

タンクモデルの構造及びパラメータの不確定性に関する検討

福岡大学大学院 学生会員 ○藤本雄大

福岡大学工学部 正会員 手計太一・佐藤研一

1. はじめに

タンクモデルは菅原¹⁾が開発した非線形流出計算法であり、そのモデル構造の簡便性や流出現象の表現性の良さ、また比較的精度が良いなどの理由から、現在、短長期の流出予測で最も頻繁にそして広く使われている流出モデルの一つである。しかし、タンクモデルはパラメータ数が多くパラメータの決定が容易でないため、現在までに様々な検討がなされてきたが、タンクモデルパラメータを一意的な値に決定することは未だ困難である。モデル構造または水文資料に不十分なことによるモデル構造及びパラメータの不確定性が、一意的に決定できない理由の一つと考えられる。そこで、本研究ではタンクモデルパラメータを一意的に決定することを目的とし、拡張カルマンフィルタでパラメータの最適化を行った結果をもとに、タンクモデルパラメータの相互関係の解明とモデル構造について検討を行う。

2. モデルと使用データ

本研究では、パラメータ数を少なくするように勤め、図-1に示す7つのパラメータを有する2段タンクモデルと9つのパラメータを有する損失を考慮した2段タンクモデルを使用した。モデル中のH1, H2, H3は貯留深(mm), A1, A2は流出孔の大きさ, B1, B2は浸透孔の大きさ, C1, C2は流出孔の高さ(mm)である。また、計算はすべて10分単位で行い、短期の出水を対象としたため、蒸発散量は考慮しない。

本研究において対象とした流域は、(独)土木研究所が1969年から継続的に水文観測を行っている裏筑波流出試験地である²⁾。本試験地は利根川水系桜川左支川山口川の最上流部、筑波山麓北側斜面に位置し、流域面積は3.12km²、流域平均勾配は等高線延長法によって25°である。流域内は国有林等による森林によって覆われた典型的な山地森林流域である。1969年から1998年までに、流域の出口に位置する山口流量観測所で計測された流量データと祖父ヶ峰雨量観測所で計測された降雨量データの中から、既往最大から順に29番目までのイベント(総降雨量: 31.5mm～301.5mm)を選択した。

3. 研究方法

本研究では、拡張カルマンフィルタを用いてパラメータを最適化した。客観的にパラメータの値を決定できるようにするために、表-1に示す値を設定し、2段タンクモデルでは5184通り、損失を考慮した2段タンクモデルでは20736通りを初期値として与える。なお、システム方程式のノイズは1%, 観測雑音の標準偏差は0.01とした。また、計算流量が観測流量をどの程度再現できているかを定量的に評価する指標として総流出量誤差とピーク流量誤差、全体の適合度を評価するNash Sutcliffe指標³⁾を用いた。Nash Sutcliffe指標を最大化することは、最小二乗誤差基準を及びRMSEを最小化することと等価である。

4. 解析結果

使用データがパラメータの最適化に与える影響として、出水規模やデータ数などが考えられる。そこで、それぞれのパラメータについて使用データの総降雨量、データ数といったデータ特性と最適化結果の標準偏差との関係について検討を行った。表-2に総降雨量と貯留深Hの決定係数を示す。ここでは、決定係数が0.5以上であったHについて結果を示す。

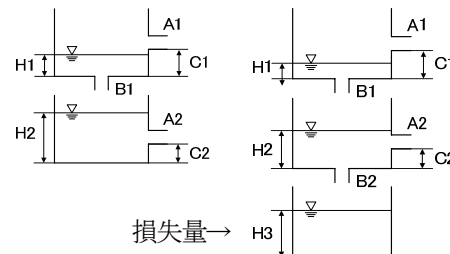


図-1 2段タンクモデルと損失を考慮した2段タンクモデル。

表-1 パラメータの初期値。

2段タンクモデル		損失を考慮した2段タンクモデル	
Parameter	Initial values	Parameter	Initial values
H1(mm)	0, 5, 10	H1(mm)	0, 5, 10
H2(mm)	20, 60, 100	H2(mm)	20, 60, 100
A1(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91	A1(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91
A2(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91	A2(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91
B1(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91	B1(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91
B2(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91	B2(-)	0.01, 0.31, 0.61, 0.91
C1(mm)	2, 6, 10	C1(mm)	2, 6, 10
C2(mm)	2, 6, 10	C2(mm)	2, 6, 10

表-2 総降雨量とHの標準偏差の相関性。

	H1	H2	H3
2段タンクモデル	0.902	0.945	-
損失を考慮した2段タンクモデル	0.811	0.535	0.849

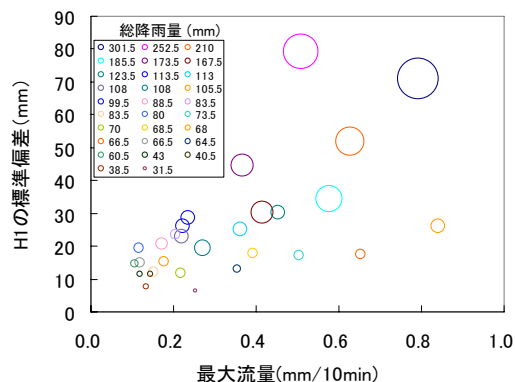


図-2 2段タンクモデルにおける総降雨量、最大流量及び貯留深H1の標準偏差の関係。

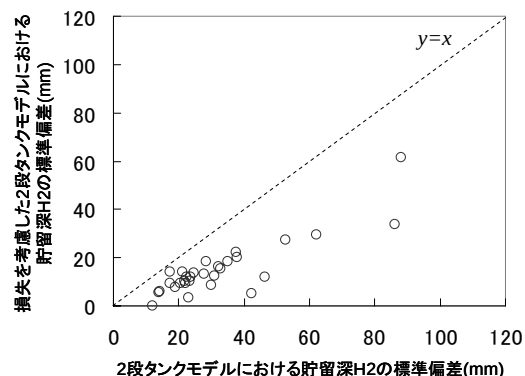


図-3 2段タンクモデルにおける貯留深H2の標準偏差と損失を考慮した2段タンクモデルにおける貯留深H2の標準偏差の関係。

H1, H2, H3ともに正の相関関係であったことから総降雨量が大きいものほど、貯留深Hの標準偏差は大きいことがわかる。正の相関関係であった要因として、タンク内で貯留することで流量を調節していることが挙げられる。損失量を考慮することで決定係数が小さくなっているが、これは3段目のタンクに貯留量が分散されたためと考えられる。図-2は、2段タンクモデルにおける使用データの総降雨量、最大流量及びH1の標準偏差の関係である。プロットの大きさは、使用データにおける総降雨量の大きさを表している。最大流量が大きいほどH1の標準偏差が大きい傾向が見られる。また、H2の標準偏差、損失を考慮した2段タンクモデルのH1,

H2, H3においても同様の傾向が見られた。貯留深H以外のパラメータについては、パラメータの標準偏差と総降雨量及び最大流量の有意な傾向は見られなかった。ここで、図-3に2段タンクモデルにおける貯留深H2の標準偏差と、損失を考慮した2段タンクモデルにおける貯留深H2の標準偏差の関係を示す。2段タンクモデルと損失を考慮した2段タンクモデルを比較すると、定性的には大きな違いはないがH2の標準偏差は損失を考慮することで全体的に約54.4%小さくなっていることがわかる。H1の標準偏差については大きな違いは見られなかった。以上のことから、損失を考慮することでモデルの安定性が向上することがわかった。

総流出量誤差率10%以下かつピーク流量誤差率10%以下を満足することを条件に設定し、Nash Sutcliffe指標を用いて最適化結果のスクリーニングを行った。図-4、図-5は、それぞれ2段タンクモデル及び損失を考慮した2段タンクモデルにおけるNash Sutcliffe指標0.93以上でスクリーニングを行なった同定結果である。なお、エラーバーの上限値は最大値、下限値は最小値を表している。いずれも、A1, A2は一意的な値に決定できているが、B1, C1, C2は比較的大きな収束幅である。このことから、浸透孔の大きさBと流出孔の高さCは流出孔の大きさAに比べて不安定な値をとると言える。また、損失を考慮することでB1の収束幅が小さくなっていることがわかる。

次に、拡張カルマンフィルタで最適化されたパラメータの収束値に着目し、パラメータの相互関係について検討を行う。各パラメータの収束値の関係性を相反関係、一意的な関係、相互的な関係の3種類に分類し、表-3に示す。貯留深Hに着目するとH1とH2は相反関係にあることがわかる。これは、1段目と2段目のタンクで貯留量を調節していることを示している。1段目のタンクにおけるA1, B1, H1は一意的な関係にあり、2段目のタンクのA2と1段目のタンクの浸透孔B1も一意的な関係にある。HとAとBはそれぞれ関係し合っているのに対して、流出孔の高さCは他のパラメータとの強い相関関係は見られなかった。ここで、C1とB1の関係性に着目すると、C1とB1はある程度どの値もとる関係で、直線的な比例関係が見受けられた。これは、表-3に示したようにB1とH1が一意的な関係にあることから、貯留深H1が大きくて浸透孔の大きさB1だけでは調節しきれない場合に、流出孔の高さC1でも調節されているためと考えられる。ここで、鈴木ら⁴⁾は初期タンク水深とタンク側方流出孔の高さには強い相関性は見られないとしている。本研究でも、流出孔の高さC1とC2はどのパラメータとも強い相関関係は見られなかったが、他のパラメータの補助的な役割をなしているものと推測される。

5. まとめ

本研究では、タンクモデルパラメータを一意的に決定することを目的とし、拡張カルマンフィルタでパラメータを最適化した結果をもとに、タンクモデルパラメータの相互関係の解明とモデル構造について検討を行った。パラメータの相互作用について検討を行った結果、2段タンクモデルにおいてそれぞれのパラメータの関係性が明らかとなり、浸透孔の大きさBと流出孔の高さCは比較的不確実性が大きいことがわかった。モデル構造について検討を行った結果、損失を考慮することでパラメータの不確実性が小さくなり、モデルの安定性が向上することを示した。

謝辞：本研究の遂行に際し、(独)土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センターより裏筑波流出試験地の水文データの提供をしていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972。
- 益倉克成，吉野文雄，吉谷純一，深見和彦，堀内輝亮，山邊満：裏筑波流出試験地調査成果報告書，土木研究所資料，第2959号，1991。
- Nash, J. E and Sutcliffe, J. V : River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, J. Hydrology, Vol.10, pp.282-290, 1970.
- 鈴木誠，百田博宣，神野健二，河村明：GAを用いたタンクモデル同定に関する統計的検討，水工学論文集，Vol.42, pp.115-120, 1998。

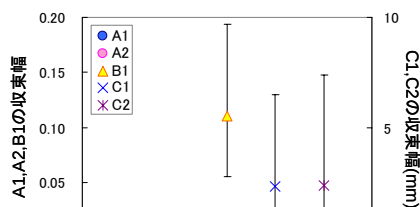


図-4 2段タンクモデルにおけるパラメータの収束幅。

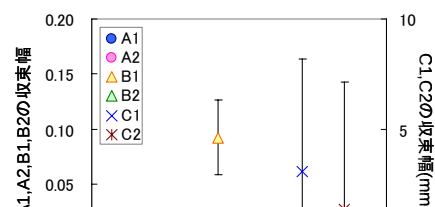


図-5 損失を考慮した2段タンクモデルにおけるパラメータの収束幅。

表-3 2段タンクモデルにおけるパラメータの相互関係。

	H1	H2	A1	A2	B1	C1	C2
H1		▼	◎	◎	◎		
H2	-		◎	◎	◎		
A1	-	-		◎			
A2	-	-	-		◎		
B1	-	-	-	-			
C1	-	-	-	-	-		↔
C2	-	-	-	-	-	-	

(▼: 相反関係, ◎: 一意的な関係, ↔: 相互的な関係)