

# リアルタイムアンサンブル洪水予測 実用化システムの開発

DEVELOPMENT OF OPERATIONAL  
REALTIME ENSEMBLE FLOOD FORECAST SYSTEM

渋尾欣弘<sup>1</sup>・生駒栄司<sup>2</sup>・Oliver C. SAAVEDRA V.<sup>3</sup>・Lei WANG<sup>4</sup>・  
Petra KOUDELOVA<sup>5</sup>・喜連川優<sup>6</sup>・小池俊雄<sup>7</sup>

Yoshihiro SHIBUO, Eiji IKOMA, Oliver C. SAAVEDRA V., Lei WANG,  
Petra KOUDELOVA, Masaru KITSUREGAWA, and Toshio KOIKE

<sup>1</sup>正会員 理博 東京大学特任助教 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

<sup>2</sup>非会員 工博 東京大学特任准教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京工業大学特任准教授 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 Chinese Academy of Sciences, Prof., Inst. Tibetan Plateau Research  
(Beijing 100101, China)

<sup>5</sup>非会員 工博 東京大学特任研究員 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

<sup>6</sup>非会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

<sup>7</sup>正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

We present here a novel system that predicts stream flood condition on a real-time. The system drives LSM-coupled distributed hydrological model to simulate river discharges as well as basin's water balance components, such as soil moisture, on hourly basis. In the meantime the system evaluates past Quantitative Precipitation Forecast (QPF) performance with respect to C-band radar derived observed rainfall for generating ensemble QPF members. The system then simulates ensemble stream flow forecast by taking real-time hydrological model output as initial condition and ensemble QPF members as forcing. The system is applied to the Upper Tone river basin, showing promising performance for the recent three typhoon cases. Being integrated with data-archive, this approach can be operationally used and its application to other river basins is widely possible.

**Key Words:** *real-time modeling, ensemble precipitation forecast, ensemble stream flow prediction, data-archive integrated system, Upper Tone river basin*

## 1. はじめに

近年、台風や梅雨前線による内・外水氾濫被害が頻発化しており治水問題が深刻化している。国土交通省が導入したXRAINにより降水量の定量的な把握が精度良く出来つつある一方<sup>1)</sup>、モデルによる洪水予測は実用化において未だ発展段階の域を出ていない。実運用において河川洪水予測が難しい原因は主として、出水初期における流域の保水状態量が河川流出モデルに反映されているか、降水量の予測精度は十分にある。

河川流量予測に用いられる手法の一つとして貯留関数法があげられ、多くの河川において過去の出水事例のモ

デル表現が示されている。同手法を用いて洪水予測を行う際に問題となるのは、出水イベント前に初期損失雨量や有効降雨を精度良く推定するのが困難な事である。初期損失は流域内の乾湿状態によって降水が河道に流出するまでの損失に相当するが、洪水前の降雨、日照時間などの気象条件により流域の乾湿状態は変化するため、それを経験的パラメータに置き換える事は容易でない。

降水量の予測精度については、近年数値予測は精度を増しており、水文モデルへの利用が可能となってきたと言われている。しかしながら大雨をもたらす積乱雲の水平規模は数km以下のスケールであるのに対し現在の数値予測モデルの格子サイズは、例えば気象庁メソ数値予報モデル格子点データ(MSM-GPV)の格子サイズにおい

でも0.05°である。決定論的数値計算手法により大気の下層収束の位置をきちんと表現するには雲微物理過程のデータ同化<sup>2)</sup>や更なる高分解能化が不可欠である。確率論的予測においても、メソスケールアンサンブル予測技術は研究開発が行われている段階であり、その実用化が待たれる所である。

以上の事から、洪水予測を行うためには流域の乾湿条件を反映した流出計算が可能なモデルが必要であり、洪水前の保水量を精度良く表した状態から連続的にその物理的变化を求める事の出来るモデルが必要である。また予測に用いる降水外力についても、予測の不確実性を考慮しなければならない。且つその予測時間は水防活動が効果的に行われるよう出来るだけ長くリードタイムをとる必要がある。

これらの点を踏まえ、本研究では実運用を前提としたリアルタイム洪水予測システムの開発を行う。そして利根川上流域を対象に試験適用し、同流域において近年比較的大きな洪水を記録した3つの出水事例（平成23年台風12号、台風15号、及び平成25年台風18号）をもとに、リアルタイム洪水予測システムの性能を検証する。

## 2. 対象領域

利根川は首都圏の農業用水・工業用水を支えている他、東京都における水道水の年間取水量の約四分の三相当を占める一方、治水面においても台風期における洪水が中下流域を脅かすなど、首都圏への影響が非常に強い河川である（図-1）。昭和22年9月のカスリーン台風では三日間流域平均雨量が八斗島上流域において318mmを超え、首都圏を中心に甚大な被害を引き起こした。現在の利根川水系河川整備基本方針においては八斗島地点における計画高水流量のうち三分の一を洪水調節施設において調節する事になっており、利根川上流域の洪水予測を行う事は出水時における適切な洪水調節の意思決定を支援する意味でも極めて重要な意義がある。

## 3. 方法

本研究で設定した目的のため次の3つモデル要素：リアルタイム水文モデル(1)、アンサンブル降水モデル(2)、アンサンブル洪水予測モデル(3)を考え、結合させる。さらに実時間解析システム(4)を介してデータベースと統合させる事で、リアルタイムに河川洪水予測を実行する事を実現させる（図-2）。

### (1) リアルタイム水文モデル

前項で述べたように流域の乾湿状態は洪水に影響するため、洪水発生前の乾湿状態が精度良く推定されなけれ

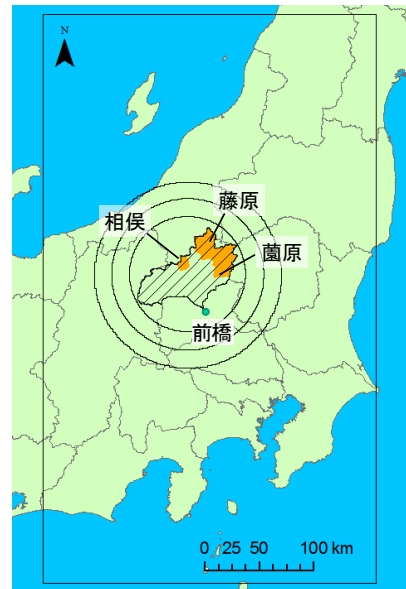


図-1 利根川上流域と誤差評価ゾーン：相俣、藤原、蕨原ダム流域（橙）、流域（網掛）、バッファー（三円）、領域全体（矩形）

ばならない。そこで本研究では水エネルギー収支分布型水循環モデル(WEB-DHM)<sup>3,4)</sup>を流域の保水状態量・河川流量の初期値をあらわすためのモデルとして用いる。WEB-DHMは分布型流出モデルGBHM<sup>5)</sup>と改良された陸面過程スキームSiB2<sup>6)</sup>が結合されたモデルであり、これにより大気陸面間の水・エネルギー収支計算に基づいて、精度の高い土壌水分と斜面流出計算が可能である。また、河道追跡計算においてフローインターバルというサブ流域末端からの距離が等しい区間を考え、同じインターバルに属するグリッドからの流出計算を河道で集中しキネ

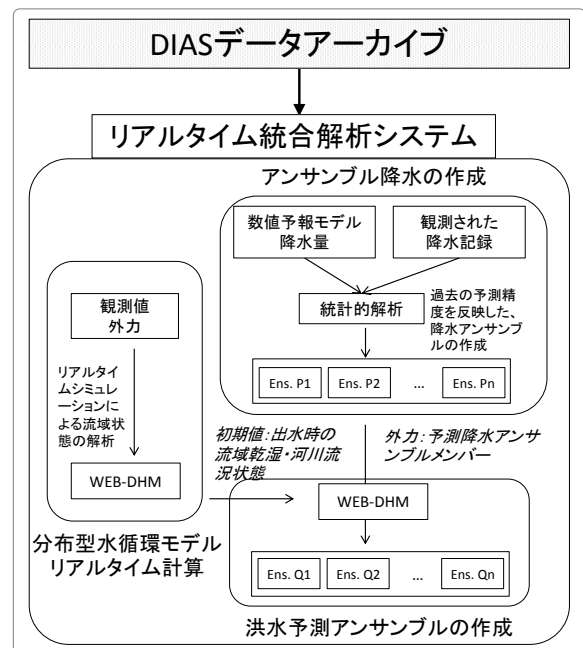


図-2 統合解析システムによるリアルタイムアンサンブル洪水予測の概要

表-1 実績降雨に対する予測降水量の誤差強度比（上段二行、予測の過小評価、あるいは過大評価）とそれに対応する評価領域毎の摂動重み付け。領域は図-1参照。

	予測誤差大 ←					→ 予測誤差小			
FE過小評価	0 - 0.01	0.01 - 0.05	0.05 - 0.075	0.075 - 0.1	0.1 - 0.3	0.3 - 0.5	0.5 - 0.7	0.7 - 0.9	0.9 - 1.1
FE過大評価	> 10	10 - 5.0	5.0 - 2.5	2.5 - 1.9	1.9 - 1.7	1.7 - 1.5	1.5 - 1.3	1.3 - 1.1	1.1 - 0.9
ダム流域	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00
全流域	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50
バッファ-1	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00
バッファ-2	4.25	3.75	3.25	2.75	2.25	2.00	1.75	1.50	1.25
バッファ-3	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50	2.25	2.00	1.75	1.50
全領域	5.00	4.50	4.00	3.50	3.00	2.75	2.5	2.25	2.00

マティックウェーブ法で解く事で、高速な計算を可能としている。WEB-DHMは本研究で対象とする利根川上流域をはじめ国内外の多くの流域においてその精度が検証されている（例えば最近ではSanchezら<sup>7)</sup>）。ここではこのモデルの高速さを活かし、時々刻々と変化する流域の乾湿状態・河川流量をリアルタイムに計算し、後述する洪水予測モデルでの初期値として用いる。

## (2) アンサンブル降水予測モデル

冒頭で述べたように決定論的に大雨を予測する事は必ずしも可能ではないため、本研究ではSaavedraら<sup>8)</sup>による降水アンサンブルモデルを適用する。このモデルは洪水予測への適用を目的に流域降雨特性を反映したアンサンブル降水メンバーを作成する事が可能であり、これまでに日本国内では利根川上流域、海外ではフィリピンのアンガット川流域、チュニジアのメジェルダ川流域において適用実績がある<sup>8,9,10)</sup>。このモデル手法はEbert and McBride<sup>11)</sup>によって提案された予測降雨と実績降雨とのずれを評価する手法を発展させ、降水強度を用いて定量的に表すように改良したものである。それによれば予測誤差を次のように定義している。

$$FE_{i,j} = 0.5 \times \left[ \left( \frac{HI_{i,QPF}}{HI_{i,OBS}} \right) + \left( \frac{MI_{i,QPF}}{MI_{i,OBS}} \right) \right] \quad (1)$$

ここにFEは予測誤差、HIは最大降水強度、MIは平均降水強度をあらわす。添字のiとjはそれぞれ、ゾーン（後述）と評価する時間ステップウィンドウを表す。また

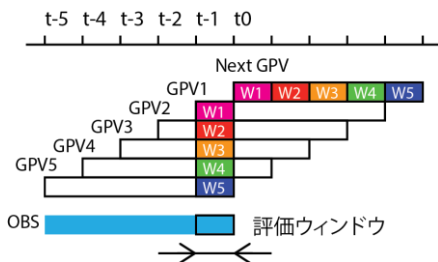


図-3過去のGPV (t-5 ~ t-1)と実績雨量を重なる時間において誤差評価を行い、新規GPV(t0)にそれぞれの時刻の不確実性の履歴(W1~W5)として重み付けを行う。

QPFは数値モデルによる降水予測値を表し、OBSはレーダによる実績雨量観測値を表す。この式においてFEが1より大きい場合はQPFの過大評価であり、値が0~1の間においては過小評価を示す（表-1上段二行）。

この予測誤差評価について、雨域の移動のずれが水文計算のタイムステップに検知されるべく、Saavedraらは空間領域ごと異なるゾーニングを設定している。まず相俣、菌原、藤原の利根川上流ダム流域を最小レベルとし、次のレベルを水文計算対象の全流域（前橋地点）、さらに低気圧等の雨域の移動速を考慮した広さの異なるバッファ領域を三つ、そして最大レベルにおいて全ての流域・バッファを囲む全領域を定義している（図-1）すなわち、予測誤差の強度と二次元的な範囲を組み合わせることで、予測誤差のずれが予測降水量の不確実性として河川洪水計算にフィードバックされる事になる。Saavedraらによればルックアップテーブル方式によりゾーンごとに予測誤差を評価しアンサンブル摂動の重み付けがなされる（表-1）。これら重み付けは直近で重なりあうQPFのリードタイム毎に行われ（図-3）、それぞれの重みが該当する区分において現行QPFへの摂動のばらつきとして以下の式により与えられる。

$$GP(x,y)_k = \max\{QPF(x,y)\{1 + A\varepsilon(0,1)w_{i,sub} + [B\varepsilon N(0,1)w_{i,tot}]\}, 0\} \quad (2)$$

ここでεは超過確率0.0014に相当する0.33であり<sup>12)</sup>、w<sub>i,sub</sub>項とw<sub>i,tot</sub>項はアンサンブル摂動の重み付けを表し、サブ流域と、全バッファ領域の平均値である。AとBは総和が1となる優位的重み付け係数であり、Saavedraらにない60%の優先順位をサブ流域に、残り40%を全バッファ領域に与える。

このように摂動幅は、過去のQPFの過小評価・過大評価に応じて、正規分布に基づいたノイズをかける事によって決定され<sup>13)</sup>、ある種のモンテカルロ解析<sup>14)</sup>のように同化を施す事なくアンサンブル摂動された降水メンバーの作成がなされる。

## (3) アンサンブル洪水予測モデル

洪水予測はリアルタイム水文モデルから得られる流域

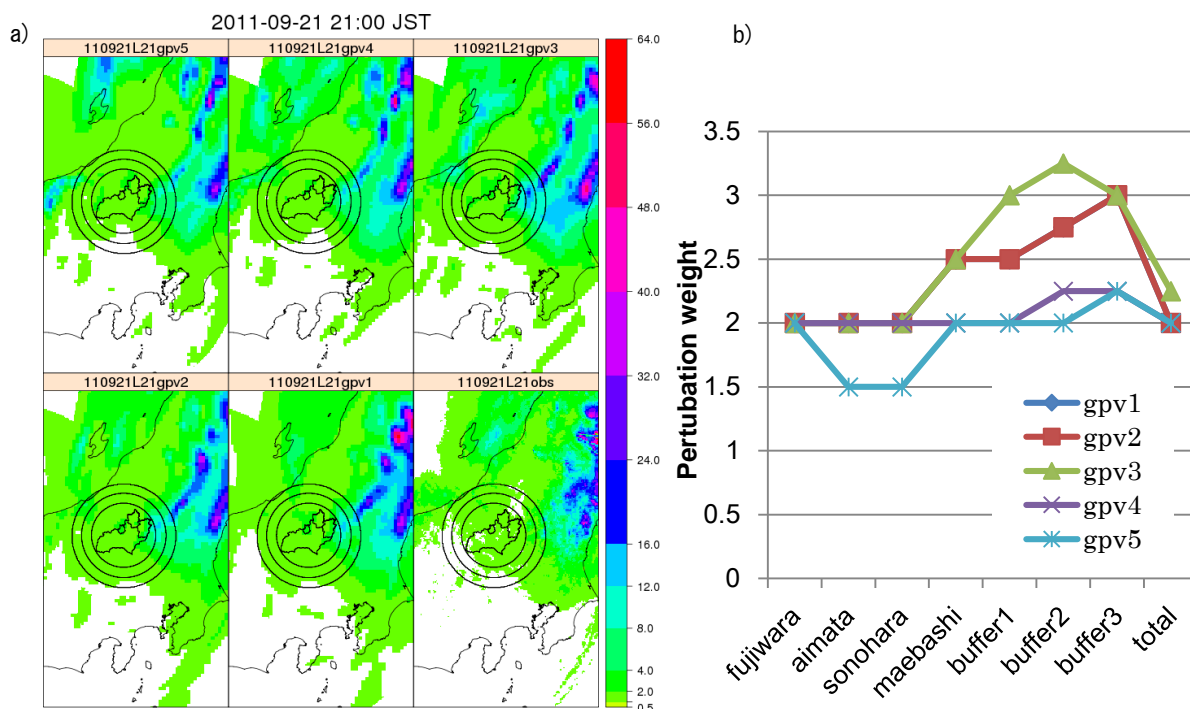


図-4 平成23年台風15号における、a) 数値予報モデルMSM-GPV15時間予測値とCバンドレーダ雨量の3時間雨量統計解析：上段左から右，下段左から右の順に，それぞれ15,12,9,6,3時間前に発行されたGPV (GPV1, 2, 3, 4, 5) の3時間積算雨量，および当該3時間のCバンドレーダによる観測雨量(mm)．b) 誤差評価から換算された重み付け．

内の保水状態・河川流量状態を初期値とし，各アンサンブル降水メンバーを外力としてWEB-DHMにより行われる．すなわち降水外力が実績雨量から予測雨量に連続的に変化したものが予測洪水流量としてアンサンブルメンバー数計算される．本研究では3時間の予測ごと51のメンバーを作成する．

#### (4) データアーカイブ統合解析システム

これらのモデルを用いて逐次洪水予測を行うためには，入出力プロセスの自動化やデータソースとのオンライン化が必要不可欠である．そこでここでは観測点情報，格子座標データなど，非構造データ郡から各モデルが必要とするそれぞれのフォーマットに成型するGISプロセス等をマクロ化し，統合解析システムによりリアルタイム実行させる．各モデルの実行，モデル間の入出力の受渡し，連携のタイミングについてもこのシステムによって管理を行う．本研究ではこのシステムをデータ統合・解析システム(DIAS)とオンライン化した環境で構築する．

#### 4. データ

地表面傾斜，土壌タイプに基づく土壌層厚，斜面長などの入力データは本研究と同じ流域を対象とした先行研究<sup>48)</sup>に準じており，詳細は参考文献に参照されたい．本研究における主な相違点として気象モデル外力データを前述の統合解析システムでリアルタイム生成しており，

気温，風速，日照時間は農業・食品産業技術総合研究機構からDIASに試験的に提供されるAMeDASから生成，相対湿度と気圧はMSM-GPVから得られる予測値を観測値と同等とみなし，これをグリッド化している．リアルタイム水文モデルや予測誤差評価に用いる実績降水量は国土交通省のCバンドレーダ雨量を用いており，QPFにはMSM-GPVを用いており（以下，予測雨量についてはGPVと表す），いずれも国土交通省，気象庁との協力で，DIASによってオンラインリアルタイムアーカイブを実施している．

#### 5. 結果

##### (1) 実績雨量による予測降水量の誤差評価

図-4a, bに平成23年台風15号時における数値予報モデルと実績雨量との比較を示す．なお紙幅の都合からここでは解析結果の一部のみを示すが，本研究で示す台風3例をはじめ，その解析は現在もリアルタイムに行われている．

図-4aは5つの異なる時刻において発行された3時間積算予測雨量について，同じ時刻における実績雨量（下段右）に対してその空間分布を比較しているが，領域全体の矩形でみた場合，雨域の相対的配置が各GPVにおいて予測できている事がわかる．一方で，より小さな評価ゾーンに着目した場合，予測された雨が必ずしも降らなかった事がわかる．例えば9時間前発行GPV（上段右）

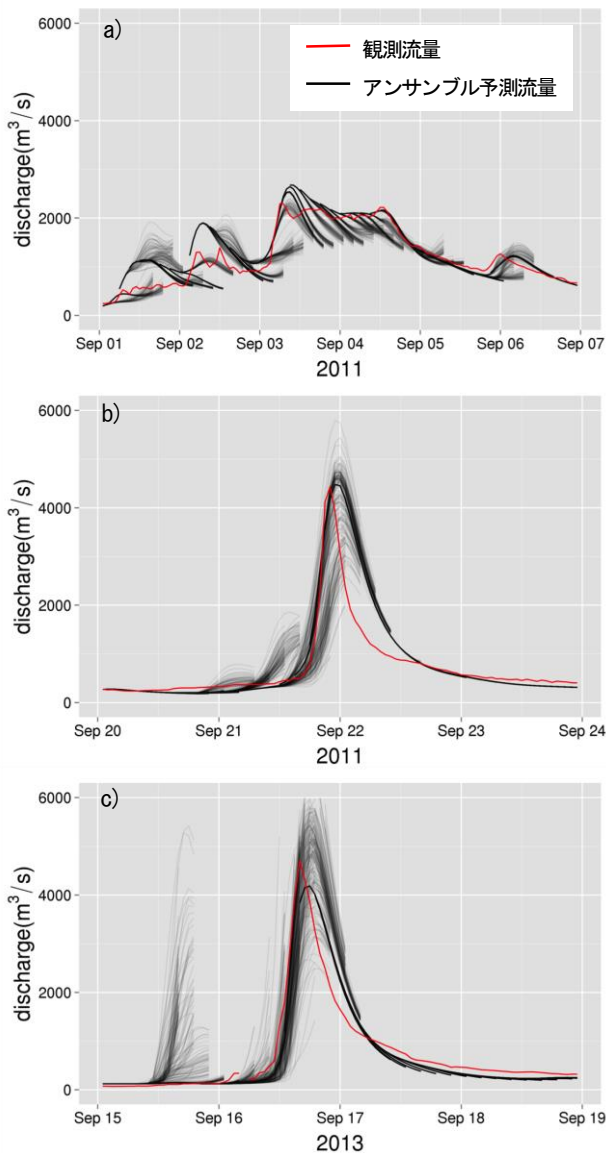


図-5 a)平成23年台風12号, b)同15号, c)平成25年台風18号の, 前橋地点における観測値ベース流量(赤線)とアンサンブル洪水予測値(黒線). 洪水予測値は3時間ごと51のアンサンブル降水メンバーで計算, 更新されている.

の円形バッファ領域内は, 実績雨量よりも比較的大きな降雨強度を予測している. これらの事からも流域規模においてはQPFの予測誤差が生じ得る事がわかる.

図-4bは同じタイムステップにおける予測誤差を表-1の摂動重み付けに変換した一例である. 前述の円形バッファ領域において過大評価により重み付けが高くなっている事がわかる. なおこの関係は必ずしも普遍的な傾向ではないが, 空間領域が広い場合は予測誤差が低い場合でも, 最小の重みは徐々に増加する(表-1). この重み付けによりダム流域のように比較的狭い空間における情報は短い時間で到達するが, 遠い雨域の情報は何時間後に到達するといった事を反映する事ができる.

## (2) アンサンブル洪水予測

図-5にアンサンブル洪水予測の結果を示す. a), b), c)はそれぞれ平成23年台風12号, 同年台風15号, 平成25年台風18号である. 赤線は国土交通省からFRICS経由で配信されている速報値流量(観測値ベース)を示し, 黒線はアンサンブル降水を外力とした予測結果である. 計算はGPVが発行される3時間ごとに行われ, 予測計算時間(各黒線)はGPVの予測時間と同様に15時間である. 各計算開始時において, 流域の初期値は実績雨量ベースで計算がされるリアルタイム水文モデルによって最新の保水状態に次々と更新されている. すなわち3時間ごとの気象状態の変化が大気陸面過程スキームにより計算され, 最新の流域保水状態・河川流量に反映されている事になる. そのため図に示されるように, 予測洪水量が間断なく連続的に変化している事がわかる. また単一のQPFによる洪水予測の変わりに予測精度の履歴が反映されたアンサンブル降水予測メンバーを外力とする事で, 幅を持った洪水予測結果となっている. 注意点として, リアルタイム計算では観測ベースのダム放流量が与えられるものの, 予測計算時は自然河川を仮定しており, すなわちダム流入とダム流出が等しい場合の洪水予測値を計算している. これは別途開発中の最適化ダムモデルにおいて, 事前放流など仮定的ダム操作を行った場合の洪水流量の変化の判断基準とするためである.

各出水事例について検証すると, 平成23年台風12号では洪水時の立ち上がりが遅れる場合も見られるが(例えば図-5a, 9月3日0時付近), リアルタイム水文モデルにより河川流量が逐次更新されていくため, 次の3時間後には予測が改善されている. 平成23年の台風15号については(図-5b), 観測された洪水到達前に洪水を過大評価しているが(9月21日12時頃), ここでもその予測値が3時間後には改善されている. 洪水の立ち上がりは観測に対して予測流量はGPVに基づき緩い立ち上りを示しているが, ここでも初期値を更新する事により, 洪水予測の改善が見られる. 最後に平成25年の台風18号のケースにおいては, 実際の洪水到達前に過大な流量の予測結果となっているが, 3時間後には予測値が全体的に下方修正されている. 観測された洪水の立ち上がりそのものについてはいずれのアンサンブルメンバーも比較的良く表現がされている.

## 6. 結論

冒頭で述べたように洪水予測に関する科学的問題点は, 土壌水分量をはじめとする流域内の保水状態が適切に表現されているか, QPFの予測精度・不確実性が検討されているかである. 本研究ではそれらに対処するため必要なモデルを組み合わせる事でアンサンブル洪水予測手法を確立した. 前者については陸面過程スキームが組み込

まれた分布型流出モデルを用いる事で、時々刻々と変化する土壌水分量や河川流量をモデル推定し、洪水初期時における適切な初期条件として与えている。後者については、流域の降水実績を用いて数値予測雨量の予測精度の履歴を評価し、その予測誤差を次の予測に反映させる手法を用いる事で、小規模スケールにおいてもアンサンブル降水メンバーの作成を可能としている。これら二つのモデル手法を組み合わせる事で洪水前の流域の乾湿状態から連続的に、かつ降水予測精度のばらつきが反映されたアンサンブル洪水予測を行う事が可能となった。

このアンサンブル洪水予測手法を利根川上流域に試験適用し、平成23年と平成25年の台風3ケースにおいて解析した結果、実用可能なレベルでの予測結果が得られたと考えられる。さらにこれらの予測情報はリアルタイムに提供可能であり、流域における適切な水防活動支援やダム事前放流の洪水調節における意思決定支援に資する情報になると考えられる。特にダム流入量を精度良く予測できる事は、適切な事前放流操作によって洪水後より多くの貯水量を確保する事に繋がる。

利根川上流域においては平成25年1月にXRRAINのドームが八斗島に設置され、その観測範囲は流域全体ではないものの、実績雨量の推定精度向上が見込まれている。本研究においても実績雨量外力を一部XRRAINに置き換える事で、計算流量の精度向上が期待される。また現在の所、決定論的数値計算により豪雨を予測する事は未だ困難であるが、メソスケールアンサンブルモデルの結果が利用できるになれば、更なる予測精度の向上も期待できる。開発したシステムはDIASデータアーカイブに統合された環境で構築されており、これら最新のデータがDIAS上で利用可能な状態になれば直ちに予測計算に反映する事が可能である。さらに本研究の予測手法はDIASとの連携で、実質的に国内の多くの河川流域において汎用的に適用可能である。

**謝辞：**本研究は、文部科学省「地球観測データ統融合連携研究機構 地球環境情報統融合プログラム (DIAS-P)」、気候変動適応研究推進プログラム (RECCA)、および国土交通省河川砂防技術開発研究課題「沿岸低平地における河川、下水道、海岸のシームレスモデルに基づく実時間氾濫予測システムの構築」の下で行われた。またデータを提供して頂いた国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所、利根川ダム統合管理事務所、農業・食品産業技術総合研究機構、及びデータデコードにご協力頂いた喜連川研究室の大柳氏、金内氏に感謝する。

#### 参考文献

1) 山口弘誠, 金原知穂, 中北英一: Xバンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発, 水工学論文集, 第56巻, pp. 367-372, 2012.

- 2) Rasmy, M., Koike, T., Kuria, D., Mirza, C.R., Li, X., and Yang, K.: Development of the Coupled Atmosphere and Land Data Assimilation System (CALDAS) and Its Application Over the Tibetan Plateau, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, issue 11, pp. 4227-4242, 2012.
- 3) Wang, L., T. Koike, K. Yang, T. K. Jackson, R. Bindlish, and Yang, D.: Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.*, 114, D08107, doi:10.1029/2008JD010800, 2009.
- 4) Wang, L., Koike, T., Yang, K. and Yeh, P.: Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone river basin, *J. Hydrol.*, Vol. 377, pp.21-34, 2009.
- 5) Yang, D., Koike, T., and Tanizawa, H.: Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan, *Hydrol. Process.*, Vol. 18, 3119-3132, 2004.
- 6) Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L.: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. 1. Model formulation, *J. Climate*, Vol. 9, pp. 676-705, 1996.
- 7) Jaranilla-Sanchez, P.A., Wang, L., Tamagawa, K., Hasegawa, I., Yamamoto, H, and Koike, T.: Integrated Modeling of Climate change impacts in the Yoshino River Basin, Japan for Basin Management Planning. *JSCE, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 68:4, I\_133-I\_138, 2012.
- 8) Saavedra Valeriano, O., Koike, T., Yang, K., Graf, T., Li, X., Wang, L., and Han, X.: Decision support for dam release during floods using a distributed biosphere hydrological model driven by quantitative precipitation forecasts, *Water Resour. Res.*, Vol. 46, W10544, 2010.
- 9) 国際協力事業団：チュニジア国 メジエルダ川流域気候変動影響評価最終報告書, 2013.
- 10) 国際協力事業団：フィリピン国 マニラ首都圏及び周辺地域における水資源開発計画に係る基礎情報収集調査（気候変動影響評価及び流出解析）最終報告書, 2013.
- 11) Ebert, E. E., and McBride, L. L.: Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors, *J. Hydrol.*, 239, 179-202, 2000.
- 12) Turner, M. R. J., J. P. Walker, and Oke, P. R.: Ensemble member generation for sequential data assimilation, *Remote Sens. Environ.*, 112, 1421-1433, 2008.
- 13) Goovaerts, P.: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, 483 pp., Oxford Univ. Press, New York, 1997.
- 14) Heuvelink, G. B. M.: *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*, 127 pp., Taylor & Francis, London, 1998.