

ステッププールの波長並びが ダム貯水池の流入土砂量へ与える影響

Estimation of Sediment Inflow to a Dam Reservoir
with Considering Wavelength Sequence of the Step-Pool Channel

長谷川和義¹・中村健作²
Kazuyoshi HASEGAWA and Kensaku NAKAMURA

¹ 北海道大学大学院工学研究科教授

² 北大大学院博士後期課程単位取得退学

要 旨

新十津川ダム本川ルークシュベツ川に対し、ステッププールが連続的に発達した河床モデルを適用して各プールの埋没と排出を評価することにより、主要な出水による年間土砂流入量の推定をおこなうことができた。

流入流砂量に対するステッププールの波長並びの影響を明らかにするために、上流側に短波長を集めたケースと下流側にそれらを集めたケースにつきシミュレーション計算をおこなった。その結果、波長の長短の違いがあっても空間的平均をとるとその差異が消されること、また1洪水においては輸送土砂量の時間ハイドログラフが並びの影響を受けるものの、長期間ではその影響がなくなることを確かめた。

ステッププールの波長並びと流砂量の関係について解析解を導き、特性線上の流砂量が境界条件のみによって決まる一定値をとることを示した。しかし、特性線における時間が波長の関数であり、結果的に流砂量の時間ハイドログラフが波長並びの影響を受けることを示した。

《キーワード：ステッププール；ダム流入土砂；ステップ波長；流砂量；特性線》

1. 緒言

昨年度¹⁾²⁾、北海道空知支庁管内徳富川流域内（流域面積 239.2km²）に位置する新十津川ダムの本川であるルークシュベツ川流域（流域面積 16.0km²、平均勾配 0.01456、昨年度報告ではウエンベツ川としていたがここに名称を訂正する）を対象に、降雨流出に対応するステッププール河床のせん断力評価をおこない、ダムに流入する総掃流砂量の推定を試みた。新十津川ダム（提高 29.2m、提頂長 95.26m、総貯水容量 493 万 5 千 m³）の底高標尺値の経年変化から推定された堆積土砂量との比較では、両者はかなり良好な一致を見た。しかし、昨年³⁾の結言に述べられているように流出流砂量がステッププール波長によって大きな影響を受けるため、波長の長短の並び方によって末端流砂量のハイドログラフに変化の現れる可能性がある。より短期の流砂量変動を推定するためには、上流におけるステッププール波長の並び方が問題となる。ただし、現在のところ波長並びの違いがどの程度の影響をあたえるかは明らかではない。そこで本年度は以下の 2 つの方法で影響を調べることにする。

その 1 は、昨年と同じ降雨データを用いてルークシュベツ川の掃流砂量推定をおこなうが、その際にステッププールの並びを人為的に変え、(A) 上流側に短波長のステッププールを集中的に配置する場合、(B) 下流側に短波長のステッププールを集中的に配置する場合のそれぞれについて流砂量計算を進め、その違いを明らかにする。

その 2 は、ステッププール河床せん断力の評価式、流砂量式、流砂連続式をもとに、プール深や流砂量に関する解析解を導き、その性質を検討するものである。

なお、ルークシュベツ川におけるステッププールの形状計測は昨年度においても実施されたが、測量時にステッププールの不明瞭箇所が多かったことから、今年度あらためて測定をおこなった。

2. ルークシュベツ川ステッププールの実測結果

ルークシュベツ川は流域面積 16.0km²、平均勾配 0.01456 であり、上流部には図-1 に見られるような直径 50cm ほどの巨礫が存在しステッププールが発達している。川幅は 5~7m でほぼ矩形断面をなし、周囲が農地のため護岸が多く施されている。下流に位置する新十津川ダムは提高 29.2m、提頂長 95.26m、総貯水容量 493 万 5 千 m³ であり、ダム底に堆積するレベル測量により計測された土砂量が過去 10 数年分存在する。

図-1 は、ルークシュベツ川上流における河床状況で、明瞭なステッププールが認められる。図-2 は、ダム流入点から上流約 100m 区間において確認された 15 のステッププールの波長を示すものである。横軸にステッププール番号、縦軸にその波長をとって示している。ステッププールの並びは番号順であり、番号の若いものほど上流に位置している。一昨年度に実測したステッププールは発達が弱く、平均波長が 3m 程度で波高も低いものが多かったが、昨年³⁾の実測ではしっかりしたステップが多数見られ、平均波長が 6m に達している。いま、竜澤・林・長谷川³⁾による次のステップ間隔（波長） λ およびステップ高 Δ に関する推定式を用い、形成流量を推定すると以下³⁾のようである。

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

$$\Delta = 6.431 I^{\frac{5}{6}} h_c \quad (2)$$

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

式(1), (3)に波長 6m をあてて形成流量を逆算すると $Q = 24 - 33 m^3 / s$ であり, このとき式(2)による Δ の値は 0.25m 程になる. 実際にあわせて考えたとき, 妥当な値であることがわかる.



図-1 ルークシュベツ川上流部の河床状況

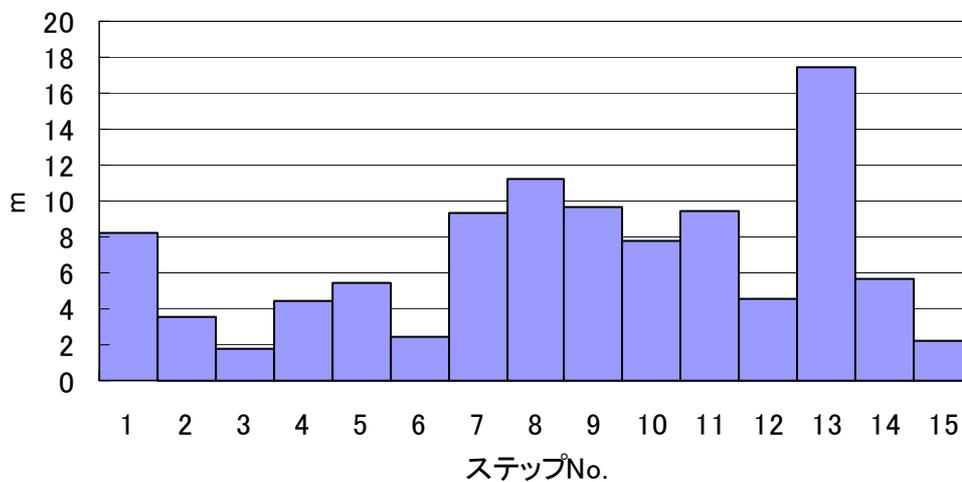


図-2 ダム貯水池上流 100m 区間におけるステッププールの波長並び

3. ダム流域における降雨流出量の推定

降雨流出の算定は昨年度報告と同じであり、徳富川幌加地点の流域流出解析として嵯峨ら⁴⁾による二段タンク型貯留関数モデルを用いた。この計算方法は未知パラメータを推定する方法であり、遂時モデル定数の最適化を行ないその未知パラメータの補正值が十分小さくなった時を収束結果とする。本論ではルークシュベツ川流域における2000年の7月17日、7月25日、9月1日、9月24日と、2001年の7月22日、8月22日、9月9日、9月10日についての解析を行なっている⁵⁾。以下にその解析結果を図示する。ただし、2001年の8月22日以外のケースについては計算が収束したが、8月22日のケースについては収束しなかったため観測値のみ図示する。

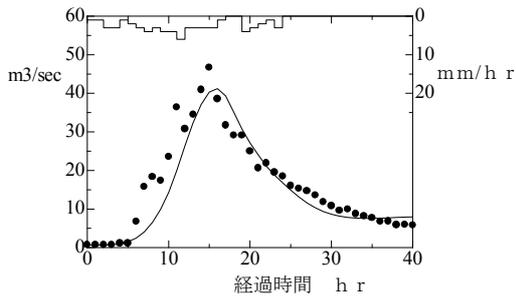


図-3-1 2000年7月17日の末端流量

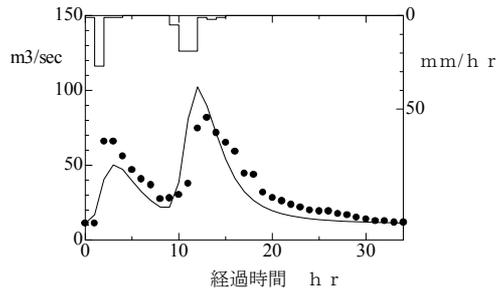


図-3-2 2000年7月25日の末端流量

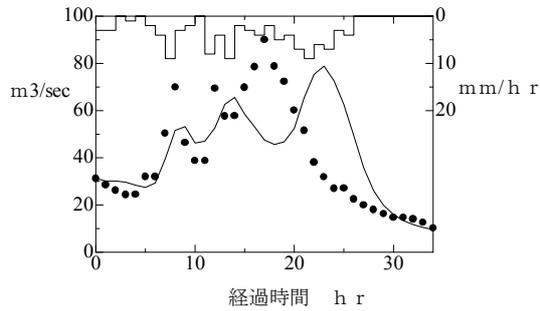


図-3-3 2000年9月1日の末端流量

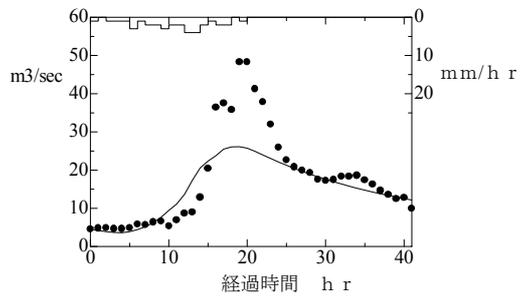


図-3-4 2000年9月24日の末端流量

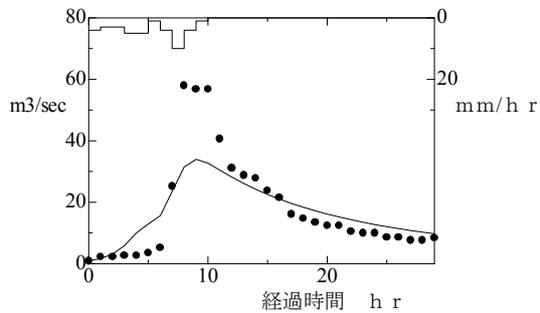


図-3-5 2001年7月22日の末端流量

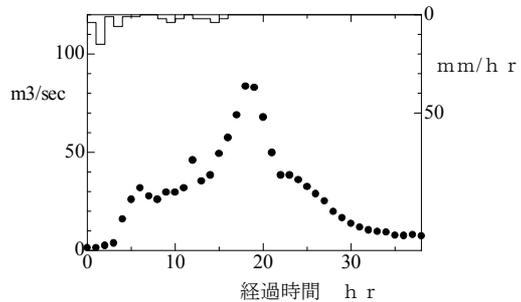


図-3-6 2001年8月22日の末端流量

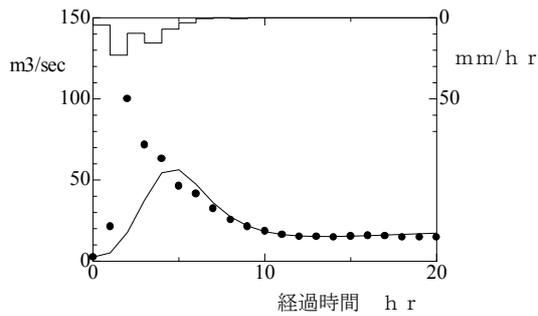


図-3-7 2001年9月9日の末端流量

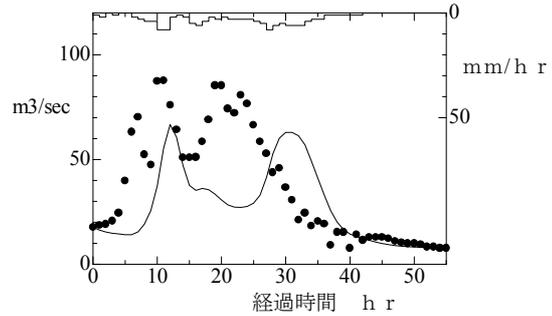


図-3-8 2001年9月10日の末端流量

本論では、上述のステッププール河床にこれらの降雨流出を外力としてあたえ、対応する土砂流出量を推定する。その際、ステッププール波長の並びを様々に変えて土砂流出量を算定し、それらの比較から波長並びが土砂流出に及ぼす影響を調べる。

4. 流入土砂量の推定

一般に大中規模出水時に大量の流砂が発生することがわかっている。本論文では比較的明瞭なまとまった降雨が発生し、ダムの堆砂量が平均的な値を示す前出の2000年と2001年の各4回の中規模出水時に注目し解析を行う。図-2の実測した15個の連続ステッププールを用いたケースに加え、図-4、図-5にみられる上流側に短いステップを配置したケース、および下流側に短いステップを配置したケースについて解析を試みる。すなわち、図-4では実測15個のステッププールを大きさの順に並べて2グループに折半したのち上流側に短波長グループを配し、上下流両グループそれぞれに対して乱数をふり並びを決めたものである。図-5は、同様な操作をおこない下流側に短波長グループを配するようにしたものである。

昨年までと同様に連続ステッププール河床上の流れを等流的に扱い、1プールでの底面せん断力を神田ら⁶⁾による護床工下流洗掘孔におけるせん断力評価式を修正⁷⁾して算定する。これを芦田・道上式の平衡流砂量式を適用し、順次各プールにおける流砂量を計算してその出入りの差からプール深の変化を求め、次の時間ステップによる計算を進める。各プールでの流砂量の積分値が流出流砂量となる。今回は平均粒径として実測値6.05cmをあたえ、河床が最大粒径程度の50cm以上洗掘されず、また堆積はせいぜいでもフラットとすることにして計算をおこなった。上流端境界条件は $\partial q_{Bx} / \partial x = 0$ 、すなわち上流端プールでは浸食も堆積も生じないものとした。これらの計算を洪水ごとに個別に計算し、通過流砂量の総和を求めた。なお、以後の便宜のために神田修正式を再掲しておく。

$$\bar{\tau} = \frac{\rho g h_c h_0 \left\{ -z_m(1-\beta) - \frac{h_c}{2} \left(3 - \beta^2 - \frac{2}{\beta} \right) \right\}}{\alpha S \left(\frac{z_m}{h_0} \right)^\gamma - h_0 \lambda}$$

$$\beta = \frac{h_0}{h_c} \quad (4)$$

ただし、 ρ = 水密度、 g = 重力加速度、 z_m = プールの最大深ぼれ深、 h_0 = 平均河床勾配上を流れる等流水深、 h_c = 限界水深、 S = プール部の縦断断面積、 λ = ステップ間隔（波長） $\alpha = 4, \gamma = 1$ である。

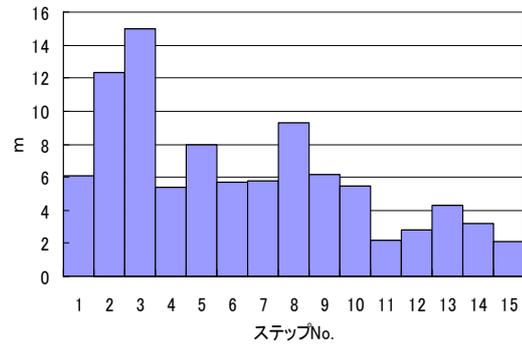
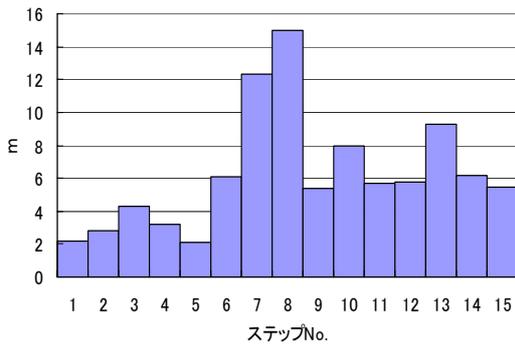


図-4 上流に短いステップを配置したケースの波長 図-5 下流に短いステップを配置したケースの波長

5. 計算結果

図-6-1～図-6-24は横軸にプール番号をとり、縦軸に通過流砂総量をとって計算結果を示したものである。図の左側が上流、右にいくにしたがって下流方向である。図-6-1から6-8までの一連の図は、図-2に示した実測のステップ並びに対し図-3-1から3-8の降雨流出流量をあたえて計算した通過流砂総量である。流量ハイドログラフの違いに応じて異なる結果が現れている。これらの出水による流砂量を年度ごとに足しあわせ、さらに空間的に平均した年間総流砂量は、2000年において2266m³、2001年において1784m³であった。これに対し、空隙率0.6としたときの2000年の年間の実測値は1569m³、2001年の年間の実測値は2045m³であり、空間平均の年間流砂量の推定値は実測値にかなり近い値をとっているものといえる。計算では算出出来ない残りの流砂は春先の融雪期やさらに小規模の出水時におこると考えられる。

次に、流砂量がステップ長によっていかなる影響を受けるかを検証するため、ステップ長の違う2つのパターンについて比較検討を行った。図-6-9～図-6-16は上流側に短いステップを配置した図-4のケース、図-6-17～図-6-24は下流側に短いステップを配置した図-5のケースにおける流砂量の計算結果である。プールごとに流砂量を求めている。全ケースとも、長波長のプールで貯砂機能がはたらき流砂量が小さく抑えられている。上流側が短いステップのケースでは上流側で洗掘傾向、下流側で堆積傾向が進んでおり、逆に下流側が短いステップのケースでは上流側が堆積、下流側が洗掘の傾向

が見られる。しかしながら、年間を通してみると通過総量の空間平均に差はみられない。このことから、ステップ波長の並びかたの違いによる影響は一雨ごとの流砂量ヒドログラフに対して顕著に現れるが、年間のような長期間に対しては問題にならないことが分かる。多くの場合、ダム堆砂において一洪水の流砂量変動が問題になることはほとんどないであろう。したがって、今回モデルとしたような100m程度のステッププール調節区間を有するダム貯水池への流砂流入に関しては、ステッププールの波長並びを考慮する必要はないものといえる。しかし、ステッププールの土砂調節区間が十分に長く上流土砂の到達が年間にわたる場合には、ステップ並びの影響が年間流入土砂量の出現の違いになって現れるであろう。

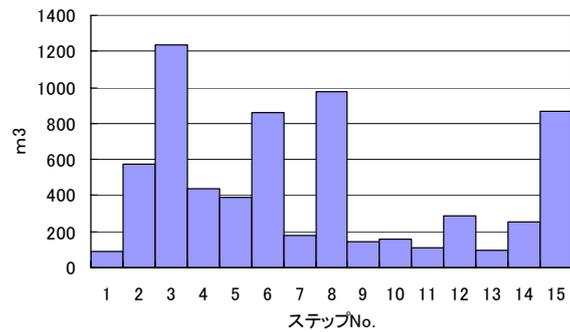
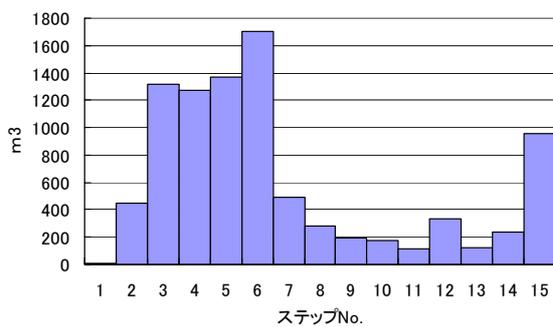


図-6-1 2000年7月17日通過流砂総量 (実測並び) 図-6-2 2000年7月25日通過流砂総量 (実測並び)

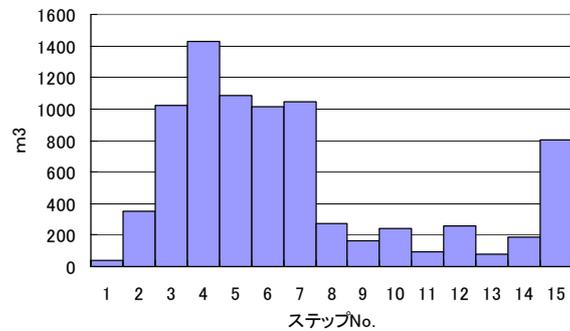
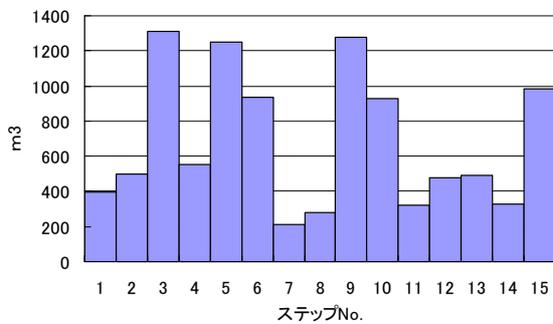


図-6-3 2000年9月1日通過流砂総量 (実測並び) 図-6-4 2000年9月24日通過流砂総量 (実測並び)

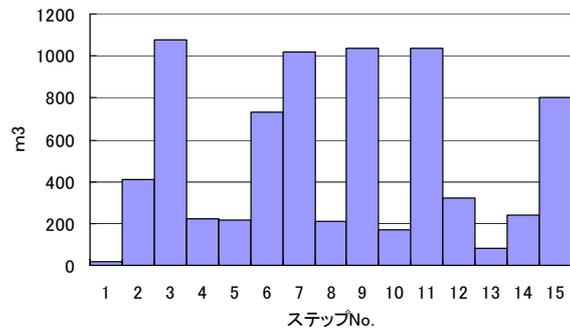
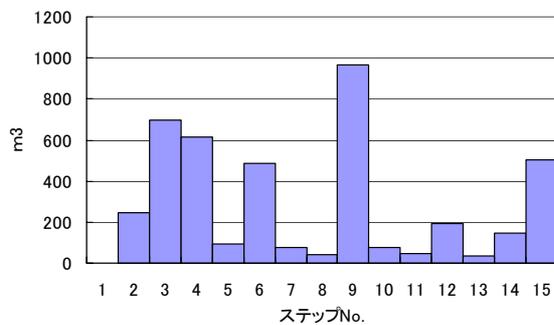


図-6-5 2001年7月22日通過流砂総量 (実測並び) 図-6-6 2001年8月22日通過流砂総量 (実測並び)

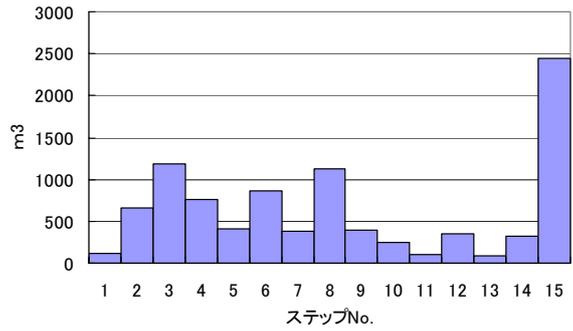
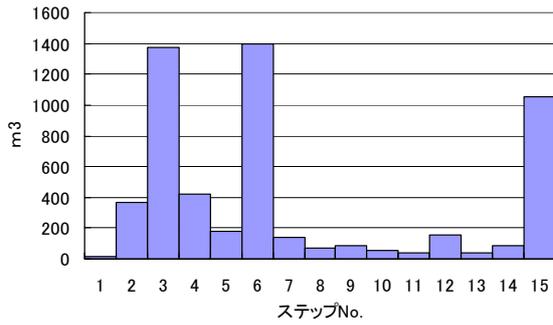


図-6-7 2001年9月9日通過流砂総量（実測並び）

図-6-8 2001年9月10日通過流砂総量（実測並び）

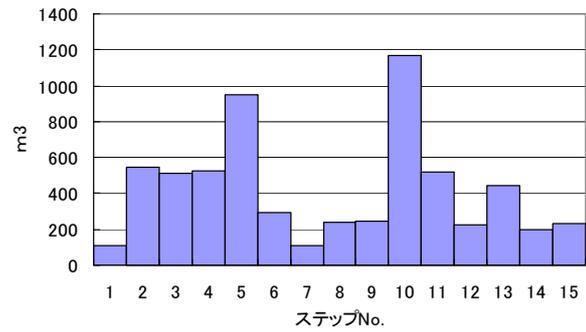
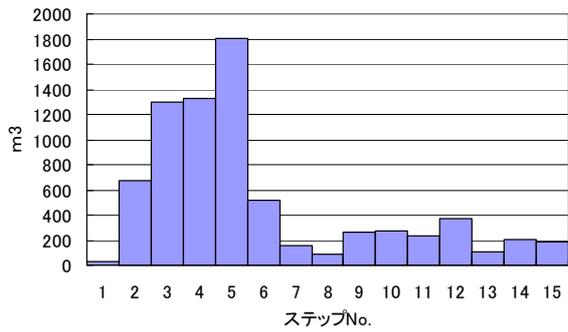


図-6-9 2000年7月17日通過流砂総量（上流短）

図-6-10 2000年7月25日通過流砂総量（上流短）

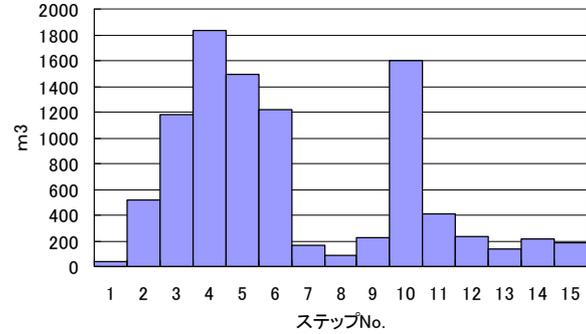
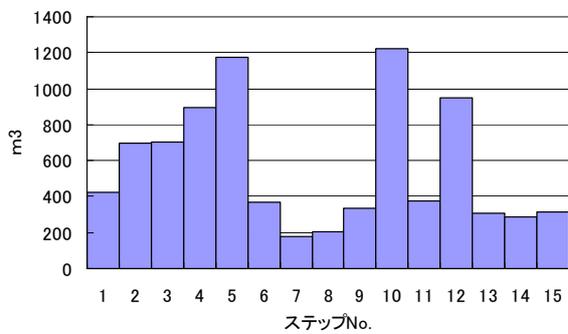


図-6-11 2000年9月1日通過流砂総量（上流短）

図-6-12 2000年9月24日通過流砂総量（上流短）

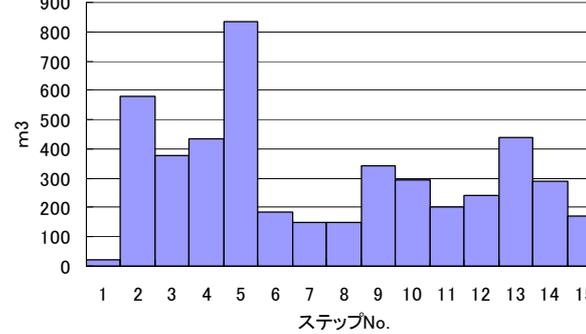
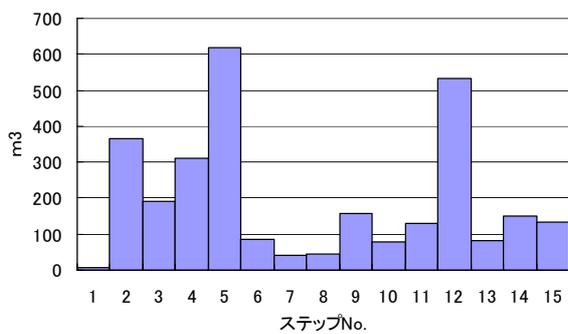


図-6-13 2001年7月22日通過流砂総量（上流短）

図-6-14 2001年8月22日通過流砂総量（上流短）

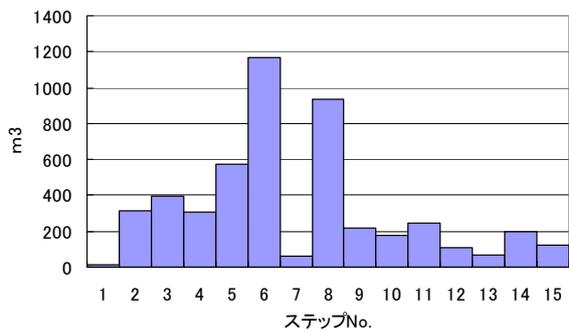


図-6-15 2001年9月9日通過流砂総量（上流短）

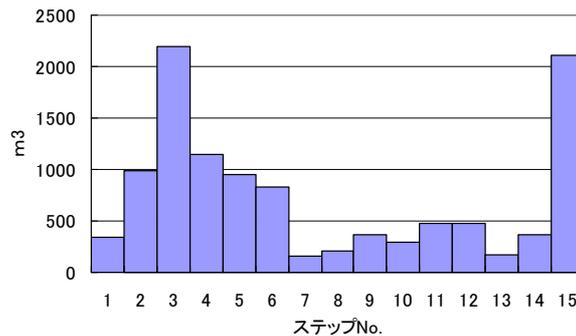


図-6-16 2001年9月10日通過流砂総量（上流短）

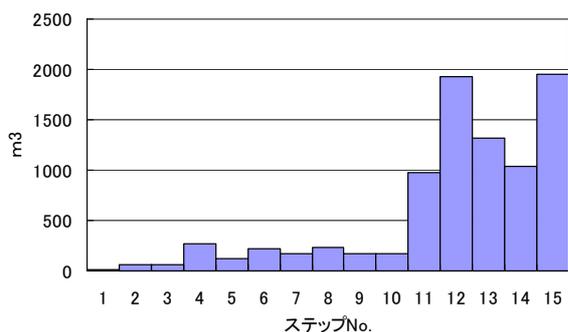


図-6-17 2000年7月17日通過流砂総量（下流短）

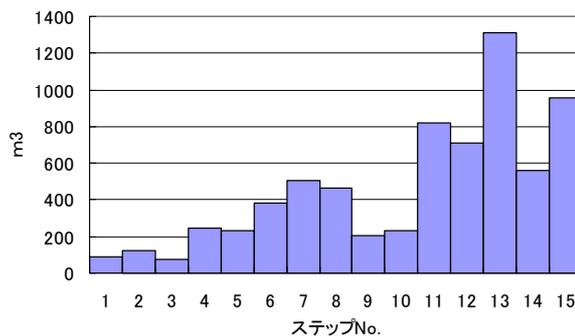


図-6-18 2000年7月25日通過流砂総量（下流短）

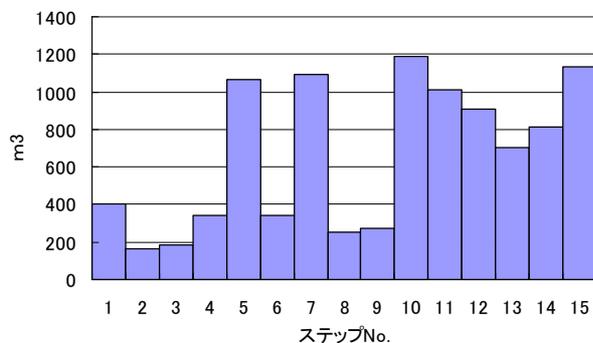


図-6-19 2000年9月1日通過流砂総量（下流短）

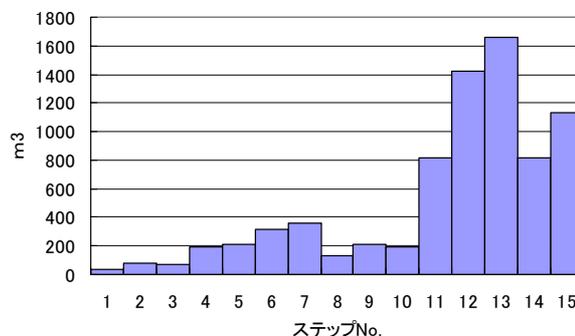


図-6-20 2000年9月24日通過流砂総量（下流短）

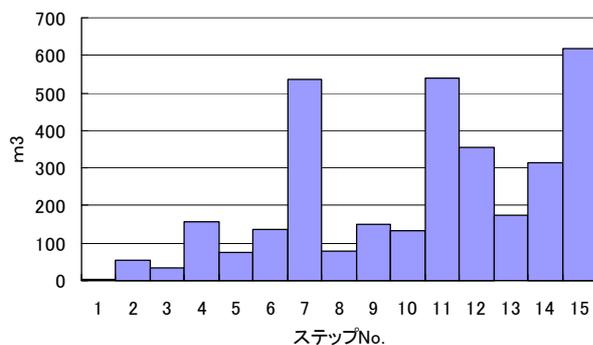


図-6-21 2001年7月22日通過流砂総量（下流短）

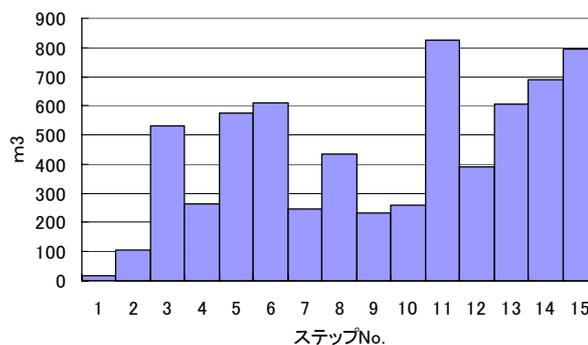


図-6-22 2001年8月22日通過流砂総量（下流短）

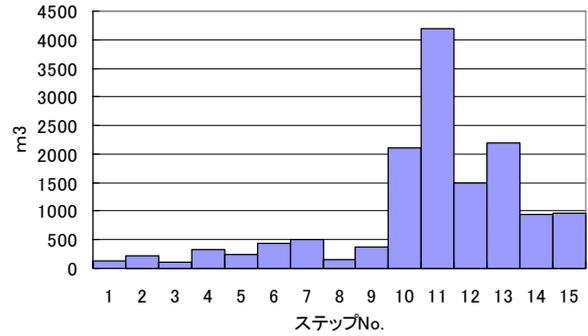
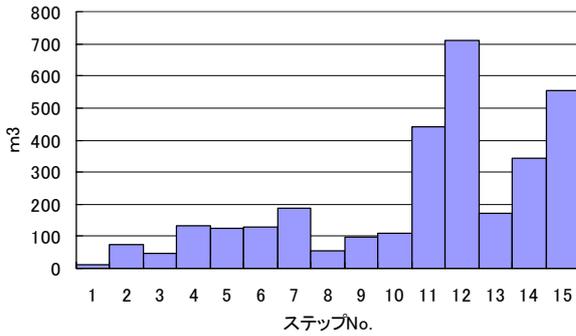


図-6-23 2001年9月9日通過流砂総量（下流短）

図-6-24 2001年9月10日通過流砂総量（下流短）

6. 解析解と考察

ステッププールの波長並びと流砂量の関係をより明らかにするために解析解を導く。

図-7に示すようなステッププールの底面に働く平均せん断力は、すでに式(4)に掲げた。これを ρsgd (ρ = 水密度, s = 砂礫の水中比重, g = 重力加速度, d = 砂礫径) にて除して無次元化をはかると,

$$\bar{\tau}_* = \frac{\bar{\tau}}{\rho sgd} = \frac{az_* + b}{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2} \frac{1}{\lambda_*} \quad (5)$$

ただし, $z_* = z_m / h_0$, $F = U_0 / \sqrt{gh_0}$ = 基本流のフルード数, $\lambda_* = \lambda / h_0$, $a = (1 - F^{2/3}) / (2sd_*)$, $b = (1/2 - 3F^{2/3} / 2 + F^2) / (2sd_*)$, $d_* = d / h_0$.

つづいて上式を用いて区間平均の流砂量を求めるが、解析の簡単化のためにここでは Meyer Peter・Mueller 式を用いることにすると以下になる。

$$\bar{q}_{Bx} = 8 \left(\frac{az_* + b}{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2} \frac{1}{\lambda_*} - \tau_{*c} \right)^{3/2} \sqrt{sgd^3} \quad (6)$$

一方、流砂連続式(7)を導入し図-7の一区間で積分すると式(8)となる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^\lambda z dx = \frac{1}{1-p} \{q_{Bx}(\lambda) - q_{Bx}(0)\} = \frac{1}{1-p} \{\bar{q}_{Bx2} - \bar{q}_{Bx1}\} = \frac{1}{1-p} \Delta \bar{q}_{Bx} \quad (8)$$

ただし, p = 空隙率, z = 任意位置のプール深さである。

上式左辺の積分部分はプールの縦断面積に等しいので、これを三角形近似すると $z_m \lambda / 2$ となる。また、右辺流砂量の差を $\Delta \bar{q}_{Bx} \approx \lambda \partial \bar{q}_{Bx} / \partial x$ のように近似すると、式(8)は次のように書き直される。

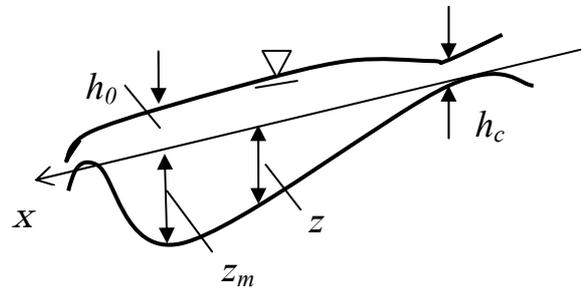


図-7 ステッププール縦断面模式図

$$\frac{\partial z_m}{\partial t} = \frac{2}{(1-p)} \frac{\partial \bar{q}_{Bx}}{\partial x} \quad (9)$$

λ が x の関数であることに注意して、式(6)を x にて微分し式(9)に代入するとともに無次元表示をおこなうと、

$$\frac{\partial z_*}{\partial t_*} = - \left[\frac{az_* + b}{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2} \frac{1}{\lambda_*} - \tau_{*c} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{az_*^2 + 2bz_* + a/2 + (F^{2/3} + 1)b}{\lambda_* \{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2\}^2} \frac{\partial z_*}{\partial x_*} + \frac{az_* + b}{\lambda_*^2 \{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2\}} \frac{\partial \lambda_*}{\partial x_*} \right] \quad (10)$$

ただし、 $t_* = 24\sqrt{sgd^3 t} / \{(1-p)h_0^2\}$, $x_* = x/h_0$.

この式は z_* に関する非線形移流方程式であり、特性方程式

$$\frac{dx_*}{dt_*} = \left[\frac{az_* + b}{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2} \frac{1}{\lambda_*} - \tau_{*c} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{az_*^2 + 2bz_* + a/2 + (F^{2/3} + 1)b}{\lambda_* \{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2\}^2} \quad (11)$$

の上で

$$\frac{dz_*}{dx_*} = - \frac{(az_* + b) \{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2\}}{az_*^2 + 2bz_* + a/2 + (F^{2/3} + 1)b} \frac{1}{\lambda_*} \frac{d\lambda_*}{dx_*} \quad (12)$$

が成り立つ。式(12)は変数分離による積分ができ以下のようなになる。

$$\ln \left[\frac{z_*^2 + (F^{2/3} + 1)z_* - 1/2}{az_* + b} \lambda_* \right] = Const \quad (13)$$

右辺は積分定数である。したがって、 z_* が次のように求まる。

$$z_* = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a}{C\lambda_*} - F^{2/3} - 1 \right) \pm \sqrt{\left(\frac{a}{C\lambda_*} - F^{2/3} - 1 \right)^2 + 4 \frac{b}{C\lambda_*} + 2} \right] \quad (14)$$

ここに、 $C = \exp(-Const)$ である。式(13)または式(14)を式(6)に代入すると流砂量が得られ、

$$\bar{q}_{Bx} = 8(C - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \sqrt{sgd^3} \quad (15)$$

となる。興味深いことに、流砂量は特性方程式(11)上で境界条件のみで定まる一定値をとることになる。式(14)を式(11)に代入して積分を施すと、

$$t_* = \Phi(\lambda_*(x_*), F) \quad (16)$$

にて表される特性線を求め得るが、関数 Φ の具体的な内容はかなり複雑になる。この式は、時間 t_* がステッププール波長の並びに強く依存することを示すものであり、ある場所の流砂量ハイドログラフがステッププール波長の並びに依存する理由となっている。

7. 結 言

(1)新十津川ダム本川ルークシュベツ川に対し、ステッププールが連続的に発達した河床モデルを適用して各プールの埋没と排出を評価することにより、主要な出水による年間土砂流入量の推定をおこなうことができた。

(2)流入流砂量に対するステッププールの波長並びの影響を明らかにするために、上流側に短波長を集めたケースと下流側にそれらを集めたケースにつきシミュレーション計算をおこなった。その結果、波長の長短の違いがあっても空間的平均をとるとその差異が消されること、また1洪水においては輸送土砂量の時間ハイドログラフが並びの影響を受けるものの、長期間ではその影響がなくなることを確かめた。

(3)ステッププールの波長並びと流砂量の関係について解析解を導き、特性線上の流砂量が境界条件のみによって決まる一定値をとることを示した。しかし、特性線における時間が波長の関数であり、結果的に流砂量の時間ハイドログラフが波長並びの影響を受けることを示した。

9. 参考文献

- 1) 長谷川和義・中村健作：ステッププール河道を考慮したダム流入土砂量の推定と検証，(財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XVI，pp.61-69，2005.
- 2) 中村健作・長谷川和義：ステッププール河道を考慮したダム流入土砂量の推定と検証，土木学会北海道支部論文集，第61号，II-28，CD-ROM，2005.
- 3) 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—魚類等の生息環境保全対策への応用を目指して—，土木学会論文集，No.656/II-52，pp.83-101，2000.
- 4) 嵯峨浩：北海道における流出予測モデルの構築と総合化，(財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XIII，pp.113-132，2000.
- 5) 中村健作・長谷川和義：二段タンクモデルを用いた幌加地点の流出解析，土木学会北海道支部論文集，第60号，pp.280-283，2004.
- 6) 神田佳一・森本龍助：護床工下流部における局所洗掘穴のせん断力と洗掘の軽減に関する研究，水工学論文集，第43巻，pp.617-622，1999.
- 7) 中村健作・長谷川和義・田中航太・竜澤宏昌：人工および自然礫列上の土砂移動に関する実験的研究，水工学論文集，第45巻，pp.661-666，2001.