

安定河道形状に関する実験的研究

An Experimental Study on the Shape of Stable Channel in Noncohesive Sand

仲井 敬司*・池田 宏**

Keiji NAKAI・Hiroshi IKEDA

1 はじめに

河道の横断面形状が、流量・勾配・河床物質などと、どのような関係をもっているかということは、地形学上からもまた河川工学上からもきわめて重要な問題であり、水面幅・平均水深などを流量の関数として表わす研究が従来から数多くなされてきた。例えば、自然河川の河道形状に関しては、Leopold and Maddock (1953)を始めとする多数の研究があり、また Wolman and Blush (1961) や Stebbings (1963) は、水路実験により河道形状の研究を行なった。

自然河川を対象とした研究には、2つのタイプがある。1つは河川の定点での流量の変化と河道形状の関係を調べたものである。この場合、河道の横断面形状は変化せず、そこを流れる水流が流量の変化に対して幅と深さをどのように変えるかといった問題である。もう1つは、河川の上・下流での流量の変化と河道形状の差違との関係を扱ったものであり、その河道を形成した流量と水面幅・水深などとの関係が検討されてきた。

自然河川では、下流方向へ流量ばかりでなく縦断勾配も変化する。したがって、河道形状と流量の関係には勾配の影響が含まれていると考えられる。しかしながら従来の研究においては、河道形状に対して流量の影響のみが評価されてきた。Ackers (1964) らは、水路実験によって河道形状と流量との関係を得たが、この実験においても流量の変化と同時に勾配も変化しており、流量の影

響のみを評価できていない。

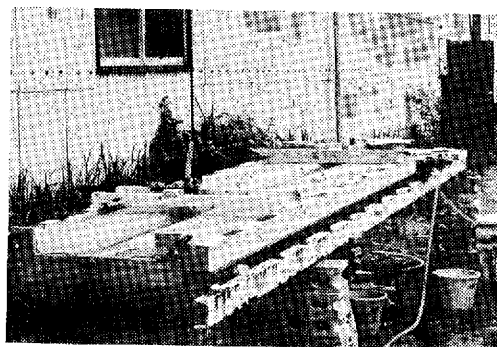
そこで本研究では、河道形状に対する流量と勾配の影響を別々に評価することを目的として、流量と勾配の条件をそれぞれ独立に変えた水路実験を行なった。

II 実験方法

1) 実験装置と実験材料

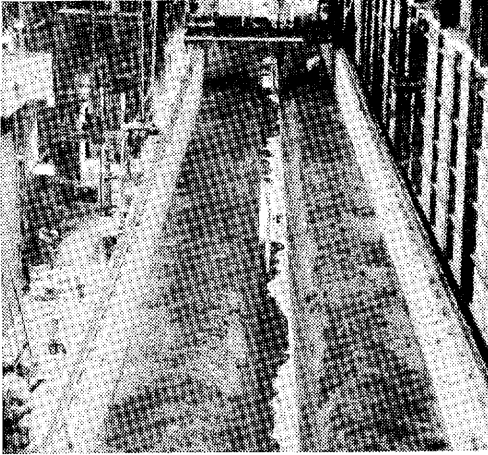
実験は、小型水路と大型水路を使って行なった。小型水路は、長さ3.6m・幅80cm・深さ10cmの木製の水路で、水路床勾配を自由に調節できる。この水路内に粒径1.0mmの均質な石英砂を平滑に敷きならし、その中央部に直線的な初期河道を掘り込んだ(第1図)。水路下流端には、高さを任意に調節できる堰を取り付け、河床勾配と水面勾配が一致するよう流量に応じて堰高を調節した。

大型水路は、水理実験センターの長さ160m・幅4mの水路である。底質は中央粒径0.74mm



第1図 小型水路

* 筑波大学自然科学類(現 筑波大学・院・環境科学研究科) **筑波大学地球科学系 (1984年6月4日受理)



第2図 大型水路

(最大粒径10mm)の混合砂を用い、小型水路実験の場合と同様に、直線的な初期河道を設定した(第2図)。

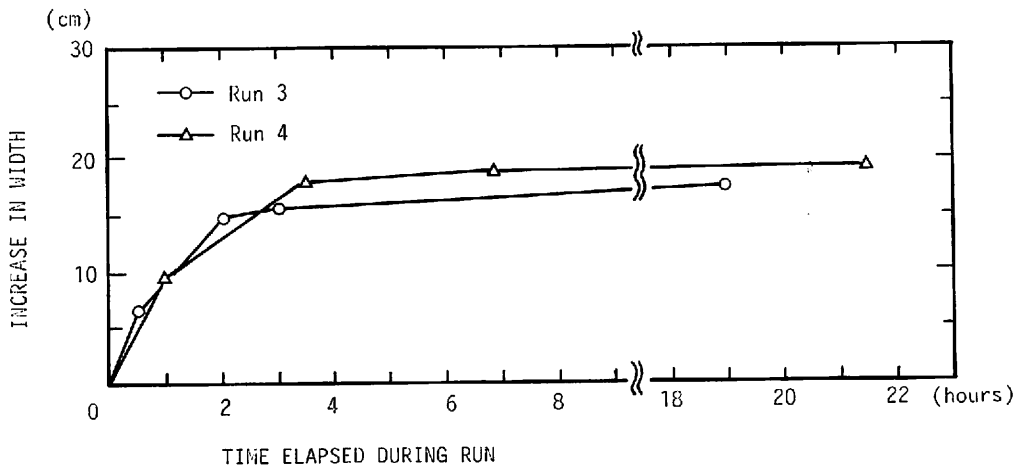
2) 実験条件

小型水路実験では、勾配が1/60, 1/100, 1/200, 1/400 という4つの場合において、それぞれ流量を100~1600 cc/secの範囲で変え、計23 Runの実験を行なった。大型水路実験では、1/100と1/400の勾配で、それぞれ流量を19~120 l/secの範囲で変え、計8 Runの実験を行なった。どちらの実験においても、それぞれの勾配において、底質の移動限界以上となる流量を与えた。

3) 実験手順

(1) 小型水路実験 初期河道は、小流量の場合には深さ8 cm・河岸傾斜角45°の三角形の断面形状とし、大流量の場合には下底7 cm・深さ6 cm・河岸傾斜角45°の台形の断面形状をもつ直線河道とした。このような初期河道上に上流から整流網を通して水を流した。このとき、水面勾配が河床勾配と等しくなるように下流堰高を調節した。堰の操作にあたっては、通水初期には堰をやや高めにしておき、水面勾配と河床勾配が一致するまで徐々に下げていった。その理由は、最初に堰を下げ過ぎると、河岸が急激に浸食され河道の拡幅が起こり、設定した流量・勾配の流れがつくる河道より広い水面幅になってしまい、その後堰を上げて勾配を小さくしても、一度拡大した幅はもとに戻らない不可逆的な変化が生じてしまうからである。また、水を流し続けると水路上流部の砂が運ばれることにより、徐々に河床が低下し緩勾配になっていくため、通水中適宜水面勾配を測定し、勾配が一定に保たれるように上流端から砂を供給した。

水を流し始めると、河岸で浸食が起こり水面幅は広がり、同時に、河岸から供給された砂が河床に堆積して河床は高まる。通水後10数分で河岸の浸食は止まり、水面幅は一定となり、河床表面で砂が移動している状態で河道はほぼ安定に達し



第3図 大型水路での水面幅の時間的变化

第1表 小型及び大型水路実験の結果

Run No.	Slope of Water Surface S	Discharge (cm ³ /sec) Q	Area (cm ²) A	Width (cm) W	Wetted Perimeter (cm) (cm)	Mean Depth (cm) D _m	Hydraulic Radius (cm) R	Mean Velocity (cm/sec) V	Share Stress (gf/cm ²)	Stream Power (gf/sec)
Small Flume										
28	1/61	170	5.3	8.0	8.3	0.66	0.62	32.1	0.0102	2.9
29	62	376	10.3	13.6	14.0	0.76	0.76	36.5	0.0119	6.1
30	62	585	15.9	18.7	19.4	0.85	0.83	36.8	0.0134	9.4
31	67	820	21.0	23.3	23.8	0.90	0.88	39.0	0.0131	12.2
32	73	1498	42.7	34.7	35.6	1.23	1.20	35.1	0.0164	20.5
2	1/128	277	10.1	11.0	11.5	0.92	0.88	27.4	0.0069	2.2
3	100	404	14.4	13.7	13.9	1.05	1.04	28.1	0.0104	4.0
4	100	500	17.5	17.1	17.6	1.09	0.99	28.6	0.0099	5.0
5	108	702	20.0	17.3	18.1	1.16	1.10	35.1	0.0102	6.5
6	86	1207	31.9	24.3	25.1	1.31	1.27	37.8	0.0148	14.0
7	100	1558	46.2	30.5	31.4	1.51	1.47	33.7	0.0147	15.6
33	100	155	5.2	6.7	7.4	0.78	0.70	29.8	0.0070	1.6
34	100	467	14.9	13.2	14.0	1.13	1.06	31.3	0.0106	4.7
10	1/200	482	17.5	12.6	13.7	1.39	1.28	39.8	0.0064	2.4
11	233	647	21.0	13.4	14.5	1.57	1.45	30.8	0.0062	2.8
12	200	986	30.4	16.7	18.0	1.82	1.69	32.4	0.0085	4.9
13	200	1411	43.7	23.6	24.9	1.85	1.75	32.3	0.0088	7.1
23	180	313	10.0	8.9	9.8	1.12	1.02	31.3	0.0054	1.7
24	200	1530	49.5	25.0	26.2	1.98	1.88	30.9	0.0094	7.7
26	200	783	23.4	15.2	16.5	1.54	1.42	33.5	0.0071	3.9
27	200	783	23.2	14.8	15.9	1.57	1.46	33.8	0.0073	3.9
35	200	735	20.9	13.2	14.4	1.58	1.45	35.2	0.0073	3.4
37	200	267	10.4	8.0	9.3	1.31	1.13	25.4	0.0057	1.3
18	1/300	723	22.1	14.6	15.8	1.51	1.46	31.7	0.0048	2.4
19	400	1087	38.4	19.7	21.4	1.95	1.80	28.3	0.0045	2.7
20	400	1458	47.3	23.1	24.5	2.05	1.94	30.8	0.0049	3.6
21	400	1580	50.2	20.3	22.2	2.48	2.27	31.3	0.0057	4.4
Large Flume										
1	1/333	19000	388	92.7	95.3	4.19	4.08	48.9	0.0123	57.1
2	385	27000	556	114	116	4.87	4.77	48.5	0.0125	70.1
3	364	38000	780	129	132	6.04	5.94	48.7	0.0162	135
4	400	54000	1114	155	157	7.20	7.08	48.5	0.0178	135
5	345	118000	1880	248	251	7.57	7.50	62.8	0.0217	342
6	1/120	19000	359	126	128	2.84	2.82	52.9	0.0235	158
7	122	28000	625	184	186	3.39	3.36	44.8	0.0275	230
8	113	39000	901	258	260	3.49	3.47	43.3	0.0307	345

た。この時点で、水面高及び水面勾配をポイントゲージとオートレベルで測定した。その後、停水して上流端から1.2m・1.8m・2.6mの3点で河道の横断面形を測定した。

(2) 大型水路実験 大型水路による実験も、小型水路による実験とほぼ同様な手順で行なった。下底50cm・深さ30cm・河岸傾斜角45°の台形の断面形をもつ初期河道を、水路下流端から80mの距離にわたって掘った。この初期河道に水を流し、

拡幅が止まり、河道が安定した時点で、水面高・水面勾配を測定した。また3～4地点で河道の横断面形を繰り返し測定した。この実験では、河道が安定するまで数時間を要した(第3図)。小型水路による実験と同様に、河床部分で砂が運ばれている状態で横断面形が安定しているが、より上流部分から砂が運ばれるため、測定範囲の河道内では、短時間に勾配が変化することはなかった。

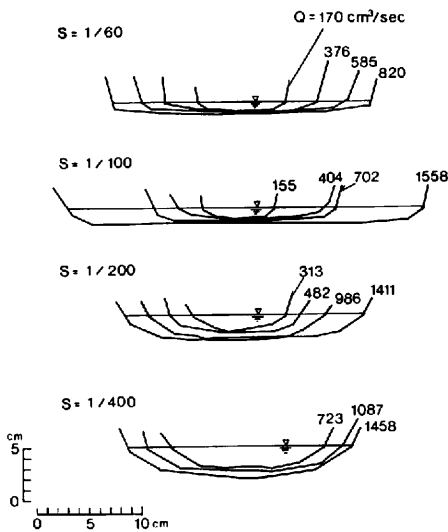
小型水路、大型水路を使ったどちらの実験にお

いても、初期河道の形状が、最終的に形成される安定した河道の横断面形に影響しないことは予備実験により確めた。また、再現性については、いくつかの実験により、きわめて良いことが確認された。

III 実験結果

1) 河道横断面形状への流量の影響

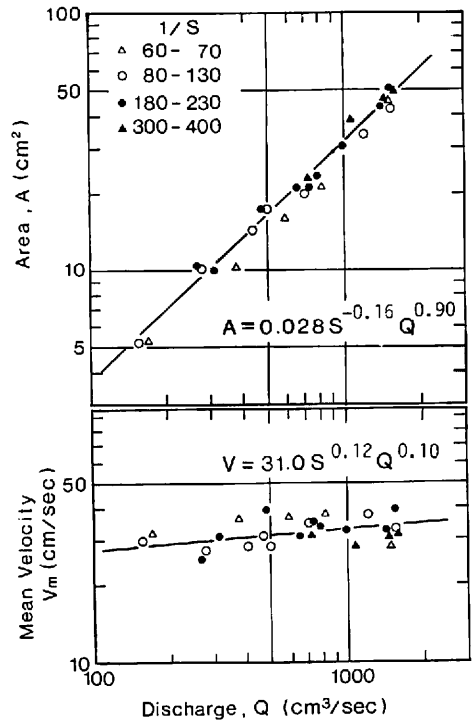
流量が大きいほど、安定時の河道幅が大きくなる(第4図、第5図)。流量が大きいほど、河岸が浸食されて河道中央部へ砂が供給されるために、河床高は実際にはかえって高まるが、第4、5図では、水面高を基準として各 Run の河道横断面図を重ね合わせた。いずれの Run においても、



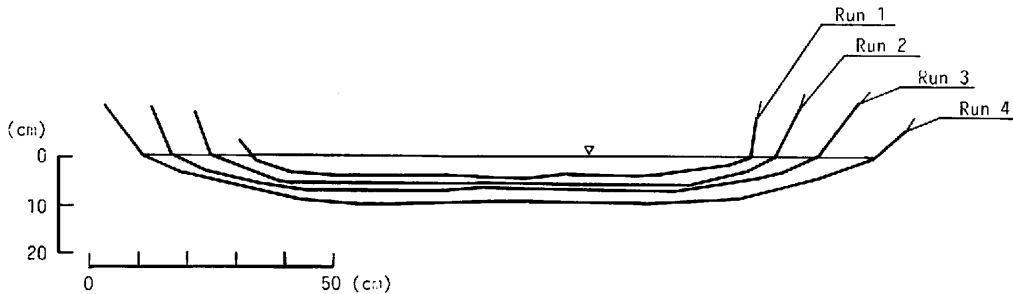
第4図 小型水路実験での、各流量・各勾配に対する河道横断面形の比較(水路下流端から1m地点)

河道の横断面形状は、それぞれ相似形をしていることがわかる。拡幅が止まり河道が安定した状態では、河道が砂の移動しない部分と、ほぼ平坦又は凹型で砂の移動している河床部分とから成っている。

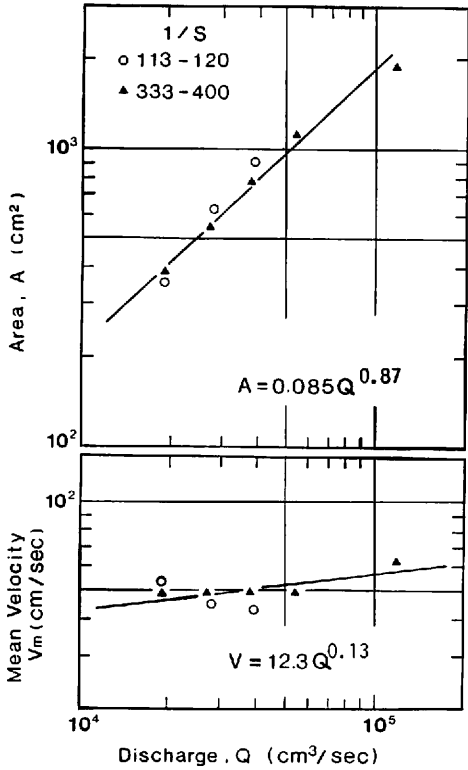
(1) 流積・平均流速と流量との関係 流量(Q)と流積(A)・平均流速(V)の間には、 $Q = AV$ の関係がある。小型水路実験では、第6図に示すように、 $A \propto Q^{0.90}$ 、 $V \propto Q^{0.10}$ で表わされた。すなわ



第6図 流積・平均流速と流量の関係(小型水路実験)



第5図 大型水路実験での、流量の増加に対する横断面形の変化(水路下流端から50m地点)



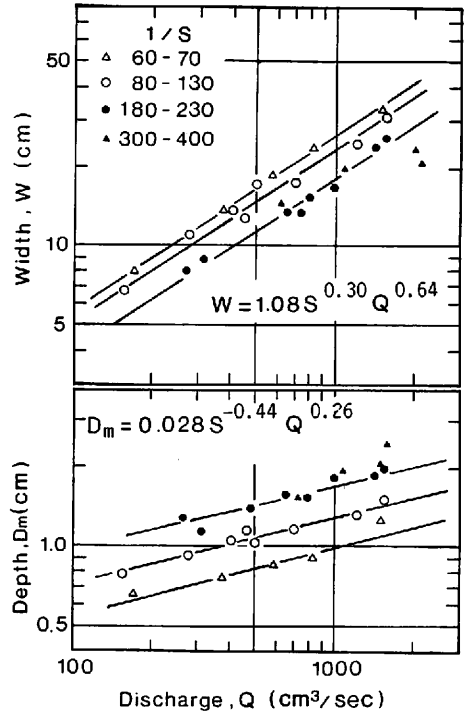
第7図 流積・平均流速と流量の関係（大型水路実験）

ち、流積は流量の増加とほぼ同じ割合で増加するのに対し、平均流速の増加率は小さい。

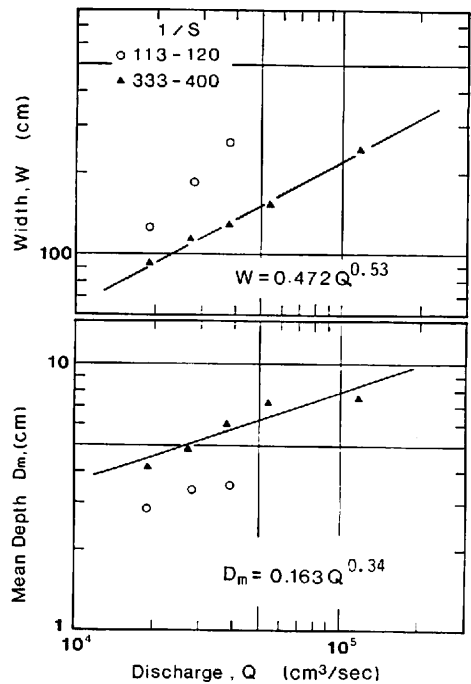
大型水路実験でも、両者の間にはほぼ同様な関係が得られ、 $A \propto Q^{0.87}$ 、 $V \propto Q^{0.13}$ と表わされた（第7図）。

(2) 水面幅平均水深と流量の関係 小型水路実験では、第8図に示すように流量の増加に比例して水面幅(W)・平均水深(D_m)はともに増加しており、 $W \propto Q^{0.64}$ 、 $D_m \propto Q^{0.26}$ の関係が認められた。流量に対する増加の割合は、水面幅の方がかなり大きい。A = W · D_mの関係が成り立つから、W、D_mをQの関数で表わしたものの指数の和は0.9で流積を流量で表わしたものの指数と一致する。

大型水路実験でも、小型水路実験の場合とほぼ同様な関係が得られた。水面幅・平均水深と流量との関係は、 $W \propto Q^{0.53}$ 、 $D_m \propto Q^{0.34}$ で表わされる（第9図）。



第8図 水面幅・平均水深と流量との関係（小型水路実験）



第9図 水面幅・平均水深と流量との関係（大型水路実験）

2) 河道形状への勾配の影響

(1) 流積・平均流速と勾配との関係 第6, 7図に示されるように、小型水路・大型水路のどちらの実験においても、流積・平均流速への勾配の影響はほとんどみられない。

(2) 水面幅・平均水深と勾配との関係 小型水路実験によると、第8図に示されるように、水面幅・平均水深と流量の関係は、各勾配ごとに成立する。すなわち勾配の影響が明らかに現われている。同一の流量で比較すると、勾配が急なほど水面幅は大きくなり、平均水深は逆に小さくなる傾向がみられる。

大型水路実験においても、小型水路実験の場合と同様に、同一流量では勾配が急なほど水面幅は大きく、平均水深は逆に小さくなる傾向が認められた。

3) 河道形状に及ぼす流量・勾配の影響の

定量的評価

小型水路実験及び大型水路実験によって得られたデータより、流積・平均流速・水面幅・平均水深を、流量と勾配との関係で表わす式を最小二乗近似によって得た。

小型水路実験の結果から、各勾配において各項と流量との関係の近似式を求め、各項を aQ^b の形で表わし、この結果、 b は各勾配に対してはほぼ一定であるから、さらに a と勾配との関係を求めた。その結果、第6, 8図に実線で示したような関係を得た。ただし、勾配1/400の場合のデータは、実験数が少ないため近似するときは除外した。

大型水路実験では、2通りの勾配についてしか行なえず、勾配1/100の条件では3つのRunしか行なえなかった。そこで、1/400の条件で得られた結果についてのみ最小二乗近似を行ない、第7, 9図に実線で示したような関係を得た。この結果は、実験材料が違うことを考慮すれば、小型水路から得られた式の勾配1/400の場合と大きく矛盾しない。すなわち、小型水路で得られた関係は、大型水路のような大きなスケールにおいても適用されるといえる。

IV 考 察

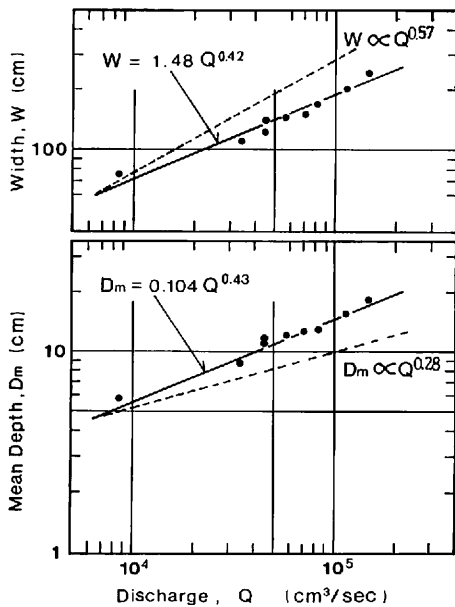
1) 従来の研究との比較

Ackers (1964) は、長さ91m・幅31mの水路と中央粒径0.16mmの細砂を用いて、本実験と同様な実験を行なった。また、Leopold and Maddock (1953) は、自然河川の測量データから河道形状と流量の関係を求めている。それらと本実験の結果を以下に比較した。

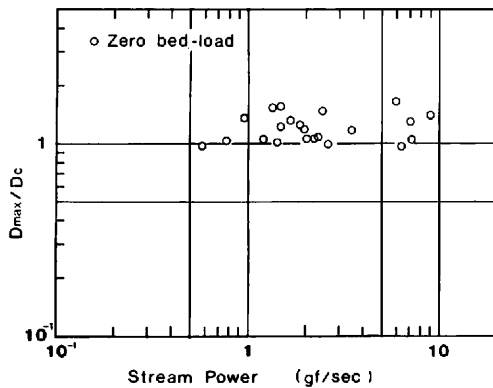
(1) 流積・平均流速と流量との関係 Ackers (1964) は、水路実験から、 $A \propto Q^{0.65}$, $V \propto Q^{0.15}$ という関係を得た。この実験では、実験材料などの違いがあるため係数は直接比較できないが、指数は本実験の結果とよく一致している。また Leopold and Maddock (1953) による、 $A \propto Q^{0.9}$, $V \propto Q^{0.1}$ という関係も、本実験の結果とよく一致する。このように、流積・平均流速と流量の関係では、従来の研究と本実験の結果はよく一致するが、これは勾配が影響しないためと考えられる。

(2) 水面幅・平均水深と流量との関係 Ackers (1964) は、水路実験によって水面幅・平均水深と流量との間には第10図に実線で示した関係を得た。この関係は、本実験の結果とかなり違っている。すなわち、流量の増加に対する水面幅と平均水深の増加の割合がほぼ等しい。ところが本実験では、水面幅の方が急激に増加した。この原因として、Ackers (1964) の行なった実験では、流量の増大につれて勾配が減少したことが影響していると考えられる。Ackers (1964) の実験において勾配と流量の関係が $S \propto Q^{-0.36}$ と与えられていることから、水面幅・平均水深と勾配との関係を、本実験の結果より $W \propto S^{0.30}$, $D_m \propto S^{-0.44}$ として修正すると、第10図中に点線で示したようになり、本実験の結果に近い関係が得られた。

さらに、自然河川において Leopold and Maddock (1953) が得た水面幅・平均水深と流量との関係が、 $W \propto Q^{0.5}$, $D_m \propto Q^{0.4}$ であることも、自然河川では、下流方向へ流量が増加するにつれて勾配も小さくなることを考慮すれば、指数の値は、Ackers (1964) の結果と同様、本実験の結果に近い値に



第10図 水面幅・平均水深と流量との関係
Ackers (1964) による。



第11図 D_{max}/D_c とストリーム・パワーの関係
Stebbing (1963) の実験結果より算定。

なるものと考えられる。

2) 平衡状態にある河道の形状

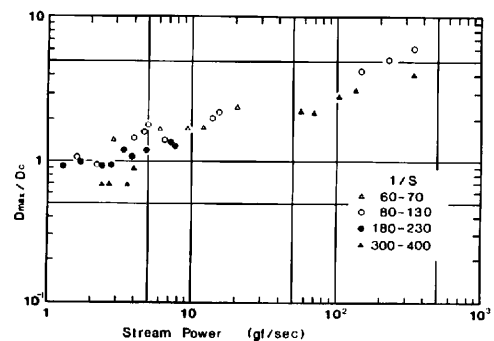
河道が安定な状態にある形状として、従来から静的平衡状態にある河道が、河川工学の分野で考えられてきた。その河道横断面形は、物質の移動限界の境界を示している。Richards (1982, p. 146-179, 281-294) によると、物質の移動限界にある河道、すなわち静的平衡にある河道の最大水深 (D_c) は、底質の粒径と河床勾配によってのみ決

まるとされている。

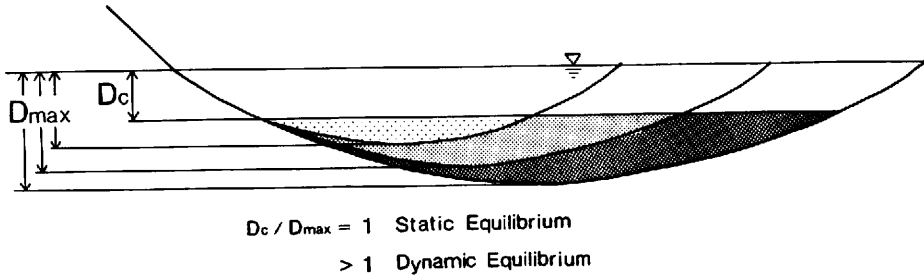
Stebbing (1963) は、水路実験によって底質が移動限界にある場合について河道形状を調べている。すなわち、中央粒径 0.84mm の砂を敷き、初期河道を掘って水を流した。水を流し続けると上流部から砂が運ばれ緩勾配となり、砂が移動しなくなる。この砂の移動しない部分と移動する部分の境界の河道を、移動限界にある河道として、その横断面形を測定した。この実験の結果得られた河道の最大水深 D_{max} と限界掃流力から計算された最大水深 D_c との比を求め、これとストリーム・パワーとの関係をみたものが第11図である。この図から明らかなように D_{max}/D_c は 1 に近い値でほぼ一定している。すなわち、勾配と底質が一定である場合、流量に関係なく D_{max} は、ほぼ D_c に一致するといえる。

ところで、本実験では第4図にみられるように流量が増すほど最大水深 D_{max} も増加している。そこで、第12図に本実験の結果から計算された D_{max}/D_c とストリーム・パワーとの関係をプロットすると、 D_{max}/D_c は、ストリーム・パワーの増大につれて大きくなっており、静的平衡の場合と違っている。第13図に、本実験で安定に達した、すなわち動的平衡に達した河道の横断面形状を模式的に示した。白ヌキの部分が、静的平衡で安定な場合の河道横断面形で、ドットで描かれた部分が、動的平衡で安定な場合に、 D_c より深い部分である。

勾配が同じ場合、もし流量が増加しても流砂濃



第12図 D_{max}/D_c とストリームパワーの関係



第13図 動的平衡状態にある河道の流量に対する横断面形の変化を示す模式図

度が一定であるとするれば、流量の増大に比例して水面幅が増加することになる。しかし本実験の結果、流量が増加すると水面幅だけでなく、水深も増加することがわかった。このことは、流量が増加するとともに流砂濃度が增大すること、すなわち単位幅当りの流砂量が増大したことを示しているのではないかと考えられる。すなわち、水深が大きくなったことで、流砂濃度の増大によって増えた単位幅当りの流砂を流していると考えられる。流量に対する流砂濃度の変化及びその原因は今後に残された問題である。

V おわりに

本実験で明らかになった主な点は、次の2つである。

1) 小型水路実験によって河道横断面形及び平均流速に対する勾配と流量の影響が、それぞれ独立に評価され、次式で表わされた。

$$A = 0.028 S^{-0.16} Q^{0.90}$$

$$V = 31.0 S^{0.12} Q^{0.10}$$

$$W = 1.08 S^{0.30} Q^{0.64}$$

$$D_m = 0.028 S^{-0.44} Q^{0.26}$$

(単位は、 Q : cc/sec, A : cm^2 , V : cm/sec, W , D_m : cm である。)

そして、従来の実験結果も、勾配の影響を考慮すれば、本実験の結果とよく一致することが確かめられた。

また、大型水路を用いた大流量での実験結果でも、小型水路実験の結果と大きく矛盾するものではなかった。今後、よりスケールの大きな自然河川にどれだけ適用できるかを明らかにする必要がある。

ある。さらに、河道横断面形を流量・勾配に加えて底質の粒径によって表わす関係式を得る必要がある。

2) 動的平衡状態にある河道は、静的平衡理論で考えられている底質の移動限界の深さ D_c より深い河道で安定する。その河道の最大水深 D_{max} と D_c との比は、ストリーム・パワーに比例する。このことは、流量変化に伴う流砂濃度の変化によるものではないかと考えられ、今後、流砂量をあわせて測定する実験が必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導いただいた筑波大学地球科学系の井口正男教授をはじめとする地形学分野の諸先生方に深く感謝いたします。

水路の製作及び実験には、水理実験センターの小島豊盛技官・飯島英夫技官の多大な御協力をいただいた。また、地球科学研究科(現在、水理実験センター)の伊勢屋ふじこさんには有益な御助言をいただいた。皆様に深く感謝いたします。

文 献

- Ackers, P. (1964): Experiments on small stream in alluvium. *Proc. ASCE*, 90, HY 4, 1-37.
- Leopold, L. B. and Maddock, T. (1953): The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U. S. G. S. Prof. Paper*, 252, 1-57.
- Richards, K. (1982): *Rivers: Form and process in alluvial channels*. Methuen, 358 p.
- Stebbins, J. (1963): The shape of selfformed model channels. *Proc. ICE*, 25, 485-510.
- Wolman, M. G. and Brush, L. M. (1961): Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse, non-cohesive sands. *U. S. G. S. Prof. Paper*, 282-G, 183-210.