

日高川流域の月・季節・年降水量の非定常頻度分析

FREQUENCY ANALYSES OF NON-STATIONARY MONTHLY, SEASONAL AND ANNUAL RAINFALLS IN THE HIDAKA RIVER BASIN

寒川典昭¹・中村 哲²

Noriaki SOGAWA and Satoru NAKAMURA

¹正会員 工博 信州大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

With the recent occurrence of frequent droughts or floods exceeding conventional predictions, an existing assumption of stationary rainfall is no longer applicable to frequency analyses in many cases.

On such a background, this paper reports the results of frequency analyses of non-stationary monthly, seasonal and annual rainfalls with a non-exceedance probability of the design level, a key index in discussing drought problems.

Key Words : *non-stationary state, frequency analyses, drought, rainfall with a non-exceedance probability of the design level*

1. はじめに

従来, 我が国における利水・治水計画は, 降水量の頻度解析を基にして策定されてきた. この際の頻度解析は, 降水事象の確率構造は変化していない (定常過程) という仮定のもとで行われている. しかし, 近年, 西日本を中心に最大 330 日間もの取水制限を引き起こした平成 6 年の渇水や, 今年の福井・新潟洪水等, 予測を大きく上回る水害が頻発しており, 「水文量の定常性」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.

また, 米国 EPA レポート¹⁾においても, 地球の温暖化が降水の時系列パターンに大きな影響を及ぼす可能性を指摘している. 一方で, 古期水文学の進展に伴い, 復元された過去の水文量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.^{2), 3), 4)}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.

このような背景を踏まえて, 本稿では, 渇水問題を議論するときの重要な計画指標である非超過確率降水量について, 和歌山県内の日高川流域を対象として, 年降水量だけでなく, 月別, 季節別の傾向の分析を行った結果を報告するものである.

なお, 非定常頻度分析に当たっては, パラメータはもちろんのこと, 確率分布の種類自身も観測所毎に異なることを想定し, 複数の確率分布モデルを対象に, SLSC (standard least-squares criterion, 標準最小二乗基準) による適合度の比較評価⁵⁾を行い, 各観測所で最も適合度の高い分布モデルによる確率降水量を算定した.

2. 検討対象データ

(1) 対象流域

日高川は, その源を紀伊半島中部山岳地帯の護摩壇山 (標高 1,372m) に発し, 山地部を蛇行しながら西に流下し, 川辺町和佐において左支川江川を合流し, 御坊市内を貫流して河口部において右支川西川を合わせて紀伊水道に注ぐ, 幹川流路延長 127km, 流域面積 652km² の, 和歌山県下最大の二級河川である.

流域は, 御坊市, 美浜町, 日高町, 川辺町, 中津村, 美山村, 龍神村の 1 市 3 町 3 村にまたがっている. 流域の約 90% は山地であり, また流域の気候は一年を通じて温暖で, 年間降水量は平野部で約 1,500mm, 山間部で約 2,500mm 程度である.

(2) 対象データ

本研究で解析の対象とした降水量は, 一般に利水計画

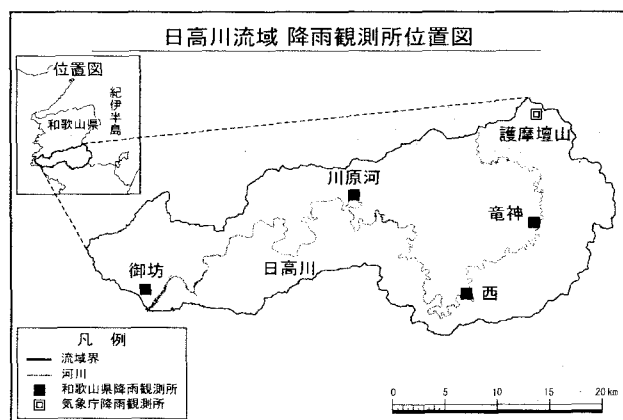


図-1 降雨観測所位置図

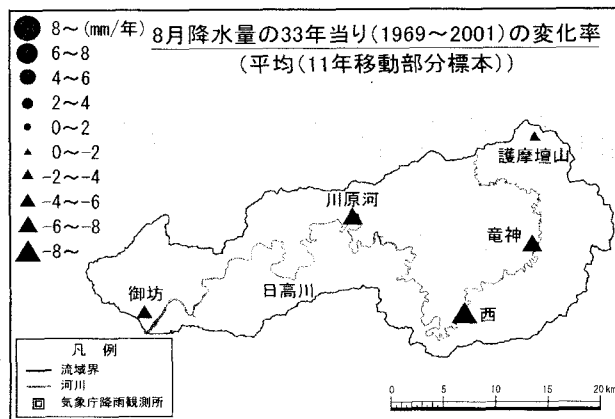


図-3 8月降水量11年移動部分標本の平均の変化率

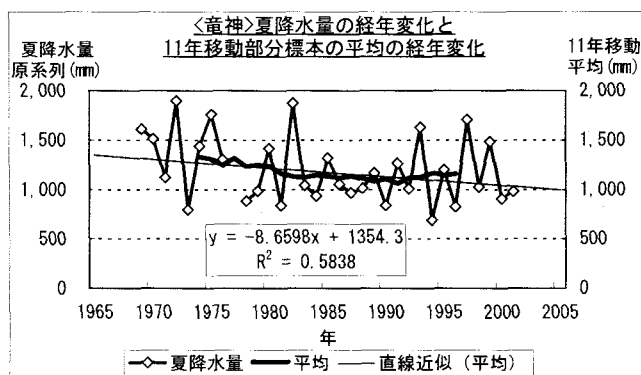


図-2 竜神観測所夏降水量の経年変化と11年移動部分標本の平均の経年変化

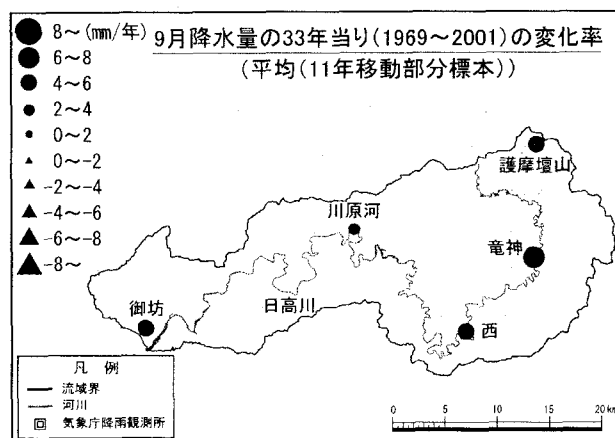


図-4 9月降水量11年移動部分標本の平均の変化率

策定に参考とされる、一定の長期間の総降水量（年、季節、月降水量）とした。

和歌山県及び気象庁によって、これらの降水量データが観測されている日高川流域内の観測所は図-1 に示す5箇所（御坊、川原河、西、竜神（以上、和歌山県）、護摩壇山（気象庁））であり、観測が開始された昭和44年（西暦1969年）から平成13年（西暦2001年）までの33年分のデータを対象とした。

なお、季節降水量は、冬降水量を前年の12月から当該年の1、2月、春降水量を当該年の3、4、5月、夏降水量を当該年の6、7、8月、秋降水量を当該年の9、10、11月の総降水量とした。

3. 平均の経年変化

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、または同じばらつきをもたないこと、すなわち統計的性質が時間とともに変化することである。例えば時系列にトレンド（長期傾向）やジャンプ（急激な変化）があれば、非定常性が存在すると言える。

そこで、日高川流域における降水量時系列の非定常性を検証するため、平均とばらつきの経年変化傾向について調査した。なお、ばらつきについては、その指標として「標準偏差」を用いた。

以下、「平均」の経年変化の傾向とその変化の割合について、また第4章にて「標準偏差」の経年変化の傾向とその変化の割合について分析した結果を述べる。

(1) 経年変化の傾向

第2章で示したデータにおいて、移動部分標本毎に平均を計算し、経年変化を算出した。なお、移動部分標本の長さは、全体のデータ数が33年分であることから、有意な経年変化傾向を確認できる長さとして、11年移動部分標本（データ数23個）を対象とすることとした。

例として、竜神観測所における夏降水量について、原系列と11年移動平均の経年変化グラフを図-2 に示す。この場合、平均が年々減少していくのが見てとれる。

(2) 経年変化の割合

本研究で対象とした各種降水量の11年移動平均の増加・減少傾向について、その傾向の大きさを「変化率」として算定した。

ここで変化率は、11年移動部分標本の近似直線の傾きの値を増加率・減少率として流域図に表示した。8月降水量の例を図-3 に、9月降水量の例を図-4 に示す。

この結果、各降水量について、以下のような結果が得られた。

年降水量は、全観測所とも減少傾向である。

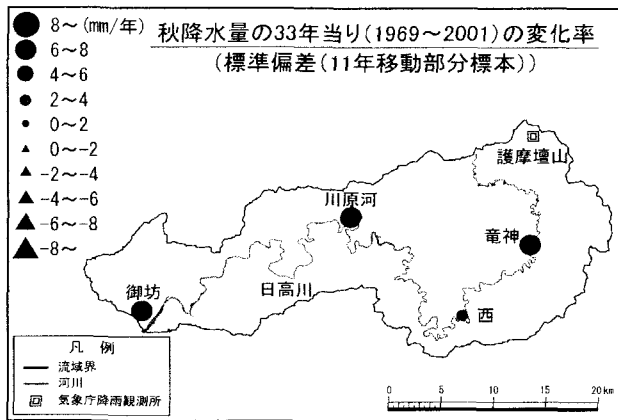


図-5 秋降水量 11 年移動部分標本の標準偏差の変化率

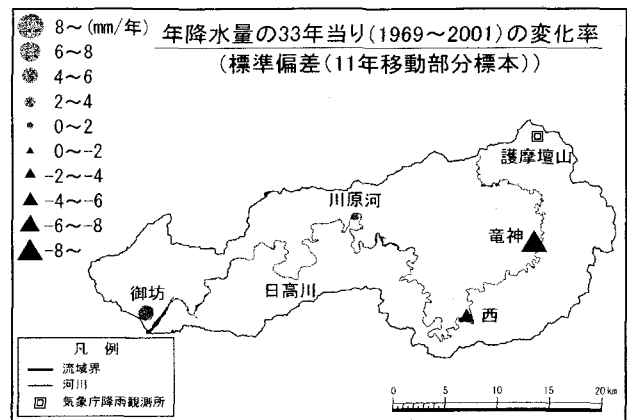


図-6 年降水量 11 年移動部分標本の標準偏差の変化率

季節降水量は、秋降水量のみ全観測所にて増加傾向、その他の春降水量、夏降水量、冬降水量については概ね減少傾向であり、特に夏降水量は減少率が高い。

月降水量は、1, 3, 5, 9, 11 月降水量が全観測所にて増加傾向で、特に 9 月降水量の増加率が高い。また、2, 4, 8, 10 月降水量は全観測所にて減少傾向、6, 7, 12 月降水量は一部の観測所を除いて全体的にわずかに減少傾向で、特に 8 月降水量の減少率が高い。

従って、降水量時系列の平均の 1 年を通しての特徴としては、夏場の渇水期は減少傾向が強く、秋の台風時期は増加傾向が強い、つまり夏場はより渇水被害の危険性が高まり、秋季はより洪水被害の危険性が高まっていると言える。

4. 標準偏差の経年変化

(1) 経年変化の傾向

利水計画においては渇水期の降水量が問題となるため、降雨のばらつきが大きいと、非超過確率降水量がより厳しい値となる。

平均と同様に、11 年移動部分標本（データ数 23 個）毎に標準偏差を算出して、その経年変化傾向を求めた。その結果、各降水量について、以下のような傾向が見られた。

年降水量は、下流の御坊、川原河観測所では増加傾向、上流の西、竜神観測所では減少傾向である。

季節降水量は、夏は全観測所で減少傾向、秋は全観測所で増加傾向、春と冬は年降水量同様、下流は増加傾向、上流は減少傾向である。

月降水量は、3, 7, 8 月降水量は全観測所にて減少傾向、5, 9, 12 月降水量は全観測所にて増加傾向である。その他の月は、観測所によって減少傾向と増加傾向が混在するが、全体的に下流側の観測所において増加傾向が顕著である。

(2) 経年変化の割合

本研究で対象とした各種降水量の 11 年移動部分標本

の標準偏差の増加・減少傾向について、その傾向の大きさを「変化率」として算定した。変化率が大きいほどばらつきが多くなり、変化率が小さいほどばらつきが少なくなっているということである。

図-5は秋降水量、図-6は年降水量の変化率の大きさを流域図上に表したものである。

各降水量の変化率の傾向から、季節的には、秋はばらつきが多くなり、夏は逆にばらつきが少なくなる傾向である。また、地域的な特徴としては、上流から下流に行くほどばらつきが多くなる傾向にある。

5. 確率降水量の経年変化

(1) 非定常頻度分析法

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、対象とする降水量データに存在する非定常性を確認した。

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検討した。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。

また、非定常頻度分析に当たっては、パラメータはもちろんのこと、確率分布の種類自身も地域的に異なり、また経年的に変化する⁶⁾。

そこで、本研究では、年・季節・月降水量に対する候補確率分布モデルとして、経験的に水文統計で一般に用いられる正規分布（NO）、対数正規分布（LN）、ピアソンⅢ型分布（PE3）を用いて、33 年間の全データを対象に確率降水量を算出し、SLSC（standard least-squares criterion, 標準最小二乗基準）による適合度の比較評価を行い、各観測所ごとに最も適合度の高い分布モデルによる確率降水量を選定することとした。

なお、母数（パラメタ）の数はすべて 2 個とし、いずれの分布も母数推定法には積率（モーメント）法を用いた。⁷⁾

以下にこれらの分布の分布関数 $F(x)$ 、確率密度関数 $f(x)$ を示す。

a) 正規分布 (NO)

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (1)$$

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

母数は μ , σ である。

b) 対数正規分布 (LN)

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (0 < x < \infty) \quad (4)$$

母数は μ_y , σ_y である。

c) ピアソンⅢ型分布 (PE3)

$$F(x) = \frac{\Gamma(b, x/a)}{\Gamma(b)} \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{1}{a\Gamma(b)} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-x/a} \quad (0 \leq x < \infty) \quad (6)$$

a は尺度母数, b は形状母数, $\Gamma(b)$ はガンマ関数, $\Gamma(b, x/a)$ は不完全ガンマ関数である。

また, 候補確率分布モデルの比較評価方法に用いたSLSCは, 確率分布の理論クオンタイル (確率降水量) と標本順序統計量との誤差度合を測る指標で, 次式によって定義される。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\zeta^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|} \quad (7)$$

$$\zeta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2 \quad (8)$$

ここに, $s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量, N : データの個数, s_i : 順序統計量データ $x_{(i)}$ を推定母数で変換した標準変量, r_i : プロットイング・ポジション (本研究では, SLSC の提唱者である宝ら⁵⁾ が用いていること, また一番小さなデータより小さな値が出る確率や一番大きなデータより大きな値が出る確率が存在するハーゼン公式を採用) に対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量である。

SLSC の値が小さいほど適合度がよいこと⁵⁾になり, 本研究では, 各観測所ごとに, 先の 3 つの分布形について, 最も SLSC の小さい分布形を当該観測所における確率分布モデルとした。

(2) ヒストグラムと確率密度関数

各降水量の 11 年移動部分標本のヒストグラムに対し

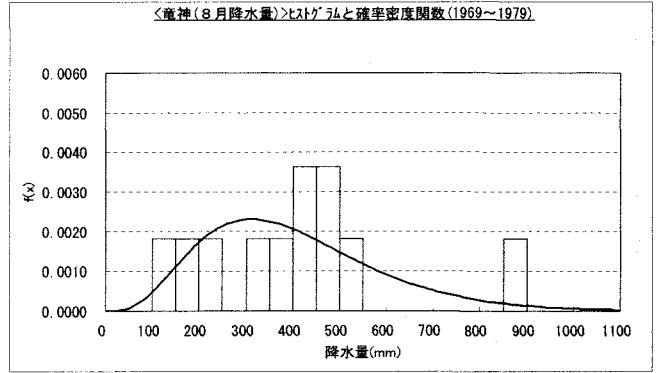


図-7 竜神観測所 8 月降水量移動部分標本(1969～1979)のヒストグラムと確率密度関数 (ピアソンⅢ型分布)

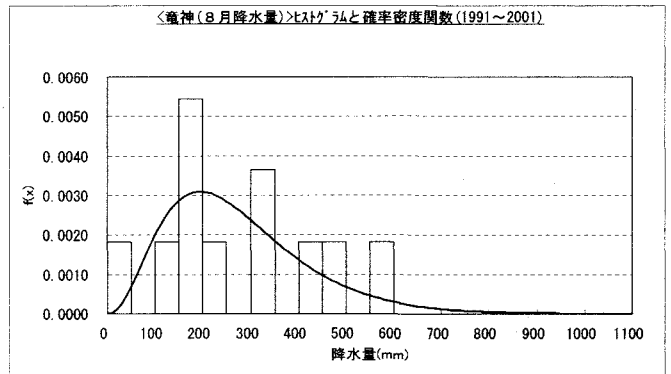


図-8 竜神観測所 8 月降水量移動部分標本(1991～2001)のヒストグラムと確率密度関数 (ピアソンⅢ型分布)

て, 最も適合度の高い分布形をあてはめ, その形状の変化の度合いを評価するため, 最初の 11 年間 (西暦 1969～1979 年) と, 最後の 11 年間 (西暦 1991～2001 年) について作図して比較した。

図-7 と図-8 は, 竜神観測所の 8 月降水量について, 最初と最後の 11 年移動部分標本のヒストグラムと, 最も適合度の高かったピアソンⅢ型分布の確率密度関数を図示したものである。

図-8 は図-7 と比較して見ると分かるとおり, 平均と標準偏差が共に減少しているため, 分布形が全体的に左にずれつつ, かつピークが尖り, 裾がよりシャープになっていることが分かる。

これら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。

各降水量について, この渇水の危険度が最も高くなる傾向となる, 平均減少・標準偏差増加のパターンが見られた降水量は, 年降水量では川原河観測所, 季節降水量は無し, 月降水量は御坊観測所の 2, 4, 6, 10 月降水量, 川原河観測所の 12 月降水量, 西観測所の 12 月降水量, 竜神観測所の 6, 12 月降水量, 護摩壇山観測所の 10

表-1 竜神観測所における各降水量の適合度比較

降水量	竜神観測所のSLSC		
	正規分布	対数正規分布	ピアソンⅢ型分布
	NO	LN	PE3
年降水量	0.0254	0.0318	0.0277
春降水量	0.0234	0.0383	0.0274
夏降水量	0.0527	0.0402	0.0401
秋降水量	0.0505	0.0249	0.0271
冬降水量	0.0753	0.0407	0.0437
1月降水量	0.0602	0.0368	0.0318
2月降水量	0.1188	0.0734	0.0684
3月降水量	0.0477	0.0485	0.0412
4月降水量	0.0642	0.0283	0.0305
5月降水量	0.0568	0.0537	0.0459
6月降水量	0.0292	0.0646	0.0425
7月降水量	0.0642	0.0438	0.0338
8月降水量	0.0620	0.0453	0.0322
9月降水量	0.0659	0.0399	0.0349
10月降水量	0.0685	0.0318	0.0268
11月降水量	0.0333	0.0736	0.0326
12月降水量	0.0354	0.0942	0.0560

月降水量であった。

全体的な傾向を見ると、6、7、8月は分布形が左に移動する観測所が多く、夏場の渇水の危険度が上がっていることが伺える。

また、地域特性を見ると、最下流の御坊観測所は、平均が減少して標準偏差が増加するパターンが多く見受けられることから、渇水の危険度が上がっている傾向にあるといえる。

(3) 標準最小二乗基準 (SLSC)

各降水量、各観測所ごとに算定した3つの確率分布モデルについて、各々のSLSCの値を算定した。SLSCの値が小さいほど適合度が良いことになる。

SLSCは適合度の相対的評価の基準としてだけでなく、絶対的評価にも有用であり、SLSC<0.02であれば良い適合度を示し、0.02から0.03の間は良否の判断が付き難い領域であり、SLSC>0.03であれば他の分布、他の母数推定法を試みるべきとされている。⁵⁾

表-1は、竜神観測所における各降水量の確率分布ごとのSLSC算定値の一覧である。年降水量、季節降水量では目立った特徴は見られないが、月降水量ではピアソンⅢ型分布(PE3)の適合度が高いケースが多く、他の観測所においても同様の傾向が見られた。

(4) 確率降水量の経年変化の傾向

各降水量ごとに最も適合度の高い確率分布により与えられる非超過確率降水量を時系列にプロットし、その経年変化の特性について検討を行った。

図-9、図-10は、竜神観測所における8月及び9月降

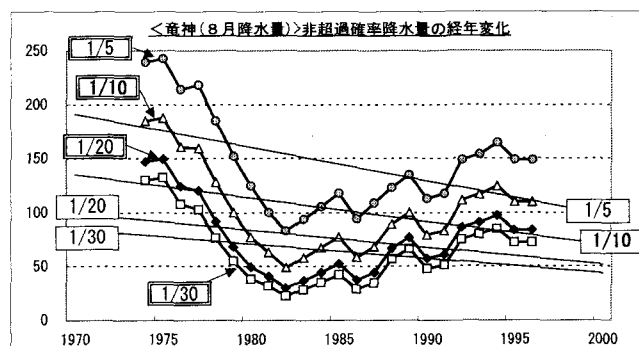


図-9 竜神観測所非超過確率降水量(8月)の経年変化

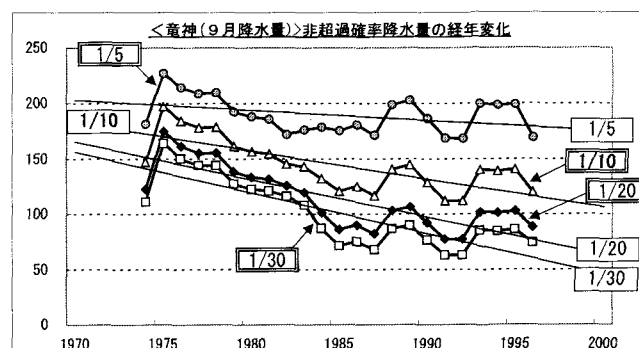


図-10 竜神観測所非超過確率降水量(9月)の経年変化

水量について、非定常頻度解析を行った結果算定された11年移動部分標本に対する1/5、1/10、1/20、1/30非超過確率降水量を時系列にプロットした例である。

各々の降水量について、非定常頻度解析による非超過確率降水量の経年変化の傾向は、以下の通りである。

年降水量は、下流の御坊、川原河観測所では減少傾向、上流の西、竜神観測所では増加傾向である。

季節降水量は、春降水量と冬降水量については、特に地域的な特徴は見られないが、夏降水量と秋降水量については減少傾向が見られ、特に下流の観測所の方が減少傾向が強い。

平均が増加傾向にもかかわらず秋降水量の確率降水量が減少傾向なのは、標準偏差の増加率が大きかったことに引っ張られているものと考えられる。

また、月降水量は地域的な特徴はあまり顕著ではないが、夏から秋にかけて、全体的に減少傾向が強い。

(5) 確率降水量の経年変化の割合

非定常頻度解析により算定した各確率降水量の変化の割合について、11年移動部分標本の近似直線上で、最初の11年の真ん中の年(西暦1974年)の値を基準として、最後の11年の真ん中の年(西暦1996年)の値の増加率・減少率を算定し、これらの増加率・減少率の大きさを流域図に表示した。

図-11、図-12は、年降水量及び8月降水量の10年非超過確率降水量の変化率を平面図上にプロットしたものである。

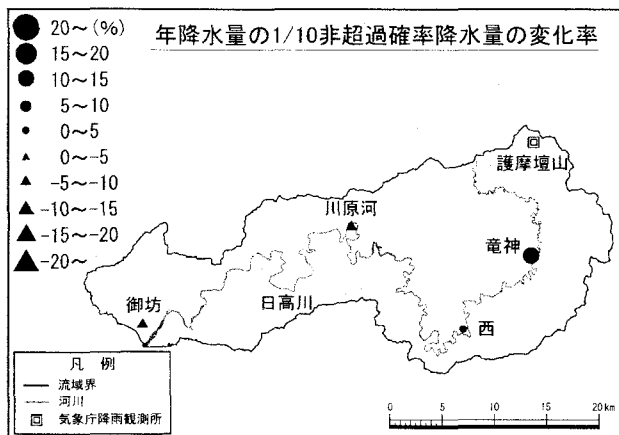


図-11 年降水量 10 年非超過確率降水量の変化率(%)

各降水量の非超過確率降水量の経年変化の割合について、10 年非超過確率降水量を対象として評価した結果は以下の通りである。

年降水量の変化率は、上流にいくほど増加率が高く、下流に行くほど減少率が高いという地域特性が見られた。

季節降水量は、地域的にも季節的にも特徴は見られなかったが、全体的に減少傾向が強く、最大で御坊観測所の秋降水量において 27%の減少率であった。

月降水量は地域的な特徴はあまり見られないが、4、8~10、12 月降水量では全観測所にて減少傾向が見られ、特に 8 月降水量は最大で川原河観測所にて 75%の減少率を示しており、このままの傾向で行くと、今後、渇水の危険性が大きくなることが予想される。

6. まとめ

本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

非超過確率降水量の変化傾向の地域特性を見ると、下流の観測所では減少傾向、上流の観測所では増加傾向という明確な地域差が現れた。このことから、上流域で降った雨は上流域内で使ってしまう水利用形態の場合、下流域での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変化傾向の月別の特徴を見ると、夏から秋にかけては 7 月を除いて減少傾向で、特に川原河観測所の 8 月降水量において、最大 75%の減少率を示しており、冬は 1~3 月にかけて増加傾向が現れている。これは、年降水量で見るとあまり大きな減少傾向ではないが、夏場の一番渇水の危険性が高い時期は、より水不足の危険性が增大していることを示しているものと考えられる。

ただし、本研究における課題として、元のデータ数が 33 カ年分と少なかったため、移動部分標本を 11 年という短いスパンで分析を行わざるを得なかったがために、SLSC の値が大きく、適合度のあまり高くない確率分布モデルを用いて分析せざるを得ないケースがいくつか

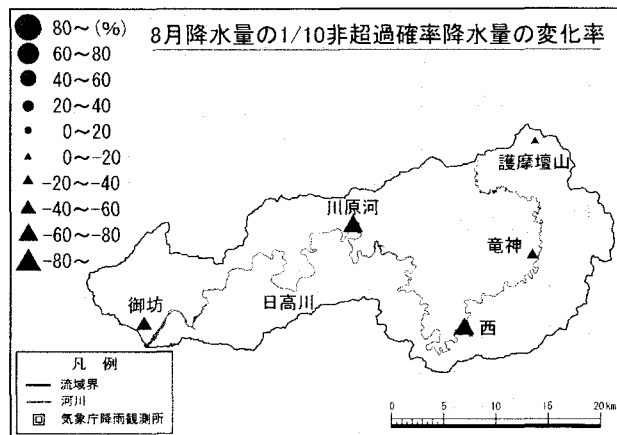


図-12 8 月降水量 10 年非超過確率降水量の変化率(%)

あった。

今後、データの蓄積に伴い、20 年以上のもっと長いスパンでの移動部分標本による解析を行うことにより、より精度の高い解析が行われることを期待する。

謝辞：本研究で用いた水文データは、和歌山県河川課河川企画班の末本氏より提供していただいた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地球温暖化影響研究会：地球温暖化による社会影響，技報堂出版，pp. 8-49(1992)。
- 2) Webb, R.H. : Late holocene flooding on the Escalante river, south-central Utah , Ph.D. Dissertation , The University of Arizona, Tucson, AZ(1985)。
- 3) Knox, J.C. : Responses of floods to holocene climate change in the upper Mississippi Valley, Quaternary Research, Vol. 23, pp. 287-300(1985)。
- 4) 寒川典昭，山下伊千造，南 志郎：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)。
- 5) 宝 馨，高埴琢馬：水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準，土木学会論文集，第 393 号／Ⅱ-9，pp. 151-160(1988)。
- 6) 寒川典昭，林 久志：年降水量に対応する確率分布の種類を経年変化，信州大学工学部紀要，第 81 号，pp. 1-12(1999)。
- 7) 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，pp. 13-76(1982)。

(2004. 9. 30 受付)