

流出成分分離による積雪影響判定と水文年に関する考察

環境システム工学専攻 水文気象研究室 大熊崇司
指導教員 陸旻皎

1. はじめに

水文データを扱う際、流域内の水収支の傾向把握は重要であり、水収支方程式はその基本となる。

$$s_2 - s_1 = \Delta s = P - Q - ET \quad (1.1)$$

ここで、 s_2, s_1 : それぞれ t_2, t_1 時の貯留量[mm],
 P : 雨量[mm], Q : 流出高[mm], ET : 蒸発散量[mm]

水収支方程式の時間 t_1 から t_2 の期間を 1 年とすることで、 $s_2 - s_1$ の値を 0 に近似することが出来る。しかし、通常のカレンダー一年の通り 1 月 1 日を開始期とし、1 年間の水収支を考えると、降雪地域では 12 月末日時点で流域内に雪が堆積している。当然毎年の積雪量は変化するため、カレンダー一年を用いての水収支の計算をすると貯留量 $s_2 - s_1$ が 0 にはならない。そのため、カレンダー一年を用いて、年水収支を計算することは相応しくないのではないかと考える。そこで、流域内が最も乾いて気候が穏やかな時期を開始期とする水文年を用いた集計方法が使われている。本研究では、流域ごとの水文年の開始期の違いを比較し、地域的、気候的な水文年の開始期の特徴を把握するため、1 級河川のうち 18 か所を選定し、日本全体の水文年の傾向を考察した。

流域内の積雪の有無が水文年の開始期の決定に関わることから、積雪の有無の正確な判定方法の考案が必要となった。流出高を直接流出と基底流出に分離することで、流出特性を把握し、正確な判定法を考案した。基底流出と直接流出に分ける分離周波数の値が積雪の有無によって大きく異なることに着目し、これを積雪影響判定の基準とした。判定基準とする上で、時間情報が損なわれていることが問題となった。そこで、ウェーブレット変換を用いて分離周波数を把握する方法を考案した。ウェーブレット変換を用いることで、時間情報を損なわずに解析できるため、個々の流域の気候に合わせた積雪影響判定が可能となる。

2. 研究手法

本研究では、1 級河川流域の水文年の開始期を調べる。流域毎の雨量、流量データを雨量・流量年表データベースから抽出し、どの時期に最も流域内が乾燥しているかを調べ、流域毎の水文年の開始期を定める。

図 1 に示す 18 箇所の河川流域を対象とし、流量データ、雨量データを解析することで、水文年の開始期を決定する。これら 18 箇所の流域の水文年の開始期を日本地図上にプロットすることで、地域毎に水文年の開始期がどのような傾向を辿るかを把握できる。また、水文年とカレンダー一年による集計を比較し、水文年考慮による水収支計算への影響について検討する。

3. 解析手法

3.1 積雪影響判定手法

各流域の流量データの積雪影響判定手法について説明する。本研究では、フィルター分離 AR 法、ウェーブレット変換の 2 つの解析手法を用いることで積雪の影響判定を行った。

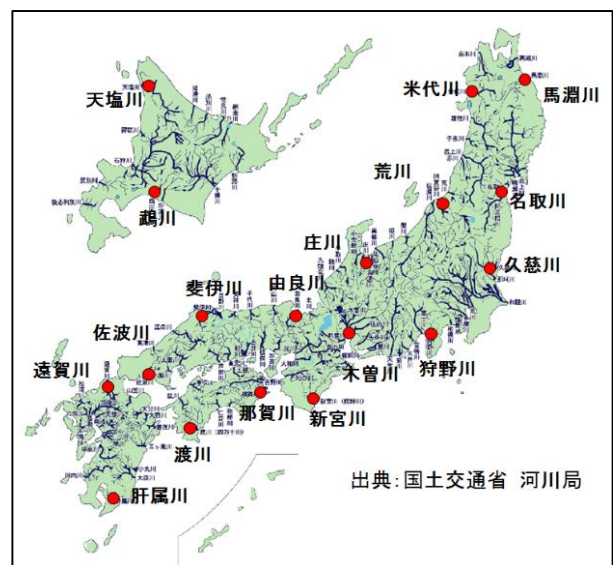


図 1: 解析対象河川流域

3.1.1 フィルター分離 AR 法

フィルター分離 AR 法を用いた流出分離について説明する。本研究では、1年毎の流量データを夏季（7月から10月末）と冬季（11月から12月末、翌年1月から6月末）の2つに分けて流出分離を行う。流出分離を行う際、初めに流出高データと雨量データのコヒーレンス・フェイズを(3.1)式、(3.2)式より算出する。

$$Coh^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (3.1)$$

ここで、 $S_{xy}(f)$ ：流出高と雨量のクロススペクトル
 $S_{xx}(f)$ ：流出高のパワースペクトル
 $S_{yy}(f)$ ：雨量のパワースペクトルとする。

$$Phase(f) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{xy}(f)}{K_{xy}(f)} \right) \quad (3.2)$$

ここで、 $Q_{xy}(f)$ ：クオドラチャスペクトル
 $K_{xy}(f)$ ：コスペクトルとする。

図 2、図 3 に名取川流域の 1972 年夏季のコヒーレンス、フェイズをそれぞれ示す。図 2 のコヒーレンスにおいても図 3 のフェイズにおいても、周波数 f が 0.3 の値のときに、谷間(gap)がある。そこで、0.3 を 1972 年夏季の分離周波数 f_c と定める。分離周波数と減衰係数 δ (本研究では 2.5 とする)が決まることで流出分離が可能となる。図 4 に名取川流域の 1972 年夏季の流出分離をした結果を示す。

3.1.2 フィルター分離 AR 法を用いた積雪影響判定法

3.1.1 にて算出した解析対象年分の分離周波数 f_c を図 5、図 6 のように夏季、冬季に分けてヒストグラムで表示する。もし、積雪の影響を流出高データが受けているならば、降水が発生してから時間をかけて流出する傾向にあるため、図 6 に示すように夏季と比較して分離周波数の値が小さくなる。このことを利用することで、積雪の流出高データへの影響の有無を判定する。他の流域については、最も高頻度となった値を各流域の夏季、冬季の代表値として表 1 にまとめる。

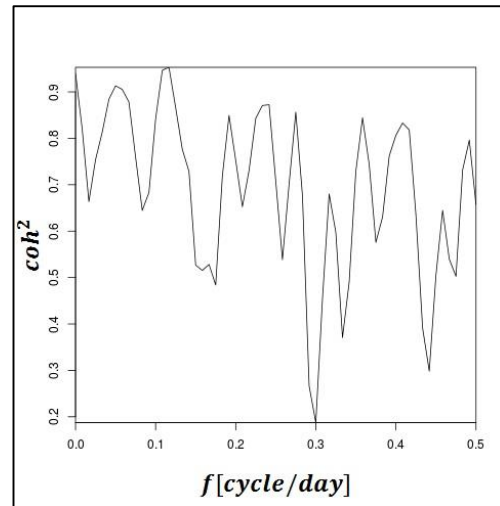


図 2：名取川流域(1972夏季)のコヒーレンス

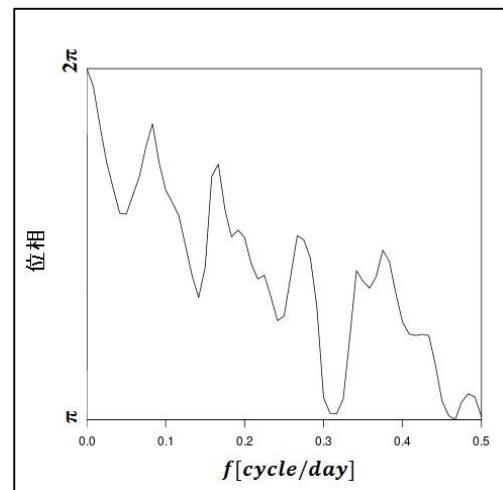


図 3：名取川流域(1972夏季)のフェイズ

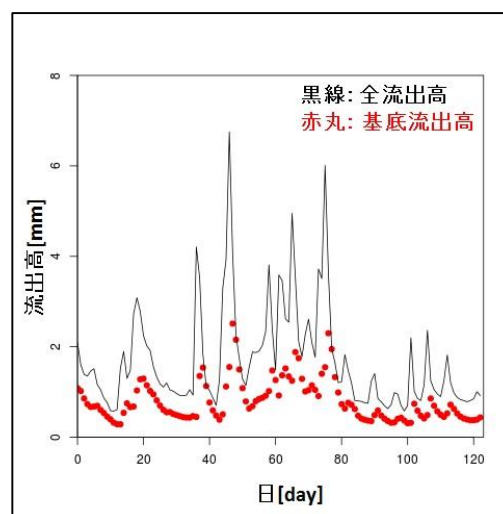


図 4：名取川流域(1972夏季)の流出分離結果

3.1.3 ウェーブレット変換

フィルター分離 AR 法を用いた判定法の欠点として、データを非積雪期と積雪期に二分しなければならないことが挙げられる。フィルター分離 AR 法による判定法では、全流域に対して、統一的に非積雪期、積雪期の設定をしている。そのため、同じ積雪の影響を受けている流域でも、例えば北海道と中国地方では気候が大きく異なり、等しい積雪の影響判定法とは言えない。

そこで、データを非積雪期と積雪期に二分することなく積雪の影響判定を行える手法として、ウェーブレット変換を用いた判定法がある。この手法を用いることで、時間情報を損なわずに解析することが出来るため、個々の流域の気候に合わせて積雪影響判定を行うことが出来る。

信号 $f(t)$ とウェーブレット関数 $\varphi_{a,b}(t)$ との内積

$$W_{\varphi}[f](a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.3)$$

を連続ウェーブレット変換という。ここで、ウェーブレット関数は、

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

で、これは基本ウェーブレット $\varphi(t)$ を時間軸方向に a 倍し、時間軸方向に b だけシフトして得られる。 a はスケールとよばれ、 $1/a$ は周波数に相当する。

3.1.4 ウェーブレット変換を用いた積雪影響判定法

3.1.3 のウェーブレット変換によって得られた解析結果を図 7、図 8 に示す。図 7 の肝属川は、九州を流れている河川であり、積雪の影響を受けていない。図 8 の天塩川は、北海道を流れている河川であり、積雪の影響を受けている。2つの図を比較すると、周期が 64[day/cycle] から 256[day/cycle] までの長周期の部分で、異なる傾向を示しているのが分かる。肝属川は、1年を通して、降雨—流出関係に変化がない傾向

にあるが、天塩川では、冬に流出高が積雪の影響を受けているために、夏と冬のように長周期で降雨—流出関係を示すとコヒーレンスの値が低くなる。このことを利用し、積雪の流出高データへの影響の有無を判定する。

3.2 対象河川流域の水文年の開始期の決定

3.1.4 にて、積雪の影響がないと判定された場合は、10 日移動平均流出高が最小となる日を水文年の開始期とする。逆に、積雪の影響があると判定された流域については、降雪期、融雪期を除いた中で、10 日移動平均流出高が最小となる日を水文年の開始期と定める。

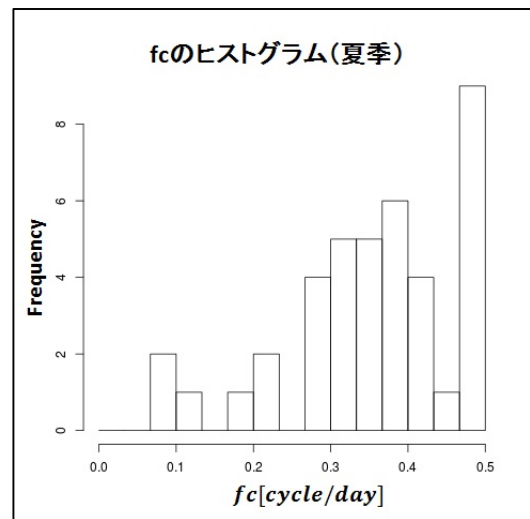


図 5：名取川流域（夏季）の分離周波数の分布

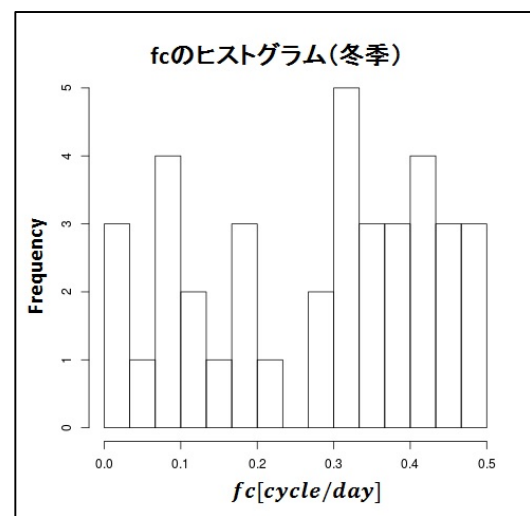


図 6：名取川流域（冬季）の分離周波数の分布

3.3 水文年利用による水収支計算への影響計算

ここでは、3.2にて決定した水文年による集計方法が、カレンダー一年による集計方法使用時と比べたときの水収支計算に与える影響を説明する。水収支方程式の内、雨量 P 、流出高 q が既知の値となっている。そこで、雨量 P から流出高 q を引くことで、未知数である蒸発散量 ET と貯留量 Δs の和が求まる。

$ET + \Delta s$ の値を代表流域の天塩川流域について解析対象年分取ったものが図 9 のグラフである。縦軸に年間の累積蒸発散量と累積貯留量の和をとり、横軸に観測年をとることで、観測対象年分の年蒸発散量と年貯留量を 2 種類の集計法で比較した。

図 9 の値のばらつきには、 ET による分散と Δs による分散が含まれている。そこで、 ET による分散の影響を小さくするために、(3.5)式を用いる。

$$I = \frac{\sigma^2(ET + \Delta s)_C - \sigma^2(ET + \Delta s)_H}{\sigma^2(ET + \Delta s)_H} \quad (3.5)$$

ここで、 I : 水文年での集計による影響の指標値、 $\sigma^2(ET + \Delta s)_C$: カレンダー一年で集計した $ET + \Delta s$ の分散、 $\sigma^2(ET + \Delta s)_H$: 水文年で集計した $ET + \Delta s$ の分散。

カレンダー一年による集計の年蒸発散量と水文年による集計の年蒸発散量の値に大きな差異がみられないと仮定し、(3.5)式の値を算出することで、カレンダー一年の Δs の分散と水文年の Δs の分散を比較する指標とすることができる。算出された I が大きいほど、水文年を用いることで良い影響があるといえ、 I が小さいまたは、負の値を取るときに、水文年を用いることによって得られる影響は小さいといえる。

欠測値の含まれ方の違いにより、図 9 ではカレンダー一年と水文年で水収支の取れる年が一致していない。一致していないことによる指標値 I への影響を考え、水文年、カレンダー一年どちらの集計方法でも年水収支が取れる年のみで I を計算したものを I_a とする。

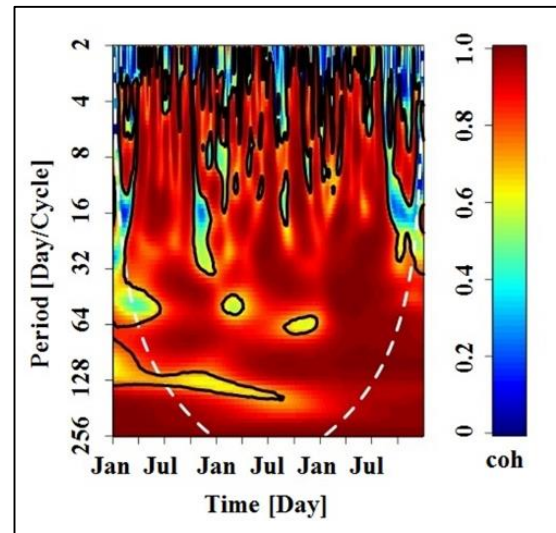


図 7: 肝属川 (1965-67) のウェーブレット結果

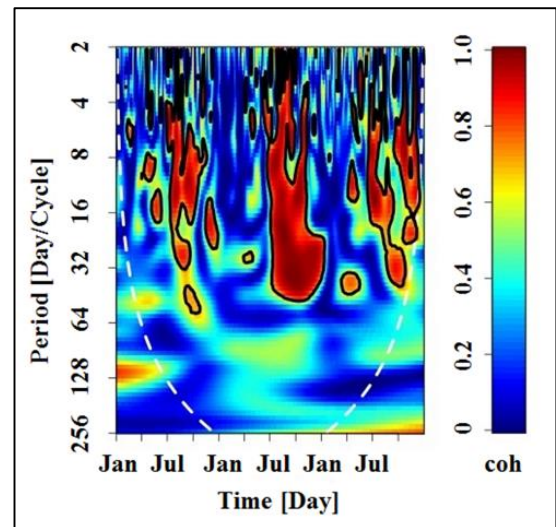


図 8: 天塩川 (1965-67) のウェーブレット結果

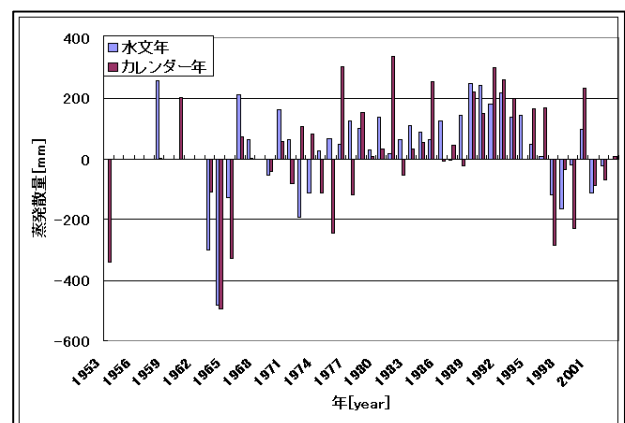


図 9: 天塩川流域の蒸発散量の集計方法比較

4. 結果と考察

4.1 積雪影響判定結果

図 10 に全研究対象河川流域に対し、積雪の影響判定した結果を示した。九州と四国、中国の西部、関西の南部の流域で積雪の影響がないと判定された。北海道、東北、中部、関東、関西の日本海側、中国の日本海側の流域については、積雪の影響を受けると判定された。また、積雪を受けると判定された流域の内、天塩川、米代川、荒川、庄川流域のウェーブレット解析の結果、解析対象年の全年で積雪の影響を受けている可能性が高いという結果となった。鶴川、馬淵川、名取川、木曾川、斐伊川流域のウェーブレット解析の結果から、積雪の影響を受けている年、受けていない年があることが明らかになった。久慈川、狩野川、由良川流域は、ほとんどの年で積雪の影響がない傾向にあったが、積雪の影響を受けている可能性が高い年も解析対象年に含まれていることが分かった。

4.2 水文年の開始期の傾向

図 11 に全研究対象流域の水文年の開始期を表示した。まず、積雪の影響がないと判定され、12月、1月に水文年の開始期を持つ流域である肝属川、遠賀川、渡川、那賀川、佐波川、新宮川流域を分類 A としてまとめた。分類 B は、積雪の影響があると判定された斐伊川、由良川、木曾川、庄川、荒川、狩野川、久慈川、名取川流域がこの分類に属し、10月、11月に水文年の開始期を持つ傾向にあった。分類 C も同様に、積雪の影響があると判定された流域であるが、分類 B と異なり 6月、7月に水文年の開始期を持つ傾向にあり、米代川、馬淵川、鶴川、天塩川流域が分類された。

4.3 水文年利用による年水収支への影響

図 12 に全研究対象河川流域の水文年を考慮することの年水収支への影響指標値を示した。4.2にて、分類 A となった流域については、水

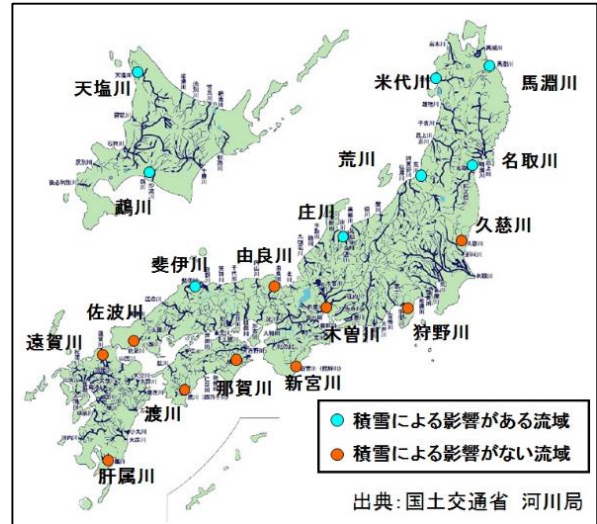


図 10: 各流域の流出高への積雪影響

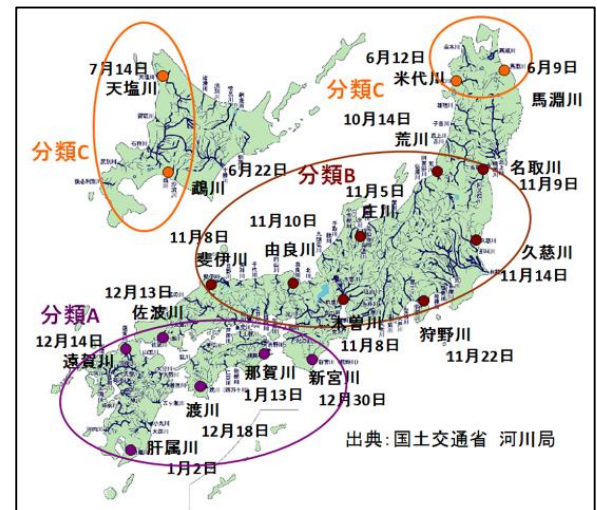


図 11: 各流域の水文年の開始期

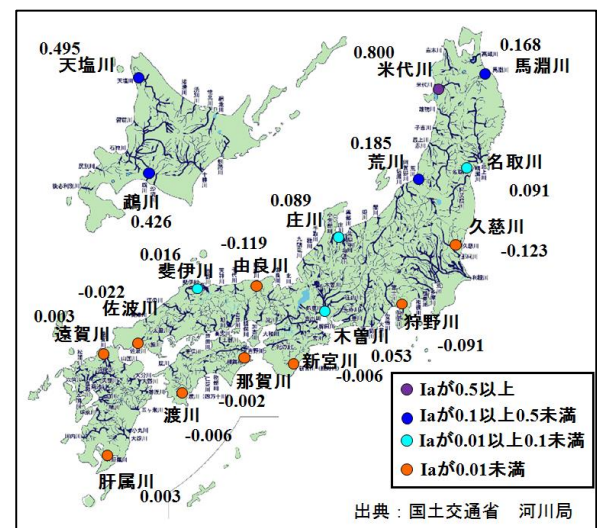


図 12: 水文年利用による年水収支への影響

水文年の開始期がカレンダー一年の1月1日とほぼ変わらないため、年水収支への影響指標値は、どの流域もほぼ0となった。分類Bとなった流域は、大きく2つの傾向を示す流域に分けられた。1つは、由良川、狩野川、久慈川流域である。これらの流域は、積雪の影響がある年が少なく、水文年の開始期として設定した時期よりも、カレンダー一年の時期の年々の流出高の変動が小さいために、指標値がマイナスの値を示していると考察する。もう1つの傾向を示す流域は、斐伊川、木曾川、庄川、荒川、名取川流域である。これらの流域は、指標値が正の値を示していて、水文年を利用することで水収支解析にとって良い影響を与える可能性があるという傾向を示している。中でも荒川流域の指標値は、0.185であり、水収支解析にとって良い影響を与える可能性が高いと考える。分類Cとなった流域は、指標値が0.1を超えていて、水文年を利用することで良い影響を与える可能性が高いことを示している。特に、米代川流域は、0.8と非常に高い値であり、水文年を利用することで良い影響を与える可能性がかなり高いという結果となった。

5. 結論

- 18箇所の河川流域の水文年の開始期を大きく3つに分類し、地域的な特徴を見出すことができた。
- ウェーブレット解析のバイコヒーレンスを算出することで、各年ごとに流出高データと雨量データの関係性を示すことができ、詳細に積雪の影響の有無を確認することができた。
- 水文年を利用することの水収支への影響を数値で表すことで、流域同士で比較をすることができ、どの流域でより良い影響を与える可能性が高いかについて考察することができた。

6. 参考文献

- 1) 森和紀(2007)『地球温暖化からみた水文環境の変化』地学雑誌 116(1), pp52-pp61
- 2) 朝岡良浩(2000)『地理的条件による積雪資源解析』土木学会第55回年次学術講演会, pp224-225
- 3) 日野幹雄・長谷部正彦(1985)『FORTRANとBASICによる水文流出解析』森北出版
- 4) 日野幹雄(1977)『スペクトル解析』朝倉書店
- 5) 丸山文男(2013)『ウェーブレットを用いたマルチフラクタル解析による気候レジーム・シフトの研究』名古屋大学博士論文
- 6) 国土交通省河川局 <http://www.mlit.go.jp/>

表 1:対象流域の解析結果

対象流域	分離周波数の代表値		積雪による流出高への影響	水文年開始期	水文年によるET+Δsの平均値	カレンダー一年によるET+Δsの平均値	水文年のET+Δsの分散	カレンダー一年のET+Δsの分散	I	一致箇所のみ _L
	夏季	冬季								
肝属川	0.44	0.38	影響なし	1月2日	377.8	377.7	71068	69746	-0.02	0.003
遠賀川	0.47	0.48	影響なし	12月14日	913.1	919.7	45193	45437	0.01	0.003
渡川	0.46	0.35	影響なし	12月18日	993.3	990.7	67268	64965	-0.03	-0.006
那賀川	0.48	0.44	影響なし	1月13日	980.3	984.4	126301	119363	-0.05	-0.002
佐波川	0.49	0.43	影響なし	12月13日	708.2	706.7	21887	21310	-0.03	-0.022
斐伊川	0.44	0.30	影響あり	11月8日	1290.6	1304.2	76794	70415	-0.08	0.016
由良川	0.49	0.45	影響あり	11月10日	903.0	901.7	30416	24010	-0.21	-0.119
新宮川	0.49	0.46	影響なし	12月30日	665.7	665.0	277626	276044	-0.01	-0.006
木曾川	0.47	0.44	影響あり	11月8日	261.9	266.8	22829	25182	0.10	0.053
狩野川	0.44	0.39	影響あり	11月22日	369.2	365.0	30559	31970	0.05	-0.091
久慈川	0.34	0.47	影響あり	11月14日	552.1	547.0	11123	10269	-0.08	-0.123
庄川	0.42	0.33	影響あり	11月5日	1293.2	1290.3	200942	214884	0.07	0.089
荒川	0.47	0.48	影響あり	10月14日	-609.7	-692.8	66619	72374	0.09	0.185
名取川	0.48	0.32	影響あり	11月9日	758.9	760.4	69005	61763	-0.10	0.091
米代川	0.39	0.01	影響あり	6月12日	592.5	584.2	27523	47395	0.72	0.800
馬淵川	0.43	0.36	影響あり	6月9日	303.2	301.9	9222	11988	0.30	0.168
鵜川	0.48	0.43	影響あり	6月22日	351.1	310.5	74609	91554	0.23	0.426
天塩川	0.46	0.01	影響あり	7月14日	44.9	23.7	22731	34135	0.50	0.495