

階段式魚道における水中音響診断とプール内部の流況解析

(独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 学 ○田中俊吾・浅野仁美

(独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 正 和田 清

1. はじめに

近年、多くの河川には魚道が設置され、回遊魚の遊泳能力(突進速度など)との関係で魚道設計が実施されてきた。魚類がプール式魚道を通過する困難さは、魚道内の乱流および気泡の含有量とともに増大すると考えられ、流量、水位差、プール内体積などを用いた散逸仕事率 P_v の大小によってプール内の攪乱状態の指標化¹⁾が行われている。一方、プールの役割は、堰の越流から生じるエネルギーを渦・乱流、音、熱などの散逸過程を通じて減勢すること、魚類の遡上経路に隣接して十分休憩可能な場所の確保などである。そこで本研究では、散逸仕事率という単純な流れのエネルギー指標ではなく、騒音に満ちた魚道プール内の状況を、水中音響の空間的な広がり方と関連づけて、プール内のエネルギー減衰や休憩場所の存在などを総合的に評価する方法を見出そうとするものである。具体的には、階段式魚道内の水中音響を流量、プールの間隔ごとに測定して、音圧スペクトル解析結果などから、音圧レベル特性とプール内における散逸仕事率 P_v の関係を明らかにすること、さらに、プール内部の流れ場を数値モデル(粒子法)によって詳細に模擬し、越流落下によるプールの減勢あるいは加速状況などを水理量と関連づけて考察しようとするものである。

2. 現地調査および数値解析

(1) 現地調査の概要

代表的な階段式魚道の水中音を計測し、音圧レベル特性とプール内における散逸仕事率 P_v の関係を把握するために、魚道群の現地調査を実施した。対象魚道は、岐阜県本巣市の農業用水路網に設置された全幅越流型の階段式魚道 4 種類 (A~D: 流量 $0.02 \sim 0.24 \text{ m}^3/\text{s}$, プール間隔 $0.45 \sim 7.0 \text{ m}$, 勾配 $1/10 \sim 1/72$ など)であり、2011 年 11 月に実施した。水中音響の測定位置は、越流直下(隔壁下流端)と越流エネルギーが減勢したプール部(隔壁上流部)の 2 か所とし、小型水中マイク(オキシテック製, OST2130 型)を固定した。水中音響測定システムは、水中マイクから SC ボックス, AD 変換を通じてノートパソコンに入力され、LabView(水中音響アナライザ)によりモニター出力されている。なお、気泡混入などの状況は水中ビデオにより記録した。また、他の現地調査データとして、兵庫県揖保川において 2008 年 10 月に実施した河東統合頭首工左岸(ノルウェー型)、吉島統合頭首工(斜隔壁式)、片島井堰(導流壁式)を利用した。

回遊魚が通過する困難さは、プール内の乱流および気泡とともに増大すると考え、プール内の攪乱レベルを簡単な指標で表したものが散逸仕事率 P_v であり、次式で定義される¹⁾。

$$P_v = \frac{\rho g Q \Delta H}{V} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 P_v : 単位体積当り散逸仕事率 (W/m^3),
 ρ : 水の単位体積当り質量, g : 重力加速度, ΔH : 2 プール間落差 (m),
 Q : 魚道内の流量 (m^3/s), V : 対象プール内の水体積 (m^3).

式(1)からわかるように、流量 Q や水位差 ΔH が大きく、プール内の水体積 V が小さければ、 P_v の値は増大し、この基準を用いると、サケ科の魚道の場合、 P_v の上限値は $200 \text{ W}/\text{m}^3$ 、小形魚の場合は $150 \text{ W}/\text{m}^3$ 未満でよいとされている¹⁾。

(2) 数値解析の概要

魚道の流況解析には、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法に圧力擾乱を抑制する機能を備えた Particleworks (プロメテック社)を利用した。MPS 法は連続体をメッシュに分割する代わりに、流体を自由に動く粒子の集まりとしてモデル化する粒子法の一つであり、連続体の挙動を表す微分方程式の離散化に対し、粒子間相互作用モデルを用いるという特徴をもっている。粒子法は格子生成が不要なので、自由表面や大変形を扱うことが容易であり、魚道越流による跳水や飛沫が生じる流体解析に適している。また、数値解析のプレ処理は、各魚道の CAD データ (obj 形式) を Blender で作成し入力条件とした。従来指摘されている水面変動や内部の圧力擾乱の影響を抑えて計算の安定性が確保されているかどうかを考慮しながら、初期粒子間距離や流量、解析時間、CFL 条件などの諸条件を設定した。その解析結果の時系列解析やポスト処理された可視化データなどから、越流による落下流、表面流の形態の差異、水面変動、乱流強度、渦流構造などを考察した。

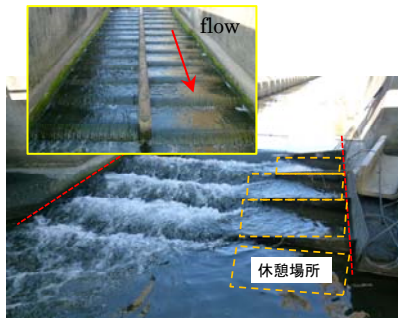


図-1 階段式魚道(上:A・B,下:C)

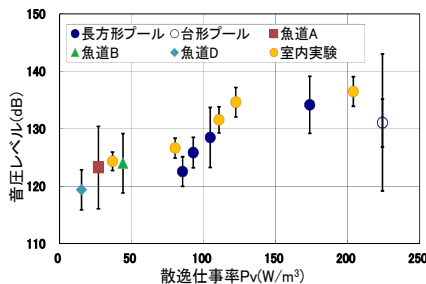


図-2 散逸仕事率 P_v と音圧レベル

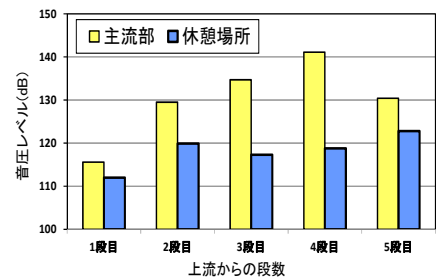


図-3 休憩プールにおける音圧減衰

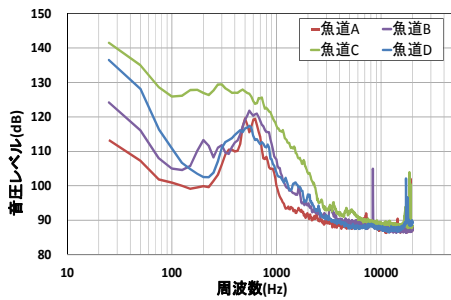


図-4 各魚道の音圧レベルの周波数特性

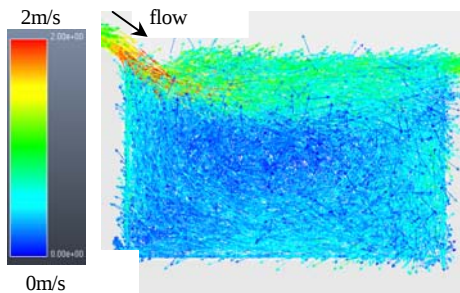


図-5 表面流状態(落差 0.2m)

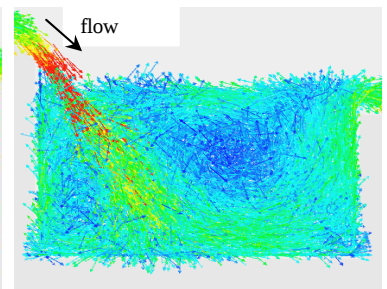


図-6 落下流状態(落差 0.4m)

3. 結果および考察

(1) 階段式魚道における水中音響特性

図-1 は階段式魚道 C の流況(流量 $Q=0.24\text{m}^3/\text{s}$, 上流端越流部の流速 $v=0.90\text{m/s}$)を示したものであり, 他の魚道 A,B,D に比べて流量が大きい. また, 流量増大時には休憩場所が確保されないために, 左岸側には斜め非越流壁を導入した改善が施されている. 図-2 は, 現地調査結果における散逸仕事率 P_v と, 水中音響の実測値から求められる *overall* 音圧レベル (dB) の関係を示したものである. なお, 同図には他の河川調査, 水理実験結果が併記されている. 魚道 C は, $P_v = 504.8\text{W/m}^3$, 136.4dB と算定され, 図の右範囲外に位置し, 大型魚類でも遡上が困難な流況であると判断される. 同図からわかるように, 散逸仕事率 P_v が大きくなるにつれてプール内の水中音の音圧レベルも増大する傾向を示している. ただし, プール形状によってはゆらぎが大きく, 流況の変動が激しいことなどから, 変動幅が大きく散逸仕事率 P_v と音圧レベルの相関性が低くなっている. 図-3 は, 魚道 C における主流部および休憩プールにおける *overall* 音圧レベルを示したものである. 同図から, 主流部では流れの加速とともに音圧レベルは増加する傾向にあるものの, 左岸側では音圧レベルの増加は見られず 120dB 以下で推移していることから, 休憩場所として機能している. さらに, 図-4 は, 魚道 A~D における越流直下(隔壁下流端)の音圧レベルを示したものである. 同図から, 魚道 C を除き, 600Hz 付近で音圧レベルのピークが現れ, これは越流落下音の特性と対応している. 流量が多い魚道 C では, その中心周波数の前後, 特に低周波数側でエネルギーが大きく, 流量増加によって広帯域スペクトル形状に変化したことを示している.

(2) 粒子法による魚道の流況解析

図-5 および図-6 は, 全幅越流型階段式魚道(幅 1m , 高さ 1m , 長さ 1.5m), 流量 $0.1\text{m}^3/\text{s}$, 粒子間距離 5cm において, 落差 $20, 40\text{cm}$ と変化させた場合のプール内流速ベクトルを示したものである. 一般に, 全幅越流型の魚道内プールの水流は, 隔壁を越流した流れがプール内に突入する落下流, 表面を滑るような表面流, その間の中間流に大別される. 同図から, 流量の同一条件下では落差 20cm では表面流(図-5), 落差 40cm ではプール内に非対称の循環渦が発生する落下流状態(図-6)が形成され, 内部の流況が詳細に模擬されていることがわかる.

4. おわりに

以上述べたように, 魚道プール内の状況を散逸仕事率と音圧レベルを関連づけ, プール内のエネルギー減衰や休憩場所の存在などを水中音響の空間的な差異から評価する試みを示した. 今後は, 数値解析による流れの構造と音圧レベルの関係を明らかにしながら, 魚道のタイプ別の検証データを蓄積する予定である.

【参考文献】 1) C.Gosset et al. 著(中村俊六ほか監修): 魚道及び降下対策の知識と設計, 財団法人リバーフロント整備センター, p.89, 1996.