

流域の地形・地質と流量逓減曲線

江川太朗・四俵正俊

Water Discharge Recession Curves Related with Geography and Geology of the Basin

Taro EGAWA and Masatoshi SHIDAWARA

Master recession curves of runoff were composed for 7 basins from long term discharge data which had been examined on their reliability.

The coincidence of master recession curves for different terms and the close relativity between ground water level and low water-discharge suggest that the master recession curve would be proper for each basin.

The attenuation constant of a master recession curve between low water-discharge and draughty water-discharge was compared with a simple index made from geographic gradient and geologic matrix of each basin. The two values seem to have correlation, provided that the river density is taken into account. It strongly suggests that the quantitative relationship between master recession curve and geography and geology of the basin would possibly be existent.

1. はじめに

河川流出の解析法は数多く提案されているが、降雨から流量への変換システムとしての流域の物理的性質については、非常に基本的な構想はあるにせよ、通常の流出解析法では考慮に入れないと言ってよい。すなわち殆どの流出解析法において、流域はブラックボックス的な取扱いを受ける。その理由の第一は河川流域の流出機構が極めて複雑であるためであり、第二は、それにもかかわらず流出計算の実行が河川管理のうえで必要不可欠なものとして要求されるためである。

当然のことながら、流域を物理的に把握し、またその物理特性から構築されるような流出モデルを作ることには、水文学における積年の課題のひとつとなっている。たとえば立神の単位図へは、素朴なものとは言え、流域の物理特性を用いて構成する流出モデルと言える。また高樟ら¹⁾による、観測に基づくA層の存在の実証的研究と、そこから展開する流出生起場の理論の系統的な研究は、流域の物理機構解明への典型的なアプローチである。

一方、流量のハイドログラフに関して、その逓減部分は個々の降雨のパターンにあまり左右されないため、その流域の特性を表現すると言われており、逓減部によって流域特性を表現し、あるいはそれを用いて流出モデルを作ることが考えられている。^{2),3)} いずれにせよ流域の物理的特性と河川流量との関連についてはまだ手探りの定

性的研究が行われている段階である。

本研究は多くのハイドログラフの逓減部分から構成される標準逓減曲線と、流域の物理的特性との間に直接の相関性が見出される可能性について調べたものである。このような研究を行うに当たって最大のネックのひとつは信頼できるデータの収集整理にあるが、データの信頼性と精度についての研究は、本研究を行う前提として筆者によってなされており、機会を得て公表する予定である。

2 標準逓減曲線

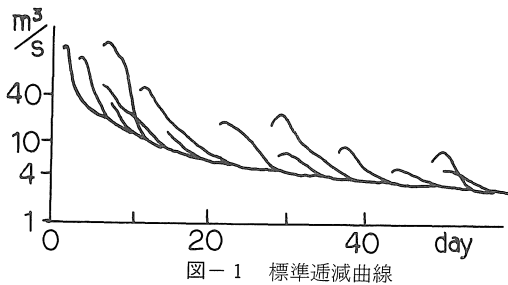
標準逓減曲線という言葉は従来あまり使われていない。我が国では自然逓減曲線という言葉がこれに近い意味で用いられていて⁴⁾ "降雨時に流域の地表面に貯溜された、いわゆる直接流出が終了して、流出が表層土中の水分や地下水の浸出によってかん養されている状態における流出量の時間的変化曲線"と定義されている。

これは筆者の定義する標準逓減曲線とは異なるが、実質的には非常に近い性質のものである。諸外国においては、Master Recession Curveという言葉で示されている曲線⁵⁾が作成の手順から見て筆者の言う標準逓減曲線とほぼ同じ性格を持つものである。自然てい減曲線、Master Recession Curveの何れも流域の地質、地形と密接な関係があるであろうことを予想し、低水流量の予測に用いようであろうことを期待している。

筆者らは⁹⁾、神流川の流量資料から、各降雨の終了後、流出量の時間に対する通減曲線はある程度の時間を経ると、結局一つの曲線上に乗る傾向にあることを見出し、これを標準通減曲線と名づけて提案し、これが流出機構解明の手がかりとなることを示した。その後の研究によって、この曲線が流域に固有のものと思われることが明らかになったので、この事実にもとづいて流出機構解明への接近を試みた。

本研究で用いた標準通減曲線の作成方法は、流量観測地点における長時間（我が国のように無降雨日数の少ない地域では、おむね4～5年を必要とする）の流量資料から、ある降雨が経ってから次の降雨の影響が表われるまでの期間のなるべく長い場合のハイドログラフを、できるだけ多く選び出すことが第一段階となる。

こうして選び出した通減部のハイドログラフを、そのうちの最も流量の小さいものから順次一枚の図の上（通常片対数方眼紙を用いる）、各々のハイドログラフの最小流量が、既に記入されているハイドログラフの下側の包絡線上の同流量の点に一致させるようにして、順次流量の大きい方へプロットしていく。このようにして得られた曲線群の下側の包絡線が標準通減曲線となる。図一は標準通減曲線の作成法を模式的に示したものである。



図一 標準通減曲線

さて地下水流出のポテンシャルは、降雨の地中浸透量のうち地下水面まで到達する量によって補充される。浸透量は降雨分布の影響を受けるため、降雨直後は地下水流出ポテンシャルも流域全体で一時的に不均衡な状態となるが、これは可及的すみやかに均衡のとれた状態に近づくと考えられる。このような流域全体の地下水流出ポテンシャルが均衡のとれた状態での流出量ハイドログラフが標準通減曲線と考えられる。

3 流域固有の標準通減曲線

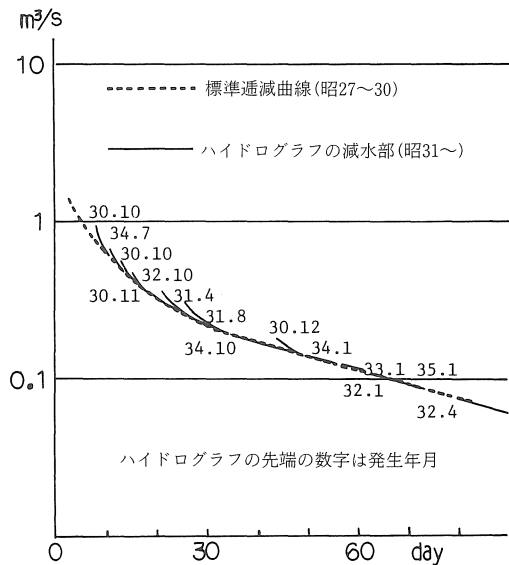
標準通減曲線が上に述べたようなものであれば、地殻に大きな変化がもたらされるようなことがない限り、標準通減曲線は流域に固有なものとなる筈である。このことを実証するために、下記の二点の検証を行った。

第一に観測期間の異なる資料により作成する標準通減

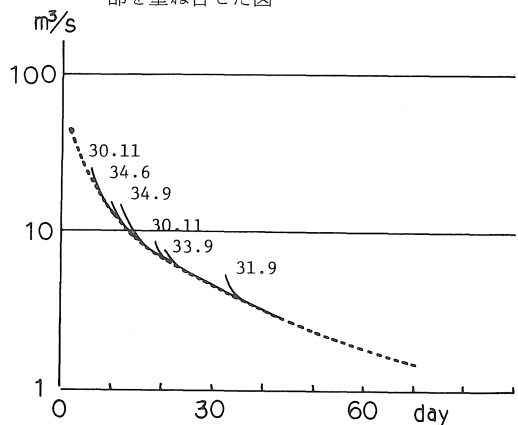
曲線が、流量の誤差の範囲内で一致する筈である。次に、地下水水位が滞水層の地下水賦存状態をとらえるひとつの指標となりうるとすれば、低水流量と地下水水位との関係は全期間を通じて一定のものとなる筈である。

これらの検討を行う流域としては、長期にわたって比較的高精度の流量測定値が得られている建設省土木研究所の持つ二つの試験地“神流川”⁷⁾と“塩沢”⁸⁾を用いた。神流川は利根川の支川で、流量観測点は埼玉県児玉郡渡瀬村にあり、その流域面積は373.6km²、塩沢は神流川の支川で、流量観測点は群馬県多野郡万場町にあり、流域面積12.6km²の小流域である。

第一の検討は、塩沢および神流川の流量観測資料のうち、昭和27～30年のものを用いて標準通減曲線を作り、この標準通減曲線に昭和31年以降のハイドログラフの減水部を重ね合せてみることによって行った。図一、二を



図二 塩沢の昭和27～30年の資料による標準通減曲線に昭和31年以降のハイドログラフの減水部を重ね合せた図



図三 神流川について、図二と同じ

見ると、昭和31年以降の減水部は、昭和27～30年の資料による標準逓減曲線にほぼ完全に重なることが分かる。すなわちそれぞれの期間の資料で作成する標準逓減曲線はほぼ同一曲線になり、標準逓減曲線が流域に固有な曲線であることを示すものと言えよう。

第二の検討は塩沢の地下水位観測資料を用いて行った。この地下水位観測は、たまたま好便な位置にあった民家の井戸を利用したものであり、人為的な水位低下がある等の欠点があるため、信頼性について若干問題のあるデータである。図4、5に季別の地下水位と流量の

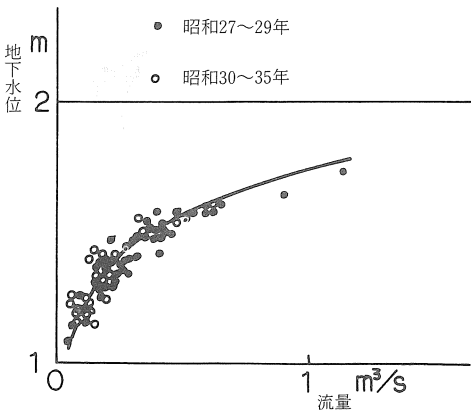


図-4 地下水と流量の関係(3月～6月)

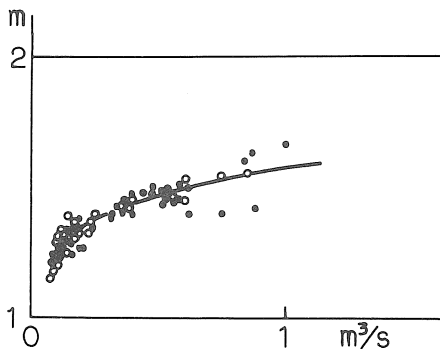


図-5 〔図-4〕と同じ(10月～12月)

相関図を示す。●は昭和27～29年の資料、実線はそれから求めた、地下水位一流量の曲線、○は昭和30～35年の資料をプロットしたものである。これらの資料は比較的長い無降雨のあとのデータを選んだものである。多少のバラツキはあるが、地下水位と流量の間にはほぼ固定した関係があると言えよう。地下水位と河川の低水流量が良い相関を示すことは、低水流量が殆んど地下水流出を成分とすることを示すものであり、標準逓減曲線に経年変化が見られないことと、標準逓減曲線に適合する場合の流量が、殆んど流域固有の地下構造に支配される地下水流出を成分とするものと想定されることと結びつけば、標準逓減曲線は流域固有の曲線と考えることができ

る。

ところで図4と図5を比較すると、地下水と流量との関係は夏季と冬季では異なり、同一の地下水位に対する流量はおもね夏季に比べ冬季が大きく、同一の地下水位変化量に対する流量の変化量も夏季に比べ冬季が大きいたことが認められる。

水は温度が変われば水自身のもつ物理的性質も変わるので、地表に近い水分の流動状況は変わるであろうし、植生や凍結等の影響を受けて標準逓減曲線が夏季と冬季とで幾分変わることも考えられる。我が国の場合、標準逓減曲線は夏季は比較的流量の多い部分に適合し、冬季は小さい部分に適合することが多く、夏季の資料と冬季の資料とでは標準逓減曲線の別々の部分を形成することになる場合が多い。結果として年間を通して一本の曲線になったと見ることもしよう。しかしながら、僅かな数の資料であるが、冬季の資料で標準逓減曲線に適合する流量の比較的大きい場合や、夏季の資料で小さい流量に適合する場合もあったため、明らかに別の曲線と見られる程の差異は認められなかった。(図-2、3参照)

4 対象流域の選定

標準逓減曲線が流域固有の曲線と考えられることから、この曲線は経年変化の殆んどない、流域の地下構造、地質およびそれらを基にして形づくられる地形等と密接な関係があることが想定される。

この問題を検討するためにはできるだけ数多くの、かつ種々の地形、地質の流域の、かなり長期間にわたる流量資料が必要である。今回筆者が入手した資料の中には、資料の精度に若干の問題のあるものもあるが、狩野川(大仁)、狩野川水系支川黄瀬川(本宿)、豊川(石田)、庄内川(枇杷島)、櫛田川(両郡)の5ヶ所を選び、さらに前出の神流川試験地および塩沢小試験地の資料を加えて検討を進めることとした。

これだけの大きさの流域となると、殆んど流量観測地点の上流で水利用がなされており、流量の少ない場合は自然流況との差が相対的に大きくなるので逓減曲線の形が変ってくる。この点は注意して取扱うこととしたが、豊川以外は取水記録が得られず、不十分なものである。今後さらに資料を求めて精度をあげたい。

各流域の流域図を図-6に示す。

5 標準逓減曲線の特性を示す指標

各対象流域の標準逓減曲線を図-7～13に示す。この曲線と流域の地形、地質との関係を検討するために、曲線の特性を数値化して表現できれば都合が良い。

標準逓減曲線の流量の大きい部分は、データが少ない

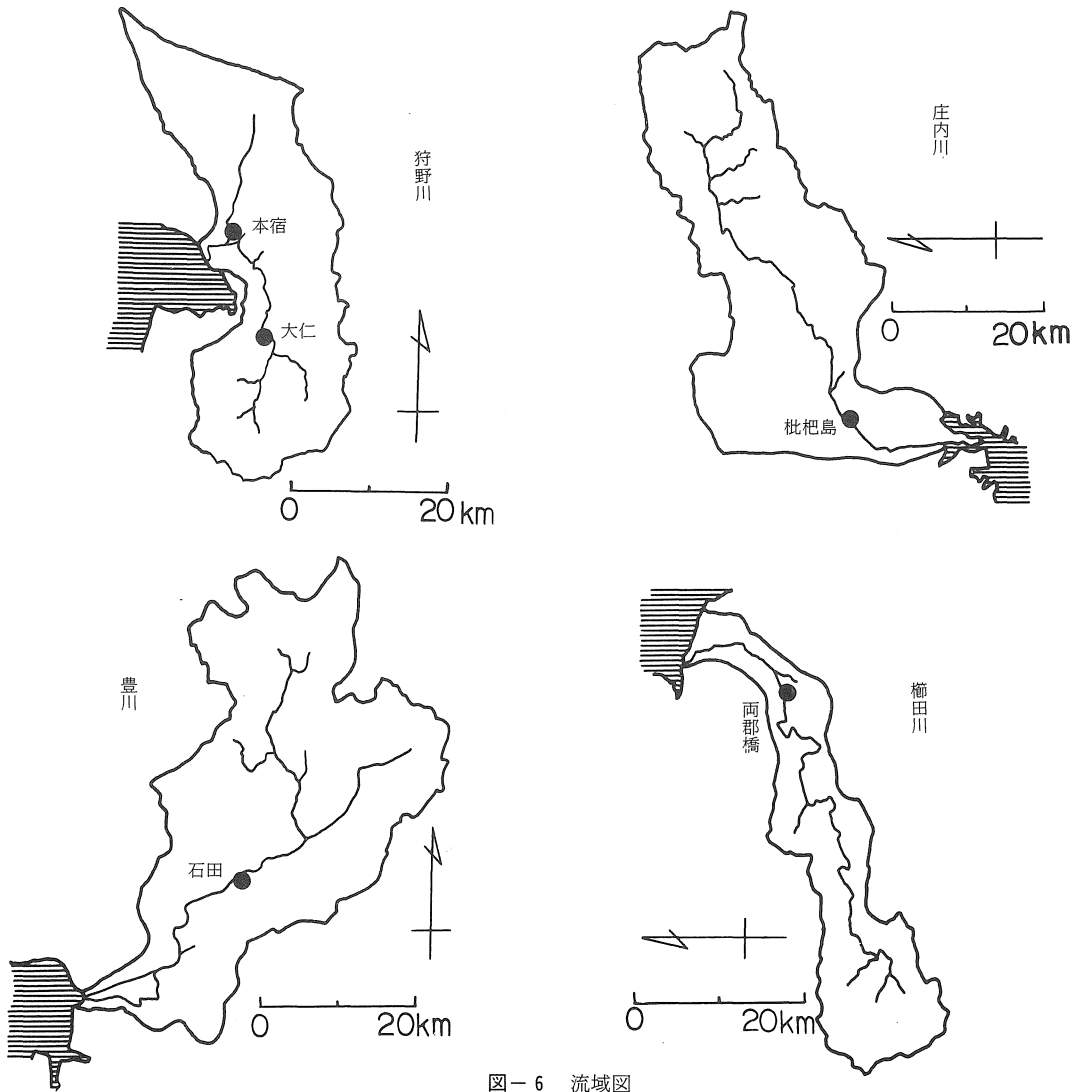


図-6 流域図

上、降雨の影響を受けている可能性があり、一方曲線の最小流量付近は一般に測定誤差が大きいの、取水等の人為的影響が大きいことおよび該当するデータが少ないことから、曲線の両端を除き、おむね平水流量から濁水量の間で考察した。こうして両端を除いた標準通減曲線を見ると片対数方眼紙上で（流量が対数）直線に近いものが多いが、やゝ下に凸の曲線状の場合もある。

何れにしても、曲線の特性を表現するのに最も重要な要素として勾配をあげることができる。勾配を求める場合に、できるだけ客観的に作業を進めるため、各々の川の低水流量（275日流量）および濁水流量（355日流量）に着目し、次の指標を考えた。

λ_1 ：曲線を指数関数で表現した場合の、低水流量の点での減衰率

λ_2 ：低水流量の点と濁水流量の点を結び、指数関数で表現した場合の減衰率

λ_3 ：概して機械的には取扱えないが、片対数方眼紙上にプロットした標準通減曲線を見て、低水流量と濁水流量の間を中心に、おむね直線近似のできる区間を選んだ場合の減衰率

図-7~13を見ると、 λ_1 は低水流量の点のみで表現するため、曲線全体の特性を示すには不十分であるが、 λ_3 は λ_2 とほぼ近い値になっていてかなりの客観性もあり、さらに曲線に多少の疑問のある場合にも対処できる。また λ_3 は流況資料のない観測所の場合でも求められるので使いやすい。

塩沢および豊川の自然流量に対しては流況表は作成されていないが、上述の理由からあえて流況表を作成せず、

本論文では、 λ_3 を用いて検討を進めることとした。各流域の $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の値を表-1に示す。

ただし今後数多くの流域の資料を処理する場合には、客観性を確保するため、まず λ_2 を求め、次に λ_3 を求めて両者に大きな差のない場合には λ_2 を用い、差の大きい場合は基礎資料の再検討を行ったうえで研究を進めることが必要であろうと考える。

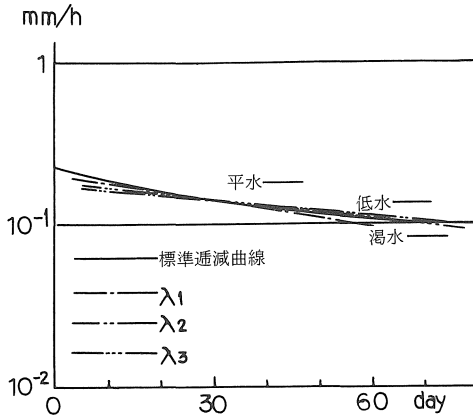


図-7 標準逓減曲線 狩野川 (大仁)

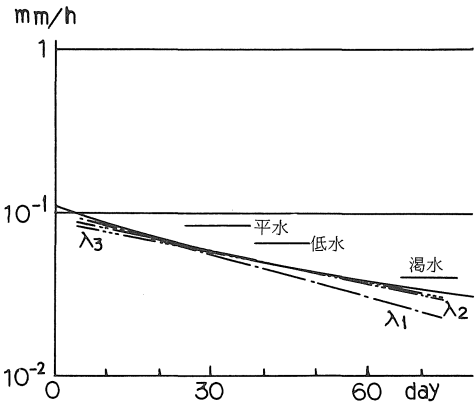


図-8 標準逓減曲線 黄瀬川 (本宿)

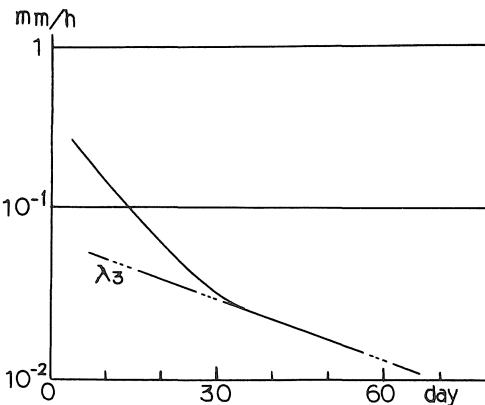


図-9 標準逓減曲線 豊川 (石田)

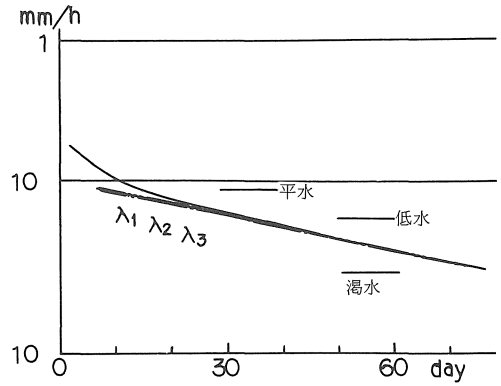


図-10 標準逓減曲線 庄内川 (枇杷島)

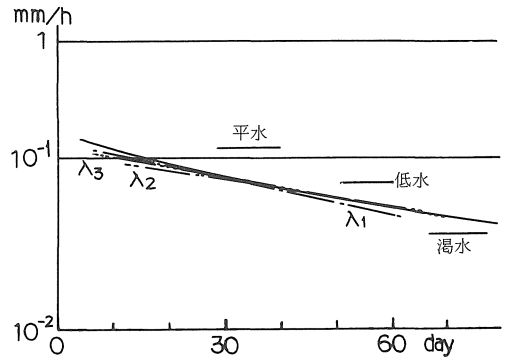


図-11 標準逓減曲線 櫛田川 (両郡)

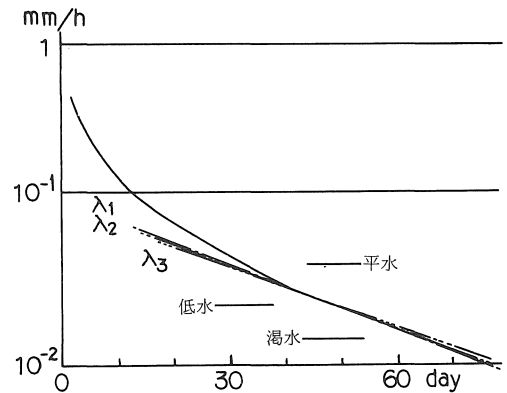


図-12 標準逓減曲線 神流川 (渡瀬)

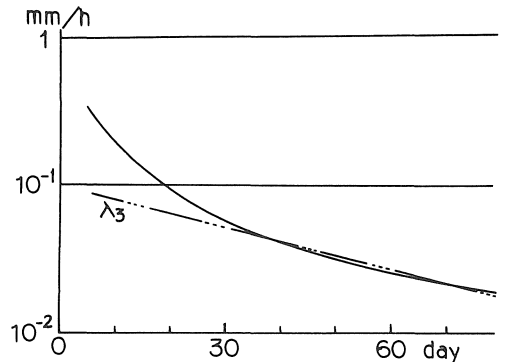


図-13 標準逓減曲線 塩沢

表-1 各流域の λ_1 , λ_2 , λ_3 (単位: day⁻¹)

	大仁	本宿	石田	枇杷島	両郡	神流川	塩沢
λ_1	0.0052	0.0089		0.0072	0.0069	0.0127	
λ_2	0.0030	0.0068		0.0072	0.0051	0.0121	
λ_3	0.0038	0.0059	0.0123	0.0072	0.0058	0.0114	0.0081

(石田の自然流量, 塩沢については流況表が作成されていない)

表-2 各流域の地質の分布

河川名 (流量観測地点)	狩野川 (大仁)	黄瀬川 (本宿)	豊川 (石田)	庄内川 (枇杷島)	櫛田川 (両郡)	神流川 (渡瀬)	塩沢 (塩沢)		
流域面積 (km ²)	321	254	545	727	365	374	13	空の 隙重 度み	
流域平均勾配 (%)	20.3	11.5	22.9	7.9	33.6	39.5	51.9		
地質の 分布 %	固結堆積物	1		3	32	12	76	92	1
	深成岩			24	20	23			1
	変成岩			44	1	53	17	8	1
	火山性岩石	87	100	20	2				2
	泥			2	10				2
	砂	1		2	14		4		3
礫	11		5	21	12	3		4	
指標 P の値	2.2	2.0	1.4	2.0	1.4	1.2	1.0		

表-3 文献による吸水率 (%)

	土木地質学 ⁸⁾	土木材料学 ⁹⁾	土木技術者のための岩盤力学 ¹⁰⁾
砂	0.94		
花崗岩質岩	0.64	0.1~0.4	0.45~0.80
片岩	0.51		0.34
片麻岩	0.60		0.26
安山岩	1.29	0.5~6.99	1.14
玄武岩	0.76		
凝灰岩	2.59	1.3~2.0	1.80~2.36

6 流域の地形・地質の特性

標準減減曲線は主として地下水流出を対象としているので、水理地質の観点から次の項目をとりあげた。

(1) 流域平均勾配ⁱ

地下水流出に流域の斜面の勾配が直接かわることはないであろうが、地形は地質によってその形態を変えられ、多くの地下水位測定の結果、巨視的には、地下水面の勾配が地表の勾配に近いことが多いので、間接的には流域勾配が地下水流出に関連があると考えた。

流域平均勾配は地形図から、等高線延長法により求めた。

(2) 流域の地質

地質は地下水の挙動に密接な関わりを持つと推察され

る。しかしながら、地質の地下水流動にかかわる性質を数量化することは、容易なことではない。

そこで、愛知県、岐阜県、三重県、静岡県および埼玉県地質図または表層地質図(土地分類図)一内外地図株式会社製作一から、各流域の地質の分布面積を拾い出したのが表-2である。

各流域共、流量観測地点の上流では岩石が圧倒的に多いので、岩石の水理的性質にかかわる量としては空隙率または吸水率を考え、文献により調べたところ、表-3に示したように、測定値にバラツキが大きく定量的表示に不適当であるため、大まかな表現で検討を進めることとした。まず地質を固結物(岩石)と未固結物とに分け、固結物は密なもの多孔隙のものとの2つに分け、未固

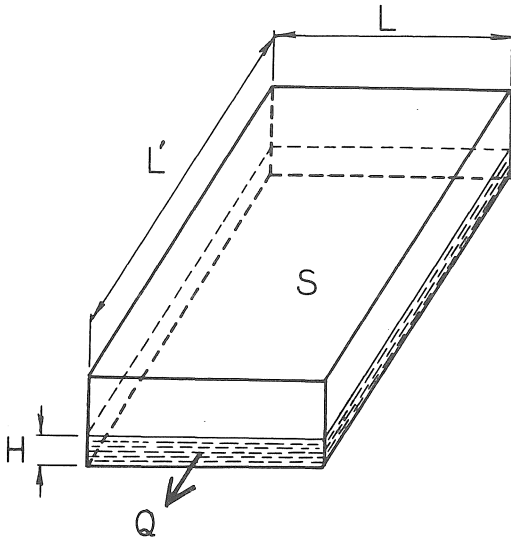


図-14 滞水層の模式図

結の泥を多孔質の岩石と同程度の空隙度とみなして、表-2のように空隙度の重みをつけた。

表-2の地質の分布を示す値に、各々の空隙度の重みを乗じて加重平均を求めた値をPとし、これを流域の地質構造の空隙率を示す指標として用いることとした。Pの値を表-2に示す。

(3) 河川密度・M

地下水流出の逓減の度合は、滞水層の透水性や保水性と共に、その形状や大きさにも左右されるであろう。地下滞水層の形状、大きさ等を直接把握することは不可能に近い。ここでは仮りに一次と二次の河川密度が地下滞水層の大きさに関係が深いと考え、流域の特性を表わすパラメーターとして取り上げた。

6 標準逓減曲線と流域の地形・地質との関係

流域内の滞水層を図-14のように模式化して考える。流量が標準逓減曲線にのるような状態では、滞水層への補給はないものと考えると連続の式は

$$\frac{dS}{dt} + Q = 0 \dots\dots\dots(1)$$

また地下水流は一般に線形性が強いと考えられるので、運動方程式に当る式として

$$Q = \lambda \cdot S \dots\dots\dots(2)$$

を用いるとする。ただし

- t: 時間
- S(t): 滞水層内の水量
- Q(t): 滞水層からの地下水流出量
- λ: 定数

連立方程式(1), (2)の一般解は

$$S(t) = S_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

である。すなわち式(2)の定数 λ は逓減の減衰率となる。ただし S₀, Q₀は積分定数。

上記以外の記号を次のように定めておく。

- H: 滞水層の水深
- v: 滞水層からの流出の流速
- L, L': 滞水層の大きさ (水平方向)
- i, i': 滞水層の動水勾配, 流域平均勾配
- P: 地層の空隙の度合を表わす指標 (前出)
- k: 透水係数

さて、図-14を参照して、

$$Q = H \cdot L \cdot v$$

ダルシー則は当然成立するとして、動水勾配と地表の勾配がほぼ等しいであろうとすると

$$v = k \cdot i = k \cdot i'$$

よって

$$Q = k \cdot H \cdot L \cdot i' \dots\dots\dots(3)$$

また $L \propto L'$ と考え、P という指標は空隙率が大きいと大きくなるようにとってあるから、簡単にPが空隙率に比例するとおけば

$$S \propto L^2 \cdot H \cdot P \dots\dots\dots(4)$$

式(3),(4)から

$$Q \propto \frac{k \cdot i'}{L \cdot P} \cdot S$$

式(2)と比較して、減衰率 λ は

$$\lambda \propto \frac{k \cdot i'}{L \cdot P} \dots\dots\dots(5)$$

このうち滞水層の水平方向の大きさを表わすLは、滞水層からの出口が河川であると考えたと河川密度に関連すると想定されるので、一次と二次の河川密度Mの関数とする。すなわち $L = L(M)$ 。

一方透水係数kは、地質に依存し、この場合指標Pが空隙の度合を示す量であるので、kとPはその増減が一致するような変化の仕方をするであろう。そこで

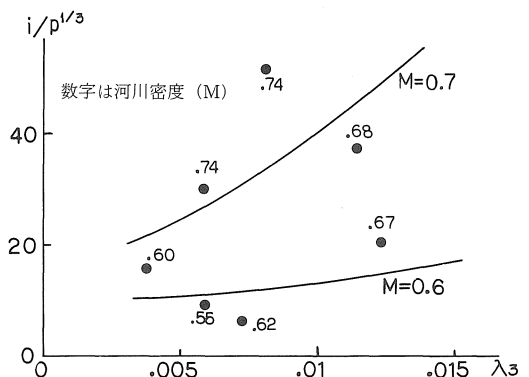


図-15 i' / P³ と標準逓減曲線の減衰率 λ³ との関係

表-4 5万分の1地形図による河川密度(1次・2次)Mと*i'*/P^αおよびλ₃の値

	狩野川 (大仁)	黄瀬川 (本宿)	豊川 (石田)	庄内川 (枇杷島)	櫛田川 (両郡)	神流川 (渡瀬)	塩沢 (塩沢)
河川密度 M (km ⁻¹)	0.60	0.55	0.67	0.62	0.74	0.68	0.74
<i>i'</i> /P ^α	15.6	9.1	20.5	6.3	30.0	37.8	51.9
λ ₃ (day ⁻¹)	0.0038	0.0059	0.0123	0.0072	0.0058	0.0114	0.0081

$$k \propto P^\alpha \quad (\alpha > 0)$$

という形を仮定して式(5)を書直して

$$\lambda \propto \frac{1}{L(M)^\alpha} \cdot \frac{i'}{P^{1-\alpha}} \dots\dots\dots(6)$$

の形で、標準通減曲線と地形・地質の相関性を吟味した。

式(6)で、Mをパラメーターとし、αを種々に仮定して、λと*i'*/P^{1-α}の関係を描くと、αが1/2~2/3のとき一定程度の相関があることが示された。表-4および図-15に、α=2/3としたときの各流域の(*i'*/P^{1-α})とλの値を示す。

この結果から見て、標準通減曲線と流域の地形・地質がかなり密接な関係にあることがうかがわれ、今後流域の地形・地質の特性を表わす指標、特に地層の空隙度を表わす指標を改善することにより、また数多くの流域について信頼できるよう流量資料を収集することにより、さらに良好な相関の得られる可能性のあることが推察される。

7 まとめ

流域固有の標準通減曲線が存在することを、神流川試験地流量資料の経年的比較および地下水位と流量との関係により確かめた。またこの曲線が流域に固有のものであることは、流域の地形、地質との密接な関係の存在を意味するという推定のもとに、標準通減曲線の減衰率と地形・地質との関係を求め、定量的な関係を設定しうる可能性を示した。

すなわち低水流量(275日流量)付近でこの標準通減曲線が片対数方眼紙上でほぼ直線に近いので、この勾配(減衰率)と流域の地形・地質特性のうち地形勾配および地

質の疎密を示す簡易な指数から作られた指標との関係を求めたところ、かなり相関性のあることが示された。

これにより流域の地形・地質と標準通減曲線が定量的に結びつく可能性が示されたと見ることができる。

終りにあたって、貴重な観測資料を提供して頂いた建設省中部地方建設局の方々に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 金丸昭治, 高棹琢馬: 水文字, 朝倉書店, 1975.
- 2) 四俣正俊: 洪水流量通減曲線の解釈, 土木学会論文報告集, 第245号, 1976.
- 3) 吉川秀夫, 砂田憲吾也: 洪水流量通減曲線の特性を考慮した流出モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, 第283号, 1979.
- 4) 土木学会: 水理公式集, pp.117~125, 1971.
- 5) C. Tobes and D. D. strang: On Recession Curves, Journal of Hydrology, vol.3, No2, 1964.
- 6) T. Takenouchi and T. Egawa: Variation in Storm Rainfall over Mountainous Basin, E. C. A. F. E., 1953.
- 7) 建設省土木研究所: 神流川流域水文観測資料, 土木研究所資料第324号, 1968.
- 8) 宮崎敬三, 高橋彦治: 土地地質学, 共立出版, p161, 1970.
- 9) 岡田清他: 土木材料学, 国民科学社, 1968.
- 10) 土木学会編: 土木技術者のための岩盤力学, p59, 1966.

(受理 昭和56年1月16日)