

米国における水文学の研究動向

角 屋 睦

RECENT TREND OF HYDROLOGIC STUDIES IN THE UNITED STATES OF AMERICA

By *Mutsumi* KADOYA

Synopsis

A recent tendency of hydrologic studies in the U.S.A. is viewed here in brief based on various publications, some of which were obtained when the writer has stayed at the Massachusetts Institute of Technology as a visiting engineer. This description consists of the following items: concept of system hydrology, parametric hydrology containing physical and system approaches, stochastic hydrology and the methodology for hydraulic planning.

はじめに

近年の、そして今後予想される水需要の急増、他分野における情報工学的手法・OR 的手法の活発な研究とあいまって、水問題研究の重要性が再確認され、その基礎となる水文学の研究も、国内外を問わず数多く行なわれるようになってきた。この間において地球上の水循環研究の重要性が再確認されるとともに、これを一つのシステムとみなして複雑な水文現象を思いきって数学的にモデル化し、部分システム、総合システム間に内在する基本的な一般法則を抽出していこうとする動き、現象の確立的側面より接近していこうとする動きが、1960年前後より活発にみられるようになり、それぞれ parametric hydrology group (1964), stochastic hydrology group (1965) の国際的研究グループの発足をみるに至った。こうした動きと相前後してアメリカ土木学会 (ASCE) 表面水の水文委員会では1963年頃より水文学研究の分類を試み、1965年従来の synthetic hydrology の名称を廃止して新たに parametric hydrology と stochastic hydrology の名称を正式に提案¹⁾した。前者は水文事象に含まれる物理的パラメーター間の関係を追求し、それらを利用して水文諸量を模擬発生ないし総合化する研究分野、後者は水文事象の確率的性質を追求し、それを巧妙に利用して水文量時系列の再配列、未観測部分の模擬生成その他の利用を行なう研究分野と定義されている。むろんこれらの分類に異論が全然ないわけではない。1967年コロラド州立大学で開かれた国際水文学シンポジウム (IHS) では、deterministic (parametric, dynamic, physical or analytical) hydrology, stochastic (statistical) hydrology および両者の同時適用と3つに分類した。むろん研究に学問的境界はなく、分類は便宜的なものであるから、すべての水文学的研究を parametric hydrology と stochastic hydrology のいずれかに分類することはむづかしいが、こうした名称はすでに多くの人々によって抵抗なく受け入れられているとみてよいようである。

さてこうした新しい研究動向は、日本にいても文献等を通じて十分知ることにはできるし、またわが国の水文学の研究にもこうした世界的動向が十分反映されているわけであるが、筆者はたまたま昨年9月より1年間アメリカ、オランダへ存外研究員として出張し、IHS および ASCE の水文学関係の講演会に出席し、また両国の多くの研究者を歴訪して入手しがたい文献を入手するなど彼等の研究動向の一部を直接知る機会

をもつことができた。ここではアメリカにおける主として1960年以降の各種文献を通して、その研究動向を概観しようと思う。

1. System としての Hydtology の認識

地球上における水の大循環の認識、これは昔からいわれその模式図も多くの成書にいろいろな形で画かれ説明されているが、概念的には Fig. 1 のようにまとめられる。

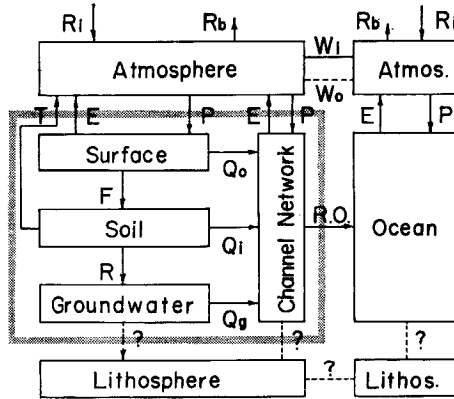


Fig. 1 Schematic diagram of the hydrological cycle.

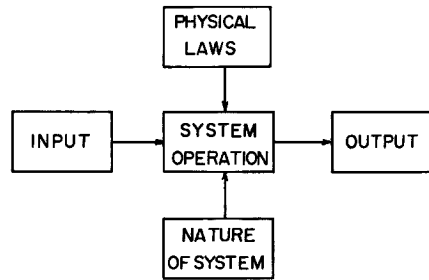


Fig. 2 Block diagram of a system.

一方ある一つの system を考える²⁾ (Fig. 2) と、この system からの output は当然ながら input の性質、system に介在する物理法則と system 自身の性質に依存する。Fig. 1 の薄枠で囲まれたブロックで一つの流域を表わし、これを一つの system とみた場合、physical hydrology の立場で input, output の関係を論じるには Fig. 2 の縦の3つの要素を考慮に入れなければならない。しかし system hydrology では必ずしも system の詳細あるいは物理法則のすべてを包含する必要はない。これらすべてを包含してはいつまでたっても解は求まらず、さしあたりの実用上の要請に応じられないから、包含し得ない要素なしそれを含めた output を stochastic の問題として考えていくわけである。その典型的な例は単位図であって、これは Fig. 2 の横の線だけを考えている。もし単位図法で降水から懸案地点の流出量の予測が十分な精度で行ないうるものであれば、流域の性状ないし物理法則に無関係に単位図法を利用できる。しかし単位図法の適用に疑問のもたれる場合、あるいは総合単位図を求める場合などでは、Fig. 2 の縦の線の吟味が必要となる。なお熱の問題を別にして、地球上の水のサイクルをみた場合、この system を closed system というが、一つの流域では何を考えても open system である。

ところで system approach の問題は、input, spstem, output の相互関係において、Table 1 のように

Table 1 Classification of system approach

Problem	Input	System	Output
Analysis			
Forecasting	given	given	?
Idetification	given	?	given
Hindcasting (Detection)	?	given	given
Simulation	given	?	given
Synthesis	?	Simulated	?

総括される。ここで simulation と synthesis は表裏一体のものであり、狭義の system analysis よりはもっと広い意味をもつものである。

以上のような見方をしてみると、はじめに述べた parametric hydrology と stochastic hydrology の分類、さらには現象の物理的説明を主とした physical hydrology は system hydrology とどのように結びつけられるか、少しあいまいになりがちである。physical hydrology は広い意味をもつ parametric hydrology に含めるのが普通であるが、Amorocho⁹⁾ は水文学研究、方法を Fig. 3, 4 のように総括している。この分類では parametric hydrology をもっと狭義に解釈していることになる。しかし以下では system の認述に必要最小限程度の physical hydrology を parametric hydrology に含めて全般の研究動向を考察することにし、いわゆる気象学、土壌物理学、水理学、地下水学等については殆んど触れないことにしたい。

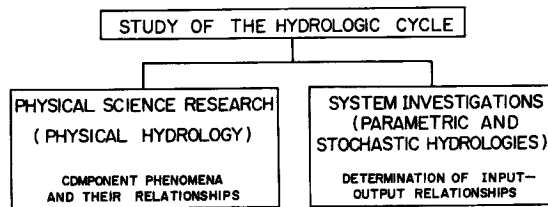


Fig. 3 Divisions of hydrologic study.

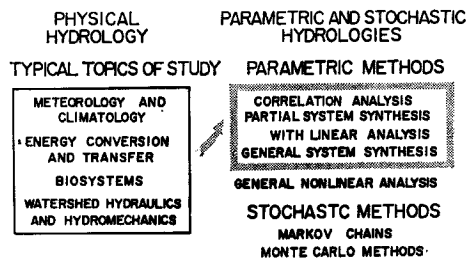


Fig. 4 Topics and methods of hydrologic study.

2. Parametric Hydrology

2.1 Physical Hydrology

2.1.1 降水とその遮断

system への input を知る上において、流域内の降雨特性を知り、雨量計配置の一般法則を得ることは重要な問題であるが、こうした研究は必ずしも多くない⁴⁻⁶⁾。雨量計の配置問題に対して Amorocho らの実証的研究⁷⁾があるが Eagleson は input, output の応答特性を考慮して雨量計、水位計の精度を論じ⁸⁾、また雨量の経験的分布則と流出量の単位図法的特性とを巧妙に組み合わせた雨量計配置に関する統計的一手法を示している¹⁰⁾。実用上これで十分という保証はむづかしいにしろ、その着想には注目すべきものがあろう。また雪の測定に空気機を用いる方法が Penton¹¹⁾ らにより示され、また空中写真による積雪調査も行なわれている¹²⁾。地表に降った降水が樹葉、樹冠によって遮断される問題は、定性的にはともかく定量的な表現は困難であるが¹³⁻¹⁵⁾、雪の遮断を樹冠の直径と関連づけた試み¹⁶⁾もある。

2.1.2 雨水の浸入と蒸発散

土壌中の水の不飽和浸透の問題は Gardner 以来数多く研究され、拡散型基礎方程式に含まれる諸定数の測定法、ガンマー線を利用した実験、電子計算機による拡散型方程式の数値解法の研究など枚挙できない程

である。これらの殆んどは Soil Science Society of America, Proceedings 誌, Soil Science 誌に集中し、最近の Water Resources Research 誌にもかなりの論文がみられる。その中で雨水の浸入・蒸発現象の解明を特に目途とした興味ある研究がいくつか見られるが¹⁷⁻²⁴⁾、いずれも雨水の開放浸透を前提としたものであり、最近空気の閉じ込め問題を扱った Peck²⁵⁾ の試みも基本的にはその線を出ない。こうした動向は、少なくとも現在の時点では、「雨水の不飽和浸入問題を開放性浸透の問題として扱おうとするのが世界的な傾向」と見てよいことを示すものといえるであろうか。

土壌物理面におけるこうした研究は、いずれも理想的な piece-wise 的な段階であり、実用面への応用という点ではなお程遠いという感じを抱かざるを得ないが、こうした意味で、Ibrahim らの研究^{26,27)} は数値解に一般性をもたすべく無次元表示をし、かつ

$$\phi_{rec} = a + b \log t \dots\dots\dots (1)$$

なる形で回復能 ϕ_{rec} を定義しようと試みた異色のもので、今後の研究に一つの手掛りを与えているように思われる。ただしここに a, b は定数、 t は浸透終了時刻よりの時間を示す。

流域よりの蒸発散は土壌水分を無視としては考えられない問題であるが、水面よりの蒸発を扱ったもの²⁸⁻³⁴⁾、海岸地方と内陸での蒸発の違い³⁵⁾、植生を対象とした蒸発散³⁶⁻³⁸⁾、ライシメーターと流域よりの年間蒸発散量を比較したもの³⁹⁾ もある。また Potential Evapotranspiration (PE) の推定法を比較して、低緯度の所では月蒸発散量の推定に Penman の式がよいことを調べたものや⁴⁰⁾、熱収支等を考慮して Penman 法の改良を試みたものがみられる⁴¹⁾。また融雪量の推定に必要な熱放射、融雪のエネルギーバランスの問題を論じたものもみられるが、その数は少ない⁴²⁻⁴⁴⁾。

こうした降水の浸入、蒸発散に関する理論的、実験的研究はいずれ十分な精度で実用化されなければならないが、現在の時点をこれで望むのはあるいは早急すぎるかもしれない。流出量推定のための土湿指数として、アメリカでは依然として API の概念が多く利用されているが、Saxton⁴⁵⁾ らはこれは理論的には ARI でなければならないとして ET モデルを考えている。また経験的な共軸図にいくらか半理論的考察を加えている研究も見られる⁴⁶⁾。浸透能 f の式として本質的には Horton の式と同じであるが、Holton^{47,48)} Overton⁴⁹⁾ は次式を用いている。

$$f = f_e + a(S - F)^n \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 f_e : 最終浸透能、 S : 上層貯水容量、 F : 累積浸透量、 $n=1.4$ 。Huggins⁵⁰⁾ らもほぼ同様の式を用いて流出量を推定しようとした。一方 Bell⁵¹⁾ は浸透能の概念を流出の問題に結びつけるべく、reterivity function, evaporative function の概念を提案しているが、物理性を十分考慮したという著者らの主張は必ずしも納得しがたい。この点 Betson⁵²⁾ の非線形モデルの方が興味深いし、Bouchet の PE 理論を利用した Solomon⁵³⁾ の蒸発に関する半経験的表現は一つの参考になる。雨水の浸入と地下水の recharge⁵⁴⁾、中間流⁵⁵⁾、の研究はあまり多くないように思われる。

2.1.3 表面流と洪水追跡

流域斜面上の流れを水理学的に扱う方法はすでに1954年頃から試みられている。初期の研究は運動方程式を準等流的に扱うもので、特性曲線解を用いる岩垣、末石らの雨水追跡法は周知のことである。このような方法は kinematic wave 法 (一部では hydrologic method と言っている) として今日でもかなり研究されている。Henderson, Wooding^{56,57)} らは Lighthill⁵⁸⁾ や岩垣の方法を単純化して自然流域への適用法を研究しているほか浸透性斜面上の流れなども検討し、この方法の実流域への適用にあたり、流域の幾何学的形状をうまく表現すること、大流域では小支川の適度な lumping が必要なこと、中間流が有意に現われることもありうることを注意している。一方、Ding⁵⁹⁾ は直接積分法すなわち Bakhmeteff の変化流関数を利用して計算する方法を提案し、Morgali⁶⁰⁾ らは貯溜法の形で解くことを考え、これを Stanford Model へ利用している。また Brakensiek^{61,62)} らは地形等高線を利用して複雑な流域を一斜面へ等価化・単純化して kinematic wave 法を実用に供する一手法を示している。

電子計算機の利用が日常化した今日では、流れを非定常流として扱ういわゆる dynamic wave 法の研究も

少なくない。これは非線形偏微分方程式を有限差分形に直して数値計算するのが普通であり、Brakensiek⁶³⁾はその一般方法を論じている。Ragan^{64,65)}は横流入のある表面流の水面形ないし hydrograph の数値計算結果と室内実験結果の両者を対比検討し、Abdel⁶⁶⁾は Izzard の結果を比較し、Manning の粗度係数が適用できるのは降雨初期と減水期に限ると指摘している。Machmeier^{67,68)}は樹枝状構造の hydrograph への効果を調べ、Chen⁶⁹⁾は実流域での観測結果とを対比して、計算上強く現われる非線形効果が実流域ではそれほどでもない述べている。Diskin⁷⁰⁾は塩水を用いて下流への雨水集中の問題を模擬しようとしている。

なお、Woolhiser⁷¹⁾らは dynamic wave 法による解析結果より kinematic wave 法の実用性をも検討し、

$$k = \frac{L \sin \theta}{hF^2} \dots\dots\dots (3)$$

で定義される k の値が $k \geq 10$ ならば kinematic wave 法が実用上十分な精度で使用できるという興味ある結果を示している。ただし上式において L は河道長、 $\sin \theta$ は河道こう配、 h は水深、 F は Froude 数である。

河道の洪水追跡の問題では、横流入を考えずに流下過程中的の変形を調べたもの⁷²⁻⁷⁵⁾のほか、Muskingham 法の改良ないし数表化を試みたものがみられる^{76,77)}。Dooge, Harley⁷⁸⁾の研究は不定流の式を線形化して従来の経験的手法の良否判断の手掛りを与えているが、linear system analysis における identification への接近を試みたものともいえる。

上述の研究とは別に河川の流量測定の見誤差、計器の精度を論じたものもいくつかみられる⁷⁹⁻⁸²⁾。

2.2 雨水の流出—system approach

2.2.1 線形モデル

周知のように linear time invariant system では、Input $x(t)$ と output $y(t)$ との間に次の関係が成立する。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \dots\dots\dots (4)$$

system operation は関数 $h(t)$ によって特性づけられ、 $h(t)$ は impulse response, あるいは system function といわれる。流域が一つの linear system とみなされる場合には、これは瞬間単位図 (instantaneous unit hydrograph) と呼ばれるものである。hydrology system では (4) 式の上下限がそれぞれ有限時間 t および 0 によっておきかえられる。

さて hydrology system を特長づける system function は流域モデルをどのように考えるかにより異なる。もっとも単純で古いモデルは Zoch⁸³⁾によって導入された一つの線形貯水池モデル (linear reservoir model) であって、この場合の $h(t)$ は次式で示される。

$$h(t) = \frac{\nu}{k} e^{-t/k} \dots\dots\dots (5)$$

ここに ν は流出率、 k は時定数ないしは低減係数である。他のモデルと比較のための discrete な場合を表示すると、結局次式を得る⁸⁴⁾。

$$h(n) = \frac{1}{C+1} \left(\frac{C}{C+1} \right)^n, \quad n=0, 1, 2 \dots\dots \dots (6)$$

この式で、 $t=n\Delta t$ 、 $C=k/\Delta t$ とおいて得られる式 $h(n) = (t/n)g(t)$ で $n \rightarrow \infty$ の極限形式を求めると (5) 式が得られる。

一つの流域を一つの linear reservoir で表現するのは不十分として、Nash⁸⁵⁾は Fig. 5 のような p 個の線形貯水池の直列モデルを考えた。この場合の system function は次式である。

$$h(t) = \frac{\nu^k}{k\Gamma(p)} \left(\frac{t}{k} \right)^{p-1} e^{-t/k} \dots\dots\dots (7)$$

$$h(n) = \frac{1}{(C+1)^p \Gamma(p)} (n+p-1)^{p-1} \left(\frac{C}{C+1} \right)^n, \quad n=0, 1, 2 \dots\dots \dots (8)$$

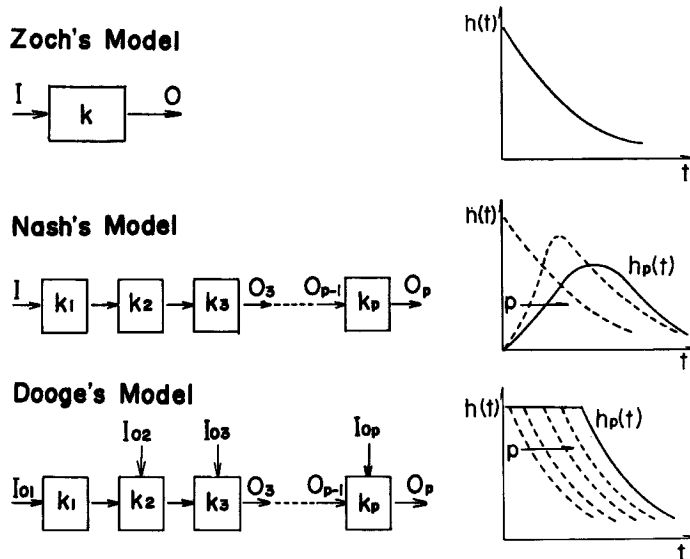


Fig. 5 Conceptual models and their instantaneous unit hydrographs.

これに対し、Dooge⁸⁶⁾はFig. 5のような形で表現できるような線形河道 (linear channel), 線形貯水池の組合せモデルを採用した。この場合 $h(t)$ の表現はむづかしいが、逆 z 変換の形で表わすと次のような形になる。

$$h^*(z) = z^r \prod_{i=1}^p \left(\frac{1}{C_i + 1} \frac{1}{1 - \frac{C_i}{C_i + 1} z} \right) \dots \dots \dots (9)$$

ただし $h^*(z)$ は逆 z 変換記号, r は線形河道の時間遅れ, C は線形貯水池の時定数である。これから $h(t)$, $h(n)$ への変換は一寸むづかしいが、概念的には $h(t)$ は Fig. 5 に示される形をとり、Wooding⁸⁷⁾ が kinematic wave 法を用いて示した解に近いから Dooge のモデルは適切とみなされている。

このほか linear system のモデルとしては Quick⁸⁷⁾ や Jackson⁸⁸⁾ の dissipative model もあり、Jackson は彼のモデルを前述諸モデルより一歩進んだものと主張しているが、基本的には前記3モデルを代表的とみてよいであろう。問題はこのような概念的モデルを用いて与えられた、input に対し output をどの程度実際のそれに近似できるか、すなわち identification の精度である。identification にはいま一つ、model parameter をどのように推定するかの問題がある。これには大別して変換法と相関法がある。Nash⁸⁵⁾ は積率法、O'Donnell⁸⁹⁾ は調和解析法、Levi⁹⁰⁾ はフーリエ変換による方法、Diskin⁹¹⁾ はラプラス変換、Dooge⁹²⁾ は Laguerre 関数による方法を提案しているが、これらは前者の分類に入る。どのような推定法が最適かという判断はむづかしいが、全般に誤差が最小になるようなあてはめかたがよく使われる。こうした観点より Snyder⁹³⁾ は最小自乗法によるあてはめ、Eagleson^{94, 95)} らは時系列論における Wiener-Hopf 式による最適解を求める方法を採用している。これらは相関法に属するとみてよい。

実際の流域では多少なりとも表面流が発生しており、system は本質的に非線形要素を含むことはだれしも異論のないことである。問題はその程度である。簡単な線形モデルで扱おうものなればその方が実用的には好ましいから、もっとこうした問題を検討すべきだという声は昨年の国際水文学シンポジウムでもよく聞かされたし、こうした線に沿っての研究もいくつかみられる^{96, 97)}。また物理的な考察より非線形性を認めながらも peak や面積の分布を考慮して線形化手法をとった Eagleson^{98, 99)} あるいは流れの基礎式を線形化して linear identification の可能性を検討した Barrere, Parkins¹⁰⁰⁾ の研究、さらには積率法の有用性を検討した Diskin^{101, 102)} らの研究も興味深い。

単位図ないし瞬間単位図の parameter を流域特性に結びつけるいわゆる総合単位図的な研究も依然少なくない^{103,104)}。

2.2.2 非線形モデル

1960年以前においては linear system としての単位図の研究が主なるものであったが、室内水路による実験的研究、野外観測等を通じて、次第に非線形効果を無視し得ないことが認識されるようになってきた。たとえば、Minshall¹⁰⁵⁾ は単位図のピーク率、ピーク時間が降雨の強度、形に依存することを試験流域の観測結果より示唆して単位図決定の一方法を提示し、Amorcho¹⁰⁶⁾ Henderson¹⁰⁷⁾ その他^{108,109)} も同趣旨のことを強調している。これは対する接近法としては、実用上線形としての扱いすなわち貯溜法的手法を基礎とし、式に含まれる parameter を修正していこうとする方法¹¹⁰⁻¹¹²⁾ がよくとられており、とくにイリノイ大学関係でこの種の研究が多い。すなわち Laurenson^{113,114)} のように、貯溜量 S と流出量 Q の関係を

$$S = K(Q)Q \dots\dots\dots(10)$$

とする方法、Singh¹¹⁵⁾ のように2つの線形貯水池を線形河道で連結し、かつ parameter を input の関数とすることにより非線形性を導入する方法、Kulandaiswamy^{116,117)} のように流入量を I として

$$S = a_0Q + a_1 \frac{dQ}{dt} + a_2 \frac{d^2Q}{dt^2} + b_1 \frac{dI}{dt} + b_0I \dots\dots\dots(11)$$

とおき、各 parameter a, b を変化させる方法、Prasad^{118,119)} のように

$$S = K_1Q^n + K_2 \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots(12)$$

とおく方法などが研究されている。

このような方法に対し Amorcho¹²⁰⁻¹²²⁾ は Wiener 流の nonlinear system 理論を採用することを試みている。すなわち input $x(t)$ に対する output $y(t)$ を

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{j=1}^n x(t-\tau_j) d\tau_1, d\tau_2, \dots, d\tau_n \dots\dots\dots(13)$$

と表現し、解である system function $h_n(t)$ を Taylor 級数の形で表わすものである。そしてこれに基づいて線形性の一測度を提案している¹²¹⁾。また同じ流れを吸む Jacoby¹²³⁾ は linear system に memory をもった非線形要素をカスケード結合し、linear system には Laguerre 関数列を、nonlinear system には多項級数列を system function として採用する一つの方法を示している。

水文サイクルは本質的に非線形であるだけに、今後こうした研究はますます多くなっていくものと期待される。

2.2.3 Simulation と Synthesis

simulation の方法は直接的、準直接的、間接的の3つに分類される²⁾。いずれも問題を概念的モデルを通して現象を simulate する。

直接的な方法とは、実験室に縮尺モデルを作る、あるいは特定の目的でアナログモデルを作り、現象を simulate するものである。表面流の実験も直接的 simulation の分類に入るべきかも知れないが、ここでは降雨を伴うものに限定する。降雨を室内で発生させて実験したものには Woo¹²⁴⁾ の研究があるが、小さいながらも精巧に作っているのは、Amorcho¹²⁵⁾ Eagleson¹²⁶⁻¹²⁹⁾、Chow^{130,131)} の研究室である。Chow の研究室のはかなり大きく、13m × 13m、前2者は 1~2m² 前後の面積が使用できる程度であるが、いずれも降雨発生装置、計測装置に努力の跡がみられる。コロラド州立大学¹³²⁾ では野外に散水器を設定しているが、精度の高い研究は期待できないように思う。こうした縮尺モデルの実験で問題になるのは相似率である。Eagleson^{126,127)} の研究はあるが、今後に残されている問題は少なくない。

電気的アナログ、Hele Show 装置を用いての準直接的研究は、地下水研究では古くから行なわれているが、近年の問題や研究を総括した Bower¹³³⁾ の報告、縮尺模型実験と併用した報告¹³⁴⁾ などもみられる。

間接的 simulation に属するものとしては、物理的研究成果をも十分利用し、かつ電子計算機による parametric simulation (digital simulation) を行なっているスタンフォード大学の研究が注目される。こ

の研究は降水・浸透・蒸発・流出など流域の水文サイクルを広く含めているのが特長であり、input として日雨量と PE を用いて日流量を発生させた Stanford Model I¹⁸⁵⁾ は、長期の synthesis 精度の点で不十分であったが、平均時間雨量、日蒸発量データを用いた Model II^{186,187)} を経て、表面流について kinematic wave 法を導入し、さらに融雪問題まで組入れた Model IV¹⁸⁸⁾ はかなり精度が高いといわれている。また最近では特定の放射性物質の移動モデルまで、Model IV に立脚して simulate しようとしている¹⁸⁹⁾。この他 Dawdy, O'Donnel¹⁴⁰⁾ は Stanford Model IV を含めて、simulation model の parameter の最適推定法を論議し、Stanford Model IV を単純化したモデルで推定値収束の問題を吟味している。たしかに Stanford Model は parameter の数の多いのが問題であろうが、一概にその可否を論じ得ない。また Fiering¹⁴¹⁾ が西パキスタンの塩害地の農地への復興の問題を計算機を用いて simulate しているものも注目される。これらの simulation とは少し異なるが、hybrid computer による地下水流の simulation を行なった例¹⁴²⁾ もある。

なお stochastic 手法による synthesis 問題は後述する。

3. Stochastic Hydrology

3.1 一変数問題

Yevjevich¹⁴³⁻¹⁴⁶⁾ らは、従来水文学の分野に殆んど応用されていなかった連と範囲の理論を渇水問題へ応用し、連続して渇水が起るような場合の確率評価などに新しい手法を提起した。電子計算機の普及化もあって、年極値水量推定精度を検討しようとする試みもいくつかある。Majumdar¹⁴⁷⁾ は極値分布、対数正規分布、Foster III 型分布について1000個の乱数を用いて適合性を調べた。これに対し Kibler, Yevjevich¹⁴⁸⁾ らは正規乱数を用いてその極値標本を抽出し、これに Gumbel 分布をあてはめ、適合度はよいが、parameter の値がデータ数によって漸変していくと指摘している。しかしこの研究では著者らの水文学における極値分布適用上留意すべき構造把握に不注意がみられる。その他には分布のあてはめ、適合性ないし plotting position を論じた研究が 2, 3 みられる程度¹⁴⁹⁻¹⁵⁴⁾ である。

3.2 相関回帰

相関関係を利用した研究は相当数見られるが、いずれも応用計算であって、新しい手法の開発というものは殆んどみられない。多重相関手法利用上の注意について論じた文献^{155,156)} を 1, 2 掲げておく。

3.3 時系列解析と応用

stochastic hydrology への認識が高まるにつれて数多くの研究報告がある。時系列解析の手法を概述したものの¹⁵⁷⁻¹⁶⁰⁾、水文時系列と太陽黒点数との相関を調べ有意な結論を得なかったもの^{161,162)}、月降水量、日流量、日流量時系列の特性を調べたものなどはかなりあるが¹⁶³⁻¹⁶⁹⁾、いずれも低いレベルの報告である。

これらのものに対し、水文事象の simulation ないし synthesis に関するものには注目されるものが 2, 3 見られる。Matalas¹⁷⁰⁾ らは水文時系列を単純マルコフ型とみて乱数を発生させ、部分和の範囲に関するいわゆる Hurst 効果をも吟味し、Wiser¹⁷¹⁾ は降水現象に関する壺モデルを考察している。河川日流量の synthesis に関する研究はいくつかあり¹⁷²⁻¹⁷⁶⁾、Fiering の成書¹⁷⁷⁾ もあるが、とくに次の研究を代表的なものとして挙げてよいであろう。Ramasseshan¹⁷⁸⁾ は年最大流量を生じる雨量の synthesis に際し、shift analysis と単純マルコフ型 simulation を行ない、Pattison¹⁷⁹⁾ は時間雨量の synthesis に単純および 6 次のマルコフモデルを用いる巧妙な方法を示した。また Grace, Eagleson^{180,181)} は10分雨量の適当な組分けを行ない、系列相関特性、壺モデルを利用して雨量系列の synthesis を行なっている。

一方 Mcgilchrist¹⁸²⁾ らは河川水位のひん度解析に単純マルコフモデルを利用すること、Bagley^{183,184)} は降雨一流出過程に確率過程の概念を導入することを試みている。また Todorovic^{185,187)} の水文現象を再生過程として把握しようとする新しい試みは、水の現象だけでなく土砂移動その他の問題にも拡張できる。さらに異色のものとして Mandelbrot^{188,190)} の self-similar process の考えも面白い。stochastic hydrology 分野における殆んどの研究が従来の時系列の理論の応用の範囲を超えないのに対し、Todorovic や Mandel-

brot の研究には今後の新しい応用が期待される。

4. 水 工 計 画

近代水工計画論の特長は OR 的手法、情報工学的手法を導入して経済的最適政策を確立しようとする点である。parametric hydrology や stochastic hydrology の成果は当然こうした水工計画に反映されなければならないが、最適水工計画の策定には考慮されるべき要素が多く、近年 stochastic synthesis 手法の導入がいくらか見られる程度で、一般的には水文学的情報を簡略化した扱が多い。

さて水資源問題へ最適政策の概念を導入しようという近代計画論の研究としては、多くの分野の専門家を糾合して組織的に進めているハーバード学派の成果が有名であり¹⁹¹⁾、成果をとりまとめた成書もある^{192, 193, 177)}。そしてこの種の研究はカリフォルニア大学その他の研究機関でも行なわれている。とくにカリフォルニア大学ではいわゆる California State Water Project に関連して多くの成果がみられる¹⁹⁴⁻¹⁹⁸⁾。

水工計画への OR 的手法の導入は貯水池問題に多く、待合せ理論や在庫問題の応用が最近でもよくみられる¹⁹⁹⁻²⁰⁵⁾。その代表的なものには Moran²⁰⁰⁾、Fiering²⁰¹⁾ らの研究であろう。Amir²⁰⁵⁾ の研究では Dynamic Programing (DP) の手法も導入されている。水工計画では Linear Programing (LP) で簡明に扱えるような問題は少ないが、適度の近似をおけば、取扱が簡単なだけにかなり複雑な問題まで扱えるのが特長であり、実用上いくつかの工夫がみられる^{197, 206-208)}。これに対し DP の適用は計算が煩雑だけにいろいろの条件を既知ないし単純化して与えることが多い。Hall^{198, 209-215)} らは水路断面、多目的ダム容量の決定やダム操作の問題に DP を適用して多くの仕事をしているが、殆んど計画基準年すなわち与えられた月流入量条件下で行なっている。この方面で比較的早い Little²¹⁴⁾ は stochastic dynamic programing の手法を導入して簡単な水力発電の水使用問題を、Buras²¹⁵⁾ は 2つのダムの同時操作の問題を扱っているが、最近 Yong²¹⁶⁾ は流量 synthesis に関する Fiering らの研究を利用して年単位流入量を発生させていく計算法を示し、これを Monte Carlo DP と名付けている。ただしこの場合給水不足による損失関数を非常に簡単な形に仮定している。Schweig²¹⁷⁾ らは最近 2つの貯水池の連けい操作、Meier²¹⁸⁾ らは DP 法適用上の条件である直列計算法がとれない branching system についての DP 法を示している。交通計画ではよく使用されている Integer Programing²¹⁹⁾ が水工計画に利用された例はあまりみない。

既存の多目的ダムにおける配分容量は一般には変更できないが、最適計画の観点より考えることは可能である。Yong²⁰⁸⁾ は利用目的間の利潤衝突がない場合は利潤最大、衝突がある場合は損失最小の概念で処理する一方法を示している。洪水防御の方法には技術的にいくつかの手段が考えられるが、James^{220, 221)} は洪水調節ダムの計画より water profing, 住民の転地その他を含めた経済的計画の考えを主張しているし、洪水保険を論じた研究もみられる²²²⁻²²⁴⁾。なおはんらん地の改良、被害評価などについてのシカゴ大学の研究²²⁵⁻²²⁸⁾ も注目される。アメリカにおいても多目的ダムの容量配分は、何が社会的に優先するかにより定め、利用目的間の経済比較を行なわないのが通例であるが、最近はレクリエーションのような経済評価のむづかしいものまで評価する方法が検討されてきており、水の社会的価値問題についての研究が最近の Water Resources Research 誌上にもかなり見られるようになってきている。

結 び

以上アメリカで見聞しあるいは入手した文献等を通じて、主として彼地における水文学、水工計画の研究動向を概述したが、文献を入手できなかつたり、見落したりしているものもあり、筆者の勉強不足のため誤解している面もあるかも知れない。また広く概観しようとしたため雑簿なものに終ってしまい、標題に対して適切な内容を持っているかを疑問に思う。この点大方の御叱正を得たい。ただオランダをも含め 1年間の外国生活を通じて、自然的・社会的条件がその国の研究の動向に大きく影響していることを実感として知り、貴重な経験の機を得たことを感謝している。

参 考 文 献

- 1) Koelzer, V.A. et al.: Parametric hydrology and stochastic hydrology. (Report of the committee on surface water hydrology) Proc. ASCE Vol.1 Hy 6, 1965, pp.119—122.
- 2) Dooge, J.C.I.: The hydrologic system as a system. Proc. International Hydrology Symposium (IHS) Vol.2, Fort Collins, 1967, pp.98—113.
- 3) Amorocho, J. and W.E. Hart: A critique of current methods in hydrologic systems investigation. Trans. AGU Vol.45, No.2, 1964, pp.307—321.
- 4) Caffey, J.E.: Inter-station correlations in annual precipitation and in annual effective precipitation. Colorado State Univ., Hydrology Papers No.6, 1965.
- 5) Huff, F.A.: Time distribution of rainfall in heavy storms. Water Resources Research (WRR) Vol.3, No.4, 1967, pp.1007—1020.
- 6) Huff, F.A.: Spatial distribution of heavy storm rainfalls in Illinois. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.47—54.
- 7) Amorocho, J. and A. Brandstetter: The representation of storm precipitation fields near ground level. Jour. of Geophysical Research (JGR) Vol.72, No.4, 1967, pp.1145—1164.
- 8) Amorocho, J., A. Brandstetter and D. Morgan: The effects of density of recording rain gauge networks on the description of precipitation patterns. International Association of Scientific Hydrology (IASH), General Assembly of Bern, 1967, pp.189—202.
- 9) Eagleson, P.S. and W.J. Shack: Some criteria for the measurement of rainfall and runoff, WRR Vol.2, No.3, 1966, pp.427—436.
- 10) Eagleson, P.S.: Optimum density of rainfall networks. WRR Vol.3, No.4 1967, pp.1020—1034.
- 11) Penton, V.E. and A.C. Robertson: Experience with the pressure pillow as a snow measuring device. WRR Vol.3, No.2, 1967, pp.405—408.
- 12) Leaf, C.F.: Areal extent of snow cover in relation to streamflow in central Colorado. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.157—164.
- 13) Helvey, J.D. and J.H. Patric: Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. WRR Vol.1, No.2, 1965, pp.193—206.
- 14) Helvey, J.D.: Interception by eastern whitepine. WRR Vol.3, No.3, 1967 pp.723—729.
- 15) Rogerson, T.L. and W.R. Byner: Net rainfall under hardwoods and red pine in central Pennsylvania. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.55—57.
- 16) Satterlund, D.R. and H.F. Haupt: Snow catch by conifer crowns. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.1035—1040.
- 17) Gardner, W.R.: Some steady state solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci. Vol.85, 1958, pp.228—232.
- 18) Gardner, W.R. and M. Fireman: Laboratory study of evaporation from soil columns in the presence of a water table. Soil Sci. Vol.85, 1958 pp.244—249.
- 19) Gardner W.R. and D.I. Hillel: The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. JGR Vol.67, No.11, 1962, pp.4319—4325.
- 20) Rubin, J. and R. Steinhardt: Soil water relation during rain infiltration. I. Soil Sci. Soc. of Amer. (SSSAP) Vol.27, 1963, pp.246—251.
- 21) Rubin, J., R. Steinhardt and P. Reiniger: Soil water relation during rain infiltration.

- II. SSSAP Vol.28, 1964, pp.1—5.
- 22) Gupta, R.P. and W.J. Stape: Infiltration into vertical columns of soil under a small positive head. SSSAP Vol.28, 1964, pp.729-732.
 - 23) Hanks, R.J. and H.R. Garder: Infiltration of difference diffusivity-water content relation on evaporation of water from soil. SSSAP Vol.29, 1965 pp.495—498.
 - 24) Liakopoulos, A.C.: Theoretical prediction of evaporation losses from groundwater. WRR Vol.2, 1966, pp.227—240.
 - 25) Peck, A.J.: Moisture profile development and air compression during uptake by bounded porous bodies, 3. Vertical columns. Soil Sci. Vol.100, 1965 pp.44—51.
 - 26) Ibrahim, H.A. and W. Brutsaert: The recovery of the infiltration capacity after drainage. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.227—234.
 - 27) Ibrahim, H.A. and W. Brutsaert: Intermittent infiltration into soils with hysteresis. Proc. ASCE Vol.94, Hy.1, 1968, pp.113—137.
 - 28) Roberts W.J. and J.B. Stall: Computing lake evaporation in Illinois. WRR vol.2, No. 2, 1966, pp.205—208.
 - 29) Richards, L.A. and H.T. Stumpf: Graphical recorder for a pan evaporimeter. WRR Vol.2, No.2, 1966, pp.209—212.
 - 30) Riley, J.J.: The heat balance of class A evaporation pan. WRR Vol.2, No.2, 1966, pp. 223—226.
 - 31) Eisenlohr, WM.S. Jr.: Water loss from a natural pond through transpiration by hydrophytes. WRR Vol.2, No.3, 1966, pp.443—453.
 - 32) Morton, F.I.: Evaporation from large deep lakes. WRR Vol.3, No.1, 1967, pp.181—200.
 - 33) Wilcox, J.C.: A simple evaporimeter for use in cold areas. WRR Vol.3, No.2 1967, pp.433—436.
 - 34) Kohler, M.A. and L.H. Parmele: Generalized estimates of free-water evaporation. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.997—1006.
 - 35) Nixon, P.R. and G.P. Lawless: Advective influences on the resuction of evapotranspiration in a coastal enviroment. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.39—46.
 - 36) Woo, K.B., L. Boersma and L.N. Stone: Dynamic simulation model of the transpiration process. WRR Vol.2, No.1, 1966, pp.85—97.
 - 37) Bay, R.R.: Evaluation of an evapotranspirometer for peat bogs. WRR Vol.2, No.3, 1966, pp.437-442.
 - 38) Lee, R.: The hydrologic importance of transpiration control stomata. WRR Vol.3, No. 3, 1967, pp.737—752.
 - 39) Mustoen, S.E. and J.L. Mcguinness: Lysimeter and watershed evapotraspiration. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.989—996.
 - 40) Brutsaert, W.: Evaluation of some practical methods of estimating evapotranspiration in arid climaters at low latitudes. WRR Vol.1, No.2, 1965, pp.187—191.
 - 41) Van Bavel, C.H.M.: Potential evaporation. The combination concept and its experimental verification. WRR Vol.2, No.3, 1966, pp.455—467.
 - 42) Lee, R.: Evaluation of solar beam irradiation as a climatic parameter of mountain watersheds. Colorado State Univ., Hydrology papers No.2, 1963.
 - 43) Anderson, E.A. and D.R. Baker: Estimating incident terrestrial radiation under all

- atemospheric condition. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.975—988.
- 44) Anderson E. A.: Development and testing of snow pack energy balance equations. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.19—37.
 - 45) Saxton K.E. and A. T. Lenz: Antecedent retention indexes predict soil moisture. Proc. ASCE Vol.93, Hy.4 1967, pp.223—241.
 - 46) Becker, A.: Threshold considerations and their general importance for hydrologic systems investigation. Proc. IHS, Vol.1, 1967, pp.94—102.
 - 47) Holton, H.N.: A concept of infiltration estimates in watersheds engineering. U.S. Dept. Agr. Agr. Res. Serv., 1961, pp.41—51.
 - 48) Holton, H.N., C.B. England and W.H. Allen, Jr.: Hydrologic capacities of soils in watershed engineering. Proc. IHS, Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.218—226.
 - 49) Overton, D.E.: Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. U.S. Dep. Agr. Agr. Res. Serv., 1964, pp.41—99.
 - 50) Huggins, L.F. and E.J. Monke: A mathematical model for simulating the hydrologic response of a watershed. WRR Vol.4, No.3, 1968, pp.529—539.
 - 51) Bell, F.C.: An alternative physical approach to watershed analysis and streamflow estimation. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.86—93.
 - 52) Betson, R.P.: What is watershed runoff. JGR Vol.69, No.8, 1964, pp.1541—1542.
 - 53) Solomon, S.: Relationship between precipitation, evaporation and runoff in tropical-equatorial regions. WRR Vol.3, No.1, 1967, pp.163—172.
 - 54) Smith, W.O.: Infiltration in sands and its relation to groundwater recharge. WRR Vol.3, No.2, 1967, pp.539—555.
 - 55) Minshall, N.E. and V.C. Jamison: Interflow in claypan soils. WRR Vol.1, No.3, 1965, pp.381—390.
 - 56) Henderson, F.M. and R. A. Wooding: Overland flow and ground water flow from a steady rainfall of finite duration. JGR Vol.69, No.8, 1964, pp.1531—1540.
 - 57) Wooding, R.A.: A hydraulic model for the catchment-stream problem. Jour. of Hydrology, Vol.3, p.254; Vol.3, p.268; Vol.4, p.21, 1966.
 - 58) Lighthill, M.H. and G.B. Whitham: On kinematic waves, 1. Flood movement in long rivers. Proc. Roy. Soc. A. Vol.229, 1955, pp.281—316.
 - 59) Ding, J.Y.: Flow routing by direct integration method. Proc. IHS, Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.113—120.
 - 60) Morgali, J.R. and R.K. Linsley: Computer analysis of overland flow. Proc. ASCE Vol.91, Hy.3, 1965, pp.81—100.
 - 61) Brakensiek, D.L.: A simulated watershed flow system for hydrograph prediction: A kinematic application. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.18—24.
 - 62) Brakensiek, D.L. and C.A. Onstad: The synthesis of distributed inputs for hydrograph predictions. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.79—85.
 - 63) Brakensiek, D.L.: Finite differencing methods. WRR Vol.3, No.3, 1967, pp.847—860.
 - 64) Ragan, R.M.: Laboratory evaluation of a numerical flood routing technique for channels subject of lateral inflows. WRR Vol.2, No.1, 1966, pp.111—121.
 - 65) Ragan, R.M.: The determination of local inflows entering a channel. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.235—243.

- 66) Abdel-R. A. Y., W. Viessman, Jr. and J. W. Hernander: A solution to the surface runoff problem. Proc. ASCE Vol. 93, Hy. 6, 1967, pp. 335—352.
- 67) Machmeier, R. E. and C. L. Larson: A mathematical watershed routing model. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 64—71.
- 68) Machmeier, R. E.: The effect of runoff supply rate and duration on runoff time parameters and peak out flow rates. Ph. D. Dissertation, Univ. of Minnesota, 1966.
- 69) Chen, C. L.: An analysis of overland flow. Ph. D. Dissertation, Michigan State Univ., 1962.
- 70) Diskin, M. H.: A dispersion analog for watershed systems. Proc. IHS Vol. 1 Fort Collins, 1967, pp. 38—45.
- 71) Woolhiser, S. A. and J. A. Liggett: Unsteady, One-dimensional flow over a plane—the rising hydrograph. WRR Vol. 3, No. 3, 1967, pp. 753—771.
- 72) Barnes, A. H.: Comparison of computed and observed flood routing in a circular cross-section. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 121—127.
- 73) Amein, M.: Streamflow routing on computer by characteristics. WRR Vol. 2, No. 1, 1966, pp. 123—130.
- 74) Amein, M.: An implicit method for numerical flood routing. WRR Vol. 4, No. 4 1968, pp. 719—726.
- 75) McLaughlin, R. T., C. Kim and J. E. Dailey: Unsteady flow in reservoirs operated for peak power. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab. Report No. 101, 1966.
- 76) Graves, E. A.: Improved method of flood routing. Proc. ASCE Vol. 93, Hy. 1, 1967, pp. 29—43.
- 77) Bull, J. A.: Synthetic coefficients for streamflow routing. Proc. ASCE Vol. 93, Hy. 6, 1967, pp. 371—386.
- 78) Dooge, J. C. I. and B. M. Harley: Linear routing in uniform open channels. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 57—64.
- 79) Delleur, J. W. and Blank, D.: Response of float type recorder systems. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 165—172.
- 80) Dickinson, W. T.: An error model for a single discharge measurement. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 244—251.
- 81) Dickinson, W. T.: Accuracy of discharge determinations. Colorado State Univ., Hydrology papers No. 20, 1967.
- 82) Dickinson, W. T.: Errors in discharge estimates on mountain streams. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967, pp. 573—580.
- 83) Zoch, R. T.: On the relation between rainfall and stream flow. Monthly Weather Review, Vol. 62, No. 9, 1934, pp. 315—322; Vol. 64, No. 4, 1936, pp. 105—121; Vol. 65, No. 4, 1937, pp. 135—147.
- 84) Ochoa-R, J. C. and P. S. Eagleson: Optimum discrete linear hydrologic systems with multiple inputs. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab., Report No. 80, 1965.
- 85) Nash, J. E.: The form of the instantaneous unit hydrograph. Proc. IASH Gen. Assembly, Tronto, Vol. 3. 1967, pp. 114—121.
- 86) Dooge, J. C. I.: A general theory of the unit hydrograph. JGR Vol. 64, No. 2, 1959, pp. 241-256.

- 87) Quick, M.C.: River flood flows: Forecasts and probabilities. Proc. ASCE Vol. 91, Hy. 3, 1965, pp. 1—18.
- 88) Jackson, D.R.: A dissipative river flow model. Jour. of Hydrology Vol. 6, 1968, pp. 33—44.
- 89) O'Donnell, T.: Instantaneous unit hydrograph derivation by harmonic analysis. IASH Gen. Assembly of Helsinki, Publ. 51, 1960, pp. 546—557.
- 90) Levi, E. and R. Valdes: A method for direct analysis of hydrographs. Jour. of Hydrology, 1964, pp. 182—190.
- 91) Diskin, M.H.: A basic study of the linearity of the rainfall-runoff process in watersheds. Ph. D. thesis, Univ. Illinois, 1964.
- 92) Dooge, J.C.I.: Analysis of Linear systems by means of Laguerre functions. Jour. Soc. for Indus Appl. Math. Control Ser. A, Vol. 2, No. 3, 1965, pp. 396—408.
- 93) Snyder, W.M.: Hydrograph analysis by the method of least squares. Proc. ASCE Vol. 81, Paper 793, 1955.
- 94) Eagleson, P.S., R. Mejia-R and F. March: Computation of optimum realizable unit hydrographs. WRR Vol. 2, No. 4, 1966, pp. 755—764.
- 95) Eagleson, P.S., R. Mejia-R and F. March: The computation of optimum realizable unit hydrographs from rainfall and runoff data. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab., Report No. 84, 1965.
- 96) Eagleson, P.S.: Unit hydrograph characteristics for sewerage areas. Proc. ASCE Vol. 88, Hy. 2, 1962, pp. 1—25.
- 97) Holton, H.N. and D.E. Overton: Analysis and application of simple hydrographs. Jour. of Hydrology Vol. 1, 1963, pp. 250—264.
- 98) March, F. and P.S. Eagleson: Approches to the linear synthesis of urban runoff systems. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamic Lab., Report No. 85, 1965.
- 99) Eagleson, P.S.: A distributed linear model for peak catchment discharge. Proc. IHS Vol. 1, Fort Collins, 1967.
- 100) Barrere-C, A. and F.K. Perkins: An extension of the role of linear systems analysis in hydrograph. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab. Report No. 106, 1967.
- 101) Diskin, M.H.: A Laplace transform proof of the theorem of momets for the instantaneous unit hydrograph. WRR Vol. 3, No. 2, 1967, pp. 385—388.
- 102) Diskin, M.H. and A. Boneh: Moments of the input, output and impulse response functions of linear systems about arbitrary points. WRR Vol. 4, No. 4, 1968, pp. 727—735.
- 103) Wn. I-Pai: Design hydrograph for small watersheds in Indiana. Proc. ASCE Vol. 89, Hy. 6, 1963, pp. 35—66.
- 104) Viessman, W., Jr.: Runoff estimation for very small drainage areas. WRR Vol. 4, No. 1, 1968, pp. 87—93.
- 105) Minshall, N.E.: Predicting storm runoff on small experimental watersheds. Proc. ASCE Vol. 86, Hy. 8, 1960, pp. 17—38.
- 106) Amorocho, J.: Discussion on "Predicting storm runoff on small experimental watersheds by N.E. Minshall. Proc. ASCE Vol. 87, Hy. 2, 1961, pp. 187—189.
- 107) Henderson, F.M.: Some properties of the unit hydrograph. JGR Vol. 68, No. 16 1963, pp. 4785—4793.
- 108) Dickinson, W. T.: Unit hydrograph characteristics of selected Ontatio watersheds. M. S. A.

- thesis, Univ. of Toronto, 1963.
- 109) Polgrim, D.H.: Radioactive tracing of storm runoff on a small catchment. *Jour. of Hydrology* Vol.4, 1966, pp.289—326.
 - 110) Amorocho, J. and G.T. Orlob: An evaluation of the inflow-runoff relationship in hydrologic studies. Univ. of California, Water Resources Center, Contrib. No.41, 1961.
 - 111) Befani, A.N.: Principles of the theory of processes of surface and underground runoff. IASH Pub.51, 1960, pp.594—596.
 - 112) Mitchell, W.D.: Linear analysis of hydrographs. *WRR* Vol.3, No.3, 1967 pp.891—895.
 - 113) Laurensen, E.M.: Hydrograph synthesis by runoff routing. Univ. of New South Wales, Water Res. Lab., Report No.66, 1962.
 - 114) Laurensen, E.M.: A catchment storage model for routing. *Jour. of Hydrology* Vol.2, 1964, pp.141—163.
 - 115) Singh, K.P.: Nonlinear instantaneous unit-hydrograph theory. *Proc. ASCE* Vol.90, Hy.2, 1964, pp.313—347.
 - 116) Kulandaiswamy, V.C.: A basic study of the rainfall excess-surface runoff relationship in a basin system. Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, 1964.
 - 117) Kulandaiswamy, V.C. and C.V. Subramanian: A nonlinear approach to runoff studies. *Proc. IHS* Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.72—79.
 - 118) Prasad, R.: Nonlinear simulation of a regional hydrologic system. Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, 1965.
 - 119) Prasad, R.: A nonlinear hydrologic system response model. *Proc. ASCE* Vol.93, Hy.4, 1967, pp.201—221.
 - 120) Amorocho, J. and G.T. Orlob: Nonlinear analysis of hydrologic systems. Univ. of California, Water Resources Center, Contrib. No.40, 1961.
 - 121) Amorocho, J.: Measures of the linearity of hydrologic systems. *JGR* Vol.68, No.8, 1963, pp.2237—2249.
 - 122) Amorocho, J.: The nonlinear prediction problem in the study of the runoff cycle. *WRR* Vol.3, No.3, 1967, pp.861—880.
 - 123) Jacoby, S.L.S.: A mathematical model for nonlinear hydrologic systems. *JGR* Vol.71, No.20, 1966, pp.4811—4824.
 - 124) Woo, D.C.: Spatially varied flow from controlled rainfall. *Proc. ASCE* Vol.88, Hy.6, 1962, pp.31—56.
 - 125) Amorocho, J. and W.E. Hart: The use of laboratory catchments in the study of hydrologic systems. *Jour. of hydrology* Vol.3, No.2, 1965, pp.106—123.
 - 126) Grace, R.A. and P.S. Eagleson: Construction and use of a physical model of the rainfall-runoff process. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab., Report No.11, 1966.
 - 127) Grace, R.A. and P.S. Eagleson: The modeling of overland flow. *WRR* Vol.2, No.3, 1966, pp.393—403.
 - 128) Grace, R.A. and D.S. Eagleson: The use of scale models in rainfall-runoff studies. *WRR* Vol.2, No.3, 1966, pp.393—403.
 - 129) Grace, R.A. and P.S. Eagleson: Scale model of urban runoff from rainfall. *Proc. ASCE* Vol.93, Hy.3, 1967, pp.161—176.

- 130) Harbaugh, T. E.: Time distribution of runoff from watersheds. Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, 1966.
- 131) Chow, V. T.: Laboratory study of watershed hydrology. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.194—202.
- 132) Dickinson, W. T., M. E. Holland and G. L. Smith: An experimental rainfallrunoff facility. Colorado State Univ., Hydrology papers No.25, 1967.
- 133) Bouwer, H.: Analyzing subsurface flow systems with electric analogs. WRR Vol.3, No.3, 1967, pp.897—907.
- 134) Nemec, J. and M. Moudry: A contribution to analogue and physical modeling of surface runoff process in small basins. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.80—85.
- 135) Linsley, R. K. and N. H. Crawford: Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer. IASH, Gen. Assembly of Helsinki, Pub. 51, 1960, pp.526—538.
- 136) Crawford, N. H. and R. K. Linsley: The synthesis of contineous streamflow hydrographs on a digital computer. Stanford Univ., Dep. of Civil Eng., Tech. Report No.12, 1962.
- 137) Crawford, N. H. and R. K. Linsley: A conceptual model of the hydrologic cycle. IASH Pub. No.63, 1963, pp.573—587.
- 138) Crawford, N. H. and R. K. Linsley: Digital simulation in hydrology; Stanford model IV. Stanford Univ., Dep. of Civil Eng., Tech. Report No.39, 1966.
- 139) Hyff, D. D. and P. Kruger: The chemical and physical parameters in a hydrologic transport model for radioactive aerosols. Proc. IHS, Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.128—135.
- 140) Dawdy, D. R. and T. O'Donnel: Mathematical models of catchment behavior. Proc. ASCE Vol.91, Hy. 4, 1965, pp.123—137.
- 141) Fiering, M. B.: Revitalizing a fertile plain. WRR Vol.1, No.1, 1965, pp.41—61.
- 142) Vemuri, V. and J. A. Dracup: Analysis of nonlinearities in ground water hydrology: A hybrid computer approach. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.1047—1058.
- 143) Yevjevich, V.: The application of suplus, deficit and range in hydrology. Colorado State Ueiv., Hydrology Papers No.10, 1965.
- 144) Kowner, R. N., M. M. Siddiqui and V. Yevjevich: Application of runs to hydrologic droughts. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.496—505.
- 145) Yevjevich, V.: An objective approach to definition and investigation of continental hydrologic droughts. Colorado State Univ., Hydrology papers No.23, 1967.
- 146) Yevjevich, V.: Mean range of linearly dependent normal variables with application to storage problems. WRR Vol.3, No.3, 1967, pp.663—671.
- 147) Majumdar, K. C. and R. P. Sawhney: Estimates of extreme value by different distribution functions. WRR Vol.1, No.3, 1965, pp.429—434.
- 148) Kinbler, D. F. and V. Yevjevich: Effects of sampling interval, periodicty, dependence and skewness on extreme values. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.537—545.
- 149) Panchang, G. M.: Realistic projections from extreme value data. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.546—555.
- 150) Markovic, R. D.: Probability functions of best fit to distrubutions of annual precipitation and runoff. Colorado State Univ., Hydrology papers Mo.8, 1965.
- 151) Nash, J. E. and J. Amorocho: The accuracy of the prediction of floods of high return period. WRR Vol.2, No.2, 1966, pp.191—198.

- 152) Nash, J.E. and J. Amorocho: Note on 'The accuracy of the prediction of floods of high return period'. WRR Vol.3, No.2, 1967, pp.635—642.
- 153) Walenth, J.: New methods of probability calculations for discharges and nonscouring velocities in rivers' cross-sections. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.589—594.
- 154) Benson, M.A.: Average Probability of extreme events. WRR Vol.3, No.1, 1967, p.225.
- 155) Sharp, A.L., A.E. Gibbs, W.J. Owen and B. Harris: Application of the multiple regression approach in evaluating parameters affecting water yield of river basins. JGR Vol.65, No.4, 1960, pp.1273—1286.
- 156) Riggs, H.C.: Discussion of Ref. 155. JGR Vol.65, No.10, 1960, pp.3509—3511.
- 157) Matalas, N.C.: Time series analysis. WRR Vol.3, No.3, 1967, pp.817—829.
- 158) Reiherand, B.S. and C.S. Huzzen: Some comments on effective sample size of second order Markov processes. Bull. IASH 12th. N4, 1967, pp.63—74.
- 159) Julian, P.R.: Variance spectrum analysis. WRR Vol.3, No.3, 1967, pp.831—845.
- 160) Rodriguez-I, I.: Application of cross-spectral analysis hydrologic time series. Colorado State Univ., Hydrology papers No.24, 1967.
- 161) Rodriguez-I, I. and V. Yevjevich: Sunspots and hydrologic time series. Proc. IHS, Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.397—405.
- 162) Rodriguez-I, I. and V. Yevjevich: The investigation of relationship between hydrologic time series and sunpot numbers. Colorado Stat^e Univ., Hydrology papers No.26, 1968.
- 163) Roesner, L.A. and V. Yevjevich: Mathematical models for time series of monthly precipitation and monthly runoff. Colorado State Univ., Hydrology papers No.15, 1966.
- 164) Yevjevich, V.: Fluctuations of wet and dry years, part II, analysis by serial correlation. Colorado State Univ., Hydrology papers No.4, 1964.
- 165) Quimpo, R.G.: Stochastic model of daily river flow sequences. Colorado State Univ., Hydrology papers No.18, 1967.
- 166) Quimpo, R.G. and V. Yevjevich: Stochastic description of daily river flows. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.290—297.
- 167) Quimpo, R.F.: Stochastic analysis of daily river flows. Proc. ASCE Vol.94, Hy.1, 1968, pp.43—57.
- 168) Sangal, B.P., T.E. Unny and H.M. Hill: Variations in statistical measures with the length of streamflow records. Proc. IHS Vol.1 Fort Collins 1967, pp.314—321.
- 169) Kunisel, W.G. Jr. and V. Yevjevich: The statistical measure of hydrologic time series. Proc. IHS Vol.1, Fors Collins, 1967, pp.306—313.
- 170) Matalas, N.C. and C.S. Huzzen: A property of the range of partial sums. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.252—257.
- 171) Wisner, E.H.: An analysis of runs of precipitation events. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.258—267.
- 172) Harms, A.A. and T.H. Campbell: An extension to the Thomas-Fiering model for the sequential generation of streamflow. WRR Vol.3, No.3, 1967 pp.653—661.
- 173) Beard, L.H.: Simulation of daily streamflow. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.624—632.
- 174) Matalas, N.C.: Mathematical assessment of synthetic hydrology. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.937—946.

- 175) Yevjevich, V.: Stochastic properties of lake outflows. Colorado State Univ., Hydrology papers No.14, 1966.
- 176) Melentijevich, M.J.: The analysis of range with output linearly dependent upon storage. Colorado State Univ., Hydrology papers No.11, 1965.
- 177) Fiering, M.B.: Streamflow synthesis. Harvard Univ. Press, 1967.
- 178) Ramaseshan, S.: A stochastic analysis of rainfall and runoff characteristics by sequential generation and simulation. Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, 1964.
- 179) Pattison, A.: Synthesis of hourly rainfall data. WRR Vol.1, No.4, 1965 pp.489—498.
- 180) Grace, R.A. and P.S. Eagleson: The synthesis of short-time-increment rainfall sequences. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamic Lab., Report No.91, 1966.
- 181) Grace, R.A. and P.S. Eagleson: A model for generating synthetic sequences of short-time-interval rainfall depths. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins 1967, pp.268—276.
- 182) McGilchrist, C.A., K.D. Woodyer and T.G. Chapman: Recurrence intervals between exceedances of selected river levels I. Introduction and a Markov model. WRR Vol.4, No.1, 1968, pp.183—189.
- 183) Bagley, J.M.: An application of stochastic process theory to the rainfall runoff process. Stanford Univ., Dep. of Civil Eng., Tech. Report No.35 1964.
- 184) Bagley, J.M.: Some considerations in the adaptation of Markov process theory to rainfall-runoff phenomenon. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins 1967, pp.633—640.
- 185) Todorovic, P. and V. Yevjevich: A particular stochastic process as applied to hydrology. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.298—305.
- 186) Todorovic, P.: A mathematical study of precipitation phenomena. Colorado State Univ., Eng. Res. Center, CET67—68PT65, 1968.
- 187) Todorovic, P., V. Vukmirovic, R. Vukotic and A. Filip: A consideration to the kinematic theory of bed-material discharge. Isotopes in hydrology, Intern. Atomic Energy. Agency. Vienna, 1967, pp.271—290.
- 188) Mandelbrot, B.B.: Self-similar random processes and the range. IBM (Watson Research Center) Research paper RC—1163, 1964.
- 189) Mandelbrot, B.B.: Self-similar random processes: extrapolation, interpolation and decay of perturbations. IBM Research Report RC—1241, 1964.
- 190) Mandelbrot, B.B. and I.R. Wallis: Noah, Joseph Son of Jacob, and operational hydrology. IBM Research RC—2086, 1968.
- 191) たとえば Dorfman, R.: Formal models in the design of water resources systems. WRR Vol.1, No.3, 1965, pp.329—336.
- 192) Maass, A. et al.: Design of water resources systems. Harvard Univ. Press, 1962.
- 193) Hufschmidt, M.M. and M.B. Fiering.: Simulation techniques for design of water resources systems. Harvard Univ. Press, 1966.
- 194) McGauhey, P.H. and H. Erlich: Economic evaluation of water part I; a search for criteria. Univ. of California, Tech. Bull. 14, I.E.R. Series 37, 1960.
- 195) Lofting, E.M. and P.H. McGauhey: Economic evaluation of water part II; an interindustry analysis of the California Water economy. Univ. of California, Water Resources Center, Contrib. No.67, 1963.
- 196) Davis, H.C.: Economic evaluation of water part V—Multiregional input-output techniques

- and western water resources development. Univ. of California, Water Res. Center, Contrib. No.125, 1968.
- 197) Dracup, J. A.: The optimum use of a ground-water and surface-water system: A parametric linear programming approach. Univ. of California, Water Res. Center, Contrib. No.107, Tech. Report 6—24, 1966.
- 198) Hall, W. A. and R. W. Shephard: Optimum operations for planning of a complex water resources system. Univ. of California, Water Res. Center Eng. Report No.67—54, 1967.
- 199) Langbien, W. B.: Queuing theory and water storage. Proc. ASCE Vol.84, Hy.5, paper 1811, 1958.
- 200) Moran, P. A. P.: The theory of strage. Methuen, London, 1959.
- 201) Fiering, M. B.: Queuing theory and simulation in reservoir design. Proc. ASCE Vol. 87, Hy. 6, 1961, pp.39—69.
- 202) Lloyd, E. H.: A probability theory of reservoirs with serially correlated inputs. Jour. of Hydrology Vol.1, No.2, 1963, pp.99—128.
- 203) Lloyd, E. H. and S. Odoom.: Probability theory of reservoirs with seasonal inputs. Jour. of Hydrology Vol.2, No.1, 1964, pp.1—10.
- 204) Prabhu, N. V.: Time-dependent results in storage theory. Jour. of Applied Problems Vol.1, 1964, pp.1—4.
- 205) Amir, R.: Optimum operation of a multi-reservoir water supply system. Stanford Univ. Report EEP—24, 1967.
- 206) Bulkley, J. W. and R. T. Mclaughin: Simulation of political interaction in multiple-purpose river-basin. MIT, Dep. of Civil Eng., Hydrodynamics Lab., Report No.100, 1966.
- 207) Jovanovic, S.: Optimization of the long-term operation of a single-purpose reservoir. Proc. IHS Vol.1, Fort Collins, 1967, pp.422—429.
- 208) Young, G. K.: Reservoir management: The tradeoff between low flow regulation and flood control. WRR Vol.4, No.3, 1968, pp.507—511.
- 209) Hall, W. A. and N. Buras.: The dynamic programming approach to water resources development. JGR Vol.66, No.2, 1961, pp.51—54.
- 210) Hall, W. A.: Aqueduct capacity under an optimum benefit policy. Proc. ASCE Vol.87, IR. 3, 1961, pp.1—11.
- 211) Hall, W. A. and T. G. Roefs.: Hydropaper project output optimization. Proc. ASCE Vol. 92, PO.1, 1966, pp.67—79.
- 212) Hall, W. A.: Optimum design of a multiple-purpose reservoir. Proc. ASCE Vol.90, Hy4, 1964, pp.141—149.
- 213) Hall, W. A., W. S. Butcher and A. Esogbue.: Optimization of the operation of a multiple-purpose reservoir by dynamic programming. WRR Vol.4, No.3 1968, pp.471—477.
- 214) Little, J. D. C.: The use of storage wster in a hydroelectric system. Jour. of the Operation Research Soc. of Amer., Vol.3, 1958.
- 215) Buras, N.: Conjunctive operation of dams aquifers. Proc. ASCE Vol.89, Hy.6, 1963, pp. 111—129.
- 216) Young, G. K., Jr.: Finding reservoir operating rules. Proc. ASCE Vol.93, Hy.6, 1967, pp.297—321.
- 217) Schweig, Z. and J. A. Cole: Optimal control linked reservoirs. WRR Vol.4, No.3, 1968,

- pp. 479—497.
- 218) Meier, W.L., Jr. and C.S. Beightler: An optimization method for branching multistage water resources systems. WRR Vol.3, No.3,1967, pp.645—652.
- 219) Fiering, M.B.: An optimization scheme for gaging. WRR Vol.1, No.4, 1965, pp.463—470.
- 220) James, L.D.: Nonstructural measures for flood control. WRR Vol.1, No.1 1965, pp.9—24.
- 221) James, L.D.: Economic analysis of alternative flood control measures. WRR Vol.3, No.2, No.2, 1967, pp.333—343.
- 222) Krutilla, J.V.: An economic approach to coping with flood damage. WRR Vol.2, No.2 1966, pp.183—190.
- 223) Lind, R.C.: Flood control alternatives and the economic of flood protection. WRR Vol.3, No.2, 1967, pp.345—357.
- 224) Schaake, J.C., Jr. and M.B.Fiering.: Simulation of a national flood insurance fund. WRR Vol.3, No.4, 1967, pp.913—930.
- 225) Murphy, F.C.: Regulating flood-plain development. Univ. of Chicago, Geography Research Paper No.56, 1958.
- 226) Kates, R.W.: Hazard and choice perception in flood plain management. Univ. of Chicago, Geography Res. Paper No.78, 1962.
- 227) White, G.F. and J.E. Edinger: Choice of adjustment to floods. Univ. of Chicago, Geography Res. Paper No.93, 1964.
- 228) Kates, R.W.: Industrial flood losses: Damage estimation in the Lehigh Valley. Univ. of Chicago, Geography Res. Paper No.98, 1965.
- 229) Saarinen, T.E.: Perception of the drought hazard on the great plains. Univ. of Chicago, Geography Res. Paper No.106, 1966.