

洪水流出予測における準線形化手法の適用に関する分析 Study on a Quasilinearization Technique for Flood Run-off

㈱日水コン 正員 森 野 彰 夫

㈱日水コン 正員 蔵 重 俊 夫

1. はじめに

本稿は、著者ら¹⁾がその収束性改善を試みた準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムをダム流入量予測を目的とした洪水流出予測モデルに適用し、その有効性を明らかにしたものである。

洪水流出の予測は、豪雨や出水が想定される場合に、その規模、発生時刻を予測するものであり、治水事業が十分に行なわれていない地域ではその代替事業として、一方、治水事業が十分に行なわれている地域でも計画超過洪水に対する対策として、又ダム、堰等の河川管理施設の操作情報として必要であることは言うまでもない。

本稿では、このうち河川上流に位置するダム流入量予測に対し、準線形化手法を用いた流出計算法の改良を試みることにした。具体的には、ダム流入量を予測する場合、予測モデルのパラメーターが不適当な場合には、予測誤差は当然大きくなり、洪水時に貯水容量をより有効に利用するという立場からは望ましくない。このため、このような誤差を縮めるための一つの方法として、実測の降雨-流出量の関係に合うようモデルパラメーターを時々刻々変えて(逆算して)いく方法が考えられている²⁾。本稿は、このプロセスに準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムを援用し、洪水流入量の大きさや洪水の時間的経過に従って予測モデルの運用を行なうことの有効性を確認することとした。

まず2.では、準線形化によるパラメーター決定問題を対象に、洪水予測手法としての有効性を主としてパラメーター決定アルゴリズムの面から考察し、本稿での目的を明らかにする。ついで、3.では実流域を対象に本モデルの運用を行ない、洪水時に必要となる予測時間、予測精度を考慮したモデルの運用方法について検討した結果を示す。

2. 洪水予測における準線形化手法の適用について

2-1 準線形化と最適化手法

準線形化は、非線形汎関数方程式の数値解法の一つであり、非線形常微分方程式を線形化することによりパラメーター決定問題を線形常微分方程式の初期値決定問題のくり返し過程として取り扱う。そしてその有効性は未知のパラメーターを含む非線形常微分方程式のパラメーター決定において特に発揮される。

そして、この手法について以下のような点を利点としてあげることができる。

①非線形微分方程式の直接的な求解を必要としないので計算が単純化される。

②パラメーター以外の変数について、その初期条件が与えられない場合や、信頼性に欠ける場合についても、その初期値をパラメーターと同様に決定できる。

③くり返し過程は2次の収束速度を持つことが示され計算時間も比較的短く、初期仮定解の適切な設定により、試行錯誤的要素を必要としない。

しかしながら、準線形化によるパラメーター同定は、最小二乗法を最適化手法として用いたアルゴリズムによる限り、収束性が悪く実用性に欠ける点が問題として指摘された³⁾。このため、著者らは収束性を改善する一つの方法として予めパラメーターに制約を設け、収束計算過程で解が発散していくことを防ぐと同時に微分方程式の求解過程や、解の最適化過程でのオーバーフローによる計算中断を防ぐことを考え、最適化手法として計算速度の早い制約条件付最適化手法としてのコンプレックス法を用いたアルゴリズムを採用することとした。

2-2 洪水流出予測モデルの運用方法

ダム流入量予測に際しては、流入規模と共に流出総量も又情報として重要である。そしてこのことは有効流出量や流域の貯留残高といった要素も推定対象となり、降雨状況や流域条件をもパラメーターとして推定することが必要となる。また、ダムは河川の中・上流部に設けられ、集水面積も数百 km^2 以下の場合が多いため、流入量予測の計算方法としても貯留関数法等に代表される流出計算が一般に行なわれる。しかしながら、貯留関数法等を用いて流域流出量を予測する場合には、その定数が適正かどうか予測精度に大きく影響する。

貯留関数法等に代表される流出計算法は、一般に洪水時の流出現象の全般（小流量～大流量、洪水の前半～後半、台風性～前線性の洪水等）にわたって必ずしも精度よく表現できるものではない。このため、生じる予測誤差を縮めるための一つの便宜法として、洪水期間中、実測の流域降雨～ダム流入量の関係が再現できるようモデル定数を時々刻々変えて（逆算して）いく方法がとられている。すなわち、洪水流出量の大きさや洪水の時間的経過に従って、きめ細かく予測モデルを運用していくという方法である。

本稿では、上述のこのプロセスに準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムを適用し、2-1で述べた3つの利点を最大限活用することにより洪水時におけるダム流入量予測の精度向上を図ることとした。図-1に準線形化手法を用いたダム流入量予測モデルの運用方法を示す。同図に示すように、モデル運用に際しては時々刻々入手できる降雨ならびに流入量データを用い、その都度モデルパラメーターの決定を行ない、必要とする予測期間までの将来流入量を推定していくという手順を踏むこととした。このような運用方式は現行のダム操作時においても用いられているが、パラメーターの決定に人為的な試行錯誤が入るため必ずしも効率よく運用されているとは言い難い。このため、本稿ではこのプロセスを準線形化によるアルゴリズムの援用により自動化するとともに予測精度、予測に要する時間をさらに改善、短縮するための検討を合わせて行なうことを目的とした。

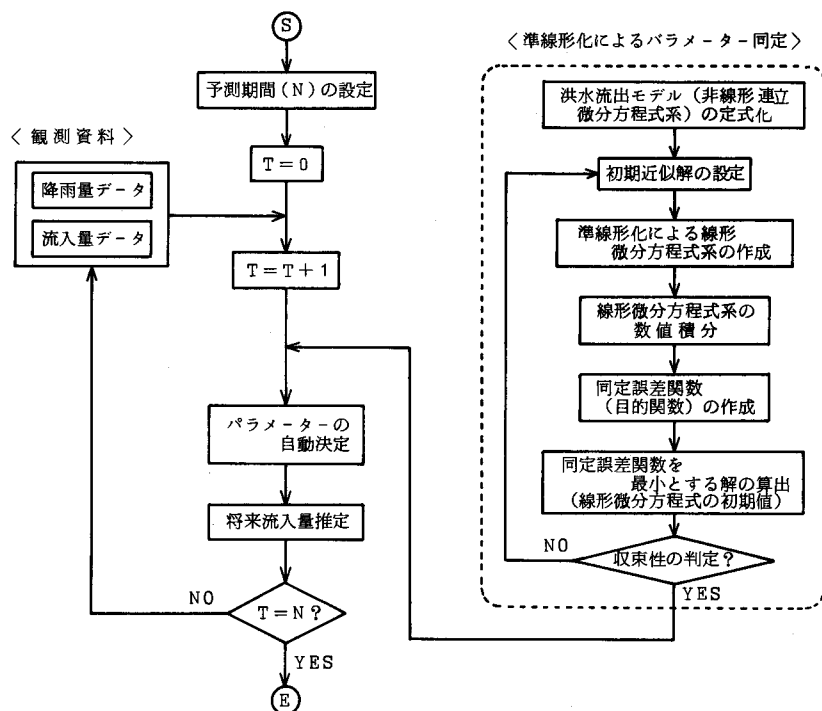


図-1 準線形化手法を用いた予測モデルの運用方法

3. 実流域における適用結果

3-1 流入量予測モデル

ダム流入量の予測に際しては、ダム地点上流域における流域平均雨量を入力とし、ダム流入量（流域からの流出量）を推定する流出計算法を予測モデルとして用いることとした。そして雨量データについては別途降雨予測により将来の降雨量が与えられるものとし、この予測降雨量を用いて将来のダム流入量を推定していくこととした。

図-2にダム流入量の予測モデルを示す。対象としたダム地点は上流域の流域面積が100Km²であり、一般にこのような流域からの流出量の推定には貯留関数法が用いられている。ここでは、貯留関数法における有効降雨の概念がさらに物理的なメカニズムとして把握できるよう降雨分離サブモデルを通した、地下損失を有するタンクモデルとして流出現象を記述することとした。⁴⁾

設定した降雨分離モデル式を(1)(2)式に示す。

<降雨分離モデル>

$$r_1 = \left(1 - \frac{a_1}{1 + a_2 \cdot rf}\right) \cdot r \quad (1)$$

$$r_2 = r - r_1 \quad \text{但し、} r_1 \leq r \quad (2)$$

ここに、

- r ; 総降雨量 (mm/hr)
- r_1 ; 直接流出に寄与する降雨量 (mm/hr)
- r_2 ; 地下水流出に寄与する降雨量 (mm/hr)
- rf ; 累加雨量 (mm), a_1, a_2 ; 定数

なお、(1)式の係数 $\left(1 - \frac{a_1}{1 + a_2 \cdot rf}\right)$ は、

貯留関係法で使用される1次流出率を $(1-a_1)$ と記述し、累加雨量 rf が大きくなれば飽和流出率（ここでは、1.0と仮定する。）に漸近して

いくというプロセスをモデル表現したものである。したがって、貯留関数法を用いた予測モデルに比べ、より現実の流出メカニズムを適切に表わしたものと考えられる。

直接流出、間接流出の各流出を記述するモデル式は、以下の(3)~(7)式である。

<直接流出サブモデル>

$$dS_1/dt = r_1 - q_1 \quad (3)$$

$$S_1 = K \cdot q_1^p = 1/m \cdot q_1^p \quad (4)$$

<間接流出サブモデル>

$$dS_2/dt = r_2 - q_2 - q_3 \quad (5)$$

$$q_2 = \phi \cdot S_2 \quad (6)$$

$$q_3 = K \cdot S_2 \quad (7)$$

ここに、

- q_1 ; 直接流出高 (mm/hr), q_2 ; 地下水流出高 (mm/hr), q_3 ; 地下損失高 (mm/hr)
- S_1 ; 直接流出高に対する貯留高 (mm), S_2 ; 地下水流出高に対する貯留高 (mm)
- m, ϕ, K, P ; 定数 ($P=0.6$)

3-2 予測モデルの運用結果

最適化手法としてコンプレックス法を組合せた準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムの適用性を調べるため、洪水期間2日間（48時間）の全データを用い、まずアルゴリズムの妥当性を検証することとした。図-2に示したようにモデルにおいて同定すべき変数は、 m, ϕ, K, a_1, a_2 の5つのパラメーターと流出高の初期条件 $q_1(0), q_2(0)$ の計7つであり、各変数の制約条件は表-1のように設定した。さらに、目的関数はハイドログラフの形状を対象とした全期間にわたって一致させるという立場から実測流入量と推定値の毎日の相対二乗誤差最小とし、5%の許容誤差内で全てのパラメーターが3回くり返されたとき収束とみなした。

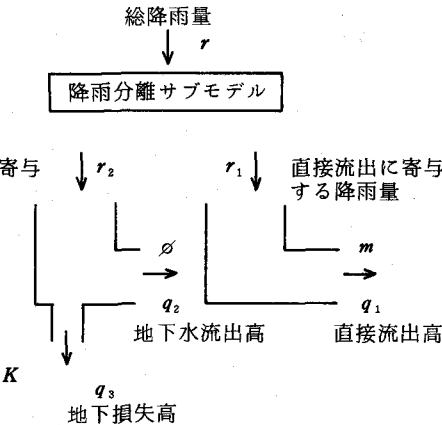


図-2 ダム流入量予測モデル

以上の条件下でのダム流入量の推定結果を図-3に示す。洪水期間の初期及び減衰期において若干誤差が大きく現われているが、総流入量については実測値392mmに対し、369mmという6%以内の誤差で推定が可能であることがわかった。

しかしながら、実際のダム操作時においては、上述のように全てのデータが得られているわけではない。このため、つぎに時々刻々入手できる降雨、流量データに対し、データを蓄積することによってどの程度の精度で将来流入量の推定が可能であるかについて検討することとした。図-4(1)(2)(3)に降雨開始から各々8、16、24時間までの流量データを用い、それ以降のダム流入量を予測した結果を示す。各ケースでの特徴は以下の通りであり、ダム操作に際しては少なくとも流量の立上り時刻までのデータを用いて将来流入量の予測を行なうことが望ましいと判断できる。

Ⅰ) 降雨開始8時間までのデータを用いた場合 (図-4(1))

いわゆる一次流出率が卓越して現われる期間であり、この期間のデータを用いての予測は、ダム流入量のピークを過小に予測してしまう結果となる。

Ⅱ) 降雨開始16時間までのデータを用いた場合 (図-4(2))

降雨の1番目のピークが通過した後の、いわゆる流出現象が飽和流出率となる時期である。このため同定されるパラメーターも直接流出の卓越する現象をよく記述しており、流入量が増大する時期の予測結果もⅠ)のケースに比べるとかなり良好となる。

Ⅲ) 降雨開始24時間までのデータを用いた場合 (図-4(3))

降雨量のピークが通過する時点までのデータを用いた場合であり、予測した流量ハイドログラフの形状も安定している。但し、ダム操作等を対象とした流入量予測に際しては、用いたデータ以降の予測精度が問われるのであって、入手済期間内での予測精度の良さは比較の対象とはならない。流入量のピークが終了し、低減に向かう期間に対する予測結果については、Ⅱ)のケースと比較してデータ蓄積したからといって必ずしも精度が向上したとは言えないようである。

以上のようにダム操作に際しては、時々刻々入手できる降雨、流量データを用いてモデルパラメーターの

表-1 パラメーターの制約条件

PARAMETER NO. 1 **	X1 (Q1)	LOWER=	0.0	UPPER=	30.00000
PARAMETER NO. 2 **	X2 (Q2)	LOWER=	0.0	UPPER=	30.00000
PARAMETER NO. 3 **	X3 (M)	LOWER=	0.01000	UPPER=	0.20000
PARAMETER NO. 4 **	X4 (F)	LOWER=	0.00100	UPPER=	0.10000
PARAMETER NO. 5 **	X5 (A1)	LOWER=	0.50000	UPPER=	1.00000
PARAMETER NO. 6 **	X6 (A2)	LOWER=	0.0	UPPER=	0.05000
PARAMETER NO. 7 **	X7 (K)	LOWER=	0.00200	UPPER=	0.10000

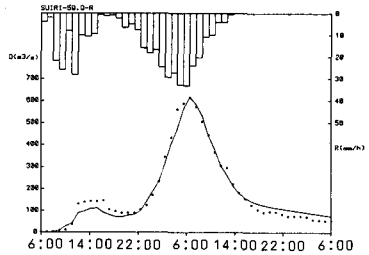


図-3 ダム流入量推定結果 (N=48)

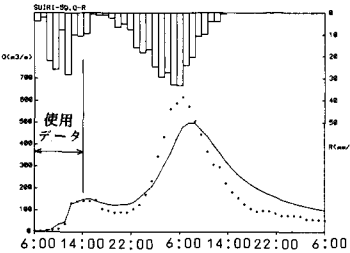


図-4(1) ダム流入量予測結果 (N=8)

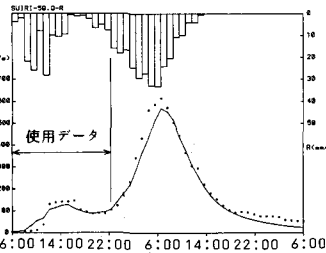


図-4(2) ダム流入量予測結果 (N=16)

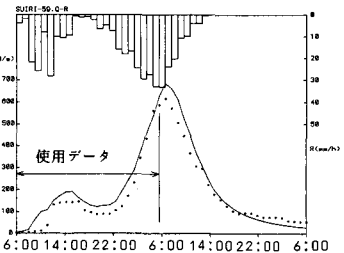


図-4(3) ダム流入量予測結果 (N=24)

逐次更新を行ない、予測精度を向上させていくという立場から、使用するデータ数と予測精度の関係について考察してきた。この結果、降雨初期の段階ではデータ数を蓄積することにより飛躍的に将来流入量の予測精度は向上していくが、流量ハイドログラフの立上り期間までのデータが入手できれば、それ以降のデータ蓄積は以降の流入量予測に際してあまり効果を有しないことが明らかとなった。

4. 準線形化を用いた予測モデルの拡張

4-1 予測モデルの運用方法に関する考察

ダム流入量予測等の実時間操作時において、予測精度と同じように重要となるのは予測に要する所要時間である。一般にこの所要時間は短い程好ましく、たとえ十分な精度で予測が可能となったにせよ、それに要する時間が長ければさしたる効果はなく、逆に少々精度が悪くても所要時間が短い方が現場の管理者には好まれるようである。本稿で用いた準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムは、その利点として前述したように、従来の試行錯誤を計算機内で自動的に行なうという点からかなりの所要時間の短縮を可能としたものであるが、さらに所要時間の短縮という観点からその改良の余地を列挙すると次の2点を挙げることが可能と考えられる。

- Ⅰ) 予測に用いるデータ数を少なくすることにより微分方程式の数値積分に要する演算時間を短縮する。
- Ⅱ) データ更新毎に設定する初期近似解を前の期間で同定されたパラメーターを用いることにより、パラメーター収集に至るくり返し回数の短縮を図る。

以下では、このうちⅠ)についての検討結果を示すとともに、使用するデータ数により異なった値として同定される洪水期間内でのパラメーターの時間的変化傾向について分析した結果を示す。

前掲図-4(3)に示した降雨開始24時間データを用いた場合のダム流入量予測結果に対し、予測精度を極端に落とさないようにしてどの程度までのデータ更新が可能となるかを分析した結果が図-5(1)(2)である。図-5(1)は、上述の24時間データのうち、降雨初期8時間のデータを捨て、予測開始前16時間のデータを使用した場合の結果であり、同様に図-5(2)は降雨初期16時間のデータを捨て、予測開始前8時間のデータを使用した場合の結果である。これらの図に示すようにデータ更新は予測に要する時間短縮に役立つ一方、用いるデータの取捨選択では予測結果にかなりの差異が生じるためデータ更新方法には十分な検討を要することがわかる。

本稿では、このための検討として各予測ケースにおいて同定されたパラメーター値をもとに以下の立場からデータ更新方法について考察し、予測に用いる妥当なデータ数として $N = 16$ 時間という結論を得た。

すなわち、まずパラメーターは基本的には時間の関係として出水期間中は変化する(本モデルでは一定として取り扱っている)ものであるが、この傾向は例えば降雨初期とそれ以降といったような期間では大きな特徴をもって変化すると考え、表-2に示すような出水期間中3期におけるパラメーター値を抽出した。この結果、直接流出量を表現するタンク穴の乗数 m については流量ハイドログラフがピークに達する17~24時間の間において最も大きくなる一方、地下損失を表現する K についてもこの期間において最小となることが明らかとなった。流量ハイドログラフがピークに達するまでのこれらパラメーターの変化についてみると

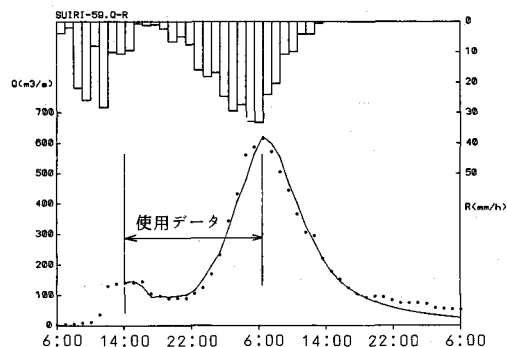


図-5(1) ダム流入量予測結果 ($N = 16$)

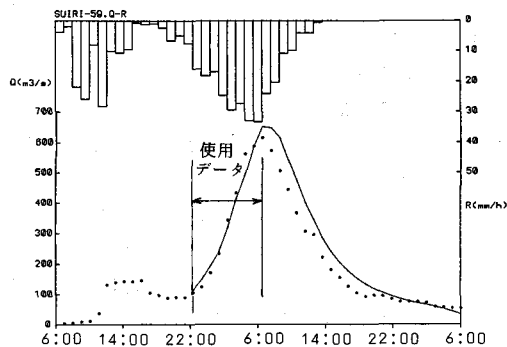


図-5(2) ダム流入量予測結果 ($N = 8$)

地下水損失を表現する K については、一般に初期損失と言われている凹地貯留、樹木遮断等のため降雨初期にはその値が大きく、時間の経過につれて低減する傾向が現われている。

表-2 パラメーターの同定結果

パラメーター 期間	m	ϕ	K	a_1	a_2
降雨初期 (0~8時間)	7.2×10^{-2}	5.1×10^{-3}	6.8×10^{-2}	9.7×10^{-1}	0.6×10^{-3}
立上り期間 (9~16時間)	5.3×10^{-2}	4.9×10^{-3}	3.0×10^{-2}	7.6×10^{-1}	1.9×10^{-3}
ピーク期間 (17~24時間)	1.1×10^{-1}	5.2×10^{-3}	1.6×10^{-2}	8.3×10^{-1}	0.7×10^{-3}

一方、直接流出を表現する m については、降雨開始から8時間程度の時間遅れをもって最小値が現われており、洪水初期における流出現象の複雑さの一端がうかがえる。流入量予測におけるデータ更新の際、降雨初期のデータを捨てて行なったケース（前掲図-5(1)）の予測結果が最も良好であった原因もこのためと考えられる。また、地下水流出を表現する ϕ については、表-2に示すようにその変化は少なく、洪水期間中一定とみなせるようである。

4-2 遅滞時間を考慮した洪水流出予測モデル

貯留関数法は、流域内の雑多な洪水流出機構を画一的に単一の模擬物理関数（貯留関数）に置き換えたものであり、その計算式が流域の洪水流出現象と対照して比較的理解しやすい。このため、その計算精度が洪水の規模や洪水継続時間などによって異なってくるという指摘を有しながらも、種々の工夫がなされ建設省を初めとして国内において広く適用され実用に供しているようである⁵⁾。ここでは、このうち特に遅滞時間の決定について検討した結果を示す。

前述したように準線形化手法は、未知パラメーターを含む非線形常微分方程式のパラメーター決定において特に有効である。このため従来貯留高と流出高との関係をもとに試行錯誤的に決定されていた遅滞時間の取り扱いを次式に示すように未知パラメーターとして記述することとした。

<直接流出サブモデル>

$$dS_1(t)/dt = r_1(t) - q_1(t) \quad (3)$$

$$S_1(t) = K \cdot q_1(t + Tl) = 1/m \cdot \{q_1(t) + Tl \cdot \dot{q}_1(t) + \frac{Tl^2}{2} \cdot \ddot{q}_1(t)\} \quad (4)$$

ここに、 Tl 遅滞時間 (hr) (他の記号は前掲式に順ずる。)

流量ハイドログラフの推定結果を図-6に示す。前掲図-3に示した推定結果は、流出量のピークが一致するよう事前に遅滞時間を試行錯誤して1hrとみなし、降雨量データをその時間だけ遅らせて計算したものであり、上記モデル式により同程度の精度を維持しつつ、かつ遅滞時間の自動決定が可能となることがわかった。

5. おわりに

本稿は、準線形化によるパラメーター決定アルゴリズムを実際のダム操作を目的とした流入量予測モデルとして、効率的運用という観点からその有効性を明らかにしたものである。今後は、流出機構の解明という観点も踏まえモデルパラメーターの時間的変化を同手法を用いてさらに詳細に分析し、流域の特性、出水形態等との因果関係を明らかにした上で、流出量の将来予測に役立てたいと考える。最後に本稿の遂行にあたり、論文作成の機会を与えて頂いた、(株)日水コン 萩原良己氏・中川芳一氏に謝意を表します。また、和田芳樹氏の多大な協力に感謝します。

〔参考文献〕

- 1) 萩原・中川・蔵重；準線形化の河川計画への適用に関する研究，NSC研究年報，Vol.12，No.1，1984.
- 2) 西原編；洪水予報，全建技術資料，全日本建設技術協会，1976.
- 3) 中川・森野・蔵重；流域の土地利用形態を考慮した洪水流出解析(2)，第26回水理講演会論文集，1982.
- 4) 建設省土木研究所，準線形化手法を用いた水循環モデルの機械的同定法，土木研究所資料，第1911号，1983.
- 5) 藤原・佐々木；貯留特性を利用した実用的洪水流出計算法，第24回建設省技術研究会報告，1970.

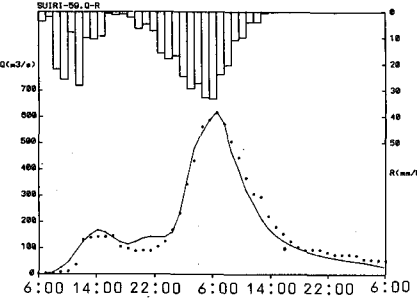


図-6 ダム流入量推定結果
($Tl = 0.94 \text{ hr}$)