

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：14301  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760462  
 研究課題名（和文） 中長期アンサンブル気象予測情報を活用した貯水池操作手法の開発  
 研究課題名（英文） Reservoir operation considering long-term ensemble hydro-meteorological forecasts  
 研究代表者 野原 大督 (NOHARA DAISUKE)  
 京都大学・防災研究所・助教  
 研究者番号：00452326

## 研究成果の概要（和文）：

中長期アンサンブル気象予測情報を活用した貯水池操作手法の開発を行った。特に、気象庁の1か月アンサンブル降水予測情報を対象に取り上げ、当該情報を考慮したダム貯水池における利水操作手法についての検討を行い、操作の効果をより高めるための実時間での利用手順を明らかにした。さらに、アンサンブル予測情報を利用した貯水池操作計画の立案に資するため、任意の不確実性を持つ予測情報を模擬発生する機構を組み合わせたアンサンブル予測情報の効果分析システムを開発した。

## 研究成果の概要（英文）：

A reservoir operation method considering long-term ensemble hydro-meteorological forecasts were developed. The method to improve the effectiveness of real-time reservoir operation was investigated and clarified considering the monthly ensemble forecast of precipitation provided by Japan Meteorological Agency. Moreover, a stochastic impact assessment model of stochastic hydro-meteorological predictions, which have a similar theoretical basis with ensemble predictions, was developed by incorporating an artificial generation method of stochastic hydro-meteorological predictions with arbitrary degrees of uncertainty, in order to contribute to efficient design of reservoir operation considering the ensemble hydro-meteorological forecasts.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,800,000	540,000	2,340,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：水資源工学，予測情報の活用

## 1. 研究開始当初の背景

ダム貯水池を有効に活用することを考える場合、将来における流域の流況をあらかじめ把握できることは、効率的な放流意思決定を行う上で重要であり、そのため、気象や水文事象に関する予測情報を意思決定に利用することは有益であると考えられる。しかし、特に渇水対策を対象とした低水管理では、一

般的に必要なとされる予測のリードタイムが数週間～数か月と長期間であることから予測精度の低下が避けられず、そのため実管理では長期予測情報の定量的な利用が行われていないのが現状であった。

予測精度のこのような低下を抑える方法として、近年、複数の数値予報の集合を統計的に処理し、単独の数値予報より確からしい

予報を得ようとする手法（経田，2006）であるアンサンブル予報が，現業の中長期気象予報業務に取り入れられてきている．これらの複数の数値予報（メンバと呼ばれる）を考慮することによって，最終的に総合された予報値のみならず，想定される複数の状況とそれらの状況が発生する可能性，あるいは予測の信頼性に関する情報が得られる．こうした予報メンバの分布特性を考慮に入れて放流意思決定を行うことができれば，従来の単一の予報を利用する場合と比較してより安定した操作を行うことができると考えられ，特に，参照とすべき予測情報の精度が低い傾向にある長期の貯水池管理に対して有用であると考えられる．

こうした点を踏まえ，これまでもアンサンブル予報を利用した長期貯水池管理における放流決定手法に関する基礎的な研究がFaberら（2001）やKimら（2007）によって行われている．しかし，いずれの研究においても，予報を利用した場合の操作結果に対する評価を結果論的に議論するにとどまっておき，予報を用いた意思決定がリアルタイムでどのように行われ，その結果，操作がどのように向上したのかについては，具体的な分析が行われていない．そのため，予報の状況を見ながら様々な貯水池実管理現場において具体的にどのような手順で放流決定に反映させれば良いのかという点について明らかになっていないことが課題であった．

## 2. 研究の目的

本研究は，上記の状況に鑑み，中長期アンサンブル気象予測情報を利用した長期貯水池放流意思決定に関する詳細なシミュレーション分析を行い，様々な貯水池実管理現場におけるアンサンブル気象予測情報の定量的かつ効果的な利用手順の開発を行おうとしたものである．

アンサンブル予測情報を利用する方法には，主に，1) 予測値のアンサンブル平均を決定論的に利用する方法，2) 予測を確率的分布情報と見なし確率的に利用する方法，3) 各予測メンバの時系列的特徴を踏まえてそれらを総合的に考慮する方法が考えられる．本研究では，貯水池の長期実管理上で想定される様々な状況下において，上記の3つの利用方法のいずれを適用すべきかを明らかにし，予測情報の汎用的な利用手法を開発することを目的とした．

さらに，非決定論的な予測情報である中長期アンサンブル気象予測情報を活用した貯水池操作の計画立案に資するため，予測情報の持つ不確実性がダム利水操作の改善に与える影響を分析し，より望ましい予測情報のあり方や，効果的な予測情報の利用手順に基礎的な検討を行うことも目的としていた．

## 3. 研究の方法

上記の目的の下，具体的には以下の方法により研究を実施した．

### (1) アンサンブル降水予測情報を利用した貯水池操作手法の比較分析

アンサンブル予測情報の利用性分析のための貯水池実時間操作のシミュレーションを行った．具体的には，1) アンサンブル予測平均を利用した決定論的動的計画法（DDP）による決定論的放流最適化モデル，2) アンサンブルメンバ別予測情報を用いた確率的動的計画法（SDP）による確率論的放流最適化モデル，および3) アンサンブルメンバ別予測情報を用いたサンプリング確率動的計画法（SSDP）による確率論的・時系列的な利水放流最適化モデルを構築し，3種の長期利水放流決定シミュレーションを実施した．その結果によって，3つのモデルの優劣を系統的に分析し，最も精度の良いモデルを予測情報の利用手順として整理した．また，予測情報の精度が著しく低い場合には観測情報と過去の統計情報のみを利用した放流決定モデルも合わせて考慮した．

### (2) 予測情報の不確実性がダム利水操作における予測情報の利用性に与える影響の分析

アンサンブル予測情報などの非決定論的予測情報をダム利水操作に活用する場合に，予測情報に含まれる不確実性が利水放流決定精度に及ぼす影響を，以下の方法によって定量的に分析した．

まず，実際の予測情報では，定量評価を系統的に行うために十分な数のサンプルが得られないことを補うため，予測情報を模擬発生する機構を開発した．ここでは，理論的な展開のしやすさを考え，アンサンブル予測情報を一般化（有限個のサンプルの集合から確率分布へと一般化）した確率予測情報を考えた．そして，予測情報の曖昧性と不安定性の二種類の指標を開発した上で，任意の曖昧性・不安定性を持つ確率流量予測情報を確率的に模擬発生する機構を開発した．さらに，これらの模擬発生された大量の確率流量予測情報を使って，SDPによる最適放流計算結果に基づいた利水放流操作シミュレーションを実施し，その結果を総合的かつ定量的に評価することのできる，モンテカルロシミュレーション分析モデルを開発し，これを用いて様々な不確実性を有する確率流量予測情報の利用性の分析を系統的に実施した．

さらに，渇水時の実時間利水放流決定に資するために，低い流況時における確率流量予測情報の利用性に関する上記と同様な分析を，より詳細に実施した．

#### 4. 研究成果

(1) アンサンブル降水予測情報を利用したダム利水放流決定のための最適化モデルの構築

気象庁の1か月アンサンブル降水予測情報を利用した利水放流決定手法を構築した。対象流域の過去の観測データを用いて、流域平均降水量からダム地点の流入量と、流況評価基準点におけるダム上流域を除く残流域からの流出量を予測する統計回帰式を開発し、対象流域の近傍格子点におけるアンサンブル降水予測値から、ダム流入量と残流域流出量に関するアンサンブル予測値を推定する手順を構築した。得られたアンサンブル流入量・流出量予測情報を使って、1) アンサンブル予測平均を利用したDDPによる決定論的利水放流最適化モデル、2) アンサンブルメンバー別予測情報を用いたSDPによる確率論的利水放流最適化モデル、および3) アンサンブルメンバー別予測情報を用いたSSDPによる確率論的・時系列的な利水放流最適化モデルを構築し、アンサンブル予測情報の利用方法に応じたダム貯水池の利水放流最適化モデルを構築した。

(2) アンサンブル降水予測情報の効果的な利用手順の検討

上記(1)で開発した3種類の利水放流最適化モデルを用いて、アンサンブル降水予測情報の効果的な利用手順の検討を行った。吉野川流域早明浦ダムを対象としてケース・スタディを実施した結果、DDPとSDP及びSSDPとの最適放流決定過程の相違が明らかになり、アンサンブル予測情報を用いる場合にその分布特性を慎重に考慮に入れることが必要であることが明らかになった。特に、DDPによって最適化された利水放流戦略の精度は、アンサンブル平均予測値の影響を受ける傾向にあり、反対に、アンサンブルメンバー別予測を考慮するSDPおよびSSDPによって最適化された利水放流戦略の精度は、アンサンブルメンバー別予測値の中央値(図1)により影響を受ける特徴がある可能性が確認された。これによって、アンサンブル予測情報に含まれる予測系列の平均値と中央値の関係と予測精度と併せて見ることによって、最適化モデルとしてDDPを採用するのか、あるいはSDPやSSDPを採用するのかを判断することができる可能性があることが明らかになった。一方、SDPとSSDPとの最適放流決定過程については、両者の計算結果に一定の違いが確認できたものの、その原因を明らかにするまでには至らず、今後の課題となった。

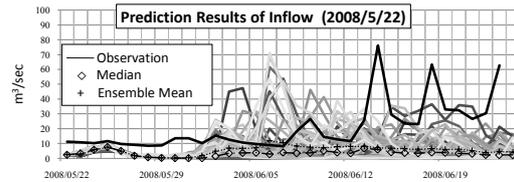


図1 アンサンブル予測情報の平均値と中央値の関係の例

(3) 非決定論的予測情報の不確実性指標の開発

アンサンブル予測情報や確率予測情報の不確実性を表現するための二つの指標を開発した。一つは、予測情報の安定性または不安定性に関する指標であり、次節に示す予測情報の模擬発生に資するよう、予測確率分布の中心とその予測情報が出されていた場合における予測対象の現象の生起確率分布の中心との差(平均誤差)の分散の、予測対象の現象の気候学的分散に対する比として定義した。もう一つは、予測情報の曖昧性または分離性に関する指標であり、予測確率分布の分散の、気候学的分散に対する比として定義した。これらの二種類の不確実性は、同じ予測対象の現象を予測しようとする場合に、しばしばトレードオフの関係となる(すなわち、安定性を高めようとする予測情報が曖昧になりがちとなり、分離性を高めようとする予測が不安定になりがちになる)ことから、予測情報におけるこれらの不確実性のバランスを取る上で重要な要素である。上記のように、気候学的分散に対する比として予測情報の安定性・分離性に関する指標を定義することで、真値の大きさに捉われることなく予測情報の不確実性の評価を行うことを可能にした。

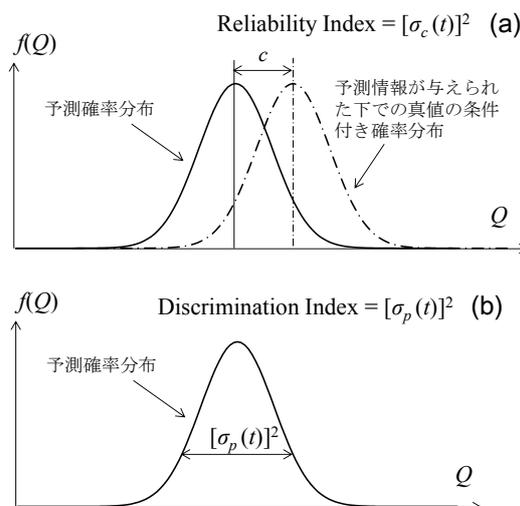


図2 予測情報の不確実性指標の概念図

(4) 任意の不確実性を有する確率予測情報の模擬発生手順の開発

上記(3)で開発した予測情報の不確実性に関する指標を用いながら、任意の不確実性を有する確率流量予測情報の模擬発生手順を開発した。確率予測情報は、流量の真値に、確率分布の形式で与えられる誤差分布を加えたものとして定義し、誤差確率分布の形状には正規分布を仮定した。具体的には(図3も参照)、まず、予測確率分布の平均が正規確率分布に従うとして、その確率分布から予測確率分布の平均の仮値をランダムサンプリングする。ただし、仮に予測確率分布の平均の予測回についての平均が予め分かっているのであれば、得られた予測値に対して $\mu_e(t)$ を減じることで実時間でも容易にバイアスの補正が可能であるので、ここではこのバイアス補正が必要に応じて既になされたものとみなす。次に、先にサンプリングした値を中心として所定の分散を持つ正規確率分布を考えれば、流量に対する予測確率分布を模擬発生できるわけであるが、このままでは得られた予測確率分布がその後の流況を予測する適切な確率分布とはならない。例えば、この確率分布の平均値が真値に等しく、かつ当該平均が従う確率分布の分散がゼロである場合、得られる予測確率分布は正しい生起確率分布になるべきところが、上記の手

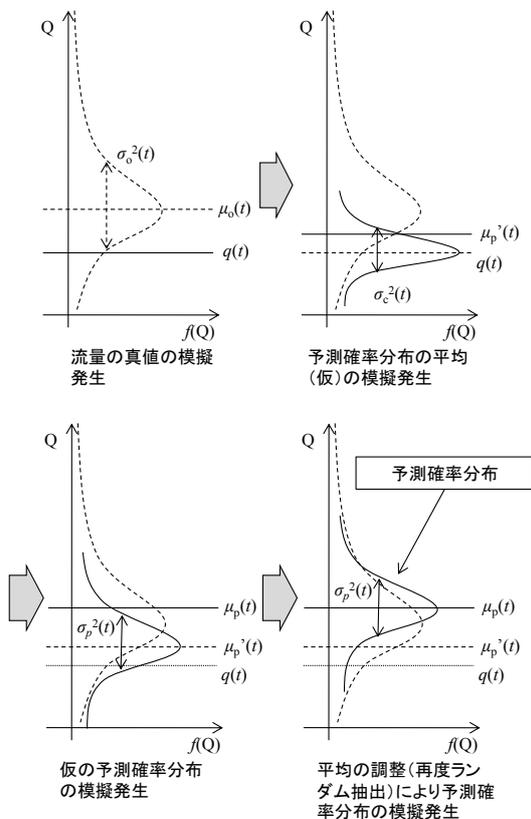


図3 確率流量予測分布の模擬発生手順

順では常に予測確率分布の平均が流量の真値と等しくなってしまうため、予測確率分布が得られたという条件の下での流量の条件付き生起確率分布が、予測確率分布と異なってしまうことになる。この問題を解消するため、上記の手順で得られた正規確率分布からさらにランダムサンプリングを実施して得られた値を実際の予測確率分布の平均とし、この平均を中心に所定の分散を持つ正規確率分布を、予測確率分布とした。この操作により、予測確率分布の平均の予測実施回方向にとった分散がゼロの場合に、予測確率分布とその後の流量の条件付き生起確率分布が一致する性質を確保することができた。さらに、予測確率分布の平均の予測回方向にとった分散の気候学的分散に対する比が(3)で開発した安定性に関する指標、また、予測確率分布の分散が(3)の分離性指標に相当することから、これらの値を変えてやることにより、任意の安定性及び分離性を持った確率予測情報の模擬発生を行うことを可能とした。さらに、同様の方法論で、確率分布ではなく予測値サンプルを多数発生させることにより、任意の不確実性を持ったアンサンブル予測情報の模擬発生を行えることを示唆した。

(5) 非決定論的流量予測情報の利用性分析

(3)、(4)で開発した任意の不確実性を持った確率予測情報の模擬発生機構を利用して、確率予測流入量情報を考慮したダム利水放流の効果を分析するためのモンテカルロシミュレーションを実施した。吉野川水系早明浦ダムを対象としてケース・スタディーを実施した結果、(平水時および豊水時を含む)全体的には予測情報の安定性よりも分離性が重視されること、渇水時には分離性

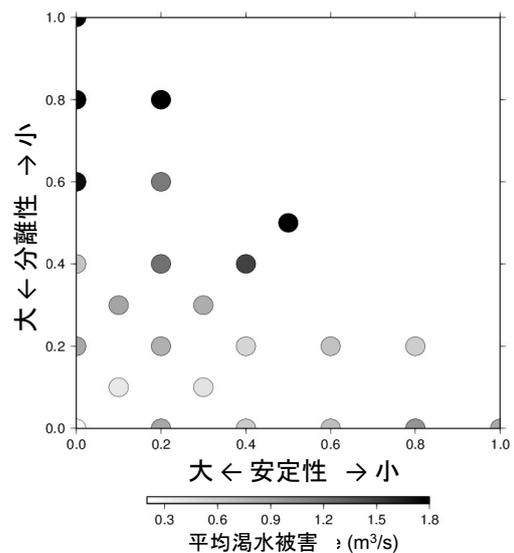


図4 予測流入量情報の不確実性と利水放流操作精度との関係の一例(低流況・状態分割数200)

の高い予測情報を利用することによってより大きな効果を見込めるが、予測情報の全体の不確実性が大きい場合には予測情報の安定性が重視されることが示された。また、利水操作の最適計算を行う確率動的計画法における、貯水池や水量などの状態量の離散化数によっても、計算結果が左右されることから注意を要することを明らかにした。この分析方法はアンサンブル予測情報の利用性に関する同様の分析へと容易に拡張することができることから、応用性が高い方法であると言える。また、分析結果は、アンサンブル予測情報の利用性を分析する場合の比較データとなり得ることから、重要な意義を持つと考えられる。

#### (6) 渇水時における非決定論的流量予測情報の利用性分析

実際に観測された低流況イベントを対象に、(5)と同様に様々な不確実性を持った予測情報の利水放流決定における利用性の分析を実施した。吉野川水系早明浦ダムを対象として、過去の渇水年の流況を用いて、渇水が多く発生する夏期について初期貯水量を変えながらシミュレーション分析を実施した結果、小・中規模の渇水時には予測情報の分離性よりも安定性の方が重視される傾向にあることが示された。しかし、大規模な渇水時には、予測確率分布の端部が大きな（流入量の）値に及ぶ傾向にある安定性が高く分離性が低い予測情報よりも、分離性の高い予測情報の方が、渇水被害を軽減しやすい可能性があることが示された。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2件）

(1) Nohara, D., Miki, H. and Hori, T.: Impact analysis of long-term stochastic inflow prediction and its uncertainty on reservoir operation during drought situation, IAHS Redbook (refereed), 362. (In printing.)

(2) Nohara, D. and Hori, T.: Impact analysis of stochastic inflow prediction with reliability and discrimination indices on long-term reservoir operation, Journal of Hydroinformatics (refereed). (In printing.)

〔学会発表〕（計 1件）

(1) Nohara, D. and Hori, T.: Impact analysis of reliability and discriminability index of stochastic inflow

prediction and its application to long-term reservoir operation, 10<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics, Hambrug, Germany, July 18<sup>th</sup>, 2012.

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://gwd.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

野原 大督 (NOHARA DAISUKE)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：00452326

##### (2) 研究分担者

無し

##### (3) 連携研究者

無し