

貯水能を考慮した山地流域の最大流量の略算式

遠 藤 泰 造

1. はじめに

洪水時の最大流量を推定する簡略式に、合理式またはラショナル式^{1), 2)}と呼ばれている式、 $Q = 0.2778 \cdot f \cdot r \cdot A$ がある。この式で、 Q は最大流量 ($m^3/sec.$)、 f は洪水時の流出係数、 r は到達時間の最大雨量の平均強度 (mm/hr)、 A は流域面積 (km^2)、0.2778は単位換算の係数である。洪水時の流出係数とは洪水期間の雨の総量に対する河川の増水総量の割合である。したがって、 f と r との積は有効雨量を意味する。この式は、面積が A の流域に一時間に $f \cdot r$ の降雨があり、これが一時間に全部流出する時の毎秒当たりの流量 Q を示す。

f の値については、物部が1933年に提示した日本内地河川の地勢・地目別の係数値があり、それ以来ずっと使用され、河川や砂防・治山等の参考書にも広く引用されている。物部の示した洪水時の f の値は、急峻なる山地に対しては0.75~0.90、三紀層山丘に対しては0.70~0.80である。

合理式は、地面に降下した雨水が各溪川に流入するまでの時間を無視した、極めて簡単にして相当の効果ある最大流量の略算法であると、この式の提案者である物部が述べているのだから、とやかく文句をつける筋合はないが、合理式では、地面に達した雨水が最寄りの各河道に流出するとき、斜面土層の貯水作用が省略され、 $f \cdot r$ の降雨量が1時間に全部河道を経て流出す

ることになっている。これは雨水流出の実態^{8), 9), 12)}と合わないで、何らかの適正な修正が必要と思われる。

この報告では、急峻斜面からなる山林小流域に対する貯水能を考慮した最大流量の略算式を求め、併せて合理式を再検討して実用に供する。

2. 山地流域に対する f の値

国立林業試験場では、森林測候所の時代より今日まで、山地河川の流量・気象を継続的に観測してきたが、森林測候所時代には岐阜県を流れる根尾川上流の急峻な山地流域 ($166.62km^2$) の流量と降水量を観測している。その観測資料を取りまとめた報告^{3), 4)}に依ると、一降雨量が250~350mmに対する f の値は0.65~0.82である。

同じく、利根川の最上流にある宝川森林治水試験地には、本流 (1906ha) および支流の初沢 (118ha) という試験流域が設けられ、1938年頃から流量・気象の観測が行われてきたが、1938~'48年の観測資料をまとめた報告^{4), 5)}によると、主なる降雨の f の値は、本流が0.43~0.83、初沢が0.31~0.70である。

国立林業試験場山形試験地の1号沢 (3.1ha) と2号沢 (2.5ha) で観測された、1943, '44年および1948, '49年の前・後期各2年の、著しい出水時の降雨量、増水量に関する報告⁶⁾によると、1号沢の f の値は0.29~0.87、2号沢の皆伐前の値は0.47~0.80、皆伐直後の値は0.53~0.90で

ある。前・後両期を通じて、1号沢の森林はそのままであるが、後期2年は2号沢の皆伐直後にあたる。

f の値は、降雨直前の流域の湿潤の程度と一降雨量とに大きく左右されるので、出水ごとに異なる数値が現れるのは当然のことであるが、以上に紹介した国立林業試験場の観測成果は大変貴重なものである。これらの観測成果と対比すると、物部の示した山地流域に対する f の値は妥当な数値であり、流域面積の大小とか地勢と余り関係がなく、山地流域に対する f の値は 0.70~0.90 として良いように思われる。

3. 最大流出率 (f_h)

一出水期間をある単位時間、例えば1時間で細分して求めた時系列を $t=1, 2, 3, \dots$ とし、任意時刻 t の1時間有効降雨量を $r_{e,t}(\text{mm/hr})$ 、同流量を $Q_t(\text{mm/hr})$ 、その時刻の単位時間の終わりににおける流域貯水量を $S_{o,t}(\text{mm})$ で表すと、 $S_{o,t} = \sum_{i=1}^{t-T_l} r_{e,i} - \sum_{i=1}^t Q_i$ である。ただし、 $T_l(\text{hr})$ は降雨流出の遅れ時間を表す。 $S_{o,t-1} + r_{e,t-T_l}$ を見掛けの流域貯水量 $S_t(\text{mm})$ と定義すると、流出の遅れが T_l である流域の出水上昇期に対する指数型貯留関数は(1)式で表される。

$$Q_t = k S_t^p \\ = k (S_{o,t-1} + r_{e,t-T_l})^p \dots\dots\dots(1)$$

ここで k と p とは貯留関数のパラメータである。(1)式で、 Q_t は先行降雨量からの流域貯水量と当該時刻の1時間有効降雨量との和である見掛けの流域貯水量の関数である。いま、 $t-T_l$ 時に1時間最大有効雨量が降り、その T_l 時間後に1時間最大流量が現れたと想定し、この時の $Q_t = Q_m$ 、 $r_{e,t-T_l} = r_m$ 、 $S_{o,t-1} = S_m$ と表し、 r_m に対する Q_m の比を最大流出率 (f_h) と定義すると、 f_h は(2)式で表される。この f_h は確率変数であるが、斜面土層の貯水作用を反映する一因子と考えることが出来る。

$$f_h = \frac{Q_m}{r_m} = \frac{k (S_m + r_m)^p}{r_m} \dots\dots\dots(2)$$

f_h の値におよぼす S_m および r_m の影響を見るために、 $S_m = 0 \sim 50\text{mm}$ 、 $r_m = 0 \sim 100\text{mm/hr}$ という条件を与えて、2, 3の小流域の f_h の値を計算した。その実例として、Fig・1と2に、山形・2号沢 ($k(\text{hr}^{-1}) = 0.0561$, $p = 1.395$) と竜の口山・北谷 (22.6ha , $k(\text{hr}^{-1}) = 0.0326$, $p = 1.516$) との $f_h \sim r_m$ 曲線を示す。ただし、ここでは最大洪水流量に関する問題を取り扱っているので、Fig・1と2には水位上昇域の範囲、すなわち $0 < f_h \leq 1.0$ の範囲の $f_h \sim r_m$ 曲線を示す。

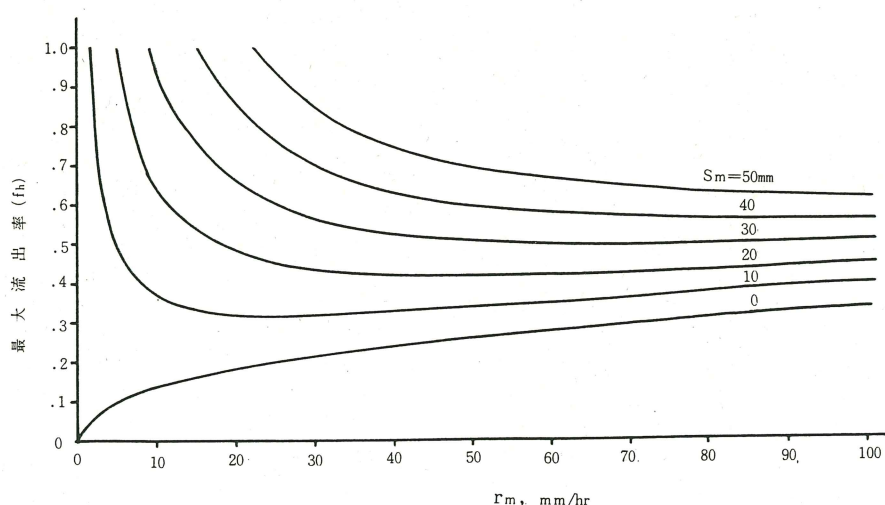


Fig. 1 山形・2号沢に対する1時間有効雨量 (r_m , mm/hr) と最大流出率 (f_h) との関係

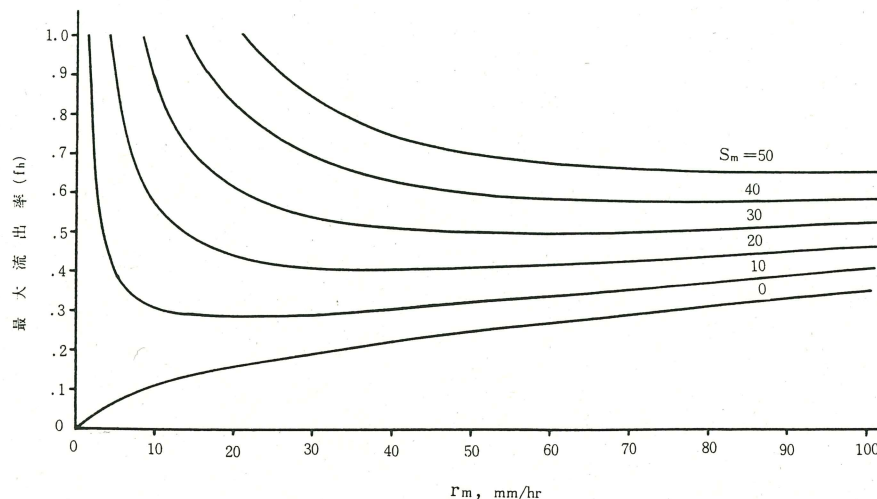


Fig. 2 竜の口山・北谷に対する1時間有効雨量 (r_m , mm/hr) と最大流出率 (f_h) との関係

これらの図から明らかなように、 f_h の値は S_m および r_m の大きさによって異なり、その詳細は図の通りである。 S_m は確率変数であるが、具体的に説明するために、 S_m の上限値を30mmと仮定すると、 f_h の値は、 $S_m=0$ および30mmの $f_h \sim r_m$ 曲線に囲まれた範囲に分布し、 r_m の値が小さいほど S_m の効果が強く効いて広く分散し、 r_m の値が増大すると S_m の効果は相対的に小さくなって中央部に集まる、という傾向が見られる。そして、 S_m の上限値=30mmに対する f_h の値は、0.05とか0.10単位の見方をすると、 r_m の値が約40~150mmでは大体定数とみることが出来る。同様な傾向は $S_m=20, 40$ mmでも認められる。

次に、実測資料から算出された、既報の f_h の値を紹介する。この場合の f_h の値は1時間最大雨量を用いて計算された値で、有効雨量を用いたものではない。合理式中の f は一降雨量に対する流出率を表すが、一降雨中の毎時の f の値を考えると、降雨初期は小さいが、後期には大きくなり、大雨や長雨の時は1.0近くになる。個々の場合によって異なるが、最大流量の算定を目的とする場合、1時間最大雨量に係る流出係数は1.0と仮定してもそう大きな間違いとは思われない。有効雨量の代わりに、1時間最大雨量そのものを使用の方が、実用上は好都合である。また、1時間最大流量とは瞬間の最大流量を挟む1時間流量のことである。

山形・3号沢(1.5ha)では1975年8月5~6日の大雨の時、 Q_m は28.10mm/hr、 r_m は58.5mmであった。この資料から算出すると、 f_h の値は0.49である。

去川試験地の1号沢(6.6ha)、2号沢(9.2ha)および3号沢(8.2ha)で、1968年の大洪水の時の Q_m は41.74、38.00および43.79 mm/hr、 r_m は94.0mm/hrであった。これらの数値から計算すると、それぞれの沢の f_h の値は0.44、0.40および0.47となる。

武田は根尾川や宝川・本流、同・初沢の各出水について、1時間最大流量とこれの誘因となった1時間最大雨量および最大流出率(武田の報告では最大増水率と呼称)を求めている。根尾川や宝川・本流は大流域であるが、参考までに引用すると、根尾川で観測された49出水の f_h の最大値は0.59、そのうちの47出水の f_h の値は0.47以下である。宝川・本流と同・初沢についての f_h と1時間最大雨量との関係をFig. 3に示す。

1時間最大雨量の範囲は8.3~38.7mm/hrでこの範囲の時間雨量に対する f_h の値は0.50以下のものが大多数で、その上限値は、本流が0.49、初沢が0.55である。

注) 林試九州支場防災研究室 竹下 幸技官の提供資料による。

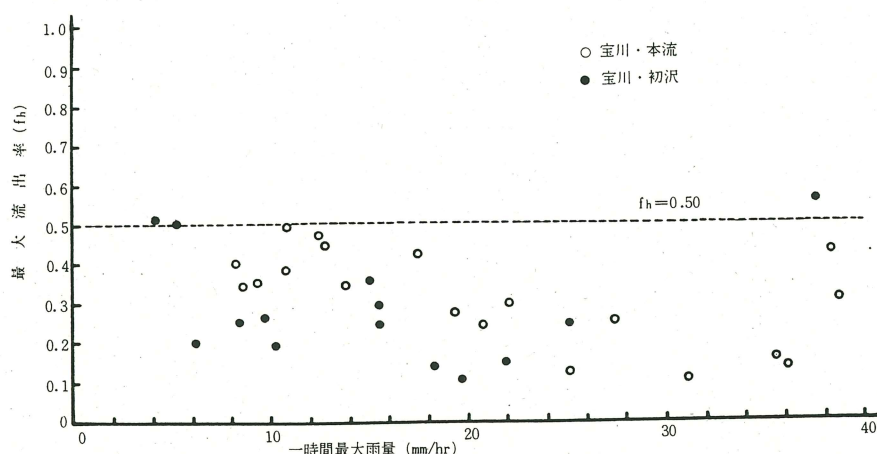


Fig. 3 一時間最大雨量と最大流出率との関係 (宝川・本流, 初沢)

4. ピーク流出率 (f_p)

1時間最大流量を毎秒当たりの流量に換算して求めた1時間平均最大流量に対する最大流量の比をピーク流出比 (n) と名付けると, 10 ha以下の小流域での n の値は1.1~1.3程度である。⁴⁾ 武田によると, 根尾川での n の値は1.10, 宝川・本流と同・初沢のそれは1.20である。大河川ではピーク流量が数時間も続き, n の値は1.0に近くなる。量水堰による水位観測の場合は, 堰の形式や静水池の大きさも最高水位の高低に多少影響する。また, 洪水時には流木その他が溢流口を一時ふさぐこともあるので, n の異常値には注意をしなければならない。 n と f_h との積をピーク流出率と定義し, f_p で表す。

$$f_p = n \cdot f_h \quad \dots\dots\dots(3)$$

¹⁰⁾ 藤枝と阿部は竜の口山・南谷 (22.6ha) と同北谷 (17.3ha) で観測された大小の出水について, ピーク60分間雨量とピーク流出量 (ピーク流量を1時間流量 (mm/hr) に換算したもの) とを求め, 両者の関係を谷別に示している。これらの図から主要範囲の各点の値を読み取り, ピーク60分間雨量と f_p との関係を示したのがFig. 4と5である。

両図で, ピーク60分間雨量は10mm/hr前後のものが多く, 30mm/hr台のものは僅少であり, その最大値は南谷では39.2mm/hr, 北谷では31.6mm/hrである。この範囲位での大局的傾向をみると, f_p の上限値はピーク60分間雨量の大

きさに比例して増大するような傾向は認められず, 反対に, 減少の傾向が見られる。Fig. 4と5で, 横軸のピーク60分間雨量は有効雨量ではなく, 実測雨量である。この点は留意しなければならないが, 30mm/hr台以下のピーク60分間雨量に対する f_p の値は, そのほとんどが0.65止まりである。

5. 最大流量の略算式

r_m の値がある大きさ以上となると, f_h の上限値は大体一定となるという理論および, 山形3号沢や去川・1~3号沢の強雨時の f_h , n の値, 宝川・本流および同・初沢の f_h , n の値, 竜の口山・南谷と同・北谷の f_p の上限値を参酌すると, f_h の上限値は0.50程度で, 1時間最大雨量が約100mm/hr以下では定数と見ることができる。依って, 上記の諸流域に対する流域の貯水能を考慮した最大流量の略算式は(4), (5)式のように表される。

$$Q_m = 0.2778 \cdot f_h \cdot r_m \cdot A \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_p = 0.2778 \cdot f_p \cdot r_m \cdot A \quad \dots\dots\dots(5)$$

これらの式で, Q_m は1時間平均最大流量 ($m^3/sec.$), Q_p は最大流量 ($m^3/sec.$), f_h は最大流出率で, その上限値として0.50を採用する。 r_m は1時間最大雨量 (mm/hr), A は流域面積 (km^2), f_p はピーク流出率で, n と f_h との積, n はピーク流量比で1.1~1.3とする。

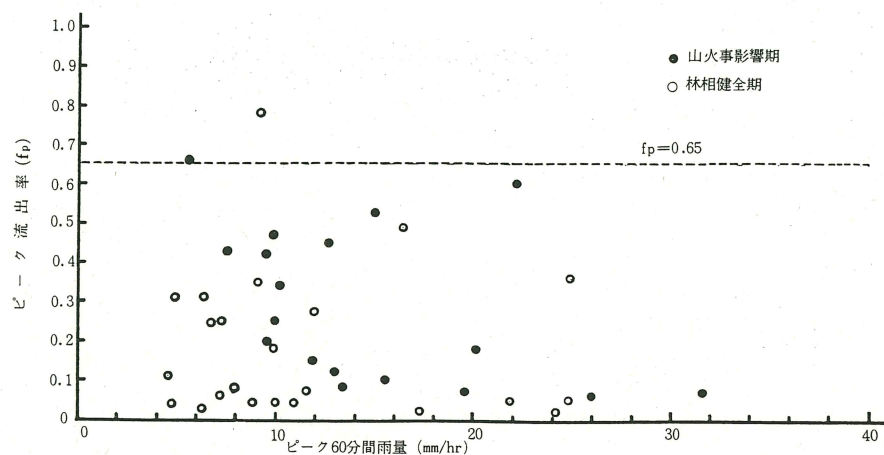


Fig. 4 ピーク60分間雨量とピーク流出率との関係（竜の口山・南谷，藤枝・阿部の報告資料より調製）

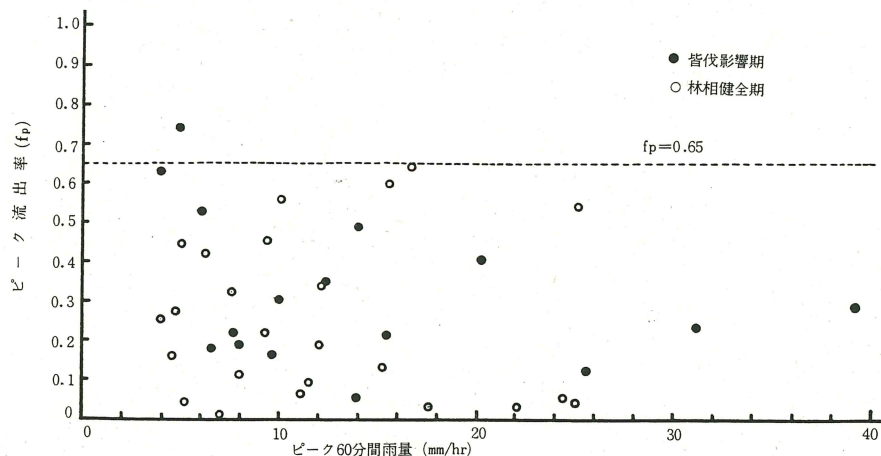


Fig. 5 ピーク60分間雨量とピーク流出率との関係（竜の口山・北谷，藤枝・阿部の報告資料より調製）

6. 斜面の貯水能を考慮した合理式

ここで検討した流域は1.5～22.6haの小流域が主で，この外に，流域面積が118haの宝川・初沢，1906haの宝川・本流の中・大流域の資料も検討した。

小流域の主流長（流域内の最高地点に向かう一番大きな谷底線長）は竜の口山・南谷が0.77km，同・北谷が0.58km，その他は0.19～0.39kmという長さである。

藤枝と阿部は，竜の口山・南北両流域の遅滞時間を30～60分，洪水到達時間を60分と推定している。山形・3号沢や去川・1～3号沢の主流長はもっと短く，その平均勾配は数分の1と大きいので，Rzihaの式やKravenの洪水の到達速度より計算すると，これらの小流域の河道の

最上流点より量水堰までの到達時間は，長くとも数分ということになる。このような斜面流出の支配する小流域より求めた f_h は，見掛け上，1時間最大雨量に対する斜面から河道への1時間流出量の比率を示し， $f_h=0.50$ はその上限値を示すと考えることができる。

合理式では地面に降下した雨が河道に流入するまでの時間は無視され，1時間有効雨量は1時間に全部流出すると仮定されている。大雑把に見て，河道への流入時間は何処の斜面でも同じと考えれば，この時間は省略することもできる。しかしながら，上記の小流域より得た f_h の値より考えると，1時間有効雨量が1時間に全部流出するという仮定は実際と合わない。それで，何らかの適正な修正が必要である。

この場合に最も信頼の出来る修正法は、斜面流出の支配する小流域より求めた最大流出率またはピーク流出率の導入である。合理式を拡大解釈すると、 $Q=0.2778 \cdot f_h \cdot f \cdot r \cdot A$ 、または $Q=0.2778 \cdot f_p \cdot f \cdot r \cdot A$ のように表現できる。そして、急峻な山地や三紀層山丘に対し、合理式では $f=0.70 \sim 0.90$ 、 $f_h=f_p=1.0$ 、斜面の貯水能を考慮した合理式では $f=1.0$ 、 $f_h=0.50$ 、 $f_p=0.55 \sim 0.65$ と解釈できる。結果的には、小流域の観測資料より求めた f_h 、 f_p の値を f の代わりに用いると、合理式がそのまま使用できる。

各流出係数の代表値として、 $f=0.80$ 、 $f_h=0.50$ 、 $n=1.2$ 、したがって $f_p=0.60$ を採用すると、斜面の貯水能を考慮した合理式より求めた1時間平均最大流量と比べて、合理式から算定した最大流量は約60%、同じく最大流量と比べて約33%過大となる。

7. あとがき

流域の貯水能を反映する因子として、最大流出率(f_h)およびピーク流出率(f_p)を用いた。これらの流出率は確率変数であるが、これまでの観測資料によると上限値があり、概数的な表現をすると、理論・経験上、一時間最大雨量の大きさとは無関係な定数との結果を得た。依って、極めて簡単に精度の高い最大流量の略算式を得た。略算式は、経験的には小流域ばかりでなく、宝川・本流のような比較的大流域にも適用できる。斜面流出の支配する小流域より求めた f_h および f_p の値を f の代わりに用いると、斜面の貯水能を考慮した合理式として使用できる。これよりの推定値と比べると、合理式より求めた最大流量は過大傾向を示す。小流域より求めた f_h または f_p の値は洪水流量の軽減におよぼす流域斜面の貯水効果を具体的に示すものであり、これらの上限値を低めに押さえることが水源かん養林の主たる施業目標の一つと思われる。

文 献

- 1) 物部長穂：水理学。岩波書店、350～355、(1933)
- 2) 土木学会編：水理学公式集。120～121、(1971)
- 3) 武田繁後：根尾川根尾量水所観測成績第2回～第5回報告。農林省林業試験場、森林治水気象彙報第14～16号、(1934～1937)
- 4) 武田繁後：昭和22. 11. 15日 利根川大出水時の宝川における増水量に就いて。前橋営林局・林業試験場、13、(1947)
- 5) 武田繁後：年流出量と主なる降雨の増水量に就いて。林試研報、50、1～87、(1951)
- 6) 丸山岩三・猪瀬虎三：釜淵森林理水第一回報告。林試研報、53、1～14、(1952)
- 7) 林試九支場防災研究室：去川森林理水試験地観測報告(1967. 1～1976. 12)。林試研報、317、147～198、(1982)
- 8) 遠藤泰造：水源かん養林の機能理論と施業目標。林試研報、321、1～38、(1983)
- 9) 遠藤泰造・小野茂夫・川口利次：集中豪雨時における山地小流域の貯水量と流量との関係。林試研報、332、1～11、(1985)
- 10) 藤枝基久・阿部敏夫：竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響。林試研報、317、113～138、(1982)
- 11) 菊谷昭雄：山地流域の地形と比流量。水利科学、148、36、(1982)
- 12) 遠藤泰造・北原 曜・真島征夫・阿部和時：緩傾斜林地小流域における浅層地下水位の形成と中間流出。林試研報、334、147～186、(1985)

研究レポート No.13

昭和61年11月12日発行

編 集 林業試験場北海道支場
〒004 札幌市豊平区羊ヶ丘1
電 話 (011)851-4131