

(1) 平成20年7月28日 都賀川水害（神戸市）

兵庫県神戸市都賀川において、10分間雨量で最大24mmを記録し、10分で1.34mの水位上昇、5名死亡、11名が救助、41名が避難という水害が発生した。従来のレーダでは、捉えきれない局地的な豪雨であった。（図-1、図-2）

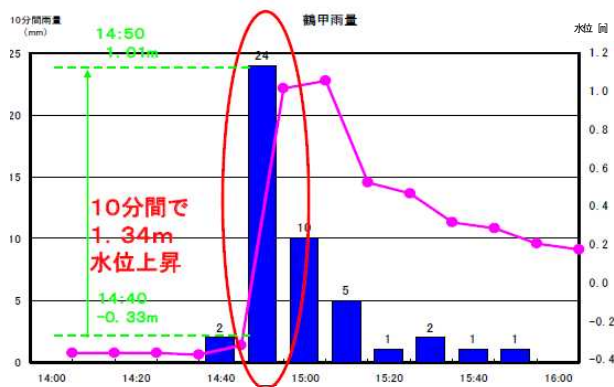


図-1 平成20年7月28日 都賀川甲橋水位と降雨量



図-2 都賀川甲橋 水位上昇状況（神戸市モニタリング画像）

(2) 豪雨水害を踏まえたWG

都賀川の水害を契機に、中小河川における局地的豪雨対策、水難事故防災策の検討を行う場として、平成20年

9月「中小河川における水難事故防止策検討WG」、
「中小河川における局地的豪雨対策WG」が設置され、局地的な大雨や集中豪雨の監視を強化するための高解像度のレーダ雨量計の設置するなど、観測体制を強化するとともに気象予測や洪水予測の高度化への取り組みについて提言された。（図-3）

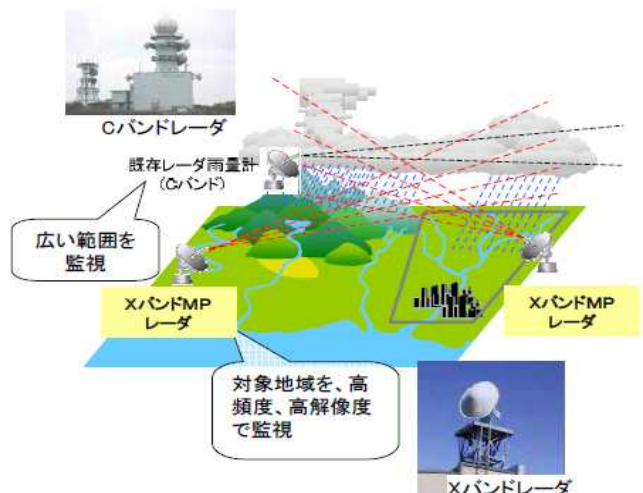


図-3 レーダ高度化のイメージ

(3) XバンドMPレーダの特徴と整備

XバンドレーダはCバンドレーダに比べ波長が短く、高分解能な観測が可能である。2種類の偏波（水平・垂直）を送信することで、雨粒の形状等を把握し、雨滴の扁平度等から雨量を推定し、地上雨量計による補正なく、高精度な雨量観測データをほぼリアルタイムで配信することが可能である。またドップラー機能により、雨滴の移動速度を計測することで風の観測も可能となっている（図-4）。 また整備状況については、人口、資産が集中

している政令指定都市等に、ゲリラ豪雨対策として整備され現在は27基体制で運用している。

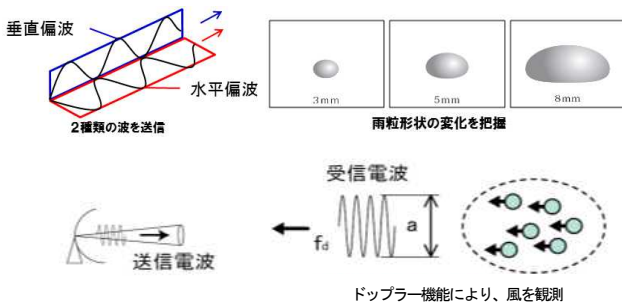


図4 XバンドMPレーダの特徴

(4) 範囲、対象および目的

a) 範囲

大阪、神戸、京都、堺の重点監視地域を含み、図-5のとおり5台（六甲、葛城、田口、鷺峰山、鈴鹿）のXバンドMPレーダにより観測可能な範囲を探知範囲とした。なお、探知を行う高度は、積乱雲の発生とその後の発達過程を追跡できる地上から上空10kmまでとした。

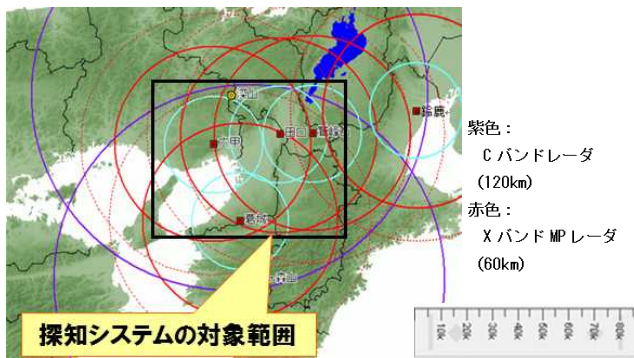


図5 局地的豪雨システムの対象範囲

b) 対象

①発生時は孤立しており、②30分以内で50mm/hに急発達し、③その後50mm/h以上の強雨が30分以上続く積乱雲を「豪雨セル」、①②の条件を満たす積乱雲を「準豪雨セル」とし、それらを対象とする。

c) 目的

都賀川で発生したような急激に発達する局地的な豪雨による災害を防止するために、従来レーダでは捉えることが困難だった積乱雲の発生当初を探知し、数分から10分程度先に豪雨のタマゴを見つけるシステムを整備する。(図-6)

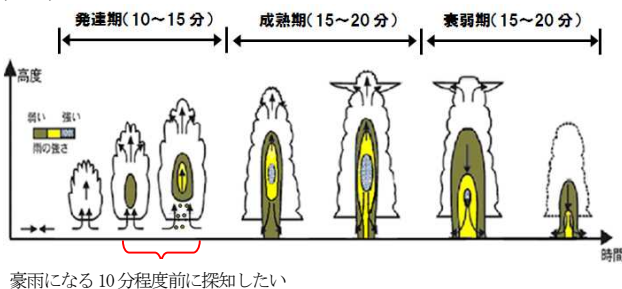


図6 積乱雲の一生

2. 豪雨のタマゴ手法

(1) 定高度面データ（CAPPI）作成処理

5台（六甲、葛城、田口、鷺峰山、鈴鹿）のXバンドMPレーダを組み合わせ、仰角運用の最適スケジュールを調整し、1分間のレーダ観測を行うことで、CAPPIデータの空間平均カバー率が76%となる。連続5分間のCAPPIデータを合成することで、空間カバー率が100%となり、それを順次、繰り返すことにより1分間隔の3次元観測を可能にしている。(図-7、図-8)

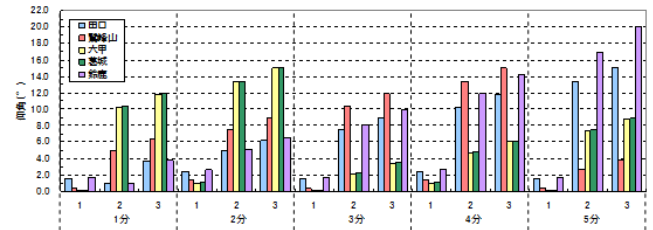


図7 近畿4基および鈴鹿局の仰角スケジュール

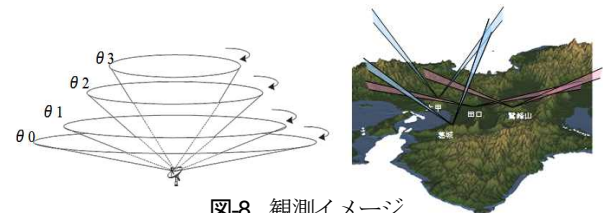


図8 観測イメージ

(2) 降雨セルの抽出・追跡

京都大学防災研究所で開発された降水セル抽出・追跡プログラム（CCL）を改修し、豪雨のタマゴシステムに適用した。

a) 抽出

降水セルの抽出は、反射強度20dBZ（雨量強度1mm/h相当）以上の降水域を検出し番号を付ける。(図-9)

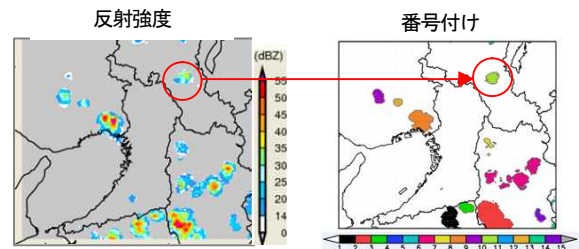


図9 降水セルの抽出

b) 追跡

抽出された降水セルを時間方向に紐付けすることで追跡を行う。紐付けは、セルとセルの体積変化量と移動距離を組み合わせた「体積距離」を使用し、体積距離が最小のセル同士を紐付けすることで追跡を行う。(図-10)

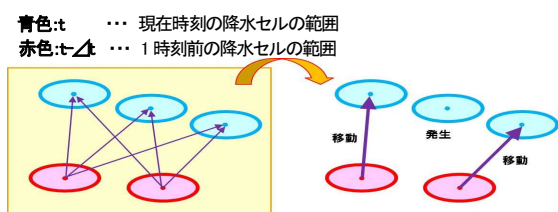


図-10 降水セルの追跡

体積変化量の式(1a)、移動距離の式(1b)、

$$dV_{ij} = |V_i^{1/3} - V_j^{1/3}| \quad (1a)$$

$$dD_{ij} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2 + (\bar{z}_i - \bar{z}_j)^2} \quad (1b)$$

体積距離(1c)が最も小さいセルとセルを紐付ける

$$C_{ij} = w_1 dD_{ij} + w_2 dV_{ij} \quad (1c)$$

(3) 各種パラメータの計算処理

各時刻の反射強度、渦度、収束量のCAPPIデータから、豪雨危険度判定に使用する総合指標値算出のための各種パラメータをセル（1個の積乱雲）毎に求める。パラメータは以下の5種類であり、各パラメータの値が多きほど、豪雨をもたらす積乱雲（豪雨セル）に発達しやすい。（図-11）

- ① エコー頂高度差 …… セル発生時と最新時刻におけるエコー頂高度の差(単位:km)
- ② 鉛直発達速度 …… ①のエコー頂高度差をセル発生からの時刻(分)で除したものの(単位:km/分)
- ③ 鉛直積算エコー強度 …… 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における反射強度の積算値(単位:dBZ)
- ④ 渦度 …… 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における渦度の最大値(単位:0.001/s)
- ⑤ 収束量 …… 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における収束量の最大値(単位:0.001/s)

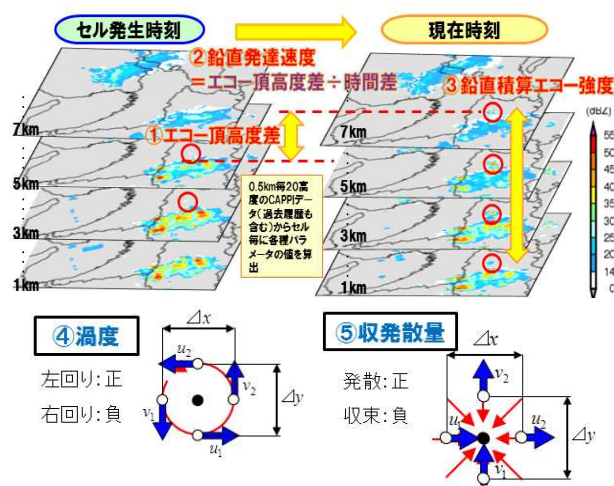


図-11 豪雨の危険度判定に用いる各指標（パラメータ）

(4) 危険度判定処理

a) 総合指標

ファジー理論におけるメンバーシップ関数を求めるため、豪雨セル（80個）と未発達セル（73個）ごとのエコ

一頂高度差、鉛直発達速度、鉛直積算反射強度、渦度、収束量を算出し、それぞれの階級毎に豪雨セルの割合を求め、それらの回帰直線を算出した（図-12）。この回帰直線をメンバーシップ関数(2a~2e)とし、重み付けして豪雨発生の可能性を判定する総合指標(2f)を作成する。

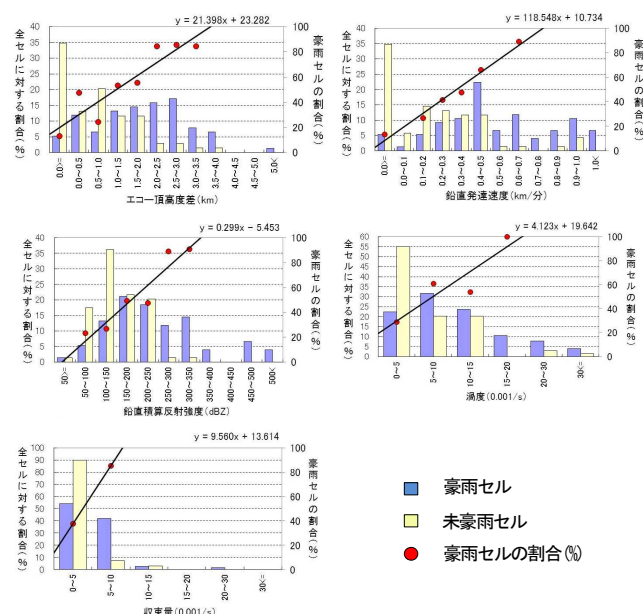


図-12 メンバーシップ関数算出

エコー頂高度差 (2a)、鉛直発達速度(2b)、鉛直積算エコー強度(2c)、渦度(2d)、収束量(2e) のメンバーシップ関数は以下のとおり。

$$f_1(x_1) = 21.398x_1 + 23.282 \quad (2a)$$

$$f_2(x_2) = 118.548x_2 + 10.734 \quad (2b)$$

$$f_3(x_3) = 0.299x_3 - 5.453 \quad (2c)$$

$$f_4(x_4) = 4.123x_4 + 19.642 \quad (2d)$$

$$f_5(x_5) = 9.560x_5 + 13.614 \quad (2e)$$

総合指標(2f)

$$G = 0.27f_1(x_1) + 0.27f_2(x_2) + 0.24f_3(x_3) + 0.10f_4(x_4) + 0.12f_5(x_5) \quad (2f)$$

b) ランク

a)で算出された総合指標値に3つのしきい値を設け、危険度ランク①②③およびランクなしの4段階の情報を作成する。（図-13）

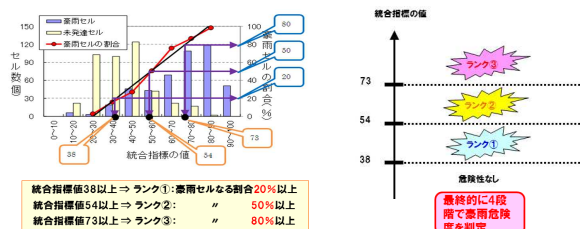


図-13 総合指標値の分布とランク

(5) Web表示プログラムの整備

豪雨危険度及び総合指標値をはじめとする関連指標値を読み込んで、画像を作成・表示する処理プログラムを豪雨のタマゴサーバに実装した。過去1ヶ月程度の雨域および豪雨のタマゴ表示の円を再現でき、GIFファイルを作成できるため動画をパワーポイントへ貼り付けることができる。また豪雨のタマゴのランクを選択するボタンをON、OFFすることで表示・非表示の選択ができる。(図-14)



図-14 表示画面

3. 精度検証

本システム対象範囲内のアメダス及び国土交通省テレメータ雨量から日最大時間雨量を調査し、2011～2013年の日最大時間雨量上位20日を抽出する。抽出20日から、降雨原因が天気不安定である上位10日を対象事例に選定する。

(1) 的中・見逃し・空振りの判定

1.(4) b)で示した豪雨セル、準豪雨セル、および降雨強度が5mm/h未満である非豪雨セルを抽出し、豪雨セル、準豪雨セルにランク値が出現した場合を的中、出現しなかった場合を見逃しと定義する。また非豪雨セルにランク値が出現した場合を空振り、出現しなかった場合を的中と定義する。(図-15)

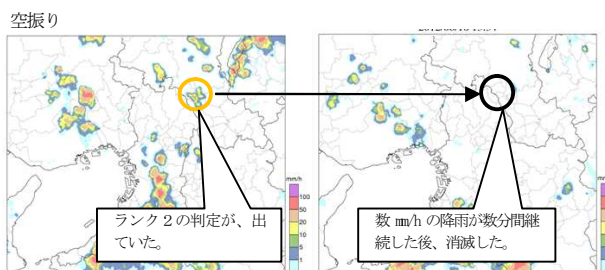
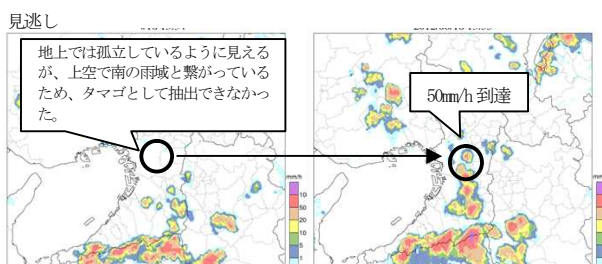


図-15 見逃し、空振りの事例

(2) 他の早期探知手法との精度比較

豪雨のタマゴ手法、雨雲発達指数（六甲砂防事務所）、VILナウキャスト（防災科学技術研究所）の3手法について、豪雨予測のリードタイム、的中率、見逃率、空振率の検証結果を比較した。その結果、豪雨のタマゴは、雨雲発達指数やVILナウキャストよりも10分程度早く豪雨・準豪雨セルを探知している。豪雨のタマゴは、地上降雨開始前に豪雨を探知できる唯一の手法だが、その他手法に比べると見逃しや空振りが多。また豪雨のタマゴは「孤立した積乱雲」のみ対象となっており、その他の手法は孤立した積乱雲以外でも予測可能となっている。(表-1、表-2、図-16)

表-1 3手法の特徴

探知手法	特徴	アウトプット
①豪雨のタマゴ	・ 定性的な指標 ・ 上空に豪雨のタマゴが発生したことを検知して、危険度をランク表示。最も早く危険性を通知。	・ 1分毎更新
②雨雲発達指数	・ 定性的な指標 ・ 現時点までの雨雲の動き傾向（発達速度）に基づいて危険度を表示。タマゴに次いで早く危険性を通知。	・ 1分毎更新
③VIL（鉛直積算雨量）	・ 定量的な指標 ・ 現時点までの雨雲の動きに基づいてメッシュ毎の雨量を予測する。このとき、上空の積乱雲の発達速度が加味される。危険性の通知は最も遅れる。	・ 5分毎更新 ・ 60分先までの予測雨量を提供

表-2 3手法比較結果

手法	豪雨予測のリードタイム		的中率	見逃率	空振率
	50mm/h到達まで	降雨開始時刻まで			
豪雨のタマゴ	16分6秒前	2分56秒前	81%	6%	13%
雨雲発達指数	7分12秒前	5分4秒後	94%	5%	1%
VILナウキャスト	2分46秒前	10分07秒後	95%	4%	1%

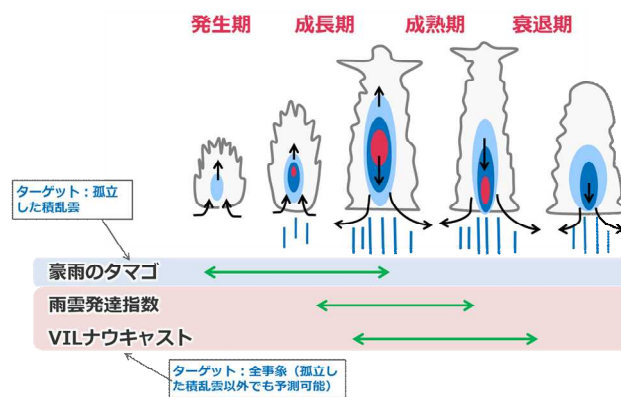


図-16 3手法の適用範囲

4. 自治体ヒアリング結果

近畿の7自治体に直接訪問し、豪雨のタマゴについて、ヒアリングを行った。豪雨のタマゴを含めた3手法について、洪水管理、内水氾濫、道路冠水、地下街の浸水などに活用したいとの意見があった。一方、住民へのアラート発信には慎重な意見が多く、その理由として、豪雨の対策を取るためには60分程度は必要との見解がほとんどであり、10分程度の早期探知では行政が対応できる時間がないとのことであった。また、見逃しは許容されず、ある程度の空振りはやむを得ないとの意見があり、3つのシステムを統合し、精度向上を図って欲しいとの要望が多かった。

5. 今後の課題

(1) 上空で結合した降水セルの分離 (OCLの見直し)

本システムで見逃しとなる事例や追跡が途中で不能となる事例の多くが、上空で他の降水セルと結合することで生じるセルの不分離が原因である。高度によってセルの分離に用いるしきい値（現行20dBZ固定）を可変する等の見直しが必要である。

(2) セルの移動方向を考慮した表示方法の検討

現行のランク円は、豪雨セルの重心位置を中心として描いているが、セル移動方向がわかるような表示方法を検討することで、より防災情報として活用しやすいシステムにしていく必要がある。

(3) 運用を通じた事例の蓄積と感度調整

今後運用を通じて検証事例を増やし、豪雨日以外の日も含めて感度調整を行う必要がある。

(4) 他の豪雨早期探知手法との連携方法の検討

本システムが対象とするのは1個の孤立した積乱雲であり、組織化した降水システムは対象としていない。利用者側にとってわかりやすく、より使いやすい情報になるよう、VILナウキャストなど他の豪雨探知手法との連携方法を検討する必要がある。

(5) 警報システムの活用検討

現在、自治体では、中小河川における安全対策のため、気象庁が大雨・洪水注意報及び警報を発表すると信号が

自動発信され、回転灯が作動するシステムを導入している。今後、自治体との適切な役割分担のもと、豪雨のタマゴシステムによる豪雨探知と警報システムの連動など活用を検討する。(図-17)

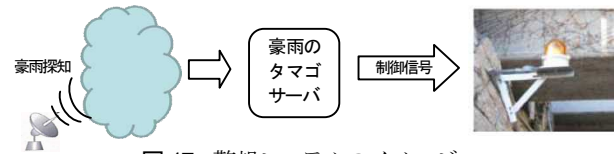


図-17 警報システムのイメージ

6. まとめ

豪雨のタマゴ手法の結論としては、精度向上を行うことができれば、局地的豪雨災害の対策に有効利用する可能性は十分にある。現在、市町村向けに「川の防災情報」でレーダの予測として移動解析を情報提供している。それに加え、今後は、本システムも配信することで情報を充実させる予定であり、試行対象自治体が実際に使用した状況を検証し、改善していきたい。最終的には、市民向けに重要かつ迅速な情報提供ツールとして、現場に回転灯を作動させるなど、都賀川水害のような痛ましい災害を防止するための監視体制強化を目指している。

謝辞：本研究において、京都大学防災研究所の中北研究室の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- ¹⁾中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究、土木学会論文集B1（水工学），第69巻4号，2013.
- ²⁾中北英一・山邊洋之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，2010.
- ³⁾中小河川における水難事故防止検討WG報告書，2009.
- ⁴⁾中小河川における局地的豪雨対策WG報告書，2009.