

江川ダム上流域における流出特性の検討

河村 明*・神野 健二*・上田 年比古*

On the Characteristics of Rainfall-Runoff Process in the Drainage Area of Egawa Reservoir

Akira KAWAMURA, Kenji JINNO and Toshihiko UEDA

(Technology Reports of the Kyushu University Vol. 58, No. 5, October 1985)

Fukuoka City is prone to water shortage because of the deficient water resources. When Fukuoka City was in the midst of its most severe water shortage during the 1978-79 drought, the operation of the biggest multipurpose reservoir in the region, Egawa Dam, was a big problem. However, the city's water shortage problem could be alleviated (if not totally solved) by optimally operating the reservoir with precise estimates of the inflow. To realize an accurate inflow estimate, a better understanding of the characteristics of the rainfall-runoff process in the drainage area of Egawa Dam should be first desired.

In this study, the unit hydrographs describing the rainfall-runoff process are identified by Kalman filter from rainfall and runoff data with five years of record. A year of record is divided into 24 equal periods and one unit hydrograph is identified in each period. The seasonal unit hydrograph is taken as the average of the identified unit hydrographs in each season. The seasonal rainfall-runoff process is characterized by the seasonal unit hydrographs. The flows estimated by the seasonal unit hydrographs from rainfall informations are compared with the actual flow data.

1. はじめに

福岡市は近郊に大河川を持たず、水資源に対する体質的な弱さを有しているが、近年水資源の再開発、新規開発事業などを行い、増加する水需要に対処してきている。また昭和53年の大渇水をきっかけとして配水調整事業に取り組み、現在は各々の浄水場からの水を相互に関連づけ、水資源の効率的な運用を検討している。そのために配水管網に水圧計、流量計、電動調整弁を取り付け、中央制御室で、常時入力される水圧計、流量計の情報をもとに電動調整弁の遠隔操作を行っている¹⁾。この配水調整システムを有効に活用するためには、各貯水池上流域の降雨の流出特性を的確に把握し、その貯水池の貯留特性などを考慮して最適な取水、配水を行う必要がある。

本報は、以上のことを考慮して、昭和53年度の福岡市の大渇水において、その操作が問題とされた福岡市の上水用ダムとして最大の貯水容量を有する江川ダム

の上流域の降雨-流出特性について検討したものである。

2. 江川ダム上流域の降雨量と流量の特性

2.1 降雨、流量データについて

流量データは、旬流量については昭和31年から存在している。日流量については、定時観測による日流量データはかなり存在するようであるが、このデータは途中かなりの欠測があり、また流域の流出特性を解明するデータとしては信頼性が乏しいように思われる。よって江川ダム上流域の流出特性を考える際に有意な日流量データは、昭和48年以降のダムの水位観測によるデータしか存在しないことになる。

降雨量データについては、江川ダム上流域の小石原雨量観測所には、いくらかの欠測はあるものの昭和34年からの日降雨量データが存在し、また小石原の日降雨量との相関が0.73である甘木雨量観測所の日降雨データは明治27年から存在している。よってこの90年間近くの豊富な日降雨データから流出解析により日流量が計算できれば、江川ダムの操作や長期的水資源計画に役立てることができると考えられ、その為にも江

川ダムの流出特性を把握する必要がある。

2.2 日降雨量と日流量の相関

江川ダム上流域の流出特性を解明するにあたって、まず、小石原観測所の日降雨量データと水位観測による江川ダムの日流量データが共に整っている昭和48年から昭和52年までの5年間のデータに対して、季節毎に日降雨量と日流量の自己相関係数 $\rho_{RR}(\tau)$, $\rho_{QQ}(\tau)$ および日降雨量と日流量の相互相関係数 $\rho_{RQ}(\tau)$ を示したのが図-1 から図-3 である。ここで ρ_{RR} , ρ_{QQ} および ρ_{RQ} は次式によって求められる²⁾。

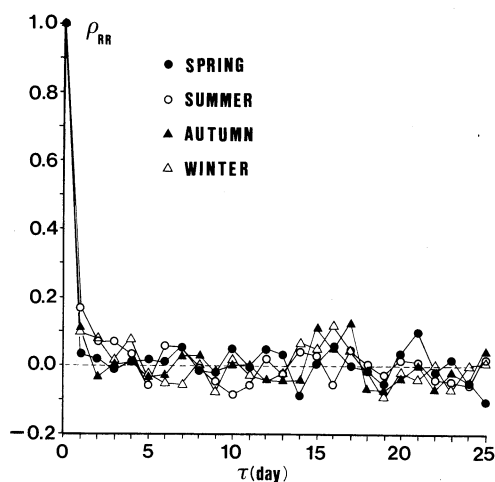


図-1 日降雨量の自己相関係数

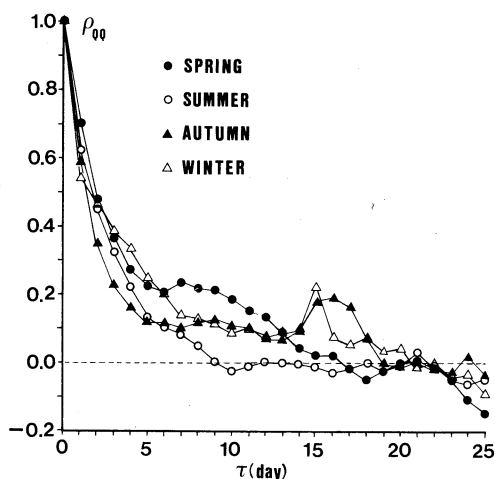


図-2 日流量の自己相関係数

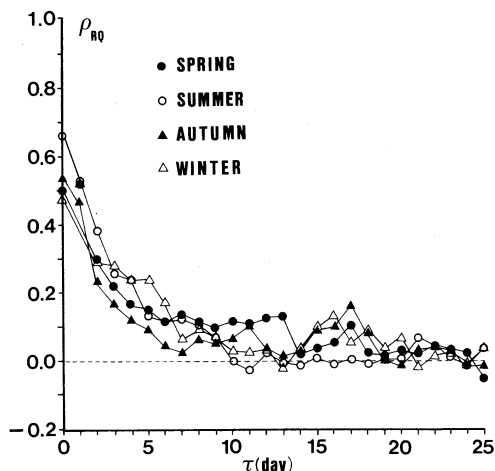


図-3 日降雨量と日流量の相互相関係数

$$\rho_{RR}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (R(t) - \bar{R})(R(t+\tau) - \bar{R})}{\sum_{t=1}^N (R(t) - \bar{R})^2} \quad (1)$$

$$\rho_{QQ}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (Q(t) - \bar{Q})(Q(t+\tau) - \bar{Q})}{\sum_{t=1}^N (Q(t) - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

$$\rho_{RQ}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (R(t) - \bar{R})(Q(t+\tau) - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (R(t) - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (Q(t) - \bar{Q})^2}} \quad (3)$$

ここに、

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N R(t) \quad (4)$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q(t) \quad (5)$$

R : 日降雨量 (mm/day) Q : 日流量 (m^3/day)

N : データ個数 τ : ラグタイム (day)

図中、春は3月から5月、夏は6月から8月、秋は9月から11月、冬は12月から2月としている。

図-1より日降雨量の自己相関は、季節に関係なく近似的に $\tau \geq 1$ では無相関となるランダム変動系列であると考えられる。図-2より日流量の自己相関は、夏の場合10日、春の場合16日、秋と冬の場合18日程度まで相関が認められ、夏は短期間で無相関となるようである。図-3より日降雨量と日流量の相互相関は、夏は当日 ($\tau=0$) の相関が特に高く、相関の持続日数は10日程度となっていて他の季節に比べてかなり短い。しかし、各季節とも τ がおよそ14日から20日程度で無相関となっているようである。

3. カルマンフィルタによる単位図同定のための定式化

カルマンフィルタは式(6)のようなダイナミクスで表されるシステム状態量 x を推定するのに適用される理論で、そのシステムの状態量は式(7)の観測方程式を通してのみ観測される³⁾。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + u(k) \quad (6)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (7)$$

ここに、

k : 時点

x : システムの状態量ベクトル (n 次元ベクトル)

Φ : 既知の状態遷移行列 ($n \times n$ 行列)

u : システム雑音. 平均値 0 で分散 U の独立な正規性白色雑音 (n 次元ベクトル)

y : 観測量ベクトル (m 次元ベクトル ($m \leq n$))

H : 既知の観測行列 ($m \times n$ 行列)

w : 観測雑音. 平均値 0 で分散 W の独立な正規性白色雑音 (m 次元ベクトル)

時点 $(k+1)$ までの観測量による $x(k+1)$ の最適推定値 $\hat{x}(k+1|k+1)$ は、時点 k までの観測量による $x(k+1)$ の最適推定値 $\hat{x}(k+1|k)$ を用いて、 $\hat{x}(0|0)$ を初期値として与えると次式で求められる。

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)v(k+1) \quad (8)$$

ここに、

$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{x}(k|k) \quad (9)$$

K : カルマンゲインマトリックス ($n \times m$ 行列)

v : 1 ステップ先の観測量の予測残差 (イノベーション) (m 次元ベクトル)

ここで、時点 k におけるカルマンゲインマトリックス $K(k)$ は次式を順次計算して求められる。

$$P(k|k-1) = \Phi(k-1)P(k-1|k-1)\Phi^T(k-1) + U(k-1) \quad (10)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + W(k)]^{-1} \quad (11)$$

$$P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1) \quad (12)$$

ここに、

$P(k|k-1)$: 時点 $(k-1)$ までの観測量を用いた時点 k のシステム状態量の推定誤差共分散行列 ($n \times n$ 行列)

$P(k|k)$: 時点 k までの観測量を用いた時点 k のシ

ステム状態量の推定誤差共分散行列 ($n \times n$ 行列)

U : システム雑音の共分散行列 ($n \times n$ 行列)

W : 観測雑音の共分散行列 ($m \times m$ 行列)

I : 単位行列 ($n \times n$ 行列)

τ : 転置記号

さて、Duhamel 型の重量積分を差分表示すると

$$Q(k) = \sum_{\tau=0}^{\tau_{\max}} h(\tau)R(k-\tau)\Delta t \quad (13)$$

ここに、 $Q(k)$ は $T=k\Delta t$ における流域の量水点での流出量、 $R(k)$ は同じく $T=k\Delta t$ での代表点での降雨量である。 $h(\tau)$ のグラフは単位図とよばれ、単位図を用いて式(13)により流出量を計算する方法が単位図法である。単位図法は一様仮定、比例仮定、加算仮定に基づいている⁴⁾が、これらの仮定は洪水流出(短期流出)を対象とすると必ずしも現実的でないが、本報で用いる日単位以上の長期流出を対象とするならば実用上許容される場合が少なくなく、何よりも理論が単純明快である点が単位図法の特徴である⁴⁾。

ここでカルマンフィルタにより式(13)の $h(\tau)$ を同定することを考えると、 $h(\tau)$ は推定すべき状態量ベクトル x となり、式(13)が式(7)の観測方程式となる。ここでは $\Delta t=1$ とした。よってシステムベクトルの次元 $n=\tau_{\max}+1$ で、式(6)、(7)の $x=[h(0), h(1), \dots, h(\tau_{\max})]^T$ となる。また観測量ベクトルの次元 $m=1$ で、式(7)の $y(k)$ は式(13)の $Q(k)$ であり、 $H(k)=[R(k), R(k-1), \dots, R(k-\tau_{\max})]$ 、そして式(6)の $\Phi(k)=I$ (単位行列) となる⁵⁾。

4. 江川ダム上流域の単位図の同定結果とその考察

4.1 単位図の同定結果

本報では昭和48年から昭和52年までの5年間の日降雨量、日流量データに対して、各年の各季節をそれぞれ半月毎に6つの期間すなわち1年を24期間に分け、その各々の期間に対して3.で定式化したカルマンフィルタを用いて単位図の同定を行った。ここで、 τ_{\max} は図-3を考慮して $\tau_{\max}=14$ すなわち次元 $n=15$ とした。カルマンフィルタの初期値 $P(0|0)$ には対角線要素に0.25、非対角要素に0.1を与え、 $x(0|0)$ には最初の年(昭和48年)の最初の期間(半月)だけ $x(0|0)=[1.5, 1.4, 1.3, \dots, 0.1]^T$ を与え、次の期間からは前期間の最終時点における単位図の同定結果を $x(0|0)$ として与えた。またシステム雑音の分散行列 U には対角線要素に0.05、それ以外には0を与え、観測

雑音の分散 W (この場合スカラー) には100を与えた。

次に、式(13)の R は有効降雨であることから、ここでは生の日降雨データに流出率0.64 (年流出量を、年降雨量に江川ダムの流域面積 30 km^2 を乗じた雨量で除した値の平均) を乗じて有効降雨に換算した値を用い、また日流量については用いた5年間の最小流量を基底流量として差し引き、さらに流域面積 30 km^2 で除して流出高 (mm/day) に換算したものをを用いた。基底流量を差し引いたのは、基底流量は式(13)における τ_{\max} より大きいラグタイムに対する降雨の影響によって流出すると考えられるからである。

カルマンフィルターはオンライン処理によりその時点での最良の単位図を逐次同定してゆくが、ここではカルマンフィルターにより同定された各期間の最終時点での単位図をさらに季節毎にまとめて、平均的単位図とその標準偏差を求めた。図-4には季節毎の平均的単位図を示し、また図-5には各季節の平均的単位図とその標準偏差を示している。ここで季節毎に単位図を求めたのは、江川ダム上流域の各季節毎の単位図の特徴を調べるためであり、また平均的単位図は、流出予測の精度上、月毎まで細かくしなくともせめて季節毎に変えることが望まれている^{4),6)} からである。なおカルマンフィルターによる単位図を季節毎に平均することは、Wiener-Hopf の方程式より得られる季節毎の統計的単位図^{2),6)} を求めることと同じになると考えられる。

次に、以上より得られた図-4の季節毎の単位図を用いて、昭和48年から5年間の日降雨量データより日流量の推定を行い、これを実測の日流量データと比較してみる。図-6にはこのうち昭和52年に対する結果を示している。なお、日降雨量および日流量データは前述のように変換したデータを示している。また図-7には、図-6の日単位の降雨量、流量を旬単位の降雨量、流量に換算した結果を示している。

4.2 考 察

図-4,5 に示す結果をみると、季節毎の単位図で、夏は他の季節に比べてラグタイム τ が小さいとき、特に $\tau=0$ での単位図の値が大きくなっている。したがって、降雨が短期間で流出してしまう割合が他の季節に比べ大きいといえる。また、単位図の推定誤差の標準偏差は全体的に他の季節に比べて大きい。このことは、夏では降雨に対する時間的流出の割合がかなり変動することを意味し、図-6の6月～8月に示される

ように平均的単位図では流出予測の精度が低くなっていることがわかる。春は図-4より、 $\tau=0, 1$ での単位図の値が秋、冬に比べて大きくなっている、短期間で流出する割合が秋、冬に比べて大きいことを示している。また $\tau=11, 12$ でも単位図の値が大きくなっている、さらに図-5(a)では $\tau=11, 12$ で単位図の標準偏差が特に大きくなっているが、これは基底流量の取り扱いなどの影響を受けたからとも考えられる。秋と冬は、図-4より互いに単位図は似ており、短期間で流出する割合が小さく、また図-5(c), (d) より全体的に単位図の変動は小さくなっている。これより秋と冬は流出特性が似かよっており、降雨が徐々に流出してくる特徴があると考えられる。

次に図-6をみると、夏の実測のピーク流量に対しては、6月中旬頃のピーク流量のように、平均的単位図を用いた流出量の計算値がよく適合している場合もあるが、計算値は全般的に小さく目で適合精度が悪いようである。このことは図-4の○印と図-5(b)に示されるように、夏では短期間で流出する量が大きくて、またその流出量の変動が大きいことに起因しているものと考えられる。なお流出量の低減部については、どの季節においても推定値は実測流量によく適合しているようである。次に、図-7のように旬流量に換算した場合は、推定値は実測流量のピークによく適合しており、非線形流出部分と考えられる表面流出の部分の影響がかなり緩和されているようである。

本報では有効降雨、基底流量の算出には簡略的な推定法を用い、さらに前述の各期間毎にカルマンフィル

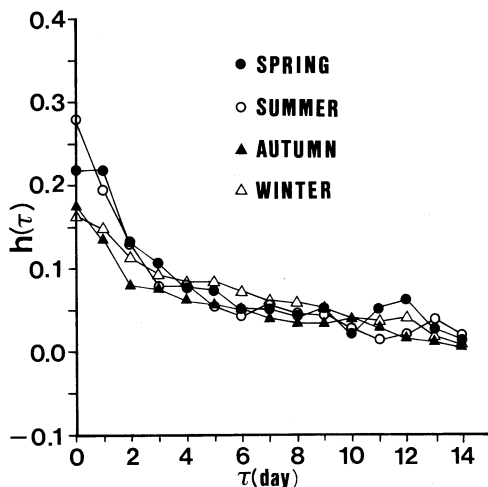


図-4 季節毎の平均的単位図

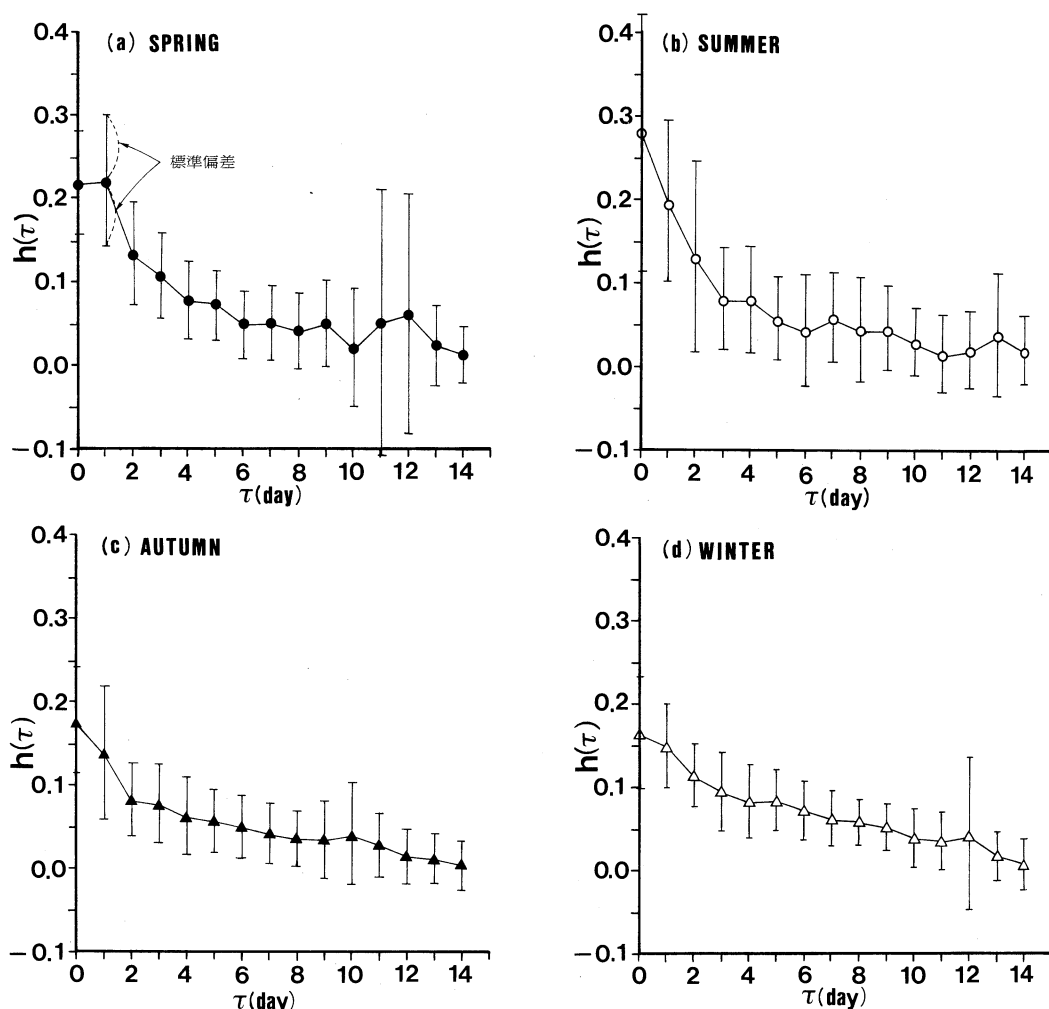


図-5 各季節の平均的単位図とその標準偏差

ターにより同定された単位図を平均化した季節毎の単位図を用いて流出量の推定を行っているが、各季節毎の単位図は実際の流出現象をよく捉えているものと考えられる。

5. む す び

本報では、江川ダム上流域の流出特性を明らかにするため、日降雨量および日流量の自己相関および相互相関係数を調べるとともに、カルマンフィルターにより半月毎に同定された単位図を季節毎に平均化した単位図について検討した。その結果季節毎の単位図の特

徴すなわち季節毎の流出特性が明らかにされた。また季節毎の単位図を用いた場合の推定流量は、特に夏のピーク流量に対して適合度が悪いが、それ以外の低減部についてはかなり精度よく適合することが示された。

今後は、ピーク流量を含めた全体的な流量予測の精度をさらに上げること、また流量の実時間予測および貯水池の実時間操作すなわち放流量、導水量の実時間決定の問題、さらに江川ダム以外の福岡市のダムの上流域における流出特性についても検討してゆくつもりである。

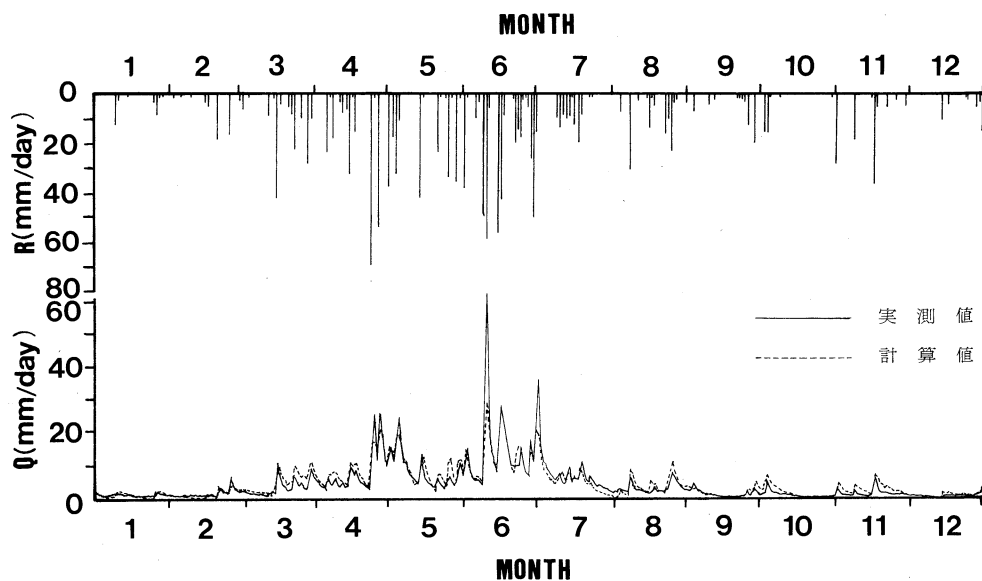


図-6 昭和52年の日降水量および日流量の実測値と計算値

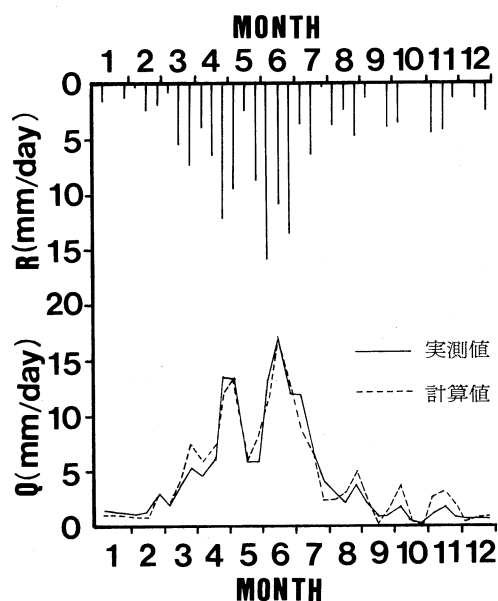


図-7 旬単位に換算した昭和52年の降雨量および流量の実測値と計算値

終りに、本研究を遂行するにあたり本学卒業生の福山裕二君（現在、三井石油化学工業）に種々御協力頂いた。ここに記して深謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 上田年比古：福岡市の昭和53年大洪水後の水対策，京大防災研究所水資源研究センター研究報告第3号，pp. 3～13，1983年1月。
- 2) 神田 徹・藤田睦博：水文学，技報堂出版，1982年。
- 3) 日野幹雄：Kalman の予測推定理論の平易な誘導について，東工大土木工学科研究報告，No. 15，pp. 91～99，1973年12月。
- 4) 角屋 睦：流出解析法（その2）—単位図法とその進展(1)—，農業土木学会誌，第47巻，第11号，pp. 873～876，1979年11月。
- 5) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用，土木学会論文報告集，第221号，pp. 39～47，1974年1月。
- 6) 丸山利輔：流出解析法（その5）—重みつき統計的単位図法による低水流解析—，農業土木学会誌，第48巻，第3号，pp. 191～196，1980年3月。