

河床波の発生・発達過程に関する実験的研究

宇 民 正・上 野 鉄 男

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GENERATION AND DEVELOPMENT OF SAND WAVES

By *Tadashi* UTAMI and *Tetsuo* UENO

Synopsis

Experimental studies are made on the process of generations and developments of sand waves. These processes are very complicated because these are dynamic and three-dimensional and also because these have important relation with the motion of water flows.

In this experimental study, photographs of plan views of sand waves are taken every half a minute with a camera which is fixed over the channel. The longitudinal distribution of height of sand waves and water depth are also measured along the center line of the channel every 20 minutes. Moreover, photographs of flow patterns on water surface are taken by the camera which is carried with the equal velocity with the mean flow.

Resultant films and datas are useful to understand the movement and development of individual sand wave. Space-time distributions of various characteristic values of sand waves are also examined. Some regularities in the process of generations and development of sand waves are made clear.

1. 概 説

河床波は3次元的であり、その発生・発達過程は時間とともに非常に複雑な変化をするものである。また同時に、それは水流と互いに影響を及ぼし合いながら発展してゆく。河床波はこのように複雑な発生・発達過程を有するために、このような機構を解明しようという従来の研究は、現象を単純化して一つの側面だけから取り扱おうとするものがほとんどであった。

河床波の発生・発達機構に関する解析的研究は、従来、主として河床面における微小な擾乱の安定・不安定の問題を流水と流砂の運動および連続の方程式に基づいて検討する立場から行なわれてきており、かなりの成果があげられてきた。^{1), 2), 3)} しかしながら、実際の現象において与えられた水理条件のもとでどのようなスケールの河床波が発生するかは明らかにされていない。この点を補うために、河床波の発生機構および発生・発達した河床波の特性を流水中の大規模乱流構造に結びつけて把握しようという試みがなされてきた。⁴⁾ 一方、河床波の形状特性は、従来の平均的な波長、波高、周期などといった取り扱いから、最近確率過程としての取り扱いにより、河床変動のパワースペクトルなどから河床波の卓越波長などの特性を求めるといった統計的手法を用いて表現されるようになってきた。⁵⁾ これに関連して、河床波の発達過程も上記のような統計量の時間的変化を用いて表現し、これと流速変動のスペクトル構造の時間的変化などとの対応を議論することもなされてきたが、⁶⁾ 河床波の発生・発達過程を十分に説明するには至っていない。

河床波の発生・発達過程を解明するための従来の研究の方向を検討し、また、前述のような河床波の発生・発達過程の複雑な側面を考慮に入れると、次のことが重要であると言える。すなわち、まず、個々の河床波の発生・発達過程を詳細に検討すること、つぎに、河床波および水流の相互作用を詳細に検討すること、その際にそれぞれの3次元的な特性に深い注意を払うこと、最後に、以上のことを総合的に検討できるよう

な実測方法を確立することが重要である。

著者ら^{7), 8), 9)}は流れの可視化の手法を用いて、波状路床上の流れの 3 次元的な特性を明らかにし、さらに、開水路の 3 次元的な大規模乱流構造を明らかにしてきており、河床波および流れの 3 次元的な特性に注意を払うことの重要性を指摘している。さらに、これらの研究結果として得られた乱流構造に関する知見およびその解明のための方法が、河床波の発生・発達機構の解明に適用されるのではないかと考えるに至った。

本研究においては、発生・発達過程にある河床波の写真が、水路直上に固定されたカメラによって各 30 秒ごとに約 6 時間にわたって撮影され、個々の河床波についてその時間的、空間的な変化の特性が詳細に検討されている。また、水路中心線上の河床状況と水面の状態が水路全長にわたって各 20 分ごとに計測され、河床波の変化特性と低抗特性の時間的な変化に関する検討がなされ、同時に流れとともに移動するカメラによって水面流況が把握され、これらから、河床波と水流の相互の関連性が検討されている。これらの検討結果から、河床波の発生・発達過程がかなり明らかにされ、また、今後の研究方向においても多くの示唆が得られた。

2. 実験方法

2.1 実験装置および計測方法

河床面を上流側上方から照明した場合、照明の方向が適切であれば河床波前面（下流に向っている面）だけを暗くすることができる。このような状態にある河床波をその真上から写真撮影すると、河床波の平面的な分布状況や波高の分布状況が読み取れるはずである。さらに、撮影を一定時間間隔で連続的に行なえば波速や掃流砂量も推定できることとなるし、個々の河床波が流下しながら変動していく様子を追跡することもできるはずである。本実験は以上のような主旨のもとに行なわれた。実験装置の概要を Photo. 1 および Fig. 1 に示す。

実験は長さ 18m、幅 1m、深さ 0.6m のモルタル仕上げの直線水路で行われた。路床には平均粒径 0.5mm の砂を 1/400 の勾配で敷き、給砂は行わず、23l/sec の流量を流した。

水路下流端から 7.2m の地点を基準点 ($x=0$ m) として、その直上 5.22m の位置に 2 台のカメラを設置し、一つは普通レンズを取り付け、路床の状態が水路に沿って 3.2m の長さにより撮影されるようにし、他は広角レンズを取り付け、路床の状態が長さ 7m にわたって撮影されるようにした。流れの観測は通水後 6 時間 15 分にわたって行った。基準点直上の 2 台のカメラによって、河床波の発生・発達の状況を 30 秒間隔で、通水を続けながら撮影した。水

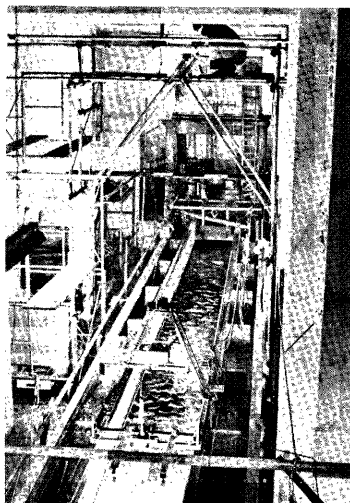


Photo. 1. Experimental facilities.

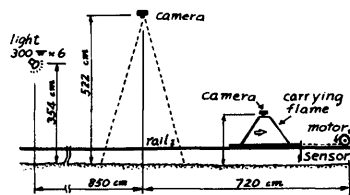


Fig. 1. Experimental facilities.

面の優乱が撮影結果に与える影響を少なくするため、シャッタースピードは1秒と比較的長くとった。上流側からの照明には300Wのリフレクターランプ6個を用いた。Photo. 2に河床波の写真撮影例を示す。

本実験では河床波の発生・発達が水流とどのように相互に影響を及ぼしあっているかについても検討した。そのために、流れとともに34.2cm/secの速度で移動する台車に設置されたカメラによって、水面の流れのパターンを3秒ごとに撮影し、その結果から流れの内部機構を推測することとした。水面にまくトレーサーとしてはアルミ粉を付着させたパンチくずを利用した。Photo. 3に8時50分における基準点付近の水面流況の撮影例を示す。

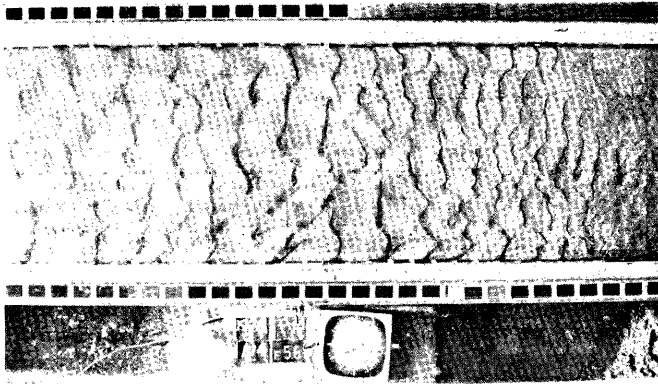


Photo. 2. Configuration of channel bed.

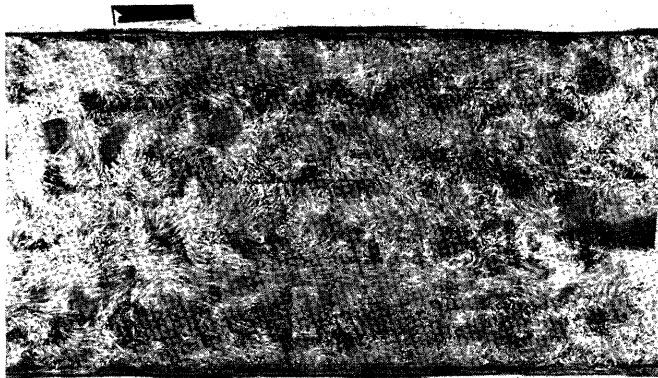


Photo. 3. Flow pattern on water surface.

写真撮影から得られる河床状況の資料を検証すると同時に、水位、水深に関する資料を得る目的で、超音波式河床測深器および水位計を台車に取り付け、水路中心線上の河床および水位の状態を水路全長にわたって記録した。水面流況の撮影、河床測定および水位測定は20分ごとに行った。

2.2 水理条件

基準点における局部的 (1m の区間ごとに計算) な水理条件を Table 1 に示す。本水理条件の特徴は、水路下流端をせき上げ状態としたことである。通水開始前にはせき上げを所定の高さより大きくしておき、かつまた流量を所定のものより小さくしておいて平坦な河床に変化が生じないようにして水路に静水を十分に溜めておいた。実験開始時刻に、このような、状態から流量を所定の大きさにすると同時に、下流端のせき上げも所定の状態とした。このような操作をしながら Table 1 のような水理条件にすると、初め平坦であった路床に通水後まもなく上流端近くで水路床に擾乱が発生し、それが時間の経過とともに下流へ移動し、発達しながら下流側につきつぎと新しい河床波を発生させるような状態が作り出される。このような水理条件を対象とした理由は、このようにすると河床波および流水の構造が時間的にも空間的にも変化し、それらの両方の側面から同時に流水と河床波の発達の過程が把握されたと考えたからである。また、本実験においては給砂を行っていないが、上流端の河床材料が次々と洗掘されている状況が観察されており、そのためにそれより下流では上流に給砂がある場合と同じ状況になっていると見せると考えた。

Table 1. Experimental conditions.

Parameters in the section $x=0$ m	at the Beginning of Experiment ($t=0$ min)	at the End of Experiment ($t=355$ min)
Water Depth (H cm)	8.62	8.88
Mean Velocity (U cm/sec)	26.6	25.9
Slope of Water Surface (I)	1/20000	1/600
Friction Velocity (U_* cm/sec)	1.2	3.9
$R_* = UH/\nu$	1.76×10^4	1.76×10^4
$F_* = U/\sqrt{gH}$	0.29	0.28
U_*d/ν	4.6	15
τ_*	0.0184	0.194

2.3 写真撮影結果の処理

Photo. 2 に示す河床波の撮影結果は河床波の平面的な形状特性を表現しているが、先述のように写真で暗く写った部分は河床波前面に一致しているの、その幅と波高との関係がわかれば、写真によって河床波の 3 次元的な特性までもがある程度把握されることになる。今、Fig. 2 に示されるように水路縦断面内の河床波の前面をカメラの位置から見込む角度を θ とすると、 θ は基準点からの距離 x の関数となる。今、河床波の前面が水平面とのなす角度を α 、カメラの路床からの高さを P とすると、 θ は次式で表わされる。

$$\theta = \frac{\left(\sqrt{\frac{7}{16}x^2 + P^2} / \tan \alpha - \frac{3}{4}x\right)\eta}{x^2 + P^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η は河床波の波高で、これは河床波の頂点と前面の谷の部分との高さの差を意味している。また、上式は河床波の峰線が水路の横断方向と平行になる場合のものであるが、それが横断方向と

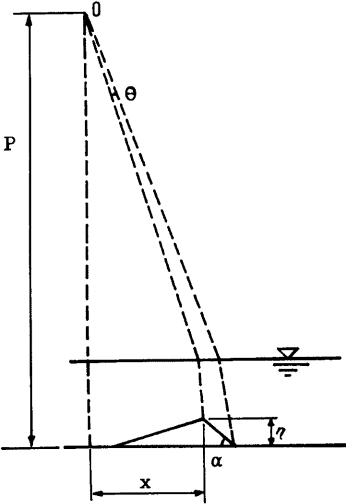


Fig. 2. Notation.

β なる角度を有する場合には次式のようになる。

$$\theta = \frac{\left(\sqrt{\frac{7}{16} x^2 \cos^2 \beta + P^2} / \tan \alpha - \frac{3}{4} x \cos \beta\right) \eta}{\sqrt{(x^2 + P^2)(x^2 \cos^2 \beta + P^2)}} \quad (2)$$

となる。ここで、 $\alpha = \pi/4$ と仮定し、 θ の $x=0$ における値を θ_0 で表わすと、 θ/θ_0 は $\beta=0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ に対して Fig. 3 のような関係となる。

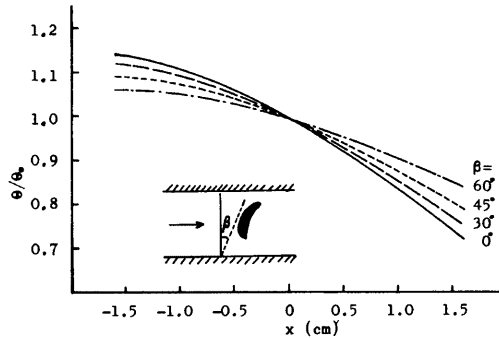


Fig. 3. Distribution of correcting factor to obtain real wave height.

3. 実験結果および考察

3.1 河床波の発生・発達に伴う抵抗特性の変化

超音波式河床測深器による水路中心線上での河床状態の計測結果を Fig. 4 に示す。図には約 20 分ごとの計測結果が並べられており、これによって、河床波の発生・発達過程の概略を把握することができる。時間の経過に伴ってそれらの波高および波長が大きくなっている様子が伺えるが、今、波高について整理すると Fig. 5 のようになる。図では波高に対応するものとして、Fig. 4 に表現されている各 1m 区間での最高河床高と最低河床高との差 $\eta_{\max}$ の時空間分布が示されている。

一方、河床波の波高の増大に伴って抵抗特性が変化するが、これを直接的に測定するのは非常に困難である。本実験においては、河床測深器による河床状態の測定に加えて、水位計によって各時刻、各場所における水面の位置が計測されているので、ここでは抵抗特性を評価する一応の目安として、各 1m 区間ごとの平均的な水深およびエネルギー勾配から局所的な摩擦速度を求め、これを無次元化した掃流力 τ_* について検討を加えることとする。

このようにして求めた τ_* の時空間分布を Fig. 6 に示す。Fig. 5 と Fig. 6 とを比較すると $\eta_{\max}$ と τ_* の間には強い相関があることがわかる。そこで $\eta_{\max}$ を砂粒の平均粒径 $d(=0.05\text{cm})$ で除して無次元化したものを $\eta_{*\max}$ で表わすこととして、各時間、各区間における $\eta_{*\max}$ と τ_* の計算値をそれぞれ両対数紙のたて軸と横軸にプロットすると Fig. 7 のようになり、平均的には次式のような関係が得られる。

$$\eta_{*\max} = 286 \tau_*^{0.7} \quad (3)$$

3.2 河床波の発生・発達過程

河床波の発生・発達過程を水流および河床波に関する水理量の平均的あるいは統計的な取り扱いから解明しようとする方法には限界があると言えそうである。その限界を補なうという観点から、本報ではまず 3.1 で平均的な水理量の時空間的な分布を検討し、ついで 3.2 で個々の河床波の発生・発達過程をありのままに

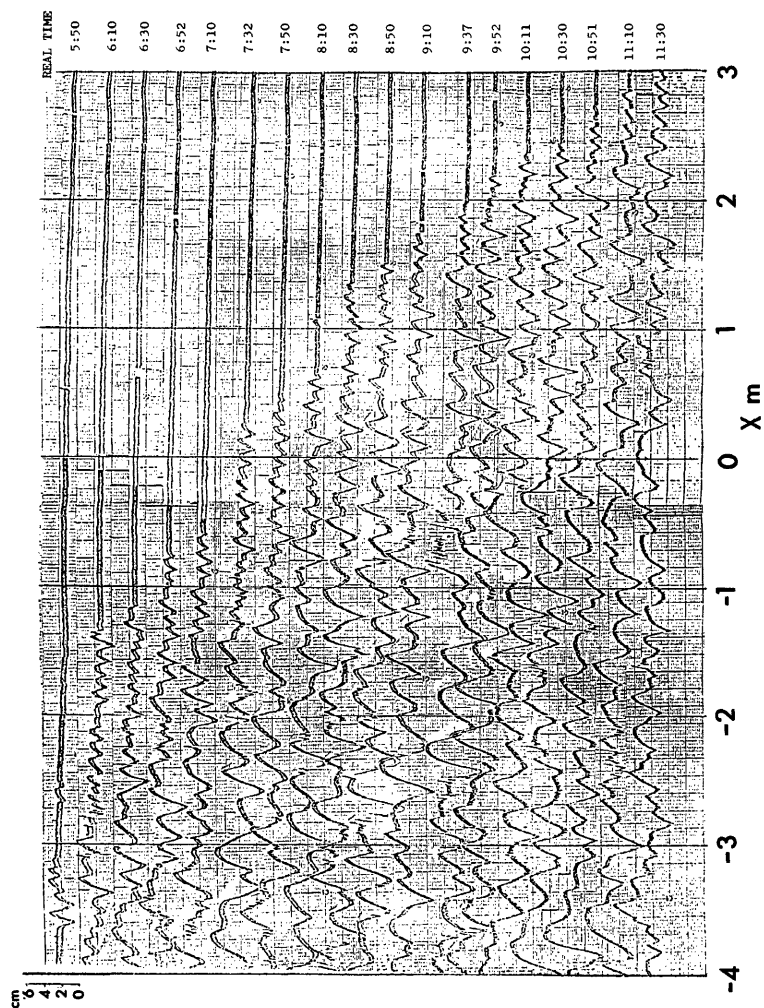
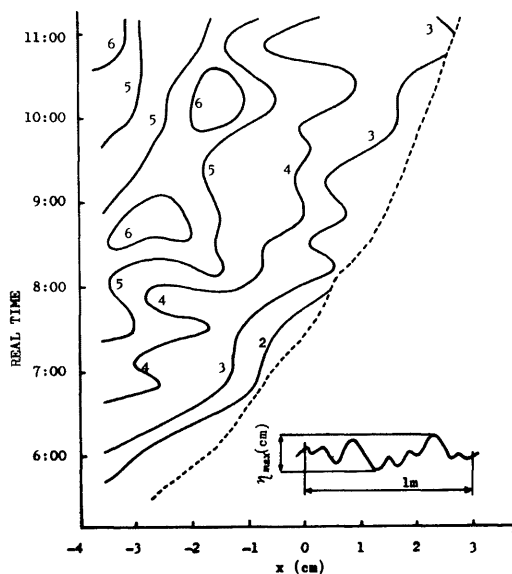
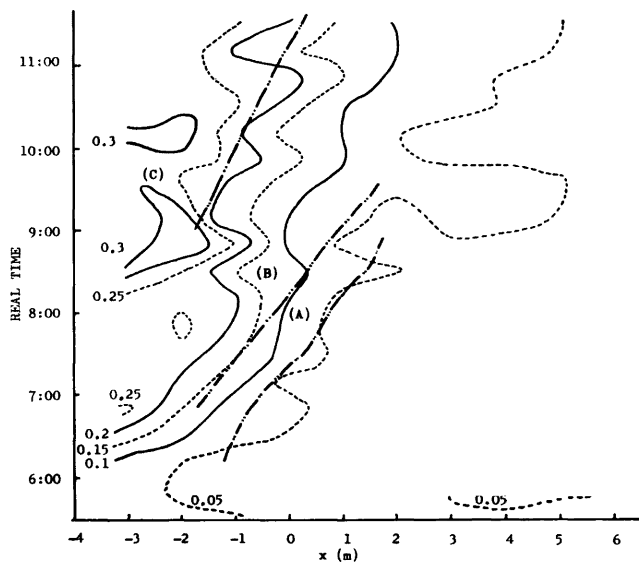


Fig. 4. Time-space variation of channel bed.

Fig. 5. Time-space distribution of maximum wave height η_{max} .Fig. 6. Time-space distribution of normalized shear stress τ_* .

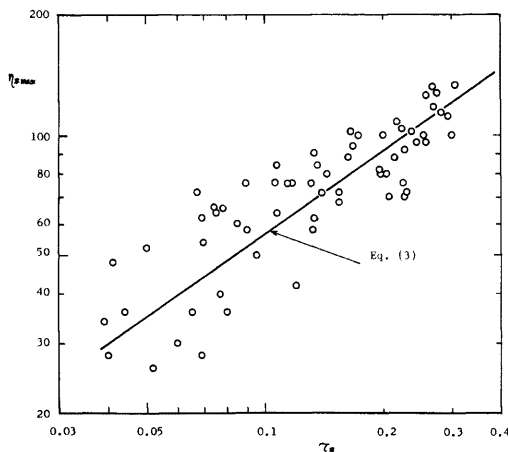


Fig. 7. Relation between normalized maximum wave height and normalized shear stress.

把握し、さらにそのような過程が時空間的に分布する平均的な水理量とどのような関係にあるかを明らかにしようとした。

(1) 河床波の発達過程とその領域区分

Photo. 2 に示されるような河床波の写真から、水路中心線上における河床波の前面（写真では暗く写っている部分）の位置および幅を読みとり、それが時間の経過とともに変化する様子を黒の縞模様によって **Fig. 8** のように表現した。なお、河床波前面の写真に写し出された幅は式(2)の関係を用いれば波高に変換できるが、概略的にはその幅は波高にほぼ匹敵する。また、図の縞模様の傾きおよび各縞模様間の横座標の間隔から、それぞれ河床波の進行速度および波長がわかる。さらに、河床波の波高と進行速度がわかると、それらを乗ずることにより、局所的な掃流砂量の分布の目安が得られることになる。**Photo. 2** にも示されるように河床波は本来 3 次元的な特性を持つものであり、詳細な検討は 3 次元的になさねばならないが、ここでは水路中心線上における特性から把握えられる範囲で河床波の発生・発達機構に関する検討をすすめることとする。図からつぎのことがわかる。

① 河床波は時間の経過とともに下流へ進行しながら全般的にはそれらの規模を増大させる。それとは別にまだ河床波ができていなかった下流の部分にもつぎつぎと新しい河床波が発生するといった形で、河床波の存在する領域が時間とともに拡大してゆく。目視観察によると河床波の存在しない領域では流砂量は認められなかった。本実験条件のもとでは、前者の河床波の平均的な進行速度は 0.73cm/min となり、後者の河床波が存在する領域の先端の伝ばん速度は 2.12cm/min と前者の約 3 倍となっている。

② 河床波は一定の速度で一様に流下するのではなく、進行速度の極端に大きな河床波が部分的に存在する。波高が小さく、進行速度が大きい河床波が比較的安定した河床波に近づくと、追いつかれた方の河床波の波高が小さくなって波速も大きくなり、追いついた方の河床波の波高は大きくなって波速も徐々に小さくなるといった現象が認められる。このような現象を「河床波のつなぎかえ」と表現することとする。このつなぎかえを契機に河床波は分裂したり、消滅したりしながら波長と波高を増大させ、段階的に発達していくようである。このような場合の河床波の進行速度は大きな場合には 5~7cm/min にもなっている。

③ 上述のような河床波の段階的な発達によって、図の時空間座標面はいくつかの領域に分けられる。ここでは便宜的に図に示すような A, B および C の 3 領域に分けると、つぎのような説明ができる。A 領域では、新しい河床波がつぎつぎと発生してその規模を保ったまま流下し、B 領域では、河床波が何回かのつ

なぎかえをくり返して発達して行き、C領域は河床波が十分に発達した領域である。

(2) 河床波の発達過程と掃流砂量

つぎに、局所的な掃流砂量の時間的、空間的な変化特性と河床波の発生・発達過程との関連について検討する。Fig. 9は式(2)において $\alpha=\pi/4$ として計算した河床波の波高 η とFig. 8から求めた波速を用いて計算した局所的な掃流砂量の時空間分布を示したものである。図からつぎのことがわかる。

① 掃流砂量の平均量な分布は時間が経過するほど、大きく、同時に上流側ほど大きくなっている。前述のA領域では掃流砂量は単位幅当たり大体 $1\text{cm}^2/\text{min}$ 以下で平均的には $0.5\text{cm}^2/\text{min}$ 、B領域では $1\sim 2\text{cm}^2/\text{min}$ 程度であり、C領域では大体 $2\text{cm}^2/\text{min}$ 以上となっている。したがって、河床のある固定点に注目すると、その地点がB領域に属している時期には砂粒は堆積して徐々に河床は上昇し、ついでC領域に達した後は河床はほぼ一定の高さに保たれることになる。

② さらに詳細に検討すると、掃流砂量は一様に分布するのではなく、ある場所、ある時間帯に集中的に極端に大きな値を示す場合がある。本実験条件においては掃流砂量の最大値は $10\text{cm}^2/\text{min}$ 程度に達する場合があり、平均的な掃流砂量と比較すると1オーダー大きくなっている。掃流砂量に関するこのような分布特性が河床に局所的な洗掘、堆積の状態を作り出すことになる。

③ 掃流砂量の分布を河床波の発生・発達の過程と比較検討することによって、掃流砂量の極端に大きくなっている場所は河床波のつなぎかえの部分であることがわかる。このことから、河床波の発生・発達過程を解明するためには河床波のつなぎかえの機構を詳細に検討することが重要であることが指摘される。また、流砂現象は水流の特性と深く関連することから、水流がどのような構造を持つときに、掃流砂量が大きくなって河床波のつなぎかえが起るのかを明らかにすることが重要となってくる。

④ 河床波のつなぎかえは単独の河床波について発生するのではなく、時間の経過とともに順次下流側へと伝わっていくが、掃流砂量の大きな場所も下流側へと伝わることになる。また、河床波のつなぎかえはある限られた時間帯に集中的に起るようである。例えば本実験条件のもとでは、7時50分から8時まで、8時40分から8時50分まで、9時から9時20分まで、9時30分から9時50分まで、10時10分から10時30分まで、10時50分から11時10分までの間につなぎかえが集中的に起り、それにもなつてそれらの時間帯に掃流砂量が大きくなっている。

以上の検討から、河床波が形成された場合に掃流砂量を平均的に把握することは非常に困難であることがわかる。それは、掃流砂量は場所的に大きな差を持つだけでなく、時間帯によっても大きく変化すると考えられるからである。したがって、掃流砂量の検討においてはこのような事実を十分に考慮に入れた取り扱いが重要であると言えよう。

(3) 河床波のつなぎかえ

河床波のつなぎかえが、河床波の波高と波長の変化過程を規定する重要な現象であることを先にふれた。本節ではこのつなぎかえ現象の内容を解明する。

Fig. 8から河床波のつなぎかえが生じている部分の河床波の時間的な変形過程の代表的なパターンを取り出すと、それはおおよそFig. 10のようにあらわされる。すなわち、時刻 t_1 においてA、A'、B、C、Dの5個の河床波が流下方向に並んでおり、そのうちA'の波高が時刻 t_1 から特に小さくなり、波速が大きくなる場合を考える。A'は時間の経過とともにBに近づく。A'がBにある一定距離以内まで近づくと(時刻 t_2)、突然Bが波速を大きくする。今度はBが波高を減少させながらCに近づいてゆき、先と同様の現象がくり返される。A'はBが動き出す前までBが占めていた進路に漸進してゆき、同時に波高を高めてゆく。そしてBがCに十分接近して、Cが波速を大きくする時刻 t_3 以後はA'はBが以前占めていた進路を占め、その波高も時間の経過にかかわらずほぼ一定となる。

以上の経過では、各河床波は1つづつ進路を入れ替えるだけで、河床波の個数は時間の経過とともに変化するのではない。しかし、実際には時間の経過とともに河床波の個数も変化しているようである。このような河床波の個数の変化は、

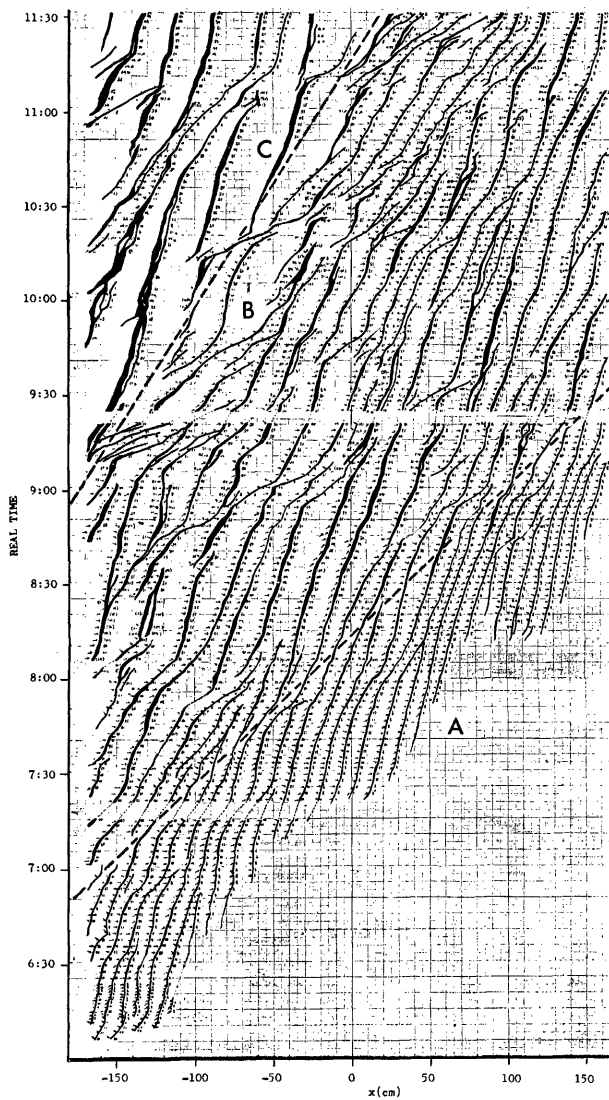


Fig. 8. Time-space variation of sand waves.

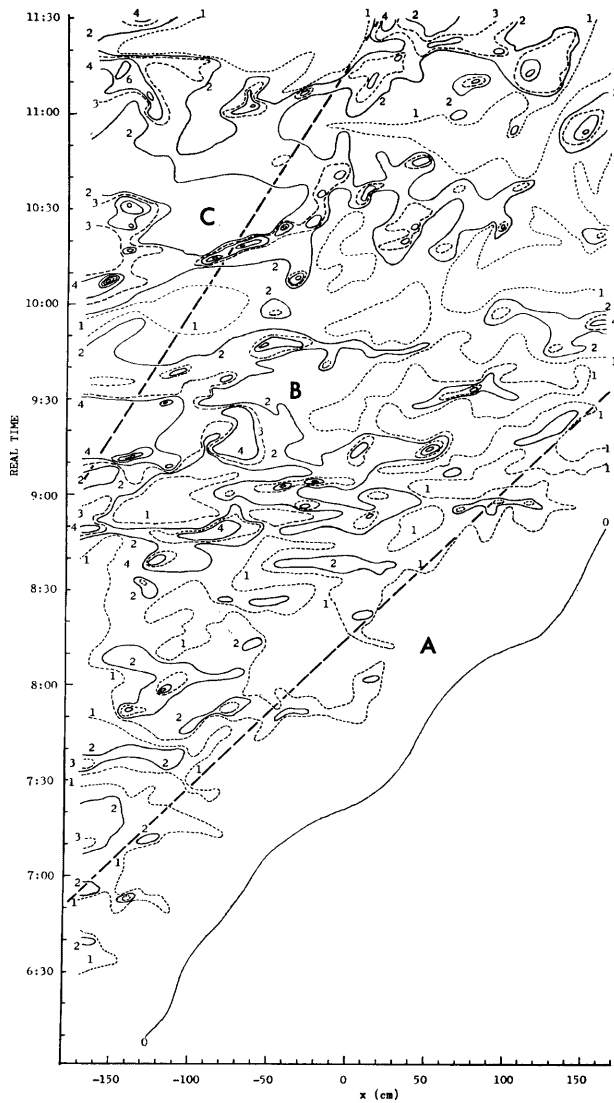


Fig. 9. Time-space distribution of local sediment transport rate (cm^2/min).

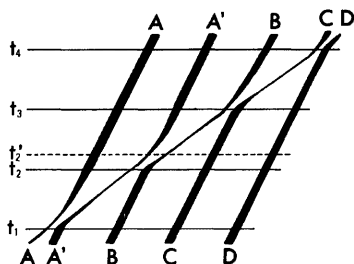


Fig. 10. Model pattern of time-space variation of sand waves.

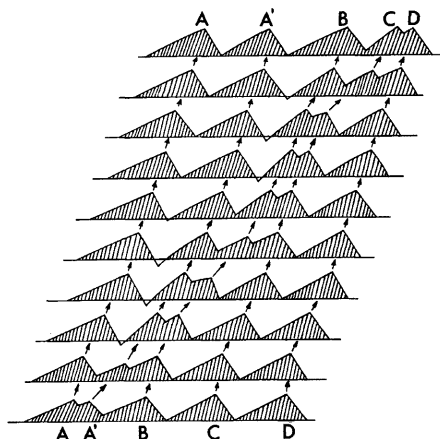


Fig. 11. Model process of development of sand waves.

- ① 1つの河床波が次の河床波に接近していったり合体してしまう,
- ② 1つの河床波が途中で消滅してしまう,
- ③ 1つの河床波が2つに分裂する,

などによっているようである。

Fig. 8の河床波の変形過程とFig. 4に示されている河床波の縦断面図の経時変化とを照合すると、Fig. 10に関してつぎのことが指摘される。たとえば河床波Bに注目すると、その変形過程は時刻 t_2 と t_3 の間であり、その期間のうちごく初めの段階(時刻 t_2' まで)では河床波の背面(上流側の面)は全面的に洗掘されながら同時にその勾配をゆるやかにしてゆく。したがって、この場合は河床波の頂部が最も多く洗掘されていると考えられる。Bの波長がある程度長くなると(時刻 t_2' 以後)、今度はBの背面の勾配は時間の経過とともに急になってゆく。これは、Bの背面のうち上流側の部分の方が洗掘量が大きくなったためであると考えられる。Bの背面が洗掘されるこのような t_2 から t_3 までの過程はBの波長を長くしてゆき、同時にA'の波高を増加させる結果となっている。以上の河床波の変形過程を模式的に図化するとFig. 11のようになる。

3.3 河床波の波高と波長との関連

砂波の波高 η と波長 λ との関係は、多くの実測値を検討した結果から

$$\eta/\lambda = 1/5 \sim 1/20 \quad \dots\dots\dots (4)$$

に分布し、平均的には1/10程度であるとされている。¹⁰⁾しかし、上の関係はばらつきが大きく、また、なぜ(4)式のような関係になるかという意味も明らかではない。

著者らは、河床波の発生・発達過程の検討から河床波の波高と波長との関係についての法則性を見出し、それによって平衡状態に達した河床波の波高と波長の関連を説明することができると考え、以下の検討を行った。

河床波の波高および波長の定義については研究者によって別のものが用いられているようなので、ここでは本実験での実測方法を考慮してその結果を整理する上で簡便なように次のように定義することとした。すなわち、Fig. 12のような河床面の縦断面図において、あい隣る2つの波頂の間の水平距離を波長 λ とし、

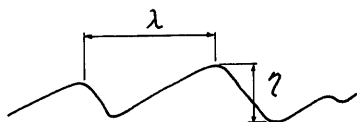


Fig. 12. Definition sketch of wave length and wave height.

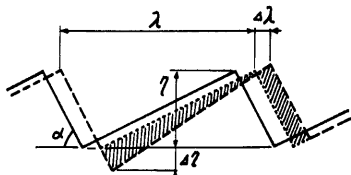


Fig. 13. Process of increment of wave length and wave height.

河床面の最も低くなった所とその直上流の波頂との間の鉛直距離を波高 η とする。

ところで、河床波が発達して波高と波長を増大させる過程には1つの法則性があると言えそうである。今、その過程を簡略化して Fig. 13 のように表わすこととする。図で実線はある時刻 t における河床波の縦断面を示し、破線は時刻 $t + \Delta t$ における河床波の縦断面を示している。点線によって元の河床波を平行移動させた時の状況を示すと、流砂量の連続条件から、図で斜線を施した2つの領域の面積が互いに等しいことになる。すなわち次式が成立する。

$$(\lambda + \Delta\lambda - \eta / \tan \alpha) \cdot \Delta\eta / 2 = \Delta\lambda \cdot \eta$$

ただし、 α は河床波の前面と水平面とのなす角度である。実測結果より、 η/λ は 10^{-1} 、 $\tan \alpha$ は1のオーダーであるので、微小項を省略して微分方程式を解くと次式が得られる。

$$\lambda = C' \eta^{0.5} \quad \dots\dots\dots (5)$$

λ, η をそれぞれ砂粒の平均粒径 d で除して無次元化したものを λ_*, η_* とすると、それらの間にもやはり同様の関係が成立つ。

$$\lambda_* = C \eta_*^{0.5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5)式、および(6)式において C' および C は積分定数である。

このようにして得られた式(6)は式(4)と異なるものであるが、本実験における実測結果によって式の妥当性を検討する。Fig. 8 から河床波の波高と波長の関連を調べた結果、河床波の波長はその直上流側の河床波の波高と関連があることがわかった。Fig. 8 から、その全領域にわたってかつ2分ごとに河床波の波長 λ とその直上流の河床波の波高 η を読みとり、波高については(2)式によって実際の値に修正した。Fig. 14 はそのようにして求めた (η, λ) から、その頻度分布を求めて等高線で示したものであり、座標軸は λ と η をそれぞれ平均粒径 d を用いて無次元化したものである。(a), (b) および (c) 図はそれぞれ Fig. 8 の A 領域、B 領域および C 領域に対応している。C 領域の結果はデータが少なく、また、A および B 領域のものについてもある程度のばらつきがあるが、(6)式をあてはめると定数 C の値を適当に決めると平均的にはよく適合していると言える。ここで特に注目されるのは、各領域ごとに採用した C の値が異なることであり、それぞれの C の値を用いて(6)式を書き直すつぎようになる。

$$\lambda_* = 45 \eta_*^{0.5} \quad (\text{A領域}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda_* = 56 \eta_*^{0.5} \quad (\text{B領域}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda_* = 70 \eta_*^{0.5} \quad (\text{C領域}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

一方、前述の Fig. 6 においては τ_* の値が A 領域、B 領域、C 領域の順に大きくなっている。そこで、A 領域、B 領域および C 領域のそれぞれの概略的な τ_* の値をごく大ざっぱに求めると、それぞれ、0.08、0.15 および 0.23 となるが、とりあえず、 C をこのような τ_* の値と関係づけると Fig. 15 のようになる。これを、一応式の形で表わせば、

$$C = f(\tau_*) = 164 \tau_* + 32 \quad \dots\dots\dots (10)$$

のようになる。

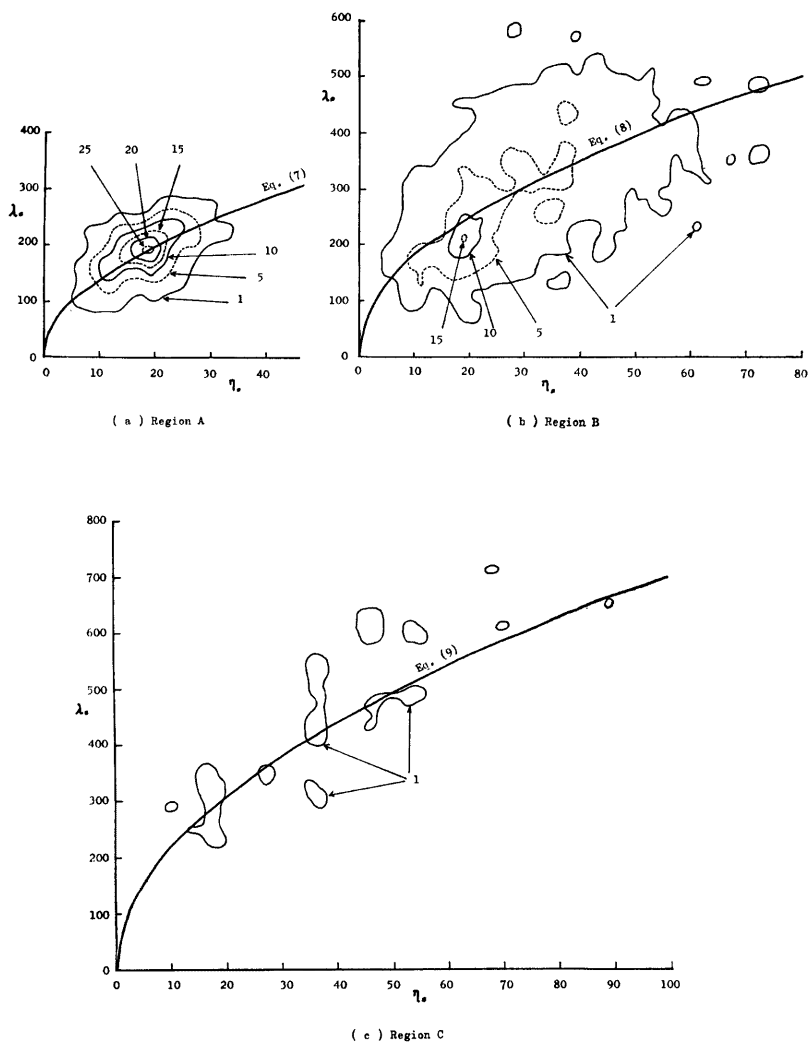
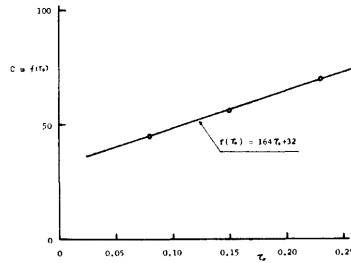


Fig. 14. Relation between normalized wave height and normalized wave length.


 Fig. 15. Relation between $C(=\lambda_*/\eta_*^{1/2})$ and normalized shear stress τ_* .

3.4 河床波と流れの構造との関連

Fig. 16 は通水後約3時間30分経た8時50分における河床波の平面的な配置を河床波前面の位置で示したものである。図には Fig. 8 で示した A, B および C 領域の範囲が示されているが、C 領域のものは広角レンズを取り付けたカメラによって撮影された写真から図化したものである。また、図には2分前の河床波の峰の位置が、現河床波の前面の位置より上流側に細い線で示されており、2分間における峰の位置のずれは河床波の進行速度を示している。写真に写し出された河床波の前面の幅が河床波の波高に匹敵するので、局所的な掃流砂量の概略が河床波の波高と進行速度の積として扱えられる。その結果からつぎのことがわかる。

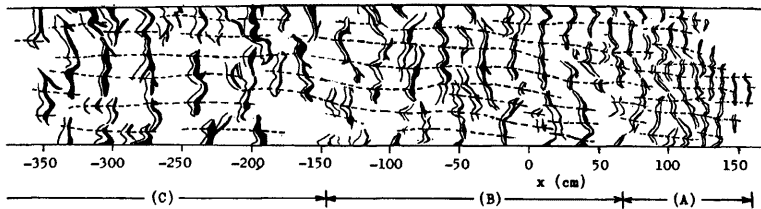


Fig. 16. Two-dimensional distribution of wave height and wave velocity.

- ① 河床波は A 領域では2次元的であり、B 領域から C 領域へと移るにつれて3次元性が強くなっている。
- ② 掃流砂量は平均的には A 領域から B 領域および C 領域へと上流に行くほど大きくなっており、B 領域の掃流砂量は A 領域のその約2～3倍、C 領域の掃流砂量は B 領域のその約2倍になっている。
- ③ 同じ領域内においても、水路の横断方向の位置によって局所的な掃流砂量は大きく異なる。A 領域内では掃流砂量の多い所と少ない所とでその量に2倍程度の差を生じており、B および C 領域においてはその差は4～5倍にもなる。河床波が上流側に向って凸になっている山の頂点の位置では掃流砂量が大きく、谷の位置では掃流砂量が小さくなっているようである。
- ④ 水路の横断方向で比較して、掃流砂量の大きな位置を流下方向につなぐと図の破線のようになる。B および C 領域においてはこれらの線はほぼ規則的に配列されており、各線間の間隔は平均的には15～18cm 程度であり、これは水深の約2倍に当る（同時刻の $x = -1\text{m}$ での水深は8.5cm であった）。

Fig. 17 は Photo. 3 に示された8時50分における基準点近傍の水面流況の写真撮影結果を図化したものである。図で斜線の部分がボイルに相当し、Photo. 3 ではトレーサーが強い上昇流によって四方に寄せられるので暗く写っている。ボイルを流下方向につなぐと図の破線のようになるが、各線間の間隔はやはり水深

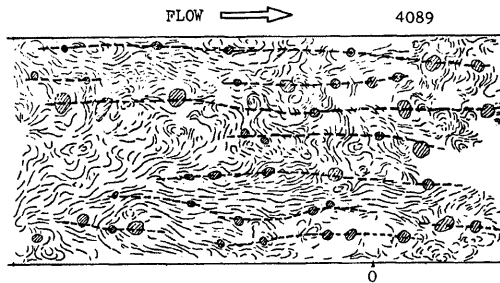


Fig. 17. Pattern of stream lines on water surface.

の2倍程度となっていることが注目される。このことは流下方向軸をもった2次流が発生していることを示唆している。さらに、このような2次流と河床波との相互作用が河床波の3次元性に反映していると考えられる。先にも述べたように、河床波の発生・発達過程においては河床波のつなぎかえの現象が重要な役割を果たしているわけであるが、以上の事実および考察から、そのような現象と大規模乱流構造との関連を明らかにすることにより、河床波の発生・発達過程と水流との関連が一層明らかになると言えそうである。

4. 結 語

河床波および水流に関する平均的な水理量の時空間的な分布とそれぞれの間の相互関連性が検討された。同時に個々の河床波の発生・発達の過程が詳細に検討され、また、河床波と水流の相互の関連性が、両者の構造の3次元的な特性に注目することによって検討された。これらによって河床波の発生・発達過程の中にある法則性がかかなり明らかにされた。得られた結果はつぎのようである。

① 河床面を上流側上方から照明し、河床波の前面だけを暗くした状態で、河床波の真上から、ある一定時間間隔で連続写真撮影することによって、河床波の流下しながら変動していく様子を捉えるという実験方法は、河床波の発生・発達過程を解明する上で有効である。

② 河床波は一定の速度で一樣に流下するのではなく、進行速度の極端に大きな河床波が部分的に存在し、このような河床波が下流の河床波に対してつぎつぎと河床波のつなぎかえを起す。河床波のつなぎかえが起っている部分では流砂量が大きく、同時に河床波の分裂や消滅も頻繁に起っている。このような現象を契機として河床波は段階的に発達する。

③ 本実験ケースのように、上流側の水路床に発生した擾乱が時間の経過とともに発達しながら下流へ移動し、下流側につぎつぎと新しい河床波を発生させるような状況のもとでは、河床波が段階的に発達するために時間的・空間的にそれぞれの発達段階に応じた領域区分が可能となる。

④ 発達過程の河床波が存在する流れにおいては掃流砂量が、時間的にも空間的にも集中する部分が存在しており、このことが、掃流砂量の的確な把握を困難にしている。

⑤ 河床波の波長と波高の間には式(6)～(10)で表現されるような関係式が成立つようである。この関係は河床波の発達の過程をかなりよく説明している。

⑥ 河床波と流れの構造はともに3次元的であり、流水中の流下方向軸をもつ2次流と河床波の3次元的な構造との間には密接な関連がありそうである。また、河床波のつなぎかえは大規模乱流構造との関連のもとに明らかにすることが重要である。

最後に、本研究の遂行にあたり有益な助言をいただいた今本博健教授に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Kennedy, J. F.: The Mechanics of Dunes and Antidunes in Erodible-bed Channels, Jour. Fluid Mech., Vol. 16, 1963, pp. 521-544.
- 2) 椿東一郎・斉藤 隆：流れによる Sand wave の発生限界，九大工学集報，第40巻，第5号，1967, pp. 741-748.
- 3) Hayashi, T.: Formation of Dunes and Antidunes in Open Channels, Proc. ASCE, HY2, 1970, pp. 357-366.
- 4) Yalin, M. S.: On the Formation of Dunes and Meanders, Proc. IAHR, Paris, 1971, pp. 101-108.
- 5) 芦田和男・田中祐一郎：砂漣に関する実験的研究（3），京都大学防災研究所年報，第10号 B, 1967, pp. 121-132.
- 6) 芦田和男・奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究，京都大学防災研究所年報，第12号 B, 1969, pp. 449-462.
- 7) 上野鉄男：波状路床上の流れの3次元特性について，京都大学防災研究所年報，第18号 B, 1975, pp. 679-688.
- 8) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号 B, 1976, pp. 267-288.
- 9) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究（2），京都大学防災研究所年報，第20号 B, 1977, pp. 331-354.
- 10) 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, pp. 65-91.