

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

奈良井 修二

河床変動の発達過程に関する研究は、従来から多くの研究者によって行われてきているが、その取り扱いはいは主として、砂選の幾何的スケールとしての平均波長、波高の時間的变化、あるいは流れにおよぼす抵抗の時間的变化を調べたものが多く、河床変動の発達過程そのもののメカニズムの全容を理解するには不十分と言える。著者らは、現象を明確に把握するため統計的手法を導入して、河床変動のスペクトル特性に関して種々の特性を明らかにすることができた。本文においては、一連の実験の解析結果から Lower regime における河床変動の波数帯の領域区分による河床形態の分類、各波数領域における発達過程および平衡状態、水流におよぼす河床変動の抵抗の問題、さらに各河床形態の発生原因について検討してみる。

実験条件

実験に用いた水路は、断面 $60 \times 60 \text{ cm}$ 、こう配 $1/500$ 、長さ 150 m の鋼製水路で、河床材料は平均粒径 0.76 mm ($U_{*c} = 2.0 \text{ cm/sec}$) である。実験条件は表-1 の各 case について、初期条件を flat bed とし、断続通水により各通水時間 T までの河床を水路中心線 ($y = 0 \text{ cm}$)、側壁近傍 ($y = \pm 25 \text{ cm}$) に沿い、横断方向に 10 cm 間隔で河床高を測定した。case I については $y = \pm 12.5 \text{ cm}$ について測定している。測定区間は case I, II, IV で 100 m 、III は 60 m である。同一流量について実験を繰返したのは、現象の再現性と平衡状態の検討のためである。なお、この実験では捨砂をしていない。このため case II については上流部で若干の河床低下が認められたが、平均的河床こう配に対する影響は無視しうる程度のものではあった。また、平均水深は各 Case 終了前のものである。

各 Case での河床形態を観察すると、case I において $T = 1, 2 \text{ hr}$ で dune, ripple が顕著であるが、 $T = 7 \text{ hr}$ では alternating bar が卓越している。case II では dune が、case III, IV では alternating bar が顕著である。各 case の水理条件による従来の分類に従うと、各 case とともに dune and ripple の regime に属している。

case	q	i	h	u	u_*	Fr	T
I	20 l/s	$1/500$	7.1 cm	47 cm/sec	3.7 cm/sec	0.56	$1, 2, 7$
II	20	$1/500$	8.6	38	4.1	0.42	$4, 10, 13$
III	10	$1/500$	4.0	42	2.8	0.67	$2, 6$
IV	10	$1/500$	3.8	44	2.7	0.72	12

表-1 実験条件

解析結果とその考察 (1). 河床形態の領域区分

各 Case、各通水時間後の $y = \pm 25 \text{ cm}$ での河床変動のパワースペクトルと、 $y = \pm 25 \text{ cm}$ 間のコヒーレンスの計算結果を示したのが図-1, 2, 3 である。通水時間の増加とともに各 Case の特性は類似の性状に発達して行くのが明らかであり、水理条件の異なる河床変動においてもその波数域は三つの領域に区分される。これらの境界を与える波数は、水理条件、通水時間によって若干変化する傾向

があるが、この実験水路ではほぼ一定の値に近い。

これら三つの領域について考察をすると、

a) $k < 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ の領域

スペクトルのひずみから詳細な検討はできないが、初期河床に存在した大スケールの河床変動、あるいは上流部の河床低下による影響があらわれる領域と考えられる。流量の大きい case I, II で、初期においてパワーの減少がみられることは前者の消失する傾向を示し、通水時間の増加とともに再びパワーが増大することは後者のものと考えられる。case III, IV では上流部の河床低下はほとんどみとめられないから、初期河床上の変動成分が一方向的に消失する傾向を明らかにしている。

b) $1.5 \times 10^{-3} < k < 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ の領域

パワースペクトル図ではこの領域の存在は明確ではないが、コヒーレンスの通水時間の増加にともなう変化から、両側壁に沿うこの波数域の変動成分は顕著な規則的変動の形態に発達して行くのがみとめられる。位相のずれがクロススペクトル計算から求められるが、コヒーレンスのピーク付近の波数についての $\theta/2\pi \approx 0.5$ で、この領域での河床形態は alternating bar であることがわかる。これは case I: $T=7 \text{ hr}$ と III での観察形態と一致している。河床形態が dune である case I: $T=1, 2 \text{ hr}$ および II においても、コヒーレンスには明らかに alternating bar の波数域が存在していることを示している。この実験水路で発達した alternating bar の半波長は、流量、通水時間によって若干変化するが、水路幅との比は約 2 へ 3 倍であり、実際に河川で観察される値に等しいことを示している。

c) $k > 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ の領域

各 Case におけるこの領域でのパワースペクトルは、そのオーダーは同じ流量でも水理条件によって著しい変化がみられるがそのこう配は、は方向および時間的にほとんど変化がなく 20^{dB} で $-3/2 \sim -5/2$, 10^{dB} で $-1 \sim -3/2$ 程度であって平衡領域も形成していると考えられる。コヒーレンスの値は小さく、バラツキが大きく傾向と見い出せないが、不規則性の強い領域であり、河床の観察から dune, ripple の形態に対応するものと考えられる。

(2). 河床変動の発達過程

上に述べた各領域での河床変動の発達過程はパワースペクトル

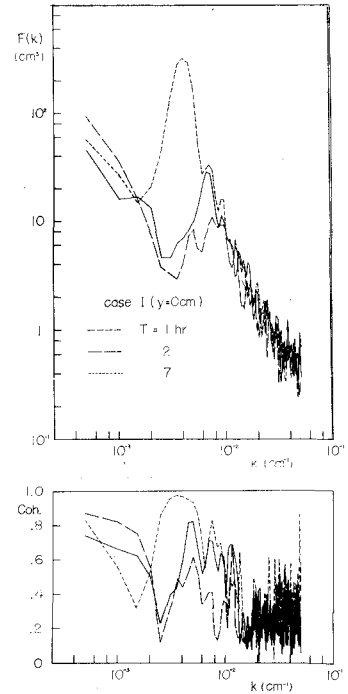


図-1 パワースペクトルとコヒーレンス

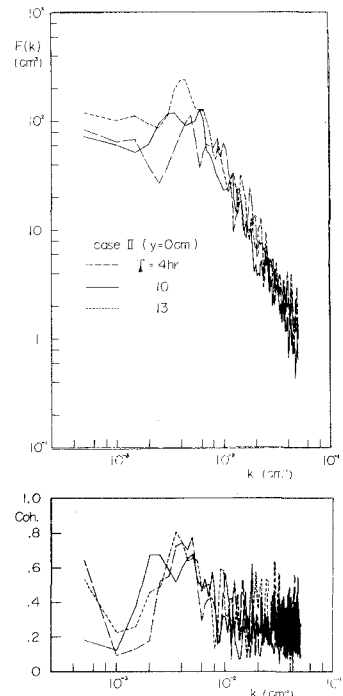


図-2 パワースペクトルとコヒーレンス

ルの時間的变化において著しく異なる挙動を示している。(C)領域ではかなり短時間で平衡状態に到達して、その後の変動の発達は(b)領域に集中されるが、この領域が平衡状態に達するに要する時間は非常に長いことがみとめられる。

そのメカニズムとして考えられるのは、本流のエネルギーはまず(C)領域の高波数域の変動成分に伝達され、この変動成分は水流との相互作用によって発達と移動の平衡状態にある平衡領域と形成して下流へ伝播する。さらにこれらの変動はより低波数領域へ供給され、(b)領域の発達、移動を維持する。そしてこの領域においても本流との相互作用により、変動成分は発達と移動のある平衡状態へ漸近して行く過程と思われる。

図-4は $y = -25, 0, 25 \text{ cm}$ での分散値 σ^2 の時間的变化を示したものである。 $y = 0 \text{ cm}$ では、各 case において時間的变化はほとんどなく、ほぼ平衡状態にあると考えられるが、そのパワースペクトルにおいては低波数域での変化は著しく、平衡状態でのスペクトルの傾向について指摘することはできない。

case I, II では $y = \pm 25 \text{ cm}$ での σ^2 は増加の傾向にあり、本実験での通水時間ではまだ発達期にあることを示し平衡状態についての検討はさらに長時間にわたる通水実験と必要とする。

注目すべき点は、同一流量の case I と II の σ^2 の値が約2倍も異なることである。これはパワースペクトルの(C)領域でパワーが一様に約2倍異なっていることに対応している。このパワーの変化にもかかわらずこのように配は等しく、時間的に変化しない平衡領域も形成している。この事實は、(C)領域での平衡状態は流量によって一意的に規定されないことを示し、この要因としては、断続通水の擾乱によって高波数域の変動が衰減すること、平衡状態への過渡の状態にある、あるいは平衡状態は一意的に存在しないなどの理由が考えられるが、本実験においてこれらを明確にすることはできなかった。今後、現象の再現性、平衡状態の存在性について検討する必要があると考えられる。この内題は case III- $T=6 \text{ hr}$ と IV- $y = \pm 25 \text{ cm}$ での σ^2 の値はほぼ等しいが、そのスペクトルの(b)領域の特性の差異が著しいことにもあらわれている。

(3). 本流によぼす河床変動の抵抗

図-5は平均水深 H の時間的变化を示したものである。再通水時に若干の水位低下がみられるが、これは断続通水による擾

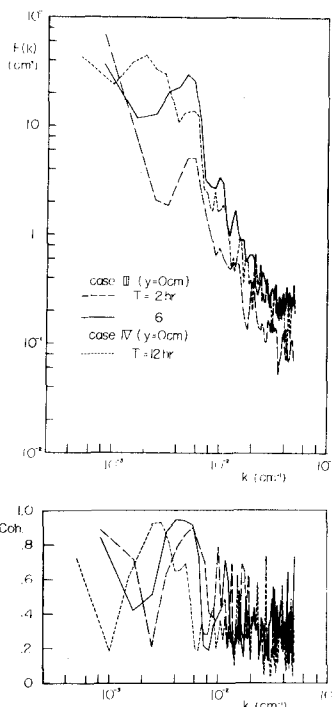


図-3 パワースペクトルとコヒーレンス

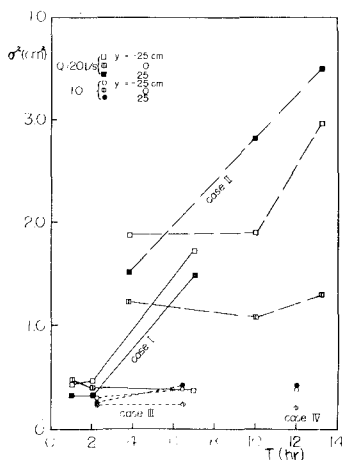


図-4 分散 σ^2 の時間的变化

乱によって高波数域の変動成分が減衰するため粗度が低減したと考えられる。再通水後、約2〜3時間で水位は定常な値に達するようである。

河床変動は通水時間の増加とともに、(b)領域での変動成分の発達に著しいが、水位にはこの影響による変化は顕著でない。すなわち、この波数域での河床変動による粗度効果は小さいと考えられる。

芦田・田中(1967)は水路中心線に沿う河床変動の標準偏差 σ が、次式から求められる相当粗度 R_s と良く表示

$$\frac{U}{U_{*R}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R_s}{k_s}$$

あることを示している。図-6は、本実験で得られた σ と R_s の関係を示したものである。他のデータに比べて R_s と過大に評価しているが、本実験範囲において良い関係が成立する。この σ による R_s の評価については測定間隔によって高波数域の変動成分の評価に厳密性を欠き、また水路中心線上の σ で代表させているなど不十分な点がある。

しかし、(c)領域の卓越する水路中心線上の σ で R_s と良く表示しうることを、また上で述べたように側壁近傍に発達する(b)領域での変動成分は粗度効果が小さいことから、(c)領域での変動特性が水流へおよぼす抵抗の重要な因子であることがみとめられよう。

(4) 発生・発達の要因

各々の異なる河床形態を示す領域においては、その発生、発達の要因を異としていると考えられる。最近の河川乱流の定例から河川には幾何学的スケールとして水路幅および水深の二つが存在し、それとれによって規定される二つの乱流場が存在することと明らかにしている。それらは、二次元的水平乱流場、その最大渦のスケールは河幅の約10倍、と鉛直せん断乱流場(境界层的乱流場)である。(b)領域での上限の波長と水路幅との比は、本実験において約10倍であり前者のスケールとほぼ一致していることは、この乱流場の不安定性がこの領域での河床変動を規定する要因として考えられる。(c)領域では、水路横断方向に一樣なスペクトル分布をもつこと、相当粗度の重要な要素であると考えられるなどの点から、この領域の発生要因として鉛直せん断乱流場の不安定性が対応するものと考えられる。このことについては今後、移動床上の流れの乱れ特性について測定を行い検討する必要がある。

以上の解析結果から、河床変動の発達過程においては現象の再現性、平衡状態の存在性についての問題が指摘されるが、今後さらに、移動床上の流れの不安定性とともに実験的検討をすすめて行く必要がある。

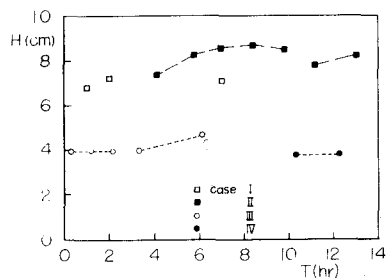


図-5 水深Hの時間的变化

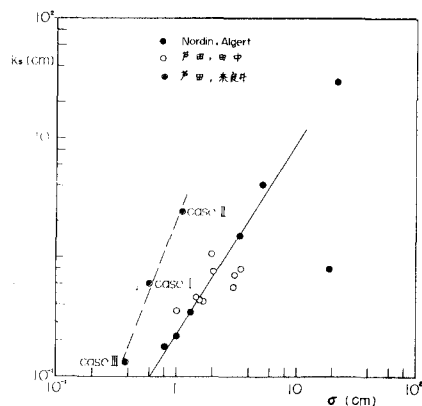


図-6 相当粗度 R_s と標準偏差 σ