

統合渇水指標 (CDI) を用いた新潟県内信濃川流域における 渇水特性の時空間評価

長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学分野 2 年 ○吉川 広大
長岡技術科学大学 正会員 細山田 得三

1. 緒言

気候変動に伴う高温や少雪^[1]は、水資源管理を困難にする。特に、少雨や高温等に伴って土壌水分、河川流量など複数の水文要素が同時に低下する干ばつを把握するには、単一の物理量による評価だけでは不十分である^[2]。そこで本研究では、気象、土壌および水文の各要因を統合した統合渇水指標 (Comprehensive Drought Index : CDI) を構築し、新潟県内信濃川流域における干ばつ特性を時空間的に評価した。

まず地点ごとの CDI 時系列から干ばつイベントを抽出する Point 解析を行った。しかし、Point 解析では同一時期に複数地点で発生した干ばつが地点ごとのイベントとして個別に抽出されるため、地点イベントの継続期間や深刻度の単純比較では広域的な干ばつの特徴を把握しにくい。そこで、203 地点に占める干ばつ地点の割合を用いる Regional 解析を導入し、干ばつの空間的な広がり进行评估した。さらに、既往の干ばつ記録との対応性を F1 スコアで評価し、判定閾値を決定した。

2. 対象領域およびデータ

対象領域は新潟県内の信濃川流域とし、約 5 km 間隔で配置した 203 地点の仮想観測点を用いた (図-1)。

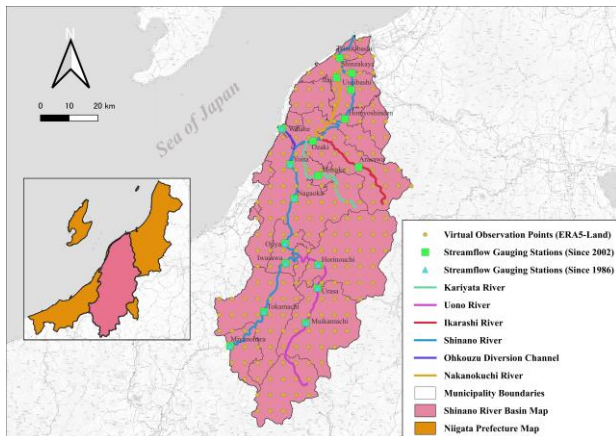


図-1 対象領域および 203 地点の仮想観測点

解析期間は 1987 年 1 月から 2023 年 12 月までとした。CDI は、流量観測所の月平均流量^[3]から算出

した SDI、気象観測所の降水量および気温^[4]から算出した SPEI、各仮想観測点の ERA5-Land^[5]土壌体積含水率から算出した SSMI を EWM (Entropy Weight Method)^[6]により統合した。土壌水分は第 1 層 (L1:0~7cm) を使用した。算出した SDI および SPEI は QGIS^[7]の逆距離加重法 (IDW)^[8]により 203 地点へ空間配置した。なお、ERA5-Land の水平解像度は約 9 km (0.1°) であり、5 km 間隔の仮想観測点の一部は同一格子の値を共有する。

3. 解析手法

3.1 構成指標の算定および CDI の構築

本研究では、気象、水文および土壌水分の各側面から干ばつを評価するため、SPEI、SDI および SSMI を用いた。いずれもタイムスケール (以下、TS) 1, 3, 6, 12 か月 (以下、それぞれ TS1, TS3, TS6, TS12) について算出した。

SPEI は、降水量と潜在蒸発散量 PET との差である水分収支を基礎とし^[9]、PET を Thornthwaite 法^[10]により算出した。各 TS の累積水分収支に三母数 Log-logistic 分布を適合させ、累積確率を標準正規分布へ変換した^[11]。

SDI は、各流量観測所の月平均流量から各 TS の累積流量を求め、全期間の平均値および標準偏差を用いて標準化した^[12]。

SSMI は ERA5-Land の土壌体積含水率 (L1) から各 TS の平均土壌水分を算出し、Gamma 分布を適合させ、累積確率を標準正規分布へ変換した^{[13][14]}。

算出した 3 指標の統合には EWM を用いた。各指標を正規化した後、情報エントロピー^[15] E_j から発散度

$$D_j = 1 - E_j$$

を求め、指標の重みを

$$w_j = \frac{D_j}{\sum D_j}$$

として算出した。最終的な CDI は、

$CDI = w_{SPEI} \times SPEI + w_{SDI} \times SDI + w_{SSMI} \times SSMI$ とした。

3.2 Point 解析

構築した CDI の時系列に対して Run 理論^[16]を適用し,地点ごとの干ばつイベントを抽出した.切断レベルは $CDI = -0.5$ とし,継続期間が 3 か月以上,またはピーク強度が -1.0 以下となるイベントを抽出対象とした.また,1 か月のみ閾値を上回る中断については同一イベントとして結合した.各イベントについて継続期間(Duration)および深刻度(Severity)を算出した^[17].

3.3 Regional 解析および DAR

Point 解析では同一時期の干ばつが地点ごとに別イベントとなるため,空間的な広がり进行评估する Regional 解析を行った.各 TS の各月について,203 地点のうち CDI が -1.0 以下となった地点の割合を Drought Area Ratio(DAR)として,

$$DAR = \frac{CDI \leq -1.0 \text{ となった地点数}}{203} \times 100$$

と定義した.DAR を月ごとの時系列として整理し,広域的な干ばつの発生状況を評価した.Regional イベントは,DAR が設定した閾値以上となる状態が 3 か月以上連続する期間とした.1 か月のみ閾値を下回る中断は結合せず,別イベントとして扱った.

各 TS で抽出した Regional イベントについて,4 つの TS のうち 3 つ以上で開始年が同一イベントが抽出された年を Regional 干ばつ年とした.既往の公的資料^[18]に基づき,基準とする干ばつ年(Ground Truth)を 1989,1990,1994,2016,2018,2023 年と設定し,これとの対応性から,DAR 閾値を 1.0~50.0%の範囲で 0.5%刻みに変化させ,F1 スコアが最大となる閾値を探索した.

4. 結果および考察

4.1 Point 解析による干ばつイベントの特徴

203 地点を対象として Point 解析を行い,Severity および Duration の上位イベントを抽出した(表-1).Duration 上位 10 イベントはすべて TS12 であり,2015~2017 年に集中し,最長は 26 か月であっ

た.また,Severity 上位 10 イベントもすべて TS12 であり,1994~1995 年に集中した.最大 Severity は 17.53,Peak CDI は -2.45 であった.

表-1 Point 解析による Severity 上位イベント

順位	発生期間	Duration	Severity
1	1994/7~1995/6	12	17.53
2	1994/7~1995/6	12	17.41
3	1994/7~1995/6	12	17.41
4	1994/7~1995/6	12	17.29
5	1994/7~1995/6	12	17.25
6	1994/7~1995/6	12	17.23
7	1994/7~1995/6	12	17.20
8	1994/7~1995/6	12	17.17
9	1994/7~1995/6	12	17.15
10	1994/7~1995/6	12	17.11

表-1 の上位 10 イベントはいずれも,1994 年 7 月~1995 年 6 月の同一の干ばつに由来する異なる地点のイベントであり,地点イベントのランキングからは広域的な干ばつの発生年度を比較しにくい.そこで,干ばつの広がり直接評価する Regional 解析を併用した.

4.2 DAR 閾値の決定

DAR 閾値を 1.0~50.0%の範囲で 0.5%刻みに変化させ,Ground Truth として設定した 1989,1990,1994,2016,2018,2023 年との対応性を F1 スコアにより評価した.その結果,DAR 35.5~50.0%の範囲で F1 スコア 0.800 が同率の最大値となった(図-2).本研究では,同率の最大値を示した候補から最小の DAR 閾値である 35.5%を採用した.DAR 35.5%における年単位の評価では,TP=4,FP=0,FN=2, TN=31,Precision=1.000,Recall=0.667 となり,1994,2016,2018,2023 年が検出された.1989 年および 1990 年は検出されなかった(図-3).以降の Regional 解析では, $DAR \geq 35.5\%$ を広域干ばつの判定条件とした.なお,F1 スコアは探索範囲の上限(50.0%)まで低下しなかったため,最大値を示す範囲は上限を超えて続く可能性がある.また,これらの性能値は閾値決定に用いた Ground Truth に対する対応性を示すものであり,独立した検証精度ではない.

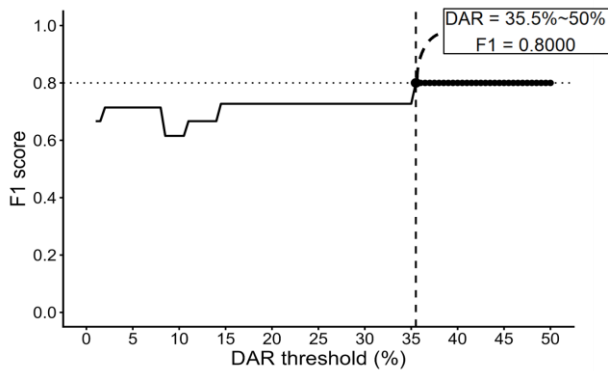


図-2 DAR 閾値と F1 スコアの関係

4.3 Regional 解析による干ばつ年の抽出

DAR $\geq 35.5\%$ を判定条件として Regional 解析を行った結果, TS1 で 1 件, TS3 で 5 件, TS6 で 6 件, TS12 で 6 件, 計 18 件の Regional イベントが抽出された.

4 つの TS のうち 3 つ以上で Regional イベントが抽出された年を Regional 干ばつ年とした結果, 1994, 2016, 2018, 2023 年が該当した. 一方, 2012 年は TS3 および TS6 で当該年を含む Regional イベントが抽出されたものの, 3TS 以上の条件を満たさず, Regional 干ばつ年には該当しなかった. さらに, 各年の 12 か月の DAR を平均し, 4 つの TS について平均した 4TS 年間平均 DAR を算出した (図-3). その結果, 1994 年が 45.59%, 2023 年が 35.41%, 2016 年が 30.38%, 2018 年が 25.39% であり, Regional 干ばつ年に該当しなかった年のうち最大は 2012 年の 20.21% であった.

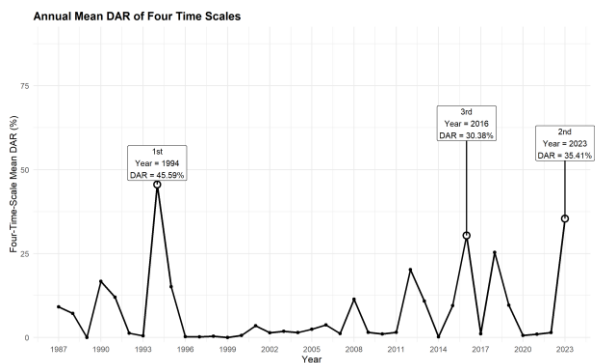


図-3 4TS 年間平均 DAR の経年変化

4.4 代表年における CDI の空間分布

Regional 干ばつ年のうち 4TS 年間平均 DAR が高かった 1994 年と 2023 年を代表年とし, Regional 干ばつ年に該当しなかった年のうち同 DAR が最大であった 2012 年を比較対象とした. 各年について, 4TS で平均した月別 DAR が最大となる月 (1994

年 8 月, 2012 年および 2023 年 9 月) を選び, その DAR は順に 99.14%, 69.09%, 99.88% であった. この 3 か月の TS1, 3, 6, 12 の CDI 空間分布を図-4 に示す.

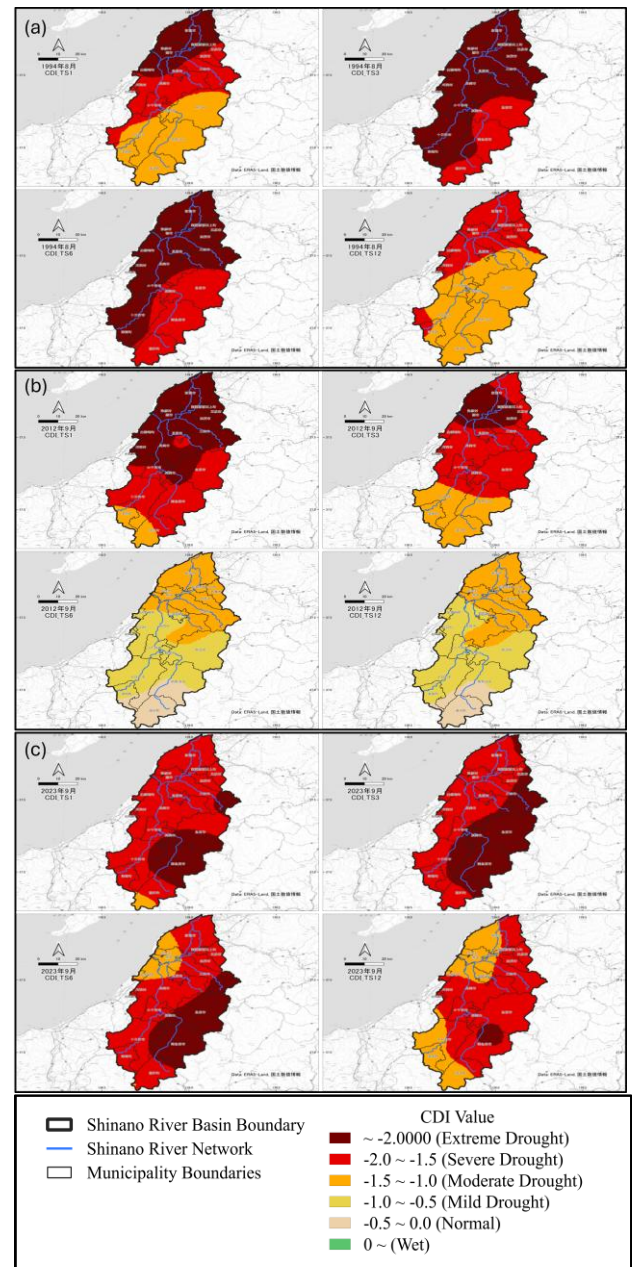


図-4 代表干ばつ年における CDI の空間分布
(a) 1994 年 8 月, (b) 2012 年 9 月, (c) 2023 年 9 月

1994 年 8 月では, TS1, 3, 6 で広範囲に強い渇水が確認され, 特に TS3 および TS6 では流域東部を中心に極端な渇水域が広がった. 一方, TS12 では同地域の渇水強度が相対的に弱く, 長期 TS で渇水域が縮小する傾向がみられた. 2012 年 9 月では, TS1 で広範囲に強い渇水が確認された一方, TS6 および TS12 では流域南部を中心に渇水が弱くなる傾向がみられた. 2023 年 9 月では, TS1, 3, 6 で流域東部を

中心に極端な渇水域が確認された一方,TS12 では極端な渇水域が限定的であった.また,TS1 では流域全体に強い渇水が広がる一方,TS6 では一部地域で渇水が弱まり,TS12 ではさらに渇水域が限定され,TS による分布の違いが確認された.特に TS の増加に伴う変化が明瞭であり,空間分布にも明確な差が生じたことが示された.

以上より,同一の干ばつ年であっても,TS によって干ばつの強度と空間分布が異なった.

5. 結論

本研究では,新潟県内信濃川流域を対象として,203 地点の仮想観測点における CDI を用いて干ばつ特性を評価した.Point 解析では,Duration 上位 10 イベントがすべて TS12 で 2015~2017 年に集中し,最長 26 か月となった.また,Severity 上位 10 イベントもすべて TS12 で 1994~1995 年に集中し,最大 Severity は 17.53,Peak CDI は -2.45 であった.ただし,上位イベントは同一の干ばつに由来する地点イベントであり,地点単位のランキングだけでは広域的な干ばつの年度比較が難しい.そこで Regional 解析を導入し,203 地点のうち $CDI \leq -1.0$ となる地点の割合を DAR として評価した.

Ground Truth として設定した 6 つの干ばつ年を用いて DAR 閾値を探索し,35.5%を採用した.この閾値で Regional イベントを抽出し,4TS 中 3TS 以上でイベントが抽出された 1994,2016,2018,2023 年を Regional 干ばつ年とした.ただし,この閾値は Ground Truth に対する F1 スコアの最大化で決めたものであり,独立した検証ではない.また,1989 年および 1990 年は検出されなかった.

さらに,4TS 年間平均 DAR に基づき 1994 年,2012 年,2023 年を代表事例として選定し,各年の 4TS 平均 DAR が最大となる月を代表月として空間分布を比較した.その結果,1994 年 8 月および 2023 年 9 月では短期から長期まで広域的な干ばつ状態が同時に確認された一方,2012 年 9 月では短期尺度と長期尺度で DAR に大きな差が確認された.以上より,Point 解析による地点単位の干ばつ特性と Regional 解析による空間的広がりを組み合わせる

ことで,信濃川流域における干ばつの発生状況と TS による特徴の違いを評価できた.

文献リスト

- [1]. 気象庁 (2023). 気候変動監視レポート 2022.
- [2]. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- [3]. 国土交通省水管理・国土保全局. 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/> (最終閲覧日:2026 年 10 月 13 日).
- [4]. 気象庁. 過去の気象データ検索. <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php> (最終閲覧日:2026 年 10 月 13 日).
- [5]. ECMWF / Copernicus Climate Change Service (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present.
- [6]. Zhu, Y., Tian, D., & Yan, F. (2020). Effectiveness of Entropy Weight Method in Decision-Making. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 3564835.
- [7]. QGIS Development Team (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- [8]. Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, 517-524.
- [9]. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- [10]. Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- [11]. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.
- [12]. Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897.
- [13]. Palagiri, H., & Pal, M. (2024). Agricultural drought risk assessment in Southern Plateau and Hills using multi threshold run theory. *Results in Engineering*, 22, 102022.
- [14]. AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2485-2492.
- [15]. Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
- [16]. Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers* 23, Colorado State University.
- [17]. Hisdal, H., & Tallaksen, L. M. (2000). Drought Event Definition. Technical Report No. 6, ARIDE.