

発電用ダム流入量の時間変化予測に用いる入力情報の検討

Examination of Input Information to Forecast Time Variation of Flow Rate into Dam for Hydro Power Plant

一柳 勝宏[†], 高塚 信行[†], 水野 勝教^{††}, 雪田 和人[†], 後藤 泰之[†], 松村 年郎^{†††}
Katsuhiro ICHIYANAGI, Nobuyuki TAKATSUKA, Katsunori MIZUNO, Kazuto YUKITA, Yasuyuki GOTO,
Toshiro MATSUMURA

Abstract We examined the number and the combination at the ground rain gauge used to forecast the amount of the flow rate into the dam for the hydro power plant. A neural network system for this purpose is developed through a case study on a dam for hydro power plant located the upper district of the Yahagi River in Central Japan. We forecast when the rain gauge in three points, five points, and seven points was used within the rain gauge in seven places set up in the basin, and compared the results.

1. まえがき

近年、地球温暖化や酸性雨をはじめとする環境問題が顕著になってきていることから、自然エネルギーへの関心が高まっている。自然エネルギーには太陽光、風力など様々な種類が存在するが、中でも水力はエネルギー密度が高く量が豊富であるといった利点から電気エネルギー用資源として最も有用であるといえる。さらにダムを伴った水力発電設備は大容量のエネルギーを高密度で蓄えることができる上、出力の調整が容易なことから、ピーク電源として系統運用上重要な役割を担っている。しかし、現在の日本において多くの水力資源は開発され尽くしており、新規のダム開発は環境に与える負荷などを考慮すると決して容易ではない。従って、現在使用できる設備において水力エネルギーを有効利用することが望ましい。そのためにはダムへの流入量および系統負荷の変動を精度良く予測する必要がある。特に水力発電の場合、利用できるエネルギーは自然現象である降雨によって大きく左右されるため、降雨による河川流出量の予測は、ダムの計画的な運用には必要不可欠である。

河川流出量の予測手法に関してはタンクモデル法、単位図法、貯留関数法などの数式モデルが一般的に知られており、実際の給電運用で用いられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。しかし、これらの手法は対象河川が異なったり、経年変化による流域の形状変化や植生変化があったりした場合、パラメータ選定など改めて構築し直す必要がある。また、新たにデータが追加され、予測システムとしてのパラメータを更新する際にも、統計処理などの面倒な計算や手入力操作が必要に

なる。さらに予測手法によっては決定すべきパラメータ数が多かったり、流出量の少ない場合の予測精度に問題があったりと運用する上で取り扱いが困難なものが多い。

筆者らは多くの数式モデルを用いた予測手法で問題となるパラメータの決定をデータの学習によって自動的に決定することができるニューラルネットワークに着目し、流出率予測を行っている⁽⁴⁾。本論文では流出率を介さず、直接流出量を出力することでシステムの簡易化を図った。さらに、入力には地上雨量計観測値および基底流量を割り当てた。

流出量の変化に最も影響を及ぼす要素は降雨量であるが、これ以外にも土地の湿潤状況によって流出量や流出に要する時間は変化する。この湿潤状況を表す指標として基底流量をとると統計的優位性が高く、平均降雨強度とも相関性が高いことが確認されている⁽⁵⁾。

一方、地上雨量計に関しては治水管理の上で最も重要なデータであることから、省庁をはじめ各自治体においても積極的な設置が進められている。そのため、一つの流域内に複数の地上雨量計が設置されている場合も多い。これにより、観測地点の増加が流出量の予測精度向上につながると期待できる。実際の流出量予測では、流域が広大な場合であると流域内に降雨分布の違いが生じる。このとき、地上雨量計の設置地点数が少ないと降雨分布の違いを捉えることができず予測精度の低下につながる。そのため、気象レーダを併用し、流域内の降雨分布を相対的に捉える方法も報告されているが⁽⁶⁾、流域内に雨量計を多数設置し、その設置地点数や設置場所を適切にすれば流出予測においても高い精度が期待できると考えられる。本論文ではニューラルネットワークを用いた流出量予測システムにおいて、入力とする地上雨量計の数と組み合わせが予測結果に与える影響について調べた結果、地上雨量計のみでも良好な予測ができたので報告する。

[†] 愛知工業大学工学部電気学科 (豊田市)
^{††} 愛知工業大学経営情報科学部情報科学科 (豊田市)
^{†††} 名古屋大学大学院工学研究科 (名古屋市)

2. 対象流域

本流出量予測の対象として取り上げた矢作ダムは中部地区主要河川の一つである矢作川の上流域に位置する(図 1 参照)。この矢作ダム上流域は愛知県北東部に位置し、東に高く、西に低い谷を形成しており、流域面積は 512km² である。同流域には槍ヶ入、平谷、上矢作、根羽、矢作ダム、名倉、産馬川(以下 A~G で表す)の計 7 地点にテレメータ式の無人地上雨量計が設置されており、1 時間ごとの地上雨量を常時観測している。

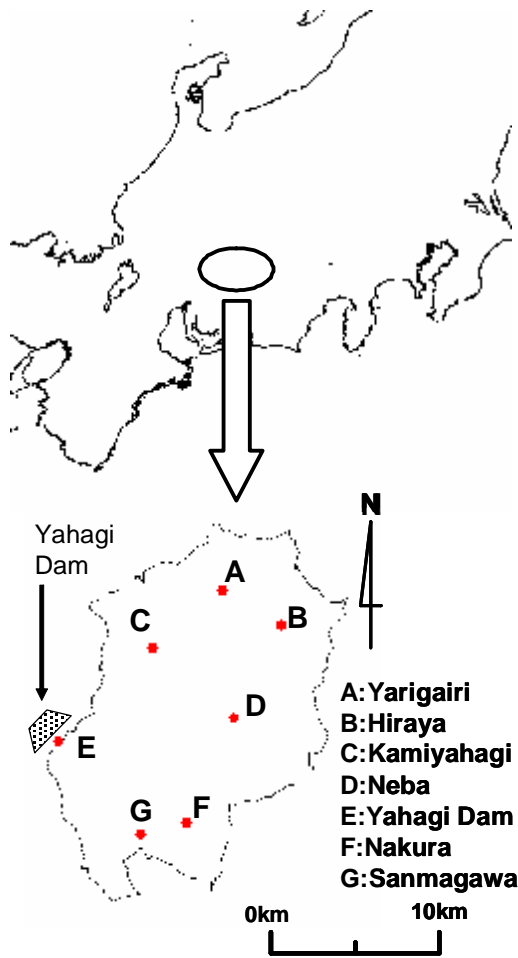


図 1 矢作ダム上流域

Fig. 1. Upper district of Yahagi Dam.

3. 予測システム

流出量の時間変化を予測するに当たり、予測対象とする流出量は予測時点から 6 時間後の流出量を予測することとした。これはピーク電源として使用されることが多いダム式水力の運転計画を考える場合、系統負荷がピークを迎え

る昼頃の流出量を朝の段階で予測する必要があると考えたためである。

予測システムとしては図 2 に示すような入力層、中間層、出力層の 3 層からなる単純階層型ニューラルネットワークを使用している。本システムでは流出量の時間変化予測を行うため、入力には 7 時間前までの時系列データを用いている。入力として使用する地上降雨量は各地上雨量計の観測値に基づいてティーセン法によりダム上流域の平均降雨量を算定したものをを用いている⁽⁷⁾。入力層には地上雨量として 8 ユニットが割り当てられており、7 時間前までの地上降雨量が入力されている。具体的には、予測する時刻を t とするとそれぞれのユニットには地上降雨量 $G(t - m\Delta t)$ ($m=0, 1, \dots, 7, \Delta t=1$ 時間) の値が入力される。また、流出量としては時刻 t を除く流出量 $q(t - n\Delta t)$ ($n=1, 2, \dots, 7$) として 7 ユニットが割り当てられており、基底流量としては降雨開始前 ($t \leq 0$) の河川流量が入力されている。出力層は 1 ユニットで時刻 t における流出量をこれにあてている。これを時刻 t における予測値に対応させている。

本システムでは流出量の 6 時間先を予測するために入力として使用されている 5 時間前までの流出量 $q(t - n\Delta t)$ ($n=1, 2, \dots, 5$) には予測システムによって出力された出力値を与え、6 時間前および 7 時間前の流出量 $q(t - n\Delta t)$ ($n=6, 7$) については流出量の実績値を与えた。なお、ニューロンの入出力関数は全てシグモイド関数としている。

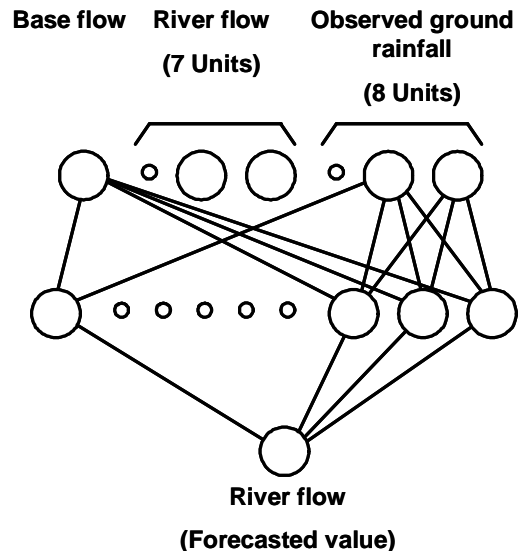


図 2 予測システム

Fig.2. Forecasting system.

表2 各設置地点数における予測誤差（雨量計を均等配置した場合）

Table 2. Forecast error in various place point.

No	Date of rain start	Total amount of rainfall [mm]	Base flow [m ³ /s]	Forecast error [%]					
				3points		5points		7points	
				ϵ_{total}	ϵ_{abs}	ϵ_{total}	ϵ_{abs}	ϵ_{total}	ϵ_{abs}
11	2004.05.19	90.7	90.0	37.6	38.3	15.9	20.8	13.6	17.2
12	2004.07.10	41.0	41.5	10.9	25.4	17.9	28.9	11.9	25.3
13	2004.08.10	23.4	30.5	19.4	33.3	22.5	34.4	20.2	33.1
14	2004.09.29	78.3	44.0	4.4	17.4	8.8	14.7	10.7	18.3
15	2005.03.11	27.9	25.2	1.1	14.6	1.3	14.3	0.4	14.4
16	2005.03.17	34.6	26.7	3.1	14.7	5.6	15.7	7.7	15.8
Average absolute error				12.8	24.0	12.0	21.5	10.8	20.7

4. 河川流出量予測

4.1 ニューラルネットワークの学習

矢作川水系矢作ダム上流域を対象として河川流出量の予測を試みた。予測の対象とした降雨は2003年～2005年の期間に同流域に降った降雨のうち、特に水力発電を行う上で有効と思われる降雨16例を取り上げた（表1参照）。この16例のうち前半の10例を用いてニューラルネットワークの学習を行い、学習に用いなかった後半の6例で流出量の予測を行った。入力データは7時間前までの地上雨量計観測値、基底流量および5時間前までの予測流出量と6、7時間前の実測流出量である。なお、地上雨量計設置地点数比較のための検証は地上雨量計が3地点、5地点、7地点の場合についてそれぞれ行った。

表1 検証データ

Table 1. Rainfall for forecast.

	No	Date of rain start	Total amount of rainfall [mm]	Base flow [m ³ /s]
used for the training of system	1	2003.10.13	97.7	38.8
	2	2003.11.03	48.0	38.0
	3	2003.11.19	39.4	43.3
	4	2003.11.25	37.6	36.3
	5	2003.11.29	67.1	49.3
	6	2004.02.29	24.3	24.1
	7	2004.03.18	21.7	28.3
	8	2004.03.30	50.7	32.9
	9	2004.04.19	35.1	26.9
	10	2004.05.04	55.4	40.7
used for evaluation of	11	2004.05.19	90.7	90.0
	12	2004.07.10	41.0	41.5
	13	2004.08.10	23.4	30.5
	14	2004.09.29	78.3	44.0
	15	2005.03.11	27.9	25.2
	16	2005.03.17	34.6	26.7

4.2 流出量予測

予測に用いる地上雨量計は流域にできるだけ均等に配置されるように考慮し以下の組み合わせを選択した。

・3地点

地点C, B, Fに設置されている地上雨量計

・5地点

地点B, C, D, F, Gに設置されている地上雨量計

・7地点

流域内に設置されている7地点全ての地上雨量計表1に示した降雨について前半10例で学習を行い、学習が終了したニューラルネットワークを用いて後半6例について予測を行った。入力データは1時間ごとに用意されているため、それに伴い流出量の予測も1時間ごとに行われる。これを1つの降雨につき100回行うことにするため、降雨開始から100時間分の流出量が出力されることになる。また、各組み合わせにおける中間層のユニット数はtrial & error法により最適な結果となる数を選択した。具体的な中間ユニット数は、7地点の場合で10ユニット、5地点の場合で15ユニット、3地点の場合で15ユニットである。学習回数に関しては学習時の誤差が10⁻³以下となるまで繰り返した。これは、ニューラルネットワークの学習回数をこれ以上に増加させても、予測精度の向上につながらなかったことから、この時点でニューラルネットワークの学習を終了した。

雨量計設置点についてそれぞれの組み合わせで予測した後半6例の結果を表2に示す。また、時間変化予測の結果としてNo.11の降雨を例として図3に示す。表2において予測精度を定量的に比較ために誤差は ϵ_{total} と ϵ_{abs} の2種類を用いている。 ϵ_{total} は各降雨例ごとの累積流出量の予測誤差を見るために式(1)により評価した値で、総量予測誤差を表したものである。一方、 ϵ_{abs} は1時間ごとにおける流量瞬時値の予測誤差を見るために式(2)により評価した値で、瞬時予測誤差を表している。

$$e_{total} = \frac{\sum_{t=1}^{100} q_{fore}(t) - \sum_{t=1}^{100} q_{real}(t)}{\sum_{t=1}^{100} q_{real}(t)} \times 100[\%] \dots (1)$$

$$e_{abs} = \frac{\sum_{t=1}^{100} |q_{fore}(t) - q_{real}(t)|}{\sum_{t=1}^{100} q_{real}(t)} \times 100[\%] \dots (2)$$

q_{fore} : 予測値, q_{real} : 実測値

同表の最下段に示すように, 総量予測から見た誤差 ϵ_{total} についてみれば, 誤差の平均は 10~13%程度に収まっている。これらの結果から雨量計設置点数について, いずれの場合も比較的良好な結果と言える。

瞬時値誤差 ϵ_{abs} に関しては, 雨量計設置点数 3~7 について誤差の平均値は 20~24%程度で予測できており, 設置点数が多いほど誤差は小さい。 ϵ_{abs} について個々の値を比べてみると, 5 地点および 7 地点の場合, 誤差 30%以上の降雨が 6 例中 1 例 (No.13) ある。誤差が 30%以上ある No.13 の総降雨量は 23.4mm と他の降雨ケースに比べて少なく, 予測が難しい降雨と言える。他方, 3 地点の場合には ϵ_{abs} が 30%以上の降雨は 6 例中 2 例 (No.11, No.13) となっている。2 例の降雨のうち No.13 は降雨量が少ないものの, No.11 は比較的に量がまとまった降雨である。この No.11 について雨量計 5 地点~7 地点の場合は誤差が少ないものの 3 地点では誤差が多くなっている。以上のことから対象流域 (5 12 km²) では雨量計を 5 地点以上に設置することにより, 比較的予測誤差が少なくできると言える。

次に設置数を 5 地点および 3 地点としたとき, 設置地点の違いによる予測精度への影響を調べた。予測にはこれまでと同様の予測システムを用いる。ただし, 使用する地上雨量計の位置は流域内を均等に配置しない例として以下のものを選んだ。

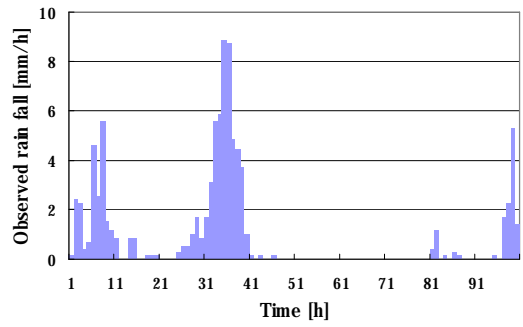
・ 3 地点

流域中央部に集中している地点 A, D, G に設置されている地上雨量計。

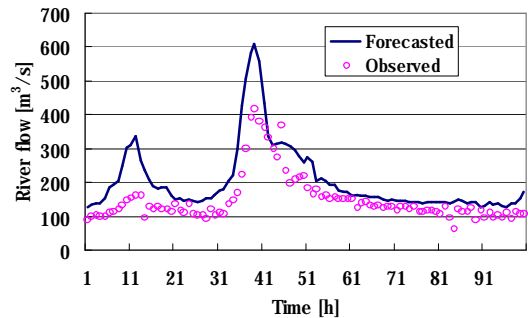
・ 5 地点

流域中央部に集中している地点 A, C, D, F, G に設置されている地上雨量計。

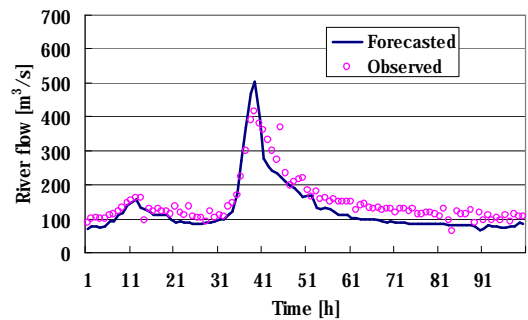
中間層のユニット数と学習時における学習回数に関してもこれまでと同様に, trial & error 法により最適な結果となるような値とした。予測の結果としてそれぞれの予測流量の誤差を表 3 に示す。また, 時間変化予測の結果として図 4 に No.11 における流出量予測結果と実測値を示す。予測結果より 5 地点の場合では, 地上雨量計を流域中央に集中させたとはいえ, 設置地点数が多かったこともあり, 流域全体に均等に配置した場合と比較しても, 予測誤差に大



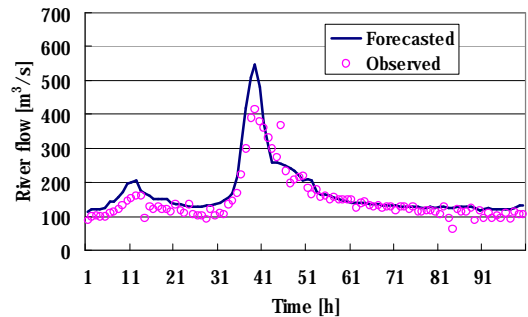
(a) 流域平均雨量



(b) 地上雨量計 3 地点を用いたときの流出量予測結果



(c) 地上雨量計 5 地点を用いたときの流出量予測結果



(d) 地上雨量計 7 地点を用いたときの流出量予測結果

図 3 流域平均雨量と予測流量の時間変化
Fig. 3. Forecast result of time variation of river flow.

表3 各設置地点数における予測誤差
(雨量計を中央に集中配置した場合)

Table 3. Forecast error at biased installation point.

(a) 地上雨量計3地点を用いたとき

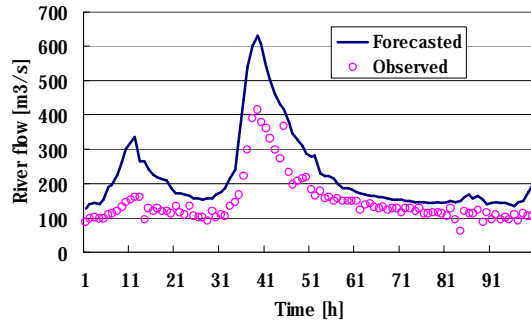
No	Date of rain start	Forecast error [%]	
		ϵ_{total}	ϵ_{abs}
11	2004.05.19	50.4	50.4
12	2004.07.10	5.0	24.7
13	2004.08.10	36.5	44.4
14	2004.09.29	16.5	19.3
15	2005.03.11	1.3	16.1
16	2005.03.17	5.4	15.1
Average absolute error		19.2	28.3

(b) 地上雨量計5地点を用いたとき

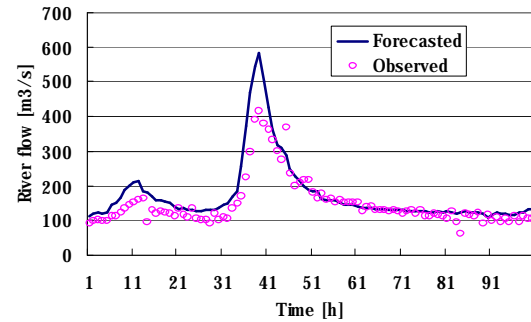
No	Date of rain start	Forecast error [%]	
		ϵ_{total}	ϵ_{abs}
11	2004.05.19	16.6	19.4
12	2004.07.10	14.9	25.9
13	2004.08.10	18.8	34.5
14	2004.09.29	13.5	17.5
15	2005.03.11	0.6	14.9
16	2005.03.17	8.7	17.4
Average absolute error		12.2	21.6

きな違いは見られなかった。一方、3地点の場合では予測精度に大きな誤差が生じた。特に No.11 の降雨に至っては50%を超える予測誤差が発生し、他の例と比較しても著しい予測精度の低下が見られた。

以上の予測結果より流域内に設置する雨量計の増設が河川流出量変化の予測精度向上につながる事が確認できた。ただし、雨量計の設置地点を流域内で均等に配置すれば、少ない雨量計数でも比較的良い流出量予測をすることができるといえる。地上雨量計は無人雨量計ならば、比較的設置は容易な設備であるが、地形や電源確保などの要因から設置が困難な場合も考えられる。そのような場合でも、設置地点の配置を適切に行えば少ない雨量計数でも比較的誤差の少ない流出量予測ができると考えられる。また、多くの無人雨量計で採用されているテレメータシステムによる地上雨量計は、無人であることに加え観測情報の伝送手段に無線を使用している場合が多い。そのため、機器自身によるトラブルや情報伝送途中での通信障害などによって、観測雨量値を受信できず記録上欠測となってしまう場合がある。このような場合においても、あらかじめ多めに設置しておいた地上雨量計を欠測した地上雨量計の代用として使用すれば予測精度を損なうことなく流出量予測を継続することができると考えられる。



(a) 地上雨量計3地点を用いたときの流出量予測結果



(b) 地上雨量計5地点を用いたときの流出量予測結果

図4 予測流量の時間変化
(雨量計を中央に集中配置した場合)

Fig. 4. Forecast result of time variation of river flow at biased installation point.

6. あとがき

地上降雨量と基底流量を用いたニューラルネットワークによる河川流出量の時間変化予測を行うにあたり、適切な地上雨量計の選択方法について検証を行った。具体的に流域面積が512km²の矢作ダム上流域を対象とし、雨量計が3地点、5地点、7地点の場合をとりあげ予測を行い、予測結果を比較検討した。その結果、対象流域では雨量計の設置地点数を5地点以上にし、雨量計を流域内に均等配置することにより比較的良好的な予測結果を得られることが判明した。

終わりに当たり、使用した地上雨量計観測データおよび河川流出量データは中部電力(株)から提供していただいたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1)岩佐義朗:最新土木工学シリーズ17・最新河川工学, 森北出版(1982)
- (2)稲田 祐・細井正延・橋本 清:わかりやすい土木講座16・河川, 彰国社(1982)

- (3)菅原正巳：水文学講座 7・流出解析法, 共立出版(1972)
- (4)K.Ichyanagi, Y.Goto, T.Matsumura, and Y.Kito :
“Estimation of Runoff Ratio of Rainfall on Upper District of a Hydro-Power Plant Dam by Using Artificial Neural Network” , T.IEE Japan, Vol.114-B, No9, pp945-946 (1994)(in Japanese)
一柳勝宏・後藤泰之・松村年郎・鬼頭幸夫：「ニューラルネットワークによる発電用ダム上流域の河川流出率推定」, 電学論 B. 114, 9, pp945-946 (1994)
- (5)M.Hino, and M.Hasebe : “Relation Between Runoff Ratio and Antecedent Discharge as An Index of the Humidity of a Basin” , Proc. of the Japan Society of Civil Engineers, Vol328, pp.41-48 (1982-12) (in Japanese)
日野幹雄・長谷部正彦：「流出率と湿潤指標としての洪水直前流量」, 土木学会論文報告集, 328, pp.41-46 (1982-12)
- (6)K.Ichyanagi, K.Mizuno, K.Nakajima, H.Yamada, K.Yukita, Y.Goto, T.Matsumura, and Y.Kawasima : “Estimation of Runoff Ratio on Upper District of Dam for Hydro Power Plant by Using Radar Echo Data” , T.IEE Japan, Vol.124-B, No.2, pp.229-236 (2004)(in Japanese)
一柳勝宏・水野勝教・中島幸一・山田浩・雪田和人・後藤泰之・松村年郎・川島靖弘：「レーダデータ活用による発電用ダム上流域における河川流出率推定」, 電学論 B. 124, 2, pp.229-236 (2004)
- (7)土木学会編：第 2 編 水文編, 昭和 6 0 年度版 水理公式集, pp.141-142, 土木学会 (1985)
(受理 平成19年3月19日)