

降雨パターンに対応した出水伝達関数による 発電用ダム流入量子測 — 加藤第一ダムを対象として —

A Forecasting Method of Time Variation of the Flow Rate into a Dam for a Hydro-Power Plant by means of the Runoff Transfer Functions Classified with the Rainfall Pattern

一 柳 勝 宏
Katsuhiko ICHIYANAGI

小 林 英 夫
Hideo KOBAYASHI

Abstract In order to convert the hydro-energy given by rainfall into electric energy as effectively as possible, this paper proposes a forecasting method of time variation of river flow rate following a rainfall on upper district of a dam. We have investigated the actual flow increases following 26 rainfalls into a dam for a hydro-power plant located the upper district of the Oh-i River in Central Japan. The derived runoff transfer functions are different from each other, of course. These runoff transfer functions are classified into two groups from the view point of the similarity of their impulse response characteristics. The cluster analysis method is used in this data processing. Further investigation reveals that the above-mentioned two groups have close relationship with the duration time of the rainfalls, i.e., the No.1 Group well corresponds to the rainfalls with the duration of less than 35 hours, while the No.2 Group roughly corresponds to those with longer than 35 hours.

Taking this fact into account, the authors develop a new method for a better prediction of the river flow rate following a rainfall. It is well predicted by another method whether a coming rainfall will continue for shorter than 35 hours or not. The river flow rate is forecasted by selection of the derived two types of the runoff transfer function corresponding to the rainfall duration period.

This method is actually applied to other 14 rainfalls except the above-mentioned 26 rainfalls. The results are obtained with less error in most case.

1. まえがき

今日の地球温暖化や酸性雨などによる地球規模の環境破壊を抑制するために、自然エネルギーを有効に利用することが世界的にも重要な課題となっている。水力エネルギーは太陽光や風力など他の自然エネルギーと比較してエネルギー密度が高い上、貯水

池という形で比較的容易に大容量のエネルギーを蓄えることができるという特徴を有しており、従来から水力発電として利用されている。

日常の給電運用業務において、発電用ダム上流域の水資源をできる限り無駄にすることなく、電気エネルギーに変換利用するためには、中規模の降雨によるダム流入量増加の総量ならびに時間的変動パターンを精度良く予測する必要がある。総量については、先に、筆者らの提案した方法で有効雨量

(降雨のうち, 直接河川に流出する量) を推定することにより, かなりの精度で予測できるようになったと考えている⁽¹⁾。

本報告では, 次の段階として, ダム流入量の時間変動まで含めて予測精度を向上させるために, 有効雨量の時間的変化を入力とみなし, ダム流入量の時間変動を出力とみなした出水伝達関数を求めてみた。もとより, 一義的な伝達関数が得られる可能性は少ないが⁽²⁾, それらが個々の降雨によってどの程度異なっており, 何らかの観点から平均的な伝達関数を設定できるかどうかについて検討した。

大井川水系畑薙第一ダム(以下, 畑一ダムと略記)を対象地点として, 昭和55年~58年の間で, 中規模程度の降雨のうちから任意に総数26例の降雨を選び, 出水伝達関数を個々の降雨毎に推定した。得られた26例の伝達関数はそれぞれ異なっているが, そのインパルス応答波形の類似性から2つのグループに分類した。

このように分類された伝達関数が降雨継続時間, 総降雨量, 降雨強度など降雨を特徴付けるパラメータとどのような相関関係にあるのかについて調べた。その結果, 出水伝達関数のインパルス応答波形の類似性から分類した二つのグループは, 継続時間と最もよく対応していることが判明した。すなわち, 畑一ダム上流域では, 降雨継続時間が35時間未満か, あるいは35時間以上のいずれかに基づいて2種類の出水伝達関数が設定できることを明らかにした。

以上の検討から, 出水予測を行う場合に來るべき降雨の継続時間を予測し, それに応じて2種類の伝達関数のいずれかを選択して, 出水シミュレーションを行えば, 流量の時間変動パターンの予測精度の向上が図れると考えられる。この考え方に基づいて, 実績降雨を出水シミュレーションの入力データとして用いることを試みた。具体的に, 伝達関数の推定に用いなかった降雨14例(昭和55年~58年)に適用したところ, 全体として良好な結果が得られ, 本提案の有効性が示された。

2. 給電指令における降雨および流量予測の必要性

各電力会社の中央給電指令所においては, 変動する電力需要に対し, 供給力を調整して電力需給の均衡をとるために, 需要の動向, 出水状況, 天気予報,

社会的な事象などの具体的な情報に基づいて需給予想を行っている。翌日需給予想においては, 翌日分の予想需要に対応した供給力を確保するために, 各電源の翌日の発電計画を作成している。そこでは, 水力・火力・原子力発電電力, 他社発電電力および融通電力を, それぞれの特性に応じて1時間ごとの単位で配分している。水力に関しては, 翌日の出水予測や貯水池の使用計画に他分野の利水状況も勘案して, 水力発電計画を立案している⁽³⁾。

この水力資源の賦与は自然条件, 特に気象条件に大きく左右されるので, それを考慮したダム運用が試みられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし, 現在, まだ気象の変化に十分に追従しているとはいえず, 特に降雨による河川の増水時には, 貴重な水力エネルギーを利用しきれず無駄に放流してしまう機会も多い。もし可能であれば, 降雨による河川の増水が予想されるときは, 対象ダムにおいてできる限り早期に発電, 放流を開始することが望ましい。そのためには, あらかじめ時間的余裕をもって降雨を予測し, その予測値に基づいて河川出水の総量および時間的変化の予測を行う必要がある。そうすることにより, ダム運用が一層的確に, かつ計画的に実施でき, 水力エネルギーを電力として有効利用を図ることができる。

さらに, 給電指令所が翌日以降の各発電所の運転計画を立てるにあたり, 次の日以降の降雨とこれに伴うダム流入量の予測があれば, 水力発電所の運転を優先し, 火力発電所の運転を抑制することができる。その予測が的確である程, 正確な運転計画を立てることができる。短時間の降雨なら1日限り, 長時間の降雨なら2~3日にわたる水力・火力発電の割り振りができる。例えば, あるダムにおいて, それが満水状態にあるとする。翌日以降の降雨が予測された場合, 予め放流してダム水位を下げておく必要がある。この放流される水資源をすべて電力に変換するためには, 発電所の最大使用水量がその発電能力に応じて決まっているので, 単位時間当たり一定量以上の放流はできず, 下げるべき水位に対応して放水のための時間が決ってしまう。したがって, この所要時間を見込んで降雨ないしは河川流量を予測することが給電指令の立場から要望されている。

この放水のための時間は, 個々のダムや発電所で大きく異なるので一概に言えないが, ここでは, 本報告で取り上げる畑一ダムについて概算しておく。本ダムおよびその貯水池の諸元を表1に示す。これ

表1 畑薙第一ダムの諸元および降雨・出水に要望されるリードタイムの検討

流域面積	315.5 km ²
有効貯水量	6.98 × 10 ⁷ m ³
有効水深	44 m
最大使用水量	160 m ³ /s
最大使用水量で1時間発電した場合の水位低下量	$\frac{160 \times 3,600}{(6.98 \times 10^7 / 44)} = 0.36 \text{ m}$
100mmの降雨のうち50mm分が流出する場合の水位上昇量	$\frac{50 \times 10^{-3} \times 315.5 \times 10^6}{(6.98 \times 10^7 / 44)} = 1.0 \text{ m}$
上記水位を下げるに要する時間	$\frac{1.0}{0.36} = 2.8 \text{ h}$

によれば、最大使用水量160m³/sで1時間発電した場合、水位は約0.36m下がることになる。ここで、315.5km²の流域全体に100mmの降雨があった場合を考える。このうち50%がダム貯水池に流入してくるとすると、水位は約1.0m上昇する。この分だけ水位をあらかじめ下げておくために要する時間は、約2.8時間と見積もられる。このようなことから、台風や前線による洪水は別として、通常の中程度の降雨に対しても30時間程度のリードタイムをもって降雨・出水を予測する必要がある。そこで、筆者らは、実用性の高い降雨および河川出水の両予測手法を開発することを目的として検討を行っている。本報告では、河川出水予測手法の検討結果について述べる。

3. 伝達関数による河川出水機構のモデル化

雨量などは1時間毎の離散データとして与えられるので、ここではパルス伝達関数で出水機構を表すことにする。図1に示すように、各時刻 $t (= t_0 + k \Delta t)$, t_0 =基準時刻, Δt =サンプリング間隔, k =整数) において離散的に得られる有効雨量を $r_e(k)$, ダム流入量を $q(k)$, それぞれのZ変換を $R_e(z)$ および $Q(z)$ で表し、次式で与えられる n 次の伝達関数 $G(z)$ を考える。

$$Q(z) = G(z) R_e(z) \tag{1}$$

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \tag{2}$$

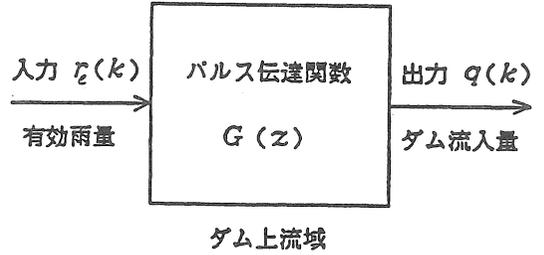


図1 伝達関数による河川出水機構のモデル化

式(2)を式(1)に代入し、差分方程式に変換すると、次式を得る。

$$q(k) = -a_1 q(k-1) - \dots - a_n q(k-n) + b_0 r_e(k) + b_1 r_e(k-1) + \dots + b_n r_e(k-n) \tag{3}$$

各時刻における降雨と流量との実測値の間に常に式(1)が成り立っているとは限らないので、式(3)も等号が必ずしも成り立っているとは言えない。そこで、検討している期間中で、式(3)の両辺の差が最小となるように係数パラメータ $a_1 \sim a_n$ および $b_0 \sim b_n$ を最小二乗法を用いて推定する⁽⁶⁾。すなわち、次に示す式(4)の評価関数 J_D を最小とするように、 $2n+1$ 個のパラメータを推定する。

$$J_D = \sum_{k=1}^{k_f} [q(k) - \{-a_1 q(k-1) - \dots - a_n q(k-n) + b_0 r_e(k) + b_1 r_e(k-1) + \dots + b_n r_e(k-n)\}]^2 \tag{4}$$

ただし、 Σ は降雨が止んだ後の流量が基底流量に近い値になる時刻 t_f まで行うものとする。すなわち、 $t_f = t_0 + k_f \Delta t$ なる関係がある。

以上の方法を、畑一ダム上流域における過去の降雨に適用し、各降雨毎に伝達関数のパラメータを推定した。その推定結果について次章に述べる。

4. 畑薙第一ダム上流域における出水伝達関数の推定

4.1 各降雨に対する出水伝達関数の算定
畑一ダム上流域における昭和55年～58年の降

雨のうち, ここで対象とするような降雨40例の中から無作為に抽出した降雨26例(14例は後の検証に用いるため除外)について, 降雨量およびダム流入量の両データを用いることにより, 個々の降雨における出水伝達関数を推定した. ここでの伝達関数の次数を1次から8次まで変えてシミュレーションを行ったところ, 5次以上に次数を多くしてもシミュレーション結果にはほとんど差異がないことがわかった. そこで, 本報告では, 伝達関数の次数を5次として検討を進める.

式(2)のような形をもつ伝達関数で, 5次の場合に未知パラメータは, $a_1 \sim a_5$ および $b_0 \sim b_5$ の11個である. 抽出した26例の各降雨について求めたこれらのパラメータの値を表2に示す. これによると, 個々の降雨に対して各パラメータ値のバラツキが大きく, 符号までも異なるものがある. したがって, 係数の類似性から伝達関数を導くことができない. そこで, 各降雨毎に求めた伝達関数のインパルス応答波形の類似性を調べてみた. インパルス応答曲線の典型例を図2に示す. ここでの表示は, すでに求めた伝達関数で表される応答であるから単位の, すなわち1mmの有効雨量が1時間続いたときの河川流量曲線を示している. 図2(a)は表2の降雨番号1のもの, 同図(b)は降雨番号5のものである. 前者はピーク値が大きく比較的早期に流出が終るもの, 後者はピーク値が小さく長期にわたり流出が続くものである. 他のインパルス応答もこのような視点から分類することができた. すなわち, 畑

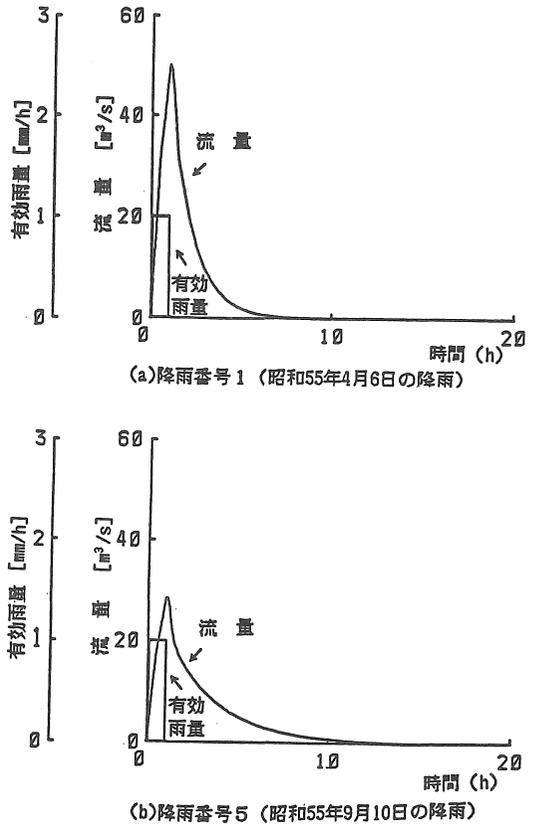


図2 出水伝達関数のインパルス応答曲線

一ダム上流域における河川出水機構を単一の伝達関数でモデル化することは困難であると言える.

表2 各降雨に対する出水伝達関数のパラメータ推定値

降雨番号	降雨開始年月日	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	55.04.06	1.20E+00	-4.69E-01	1.01E-01	1.15E-01	-2.61E-02	3.89E+00	1.91E+00	3.61E-01	3.81E+00	-2.63E+00	-5.11E-01
2	55.04.12	1.28E+00	-3.50E-01	1.38E-03	-9.52E-02	1.19E-01	1.76E+00	-1.40E+00	4.97E+00	-5.99E-01	2.94E+00	-3.63E+00
3	55.05.15	1.19E+00	5.34E-02	-3.55E-01	7.34E-02	7.39E-03	-1.55E+00	3.05E+00	2.79E+00	-1.53E+00	2.32E-01	-1.32E+00
4	55.05.25	1.02E+00	-4.06E-02	-1.65E-01	-7.32E-03	1.33E-01	9.48E-01	4.03E+00	-1.82E+00	4.48E+00	-3.55E+00	8.79E-01
5	55.09.10	6.29E-01	3.90E-01	9.30E-02	-8.43E-02	-6.45E-02	1.77E+00	2.53E+00	2.11E+00	-1.04E+00	-1.27E+00	-1.19E+00
6	55.10.19	1.17E+00	-3.68E-01	2.13E-01	3.05E-02	-7.37E-02	3.27E-01	7.10E-01	1.81E-01	1.32E+00	5.75E-01	-1.16E+00
7	56.05.11	9.21E-01	5.11E-01	-8.30E-01	-1.22E-01	4.42E-01	8.57E+00	-2.29E+00	-1.12E+00	1.66E+00	2.01E+00	-8.34E-01
8	56.05.17	1.13E+00	-1.03E-01	4.11E-02	-3.68E-01	2.61E-01	1.61E+00	2.99E+00	-5.21E-01	5.52E-01	-7.61E-02	-1.45E+00
9	56.08.21	1.13E+00	-9.30E-02	-1.02E-01	-6.82E-02	9.21E-02	1.37E+00	-2.27E-01	4.04E-01	2.15E+00	1.59E+00	-2.28E+00
10	56.08.25	1.38E+00	-2.58E-01	-7.48E-02	-1.38E-01	6.85E-02	4.40E-01	2.41E-01	4.29E-01	7.32E-01	-5.36E-01	-1.70E-01
11	56.07.02	8.93E-01	3.41E-01	-1.41E-01	-2.71E-01	1.39E-01	5.41E-01	1.06E+00	6.75E-01	1.17E+00	-1.12E+00	-2.47E-01
12	56.09.03	7.50E-01	-4.10E-02	3.83E-01	-2.03E-01	3.02E-02	2.77E+00	8.99E+00	7.00E+00	-1.22E+00	-2.12E+00	-4.01E+00
13	56.10.08	8.16E-01	2.31E-01	-4.29E-02	-8.30E-02	2.95E-02	2.07E-01	3.50E+00	1.95E+00	1.09E+00	-3.14E+00	-4.51E-01
14	56.10.22	1.17E+00	-4.14E-02	-4.63E-02	-2.32E-01	1.18E-01	1.54E+00	5.87E-01	1.71E+00	-1.18E+00	-1.66E+00	5.76E-01
15	57.11.02	1.05E+00	-1.53E-01	-3.20E-02	2.50E-01	-1.80E-01	2.36E+00	-1.29E+00	2.42E+00	-2.87E-01	3.70E-01	-6.08E-01
16	57.05.06	1.09E+00	-4.35E-01	3.35E-01	-7.14E-02	1.67E-02	1.16E+00	1.33E+00	3.36E+00	-3.46E+00	2.37E+00	1.44E+00
17	57.05.14	1.15E+00	-5.40E-02	-1.06E-02	-7.43E-01	5.67E-01	-4.20E-01	4.46E+00	4.52E+00	-3.89E+00	-1.03E-01	1.64E+00
18	57.08.26	5.80E-01	3.65E-01	1.19E-01	-1.31E-01	3.92E-02	4.22E+00	4.18E+00	5.27E+00	-5.76E+00	-4.36E+00	-1.22E+00
19	57.09.24	1.47E+00	-8.57E-01	3.97E-01	-5.96E-02	1.49E-02	4.76E-01	2.89E+00	7.28E-01	-5.60E-01	8.81E-01	-9.91E-01
20	58.04.15	9.54E-01	4.15E-01	-3.32E-01	-1.17E-01	4.39E-02	1.88E+00	2.09E+00	1.61E-01	8.21E-01	-2.15E+00	2.53E-01
21	58.05.06	5.89E-01	1.39E-01	1.50E-01	-1.41E-01	1.81E-01	1.93E+00	4.25E+00	4.49E+00	1.74E+00	-2.88E+00	-5.35E-01
22	58.05.15	9.41E-01	2.39E-01	-4.56E-01	9.70E-02	1.18E-01	2.49E+00	2.57E+00	1.57E+00	-5.04E-02	-4.07E-01	-1.21E+00
23	58.08.20	5.94E-01	3.83E-01	-5.94E-02	-6.99E-02	7.39E-02	1.84E+00	3.84E+00	7.57E+00	2.99E-01	-3.26E+00	-3.60E+00
24	58.07.20	9.49E-01	-1.73E-01	-3.53E-02	6.66E-02	1.10E-01	3.61E-01	1.06E+00	2.36E-01	1.19E+00	1.64E+00	-3.54E-01
25	58.09.26	1.09E+00	-4.93E-01	3.82E-01	-1.68E-01	6.53E-02	8.21E-02	-1.73E+00	-4.62E-01	2.08E+00	9.99E+00	-2.78E+00
26	58.10.08	8.89E-01	1.77E-01	-2.82E-01	1.35E-01	1.66E-02	6.48E-01	8.88E-01	1.64E+00	-1.10E+00	1.59E+00	-1.47E+00

4・2 出水伝達関数のグループ分け

降雨26例に対して得られた河川出水伝達関数とそのインパルス応答波形の類似性から数個のグループに分類することを試みた。すなわち、クラスタ分析法⁽⁷⁾により、求めた26本のインパルス応答曲線相互の相関係数の値が1.0に近いもの、言い換えれば、曲線形状の似かよったグループに伝達関数を分けた。グループ数を2個とした場合の結果を表3に示す。クラスタグループ①には8例の降雨が、クラスタグループ②には18例の降雨が属している。クラスタ分析では、グループ数を任意に与えることができる。しかし、グループの個数を3以上にすると、各グループの自然現象に対する大局的特徴を明確に知ることが難しく、次章で述べるような降雨を特徴付ける特性との依存性の有無についても判断が困難であった。本報告では、そのような降雨特性との関連をとりながら、結局、分類個数を2個とした場合のクラスタ分類結果について検討を行う。

表3 出水伝達関数のクラスタ分類結果

分類 個数	クラスタ グループ	降雨のケース番号
2 個	①	1, 7, 8, 12, 17, 18, 22, 23
	②	2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 13 14, 15, 16, 19, 20, 21, 24, 25, 26

5. 出水伝達関数の降雨パターン依存性に関する
検討

5・1 伝達関数の降雨パターン依存性

出水機構は雨の降り方や土地の湿潤状況によって異なっており、その伝達関数もそれに依って変化しているものと考えられる。しかしながら、土地の湿潤状況については筆者らが先に提案した手法⁽⁴⁾により、有効雨量を求める段階ですでに考慮に入れている。前章で求めた伝達関数には、有効雨量を入力としているので、流域の湿潤状況などの影響は排除

されていることになる。そこで、ここでは出水伝達関数と雨の降り方との関係を調べることにした。そのために、降雨継続時間、総降雨量、有効雨量の総量、降雨強度(総降雨量/降雨継続時間)および有効雨量強度(有効雨量の総量/降雨継続時間)という5種類の数値に着目した。これらの各数値に対して、クラスタグループ毎にそれぞれ属する降雨の累積度数分布を求めた。その結果を図3～図7に示す。なお、累積度数は次式で計算している。

$$\text{累積度数} = \frac{\text{グループに属する降雨のうち横軸の値以上の降雨の数}}{\text{グループに属する全降雨数}} \times 100 \% \dots (5)$$

これらの図のうち、二つの曲線が明瞭に離れているのは図3のみである。この図において、二つの累積度数分布曲線間は降雨継続時間35時間の位置に

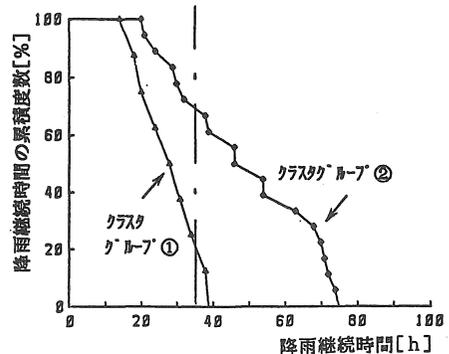


図3 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する降雨継続時間の累積度数分布

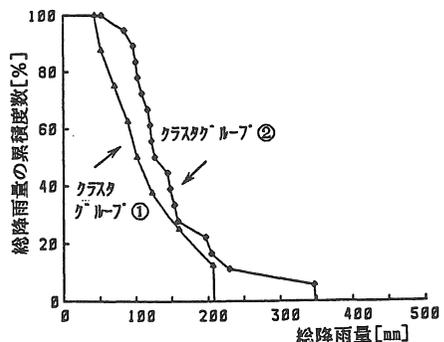


図4 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する総降雨量の累積度数分布

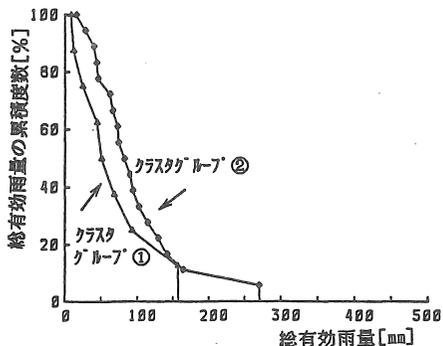


図5 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する総有効雨量の累積度数分布

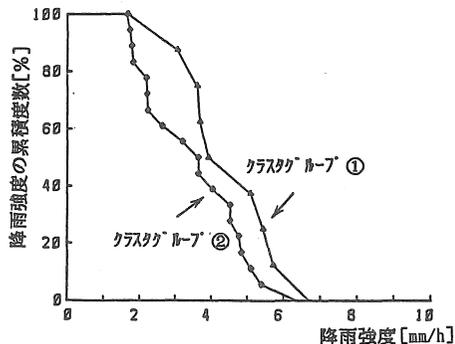


図6 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する降雨強度の累積度数分布

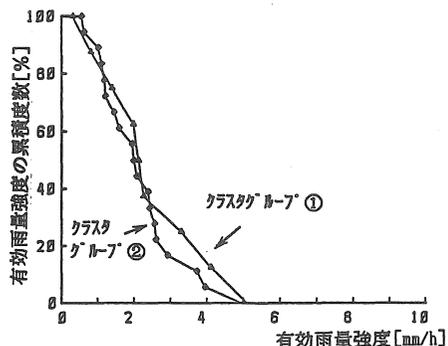


図7 出水伝達関数のクラスタ分類結果に対する有効雨量強度の累積度数分布

において最も大きく離れている。そこで、同図の降雨継続時間35時間（同図一点鎖線）に着目すれば、それ以上の継続時間の降雨はクラスタグループ①には20%程度しか属していないが、グループ②には70%程度属している。すなわち、クラスタグルー

プ①は35時間未満の比較的短時間の降雨に対する伝達関数であり、グループ②は35時間以上の長時間降り続く降雨に対する伝達関数であると言える。

他方、図4～図7においては、クラスタグループ①および②はともに似かよった累積度数分布を示している。すなわち、これらの図で横軸にとりあげた諸量値によっては、グループ①および②を特徴付けることはできない。

以上の検討から、畑一ダム上流域における出水伝達関数は主として降雨継続時間の長短によって分類できるといえる。したがって、降雨を35時間を境として、

短時間降雨パターン：35時間未満の比較的短時間で終る降雨

長時間降雨パターン：35時間以上の比較的長時間続く降雨

の長短二つに分類し、それに応じた出水伝達関数を用いることにより、精度の高い河川出水予測のシミュレーションを行うことができると考えられる。

5・2 降雨継続時間に対応した出水伝達関数

前章のような継続時間による降雨の分類と表3のクラスタ分類との対応を表4に示す。同表をクラスタ分類から見ると、クラスタグループ①には全体で8例の降雨が属し、そのうち短時間降雨パターンに対応するものが7例と多い。また、クラスタグループ②には全体で18例が属し、そのうち長時間降雨パターンに対応するものが12例と多い。

他方、同表をマトリックスと見なせば、対角要素については上述のように短時間降雨パターンにはクラスタグループ①の伝達関数を対応させ、長時間降

表4 出水伝達関数のクラスタ分類と降雨パターン分類との対応

クラスタグループ	降雨パターンに対応する降雨数	
	短時間降雨パターン (35時間未満の降雨)	長時間降雨パターン (35時間以上の降雨)
①	7例	1例
②	6例	12例

雨パターンにはクラスタグループ②を対応させればよいことになる。問題は非対角要素のうち左下の6例の処理である。しかし、予測という立場に立つと、降雨パターンから伝達関数を選択できる方が望ましいので、第1列に属する全13例の平均伝達関数を求めて短時間降雨パターンに対応した伝達関数とし、これを短時間降雨伝達関数ということにする。次に、第2行第2列にあるクラスタグループ②の12例の平均伝達関数を求めて長時間降雨パターンに対応した伝達関数とし、これを長時間降雨伝達関数ということにする。降雨継続時間に対応して得られた出水伝達関数のパラメータ推定結果を表5に示す。伝達関数の形であらわに示したものが式(6)および式(7)で、本報告ではこのような伝達関数を用いることにして、以下の検討を進めた。

短時間降雨伝達関数：

$$G(z) = \frac{2.17 + 2.90z^{-1} + 2.56z^{-2} - 0.136z^{-3} - 1.31z^{-4} - 0.919z^{-5}}{1 + 0.990z^{-1} - 0.0329z^{-2} - 0.0153z^{-3} - 0.132z^{-4} + 0.130z^{-5}} \dots\dots\dots (6)$$

長時間降雨伝達関数：

$$G(z) = \frac{0.878 + 0.863z^{-1} + 1.31z^{-2} + 0.364z^{-3} + 1.04z^{-4} - 1.00z^{-5}}{1 + 1.02z^{-1} - 0.0514z^{-2} + 0.00126z^{-3} - 0.0719z^{-4} + 0.0469z^{-5}} \dots\dots\dots (7)$$

6. 分類された伝達関数の有効性の検証

前章で伝達関数の推定に用いなかった別の降雨14例について、表6に示すようにその継続時間が35時間未満のものと以上のものとに分類し、前者には短時間降雨伝達関数を、後者には長時間降雨伝達関数を適用して出水シミュレーションを行った。その結果の二例を図8および図9に示す。前者は短時間降雨パターンの例で、降雨番号29、後者は長時間降雨パターンの例で、降雨番号34のものである。両者は比較的良好なシミュレーション結果が得られている。

このような降雨パターンに対応する伝達関数を用いてシミュレーションを行うことが有効な方法であ

表5 降雨継続時間に対応した出水伝達関数のパラメータ推定値

伝達関数のパラメータ	短時間伝達関数	長時間伝達関数
a_1	9.90E-01	1.02E+00
a_2	-3.29E-02	-5.14E-02
a_3	-1.53E-02	1.26E-03
a_4	-1.32E-01	-7.19E-02
a_5	1.30E-01	4.69E-02
b_0	2.17E+00	8.78E-01
b_1	2.90E+00	8.63E-01
b_2	2.56E+00	1.31E+00
b_3	-1.36E-01	3.64E-01
b_4	-1.31E+00	1.04E+00
b_5	-9.19E-01	-1.00E+00

ることを次のようにして検証した。すなわち、上述の14例の降雨について、故意に、降雨パターンに対応しない伝達関数（すなわち、継続時間が35時間未満の降雨に対して長時間降雨伝達関数、35時間以上の降雨に対して短時間降雨伝達関数を適用）および26例全体の平均伝達関数をも用いて出水シミュレーションを行い、上述の結果と比較した。具体的には、シミュレーション誤差 ϵ_q を式(8)を用いて求め、その値がここで述べるような降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合に最小になっているかを検討した。

$$\epsilon_q = \frac{\int_{t_0}^{t_2} |q_{fore}(t) - q_{real}(t)| dt}{\int_{t_0}^{t_2} q_{real}(t) dt} \times 100[\%] \dots\dots (8)$$

ここで、 $q_{fore}(t)$ および $q_{real}(t)$ は各時刻におけるダムでの流量のシミュレーション値および観測値、 t_0 は降雨開始時刻[時]、 t_2 は降雨が止んだ後の

表6 出水シミュレーションに用いた降雨

降雨番号	降雨開始年月日	降雨時間 [h]	降雨パターン
27	55.07.07	34	短時間降雨
28	55.07.14	11	
29	55.08.26	30	
30	57.11.22	13	
31	57.11.29	13	
32	58.04.22	13	
33	58.07.05	16	
34	55.06.07	59	長時間降雨
35	56.08.21	39	
36	57.05.31	77	
37	57.09.10	68	
38	57.09.19	38	
39	57.11.09	46	
40	58.08.14	93	

$q_{real}(t)$ がそのピーク値の1/2の値になる時刻である。

短時間伝達関数, 長時間伝達関数および平均伝達関数のシミュレーション誤差の算定を表7に示す。同表のアンダーラインを付したものは降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合である。短時間降雨の場合には, 本伝達関数を用いた誤差の平均値は17%で, これは全平均伝達関数を用いた場合の誤差18%とほとんど変わらなかった。ところが, 長時間降雨については, 長時間降雨伝達関数を用いたときの平均誤差は25%で, これは全平均伝達関数を用いた場合の誤差35%よりかなり改善されている。結局, この手法は長時間降雨に対してかなり効果が現れている。

また, 同表で*印を付したものは3種類の伝達関数を用いた場合のうちで, 誤差が最小のものである。アンダーラインと*印が重なっているものは14例中10例(71%)である。すなわち, それらは降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合に, シミュレーション誤差が最小となっているものである(備考欄にOKと記した)。残りの4例のうち番号32の降雨はいずれの伝達関数を用いても誤差は小さく, 似かよった値を示している。

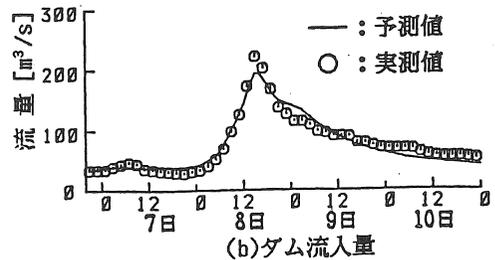
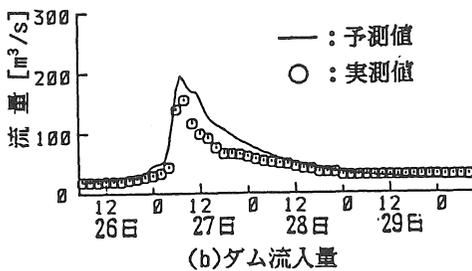
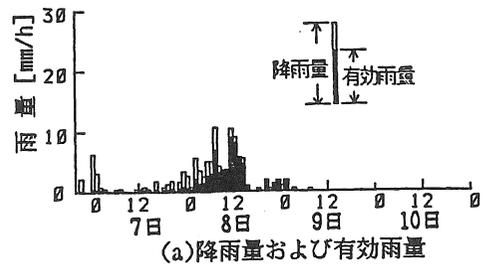
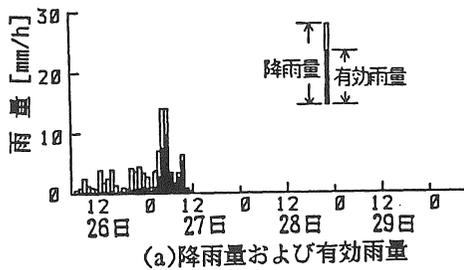


図8 短時間降雨による流量予測例 (降雨番号29, 昭和55年8月26日)

図9 長時間降雨による流量予測例 (降雨番号34, 昭和55年6月7日)

表7 畑雑第一ダム上流域における出水シミュレーション手法の妥当性

降雨番号	降雨開始年月日	降雨パターン	流量減衰が η - θ 値の1/2になるまでの流入量予測誤差の累積値 [%]			備考		
			短時間降雨伝達関数	長時間降雨伝達関数	全平均伝達関数			
27	55.07.07	短時間降雨	<u>16</u> *	28	19	OK		
28	55.07.14		<u>14</u> *	19	14	OK		
29	55.08.26		<u>38</u>	17*	28	×		
30	57.11.22		<u>8</u> *	27	13	OK		
31	57.11.29		<u>20</u> *	33	25	OK		
32	58.04.22		<u>8</u>	10	7	大差なし		
33	58.07.05		<u>17</u> *	30	21	OK		
			平均	1.7	平均	2.3	平均	1.8
34	55.06.07		長時間降雨	31	<u>10</u> *	20	OK	
35	56.08.21			59	<u>22</u> *	39	OK	
36	57.05.31	117		<u>50</u> *	93	OK		
37	57.09.10	30		<u>15</u> *	17	OK		
38	57.09.19	52		<u>23</u> *	41	OK		
39	57.11.09	14*		<u>33</u>	20	×		
40	58.08.14	22		<u>23</u>	16	×		
		平均		4.6	平均	2.5	平均	3.5

- 注1) 「短時間降雨伝達関数」は短時間降雨パターンに対する全伝達関数の平均
- 注2) 「長時間降雨伝達関数」はクラスタグループ②のうち長時間降雨パターンに対する全伝達関数の平均
- 注3) 「全平均伝達関数」は推定に用いた全降雨に対する伝達関数の平均
- 注4) アンダーラインを付したものは降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合の誤差
- 注5) *印を付したものは3種類の伝達関数を用いた場合のうちで誤差最小のもの

表7の備考欄に×印を記した3例については、アンダーラインを付した誤差は比較的大きな値を示している。これらの降雨に対するシミュレーション結果を視覚により比較すれば、図8（表7の降雨番号29）の例でもわかるように、降雨パターンに応じた伝達関数を用いることにより、比較的良好な流入量予測ができたと言える。

また、降雨パターンに対応した伝達関数を用いた場合、そのシミュレーション誤差が2.5%以下のものは14例中11例(78%)である。提案手法では流域の形状を考慮することなく伝達関数を推定しているが、畑一ダムにおける出水シミュレーション結果は比較的良好である。

他方、中安氏の単位図法⁽⁸⁾に基づいた筆者らのこ

れまでの出水シミュレーション結果⁽⁹⁾では、その誤差が2.5%以下のものは、全体の半分程度であった。そこでは、流域の形状を参考にして、単位降雨に対する流出曲線、いわゆるユニットハイドログラフを推定していたので、その流域形状の把握の不確かさがシミュレーション結果に影響しているものと思われる。

7. あとがき

河川出水機構を有効雨量とダムへの流入量とをを入力とみなした場合の伝達関数について、具体的に、大井川水系畑雑第一ダム上流域の降雨26例を対象として検討した。5次の伝達関数を設定し、それに含まれる11個の係数をパラメータとして、それらが各降雨毎にどの程度異なっているのかを調べた。個々の降雨に対して各パラメータ値のバラツキが大きく、符号までも異なるものがある。すなわち、畑一ダム上流域における河川出水機構を単一の伝達関数でモデル化することは困難であると言える。このような事実は過去にも指摘されていることである⁽²⁾。そこで、畑一ダム上流域において、降雨毎に推定した出水伝達関数に関して、以下のような検討を行った。

- (1) 降雨毎に、出水伝達関数を求めることができる。そうして求めた各伝達関数のインパルス応答について、その波形の類似性を調べることにより、大まかに2個のグループに分類した。
- (2) このように分類した伝達関数と降雨状況を表す下記のような定量的な指標との関係を調べた。すなわち、降雨継続時間、総降雨量、有効雨量の総量、降雨強度(総降雨量/降雨継続時間)、および有効雨量強度(有効雨量の総量/降雨継続時間)の5種類をとりあげた。このうち、降雨継続時間の長短が前述のグループ分けに比較的良好に対応していることが明らかになった。すなわち、出水伝達関数は降雨継続時間依存性を有しており、それは降雨が短期間で終るか、長く続くかに関係している。
- (3) そこで、降雨をその継続時間に基づいて「35

時間未満の比較的短時間で終る降雨」および「35時間以上長期間続く降雨」との二つのパターンに分類し、各降雨パターンに対応する出水伝達関数を推定した。

- (4) 降雨パターンに対応する出水伝達関数を用いて、河川出水予測のためのシミュレーションを行った。ここで対象とした短時間降雨、長時間降雨各7例について、平均の誤差はそれぞれ17%および25%であった。単純な平均伝達関数による予測平均誤差と比較すると、短時間降雨では大差なかったが、長時間降雨については誤差は約2/3となった。

気象衛星やAMeDASのデータを活用することにより、到来する降雨が短時間で終るか、長く続くかのいずれかを予測することは容易に行えることについて、筆者らが先に報告している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。これと本手法とを組み合わせることにより、発電用ダムへの流入量予測の早期化および精度の向上が期待できる。

なお、本手法を適用するにあたり必要なデータは、過去の降雨・流量の実測データおよび地図から得たものであり、なんら特別な情報を必要としない。このことから、本報告で提案した手順は他の河川へも容易に適用できるものである。ただし、伝達関数のグループ分けと降雨パターンとの対応は、大井川上流域で得られた関係と常に同じであるとは限らない。

終わりに、本研究の実施に際して、有益なご助言を賜りました名古屋大学工学部電気工学教室鬼頭幸生教授、並びに同、松村年郎助教授に対し、心よりお礼申し上げます。さらに、本研究に利用した降雨・流量データは中部電力(株)から提供して頂いたこと、それらのデータ処理を愛知工業大学計算センターで行ったことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 一柳, 小林, 竹内, 松村, 鬼頭:「基底流量を考慮した発電用ダム上流域における流出率の推定」, 電気学会論文誌, 105-B [8], 691~697(1985)
- (2) 和歌森, 松本, 大成:「河川出水予測モデル」, 計測と制御 19 [7], 113(1980)
- (3) 電力系統の受給制御技術調査専門委員会:「電力系統の受給制御技術」電気学会技術報告(Ⅱ部)第302号(1989)
- (4) 豊田, 深尾:「コンピューターサイエンスシリーズ・電力系統へのコンピューターの応用」, (1972) 産業図書
- (5) 成松, 小林:「水力発電所の集中制御と水系一貫運用計画の考え方」, 電気雑誌OHM, 56 [5], 17~22(1969)
- (6) 成田:「デジタルシステム制御・理論と応用」, 153(1980) 昭晃堂
- (7) 富士通:「FACOM OS IV CLUSTER 解説書」
- (8) 稲田, 細井, 橋本:「河川」, 56(1982) 彰国社
- (9) 竹内, 松村, 鬼頭:「発電用ダム上流域の河川出水機構の電気回路モデル」, 昭和59年電気学会全国大会, No.895(1984)
- (10) 一柳, 松村, 鬼頭, 山田, 鈴木:「気象衛星データを活用した発電用ダム上流域における降雨予測手法の提案」, 電気学会論文誌, 104-B [7], 441~448(1984)
- (11) 一柳, 小林, 篠田, 松村, 鬼頭:「AMeDAS観測値を活用した発電用ダム上流域における降雨量の時間変動予測手法」, 電気学会論文誌, 106-B [9], 809~816(1986)

(受理 平成4年3月20日)