

実用的な日単位の長期流出モデルの  
ダム流域への適合性  
Adaptability of Practical Daily Long-term  
Runoff Model to Dam Basin

東京都立大学工学部 正員 ○安藤義久  
前田 建設工業 株式会社 知久岳史

1. はじめに

河川上流域における水資源の開発・管理にとって、実用的な日単位の長期流出モデルにより、過去の雨量データから河川の流出量の再現や流出量の予測を行なうことは重要な課題である。安藤・高橋<sup>1)</sup>は比較的簡便で雨量と気温データだけから流出量を算定できる実用的な日単位の長期流出モデルを提案した。その後、安藤<sup>2)</sup>はモデルに若干の修正を加え、いくつかの山地河川流域で高い適合性を有することを示した。さらに、安藤・高橋・水谷<sup>3)</sup>は、50年間という非常に長期間の水文観測データを用いて、同モデルの適合性を詳細に検討し、流量を比較的高い精度で再現できること、初期値を解析初年度だけに与えても誤差が累積しないことを示した。しかし、いずれの場合も対象流域は、12 km<sup>2</sup>程度以下の小流域であり、水資源が直接問題となる数百km<sup>2</sup>のダム流域での検討は今後の課題として残されてきた。

そこで、本稿では、この小試験流域への適合性が確認されている実用的な日単位の長期流出モデルのダム流域への適合性の可否が研究目的である。

2. 長期流出モデル

(1) モデルの計算過程

本稿で用いる長期流出モデルは、図1に示す計算フローにより構成されている。また、モデルで用いる変数およびパラメーターを表1に示す。すでにモデルの計算フローについては詳細に述べてあるので、ここではモデルの概略のフローを以下に説明する。流域は、流出域と浸透域に2大別される。流出域への降雨は直接流出となると考える。直接流出量を求めるためには、まず前期降雨の多寡により有効降雨を算定する。次に、有効降雨を単位図の配分率を用いて降雨当日、翌日、翌々日に配分する。浸透域へ

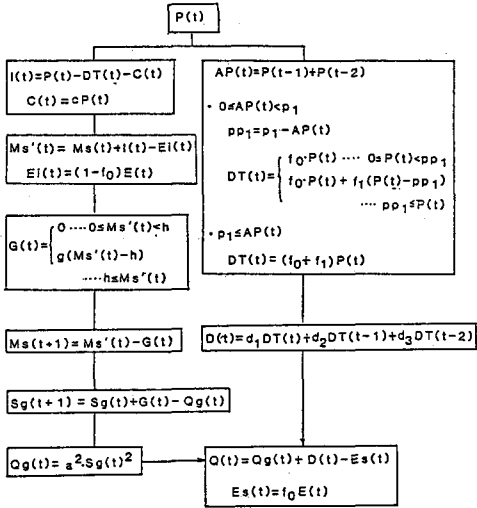


図1 モデルの計算フロー

表1 変数およびパラメーターの名称

| 変 数   |            | パ ラ メ ー タ ー |                |
|-------|------------|-------------|----------------|
| 記号    | 名 称        | 記号          | 名 称            |
| $t$   | 日単位の時間     | $a$         | 地下水流出の分数減水定数   |
| $P$   | 雨量         | $c$         | 樹冠遮断率          |
| $AP$  | 前期降雨       | $d_1$       | 単位図の配分率（降雨当日）  |
| $DT$  | 有効降雨       | $d_2$       | 単位図の配分率（降雨翌日）  |
| $D$   | 直接流出量      | $d_3$       | 単位図の配分率（降雨翌々日） |
| $C$   | 樹冠遮断量      | $e$         | 蒸発散の補正係数       |
| $I$   | 浸透量        | $f_0$       | 基本流出率          |
| $Ms$  | 土壌水分保留量    | $f_1$       | 1次付加流出率        |
| $Ms'$ | 土壌水分保留量    | $p_1$       | 1次遷移雨量         |
| $G$   | 地下水涵養量     | $g$         | 地下水涵養の定数       |
| $Sg$  | 地下水貯留量     | $h$         | 土壌の最小含水量       |
| $Qg$  | 地下水流出量     |             |                |
| $Q$   | 総流出量       |             |                |
| $E$   | 蒸発散量       |             |                |
| $Ei$  | 浸透域からの蒸発散量 |             |                |
| $Es$  | 流出域からの蒸発散量 |             |                |

の浸透量は、降雨量から有効降雨と樹冠遮断量をさし引くことによって得られる。ここで、樹冠遮断量は降雨量に比例すると仮定している。土壌水分保留量には、地表からの浸透量に加わり、浸透域からの蒸発散量が消失していく。次に、地下水涵養量は表層の土壌水分の超過保留量に比例すると考える。そこで、ある日の土壌水分量から地下水涵養量をさし引くことによって、翌日の土壌水分保留量を求めることができる。一方、地下水涵養量は地下水貯留量を増加させ、地下水流出量は地下水貯留量を減少させる。そして、地下水貯留量の2乗に比例して地下水は流出する。最後に、総流出量は直接流出量と地下水流出量の和から、流出域からの蒸発散量をさしひくことによって求められる。

(2) パラメーターの決定方法

これについては、すでに詳細に述べてあるので、表2にその概略を示すにとどめる。

表2 パラメーターの決定方法

| 記号    | 決 定 方 法                          |
|-------|----------------------------------|
| $a$   | 冬期の無降雨期間の減水部に、分数関数減水式をあてはめる。     |
| $c$   | $P_Y - E_Y$ 図の傾きより求める。           |
| $d_1$ | 孤立降雨の直接流出の配分率より求める。              |
| $d_2$ |                                  |
| $d_3$ |                                  |
| $e$   | 年単位の水収支と Hamon 式による年蒸発散量を用いて求める。 |
| $f_0$ | 一雨雨量と直接流出量の相関図より求める。             |
| $f_1$ |                                  |
| $p_1$ |                                  |
| $b$   | 1.0 と仮定する。                       |
| $h$   | 200 mm と仮定する。                    |

(3) 初期値の設定方法

本稿では、初期値を各年の年頭に与える場合（これを解析Ⅰとする）と、初期値を同定期間と検証期間の初年度だけに与える場合（これを解析Ⅱとする）との2通りの解析を行ない、両者の解析結果を比較、検討する。

(4) モデルの適合性の評価方法

モデルによる計算ハイドログラフと実測ハイドログラフの適合性の評価方法として、1年間の日流量の相対誤差の平均値（ $ADRE$ ）と、1年間の総流量の相対誤差（ $YRE$ ）、1年間の各月の流量の相対誤差（ $MRE$ ）を用いる。

$$ADRE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Q_c(t) - Q_0(t)|}{Q_0(t)} \dots\dots\dots ①$$

$$YRE = \left\{ \sum_{t=1}^N Q_c(t) - \sum_{t=1}^N Q_0(t) \right\} / \sum_{t=1}^N Q_0(t) \dots\dots\dots ②$$

$$MRE = \left\{ \sum_{t=1}^{n_j} Q_c(t) - \sum_{t=1}^{n_j} Q_0(t) \right\} / \sum_{t=1}^{n_j} Q_0(t) \dots\dots\dots ③$$

ここで、 $Q_0(t)$  :  $t$  日目の実測流量、 $Q_c(t)$  :  $t$  日目の計算流量、 $N$  : 1年間の日数、 $n_j$  :  $j$  月の日数である。

3. ダム流域へのモデルの適用とその結果の検討

(1) 対象流域への概要

本稿で対象とする小河内ダム流域は、多摩川の最上流部に位置し、東京都と山梨県の二都県にまたがっている。流域面積は262.9  $km^2$  であり、図2に示すような流域形状である。多摩川の水が昔から、東京の主要水源であった関係から、流域での水文気象調査は、東京都水道局などによって比較的長期間にわたって行なわれている。現在、小河内ダム流域内には、雨量観測所が、ダム地点、小菅、丹波山、落合の4地点にあり、また流量観測はダム地点において放流量と貯水位の変化からの逆算によって求められている。また、気温もダム地点において観測されている。本稿で用いたデータは参考文献4)による。

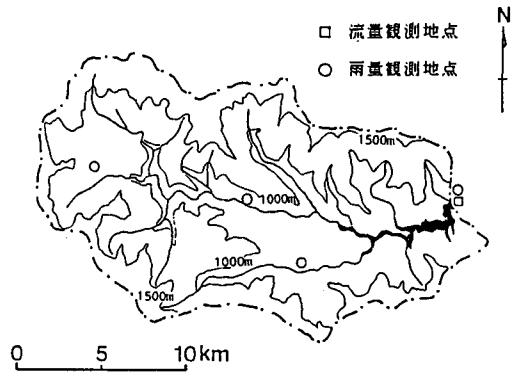


図2 小河内ダム流域の概要

(2) 対象期間の設定

参考文献 4)に掲載されている、本研究で使用するデータについて、欠測は一度もないので、対象期間は昭和 35 年 (1960)～昭和 56 年 (1981) の 22 年間として設定する。本研究の目的は、モデルの適合性を検討することなので、対象期間を半分に分けて、前半の昭和 35 年 (1960)～昭和 45 年 (1970) の 11 年間はパラメーター値設定のための同定期間、後半の昭和 46 年 (1971)～昭和 56 年 (1981) の 11 年間は検証期間として設定した。

(3) パラメーター値および初期値の設定

① 地下水流出の分数減水定数  $a$

地下水流出の分数減水定数  $a$  は、冬季の無降雨期間の減水部に Werner と Sundquist<sup>5)</sup>、Roche<sup>6)</sup>、および高木<sup>7)</sup>により導かれている次式の分数関数減水式をあてはめることによって求める。

$$Q_g = \frac{Q_0}{(1 + a\sqrt{Q_0}t)^2} \dots\dots\dots ④$$

ここで、 $Q_g$  :  $t$  日目の地下水流出量、 $Q_0$  : 初期地下水流出量、 $t$  : 日単位の時間である。

分数減水定数  $a$  と初期流量  $Q_0$  の相関図を図 3 に示すが、6 期間について  $a$  を算定し、分数減水定数  $a$  は、 $a = 0.0054$  と決定した。

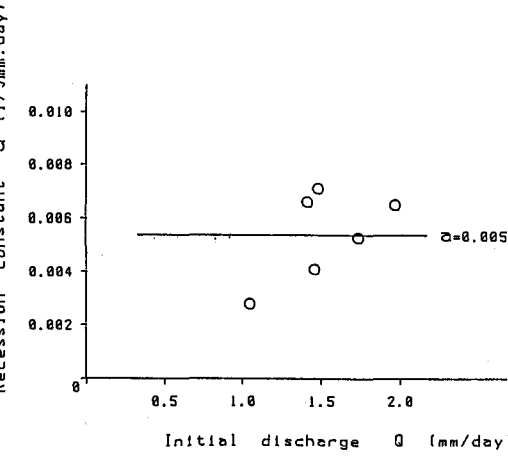


図 3 分数減水定数  $a$  と初期流量  $Q_0$  の相関

② 単位図の配分率

小河内ダム流域での 6 つの孤立降雨の単位図の配分率を平均することにより、 $d_1 = 0.46$ 、 $d_2 = 0.42$ 、 $d_3 = 0.12$  とした。

③ 基本流出率  $f_0$ 、1 次付加流出率  $f_1$ 、および 1 次遷移雨量  $p_1$

一雨雨量  $PT$  と直接流出量  $DT$  の相関図を図 4 に示すが、この図より  $f_0 = 0.08$ 、 $f_1 = 0.32$ 、 $p_1 = 60$  mm と決定した。

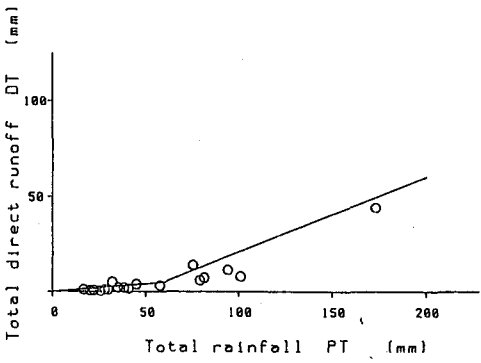


図 4 一雨雨量  $PT$  と直接流出量  $DT$  の相関

④ 樹冠遮断率  $c$  および蒸発散の補正係数  $e$

年総降水量  $P_r$  と年損失量  $E_r$  の相関図を図 5 に示すが、 $P_r$  と  $E_r$  の関係を直線で近似することにより、樹冠遮断率  $c$  および蒸発散の補正係数  $e$  を求めることができる。 $c = 0.105$ 、 $e = 0.53$  と決定した。

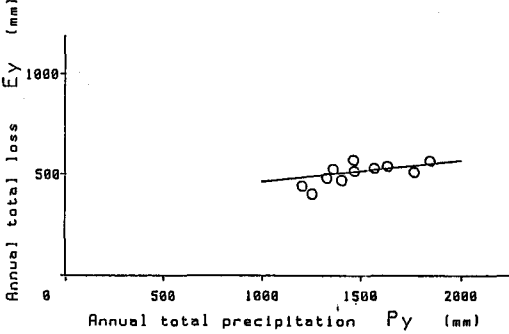


図 5 年降水量  $P_r$  と年損失量  $E_r$  の相関

以上のように決定した小河内ダム流域のパラメーターの一覧を表 3 に示す。

表3 小河内ダム流域におけるパラメーター値

| 記号    | パラメーターの名称      | 値      |
|-------|----------------|--------|
| $a$   | 地下水流出の減水定数     | 0.0054 |
| $c$   | 樹冠遮断率          | 0.105  |
| $d_1$ | 単位図の配分率(降雨当日)  | 0.46   |
| $d_2$ | 単位図の配分率(降雨翌日)  | 0.42   |
| $d_3$ | 単位図の配分率(降雨翌々日) | 0.12   |
| $e$   | 蒸発散の補正係数       | 0.53   |
| $f_0$ | 基本流出率          | 0.08   |
| $f_1$ | 1次付加流出率        | 0.32   |
| $p_1$ | 1次遷移雨量         | 60 mm  |
| $g$   | 地下水涵養の定数       | 1.0    |
| $h$   | 土壌の最小含水量       | 200 mm |

#### ⑤ 初期値の設定

初期値の設定法は従来通りとした。

#### (4) モデルの適用結果と考察

上記のようにして求めたモデルのパラメーターの値を用いて、同定期間と検証期間の両方について再現計算を行なった。また、解析方法として、解析Ⅰと解析Ⅱの2通りの方法を採用して結果を比較した。図6には、解析Ⅱによる同定期間である1969年の計算ハイドログラフと実測ハイドログラフの比較を例示する。また、図7には、検証期間である1971年の結果を例示する。これらの図をみると、計算ハイドログラフは実測ハイドログラフとはほぼ一致していることがわかる。

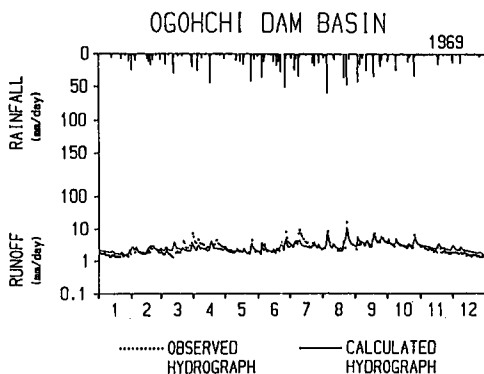


図6 小河内ダム流域における同定期間における計算ハイドログラフと実測ハイドログラフ

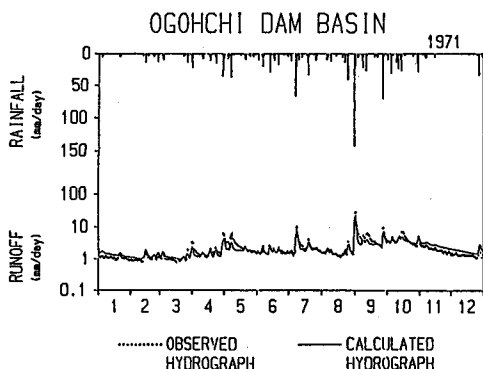


図7 小河内ダム流域における検証期間における計算ハイドログラフと実測ハイドログラフ

図8には、日流量の相対誤差の平均値  $ADRE$  を示す。図中、斜線のない部分は解析Ⅰ、斜線のある部分は解析Ⅱによる結果を示す。この図より、どちらの解析方法を用いても日流量の相対誤差の平均値はほとんど0.3程度であり、誤差は累積しないといえる。また、同定期間においても、検証期間においても、 $ADRE$ の値は0.3程度であり、モデルの適合性は高いといえる。

#### (a) 同定期間

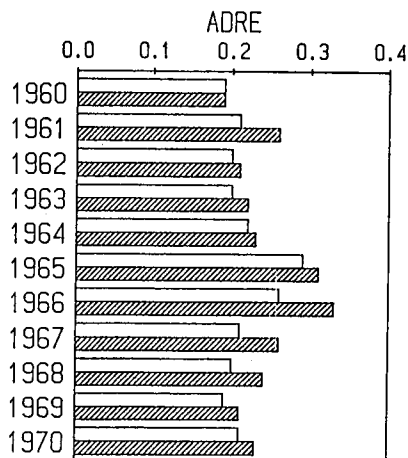


図8 日流量の相対誤差の平均値 ( $ADRE$ )

(b) 検証期間

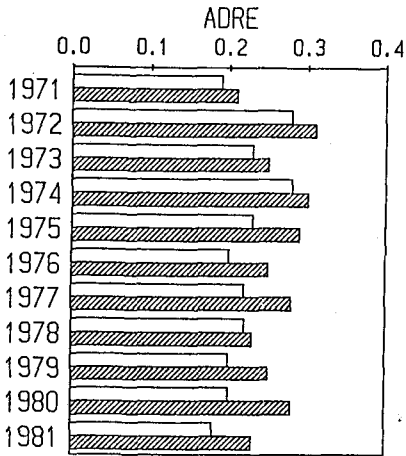


図8 日流量の相対誤差の平均値 (ADRE)

図9には、1年間の総流出量の相対誤差  $YRE$  を示す。図中、斜線のない部分は解析Ⅰ、斜線のある部分は解析Ⅱによる結果を示す。この図より、どちらの解析方法を用いても、1年間の総流出量の相対誤差はほとんど±0.1以内に収まっており、誤差は累積しないといえる。また、同定期間でも検証期間でも  $YRE$  の値は±0.1以内であり、モデルの適合性は高いといえる。

(a) 同定期間

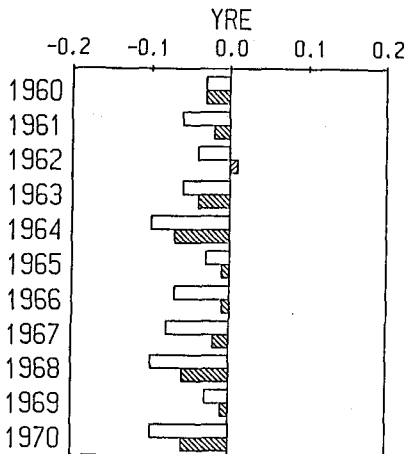


図9 1年間の総流量の相対誤差 ( $YRE$ )

(b) 検証期間

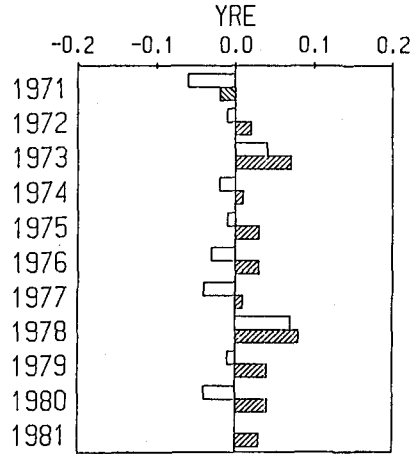
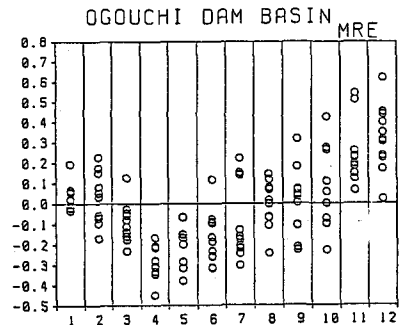


図9 1年間の総流量の相対誤差 ( $YRE$ )

図の10と図11には、月流量の相対誤差  $MRE$  を同定期間と検証期間についてそれぞれ示す。

(a) 解析Ⅰ



(b) 解析Ⅱ

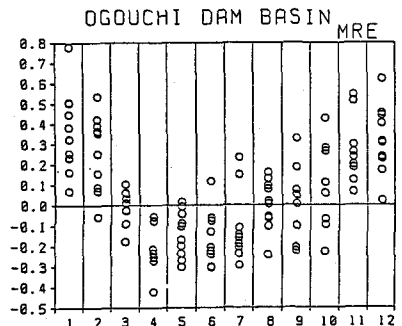
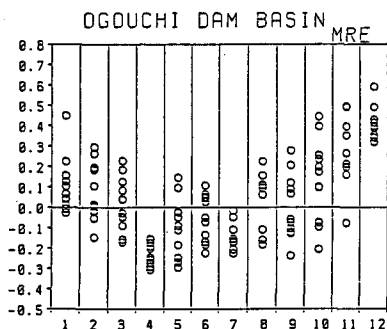


図10 同定期間における月流量の相対誤差 ( $MRE$ )

(a) 解析 I



(b) 解析 II

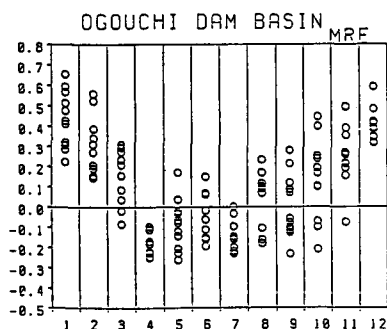


図 11 検証期間における月流量の相対誤差(MRE)

図10と図11より、解析Ⅰの方が解析Ⅱより、同定期間と検証期間の両方において、MREが全体的にやや小さい傾向が見うけられる。図10と図11に共通していえることは、4～7月は値がマイナスであり計算流量が実測流量より過小に評価されており、11～2月は値がプラスであり計算流量が実測流量より過大に評価されていることである。このことは、前に示した図6と図7の実測ハイドログラフと計算ハイドログラフの比較をみてもわかる。特に冬季における減水部は計算流量が実測流量ほど減っていない。逆に、4月は検証期間中は全てで、同定期間ではほとんど計算流量が過小となっている。このことは、融雪の影響のためとも考えられ、今後、本モデルに融雪をも考慮する必要があるといえる。ただし、雪の影響の小さい東京大学愛知演習林の試験流域の解析においてもMREの同様な季節的変動があることが安藤・高橋・水谷<sup>3)</sup>により指摘されているので、蒸発散などの損失過程のモデル化に改良の余地があ

るとも考えられる。

#### 4. 結論と今後の課題

本モデルは、小河内ダム流域という水資源に直接関係している大流域において、22年間という長期間にわたって、高い精度で流出量が再現できたといえる。また、初期値を初年度だけに与えても比較的適応結果はよく、誤差が累積するような傾向はなかった。

以上のことから、本稿の実用的な日単位の長期流出モデルの山地河川のダム流域において長期間にわたる適合性は確かめられたといえる。

今後の課題としては、ダム流域への適用例を増やし、モデルの実用性を高めるとともに、融雪モデルの組み込みや蒸発散などの損失モデルの改良などを図ることであろう。

#### 謝 辞

小河内ダムの水文観測に関与された関係各位と現地を案内して下さった東京都水道局の神藤隆夫氏と大類喜一郎氏には記して深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 安藤義久・高橋裕：山地河川の長期流出解析に関する一考察，土木学会論文報告集 第318号，PP. 93～105，1982.
- 2) 安藤義久：試行錯誤のない実用的な長期流出モデルに関する研究，水利科学 No154，第27巻 第5号，PP. 17～36，1983.
- 3) 安藤義久・高橋裕・水谷誠：実用的な日単位の長期流出モデルに関する研究，水利科学 No168，第30巻 第1号，PP. 1～16，1986.
- 4) 東京都水道局：小河内貯水池管理年報，昭和35年度～昭和56年度.
- 5) Werner, P.W. and K.J. Sundquist: On the ground-water recession curve for large watersheds, Publ. No. 33, IAHS, PP.202～212, 1951.
- 6) Roche, M.: Hydrologie de Surface, Gauthier-Villars, PP. 267～275, 1963.
- 7) 高木不析：低水流出の低減特性に関する研究，土木学会論文報告集 第128号，PP. 1～11，1966.