

水面振動の特性を考慮したフィルタリングによる

ダム貯水池流入流量の高精度推定法

学位論文内容の要旨

ダム貯水池へ時々刻々流入してくる水量を正確に知ることはダム管理・運営のために最も重要なことである。しかし、実際には十分な精度で流入量の推定がなされているとは言い難く、ダム管理者は経験による操作を余儀なくされているのが現状である。

ダム貯水池の流入量は静水位の時間変化量を貯留量の時間量に変換して求める貯留分流入量にダム放流量を加えて推定されており、その精度は静水位の計測・推定の精度に大きく依存している。しかし、実際の水位データの静水位情報は様々な水面変動に起因するノイズによって乱されているため、流入量の推定は非常に困難であり、洪水時に洪水波形が得られないことすらある。現行の推定法は水位平滑化に移動平均法を採用しているが、平均時間はダム管理上 10 分間と定められている。このため 10 分以上の周期を持つ変動に対する平滑効果の劣化もこのような現状を作り出す原因の一つとなっている。

過去の研究では水位平滑化法として 1) フーリエ級数を用いる方法 2) カルマンフィルタを用いる方法 3) 水位情報と河川流量の情報を併用する方法が提案されているのみである。1) の方法は必要とされるリアルタイム推定の観点から実用化が困難であり、2) の方法は推定精度の向上ではなくダムゲートの制御を目的とした研究である。また 3) の方法は経験的要素が大きい手法である。このように実用的かつ理論的に整った水位平滑化法はいまだ無い状況にある。

本論文は実際にダム貯水池に生じる水面振動の特性を念頭に置き、現行法の基本となる水位情報から理論的に流入量を推定する実用的な手法の開発を目的としている。

本論文は全 6 章から構成されている。

第 1 章ではダム管理の現場における流入量推定の重要性和問題点及び過去の研究例を示した上で、本研究の目的を述べている。

第 2 章では本研究で対象とした定山溪ダム貯水池と金山ダム貯水池の概要及び両貯水池で実施した多点同時水位計測について説明しており、計測で実際に確認できた水面変動とこれらが流入量推定に与える問題について述べている。本計測では定山溪ダムで 5 点の同時水位を 1 秒間隔でサンプリングし、金山ダムでは 4 点の同時水位を 5 秒間隔でサンプリングするという貴重なデータを得た。本計測から得た多点同時水位データの時系列解析から、セイシュ・うなり・風による水面の吹き寄せ現象による水面変動が水位データ中のノイズとなり流入量推定に深刻な問題を与えていることを確認した。

第 3 章では流入量推定で特に問題となるセイシュ及び風による水面の吹き寄せ現象をモデル化して現象解析を行うことでその性質を明らかにしている。これらの現象を風が湖面に与えるせん断力を外力として生じるとすると、風外力を表す強制項を有する波動方程式型の水面振動方程式が現象の基礎方程式として得られる。定山溪ダム・金山ダムともに貯水池の縦断形状を堤体から直線的に浅くなる三角形に、また、平面形状を定山溪ダム・金山ダムでそれぞれ、上流側が細

くなる三角形と矩形に近似した水面振動方程式の解析解を求めた。この解析から得られた知見は以下のようになる。

- (1) セイシュを表す水面振動方程式の同次解から得られるセイシュ理論周期と理論水面形は両貯水池で確認された実測のセイシュ周期と節位置を非常に良く再現できる。
- (2) 吹き寄せ現象を表す水面振動方程式の非同次解から貯水池内で吹き寄せの影響を受けない「吹き寄せの節」が第 1 モードセイシュの節位置とほぼ同じ位置に現れることを確認した。すなわち、吹き寄せの節位置付近での水位データが流入量推定に有用となる。
- (3) 堤体から直線的に浅くなる縦断形状を有する貯水池においてセイシュの周期と節位置が未計測の場合でも、平面形状が三角形及び矩形である場合の 2 種類の同次解を用いておよその貯水池でセイシュの周期と節位置を知ることのできる可能性を示した。

第 4 章では第 2 章と第 3 章で得た知見を踏まえた全く新しい流入量推定精度向上の試みとして、セイシュ信号をリアルタイムで水位データから除去するディジタルフィルタ（貯水位平滑化フィルタ）の開発及び貯水位平滑化フィルタの特性解析を行っている。貯水位平滑化フィルタはある特定の周波数成分を除去する再帰型ディジタルノッチフィルタ（IIR ノッチフィルタ）により振幅が大きく、周期も長い上位 3 モードのセイシュ信号を除去し、かつ再帰型ディジタルローパスフィルタ（IIR ローパスフィルタ）によりその他の高周波成分を除去するものである。ディジタルフィルタの出力には時間遅れが生じる特性があるが、金山ダム・定山溪ダムでそれぞれ 20 分と 15 分の遅れ時間を貯水位平滑化フィルタに認めると、現行の 10 分間移動平均処理によって得られた推定流入量と比べて、セイシュの影響による振動を大きく抑えた実用に耐えうる推定が可能であった。

ダム貯水池への流入量や静水位の真値は知りえない量であるため、フィルタ処理で得られた推定静水位や推定流入量をそのまま用いてフィルタの性能を評価することは不可能である。そこで、フィルタ入出力前後の自己相関関数の変化を調べることでフィルタの性能を評価した。すなわち、実水位データから真値となる静水位の変動が持つ自己相関関数を推定して、この自己相関関数を持つ信号が貯水位平滑化フィルタに入力された場合にフィルタ出力が持つ自己相関関数を調べた。この結果、出力真値信号の持つ分散は入力真値信号のもつ分散よりも小さくなることを確認した。貯水位平滑化フィルタはダム水位を平滑化するフィルタとしては有利な性能を持つことが確認された。

第 5 章では貯水位平滑化フィルタの持つ問題である時間遅れの解決法を提案している。貯水位平滑化フィルタを用いた静水位・流入量の推定には金山ダム用フィルタで 20 分、定山溪ダム用フィルタで 10 分の時間遅れを伴う。フィルタ出力に生じる時間遅れはダム管理上不利な要素である。この問題の解決には予測の概念を現時刻推定システムに導入することが必要である。すなわち、20 分の時間遅れを認めた貯水位平滑化フィルタの場合、貯水位平滑化フィルタで得られた現時刻の流入量は 20 分前の流入量であるため、現時刻の流入量（実際には 20 分前の流入量）から 20 分先の予測を行い、この予測値を時間遅れなしの現時刻推定値とする必要がある。そこで、貯水位平滑化フィルタで平滑化された水位から得られた現時刻の流入量を観測値に、また損失雨量を考慮した星による 2 価非線形の貯留関数を線形化してシステムに採用したカルマンフィルタを用いることで予測の概念を取り入れてディジタルフィルタの出力に生じる時間遅れをカバーした。システムとして採用した流出モデルのパラメータを適切に定めることができれば、時間遅れのない流入量の現時刻推定が可能であることを確認した。こうしたカルマンフィルタによる精度良好な予測手法は、はじめて得られたものである。

第 6 章では本研究の成果を総括したまとめと、今後の展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 助教授 清 水 康 行

学 位 論 文 題 名

水面振動の特性を考慮したフィルタリングによる ダム貯水池流入流量の高精度推定法

ダム貯水池への流入量推定は、貯水池連続式の逆問題として定式化されることが指摘されており、このため貯水位の僅少の誤差（変動）が流入量の推定値に大きく影響することが知られている。流入量推定精度の向上をはかるためには、①貯水位計測データに含まれる誤差（変動）成分の性質解明をはかること、②それらをふまえた適切な方法により誤差（変動）成分の除去をおこなうことが必要である。

本研究は、①に関して、定山溪ダムと金山ダムというタイプの異なる2つのダム貯水池における多点同時水位計測をもとに、変動成分として最も影響の大きいセイシュ振動の特性解明をおこない、②に関して、これらを除く新しいフィルターの開発をはかったものであり、あわせて必然的に伴う出力の遅れを予測フィルターの適用によって補う方法を提案している。

本論文は6章から構成されている。

第1章は、ダム流入量推定の重要性和既往研究のレビューが述べられており、実用的でかつ理論的に整った推定法がいまだ存在しないことが指摘されている。

第2章は、定山溪ダムおよび金山ダムの各貯水池に関する多くの水位変動事例をもとに、ダム貯水池に生じる水面変動の実際が調べられている。すなわち、両ダムにおける多点同時水位計測データ・風計測データ、およびそれらに関する相関解析・スペクトル解析から、貯水池水面においては、周期の短いものから順に、(1)風波、(2)貯水池に固有な周期をもつ複数モードのセイシュ振動、(3)セイシュの重なりによるうなり、(4)風による吹き寄せの各変動が現れていることを明らかにしている。

第3章は、2章の水位変動現象に関する理論的な解析がおこなわれている。すなわち、風による水面せん断力、および底面における摩擦力を考慮した1次元運動量方程式と連続式を貯水池に適用し、線形近似のもとで波動方程式を誘導するとともに、定山溪、金山それぞれの貯水池縦断形状・平面形状をモデル化し、水面変位の自由振動解（セイシュ）、強制振動解（吹き寄せ解）を得ている。これらにより、(1)定山溪ダム貯水池では、縦断形状・平面形状をともに三角形に見なすことによって2次ベッセル関数のゼロ点をあたえる固有値を含むセイシュ解を導くことができ、それらの周期ならびに節位置に関する理論解が実測値に良好に合致すること、(2)金山ダム貯水池では、縦断形状を三角形に、平面形状を四角形に見なすことによって1次ベッセル関数のゼロ点をあたえる固有値を含むセイシュ解を導くことができ、それらの周期ならびに節位置に関する理

論解が実測値に良好に合致すること、(3)適切な風速データがあたえられた場合に強制振動解によって水面の吹き寄せ現象を再現しうること、(4)吹き寄せ水面形の節位置は第1モードのセイシュ水面形の節位置に一致し、水位計設置位置として望ましこと、などを明らかにした。これらの結果は、本邦の多くのダム貯水池に適用しうるものと考えられる。

第4章は、貯水位変動を平滑化するための新しいフィルタの開発について述べている。流入量推定に対して最も深刻な影響をおよぼすセイシュ振動は、その最大周期が長く（定山溪 700 秒、金山 2500 秒）単純な移動平均や高周波除去フィルタにては対処できない。本論文では、当該周期波をねらい打ち的に除去する3種のノッチフィルタの適用をはかって第3モードまでのセイシュ振動を除去し、これより高周波のセイシュ振動および風波をローパスフィルタにて除去する方法を採っている。すなわち、3種の2次再帰型デジタルノッチフィルタと1種の2次再帰型デジタルローパスフィルタの直列構成を提案している。フィルタパラメータには、第3モードまでのセイシュ周期の他にノッチバンド幅、カットオフ周波数があり、出力の許容遅れ時間からこれらを決定する関係式が導かれている。提案されたフィルタのさまざまな出水時への適用結果はきわめて有効であり、定山溪ダムで15分、金山ダムで20分の許容遅れを認めた場合、従来法に比して流入量変動幅を1/3程度にまで抑える結果になっている。この章の最後に、フィルタの推定精度に関する検討がおこなわれている。実測水位自己相関をもとに1次マルコフ型時系列の入力を仮定した際のフィルタ応答を調べ、相関係数が高い場合に出力分散が大きくなることを明らかにしている。本章の成果は、金山ダム貯水池にて実用に供されることになり準備中である。

第5章は、平滑化水位から得られる流入量推定の時間遅れに対処するために、カルマンフィルタによる予測をおこない克服する方法を提案している。すなわち、システム方程式として既往の損失を考慮した2価非線形貯留関数モデルの線形化方程式を、観測値方程式として上述の水位平滑化フィルタから得られる推定流量をそれぞれ用い、降雨情報を取り込んで遅れ時間分の予測をおこなうものである。遅れ時間を補正し、かつ観測値を重視するようにシステム誤差共分散と観測誤差共分散を決定するならば、これらの予測手法は良好な結果を示し、遅れ時間の克服が可能であることを示した。提案された手法は、より実際に近い降雨流出を示すシステム方程式の採用によって改良が可能であり、将来予測への発展も期待できる。

第6章は、本論文において得られた結論が述べられている。

これを要するに、著者はダム貯水池における水面変動現象に対する詳細な解析によってその一般的特性を明らかにし、対応する水面変動信号の除去、遅れ時間の補正を可能にする合理的なフィルタを提案することによってダム流入量推定に関する新知見を得たものであり、水文学、河川工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。