

北海道内 22 気象官署降水量データを用いた T 年確率降水量の経年変化解析

Annual Change Analysis of T-Year Probable Rainfall
using 22 Meteorological Observatory's Precipitation Data in Hokkaido

佐渡公明¹・杉山一郎²
Kimiteru SADO and Ichiro SUGIYAMA

¹ 北見工業大学 工学部 教授

² 北見工業大学 工学部 非常勤研究員

要 旨

日本に接近する台風による災害，特にそれがもたらす湿った風が秋雨前線を刺激し，大雨となる場合が近年増加している．地球温暖化や気候変動が示唆されている現状では，過去に想定された水工構造物の設計安全率に対し，最近の降水量データから，その治水安全率を再評価することが重要と考える．

本研究では，北海道内 22 気象官署の降水量データ（各官署の統計開始年～2005 年）を用いて，T 年確率降水量の経年変化を解析する．

まず，年降水量，年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数の上位第 1 位に対して異常値検定を行ない，異常値の気象状況を調べる．次に，降水量の非定常性を見るため，降水量データのトレンド及び平均値のジャンプについて，それぞれ 4 手法の検定を用いて行ない，母集団の変質の有無を明らかにする．また，全 22 気象官署に対して，10 種 17 通りの確率分布モデルの中から，毎年最適確率分布モデルを選択し，降水量の非定常性に起因する 100 年確率日雨量及びそのリターンピリオド（再現期間）の経年変化を示す．さらに，100 年確率日雨量の経年変化の 1 次回帰直線の傾きから治水安全率のパターン（上昇型・一定型・低下型）を明らかにし，異常値の有無による 100 年確率日雨量の変化についても検討する．同様に，年最大無降雨連続日数による，10 年確率無降雨連続日数及びそのリターンピリオドの経年変化を明らかにする．

《キーワード：T 年確率降水量；異常値；棄却検定；トレンド；ジャンプ》

1. はじめに

近年では世界中で記録的豪雨，記録的猛暑，そして記録的少雨といった「記録的～」という言葉を目にしない年は無くなってきている。日本では，台風がもたらす湿った風が，梅雨前線または秋雨前線を刺激し，強い短時間降雨を引き起こす大雨が増加している。台風の上陸数も2004年には10個と従来の記録（1990年と1993年の6個，平年の上陸数は2.6個）を大幅に上回り，浸水害は17万棟を超えた¹⁾。さらに，地球温暖化が進めば，日降水量が100mm以上の大雨の年間出現日数は，多くの地域で1.5～2倍程度増加する可能性が高いことが予測されている¹⁾。こうした極端な気象現象がもたらす自然災害を防ぐことを担う，河川における水工構造物のT年確率降水量などの推定は，年最大日雨量が定常確率過程を示すという仮定のもとに，数十年あるいは数百年に一度というような非常に低い確率で生起する事象を対象に設計されている。数十年も前に設計された水工構造物の治水安全率は，地球温暖化や気候変動が示唆され始めている状況において，定常性の仮定にはもはや限界があり，再評価されるべきであろう。ゆえに，河川の高水・低水計画において精度のよい計画降雨推定の重要性は論を待たない。過去に想定された設計安全率を上回る自然現象は，単にその維持管理だけでは，住民の生活を保障することは難しくなっているのではないだろうか。しかし，昨今の公共工事に対する世間からの批判及び財政状況では維持管理すらままならないことも現状である。

本研究では，北海道内22気象官署の降水量データ（各官署の統計開始年～2005年）を用いて，10種17通りの確率分布モデルの中から毎年最適確率分布モデルを選択し，T年確率降水量の経年変化を解析する。まず，年降水量，年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数の上位第1位に対して3母数対数正規分布を用いた異常値検定を行ない，異常値と判定された当時の気象状況を調べる。次に，降水量データのトレンド及び平均値のジャンプに対して，それぞれ4手法の検定を行ない，降水量の非定常性及び母集団の変質の有無を調べる。また，非定常性に起因する100年確率日雨量及びそのリターンピリオド（再現期間）の経年変化による治水安全率の変化を明らかにし，異常値の有無による100年確率日雨量の変化についても検討する。同様に，年最大無降雨連続日数による，10年確率無降雨連続日数及びそのリターンピリオドの経年変化を明らかにする。

2. 北海道内22気象官署における降水量データ

(1) 降水量データの統計値

本研究で取り扱う降水量データは，札幌管区气象台，旭川地方气象台，網走地方气象台，苫小牧測候所，気象庁ホームページ内電子閲覧室及び気象庁年報CD-ROM（2002年）²⁾から収集し，道内22気象官署の統計開始年から2005年までのデータ（年降水量・年最大日雨量・年最大無降雨連続日数）を取り扱う。図-1に道内22気象官署の位置図を示し，日本海，オホーツク海，太平洋に囲まれた地域及び内陸で気象条件にそれぞれ違いがあると予測されるため，全22気象官署を日本海，オホーツク海，東部・西部太平洋及び内陸の5つのグループに分類した。これらのグループ分類図も同様に図-1に示す。年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数は，雪の影響を取り除くため，5月～11月までを対象とした。さらに，年最大無降雨連続日数においては，“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。これは，目視による観測，あるいは現在の転倒枡雨量計が0.5mm単位で計測され，0.5mmに達しない降水が0.0mmとして記録されているためである。

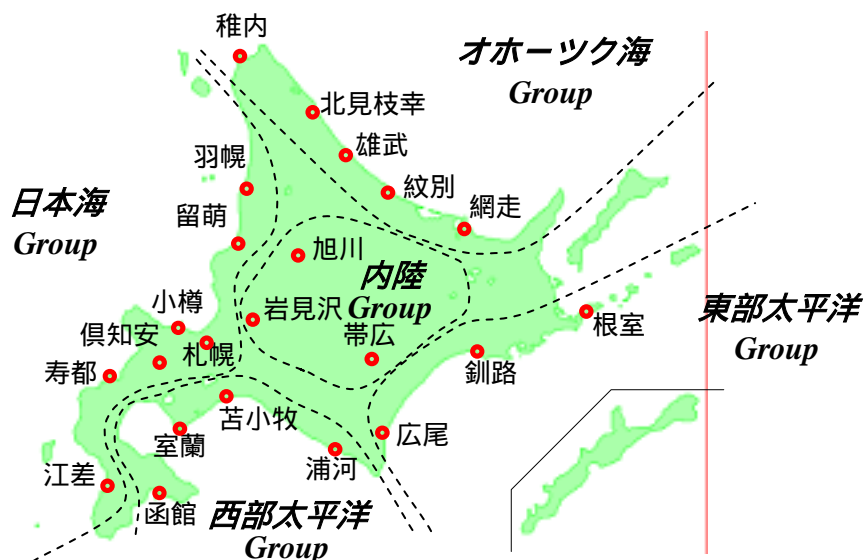


図-1 道内 22 気象官署位置図及びグループ分類図

ここで、年降水量の統計開始年～2005 年までの基本統計量を表-1 に示す。なお、最大値に二重下線、最小値に単下線を引いている。

表-1 より、年降水量の全道平均は 1165mm で、日本の年降水量の平年値 (1732mm : 1971～2000 年)²⁾よりも 600mm 近く低い値である。しかし、広尾のみ 1726mm でほぼ全国平年値に等しい。これは、南東寄りの比較的温かく湿った風が日高山脈の斜面で強制上昇気流が発生し、それに伴う積乱雲による地形性降雨の影響があるためと思われる。この様子を北海道地方標高図³⁾(図-2)、北海道地方年降水量平年値³⁾(図-3)及び北見工業大学地域共同研究センターで受信された衛星 NOAA17 号/AVHRR の 4ch 赤外画像(図-4)を用いて示す。なお、図-4 の赤外画像では、発達した積乱雲の様に背が高く厚い雲で覆われるほど、“真っ白”な色で表現される。これらの図より、日高山脈の尾根に沿って、図-4 の赤外画像が白い部分と灰色の部分に明確に分かれているのがわかる。

表-1 道内 22 気象官署の年降水量の基本統計量 (気象庁提供)

Group	官署名	統計年数	平均値 (mm)	変動係数	歪係数	Group	官署名	統計年数	平均値 (mm)	変動係数	歪係数
日本海	羽幌	85	1324.8	0.137	0.343	太平洋	広尾	48	<u>1725.6</u>	0.177	0.406
	留萌	63	1263.3	0.165	0.786		釧路	96	1075.5	0.164	0.582
	小樽	63	1232.3	0.136	0.163		根室	126	1008.0	<u>0.184</u>	0.187
	札幌	129	1090.7	0.145	0.620	オホーツク	網走	116	<u>823.9</u>	0.171	0.350
	倶知安	62	1562.0	<u>0.135</u>	0.409		紋別	50	843.8	0.174	0.244
	寿都	118	1231.4	0.149	0.114		雄武	63	907.1	0.162	0.508
	江差	65	1233.4	0.148	<u>-0.186</u>		北見枝幸	63	1221.7	0.144	<u>1.123</u>
太平洋	函館	<u>133</u>	1170.9	0.150	0.142	稚内	68	1132.8	0.169	0.802	
	室蘭	83	1185.5	0.154	0.249	内陸	旭川	117	1096.9	0.146	0.749
	苫小牧	63	1227.7	0.146	0.530		岩見沢	59	1219.9	0.155	0.422
	浦河	79	1113.4	0.175	0.352		帯広	112	935.2	0.178	0.589

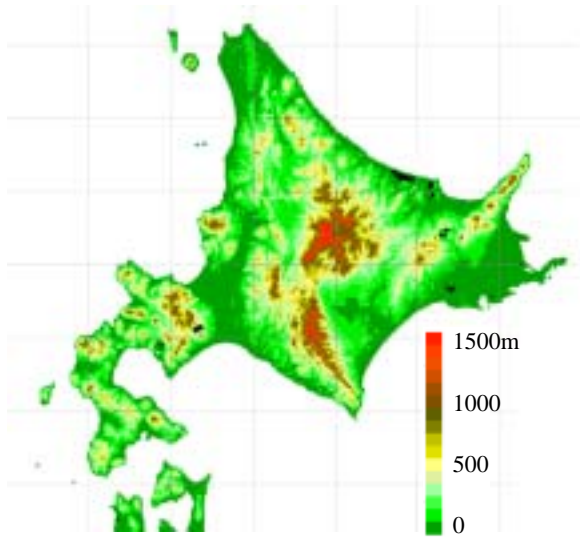


図-2 北海道地方標高図
(気象庁提供)

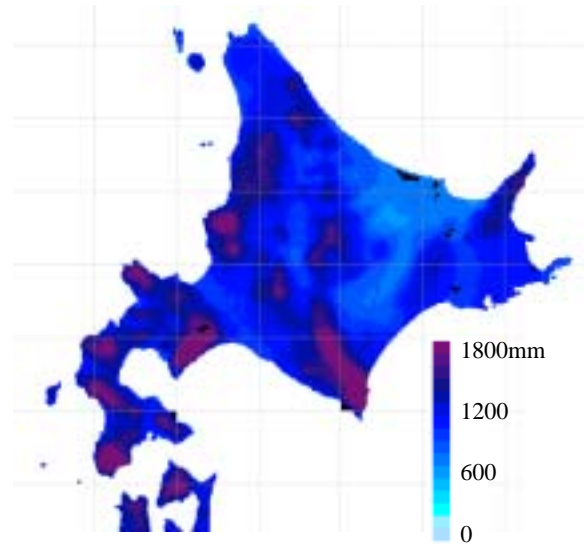


図-3 北海道地方年降水量平年値
(1971~2000年)(気象庁提供)

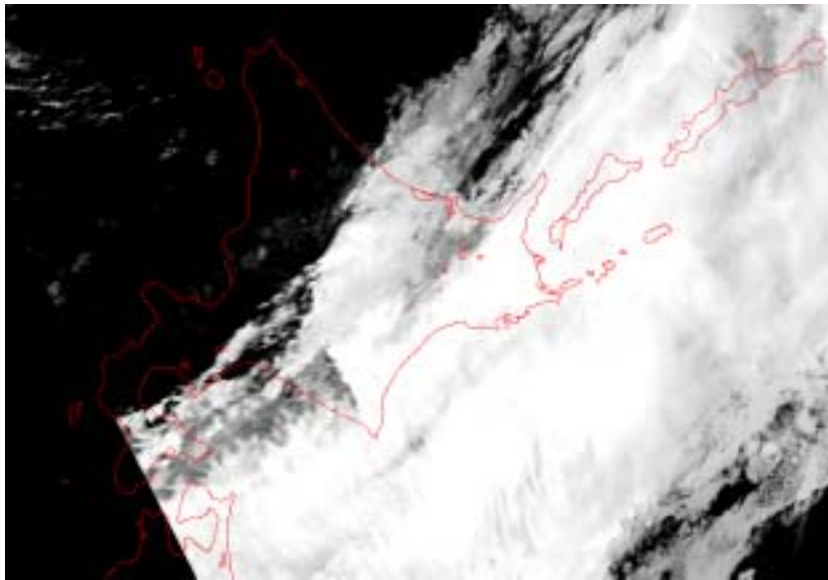


図-4 NOAA17号/AVHRRデータによる4ch赤外画像(2003年8月8日20時受信)

他方、オホーツク海側の雄武、紋別、網走の3官署は平均値が1000mmを下回っており、降水量の少ない地域であることがわかる。特に、網走の平年値(801.9mm)²⁾は、全国の気象官署の中で最も低い値であり、紋別は下位第2位(836.4mm)、雄武は下位第3位(892.6mm)と軒並みに降水量の低い地域である。前述の広尾の場合と同様に図-3を見ると、上記3官署の地域は平年値の低い“薄い水色”で表わされている。また、図-4の赤外画像からは、図-3で平年値の低い地域に合わせるように灰色で表わされ、周囲と比較して雲があまり発達していないことがわかる。これは推測であるが、日高山脈に吹き付けた強制上昇気流による雲の発達に伴い、大気から水蒸気が失われ、乾燥した大気が上空の偏西風によりオホーツク海側へ流れていくためではないかと思われる。

年最大日雨量についても年降水量と同様に統計開始年～2005年までの基本統計量を表-2に示す。年最大日雨量の全道平均値は73.4mmだが、広尾のみ100mmを超え、その約2倍の141.6mmであった。これも前述の地形性降雨による影響があるものと思われる。逆に、平均値の最小値は、網走の52.5mmで、60mmを下回っている官署は網走のみである。グループ別に見ても年降水量と同様に、オホーツク海グループの降水量が低く、それらの平均値は70mmを下回った。

年最大無降雨連続日数も年降水量と同様に統計開始年～2005年までの基本統計量を表-3に示す。全道平均値は7～9日で、日数の変化が小さいこともあり、全22官署を5グループに分類したことによる地域的な特徴は見られなかった。

表-2 道内22気象官署の年最大日雨量の基本統計量(5～11月)(気象庁提供)

Group	官署名	統計年数	平均値 (mm)	変動係数	歪係数	Group	官署名	統計年数	平均値 (mm)	変動係数	歪係数
日本海	羽幌	85	63.9	0.416	1.190	太平洋東部	広尾	48	<u>141.6</u>	0.349	1.684
	留萌	63	65.9	0.407	0.994		釧路	96	80.8	0.328	1.067
	小樽	63	63.8	0.404	1.159		根室	122	75.2	0.395	1.367
	札幌	<u>123</u>	70.4	0.439	1.516	オホーツク海	網走	116	<u>52.5</u>	0.396	2.007
	倶知安	62	64.9	0.416	1.908		紋別	50	63.2	0.428	1.691
	寿都	122	64.8	0.422	2.150		雄武	64	66.5	0.376	0.878
	江差	65	77.2	0.393	1.676		北見枝幸	63	66.6	0.322	<u>0.782</u>
太平洋西部	函館	<u>123</u>	75.5	0.357	1.315	稚内	68	65.5	0.380	1.572	
	室蘭	83	80.9	<u>0.299</u>	1.025	内陸	旭川	114	62.2	0.494	1.697
	苫小牧	64	97.0	0.546	<u>4.612</u>		岩見沢	59	70.2	<u>0.616</u>	2.426
	浦河	79	70.7	0.376	1.829		帯広	114	74.5	0.370	1.073

表-3 道内22気象官署の年最大無降雨連続日数の基本統計量(5～11月)(気象庁提供)

Group	官署名	統計年数	平均値 (日)	変動係数	歪係数	Group	官署名	統計年数	平均値 (日)	変動係数	歪係数
日本海	羽幌	85	8.2	<u>0.387</u>	1.095	太平洋東部	広尾	48	7.5	<u>0.249</u>	<u>0.658</u>
	留萌	59	7.7	0.309	1.133		釧路	96	7.1	0.357	1.552
	小樽	63	<u>8.5</u>	0.359	1.526		根室	114	<u>6.5</u>	0.307	1.018
	札幌	<u>117</u>	7.9	0.312	1.167	オホーツク海	網走	116	8.3	0.315	1.255
	倶知安	62	7.6	0.332	0.962		紋別	50	7.3	0.323	1.049
	寿都	114	8.5	0.376	1.238		雄武	63	7.6	0.332	1.145
	江差	65	8.3	0.321	<u>1.752</u>		北見枝幸	63	7.0	0.350	1.369
太平洋西部	函館	114	7.8	0.300	1.259	稚内	68	7.5	0.337	1.576	
	室蘭	83	6.9	0.300	0.795	内陸	旭川	114	7.9	0.381	1.703
	苫小牧	63	7.5	0.293	0.736		岩見沢	59	7.9	0.330	1.606
	浦河	79	7.0	0.308	1.137		帯広	114	6.8	0.314	0.733

ここで、年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数に対して、どの月に発生することが多いのを見るため、各 22 官署の発生月に対する相対度数分布図をそれぞれ図-5(a~d)及び図-6(a~d)にグループ毎にまとめてそれぞれ示す。なお、年最大無降雨連続日数の期間が翌月にまたいでいる場合は、その期間が多く占めている方の月を当該年の発生月とし、またいだ日数が同数の場合は、前半の月を発生月としている。

図-5(a~d)より、8月、9月に年最大日雨量の発生する官署が多く、5月、6月及び11月に少ないことがわかる。8月と9月の発生割合の合計は、釧路の41%～岩見沢の68%であり、非常に高い。これは、北海道では台風及び秋雨前線の影響の多いことが影響していると思われる。また、本州が梅雨期である6月頃は、全22官署においても年最大日雨量を観測することが少なく、5月、6月及び11月の発生割合の合計は、旭川の5%～帯広の31%である。夏のオホーツク海高気圧の勢力が強いため、梅雨前線が北上してこないことによる北海道の特徴だと思われる。

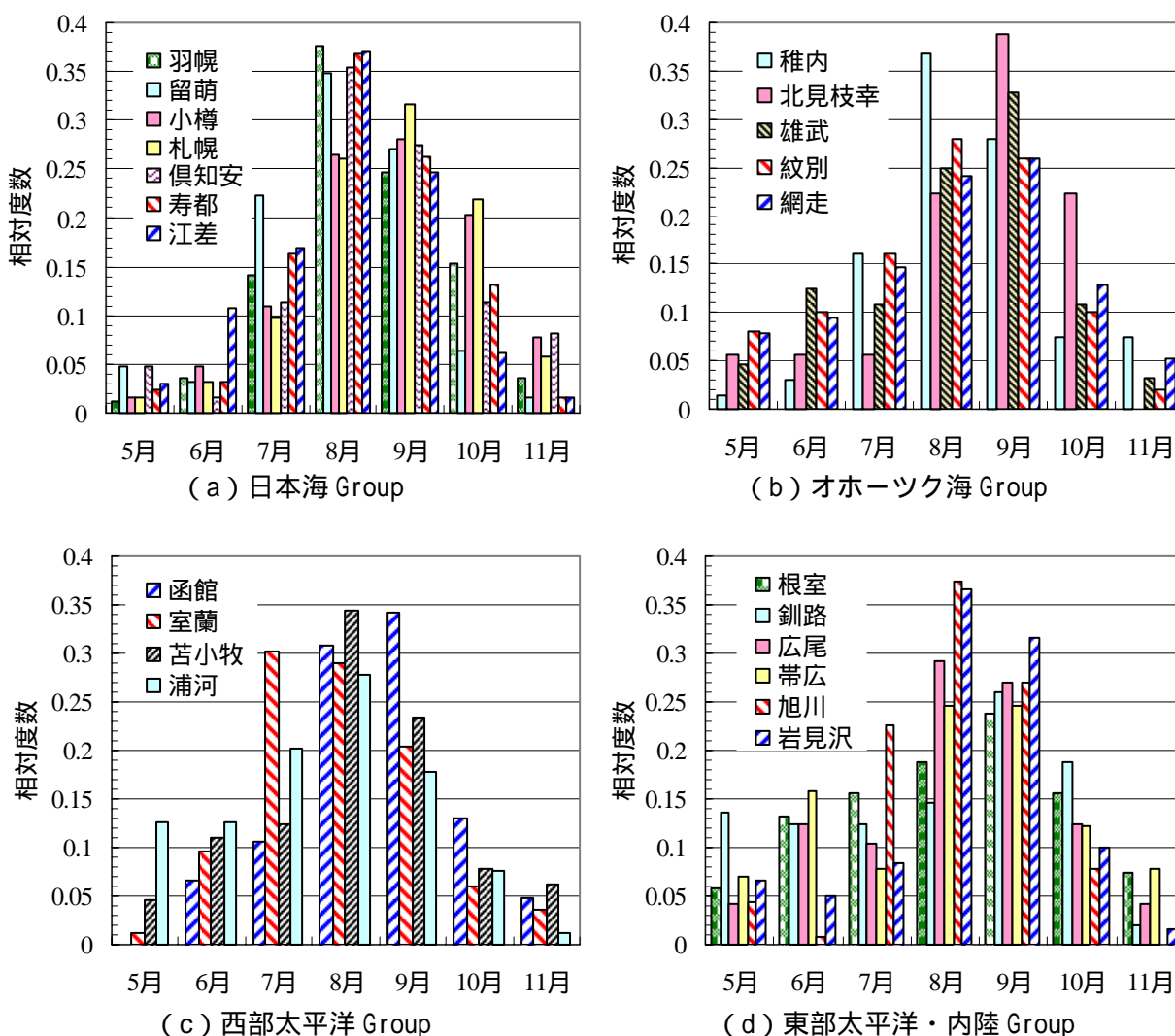


図-5(a~d) 道内22気象官署における年最大日雨量の発生月別ヒストグラム

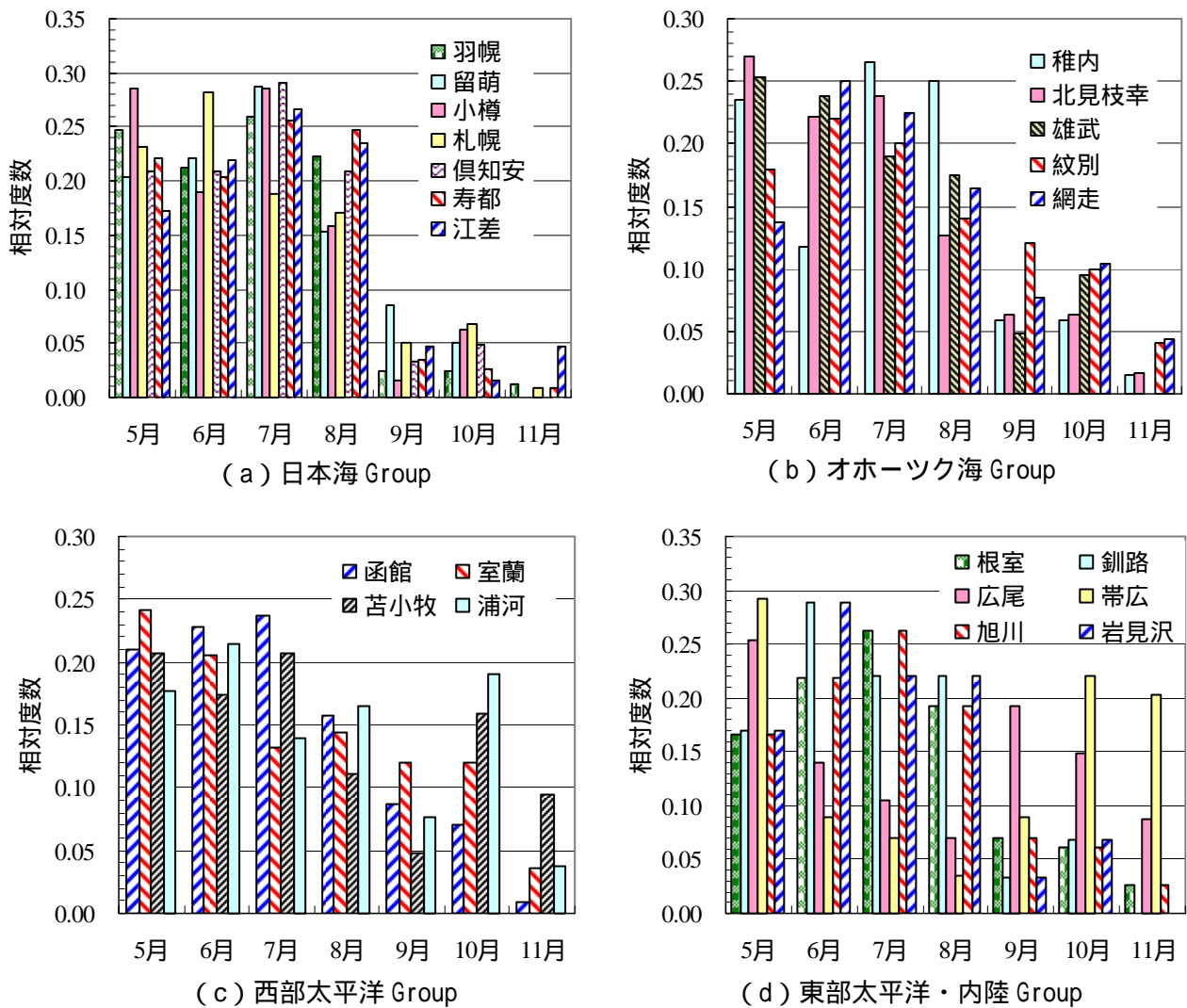


図-6 (a~d) 道内 22 気象官署における年最大無降雨連続日数の発生月別ヒストグラム

図-6 (a~d) では、5 月～8 月に年最大無降雨連続日数が発生する官署の多いことがわかる。特に、日本海グループ (図-6 (a)) は、その傾向が明確であり、5 月～8 月に発生する合計割合は、全 7 官署とも約 90% で、9～11 月の発生率が極端に少ない。苫小牧、浦河、広尾及び帯広については、秋に無降雨連続日数が発生するケースが多いが、それ以外の官署では、ほぼ右肩下がりヒストグラムであり、降水量が梅雨期に少なく秋に多い北海道の特徴がよく表われている。

(2) 降水量データの異常値検定

確率降水量の推定値に誤差は付きものだが、標本集団に異常値を含んでいる場合、計算結果に天文学的な数値を与える可能性がある。本研究では、各官署における降水量データの上位第 1 位を対象とし、3 母数対数正規分布を用いて有意水準 5% の異常値検定^{4) 5)}を行なった。なお、3 母数の推定方法には、Quantile-最尤法及び積率法の 2 種類で推定した。表-4 に、道内 22 気象官署における年降水量、年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数で上位第 1 位が異常値と判定された結果をまとめる。

では、異常値と判定された上位第 1 位の気象状況はどのようなものであったのだろうか。年降水量については、年間を通しての降水量と無降雨日数の関係があるため、一概に気象状況を説明することは困難であるが、表-4 から苫小牧と岩見沢で 1981 年に異常値と判定されており、当該年の年最大日雨量に注目すると、両地点で 8 月 4 日に記録 (苫小牧: 176.0mm, 岩見沢: 262.0mm) されている。

このときの気象状況は、寒冷前線と三陸沖を北上した台風 12 号の影響によるものであり、全道的な被害を受けた。他にも台風 15 号（8 月 23 日）及び 18 号（9 月 4 日温帯低気圧となって北海道上陸）といった大雨を降らす気象条件が、他の年よりも多く発生したことが影響していると思われる。

表-4 道内 22 気象官署の降水量データにおいて異常値と判定された上位第 1 位と第 2 位
 (A：年降水量，B：年最大日雨量，C：年最大無降雨連続日数)

官署名	統計年数	上位第 1 位 x_1		上位第 2 位 x_2	$x_1 - x_2$	
		起年月日	雨量・日数			
A	苫小牧	63	1981 年	1816.5mm	1590.1 mm	226.4mm
	釧路	96	1920	1703.9	1395.0	308.9
	旭川	117	1955	1741.2	1556.1	185.1
	岩見沢	59	1981	1829.0	1575.5	253.5
B	苫小牧	64	1950/08/01	447.9mm	195.5 mm	252.4mm
	広尾	48	1998/09/16	346.0	244.3	101.7
	根室	122	1992/09/11	211.5	147.5	64.0
C	江差	65	1954/07/04-07/24	21 日	13 日	8 日

年最大日雨量では、表-4 より苫小牧の 447.9mm (1950/8/1) は同官署第 2 位の 195.5mm と 252.4mm の差がある。隣接地域の室蘭や浦河では、これと別の日に年最大日雨量が観測されており、明らかに局所的に降り過ぎである。もし、詳細な高層気象観測値があったとしても実際にこの雨量を観測したのかを検証することは、ほぼ不可能であるため、当時の新聞等の報道記録を参照してみた。そこで、北海道新聞に掲載された天気図（図-7）によれば、苫小牧沖の停滞前線が 7/31～8/3 にかけてほぼ同緯度に位置し、わずかに北上している程度であること。さらに、オホーツク海高気圧が停滞しており、“北東気流型”の気圧配置となっている。これは、対流圏下層の比較的寒冷な気流が北東風（やませ）となって相対的に暖かい海上を吹走する間に、海面から水蒸気と顕熱を供給され、気団の変質を起こして大気の安定度が悪くなっているのである^{6),7)}。この北東気流が停滞前線面に吹き付けることにより、前線面が活発に働き、局所的な集中豪雨となったことが予測される。

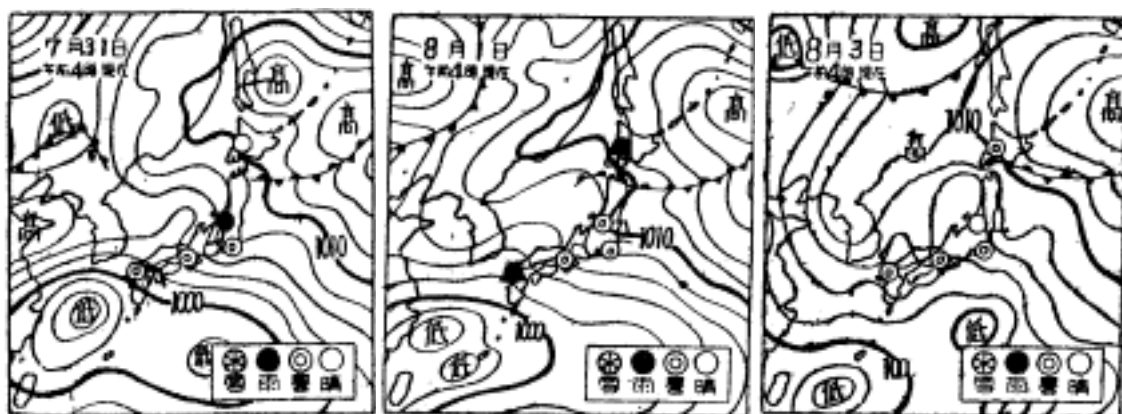


図-7 1950 年 7/31～8/3 までの日本の天気図（左図：7/31，中央図：8/1，右図：8/3）
 (いずれも北海道新聞(8/1, 8/2, 8/4 発刊)より)

広尾の 346.0mm (1998/9/16) については、秋雨前線と台風 5 号が重なり、前線が活発化したことによるものである(図-8)。しかし、広尾は道内で最も雨の降りやすい地域であることが前節で示され、統計年数が 48 年と短いことを考慮すれば、2005 年時点においては異常値と判定されたが、将来においては異常値でなくなる可能性があると思われる。

根室の場合 (211.5mm : 1992/9/11) は、3 母数推定方法が Quantile-最尤法のみでの異常値判定となったが、このときの気象状況は、台風 17 号の進路がやや東に逸れた程度で、広尾の場合とほぼ同じである(図-9)。第 4 章でもこれについて触れるが、異常値判定では、片方のみ有意であったことから、根室の上位第 1 位は異常値としない方がよいようである。

年最大無降雨連続日数については、江差で 21 日間 (1954/7/4-7/24) と非常に長く、データも古いため気象状況を述べることは困難である。参考までに、降水量 0.0mm も含めてカウントした場合、2006 年 7/20~8/17 の期間で、江差は 25 日間 (7/24~8/17)、札幌で 28 日間 (7/20~8/16) という道南地方を中心に記録的な値を観測した。この時の気象状況は、通常津軽海峡上空にあるジェット気流が北海道中部まで北上したため、太平洋高気圧も北上し、好天が続いたこと。さらに、南よりの湿った風が高気圧にブロックされ、北海道まで達しなかったことなどが気象要因として挙げられている。よって、江差の 21 日間は、将来において異常値でなくなる可能性が高い。

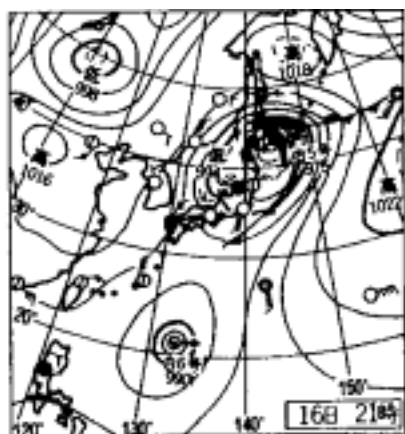


図-8 1998 年 9/16 の日本の天気図
(北海道新聞 (9/17 発刊) より)



図-9 1992 年 9/11 の日本の天気図
(北海道新聞 (9/11 発刊) より)

3. トレンドとジャンプの検定

(1) 年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数のトレンド検定

まず、道内 22 気象官署の年最大日雨量データに対してトレンドと平均値のジャンプを検出し、これらの非定常性を調べる。トレンドとは、統計データ全般に渡る 1 次回帰直線の傾きであり、ジャンプとは、急激にある区間の標本平均値が増加あるいは減少 (母集団が変質) することである。

本研究のトレンド検定では、次の 4 手法⁸⁾を取り扱う。

- ・ 線形トレンドの t 検定
- ・ Mann-Kendall (MK) 検定
- ・ ブートストラップこう配 (BS-Slope) 検定
- ・ ブートストラップ Mann-Kendall (BS-MK) 検定

なお、ブートストラップ標本を $M=3000$ 組，帰無仮説 H_0 は「トレンドがない」とする．また，第 2 章で上位第 1 位が異常値と判定された 3 官署については，その値を削除し，前後年の平均値で置き換える．これは，異常値をそのまま使用して検定すれば，異常値の有無で結果に大きな影響を及ぼす恐れがあること．また，欠測年のない連続した時系列データを取り扱わなければならない，異常値として削除してしまうと，それ以前のデータも使用不能となるためである．年最大日雨量で異常値を前後年の平均値で補間している官署は，苫小牧，広尾，根室である．

以上より，道内 22 気象官署の年最大日雨量のトレンド検定を行なった結果，4 手法の全てにおいて有意水準 $\alpha=5\%$ で H_0 が棄却されたのは，札幌のみであった．このとき，BS-MK 及び BS-Slope は増加トレンドとして判定されている．同様に $\alpha=10\%$ の場合，札幌以外に 4 手法の全てで H_0 が棄却されたのは，苫小牧で，BS-MK 及び BS-Slope とともに増加トレンドと判定されている．また，苫小牧は異常値を含めると，4 手法の全てで H_0 が採択され，トレンドがないと判定された．図-10 にトレンドがあると判定された上記 2 官署の年最大日雨量に対する 1 次回帰直線を示す．

増加トレンドが有意と判定された気象要因を特定することは，統計開始年からの気象状況を調べなければならないため非常に困難であるが，近年の都市化によるヒートアイランドの影響により，降雨が増加していることも考えられる⁹⁾．

ここでトレンド検定において注意しなければならないことは，札幌及び苫小牧で増加トレンドがあると判定されたが，統計データの開始年をずらすことによって，“トレンドがない”またはトレンドの正負が逆になる可能性があることである．例えば，全 22 官署の統計データ年数を最も少ない広尾に合わせ，1958 年～2005 年までのトレンド検定を行なった場合，札幌のトレンド(傾き:0.19mm/day/year)は検出されず，苫小牧のみ増加トレンド(10%有意，傾き:0.57mm/day/year)と判定された．

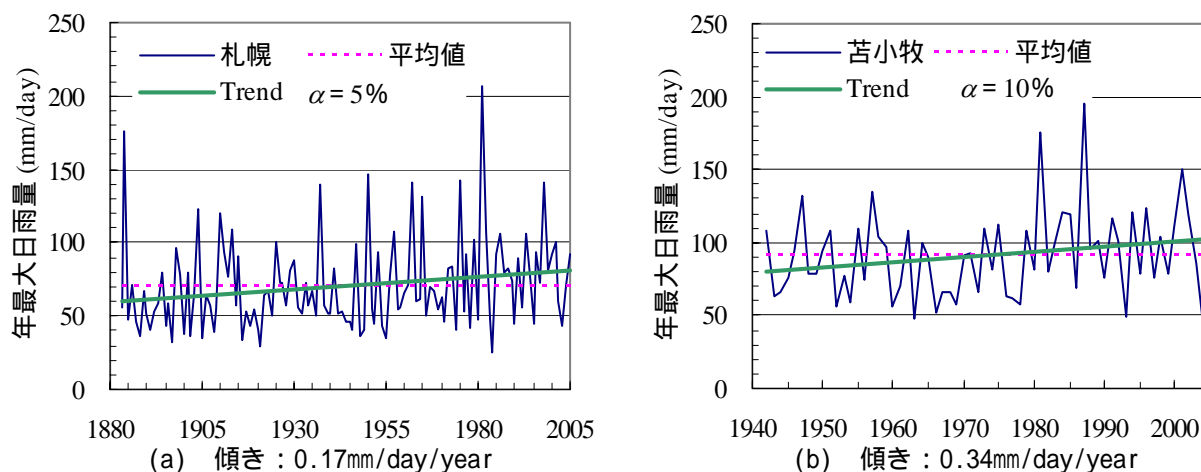


図-10(a)～(b) 4 検定手法で年最大日雨量のトレンドがあると判定された
(a)札幌，(b)苫小牧の 1 次回帰直線

次に、年最大無降雨連続日数は離散量であるが、本研究では雨量と同様に連続分布として取り扱う。また、年最大無降雨連続日数は、降水量の増減を直接表わすものではなく、正のトレンドは、渇水となる危険性の増加を表わすものと考えられる。さらに、第2章で江差の上位第1位は異常値と判定されているため、これを削除して前後年の平均値で補間している。

江差を含めた道内22気象官署の年最大無降雨連続日数のトレンド検定を行なった結果、4手法の全てにおいて $\alpha = 5\%$ で H_0 が棄却されたのは、羽幌と網走であった。このとき、BS-MK及びBS-Slopeにおいて羽幌は増加トレンド、網走は減少トレンドと判定されている。同様に $\alpha = 10\%$ の場合、上記2官署以外に4手法の全てで H_0 が棄却されたのは、浦河のみで、BS-MK及びBS-Slopeともに減少トレンドと判定されている。図-11にトレンドがあると判定された3官署の年最大無降雨連続日数に対する1次回帰直線を示す。

年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数において、トレンドが有意と判定された官署は少なく、図-1で分類したGroupに対する地域的な特徴は見られなかった。

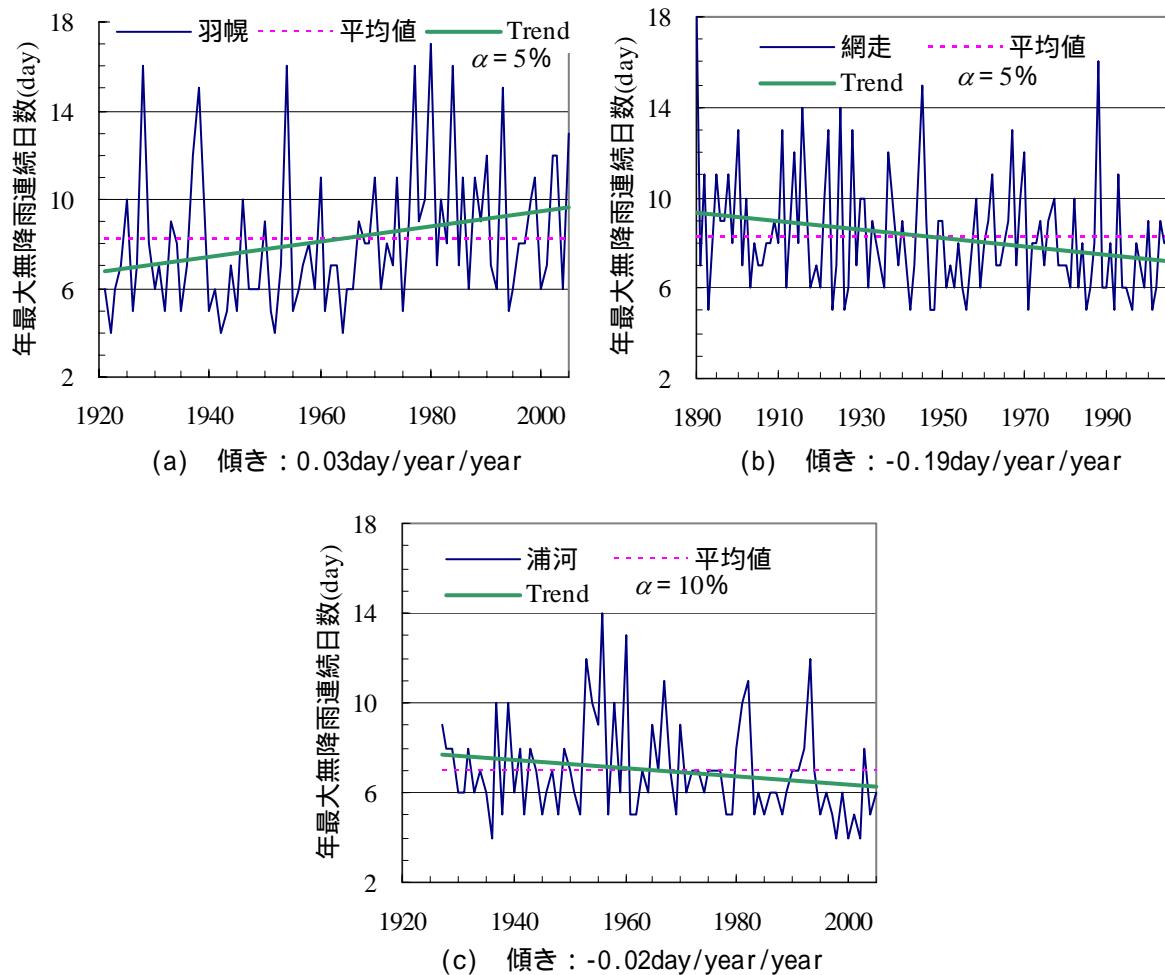


図-11(a)～(c) 4検定手法で年最大無降雨連続日数のトレンドがあると判定された
(a)羽幌，(b)網走，(c)浦河の1次回帰直線

(2) 年最大日雨量及び年最大無降雨連続日数のジャンプ検定

本研究で取り扱うジャンプ検定には、次の4手法⁸⁾を用いる。

- ・ ジャンプの t 検定 (Welch 検定)
- ・ Mann-Whitney (MW) 検定
- ・ ブートストラップ t (BS-t) 検定
- ・ ブートストラップ Mann-Whitney (BS-MW) 検定

まず、標本の大きさ n の時系列 $X (= x_1, \dots, x_n)$ に対して、ジャンプが 1 個ある場合を考えると、2 組の部分時系列 X_1, X_2 及びジャンプの幅 δ_1 は、

$$\left. \begin{aligned} X &= X_1 (= x_1, \dots, x_{n_1}) + X_2 (= x_{n_1+1}, \dots, x_{n_1+n_2}) \\ n_1 + n_2 &= n, \delta_1 = \overline{X_2} - \overline{X_1} \end{aligned} \right\} \dots (3.1)$$

で表わされる。ジャンプ 2 個の場合は、部分時系列 X_1, X_2, X_3 とジャンプの幅 δ_1, δ_2 を次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_1 (= x_1, \dots, x_{n_1}) + X_2 (= x_{n_1+1}, \dots, x_{n_1+n_2}) + X_3 (= x_{n_1+n_2+1}, \dots, x_{n_1+n_2+n_3}) \\ n_1 + n_2 + n_3 &= n, \overline{X_2} - \overline{X_1} = \delta_1, \overline{X_3} - \overline{X_2} = \delta_2 \end{aligned} \right\} \dots (3.2)$$

X_1 と X_2 の母集団の間に平均値の差があり、また X_2 と X_3 の母集団の間にも平均値の差があるときのみ、時系列 X はジャンプ 2 個を有すると判定される。以下、ジャンプが k 個のときも同様に表示できる。

また、ブートストラップ標本の組数 M が多いほど、ブートストラップ経験分布関数の信頼性は増す。しかし、部分時系列の標本の大きさが極端に小さい場合、 M を多くすると全く同じ値の標本が含まれ不自然になってしまう¹⁰⁾。例えば、ある部分時系列の標本の大きさが 6 の場合、並べ方の総数は $6! = 720$ 通りである。 $M = 3000$ 組とすると、最小でも $3000 - 720 = 2280$ 組のブートストラップ標本は元の部分時系列と同一の並びになる。これを防ぐために、部分時系列の標本の大きさは全て 7 以上とした。 $7! = 5040$ 個であり、このとき 3000 組のブートストラップ標本には、元の部分時系列を含まないこともあり得る。

上記を考慮して、4 手法の検定を用い、1~4 個のジャンプを自動検出する Fortran のプログラムを走らせた。まず、

4 手法の全てにおいて、 $\alpha = 5\%$ で H_0 が棄却。

BS-t 検定と BS-MW 検定で正、負のジャンプ判定が同一となったものを採用する。

次に、これら有意なジャンプの中で、

同一個数のジャンプのときに、有意なパターンが複数ある場合、検定統計量が t 検定の棄却域に有意水準 $\alpha\%$ 点を越えて最も深く入ったときのパターンが最も信頼性が高いと判断。

数種類のパターン (例えば 2 個の場合と 4 個の場合等のジャンプ) が出現した場合は、優先的にジャンプの個数が多い場合 (この場合は 4 個) をその官署のジャンプ数とする。

と考えた。上記で正負の判定が分かれた場合を採用しないのは、乱数を用いてブートストラップ標本を抽出するため、符号が一致しない場合があり、判定結果に対する信頼性が低いと判断したためである。

以上より、道内 22 気象官署の年最大日雨量に対してジャンプの検定を行なう。ジャンプがあると判定された官署は、次の通りである。

- ジャンプ 1 個 ... 札幌, 寿都, 苫小牧, 帯広 (4 官署)
- ジャンプ 2 個 ... 江差, 釧路 (2 官署)
- ジャンプ 3 個 ... なし
- ジャンプ 4 個 ... なし

上記の官署のジャンプを図-12 (a~f) に示す。

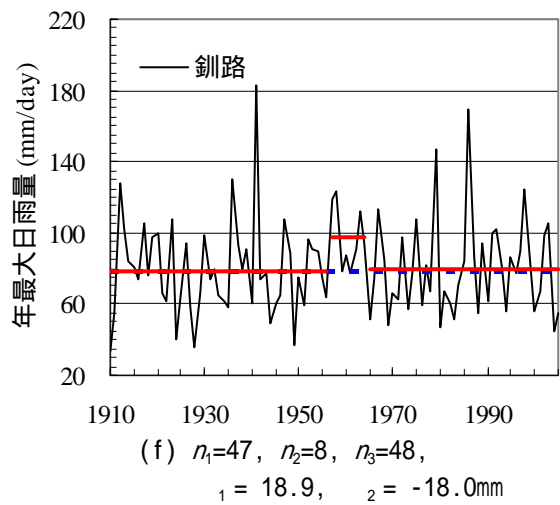
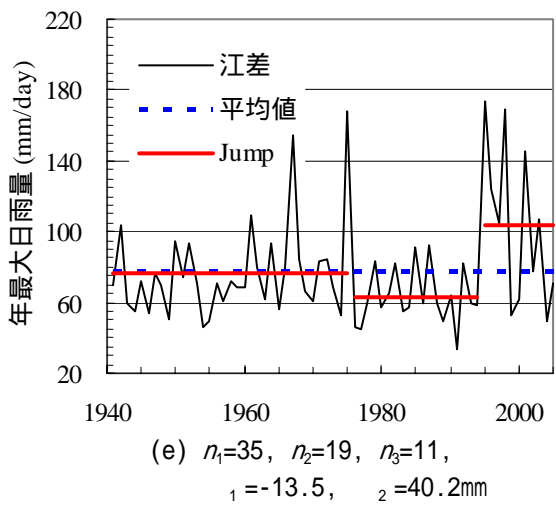
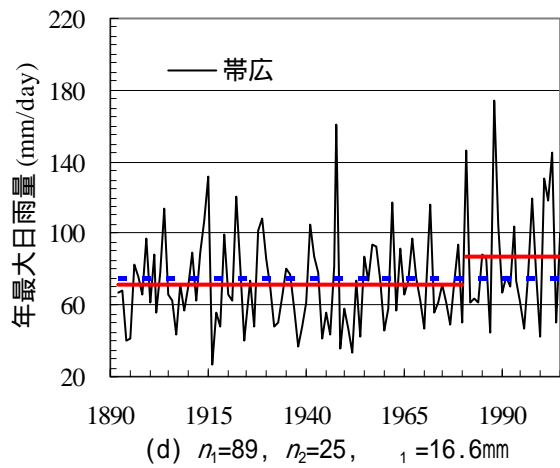
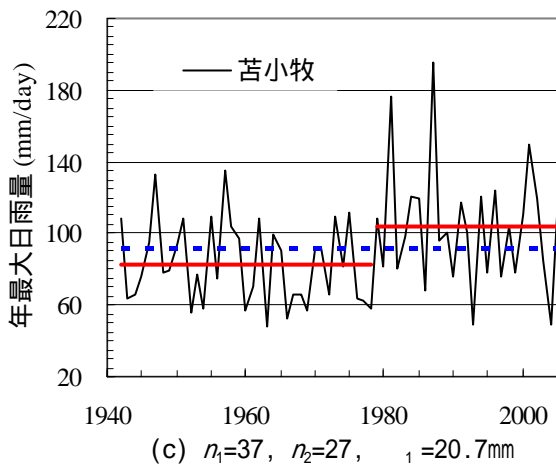
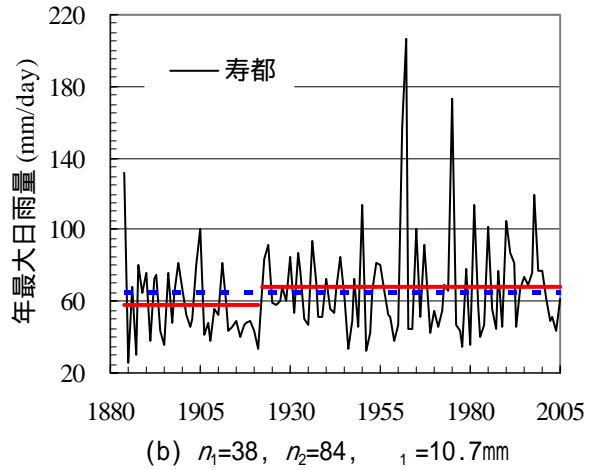
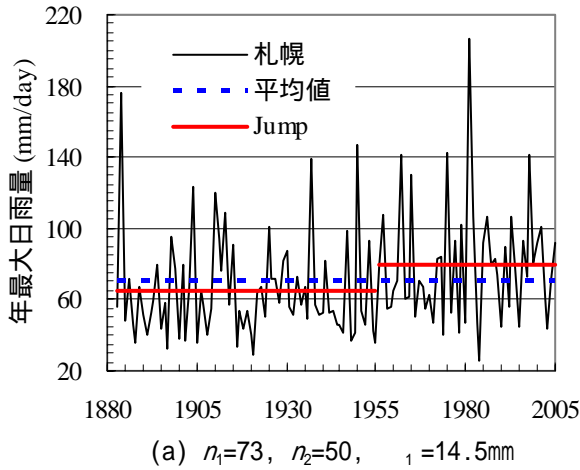


図-12(a) ~ (f) 4 手法の検定で年最大日雨量にジャンプがあると判定された官署
(ジャンプ数: (a~d)1 個, (e, f)2 個)

いずれの官署も 2005 年を含むジャンプの平均値は，原系列全体の平均値よりも大きい特徴があり，一雨に降る量が増えていることが言える．正のジャンプで最大のものは，江差の $\delta_2 = 40.2\text{mm}$ (図-12(e))．負のジャンプで最大のものは，釧路の $\delta_2 = -18.0\text{mm}$ (図-12(f)) であった．札幌及び苫小牧は，トレンドに続きジャンプでも検出されており，近年，局所的な集中豪雨が観測されていることを表しているが 5~10%の確率で第 1 種の誤りを犯している可能性もあることに留意しなければならない．

同様に，年最大無降雨連続日数に対し，ジャンプがあると判定された官署は，以下の通りである．

- ジャンプ 1 個 ... 苫小牧，紋別 (2 官署)
- ジャンプ 2 個 ... 小樽，倶知安，江差，浦河，北見枝幸，稚内，旭川 (7 官署)
- ジャンプ 3 個 ... 羽幌，室蘭，釧路，網走，雄武，岩見沢 (6 官署)
- ジャンプ 4 個 ... 札幌，寿都，函館，根室，帯広 (5 官署)

上記の官署のジャンプを図-13(a~t)に示す．ジャンプが検出されなかった留萌及び広尾の 2 官署の時系列グラフも，参考までに図-13(u,v)に示す．

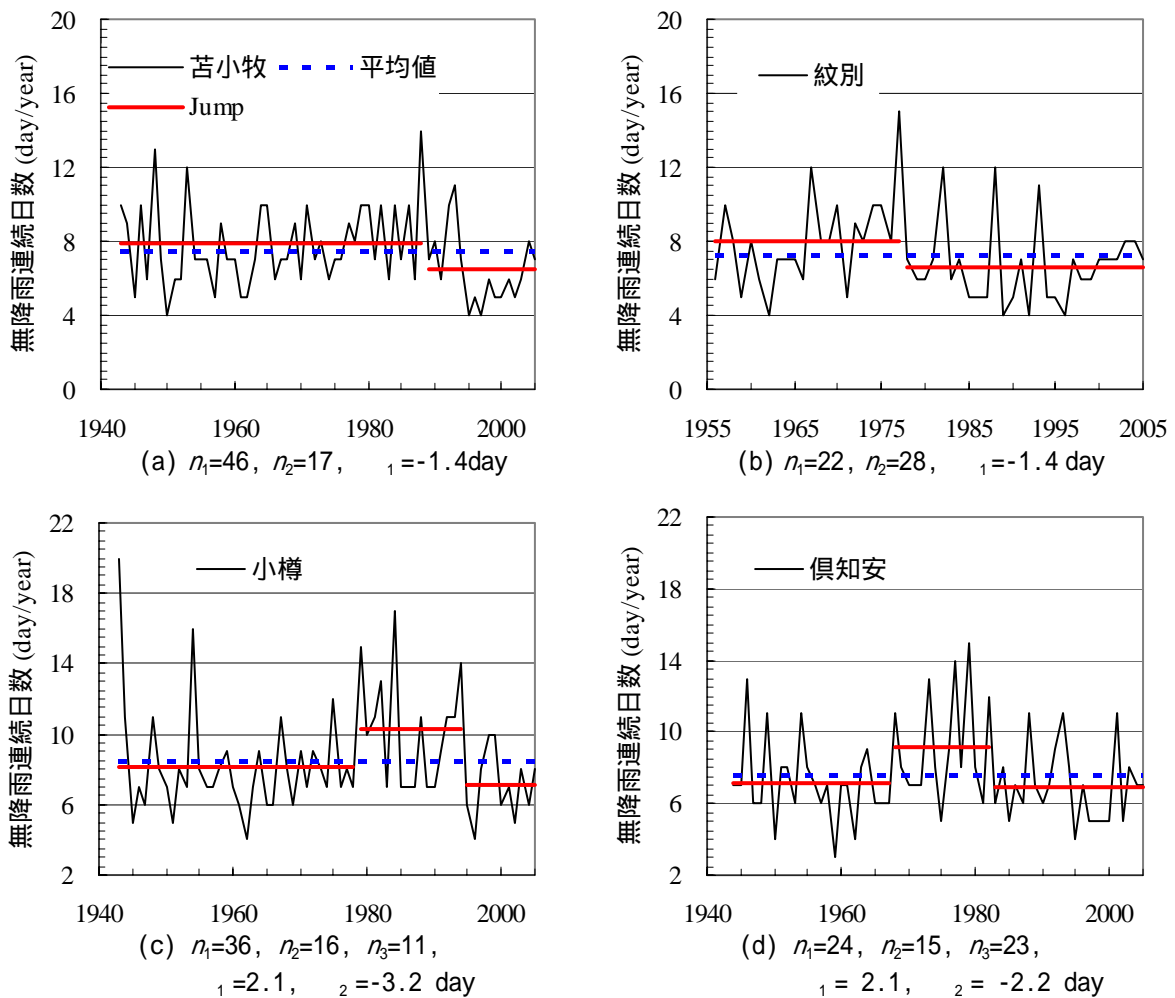


図-13(a)~(d) 4手法の検定で年最大無降雨連続日数にジャンプがあると判定された官署 (ジャンプ数：(a, b)1個，(c~i)2個，(j~o)3個，(p~t)4個，(u, v)0個)

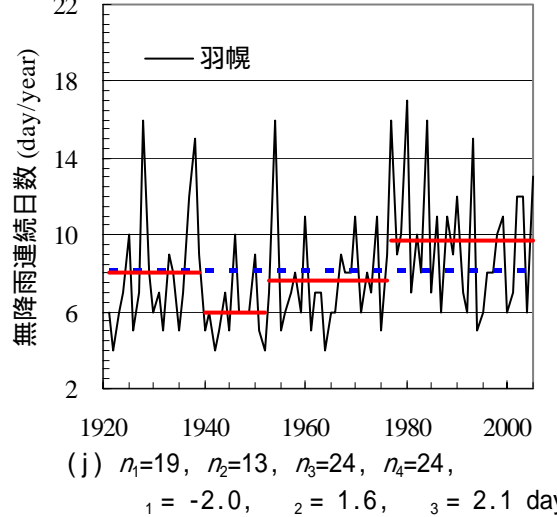
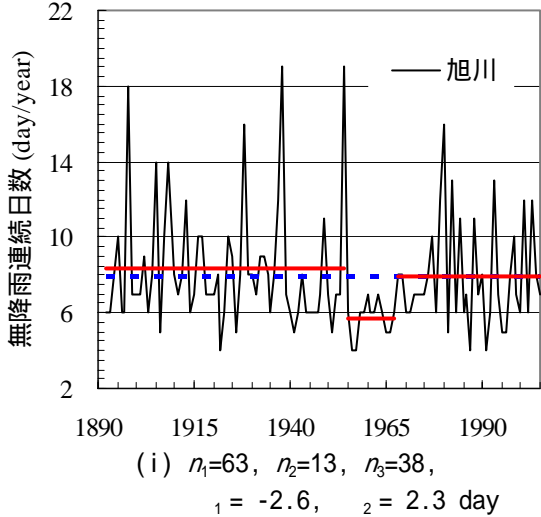
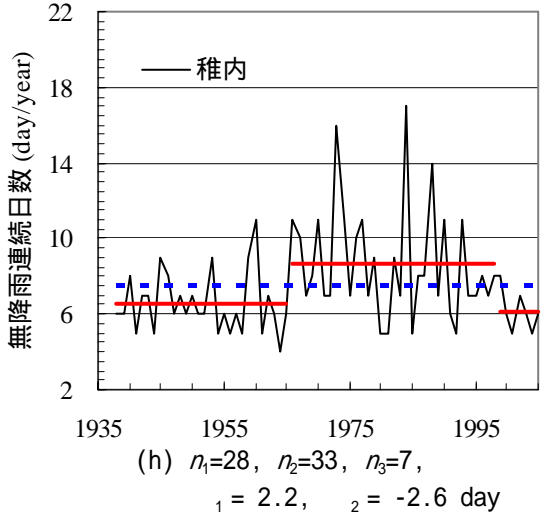
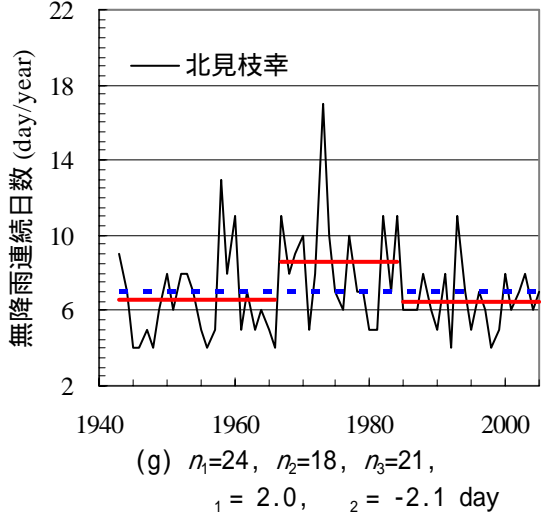
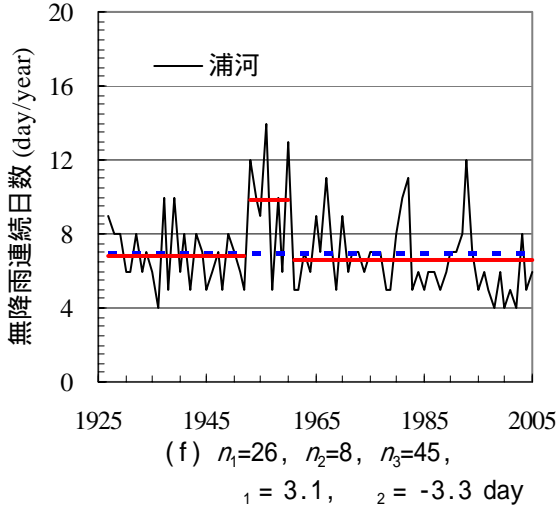
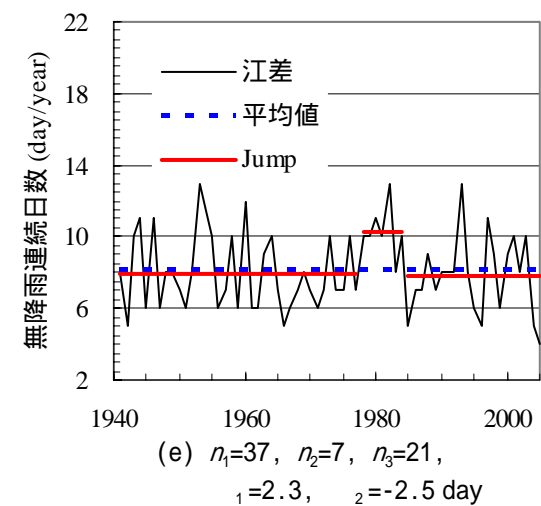


図-13(e) ~ (j) 4手法の検定で年最大無降雨連続日数にジャンプがあると判定された官署
 (ジャンプ数: (a, b)1個, (c~i)2個, (j~o)3個, (p~t)4個, (u, v)0個)

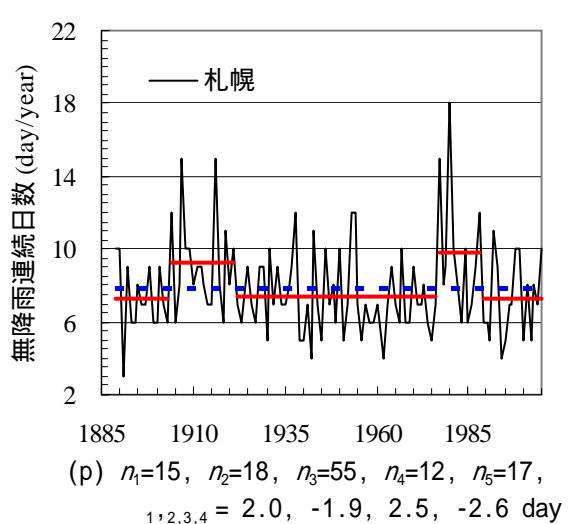
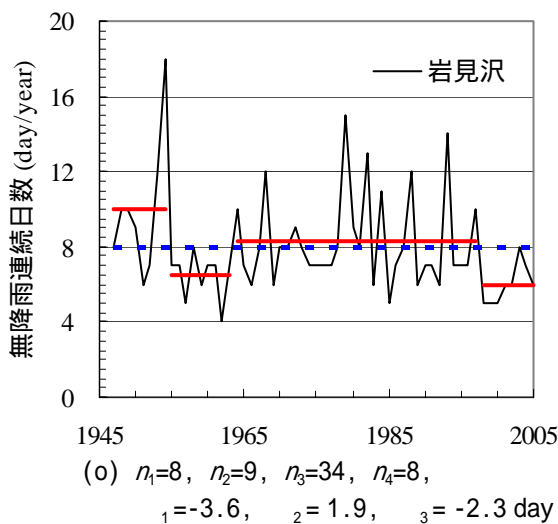
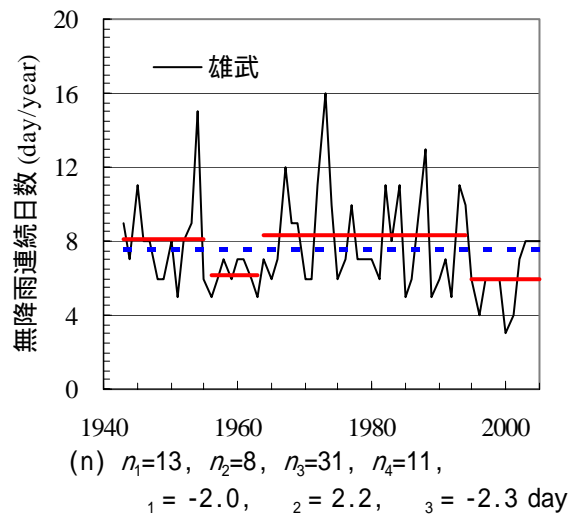
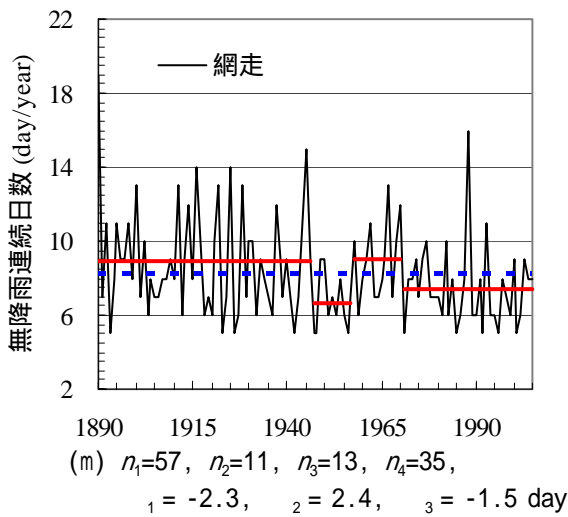
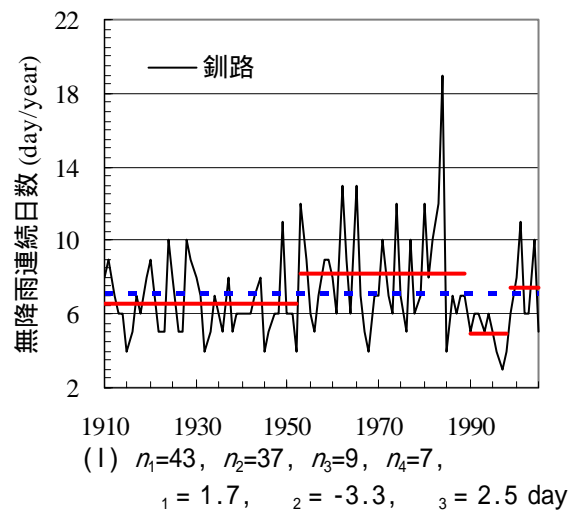
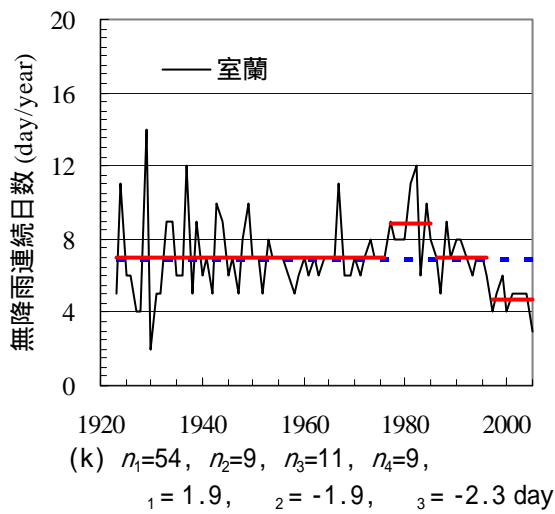
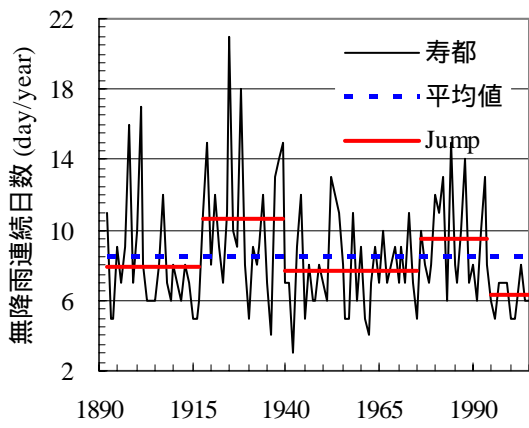
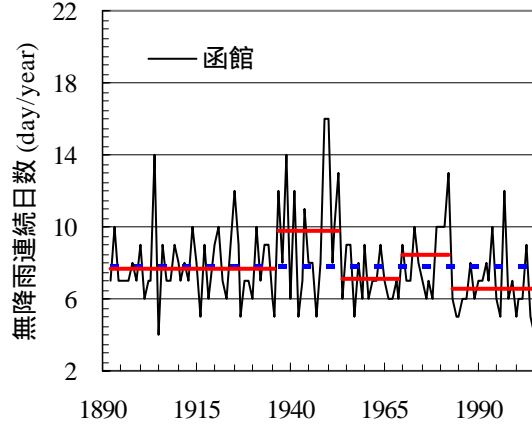


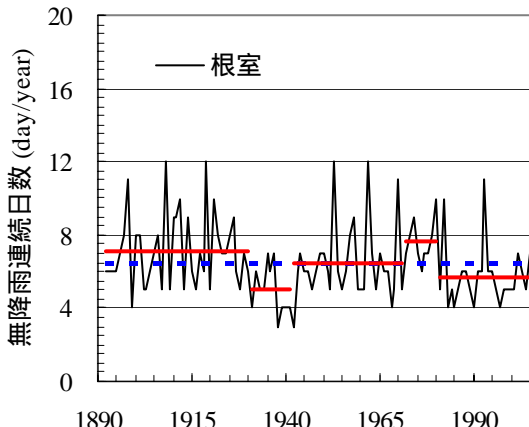
図-13(k) ~ (p) 4手法の検定で年最大無降雨連続日数にジャンプがあると判定された官署
 (ジャンプ数 : (a, b)1個, (c~i)2個, (j~o)3個, (p~t)4個, (u, v)0個)



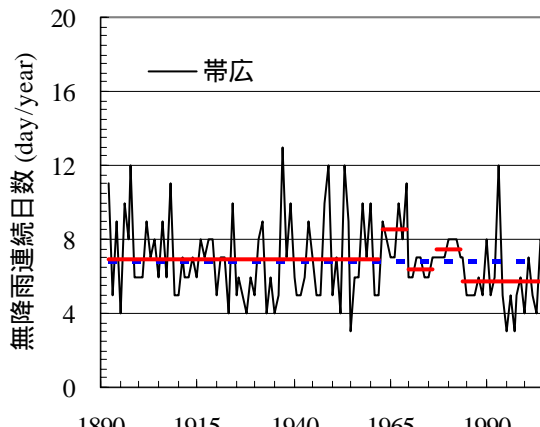
(q) $n_1=26, n_2=22, n_3=36, n_4=19, n_5=11,$
 $_{1,2,3,4} = 2.7, -3.0, 1.9, -3.2$ day



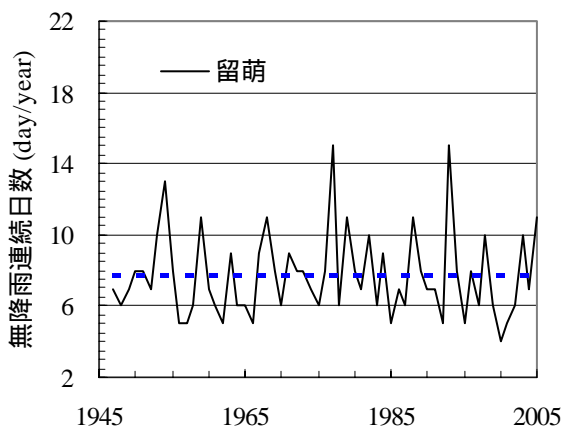
(r) $n_1=45, n_2=17, n_3=16, n_4=13, n_5=23,$
 $_{1,2,3,4} = 2.1, -2.8, 1.4, -1.9$ day



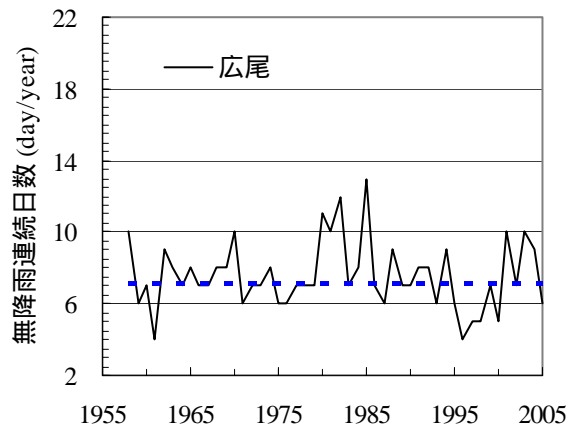
(s) $n_1=39, n_2=11, n_3=30, n_4=9, n_5=25,$
 $_{1,2,3,4} = -2.2, 1.4, 1.2, -1.9$ day



(t) $n_1=71, n_2=7, n_3=7, n_4=7, n_5=22,$
 $_{1,2,3,4} = 1.6, -2.1, 1.0, -1.7$ day



(u) ジャンプなし



(v) ジャンプなし

図-13(q) ~ (v) 4手法の検定で年最大無降雨連続日数にジャンプがあると判定された官署
 (ジャンプ数 : (a, b)1個, (c~i)2個, (j~o)3個, (p~t)4個, (u, v)0個)

ジャンプ4個の官署は、全て100年以上のデータを有する官署であった。正のジャンプで最大のものは、浦河の $\delta_1 = 3.1$ 日(図-13(f))。負のジャンプで最大のものは、岩見沢の $\delta_1 = -3.6$ 日(図-13(o))であった。ジャンプが検出された20官署中17官署(図-13(a: 苫小牧, c: 小樽, d: 倶知安, e: 江差, g: 北見枝幸, h: 稚内, i: 旭川, j: 羽幌, k: 室蘭, l: 釧路, n: 雄武, o: 岩見沢, p: 札幌, q: 寿都, r: 函館, s: 根室, t: 帯広))において、1980年前後を含むジャンプは、正のジャンプであることがわかる。著者が調べたところ、全ての官署で1984年を含む期間の年降水量の平均値は低く、この年は台風上陸がゼロであった。よって、無降雨日数が増加した年であったことが予想され、1984年の無降雨連続日数のデータから、下位第1位となっている官署が2官署(釧路: 19日, 稚内: 17日)、10日以上が13官署(小樽: 17日, 羽幌: 16日, 寿都: 15日, (雄武, 北見枝幸, 旭川, 岩見沢): 11日, (札幌, 江差, 室蘭, 苫小牧): 10日)であることがわかった。また、年最大日雨量のデータについても調べてみると、1980年における年最大日雨量は全22官署で100mm/dayを下回っている(最大は、広尾の96.5mm/day)。札幌では、1981年に207.0mmを観測しているが、1980年では、わずか47.5mmであった。1980年の年最大日雨量が50mm/dayを下回っていた官署は、羽幌、留萌、倶知安、寿都、釧路、根室、旭川、岩見沢の8官署であった。これらのことから、1980年前後を含むジャンプが正のジャンプになったと思われる。

逆に、2005年を含むジャンプの平均値は、負のジャンプとなっており、同じく17官署(図-13(a: 苫小牧, b: 紋別, c: 小樽, d: 倶知安, e: 江差, f: 浦河, g: 北見枝幸, h: 稚内, k: 室蘭, m: 網走, n: 雄武, o: 岩見沢, p: 札幌, q: 寿都, r: 函館, s: 根室, t: 帯広))であった。

ジャンプの検定が、トレンドの検定に比して有意となる判定結果が多数現れたことについては、トレンド検定では、ある官署に一つのトレンドに対して、一回の検定を行なっているが、ジャンプは、降雨データ原系列を最小7年間以上の組に分類して総当りで行なっているため、その組合せの数だけ検定を行なっており、ジャンプが有意となる可能性がトレンド検定よりも多く出現する。単純に検定をしている回数が全く違うことが大きい。

ジャンプの検定を行なうことにより、年最大無降雨連続日数では、1980年前後の正のジャンプ及び近年の負のジャンプというほぼ全道的に共通するポイントが浮き上がってきた。今後は、これらの気象要因を詳しく調べていくことが課題である。

4. T年確率降水量の経年変化

(1) 最適確率分布モデルによる100年確率日雨量の経年変化

本研究で用いる確率分布モデル¹¹⁾¹²⁾は、10種類17通りである。それらを次に示す。

正規分布(ND)(S^2 : 標本分散, または U^2 : 不偏分散採用)

対数正規分布(積率法(高瀬法))

- ・ Plotting position として Hazen plot 採用 (MoHa) し, S^2 または U^2 採用
 - ・ Plotting position として Thomas(Weibull) plot 採用 (MoTo) し, S^2 または U^2 採用
- 岩井法 (Iwai) (S^2 または U^2 採用)

3母数型対数正規分布

- ・ 母数推定方法を Quantile-最尤法 (LNQ) による場合
- ・ 母数推定方法を積率法 (LNM) による場合

Pearson 型分布 (P3)

対数 Pearson 型分布 (LP3)
Gumbel 分布 (Gum)
Gumbel-Chow 分布 (G-C) (S^2 または U^2 採用)
一般化極値分布 (GEV)
平方根指数型最大値分布 (SQEX)

標本分散と不偏分散のどちらを採用するか、あるいは母数推定法の違いによって最適確率分布モデルが異なる場合もあるため、本研究では上記のように 17 通りとする。また、確率分布の適合度評価には、標準最小二乗基準¹³⁾ (Standard Least-Squares Criterion: SLSC) を用いて行なった。

以上より、各気象官署の統計開始年から部分標本値の最終年を 1990 年～2005 年まで変化させたときの経年変化を調べる。なお、第 2 章で異常値と判定された 3 官署 (苫小牧, 根室, 広尾) の上位第 1 位を削除し、その前後年の平均値で補間している。

まず、最適確率分布モデルとそれ以外の確率分布モデルによって求められた 100 年確率日雨量 X_{100} にどの程度の差があるのかを見るため、多様な確率分布に対して最適確率モデルとなる場合が多い GEV モデルに統一¹⁴⁾して求めた X_{100} と各年最適確率モデルによる X_{100} の経年変化を比較する。各年最適確率モデルは、標本値として各年の値を加えていくごとに、17 通りの確率分布モデルから新たに SLSC を求め、それが最小値となったモデルの X_{100} を採用する。なお、SLSC の最小値が 0.03 を超える場合は、他の分布モデル等を試みると良いとされているが¹³⁾、これについては 17 通り以外の確率分布モデルを取り扱っていないため考慮していない。これにより、全 22 気象官署の中で、 X_{100} の差が大きく出現した 4 官署を図-14 に示す。実線は最適確率分布、破線は GEV モデルを表わし、重なっている部分は最適確率分布が GEV モデルとなっている部分である。また、1990 年の X_{100} を固定し、それに相当する 1990 年～2005 年までのリターン期間 T の経年変化を図-15 に示す。つまり、1990 年では $T=100$ 年であるが、その後 15 年間で標本が 1 つずつ増加するたびに、どのように変化しているかを表わしている。

図-14 より、苫小牧で 1999 年に最大約 20mm の差が出現した。また、GEV モデルの X_{100} は最適確率分布よりも大きく出現する場合と小さく出現する場合があり、治水・利水計画で確率水文量を求める際、確率分布モデルを Gumbel 分布等一つの手法のみで求めている場合が多いが、数種のモデルを考慮する必要があることが言えるだろう。

また、図-15 より、留萌における最適確率モデルと GEV モデルによる T の差は、1991 年では約 40 年であるが、2005 年では約 55 年に広がっている。苫小牧では、2000 年～2003 年及び 2005 年以外は、最適確率分布と GEV は全く正反対の挙動を示しており、2005 年では約 120 年の差が出現した。さらに、GEV モデルによる 2005 年の苫小牧の T は、142 年増加して 242 年となった。

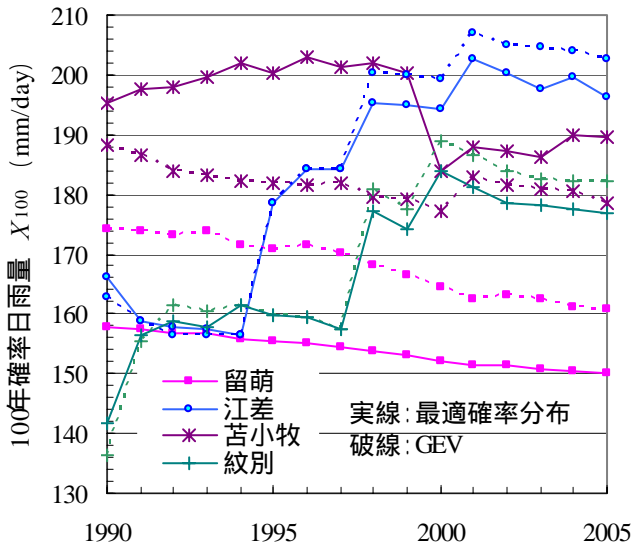


図-14 各年最適確率分布と GEV による X_{100} の経年変化の比較

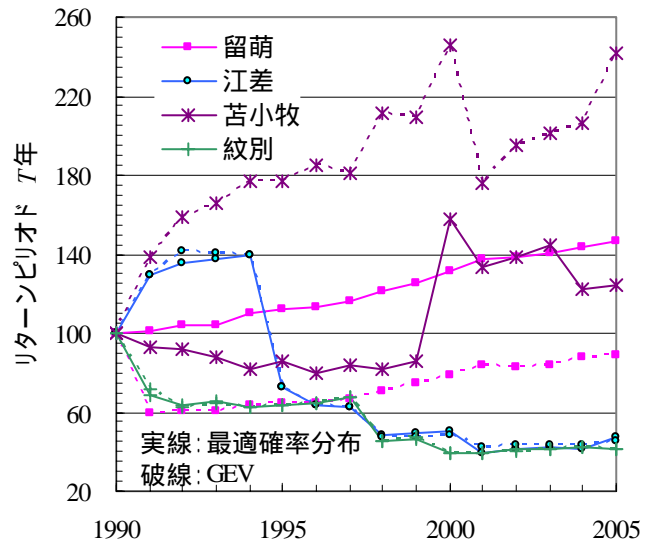


図-15 各年最適確率分布と GEV による 1990 年の X_{100} に相当する T の経年変化の比較

ここで、苫小牧における統計開始年～1990年及び統計開始年～2005年までのヒストグラムと GEV モデルによる PDF を図-16 に示し、これらの変化をしてみる。なお、ヒストグラムの階級幅は、10mm/day である。

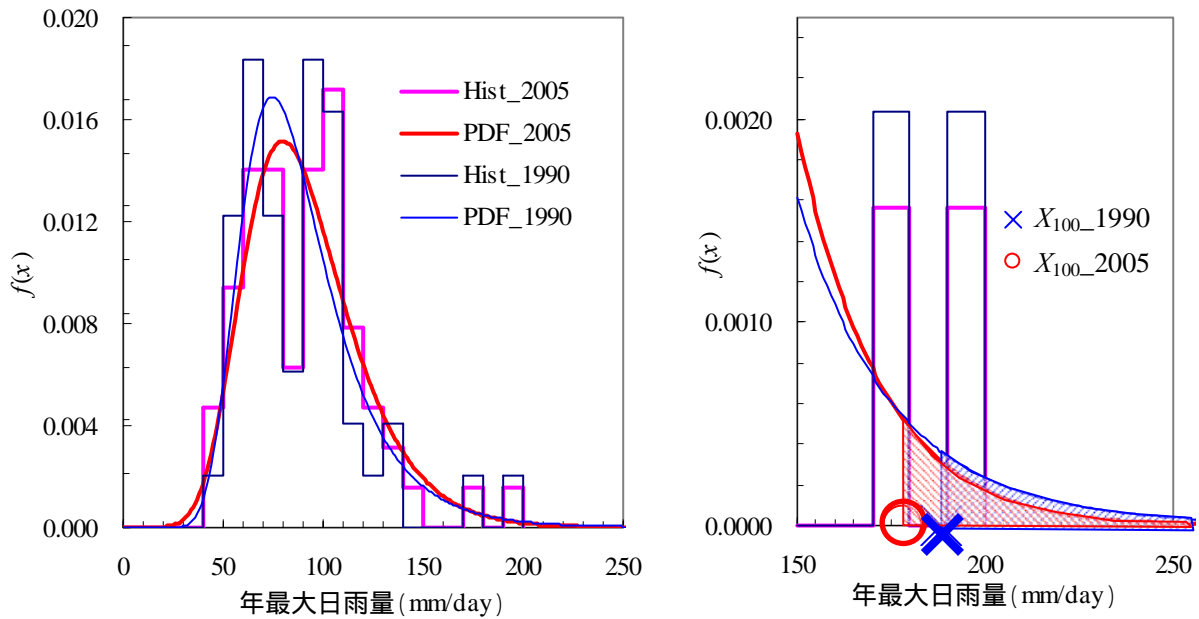


図-16 苫小牧における統計開始年～1990年及び2005年までのヒストグラムと GEV モデルによる PDF (左図：全体図、右図：PDF の右端部拡大図)

図-16(左図)より、PDF の山の頂点が 1990 年と比較して 2005 年には右へ移動していることから、平均値が上昇していることがわかる。また、100mm/day～120mm/day 付近では、ヒストグラムが増加し、2005 年の PDF の方がやや大きく膨らんでいる。よって、この区間の雨量が 15 年間で多く観測されたことを示している。他方、170mm/day より大きいヒストグラムでは小さくなっているため、この

値より大きな雨量は観測されていないことになる。ゆえに、これら PDF の右端部の拡大図(図-16(右図)) から、175mm/day 付近より大きい場合では、2005 年の PDF の方が小さくなっているのがわかる。 X_{100} の値は、PDF 全体の面積を 1 とした場合、図-16(右図) の斜線部分が 1/100 の面積に相当するときの横軸の値(1990 年：188.3mm/day で × 印，2005 年：178.4mm/day で 印) である。このように、 X_{100} が減少した場合、減少前の X_{100} を 2005 年の PDF で考えれば、その面積が 1/100 よりも小さくなっている。つまり、 T が増加したことを表わしている。

以上を踏まえ、全 22 気象官署に対して 1990 年～2005 年における各年最適確率分布モデルを用いた X_{100} 及び T の経年変化をそれぞれ図-17 及び図-18 に示す。 X_{100} の増加 (T の減少) は、治水安全率の低下を示し、 X_{100} の減少 (T の増加) は、治水安全率の上昇を示している。

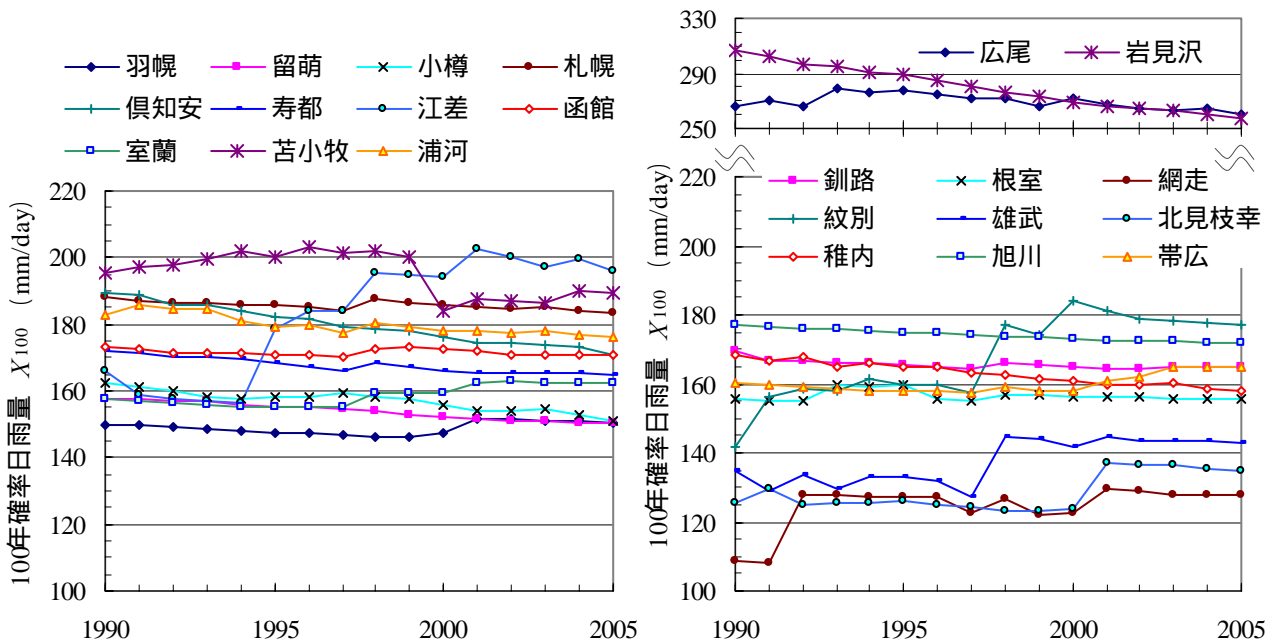


図-17 各年最適確率分布による全 22 気象官署の X_{100} の 1990 年～2005 年間の経年変化 (左・右図)

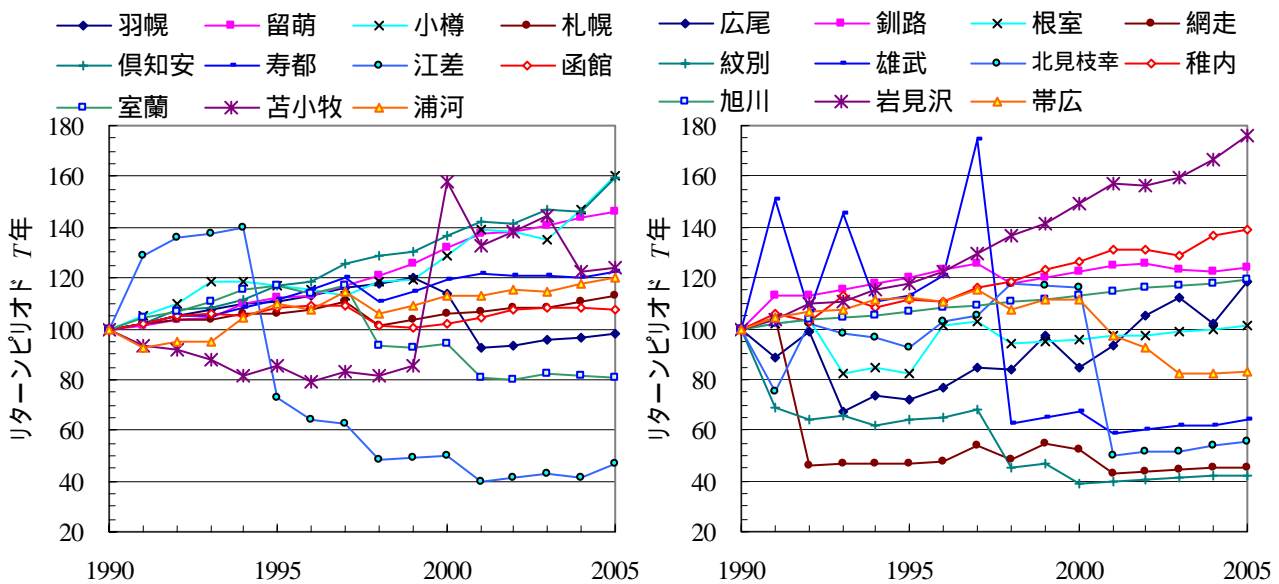


図-18 各年最適確率分布による全 22 気象官署の 1990 年の X_{100} に相当する T 年の経年変化 (左・右図)

図-17より、広尾と岩見沢は、その他の官署よりも X_{100} が 250mm 以上と特に高い。広尾は、降水量の多い地域であることが、 X_{100} を大きくさせていると思われる。岩見沢は、1999 年までは広尾よりも X_{100} が大きく、2005 年でほぼ等しい。第 2 章で示した表-2 によると、岩見沢の変動係数及び歪係数は、異常値を含む苫小牧を除けば、全官署の中で最も大きいことが、 X_{100} を大きくさせている一因と思われる。

逆に、降水量の少ないオホーツク海グループに属している北見枝幸、雄武、網走の 3 官署の X_{100} は、150mm を下回っている。1990 年～2005 年間で X_{100} が最も大きく増加（治水安全率が減少）した官署は、江差で 46mm（ジャンプでも 40.2mm が出現）、次いで紋別の 42mm であり、オホーツク海グループは稚内を除く 4 つの官署で治水安全率が減少している結果となった。逆に最も X_{100} が減少（治水安全率が上昇）した官署は、岩見沢の -50mm であった。

また、図-18 から、最も T が増加（治水安全率が最も上昇）している官署は、岩見沢の 176 年、次いで小樽の 160 年であった。逆に最も T が減少（治水安全率が最も減少）している官署は紋別の 42 年で大きな違いを示している。ここで、雄武や苫小牧のように T が大きく上下に振動しているのは、大雨の影響だけでなく、前後の年で最適確率分布モデルが変化したことによるモデル間の差が含まれているからである。 T が 80 年以下と顕著に減少している官署は、江差、雄武、北見枝幸、網走、紋別の 5 官署であり、これらの官署の統計年数を見ると、50 年～116 年である。特に、統計年数が 116 年と 100 年を超える網走の T が 45 年で、その半分にも満たない統計年数 50 年の紋別がほぼ等しく減少し、同様な挙動を示している。統計年数の少ないことによる不安定性は、統計年数が 50 年あれば解消することを表していると思われる。

ここで、リターンピリオドが大幅に低下している、江差、紋別、網走の年最大日雨量データ上位 5 位までの気象状況を表-5 に示す。この表より、リターンピリオドを下げる要因となった気象状況は、低気圧または秋雨前線と台風の影響によることがわかる。さらに、1990 年以降の雨量が上位 5 位以内に多く観測されていることがわかる。また、網走の上位第 1 位は 1992 年 9 月 11 日に 163mm/day を観測しているが、紋別では、1992 年の同日では 99.5mm/day であり、その年における年最大日雨量は 8 月 9 日の 100mm/day で上位第 5 位である。1998 年においては、紋別で 9 月 16 日に 151mm/day の雨量を観測しているが、同年月日の網走では、69mm/day（上位第 20 位）しか観測されていない。紋別と網走は隣接官署にもかかわらず、それぞれ別の年月日で年最大日雨量を記録しており、近年では局地的な降雨の傾向が強いことが示されている。

表-5 江差、紋別、網走の年最大日雨量上位 5 位までの気象状況

順位	江差 (n = 65 年)				紋別 (n = 50 年)				網走 (n = 116 年)			
	年月日	雨量	気象	年月日	雨量	気象	年月日	雨量	気象			
	1995	8/20	140	低	1998	9/16	151	秋・台 5	1992	9/11	163	秋・台 17
	1998	5/2	126	低	1973	8/18	148	台 10	2001	9/11	122	秋・台 15
	1975	8/23	122	台 6	2000	9/2	129	前・台 12	1935	8/30	107	
	1967	8/10	121	低	1991	9/6	122	前・低	1941	9/6	104	
	2001	9/10	118	秋・台 15	1992	8/9	100	前・台 10	1979	10/1	97	台 16

(雨量 : (mm/day), 低 : 低気圧, 台 : 台風, 秋 : 秋雨前線, “空白” : 年代が古いため不明)

(2) 100年確率日雨量のトレンドによる治水安全率の分類

ここでは、前節で求めた100年確率日雨量 X_{100} の1次回帰直線の傾きによって治水安全率の変化とし、道内22気象官署について調べていく。 X_{100} の経年変化に対する1次回帰直線を最小二乗法により求め、その傾き $a_{X_{100}}$ (mm/day/year) から、治水安全率を次のように分類する。

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.2 < a_{X_{100}} & \text{(ある一定値の } x_{100} \text{ に対する } T \text{ 減少)} \quad \dots \text{ 治水安全率低下型} \\ -0.2 < a_{X_{100}} < 0.2 & \text{(ある一定値の } x_{100} \text{ に対する } T \text{ 一定)} \quad \dots \text{ 治水安全率一定型} \\ a_{X_{100}} < -0.2 & \text{(ある一定値の } x_{100} \text{ に対する } T \text{ 増加)} \quad \dots \text{ 治水安全率上昇型} \end{array} \right.$$

上記により、1990年～2005年までの期間の $a_{X_{100}}$ より分類された道内22気象官署における治水安全率上昇・一定型・下降型の分布図を図-19に示す。さらに、年最大日雨量データ原系列 X についても同様に、回帰直線の傾き a を求めて分類したものを図-20に示す。なお、地域間の比較が出来るように、統計年数が最も少ない広尾に統一して1958年～2005年までの a で求めている。また、異常値はその前後年の平均値で補間している。

図-19及び図-20で分類型が一致した官署は、治水安全率低下型が、江差、室蘭、紋別、雄武、北見枝幸、帯広の6官署、一定型が羽幌、札幌、釧路、根室の4官署、上昇型は稚内、留萌、小樽、倶知安、広尾、岩見沢の5官署である。特に、日本海北部方面は上昇型が多く、稚内を除くオホーツク海グループは、軒並み低下型であることが明らかである。原系列 X の傾きは、降水データを1回使用して求めたものであるのに対して、推定値である X_{100} の値はその年以前の降水データ全てを考慮したものである。よって、 X_{100} の傾きの方がより重みがある。よって、 X_{100} 及び X 一致している治水安全率低下型の6官署は、一雨で降る量が近年増加していることを裏付けている結果といえるだろう。

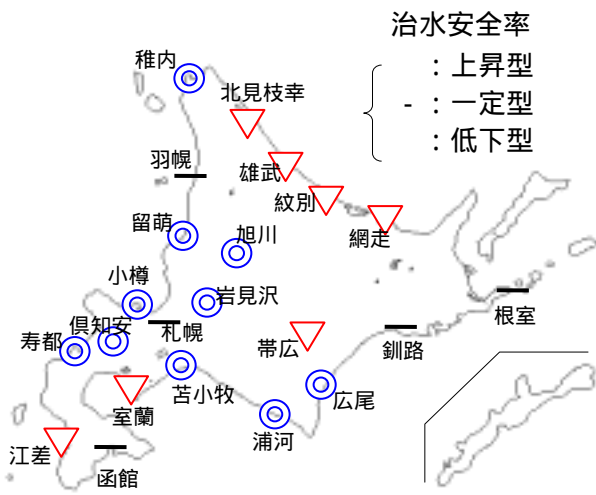


図-19 1990年～2005年の X_{100} の回帰直線の傾きによる治水安全率3分類の分布図

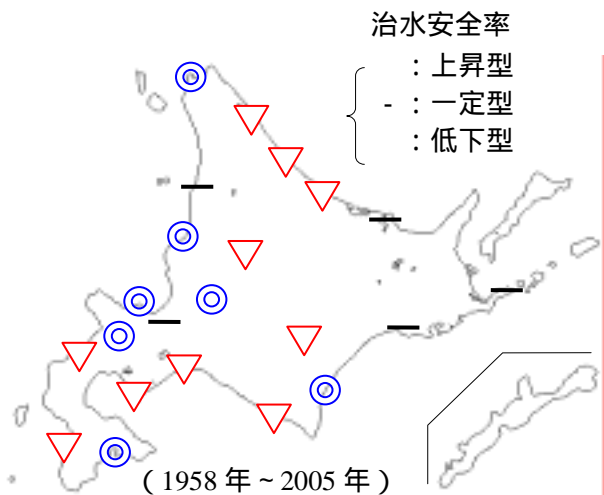


図-20 年最大日雨量原系列 X の回帰直線の傾きによる治水安全率3分類の分布図

(3) 異常値の有無による 100 年確率日雨量の経年変化

第 2 章でも触れたように、本研究では、苫小牧、根室及び広尾の 3 官署の上位第 1 位に対して異常値と判定されたが、実際に観測されたデータを確率論の棄却検定により、簡単に棄却しても良いのだろうか。ここで、異常値として削除しない場合と、削除して前後年の平均値で補間した場合で求めた 1990 年～2005 年間の X_{100} の経年変化(図-21)、1990 年の X_{100} に相当するリターンピリオド T の経年変化(図-22)、SLSC、相関係数 r 及び最適確率分布モデル(表-6)を比較してみる。なお、表-6 の X_{100} 、 T 、SLSC、 r 及び最適確率分布は 2005 年の値及びモデルである。

図-21 及び図-22 より、3 官署とも異常値年以降の X_{100} の及び T の差は極めて大きいことがわかる。上位第 1 位と第 2 位の年最大日雨量の差は、昇順に根室、広尾、苫小牧であるが、図-21 より、 X_{100} の差もこの順に増加している。また、 T では、1950 年に異常値が出現した苫小牧を除いて、50 年以上の差が現れた。SLSC 及び r の両方で、苫小牧に大きな差がみられ、異常値を前後年の平均値で補間した方は SLSC が小さく、 r が大きく適合度が良い。しかし、他の 2 官署ではそれらの差は小さく、根室では逆に異常値を補間した方の適合度が悪い。これは、表-6 より、降水データの第 1 位と第 2 位の差が小さいこと。さらに、対数正規分布の 3 母数推定が積率法による場合では、異常値として判定されていないことが影響していると思われる。つまり、確率分布として対数正規分布を仮定して異常

表-6 異常値の取扱いによる X_{100} 、 T 、SLSC、 r 及び最適確率分布の違い

(X_{100} 、 T 、SLSC、 r 及び最適確率分布は 2005 年の値及びモデルである。)

官署名	標本数	第 1 位 mm	第 2 位 mm	差 mm	異常値 mm	X_{100} mm/d	T 年	SLSC	r	最適 確率分布	
苫小牧	64 年	447.9 (1950 年)	195.5 (1987 年)	252.4	有	447.9	303.2	166	0.0796	0.955	LP3
					補間	93.5	195.2	124	0.0283	0.991	LNQ
広尾	48 年	346.0 (1998 年)	244.3 (1964 年)	101.7	有	346.0	327.1	32	0.0310	0.987	SQRT-ET
					補間	146.3	265.7	119	0.0283	0.990	MoHa
根室	122 年	211.5 (1992 年)	147.5 (1986 年)	64.0	有	211.5	179.5	46	0.0235	0.993	GEV
					補間	71.5	155.7	101	0.0293	0.991	P3

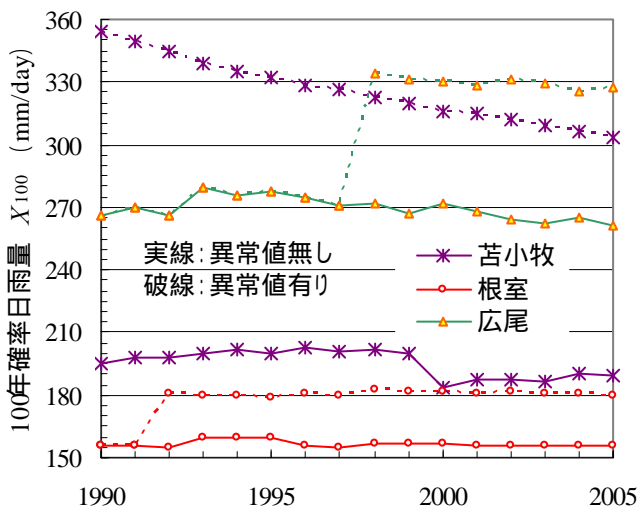


図-21 異常値の有無による年最大日雨量の X_{100} の経年変化の比較

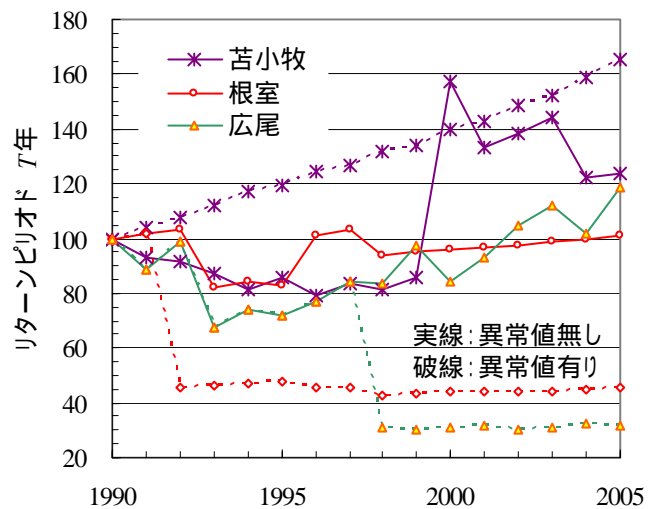


図-22 異常値の有無による 1990 年の X_{100} に相当する T の経年変化の比較

値検定を行なうのではなく、表-6 に示す最適確率分布の GEV または P3 を用いて異常値検定を行なえば、異常値でなくなる可能性が高いということになる。これについては、今後の課題としたい。

最適確率分布モデルは、3 官署全てにおいて異常値の有無で異なるモデルとなった。たった一つのデータが最適確率分布を変化させた結果である。以上より、異常値と判定されたデータを補間することによって、 X_{100} を減少させる効果及び確率分布に対する適合性を良くする効果（ただし、異常値とする第 1 位と第 2 位の差が小さい場合を除く）の期待できることが言える。

つまり、年最大日雨量データを均質母集団として、確率分布モデルの適合性を良くしたい場合は、異常値を削除して補間すると良い。しかし、現実に観測されている降水データを異常値として補間してしまえば、 X_{100} は減少し、治水安全率は低下することになる。現在までの上位第 1 位と第 2 位の平均値程度の標本値が将来観測されれば、現時点での異常値は、異常値でなくなるのが著者らの論文で明らかにされている¹⁵⁾。水工構造物の目的を考えれば、治水安全率を優先させるべきと考える。

(4) 最適確率分布モデルによる 10 年確率無降雨連続日数の経年変化

している。 X_{100} の解釈とは逆に、 X_{10} の増加は、渇水危険率の増加を示し、 X_{10} の減少は、渇水危険率の低下を示す。

図-23 より、全道的に X_{10} は 11 日前後となる官署が集中しており、その幅も 9~13 日前後で大きな変動は見られない。地域的には、日本海グループの羽幌、小樽、寿都の 3 官署が 12 日以上となっている。また、函館、室蘭、苫小牧、浦河の西部太平洋グループは図-23 (左図) において、下位 (10 日前後) を占めた。根室は、2005 年でほぼ 9 日と最も低い値になったが、この要因としては、太平洋の親潮が多湿の南風を冷やすことによって霧が観測されやすい地域であることのほか、本研究では、気象日報への記載が“0.0mm”であった場合も“降雨有り”とカウントしていることなどが考えられる。釧路は、年最大無降雨連続日数の第 1 位が 1984 年の 19 日が多いことが影響して、根室ほど低い値にはならなかったと思われる。また、降水量の少ないオホーツク海グループの X_{10} は、特に目立った挙動も無く全道の平均並みである。

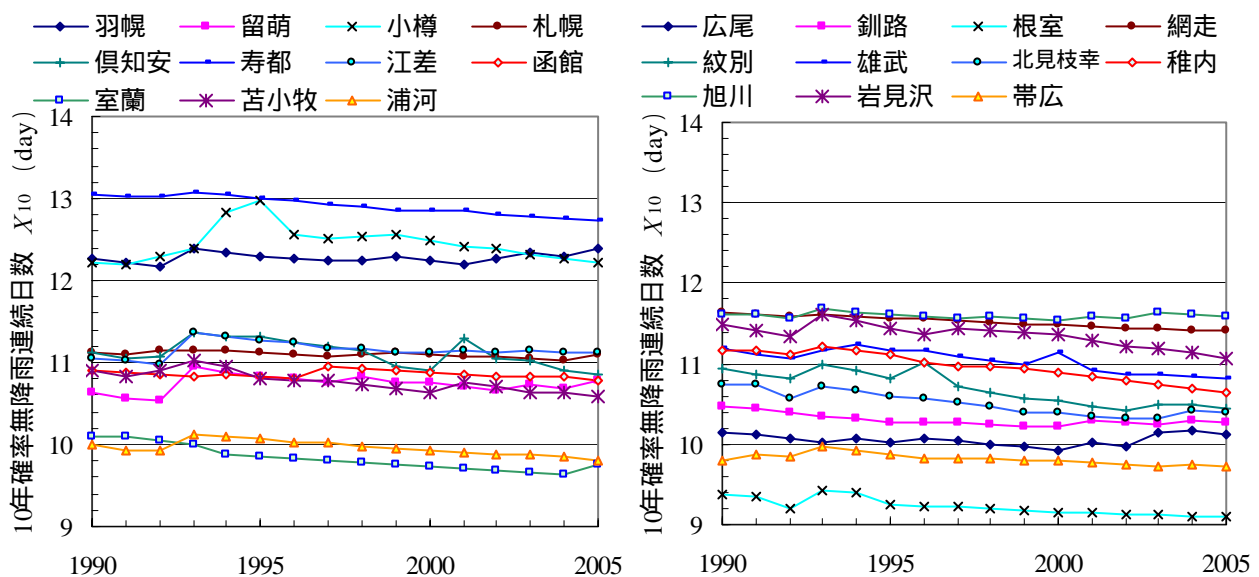


図-23 各年最適確率分布による全 22 気象官署の X_{10} の 1990 年～2005 年間の経年変化 (左・右図)

次に、1990年の X_{10} に相当するリターンピリオド T の、その後の15年間における経年変化を図-24に示す。ここでは、 $T > 10$ 年で渇水危険率が1990年時点よりも減少、逆に $T < 10$ 年は増加していることになる。

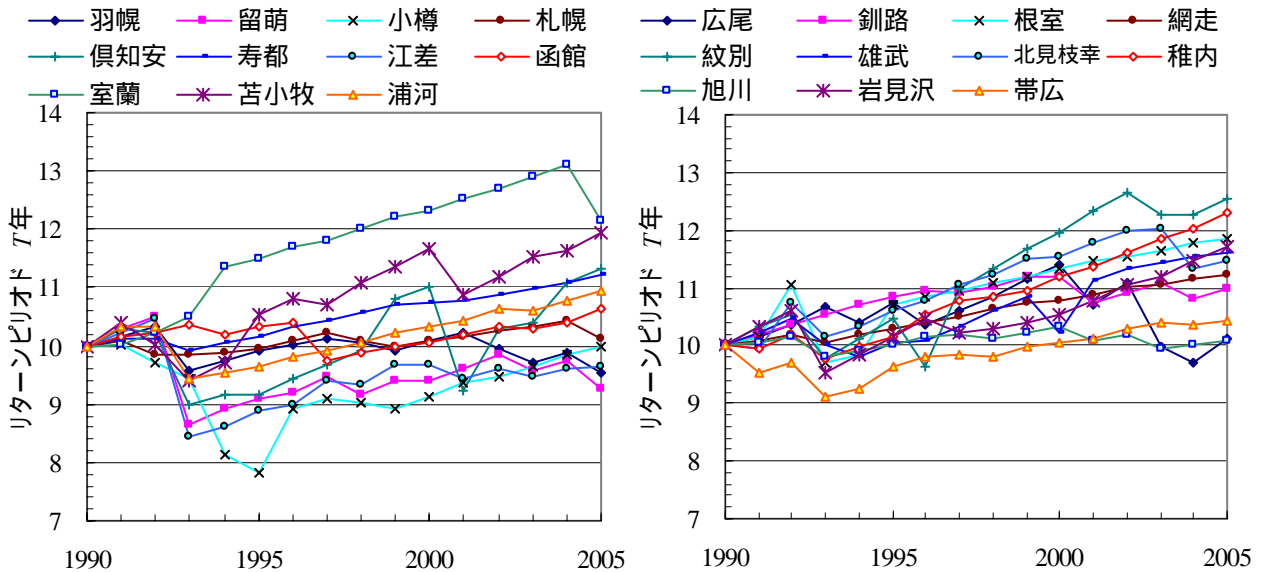


図-24 各年最適確率分布による全 22 気象官署の 1990 年の X_{10} に相当する T の経年変化 (左・右図)

T の変化は道内で 9 年～12 年前後の範囲であり、2005 年において室蘭、紋別、稚内で 12 年を超え、10 年を下回った官署は、日本海グループである羽幌、留萌、江差の 3 官署であった。江差は、年最大日雨量の増加により、治水安全率が低下していることが前章において示されたが、年最大無降雨連続日数の増加による渇水危険率も上昇している結果となった。なお、江差は、2005 年の翌年、2006 年に 25 日間 (7/24～8/17) の無降雨連続日数 (降水量 0.0mm 含む) を記録している。

逆に、2005 年において $T > 10$ 年で渇水危険率が減少しているのは、19 官署もあり非常に多いことがわかる。これは、“渇水の危険が少なくなる = 降雨の増加” ということを意味しているわけではなく、雨の量的な関係とは一切結びつかないので注意しなければならない。したがって、降水量“0.0mm”であった場合の取り扱いにも工夫がいるだろう。余談だが、年最大無降雨連続日数は、現在のところ気象月報の毎日の観測データに目を通し、人力でそれをまとめなくてはならないため、日数のカウントを行い易くする目的もあって無降水の記録である“--”のみをカウントした。

5. まとめ

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 種類の統計開始年～2005 年までの基本統計量を明らかにした。
- (2) 道内 22 気象官署で最も降水量の多い広尾について、その気象要因の一つとして地形性降雨の影響があることを、北海道地方標高図及び NOAA/AVHRR データによる 4ch 赤外画像を用いて示した。
- (3) 年最大日雨量及の発生月に対する相対度数分布図を示し、8 月と 9 月の発生割合の合計は、釧路の 41%～岩見沢の 68%と高く、5 月、6 月及び 11 月の発生割合の合計は、旭川の 5%～帯広の 31%と小さいことを示した。

- (4) 年最大無降雨連続日数の発生月に対する相対度数分布図を示し，日本海グループの全 7 官署において，5 月～8 月に発生する合計割合は約 90%であることを示した．
- (5) 3 母数対数正規分布による有意水準 $\alpha = 5\%$ の異常値検定の結果，Quantile-最尤法と積率法の 2 種類の母数推定法で異常値と判定された官署は，年降水量では苫小牧及び旭川，1 種類のみで異常値と判定された官署は釧路，岩見沢であった．
- (6) (5)と同様に，年最大日雨量では，2 種類で異常値と判定された官署は，苫小牧と広尾，1 種類のみでは，根室であった．
- (7) (5)と同様に，年最大無降雨連続日数では，2 種類で異常値と判定された官署は，江差のみであり，1 種類でも異常値と判定された官署は他になかった．
- (8) 年最大日雨量が異常値と判定された苫小牧，広尾，根室の異常値観測日の気象状況について，天気図を引用して示した．
- (9) 北海道内 22 気象官署の年最大日雨量データのトレンド検出の結果，4 検定手法全てで，増加トレンドと判定されたのは $\alpha=0.05$ のとき札幌， $\alpha=0.10$ のときは苫小牧のみであり，減少トレンドと判定された官署はなかった．
- (10) 年最大無降雨連続日数データのトレンド検出の結果，4 検定手法全てで， $\alpha=0.05$ のとき増加トレンドと判定されたのは羽幌，減少トレンドと判定されたのは網走であった． $\alpha=0.10$ のとき浦河で減少トレンドが有意となった．
- (11) 年最大日雨量について各官署 1～4 個のジャンプ検出を試みた結果，最も信頼性の高いジャンプ 1 個が札幌，寿都，苫小牧，帯広において有意となった，同様のジャンプ 2 個が江差，釧路で有意となった．
- (12) 年最大無降雨連続日数について各官署 1～4 個のジャンプ検出を行なった結果，留萌と広尾以外の 20 官署で有意となった．
- (13) 10 種 17 通りの確率分布モデルの中の最適確率分布と一般化極値分布 GEV の比較を行ない，1999 年での苫小牧の 100 年確率日雨量 X_{100} の差は 20mm にもなることを示した．また，1990 年～2005 年のリターンピリオドの経年変化により，2005 年の苫小牧で約 120 年の差があることを示した．
- (14) 道内 22 気象官署の各年最適確率分布による X_{100} の 1990 年～2005 年までの経年変化を示し，江差及び稚内を除くオホーツク海グループで X_{100} が増加していることを示した．
- (15) X_{100} 及び年最大日雨量データ原系列の 1 次回帰直線の傾きから，治水安全率の経年変化を上昇型・一定型・低下型に分類し，江差，室蘭，紋別，雄武，北見枝幸，帯広で治水安全率が低下していることを示した．
- (16) 苫小牧，広尾，根室における異常値の有無による， X_{100} ，SLSC， r 及び最適確率分布モデルの違いを明らかにした．特に，3 母数対数正規分布の 2 種類の異常値判定で片方のみで異常値となった根室の SLSC は，異常値を含めた方が良い結果となり，最適確率分布による異常値検定の必要性を示唆している．
- (17) 各年最適確率分布による 10 年確率無降雨連続日数 X_{10} の 1990 年～2005 年までの経年変化を示し，羽幌，留萌及び江差で渇水危険率が増加していることを示した．特に，江差は，年最大日雨量の増加による治水安全率の低下と，年最大無降雨連続日数の増加による渇水危険率の上昇の二極化した結果が示された．

以上，本研究の結果より，トレンドとジャンプの検出によって，北海道内降水量の非定常性が明らかにされた．また，100 年確率日雨量及び 10 年確率無降雨連続日数の経年変化から，確率降水量の変動特性が明らかにされた．

本研究で取り扱ったトレンド及びジャンプの検出手法を，実際に治水計画や利水計画で利用していくには，まず，ジャンプの検出を行ない，ジャンプが有意となった場合は，その時点で母集団が変質

したと考え、ジャンプ以前のデータを参考資料とする。つまり、T年確率降水量の推定には利用せず、最近のジャンプ期間のデータのみを用いてT年確率降水量を推定する。ただし、30年～40年の初期の不安定性を考慮する必要がある。トレンドの検出においても、ジャンプが有意となった最近の期間のデータのみを利用すれば、この期間の降水量の傾向を知る目安になる。

また、河川ハザードマップに対して、当該河川流域の降水データによるトレンド及びジャンプの検出結果をグラフで示せば、河川流域周辺住民に対して視覚的に過去と比較した最近の降水量の多寡を知らせることができる。トレンド及びジャンプのグラフは、一目瞭然なところに利点がある。さらに、T年確率降水量またはリターンピリオドの経年変化に対する1次回帰直線の傾きから治水安全率の変化を示すことで、住民の防災意識を高めていくことが期待できるのではないだろうか。自然災害を完全に防ぐことは不可能でも、住民の防災意識を高めることによって被害を最小限なものにすることは可能である。降水量の変化による水工構造物の治水安全率の経年変化を、既存及び将来の河川ハザードマップ等に盛り込むことで、周辺地域住民の防災意識を高め、避難行動がより良いものへと変わることを期待している。

最後に、河川の治水計画や利水計画で扱うT年確率降水量は非正常性を有するので、初期不安定期間を除いた経年変化の中で、T年確率降水量の最も危険な値を採用すべきであると考えられる。また、異常値と判定されたデータの取り扱いについては、確率分布モデルの適合性よりは、治水安全率を優先させるようにするべきと考えられる。

参考文献

- 1) 異常気象レポート 2005 概要版, 気象庁, 2005.10.
- 2) 気象庁: 気象庁年報 2002 (CD-ROM), (財) 気象業務支援センター, 2002.6.
- 3) 気象庁: メッシュ気候値 2000 表示プログラム (CD-ROM), (財) 気象業務支援センター, 2002.3.
- 4) 角屋 睦: 異常 (確率) 水文学量とデータの棄却検定, 農業土木研究別冊第 3 号, pp.23-27, 1961.7
- 5) 星 清: 現場のための水文統計(2), 開発土木研究所月報, 北海道開発局土木研究所, pp.32-55, 1998.6.
- 6) 気象予報士合格指導講座～テキスト 4～, U-CAN, pp.44-67, 2004.
- 7) 小倉義光: 一般気象学, 東京大学出版会, pp.70-75, 1999.8.
- 8) 中尾隆志・佐渡公明・杉山一郎: 年最大日雨量時系列の非正常性を示すトレンドとジャンプの検出について, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.301-306, 2007.3.
- 9) 原沢英夫・西岡秀三: 地球温暖化と日本 自然・人への影響予測 第 3 次報告, 古今書院, pp.1-55, 2003.8.
- 10) 奥村晴彦: パソコンによるデータ解析入門 - 数理とプログラミング実習, pp.215-224, 技術評論社, 1990.
- 11) 篠原謹爾: 河川工学, 共立出版株式会社, pp.19-34, 1991.
- 12) 星 清: 水文統計解析, 開発土木研究所月報, 北海道開発局土木研究所, pp.31-63, 1998.5
- 13) 宝 馨・高棹琢馬: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価規準, 土木学会論文集, 第 393 号 / -9, pp.151-160, 1988.5.
- 14) 杉山一郎・佐渡公明: 北海道内 22 気象官署における降水量の非正常頻度解析, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.187-192, 2006.3.
- 15) 杉山一郎・佐渡公明・中尾隆志: 北海道内の降水量に関する異常値特性, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 63 号, B-48, 2007.2.