

礫段礫列理論を適用した台湾マス生息河川における 魚道の基礎設計

TRANSVERSE BARS THEORY BASED FISH LADDER DESIGN IN A TAIWAN SALMON STREAM IN THE TAIWANESE MOUNTAINS

村上泰啓¹・長谷川和義²・山下彰司¹
Yasuhiro MURAKAMI, Shoji YAMASHITA

¹ 正会員 独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

² 正会員 財) 河川環境管理財団 北海道事務所
(〒060-0061 札幌市中央区南1条西7丁目16-2 岩倉ビル4F)

The Formosan landlocked salmon, believed to be a close relative of the cherry salmon (*Oncorhynchus masou*). It is found only in a few-kilometer section of Chichiawan Creek, which flows through a highland at an elevation of 1700 m in Taiwan. This salmonid is listed as critically endangered by IUCN. Shei-pa national park has been operated captive breeding program at lower reaches of the Chichiawan creek (figure 1). There are some check dams which artificially demolished to conserve this species. It is very important concept to extend migration range for every aquatic life. However there are still quite many check dams operated for sediment control to maintain dam reservoir capacity. It is needless to say that all the check dams must not demolished if there are sort of appropriate passage system. The authors suggest that transverse theory based fish ladder which simulated the small scale bed topography in mountain streams (Takizawa et al. 2000). Furthermore, the authors estimate a frequency of annual critical discharge occurrence using storage function model.

Key Words: Remote sensing, Resolution, GIS, sediment yield.

1. はじめに

台湾島の雪霸国家公園 (Shei-Pa National Park) には、タイワンマス (学名: *Oncorhynchus masou formosanus*) が生息¹⁾している。サクラマスの近縁種とされるタイワンマスは氷河期の生き残りと言われ、標高1,700mを超える七家湾溪の数km区間にのみ生息している絶滅危惧種である。台湾政府はタイワンマスの孵化場を建設し、親魚から採卵、受精、稚魚の育成、放流を行っている。1940年代以前は七家湾溪以外の溪流にもタイワンマスが生息していたとされるが、現状ではタイワンマスの生息環境の多様性は十分なものとはいえない。こうした現状を改善するため、台湾政府は既存砂防ダムのスリット化や稚魚の放流など、タイワンマス資源の保全を進めている。鮭科魚類の場合、成長の段階に応じて上下流に移動することが知られているが、七家湾溪周辺には砂防ダムが設置されているため、魚類の移動を円滑にするためには砂防ダムへの魚道の設置が有効な手法といえる。七家湾溪流域は標高3,886mの雪山を源頭部に持ち、近隣の梨山雨量観測所(図-1)の2005年の年間降水量は4,250mmあることから、比較的土砂生産も多いも

のと想定される。こうした山間地の魚道維持上の問題として、堆積土砂の除去がある。竜澤²⁾らは反砂堆から形成される礫列の波長・波高理論から導かれる結果を魚道に適用し、プール部分に堆積した土砂が、反砂堆が形成

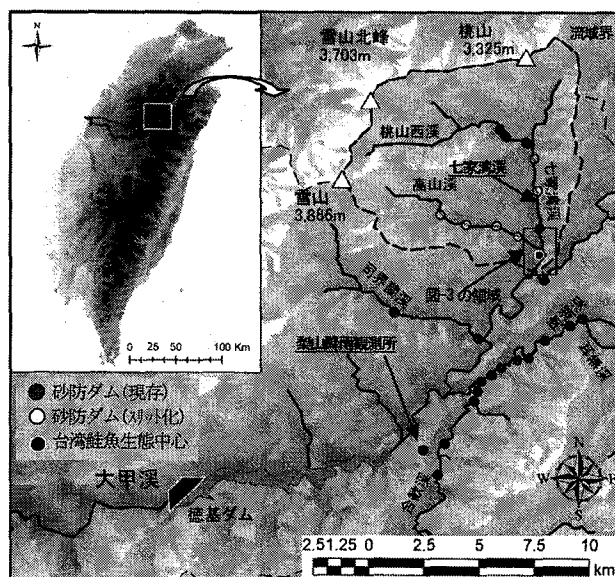


図-1 七家湾溪及び砂防ダム位置図

される水理条件下で、分級作用により容易に排出されることを示している。一般に、射流条件下で発生した反砂堆上における河床せん断力の分布が上流側に位相ずれを起こす³⁾ことにより、反砂堆の峰の上流側では堆積傾向、下流側では浸食傾向を示すことが知られている。竜澤らの提案している魚道理論は、こうした反砂堆形成時の土砂水理現象を魚道設計に取り入れたものであり、維持管理が困難な山間地溪流の魚道構造として適するものと考えられる。

筆者らは、七家湾溪のステップアンドプールの波長、波高を現地調査により把握し、河床土砂の粒径分布を写真解析により求めた。これらのデータを用い、七家湾溪においてタイワンマスの移動の支障となっている砂防ダム(落差 9m)に適用可能な礫列理論を基にした維持管理の容易な魚道構造を提案した。

2. タイワンマス資源の現状

(1) タイワンマス資源の現状

タイワンマスが生息するのは、大甲溪の最上流部に位置する七家湾溪(図-1)である。タイワンマスの生息域は、1930年代までは德基(Techi)ダム上流域の主要な支川までが含まれたとされるが、1980年代には七家湾溪のみとなった。七家湾溪のタイワンマス生息数は一時250尾を記録し、絶滅の一手前まで生息数が落ち込んだ。台湾政府は1997年に七家湾溪を保護区に指定し、人工孵化場を整備して稚魚(写真-1)を放流するなどして、2002年の夏には3988尾を記録するなど、資源量は徐々に回復しつつある。小林ら¹⁾はタイワンマス資源の保全のためには、産卵環境、採餌場、越冬環境など多様な生息域も重要であり、下流側のダム貯水池や他の流域と行き来(migration)するために、前述の砂防ダムを遡上、降下可能な魚道の整備が必要であると指摘している。

3. 礫列理論を用いた魚道構造について

① ステッププールの砂堆波高、波長の理論値

長谷川ら²⁾は図-2に示される小規模河床形態の理論的な解析から、山地河川の反砂堆発生時の礫列波長 λ_F を(1)式のように導いた。

$$\lambda_F = 3.36 \sqrt{6.48\sqrt{I} - \frac{1}{3}} I^{-1/6} h_c \quad (1)$$

ここで、 λ_F : 礫列の波長(m)、 I : 河床勾配、 h_c : 限界水深(m)である。

(1)式中、 h_c はベルヌーイの定理から、次式により求められる。

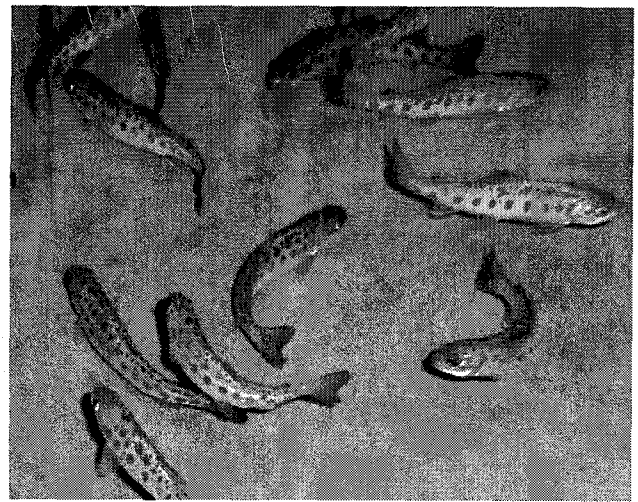


写真-1 タイワンマス稚魚 (台湾鮭魚生態中心にて)

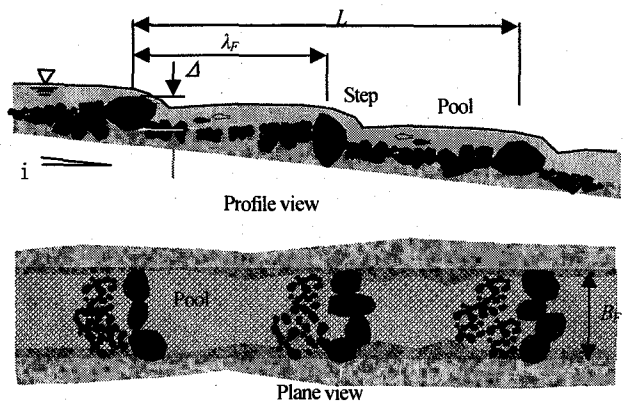


図-2 礫列のある溪流の概念図 (長谷川ら³⁾を改変)

$$h_c = \left(\frac{Q^2}{gB^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 Q : 設計流量(m^3/s)、 g : 重力加速度($9.8\text{m}/\text{s}^2$)、 B : 川幅(m)である。

(2)式を Q について整理すると、次式が得られる。

$$Q = h_c^3 g B^2 \quad (3)$$

次に、ステッププールの波長 λ_F が既知であるとき、限界水深 h_c は(1)式を変形し、次式で求められる。

$$h_c = \frac{\lambda_F}{3.36 \sqrt{6.48\sqrt{I} - \frac{1}{3}} I^{-1/6}} \quad (4)$$

竜澤ら²⁾は山地溪流によって形成されたステッププールが反砂堆で形成されたものとする、ステップ部の波高 Δ を次式で表せるとした。

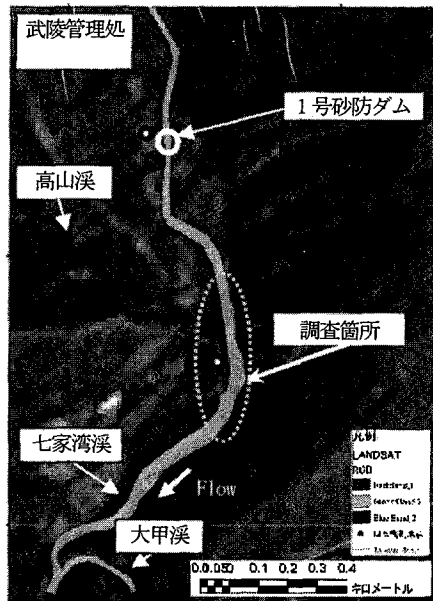


図-3 七家湾溪調査箇所

$$\Delta = 6.43 I^{5/6} h_c \quad (5)$$

4. 礫列理論を用いた魚道構造の推定

①七家湾溪における礫列波長・波高調査

調査箇所(図-3)において、レーザーロケーターを用いて河床勾配、川幅、礫列波長を計測した。礫列波長は礫列の発生している河道区間内の礫列数を目視によりカウントして求め、礫列波高 Δ は測量用ポールを用いて計測(写真-3)した。この結果、礫列区間長($L=40.5\text{m}$)、川幅($B=28\text{m}$)、河床勾配($I=1/27$)、礫列数($n_k=9$)、礫列波高($\Delta=0.9\text{m}$)などの諸元が得られた。

②コドラートを用いた河床材料粒径分布調査

河床材料の粒径分布を得るために、 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 枠のコドラート(Quadrat)(図-4)を河床上に置き、デジタルカメラにより写真撮影を行った。撮影された写真には歪みがあるため、ESRI社製ERDAS IMAGINEにより撮影歪を補正し、コドラートと水系がほぼ直交するようにした。歪みを補正した画像中の小礫を、ESRI社製ArcMap9.1を用いて個々(ポリゴン)に分離し、面積を求積した。次に、上記で判読した小礫の重量を求めるため、小礫の面積を一律に円と仮定することで半径を逆算し、河床材料を球体と仮定することで、小礫個々の重量(単位堆積重量を2.65)を求めた。これらの資料を粒径毎に整理することで、コドラートで撮影された範囲における河床材料の粒径分布が求められる。以上の分析結果を基に、粒径加積曲線(図-5)及びTalbot曲線の理論値に実測値を加えた図-6を示す。これによれば、七家湾溪の表層河床材料は分級が進み、一部Talbot分布の理論曲線から離れた結果も示される。竜澤らの報告²⁾によれば、礫

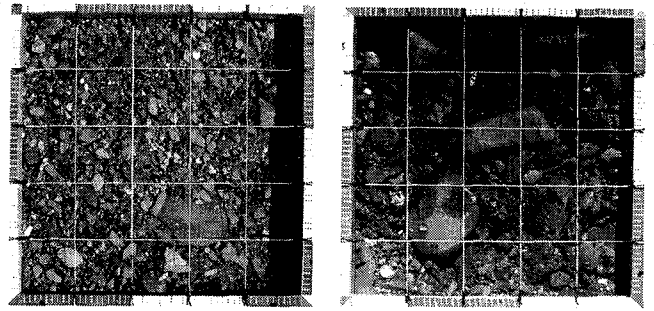


図-4 コドラートによる河床材料調査

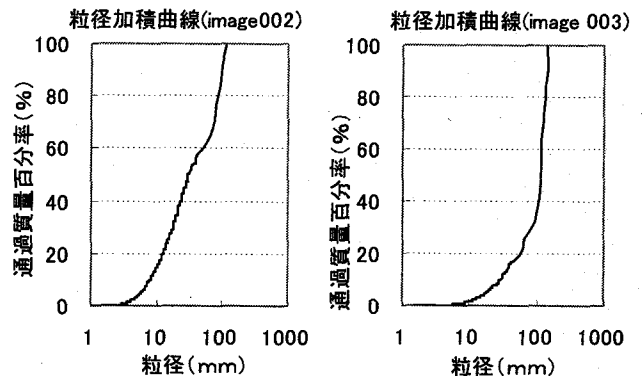


図-5 七家湾溪における河床表層砂礫の粒度分布

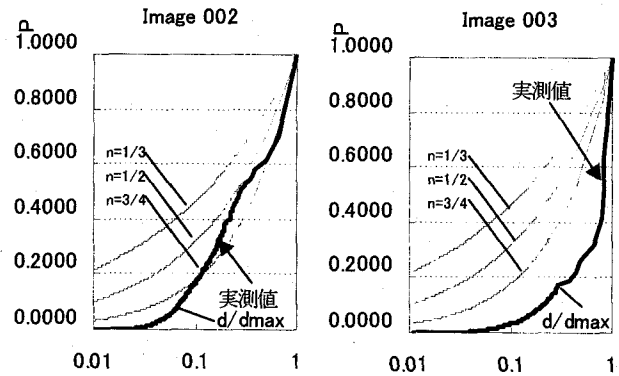


図-6 七家湾溪における河床表層砂礫の分布特性



写真-2 1号砂防ダムの状況

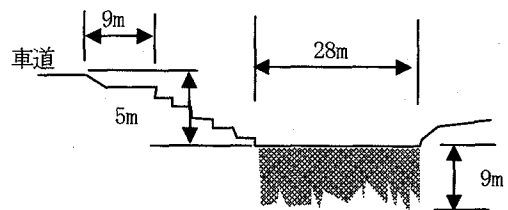


図-7 1号砂防ダム周辺の河道構造(写真-2の箇所を計測した結果)

列（ステッププール）構造が卓越した溪流のプール部の表層粒径分布はタルボット分布 $\{P=(d/d_{\max})^n, n=1/2\sim 3/4\}$ に概ね従う傾向を有していた。七家湾溪においても礫列（ステッププール）構造が各所（例えば写真-4）で確認されていることから、図-6に示した河床材料の粒径分布特性が一部Talbot分布から離れているものの、分級が進んだ山地溪流の河床材料であり、滝沢らの結果²⁾と矛盾しないといえる。

③礫列波長の推定

七家湾溪において出水時に形成された反砂堆がステッププール構造を規定しているものと仮定し、七家湾溪においてタイワンマスの移動の支障となっている1号砂防ダム（写真-2）に魚道を設置した場合の基本的な諸元を推定するため、現地調査結果から礫列波長を次式で推定した結果、調査区間における礫列波長 λ_F は5.1mと算出される。

$$\lambda_F = \frac{L}{n_\lambda - 1} \quad (6)$$

ここで、 λ_F ：礫列波長(m)、 L ：礫列区間長、 n_λ ：礫列数。

④魚道的设计流量 Q_d

遡上して来た魚が魚道を流下する水流を感知するためには、基本的に対象河道の単位幅流量以上の流量規模である必要がある。設計流量は(4)式に調査結果($I=1/27$, $\lambda=5.1$ m)を代入して得られる限界水深($h_c=0.91$ m)、川幅($B=28$ m)、を(3)式に代入して $Q=76.1\text{m}^3/\text{s}$ と求められる。よって魚道に求められる単位幅流量 q は設計流量 $Q=76.1\text{m}^3/\text{s}$ を川幅 $B=28$ mで除すことで得られ、 $2.71\text{m}^2/\text{s}$ となる。ここで、魚道幅を1.5mとすれば、魚道的设计流量 Q_d は、 $2.72 \times 1.5 = 4.08\text{m}^3/\text{s}$ 以上あればよいこととなる。

⑤魚道の礫列波高 Δ

長谷川らによれば、礫列波高 Δ は次式で推定される。

$$\Delta = 6.43 I^{5/6} h_c \quad (7)$$

(7)式に魚道勾配 $I=1/10$ 、限界水深 $h_c=0.91$ を代入すると、礫列波高 Δ は0.86mとなる。七家湾溪における礫列を構成する巨礫には1mクラス(写真-3)のものが多く見られ、現地材料をそのまま転用することが可能である。したがって、1号砂防ダムを迂回する魚道構造として、次のような構造が概略提案できる。

魚道設計流量： $Q_d=4.08\text{m}^3/\text{s}$ 、魚道幅： $B=1.5$ m、限界水深： $h_c=0.91$ m、礫列波高： $\Delta=0.86$ m、魚道勾配： $i=1/10$ 、魚道長： $L=90$ m。

参考まで、魚道勾配(3パターン)、魚道幅(2パターン)を

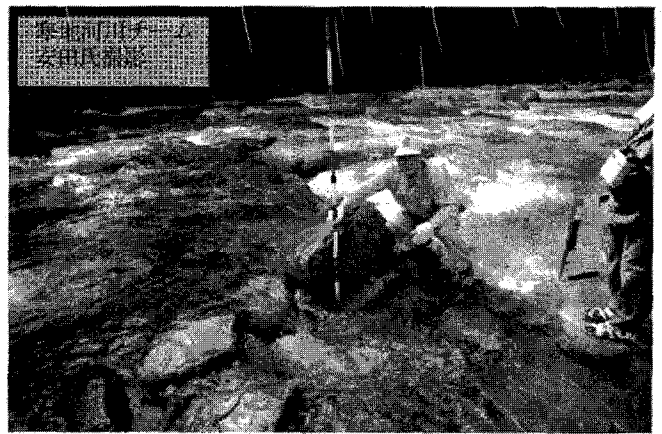


写真-3 七家湾溪の礫列を構成すると思われる巨礫（長径1.1m，中径0.8m，短径0.6m）

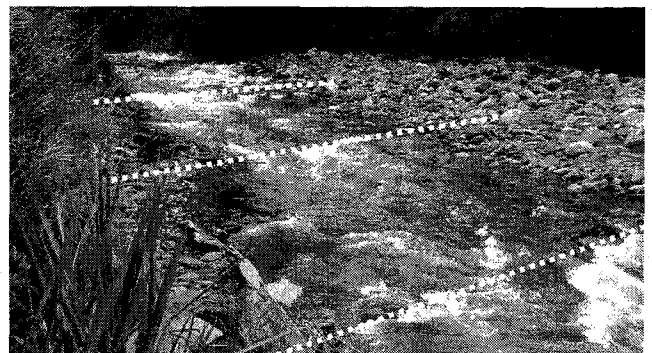


写真-4 七家湾溪で見られる礫列（ステッププール）

表-1 勾配と幅を変化した場合の魚道構造比較

魚道勾配 i	1/5	1/10	1/20	1/5	1/10	1/20
設計流量 q	4.08	4.08	4.08	5.44	5.44	5.44
魚道幅 B	1.50	1.50	1.50	2.00	2.00	2.00
限界水深 h_c	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
礫列波長 λ	6.40	5.88	5.32	6.40	5.88	5.32
礫列波高 Δ	1.53	0.86	0.48	1.53	0.86	0.48
魚道長(m)	45	90	180	45	90	180

※ここで、設計流量は元河川の設計流量の単位幅流量に魚道幅を乗じて決定している。

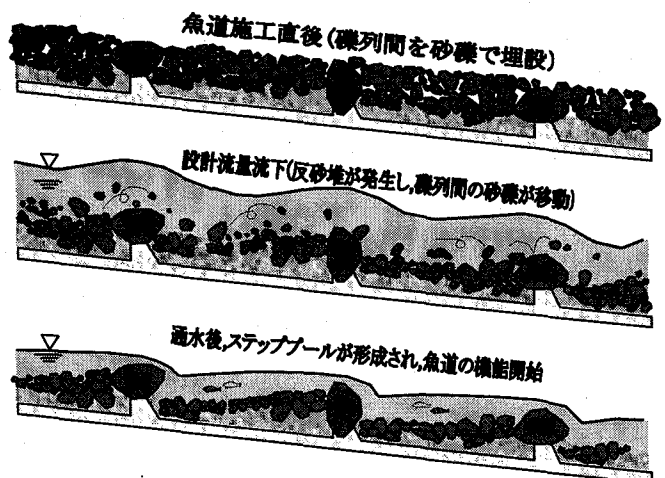


図-8 礫列理論を用いた溪流魚道の形成過程概念図

設定した場合の魚道緒元を試算し、表-1にとりまとめた。竜澤らの模型実験の結果、魚道が満砂状態となっていて、設計流量規模の出水があった場合、図-8に示す様に砂礫の交換が容易に起きる点、底生生物も生息可能な点、景観上も自然に近い点など、ここで提案する魚道構造はタイワンスの生息する七家湾溪に適するものの一つと考えられる。しかしながら、実際の魚道を設計する上で、魚の遡上・降下がスムーズに行われるためには、対象魚類の行動特性を踏まえた上で魚道と河川の分合流構造を別途考慮する必要がある。

5. 流量規模の推定

これまでの検討において、礫発生流量 Q_l は $76.1 \text{ m}^3/\text{s}$ と推定されている。七家湾溪では流量観測がなされていないため、どの程度の頻度、規模で出水があるかを星ら⁴⁾によって提案された分布定数系流出モデル(kinematic wave)の理論解と等価な非線形貯留関数モデルを用いて推定を行った。この貯留関数モデルの特徴は、モデルパラメータが流域定数(A :流域面積, n :等価粗度, i :斜面勾配)、降雨定数(r :平均降雨強度)で構築されている点であり、流量観測資料などが整備されていない河川流域でも近傍の既知の降雨観測資料があれば、容易に流量を推定できる。ここで利用した降雨資料は梨山観測所(図-1)の2005年1月1日~12月31日までのものを利用した。モデル基礎式は(8)~(14)に示す。なお、この貯留関数モデルは線形化⁹⁾により容易に解くことが可能である。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (8)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q \quad (9)$$

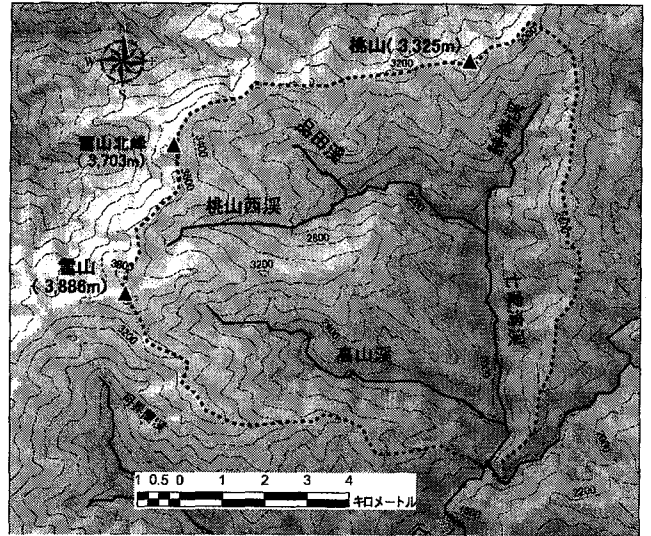


図-9 七家湾溪流域図

$$p_1 = 0.6 \quad (10)$$

$$p_2 = 0.4648 \quad (11)$$

$$k_1 = 2.8235 f_c A^{0.24} \quad (12)$$

$$k_2 = 0.2835 k_1^2 r^{-0.2648} \quad (13)$$

$$f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6} \quad (14)$$

ここで、 s :貯留高(mm/h)、 q :流出高(mm/h)、 r :有効降雨量(mm/h)、 t :時間(hr)、 k_1, k_2, p_1, p_2 :モデルパラメータ、 n :等価粗度、 i :斜面勾配、 A :流域面積(km^2)、 f_c : friction factorである。

七家湾溪の流域面積 63.4 km^2 は、USGSのWEBサイトで公開中のSRTM(概ね90mメッシュのDEM資料)を用い、ArcMapのHydrology Modeling機能を用いて求めた流域界から算出した。七家湾溪における流出計算対象領域は図-9点線枠で示す領域

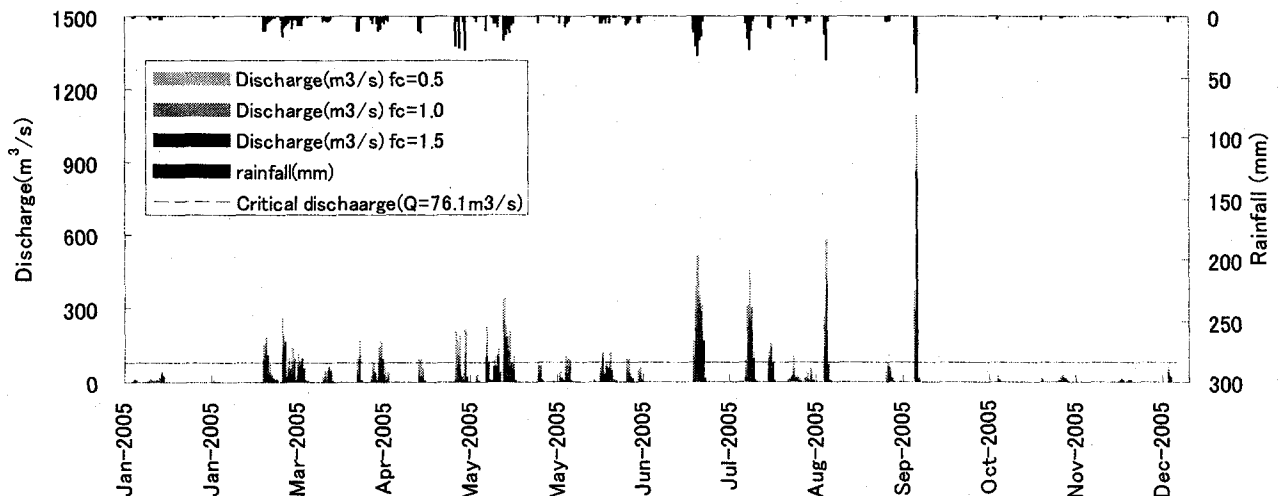


図-10 一般化貯留関数モデルを用いた七家湾溪における年間の流出量予測

($A=63.4\text{km}^2$)とした。

ここで計算される流量は表面流であり、基底(base)流量は考慮していない。図-10には前述した礫列形成流量 $Q=76.1\text{m}^3/\text{s}$ のラインを破線で併記している。計算結果によれば、七家湾溪において礫列発生流量を超える流量が10時間以上続いたケースは2005年において15例あった。これは、魚道上に堆積した土砂をフラッシュするうえで、十分な回数であるといえる。なお、図-10中では f_c 値を0.5、1.0、1.5の3ケースで計算した結果を図示している。 f_c 値は本モデル中で唯一の未知定数であるが、等価粗度 n と斜面勾配 i の関数であり、 f_c 値が小さいとハイドログラフの立ち上がりが増大し、短時間で流出ピークが出現し、大きいと逆の傾向となる。図-9に示されるように七家湾溪流域は標高3,886m～2,000mまでを10kmに満たない距離で変化する急峻な地形を有する。既往検討において、北海道の38小流域99洪水例(ピーク比流量 $0.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)で f_c 値を同定した結果⁹⁾、平均値は1.62であった。七家湾溪は北海道での検討対象流域よりも急峻であるためハイドログラフの立ち上がりが早くなることを想定したものである。

6. 結論

結論として以下の結果が得られた。1) 七家湾溪のステップアンドプールの波長、波高を現地調査した結果から推定し、礫列が生成された流量規模が $76.1\text{m}^3/\text{s}$ であることが推定された。2) 魚道勾配を1/10とした場合、魚道部分の礫列波長 λ は5.9m、礫列波高 Δ は0.9mであると算出された。3) 近傍の時刻降雨資料を入力条件とし、非線形貯留関数モデルにより七家湾溪の時刻流量を計算した結果、礫列発生条件以上の流量規模は年間に15回発生していると推定され、ここで提案した魚道が設置されたとしても十分な頻度で魚道が維持されることが期待される。なお、魚道の設置に際しては模型実験などを含めた詳細設計が別途必要となる。なお、写真-5は礫列理論を実際に適用した日本国内の魚道事例(滝沢ダム貯水池貯砂ダム、独)水資源機構、竜澤氏提供)である。住谷ら⁶⁾の報告によれば、写真-4の魚道完成後の2005年8月26日、台風の影響により貯砂ダムへのピーク流入量 $88.9\text{m}^3/\text{s}$ を記録した後の調査で、魚道内に敷設されていた土砂は流出し、当初の目的である土砂の排出機能が確認されたという。礫列理論を適用した魚道構造は全ての場面で適用可能とはいえないが、維持管理の困難な山間地や景観要素を求められるケースなどで今後有効な手段となるものと考えられる。

台湾における現地調査にあたって、様々な便宜を図っていただいた国立中興大学(National Chung Hsing University)の陳樹群教授(Professor Su-Chin Chen Ph.D.)、雪霸国家公园管理處武陵管理站(Shei-pa National Park Wuling station)のLiao氏、滝沢ダムの魚道写真資料を提供頂いた

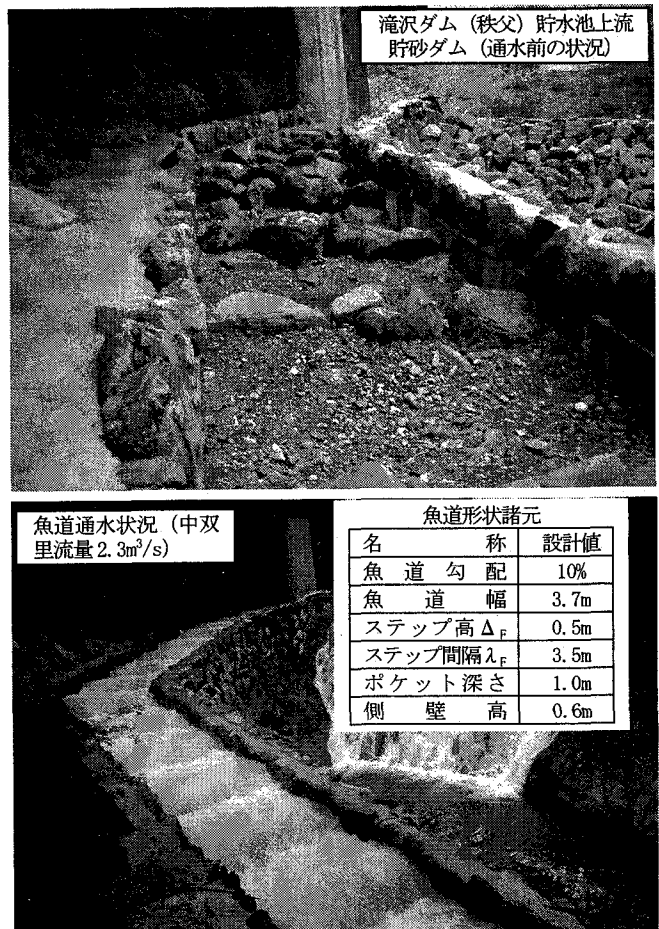


写真-5 礫列礫段理論による魚道実施例

独)水資源機構の竜澤氏にここで謝意を表したい。

参考文献

- 1) 小林美樹, 矢部浩規, 村上泰啓: 亜熱帯地方における台湾大甲溪に生息するタイワンマス(*Oncorhynchus masou formosanus*)の現況について, 寒地土木研究所月報第636, pp32-43, 2006. 5
- 2) 竜澤宏昌, 林日出喜, 長谷川和義: 溪流の小規模河床形態に関する研究, 土木学会論文集No. 656/II-52, pp83-101, 2000. 8.
- 3) 長谷川和義: 山地河川の形態と流れ, 水工学シリーズ88-A-8, pp1-22, 1988.
- 4) 星清, 山岡勲: 雨水流法と貯留関数の相互関係, 第26回水理講演会論文集, pp273-278, 1982. 2.
- 5) 星清, 村上泰啓: 実用的な洪水流出計算手法, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1987. 3.
- 6) 住谷昌宏, 青山太洋, 星野秀, 笹原智弘: 滝沢ダム貯砂ダムに設置した魚道の設計と施工, ダム技術No. 243, pp36-44, 2006. 12.

(2007.4.5受付)