

# 貯水池の水資源確保効果に関する統計分析

Statistical analysis of water resource stabilization function of reservoirs

田中 大司\*

Hiroshi TANAKA

\*地域計画科学研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

Stability of water resource will be harmed by abnormal precipitations caused by the possible climate change in next decades, resulted to increase of drought damages. Dam reservoir enlargement projects are then proposed, but the water stabilization function of reservoirs has not been analyzed yet. This paper proposes 3 drought indexes which describe 3 aspects of drought phenomenon at first. Comparison of those indexes calculated by inflow and outflow provides the stabilization measure of each reservoir. Next, that stabilization function is statistically regressed by dam capacity, variation of inflow. Finally, we roughly estimate the required reservoir enlargement to cope with the possible increase of instabilities.

**Key Words :** *flow duration, drought intensity, dam capacity, outcome evaluation*

## 1. 研究の背景と目的

近年、気候変動に伴う異常少雨により全国で渇水被害が頻発している。将来、降雨の変動がさらに大きくなることが予測されており、水資源の安定的確保のために利水用ダム貯水池の重要性はますます高まると考えられる。

現在運用されている多くのダム貯水池は、1956年～1970年に建設され、当時の流量を基準として容量設計されており、将来の異常少雨に対応できない可能性がある。ダム貯水池の水資源確保効果の向上のためには、操作精度の向上または貯水能力の増強という2つの方法が考えられる。ただし、前者は現状の気象予測の精度では困難であることから、容量の増強が全国のダム貯水池で計画されている。

このような政策の評価方法として、貯水池容量などの生産物の量を用いるアウトプット評価が多く行われてきた。近年では、生産物が実際に発揮した効果に着目したアウトカム評価が重視されてきている。国土交通省の水資源政策においては、河川の流量不足解消指数による評価を行っているものの、この指標はダム建設の進捗状況を示すにすぎず、アウトプット指標の意味合いが強い。ゆえに、渇水に関するアウトカム指標によって、貯水池容量の確保がもたらした効果を適切に評価する必要がある。

そこで、本研究の目的は、ダム貯水池のアウトカム評価に適用ができる渇水指標の提案、貯水池容量が水資源確保効果（アウトカム）に与える影響の解

明、および将来の水資源確保の効果の推計、の3点である。

## 2. 水資源確保効果把握のための渇水指標の作成

小尻ら(1987)は、河川の利水安全度評価に必要な観点として、水資源の量的な不足（深刻度）、渇水発生確率すなわち年間渇水日数（信頼度）、渇水期間の長さ（回復度）を挙げている。本研究では、この3つの側面を表現する渇水指標を定義する。

久米ら(1998)は、利根川上流域の貯水池群に対して貯水池上下流の流況データに基づく、量的な不足の差異を貯水池の効果として見なす方法を提案し、貯水池による渇水軽減の効果はみられないことを結論づけた。しかし、この分析方法は、洪水防止操作による放流抑制を渇水回避失敗と見なしているため、貯水池の効果が過小評価となっていることを、小松ら(2009)が批判している。

以上の議論を踏まえて、本研究では、貯水池への流入量が多い豊水期における洪水防止の放流抑制操作の影響が表れないよう、流入量が少ない低水期を分析対象とする。さらに、低水期のうち流入量がより小さく、渇水が深刻化しやすい時期を重視して渇水指標を定義する。

### 2.1 不足流量比

1つめの渇水指標として、不足流量比  $y_1$  を式(1)のように定義する。

$$y_1 = \frac{1}{n(T)} \sum_{t \in T} \frac{\bar{D} - Q_t}{Q_t^{\text{in}}} \quad (1)$$

ただし、 $T = \{t | \bar{D} > Q_t, \bar{D} - Q_t > 0\}$

- $n(T)$  : 対象日の集合  $T$  の要素数 (日数)
- $\bar{D}$  : 下流域の最大利水要求量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q_t$  :  $t$  日の下流域への流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q_t^{\text{in}}$  :  $t$  日の貯水池流入量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\bar{D} > Q_t^{\text{in}}$  となる豊水期の日、洪水調節のための放流量抑制操作を行っている可能性があるため、こ計算対象としない。また、 $\bar{D} - Q_t > 0$  となった日に流量の不足が発生する。この 2 つの条件を満たす日を計算の対象日とする。

$y_1$  は、不足流量  $(\bar{D} - Q_t)$  に  $Q_t^{\text{in}}$  の逆数で重みをつけることで、流入量が少なく渇水が深刻化しやすい日ほど、より重視して表現した値となっている。 $(\bar{D} - Q_t)/Q_t^{\text{in}}$  は、 $t$  日の貯水池への流入量  $Q_t^{\text{in}}$  を基準として何倍の流量が不足したかを表す。この値の総和を分析対象の日数  $n(T)$  で割ることで、 $y_1$  は、流入量を基準にした不足流量の比率の平均値である。

## 2.2 渇水総日数

渇水日  $t_{\text{drought}}$  を式(2)のように定義する。

$$t = t_{\text{drought}} \quad \text{if} \quad \bar{D} > Q_t^{\text{in}}, D > Q_t \quad (2)$$

前節と同様に洪水抑制操作の影響を考慮して  $\bar{D} > Q_t^{\text{in}}$  を満たし、流量  $Q_t$  が利水要求量  $D$  を下回った日を渇水日  $t_{\text{drought}}$  とする。渇水日  $t_{\text{drought}}$  が連続して発生した日数を渇水日数とすれば、渇水日数は  $D$  の関数  $s_m(D)$  で表される。

これらを踏まえて、2 つ目の渇水指標として、渇水総日数  $y_2$  を式(3)のように定義する。

$$y_2 = \frac{\int_{\underline{D}}^{\bar{D}} \frac{1}{D} \sum_m s_m(D) dD}{\int_{\underline{D}}^{\bar{D}} \frac{1}{D} dD} \quad (3)$$

- $\bar{D}$  : 下流域の最大利水要求量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\underline{D}$  : 下流域の最小利水要求量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $D$  : 利水要求量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $s_m(D)$  : 利水要求量が  $D$  のときの年間  $m$  番目渇水の連続日数

$\sum_m s_m(D)$  は、流量  $Q_t$  が利水要求量  $D$  を下回った日数の年間の合計値である。 $D$  が小さいにもかかわらず渇水が発生した場合は、より深刻であると考えられるため、 $D$  の逆数で重みづけし、分母の積分によ

って基準化している。つまり  $y_2$  は、年間の渇水合計日数について、利水要求量を  $\underline{D}$  から  $\bar{D}$  まで動かした際の重み付き平均値となる。

## 2.3 渇水継続日数

3 つ目の渇水指標として、渇水継続日数  $y_3$  を式(4)のように定義する。

$$y_3 = \frac{\int_{\underline{D}}^{\bar{D}} \frac{1}{D} \max_m s_m(D) dD}{\int_{\underline{D}}^{\bar{D}} \frac{1}{D} dD} \quad (4)$$

$\max_m s_m(D)$  は、流量  $Q_t$  が利水要求量  $D$  を連続して下回った日数の年間最大値である。積分計算や重みづけの意味は、 $y_2$  と同様である。

## 2.4 水資源確保効果の把握方法

各貯水池の実際の放流量に基づく渇水指標と、貯水池が存在しない場合の渇水指標の差異を水資源確保効果とする。貯水池が存在しない場合には、上流域からの流量がそのまま下流域に流れるため、流入量データ  $Q_t^{\text{in}}$  を用いて算出した自然渇水指標  $y^{\text{without}}$  を用いて評価する。一方、実際の放流量データ  $Q_t^{\text{out}}$  は、流入量がいったん貯水され貯水池操作がなされた後の下流域への流量であり、 $Q_t = Q_t^{\text{out}}$  として算出された渇水指標を実績渇水指標  $y^{\text{with}}$  とする。

## 2.5 渇水指標値の算定

国土交通省 水文水質データベース ダム統計情報 (<http://www2.river.go.jp/>) より、全国 462 多目的ダムの 1993~2010 年の日流入量・日放流量データを年毎に分割した 12738 のサンプルを用いて渇水指標値を算出する。

貯水池効果の把握のためには、自然・実績渇水指標に同じ利水要求量を設定して算出し、比較することが重要である。本研究では、年間降順 185 日目の流入量 (平水流量) を、記号  $\bar{Q}^{\text{in}}$  で表し、最大の利水要求量  $\bar{D}$  として用いることにする。すなわち利水量は最大でも、自然状態で 1 年間の半数以上の日で確保できる程度の量であると考えた。渇水指標は、 $\bar{D}$  の付近では小さく重みづけされているため、 $\bar{D}$  の多少の違いは指標値にほとんど影響を与えない。

## 2.6 渇水の改善度

実績渇水指標  $y^{\text{with}}$  と自然渇水指標  $y^{\text{without}}$  から、改善度  $p = -\ln(y^{\text{with}}/y^{\text{without}})$  を算出する。図 1~3 は、各貯水池の改善度の 1993~2010 年平均値を示す。横軸

の表示は都道府県コード順であり、都道府県ごとのサンプル数が異なるため、あくまで目安である。

図1~3のように、四国~九州北部の地域で改善度が大きいことがわかる。図2~3のように、改善度が負となっているサンプルも数多く見受けられるが、これらは栃木県鬼怒川水系などダム間連携事業により他の貯水池と統合管理されている場合や、農業目的の利水が卓越する場合であった。

### 3. 渇水強度回帰モデル

#### 3.1 説明変数

貯水池は、容量の確保によって流入量の変動を抑え、下流域に安定的な水資源を供給する機能を持つ。そこで以下では、流入量の変動、および貯水池容量が渇水強度に与える影響を、統計的に分析する。まず、低水期における流入量の変動を表す変数として、渇水流況変動率  $r$  を式(5)のように定義する。

$$r = \frac{3\bar{Q}^{\text{in}} - 2Q_{275\text{th}}^{\text{in}} - Q_{355\text{th}}^{\text{in}}}{3\bar{Q}^{\text{in}}} \quad (5)$$

$Q_{275\text{th}}^{\text{in}}$  : 年間降順 275 日目の流入量 (低水流量)

$Q_{355\text{th}}^{\text{in}}$  : 年間降順 355 日目の流入量 (渇水流量)

$r$  は、図4のように低水期の流況曲線と  $Q_t^{\text{in}} = \bar{Q}^{\text{in}}$  で囲まれた面積を近似表現しており、0~1 の値をとる。

また、貯水池の利水容量を  $V$  とし、流況変動の大きさに対する利水容量の比率を意味する  $V/(\bar{Q}^{\text{in}} r)$  を説明変数として用いる。

#### 3.2 渇水強度回帰モデルの定式化

自然渇水指標  $y^{\text{without}}$  を説明するモデル  $f^{\text{without}}$  を式(6)、実績渇水指標  $y^{\text{with}}$  を説明するモデル  $f^{\text{with}}$  を式(7)のように定式化する。式(7)は、自然渇水指標に対し、貯水池による渇水低減効果を乗じた形式である。

$$f_l^{\text{without}}(r_{iz}) = \exp[\alpha_l + \beta_l r_{iz}] \quad (6)$$

$$f_l^{\text{with}}(r_{iz}, V_i) = \exp[\alpha_l + \beta_l r_{iz}] \times \exp\left[\delta_l + \gamma_{1l} \frac{V_i}{Q_{iz}^{\text{in}} r_{iz}} + \gamma_{2l} \left(\frac{V_i}{Q_{iz}^{\text{in}} r_{iz}}\right)^2\right] \quad (7)$$

- $l$  : 1, 2, 3 (渇水指標の種類)
- $\alpha_l, \beta_l, \delta_l, \gamma_{1l}, \gamma_{2l}$  : パラメーター
- $V_i$  : 貯水池の利水容量
- $i$  : 貯水池名 (462 種類)
- $z$  : 観測年次 (1993~2010 年)

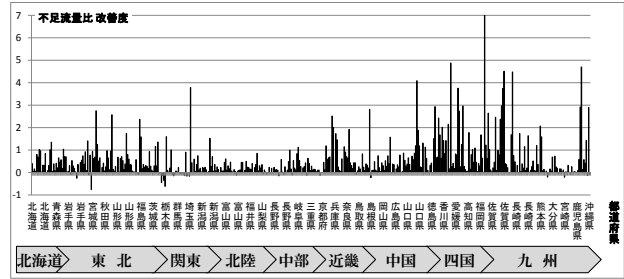


図1 不足流量比の改善度  $p_1$

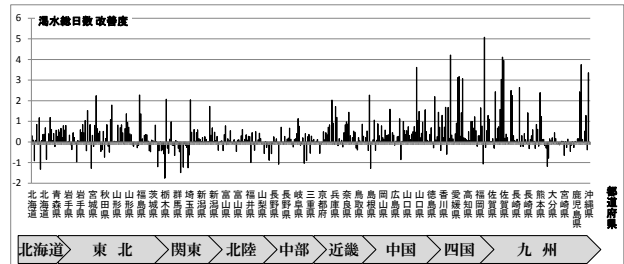


図2 渇水総日数の改善度  $p_2$

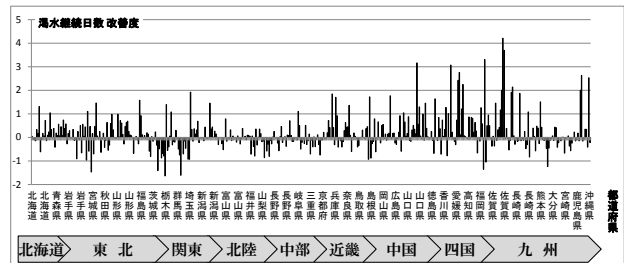


図3 渇水継続日数の改善度  $p_3$

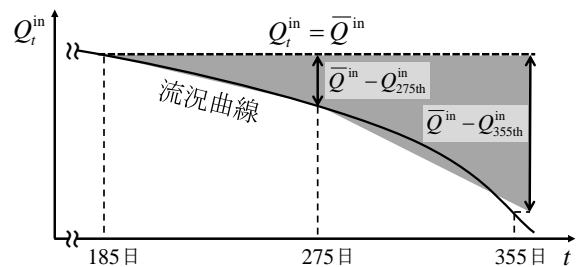


図4 渇水流況変動率  $r$

#### 3.3 パネル分析手法

本研究のデータセットは、同一貯水池の複数年次に渡るデータがプールされているパネルデータであるため、通常の回帰分析では、バイアスによって真の関係性を有意に抽出できない可能性がある。本研究では、貯水池ごとに異なる定数項  $\alpha_{it}, \delta_{it}$  を推定する固定効果モデル、およびプーリングモデルによる回帰分析を行い、結果を比較する。

#### 3.4 結果と考察

表1は、回帰分析結果のモデル間比較を示す。3種類いずれの渇水指標を説明するモデルにおいても、 $R^2$  は固定効果モデルの方が大きく説明力が高い。F

表 1 回帰分析結果のモデル間比較

モデル		$R^2$	F 統計量
$y_1$	固定効果	0.782	11.64 ***
	プーリング	0.251	
$y_2$	固定効果	0.744	18.69 ***
	プーリング	0.380	
$y_3$	固定効果	0.683	13.63 ***
	プーリング	0.292	

(\*\*\*は 0.1%統計的に有意であることを示す)

表 2 固定効果モデル推定結果

パラメーター	推定値	t 値	有意水準	
$y_1$	$\beta_1$	4.75E+00	81.166	***
	$\gamma_{11}$	-1.36E-05	-12.132	***
	$\gamma_{21}$	4.32E-11	10.072	***
$y_2$	$\beta_2$	2.87E+00	60.886	***
	$\gamma_{12}$	-1.94E-05	-21.62	***
	$\gamma_{22}$	5.28E-11	15.288	***
$y_3$	$\beta_3$	3.82E+00	68.391	***
	$\gamma_{13}$	-1.87E-05	-17.502	***
	$\gamma_{23}$	5.26E-11	12.829	***

(\*\*\*は 0.1%統計的に有意であることを示す)

検定の結果からは、固定効果モデルが採択された。ゆえに、固定効果モデルの推定結果は、より信頼できる結果と言える。

表 2 は、固定効果モデルのパラメーター推計結果を示す。いずれの渇水指標を説明するモデルでも、パラメーター  $\beta_i$  の符号は全て正であり、流入量の変動が大きいかほど渇水強度が大きいかを意味する。また、パラメーター  $\gamma_{1i}$  は負、 $\gamma_{2i}$  は正であることから、変動に対する利水容量の比率が大きいかほど渇水強度を軽減できるものの、過剰に容量がある場合には効果は低減することを意味する。

#### 4. 将来の水資源確保効果の概算

佐藤ら(2009)は約 70 年後における河川流況を予測しており、これを参考に将来の渇水流況変動率  $r'$  を算出し、回帰分析結果を外挿し将来の概算を行う。

図 5 は、花山ダム（北上川水系迫川）の渇水流況変動率  $r$  に対する各渇水指標値を示す。現在の  $r = 0.32$  から将来  $r' = 0.42$  となった場合、各渇水強度は約 1.5 倍程度に増加する。

渇水強度を低減させる方法として、利水容量の増強が考えられる。図 6 は、 $r = 0.42$  に固定し、利水容

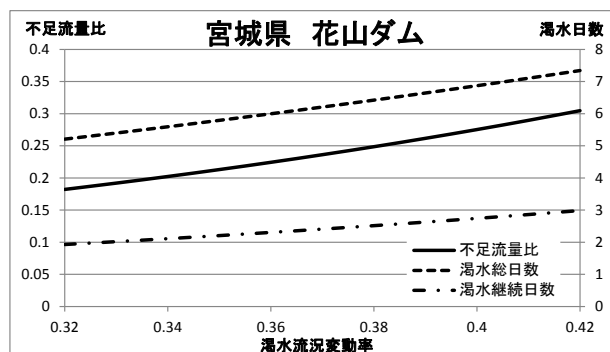


図 5 渇水流況変動率と渇水指標

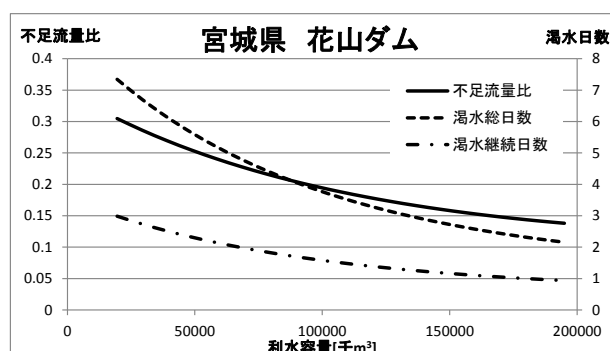


図 6 利水容量と渇水指標

量  $V$  を設定した際の各渇水指標値を示す。利水容量の増強のみにより、各渇水強度を現在の水準に戻すためには、現状の 3~6 倍の利水容量が必要となることが明らかとなった。

#### 5. おわりに

本研究では、実際の流況データから 3 種類の渇水指標を作成し、貯水池の水資源確保効果の影響要因を定量的に把握した。ここでは利水容量の増強のみを取り上げたが、今後、実際の利水量に関する調査を行うことで、利水要求量の減少による渇水強度軽減の可能性について検討することが望まれる。

#### 参考文献

- 1) 小尻ら, 利水システムの安全度評価に関する研究, 土木学会論文集 381, 1987
- 2) 久米ら, 森林流域におけるダム貯水池の流況平準化効果の評価, 水文水資源学会誌 11-4, 1998
- 3) 小松ら, 首都圏上流域のダム貯水池が渇水時流量に与える影響, 九大農学部演習林 90, 2009
- 4) 佐藤ら, 複数の気候予測シナリオによる日本河川流域の将来流況変化, 京大防災研究所, 2009

(2013 年 2 月 6 日提出)