

流域の理水特性に関する研究 VII

流況係数と流域の地形・地質との関連について

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者名	岸原,信義 田中,洋二
発行元	日本林學會
巻/号	57巻8号
巻号補足	
掲載ページ	p. 245-254
発行年月	1975年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論 文

流域の理水特性に関する研究 (VII)

流況係数と流域の地形・地質との関連について

岸原信義*・田中洋二**

岸原信義・田中洋二：流域の理水特性に関する研究 (VII) 流況係数と流域の地形・地質との関連について 日林誌 57: 245~254, 1975 流域の理水特性の表示法の一つとして、湧水量と豊水量の比を流況係数と名づけ検討を行なった結果、それは主として平、低水部の流出特性を表示するものであり、流域間の流出の一樣性の比較に用いることができることがわかった。この流況係数と流域の地形、地質、雨量、流量等の因子との関連を多変量解析の手法を用いて解析した。その結果、流出の一樣性に最も大きく影響する因子は地質であり、流況係数は地質の細かい相異なども検出しているようである。流域の開析度を表現するものとして岸原は流域開析度係数を提案したが、流況係数と関連のある地形因子は、この流域開析度係数だけに有意性が認められ、谷頻度も若干の関連が認められた。雨量、流量等との関連は認められなかった。

KISHIHARA, Nobuyoshi & TANAKA, Yoji: Study on the water regulating characteristics of watershed (VII) Effect of basin characteristics on the water regulating characteristics of watershed J. Jap. For. Soc. 57: 245~254, 1975

The function of watershed to control the stream flow is defined as an ability to keep the amount of discharge constant. The writer suggests the coefficient of flow-duration (the ratio plentiful discharge and scanty discharge) to express the function of a watershed to control the runoff. Multivariate analyses especially principal component analysis, factor analysis, stepwise regression analysis, and quantification theory (1) etc., were applied to the coefficient of flow-duration, geology, topography, precipitation, and runoff data of several watersheds in Kyushu. The objective was to identify the factors affecting the coefficient of flow-duration of these watersheds, and to determine the relative importance of identical factors. The most important factor was geological, followed by the coefficient of dissection degree, and drainage frequency. The factors of precipitation and runoff were not significant.

I は し が き

流域からの洪水流出量、低水流出量の大小、あるいは流出量の年間を通じての定常性などは、基本的にはその流域に降った降水の性格によって規制されるが、降水～流出の変換系としての流域の特性によっても大きく異なってくる。流域の特性すなわち地形、地質、地質構造、地被条件、土地利用状況等が、流域からの水の出方～理水特性とどのような複合的関連があるかについて検討することなしには、森林と流出との関連を見いだすことは困難であろう。森林と流出との関連を調べるほかの方法、すなわち試験流域での検討は内外で多数の研究が行なわれているが、前者すなわち流域変数法による検討は、洪水時を除けばほとんど見当たらない。これは第一

に流域の理水特性の表示法が見いだされていないこと、第二に流域特性の表示法が明らかでないこと、第三に解析の手法が十分でなかったことなどに起因するものと思われる。理水特性の表示法には、LLOYD, D. (11) をはじめとして内外での研究があり(14)、その紹介と検討の一部はすでに発表した(7, 8)。またモデル流域による検討も一部行なった(9)。今回は理水特性の表示法の一つである流域係数について、いくつかの多変量解析の手法を用いて流域特性との関連について検討を行なったので報告する。

本研究の計算には、東北大学、東京大学、九州大学の各大型計算機センターを利用させていただいた。また本論をまとめるにあたっては本学の石井教官に種々ご教示をいただいた。

* 岩手大学農学部 Fac. of Agr., Iwate Univ., Morioka 020

** 清水建設(株) Shimizu Kensetsu Co. & Ltd.

なお本研究の一部は文部省科学研究費（研究代表者、岩手大学農学部 林弘宜教授）の援助を受けて行なったものである。

II 既 応 の 検 討

流域からの流出状況の定常性を表示する指標として、岸原は豊水量に対する渇水量の比を流況係数と名づけた(9)。これは他の理水特性値に比較すると、第一に流域間の理水特性値の差の検出力は必ずしも大きくないが、水資源の利用上から意味のある数値であり、第二に河川上流部での精度の高い流量資料は電力会社関係のものが大部分であるが、日流量の資料は入手困難である。その点、流況係数は入手が容易な豊水量と渇水量から簡単に計算できるという利点を有している。これらの点を考慮して菅原が月流量の資料から作製した九州 13 流域のタンクモデルと、昭和 37 年から 44 年にいたる 8 カ年の流況係数の平均値を比較、検討した。その結果流況係数は、菅原のタンクモデルの構造とくに雨量の直接流出、地下浸透の振り分け比率と高い相関があること、また地質との関連が深いことがわかった。さらにモデル流域として 5 種類のタンクモデルをつくり、理水特性の表

示法 49 種類について検討した結果(9)、流況係数はタンクモデルの構造の差の検出力が他の表示法に比較するとあまり大きいとはいえないが、主として平、低水部の特性をよく表わしていることがわかった。次に九州の 38 流域の資料で検討した結果、①流況係数はきわめて敏感に地質を反映していること。②流況係数は時系列的な変動が少ないこと。③量水標を使つての 1 日 1～2 回流量の定時観測の時期（昭和 5～32 年）と自記記録の時期（昭和 37～44 年）と観測の精度に大差があっても、流況係数の時期的な変動は少なく、また流域間の順位にも差が認められず、観測の精度にあまり左右されないことがわかった。しかし既応の検討では、解析の手法が十分でないとともに、流域特性も地質のみとりあげ、雨量、流量、地形等との関連またはそれらの複合的な関連についての検討は行なっていなかったので引き続き検討を行なったものである。

III 検 討 結 果

1. 対象流域

対象流域は九州の河川上流部の流域をとりあげた。資料入手の関係上、測水地点は明記せず水系、河川名のみ

表-1. 流 域 一 覧 表

No.	水 系	河 川	雨量観測点	流況係数	変動係数	地 質
1(3)	名 賀 川	名 賀 川	名 賀 川	4.45	21.29	第三紀尾鈴山石英斑岩（石英斑岩，流紋岩，花崗岩）
2(2)	筑 後 川	川 原 川	中 津 江	3.28	16.34	洪積世安山岩（9割），阿蘇熔岩（1割）
3(3)	筑 後 川	鯛 生 川	中 津 江	4.05	18.43	洪積世安山岩（6割），新第三紀安山岩（3割）
4(1)	筑 後 川	玖 珠 川	飯 田	1.68	15.61	洪積世安山岩（7割），山麓堆積物（3割）
5(2)	筑 後 川	城 原 川	仁 比 山	3.20	37.34	中生代花崗岩類
6(2)	嘉 瀬 川	川 上 川	三 瀬	2.70	26.76	中生代花崗岩類
7(2)	緑 川	御 船 川	島 木	2.46	11.38	阿蘇噴出物（6割），金峰山火山岩類（4割）
8(3)	球 磨 川	球 磨 川	田 迎	4.29	21.29	中生代四万十層群（砂岩，頁岩）
9(1)	菱 田 川	大 鳥 川	大 陽	1.81	22.22	始良火山大隅軽石流および大隅降下軽石流（8割）
10(4)	大 分 川	七 瀬 川	今 市	6.08	37.92	古生代粘板岩（4割），第三紀花崗岩類（2割），第三紀安山岩（2割）
11(1)	大 分 川	大 分 川	由 布 院	1.49	10.98	山麓堆積物（4割），洪積世安山岩（3割），新第三紀安山岩（3割）
12(3)	一ツ瀬川	米 良 川	大 河 内	4.64	30.10	古第三紀四万十層群（未区分岩類3.5割），古第三紀四万十層群砂岩（3.5割）
13(3)	五ヶ瀬川	祝 子 川	祝 子 川	3.90	24.55	第三紀花崗岩（8割），古第三紀日南層群（2割）
14(2)	耳 川	耳 川	上 椎 葉	3.04	13.83	古第三紀四万十層群（頁岩，砂岩7割），石灰岩，玄武岩脈（3割）
15(3)	耳 川	小 崎 川	上 椎 葉	4.68	35.50	四万十層群（粘板岩，頁岩6割），古第三紀四万十層群砂岩（4割）
16(4)	広 渡 川	広 渡 川	坂 元	6.13	25.08	古第三紀日南層群（砂岩）
17(2)	緑 川	大 矢 川	浜 町	2.31	30.49	阿蘇噴出物（9割），金峰山火山岩類（1割）
18(3)	耳 川	十 根 川	鞍 岡	4.99	20.60	古生代粘板岩，砂岩（9割），チャート（1割）
19(1)	天 降 川	天 降 川	栗 野	1.64	19.79	始良火山先カルデラ軽石流（7割），洪積世安山岩（3割）
20(2)	菊 池 川	菊 池 川	隈 府	2.61	26.31	阿蘇噴出物（6割），金峰山火山岩類（4割）
21(3)	雄 川	雄 川	田 代	4.26	29.85	第三紀花崗岩類（8割）
22(4)	五ヶ瀬川	三ヶ所川	三ヶ所	6.53	39.66	古生代粘板岩，砂岩（6割），中生代粘板岩，シルト岩，砂岩（4割）
23(5)	一ツ瀬川	銀 鏡 川	銀 鏡	7.09	32.86	中生代四万十層群粘板岩，頁岩
24(2)	玉 島 川	玉 島 川	七 山	2.68	27.27	中生代花崗岩類
25(4)	遠 賀 川	彦 山 川	—	5.34	18.76	新第三紀安山岩類（5割），中生代花崗岩類（3割），中生代関門層群（2割）
26(2)	千々石川	千々石川	—	2.73	31.36	洪積世安山岩類
27(2)	緑 川	笹 原 川	—	2.98	40.43	阿蘇噴出物（7割），金峰山火山岩類（3割）
28(3)	筑 後 川	高 瀬 川	—	3.83	27.91	新第三紀安山岩類（6割），洪積世安山岩類（4割）
29(3)	大 野 川	奥 獄 川	—	5.22	38.80	古第三紀火山岩類（4割），古生代砂岩，頁岩（3割），阿蘇熔岩（2割）
30(5)	一ツ瀬川	小 川	—	8.70	38.59	中生代四万十層群（未区分岩類）
31(2)	天 降 川	中 津 川	—	2.65	25.89	始良火山先カルデラ軽石流（4割），洪積世安山岩類（6割）
32(2)	那 珂 川	那 珂 川	—	2.95	17.65	中生代花崗岩類

を表-1 に記した。流況係数と地質との関連をみるために 32 流域を、雨量と流況係数との関連をみるためには、測水地点の近傍に雨量観測点のある 23 流域をとりあげた。地形との関連については、地域的、地質的にかたよらず、流域面積がほぼ等しい 16 流域をとりあげて、地形解析、水系解析を行なった。地形解析の結果は表-3 に記した。

表-1 の流況係数は昭和 37 年から 44 年にいたる 8 年の平均値で、地質は各県地質図を参照し、面積占有率も算出した。地形解析は 5 万分の 1 地形図を利用し、計算の手法は地形学の図書（たとえば(18)）によった。流域特性係数は坂口(16)が述べたものであり、 $\bar{R}$ は流域解析度係数と岸原が名づけたもので後述する。

2. 流況係数と流況指数について

すでに述べたように流況係数は流出の定常性を表示する指標として、豊水量と渇水量の比をとったものである。一方金内は流況曲線が両対数方眼紙にプロットすると直線になることに注目し、その勾配の変化から森林伐採の影響をみようとした(5)。岸原はこれを流況指数と名づけたが(8)、両者は流況表から簡単に計算され、その性格も似ているように思われたので、両者の性格、検出力等について比較検討を行なってみた。流況指数は、その前提として対数変換を行なった各種流量とその日数との直線回帰の有意性が認められねばならない。表-3 の 16 流域の各 8 年間の資料ではいずれも危険率 1% で有意性が認められ、前提条件は満足された。したがって次に両者の検出力の比較に分散分析を行ない、その F 値で比較した。

比較に F 値を用いた理由は、表示値は同一流域内では年次による変動が少なく、流域間では変動が相対的に大きいことが、流域間の差の検出に有効であるためである。また資料数が等しいので F 値の大小で検出力の比較が可能である。前記 16 流域で計算すると、流況係数は $F=15.12$ 、流況指数は $F=7.84$ で、いずれも危険率 1% で有意性は認められるが、流況係数のほうが F 値が大きく、検出力が大きいことを示している。次にその性格をみるために 16 流域ごとに流況係数、流況指数と各種流量との相関係数を算出してみた。これは表示値がその流域の年々の流量と相関があれば、流域の比較に使いにくいからである。計算の結果若干の例外を除き、相関係数の有意性は、流況指数と年最大日流量との間のみ認められた。この点から流況指数は少なくとも同一流域の流域条件の変化を検出する指標とはいいいがたいことがわかる。次に流域間で計算した各特性値の相関行列表を表-2 に示した。流況係数について検討すれば、まず渇水

表-2. 相関係数行列表 (九州 16 地域)

	平均年最大 日流量	豊水量	平均日 流量	渇水量	流況係数	流況指数
平均年最大 日流量	1.0000	0.3467	0.4942	-0.4448	0.3641	0.8239*
豊水量		1.0000	0.9002	0.1020	0.1020	0.0457
平均日流量			1.0000	-0.0836	0.3905	0.3448
渇水量				1.0000	-0.8943**	-0.8419**
流況係数					1.0000	0.6984**
流況指数						1.0000

** 危険率 1% で有意, * 危険率 5% で有意

量とマイナスの相関がある。すでに述べたように 16 流域ごとに計算した流況係数と渇水量との相関は認められていないので、これは流況係数が渇水量で表現される流域の流出特性、とくに低水部の特性を表現しているものといえる。

流況指数は平均年最大日流量と相関があるが、同一流域内でも相関係数に有意性が認められているので、平均年最大日流量で表現される流域の流出特性を表現しているとはいえない。一方、同一流域内では認められなかった渇水量との相関があることは、流況係数同様に、低水部の流出特性を表現しているといえそうであり、これは流況係数と相関があることから裏書きされる。

3. 地形と流況係数との関連について

流域からの流出と地形因子との関連についての検討は、アメリカでは主として流出量、あるいは流出率と地形の関連を因子分析等多変量解析の手法を用いて検討され始めており、日本では主として洪水流出に関連して検討が進められてきた。一方低水流出と地形との関連については、2, 3(10)を除いてあまり見当たらないようである。本論ではすでに述べたように主として流出の低水部の特性を表現すると思われる流況係数と地形との関連について検討を行なってみた。

1) 解析の手法について

主成分分析、因子分析を含む多変量解析は、1960 年代よりの電子計算機の発達とともに各分野で盛んに適用され始めている。主成分分析や因子分析は分野により、人により手法の適用が異なるようである。すなわち因子の意味づけ、解釈におもな関心がもたれるもの、地域の分類とその基準としての因子の意味づけに関心がもたれるもの、さらに主として地域の分類に用いられるもの等である。アメリカの水文学界では 1960 年代の後半からこれらの手法が適用され始めたが、もっぱら変数の減少、ひいては予測のために用いられている。この点で従来の一変量回帰分析との有効性に関して現在も主として Water Resources Research 誌上で論争が続いている(3)。これらの論争の紹介と検討は別途に発表の予定である。

本論ではこの二つの手法を主として分類のために用いた。次に計算の結果得られた各流域の主成分または因子のスコアをもとにして流域の分類を行なう必要があるが、既応の文献によっても、その方法は必ずしも確立しているわけではない。たとえばスコアの散布図を適当に方眼の形に区切る方法(奥野, (15)), スコアを正負によって2分する方法(村上, (2)), スコアの平均値よりの大小によって2分する方法(安木, (2)), 等がある。小島(6)はまず第1主成分, 第2主成分のスコアの散布図からその象限によって分類し, さらに第3, 第4等々の主成分のスコアを考慮する場合には, 原点からの距離によって細分した。この方法は, 前記の方法にくらべると合理的な方法であるが, 次の二つの点で問題があるように思われる。まず第1に本人も指摘しているように, 第2主成分の値がほぼ等しく, 第1主成分の値が正と負であってもその絶対値が小さい地点があった場合, たとえ象限は異なっても, 同一グループに属させたほうが合理的な場合が多い。第2に, 第3主成分以下を原点からの距離によって細分することは, 多次元空間に分布する点を一つのベクトル量で表現することになり, 多次元分布の特性が生かされなくなる。そこで本論では, 山口(19)が因子負荷量の距離行列を算出したのと同じ方法で, 主成分のスコアの距離行列を算出した。すなわち流域 J-L 間の距離を D_{jl} とし, J 流域, I 主成分のスコアを f_{ij} とすれば, $D_{jl} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (f_{ij} - f_{il})^2}$ になる。距離行列を用いて流域を分類する方法は, クラスタ分析

等いくつかあるが(19), ここでは変形グループ結合法ともいうべき方法, すなわち距離の許容限界値を定め, 流域相互間の距離がすべて限界値内にあるものだけをグループビンする方法をとった。距離の許容限界値としては, 主成分の数に 0.1 を乗じた値にした。これは一つの主成分の距離をほぼ 6 等分する値であるが, これくらいでグループの数が多くも少なくもなく適当になるからで, 理論的な意味があるわけではなく, 今後検討の必要がある。

2) 流域の開析度の表現について

九州 32 流域中, 地形解析, 水系解析を行なった 16 流域の解析結果は表-3 に記した。流域特性係数は坂口(16)が名づけたものであり, $\bar{R}$ は起伏量を標高で除したもので岸原が流域開析度係数と名づけたものである。流域の開析度について多田(17)は山頂高度と起伏量をプロットし, 開析度を表わしたが, 平野(4)は起伏量ダイアグラムにより, 多田の考え方を前進させ, 時間の目盛りを導入した。一方村野(13)は STRAHLER の考え方を発展させ, 現地形のヒプソメトリック・インテグラル hi_1 の比で開析度を数量的に表現しようとした。平野の起伏量ダイアグラムについては, 原地形面の高度の推定に問題があることが指摘され(20), 村野の方法については, 原地形が一樣に傾斜していたという仮定に問題があり, かつ hi_3 あるいは hi_3/hi_1 が現実の流域の開析度と対応しているかどうかの検討が不十分であったように思われる。後述のように 16 地域を 5 万分の 1 地形図からその開析の程度を判読し, 多田の開析度図と対照するとほとんど一

表-3. 流域一覽表

	名貫川	川原川	七瀬川	鎮生川	玖珠川	耳川	小崎川	米良川	広渡川	祝子川	城原川	御船川	大分川	大島川	川上川	球磨川
流域面積 (km ²)	40.37	37.78	82.36	72.18	32.19	88.41	24.23	61.80	117.29	48.42	23.96	36.75	51.85	90.29	25.48	56.53
平均標高 (m)	747	756	341	686	1,142	1,083	8,473	983	593	909	566	663	705	274	544	1,011
起伏量 (m)	377.6	264.5	180.8	279.8	255.3	443.1	374.7	320.9	282	395	164.4	144	244	101.0	142	432
流域傾斜	13.00	6.82	3.45	4.54	7.07	8.74	9.31	8.08	2.68	13.15	5.33	4.44	3.09	2.12	4.16	12.84
起伏比	11.40	6.43	3.17	4.66	8.38	7.70	11.70	8.88	4.11	9.53	6.04	5.66	5.71	1.71	4.51	11.40
谷頻度 (本/km ²)	3.988	7.094	8.888	9.130	7.549	6.651	6.686	9.498	7.989	3.573	4.674	3.129	4.339	3.312	6.790	7.837
谷密度 (km/km ²)	2.309	3.253	3.934	3.791	3.585	3.288	2.988	3.701	3.481	2.780	2.545	2.784	3.057	2.259	3.356	3.989
一次流谷頻度 (km/km ²)	3.319	5.506	6.982	7.329	6.027	6.651	5.282	7.783	6.335	2.871	3.385	2.476	3.163	2.857	5.024	5.908
平均幅 (km)	4.04	3.29	3.71	2.724	2.42	7.25	3.23	6.94	6.17	4.12	2.26	2.53	4.23	3.69	2.61	5.65
形状係数	0.404	2.286	0.117	0.103	0.182	0.594	0.431	0.780	0.325	0.351	0.213	0.175	0.346	0.150	0.268	0.565
一次流平均長 (km)	0.4284	0.3399	0.3110	0.3140	0.3430	0.3880	0.3484	0.2931	0.3452	0.5482	0.4380	0.6429	0.5910	0.3970	0.3910	0.4160
分岐比	5.02	3.83	3.30	3.56	3.84	4.59	3.40	3.87	3.86	3.50	3.06	4.52	3.64	3.78	3.34	4.33
流長比	2.54	1.77	2.29	1.79	2.27	2.11	1.64	1.90	2.24	1.98	1.83	2.40	1.69	2.28	1.88	2.07
ヒプソメトリックインテグラル	0.570	0.530	0.544	0.493	0.422	0.568	0.423	0.455	0.326	0.519	0.441	0.392	0.270	0.620	0.461	0.563
地上流の長さ (km)	0.2165	0.1537	0.1271	0.1318	0.1395	0.1521	0.1673	0.1350	0.1440	0.1938	0.1965	0.1796	0.1640	0.2210	0.1490	0.1250
主流路長 (km)	10.0	11.5	26.5	26.5	13.3	12.2	7.5	8.9	19.0	11.8	10.6	14.5	12.3	24.5	9.8	10.0
流域特性係数	1.574	1.871	2.920	3.119	2.345	1.297	1.524	1.132	1.754	1.650	2.167	2.393	1.711	2.579	1.941	1.330
$\bar{R}$ (流域開析度係数)	0.506	0.351	0.522	0.408	0.223	0.409	0.443	0.327	0.476	0.435	0.290	0.217	0.345	0.369	0.626	0.427
流況係数	4.45	3.28	6.08	4.05	1.68	3.04	4.68	4.64	6.13	3.90	3.20	2.46	1.49	1.81	2.70	4.29
年平均日雨量 (mm)	8.44	7.21	5.32	7.21	6.43	5.83	5.83	9.06	8.57	8.95	5.46	6.16	5.28	6.58	6.93	7.71
年平均最大日雨量 (mm)	232	173	189.5	173	186	183	183	241	207	306.8	128	180	209	144	176	199

致した。しかし多田の方法は定性的で開析度の定量的な表現ができないという欠点がある。多田の開析度図では各点の勾配すなわち平均起伏量と平均山頂高度の比は開析の進まない無限小から満度の開析ステージの1に近づき、再び小さくなってゆく。開析のステージを無視すれば、起伏量の平均値と山頂高度の平均値の比で開析の程度を表現できるのではないかと思ひ、その比を流域開析度係数と名づけたのである。これらの方法を比較するために、まず多田の開析度図の判読により、開析の進んだ流域を順序づけし、その順に地形図判読の結果を記載してみた。

① 七瀬川：左岸阿蘇熔岩の地帯は残丘状で起伏に乏しいが、2cm方眼では適確に表現されていない。右岸古生層の地帯は満壮年期の地形で起伏に富み急峻である。

② 名貫川：地質は第三紀尾鈴山石英斑岩よりなり谷の下刻作用が盛んである。稜線部に一部山頂平坦面が残っているが全般的に満壮年期の地形を呈している。16流域中傾斜、起伏量等最も大きい流域の1つである。

③ 広渡川：古第三紀日南層群よりなり、長大な斜面を有し早壮年期の地形を呈している。

④ 祝子川：第三紀の花崗岩よりなり、中腹部に露石が連続し、早壮年期の地形を呈し、傾斜、起伏量等最も大きい流域の1つである。

⑤ 球磨川：全般的に早壮年期の地形であるが、支川横才川より左岸は晩幼年期～早壮年期の地形を呈している。地質は古第三紀日南層群よりなり、傾斜、起伏量等大きい。

⑥ 大鳥川：シラス地帯特有の地形を呈し、海岸段丘の地帯同様な地形解析のむずかしい流域である。平坦面が急崖で開析され、その下部は沖積地、集落が形成されているが、5万分の1地形図による地形解析では、平坦面、沖積地と急崖部が平均され、傾斜の急な流域に表現される。開析度図と地形図よりの判読結果が食い違った流域の一つである。

⑦ 小崎川：早壮年期の地形を呈しているが、谷の下刻作用はまだ上流部では激しくない。古第三紀～中生代の四万十層群よりなる。

⑧ 大分川：典型的な鐘状火山の福万山と由布岳に囲まれた流域で、火山斜面開析はあまり進んでいないが、両火山に囲まれた中央部は山麓堆積物が広く分布している。この流域も大鳥川流域同様な地形図判読と開析度図の結果が食い違った流域である。

⑨ 鯛生川：本川に沿って阿蘇熔岩が分布し急崖部をなしているが面積は狭い。洪積世安山岩の地帯は開析が進み満壮年期地形に近づいているが、新第三紀安山岩地

帯は開析があまり進まず早壮年期の地形を呈している。

⑩ 耳川：全般的に山ひだの少ない単純長大な斜面よりなり、早～満壮年期の地形を呈しているが、石灰岩、玄武岩脈の分布する地帯は四万十層群の地帯にくらべ開析が遅れている。

⑪ 玖珠川：鐘状火山の黒岩山を中心とする流域で山体は晩幼年期の地形を呈している。

⑫ 城原川：糸島花崗閃緑岩の分布する隆起準平原状の地形で、山ひだは細かくいりこんでいる。

⑬ 川上川：城原川に隣接する流域で地質、地形ともほぼ同一の流域である。

⑭ 川原川：本川に沿って、阿蘇熔岩が分布し急崖をなしているが、安山岩の地域は開析が進まず晩幼年期の地形を呈している。

⑮ 米良川：古第三紀四万十層群と同時代の花崗岩が分布しているが、流域の西部山稜部の花崗岩地帯は開析が進み急峻であるが、四万十層群特に流域の東部に分布する粘板岩、砂岩の地帯は開析がおくれ傾斜も緩である。隣接する小崎川流域にくらべると開析の程度は相当遅れている。

⑯ 御船川：阿蘇外輪山の南に位置する流域で、典型的な熔岩流の侵蝕地形を呈している。開析はあまり進んでいないが、火山岩類の地域に比し、火山噴出物の地域は侵蝕が進み、細かい肢節に富んでいる。

以上のように多田の山頂高度～起伏量による山地の開析度図による流域の開析度の順位づけと、地形図判読による開析度の順位とは、シラス地域等2～3の例を除けば一致することがわかった。またその過程で地質の差が侵蝕力に対する抵抗力の差をもたらし開析度に影響を与えていることがわかった。多田の開析度図による判定と他の方法との関連をみるために順位相関を計算した。計算結果は表-4に記したが、多田の開析度図による順位と岸原の流域解析度係数による順位との相関がきわめて高いことがわかる。また流域解析度係数と流況係数との相関も高い。一方、現地形、原地形のヒソメトリック・インテグラル、 hi_3 、 hi_1 とその比のいずれの方法とも開析度図との相関が認められず本論での資料に関する限り地形の開析度を表わす指標とは言いがたいよう

表-4. 順位相関係数行列表

	hi_1	hi_3	hi_1/hi_3	$\bar{R}$	流況係数
開析度図	0.3956	0.1868	0.2637	0.9033**	0.6352**
hi_1		0.4613	-0.2544	0.0889	-0.0820
hi_3			0.6872**	0.4108	0.0128
hi_1/hi_3				0.2780	0.0160
$\bar{R}$					0.8335**

** 危険率1%で有意, * 危険率5%で有意

ある。

3) 流況係数の主成分分析, 因子分析

地形解析を行なった16流域の8カ年の流況係数について主成分分析を行なった。第1主成分の固有値は5.415, 第2主成分は1.325で, 第2主成分までの累積寄与率は84.3%であったので第2主成分までとりあげた。第1主成分の係数はすべてプラスで, また流域ごとの第1主成分のスコアを求めると流況係数が大きい流域ほどスコア

も大きくなり, 第1主成分は流況係数の大きさを表わす因子であることがわかる。第2主成分については係数からも流域ごとのスコアからも解釈することは困難であった。この第1, 第2主成分のスコアからすでに述べたように距離行列を算出し, 変形グループ結合法によって流域の分類を行なうと, 図-1 のように四つのグループに分類される。小崎川はいずれのグループとも距離の許容限界値外にあったが最も近い第4グループに属させた。

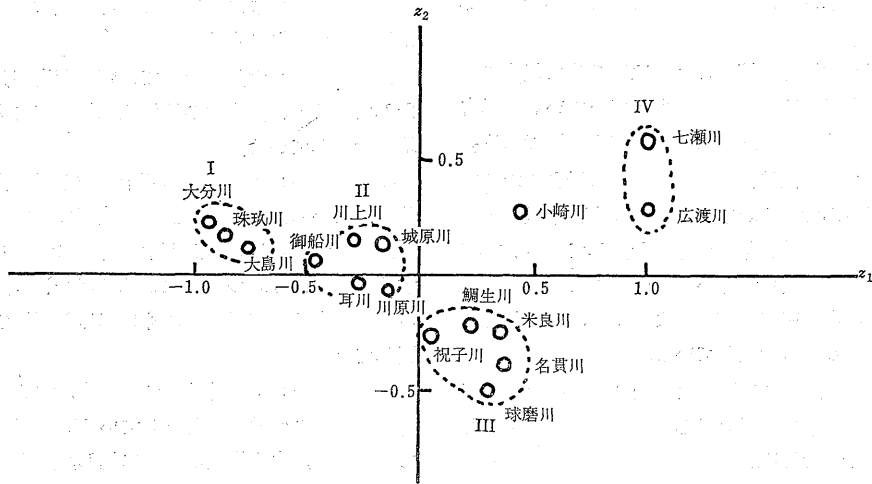


図-1. 16 流域のスコアの散布図 (第 1, 2 主成分)

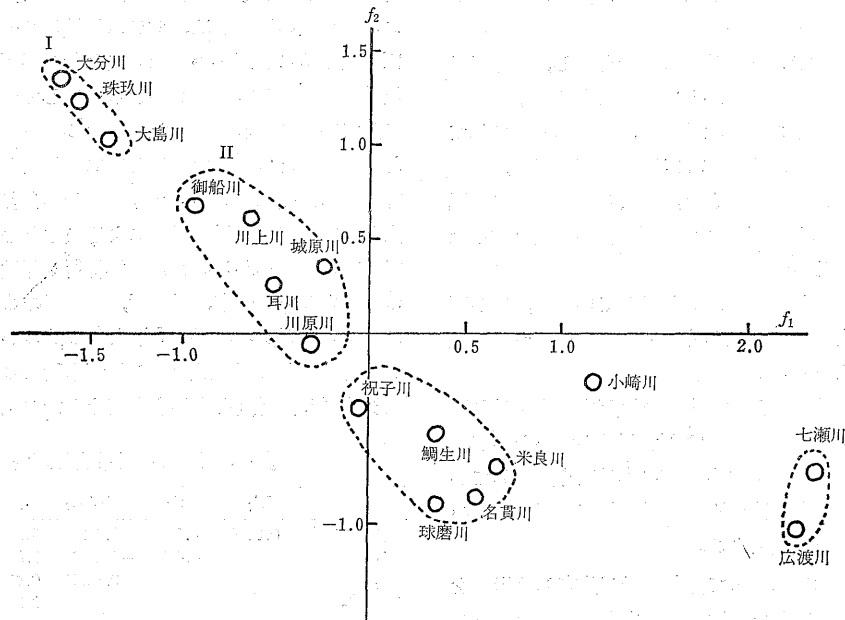


図-2. 16 流域の因子得点の散布図 (第 1, 2 因子)

次に同じ資料で因子分析を行なった。累積寄与率が第2主成分までで84.3%だったので第2因子までの各流域の因子得点を計算しプロットしたのが図-2である。図-1と比較すれば、縦軸すなわち第2因子の得点の分布幅が広くなるとともにほぼ直線上に並んでいる。このことによって主成分分析では明らかでなかった第2因子の解釈が容易になる。各流域の第2因子の因子得点と流況係数の分散の大小との順位相関係数を算出すると0.72と危険率1%で有意性が認められ、第2因子は流況係数の変動の大きさを表わす因子であることがわかる。第1因子と流況係数の順位相関係数は0.99で、第1因子は流況係数の大きさを表わしている。このように流況係数の大きさとその変動を表わす第1、第2因子の因子得点による流域の分類は図-2のごとく主成分分析による流域分類とほぼ一致する。異なる点是小崎川流域が第Ⅳグループより第Ⅲグループに近づいた点だけである。

このように因子分析と主成分分析はこの資料に関する限り、流域分類はほぼ一致し、因子、主成分の解釈では因子分析が容易であるという点から因子分析のほうが有効であるように思われる。このことについては別途に報告する。

4) 地形因子の因子分析

16流域、15の地形因子について流況係数と同様に主成分分析、因子分析を行なった。これは第1に地形因子の分類を行ない、地形間の関連を明らかにしひいては変数を減少させることを目的とし、第2には地形因子に基づく流域の分類と流況係数に基づく流域分類の結果との対応をみるためである。累積寄与率が第3主成分までで78.1%であったので、第3因子までの因子得点により流域分類を行なうと、①鯛生川、広渡川、七瀬川 ②川上川、大分川 ③城原川、御船川 ④玖珠川、川原川、小崎川 ⑤米良川、球磨川、耳川 ⑥祝子川、名貫川 ⑦大鳥川のように細かく分類され、流況係数による流域分類との対応性は認められない。この点をさらに確かめるために流況係数の因子分析によって四つのグループに分類された流域間の地形因子の平均値に差があるかどうかの検定を行なった。各地形因子ごとにグループ間のT値行列を算出してみると、流域解析度係数は六つの組み合わせのうち、1と4、2と3グループ間を除いて平均値の差に有意性が認められ、起伏量が1と3グループ間に有意性が認められたほかはすべて有意性が認められなかった。このことは流況係数の値とその分散をもとに行なった流域の分類には、開析度係数を除けば地形因子は関連が少ないことを示している。次に回転後の因子負荷行列から因子の意味づけを行なってみると、第1因子で

は、起伏比、流域傾斜、標高など垂直的な広がりに関連のある因子であり、第2因子は、谷密度、谷頻度、地上流の長さなどが因子負荷量が大きく、谷に関連のある因子であり、第3因子は、流域面積、平均幅など流域の水平的な広がりに関連のある因子であることがわかる。この第3因子までの因子負荷量の距離行列を算出し、すでに述べた変形グループ結合法で分類すると次の六つのグループに分類された。①平均標高、形状係数、起伏量、起伏比、流域傾斜 ②谷密度、谷頻度 ③平均幅、分岐比 ④ $\bar{R}$ 、ヒプソメトリック・インテグラル ⑤一次流の平均長、地上流の長さ ⑥流域面積、主流路長。このようにして分類された地形因子で同一グループに属するものは、ほぼ同一の性格を有していると考えてよい。したがって各グループから一つずつ、水文学的解釈の容易さ、計測の容易さ、因子負荷量の大きさ等を考慮して、地形因子を選択すれば、情報量の損失を最小におさえて地形因子の数を減少させることができる。

5) 流況係数と地形因子との関連

地形因子の因子分析によって六つに分類した。その各グループからの起伏比、谷頻度、平均幅、 $\bar{R}$ 、地上流の長さ、流域面積を選択した。これらの地形因子と流況係数との関連をみるために、ステップワイズ回帰分析を行なった。これは、ふつうの重回帰解析では、とりあげてもあまり効果のない因子や相互に関連のある因子等を除去することができないからである。

変数の出し入れの基準を $F_1=F_2=2$ として計算すると、第1ステップで $\bar{R}$ 、第2ステップで谷頻度がとり入れられた。それ以外の因子はとり入れられなかった。求められた回帰式は流況係数を Y 、 $\bar{R}$ を X_1 、谷頻度を X_2 とすれば、 $Y=9.483X_1+0.268X_2-1.605$ である。

重相関係数 $R=0.8262$ 、回帰の検定のための分散分析で $F=13.97$ でいずれも危険率1%で有意性が確かめられた。ただし変数の出し入れの基準 $F_1=F_2=2$ としているので、その基準が甘く、有効でない変数もとり入れられる危険性があるため、 Y と X_2 の偏相関係数を算出してみると、0.5828で有意性は認められない。したがって厳密に言えば、流況係数と関連のある地形因子は流域開析度係数だけである。

4. 地質と流況係数との関連について

流況係数と地形との関連をみるために、地形解析を行なった16流域で、流況係数の主成分分析、因子分析を行なったが、地質との関連をみるために流域を追加し、32流域で同様の分析を行なった。因子得点により流域を分類すると五つのグループに分類された。この結果を地図上にプロットしたものが図-3である。図上の流域

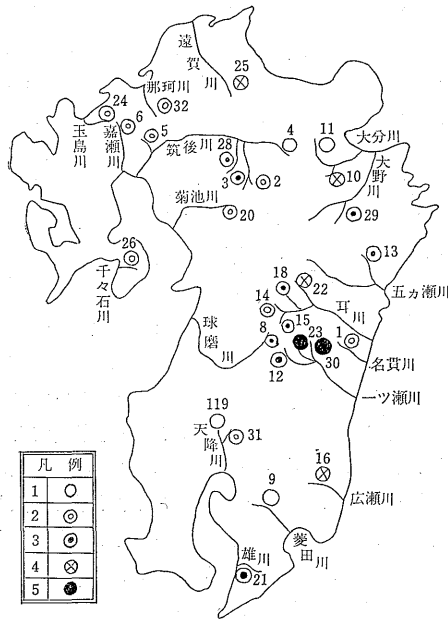


図-3. 流況係数の分布

番号は表-1 の第1列に記し、グループ番号は同列に括弧に入れて記入した。図をみると九州の脊梁山脈から東側は流況係数が大きく、西側は小さい傾向が認められる。しかし同一水系であっても、河川によって流況係数に大きな差が認められる所がある。まずこのような特徴的な水系について検討を行なってみる。

① 大分川水系：大分川と七瀬川の流況係数は1.49と6.08と大差があるが、表-3でわかるように地形、雨量因子等は大差なく、常識的には流況係数を大きくすると思われる起伏比、起伏量、年最大日雨量等は大分川のほうが大きい。しかし表-1でわかるように、地質は大分川流域に山麓堆積物が広く分布しているのに対し、七瀬川流域は古生代の粘板岩が分布している。流況係数の大差に地質が大きく影響しているのは否定しがたいようである。

② 筑後川水系：同じ水系の上流部4河川の中、玖珠川流域は流況係数1.68、川原川3.28、鯛生川4.05、高瀬川3.83と相当の差が認められる。4流域とも地形、雨量因子にはあまり差が認められないが、玖珠川流域は大分川と同様に山麓堆積物が分布しており、次いで流況係数の小さい川原川は洪積世安山岩が9割を占め、高瀬川、鯛生川は洪積世安山岩が6割以下になっている点が特徴的である。

③ 耳川水系：耳川流域の流況係数3.04と十根川流域の4.99とは相当の差がある。両流域には同じ古生層

が広く分布しているが、耳川流域には石灰岩、玄武岩の岩脈が面積の約2割を占め、これが流況係数の差をもたらしたのではないかと思われる。

④ 天降川水系：隣接した天降川と中津川流域で流況係数は1.65と2.65で差がある。地質をみると天降川流域が始良火山のいわゆるシラスが7割を占めているのに、中津川流域では4割になっている。水系は異なるが、菱田川水系の大鳥川はシラスが8割を占めていて、流況係数は1.81である。阿部(1)、虫明その他(12)らも第四紀火山岩地帯は降水量が多く、流況がよいと述べている点から考えても、天降川と中津川の流況係数の差はシラスの分布面積率の差と考えてもよさそうである。

⑤ 一ツ瀬川水系：銀鏡川、小川ともに流況係数が最も大きい流域で7.09、8.70である。同じ四万十層群でありながら小崎川は4.68、隣接する水系の球磨川では4.29と相当の差がある。未区分岩相の銀鏡川を除いて考えると、小川流域の四万十層群は粘板岩、頁岩等透水層の悪い岩が面積の9割を占めているが、小崎川では6割で残りは砂岩であり、球磨川では砂岩、頁岩からなっている。このように同じ四万十層群でも、その岩質によって流況係数に差があるようである。以上の点を考慮しながら、流況係数の因子分析で分類した流域のグループ(表-1、図-3参照)について検討を加えてみる。

① グループ1に属する流域は、いわゆるシラス地帯で、シラスの占有面積率が5割以上、それと火山噴出物による山麓堆積物が分布する流域で、流況係数1.5～1.9、平均1.7である。

② グループ2の流域は、洪積世安山岩、阿蘇噴出物および中生代の深層風化の花崗岩類よりなり、流況係数は2.3～3.3、平均値は2.8である。

③ グループ3で流況係数の小さい流域は、第三紀の安山岩類、花崗岩類、流況係数の大きい流域は、古生層、中生層の砂岩系統よりなっている。流況係数は3.8～5.2、平均値は4.4である。

④ グループ4、5の流域は、中・古生層の粘板岩系統からなり、流況係数は5.4～8.7で平均6.7である。

このように流況係数の因子分析による流域の分類と流域の地質とはきわめてよく対応しており、花崗岩、安山岩類の年代の差、堆積岩の岩質の差、さらに地質の面積占有率の差等も表現されているようである。

16流域で行なった因子分析の第2因子は流況係数の分散を表わしているとして述べたが、流域数を増して32流域の資料で因子分析を行なっても結果は同じで、第2因子は流況係数の分散を表わしている。これは各流域の第2因子の得点と流況係数の分散の相関係数を求めると、

0.9018と高い相関があることからわかる。流況係数の変動を流域相互で比較するため、変動係数を算出し、第2因子の因子得点との相関係数を求めると、0.5259とあまり大きくはないが1%の危険率で有意性が認められる。表-1に変動係数を記したが、これをみると、流況係数の大小に変動係数もだいたい比例していることがわかり、流況の悪い流域は年間の変動も大きいことがわかる。変動係数の分布の特徴的な点として、①シラス流域と山麓堆積が分布する流域の流況係数には大差ないが、変動係数は後者が小さい(大分川、玖珠川)②火山岩類の分布する流域は相対的に小さい(彦山川、鯛生川、川原川)③粘板岩系統の分布する流域はとくに大きい(小川、銀鏡川)④石灰岩脈の分布する耳川流域はとくに小さい等の点があげられる。

5. 流況係数と流域特性との複合的関連について

流況係数と地質、地形との関連について、個別的に解析を行なったが、その複合的な関連を調べるために数量化I類の計算を行なった。これは地形因子と異なり地質は数量的に表現できないためこの手法を用いたものである。地形解析を行なった流域が16と少ないため、各アイテム、カテゴリーを増やすことができず、地質は次の三つに大別した。①シラス地帯(山麓堆積物含む)②火山岩地帯 ③中、古生層地帯。流況係数は地質の細かい変化に対応していることはすでに述べたが、情報の損失は覚悟のうえで大別したものである。地形因子はステップワイズ回帰分析でとりあげられた $\bar{R}$ と谷頻度を用いた。計算の結果、それぞれの要因のレンジと偏相関係数は、地質 2.536, 0.868, $\bar{R}$ 1.695, 0.690, 谷頻度 1.009, 0.640 で偏相関係数の有意性は地質が危険率1%で、 $\bar{R}$ が5%で認められ、谷頻度は有意性が認められなかった。ステップワイズ回帰分析のときにくらべ $\bar{R}$ すなわち流域開折度係数の偏相関係数が小さくなったのは、本来連続量である $\bar{R}$ を四つのカテゴリーに分類したためである。三つのカテゴリーに分類した地質の偏相関係数が大きいことは、地質因子が流況係数に強い関連を有していることを物語っている。重相関係数は0.936で、残差平方和は3.78であった。雨量因子として、年平均日雨量、年最大日雨量、流量因子として、年平均日流量、渇水量、年最大日流量を独立変数として流況係数とのステップワイズ回帰分析を行なったが、とりあげられる因子はなかった。地質との関連で流況係数と雨量、流量との関係を見るため、数量化I類の計算を行なった。雨量については、雨量資料のある23流域をとりあげ、地質、年平均日雨量、年最大日雨量を要因として計算の結果、偏相関係数はそれぞれ0.845, 0.297, 0.007で、地質は別

として流況係数と雨量との関連は認められなかった。

流量については31流域の資料を用いて解析の結果、偏相関係数は地質 0.718, 年平均日流量 0.151, 渇水量 0.308, 年最大流量 0.008 で、流況係数と流量の関連は認められなかった。結局本論でとりあげた範囲内の雨量、流量、地質、地形等の流域特性と流況係数との関連は、地質が最も大きく、ついで流域開折度係数、谷頻度で、他の因子では認められなかった。

IV 結論と問題点

1) 流況係数と流況指数について検討した結果、流況係数は主として低水時の、流況指数は高水時の流況を表示している。流域間の差の検出力は流況係数のほうが大きかった。また流況指数の年々の変動はその年の年最大日流量に左右され、同一流域内での流域条件の変化の検出に用いることはできないようである。

2) 流況係数と地質との関連について主成分分析、因子分析で解析の結果、グルーピングされた流況と、その流域に分布する地質とはきわめてよく対応していることがわかった。すなわち流況が最も安定しているグループは、シラスが5割以上分布する流域と山麓堆積物の分布する流域であり、ついで洪積世の火山岩類と古生代の深層風化した花崗岩類の分布する流域である。第3のグループはさらに二つに分けられ、流況係数の小さいグループは第三紀の火成岩類、大きいグループは中、古生層の砂岩系統よりなる流域である。第4、第5のグループは中、古生層の粘板岩系統の流域である。

3) 流域の開折度の表示法について検討し、九州の16流域では岸原の流域開折度係数が開折度を数量的に表現できることがわかった。

4) 流況係数と地形因子との関連について、因子分析とステップワイズ回帰分析で検討の結果、とりあげられた因子は流域開折度係数と谷頻度のみであった。しかし谷頻度は偏相関係数に有意性が認められなかった。

5) 流況係数と雨量、流量因子との関連については、数量化I類の手法を用いて、地質との複合的な解析を行なった結果、関連は認められなかった。

6) 本論でとりあげた流域の雨量、流量、地形因子のうち、流況係数と最終的に関連が認められたのは、地質と流域開折度係数のみであった。

以上流出の一樣性を表示する指標の一つである流況係数と流域特性との関連について検討を加えてきたが、今後の問題点として次のような点があげられる。

1) 流出の一樣性を表示する指標の一つとして流況係数をとりあげたが、より合理的な指標が検討されねばな

らない。

2) 流況係数についていえば、その年次変動を規制する因子は何であるか。低水流出機構と関連させ、モデル流域と現実流域との対応から検討を進めてゆく必要がある。

3) 本論での解析はいわば一種のブラックボックスアナリシスであって、今後水文学的、物理学的に実体の解明を行なう必要がある。たとえば本論で流況係数と地質との関連が深いことが見いだされたが、そのメカニズムの解明に進まねばならず、解析の結果明らかになった代表流域で具体的な水文学的調査を行なうのも一つの方法である。

4) 本論でもいくつかの地形解析、水系解析に基づく地形因子をとりあげたが、地形学で用いられている地形解析の手法を機械的にとり入れるのではなくて、水文学的な意味づけ可能な地形表現の方法を見いだしてゆかねばならない。

5) 今後流域の数をふやすとともに、解析手法についても検討を加え、2) で述べた解析法と併行して、本論で行なった流域変数法での検討も深化させてゆかねばならない。

6) 今回は最終的な目的である地被条件(森林の影響)についての検討は未完であった。

引用文献

- (1) 阿部謙夫: 九州に於ける河川の流量について. 土木学会誌 12, 296~316, 1926
- (2) 鮎戸 弘ほか: 因子分析. 数理科学 3: ダイヤモンド社,

1971

- (3) DIAZ, G., SEWELL, J. I. & SHELTON, C. H.: An application of principal component analysis and factor analysis in the study of wateryield. Water Resources Research 4, 299~306, 1968
- (4) 平野昌繁: HRT(起伏量)ダイアグラムによる侵蝕度の量的表現. 地理評 44: 628~637, 1971
- (5) 金内英司: 森林伐採量が溪川流出量に及ぼす影響(I). 日林東北支誌 154~155, 1972
- (6) 小島忠三郎: 主成分分析による東北地方の詳細な気候区分. 農業気象 29: 9~19, 1973
- (7) 岸原信義: 流域の理水特性に関する研究(1). 岩大農報告 9: 209~219, 1969
- (8) 岸原信義: 流域の理水特性に関する研究(VI). 48年農土講要旨集 90~91, 1973
- (9) 岸原信義: 流域の理水特性に関する研究(V). 48年農土講要旨集 88~89, 1973
- (10) 林野庁治山課: 水資源対策調査報告書. 林野庁 治山課, 1974
- (11) LLOYD, D.: A measure of uniformity and its application to daily stream flows. Water and Water Engineering 42: 10~13, 1940
- (12) 虫明功臣・坂口雄二・高橋 裕: 河川上流域における流出特性. 28 回土木年講 137~139, 1973
- (13) 村野義郎: 山地における砂石の生産に関する研究. 土研報 114: 1~46, 1962
- (14) 野口陽一: 森林の流量調節作用表示式に対する統計的検討. 東大演報 39: 135~141, 1951
- (15) 奥野忠一ほか: 多変量解析法. 日科技連, 東京, 1971
- (16) 坂口 豊: 流域の発達と日本列島流域の特性. 地理評 38: 74~91, 1965
- (17) 多田文男: 山頂の高度と起伏量との関係並に之より見たる山地の開析度に就いて. 地理評 10: 939~967, 1934
- (18) 高山茂美: 河川地形. 共立出版, 東京, 1974
- (19) 山口岳志: 都市機能の空間構造 計量地理学. 共立出版, 東京, 1973
- (20) 吉川虎雄ほか: 日本地形論. 東大出版会, 東京, 1973
(1974年8月5日受理)