

貯水池の最適運用に関する研究

餘利野直人、造賀芳文、Deependra Kumar Jha、林佑貴*

(広島大学)

1. はじめに

近年、既存の貯水池運用をより効率化させることが求められている。貯水池の管理は、治水および発電に関連する重要な問題であり、最適な貯水池運用の策定は非常に難しい。貯水池の運用計画は、不確実な自然の流入量および貯水量や電力需要の下で最適な放流量を決定する問題であり、通常は非常に複雑である。本研究では、確率的動的計画法 (SDP) を用いて、年間の最適貯水運用政策を決定する。

2. 貯水池運用

2. 1 概要

貯水池 (ダム) には、水の確保や水力発電のための利水、洪水を調節する治水の役割がある。ダムでは、決められた水量を放流 (責任放流) し、また最大貯水容量を超えないように放流 (普通放流) しつつ発電を行っている。同じ水量を発電機に流す場合、水位が高い方が発電量は大きくなるため、できるだけ高い水位を保ったまま発電を行う方が得策である。

2. 2 状態変数と決定変数

状態変数と決定変数の適切な選択は DP モデルを考える上で、重要となる。これらの変数の厳密な選択規則はないが、通常の貯水池運用において状態変数が貯水量で決定変数が取水量である。

2. 3 定式化

SDP モデルを用いて、可能である全ての初期貯水量と流入量から月末の目標貯水量を算出する。状態変数は、月の始めの貯水量と現在の流入量である。決定変数は、月末の貯水量である。目的関数は貯水池運用による年間の電力量を最大化することである。

$$F = \max imize \sum_{t=1}^{12} E_t \quad (1)$$

$$E_t = 9.8eR_e H_e d_t \quad (2)$$

ここで、 H_e は月 t の平均有効落差 (m)、 R_e は月 t での取水量 (m^3/s)、 d_t は月の時間数、e は発電機効率である。

今回 SDP を用いたときの最適政策を以下に示す。

$$f_t^n(k, p) = Opt_l [GE_{kpl} + \sum_q P_q^{t+1} f_{t+1}^{n-1}(l, q)] \quad (3)$$

図 1 に変数の説明を示すが、k、l は当該月 t の初期と期末の貯水量、p はその月の流入量である。

GE_{kpl} は期間 t、流入量 p において、貯水量が k から l に変化する際の発電量、 P_q^{t+1} は流入量の確率で

あり、現在と以前の流入量は互いに時間に対して独立である。

$$P(q|p) = P(q) \quad \text{すなわち} \quad p_{pq}^{t+1} = p_q^{t+1} \quad (4)$$

$$0 \leq P_q^{t+1} \leq 1, t = 1 \cdots 12, \sum_q P_q^{t+1} = 1 \quad (5)$$

を仮定する。

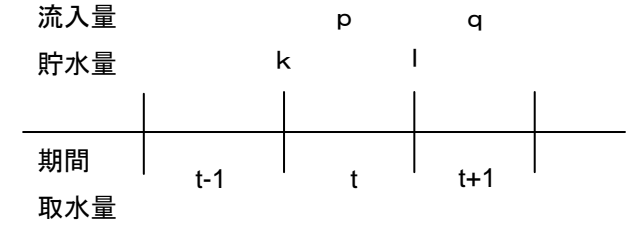


図 1：貯水量と流入量

また、

$$GE_{kpl} = 24d_t PR_t \quad (6)$$

ここで、 PR_t は月 t 期間の平均電力量、 d_t は月 t の日数である。

月 t での平均水位 H_e は以下の式で定義される。

$$H_e = H_t - H_{tail} - H_{loss} \quad (7)$$

$$H_t = 502 + \sqrt{\frac{S_t}{28057}} \quad (8)$$

H_{tail} および H_{loss} は放水位と損失落差 (m)、 S_t は月初めの貯水量 (m^3) である。

制約条件は

$$R_{e\min} \leq R_e \leq R_{e\max} \quad (9)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (10)$$

ここで、 R_e は取水量 (m^3/s) である。

また、次月の貯水量は以下の式で表される。

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - E_t - O_t \quad (11)$$

ここで、 S_{t+1} は期間 t の最終貯水量 (m^3) または次の期間 t+1 の始めの貯水量である。 Q_t は月の平均流入量 (m^3)、 R_t は平均取水量 (m^3)、 E_t は責任放流量 (m^3)、 O_t は普通放流量 (m^3) で次のように与えられる。

$$O_t = \max[S_t + Q_t - R_t - E_t - S_{\max}, 0] \quad (12)$$

2. 4 モデルの実装

貯水池の運用貯水容量を、以下の式のように最大貯水量と最小貯水量の間で N 分割して考える。

$$S_1 = S_{\max}, S_N = S_{\min} \quad (13)$$

$$S_j = S_{\max} - \frac{(j-1)(S_{\max} - S_{\min})}{(N-1)}; j = 2, 3, \dots, N-2$$

次に、解法アルゴリズムを示す。

Step1) 流入量を分割し、流入量の推移確率を求める。

Step2) (13)式により、貯水量を N 分割する。

Step3) $n=1$ のとき全ての l, q において $f_{j+1}^0 = 0$ に設定する。

Step4) $j=12$ から 1 まで後ろ向きに式 (3) $f_i^n(k, p)$ を計算する。

Step5) $\frac{(F_i - F_{i-1})}{F_{i-1}} \leq 0.001$ となるまで計算する。

Step6) Step5 が満たされれば、年間の最大電力量と最適貯水量運用政策が求まる。

3. 結果

過去 65 年分 (1942-2006) の月平均流入量データを用いて(4)式の確率密度関数の解析を行った。シミュレーションは貯水量を 12 分割し、流入量を 25 個に分類して行った。

9 月の初期貯水量を最大貯水量および最小貯水量に設定したときの、貯水量の運用政策をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

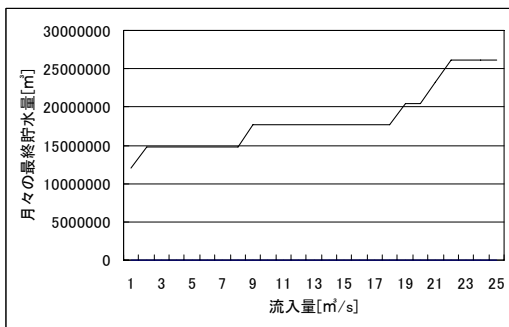


図 2 : 初期貯水量が最大貯水量のときの最適貯水量政策 (9 月)

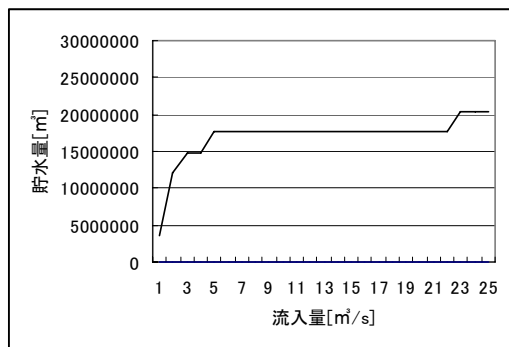


図 3 : 初期貯水量が最小貯水量のときの最適貯水量政策 (9 月)

次に 1997 年における年間の電力量を最大化する貯水量の推移を図 4 に示す。

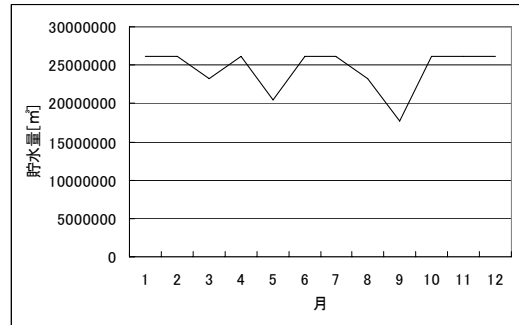


図 4 : 初期貯水量を最大貯水量と仮定したときの年間の最適貯水量運用政策 (1997 年)

4. おわりに

本研究では、確率的動的計画法 (SDP) を用いて貯水池運用による年間の電力量を最大化する最適貯水運用を定式化した。そして、年間の発電量が最大となる月々の最適貯水量を求めることができた。

付録

流入量の過去のデータから起こりうる範囲内で分割する。流入量の確率は、月々の流入量が正規分布であると仮定して計算した。

参考文献

- [1] Deependra Kumar Jha, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka and Yuki Hayashi, Study Optimal Reservoir Operation Policy for Hydropower plants, PE-07-73, PSE-07-88
- [2] Sule, B. F., Reservoir Operation Policies for Optimizing Energy Generation at the Shiroro Dam, *Water Resources Management, Kluwer Academic Publishers*, Vol. 2, pp 209-219, 1988
- [3] Nandalal, K. D. W. and J. J. Bogardi, Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits, *International Hydrology Series*, Cambridge University press, UK, 2007