

山地河川の地下水流出の逓減特性とそれに対する流域地質の効果 Recession Characteristics of Groundwater Runoff of Mountainous Rivers and Effects of Basin Geologies on Them

東京大学工学部土木工学科 正会員 安藤 義久
 東京大学工学部土木工学科 正会員 高橋 裕
 東京大学大学院 学生員 ○伊藤 孝

1. はじめに

山地河川の地下水流出の逓減特性は、渇水時の水資源管理にとって重要な研究課題であり、従来から様々な研究が行われてきた。山地河川の地下水流出の逓減式として(1)式と(2)式がWernerとSundguist (1951)¹⁾, Roche (1963)²⁾, および高木 (1966)³⁾, により理論的に導かれている。物理的には、(1)式は被圧地下水帯水層からの地下水流出の逓減式であり、(2)式は不圧地下水帯水層からの地下水流出の逓減式である。一方、低水流出(地下水流出)に対する流域地質の効果に関しては、虫明・井口・高橋 (1975)⁴⁾ の指摘以来、筆者ら⁵⁾により統計的な検討が行われてきている。これらをふまえて、筆者ら⁶⁾は山地河川の地下水流出の逓減特性とそれに対する流域地質の効果について予備的解析を進めてきた。本稿では、解析対象流域をふやすとともに、各流域の地下水流出の逓減部もふやして解析し、地下水流出の逓減式として、被圧逓減式と不圧逓減式のどちらが適合性がよいか、逓減係数に対する季節・流域面積・流域地質の効果について検討を加える。

2. 対象流域と逓減部の選定について

対象流域は、流量年表(昭和32～52年)⁷⁾, 多目的ダム管理年報(昭和40～50年)⁸⁾に記載される流域の中から、流域がほぼ単一の地質より構成され、上流のダム・発電・かんがいによる取水の影響のない自然流域を選び、これらに土木研究所の神流川試験地⁹⁾と裏筑波試験地¹⁰⁾および東京大学愛知演習林の瀬戸試験地¹¹⁾内の6流域を加え、全部で約40流域とした。地質は、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5つに分類した。表1には、地質別において対象流域を示す。なお、流域の地質は、地質調査所発行の100万分の1の日本地質図により判読した。

地下水流出の逓減部は、降雨終了2, 3日後の無降雨期間10日以上逓減部を選んだ。

3. 解析方法について

高木³⁾により、被圧・不圧地下水流出に対する逓減式は次の式(1), (2)のように示されている。

$$\text{被圧逓減式} \quad Q = Q_0 \exp(-AcT) \quad (1)$$

$$\text{不圧逓減式} \quad Q = \frac{Q_0}{(1 + Au\sqrt{Q_0}T)^2} \quad (2)$$

ここで、 Q_0 (mm/day)は初期流出高、 Q (mm/day)はT日後の流出高である。また、 Ac は被圧逓減係数 Au は不圧逓減係数である。これに示されるように、被圧地下水流出は指数関数的に逓減し、不圧地下水流出は分数関数的に逓減する。

解析に際しては、式(1), (2)を式(3), (4)のように変形し、最小自乗法を用いて、被圧逓減係数 Ac , 不圧逓減係数 Au とそれぞれの定数 C , 相関係数を求めた。

$$\ln\left(\frac{Q_0}{Q}\right) = AcT + Cc = Ac\left(T + \frac{Cc}{Ac}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{Q_0/Q} - 1}{\sqrt{Q_0}} = AuT + Cu = Au\left(T + \frac{Cu}{Au}\right) \quad (4)$$

式(3)、(4)のまん中の項における定数 C_c 、 C_u が小さい程理論式に一致する。しかし、定数 C が小さくとも通減係数 A も小さく同じオーダーであると理論式に一致するとはいえなくなるため、右辺の項のように変形する。これにより、定数 C/A は T が小さい場合大きく影響する、すなわち、通減初期における補正項と考えることができる。

3. 解析結果

次の4つの点から解析した結果について述べる。

- (1) 被圧・不圧通減式の適合性について
- (2) 通減係数の季節的変動について
- (3) 流域面積の効果について
- (4) 流域地質の効果について

3-1. 通減式の適合性と通減係数の季節的変動について

最初に、観測流量データの通減部分と理論式との一致性について、全体的な相関係数と定数 C/A に関して述べる。相関係数は、各流域ともに、被圧・不圧通減式の両者とも平均値 0.90 以上と高い相関を示している。しかし、通減初期における補正項と考えられる定数 C/A は、各流域とも被圧通減式の方が不圧通減式よりも平均値において 0.5～2.0 程度大きくっており、理論式との一致という面では被圧・不圧通減式両者に大差はないものの若干不圧通減式の方がよいとみられる。

次に、通減特性を考察するために、各流域毎に横軸に初期流出高、縦軸に被圧・不圧通減係数を描いたものの代表例を図1～10に示す。図1・2は第四紀火山岩類、図2・3は第三紀火山岩類、図5・6は花崗岩類、図7・8は中生層、図9・10は古生層の例である。これによると、ほとんど、特に中・古生層では、バラツキはあるものの被圧通減係数は右上がりの傾向、すなわち、初期流出高が大きくなるにつれて通減係数も大きくなっている。これに対し、不圧通減係数は、初期流出高によらず、比較的一定していることがわかる。

また、通減の季節的変動を考察するために、図1～10の通減係数を表2に示すように、春季（3～5月：△）、夏季（6～9月：○）、秋季（10～11月：▲）、冬季（12～2月：●）の4季に分けて描いた。これによると各図ともに、夏季通減係数は値が大きくバラツキも大きいのにに対し、冬季通減係数は値が小さくバラツキも小さい。また春季・秋季の通減係数は夏季・冬季の間、もしくは、両者のどちらにも広がる分布、すなわち夏季・冬季の中間的分布を示している。この原因は冬季は気温が低く、河道周辺の蒸発散量が少なく安定しているのに対して、夏季は気温が高く、河道周辺の蒸発散量が多く変動が大きい、また春季・秋季はちょうどその中間にあるためと考えられる。図1～10について夏季・冬季の季節別に、被圧通減係数、不圧通減係数を較べると、より一層、不圧通減係数は一定値として扱うことができることがわかる。

以上、図1～10の考察をまとめると、通減係数は季節的に変動しており、夏季が大きく、冬季が小さい。また、示された例の大体において、被圧通減係数は初期流出高と正の相関、すなわち図において右上がりの傾向をもつのにに対し、不圧通減係数は4つの季節を合わせてみても、また夏季・冬季の季節別にはより一層一定として考えられ、通減特性を説明する上でより適合性がよいことが示された。

各対象流域について、通減係数の季節的変動がみられるかどうか、また被圧通減式、不圧通減式のどちらがより適合性がよいか、上で述べてきた観点でまとめた結果が表1に示されている。季節的変動はほとんどの流域でみられ、適合性については、おおむね不圧通減式の方がより適合性に勝れることがわかる。

3-2. 通減特性における流域面積と流域地質の効果について

3-1において、被圧通減式に較べて、不圧通減式は夏季・冬季の季節別に通減係数が一定値として扱えることが明らかにされたので、不圧通減式の夏季・冬季の通減係数を用い、流域面積、流域地質の効果について考察を加える。

各地質毎に、対象流域の流域面積を横軸に、縦軸にその流域の夏季（○）、冬季（●）の不圧通減係数の平

均値を描いたのが図11～15である。図11～15をみると、各流域の夏季・冬季不圧通減係数と流域面積との間に特別な傾向はみられない。即ち流域面積は通減特性に影響をおよぼしていない。そこで、平均値をもって流域地質の効果を考察する。表3に地質別の対象流域の夏季・冬季不圧通減係数のサンプル数、平均値、標準偏差を示す。

バラツキの少ない冬季の通減係数についてみると、第三紀火山岩類はデータがないためわからないが、第四紀火山岩類・花崗岩類は0.010以下と小さく、中生層・古生層については0.020前後と大きい。次に夏季の通減係数についてであるが、夏季はバラツキが大きいため明確なことは言えないが、第四紀火山岩類・第三紀火山岩類が0.020以下と小さく、次に花崗岩類が0.020前後、中生層・古生層が0.020以上と大きくなっている。

このように、夏季・冬季でみても、第四紀火山岩類・第三紀火山岩類・花崗岩類は大差がなく通減係数の小さいグループに属し、中・古生層は大きいグループに属す。このように2つのグループに大別できる。

4. 結論

以上の結果をまとめて以下に列記する。

- (1) 被圧通減式に較べ、不圧通減式は季節的にみても通減係数を一定として扱え、適合性に勝れる。
- (2) 通減係数は季節的に変動しており、冬季通減係数は小さくバラツキも小さいのに対し、夏季通減係数は大きくバラツキも大きい。また春季・秋季通減係数は冬季・夏季の中間的分布を示す。
- (3) 通減特性に対する流域面積の効果はみられなかった。
- (4) 地質別にみると、第四紀火山岩類・第三紀火山岩類・花崗岩類は通減係数の小さいグループで冬季不圧通減係数で0.010以下、夏季不圧通減係数で0.020程度かそれ以下、また中・古生層は通減係数の大きいグループで、冬季不圧通減係数で0.020前後、夏季不圧通減係数で0.020以上である。

今後、より対象流域をふやし解析を進める予定である。

謝 辞

末尾ながら、水文データを提供された建設省河川局、土木研究所水文研究室、愛知工業大学の江川太朗教授、東京大学農学部山口伊佐夫教授、諸戸清一講師に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Werner, P.W., and Sundquist, K.J.: On the Groundwater Recession Curve for Large Watersheds, Publ. No.33, IAHS, pp.202～212, 1951.
- 2) Roche, M.: Hydrologie de Surface, Gauthier-Villars, pp.267～275, 1963.
- 3) 高木不折: 低水流出の低減特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第128号, 1966,
- 4) MUSIAKE, INOKUTI, and TAKAHASI: Dependence of Low Flow Characteristics on Basin Geology in Mountainous Areas of Japan, Publ. No.117, IAHS, pp.147～156, 1975.
- 5) 安藤・高橋・虫明: 表日本山地河川の流況の地域特性, 土木学会第33回年講, 1978.
安藤・井上: 表日本山地河川の流況の要因分析と地域特性, 土木学会第7回関東支部講, 1980.
井上・高橋・安藤: 表日本河川の山地部における流況の統計的解析, 土木学会第35回年講, 1980.
- 6) 安藤・伊藤・高橋: 表日本山地河川の低水流出の低減特性と流域の地質, 第7回関東支部講, 1980.
伊藤・高橋・安藤: 山地河川の低水流出の低減特性と流域の地質, 土木学会第35回年講, 1980.
- 7) 建設省河川局: 流量年表, 1957～1977.
- 8) 建設省河川局: 多目的ダム管理年報, 1965～1975.
- 9) 建設省土木研究所水文研究室編: 神流川流域水文観測資料, 土木研究所資料No.324, 1968.
江川太朗: 河川流出の標準通減曲線とその適用に関する研究, 付属資料, 東京大学学位論文, 1979.
- 10) 建設省土木研究所: 裏筑波試験地水文観測資料, 土木研究所資料第1429号, 1978.
- 11) 東京大学演習林: 愛知演習林水量観測結果報告 (I), (II), 東京大学農学部演習林第20, 21号, 1976, 1977.

表 1. 地質別の対象流域と解析結果一覧

(a) 第四紀火山岩類流域

水系名	観測所名	通減式の適合性		季節的変動
		被圧	不圧	
石狩川	暁橋	—	○	○
尻利別川	名駒	—	○	不明
阿武隈川	白河	—	○	○
利根川	村上	—	—	○
利根川	上里見	—	○	○
狩野川	大仁	—	○	○
狩野川	本宿	—	○	○
本明川	裏山	—	○	○
白川	陣内	—	—	—
川内川	吉松	—	○	○
川内川	下手橋	—	○	○
肝属川	高良橋	—	○	○
大淀川	乙房	—	○	○
大淀川	樋渡	—	○	○
大野川	大飼	—	○	○
山国川	新原井	—	—	○

(b) 第三紀火山岩類流域

水系名	観測所名	通減式の適合性		季節的変動
		被圧	不圧	
石狩川	豊平狭ダム	—	○	不明
米代川	素波里ダム	—	○	不明
犀川	犀川ダム	—	○	不明
犀川	内川ダム	—	○	不明
大聖寺川	我谷ダム	—	○	不明

(c) 花崗岩類流域

水系名	観測所名	通減式の適合性		季節的変動
		被圧	不圧	
江の川	南畑敷	—	—	○
江の川	三次	—	○	○
嘉瀬川	川上	—	—	—
裏筑波試験地	山口	—	○	○
裏筑波試験地	祖父ヶ峰	—	○	○
愛知演習林	白坂	—	○	○
愛知演習林	東山	—	○	○

(d) 中生層流域

水系名	観測所名	通減式の適合性		季節的変動
		被圧	不圧	
沙流川	平取	—	—	—
天竜川	大居	—	○	○
重信川	山之内	—	—	—
渡川	大正	—	○	○
渡川	磯之川	—	○	○
土器川	御用橋	—	○	○

(e) 古生層流域

水系名	観測所名	通減式の適合性		季節的変動
		被圧	不圧	
北上川	寺林	—	—	○
利根川	高津戸	—	—	○
木曾川	山口	—	○	○
櫛田川	両郡橋	—	○	○
紀の川	貴志	—	—	○
北川	高塚	—	○	○
由良川	岩間	—	○	○
佐波川	島地	—	○	○
仁淀川	川口	—	—	○
神流川試験地	渡瀬	—	○	○
神流川試験地	塩沢	—	○	不明

表 2. 季節区分と記号

季節区分		記号
春季	3, 4, 5 月	△
夏季	6, 7, 8, 9 月	○
秋季	10, 11 月	▲
冬季	12, 1, 2 月	●

○ よく説明する

— よく説明するとはいえない

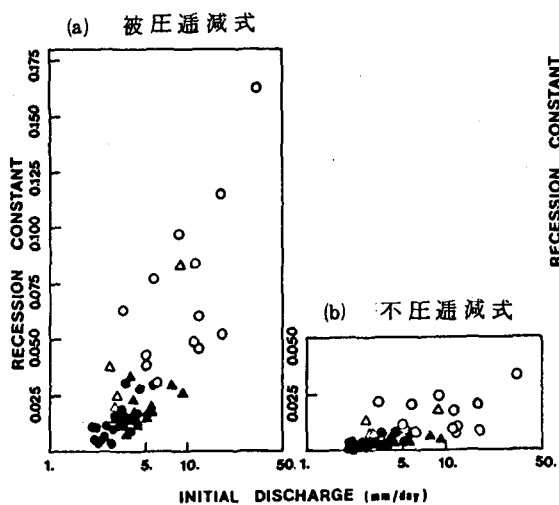


図2 第四紀火山岩類 (川内川・吉松)

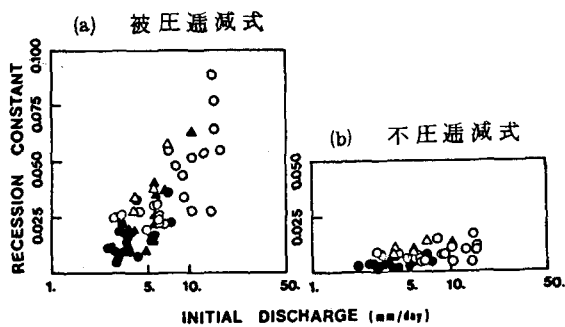


図1 第四紀火山岩類 (狩野川・大仁)

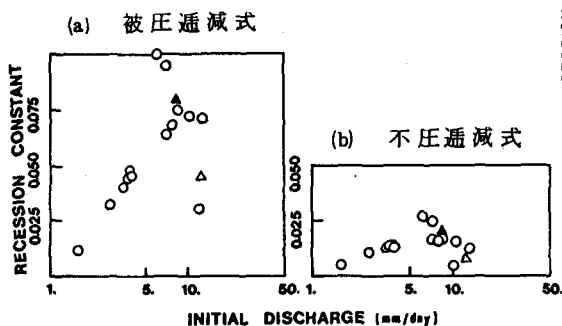


図4 第三紀火山岩類 (犀川・犀川ダム)

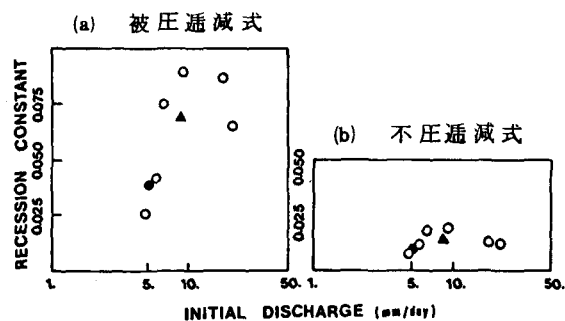


図3 第三紀火山岩類 (石狩川・豊平狭ダム)

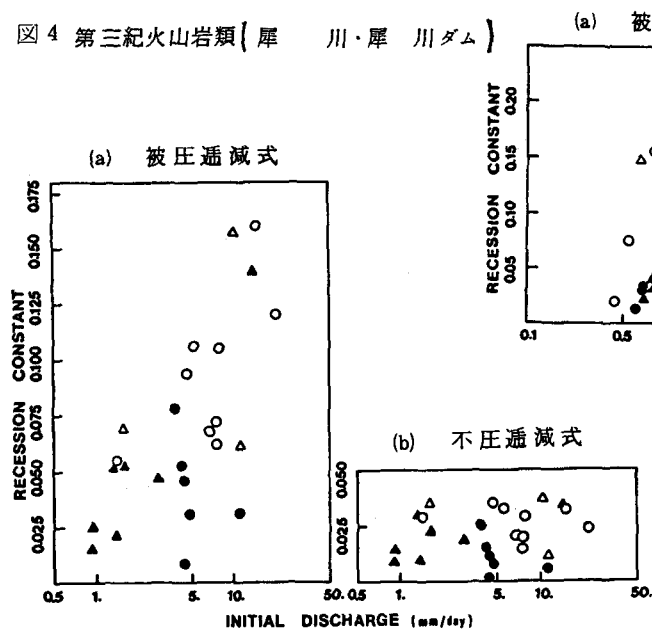


図6 花崗岩類 (江の川・三次)

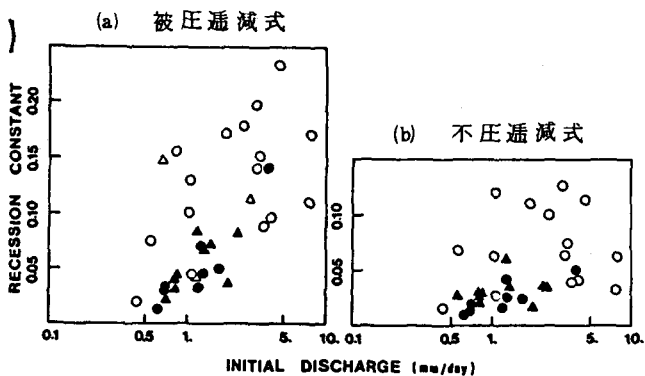


図5 花崗岩類 (江の川・南畑敷)

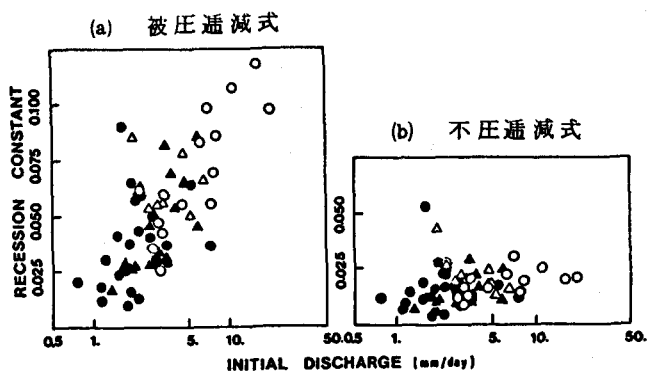


図7 中生層(天竜川・大居)

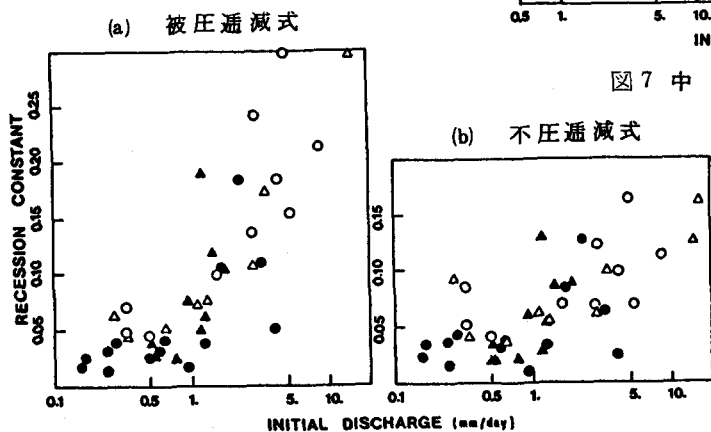


図8 中生層(渡川・大正)

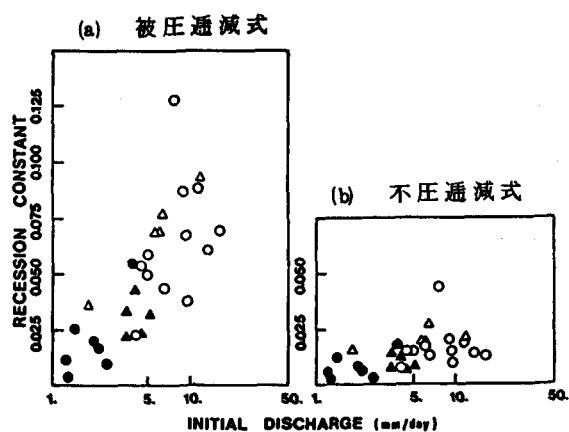


図9 古生層(佐波川・島地)

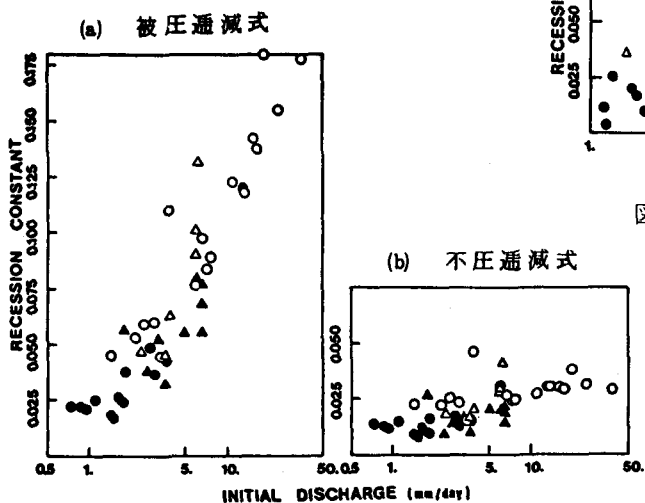


図10 古生層(榑田川・両郡橋)

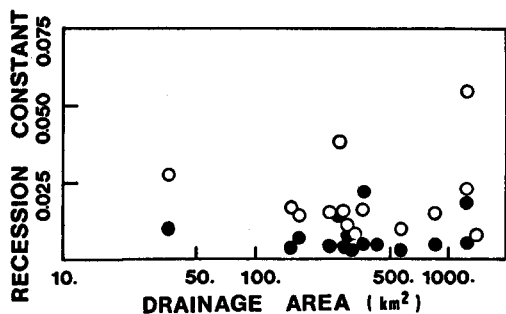


図 11 第四紀火山岩類流域
の夏季・冬季不圧通減係数
と流域面積

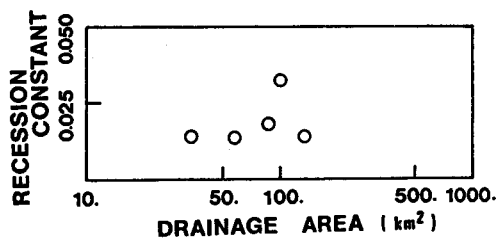


図 12 第三紀火山岩類流域
の夏季・冬季不圧通減係数と流域面積

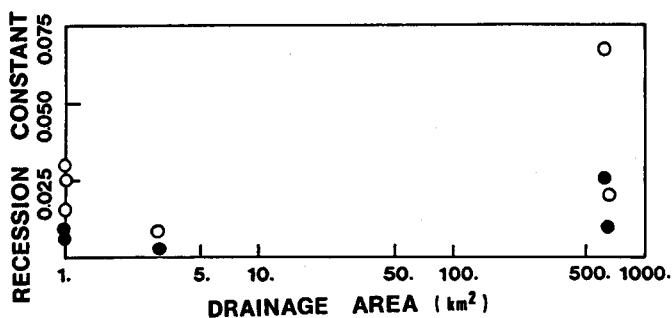


図 13 花崗岩類流域の夏季・冬季不圧通減係数と流域面積

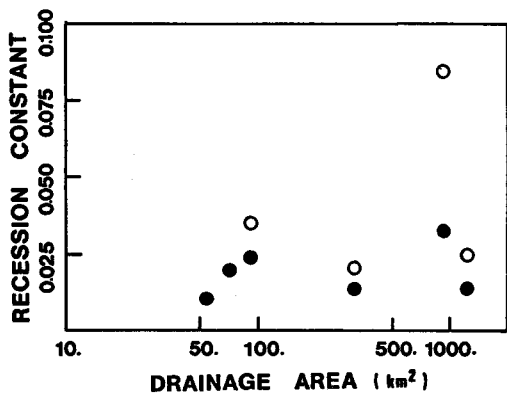


図 14 中生層流域
の夏季・冬季不圧通減係数と流域面積

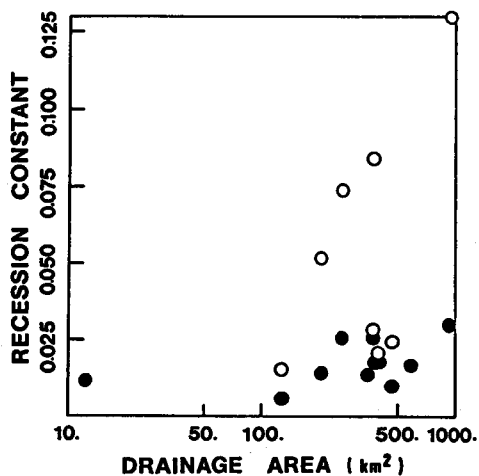


図 15 古生層流域
の夏季・冬季不圧通減係数と流域面積

表 3 不圧通減係数の地質別、季節別の値

地 質	冬季不圧通減係数			夏季不圧通減係数		
	サンプル数	平均値	標準偏差	サンプル数	平均値	標準偏差
第四紀火山岩類	15	0.006	0.004	14	0.019	0.014
第三紀火山岩類	—	—	—	5	0.018	0.008
花崗岩類	6	0.010	0.006	6	0.029	0.023
中生層	6	0.019	0.008	4	0.041	0.029
古生層	11	0.017	0.007	8	0.055	0.043