

数値フィルターと水質データを用いた 阿武隈川の流量時系列データの成分分離に関する研究

福島大学共生システム理工学類 芳賀 友洋
福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

1 はじめに

降雨流出過程の解析においては、タンクモデルや貯留関数モデルなどの降雨流出モデルが数多く用いられているが、これらの降雨流出モデルはモデル構造やモデルパラメータの値に関して不確実性がある。一方、数値フィルターや水質の時系列データを用いると、降雨流出の応答時間に応じて各流出成分への分離と特定ができることが知られている。

そこで本研究は、阿武隈川流域を対象流域として数値フィルターと水質データを併用して降雨流出過程の成分分離を行い、成分別に降雨流出モデルを構築する手法の可能性を検討した。

2 方法

2.1 対象流域および使用データ

本研究では、福島県および宮城県を流れる阿武隈川本流を対象流域とした。阿武隈川は流域面積 5390km^2 、水源の標高 1835m の一級河川である。

本研究で使用したデータは、国土交通省が所轄する水文水質データベースより、①二本松観測所(流量, 雨量), ②郡山観測所(雨量)・阿久津観測所(流量), ③黒岩観測所(流量)・福島観測所(雨量), ④須賀川観測所(流量, 雨量)の4つの調査地点の降水量データと流量データを2007年から2008年までの2年分を取得した。なお、流量データは流域面積で除し、単位を mm/h と変換して利用した。

また、黒岩観測所、南小平観測所(郡山・阿久津観測所と同じ地点)の2ヶ所の毎時の水質データを収集・利用した。

2.2 流量時系列の逓減係数(対数プロット)を利用した成分分離

本研究では複数の手法を用いて河川流量の成分分離を行った。最初に行った流量時系列データの逓減部分を利用する方法は、流量の自然対数を用いてグラフ(図-1)の傾き(逓減部分)から時定数を決定し、成分分離を行うというものである。なお、この時のグラフの縦軸は $\ln(Q_0/Q(t))$ 、横軸は $\tau(\text{h})$ である。ここで Q_0 は、基準流量¹⁾であるが、本研究では流量の最小値とした。傾き α の逆数が時定数 $T_c(=1/\alpha)$ であり、対数軸上の流量逓減部に見ら

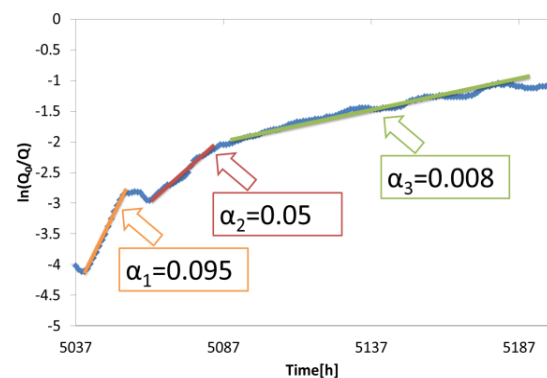


図-1 逓減曲線

* Hourly hydrograph separation for the Abukuma river based on numerical filter technique and water quality data by
Tohohiro Haga, Yoshiyuki Yokoo

れる異なる傾きを示す部分の数を流量の成分数としている。

2.3 高速フーリエ変換を用いて決定した分離周波数を利用した成分分離

次に、日野・長谷部¹⁾を参考に、それらのデータに対して高速フーリエ変換（FFT）を用いて分離周波数を決定し、成分分離を行った。この手法は、分離周波数の決定にコヒーレンスを用いる。コヒーレンスは周波数に応じて変動が非常に大きく細かくなったので、本研究ではコヒーレンスの移動平均が大きく変化するギャップ周波数を特定した。このギャップ周波数の逆数を時定数 T_c とし、この時定数 T_c と分離周波数 $f_c = \delta / 2 \pi T_c$ ($\delta=2.5$) を用いて成分分離を行った。特に遅い成分(基底流出成分)に関しては、周波数の値の小さいところ ($0 \leq f \leq 0.01$) から移動平均法を用いてギャップを選定する。なお、初期値を取り除くため、最初の 1 年間はから回しし、残りの 1 年分(2008 年)のデータを解析に用いた。

2.4 水質時系列データを利用した成分分離

最後に、End-Members Mixing Analysis(EMMA)と呼ばれる手法により成分分離を行った。この手法は、複数の水質データをトレーサーとして混合解析を行う。具体的には、2 つの水質の値をそれぞれ軸に取り、すべてのデータを 2 軸で構成される平面上にプロットした際にそれを包含する三角形を描画する。この三角形がトレーサー濃度をプロットした Mixing diagram であり、三角形の頂点を End-Member と呼ぶ。3 つの End-Member が 3 つの流出成分のトレーサーであり、それぞれの線形混合で河川の水質変動が表現されると仮定し、質量保存則から成分分離を行う。この場合、以下のような連立方程式を解くことにより、流量の成分分離が可能となる。

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (1)$$

$$C[A]_1 f_1 + C[A]_2 f_2 + C[A]_3 f_3 = C[A]_{st} \quad (2)$$

$$C[B]_1 f_1 + C[B]_2 f_2 + C[B]_3 f_3 = C[B]_{st} \quad (3)$$

ここで、 $C[A]$ と $C[B]$ は 2 種の溶存物質 A 、 B の濃度を、添字の 1, 2, 3 は 3 つの End-member を、 st は時系列でのそれぞれの濃度を、 f は時系列での流量に寄与する各成分の寄与率を表す。なお、本研究では、トレーサーとして濁度と導電率を用いた。

通常、井戸水や土壌水や雨水などの異なる河川の起源の水についての水質組成の差異に基づいて成分分離を行うので、まずそれらを End-Member とし、その End-Member で構成される三角形内に河川の水質をプロットして混合解析を行うが、本研究は多量の水質データが得られたため、データの分布形状から逆に起源となる水質の特性を推定しており、この点については議論の余地がある。また、End-Member の数は理論的には 1 つ以上あればいくつでも導入できるが、2 つの水質を利用して End-Member を 3 つとすることが多い。

3 結果

3.1 数値フィルターによる解析結果

3.1.1 逓減係数(対数プロット)による解析結果

逓減係数による分析結果に関しては郡山観測所(雨量)・阿久津観測所(流量)を代表として示している。まず、流量の自然対数をとった逓減部の解析では図-1 のように 3 つの異なる傾きが見つかった。傾き α から分離時定数を求めて 4 つの成分に分離した結果が図-2 である。

3.1.2 分離周波数による解析結果

分離周波数による成分分離結果の例として郡山観測所(雨量)・阿久津観測所(流量)での結果を(図-3 および図-4)に示す。図-3 は、表面流出成分や中間流出成分に代表される降雨に対する応答が比較的速い成分に関するものである。降水量データと流量データの相関係数について、180 区間の移動平均を計算し、そこから成分が切り換わる部分(ギャップ)を選定した。ここで、ギャップの逆数が分離時定数 T_c となり、 T_c を求めると値の大きいほうから順に 11.5, 3.58, 2.20 h となった。ここから、 $f_c = \delta / 2\pi T_c$ の式を用いて、成分分離を行った。しかし、遅い表面流出成分と速い中間流出成分の違いはほとんど見られなかった。そこで、遅い中間流出成分の方が分離周波数による解析結果のギャップ(谷間)が大きかったので、遅い中間流出成分の成分に代表させた。

図-4 は、比較的流れの遅い基底流出成分に関するものである。ここでは、横軸の周波数の値を 0~0.01 cycle/h の範囲に絞り、15~25 区間の移動平均を計算して、分離周波数(ギャップ)を決定した。図-4 についても上述の図-3 に用いた方法を用いて時定数を決定し、成分分離を行った。なお、このときの分離時定数は 142.9 h であった。

以上の分離時定数を用いた結果、①表面流出成分、②速い中間流出成分、③遅い中間流出成分、④基底流出成分の 4 成分に分離され、結果は図-5 の通りである。

3.1.3 通減係数による結果と分離周波数による結果の比較

図-6, 7, 8, 9 が示すように、通減係数による成分分離結果は分離周波数を用いた成分分離結果と顕著な違いは見られなかった。この結果は他流域で十分に

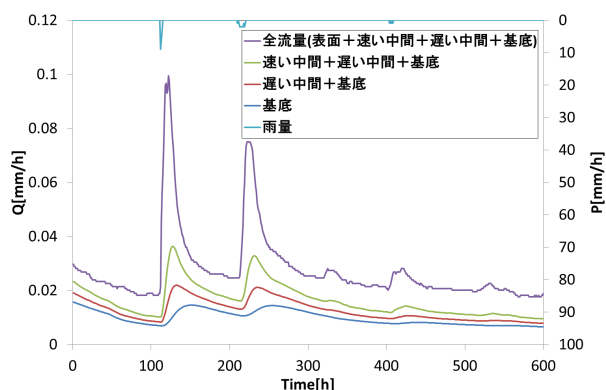


図-2 通減係数による成分分離結果

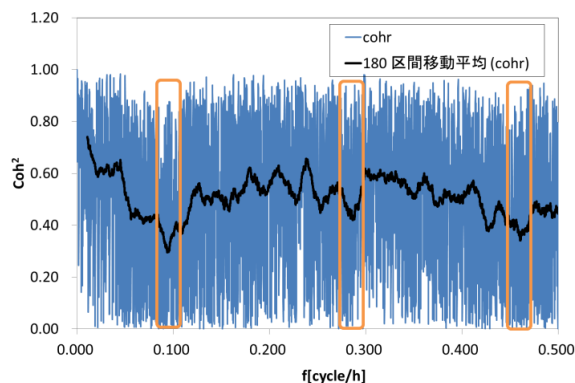


図-3 分離周波数による解析結果(1)

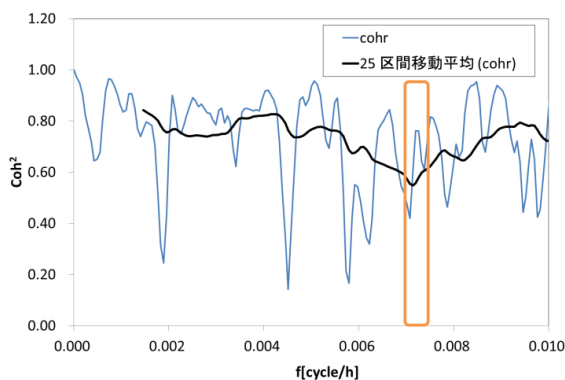


図-4 分離周波数による解析結果(2)

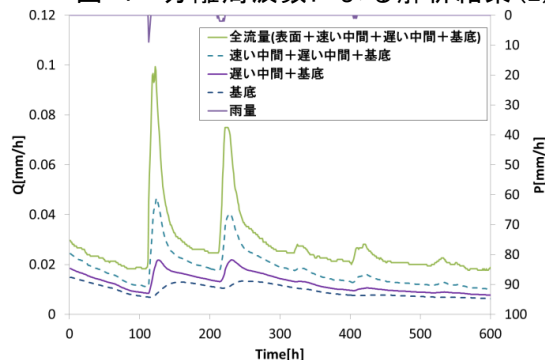


図-5 分離周波数による成分分離結果

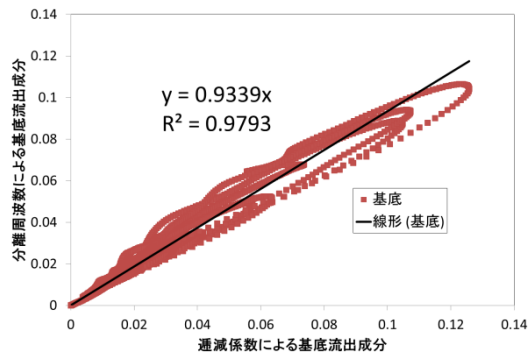


図-6 数値フィルターの比較結果 (1)

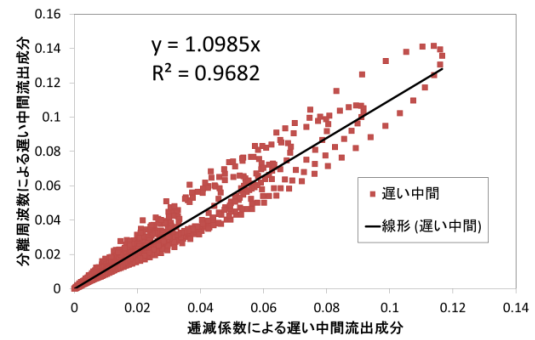


図-7 数値フィルターの比較結果 (2)

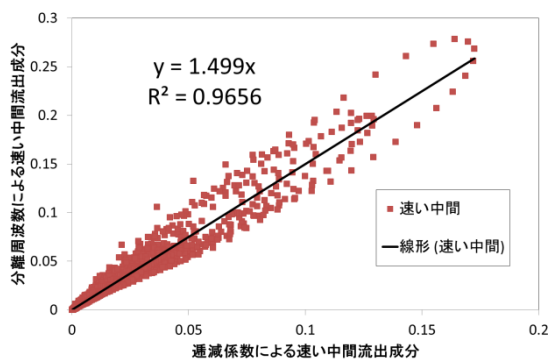


図-8 数値フィルターの比較結果 (3)

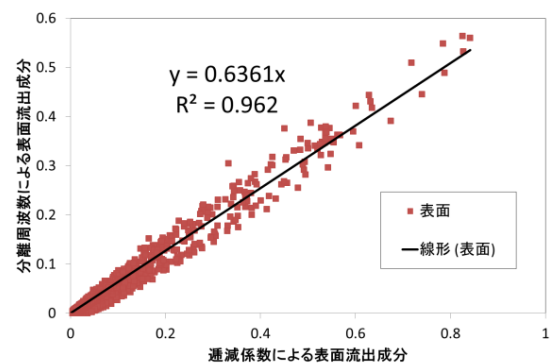


図-9 数値フィルターの比較結果 (4)

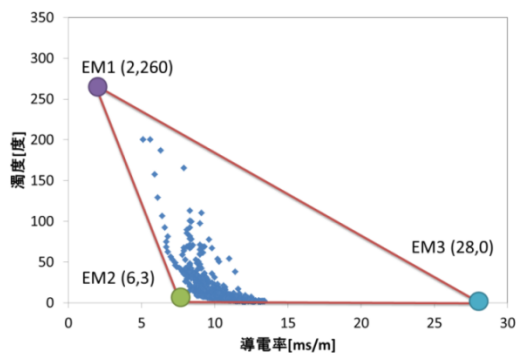


図-10 Mixing diagram

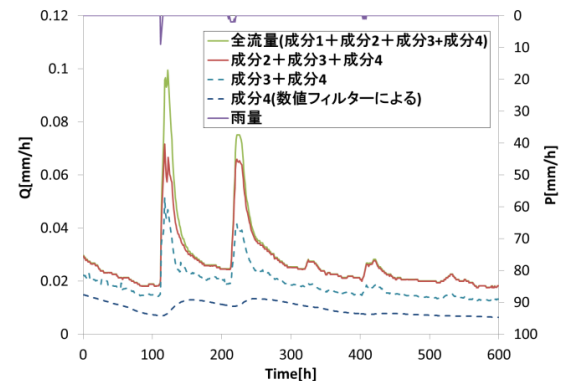


図-11 EMMA による成分分離

検証を行う必要はあるが、時間単位でも分離周波数による解析が行えることが確認できた。そこで、成分分離結果が解析者により結果が異なる逓減係数による成分分離手法ではなく、FFTを用いて分離周波数を計算し、数値フィルター¹⁾で成分分離を行う手法を採用することとした。

3.2 End-Members Mixing Analysis による解析結果

阿久津観測所の毎時の濁度および導電率のデータを用いて横軸に導電率、縦軸に濁度をとって Mixing Diagram を描き(図-10)、3 点の End Member を EM1, EM2, EM3 とし、座標を求めると EM1=(2,260), EM2=(6,3), EM3=(27,0)となった。EMMA では降雨に対する応答の遅い基底流出成分が分離できなかったため、数値フィルターで求めた基底流出成分を分離した上で EMMA によってさらに成分分離を行った。成分分離を行った結果が図-11 である。

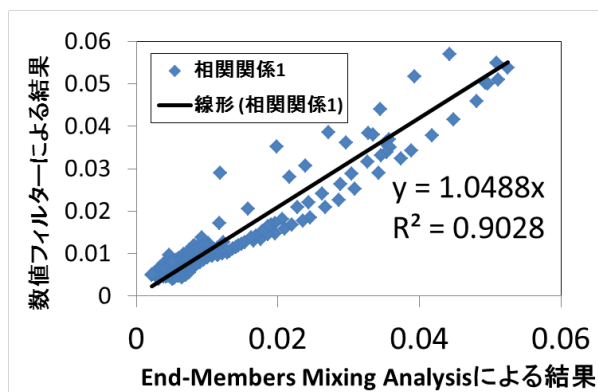


図-12 表面流出成分と EMMA の成分 1
+ 成分 2 の関係

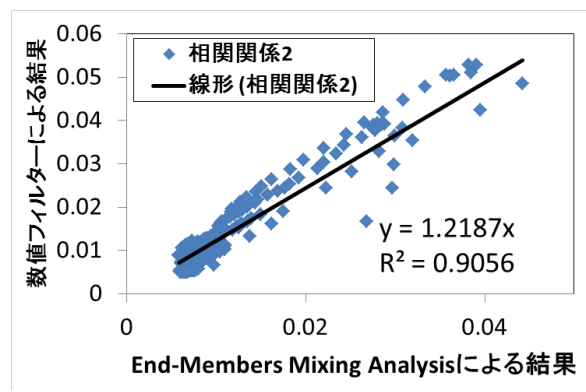


図-13 中間流出成分と EMMA の成分
3 の関係

3.3 数値フィルターと End-Members Mixing Analysis による成分分離結果の比較

数値フィルターおよび EMMA による成分分離結果の比較を行うが、基底流出成分に関しては数値フィルターを用いた方法で全流量から差し引いた上で、残りの成分に関する比較を行っている。これは、本研究で利用した水質データには、基底流出成分のトレーサーとなりうる長周期の変動を示すものが含まれなかったためである。

数値フィルターおよび EMMA の両手法で分離した成分同士を比較した結果、数値フィルターで分離した表面流出成分と EMMA で分離した 3 成分のうち成分 1(EM1 起源)と成分 2(EM2 起源)を足し合わせたものが非常に似通っていることが分かった (図-12)。また、数値フィルターによって分離した「速い中間流出成分+遅い中間流出成分」と EMMA における成分 3(EM3 起源)についても似通っていることが分かった (図-13)。以上より、濁度と導電率のデータを用いると、数値フィルターを用いて客観的に成分分離された速い表面流出成分および中間流出成分に相当する成分に分離できることがわかった。しかし、上述のように、基底流出成分を分離する毎時の水質データに関しては見つけることができなかった。

4 まとめ

本研究は降雨流出モデルのモデル構造やパラメータの不確実性に関する問題の解決に資するため、流量時系列データのフィルタリング手法や河川の水質時系列データを利用し、河川流量の成分分離を行う方法を検討することを目的とした。具体的には、フィルタリング手法には FFT と数値フィルターを組み合わせた成分分離方法を採用し、水質時系列データを利用した成分分離手法には End-Members Mixing Analysis(EMMA)を採用し、両成分分離手法の比較検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 逓減曲線(対数プロット)と分離周波数による解析では、応答の速い部分では若干差異があったものの、両者に相関がみられた。
- ② 数値フィルターを用いた解析によると、阿武隈川の対象観測点の河川流量は、4~5 つに成分分離でき、下流部に行くほど成分数が増える傾向が確認された。
- ③ End-Members Mixing Analysis (EMMA)は、主に小流域において用いられていた解析法だが、

大河川でも用いることができた。

- ④ 水質を用いた解析 (EMMA) ではトレーサーとして濁度と導電率を用いたが、これらによって成分分離した結果は、一番応答の遅い成分が数値フィルターの成分分離の結果よりも成分数が多かった。そのため、数値フィルターで得られた基底流出成分を除いて解析を行う必要があった。
- ⑤ 数値フィルターによる分離結果と水質による分離結果を比較した結果、表面流出成分と中間流出成分を分けるトレーサーとして濁度と導電率を用いることができることが分かった。一方、本研究で解決すべき問題も見出された。具体的には、基底流出成分の分離に利用できる水質データがなかったため、これを見つける必要があることである。水温は季節変動のよい指標になり得るが、ここで言及している基底流出成分はもう少し短い周期で変動する成分であったため、利用できなかった。今後、観測が比較的簡単な水質項目を見出す予定である。また、EMMA を行う際、2 年分のデータを用いても恒久的な End-member の値には帰着できないと考え、直感的に決めた。このため、End-Member の決定が成分分離結果に与える影響を評価しながら、End-Member に求められる精度を明らかにするとともに、長期的水質データを集めることで End-Member の恒久的な値を決定する方法も検討する必要がある。

謝辞

東京大学総括プロジェクト機構「水の知」(サントリー) 総括寄付講座, 科学研究費補助金 (若手研究 B, 21760381), 環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4), 科学研究費補助金 (基盤研究 B, 22360192, 代表: 風間聡), 福島大学自然共生再生プロジェクト「阿武隈川流域水循環系の健全化に関する研究」・「裏磐梯の人間－自然環境系に関する研究」の成果の一部である。本研究は国土交通省所管の水文水質データベースを活用した。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 日野幹雄・長谷部正彦: 水文流出解析 FORTRAN と BASIC による, 森北出版, 1985.
- 2) 長谷部正彦・日野幹雄: 安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) および硝酸イオン濃度 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) による流出分離とフィルター分離 AR 法による成分分離について, 土木学会論文集, 第 387 号/II-8, pp.229-235, 1987.
- 3) 長谷部正彦・日野幹雄・星清: フィルター分離 AR 法による流出予測と他の流出モデルとの比較評価について, 土木学会論文集, 第 405 号/II-11, pp.195-204, 1989.
- 4) 日野幹雄・長谷部正彦: フィルターAR 法による非線形流出系の同定と予測(時間単位), 土木学会論文報告集, 第 324 号/II-8, pp.83-94, 1982.
- 5) 日野幹雄・長谷部正彦: 流出成分への降雨分離則および部分流出域と流域貯留の関係について, 土木学会論文集, 第 357 号/II-3, pp.133-140, 1985.
- 6) 上條善康・島田正志・中村良太: 流出解析・フィルタ分離 AR 法に関するパラメータ同定問題, 水文・水資源学会誌, 第 12 巻, pp.231-241, 1999.