

ダム貯水池振動特性と貯水位平滑化について

CHARACTERISTICS AND SMOOTHING OF WATER LEVEL FLUCTUATIONS IN DAM RESERVOIRS

中村 興一¹・藤間 聡²・中村 篤史³

Kouichi Nakamura, Satoshi Tohma and Atushi Nakamura

¹フェロー会員 (財) 石狩川振興財団 専務理事 (〒060-0051 札幌市中央区南一条東一丁目5番地)

²フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 藤間 聡 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

³正会員 (財) 石狩川振興財団 企画部 (〒060-0051 札幌市中央区南一条東一丁目5番地)

Accurate predictions of inflows to dam reservoirs are the most important information for operations and managements. The water levels in the reservoirs are significantly influenced by wind and seiche resulting from gate operations and hence the computed inflow volumes are highly fluctuated with relatively large errors.

The characteristics of fluctuations in water levels of reservoirs managed by Regional Hokkaido Development Bureau are practically clarified in this paper. The present study proposes a new smoothing method of fluctuated water levels in dam reservoirs, using Fourier analysis. The proposed method can easily be applied to the practical situations where the inflows are estimated with high accuracy.

Key Words : *fluctuated water levels in dam reservoirs, seiche, smoothing method*

1. はじめに

ダム貯水池への流入量は、ダム管理における最も重要な情報の一つであり、流入量を的確に把握することが安全かつ効果的なダム操作を行うための必須条件となる。

流入量の計算方法はダム管理用制御処理設備標準設計仕様書(案)¹⁾(以降「標準設計仕様書」という)に規定されており、一定時間内におけるダム貯留量の変化量から算出される「貯留量分流入量」とこの間の平均放流量である「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。

ダム貯水池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することにより、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、標準設計仕様書¹⁾に基づき、数分から数十分間の貯水位の移動平均を用

いて貯水位の平滑化を行っているのが多い²⁾。しかし、この手法では長周期のセイシュ等による貯水位の平滑化には不十分である。このため、最近では FIR (Finite Impulse Response) フィルタ³⁾や IIR (Infinite Impulse Response) フィルタ⁴⁾のデジタルフィルタを用いた平滑化手法が開発されているが、これらの平滑化手法では、1/2 時間遅れが避けて通れない課題となっている。

本論文では、観測データを基にダムの貯水池振動実体を解明すると共に、これに伴うダム管理上の最大の課題である貯水位の平滑化についての新しい手法を提案する。

2. 北海道内のダム貯水池振動観測結果

解析に用いたダムは、金山、滝里、二風谷、十勝の4ダムである。風速は滝里ダムが1時間平均風速で、その他のダムは貯水位と同じ時間間隔である。また、貯水位測定単位は、二風谷ダムは1cm単位、その他のダムは1mm単位である。水位計は、十勝ダムはダム堤体から300m離れた左岸斜路部に、その他のダムはダム堤体内に埋設された測水井に設置されている。また、4ダムの諸元及び貯水位観測時間間隔は表-1のとおりである。

表-1 解析に用いた北海道開発局管理のダム諸元等

ダム名	ダム型式	ダム高 (m)	流域面積 (km ²)	湛水面積 (km ²)	総貯留容量 (千m ³)	貯水位観測時間間隔
金山	HG	57.3	470	9.2	150,450	5秒
滝里	G	50.0	1,662	6.8	108,000	2秒
二風谷	G	32.0	1,215	4.3	31,500	2秒
十勝	R	84.3	592	4.2	112,000	2秒

HG: 中空重力式コンクリートダム, G: 重力式コンクリートダム,
R: ロックフィルダム

(1) 測水井の貯水池振動減衰効果

ロックフィルダムのような構造的に測水井設置が不可能な場合を除き、ほとんどのダムでは貯水位観測のために測水井が設けられている。これは結氷や流木から水位計を保護することと、貯水池振動を平滑化させることを目的としている。

単構造測水井による貯水池振動の平滑化効果を把握することを目的に、測水井内とこの直上流の堤体上流面に設置された水晶式水位計により、測水井内と測水井外（貯水池側）の貯水池振動の同時観測を行った。そのデータについての検討結果を以下に示す。

a) 測水井内の貯水池振動特性

ダム貯水位を測定する測水井は、図-1に示すような単構造測水井が、ほとんどのダムで用いられているようである。貯水池振動減衰率 (h_0/H_0) は、貯水池振動周期と導水孔のしぼり率 (a/A) (導水孔断面積/測水井断面積) により変化し、しぼり率=1/500の場合、1分周期の波の減衰率は0.3、2分周期の波は0.7程度となり、4分周期以上の波では減衰効果は無くなる⁵⁾。「ダム管理の実務」では、このしぼり率は、「1/400~1/500 とすることがよいと認められている。」と記載されており、多くのダムがこの範囲内にしぼり率を収めるように設計されている。

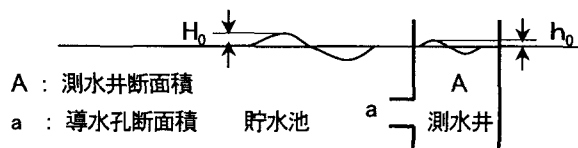


図-1 単構造測水井の模式図

b) 測水井内外の貯水池振動観測結果とそのスペクトル

滝里ダムにおける風に起因する貯水池振動が発生している時の測水井内外の観測結果を図-2に示す。滝里ダム測水井のしぼり率は1/417で、標準的な値となっている。測水井外の最大振幅は6cm程であるが、測水井内では3cm程に減衰されており測水井による減衰効果が認められる。測水井による周期帯ごとの減衰効果を確認するため、測水井内外振動観測値を用いフーリエ・スペクトル解析を行った。

図-3に示す測水井外スペクトルでは、1分40秒をピークに30秒から3分程の周期帯に卓越周期が集中し、10

分前後と40分に長周期のピークが見られる。

また、図-4に示す測水井内スペクトルでも、測水井外と同じスペクトル波形を呈しているが、2分20秒以下の周期帯では振幅が小さくなっており、この周期帯での測水井による減衰効果が認められる。しかし、3分以上の周期では振幅に若干の変動があるものの、振幅に大きな差異は認められ難い。

図-5は、測水井内外フーリエ・スペクトルの同周期の振幅比率を減衰率と定義し、計算した結果である。0.3分以下の周期の減衰率は25%以下の値となっているが、0.3分からはほぼ直線的に増加し、2分前後では30~80%、3分前後では40~130%となっている。5分以上の中長周期帯では、減衰率の下限値は50%ほどとなり長周期になるにつれ、測水井による減衰効果は低下している。

このように測水井では、短周期波と長周期波では貯水位の平滑化効果に差があり、このことが測水井が設置されているダムでも流入量計算精度が向上しない原因となっている。流入量計算精度に影響を与える周期までの波を平滑する方法が、ダム管理現場では必要となっている。

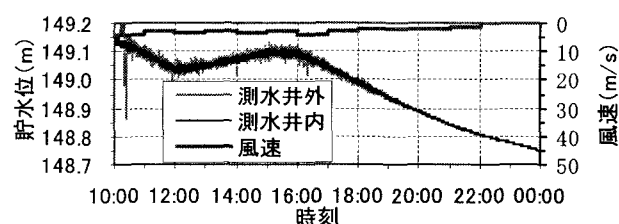


図-2 測水井内外の貯水位観測結果 (滝里ダム 2002. 11. 26)

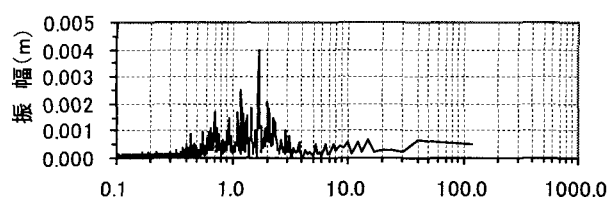


図-3 測水井外（貯水池側）スペクトル (13:00~15:00)

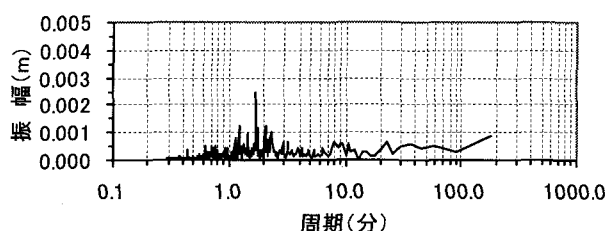


図-4 測水井内スペクトル (13:00~15:00)

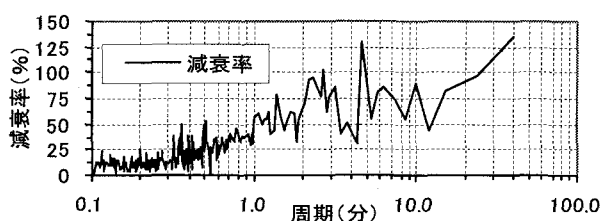


図-5 測水井内外振幅の減衰率

(2) 金山ダム強風時の貯水池振動特性

ダム流入量計算精度を低下させる原因が、強風による貯水池振動であることは多くのダムで観測されており、ゲート操作に起因する貯水池振動の場合も有る⁵⁾。種々な原因による貯水池振動の最長周期波まで完全に平滑化できれば、流入量計算精度は大きく向上する。平滑化に必要となる周期を確認するため、貯水池振動が最も多く発生している強風時における貯水池振動解析を行なった。

金山ダムでの強風時の観測貯水位を図-6に、この貯水位から、貯留量変化による貯水位の上昇成分を分離した変動成分を図-7に示す。風速が5 m/s程度に達すると、貯水池では数cmの振動が発生し、10 m/sから20 m/sになると5～10 cm程度の大きさに達している。貯水池振動の振幅が最大となる段階では、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分周期の正弦波状の卓越した波が明確に現れてきている。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。金山ダムでは他ダムに比べ、卓越長周期の波の発達とこの長時間継続が顕著であり、ダム流入量計算の精度を下げる大きな原因となっている。

図-6に示した貯水位のフーリエ・スペクトル解析結果を図-8に示す。金山ダムの場合、最大卓越スペクトルである40分周期波がシャープに現れている。このほか、60分、90分の周期波のスペクトルも大きなものとなっている。これらの長周期波を主成分に最大2 mm程度の振幅を持つ短周期波が合成されて図-6に示す5 cmから10 cmの最大振幅の貯水池振動となっていることが認められる。

図-8のフーリエ・スペクトルは、振動の発達初期から正弦波状の振動が発生するまでの12時間分データの結果であるが、振動波の発達過程を見るため、発達初期段階、最大振幅発達段階、正弦波振動継続段階の3段階でのフーリエ・スペクトルを図-9～11に示す。

図-9に示す発達初期段階(04:00～08:00)では振動の大きい順に、40分、60分、80分、10分、24分の卓越周期波が発生している。

図-10に示す最大振幅発達段階(08:00～12:00)ではこれらの波がさらに発達すると共に、検出限界最小周期から3分周期までの間に多くの短周期の波が新たに発生してきている。

図-11の正弦波振動継続段階(12:00～16:00)では、これら短周期の波の大部分は発達初期段階の状態まで減衰し、40分、48分、10分、60分、80分の5種類の中長周期卓越波と1.6分、1分の2種類の短周期卓越波とに収まる。最大卓越周期波である40分周期波は他の周期波の5倍以上の振幅となっている。

金山ダムの全ての段階で発生する卓越周期は、40分、60分、10分、80分の4種類であり、風速が強まるにつれこれらの卓越周期波が発達するとともに、3分以下の広範囲な短周期波と20分、30分代の波が新たに発生し、最大波高10 cmほどの貯水池振動となる。波がある程度成

熟していくと、40分周期波が他の周期波の5倍以上の振幅を持つ最大卓越波となり、図-6に示す貯水位観測データでもこの周期が正弦波状に明確に現れるようになる。

従って、金山ダムで貯水位平滑化を行う場合、少なくとも40分周期の波を除去できる平滑時間が必須となり、平滑精度をさらに向上させるためには80分周期波の除去が必要となる。

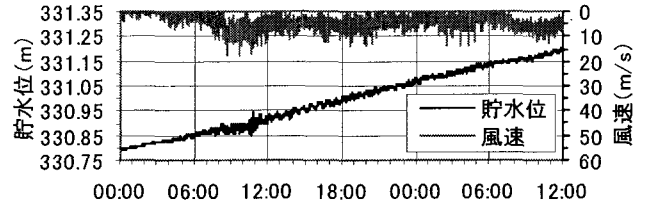


図-6 金山ダムの強風時の貯水池振動状況 (1999. 10. 23～24)

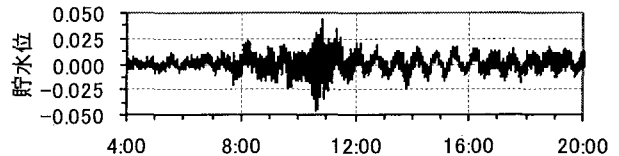


図-7 金山ダムの強風時の変動成分 (1999. 10. 23)

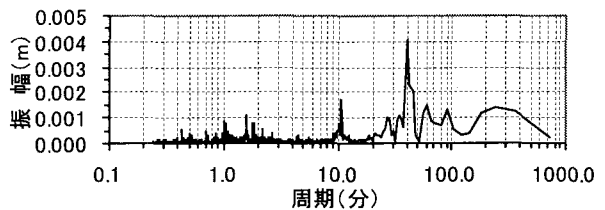


図-8 金山ダム・ダムサイトのスペクトル (04:00～16:00)

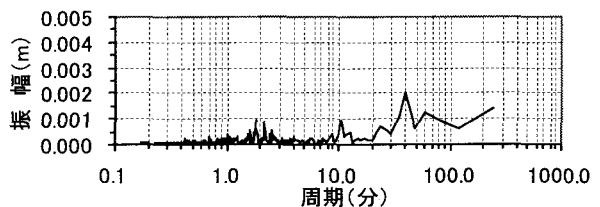


図-9 振動発達初期段階のスペクトル (04:00～08:00)

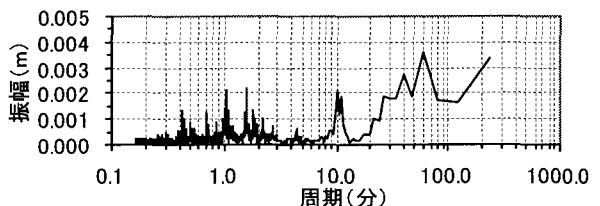


図-10 最大振幅発達段階のスペクトル (08:00～12:00)

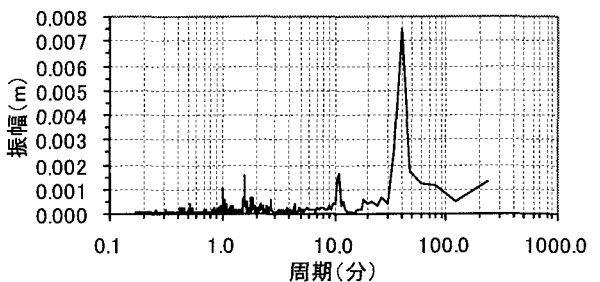


図-11 正弦波振動継続段階のスペクトル (12:00～16:00)

(3) 滝里、十勝、二風谷ダム強風時の貯水池振動特性

図-12～13 に示す滝里、十勝ダムとも風の発達状況に対応した貯水池振動が見られる。しかし、金山ダムに見られた正弦波状の卓越した周期の波は発生しない。

十勝ダムでは風速が5%程度までは、振幅が1cmに満たない振動であるが、10%程度になると急速に発達し、20%程度で7～8cmの大きさに達する。しかし、風が収まると急速に収束する。十勝ダムはロックフィルダム、その他のダムは重力式コンクリートダムであり、ダムタイプによる上流面勾配と表面形状の違いが、反射率と減勢効果の差を生じさせる主たる原因と考えられる。

図-10 の金山ダムの最大振幅発達段階に対応する各ダムでの最大振動発生時のスペクトルを図-14～16 に示す。

金山ダムでの最大卓越スペクトル周期は40分の長周期であったが、滝里ダムでは1分18秒、二風谷ダムでは2分6秒、十勝ダムでは1分の短周期であり、全体のスペクトル分布も金山ダムに比較し、10分以下の短周期側に偏っている。十勝ダムのような短周期スペクトル主体の貯水池振動の場合は減衰が早まり、金山ダムのような長周期スペクトル主体の貯水池振動の場合は、長時間に亘る長周期振動が継続していることが認められる。

最長周期は、滝里ダムで40分、二風谷、十勝ダムでは80分であり、平滑対象周期は金山ダムと同じ傾向にある。

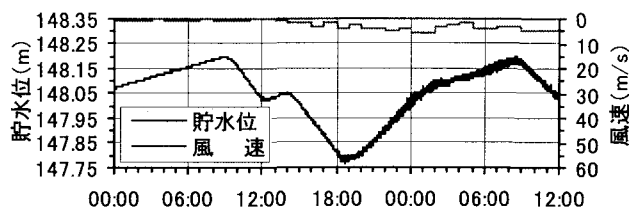


図-12 滝里ダムの強風時の貯水池振動状況 (2000. 11. 20～21)

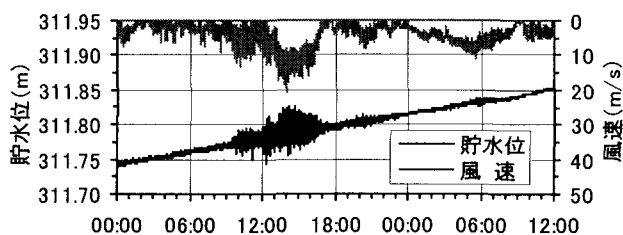


図-13 十勝ダムの強風時の貯水池振動状況 (2001. 10. 25～26)

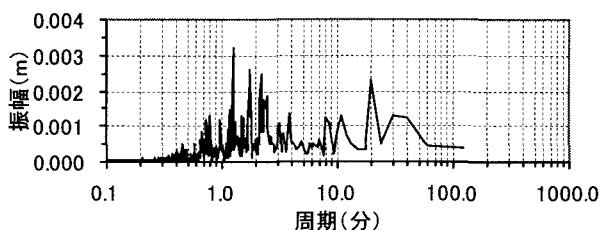


図-14 滝里ダムの最大振動時スペクトル (22 : 00～00 : 00)

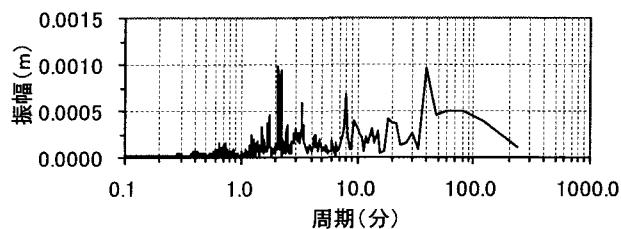


図-15 二風谷ダムの最大振動時スペクトル (00 : 00～04 : 00)

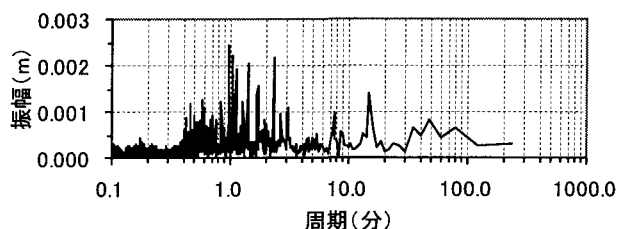


図-16 十勝ダムの最大振動時スペクトル (12 : 00～16 : 00)

(4) ゲート操作による貯水池振動

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-17 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。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2cm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1cm程の貯水位低下が見られる。

図-18 示すこの時のスペクトルは強風時振動の図-14と比較し、2分以下の短周期分が少なく、6～20分の中周期に卓越スペクトルが見られ、スペクトル分布にも差が見られる。

図-19 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8cm振幅の振動が生じ、20時間近くにとり継続している。これは、貯水池が結氷し、一方、測水井内は自由水面状態であり、このため、ゲート操作による微小振動が、測水井側で増幅されたことによるものと思われる。

この時の二風谷ダムでのフーリエ・スペクトル解析結果を図-20 に示す。最長卓越周期は30分で、振幅は他に比べ3倍以上の際立ったものとなっている。これ以外のスペクトルは、10分以下の短周期帯に、ほぼ同じ振幅のスペクトルが密に分布し、金山ダム等の風による自由水面の振動スペクトル分布形状と大きな違いを呈している。

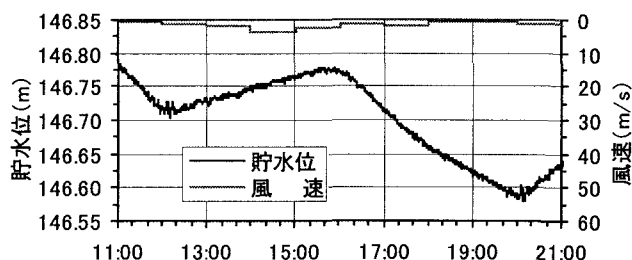


図-17 滝里ダムゲート操作時の貯水池振動状況 (2000. 10. 17)

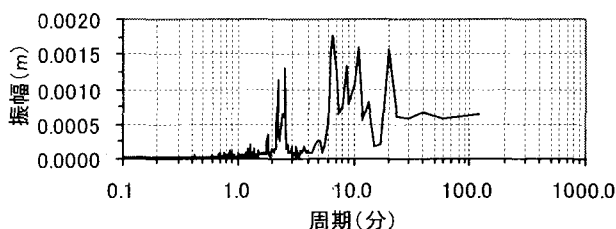


図-18 滝里ダムゲート開操作時のスペクトル (11:30~13:30)

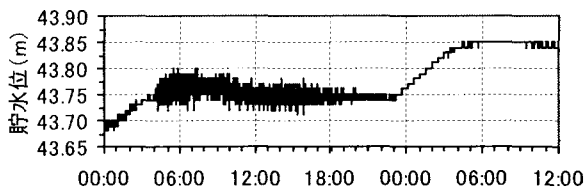


図-19 二風谷ダムの結氷時の貯水池振動状況 (1999.3.6)

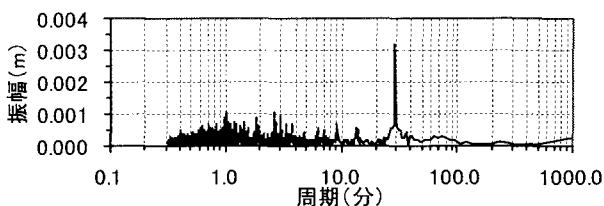


図-20 二風谷ダムの結氷時の貯水池振動スペクトル

3. フーリエ級数による貯水位平滑化

流入量計算結果に大きく影響する項目は、貯留量分流入量である。この計算精度を上げる為には、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。

この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。

T 時間内に ΔT 間隔で測定された N 個の時系列データを $(x_k = x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1})$ としたとき、 k は時系列データの番号であり、 k 番目の観測時刻 t_k は、 $t_k = k\Delta T$ となり、これを n 次のフーリエ級数で近似する場合、次式のように表せる。

$$x(t_k) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{n-1} \left(A_m \cos \frac{2\pi m t_k}{N\Delta T} + B_m \sin \frac{2\pi m t_k}{N\Delta T} \right) + \frac{A_n}{2} \cos \frac{2\pi n t_k}{N\Delta T} \quad (1)$$

定数項 A_m 、 B_m は有限フーリエ係数と呼ばれ、次式で与えられる。

$$A_m = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos \frac{2\pi m k}{N} \quad (m = 0, 1, 2, \dots, n-1, n) \quad (2)$$

$$B_m = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin \frac{2\pi m k}{N} \quad (m = 1, 2, \dots, n-1) \quad (3)$$

フーリエ級数を用いて貯水池振動の平滑化を行う場合、貯水池振動をフーリエ級数により関数近似し、フィルタリングする周波数以下の周期波を除去することにより平滑化が可能となる。しかし、この手法は貯水位が一定の場合の貯水池振動時にのみ可能である。通常のダム管理現場においてこの手法を用いる場合は、何らかの方法で貯留量変化による貯水位変動成分の除去処理をしておくことが必要となる。

本論文で提案するフーリエ級数を用いた貯水位平滑化は、貯水池振動再現の時に低周波波とも追従性の高い最も単純な近似曲線を、フーリエ級数で求めようとするものである。

フーリエ級数を用いた貯水位平滑化は、次の様な手順で行う。

- ① 観測された貯水池振動の最長卓越周期の波を除去する必要があることから、この最長卓越周期を平滑化時間間隔 (1 つのフーリエ級数で近似するデータ区間) とする。
- ② この区間データで (1) ~ (3) 式を用い 1 次フーリエ級数近似し、任意の計算時刻 t_k での近似貯水位 (平滑貯水位) を求める。
- ③ この計算を貯水位データが更新される 2 秒毎に行う。

貯水池振動のフーリエ・スペクトル解析を行なう場合には、貯留量変化による貯水位変動成分の分離処理をしておくことが必要となる。本論文で提案した平滑化手法は、この変動成分の分離処理にも適用できる。本論文では平滑化時間間隔を 80 分とした場合の平滑貯水位を貯留量変化による貯水位変動成分と仮定し、スペクトル計算を行なった。このため、フーリエ・スペクトル解析結果から信頼できる最長卓越周期は 80 分までとなる。

図-21 に平滑時間を 80 分とし、計算時刻を現時刻 ($t_k = 6T/6$) とした場合の計算流入量と実測値の比較図を示す。この場合は、遅れ時間はゼロで現時刻での流入量が得られるが、計算流入量のハイドログラフは実測値に比較しピーク付近で右に 20 分、貯水位では右に 40 分移動させた形となっている。

図-22 は $t_k = 5T/6$ の場合であるが、実測流量と良く一致しており実用上問題のない範囲となっていることが認められる。この場合の遅れ時間は 13.3 分となり、他の手法での遅れ時間は平滑時間の 1/2 となることから、本手法では大幅に短縮できる。

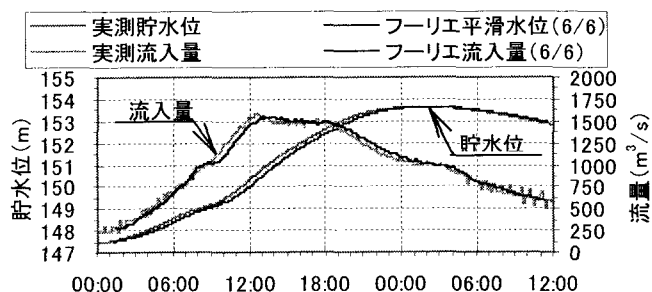


図-21 計算時刻を $t_k = 6T/6$ とした場合 (2001.9.11~12)

4. フーリエ級数貯水位平滑化による流入量計算

標準設計仕様書¹⁾に従って算出された実測流入量と、平滑時間を80分、計算時刻を $t_k = 5T/6$ とした場合のフーリエ級数を用いた貯水位平滑化によるダム流入量の計算値の比較を図-22～25に示す。いずれの場合でも、フーリエ級数平滑化手法での計算結果は大幅に改善され、ピーク発生時刻も明確になっている。

図-25の十勝ダム洪水時では、大きな貯水池振動は発生していなく、平滑化後の貯水位は図上ではほとんど差異がない。標準設計仕様書¹⁾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、計量槽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の平滑化手法の有効性と安定性が、これらの図から認められる。

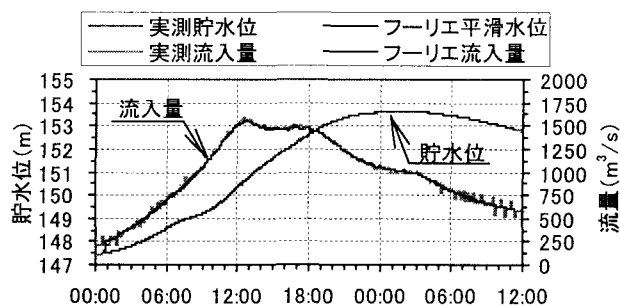


図-22 滝里ダム洪水時の再現計算 (2001.9.11～12)

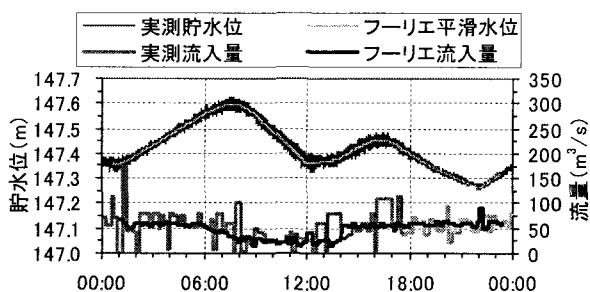


図-23 滝里ダム強風時の再現計算 (2002.10.22)

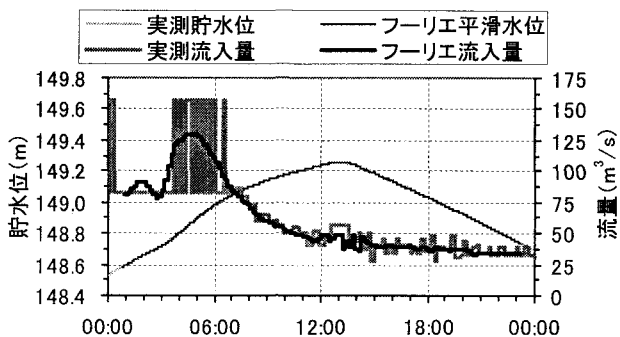


図-24 滝里ダム静穏時の再現計算 (2002.8.29)

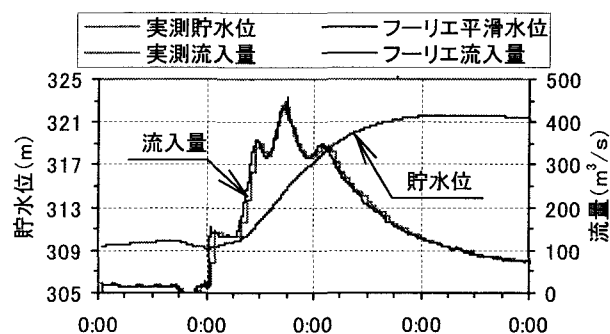


図-25 十勝ダム洪水時の再現計算 (2001.9.10～13)

5. 結論

多くのダムでは、測水井内で観測された貯水位を10分程度の移動平均をかけ平滑貯水位としているが、この手法では流入量計算精度を上げることはできない。

貯水池で発生する振動の最長周期は80分であり、40分周期波は、今回解析を行なったほとんどのダムで発生し、スペクトル振幅も他の波に比較し大きな値となっている。流入量計算精度向上のための貯水位平滑化は、最低でも40分周期波を対象波とする必要がある。

1次のフーリエ級数による平滑化方法は、平滑時間を80分、計算時刻を遅れ時間を最小とする $t_k = 5T/6$ とした場合でも、洪水時、強風時ともダム管理上支障ない十分な精度を持ってダム流入量が計算可能となる。

なお、平滑時間を最長卓越振動周期の80分とした場合、計算流入量の遅れ時間は13.3分となる。この遅れを解消するため、平滑貯水位を最小二乗法処理する方法がある。この場合、流量外挿近似ではピーク流量を過大に計算するが、貯水位外挿近似ではこのような問題は生じない。

謝辞：本論文のテーマである貯水池振動の平滑化に取り組んでからすでに十数年が経過したが、この間、貴重なデータを収集・提供していただいた北海道開発局ダム管理の現場の多くの方々に、心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人 ダム水源地環境整備センター編：ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書（案），1995。
- 2) 石田享平，中村興一，鈴木洋一，藤田睦博：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.31-43，1997。
- 3) (株) アイ・エヌ・エー筑波研究所：新しいダム諸量の演算処理・操作のための演算処理，増補改訂第2版，2000。
- 4) 鈴木洋一：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量の高精度推定法，北海道大学博士論文，pp.56-68，2000。
- 5) 佐々木元，北森佳昭：貯水池流入量把握方法に関する一検討，土木研究所資料第2302号，pp.30-33，1986。

(2003.9.30 受付)