

洪水による河床変動についての実験的研究： 真名川の九頭竜川との合流点より上流の8Km の区間について

西谷, 隆亘 / NISHIYA, Takanobu / 吉野, 文雄 / 牧野, 立平
/ MAKINO, Rippei / YOSHINO, Fumio

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

9

(開始ページ / Start Page)

29

(終了ページ / End Page)

51

(発行年 / Year)

1973-02

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004223>

洪水による河床変動についての実験的研究

—真名川の九頭竜川との合流点より
上流の8 km の区間について—

Étude expérimentale de la formation des bancs obliques lors d'une crue.

—sur le modèle réduit de la section longue de 8km de la
rivière MANA en amont du confluent avec
le fleuve KU-ZU-RYÛ au Japon—

西谷隆亘	工学部助教授
Takanobu NISHIYA	<i>Maitre-assistant</i>
吉野文雄*	土木工学科兼任講師
Fumio YOSHINO	<i>Chargé de cours</i>
牧野立平	工学部技術職員
Rippeï MAKINO	<i>Technicien</i>

概 要

本実験は、実際の河川での巨視的な河床変動では砂礫堆が大きな役割を果し、河道内の洪水流の運動が、河床形態のこの巨視的な変動によって捉えられるという前提に立って、蛇曲河道内での砂礫堆の形成に着目して行なわれた。実験対象としては、福井県九頭竜川の左支川である真名川（全長約10km）を選び、模型は縮尺1：200で作成された。相似律はフルード則と無次元掃流力によった。模型で使用された砂は原型で約10cmに相当する平均粒径0.5mmの浜砂（比重2.65）であり、流量は原型で約2,000m³/sに相当する3.54 l/sを約2時間通水された。そして、水を止めた後の河床状況を測定した。模型で得られた河床状況は真名川の現地航空写真とよく一致し、良好な結果が得られた。また、模型での洪水の流心線の水衝部と実際の洪水による破堤箇所に関してもよい一致がみられた。

Résumé

Cette expérience a été effectuée mise au point de la formation des bancs obliques sur le lit de cours d'eau de la rivière faiblement sinueuse, en supposant que l'écoulement de la crue dans le canal se comprenne par l'existence des bancs

*元東京大学生産技術研究所勤務
現建設省土木研究所水文研究室勤務

obliques qui ont un rôle très important dans l'évolution du lit de cours d'eau.

On a exploité dans le rapport 1:200 le modèle réduit de la rivière MANA qui est l'affluent gauche du fleuve KU-ZU-RYÛ au Japon, et a dirigé l'expérience avec le même nombre de Froude et avec la même force tractrice sans dimension, c'est-à-dire,

$$\tau_{0*} = \frac{u_*^2}{Sgd}$$

u_* ; vitesse de frottement

S ; poids spécifique apparent du matériau charrié dans l'eau

g ; accélération de la pesanteur

d ; diamètre des grains du matériau charrié

dans la nature et sur le modèle réduit.

Le matériau charrié employé pour l'expérimentation est le sable ayant 0,5mm de diamètre moyen et 2,65 de poids spécifique. Le débit de 3,54 l/s correspondant à 2.000m³/s de la nature est coulé sur le modèle réduit, et on l'a arrêté au bout de 2 heures. Ensuite on a pris des niveaux du lit de cours d'eau sur le modèle réduit (Fig. 14). La configuration du canal esquissée par la photographie aérienne de la nature (Fig. 15) témoigne du bon accord avec celle du modèle réduit (Fig. 14 et Fig. 16), et aussi les positions réelles de rupture des digues par la crue en 1965 correspondent aux celles que le thalweg s'aborde aux digues sur le modèle réduit (Fig. 16).

1. 緒 論

普通の自然の河川は河岸や河床が土や砂や砂利のような水の流れによって動かされ易い材料で構成されていて、河道では水だけでなく、砂や砂利のようないわゆる流送土砂も流れるので、一般に河道はその河道を構成する物質と流れの間での相互作用によって、多様な形態を呈している。このような状態にある河道の流れの特性や河床形態をそのまま研究の対象とすることは非常に困難である。

河岸が固定されているような河道内における流れと河床材料の相互作用の特性のひとつとして、その河道が直線的であっても、河床高の変化量が河道を横断する方向において異なることと共に、その河道内で流水は蛇行する、という注目すべき事実がある。この事実の要点は、河道の左右岸にそって交互に砂礫の洲（砂礫堆という）が形成されることにある。この砂礫堆の形成と流水の蛇行現象が、主として、洪水時に生じているものである、ということが、最近の諸研究により明らかにされてきた¹⁾。洪水の河道内での流向や水衝部、低水流の状態などを説明するにはこの種の現象の解明が鍵であると思われる。

河道内の洪水流の運動に関する研究は、古くから河川の改修工事にたずさわる技術者達の間での経験的な知識の積み重ねとして行なわれてきた。それらの知識が、河道内での洪水流の運動に

特有力学現象としての研究に集大成され始めたのは、19世紀半葉頃の事であると考えられる。当時、西欧諸国では舟運のための河川改修工事が盛んに実施されていて、これらの工事にたずさわる人々の間で、砂礫堆の形成と流水の蛇行現象が共通の話題として論じられていた。そして、20世紀初頭には、これらの現象に焦点を合わせて、洪水による河床変動を実験的に研究するに至っていたが、我国においては、この現象についての研究が行なわれるようになったのは、1950年代になってからのことであった²⁾。

本論文は、この砂礫堆の形成と洪水流の蛇行現象に注目して、河道内の流水の特性と河床変動の状態を解明するために実施した、模型実験についての報告である。これまでのこの現象についての実験的研究は、主として、直線移動床水路におけるものがほとんどであって、実際の河道での砂礫堆の形成を対象とした実験は、我国ではまだ行なわれていないといってよい。その意味で、筆者等が行なった模型実験による河床変動の研究は、この種の実験的研究の初歩となると考えてよいであろう。

今回の実験は、実験対象を福井県九頭竜川の左支川である真名川(全長約10km)を選び(Fig. 1)、実際河川での巨視的な河床変動では砂礫堆が大きな役割を果し、河道内の洪水流の運動が、河床形態のこの巨視的な変動によって捉えられるという前提に立って、蛇曲河道内での砂礫堆の

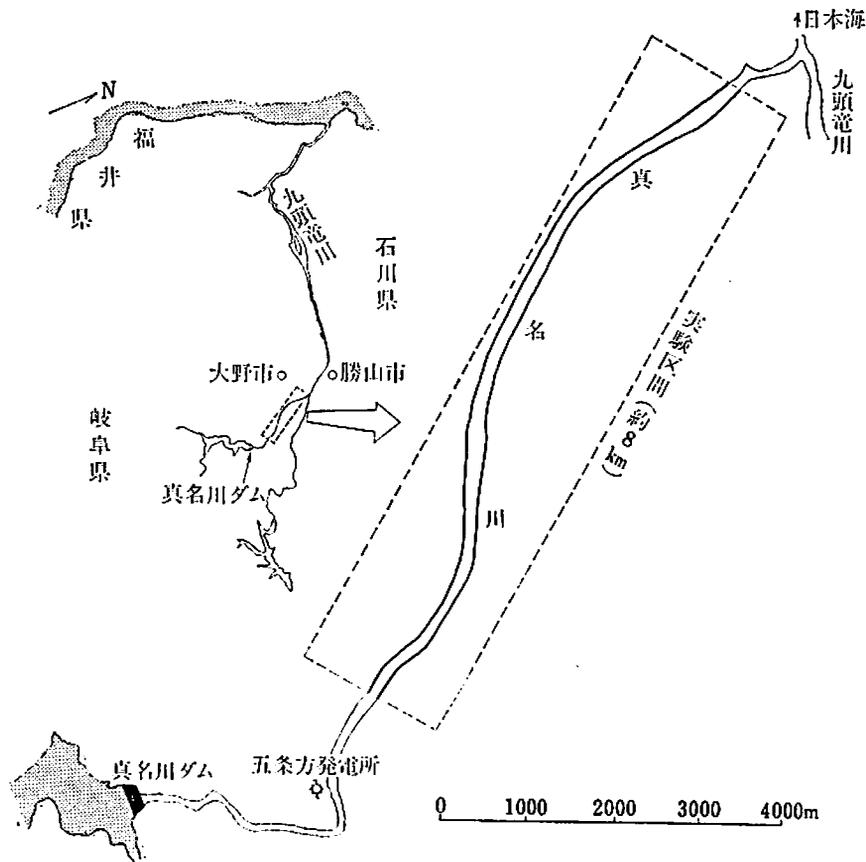


Fig. 1 真名川の位置
 Fig. 1 La situation de la rivière MANA.

形成に着目して行なわれた。そして実際の河道の河床形態と模型の河床形態との比較が行なわれた。

以下では、この模型実験を中心として、現在得られている洪水時の河床変動についての知識を要約して述べ、模型実験を行なうに必要な相似律について検討を加えた後、実験についての詳細と実験の結果を述べることにする。

2. 直線河道内の流れの特性と河床形態

一般に、河道は水の流れと移動性の河床材料で構成されるので、境界条件が複雑で多様な形態を呈している。そのような状態をそのまま実験室内で再現することは、不可能に近い。最も単純な問題は、平面形が直線で構成され、岸の面が鉛直で固定されていて、平均的な水路床こう配が一定であるような河道である。このような河道は実験室内での直線移動床水路でモデル化される。このような単純化された水路においても、流れと河床材料の相互作用すなわち砂礫堆の形成と流れの蛇行現象の一般性は失われないことは諸々の研究の結果より推察される。そこで、ここでは河道の多様性を認めた上で、今回の実験の遂行や結果の考察に必要な知識を明らかにするために、現在明らかになっている直線移動床水路内での流れと河床形態についての要素的な事実を略述することにする。

2-1. 直線移動床水路内での流れと河床形態

直線水路内に水によって動かされるような粒状材料、たとえば砂や合成樹脂粒などを平坦に敷き均し、その上にある量の水を流すと水が粒状材料を動かすだけの力を持たない時は、河床面はもとのままであるが、こう配を一定に保って流量を増やしていくと、ある流量の時に河床粒子は移動を始めるようになる。水が砂礫を動かそうとするこの力を掃流力といい、次式の如く、一般に流水の重力の成分で表現されている。

$$\tau_0 = wHI \quad (2.1)$$

ここに、 τ_0 : 掃流力 (底面に及ぼされる摩擦力)

w : 水の単位体積重量

H : 水深

I : こう配

あるいは Prandtl の摩擦速度 $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ を用いて表わすと

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (2.2)$$

ここに、 ρ : 水の密度

である。

そして砂礫が移動し始める時の掃流力を限界掃流力と呼んでいる。

粒子が移動し始めると、河床面にはいろいろな形状の波が形成される (Fig. 2)。この波は通常

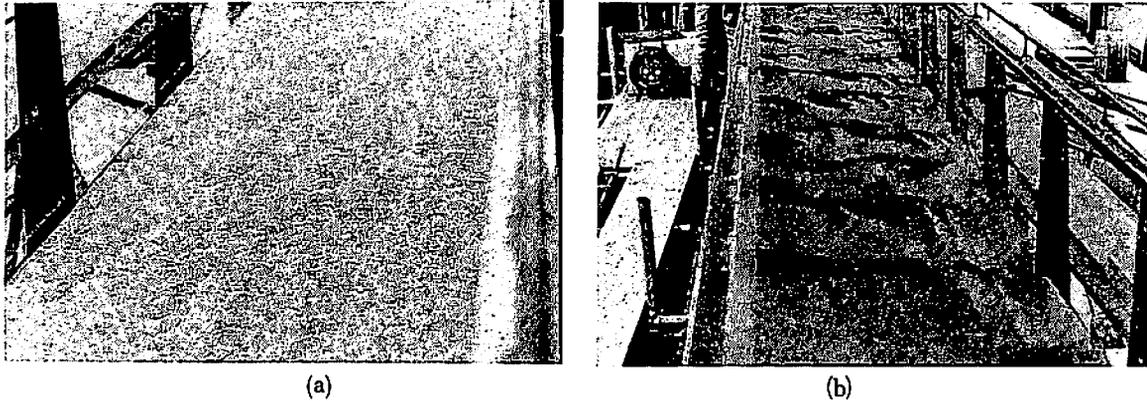


Fig. 2 (a) ripples (b) dunes

ripples と呼ばれ、その時の流れの掃流力に応じた速度で下流にゆっくりと前進する。現在、この ripples の定義は一般にその波の大きさを示されていて、波高が粒子の径の数倍～数十倍で波長が大体30cm以下のものとされている。流量をこの状態から更に増すと、波の峰が水路の横断方向に直線的で、波長や波高が ripples より大きな波が河床面に生ずる。これは dunes と呼ばれ、流れの方向にゆっくりと前進する。更に流量を増すと河床面は箒で掃いたように滑らかになり、河床波がなくなる状態となる。この状態を transition という。これ以上流量を大にし、流れの掃流力を大きくすると、河床にほぼ正弦波の波形をもつ波が形成される。この波は antidunes と呼ばれ、静止しているか、あるいは流れの上流側へ移動する。この時の水面はほぼ河床波と同位相の波面となる⁹⁾。

以上の過程が一般に移動床水路で認められ、研究されてきている現象であるが、前述のように、流水が河床に及ぼす力である掃流力は流水の重力成分として定義され、(2.1)式で表わされるので、掃流力を同一にするには、水深 H とこう配 I の組み合わせ方によって二通りの方法が可能である。たとえば、こう配を小にし、水深を大にしても、こう配を大にし、水深を小にしても、同一の掃流力とすることができる。そして、上述のいろいろな河床波形の形成される条件は、一般に水路床こう配が緩やかで、水深が水路巾に比して大の時である。では水路床こう配を急にして、水深と水路巾の比を小さくするとどういふ現象が観察されるであろうか。このような状態で実験を行なうと、河床面には波の峯が水路を横断する方向に斜めに連なり、上流面が緩傾斜で峯の下流側が急こう配をなす、砂礫堆と呼ばれる河床形態が形成される (Fig.3)。そして、河床には左右岸交互に深く掘れる部分ができ、流れは蛇行するようになる。この現象は本報告の中での中心課題であり、次項でこの現象についての直線水路内で知られている事実を詳述することにする。

2-2. 直線水路における砂礫堆とその上の流れについて

自然状態の河道では流量が普段に変化している。そして一般に流量が少ない時には、水は河道

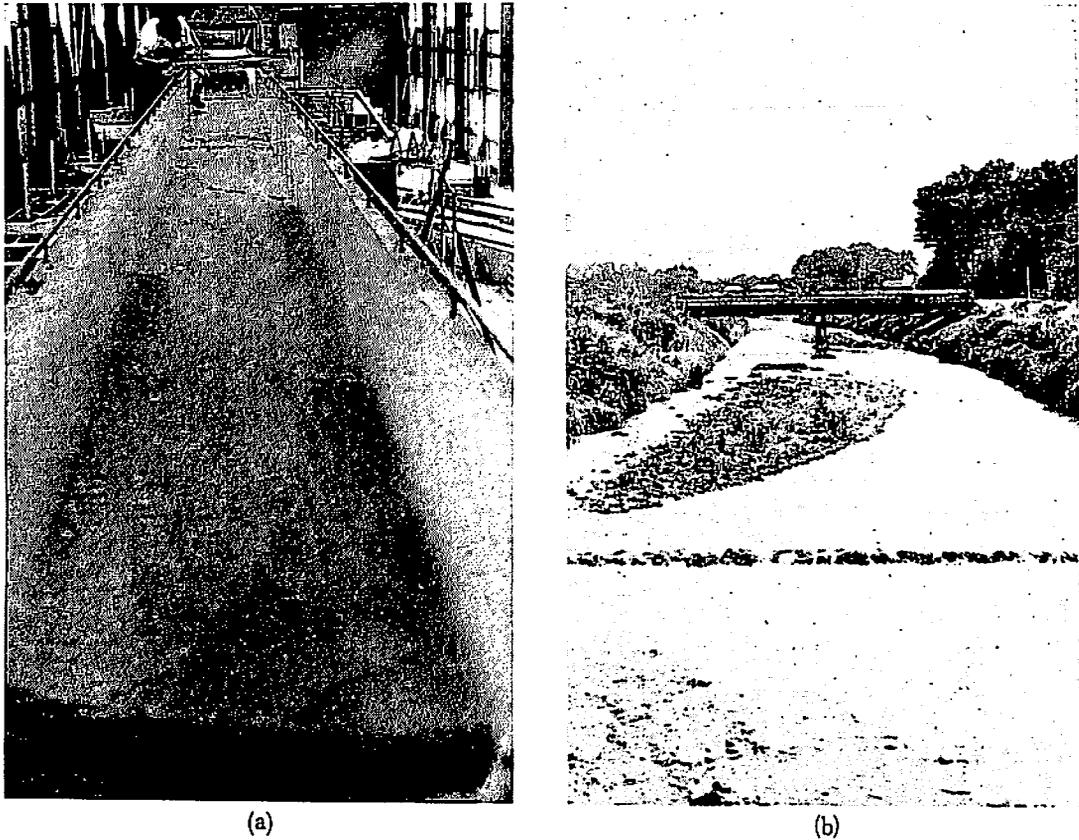


Fig. 3 砂礫堆の写真 (a) 実験室内 (b) 自然河川
 Fig. 3 Des bancs obliques (a) dans le laboratoire (b) dans la rivière.

内の一部分だけにしか流れていず、他の大部分には広大な洲があらわれている。その時よく観察すると、洲にそうように左岸から右岸へ、右岸から左岸へと交互に低水の流れは蛇行あるいは網流していることがわかる。流量が多くて河道を全面にわたって水が流れるような状態の時を考えると、その時の水深は河道の巾に比し非常に小さなものであって、水深と水路巾の比が1/10になることさえ稀で、大多数の河川ではこれよりも相当小さな比の値を示す。このことを考慮して、直線水路内に適当な粒径の砂を敷き均し、水深と水路巾の比を1/10以下になるようにして水を流す。もちろん、砂の限界掃流力以上になるような水流を通水する。このような条件を実験水路に与えると、大抵の場合、水路床こう配をかなり急なものにしなければならなくなる。一定時間通水すると、実際の河川と同様な砂礫堆が形成される。このような種類の実験のうちで、巾50 cm、こう配1/50、河床砂の平均粒径0.23 cm、の条件で流量 $Q=0.90$ l/s を通水した時の実験をとりあげその結果を要約しておく。

0.23 cmの砂を平坦に敷き均し、4.90 l/sの流量の水を約30分間通水し、断水した後、河床変形状態を測定した。この結果は Fig.4 に示すとおりである。この図からも見られるように、最初平坦に敷き均されていた河床が、水路側壁にそって極端な深みをもつ細長い部分と、その他の大部分のところで平坦で浅い部分との二つの部分に変形されていることがわかる。そして深みのあ

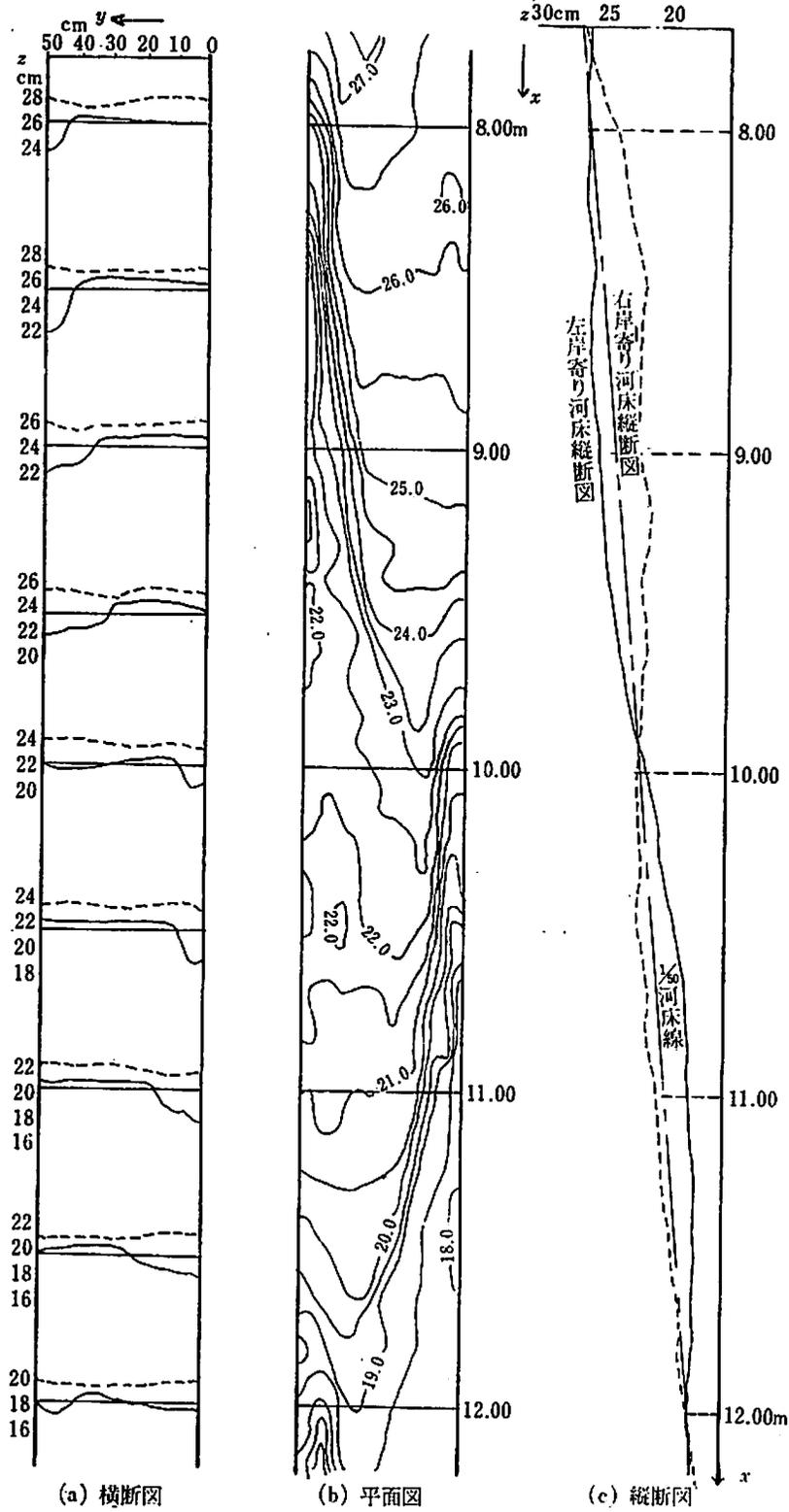


Fig. 4 測定を対象とした「砂礫堆」

Fig. 4 Courbes de niveau des bancs obliques typiques.

る淵の部分が左右岸交互に形成され、その深みを分離する峯が、流れを横断して斜めに連なっている。

この状態での水の運動を調べるために、河床砂の移動をとめて、流水の流速分布を詳細に観測した。河床砂を Fig. 4 の状態で固定するために、水性ビニール塗料を塗布して、乾燥させた。そして再び 4.90 l/s の流量を通水して流速をピトー管で測定した。その結果を用いて計算された等流量線を示すと Fig. 5 のようになる。この図は実線ではさまれた部分にそれぞれ全流量の10%の流量が流れていることを示し、太実線は流量の二等分線を示している。この図から、深みの部分に次第に流量が集中していき、砂礫堆の巾が拡がり始める付近で最も流量が集中することがわかる。すなわち、流れの蛇行は河道横断の最低点を縦断方向に連ねた線である谷線の蛇行とはほぼ 1/4 波長だけずれていることがわかる。

各測定点における平均流速の分布を示すと Fig. 6 のようになる。この図によると淵の上流端では流速が遅く、その横断方向に反対側の洲の高まっている部分で最も速くなっている。そして等流量が狭い中で流れる部分と広い中で流れる部分のような、流れが収束、発散を繰り返す現象と対応して、平均流速が加速、減速を繰り返す。

砂礫堆上の流れの状態を概括的にみるために水面および底面における流線を描くと、Fig. 7 のようになる。この図から、流れが淵に集中し、次第に砂礫堆の前縁に沿って拡がり、深み及び砂礫堆の前縁に沿う部分では、水面と底面での流向が異なっていて、流れは螺旋状の流動をすることが推定されるが、流れが拡がる部分では水面と底面における流線の方向は一致しており、この部分では二次元的な流れをしていると考えられる。

2-3. 移動床上の粗度について^{5), 6)}

砂礫堆を形成する水流は、全体としては三次元的な流動をし、一断面内の水深や流速は場所による差が著しいことは先に述べた通りで、平均量を取り扱うこれまでの水理学的手法では、この種の現象を充分表現し得ないだろうことは想像に難くない。しかし、ここでは、現象を総括的に表現する意味で、流速、水深、こう配などの断面全体の平均的な水理量を用いて、流れの抵抗を検討する。

固定床乱流と比較するために、Darcy-Weisbach の摩擦係数 f と平均水深 h_m および砂礫の平均粒径 d_m の関係を図示すると Fig. 8 となる。図中 $k_s = d_m$ の直線は h_m を径深 R で置きかえると

$$\frac{u_m}{u_*} = 6.25 + 5.75 \log \frac{R}{k_s} \quad (2.7)$$

となり、開水路固定床乱流での対数則を表わす Keulegan 式に相当するものである。この図から、砂礫堆が形成されている時の水路床の抵抗は固定床開水路の抵抗と比べて大きくなっていることがわかる。それに対応して、流速は河床波が形成される以前に比し、形成後は小さくなる。これは、移動床では水路床面に波が形成されると、形成される以前に比べて、形状抵抗の増加により、全体の抵抗が増加するものと考えられている。巾50cmの水路で平均径0.23cmの砂を敷き

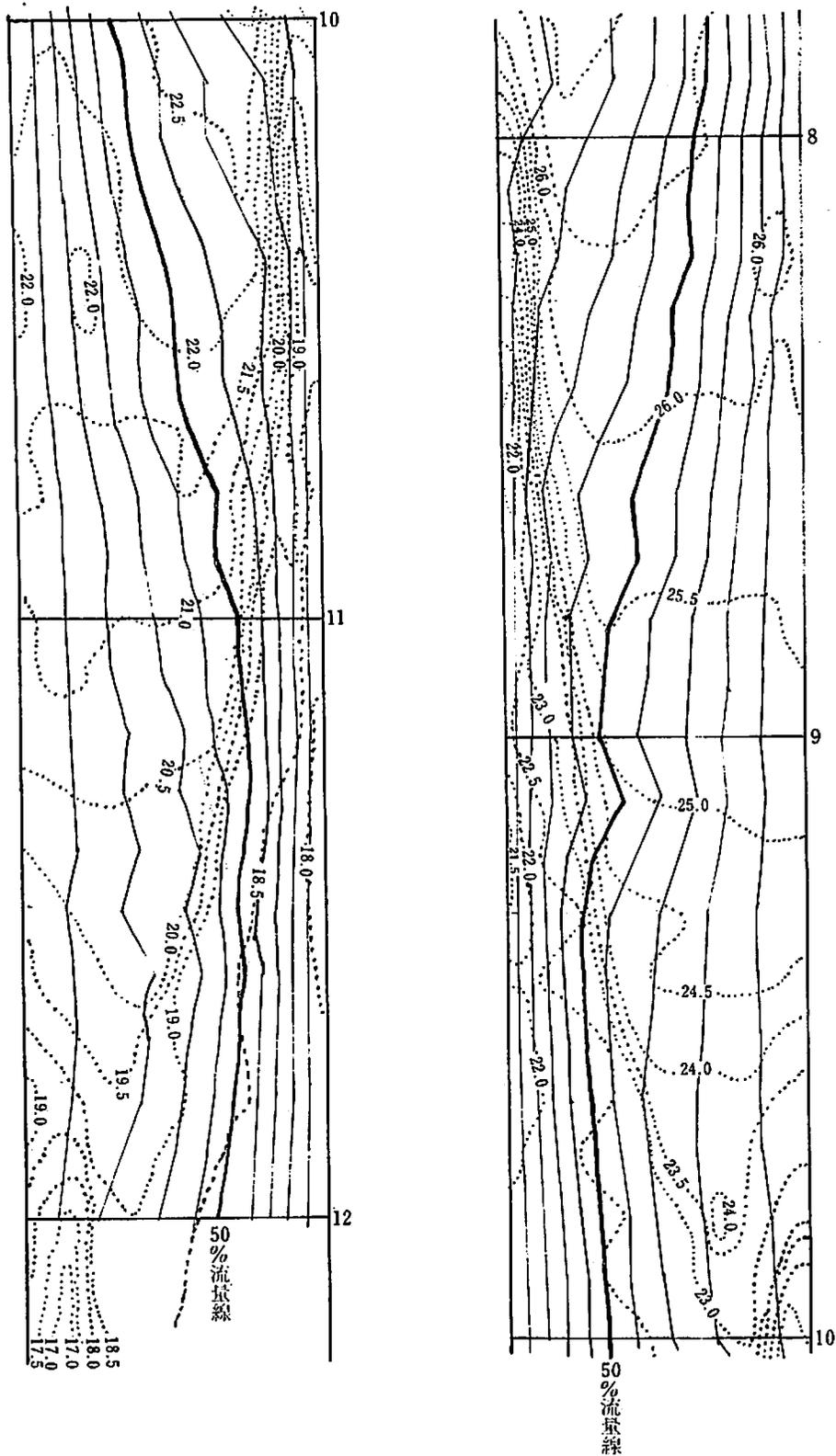
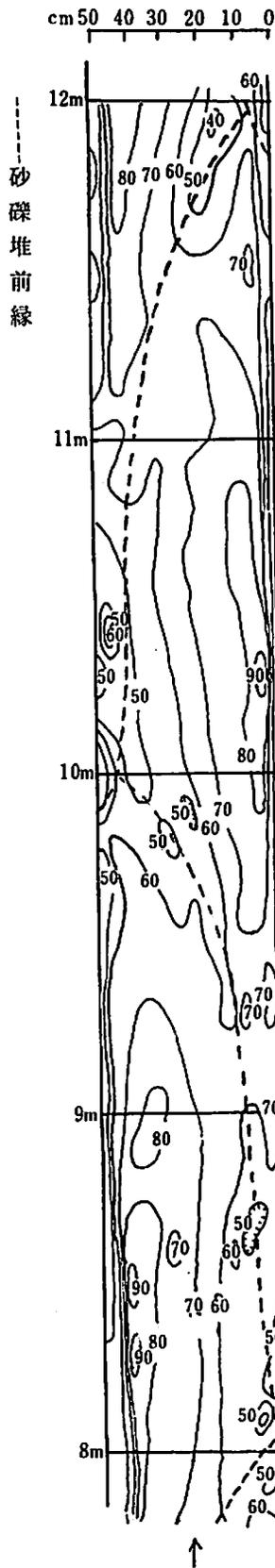
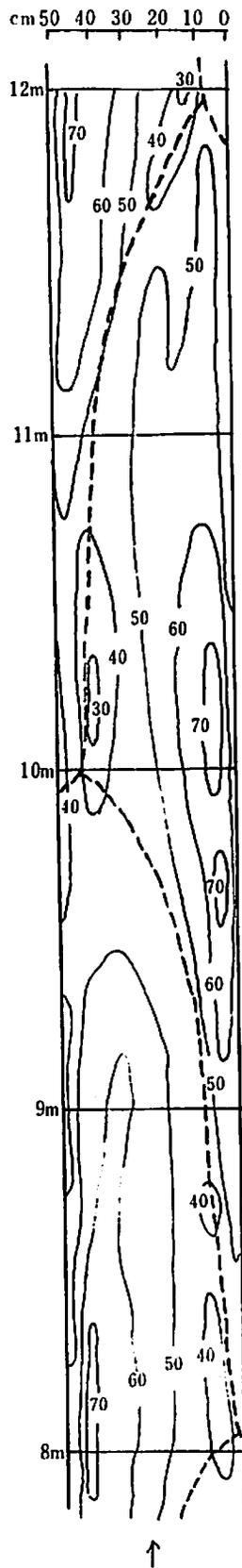


Fig. 5 10%流量線図(点線は河床高(cm)を表わす)
 Fig. 5 Diagramme des lignes de débit de 10% sur les bancs obliques.

均し, 実測した結果を Table 1 に示す。こう配は1/50で, 流量は5.2l/s を通水し, 45回の実測値



(a) 等水面流速線図 (图中数値の単位は cm/sec)



(b) 等水面流速線図 (图中数値の単位は cm/sec)

Fig. 6 砂礫堆上の流れの等流速分布図

Fig. 6 Répartition des égales vitesses sur les bancs obliques.

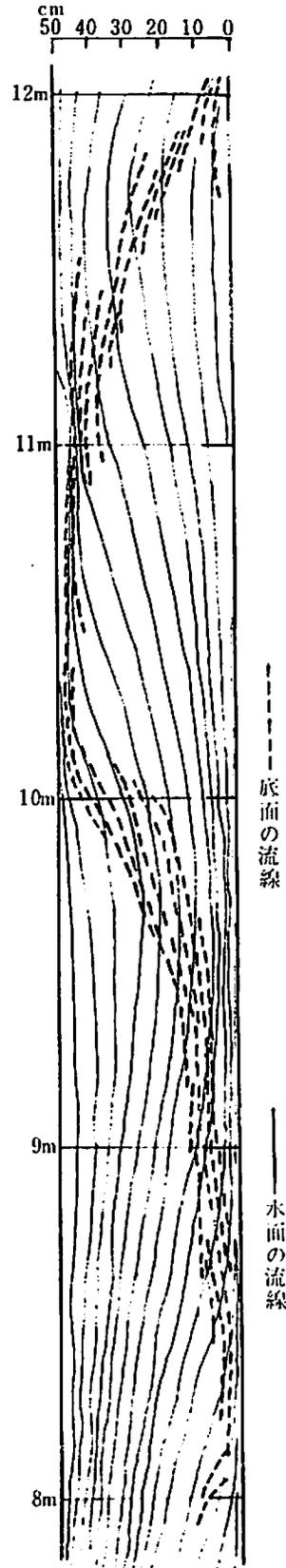


Fig. 7 砂礫堆上の流れの水面及び底面における流速線図

Fig. 7 Lignes de courant à la surface d'eau et de courant de fond sur les bancs obliques.

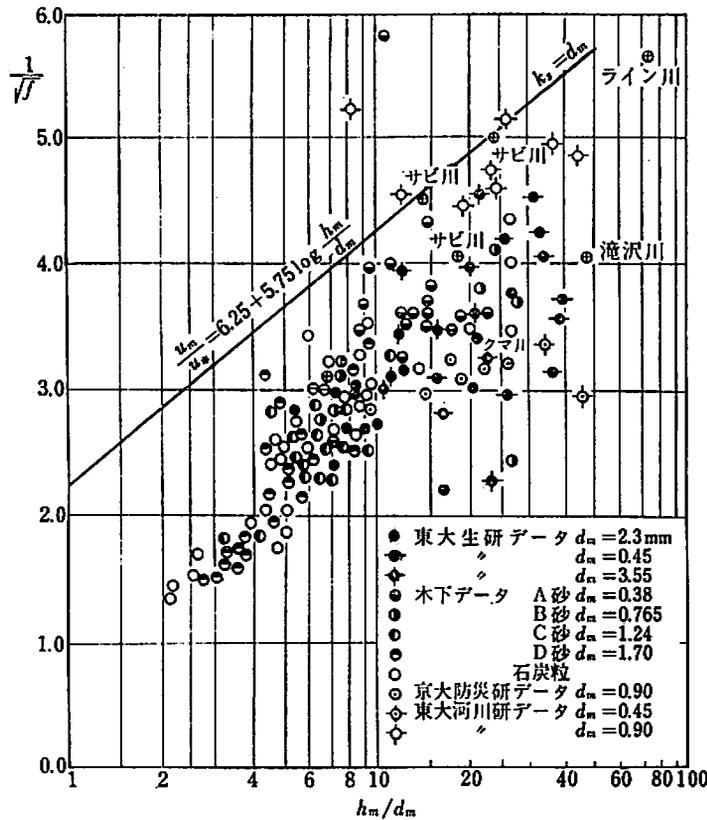


Fig. 8 抵抗係数 $1/\sqrt{f}$ と h_m/d_m の関係

Fig. 8 Relation du coefficient de résistance $1/\sqrt{f}$ à h_m/d_m sur les bancs obliques.

の平均値を示したものである。

流速	砂礫堆		
	形成前 (I)	形成後 (II)	(II)/(I)
平均流速 u_m	53.8cm/s	51.3cm/s	0.954
表面流速 v_m	74.0cm/s	71.2cm/s	0.962

Table 1 砂礫堆形成による流速の変化

Table 1 Variation de la vitesse par la formation des bancs obliques sur le lit de cours d'eau.

これによるとこの条件のもとでは表面流速，平均流速とも砂礫堆の形成により，形成前のそれの約95%になっていることがわかる。この結果からは，砂礫堆の形成による形状抵抗の増加はあまり大きなものではなく，砂礫堆を形成する水流の抵抗はほとんど粒子抵抗によって規定されるものであろうということが推察される。これを検討するために，マンシングの粗度係数についての Strickler 公式

$$n = 0.015 d_m^{1/6} \quad (d_m: \text{平均粒径 mm}) \quad (2.4)$$

と砂礫堆の抵抗とを比較したものが Fig. 9 である。この図から $h_m/d_m > 10$ の範囲では，粗度係数は，Strickler 公式すなわち，砂の粒径だけの関数として表わされることがわかる。

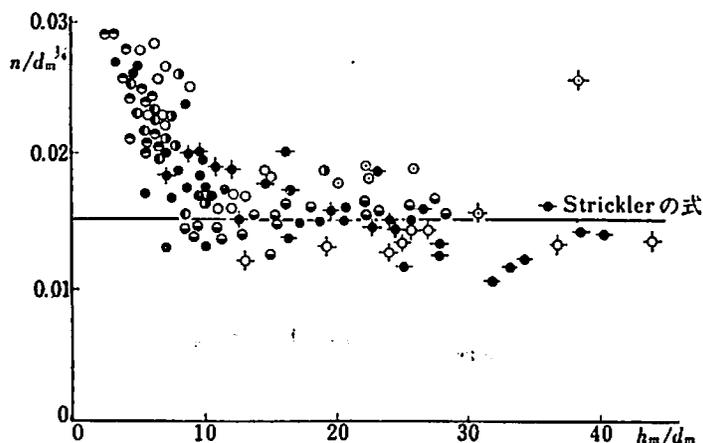


Fig. 9 粗度係数 n と h_m/d_m の関係
 Fig. 9 Relation du coefficient de rugosité n à h_m/d_m
 sur les bancs obliques.

2-4. 砂礫堆の形状について

現在のところ砂礫堆の形状や規模を水理諸量と関係づけた一般的な関係はまだ知られていない。sand waves のひとつとしての砂礫堆の形状を代表する量として、砂礫堆の長さとその高さの比をとると、フルード数との間には Fig.10に示すような関係がある⁷⁾。フルード数 F_r とこう配 I の間にはかなり強い相関があることが考えられるので、 I と F_r の相関を検討したが、Fig. 10以上に点がちらばるので、Fig.10は一応、砂礫堆の形状とフルード数の間の関係を表現するものと考えられる。砂礫堆の高さや長さ各々については、同一の実験でもばらつきが大きく、水理量との関係は明らかでない。

3. 模型実験の相似律

模型実験を行なうには原型と模型の間に「相似」の関係がなければならない。

一般に「相似」という語からは、二つのもの（実物と模型）で、大きさや形だけに一定の比例関係（幾何学的相似）が成立している印象を受けるが、ここで述べる「相似」という語は幾何学的相似のみならず、そこに作用し、発生する力（力学的相似）、運動状態（運動学的相似）など全てに亘り、一定の関係が成立しているという意味で使われる。

模型はある縮尺で実物と幾何学的相似を保つよう製作されるが、事情により幾何学的相似が保たれない場合がある。その時は鉛直方向の縮尺と水平方向の縮尺の異なる「ひずみ模型」となる。また、力学的相似に関しても実際に実験を行う場合、そこに出現する総ての水理量間に相似関係を成立させることは非常に困難であり、後に述べるように着目するいくつかの限られた要素間の比例関係だけしか成り立たせることができない。従って、水理模型実験が行われる場合、全てに亘って相似関係が保たれることが望ましいが、主要な役割を果たさない水理量に関しての相似関係を保つことはあきらめざるを得ない。言い換えると、着目する要因とそれによって生ずる現象ごとに必要な相似律が定まることになる。

普通、境界面をもつ水の流れは大きく分けて二つの領域からなる。粘性力の大きい境界層領域と慣性力の支配的な境界層外の領域である。普通の実験では、模型と原型の間で二つの領域に同

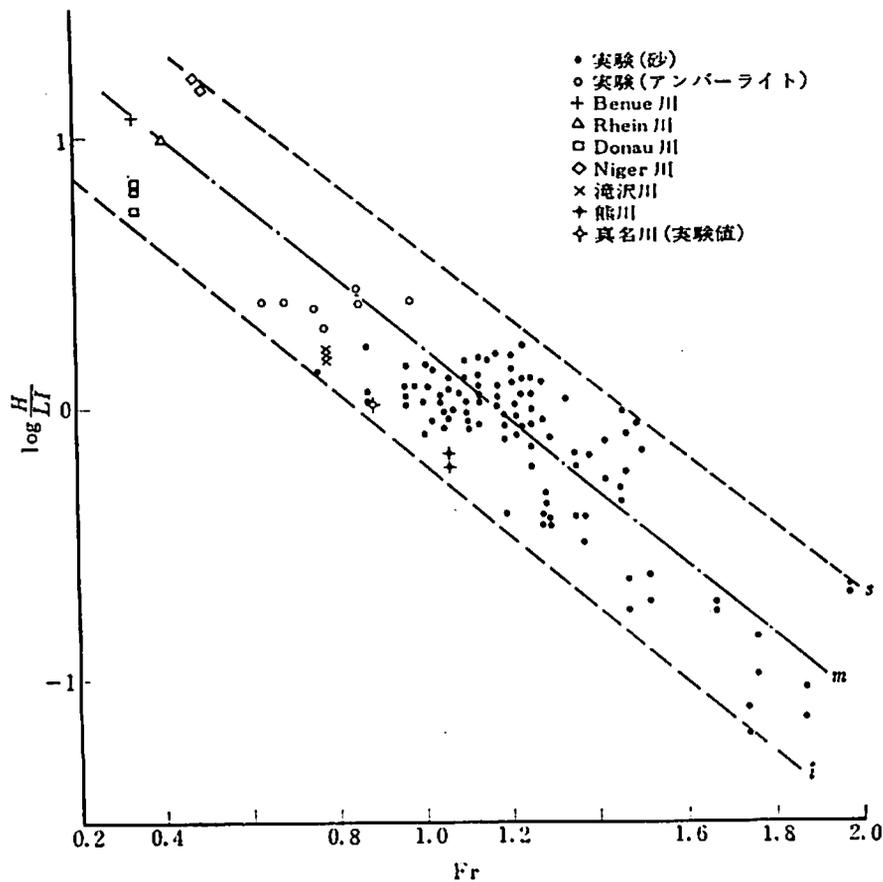


Fig. 10 砂礫堆の形状 (L:長さ, H:高さ, I:摩擦勾配) と Fr 数の関係
 Fig. 10 Relation de la forme (L: longueur, H: hauteur, I: pente de ligne d'énergie) au nombre de Froude.

時に同じ相似律を適用することはできないので、どちらか一方の領域にのみ着目して行なわれる。ところが、流れと河床構成材料の相互作用が問題にされる移動床の実験では、二つの領域での相似が要求される。しかし、現段階では統一された理論による一個の相似律がないので、便宜的に二つの領域に別々の型の相似律が適用される。

ここでは、運動方程式により流れの相似律を説明した後、2章で述べられた砂礫堆上の流れに関する考察を基に、今回の移動床実験に必要な相似律について述べる。

3-1. 水の流れの相似律

模型実験を行なう場合、模型の寸法の縮尺を考えるが、目に見える模型の幾何学的相似のみならず、模型での水の動きに関する要素や作用する諸力に関しても縮尺が考えられ、その縮尺の間に何らかの関係がなければならない。

模型と原型での水の流れが同じ方程式に従う時、その流れは相似であるという。水の動きに関する要素には流速や流線があり、これらは流線の方程式や連続方程式で表現されるが、これらが模型に関しても、原型に関しても同じ型の方程式に従い、力に関しては加速度、外力、圧力、粘

性力などが同じ方程式に従うということである。

流線の方程式は

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (3.1)$$

である。通常の実験では水は非圧縮性として扱われるから、連続方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

であり、Navier-Stokes の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$$\text{但し, } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

ここに、 x, y, z は空間座標を表わす独立変数

t は時間を表わす独立変数

u, v, w は各々 x, y, z 方向の流速

F_x, F_y, F_z は各々 x, y, z 方向の外力

p は圧力、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数

を表わす。

である。

(3.1)あるいは(3.2)式を模型と原型で共に満たす時運動学的相似であるといい、(3.3)式が満たされる時、力学的相似であるという。

原型に関する変数には p という添字を、模型のそれには m という添字をつけ、各変数の縮尺を K で表わし、次のように定義する。

a) 幾何学的要素の縮尺

$$K_x = \frac{x_m}{x_p} = \lambda_x K_z, \quad K_y = \frac{y_m}{y_p} = \lambda_y K_z, \quad K_z = \frac{z_m}{z_p}$$

b) 運動学的要素の縮尺

$$K_u = \frac{u_m}{u_p}, \quad K_v = \frac{v_m}{v_p}, \quad K_w = \frac{w_m}{w_p} \quad (3.4)$$

c) その他の物理的要素の縮尺

$$\begin{aligned} K_t &= \frac{t_m}{t_p}, \quad K_{F_x} = \frac{F_{xm}}{F_{xp}}, \quad K_{F_y} = \frac{F_{ym}}{F_{yp}}, \quad K_{F_z} = \frac{F_{zm}}{F_{zp}} \\ K_\rho &= \frac{\rho_m}{\rho_p}, \quad K_p = \frac{p_m}{p_p}, \quad K_\nu = \frac{\nu_m}{\nu_p} \end{aligned}$$

原型での水の流れと模型でのそれが同じ方程式 (3.1), (3.2), (3.3) の各式に従うことから (3.4) 式の縮尺の間にある関係が生ずる。その関係は二つの水流の相似を律するという意味で、相似律あるいは相似則と呼ばれる。

i) 運動学的相似則

(3.1)式と(3.2)式について運動の相似を考えてみる。模型についての方程式は各々次の式になる。

$$\frac{dx_m}{u_m} = \frac{dy_m}{v_m} = \frac{dz_m}{w_m} \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial u_m}{\partial x_m} + \frac{\partial v_m}{\partial y_m} + \frac{\partial w_m}{\partial z_m} = 0 \tag{3.6}$$

(3.4)式により原型の式に変換すると

$$\frac{K_x}{K_u} \frac{dx_p}{u_p} = \frac{K_y}{K_v} \frac{dy_p}{v_p} = \frac{K_z}{K_w} \frac{dz_p}{w_p} \tag{3.5}'$$

$$\frac{K_u}{K_x} \frac{\partial u_p}{\partial x_p} + \frac{K_v}{K_y} \frac{\partial v_p}{\partial y_p} + \frac{K_w}{K_z} \frac{\partial w_p}{\partial z_p} = 0 \tag{3.6}'$$

となる。(3.5)' および (3.6)' 式は共に原型に関する式なので

$$\frac{K_u}{K_x} = \frac{K_v}{K_y} = \frac{K_w}{K_z} \tag{3.7}$$

を得る。(3.4) 式により

$$\left. \begin{aligned} K_v &= \frac{\lambda_y}{\lambda_x} K_u \\ K_w &= \frac{1}{\lambda_x} K_u \end{aligned} \right\} \tag{3.8}$$

(3.7)式あるいは(3.8)式は運動学的相似則を与える。これは幾何学的相似が与えられ、運動方程式による力学的相似が満たされると自づと満たされる。

ii) 力学的相似則

(3.3)式の運動方程式についても(3.7)式を導いたと同様にして

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_u}{K_t} = \frac{K_u^2}{K_x} = \frac{K_u K_v}{K_y} = \frac{K_u K_w}{K_z} = K_{F_x} = \frac{K_p}{K_\rho K_x} = \frac{K_v K_u}{K_x^2} = \frac{K_w K_u}{K_y^2} = \frac{K_w K_u}{K_z^2} \\ \frac{K_v}{K_t} = \frac{K_v K_u}{K_x} = \frac{K_v^2}{K_y} = \frac{K_v K_w}{K_z} = K_{F_y} = \frac{K_p}{K_\rho K_y} = \frac{K_v K_v}{K_x^2} = \frac{K_v K_v}{K_y^2} = \frac{K_v K_v}{K_z^2} \\ \frac{K_w}{K_t} = \frac{K_w K_u}{K_x} = \frac{K_w K_u}{K_y} = \frac{K_w^2}{K_z} = K_{F_z} = \frac{K_p}{K_\rho K_z} = \frac{K_v K_w}{K_x^2} = \frac{K_w K_w}{K_y^2} = \frac{K_w K_w}{K_z^2} \end{aligned} \right\} \tag{3.9}$$

を得る。(3.4) 式と (3.8) 式を使うと (3.9) 式の中のいくつかの項が省略され、また開水路の流れで卓越する速度に注目して整理すると

$$\frac{K_u}{K_t} = \frac{K_u^2}{K_x} = K_{F_x} = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} K_{F_y} = \lambda_x K_{F_z} = A = \frac{\lambda_x^2}{\lambda_y^2} A = \lambda_x^2 A = B = \frac{\lambda_x^2}{\lambda_y^2} B = \lambda_x^2 B \tag{3.10}$$

$$\text{ただし } A = \frac{K_p}{K_\rho K_x}, \quad B = \frac{K_\nu K_u}{K_x^2}$$

(3.10)式は $\lambda_x = \lambda_y = 1$ のときのみしか成立しない。すなわち幾何学的に相似の場合に限り成立する。そのとき $K_x = K_y = K_z = K_L$, $K_u = K_v = K_w = K_V$, $K_{F_x} = K_{F_y} = K_{F_z} = K_F$ とおくと (3.10)式は

$$\frac{K_V}{K_L} = \frac{K_V^2}{K_L} = \frac{K_p}{K_\rho K_L} = \frac{K_u K_V}{K_L^2} = K_F \quad (3.10)'$$

となり、慣性項と外力項の比をとると

$$\frac{K_V^2}{K_L K_F} = 1 \quad (3.11)$$

さらに、慣性項と粘性項の比をとると

$$\frac{K_V K_L}{K_\nu} = 1 \quad (3.12)$$

を得る。(3.11)式を模型に関する項と原型に関する項で表わすと $\frac{V_m^2}{L_m F_m} = \frac{V_p^2}{L_p F_p}$ となるが、外力の代表的なものは重力であり、普通は原型も模型も重力場の流れなので、 $F_m = F_p = -g$ と書け、

結局

$$\frac{V_m^2}{g L_m} = \frac{V_p^2}{g L_p} \quad (3.11)'$$

となる。これは両辺共にフルード数の自乗を表わしていて、フルードの相似則と呼ばれる。

(3.12)式に関しても同様にして

$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \quad (3.12)$$

を得る。これは両辺共にレイノルズ数を表わしていて、レイノルズの相似則と呼ばれる。模型と原型で同じ流体を用いた場合(3.11)式と(3.12)式は同時に成立させることはできないのは明らかで、注目する現象に応じていずれか一方の相似則しか採用されないため、厳密な意味で、模型と原型の間に相似関係を保たせるのは不可能である。外力による影響が小さい時には慣性項と粘性項に関する相似則(3.12)を適用すればよいが、(3.10)式からわかるように、その時は当然 $K_x = K_y = K_z$ でなければならない。粘性による影響が小さい時は粘性項を省略して、慣性項と外力による相似則(3.11)式が適用されるが、その時は必ずしも $K_x = K_y = K_z$ でなくてもよく、その場合は(3.10)式より改めて相似則を求めればよい。

3-2. 模型実験のための各種水理量の縮尺

幾何学的縮尺を定めると、定義や相似律などにより、必要な水理量は決定される。幾何学的に相似な場合における各種水理量の中、主なものが Table 2 に示されている。

表の中で、実験を遂行するに当り、特に問題になるのは、粗度係数である。これは壁面での抵

各種水理量		縮尺	
		フルードの相似律による場合 (但し $K_F=1$)	レイノルズの相似律による場合 (但し $K_\nu=1$)
幾何学的縮尺		K_L	K_L
幾みもの 何学により 縮尺の 決まる	エネルギー勾配 I	1	1
	流れの断面積 A	K_L^2	K_L^2
	潤 辺 P	K_L	K_L
	径 深 R	K_L	K_L
相似律に よるもの により決	流 速 V	$K_L^{1/2}$	K_L^{-1}
	流 量 Q	$K_L^{5/2}$	K_L
	粗 度 係 数 n	$K_L^{1/2}$	$K_L^{5/3}$
	時 間 t	$K_L^{1/2}$	K_L^2

Table 2 幾何学的相似模型の主な水理量の縮尺
Table 2 L'échelle de réduction des quantités hydrauliques principaux pour le modèle réduit à la similitude géométrique.

抗に関する項であり、模型に相似律より決定された流量を流したとしても、水流の壁面との境界条件を考慮に入れてないと、必要な流速がでるとは限らない。所要の流速を出すには何らかの形で壁面の抵抗の状況を考慮に入れる必要があり、ここでは Manning の平均流速の公式

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \tag{3.13}$$

によって表現される粗度係数 n を抵抗を表わす項として採用している。この粗度は実験に用いる材料の表面粗さにより決まってしまうので、粗度に影響を及ぼす材料の選定には十分な注意が必要である。移動床上の粗度の相似については後述する。

3-3. 移動床実験の相似律

移動床模型実験では水の運動以外に、河床を構成する砂礫が移動するので、この砂礫の運動を模型と原型で相似にする必要がある。しかしながら、現在のところ、砂礫の運動と水の運動の相互作用を適切に表現する式は存在しないので、それに代るものとして、砂礫の移動に影響を与える力すなわち (2.1) 式による掃流力並びに 2 章で述べられたように同じ掃流力でも河床形態が異なるので、原型の河床形状を現す sand wares と同一の範疇に属する sand wares を模型で再現するような水理量の二面から「相似」を考察する。実験対象とした真名川では Fig.11 にみられる如く砂礫堆が形成されている。従って、河床形態としては、砂礫堆を対象とした実験がなされねばならない。砂礫堆の形成とその上の流れに関する水理量はフルード数と掃流力であることが井口昌平博士の研究により示唆されている⁹⁾。掃流力に関しては、その河床材料に及ぼす影響が運動の中で果たす役割を同一にする意味で、流れに対する砂礫の抵抗力との比をとった無次

元掃流力

$$\tau_{0*} = \frac{u_*^2}{Sgd} \quad (3.14)$$

S : 河床材料の水中比重。 $S = \frac{\sigma}{\rho} - 1$

σ は河床材料の密度

g : 重力加速度

d : 河床材料の粒径

を模型と原型で等しくすることが考えられる。このことは流水により流送される流砂量が、無次元掃流力の関数として表現できるということによっても裏づけられる。

(3.14)式により粒径に関する縮尺が求まる。すなわち、同じ比重の河床材料を使うなら

$$K_d = K_L \quad (3.15)$$

を得る。

同じ sand wares の範疇にあるものでも規模とか形状とかが異なるものが存在するので、模型実験を行なう場合、注意しなければいけないが、これを表わす指標は、Fig. 10 に見られる如く、砂礫堆の長さとその高さの比とフルード数の間の関係しか見出されていない。これからは新しい相似則は求まらないし、また、規模に関する情報も得られない。

一方、河床材料は流れの境界面を構成し、粗度係数を決めるものであるが、Table 3 からわかるように、原型では $h_m/d_m > 10$ の範囲にあり、粗度係数に関しては (2.4) 式の Strickler 公式が適用できるので

$$K_n = K_L^{1/6} \quad (3.16)$$

を得るが、これはフルード則を適用して計算されたマンニングの公式より得られた縮尺と同じである。この事は幾何学的縮尺によって決められた粒径の砂礫を用いれば、自づとフルード則が満足される流れになることを示している。

水流に関しては、今回の実験は Table 3 からわかる

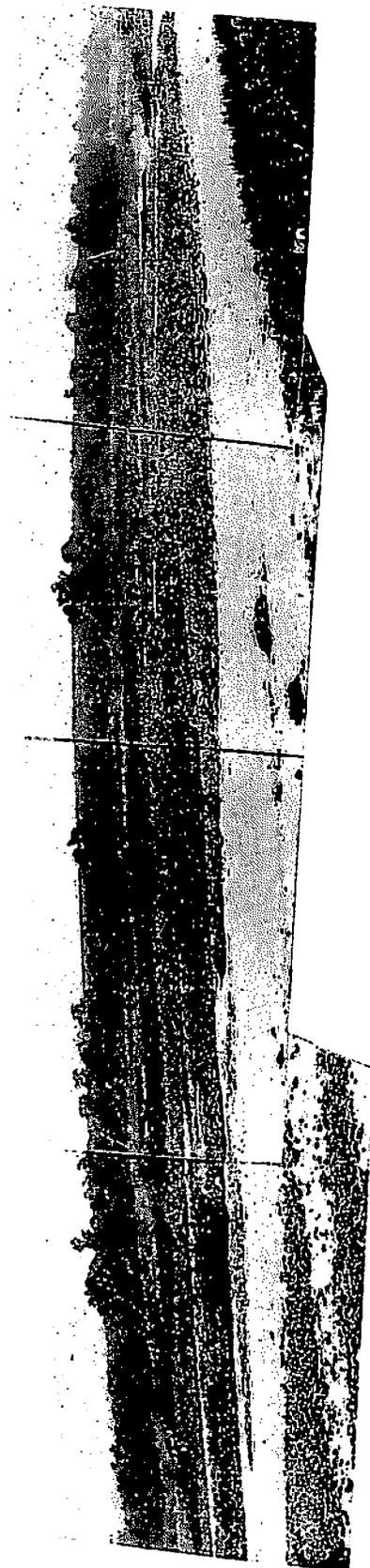


Fig. 11 真名川現地の河床状況の写真
Fig. 11 L'état actuel du lit de cours d'eau de la rivière MANA.

	水 理 量	縮 尺	原 型	1:200 縮 尺 模 型		1:1000 縮 尺 模 型 ⁷⁾	
				計 算 値	実 測 値	計 算 値	実 測 値
幾相 何学 的似	水 路 幅 b	K	250m	125cm	125cm	25cm	20cm
	平 均 水 深 h_m	K	2.04m	1.02cm	1.02cm	0.20cm	0.51cm
	勾 配 I	1	1/130	1/130	1/130	1/130	1/125
	砂 粒 径 d	K	10cm	0.5mm	0.5mm	0.1mm	0.7mm (アンバーライト)
運相 動学 的似	平 均 流 速 U_m	$K^{1/2}$	3.92m/s	27.5cm/s	27.5cm/s	12.6cm/s	6.76cm/s
	流 量 Q	$K^{3/2}$	2,000m ³ /s	3.54l/s	3.54l/s	0.063l/s	0.069l/s
	粗 度 係 数 n	$K^{1/6}$	0.036	0.015	0.015	0.011	0.039
力相 学 的似	フルード数 Fr	1	0.88	0.88	0.88	0.88	0.30
	レイノルズ数 Re	/	8×10^6	2800	2800	252	340
	摩 擦 速 度 u_*	/	0.39m/s	2.77cm/s	2.77cm/s	1.23cm/s	2.0cm/s
	無次元掃流力 τ_{0*}	1	0.095	0.095	0.095	0.095	0.114

Table 3 真名川模型実験のための水理諸量
 Table 3 Les quantités hydrauliques principaux pour
 le modèle réduit de la rivière MANA.

ように原型でのレイノルズ数は 8×10^6 であり、当然、フルード則が適用される。

以上の考察に基づき計算された今回の模型実験に必要な水理量の諸元は Table 3 の如きものである。

4. 実 験

模型は土木工学科水工実験室内に平均水路巾125cm、延長約50mの大きさで約三ヶ月の時間と労力を費して製作された。

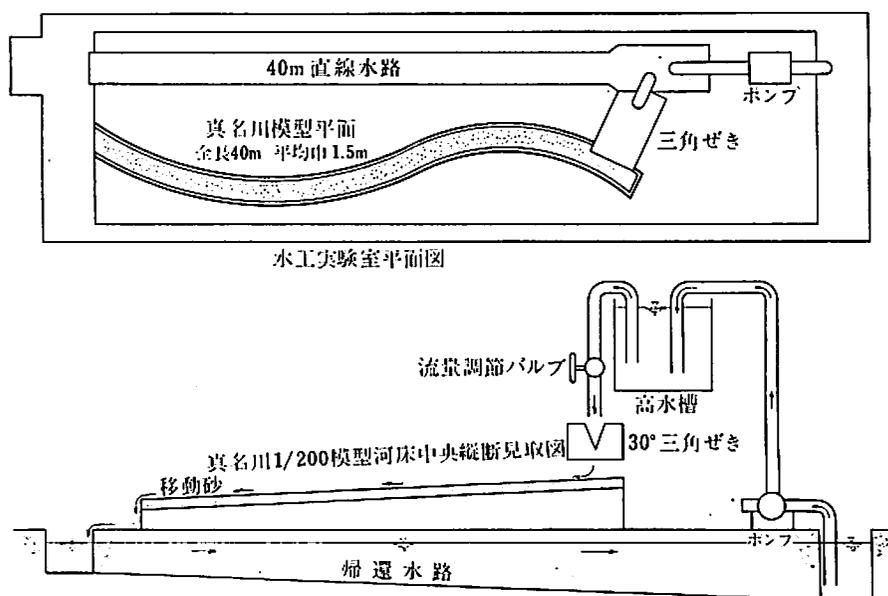


Fig. 12 真名川模型実験装置略図
 Fig. 12 L'esquisse d'équipement expérimental et le plan
 du modèle réduit de la rivière MANA.

実験に必要な現地の資料は著者の一人が所属している東京大学生産技術研究所井口研究室より提供を受けた。流量は最近の出水記録の調査から約 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ に相当する流量を模型の流量に採用し、河床砂礫は直径10cmのものを対象とした。

4-1. 装 置

Table 3 の必要な水理量の諸元により作成された装置は Fig. 12 に示されている。模型縮尺は 1:200 で河床はコンクリートモルタルでライニングした上に河床材料として粒径 0.5mm の浜砂が平均厚約 13cm に敷かれた。

4-2. 実験方法および経過

通水前に模型上に敷かれた砂の整地を行ない、砂の移動の基準をハッキリさせるために、ほぼ 50 cm 等間隔で予め定められた 73 断面について横断測量が行なわれた。当然の事ながら、流れは流量が小さいので水深に比べ、横巾の広い薄い流れになるから、実験開始前の砂の均しは念入りに行なう必要がある。通水開始後の河床状況は次のようである。砂の掃流力により下流方向へと移動を始め、約 15 分後には最初ほぼ平に均してあったはずの河床上に、左右両岸より河床中央で交差するような斜めの筋が何本もでき始め、その中の幾本かは次第に段差を生じるようになり、他は消えてゆく。時間の経過にともない両岸より生じた斜めの筋は、左右のうち片方のみが、下流方向に移動して発達したりあるいは消滅したりして 30 分位経過すると遂には左右岸より交互に砂礫堆が形成されて、流路中央部が下流にふくらむような弓形に発達する。そして水の流れに比して非常に遅い速度で下流方向に移動して行く。以上が砂礫堆の発生過程であるがこれは直線水路で見られるものと全く同様である。それから約 1 時間半通水して水を



Fig. 13 真名川模型実験の砂礫堆の写真
Fig. 13 Les bancs obliques obtenus sur le lit de cours d'eau du modèle réduit de la rivière MANA.

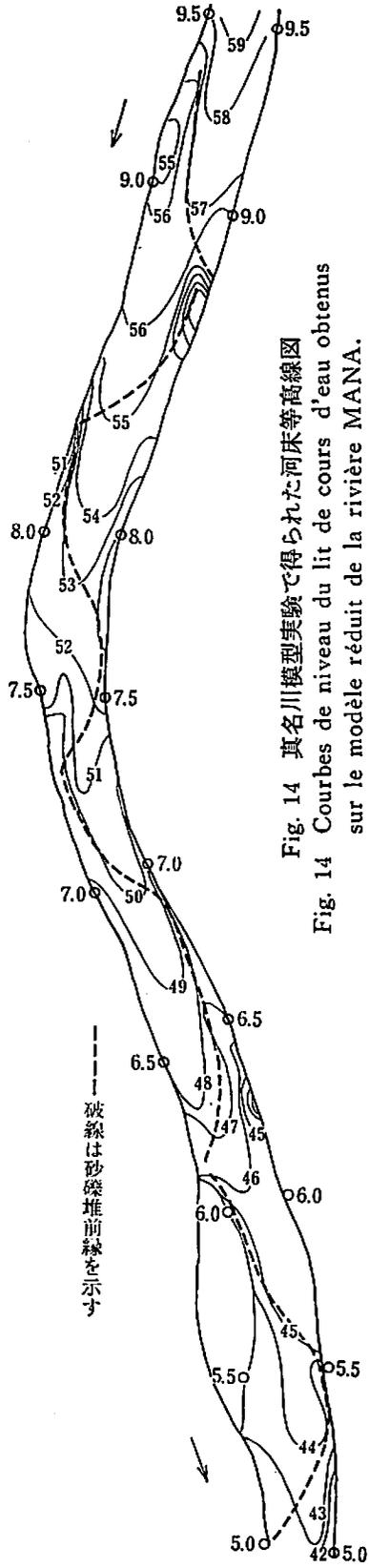


Fig. 14 真名川模型実験で得られた河床等高線図
Fig. 14 Courbes de niveau du lit de cours d'eau obtenus sur le modèle réduit de la rivière MANA.

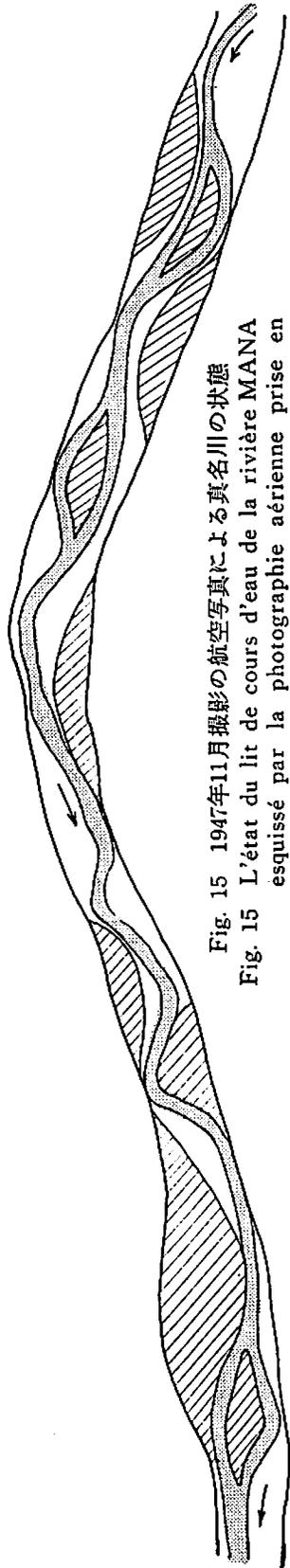


Fig. 15 1947年11月撮影の航空写真による真名川の状態
Fig. 15 L'état du lit de cours d'eau de la rivière MANA esquissé par la photographie aérienne prise en 1947.

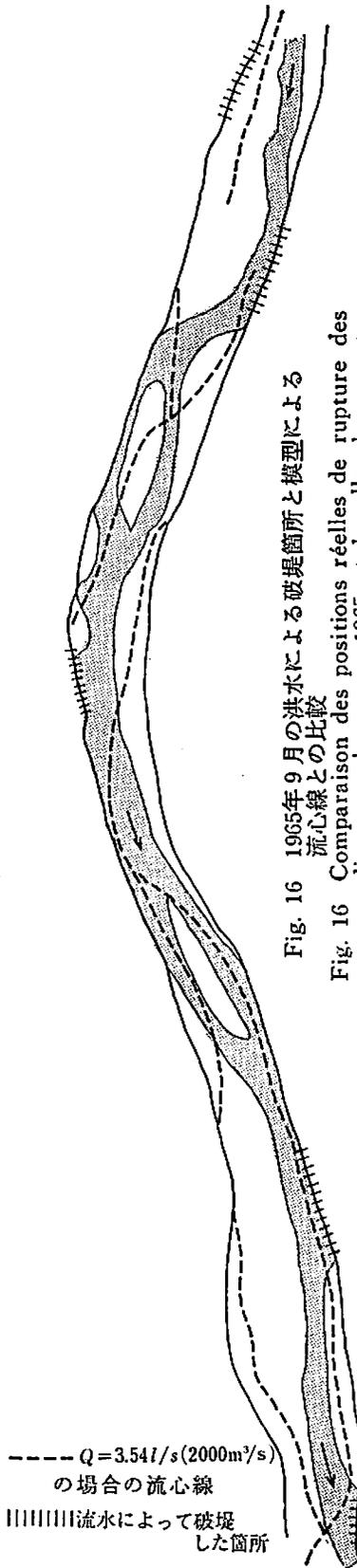


Fig. 16 1965年9月の洪水による破堤箇所と模型による
流心線との比較
Fig. 16 Comparaison des positions réelles de rupture des digues par la crue en 1965, et de celles de rencontre du thalweg et des digues sur le modèle réduit de la rivière MANA.

止める (Fig. 13)。

4-3. 測 定

通水中は所定の3断面で、横断方向の水面形と河床形の同時測定が、ポイントゲージによりなされた。また、河床の状況を調べるには、砂礫堆が壊れないように水を止め、砂礫堆上より水を抜いた後、73断面についてやはりポイントゲージにより横断測量がなされた。結果は Fig. 14 に示されているが、最大洗掘深は約4 cmで、原型の約8 mに相当し、川巾が250m位の河では考えられない高低差ではない^{9),10)}。また、実験で得られた数値は、計算値との比較のために、Table 3に計算値と実験値が併記されている。

5. 考 察

Table 3によると、今回の実験は水理量は全て、相似律による縮尺通りであることがわかる。河床状況も以下の比較で判るように、ほぼ、原型が再現されたと思われる。

5-1. 航空写真との比較

現地の自然の河床状態を撮影していると思われる昭和22年11月撮影の航空写真より低水流路と砂礫堆をスケッチしたものが、Fig. 15である。実験で得られた Fig. 15と比較すると砂礫堆の位置には若干のずれはあるが、砂礫堆の規模と配置のパターンが類似していることがわかる。

5-2. 洪水時の流向の検討

洪水時の流向は、河床の一番深い所を連ねた線いわゆる谷線に沿うと考えられる。これの実験の結果を図示すると Fig. 16のようになる。同図上には昭和40年の洪水(流量約1,500m³/s)によって破堤した箇所も記入してあり、模型上の水衝部と破堤箇所のよい一致がみられる。このことは、洪水流が河道内を蛇行していることを推察させる。

6. 結論及び今後のための問題点

今回の実験は均一粒径を用い、定常状態でのものであったが、条件さえ整えば、模型上で、河床の巨視的な再現は可能であることがわかった。今回は相似律としては、砂礫堆上の流れの研究成果より推論されるフルード則と無次元掃流力によるものが採用された。これによると砂礫堆の規模の相似に関しては何も規定されていないが、結果は先にみたように良好であった。砂礫堆の形状のみならず、規模に関してもフルード数が大きく影響しているらしいので、この点の解明が必要である。因みに、著者の一人が別の目的で行なった同じ区間の1:1000縮尺模型の水理量をTable 3に併記してあるが、この場合はフルード数に大きな開きがあり、砂礫堆の規模は一致しないことが報告されている⁷⁾。

水流の実験を行なう際の大きな問題の一つは粗度の問題であるが、今回は一応 Strickler 公式によった。粗度が適切でない、他の水理量が総て変るので、移動床の場合だと河床形状との関

連で今後の詳しい研究が必要であろう。また、今回行なわれた実験は、時間の縮尺が考慮されていないので、河道の平面形（蛇曲）による河床への影響は充分には調べられていない。砂礫堆形成の正確なメカニズムを把握するには、さらに、洪水流の非定常性をも考えるという意味も含めて時間の縮尺を考慮した実験や実際の河床に近い混合粒径の材料を用いた実験が必要であると思われる。

謝 辞

本論文を終るにあたり、実際に現地の踏査を行なわれ、貴重な資料や研究成果を提供し、研究を指導して下さった東京大学生産技術研究所井口昌平教授に厚く御礼申し上げるとともに深く感謝の意を表します。また、実験や資料の整理に協力してくれた本学昭和45年度卒業生、秋山晴彦、太田資郎の両君並びに、研究を励まして下さった本学の横山勝信教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 木下良作,「石狩川河道変遷調査」, 科学技術庁資源局資料第36号 (1961年11月1日)
- 2) 井口昌平, 吉野文雄,「河床形態の研究過程について」, 生産研究, Vol.19, No.1, 1967.
- 3) Guy, H.P., Simons, D.B. and Richardson, E.V., "U.S. Geol. Surv. Professional Papers", 462-I, 1966
- 4) 鮭川登,「直線河道における流れの蛇行現象に関する水理学的研究」科学技術庁資源調査会, 1971
- 5) 吉野文雄,「河床形態に関する水理学的研究」東京大学土木工学科論文集録, Vol.4, 1967
- 6) 井口昌平, 鮭川登, 吉野文雄,「河道のなかの流れの特性について (第1報)」第12回水理講演集, 1968
- 7) 井口昌平, 吉野文雄,「真名川の砂礫堆の形成に関する実験的研究」生産研究, Vol. 24, No. 4, 1972
- 8) 井口昌平,「砂礫堆の形成に関する水理学的考察」東京大学生産技術研究所報告, 第14巻, 第5号, 1965
- 9) 本間仁,「河川工学」, コロナ社, 1958, p.111
- 10) 安芸皎一,「河相論」, 岩波書店, 1951, p.41