

三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究

井上卓也（寒地土研）

はじめに

- 集中豪雨の増加に伴い、急流河川における被災事例が増加している。
- 洪水時の写真を見ると、しばし巨大な水面波列がある。



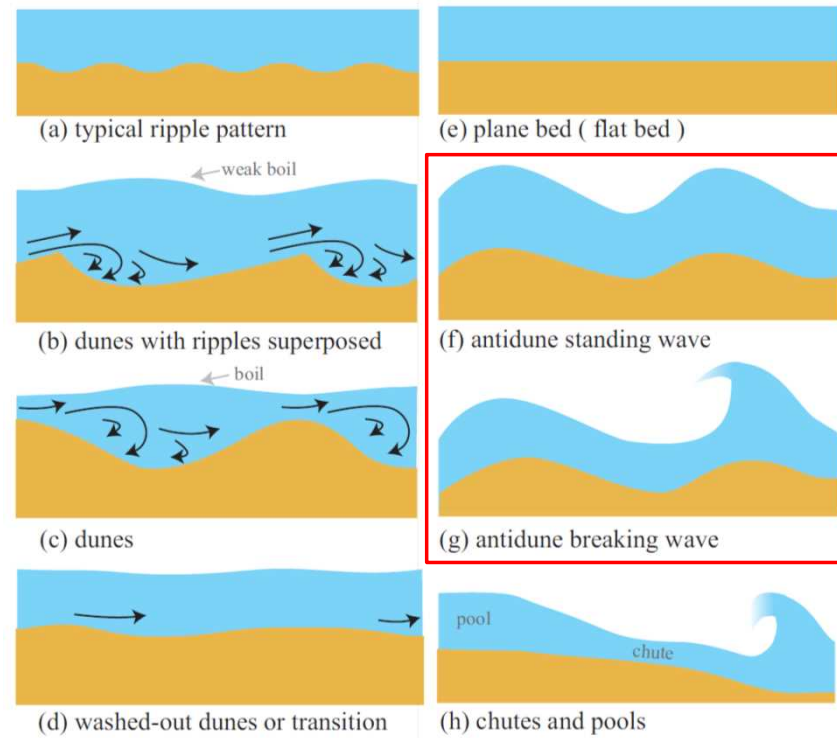
豊平川/平成56年洪水
札幌河川事務所撮影



辺別川/平成22年洪水
清水康行氏撮影

三角状 水面波列

- 反砂堆上の水面波と考えられている。
- 線上跳水とも呼ばれる。



河床波形態の概略図(Simons, 1977)

疑問

- なぜ横断方向に一様にできないのか？
→三角錐形状で、河岸付近に一例.



五十嵐川/平成23年洪水
新潟県HPより

既往研究

- 反砂堆の研究はたくさん行われているが、川幅水深比15以上を対象とした研究例はすくない。（豊平川の川幅水深比は25程度）

| | |
|------------|---|
| 反砂堆の実験的研究 | Guy et al. (1966), 田中(1970), 福岡ら(1982), Núñez-González and Martín-Vide (2010), Yokokawa et al. (2010) |
| 反砂堆の理論的研究 | Kennedy (1963), Hayashi(1970), Engelund(1970), Parker (1975), Coleman and Fenton (2000), Colombini(2004), 泉・ Parker(2009) |
| 反砂堆の数値計算 | 音田・細田(2009), 井上ら(2011), 内田・福岡(2013), 山口 ら(2015) *1次元or鉛直2次元 |
| 水面波列の理論的研究 | 長谷川ら(2009) *1列の場合のみ検証済み |

長谷川ら (2009)の理論

- 水面における斜め交錯波が河床における三次元的な反砂堆起伏に対して共振状態に至った結果発生するものと考えた。

$$Fr^2 = \frac{\cosh(kh)}{kh} \approx \frac{1}{(kh)^2} + \frac{1}{3} \quad \text{反砂堆の波長 (Hayashi理論の近似式)}$$

共振=一致

$$Fr^2 = \frac{\beta h \tanh(\beta h)}{(k_w h)^2} \approx \frac{\alpha \beta h}{(k_w h)^2} \quad \text{斜め交錯波の波長とフルード数の関係 (斜め交錯波の波長を3次元定常Airy wavesで表せると仮定)}$$

$$\frac{B}{h} = \frac{2\pi\alpha(Fr^2 - 1/3)n}{\sqrt{Fr^4 - \alpha^2(Fr^2 - 1/3)}}$$

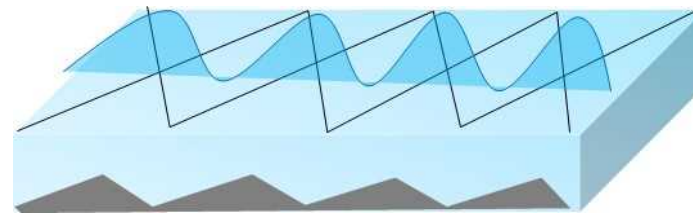
$n = 1$ (1列の水面波) はYokokawa et al.によって検証されているが, $n > 1$ (複数列) における妥当性は検証されていない。

→本研究 $n > 1$ モードを実験的検証

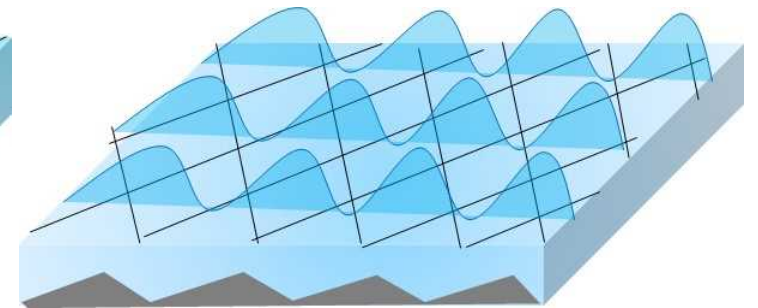
Fr = フルード数, k = 反砂堆の波数 ($k = 2\pi/\lambda_b$), λ_b = 反砂堆の波長, h = 水深, $\alpha = 0.83$, $\beta = \sqrt{k_w^2 + l_w^2}$, k_w = 交錯波の縦断方向波数 ($= 2\pi/\lambda_w$), l_w = 交錯波の横断方向波数 ($= 2\pi n/B$), λ_w = 交錯波の縦断波長, B = 水路幅, n = 交錯波の横断方向のモード数

長谷川らの理論のイメージ

- 川の水面には斜めの波が定在している（黒線）。
- 斜め波の交点の長さと、河床波の波長が一致したとき、巨大な波が発生する。
- 川幅が増加すると、斜めの波の交点が横断方向に何個もできるので、複数の水面波が発生する場合もある。

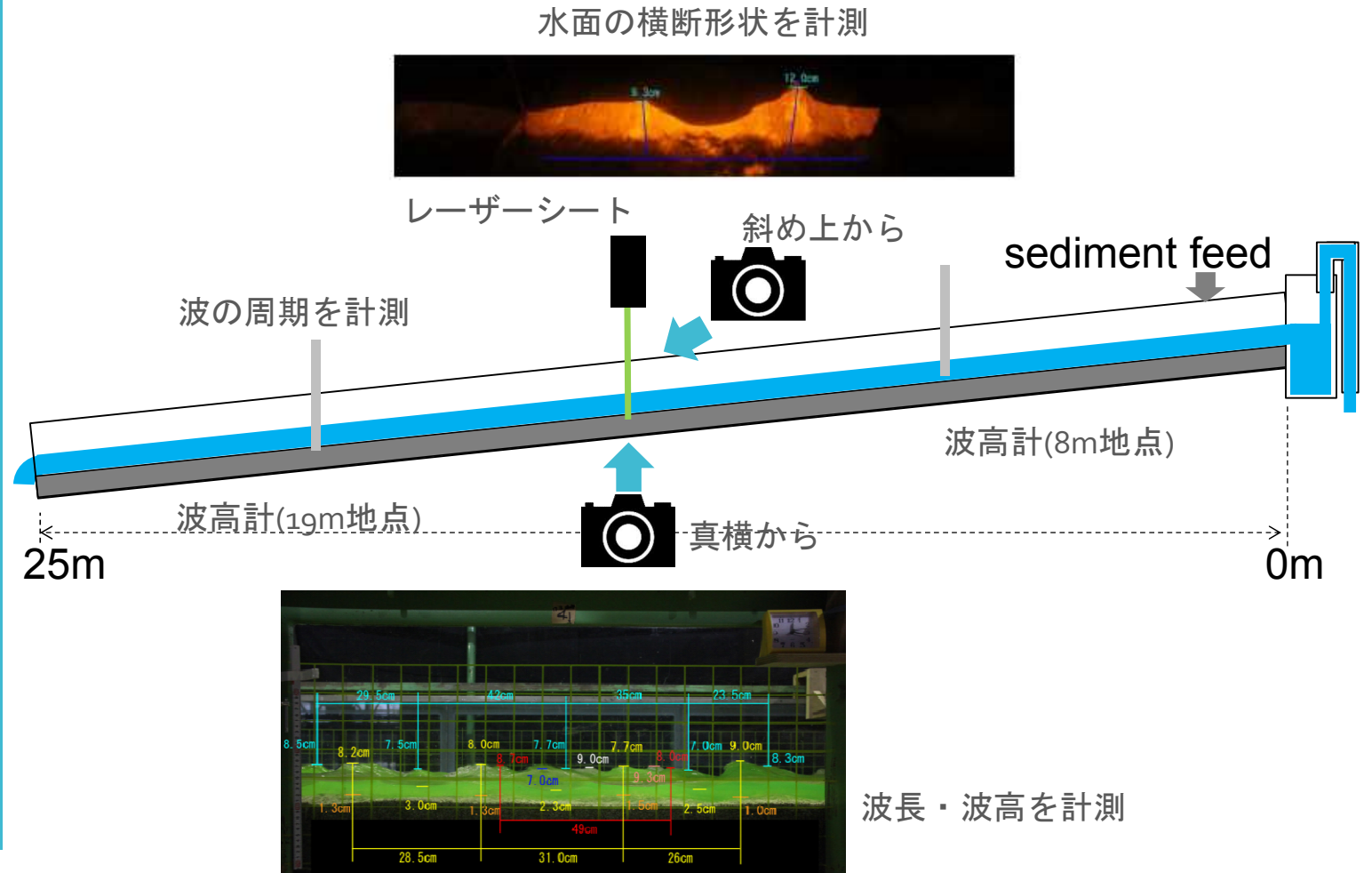


一列の水面波



複数列の水面波

実験の概要

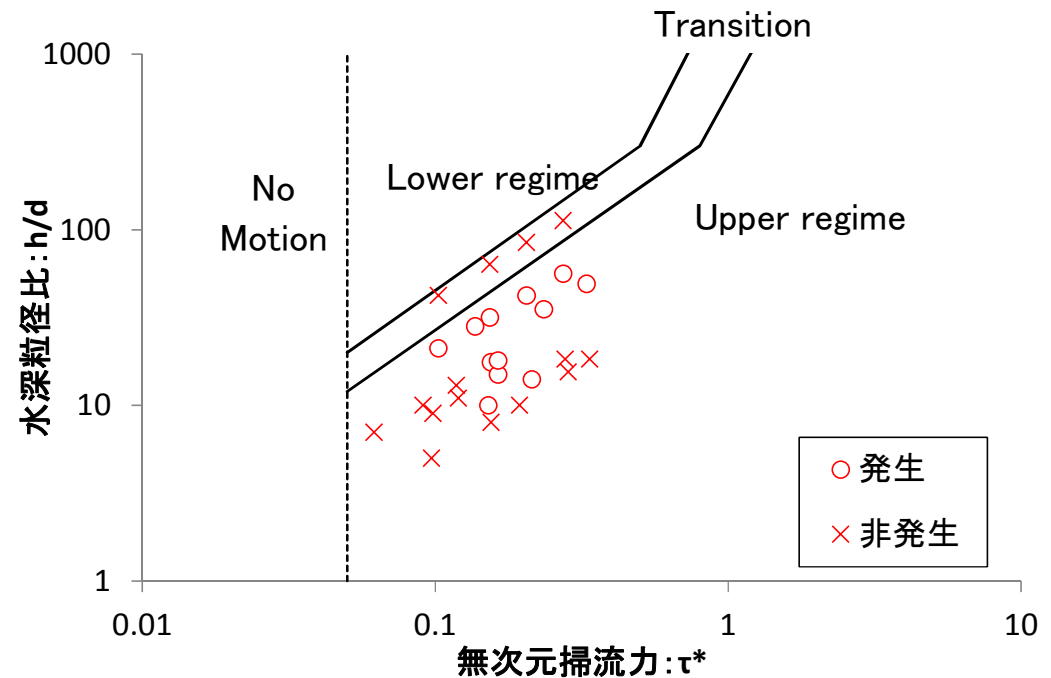


実験条件

| | 水路幅 (m) | 粒径 (mm) | 勾配 | 流量 (ℓ/s) | 初期水深 (m) | フルード 数 | 川幅 水深比 | 無次元 掃流力 |
|-------|------------|------------|--------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Run1 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 15.2 | 0.045 | 1.02 | 11.1 | 0.154 |
| Run2 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 36.8 | 0.079 | 1.04 | 6.3 | 0.273 |
| Run3 | 0.5 | 1.42 | 0.0145 | 8.1 | 0.025 | 1.30 | 20.0 | 0.155 |
| Run4 | 0.5 | 1.42 | 0.0145 | 1.8 | 0.010 | 1.16 | 50.0 | 0.062 |
| Run5 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 19.5 | 0.045 | 1.31 | 11.1 | 0.098 |
| Run6 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 26.7 | 0.055 | 1.32 | 9.1 | 0.120 |
| Run7 | 0.5 | 5.00 | 0.0180 | 42.9 | 0.075 | 1.34 | 6.7 | 0.164 |
| Run8 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 10.3 | 0.025 | 1.66 | 20.0 | 0.097 |
| Run9 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 21.7 | 0.040 | 1.73 | 12.5 | 0.155 |
| Run10 | 0.5 | 5.00 | 0.0320 | 30.7 | 0.050 | 1.76 | 10.0 | 0.194 |
| Run11 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 44.6 | 0.050 | 1.27 | 20.0 | 0.091 |
| Run12 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 113.3 | 0.090 | 1.34 | 11.1 | 0.164 |
| Run13 | 1.0 | 5.00 | 0.0150 | 67.8 | 0.065 | 1.31 | 15.4 | 0.118 |
| Run14 | 1.0 | 5.00 | 0.0250 | 57.5 | 0.050 | 1.64 | 20.0 | 0.152 |
| Run15 | 1.0 | 1.42 | 0.0110 | 44.5 | 0.050 | 1.27 | 20.0 | 0.235 |
| Run16 | 1.0 | 1.42 | 0.0110 | 76.2 | 0.070 | 1.31 | 14.3 | 0.329 |
| Run17 | 1.0 | 1.42 | 0.0250 | 15.1 | 0.020 | 1.71 | 50.0 | 0.213 |
| Run18 | 0.5 | 1.42 | 0.0303 | 12.4 | 0.026 | 1.89 | 19.23 | 0.336 |
| Run19 | 0.5 | 1.42 | 0.0303 | 9.5 | 0.022 | 1.86 | 22.73 | 0.285 |
| Run20 | 0.5 | 1.42 | 0.0250 | 11.3 | 0.026 | 1.72 | 19.23 | 0.277 |
| Run21 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 8.0 | 0.030 | 0.98 | 16.67 | 0.102 |
| Run22 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 23.8 | 0.060 | 1.03 | 8.33 | 0.205 |
| Run23 | 0.5 | 1.42 | 0.0080 | 12.6 | 0.040 | 1.01 | 12.50 | 0.137 |
| Run24 | 0.5 | 1.42 | 0.0040 | 16.8 | 0.060 | 0.73 | 8.33 | 0.102 |
| Run25 | 0.5 | 1.42 | 0.0040 | 31.0 | 0.090 | 0.73 | 5.56 | 0.154 |
| Run26 | 0.5 | 1.42 | 0.0040 | 47.4 | 0.120 | 0.73 | 4.17 | 0.205 |
| Run27 | 0.5 | 1.42 | 0.0040 | 71.5 | 0.160 | 0.71 | 3.13 | 0.273 |

三角状水面波列の発生条件

- 反砂堆が発生したときに水面波列も発生する。
- Upper regimeでも h/d が小さいときは、反砂堆・水面波ともに発生しにくい。



芦田・道上(1971)のlower regimeとupper regimeの区分の上に実験結果をプロットした図

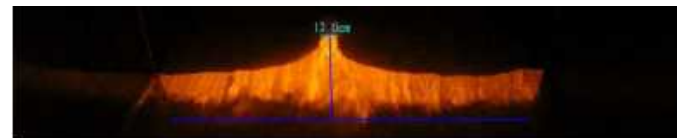
横断方向の モード数 (通水初期)

- 通水初期では、川幅水深比に応じて三角状水面波列の横断方向の列数（モード数）が変化する.

n = 1



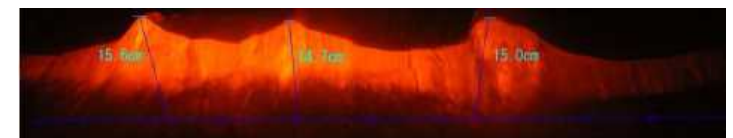
横断形状（レーザーシート）



n = 3

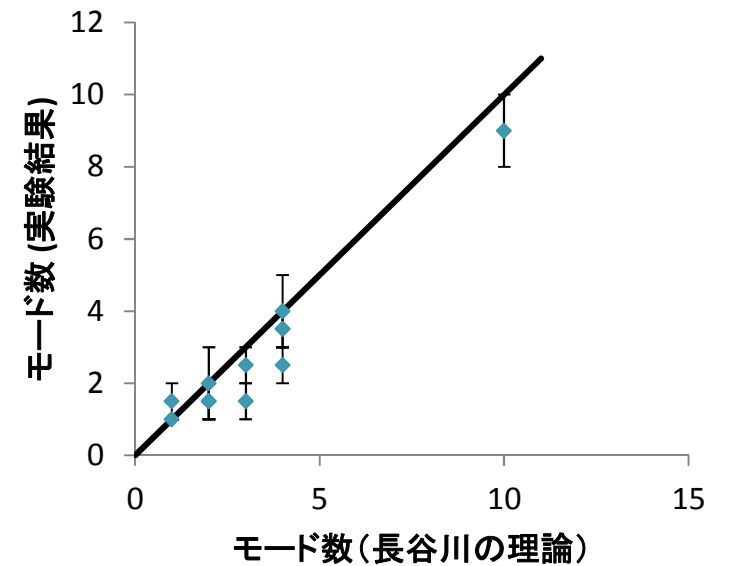
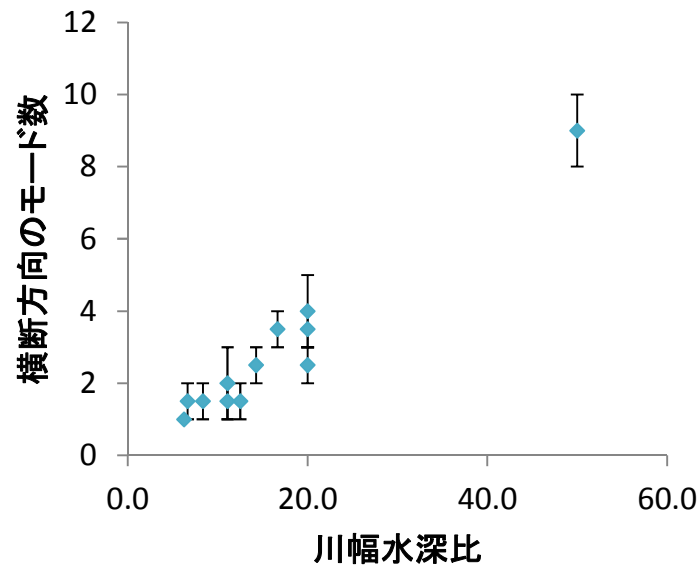


横断形状（レーザーシート）



モード数と 川幅水深比 (通水初期)

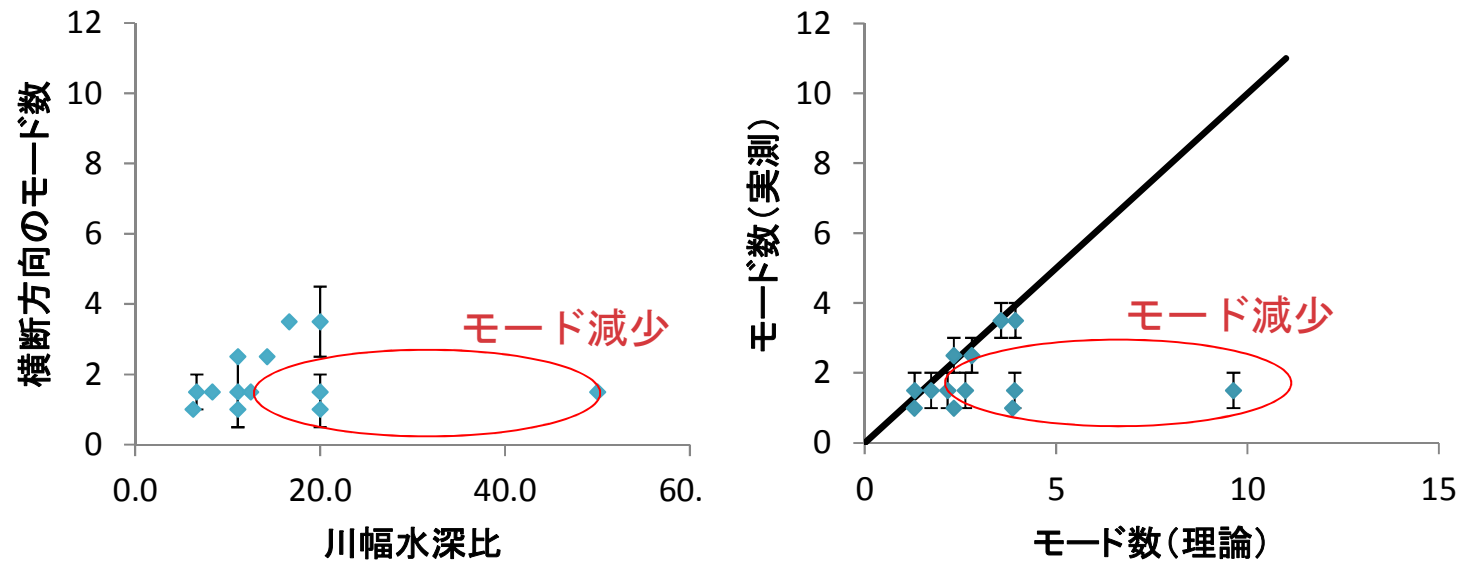
- 三角状水面波列の横断方向の列数（モード数）は川幅水深比の増加に伴い増加する。
- 通水初期の実験結果と長谷川理論はおおむね一致する。



通水初期における横断方向モード数, (a)モード数の実験結果と川幅水深比,
(b)実験結果と長谷川理論の比較

モード数と 川幅水深比 (通水後期)

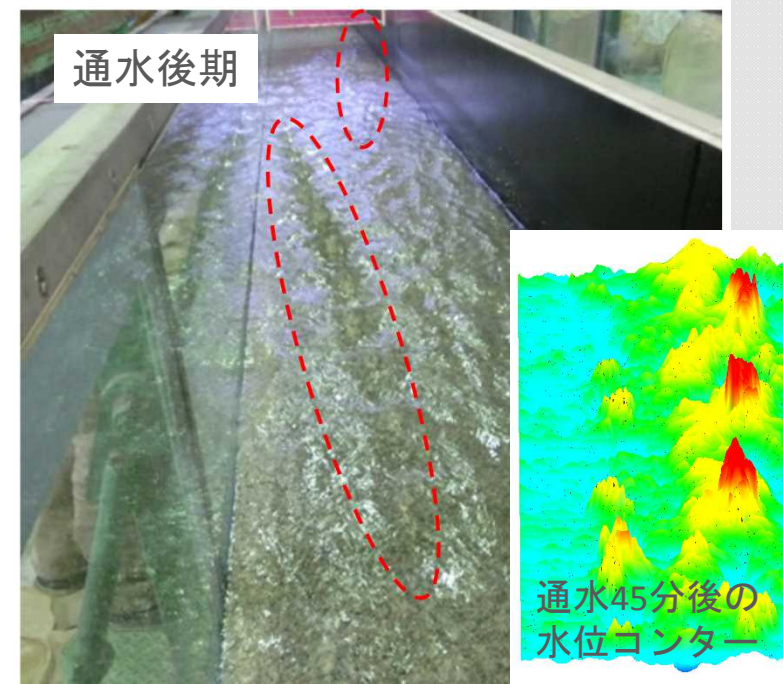
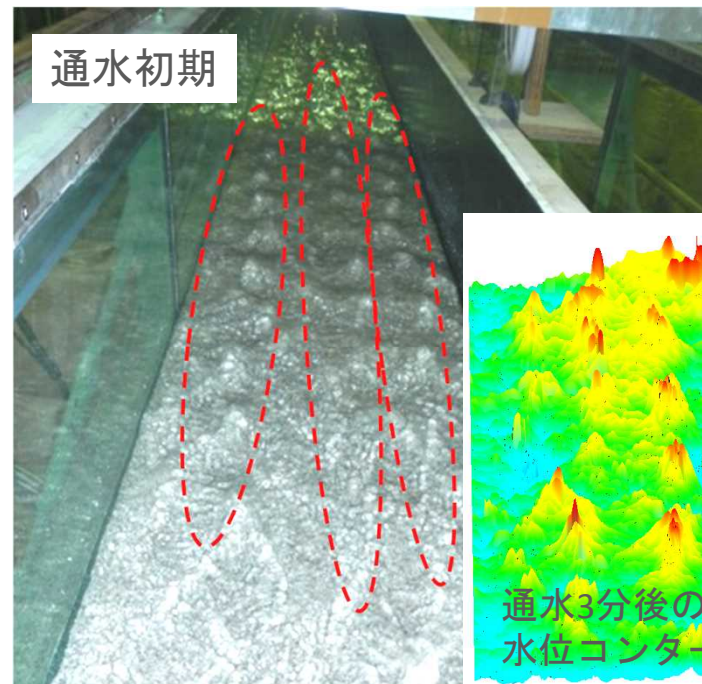
- 通水を続けると、川幅水深比が大きいケースで、横断方向のモード数が減少する。
- 長谷川ら(2009)の理論は線形領域を対象としているため、通水後期のモード減少は表現できない。



通水後期における横断方向モード数, (a)モード数の実験結果と川幅水深比, (b)実験結果と長谷川理論の比較

モード減少

- 藤田・村本の砂州の領域区分図と比べると、モード減少を起こしたケースは、交互砂州の発生領域に位置する。
- このことから、モード減少には交互砂州の発達が影響を与えていると思われる。



水面波列のモード減少 (Run 3)

*写真とコンター図は計測区間が異なるため、水面波の形状は一致はしていない。

まとめ

なぜ豊平川の三角波は、河道中央でなく河岸付近に1列だけ発生したのか？

- 川幅水深比が大きい場合、横断方向に複数の水面波列が初期に発生する。
- しかし、川幅水深比が15～20以上の場合、実験の進行とともに砂州が形成され、砂州の影響を受け徐々に水面波列のモード数が減少する。
- 例えばRun3では、実験開始3分後には3～4列の水面波列が観測されたが、実験開始45分後には砂州が形成され、砂州の瀬に1列の水面波が形成された。
- 昭和56年の豊平川などにおいて、川幅水深比が大きいのに水面波列が1列しか観測されなかったのは、河床に砂州が形成され、その影響で水面波列の数が減少したためと推測される。

本発表の詳細は、以下の論文に記載されています。井上卓也, 長谷川和義, 渡部靖憲, 船木淳悟: 三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2, I_739-I_746, 2015.

参考文献 (日本語)

芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol. 195, pp.59-69, 1971.

泉典洋, Gary Parker: 平坦床-反砂堆遷移過程の分岐特性, 水工学論文集, Vol. 53, pp.733-738, 2009.

井上卓也, 清水康行, 木村一郎, 川村里実: 1次元ブシネスク方程式モデルを用いた豊平川における三角状水面波列の数値計算, 水工学論文集, Vol.55, 1_997-1002, 2011.

内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる種々な小規模河床形態の統一的解析法の構築, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, 1_1135-1140, 2013.

音田慎一郎, 細田 尚: 水深積分モデルによる小規模河床波の発生・発達過程と流れの抵抗則の数値解析, 水工学論文集, Vol. 48, pp.973-978, 2004.

田中祐一郎: Antidune に関する実験的研究, 京大防災研年報第13号B, pp.271-284, 1970.

長谷川和義, 山口甲, 伊賀久晃, 辻珠希: 急流河川における三角状水面波列の発生条件について, 土木学会北海道支部論文報告集第66号, B-1, 2009.

福岡捷二, 奥津一夫, 山坂昌成: 急勾配移動床流れにおける河床波の形状, 伝播特性, 土木学会論文集, Vol.323, pp.77-89, 1982.

山口里実, Sanjay Giri, Jonathan M. Nelson, 清水康行, 船木淳吾: 流量変化に対するデューン形状の応答に関する数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, 1_1015-1020, 2015.

村本嘉雄, 藤田祐一郎: 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, pp.243-258, 1978.

参考文献 (英語)

- Coleman, S. E. and Fenton, J. D. : Potential-flow instability theory and alluvial stream bed forms. *J. Fluid Mech.* pp.101-117, Vol. 418, 2010.
- Colombini, M.: Revisiting the linear theory of sand dune formation, *J. Fluid Mech.*, Vol. 502, pp.1-16, 2004.
- Engelund, F.: Instability of erodible beds, *J. Fluid Mech.*, Vol. 42, pp. 225- 244, 1970.
- Guy, H., Simons, D. and Richardson, E. : Summary of Alluvial channel data from flume experiments, 1956–61, Professional Paper 462-I, U.S.G.S., 1966.
- Hayashi, T. : Formation of dunes and antidunes in open channels, *Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE*, Vol. 96, No.HY2, pp. 357-366, 1970.
- Kennedy, J. F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, *J. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp.521- 544, 1963.
- Núñez-González, F., and Martín-Vide, J. P. : Downstream-migrating antidunes in sand, gravel and sand-gravel mixtures, in *River Flow 2010*, vol. 1, edited by A. Ditttrich et al., pp. 393–400, Bundesanst. für Wasserbau, Braunschweig, Germany, 2010.
- Parker, G. : Sediment inertia as cause of river antidunes, *J. Hydraul. Div. ASCE* 101, 211–221, 1975.
- Yokokawa, M., Hasegawa, K., Kanbayashi, S. and Endo, N. : Formative conditions and sedimentary structures of sandy 3D antidunes: an application of the gravel step-pool model to fine-grained sand in an experimental flume, *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 35, pp.1720–1729, 2010.