

時系列分析を用いた河川流量変動の典型性抽出 手法に関する研究

Study on an extraction of typicality of water
Level fluctuation using time series analysis

傳田正利¹・竹下邦明²・尾嶋百合香³・天野邦彦¹

Masatoshi DENDA, Kuniaki TAKESHITA, Yurika OSHIMA and Kunihiro Amano

¹正会員 博 (工) 独立行政法人土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修 (学術) 復建調査設計株式会社環境技術部生物環境課
(〒732-0052 広島市東区光町2丁目10番11号)

³正会員 修 (工) 国土交通省四国地方整備局徳島河川事務所
(〒770-8554 徳島市上吉野町3丁目35番)

This study attempted to extract typicality of water level fluctuation by using time series analysis of water level data from 1975 to 2006. Universality of the typicality was examined by comparing to water levels in 1890s. The results showed that time series analysis was able to extract the typicality. Particularly, flooded periods and seasonal variation of flow rate were well extracted and the typicality was very similar to in 1890s. However, we were not able to find similar patterns in the scale of floods between two periods because the flooded scale depended on stochastic variation.

Key Words : Flow regime, Time-series analysis, water level, Typicality, flow fluctuation

1. はじめに

流量変動は、河川生態系にとって大きな影響因子である。流量変動は、物理環境を変動させ、生物生息空間を変動させると同時に、流量変動に適応できる生物群集の定着を促し、河川生態系の典型性を形成していくことが指摘されている。同時に、流量変動は、その攪乱強度により外来生物の定着を抑制し、河川生態系の健全さを維持する重要な特性である¹⁾²⁾。

流量変動の詳細を予測するのは不可能であるが、流量変動は全くランダムに変動するわけではない。流量変動は、対象河川が属する気候帯、気候により特徴づけられた流域への降雨特性、流域特性（地質、地形、流域土地利用など）の影響を受けて決定される。流量変動をよく観察すれば、その統計的特性を理解できる。例えば、出水年、渇水年などと呼ばれる周期的な各年の流量の増減、1年の中では、平均流量の季節変動、梅雨・台風期など出水が集中的に生起する時期などを直感的に感じることが出来る。この統計的性質を見極め、時系列データのの中から流量変動の代表例、すなわち「典型性」を見出す

ことが出来れば、河川生態系の研究に有用であると考えられる。特に、1年の中の流量変動、特に月や旬といった時間単位での「典型性」を把握することは、調査対象年の流量変動の一般性や調査データに影響を与えた出水などの流量変動に伴うインパクトの一般性・特異性を評価する上で重要な意味を持つ。

水文学統計では、気温、降水量、流量変動などの時系列データを分析し、その統計的性質を把握するような解析が多く行われ、その理論的研究、水資源管理や降水量予測といった実務的な研究が積極的に行われている³⁾。

これらの研究成果は、この流量変動の典型性抽出に大きな可能性を示す。例えば、周期性解析による出水年、渇水年の変動サイクルや河川の流量変動に特有の季節変動性など、多くの可能性を持った研究・技術である。

しかし、水文学統計では主に水資源管理などへの利用を主目的とするため、出水年、渇水年の生起確率などに関する研究が一般的で、1年の中の流量変動の「典型性」を抽出するような観点で行った研究は少ない。一部の流量観測所データに適用された研究事例があるが、河川生態系研究に必要な精度までは実現出来ていないのが現状である⁴⁾。

また、過去のデータなどがあった場合、そのデータを解析の必要性が生じることがある。過去の水位データはその信頼性の担保がとれておらず、解析に用いる前に検証を行う必要がある。そのような場合、「典型性」を一つの検証用データとして利用し、過去のデータを検証することが可能となると考えられる。

このような背景から、本研究では、①流量時系列データから、時系列分析などの統計的手法を活用しながら「典型性」を抽出する手法を提案すること、②提案した手法により抽出した流量変動の「典型性」を用いて過去の流量時系列データの信頼性を検証することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 調査地の概要及び現在・過去の水位データの概要

調査は信濃川水系千曲川で行った。本河川は流域面積7163km²、流路延長214kmの1級河川であり甲武信ヶ岳（標高2475m）から長野盆地を流下し新潟県境に入り信濃川と名前を変える。

千曲川流域は、上信越高原・秩父多摩山地・八ヶ岳・北アルプスなどの標高2000～3000mの山岳に囲まれ、平地は長野・上田・佐久などの盆地地形を形成する。盆地特有の気候のため、千曲川上・中流は日照時間が多く多照地帯である。また、盆地での年間降水量は1000mm以下で少雨地帯である。一方、山岳部では1500～2000mmの多雨・多雪地帯である。降水は、雷雨や台風による出水が多いのが特徴である⁵⁾。

調査対象地区は、千曲川の中流部に位置する生田観測所（長野県上田市、東経138° 16' 45"、北緯36° 22' 4"）で、ここの水位データを対象とした。水位データを対象としたのは、後に詳述するが、過去の流量時系列データを整備することが困難であったためである。過去の流量時系列データを整備するためには、過去の現地流量観測データと水位データが存在しなければならず、明治での流量時系列を計算する資料・データは、保存されていなかった。そのため、流量時系列データの代わりに水位時系列を用いて研究を進める。

水位データを用いる妥当性であるが、一般に水位と流量は極めて良好な相関関係があり、流量時系列データ分析を水位時系列データの分析で置き換えても、著しい問題がないと判断したためである⁶⁾。以下、解析対象とした水位データを対象データと記述する。

千曲川は、本研究を行う上で適した特徴が2点ある。1点目は、千曲川本流には、大規模なダムが多数存在せず、千曲川の流量変動は極めて自然の流量変動に近い特徴がある。2点目は、千曲川では、河川に関する過去資料が良好な状態で保存されている。特に有用な資料は、1893～1897年（明治26～30年）に内務部第二課土木係が長野県内の主要河川（千曲川を含む）を中心に観測・記録し

た河川水位一覧表である。この記録には、現在も水位観測が行われている塩名田（長野県佐久市）、立ヶ花（長野県中野市）、そして、生田流量観測所近傍の観測所の日平均水位データも記録されている（以下、上田と記述する）。

本研究では上田の水位データを検証用データとして利用する。上田の水位観測地点はゼロ点高の資料は散逸しているため不明ではあるが、水位データの変動パターンを把握することが可能なため検証用データとして採用した。信頼性の判断に際しては、現在の水位時系列のパターンと著しく異なる場合、季節的、前後の関係性から水位変動特性の信頼性が低い場合には、その年の水位時系列は、検証用データとして採用しなかった。最終的に、上田の水位データでは信頼性が高いと考えられる1896年の水位データを検証用データとして採用した（以下、検証用データと記述する）。

検証用データは、尺などの度量衡を用いていたため、1尺を30.3cm、1寸を3.03cmとして、現在の単位で修正し日平均水位時系列を作成した。

(2) 本研究で提案する典型性抽出手法の特徴

a) 時系列解析の問題点と本研究で提案する典型性抽出手法の特徴

時系列データを構成する各年は、特有の水位変動特性（年平均水位、出水による水位増加数など）を持ち、その特性により、「出水年」、「平水年」、「渇水年」などと呼ばれるグループに分類される（以下、年特性と記述する）。同時に、年特性には一定の周期性があることが知られている。本研究の目的である水位時系列の典型性を抽出するには、水位時系列を構成する各年の年特性に分類し、各年特性で特徴的な水位時系列を抽出するのが有効である。

これを、時系列分析で行う場合、以下の2点の問題点があった。1点目は、年特性の周期の始点・終点の判別が困難な点である。時系列解析は、主に自己相関係数などを用いて、時系列データ内の周期に着目し解析が行われる。この解析では、時系列データの中にある周期は特定できるが、周期がどの年から始まりどの年で終わるかの判断は曖昧になる。すなわち年特性に属する年の特定が明瞭に行えない問題点が生じていた。2点目は、自己相関係数で特定した周期には、長周期が短周期を含む場合が考えられる。これにより、各年の年特性の特定が難しくなる問題点が生じていた。

このため、本研究では、時系列分析を用いて周期、有効な周期数を特定した後、各年の月平均水位時系列の類似度から各年を分類し、年特性周期に属する年を特定し、典型性を抽出する手法を提案する。以下に、その詳細な手順を述べる。

b) 水位時系列の分析

水位データのトレンドの有無を検定した（スピアマ

ンの順位相関係数検定, $p=0.05$)。トレンドの有無は、年平均水位時系列データ、月平均水位時系列データのそれぞれについて検定した(数理システム社、S-PLUS 6.0、以後、同一のソフトウェアを使用する)⁷⁾。

c) 周期性の抽出

この年特性の周期を算出するため、年平均水位を用いて自己相関係数を算出し、周期を算出した。周期の特定では、自己相関係数の中で信頼性が高いものだけを年特性として採用した。また、周期の数だけの年特性があると仮定した。

d) 年特性ごとの水位変動特性の把握

c)の周期性の抽出では時系列データを構成する年特性の数しか特定できない。そのため、年特性に属する年を特定するため、水位データを各年に分割し、各年の各月平均水位、各月水位の標準偏差をパラメータとしてクラスタ分析(K-平均法)を行った。

その後、各年特性に属する各年の水位変動特性を月単位で集計し比較した。比較には、箱ひげ図を用いて平均、各月変動特性を比較した。

e) 季節変動性の抽出

時系列データには、季節変動に伴う周期変動データが含まれることが知られている。そのため、季節変動成分を抽出するために水位データの季節変動分析を行い、各年に共通する季節変動成分を抽出した。その後、年特性との関係性を分析した。

(3) 各年特性での流量時系列と1896年(明治29年)との比較・検証

抽出した年特性の典型性を用いて、1896年の時系列の信頼性を検証するため、1896年の水位データと比較・検証を行った。1896年がd)で求めたどの年特性に該当するのかを検討した。1896年の年特性の特定は、1975年を基準としてc)で求めた周期を参考に特定した。また、d)で求めた年特性に属する年の内、その特性を明瞭に持つ年と1896年を比較した。

3. 結果

(1) 水位データと検証用データの時系列特性

図-1に日平均水位時系列を示す。水位時系列は、増加・減少といった著しいトレンドがないと考えられた。水位時系列は、1975～1981年前後、1981年前後～1988年前後など、約7～11年間ごとに各年の水位時系列特性が異なっているとみられた。また、水位が高い期間は、出水の水位が約2m、水位の低い期間は、出水の水位が高い傾向があった。

図-2に検証用データの日平均流量時系列を示す。現在と同様の水位変化がある。4月、7月、9月、10月頃に出水が頻発し、冬季に水位の著しい低下を示す傾向が

あった。

(2) 時系列分析の結果

a)トレンドに関する検定

トレンドの検定を行った結果、月平均水位、日平均水位共に正のトレンド、負のトレンドはなかった(月平均水位: Z 値=-2.2, Z 値=1.96; 日平均水位: Z 値=-29.14, Z 値=1.96,)。

b) 周期性の抽出

図-3に年周期の自己相関係数を示す。4, 7, 11年に周期性が認められた。ただし、4年周期は、信頼性が低かった。この結果は、図-1での判読結果と同様の結果となった。

c) 季節変動性の抽出

図-4に水位データに共通する季節変動性を示す。季節変動に由来する周期は、4, 7, 9月に月平均水位が高くなる特性があった。水位は10月から減少を始め、1～2月頃、再度上昇する特性があった。

d) 月平均水位・月平均標準偏差による各年の分類

表-1に月平均水位・月平均標準偏差による各年の分類結果を示す。水位変動特性から、3つに分類することができた。図-5に代表的な年の水位変動特性を示す。タイプ1は、年間を通じた平均水位は平均的で、出水が多発しない。タイプ2は、年間を通じた平均水位が高く、出水が多発する出水年タイプであった。出水は、季節変動性で認められた7月、9月近傍で大規模な出水が発生する平水年タイプであった。タイプ3は、年間を通じた平均水位は低く出水が多発しない。出水は、季節変動性で認められた7月、9月近傍で大規模な出水が発生する渇水年タイプであった。

e) 各年特性の月平均水位の変動特性

図-6に各タイプの水位データを各月で集計した箱ひげ図を示す。各タイプともに各月の平均水位は図-4に示す季節変動性に類似していた。季節変動特性が維持したまま、各タイプの水位特性に応じて上下にオフセットするような状態であった。また、各タイプにおける月毎の水位変動特性も明瞭に異なっていた。特に、顕著な違いを示したのは、出水が多発する4月の水位変動特性である。例えば、タイプ2は4月の変動が大きい、すなわち出水が多い傾向があった。また、タイプ3では、出水が多発する時期の変動が大きい特性があった。

f) 典型性を用いた1896年の信頼性の検証

1896年の年特性は、1975年を起点に考える周期性と、4月に中規模な出水がある1896年の水位変動特性から考慮するとタイプ2の周期である可能性が高い。このため、タイプ2の年特性と比較を行った。図-7に1896年と1999年の日水位データの比較を示す。4月、6月、9月の主要な時期の出水のタイミングは、良好な合致を示した。

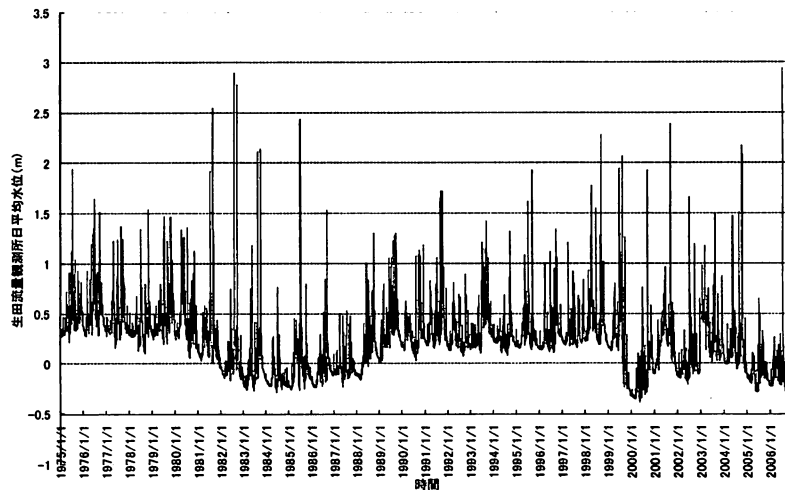


図-1 日平均水位時系列

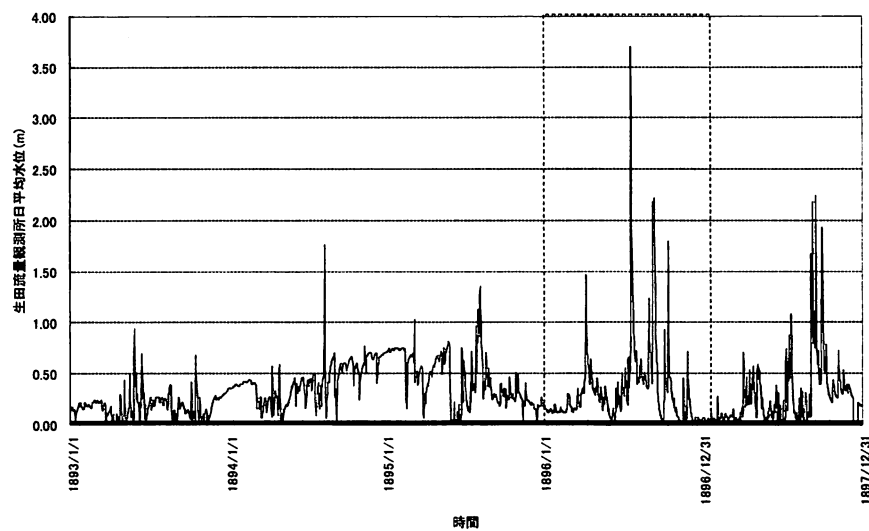


図-2 検証用データの日平均水位時系列（点線部：検証用データ）

表-1 年特性と対応年

分類	対応年
1	1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1989, 1991, 1993, 1998
2	1981 1990, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 1999, 2001, 2003, 2004
3	1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 2000, 2002, 2005, 2006

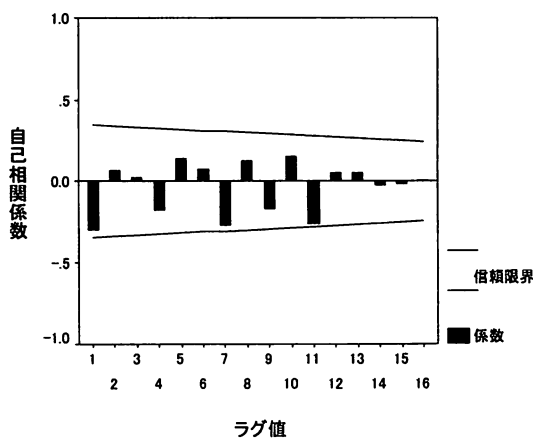


図-3 自己相関係数のプロット

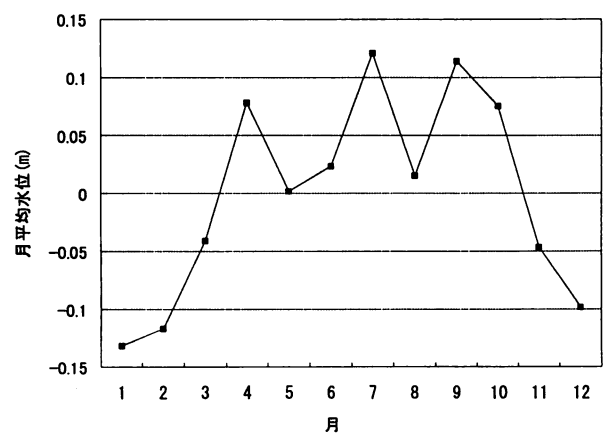


図-4 季節変動性のプロット

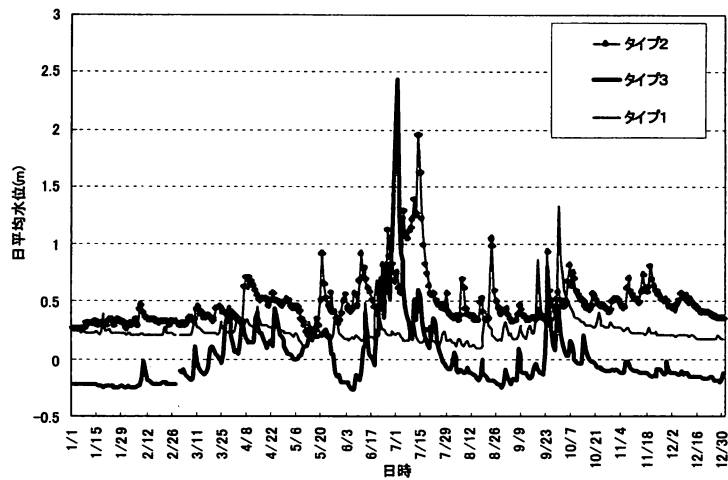


図-5 各年特性の代表的な水位変動特性

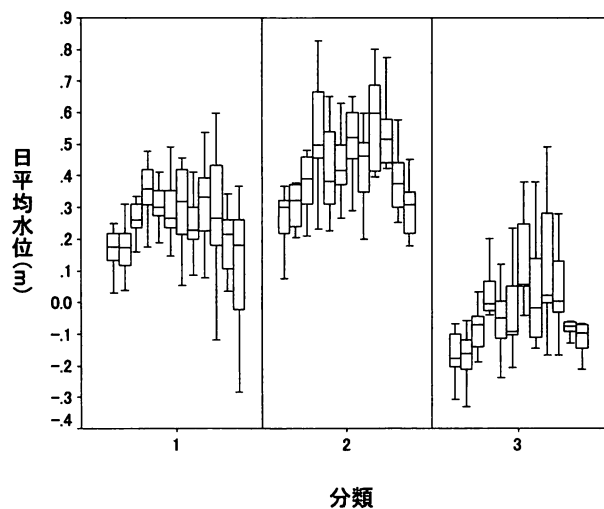


図-6 各年特性の月毎の水位変動特性

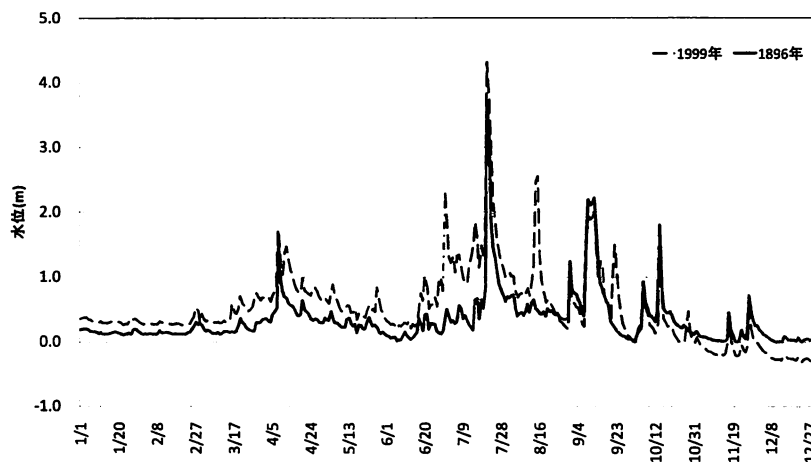


図-7 1896年と1999年の水位時系列の比較

4. 考察

(1) 典型性抽出への時系列解析の可能性

本研究で行った時系列分析、K-平均法などの統計解析を併用することで、より正確な典型性を抽出することが可能であると考えられる。

本研究で用いた自己相関係数は、時系列データの中に隠された周期を特定することまでしか出来ない。図-1では、1975年をスタートにして、明瞭な周期性を持ち、時系列が変動するが、タイプ2からタイプ1への移行を何年にするかは、判断が難しい。自己相関係数を見れば、5年か7年かは推定できるが、断定的には判断できない。

また、図-1のように明瞭な変化点が時系列データの中にはない場合がある。この場合には、周期をカウントする始点をどこにするかは、大きな問題である。

しかし、統計的な分類は、この判断を助ける。自己相関係数により、その周期が明瞭になることは、時系列データの中にある年特性の数を示唆する結果となる。この個数を目標にK-平均法など、特定数の集団への分類を加えることで、周期の中に含まれる年をより明瞭に特定でき、年特性の抽出につながった。この点は、本研究で提案できる有用な方法であると考えられる。

また、年特性に属する年が特定できれば、年特性内に属する年の日水位変動の特徴がより明瞭に把握できる。更に季節変動性を年特性に照らし合わせれば、一般的な季節変動と年特性の違いがより明瞭に把握できる。

(2) 時系列分析で抽出できる典型性の普遍性

図-7の結果が示すように、本研究で抽出した典型性は、1896年のような過去データの検証に有用と考えられた。1896年は、年特性の周期性から、タイプ2に該当すると考えられるが1896年と1999年は4月出水の発生や7月下旬の出水などと主要な部分は合致している。

しかし、7月中旬、8月中旬などの水位上昇は合致していない。つまり、時系列解析、統計解析による典型性抽出には、一定の限界があると考えられる。千曲川の場合、梅雨前線に低気圧が重なる場合か、台風の通過による降水が6～9月まで頻繁に見られる。このような場合、出水の時期、出水の規模は、確率的に変動し、良好な合致は得られないと考えられる。これらの部分に「典型性」の信頼解析は利用できないが、他の一般的な水位時系列には、この方法は利便性が高いと考えられる。

(3) 典型性を今後の河川環境管理に活かすための考察

今後、河川環境の維持管理をより定量的に進めたいというニーズが強まると考えられる。その場合、河床変動計算などの数値計算が有効な手法と考えることが出来るが、その時、入力条件となる流量条件は、その変動を考察する上で、極めて重要な要素となる。しかし、既存の方法では、過去の流量時系列をそのまま流すことが多い。この方法では、長い流量時系列で計算すれば、典型性に基づいた一定の成果を得られると考えられるが、将来予測には適さない部分が多い。例えば、過去の流量時系列では、過去の変動シナリオに検討が限定されるなど、初期の定着条件が重要となる生物群集などの予測計算には不向きな部分も多い。

一方、本研究で扱った典型性に基づき出水シナリオを作る場合には利点がある。それは、事業を検討する対象河川で今後生じうる流量時系列を、河川改修検討時の状況にあわせ作れる利点ある。高水敷の切り下げを行う時

点を基準として周期性を判断し、今後、どのような年特性が生じうるかなどの検討に利用できると考えられる。本研究で提案する手法は、今後、本格化する自然再生事業、アダプティブマネジメントで、有用な手法になると考えられる。

5. まとめ

河川の流量変動を抽出するため、時系列解、統計解析を併用し、流量変動（水位変動）の典型性を抽出する手法を提案した。同時に、抽出した典型性の時間的普遍性を、明治の水位変動データを用いて検証した。

その結果、各年の水位変動特性から、各年の水位変動を類型化し、類型化されたグループの典型的な水位変動時系列をより正確に抽出することが可能となった。また、抽出された典型性は時間的な普遍性を持っていると判断できる類似性を持っていた。

本研究で提案した手法による典型性は、一定の普遍性を持っていた。年特性が一致すると考えられる1896年の日平均水位時系列と比較した結果、年特性に特有の特徴を1896年でも確認することが出来た。

謝辞：本研究を進めるにあたり、文献調査にご協力いただいた長野県立歴史館の職員の方々には、調査期間中、様々な面で便宜を図っていただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) BUNN, S. and ARTHINGTON, A.H: Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity, Environmental Management Vol.30, No.4, pp.492-507, 2002.
- 2) POFF, N.L. ALLAN, D., BAIN, M., Karr, J., PRESTEGAARD, B., RICHTER, B. SPAREKS, R. and STROMBERG, J.: The Natural Flow Regime, A Paradigm for river conservation and restoration, Bio Science, Vol.47, No.11, pp.769-784, 2002.
- 3) 藤田睦博・神田徹：土木学会編 新体系土木工学Vol. 26, 技報堂出版, 1982.
- 4) 神田徹・牧龍一郎：ショット・ノイズ過程の流量時系列への適用, 土木学会関西支部年次講演会講演概要, 1981.
- 5) 千曲川河川事務所：建設省北陸地方整備局編, 千曲川犀川三十年のあゆみ, 山海堂, pp.35-38, 1980.
- 6) 土木学会水理委員会編：水理公式集, 土木学会, pp.77-78, 1999.
- 7) 国友直人・山本拓：時系列モデル入門, 東京大学出版会, 2004.

(2008. 4. 3 受付)