

砂れんと砂堆の発生領域について

On the Regions of Occurrence of Ripples and Dunes

京都大学防災研究所 正員 上野鉄男

1. ま え が き

河床形態の領域区分に関する研究はこれまで数多くの研究者によってなされてきたが、従来の領域区分法のはほとんどが砂漣、砂堆の Lower regime を一括して取り扱い、これと平坦河床、反砂堆の領域との境界に注目して得られたものであった。砂漣と砂堆の領域を区分して取り扱ったものとしては、Albertson ら¹⁾ Allen²⁾ Yalin³⁾ 山本⁴⁾ らの研究があげられる。Yalin は砂漣と砂堆の発生原因が異なることを指摘し、砂漣と砂堆の区分を支配するのは砂粒レイノルズ数であるとしている。一方、山本は Yalin の考え方に疑問を提示し、砂漣と砂堆を区分するパラメーターとして無次元掃流力と水深粒径比をとることを提案した。

以上のように砂漣と砂堆を区分しようとする試みは、研究そのものもわずかであり、立場を異にする研究も含まれているが、これらは砂漣と砂堆を区別することの積極的な意味が認められなかったことや砂漣と砂堆の定義にあいまいな点が含まれていることによると考えられる。

本研究においては、河床波の発達過程の現象観察をもとにして、砂漣と砂堆とで流砂現象が異なることに注目して、相似な流砂現象が相似な河床形態を形成するという考え方によって砂漣と砂堆を区別し、それらの発生領域を区分した。

2. 砂漣と砂堆の区別

土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会の調査・研究⁵⁾によると、「砂漣は、河床面近傍の物理量によって支配される最も小規模な河床形態であって、砂粒レイノルズ数がほぼ、 $10 \sim 20$ 以下の場合に形成され、その波長、波高は粒径と密接な関係がある。」とされ、「砂堆は、砂漣よりも規模が大きく、その波長、波高が水深と密接な関係があり、河床波と逆位相の水面波を伴う河床形態である。」とされている。また、河床波の形状特性に関しては、その波形勾配を実験資料から検討した結果、それは砂漣では、 $1/20 \sim 1/5$ 、砂堆では $1/40 \sim 1/10$ とされている。

上のような方法で砂漣と砂堆を区別しようとするとき、あいまいな点が多く含まれていることが指摘できる。すなわち、まず第1に、河床波の形成過程を観察して、それが河床面近傍の物理量に支配されて形成されているものか、水深規模の運動によって形成されているものかを見分けることは一般的には不可能である。砂漣の波長が水深と関係しないという事実は多くの実験資料を検討して初めて明らかになることである。つぎに、Yalin も指摘しているように³⁾、砂粒レイノルズ数が8よりも小さい場合には砂漣のみが形成され、それが24よりも大きな場合には砂堆のみが形成されるが、砂粒レイノルズ数が $10 \sim 20$ の間では砂漣、砂堆のいずれの河床形態の発生も可能であるから、砂粒レイノルズ数のみで砂漣と砂堆を区別することはできない。最後に、河床波の波形勾配に関しても、それが $1/20 \sim 1/10$ となる範囲では砂漣と砂堆の区別ができない。

以上の検討結果から、残されたものは河床波の規模によって砂漣と砂堆を区別するという方法であるが、A.S.C.E.の定義によると⁶⁾、波長および波高がおのおの1フィートおよび0.1フィートよりも小さな河床形態が砂漣、それよりも大きなものが砂堆とされている。このような方法では砂漣と砂堆を区別する上でのあいまいさが小さく、実際にこれによって砂漣と砂堆をかなりのところまで区分できるが、なぜあるいはどのような水理条件のもとで砂漣および砂堆が形成されるかという物理的イメージと結びつかないところに最大の弱点がある。

ところで、実験水路において、初め平坦に敷きならされた河床上に通水を開始し、砂漣の発生・発達する様子を観察すると、次のような現象が認められる。通水後まもなく河床のあちらこちらに凹凸が形成され、

それにともなう水面波も形成される。この水面波によって河床の凹凸は横方向に連らねられて2次元的で波高、波長がほぼ等しい河床波が上下流に連らなうて発生するようになる。さらに時間が経過すると、河床波は波高を増大させるが、このときに河床波の峰の下流側に水路横断方向に対して一定角度傾いた軸をもつらせん流（以下、これを「斜めらせん流」と呼ぶ）が局所的に形成され、河床が急激に洗掘される。この斜めらせん流は、流砂量の空間的不均一などの原因によって河床波の峰線が水路横断方向と一定の傾きをもつようになったときに突然発生するようである。それは発生した直後は規模も強度も小さく、らせん的な渦運動をしているが、この渦運動によってそれが発達するのに最も適した形状に河床が洗掘され、渦運動は規模と強度を増大させる。すると、河床の洗掘はいっそう進み、下流への流砂量は増大させられる。それに伴って、河床波は波高と波長を急激に増大させ、同時にその形状も3次元性の強いものへと変化してゆく。このように、斜めらせん流と河床波は相互に作用を及ぼし合いながら発達してゆく。このときの斜めらせん流に伴う流砂量は周辺の平均的な流砂量の10倍にも達する。⁷⁾河床の洗掘が進んで斜めらせん流が一定程度の規模に到達すると、河床の洗掘速度は小さくなっていく。それと同時に、上流から流送される砂粒によって斜めらせん流の上流側の河床が部分的に埋め戻され、谷筋と横断方向とのなす角度が変化したり、谷の形が凹凸のある複雑な形に変形されるような場合に斜めらせん流は消滅してゆくようである。このように、斜めらせん流は発生、発達、消滅を繰り返しながら河床波を局所的に発達させ、そのような運動の総合的な結果として河床波は全体として発達してゆく。このようにして河床波の波高が増大してゆくと、流れの抵抗係数が大きくなり、水深が増大して全体的な流砂量は小さくなり、河床波の発達も止ることになる。

一方、砂堆の発達過程においては顕著な斜めらせん流の形成は認められず、また斜めらせん流が形成された場合でも、それが十分に発達する以前に上流からの流砂によって洗掘部分がすぐに埋め戻されて、斜めらせん流は消滅してしまう。また、砂堆の場合には斜めらせん流によって巻き上げられる流砂量よりも流れの掃流作用による流砂量の方が大きくなっている。

以上のように、砂漣と砂堆とでは発達過程が異なるが、著者らは写真観察の手法を用いた実験的研究^{7),8)}を行うことによって、次のような結論に達した。すなわち、

砂漣の発達においては、局所的に発生する斜めらせん流による流砂機構が支配的な役割を果す。

砂堆の発達においては、流れの掃流作用による流砂機構が支配的な役割を果す。

一方、木下⁹⁾は、河床形態の相似は流砂現象の相似によってひき起されるとの考えのもとに、模型実験において相似な掃流現象が発生する条件を与えて、従来から難解とされてきた網流河道の砂レキ堆を模型水路上で意のままに再現させた。同様に、著者も「相似な流砂現象が相似な河床形態を形成する」と考えて砂漣と砂堆を区別する方法（以下、これを「流砂現象の相似の方法」と呼ぶこととする）を用いることとする。このような観点から砂漣と砂堆を区別するとつぎのようになる。

砂漣は、流れの中に局所的に発生する渦運動によって河床が洗掘され、それに伴う流砂機構が支配的である河床形態である。

砂堆は、流れの掃流作用による流砂機構が支配的である河床形態である。

以上のような現象認識から砂漣と砂堆の発達過程をモデル化することによって、それらの波高 H と波長 L の間に次のような関係が見出された。⁸⁾すなわち、砂漣に対しては、

$$L_* = C_1 H_*^{0.5} - H_* / \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

砂堆に対しては、

$$L_* = C_2 H_* - H_* \ln H_* / \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られた。ここに、 $H_* = H / d_m$ 、 $L_* = L / d_m$ 、 d_m は砂粒の平均粒径、 C_1 および C_2 は定数、 α は河床波の下流側の斜面が水平面となす角度である。

つぎに、以上のような砂漣と砂堆の区別が従来のそれらに関する定義とどのような関係にあるかを検討する。図-1は、Laursen¹⁰⁾、Guyら¹¹⁾、Vanoniら¹²⁾および著者らの実験結果を用いて、(1)式および(2)式の適用

性を検討したものである。図においては、砂漣と砂堆の区別はA.S.C.E.の定義に基づいて、波長が1フィートより小さな河床形態を砂漣、それよりも大きなものを砂堆としている。ただし、Guyらは波長および波高がおのおの2フィートおよび0.2フィートより小さな河床形態を砂漣としているのでGuyらの資料のうち波長が1フィートから2フィートの間にある河床波を他と区別した上で、Guyらの区分のまま示している。

Guyらによる資料のうち波長が1フィートから2フィートの間にある河床波を別とすると、図において、 $C_1 = 105$ 、 $C_2 = 30$ とすると、各実験資料は砂漣の場合には(1)式、砂堆の場合には(2)式

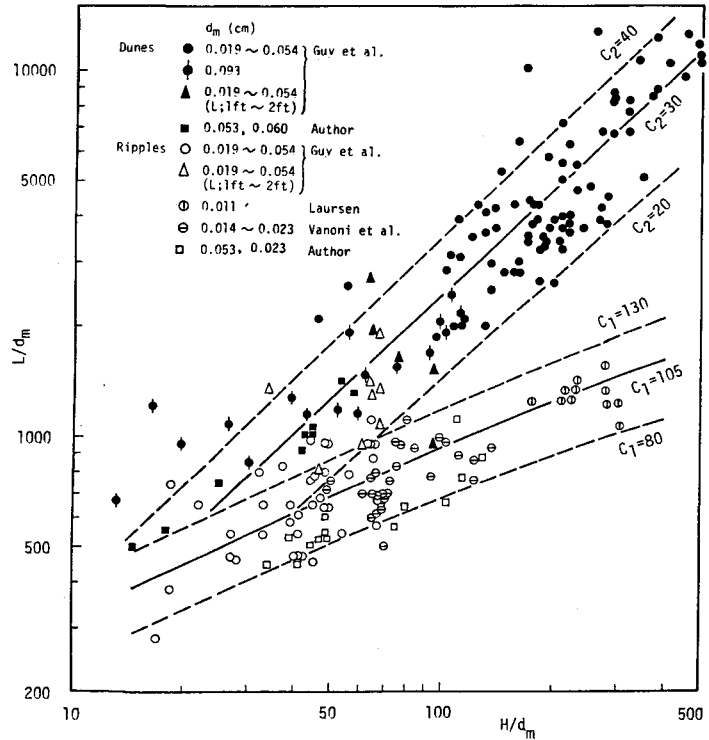


図-1 河床波の波高と波長の関係

表-1 実験条件

Run No.	d_m (cm)	B (cm)	Q (l/s)	I (%)	h (cm)	T (°C)	n (m-s)	L_m (cm)	H_m (cm)	$\frac{u_* d_m}{V}$	τ_*	Bed Configuration
A-1	0.023	40	1.20	0.200	1.42	15.5	0.012	—	—	3.4	0.075	Plane
2	"	"	1.50	0.200	1.60	15.5	0.012	—	—	3.7	0.084	"
3	"	"	1.75	0.217	2.64	15.8	0.025	13.0	1.73	4.9	0.151	Ripple
4	"	"	2.63	0.200	3.97	13.0	0.031	14.6	1.84	5.3	0.209	"
5	"	"	5.00	0.235	6.20	14.1	0.038	15.5	2.39	7.4	0.384	"
6	"	"	9.40	0.217	8.36	15.2	0.032	17.7	2.63	8.6	0.478	"
7	"	"	13.55	0.203	11.50	16.6	0.036	20.0	2.96	10.0	0.615	"
8	"	"	13.55	0.263	9.20	16.0	0.028	25.6	2.54	10.0	0.638	"
B-1	0.053	100	20.0	0.100	7.75	15.7	0.022	27.0	2.4	13.1	0.089	Ripple
2	"	"	"	0.143	7.43	8.3	0.025	27.5	2.5	12.4	0.121	"
3	"	"	"	0.167	7.62	14.8	0.028	27.5	2.6	16.3	0.145	"
4	"	"	"	0.200	7.36	14.8	0.029	28.0	2.6	17.6	0.168	"
5	"	"	"	0.250	6.10	13.5	0.024	32.0	2.6	17.3	0.175	"
6	"	"	"	0.250	5.70	14.6	0.021	56.0	2.4	17.2	0.163	Dune
7	"	"	28.4	0.250	6.95	16.2	0.021	54.0	2.4	19.7	0.199	"
8	"	"	30.0	0.250	7.90	14.4	0.024	70.0	3.1	20.1	0.226	"
9	"	40	1.50	0.200	1.58	13.5	0.012	—	—	7.9	0.036	Plane
10	"	"	2.05	0.200	1.95	14.0	0.012	—	—	8.8	0.045	"
11	"	"	3.24	0.200	2.64	15.0	0.013	—	—	10.6	0.060	"
12	"	"	3.76	0.230	4.05	16.2	0.024	22.7	1.81	14.5	0.107	Ripple
13	"	"	6.05	0.233	5.45	17.0	0.025	23.6	2.16	17.2	0.145	"
14	"	"	9.45	0.180	6.67	15.0	0.020	28.0	2.07	15.9	0.137	"
15	"	"	10.50	0.230	6.56	14.7	0.020	48.6	2.22	17.7	0.173	Dune
16	"	"	13.80	0.338	7.58	15.2	0.023	74.3	2.88	23.4	0.293	"
C-1	0.060	40	1.85	0.163	2.00	18.5	0.013	—	—	10.3	0.033	Plane
2	"	"	2.30	0.200	2.25	18.0	0.014	—	—	11.9	0.046	"
3	"	"	2.95	0.200	2.65	18.0	0.014	—	—	12.9	0.053	"
4	"	"	3.85	0.200	3.10	17.0	0.014	65.7	0.41	13.7	0.063	Dune
5	"	"	4.74	0.188	3.61	19.2	0.014	34.3	0.47	15.1	0.068	"
6	"	"	6.10	0.200	4.30	21.9	0.016	30.2	0.89	18.1	0.086	"
7	"	"	8.10	0.260	5.20	20.6	0.018	33.5	1.08	22.0	0.137	"
8	"	"	9.80	0.200	6.20	21.2	0.018	44.8	1.49	21.4	0.125	"
9	"	"	11.70	0.175	7.30	21.5	0.018	60.4	2.57	21.9	0.129	"

の周辺にまとまる。このことから、流砂現象の相似の方法による砂漣と砂堆の区別は従来の定義と矛盾するものではなく、流砂現象の特徴から河床波を区別する立場から従来の定義を豊富にするものであると言える。

3. 砂漣と砂堆の発生領域

砂漣と砂堆の発生領域に関する実験は、長さ 18 m、幅 1 m、深さ 60 cm のモルタル仕上げの直線水路および長さ 8 m、幅 40 cm、深さ 30 cm の木製の直線水路で行われた。

実験条件および形成された河床波の状況を示すと表 1 のようになる。 d_m は砂粒の平均粒径、 B は水路幅、 Q は流量、 I はエネルギー勾配、 h は水深、 T は水温、 n はマニングの粗度係数、 L_m は河床波の平均波長、 H_m は河床波の平均波高、 u_* 、 d_m/ν は砂粒レイノルズ数、 τ_* は無次元掃流力である。河床形態の区別は流砂現象の相似の方法によって行った。

次に砂漣と砂堆を区分するパラメーターについて検討することとする。

砂漣と砂堆を区分する上で、斜めらせん流のような局所的に安定した渦運動の存在条件を検討することが重要であると考えられる。前述の現象認識から、斜めらせん流が発達しにくい条件があれば砂漣が発生しないことになる。そのような条件として次の 2 つのことがらが考えられる。

その第 1 は、砂粒径が大きいことである。砂粒径が大きい場合には、局所的な渦運動によって砂粒が巻き上げられにくくなるから、このような渦運動が全く発達しないか、その発達速度が小さくなる。この場合には上流から流送される砂粒によって谷の部分に変形させられ、局所的な渦運動は短時間で消滅することになり、その役割は小さなものとなる。

第 2 は、掃流砂量が多いことである。掃流砂量が多い場合には、渦運動が十分に発達する以前に洗掘部分が埋め戻されることになり、局所的な渦運動が大きな役割を果たすことができなくなる。

以上の現象論的な考察から、砂漣と砂堆の発生領域を区分するパラメーターとして、砂粒径と掃流砂量を

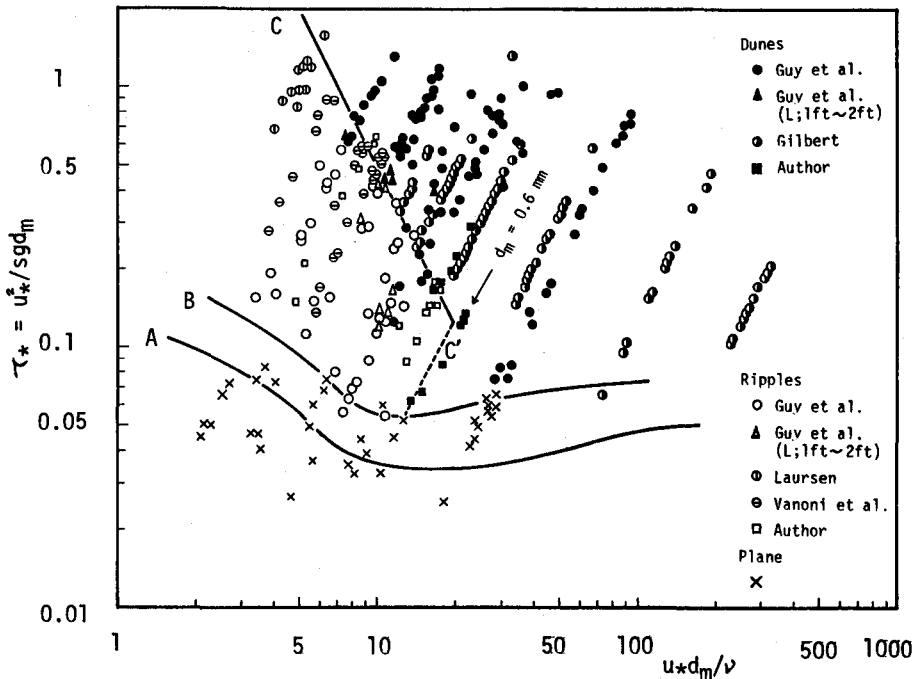


図-2 砂漣と砂堆の発生領域

用いることが適切であると結論づけられる。

図-2は砂粒径と掃流力を無次元化表示したパラメーターを用いて、砂漣と砂堆の発生領域を示したものである。図には著者らの実験結果の他に、先述の Laursen, Guy ら, Vanoni らの資料、さらには Gilbert¹³⁾の実験結果も加えられている。また、図には限界摩擦速度に対する岩垣の実験式が曲線Aで表わされている。

河床波の発生限界は、実験資料から曲線Bのように求められる。これと曲線Aとを比較すると、河床波の発生限界の τ_* の値は砂粒の移動限界摩擦速度の1.5～1.8倍となることがわかる。砂漣と砂堆の発生領域に関して検討すると、砂漣は平均粒径が0.6mm以上では発生が認められない。砂粒レイノルズ数が8～18の範囲では砂漣と砂堆の両者が発生するが、概略的には直線Cによって砂漣と砂堆の発生領域を区分することができる。砂粒が大きい場合には、河床が洗掘されにくく斜めらせん流の発達する速度が小さいから、小さな掃流力で砂堆ができ、砂粒が小さい場合には、斜めらせん流の発達する速度が大きいから、砂堆が形成されるためには大きな掃流力が必要とされる。図の曲線Cの傾きはこのような事実をよく説明している。このことは砂粒レイノルズ数のみでは砂漣と砂堆の発生領域を正確に区分することができないことを意味している。なお、直線Cは次の式で表わされる。

$$\tau_* = 50 (u_* d_m / \nu)^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

砂漣と砂堆の領域区分に関する上記の方法は次のような問題点を含んでいる。砂堆が発生する条件から流量を減少させて砂漣が発生するようにした場合には、砂漣の発生によって流水の抵抗係数が大きくなり、流量を減少させたにもかかわらず水深が増大し、摩擦速度が大きくなる。このため、流量の小さい砂漣の場合の方が流量の大きな砂堆の場合よりも τ_* および $u_* d_m / \nu$ の値が大きくなるので、砂漣と砂堆の発生の境界条件の付近、すなわち直線Cの付近では砂漣と砂堆の実験値が入り交ることになり、完全な領域区分は行えない。つぎに、両軸のパラメーターに含まれる u_* は河床波が発生した結果の水理条件から求められるので、与えられた水理条件と砂粒の特性からどのような河床形態が形成されるかを正確に予測することが困難であることが指摘できる。

上記の問題点を取り除くために、便宜的に図-3のような領域区分図を考えた。ここで、縦軸に用いられているパラメーターはStream powerの無次元化表示である。Stream powerと粒径を用いて河床形態を領域区分する方法はすでに、Allen²⁾によってなされており、Allenは流砂量はStream powerの関数となると述べている。

図-3において、曲線Dは図-2の曲線Bに対応する。本図の方法によると、砂漣と砂堆の発生領域は直線EおよびE'によって区分される。

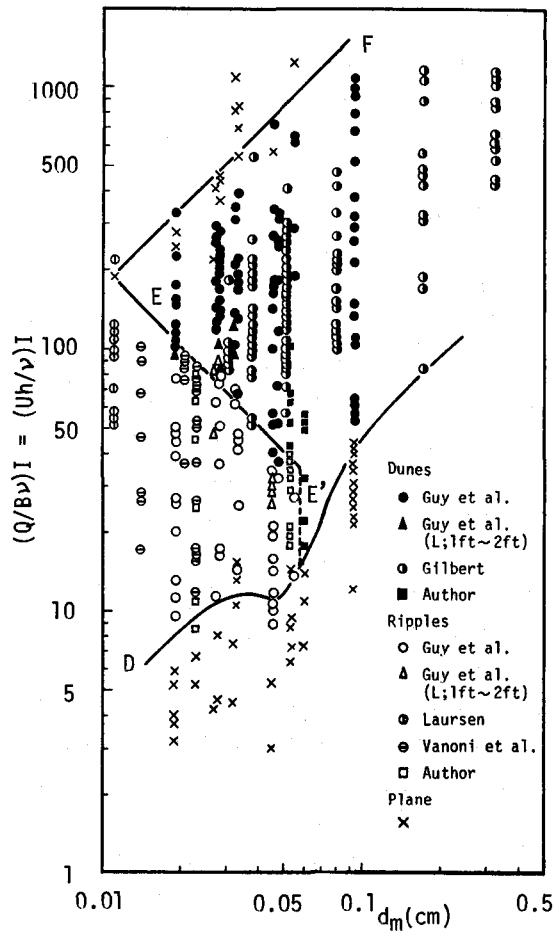


図-3 砂漣と砂堆の領域区分図

なお、直線 E は次の式で表わされる。

$$\frac{Q}{B\nu} \times I d_m = \frac{U h}{\nu} \times I d_m = 2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、U は断面平均流速である。図-3 においては、直線 E の周辺での砂漣と砂堆の実験値の入り交りの程度は、図-2 の場合と比較すると、かなり小さくなっている。また、この方法によると、水路幅、粒径、勾配、流量、水温が与えられると、どのような河床形態が形成されるかが簡単に予測できるので、移動床の模型実験を行う場合などにこの方法を有効に利用することができる。

4. お わ り に

本研究は、河床波の発達過程の詳細な観察をもとにして、砂漣と砂堆を区別し、それらの発生領域を区分したものである。砂漣と砂堆の発生領域を区分するパラメーターとして、砂粒径と掃流砂量を表示するものが適切であることを明らかにし、砂粒レイノルズ数と無次元掃流力を両軸とする領域区分図を提案した。実験資料による検討結果から、「相似な流砂現象が相似な河床形態を形成する」という考え方にもとづいた砂漣と砂堆の区別およびそれらの発生領域の区分の方法の有効性が確かめられた。

以上の結果から、砂漣と砂堆とは異なる流砂現象が河床波の形成を支配していることが明らかになったが、このことは移動床流れの流砂量や抵抗特性を評価する際に砂漣と砂堆とで異なる形の定式化が必要であることを示唆している。

最後に、本研究を進めるにあたって多大の御援助をいただいた宇民正氏、有益な助言をいただいた芦田和男教授ならびに今本博健教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Albertson, M. L., D. B. Simons and E. V. Richardson: Discussion, Proc. ASCE, HY1, 1958.
- 2) Allen, R. L.: Current Ripples, North-Holland, 1968.
- 3) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, 1972.
- 4) 山本晃一: 相似律の観点から見た移動床流れの水理, 土木研究所資料, 第1059号, 1975.
- 5) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: 土木学会論文報告集, 第210号, 1973.
- 6) Task Force on Bed Forms in Alluvial Channels of the Committee on Sedimentation: Proc. ASCE, HY3, 1966.
- 7) 上野鉄男・宇民正・徳平隆之: 第35回土木学会年講Ⅱ, 1980.
- 8) 上野鉄男・宇民正・有本俊志: 京都大学防災研究所年報, 第22号B, 1979.
- 9) 木下良作: 大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験, 建設省中部地建静岡河川工事事務所, 1980.
- 10) Laursen, E. M.: Proc. ASCE, HY1, 1958.
- 11) Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson: U. S. Geological Survey Professional Paper, 462-I, 1966.
- 12) Vanoni, V. A. and L. S. Hwang: Proc. ASCE, HY3, 1967.
- 13) Gilbert, G. K.: U. S. Geological Survey Professional Paper 86, 1914.