

河床変動のスペクトル特性について

京都大学防災研究所 正会員 芦田 和 男
京 都 大 学 大 学 院 学 生 員 奈良井修二

1. 緒言

河川形態や河床変動の問題は河川工学における基本的課題であって、従来より種々の観点から論議されている。その接近の方法は、大別すると、境界条件を単純化して土砂水理学的手法を展開しその一般的性質を把握しようとする立場、実態をできるだけ忠実に把握し内在する法則性を追究しようとする立場および経験法則を追求するいわゆる *regime theory* と呼ばれる立場となる。以上いずれの立場も重要であって、それぞれの立場が統一されてはじめてこの問題が解明されたといえるが、現状ではそれぞれの立場での研究も必要であろう。ここでは第2の立場に立って変動の特性を考察しよう。一般に移動床の問題は、規則性や不規則性に支配されかなり複雑であって、*stochastic* な解析を必要とする。例えば河床形態にしてもその区分は人によりまちまちである。最近 *ASCE* の *Task Force on Bed Forms*¹⁾でこれに関する定義が与えられているが、その区分も定性的であり、区分の基準は必ずしも明確でない。これはこのような現象に対する定量的評価が十分に行なわれていないこと、各スケールごとの変動の特性の相異が明確に把握されていないことによるものであって、この方向の研究の重要性が理解される。

著者らは実験水路での河床変動に対して *stochastic* な解析法を試み²⁾2, 3の興味ある結果をえた。さらに実際の河川の河床変動に対して同様な解析を試み、注目すべき成果をえた。³⁾

しかしながら、河床変動の三次元的な特性や長波長域でのスペクトル特性に関する知識は不十分であった。

この研究は、従来明確でなかった長波長域でのスペクトル特性について実験的に検討するとともに河床変動の三次元的特性ならびに移動特性に対してクロススペクトル解析の適用性を論じかつ得られた結果について若干の考察を行ったものである。

2. 実験装置および方法

実験水路：幅 60cm，長さ 150m。

実験用砂：平均粒径 0.76mm の均一砂をこう配 $1/500$ に敷く。

実験の条件：流量 $20 \ell/s$ ，水深 7.0cm，平均流速 47 cm/s ，

Froude 数 0.60。

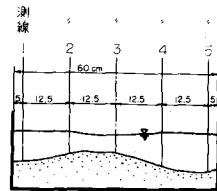
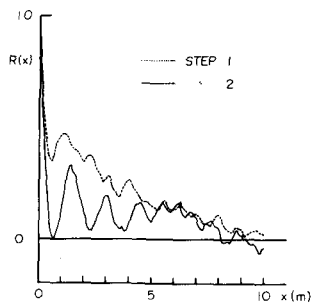


図 - 1 測線位置図

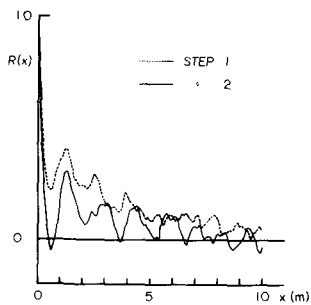
河床高の測定：河床高は超音波河床測定器を用い、図 - 1 に示す横断方向 5 測線に沿い、縦断方向に 10cm 間隔で上下流端の影響が入っていないと定常的であると考えられる 100m の区間にわたって測定した。 $20 \ell/s$ の一定流量を 1 時間流し水を止めた後測定した河床を STEP 1，さらに 1 時間通水した後の河床を STEP 2 とした。

3. 実験結果の解析とその考察

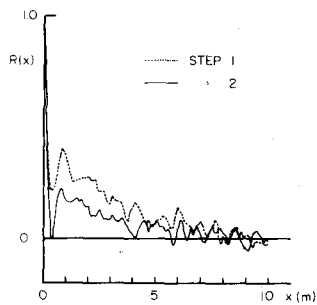
(1) 相関係数およびスペクトル特性



図－2(1) 自己相関係数
(測線 1)



図－2(2) 自己相関係数
(測線 2)



図－2(3) 自己相関係数
(測線 3)

図－2(1)～2(3)は各測線に沿う河床高の系列の自己相関係数 $R(x)$ である。ずらし x を大きくしても $R(x)$ が 0 にならないのは初期河床を設定する際に入った大きなスケールのノイズ成分の影響であろう。この影響は時間とともに次第に減少し特有の河床形態に発達することが、 $R(x)$ の STEP 1 および 2 における変化から認められる。STEP 2 が十分発達した河床形態になっているかいないかは明確ではないが、いずれにしても初期河床の影響が消失するまで非常に長時間を必要とすることが知られた。

このことは後に述べるスペクトル特性にもみられる。

側壁近傍における測線 1 と 2 では周期性が顕著にあらわれているのに対し、中央部の測線 3 では明らかではない。このことは河床変動に内在するこの程度のスケールの周期性の原因として側壁の存在が重要な要素であることを意味している。

つぎに乱れの研究における最小渦寸法を定義する次式，

$$\left. \frac{d^2 R(x)}{dx^2} \right|_{x=0} = - \frac{2}{\lambda_0^2}$$

を用いて河床変動に存在する最小スケール λ_0 を求めた。結果は表－1 に示すように水路中央部でやや小さくなる傾向はあるが、ほぼ一定値で水深の約 2～3 倍である。

表－1 最小スケール λ_0 の値

	測線 1	測線 2	測線 3	測線 4	測線 5
STEP 1	21.8 cm	18.1 cm	15.6 cm	16.8 cm	19.6 cm
STEP 2	20.4	18.0	15.4	18.6	19.0

後で述べるように Bar のスケールが河幅の約 2.5 倍であることを考え合せると興味ある結果であろう。

データの個数 $N = 1000$ ，最大ずらし数 $M = 100$ として得られた各測線についてのパワースペクトルは図－3(1)～3(3)のとおりである。

STEP 1 では河床は発達期にあり，初期河床に存在したノイズ的変動の影響を受けて特徴的波長は明瞭でない。STEP 2 では 4 m 以上の波長域のパワーも減少し，特徴的な河床形態に発達している。さらに水路中央部と側壁よりでスペクトルの形が非常に異なることは注目に値する。測線 1 および 2

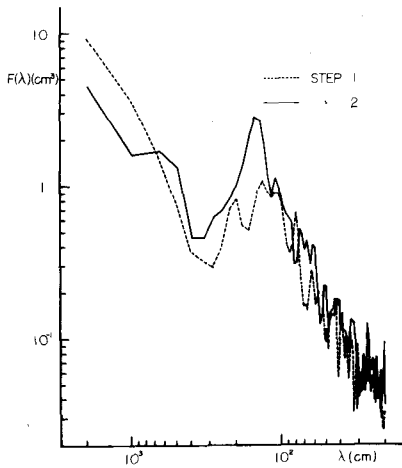


図-3(1) パワースペクトル (測線 1)

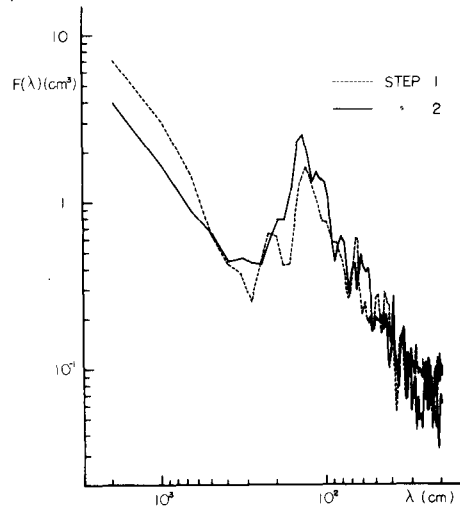


図-3(2) パワースペクトル (測線 2)

では波長 $\lambda = 150 \text{ cm}$ (水路幅の 2.5 倍) に卓越するピークを持つ。これは Bar のスケールである。これに対して、水路中央部の測線 3 では卓越波長が短かく、Bar の半波長付近の変動が卓越しているとともに、測線 1 および 2 よりランダム性が強い。

1 m 以下の波長域において STEP 2 の測線 1 および 2 でパワーが連続的に変化せず、 $\lambda = 90 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 30 \text{ cm}$ および 30 cm 以下の三つのスペクトル帯でステップに減少しているのがみられるが、これは河床変動に一つのユニットが存在することを示唆しているとも考えられ、今後さらに検討すべき興味ある事実であろう。

STEP 2 の測線 1 のスペクトルにおいて $\lambda = 6 \text{ m}$ (河幅の 10 倍) 付近にパワーの増加があらわれている。これが今後発達するかどうかはさらに長時間の通水実験によって検討することが必要であるが河川の大規模な乱れの最大スケールが河幅の 10 倍程度である⁴⁾ことから興味のある点であろう。

(2) 河床形状の三次元的構造

各測線に沿う河床高のクロススペクトルを用いた解析により河床形状の三次元的構造について考察しよう。

STEP 2 において測線 1 を基準として他の測線間 Co-spectrum $\text{Co}_{ii}(\lambda)/\lambda$ [$i = 1, 2, 3, 4, 5$] を求めたものが図-4 である。これより $\lambda = 150 \text{ cm}$ 、 90 cm について $\text{Co}_{ii}(\lambda)/\lambda$ を水路横断方向にプロッ

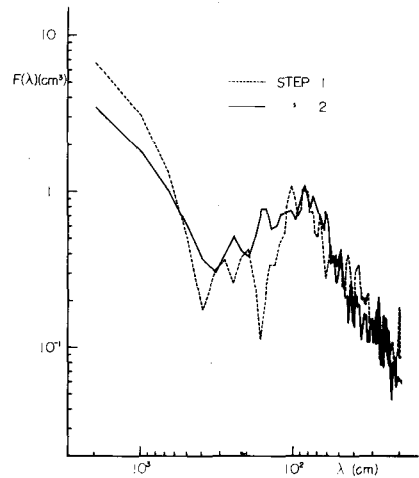


図-3(3) パワースペクトル (測線 3)

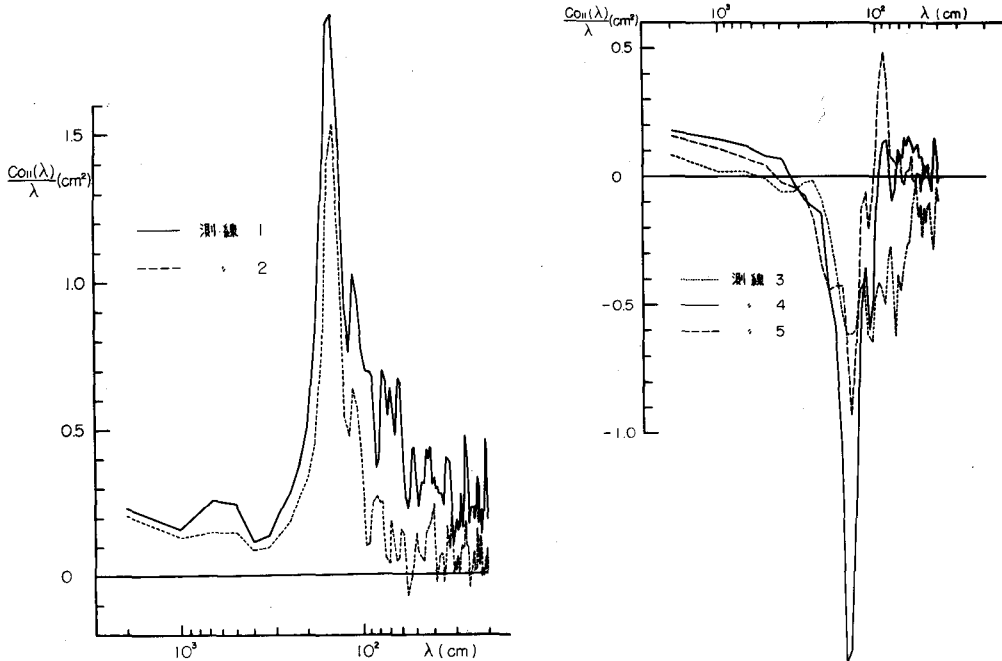


図-4 Co-spectrum $Co_{ii}(\lambda)/\lambda$

トすると図-5のとおりである。このことからつぎのことが認められる。

a) 水路幅内に単一Nodeの振動特性を持つ河床形状が存在する。これは従来よりBarと呼ばれるもので波長は水路幅の約2.5倍である。この値はFroude数などにより変化するが実際河川における値とはほぼ同じである。

b) 水路幅内に二つのNodeの振動特性を持つ河床形状が存在する。これは交叉状あるいはウロコ状の変動とも呼ばれるものである。この河床形状をBarと区分すべきかDuneと区分すべきかは従来の研究でも明らかでない。aおよびbの河床形状の位相上の相対的關係はいまのところ明らかでないが、今後検討すべき問題である。

c) bに述べたスケールよりもさらに小さなスケールの変動が存在するが、これは水深に規制される変動であり、その特性の解明は今後の課題であるが、前述のように最小渦に対応するスケールが存在するであろう。

a, bで述べた事実をさらに検討するために、各波長について横断方向の位相のずれを示したものが図-6である。 $\lambda=150\text{cm}$ のスケールの波動成分は半波長で水路幅を横断しているのに対して、 $\lambda=90\text{cm}$ のスケールのものは一波長で水路を横断している。これはa, bで述べた事実と一致する。

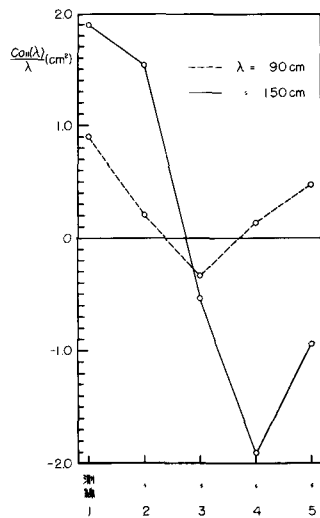


図-5 $Co_{ii}(\lambda)/\lambda$ の横断分布

(3) 河床形状の移動特性

種々のスケールの変動成分が共存する河床において、それぞれの変動成分は一般に異なる移動特性を有している。これらの関係を解析するためには Δt 時間前後の河床形状系列のクロススペクトルによる方法が有力であろう。

クロススペクトルで解析される位相のずれは、 $\theta + 2n\pi$ (n : 整数) である。変動成分が自己の波長以上に移動しないように Δt を定めると、 $n = 0$ となり、移動距離は容易に求まる。しかし一般には各波長の位相のずれを追跡することにより n の値を推定しなければならない。

しかし水路幅および水深などによってそのスペクトルが切断され、移動特性が不連続である場合には追跡が困難であって、 $n = 0$ になるように Δt を定める必要がある。

今回の実験への適用については、STEP 1と2でそのスペクトル特性にかなりの相異があり移動速度を求める特定の波長成分を定め難いが、Barに相当する $\lambda = 150\text{cm}$ のものについて移動速度を求めた。位相のずれの追跡図の1例は図-7のとおりであって、これから位相のずれ $\theta_\lambda + 2n\pi$ を求め、

$$v_\lambda = \frac{\lambda \cdot (\theta_\lambda + 2n\pi)}{2\pi \cdot \Delta t}$$

から移動速度を計算した結果は表-2のとおりであって移動速度の推定が可能であった。

表-2 移動速度 ($\lambda = 150\text{cm}$ について)

	測線1	測線2	測線3	測線4	測線5
移動速度 cm/min	3.59	3.63	n の値推定不可能	3.37	3.34

これは従来の研究から得られたものに比してかなり小さい値であるが、いろいろのスケールの変動成分が混在する場合のBarの移動速度は、これらの変動成分の影響を受けておそくなることにもよるものであろう。これらについての一般的な性質は今後さらに数多くの実験によって検討しなければならないが、クロススペクトル解析により各波長成分ごとの移動速度を求めうることは興味がある。

4. むすび

本実験は従来の分類によればRipples and Dunesの領域のものでかなり不規則な変動を呈しているが、各測線に沿う河床高のスペクトル、測線間のクロススペクトルおよび Δt 時間前後の系列のクロススペクトルを求めることにより、河床形状に内在する各波長成分の特性、河床形状の三次元的構造および移動特性を考察することができた。こうした手法をさらに水理条件や河道条件の異なる他の場合に適用する

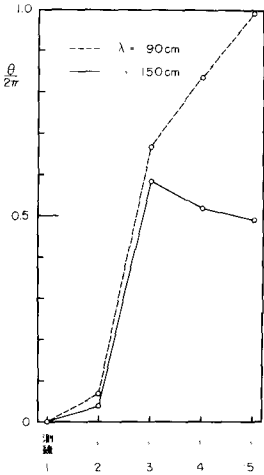


図-6 横断方向の位相のずれ

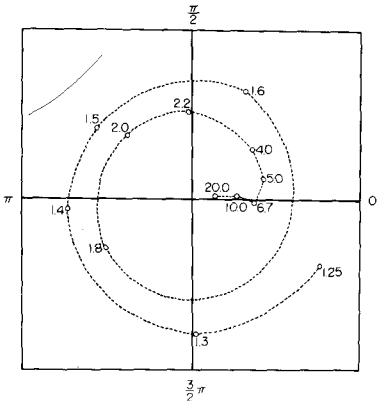


図-7 位相のずれの追跡

図中の数字は波長 $\lambda(\text{m})$ を示す

ことにより複雑な河床形態や河床変動の実態がさらに明確になるであろう。

参 考 文 献

- 1) Task Force on bed forms in alluvial channels of the Committee on Sedimentation, A.S.C.E. :
Nomenclature for bed forms in alluvial channels. Proc. of A.S.C.E., HY3, May, 1966
- 2) 芦田和男・田中祐一朗：砂漣に関する実験的研究(3)，京大防災研究所年報，第10号，昭．42
- 3) 芦田和男：富士川の河床変動に関する研究，京大防災研究所年報，第11号，昭．43
- 4) 余越正一郎：河川の大規模乱れ，京大防災研究所年報，第10号，昭．42
- 5) Lumley L.J. and Panofsky H.A. : The structure of atmospheric turbulence, Interscience ,
1964
- 6) 芦田和男・塩見靖国：水路における砂礫堆の水理特性について，京大防災研究所年報，第9号，
昭．41