

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560234

研究課題名（和文） 堰の水膜振動特性と低周波騒音の予測法に関する研究

研究課題名（英文） Study on the Method of Predicting the Low Frequency Noise and Characteristic of Nappe Oscillation at Weir

研究代表者

長嶺 拓夫（NAGAMINE TAKUO）

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00323379

研究成果の概要（和文）：河川や用水路で実際に使用されている落下高さ 2 m 程度までの堰に設置する上での設計指針を得ることができた。この結果、落下高さが 2 m クラスの堰の越流部で起こる水膜振動の特性を明らかにし、水膜の厚さにより卓越した振動数成分をもつ低周波音が発生することを示した。また、水膜振動を抑える装置を提案し、水膜振動の防止に有効であることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The design manual when installing in the floodgate to the fall height 2 m grade actually used for the river or the irrigation canal was acquired. As a result, the characteristic of water screen oscillation which takes place in a floodgate with a fall height of 2m was clarified. It was shown that there is a frequency ingredient which excelled in the low frequency noise. Moreover, the equipment which suppresses water screen oscillation is proposed, and it is shown that it is effective in prevention of water screen oscillation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：流体関連振動、低周波騒音、水膜振動、越流、騒音防止

1. 研究開始当初の背景

河川や用水路に設けられる堰の越流部では水が膜状となって落下する。このとき水膜

振動が起こることが知られている。近年においては、用水路の側まで住宅が建てられることが増えてきており、水膜振動が起こると低

周波音が発生し、河川や用水路の近くの住居に騒音問題を引き起こす場合がある。このような問題の対策として従来スポイラーが用いられている。しかしスポイラーを用いても水膜の厚さなどによっては水膜振動が起こることがある。

2. 研究の目的

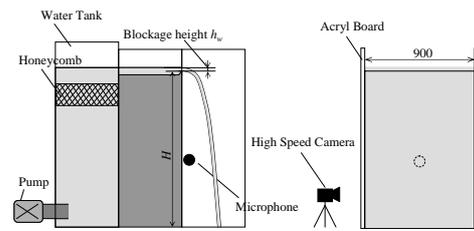
堰から落下する水膜に起こる振動については、複数の要因が関連しており、必ずしも十分に解明されているわけではない。しかしこれまでに多くの研究がなされ、水膜と堰とで構成される空間の圧力変動がひとつの要因となっていることが報告されている。また、構造物と流れの相互作用によっても振動が発生することが報告されている。

筆者らは、落下水膜形状と水膜の落下時に発生する圧力の関係を利用して、その水膜振動の防止方法の一案を提案し、本研究では、水膜振動による低周波騒音の特性を明らかにすると共に、防止方法を実機に適用しその有効性を確認するとともに、実際に使用されている落下高さ2 m程度までの堰に設置する上での設計指針を得ることを目的とする。

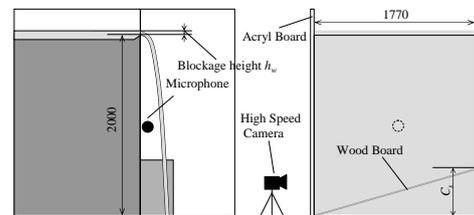
3. 研究の方法

鉛直に落下する水膜に低周波振動が生じることがある。このとき、発生する振動は卓越した振動数成分をもつ。この振動による圧力の変動は水膜の形状と一定の関係がある。水膜振動では、振動の山と谷が進行波的に落下する。この水膜の山が落下したとき圧力が高くなり、水膜の谷が落下したときに圧力が低くなることが実験的に示されている。ここでは、越流においても落下水膜の低周波音と水膜形状との関係が同じように成り立っているのかを調べるとともに、落下高さを水膜の幅方向に変えることにより落下地点での圧力の発生を小さくする振動の防止方法の有効性を検討し、振動防止装置の開発を行う。

実験装置：図1(a)は水膜の落下高さによる水膜の振動特性を調べる装置である。水を整流してから落下させている。水膜と装置でつくられる閉空間内の圧力の変動はマイクロホンを用いて計測を行った。水膜の形状を計測するために両側の壁はアクリルを用いている。



(a) 高さ H 500 mm ~ 3500 mm



(b) 防止装置(木板)

図1 実験装置

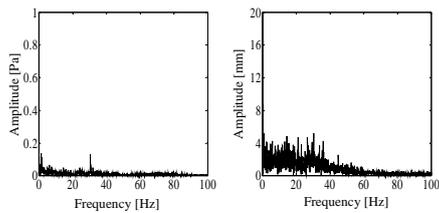
水膜の振動波形は側面から高速度カメラ(250 fps)により撮影した。

図1(b)は水膜落下部に板(振動防止用)を設置している。この板により上部から落下してくる水膜の幅方向の落下高さを変えている。傾斜板の設置高さ C_s は0~1000 mmの範囲で設定した。

実験方法：ポンプを起動し越流水深が一定となったことを確認してから、計測を行った。計測は低周波騒音計用のマイクロホンと高速度カメラの映像により行った。水膜の変位は画像から計測を行っているが、落下地点では水膜が破れることがあり、変位を常に計測することができない。このため、水平方向変位は下から400mmの位置で行っている。

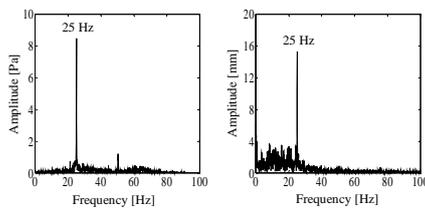
4. 研究成果

越流水膜の振動：落下高さ $H = 2500$ mmの結果を示す。図2は越流水深が20 mmのときの計測結果を示したものである。図2(a)、(b)はそれぞれ音圧と変位の周波数解析結果を示したものである。さらに、同じまとめ方で越流水深が40 mmの計測結果を図3、80 mmの結果を図4にそれぞれ示している。越流水深が20 mmの場合、水膜が薄くこれ以下の越流水深では膜が形成されず破れてしまう。このように水膜が薄いためか周波数においては卓越したものはみられない。周波数解析結果の図3(a)、(b)と図4(a)、(b)を比較す



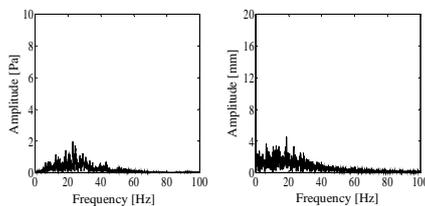
(a) (b)

図2 水膜の音圧と変位($h_w = 20$ mm)



(a) (b)

図3 水膜の音圧と変位 ($h_w = 40$ mm)



(a) (b)

図4 水膜の音圧と変位 ($h_w = 80$ mm)

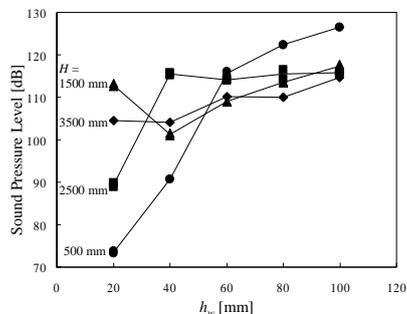


図5 低周波騒音の音圧レベル

ると越流水深が 40 mm では卓越した 25 Hz の振動数をもつことが分かる。このように、卓越した振動数をもつ水膜振動が起こることがわかる。図 5 は落下高さ毎に計測した低周波音の音圧レベルを越流水深に対して示したものである。水膜と装置でつくられた閉空間内部の圧力を低周波騒音計で計測したものである。このため、閉空間内での空気の流れの影響も受けていると考えられる。まず ■ で表した落下高さ 2500 mm の計測結果で

は、水膜が薄い越流水深 20 mm で、水膜が落下の途中において破れてしまう。このためか、閉空間内部での音圧レベルが 90 dB と低くなっている。越流水深が 40 mm となると水膜は厚く落下の途中で破れることはなくなる。このとき、水膜は振動し、図 3(c) のように 25 Hz の卓越した振動数成分の低周波振動となる。この落下高さが 2500 mm の実験では低周波振動が発生したのは、越流水深が 40 mm のときである。このときの音圧レベルは 116 dB である。越流水深が 60 mm の場合は 114 dB である。落下による位置エネルギーの量を比べると越流水深が 60 mm のほうが大きいのに、振動により発生する音圧レベルは越流水深が 60 mm の方が小さくなっていることがわかる。水膜振動が起こると落下水量によらず大きな低周波音が起こることがわかる。▲ は落下高さが 1500 mm のときの計測結果である。水膜振動が発生したのは、越流水深が 20 mm のときである。音圧レベルは 113 dB であり、越流水深が 40 mm のときの音圧レベル 101 dB に比べ、水膜が薄いにも関わらず大きな低周波音が発生する。落下高さが 3500 mm の場合、卓越した振動数成分をもつ振動は起こらなかった。越流水深の増加に伴い発生する音圧レベルが単調に増加していることがわかる。落下高さが 500 mm の場合も振動は観察されなかった。音圧レベルが落下高さ 3500 mm と比較して変化量が大きい。この理由は、もともと落下高さが低いいため閉空間が小さく水面の変動の影響を受けやすいのではないかと考えられる。図 6 は音圧を時間に対して示したものに、落下水膜の形状を併せて示したものである。騒音計のサンプリング周波数は 2500 Hz、高速度カメラは 250 Hz で撮影を行ったものである。サンプリング周波数が異なるため、ピークの時刻の若干のずれが生じているが、このときの水膜振動の卓越振動数は 16 Hz であり、図中の記号 b、c と d、e の図はほとんど同じため、ピーク時の波形として一方のみを載せている。写真は左側が閉空間であり、右側が開空間である。音圧が正のピークするとき水膜の落下位置は開空間側に振れ、音圧が負のピークるときに閉空間側に振れている

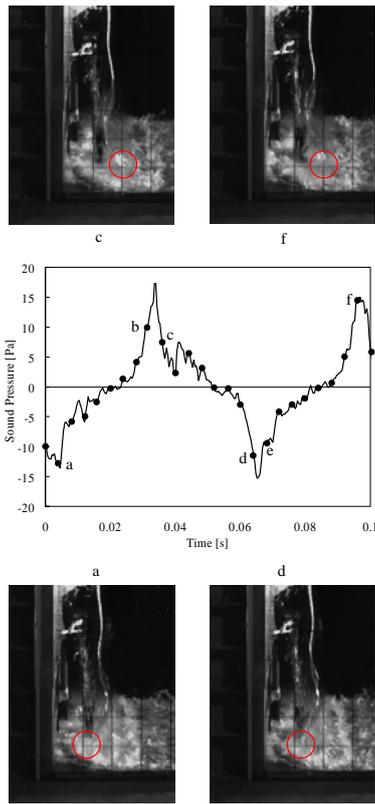
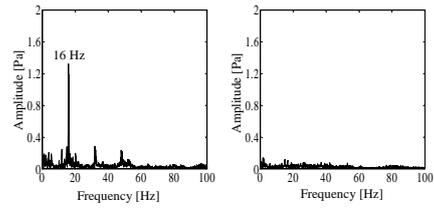


図 6 落下水膜形状と音圧
($H = 1500 \text{ mm}$ 、 $h_w = 20 \text{ mm}$)

ことがわかる。越流における閉空間内の音圧変動と水膜の変位の関係は著者らが行った鉛直落下水膜におけるものと同じであることが確認された。落下高さが 2500 mm の水膜振動の場合でも、水膜の変位と音圧の波形は振動数が一致する。

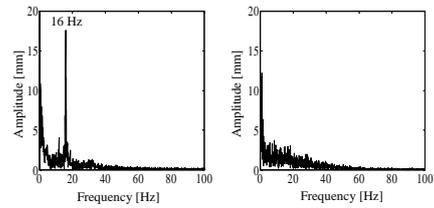
傾斜板の効果：図 7～12 は低周波振動の防止用の板を取り付けた場合と何も取り付けない場合の結果を比較したものである。 $C_s/H = 0.0$ は何も取り付けしていないことを表し、 $C_s/H = 0.3$ は落下高さに対して取り付け板の高さの比を示したものである。この場けた合は落下高さが 2000 mm であるため、取り付け高さは 600 mm である。

図 7 は越流水深が 20 mm と水膜が薄い場合の音圧の波形とその周波数解析結果の比較を示したものである。図 7(a)、(b) はそれぞれ装置なしとありのものである。装置を取付けた(b)の方の振幅が小さくなっている。また周波数解析結果から卓越した振動数成分がなくなることがわかる。



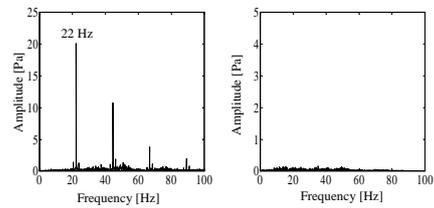
(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 7 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 20 \text{ mm}$)



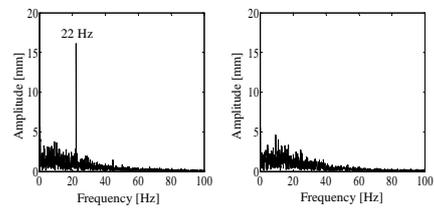
(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 8 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 20 \text{ mm}$)



(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 9 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 40 \text{ mm}$)



(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 10 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 40 \text{ mm}$)

図 8 は同じ水膜の変位について示したものである。水膜の水平方向変位は装置左側面より撮影した映像をもとに計測を行った。装置を取り付けた場合、最も落下距離が長い位置で変位を計測した。

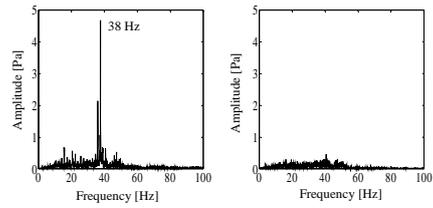
正面から観察すると最も落下距離の長い位置での振幅が大きかった。水膜変位のデータは最も振れの大きい位置の計測結果となっている。図 8(a)、(b) から水膜の変位の振動数成分にも卓越した振動数成分がなくなることがわかる

図 9、10 は最も大きな水膜振動が起った越流水深 40 mm の結果である。装置を取付けない場合、図 9(a)から単独の振動数成分 22 Hz で 20 Pa の音圧成分をもつ低周波音が発生している。この音を傾斜板の設置により、図 9(b)のように低周波音の卓越振動数成分を抑えることができることが明らかとなった。また図 10(a)、(b)から水膜の水平方向変位の振動数成分にも卓越した振動数成分がなくなっている。

図 11、12 は越流水深が 50 mm と水膜が厚い場合の結果である。水膜の振幅は小さくなっていく。また卓越した音圧の振幅は小さくなり、水膜波形の振動数成分との関係がみられなくなる。しかし、図 11 (a)、(b)と図 12(a)、(b)をそれぞれ比較すると若干ではあるが各振動数成分の値が小さくなっているようにも見える。取り付けた装置は落下距離を幅方向に変えることにより水膜の波形の山と谷で発生する圧力を相殺する作用をもたせているが、卓越した振動数成分以外においても抑制の効果が表れている。

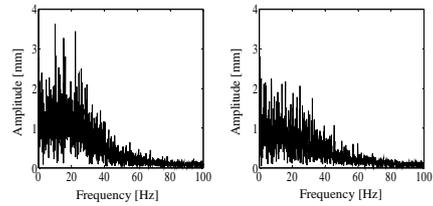
図 13 は設置高さ毎の音圧レベルを越流水深に対して示したものである。■で示した結果は、通常の場合で装置を設置していないときの結果である。越流水深が 40 mm の水膜振動による低周波音の音圧レベルは最大の 121 dB となった。装置の設置高さ C_s/H を高くするに従い、音圧レベルの低下がみられる。 $C_s/H=0.3$ までは大きく減少する。0.3 以上では音圧レベルの低減効果はほぼ同じである。

設計指針：対象としている水膜振動の低周波音は、卓越した振動数成分をもつ。この振動数は落下する水膜波形の振動数と一致し、図 6 で述べたように閉空間内では水膜が堰側に振れた場合（ここでは、振動波形の谷とする。）に圧力が低く、開放空間側に振れた場合（ここでは、山とする。）に圧力が高くなる。落下地点は水平であり、山、谷、山、谷と水膜が規則的に衝突することになる。この圧力変動が水膜の形成にフィードバックされ水膜振動が連続的に持続する。提案手法は、水平である落下位置を傾きを付けることに



(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 11 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 50$ mm)



(a) $C_s/H = 0.0$ (b) $C_s/H = 0.3$

図 12 C_s/H の音圧に与える効果($h_w = 50$ mm)

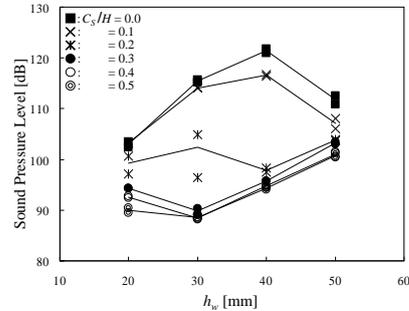
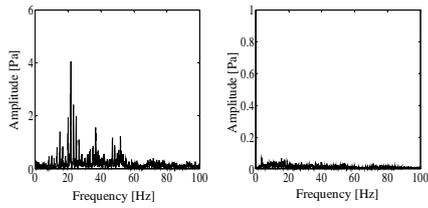


図 13 C_s/H の音圧レベルに与える効果
($H = 2000$ mm)

より、水膜の山と谷を同時に落下させ発生する圧力変動を相殺するものである。この方法を用いた場合、発生する水膜振動の半波長より長い落下高さの差を与えることが必要となる。従って、ある一定以上の落下高さの差を与えることができれば、発生する振動モードに関わらず圧力変動を相殺することができる。本実験の範囲では問題無く 2 m クラスの堰では、落下高さ比で 0.3 以上の傾きを与えることで振動の防止効果があることが分かった。

図 14 は同じながれの条件における装置なし、装置ありの音圧の周波数解析結果である。図 14(b)の装置ありの場合は、卓越した振動成分をよく抑えることができていることがわかる。図 15(b)では装置を取り付け、水膜振動を防止することができている。また水膜



(a) $C_S/H = 0.0$ (b) $C_S/H = 0.3$

図 14 防止装置の周波数解析 ($h_w = 30 \text{ mm}$)



(a) Nappe oscillation



(b) Suppression of nappe oscillation with equipment

図 15 堰での越流振動

落下部は白く波立っていないことから水膜振動が発生していないことがわかる。このとき、音圧レベルは図 15(a)に比べ 10dB 程低減されている。

実機での試験:実機での試験は、上下に稼動する水門を用いて行った。この水門は、洪水などを防止するために水門を上げることがある。このような場合に傾斜板も一緒に上げる必要があるため、水門に傾斜板を取付ける方法を採用した。固定堰の場合には、傾斜板を水膜の落下地点に流されないように設置すれば良いと考える。

実機での観察結果を図 15(a)、(b)に示している。越流水深が 40 mm のとき水膜振動が発生する。図 15(a)では装置が無く、水膜が振動している様子を見ることが出来る。このときの外部で計測した音圧レベルは 95dB であった。

まとめ: 落下高さが 2 m クラスの堰の越流部で起こる水膜振動の特性を検討した。これにより水膜の厚さにより卓越した振動成分をもつ低周波音が発生することを示した。また、水膜振動を抑える装置を提案し、水膜振動の防止に有効であることを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①長嶺拓夫, 峯岸雄一, 関谷明, 後藤眞宏, 高木強治, 森博輝, 佐藤勇一, 越流に発生する低周波振動防止装置の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 77 巻, 778 号, 2011, 2211-2220.

[学会発表] (計 3 件)

①長嶺拓夫, 生野靖, 峯岸雄一, 和田弘, 関谷明, 後藤眞宏, 高木強治, 森博輝, 佐藤勇一, 越流に発生する低周波振動防止装置の開発, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 D&D2010 CD-ROM 講演論文集, No.10-08, 2010, 1-6, 京都.

②長嶺拓夫, 森博輝, 佐藤勇一, 落水水膜により発生する低周波騒音, 日本機械学会, 第 9 回評価・振動に関するシンポジウム, No.10-69, 2010, 85-89, 徳島.

③伊藤亮, 森博輝, 長嶺拓夫, 佐藤勇一, 落水水膜振動に関する研究, 日本機械学会関東支部, 第 17 期総会講演会, No.110-1, 2011, 225-226, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長嶺 拓夫 (NAGAMINE TAKUO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 00323379

(2) 研究分担者

森 博輝 (MORI HIROKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 50451737

(3) 研究分担者

佐藤 勇一 (SATO YUICHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 30134828