

実用的長期流出モデルの山地流域への適用性 Adaptability of a Practical Long-Term Runoff Model to a Mountainous Basin

東京大学工学部土木工学科 正員 ○安藤義久
東京大学工学部土木工学科 正員 高橋 裕

1 はじめに

長期流出モデルの主要な用途としては、次の3つが考えられる。

- (1) 短期間の降水-流出量データに基づく長期間の流出量の再現。(水資源計画への応用)
- (2) 既存の降水-流出量データに基づく長期流出予測。(水資源管理への応用)
- (3) 流出量データのない流域の流出量の推定。(水資源計画・管理への応用)

従って、長期流出モデルの実流域への適用可能性の可否を検討するには、精度の高い長期間の水文データを有する流域を対象にして、対象期間を同定期間と検証期間に分けて、同定期間においてモデルのパラメータを同定し、検証期間においてモデルの適合性を検討する必要がある。本稿では、筆者ら¹⁾がすでに提案した長期流出モデルに若干の修正を加え、上記の同定と検証によるモデルの実流域への適用性の検討を試みる。モデルの修正に当っては、その基本的特徴である、変数とパラメーターの数が少なく簡単であること、パラメーターの値を試行錯誤ではなく実測の水文データから決定論的に求められること、パラメーターの値と流域特性との対応がつくことという実用性は堅持して、筆者ら²⁾が丘陵地流域において加えた直接流出へ単位図法を導入することと樹冠遮断を考慮することなどについて修正を加えている。

2 長期流出モデル

ここでは、まず、山地流域の流出過程について簡単に述べ、次に長期流出モデルのフローについて述べ、最後にパラメーターの値の算定法について述べる。

2-1 山地流域の流出過程

図1には、山地流域における流出過程の概念図を示す。流域は、流出域と浸透域に二大別される。浸透域への降水の一部は樹冠に遮断され、その後蒸発する。地表へ到達した雨水は、土壌水分の保留となるものと、浸透域からの直接流出となるものと、地下水涵養となるものに分かれる。土壌水分に保留された雨水の一部は浸透域からの蒸発散となる。地下水涵養は地下水貯留を増加させる。地下水流出は地下水貯留に由来する。一方、流出域への降水はそのまま流出域からの直接流出となる。また、流出域の大部分を占める飽和域からの蒸発散もある。従って、河川の総流出は、直接流出と地下水流出の和から、飽和域からの蒸発散をひいたものに等しいことになる。

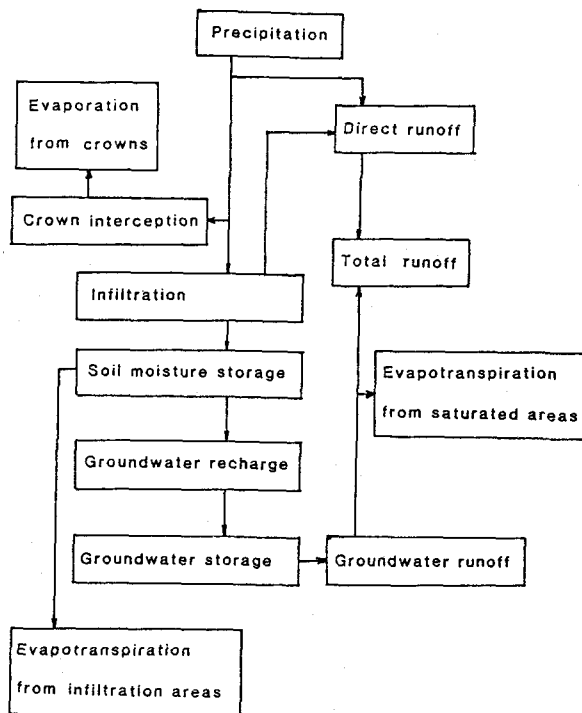


図1 山地流域における流出過程の概念図

2-2 長期流出モデルのフロー

図2には、長期流出モデルのフローを示す。このモデルの時間単位は1日であり、図2中の t は日単位の時間を表わす。図2中で、変数は大文字で表示されており、パラメーターは小文字で表示されている。

(1) 流域平均日降水量 $P(t)$ の算定

流域内に複数地点の日降水量データがある場合には、ティーセン法などを用いて流域平均日降水量を算定することができる。一方、流域内の1地点の日降水量データから流域平均日降水量を推定する場合には、次式を用いる。地点日降水量を $P_s(t)$ 、地点降水量から流域平均降水量を算出する補正係数を b とおくと、

$$P(t) = b \cdot P_s(t) \quad \dots\dots ①$$

とかける。

(2) 日蒸発散量 $E(t)$ の算定

Hamon 式による月平均日蒸発散量を月平均気温を用いて算定し、各月の蒸発散量 $EM_i (i=1, 2, \dots, 12)$ を求め、 EM_i に補正係数 e を乗じたものを各日の蒸発計蒸発量 E_p により各日に比例配分して $E(t)$ を求める。

(3) 有効降雨 $DT(t)$ の算定

前期降雨 $\{AP(t) = P(t-1) + P(t-2)\}$ の多寡を考慮し、基本流出率 f_0 、1次付加流出率 f_1 、1次遷移雨量 p_1 を含む次式で有効降雨 $DT(t)$ を算定する。

$0 \leq AP(t) < p_1$ の場合、 $\{pp_1 = p_1 - AP(t)\}$ とおき、

$$DT(t) = \begin{cases} f_0 P(t) & 0 \leq P(t) < pp_1 \\ f_0 P(t) + f_1 (P(t) - pp_1) & pp_1 \leq P(t) \end{cases} \quad \dots\dots ②$$

$p_1 \leq AP(t)$ の場合、

$$DT(t) = (f_0 + f_1) \cdot P(t) \quad \dots\dots ③$$

(4) 直接流出 $D(t)$ の算定

有効降雨 $DT(t)$ を単位図法により配分し、直接流出量 $D(t)$ を算定する。

$$D(t) = d_1 \cdot DT(t) + d_2 \cdot DT(t-1) + d_3 \cdot DT(t-2) \quad \dots\dots ④$$

ただし、 d_1, d_2, d_3 はそれぞれ降雨当日、翌日、および翌々日への単位図の配分率である。

(5) 日浸透量 $I(t)$ の算定

日降水量 $P(t)$ から有効降雨 $DT(t)$ と樹冠遮断 $C(t)$ をひいて $I(t)$ を求める。

$$I(t) = P(t) - DT(t) - C(t) \quad \dots\dots ⑤$$

なお、樹冠遮断 $C(t)$ は次式で算出する。

$$C(t) = c \cdot (1 - f_0) P(t) \quad \dots\dots ⑥$$

ここで、 c は樹冠遮断率を表わす。

(6) 土壌水分貯留量 $Ms(t)$ の算定

土壌水分貯留量 $Ms(t)$ には、日浸透量 $I(t)$ が加わり、浸透域からの蒸発散 $Ei(t)$ が消失していく。

$$Ms'(t) = Ms(t) + I(t) - Ei(t) \quad \dots\dots ⑦$$

なお、浸透域からの蒸発散 $Ei(t)$ は次式で算定される。

$$Ei(t) = (1 - f_0) E(t) \quad \dots\dots ⑧$$

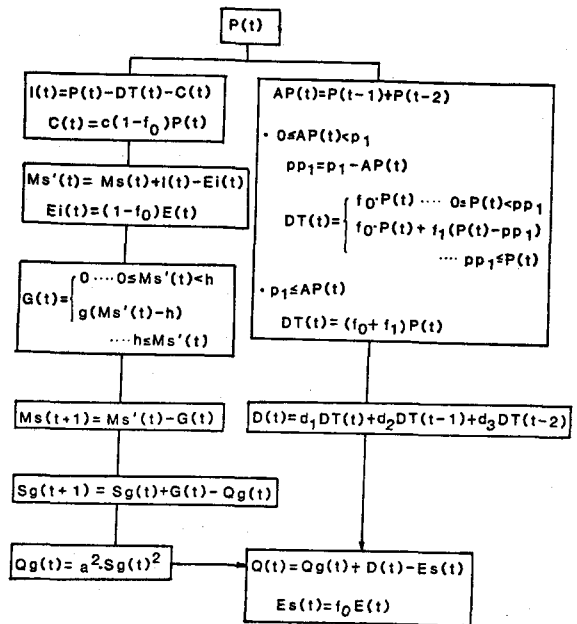


図2 長期流出モデルのフロー

(7) 地下水涵養量 $G(t)$ の算定

地下水涵養量 $G(t)$ は、土壌水分の超過保留量に比例すると考える。

$$G(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq M_s'(t) < h \\ g \cdot (M_s'(t) - h) & h \leq M_s'(t) \end{cases} \dots\dots ⑨$$

ここで、 h は土壌の最小含水量であり、 g は地下水涵養の定数である。次に、 $G(t)$ は $M_s'(t)$ からひかれる。

$$M_s(t+1) = M_s'(t) - G(t) \dots\dots ⑩$$

(8) 地下水流出量 $Q_g(t)$ と地下水貯留量 $S_g(t)$ の算定

地下水流出量 $Q_g(t)$ は地下水貯留量 $S_g(t)$ の 2 乗に比例すると考える。

$$Q_g(t) = a^2 \cdot S_g(t)^2 \dots\dots ⑪$$

ここで、 a は地下水流出の分数減水定数である。また、次式も成り立つ。

$$S_g(t+1) = S_g(t) + G(t) - Q_g(t) \dots\dots ⑫$$

(9) 総流出量 $Q(t)$ の算定

総流出量 $Q(t)$ は、地下水流出量 $Q_g(t)$ と直接流出量 $D(t)$ の和から飽和域からの蒸発散量 $E_s(t)$ をひいて算出できる。

$$Q(t) = Q_g(t) + D(t) - E_s(t) \dots\dots ⑬$$

なお、 $E_s(t)$ は次式から求まる。

$$E_s(t) = f_0 \cdot E(t) \dots\dots ⑭$$

2-3 パラメーターの値の算定法

上記の長期流出モデルのパラメーターは 12 であり、表 1 にはそのパラメーターの一覧表を示す。これらのパラメーターの値の大部分は、水文データから算定することができるが、以下にその方法を簡単に記す。

- (1) a は冬季の無降雨期間の減水部に地下水流出の分数関数減水式をあてはめ、その減水定数として求める。
- (2) b は地点降水量と流域平均降水量の相関から求める。
- (3) c は森林水文学の成果と年単位の水収支を考慮して求める。
- (4) d_1, d_2, d_3 は、孤立降雨の配分率より求める。
- (5) e は年単位の水収支と Hamon 式による年蒸発散量より求める。
- (6) f_0, f_1, p_1 は一雨雨量と直接流出量の相関図より求める。
- (7) g と h は $g=1.0$ 、 $h=200\text{mm}$ と仮定する。

3. 塩沢試験流域へのモデルの適用結果と考察

3-1 塩沢試験流域の概要

塩沢試験流域は、建設省土木研究所が 1952 年～1959 年に水文観測を行なった試験流域であり、利根川水系神流川の支川の流域である。図 3 には塩沢試験流域の概要を示すが、流域面積が 12.6 km^2 の山地流域であり、流域内には 14ヶ所の雨量観測所と 1ヶ所の流量観測所と 1ヶ所の地下水位の観測所が設置されていた。この流域

表 1 パラメーターの名称と塩沢流域の値

No.	記号	パラメーターの名称	塩沢流域の値
1	a	地下水流出の分数減水定数	0.014
2	b	地点降水量から流域平均降水量を算出するための補正係数	1.14
3	c	樹冠遮断率	0.10
4	d_1	単位図の配分率(降雨当日)	0.40
5	d_2	同 上 (降雨翌日)	0.46
6	d_3	同 上 (降雨翌々日)	0.14
7	e	蒸発散の補正係数	0.60
8	f_0	基本流出率	0.08
9	f_1	1 次付加流出率	0.41
10	g	地下水涵養の定数	1.0
11	h	土壌の最小含水量	200 mm
12	p_1	1 次遷移雨量	50 mm

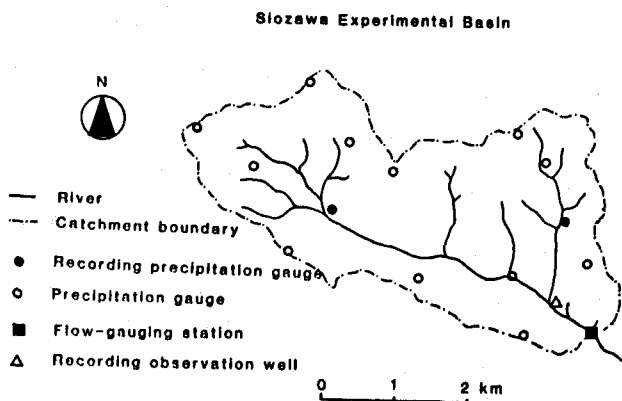


図 3 塩沢試験流域の概要 (出典：参考文献 3))

の雨量, 流出量, 地下水位などの水文観測結果は参考文献3)に整理されている。また, 流域内では気温と蒸発量の観測が行なわれなかったので, 神流川試験流域の下流端の渡瀬地点における観測結果を参考文献4)から引用して用いる。

なお, 塩沢試験流域については, 江川⁵⁾による水文観測の誤差, 標準減減曲線, および流域の浸透量に関する研究があることを付言しておく。

3-2 塩沢試験流域へのモデルの適用

(1) 同定期間と検証期間のとり方

日雨量, 日流量だけでなく, 蒸発計蒸発量, 気温などの水文気象データもそろっている1956~1959年の4年間を同定期間とし, 1952~1955年を検証期間とする。

(2) パラメーターの値の算定

同定期間の水文データに基づき, パラメーターの値を算定した。

地点降水量から流域平均降水量を算出するための補正係数 b は, 図4に示す一雨ごとの地点降水量と流域平均降水量の相関図に基づき $b=1.14$ とした。

直接流出に関するパラメーターである基本流出率 f_0 , 1次付加流出率 f_1 , 1次遷移雨量 p_1 は, 図5に示す一雨雨量と直接流出量の相関図に基づき, $f_0=0.08$, $f_1=0.41$, $p_1=50$ mmとした。

単位図の配分率 d_1, d_2, d_3 は, 図6に示す孤立降雨の配分率に基づき, $d_1=0.40$, $d_2=0.46$, $d_3=0.14$ とした。

地下水流出の分数減水定数 a は, 安藤・高橋・伊藤^{6,7)}により地下水流出の減水式として指数関数減水式よりも分数関数減水式の方が適合性にすぐれることが示されているので, 図7に示す分数減水定数と初期流量の相関図に基づき, 冬季の値である $a=0.014$ を用いる。

その他のパラメーターの値も, 表1に示されている。

3-3 モデルの適用結果と考察

表1に示す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。図8と図9には, それぞれ同定期間と検証期間における長期流出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比較を例示するが, 同定

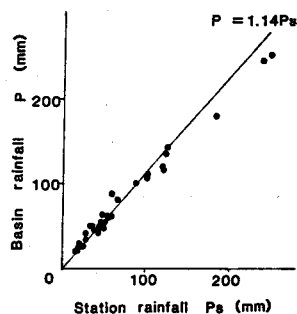


図4 一雨ごとの地点降水量と流域平均降水量

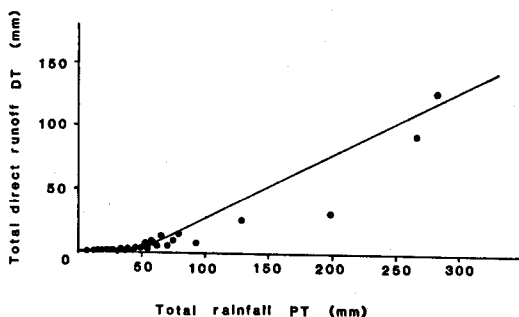


図5 一雨雨量と直接流出量の相関図

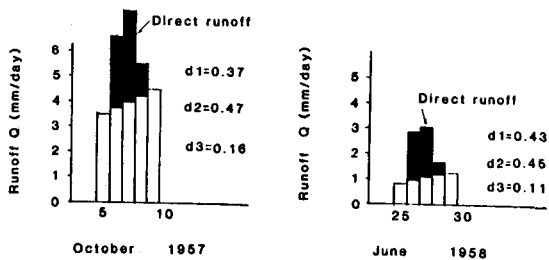


図6 孤立降雨の単位図

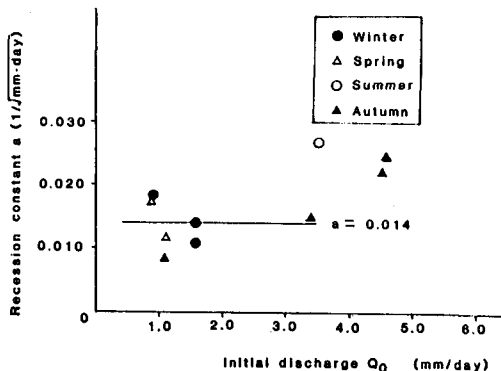


図7 分数減水定数と初期流量の相関図

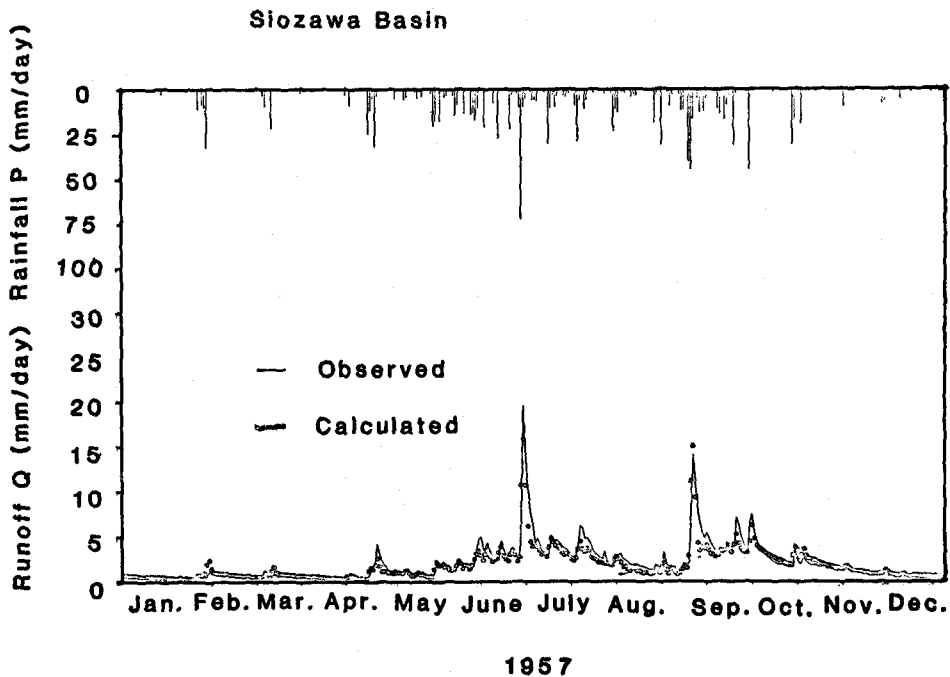


図 8 同定期間における長期流出モデルによる計算ハイドログラフと実測ハイドログラフの比較

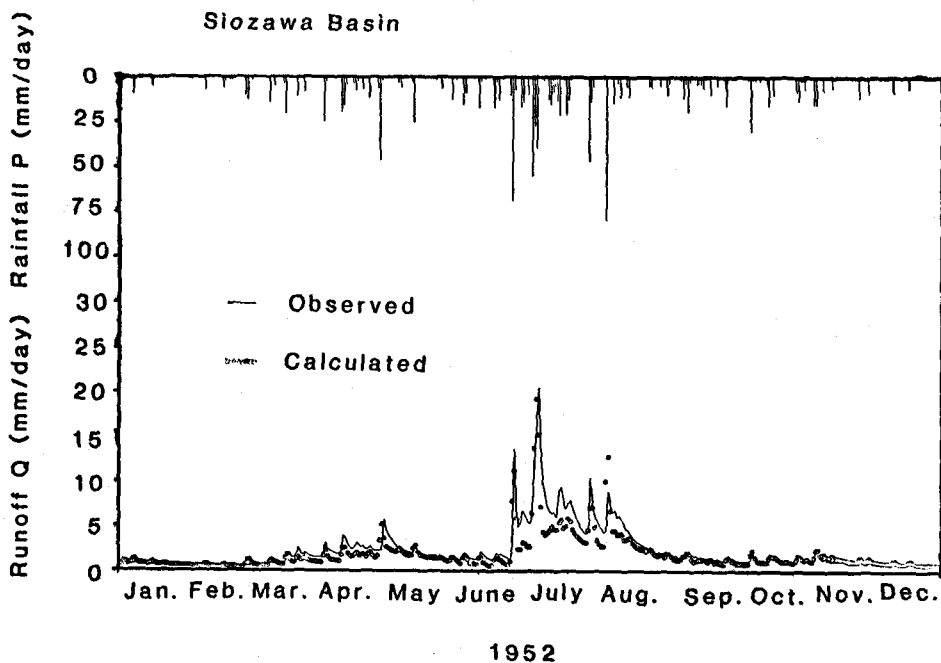


図 9 検証期間における長期流出モデルによる計算ハイドログラフと実測ハイドログラフの比較

期間においても検証期間においても計算ハイドログラフと実測ハイドログラフはよく符合していることがわかる。

計算ハイドログラフと実測ハイドログラフの適合度を表わす指標として、1年間の日流量の相対誤差の平均値(ADRE)と1年間の総流出量の相対誤差(YRE)の2つを用いる。式では、

$$ADRE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Q_0(t) - Q_c(t)|}{Q_0(t)} \quad \cdots \cdots (15)$$

$$YRE = \left| \frac{\sum_{t=1}^N Q_0(t) - \sum_{t=1}^N Q_c(t)}{\sum_{t=1}^N Q_0(t)} \right| \quad \cdots \cdots (16)$$

となる。但し、 $Q_0(t)$: 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。

図10には、4年間の同定期間と4年間の検証期間の合計8年間について、各年の1年間の日流量

の相対誤差の平均値と1年間の総流出量の相対誤差を示すが、日流量の相対誤差の平均値は0.18~0.35であり、永井・角屋・中嶋・鈴木⁸⁾が長期流出タンクモデルについて得た値とほぼ同程度の値である。また、図10によると、1年間の総流出量の相対誤差も0.05~0.20の値であり、比較的小さいことがわかる。以上のことから、ADREとYREの相対誤差から評価しても、モデルの適合性は高いと考えられる。

4. むすび

本稿では、筆者らの提案した長期流出モデルに若干の修正を加え、そのモデルの実流域への適用可能性を塩沢試験流域のデータを用いて示すことができた。今後、他の試験流域や多くの大河川流域についても同様な検討を進めていく予定である。

謝 辞

塩沢試験流域に関して種々の御教示を賜った愛知工業大学の江川太朗教授、ならびに水文資料を提供して下さった建設省の石崎勝義氏と佐合純造氏、および塩沢試験流域の水文観測に携わった建設省土木研究所の関係各位には深く感謝の意を表します。

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，1982。
- 2) 安藤義久・高橋裕・有賀茂・金尾健司：丘陵地の中小河川流域の水循環機構と都市化によるその変化，第26回水理講演会論文集，1982。
- 3) 建設省土木研究所河川部水文研究室：塩沢小試験地水文観測資料，土木研究所資料 1698号，1981。
- 4) 建設省土木研究所：神流川水文気象観測資料，土木研究所資料 第365号，1968。
- 5) 江川太朗：河川流出の標準逓減曲線とその適用に関する研究，東京大学博士論文，1979。
- 6) 安藤義久・高橋裕・伊藤孝：山地河川の地下水流出の逓減特性とそれに対する流域地質の効果，第25回水理講演会論文集，1981。
- 7) 安藤義久・高橋裕・伊藤和央：渇水時の河川流出量の予測手法，第2回水資源シンポジウム，1982。
- 8) 永井明博・角屋陸・中嶋章雅・鈴木克英：長期流出タンクモデルの実用的同定法とその考察，京大防災研究所年報 第23号B-2，1980。

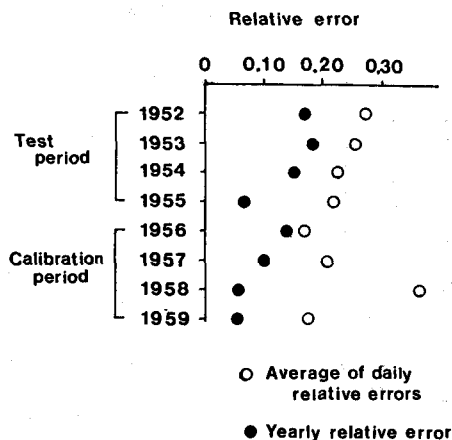


図10 相対誤差による適合性の評価