

日降水量時系列のジェネレーションとその貯水池管理への適用 A Generation Technique of Daily Precipitation Series and its Application to Reservoir Management

近畿大学理工学部 正員 中西 祐 啓
近畿大学理工学部 正員 江 藤 剛 治

1. はじめに

これまで日降水量時系列の特性について色々な検討が行われている。そしてそれらの特性を考慮したいいくつかのシミュレーションモデルが提案されている。これらの多くは日降水量時系列の独立性を仮定し日単位程度の確率構造、たとえば無降水期間分布・降水強度分布等をうまく再現するようなモデルとなっている。しかしこのようなモデルでシミュレートした日降水量時系列資料は、次のような問題点を持っていることが知られている。ある期間長、たとえば1カ月・1年にわたって合計したものを作ると、その確率分布は実測の月降水量・年降水量の確率分布と一致しない。これまでに提案されているほとんどのモデルにおいて、実測の日降水量時系列はシミュレートした日降水量時系列に比べて、量的に多い方はより多く、少ない方はより少なくなるという一定の傾向を持っている(図-1)。

以上の差異の現われる原因の1つは、日降水量時系列の独立性の仮定であると考えられる。通常の積率相関係数を用いた時系列相関関数はほぼ0となる。したがって日降水量時系列の独立性の仮定が成り立つことになる。しかし、降水・無降水という一種の属性に着目し時系列相関関数を計算すると、日降水量時系列には弱いながらも持続性(周期性)が存在していることがわかる。著者らは以前、このような日降水量時系列特性を考慮できるようなモデルを提案した³⁾。これを潜在変動モデルと名付けた。潜在変動モデルを使うと、年降水量・月降水量等の合計量の確立分布の再現性は、日降水量時系列の独立性を仮定したモデルに比べてかなり改善される。

実測の日降水量における水文学的渇水特性が本当にうまく再現されているかどうかさらに細かく検討を行うと、実測の日降水量時系列はシミュレートしたものより強い渇水が生起するという傾向がある。潜在変動モデルにより日降水量時系列の持続性をシミュレーションに導入すればこの傾向は改善されるが、それでもなお実測の日降水量時系列の方がより強い渇水が生ずるという傾向は残る。この原因として、降水量時系列は日単位程度の確率モデルでは表現が困難なよりマクロな気象変動に支配されているのではないかと考えられる。これを解明するための1ステップとして、偏西風特性が日降水量時系列に与える影響を調べた。

一方、今日以降数か月にわたって貯水池等により、水資源を管理する場合を考える。現在の貯水量を与え、以後の管理方式等を定めて、過去数十年分の流量時系列資料(降水量資料)に対して、貯水池の水収支計算を行えば、以後の渇水の生起頻度、その継続期間長分布等を計算することができる。実測水文資料長が十分でないと考えられるときは、水文量のシミュレーション手法により、人為的に必要な長さの

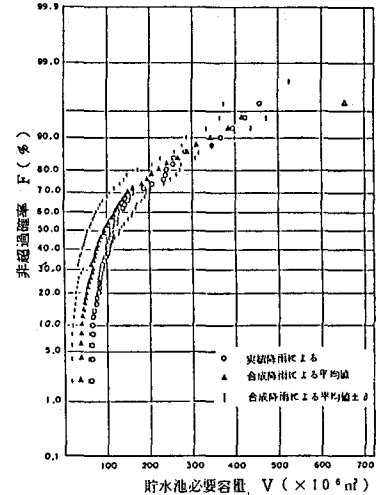


図-1. a 貯水池必要容量の確率分布¹⁾

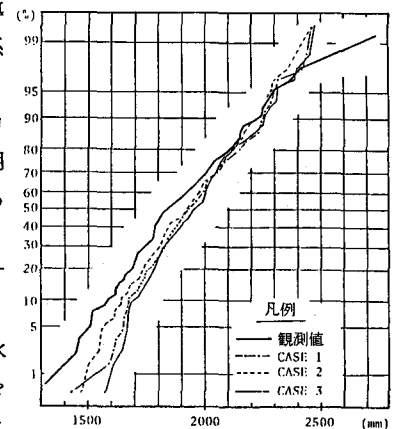


図-1. b 年降水量非超過確率²⁾

水文資料を発生させることができる。しかし、実際には、天気予報等により、明日以後ある期間内の気象予測が与えられている。よって明日以後の水資源管理の入力として用いる水文量時系列は、過去の時系列資料や、通常のシミュレーション手法によって作成した水文資料のように、予測とは無関係にランダムに変動するのではなく、与えられた予測値のまわりに予測精度に依存する幅をもって分布するような水文量時系列でなければならない。潜在変動モデルを用いて、このような気象予測の効果を導入できる日降水量シミュレーション・モデルを開発した。このモデルに、週間予報を入力情報として用いたときのシミュレーション結果を示す。

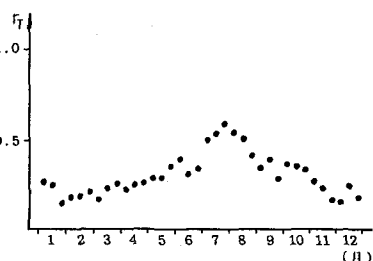


図-2 日降水量の時差1日の相関係数
(旬ごと)
 r_T : テトラコリック相関係数

2. 潜在変動モデルによる日降水量シミュレーション

2. 1 潜在変動モデル³⁾

潜在変動モデルとは、降水量の指標となるような連続に変動する潜在的な変動が存在すると仮定し、潜在変動がある強度を越えたとき降水事象が生起し、降水量は潜在変動の強度の関数で表わされるとしたものである。

潜在変動モデルは、時系列モデル(潜在変動をシミュレートする)と分布変換モデル(潜在変動を降水量に変換する)とから成っている。時系列モデルを次の多変数線形回帰モデルで表わす。

$$Y = AX + B\varepsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 X 、 Y 、 ε は標準化された説明変数ベクトル、被説明変数ベクトル、誤差ベクトル、 A 、 B は係数行列である。 R_{xy} 、 R_{yx} 、 R_x 、 R_y をそれぞれ、 X と Y の相関行列、 Y と X の相関行列、 X の要素間の相関行列、 Y の要素間の相関行列とすれば、

$$A = R_y x R_x^{-1} \quad , \quad B B^T = R_y - R_y x R_x^{-1} R_x y \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の Y を $i+1$ 日の各種の水文気象量の潜在変動 X_{i+1} 、 X を i 日の各種の水文気象量 X_i と置き換える。これで X_i を与えて X_{i+1} を発生させることができる。この X_{i+1} の値を X_i に代入して同様の計算を行えば、 X_{i+2} が求まる。同様にして任意の長さの潜在変動を発生させることができる。得られた潜在変動があるレベル以上のときは降水、以下のときは無降水とし、降水の場合は潜在変動を適当に分布変換すれば、潜在変動の相関構造を持ち、降水量の確率分布を再現する降水量時系列が得られる。同様にして、任意の水文量時系列を同時に発生させることができる。以上が潜在変動モデルの概要である。

2. 2 日降水量シミュレーション結果の検討

図-2に日降水量時系列の持続性(時差1日の相関係数)について調べたものを示す。解析には属性相関解析の一手法であるテトラコリック相関解析手法を用いた。春、秋、冬期において相関係数は0.2~0.4の間の値を取っている。一方夏期、特に7月においては異常と思われるほど大きな値(0.5~0.6)となっている。これは梅雨というマクロな気象変動が影響してきているのではないかと考えられる。この持続性を潜在変動モデルに代入して6

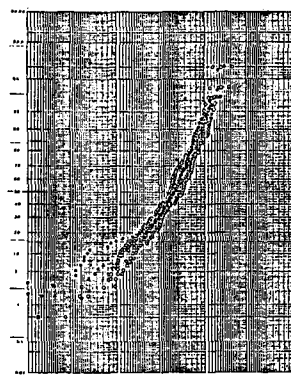


図-3. a 31日最小移動合計

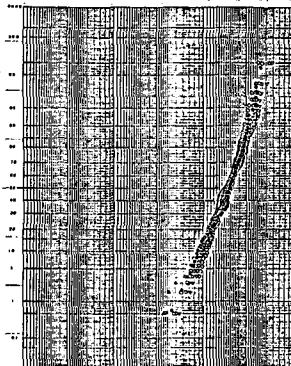


図-3. b 61日最小移動合計

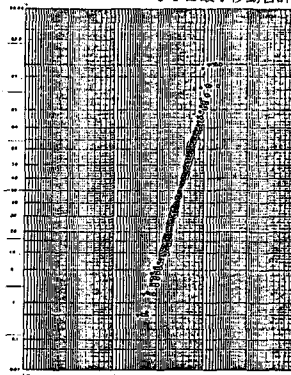


図-3. c 101日最小移動合計

図-3 日降水量の*i*日最小移動合計の確率分布

月（梅雨期）から9月（台風期）までの日降水量時系列をシミュレートした。シミュレーションのバラツキをある程度知るため、100年間のシミュレーションを5回行った。

実測の日降水量資料における水文学的渇水特性が本当にうまく再現されているかどうか細かく検討するため、単なる合計量ではなく移動合計を計算した。6月から9月までの*i*日移動合計を計算し、その内の最小値をその年の期間長*i*日の代表的な渇水とみなした。これを確率紙にプロットしたものを図-3に示す。図中黒く塗りつぶしたものが実測の日降水量資料によるものである。

図-3. aの31日最小移動合計ののを見ると、実測のものとシミュレーションによるものとに大きな差が現われている。期間長を61日（図-3. b）、101日（図-3. c）と長くするにつれて確率分布はうまく一致してきている。このことより、4か月間（6月～9月）の合計量の確率分布についてはうまく再現できることがわかる。本研究ではシミュレートした期間が6月～9月までの約120日間であるので101日最小移動合計をとっても単なる合計量をとったものと大差ない。すなわち、期間長を約120日としたときにはその年の極端な渇水状態を示しているのではなく、単なる合計量を計算したにすぎない。また図では示していないが、シミュレートした日降水量時系列は、実測の日降水量時系列のもつ日単位の確率構造をうまく再現している。このモデルは日単位の確率構造を再現するように作成したモデルであるので当然のことである。よって1400か月程度の期間長の最小移動合計をプロットしたときに最も明確に極端な渇水状態が示されたものと考えられる。これが31日最小移動合計のときに実測とシミュレーションとに最も大きな差が現われた理由である。

31日最小移動合計（図-3. a）ののを見ると、生起確率 $1/5$ 以下で差異が生じている。この差異は、潜在変動モデルを用いて時系列相関構造を導入してもなお実測による日降水量時系列の方がシミュレートしたものよりも強い渇水が生ずる傾向があることを示している。この差異の生ずる原因の1つとして降水量時系列は日単位程度の確率モデルでは表現が困難な、よりマクロな気象変動に支配されていることが考えられる。

3. 偏西風と日降水量時系列

3. 1 偏西風の指標

高層における空気の流れは、地表の影響がなく等圧線（等圧面高度線）に平行に吹いていると考えられる。これを地衡風という。地衡風の風速は等圧線（等圧面高度線）の密度に比例していることが知られている。緯度圏に沿う帯状流の平均風速は地衡風として計算できる。したがってある緯度帯の平均風速は南北端の平均気圧差（平均等圧面高度差）に比例する。この平均気圧差（平均等圧面高度差）を東西指数という⁴⁾。北緯40°～60°付近の平均気圧差（平均等圧面高度差）は偏西風の強さの指標となる。

本研究では東西指数の計算に500mb高度面の資料を用いた。一般に東西指数の計算は半球規模の平均値をとる。しかし本研

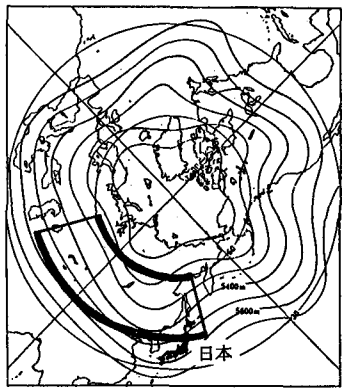


図-4 東西指数の計算範囲

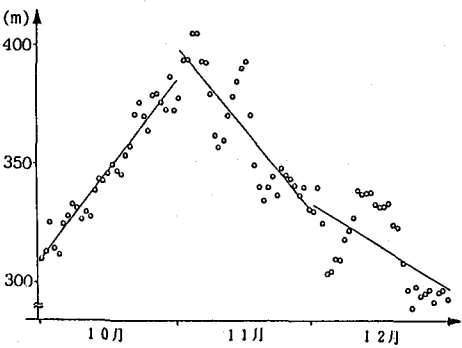


図-5 東西指数の年周期変動

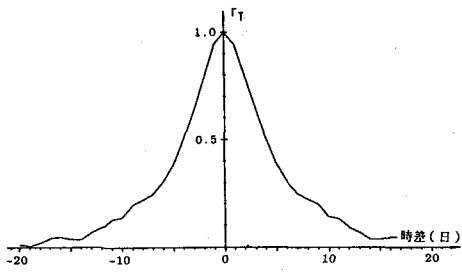


図-6 東西指数時系列の自己相関関数（10月～12月）
 r_T : テトラコリック相関係数

表-1 東西指数の大小条件付での降水日率
（ ）内は0.0mmの記録を無降水とみなしたとき

東西指数	〔大〕	〔小〕
10月	42% (32%)	48% (35%)
11月	56% (37%)	55% (36%)
12月	66% (41%)	66% (49%)

究では半球的な 500mb 高度面の資料がなかったので、次のような範囲で南北の平均等圧面高度差を計算したものを東西指数と呼ぶことにした。すなわち、500mb 高度面の北緯 40°における東経 60°～150°(10°間隔)の平均値と北緯 60°における平均値との差を、以下では東西指数とよんでいる(図-4)。また同じ理由で、資料の解析年数は 1959 年から 1978 年までの 20 年間、解析の季節は 10 月から 12 月までの 3 か月間とした。

3. 2 東西指数時系列と日降水量時系列

日降水量時系列は降水・無降水という間欠的な時系列になっているので、相関解析には属性相関解析手法(テトラコリック相関解析)を用いた。また東西指数のような連続量に対してもある閾値を定め、それ以上それ以下という属性に分割すれば同じ手法で相関構造を解析することができる。したがって相関解析にはすべてこの手法を用いた。

一方日降水量資料には 0.0mm という記録がある。降水事象はあったが記録できるほどの量ではなかったときにこのように記録される。これを降水とみなした場合、無降水とみなした場合の 2 通りについて解析を行った。

東西指数の 20 年間の各日の平均値をプロットしたものを図-5 に示す。10 月の間大きくなり、それ以後減少している。このような年周期変動を折線(図中実線)で近似し、これより大きいとき東西指数は大きく、これより小さいとき東西指数は小さいと考えた。東西指数時系列の自己相関関数を図-6 に示す。東西指数は 10 日以上の特続性を持つ変動であることがわかる。各月ごと(10 月～12 月)の解析についても同様の結果が得られた。

東西指数が大きいとき小さいときの降水確率について調べた(表-1)。ほとんど差は現われておらず、10 月～12 月について降水確率は偏西風の強さに無関係であるといえる。

東西指数時系列と日降水量時系列との相互相関関数を図-7 に示す。ほぼ 0 となっており直接の関連性がないことがわかる。各月ごと(10 月～12 月)の解析についても同様の結果が得られた。

次に東西指数が大きい小さいか、言い換えると、偏西風が強く吹いているか弱く吹いているかの条件付で日降水量の自己相関関数を調べた(図-8)。図中実線は東西指数が大きいときの日降水量時系列の自己相関関数であり、破線は東西指数が小さいときのものである。

日降水量資料の 0.0 mm を降水とみなしたときの解析結果(図-8. a) から以下に示すようなことがわかる。

- ① 時差 1 日の相関係数で持続性を評価すると、東西指数が

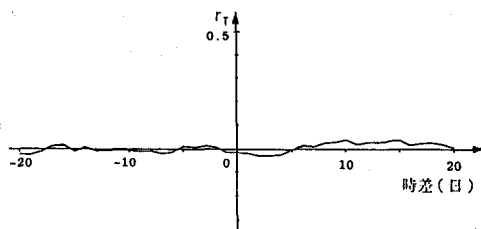
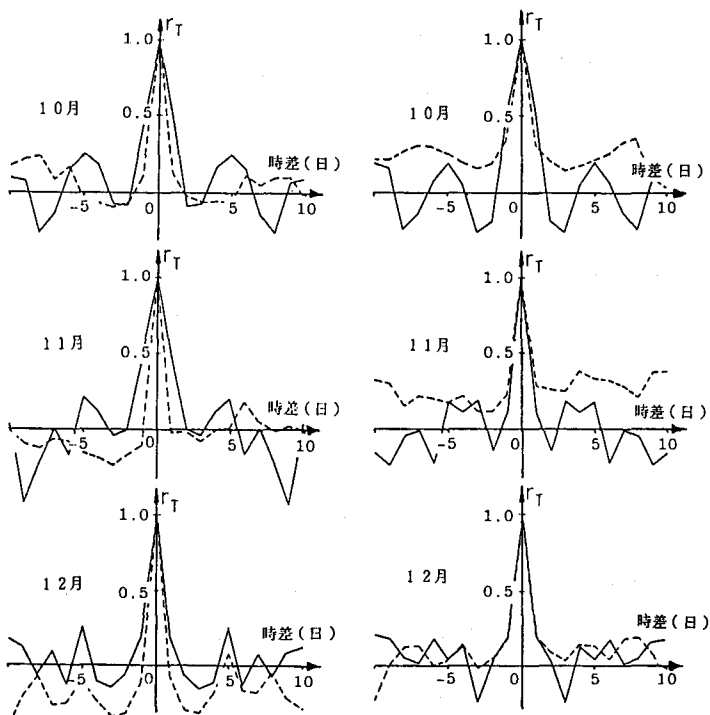


図-7 東西指数と日降水量の相互相関関数
(10 月～12 月)
「 r_T 」テトラコリック相関係数



(a) 0.0 mm の記録を降水とみなしたとき (b) 0.0 mm の記録を無降水とみなしたとき
図-8 東西指数の大小条件付での日降水量時系列の自己相関関数
「 r_T 」テトラコリック相関係数

大きい時の方が持続性は高くなっている。

- ② 東西指数が大きいとき周期性がかなり明確に現われており周期は約5日である。東西指数が小さいとき周期は明確ではないが5日よりは長くなっているようである。

偏西風が強く吹いているとき天気の周期が短くなり、偏西風が弱いときに周期が長くなるというのは直観的にも理解できる結果である。

日降水量資料の0.0mmを無降水とみなしたとき(図-8.b)は次のようになっている。

- ① 東西指数が大きいときには、図-8.a とほぼ同様の結果が得られている。
② 東西指数が小さいとき相関係数が全体的に大きくなっている。

日降水量資料の0.0mmを降水とみなしたとき無降水とみなしたときの結果の差については現在のところ解明できていない。

4. 日降水量予測シミュレーション

4. 1 予測シミュレーション・モデル

2.1節で示した多変数形回帰モデル $Y = AX + B\epsilon$ に予測の効果を導入する。

説明変数ベクトル X の要素として予測値を含めることにすると、予測値を考慮したシミュレーション・モデルとなる。説明を簡単にするために、1気象量の場合を考える。 $i+1$ 日の気象量の潜在変動 X_{i+1} を予測値 $\hat{X}_{i+1}$ のまわりに発生させ、かつ i 日の降水量の潜在変動 X_i と X_{i+1} の相関関係を保持するためには次式を用いればよい。

$$X_{i+1} = a_1 X_i + a_2 \hat{X}_{i+1} + b \epsilon_{i+1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、 $Y = X_{i+1}$ 、 $X = (X_i, \hat{X}_{i+1})$ 、 $\epsilon = \epsilon_{i+1}$ 、 $A = (a_1, a_2)$ 、 $B = b$ である。

他の説明変数、他の予測値があるときには X の要素として付け加えればよい。リード・タイムが1～ n の期間で予測シミュレーションを行うときには次の2モデルが考えられる。

(a) 逐次モデル(図-9.a)

$$X_{i+k} = a_{1k} X_{i+k-1} + a_{2k} \hat{X}_{i+k} + b_k \epsilon_{i+k} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、 X_{i+k-1} が既にジェネレートされているとき、式(4)を用いて X_{i+k} を発生させる。これを $k=1$ から n まで繰り返す。

(b) 一括モデル(図-9.b)

$$\begin{pmatrix} X_{i+1} \\ X_{i+2} \\ \vdots \\ X_{i+n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n+1} \\ a_{21}, a_{22}, & & \\ \vdots & \ddots & \\ a_{n1}, & \dots, & a_{nn+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ \hat{X}_{i+1} \\ \hat{X}_{i+2} \\ \vdots \\ \hat{X}_{i+n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11}, 0, \dots, 0 \\ b_{21}, b_{22}, & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ b_{n1}, & \dots, & b_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} \quad \dots\dots (5)$$

すなわち、 $X_{i+1} \sim X_{i+n}$ を一括して発生させる。降水量、気温など多くの水文気象量、多地点の場合などに対しては、 X_{i+1} の要素として $X_{i+1} \sim X_{i+n}$ に引き続いて、さらに発生させる変動を追加し、 X_i の要素に相当する説明変数、予測値などを付け加えればよい。

予測不可能な n より先の期間については、 X_{i+n} を初期値として、通常のシミュレーションを行えばよい。

4. 2 予測シミュレーションの結果

前述の予測シミュレーション・モデル(一括モデル)を作成した。

6月3日に予報が出たものとし、6月4日～6月10日の降水・気温の予測シミュレーションを行い、6

月11日から通常のシミュレーションを行った。予報としては、週間予報の次日・次々日の降水予報、週全般の降水予報、週前半・後半の気温予報を用いた。予測値を色々に変えてシミュレートした。結果を図-10に示す。たとえば、図-10中一番上の3点鎖線は雨がたいへん降りやすいという予報を入力して100年分をシミュレートしたものの平均的な値をプロットしたものであり、一番下の2点鎖線は雨がたいへん降りにくいという予報を入力したものの平均的な値である。降水日率、降水条件付平均降水量とも、はじめは予報の効果で予測値が大きいときはシミュレーション値は大きい方に、予測値が小さいときは小さい方にずれている。10日以上経過すると、シミュレーション値から計算される統計量は、予報とは無関係に平均的な値に漸近してくる。気温についても同様の結果が得られた。また、各種の分布、相関構造についてもうまくシミュレートされている。

以上のように、潜在変動モデルに予測値を入れることによって、予報の効果を導入した日降水量のシミュレーションが可能である。

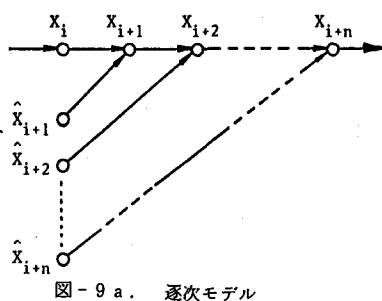


図-9 a. 逐次モデル

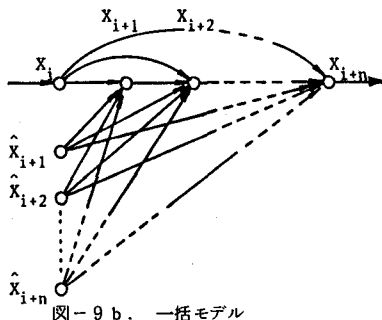


図-9 b. 一括モデル

5. おわりに

偏西風が強く吹いているとき弱く吹いているときによって地上の日降水量時系列の相関構造に差が現われることが明らかになった。

東西指数時系列（偏西風の強さの時系列）をシミュレートし、その大小条件付での日降水量の時系列構造を再現できるようなシミュレーションモデルを作れば、マクロな気象変動も導入することができるであろう。そして実測の日降水量の持つ渇水特性とシミュレーションとの差異を縮めることができる可能性がある。

このモデルを用いて日降水量時系列をジュネレートし、タンク・モデル等により流量時系列に変換する。そして貯水池管理方式を与えて貯水池のシミュレーションを行えば、貯水位（貯水量）の変動が得られる。これを数多く発生させれば、渇水発生頻度、その継続時間長分布等が得られる。また非常に多くの流量時系列資料を得ることができるので、貯水位（貯水量）の等確率曲線等を描くことができる。

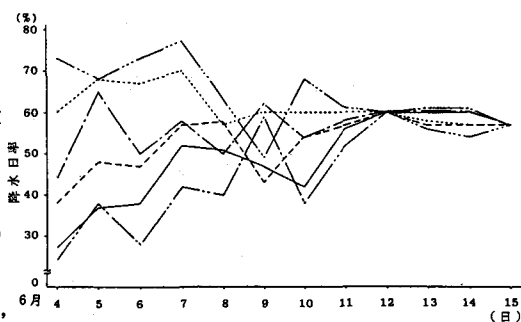


図-10 a 降水日率

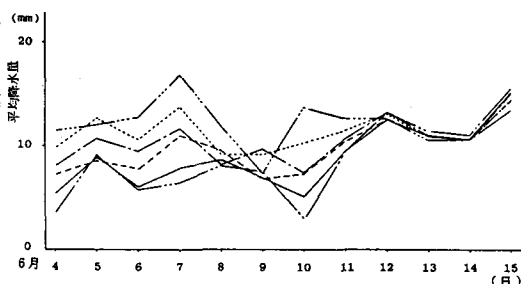


図-10 b 降水条件付での平均降水量

〔参考文献〕

- 1) 中村昭・小林隆幸：降水シミュレーションの水管理への適用，土木技術資料，22巻11号，1980
- 2) 近畿地建淀川ダム統合管理事務所：広域利水のための日降水量シミュレーションモデル作成，1974.1
- 3) 室田明・江藤剛治：潜在変動モデルによる日降水量時系列の解析とシミュレーション，土木学会論文報告集，第270号，1978
- 4) 和達清夫監修：新気象の事典，東京堂出版，1974初版