

北海道内ダム貯水池の振動特性とその平滑化について

Property and Smoothing of Water Surface Fluctuation in Dam Reservoirs

(財)石狩川振興財団 フェロー 中村 興一 (Kouichi Nakamura)

1. まえがき

ダム貯水池への流入量計算は、貯留量の変化量から算出される「貯留量分流入量」と計算時間内の平均放流量から求められる「放流量分流入量」の和から求めることとされている。いずれの値も貯水位観測値が必要となるが、貯水位単位当り変化量に対する計算流入量の増減は、貯留量分流入量の方がはるかに大きい。数センチ程度の貯水位変化量では、放流量分流入量の増減量はダム管理精度上からは無視できる量である。しかし、貯留量分流入量は貯水池面積により差があるが、1センチ貯水位が変化した場合、数 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ から数 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ の計算流入量の変化量となる。

計算流入量の精度を上げるためには、貯水位の測定精度を高めればよいが、貯水位は風やゲート操作などにより波浪やセイシュが発生し、数秒から数十分周期の振動が発生している。このため、計算流入量は大きな誤差を含み、ダム管理上の大きな課題となっている。現在のダム管理の現場では、数分から数10分間の貯水位の移動平均を用いて平滑化を行っているが多い。しかし、この手法では長周期のセイシュ等による貯水位振動の平滑化には不十分であり、平滑時間の1/2の計算値の遅れなど課題を含んでいる。

本論文では、北海道内の管理ダムでの貯水池振動実体を解明するとともに、これに伴うダム管理上の諸問題とその解決策、貯水位の平滑化についての新しい手法を提案する。

2. 北海道内のダム湖の貯水池振動観測結果

道内の主な直轄管理ダムの貯水池振動観測結果について図-1 から図-6 に示す。貯水位は金山ダムが5秒ごと、その他のダムは2秒ごとの観測値であり、風速は滝里ダムが1時間平均風速であり、その他のダムは貯水位と同じ時間間隔である。また、二風谷ダム、札内川ダムのフロート式水位計の値は1cm単位、その他の水位計は1mm単位である。貯水位観測場所は、札内川ダム、二風谷ダムの全水位計と滝里ダムの「水位観測室」と金山ダムの「ダムサイト」は測水井内、その他の水位計は橋脚や斜路に設置されている。

図-1、2 に示すように、金山、札内川ダムでは、風速が5%程度に達すると、貯水池では数cmの振動が発生し、10%から20%になると5~10 cm程度の大きさに達している。

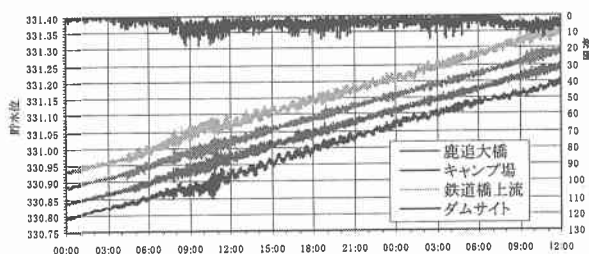


図-1 強風時の金山ダム貯水位観測結果

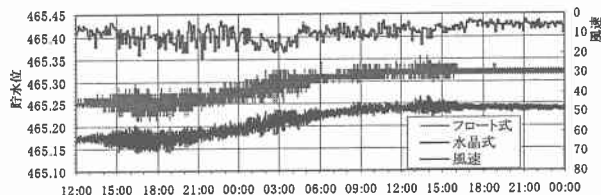


図-2 強風時の札内川ダム貯水位観測結果

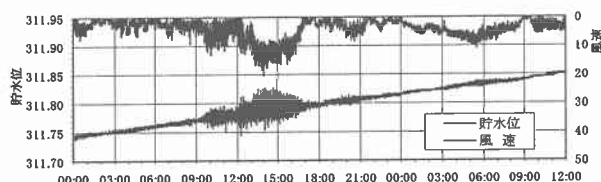


図-3 強風時の十勝ダム貯水位観測結果

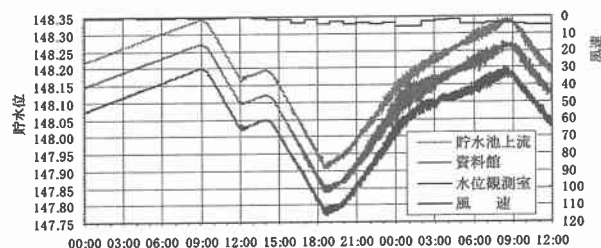


図-4 強風時の滝里ダム貯水位観測結果

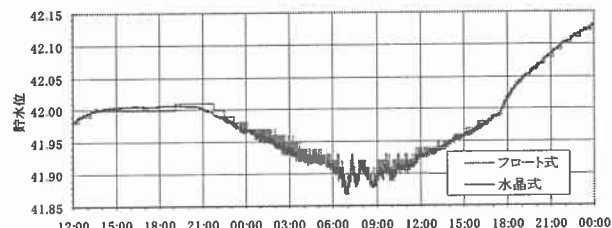


図-5 洪水調節時の二風谷ダム貯水位観測結果

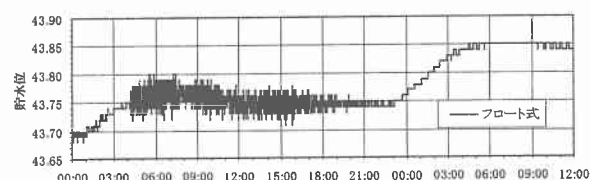


図-6 結氷時の二風谷ダム貯水位観測結果

金山ダムでの振動の発達段階では、多くの周期の波が合成された形となっているが、その後は約40分周期の卓越した波が明確に現れてきている。このような貯水池振動を平滑化するには、平滑時間は少なくとも波の周期以上が必要となり、

このようなことが貯水池流入量計算の精度を低下させる原因となっている。

この卓越した周期の振動は、風が弱まった後も減衰しながら長時間にわたって継続する傾向がある。このときの観測結果を図-7に示す。

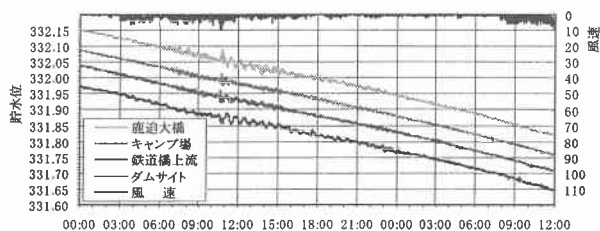


図-7 金山ダムでの卓越長周期振動の継続

図-3に示す十勝ダムでは、金山、札内川ダムとは違った波形を呈している。風速が5%程度までは、振幅が1 cmに満たない振動であるが、風速が10%程度になると急速に発達し、20%程度で7~8 cmの大きさに達する。しかし、風が弱まった後は、金山ダムに見られるような卓越した周期の波の出現や、長時間にわたる振動の継続は発生せず、急速に収束する。これは、コンクリートダムとロックフィルダムの上流面勾配と表面形状の違い(得にリップラップの有無)による、反射率と減勢効果の差によるものと考えられる。

滝里ダムにおいては、急激な発電ゲート開閉による貯水池振動が見られる。図-4示す貯水位変動は発電放流の開始、停止によるものである。風速が弱く、貯水位振動が小さい12:00頃の水位上昇に転じた時に、2 cm程度の振動が発生し、風による振動が発達し始めた18:30頃の変曲点では、振幅が2倍ほどに増幅されている。

同様な現象が起こっていた別なデータの拡大図を図-8示す。12:00頃と20:00頃に発電ゲートが閉められ、貯水位上昇に転じているが、この時の振幅は2 cm程度、周期は10分程である。また、15:40頃には、ゲートが開かれ貯水位低下が始まっているが、この時は1 cm程の水位低下が見られる。滝里ダムでは、10分間に2 cmの水位変化が生じた場合の流入量は160 m³/s程に相当する。

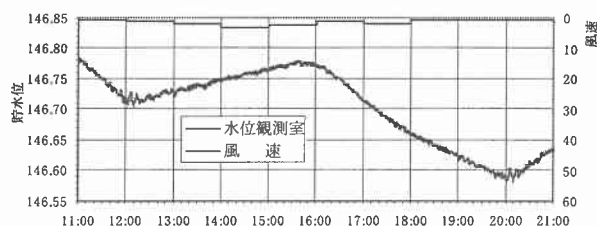


図-8 滝里ダムでの発電ゲート開閉時の貯水池振動

二風谷ダムでの数値シミュレーションでは、35 m³/sの放流量増加を伴うゲート操作時に、その近傍での貯水池変化がおよそ1 cm、115 m³/sの時はおよそ3 cmになるとの報告がある。今回は、貯水池振動が急激なゲート開閉によっても発生していることが現場段階で確認された。

図-5に示す二風谷ダムの6:00~9:00にかけての貯水位変動は、洪水時のゲート操作によるものである。二風谷ダムは流入量1,900 m³/sまでは流入量と放流量を一致させ、

その後は流入量の一定率を放流する計画となっている。このため、他のダムに比べ流入量計算精度のより高いものが要求される。

図-6は、二風谷ダムでの結氷期の測水井内水位変化である。最大で約8 cm振幅の振動が生じ、20時間近くにわたり継続している。これは、貯水池側が結氷し、密閉された巨大な容器となり、測水井側は開放された自由水面であり、このため、貯水池の発電放流開始による微小振動が、測水井側で大きく増幅されたことによるものと思われる。

金山ダム、滝里ダムでは、測水井内と貯水池側の複数地点で同時貯水位が観測されている(図-1、4)。いずれも測水井による減衰効果はさほど発揮されていない。これは、導水孔しぼり率(導水孔断面積/測水井断面積)が所要の値(1/500程度)になっていなかったことによるものである。

3. 貯水位の計測と平滑化

3.1 標準設計仕様書による貯水位の計測と平滑化

ダム湖に設置された水位計では、2秒間内の0.2~0.5秒ごとに抽出した瞬間水位について、各種検定を行い計測貯水位としてダムコンピュータに送信している。

「ダム管理用制御処理設備 標準設計仕様書(案)」では、計測貯水位の1分間分(欠測のない場合は30個)の単純平均値を1次平滑貯水位とし、2秒ごとに更新することとしている。

貯水位1次平滑処理では、数十秒程度の短周期貯水池振動は除去できるが、それ以上の長周期振動の平滑化はできない。このため、数分周期の振動除去目的で、貯水位2次平滑処理を行うこととしている。この方法は、毎正分時の1次平滑貯水位の10個程度の移動平均を用いることを基本とし、平滑化に用いるデータ数は、各ダムの貯水池特性や振動特性に応じて設定できるとしている。

$$H_a(t) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N H_{a1}(t-i) \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $H_a(t)$ は t 分の2次平滑貯水位(分ごと)、 $H_{a1}(t)$ は t 分の1次平滑貯水位(分ごと)、 N は移動平均数(1から10程度)

3.2 札内川ダムでの平滑化手法

札内川ダムでは、2秒毎に更新される1次平滑貯水位(2秒毎計測貯水位の1分間平均水位)の30分間データを用い、最小二乗法により、2次平滑化処理と平滑化による1/2時間遅れ(15分遅れ)の外挿近似を行っている。

図-9に強風時の札内川ダムでの1次平滑貯水位と2次平滑貯水位の計算結果を示す。1次平滑貯水位は最大で5 cm以上の振動をしており、2次平滑貯水位は流入量計算に用いるには不十分な結果となっている。

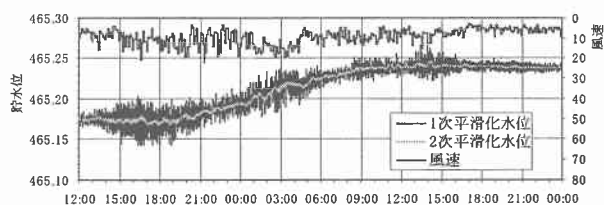


図-9 札内川ダムでの1次・2次平滑化水位

4. 流入量計算精度に影響する要因

4.1 流入量計算式

貯水池流入量は、一定時間内における貯留量の変化分と、この時間内の平均放流量の和で計算され、(2)式のようになる。この値は「仮想流入量」と呼ばれることもあり、さらに、右辺第1項を「流入量分(仮想)流入量」、第2項を「放流量分(仮想)流入量」としている。

$$Q_i = \frac{1}{60T}(V_i - V_{T+i}) + \frac{1}{T+1} \sum_{j=i}^{T+i} O_j \cdots \cdots (2)$$

ここに、 Q_i は時刻 t_i におけるダム流入量(m^3/s)、 V_i は時刻 t_i における平滑水位から求まる貯留量(m^3)、 T は貯水位変化に要した時間(分)(最小値は10分)、 t_i は流入量計測時刻(現時刻)を t_0 とし、その i 分前の時刻(分)、 O_j は時刻 t_j に測定された毎正分時の瞬間放流量(m^3/s)

流入量計算結果に大きく影響する項目は、(2)式の右辺第1項「貯留量分流入量」である。この計算精度を上げるためには、貯留量の増減と貯水位変化に要した時間を正確に把握できれば良い。貯留量は貯水位から求められるから、貯水位をいかに正確に測定するかにかかってくる。

4.2 流入量計算タイミング

流入量計算タイミング間隔の最小値は10分である。これは、ダム管理の基本は、流入量の変化量に対してゲート等の操作を行うものであり、流入量の増減の見極めに最低でも10分は必要である、との考え方からきている。

図-10の上段に貯水位変化図を、中段には標準設計仕書に示されている貯水位変化方式での計算タイミングを示す。新標準設計仕様書の計算タイミングでは、貯水位変化に10分以上要した場合には、分単位の実変化時間で計算するようになっている。(10分+ α 、10分+ β の時)

しかし、10分以内で貯水位が変化した場合には、10分で変化したと仮定した計算をしており、計算流入量は真値より小さな値となる。このような計算タイミングが、流入量計算結果にどのような影響を及ぼしているか、滝里ダムの実測デー

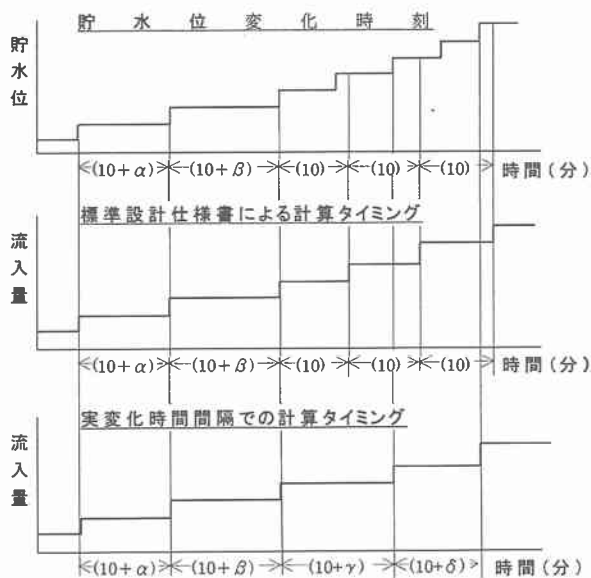


図-10 貯水位変化時刻と流入量計算タイミング

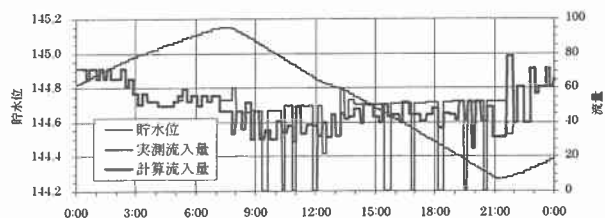


図-11 流入量計算タイミングの違いによる比較

タに基づき検証検証してみる。

図-11の「実測流入量」は、0~60 m^3/s の変動をしており、9:00から21:00にかけて、ゼロ値となっている時間帯がある。(計算値はマイナスであるが、表示はゼロとなっている。)この原因は、貯水位変化が生じた実時間が計算タイミングになっていないことにある。

この解決策として、図-10の下段に示すように、「直前流入量計算時刻から10分以上経過し、かつ、貯水位が変化した時刻(10分+ γ 、10分+ δ の時)」を計算タイミングとした。これにより計算したものが、図-11の「計算流入量」である。貯水位変化に要した実時間を用いた為、安定した計算結果となっており、ゼロ値は解消されている。それでもまだ10~20 m^3/s 程の振れ幅があるが、これは時間単位が分単位であることが大きな原因と推測され、秒単位とすればさらに改善されると思われる。

4.3 フーリエ級数による貯水位平滑化

ダム流入量計算の精度に最も影響を与えているのは、貯水池の振動やセンシュによる貯水位の変動である。図-12に貯水池振動が発生している時の実測流入量を示す。図-11の貯水位は、階段状の規則的な値となっているが、図-12では貯水位変化が一樣でない。このため流入量は短時間に最大120 m^3/s 程の振れ幅を示している。

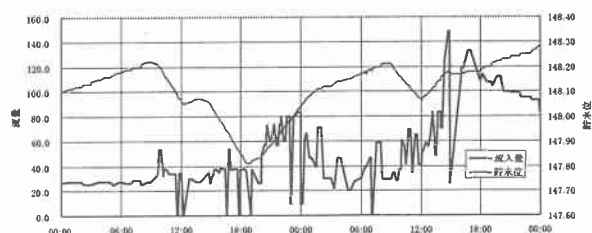


図-12 貯水池振動発生時の滝里ダムでの流入量計算結果

これを解決するためには、貯水位を平滑化する必要があるが、これにフーリエ級数を用いる手法について、以下に説明する。

等間隔時間($t = t_0, t_1, t_2, \dots, t_r$)に観測された($r+1$)個の貯水位データ($h = h_0, h_1, h_2, \dots, h_r$)を区間 $(0, 2\pi)$ に変換し

$$t' = t \frac{2\pi}{r} \text{としたとき}$$

全区間の n 次のフーリエ級数での近似式は

$$S_n(t') = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kt' + b_k \sin kt') \cdots \cdots (3)$$

$$a_m = \frac{2}{r} \sum_{k=1}^r h_k \cos \frac{2m\pi}{r} k \quad (m=0,1,2,\dots,n) \dots (4)$$

$$b_m = \frac{2}{r} \sum_{k=1}^r h_k \sin \frac{2m\pi}{r} k \quad (m=1,2,\dots,n) \dots (5)$$

で与えられる。

また 0 次のフーリエ級数での近似式は

$$S_0(t') = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r h_k \dots \dots \dots (6)$$

となり、初期値 h_0 を除いた r 個の h の平均値となる。

また、(3) 式で近似値を計算する場合、中間点 ($t' = \pi$) では三角関数項が定数項になり、次式で表せる。

$$S_n(t_\pi) = \frac{a_0}{2} - a_1 + a_2 - \dots (-1)^n a_n \dots \dots \dots (7)$$

4.5 フーリエ級数を用いた貯水位平滑化計算結果

フーリエ級数を用いた貯水池の平滑化は、次の様な手順で行う。

- ① 観測された貯水位振動の卓越周期の 2 倍程度を、平滑化時間間隔 (T) とする。(2 秒毎データの場合は $T = 2r$ 秒)
- ② このデータで(4)、(5)式を用い、フーリエ係数を計算し、近似時間 t を与え、(3)式から平滑水位を求める。
- ③ フーリエ級数での関数近似は中間点付近での近似精度が高く、両端部では精度は落ちるが、貯水位平滑化に用いる場合は、図-13、14 に示すように $t = T \cdot 5/6$ 程度までは適応可能である。単純平均法による平滑化では、1/2 時間遅れが問題となるが、この手法では 1/6 (計算例では平滑時間 40 分の 1/6 の 6.7 分) の遅れで済む。
- ④ この計算を貯水位データが更新される 2 秒毎に行う。

図-13、14 に、弱風から強風に変化し、貯水池の振動も徐々に発達して行く場合に、平滑時間 40 分でフーリエ級数を用い平滑化を行った滝里ダムでの例を示す。全ての区間にわたってスムーズな平滑化がされている。

図-15、16 に、十勝ダムでの台風による洪水時の標準設計仕様書に従った流入量計算と、フーリエ級数を用い平滑化を行った後の流入量計算結果を示す。標準設計仕様書による結果は、ピーク付近で最大 80 m³/s 程の振れ幅があるが、フーリエ級数では大幅に改善され、ピーク発生時刻も明確になっている。

この洪水時には、図-15 から分かるように大きな貯水池振動は発生していなく、図-16 の平滑化後の貯水位は、図上ではほとんど差がない。標準設計仕様書では、貯水位を cm 単位、時間を分単位で計測することとなっているが、フーリエ級数では、貯水位を mm 単位、時間を秒単位とすることが可能となった。このことが、計量枘としての貯水池容量の目盛りをきめ細かにし精度を上げることが可能となり、流入量計算の精度向上になったものと思われる。フーリエ級数を用いた貯水位平滑化手法の有効性と安定性が、この図からも認められる。

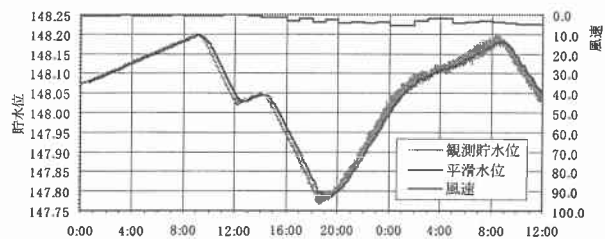


図-13 フーリエ級数を用いた平滑化計算結果 (計算点=T・6/6)

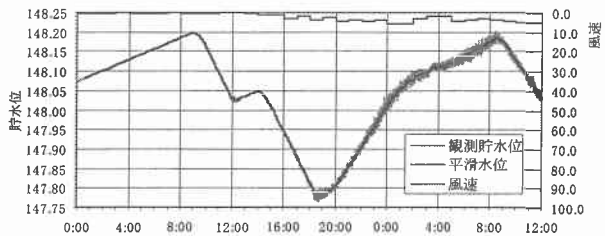


図-14 フーリエ級数を用いた平滑化計算結果 (計算点=T・5/6)

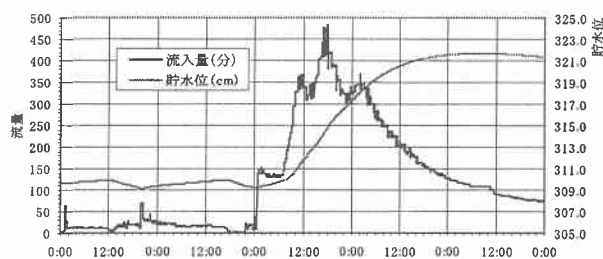


図-15 標準設計仕様書による手法での流入量計算結果

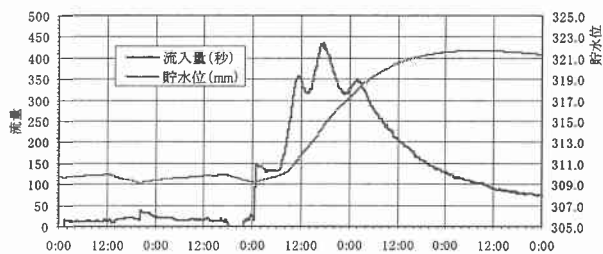


図-16 フーリエ級数平滑化を用いた流入量計算結果

5. あとがき

この論文に使用したダム貯水池データは、北海道開発局のダム管理所の多大な協力を得て収集した。また、現場での諸問題についても提供していただき、現象解明と解決策の見いだしに大変参考になった。ここに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) ダム管理用制御処理設備 標準設計仕様書(案)、(財)ダム水源地環境整備センター
- 2) 石田享平・中村興一・鈴木洋之・藤田陸博:ダム貯水池流入量の推定精度向上に関する研究、水文・水資源学会誌、第13巻1号、pp. 31-43、2000
- 3) 高瀬貞雄・石田享平・中村興一:ダムへの流入量の計算方法の問題と精度向上に関する研究、ダム技術No.134、pp. 24-29、1997