

II-43

水面波に同調する河床波上の射流流れに関する実験的研究

北海道大学 正員 長谷川和義
北海道大学工学部 学生員 富田 稔

1 はじめに

水面波の影響によっても河床波が成長・減衰するという事実は、よく知られているようであるがその研究は意外に少ない。河川流が浅水流的(すなわち長波的)性質を有し、多くの河床波がその境界不安定現象によって生じていることが、河床波研究の大部分を不安定解析に向けているのであろう。しかし、Jain & Kennedy (1974)、中川・辻本(1980)は、ポテンシャル流による河床波応答スペクトルあるいは河床不安定条件を調べ、Airy波の波長において河床波高が無限大になる特異点の存在を指摘している。山田ら(1984)は、2次元常流のAiry波が強制河床波を発生させる可能性を初めて示し、実験結果がよく合うことを示している。しかし、射流の定常水面波がもたらす影響に関する研究は見あたらない。このような水面波の対河床積極性は、射流域においても存在するものと考えられ、著者ら(1988, 1990, 1993)は、山地河川でみられるステップ・プールの成因が水面波にあるものとみて一連の研究を進めてきた。これまでに次のことを明らかにしてきた。

- ① 平坦床水路に射流状態で水面波を発生させた場合、定常水面波は斜め波であり、河床せん断力はこの水面波の起伏に対応して変化する。その位相は水面波に対して $1/8 \sim 1/2$ 波長上流側にずれる。このことは、水面波の誘起によって河床波が成長し得ることを示す。
- ② 反砂堆成長条件にある波長をもった2次元波面を河床に設置して水面に擾乱をあたえた場合、擾乱波は河床波対応の水面波の影響によって減衰するが明瞭に存在し、河床せん断力も両者の起伏に対応して変化する。このことは、水面波起源の河床波と反砂堆とが別個のものであること、互いの干渉は存在するものの両者が共存し得ることを示す。

以上の知見にたつて今後解明すべき問題は、”固有の波長を有する水面波と同一波長の河床波が成長し始めたとき、水面波はいかなる影響を受けるか? また、そのときせん断力分布はどのように変化するか?”ということである。このことは、河床波の安定性と定常にいたる発達過程とに関わる問題である。

本研究はこの問題を明らかにすることを目的としており、水面波と同様の地形を水路底にあたえた実験において、干渉を受けた流れの水面波形状、流速分布、せん断力変化などを詳しく調べた結果を報告するものである。

2 実験の概要

2-1. 実験装置

使用水路は、昨年と同一の循環式10m可傾斜水路である。底面に、長谷川・小野寺、長谷川・八木の実験を参考に定めた、流下方向50cm、横断方向30cmの波長の発生水面波とほぼ同様な3次元起伏をあたえた。

振幅は底面剥離など他の問題が生じないように、1cmと小さ目にとった。すなわち、河床形は、図1のように座標をとるとほぼ以下の式によって表される。

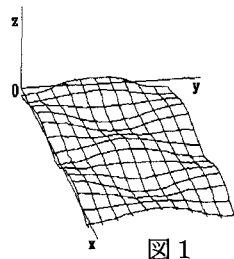


図1

Shooting flow on bed wave with synchronized water surface wave.

By Kazuyoshi Hasegawa and Minoru Tomita.

$$z = \sin\left(\frac{2\pi}{50}(x + 12.5)\right) \cos\left(\frac{2\pi}{30}(y - 15)\right)$$

2-2. 実験条件

流れの性質は、フルード数(Fr)および水深/波長比(h/λ)によって大きく変化する。特に、河床波と水面波の波長が十分に一致する条件で跳水状の流れが起こるものと予想されたので、予備実験によってあらかじめその状態の発生フルード数と水深を確認した。本実験は、この状態を含むFr, h/λ 両パラメータの組み合わせを変えた表-1に示す4種類についておこなった。後述のように、Run-2が水面波河床波の干渉条件にあり、河床波の波長に一致するAiry波の流下方向位相速度が、平均流速に一致する条件にほぼ一致している。他のケースは、同一Frに対して異なるh/λ、同一h/λに対して異なるFrが組合わさること、および異なる水面状態が生ずることを目標として設定に努めたが、装置の制限によって結果的に余り違いのない条件になっている。

	h(cm)	i	Q(l/s)	Fr	B/h	v(m/s)
R-1	6.42	2.348E-02	27.48	1.798	4.67	1.4263
R-2	5.43	2.348E-02	18.20	1.532	5.53	1.1175
R-3	6.56	2.590E-02	29.23	1.852	4.57	1.4852
R-4	5.77	2.590E-02	23.87	1.834	5.20	1.3790

表 1

2-3. 計測項目と方法

主要な計測項目は、平均水深、水面形状、ならびに流速分布である。このうち、水面形及び底面高は、水面形が顕著に現れ始めたところから100cmの区間（2波長）において、ポイントゲージを用いて計測した。計測点は、x方向に2.5cm間隔で41点、y方向に1cm間隔で15点の計615点である。平均水深は、各局所水深の全合計の平均によって求めた。

流速の計測は、水面形の計測開始点と同じところから75cmの区間（1.5波長）においてドップラーレーザー流速計（KANOMAX FLVP-K7[®]）を用いて行った。計測点は、水路中央でx方向に5cm間隔、z方向は底面から2mm間隔で2cm、5mm間隔で測定可能な位置までとした。

3 実験結果

3-1. 水面形状

図2-1～2-4は、それぞれRun-1～4における発生水面形状を鳥瞰図風にみたものである。これらの波の主要パラメータは表-2に示すとおりである。R-1, R-3, R-4の水面形は干渉条件からややはずれる状態にあり、河床波にほぼ平行になっている。しかし、位相がわずかに下流にずれており、振幅が河床波に比べて大きくなっている。これに対して干渉条件にあるR-2の水面形は特異であり、跳水気味の大きな波頂が現れ位相が上流側にずれている。波頂は一部空気を混入して振動しており飛沫がとんでいる。この種の水面形は山地河川の洪水時にも見られ、ステップ・プールとの関係が推測される。

	L(cm)	λ(cm)	a(cm)	h(cm)	a/h	a/λ	h/λ
R-1	25.724	50	0.8216	6.42	0.1279	0.0164	0.1284
R-2	25.724	50	2.1804	5.43	0.4015	0.0436	0.1086
R-3	25.724	50	1.0444	6.56	0.1592	0.0208	0.1312
R-4	25.724	50	0.9449	5.77	0.1637	0.0188	0.1154

表 2

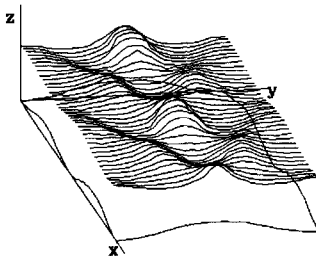


図2-1 Run1の水面形

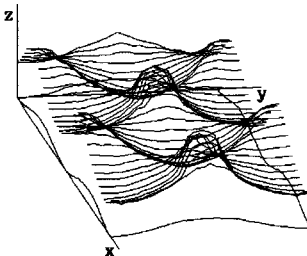


図2-2 Run2の水面形

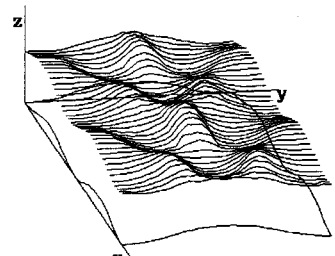


図2-3 Run3の水面形

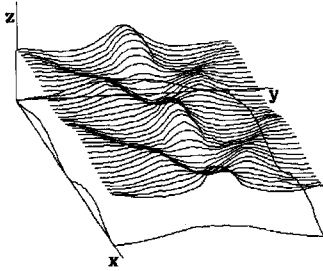


図 2-4 Run4の水面形

3-2. 流速分布

図 3-1～図 3-4 は、流速測定結果の全体を示したものである。Run-1, 3, 4 は非常に似た分布を示しており、河床波の谷から峰にかけての加速、峰から谷に向けての減速の傾向が顕著に現れている。しかし、Run-2 ではこの傾向が逆であり、河床波の谷から峰にかけての減速、峰から谷にかけての加速が明瞭に読み取れる。

図 4-1～図 4-4 は、Run-1 および Run-2 の鉛直流速分布の実測値を片対数プロットしたものである。それぞれ、河床波の峰部、谷部の値を分けて示す。測定点の手前の波の存在でレーザー光が届かず、水面まで計測された箇所はほとんど無い。しかし、いずれも底面から 1cm のあたりまでは対数則に合致しており、後述の河床せん断力はこの性質を利用して求めている。これより上の層では水面波の影響を受けて対数則からはずれてくるが、水面波の峰部での計測可能範囲はほとんど対数則に一致しており、谷部では波の性質とおりこれより大きな値をとっている。他のケースも、鉛直分布に関しては同様な性質を示している。

3-3. 底面せん断力分布

図 5-1～図 5-4 は、壁法則を利

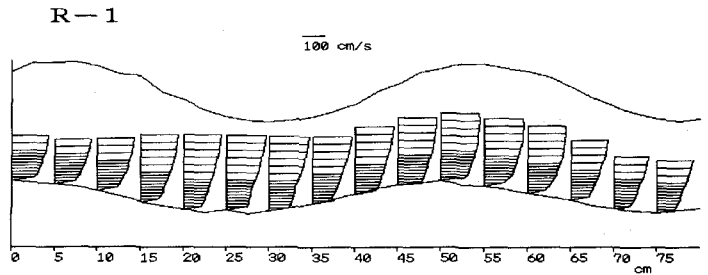


図 3-1 Run1の流速分布

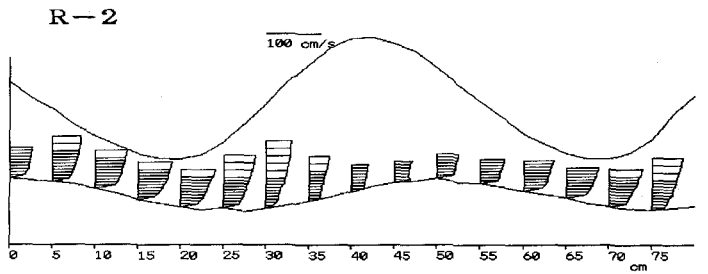


図 3-2 Run2の流速分布

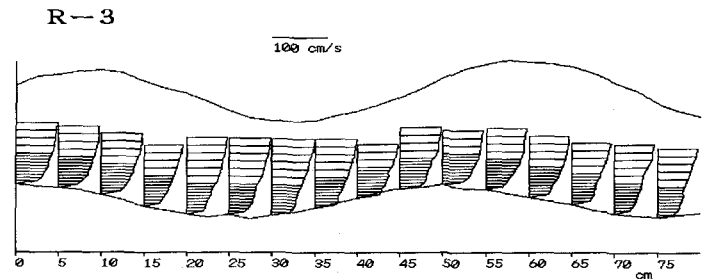


図 3-3 Run3の流速分布

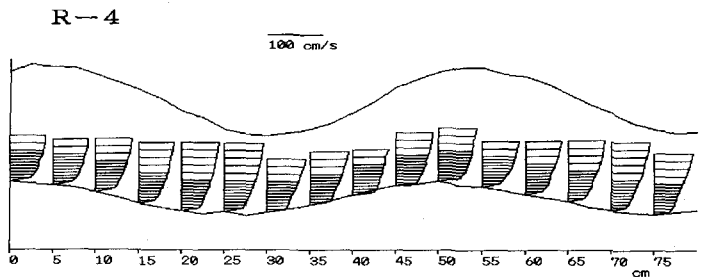


図 3-4 Run4の流速分布

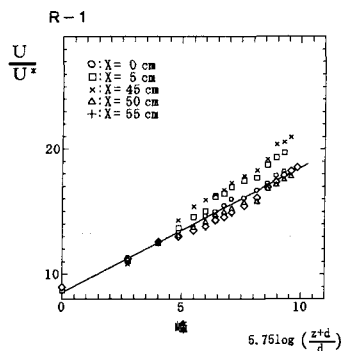


図 4-1 対数分布の検討Run1峰

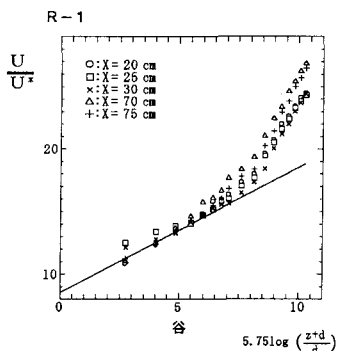


図 4-2 対数分布の検討Run1谷

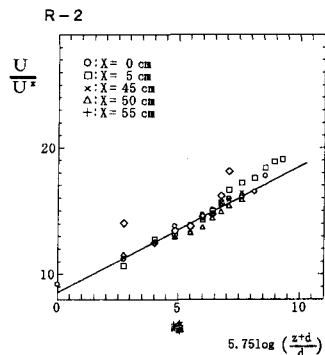


図 4-3 対数分布の検討Run2峰

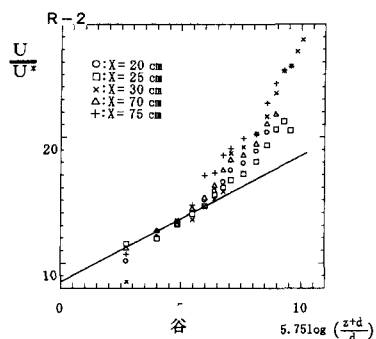


図 4-4 対数分布の検討Run2谷

用して計ったせん断力の分布を河床形状、水面形状とともに描いたものである。Run-1, 3, 4の分布が非常に似たものになったのは、流速分布がほとんど一致していたことから当然である。

これらのせん断力分布は、明らかに河床波に対して位相の遅れを示している。分布の峰は流速の加速部に、谷は減速部に対応している。これに対して、Run-2のせん断力分布は位相の進みを示し、やはりせん断力分布の峰・谷が流速の加速部・減速部に対応している。

R - 1

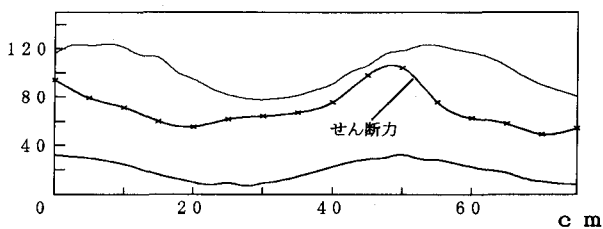


図 5-1 Run1における底面せん断力分布

R - 2

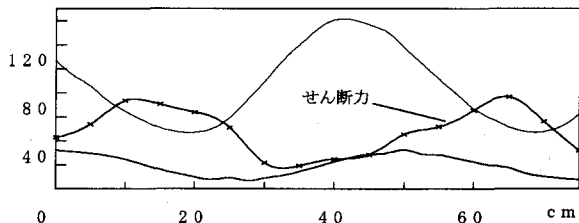


図 5-2 Run2における底面せん断力分布

R - 3

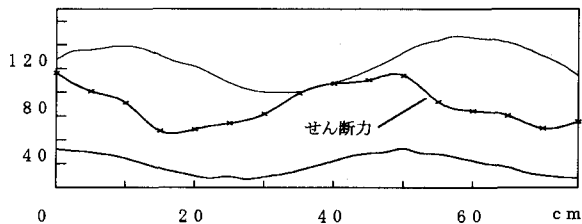


図 5-3 Run3における底面せん断力分布

4 考察

4-1. 水面波の性質

不規則底面上の流れの表面にはAiry波が発達し、その伝播速度が流速に一致する波長が定常波となる(山田ら(1984))。流れが射流の場合には、斜め波の形でしか一箇所にとどまることができない。この関係はよく知られているように、

$$Fr^2 = \frac{\beta h \tanh \beta h}{(kh)^2} \quad (1)$$

$$\left(\beta = \sqrt{k^2 + l^2}, Fr^2 = \frac{U^2}{gh}, k = \frac{2\pi}{\lambda}, l = \frac{2\pi}{B} \right)$$

にて表される。図6-1の曲線は、 λ に河床波のx方向波長(50cm)、Bに水路幅(30cm)をあたえて描いた上式の関係である。図中の点の実験値であるが、 λ は50cmのままあたえている。いずれも曲線の近傍にあるが、現象が有限振幅波であることを考慮すれば式中のhはむしろh+a(a=水面波振幅)に置き換えるべきであろう。この関係を見たのが図6-2である。Run-2はほぼ線上にあり、干渉条件を満たしていることが分かるが、他は離れている。Run-1, 3, 4のフルード数・水深に対するAiry波長は60cm程度であり、このためこれらのケースの水面波は次第に河床波からずれていき、長区間で振幅の増大・減少が起こっている。水面波と河床波の峰が一致したところは、大きな振幅を示す。観測区間はほぼこの部分に相当している。

図7-1、7-2は、3次元ポテンシャル流れの線形水面解、式(2)と実測水面を比較したものである。

$$\eta = \frac{Fr^2 / \cosh \beta h}{Fr^2 - (\beta h \tanh \beta h) / (kh)^2} A \sin km \cos ln \quad (2)$$

(m = x + 12.5 n = y - 15)

微小振幅を前提にした理論解は、干渉条件にないRun-1に対しても必ずしも合致していないが、傾向は一致している。しかし、式(2)の分母がゼロに近くしかも負値をとるRun-2は、まったく異なる結果になっている。干渉状態の解を知るためには、非線形解析

R - 4

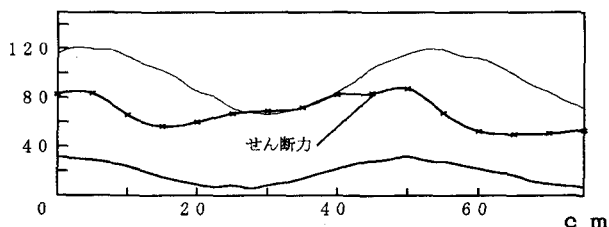


図5-4 Run4における底面せん断力分布

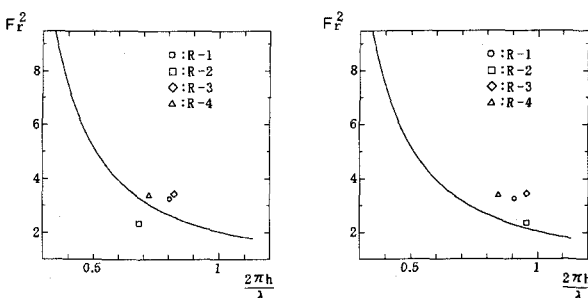


図6-1 有限振幅波を考慮していないときの分散関係 図6-2 有限振幅波を考慮したときの分散関係

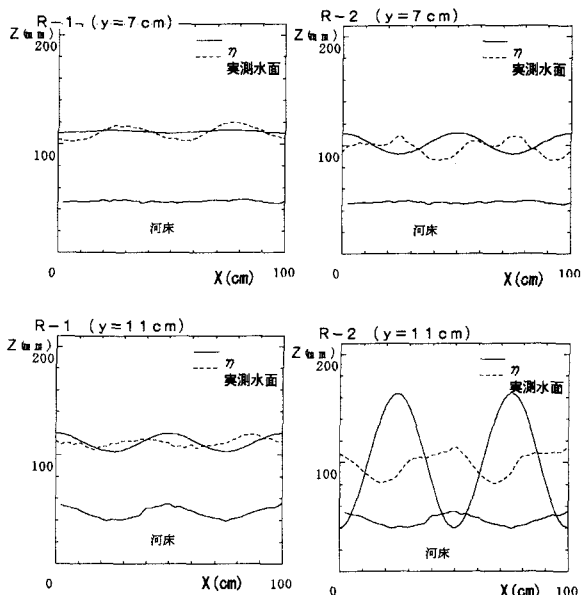


図7-1 理論水面波と実測値との比較

が不可欠である。実測干渉波は、平均水深に対する振幅の比が0.4程度におさまっているほか、波形の傾斜や碎波が生じておらずむしろ保存波的である。これらは、非線形効果によるものと考えられる。

4-2. 河床波の発達減衰に対する水面波の影響

図5-2によれば、干渉条件にあるRun-2の河床せん断力は、河床に対して0.4波長ほどの位相の進みをもっており、河床波を減衰させる働きをもつことが分かる。このことは、水面波に強制されて形成された河床波が、水面に影響をあたえる程度に成長した段階で消滅に向かわれることを意味しており、重要である。しかし、Run-1, 3, 4のケースに認められるように、わずかに河床波の波長からずれる条件をもつ流れでは、せん断力の位相に遅れが生じ、河床波は発達に向かう。したがって、洪水時のように水理条件が時間的に変化する場合には、あるステージの水面波によって形成された河床波が、ひきつづく水深・フルード数の変化のもとで発達し続ける可能性がある。もしこれが正しければ、ステップ・プールの形成には洪水流が不可欠な条件となろう。今後さらに検討を重ねるつもりである。

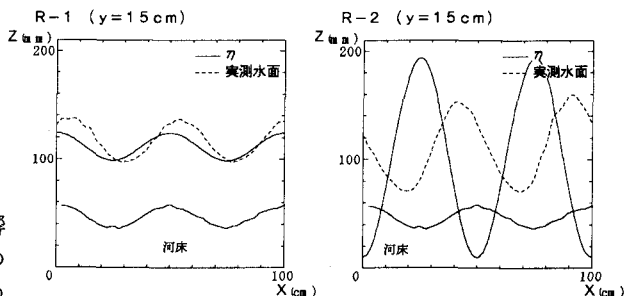


図7-2 理論水面波と実測値との比較

5 まとめ

- (1) 射流上定常水面波の波長に近い固定河床波上に通水すると、両者の波長が一致する条件の場合に、大振幅の保存波状水面波が生ずる。しかし、わずかに条件がずれると底面との振幅比が1に近い流れに落ちつく。
- (2) 前者の水面波の河床波に対する位相は遅れており、河床せん断力の位相は進んでいる。しかし、後者の波では逆になる。
- (3) このため、前者の条件下では河床波は消滅に、後者の条件下では発達に向かうことが予想される。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金試験研究(B)(1)「最近の移動床水理学研究に立脚した多自然型親水性河道の設計指針の確立」(代表・京大防災研・村本嘉雄)による援助を頂いた。記して関係者の方々に深謝を表する次第である。

参考文献：

- Jain S. and J.F.Kennedy(1974):The spectral evolution bed forms, J.Fluid Mech., vol. 63, part 2.
- Nakagawa, H. and T.Tujimoto(1980):Sand bed instability due to load motion, J. Hy. Div. ASCE, vol. 106, No. HY12.
- 山田・池内・堀江(1984):不規則底面をもつ開水路流れに関する研究, 第28回水理講演会論文集.
- 長谷川・藤田・小野寺(1988):定常波を有する流れの河床せん断力, 土木学会北海道支部論文報告集, 第44号.
- Hasegawa, K., A.Mori and S.Isikawa(1990):Bed topographies and sediment transport during flood in mountainous rivers, Proc. of Int. Conf. on RIVER HYDRAULICS Paper J3.
- 長谷川・八木(1993):2次元波状底面の影響を受けた射流における定常水面波と流速分布, 土木学会北海道支部論文報告集, 第49号.