

融雪流出卓越地域における地域洪水頻度解析

REGIONAL FLOOD FREQUENCY ANALYSIS IN SNOW-MELT FLOOD AREA

小松陽介¹・葛葉泰久²・友杉邦雄³・岸井徳雄⁴

Yosuke KOMATSU, Yasuhisa KUZUHA, Kunio TOMOSUGI and Tokuo KISHII

¹正会員 博士(理学) 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 特別研究員 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

²正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所 主任研究員・筑波大学地球科学系 助教授 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

³正会員 博士(工学) 京都大学防災研究所 助教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴フェロー 博士(工学) 防災科学技術研究所 総括主任研究員・筑波大学地球科学系 教授 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

This paper reports an application of Regional Flood Frequency Analysis (RFFA) to Hokkaido region, northern Japan, where snow-melt flood is predominant. Optimal probability density function for annual maximum flood series was selected from seven fitting methods based on goodness-of-fit-criterion. This paper calculated the scale exponents in the power law relationship between flood quantiles and drainage area in order to evaluate scaling property: e.g. simple scaling or multiscaling. As a result of the analysis, simple scaling holds because the scaling exponents slightly vary between different return period flows.

Key Words: PUB, regional flood frequency analysis, simple scaling, snow-melt flood, hydrologic regime

1. はじめに

国際水文学会 (IAHS) では今後 10 年間の重要な研究課題として未観測流域での水文量予測 (Prediction in Ungauged Basins: PUB) を掲げている (<http://www.cig.enscm.fr/~iahs/index.html>). PUB に貢献する手法としては、スケーリング理論によって未知のパラメータを減らす方法¹⁾や、地域洪水頻度解析 (Regional Flood Frequency Analysis: 以下, RFFA と称する) などの水文統計学的手法²⁾、分布型流出モデルや集中型流出モデルを用いた水文予測に関する研究、および予測値の不確実性の低減する手法の開発などが挙げられる。

欧米においては Dalrymple^{2), 3)}の研究以降, RFFA への関心が高まってきたが、日本においてはあまり発展しなかった。地域頻度解析で扱う変量として、洪水・渇水の河川流量^{2), 3), 5), 6)}、降水量^{7), 8)}、海岸での波高⁹⁾などの研究例がある。洪水予測の場合、流出形態が同じ (homogeneous) である地域内の複数地点における既存の流量統計資料を合成することで、未観測流域や観測期

間の短い観測流域 (poor-gauged basin) において、任意の return period における洪水流量の予測精度を向上させることができる。

この解析を行うための水文資料の条件としては、解析地域内における水文特性の類似性 (homogeneity) が重要であり、そのほかランダム性 (randomness)、トレンドの有無 (trend)、観測地点間のデータの独立性 (independence) を検証する必要がある。水文特性の homogeneity は、流量特性から直接的に分類する方法と、植生・土地利用・地形特性・降水量・蒸発散量などの要素を用いた間接的分類方法がある。近年では順序統計量の一種である L-moment を用いて homogeneity を検証する研究も発展している^{10), 11)}。

本研究では、葛葉ほか^(2001a)¹²⁾が simple scaling 成立の可否を検証した北海道地域を解析対象地域とし、水文レジム区分¹³⁾を用いた homogeneity についての分類・検定をしたのち、7 種の確率分布モデルから選択した最適なモデルを用いて RFFA を行った結果を報告する。

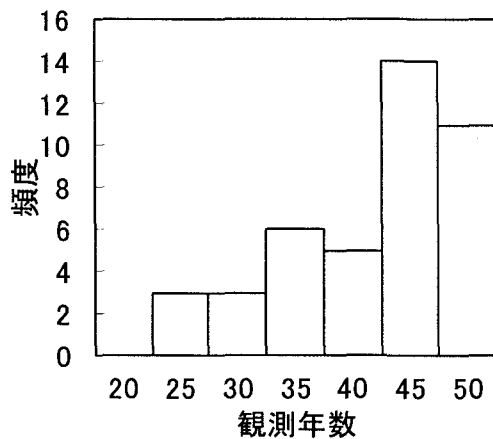


図-1 解析流域の観測期間.

2. 解析データと水文レジム

国土交通省（旧建設省）発行の流量年表から、北海道の流量観測地点のうち20年以上継続して観測が行われている42地点の年最大流量（ m^3/s ）を抽出した。観測年数の平均は39.7，最大は49であった（図-1）。このデータは、流量の人為操作や人工構造物の影響を受けられていると考えられるが、本研究ではこの流量データをそのまま使用して解析した。なお、流域面積の頻度分布は図-2に示すとおりで、234～12700 km^2 ，平均2100 km^2 である。

葛葉ほか(2001b)¹³⁾は平均月流量の分布特性により、日本全国の河川（流量観測地点）を6種類の水文レジムに分類しており、北海道では3種類の水文レジムが出現する（図-3）。Hタイプは春に年最大月流出量が現れるタイプであり、全42観測地点のうち39地点と大部分を占める。春に年最大月流量が現れるという事は、融雪出水による洪水流量が卓越していることを示す。ただし、このレジム区分は平均月流量として表現しているため、低頻度の台風にとまなう豪雨の存在は必ずしも表現さ

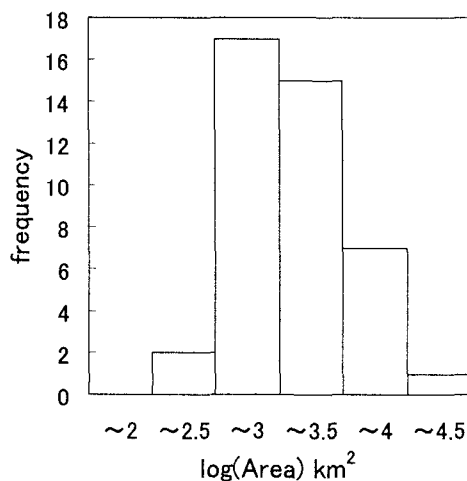


図-2 解析に用いた流量観測地点の流域面積.

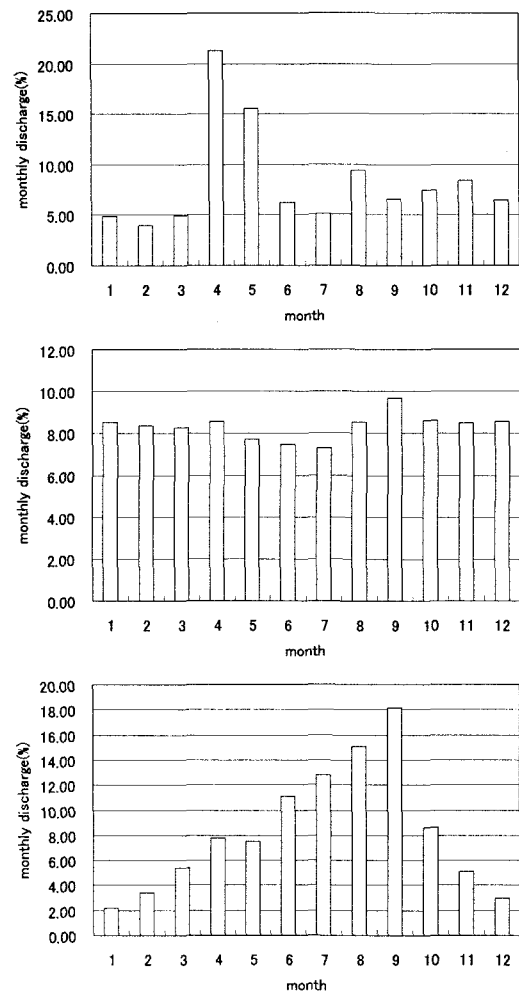


図-3 北海道に現れる水文レジム（葛葉ほか,2001b）.
上からレジム H, C, S.

れていない。Cタイプは、年間を通して月流量の変化が小さく、北海道地域では西越と弟子屈の2地点が該当する。最後にSタイプは、春以外の時期に月流量が大きく、12～5月の半年流量が年流量40%以下である地域と定義されている。該当する観測地点は音更の1地点のみである。

3. 確率水文量の計算方法

年最大流量データを確率分布モデルにあてはめ、T年確率の洪水流量を計算した。Rolling (1999)¹⁴⁾では代表的な確率分布モデルである一般化極値分布と対数正規分布の2種類を当てはめているが、本研究では、次の確率分布モデルとその母数推定法の組み合わせ、計7通りを用いた；グンベル分布（積率法【Gm】，L積率法【GL】），ピアソンⅢ型分布（積率法【P3】），対数ピアソンⅢ型分布（原標本の積率解【LP3Rs】，対数標本の積率解【LP3Ls】），一般化極値分布（L積率法【GEV】），対数

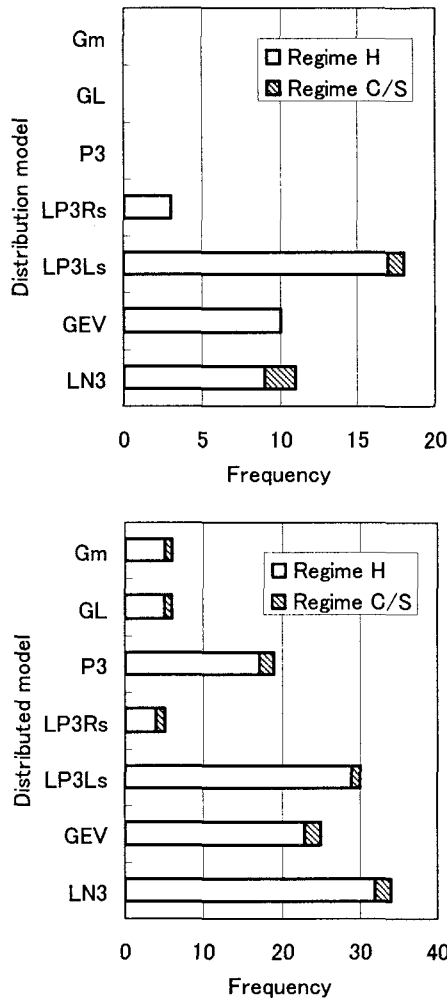


図-4(上) 適用された確率分布モデルのヒストグラム
 図-4(下) SLSC≤0.04 となる確率分布モデルのヒストグラム

正規分布 (岩井法【LN3】). 各確率分布モデルでの解法については, 主として神田・藤田(1982)¹⁵⁾, 星(1997)¹⁶⁾を参考にした.

これらの確率分布モデルによる予測値の適合度を, 高棹ほか(1986)¹⁷⁾や宝・高棹(1988)¹⁸⁾の標準最小二乗規準 (SLSC) を用いて比較し, SLSC が最小となるモデルの推定値を採用した.

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|S_{0.99} - S_{0.01}|} \quad (1)$$

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - S_i^*)^2 \quad (2)$$

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 : 標本数, S_i : 順序統計量を推定母数で変換した標準変量, S_i^* : プロット

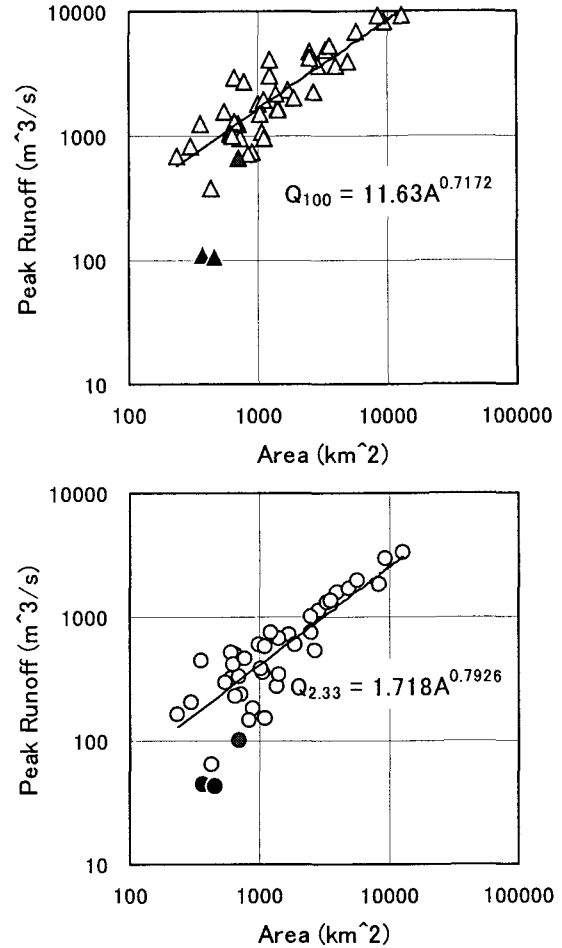


図-5 流域面積と確率洪水流量の関係.
 (上) T=2.33 年, (下) T=100 年. 白, 黒, 灰色はそれぞれ水文レジム H,C,S を示す.

イングポジション (本研究では Cunnane の公式を用いた) に対応した理論 quantile を推定母数によって変換した標準変量である.

北海道全体では, 採用頻度が高い確率分布モデルと母数推定法の組み合わせの順位は【LP3Ls】,【LN3】,【GEV】の順であったが, レジム H 地域に限ると【LP3Ls】,【GEV】,【LN3】である (図-4 の上). また北海道のレジム H において採用された確率分布モデルの順位は田中・宝(1999)¹⁹⁾の結果と, 上位 3 つは同じであった. 一方, この SLSC は 0.04 以下であれば, 比較的適合度が良いと指摘されており¹⁹⁾, SLSC ≤ 0.04 となるすべての確率分布モデルの頻度分布を図-4(下)に示すと【LN3】が最も頻度が高く, 【LP3Ls】や【GEV】に比べて多くの観測地点で適合しやすいモデルであるといえる.

4. 水文レジム H 地域におけるスケーリング

最適確率分布モデルから推定された 2.33 年, 100 年確

表-1 水文レジムH地域における流域面積と確率洪水流量の関係式の係数。

T(yr)	a	θ_p
2	1.496	0.799
2.33	1.718	0.793
10	4.323	0.754
25	6.629	0.738
50	8.863	0.727
75	10.410	0.721
100	11.633	0.717

率洪水流量と流域面積の関係はベキ関数で近似され、スケーリング式を求めることができた。図-5 に流域面積と確率洪水流量の散布図を水文レジム別に異なるマークで示した。2.33 年確率の流量は平均年最大流量と理論的に等しい。北海道の大部分を占めるレジム H に属する観測地点における、各確率年と確率洪水流量の関係にはばらつきが見られるが、大局的には両対数グラフ上で直線に近似された。レジム H の地点のみから再現期間ごとに回帰直線を計算し、洪水流量のスケーリング式

$$Q_p = aA^{\theta_p} \quad (3)$$

の定数を求めた (表-1)。ここで、 Q_p は非超過確率 p の洪水流量(m^3/s)、 A は流域面積(km^2)、 a と θ_p は定数で、

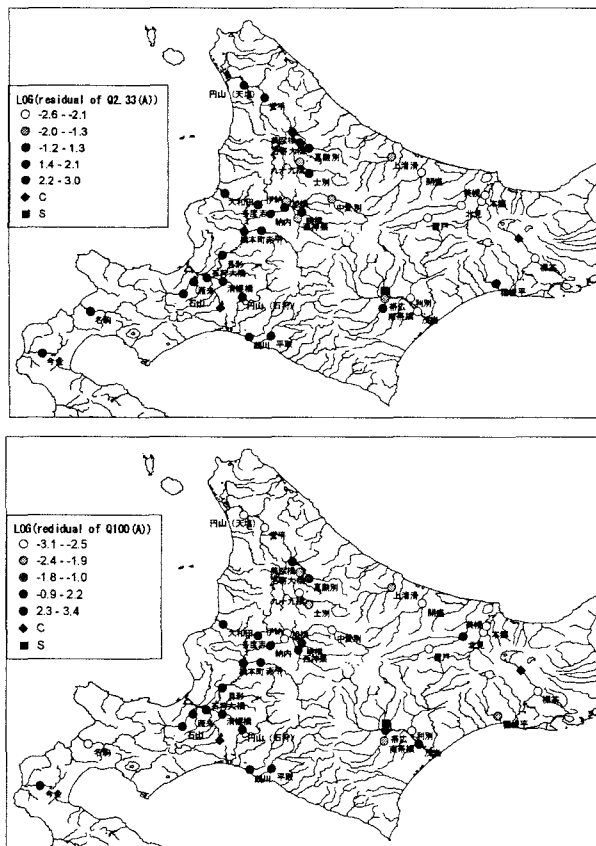


図-6 残差の空間分布。
(上) $T=2.33$ 年, (下) $T=100$ 年

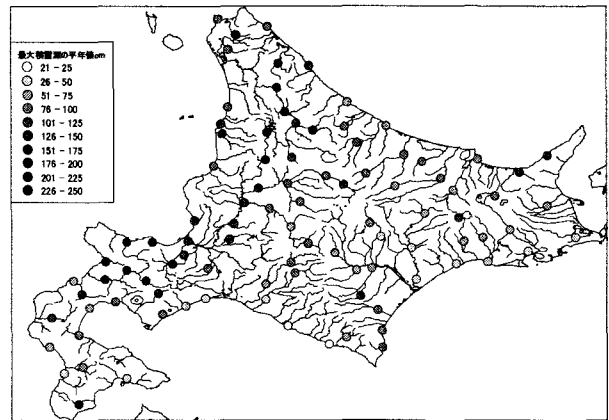


図-7 平均年最大積雪量分布。
アメダスの平年値データより作成

θ_p を特にスケール指数と呼ぶ。

スケール指数 θ_p は T の増加にともなって若干減少しているもののほぼ等しい値を示し (表-1), simple scaling が成立するといえる。スケール指数 θ_p が T (もしくは p) によらず一定になる場合、洪水流量の simple scaling が成立し、大きく変化する場合は multiscaling が成立するという。融雪出水や空間的に様な降雨に起因する洪水流出が卓越する地域では simple scaling が成立する事が指摘されている^{20), 13)}。Gupta and Dawdy (1995)²⁰⁾では、豪雨による洪水発生地域の 100 年確率のスケール指数に対する 2 年確率のその比は 0.61~0.70, 融雪流出地域でのその比率は 1.03~1.04 であった。本研究でのその比率は 0.90 と示すが Gupta and Dawdy (1995)²⁰⁾の融雪流出地域での値により近い。この中間的な値の原因としては、北海道においても頻度が低いながらも春季以外の豪雨による洪水が発生することがあり、これらのデータを分離すればより高い精度で simple scaling が成立すると推測される。

レジム C に属する 2 地点はレジム H のグループから大きく外れた位置にプロットされており (図-5), 洪水流量が相対的に小さいことを示している。これはレジム C の平均月流量分布が特定の時期に集中しないということと調和的であり、流出特性の違いが明確に現れた例である。

5. 北海道地域での地域洪水頻度解析

レジム H 地域における流域面積と確率洪水流量のばらつきは積雪量と関係している。各観測地点における回帰直線との残差の対数値の分布を地図上に示した (図-6)。残差は西部では正の値を得ることが多く、道南に位置する今金では特に値が高い。一方、東部では負の値をとる場合が多く、明らかに地域依存性が見られる。ま

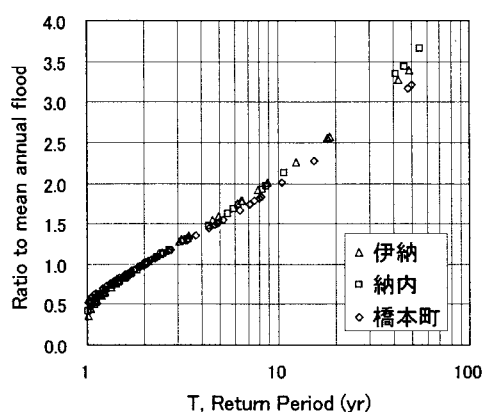


図-8 石狩川3観測地点における地域洪水頻度曲線。

た、アメダスの平年値データより作成した平均年最大積雪量の分布は西高東低の傾向を示し（図-7）、前述した洪水流量の残差分布の傾向と大局的に一致する。したがって、レジム H では春季の融雪出水による洪水が年最大流量に寄与しているため、冬季積雪量や春から初夏にかけての降水量分布などの気象条件と関連していると推測される。

レジムHの中で残差がほぼ等しい、石狩川中流域に位置する伊納、納内、橋本町について RFFA を行った結果、ばらつきの少ない良好な地域洪水頻度曲線を作成することができた（図-8）。この図は Dalrymple (1960)²⁾、Linsley et al. (1975)²¹⁾ などの研究例に基づいて作成したものであり、横軸は確率年、縦軸は回帰直線から計算した平均年最大流量に対する個々の観測流量の比を示す。これら3観測地点は地理的位置が近く、流域面積も最大で1.6倍の違いしかないため、曲線が非常に良く一致したものと考えられる。一方、観測地点間の距離が遠い場合には、地域洪水頻度曲線は重ならないこともあった。

RFFAにより、観測年数が不足している地点や未観測地点において、より高精度に洪水流量を予測できるが、本研究で用いた水文レジムによる河川流域区分だけでは homogeneity の基準が緩いため、分解能の高い分類方法が必要と言える。回帰直線からの残差のみならず、平均最大洪水流量に対する各確率洪水流量の比も観測地点ごとに異なる（図-9）。平均洪水流量の非超過確率を m とすると、(3)式より以下のように示される。

$$Q_m = a'A^{0m} \quad (4)$$

ここで、 $1/m = 2.33(\text{yr})$ とすると(3)、(4)式と表1から、 $p=0.99$ の場合次式が導かれる。

$$Q_p/Q_m = 6.771A^{-0.076} \quad (5)$$

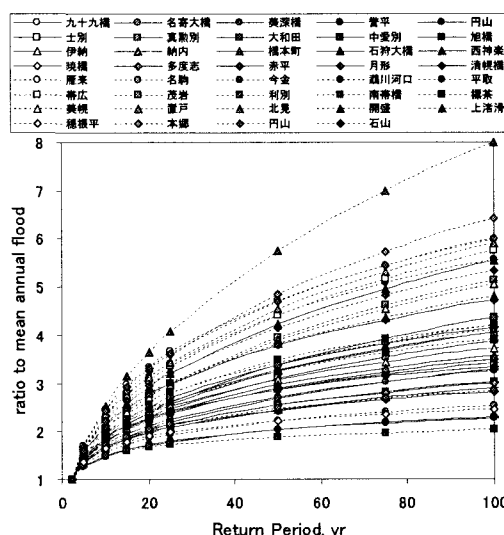


図-9 確率年に対する洪水流量の変化。

$A=1000, 10000(\text{km}^2)$ の場合、右辺の値は 4.005, 3.3624 となり、両者の比は 1.1913 となる。したがって、流域面積の影響によって 100 年確率洪水流量が 1.19 倍異なる可能性を示している。また、Rolling (1999)¹⁴⁾ はアイルランドで4種の homogeneity を有する地域に区分し、流域面積のほか、湖および湿地面積の関数から洪水流量の計算を行った。また Smith (1989)²²⁾ は地質条件との関係を示した。これらの研究のように地域洪水頻度曲線が大きくずれる観測点については、気象条件や地質・地形条件で補正式を作成することで洪水流量を予測することができると考えられ、今後の課題としたい。

6. 結論

7 種類の方法から最適な確率分布モデルを定め、融雪流出卓越地域でのスケール指数を計算した結果、葛葉ほか(2001b)の定義による融雪流出が卓越する水文レジム H に属する地点の確率洪水流量は、レジム C のそれと明瞭に区別され、simple scaling がほぼ成立することが再確認された。また、同一河川など条件が良い地点間ではより高い精度で地域洪水頻度曲線を作成することが確かめられた。一方で、レジム H 地域内のスケール指数が確率年によって変化する原因としては、豪雨により引き起こされる洪水が低頻度ではあるが存在することに起因し、また回帰直線からの確率洪水流量の残差は積雪量などの気象条件の空間分布が反映されていると考えられ、さらなる検証を要する。

参考文献

- 1) Gupta, V. K. and Waymire, E. D.: Spatial variability and scale

- invalence in hydrologic regionalization, *Scale dependence and scale invariance*, ed. Sposito, G., Cambridge University Press, pp. 88-135, 1998.
- 2) Dalrymple, T.: Flood-frequency analysis, *U. S. Geological Survey, Water Supply Paper*, **1543-A**, 1960.
 - 3) Dalrymple, T.: Regional flood frequency, *High. Res. Board. Res. Rep.*, **11-B**, pp. 4-20, 1950.
 - 4) Landwehr, J. M. and Metalas, N. C.: Quantile Estimation with more or less flood like distributions, *Water Resources Research*, **16**, pp. 547-555, 1980.
 - 5) Gries, N. P. and Wood, E. F.: Regional Flood Frequency Estimation and network design, *Water Resources Research*, **17**, pp. 1167-1177, 1981.
 - 6) Jaiswal, R. K., Goel, N. K., Sinh, P. and Thomas, T.: L-moment based flood frequency modeling, *Journal of the Institution of Engineers (I)*, **84**, pp. 6-10, 2003.
 - 7) Guttman, N. B., Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R.: Regional precipitation quantile values for the continental U. S. computed from L-moments, *Journal of Climate*, **6**, pp. 2326-2340, 1993.
 - 8) Nguyen, V. T. V., Nguyen, T. D. and Ashkar, F.: Regional frequency analysis of extreme rainfalls, *Water Science & Technology*, **45(2)**, pp. 75-81, 2002.
 - 9) Mathiesen M., Goda Y., Hawkes P.J., Mansard E., Martin M.J., Peltier E., Thompson E.F., Van Vledder, G.: Recommended practice for extreme wave analysis, *Journal of Hydraulic Research*, **32**, pp. 803-814, 1994.
 - 10) Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R.: Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resources Research*, **29**, pp. 271-281, 1993.
 - 11) Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R.: *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*, Cambridge University Press, New York, 224p, 1997.
 - 12) 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄: Simple scaling が成立する地域での洪水流量のスケーリング, 第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 478-479, 2001a.
 - 13) 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄, 早野美智子: 水文レジムによる河川流域区分, 水文・水資源学会誌, **14**, pp. 131-141, 2001b.
 - 14) Rolling, K.: Regional flood frequency analysis for the Island of Newfoundland, *Government of Newfoundland and Labrador, Department of Environment and Labour, Water Resources Division*, 122p, 1999.
 - 15) 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—, 技報堂出版, 275p, 1982.
 - 16) 星 清: 水文頻度解析, 水文・水資源学会編「水文・水資源ハンドブック」, 朝倉書店, pp. 238-248, 1997.
 - 17) 高埴琢馬, 宝 馨, 清水 章: 琵琶湖流域水文データの基礎的分析, 京大防災研年報, **29B-2**, pp. 157-171, 1986.
 - 18) 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, **393II-9**, pp. 151-160, 1988.
 - 19) 田中茂信, 宝 馨: 河川流量の頻度解析における適合度と安定性の評価, 水工学論文集, **43**, pp. 127-132, 1999.
 - 20) Gupta, V. K. and Dawdy, D. R.: Physical interpretations of regional variations in the scaling exponents of flood quantiles, *Hydrological Processes*, **9**, pp. 347-361, 1995.
 - 21) Linsley, R. K. Jr., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H.: Streamflow hydrographs, *Hydrology for Engineers second edition*, Linsley, R. K. Jr., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H. eds., McGraw-Hill Inc, New York, 223-256, 1975.
 - 22) Smith, J.: Regional flood frequency analysis using extreme-order statistics of the annual peak record, *Water Resources Research*, **25**, pp. 311-317, 1989.

(2003.9.30 受付)