

河川流出量分析による浸透能の検出について

正 員 酒 井 一 郎*

LIMIT OF INFILTRATION FROM RUN-OFF RECORDS

By Ichiro Sakai, C.E. Member

Synopsis : Applying the specific base flow curve of a stream run-off, we can devide the run-off into two parts precisely, one the base flow and another the surface flow. In this way, we are able to estimate the rate of precipitation, which causes the surface flow, and the remainder as the "limit of infiltration", from rainfall records.

要 旨 河川特有の基底流減衰曲線を適用することによつて、降雨時の河川流出量を表面流と基底流とに、かなりの精度で分離することができる。これを利用して、分離した表面流に対応する水量を降雨中から求めることが可能であり、したがつてその残余から浸透能の数値を知ることができる。

1. ま え が き

洪水計算において、直接流出の原因となる降水量を求めるに当り、地下に浸透する水量をさし引かねばならないが、従来浸透の限界となる浸透能を実績から検出したものはないようである。

本文では先に報告した河川特有の基底流減衰曲線を使用すれば、表面流と基底流とを、かなり精密に分離することができるので、現場における測水記録を分析して、浸透能を求め得ることを提案する。

2. 河川特有の基底流減衰曲線

河川の流出を、地下水の浸出によるいわゆる基底流と、地下に浸透することなく直接流出する表面流とに分けて考えるとき、前報告に述べたように、地下水量と基底流との間に1対1の対応がある。このことはその後も引き続き確認している所であつて、実に厳重に守られている。この関係を示す基底流減衰曲線（BF 曲線）は、本文に述べようとする浸透能算出にも、その規矩となるもので、この分野の基礎となる重要法則であるから、まずその概要を述べる。

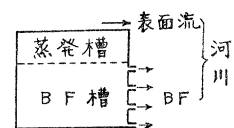
河川流域において、地下水の貯溜される容器は、模型的に 図-1 のように、槽の中に土砂などを充填し、側面に水の浸出を可能ならしめる小孔を多数設けたものと考えることができる。容器内の水位が高いときは流出が多く、水位が低くなると流出が減少することは、当然考えられるところである。このような小槽をあるいは高く、あるいは低く、直列にまたは並列に、流域の形状寸法どおりに多数組合せ配置したものが実際の流域そのものである。かく考えられる流域小槽群のうち1個を単位槽として取りあげて考察するに、各小孔からの流出は時間経過につれて指数関数に近い形で減衰すると考えられ、また、上部の小孔からの流出は急速に減衰し、下部になるほど減衰が緩慢となることも、常識的に受け入れられるところである（実験により確かめることも容易である）。このように考えてくると、これら単位槽の集合である流域そのものの流出が、上記水位（従つて包蔵水量）に応じて、減衰しながら流出するという本質を失うとは考えられないので、その様相を流域の1地点に関し調査して得たのが、BF 曲線である（表-1）。

すなわち、河川の流出は河川ごとに、またその計測地点ごとに固有のものであり、その地点固有の BF 曲線に沿つて減衰する。降雨があれば、その量に応じて基底流は増加し、1時いくらかの表面流をともなうが、表面流は1,2日のうちに減衰して無視しうる程度となり、その後はまた基底流のみとなつて、BF 曲線を辿つて緩慢に減衰する。BF 曲線については、多少は季節的变化を感じられるが、かんがい期間、洪水期間を通じて、かなり長期にわたつて不変であると見なしてよく、この期間における降水分析の有力な規矩とすることができる。

3. 流域の空けきについて

前報告では、上記模型を上下に区分して、流出に関係なく蒸発すべき水を貯溜する部分（蒸発槽）と、基底流用の水のみを貯溜する部分（BF 槽）とに分けて考え、これら両槽の空けき分を“洪水予防ポケット”とし、洪

図-1 河川模型



* 岡山県電気局旭川発電所長

表-1 基底流減衰表 旭川第一ダム

BF 番号	BF 流量	BF 槽 保有水量	BF 槽空けき	流域 標準空けき	同左 換算雨量	記 事
0	85	800	0	0	0	0番は流域が完全に飽和状態のときの流出 註1: BF番号は完全飽和後無降雨の場合の経過 日数に該当する
1	70	715	85	145	11	
2	60	645	155	264	20	
3	53	585	215	366	28	
4	47	532	268	456	35	
5	41	485	315	536	41	註2: 単位は雨量 (mm) を除きすへて個日 $(\frac{m^3}{sec} \cdot day)$ とする 1 個日=86 400 m ³
6	36	444	356	605	46	
7	32	408	392	666	50	
8	28	376	424	721	55	
9	25	348	452	768	58	
10	23	323	477	811	61	註3: 使用例 BF#14 のとき、浸透の範囲内の降雨か 51 mm 降つた場合 71-51=20 BF #2 になる。 (ただし、降雨中も基底流は流出するから、 この降雨終了時には BF #2 と BF #3 と の間になる)
11	20	300	500	850	64	
12	18	280	520	884	67	
13	17	262	538	915	69	
14	15	245	555	944	71	
15	14	230	570	969	73	註4: 流域面積 1 140 km ² ∴ 雨量 1 mm=13.2 個日
16	13	216	584	993	75	
17	12	203	597	1 015	77	
18	11	191	609	1 035	78	
19	10.4	180	620	1 054	80	
20	9.8	169.6	630.4	1 072	81	
21	9.2	159.8	640.2	1 088	82	
22	8.6	150.6	649.4	1 105	84	
23	8.2	142.0	658.0	1 119	85	
24	7.9	133.7	666.3	1 133	86	
25	7.6	125.8	674.2	1 146	87	
26	7.3	118.2	681.8	1 159	88	
27	7.0	110.9	689.1	1 171	89	
28	6.7	103.9	696.1	1 183	90	
29	6.5	97.2	702.8	1 195	91	
30	6.2	90.7	709.3	1 206	91	
31	6.0	84.5	715.5	1 216	92	
32	5.7	78.5	721.5	1 226	93	
33	5.6	72.8	727.2	1 236	94	
34	5.5	67.2	732.8	1 246	94	
35	5.4	61.7	738.3	1 255	95	
36	5.2	56.3	743.7	1 264	96	
37	5.1	51.1	748.9	1 273	96	
38	5.0	46.0	754.0	1 282	97	
39	4.9	41.0	759.0	1 290	98	
40	4.8	36.1	763.9	1 298	98	
41	4.7	31.3	768.7	1 307	99	
42	4.6	26.6	773.4	1 315	99	
43	4.5	22.0	778.0	1 323	100	
44	4.5	17.5	782.5	1 330	101	
45	4.4	13.0	787.0	1 338	101	
46	4.3	8.6	791.4	1 345	102	
47	4.3	4.3	795.7	1 353	102	
48	4.2	0	800.0	1 360	103	

水計算に当つては、降雨から洪水予防ポケット分だけ控除したものが、直接流出の原因となると述べたのであるが、小洪水はこれら両槽を埋めつくさないうちに終了することがあるので、次のように改めたい。

すなわち、降雨はこれら両槽の空けきを、浸透能の範囲内において埋めていき、それに消費せられる雨量がいわゆる損失雨量である。

また用語についても、“洪水予防ポケット”と称えたものを“流域の空けき”と呼ぶことに改めたい。

(1) BF 槽の空けき

BF 槽からの流出 BF は、この槽の貯水量によって決定せられ、その関係はかなり厳格に守られているので、ある時刻の BF から、その時刻の BF 槽の空けきが、ただちに数値をもつて与えられる。図-2 において、曲線 b_1 は BF 曲線であるとする。BF番号 t_1 のとき（この時の BF は線分 $t_1 B_1$ で表わされる）BF 槽の空けきは $0 t_1 B_1 B_0$ で囲まれた面積で表わされる。したがつてこの面積はその時の BF（貯水池流入量）が index となつて、ただちに数値をもつて与えられる（あらかじめ数表をつくることもできる）。

(2) 蒸発槽の空けき

蒸発槽の空けきについては、BF 槽におけるがごとき index が存在しない。また完全に飽和状態になる機会もきわめてまれである（しばしば飽和するならば、その時を起点として、その後の蒸発状況を推定して、空けき容積の概略を知ることのできる）。

推定の一つの便法として、BF 曲線を用いておこなう降水分析の統計から、BF 槽の空けきに対する一定比率

(われわれの場合70%)を求めることができる。ただし、この関係は平均値としては、かなり正確であるが、1回ごとの比率については、その直前の降雨や蒸発の履歴の相違によつて、多少のくるとはまぬかれないと思われる。

降雨や日照履歴などによつて、いかなる補正を要するかは今後の研究にまつこととし、本質的にはこれら両槽の空けきは正比例すべき性質を有するから、ここでは一定比率(旭川についてはBF槽空けきの70%が蒸発槽の空けきである)として取扱う。

4. 損失雨量

損失雨量とは、流域の空けきを充填するために消費せられて、直接流出とならない雨量のことである。本文で提案するところは、流域の空けきがBFをindexとして、大体数値をもつて与えられ、浸透能の範囲内の雨量が、この空けきを逐次充填していくものであること、また浸透能の数値そのものも流域の空けきと対応したものであるという点にある。この構想は、従来の連続降雨時間による浸透能の減衰あるいは累加雨量に対する累加損失雨量などの考え方の工程で起きる不具合を解消する。

5. 浸透能

浸透能が流域の湿潤状態に関係することは明らかであつて、前記模型のごとく考えると、蒸発槽およびBF槽が飽和状態のとき、浸透能は両槽からの放出を補うに止まるから、きわめて小さい(旭川の例ではBF0番を維持するための0.27mm/hrに、降雨中の蒸発量を加えたもの)。

一方流域が乾燥状態(BF番号大)の場合には、かなりの降雨でも、よく両槽に浸透する。降雨と流出とのバランスシートによれば、BF19番では6mm/hrの降雨がほとんど表面流をとまなつていないから、その程度までは浸透しうることがわかる。

このように浸透能は流域の湿潤状態によつて大いに異なるのであるから、なんらかの方法によつて、その状況に到達するまでの履歴を折り込んだものから出発しなければならない。従来、それまでの降雨継続時間によるか、累加雨量によつて浸透が漸減するといった考え方が用いられたゆえんであろう。しかしこれらの方法は、いずれも雨量強度の影響、あるいはいつまで測つて降雨時間をとるかという難点、さらに、そのようにある時間測つて考えたとしても、その考えの出発点の状況に差別があつた場合、それをいかに反映させるかなど、不具合な点があつて、明快な解決は得られないと思う。

本文では、これらを一挙に解決する方法として、流域の状況はBF番号によつて一義的に定義されているという考え方を提案するものである。

(1) 降雨分析による浸透能の判定

分析方法は先に報告した方法による。すなわち図-2において、BF曲線 b_1 に沿うて日々減衰してきた流量が、降雨 R のために増加し、BF曲線 b_2 に移動したとす。移動の過渡期に生じた表面流は面積 S で表わされる。BF槽に供給された水量 B は

$$B = \text{面積 } t_3 B_3 B_1 t_3 - \text{面積 } B_1 B_2 / B_2 B_1$$

である。このとき水量について恒等式

$$R = B + V + S \dots \dots V \text{ は蒸発槽に充填された水量,}$$

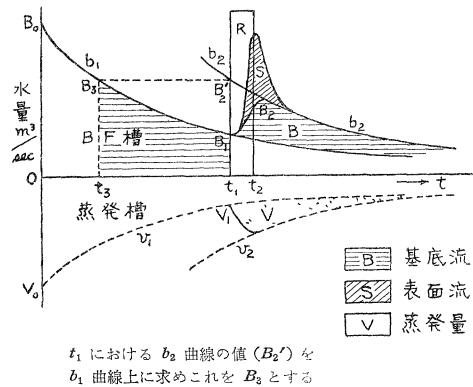
が成り立つことは前報告で述べたとおりである。

もし S が R の1%以下であるならば、その降雨は全く表面流をつくらなかつた…すなわちことごとく浸透したことを事実上証明するものである(1%というのは、いかなる微雨でも直接流出となる比率、すなわち河川流水の表面積の、全流域面積に対する割合である)。

また、もし表面流 S が1%を超えて生じるならば、降雨 R のうち、それだけ浸透しないものがあつたということである。降雨波形が、たとえば図-3における R_1 のごとく、その末尾に強度の強いものを有する場合は、その先端における S と等面積の部分が表面流 S の原因になつたことが明らかであつて、同時にそれ以下の部分はことごとく浸透したと考えざるを得ない。

降雨波形が図-3の R_2 のごとく、降り初めのとき強度が強い場合は、いずれの部分か S の原因となつたか明らかにはしがたい。この場合ある減衰曲線 f で切り、その上方の面積 S が等しくなるようにすれば、この部分

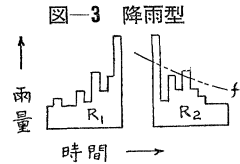
図-2 降水分析図



■ B 基底流
 ■ S 表面流
 ■ V 蒸発量

t_1 における b_2 曲線の値(B_2')を
 b_1 曲線上に求めこれを B_2 とする

が浸透しなかつたと推定できるが（この曲線 f は後述の浸透能曲線から逆算する）このような不明確な点は除いても、多くの降雨例の中には、極端な突出部分がある場合、あるいは最終降雨が特に大きいものなど表面流の原因となる部分が明らかかなものがあるので、これらのみとりあげるることによつて、明確に浸透能の限界をつかむことができる。要するに BF 曲線が相当正確であるから、表面流と BF の分離が正確に実施され、したがつて降雨および流量測定記録から、実際にあらわれた浸透能を分離することが可能である。

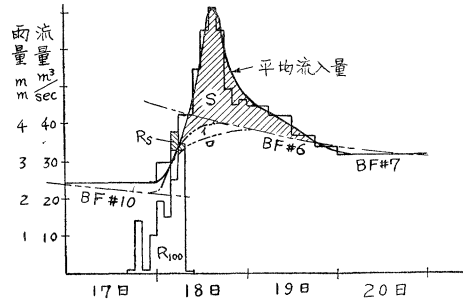


(2) 浸透能の実例

図-4 は降雨の1例(旭川における降雨一連番号100番……

昭和33年4月)から浸透能を求めたもので、実線は貯水池への流入量実測値(上流湯原発電所の影響をさし引いたもの)、破線は基準として用いた BF 曲線である。BFが17日に10番(1日平均 23 m³/sec)であつたことは、それまでの実績から、また18日に5番に移つたことは20日以降の実績を測つて延長することから明らかである。不明確な点は BF が転移するとき、たどる経路が、イとなるかロとなるか、あるいはその中間であるかという点のみである。しかもイとロとの差は僅少であるから、表面流の量は斜線で示される量あるいはそれよりもやや大きいことになる。降雨中の突出部分に表面流と等量の部分を求めて、これを R_s とすれば、 R_s が表面流の原因となつたことが明らかである。したがつてこの場合、BF が5番に達する原因が完了する直前まで、3.3 mm/hr 程度の降雨が流域において浸透したという一つの実績を得たわけである(もしそれ以前の降雨が多少とも表面流の原因となつたと見るならば、実績の表面流は不変であるから、降雨の突出部分の R_s はそれだけ減じて考えなければならぬので、降雨初期に低い雨量強度から表面流を生じ降雨終期において 3.3 mm/hr 以上も浸透し得たという不合理におちいる)。

図-4 浸透能分離法



(3) 浸透能曲線

前項のようにして得た点を多数プロットして、旭川第一ダム地点における流域浸透能曲線を得た。これを図-5に示す。この図では BF 番号相当の標準空げき (BF 槽空げきの 1.7 倍を全空げきと見なす) を、全流域面積に対する雨量 (mm) に換算して横座標にとつてある。

点のバラツキのおもな原因は、降雨が全域に対して均等でない場合があること、および蒸発槽の空げきが標準値からずれていることがあるなどによると思われる。

本資料作製に当つて、降雨は各測点の記録のうち、代表点のものを用いるべきであつて、平均値を用いてはならない。たとえば図-6のごとく A 地点についてはその降雨中 a が、B 地点についてはその降雨中 b が、それぞれの区域の表面流の原因となつたと見るべきである。本図資料としては旭川第一ダム地点の降雨曲線を用い、かつ同一降雨が流域各測点(8地点)に関して、ほぼ等量であつた場合のみを採用した。

図-6 降雨形

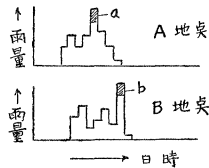
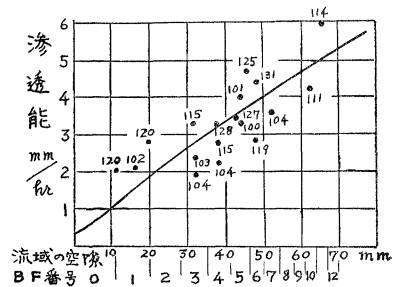
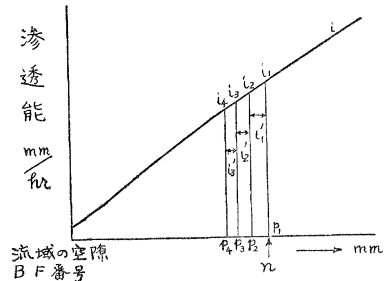


図-5 浸透能曲線



【説明】流域の空げきは全域平均雨量に換算してある。流域面積 1140 km² のゆゑ 1 mm 雨量が 132 個日に相当する。図表中の数字は降雨に付した一連番号である。

図-7 損失雨量の求め方



6. 浸透能曲線の使用方法

この浸透能曲線は流域の空げき(降雨量換算)に対応して求めてあり、流域の空げきはまた BF に対応させてあるから、考察時の BF から、ただちに初めの浸透能が得られる。図-7において、 i は浸透能曲線である。BF 番号 n 、したがつて流域の空げき l_1 のとき降雨が初まつたとする。最初の浸透能 i_1 は曲線 i からただち

に得られる。

初めの1時間の降雨量が i_1 を超過するときは i_1 だけ、また降雨量が i_1 未満であれば、降雨量全部が浸透して、流域の空けきを埋めるから、空けきはそれだけ小さくなる。したがって2時間目の浸透能は、初めの1時間に浸透した量 (i_1') を流域の空けきからさし引いた点 (b_2) に対応する i_2 で表わされる。以下同様にして3時間目以後の i_3, i_4, \dots を得る。もちろん各時間の降雨のうち、その時の浸透能をこえた部分は表面流となるものである。

この方法によつて得た有効雨量から直接流出を求め、これに基底流(浸透によつて増加したもの)を加えることによつて、洪水予想計算を実用上支障のない程度に行うことができる。このことについては別稿をもつて報告する。

7. 結 言

浸透能は流域の湿潤状況に大きく左右される。この計算に当つて、従来、初期条件として無降雨継続時間をとりあげたものなどがあるゆえんであろう。しかし、これは条件の一部であつて全部の条件をとり入れたものではない。筆者は、河川流出量の刻々の数値そのものこそ、その時までのあらゆる履歴を総括した最善の index であることを強調するものである。

流出量を利用することの効果を、実用的に発揮するための定規として、先に、河川特有の基底流減衰曲線を提唱したのであるが、本文では、浸透能に関しても、同じ定規を用いて表面流との分離を行うならば、その数値を実績値として把握できることを述べた。

ただ残念なことは、適用した流域について降雨記録が少く(流域面積 1 140 km² に対して 8 点)、毎時間雨量の記録はさらに少く(5 点)のために、総降水量および最大時間雨量に対して不安があることである。この点将来早急に整備して、さらに完全な数値をたしかめることに努力する決意であるが、今までに得た結果のみによつても、実用上十分の効果があり、治水および給電上大いに役立つ。広く一般に利用せられることを熱望するものである。

参 考 文 献

- 1) 酒井一郎：河川流出と降雨との関係，土木学会誌，第43巻 第4号 1958，p.1～p.8

(昭.34.5.15)