

## 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果

EFFECTS OF BASIN GEOLOGY ON RIVER-FLOW REGIME  
IN MOUNTAINOUS AREAS OF JAPAN

虫 明 功 臣\*・高 橋 裕\*\*・安 藤 義 久\*\*\*

By Katumi MUSIAKE, Yutaka TAKAHASHI and Yoshihisa ANDŌ

## 1. ま え が き

降水の河川への流出現象は、それが生起する場の特性、すなわち流域特性に支配され、両者の関係の探究は従来から水文学の主要なテーマの1つとなっている。ここで対象とする山地河川に限定すれば、流域特性は、地形的要因、土地被覆の要因および地質的要因の3つに大別できる。前二者は地表付近の特性であり、後者は地下の特性である。流出現象はこれらすべての要因が複雑に影響し合って構成されるが、洪水時以外の流出すなわち地下水流出に対しては、流域の地質条件が最も大きな規定要因になるものと想定される。本論文では、流出に及ぼす流域の地質条件は主としてその地下構造によって表現できるとして、日本の山地河川の流出と地質的要因との関係について検討する。

地形的要因も流域の傾斜の分布、帯水層の規模、雨水の浸透などと関連して、地下水流出に影響を及ぼすと考えられる。しかし、一般に地質構造が山地の浸食地形と相関が高いことは、地形学でも認められており、その意味で、地質的要因で代表させることにより、地形の効果もある程度考慮されているとみなせる。植生は地質あるいは土壌と無関係ではないが、むしろ気候的条件に大きく規定されると考えられる。この点について本研究では巨視的にみて気候条件が同じとみなせる地域内で河川間の流出量を比較あるいは分析することによって、植生の違いによる効果がある程度消去されていると思われる。定性的な議論ではあるが、筆者らがここで流域特性の中から特に地質的要因をとりあげるのは、以上の理由による。

河川の流出特性と流域の地下構造あるいは地質の関係については、従来、第四紀火山岩類流域で流況がきわめて

安定しているのが一般に認められているほか、限られた範囲内で流域の地質と通減曲線<sup>1)</sup>あるいは湯水比流量<sup>2)</sup>の対応が議論されているにすぎない。

本研究では、日本列島スケールでの水源山地河川を対象として、流出との対応関係を考慮した実用的な地質区分を提示し、その区分に応じて、近隣する河川の“低水流指標”が有意な差を表わすこと、また通減曲線がほぼ一致することを示す。さらに、各種流況区分流量を分析対象として、気候要因を取り入れた形で数量化理論I類を適用することにより、流量の大小に伴う地質要因と気候要因の規定力について議論する。最後に、取り扱った気候区ごとに、地質分布の要点を整理し、地質区分別に平均的な流況曲線を比較検討する。

## 2. 隣接する中小山地流域における低水流指標と流域の地質

## (1) 低水流指標

## a) 資料上の制約

低水流出が流域の地下構造と関連が深いであろうという作業仮説はあっても、まずそれを実証する資料を何に求めるかが問題になる。降水や蒸発散がほぼ同じと考えられる地域内に、単一の地質で構成され、しかも流量観測記録を備えたいくつかの異なる流域が存在すれば、おのおの流出特性を解析比較することによって、流出に及ぼす流域の地質の効果を吟味できる。

日本の水源山地河川の流況資料としては、「流量要覧第1~4回」がある。これには、月平均、月最大、月最小流量ならびに豊、平、低、渇、最小流量などの順序統計量の形に整理された流量記録が収録され、かなりの小支川まで含まれている。しかし、日本の山地では一般に各種の地質が小規模でモザイク状に分布する場合が多く、「流量要覧」所載の測水所でさえも、その上流域が単一の地質で構成されているものは比較的少ない。さらに、

\* 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 東京大学教務員 工学部土木工学科

降水や可能蒸発散量が同じとみなされるごく近い範囲内で、そうした条件を満たす流量観測所を選び出すと、利用できる資料が極めて少なくなる。

**b) 資料の拡張—初期の水力開発を検討する意義—**

こうした資料上の制約を補足するものとして、次のような発想から、初期における水力開発について調査・検討を行った。

一般に、大ダムや大型揚水施設などの大規模な水利施設を造るハードな技術力が低い時代においては、水に対する人間の対応は、その自然に順応する面が強かったといえる。つまり、人間の水に対する対応が水の自然を忠実に表わす場合が少なくない。こうした観点に立てば、過去の人間の水に対する対応の仕方を水の自然を知るための“トレーサー”とみることができる。たとえば、火山地帯、扇状地あるいは段丘崖での古い集落は安定した湧水を中心に立地する場合が多く、これを追跡することによって水循環に関する知見を得ることができる。また水害地では、住居形態や土地利用などからその地域の氾濫の状況がある程度類推することができる。かなりの広がりをもった河川流域において、測定によって得られる情報は、場所的にも時間的にも限られており、これを補足するものとしてこのトレーサーがきわめて有効なことがある。河川と人間が相剋を繰り返す河川開発史、治水史あるいは水害誌の中からも、人間の対応をトレーサーとみる立場を意識的にとれば、水文学的に有用な情報を得られる場合が多い。

山地河川に対する人間の働きかけとしては、水力発電所の開発がある。わが国の河川上流域では、明治後半から水力開発がその形を変えながら盛んに進められてきた。水力開発では河川流量が直接経済性に結びつくため、古くから精細な調査が行われてきた<sup>3),4)</sup>。わが国の水源地帯の水の賦存状況について、水力発電は豊富な経験と知識の蓄積をもっており、水力開発にそれが端的に反映されている。したがって、各河川における水力開発の経緯、発電所の分布、取水形態、使用水量などを追跡することにより、上流水源地帯の水に関する有用な情報を得ることができる。

**c) 発電所使用水量の変遷と低水流指標**

水力開発の発展の経緯は、建設技術や送電技術などの技術力の進歩および社会経済的背景などさまざまな要因に左右されており、観点の相違によっていくつかの時代区分が提示されている<sup>5)</sup>。本項は、発電所の使用水量の変遷との対応付けを明らかにしたいので、それと関連が深い発電所規模と送電距離に着目した時代区分を引用し、使用水量との関連を

議論する。表—1 は川村によって与えられた区分<sup>6)</sup>に筆者が使用水量を対応させたものである。

わが国では、明治 23 (1890) 年 7 月利根川水系鬼怒川支川大谷川に下野紡績が所野発電所の運転を開始したのをはじめとして、水源山地河川で水力開発が急激に進展する。明治 39 (1906) 年の水力発電事業者数は 105 を数え、総発電力は 25 195 kW であった<sup>7)</sup>。1 事業者当りの発電力は平均 250 kW となり、1 つの事業者が複数の発電所をもっていることが多いから、1 発電所当りの発電力はさらに小さい。すなわち、市内配電～近距離送電時代においては、一般に供給地との限られた距離の範囲内で発電所の立地が検討されたにすぎず、利用水量が少ない小規模な発電所であった。このような発電所は、その後の電力開発の進展に伴い廃止されたものが多い。

明治 40 (1907) 年相模川上流の桂川駒橋地点に東京電燈により 15 000 kW の水力発電所が建設され、55 000 V の高圧で駒橋—東京間 80 km の送電に成功し、さらに大正 3 (1914) 年には猪苗代—東京間 226 km の遠距離送電も達成された。このように遠距離の送電が可能となり、送電網が拡張されるにつれて、より広域的な立場から発電にとって有利な河川を選択できる技術的基盤が整えられてきた。こうした状況を背景に、明治 43 (1910) 年に逓信省に臨時水力調査局が設置され、全国に広がる 2 233 地点で水力発電所の立地条件に関する調査が行われた。これが後に第 1 次水力調査 (1910～1913 年) とよばれるものである。この調査における発電計画はすべて自流式で、使用水量には最大、常時の区別はなく、河川の湯水量 (355 日流量) を標準とした<sup>8)</sup>。湯水量を標準とした理由は、当時個々の電力企業あるいは発電所がそれぞれ独立した配電系統をもっていたので、1 か年を通じて常に安定した電力を供給するためには、最湯水期の流量を規準にとらなければならなかったからである。

この間、日露戦争 (1904～1905 年)、さらに第 1 次大

表—1 発電所規模・送電距離を中心とした電力産業の時代区分と発電所使用水量

期別	年代	時代区分	摘要	発電所使用水量		
				常	時	最大
第 1 期	明治 20 年～ (1887 年)	市内配電時代	東京茅場町火力以後 京都蹴上流水、水力以後			
第 2 期	明治 32 年～ (1899 年)	近距離送電時代	郡山、広島近郊水力以後 11 000 V 送電			
第 3 期	明治 40 年～ (1907 年)	遠距離送電時代	桂川—東京送電以後 55 000 V 送電	湯水量 (355 日 流量)		
第 4 期	大正 3 年～ (1914 年)	大送電網時代	猪苗代—東京送電以後 115 000 V、226 km 送電			
第 5 期	大正 14 年～ (1925 年)	調整発電 (人造湖) 時代	津留、賤母、大井発電所 以後			平水量 (185 日 流量)
第 6 期	昭和 8 年～ (1933 年)	水火併用 (大火力) 時代	尼ヶ崎共同火力以後			
第 7 期	昭和 17 年～ (1942 年)	補給用水力 (大 貯水池式) 時代	木曾川水系三浦ダム以後	ビッグ発電 をするので、 一様でない		豊水量 (95 日 流量)

戦(1914~1918年)に伴う炭価の高騰も1つの要因となつて、発電の比重は火力から水力へと急速に移行していった。大正7(1918)年から5か年間にわたって行われた第2次発電水力調査では、河水の利用率を上げるために最大使用水量は平水量(185日流量)を標準とした。しかし常時使用水量の規準は一般に渇水量であった<sup>9)</sup>。

日負荷の変動に対処するために日流量を調整する小規模な調整池は、明治から大正にかけての比較的古い発電所においても採用されていた。水系間の連系運転と火力の補助的併用が進むにつれて、数日から月にまたがって調整を行う比較的大規模な調整池式発電が、木曾川筋を中心に登場する。このような発電所においては、最大使用水量は平水量以上を標準とするが、常時使用水量は渇水量を規準に決められる場合が多い。

昭和17(1942)年木曾川上流に渇水期の流量増強を目的とする三浦ダムが築造され、さらに戦後になると大貯水池による発電が推進される。このような水力発電所では、常時使用水量も当然渇水量以上になってくるが、貯水池式発電が登場する以前の発電所では、常時使用水量は一般に渇水量を標準に決められている。

つまり、第2次大戦前の水力発電所、およびそれ以後についても自流水発電所については、その常時使用水量を渇水量とみなすことができる場合が多い。昭和16(1941)年までに全国の1067地点で水力発電所が建設されており<sup>10)</sup>、流量要覧(第4次)所載の測水所数457の測水資料にそれらの常時使用水量を加えると、山地におけるかなり小流域の河川の渇水量に関する情報を得ることができる。本研究では、まず「流量要覧」の渇水量ならびに自流水あるいは調整池式発電所の常時使用水量を“低水流出指標”として、流域の地質とその指標との対応を試みる。

ただし、河川によっては、上流山間部にあっても他の利水部門一農業用水、流木、漁業など一との関係で、渇水量全量を常時使用水量として取水していない例がある。また、上流地点の貯水池建設による流量増強に伴って、常時使用水量が自然渇水量を上回る場合もある。常時使用水量を低水流出指標とする場合、これらの点についてチェックする必要がある。本研究で取り扱った河川については、発電所管理者への問い合わせによってそうした吟味を行っている。

## (2) 地質区分

水分の貯留や流出に関連する流域の地質条件は主として地下構造によって左右されるとして、どのような地質区分が流域の水文特性とよく符合するかが次に問題となる。本研究では、以下の規準のもとに表-2の地質区分を提案する。

表-2 地質区分

地質区分	記号	備 考
第四紀火山岩類	Vq	溶岩、あるいは未固結の火山堆出物を含む。
第三紀火山岩類	Vt	部分的に第三紀以前の火山岩類を含む。
花崗岩類	G	日本の花崗岩類は程度の差はあれ、深部までマシ化している <sup>11)</sup> 。
第三紀層	T	日本の第三紀層は、一般に高い山脈の周辺部や沖積地と山脈の間に丘陵状の山地や島のような地形で分布し、水力開発の対象となるような高位山岳地帯での分布は稀である。
中生層	M	
古生層	P	古生代以前の地質、および結晶片岩、片麻岩などの動力変成岩を含む。
その他		上記に分類されない比較的小規模な分布を示す地質。

i) 日本列島の水力開発の対象となるような高い山岳地帯に、ここで問題とする流域規模100km<sup>2</sup>単位で分布し、かつ出現頻度が比較的高いこと。

ii) 日本列島スケールでマクロに地質と流出の関係をみる立場から、地質学的な細かな区分は避け、大区分を用いる。

iii) 噴出岩や堆積岩は、一般に古期の岩石ほど固結度が高く、時代の経過に応じて地殻変動や熱作用などによる変質の程度が同じと考えられるので、地質時代の大区分を分類の規準とする。

流域の地質判読には、地質分類を全国でほぼ統一的に表記してある50万分の1地質図(地質調査所発行)をベースとし、細部の地質の境界をみるために縮尺が大きい分県地質図などを参照した。

## (3) 水系別検討

太平洋側の数河川流域を選んで、流域内の水力発電所の分布、取水形態、常時使用水量および測水資料について検討を行った。太平洋側の河川に限定した理由は、日本海側では、河川の流出に雪の影響がかなり大きく、同等には議論できないと考えられるからである。

水系別の検討にあたっての基本的な考え方や留意点は次のとおりである。

i) 低水流出指標は、当然降水の季節変動パターンを反映するから、それがほぼ一様とみなせる同一水系あるいは近接水系において比較を行う。

ii) 本研究の目的上、前述の地質区分のうちのいくつかが、比較的広くまとまった分布を示す流域を対象河川水系に選定する。

iii) 水力発電事業の“河川の選択性”が本研究の1つの前提条件となっていることから、個々の対象水系とその周辺地域における電力事業の経緯、個々の発電所の建設の目的などについて明らかにするよう努める。

iv) 現地調査を行い、個々の発電所の運転状況ならびに河川流況などについて、発電所管理者から情報を得る

表-3 隣接する河川における低水流出指標と流域の地質  
(a) 利根川, 荒川水系

水系	河川	発電所ある いは測水所	発電開始年 月あるいは 測水期間	流域面積 (km <sup>2</sup> )	低水流出 指標 (mm/日)	流域のお もな地質		
利根川	吾妻川	鹿沢	大15	60.0	4.00	Vq		
		西窪	昭8	211.6	2.73			
	"	"	今井	大14. 11	264.0		2.54	
			長野原	昭17~昭32	458.0		2.11	
	"	大谷川	馬道	明39	119.0		3.03	
			細尾	明43. 5	133.0		3.53	
	"	"	日光第1	大7. 5	166.4		3.18	
			神橋下*		200.0		3.70	
	"	烏川	里見	大7.12	126.9		2.25	Vq, Vt
	"	利根川	矢木沢	昭32.1~12	164.0		1.40	G
幸知			大13~昭29	413.0	1.56			
小松			大11.11	461.5	1.56			
湯松曾*			昭16~昭32	49.4	1.56			
"	山田川	西万	昭36.5	64.4	1.46	Vt		
		四万	大8~昭24	84.2	1.31			
		鬼怒川	保俱*	昭12~昭32	70.2		1.19	
荒川	入川	川保	昭28.6	36.4	0.97	M		
		荒川	宮平	大12.3	185.0		0.91	
	"	"	大滝	大12.8	278.0		0.78	
			秩父	昭17.11	344.0		0.68	
	"	滝川	滝川*	昭3~昭32	47.8		0.85	
			大洞	大洞*	昭2~昭32		61.3	1.02
"	中津川	宮平	昭3~昭32	114.0	0.31	P		
		利根川	神流川	矢納	大3.11		262.0	0.73
"	"	坂原*	大12~昭32	305.0	0.41			

(b) 多摩川, 笛吹川, 相模川, 酒匂川水系

水系	河川	発電所ある いは測水所	発電開始年 月あるいは 測水期間	流域面積 (km <sup>2</sup> )	低水流出 指標 (mm/日)	流域のお もな地質	
相模川	桂川	鹿留	大3. 4	203.0	3.19	Vq	
		谷村	大9.12	258.0	3.07		
	"	"	駒橋	明41. 1	293.0		5.40
			鮎川	大2.12	29.0		3.90
			菅沼	大14. 7	163.0		3.69
"	"	生土	昭5. 2	175.0	4.12		
		峰	明43. 7	186.0	3.89		
"	世附川	世附*	大12~昭32	18.5	2.43	Vq, G	
笛吹川	笛吹川	広瀬*	大9~昭32	64.2	1.30	G	
		第3	大11.10	75.0	1.60		
	"	"	第2	大10. 2	112.0		1.61
			琴川	昭2.12	14.2		1.52
	"	"	第1	昭1.12	19.0		1.52
			白川	初鹿野	大7.11		40.0
多摩川	秋川	秋川	大12. 2	83.0	1.01	M	
相模川	鶴川	向風	大15. 9	63.0	0.77		

(c) 五ヶ瀬川水系

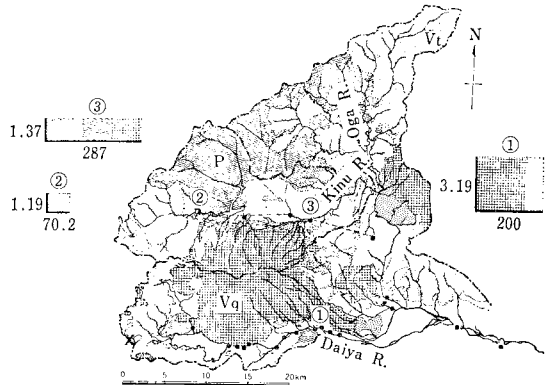
水系	河川	発電所ある いは測水所	発電開始年 月あるいは 測水期間	流域面積 (km <sup>2</sup> )	低水流出 指標 (mm/日)	流域のお もな地質
五ヶ瀬川	川走川	白水	昭31.11	34.0	4.32	Vq
		第2	大15.11	63.0	3.69	
"	網の瀬川	菅原	昭33.10	61.0	1.44	G
		祝子川	祝子川	昭4.12	49.0	
"	北川	熊田*	昭27~昭34	518.5	0.52	M, P

注 1) 発電所の諸元は、通商産業省公益事業局：許可水力地点要覧、1953より。  
2) \*印は測水所。文献12)より。ただし、五ヶ瀬川水系北川熊田流量観測所については、建設省河川局：流量年表、1952~1959より。

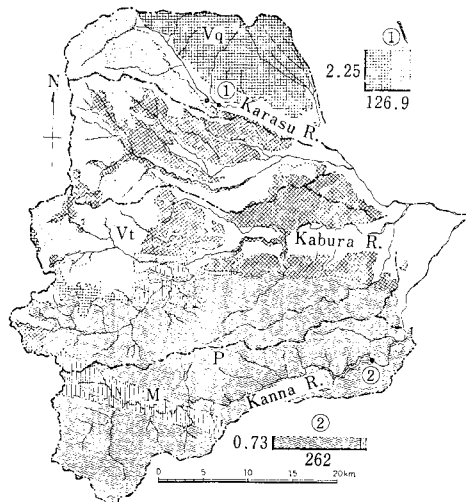
よう努める。また、上流に貯水池が建設され、流量増強がなされた河川については、それ以前の常時使用水量を低水流出指標とする。

地質図、地形図で予備的検討を行ったうえ、利根川水系、荒川水系、多摩川水系と笛吹川水系、相模川水系、酒匂川水系、および五ヶ瀬川水系を対象河川とした。これらのうち、発電所の取水河川流域あるいは測水地点上流域の地質構成が比較的単純なものを抽出して整理したのが表-3である。また、流域の地質と発電所の取水点の分布および低水流出指標の関係を地図上で示しやすい例を図-1(a)~(c)にあげる(このほか、吾妻川流域、多摩川流域と笛吹川流域、五ヶ瀬川流域については文献13)、あるいは14)参照)。水系別検討の結果は次のように要約される。

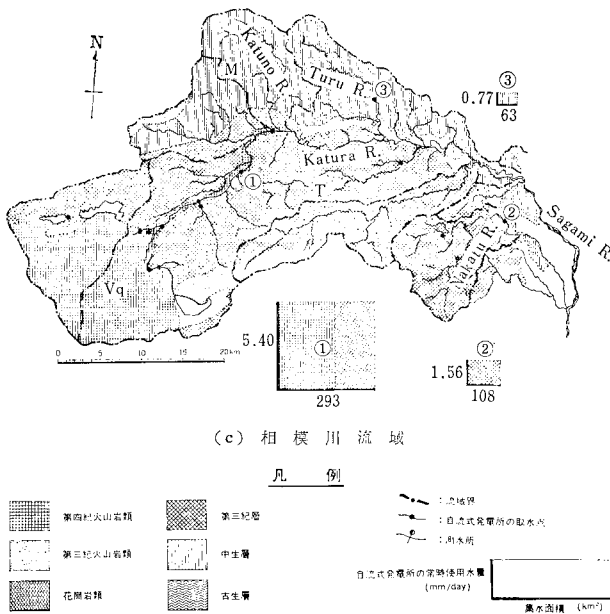
- i) 第四紀火山岩類流域で低水流出指標は2~5mm/日の最も高い値を示すが、地点ごとのばらつきは大きい。
- ii) 低水流出指標は、花崗岩類流域がこれにつき、関東地方諸河川と九州の五ヶ瀬川流域とも1.5mm/日前後の値を示す。



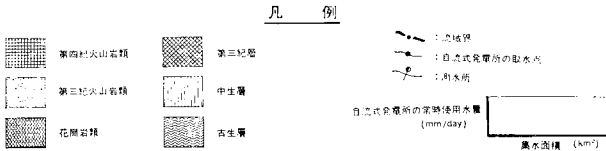
(a) 利根川水系鬼怒川流域



(b) 利根川水系烏川流域



(c) 相模川流域



図一 流域の地質と低水流指標ならびに自流式発電所の分布

iii) 第三紀火山岩類流域においては、この指標の値が花崗岩類流域と同程度かわずかに低いものと推定され、関東地方の例では 1.3 mm/日 前後の値となっている。

iv) 中生層、古生層流域において低水流指標は最も低い値を示し、関東地方諸河川では、中生層流域で 0.8 ~ 1.0 mm/日、古生層流域で 0.3 ~ 0.7 mm/日 となっている。

v) 表一に提示した流域の地質区分に低水流指標

がよく対応している。すなわち、100 km<sup>2</sup> 程度の流域規模の山地河川の低水流出を議論するには、上記の地質区分が妥当であると判断される。

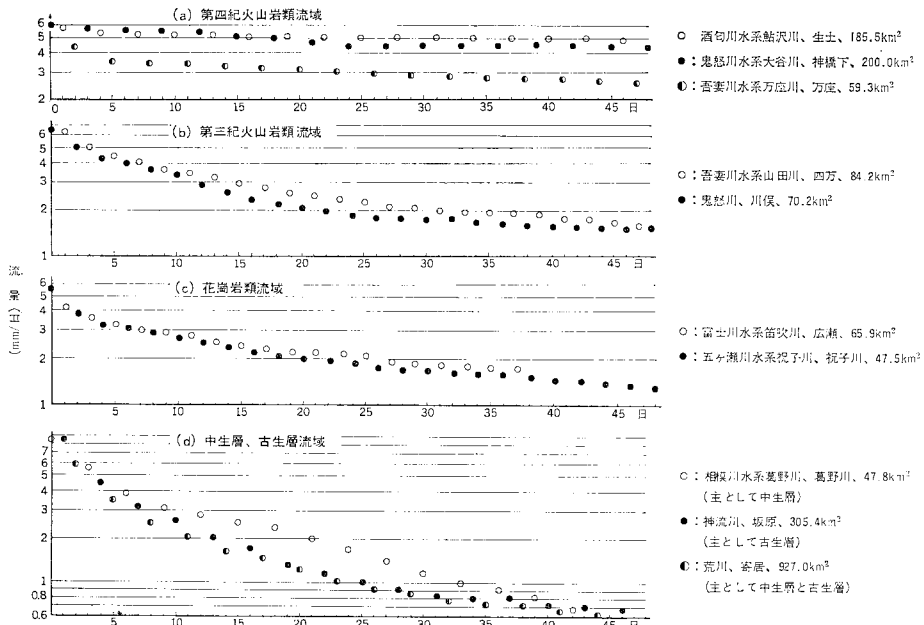
vi) 同一水系あるいは近接水系に 3~4 種以上の異なる地質要素によって構成される流域が存在する場合、自流式および調整池式発電所は湧水量が豊富な第四紀火山岩流域や花崗岩類流域に集中し、湧水量が少ない中・古生層流域にはほとんど開発をみない<sup>14)</sup>。

### 3. 標準通減曲線と流域の地質

前節の検討で、湧水量が流域の地質によく対応することが明らかになったが、本節では流出波形と流域の地質の対応関係を調べる。上流域がほぼ単一の地質で構成されている測水所（あるいは流量観測所）のうち、日流量資料が入手できたものについて、標準通減曲線<sup>15)</sup>を作成したのが図二である。

第四紀火山岩類流域では、河川ごとに通減曲線がばらつくが、いずれもその勾配がきわめて緩やかである。第四紀の噴出岩・溶岩あるいは火山砕屑物は亀裂や空隙に富んでおり地下水貯留能に富んでいることが第四紀火山岩類流域で流況が安定している理由であるが、流域ごとに火山体の内部構造—岩相や帯水層厚など—がかなり異なるため、各種流量、通減曲線に相違がみられる。

花崗岩類、第三紀火山岩類、中・古生層流域では、そ



図二 流域の地質別の標準通減曲線

れぞれ逓減曲線がほぼ一致するとみなすことができ、しかも前節の検討で低水流出指標が大きい地質ほど、逓減曲線の勾配が緩やかになっている。

4. 流況の要因分析による検討

2. においては近接河川の低水流出指標が流域の地質によく対応し、3. では少数例ではあるが流域の地質ごとに逓減曲線がほぼ一致することを示した。これらの逓減曲線の初期流量は、豊水量、平水量に相当しているので、渇水量のみならずより大きな流量まで流域の地質の影響が現われるものと推察される。本節では数量化理論Ⅰ類を用い、表日本の山地河川について流況区分全般を対象として気候要因も取り入れた形で、地質要因の効果を明らかにする。

(1) 要因の取り上げ方

河川の流況を支配する要因は、降水、蒸発散などの入力を左右する気象的あるいは気候的要因とその受け皿としての流域の地質的要因に大別できる。後者については、前節までの検討と同様に地質要因で代表させ表2の区分とする。ただし、第三紀層の出現頻度は低いので、第四紀火山岩類、第三紀火山岩類、花崗岩類、中生層、および古生層の5区分とする。

気象的あるいは気候的要因としては、気温、降水、日照率、乾湿の4つの気候要素を組み合わせて区分した関口の気候区分<sup>1)</sup>を準用する。すなわち、図-3に示すように東北東部気候区、関東東海気候区、瀬戸内気候区、南海気候区、および九州気候区の5区分を採用する。

(2) 流量資料

流量資料としては、全国の山地河川の比較的長期の流況に関する情報が得られる「流量要覧」を用い、年最大流量、35日流量、豊水量(95日流量)、平水量(185日流量)、低水量(275日流量)、渇水量(355日流量)、年



図-3 太平洋側の気候区分

表-4 流量資料の気候区分・地質区分別の度数分布

気候区分	地質区分					計
	第四紀火山岩類	第三紀火山岩類	花崗岩類	中生層	古生層	
東北東部	0	2	3	8	2	15
関東東海	4	3	5	9	6	27
瀬戸内	0	6	8	0	14	28
南海	3	0	0	37	7	47
九州	5	0	1	0	1	7
計	12	11	17	54	30	124

最小流量および年平均流量を分析の対象とする。

測水所の選択にあたっては、流域の約80%が同一の地質で構成されているものを選んで、その流域の地質とした。また用水関係や貯水関係があつて流量に人為的操作が加わっている測水所は除外した。このようにして選定された測水所の総数は124である。表-4に気候区分、地質区分別の度数分布を示す。

なお、流域面積は18.5~1730km<sup>2</sup>の範囲にあり、その平均値は258km<sup>2</sup>である。流量の観測期間は、同じ期間をとることが望ましいが期間をそろえると資料数が減少することから、昭和32年までの最大期間をとり、その間の各種流量の平均値を用いた。

(3) 要因分析の方法

分析の対象とする各種流量は数量で与えられており、ここで取り上げた気候要因と地質要因は分類で与えられている。このように、分析対象-外的基準-が数量で与えられ、要因が分類で与えられている場合には、数量化理論Ⅰ類が適用できる。この数量化は外的基準と分類で与えられた要因の関係を分析するに際して、要因の1次の和をつくり、その和の形を通して、外的基準を最もよく表現するように各要因に数量を与える方法である<sup>17)</sup>。ここでのモデル式は図-4のとおりで、気候要因と地質要因の各カテゴリ-に対して、推定誤差が最小になるように数値を与える。

式で表現すると次のとおりである。各種流量に対して、実測値の番号を*i*、要因の番号を*j*(ここでは*j*=1:気候要因、*j*=2:地質要因)、要因内のカテゴリ-の番号を*k*として、実測流量を次の形で表わす。

$$Y_i = \sum_j \sum_k x_{jk} \delta_i(jk) + \epsilon_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、*Y<sub>i</sub>*:流量実測値、*x<sub>jk</sub>*:*j*要因の*k*カテゴリ-に与えられる数値、*δ<sub>i</sub>(jk)*:*i*番目実測値が*j*要因の*k*カテゴリ-に関与する場合に1、そうでない場合に0、*ε<sub>i</sub>*:実測値と推定値の誤差、である。

次に、*ε<sub>i</sub>*の二乗和を最小とする条件、すなわち、

$$\begin{matrix} \boxed{\text{各種流量}} & = & \boxed{\text{気候要因}} & + & \boxed{\text{地質要因}} \\ & & \text{(カテゴリ-5)} & & \text{(カテゴリ-5)} \end{matrix}$$

図-4 数量化理論Ⅰ類に基づくモデル式

$$\partial(\sum_i \varepsilon_i^2) / \partial x_{jk} = 0$$

を用いて  $x_{jk}$  を求め、少し変形して次式を得る。

$$y_i = \sum_j \sum_k \delta_i(jk) (x_{jk} - \bar{x}_j) + \bar{Y}_i \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $y_i$ : 流量推定値、 $\bar{x}_j$ :  $j$  要因内の各カテゴリーに属するサンプル数のウェイトつき平均値、 $\bar{Y}_i$ : 実測値の総平均、である。

(4) 分析結果の考察

a) 結果と精度

年最大流量、35日流量、豊水量、平水量、低水量、渇水量、年最小流量および年平均流量の要因分析結果を表一5に示す。総サンプル数は、いずれも124である。総平均は年最大流量が145mm/日、35日流量が11.5mm/日、豊水量が5.37mm/日、平水量が3.01mm/日、低水量が1.86mm/日、渇水量が1.16mm/日、年最小流量が0.97mm/日、年平均流量が5.72mm/日となっている。表中の  $(x - \bar{x})$  は、式(2)中の  $(x_{jk} - \bar{x}_j)$  であり、各要因カテゴリーに与えられた数値である。推定値は、推定しようとする流量が属する要因カテゴリー値  $(x - \bar{x})$  の和に、総平均を加えたものとして与えられる。たとえば、関東東海気候区の花崗岩類流域の渇水量の推

定値は表一5(f)より、

$$0.13 + 0.24 + 1.16 = 1.53 \text{ mm/日}$$

となる。

重相関係数は、分析結果の精度を表わし、推定値と実測値の相関係数とも一致する。年最大流量、35日流量、年平均流量の重相関係数は0.7程度であり、豊水量、平水量の重相関係数は0.65前後で小さく、低水量の重相関係数は0.77で、渇水量、年最小流量の重相関係数はいずれも0.85前後と大きい。このように平水量以上で重相関係数が小さいのは、大きな流量ほど、降水の年変動や気候区内のばらつきに敏感に反応し、また本研究では考慮していない地形的要因などの影響を受けるためと推察される。

b) 気候要因と地質要因の規定力

各要因の規定力の相対的な強さを判定する指標として偏相関係数がある。また、もう1つの指標として、ある1つの要因に属するカテゴリー値  $(x - \bar{x})$  のうち、最大のもとの最小のもの之差レンジが用いられ、この値が大きいほど要因の規定力が大きい。表一5の中には偏相関係数とレンジが併記されているが、両者とも大小関係は、当然のことながら同じ傾向を示す。

表一5 各種流量の要因分析結果

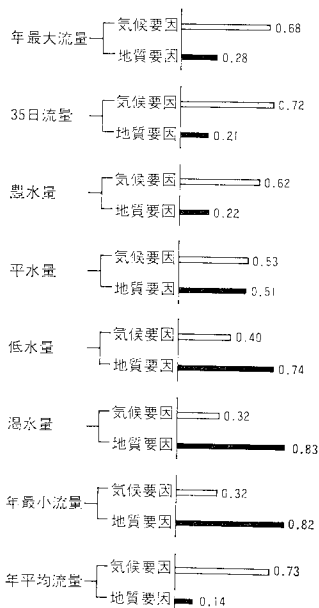
要 因		気 候					地 質					重 相 関 係 数	
		東北東部	関東東海	瀬戸内	南海	九州	Vq	Vt	G	M	P		
サ ン プ ル 数		15	27	28	47	7	12	11	17	54	30		
計 算 結 果	(a) 年流最大量	$x - \bar{x}$	-119.1	-57.1	-21.6	81.3	17.9	-52.3	-10.1	-21.2	5.6	26.6	0.71
	偏相関係数レンジ		0.678 200.4					0.284 78.9					
	(b) 35日流量	$x - \bar{x}$	-6.87	-1.53	-2.74	4.26	2.98	-1.76	1.16	1.26	-0.10	-0.26	0.72
	偏相関係数レンジ		0.716 11.13					0.208 3.02					
	(c) 豊水量	$x - \bar{x}$	-2.70	0.02	-0.92	1.27	0.83	0.41	0.03	0.55	0.05	-0.57	0.64
	偏相関係数レンジ		0.623 3.97					0.220 1.13					
	(d) 平水量	$x - \bar{x}$	-1.18	0.15	-0.38	0.48	0.25	1.40	0.03	0.39	-0.21	-0.41	0.66
	偏相関係数レンジ		0.528 1.66					0.510 1.81					
	(e) 低水量	$x - \bar{x}$	-0.51	0.11	-0.16	0.17	0.17	1.60	0.02	0.33	-0.29	-0.32	0.77
	偏相関係数レンジ		0.400 0.68					0.737 1.93					
	(f) 渇水量	$x - \bar{x}$	-0.20	0.13	-0.16	0.06	0.16	1.63	0.08	0.24	-0.31	-0.26	0.85
	偏相関係数レンジ		0.321 0.35					0.829 1.94					
(g) 年流最小量	$x - \bar{x}$	-0.13	0.15	-0.17	0.04	0.11	1.50	0.06	0.18	-0.28	-0.23	0.84	
偏相関係数レンジ		0.315 0.32					0.818 1.78						
(h) 年流平均量	$x - \bar{x}$	-3.07	-0.80	-0.93	1.85	0.92	0.33	0.17	0.40	-0.15	-0.16	0.73	
偏相関係数レンジ		0.727 4.92					0.141 0.56						

図一5には、流量の種別ごとに気候要因と地質要因それぞれの偏相関係数を対比してある。この図で明らかのように、年最大流量、35日流量、豊水量ならびに年平均流量においては、気候要因の規定力が大きい。これに対して、低水量、湯水量、年最小流量では地質要因の規定力の方が大きくなり、ちょうど、平水量で気候要因と地質要因が均衡している。すなわち、地下水流出成分が卓越する平水量以下になると、地質要因が支配的になることがわかる。

### c) 各要因カテゴリーの解釈

前述したように、推定流量は、それが属する要因カテゴリー値  $(x - \bar{x})$  の和に総平均を加えたものであるから、それぞれの  $(x - \bar{x})$  の大小が推定流量の大小と直接関連している。この関係をわかりやすくするために、流量種別ごとに気候要因と地質要因の各カテゴリーに与えられた値を図一6(a)~(h)に示す。

この図の気候要因に着目すると、年最大流量、35日流量、豊水量、平水量および年平均流量においては、南海気候区に与えられた値が最も大きく九州気候区がこれにつき、関東東海気候区と瀬戸内気候区に与えられた値が小さく、東北東部気候区で最も小さくなっている。低水量以下の流量についても、上記のものほど顕著な差ではないが、南海、九州、関東東海気候区に与えられた値は、瀬戸内、東北東部気候区に比べて相対的に大きい。これらの傾向は、各気候区の降水量の多寡と符合しており、このモデル式の妥当性を示す1つの証左となっている。



図一5 各種流量に対する気候要因と地質要因の規定力 (偏相関係数)

次に、地質要因の各カテゴリーに注目すると、平水量、低水量、湯水量および年最小流量に共通して、第四紀火山岩類に与えられた数値が最も大きく、花崗岩類と第三紀火山岩類がこれにつき、中、古生層に与えられた値が最も小さくなっている。各数値の間の差は小さいが、豊水量と年平均流量においてもこれと類似の傾向が認められる。これらは、2.ならびに3.における検討結果と一致し、流域の地下構造の違いによる保水機能—地下水貯留能と流出量を調整平均化する機能—の相違を表わしていると解釈される。すなわち、第四紀火山岩類流域で保水機能が最大であり、花崗岩類流域の保水機能がついで大きく、第三紀火山岩類流域がこれよりやや劣り、中・古生層の保水機能が最も小さい。

一方、年最大流量においては、第四紀火山岩類流域が際立って小さく、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層、古生層の順に与えられた数値がかなり明瞭な差をもって大きくなっている。これは、平水以下の流量で認められた傾向とちょうど逆である。従来、洪水流出への貯留閾数の適用に際して、第四紀火山岩類流域と非第四紀火山岩類流域の2つに大別して流出モデルの定数を与えることが提案されている<sup>19)</sup>。年最大流量の各地質区分別に与えられた数値にも、そうした区別の必要性が表われているが、ここでの結果は、本研究で提案した地質区分に応じて非第四紀火山岩類流域をさらに分類できる可能性を示していると考えられる。

## 5. 各気候区の地質区分別の流況特性

前節において、ほぼ平水量以下の流量は、地質要因の方が気候要因よりも支配的な影響を受けることがわかった。この節では、気候区ごとに地質区分別の流況特性を検討することによって、具体的な考察を加える。

流量資料は要因分析に用いたものと同じであり、表一6に気候区分・地質区分別に各種流量の平均値と標準偏差を示してある。これをもとに、気候区別の流況曲線を描いたのが図一7(a)~(e)である。各気候区内の地質構成についての概説を加えながら、主として平水量以下に着目して以下に要点を列記する。

### i) 東北東部気候区

火山フロントが脊梁山脈の西部すなわち日本海側に位置するために、東部には第四紀火山岩類の分布は狭く、それを流域とする測水資料は得られなかった。平水量以下の流況についてみると、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層、古生層の順に流量が小さくなっている。

### ii) 関東東海気候区

この区域では、5区分の地質それぞれについて測水資料が得られる。平水量以下については、第四紀火山岩類



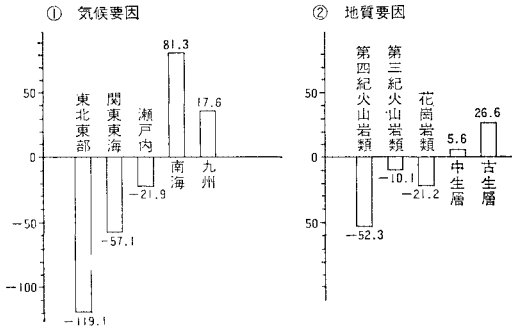
流域で流量が最も大きく、以下、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層、古生層の順になっている。

iii) 瀬戸内気候区

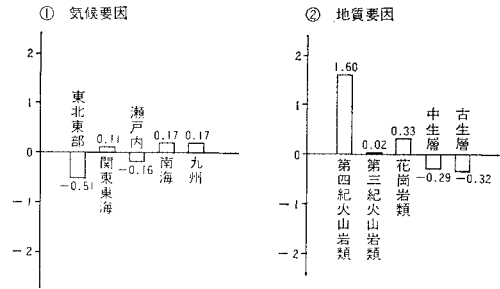
火山フロントが山陰の日本海沿いを走るために、この区域内には第四紀火山岩類は分布しない、また、中生層

の分布もきわめて少ない。したがって、得られた測水資料は、花崗岩類、第三紀火山岩類および古生層の3種についてであり、平水量以外の流量の大小関係は、上述の他の気候区と同様である。

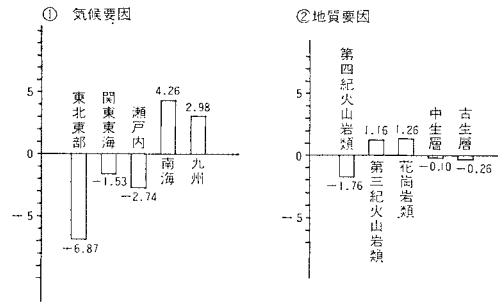
iv) 南海気候区



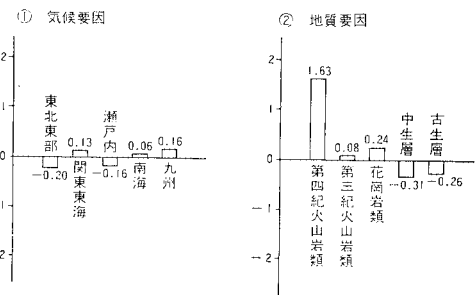
(a) 年最大流量



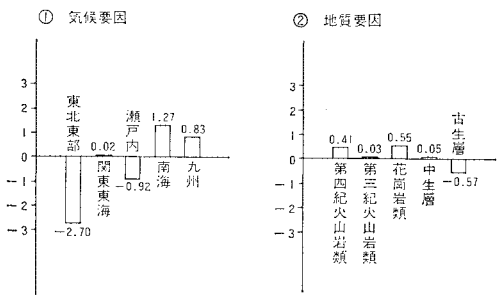
(e) 低水量



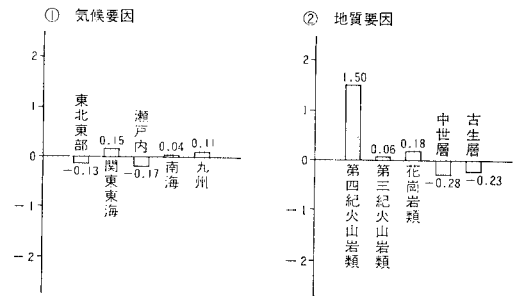
(b) 35日流量



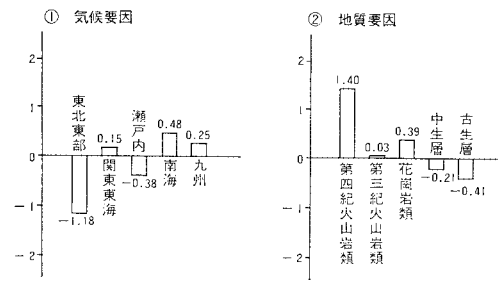
(f) 渇水量



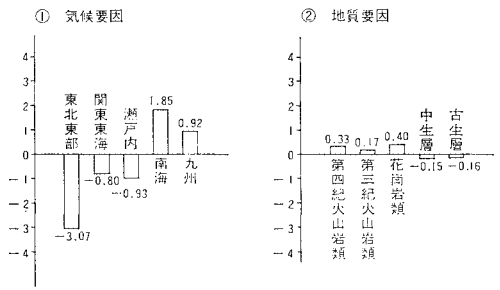
(c) 豊水量



(g) 年最小流量



(d) 平水量

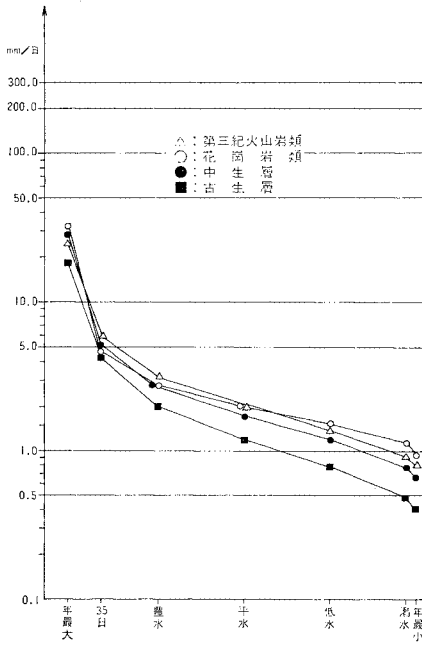


(h) 年平均流量

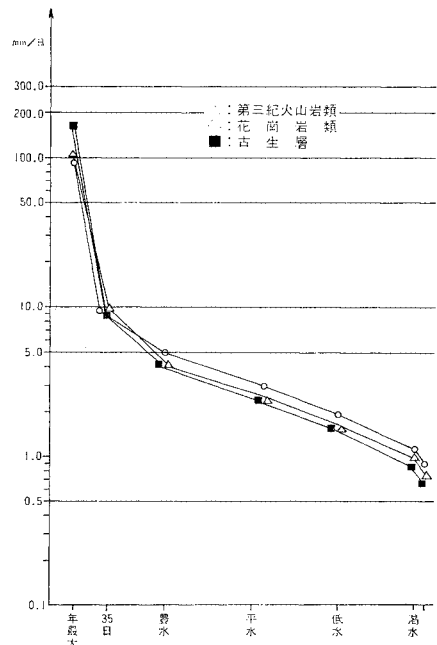
図-6 各種流量の気候要因と地質要因の各カテゴリーに与えられた値 ( $x-\bar{x}$ )

地質構造区でいう外帯とほぼ一致し、第三紀火山岩類と花崗岩類の分布は局部的で、九州南部に火山があるのを除けば、中生層と古生層が大部分を占める。この気候区内では、中生層流域より、古生層流域の方が平水量以下の流量が多く、他の気候区の両者の関係が逆転している点が注目される。ここで取り上げた古生層流域の測水

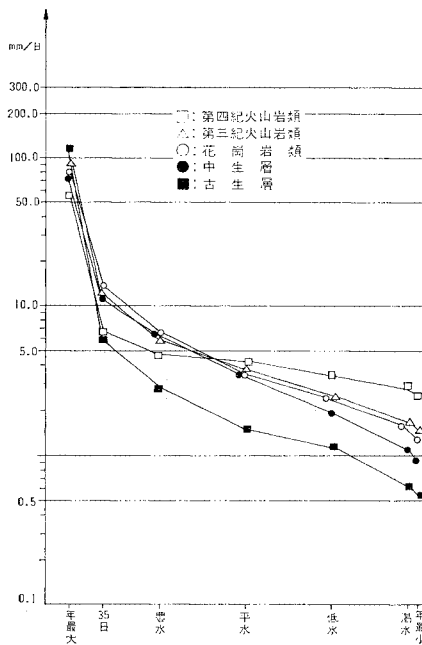
所は、吉野川、仁淀川、鏡川上流や那賀川などの長湊変成岩類および秩父古生層の流域に属し、この地帯では、中央構造線、御荷鉾構造帯、黒瀬川構造帯、仏像一条川構造線などの大規模な破碎帯が連なっている<sup>19)</sup>。流域が広範な破碎作用を受けている点が、他の地帯の古生層流域と異なり、これがこの気候区内で古生層流域が中生層



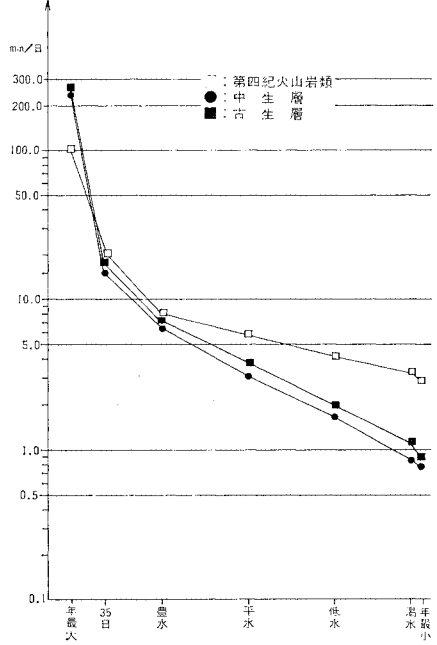
(a) 東北東部気候区



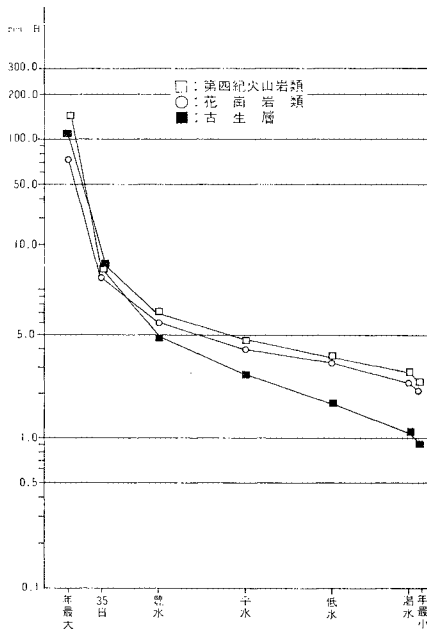
(c) 瀬戸内気候区



(b) 関東東海気候区



(d) 南海気候区



(e) 九州気候区

図一七 各気候区における地質区別の流況曲線

流域より流量が豊富になる理由ではないかと推察される。

v) 九州気候区

阿蘇山、霧島山などの火山による第四紀火山岩類が広く分布するほか、他の4区分の地質も混在する、測水資料としては、第四紀火山岩類のほかは、花崗岩類と古生層のおおの1サンプルしか得られなかった。平水量以下の流量の大小関係については前述の他の気候区と同様である。

6. ま と め

本研究は、山地河川の流況に対する流域の地質の影響について、おもに太平洋側の河川を対象として検討したものである。

まず、日本の山地で比較的分布面積が広くかつ出現頻度が高い地質を表-2のように大区分し、近接する河川水系ごとに流域の地質がほぼ単一とみなせる河川の“低水流出指標”(35日流量に相当)を比較検討した。その結果、第四紀火山岩類、第三紀火山岩類、花崗岩類、中生層、古生層の地質区分に対応して、低水流出指標に顕

表一六 気候区分・地質区別の各種流量の平均値と標準偏差

(単位: mm/日)

気候区分	地質区分					
	第四紀火山岩類	第三紀火山岩類	花崗岩類	中生層	古生層	全地質区分
東 北 東 部	年最大	24.7 (0.18)	31.9 (4.65)	28.2 (13.5)	18.0 (2.57)	27.1 (10.7)
	35日	5.86 (0.22)	4.69 (0.69)	5.05 (1.18)	4.24 (1.39)	4.98 (1.05)
	豊平	3.12 (0.33)	2.76 (0.35)	2.81 (0.66)	1.99 (0.95)	2.73 (0.64)
	低水	1.96 (0.30)	2.04 (0.02)	1.73 (0.39)	1.81 (0.52)	1.75 (0.42)
	最低	1.39 (0.15)	1.55 (0.07)	1.18 (0.26)	0.77 (0.37)	1.23 (0.32)
	年最小	0.91 (0.01)	1.14 (0.09)	0.77 (0.22)	0.48 (0.36)	0.82 (0.28)
関 東 東 海	年最大	54.9 (44.0)	70.7 (12.4)	78.6 (39.1)	113.3 (52.2)	80.9 (39.8)
	35日	6.48 (0.78)	10.41 (2.57)	13.63 (4.11)	11.51 (5.37)	9.85 (4.69)
	豊平	4.75 (1.06)	5.30 (0.34)	6.55 (1.73)	6.63 (3.78)	5.38 (2.74)
	低水	3.96 (0.98)	3.18 (0.24)	3.65 (0.65)	3.64 (1.60)	3.21 (1.34)
	最低	3.38 (0.91)	2.03 (0.17)	2.42 (0.46)	1.94 (0.58)	2.07 (0.90)
	年最小	2.86 (0.92)	1.39 (0.26)	1.63 (0.30)	1.10 (0.21)	1.40 (0.81)
瀬 戸 内	年最大	104.3 (23.6)	93.4 (45.4)	157.0 (98.1)	128.5 (72.6)	128.5 (72.6)
	35日	9.62 (2.62)	9.52 (1.48)	8.99 (2.16)	9.28 (2.04)	9.28 (2.04)
	豊平	4.09 (1.04)	4.91 (0.59)	4.12 (0.82)	4.34 (0.87)	4.34 (0.87)
	低水	2.33 (0.55)	2.98 (0.31)	2.38 (0.53)	2.54 (0.54)	2.54 (0.54)
	最低	1.51 (0.47)	1.92 (0.27)	1.54 (0.40)	1.64 (0.41)	1.64 (0.41)
	年最小	0.99 (0.28)	1.11 (0.26)	0.86 (0.33)	0.96 (0.31)	0.96 (0.31)
南 海	年最大	99.5 (34.4)	237.3 (112.3)	258.0 (39.2)	231.6 (100.6)	231.6 (100.6)
	35日	15.17 (0.90)	15.19 (4.40)	17.70 (4.87)	15.56 (4.37)	15.56 (4.37)
	豊平	7.91 (0.33)	6.38 (1.70)	7.35 (0.96)	6.62 (1.62)	6.62 (1.62)
	低水	5.74 (0.72)	3.09 (0.94)	3.71 (0.61)	3.36 (1.10)	3.36 (1.10)
	最低	4.15 (0.74)	1.66 (0.54)	1.94 (0.48)	1.86 (0.81)	1.86 (0.81)
	年最小	3.19 (0.80)	0.85 (0.34)	1.11 (0.25)	1.04 (0.68)	1.04 (0.68)
九 州	年最大	140.3 (87.0)	73.1 (—)	109.7 (—)	126.3 (75.7)	126.3 (75.7)
	35日	13.49 (3.30)	12.00 (—)	14.30 (—)	13.39 (2.78)	13.39 (2.78)
	豊平	6.94 (1.07)	6.00 (—)	4.77 (—)	6.50 (1.21)	6.50 (1.21)
	低水	4.61 (0.36)	3.99 (—)	2.70 (—)	4.25 (0.78)	4.25 (0.78)
	最低	3.49 (0.46)	3.16 (—)	1.70 (—)	3.18 (0.76)	3.18 (0.76)
	年最小	2.79 (0.43)	2.33 (—)	1.08 (—)	2.48 (0.73)	2.48 (0.73)
全 気 候 区	年最大	101.6 (59.1)	80.7 (36.1)	179.4 (93.3)	161.9 (71.4)	145.3 (108.4)
	35日	11.56 (1.98)	9.15 (2.74)	13.07 (4.21)	10.32 (2.88)	11.52 (5.14)
	豊平	6.45 (0.86)	4.24 (1.09)	5.89 (1.40)	4.52 (0.82)	5.37 (2.15)
	低水	4.68 (0.64)	2.50 (0.62)	2.98 (1.00)	2.49 (0.59)	3.01 (1.16)
	最低	3.62 (0.63)	1.63 (0.43)	1.64 (0.26)	1.50 (0.43)	1.86 (0.82)
	年最小	2.92 (0.64)	1.08 (0.30)	0.88 (0.30)	0.86 (0.30)	1.16 (0.72)
	2.58 (0.67)	0.89 (0.30)	0.72 (0.27)	0.69 (0.37)	0.97 (0.66)	

著な差が認められる。具体的には、第四紀火山岩類流域で低水流出指標が最も大きく、花崗岩類、第三紀火山岩類がこれにつき、中生層、古生層流域でその値が最も小さい。

ついで、上記地質区別に日流量の標準通減曲線を比較したところ、低水流出指標が大きい地質ほど通減が緩やかであり、第四紀火山岩類流域を除いて曲線がほぼ一致することが明らかになった。

さらに、太平洋側に位置しかつ流域がほぼ単一の地質で構成される124測水所を「流量要覧」(通産省)から選び、各種流況区分流量(最大流量、35日流量、豊水量、平水量、低水量、渇水量、年最小流量、年平均流量)を外基の基準とし、気候要因も取り入れた形で数量化理論I類を適用することによって、地質要因の効果を検討した。その結果、地下水流出が支配的と考えられる平水以下の流量については、地質要因の規定力が卓越し、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層・古生層の順に流量値が小さくなることが明らかとなった。すなわち、上記地質区分に対応して、流域の地下水貯留能ならびに流出調節機能に有意な相違があるものと考えられる。

一方、年最大流量に着目すると、第四紀火山岩類流域が際立って小さく、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層、古生層の順にかなり明白な差を示しながら大きくなる。これは、平水量以下で認められたのとちょうど逆の傾向であり、浸透性の高い流域ほど洪水流出量が小さいというごくあたりまえの結果であるが、本研究で提案した地質区分が洪水流出に対しても有用であることを示唆するものと思われる。

最後に、気候区ごとに流域の地質区別に平均的な流況曲線を示し、流況特性と流域の地質との関係について考察した。

日本海側の河川については、同じ気候区に属しても低水流出に対する雪の影響や流水の結氷の効果が測水所ごとに異なるために、気候区というような空間平均的な取り扱いでは不十分であると考え、今回の分析の対象からは除外した。しかし、流域の地下水貯留能ならびに流出調整機能の地質による相違は、日本海側の河川も太平洋側と同様であると考えられる。

したがって、以上の検討結果より、日本の山地河川の流域面積数十km程度以上の流域からの流出を問題とする場合、流域特性としての流域の地質は、表-2に示す区分が妥当なものと判断される。ただし、測水資料がほ

とんど得られないため本研究の対象外となった第三紀層流域については、別途検討した結果<sup>20)~22)</sup>、新しい地層のために一般に固結度が低く、砂、礫、泥などの堆積素材とその層序ならびに傾斜など地質構造が流出特性と深い関係をもつことが明らかとなっている。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、東京農業大学 小出 博教授(元)、武蔵工業大学 井口昌平教授から有益な助言をいただいた。また、計算に際して東京大学大学院(現・東京電力)井上誠一君の援助を受けた。末筆ながら深謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 竹内俊雄：水資源講座 2, 地表水, 土木学会誌, 第46巻11号, p. 56, 1961.
- 2) たとえば, 宮崎県: 宮崎県の地質と資源, p. 66, 1972.
- 3) 逓信省: 発電水力調査書, 第1~4巻, 1914.
- 4) 逓信省: 水力調査書, 第1~7巻, 1923.
- 5) 現代日本産業発達史研究会: 現代産業発達史 III, 電力, 交詢社出版会, pp. 3~4, 1964.
- 6) 川村泰治: 電源開発の史的考察, 水経済年報, 1954年版, 水利科学研究所, p. 85.
- 7) 森 忠蔵: 日本ニ於ケル水力ニ就テ, 土木学会誌, 第3巻1号, p. 61, 1917.
- 8) 前出 3), 第1巻.
- 9) 前出 4), 第1巻.
- 10) 通商産業省公益事業局: 発電水力調査書(第4次), p. 2, 1960.
- 11) 小出 博: 日本の国土, 上, 東京大学出版会, pp. 15~19, 1973.
- 12) 通商産業省公益事業局: 発電水力調査書(第4次), 流量要覧, 1960.
- 13) Musiak, K., S. Inokuti and Y. Takahashi: Dependence of Low Flow Characteristics on Basin Geology in Mountainous Areas of Japan, Proc. of IAHS Tokyo Symp., IAHS Pub. No. 117, pp. 147~156, 1975.
- 14) 高橋 裕編: 河川水文学, 共立出版, pp. 168~179, 1978.
- 15) 前出 1).
- 16) 関口 武: 日本の気候区分, 東京教育大学地理学研究报告III, pp. 65~78, 1959.
- 17) 林知己夫・村山 孝: 市場調査の計画と実際, 日刊工業新聞社, pp. 195~224, pp. 305~309, 1964.
- 18) 木村俊晃: 貯留関数法 (IV-2), 土木技術資料, Vol. 4, No. 7, pp. 37~42, 1962.
- 19) 前出 11), pp. 1~10.
- 20) 虫明功臣・村上雅博・小池雅洋: 河川の低水時流量の地域的偏在とその要因—台地・丘陵河川の場合, 生産研究, 第30巻, 第5号, pp. 43~46, 1978.
- 21) 虫明功臣・安藤義久・高橋 裕・松下 潤: 環境用水としての地下水流出の分布特性と都市化による変化, 第7回環境問題シンポジウム講演論文集, pp. 93~98, 1979.
- 22) 虫明功臣・安藤義久・小池雅洋: 河川の低水時流量の地域的偏在とその要因(2)—多摩丘陵の河川の場合, 生産研究, 第31巻, 第9号, pp. 25~28, 1979.

(1979.12.24・受付)