

実運用降雨予測システムの高度化に向けた 新たな可降水量推定手法の開発

A NEW ESTIMATION METHOD OF PRECIPITABLE WATER VAPOR FOR
ADVANCEMENT OF THE RAINFALL PREDICTION SYSTEM RUNNING AT
THE ACTUAL SITE

橋本 徳昭¹・高田 望²・大石 哲³
Noriaki HASHIMOTO, Nozomu TAKADA and Satoru OISHI

¹フェロー会員 工修 関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市北区中之島3-6-16)

²理修 株式会社気象工学研究所 (〒550-0003 大阪市西区京町堀1-3-1)

³正会員 工博 山梨大学助教授 大学院医学工学総合研究部 (〒400-8510 甲府市武田4-4-37)

It is very important for appropriate dam operation and disaster prevention to predict severe rainfall in mountainous region. For last several years, we have developed rainfall prediction system for the Kurobe-Valley, which is consist of steep mountains and valleys. The system has been already installed and used at the dam administration offices. The system had a weak point in terms of the rainfall prediction especially at the beginning of rainfall event. In this paper, we reveal that precipitable water vapor is related with rainfall event, and propose a new index which is applicable for the signal of the beginning of rainfall event for real-time estimation.

Key Words : *precipitable water vapor, rainfall prediction, dam operation, mountainous region*

1. はじめに

ダムの適切な管理・運用のためには、ダム流入量を精度よく予測することが求められる。そのためには、多くのダムが位置する急峻で複雑な山岳域において精度の高い降雨予測手法を確立することが重要である。筆者らは、標高3,000m級の急峻な山々と深い峡谷から形成される日本有数の山岳地域である黒部峡谷を対象として、ダム管理・運用のみならず、防災技術の向上も視野に入れた降雨予測手法の開発を行ってきた^{1), 2), 3), 4)}。さらに、別途開発した流出予測手法⁵⁾と組み合わせた上で、実時間で同渓谷の降雨量および同渓谷内に位置するダム群への流入量を予測・表示するシステムを開発し、実運用を開始している。

開発したシステムに含まれる降雨予測手法は、レーダー情報をベースとした運動学的手法と、同化手法を取り入れた局地気象モデルを用いた物理的手法を組み合わせることより6時間先までの降雨分布を予測するものであり、システム対象流域では、既存の降雨予測手法の精度を上回っていることを確認している⁴⁾。しかしながら、ダム操作上特に着目すべき出水の立ち上がり

を予測するために重要となる、降雨開始のタイミングおよび降雨量の予測精度に改善の余地があることが判明している。その原因として、同降雨予測手法において入力データとして用いる気象庁配信のGPVによる水蒸気移流量の予測値の精度が影響しており、この予測値を実況値に置き換えることで、同降雨予測手法の精度向上が可能なのと推察された。

水蒸気の実況データとしては、近年、可降水量が注目されており、降雨予測における可降水量の利用に関する研究としては、神田ら⁶⁾による東京での集中豪雨事例の解析等があり、豪雨に先行して可降水量が増加すること、降雨開始の先行指標としての利用可能性が指摘されている。一方、この可降水量のデータ取得方法に着目すると、水蒸気ラジオメータなどによる直接観測のほか、GPS観測データを利用して解析的に算出する方法がある。前者で恒久的な観測を目的とした場合、設置および維持管理に要する費用が問題となる。また後者による場合、例えばドイツにおいてはGPS可降水量がほぼ実時間で利用可能な状況になっている⁷⁾ものの、わが国において、精密なGPS衛星の軌道情報が得られるまでに要する時間を考慮すると、GPS可降水量は現時点では実時間では利用できないという問題がある。

以上を踏まえ、本研究では既に実ダムにおいて運用されているダム流入量予測システムに含まれる降雨予測手法の更なる高度化を目的として、まず、水蒸気ラジオメータにより可降水量の現地観測を行い、可降水量変動と降雨量の関係について考察した。つぎに可降水量を用いた降雨開始の指標を提案し、最後に実時間で入手可能なデータを用いた可降水量推定手法について検討を行った。

2. 可降水量変動と降水量の関係

黒部峡谷周辺での降雨発生前後の可降水量と地上雨量の対応を調べるために、2003年10月9日～11月5日の期間に、富山平野において水蒸気ラジオメータによる可降水量の観測を行った。図-1に水蒸気ラジオメータの設置位置を示す。水蒸気ラジオメータにはWVR-1100を用い、観測仰角として17仰角（25.2, 30.1, 35.1, 40.0, 50.0, 54.9, 59.9, 75.2, 90.0, 104.8, 120.2, 125.1, 130.1, 139.9, 144.9, 149.8, 154.8度）を設定し、測器設置地点を中心とする南北断面の連続観測を行った。表-1に用いた水蒸気ラジオメータの仕様一覧と観測モードを示す。図-2に水蒸気ラジオメータによる仰角90度（直上）の観測データと観測地点に隣接する富山地方気象台における地上雨量データの時系列を示す。図から、降雨の開始に先行して可降水量が増大していることがわかる。

図-3に2003年10月11日18時30分～23時00分の期間における、90分毎の気象庁合成レーダー雨量分布図を、図-4に25.2度（北側）、90.0度（直上）、154.8度（南側）の各仰角の水蒸気ラジオメータによって観測された可降水量の時系列を示す。図-4に示す観測期間中には地上雨量は観測されていないが、図-3のレーダー雨

量分布図から、10月11日23時には水蒸気ラジオメータ観測点周辺の上空にレーダーエコーがかかっていることが見て取れる。これらの図から、富山平野に近づいてくる雨域は南南西～北北東の方向に移動しており、水蒸気ラジオメータによってとらえられた可降水量の変動も観測点から見て、南・直上・北の順に可降水量の増大が観測されており、可降水量の変動と雨雲の移動が良く対応していることがわかる。

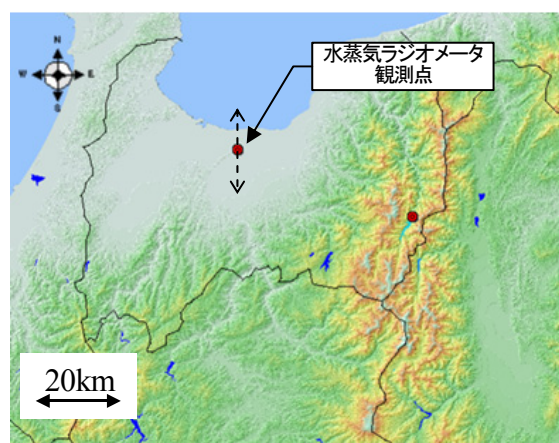


図-1 観測点位置図

表-1 水蒸気ラジオメータの仕様と観測モード

機器名	WVR-1100 (radiometrics corporation)
周波数	23.8GHz 31.4GHz
設定・出力	RS232CによりPCで設定・データ収録
使用電源	AC90～135V, 200～270V DC22～32V
消費電力	測定中17W 観測中30W
本体寸法・重量	40×28×74cm ・ 15kg
観測仰角 (17仰角)	25.2, 30.1, 35.1, 40.0, 50.0, 54.9, 59.9, 75.2, 90.0, 104.8, 120.2, 125.1, 130.1, 139.9, 144.9, 149.8, 154.8度

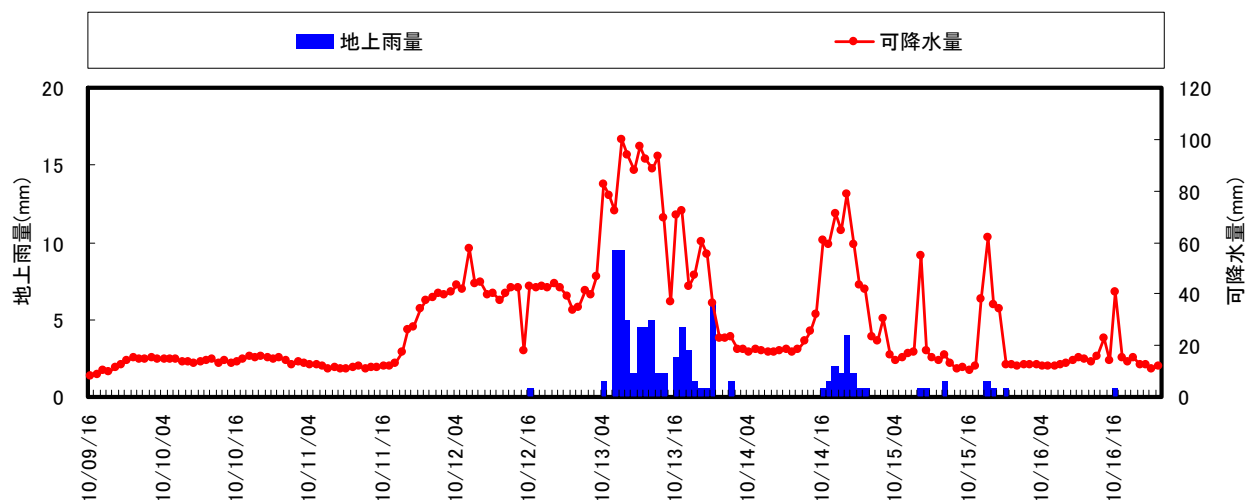


図-2 地上雨量（「富山地方気象台」）と可降水量の時系列
（棒グラフ：地上雨量 折れ線グラフ：可降水量）

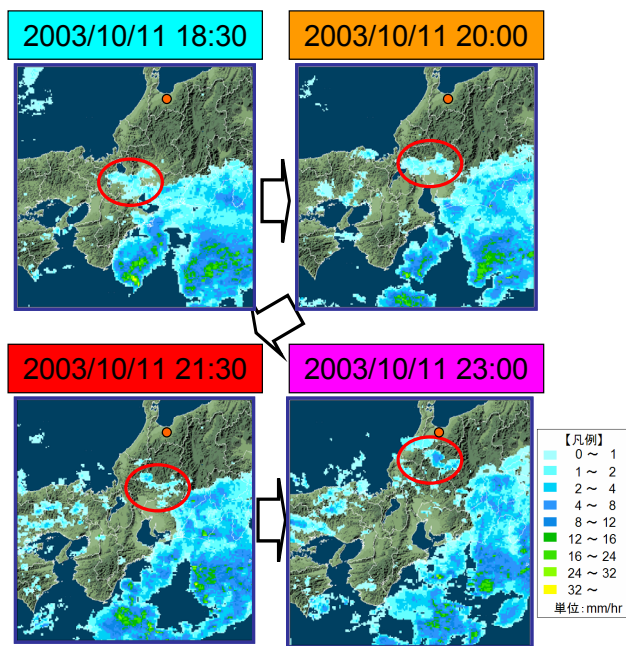


図-3 気象庁合成レーダー雨量分布図

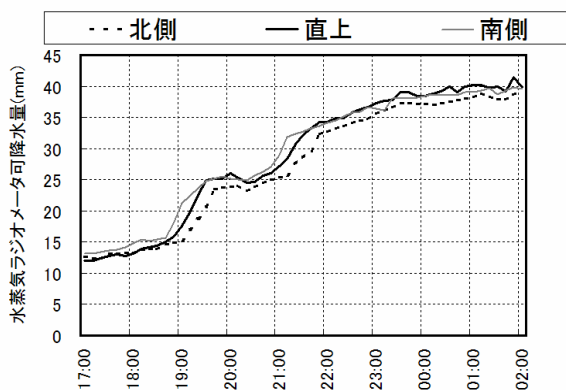


図-4 可降水量の系時変化（観測方向毎）

また、図-4から、可降水量の南側データと北側データの変化には、約30～45分の時間差があることがわかる。大気中の水蒸気の大部分が大気下層に集中していることを踏まえ、今回の場合、計測された可降水量が高度5,000m以下の水蒸気量の積算であると仮定すると、南側（仰角154.8度）および北側（仰角25.2度）の計測データは、図-1の破線矢印に示すように、観測点を始点とした南北それぞれ約11kmの範囲の水蒸気量を反映していると考えられる。したがって、降水過程、雲物理過程を伴わずに大気塊が南北22kmの観測断面を30～45分で移流したと仮定した場合、水蒸気ラジオメータによってとらえられた観測断面方向の「水蒸気の移流速度は、約29～44km/h以下であると推察される。一方、図-3の雨域は35kmから40kmを1.5時間程度（約25km/hr）かけて移流しており、このことから研究対象領域に降雨が南方から接近する場合の雨域の移流速度は可降水量変動の速度と同程度であるといえる。

これらの観測結果から、可降水量は地上降水量に先行して増大しており、降雨開始の先行指標として利用可能であることが示唆された。

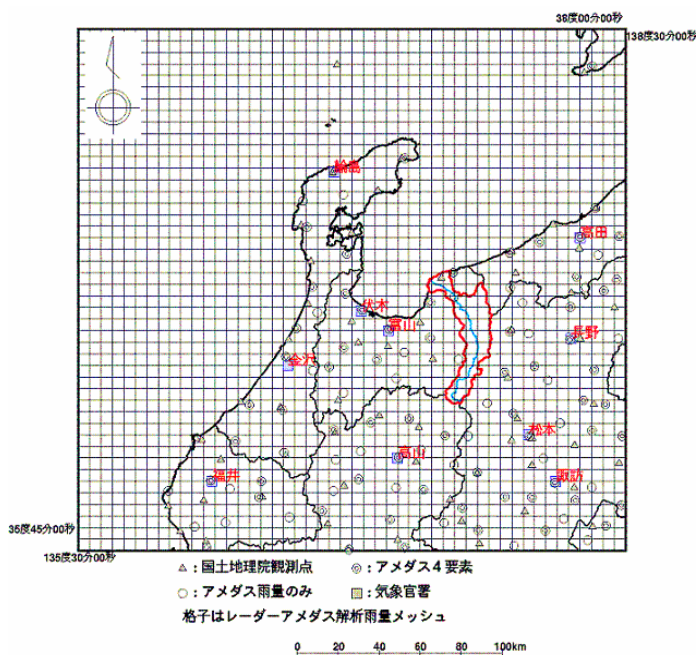


図-5 データポイント位置図

表-2 検討対象降雨一覧

降雨番号	降雨期間	降雨原因
1	1999年06月15日～06月20日	梅雨前線
2	1999年06月23日～06月25日	梅雨前線
3	1999年06月26日～06月28日	梅雨前線
4	1999年06月29日～07月01日	梅雨前線
5	1999年07月02日～07月04日	梅雨前線
6	1999年09月13日～09月15日	秋雨前線＋台風
7	1999年09月20日～09月23日	秋雨前線＋台風
8	2000年06月08日～06月09日	梅雨前線
9	2000年06月22日～06月25日	梅雨前線
10	2000年06月27日～06月28日	梅雨前線
11	2000年07月14日～07月16日	梅雨前線
12	2000年09月08日～09月13日	秋雨前線＋台風
13	2000年09月23日～09月25日	低気圧
14	2001年06月18日～06月21日	低気圧
15	2001年06月23日～06月26日	梅雨前線
16	2001年06月30日～07月01日	低気圧
17	2001年07月05日～07月07日	低気圧

3. 可降水量を用いた降雨開始指標の提案

前章で示した黒部峡谷周辺における可降水量の変動と降雨開始との関係を踏まえて、可降水量データを用いた降雨開始指標の検討を行った。可降水量データとしては、空間的に密に存在するGPS可降水量を用いることとした。GPS可降水量は、文部科学省振興調整費による特別研究「GPS気象学」プロジェクトによる可降水量データベース⁸⁾に整理されている3時間毎のデータを用いた。検討対象降雨事例は、1999～2001年の期間において黒部峡谷周辺で比較的規模の大きな降雨が発生し

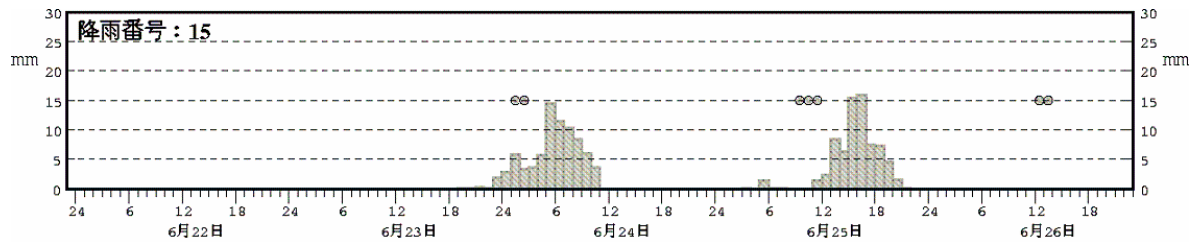


図-6 黒部峡谷内の地上雨量（棒グラフ）と降雨開始指標（●）の時系列

た17事例とした。表-2に検討対象降雨一覧を示し、図-5に検討に用いたデータのポイント（国土地理院GPS観測点、アメダス観測点、気象官署観測点）を地図上に示す。国土地理院GPS観測点におけるGPS可降水量は、①標高補正 ②空間メッシュ展開 を行い、約5.5kmメッシュのレーダーアメダス解析雨量のメッシュに展開した。次に、解析対象領域内の気象官署（10地点）のメッシュについて、3時間毎の可降水量から時間方向の線形内挿によって1時間データを作成した。

GPS可降水量と各気象要素（気圧、気温、相対湿度、風向、風速）および黒部峡谷内における地上雨量の時系列データの変化傾向から、黒部峡谷周辺の可降水量と気圧の変化量を組み合わせて算出した降雨開始指標を抽出した。降雨開始指標とは、気圧の二次微分に相当する変化量と可降水量の増加量を組み合わせた、式(1)～(4)で定義する $R_Sig(t)$ である。この「降雨開始指標」は、降雨タイプによらない一般的な降雨開始の目安と考えられる、①気圧降下量の増大による対象領域への大気の収束および上昇流の強化による水蒸気から雲粒への変換 ②雲粒のもととなる水蒸気量の増大を用いて作成した指標である。また、「降雨開始指標」の算出には、6時間前から最新時刻までの可降水量変化量および気圧の2次微分量を用いているが、現在時刻に近い時間のデータにより重きを置くように、時間数の自乗で除した値の積算値にて表現している。自乗で除すという設定および式(1)の降雨開始指標に用いた閾値「2」は、検討対象降雨の17事例の可降水量、気圧の時系列データから試行錯誤的に決定した。

この降雨開始指標を気象官署観測点毎に計算し、「輪島」、「金沢」、「伏木」、「富山」の4地点全ての観測点において、 $R_Sig(t)$ が1となる場合を、黒部峡谷周辺で降雨が発生すると予測する指標とした（以降、「降雨開始指標」と称する）。図-6に黒部峡谷の流域平均雨量と降雨開始指標の時系列図の一例を示す。図から一部空振りがあるものの、降雨のピークに先行して降雨開始を予測していることがわかる。また、全17事例中、15事例で良好な結果を得ており、今回提案した「降雨開始指標」は、一般的な降雨に対して有効な指標であると評価した。

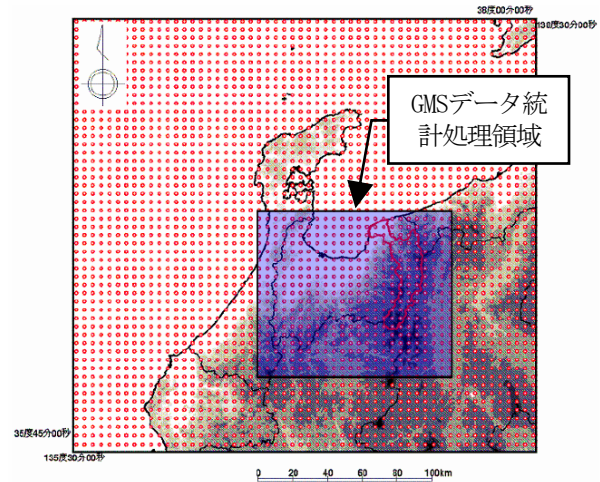


図-7 GMSデータの解析対象領域

(● : GMSデータメッシュ (約5km))

$$R_Sig(t) = \begin{cases} 1 & (DPW(t) - DDP(t) \geq 2) \\ 0 & (DPW(t) - DDP(t) < 2) \end{cases} \quad (1)$$

$$DPW(t) = \sum_{K=0}^6 \frac{PW(t-K) - PW(t-K-1)}{(K+1)^2} \quad (2)$$

$$DDP(t) = \sum_{K=0}^6 \frac{DP(t-K) - DP(t-K-1)}{(K+1)^2} \quad (3)$$

$$DP(t) = P(t) - P(t-1) \quad (4)$$

ここに、

$PW(t)$: 可降水量

$P(t)$: 気圧

t : 時間

K : 時間 (0: 現在時刻 N: N時間前)

4. 実時間利用を考慮した可降水量推定式

現在の日本においては、GPS可降水量は、精密なGPS衛星の軌道情報が得られるまでの時間を考慮すると、実時間では利用することが出来ないため、前章で検討した降雨開始指標は実時間で利用出来ないのが現状である。実運用システムにおいて、前章で検討した降雨

表-3 重回帰分析の係数および重相関係数、推定可降水量とGPS可降水量のRMSEの一覧

	係数(1)	係数(2)	係数(3)	係数(4)	係数(5)	係数(6)	係数(7)	定数項	重相関係数	RMSE(mm)
輪島	3.3213	-0.2859	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6123	-3.1468	0.84	5.3
金沢	3.6791	-2.1123	-4.8474	1.6785	5.1933	0.2727	-1.6404	2.0035	0.85	5.1
伏木	3.7188	-0.4718	-3.9842	0.0000	4.2462	0.4453	-1.3320	7.5326	0.83	5.2
富山	3.4638	-1.5167	-4.2647	1.1042	4.6380	0.3145	-1.4211	4.9337	0.81	5.5

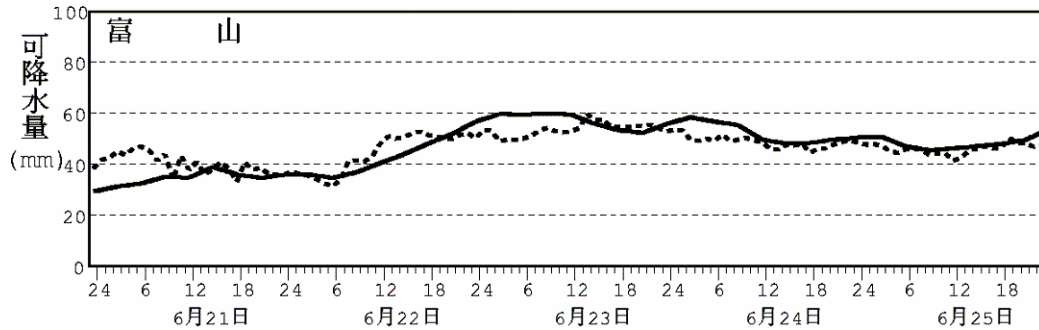


図-8 GPS可降水量（実線）と推定可降水量（点線）の経時変化

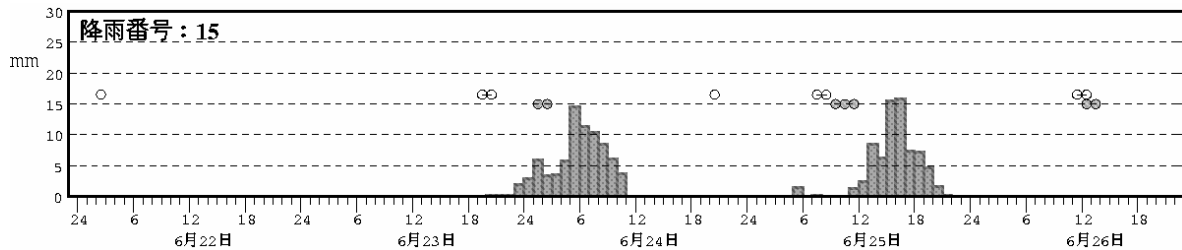


図-9 黒部峡谷内の地上雨量（棒グラフ）とGPS可降水量を用いた降雨開始指標（●）と推定可降水量を用いた降雨開始指標（○）の時系列

開始指標を利用可能とするために、実時間で利用可能なデータを用いて可降水量を推定する手法の検討を行った。一般的に、水蒸気は地上付近に多く存在しているため、地上の水蒸気混合比が、可降水量と最も相関が良いと考えられるが、上空の水蒸気情報も考慮に入れるため、GMS衛星データも併用した可降水量推定式を作成することとした。なお、GMSデータは約5kmメッシュのデータである。図-7に黒部峡谷周辺におけるGMSメッシュポイントの対応を示す。

今回の解析では、図-7の網掛けで示す領域データを統計処理することによって利用することとした。解析手法としては線形重回帰分析手法を用いた。重回帰分析において、目的変数としてGPS可降水量を設定し、説明変数として、次に示す7変数を設定した。

- 1) 水蒸気混合比データ (g/kg)
- 2) GMS (赤外1) 輝度温度の解析対象領域の平均 (°C)
- 3) GMS (赤外1) 輝度温度の解析対象領域の標準偏差 (°C)
- 4) GMS (赤外2) 輝度温度の解析対象領域の平均 (°C)
- 5) GMS (赤外2) 輝度温度の解析対象領域の標準偏差 (°C)
- 6) GMS (水蒸気) 輝度温度の解析対象領域の平均 (°C)
- 7) GMS (水蒸気) 輝度温度の解析対象領域の標準偏差 (°C)

表-3に線形重回帰解析結果、図-8に推定可降水量とGPS可降水量の時系列の一例を示す。これらの図表から、推定

可降水量はGPS可降水量と0.8以上の相関にあり、RMSE(二乗平均誤差)も5(mm)程度であることがわかる。大谷ら⁹⁾によればGPS可降水量とラジオゾンデから得られる可降水量の間のRMSEは3.7(mm)であるので、本手法において可降水量の絶対値は概ね妥当に推定できるといえる。

一方、可降水量の変動については重相関係数から妥当に推定できている。しかし、図-8より推定可降水量はGPS可降水量より短周期の変動を持っていることがわかる。ここで、GPS可降水量は3時間毎に算出されたものを用いているために実際の短時間水蒸気変動をとらえていないことが考えられる。したがって、推定可降水量の算出手法の構造的欠陥のために短周期変動が生じているのではない。しかし、3.で提案した降雨開始指標はGPS可降水量を用いて開発されたものであるため、可降水量の2次微分は推定可降水量とGPS可降水量で異なることが影響し、推定可降水量を用いた降雨開始指標では予測が先行すると同時に空振りが増加すると考えられる。そこで図-9に、黒部峡谷内の地上雨量とGPS可降水量を用いて算出した降雨開始推定指標、推定可降水量を用いて算出した降雨開始推定指標の時系列を示す。図から推定可降水量を用いて算出した降雨開始推定指標は、GPS可降水量を用いた降雨開始指標と比較して、予想通り空振りが増加し、降雨開始予測が先行している。しかし、空振りの増加は著しいものではなく、また、降雨開始予測が先行することは降雨予測システムの使用目的からいえばむしろ好ましいといえる。すなわち、

推定可降水量を用いた降雨開始指標の算出は降雨開始とよい対応にあり、実用上有効であることが示された。

5. まとめ

本研究では、実ダムにおいて運用中のダム流入量予測システムに含まれる降雨予測手法の更なる高度化の一環として、降雨開始時点の予測精度向上を目的とし、可降水量の利用性検討を行った。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 水蒸気ラジオメータを用いた観測から、可降水量は、降水量の発生に先行して変動することがわかった。
- (2) 可降水量と気圧を組み合わせた、降雨開始指標を提案した。
- (3) 地上気象データ、衛星データを用いた可降水量推定式を提案し、可降水量を用いた降雨予測開始指標を実時間で利用可能とした。

今後は、今回提案した可降水量推定手法および降雨開始指標を、現在運用中のシステムに組み込んだ場合の精度検証を実施する予定である。

謝辞：本研究の実施に際し、富山平野における可降水量観測にあたっては、千葉大学リモートセンシング研究センターの高村民雄教授に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 片岡幸毅, 大東秀光, 角田恵, 池淵周一, 中北英一, 大石哲, 藤田暁, 高田望: 山岳域の気象・降雨特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第44巻, pp103-108, 2000.
- 2) Hashimoto, N. and Kataoka, K.: Development of a system for operating the spillway gate for hydroelectric dams, Proc. of ICOLD—69th Annual Meeting Dresden, Vol.I, pp.293-313, 2001.
- 3) 橋本徳昭, 片岡幸毅: 電力ダムの洪水吐ゲート操作に関するシステム開発, 大ダム, No.177, pp.65-75, 2001.
- 4) 片岡幸毅, 安岡恒人, 小久保鉄也, 高田望: 急峻な山岳域を対象とした短時間降雨予測手法の開発, 電力土木, No.316, pp1-5, 2005.
- 5) 橋本徳昭, 藤田 暁, 椎葉 充晴, 立川 康人, 市川 温: 分布型流出モデルに基づくダム流入量予測システムの構築, 水工学論文集, 第50巻 (投稿中)
- 6) 神田学, 石田知礼, 鹿島正彦, 大石哲: 首都圏における雷雨性集中豪雨とGPS可降水量の時空間変動 -1997年8月23日の集中豪雨の事例解析-, 天気 Vol.47 No.1, pp.7-15, 2000.
- 7) Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M., Liu, Y. and Ramatschi, M. : Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol.82, No1B, pp.361-370, 2004.
- 8) http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps_Met/GpsHome_j.html
- 9) 大谷竜, 辻宏道, 萬納寺信崇, 瀬川爾郎, 内藤勲夫: 国土地理院GPS観測網から推定された可降水量, 天気, Vol.44, pp.317-325, 1997.

(2005. 9. 30受付)