

真名川の砂礫堆の形成に関する実験的研究

An Experimental Study on the Formation of Alternating Bars in the River MANA

井口昌平*・吉野文雄*

Syōhei INOKUTI and Fumio YOSHINO

1. ま え が き

河道内に特有な流れの現象のひとつとして、直線的な河道区間においてさえその河道内で流水が蛇行し、それとともに左右岸に交互に砂礫の洲が形成される現象がある。この砂礫堆の形成と流水の蛇行という現象が、河道を流れる水流との関係においては主として洪水時に生じているということが、最近の研究の結果として知られてきている。洪水時に砂礫堆が形成され、洪水流が蛇行しているということが河道内の流れの特性として検討すべきひとつの課題である、という観点に立つと、この現象に注目して実際河川の河床形態や低水流の状態を調査することが重要であると考えられる。

このような観点から、筆者らは自然の状態の河川で観察される河床形態と、それより推定される洪水時の河道内の流れの特性について、基礎的研究^{1),2),3)}を行ってきた。ここでは、筆者らのこの種の研究をふまえて行なった、真名川の河床形態と洪水流の運動についての模型実験の結果を報告することにする。

2. 移動床実験の相似律について

水工学的な水理実験を行なう場合に、原型と模型との間の相似関係は一般にこれに作用するところの主作用力のいかんによって律せられる。河川の模型実験では重力が支配的な作用力であるので、原型と模型での流水の運動は、フルード数を等しくすることにより相似にできると考えられる。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。砂礫の運動を相似にするには、現在のところ、河床砂礫に流水が及ぼす力とそれに対する砂礫の抵抗力の比をとった、無次元掃流力を模型と原型で等しくすることが考えられている。

流水中にある砂礫が移動するに伴ない、砂床面は sand waves と総称される波面に変型される。この sand waves はその上の流れの状態にも大きな影響を与えるので、移動床実験を行なう場合には、原型での河床形状を現わす sand waves を模型で再現させなければならない。河道内の流れの状態を巨視的に観察することが必要とされる種類の移動床模型実験では、この sand waves と流れの相互作用に特に注意する必要がある。砂礫堆は sand

waves のうちのひとつであって、真名川では砂礫堆が形成されているので、砂礫堆を形成する流れの相似性についての検討を行なわなければならない。

砂礫堆の形成とその上の流水の蛇行現象を支配する物理量についての考察は、すでに井口が発表しているとおりである¹⁾。その中で採用された量はフルード数と、摩擦速度と粒径についてのフルード数であって、後者は掃流力を表現するものである。したがって、フルード数と掃流力をともに原型と模型で等しくすれば、模型においても原型と同じ種類の河床形態、すなわち砂礫堆が形成されることが考えられる。

河床に形成される sand waves が模型と原型で同じ種類のものになったとしても、それらの形状を代表する量(たとえば波長と波高のような)が相似になっていなければならない。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をとると、フルード数との間には図1に示すような関係がある。この図においては、高さ(と長さ)が比の形で採用されている。したがって、フルード数を原型と模型で等しくした場合、この比の値が等しくなることが考えられるが、砂礫堆の高さ、長さがおのおの相似になるという保障はない。しかし現在のところ砂礫堆の形状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ので、ここではフルード数により形状が規定されるという考え方を採用することにする。

3. 実験とその結果の検討

上述の相似律の考察から、フルード数と無次元掃流力を模型と原型でともに等しくすればよいということが考えられるので、この観点に立って模型実験を行なった。実験対象は九頭竜川上流の左支流真名川である。

砂礫堆の形成現象に注目して真名川の状態を調査した結果、最近の真名川の河床は砂利採取が激しくて人為的に大きく変形されていることが判明した。したがって、自然に近い状態の河床形態を知る必要から、ここでは原型の状態として昭和22年11月撮影の航空写真から得られる河床形態を対象として採用することにする。この時の河床での砂礫堆の形成状態を図2に示す。

原型での河床形態を図2のように考えるとき、この状態を発生させた洪水流はどのようなものであったかを推定しなければならない。そのため最近における真名川の

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

出水記録を調査した。それによると昭和 34 年 9 月の伊勢湾台風時に毎秒 1,500m³, 第 2 室戸台風時には毎秒 1,900m³, 昭和 40 年 9 月の奥越豪雨時には毎秒 2,540m³ の洪水を経験している。このことから洪水流量としては 2,000m³/s の流量を採用することにした。また、河床砂礫は大きいものは数 10cm の径のものから小さいものは数 mm の砂までを含んでいるが、対象として直径 10cm のものを選んだ。また原型での粗度係数を $n=0.036$ と推定した。これらの数値を原型の状態として、1:200 と 1:1,000 の縮尺の二つの模型を製作した。相似律から考えられる原型と模型での諸水理量の関係は表 1 のようである。この表の模型欄で、計算値、実測値とあるのは、それぞれ相似律から計算される値と、実験での実測値を示すものである。なお 1:1,000 縮尺模型で使用した河床砂は、比重 1.51 で平均粒径 0.7mm の合成樹脂材料である。また 1:200

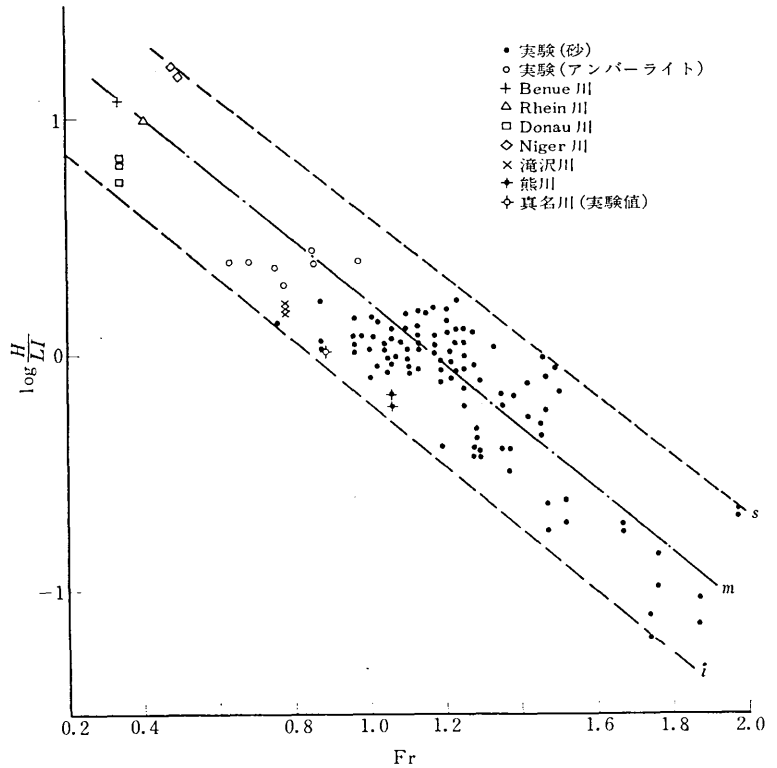


図 1 砂礫堆の形状 (L: 長さ, H: 高さ, I: 勾配) と Fr 数の関係

縮尺模型での実測値は、通水中 3 断面で測定した流水断面面積を用いて計算した粗度係数を、125cm の幅の部分での粗度係数として用いて計算した水理量である。したがって、この時の実測粗度係数が、模型で必要とされる値 0.015 と等しかったので、原型と模型での流水の運動について厳密な相似が成立していると考えられる。この 1:200 縮尺模型で 2 時間通水後に得られた河床形態を図 3 に示す。図 3 の河床の状態は、図 2 での状態と比較すると、砂礫堆が若干下流に移動しているが、図 3 での砂礫堆は図 2 のものとその長さと同程度の点で相似であることが認められる。なお図 3 での砂礫堆の高さは 3~4cm であるので、原型では 6~8m のものに相当するが、洪水時の砂礫堆としては妥当な大きさのものであると考えられる。7.5~6.0km 区間は 7.5km 付近の彎曲部の影響をうけて砂礫堆の配列が不規則になっていることが、図 2, 図 3 ともに認められる。

1:1,000 縮尺模型実験は、移動床模型実験に及ぼす粘性力の影響を調べるために行なった。粘性力が支配的な作用力となっているので、フルード数による相似法則を成立させることは不可能である。表中の計算値はフルードの相似律を成立させるとした時の水理量を示している。この模型での実験の結果、粗度係数が 0.039 となり

表 1 原型と模型での代表的な水理量の関係

	縮尺	原型		1:200 縮尺模型		1:1,000 縮尺模型	
		計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値
流量	$\lambda^{3/2}$	2,000m ³ /s	3.54l/s	3.54l/s	0.063l/s	0.069l/s	
水路幅	λ	250m	125cm	125cm	25cm	20cm	
こう配	1	1/130	1/130	1/130	1/130	1/125	
砂粒径	λ	10cm	0.5mm	0.5mm	0.32mm	0.7mm	
粗度	$\lambda^{1/6}$	0.036	0.015	0.015	0.011	0.039	
平均水深	λ	2.04m	1.02cm	1.02cm	0.20cm	0.51cm	
平均流速	$\lambda^{1/2}$	3.92m/s	27.5cm/s	27.5cm/s	12.6cm/s	6.76cm/s	
フルード数	1	0.88	0.87	0.87	0.88	0.30	
無次元掃流力	1	0.095	0.095	0.095	0.095	0.114	
レイノルズ数		8×10^6	2,800	2,800	252	340	

粘性の影響が顕著にあらわれていることがわかる。レイノルズ数は 340 で層流状態であるが、河床粒子の移動があるため乱れの生じている部分もある。この実験で得られた河床状態を図 4 に示す。河床にはやはり砂礫堆が形成され、流水は蛇行する。このような現象が発生した理由のひとつに、実測値から求めた無次元掃流力が 0.114 となっていて原型での 0.095 に非常に近いことがあげられる。レイノルズ数が 500 以下の層流域においても砂礫の移動があれば砂礫堆の形成がみられることは、筆者ら

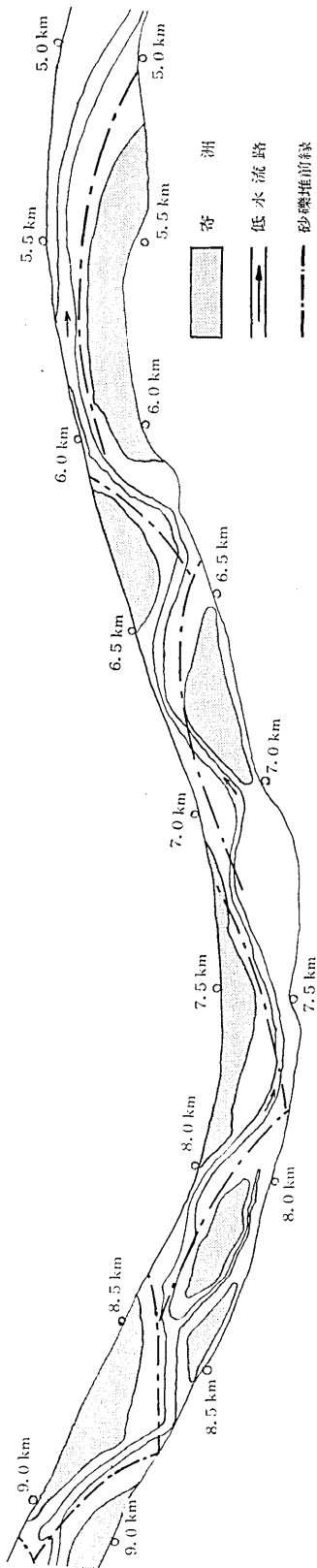


図 2 1947 年 11 月の真名川の状態

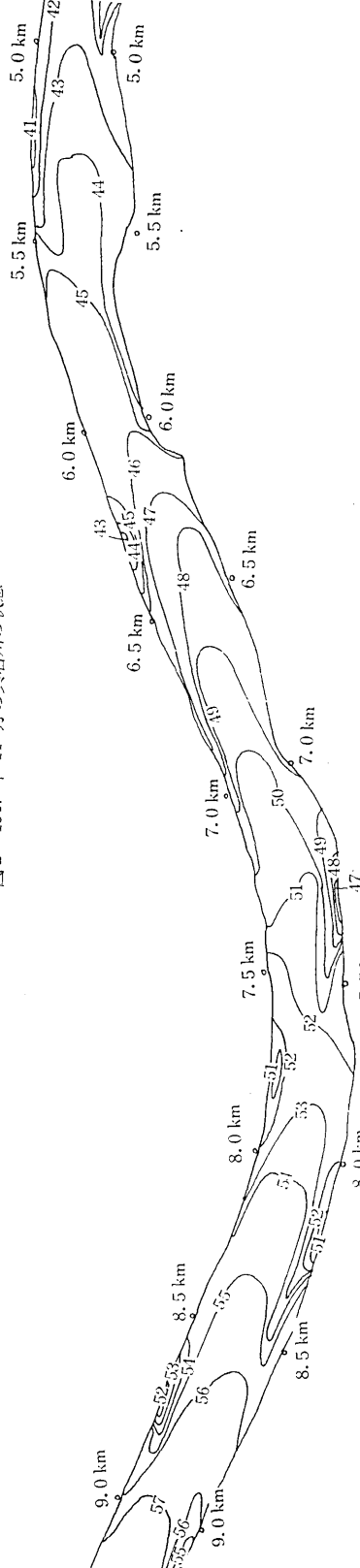


図 3 1:200 縮尺模型実験で得られた河床形態 (数字は cm 単位)

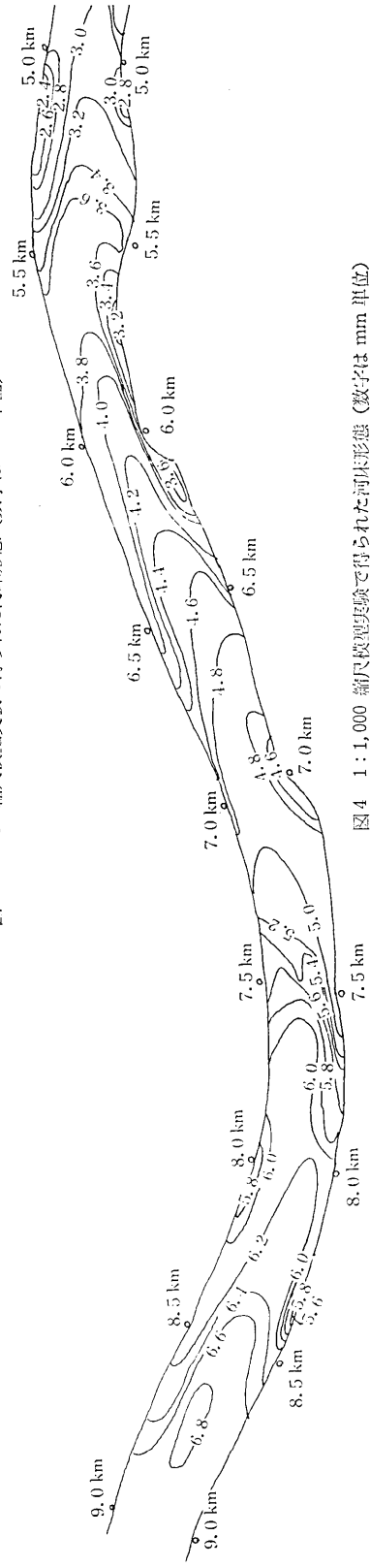


図 4 1:1,000 縮尺模型実験で得られた河床形態 (数字は mm 単位)

研 究 速 報

の実験ですでに明らかになっているので⁴⁾、この砂礫堆の形成という現象は、全体としての流れの状態が層流であるか乱流であるかということには影響されない現象であると考えられる。したがって、模型と原型において砂礫の運動状態を等しくすることを考えれば、河道内の流水の蛇行現象は相似に示ることが推定される。1:1,000 縮尺模型で生じた河床形態は、原型の状態とは必ずしも一致していない。特に砂礫堆の長さ、高さについては一致していないが、これは図1からもわかるようにフルード数が形状を支配する量のひとつであると考えられるので、フルード数についての相似が成立していないことにもよるものと考えられる。

4. あとがき

河道内に形成される砂礫堆とその上の流水の蛇行現象を中心として移動床模型実験を行なった。その結果、

- (1) 相似律としてフルード数と無次元掃流力を原型と模型でともに等しくした模型実験を行なうと、河床に形成される砂礫堆が相似になることが、この実験では認められた。
- (2) 流れが平均的に層流であるか乱流であるかは、砂礫堆が形成される現象には関係しない。

(3) 砂礫堆の形状に関係する量のひとつに、フルード数がある。

ことが知られた。

実験を行なうに際して、移動床砂礫としてはほぼ均一な粒径の粒子を使用しているが、実際河川の河床は混合粒径の粒子で構成されていること、および洪水流の非定常性を考慮していないこと、の二点についての考察を行っていないが、これらの点についての研究が今後必要とされると思われる。

この研究を行なうにあたり、法政大学工学部の牧野立平、太田史郎、秋山晴彦の三氏から協力を得たことを付記して、感謝の意を表わします。

(1972年1月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 井口昌平，吉野文雄：河床形態の研究の過程について，生産研究 Vol. 19, No. 1, 1967
- 3) 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
- 4) 井口昌平，吉野文雄：未発表資料

