

長期貯水池操作のための多様な全球気象情報の利用可能性

野原大督・三木博子*・堀智晴

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

ダム貯水池の利水操作時における全球気象情報の利用可能性を検討することを目的として、管理対象とする河川流域の降水量と複数の全球気象情報の格子点データとの相関関係を利用した長期貯水池操作手法を構築した。まず、各気象情報の格子点値のうち、流域降水量と強い相関を示した格子点における観測値（解析値）を予測因子として考え、これらの予測因子を説明変数とした将来の長期降水量の予測重回帰式を構築した。次に、貯水池操作手法については、降水予測結果と現在の貯水池の状態を考慮しながら動的計画法により実時間で求めた放流戦略に従って放流を行う方法をとった。提案手法を、実流域を対象に適用した結果、3か月降水量の予測精度が改善された。また、得られた予測結果を用いて利水放流決定のシミュレーションを行った結果、予測を考慮しない場合と比較して操作結果が改善されることが確認された。

キーワード：貯水池操作，渇水，全球気象情報，降水予測

1. はじめに

渇水管理を目的としたダム貯水池の長期操作を効果的に行うためには、管理対象である河川流域の将来の気象・水文状況が予め把握できることは重要である。渇水が比較的長期間にわたる少雨現象によって引き起こされることに鑑み、わが国では概ね数週間から数か月先までの流域の将来の状態に関する降水または流況の予測情報があることが望ましいとされることが多い（例えば、永井ら、2003）。各国の気象機関が提供する現業気象予報の中には、こうした数週間から数か月先の期間を対象とした中長期気象予報等の予報メニューが用意されており、これらを利用することが可能である。

しかし、予測期間がこのように長期間に及んでくると、大気を持つ非線形性の効果が極めて大きくなることから、予測精度が大きく低下することは避けられず、そのことがダム貯水池の実管理において中長期気象予報を定量的に利用することを難しくしている。例えば、池淵ら（1990）やKojiri et al. (1994)では、現業の中長期気象予報を利用した長期貯水池操作手法について検討を行っているが、一定水準の予測精度の確保が難しく、実用化にはいまだ至って

いない。

こうした状況に鑑み、現業の中長期気象予報のみを頼みにするのではなく、管理対象の河川流域の長期の将来における気象・水文状態をより広範な視点から推し量ろうと、多様な情報源の利用が検討されている。一般に、気象現象は空間スケールが大きいほど、その時間スケールも大きいことが知られており、惑星規模の現象であれば、その時間スケールは数か月を超えるものもある（小倉，1984）。このことから、特に、全球にわたるような広域の空間スケールを持つ気象現象の中には、流域の比較的長期の将来における気象・水文状態と関係が深いものがある可能性が考えられることから、近年、水資源管理における広域気象情報の利用に関する研究が盛んに行われている。櫻井（1996）は、北半球上空における気圧高度分布状況や太平洋の数種の海域における海面水温分布状況から、ニューラルネットワークを用いて日本の各地点の少雨現象や渇水状況を予測する手法について検討を行っている。Robertson and Ghil (1999) は、PNA (Pacific-North American) パターンやTNH (Tropical- Northern Hemisphere) パターン、ENSO (El Niño/ Southern Oscillation) などのテレコネクションパターンや太平洋におけるΩ型プロ

ッキングの状況を利用して、アメリカ合衆国西部の8地点の観測点における冬季の降水量および気温の分布を統計的に推定することを試みている。Xoplaki et al. (2000) は、ギリシャにおける冬季降水量の空間分布と、大西洋北東部からヨーロッパの対流圏中層の循環場と見なせるヨーロッパ上空における500hPaジオポテンシャル高度分布及び地表面気圧分布との関係を分析するために、EOF (Empirical Orthogonal Functions) とCCA (Canonical Correlation Analysis) を実施し、水資源管理に有用と考えられる3つの典型的なCCAパターンを得ている。野原ら (2010) では、北半球の500hPaジオポテンシャル高度分布を用いて、数個に分類された典型的なジオポテンシャル高度分布の各パターンの生起と流域降水量との統計的關係を利用した長期降水予測手法を構築し、日本の貯水池の利水操作に反映させることで、渇水対応のための放流調整の合理化を図ろうとしている。また、Maity and Kumar (2009) は、ENSO及びEQUINOO (Equatorial Indian Ocean Oscillation) とインドのHirakudダムにおけるモンスーン期の流入量の変動との水文・気候学的な関係を、主に相関解析によって調べ、ENSO及びEQUINOOの合成指標から流入量を予測する方法について、検討を行っている。

しかし、以上のいずれの研究においても、対象とする地域または河川流域における地域スケールの気象・水文状態との関係が先験的に期待される広域または遠隔地の気象現象を考慮の対象としている。対象とする流域によっては、当該流域との関係性が期待されるような気象現象が、必ずしも明らかとなっていないところもある。また、地域気候と何らかの関連性があると考えられる広域気象現象が既に明らかになっている場合においても、日本の山岳域におけるダム流域のように、より小さな空間スケールの流域の降水・流況との関連性に特化して考えた場合には、流域の水資源管理に役立つような別のシグナルが広域または遠隔地の気象現象に内在する可能性も考えられる。

こうした観点から、水資源管理への全球気象情報の利用にあたり、やや探索的な方法を取っている研究もある。Sveinsson et al. (2008a, 2008b) では、カナダのChurchill Falls流域における春季の河川流量との間に関連性を示す、大気の大規模循環指数やテレコネクション指標、気温・気圧や海面水温などの情報を、相関解析や合成図解析によって探索し、これらの情報を用いた流況予測手法について検討している。また、Han (2009) では、全球降水量GPVとタイのChao Phraya川流域のBhumibolダム流入量とのラグ相関解析を行い、高い相関を示すGPVを予測因子とした長期ダム流入量の予測手法を構築している。しか

し、これらの研究では、降水量あるいは流量の予測方法に関する議論に終始しており、各種の気象情報の利用によって最終的に貯水池操作がどのように改善されたかについては検討されていない。また、適用対象についても、いずれの研究においても大陸における比較的大きな面積を有する流域を取り上げており、我が国においてしばしば見られるような、山間部の比較的小さな流域において、広域気象現象と同様な関係が見られるかどうかについては、いまだ十分に議論されていないのが現状である。

そこで、本稿では、近年、各国の気象機関から提供されている複数の全球気象情報を用いて、対象とする河川流域の降水量との関連性の大きな気象要素や、そういった現象が生起する位置を定量的に選択しつつ、当該地点における気象状態を考慮した長期貯水池操作手法を構築する。具体的には、対象流域の長期降水量と各全球気象情報に含まれる各格子点値との相関解析を行ってまずは両者の線形の関係性を調べ、高い相関を示す地点における気象状態を予測因子とする降水量予測重回帰式を構築するとともに、当該予測結果を活用したダム貯水池の利水放流決定手法を開発する。そして、開発した利水操作手法を日本の山岳域に集水域を持つダム貯水池に適用し、全球気象情報の利用可能性について検討を行う。

2. 提案手法の概要

2.1 利用する全球気象情報

近年の計算機資源の性能の向上や情報通信技術の進展に伴い、気象観測地点での観測結果を基礎にした数値計算により算出された気象諸量の解析データが、全球にわたる格子点データの形式で各国の気象機関から提供されている。本研究では、大気及び海洋の状態を表す気象諸量のうち、一般的に、流域における概ね数週間から数か月程度の長期的な気象・水文状態に影響を及ぼす可能性が考えられる気象諸量を考慮する。具体的には、全球の大気の状態については、大気中下層における気圧(気圧高度)および気温、すなわち500hPa気圧高度、850hPa気圧高度、地表面気圧、500hPa気圧高度面気温、850hPa気圧高度面気温、地表面気温の6種の気象量を考える。また、海洋の状態については、大気に大きな影響を与える大気・海洋間の熱交換を考慮するため、海面水温を考え、大気と海洋を合わせて7種の気象量を考える。

次に、上記の気象諸量の状態を把握するために利用する情報についてであるが、貯水池での実管理で用いることを念頭に置くと、利用する情報には、情報へのアクセス性が高く、また、最新の情報を素早く入手できることが求められる。さらに、過去の統

Table 1 Properties of datasets used in this study

Meteorological element [Dataset]	Spatial range	Spatial resolution	Temporal range	Temporal resolution	Update frequency
Pressure height (500hPa, 850hPa)	90°N-90°S, 180°W-180°E	2.5 degrees grid	Jan. 1948 - present	Monthly	Monthly
Surface pressure					
Air temperature (500hPa, 850hPa, surface)					
[NCEP/NCAR reanalysis]					
Sea surface temperatures [glbsst]	80°N-80°S, 180°W-180°E	2 degrees grid	Jan. 1946 - present	Monthly	Monthly

計データを用いる上では、長期間のデータの蓄積があることが望ましい。本稿で考慮しようとする気象諸量については、いずれもオンライン上で長期間にわたる全球データが無償で公開している機関があり、比較的これらを容易に利用できる体制となっている。こうした全球気象情報のうち、本研究では、大気の状態を示す500hPa気圧高度、850hPa気圧高度、地表面気圧、500hPa気温、850hPa気温、地表面気温の気象諸量については、米国海洋大気庁地球システム研究所（NOAA/ESRI）のWEBサイト上で提供されているNCEP/NCAR再解析データ（National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research Reanalysis Data）（Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001）の月平均データを利用する。一方、海面水温については、気象庁が作成し、海上保安庁海洋情報センター（JODC）が運用する北東アジア地域遅延モードデータベース（NEAR-GOOS RDMDB）で公開されている、月平均海面水温データセット（Global Sea Surface Temperature: glbsst）を利用する。利用する全球気象情報のスペックをTable 1に示す。

2.2 提案操作手法の概要

本研究では、全球の気象の状態から統計的に推定した長期降水量の予測情報を考慮した長期貯水池操作手法を開発する。長期降水量としては、概ね1～3か月程度先までの降水状況を考え、ダム貯水池の操作目的としては利水操作を考える。以下では、長期降水量の予測対象期間が向こう3か月間である場合を例に取り、提案手法の概要を述べる。

まず、全球気象情報の中から予測対象期間の積算降水量の予測因子を探索するため、前項で取り上げた7種の各全球気象情報の各格子点における解析値と、対象とする流域における1月から12月までの各月

を始点とする予測リードタイム分の積算降水量とのラグ相関解析を実施する。このとき、全球気象情報の各格子点値については、時間スケールについては、概ね1か月～3か月程度の期間における平均値、空間スケールについては、概ね1格子点から9格子点（3×3格子点）の平均値を考える。また、3か月間先までの予測を行うことから、相関解析の際には最大3か月間の時間ラグを考慮する。

次に、相関解析の結果、7種の各全球気象情報の各格子点のうち、1月～12月までの各月を始点とする予測対象期間の積算降水量とそれぞれ最も高い相関を示す格子点を選び出し、それぞれを各予測対象期間における降水量の予測因子の候補と見なす。すなわち、7種の各全球気象情報を代表する予測因子の候補7つが、予測対象とする期間ごとに得られることになる。続いて、これらの予測因子を説明変数とした降水量予測のための重回帰式を予測対象期間ごとに構築する。この際、各重回帰式にとっての最適な説明変数の組合せを赤池情報量基準（Akaike Information Criteria: AIC）（Akaike, 1974）を用いて決定する。

一方、対象ダム貯水池の放流戦略は、対象流域の降水予測状況を元に決定する。本研究では、主にダム貯水池の利水操作を考えるので、操作目的を渇水被害の最小化と設定する。予測状況を元にした放流戦略の最適化は、降水予測対象期間において想定される対象流域での降水状況と流域及び貯水池の状態、各種制約条件を考慮した上で、動的計画法（Dynamic Programming: DP）によりリアルタイムで実施する。ただし、日本におけるダム貯水池のように、比較的貯水容量が小さなダム貯水池や、年間の河川の流況の変動が激しい流域においては、1か月間や3か月間といった長い期間における総降水量や流況の平均的状态を最適計算モデルに与えるのみでは、現実的な操作戦略を算定するには時間スケールが大きくなり

すぎる恐れがある。さらに、DPによる最適化計算において、貯水池における連続式を直接計算するためには、ダム貯水池への流入量や河川流況に関する予測情報が必要である。そこで、前述の過程で算出された予測積算降水量を、予測対象期間内の各日の降水量の気候値に基づいて比例配分することで、日単位の予測降水量系列を算出する。さらに得られた予測日降水量系列から、日単位の予測流況系列を算出する線形重回帰式を推定し、この重回帰式によって求められた予測流況系列を用いて、利水放流戦略の決定を行う。

3. 全球気象情報を利用した貯水池操作手法

3.1 相関解析

前述のように、全球的な気象情報には、その空間スケールから、目的とする流域の将来における気象・水文状況と関係の深い情報が含まれている可能性があるが、そのような情報に含まれる全てのデータが流域の気象・水文状況との良好な関係を示すとは限らない。むしろ、流域の気象・水文状況とほとんど関係が見られないデータが大半であることが十分に考えられる。まずは、両者の関係性について、客観的な分析を行うことが、情報に含まれる大量のデータの中から流域の気象・水文状況と関係が大きく予測因子となり得るようなシグナルと、逆に関係が小さいノイズとを識別する上で重要であろう。そこで、全球気象情報と流域の気象・水文状況との間の関係性の分析の第一歩として、両者の線形な統計的関係を分析し、本研究で考慮する7種の各全球気象情報の各格子点における解析値と、対象とする流域における1月から12月までの各月を始点とする各予測対象期間の降水量のそれぞれとのラグ相関解析を実施する。ラグ相関解析は、次式に従って算出する。

$$r_{xy}(m, g, n) = \frac{\sigma_{xy}(m, g, n)}{\sigma_x(m, g, n) \cdot \sigma_y(m)} \quad (1)$$

ただし、

$$\sigma_{xy}(m, g, n) = \sum_{j=1}^{T_j} [x(j, m, g, n) - \bar{x}(m, g, n)][y(j, m) - \bar{y}(m)] \quad (2)$$

$$\sigma_x(m, g, n) = \left\{ \sum_{j=1}^{T_j} [x(j, m, g, n) - \bar{x}(m, g, n)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\sigma_y(m) = \left\{ \sum_j^{T_j} [y(j, m) - \bar{y}(m)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$x(j, m-l, g, n) = \sum_{l_M=1}^{L_M} \sum_{l_G=0}^{L_G} x_{raw}(j, m-l_M, g+l_G, n) \quad (5)$$

$$y(j, m) = \sum_{l_P=0}^{L_P} y_{mon}(j, m+l_P) \quad (6)$$

ここで、 $r_{xy}(m, g, n)$ は、 m 月を始点とした L_P か月先までの期間（降水予測時における予測リードタイム分の期間）における積算降水量と、 n 番目の全球気象情報の格子点 g 周辺の L_G 個の格子点における m 月より遡る一定の平滑化期間 L_M の気象の平均状態との相関係数である。 $x_{raw}(j, m, g, n)$ は n 番目の全球気象情報の格子点 g における j 年 m 月のデータ、 $y_{mon}(j, m)$ は j 年 m 月の対象流域の月降水量データ、 $x(j, m, g, n)$ は時空間平滑化後の n 番目の全球気象情報の格子点 g における j 年 m 月のデータ、 $y(j, m)$ は対象流域における時間積分後の j 年 m 月を始点とする積算降水量、 T_j は統計年数、 $\bar{x}(m, g, n)$ および $\sigma_x(m, g, n)$ はそれぞれ時空間平滑化後の n 番目の全球気象情報の格子点 g における m 月のデータの平年値および標準偏差、 $\bar{y}(m)$ および $\sigma_y(m)$ はそれぞれ対象流域における m 月を始点とする積算降水量の平年値および標準偏差、 $\sigma_{xy}(m, g, n)$ は時空間平滑化後の n 番目の全球気象情報の格子点 g における m 月のデータと対象流域における m 月を始点とする積算降水量の共分散である。

1月～12月の各月を始点とする予測リードタイム分の期間における積算降水量との相関解析を7種全ての全球気象情報の各格子点に対して行い、ここでは、各気象情報のうち最も強い相関を示す格子点における気象状態を、その月に実施する降水予測の予測因子と考える。

3.2 長期降水予測手法

次に、前節における相関解析の結果得られた予測因子を用いて、1月から12月までの各月を始点とする積算降水量を予測するモデルを構築する。前節の相関解析の結果、合わせて12の降水量の各予測期間に対して、各全球気象情報の中からその地点における気象状態が流域の予測因子と見なされる格子点が、それぞれ抽出される。これらの各格子点における気象解析データを説明変数の候補として、予測対象期間の積算降水量を予測する線形重回帰式を作成する。重回帰式の推定の際には、7つの説明変数の候補の中から、汎用的な予測能力が最も高いと考えられる説明変数の組合せを、AICを最小にするように選択する。

この結果、推定された重回帰式は、次式のように表すことができる。

$$y(m) = a_0(m) + \sum_{i=1}^k a_i(m) \cdot x^*(m, i) + \varepsilon(m) \quad (7)$$

ここで、 $y(m)$ は目的変数（予測変数）である m 月から始まる予測対象期間の積算降水量、 $x^*(m, i)$ は $y(m)$ を推定するための回帰式に含まれる説明変数の最適な組み合わせとして選ばれた k 個の全球気象情報のうち、 i 番目の全球気象情報に含まれる格子点値の中で、予測対象期間の積算降水量との相関が最も大きい格子点における解析値（説明変数）、 $a_0(m)$ 、 $a_i(m)$ 、および $\varepsilon(m)$ はそれぞれ m 月を始点とする予測対象期間の積算降水量に関する予測回帰式における定数項、説明変数 i の係数、および残差項である。重回帰式は、1月から12月までの各月を始点とする12の予測対象期間の積算降水量についてそれぞれ推定される。こうして推定された予測重回帰式を用い、全球気象情報の最新の観測状況から予測対象期間内の降水量の予測を行う。

3.3 流況予測手法

続いて、前節で求められた積算降水量の予測値を用いて、予測期間内の流況の予測を行う。流況の予測状況を考慮してダム貯水池における放流意思決定を行うことを考えると、流況予測は、1か月間や3か月間といった長期の予測期間における平均的な状態ではなく、さらに細かい時間解像度を有することが望ましいと考えられる。そこで、予測された対象期間の積算降水量から、予測期間内の日単位の流況系列を推定する。

まず、予測対象期間の積算降水量の予測値から予測期間内の各日の日降水量を算出する。日降水量は、予測期間内の各日における降水量の気候値の多寡に応じて、積算降水量を比例配分することで求める。

次に、得られた予測対象期間における予測日降水量系列を用いて、予測対象期間内の流況系列を求める。日単位の流況の算出には、統計データを用いてあらかじめ構築した過去数日間の流況と降水量を説明変数とする重回帰式を利用する。予測対象となる流況としては、まず、対象ダム貯水池への流入量が挙げられる。また、利水補給を目的に持つダム貯水池には、一般的に河川のダム地点より下流側に流況評価地点が定められていることが多い。こうした流況評価地点がダム地点の直下流ではなく、ダム地点からある程度距離のある箇所定められている場合、ダム地点から当該流況評価地点までの間に河川に流入する水量（ダム貯水池の残流域流出量）が無

視できなくなる。この場合、残流域流出量についても流況予測の対象とする必要があり、流況予測のための重回帰式はダム貯水池への流入量と流況評価地点までの残流域流出量のそれぞれを予測変数として別々に推定しなければならない。下流の流況評価地点が増えると、その分、流況予測回帰式の数が増えることになる。

上記で推定した流況予測回帰式に、これまでの降水・流況の観測状況と降水量の予測状況を入力することによって、予測対象期間中の日単位の流況の予測値が得られる。

3.4 貯水池操作手法

本研究では、ダム貯水池の操作目的として低水管理に着目し、操作の最適化問題を需要水量に対する供給不足によって生じる被害を最小化する問題として考える。いま、 T 期先までの貯水池操作を最適化することを考えると、この最適化問題の目的関数は次のように定義できる（Nohara et al., 2009）。

$$\min_{r_t} \sum_{t=1}^T H_t \quad (8)$$

ここに、 r_t は第 t 期（ $t = 0, \dots, T$ ）における貯水池からの放流量、 H_t は第 t 期において当該流域が受ける渇水被害を表わす被害関数である。いま、流況評価地点がダム下流の河道における1地点である場合を考えると、渇水による被害を表す関数は、池淵ら（1990）と同様に、不足量と不足率の積として以下のように定義する。

$$H_t = \begin{cases} (d_t - q_t)^2 / d_t & (d_t > q_t) \\ 0 & (d_t \leq q_t) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 d_t は第 t 期の下流流況評価地点における需要量、 q_t は第 t 期の下流流況評価地点における流量である。また、ダム貯水池の物理的制約、あるいは操作規則上の制約は、次式の通りである。

$$S_{\min} < s_t < S_{\max} \quad (10)$$

$$R_{\min} < r_t < R_{\max} \quad (11)$$

ここで、 s_t は第 t 期期首における貯水量、 $S_{\min}$ 及び $S_{\max}$ はそれぞれ利水容量の最小値及び最大値、 $R_{\min}$ 及び $R_{\max}$ はそれぞれ放流量の最小値及び最大値である。また、貯水量の変化は、連続式を用いて次の

Table 2 Specs of applied reservoir

Capacities		Specs
Active storage capacity		289,000,000 m ³
Water use capacity		173,000,000 m ³
Flood control capacity	Flood season (Jul. 1 st – Oct. 10 th)	90,000,000 m ³
	Dry season (Oct. 11 th –Jun. 30 th)	80,000,000 m ³
Power generation capacity	Flood season (Jul. 1 st – Oct. 10 th)	26,000,000 m ³
	Dry season (Oct. 11 th –June 30 th)	36,000,000 m ³
Designed flood inflow		4,700 m ³ /sec
Designed release discharge		2,000 m ³ /sec
Maximum release discharge in case of no flood situation		800 m ³ /sec

ように表される。

$$s_{t+1} = s_t + i_t - r_t - \alpha_t \quad (12)$$

ここに、 i_t は第 t 期における貯水池の流入量、 α_t は第 t 期における蒸発や漏水等による貯水量の減少量である。ただし、本研究では、この効果を考えないものとし、以降では $\alpha_t = 0$ とする。一方、関数方程式は次式のように定義される。

$$\begin{aligned} f_T(s_T) &= \min_{r_T} H_T(q_T) \\ f_t(s_t) &= \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 $f_t(s_t)$ は将来被害関数であり、第 t 期期首において貯水量が s_t である場合に、第 t 期から第 T 期までの間に被り得る総被害の最小値を表す。全ての期間に対する将来被害関数を第 T 期から第 1 期へと後退しながら順に算出したのち、最適放流量 r_t^* は次式のように求められる。

$$r_t^* = \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \quad (14)$$

本研究の利水操作では、全球気象情報を基にした流況予測情報を考慮しながら、ここで定義したDPモデルを用いて最適化計算の対象期間内の日単位の最適放流戦略を決定する。操作時には、算出した最適放流戦略を念頭に置きつつ、流入量や貯水量などのダム貯水池の最新の状態を反映させながら、実時間で放流量を決定する。

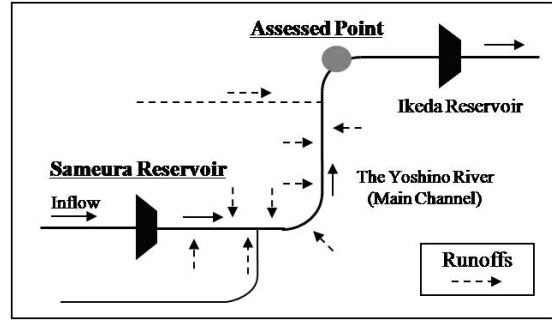


Fig. 1 Simplified model of the downstream of Sameura reservoir for application

4. 適用と考察

4.1 対象流域と適用条件

提案する貯水池操作手法を、吉野川流域の早明浦ダムを対象に適用した。適用期間は2001年1月～2005年12月の期間である。早明浦ダムの諸元をTable 2に示す。早明浦ダムは利水、治水、発電など、多目的ダムとして運用されているが、本研究ではこれらの操作のうち利水操作のみに着目する。すなわち、洪水時には操作規則に定められた操作を行いながら、原則としてダム下流の評価地点における水不足量（渇水被害）を最小化することを目的として操作を行い、発電による便益は評価しないものとする。早明浦ダムの諸元を考慮すると、式(10)、式(11)は具体的に次のようになる。

$$0 \text{ (m}^3\text{)} \leq s_t \leq 1.73 \times 10^8 \text{ (m}^3\text{)} \quad (15)$$

Table 3 Results examples of correlation analysis (JAS/MJJ)

Variable (abbrev.)	Location of max correlated point	Correlation
Geopotential height at 500hPa (hgt500)	80°S, 75°W	-0.60
Geopotential height at 850hPa (hgt850)	77.5°S, 70°W	-0.59
Surface pressure (pressure)	5°S, 57.5°E	0.58
Temperature at 500hPa (temp500)	30°N, 2.5°W	-0.67
Temperature at 850hPa (temp850)	80°N, 62.5°W	-0.60
Temperature at surface (temperature)	55°N, 0°E	0.65
Sea surface temperature (sst)	6°N, 60°E	-0.67

$$0 \leq r_t \leq 2000 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (\text{for flood situation})$$

$$0 \leq r_t \leq 800 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (\text{for no flood situation}) \quad (16)$$

また、早明浦ダムとその下流域のモデルとしては、DPを適用するために、利水操作を中心に行うことを念頭に置きながら、ここではFig. 1に示すように単純化したモデルを考えた。流況の評価地点は、Fig. 1に示すように、早明浦ダムの下流にある池田ダムの直上流に位置する。ここで、状態量として考えるものは、早明浦ダムの流入量及び貯水量、早明浦ダム直下流から評価地点までに吉野川本川へ流入する水量（残流域流出量）、評価地点における河川流量の4つであり、決定量は早明浦ダムからの放流量である。早明浦ダムから評価地点までの区間には、比較的大きな支川からの流入もあるが、これらも含めた全ての支川流入の合計分の流入を残流域流出量として表現した。さらに、この区間には吉野川の最も大きな支川である銅山川からの流入もあるが、非洪水時においては多くとも0.45m³/s程度の流量であるため、残流域流出量に含めて考えた。以上から、流況予測の対象としては、ダム貯水池への流入量とダム地点から流況評価地点までの残流域流出量の2種となるが、ここでは全球気象情報に基づく長期降水量・流況予測情報が利水操作の改善に寄与する効果の評価を容易にするため、残流域流出量については完全に予測できるものと仮定し、まずはダム流入量のみを予測対象として分析を行った。また、これに対応して、降水量についても吉野川流域の流域平均値ではなく、早明浦ダム上流域のデータを用いた。

全球気象情報の各格子点値と早明浦ダム上流域における降水量との相関解析は、1976年～2000年の期間のデータを用いて行った。また、降水予測のための重回帰式の推定についても、同様の期間のデータを用いて行った。一方、流況予測のための重回帰式については、1979年～2000年の期間のデータを用いて推定した。

長期降水量の予測対象期間については、1か月～3か月、全球気象情報の格子点値の平滑化期間数については1か月～3か月、全球気象情報格子点値の平滑化格子点数については1格子点～9格子点の範囲の任意の組合せを考えた。ただし、以下では、紙面の都合上、相関解析および降水予測の結果、予測精度の改善が見られた組合せ、すなわち、長期降水量の予測対象期間については向こう3か月間、全球気象情報の平滑化格子点数および平滑化期間数については順にその格子点を中心とする9格子点（3×3格子点）および3か月間の条件の下での適用結果について述べる。適用は全シーズンについて行ったが、農耕期間との関係で水需要量が大きくなる5月～10月の期間（通常6月～10月とされる洪水期と概ね重なることから以下では5月～10月の期間を洪水期と呼ぶ）が、ダム貯水池の利水操作を考える上で特に重要であると考えられるので、以下ではこの期間における適用結果を中心に論じる。なお、利水操作の最適計算期間については、降水量予測期間と対応させるように考え、以下では向こう3か月間とする。

4.2 相関解析結果

全球気象情報の各格子点値と早明浦ダム上流域の3か月降水量との相関解析結果の例をTable 3に示す。ここには、7月を起点とする3か月間の積算降水量と4月から6月までの期間で平均した全球気象情報の格子点値（3×3格子点の平均）との相関解析結果を示している。Table 3を見ると、各全球気象情報の中で流域降水量と最も強い相関を示した格子点値の流域降水量との相関係数の絶対値は0.58～0.67の間に分布していた。また、全期間を通じた適用結果では、Table 3における500hPa気圧高度情報と850hPa気圧高度情報のように、同様の位置の格子点が最大の相関を示す格子点として選択されているケースが多く見られた。この原因としては、最大の相関を示す格子点の位置が互いに似ていた全球気象情報の示す気象量がそもそも互いに密接に関係のある気象量同士で

Table 4 Estimation results of best combination of predictors in the wet season

Prediction	Employed predictors	AIC
MJJ/FMA	hgt500, sst	355.3
JJA/MAM	hgt500, pressure, temp850	370.2
JAS/AMJ	hgt850, temp850, temperature, sst	352.3
ASO/MJJ	pressure, temp500, temp850, temperature, sst	343.2

Table 5 RMSEs for three-monthly precipitation prediction

Period	Proposed prediction (mm)	Normal prediction (mm)
Total average in all season	480.1	498.3
MJJ/FMA	254.8	302.0
JJA/MAM	788.7	709.8
JAS/AMJ	725.6	902.0
ASO/MJJ	907.2	1060.2

あり、そのためそれらの格子点値間にも比較的強い相関があったことにより、降水量との相関解析の結果も互いに似た結果となった可能性が考えられる。また、相関解析結果では、各気象情報において最大の相関を示す格子点には、対象流域からかなり離れた位置にある格子点選ばれている事例が多かったが、流域降水量に対するそのような大きな相関が対象流域と遠く離れた格子点における気象量から得られた物理的または力学的要因については、本研究では明らかにならず、今後の課題である。

次に、上記で得られた相関解析結果を用いて、各月を始点とする3か月間の積算降水量を予測する重回帰式の推定を、説明変数の組合せがAICを最小とする組合せになるように行った。洪水期の各期間に対して推定された降水予測重回帰式における説明変数の選択結果をTable 4に示す。Table 4内のMJJ/FMAといった表現は、予測における説明変数（全球気象情報格子点値）の平均化期間と被説明変数（流域降水量）の積算期間を表わしており、例えばMJJ/FMAの場合は、2月から4月までの全球気象情報の格子点値の平均値を使って、5月から7月までの流域積算降水量を予測する重回帰式を表わす。同様に、JJA/MAMは3月から5月までの全球気象情報の格子点値の平均値を使って6月から8月までの流域積算降水量を予測する重回帰式を表わし、以下同様にひと月ずつ後ろにずらした期間についての予測重回帰式の説明変数の選択結果を表わしている。Table 4より、相関解析結果において、流域降水量と最も強い相関を示す格子点として互いに同じような位置の格子点選ばれていた全球気象情報のうちのいずれかが説明変数の

中から除外されていることが確認できる。重回帰式の説明変数の選択時にAICを考慮したことにより、共線性のある説明変数候補を除外できていることがうかがえる。

推定の結果、洪水期を対象とした5月～8月の各月を始点とする3か月積算降水量の予測重回帰式の説明変数には、850hPa気圧高度面上の気温情報と海面水温情報が最も頻繁に（4式中3式において）採用されていた（Table 4参照）。

4.3 降水予測結果

前節で推定された重回帰式を用いて、全球気象情報から3か月先までの積算降水量の予測を適用期間内の各月において実施した。5月～8月を始点とする3か月積算降水量の予測の2乗平均平方根誤差(RMSE)をTable 5に示す。表中には、提案手法による予測結果を使って算出したRMSEと、予測が得られない場合として予測対象期間中に常に気候値（平年値）の降水が生じると予測した結果得られたRMSEとを示している。Table 5より、全期間を通じて算出されたRMSEは、気候値を予測値とした場合と比較して提案手法では約3.7%改善していることが分かる。5月～8月を始点とする各期間の予測結果に目を向けると、5月、7月、8月を始点とする期間では、提案手法でRMSEに改善が見られたのに対し、6月を始点とする期間では、逆にRMSEが大きくなり予測精度が悪化した。

また、Table 4とTable 5の二つの結果を比較すると、提案手法のRMSEが良かった期間では、全ての期間で海面水温情報が降水予測重回帰式の説明変数に含まれていたのに対し、提案手法のRMSEが悪かった6月を

Table 6 Total damages caused by reservoir operations

Period	Operation with proposed prediction ((m ³ /sec)·day)	Operation with prediction of climatic normal value ((m ³ /sec)·day)
Total	503.5	548.5
2001, 2003 and 2004	0.0	0.0
2002	0.0	2.2
2005	503.5	546.3

始点とする期間では、降水予測重回帰式に海面水温情報が説明変数として含まれていなかったことが分かる。これらの結果から、早明浦ダム上流域における洪水期(5月～10月)の長期降水量を予測する上で、海面水温情報が良い予測因子になる可能性があることが考えられる。一般に海面水温などの海洋に関する現象が大気と比べてゆっくりと変化することから(古川・酒井, 2004), 3か月という長い期間の積算降水量との線形の関係が大気と比べて海面水温では出やすかったのではないかと考えられる。一方, ここには示していないが, 1月～4月, 9月～12月を始点とする主に非洪水期にあたる期間では, 提案手法の予測精度は気候値を予測値とした場合と比較して改善が見られなかった。これらの期間における水文学の変動性は洪水期のそれと比較すると一般的に小さいわけであるが, このことが当該結果に影響したかどうかについては, 本適用からは明らかにならず, さらなる検討が必要であると考えられる。

4.4 利水操作結果

前節で算出された向こう3か月間の積算降水量の予測値を日降水量の平年値を基にした比例配分により日単位の降水時系列に変換し, 引き続いて流入量を予測する重回帰式を用いて3か月先までの日流入量系列に変換した。流入量を推定する重回帰式については, あらかじめ推定した次の式を用いた。

$$\begin{aligned}
 i_t &= a_1 \cdot p_t + a_2 \cdot p_{t-1} \\
 &\quad + a_3 \cdot i_{t-1} + a_4 \cdot i_{t-2} + a_5 \cdot i_{t-3} \quad (17) \\
 &\left\{ \begin{aligned} a_1 &= 0.4147, \quad a_2 = 0.1667 \\ a_3 &= 0.1150, \quad a_4 = 0.0531, \quad a_5 = 0.0270 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

ここに, p_t は第 t 日の降水量である。算出された3か月先までの予測流入量系列を考慮した, 3か月先までの日単位の最適放流政策をDPによって実時間で算出し, 算出した最適放流政策に従って日単位の放流操作を行った。操作期間は2001年1月1日から2005年12月31日までである。この期間における吉野川流域の実際の状況は, 2001年から2004年までの期間につい

ては, 比較的豊水であったため, 水の補給不足は生じなかったが, 2005年については4月から8月にかけての少雨により, 早明浦ダムの利水貯水率が一時0%になるなど, 夏季に厳しい渇水が生じた。

提案手法によるダム貯水池の利水操作によって生じた渇水被害の結果をTable 6に示す。降水予測における予測精度の改善を反映して, 提案手法による操作の方が, 気候値を予測として考えた場合の操作と比較して良好な結果を示しており, 全体として渇水被害を約8.2%小さくすることに成功している。

より詳細に結果を見ると, 比較的豊水であった2001年から2004年については, そもそも渇水被害が生じにくい流況であったこともあり, 二つの操作に大きな違いは見られなかった。2002年に気候値を予測とした場合の操作において若干の被害が生じているが, これは, 2002年10月から同年11月にかけて気候値から大きくかけ離れた少雨があったため, 平年程度の降水が得られるという見積りのもと操作を行ったところ, 結果的に過剰な放流を続け貯水量の低下を招いたためである。

一方, 実際にも渇水被害が大きかった2005年については, 二つの操作間に比較的大きな差が見られた。前述のように, 2005年における吉野川流域では, 著しい少雨により, 実操作および本適用シミュレーションのいずれにおいても, 早明浦ダムの利水貯水率が一時0%となるほどの厳しい渇水に見舞われた。提案手法に基づく操作結果および気候値を予測値とした場合の操作結果のいずれにおいても, 現在あるいは将来における貯水量の低下の見込みを反映して, 放流量を制限した結果, 下流の流況評価地点において河川流量が確保水量を大きくかつ長期間下回ることになり, 大きな渇水被害が記録された。しかし, 気候値を予測値とした場合の操作結果と比較すると, 提案手法による操作結果では渇水被害が小さく抑えられている。降水予測精度が比較的良かった提案手法では, 長期降水予測において少雨傾向が予測されたことから, 貯水量の急激な低下を抑えるためにより早い段階から放流量の制限を行っており, 結果として渇水の底にあたる期間において放流制限量を小

さくすることができたことから、渇水による総被害を小さくすることができたものと考えられる。

以上の結果は、3か月間の積算降水量といった、日本の山岳域に位置するダム貯水池にとってはやや大まかとも言える時間解像度の予測情報であっても、予測精度がある程度確保できれば、当該予測情報を考慮することによって渇水時における利水放流決定を改善することができる可能性があることを示唆している。また、提案手法により全球気象情報を考慮した場合には、降水予測結果に加えて利水操作結果についても改善が確認できたことから、全球気象情報の利水操作への適用性が確認できたと考えられる。また、本研究では、空間的には9格子点、時間的には3か月分の平均化を施した全球気象情報の格子点値と流域の3か月積算降水量との線形な関係を利用した操作手法を構築したが、非線形な関係ではなく線形な関係を考慮するだけでも、貯水池の利水操作の効率化を考える上で、ある程度の貢献が期待できることが示されたと言える。

5. おわりに

本稿では、ダム貯水池の利水操作における全球気象情報の利用可能性を確認することを目的として、管理対象とする河川流域の降水量と複数の全球気象情報の格子点データとの相関関係を利用した長期降水予測手法を構築し、当該予測手法による予測情報を考慮した長期貯水池操作手法を構築した。吉野川流域早明浦ダムを対象に提案操作手法の適用を行った結果、5月～8月を始点とする3か月積算降水量の予測においては、6月を始点とする3か月間の積算降水量の予測精度は気候値を予測値とした場合と比較して向上しなかったものの、5月、7月、8月を始点とする3か月積算降水量の予測精度には向上が見られた。また、2001年～2005年の適用期間全てを通じて若干の改善が見られた。また、利水操作においては、当該降水予測情報を考慮することによって、特に渇水時において操作精度の改善が見られた。

以上のことから、本研究で提案した、全球気象情報を利用した降水予測手法の一定の有用性が示されるとともに、利水操作上も改善が見られることが確認された。ただし、本研究では適用対象として一つの河川流域のみを取り扱っているため、今後は地域の異なる複数の河川流域へ適用を行い、提案手法の妥当性を引き続き検討する必要がある。また、相関解析結果においては、流域降水量と遠方の格子点上の気象量とが強い相関を示すことについて、物理的な解釈を行うことができず、この点も今後の課題であると考えられる。

本研究では、全球気象情報の格子点データと流域長期降水量との線形な関係を利用した貯水池操作手法を提案した。しかし、一般に大気や海洋が非線形な挙動を示すことを考えると、全球気象情報の格子点値との統計上の線形な関係を用いて推定することができるのは、本稿の適用で考えた3か月間の積算降水量のような、大まかな気象・水文状態にとどまる可能性が考えられる。日々、意思決定がなされる貯水池実管理に対してさらに有用な予測情報を提供すべく、より細かな時間解像度の予測情報を提供しようとする場合には、全球の気象状態と流域降水量との非線形な関係を考慮する必要があると考えられ、今後はこの点についても検討していきたい。

謝 辞

本研究で利用した流域データは、独立行政法人水資源機構吉野川局池田総合管理所より提供していただいた。関係者の皆様に対し、ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 池淵周一・小尻利治・宮川裕史(1990)：中・長期予報を利用したダム貯水池の長期実時間操作に関する研究，京都大学防災研究所年報，第33号B-2, pp.167-192.
- 小倉義光(1984)：一般気象学，財団法人東京大学出版会，pp.158-202.
- 櫻井健一郎(1996)：時空間パターン分類化手法による少雨現象分析と渇水対策，岐阜大学大学院修士論文，39 pp.
- 永井明博・田中丸治哉・角屋睦(2003)：ダム管理の水文学，森北出版株式会社，p.126.
- 野原大督・岡田知也・堀智晴(2010)：全球気圧高度分布情報を用いた長期降水予測とその貯水池操作への利用性に関する基礎的検討，京都大学防災研究所年報，第53号B, pp.707-713.
- 古川武彦・酒井重典(2004)：アンサンブル予報—新しい中・長期予報と利用法—，株式会社東京堂出版，pp.71-74.
- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, 19, pp.716-723.
- Han, S.O. (2009): Inflow prediction for long-term reservoir operation through lag correlation analysis of global meteorological information, Kyoto Univ. Master Thesis, 134pp.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W.,

- Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.77, pp.437-471.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., Dool, H.V.D., Jenne, R. and Fiorino, M. (2001): The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.82, 247-267.
- Kojiri, T., Tomosugi, K. and Galvao, C.V. (1994) : Knowledge-Based Decision Support System of Real-Time Reservoir Operation for Drought Control , *J. Japan Soc. Hydro & Water Resour.*, Vol. 7, No. 3, pp.188-195.
- Maity, R. and Kumar, N. (2009): Hydroclimatic influence of large-scale circulation on the variability of reservoir inflow, *Hydrol. Process*, Vol.23, pp.934-942.
- Nohara, D., Tsuboi, A. and Hori, T. (2009): Long-term reservoir operation optimized by DP models with one-month ensemble forecast of precipitation, *Proceedings of Symposium JS.4 at the Joint Convention of IAHS and IAH*, IAHS Press, pp.284-295.
- Robertson, A. and Ghil, M. (1999): Large-Scale Weather Regimes and Local Climate over the Western United States, *J. of Climate*, Vol.12, pp.1796-1813.
- Sveinsson, O.G.B., Lall, U., Gaudet, J., Kushnir, Y., Zebiak, S. and Fortin, V. (2008a): Analysis of Climatic States and Atmospheric Circulation Patterns That Influences Québec Spring Streamflows, *J. of Hydrol. Eng.*, Vol.13, No.6, pp.411-425.
- Sveinsson, O.G.B., Lall, U., Fortin, V., Perrault, L., Gaudet, J., Zebiak, S. and Kushnir, Y. (2008b): Forecasting Spring Reservoir Inflows in Churchill Falls Basin in Québec, Canada, *J. of Hydrol. Eng.*, Vol.13, No.6, pp.426-437.
- Xoplaki, E., Luterbacher, J., Burkard, R., Patrikas, I. and Maheras, P. (2000): Connection between the large-scale 500hPa geopotential height fields and precipitation over Greece during wintertime, *Climate Research*, Vol.14, pp.129-146.

Applicability of Multiple Information Sources of Global Meteorological Condition to Long-term Reservoir Operation

Daisuke NOHARA, Hiroko MIKI* and Tomoharu HORI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A long-term reservoir operating scheme is proposed for the drought management considering large-scale meteorological conditions, which are correlated with precipitation in a target basin. In the proposed model, large-scale meteorological conditions, such as pressure height or sea surface temperature, which are highly correlated with basin precipitation, are firstly searched by use of correlation analysis. Basin precipitation and streamflow series for the coming three months are then predicted by use of multivariable regression models. Real-time reservoir operation is conducted by daily basis considering the prediction results of precipitation and streamflow, optimizing release policy for water use. Proposed reservoir operation model is applied to actual reservoir basin with the simplified river basin in Japan, demonstrating an improvement in the water release practices in comparison with operation without consideration of large-scale meteorological conditions.

Keywords: reservoir operation, drought, global meteorological information, precipitation prediction