

降水量、地形、地質、植生と流出の関係について
Relation between Runoff and four factors (Precipitation,
Topography,Geology and Vegetation)

（機建設技術研究所 正員 遠竹 明弘

表1-1

1. はじめに

ダム調節、取水等の人為的影響の少ない表1-1に示したような流量観測地点を選定した。取水のある地点については、取水前の流量に補正した。そして、年平均流量、豊水量、平水量、低水量、渇水量を取り上げて、これらと降水量、地形、地質、植生の関係を検討した。

流出と降水量、地形、地質、植生の関係は次のように仮定した。

$q_i = P_i \cdot F_i \cdot G_i \cdot V_i$ (1.1)

q_i = 比流量 (m³/s/100km²)

q_1 = 豊水量, q_2 = 平水量, q_3 = 低水量,

q_4 = 渇水量, q_5 = 年平均流量

P_i : 降水量の関数 F_i : 地形の関数

G_i : 地質の関数 V_i : 植生の関数

P_i, F_i, G_i, V_i について、次のように検討した。

No.	水系名	河川名	地点名	地形 勾配	形状 係数	流域面積 (km²)	植 生 (%)				地 質 (%)					
							I	II	III	IV	1	2	3	4	5	6
1	尻別川	尻別川	名 駒	1/16	0.063	1402.2	-	6	25	69	11	29	60	-	-	-
2	十勝川	札内川	南帯橋	1/20	0.011	608.1	-	-	76	24	13	45	-	42	-	-
3	湧別川	湧別川	開 盛	1/27	0.012	1402.5	-	1	11	88	13	21	34	31	1	-
4	久慈川	久慈川	山 方	1/35	0.006	897.8	1	10	1	88	9	1	26	47	17	-
5	那珂川	那珂川	野 口	1/34	0.004	2181.0	3	18	31	48	23	32	24	16	5	-
6	利根川	渡良瀬川	早川田	1/23	0.012	1046.0	3	8	22	67	20	13	20	34	13	-
7	"	思 川	乙 女	1/30	0.007	765.0	5	22	13	60	20	36	-	34	10	-
8	荒 川	荒 川	寄 居	1/20	0.011	927.0	3	1	11	85	2	1	-	93	3	1
9	富士川	富士川	清水橋	1/12	0.003	2121.0	6	7	17	70	20	40	1	11	27	1
10	狩野川	狩野川	大 仁	1/12	0.019	322.0	3	10	2	85	15	48	29	8	-	-
11	長良川	長良川	美 濃	1/33	0.007	1076.0	-	6	15	79	8	-	42	46	2	2
12	円山川	円山川	上小田	1/18	0.013	700.0	-	16	1	83	18	1	1	50	30	-
13	千代川	八束川	若 萩	1/ 5	0.034	152.8	-	5	10	85	2	15	29	36	18	-
14	日野川	日野川	溝 口	1/ 7	0.063	645.0	-	19	3	78	3	9	14	10	64	-
15	佐波川	島地川	島 地	1/12	0.080	127.6	-	3	-	97	13	-	8	66	13	-
16	重信川	重信川	山ノ内	1/ 9	0.171	55.3	-	-	1	99	6	-	-	84	10	-
17	球磨川	川辺川	柳 瀬	1/24	0.071	521.0	0	1	17	82	3	2	4	83	-	8
18	大分川	七瀬川	胡麻橋	1/17	0.003	93.0	4	20	2	74	4	-	53	28	15	-

注) I : 市街地、造成地 II : 水田 III : 農耕地、二次草原、自然草原 IV : 造林地、二次林、自然林
1 : 第四紀堆積層 2 : 第四紀火山岩 3 : 第三紀層 (火山岩、堆積層) 4 : 中・古成層、変成岩
5 : 深成岩 6 : 石灰岩

2. P_i : 降水量

2.1 降水量と比流量 q_i の関係

降水量の観測値の算術平均によって、流量観測地点上流域の平均降水量は求めた。

豊水量、平水量、低水量、渇水量と年降水量、これらの生起した日の前30日雨量、60日雨量、90日雨量の関係について検討した。この結果、渇水量以外については、年降水量との相関性が高かった。渇水量に関しては、30日雨量、年降水量との相関性は同程度であった。年平均流量については、特に検討しなかったが、年降水量との相関性が高いと考えられる。

推定の際の使いやすさと以上の相関性を考慮して、年降水量による q_i の推定を行うこととした。

q_i と年降水量の関係は、図2-1に示すように

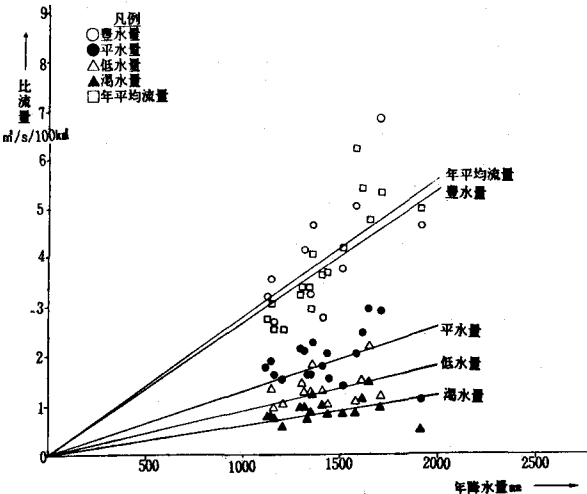


図2-1 比流量と年降水量の関係: 利根川水系思川乙女地点

原点を通る直線で近似した。qiの実測値とこの直線による推定値を比較すると図2-2のようになり、ある程度の精度でqiを推定可能ことがわかる。

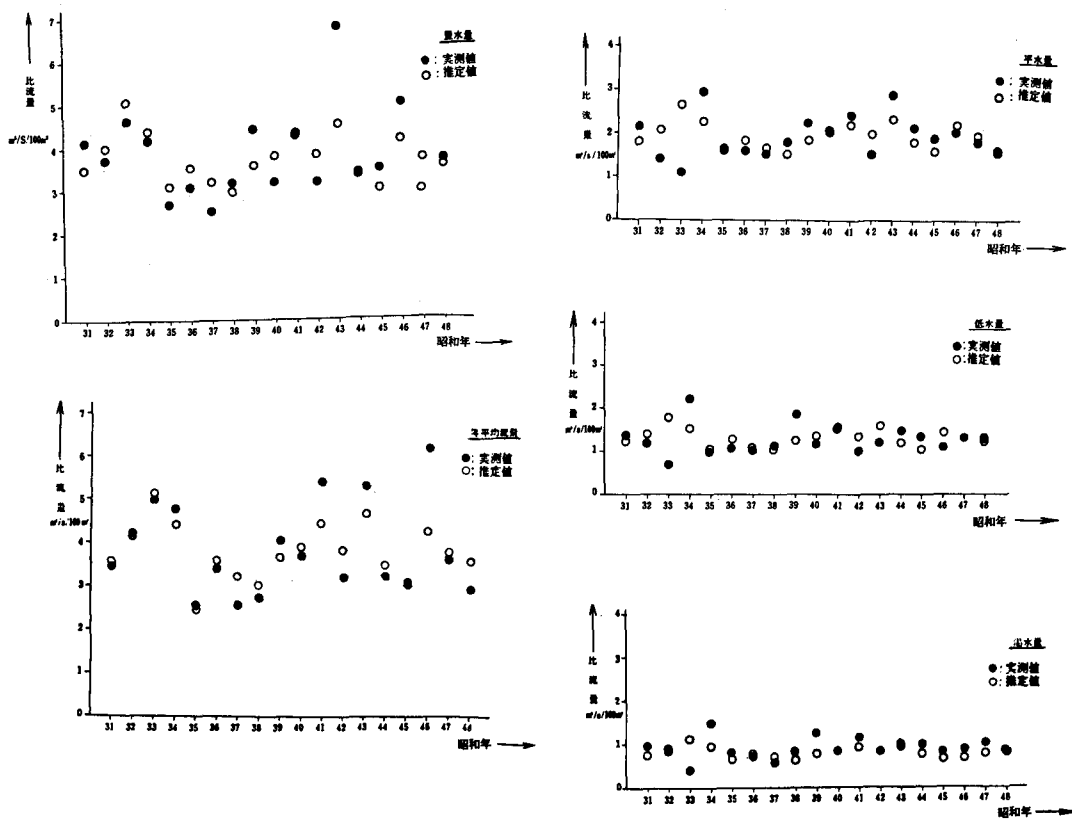


図2-2 qiの実測値と年降水量による推定値の比較 恩川乙女地点

2.2 年降水量と降水パターンを組み合わせた比流量qiの推定手法の検討

年降水量でqiを推定した場合に、図2-3に示すような推定誤差が発生する。この推定誤差の要因の一つとして、降水量の様々な時間的分布の存在が考えられる。例えば、一定の年降水量に対して降水量が年間一様である場合とそうでない場合を比較すれば、前者の方が流況は安定し、渇水量は大きくなると考えられる。そこで、図2-4に示すように、年降水量によるqiの推定誤差を説明可能な降水量の時間的分布を表す指標を検討した。

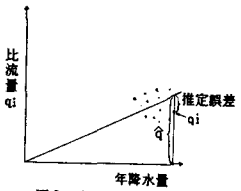


図2-3

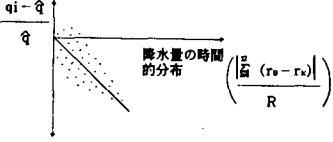


図2-4

降水量の時間的分布は、月降水量を用いて表すことにした。図2-5に示すように、月降水量を小さい方から並べかえる。そして、指標を検討した結果、渇水量以外については次が適切と考えられた。



図2-5 小さい方から並べかえた月降水量mm/月

$$(qi - \hat{q}) / \hat{q} = fi = \sum_{k=1}^n (r_0 - r_k) / R \quad (2.1)$$

R : 年降水量 rk : 月降水量

すなわち(2.1)式によって次のような推定が可能となる。

$$qi = \hat{q} (1 + fi) \quad (2.2)$$

$\hat{q}$ は年降水量を用いて次のように表す。

$$\hat{q} = F_i \cdot G_i \cdot V_i \cdot R \cdot 100/365/24/3.6 = 0.0032 R \cdot F_i \cdot G_i \cdot V_i \cdots (2.3)$$

0.0032は、年降水量を比流量の次元 $m^3/s/100 \text{ km}^2$ に換算する係数である。

(2.2), (2.3) 式より q_i の推定式は次のように表現できる。

$$q_i = 0.0032 R (1 + f_i) \cdot F_i \cdot G_i \cdot V_i \cdots (2.4)$$

渇水量については、表2-1または図2-6に示すように、原則的には r_1/R が時間的指標として適切と考えられた。

しかし、次の理由から、(2.1) 式による f_i か表2-1の f' の絶対値の大きい方を適用することとした。

$$\text{低水量} = 0.0032 R (1 + f) \cdot F_3 \cdot G_3 \cdot V_3$$

$$\text{渇水量} = 0.0032 R (1 + f_4) \cdot F_4 \cdot G_4 \cdot V_4$$

低水量推定値 < 渇水量推定値という不合理が生じないためには、次の条件が必要である。

$$\frac{(1 + f_4) F_4 \cdot G_4 \cdot V_4}{(1 + f) F_3 \cdot G_3 \cdot V_3} < 1 \cdots (2.5)$$

ここで、 $F_4 \cdot G_4 \cdot V_4 < F_3 \cdot G_3 \cdot V_3$ であるが、 $F_4 \cdot G_4 \cdot V_4$ と $F_3 \cdot G_3 \cdot V_3$ の数値に関わりなく常に (2.5) が満足されるためには、 $f_4 \geq f$ であることが必要である。従って、 $f' \geq f$ のとき $f_4 = f'$ とし、 $f' < f$ のとき $f_4 = f$ とする。いずれにせよ、降水量の関数は (2.6) 式ようになる。

$$P_i = 0.0032 R (1 + f_i) \cdots (2.6)$$

いくつかの水系で10ヶ年程度の比流量 q_i を対象に、年降水量による推定精度と f_i と組み合わせた場合の推定精度を比較した。この比較よれば、 f_i によって平均10%前後推定精度は向上する。

f_i は常に負であることから、図2-3に示す直線より実測値が大きい場合は、 f_i によって推定誤差はむしろ大きくなる。しかし、このような場合は、降水量の時間的分布が年間一様な傾向にあることから、 f_i の絶対値は小さくなり、さほど推定誤差を大きくしない。

逆に、図2-3に示す直線より実測値が小さい場合は、 f_i によって推定精度は向上する。この場合、降水量の時間的分布は一様でなくなるので f_i の絶対値は大きくなり、推定精度はかなり向上する。

f_i の大きい年の蒸発による損失は大きくなるのではないかと考えられる。このことが、年平均流量の推定精度向上に f_i が寄与する理由として考えられる。

3. F_i : 地形

図2-1に示す直線の勾配を A_i とすると、(2.3) 式より次が成立する。

$$A_i R = 0.0032 R F_i \cdot G_i \cdot V_i$$

$$B_i = F_i \cdot G_i \cdot V_i \text{ とおくと、} B_i = A_i / 0.0032$$

図2-1に示す整理を行うことによって、表1-1に示す18流域の B_i を求めることができる。

B_i が地形特性に強い関係を持つならば、地質、植生に乱されながらも地形特性に対してなんらかの傾向を示すはずである。地形特性としては、地形勾配と形状係数を取り上げて検討した。この結果、 B_i と地形勾配の相関性の方が、形状係数との相関性よりもやや高いと考えられたので、地形特性は地形勾配で代表させることにした。 B_i と地形勾配の関係は、図3-1に示す通りである。

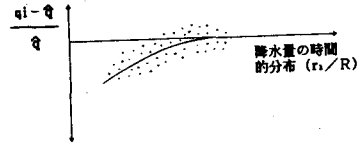


図2-6

表2-1

r_1/R	f'
0.01	-0.43
0.0125	-0.35
0.015	-0.28
0.0175	-0.21
0.02	-0.16
0.0225	-0.1
0.025	-0.05
0.0275	-0.01
0.03	0.0
0.0325	0.0

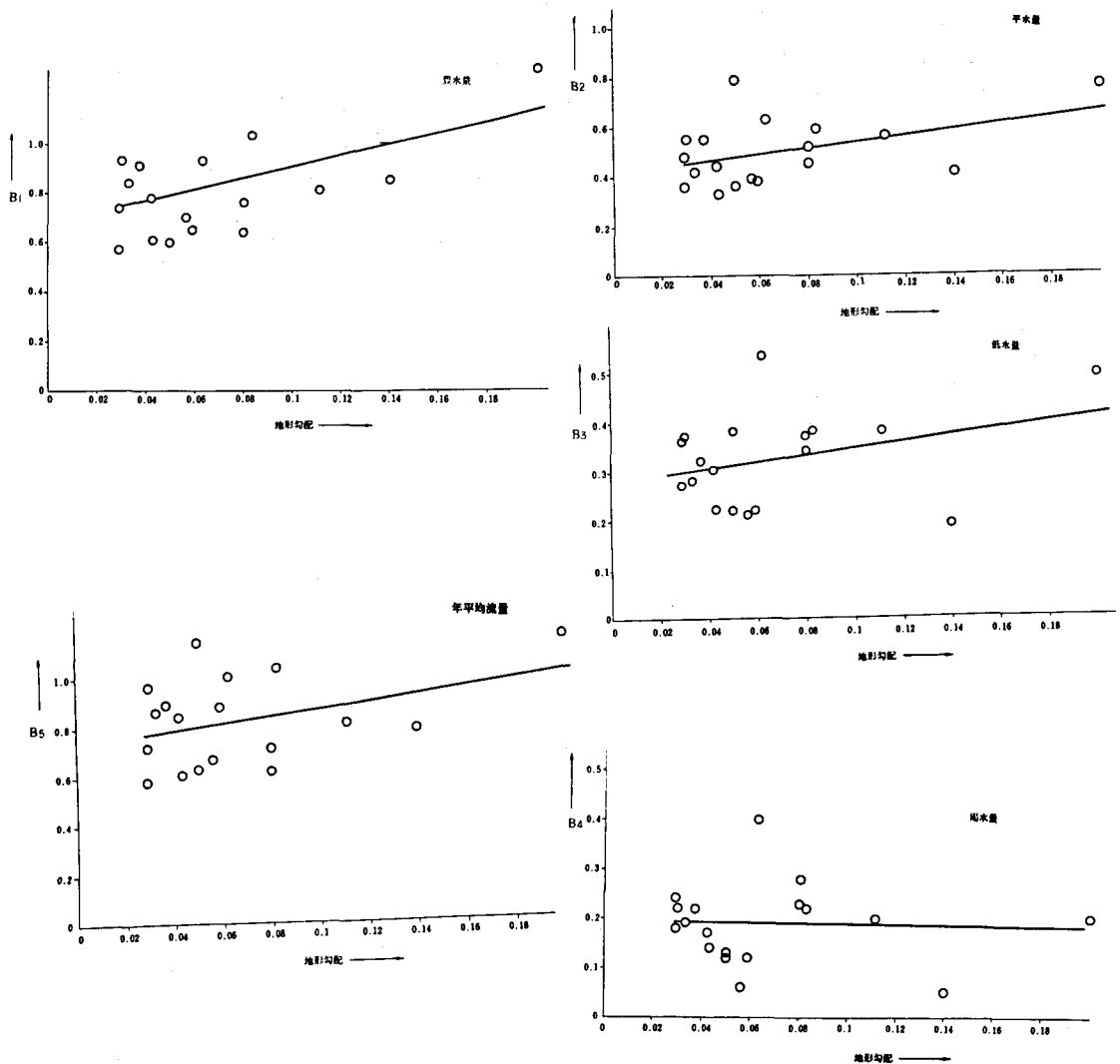


図3-1

地形勾配は流域の最高点と最低点を結ぶ勾配を原則とした。ただし、図3-2のように極端な場合は、最低地点と2番目に高い地点を結ぶ勾配とした。

18流域の B_i の平均値を $\bar{B}_i$ とし、図3-1における B_i を内挿する直線を $\hat{B}_i$ とする。 $F_i = \hat{B}_i / \bar{B}_i$ と考えると、 F_i は次のようになる。

豊水量 $F_1 = \hat{B}_1 / \bar{B}_1 = 2.6 L + 0.82$ L : 地形勾配 ($\bar{B}_1 = 0.84$)

平水量 $F_2 = \hat{B}_2 / \bar{B}_2 = 2.4 L + 0.84$ ($\bar{B}_2 = 0.50$)

低水量 $F_3 = \hat{B}_3 / \bar{B}_3 = 2.0 L + 0.88$ ($\bar{B}_3 = 0.32$)

渇水量 $F_4 = \hat{B}_4 / \bar{B}_4 = -0.74 L + 1.1$ ($\bar{B}_4 = 0.19$)

年平均流量 $F_5 = \hat{B}_5 / \bar{B}_5 = 1.6 L + 0.89$ ($\bar{B}_5 = 0.83$)



図3-2

4. Gi (地質), Vi (植生)

BiをFiで除したものをCiと定義する。18流域の平均Ciに対するCiの変動は地質、植生の違いによると考えられる。

保水力との関係を考慮し、虫明・高橋・安藤による地質区分を参考にしながら、地質区分は次のとおりとした。

j = 1 第四紀堆積層 j = 2 第四紀火山岩
j = 3 第三紀層 (火山岩、堆積岩) j = 4 中・古生層・変成岩
j = 5 深成岩 j = 6 石灰岩

植生 (土地利用を含む) については、保水力を考えて次のような分類とした。

j = 1 市街地・造成地 j = 2 水田、 j = 3 草原、 j = 4 森林

$Ci = \bar{C}i \cdot Gi \cdot Vi = \bar{C}i \left(\sum_{j=1}^6 gi,j,aj \right) \left(\sum_{j=1}^4 Vi,j,bj \right) \dots\dots\dots (4.1)$

gi,j: 地質の重み aj : 地質の面積比 ($\sum_{j=1}^6 aj = 1$)

Vi,j: 植生の重み bj : 植生の面積比 ($\sum_{j=1}^4 bj = 1$)

Ci/Ciが植生の影響を全く受けない場合はVi = 1, 地質の影響を受けない場合はGi = 1 とする。

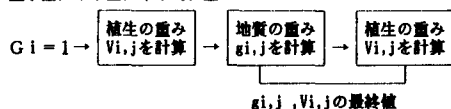
Vi = 1 とし、最小2乗法によってgi,jを求め、Ci/CiとGi(Gi = $\sum_{j=1}^6 gi,j,aj$) の相関係数を求め表4-1に示した。同様にGi = 1とした1場合のCi/CiとVi(Vi = $\sum_{j=1}^4 Vi,j,bj$) の相関係数についても求め、同表に示した。表4-1から豊水量、平水量、年平均流量については植生との相関が高く、低水量、渇水量は地質との相関が高いことがわかる。

このことを考慮にして、gi,j、Vi,jを最小2乗法を用いて図4-1に示す手順によって求めた。

表4-1

	Vi=1とした場合の Ci/CiとGiの相関係数	Gi=1とした場合の Ci/CiとViの相関係数
豊水量 i=1	0.51	0.81
平水量 i=2	0.67	0.79
低水量 i=3	0.73	0.52
渇水量 i=4	0.75	0.30
年平均流量 i=5	0.53	0.65

豊水量、平水量、年平均流量



低水量、渇水量

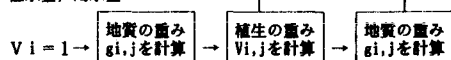


図4-1

5. 降水量、地形、地質、植生と流出の関係の定式化

前述の検討から、次のような定式化を行った。

$qi = 0.0032R (1 + fi) \bar{C}i Fi \cdot Gi \cdot Vi \dots\dots\dots (5.1)$

qi: 比流量 (m³/s/100km²) q₁ = 豊水量, q₂ = 平水量,

q₃ = 低水量, q₄ = 渇水量, q₅ = 年平均流量

R: 年降水量 (mm/年)

0.0032: 年降水量を比流量 (m³/s/100km²) になおす換算係数

fi: i = 1 ~ 3, 5 のとき $fi = \frac{r_s - r_k}{R} \dots\dots (5.2)$

j = 4 のとき, (5.2) 式によるfiの絶対値と、表2-1

によるf'の絶対値の大きい方をf₄とする。

rₖは図2-5に示す小さい方から並べかえた月降水量である。

Ci: 無次元量

Fi: 無次元量で地形勾配Lの関数 Fi = Pi L + hi

Gi: 無次元量で地質の関数 Gi = $\sum_{j=1}^6 gi,j,aj$

gi,jは地質の重み, aj は地質の面積比

表5-1 Ci

	豊水量 i=1	平水量 i=2	低水量 i=3	渇水量 i=4	年平均流量 i=5
Ci	0.84	0.50	0.32	0.19	0.83

表5-2

	豊水量 i=1	平水量 i=2	低水量 i=3	渇水量 i=4	年平均流量 i=5
Pi	2.6	2.4	2.0	-0.74	1.6
hi	0.82	0.84	0.88	1.10	0.89

表5-3 gi,j

		豊水量 i=1	平水量 i=2	低水量 i=3	渇水量 i=4	年平均流量 i=5
第四紀堆積層	j=1	0.5	0.6	0.9	1.3	0.4
第四紀火山岩	j=2	1.1	1.2	1.5	1.6	1.0
第三紀層	j=3	1.0	1.2	1.3	1.4	1.2
中・古生層・変成岩	j=4	1.0	1.0	0.9	0.5	1.0
深成岩	j=5	0.7	0.6	0.2	0.0	0.7
石灰岩	j=6	0.0	0.0	0.9	2.3	0.4

表5-4 vi.j

	豊水量 i=1	平水量 i=2	低水量 i=3	渇水量 i=4	年平均流量 i=5
市街地 造成地 j=1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
水田 j=2	1.6	0.7	0.6	0.0	1.5
草原 j=3	1.9	1.7	1.1	0.6	1.6
森林 j=4	1.0	1.0	1.1	1.3	1.0

(5.1)式を大田川水系中深川, 小瀬川水系両国橋のそれぞれの流量観測値に適用すると、図5-1, 図5-2に示す通り、ある程度の精度で推定できることがわかる。

6. まとめ

降水量, 地形, 地質, 植生と流出の関係には次の特性があると考えられる。

(1) 降水量とqiの関係

年降水量とその時間的分布によってqiはある程度支配される。

ただし、降雪量の大きい地域においては、山地の降雪量の観測データが不足していたり、降雪量計器による雪の捕捉率の問題によって、流域平均降水量が過小に評価される傾向にある。そこで、このことを考慮した流域平均降水量の補正を行ったうえで、(5.1)式を適用する必要がある。

(2) 地形とqiの関係

渇水量は地形勾配が増加するにしたがって減少する傾向にある。その他のqiは、これと逆の傾向を示す。

(3) 地質とqiの関係

低水量, 渇水量については地質との相関性が高い。また、表5-3によると、例えば、第三紀層は第四紀堆積層の3倍程度渇水量に寄与すると考えられる。ただし、石灰岩については、18流域のうちで最も面積比の大きい流域においても8%であり、2%以下が3流域、その他の流域には石灰岩の地質はない。石灰岩の重みの適用についてはこのことに留意する必要がある。

4) 植生とqiの関係

豊水量, 平水量, 年平均流量は植生との相関性が高い。

表5-4によると、例えば、森林は草原の2倍以上渇水量に寄与すると考えられる。

参考文献

- 1) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果，土木学会論文集，1981年5月号
- 2) 村井 宏：水資源かん養のために望ましい森林とその取り扱いについて，水利科学1980年N o 131

