

実時間洪水予測に及ぼす流量観測および降雨予測精度の影響

The Influence of Precisions of Discharge Measurement and Rainfall Forecasting
on On-Line Real-Time Predictions of Flood Runoff

山梨大学工学部 正員 砂田 憲吾

東京都建設局 正員 大沢 健二

1. はじめに

カルマン・フィルター理論などを適用して河川の洪水流量の予測方法が検討されてきている。こうした方法ではさらにレーダー雨量計などによる降雨強度の実時間情報に基づく降雨予測と結合させてより有効な洪水流量の予測を期待し得る。この場合、実際面での対応を考えれば流量予測値の精度についても提示される必要がある。この点について、高埴^{1,2)}は主に降雨予測の精度が与える流量予測精度への影響を調べている。一方、実時間予測の基本となる流量観測誤差や精度は各河川・地点で相違し、精度そのものが不明確な場合も少なくないことから、流量観測精度が洪水流量予測に及ぼす影響についても議論しておく必要がある。本論文は上記の点に関して、流量観測精度と降雨予測精度の両者を同時に考慮する場合の洪水流量予測精度への影響を検討し、洪水予測性の向上のために考察を加えたものである。

以上のような検討は、結果の応用性から大小の流域に共通して適用できるより汎用性の高い予測システムを用いて進められるのが適当である。本論文では、昨(1983)年提案された流域分割予測システムを用いる。この方法は、後述するように、対象流域内における降雨の空間的分布情報が考慮され、各分割流域からの流量を非線型に合成していくもので、小流域のみならず大河川流域への拡張も可能な予測システムと考えられる。検討を明瞭な形でかつ系統的に進めるために、ここでは各種誤差レベルの設定・変更が可能なシミュレーション・データに基づいて議論する。

2. 流域分割予測システム³⁾

レーダー雨量計などの情報を有効に利用するには、降雨分布特性に応じた面積の程度にまで流域を分割して、各分割流域からの流量の合成により対象流域全体の流量を予測する方法が考えられる。ここでは流域中間地点で流量観測が行われない場合を考えるが、中間地点に流量観測値があればそれを考慮して発展的にシステムの改善が行える。

カルマン・フィルター理論の適用において、状態量に単位図をとることにすれば、状態方程式(1)、観測方程式(2)を得る。

$$h_{k+1} = l h_k + u_k \quad (1)$$

$$Q_k = m_k h_k + v_k \quad (2)$$

ここに、 h は単位図、 l は単位行列、 Q は流量、 m は降雨系列、 k はステップ、 u 、 v はノイズを示す。

式(2)の $m_k h_k$ の内容は、 r を流域平均降雨、 r_i を i 番目分割流域での降雨とすれば、

単一流域の場合：

$$m_k h_k = [r_k, r_{k-1}, \dots, r_{k-\tau}] [h_k, h_{k-1}, \dots, h_{k-\tau}]^T \quad (3)$$

流域分割の場合：

$$m_k h_k = m_{1,k} h_{1,k} + m_{2,k} h_{2,k} + \dots + m_{i,k} h_{i,k} + \dots + m_{n,k} h_{n,k} \quad (4)$$

である。ここに、 n は流域分割数であり、 $h_{i,k}$ は k ステップでの i 番目分割流域での単位図、 $m_{i,k}$ は i 番

目分割流域での降雨(r_i)の系列で、全体流域末端への到達時間を考慮してセットされる。

流域分割予測システムの基本式は式(1)、(2)、(4)で表わされ、分割流域の構成が直列、並列を問わない形式で柔軟性をもつが、問題は $m_{i,k}$ を指定する洪水到達時間の推定にあり、河道での流量合成の仮定により推定値が異なる。

これまでの検討によれば、各分割流域からの到達時間を常に一定として合成する場合(線型合成)に較べ河道系にkinematic wave理論を近似的に適用して、各区間毎に、各ステップごとに到達時間を推定して合成する場合(非線型合成)の方が良好な予測を示し、特に大出水時に有効なことが知れている。

kinematic wave理論によれば、河道での洪水伝播特性が特性曲線式(5)、(6)により表わされる。

$$\frac{dx}{dt} = m \alpha^{\frac{1}{m}} Q^{1-\frac{1}{m}} \quad (5)$$

$$\frac{dQ}{dx} = g \quad (6)$$

ここに、 m は抵抗則に関する定数(Manning則で $\frac{5}{3}$)、 α は S を河床こう配、 B を河幅、 n を粗度係数として $\alpha = \sqrt{S/n} B^{\frac{2}{3}}$ 、 Q は河道流量、 g は河道単位長さ当りの横流入量である。

式(5)、(6)を近似的に用い、Fig.1に対応させると、

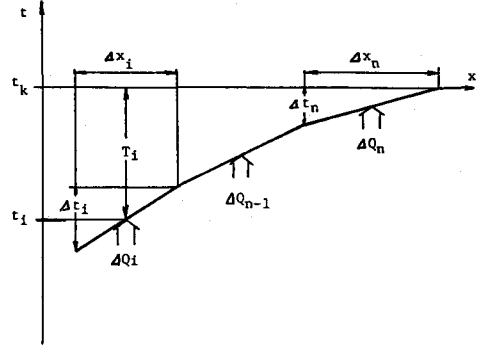
$$\Delta t_n = \frac{\Delta x_n}{m \alpha^{\frac{1}{m}} Q_n^{1-\frac{1}{m}}} \quad (7)$$

$$\Delta Q_n = g \Delta x_n \quad (8)$$

$$Q_{n-1} = Q_n - \Delta Q_n \quad (9)$$

いま、 k ステップまでの流域末端観測流量 Q_k が得られたとすると、その時点までで推定されている分割流域からの流出量を ΔQ_n に対応させることにより、式(7)、(8)、(9)から順次上流区間の Δx_i を定めることができ、その結果上流各分割流域から末端地点までの到達時間が求められることになる。計算では、フィルタリング理論による k ステップまでの一連の状態推定が済んだのち、別個に上式から各到達時間を求め、次の $k+1$ ステップでの対応する降雨時系列を各分割流域ごとにセットして新たな状態推定に移る。

Fig.2は計算の大略のフローを示す。



$$\Delta Q_i = m_{i,k} h_{i,k}$$

$$= [r_{i,k-i}, r_{i,k-i-1}, \dots, r_{i,k-i-\tau}] [h_{i,k}, h_{i,k-1}, \dots, h_{i,k-\tau}]^T$$

Fig. 1 分割流域からの流量合成

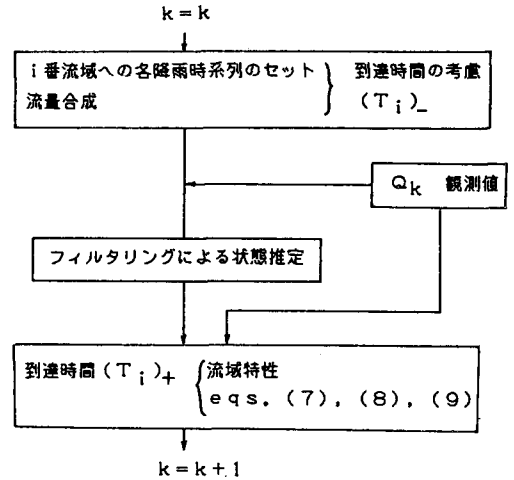


Fig. 2 流域分割予測システム

3. 流量のシミュレーションと予測システムの検証

流域面積が300 km²程度の直列の流域を想定し6分割した。河道区間長、Manningの粗度係数は一定とし、河床こう配、河幅を変化させて与えた。単位図はそれぞれの分割流域で、 $h_i = 0.5 \alpha_i^3 \tau^2 e^{-\alpha_i \tau}$ を用いて設定し、パラメタ α_i は一定値を与えた。また、ノイズは次のように設定した。

$$E[u_k] = 0.0, U = \text{Var}[u_k] = 0.0001, E[v_k] = 0.0, V_k = \text{Var}[v_k] = S_Q^2 Q^2$$

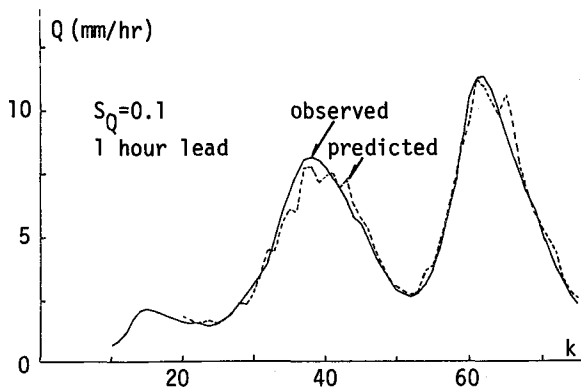


Fig. 3 流量予測 (1時間先)

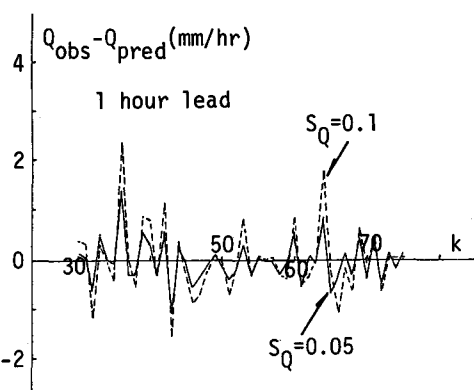


Fig. 4 予測誤差 (1時間先)

ここに、 $E[\cdot]$ 、 $\text{Var}[\cdot]$ はそれぞれ期待値、分散を示し、 S_Q は流量観測のあいまいさを規定するパラメタである。以上の諸量をもとに前節の流量合成方法により既知の時間・空間分布降雨を与えて、種々の S_Q に対して観測流量をシミュレートした。

まず、流域分割予測システムの検証のために、所与の降雨を用いて1時間先の予測流量と観測流量を比較すると、例えばFig. 3、Fig. 4 ようになる。Fig. 3 は予測値が観測値にほぼ精度よく一致することを示し、Fig. 4 は予測誤差の分布も妥当であることを表わしている。一方、単位図の推定も良好な結果となっており予測システムとしての機能が検証できる。

4. 予測降雨のシミュレーション

本論文では、予測される降雨を explicit な形式で扱うことにする。流量観測精度とともに降雨予測精度の洪水予測に及ぼす影響を調べるために、真の(実現した)降雨データから予測降雨をシミュレートする必要がある。降雨の短時間予測手法には各種あり⁴⁾ それらは物理的手法、統計的手法、運動学的手法(補外)にわけられ、目的・対象地域・情報の種類によりそれぞれ研究発展段階にある。この点を考慮して、基本的な予測形式とその精度評価のため次の2つの方法による場合を取り上げて並列して検討する。

- ①降雨の時間分布パターンを含めて予測降雨を与える場合。Fig. 5①の場合で、予測精度の指標として、高棹ら^{1,2)}の定義と同様なパラメタを用いて式(10)のよう表わす。

$$\left. \begin{aligned} E[\hat{r}_{k+l}] &= r_{k+l} \\ \text{Var}[\hat{r}_{k+l}] &= A^2 \ell r_{k+l}^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 $\hat{r}_{k+l}$ は ℓ ステップ後の予測降雨を示す。

- ②現時点から ℓ ステップ後までの平均降雨を予測として与える Fig. 5②の場合で式(11)のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} E[\hat{r}_{m,k+l}] &= r_{m,k+l} = \frac{1}{\ell} \sum_{j=k+1}^{k+l} r_j \\ \text{Var}[\hat{r}_{m,k+l}] &= A^2 \ell r_{m,k+l}^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

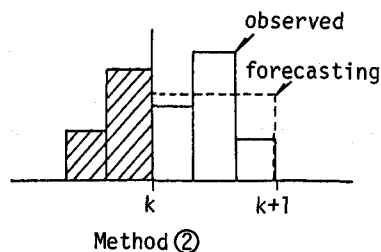
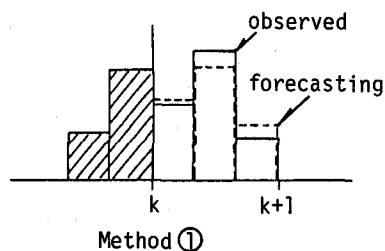


Fig. 5 降雨予測の形式

ここに、 $\bar{Q}_{m, k+l}$ は $k+1$ から $k+l$ ステップまでの平均の予測降雨を示す。

式 (10)、(11) において、 A_1 、 A_2 はそれぞれ降雨予測精度を規定するパラメタであり、リード・タイムの長さ、降雨強度の大きさに応じて予測精度が低下するであろうことを考慮している。式(10)、(11) に従い高棹らの方法に準じて正規乱数を用いて非負の予測降雨をシミュレートする。

5. 予測結果と考察

4種 ($S_Q = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) の観測精度をもつ流量データに対して、方法①、②それぞれに4種 ($A_1(A_2) = 0.01, 0.1, 0.25, 0.5$) の降雨予測精度による場合について、極端に大きいリードタイム (最大10hr) までの洪水予測計算を実行した。

まず、降雨予測の方法の違いによる洪水予測の結果の一例は Fig. 6、Fig. 7 のようになる。両者とも流量観測精度は同一 ($S_Q = 0.1$) の場合であり、方法①による方が予測性が高いようにみえる。 A_1 と A_2 とは本来その同一値で比較すべきものではないが、計算過程で推定されている状態量がほぼ同様となっていることから、 A_2 が大きい場合はトータル降雨量が真値と大きくかけ離れてくるものと考えられる。Fig. 8 は Fig. 6 の予測誤差を示している。

次に、リード・タイムによる流量予測精度について調べたものが次頁以後の Fig. 9～Fig. 16 である。比較のための予測精度の指標には、状態量の推定が十分進んだと考えられる流量の最終ピークの立ち上がり点付近 ($k = 50$) から、そのピークを過ぎた点 ($k = 65$) までの予測誤差の分散の平均 $\bar{W}_{65}$ をとっている。

Fig. 9～Fig. 12 は降雨予測精度を固定して、流量観測精度の良否の影響を方法①、②別に示したものである。 $A_1(A_2)$ が小さい場合は流量予測誤差の分散はほとんど S_Q に依存するが、 $A_1(A_2)$ の増大とともに降雨予測精度にも影響されるようになることが判る。

Fig. 13～Fig. 16 は逆に流量観測精度を固定して、降雨予測精度の影響を調べたものである。 S_Q が小さいときは $A_1(A_2)$ による影響は明確であるが、 S_Q の増大とともにその差は不明確になる。これらは、降雨予測の精度、流量観測の精度のどちらか一方を高めても洪水予測には効果的でなく、両者のバランスのとれた精度向上が必要であることを示し当然の結果となっているが、特に Fig. 9～Fig. 12 からは降雨予測精度の影響は徐々に効くに対して流

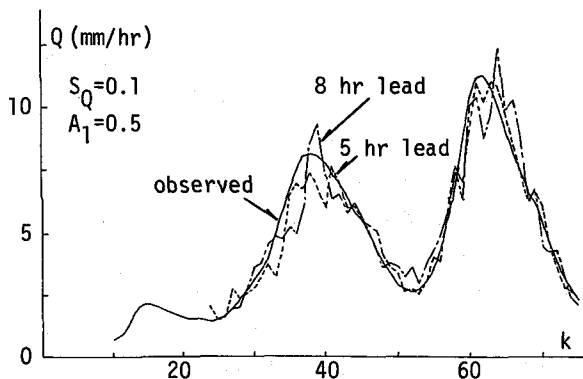


Fig. 6 流量予測 (方法①)

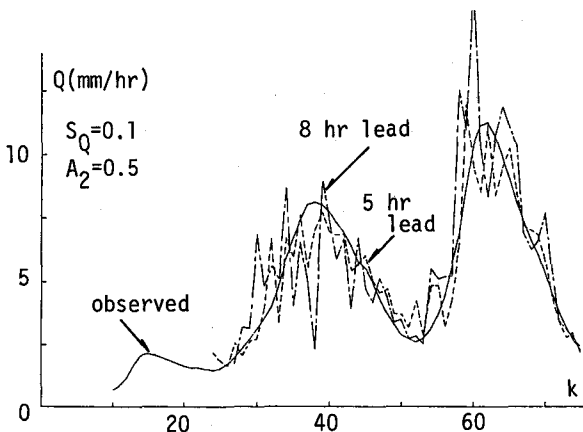


Fig. 7 流量予測 (方法②)

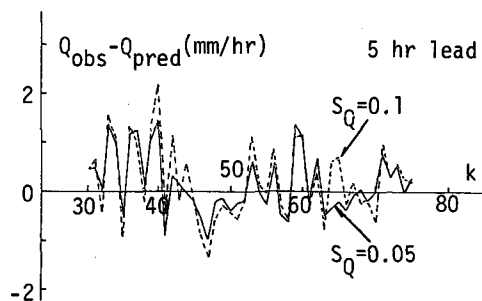


Fig. 8 予測誤差 (方法①)

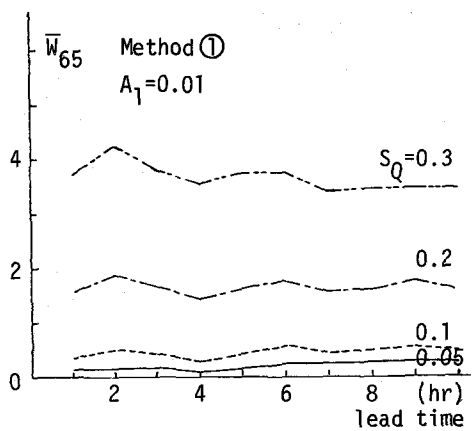


Fig. 9

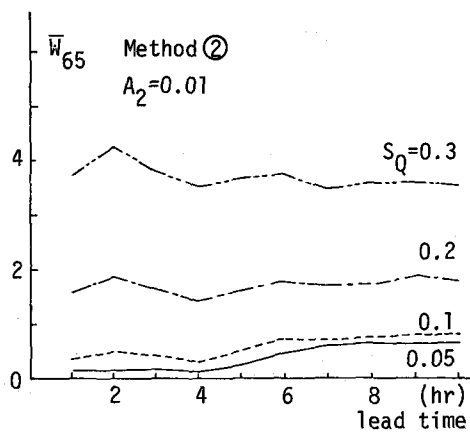


Fig. 10

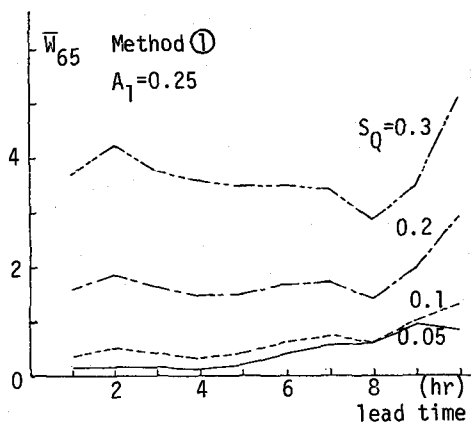


Fig. 11

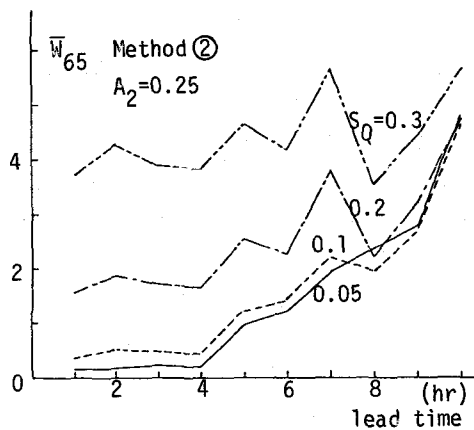


Fig. 12

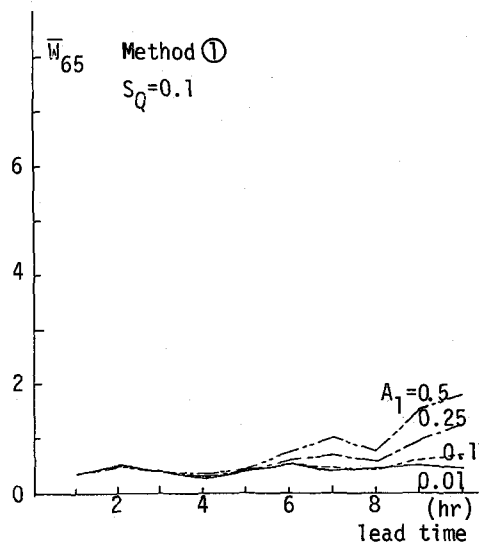


Fig. 13

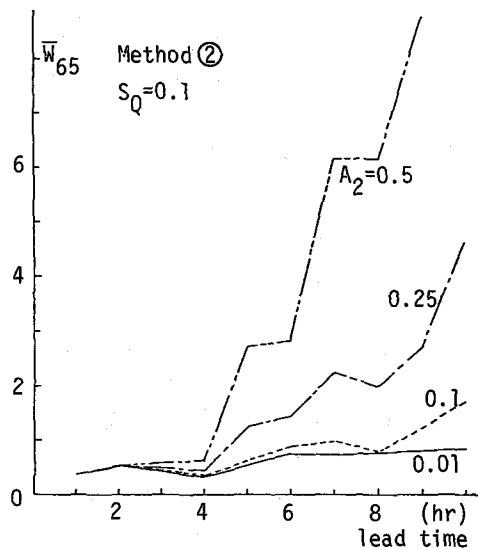


Fig. 14

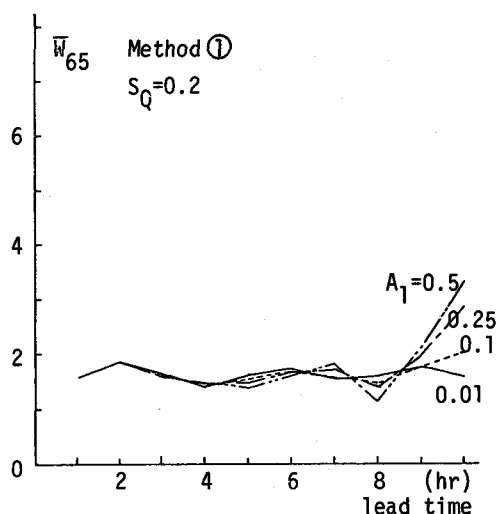


Fig. 15

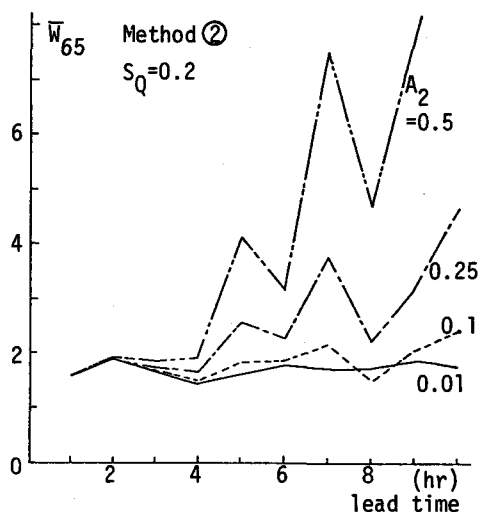


Fig. 16

量観測精度の影響は $S_Q = 0.1$ (流量観測誤差の標準偏差が10%)を超えると急に流量予測精度が低下する傾向のあることが判る。

ところで、降雨予測精度に着目すれば、方法①では3~4時間先まで、方法②では2~3時間先までの流量予測に与える A_1 (A_2) の差があまりない。これは、流域規模にもよるが、ここで用いた流域分割予測システムでは洪水到達時間に応じて個別に予測降雨が設定されるので、特に上流側流域では予測降雨の誤差の比重が相対的に小さくて済むためであると考えられる。このことから、上記の予測システムは数時間先洪水予測における降雨予測の負担を軽減できる有利な方法と考えられる。

6. おわりに

降雨の空間分布情報を重視する流域分割予測システムを用いて、洪水流量の実時間予測に与える流量観測、降雨予測の精度の影響を調べた。当然のことながら用いる予測システムが異なれば結果は別に得られるであろうが、洪水予測性の向上のためにここに述べたような検討は重要であることを強調しておきたい。実河川の場合にはモデルそのものの誤差と提示し難い流量観測誤差とが混然となるため、モデルの精度の合理的な設定方法などについての今後の検討が必要である。降雨予測についていえば、方法②は将来の降雨に対して平均値で示す現実的な方法であるが、ここでも示されたように、方法①の方がより合理的で洪水予測性も高まることから、時間分布降雨予測手法の研究発展にも期待するところが大きい。

最後に、本研究の一部は昭和58年度文部省科学研究費(試験研究)代表者・砂田)の補助を受けて行われたものであり、記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 高埴・椎葉・宝：貯留モデルによる実時間流出予測に関する基礎的研究、京大防災研年報、№25 B-2、PP. 245-267、1982.4
- 2) 高埴・椎葉・宝：洪水流出の確率予測におけるモデルと手法、第19回自然災害総合シンポジウム要旨集、PP. 63-66、1982.11
- 3) 砂田：洪水流量の実時間予測に関する検討、水理講演会論文集、№27、PP. 11-16、1983.2
- 4) 立平：レーダによる雨量測定と短時間予報、気象研究ノート、№139、PP. 79-107、1980