

最近の流出解析モデルについての二三の批判

Discussion on Recent Advancement in Rainfall - Runoff Models

東京工業大学 工学部 日 野 幹 雄

Hino, M., Tokyo Inst. of Tech.

1. はじめに

最近、水文学は国の内外において新たな発展の時機を迎えつつあるように思う。日本においては菅原の提案になるタンクモデルの合理化の動きと、1960年代後半から1970年代にかけて展開された確率過程水文学の物理過程への関連の追求である。すなわち、流出解析に関して展開されつつある最近の一群の研究は、降雨-流出の予測にある程度の成功をおさめた概念的（ある意味ではブラック・ボックス的）なモデルの物理性を求めようという方向を目指していると云えよう。

他の一つは、米英の地質学系統の研究者を中心とする流出の物理的ないしは地質学的素過程の実測的研究で、その一つの成果が partial source area concept である。（これらの成果は、最近 Kirkby (編) (1978) “Hillslope Hydrology” としてまとめられた。）

これらの諸研究は、当人達が意識するとしなにかゝらず互に関連しているし、しかも発表の前後関係と系統上の前後関係は必ずしも一致していない。本小論は多くのモデルが提出されつつある現在、こうした研究段階の中ほどにおいてそれらを整理し分析し、若干の批判をしつつ、今後の方向を探るうとするものである。

2. 単位斜面流出から実流域流出への変換——分布定数系から集中定数系への変換——

流出機構を基礎的に説明しようとする試みは、決して新しいものではない。1950年代水文現象を水理学的に解明しようとした dynamic hydrology は、単一斜面上の流れの解析におけるいわゆる kinematic wave theory を生んだ。この流れは単一斜面上の降雨と流出についての室内実験による研究とそれと比較すべきコンピューター実験へと発展し、さらに日野・難岡 (1978) による Wiener-Hermite 展開による非線型核の解析的導出と進んだ。

こうした流れの研究の結果生じた疑問の一つは、矩形の単一斜面での単位流出図と現実の単位流出図（上昇時には急で通減部のゆるやかで滑らかな単位流出図）との違いである。こうした理想的単一斜面と現実の斜面のユニット・グラフの差異について平野・伊東 (1978) は到達時間分布の考えを導入し、見事に説明した。平野の考え方は流域の平面構造を流出現象に結び付けたものとして高く評価しえよう。また、別の表現をすれば分布系 (distributed system) の集中系 (lumped system) への変換の説明の成功である。

平野に続いてこの種の様々な提案 (山田 1981a, 藤田 1981) がなされているが、これらは流出系を線型サブシステムの集合として捉えている点で、一つの表現上の共通性をもっている。流出系を多数の（極限的には無数の）それぞれ異なる特性（時定数）をもつサブシステムの集合として表現しうるのでないかとの主張は、すでにかなり早い時機に四俣 (1976) によりなされている。彼は流出図の数学的な表現法の分解からこの考えに達したものであり、これは平面的地形構造あるいは地層構造と関連すると考えているが、これを具体的に地形あるいは地層と結び付けるところまで行かなかつた。しかし、その着想は見事でありこの考えはのちに山田に引きつがれている。

以上のことから流出現象の課題の一つである‘基本現象（単位現象）と実際現象の定性的不一致’は平野の到達時間分布の考え方により説明しえたと云えよう。残る一つは、定量的な説明である流水系の非線型性の説明である。

3. 多層構造の線型集中定数系モデル

実用性という点からすれば、最も成功したと思われる菅原のタンク・モデルは、一方においてモデルの中の多数のパラメーターをいかに決定(同定)するかという問題をかゝっている。これに関して、角屋ら(1978, 1979)は最適化理論の応用を試みたのに対して、吉川ら(1979)は流出系の物理構造に着目し、これを地表・中間・地下水の三成分より成るものとし、洪水の通過部の曲線を利用してそれぞれのサブシステムの応答パラメーターを実データより決定する方法を提案した。

一方 stochastic なアプローチをしていた日野・長谷部(1979, 1980)は、すでに日野や橋本(1977)により見出されていた降雨と流出との間の coherence による流出成分の分離周期の決定、数値フィルターによる流出成分の分離法より、各成分に対する AR モデル fitting から流出サブシステムの特性の同定および降雨時系列の逆推定法(逆探法)を提案した。かつ、その副産物として、降雨の非線型分離則を実証しえた。

そして、これらの研究の結果、各流出成分系はほぼ線型系として取扱えることが明らかとなった。

4. 降雨一流出現象の非線型とは何か

一般的に云って、線型性を定義することは簡単であるが、非線型性を具体的に定義することは難しい。それは非線型性の出現の仕方の多様性による。

さてわれわれは、水文系(降雨一流出系)の特徴はその非線型性にあると良く云う。しかし、その中身は何んであろうか?“降雨が m 倍になれば、(i)流出ピークは m 倍以上となり、(ii)ピークに達する時間は早まる”と云われる。(こゝに云う降雨は有効降雨と考える。)前者は降雨強度に対する非線型性と云えよう。石原・金丸(1956)は降雨条件によるユニット・グラフの差異を指摘しているが、これは(i)に当る。ところで、もし図-1のように単位有効降雨とその二倍の降雨による流出と、強さが2倍で継続時間が半分の降雨の継続時間が二単位続いた場合の流出を、単位応答の重ね合せて説明することはできないであろう。単位時間のとり方によるユニットグラフの差異は Newton・Vinyard(1967)により指摘されている。私はこれを「降雨の継続に対する非線型性」という。では、こうした非線型性は何に由来するものだろうか。

もし、流出の主な成分が狭い意味での(文字どりの)表面流出であるならば、開水路流れの非線型性として、これを説明しようと考えられて来た。しかし、近年の現地観測や室内実験および流出解析理論は、これに対して否定的である。なるほど partial source area concept は狭い意味の表面流出を認めているが、これは必ずしも流出の非線型性を主張しているのではない。

しかし、一方において流出の非線型性は否定しえない事実である。否、最大の課題である。ところで、平野の理論により、分布定数系の集中定数系への変換は一応成功したと云えるから、流出系を集中定数系として取り扱うことは認めよう。そうした上で、流出系の非線型性の問題に入ろう。すでに述べたように、表面流出は開水路流的なものではなく表層上や落葉・腐蝕土などの表面層を流れる流れてこれを線型系と考えることは認められよう。ましてや、中間流出や地下水流出には強い非線型性は無いであろう。もつとも、樹根孔や獣虫孔あるいは水みちによる早い流出や弱い非線型性は考えられるが、これらは主として浸透に関係し、流下への直接的寄与は少ないであろう。少なくともそれを実証するデータはない。とすれば、流出の非線型性は降雨の各成分

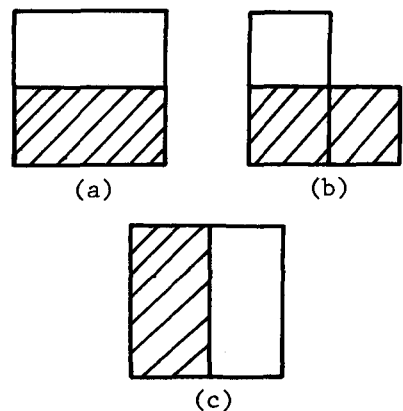


図-1 : (a)降雨強度が2倍になると考える, (b)降雨継続時間が2倍と考える, (c)強さは2倍・継続時間は半分になる場合。

系への分離則にあると考えて良いのではないだろうか。菅原(1972)のタンク・モデルにはこれが組み込まれているし、日野・長谷部(1979)は逆探法により実データから“降雨流出系の非線型性は降雨の成分分離則にある”ことを示した。

5. 地層構造と降雨の成分分離

流出がいくつかの成分(表面・中間・地下水)より成ることは、比較的早い時機から受け入れられた水文学における基礎的概念である。しかし、不思議なことにこれらの成分を野外で実際に測定して確認し実証しようとすることは極く最近になって行われるようになったようである。塚本(1966)による林地斜面における実測はその最も早いものの一つで、かつ秀れたものである。より最近では、岡本(1972)の研究や木村(1978)による推論がある。また、海外でもこのような実測が急に増加し先に述べたように partial source area の考え方も結び付いて新しい展開をみせつつある。もっとも、partial source area の概念は野外におけるミクロな実測の結果としてではなく、普通のマクロな降雨一流出データの解析から一つの推論として Betson(1964)により提唱され、後になっていくつもの小流域で実際にこのような現象が確認されたものである(Kirkby 1979)。

さて、流出解析に流出成分の考え方を積極的に取り入れたのは菅原(1972)のタンク・モデルである。また、高樺・池淵(1971)は長周期成分に Wiener 理論の適用を試みているし、角屋ら(1978)および下垣ら(1979)も流域を小分割し雨水モデルやタンクモデルを組み合わせた方法を展開している。高木ら(1980)は斜面内飽和浸透流の流動基本式のパラメーターの分布 $p(\alpha, \beta)$ を考慮したモデルを提案している。

降雨を成分に分解する際の問題は、降雨をどのようにして成分に分けるかである。多くの場合これは正面切って取り挙げられないし、一定比率として取扱われたりする(岡本, 1979)。以下はこの点を主に二三の方法を挙げて比較検討する。

(a) 地層構造による時定数分布スペクトル

先に、流域の平面構造による到達時間の分布スペクトルを考え、これと斜面長分布との対応から単位斜面上の流出を重ね合せたと同じように、地層の深さ方向の透水特性の差による到達時間あるいは応答時定数の分布スペクトルを考えれば、地層構造を考慮したモデルとなる(山田, 1981b)。これをシンボリックに表わせば、

$$Q(t) = \int_0^\infty \varphi(T) \int_0^t F\{u(\tau, T), r(t-\tau, T)\} d\tau dT \quad (1)$$

ここに、 $\varphi(T)$: 時定数スペクトル、 $r(t)$: 降雨、 $u(t)$: 応答関数。

しかし、この場合には流出の時定数分布スペクトルは降雨の影響を受けるわけで、もしそれを考慮しなければ線型モデルとなってしまう。したがって、式(1)は一つの形式表現である。時定数分布スペクトルを地形的にも地層的にも定義することも考えられるが、非線型性の問題はそのまま残る。

(b) 各成分系への越流形降雨分離法

これに対して市川・砂田(1980)は降雨は時定数の長い方の系から順に各成分に振り分けられると考えた。すなわち、

$$Q(t) = \int_0^t \left[\sum_{k=0}^i h_k(\tau) r_{0k} + h_{i+1}(\tau) \{r(t-\tau) - \sum_{k=0}^i r_{0k}\} \right] d\tau \quad (2)$$

ここに、 $k(=0, 1, 2, \dots)$ は時定数の長いものから順次付される系の番号、 i は時刻 $\tau-t$ の関数で、

$\sum_{k=0}^i r_{0k} < r(t-\tau)$ となる最大の系番号、また各系の単位応答は式(3)である。

$$h_k(\tau) = \left(\frac{1}{k}\right)^n \tau^{n-1} e^{-\frac{\tau}{k}} / (n-1)! \quad (3)$$

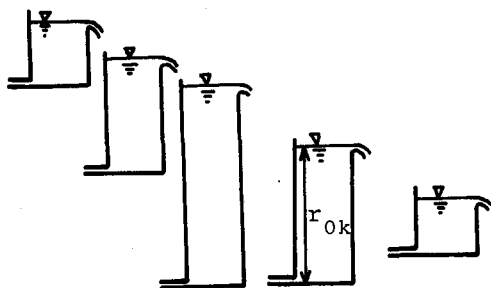


図-2：越流型の降雨分離法

これは吉川・砂田・フン（1979）の解析における降雨の成分分離法を成分を三成分から多成分へ上げ、スペクトルの数式表現としたものであり、実測データからいくつかの流域における時定数もしくは番号 k と分離パラメータ r_{0k} との関係を求めた。

この考えによれば、降雨が強くなれば次々と早い流出成分へと降雨が配分されるから、確かに降雨の強さに対する非線型性を説明しうる。しかし、この考えによれば、単位時間内に各成分へ配分された降雨はその流出計算の単位時間のうちに系外に流出し、次の単位時間にはまた新たにその層の能力いっぱい降雨配分を受けることになる。流出時間の短い成分にはそれは認められようが、流出時間の長い成分についても成立するかどうか検討の余地がある。そのためには第 k 成分への浸透能 r_{0k} がその成分系の初期流出量 $u_k(0)$ に比べて十分小さいか、あるいはその成分層の貯留能 S_k や流出能が十分大きく貯留が満杯にならないことが必要である。（しかし、浸透能が小さければ流出能もまた小さいであろう。）

(c) 各成分系の貯留効果を考慮した非線型分離法

これに対し、著者ら（1979）は各成分への配分はその地層の貯留高

$$S_i^{(l)} = \sum (r_i^{(l)} - u_i^{(l)}) \quad (4)$$

の非線型な関数であると考えた。（ここに、添字 l は成分系番号、添字 i は時刻を示す。すなわち、 $r_i^{(l)} = r^{(l)}(i\Delta t)$ 等。）

$$r_i^{(l)} = f_n^{(l)}(S_i) \quad (5)$$

これまでの解析例では日降雨一日流量を対象としており、また降雨と流出の遅れから $r_i \gg u_i$ と仮定して良いので、上式は近似的に

$$r_i^{(l)} = f_n^{(l)}(\sum r_i^{(l)}) \quad (6)$$

となる。

さて、表面よりの降雨の浸透能は時間の経過と共に減少すること、降雨強度が強いほど初期浸透能が高くなることが知られている。したがって、もし降雨強度が弱く浸透能が時間の経過によりあまり減少せず、かつ第 l 層への浸透能 $r_i^{(l)}$ と流出能 $u_i^{(l)}$ が

$$r_i^{(l)} \leq u_i^{(l)} \quad (7)$$

であるならば、各 l 層への浸透は一定となるであろう。

$$r_i^{(l)} = \text{const} \quad (8)$$

これは、吉川・砂田・フン（1979）や市川・砂田（1980）のモデルと一致する。

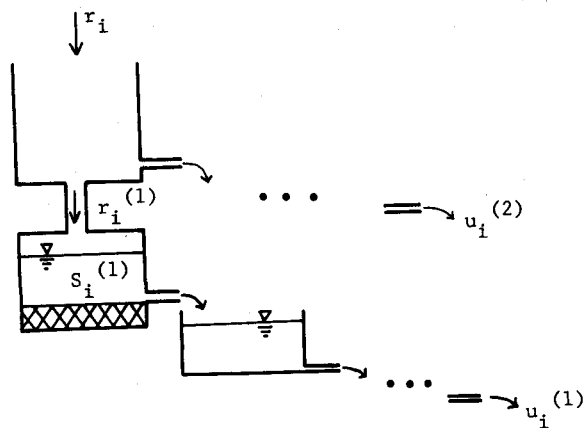


図-3：飽和槽型の降雨分離法

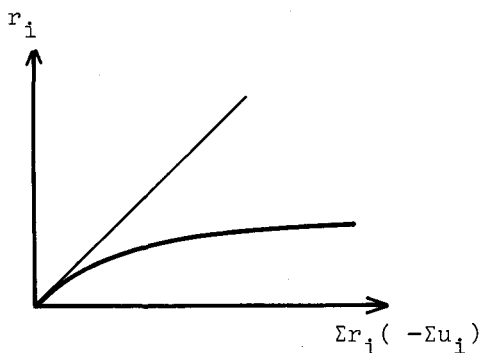


図-4：降雨の非線型分離法

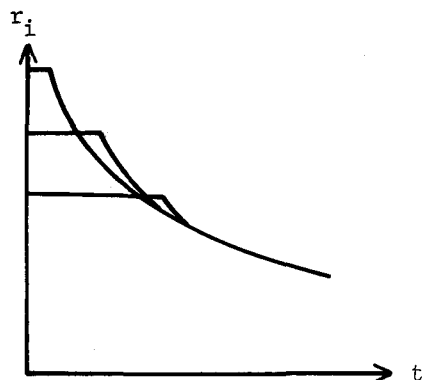


図-5：浸透能の時間的变化と降雨強度の影響

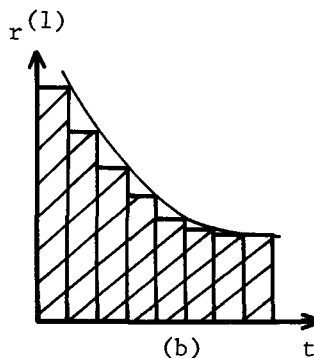
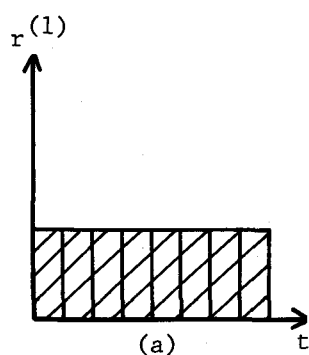


図-6：地下流出成分への分離降雨と継続時間の関係。(a)降雨強度が弱い、(b)降雨強度が強い。

ところで、降雨強度が十分高いとどうであろうか。地表からの浸透能は降雨開始後急速に減少し、下の層の貯留槽が一杯になることで、つまり、下の応答の時定数あるいは周期の長い層が満杯になり次第順次上の層へと一定量浸透するということとはできなくなり、図-6(b)のようになるであろう。事実われわれの逆探法によるデータ解析からこのような例が見出された(Hino and Hasebe 1980, 原・日野・長谷部 1980)。これについては機会を改めて報告したい。

また、著者ら(1980)は時間降雨の成分分離を逆探法で調べ、地下水成分のような長い時定数をもつ成分では降雨は一旦非線型フィルターで分離されたのち、伸張フィルターを通ったと解釈しなければならないことを見出した(日野・長谷部 1980)。これが地層構造や浸透機構とどう結び付くのかは今後の課題である。このようなマクロな水文現象の解析とミクロな水文機構との関連を具体的に探る方向を、私は Physical Hydrology と呼ぶことにしたい。

参考文献

- (1) 藤田睦博(1981)：斜面長の分布を考慮した貯留関数法に関する研究，土木学会論文報告集(投稿中)。
- (2) 原 輝彦・日野幹雄・長谷部正彦(1980)：流量時系列のみによる流出解析法(逆探法)の時間単位水文データへの拡張，第35回年講，第2部，p.207-8。
- (3) 長谷部正彦・日野幹雄(1979)：特性関数法による非線型流出系の流出スペクトルの理論，第34回年講，第2部，41-2。
- (4) 橋本 健(1977)：流出成分を考慮したGMDHによる低水流出予測，第21回水理講演会論文集。

- (5) 日野幹雄・長谷部正彦(1979):流出時系列のみによる降雨時系列,流域の流出特性および流量分離の推定について,第23回水理講演会論文集.
- (6) Hino, M and Hasebe, M (1980):Further test of applicability of the inverse detection method and extension to hourly hydrologic data, Proc. 3rd Int. Symp. on Stochastic Hydraulics, 129-140.
- (7) 日野幹雄・長谷部正彦(1980):洪水をもたらす豪雨の逆推定,第17回自然災害科学総合シンポジウム論文集, 1980
- (9) 平野宗夫・伊東尚規(1978):到達時間の分布を考慮した流出解析,第22回水理講演会論文集, 197-202.
- (10) 市川良輔・砂田憲吾(1980):流出成分分離モデルのパラメータと流域特性,第35回年講,第2部, pp.215-6.
- (11) 石原藤次郎・金丸昭治(1956):降雨条件の変動による単位図の特性について,土木学会論文集,第32号.
- (12) 角屋 睦・福島 晟・佐合純造(1978):丘陵山地流域モデルと洪水流出モデル,京大・防災研究所年報 No. 21, B-2, 219-233.
- (13) 吉川秀夫・砂田憲吾・グエン・ソン・フン(1979):洪水流量逓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, No.283.
- (14) 木村俊晃(1978):貯留関数法の最近の進歩,第22回水理講演会論文集, 191.
Kirkby, M. J.(editor)(1978):Hillslope Hydrology, John Wiley.
- (15) 松林宇一郎・高木不折(1980):地形・地質特性の分布と貯留-流出関係について,第35回年講,第2部, pp.173-4.
- (16) 永井明博・角屋 睦(1978):洪水流出モデルの適用比較——丘陵山地流域及び市街地流域を対象として——,京大・防災研究所年報 No. 21, B-2, 235-249.
- (17) 永井明博・角屋 睦(1979):流出モデル定数の最適化手法,第34回年講,第2部, 49-50.
- (18) 中野秀章(1976):森林水文学,共立出版.
- (19) Newton, D.W. and Vinyard, J. W.(1967): Computer-determined unit hydrograph from floods, J. Hydr. Div., ASCE, Vol.93, No. HY5, 219-235.
- (20) 岡本芳美(1972):山腹における降雨の浸透と流下について,第16回水理講演会論文集.
- (21) 岡本芳美(1979):日本列島の山林地流域における降雨の洪水流出現象についての研究,土木学会論文報告集, No.280.
- (22) 四俵正俊(1976):洪水流量逓減曲線の解釈,土木学会論文報告集, No.245.
- (23) 下垣 久・白水清志・磯部明久・秋元 保(1979):試験流域における降雨・流出解析,第23回水理講演会論文集, 205-210.
- (24) 菅原正己(1972):流出解析法,共立出版.
- (25) 高埴琢馬・椎葉充晴(1976):河川流域の地形構造を考慮した出水系モデルに関する研究,土木学会論文報告集, No.248, 69-82.
- (26) 塚本良則(1966):山地流域内に起る水文現象の解析,東京農工大学農学部演習林報告,第6号.
- (27) 山田 正(1981a):山地小流域の瞬間単位図と斜面長分布の関係,土木学会論文報告集, No. 306.
- (28) 山田 正(1981b):時定数スペクトルを用いた山地小流域の洪水流出解析,土木学会論文報告集(投稿中).