

ダム貯水位振動発生要因とその振動特性

GENERATING FACTORS AND CHARACTERISTICS OF WATER LEVEL FLUCTUATIONS IN DAM RESERVOIRS

中村 興一¹・藤間 聡²・大城 英嗣³

Kouichi Nakamura, Satoshi Tohma, Hidetugu Oshiro

¹フェロー会員 (株) ケイジー技研 技術研究所長 (〒060-0063 札幌市中央区南 3 条西 13 丁目 320)

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 (株) ケイジー技研 設計部 技師 (〒060-0063 札幌市中央区南 3 条西 13 丁目 320)

Primary causes of generating fluctuation at the dam reservoir water level are wind and gate switching operation.

However, since the observation data of every generating factor of fluctuation at the dam reservoir water level was scarce, examination of the fluctuation characteristic for every generating factor of the fluctuation has been hardly performed until now.

Reservoir water level fluctuation data by Tokachi-Oki Earthquake which arose on September 26th, 2003 was observed in the Takisato dam, and by this, we collected the three predominant reservoir water level fluctuation cause data of wind, gate operation, earthquake in the Takisato dam.

This paper describes the observation result for every generating factor of fluctuation at the dam reservoir water level on Takisato dam, and the fluctuation characteristic examination result by the Fourier spectrum.

Key Words : *fluctuation at the dam reservoirs water levels, generating factor of reservoir water level fluctuation*

1. はじめに

ダム貯水池に発生する貯水位振動には、次のようなものがある。

- ① 風に起因するもの。(波浪や吹き寄せ現象など)
- ② 発電開始・終了時の急激なゲート操作に起因するもの。
- ③ 地震に起因するもの。
- ④ 貯水池湖岸の地滑り等に起因するもの。

風に起因する貯水位振動は、全てのダム貯水池において日常的に発生するものであり、貯水位振動の 76% は風起因のものであるとの報告もある¹⁾。また、ゲート操作や地震による貯水位振動は、ダム管理の現場からの報告で知られていたが、ダム貯水位振動の発生要因毎の観測データが乏しいこともあり、振動発生要因ごとの振動特性など詳しい報告はほとんどされていない。

平成 15 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震による貯水位振動データが滝里ダムで観測され、これにより滝里ダ

ムにおける、風、ゲート操作および地震の 3 種類の原因による貯水位振動データがそろって得られた。

発生要因ごとの貯水位振動の卓越周期や持続性などの特性を把握することは、ダム管理の精度向上につながる重要な事柄である。滝里ダムにおける風、ゲート操作、地震の 3 要因による貯水位振動の観測結果を基に、本論文では、滝里ダムでの貯水位振動の発生要因毎の観測結果とそのフーリエ・スペクトルによる振動特性検討結果について述べる。

解析対象とした滝里ダムは図-1、表-1 に示す貯水池形状、ダム諸元を持つ重力式コンクリートダムの多目的ダムで、オールサーチャージ方式のため冬期を除いては、湛水面は図-1 の濃いばかしで示すように、ほぼ常時満水位での形状となっている。

貯水位データは、ダム堤体内の測水井(しぼり率 1/417)に設置された主水位計(フロート式水位計 cm 単位)とセイシュ観測用水位計(水晶式水位計 mm 単位)により、2 秒ごとに観測されている。

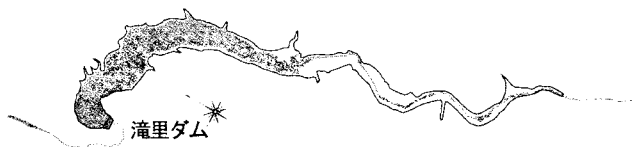


図-1 滝里ダム貯水池平面図

表-1 滝里ダム諸元

流域面積 (km ²)	ダム高 (m)	湛水面積 (km ²)	総貯留容量 (千m ³)	常満湛水面積 (km ²)	常満水深 (m)	常満貯水池長 (km)
1,662	50.0	6.8	108,000	4.9	38.9	9.3

2. 風に起因する貯水位振動特性

図-2に滝里ダムで、1時間平均風速で最大6.6m/sの強風により、最大7cmほどの貯水位振動が測水井内で発生している観測結果と、フーリエ貯水位平滑化手法による平滑水位²⁾を示す。貯水位の大きな変動は発電放流の開始、終了によるものである。図-3には、貯留量増減による貯水位変動である貯留変動成分を分離した、波やセイシュ等による振動成分²⁾のみを示す。

風速と貯水位振動は対応しており、風の強弱に合う形で貯水位振動も変化していくことが認められる。

この時の観測値の10:30から23:00間のスペクトルを図-4に示す。また、図-5にはこの区間の2時間30分ごとのランニング・スペクトルを示す。

図-4に示す全区間(10:30~23:00)と、図-5の最大振動時(10:30~13:00)ランニング・スペクトルは振幅の大小はあるが、スペクトル波形はほぼ同じ形状を呈し、最長卓越周期は全区間が35分42秒、最大振動時が37分30秒とほぼ同じ値となっている。

また、各区間のランニング・スペクトルでは、貯水池振動が収まるにつれ10分以下の中短周期のスペクトルの振幅が小さくなり波数も減少するが、最長卓越周期は全ての区間で37分30秒と同じ値となっている。

従って、滝里ダムでの強風時貯水位振動を平滑化するためには、37分30秒周期の波まで平滑化可能なフィルターが必要となる。

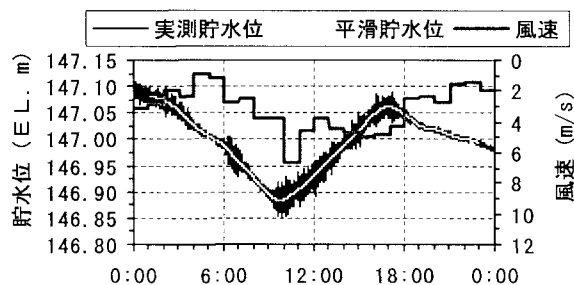


図-2 強風時の貯水池振動状況 (2002.10.2)

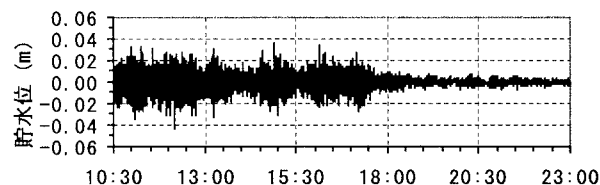


図-3 強風時貯水位振動の振動成分 (10:30~23:00)

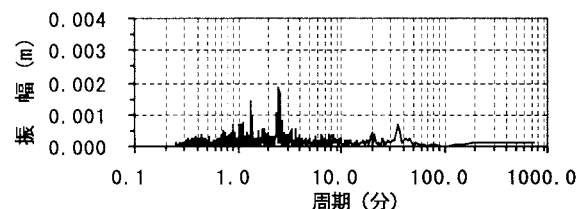


図-4 強風時貯水位振動のスペクトル (10:30~23:00)

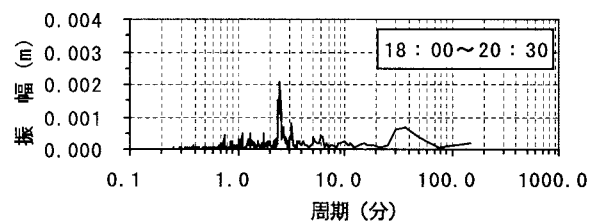
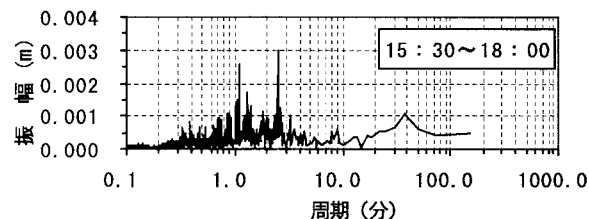
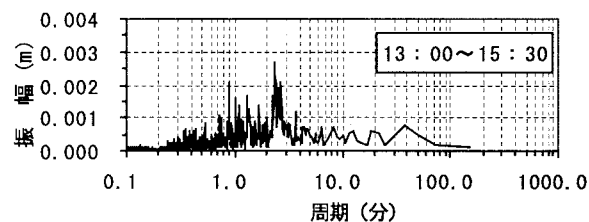
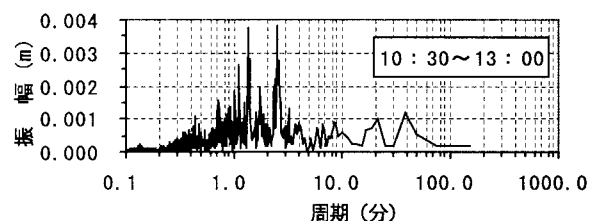


図-5 強風時貯水位振動のランニング・スペクトル

3. ゲート操作に起因する貯水位振動特性

貯水池の振動は風等による原因の他に、ゲートの開閉操作によっても発生すると云われているが、滝里ダムにおいてこの現象が観測されている。

滝里ダムの発電計画では、最大使用水量 $150\text{m}^3/\text{s}$ で最大出力 $57,000\text{kw}$ の発電を行うこととなっており、ダム直下流に位置する野花南調整池を利用してピーク発電と、使用電力負荷変動により生ずる周波数調整を行っている。このため、滝里発電所の使用水量は、秒単位で最大使用水量の $1/3$ ほどの変動をすることもある。

図-6 に、滝里ダムでの発電ゲート開閉操作による貯水位振動の発生状況を示す。この時の風は1時間平均風速で最大 1.5m/s であり、風起因の貯水位振動はほとんど発生していない条件であった。ゲート開操作時よりも、閉操作の時に貯水位振動の振幅が大きいことが認められ、最大で 1.6cm ほどの振幅となっている。この貯水位振動データを用い、平滑時間 80 分でフーリエ平滑貯水位を求めた結果を図-7 に、そのゲート閉操作が行なわれた前後の拡大図を図-8 に示す。

図-8 に示すように、 $105\text{m}^3/\text{s}$ であった発電使用水量が、1分毎のゲート閉操作により $97\text{m}^3/\text{s}$ 、 $62\text{m}^3/\text{s}$ 、 $46\text{m}^3/\text{s}$ に減じられたが、発電使用水量を $35\text{m}^3/\text{s}$ 減少した2回目のゲート操作時 ($12:03$) に段波が発生し、1時間以上に亘る貯水位振動が継続している。3回目のゲート操作では、発電使用水量を $16\text{m}^3/\text{s}$ 減少させたが、この影響は出ていない。

図-7 に示したフーリエ平滑貯水位は、 $11:30$ 頃から実測貯水位を下回り、段波が発生したあたりでは実測貯水位を上回っている。段波が発生した $12:03$ までは、フーリエ平滑貯水位は実測貯水位と同じ値とならなければならないが、これは、この前後の貯水位振動を 80 分の平滑時間で平滑化しているために生じた計算上の現象である。

図-6 に示すように、貯留量変化と放流量から算出された $11:00\sim14:00$ 間のダム流入量は $35\text{m}^3/\text{s}$ 前後のほぼ一定した値であったことから、この流入量と全放流量から逆算した貯水位を、貯留変動成分としたものを図-9 に示す。図-10 はこの振動成分である。水平面から下方に 3mm 、上方に 13mm と上下非対称の特異な水面振動となっているが、図-10 に示す貯水位振動前後の $12:00$ 前と $13:30$ 以降の時間帯の貯水位が水平面に収まっていることから、これが測水井内での実振動と認められる。

この流入量と全放流量から逆算した貯水位を平滑貯水位として計算した $6:00\sim18:30$ 間のスペクトルを図-11 に、図-12 にはこの区間の2時間30分ごとのランニング・スペクトルを示す。

ゲート操作による貯水位振動が発生する前の最長卓越周期は 21 分 24 秒であるが、図-12 の $11:00\sim13:30$ に示す貯水位振動が発生した時間帯のスペクトルでは、風起因の貯水位振動時と同じ周期である 37 分 30 秒の卓越周期が明確に現れている。また、 50 分、 75 分のスペクトルも見られるが、これは上下非対称の波をスペクトル解析した結果生じたものと考えられる。図-13 に図-7

に示した平滑時間 80 分でのフーリエ平滑貯水位を用いた貯水位振動成分とそのスペクトルを示す。 40 分周期までのスペクトル波形は図-12 の $11:00\sim13:30$ とほとんど一致しているが、図-13 の平滑時間 80 分では、 50 分、 75 分周期のスペクトルは大きく現れていない。このことから、これらの長周期のスペクトルは上下非対称の波をスペクトル解析した結果生じたものと考えられる。

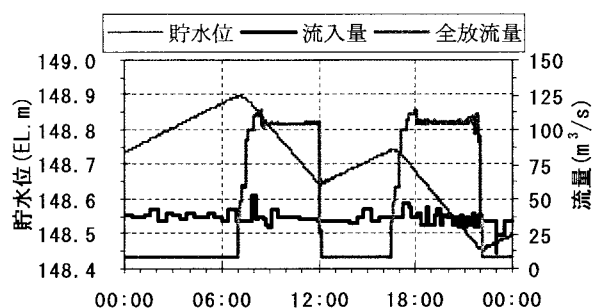


図-6 ゲート操作時の貯水位振動状況 (2001.9.26)

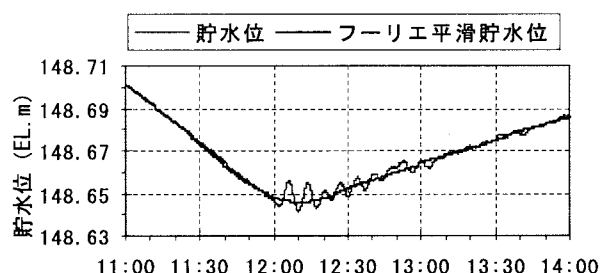


図-7 ゲート操作時貯水位振動とフーリエ平滑貯水位

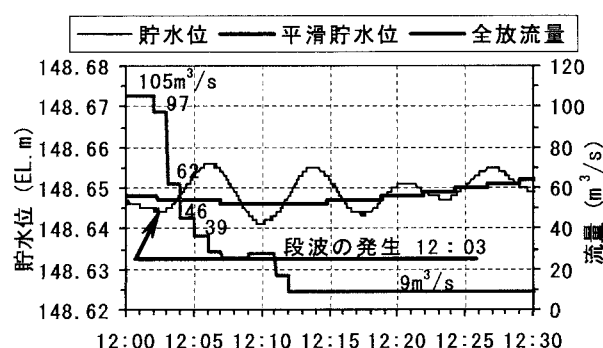


図-8 ゲート操作時貯水位振動とフーリエ平滑貯水位

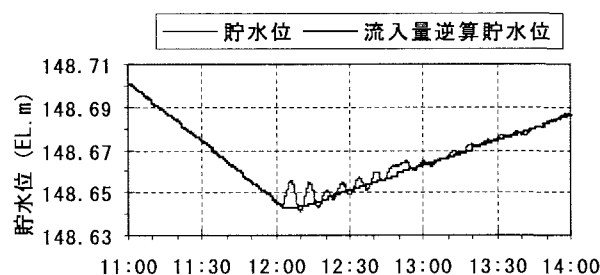


図-9 ゲート操作時貯水位振動と流入量から逆算した貯水位

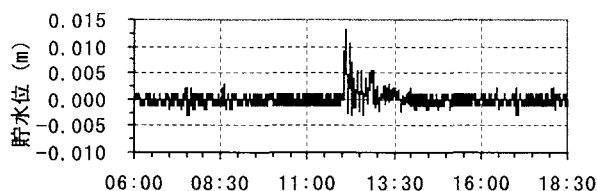


図-10 ゲート操作時貯水位振動の振動成分

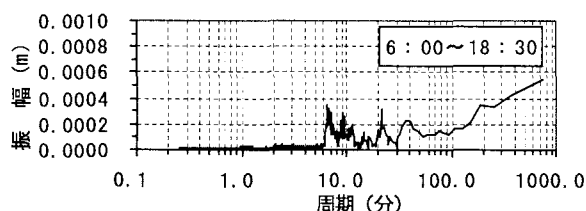


図-11 ゲート操作時貯水位振動のスペクトル

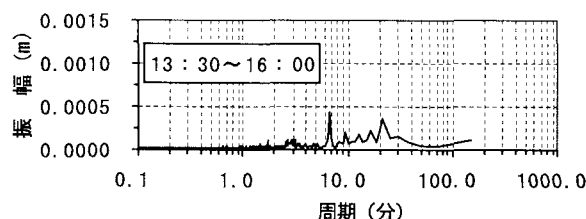
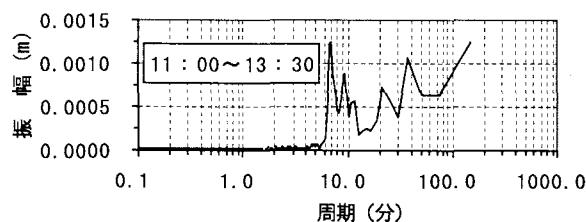
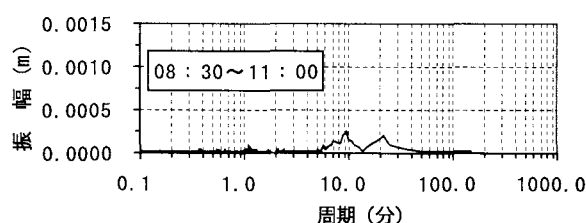


図-12 ゲート操作時貯水位振動のランニング・スペクトル

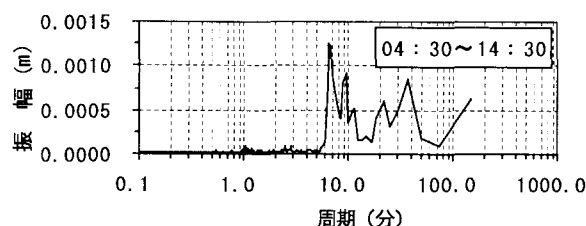
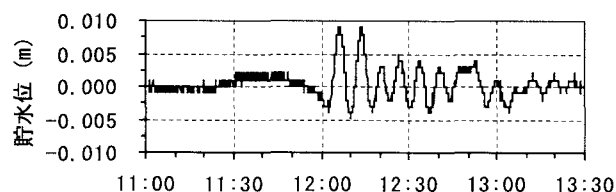


図-13 振動成分とスペクトル (フーリエ平滑化貯水位)

4. 地震に起因する貯水位振動特性

平成15年9月26日4時50分頃発生した十勝沖を震源(深さ42km)とするマグニチュード8.0の十勝沖地震では、滝里ダム天端で上下流方向振動最大13.0galの強震計加速度を観測した。この時の加速度記録図を図-14に示す。強震計の起動時刻は4時50分53秒で、最大加速度記録時刻は4時51分16秒であった。なお、デジタルタイプでの強震計加速度記録は入手できず、アナログタイプでのみのデータが得られた。このため、地震動のスペクトル解析は行っていない。

図-15に、この時の測水井内での観測貯水位と、平滑時間80分でのフーリエ平滑貯水位を示す。また、図-16には振動成分を示す。きれいな地震起因の貯水位振動が記録されているが、図-16の平滑水位は、ほぼ一直線に水平面上に伸びており、このことはフーリエ級数を用いた貯水位平滑化手法の精度の高さを示している。

図-17に、この時のフーリエ・スペクトルを示す。最長卓越周期は、風起因、ゲート操作起因の貯水位振動時と同じ周期である37分30秒の卓越周期が現れている。また、最大卓越スペクトルは1分42秒で、風起因の2分30秒に近い値となっている。

図-15、16に示す貯水位振動で、振動開始直後に15cm程の振幅の振動が短い時間内に発生し、その後4cm程の振幅で安定した振動が続いている。この部分の拡大図を図-18に示す。強震計起動時刻と同じ4時50分53秒から貯水位振動が始まる4時51分36秒までの43秒間の前半振動と、57秒間の振動停止後の4時52分34秒から振動が始まる後半振動の2種類の振動が認められる。

前半振動は、最大振幅約15cmの不規則な振動で、最大振幅発生時刻は最大加速度記録時刻と同じ4時51分16秒となっている。また、後半振動は、正弦波に近い振動で、継続時間は6時間以上に及ぶものとなっている。

図-19に、図-18に示した4:48~4:58間のフーリエ・スペクトルと、図-20にこの前半振動と後半振動の2種類の振動のランニング・スペクトルを示す。前半の振動の最大スペクトルは周期12秒で発生し、後半では1分30秒となり、図-19の全区間のスペクトル波形は、この2つを重ね合わせた形状となっている。

水晶式水位計は、測水井内にワイヤーにより吊り下げられて設置されていることから、前半の貯水池振動記録は、水晶式水位計圧力感知部分の地震慣性力によるものと考えられ、地震発生時刻である強震計起動時刻4時50分53秒から1分41秒後の4時52分34秒に、貯水位振動が発生したものと考えられる。

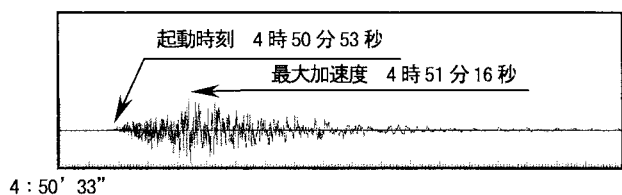


図-14 滝里ダム強震計の地震波観測記録 (2003.9.26)
(大目盛10秒、小目盛1秒)

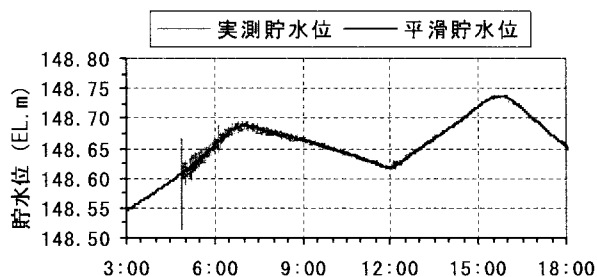


図-15 地震時の貯水位振動状況 (2003.9.26 十勝沖地震)

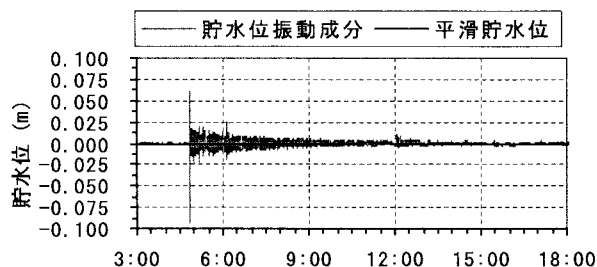


図-16 地震時貯水位振動の振動成分 (2003.9.26 十勝沖地震)

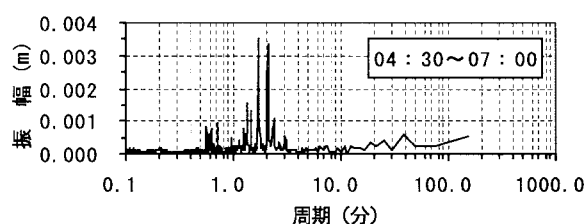


図-17 地震時貯水位振動のスペクトル

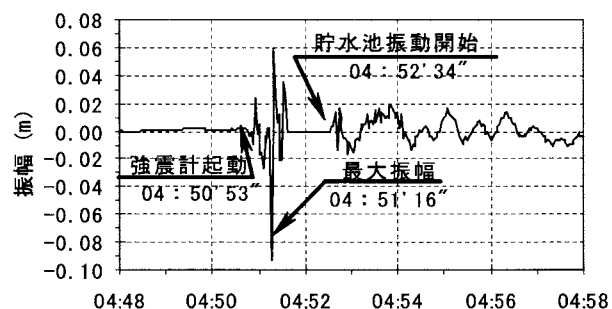


図-18 地震時貯水位振動発生直後の詳細図

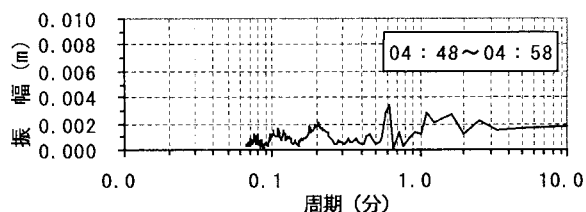


図-19 地震時貯水位振動発生時のスペクトル

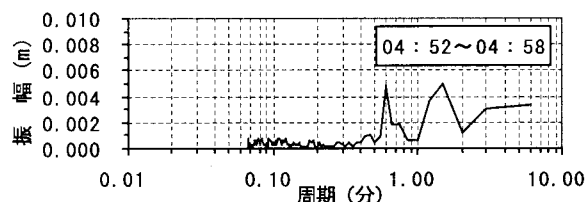
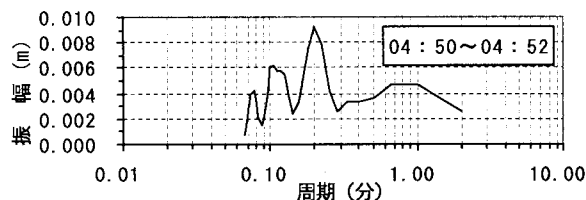


図-20 地震時貯水位振動発生時のランニング・スペクトル

5. 発生要因ごとの貯水位振動特性

滝里ダムにおける貯水位振動時の実測貯水位の振幅は、風起因の振動の場合が約7cmと最も大きく、ついで地震起因が約4cm、ゲート操作起因が約1.6cmとなっている。また、フーリエ・スペクトルでは、風起因の場合は10分以下の周期帯に多くのスペクトルが分布しているが、地震起因の場合は3分以下の周期帯に10程の主なスペクトルが分布し、ゲート操作起因の場合では6分から40分の周期帯に8程のスペクトルが分布している。フーリエ・スペクトル成分数の分布からは、風による貯水位振動が最も複雑な振動で、ゲート操作によるものが最もシンプルな振動であり、10分以下周期の数多くの波の重ね合わせにより、貯水位振動が大きく発達することを示している。

風、ゲート操作、地震に起因する滝里ダムの貯水池振動時の、最大卓越スペクトルの周期・振幅と卓越スペクトル周期・振幅を表-2に示す。最大卓越スペクトルは、風起因が2分30秒、ゲート操作起因が6分48秒、地震起因が1分42秒で、比較的短い周期で発生しているが、最長卓越周期はいずれの場合でも37分30秒となっている。滝里ダムの貯水位振動を平滑化し、ダム流入量計算精度を高めるためには、この周期の波までは確実に平滑化が必要であることが認められる。

表- 2 滝里ダム貯水位振動発生要因別スペクトル周期と振幅
(振幅単位：mm×100)

周 期	卓越スペクトル振幅			最大卓越スペクトル	
	11' 30"	21' 24"	37' 30"	周 期	振 幅
強 風		99	121	2' 30"	382
ゲート	58	72	107	6' 48"	124
地 震			61	1' 42"	355

6. まとめ

本論文では、滝里ダムでの貯水位振動の次のような発生要因毎の観測結果と、その振動特性についてフーリエ・スペクトル解析を基に論じた。

- ① 風に起因するもの。
- ② 発電開始・終了時の急激なゲート操作に起因するもの。
- ③ 地震に起因するもの。

滝里ダムにおける貯水位振動時の実測貯水位振幅は、風起因振動の場合が約7cmと最も大きく、ついで地震起因が約4cm、ゲート操作起因が約1.6cmとなっている。フーリエ・スペクトル解析結果では、風起因の貯水位振動では10分以下の周期帯に振幅の大きな、数多くのスペクトルが分布しており、これらの波群の重ね合わせにより貯水位振動は大きく発達する。貯水位振動を平滑化し、ダム流入量計算精度を高めるためには、これらの波は確実に平滑化しなければならない。

ゲート操作に起因する貯水位振動は、ゲート開操作時よりも、閉操作時が貯水位振動の振幅が大きく、これは、ゲート閉操作による流水の急激遮断により段波が発生す

ることによるもので、水平面に対し上下非対称の特異な水面振動となっている。この特異な振動は、ゲート操作時のダム流入量計算精度を低下させる大きな原因となっている。

地震に起因する貯水位振動は、地震波が到達してから貯水池に振動が発生するまでにタイムラグがあり、水位計の種類や設置方法によっては、真の貯水位振動とは異なる振動が、地震直後に記録される場合があるので注意を要する。

また、風、ゲート操作、地震に起因する滝里ダム貯水池振動時のいずれの場合でも、最長卓越周期は37分30秒であり、滝里ダムの貯水位振動を平滑化するためには、この周期の波を平滑化することが必要となる。

なお、この解析結果を基にしたフーリエ貯水位平滑化手法を用いたダム流入量計算システムは、北海道開発局管理の滝里ダムにおいて平成16年度から実運用中であり、従来の手法に比べ、高い精度と信頼性で低水・洪水管理に寄与している。

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) 佐々木元，森北佳昭：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，1986。
- 2) 中村興一，藤間 聡，中村篤史（2004）：ダム貯水池振動特性と貯水位平滑化について，水工学論文集，第48巻，pp. 1387-1392。

(2004. 9. 30 受付)