

四国地方における気象庁アメダス 降水量の非定常頻度分析

寒川 典昭*・中村 哲**・竹内 健二***

Non-stationary hydrologic frequency analysis of Meteorological Agency AMEDAS precipitation in the Shikoku region

Noriaki SOGAWA *, Satoru NAKAMURA **
and Kenji TAKEUCHI ***

Abstract

In recent years, droughts and floods that have greatly exceeded projected scales have occurred frequently. The stationarity of precipitation, which has been the basic hypotheses in conventional hydrologic frequency analyses, has been discredited in many of these extreme cases. Global warming has been suggested as a factor contributing to these extreme meteorological phenomena. Concerns have been growing regarding increases in the amount of precipitation and in the frequency of localized high-intensity precipitation events and of drought resulting from increases in precipitation fluctuations.

This paper reports on the analyses of time-series characteristics of long-term gross precipitation, including monthly, seasonal, and annual precipitation, which are generally used for water-use planning. The target area is the Shikoku Region, where occurrences of drought have become notable.

The results of the trend analysis of precipitation for the non-exceedance probability revealed notable decreases in precipitation in Kochi prefectures.

キーワード：極端気象，非定常性，水文頻度分析，渇水，非超過確率降水量

Key words: The extreme weather, Non-stationary state, Hydrologic frequency analysis, Drought, Non-exceedance return period precipitation

* 信州大学 工学部 土木工学科
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Shinshu University

** パシフィックコンサルタンツ株式会社
Pacific Consultants Co., Ltd

*** 長野市役所
Nagano City Hall

本論文に対する討論は平成24年2月末日まで受け付ける。

1. はじめに

従来、土木工学の分野における利水・治水計画では、整備の目標として「10年に1回の渇水」や「100年に1回の洪水」といった任意の規模の確率降水量を対象として策定されてきた。このような場合の水文頻度分析は、降水量の経年の時系列特性は時間的に変化しないという「降水量の定常性」を仮定している。

しかし、近年、今までの予測を大きく上回る渇水や洪水が頻発している。例えば、四国の早明浦ダムでは毎年のように長期間の取水制限が行われるなど、慢性的な水不足に悩まされているほか、日本各地で時間100mm以上の局地的な短時間集中豪雨が発生するなど、「降水量の定常性」という従来の水文頻度分析における仮定が成り立たないケースが多々見受けられるようになってきている。

これら「極端気象」の要因については、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の第4次評価報告書において、地球温暖化による影響の可能性が示唆されており、降水量の増加、集中豪雨発生頻度の増加、また降水量変動幅の増大に伴う渇水頻度の増加などが懸念されている。

一方で、古期水文学の進展に伴い、復元された過去の水文学と記録のある時系列とを比較してみると、両者を合成した時系列には非定常性が見られる場合が多いことが報告されている。¹⁻³⁾ これらの現象に対処するためには、対象とする原系列をそのまま非定常として取り扱う頻度分析手法が要求される。このような現状に鑑み、1992年から寒川・他⁴⁻¹⁰⁾は降水量の非定常頻度分析を提案してきた。杉山¹¹⁾は、北海道内の22気象官署の年降水量、年最大日降水量及び年最大無降雨連続日数をとりあげ、トレンドとジャンプの検出及び時系列解析によって、北海道降水量の非定常性を明らかにしている。また、2010年1月には、米連邦政府の水関係機関共催による『非定常性、水文頻度分析、水マネジメント』と銘打ったワークショップが開催され、竹内¹²⁾は、その時の様子として、特に非定常時代に入った現在、従来の手法は使えな

い可能性が多分にあるので、その代替案としての非定常頻度分析の導入の必要性を報告している。このように水文頻度分析における非定常過程の取り扱いについて、世界的にも関心が高まってきているところであり、Milly et. al.¹³⁾の論文は、降水量の非定常性に対する科学政策を論じたものであり、それに呼応して頻度分析に非定常性を導入することの必要性を示唆している。

このような背景を踏まえて、本稿では、渇水傾向が顕著な四国地方を対象に、一般に利水計画策定に用いられる月・季節・年降水量といった一定の長期間の総降水量について、その時系列特性を分析した。また、11年間移動部分標本による平均降水量及び標準偏差の経年変化傾向より、今後の降水形態のトレンドを分析するとともに、非超過確率降水量について、近年30年間のトレンドを解析した。

2. 検討対象データ

本稿で対象とするデータは、図1及び表1に示す四国地方4県(徳島、香川、愛媛、高知)の42箇所の地域気象庁観測所(通称:アメダス)における過去の降水量データである。分析データは、一般に利水計画の検討に用いられる一定の長期間の総降水量(月降水量、季節降水量、年降水量)とした。

この際、年降水量は1~12月、季節降水量の振

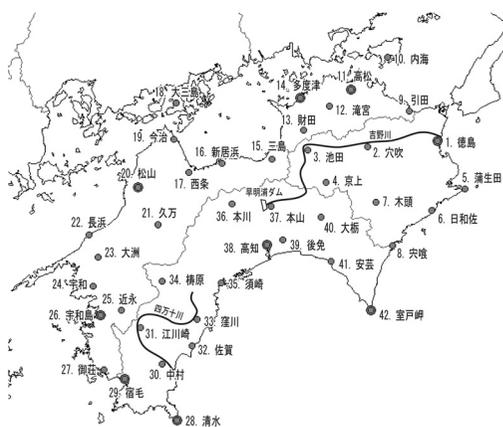


図1 検討対象降水量観測所位置図

表1 検討対象降水量観測所一覧

県	観測所
徳島県 (8)	(1) 徳島, (2) 穴吹, (3) 池田, (4) 京上, (5) 蒲生田, (6) 日和佐, (7) 木頭, (8) 穴喰
香川県 (6)	(9) 引田, (10) 内海, (11) 高松, (12) 滝宮, (13) 財田, (14) 多度津
愛媛県 (13)	(15) 三島, (16) 新居浜, (17) 西条, (18) 大三島, (19) 今治, (20) 松山, (21) 久万, (22) 長浜, (23) 大洲, (24) 宇和, (25) 近永, (26) 宇和島, (27) 御荘
高知県 (15)	(28) 清水, (29) 宿毛, (30) 中村, (31) 江川崎, (32) 佐賀, (33) 窪川, (34) 梶原, (35) 須崎, (36) 本川, (37) 本山, (38) 高知, (39) 後免, (40) 大栃, (41) 安芸, (42) 室戸岬

り分けとして、春降水量は3～5月、夏降水量は6～8月、秋降水量は9～11月、冬降水量は前年の12月と当該年の1、2月とした。なお、冬降水量は最初の年のデータが取得できないため、常にデータ長が1つ短くなっている。

3. データ処理

3.1 トレンド分析

本研究では、時系列中に埋もれているトレンド(変動傾向)を線形と仮定して、回帰方程式を使用する。回帰方程式では、方程式を $Y = aX + b$ とおくと a 、 b は、独立変数を X 、従属変数を Y と仮定したときに、次のように定義される。

$$a = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$b = \bar{Y} - a\bar{X} \quad (2)$$

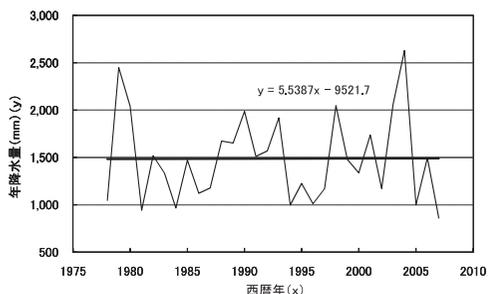


図2 徳島観測所(1)における年降水量の時系列と線形トレンドと回帰方程式

この時、 a を回帰係数と呼ぶ。ここで \bar{X} 、 \bar{Y} は、 X 及び Y の平均値を示す。

例として、図2に徳島観測所の年降水量の時系列とその線形トレンド、及び回帰方程式を示す。

3.2 移動部分標本

対象とする降水量について、平均と変動係数の経年変化を調べる際に、11年移動部分標本を用いた。

ある地点において過去に n 個の降水量データが観測されているとした場合、例えば図3に示されるように、まず観測1年目から11年目(1978年～1988年の11年間)のデータを1番目の部分標本($t=1$)とし、2年目から12年目のデータ(1979年～1989年の11年間)を2番目の部分標本($t=2$)とする。同様にして、3番目、4番目、…、というように部分標本を作成し、観測最終年の n 年目を

西暦年	降水量 (mm)	No	11年移動部分標本 平均降水量(mm)
1978	1,260	n_1	
1979	2,371	n_2	
1980	2,558	n_3	
1981	1,725	n_4	
1982	2,290	n_5	
1983	1,715	n_6	
1984	1,472	n_7	
1985	1,979	n_8	
1986	1,739	n_9	
1987	2,110	n_{10}	
1988	1,737	n_{11}	
1989	2,064	n_{12}	
1990	2,210	n_{13}	
1991	1,994	n_{14}	
1992	1,560	n_{15}	
1993	2,965	n_{16}	
1994	1,050	n_{17}	
1995	1,669	n_{18}	
1996	1,663	n_{19}	
1997	1,832	n_{20}	
1998	1,845	n_{21}	
1999	2,162	n_{22}	
2000	1,766	n_{23}	
2001	1,599	n_{24}	
2002	1,216	n_{25}	
2003	1,966	n_{26}	
2004	2,297	n_{27}	
2005	1,708	n_{28}	
2006	2,733	n_{29}	
2007	1,827	n_{30}	

図3 11年移動部分標本のモデリング例

含む $(n-10)$ 年目から n 年目のデータを $(n-10)$ 番目の部分標本とし、時系列順に並べ、平均、標準偏差、確率降水量 (3.3参照) を算出し、分析を行った。

3.3 非超過確率降水量

本稿では、確率降水量を太陽の黒点周期である11年区間の小標本で算定し、それを1年ずつずらしていくことで、非定常頻度の分析を可能にしている。(3.2参照)

ここで、年降水量は正規分布に従うこと、及び月・季節降水量は対数正規分布に従うことが経験的に知られているので、それぞれ正規分布、対数正規分布を用いて頻度分析を実施した。

正規分布は、 x に関する平均を μ 、分散を σ^2 とするとき、次の式で与えられる。¹⁴⁾

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

また、対数正規分布は、 $y = \log x$ に関する平均を μ_y 、分散を σ_y^2 とするとき、次の式で表される。¹⁵⁾

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y x} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (4)$$

4. 長期間降水量の経年変化傾向

4.1 分析方法

本稿では、降水量の時系列特性を、各データを時系列にプロットした経年変化グラフを作成し、そのグラフの近似直線の傾き(回帰係数)、つまり「単位期間あたりの変化量=変化率」をもって評価

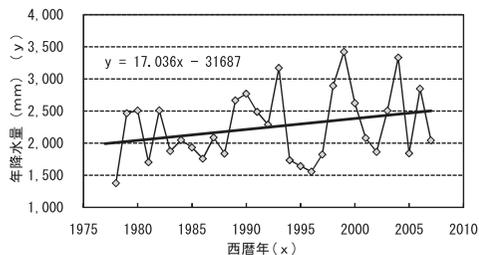


図4 江川崎観測所 (31) における年降水量の時系列と直線トレンドの回帰係数

することとした。

図4に高知県の江川崎観測所の1978年から2007年の年降水量の経年変化グラフを示す。図4中に示している回帰直線の傾き「17.036 (mm/年)」が単位期間あたりの変化量(変化率)であり、回帰係数である。

4.2 観測年

本稿では、多くの観測所において、気象庁ホームページの気象統計情報において、多くの観測所のデータが公開されている1978年(昭和53年)から2007年(平成19年)までの30年間を検討対象の目安とした。しかし、観測所の中には観測開始年が遅い所もあり、標本数が1年分少ない観測所もある。

各観測所の観測開始年及びデータ数は、表2のとおりである。

4.3 原系列データのトレンド分析

各観測所別、各降水量別の変化率を整理した。図5に年降水量、図6から図9に季節降水量の変化率を示す。また、図10及び図11に、月降水量のうち特徴的な例として、6月降水量と9月降水量の変化率を示す。

図5の年降水量の変化率を見ると、観測所毎に値の大小はあるものの、比較的增加傾向にある観測所が多いことが分かる。地域的な傾向として

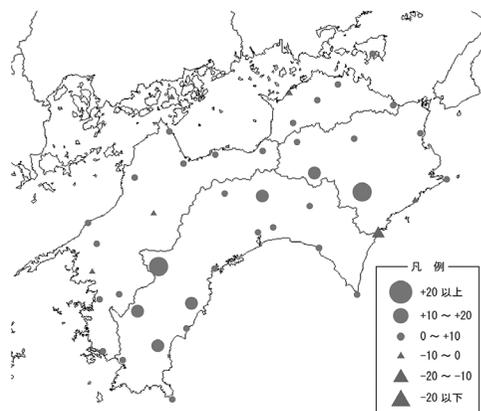


図5 年降水量(1~12月)の変化率(mm/年)

表2 各観測所のデータ使用期間とデータ数

県	番号	観測所名	データ使用期間		データ数
			開始年	最終年	
徳島県	1	徳島	1978	2007	30
	2	穴吹	1978	2007	30
	3	池田	1978	2007	30
	4	京上	1978	2007	30
	5	蒲生田	1979	2007	29
	6	日和佐	1978	2007	30
	7	木頭	1979	2007	29
	8	宍喰	1979	2007	29
香川県	9	引田	1978	2007	30
	10	内海	1978	2007	30
	11	高松	1978	2007	30
	12	滝宮	1978	2007	30
	13	財田	1978	2007	30
	14	多度津	1978	2007	30
愛媛県	15	三島	1978	2007	30
	16	新居浜	1978	2007	30
	17	西条	1978	2007	30
	18	大三島	1978	2007	30
	19	今治	1978	2007	30
	20	松山	1978	2007	30
	21	久万	1979	2007	29
	22	長浜	1979	2007	29
	23	大洲	1978	2007	30
	24	宇和	1978	2007	30
	25	近永	1979	2007	29
	26	宇和島	1978	2007	30
	27	御荘	1978	2007	30
高知県	28	清水	1978	2007	30
	29	宿毛	1978	2007	30
	30	中村	1978	2007	30
	31	江川崎	1978	2007	30
	32	佐賀	1978	2007	30
	33	窪川	1978	2007	30
	34	梼原	1978	2007	30
	35	須崎	1978	2007	30
	36	本川	1979	2007	29
	37	本山	1978	2007	30
	38	高知	1978	2007	30
	39	後免	1979	2007	29
	40	大柝	1978	2007	30
	41	安芸	1978	2007	30
	42	室戸岬	1978	2007	30

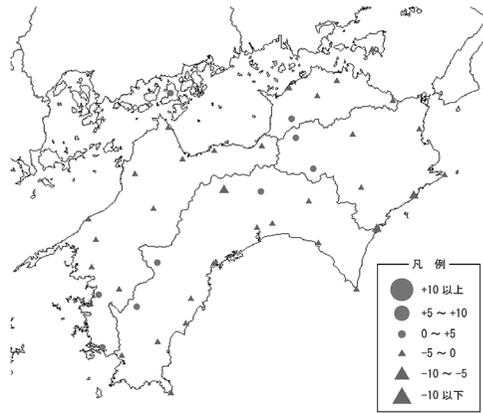


図6 春降水量(3~5月)の変化率(mm/年)

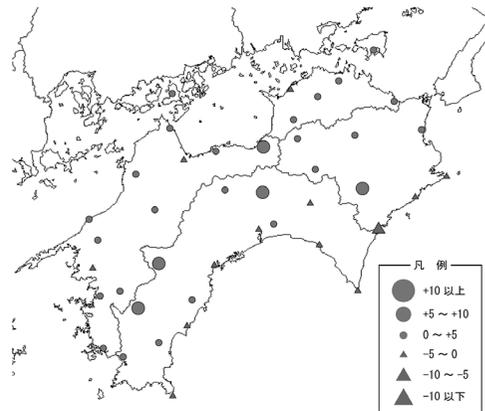


図7 夏降水量(6~8月)の変化率(mm/年)

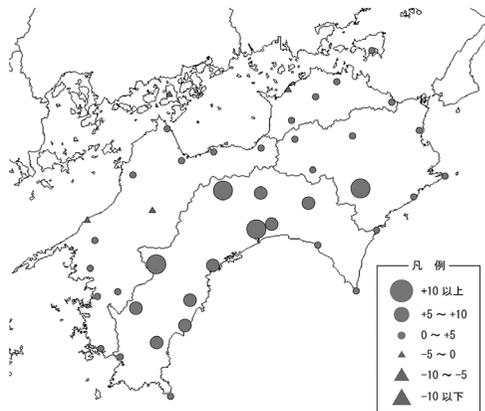


図8 秋降水量(9~11月)の変化率(mm/年)

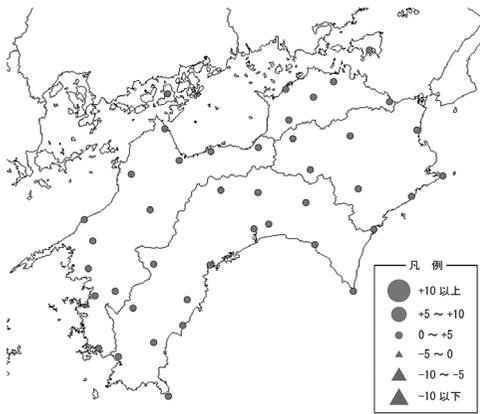


図9 冬降水量（12～2月）の変化率（mm/年）

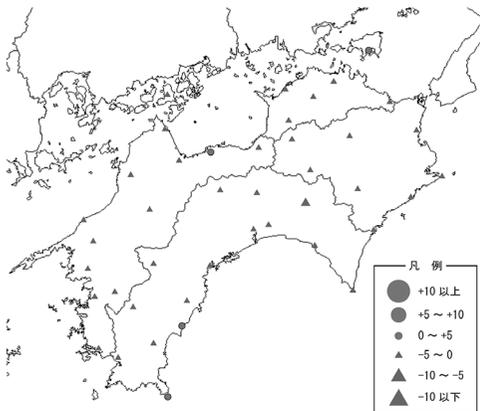


図10 6月降水量の変化率（mm/年）

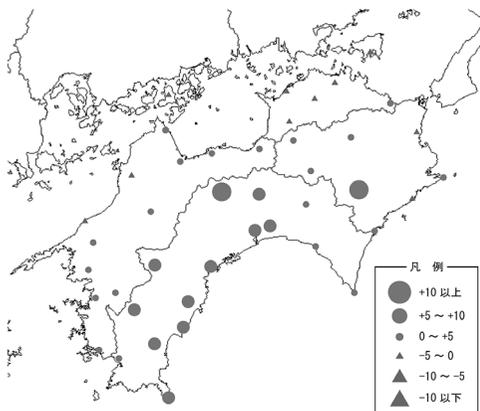


図11 9月降水量の変化率（mm/年）

は、瀬戸内海側の香川県及び愛媛県の一部の観測所の変化率が小さく、高知県は変化率が大きいことである。

一方、季節降水量を見ると、季節によって明確な傾向の違いが見てとれる。図6の春降水量では、ほとんどの観測所が減少傾向であるのに対し、その他の季節ではほとんどの観測所が増加傾向である。

月別で見ると、それぞれの月はその季節降水量の傾向が出現しているが、6月降水量はほぼ全ての観測所で減少傾向であり、9月降水量では、高知県のみ極端な増加傾向が見られた。

4.4 11年移動部分標本による平均降水量と標準偏差の分析

降水量時系列における「非定常性」とは、簡易的には時間的に同じ平均、または同じバラつきをもたないことである。そこで、本研究では降水量時系列の11年移動部分標本毎の「平均」と「標準偏差」の経年変化傾向を分析することにより、非定常性を評価することとした。

図12に示すような確率分布形の変化による非超過確率降水量の変化傾向を評価指標とした渇水の危険度の判断基準としては、分布形が左にずれる（平均が減少する）ほど渇水の危険度が上がり、またピークがつぶれて裾が広がる（標準偏差が大きくなる）ほど渇水の危険度が上がる。

逆に洪水については、分布形が右にずれる（平均が増加する）ほど洪水の危険度が上がり、標準偏差が大きくなるほど洪水の危険度が上がる。

(1) 11年移動部分標本による「平均」のトレンド分析

各観測所別、各降水量別の変化率を整理した。図13に年降水量、図14から図17に季節降水量の変化率を示す。また、図18及び図19に、月降水量のうち特徴的な例として、8月降水量と9月降水量の変化率を示す。

図13の年降水量の変化率を見ると、四国地方全体的に増加傾向にある観測所が多い。また、地域的な傾向としては、図5の原系列同様、瀬戸内海

側の香川県及び愛媛県の観測所の変化率が小さく、高知県や徳島県の南西部は変化率が大きい傾向にある。

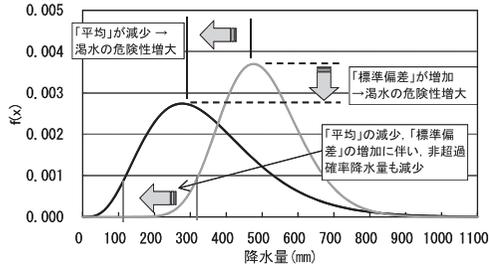


図12 確率分布形の変化による確率降水量の変化傾向

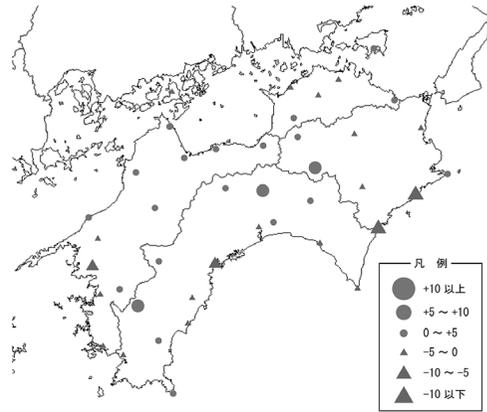


図15 11年平均 夏降水量の変化率 (mm/年)

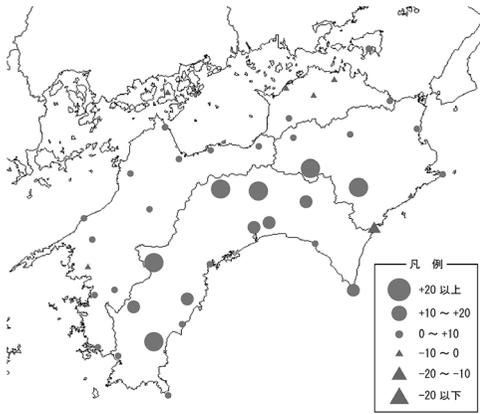


図13 11年平均 年降水量の変化率 (mm/年)

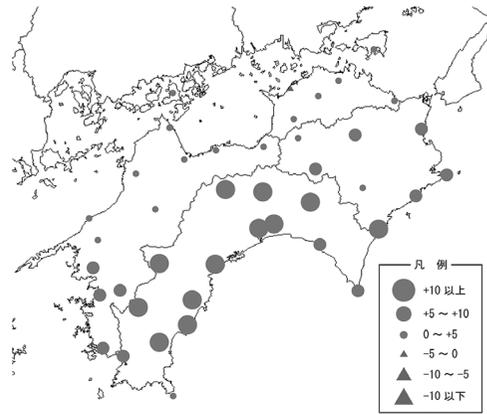


図16 11年平均 秋降水量の変化率 (mm/年)

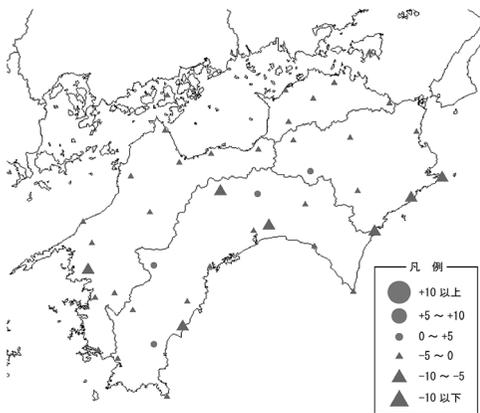


図14 11年平均 春降水量の変化率 (mm/年)

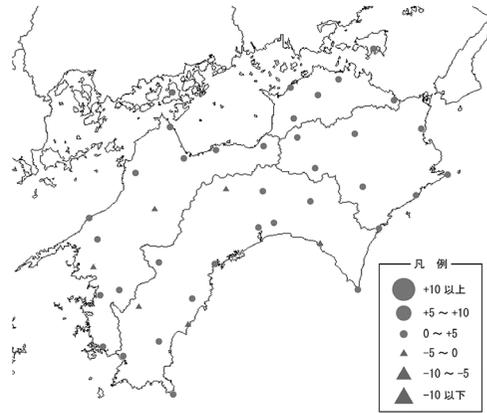


図17 11年平均 冬降水量の変化率 (mm/年)

一方、季節降水量を見ると、季節によって明確な傾向の違いが見てとれる。図14の春降水量では、図6の原系列と同様、ほとんどの観測所が減少傾向であるのに対し、図15の夏降水量では、図7の原系列で増加傾向であった一部の観測所が減少傾向を示しており、一定の傾向が見られない。また、図16、図17の秋降水量・冬降水量では、ほとんどの観測所が増加傾向にあり、秋は高知県、冬は徳島県が増加傾向が顕著である。

月別で見ると、それぞれの月はその季節降水量の傾向が出現しているが、図18の夏場の8月降水量は減少傾向の観測所が多く、図19の9月降水量は、高知県を中心に増加傾向が強く見られた。

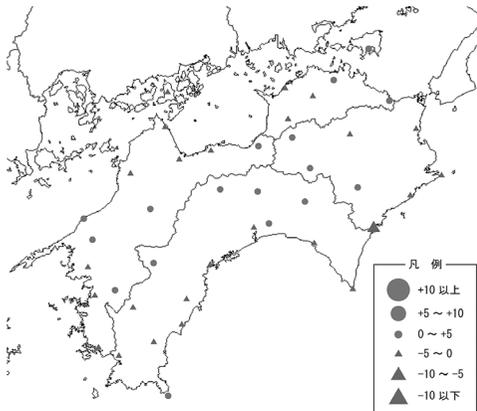


図18 11年平均 8月降水量の変化率 (mm/年)

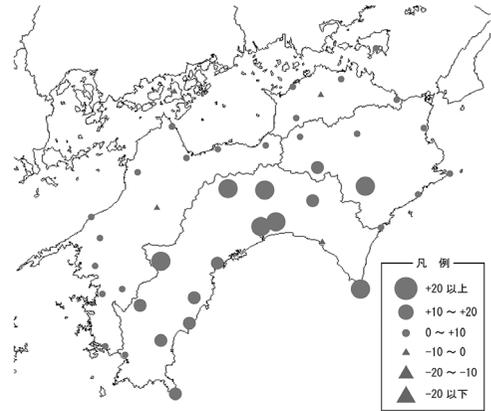


図20 11年平均 年降水量の標準偏差の変化率 (mm/年)

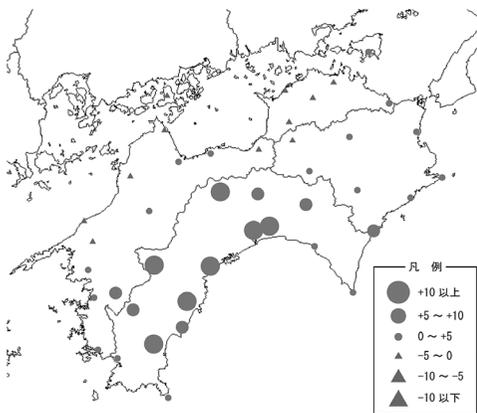


図19 11年平均 9月降水量の変化率 (mm/年)

(2) 11年移動部分標本による「標準偏差」のトレンド分析

「平均」同様、各観測所別、各降水量別の変化率を整理した。図20に年降水量の変化率を示す。また、地域特性を考慮した無次元量の評価として、図21から図24に代表地点として4県の県庁所在地に位置する観測所の変動係数(標準偏差÷平均)を示す。

図20の年降水量の変化率を見ると、四国地方全体的に増加傾向にある観測所が多い。また、地域的な傾向としては、瀬戸内海側の香川県及び愛媛県の観測所の変化率が小さく、高知県や徳島県の南部の観測所は変化率が大きい傾向にある。

図21から図24の代表4観測所の変動係数を見ると、いずれの観測所も増加傾向にあるが、特に高知観測所は変動係数の増加傾向が高い。

5. 非定常頻度分析

前章までの検討において、11年移動部分標本の平均と標準偏差が時系列的に大きく変化していることから、対象とする降水量の非定常性が明らかとなった。そこで、この11年移動部分標本ごとに確率降水量を算定し、その経年変化について分析を行った。なお、算定する確率降水量の非超過リターンピリオドは5、10、20、30年の4ケースとした。

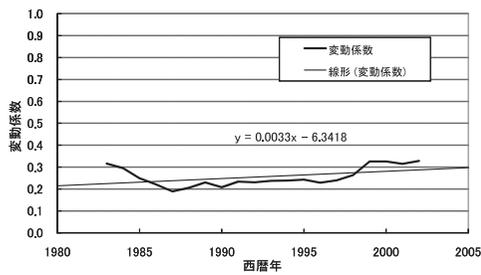


図21 徳島観測所 (1) 11年平均 年降水量の変動係数

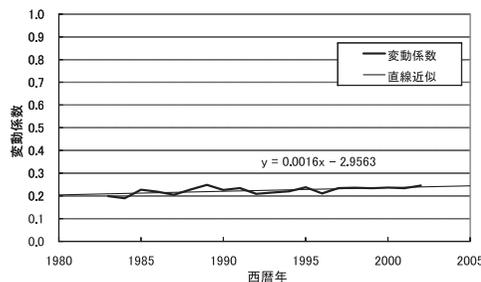


図22 高松観測所 (11) 11年平均 年降水量の変動係数

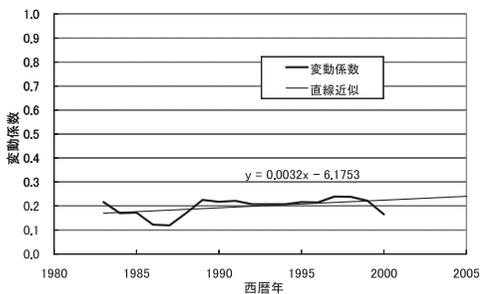


図23 松山観測所 (20) 11年平均 年降水量の変動係数

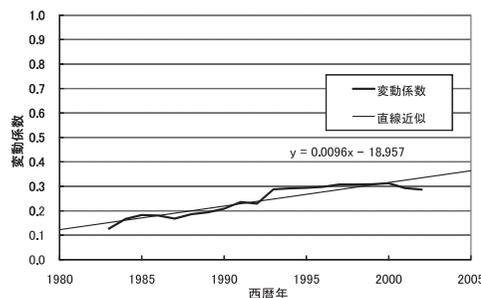


図24 高知観測所 (38) 11年平均 年降水量の変動係数

例として、図25に年降水量、図26から図29に季節降水量の10年非超過リターンピリオドの確率降水量の変化率を示す。また、図30から図33に、月降水量のうち特徴的な地域傾向が見られた、6月～9月降水量の10年非超過リターンピリオドの確率降水量の変化率を示す。

図25の年降水量の変化率を見ると、四国地方全体的に減少傾向にある観測所が多く見られた。また、地域的な傾向としては、瀬戸内海側の香川県及び愛媛県の観測所の変化率が小さく、高知県や徳島県の南部の観測所は変化率が大きい傾向にあり、今後、さらに渇水被害のリスクが増加する可能性がある。一方、季節降水量を見ると、春降水量と夏降水量は減少傾向、秋降水量は増加傾向、冬降水量は一部の地域で増加傾向が見られた。

図26の春降水量では、特に徳島県南部と高知県において顕著な減少傾向が見られ、香川県や愛媛県など瀬戸内海側の観測所が概ね2 (mm/年) 程度の減少なのに対し、高知県では平均的に7 (mm/年) の減少傾向が見られた。

図27の夏降水量を見ると、高知県においては春降水量同様、平均7 (mm/年) 程度、その他の地域では平均4 (mm/年) 程度の減少傾向が見られた。

図28の秋降水量では、全体的に増加傾向であるが、特に徳島県南部及び高知県中部において平均10 (mm/年) 近い増加傾向が見られた。

図29の冬降水量は、徳島県と高知県において微小な増加傾向が見られるが、全体的には大きな変化傾向は見られない。

次に、月別降水量については、月別に顕著な地域特性が見られた。

図30の6月降水量は、高知県西部の観測所のみ微増傾向で、その他の観測所は減少傾向が見られ、図31の7月降水量は、徳島県南部及び高知県中東部において増加傾向、逆に6月降水量で増加傾向が見られた高知県西部及び香川県の観測所は減少傾向という結果となった。

次に図32の8月降水量を見ると、全体的に減少傾向が見られ、特に高知県中部から愛媛県南部にかけて顕著な減少傾向が見られた。また、図33の

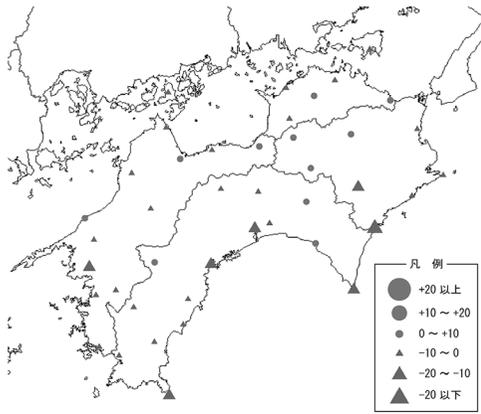


図25 年降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

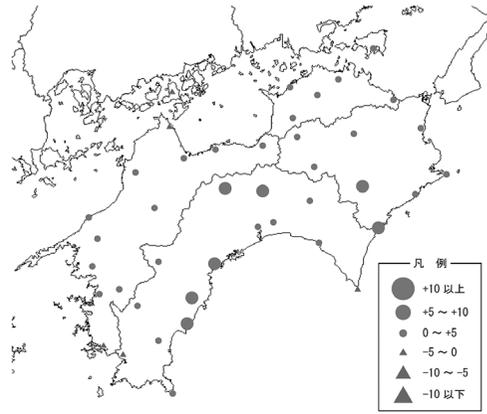


図28 秋降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

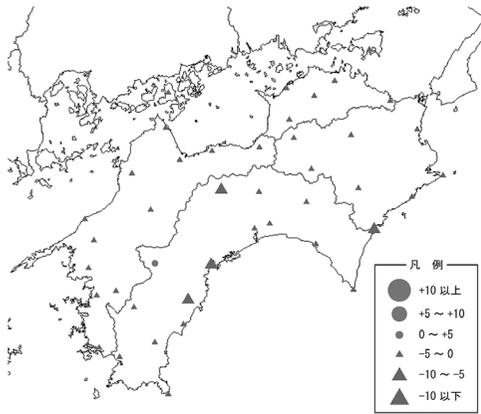


図26 春降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

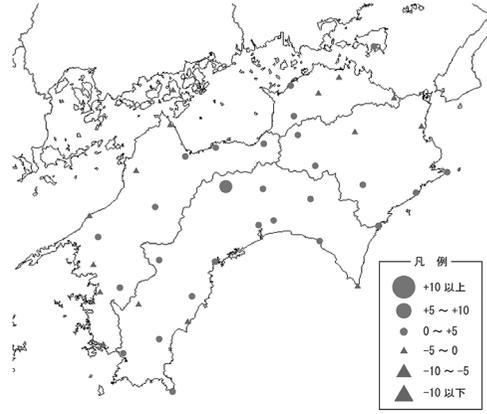


図29 冬降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

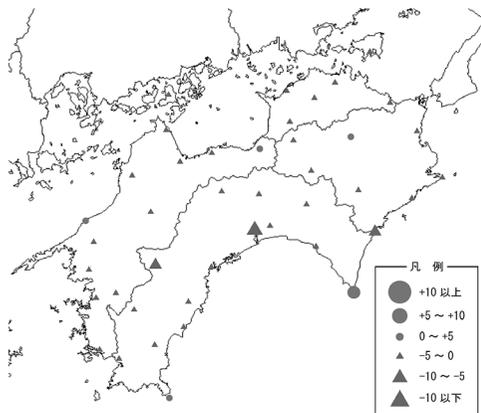


図27 夏降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

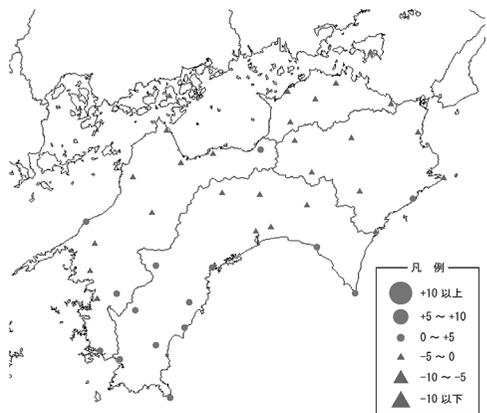


図30 6月降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

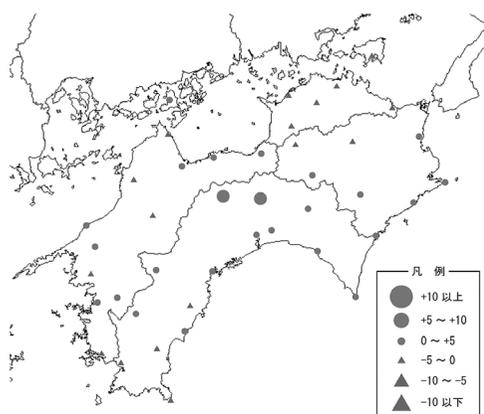


図31 7月降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

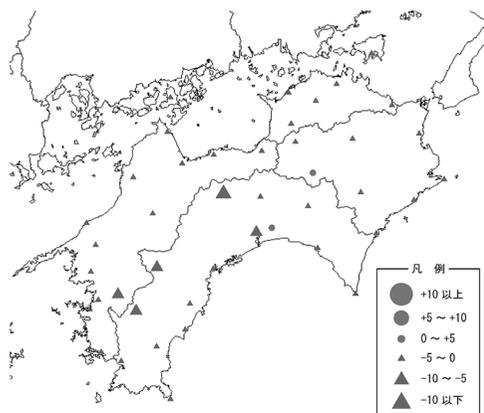


図32 8月降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

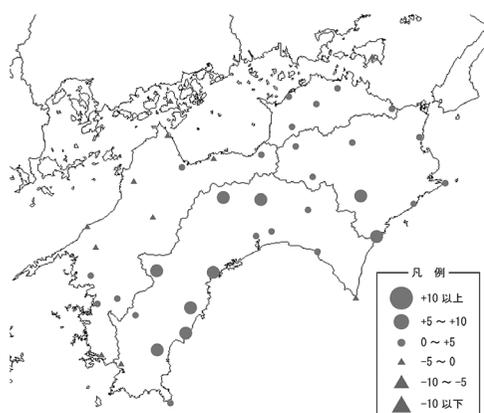


図33 9月降水量 10年非超過確率降水量の変化率 (mm/年)

9月降水量を見ると、徳島県南部と高知県において特に顕著な増加傾向が見られ、その他の地域においても愛媛県中部を除き、全体的に増加傾向が見られる。

6. まとめ

本研究で得られた成果を要約すると以下のようになる。

非超過確率降水量の変化傾向を見ると、四国地方全体的に減少傾向が見られる。特に、地域特性を見ると、香川県や愛媛県など瀬戸内海に面した地域では減少傾向は微小であるが、高知県や徳島県では顕著な減少傾向が見られるという明確な地域差が現れた。このことから、高知県内及び高知県北部に位置する早明浦ダムを水源とする吉野川水系の水を利用する徳島県においては、今後の水不足の危険性が增大することが予想される。

非超過確率降水量の季節別の変化傾向を見ると、大まかに春から夏にかけては減少傾向、秋から冬にかけては増加傾向という特徴が見られた。月別の降水量で評価すると、各月によって地域的な傾向は異なるが、8月の夏場の一番渇水の危険性が高い時期は、どの県も水不足の危険性が增大する可能性を示しており、特に高知県では夏場の減少傾向と秋の増加傾向の差が極端に現れている。

以上より、四国地方においては、今後、渇水被害のリスクがますます増大する傾向にあり、特に高知県においては、渇水被害のリスクが増大する可能性が高いと考える。

なお、本稿では回帰係数の有意性の検定が不十分であるため、今後、検討していく。

参考文献

- 1) Webb, R.H.: Late holocene flooding on the Escalante river, south-central Utah, Ph. D. Dissertation, The University of Arizona, Tucson, AZ, 1985.
- 2) Knox, J.C.: Responses of floods to Holocene climate change in the upper Mississippi Valley, Quaternary Research, Vol.23, pp.287-300, 1985.
- 3) 寒川典昭・他：千曲川下流の歴史洪水の復元と考

- 察, 土木史研究, 第12号, pp.251-262, 1992.
- 4) 寒川典昭・他：長野県における月降水量時系列の経年変化と確率水文学, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.775-780, 1992.
 - 5) 寒川典昭・他：年降水量時系列の経年変化と非定常水文頻度分析, 環境システム研究, 第20巻, pp.25-32, 1992.
 - 6) 寒川典昭・他：年最大1・2・3日降水量時系列に存在する非定常性と非定常確率水文学の推定, 日本統計学会誌, 第23巻, 第2号, pp.249-262, 1993.
 - 7) 寒川典昭・他：周期性を考慮した年降水量時系列の非定常な確率降水量の算定, 天気, 第43巻, 第3号, pp.159-165, 1996.
 - 8) 寒川典昭・西 知哉：統計モーメントを情報とした1VNME分布と頻度分析, 水工学論文集, 第47巻, pp.151-156, 2003.
 - 9) 寒川典昭, 中村 哲：日高川流域の月・季節・年降水量の非定常頻度分析, 水工学論文集, 第49巻(1), pp.7-12, 2005.
 - 10) 寒川典昭, 鈴木將史：日本列島20世紀の降水量時系列の経年的非定常性とその確率降水量の評価値に及ぼす影響, 自然災害科学, 第26巻, 第4号, 2008.
 - 11) 杉山一郎：北海道内降水量の非定常性と確率降水量の変動特性, 学位論文, 北見工業大学, 2007.
 - 12) 竹内邦良：米連邦水関係機関共催「非定常性, 水文頻度解析, 水マネジメント」ワークショップ参加報告, 河川, pp.90-96, 2010.
 - 13) P.C.D. Milly, et. al.: Stationarity Is Dead: Whither Water Management?, Science, Vol.319, No.5862, pp.573-574, 2008.
 - 14) 神田 徹・藤田睦博：新体系土木工学, 26, 水文学 - 確率論的手法とその応用 -, 土木学会編, 技報堂出版, p.31, 1982.
 - 15) 14) に同じ, p.32.

(投稿受理：平成22年12月21日)

訂正稿受理：平成23年3月29日)