

II-354

風によって生じる定山溪ダム貯水池の水面変動特性

北海道大学大学院 学生員 鈴木 洋之*
 北海道大学大学院 正 員 長谷川 和義*
 北海道開発局 正 員 石田 享平**

1. はじめに

ダムの操作管理において流入量の推定は非常に重要な問題である。また、この流入量は静水位の変化から貯水量の変化量を求めることで推定される。しかし、この水位データはセイシュ、風波など各種ノイズを含んでおり、真の静水位を知ることは非常に困難となっている。著者らは、この問題の解決の為に定山溪ダム貯水池に5点の水位計を設置し、解析を行うことで風によって引き起こされる水面の吹き寄せ現象の存在を確認した^{1),2)}。流入量推定において、この現象は一般的に行われている平均処理のみでの除去は不可能であり、解析的に変動量を推定することが必要となる。本研究は、この変動量の推定を目的として、定山溪ダム貯水池を対象に風に対する水面振動の応答を解析的に調べたものである。

2. 風による吹き寄せ現象

図-1は定山溪ダム貯水池の平面形状と水位計位置を示したものである。風向風速計はNo. 4の位置に水面から2mほどの位置に設置されている。図-2は1996年10月30日にこの風速計で記録された平均風速であり、長軸成分風速は上流向きを正とし短軸成分風速は右岸向きを正としてある。図-4は各点で記録された水位のトレンド成分を除去し900秒移動平均を施したものである。これらの図から風速は30分から1時間程度で変動していること、長軸方向風速が0となる時に、No. 1とNo. 6で変動の山が出現し位相がずれることが確認できる。この時系列から8:45と30分後の9:15の水面形を同時水位で表わすと図-3のように水面形の振動が現れる。これは風速変動に伴う見かけの振動である。

3. 風による水面変動の理論解析

図-5に示すように堤体を原点として上流側にx軸をとる二次元座標を定義する。貯水池幅B(x)は軸に垂直なものとし、横断面形状は矩形近似できるものとする。ここで風が湖面に与える力はせん断力のみとして、この座標系において二次元連続式及び運動量式を適用する。この時、運動量式と連続式に対して、運動量係数は1とみなして、さらに長波近似を適用することで表-1の基礎式(1)を得ることができる。この方程式は形からみて明らかに風のせん断力を外力とする波動方程式である。定山溪ダムの場合、平面形状は図-1から明らかに三角形で近似できる。また、貯水池幅、水深共に堤体から離れるに伴い直線的に小さくなるので、(1)式のBとhに1次関数を与えると表-1の定山溪ダムのモデル式(2)になる。次にこのモデル式を解く際に、初期条件と境界条件を端点での反射を考慮し表-1の(3)、(4)のように与える。この時、解は表-1(5)式のように得ることができる。

4. 解析解の検討

本稿では省略するが、セイシュを表わす(2)式の同次解は実測値によく一致することが確認されている。(5)式は風外力によっておこる水面の強制振動を表わしている。今回は、風入力として表-2(6)式の周期関数を与えて水面応答の検討を行った。式(5)に(6)を入れて積分を行うと(7)式を水面応答として得る。さて、 $a=0$ (一様風)では、(7)式中[]の中は(8)式のようになり、自由振動周期

が残ることが分かる。ここで、 $b=5$ 、 $C_f=0.01$ を(8)式に与えてiを10項までとり水面形状を調べてみた。図-6は最大傾斜時、図-7は最も水平に近づいた時の水面形状を示している。一様風の場合でも水面が一定の傾斜を保つのではなく、平均傾斜面付近で小さい変動を繰り返す結果が得られた。次に風速が周期的に変化する場合について考える。この時注目すべき点は、風の周期が自由振動周期に一致する場合、及び自由振動周期の2倍になる場合である。これら2つの周期が一致する時、(7)式の[]中の4項目と5項目が(9)式に示すように極限で共振状態を表わすようになる。また、風の周期が自由振動周期の2倍となる時にも2項目と3項目が式(10)に示すように共振状態を表わす。また、この時4項目と5項目が(11)式のようになり、自由振動周期の2倍周期の水面振動が現れることが確認できる。この仕組みで発生すると考えられる振動は700秒周期のセイシュとして観測されている³⁾。図-8は最大5m/s、周期30分の風、 $C_f=0.01$ を与えて式(6)の和を10項まで求めた時の時空間変化を示したものである。風周期に対応した水面変動が現れており、図-4に示した吹き寄せに非常に近い形を得ることができた。また水面の応答は約1/4周期遅れて現れており、位相ずれも理論上で確認することができた。

5. 終わりに

定山溪ダム貯水池における風の水面振動応答の解析解は実現象を良く表現している。今後はこの解析解をフィルター理論に応用するなどの方法で、より精度の高い流入量の推定を行いたいと考えている。

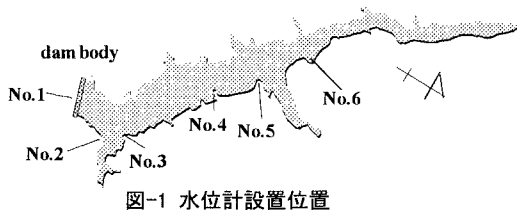


図-1 水位計設置位置

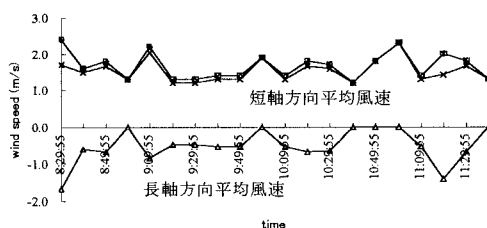


図-2 風速変動 (96.10.30 8:30-11:30)

キーワード：流入量推定、風による吹き寄せ、波動方程式

* 札幌市北区北13条西8丁目、** 札幌市中央区南32条西8丁目

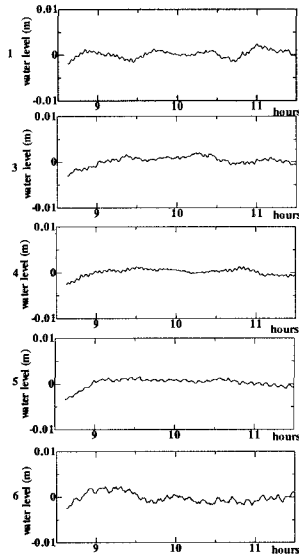


図-3 各点水位の900秒移動平均
(96.10.30 8:30~11:30)

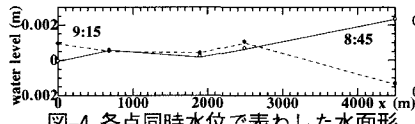


図-4 各点同時水位で表わした水面形

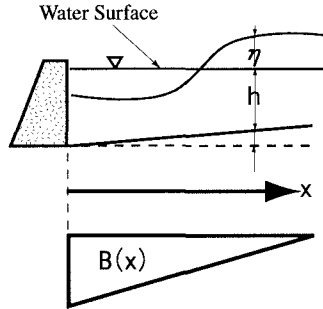


図-5 座標軸の定義

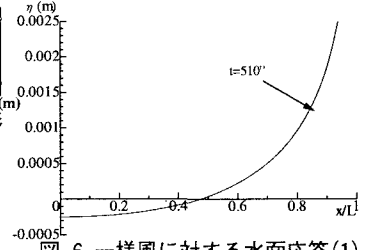


図-6 一様風に対する水面応答(1)
(最大傾斜時)

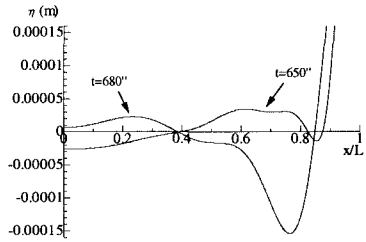


図-7 一様風に対する水面応答(2)
(最も水平に近づいた時)

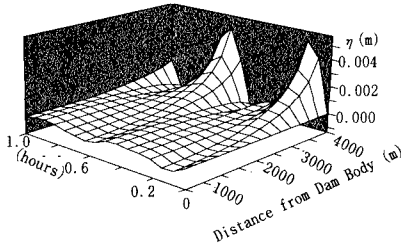


図-8 周期30分の風に対する理論水面変動

表-1 基礎式と解析解

(基礎式)
$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - h \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \left(-\frac{h}{B} \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{gB} \frac{\rho_s C_f U_s^2}{2\rho} \frac{\partial B}{\partial x} \quad (1)$$

(モデル式)
$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gh_0 \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{2gh_0}{L} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\rho_s C_f U_s^2}{2\rho(L-x)} \quad (2)$$

(初期条件) $t=0 \rightarrow \eta=0 \quad (3)$

(境界条件) $x=0, L \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial x}=0 \quad (4)$

(非同次解)
$$\eta = \frac{2}{\sqrt{gh_0}} \frac{\rho_s}{\rho} C_f \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1-J_0(j_{2,i})}{j_{2,i} J_1(j_{2,i})} \frac{J_1(j_{2,i} \sqrt{1-x/L})}{\sqrt{1-x/L}} \int_0^t [U_s(\tau)]^2 \sin \left[j_{2,i} \frac{\sqrt{gh_0}}{2L} (t-\tau) \right] d\tau \quad (5)$$

ここで、 h =平均水深、 g =重力加速度、 η =平均水位からの水面変位、 ρ =水の密度、 t =時間、 h_0 は堤体での水深、 U_s =風速、 J_n は n 次ベッセル関数、 $j_{2,i}$ は2次ベッセル関数の零点で定義される i 番目の固有値である。

表-2 風入力に対する水面の応答

$$U_s(\tau) = a \sin(\omega_s \tau) + b \quad (6)$$

$$\eta = \frac{2}{\sqrt{gh_0}} \frac{\rho_s}{\rho} C_f \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1-J_0(j_{2,i})}{j_{2,i} J_1(j_{2,i})} \frac{J_1(j_{2,i} \sqrt{1-x/L})}{\sqrt{1-x/L}} \left[\frac{a^2 + 2b^2}{2\omega_i^2} + \frac{a^2 \omega_i}{2(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(2\omega_i t) - \frac{2(a^2 + 2b^2)\omega_s^2 - b^2 \omega_i^2}{\omega_i(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(\omega_i t) - \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] \quad (7)$$

$$[] = \frac{b^2}{\omega_i} \{ 1 - \cos(\omega_i t) \} \quad (8)$$

$$\lim_{\omega_s \rightarrow \omega_i} \left[\frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] \rightarrow ab \left\{ -t \cos(\omega_i t) + \frac{\sin(\omega_i t)}{\omega_i} \right\} \quad (9)$$

$$\lim_{\omega_s \rightarrow \omega_i} \left[\frac{a^2 \omega_i}{2(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(2\omega_i t) - \frac{2(a^2 + 2b^2)\omega_s^2 - b^2 \omega_i^2}{\omega_i(4\omega_i^2 - \omega_s^2)} \cos(\omega_i t) \right] \rightarrow -\frac{a^2}{4} t \sin(\omega_i t) - \frac{a^2 + 2b^2}{2\omega_i} \cos(\omega_i t) \quad (10)$$

$$\left[\frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_i t) + \frac{2ab\omega_s}{\omega_i^2 - \omega_s^2} \sin(\omega_s t) \right] = \frac{8ab}{3\omega_i} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\omega_s}{2} t\right) \right\} \sin\left(\frac{\omega_s}{2} t\right) \quad (11)$$

ただし、 ω = 風速変化の角周波数、 a, b =定数、 $\omega_i = i$ 番目のモードを持つ自由振動の角周波数である。

参考文献

- 1) Ishida, K., K. Hasegawa, H. Suzuki and M. Fujita: Characteristic of Water Surface Oscillation in Jozankei Dam Reservoir, Proceeding of the First Korea-Japan Bilateral Seminar on Water Resource and Environmental Research, pp.73-80, 1996.
- 2) 石田享平、長谷川和義、鈴木洋之：多点同時水位計測による貯水池の水面振動解析、水工学論文集、第41巻、pp.1017~1022、1997.
- 3) 鈴木洋之、長谷川和義、石田享平：風を外力として生ずる定山溪ダム貯水池の水面変動特性、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(B)、pp.208~213、1998