

# 渇水期における山地小流域の流出特性に関する研究

—淀川水系服部川流域の場合—

田 中 信太郎\*

## I はしがき

わが国においては、多少の地域差はあるものの、梅雨期および降雪期に降水が集中するため、年間の流況はかなり大きな変化を呈している。

流出現象についての研究は、従来、洪水流出を対象に、流出機構の解析あるいはその利用による治水を目的としたものが多く見られる。また、低渇水流出については、洪水解析の一部としての地下水流出解析によって取り扱われ、主に利水を目的としたものがほとんどであった。一方、流域の渇水流出特性そのものについての研究は、最近になってようやく増加してきた。

渇水流出は、流域特性の複合現象として表現される。すなわち、流域の形状・地質・地形・植生の状態・降水量・降水強度・先行降雨量・降雨継続時間・表土層の乾湿の状態によって、ハイドログラフの形状が著しく変化する。これは、流域内に保留されている水の流出が、その保留量の大小によって、あるいは保留のされ方によって、変化するというを示していると考えることができよう。

この小論は、流域の水保留量の大小を示す指標として先行降雨指数 (Antecedent-precipitation index) を取り上げ、渇水流量との関係を明らかにし、その中に見られる渇水期における河川流量の状態、すなわち、流域の水保有特性およびその変化特性について、若干の考察を加えたものである。

なお、対象とした流域は、伊賀上野盆地東部の服部川流域である(図1)。

## II 渇水期における河川の流出

渇水期には、雨水の供給などの外的な条件が加わることが少ないため、河川の流量は指数関数的に減少する。このとき、河川水の涵養源を地下水流出のみであるとみなせば、流出量の低減特性は、流域内の地下水のあり方、すなわち、帯水層の地域的分布や形状・大きさ・保水能力などの効果を総合的に表現するであろう。これは、流域内の水保留量という形で表すことができる。

ここで、ある一つの河川流域について、渇水量の変化を考えると、その河川の渇水量の大小は、その流域の地下水のあり方——流域内の水保留量の大小によって支配されることになると考えられる。

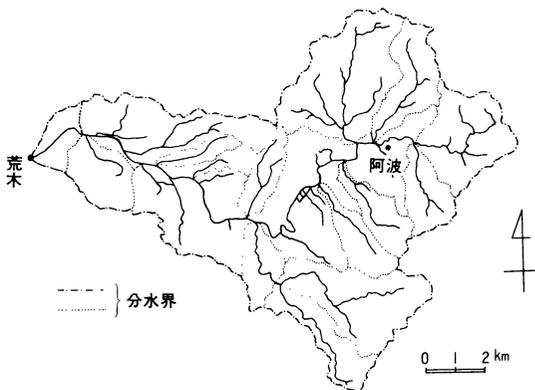


図1 服部川流域  
(荒木：流量観測地点，阿波：雨量観測地点)

\* 愛知教育大学大学院

これは、次のような式で表現できる。つまり、

$$Q = CS \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

Q = 湧水流量

S = 流域内の水保留量

C = 低減係数

### III 先行降雨指数 (Antecedent-precipitation index)

先行降雨指数 (P<sub>a</sub>) は、問題とする湧水の出現の時期より以前に降雨量がどれだけあったかということで、流域内の水保留量を間接的に表すのに都合がよい。これは、流域内の水保留量の大小をそれ以前の降雨量と日数との関数として表される。つまり、

$$P_a = \sum_{t=0}^n P_t \cdot k^t \quad \dots\dots(2)$$

ここで t は問題とする流量のあった前日を第 1 日として、この日から前にさかのぼって 2, 3, ……、n 日目の日を示す。P<sub>t</sub> は、t 日目の日雨量

表 1 確率湧水量計算表

順位	Q <sub>355</sub> <sup>(x)</sup>	F <sub>n</sub> <sup>(%)</sup>	log <sub>10</sub> Q <sub>355</sub>	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>
1	1.84	90	0.2648	3.3856	6.229504
2	1.56	80	0.1931	2.4336	3.796416
3	1.54	70	0.1875	2.3716	3.652264
4	0.89	60	-0.0506	0.7921	0.704969
5	0.70	50	-0.1549	0.4900	0.343000
6	0.44	40	-0.3565	0.1936	0.085184
7	0.38	30	-0.4202	0.1444	0.054872
8	0.05	20	-1.3010	0.0025	0.000125
9	0.01	10	-2.0000	0.0001	0.000001

表 2 確率湧水量計算表

$$\log(x+0.886) = \log 1.922 - 0.6107y$$

T(年)	G(x)(%)	y	0.1611/y	log(x+0.886)	x+0.886	x
8.61	88.4	2.092	0.3362	-0.0524	0.886	0.0003
8	87.5	2.013	0.3236	-0.0398	0.912	0.026
7	85.7	1.870	0.3005	-0.0167	0.962	0.076
6	83.3	1.702	0.2735	0.0102	1.024	0.138
5	80	1.500	0.2411	0.0427	1.103	0.217
4	75	1.246	0.2002	0.0835	1.212	0.326
3	66.7	0.903	0.1451	0.1387	1.376	0.490
2	50	0.366	0.0588	0.2250	1.679	0.793
1.58	36.7	0	0	0.2838	1.922	1.036
1.07	6.6	-1.000	-0.1607	0.4445	2.783	1.897

であり、k は常数である。

Linsley ら (1949) の報告によると、合衆国の東部および中部の観測値から、k の値としては、k = 0.85~0.90 が与えられている。

本流域では、k = 0.88 と仮定し、t = 30日 までとした<sup>8)</sup>。

### IV 湧水流量と先行降雨指数との関係

一般に、流域内の水保留量が大きなら、基底流量も大きいと考えられる。

この仮定のもとで、湧水流量と先行降雨指数との関係を見るために、既存の資料を用いて検討する。用いた資料は、1971 (昭和46) 年~1980 (昭和55) 年の日流量年表および日雨量年表である。

まず、湧水量の概観とともに、データの使用年数の妥当性を見るため、各年における355日流量を大きい順に並べ、確率湧水流量を計算で求めた。その結果を表—1, 2, 図—2に示す。これらの図表より、本流域においては、8年に一度は、非常に厳しい湧水に襲われるということがうかがえ、

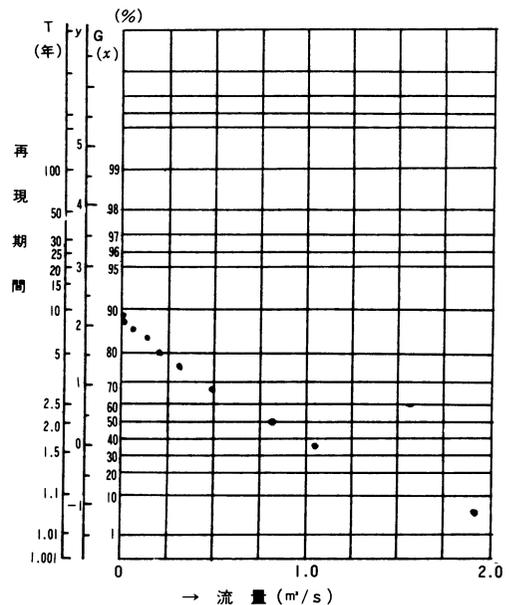


図 2 確率湧水流量

表3 渴水量・先行降雨指数・無降雨連続日数

年・月・日	Q	Pa	Dn	年・月・日	Q	Pa	Dn
1971.05.16.	0.57	21.910	1	06.16.	0.67	25.897	6
05.17.	0.44	19.140	2	06.17.	0.67	22.777	7
05.18.	0.18	25.984	3	06.18.	0.69	19.640	8
08.16.	0.89	33.480	3	06.19.	0.69	16.821	9
08.17.	0.72	28.857	4	06.20.	0.67	14.822	10
08.18.	0.57	32.585	5	1976.01.11.	1.51	3.010	35
08.29.	0.89	36.514	0	01.13.	1.54	2.449	37
1973.03.14.	1.84	5.238	19	01.14.	1.33	2.251	38
03.15.	1.84	4.610	20	01.15.	1.24	1.981	39
03.16.	1.84	4.024	21	01.16.	1.26	1.752	40
04.10.	1.84	22.849	0	01.17.	1.28	1.532	41
04.11.	1.84	20.080	0	02.03.	1.54	0.825	58
04.12.	1.84	19.960	1	02.04.	1.52	15.728	59
04.13.	1.56	17.581	2	02.14.	1.48	13.037	8
04.14.	1.56	19.574	3	02.15.	1.30	11.584	9
05.07.	1.84	51.561	2	02.16.	1.25	19.710	10
05.29.	1.84	22.559	0	02.17.	1.27	20.063	0
05.30.	1.84	19.855	1	02.18.	1.38	26.549	1
05.31.	1.84	17.493	2				
06.01.	1.84	15.343	3	1977.05.29.	0.04	22.797	2
06.02.	1.84	13.041	4	07.30.	0.05	6.225	11
06.03.	1.56	11.460	5	07.31.	0.05	5.282	12
06.04.	1.44	13.669	6	08.06.	0.05	2.047	18
07.14.	1.84	11.649	11	08.07.	0.03	1.807	19
07.15.	1.84	9.262	12	08.10.	0.02	8.275	1
07.16.	1.84	8.153	13	08.11.	0.01	7.383	2
07.17.	1.84	6.614	14	08.12.	0.01	16.107	3
07.18.	1.84	5.603	15	08.13.	0.01	14.170	0
07.19.	1.84	10.537	16	08.14.	0.03	12.556	1
08.13.	1.84	27.808	7	08.15.	0.02	12.652	2
09.16.	1.84	19.371	2	08.16.	0.04	41.408	3
11.05.	1.84	23.097	8	1978.05.06.	0.10	19.710	7
11.06.	1.84	21.626	9	05.24.	0.10	19.457	5
11.07.	1.84	18.949	10	05.25.	0.10	17.109	6
11.08.	1.84	16.696	11	05.26.	0.10	15.023	7
11.09.	1.84	26.005	12	05.27.	0.10	13.208	8
11.10.	1.84	22.872	0	05.28.	0.10	11.642	9
11.25.	1.84	4.307	15	05.29.	0.10	10.913	10
11.26.	1.84	3.793	16	06.01.	0.10	9.208	13
11.27.	1.84	2.171	17	06.02.	0.10	8.105	14
11.28.	1.84	2.010	18	06.03.	0.10	32.429	15
11.29.	1.84	1.774	19	1979.07.31.	0.24	20.689	7
11.30.	1.84	1.554	20	08.02.	0.38	15.845	9
1974.05.10.	1.56	21.449	0	08.03.	0.28	19.767	10
05.11.	1.56	18.867	1	08.06.	0.05	35.695	2
05.12.	1.31	16.609	2	08.09.	0.35	28.328	1
05.13.	1.31	19.924	3	08.10.	0.01	24.947	2
05.14.	1.09	41.240	0	08.11.	0.10	21.908	3
05.15.	1.09	35.826	0	08.21.	0.05	11.641	1
05.16.	1.09	31.501	0	08.22.	0.27	10.236	2
05.17.	1.09	27.734	1	08.25.	0.23	28.304	1
05.18.	1.09	24.547	2	08.26.	0.06	24.464	2
05.19.	0.88	24.547	3	1980.02.11.	0.44	7.935	12
05.20.	0.88	30.264	4	02.12.	0.39	6.817	13
1975.05.25.	0.70	25.863	5	02.13.	0.19	5.845	14
05.26.	0.70	15.762	6	02.14.	0.19	5.618	15
05.27.	0.70	13.185	7	02.15.	0.12	4.973	16
05.28.	0.70	11.136	8	03.06.	0.42	19.145	4
05.31.	0.70	13.554	11	03.07.	0.32	36.446	5
06.01.	0.67	12.226	12	08.12.	0.38	8.622	12
06.02.	0.67	10.164	13	08.13.	0.25	7.578	13
06.03.	0.67	9.149	14	08.14.	0.37	4.839	14
06.04.	0.67	7.280	15	08.16.	0.13	8.550	16
06.15.	0.69	29.498	5	08.19.	0.33	17.925	0

10年程度のデータ数で十分であることが裏付けられると考えられる。

次に、10年間の<sup>10)</sup> 渇水流量と先行降雨日数および<sup>11)</sup> 無降雨連続日数を資料から求めたものが表—3である。連続した渇水量の変化は、1976（昭和51）年と1980（昭和55）年の冬季に見られるだけである。

これらの年においては、先行降雨指数が大きければ渇水量が大きという一般的な傾向が比較的よく表れているが、その他の年では、渇水流量の出現期が分散したり、旱天の連続した期間が少なかったりするために、両者の関係がはっきりと表れていないようである。

そこで、渇水量と先行降雨指数との関係が、比較的明瞭に把握できると思われる、1976（昭和51）年と1980（昭和55）年の冬季における両者の関係について検討していくことにする。

片対数紙の横軸に先行降雨指数(P<sub>a</sub>)、縦軸に渇水量(Q)をとり、それぞれの値をプロットすると、ほぼ直線にならぶ（図—3、4）。

ゆえに、次のような式を仮定できる。つまり、

$$Q = a \cdot e^{b \cdot P_a} \quad \dots\dots(3)$$

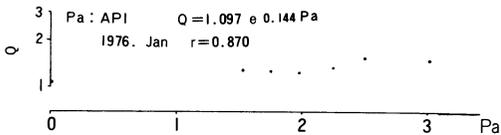


図3 PaとQの関係

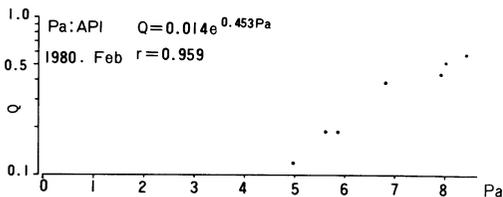


図4 PaとQの関係

ここで、

Q=渇水流量

P<sub>a</sub>=先行降雨指数

a=流域内の水保有量に  
関する係数

b=流域の保水能力に関する係数

(3)式中の係数a, bを求めるために、1976（昭和51）年と1980（昭和55）年のデータについて最小二乗法を適用し、次の回帰式を得た。

$$1976 \text{ (昭和51) 年: } Q = 1.079 \cdot e^{0.114 P_a} \quad (r = 0.959)$$

$$1980 \text{ (昭和55) 年: } Q = 0.014 \cdot e^{0.453 P_a} \quad (r = 0.870)$$

これらの式のF値は、12.435, 34.598であり、それぞれ危険率2.5%, 1.0%で有意であった。

二式を比較すると、aの値が小さければ、bの値が大きという傾向がみられる。つまり、このことは、流域内の水保留量が小さい時に、流域の保水能力あるいは浸透能が大きく、水を吸収しやすい状態であるということからも裏付けられ、渇水量と先行降雨指数との関係を表す回帰式中の係数a, bは、流域の水保有特性を示すものであるといえよう。

そこで、流域内の<sup>12)</sup> 水保留量の変化について考えてみることにする。

無降雨期には、流域内に保留されている水は、基底流出となり、ほぼ指数曲線の形で低減する。すなわち、低減初期の保留量をS<sub>0</sub>、これよりt日後の保留量をSとすれば、次式が成立するであろう。

$$S = S_0 \cdot e^{-Ct} \quad \dots\dots(4)$$

常数Cは低減係数であって、(4)式が成立することは保留量Sと保留量の変化ΔSとの間に、次の関係があることにより証明することができる。

$$\Delta S = C \cdot S \quad \dots\dots(5)$$

ここで、単位時間の保留量変化ΔSは、(1)式におけるQに相当するから、Qの時間的変化も、無

降雨時には指数曲線的減衰を示し、その低減係数は、保留量のそれと等しくなるといえる。

以上のことより、無降雨期における湯水量の低減は、次式で表すことができるであろう。つまり、

$$Q = Q_0 \cdot e^{-C \cdot D_n} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

Q = 湯水流量

Q<sub>0</sub> = 初期流量

D<sub>n</sub> = 無降雨連続日数

C = 低減係数

1976 (昭和51) 年と1980 (昭和55) 年の冬季における湯水量の低減式を求め、以下に示し、図化したものを図-5, 6に掲げる。

1976 (昭和51) 年:

$$Q = 5.543 \cdot e^{-0.9367 \cdot D_n}$$

(r = -0.838)

(35 ≤ D<sub>n</sub> ≤ 41)

1980 (昭和55) 年:

$$Q = 24.628 \cdot e^{-0.332 \cdot D_n}$$

$$(r = -0.961)$$

$$(12 \leq D_n \leq 16)$$

このときのF値は、9.458, 36.474であり、それぞれ危険率5.0%, 1.0%で有意であった。

二式を比較することにより、無降雨日数が短く、減衰初期の段階にあるほど、低減速度が速いといえる。

そこで、ハイドログラフから低減部分を取り出

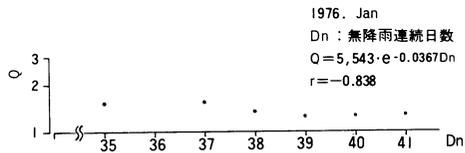


図5 D<sub>n</sub>とQの関係

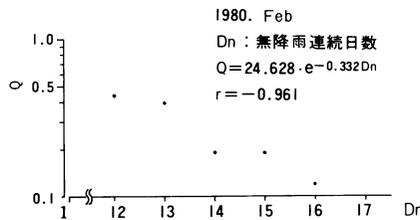


図6 D<sub>n</sub>とQの関係

表4 低・湯水時における減衰曲線の計算結果およびその検定

年・月・日	n	Q <sub>0</sub>	-C	e <sup>-c</sup>	r <sup>2</sup>	r	F	F <sub>α</sub>	α
1971.03.21.	6	1.826	-0.107	0.898	0.854	-0.924	23.397	21.198	0.010
09.14.	5	1.919	-0.0917	0.912	0.866	-0.931	19.388	17.443	0.025
1975.04.03.	6	1.980	-0.0377	0.963	0.686	-0.828	8.739	7.709	0.050
06.13.	5	1.206	-0.141	0.869	0.830	-0.911	14.647	10.128	0.050
07.27.	9	1.326	-0.0631	0.939	0.831	-0.912	34.420	16.236	0.005
11.01.	5	1.782	-0.0035	0.997	0.156	-0.395	0.555	—	—
12.01.	8	1.936	-0.0744	0.928	0.938	-0.969	90.774	18.635	0.005
1976.01.07.	5	1.922	-0.0439	0.957	0.887	-0.942	23.549	17.443	0.025
01.29.	7	1.915	-0.0302	0.970	0.765	-0.874	16.277	16.258	0.010
1977.07.20.	12	1.758	-0.288	0.749	0.938	-0.968	151.290	12.826	0.005
11.30.	13	1.857	-0.0423	0.959	0.941	-0.970	175.441	12.226	0.005
12.19.	6	1.047	-0.0357	0.965	0.585	-0.765	5.639	4.545	0.100
1978.04.22.	7	1.209	-0.181	0.835	0.925	-0.962	61.667	22.785	0.005
08.24.	17	0.059	-0.0256	0.975	0.498	-0.706	14.880	10.798	0.005
11.01.	11	0.945	-0.0761	0.927	0.942	-0.970	146.172	13.614	0.005
11.22.	4	0.522	-0.0634	0.939	0.886	-0.941	15.544	8.526	0.100
12.14.	5	0.524	-0.0598	0.942	0.876	-0.936	21.194	17.443	0.025
1979.01.04.	8	1.035	-0.0824	0.921	0.681	-0.826	12.809	8.813	0.025
01.23.	6	0.491	-0.0393	0.961	0.429	-0.655	3.005	—	—
02.02.	4	1.707	-0.151	0.859	0.870	-0.933	13.385	8.526	0.100
04.30.	5	0.623	-0.0741	0.929	0.838	-0.915	15.519	10.128	0.050
1980.03.04.	4	1.684	-0.442	0.643	0.983	-0.992	115.647	98.503	0.010
03.17.	4	1.844	-0.110	0.896	0.911	-0.955	20.472	18.513	0.050

減衰曲線:  $Q = Q_0 \cdot e^{-C \cdot D_n}$

r<sup>2</sup> = 決定係数

r = 相関係数

α = 有意水準 (%)

すことによって、実際の河川流量の低減係数を求めた(表-4)。

さらに、1976(昭和51)年と1980(昭和55)年の流況に比較的似ていると考えられる低減部分を図-7~9に示した。

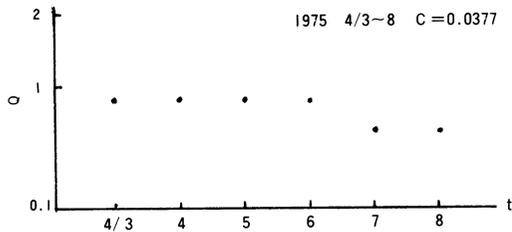


図7 減衰曲線

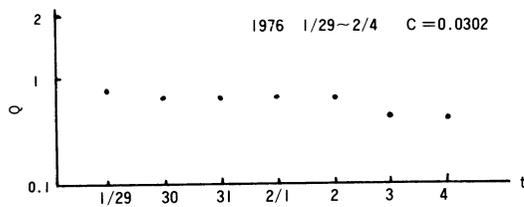


図8 減衰曲線

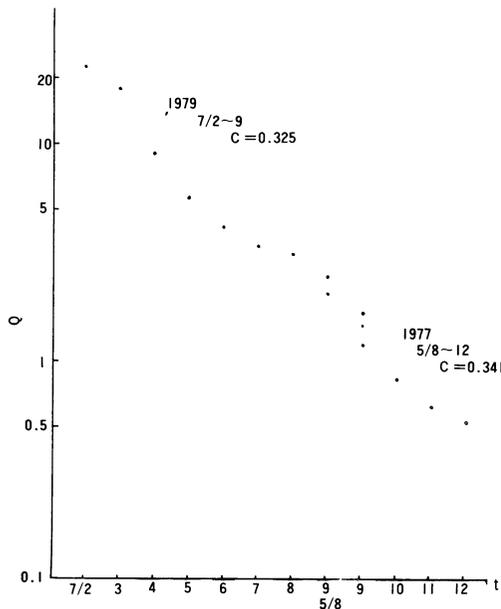


図9 減衰曲線

これらを見ても明らかなように、無降雨連続日数( $D_n$ )は、渇水期における流域内の水保留量の低減特性を表す際に用いることができる指標であるといえよう。

また、ハイドログラフの低減部を見ることにより、降雨終了後の経過時間が短いほど、流域内に保留されている水の流出が多いことから裏付けることができよう。

よって、渇水量と無降雨連続日数との関係は、流域内の水保留量の低減特性を示すものであるとみなしてもさしつかえないであろうと思われる。

### V 先行降雨指数と無降雨連続日数との関係

流域の水保有特性を示すのに用いた先行降雨指数( $P_a$ )と、流域の水保留量の低減特性を示すのに用いた無降雨連続日数とは、それぞれ持つ意味が正反対であることにより、逆数的関係が予想される<sup>8)</sup>。そこで、次式を仮定する。つまり、

$$D_n = a' + \frac{b'}{P_a} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

$D_n$  = 無降雨連続日数

$P_a$  = 先行降雨指数

$a'$ ,  $b'$  は定数

回帰式を求めるため、(7)式を 1976(昭和51)年と1980(昭和55)年の資料に適用すると次のようである。

1976(昭和51)年:

$$D_n = 29.399 + \frac{18.401}{P_a} \quad (r=0.990)$$

1980(昭和55)年:

$$D_n = 5.177 + \frac{53.971}{P_a} \quad (r=0.984)$$

これらのF値は、125.032, 139.857であり、それぞれ危険率0.5%で有意性が認められた。このこ

とより、さまざまな流況における連続した無降雨期間における先行降雨指数は、これらの式を用いて求めることができるであろう。そうすれば、流域内の水保有量に関する係数をも、容易に求めることができるであろう。

## VI あとがき

以上、渇水量と先行降雨指数との関係、そして渇水量と無降雨連続日数との関係、さらに先行降雨指数と無降雨連続日数との関係を、服部川流域において、検討してきたが、結果をまとめると次のようである。

①渇水量 ( $Q$ ) と先行降雨指数 ( $P_a$ ) との間には、指数関数的関係が成り立ち ( $Q = a \cdot e^{-bP_a}$ )、式中の係数  $a$ 、 $b$  はそれぞれ、流域内の水保有量に関する係数、流域の保水能力に関する係数を意味するものであると考えられ、流域内の水保有特性を示す指標であるとみなすことができる。

②また、渇水量 ( $Q$ ) と無降雨連続日数 ( $D_n$ ) との間にも、指数関数的関係が成立し ( $Q = Q_0 \cdot e^{-cD_n}$ )、係数  $C$  は、ハイドログラフの減衰部を表す曲線の式、そして流域内の保留量変化の式における  $C$  と同じ意味をもつ低減係数であるということ。

③そして、先行降雨指数 ( $P_a$ ) と無降雨連続日数 ( $D_n$ ) との間には、逆数的関係の成り立つこと ( $D_n = a' + \frac{b'}{P_a}$ ) がわかった。

しかし、長期間にわたる連続した旱天におけるデータが、ほとんど得られなかったこともあり、十分な考察を加えることができなかつた。今後は、これらの指標の意味及び関係式の明確化、さらに流域の地形特性などと関連づけて考察していくことが必要であろう。

## 謝辞

この拙論を作成するにあたり終始御指導頂いた、原昭宏

先生 (愛知教育大学)、森和紀先生 (三重大学教育学部) に感謝します。また、資料収集の際には、建設省淀川水系木津川上流工事事務所 (名張) の皆様、中浦基之・近藤正幸 (三重大学生) の両君、の協力を、資料整理には、市川達哉・大塚俊幸・矢田圭毅 (三重大学生) 諸君の協力を得たので謝意を表します。

なお、この拙論を榊原康男先生の退官のお祝に捧げ、ますますのご発展を祈ります。

## 参考文献および注

- 1) 例えば、  
高瀬信忠・宇治橋康行 (1975) : 山地小流域河川における出水特性について、金沢大学工学部紀要, 9—1, PP. 23—30.  
石崎勝義ほか (1982) : 山地小流域における流出特性に関する研究——裏筋波流出実験における解析例——, 土木技術資料, 24—3, PP. 21—27. など。
- 2) 例えば、  
瀬口昌洋ほか (1974) : 基底流出に関する基礎的研究 (I), 九大農学芸誌, 29—3, PP. 117—129.  
瀬口昌洋ほか (1979) : 山地小流域からの基底流出成分の解析, 農業土木学会論文報告集, 82, PP. 15—24. など。
- 3) 例えば、  
市川正巳ほか (1969) : 首都圏における主要河川の渇水流出と降水との関係, 東京教育大学地理学研究報告, XIII, PP. 89—101.  
高木不折 (1966) : 低水流出の低減特性に関する研究, 土木学会論文集128, P. 1—11. など。
- 4) 355日流量以下の流量を、ここでは、渇水流量とする。
- 5) 山口雅功 (1981) : 柿岡盆地における河川の流出特性, 地域研究, 22—1, PP. 29—38.
- 6) 三重地理学会 (1981) : 三重県阿山郡大山田村調査報告書 (III. 水文), 三重地理学会報, 33, 192P.
- 7) Linsley, R. K. and Others (1949) : Applied Hydrology, 689P.

- 8) 岩井重久・石黒政儀 (1970) : 応用水文統計学, 森北出版, 370P.
- 9) 建設省淀川水系木津上流工事事務所の資料による。  
  { 流量観測点——荒木 (上野市)  
  { 雨量観測点——阿波 (大山田村)
- 10) 1972年 (冬季) 欠測のため, 実質 9 年分のデータを用いた。
- 11) 無降雨日とは, 降雨量 5 mm以下の日とした。
- 12) 金子良 (1956) : 水文学的循環における土壌の効果, 農業技術研究所報告, F—9, PP. 211—343.