

跳水から発生する音に関する基礎的研究

SOUND GENERATED BY HYDRAULIC JUMP

斎藤 秀徳¹・前田 直輝²・京藤 敏達³・桜井 力⁴・西村仁嗣⁵

Hidenori SAITOH, Naoki MAEDA, Harumichi KYOTOH and Hitoshi NISHIMURA

¹工修 日本精工 (〒141-8560 東京都品川区大崎1-6-3)

²筑波大学理工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

³正会員 工博 筑波大学 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁴正会員 工修 水資源開発公団 企画部調査課 (〒107-8488 東京都港区赤坂5-3-3)

⁵正会員 工博 筑波大学 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Sound generated by hydraulic jump has been investigated experimentally and theoretically. The process of sound scattering from hydraulic jump is so complex that the system has not yet been studied in detail. Mainly four origins of the sound were considered in the present paper, i.e., oscillations of a single bubble, bubble cloud, sound occurred during the breakup of free surface and the resonance of an air column. To reveal the origin of the spectral peaks appeared in the power spectrum of sound data, we measured the sound at various locations along the hydraulic jump. Also, to specify the origin, salt and cleaning-material were mixed into the working water in order to change the void fraction of hydraulic jump. Furthermore, to investigate more clearly the relation between each physical process and the spectral peaks of sound, the experiment of free fall of a round jet into a still water-tank was also achieved for various jet velocities and different depths of water-tank.

We have concluded that the strong peak of the spectrum occurs from bubble cloud oscillations, but the other peaks are originated from the generation of bubbles and the existence of air columns at the free surface.

Key Words : Hydraulic jump, round jet, air entrainment, low frequency sound, air column, bubble cloud, the Helmholtz equation, eigen-value problem

1. 序論

われわれの身の周りにおいて、水流から発生する音は避けられない。特に、水流中に気泡が存在するとその音はより複雑となり、さまざまな卓越周波数をもつようになる。気泡が発生または混入しうる例として、次のようなことがあげられる。ポンプなどの流体機器は、それ自身の回転運動により、流体中に局所的な減圧を生じさせキャビテーションを発生させる。この場合、気泡の存在は周囲に音を伝播させるだけでなく、機器の効率を低下させてしまう。また、下流を保護する目的で、ダムから放流された水の勢いを減じる跳水式減勢工は、跳水によって水流中に多量の気泡を混入させ、水のもつエネルギーを低下させる^{1), 2), 3)}。一方、空中に放射された音を測定することで水中に混入された気泡の量を推定することは、海洋への大気の混入量を見積もるために重要である⁴⁾。

上述のように気泡の存在は周囲に音波を伝播させ、

周辺環境に影響を与える。この問題で桜井らは、減勢池内の気泡群の固有振動数を解析的に求め、減勢池から空中に放射される低周波音の振動数の説明を試みた³⁾。しかし、跳水によって放射される音の原因は気泡群の固有振動のみではなく、高速水脈が減勢池の水に貫入する際にできる空洞の共鳴、水脈の不安定性による気泡の混入などが考えられる。また、発生する音のメカニズムやその支配要因についての研究例は少ない。

そこで本研究では、i) 発生音の位置を特定するために減勢池上の3地点における音の測定、ii) 気泡の混入状況を変化させるために食塩および洗剤を混入したときの音の変化、iii) 落下水脈が水面に貫入するときの発する音を調べた。

第2章では跳水から放射される音波の周波数特性を測定し、その卓越振動数の発生原因を調べた。第3章では、跳水始端部の流況と発生音の関係を明らかにするために、鉛直落下水脈が水面に貫入した際の発生音について同様の実験を行った。第4章では、

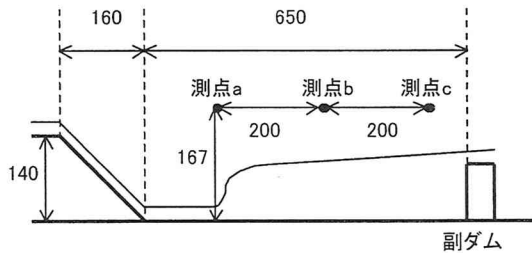


図-1 実験装置
(図中の長さの単位はmm)

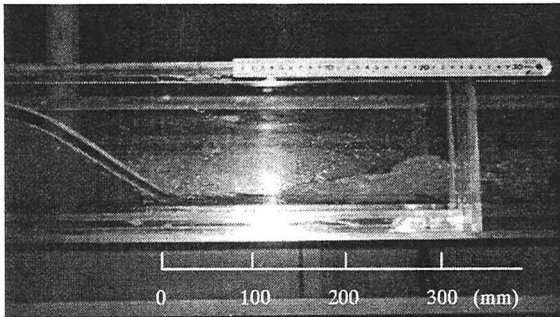


写真-1 跳水の側面画像

跳水内部における気泡群から放射される音について理論解析を行い、その放射される音の予測を行った。

2. 跳水から発生する音

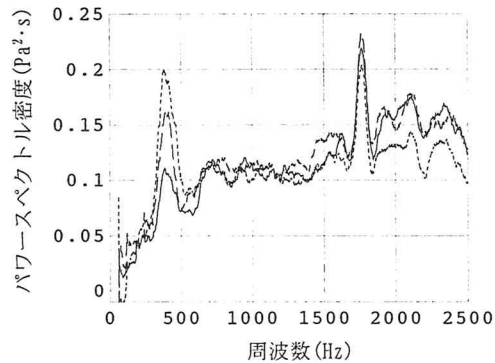
(1) 概要

跳水から空気中に放射される音の発生原因を調べるために、跳水始端部、副ダム位置および減勢池中央において音圧の測定を行った。さらに、気泡の混入状況を変えるために、食塩および洗剤を混入し同様の実験を行った。

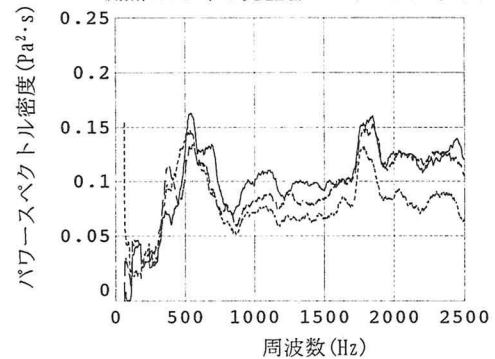
(2) 実験装置

実験装置を図-1に示す。水路の材質はアクリル(厚さ10mm)で、水路幅は200mmである。水路の上流側に堰を、下流側に副ダムを設置することにより、強制的に跳水を起こしている。副ダムを流下した流体はポンプで水路の上流に送られる。実験で用いた液体は、発生音の支配要因を明らかにするため、ボイド率がそれぞれ異なるものを用意した。使用したのは水、濃度5%の食塩水および台所用洗剤を溶かした濃度66.0 $\mu\text{g}/\ell$ の水溶液で、食塩は表面不活性剤として、洗剤は表面活性剤としての性質を有している。

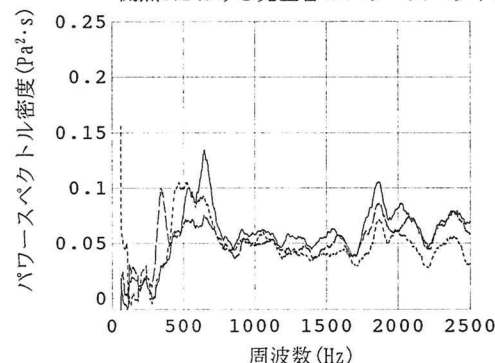
騒音計は、普通騒音計(小野測器製計LA-1250)を用い、マイクロホンには防風スクリーンを装着した。測定地点は、図-1に示すように、跳水始端部直上(側点a)、さらに、そこから流下方向に200mm、400mm水平移動した点(測点b、測点c)とした。各測点とも高さは底面より167mmとしている。



測点aにおける発生音のパワースペクトル



側点bにおける発生音のパワースペクトル



測点cにおける発生音のパワースペクトル

図-2 発生音のパワースペクトル
(—:水、---:洗剤、.....:食塩)

また、発生音の周波数特性は、得られた音圧のデータにFFT解析を行い、そのパワースペクトルを求めることによりもとめた。測定は、サンプリング時間0.8192秒の測定を10回を行い、それらの平均をとった。また、測定地点a, b, cにおいて、それぞれポンプ運転音等の暗騒音を測定し、同様にFFT解析を行い、周波数ごとに発生音から引いて補正した。

(3) ボイド率

流量、平均流速および水深を測定し、それらの値から水脈断面におけるボイド率(推定値)を求めた。測定地点は、跳水始端部から約150mm地点を測点1とし、測点1 から流下方向に50mmずつ150mmまで移動した点をそれぞれ、測点2、測点3、測点4としている。流量は15リットルの容器を満たす時間の測定

を10回行い、その平均値とした。平均流速は、それぞれの測定地点において上、中、下部の3点の流速をプロペラ式流速計(ケネック製)で計測し、それらの平均値とした。

ボイド率の算出には水量の保存則から得られる次の式を用いた。

$$\beta = 1 - \frac{Q}{Ubh} \quad (1)$$

ここで、 β はボイド率、 Q は流量、 $\bar{U}$ は水脈断面における平均流速、 b は水路幅、 h は水深である。ただし、ボイド率 β は断面内で一定とした。上記の測定方法から得られた跳水部全体の平均ボイド率は、水:0.14、洗剤:0.22、食塩:0.18であった。

(4) 実験結果

騒音計のAC出力をサンプルレート5000HzでAD変換し、FFT解析を行いパワースペクトルを求めた(図-2)。これらの図から、400Hz付近、500~600Hz付近および1700Hz付近に卓越周波数が存在することがわかる。以下は各卓越周波数について議論する。また、測定位置が水路の直上(約10cm)であることから、測定された音はその測定点からによるものと判断した。

a) 400Hz付近の卓越周波数

測点aにおける音は、400Hz付近に明確な卓越周波数を持つが、この周波数値はボイド率に依らないことがわかる。この卓越周波数の音圧は、跳水始端部から流下方向に移動する(測点a→測点b→測点c)につれ小さくなる傾向を示していることから、この発生音の音源は跳水始端部に存在すると考えられる。跳水始端部における音源としては、“水脈の振動音”、“単一気泡の振動音”、“気柱の共鳴音”などが考えられるが、詳しくは第3章で議論する。

b) 500Hz~600Hz付近の卓越周波数

測点b、測点cにおける発生音の周波数特性は、測点aで見られた400Hz付近の卓越周波数の音圧は小さくなり、500Hz~600Hz付近に新たな卓越周波数を持つことから、測点aにおける音源とは別の音源が存在していると考えられる。400Hz付近の卓越周波数はボイド率による変化は大きくなかったが、この500Hz~600Hz付近の卓越周波数はボイド率の増加(水→食塩水→洗剤入りの水)により周波数が小さくなる傾向を示している。この卓越周波数は不明瞭な卓越周波数であるが、音源として“混入された気泡群から放射される音”を考えると説明できる。この混入された気泡群から放射される音の固有周波数については第4章で議論する。

c) 1700Hz付近の卓越周波数

1700Hz付近に卓越周波数の音圧は、跳水始端部から流下方向に移動する(測点a→測点b→測点c)につれて小さくなる傾向を示しているが、周波数は逆に高周波側にシフトしている。また、この卓越周波数

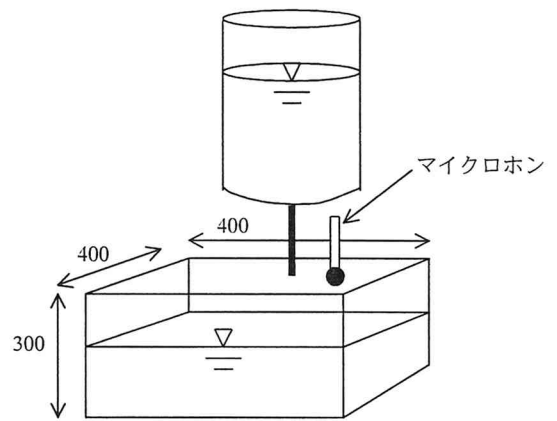


図-3 落下水脈実験装置
(図中の長さの単位はmm)

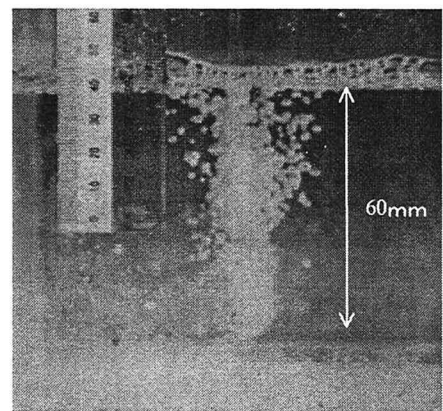


写真-2 混入気泡の画像(水位差91mm)

はボイド率に依らないことがわかる。そこで、この発生音の音源として考えられるのは“水中における単一気泡の振動による音”である。森らは、鉄球の水面への落下実験から、気泡が水面から離脱する際の発生音周波数が、Minnaertによって理論的に求められた次式の気泡の膨張・収縮振動(0次モードの振動)の周波数に従うとしている。

$$f = \frac{1}{\pi R_a} \sqrt{\frac{3p_0}{\rho_w} - \frac{4\sigma}{\rho_w R_a}} \quad (2)$$

ここで、 f は周波数、 R_a は気泡の直径、 γ は比熱比、 p_0 は大気圧、 ρ_w は水の密度、 σ は水の表面張力である。本実験において、高速ビデオカメラによる画像から読み取った気泡の直径は約1mm~5mmであったので、1700Hz付近の卓越周波数は、この“水中において単一気泡が振動する際の発生音”によるものであると考えられる。

3. 水脈の落下実験

(1) 概要

本章では、とくに跳水始端部における流況および発生音の特性をより詳細に検討するための基礎実験

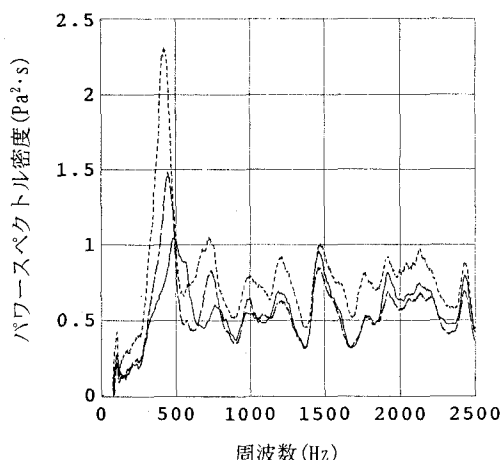


図-4 流速と発生音のパワースペクトルの関係
(— : 3.7m/s — — : 4.2m/s : 4.7m/s)

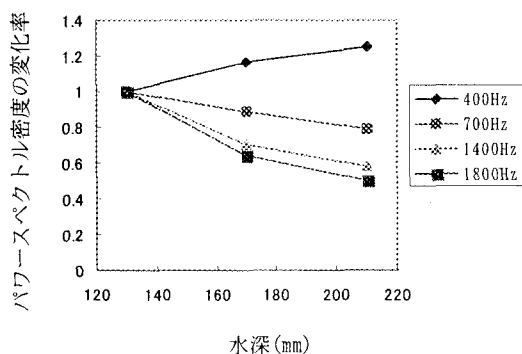


図-5 水深による音圧の変化

として、水脈の落下速度および下部水槽の水深を変化させ、発生音の周波数特性を調べた。

(2) 実験装置

実験装置の概要を図-3に示す。実験方法は、上部円筒容器(内径200mm:アクリル製:厚さ10mm)に水を貯め、円筒容器下部についたチューブ(長さ165mm、内径2.0mm)を通して下部水槽(400mm×400mm×300mm:厚さ10mmのアクリル製)の水面に水脈を落下させた。チューブの先端から下部水槽の水面までの距離は165mmとした。普通騒音計(小野測器製:LA-1250)はチューブ先端から水平に100mmずらした位置に設置し、マイクロホンに防風スクリーンを装着した。

(3) 実験結果

図-4は、下部水槽の水深を170mmに固定し、上部円筒容器の水位のみを変化させることで流速の違いによる発生音の周波数特性を調べたものである。また、図-5は、図-4に示されるピークの値の下部水槽の水深依存性を見るために、水深が130mmのときのパワーで正規化したときのパワーの水深による変化を示す。

(4) 考察

気泡が水中で生成される過程は、まず、水脈に連行された空気により水脈の周りに細長い空洞が形成される。さらに空洞が長くなると、空洞は分裂し、気泡の塊と水面の凹部を形成する部分に分かれる。その気泡の塊は、水脈によりさらに深部へ運ばれ、1つ1つの気泡に分かれる。これらの結果より、水脈貫入時の発生音の支配要因には、水脈に連行された空気による空洞の共鳴音、水脈の振動により発生する音、水中における気泡群の振動による音、水中における単一気泡の振動による音の4つが考えられる。

以下では、図-4の観測された卓越周波数に注目して、先にあげられた4つの音について議論する。

a) 水脈に連行された空気による空洞の共鳴音

400Hz付近および1400Hz付近の2つの卓越周波数は、流速に対して異なる特性を示している。400Hz付近は、流速の増加に対して周波数が低下しているのに対して、1400Hz付近の周波数は流速に依らない。流速が増加すると、水脈の貫入長さは長くなることが実験において観察された。つまり、流速が増加し、空洞の深さが増大すれば、空洞共鳴音の周波数は低下する。400Hz付近の卓越周波数は、この特性を示していると考えられる。

b) 水脈の振動により発生する音

空洞における共鳴現象には音源が必要である。まず考えられるのは、空洞自身の振動であるが、水の表面張力から考えると空洞自身の振動はありえない。もう1つは、円筒ジェット的不安定性から生じる水脈振動である。高速ビデオカメラによる落下水脈の撮影から、本実験における水脈の振動数は400Hz～600Hzであり、この水脈振動は400Hz付近の卓越周波数の発生要因(空洞における共鳴現象の音源)として十分に考えられる。

c) 水中における単一気泡の振動による音

本実験において、高速ビデオカメラによる画像から読み取った気泡(個々の気泡に分かれた後)の直径は約1mm～5mmであった。したがって、式(2)より、単一気泡から発生する音は、1000Hz～2500Hzにおける雑音源となっていると考えられる。さらに、図-4において1000Hz～2500Hzの周波数特性は、流速に全く関係していないが、単一気泡の振動音も流速に依らないことから、これらの支配要因として単一気泡の振動音が考えられる。

d) 水中における気泡群の振動による音

図-5は水深と各周波数帯の音圧の変化率を示したものである。水深が増加すると、周波数が高いほど音圧の減少率が大きく、周波数が最も小さい400Hz付近の卓越周波数のみ音圧が増加している。これは水深が増加するにつれ、音波の波長が長くなり、そ

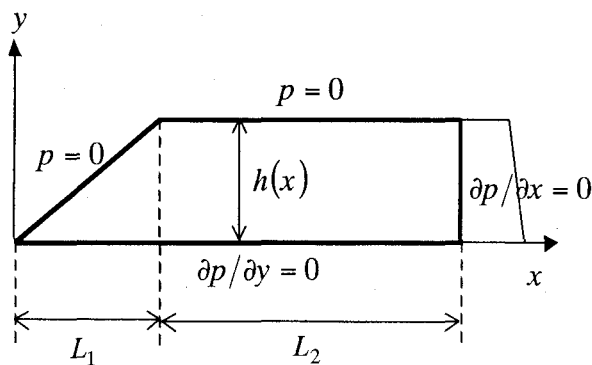


図-6 理論解析モデル

の結果、水槽内領域の固有振動数が低下したためと考えられる。したがって、発生音の周波数特性には、気泡群を含んだ水槽内領域の共鳴による影響が存在すると考えられる。

4. 気泡群の振動から発生する音

(1) 概要

本章では、跳水において気泡群から放射される音の発生音の予測を行った。ここでは、2次元ヘルムホルツ方程式を用い、跳水始端部および副ダムで囲まれた領域における固有振動数および固有関数の計算を行った。

(2) 理論解析

水中音速は流速より2オーダー大きいため、流れとの相互作用は無視する。最終的に、跳水中(跳水始端部および副ダムで囲まれた領域)の圧力変動は次のヘルムホルツ方程式により支配される。

$$\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial y^2} + \kappa^2 p_m = 0 \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{2\pi f}{c_m} \quad (4)$$

ここで、 p_m は圧力の複素振幅、 κ は波数、 C_m は混相流体中の音速、 f は振動数である。 x 、 y はそれぞれ上記領域の流下方向座標および鉛直方向座標を表わす。以下では、式(3)に基づいて跳水始端部および副ダムで囲まれた領域での音波および空中へ放射される音について検討を行う。計算領域については図-6に示すように、跳水始端部を原点として、跳水部前方斜面、後方水面、副ダム側壁および底面により囲まれた台形領域とした。

(3) 境界条件

音波に対する境界条件は、水面では透過条件

$$p = 0 \quad (5)$$

副ダム側壁で完全反射条件

$$\frac{\partial p_m}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

底面で完全反射条件

$$\frac{\partial p_m}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

を与える。

(4) ボイド率および混相流体中の音速

混相流体では、重要なパラメータの一つにボイド率がある。流速に比べて音速が非常に大きい場合、混相流体中の音速は、混相流体の質量保存則および運動量保存則から以下のように表わせる。

$$c_m = (\rho_m K_m)^{-1/2} \quad (8)$$

$$\rho_m = \rho_a \beta + \rho_w (1 - \beta) \quad (9)$$

$$K_m = \frac{\beta}{\rho_a c_a^2} + \frac{1 - \beta}{\rho_w c_w^2} \quad (10)$$

ここで、 β はボイド率、 K_m は体積弾性率、 ρ_m は混相流体の密度、 ρ_a は空気密度、 ρ_w は水の密度、 C_m は混相流体中の音速、 C_a は空気中の音速、 C_w は水中の音速である。

また、2章の実験により、跳水始端部および副ダムで囲まれた領域のボイド率分布は、水深方向に放物形、流下方向に線形であることが観察された。よって、ここではボイド率分布を以下の関数で与える。

$$\beta = \frac{\beta_s}{\sqrt{h(x)}} \sqrt{y} \quad (11)$$

$$\beta_s = \beta_1 + \frac{\beta_2 - \beta_1}{L_1 + L_2} x \quad (12)$$

ここで、 β_1 は跳水始端部におけるボイド率、 β_2 は最終ボイド率、 $h(x)$ は水深、 L_1 は跳水部前方三角形領域の流下方向距離、 L_2 は跳水部後方矩形領域の流下方向距離である。

水深 $h(x)$ は a を水面勾配とすると、次のように与えられる。

$$h(x) = ax, \quad x < L_1 \quad (13)$$

$$h(x) = aL_1, \quad L_1 < x < L_1 + L_2 \quad (14)$$

(5) 解析結果

図-6に上記の解析により得られた基本モードの気泡群から放射される音の振動数をボイド率の関数として示す。本計算では、実験においてボイド率が0になる地点は副ダム側壁付近であったので、副ダム側壁におけるボイド率を $\beta_2=0$ とした。また、第2章において跳水始端部付近のボイド率は0.17~0.34であった。したがって、図-7から跳水始端部と副ダムで囲まれた領域内の気泡群から放射される音の固有振動数(基本モード)は200Hz~300Hzと推定される。一方、実験では500~600Hz付近にピークがあり、詳

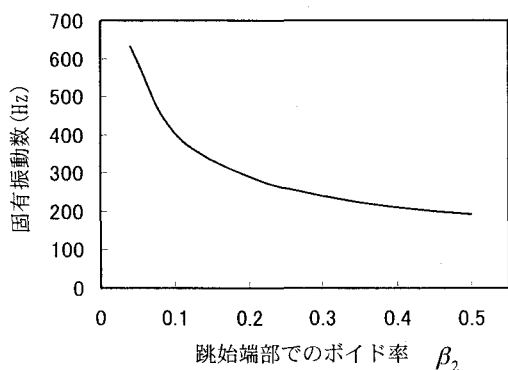


図-7 気泡群から放射される音の固有振動数
 $\beta_1 = 0.04$ $\beta_2 = 0$ $L_1 = 3.6$ $L_2 = 2.9$ $h = 1.0$

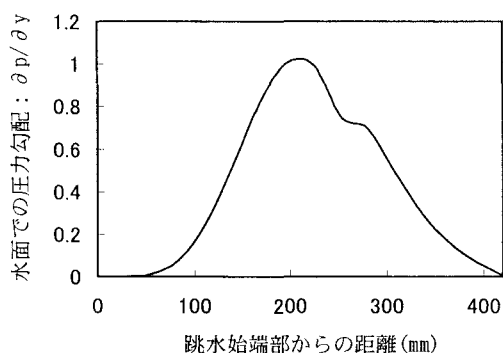


図-8 水面での圧力勾配
 $\beta_1 = 0.3$ $\beta_2 = 0$ $L_1 = 3.6$ $L_2 = 2.9$ $h = 1.0$

細な実験も含めてさらなる検討を要する。

次に、跳水内部における気泡群から発生する音が空中へ放射される過程について検討する。跳水内部から空中に放射される音波は、跳水内部で励起され増幅された音波が自由表面の変位を通して空中に伝播するものと解釈することができる。そこで、図-8に $\beta_1 = 0.3$, $\beta_2 = 0.0$ ときの基本モードに対応する固有関数から求めた水面での圧力勾配を示す。オイラーの運動方程式から圧力勾配は加速度と釣り合うことを考慮すると、図の縦軸は加速度の大きさを示す。また、単振動の場合には加速度が速度に比例することを考慮すれば、図-8は水面における速度振幅の分布を示している。ただし、図-8の縦軸は最大値が1となるように正規化されている。

図-8において圧力勾配が最大となっているのは、跳水部前方斜面付近であり、ボイド率の大きい領域において空中への音の放射が顕著になることを示している。しかし、最終ボイド率が0でないボイド率分布($\beta_1 = 0.3$, $\beta_2 = 0.1$)では、図-8に比べて圧力勾配が非常に大きくなること、さらに、圧力勾配が最大となる地点も跳水部後方へ移動することも本解析で

確認された。したがって、ボイド率の変化が跳水内部から空中へ放射される音に大きく関与することが推定される。

5. まとめ

跳水および円筒ジェットの水面上への落下によって生じる音波の計測を行い、音の原因について考察した。跳水から放射される音の原因を単一気泡、気泡群、気柱の共鳴、気液界面の破壊によると考え、実験的および理論的に考察した。流れが引き起こす音は、その外力およびそれを励起する媒質が相互に作用して発生する。

跳水始端部およびジェット貫入部においては、自由表面の不安定性による水面変動と水流の貫入により生じた空洞の共鳴が考えられる。気泡群の振動に関しては、跳水では水面の気泡密度が大きく、ジェットでは水中の気泡密度が大きい。水面に気泡が存在する場合と存在しない場合で空中に放射される音がどのような影響を受けるか今後検討を要する。

水中マイクロホンにより水中の音を計測すれば、気泡群の発する音を直接測定できるが、これについては現在進行中である。今後、気泡の生成をコントロールした実験を行うことで、気液混相流から放射される音波のより詳細な理解を得る必要がある。

参考文献

- 1) 金沢純一, 金安公造: ダムの放流に伴う低周波騒音の発生と伝播, 日本音響学会講演論文集, pp. 179-180, 1976.
- 2) 桜井力, 柏井条介, 小野雅人: 跳水式減勢工の発生音特性とその予測手法, ダム工学, V.11, No.2, pp. 117-129, 2001.
- 3) 桜井力, 京藤敏達, 西村仁嗣: 跳水から発生する低周波音の予測, 水工学論文集, 第46巻, 2002.
- 4) Prosperetti, A.: Bubble-related ambient noise in the ocean, J. Acoust. Soc. Am., 84(3), pp. 1042-1054, 1988.
- 5) 森靖夫, 水上雅人, 武士保健: 剛球または水滴の水面上への落下および水流により発生する音の研究, 機械学会論文集(B編), 第53巻, 487号, pp. 894-910, 1987.
- 6) M. Minnarert: Musical air-bubbles and sounds of running water, Philos. Mag. 16, pp. 235-248, 1933.
- 7) Crighton, D.G. and J.E. Ffowcs Williams: Sound generation by turbulent two-phase flow, J. Fluid Mech., V. 36, pp. 585-603, 1969.
- 8) Commander, K.W. and Prosperetti A.: Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments, J. Acoust. Soc. Am., 85(2), pp. 732-746, 1989.
- 9) Gibson, F.W.: Measurement of the effect of air bubbles on the speed of sound in water, J. Acoust. Soc. Am., 13(3), pp. 1195-1197, 1970.

(2002. 9. 30受付)