

河床形態に及ぼす水路幅の影響について

Study on the Influence of Channel Width on the Bed Form

鳥取大学工学部 正 員 ○鈴木 幸一

鳥取大学工学部 正 員 道上 正規

鳥取大学大学院 学生員 岩垣 孝一

1. まえがき

移動床河道内に形成される河床形態は、砂漣・砂堆のような小規模河床形態と砂州のような中規模河床形態とに大別されて扱われてきており、前者は主に河床砂粒径あるいは水深によってその規模が特性付けられ、後者では水路幅がその形状特性の支配要素の一つであるといわれている¹⁾。そうであるとするならば、中規模河床形態のスケールと小規模河床形態のスケールとが同程度で共存する実験室規模での河床形態は、同一流量、同一流砂量の条件のもとでも水路幅 B と水深 h との比 B/h の相違によってかなり異なったものとなることが考えられる。従来、 B/h が極端に小さいと河床形態は二次元的となり、逆に B/h が大きいと三次元的となることが経験的に知られているが、水路幅が小さいと中規模河床形態が形成されず、小規模河床形態を乱さないこともその原因の一つであることが予想される。また、村本・藤田²⁾の示した中規模河床形態の領域区分図による $5 < B/h < 10$ での short diagonal bars の領域では、小規模および中規模の河床形態スケールが同程度と考えられ、両者の強い相互干渉のもとに河床形態が形成されていることから、従来いわれている小規模河床形態とりわけ砂堆特性を水路幅の影響を考えずに検討することには問題があるように思える。また逆に、 $B/h < 5$ のように水路幅が極端に小さいような条件での二次元的河床形態のデータが、実河道のように幅広い河床に三次元的に形成される小規模河床形態の特性を説明し得るのかという疑問も残る。河床形態の三次元性に関して、芦田・奈良井³⁾は水路中央部と側壁近くとで河床縦断形状特性が著しく異なり、側壁近くでは砂州の特性が顕著になる場合もあることを指摘しているが、このことは、河床の流れに対する抵抗は河床面全体の凹凸特性に関係するはずであるから、河床形態の三次元的特性の検討が必要であることを示唆している。

本研究では、 B/h が比較的小さい範囲($1 < B/h < 10$)での十分発達した河床形態特性と B/h との関係を、とくに河床形態が二次元的であるか三次元的であるかに注目して、実験的に明らかにすることによって河床形態に及ぼす水路幅の影響について考察しようとするものである。

2. 実験の概要とデータ処理

実験の概要 実験の目的は、移動床上に十分発達した河床全体として定常状態での河床形態の水路横断方向構造の解明および水路幅の違いによる河床形態の変化特性を明らかにすることである。用いた水路は幅、高さとも50cmの長方形断面水路で、水路部全長が20mであるが、薄い鉄板で仕切ることによって水路幅を10cm, 20cm, 30cm, 40cmおよび50cmの5つの場合に変えて実験を行なった。給砂は水路上流端に設けられている連続給砂可能なエレベーター式給砂装置によって行なった。実験方法については、まず水路床に約10cm厚になるように供給砂と同じで図-1に示すような中央粒径が0.6mmのはほぼ均一な粒径の砂を敷き、所定の流量および給砂量のもとに通水し、河床が平均的に平衡状態になった後、河床の縦断形状を測定する。

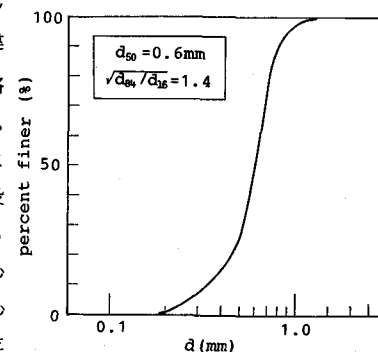


図-1 使用砂の粒径加積曲線

河床が平衡状態になったか否かは、平均的な河床勾配および水面勾配が時間的に変化しなくなりしかも両者がほぼ等しくなるということと、水路上流端からの給砂量と下流端からの流出砂量が等しいかどうかという条件を用いて判定したが、一つの実験について最低20時間は通水した。河床縦断形状の測定は、水路幅が10 cmのものについては河床形態がほぼ完全に二次元的であったので水路中央1測線についてのみ、水路幅が20 cm, 30 cmおよび40 cmでは中央測線およびそれと左右側壁とのほぼ中間の2測線の計3測線について、また水路幅が50 cmの実験では5測線について行なう。実験条件は表-1に示すとおりであって、流量および給砂量を一定にして水路幅のみを5通り変化させる実験を1組として6組の実験、合計30Run行なった。なお表-1には水路中央測線の Zero-up-cross 法による河床波の平均波高 $\bar{\Delta}$ および平均波長 $\bar{\Lambda}$ も示している。

表-1 実験条件

Run No.	B (cm)	q (cm ² /s)	q ₀ (cm ² /s)	h ₀ (cm)	R ₀ (cm)	i ₀ (×10 ⁻³)	Δ (cm)	Λ (cm)	Run No.	B (cm)	q (cm ² /s)	q ₀ (cm ² /s)	h ₀ (cm)	R ₀ (cm)	i ₀ (×10 ⁻³)	Δ (cm)	Λ (cm)
1	50	400	0.222	8.55	7.83	2.41	2.22	71.3	16	30	320	0.167	7.43	6.57	2.63	2.07	59.5
2	50	400	0.167	8.37	7.44	2.39	2.21	80.9	17	30	240	0.167	5.31	4.55	2.46	0.69	35.8
3	50	400	0.111	9.10	8.24	1.89	2.02	87.5	18	30	285	0.0413	6.67	5.77	2.27	0.88	57.2
4	50	320	0.167	7.64	7.12	2.49	1.12	47.1	19	20	400	0.222	6.14	3.83	2.72	0.88	43.0
5	50	240	0.167	5.74	5.35	2.58	1.21	59.9	20	20	400	0.167	7.73	5.55	2.33	1.26	60.5
6	50	285	0.0413	6.78	6.10	1.73	1.18	63.8	21	20	400	0.111	8.82	6.67	2.20	1.24	53.7
7	40	400	0.222	7.61	6.92	3.53	2.08	73.4	22	20	320	0.167	5.78	3.99	2.49	0.70	39.4
8	40	400	0.167	8.61	5.44	2.38	2.58	95.6	23	20	240	0.167	5.14	3.85	2.31	0.51	34.6
9	40	400	0.111	9.64	8.26	1.42	2.61	78.4	24	20	285	0.0413	6.30	4.54	1.90	0.54	54.6
10	40	320	0.167	6.57	5.75	2.29	1.44	56.1	25	10	400	0.222	6.70	3.31	3.69	0.83	35.8
11	40	240	0.167	5.72	5.29	3.01	0.92	45.1	26	10	400	0.167	6.35	3.06	2.31	1.29	67.2
12	40	285	0.0413	6.86	6.02	1.75	1.06	53.3	27	10	400	0.111	7.20	3.89	2.00	0.97	74.0
13	30	400	0.222	8.22	6.99	2.52	1.99	67.0	28	10	320	0.167	7.10	4.31	2.86	0.42	38.9
14	30	400	0.167	9.10	7.71	2.02	2.13	71.8	29	10	240	0.167	5.07	2.80	2.84	0.29	31.7
15	30	400	0.111	9.69	8.63	2.49	2.43	80.1	30	10	285	0.0413	6.99	3.69	1.99	0.56	52.8

データ処理 自動河床面測定器によって記録紙上に連続的に得られた河床縦断形状に関するデータは、水路流入部および流出部の影響を考慮して水路の上下流端からそれぞれ3 m区間を除く14 m区間のものについて、ディジタイザーによって基準面からの河床高 Z_1 を水路縦断方向に5 cm間隔で280点読み取り、最小自乗法によって平均河床高 Z_0 およびその勾配 i_0 を決定する。平均河床高からの河床高(≡ $Z_1 - Z_0$)の変動の分散あるいは波数スペクトル密度等を計算するが、波長および波高は図-2に示すように基線を Z_0 にするZero-up-cross 法によって決定する方法と、元の記録紙上で波高が5 mm以上の連続した全ての波を読む方法(trough-to-trough 法)の両方によって求める。また、径深 R_0 に対する側壁の補正はEinstein⁴⁾の方法によって行なった。

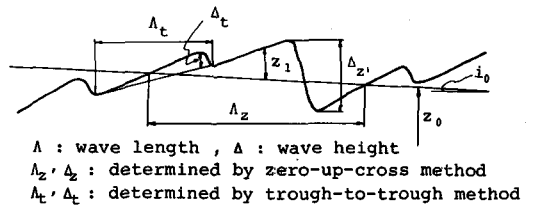


図-2 波長および波高の定義

3. 河床形態の水路横断方向特性

図-3は50 cm幅水路の横断方向5測線の河床縦断形状の一例を示したものである。太い実線で示される中央測線($y/(B/2)=0$, B : 水路幅, y : 水路中央測線からの横断方向距離)と細かい点線および一点鎖線で示される側壁に近い測線($y/(B/2)=0.64$)での縦断形状を比較すると、平均的な波長・波高とも側壁に近い方が大きいことが認められ、河床形態は水路横断方向には一様でないことがわかる。また、側壁に近い測線ほど卓越波数ははっきりしており周期性が強いようである。細い実線および破線で示される $y/(B/2)=\pm 0.32$ の測線についての河床は不規則性が比較強いことがわかる。また、水路中央測線について右左対称の位置にある測線、すなわち、 $y/(B/2)=0.32$ と -0.32 の測線および $y/(B/2)=0.64$ と -0.64 の測線とでは、平均的な波高、波長あるいは

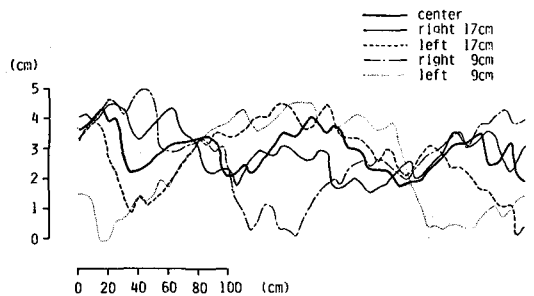


図-3 河床縦断形状 (Run2)

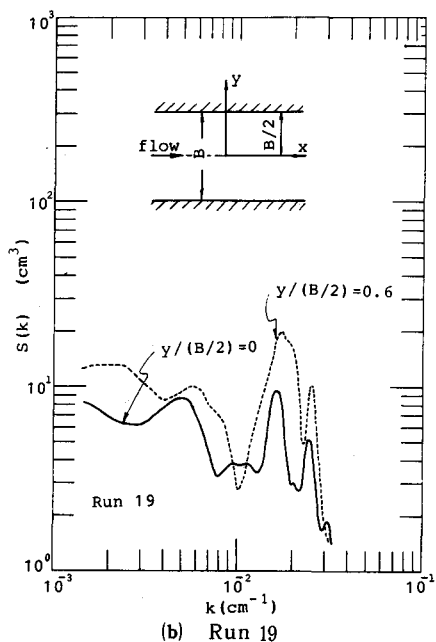
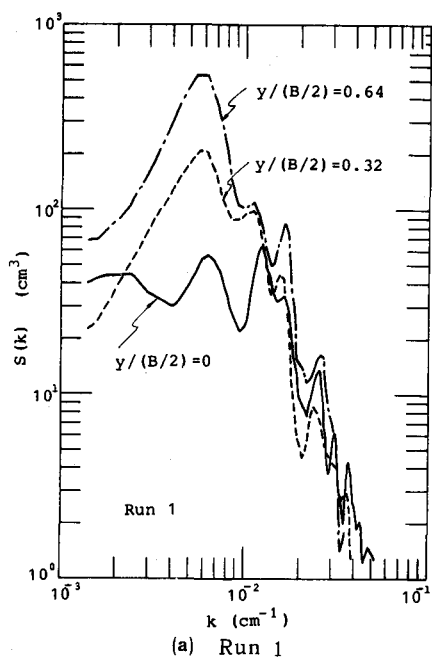


図-4 各測線の波数スペクトル

は周期性などの特性はほとんど同じであるが、位相差があることがわかる。図-4(a)および(b)は同一流量、流砂量の条件で水路幅がそれぞれ50cmおよび20cmであるRun 1とRun 19の縦断河床の波数スペクトル密度を示したものである。まず、Run 1についてみると、波数 k が $\sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1} (\equiv k_h)$ より大きい高波数域に水路横断方向にスペクトル密度の変化しない領域が認められる。 $k < k_h$ の低波数域にみられる卓越波数に対するスペクトル密度は側壁に近い測線ほど大きく、側壁に近いほど規則的でしかも河床変動が大きいことが認められる。低波数域での卓越波数を k_e とすると、 k_e は3測線とも $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 程度であって、 $k_e \cdot B \approx 0.3$ である。 k_e と k_h の間にスペクトル密度がやや卓越したものが見られるが、とくに水路中央測線で相対的に顕著であって、この卓越波数を k_m とすると、 $k_m \approx 1.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ である。 $y/(B/2) = 0.32$ および 0.64 の測線でもあまり顕著ではないが同様な波数のスペクトル密度が大きくなっている。また、 $k_m \cdot h_0 \approx 0.1$ である。つぎに、水路幅が比較的小さいRun 19についての(b)図をみると、中央測線($y/(B/2) = 0$)と側壁に近い測線($y/(B/2) = 0.6$)とでのスペクトル密度はほとんど同じ形をしており、その大きさも側壁近くがやや大きいもののほとんど変りなく、河床形態は二次元的であると考えられる。また、低波数域での卓越波数 k_e は顕著ではなく、上記の $k_m (\approx 1.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1})$ のスペクトル密度がとくに卓越していて、 $B = 50 \text{ cm}$ の場合と同様 $k_m \cdot h_0 \approx 0.1$ となっている。図-5は中央測線の河床変動に対する $y/(B/2) = 0.32$ および 0.64 測線での河床変動のコヒーレンスをRun 1について示したもので、図-4(a)の卓越波数 k_m および k_e に対するコヒーレンスは $0.7 \sim 0.85$ と大きく、これらの波数の変動は水路横断方向に線型的に伝わっていると考えられる。

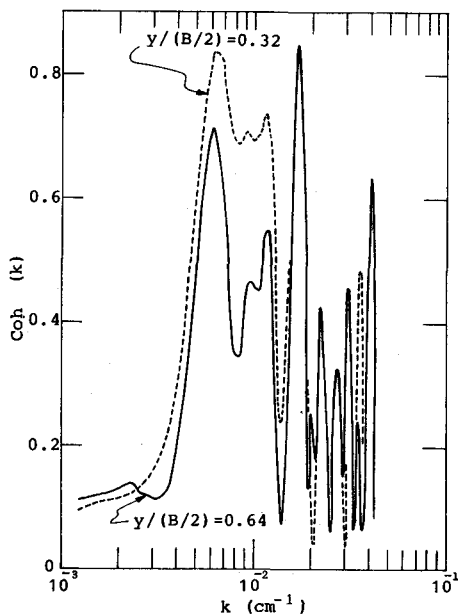


図-5 中央測線と各測線間のコヒーレンス

4. 水路幅の河床波特性に及ぼす影響

図-6 (a)は幅50 cm水路の中央測線の河床変動に関する波数スペクトル密度を示したものであって、Run 1のようにスペクトル密度がはっきりと2つのピークをもつ多重構造の河床状態のものと、Run 4のようにピークが1つしかない単構造のものがあるが、比較的低波数域にあるスペクトル密度は顕著であってそれに対

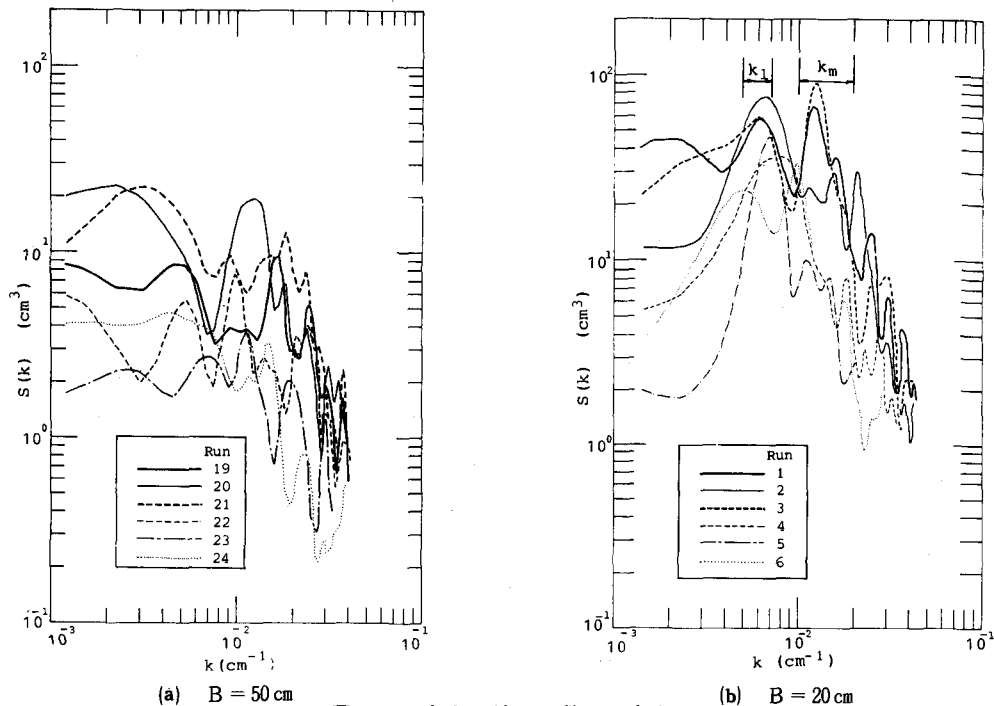


図-6 中央測線の波数スペクトル

応する波数 k_e は水理量が変わっても $\sim 6 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ($k_e \cdot B \approx 0.3$) でほぼ不変であり、この k_e は $B = 50$ 水路に発生する河床波の波数と考えることができよう。したがって、 k_e は水路幅に規定されているとみなせるが、いま k_e に対する波長の2倍を λ_B とすると、 $k_e \cdot B \approx 0.3$ は $\lambda_B/B \approx 13$ であって従来いわれている砂州の波長と水路幅の比 $\lambda_B/B = 7 \sim 15^{1)}$ に対応している。一方、高波数側のスペクトル密度のピーク特性およびそれに対応する波数 k_m は水理量によって大きく変わっており、本実験の場合水深が大きければピーク値は大きくなっている。水深の比較的大きいRun 1, 2 および 3 は全体的にスペクトル密度は大きく、水深の小さいRun 4, 5 および 6 では小さくなっている。図-6 (b)に示される幅が20 cmと小さい水路では、図(a)と流量および流砂量が同一の実験であるけれども、図(a)に比してスペクトル密度は全体に小さい。また、 k_1 に相当するものが顕著でなく、 k_e と k_m の区別ができてくりに、 k_m に対応するスペクトル密度が k_e に対するものより相対的に大きくなっている。卓越波数の水路幅に対する変化を調べたのが図-7であって、6種類の水理条件で得られたものの平均値を示している。水路幅が20 cmより小さいときは k_m と k_e は区別できなくて卓越波数が1つの単構造の河床形態となっているが、水路幅が大きくなるにつれて2つの卓越波数が存在する多重構造となっている。 k_e については、水路中央測線の方が $y/(B/2) = 0.6$ 測線よりやや大きくなっているが、ほぼ $k_e \sim B^{-1}$ の関係、すなわち卓越波長は水路幅に比例する関係が認められる。一方、 k_m は水路幅の変化にはほとんど影響されないことがわかる。ちなみに、 k_m と水深 h_0 との関係を調べると、 $k_m \cdot h_0 = 0.07 \sim 0.13$ とばらついているものの $k_m \cdot h_0$ はほぼ一

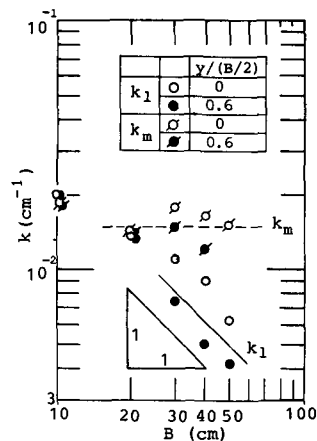


図-7 卓越波数と水路幅の関係

定しており、 k_m は水深に強く関係していることが認められた。図-8は、水路中央測線および $y/(B/2)=0.6$ 測線のZero-up-cross法(Z-C法)およびtrough-to-trough法(T-T法)で計算した平均波長 $\bar{\lambda}$ と波数スペクトル密度図から求められた $1/k_m$ との関係を示したものである。黒丸で示されるT-T法による $\bar{\lambda}_t$ をみると、 $y/(B/2)=0.6$ 測線より $y/(B/2)=0$ 測線の方がやや大きくなっていて、側壁近くでは $1/k_m$ と $\bar{\lambda}_t$ とはかなり一致しているが、中央測線近くでは $\bar{\lambda}_t$ は $1/k_m$ より全体的に小さくなっている。一方、白丸で示されるZ-C法で求めた $\bar{\lambda}_z$ は、 $y/(B/2)=0$ 測線については $1/k_m$ と比較的よく一致しているが、 $y/(B/2)=0.6$ 測線ではばらつきが大きい。これらのことから、Z-C法によって波長を論じる場合には水路横断方向特性をも同時に論じることが必要であるが、T-T法では砂州に対応するような大波長の影響が除外できるので、小規模河床形態を論じる場合には水路横断方向には一様とみなせるかもしれない。しかし、図-9の $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ あるいは平均波高比 $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ と B/h との関係をみると、 $B/h > \sim 4$ では $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ あるいは $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ は B/h の増加とともに減少する傾向が認められるが、 $B/h < \sim 4$ では平均的には1に近く、 $B/h < \sim 4$ ではZ-C法でもT-T法でも同じ結果になる。このことは、 $B/h < \sim 4$ では砂州が生じないか、砂州のスケールが砂堆のスケールより「小さく」なりその影響がなくなるため、水路横断方向に河床が一様に近くなっていることを示している。

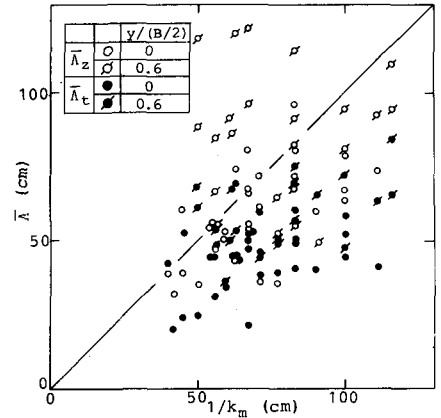


図-8 卓越波長と平均波長との関係

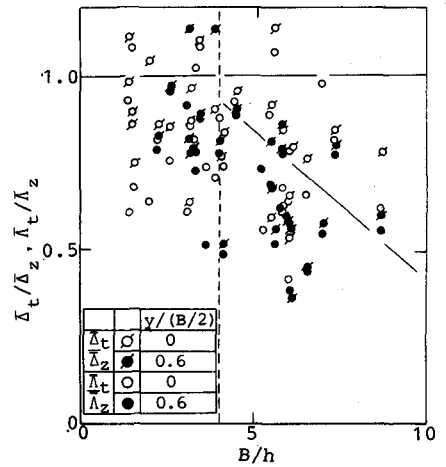


図-9 $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ および $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ と B/h の関係

5. 河床の抵抗と水路幅の関係

図-10は平均流速 v と摩擦速度の比 v/u_* と τ_* との関係を示したものである。本実験の場合、 $50 < R_b/d < 140$ の範囲であって、従来の B/h が10以上の実験の結果では図中の実線が平均的な値であるが、例外はあるが、 $B/h > 4$ の白丸で示すデータはほぼ従来のデータの傾向と一致しているが、黒丸で示す $B/h < 3$ の場合では、従来のものより抵抗がかなり小さくなっていることがわかる。 v/u_* に及ぼす B/h の影響をみたのが図-11であって、同一流量および同一流砂量での実験結果を1組として直線で結んで示している。同一直線で結ばれた点が必ずしも同じ摩擦速度に対応してはいないけれども、 $B/h \approx 4$ で抵抗特性が変化し、 $B/h < \sim 4$ では抵抗が小さくなり、 $B/h > \sim 4$ では B/h によってはほとんど変化しないことが巨視的には認められる。このことは、同じような水量でも B/h がある程度より小さくなれば河床形態が二次元的になり、しかも河床高の変動量が小さくなるというこれまでの議論からもある程度予想されるところではあるが、河床形態の二次元性、三次元性についてもう少し検討してみる必要がある。すなわち、水路中央測線での河床形態特性が側壁近くでのものとどのように異なるかについて調べる必要が

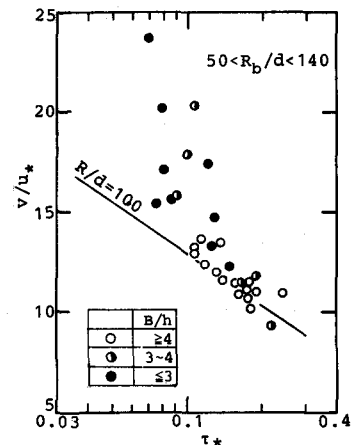


図-10 v/u_* と τ_* の関係

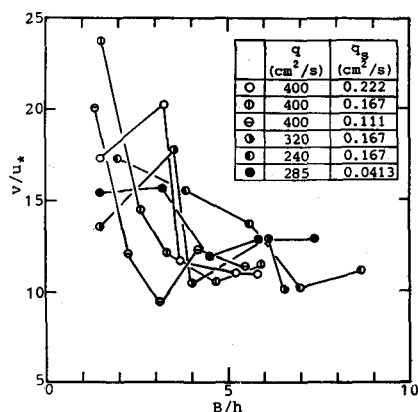


図-11 V/u_* と B/h の関係

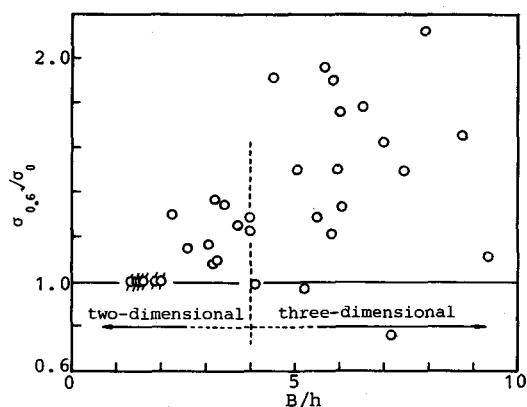


図-12 $\sigma_{0.6}/\sigma_0$ と B/h の関係

あり、その一例として図-12に $y/(B/2)=0.6$ 測線での河床高の分散 $\sigma_{0.6}$ を中央測線 ($y/(B/2)=0$) での分散 σ_0 で無次元化した $\sigma_{0.6}/\sigma_0$ と B/h との関係を示した。 $B/h < \sim 4$ では $\sigma_{0.6}/\sigma_0 = 1.0 \sim 1.4$ となっており、中央測線と $y/(B/2)=0.6$ 測線とでの河床高変動の大きさはあまり変わらないことがわかるが、 $B/h > \sim 4$ では若干の例外はあるものの $\sigma_{0.6}/\sigma_0$ はかなり大きくなっていて、 $\sigma_{0.6}/\sigma_0 = 2$ 程度のもも認められる。このことから変動の大きさという点からみても、 $B/h < \sim 4$ では河床形態はほぼ二次元的、 $B/h > \sim 4$ では三次元性が強くなっていると考えられる。

6. あとがき

本研究は、同一流量、同一流砂量条件でも水路幅の違いにより河床形態が著しく異なるため、従来の実験室規模でのデータが得られた水路幅の影響を考えずに同等に扱うことに疑問を感じ、水路幅の河床形態に及ぼす影響について実験的検討を加えようとしたもので得られた主な結果は以下のとおりである。

1) 水路幅 B と水深 h の比が比較的大きい場合 ($\sim 4 < B/h < \sim 10$) では、スペクトル密度が卓越する波数がいくつか存在し、河床波は多重構造を呈するが、卓越波数は水路幅に規定されるもの (k_e) と水深に強く関係するもの (k_m) であって、 $k_e \cdot B = 0.15 \sim 0.3$ 、 $k_m \cdot h = 0.07 \sim 0.13$ である。一方、水路幅が極端に小さい場合 ($B/h \approx 1 \sim 2$) では、スペクトル密度が卓越する波数は1つしかない単構造となる。

2) 卓越波数 k_m に対する波長 $1/k_m$ と Zero-up-cross 法で求めた平均波長との対応は、中央測線についてはほぼ一致しているものの側壁に近い測線でしかも $B/h > \sim 4$ のときは $1/k_m$ の方がかなり大きい。また、trough-to-trough 法による平均波長は中央、側壁測線とも大差なく、 $1/k_m$ より全体的に小さいが、強い相関がある。

3) 同一流量、同一流砂量条件でも、 $B/h < \sim 4$ では河床形態は二次元的となりしかも河床の抵抗は小さくなるが、 $B/h > \sim 4$ では河床形態は三次元的となり、抵抗は増加する。

参 考 文 献

- 1) 水理委員会 (移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会) : 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210号, 1973.
- 2) 村本嘉雄・藤田裕一郎: 中規模河床形態に関する研究, 京都大学防災研究年報, 第20号B, 1977.
- 3) 芦田和男・奈良井修二: 河床形態の変動特性に関する研究—その統計的構造について—, 京都大学防災研究年報, 第12号B, 1969.
- 4) Einstein, H.A.: The bed load function for sediment transportation in open channel flow, U.S. Dept. of Agric., Soil Conserv. Serv. Techn. Bull. No. 1026, 1950.