

京都大学工学部 正員 石 原 藤次郎
 京都大学防災研究所 正員 岩 垣 雄 一

1. 序論

わが国は地形、気象などの好ましかうぶる環境のために、降水に起因する災害、とくに豪雨によって発生する洪水時の損害が年々莫大な額にのぼり、また多くの尊い人命を失っている。とくに第二次大戦以降は、戦時中の河川維持の不備とともに、不幸にも長期傾向の多雨期にあたり、さうに流域の開発が進んだことなどが原因となって、戦後15年以上も経過した今日においても、その惨状をなくすることは容易ではない。こうした災害をもたらす主な原因は、降雨にともなう出水であり、わが国における最近の水文学研究は、必然的に降雨現象とそれに引き続いておこる出水現象の究明に主眼がおかれたといつてよい。

このような状況にかんがみて、われわれは由良川の大野から地奥より上流約250 kmをモデル流域とし、今日まで約10年間にわたり、各種の水文学観測を実施するとともに、水文学の研究を行なってきた。この由良川を中心としたわれわれの研究は、わが国の水文学研究の先駆をなすものであると考えている。以下ここではとくにわれわれの研究成果についてのみ略述するが、講演時にはわが国の水文学の進歩について全般にわたり述べるつもりである。

2. 降雨特性に関する研究

わが国の出水の主原因は豪雨である。したがって、降雨現象に関する研究は水文学研究の根元をなすものと考えられる。しかしながら、気象学においてすら降雨の真因が十分に解明されていない現在では、降雨量に関する理論的研究を行なうことは非常に困難である。このため、水文学で取り扱われているものは、主として確率的、統計的組織

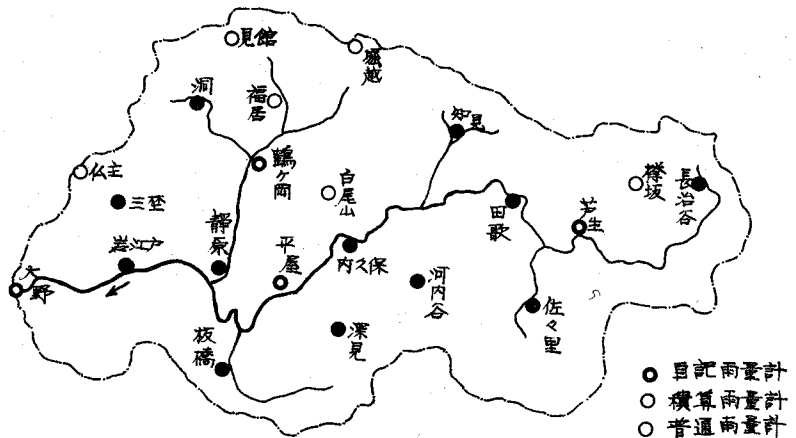


図-1. 由良川流域雨量計配置図

を用い、あるいは経験的事実からいろいろな関係を見出すことである。われわれは図-1に示すように配置した雨量計により得られた記録にもとづいて降雨特性を調べた。なおこの図に示した雨量計の配置は、昨年一部を撤去して観測を中止した当時のもので、当初の観測数はこれより多い。まず、一連の降雨について気象条件別の地域的分布特性を調べたが、その結果一般に認められているように各要因別の降雨特性はほぼ一定していることが

確認された。ついで、こうした降雨特性をさらに詳細に検討するため、気象条件と五つの型にわけ、それぞれの型ごとの標高、地形起伏、方位性、開放性及び地帯性の五つの地形的因子との相関関係を *co-axial method* によって調べたところ、かなり有意の相関があることが確認された。さらに、これらの結果をもとにして、一連の降雨の流域平均総雨量の算定精度について検討した結果、*Thiessen* 法によるときの誤差が±5%以内にあるためには、35 km² に1ヶの割合で観測点を流域に比較的均等に配置すればよいことがわかった。これは菅谷博士による忠別川調査に際しての10~25 km² に1ヶの割合より、かなりゆるい条件である。さらに、現在の流出解析に際してもっとも基本となる流域平均時間雨量の算定精度を調べたところ、いずれの方法とも大差はないが、*Thiessen* 法にもとづく各基地観測所の支配面積についての加重平均によるものが、流出量曲線を算定したときの全般的精度からして、もっとも好ましいことが確認された。なお最後に、この流域の最大可能降水量と山岳性降雨理論による方法で推定してみたが、この方法によってえられた結果が真の最大可能を示すものであるかどうかは大いに疑問である。以上、由良川上流域の降雨特性の一般的調査の結果の概要を述べたが、後述するように洪水流出機構が次々に明らかになり、したがってその算定方法の精度が向上しつつある今日、こうした降雨の地域的、時間的分布特性の研究はますます有意義なものとなり、さらに詳細な研究が望まれるわけである。

3. 雨水の損失特性に関する研究

われわれは洪水流出とその流出機構の相違から基底流と直接流出とに分けて考えている。雨水流出の成分からみれば、基底流は地下水流出であり、直接流出には表面流出、中間流出及び河道降雨が含まれる。直接流出は洪水期間中大きく変化する流出成分である。由良川では基底流はつねに100 mm/sec以下であり、その変化量は直接流出のそれに対してほとんど無視できる程度に小さいものと考えられるので、特別な場合を除いてはいわゆる水平分離法を一貫して採用している。このように、洪水流出を直接流出のみで特性づけようとしたわけであるが、直接流出に対しての降雨の損失は、降雨初期における初期損失と、流出期間中の降雨損失とにわけられる。前者は樹木その他による降雨遮断、凹地野溜などによっておこるものであり、流域の初期の湿润量とも含めて、ほぼ流域特有の一定値となるものと考えられるが、この点についての検討はまだ十分行っていない。現状では、河川流量が増加しはじめ時刻まで降った雨はすべて初期損失となるものとして流出解析を進めている。さらに出水期間中の損失は主として雨水の土中への浸透によるものと解されるので、*Horton* 型の浸透能曲線が通用されるはずである。由良川において求められた浸透能曲線及び初期浸透能回復曲線は、それぞれ

$$f = 0.274(f_0 - 0.27)e^{-0.15t}, \quad f_0 = 4.30 - 4.03e^{-0.0152t}, \quad \begin{matrix} f, f_0; \text{ mm/hr.} \\ t; \text{ hr.} \end{matrix}$$

であるが、このような *Horton* 型の指数関数的関係は雨水の土中への浸透を取り扱うことにより理論的にも証明することができた。このような初期損失及び浸透損失と流域平均時間雨量から差引いたものが、いわゆる有効雨量となるわけである。

4. 洪水の流出解析に関する研究

前節で述べた有効雨量が時間的にどのような割合で懸崖地質へ流出してくるかが災害水文学のもっとも主要な課題であり、われわれの研究も必然的にこの点に主力がおかれたわけである。雨水流出は流域全般にわたる現象であつて、これを水理学的にみれば、上から有効雨量の供給のある山腹斜面上の流れ、河谷内の流れ、地中の流れなど各種の水流が存在し、これらが複雑に組み合わさった現象であるから、厳密な解析はなかなか困難な問題といえる。そこで、われわれは各種の観測から洪水の流出解析の研究を行なつてきたが、その研究方法はつぎの二つに大別される。

(1) 単位図、流出関数などによる流出解析

これは流域内の複雑な諸現象の詳細な検討はともかくとして、有効雨量と流出量との間の関係を経験的に、あるいは若干の水理学的考察によつて推定し、その関係を用いて雨量から流出量を求めようとするもので、単位図法、流出関数による方法などが用いられる。

Sherman によつて提案された単位図の概念は、流出現象の厳密な理論的取り扱いの困難さと工学的実用性に富んでいることなどのために、今日でも流出解析に広く用いられている。単位図の概念は、はじめは経験的事実に基づいていゝといへ、流出の純線型現象とみなすものであり、こうした概念がわが國の河川の流出現象にそのまま適用できるかどうか大いに疑問とするところであつた。このような意味から、われわれは由良川において実測した水文資料によつて、従来の単位図の特性を調べたわけであるが、その結果出水の大小あるいはそのときの出水制御能力の変化によつて、各出水ごとに求められた単位図が異なってくることを確認し、出水の規模が大きく大洪水の場合ほど単位図の peak 流量が大きくなり、かつ早く出現するという事実を明かにした。そのため、単位図のこうした不合理を取り除き、実用的な計算法を見出すよう考案したわけである。すなわち、従来の単位図が出水ごとに変わるのは、現象の非線型特性によるものと考え、このような影響ができる限り取り入れられ、かつ実用性を失なわないような計算法を考案したのである。

その一つは、前述した直接流出と表面流出（狭義の直接流出）と遅滯流出とにわけ、有効降雨のうち遅滯流出となすべき遅滯降雨は、Horton 型浸透能曲線と同様の指数式であらわされるとき有効降雨と分離した。そして遅滯流出は現象が比較的緩やかであるとして、従来の単位図法とそのまま採用し、単一の単位図を用いた。表面流出（直接流出）はかなり速い現象であつて、しかも主として流路を流れる水流の特性をもつていゝものと考え、流路を流れる洪水波理論から流出量を算定した。すなわち、由良川のモデル流域と代表的な支川を考慮して四つの部分にわけ、さらに各部分流域について懸崖地質である大野地先への流下距離が著しきような地帯に分割し、各分割線上から流下する出水を線型の洪水波理論から計算し、それらを合計してその支川流域からの流出量とした。こうした計算を各支川流域の河道特性、とくに河床こう配を考慮して行なうわけであつて、ある強度をもつ単一降雨に対する各支川流域からの時間流出量曲線が求められ、これらは降雨強度によつて変化する。このようにして求められた基準時間流出量曲線と降雨の模様によつて適宜合成することにより表面流出量が求められ、これとさきに述べた遅滯流出量を加えると流出量全体の様相がわかるというわけである。この計算法は水理学的には問題点があるが、河床

こう配のみをパラメーターとして基準流出量曲線が求められるという利点があり、われわれはこうした観点からした総合単位図の研究を行ない、注目すべき成果をえた。

他の一つは流出関数の適用である。流出関数としては、Horton の貯溜方程式を考慮して Pearson 型類似の指数関数を主体とし、表面流出終了後を指数減衰関数で置換した複合指数関数を用いた。すなわち、実測値を参照してこの流出関数に含まれる特性値と降雨強度との関連において決定し、有効雨量が与えられたとき、各単位時間降雨（由良川の場合は2時間）ごとに強度に応じて流出量を算出してそれらの結果を加え合わせ、全体の hydrograph を求めるのである。この方法は近似的ではあるが、単一降雨の降雨強度変化による hydrograph の差異の模様が、前述したような従来の方法で求めた単位図の形状の出水による変化と同じ傾向であることなどから考えて、ある程度流出現象の非線型性がとり入れられていることがわかり、こうした意味でこの方法は注目すべきものであると思われる。

(2) 水理学的流出解析

流域内における雨水の挙動をできるだけ詳細に水理学的に究明して、流体運動として流出現象を明らかにしようとするもので、特性曲線法がその主体である。さきく述べたように流出現象は上から降雨の供給というけながら流下する水流であるから、基本的には横から流出入りのある不足流として取り扱ってよいはずである。そこで、流域モデルとして重要支川を根幹とし、その両側に等値した山腹斜面を付加したものを考えた。斜面は降雨の供給を受け、流路（支川）は基底流量をも含めて斜面からの流出量の供給を受け流す水流とし、水理学的に解析を進めた。計算法としては、こう配が比較的急なため、等流に近い流れとして解析する特性曲線法を提案したが、由良川への適用結果では斜面の等価粗度係数を $1.0 \sim 1.5 \text{ m}^2/\text{sec}$ とするとかなりよく適合することがわかった。また流出の遅延現象は主として山腹斜面であり、流路は合流時差による hydrograph の形状変化に寄与するのみであるという重要な事実を明らかにすることができた。なお、これと同様な考え方にもとづき、流域の表面状態の不規則性や降雨の地域的変動をも考慮して、雨水流出演算用アナログコンピュータの試作に成功し、かなりの精度をもって計算できることがわかった。

また最近では中間流と有効降雨の意義を、特性曲線法によって解明するとともに、単位図法の新しい計算法をも考慮したが、これは別の表題にて本研究会で発表する。

5. 結 語

以上のように、われわれは由良川上流のモデル流域に対する豊富な水文資料にもとづき、いろいろな観点からした水文学研究を行ない、多くの注目すべき成果をえたが、この研究がわが国の災害水文学の進歩と洪水災害の防止軽減にいくらかでも役立てば幸いである。

なおこの研究は文部省試験研究費と京都府由良川水文調査費によって行われたものであり、また多くの研究者と卒業生の協力援助によってなされたとげられたものであることを記し、関係者の方々に厚く感謝の意を表する次第である。