

タンクモデルによる流域エントロピー解析

塩月 善晴*・芝崎 一也**・川畑 俊明***
 笈下 雅章****・小田原祐司*

Some Examples of the Basin Entropy Analysis by TANK Model

Yoshiharu SHIOTSUKI, Kazuya SHIBASAKI, Toshiaki KAWABATA
 Masaaki KAKESHITA and Yuji ODAHARA

Abstract

The BASIN ENTROPY, ENT, was proposed as a new index indicating the basin characteristics by Shiotsuki¹⁾. ENT is written by the equation (6) in this paper. The meaning of each letter for unit time duration is as follows; $S=ENT, Q_1=$ Surface Inflow into basin at altitude $T_1, Q_2=$ Surface Outflow from basin at $T_2, R=$ Rainfall at $TR, E=$ Evaporation at $TR, \Delta W=$ Basin Storage Change, $G=$ Infiltration downward at T_2 . The first term of the right hand of (6) is the FLOW ENTROPY which is always negative because of $T_1 > T_2$. The second is the net RAIN ENTROPY, also always negative by $T_1 > TR > T_2$. The third term is the STORAGE ENTROPY, positive when $\Delta W > 0$ or negative when $\Delta W < 0$. $\Delta W > 0$ means the increase of the basin water resources and $\Delta W < 0$ means those decrease. The total entropy ENT indicates the basin is rich in the water resources when $ENT > 0$. On the other hand the basin takes on the different character, disastrous, when $ENT < 0$. The basin entropy analysis are made for the various basins with the different scales in this paper. It is found that the effect of the man made DAM can be assessed or evaluated by the basin entropy analysis.

1. はじめに

塩月¹⁾は河川流域の特性を示す新たな指標として流域エントロピー, ENT を定義した。ENT は主として降雨エントロピー, 流れエントロピー, 貯留エントロピーからなる。それぞれの水文諸量のもつエントロピーの性格は次のようになる。

(1) 降雨エントロピー／流域上流側で降る雨は資源性をもち、下流側の雨は災害性を帯び、流域全体では

降雨は災害性をもつ。

(2) 流れエントロピー／流域表面で出入りする流れ(流入, 流出)は災害性をもつ。

(3) 貯留エントロピー／流域貯留増大は資源性となり、減少は災害性につながる。

仮に水文諸量が同一であっても定義によりそれぞれのもつエントロピーは高度によって異なるからトータルの流域エントロピーは異なってくる。定義により $ENT > 0$ では資源性が豊富な流域であり、 $ENT < 0$ では災害性が強くなる。1960年代筑後川上流域に下笠、松原ダム建設をめぐる大きな紛争があった(下笠・松原ダム研究会²⁾。紛争の一点であった二つの上流域大山川水系、玖珠川水系どちらを優先してダム設置をはかるかについて、両流域の流域エントロピーを評価することにより考察が行われた¹⁾。結果は計画として優

*山口大学社会建設工学科建設計画研究室

**山口大学大学院システム工学専攻

***(株)エイトコンサルタント

****九州大学大学院都市建設工学専攻

先された大山川が大きな負のエントロピーを示して、より暴れ川の性格を帯びており、優先順位に関する限り建設省側の当初の計画はやむを得なかったものであることを示した。このように流域エントロピーは流域の特性を表現する指標となりそうである。本論ではさらに山口県下のダム流域について解析を行った結果について述べる。

2. 流域エントロピー

2.1 流域水のエントロピー表現

樋田³⁾によるとエントロピー保存則は次のとおりである。

$$\begin{aligned} & \text{拡散する(消費する)能力} = \\ & \text{[廃棄(最終)エントロピー]} - \text{[導入エントロピー]} \\ & > 0 \end{aligned}$$

樋田の表現を借りれば、高所の水は放っておけば「高所の水の拡散能力は流れによる摩擦で消費され熱エントロピーに転化するだけであり」、エントロピー増大の結果低所の水となる。したがって、流域水のエントロピー保存則は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \text{流域水の拡散能力} = & \text{[流域下流出口(高度, } T_2 \text{)の水のもつエントロピー]} \\ & - \text{[流域上流入口(高度, } T_1 \text{)の水のもつエントロピー]} \end{aligned}$$

いま降雨Rは無く、入り口、出口での流量Qが等しいとする。さらに流域にはべつ物理量 Q/T_1 が入り、 Q/T_2 が出て行くとする。 $T_1 > T_2$ なので、差 $(Q/T_2 - Q/T_1)$ は出て行く物理量 Q/T_2 の方が大きいので正となる。高所の水は位置エネルギーが高く、水力発電に見られるように資源価値がある。したがって上流側の Q/T_1 は水の低エントロピー資源としての状態量を表わしている。この資源を得て流域の生命、生産活動が可能であり、流域水の動きに伴って発生するエントロピーは Q/T_2 として海に廃棄される。このように流域水は拡散能力をもつことを考えたとき物理量 Q/T は流域水のエントロピーを表現しているものとみなすことができる。したがって

$$\begin{aligned} \text{流域水の拡散能力} = \\ \text{定常流量}(Q) \times (1/T_2 - 1/T_1) > 0 \end{aligned}$$

2.2 流域水のエントロピー収支

流域に降った雨は一部は蒸発(E)や地下水帯下部からさらに下へ浸透して流域表面に現れない成分(G)を除き、一部は表面貯留・地下水貯留(W)になるが、最終的には直接流出(Q)と一緒に海へ流れ去る。Fig.1のような流域の断面図で単位時間当たりの流域水の動

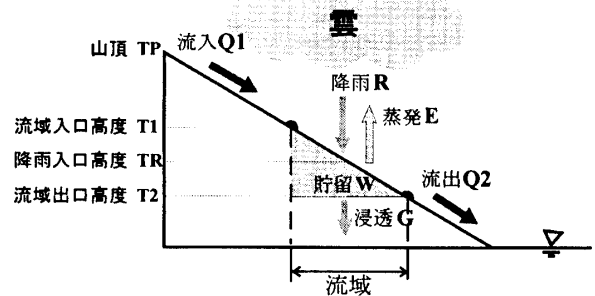


Fig.1; A cross sectional view of basin.

きを考えてみる。流域上流入口で流入 Q_1 が入り、下流出口で流出 Q_2 が出る。流域全域に降雨 R、蒸発 E があり正味の降雨 $(R-E)$ がもう一つの流入として補給されたとする。G の高度は便宜的に下流出口の高度とする。 T_1, T_2, TR はそれぞれ流域の入り口の高度、出口の高度、正味降雨の高度を示す。高度(T)は基準面からの高さで相対的な値だがここでは海拔高度としておく。

・水の出入りによって流域が受ける単位時間あたりのエントロピー

$$S = Q_1/T_1 + (R-E)/TR - (Q_2+G)/T_2 \quad (1)$$

・流域で水が新たに担う単位時間あたりのエントロピーを S' とすると

$$Q_1/T_1 + (R-E)/TR + S' = (Q_2+G)/T_2 \quad (2)$$

・水収支による貯留変化量

$$\Delta W = Q_1 + R - E - Q_2 - G \quad (3)$$

ここで S は流域が受ける水のめぐみの度合いを表す。 S' は流域水の拡散能力を表す。 S' は通常まさつ熱で発生するエントロピーで、過大な場合は流域での水災害に伴って発生するものと考えてよい。従って S' は流域

水のもつ災害性（環境の面では流域の汚れを拭う洗浄性）を表すと考えてよい。(1),(2)式により $S = -S'$ で S は流域水のもつ資源性と考えられる。

(1),(3)式より Q_2 を消去すると

$$S = Q_1(1/T_1 - 1/T_2) + (R-E)(1/TR - 1/T_2) + \Delta W/T_2 \quad (4)$$

(1),(3)式より Q_1 を消去すると

$$S = Q_2(1/T_1 - 1/T_2) + (R-E)(1/TR - 1/T_1) + (\Delta W + G)/T_1 - G/T_2 \quad (5)$$

したがって流域水の資源性 S を 2 倍したもので表せば、(4)+(5)より

$$2S = (Q_1 + Q_2)(1/T_1 - 1/T_2) + (R-E)(2/TR - 1/T_1 - 1/T_2) + \Delta W(1/T_1 + 1/T_2) + G(1/T_1 - 1/T_2) \quad (6)$$

となり、入口、出口の両方の流量が入って考察に便利である。ただし右辺最終項 G/T_1 については、 G はいま高度 T_2 でのみ意味を持つので(6)式から削除できる。

(6)式右辺の各項のもつ意味は次のようである。

・第1項について

$T_1 > T_2$ であるので、第1項、流れによるエントロピーは常に負である。したがって $2S$ 資源性では流れは流域水の資源性の低下を示し、流域の水の災害性を増大させる。

・第2項について

いま図のように近似的に流れについての流域入り口の高度 $T_1 = (TP + T_1)/2$ 、正味降雨についての流域入り口の高度 $TR = (T_1 + T_2)/2$ とする。第2項は、 $(R-E)(1/TR - 1/T_1) + (R-E)(1/TR - 1/T_2)$ であり、 $(R-E)(1/TR - 1/T_1)$ 、 $(R-E)(1/TR - 1/T_2)$ はそれぞれ流域上流側、下流側の正味降雨項である。これらに上の TR を代入すると、

$$\text{上流側正味降雨項} = R(T_1 - T_2)/T_1/(T_1 + T_2) > 0 \quad (7)$$

なので、上流側の降雨は資源性を持つことが判る。これに対し、

$$\text{下流側正味降雨項} =$$

$$R(T_2 - T_1)/T_2/(T_1 + T_2) < 0 \quad (8)$$

となり、下流側の正味降雨は災害性を持つことになる。全流域では、

$$(7) + (8) = -(R-E)(T_1 - T_2)^2 / (T_1 + T_2) / T_1/T_2 < 0$$

で降雨のもつエントロピーは負となり災害性を示す。以上のように、流域での流れのせきとめ努力、雨水貯留努力は流域の水災害低減につながるが、とくに流域上流で降る雨は資源性を持つのでここでの雨水貯留促進は流域水の資源性を高めることになる。

・第3項について

$\Delta W > 0$ のときは資源性増大で災害性は低下する。 $\Delta W < 0$ のときはその逆である。 ΔW には流域が自然に持っている貯留水位調節作用、人間がため池やダム設置による貯留水位調節作用、さらに一般に短時間に降り終わるシャワー性の雨より、長時間にわたって降り続ける地雨の方が地中浸透にまわる雨量成分が多いので、降雨自体のもつ貯留水位調節作用が含まれているものと解釈できる。

・第4項について

流域貯留水で流域表面に表れずさらに下部に浸透する成分 G は一般的には小さいので第4項はふつう無視できる。

2.3 流域エントロピー

(6)式 $2S$ を ENT とおきかえ流域エントロピーと呼ぶ。(6)式に見られるように、仮りに正味降雨、流入、流出、貯留が同じであっても、流域の出入口の高度 T_1 、 T_2 によって流域エントロピーは異なる。上流側に急峻山岳部をもつ、地形勾配の大きい流域では、 $T_1 \gg T_2$ 、したがって $TR \gg T_2$ となるので、第1,2項では負の度合いが強くなり、第3項では正の度合いが弱くなって流域エントロピーは災害性が強まることが判る。逆に平坦な流域では T_1 と T_2 の差が小さくなり災害性は弱まる。平野部の少ない急流河川流域では、資源性確保、災害性低減のために山岳部での雨水貯留促進の一層の努力が望まれる。

3. 解析例

3.1 筑後川上流大山川、玖珠川流域について

筑後川上流域の解析¹⁾はすでに公表されているが議論のためここでも簡単に触れておく。

・タンクモデル⁴⁾による流出解析 (月単位)

大分県日田市では筑後川の上流支川である大山川と玖珠川が流れ込み筑後川本流となる。筑後川全流域面積2860km²に対し、日田盆地へ流れ込む上流域の面積は1137km²である。大山川は阿蘇北側外輪山に、玖珠川は九重山麓に発している。合流直前のそれぞれの支川流域を解析対象とした。流域は互いに隣接している。流域面積はそれぞれ小平流域(大山川)では532.8km²、小ヶ瀬流域(玖珠川)では540.5km²でほぼ同じである。水年は1年のうちで降水量、表面流出、蒸発とも最も小さくなる冬季を起点、終点とすることにし、前年12月からその年の11月までとした。両流域とも下筈、松

原両ダムが完成する前の1960-61年、61-62年、62-63年の3水年で調べた。3水年の降水量は、両流域とも同じ値でそれぞれ1930mm,3280mm,2440mmであった。

Fig.2はタンクモデルの概念図である。流域の水の貯留機構をタンクで表す。降雨Rは最上段のタンクにふりこむ。側面の流れ口は流出孔で、タンク内の水位がその高さ以上になるとここから流出する。タンク底辺の流れ口は浸透孔で、ここから二番目の貯留機構に流れ込む。流出孔での流出率 (r)、浸透孔での浸透率 (GA,GB,GC) は現実の流出 (QQ) に合うように試行錯誤で決定される。タンクモデルでは単位時間での流域貯留変化(ΔW)、下部浸透(G)も表現できるのでエントロピー解析に便利である。なお蒸発(E)については本解析では考慮しない。

Fig.3, Fig.4はタンクモデルを先にとりあげた小平、小ヶ瀬両流域に適用した結果である。横軸は1960年11月から1963年11月までの期間を示す。縦軸は左に流出量の目盛りを、右上に降雨量の目盛りを示した。流出は黒丸印で測定流出量、白丸印で計算流出量を示した。降雨量は最上段に棒グラフで示している。Table 1(小平、大山川)、Table 2(小ヶ瀬、玖珠川)には決定された各タンクの流出孔の高さ、流出率、浸透係数を示した。図の中程の表示は流域エントロピーの計算結果で次節で説明する。

流出QQが大きく出た小平では、一段目のタンクでH1A=250mm,R1A=0.8と小ヶ瀬の150mm,0.4に比べて大きく、表面流出のうち洪水成分が大きく出ていることが判る。また2段目のタンクへの浸透もGA=0.25で小ヶ瀬のGA=0.5より著しく小さい。小ヶ瀬の方が貯留機構がうまく働いていることが判る。2段目、3段目、4段目のタンクの数値にはそれほど差はない。なお4段目は両流域ともH1D=10mm,R1D=0.001とした。Table 1,2に3水年での総雨量RS、測定総流出量QQS、計算総流出量QS、1段目から4段目までの貯留変化量 ΔW の合計DWS、4段目からさらに下部へ浸透したGの総量GSをそれぞれmm単位で示している。RS=QS+DWS+GSである。小平ではQQS=4265.2mm, QS=4265.3mmで合っており両者の相関係数RXYは0.9648であった。小ヶ瀬ではQQS=2767.4mm, QS=2766.4mmでRXY=0.9384である。総貯留変化量では小平のDWS=3368.3mmに対し小ヶ瀬では4881.2mmではるかに大きい。

・流域エントロピー解析 (月単位)

タンクモデルにより両流域とも計算流量Qは実測流量QQに近いものが得られたので、タンク貯留も実際

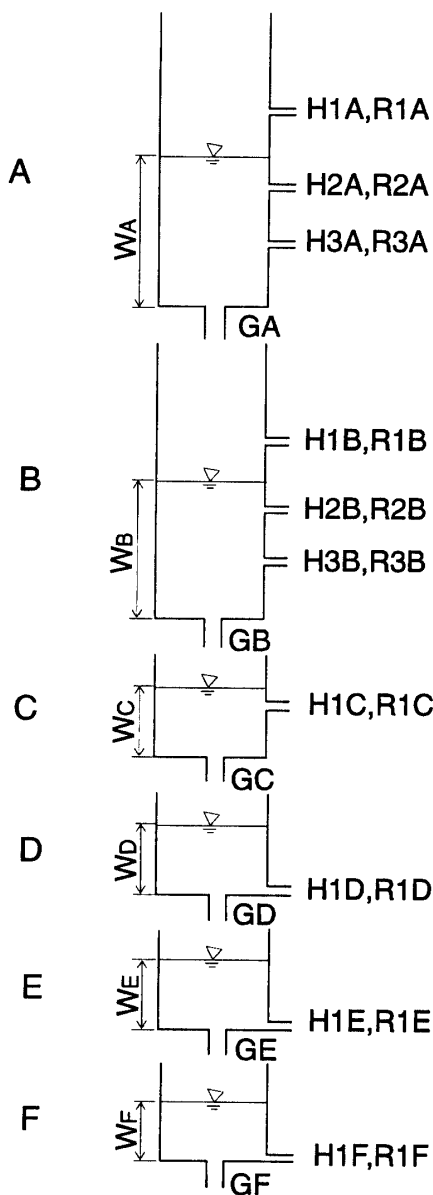


Fig.2; TANK model.

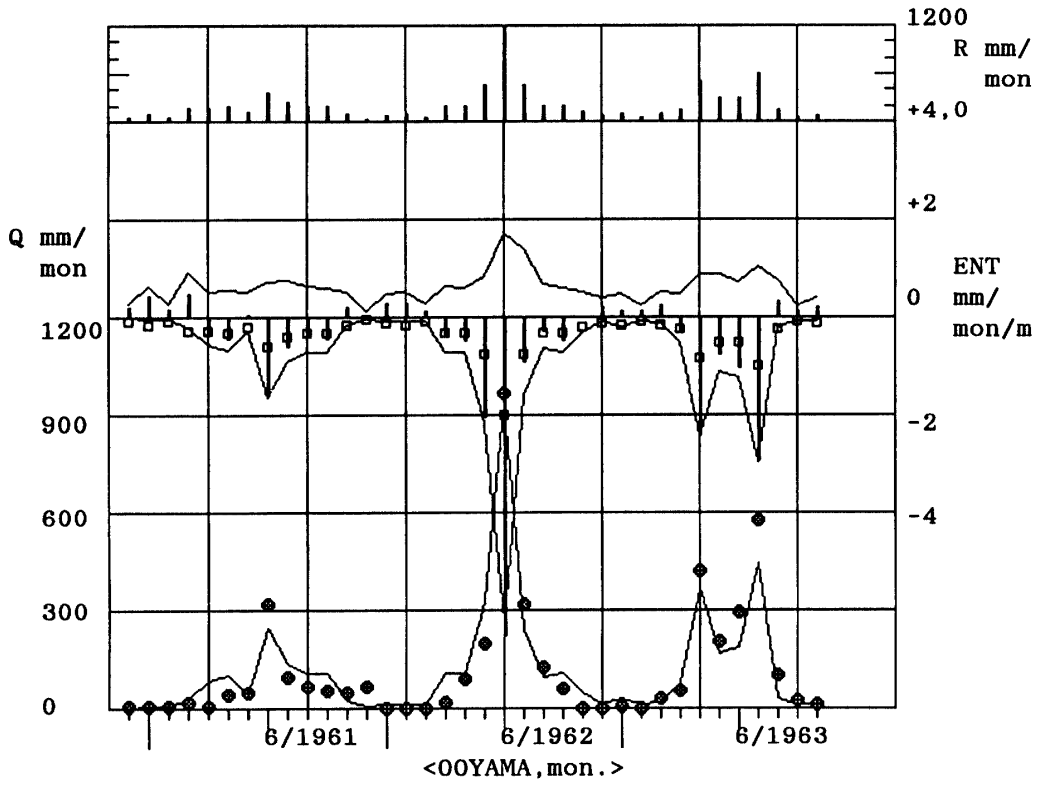


Fig.3; Monthly change of run-off (QQ; real, Q; calculated by TANK model) and basin entropy (ENT) for the Ooyama river basin.

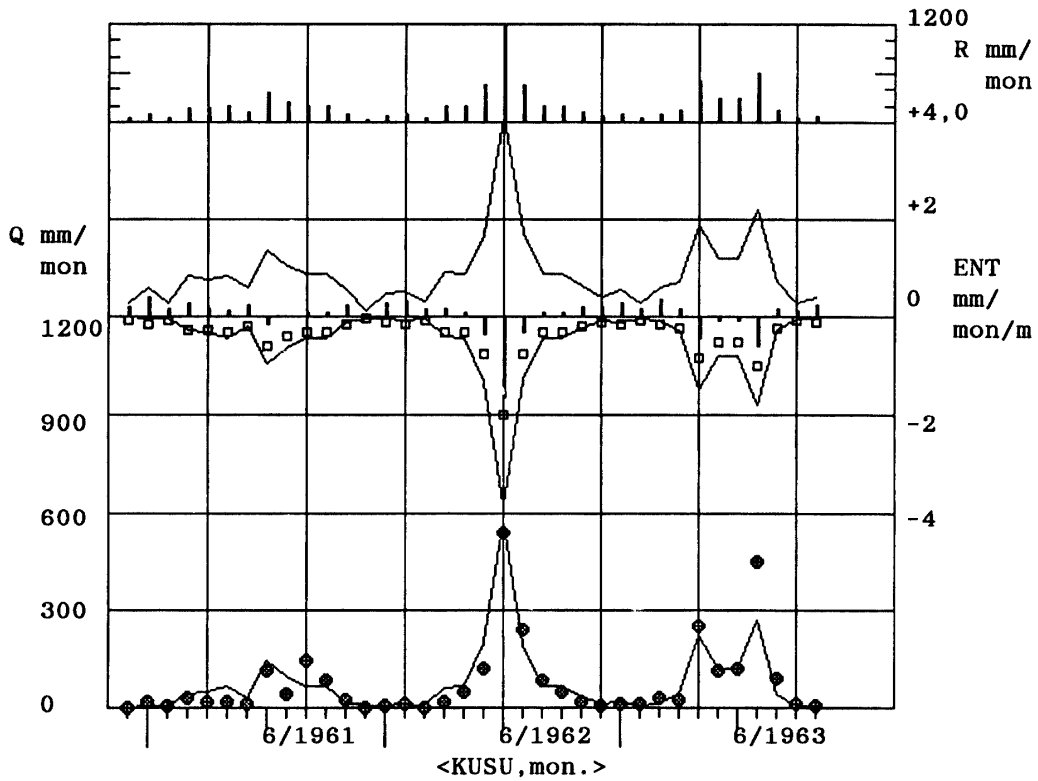


Fig.4; Monthly change of run-off and basin entropy for the Kusu river basin.

Table 1; TANK and basin parameters, and results of entropy analysis for the OOOYAMA river basin.

H1A	250	R1A	0.800	RS	7650	RANE1S	6.3750
H2A	50	R2A	0.028	QQS	4265	RANE2S	-19.1250
H3A	10	R3A	0.025	QS	4265	RANES	-12.7500
H4A		R4A		OS	4265	INFES	-14.2176
GA	0.250			DWS	3368	OUFES	-14.2176
H1B	15	R1B	0.0001	DHS	0	FLWES	-28.4351
GB	0.2000			GS	16	BASES,B	22.4551
H1C	15	R1C	0.0001	S	532.80	DAMES,D	
GC	0.0500			DAMS		STRES	22.4551
H1D	10	R1D	0.0001	DAMS/S		ENTS	-18.7301
GD	0.0010			TP	1000	RENTS,X	28.8301
H1E		R1E		T1	600	DENTS,Y	-47.5601
GE				TR	400	X/[Y]	0.6062
H1F		R1F		T2	200	D/[Y]	
GF		RXY	0.9648	D/(B+D)		D/(X+D)	

<OOYAMA, mon.>

Table 2; Specially as Table 1 for the KUSU river basin.

H1A	150	R1A	0.400	RS	7650	RANE1S	6.3750
H2A	50	R2A	0.075	QQS	2767	RANE2S	-19.1250
H3A	15	R3A	0.030	QS	2766	RANES	-12.7500
H4A		R4A		OS	2766	INFES	-9.2214
GA	0.500			DWS	4881	OUFES	-9.2214
H1B	15	R1B	0.0001	DHS	0	FLWES	-18.4428
GB	0.1000			GS	2	BASES,B	32.5413
H1C	15	R1C	0.0001	S	540.50	DAMES,D	
GC	0.0050			DAMS		STRES	32.5413
H1D	10	R1D	0.0001	DAMS/S		ENTS	1.3485
GD	0.0010			TP	1000	RENTS,X	38.9163
H1E		R1E		T1	600	DENTS,Y	-37.5678
GE				TR	400	X/[Y]	1.0359
H1F		R1F		T2	200	D/[Y]	
GF		RXY	0.9384	D/(B+D)		D/(X+D)	

<KUSU, mon.>

の貯留 W を表しているとし、流域エントロピーの考察に従って解析を進めた。ただし本節では流域内でダムはなく流量の人工的調節はないので、流域入り口での流入量 $Q1$ と流域出口での流出量 $Q2$ は等しいとした。Fig.3, Fig.4の中段の右縦軸に流域エントロピー(2S資源性)の目盛りを示している。上側(+側)の実線で示した変化線は貯留項、下側(-側)の変化線は流れ項、四角印は降雨項によるエントロピー値を示してい

る。これらの合計の流域エントロピーは棒グラフで示した。小平では流域エントロピーは各水年とも正となるのは冬季だけで、夏の雨期には大きな負の値となり災害性が強いことを示している。全期間の流域エントロピー合計は Table 1 に示したとおり $ENTS = -18.73$ である。これに対し小ヶ瀬では多雨月を除き期間を通じて安定して正の値を示していて、Table 2 に示したように $ENTS = 1.35 > 0$ で資源性に富む流域と言える。な

お表の RANES, RANE1S, RANE2S, FLWES, STRES は期間でのそれぞれ降雨エントロピー, 流域上流側の降雨エントロピー, 下流側の降雨エントロピー, 流れエントロピー, 貯留エントロピーの合計値を示している。流域の高度特性値, TP, T1, TR, T2を両流域で等しく取ったため降雨エントロピーの両流域での差はない。このように流域の規模がほぼ同じで、生態学的にも同じような特徴を持つ隣接した二つの流域についてエントロピー解析では明瞭な違いが浮き彫りにされた。解析の3水年では大山川上流では下笠・松原ダムの計画が進行していた。流域エントロピー論では玖珠川に比べて大山川は災害性を強く帯びていて、論争でも触れられた玖珠川、大山川どちらを優先的に洪水対策として取り上げるかの判断では大山川水系とする行政の示した計画案は止む得ないものであったと考えられる。

3.2 山口県厚東川ダム、一の坂川ダムについて

3.2.1 日単位の場合

・タンクモデルによる流出解析

厚東川水系上流部は秋吉台カルストで占められ宇部

市の瀬戸内海域に流れ込む。宇部市北部に湛水面積(DAMS)2.49km²の多目的用厚東川ダムがある。ダムより上流域の面積(S)は324km²である。一の坂川は山口市の北部の山間部に発し同市のふし野川に流れ込む小川である。一の坂ダムは洪水調節と利水を目的としたダムであり湛水面積は0.18km²で、その上流域の面積は6.7km²と小さい。両地域とも多雨年であった1993年について解析した。Fig.5a(厚東川), Fig.6a(一の坂川)は1993年1月1日から12月31日までの1年間の日単位での流出解析結果である。上段は降水量mm, 下段の四角印はダムへの実測流入量mm(QQ), 実線はタンクモデルによる計算流入量mm(Q)である。両ダムでの一年間の総雨量mm(RS), 総流入量mm(実測 QQS, 計算 QS), QQとQとの相関係数 RXY は最下段に示されているとおりでである。タンクのパラメータは右欄に示したが、両ダムとも4段目を付けてありそのパラメータ(H1D,R1D,GD)はそれぞれ Table 3, Table 4に示してある。両ダムのRXYは厚東川ダムで0.8857でやや悪く、一の坂ダムでは0.9480であった。厚東川ダムでは集水域はカルスト台地で表流河川がないのが特徴であり、とくに一段目のタンクの浸透率は大きな値を取ることが期待されたが、結果はGA=0.02で一の坂ダム

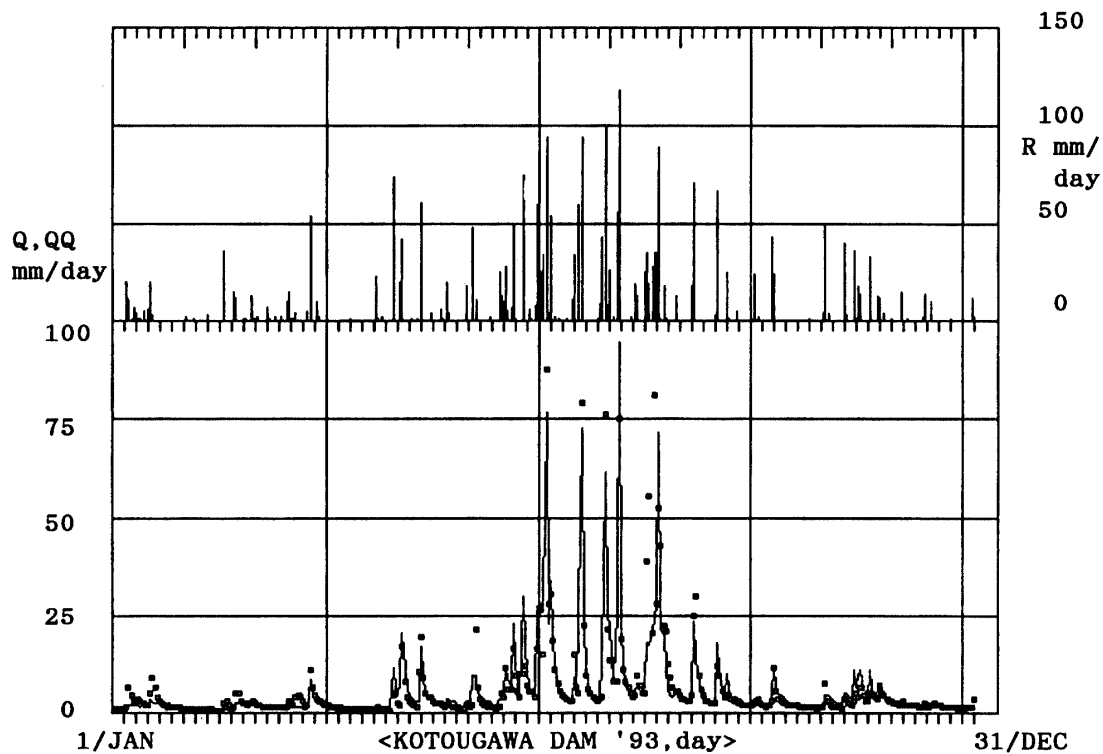


Fig.5a; Daily run-off change for the KOTOUGAWA DAM basin, 1993/Jan.1 to Dec.31.

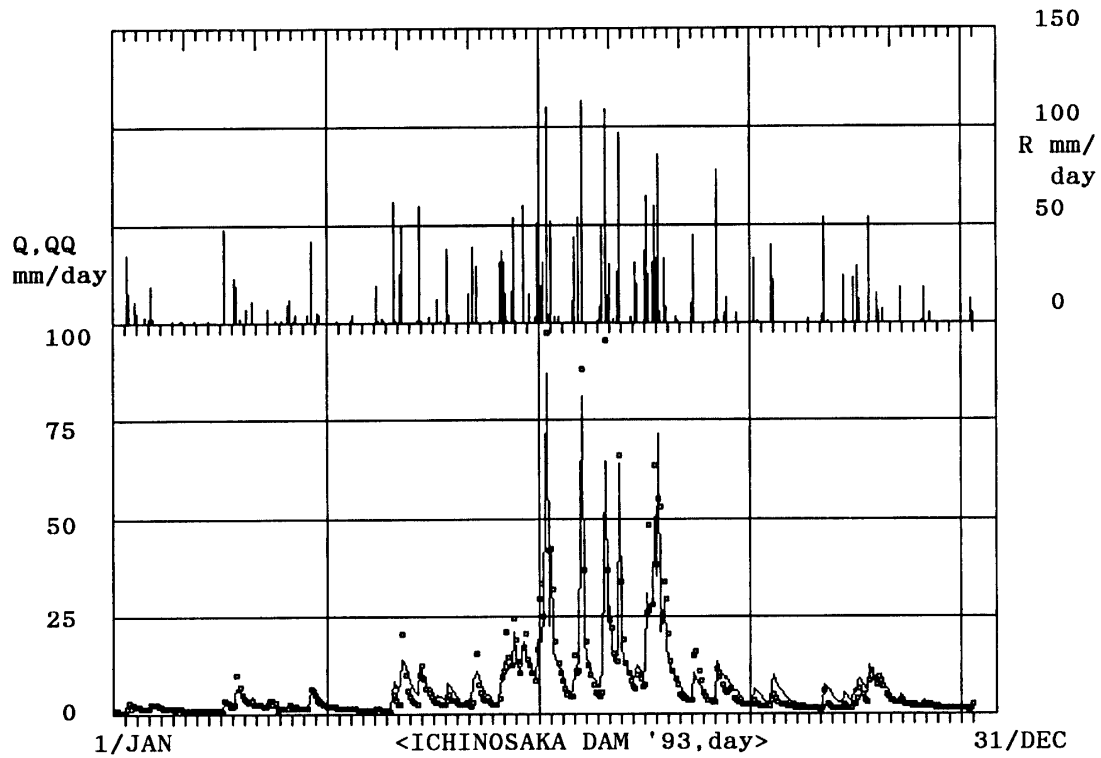


Fig. 6a; Same as Fig. 5a for the ICHINOSAKA DAM basin.

Table 3; Results of daily analysis for the KOTOUGAWA DAM basin.

H1A	200	R1A	0.500	RS	2638	RANE1S	8.3746
H2A	125	R2A	0.300	QQS	2119	RANE2S	-29.3111
H3A	80	R3A	0.075	QS	2118	RANES	-20.9365
H4A	30	R4A	0.010	OS	2097	INFES	-30.2663
GA	0.020			DWS	498	OUFES	-29.9586
H1B	15	R1B	0.003	DHS	3580	FLWES	-60.2250
GB	0.010			RXY	22	BASES,B	12.8177
H1C	15	R1C	0.001	S	324.00	DAMES,D	0.7075
GC	0.001			DAMS	2.49	STRES	13.5251
H1D	10	R1D	0.001	DAMS/S	0.00769	ENTS	-67.6363
GD	0.001			TP	300	RENTS,X	21.1923
H1E		R1E		T1	175	DENTS,Y	-89.5361
GE				TR	113	X/[Y]	0.2367
H1F		R1F		T2	50	D/[Y]	0.0079
GF		RXY	0.8857	D/(B+D)	0.0523	D/(X+D)	0.0323

<KOTOUGAWA DAM '93, day>

Table 4; Results of daily analysis for the ICHINOSAKA DAM basin.

H1A	150	R1A	0.600	RS	2799	RANE1S	4.4429
H2A	50	R2A	0.100	QQS	2562	RANE2S	-15.5500
H3A	15	R3A	0.040	QS	2560	RANES	-11.1071
H4A		R4A		OS	2534	INFES	-18.3024
GA	0.025			DWS	233	OUFES	-18.0979
H1B	15	R1B	0.035	DHS	2850	FLWES	-36.4004
GB	0.020			GS	6	BASES,B	2.9928
H1C	10	R1C	0.005	S	6.700	DAMES,D	0.9844
GC	0.002			DAMS	0.180	STRES	3.9772
H1D	10	R1D	0.001	DAMS/S	0.02687	ENTS	-43.5303
GD	0.001			TP	600	RENTS,X	7.4356
H1E		R1E		T1	350	DENTS,Y	-51.9504
GE				TR	225	X/[Y]	0.1431
H1F		R1F		T2	100	D/[Y]	0.0189
GF		RXY	0.9480	D/(B+D)	0.2475	D/(X+D)	0.1169

<ICHINOSAKA DAM '93, day>

のGA=0.025より小さくなった。また他のパラメータについても両ダム流域の差はあまりない。

・エントロピー解析

Fig.5b, Fig.6bに各エントロピーの変化を示す。年間のエントロピー合計値はTable 1,2に示した。図の

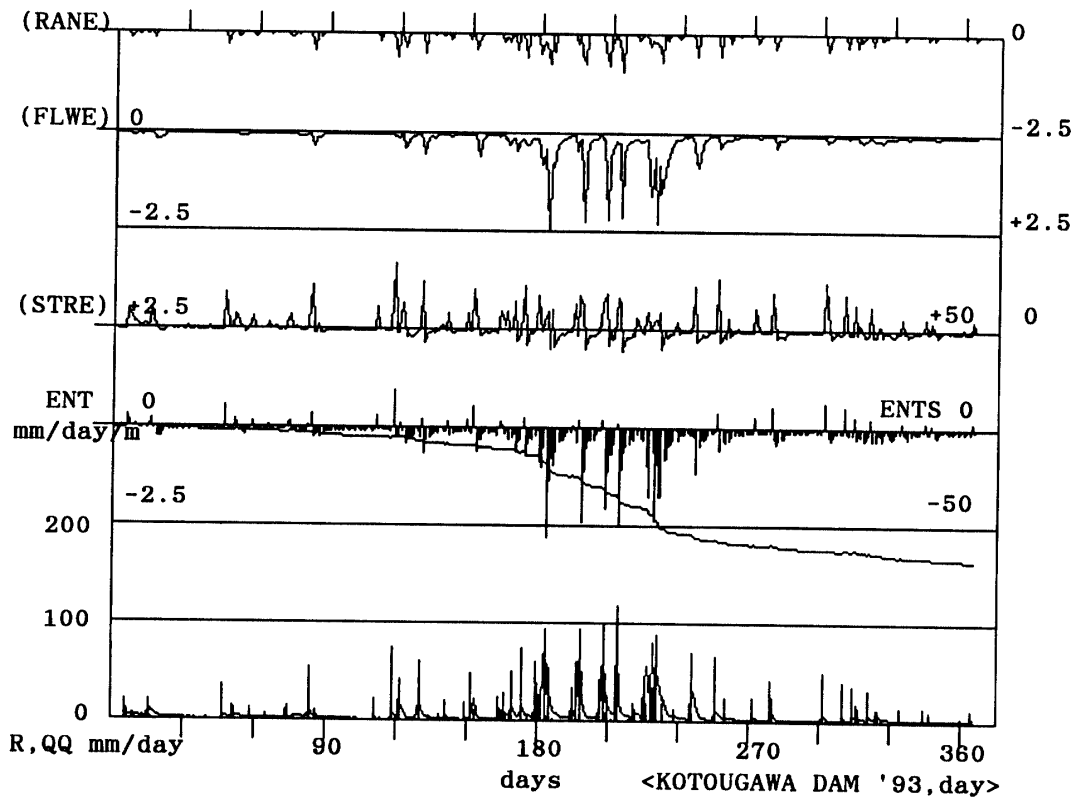


Fig.5b; Daily change of ENT for the KOTOUGAWA DAM basin.

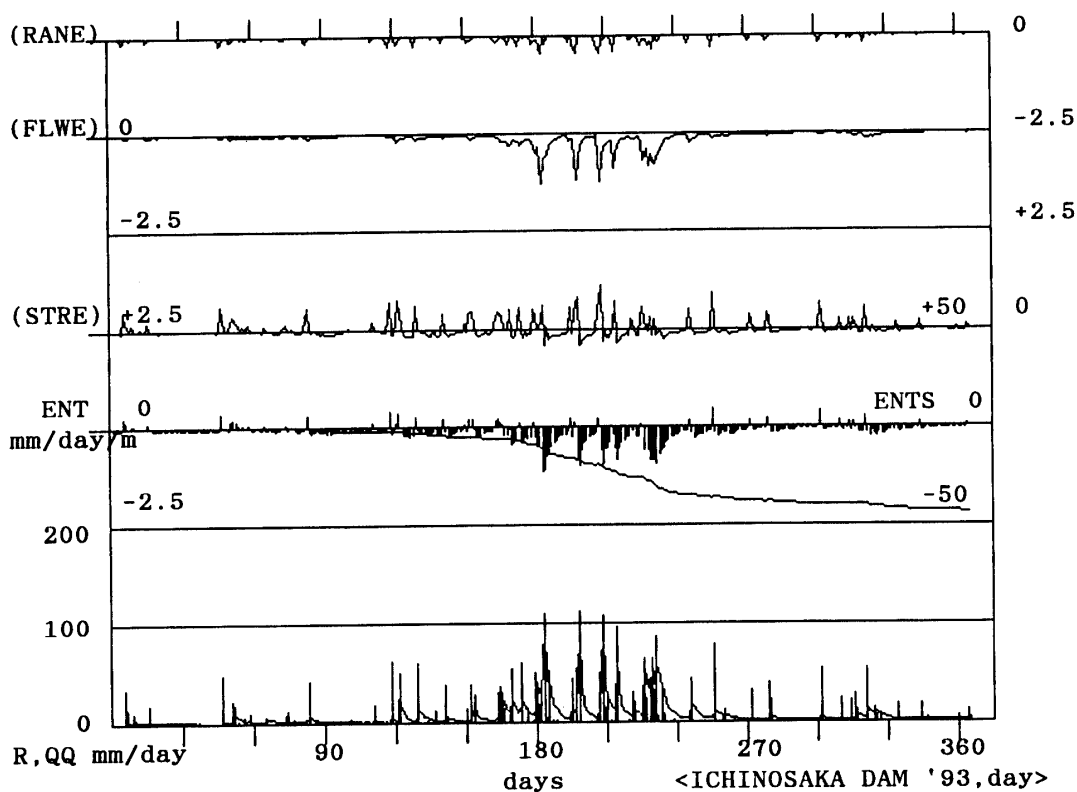


Fig. 6b; Daily change of ENT for the ICHINOSAKA ADAM basin.

中程の ENT は毎日の流域エントロピー(棒グラフ)で左縦軸の目盛りに従う。他の各成分のエントロピー値の目盛りはそれぞれをベースにして ENT のものと同じである。同じく実線のカーブは積算流域エントロピー ENTS で右縦軸の目盛りに従う。両流域とも積算値は夏の雨期に負、即ち災害性を増大させ負のまま一年を終わっている。ダムが存在のため流れのエントロピー (FLWE) はダムへの流入によるもの (INFE) と、ダムからの流出によるもの (OUFE) との合計である。また貯留エントロピー (STRE) は流域貯留によるもの (BASE) とダム貯留によるもの (DAME) との合計である。それぞれの一年間の合計は FLWES, INFES, OUFES, STRES, BASES, DAMES で表に示した。表には各高度 m も示されている。ダムの効果を見るため $B = \text{BASES}$, $D = \text{DAMES}$ として表の最下段に示した。 $D / (B + D)$ は流域でのトータルの貯留エントロピーのうちダムの寄与率を見たもので厚東川ダムでは 5.23% でダム面積の流域面積に対する比 $\text{DAMS} / S = 0.769\%$ に較べて大きい。 $\text{RENTS} (= X)$ は流域水が自然にもつ資源性エントロピーの合計で $\text{RENTS} = \text{RANE}1S + \text{BASES}$ で表される。 $D / (X + D)$ はダム貯留を含めた

トータルの資源性エントロピー ($X + D$) に対するダムの貯留エントロピーの比で同じくダムの効果を見たものである。厚東川ダムでは 3.23% である。一の坂ダムでは $D / (B + D) = 24.75\%$, $D / (X + D) = 11.69\%$ で $\text{DAMS} / S = 2.687\%$ より大きく、厚東川ダムのそれぞれの数値よりはるかに大きい。

3.2.2 時間単位の場合

・タンクモデルによる流出解析

両ダムについて H 単位の場合と同じ 1993 年 6 月 1 日から 8 月 31 日の夏期 3 カ月について時間単位での解析を行った。 Fig. 7a, Fig. 8a に示すように時間単位の場合両ダム流域でのパラメータには大きな差がある。図の右に示すように両流域とも 6 段タンクとした。しかし 5, 6 段目は数値が示すようにあまり効いてはいない。厚東川流域では 1 段目の流出口は一つで $GA = 0.35$ で著しく大きな浸透率となった。 2 段目の流出口が三つになった。これに対し一の坂川流域では一段目は二つの流出口となり $GA = 0.15$ である。 QQ, Q の相関係数は両流域とも 0.95 を越えた。

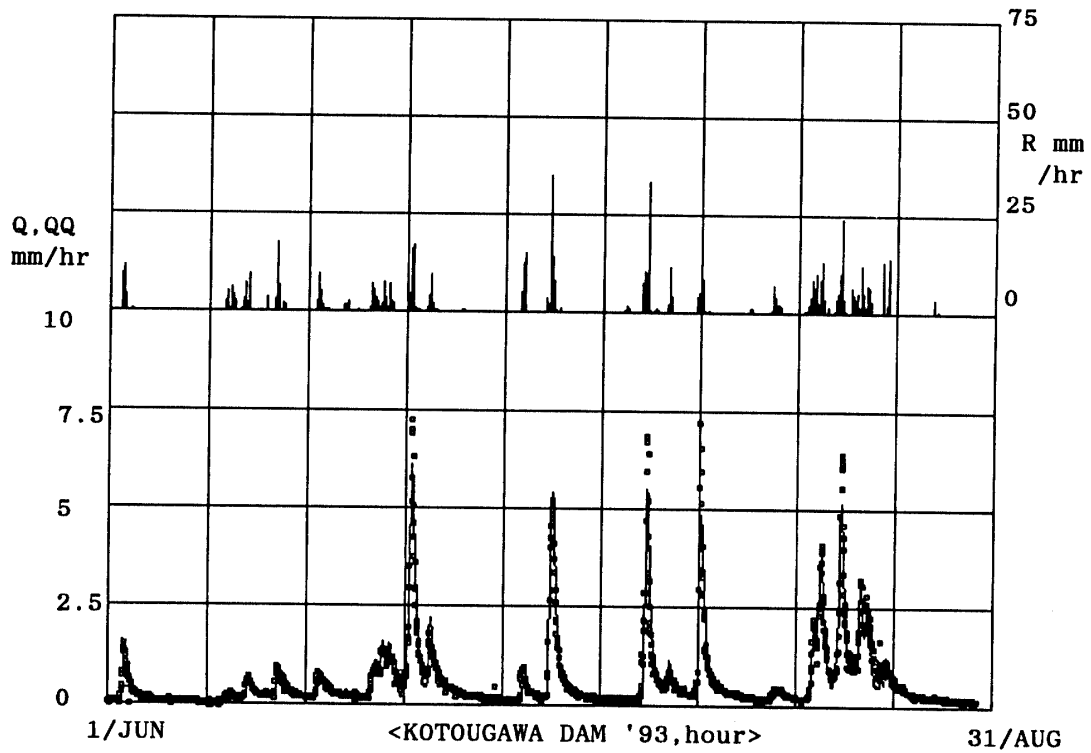


Fig.7a; Hourly change of run-off for the KOTOUGAWA DAM basin, 1993/Jun.1 to Aug.31.

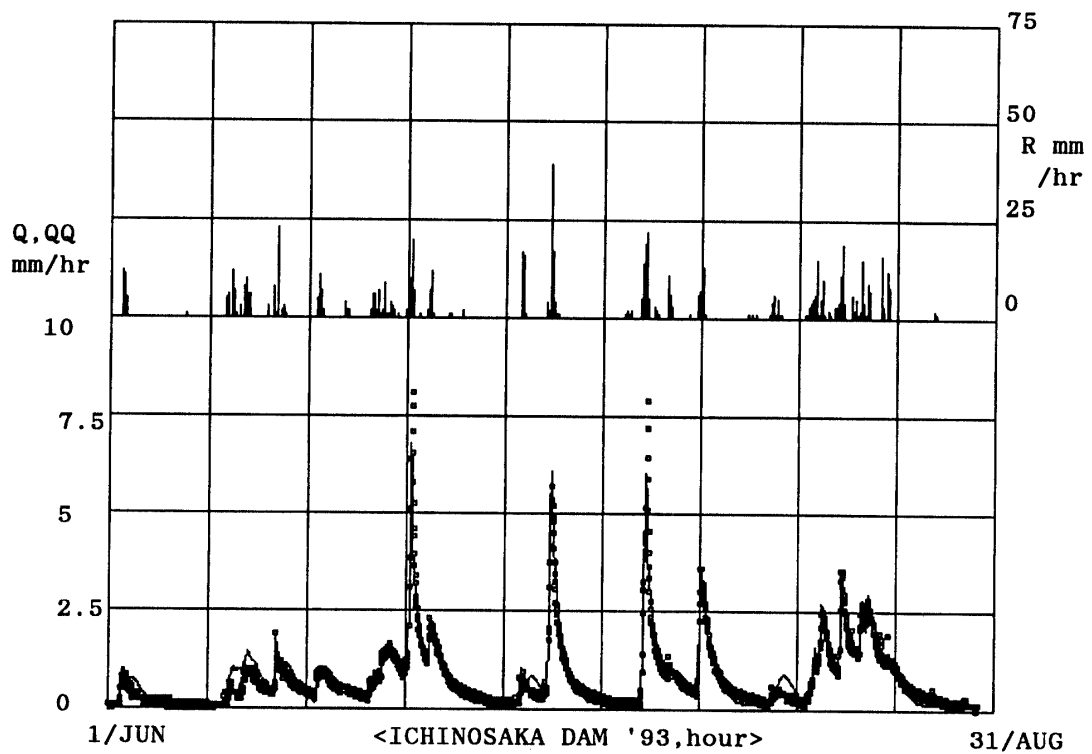


Fig.8a; Hourly change of run-off for the ICHINOSAKA DAM basin, 1993, Jun.1 to Aug.31.

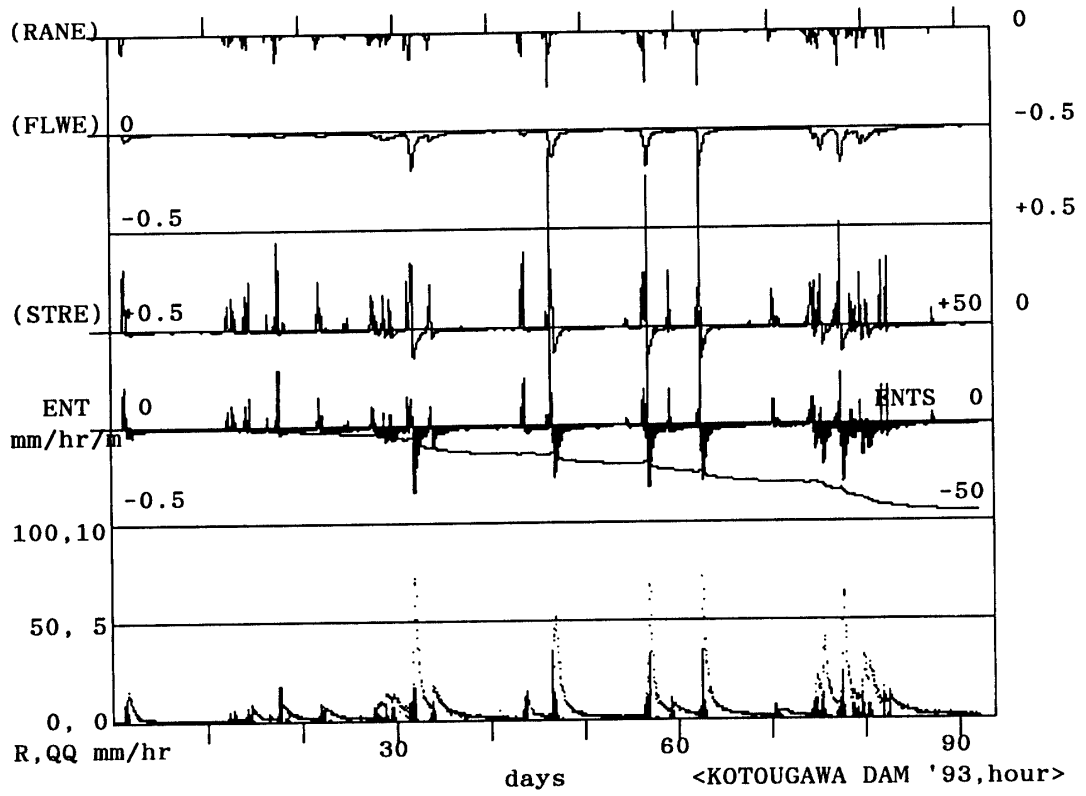


Fig.7b; Hourly change of ENT for the KOTOUGAWA DAM basin.

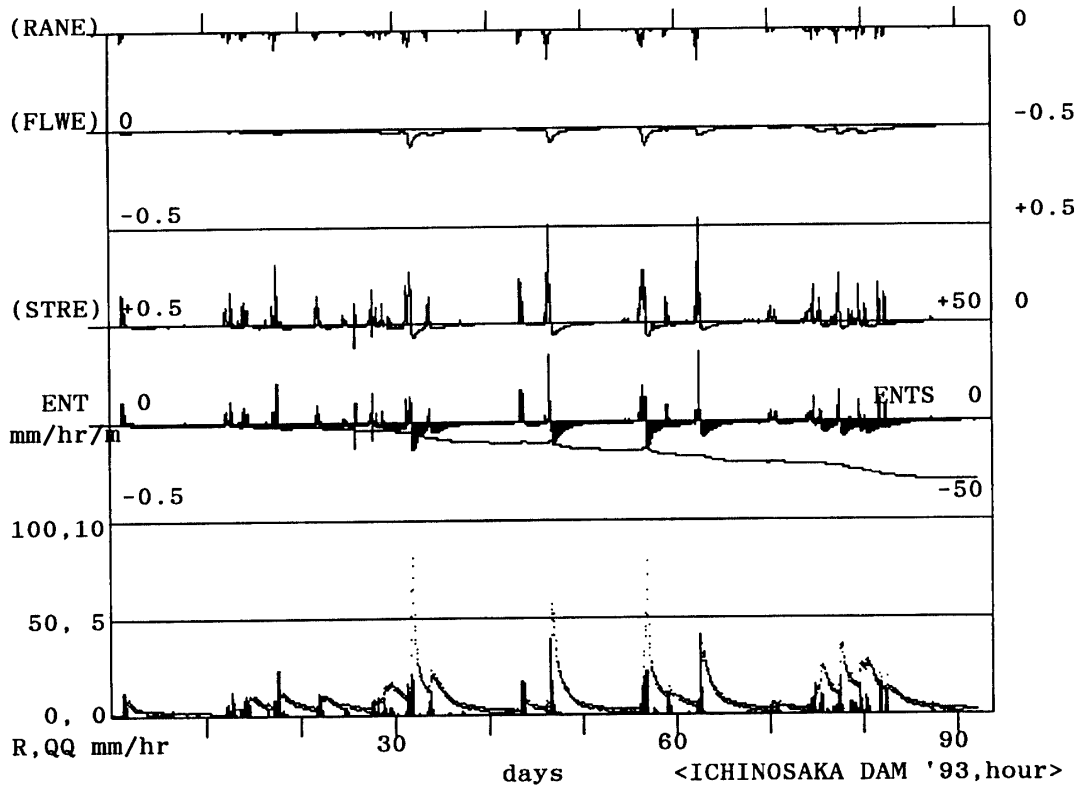


Fig.8b; Hourly change of ENT for the ICHINOSAKA DAM basin.

Table 5; Results of hourly analysis for the KOTOUGAWA DAM basin.

H1A	120	R1A	0.250	RS	1509	RANE1S	4.7918
H2A	0	R2A	0.000	QQS	1335	RANE2S	-16.7711
GA	0.350			QS	1335	RANES	-11.9794
H1B	90	R1B	0.075	OS	1328	INFES	-19.0683
H2B	50	R2B	0.007	DWS	174	OUFES	-18.9674
H3B	15	R3B	0.002	DHS	928	FLWES	-38.0357
GB	0.003			GS	0	BASES,B	4.4869
H1C	10	R1C	0.0008	S	324.00	DAMES,D	0.1834
GC	0.001			DAMS	2.49	STRES	4.6703
H1D	0	R1D	0.00050	DAMS/S	0.00769	ENTS	-45.3448
GD	0.00025			TP	300	RENTS,X	9.2786
H1E	0	R1E	0.00050	T1	175	DENTS,Y	-54.8068
GE	0.00010			TR	113	X/[Y]	0.1693
H1F	0	R1F	0.00010	T2	50	D/[Y]	0.0033
GF	0.00001	RXY	0.9646	D/(B+D)	0.0393	D/(X+D)	0.0194

<KOTOUGAWA DAM '93, hour>

Table 6; Results of hourly analysis for the ICHINOSAK DAM basin.

H1A	0	R1A	0.000	RS	1646	RANE1S	2.6127
H2A	50	R2A	0.100	QQS	1755	RANE2S	-9.1445
H3A	15	R3A	0.050	QS	1729	RANES	-6.5317
H4A	0	R4A	0.000	OS	1733	INFES	-12.5335
GA	0.150			DWS	28	OUFES	-12.3794
H1B	25	R1B	0.050	DHS	2000	FLWES	-24.9129
GB	0.050			GS	0	BASES,B	0.3570
H1C	10	R1C	0.050	S	6.700	DAMES,D	0.6908
GC	0.010			DAMS	0.180	STRES	1.0478
H1D	10	R1D	0.050	DAMS/S	0.02687	ENTS	-30.3969
GD	0.005			TP	600	RENTS,X	2.9697
H1E	0	R1E	0.005	T1	350	DENTS,Y	-34.0573
GE	0.0001			TR	225	X/[Y]	0.0872
H1F	0	R1F	0.0001	T2	100	D/[Y]	0.0203
GF	0.00001	RXY	0.9549	D/(B+D)	0.6593	D/(X+D)	0.1887

<ICHINOSAKA DAM '93, hour>

・エントロピー解析

Fig.7b,8bのようにENTSは、両流域とも負で終わっている。Table 5,6に示すように、厚東川ダムでは $D/(B+D)=3.93\%$ 、 $D/(X+D)=1.94\%$ でH単位の場合と同じ程度であるが、一の坂ダムではそれぞれ65.93%、18.87%となってダムの効果をはっきりとでた。ダムは小さなものをたくさん設置した方がよいとする議論もあるが、今後いろいろなダムについて同様の解析を積み重ねる必要がある。

3.3 山口県菅野ダムについて (時間単位)

・タンクモデルによる流出解析

錦川は山口県東部に位置し徳山市北部をかすめ岩国市を通って瀬戸内海に流れ込む。流路延長124km、流域面積900km²で県最大の河川である。菅野ダムは徳山市北部に位置し湛水面積3.02km²、集水域225km²の多目的ダムである。まず厚東川ダム、一の坂ダムと同じく1993年6-8月の雨期の期間で時間単位で解析した。つ

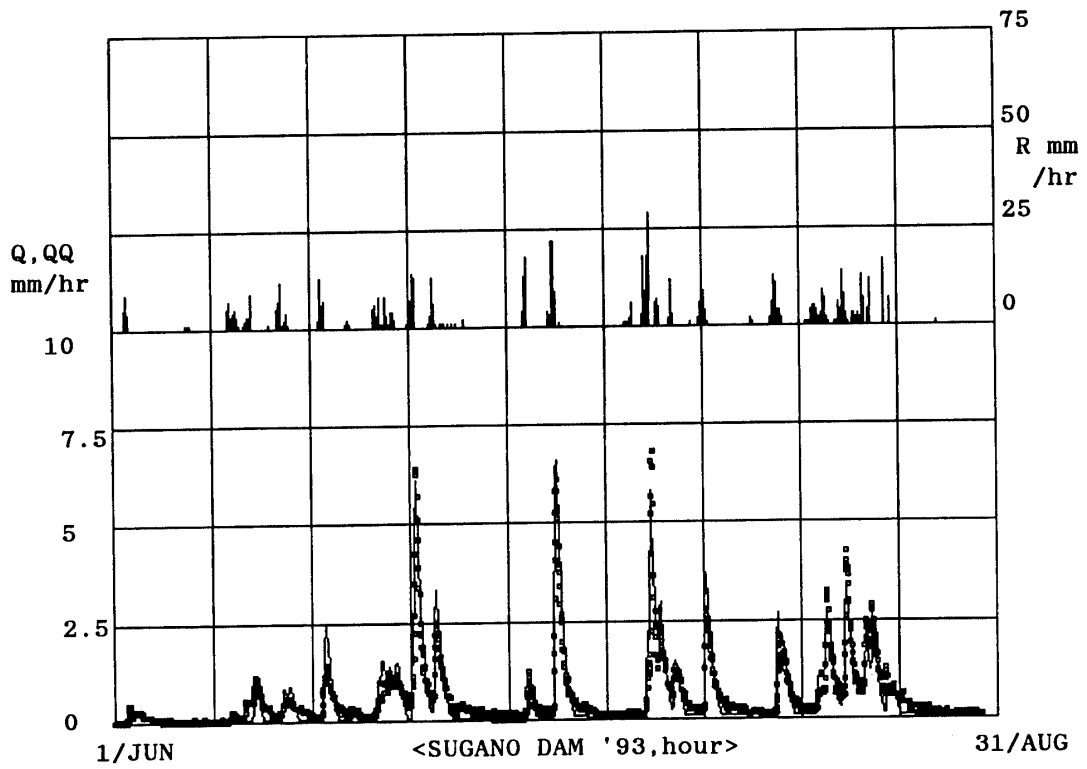


Fig.9a; Hourly change of run-off for the SUGANO DAM basin,1993/Jun.1 to Aug.31. (Rainy Year)

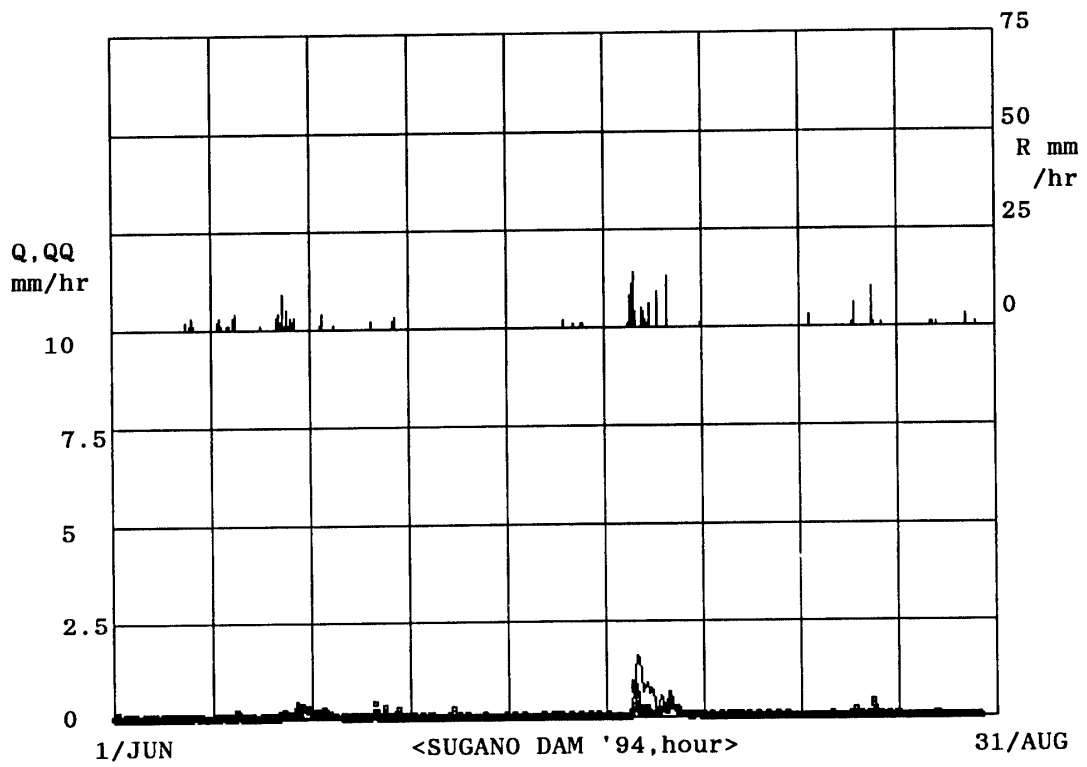


Fig.10a; Hourly change of run-off for the SUGANO DAM basin,1994/Jun.1 to Aug.31. (Drought Year)

いで翌1994年は西日本では一転して干ばつであったので比較のため解析した。Fig.9aは1993年の、Fig.10aは1994年の解析結果である。年毎に決められたタンクパラメータはそれぞれ別の値でQQ,Qの相関係数はもっとよいものであったが、大幅な自然開発が伴わない限りタンクのパラメータは変化しない約束であるから、パラメータは固定する必要がある。結果的に凶のようなパラメータで両年について計算された。1993年では $QQS=1250.1\text{mm}$ 、 $QS=1160.0\text{mm}$ 、 $RXY=0.9441$ 、1994年では $QQS=106.8\text{mm}$ 、 $QS=143.6\text{mm}$ 、 $RXY=0.5617$ でこれまでの他流域の解析に較べQQS,QSの誤差は大きい。また1994年のQQ,Qの相関係数RXYは小さい。Fig.10aに見るように1994年7月下旬にまとまった降雨があったが実際のダムへの流入量QQはそれほどなく計算値Qが大きくてた。このときを除いてとくに大きな誤差はないのでタンクパラメータは干ばつ年をもよく表現しているとしてよい。一段目のタンクで3個の流出口をもちさらに二段目では2個の流出口をもっていて厚東川ダム、一の坂川ダムとタンクの構造が違う。

・エントロピー解析 (時間単位)

Fig.9b, Fig.10bは両年の流域エントロピーの変化を示したものである。Table 7,8に示すように高度TP,T1,TR,T2が前の二つの流域に較べて大きいため降雨(RANE),流れ(FLWE)のエントロピーの値は小さい。1993年では6月中旬から7月中旬にかけて流域エントロピーの積算値ENTSは正の値となっているがその後は負に転じている。これに対し1994年ではRANE,FLWEはほとんど0で推移しENNTS=-0.1でこれまでのケースと違い災害性が著しく小さい。干ばつのため降雨も流入,流出も小さいことを反映している。Table 5(1993年)では $D/(B+D)=21.92\%$ 、 $D/(X+D)=16.65\%$ とダムの貯留効果は大きい。Table 6(1994年)ではそれぞれ-108.2%,-79.47%とでた。表に示すようにダムの貯留エントロピーの3カ月間の合計DAMES=-0.6668が効いている。流域貯留エントロピーの合計BASES=1.2826は正を示している。干ばつ年でも流域の自然貯留は依然資源性を保持しているのに対し、ダム貯留は流出(放流)の方が大きくDAMESは負の災害性を帯

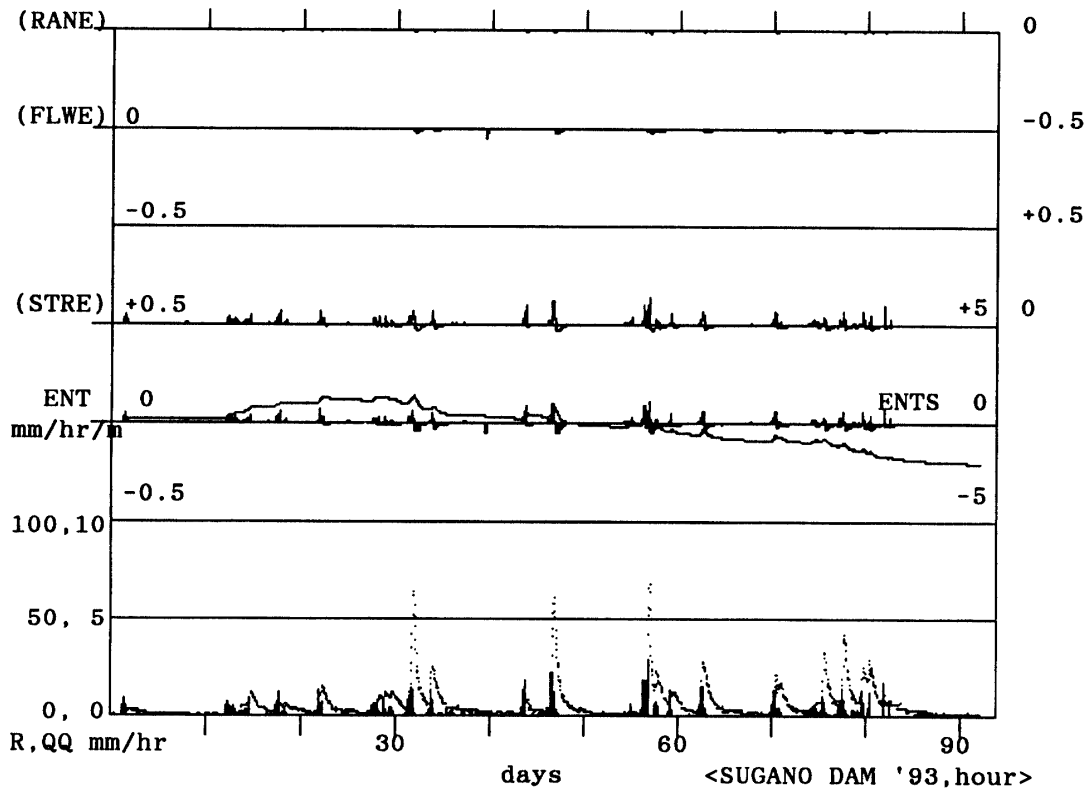


Fig.9b; Hourly change of ENT for the SUGANO DAM basin,1993/Jun.1 to Aug. 31. (Rainy Year)

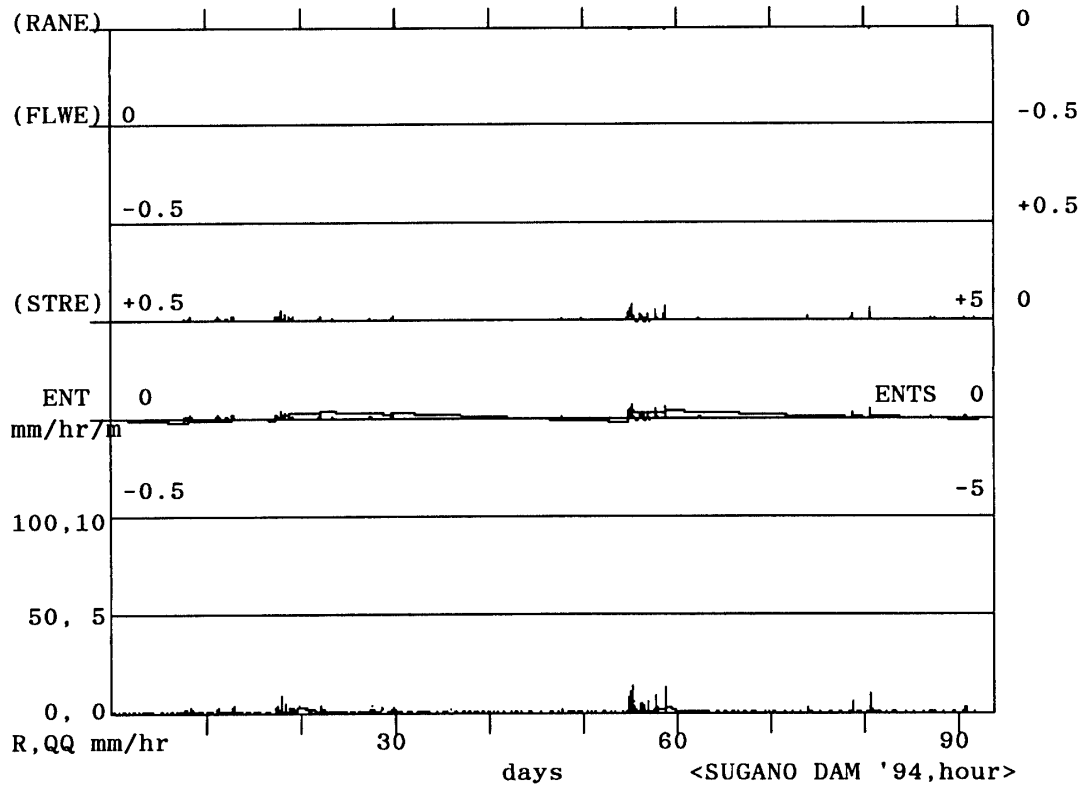


Fig.10b; Hourly change of ENT for the SUGANO DAM basin,1994/Jun.1 to Aug.31. (Drought Year)

Table 7; Results of hourly analysis for the SUGANO DAM basin,1993/Rainy Year.

H1A	120	R1A	0.250	RS	1582	RANE1S	0.9544
H2A	50	R2A	0.100	QQS	1250	RANE2S	-1.8029
H3A	10	R3A	0.050	QS	1166	RANES	-0.8484
GA	0.250			OS	1189	INFES	-2.1788
H1B	90	R1B	0.075	DWS	416	OUFES	-2.0722
H2B	15	R2B	0.001	DHS	8700	FLWES	-4.2510
GB	0.0025			GS	0	BASES,B	2.3563
H1C	10	R1C	0.00025	S	225.00	DAMES,D	0.6615
GC	0.0005			DAMS	3.02	STRES	3.0178
H1D	0	R1D	0.00010	DAMS/S	0.01342	ENTS	-2.0816
GD	0.00025			TP	750	RENTS,X	3.3108
H1E	0	R1E	0.00005	T1	510	DENTS,Y	-6.0539
GE	0.00010			TR	390	X/[Y]	0.5469
H1F	0	R1F	0.00001	T2	270	D/[Y]	0.1093
GF	0.00001	RXY	0.9441	D/(B+D)	0.2192	D/(X+D)	0.1665

<SUGANO DAM '93, hour>

Table 8; Results of hourly analysis for the SUGANO DAM basin, 1994/Drought Year.

H1A	120	R1A	0.250	RS	370	RANE1S	0.2232
H2A	50	R2A	0.100	QQS	107	RANE2S	-0.4217
H3A	10	R3A	0.050	QS	144	RANES	-0.1984
GA	0.250			OS	188	INFES	-0.1862
H1B	90	R1B	0.075	DWS	226	OUFES	-0.3279
H2B	15	R2B	0.001	DHS	-8770	FLWES	-0.5141
GB	0.0025			GS	0	BASES, B	1.2826
H1C	10	R1C	0.00025	S	225.00	DAMES, D	-0.6668
GC	0.0005			DAMS	3.02	STRES	0.6158
H1D	0	R1D	0.00010	DAMS/S	0.01342	ENTS	-0.0967
GD	0.00025			TP	750	RENTS, X	1.5058
H1E	0	R1E	0.00005	T1	510	DENTS, Y	-0.9358
GE	0.00010			TR	390	X/[Y]	1.6092
H1F	0	R1F	0.00001	T2	270	D/[Y]	-0.7125
GF	0.00001	RXY	0.5617	D/(B+D)	-1.0828	D/(X+D)	-0.7947

<SUGANO DAM '94, hour>

びた。干ばつ年ではダム水の資源性低下が著しいことを意味する。このように流域エントロピーは多雨年と干ばつ年とでのダムの役割の違いを表現できることがわかる。

4. まとめと今後の作業指針

以上のように、さまざまな規模、地質、地形の流域で、期間、単位時間の取り方を変えて流域エントロピー解析を行った。タンクモデルによる流出解析は流域水の地下貯留の動きを把握できることでエントロピー解析には有用であることがわかった。流域のもつ災害性、資源性を評価できることで、流域エントロピーによる解析は流域の特徴、個性を把握するのに有用であることがわかる。とくに多雨年、干ばつ年での流域水の動きを一元的に取り扱えることで流域エントロピーは有用である。またダムの効果、役割を表現できることでも有用である。流域エントロピーはさらに環境量としての流域水のもつ洗浄性の評価の可能性をももつことを示唆している。今後解析を他流域、長い期間の径年変化を調べることで積み重ねそれぞれの流域の特性、今後のあり方について考察を加えたい。当面の作業指針として、水災害と流域エントロピー、既設ダム・計画ダムの評価（ダムによる流域エントロピー変化）、

河川汚染と流域エントロピーの関係を調査し、エントロピー論から見た流域の定常性、流域水の災害性に対する人間の努力による防災性評価、流域水の資源性に対する人間の努力による貯留性評価、流域水の洗浄性に対する人間の努力による環境保存性評価を試みたい。

謝 辞

当研究室では山口県各水系でのタンクモデルのパラメータ設定に取り組んでいる。流域エントロピー解析はその成果により可能となった。お世話になった山口県各ダム管理事務所の方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 塩月善晴：流域エントロピーについて、エントロピー学会沖縄シンポジウム、1995
- 2) 下笠・松原ダム研究会：公共事業と基本的人権、(株)帝国地方行政学会、956P、1972
- 3) 樋田 敦：資源物理学入門、日本放送出版協会、231P、1982
- 4) 菅原正巳：流出解析法、共立出版社、257P、1972
(平成7年10月12日受理)