

1 緒言 森林による流出の平準化作用については従来多くの研究成果が得られている。平準化作用の解析方法に関して2つの方向がある。その1つは流域試験とともに従来論じられてきた方法であるが、水文観測資料そのものあるいはそれを用いて算出された流量資料に統計的処置を施し林相の改変に伴う経年変動を論ずる方法であり、他の1つは、水循環過程における物理的な現象をモデル化し、流域内の物理的な諸情報を取り入れて流出モデルを構築し、モデル中のパラメータやそれから算出された2次的な量によって森林の機能を論ずる方法である。

本研究は後者の流れを汲むものであるが、流出モデルを基本にして、経年変動の追跡法に新しい方向を見いだそうとするものである。ここでは流出モデルとしてタンクモデルを取り上げた。

東京大学愛知演習林では昭和初期より量水観測が継続されている。観測期間の中途における伐採や森林被害はなく、従来の森林理水試験に見られるような伐採による流出への効果を論ずることはできないが、観測期間も長く、観測初期に較べれば、森林の成長や土壌層の形成も進行し、流出への影響も無視できないものがあると判断した。そこで、降雨・流量・蒸発量が揃う昭和16年から昭和51年の36年間における愛知演習林穴宮試験流域を対象に林相の改良に伴う流出特性の経年変化を追跡することにした。

2 流域の概況と沿革 穴宮試験流域は愛知県瀬戸市水野町に所在し、流域面積は13.9ha、地質は母岩が黒雲母花こう岩と花こう閃緑岩よりなり深層風化を受けていて、表層部には第3紀新層を混える。標高は136mから218mに広がり、山腹は緩傾斜で流域起伏量比は7.17%、エロージョン比は0.956である。流域の地形は図1に掲げた。

量水観測は大正15年に開始しているが、大正14年から昭和4年にかけてクロマツを中心とした砂防造林が実行され、現在約半分程度は良好な状況に移行し、残りは僅かに良好になった程度である。林相の変遷を図2に示した。林相図は昭和28年と昭和54年の2回作製されている。昭和28年での調査では針広混交林が7.6ha、砂防造林地が3.4ha、禿しゃ地・崩壊地が0.75ha、無林地が0.59ha、その他が1.55haであったが、昭和54年の調査では針広混交林が5.5ha、針葉樹林(砂防造林地)が6.00haで、無林地が姿を消し、崩壊地も0.43haへと減少している。また、湿地の面積も図上から減少していることが理解できる。一方、昭和12年に同流域を撮影した航空写真を使って裸地をプロットすると図2aのようになる。実際の踏査による作図ではないので単純な比較はできないが、当時の概況を知ることではできよう。林相の変化をまとめると、昭和12年、昭和28年、昭和54年と年を経るに従って裸地の後退と植栽木の生育が進展し、さらに流域内に分布した湿地が減少し、植生の侵入成長による蒸散の向上を物語っている。

3 解析の方法と結果

3.1 流出モデルによる水文特性の抽出 資料として36年間の日流量、日雨量、日蒸発量をを用いる。日蒸発量はパンによる測定値である。これらの資料は3年間を1組として表1のように12期に分割した。3年間の消失量 L 、蒸発量 E は表中に示されたとうりであるが、 $R=L/E$ を見ると

0.6 付近の値をとるので、計算に用いる日蒸発散量 \tilde{e}_i はパンによる観測日蒸発量を e_i とすると、

$$\tilde{e}_i = 0.6 e_i \quad (1)$$

と定義することにした。

直列貯留型の4段タンクモデルを適用するが、最下段には浸透孔はなく、流出孔の高さは0mm、最上段には2つの流出孔をもつという形式とすると、初期水深として4つ、流出孔の高さに関して4つ、流出孔及び浸透孔の大きさに関して8つで計16のパラメータを決定する必要がある。3年間1期を対象としてパラメータの同定を行なうが、基準化Powell法を用いて評価基準として χ^2 乗誤差

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (Q_c(i) - Q_{ob}(i))^2 / Q_{ob}(i) / N \quad (2)$$

(ただし、 Q_{ob} : 観測日流量、 Q_c : 計算日流量、 N : 1095, 1096)

が最小になるようにした。期間によって異なるが、最適化によって求められたパラメータにより、その期間の計算流量と実測流量の相対誤差は、0.16から0.26となった。初期値をかえて最適化を行なってみたが、結果は同じであったので、採用したモデルの構造を用いた場合の最良のパラメータが求められたものと判断した。3年連続の資料に対する適合度としては良好である。なお、融雪の計算は本報告では用いなかった。さて、上述のような手続きにより各期間でのパラメータが同定されたが、16個のパラメータからその流出特性を浮き彫りにすることはこのままでは困難である。ここでパラメータに目を向けることはせずに、このパラメータにより特定の入力に対して再現されたハイドログラフを各期間毎に12個取り出し、これを解析することにより流出特性の経年変化を追うことを考えてみる。

3.2 水文特性の経年変化の追跡 現実には稀であるが、降雨-流出系が線形系の場合をまづ考える。蒸発散は負の降雨と考えるとそれは降雨の中に取り入れられ、これを $p(t)$ とする。単位応答関数を $u(t)$ とするとハイドログラフ $h(t)$ は、 $\tau < 0$ では $u(\tau) = 0$ であるから、

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) p(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

ここでハイドログラフ、単位応答関数、ハイエトグラフのフーリエ変換を次のように表わす。

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

(ただし、 $\omega = 2\pi f$, f : 振動数)

すると、

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) p(t-\tau) d\tau \right) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

$$\therefore H(\omega) = P(\omega) U(\omega) \quad (8)$$

となる。特定の入力を $p_A(t)$ としよう。これに対して12期のパラメータ群から再現されたハイドログラフの時系列 $\{h_{Ai}(t)\}$ を

$$\{h_{Ai}(t)\} = h_{A1}(t), h_{A2}(t), \dots, h_{A12}(t) \quad (9)$$

とする。一方、12期のパラメータ群より構成される単位応答関数の時系列 $\{u_i(t)\}$ を

$$\{u_i(t)\} = u_1(t), u_2(t), \dots, u_{12}(t) \quad (10)$$

とする。それぞれのフーリエ変換は、 $p_A(t)$ が $P_A(\omega)$ 、ハイドログラフが

$$\{H_{Ai}(\omega)\} = H_{A1}(\omega), H_{A2}(\omega), \dots, H_{A12}(\omega) \quad (11)$$

単位応答関数が

$$\{U_i(\omega)\} = U_1(\omega), U_2(\omega), \dots, U_{12}(\omega) \quad (12)$$

である。(8) から各期間 ($i = 1, 2, \dots, 12$) において

$$H_{Ai}(\omega) = P_A(\omega) U_i(\omega) \quad (13)$$

の関係が成立するから、周波数領域においては、フーリエ変換されたハイドログラフ間の比は流出特性(線形系の場合はフーリエ変換された単位応答関数)間の比に等しい。即ち、

$$H_{Ai}(\omega) / H_{Aj}(\omega) = U_i(\omega) / U_j(\omega) = R_{ij}(\omega) \quad (14)$$

となり、入力降雨によらず定義できる。ここで、 $R_{ij}(\omega)$ は周波数応答関数である。

実際の降雨-流出系は線形系ではないので、単位応答関数を定義できない。しかし、ハイドログラフのフーリエ変換を考えることは許される。そこで、周波数応答関数に準じた関数として

$$R_{Aij}(\omega) = H_{Ai}(\omega) / H_{Aj}(\omega) \quad (15)$$

を考える。非線形の場合は、このようにフーリエ変換されたハイドログラフの比較は、人力である降雨のパターンによってまちまちであるが、 $R_{Aij}(\omega)$ には年月の経過に応じて森林が流出におよぼす平準化作用の経時変化に関する完全な情報が保存されている。

さて、フーリエ変換は時刻歴に含まれる振動数成分の検出を行なうことでもある。ハイドログラフの有限フーリエ近似 $\tilde{h}(t)$ は

$$\tilde{h}(t) = X_0/2 + \sum_{k=1}^{K/2-1} X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) + (X_{K/2}/2) \cos 2\pi f_{K/2} t \quad (16)$$

とすると、ハイドログラフの分散 σ^2 はフーリエ振幅を用いて

$$\sigma^2 = 1/2 \left(\sum_{k=1}^{K/2-1} X_k^2 + X_{K/2}^2 / 2 \right) \quad (17)$$

とかける。これによってハイドログラフの分散は流出に加えられた平準化作用の程度を直接的に表現する方法として認識することができる。時系列 $\{h_{Ai}(t)\}$ に対してその分散の時系列

$$\{\sigma_{Ai}^2\} = \sigma_{A1}^2, \sigma_{A2}^2, \dots, \sigma_{A12}^2 \quad (18)$$

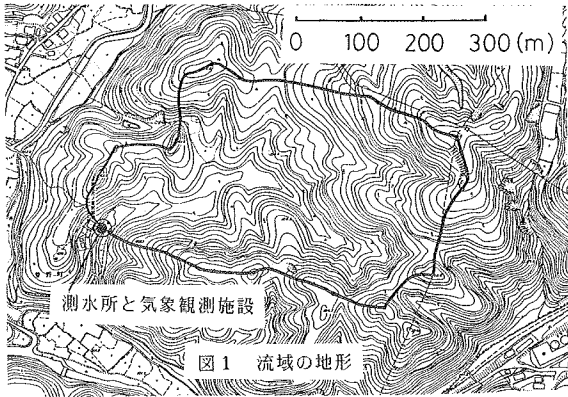
を考えることができる。流出特性間の変化があまり大きくならない範囲において、線形系ならば $\sigma_{Aic}^2 / \sigma_{Aij}^2$ は(13)と(17)から入力に依存しない量であるが、非線形系を対象とした場合には入力である降雨に依存して変わる量である。

図3に2つの入力 $P_A(t)$ 、 $P_B(t)$ (多雨期間と渇水期間) に対する応答を総合的に表現する量として分散の時系列を示した。3年分の流出に対しては $\sigma_{Aic}^2 \cdot \sigma_{Bic}^2$ 、そのうち後半の2年分に対しては $\sigma_{Aic}^2 \cdot \sigma_{Bic}^2$ を示してある。

4 考察 σ_A^2 の経時変化と σ_B^2 の経時変化の比較をすると、後年ほど減少するという傾向を程度の差はあれ確認することができるし、3節で論じたことと一致するが、入力に応じて経時変化も異なるということに気がつく。結論として以下のことが導かれる。

(1) 林相の良好化に伴って流出の平準化が進んだこと。

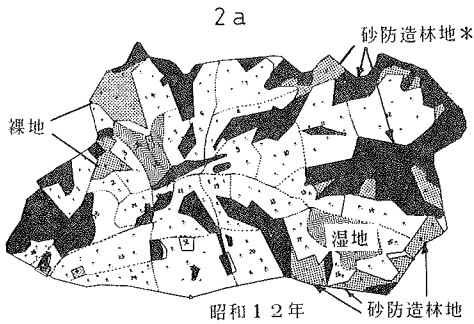
(2) 入力である降雨や蒸発散のパターンに応じて平準化作用の進展が明確なものもあればそうでないものもあり、それは降雨-流出系の非線形性に起因しているということ。



解析期間内の雨量・消失量・蒸発量

コード	年	p (mm)	P (mm)	L (mm)	E (mm)	R
M1	1941	2036.4				
	1942	1355.9	4759	2032	4149	0.490
	1943	1356.6				
M2	1944	1218.2				
	1945	2051.9	4932	2168	4154	0.522
	1946	1661.5				
M3	1947	1244.4				
	1948	1472.2	4552	2055	3760	0.547
	1949	1835.7				
M4	1950	1782.0				
	1951	1632.3	5309	1880	2956	0.636
	1952	1895.0				
M5	1953	1888.8				
	1954	1772.6	5064	1926	3150	0.612
	1955	1403.0				
M6	1956	1911.1				
	1957	2016.0	5424	1870	3037	0.616
	1958	1497.0				
M7	1959	1949.1				
	1960	1359.5	4913	2142	3410	0.628
	1961	1604.8				
M8	1962	1449.7				
	1963	1386.6	4183	2165	3542	0.611
	1964	1346.5				
M9	1965	1604.5				
	1966	1647.4	4838	2216	3795	0.584
	1967	1585.8				
M10	1968	1522.6				
	1969	1583.9	4921	1731	3451	0.501
	1970	1814.3				
M11	1971	1809.7				
	1972	1960.2	5004	1702	3312	0.514
	1973	1233.3				
M12	1974	1983.8				
	1975	1806.4	5751	1861	2868	0.649
	1976	2160.5				

注： p：年雨量， P：3年間雨量，
L：3年間消失量， E：3年間蒸発量



*：砂防造林地内であるが裸地状を呈する

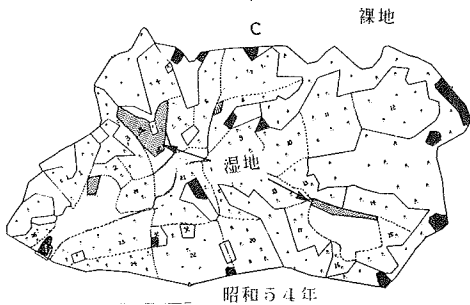
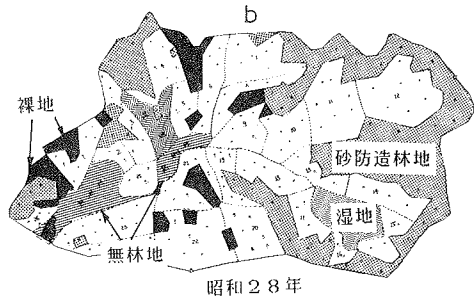


図2 林相の変遷

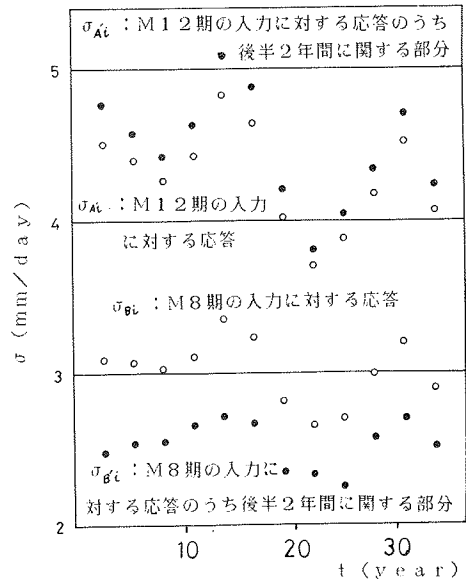


図3 流出の平準化作用の経年変化