

# 蒸発散による河川流量の変動について

望 月 誠 美

Fluctuating Discharge Due to Evapotranspiration

Seimi Mochizuki

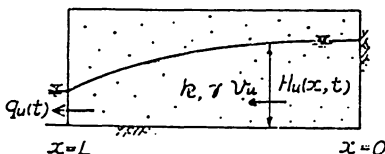
(昭和50年10月31日受理)

## 1. はじめに

山地流域の保水性を高め出水を遅らせようとする目的で通称「緑のダム」という植林政策が打ち出され実施されている。これに対し山麓の農民は植林後渇水時における流量の低下が著しいという経験から政策の実行に反対を唱えているが、これを裏づけるデータが我が国にはないのが現状であった。著者は山地流域の無降雨期間における流量の低減特性を調べるうち、データとして日平均流量を用いると低減係数にばらつきが大きいことを見だし、また低減曲線をあてはめることをはばかるような流量が変動する期間が多数現われることをみだした。そこでこれを究明するため、鎧畑ダムでの毎時流入量を調べたところ、24時間周期をもつ流量の変動があらわれる期間を見いだすに至った。さらにこの変動が植物による蒸発散効果によるものであるかを Hylcama の実験結果と照らし検討を加えた所、非常によく類似することが明らかとなった。また、渇水が継続し流量が低下すると蒸発散量の流量に及ぼす影響が少なくなる例を示した。

## 2. 地下水流出モデル

渇水期における流出成分は地下水より成り、その流出量にあらわれる蒸発散の影響量を研究するためには、まず地下水流出のモデル化をしなければならない。そのモデルは数々提案されているが、現在までの地下水学から適当と考える不被圧流出モデルを選んだ。このモデルに



図一 不被圧流出モデル

水供給がない場合(図一)について運動、連続の式を導くと次のようになる。

$$V_u = -\frac{\partial}{\partial x} \{k \cdot H_u(x, t)\}$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} \{r \cdot H_u(x, t)\}$$

$$= -\frac{\partial}{\partial x} \{H_u(x, t) \cdot V_u\}$$

ここで  $r$ ; 間げき率

$k$ ; 透水係数

上の2式より低減時の流出流量は次の関係となる事が導かれる。

$$\gamma_u(t) = \frac{q_{u0}}{(at+1)^2}$$

ここで  $q_{u0}$ ; 初期流量

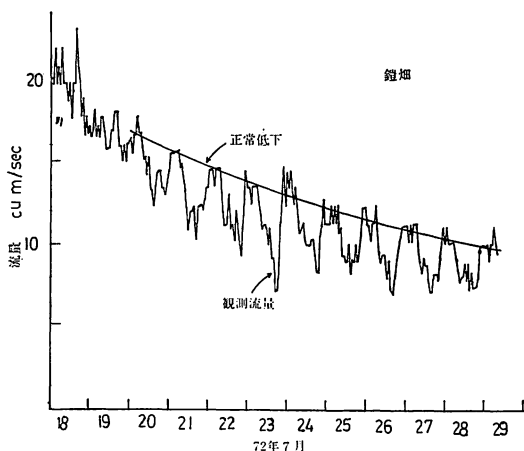
$a$ ; 低減係数

## 3. 鎧畑ダムで観測された地下水流量の変動

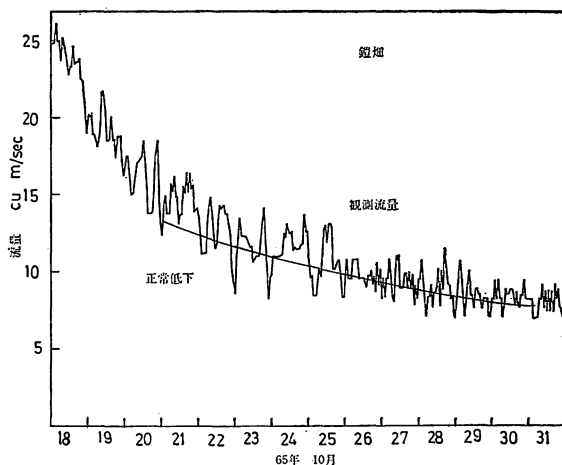
図一2、図一3は鎧畑ダム(流域面積320km<sup>2</sup>)で観測された hydrograph であり、いずれの期間も無降雨(日雨量で1mm以下は無降雨とみなした)である。図一2の期間は7月で明らかな周期的な変動をみることができる。すなわち真夜から朝方にかけて流量が大きく昼間流量が少ない。図一3は10月のもので7月のような明確な周期的変動はみられない。この時期より前10月10日に初霜があったことを考慮すればこの変動は蒸発散によるものではなく、水位観測誤差、水位一貯水量の関係を線形近似したための誤差等によるものと推定される。

## 4. 損失量と蒸発量

図一2でみられる正常低下と観測流量との差を損失量とした。正常低下曲線は通常低減曲線と呼ばれるもので、前述した式に最も流量の安定した時刻のデータを選びあてはめた。この量は流域からの蒸発散量であろう



図—2 鏡畑ダムで観測されたハイドログラフ



図—3 鏡畑ダムで観測されたハイドログラフ

が、また、損失量がダム貯水池及び河道からの蒸発量である可能性もあるためダム貯水池からの蒸発量を推定した。蒸発量公式は次の Penman 型の公式を用いた。

$$E_L = 0.7 \frac{Q_n d + E_a r}{d + r}$$

ここで  $E_L$ ; 湖面からの蒸発量 (inch)

$d$ ; 蒸気圧勾配

$$d = \frac{k}{(T_a + b)^2} e^{-k/(T_a + b) + c}$$

$T_a$ ; 気温 (°F)

$Q_n$ ; 蒸気量に換算した実放射量 (inch)

$$Q_n d = e^{(T_a - 212)} (0.1024 - 0.01066 \ln R) - 0.0001$$

$R$ ; 日射量 (Langley's / day)

$E_a$ ; U. S. Geological Survey によるペン蒸発量公式

$$E_a = (e_s - e_a)^{0.88} (0.37 + 0.0041 U_p)$$

$e_s$ ; 気温における飽和蒸気圧 (inchHg)

$$e_s = e^{-k/(T_a + b) + c}$$

$e_a$ ; 露点温度における飽和蒸気圧 (inchHg)

$$e_a = RH \cdot e_s \quad RH; \text{湿度}$$

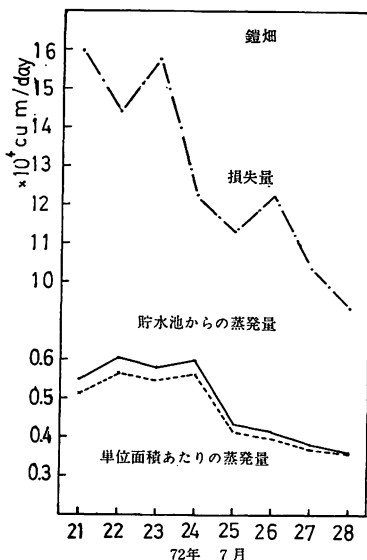
$U_p$ ; 風量 (miles / day)

$r$ ; 蒸発面から空気に伝達される熱量に関する係数

係数の値は  $k = 7482.6$   $b = 398.36$   $c = 15.674$

図—4 でその計算値と損失量とを較べた。貯水池からの蒸発量は損失量に較べて微々たる量であり、河道からの蒸発量はどの程度か推定できないが損失量を満たすに至らないと思われる。しかし両者の時間的傾向は似ている。次に蒸気圧差 ( $e_s - e_a$ ), 蒸気圧勾配 ( $d$ ), 風量

昭和51年2月



図—4 流量の損失と貯水池からの蒸発量との比較

( $U_p$ ) と損失量との相関をもとめた。72年7月の場合には各 factor との間に Lag time が0~1時間の時高い相関が得られた。しかし65年10月の場合、前者の場合と異なり逆のパターンを示し相関は低いことがわかる。(図—5参照) 以上のことから72年7月について損失量に占める貯水池及び河道からの蒸発量はわずかであるが損失量は蒸発に関係が深いことがわかる。

### 5. 地下水位と蒸発散

地下水位もまた流量と同様に変動することが観測されている。図—6は Milford, Utah で観測されたもの

である。8月には水位の変動が大きく、10月の霜が降りてからではこのような大きな変動がみられない。図-7は Asheville, North Carolina で観測されたもの

で乾燥した山間草原での2つの井戸での記録である。井戸G-1とG-2は30 feet しか離れていないが標高はG-1の方が18 feet ほど高く、また水位も高い。この

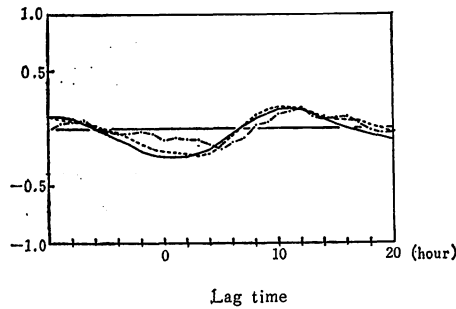
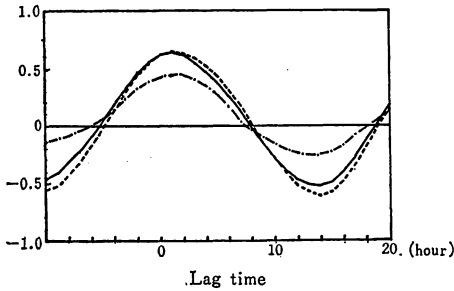
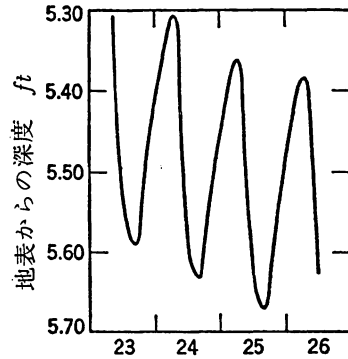
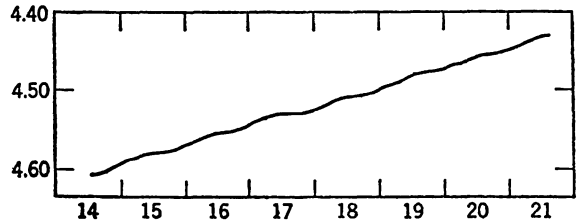


図-5 損失量と飽和蒸気圧勾配 (実線), 蒸気圧差 (破線), 風量 (一点鎖線) との相互相関



8月  
(A)



10月  
(B)

図-6 地下水位にあらわれた蒸散効果 (A) 夏 (B)地降霜後 ユタ州, ミルフォード

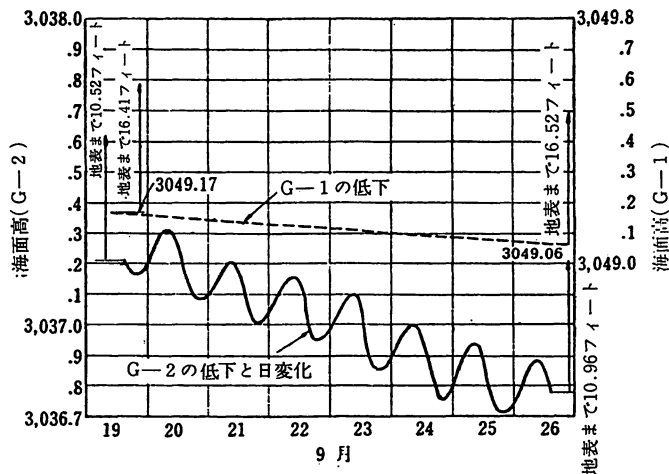


図-7 地下水位

ノースカロライナ州アッシュビル, 南東森林試験所, コイータ試験林

図をみるとG-2は顕著な変動がみられたのに対しG-1はこのような現象はみられない。これらの事は図-8によって説明できる。つまり一般的に山側では地表より

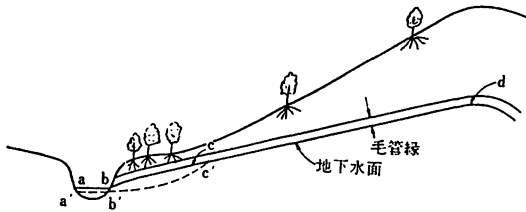


図-8

地下水位がかなり低く、植物の根が毛管縁に届かず地下水位に影響を与えないのに対し、河側では地下水面が地表に近く根が毛管縁、地下水帯に届き地下水位に影響を与える。昼間では  $b' c'$  のように植物の吸い上げによって水位が下がり、 $a' b'$  のように河の水位も下って流量が低下する。夜になるとほとんど回復するが降雨による補給がないかぎり完全には回復しない。また季節によって植物の吸い上げ量が異なり夏は活動が活発で地下水位に変動をもたらすが霜が降った後では葉は枯れて植物の活動はにぶり地下水位にほとんど影響を与えない。

6. 実験による蒸発散量の測定結果について

Hylckama は大きさ  $6 \times 6$  m, 深さ 3 m のタンクに土をつめ、その表面に salt cedar を植えたもの、土壌のままのものについて蒸発散による水の損失量を観測した。この実験では常に地下水位は一定である。図-9はこの実験結果の一部である。これは6月の2期間について時刻ごとの平均をプロットしたもので、7は植物を植えたタンク、11は土壌のままのタンクである。6月上旬から中旬にかけて(A)と6月下旬(B)とを較べると水の損失量は上旬より下旬の方が大きく、また昼間のピークも高い。このことはこの間に植物がかなりの成長をみて水の吸上げ量が大きくなったと思われる。11では両者は異なったパターンを示し(A)では1つのピーク、(B)では2つのピークが表われている。この原因については定かでない。しかし両者に共通するピークは夕方から夜半にかけてである。また(A)、(B)ともに植物を植えたタンクの方が数倍から数10倍も大きいことがわかる。彼はまた得られた曲線をフーリエ級数にあてはめている。図-9の曲線はいずれも2~3項のフーリエ級数でよくあてはまっていることに注目したい。そしてさらに他の期間を含め解析した結果を表-1に示している。これによると植物を植えたものは1項目の級数(24時間周期)の効果が卓越している反面、土壌では1、2項目共に効果が大き

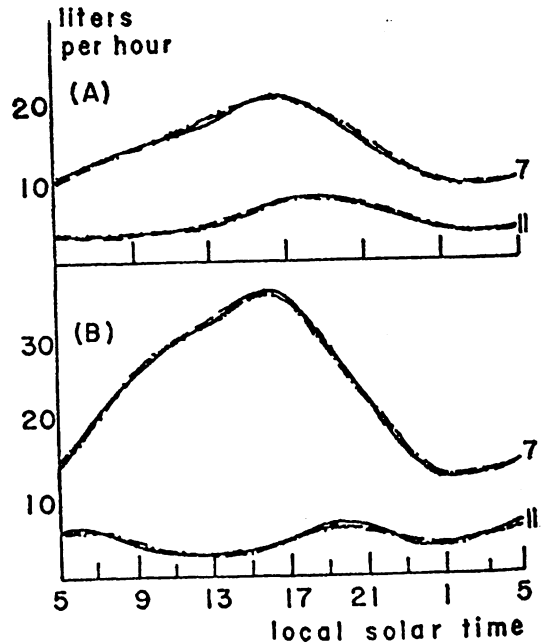


図-9 蒸散計による水の使用量  
No. 7 salt cedar を植えたもの No. 11土壌  
(A) 6月9~13日, (B) 6月25~30日  
1963年, 実線観測値の時刻平均値, 破線3項までのフーリエ級数, 一点鎖線2項までのフーリエ級数

表-1 タンク7, タンク11での水使用量をフーリエ解析した際の平均と振幅 (liters/hr)  
カッコ内の数は全分散に対する各項の分散のパーセンテージ

	平均		振 幅			
	7	11	$a_1$		$a_2$	
1963	7	11	7	11	7	11
6/9 %	14.7	5.1	5.2 (95)	2.3 (87)	1.0 (3)	0.9 (12)
6/25 %	23.5	4.3	11.6 (98)	1.0 (27)	1.2 (1)	1.6 (63)
7/3 %	27.3	4.3	14.1 (99)	2.0 (59)	1.1 (1)	1.5 (36)
7/9 %	28.0	3.4	15.4 (99)	1.6 (56)	0.1 (1)	1.3 (35)
8/12 %	28.2	4.0	10.6 (98)	4.1 (76)	1.2 (1)	2.0 (19)
9/23 %	27.6		15.2 (98)		2.3 (2)	
1964						
8/10 %	25.6	4.8	10.3 (98)	0.6 (50)	1.0 (1)	0.5 (39)

い。また調査期間が異っても時刻平均的にはほぼ同様なパターンを示すことがわかる。

7. 損失流量のフーリエ解析

前掲した72年7月の期間の他、73年7月の期間(図-11)についても損失量をもとめ、その量をフーリエ解析した。その結果を図-10、図-12に示す。72年では3項までの級数でよくあてはまり、その変動のパターンは図-9の実験結果と著しく相似している。ただフーリエ級数による解析効果をみると、3項まで有意とみられるので実験よりも多少現象は複雑であるが、流出の時間遅れなどを考えれば損失量は蒸発散によるものとしてさしつかえないと考える。次に73年7月であるが、この期間は降雨がダムサイトで合計9mm、流量は比流量で $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$ 以下という長期渇水期間であり特殊性がある。この期間の損失量の時刻平均の変動をみると(図-12(B))、ピークが低いとの変動が多少複雑であ

表-2 鏡畑での時刻平均損失量をフーリエ解析した際の平均と振幅 (cu m/sec) カッコ内の数は全分散に対する各項の分散のパーセンテージ

	平均	振 幅				
		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>
1972						
7/21-28	1.47	1.70	0.24	0.48		
%		(89)	(2)	(7)		
1973						
7/6-30	0.51	0.59	0.23	0.11	0.11	0.10
%		(79)	(12)	(2)	(3)	(2)

るのが特徴である。前者については地下水位が低下したため植物の根が毛管縁まで届かない面積が増加したためと思われる。後者については12時間周期もかなり解析効果があることから、中間包気帯への地下水からの水の充

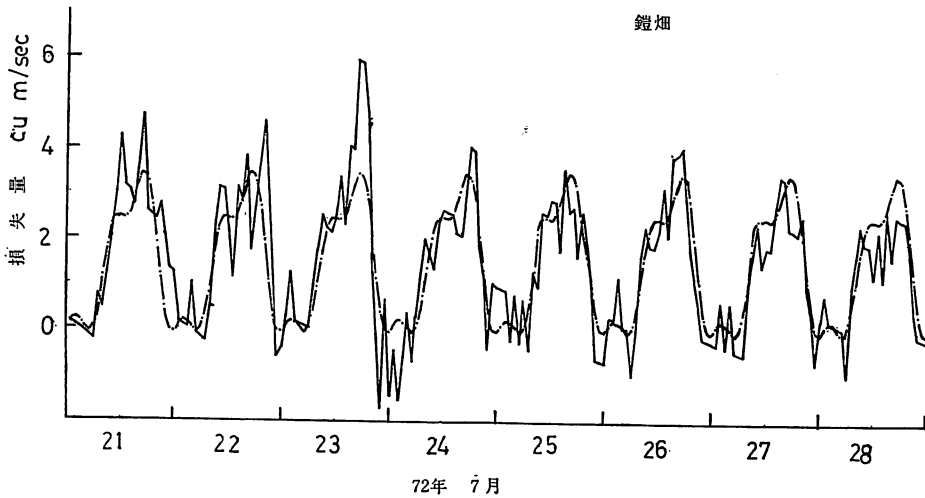


図-10 鏡畑ダムで観測された流量の損失(実線)とフーリエ級数による近似(一点鎖線)

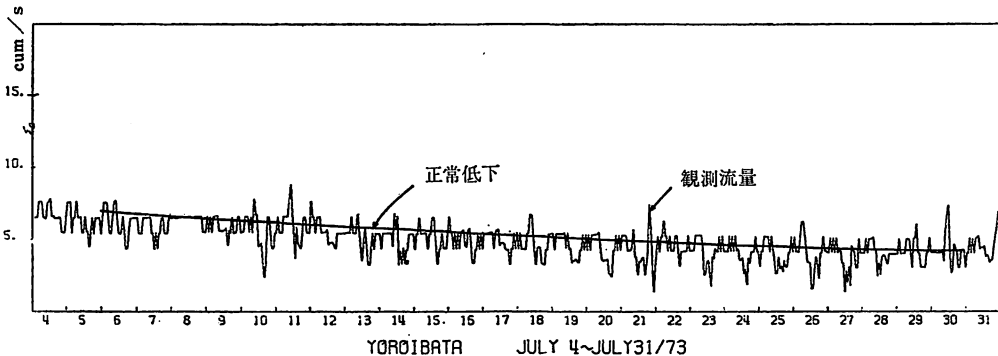
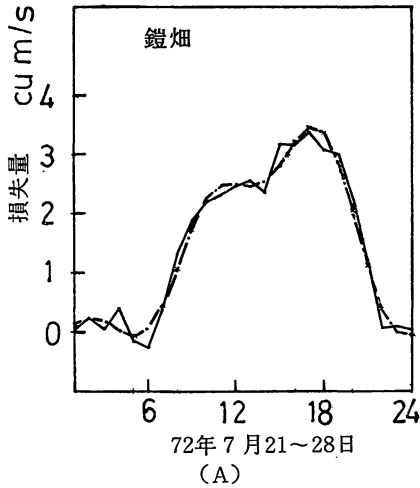
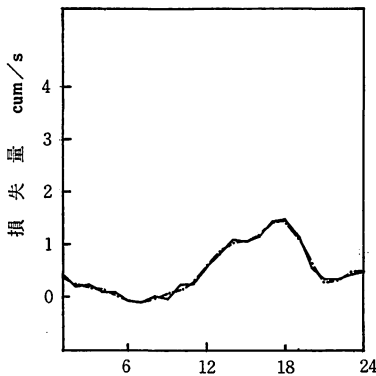


図-11 鏡畑ダムで観測された hydrograph



72年 7月21~28日  
(A)



図一12 73年 7月 6日~30日  
(B)

図一12 鎧畑ダムで観測された流量の損失の時刻ごとの平均(実線)とフーリエ級数による近似(一点鎖線)

足があったと推測される。この点については図一9(B)のタンク11の水使用量の時間変化を参照されたい。

## 8. あとがき

蒸発散は地下水流出量にかなりの影響をおよぼし特に

夏季の渇水時にはその量は大きいことが概略的にはいえる。また、蒸発散量は樹木からの蒸散(これは根からの吸水と同じとみなされる)が大半を占めるので地下水位が大きく左右する。したがってかなり渇水が続くと地下水位が下がり蒸発量は減ることが予想される。今後流域からの蒸発散量の推定が問題となろうが容易でないことがわかる。次に流出解析に必要な低減曲線、同係数を得るためには蒸発散の影響の少ない秋から冬の渇水期を選ぶことが望ましい。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり膨大なデータを提供して下さいました鎧畑ダム管理事務所、並びに解析にあたり助言をいただいた長谷部正彦先生に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Chester O. Wisler, Ernest F. Brater, Hydrology, Second edition, John Wiley & sons, New York, 1959.
- 2) David K. Jodd, Ground Water Hydrology, John Wiley & sons, New York, 1959.
- 3) C. J. Wiesner, Hydrometeorology, Chapman & Hall, London, 1970.
- 4) Van Hylckama, "Evaporation from Vegetated and Fallow Soils", Water Resources Research, Vol. 2, No. 1, 99-103, 1966.
- 5) Wallace W. Lamoreux, "Modern Evaporation Formulae Adapted to Computer Use", Monthly Weather Review, Jan, 26-28, 1962.
- 6) Tojiro Ishihara, Fusetsu Tagagi, "A Study on the Variation of Low Flow", Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol. 15, Part 2, No. 95, 1965.