

多地点データを用いた時系列モデルによる 降雨予測手法に関する研究

A Study of Rainfall Prediction by Multi-point Time Series Model

國方美規義*, 端野道夫**, 大下 勲***

BY Mikiyoshi KUNIKATA, Michio HASHINO and Isao OHSHITA

In this paper, basic structures of rainfall prediction models based on multi-point time series data are studied. According to medium- and meso-scales of precipitation areas, the life spans of precipitation are assumed to consist of two spans longer and shorter than eleven hours. It is concluded from studies based on multi-point data over Western Japan that the product form of regressive models for the long and short components is best. The accuracies of the prediction models for various (1-, 3- and 6-hour) lead times are shown.

keywords: rainfall prediction, multi-point time series, regressive model and Laguerre model.

1. ま え が き

洪水調節を目的としたダム操作においては、ピーク流量の大きさおよびその発生時刻、異常洪水が想定される場合のただしき操作に入る時刻等の推定をいかに早く的確に予測するかが重要である。そのためには、数時間先の降雨予測がどうしても必要となり、気象情報を加味した予測モデルとならざるを得ない。ただ現場での洪水管理作業は多忙を極めることから、逆に現場としては簡便で計算時間を要しないモデルの開発が望まれている。そこで本研究は、現場での洪水時の使用に配慮して、簡易で応用範囲の広い時系列モデルを採用し、流域内雨量だけでなく、流域外雨量も考慮に入れることにより間接的にも気象情報を取り入れた数時間先までの予測を目指した降雨予測モデルの提案と考察を行う。

2. 基本方針

2-1. モデル構築の基本方針

降雨波形は、傾向成分とその波形の上に乗る残差成分から成ると考える。その傾向成分は、長周期成分（中間規模擾乱を想定）と短周期成分（中規模擾乱を想定）に分ける。このうち長周期の傾向成分は11時間移動平均雨量の波形で近似する。

降雨の特性は、リードタイム（予測時間）により変化するものと考え、予測式はリードタイム毎に設定す

* 正会員 工修 四電技術コンサルタント 土木第2部 (〒761-01 高松市屋島西町2109-8)

** 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

*** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

る。また、リードタイムを長くとるためには、それに応じた降雨の広域的情報が必要であろうから、予測モデルには流域外の広域多地点の雨量を説明変数に加える。

2-2. 条件

使用手法：傾向成分（長周期，短周期）の推定には，流域外の地点雨量を考慮にいたれた線形モデルである重回帰モデルと，降雨の履歴も考慮した非線形モデルであるLaguerre型多項式¹⁾（以下赤池モデルとよぶ），残差成分はARMAモデルを用いる。

リードタイム：今回の降雨予測は将来のダム操作を念頭に置くものであり，降雨予測のリードタイムは最低6時間は確保したい。そこで，リードタイム6時間までは細かな検討とし，それ以降は長期的傾向把握に重きを置く。

評価の基本的考え方：同じデータで予測モデルの同定と予測モデルの評価を行った場合，モデルの硬直化が予想される。そこで，評価は同定に用いたデータとは別のデータにより行う。また，予測モデルの評価は，洪水管理のための降雨予測という立場から，ピーク付近の予測に着目するが，そのため降雨波形の予測結果が不自然となることを避けるため，ここでは評価期間を設定し，降雨の規模にとらわれず行うこととする。

評価期間：検討における評価期間は，ひとまとまりとなった降雨波形で行うものとし，①ピーク雨量が10mmを越え1mm以上の雨が3時間以上継続する降雨波形であること，②雨の中休みは1mm未満が3時間まで，を評価期間設定の条件とする。

評価指標：予測モデルの評価に用いる指標は，パラメータ数を考慮した誤差分散から求めたAICを採用する。なお，降雨規模からみた精度，実績と予測の波形の違い等をみるために，他の指標も参考とする。

予測方法：予測モデルの基本的考え方として，6時間までの短時間先の予測には，入手している雨量の最小時間単位である1時間雨量を用いて細かな波形の特性の把握を行い，それを用いて『今後n時間先の1時間雨量を求めようとする方法』と，6時間以上の長時間先の予測には，予測精度が低下することから，傾向の把握が主となると考え，『n時間先までの平均雨量を予測しようとする方法』の2方法を考える。

2-3. 降雨予測モデル

現時点tからn時間先の推定値 $\hat{x}_{t+n}$ は，傾向成分 $\hat{m}_{t+n}$ と残差成分 $\hat{\varepsilon}_{t+n}$ より成り，傾向成分は長周期成分と短周期成分より成ると考える。用いるモデルは，傾向成分は，重回帰モデル（式(1)）と赤池モデル（式(2)），残差成分はARMAモデル（式(3)）により表す。なお，モデルの結合は，和より成る（和モデル）場合と，積より成る（積モデル）場合を考える。

$$[\text{重回帰モデル (K1次, N1地点)}] \quad \hat{m}_{t+n} = \pi + \sum_{i=1}^{N1} \sum_{k=1}^{K1} \pi_{k,i} X_{t-k-1,i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$[\text{赤池モデル (K2次, N2地点)}] \quad \hat{m}_{t+n} = \lambda + \sum_{i=1}^{N2} \sum_{j=1}^i \sum_{k=0}^{K2} \lambda_{k,i} (t-j)^k \exp[-\nu_k(t-j)] X_{j,i} \quad \dots\dots (2)$$

$$[\text{ARMA (p, q) モデル}] \quad \hat{y}_t = \sum_{k=1}^p \phi_k y_{t-k} - \sum_{k=1}^q \theta_k a_{t-k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに， $y_{t-k} = (x_{t-k} - m_k) / \sigma_k$ ， $a_{t-k} = y_{t-k} - \hat{y}_{t-k}$ ，

$x_{t-j,i}$ ：現時点tからj時間前のi地点の観測地点（iを省略時は予測対象地点），

$\hat{m}_{t+n}$ ：現時点tからn時間先の傾向成分の推定値，

$\pi_{k,i}$ ：次数がkでi地点にかかる重回帰モデルの係数（k，iを省略時は定数項），

$\lambda_{k,i}, \nu_k$ ：次数がkでi地点にかかる赤池モデルの係数（k，iを省略時は定数項），

y_{t-k} ：現時点tからk時間前の基準化された偏差， m_k ：現時点tからk時間前の平均値，

σ_k ：現時点tからk時間前の標準偏差， ϕ_k, θ_k ：次数がkのARMAモデルの係数，

a_{t-k} ：現時点tからk時間前の標準偏差

なお，赤池モデルの計算を行う場合には，計算時間を省くために，以下に示す漸化式により，計算を実行する¹⁾。

$$(2) \text{式右辺第2項} = \sum_{i=1}^{N2} \sum_{k=0}^{K2} \lambda_{k,i} R_{k,i}(t-1) \dots\dots\dots(4)$$

$$R_{k,i}(t) = A_{k,i} X_{t-1,i} + \sum_{j=0}^k C_j A_{k-j,i} R_{j,i}(t-1)$$

$A_{k,i} = n^k \exp(-\nu n)$, n : 時間単位, $R_{j,i}(1) = 0$, C_j : 2項係数

3. モデルの検討

本章では、2-2. で示した各モデルを用いて降雨予測モデルの検討を行う。検討内容は、適用する降雨予測モデルの組合せ、説明変数と目的変数の時間単位の取り方、予測モデルの精度についておよび長時間先の予測を目指した m 時間平均予測である。なお、検討に先立ち適用流域および使用資料について述べる。

3-1. 適用流域および資料

適用流域: 対象とする柳瀬ダム流域(図-1参照)は、1級河川吉野川の左支川である銅山川の中流部に位置し、東西約25km、南北最大10kmと、東西に細長い山岳流域である。上流域は吉野川流域の中でも最多雨域であり、逆に下流域は瀬戸内気候の寡雨域というように降雨特性が大きく異なっている。そこで、中央付近の富郷地点で流域を2分し、検討の対象流域として上流域を採用する。

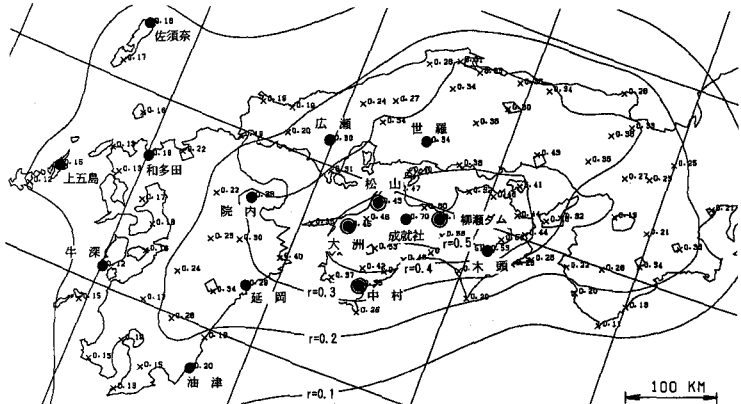


図-1 観測所位置図

(図中の数値は富郷上流域雨量との相関係数を示す)

使用資料: 検討に用いた雨量資料は次の2種である。

- ①モデルの構築用対象洪水: 柳瀬ダムで昭和44年から平成元年までの期間で洪水調節を行った70洪水のうち、前線が関与していない台風が原因となった洪水で欠測の少ない17降雨を対象とする。使用雨量は、富郷地点の上流域および下流域の各流域平均雨量、および流域外の3観測所の地点雨量(図中の2重丸)である。
- ②モデルの検証用対象洪水: より広域の降雨の状況が柳瀬ダム流域への影響を与えているのか検討を行うために、①の地点も含めて西日本(四国以西)から柳瀬ダム流域の雨量との相関関係(図中に富郷上流域との相関係数のコンターを示す)およびタイムラグを考慮し、代表観測所として17観測所(図中の黒丸、うち柳瀬ダム流域の2平均雨量を含む)を採用する。また、対象とする降雨は、局地的降雨を避け、全国的な広がりを持った台風性降雨とし、昭和57年から平成3年までの期間から20降雨とする。

チェックングデータとトレーニングデータ: 予測モデルを構築する際、予測精度の低下をできるだけ避けるために、同定はトレーニングデータを用いて行い、その同定結果の評価は別のチェックングデータにより行う。なお、トレーニングデータとチェックングデータの分離は、作為が入らないように、降雨の発生日時の順に交互に採用することとする。

3-2. モデルの組合せ

本節では、表-1に示すようなモデルの組合せを考え、どのような組み合わせが有利となるか検討する。まず重回帰モデルと赤池モデルを単独で採用する場合の検討を行い、モデルの基本となる長周期成分に採用するモデルを決める。つぎにこの長周期成分に短周期成分を加えた複合モデルについて検討し、短周期成分に採用するモデルとモデルの組合せ方法を決める。そして、残差成分を追加し、残差成分の有効性について検討する。この検討の結果を総括して表-1にAIC、誤差分散および相関係数を示す。これにより以下の

結論を得た。

単独モデル：重回帰モデルと赤池モデルの単独モデル（CASE 1とCASE 2）について、 n 時間先の1時間雨量での精度の比較を行った結果、1時間先は赤池モデルが良好であるが3、6時間先については重回帰モデルが良く、長周期成分の説明には重回帰モデルの採用が有利と判断された。

複合モデル i：複合モデルとして、長周期成分と短周期成分ともに重回帰モデルを採用した場合のモデルの組合せ（CASE 3とCASE 4）について検討した結果、単独モデル（CASE 1）と比べ、複合モデルにすることにより精度の向上が特に1時間先において大きくまた積モデル（CASE 4）とすると3、6時間先で和モデル（CASE 3）に比べ良好となった。これより、複合モデルとすることの有効性が示され、またモデルの組合せは積モデル（CASE 4）の採用が有利と判断された。

複合モデル ii：長周期成分として重回帰モデル、短周期成分として赤池モデルとした複合モ

した場合のモデルの組合せについて検討した結果、単独モデル（CASE 1）と比べ、複合モデルにすることにより1時間先の精度は大きく向上しているが3、6時間先の精度はほぼ同様であり、またモデルの組合せによる差も殆ど無いがどちらかといえばは和モデル（CASE 5）が良好である。

残差成分の追加：残差成分の考慮の有効性について、長周期成分（重回帰モデル）にARMAモデルを付加することによる精度の違いを検討した。モデルの組合せは、和モデル（CASE 7）と積モデル（CASE 8）を考えた。検討の結果、単独モデル（CASE 1）と比べ、残差成分を考慮することによる精度の向上は特に1時間先において大きく、また積モデル（CASE 8）とすることにより3、6時間先で和モデル（CASE 7）に比べ良好となる。これより、モデルに残差成分を考慮することの有効性が示され、またモデルの組合せは積モデルの採用が有利であると判断された。

3-3. 説明変数と目的変数の時間単位の取り方

説明変数および目的変数の時間単位をリードタイムとの関係でどのように設定したら良いかの検討を3-2.の検討結果良好と判断されたモデルについて行い、以下の結果を得た（表-2）。

重回帰モデル（長周期成分）：説明変数、目的変数ともに1時間雨量

表-1 モデルの組合せ

CASE	総括 名称	重回帰		赤池		ARMA	モデル 和 積	評価 雨量	項目	リードタイム(hr)		
		長	短	長	短					1	3	6
1	単独	○						11hr MA	AIC	544	637	741
									分散	9.58	15.69	26.59
									相関	0.913	0.857	0.731
								1 hr	AIC	822	901	941
									分散	33.15	51.01	65.10
									相関	0.837	0.710	0.589
2	モデル			○				11hr MA	AIC	519	643	755
									分散	9.26	16.12	27.32
									相関	0.917	0.852	0.719
								1 hr	AIC	811	904	950
									分散	34.09	51.83	65.41
									相関	0.831	0.703	0.584
3	複合 モデル i	○	○				○	1 hr	AIC	757	900	940
									分散	22.64	49.45	63.62
									相関	0.877	0.704	0.593
4	複合 モデル ii	○	○				○	1 hr	AIC	781	892	937
									分散	25.23	47.27	61.11
									相関	0.866	0.718	0.618
5	複合 モデル ii	○		○			○	1 hr	AIC	753	901	941
									分散	22.28	49.66	61.16
									相関	0.880	0.705	0.615
6	複合 モデル ii	○		○			○	1 hr	AIC	755	899	944
									分散	22.64	49.35	63.05
									相関	0.877	0.707	0.595
7	残差 成分 の 追加	○				○	○	1 hr	AIC	730	895	941
									分散	21.78	49.31	63.26
									相関	0.881	0.714	0.607
8	残差 成分 の 追加	○				○	○	1 hr	AIC	753	882	926
									分散	24.13	45.21	58.59
									相関	0.873	0.731	0.631

注) 表中の11hrMAは11時間移動平均雨量（長周期成分）との評価値、1hrは生雨量との評価値、長：長周期、短：短周期、和：和モデル、積：積モデル

重回帰モデル（短周期成分）：説明変数はn時間雨量，目的変数は1時間雨量

赤池モデル（短周期成分）：説明変数，目的変数ともに1時間雨量

3-4. 予測精度の検討

前節までの検討では手法に関する予備検討ということで適用する次数は採用された地点すべて共通としたが，本節では予測精度の確認ということで，用いる地点毎に適用する次数が異なることを許容した。なお，用いる予測モデルは3-2.での単独モ

表－2 時間単位の取り方（リードタイムn時間）

説明	目的	項目	重回帰モデル（長周期）			重回帰モデル（短周期）			赤池モデル（短周期）		
			1時間	3時間	6時間	1時間	3時間	6時間	1時間	3時間	6時間
n	n	AIC	544	737	761	747	717	818	693	742	842
		分散	9.58	25.19	28.84	25.66	21.87	34.27	20.20	25.12	39.19
		相関	0.913	0.790	0.715	0.888	0.883	0.813	0.895	0.867	0.784
n	1	AIC	544	738	744	747	702	752	693	738	764
		分散	9.58	25.30	26.72	25.66	22.20	27.74	20.20	24.72	27.72
		相関	0.913	0.775	0.728	0.881	0.882	0.849	0.895	0.869	0.852
1	1	AIC	544	646	745	747	730	748	693	738	755
		分散	9.58	17.29	24.73	25.66	25.09	25.11	20.20	24.68	26.64
		相関	0.913	0.839	0.760	0.888	0.869	0.871	0.895	0.869	0.856

デル，複合モデルi，複合モデルiiと残差成分の組合せから良好と判断された次の3モデルである。

model 1：重回帰モデル（長周期成分）×ARMAモデル（積モデル）

model 2：重回帰モデル（長周期成分）×重回帰モデル（短周期成分）×ARMAモデル（積モデル）

model 3：〔重回帰モデル（長周期成分）＋赤池モデル（短周期成分）〕×ARMAモデル（和・積モデル）

注）＋：和モデル，×：積モデル

この3モデルによる短時間先予測の結果（表－3）によると，1時間先の精度はmodel 1と3が良好であるが，リードタイムが3，6時間先の予測となるとmodel 2が良好となり，1～6時間先の降雨予測モデルとしてはmodel 2が最も精度的に安定しているといえる。

次に，この四国内のデータでもって最も良好と判断されたmodel 2を用い，西日本の台風性降雨について適用しこのモデルの検証を行った。表－4に洪水毎の予測精度（相関係数）を示す。これによると，雨の規模の大きな降雨については予測精度も良好であるのに対し，ピーク雨量が10mm程度

のものについては精度が期待できない。またリードタイム1時間の予測精度の良好な洪水はリードタイム6時間でも良好であり，リードタイム1時間の予測精度がその先の精度に反映することが分る。降雨波形からみると，持続性のあると思われる洪水は予測精度も良好であるが，雨量規模が小さいとその精度の維持は長続きしない。また雨量資料を面的にみた場合，全体的にくまなく降っている雨は予測精度もかなりのものを期待し得るが，平面的分布にばらつきがある雨は降雨波形的にも変動が激しく，精度は良好なものでない。計算結果の1例として，リードタイム6時間の予測結果のうち，精度の良好な昭和62年10月の台風19号の結果と，降雨規模は大きいが精度が劣る平成2年8月の台風14号の結果を図－2～3に示す。

表－3 予測精度の検討

model	項目	リードタイム(hr)			重回帰		赤池	ARMA	モデル	
		1	3	6	長	短			和	積
1	AIC	764	908	949	○			○		○
	分散	23.57	45.34	60.46						
	相関	0.878	0.731	0.617						
2	AIC	808	897	915	○	○		○		○
	分散	26.26	39.79	47.97						
	相関	0.861	0.772	0.716						
3	AIC	763	915	958	○		○	○	○	○
	分散	21.12	45.53	57.63						
	相関	0.885	0.731	0.647						

表－4 洪水毎の予測精度（相関係数）

洪水名	ピーク 降雨強度 (mm/hr)	リードタイム(hr)		
		1	3	6
82. 9. 22	36.89	0.820	0.497	0.821
84. 8. 19	30.97	0.612	0.568	0.150
86. 9. 18	21.09	0.536	-0.037	-0.057
87.10.15	53.78	0.886	0.857	0.817
89. 8. 1	10.18	0.189	0.496	0.142
89. 9. 12	15.99	0.180	0.258	-0.327
90. 8. 21	42.52	0.612	0.246	-0.154
90.10. 5	17.89	0.713	0.462	0.617
91. 7. 28	37.34	0.438	0.203	0.384
91. 9. 13	19.89	0.458	0.438	-0.401

このことから、今回提案した予測モデルは、ダムにて洪水調節を行う規模の降雨については、かなりの予測精度を期待し得るが、地域性の強い降雨や規模の小さな降雨については今後の検討が必要であることが分る。

3-5. 平均雨量を用いた長時間先予測

リードタイム 6 時間以上の長時間先の予測を想定する場合、予測精度の低下が大きいことから、数時間の平均雨量を用いた予測法の採用が有利と考えられる。検討に用いる時間単位 (m) は、比較的使いやすい 3 時間と 6 時間とし、適用するモデルは重回帰モデル (長周期成分) とした。検討結果を表-5 に示す。これによると、パラメータ数を考慮した AIC は平均雨量予測が有利であるが、誤差分散、相関係数を考慮してみると、6 時間先までは 1 時間雨量予測が、6 時間より先の予測は 3 時間雨量の平均雨量予測が良好である。

4. あとがき

以上の検討の結果をとりまとめ、以下に示す。

- a) 降雨予測モデルは、降雨波形を傾向成分と残差成分に分け、また傾向成分も長周期成分と短周期成分に分けて取り扱った方が良い結果をもたらす。
- b) 長周期成分に対する重回帰モデルの時間単位は 1 時間を、また短周期成分に対する重回帰モデルの時間単位はリードタイムと同じく n 時間を取り扱った方が良い結果をもたらす。
- c) 6 時間先までの予測モデルとしては『重回帰モデル (長周期成分) × 重回帰モデル (短周期成分) × ARMA (残差成分)』、それ以上先の予測モデルとしては『重回帰モデル (長周期成分)』 (3 時間の平均雨量予測) が最も良好と判断された。

参考文献

1) Y. Ogata, H. Akaike and K. Katsura :
The Application of Linear Intensity Models to the Investigation of Causal Relation between a Point Process and Another Stochastic Process : Ann. Inst. Statist. Math., 34, Part B, pp. 373 ~ 387, 1982.

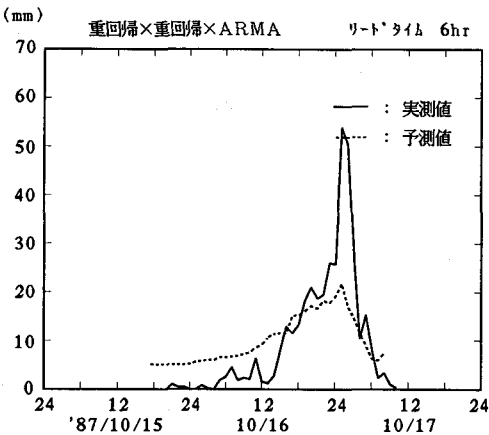


図-2 降雨予測結果 (昭和62年10月台風19号)

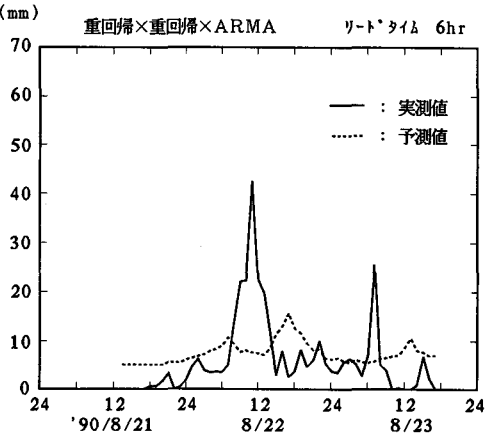


図-3 降雨予測結果 (平成2年8月台風14号)

表-5 区間による予測

	項目	1~3 時間	4~6 時間	7~9 時間	10~12時間
各時点 予測	AIC	924.36	1011.15	983.07	990.99
	分散	42.59	59.47	67.97	73.63
	相関	0.770	0.643	0.566	0.495
区間予測 (m=3hr)	AIC	873.54	934.03	947.53	973.48
	分散	45.17	60.78	66.90	70.57
	相関	0.753	0.631	0.572	0.532

	項目	1~6 時間	7~12時間	12~18時間	19~24時間
区間予測 (m=3hr)	AIC	923.24	973.58	1023.67	1040.15
	分散	52.97	68.74	89.88	98.49
	相関	0.692	0.552	0.286	0.049
区間予測 (m=6hr)	AIC	911.83	959.03	1030.53	1034.93
	分散	55.05	67.96	96.61	98.84
	相関	0.670	0.561	0.208	0.023