

渇水被害調査結果を用いた最適利水運用に関する研究

Optimum Water Supply Control using Data of Draught Damage Research

許士達広¹・田中圭一²・横井 潤³

Tatsuhiro KYOSHI, Keiichi TANAKA and Jyun YOKOI

¹ 北海学園大学 工学部 教授

² (株)ジャパンテクニカルソフトウェア

³ 北海学園大学 工学部 修士課程

要 旨

新規の水資源開発が進まない現状において、既存のダムを有効に活用することによる利水運用の効率化を図ることが重要になっている。しかし、貯水池による渇水コントロールの方法は確立されておらず、近年の少雨化傾向により、開発された水源を加味した渇水調整ルールの必要性が高まっている。

ここでは利水経済調査などの既往渇水被害のデータを利用した確率確保容量理論による渇水時の水運用を検討する。確率確保容量理論によるダム利水運用は、実際のダム計画との整合がとりやすく、簡易でかつ見た目に分かりやすい手法である。しかし、どのモデルにも共通することであるが、最適運用のためには、水道等の利水における節水率と被害の関係の解明が不可欠である。

本研究では近年の最大の渇水である平成6年5月から8月にかけて発生した渇水時に行われた利水経済調査の結果から、データとしては十分とはいえないが、節水率と被害額の間関係を推定して、渇水被害の推定とダムの利水最適運用の算定方法を示すものである。

《キーワード：ダム；利水最適運用；確率確保容量；渇水被害；節水率》

1. まえがき

近年の新規の水資源開発がなかなか進まない状況においては、安定供給維持のため、すでに開発された既存のダムを有効に活用することで、利水運用の効率化を図ることが重要になっている。その様な中で、渇水時の利水コントロールのためのルールが確立されていない状態にあるため、その明確化へのニーズが生じている。ダムの利水運用は日常管理と渇水管理に分けられ、渇水管理は水系ごとに開催する「渇水対策協議会」においてダム管理者と各利水者との基本調整を行い、経験に頼った運用が行われている現状にある。そのため、最大の水資源供給施設であるダムの、渇水時における利水運用ルールをより科学的な見地から定める必要がある。

ダムの利水最適運用方法として、後述する確率確保容量を用いる方法があり、簡易で視覚上分かりやすい利点を持つ。この手法に限らず利水運用の最適化のためには節水率等の渇水の量と渇水被害額との関係の解明が不可欠であるが、渇水時にそれに対応する実用的な調査は殆ど行われておらず、行われたものも原データの所在が不明になっていることなどにより、解明が難しく、最適運用の実現を困難にしている。本研究では僅かに残存する既往調査として、近年の最大の渇水である平成6年5月から8月にかけて発生した列島渇水時に行われた利水経済調査の結果から、データとしては十分とは言えないが、節水率と被害額との関係を推定して、渇水被害の推定とダムの利水最適運用の算定方法を示すことにする。

2. 確率マスカーブによる最適利水運用方法

(1) 確保容量への確率論の導入

確保容量は一般にダム計画でダム規模の決定に使われているもので、ダム地点の必要放流量に対し流入量の不足分を時点を遡って累加するものであって、流入量、放流量のそれぞれを単に時間的に累加したものの差に等しく、利水のために各時点でダムに貯留しておく必要がある水量を示す。確保容量曲線は、各時点の確保容量をつなぐことによって得られる曲線で、通常各年の既往流量データに対して1本の確保容量曲線が描かれ、図2-1のように表される。

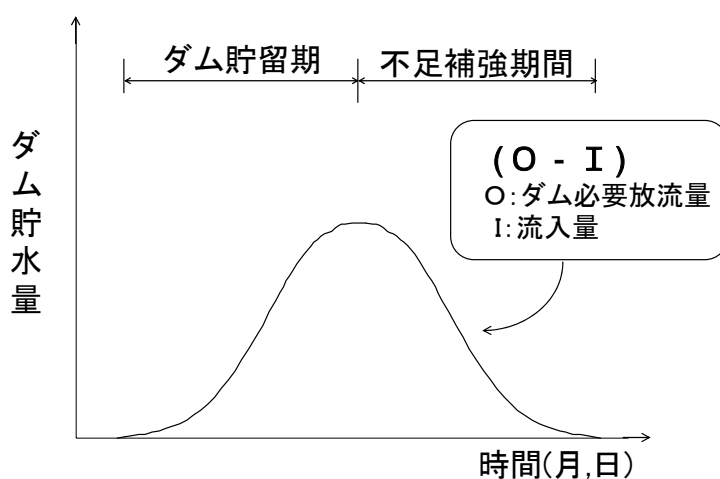


図 2-1 確保容量曲線のモデル

確保容量は従来からダム規模決定のときに通常確率規模(1/10)に相当する各年の確保容量包絡が使われている。確保容量は横軸が時間軸、縦軸が容量であり、当該時期にダムが渇渴しないために前

もって貯留しておかなくてはならない貯留量を，曲線で示される容量で確保することにより，所定の利水安全度を確保できる．

このような性質を持つ確保容量を利水運用に用いて，実際の最適運用を行なう時には将来流入量が必要になる．しかし将来流入量は不明であり，流量予測も一定の精度が期待できるのはせいぜい半月ほどでしかないので，確率論の導入が必要になる．

ここで導入するのは順序確率で，過去数十ヶ年の流況に対してそれぞれ確保容量曲線を描き，曲線群について大きい順に並び替えを行い，各半月において上から等しい順位の曲線の値を包絡したものを作成する．これを確率確保容量曲線といい，各時点で等しい確率規模を持つ順序統計確率値の曲線であり，各時点で渇水に対する安全度を保つために確保すべき利水容量を示している．10年間で3位の確率確保容量曲線は図2-2の太線のようになる．なお現在一般的なダム計画において使われている確保容量は，計画規模を上回る渇水年を異常値と考慮して除外するなど，これとは少し考え方が異なっている．

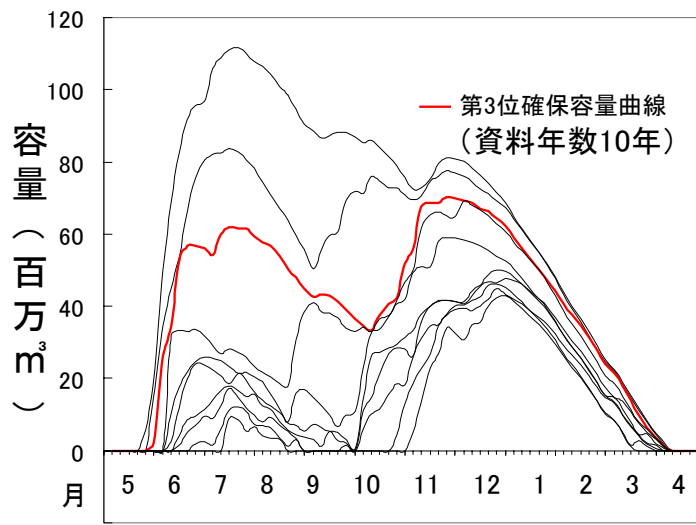


図2-2 確率確保容量曲線

確率確保容量については以下の式で表すことができる．

$$V_t^j = V_{t+1}^j + (1 - \alpha)O_t^j - I_t^j \dots\dots\dots (1)$$

$$V_t^k = k - th \text{ largest } V_t^j \dots\dots\dots (2)$$

$$j = 1, 2 \dots N$$

ただし(1)式の計算は各時点において

$V_t < 0$ のとき $V_t = 0$ とおきかえて，未来から現在の方向へ時点を遡って累加するものであり $V_t > 0$ となる時点が確保容量の立ち上がりとなる．

V_t^j ; j 年目の流況に対する時点 t における確保容量

V_{t+1}^j ; j 年目の流況に対する時点 $t+1$ における確保容量

I_t ; 時点 $t \sim t+1$ における流入量

O_t ; 時点 $t \sim t+1$ における必要放流量

j ; 既往流況 j 年目 N ; 既往資料年数

k ; 確率順位 α ; 節水率 (一定)

V_t^k ; N 年中 k 位の渇水確率に対する時点 t の確保容量

(2) 節水曲線群

確率確保容量の式(1)に示す節水率 α を 0% , 5% , 10%... と変化させていくと, 確率規模毎にそれに対応した節水曲線群を描くことが出来る. 例えば 54 年間のデータであれば 54 通りの節水曲線群が描かれる. 詳しい証明はここでは省略するが, ある期間で不足する全体水量が決まっていれば, 一定の割合で節水することにより被害が最小になるように利水運用をすることができる. (これを節水率一定の理論という). 確保容量は対象とする期間の取水量の節水率を一定にして流量との不足分を累加するので, それぞれの節水率の確保容量曲線が各時点の貯留量に対する最適節水率を示している. このため節水曲線群は, 単に水位低下に応じて節水率を自動的に定めるだけでなく, その流況に対する最適運用を誘導することができるという都合の良い特性を持つ.

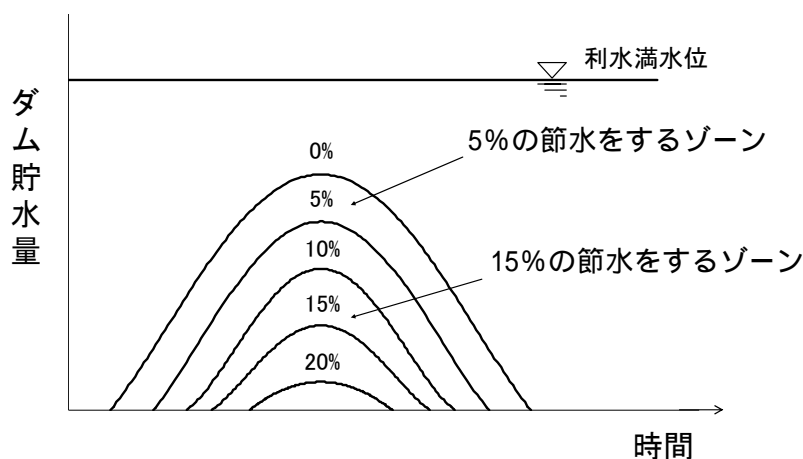


図 2-3 節水曲線群のモデル

(3) 確率確保容量による節水曲線群

前述したように, 実際の管理では将来の流況は不明であるために, 流量データの数だけ描かれた節水曲線群のうち, どの節水曲線群が最適節水曲線群であるかを選定することができない. そこで過去の流況データすべてに対して各確率年の節水曲線群の示す節水率に従いながら放流し, 運用した時の被害額の合計をそれぞれ算出して, 計算された被害が最も小さくなる節水曲線群を選択し, 最適節水曲線群とする手法をとる. これにより任意の流況に対しても最適運用を誘導することができるようになるが, このためには節水率と被害の関係を知る必要がある.

確率規模 1/54, 5/54, 25/54 を例として節水率 α を 5% ごとに变化させて, 54 年の既往流量データに対して計算を行い, 曲線を描いたものを図 2-4, 2-5, 2-6 に示す.

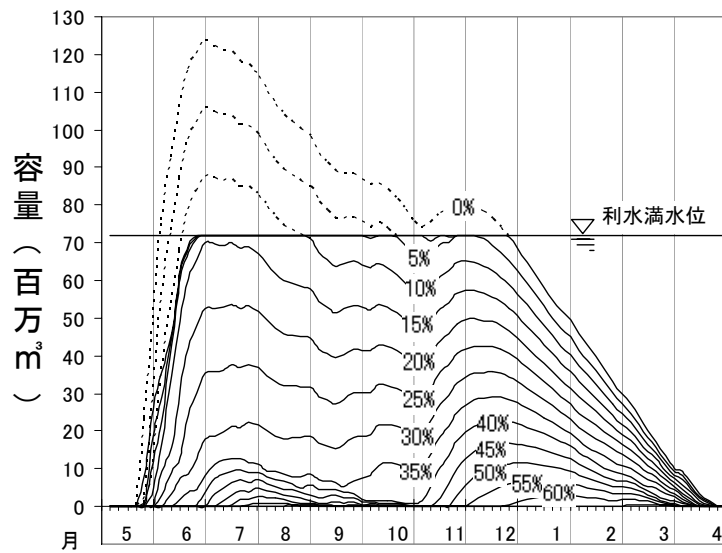


図 2-4 1/54 の確率曲線群

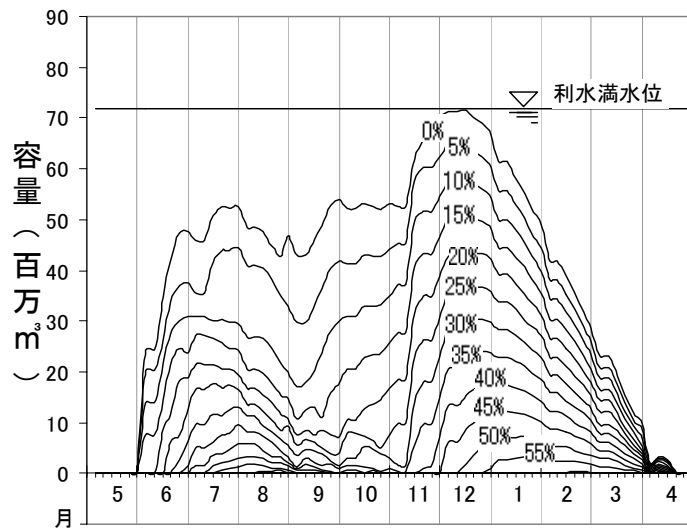


図 2-5 5/54 の曲線群

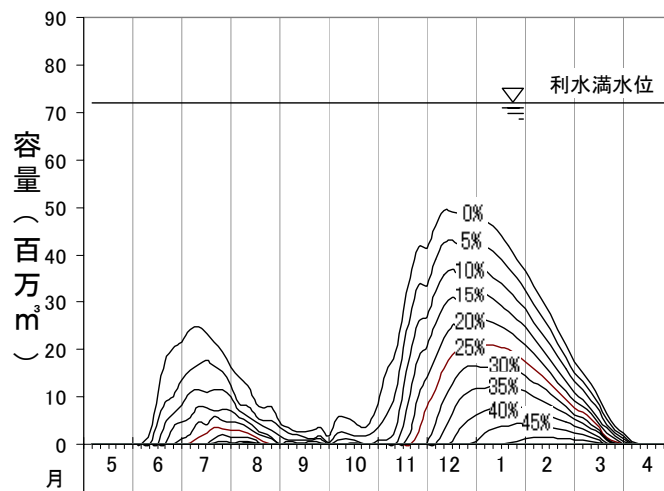


図 2-6 25/54 の曲線群

これらの各確率の節水曲線群に対してそれぞれ運用計算を行い、節水の生じる状況を計算する。

次に示す図 2-7 の利水運用図は丸印がこの運用による各時点の貯水容量変化を表しており、例えば A 点で 10%、B 点で 20% の節水が最適であることが示され、各時点での最適節水運用が図られる。曲線と曲線の間、例えば B 点のように 15% の節水曲線と 20% の節水曲線の間に貯水容量が位置しているときには、17.5% としても良いが、涸渇を避ける意味から強めの節水を採用し、この場合には 20% の節水を実施する。また、節水率 0% の曲線より上回っている貯水容量の時には、節水の実施がなく必要放流量がそのまま放流されることを示している。この方法は各時点での貯水容量によって自動的に節水率を決定できるので、取り扱いが容易で分かりやすい利点をもっている。

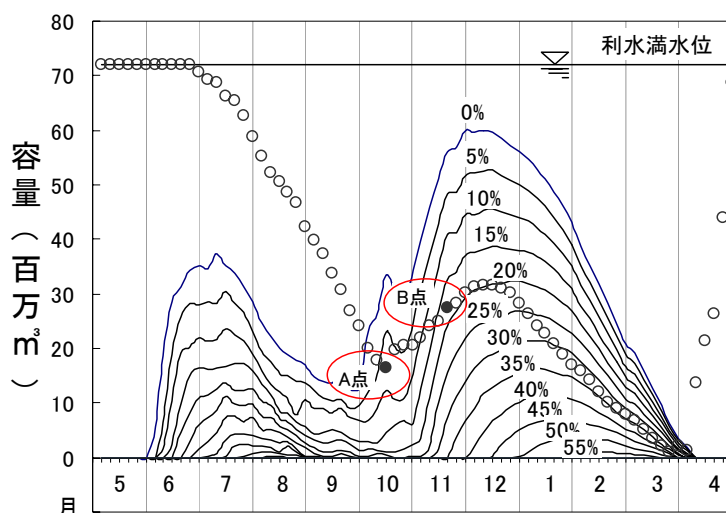


図 2-7 確率確保容量による利水運用図

3. 節水率と被害額の関係

(1) 渇水被害額の調査

最適利水運用を評価する指標として、実際の過去の流況で利水運用して渇水被害額が最小となるものを選定する。こうした被害額の算出のためには、既往の渇水における給水制限段階ごとの実績被害額を整理して節水率と被害額の間を明らかにし、節水率 - 被害額曲線の関係式を求める必要がある。

渇水被害の対象は一般家庭用水、都市用水、工業用水、農業用水に区分され、さらにそれぞれが日常的支出などによる被害額と一時的支出などによる被害額に分けられる。ここでは、日常的支出などによる被害を経常的被害、一時的支出などによる被害を一時的被害として以下のように定義する。

経常的被害：水の不足による水確保のための支出と、渇水が原因で生じる労働時間増などを金額に換算した支出のことで、渇水の程度と期間に依存する。

一時的被害：ポリ容器やポンプなど、一度購入すれば渇水期間を通して使用できるものへの特別な支出のことで、渇水期間の長さとは関係なく、渇水の程度に依存する。

渇水被害については利水経済調査という名称で、調査が国土交通省で大渇水時に行なわれているが、その結果の詳細は現在ではほとんど残っていない。本研究では、資料は乏しいが平成 6 年 5～8 月に発生した列島渇水について実施された渇水被害調査の結果を用いた。平成 6 年度の渇水被害調査において、全被害額のうち構成比率の高い一般家庭、都市活動、及び工場について節水率と被害額が算定で

きるデータがあるのは、広島県広島市、福山市、尾道市、福岡県福岡市、大野城市、長崎県佐世保市、愛媛県松山市、今治市、銅山川の9つの都市である。

湯水被害調査のアンケートでは、例えば家庭用水では、「給水制限期間中で最も制限が厳しかった1ヶ月における家庭の日常的な支出増はいくらか」などの各質問について「外食の支出増」、「ミネラルウォーター等の飲料水の購入による支出増」などのように具体例を挙げて調査している。そのため、給水制限期間中で最も制限が厳しかった期間の被害額に相当する資料になっている。

アンケートについて代表的な項目を要約すると次の5つを挙げることができる。

最も給水制限の厳しかった1ヶ月間における日常的な支出増

給水制限期間中の1回限りの特別な支出増

最も給水制限が厳しかった1ヶ月間における一日の労働時間増

給水制限期間中における残業時間減などによる収入の減少

給水制限による健康への影響、支払った医療費や薬代など

アンケートのデータをもとに9都市における最も制限が厳しかった月の給水量減少率とその時の各主体（一般家庭、都市活動、工場）の日平均被害額との関係から節水率と被害額の間を整理すると以下の表のようになる。

表3-1は、別々の都市で観測された値を集めたものである。本来各都市別に節水率と被害額の間を求めなければならない。しかし、湯水被害調査の手法はそのようになっておらず、各都市で最も節水が厳しかった月の値しか残されていない。このため、不十分ではあるが各都市で1組ずつの節水率と被害の間を組み合わせ、関係式を求めてみる。

表3-1 節水率と被害額

地域	節水率	家庭用水		都市用水		工業用水	
		経常被害 円/日/世帯	一時被害 円/世帯	経常被害 円/日/事業所	一時被害 円/事業所	経常被害 円/日/工場数	一時被害 円/工場数
大野城市	10%	1063	2631	—	—	—	—
広島市	20%	771	3060	266	35680	858	186000
福山市	25%	1744	3492	509	73600	5220	666525
福岡市	25%	1745	2884	238	60105	3816	108000
松山市	36%	2527	6272	489	109300	3829	175215
尾道市	42%	2614	6636	1857	99572	6327	123583
佐世保市	46%	2509	8684	—	—	—	—
銅山川	60%	—	—	—	—	19275	2055000
今治市	96%	—	—	—	—	266557	3005000

(2) 節水率と湯水被害額の間

湯水被害は従来から節水率(%)×節水日数(day)や(節水率)²×(節水日数)dayといった指標が知られており、一般的に節水率と被害の間を関係式は

$$\text{被害 } D = B \times (\text{節水率})^n \times \text{節水日数} = B \cdot (\%)^n \cdot \text{day} \quad (B: \text{定数} \quad n: \text{指数}) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。定数 B は全ての被害に等しくかかるので最適節水曲線群を選ぶ要素にはならず、カーブの変化率(曲率)によってのみ決まる。

このような被害においては、感覚的に節水率の増加とともに被害額の増加割合が大きくなる関係にあり、節水率と被害額の関係が下に凸となる曲線となるとイメージすることができる。この式にアンケートで得られた表 3-1 のデータを用いることで、家庭用水、都市用水、工業用水の経常的被害について、湯水時の節水率と湯水被害額との間の関係が求められる。また、それぞれの一時的被害についても同様にして湯水の最大節水率とその湯水での一回限りの特別な支出との関係が求められる。検討結果は図 3-1～6 に示すとおりであり、表 3-2 に示すような関係式を得ることができる。

実際には、これらは僅か 5～7 点のデータから求めているため精度上の問題がある。累乗式は、原点 (0, 0) を入れると定まらないため、図 3-1～6 は、原点を (0.00001, 0.00001) とした時のものである。原点を少し変えると曲線が変化し、指数 n 、定数 B の値が異なるが、ここではこの式を用いる。

表 3-2 湯水被害曲線の式

家庭	(経常的被害 $y = 25.574x^{1.2764}$ 一時的被害 $y = 54.774x^{1.3424}$
都市	(経常的被害 $y = 11.392x^{1.2217}$ 一時的被害 $y = 403.97x^{1.5211}$
工場	(経常的被害 $y = 56.473x^{1.3683}$ 一時的被害 $y = 994.54x^{1.6051}$

y : 被害額 x : 節水率 (%)

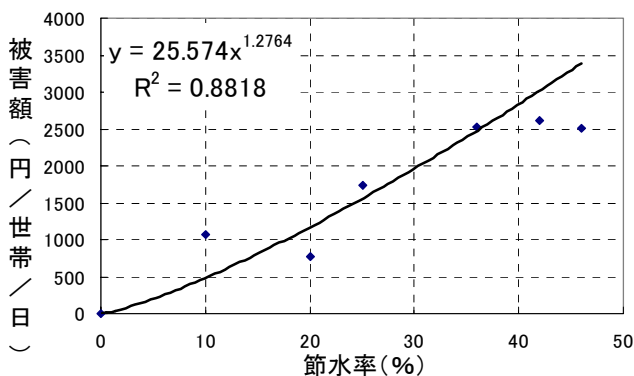


図 3-1 湯水被害曲線 (家庭：経常的被害)

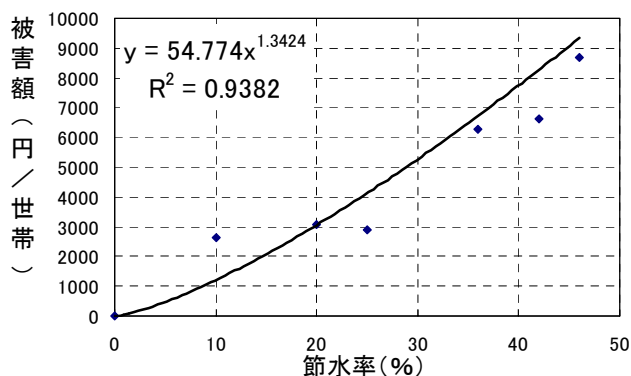


図 3-2 湯水被害曲線 (家庭：一時的被害)

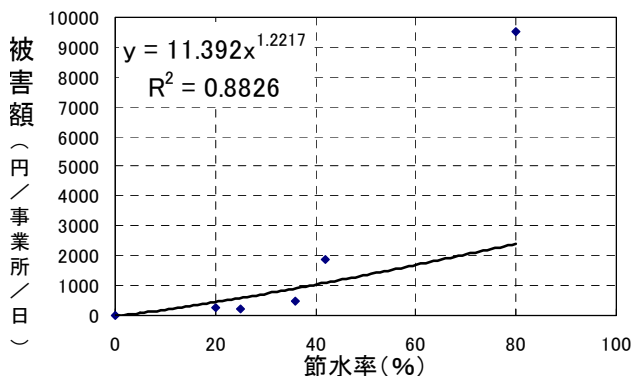


図 3-3 湯水被害曲線 (都市：経常的被害)

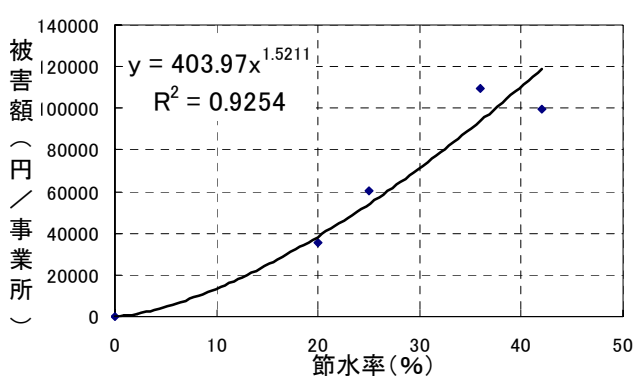


図 3-4 湯水被害曲線 (都市：一時的被害)

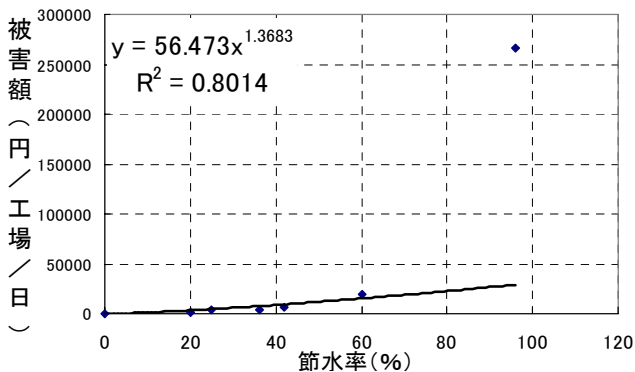


図 3-5 湯水被害曲線 (工場：経常的被害)

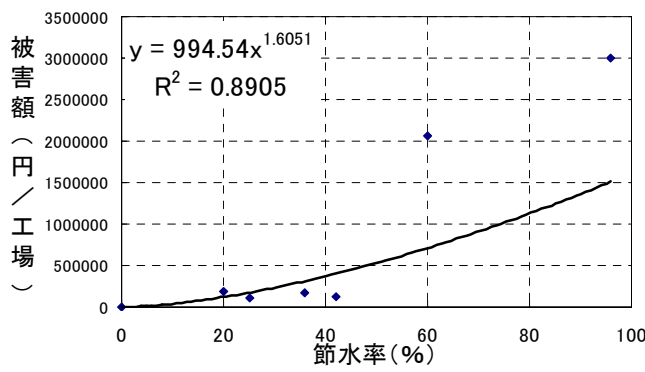


図 3-6 湯水被害曲線 (工場：一時的被害)

4. 最適被害曲線の算定

(1) 被害額の算定

被害曲線の関係式を用いて被害額の計算を行うためのフローを図4-1に示す。湧水の程度と期間に依存する経常的被害の推計のために節水率別制限日数を求め、さらに湧水の程度のみ依存する一時的被害の推計のために湧水ごとの最大節水率を求めることが必要となる。そのため、既往流量データに対する制限給水計算を半旬単位で行い、それらから得られる節水率別制限日数および最大節水率を用いて、被害曲線の式から経常的および一時的被害を推計し、世帯数等に乗じて合計することで湧水被害額を求めることができる。

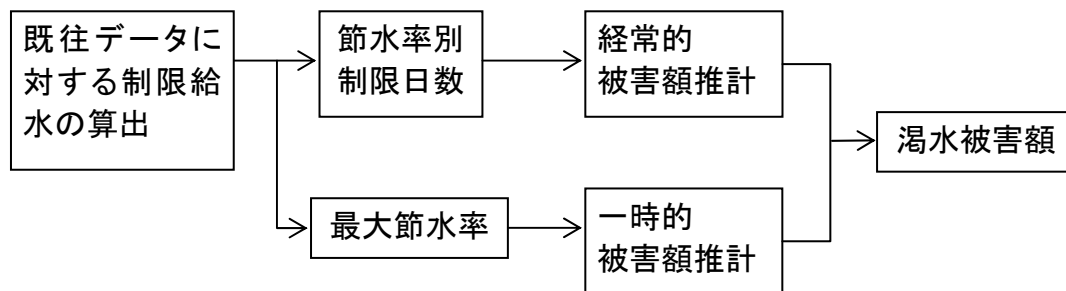


図4-1 被害額推計プロセス

(2) 運用計算の例

54カ年の流量データでAというダムの場合の計算を行う場合を考える。図4-2は1951年の流況に対する38/54確率の節水曲線の利水運用図であり、3月～4月にかけて節水曲線の線と貯水量が交わっているため、節水の実施が必要になる。また図4-3の1954年は、節水曲線と貯水量の交わりがないため、節水の必要がない。

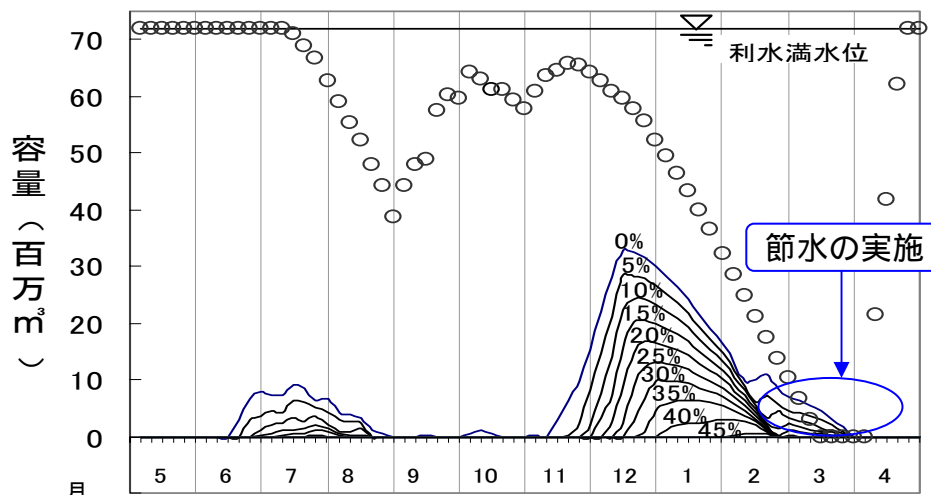


図4-2 利水運用図 (38 / 54) : 1951年の流況に対しての利水運用

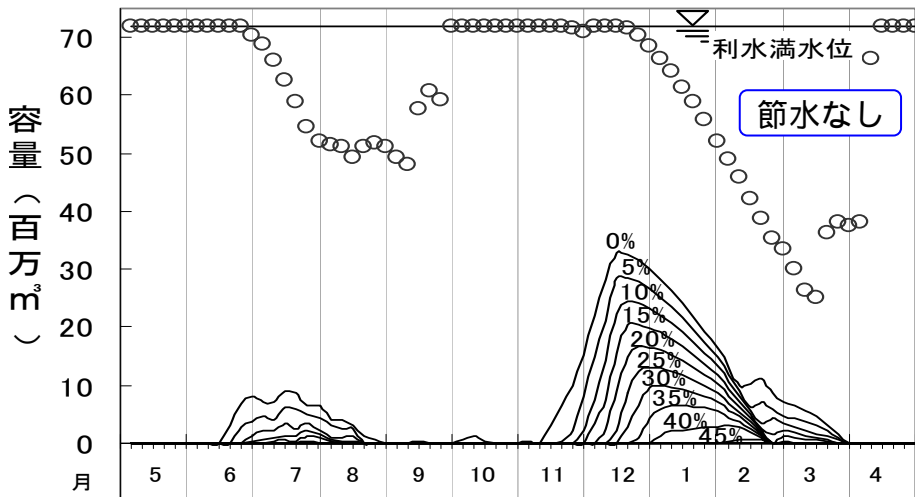


図4-3 利水運用図 (38 / 54) : 1954年の流況に対しての利水運用

(3) 最適節水曲線の算定

上記のような求め方で、実際の54年間の流況データと、ある確率順位での節水曲線群を適用して利水運用すると、被害曲線の式において各主体（家庭、都市、工業）でそれぞれデータ年数分の合計被害額を求めることができる。このときに、湯水被害曲線の関係式から求めることのできる経常的被害のうち、家庭用水は一世帯の一日、都市用水は一事業所の一日、工業用水は一工場の一あたり被害額であるので、そのダムの給水対象となる都市の世帯、事業所、工場数を調査し、対象となる各被害額に乘じ、さらに節水率ごとに実施される日数を乘じることで経常被害額を算出する。一方で一時的被害額は一回限りの特別な支出であると考えているので、利水運用中での最大の節水率に対して一時的被害額を求め、ダムの給水対象となる都市の世帯、事業所、工場数を対象となる被害額に乘じて被害額を算出することになる。最適節水曲線群はこれらの被害額の合計が最小となる確率順位の節水曲線群であり、既往の流況のデータを基に、このダムの最適利水運用を誘導するものである。

例えばS市の場合には、給水世帯数724,000、事業所数74,204、工場数1,709であり、単位あたりの被害に乘じて、仮定した節水曲線群に対する被害額が計算できる。54通りの各節水曲線群に対して、給水制限計算および被害額計算を行い、合計が最小となる節水曲線を選ぶと図4-4に示すようになり、13/54の確率曲線を用いて利水運用を行えば被害額が最小となり、最適であることになる。給水対象にある家庭用水の世帯数724,000が、事業所数74,204と工場数1,709に比べて大きいいため、世帯あたりの被害が小さいにもかかわらず、家庭用水が合計被害の大部分を占めている。

この図4-4から、節水の強さを弱くしすぎると、ある節水曲線確率以下で節水を全く実施しない時と変わらない被害額が発生してしまうことや、また、節水の強さを強くしすぎることによって節水を全く実施せずにいたときよりも、被害額が大きくなってしまふことがわかる。

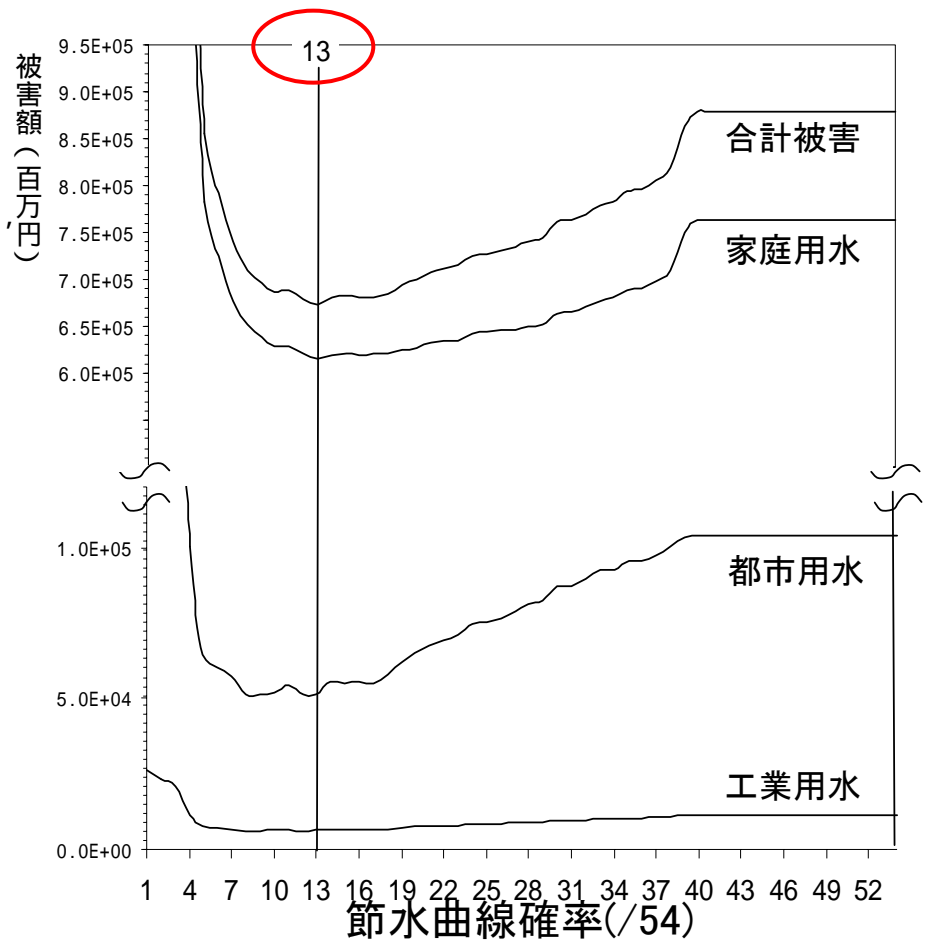


図4-4 節水曲線確率と湯水被害の関係

5. 他のダムにおける最適節水曲線群

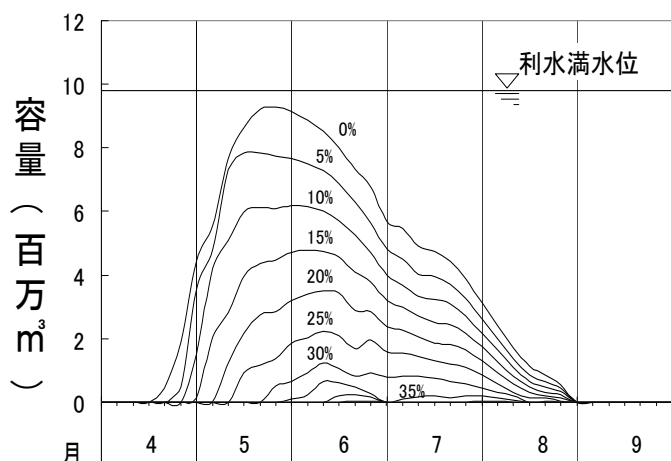
ここまでの検討は実測流量を基に、Aダムという実際のダムを基にした仮想ダムについて検討を行っている。同様にB～Eダムを考え、これらについても最適節水曲線群を調べ図5-1に示した。

ダムによって節水曲線がかなり違った形になることが分かる。使用した流量データを表5-1に示す。

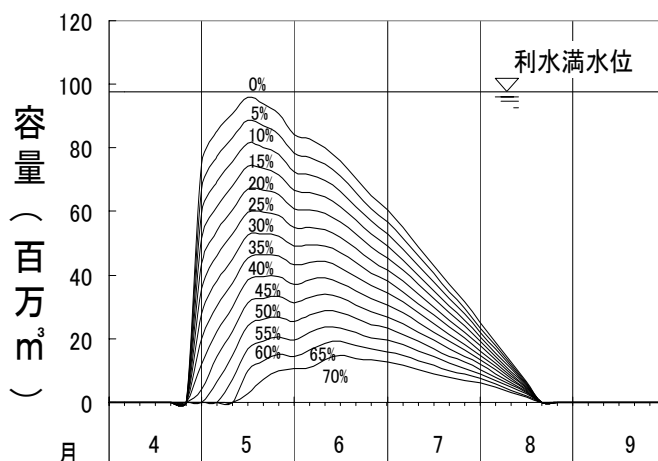
B～Eのダムについて描いた曲線群が4月～9月の限られた期間であるのは、これらのダムの利水が水道主体のAダムと異なり、大半が農業用水であることによる。農業用水の取水は8月末の時点でほぼ無くなるので、9月以降は確保容量がゼロより小さくなり曲線が描かれない。

表5-1 流量データ

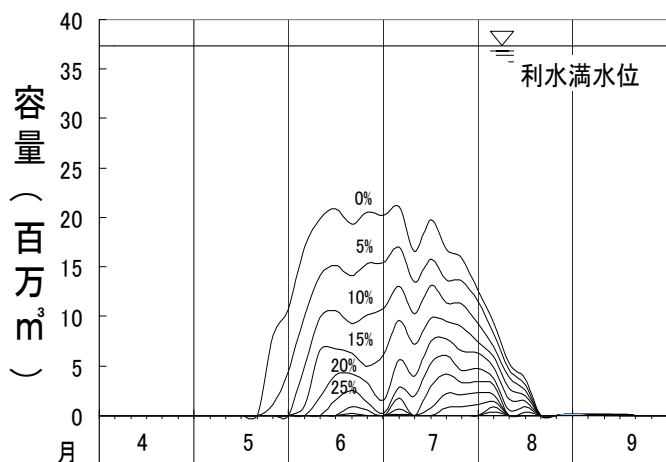
ダム名	既往データ年数
A	1951～2004 (54年間)
B	1950～1996 (47年間)
C	1957～1996 (40年間)
D	1961～1996 (36年間)
E	1943～1997 (43年間)



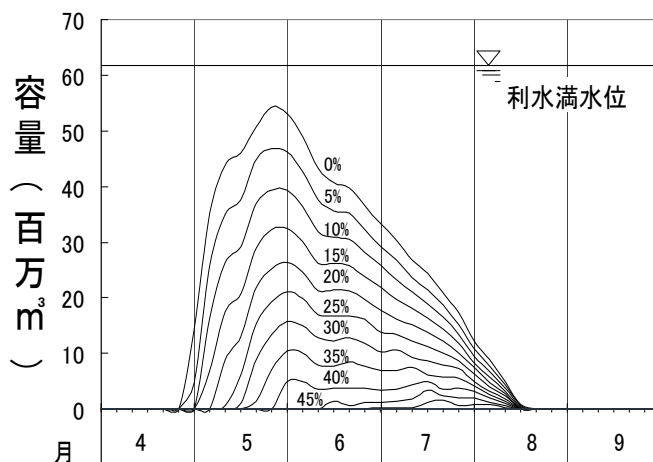
Bダムの最適節水曲線(5/47)



Cダムの最適節水曲線(6/40)



Dダムの最適節水曲線(9/36)



Eダムの最適節水曲線(7/43)

図5-1 ダム別の最適節水曲線群

最適節水曲線の確率規模，すなわち何分の一の確率の確保容量曲線群が被害を最小にするかは，ダムにより異なる。これをダム自体の利水容量がどの程度の安全度をもっているかということと比較するため，各ダム規模も利水安全度の確率で示す。これらと比較したものが表5-2である。

ここで見るように、ダム規模が約 10 分の 1 確率程度の 5 つのダムについて最適節水曲線を求めたところ、最適節水曲線群の確率は、4 分の 1～9.4 分の 1 となった。

表 5-2 ダム別最適節水曲線確率

ダム名	最適節水曲線	ダム規模
A	13/54(1/4.2)	5/54(1/10.8)
B	5/47(1/9.4)	4/47(1/11.8)
C	6/40(1/6.7)	4/40(1/10)
D	9/36(1/4)	4/36(1/9)
E	7/43(1/6.1)	4/43(1/10.8)

6. おわりに

節水曲線を用いた最適利水運用の具体的方法を示した。最適運用のためには実際の節水率と被害額の関係式が不可欠である。しかし現在残っている利水経済調査のデータ数が少ないため、被害曲線の式を決定する時に、データの値の僅かな違いによる影響を非常に受けることになる。また、現在は全国数ヶ所のデータから 1 本の曲線を算定しているが、被害曲線の形状は地域ごとの生活形態や環境により異なり地域特性があると考えられるため、本来ならば各地域によった被害曲線の式をそれぞれ決定し、被害額の推計を行うことが必要である。今回は平成 6 年度の利水経済調査の結果を用いたが、それ以前の調査結果は現在見つかっておらず、今後はそれらの調査と新たな渇水時の詳細な調査が求められる。

今回の報告では割愛しているが、本研究においては更なるデータを求めて香川県を中心に、聞き取り調査を行なっている。それらを通じてわかったことは、渇水被害曲線が得られるような渇水は日本においては平成 6 年まで遡らなくてはいけないこと。上水道の被害は家庭において生ずるが、家庭への給水制限率は通常記録されておらず、減圧給水の圧力や断水時間の記録しかないため、節水率の実績の調査は各都市の水道管理者にかなりの負担をかけることになること。同じ給水制限であっても減圧給水と断水の間には相当の被害の違いが出ることなどである。また多目的ダムの運用においては農業関係の被害についても調査する必要があるが、一般化されたものは無く、このためのデータの入手は県単位の農業試験所や農業指導者から入手するより無いのが現状である。これらについては手法を試行錯誤しながら、一定の期間をかけて困難を克服して続けていく方針である。

本研究は非常に大きなテーマであり、簡単に最終成果が得られるものではないため、本報告は第一報である。実際のダムの利水運用ルールから見て非常に重要なテーマであり、環境問題等で利水に対する研究に目が向けられない中で、実用的見地から研究の進展が求められていると考えている。

参考文献

- 1) 許士達広・下田明：確率曲線を用いたダムの利水運用および計画の最適化(II)，水文・水資源学会誌第 9 巻 3 号，pp.265-266，1996.
- 2) 許士達広・下田明：確率曲線を用いたダムの利水運用および計画の最適化(III)，水文・水資源学会誌第 9 巻 3 号，pp.265-266，1996.
- 3) ダム管理技術検討報告書：北海道開発局 2002.
- 4) 平成 16 年版 日本の水資源：国土交通省 土地・水資源局水資源部 編