

規準化渇水持続曲線による降雨・流量・年輪資料の解析

Standardized Drought Duration Curve Analyses of
Precipitation, Streamflow And Tree-Ring Index Series

山梨大学工学部 正員 竹内邦良

1. はじめに

渇水持続曲線は時系列の低位持続特性を確率的に表わす水文統計量である。その性質を利用して貯水池等、水資源の管理に利用される一方¹⁾、水文統計量自体としても、渇水時の持続特性を雄弁に表現する能力をもっている。筆者はその能力を利用する一つの方法として渇水持続曲線差 (DDCD) を定義し、日本および世界の降水時系列、流量時系列に適用した。この結果 DDCD は、自己相関々数では表現出来ない、水文時系列の低位持続特性を抽出して示すこと²⁾、流出の背景をなす地形・地質の特性をも表現すること³⁾、などを示した。この DDCD では、原水流量を正規変換し white noise の渇水持続曲線からのずれによって持続特性 (correlation effect) のみを抽出するという手続きをとったが、本稿では、このように迂遠な手順を踏まずとも、各水文時系列の平均値について規準化 (scale effect のみ除去) するだけで、その持続特性を明らかに読みとることが出来ることを示す。

適用資料 (Table 1)

解析対象資料としては、世界各地の降雨・流量資料の他に年輪資料も加え、各地域の地理的水文・気象特性が渇水持続曲線にいかに関わり、またそれをいかに読み取れるかを検討した。用いた資料は、日本では豪雪地帯新潟県の三面ダムおよび石灰岩地帯の山口県厚東川ダムでの、日降水量、日流量、国外ではポーランド Warta 川の Poznań 市地点での日流量、半砂漠地帯アリゾナ州 Gila (ヒラ) 川流域内各地の日降水量、日流量および年輪資料である。

2. 規準化渇水持続曲線の定義

規準化渇水持続曲線 (Standardized Drought Duration Curve : SDDC) を以下のように定義する。

$$f_k(m) = k\text{-th smallest}_{j=1, \dots, N} \cdot \min_{t_1 \in j\text{-th year}} \frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q_t / \bar{q} \quad (1)$$

$$P_k = 1/T_k = k/(N+1) \quad (2)$$

ここに q_t : t 時点の水文学量、 $\bar{q}$: 全観測期間 N 年以内での q_t の平均値、 P_k : m 日平均が $f_k(m)$ を超えない確率、 T_k : 同確率年。これは本来の渇水持続曲線 $f_k(m)$ を時系列平均値 $\bar{q}$ で除しただけのものである。

時系列が 1 年単位で与えられているものについては (1) の右辺の $\min$ の operation は不要であり、単純に

$$f_k(m) = k\text{-th smallest}_{j=1, \dots, N-m+1} \frac{1}{m} \sum_{t=j}^{j+m-1} q_t / \bar{q} \quad (3)$$

$$P_k = 1/T_k = k/(N-m+2) \quad (4)$$

と表わされる。

3 解析結果

3.1 豪雪地帯および石灰岩地帯の渇水持続特性 (Fig. 1 a, b, Fig. 2 a, b)

三面ダムは1952年完成した新潟県管理の多目的ダムで、集水面積 305.7 km²、有効貯水量 3294 万 m³である。豪雪地帯で、年平均降水量は 2934 mm である。一方厚東川ダムは1948年完成山口県管理の多目的ダムで、集水面積 324.0 km²、有効貯水量 2254 万 m³である。流域は秋吉台を含み石灰岩地帯である。気候は山陰型であり、年平均降水量は 1713 mm である。

両地点の SDDC をみると、かなり違っている。雨については三面は立上がり部が急であること、1年以内での確率年によるばらつきが小さいことなどから、厚東川に比べ三面は年間の全降水量が倍近いのに加え安定性も高いことがわかる。この事情は流量に変換されるとさらに著しく、三面の流量の確率年によるばらつきは降雨よりも小さくなっているのに対し、厚東川におけるそれはかえって拡大されている。三面の場合のような流量の平滑化の事情は、同じく融雪地帯である青森県沖浦ダム地点についても観察された。なお、厚東川の例が石灰岩地帯からの流出の一般的特徴であるかどうかについては、更に検討が必要である。

3.2 ポーランド大陸河川の渇水持続特性 (Fig. 3)

Warta 川はポーランド・東ドイツ国境をバルト海へ流入するオーデル川の東支流で、Poznań 地点での流域面積は 25,083 km² である。冷温帯気候の大陸性混合林気候区に属し、Poznań で年降水量約 500mm、年流出量は平均約 30 億 m³ である。渇水持続曲線を見ると他の地点に比べ著しく低位持続性が高く、平均期間長 1 年では確率 20% で通年平均の 50% 程度、2 年平均でも 65% 程度になることがわかる。また確率年によるばらつきも期間長が長くなっても非常に大きいこともわかる。

この原因は、まず一つには年変化がかなりはげしいことによると考えられる。他の河川と比べると、三面の年流量の変動係数が 0.12、厚東川が 0.26 (他に綾北ダム地点 0.26、沖浦ダム地点 0.12) であるのに対し、Warta 川では 0.35 である。チェコ国境の山岳地帯における積雪状態により、融雪期における出水量が変動するのが大きく影響するものと思われる。さらにまた長期にわたる降雨の多少が、大流域の中でさらに平滑化され、長期傾向としては増巾されてあらわれることも考えられる。

3.3 半砂漠地帯での渇水持続特性

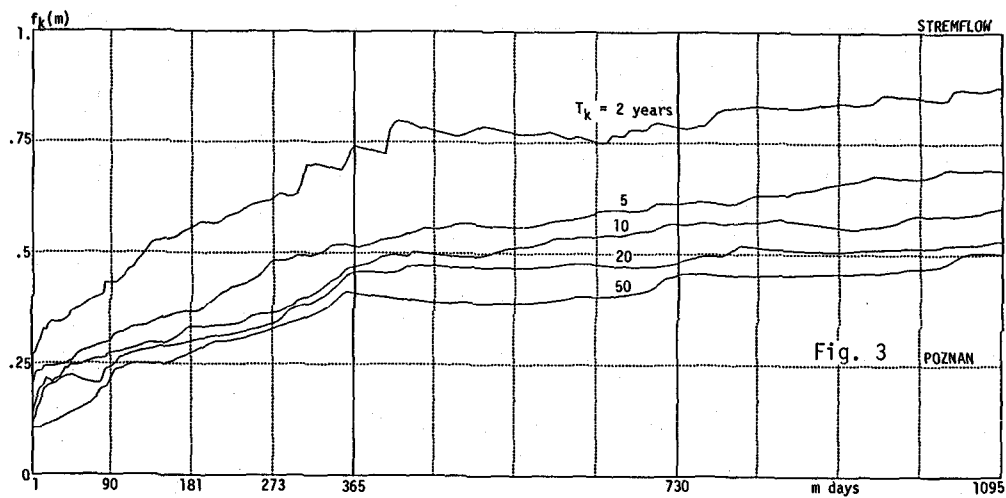
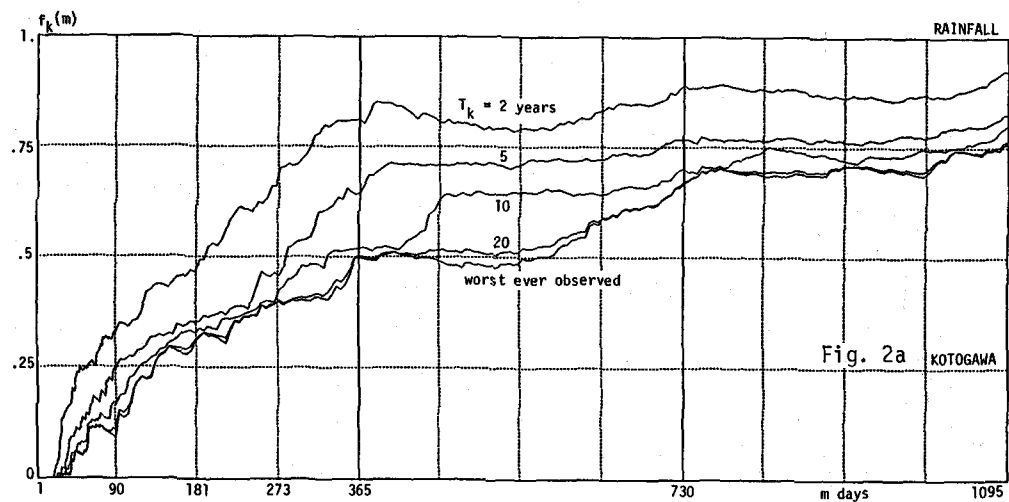
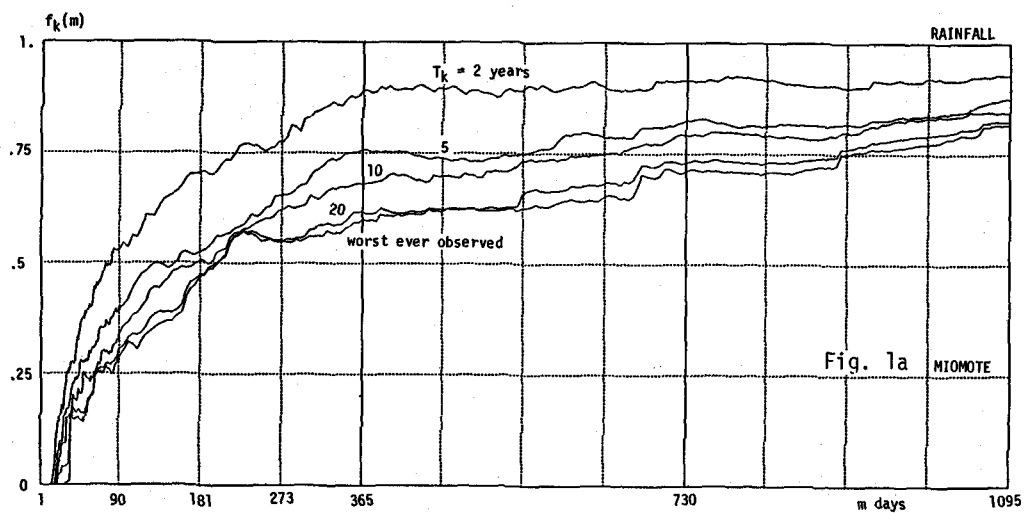
アリゾナ州南部は年降水量 200~400mm 程度の半砂漠地帯である。年変化は太平洋気団の影響による地中海性気候、すなわち冬～春比較的安定した降雨があり、4~10 月は乾季になるというパターンの上に、7~8 月を中心にメキシコ湾からのモンスーンによりもたらされる多量の降雨を重ねたものになっている。桁はずれの大雨はこのモンスーンによりもたらされるものである。この雨により Tucson 市など都市化した地域の wash はしばしば橋梁・住居をおし流し、大きな洪水被害をもたらす。また 4~6 月、9~10 月には無降雨、無流量状態のあらわれることが多い。

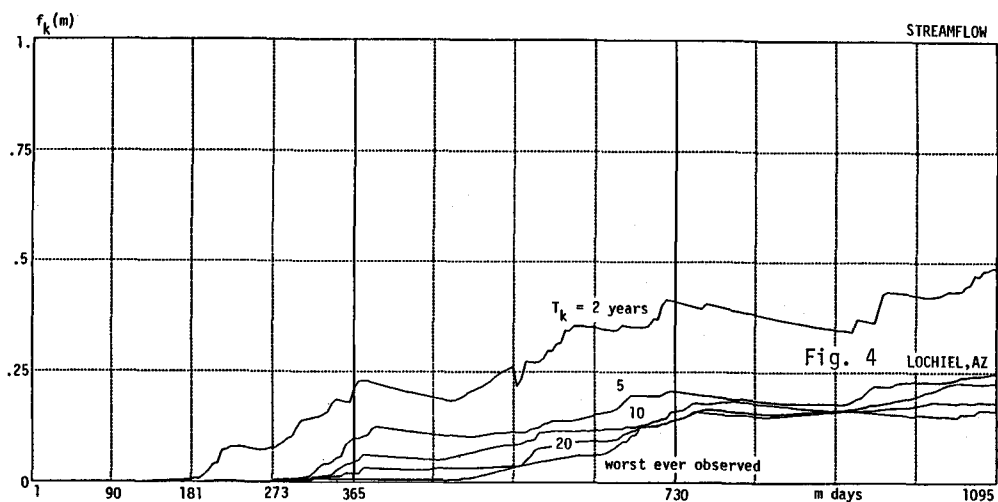
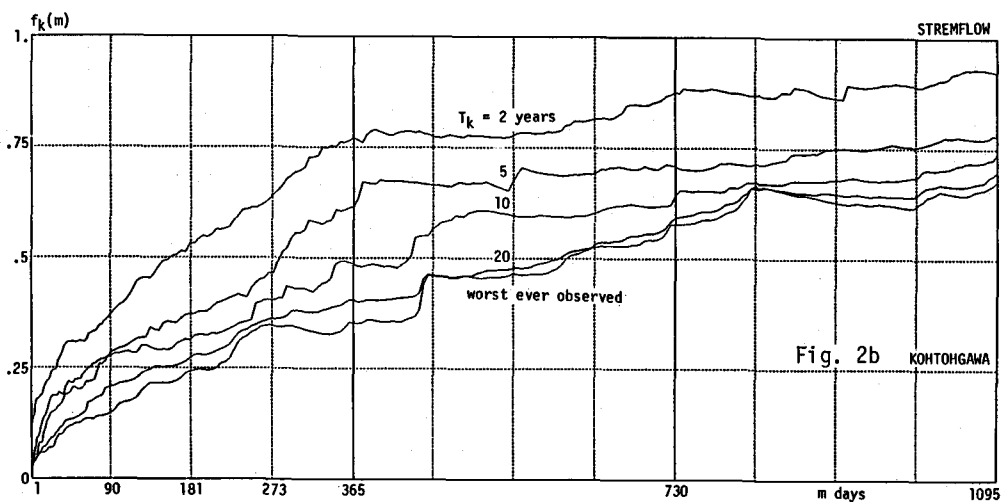
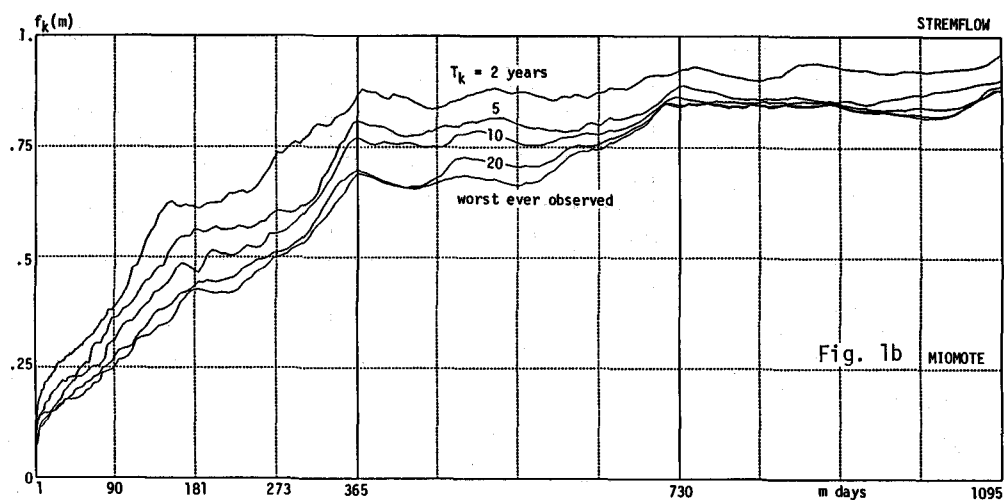
Lochiel 地点の流量 (Fig. 4)

Lochiel はコロラド川最南端の左枝である Gila 川流域の南支川、Santa Cruz 川の最上流部 212.9 km² 地点で、メキシコ国境に位置している。すぐ西の国境の町 Nogales の降水量は 390mm である。全体の平均は 3.46 cfs であるが日単位の標準偏差が 30.17 cfs でもあることからわかるように、この川は wash であって一年中流出があるわけではなく、流れるときでもそのばらつきは極めて大きい。SDDC は流量のものとしては異常に低く、2~3 年の長期にわたる平均値であっても、50% の確率で全体の平均値の $1/3$ 、20% の確率では全体の平均の $1/5$ となっている。これは全体の平均が、ごくまれにおこる桁はずれの大洪水に大きく左右されるためである。年流量の変動係数は実に 1.15 である。

Roosevelt 地点の降水量 (Fig. 5)

Gila 川流域の東部支流、Salt 川の、流域面積 11,153 km² 地点に築造された Roosevelt ダム地点での降水記録である。年平均は 401 mm である。日本のどの地点の雨の SDDC と比較しても、長期に





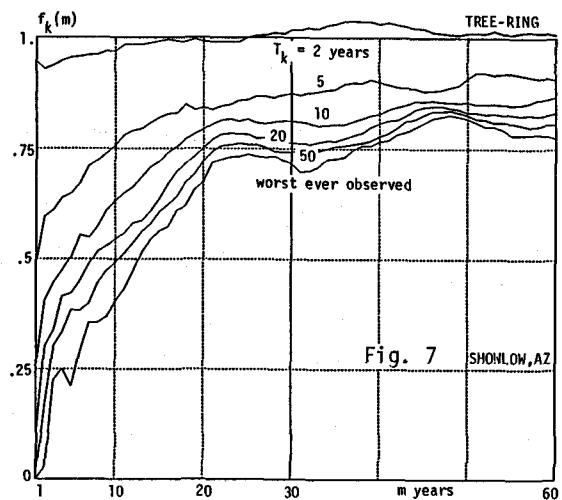
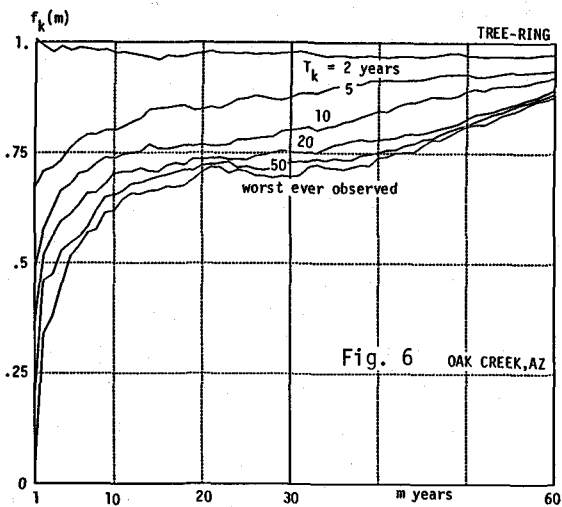
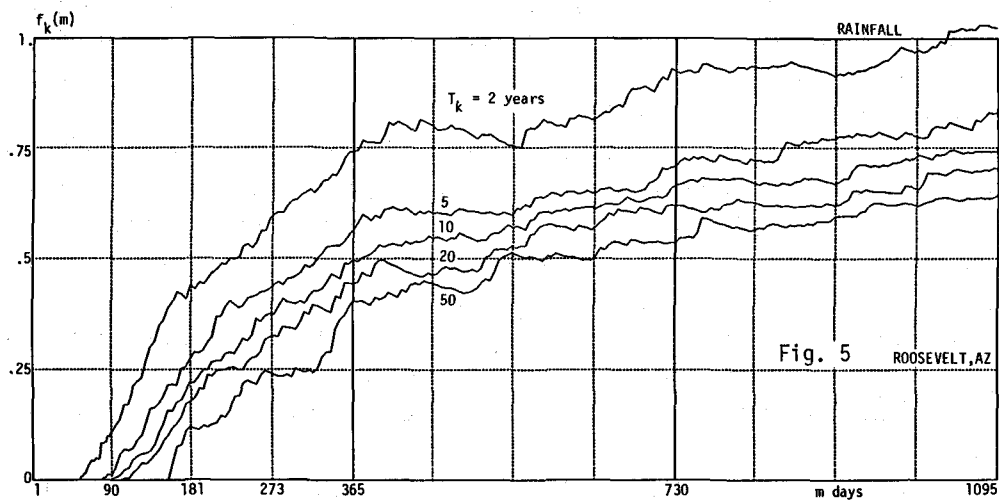


Table 1 List of Data Analyzed

Station	Daily Precipitation annual (x,s) mm	Daily Streamflow (x,s) m ³ /s	Tree-Ring
Miomote, Aomori, Japan	1953.1 - 1983.12 (2934, 438)	1953.1 - 1983.12 (37.8, 4.4)	
Kohtohgawa, Yamaguchi, Japan	1953.1 - 1983.12 (1713, 331)	1953.1 - 1983.12 (11.9, 3.1)	
Poznań, Poland		1915.11 - 1965.10 (95.0, 33.7)	
Roosevelt, AZ, USA	1905.7 - 1983.12 (401, -)		
Lochiel, AZ, USA		1949.1 - 1984.6 (0.0984, 0.113)	
Oak Creek, AZ, USA			1749 - 1979
Showlow, AZ, USA			1649 - 1979

わたる低位持続特性は顕著である。なお、平均期間長 3 年付近で 2 年確率では 1 を超えた値を示しているが、これは 2 年確率（非超過確率 50%）値を順序統計の中央値（median）としているため、それが平均値より大きい値となっているためである。

3.4 年輪の低位持続特性（Fig. 6, Fig. 7）

アリゾナ州の Salt River ならびにその西に隣接する Verde River 流域付近における年輪指標を SDDC 解析した。両流域はアリゾナ州のほぼ中央に位置し、Gila 川の北東の支流域に当たっている。年輪の研究は 1900 年前後に、太陽物理学者 A. E. Douglass により太陽黒点の長期変化を知る資料の検討として始められ、その後彼自身により 1938 年アリゾナ大学に年輪実験所が開設され dendrochronology として発展している。

年輪は植物の種類、個体の成長パターン等に伴う特殊条件を修正規準化しなければ気候時系列としての意味をもたない。その修正方法は適当な期間長での移動平均に対する各年の年輪巾の比をとることを基本とするが、厳密にはかなり複雑であり⁴⁾、ここでは上記実験所で算定された指標（treering indices）をそのまま用いた。

他の水文 SDDC と比較できる 3 年分のところまでで見ると、雨、流量に比べ確率年によるばらつきは極めて大きい。10 年平均で見ても、このばらつきは相当大きく、50 年確率では平均の 50～65%、10 年確率でも 60～70% であることがわかる。確率年 2 年（非超過確率 50%）が平均期間長 1 年からすでにほぼ平均に近くなっているのは年輪指標が移動平均に対する比の形で与えられていることによるためであろう。

謝辞

本研究に当っては内外諸機関および諸先生方から多くの貴重な資料を提供いただいた。ことにポーランドの Warta 川の資料については Prof. Kaczmarek, Polish Academy of Sciences, また Arizona 関連資料については Prof. N. Buras, Dept. of Hydrology & Water Resources, Univ. of Arizona に地点の選定、機関の紹介等の労を賜った。Prof. Stockton, Lab. of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona には貴重な年輪資料を提供いただいた。以下に関係機関名を列記し、深甚なる謝意を表する。

山口県。新潟県。USGS, Arizona District Office, Tucson, AZ. NOAA, National Climatic Data Center, Asheville, NC. Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences. Lab. of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona.

なお本報告に図で示したものは、提供に与ったもののごく一部であり、さらに包括的かつ十分な発表の機会をつくり御好意に応えたい。

参考文献

- 1) 竹内・富田・伊藤：給水用貯水池のための DDC ルール・カーブ、水理講演会論文集、第 28 回、1984 年 2 月、pp. 21～26。
- 2) Takeuchi, K., Autocorrelation Structure of Monthly Precipitation Series Detected by Drought Duration Curve Differences, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 1, No. 1, April, 1983, pp. 97～107.
- 3) Takeuchi, K., Drought Characteristics of Daily Streamflow Series Detected by Drought Duration Curve Differences, Proc. of 4th Intern. Symp. on Stochastic Hydraulics, IAHR, Urbana, Ill., July, 1984.
- 4) Fritts, H. C., Tree Rings and Climate, Academic Press, 1976.