

北海道内22気象官署における降水量の 非定常頻度解析

UNSTEADY FREQUENCY ANALYSIS OF PRECIPITATION AT THE 22 METEOROLOGICAL OBSERVATORIES IN HOKKAIDO

杉山一郎¹・佐渡公明²

Ichiro SUGIYAMA and Kimiteru SADO

¹学生会員 工修 北見工業大学大学院 工学研究科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²フェロー 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

We need to discuss that the well-precisely estimate of design rainfalls regarding design high and low water-level of a river is one of the most significant problems. Moreover, we have to consider about to improve the awareness of emergency from disaster for people who live along a river.

In this paper, we clarified the non-stationary properties of precipitation by a time series analysis. The sum of trend and period components of each of the 22 meteorological observatories in Hokkaido was shown to have 30%-67% variance of original series. Next, we decided the optimum probability distribution models of the annual precipitation, the annual maximum daily amount of rainfall and the annual maximum number of days with continuous non-rainfall in 17 models by the Standard Least-Squares Criterion. Finally, it was shown that the design rainfall for flood management changes extremely, as a result of the change of the T-year probable hydrological amount and its return period from 1989 to 2004 using the Generalized Extreme Value distribution. Especially, the Okhotsk Sea area indicated to decrease the safety factor for flood management.

Key Words : *Unsteady frequency analysis, Annual maximum daily amount of rainfall, Annual maximum number of days with continuous non-rainfall, Safety factor for flood management*

1. はじめに

近年, 記録的豪雨, 記録的猛暑及び記録的少雨といった「記録的～」という言葉が紙面を賑わしている。さらに, 土砂災害, 堤防の決壊及び水不足といった被害が続出しており, 河川の治水計画及び利水計画において精度のよい計画降雨や無降雨期間推定の重要性は論を待たない。過去に想定した土木構造物の設計安全率を上回る自然現象は, 従来の土木構造物の維持管理だけでは, 住民の生活を保障することは困難なことを意味するのではないだろうか。しかし, 現在の財政状況では維持管理すらままならない。そこで, 限られた資金を効率的に投入し, 水利構造物の耐久能力を高めることよりも, むしろ住民の危機意識を高めることで災害を最小限なものにする工夫, 例えば, 河川ハザードマップ等に, 降水量の変化による水利構造物の安全率の推移を盛り込むことも一つの手法と考える。

本研究の目的は, 北海道内22気象官署の統計開始年か

らの年降水量, 年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数データによる降雨の非定常性を調べること。また, 非定常性に起因する年最大日雨量の治水安全率の年々変化, 年最大無降雨連続日数の利水安全率の年々変化を明らかにすることである。寒川ら¹⁾²⁾は, 降雨に関する非定常頻度解析を行ない, 安定した確率日雨量の推定には30~40年分以上のデータが必要であることを述べている。しかし, これ以外に最近の降水量の非定常頻度解析を扱った研究例は少ない。そこでまず, 道内22官署の年降水量, 年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数のそれぞれの基本統計量を求め, 時系列解析により, 降雨の非定常性の指標を調べる。次に, 各官署の降水量データに対する最適確率分布モデルを17種類の中から判定する。最後に, 各官署の統計開始年から1989年までのデータを用いて計算したT年確率水量及びそのリターンピリオド(再現期間)が, その後1990~2004年の期間でどのように変化するかを求め, ある治水安全率を持つ計画降雨に対する, 統計年数及び最近の降水量の変動の影響を明らかにする。

表-1 道内22気象官署の年降水量の基本統計量（2004年まで）（気象庁提供）

気象官署名	統計年数	平均値(mm)	変動係数	歪係数	気象官署名	統計年数	平均値(mm)	変動係数	歪係数
羽幌	84	1327	0.137	0.322	稚内	67	1134	0.169	0.781
留萌	62	1265	0.166	0.764	北見枝幸	62	1225	0.143	<u>1.128</u>
岩見沢	58	1217	0.156	0.462	雄武	62	909	0.162	0.482
札幌	128	1090	0.145	0.640	紋別	49	846	0.175	0.214
苫小牧	62	1228	0.147	0.522	網走	115	<u>824</u>	<u>0.171</u>	0.339
室蘭	82	1184	0.154	0.274	根室	125	1009	<u>0.184</u>	0.179
小樽	62	1227	<u>0.134</u>	0.155	釧路	95	1077	0.164	0.565
倶知安	61	1557	0.135	0.450	帯広	111	937	0.178	0.581
寿都	117	1229	0.148	<u>0.127</u>	広尾	<u>47</u>	<u>1729</u>	0.178	0.378
江差	64	1234	0.149	-0.199	旭川	116	1098	0.146	0.736
函館	<u>132</u>	1171	0.150	0.138	浦河	78	1115	0.175	0.330

表-2 年降水量の各最適確率分布の官署数

モデル		R	SLSC
①	LNM	10	6
②	GEV	6	6
③	MoHa(U^2)	0	3
④	LP3	1	2
⑤	Iwai(U^2)	0	2
⑥	ND(U^2)	1	1
⑦	LNQ	0	1
⑧	MoTo(S^2)	0	1
⑨	P3	3	0
⑩	Iwai(S^2)	1	0
計		22	22



図-1 北海道内22気象官署位置図

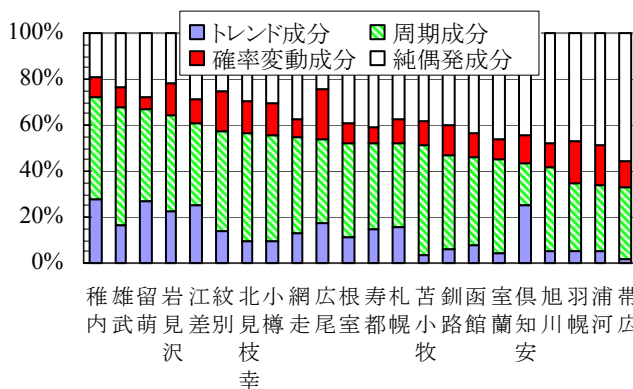


図-2 道内22官署の年降水量の分散に対する各成分の分散の割合（決定論的成分の大小順に並べている）

2. 非定常頻度解析

(1) 非定常頻度解析とは

確率過程の統計的性質が、時間の取り方により変化する確率変動を非定常確率過程という。特に、データ数が非常に大きくなった場合は、定常確率過程となる。降水の時系列過程には、時間の関数であるトレンド成分や周期成分が通常含まれているので、降水データは一般に非定常確率過程である。しかし、治水計画においては、取り扱いの容易さから定常頻度解析が採用されている。このような非定常確率過程の母集団から抽出された標本値の頻度解析を“非定常頻度解析”と呼ぶ。

(2) 降水量データ

降水量データは、札幌管区气象台、網走地方气象台、気象庁HP電子閲覧室及び気象庁年報CD-ROMにより、各官署の観測開始年又はデータ収集開始可能年から2004年までを取扱う。なお、欠測等により参考値となっている場合も有効とし、日界及び観測機器等の変更による誤差もここでは考慮しない。図-1に道内22気象官署の位置図を示す。全22官署の内、100年以上の降水量データがある

のは、年降水量が7官署（最長：函館の132年間）、年最大日雨量（同：札幌・函館の122年間）及び年最大無降雨連続日数（同：札幌の116年間）は8官署である。また、年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数は、雪の影響を除くため5月～11月までを対象とした。

(3) 最適確率分布^{3), 4), 5)}

本研究で扱う確率分布は、一般化極値分布（GEV）、PearsonⅢ型分布（P3：積率法による）、対数PearsonⅢ型分布（LP3：対数標本値の歪係数の正、負に対しそれぞれ対数標本値の積率解、原標本値の積率解を採用）、3母数対数正規分布（LNQ：Quantile-最尤法による、LNM：積率法による）、Gumbel分布、岩井法（Iwai(U^2), Iwai(S^2))（ U^2 ：不偏分散採用、 S^2 ：分散採用）、Gumbel-Chow法（G-C(U^2), G-C(S^2))、平方根指数型最大値分布（SQRT-ET）、正規分布（ND(U^2), ND(S^2))、積率法（高瀬法）（MoHa(U^2), MoHa(S^2))：Plotting positionとしてHazen plot採用、MoTo(U^2), MoTo(S^2))：Thomas plot採用の17通りの確率分布から、標準最小二乗規準（SLSC：Standard Least-Squares Criterion）により決定する。分散 S^2 を採用した確率分布も取り上げたのは、これが最適確率分布となる場合も有るからである。

表-3 道内22気象官署の年最大日雨量の基本統計量（2004年まで：5～11月）

(北見枝幸, 苫小牧, 根室, 広尾は上位1位削除) (気象庁提供)

気象官署名	統計年数	平均値(mm)	変動係数	歪係数	気象官署名	統計年数	平均値(mm)	変動係数	歪係数
羽幌	84	63.8	0.419	1.193	稚内	67	65.7	0.381	1.549
留萌	62	66.1	0.409	0.974	北見枝幸	61	63.2	<u>0.293</u>	<u>0.498</u>
岩見沢	58	70.0	<u>0.623</u>	<u>2.417</u>	雄武	63	66.3	0.380	0.892
札幌	<u>122</u>	70.3	0.442	1.533	紋別	49	62.6	0.431	1.780
苫小牧	62	91.1	0.325	1.033	網走	115	<u>52.7</u>	0.396	1.996
室蘭	82	81.1	0.299	1.007	根室	120	74.1	0.368	0.888
小樽	62	63.6	0.408	1.180	釧路	115	78.7	0.336	1.012
倶知安	61	64.9	0.419	1.897	帯広	113	74.3	0.371	1.099
寿都	121	64.9	0.423	2.139	広尾	<u>46</u>	<u>136.6</u>	<u>0.293</u>	0.783
江差	64	77.3	0.395	1.655	旭川	113	62.2	0.497	1.691
函館	<u>122</u>	75.7	0.357	1.304	浦河	78	71.0	0.375	1.818

表-4 年最大日雨量の各最適確率分布の官署数

モデル		R	SLSC
①	GEV	9	8
②	P3	7	5
③	LP3	2	5
④	Iwai(U ²)	0	2
⑤	LNQ	1	1
⑥	Gumbel	0	1
⑦	G-C(S ²)	1	0
⑧	Iwai(S ²)	1	0
⑨	LNМ	1	0
計		22	22

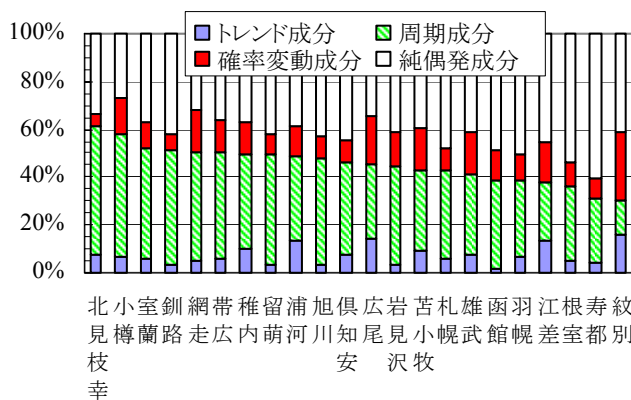


図-3 道内22官署の年最大日雨量の分散に対する各成分の分散の割合（決定論的成分の大小順）

3. 年降水量の非定常頻度解析

表-1に道内22官署の年降水量の基本統計量を示す。全道平均は1165mmで、道南方面の太平洋及び日本海側の降水量が多く、年平均最大値が広尾の1729mmである。変動係数は全道的に0.15前後であり、歪係数は-0.20～1.13とバラツキがある。

次に、時系列解析により、降雨量原系列 $Y(t)$ に対して時間 t により決まる決定論的成分（トレンド成分： $T(t)$ 、周期成分： $P(t)$ ）及び非決定論的成分（確率変動成分： $\varepsilon(t)$ 、純偶発成分： $\eta(t)$ ）の分散の割合を求め、降雨の非定常性を調べる。式(1)に上記の関係式を示す。

$$Y(t) = T(t) + P(t) + \varepsilon(t) + \eta(t) \quad (1)$$

ここでは、決定論的成分の割合が多くなるよう、 $T(t)$ を5次式で求め、 $Y(t)-T(t)$ 系列のパワースペクトルからピークとして現れた卓越周期を全て採用して $P(t)$ とした。 $\varepsilon(t)$ は、 $Y(t)-T(t)-P(t)$ 系列から $\eta(t)$ の割合が少なくなるように10次のMarkov過程で表し、 $Y(t)-T(t)-P(t)-\varepsilon(t)$ 系列を $\eta(t)$ とした。図-2は、以上4成分の分散を年降水量原系列の分散に対する割合で示した棒グラフである。この

図より、決定論的成分が33～72%を占めており、その非定常性と同時に28～67%のランダム性も示している。道央、道南、日本海側、太平洋側、オホーツク海地域に分けた地域特性について、顕著な特徴は見られない。また、第1位卓越周期としては、長い方から、36.7、24.0、18.0年、以下1桁台で8、4、3、2年であった。

次に、第2章(3)節で述べた確率分布モデルの中から、年降水量の最適確率分布を求める。全22官署に対して、標本順序統計量($x_{(j)}$)とPlotting PositionとしてCunnane公式を用いた採用確率分布の理論Quantile($y_{(j)}$)の相関係数 R^2 、及び $x_{(j)}$ と $y_{(j)}$ から得られるSLSC⁵⁾で最適と判定された確率分布の官署数を表-2に示す。Rは積率法による対数正規分布(LNM)が10官署と最も多く、SLSCはLNMと一般化極値分布(GEV)が6官署となっている。

4. 年最大日雨量の非定常頻度解析⁶⁾

(1) 時系列解析と最適確率分布

前章の図-2と同様の方法で求めた時系列成分を、図-3に示す。決定論的成分は30～61%を占めているが、トレンド成分の割合が小さい官署が目立つ。また、顕著な地域的特性は見られず、第1位卓越周期としては、16.7年が最も長く、以下1桁台で8、7、6、5、4、2年であった。

次に、道内22官署の年最大日雨量の基本統計量を表-3に示す。なお、北見枝幸、苫小牧、根室及び広尾の上位第1位について、上位第2位との差が40mm以上と大きく、危険率5%のF検定の結果、異常値として削除している。年平均値では、広尾のみ100mmを超えており、最小値の網走は52.7mmで、隣接地域の紋別と約10mmの差がある。変動係数は0.29～0.62、歪係数は0.5～2.4の範囲であり、ヒストグラムが値の大きい方に尾を引く非対称分布を示すことがわかる。表-4は、前章の表-2と同様の方法で求めた最適確率分布の官署数である。R及びSLSCの両方で

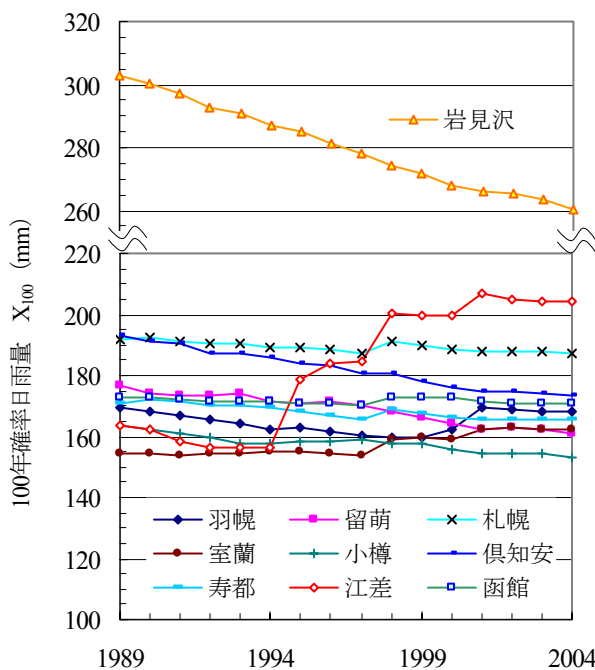


図-4 GEVによる道内18官署の年最大日雨量の X_{100} の年々変化

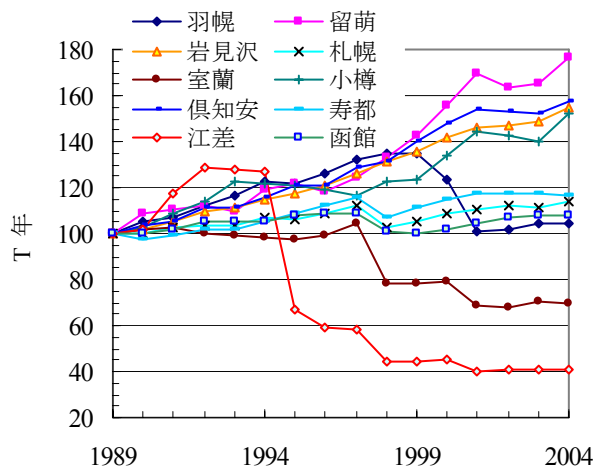


図-5 GEVによる道内18官署の年最大日雨量の1989年の X_{100} に相当するリターンピリオドの年々変化

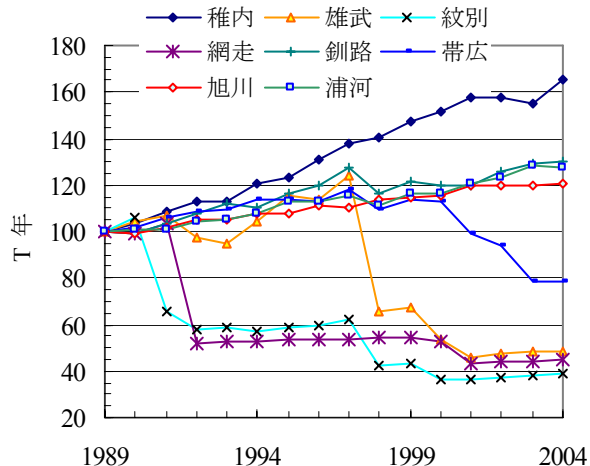
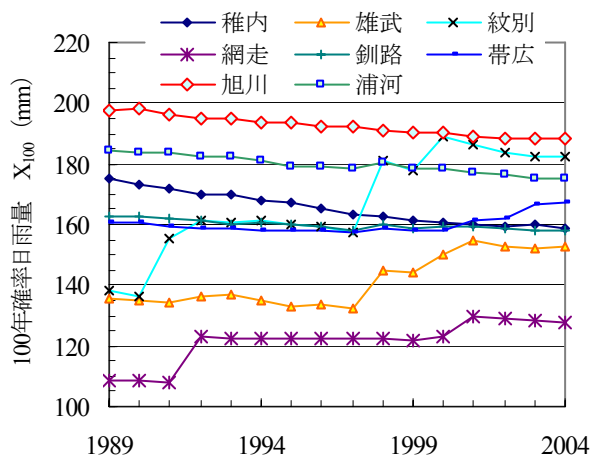
GEVが最も多く、次いでPearson3型分布及び対数Pearson3型分布となっている。

(2) 100年確率日雨量の年々変化

以上より、異常値を削除した4官署を除く18官署に対する確率分布をGEVに統一した上で、各官署の標本値の最終年を1989～2004年と変化させたときの100年確率日雨量(X_{100})の年々変化を図-4に示す。標本値として、各年の値を加えていくことにより、GEVの3母数を更新させた。また同様に、1989年の X_{100} に相当するリターンピリオドの、その後1990～2004年の期間における年々変化を図-5に示す。これにより、ある治水安全率を持つ計画降雨に対する、最近の降水量変動の影響を明らかにすることができる。図-4より、6官署で X_{100} が増加(治水安全率が低下)していることがわかる。最大の増加量は紋別の+44.0mmであり、次いで江差、網走、雄武となっている。逆に岩見沢は-42.1mmと大きく減少(治水安全率が上

昇)している。

図-5では、 $T > 100$ 年は治水安全率が1989年時点より増加、逆に $T < 100$ 年は減少していることになる。これより、最も増加しているのは留萌の176年であり、逆に最も減少しているのは紋別の39年と大きな違いを示している。80



年以下と顕著に減少している紋別、雄武、江差、室蘭、帯広、網走の統計年数を見ると、49年～115年であり、統計年数の大小による影響は少ないと言える。特に、網走、紋別及び雄武はオホーツク海に面した隣接地域である。表-1より、年降水量が最も小さく雨が少ないと言われてきたこの地域では、年最大日雨量は最近増加し、治水安全率が低下していることを表している。このように、一度決定された治水安全率は、その後の雨の降り方によって大きく変化する場合も有り得ることを示している。

ここで、図-4で X_{100} の変化が増加・一定・減少を示した網走・札幌・岩見沢の標本平均値、標準偏差及び歪係数についてグラフ化してみる(図-6)。図-4で示された網走の確率水文量の顕著な変化は、平均値及び標準偏差のグラフと類似している。また、歪係数のグラフでは、網走は1992年に極端な増加を示しており、ヒストグラムが値の大きい方に変化したこと、すなわち、過去と比較して大きな降雨が観測されたことを表している。他方、

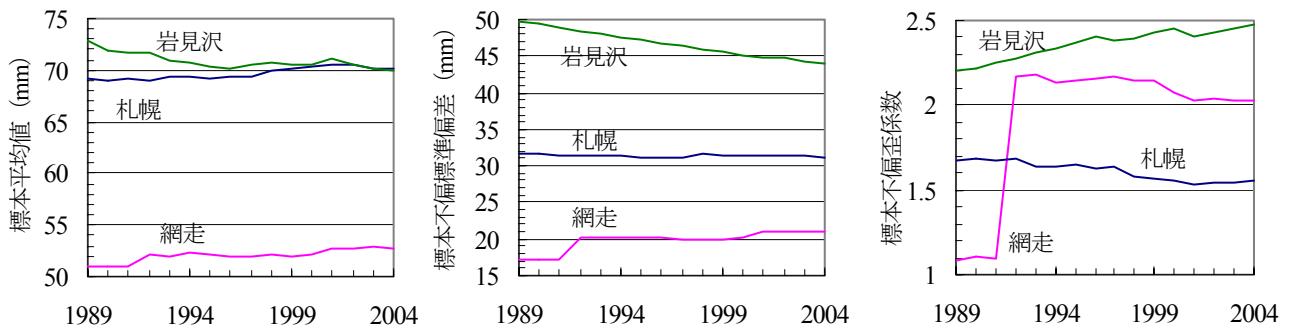


図-6 札幌、網走及び岩見沢の年最大日雨量の標本平均値(左)、不偏標準偏差(中央)及び不偏歪係数(右)の年々変化

表-5 道内22気象官署の年最大無降雨連続日数の基本統計量 (2004年まで: 5~11月)

気象官署名	統計年数	平均値(日)	変動係数	歪係数	気象官署名	統計年数	平均値(日)	変動係数	歪係数
羽幌	84	8.1	0.4	1.1	稚内	67	7.6	0.3	1.6
留萌	58	7.6	0.3	1.2	北見枝幸	62	7.0	0.4	1.4
岩見沢	58	8.0	0.3	1.6	雄武	62	7.6	0.3	1.1
札幌	116	7.9	0.3	1.2	紋別	49	7.3	0.3	1.0
苫小牧	62	7.5	0.3	0.7	網走	114	8.3	0.3	1.2
室蘭	82	7.0	0.3	0.9	根室	113	6.5	0.3	1.0
小樽	62	8.5	0.4	1.5	釧路	113	7.1	0.3	1.4
倶知安	61	7.6	0.3	0.9	帯広	113	6.8	0.3	0.7
寿都	113	8.5	0.4	1.2	広尾	47	7.6	0.2	0.6
江差	64	8.4	0.3	1.8	旭川	113	7.9	0.4	1.7
函館	113	7.8	0.3	1.3	浦河	78	7.0	0.3	1.1

表-6 年最大無降雨連続日数の各最適確率分布の官署数

モデル	R	SLSC
① GEV	5	6
② SQRT-ET	0	4
③ LP3	4	3
④ G-C(U ²)	1	2
⑤ Iwai(U ²)	0	2
⑥ LNQ	0	2
⑦ P3	9	1
⑧ MoHa(U ²)	0	1
⑨ MoTo(S ²)	0	1
⑩ G-C(S ²)	1	0
⑪ Iwai(S ²)	1	0
⑫ LNM	1	0
計	22	22

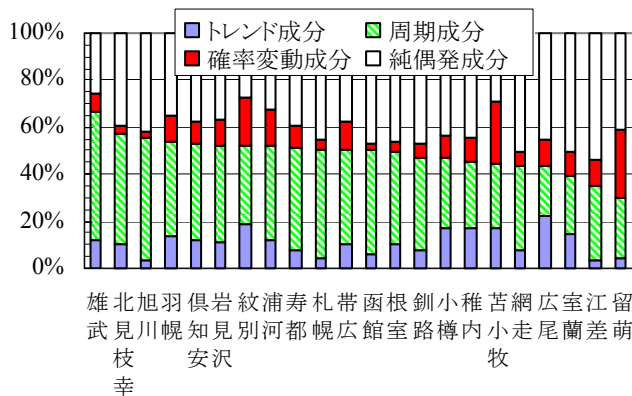


図-7 道内22官署の年最大無降雨連続日数の分散に対する各成分の分散の割合 (決定論的成分の大小順)

札幌の平均値は増加、標準偏差及び歪係数はほぼ一定であることから、ヒストグラムの極値は無く、平均値より多い日雨量を多数記録したといえる。また、岩見沢の平均値は減少した後一定、標準偏差は減少、逆に歪係数は増加していることから、極値に近い大きな降水はなく、平均値よりも少ない日雨量を多数記録したことを示している。このように、 X_{100} の安定には30~40年分以上のデータが必要とされているが、100年以上のデータでさえ大きな変化を示すことは、河川の計画降雨の推定に与える影響は大きい。

5. 年最大無降雨連続日数の非定常頻度解析

(1) 時系列解析と最適確率分布

河川の維持流量では10ヵ年に1度の渇水流量を計画に採用している。ここでは、年最大無降雨連続日数の増加は、渇水となる危険性の増加を表すと考える。また、日数は離散量であるが、雨量と同様の手法で取り扱う。

道内22官署の年最大無降雨連続日数の基本統計量を表-5に示す。ここで、降水がわずかに観測されたとする“0.0mm”の記録は、降水有りと判定している。年平均値は全道的に7~8日、変動係数は0.2~0.4、歪係数は0.6~1.8であり、年最大日雨量と比べて変化は少ない。

これまでと同様の方法で求めた時系列成分と最適確率分布の官署数を、図-7及び表-6に示す。図-7より、確率変動成分の割合の小さい官署が目立ち、決定論的成分は30~67%である。また、顕著な地域的特性は見られず、第1位卓越周期としては、長い方から、13.3、10.0年、以下1桁台で5、4、3、2年であった。表-6の最適確率分布モデルの官署数では、Rに対してP3が9官署と多いが、SLSCで最も多いのはGEVの6官署であった。これまでの結果と合わせてGEVは、種々のヒストグラムに対して良い確率分布を表現していると言える。

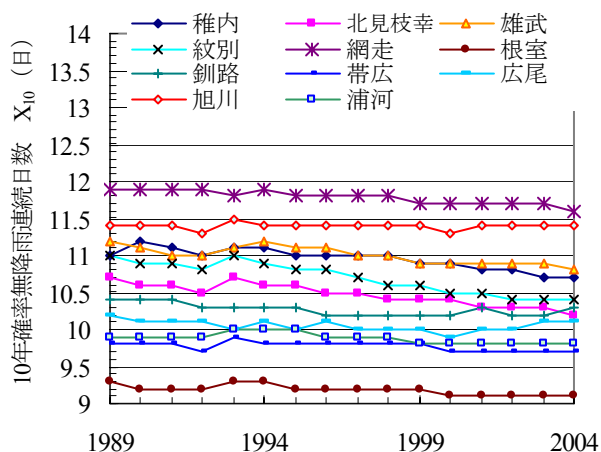
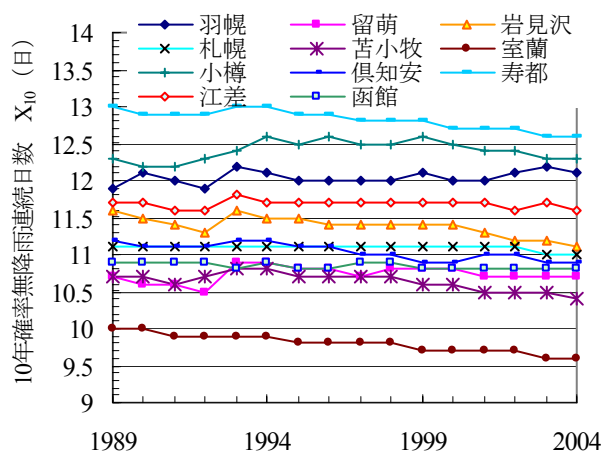


図-8 GEVによる道内22官署の年最大無降雨連続日数の X_{10} の年々変化

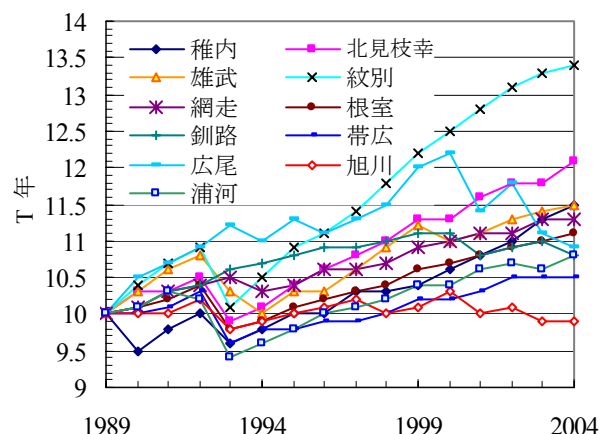
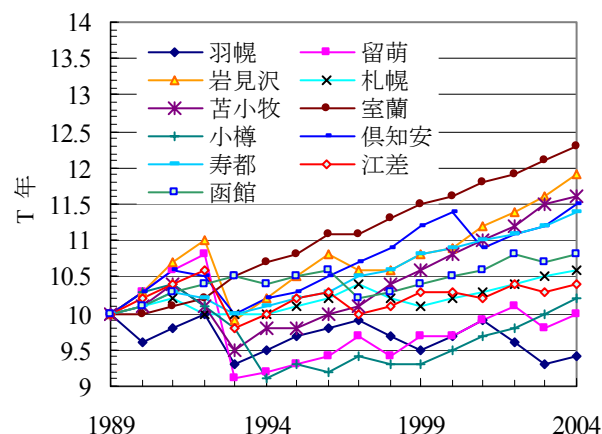


図-9 GEVによる道内22官署の年最大無降雨連続日数の1989年の X_{10} に相当するリターンピリオドの年々変化

(2) 10年確率無降雨連続日数の年々変化

図-8, 9に、道内22官署の10年確率無降雨連続日数 (X_{10}) の年々変化と1989年の X_{10} に相当するリターンピリオドの年々変化を示す。全道的に X_{10} は9～13日前後であり、リターンピリオドの変化は、最大で紋別の13年、最小は羽幌の9年である。T年の増加は、雨の頻度が増加していることが考えられるが、降水量“0.0mm”の扱いにも工夫がいるだろう。

6. 結論

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 道内22気象官署の年降水量、年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数の3つの基本統計量を明らかにした。
- (2) 道内22気象官署の降水データから、時系列解析による決定論的成分の分散の割合を用いて、その非定常性を明らかにした。
- (3) GEVは、年最大日雨量の最適確率分布として知られているが、年降水量や年最大無降雨連続日数の確率分布としても有効である。
- (4) 100年確率日雨量の最近15年間の変化を明らかにし、道内6官署、特に、オホーツク海に面した網走、紋別及び雄武で治水安全率が低下していることを示した。

- (5) 10年確率無降雨連続日数の最近15年間の変化は9～13日である。

以上より、河川の治水計画や利水計画で扱う確率水文量は、非定常頻度解析により、最も危険な値を採用すべきであると考ええる。

謝辞：本研究は、財団法人北海道河川防災研究センターの平成16年度及び平成17年度研究助成を受けたものです。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寒川典昭, 荒木正夫, 渡辺輝彦: 確率分布の推定母数の不確定性評価法, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.133-141, 1986.
- 2) 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, pp.7-12, 2005.
- 3) 神田 徹, 藤田睦博: 水文学—確率論的手法とその応用—, 新体系土木工学 26, 土木学会編, pp.13-75, 1982.
- 4) 篠原謹爾: 河川工学, 共立出版株式会社, pp.19-34, 1991.
- 5) 星 清: 洪水ピークの確率評価法について, 開発土木研究所月報 別冊, 北海道開発局土木研究所, 1998.
- 6) 佐渡公明, 杉山一郎: 北海道内降水量データによる降雨に関する確率水文量の変動特性, H16年度河川防災研究センター報告, 2005.

(2005. 9. 30受付)