

28. 地球温暖化にともなう日本の主な気候区における 一雨降水特性の変化量評価

CHANGES OF PRECIPITATION CHARACTERISTICS IN JAPANESE MAJOR CLIMATIC
REGIONS DUE TO GLOBAL WARMING

端野道夫* ・ 吉田弘*

Michio HASHINO, Hiromu YOSHIDA

ABSTRACT;The objective of this study is to evaluate the effects of the global warming on rainfall characteristics. A time series models taking account of monthly temperature of precipitation characteristics; the number of occurrences and precipitation amount of a storm cluster. The proposed models consist of trend, periodic and jump components due to the movement of observatories and population regarded as an index of local urbanization. A global warming scenario for future 30 years from 2026 to 2055 was given by a time series model of monthly temperature developed by authors. The prediction of monthly precipitation for future 30 years was given by the proposed models based on the global warming scenario in 11 sites in Japan and compared with monthly precipitation from 1966 to 1995. The decrease from December to March all over Japan, the decrease in April and May mainly in eastern Japan, the increase in June and July mainly in western Japan were found respectively. But no apparent change could be found from August to November.

KEYWORDS;global warming, precipitation characteristics, time series model, climate change

1. はじめに

現在地球温暖化の水資源に及ぼす影響が懸念されている。そのためには、温暖化の進行にともなう降水量予測評価が必須であり、GCM等の手法を用いて精力的に試みられている。しかしながら、GCMによるシミュレーションの試行数と同じだけの異なった結果が得られているのが現状であり、定量的な検討を行うためには、モデルで考慮すべき物理過程の吟味と追加や同定されたパラメータの妥当性の評価など更なる検討が必要となっている。本論文では、地球温暖化が降水量に影響を及ぼす過程で有意な因子の抽出と、過去100年間の気温と降水量の変動履歴データに基づく将来予測に重点を置いた。そこで詳細な物理過程の表現に基礎をおくGCMのような決定論的手法ではなく、気温と降水量の変動履歴データを時系列モデルによって表現する確率統計的な手法を採用して、地球温暖化が降水量に及ぼす影響の評価を試みた。

2. 月平均気温に関する時系列モデル¹⁾

気温は降水よりも地形、地勢に大きく影響され易いため、地球温暖化の視点で解析する場合には、観測気温から都市化にともなう局地的気温上昇分を除去したデータを解析に供する必要がある。そこで、(a)経年的な気温の増減トレンド成分(T)、(b)周期(正弦)変動成分(S)、(c)気象観測所の移動によるジャンプ成分(J)²⁾、および集中人口に比例する人口成分(P)を考慮に入れて、以下のように定式化した。

*;徳島大学工学部建設工学科 Dept. of Civil Engineering, Fac. of Engineering, The Univ. of Tokushima

$$\overline{\theta_{ij}} = T_{\theta j} + S_{\theta j} + \{I_{\theta j} + P_j\} \quad (1)$$

ここに、添字 i, j はそれぞれ年と月を表す。集中人口とは人口密度が4000人/km²となる地域の人口である。第1項と第2項が自然的成分、第3項と第4項が人為的成分と考えることができる。

3. 一雨降水特性の時系列モデル

3. 1 一雨降水特性の確率分布と平均値の時系列モデル

日降水量データについては、月別に一雨降水群として整理し、その一雨降水時系列をマクト・ポイント過程³⁾に従うと仮定する。本論文では、日単位で連続して降る0.5mm/day以上の雨を一雨降水群とし、一雨での総降水量を一雨降雨量、一雨が生起する回数を一雨発生回数とそれぞれ定義する。

(A) 一雨発生回数

一雨発生回数(x)は以下のように二項分布で良好に表現できることを既に確認している¹⁾。

$$f_N(x) = \frac{k_b!}{x!(k_b - x)!} p_b^x (1 - p_b)^{(k_b - x)}, \quad E_N = k_b \cdot p_b, \quad V_N = k_b \cdot p_b (1 - p_b) \quad (2)$$

ここで、 k_b, p_b は二項分布のパラメータであり、 f_N, E_N, V_N は、それぞれ確率密度関数、平均および分散である。

2つのパラメータのうちで、 k_b を一定とし、 p_b が経年変化をすると仮定して i 年 j 月での平均値 $\overline{N_{ij}}$ に関する時系列モデルを構築した。平均値の説明変数としては、月平均気温のモデルで採用した3つの成分に加えて、純粹に温暖化の影響を考慮するために人為的成分(ジャンプ成分、人口成分)の影響を除去し自然的成分のみを考慮に入れた気温成分($\overline{\theta}$)も採用し、次式のような定式化を試みた。指数関数となっているのは平均が非負であるためである。

$$\overline{N_{ij}} = k_b \exp(\overline{\theta_{ij}} + T_{Nj} + S_{Nj} + I_{Nj}) \quad (3)$$

大阪と金沢の1月を例として適用結果を図-1に示す。図よりモデルによって一雨発生回数の平均値の経年変化をよく表現できていることが分かる。

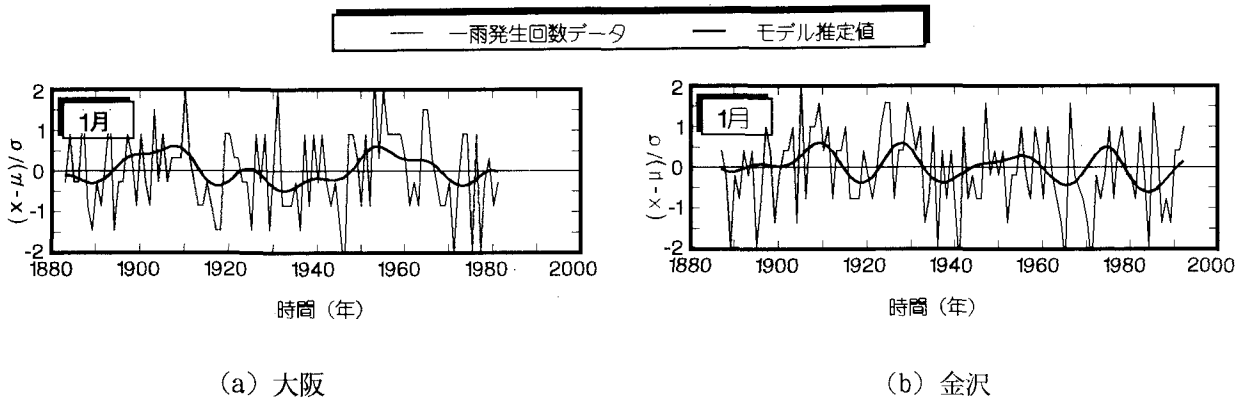


図-1 一雨発生回数の時系列変化

(B) 一雨降水量の確率分布

一雨降水量(y)は以下のように2母数ガンマ分布で良好に表現できることを確認している¹⁾。

$$f_R(y) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-\beta y), \quad E_R = \alpha / \beta, \quad V_R = \alpha / \beta^2 \quad (4)$$

ここで、 α および β はガンマ分布のパラメータであり、 f_R, E_R, V_R は、それぞれ確率密度関数、平均および分散である。

2つのパラメータのうちで α のみに経年変化を認め、 β は一定と仮定して、 i 年 j 月での一雨降水量の平均値 $\overline{R_{ij}}$ に関する時系列モデルの構築した。一雨発生回数の場合と同様に考えて、次式のような指数関数による定式化を行った。

$$\overline{R_{ij}} = \alpha_{ij} \exp(\overline{\theta_{ij}} + T_{Rj} + S_{Rj} + I_{Rj}) / \beta_j \tag{5}$$

大阪と金沢を例として適用結果を図-2に示す。図よりモデルによって一雨降水量の平均値の経年変化を良好に再現できていると判断される。

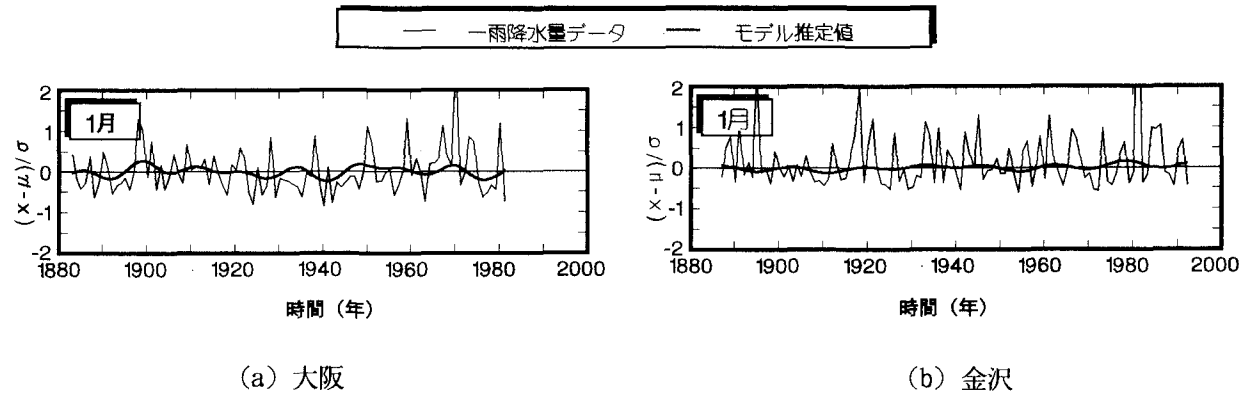


図-2 一雨降水量の時系列変化

(C) 月降水量の確率評価

月降水量の平均値 $\overline{C_{ij}}$ は一雨降水量とその発生回数の積で表されるので、 $\overline{C_{ij}} = \overline{R_{ij}} \cdot \overline{N_{ij}}$ である。気温変化の月降水量変化に及ぼす影響度を評価するために、次式のような評価指標 $C_{\theta ij}$ を考案した。

$$C_{\theta ij} / R_{ij} N_{ij} = \frac{\exp(\theta_{Nij}) \exp(\theta_{Rij})}{\exp(\theta_{Nij}) \exp(\theta_{Rij}) + \exp(T_{Nj} + S_{Nj} + I_{Nj}) \exp(T_{Rj} + S_{Rj} + I_{Rj})} \tag{6}$$

4. 気温の経年変動

4. 1 年平均気温の経年変動

全国52地点での観測データに適用した結果の一例を示す。図-3は大阪と金沢について年平均気温の経年変動を検討した結果である。また表-1に人口成分の寄与をまとめている。明らかに人口10万人以上の都市ではヒートアイランド効果の指標として都市人口が有意な説明変数であり、人口が大きいほどヒートアイランド効果の影響が強いことが分かる。

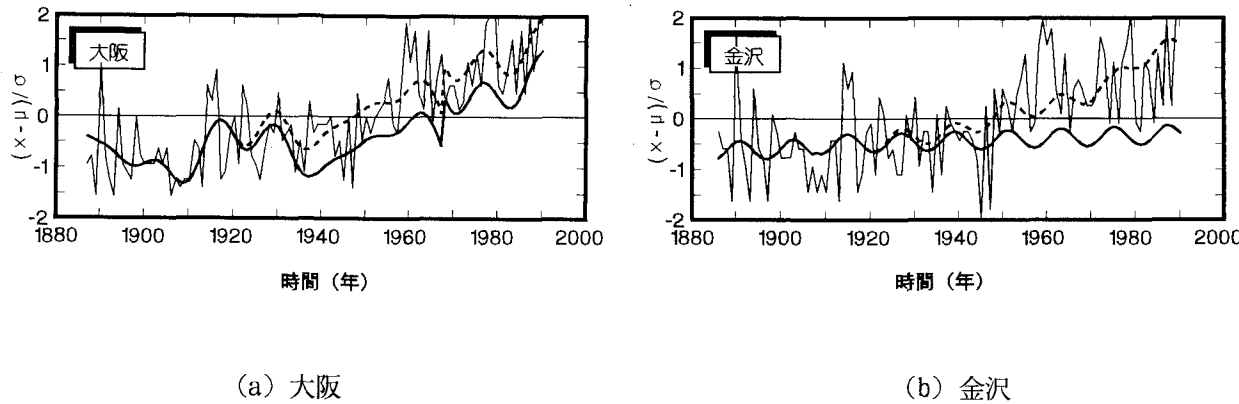


図-3 年平均気温の経年変動

的に増加トレンドが認められるのが特徴である。なおそれぞれの降水特性について卓越する周期成分はそのほとんどが10～20年である。

6. 将来月降水量の予測

6. 1 気温シナリオの設定と月降水量予測手法

WMOの取り決めより平年の気候として一般に用いられている30年平均值に整理したデータに対して2.で提示した月平均気温時系列モデルを用いて、将来（2026年～2055年）の30年における平均値を予測し気温シナリオを設定する。続いて気温シナリオを用いて(3)式および(5)式から、それぞれ将来の月平均一雨発生回数と一雨降水量の予測値を計算する。最終的に両者の積として月降水量の予測値が算定される。なお1966年～1995年を現在とし、将来予測と同様の手順で月降水量を計算し、将来予測値との比較検討を行う。

6. 2 予測結果

現在（1966年～1995年）に対して将来（2026年～2055年）での気温と月降水量の変化率を前述の11地点について算定した結果を表-4にまとめて示す。

表-4 気温シナリオに基づく30年平均月降水量の現在と将来とでの変化率

		(単位:降水量(%), 気温(°C))										
		札幌	新潟	金沢	宇都宮	甲府	大阪	和歌山	徳島	本山	広島	福岡
年間	降水量	-0.5	-0.2	-1.3	-3.8	-1.0	-0.2	-2.5	+4.3	-3.4	+2.1	+0.9
	気温	+0.3	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+0.1	+0.2	+0.1	+0.2	+0.1	+0.2
12～3月	降水量	-4.2	-2.1	-4.0	-4.1	-0.4	-6.6	-10.9	-0.7	-9.4	-6.8	-0.2
	気温	+0.4	+0.3	+0.2	+0.7	+0.2	+0.2	+0.2	+0.3	+0.1	+0.2	+0.2
4～5月	降水量	-3.4	-12.7	+7.3	-5.7	-7.7	-0.8	-0.2	+2.6	-0.1	-1.4	+3.1
	気温	+0.3	+0.1	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+0.0	+0.2	+0.2	+0.2
6～7月	降水量	+6.3	+0.9	-5.3	-4.1	-3.0	+3.8	+0.1	+9.2	+2.3	+9.5	+2.7
	気温	+0.1	+0.2	+0.2	+0.1	+0.3	+0.1	+0.1	+0.0	+0.3	+0.3	+0.4
8～9月	降水量	+1.6	+5.7	+1.6	-11.2	-4.3	+1.3	-0.4	+12.8	-4.9	+6.9	-3.9
	気温	+0.0	+0.1	+0.4	+0.3	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+0.5	+0.2	+0.2
10～11月	降水量	+0.0	+3.9	-0.2	+11.0	+10.3	-1.3	-2.8	-15.5	-9.3	-13.1	+3.2
	気温	+0.5	+0.1	+0.1	+0.1	+0.2	+0.3	+0.3	+0.2	+0.3	+0.2	+0.2

表-4によれば、冬季（12月～3月）では全ての地点で降水量変化率は減少傾向（-0.2%～-10.9%）にあることがうかがえる。4月～5月では、金沢、徳島、福岡の3地点以外の主として東日本の8地点で減少傾向（-0.1%～-12.7%）を示しているのに対して、梅雨期（6月～7月）では、金沢、宇都宮、甲府以外の主として西日本の8地点で増加傾向（+0.1%～+9.4%）を示している。台風期（8月～9月）および秋季（10月～11月）では、地域的な観点で余り明瞭な変化傾向は認められないが、東日本内陸に位置する甲府と宇都宮で10%以上の増加となっているのは大きな特徴である。気温上昇の影響が西日本では梅雨・台風期での降水量増加として現れていることから、梅雨前線の発達・停滞や来襲する台風の頻度や規模との因果関係が示唆される。

年降水量で見た場合には、関西より以东の札幌、新潟、金沢、宇都宮、甲府、大阪、和歌山および本山の8地点で減少傾向（-0.2%～-3.8%）を示しているのに対して、徳島、広島、福岡の3地点で増加傾向（+0.9%～+4.3%）が認められる。これら3地点では、4月～9月での降水量増加が年降水量の増加に寄与していることが分かる。

6. 3 月降水量に対する月平均気温の寄与

(6)式に基づいて月降水量に対する月平均気温の影響を徳島と広島について検討した例が図-4である。両都市について特徴的なのは、6月～8月に月降水量に対する月平均気温の寄与がほとんど認められない点であり、これは大阪や福岡についても類似している。もちろんその他の都市についても若干その傾向にあるが、

表-1 年平均気温に対する人口成分の寄与

(単位: °C/万人)

解析地点	札幌	新潟	金沢	宇都宮	甲府	大阪	和歌山	徳島	本山	広島	福岡
人口成分	1.16	1.82	1.88	1.27	1.24	0.90	1.32	2.72		1.61	1.60

4. 2 月平均気温の経年変動

月平均気温の解析結果について、人口成分の寄与分を表-2にまとめる。一般にヒートアイランド効果は夏季よりも冬季に現れやすいとされているが、これを裏付ける結果である。

5. 一雨降水特性の経年変動

札幌、新潟、金沢、宇都宮、甲府、大阪、和歌山、徳島、本山(高知県)、広島および福岡の合計11地点を対象に、各月について一雨降水特性の平均値の経年変化を解析した。

表-2 月平均気温に対する人口成分の寄与

(単位: °C/万人)

月	札幌	新潟	金沢	宇都宮	甲府	大阪	和歌山	徳島	本山	広島	福岡
1	2.62	②1.82	③2.71	5.67	3.21	③0.98	1.21	5.34	①	1.34	2.19
2	2.08	③1.30	3.27	③21.87	①0.73	0.99	1.40	③4.49	③	1.06	0.98
3	1.69	1.71	3.67	②14.67	②1.33	1.89	③1.34	4.12		0.73	1.93
4	1.65	2.90	①4.20	①1.33	0.81	1.11	2.03	②5.26	②	0.52	2.91
5	0.67	1.95	②2.79	10.15	③5.35	①1.93	②2.41	①3.72		1.76	①2.72
6	1.41	1.19	2.09	0.73	0.73	0.73	1.08	3.60		1.65	②1.74
7	0.73	1.04	1.70	1.15	1.09	0.73	1.37	1.04		0.73	0.87
8	0.73	0.88	2.01	0.73	2.08	2.02	①1.19	3.60		0.73	1.99
9	0.89	0.78	1.68	0.73	0.73	1.23	1.27	3.00		0.89	2.04
10	1.21	0.73	2.27	3.02	0.94	0.73	0.96	3.77		0.54	3.78
11	1.67	0.73	1.88	8.88	4.70	②1.33	1.26	3.52		0.73	2.09
12	2.80	①1.33	2.82	9.40	0.73	0.81	1.38	0.73		1.56	③1.92

5. 1 月平均一雨降水特性の経年変動

表-1に月平均一雨発生回数および一雨降水量のトレンドをまとめて示す。

表-3 月平均一雨降水特性のトレンド(+は増加, 空欄は減少を表す)

月	札幌		新潟		金沢		宇都宮		甲府		大阪		和歌山		徳島		本山		広島		福岡	
	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R
1			+	+		+		+		+					+				+			+
2		+	+			+							+	+		+						
3		+					+		+	+											+	
4			+				+							+	+	+		+			+	
5					+	+	+	+			+			+				+	+			
6		+	+	+			+		+	+	+	+			+	+	+		+		+	
7	+		+	+		+		+		+	+	+		+		+		+	+	+	+	+
8	+				+	+			+	+	+		+	+	+	+		+	+		+	
9		+	+	+		+	+				+	+	+			+	+		+			
10	+			+	+			+	+	+	+											
11			+	+	+	+			+	+		+						+				+
12						+	+											+			+	+

N: 月平均一雨発生回数 R: 月平均一雨降水量

(+)は増加, 空白は減少を示す)

一雨発生回数については、西日本において6～9月での増加トレンドとその他の月での減少トレンドが明瞭である。一雨降水量については、西日本において10～3月に減少トレンドが認められるのと、6月は全国

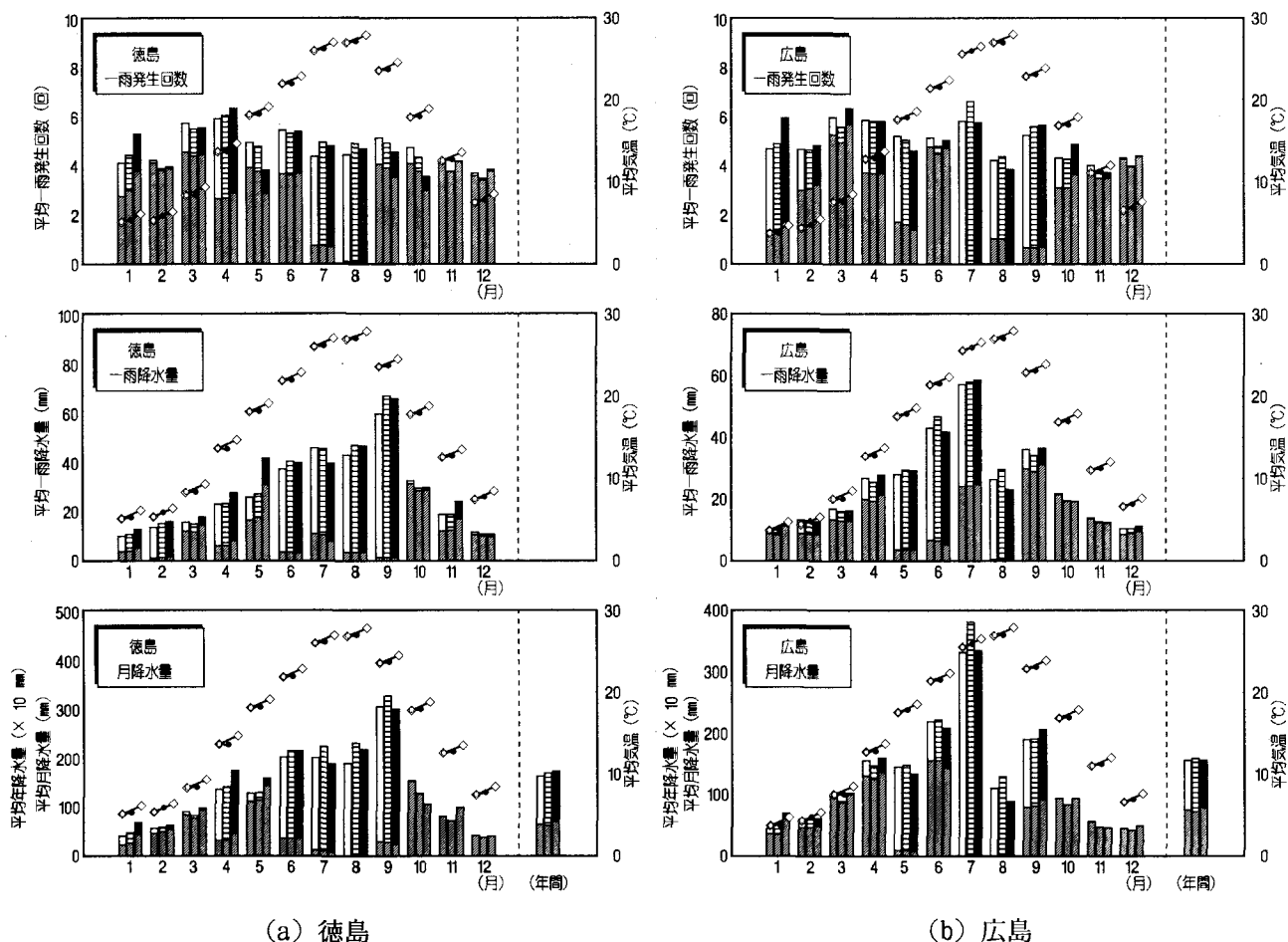


図-4 気温成分の一雨降水特性に及ぼす影響の評価

西日本地区の都市と比較にはならない程度である。月平均量での議論で気温の寄与が小さいということは、日～週の時間スケールで生起する中間規模から総観規模にかけての気象現象、すなわち梅雨前線や台風が、特に6月～8月で顕著な影響を与えている可能性が高いことを示唆していると解釈できよう。

7. おわりに

気温変動と降水量変動の関係をブラックボックスとして取り扱った時系列モデルにより、地球温暖化の進行にともなう降水量変化量の予測とそれに関わる若干の考察を試みた。得られた結果は物理過程を考慮に入れたモデルによる出力ではないため、現象のメカニズムの詳細に立ち入ることはできないが、日本の典型的な気候区における降水量変化予測とその支配的な因子の抽出手法の一例を提示できたと考えている。最近では全球規模モデルから領域モデルへと物理モデルの開発が進んでいるが、残念ながら土木技術者の現場サイドからは解像度と精度が不十分と言わざるを得ない。物理モデルで現在カバーしきれない時間・空間スケールについて、その補完的な意味から統計学的モデルの有効性が考えられる。本研究のようなアプローチによる結果が、GCMを用いたシミュレーションに基づく議論の一つの刺激となれば幸いである。

謝辞：本研究の一部は平成6・7年度河川環境整備基金の研究助成を受けました。記して深謝申し上げます。
参考文献

- 1) H. Yoshida and M. Hashino: Time Series Analysis of Precipitation Characteristics Taking Account of Monthly Temperature, Proc. of Int. Conf. on Water Resour. & Environ. Res., II, 603-610, 1996.
- 2) 端野道夫：水文量の確率・統計解析，1982年度水工学に関する夏期研修会講義集，A-1-1-A-1-19，1982.
- 3) 例えば，土木学会編：水理公式集，137，1980.