

模擬作成されたアンサンブル流入量予測情報の再現性 —ダム洪水操作計画への適用に向けて—

Comparison of Generated Ensemble Inflow Prediction with Operational Prediction -Towards Application to Flood Control Operation of Reservoirs-

野原大督・齋藤宏樹⁽¹⁾・Ratih Indri HAPSARI⁽²⁾

Daisuke NOHARA, Hiroki SAITO⁽¹⁾ and Ratih Indri HAPSARI⁽²⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) インドネシア国立マラン工科大学土木工学科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

(2) Department of Civil Engineering, State Polytechnic of Malang, Indonesia

Synopsis

Characteristics of ensemble inflow predictions synthetically generated using error characteristics of the operational hydrological prediction is analyzed to investigate the way to effectively use the simulated generation method of hydrological predictions. As a result of the analysis, it was shown that the conventional generation method assuming stationary error parameters did not well simulate operational ensemble inflow prediction. It was also shown that the modified generation method assuming non-stationary error parameters could reproduce operational ensemble prediction. It is therefore considered to be important to include a model of non-stationary error parameter in the generation model for more realistic generation of ensemble inflow predictions.

キーワード: アンサンブル予測, 模擬作成, 流入量, 誤差特性, ダム洪水操作

Keywords: ensemble prediction, simulated generation, inflow, error characteristics, reservoir operation for flood management

1. はじめに

近年, 現業の気象予報では, アンサンブル予報が提供されている. アンサンブル予報では, 単独の予測値だけではなく, 大気の状態の観測誤差程度のばらつきをもった複数の初期値からそれぞれ数値予報を行うことによって, 複数の予測系列を作成することができる(経田, 2006). これらの複数の予測系列を総合的に考慮することによって, 予測の確からしさや期待される予測値の幅などを把握することができると考えられている. 特に, 降水量やダム流入

量, 河川流量などに関するアンサンブル予測情報は, ダム管理や河川管理の様々な場面で活用することが可能であると考えられ, 様々な研究が行われている(Kim et al., 2007; Hapsari et al., 2012; 野原ら, 2017). 水文予測情報の考慮が重要であるダム治水操作や事前放流操作にとっても, 有益な情報であると期待されており, ダム操作決定におけるアンサンブル予測情報の活用に関する検討が, 近年盛んに行われている.(Masuda and Oishi, 2013; 猪股ら, 2015; Nohara et al., 2015; 松原ら, 2017)

現業のアンサンブル予測情報を考慮することによ

るダム治水操作の効果を統計的に分析するためには、ダムが治水操作を実施するような規模の出水時において提供された予測データを大量に用意する必要がある。しかし、大規模な出水は同一流域において頻繁に経験するものではなく、このような規模の出水期間を対象として発表された現業予測データの蓄積が少ないという課題がある。こうした課題に対応するための一つの方法として、実際に発表された予測データを分析に用いるのではなく、模擬的に作成した予測データを利用することが考えられる。予測誤差の傾向など、現業予測データが持つ特性を再現できるように予測データを模擬的に作成することができれば、ダム操作への適用性の確率的な分析に必要な大量の予測データを用意することができる。実際に、決定論的予測情報を考慮したダム事前放流操作の効果の分析に、同様の方法が利用されている (Nohara and Hori, 2017)。

このような観点から、著者らはこれまでに、現業アンサンブル予測の誤差特性に基づいた、アンサンブル流入量予測情報の模擬作成手法を開発している (得津ら, 2016)。得津ら (2016) では、ダム貯水池の利水操作の意思決定支援を目的として、1か月先までの長期的なアンサンブル流入量予測を模擬作成する機構を開発している。この模擬作成機構は、理論的には、ダム治水操作で必要とされるような数時間～数日間の短期・中期的なアンサンブル流入量予測の模擬作成にも応用できると考えられる。しかし、予測対象である流入量の真値の時系列 (ハイドログラフ) の特性が、ダム利水操作で対象となる低水時と治水操作で対象となる出水時とでは大きくことなるため、これに伴って予測の模擬作成に必要な予測誤差の特性も大きく異なる可能性が考えられる。

本稿では、こうした視点から、得津ら (2016) のアンサンブル流入量予測情報の統計的な模擬作成手法をベースとして、出水時の予測情報を模擬的に作成した上で、作成されたアンサンブル流入量予測情報と現業のアンサンブル降水予測情報より推定した流入量予測情報とを比較し、模擬作成した予測値の実予測値に対する再現性の検討を行う。

2. アンサンブル流入量予測情報の模擬作成手法

本研究で用いるアンサンブル流入量予測情報の模擬作成手法の概要は以下の通りである。まず、予測対象の各時点における予測値の模擬作成は、その時点の流入量の真値 (観測値) に予測誤差を追加することで行い、この予測誤差の値を模擬作成する。予

測誤差の値の模擬作成は、現業の予測情報が持つ予測誤差が従うと推定される確率分布 (誤差確率分布) から、ランダムに値をサンプルすることで行う。予測誤差の定義や、予測誤差が従う確率分布には、様々なものが考えられるが、天井ら (2013) や得津ら (2016) では、それぞれ予測値より真値を減じた値と正規確率分布を仮定している。この仮定に従えば、上述のようにして得られた予測誤差を真値に加えることによって、予測値の模擬作成が行える。各時点のアンサンブル予測値を模擬作成する場合には、誤差の値のランダムサンプリングを含んだこの手順を、繰り返すことによって、アンサンブルメンバ数に相当する数の予測値を模擬作成すればよい。

次に予測系列の模擬作成には、自己相関モデルを用いる。同じアンサンブルメンバの連続する時点の予測誤差には相関があると仮定し、1次の自己相関モデル (AR(1)モデル) を採用する。AR(1)モデルを用いて、前の時点の予測誤差の値から次の時点の予測誤差の値を、その時点の誤差確率分布に従うようにランダムサンプリングし、これを真値に加えることで、同じアンサンブルメンバの次の時点における予測値を模擬作成することができる。この過程を定式化すると、次のようになる。

$$e(l, m) = e'(l, m) + \mu_e(l) \quad (1)$$

$$e'(l, m) = e'(l-1, m) \cdot \rho_L \cdot \frac{\sigma_e(l)}{\sigma_e(l-1)} + w(l, m) \sqrt{1 - \rho_L^2} \quad (2) \quad (2 \leq l \leq L)$$

ここに、 $e(l, m)$ は模擬作成された l 期先のアンサンブルメンバ m の予測誤差値、 $\mu_e(l)$ 、 $\sigma_e(l)$ はそれぞれ l 期先における予測誤差が従う確率分布の平均と分散、 ρ_L は予測誤差の1次の自己相関係数、 $w(l, m)$ は確率分布 $N(0, \{\sigma_e(l)\}^2)$ よりランダムにサンプルされた白色ノイズ、 L は予測のリードタイムである。

この方法で予測誤差値の模擬発生を行う場合、模擬発生されたアンサンブル予測値のアンサンブル平均とスプレッドは、メンバ数が十分に大きければ、概ね $\mu_e(l)$ 、 $\sigma_e(l)$ となる。そのため、例えば現業のアンサンブル予測情報のアンサンブル平均値とスプレッドの値を使ってそれぞれ $\mu_e(l)$ 、 $\sigma_e(l)$ を設定すれば、現業予測情報のアンサンブル平均とスプレッドの情報を保存する形で、アンサンブル予測情報を模擬的に作成することが可能となる。また、 $\mu_e(l)$ や $\sigma_e(l)$ の値を変化させることで、例えば現業アンサンブル予測情報の精度が改善し、アンサンブル平均が概ね小さくなった場合の予測値や、任意のスプレッドの大きさ

の予測値を、大量に確率的に作成することも可能である。なお、上述の方法は、Takeuchi and Sivaarthiskul (1995)の決定論的予測情報の模擬作成方法を、アンサンブル予測情報の模擬作成へ拡張したものと捉えることができる。

一方、水文量のような非負の変数が従う確率分布は、正規分布のように左右対称な分布とならないことも多い。このことから、予測対象である真値の確率特性を反映して、予測誤差が従う確率分布も、必ずしも正規分布のようにあまり歪みの無い分布とならない可能性がある。例えば、予測誤差が従う確率分布が、多くの非負の水文量のように、右に歪んだ確率分布に従うと考え、例えば、対数正規分布に従うと仮定すると、予測誤差の模擬作成手順は、次のように定式化される (Nohara and Saito, 2018)。

$$e(l, m) = \exp[\mu_A(l) + \sigma_A(l) \cdot \varepsilon(l, m)] + c_A(l) \quad (3)$$

$$e(l, m) = \exp[\mu_A(l) + \sigma_A(l) \cdot e'(l, m)] + c_A(l) \quad (4)$$

$(2 \leq l \leq L)$

$$e'(l, m) = [\varepsilon(l, m) \cdot \sqrt{1 - \rho_e(l, l-1)}] + \rho_e(l, l-1) \cdot e'(l-1, m) \quad (5)$$

$$\rho_e(l, l-1) = \frac{\log \left[\rho_L^2(l, l-1) \cdot \exp \left\{ \frac{[\sigma_A(l)]^2 + [\sigma_A(l-1)]^2}{2} - 1 \right\} + 1 \right]}{\sigma_A(l) \cdot \sigma_A(l-1)} \quad (6)$$

ここに、 $\mu_A(l)$ 、 $\sigma_A(l)$ 、 $c_A(l)$ はそれぞれ対数正規分布の母数、 $\varepsilon(l, m)$ は標準正規分布 $N(0,1)$ に従うランダム変数である。なお、ここでは、星 (1997) の3母数対数正規分布の模擬発生手法を基礎としている。

3. 模擬作成された予測情報の再現性の検討

3.1 対象ダム貯水池と模擬作成の条件

再現性の検討にあたって対象としたのは、徳島県的那賀川水系にある長安ロダム(集水面積538.9 km²)である。長安ロダムでは、常時空けられている治水容量が無く、利水・発電容量と共同で用いられている。そのため、出水の直前において貯水位が高い場合には、予備放流を行って、出水開始前に所定の治水容量を確保する必要がある。そのため、気象・水

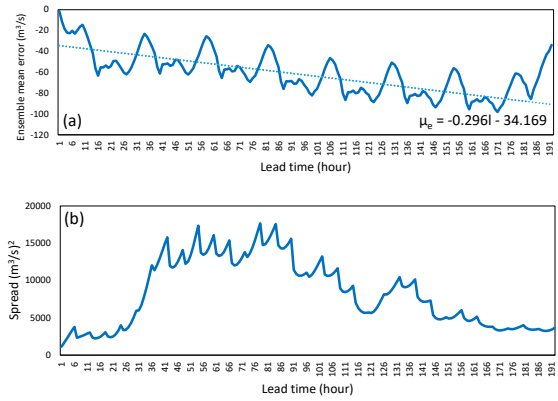


Fig. 1 Estimated error parameters of ensemble inflow predictions: (a) ensemble mean errors, (b) spread values.

文予測情報の利用が重要なダムであり、ダム治水操作の高度化に向けて、アンサンブル気象・水文予測情報の活用が期待されるダムの一つである。

長安ロダム流入量のアンサンブル予測情報の模擬作成のためのパラメータには、現業のアンサンブル気象予報を利用した。ここでは、気象庁の週間アンサンブル予報の降水量プロダクトを利用し、これを入力として分布型流出モデルHydro-BEAM (小尻ら, 1998)を用いてダム流入量に変換したものを、現業のアンサンブル流入量予測情報として考えた。その上で、現業アンサンブル流入量予測情報のアンサンブル平均 ($\mu_e(l)$)、スプレッド ($\sigma_e(l)$) (予測誤差の確率分布に対数正規分布を考える場合においてはその母数の値)を推定し、模擬作成モデルに設定した。模擬作成するアンサンブル流入量予測情報のアンサンブルメンバー数とリードタイムについては、気象庁の週間アンサンブル予報と同様にそれぞれ51と192時間(8日間)とし、時間解像度については、将来的なダム治水操作への適用を想定して1時間単位とした。なお、分析の対象とした期間が概ね2006~2013年の8年間であったため、この期間における週間アンサンブル予報の仕様を参考としている。

3.2 模擬作成された予測情報の再現性

以上の設定の下で、アンサンブル流入量予測情報の模擬作成を行った。はじめに、得津ら (2016) の方法 (式(1), (2)) を使って、出水時のアンサンブル流入量予測系列の模擬作成を行った (以下、Case 1と呼ぶ)。模擬作成にあたっては、2006~2013年の間に発生した流入量のピーク値が500 m³/s以上の主な出水15事例を対象として、現業アンサンブル流入量予測のリードタイム別のアンサンブル平均とスプレッドの平均値を算出した。この結果をFig. 1に示す。

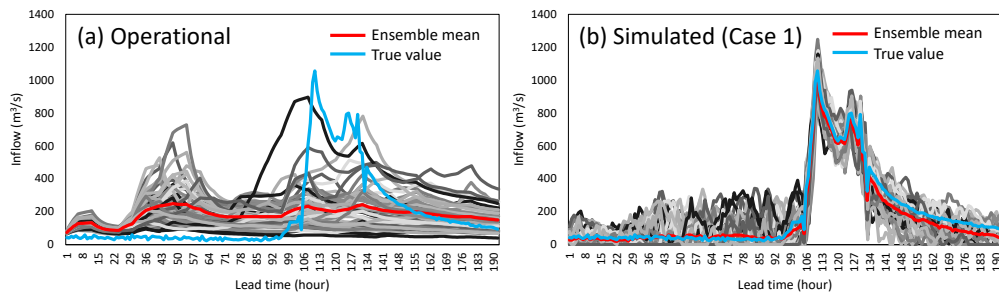


Fig. 2 Ensemble inflow prediction for Flood Event A: (a) operational prediction, (b) synthetically generated prediction (Case 1).

なお、この時期における週間アンサンブル予報は1日に1度の頻度で予測が更新されているが、本研究では、各出水事例について、観測流入量がピークを示した時刻を概ね中心とした9日間（9回分）の予測を解析対象としている。そのため、サンプル数は各リードタイムについて、135となっている。Fig. 1より、この期間における現業アンサンブル流入量予測値は、アンサンブル平均については過小傾向で、リードタイムが大きくなるにつれてその傾向が強くなること、スプレッドについては2～4日先で概ね最大となった後、徐々に減少していくことが見て取れる。スプレッドについては、通常リードタイムが伸びるにつれて概ね単調に増加しそうであるが、結果的にはそうならなかった。この理由としては、スプレッドと予測値との間に正の相関が見られること、週間アンサンブル予測のリードタイム後半にあたる5～8日先では、出水の発生の予測が難しく、予測値が大きくなることが少ないことの双方の影響が挙げられる。

以上のように推定された予測誤差パラメータを用いて、アンサンブル流入量予測情報の模擬作成を行った。その一例をFig. 2に示す。現業アンサンブル流入量予測と模擬作成された流入量予測を比較すると、模擬作成された流入量予測情報は、実際の予測を全く反映できていないことが分かる。模擬作成された流入量予測情報の特徴としては、流入量真値のピークの前後のスプレッドは、現業の予測と比較してやや過小か、あるいはそれほど変わらない。しかし、流入量真値のピーク付近については、現業の予測に見られる過小傾向が模擬作成された予測では全く見られず、スプレッドはかなり小さくなっている。また、予測期間全体で見た時系列的な特徴も、両者では全く異なることが見て取れる。そもそも、15の出水事例において出された計135回の予測全体から推定されたアンサンブル平均とスプレッドを模擬作成に利用しているため、各回の予測で模擬作成された予測系列のこれらの値が、現業の予測のアンサンブル

平均とスプレッドを完全に再現できることは原理的にあり得ない。しかし、予測情報の分布的な特徴や真値からの傾向があまりにも異なり、また流入量のピーク付近で異なる傾向が強まることから、このまま模擬作成された予測系列を利用して、例えばダム洪水調節操作へのアンサンブル流入量予測情報の利用の効果を分析しようとする、実際の流入量予測情報を使う場合と結果が大きく異なる可能性がある。なお、この模擬作成方法では、流入量の真値が比較的小さい期間において負の予測値が発生し得る。Fig. 1では、これらの負の予測値はゼロとして表示していることに留意されたい。

得津ら（2016）での検討によれば、低水時のアンサンブル流入量予測情報の模擬作成は、Case 1の方法で良好に現業予測情報の分布特性を再現できたが、ハイドログラフの急激な立ち上がりがある出水時の流入量予測情報の模擬作成には、この方法では不十分であることが考えられる。また、その他の予測事例を精査したところ、現業の流入量予測値の真値との関係は、出水ごとに、また予測発表ごとに大きく変化していることが確認された。分析期間を通じたアンサンブル平均やスプレッドの値は一応算出できるものの、それらの変動は非常に大きい。すなわち、分析期間を通じた予測誤差パラメータの定常性の仮定が、出水時のアンサンブル流入量予測情報の模擬発生の際には成立しないことが考えられる。

そこで、Case 2として、各出水期間の予測発表ごとに予測誤差パラメータを推定し、模擬作成を行う方法を検討した。同時に、予測誤差が従う確率分布として、3母数対数正規分布を仮定した（式(3)～(6)）。これは、誤差パラメータの定常性は、予測の発表ごとに異なる、すなわち完全に非定常であると仮定することと同じである。なお、出水事例が同じであれば予測発表のタイミングが異なっても、誤差パラメータの定常性が仮定できるのではないかと考えたが、結果として定常性は見られなかったため、本稿

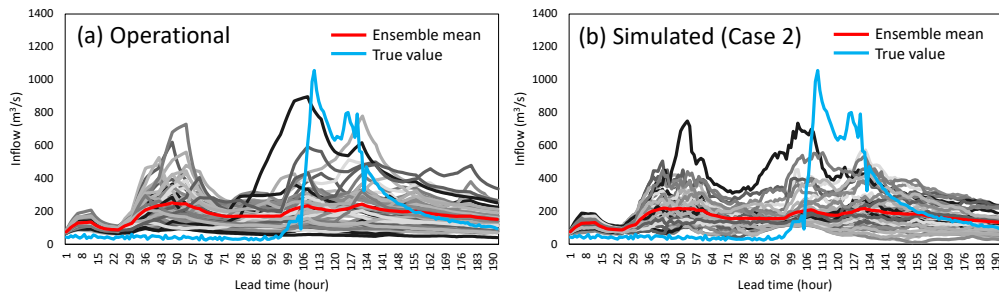


Fig. 3 Ensemble inflow prediction for Flood Event A: (a) operational prediction (shown again), (b) synthetically generated prediction (Case 2).

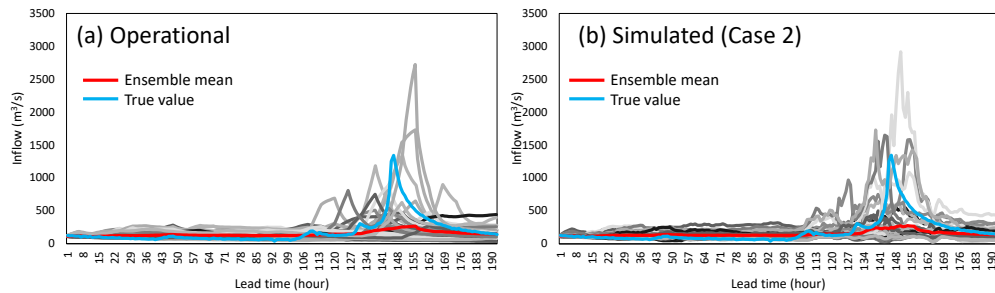


Fig. 4 Ensemble inflow prediction for Flood Event B: (a) operational prediction (shown again), (b) synthetically generated prediction (Case 2).

では結果の掲載を割愛する。Case 2の方法で模擬作成されたアンサンブル流入量予測情報をFig. 3に示す。Case 1と比較すると、当然ではあるが、模擬作成されたアンサンブル予測の特徴が、現業のアンサンブル予測のそれに近付いていることが分かる。個々のアンサンブル予測メンバの時系列的な特徴は再現性が低いところもあるが、予測メンバ全体の分布的な特徴については、真値との関係も含めて、再現性が高まっている。Fig. 4に別の出水事例における予測情報の模擬作成結果を示すが、こちらも再現性が比較的高い。現業の予測情報に見られる真値に比べて過大な予測メンバも模擬作成された予測情報では同様に過大なメンバを再現できている。

これらのことから、出水時におけるアンサンブル流入量予測情報を現業の予測情報のような特性を持つよう模擬作成するためには、分析期間全体を通じて、予測誤差パラメータが定常であることを仮定するのは非現実的で、予測発表ごとに誤差パラメータが変動し得ることを前提とする必要がある。すなわち、誤差パラメータの変動モデルを導入することが、より現実的なアンサンブル予測情報の模擬作成機構を構築する上で重要であると考えられる。

なお、このように模擬作成されたアンサンブル水文予測情報を用いて、ダム貯水池の治水操作、とりわけ予備放流操作や事前放流操作といった弾力的な操作を、予測を使って実施することの効果を定量的

に分析する方法については、既に齋藤(2017)やNohara et al. (2017)などで報告済みであるので、そちらを参照されたい。

4. おわりに

本稿では、アンサンブル流入量予測情報の統計的な模擬作成手法をベースとして、出水時の予測情報を模擬的に作成した上で、作成されたアンサンブル流入量予測情報と現業のアンサンブル降水予測情報より推定した流入量予測情報とを比較し、模擬作成した予測値の実予測値に対する再現性の検討を行った。その結果、分析期間を通じて予測誤差パラメータの定常性を仮定する形で模擬作成されたアンサンブル流入量予測情報は、現業予測情報とは異なる非現実的なものとなり、この仮定が非現実的なものであることが分かった。現実的なアンサンブル流入量予測情報を模擬作成するためには、誤差パラメータが予測発表ごとに変わることを前提に、誤差パラメータの変動モデルを考慮する必要性が示された。なお、これらの結論は、検討事例から帰納的に得られたものに過ぎないので、誤差の定常性が仮定できる範囲を理論的かつ網羅的に再度精査するなどして、今回得られた結果の一般性の検証に向けて、さらに検討を進めたい。

謝 辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号：16K06510）の支援を受けた課題研究の一環として行われた。また、那賀川流域および長安口ダムに関する諸データについては、国土交通省より提供を受けた。気象庁週間アンサンブル予報GPVデータについては、地球流体電脳倶楽部（<https://www.gfd-dennou.org/>）のデータサーバより入手した。これらの関係諸氏に対し、ここに深い謝意を表す。

参考文献

- 天井洋平・野原大督・堀智晴・角哲也（2013）：予測流入量情報を用いたダム事前放流操作の影響分析手法に関する基礎的検討，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1627-I_1632.
- 猪股広典・川崎将生・後藤祐輔・増田有俊・荒木千博・荒木孝之（2015）：アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関する研究，水文・水資源学会誌，Vol.28, No.6, pp.278-290, 2015.
- 齋藤宏樹（2017）：アンサンブル水文予測情報のダム予備放流操作への利用性分析，京都大学学士論文。
- 得津萌佳・野原大督・堀智晴（2016）：アンサンブル水文予測情報を考慮したダム利水操作の効果分析手法の検討，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72, No.4, I_1213-I_1218.
- 経田正幸（2006）：アンサンブル予報概論，数値予報課報告・別冊，気象庁予報部編，第52号，pp.1-12.
- 野原大督・堀智晴・佐藤嘉展（2017）：現業中長期アンサンブル降水予測情報を考慮した実時間ダム利水操作に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73, No.4, pp. I_1315-I_1320.
- 星清（1997）：7.4.3時系列データの模擬発生，水文・水資源ハンドブック，株式会社朝倉書店，pp.249-251.
- 松原隆之・高田望・中北英一（2017）：気象庁週間アンサンブル予報と気象庁GSMを活用した流域雨量の予測精度向上手法の基礎的検討，土木学会論文集B1（水工学），第73巻，第4号，pp. I_265-I_270.
- Hapsari, R.I., Oishi, S., Sunada, K. (2012): Ensemble flood prediction by cascading the uncertainty from rainfall to runoff short-term prediction, Journal of Japan Society of Civil Engineers B1 (Hydraulic Engineering), Vol.68, No.4, pp. I_139-I_144.
- Kim, Y. O., Eum, H. I., Lee, E. G. and Ko, I. H. (2007): Optimizing Operational Policies of a Korean Multireservoir System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with Ensemble Streamflow Prediction, Journal of Water Resources Planning and Management, 133(1), pp.4-14.
- Kojiri, T (2006): Hydrological River Basin Environment Assessment Model(Hydro-BEAM), Watershed models, Singh VP, Frevent DK.(eds.) Taylor & Francis, CRC Press, pp. 613-626.
- Masuda, H. and Oishi, S. (2013): Study on optimization of the integrated operation of dams using ensemble prediction in the upper reaches of the Nabari River, Proc. 35th IAHR World Congress, S10065.
- Nohara, D., Hori, T. (2017): Integrated Reservoir Operation Considering Real-time Hydrological Prediction for Adaptive Water Resources Management, Sustainable Water Resources Planning and Management under Climate Change, Kolkytha, E., Oishi, S. and Teegavarapu, R.S.V. (eds.), Springer Singapore, pp.101-132.
- Nohara, D. and Saito, H. (2018): Assessment on effects of preliminary release operation of a multi-purpose reservoir considering ensemble inflow prediction, Proceedings of 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo.
- Nohara, D., Nishioka, Y., Hori, T. and Sato, Y. (2015): Real-time reservoir operation for flood management considering ensemble streamflow prediction and its uncertainty, Advances in Hydroinformatics SIMHYDRO2014, Gourbesville, P. et al. (Eds.), Springer, pp.333-347.
- Nohara, D., Saito, H. and Hori, T. (2017): A framework to assess effectiveness and risks of integrated reservoir operation for flood management considering ensemble hydrological prediction, Proc. XVI World Water Congress, Cancun, ABSID359 (14pp.).
- Takeuchi, K. and Sivaarthitkul, V. (1995): Assessment of effectiveness of use of inflow forecasts to reservoir management, IAHS Publications, Vol. 231, pp.299-309.

（論文受理日：2018年6月13日）