

水膜振動の三次元特性と音圧レベルの推定に関する研究

3-D characteristics of Nappe Oscillations and Estimation of Sound Pressure Levels

建設省土木研究所 正員 角 哲也 Tetsuya SUMI

(株)栗本鉄工所 正員 中島 康夫 Yasuo NAKAJIMA

The author has outlined three-dimensional characteristics of nappe oscillations for explaining the effect of spoilers. Full-scale models have provided the common tendency of Sound Pressure Levels of the Low Frequency Air Vibration under the increase of the overflow depth of weirs. Various combinations of the opening of weir nappes have confirmed the effect of spoilers for restricting the oscillation within narrow limits as well as decreasing peak Sound Pressure Levels. The author has also proposed the measure to estimate Sound Pressure Levels about the weir width, height, overflow depth and the distance from the weir.

Keywords: Nappe Oscillation, Low Frequency Air Vibration, Sound Pressure Level, Overflow Weir, Spoiler

1. はじめに

越流型ゲートや砂防ダム等において、ある特定の越流水深になると水膜が高いレベルの振動現象を起こすことがあり、ゲートが振動したり低周波空気振動が発生して問題となっている。この水膜振動現象は、水膜、水膜背後の空洞、ゲート形状による水膜放出部特性、落下高などが複雑に関係したものであるため、従来から発生源と増幅機構の考え方に混乱が生じている。

フラップゲート等のように水膜放出部であるゲート自体が弾性支持された場合には、自励振動が発生する条件を検討した研究^{1),2)}があるが、砂防ダムのような固定堰においても同種の現象が見られることから、水膜自体の特性を解明する必要がある。水膜に関するこれまでの研究^{3),4),5),6),7),8)}によれば、振動の発生には、落下する流速による動的な不安定性と、それに抵抗する水膜の厚さが関係しており、背後の空洞や気柱などは増幅機構として作用していることが明らかとなっている。

本報文は、この振動機構を裏付けるために、水膜の越流幅を変えられる三次元模型を用いて振動発生条件と発生周波数を調査したものである。また、従来から振動防止対策として採用されている水膜分断スポイラーの音圧レベル低減効果を確認し、越流型ゲートの設計における振動発生条件の特定と低周波音圧レベルの予測を試みるものである。

2. 実験方法

実験装置は、図-1に示す落下高 $H=2.5\text{m}$ 、最大越流幅 $B=6\text{m}$ の越流型ゲート模型で、実物ゲートの一部分を等大に抽出したものとする。ゲートに相当する部分には刃形ぜきを水面に対して 40° の起立角で固定しており、ゲート部における振動は発生しないものとする。図-2に、越流幅および水膜分断形状を示すが、これらは非越流板を任意位置に設置することにより変化させており、端に非越流板がある場合には側壁から開放されていると判断した。また、落下高については、他の模型を用いて $H=1.5\sim 3.1\text{m}$ ($B=0.88, 1.9\text{m}$)の範囲で変化させており、検討を行った実験条件は表-1に示すとおりである。

低周波空気振動の音圧レベルは、図-3に示すように最大越流幅に等しい 6m 下流の地点において低周波音圧レベル計(リオン製NA17)で定点測定し、音圧レベルの減衰特性を検討する場合のみ水膜中心線上を上下流方向に計測した。また、振動周波数はアナライジングレコーダ(横河電気製3655E)による周波数分析から求めている。写真-1に、代表的な水膜振動状況($B=6.0\text{m}$, $H=2.5\text{m}$, $h=4.6\text{cm}$, $f_r=21.5\text{Hz}$)を示す。

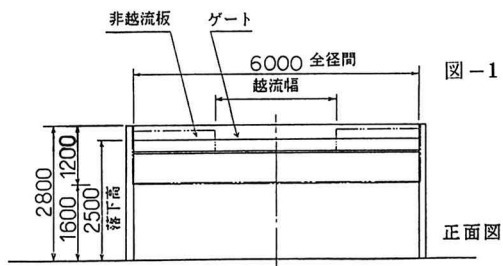
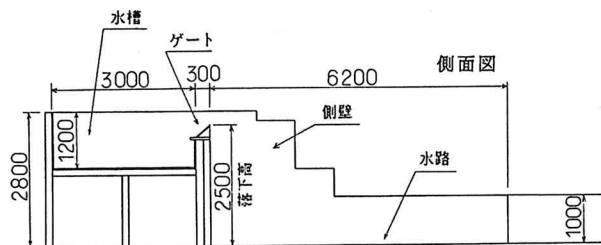


図-1 実験装置

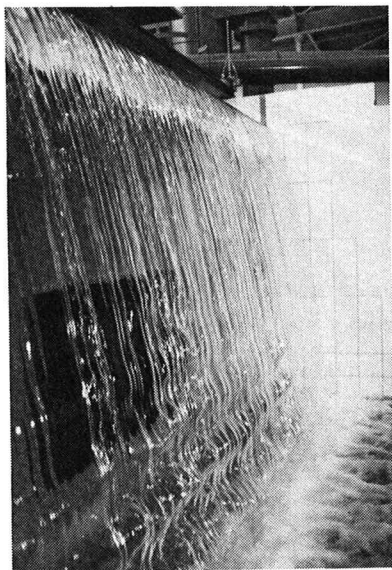


写真-1

水膜振動状況

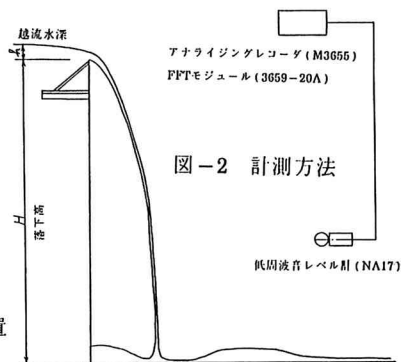


図-2 計測方法

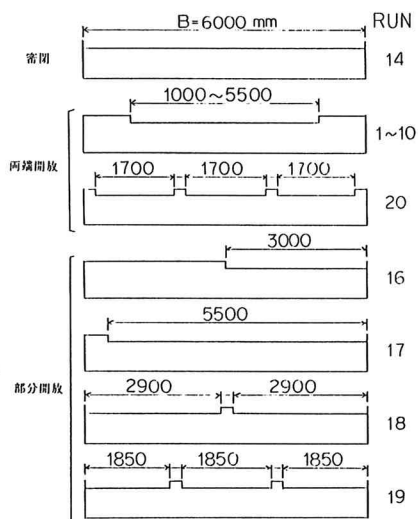


図-3 水膜断面形状

$B=6.0\text{m}, H=2.5\text{m}$

$h=4.6\text{cm}, f_r=21.5\text{Hz}$

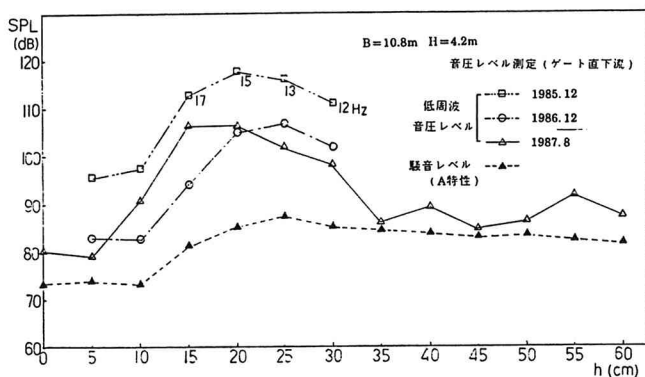


図-4 低周波空気振動事例 (音圧レベル)

RUN	放流 状態	落下高 H(m)	越流幅 B(m)	扉体 起立角 $\alpha(^{\circ})$	越流 水深 h(cm)
1	両端 開放	2.5	1.0	40	1~10 cm
2			1.5		
3			2.0		
4			2.5		
5			3.0		
6			3.5		
7			4.0		
8			4.5		
9			5.0		
10			5.5		
11	密閉	1.8	3.0	0.9	6.0
12		1.6	0.9		
13		1.9	6.0		
14		2.6	1.9		
15		3.1	3.0		
16	部分 開放	2.5	3.0	2@2.9 3@1.85 3@1.7	1~10 cm
17			5.5		
18			2@2.9		
19			3@1.85		
20			3@1.7		

表-1 実験条件

3. 低周波空気振動事例

図-4に、扉高4.2m、径間長10.8mの越流型の2段式ローラゲートで計測された低周波音圧レベル(SPL)と越流水深(h)の関係を示す。測定ゲート以外の放流の影響で計測時により起点音圧レベルが異なるため、個々の値は一致しないが、15~20cm程度で最大音圧を与える傾向は一致している。なお、実物ゲートには振動防止用のスポイラーが設置されているが、計測はこれを取りはずしてその有効性を確認したものである。

図-4には、可聴域における聴音レベル(A特性)の変化も合わせて示しているが、顕著なピークを有する低周波域の傾向とは異なり、実機の計測において低周波音特性を重視すべきことを示唆している。

4. 実験結果

(1) 越流幅の効果

落下高2.5mの一定条件において、越流幅を1.0m~5.5mと変化させた場合の音圧レベルの変化を図-5に示す。図には、水膜振動の大きさを比較するために次式で定義されるパワーレベル(PWL)を用いている。

$$PWL = SPL(r) + 20 \log r + 8 \text{ (dB)} \quad (1)$$

ここに、 r ; 水膜から測定点までの距離(m)

$SPL(r)$; r 地点での音圧レベル(dB)

越流幅にかかわらず、ある特定の越流水深でPWLが最大となる傾向は先に示した実物ゲートと同様であるが、越流幅の増加により最大PWL(以下 PWL_{max} と呼ぶ)を与える越流水深(以下 h_{max} と呼ぶ)が大きくなっていることが確認される。

また、低周波空気振動を対象としない越流水脈の落下騒音の研究⁹⁾によれば、落下音のPWLは越流幅と落下高と水脈の質量によって示される水流の落下エネルギーに関係すると考えられる。しかしながら、今回得られた PWL_{max} は、後述するように、越流幅に関して水流の落下エネルギーだけでは説明されず、越流幅により振動レベルが変化して、単位幅当たりの低周波音のPWLが異なっていることが考えられる。

(2) 水膜分断の効果

水膜の端部を側壁から離して開放したRUN 5と16およびRUN 9と17を比較すると、図-6に示すように同じ越流幅3.0、5.0mにおいて PWL_{max} に約10dBの相違があり、両端を開放すると音圧レベルが低減される。しかしながら、RUN 14と17ではわずかに1dBの差しかなく、片端のみの開放では水膜振動に大きな影響を及ぼさない。

次に、水膜の中央における分断においては、RUN 18、19、20と分断箇所が増えるほど PWL_{max} が低下し、水膜を中央で分断したRUN 18と端部で分断したRUN 17が同程度であることは興味深い。なお、越流幅6mにおける今回の最大であるRUN 14と最小であるRUN 20の PWL_{max} の差は約18dBである。

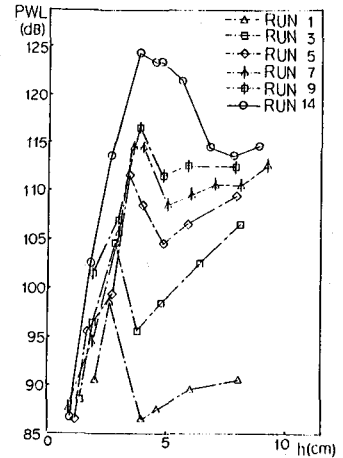


図-5 パワーレベル特性(1)

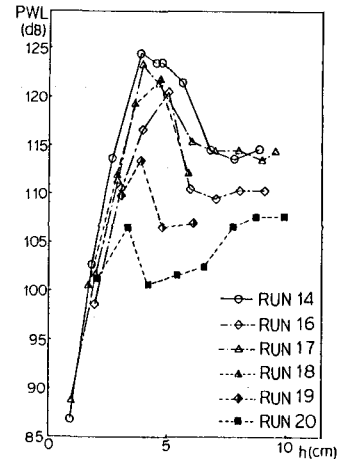


図-6 パワーレベル特性(2)

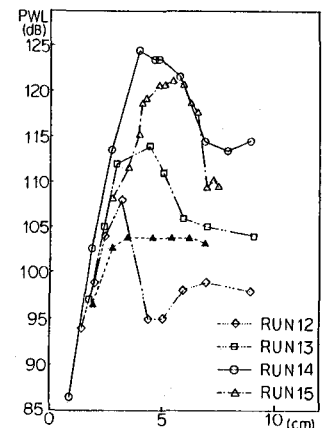


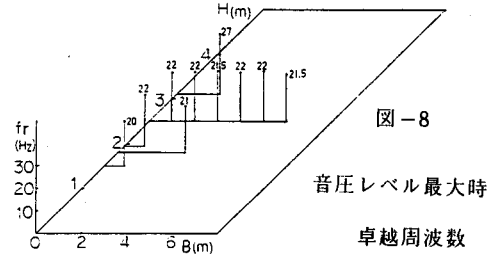
図-7 パワーレベル特性(3)

(3) 落下高の効果

図-7に落下高の異なるRUN 12～15の音圧レベルを示すが、図-5の越流幅の場合と同様に、落下高が大きくなるに従って、 PWL_{max} および h_{max} が大きくなっている。特に、RUN 12と13は同一越流幅であるが約6dBの差があり、水流の落下エネルギーのPWLの差よりもかなり大きな結果である。また、RUN 15については、全実験条件の中で最も大きい h_{max} を示しており、「落下高が大きく、流速が増大するほど厚い水膜でも振動する」という、これまでの研究成果を裏付けるものとなっている。なお、RUN 14と15が逆転しているのは、越流幅の相違によるものである。図-7には、RUN 15において振動を完全に止めた場合の音圧レベルも合わせて示しているが、これが水流による落下エネルギーに相当していると考えられ、ここでは約18dBの差が認められる。

(4) 音圧レベル最大時卓越周波数

低周波音レベル計の出力波形から求められた卓越周波数を図-8に示すが、越流幅に関してほぼ一定であり、水膜振動は周波数に関して2次元性を保っていると考えられる。一方、落下高に関しては $H=1.8\sim 2.5m$ 範囲でほぼ21～22Hzであり、 $H=3.1m$ の27Hzと $H=1.5m$ の20Hzのみが異なる傾向を示している。従来から、落下高が周波数を決定する報告が示されており、落下水膜に含まれる波数 (Schwartzの $k+1/4$ 則の k)が増大する考え方と同様の結果と考えられるが、実験条件が少ないために、明確な結論を導くことは困難である。



(5) 音圧レベル減衰特性

図-9にRUN 19、 $h=5.5cm$ における水膜中央断面内の音圧レベル分布を示す。これより、低周波空気振動は水膜全体の面音源ではなく落下点における線音源であることは明確である。また、その分布特性は、水平下流、鉛直方向ともに等方的と考えられるが、底面付近は反射の影響で若干高い音圧レベルを示している。

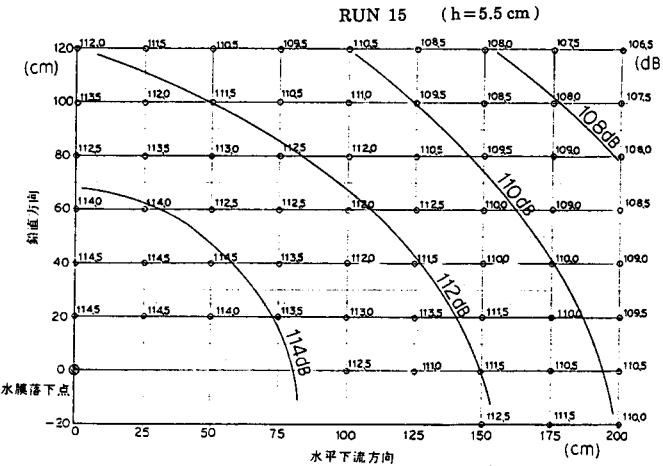


図-9 音圧レベル分布

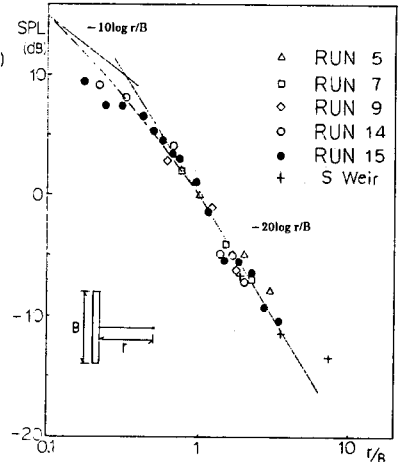


図-10 音圧レベル減衰特性

そこで、水膜を図-10に示すように幅Bの線音源と考え、測定点までの無次元距離 r/B で $SPL(r)$ を整理すると図のように実験条件にかかわらず一定の減衰傾向を示すことになる。これは、騒音の減衰特性⁹⁾と同様であり、 $r/B \leq 0.2$ 程度で倍距離3dBの無限長線音源($SPL(r) = PWL - 20 \log r - 8$)、 $r/B \geq 1.0$ 程度で倍距離6dBの有限長線音源($SPL(r) = PWL - 10 \log r - 8$)に近似される。ここで図-10においては、水膜端部が側壁に接している場合に、側壁が音響的に反射面となって音源が長くなる(音響映像)ため、減衰特性をもとに(2)式に示す越流幅の補正を近似的に行っている。

$$B' = a \cdot B \quad (2)$$

ここに、 a ; 越流幅補正係数 (1.5~両端密閉、
1.25~片端開放、1.0~両端開放)

(6) 最大音圧を与える越流水深

図-5~7に示した PWL と越流水深の関係から、 h_{max} を越流幅ごとに示したものが図-11である。両端開放(RUN 1~10)条件においては、越流幅の増大とともに h_{max} が大きくなっており、長径間になるほど水膜の厚い状態でも振動することになる。この理由は、水膜端部では縮流の影響によりゲート部での越流幅と落下点の水膜幅が異なり、特に越流幅が小さい場合には落下点付近の水膜が厚くなってしまいうためと考えられる。また、スポイラーで水膜を分断したRUN 19と20の場合には、複数の水膜が存在しても h_{max} は単独の場合と同様と考えられる。両端密閉の場合および落下高の影響については、明確な結論を導くことは困難であるが、落下高が高く、密閉状態であるほど h_{max} が大きくなるものと考えられる。

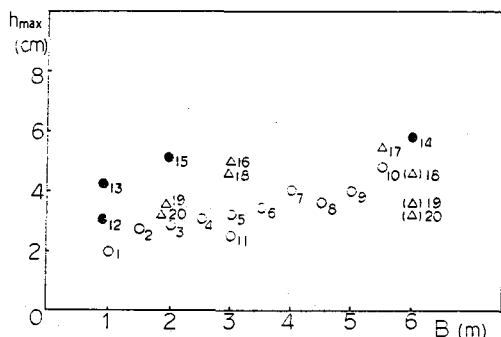


図-11 音圧レベル最大時越流水深

5. 音圧レベルに関する考察

落下音による音圧レベルは、越流水膜の落下により発生する音のエネルギーが越流水膜の落下エネルギーに比例すると考える⁹⁾。

$$W = \alpha \cdot U \quad (3)$$

ここに、 W ; 音のエネルギー、 U ; 落下エネルギー、 α ; 定数

落下エネルギーをポテンシャルエネルギーで表わすと次式になる。

$$U = m \cdot g \cdot H \quad (4)$$

ここに、 m ; 水の質量、 g ; 重力加速度

ここで、質量は流量に相当し、堰あるいはゲートの越流公式により(5)式で示され(4)式は(6)式となる。

$$m = \rho \cdot C B h^{3/2} \quad (5)$$

ここに、 ρ ; 水の密度、 C ; 流量係数、 B ; 越流幅、 h ; 越流水深

$$U = \rho g C B h^{3/2} H \quad (6)$$

次に、落下水膜が振動して落下音以外に空気振動を発生する場合に、振動振幅に相当する係数 K を導入して落下エネルギーを補正すると(7)式となり、最終的に(3)式は(8)式となる。

$$U' = K \cdot U = K \cdot \rho g C B h^{3/2} H \quad (7)$$

ここに、 U' ; 水膜振動を考慮した落下エネルギー

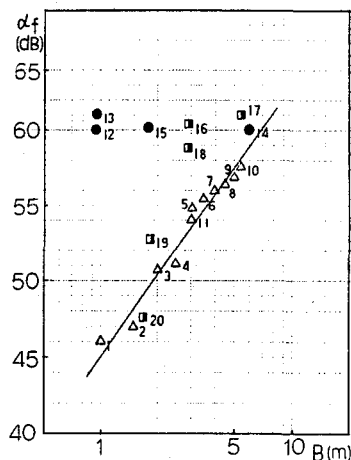


図-12 音圧レベル補正值

$$W = \alpha \cdot K \cdot U = \alpha \cdot K \cdot \rho g C B h^{3/2} H = A \cdot K \cdot B h^{3/2} H \quad (8)$$

ここに、 A ; 定数($=\alpha \rho g C$)

これを、対数変換すると(9)式となる。

$$\begin{aligned} \text{PWL} &= 10 \log(A K B h^{3/2} H) \\ &= 10 \log A + 10 \log K + 10 \log B + 15 \log h + 10 \log H \\ &= \alpha_f + 10 \log B + 15 \log h + 10 \log H \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 α_f ; 定数項および振動振幅による補正項($= 10 \log A + 10 \log K$)

そこで、(9)式を用いて、各実験条件ごとに α_f を求めたものが図-12である。図より、 α_f はスポイラーで水膜を分断したものも含めて、両端が開放された水膜は越流幅の対数項に関して線形である。一方、両端を密閉したものは、越流幅にかかわらず約60dBである。これより、 α_f は(10)式で近似されるものと考ええる。

$$\begin{aligned} \alpha_f &= 60 && (\text{両端密閉}) \\ &= 9 + 18 \log B, \quad B \leq 6.0\text{m} && (\text{片端または両端開放}) \end{aligned} \quad (10)$$

なお、 α_f の補正は水膜両端の縮流に関係し、水膜幅が6m以上の場合は両端密閉の場合とほぼ同様になるものと考えられる。

従って、最終的な低周波音圧レベルの予測式は、距離減衰項も導入して(11)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{SPL}(r) &= 10 \log B' + 15 \log h_{\max} + 10 \log H - 20 \log r + 52 && (\text{両端密閉}) \\ &= 10 \log B' + 15 \log h_{\max} + 10 \log H - 20 \log r + 18 \log B + 1 \\ &&& (B \leq 6.0\text{m} \text{ かつ 片端または両端開放}) \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 B ; 越流幅(cm)、 B' ; 1.5B(両端密閉)、1.25B(片端開放)、B(両端開放)(cm)、 $h_{\max}$; 最大音圧レベルを与える越流水深(図-11)(cm)、 H ; 落下高(cm)

6. おわりに

本実験では越流幅および水膜分断の効果を調査したが、水膜振動は周波数に関して二次元性を保っている。しかしながら、音圧レベルが最大となる越流水深やその音圧レベルは越流幅の影響を受けて二次元モデルだけでは説明されない結果となった。また、越流水膜を分断したり端部を開放したりすると、水膜振動を停止させることは必ずしもできないが音圧レベルの低減は可能であり、従来の対策の有効性が確認された。

また、水膜振動が発生する各越流幅における越流水深の領域が特定され、長径間ほど振動発生越流水深が大きくなる可能性が示された。さらに、低周波音圧レベルは、水流のエネルギーに比例する落下エネルギーと、主に越流幅に依存する非線形な水膜振動エネルギーが複雑に絡み合っており、本実験で提案した予測式について、実機の計測データをもとに検証を行う必要がある。

7. 参考文献

- 1) 萩原: フラップゲートおよびナップの自励振動、土木学会論文集、第357号/II-3、1985年
- 2) Petricat: "Vibration tests on weir and bottom gate", Water Power, March(1958)
- 3) Hagerty: "Study of the Stability of Plane Fluid sheets" Jr. of Applied Mechanics, Dec.(1955)
- 4) Schwartz: "Edgetone and Nappe Oscillation", Jr. of the Acoustic Society of America, 1966-3
- 5) Kolkman: "Instability of a Vertical Water-Curtain Closing an Air-Chamber", IAHR, (1972)
- 6) 大久保・角: 鉛直落下水膜の振動特性、土木学会第43回年講、1988年
- 7) 角・大久保: フラップゲート越流水膜の振動特性、土木学会第43回年講、1988年
- 8) 中島・角: 三次元性を考慮した水膜振動特性、土木学会第44回年講、1989年
- 9) 川崎重工業: 水門越流水騒音の研究、1981年