

河口閉塞に関する研究(1)

—洪水流によるフラッシュの効果—

野田英明・木村晃

STUDIES ON CLOSURE OF RIVER MOUTHS

[BY DRIFTING SAND (1)]

—The Effect on Enlarging of the Flow
Area of River Mouths by River Flows—

By *Hideaki* NODA and *Akira* KIMURA

Synopsis

Most river mouths on sandy coasts are in a state of equilibrium by which littoral drift and river flow forces are trying to find a balance. Then, it is said that such a river mouth is stable and the flow area is a function of the river discharge when equilibrium has been achieved.

In this paper, as the first step of an analysis of a stability criterion, a relationship between the minimum cross-sectional area of the river mouth and the maximum discharge of the river flow has been tested with regard to the observed data in the Japanese coasts.

In addition, the law of momentum has been applied to solve the problem which would be of much more interest to know how an unstable river mouth will change its shape.

1. 緒 言

一般に、河口の地形に影響を与える要素は海からのものと河からのものに大別できる。しかし、これらは別々に作用するのではなく、同時に作用するため、河口における水理条件はきわめて複雑なものとなる。こうした条件のもとに発達する河口砂州は、その消長が著しく、時には、河口を閉塞し、その結果として、洪水時には著しく河川水位が上昇し、氾濫の危険を増大させるとともに、渇水時には舟航に支障をきたすなど、われわれの社会生活に重大な影響を与える災害をもたらしている。

さて、こうした河口閉塞の原因は種々考えられるが、樫木¹⁾はその主要原因としてつぎの4つをあげている。すなわち、

- (1) 河川流による運搬土砂の堆積
- (2) 波による土砂の押込み
- (3) 河口前面に形成される沿岸砂州
- (4) 沿岸漂砂による砂州形成

である。しかし、これらの現象は別々に起こるものではなく、樫木も指摘しているように、取り扱いかの便宜上分けられたものであって、実際には、いくつかの現象が重なって生じていると考えられる。

こうした分類によって従来の研究を概観すると、(1)については、Grijm²⁾ や Bakker Edelman³⁾ によ

る河口デルタの発達に関する研究, (2)については, 篠原・椿・吉岡・上森⁴⁾や著者⁵⁾による実験的研究, (3)については, 流れと波の相互作用による沿岸砂州の発生・発達を取り扱った榎木^{6),7)}の研究があり, (4)についても, 榎木¹⁾が検討を加えている。

一方, Bruun・Gerritsen⁸⁾ は, 河口地形の安定性を論じるために, 河口地形を3つに分類した。すなわち, geological background をもつ河口, hydrological background をもつ河口および littoral drift background をもつ河口である。geological background をもつ河口は, 河口の最狭部付近が岩石よりなるものであって, 流況の影響を受けないので, 河口の地形はほとんど変化しないものである。hydrological background をもつ河口は, 河川流と潮流の影響が強いために, その流量に対応した形となり, 上流にいくほど, 流水断面積が漸減する。最後の littoral drift background をもつ河口は一般に砂浜海岸を貫通して海に流入しているもので, 沿岸漂砂の影響が著しく, 堆砂の原因は漂砂であることが多い。Bruun・Gerritsen⁸⁾ および O'Brien⁹⁾ は, 米国における沿岸漂砂の影響を強く受ける河口について調査し, その最小流水断面積と tidal prism の間に密接な関係のあることを見出し, これを Gorge theory と名付けた。しかし, こうした河口地形の変形過程を正確に表現しうる力学的関係はまだ十分明らかではなく, とくに, littoral background をもつ河口はその変形がきわめて複雑であるので, 取り扱いが最も困難な問題の一つとなっている。とくに, わが国の中小河川は潮流よりもむしろ洪水流の影響を大きく受けるために, 波浪による閉塞と, 洪水による拡幅とが繰返されている。しかし, 近年, 貯水池の建設によって河口に排出される流量が調整されるようになり, また水利用の高度化によって取水量が増大して, 河口における流量が減少する傾向にあるとき, 低水量に対してどの程度閉塞が進むかを予知すること, またこうした状態で出水があった場合, 河道内水位がどこまで上昇するかを予知することなどが重要な問題となっている。

本論文は, こうした問題を解決する第一歩として, 洪水時, 拡幅された河口の最小断面積と洪水流量との関係を見い出して, Gorge theory を洪水流に対しても適用できるようにしようとするものであり, さらに, 閉塞が進んだ状態で出水があった場合の水位上昇についても検討しようとするものである。

2. 河口付近の地形変化

ここではまず, 河口地形の変化の実態を二, 三の実例について示し, 本研究における考え方を明らかにする。Fig. 1 は昭和40年5月から翌41年6月までのほぼ1年間における, 島根県江川河口の深浅図を示すものである。図から明らかなように, 昭和40年7月29日の深浅図を同年5月29日のそれと比較すると, 砂州はきわめて小さくなり, 河口幅が大きく広がっているのがわかる。これは同年7月23日の洪水(ピーク流量約 8,000 m³/s)によるものであって, 洪水流による砂州フラッシュの効果が著しいことを示している。その後, 大きな洪水はなく, 冬季波浪によって, 河口の砂州が一方的に発達し, 河口幅が縮小する傾向がよく示されている。しかし, かなり砂州が発達しても, 左岸導流堤によって, 一応滞筋は維持され, ほとんど一様な水深をたもっていることがわかる。

Fig. 2 は江川河口の地形特性を示す一例である。この図は, 河口付近において最小流水断面積をもつ断面の位置を原点として, その上下流における流水断面積 $A(\text{m}^2)$, 河幅 $B(\text{m})$, 径深 $R(\text{m})$ および最大水深 $h_{\max}(\text{m})$ の変化を示したものであって, 図から明らかなように, 最小流水断面積をもつ断面(以後これを gorge 断面と呼ぶ, 詳しくは次節で説明する。)を中心にして, 上下流は300~400 m の距離で, 河幅, 流水断面積ともに, いちじるしく減少することがわかる。また, 河口付近における最深部は河幅が縮少しはじめると急激に深くなり, 海に出ると急に浅くなるという傾向がみられるが, 河口砂州の発達した領域ではほぼ一様な水深であり, 上下流各断面の平均的特性を示す径深はそれほど急激に変化していないことから, こうした深堀れはかなり局所的な現象であると考えることができよう。

Fig. 3 (a) および (b) はそれぞれ gorge 断面における流水断面積とその河口幅およびその断面における最大水深との関係を示したものであって, 江川における昭和38年7月から同42年12月までの間ほぼ1ヶ月ごとに行なわれた深浅測定の結果を用いて整理したものである。これらの図から明らかなように, 河口幅

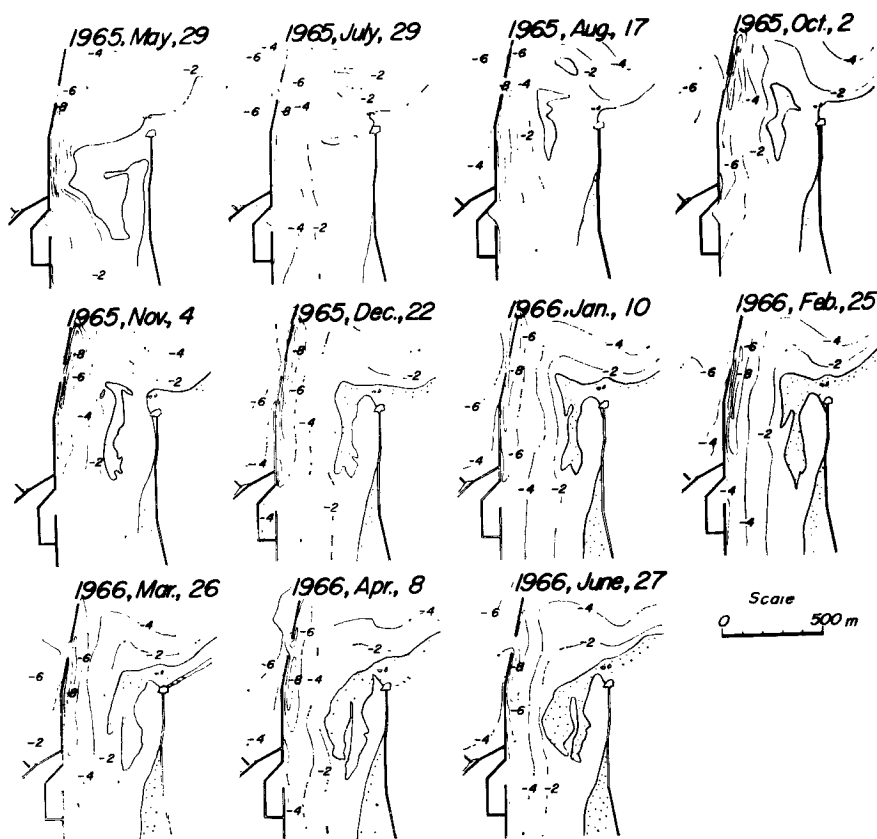


Fig. 1 Bottom Topographies near the the river mouth of Go river.

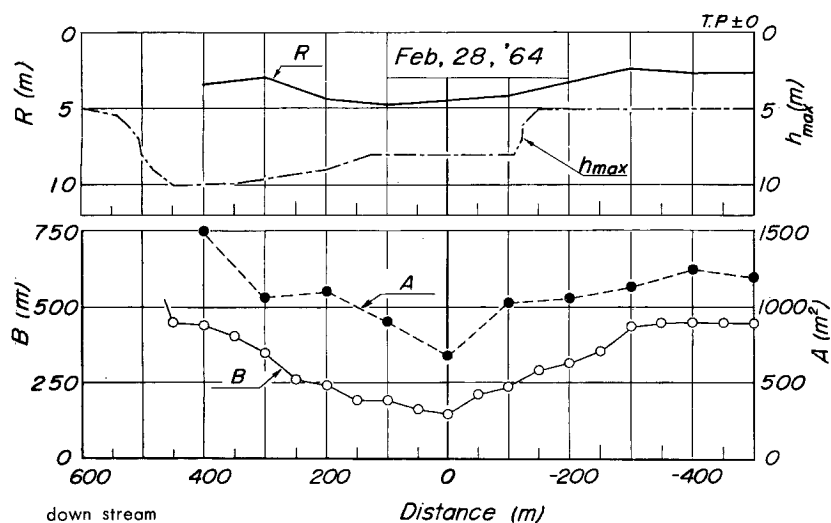


Fig. 2 An example of topographical characteristics of river mouth area.

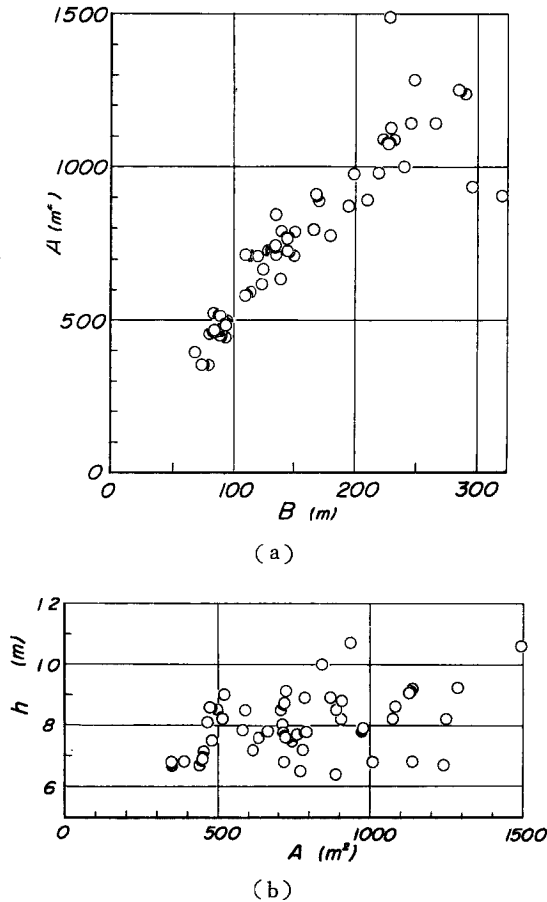


Fig. 3 Relationship between the minimum cross-sectional area and the river width and the maximum depth.

は流水断面積の増大とともに大きくなるが、一方、最大水深は、かなりのばらつきがみられるけれども、流水断面積にはほとんど関係なくほぼ一定であることがわかる。この事実はわれわれに重要な示唆を与えてくれる。すなわち、河口では、水深を変えることなく、河幅を増大させることによって、流水断面積を増大し、流量の増加に対応しているということである。

つぎに、こうした河口の地形特性と水理特性との関係について検討しよう。まず最初に、河口の閉塞がかなり進んだ状態の時に、出水があれば、河道内の水位がどれほど上昇するかについて検討する。

Fig. 4 は、江川河口の江津港において観測された最高水位とピーク流量との関係を示すものである。江津港は、Fig. 1 から明らかなように、河口に発達した砂州の上流側にあり、ここで観測された水位は河道内のそれを示すものと考えてよいであろう。この図から明らかなように、ピーク流量が $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ より大きくなると、河道内の最高水位は急激に上昇する。しかし、同じ流量、たとえば $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合でも、その水位が T.P. + 0.5m ~ T.P. + 2.0m とかなり変動しているのがみられる。この結果は、河道水位が河口の開口率などによって示される地形特性の影響を受けることを示すものであろう。

一方、河道水位に与える地形特性の影響とは逆に、水理特性もまた地形特性に影響を与えるであろう。Fig. 5 は、京都府由良川河口における砂州の形状を、昭和40年9月14日および23日の両日建設省で行なわ

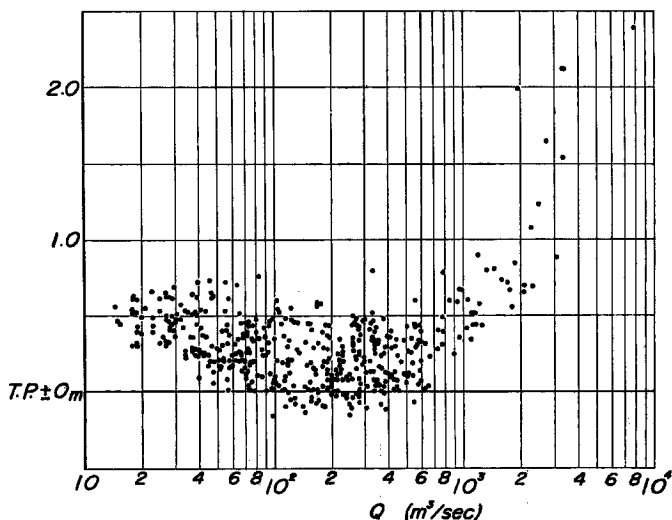


Fig. 4 Relationship between the highest water level and the peak discharge.

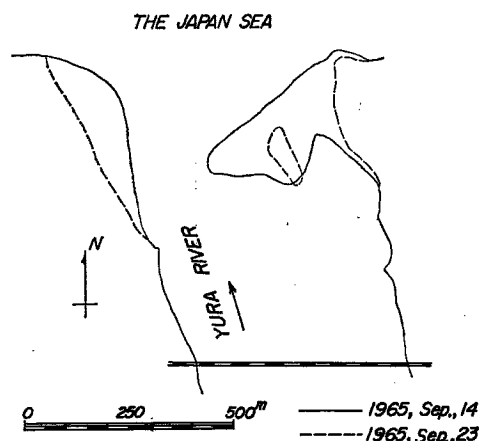


Fig. 5 Changes in sand bar of its mouth in Yura River.

れた測定の結果にもとづいて、示したものであって、この間に砂州の形状が大きく変化したことがわかる。この砂州の崩壊は15日と18日の出水（いずれもピーク流量は $3,550 \text{ m}^3/\text{s}$ ）によるものであるが、とくに、砂州の大部分は15日の洪水によって流失したことが確認されている。Fig. 6 (a) および (b) は、それぞれ 9 月 15 日および 18 日の出水の水位時間曲線を示すものであって、由良川河口より 0.5 km および 4 km 上流にある神崎水位観測所と和江水位観測所の水位記録が示されている。さらに、図 (a) には、砂州の崩壊が始まった時刻も記入されている。この図でとくに興味深いのは、神崎における水位ピークの出現時刻が、その上流の和江におけるそれより早いことである。この事實は、流量が増大し、水位が上昇する段階にあるにもかかわらず、河口では砂州の崩壊によってその付近の流水断面積が拡大され、すでに河口では水位が下降しつつあることを示すものであって、河口における地形と水位の相互作用を示すきわめて興味深い結果であるといえよう。一方、図 (b) は 18 日の出水による水位時間曲線を示すものであるが、これを図 (a) と比較す

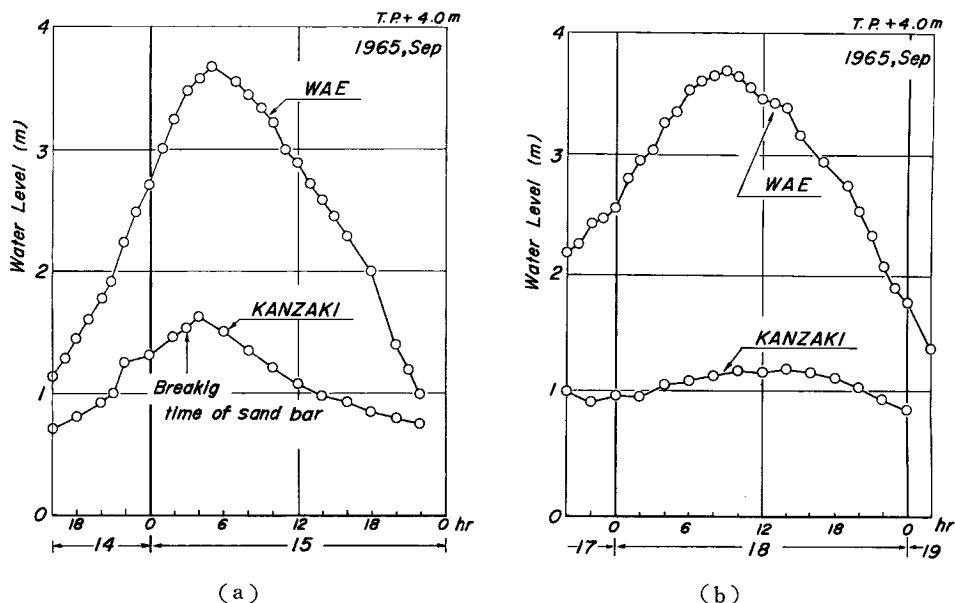


Fig. 6 Stage-time curves at Kanzaki and Wae.

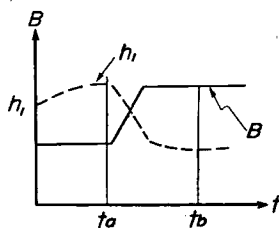


Fig. 7 Schematic illustration of the processes of change in topography and water level of river mouths.

るとつぎのことがわかる。すなわち、1) 和江の水位時間曲線は15日と18日ではほぼ同じ傾向を示し、最高水位もほとんど等しい。2) 神崎の水位時間曲線は15日と18日ではかなり相違する。とくに、18日のそれには15日の場合のような水位のピークがみられないし、水位も15日ほど高くない。

これは、15日の出水によってすでに砂州が崩壊しているため、15日と同程度の規模の出水では、その前の出水による拡幅の効果が大きく、水位がほとんど上昇しなかったことを示すものである。

以上、二、三の実例によって、河口付近の地形変化と水理特性との関係を説明してきたが、洪水時における河口砂州の変形過程と河道水位の時間的変化を図式的に示すと、結局、Fig. 7 のようになるであろう。この図は、河口閉塞がかなり進んだ状態で出水があれば、河道内水位 h_i は上昇するが、時刻 $t=t_a$ までは、河口幅 B は洪水前の状態に維持されることを示し、さらに、流量と河口幅に対応したある限界状態に達する $t=t_a$ 以後では、河口砂州が急激に流失して、河口幅が拡大され、河道水位が低下して、 $t=t_b$ において、その流量に対応した安定状態に達するという過程を示している。しかし、こうした変形の過程を表現する力学的関係を見出すことは、現象がきわめて複雑なため、現状では非常に困難である。したがって、本論文では、 $t=t_a$ における水位の上昇を固定床における水理条件から求め、また、 $t=t_b$ においては、流量と gorge

断面における流水断面積との間にある種の平衡状態が形成されると考えて、巨視的な取り扱いによって、河口付近における地形および水理特性の変動を明らかにしたい。

3. Gorge 断面の断面形状

緒言で述べたように、河口における砂州発達の原因は漂砂であることが多い。漂砂を支配する主な要素は波浪である。したがって、波浪のエネルギーが河川流のそれより大きい場合には、漂砂が卓越して河口は閉塞されやすく、逆の場合には、河口は拡幅されるか維持されることが考えられる。こうした考え方によると、低水時波浪にともなう漂砂によってせばめられた河口は、洪水によってその流量に対応した大きさまで拡幅されるであろうし、洪水時拡幅された河口は、平常時、漂砂によってその低水流量に対応した河口幅まで減少し、漂砂が存在してもそれ以上には減少しなくなるという限界に達するであろう。

Bruun・Gerritsen⁹⁾ はこうした考え方を潮流の影響が著しい river estuary に適用して、流水断面積と tidal prism の間に密接な関係のあることを見出し、これを Gorge theory と名づけた。gorge 断面というのは、河口における最小流水断面積をもつ断面と定義しているが、この理論は、潮流によって gorge 断面を輸送される土砂量のバランスから河口の安定、不安定を論じたものである。わが国の中小河川では、潮流の影響よりもむしろ河川流の影響の方がはるかに大きいと考えられるため、ここでは河川流の流量と流水断面積との対応を検討する。

なお、この節では、河川流の流量と流水断面積との対応を検討するに先だって、まず、わが国における諸河川の gorge 断面の形状やその断面特性を調べ、従来の河道における安定断面形状理論と比較しながら考察する。

（１）河口における流砂の連続式

いま、河口における gorge 断面の流水断面積を A 、この断面を通過する流砂量を Q_s とすれば、流砂の連続式は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial Q_s}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに、 x は流下方向の距離、 t は時間を表わし、 λ は河床を構成する物質の空隙率を 100 で除した値を表わす。(1) 式における流砂量 Q_s には上流から河川流によって運搬されてくる土砂量と、海から波浪や沿岸流によって輸送されてくる漂砂量が含まれているが、現状において、こうした輸送砂量を理論的に明確にすることはきわめて困難であるので、(1) 式を一般的に解いて、gorge 断面における流水断面積の変化過程を明らかにすることは不可能に近い。したがって、ここでは、Fig. 7 で示したように、 $t=t_0$ における断面、すなわち、洪水流によってフラッシュされたのちの安定な状態にあると考えられる gorge 断面について考察する。

安定状態における gorge 断面は $\partial A / \partial t = 0$ と考えることができる。したがって、このような状態では、(1) 式から明らかなように、 $\partial Q_s / \partial x = 0$ となる。一般に、 $\partial Q_s / \partial x = 0$ に対応する河口断面については二つの状態が考えられる。その一つは、 $Q_s = 0$ すなわち、流砂がまったくないという静的平衡状態であり、他の一つは、 $\partial Q_s / \partial x = 0$ ではあるが $Q_s \neq 0$ という動的平衡状態である。静的平衡状態にある流路の横断面形状は、普通、安定横断面形と呼ばれ、河床横断面に沿うすべての点で掃流の限界あるいはそれ以下の状態にある断面と定義されている。gorge 断面についてもこうした静的平衡の概念が適用できるかどうかを明らかにすることが非常に重要であると考えられる。

（２）流路の安定横断面形状とその特性

流路の安定横断面形については、すでに数多くの研究がなされている。その中でも、とくに、Lane¹⁰⁾ は限界掃流力の概念を導入して安定断面形状を理論的に明らかにした。また、岩垣・土屋¹¹⁾ も流路床面上にある砂礫の移動限界の水理学的な条件を考察することによって、流路の安定横断面形を表わす関係を求め、摩擦速度 u_* と河床を構成する底質の粒径 d に関する Reynolds 数 $u_* d / \nu$ が重要なパラメータであることを明

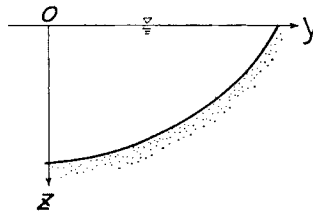


Fig. 8 Illustration of notation.

らかにした。

そこで、安定横断面形の断面形状特性を明らかにするために、ここでは計算の簡単な Lane の求めた関係を用いて検討を加える。Lane が理論的に求めたその断面形状は、Fig. 8 に示すような座標系すなわち、水面上の水路中心を原点にとり、 z 軸を鉛直下向きに、 y 軸を横断方向にとると、

$$\left(\frac{dz}{dy}\right)^2 + \left(\frac{z}{h_c}\right)^2 \tan^2 \phi = \tan^2 \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

なる微分方程式によって表わされる。ここに、 h_c は最大水深であり、 ϕ は河床を構成する土砂粒子の安息角である。この式を適当な境界条件のもとに解くと、安定断面形状は、結局

$$\frac{z}{h_c} = \cos\left(\frac{y}{h_c} \tan \phi\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。一般に、最大水深 h_c は、はじめの仮定から、水路中心に存在する土砂粒子の移動限界水深と考えることができるから、河床を構成する土砂粒子に対する限界掃流力を τ_c 、水の密度を ρ 、流路の縦断勾配を I とすると、 $h_c = \tau_c / \rho g I$ となる。〔ここに g は重力の加速度である。限界摩擦速度 u_{*c} は、 $u_{*c} = \sqrt{\tau_c / \rho}$ によって与えられるから、河床の土砂粒子 d の粒径を与えるならば、岩垣公式を用いて u_{*c} を求めることができる。したがって、 h_c は土砂粒子の粒径 d と、河床勾配 I を与えたならば決定することができる。〕

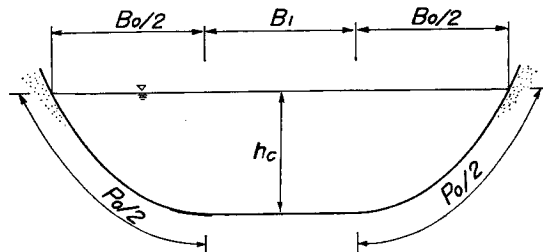


Fig. 9 Geometry of a stable cross section of a river channel.

つぎに、(3) 式で示される安定断面形状に対する流水断面積 A 、水面幅 B 、潤辺長 P および径深 R の間の関係を調べよう。いま、Fig. 9 に示すように、断面傾斜部における水面幅を B_0 、潤辺長を P_0 、水平部分の水面幅を B_1 として、無次元量

$$y_* = \frac{y}{h_c}, \quad z_* = \frac{z}{h_c}, \quad A_* = \frac{A}{h_c^2}, \quad R_* = \frac{R}{h_c}, \quad B_* = \frac{B}{h_c} = \frac{B_0}{h_c} + \frac{B_1}{h_c} = B_{0*} + B_{1*}$$

$$P_* = \frac{P}{h_c} = \frac{P_0}{h_c} + \frac{B_1}{h_c} = P_{0*} + B_{1*}$$

を導入すると、(3) 式は

$$z_* = \cos(\alpha y_*) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに $\alpha = \tan \phi$ である。さて、傾斜部の水面幅 B_{0*} は、 $y_* = B_{0*}/2$ において $z_* = 0$ であることを利用して (4) 式から、

$$B_{0*} = \frac{\pi}{\alpha} \dots\dots\dots(5)$$

をうることができる。(5)式から明らかなように、 B_{0*} は α すなわち ϕ のみの関数であるので、土砂粒子の特性に支配される。以上の結果から、水面幅 B_* は

$$B_* = \frac{\pi}{\alpha} + B_{1*} \dots\dots\dots(9)$$

によって与えられる。また、傾斜部の断面積を無次元化して A_{0*} とすれば、

$$A_{0*} = \int_0^{B_{0*}/2} z_* dy_* = \frac{3}{\alpha} \dots\dots\dots(7)$$

となる。したがって、全断面積の無次元表示 A_* は、

$$A_* = \frac{2}{\alpha} + B_{1*} \dots\dots\dots(8)$$

で与えられる。したがって、 $B_{1*} > 0$ の場合には、上式と(6)式とから B_{1*} を消去して、

$$A_* = B_* - \frac{\pi - 2}{\alpha} \dots\dots\dots(9)$$

となる。つぎに、 $B_{1*} = 0$ すなわち、水平床部分のない場合には、(6)および(8)式より明らかなように、 A_* および B_* はそれぞれ(5)および(7)式に一致する。なお、この場合には、

$$A_{0*} = \frac{2}{\pi} B_{0*} \dots\dots\dots(10)$$

の関係がなりたつことになる。

さらに、 $B_* < B_{0*}$ の場合には、

$$A_* = \frac{2}{\alpha} \left(1 - \cos \frac{\alpha B_*}{2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

の関係によって表わされる。

つぎに、傾斜部における潤辺長 P_{0*} は、

$$P_{0*} = 2 \int_0^{B_{0*}/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dz_*}{dy_*} \right)^2} dy_*$$

で表わされるから、若干の計算により、

$$P_{0*} = \frac{2}{\sin \phi} E \dots\dots\dots(12)$$

となる。ここに、

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin \phi} d\phi, \quad (k^2 = \sin^2 \phi)$$

で表わされる完全楕円積分であって、数表より求めることができる。したがって、結局、潤辺長 P_* は

$$P_* = P_{0*} + B_* - \frac{\pi}{\alpha} \dots\dots\dots(13)$$

で与えられ、 R_* も

$$R_* = \frac{A_*}{P_*} \dots\dots\dots(14)$$

によって求められる。

以上、Lane の求めた安定断面形状にもとづいて、その断面の諸特性を検討し、(4)～(14)式に示す関係を求めてきたが、従来こうした理論結果は、現地の実測資料にもとづいて検証されているにすぎず、安定断面形状に関する実験的研究はほとんど行なわれていなかった。しかし、近年、Stebbing¹²⁾ はこの安定断面に関する実験を、長さ 8 m、幅 0.9 m、深さ 0.25 m の傾斜水路を用いて行なった。実験は流量 Q と水路勾配を種々変えて行なわれ、安定横断面における水面幅、最大水深、断面積および水面勾配（長さ 50 cm

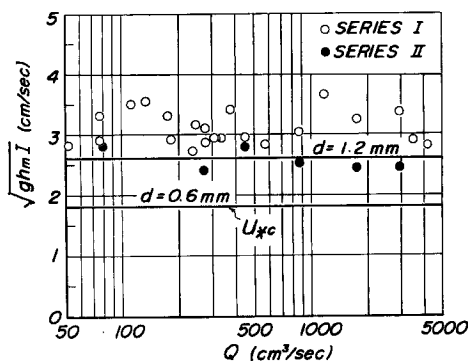


Fig. 10 Relationship between Q and $\sqrt{gh_m I}$ for Stebbings' experiments.

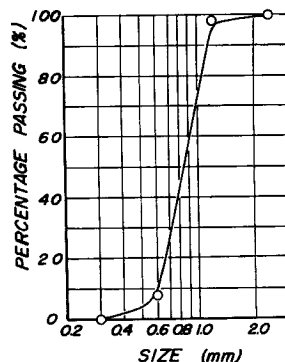


Fig. 11 Accumulative curve of the grain size used for the experiments.

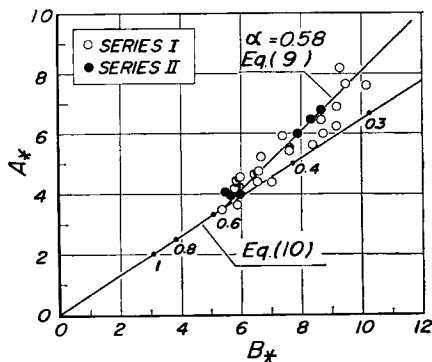


Fig. 12 Comparison with theoretical result and experimental one for the relationship between A_* and B_* .

の区間で測定)が測定された。

著者らはこの実験結果を再整理して、上述の理論結果と比較検討して、理論の妥当性を検証する。

Fig. 10 は実験に用いられた流量 Q と $\sqrt{gh_m I}$ (h_m : 最大水深, I : 水面勾配) の関係を示すものであって、実験に使用された流量の範囲内では、摩擦速度はほぼ一定であることがわかる。なお、図中の実線は、岩垣公式による限界摩擦速度を、粒径をパラメータとして示したものであって、Fig. 11 に示すように実験に用いた底質の粒度分布曲線から判断しても、この摩擦速度はほぼ限界摩擦速度に等しいことが推定できる。Fig. 12 は実験でえられた A_* と B_* の関係を上述の理論と比較したものである。図中の実線は、(9) および (10) 式を表わすが、(10) 式は、Fig. 9 に示す $B_1=0$ の場合の理論式であり、その線上の数字は α の値を表わしている。したがって、もし実験によって得られた安定断面が $B_1=0$ であるならば、実験結果は、(10) 式を示す線に一致し、さらに実験に用いられた砂は一種類のみであるので、この砂の α に対応した 1 点に集中するはずである。しかし実験結果は B_* の増大とともに A_* も増大することを示し、結局 $B_1 \neq 0$ であることがわかる。図から明らかなように、(9) 式において $\alpha=0.58$ とおくと、実験結果にもっともよく一致することがわかる。この実験に用いられた砂の中央粒径は、Fig. 11 からわかるように、0.8 mm であり、従来の研究¹³⁾によると、この粒径の砂の水における安息角は、上限の値が $\phi=33^\circ$ 、下限の値が $\phi=28^\circ$ であるから、それぞれに対する $\alpha=\tan \phi$ の値は、0.65 および 0.53 となる。Fig. 12 に

おける $\alpha=0.58$ は、ちょうどその中間の値であり、妥当なものといえよう。

以上の結果から明らかなように、水路側面が固定床でない場合には、流量が増大すると、水深の変化よりはむしろ水路幅が増大することによって流水断面積を増大させるということが実験的にも明らかにされたわけである。なお Stebbings の実験では断面形状が測定されていないので、 P_* や R_* については検討できなかった。

（３）Gorge 断面の特性

水路の安定横断面に関する A_* と B_* の関係は、 $B_* \geq B_{1*}$ の場合、（９）式で表わされることが、理論的にも、実験的にも明らかにされた。しかし、こうした関係が河口の gorge 断面についてもなりたつかどうかは不明である。そこで、著者らはわが国諸河川における河口の gorge 断面について A_* と B_* の関係を調べた。なお、由良川の資料は菱田¹⁴⁾の論文および建設省¹⁵⁾の報告書から、神戸川は佐藤¹⁶⁾の論文から、一ツ瀬川は吉高¹⁷⁾の論文から、川内川は嶋・吉村・福田¹⁸⁾の論文から、天塩川は古谷・松山¹⁹⁾の論文から、さらに相模川は本間・堀川・影山・鮮干²⁰⁾の論文から引用した。

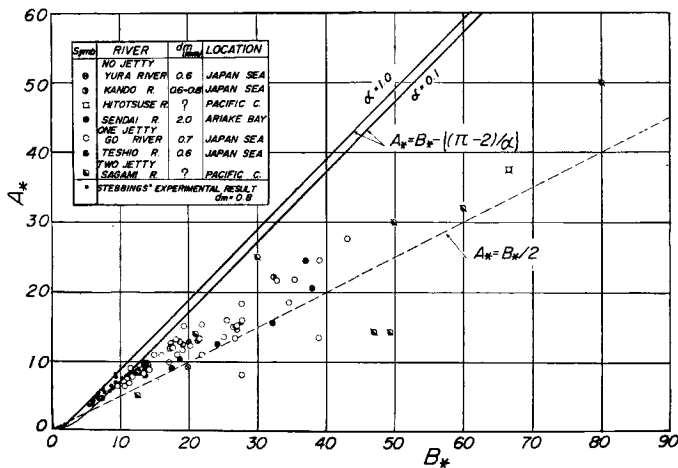


Fig. 13 Relationship between A_* and B_* at gorge section of some rivers in Japan.

Fig. 13 はその結果であって、この図に示された A_* および B_* は gorge 断面の断面積（T.P. $\pm 0m$ 以下の断面積）および水面幅をその断面における最大水深でもって無次元化したものである。なお図中の実線は Lane の理論にもとづく安定断面の A_* と B_* の関係を、また破線は三角形断面のそれを示すものである。

この図から明らかなように、河口の gorge 断面に関する A_* と B_* の間には、若干のばらつきはみられるが、ほぼ一定の関係が存在することがわかる。ここに示された現地の資料には、水理量、潮流の影響の有無や導流堤の有無など、条件が種々異なる資料が含まれている。さらに、出水直後に測定の行なわれたもの、相当時間経過したのちに測定の行なわれたものなど、出水や漂砂の影響を直接受けたものなどが含まれ、ここに用いた資料のうち、どれが安定断面に対応するか確かでない。しかし、こうした条件の相違にもかかわらず、現地の A_* と B_* の間にはほぼ一定の関係が存在することは、gorge 断面の安定性について一つの示唆を与える事実として、非常に興味深いものがある。ただし、その関係は Lane の理論曲線とその傾向がかなり異なっている。とくに A_* の値が大きくなると、水面幅を表わす B_* は Lane の理論によるそれよりかなり大きくなり、三角形断面に近づくことがわかる。こうした相違が何によるか、現在のところ明らかでないが、流下方向に断面積が急変すること、波浪による漂砂が存在することなどが原因として考えら

れ, こうした点については今後さらに詳しく検討する必要があると考えられる。

4. Gorge 断面の断面積と水理量との関係

一般に, 河口における災害を防止するためには, 漂砂によって河口幅が縮小したとき, 所定の洪水流量に対して gorge 断面の河積が不足していないかどうか, もし不足している場合には水位上昇量はどの程度になるかを適確に予測することがきわめて重要であり, さらに, 分水などによって低水流量が減少したとき, 従来より河口幅の縮小が起こるかどうかを予測して, 出水時の対策を樹立しておくことも必要である。こうした問題を解決するためには, gorge 断面における水理特性ならびにそれと河口地形との関係についても十分に検討しておく必要がある。Bruun らは, この方面の研究方法の一つとして, gorge 理論を提唱したが, この理論ではもっぱら tidal prism と最小流水断面積の関係が論じられているのみであって, 河川流についてはほとんど考慮されていない。しかし, わが国諸河川の河口のように, 河川流量の影響が大きい場合には, これを無視して取り扱うことはできないと考えられる。そこで, ここでは, 河川流量と流水断面積の関係について, さらに詳しく検討する。

まず, 最初に, Stebbings の実験では, 所定の流量に対する安定断面形の諸特性が求められているので, この結果を用いて安定断面に関する流量と流水断面積の関係を調べる。いま, 安定断面における流量 Q を Manning の平均流速公式を用いて示すことができるとすると,

$$Q = n^{-1} R^{2/3} I^{1/2} A \quad (\text{m-sec})$$

となる。ここに n は Manning の粗度係数である。つぎに, 前節で述べた無次元量を用いて上式を変形し,

$$Q_* = \frac{ng^{1/2}Q}{hc^{13/6}u_{*c}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

において, (9) および (13) 式の関係を用いると, 結局

$$Q_* = A_*^{5/3} \left(P_{0*} - \frac{2}{\alpha} + A_* \right)^{-2/3} \quad \dots\dots\dots(16)$$

となる。(12) 式から明らかなように, P_{0*} は α のみの関数であるから, Q_* は A_* と底質の特性を示す α によって表わされることになる。Fig. 14 は (16) 式の計算結果であって, α をパラメータとして示されている。この図から明らかなように, Q_* の値が大きくなると, A_* は Q_* に比例して増大することがわかる。Stebbing は実験にあたって, 流量, 最大水深, 断面積および水面勾配を測定しているが, 実験結果から (16) 式の Q_* を算出するためには, (15) 式から明らかなように, これに含まれている Manning の粗度係数を他の方法で測定しておく必要がある。しかし, Stebbings の実験結果から粗度係数 n の値を求めることはできないので, ここでは, 一応, $Q_* = nQ'$ ($Q' = \sqrt{g}Q/hc^{13/6}u_{*c}$) とおいて, Q' について実験結果を

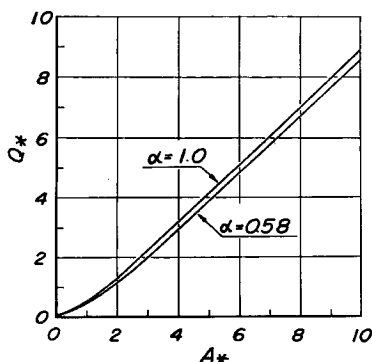


Fig. 14 Relationship between Q_* and A_* calculated from Eq. (16).

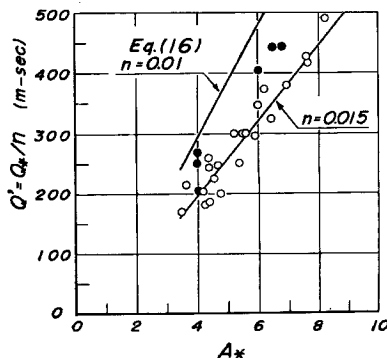


Fig. 15 Relationship between Q' and A_* for Stebbings' experiments.

整理する。なお、 h_c の実験値としては最大水深を用いることにする。Fig. 15 は実験結果から求めた Q' と A_* の関係を示すものであって、図中の実線は、(16) 式において、粗度係数をそれぞれ、 $n=0.010$ および $0.015(\text{m-sec})$ として得られる理論曲線である。この図から明らかなように、実験結果は、 $n=0.015$ とした理論曲線にほぼ一致していることがわかる。以上の結果から、水路の安定断面に関する Q_* と A_* の関係は (16) 式によって表わされることが明らかとなり、 Q_* の値が大きくなると、ほぼ A_* に比例することが見いだされた。

しかし、こうした関係が流路の安定断面にかぎらず、河口の gorge 断面についてもそのまま適用できるかどうかは非常に疑問である。というのは、河口付近では流下方向に流水断面積が急変するため、こうした領域で Manning の粗度係数をどのように定めるべきか明確でないし、また、これを測定した結果もない。しかし、(15) 式から明らかなように、 Q_* の値は粗度係数 n の値に大きく依存していることがわかる。したがって、こうした方法によって、河口付近における流量—最小流水断面積の関係を求めることは適当でなく、むしろ、こうした局所の変動の著るしい現象に対しては、石原・志方²¹⁾らが示した運動量方程式を解析の手段として用いる方が適切のように考えられる。

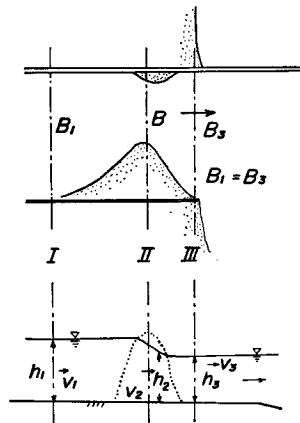


Fig. 16 Illustration of notations.

いま、Fig. 16 に示すように、河口砂州の上下流の検査面 I および III における水面幅、水深および平均流速をそれぞれ、 B_1 および B_3 ($B_1=B_3$)、 h_1 および h_3 、ならびに、 v_1 および v_3 とし、gorge 断面を検査面 II にとり、ここにおける水面幅、水深および平均流速をそれぞれ、 B 、 h_2 および v_2 とする。なお、計算の簡単のために、本研究では、各断面における断面形は長方形とし、この付近の河床は縦断方向にはほぼ水平と仮定する。そうして、断面 I ～ III に運動量の関係を適用すると、

$$\rho Q(v_3 - v_1) = \frac{1}{2} \rho g (B_1 h_1^2 - B_3 h_3^2) - \frac{1}{2} \rho g (B_1 - B) (h_1^2 - h_2^2) \quad (17)$$

となる。また連続の式は

$$Q = B_1 h_1 v_1 = B_3 h_3 v_3 \quad (18)$$

一方、断面 II ～ III 間に関しては、

$$\rho Q(v_3 - v_2) = \frac{1}{2} \rho g B_3 (h_2^2 - h_3^2) \quad (19)$$

$$Q = C_c B h_2 v_2 = B_3 h_3 v_3 \quad (20)$$

がえられる。ここに、 C_c は収縮係数であるが、ここでの解析の精度から考えて、1 とおいてよいであろう。さて、(17)～(20) 式をつぎの無次元量

$$Fr_3 = \frac{v_3}{\sqrt{gh_3}}, \quad Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gh_2}}, \quad Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}, \quad \phi = \frac{h_1}{h_3}, \quad \phi = \frac{h_2}{h_3}, \quad \beta_* = \frac{B}{B_3} \quad \dots\dots\dots(21)$$

を用いて書きかえると,

$$f_1(\phi) = \beta_* \phi^3 + \{(1 - \beta_*) \phi^2 - 2Fr_3^2 - 1\} \phi + 2Fr_3^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$f_2(\phi) = \beta_* \phi^3 - \beta_* (2Fr_3^2 + 1) \phi + 2Fr_3^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$Fr_1^2 = Fr_3^2 \phi^{-3} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$Fr_2^2 = \frac{Fr_3^2}{\beta_*^2 \phi^3} \quad \dots\dots\dots(25)$$

となる。

まず, gorge 断面における流量—断面積の関係について検討する。(23) および (24) 式において, Fr_3 および β_* を既知量とすると, ϕ および Fr_2 は β_* および Fr_3 によって表わされることになる。さらに, $A_* = A_2/h_2^2$ の関係を用いると,

$$Fr_2 = \frac{Q}{\sqrt{gh_2} A_2} = Fr_3 \phi^{-5/2} A_*'^{-1} \quad \dots\dots\dots(26)$$

となる。ここに, $A_*' = A_*(B_3/h_3)^{-1}$ である。したがって, Fr_3 および β_* を与えると, ϕ, Fr_2 および A_*' が

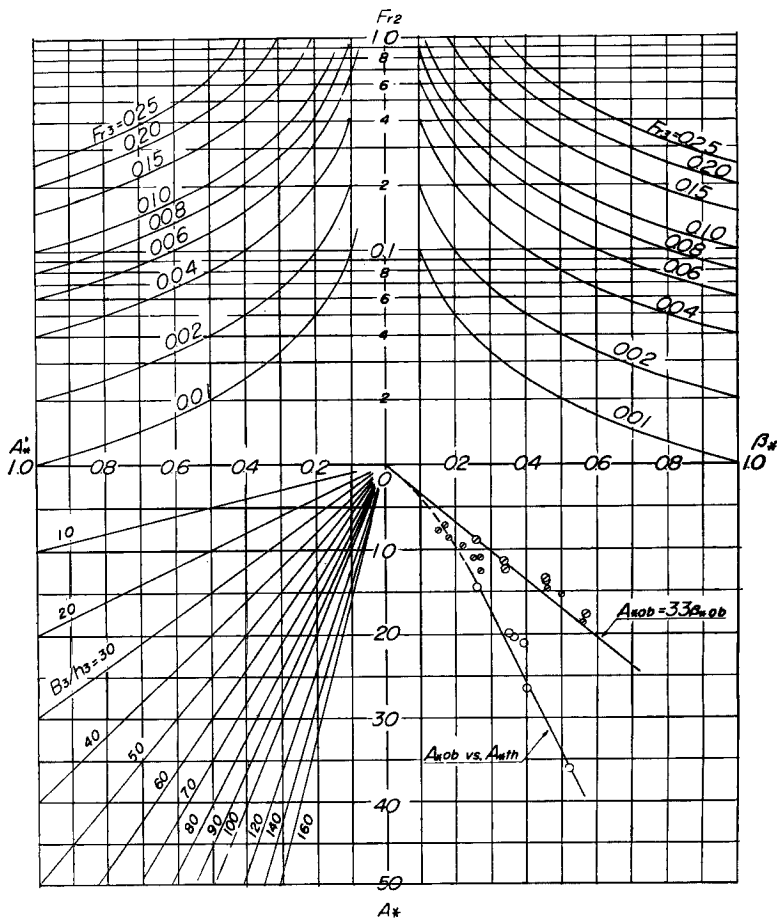


Fig. 17 The method of determination of A_* corresponding to Fr_3 .

それぞれ (23), (25) および (26) 式から決定され、さらに B_3/h_3 が与えられると A_* が決定される。**Fig. 17** はこの関係を示すものであって、第 1 象限は F_{r3} と β_* を与えて、 F_{r2} を決定する図表であるが、この図表では、 $F_{r2} > 1$ すなわち、gorge 断面で射流になる領域は除外されている。第 2 象限は、上述の方法によって決定された F_{r2} から A_*' を求める図表であり、さらに第 3 象限は第 2 象限で決定された A_*' とすでに与えられている B_3/h_3 とから A_* を求めるそれである。ただし、この結果は固定床に対するものであるから、 F_{r3} に一つの値を与えても、 A_* が唯一決定されるわけではなく、 β_* の種々の値に対して、それぞれ A_* が求まることになる。gorge 断面が安定であるということは、 F_{r3} と A_* の間に 1 対 1 の対応が存在するということである。したがって、このためには第 4 象限において安定断面の概念を導入して A_* と β_* の関係が決定できればよい。**Fig. 13** から明らかなように、これを理論的に求めることは困難であるが、gorge 断面においては、 $A_* = f(B_*) = f(\beta_*, B_3/h_3)$ の関係があるから、第 4 象限では、 B_3/h_3 をパラメータとして A_* と β_* の関係を **Fig. 13** から求めることができる。**Fig. 17** に示されている A_* と β_* の関係は、その一例であって江川における実測値にもとづいて得られたものであり、洪水によって拡張されたことが明確に判定でき、かつその直後に測量が行なわれた資料から求めた結果である。ただし、 F_{r3} と A_* の関係を求めるにあたって、最初、断面は長方形と仮定したため、 A_* の実測値とはかならずしも一致しない。これを補正するために、安定断面と考えられる実測資料から F_{r3} （この値は流量 Q 、下流の潮位に支配される最大水深 h_3 および砂州が存在しない場合の河幅 B_3 を与えると計算できる。）と β_* の値を与え、**Fig. 17** を用いて算出した A_{*th} と、実測による A_{*ob} を比較して、同図の第 4 象限に示されている。

以上の結果を用いると、所定の流量に対して現状の β_* で安定かどうかの判定を図式的に求めることができる。すなわち、所定の流量に対する Froude 数 F_{r3} を算出し、現状における β_* を与えて、第 1 象限から第 4 象限へと、それぞれの象限で必要な値を求め、それらの値がほぼ一定値になるまで同じ手順を繰返すならば、所定の流量に対する β_* がもとなり、これが現状における β_* の値より大きければ、それだけ河積が不足することを、また逆に、小さければ、十分の河積をもつことが示されることになる。

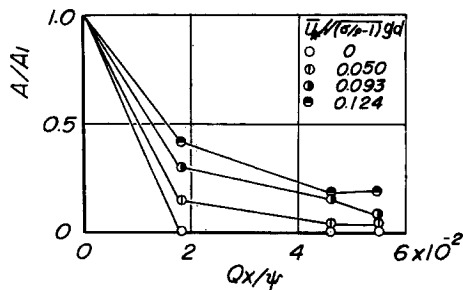


Fig. 18 The Effect of littoral drifts on gorge section
(After Sawaragi).

以上、海からの漂砂がまったく存在しないとして gorge 断面の変化を取り扱ってきたが、漂砂が存在する場合には、かなりことになった取り扱いが必要であると考えられる。**Fig. 18** は、樺木²⁾が漂砂の存在する場合について行なった実験の結果を示すものであって、この図の縦軸は断面積の縮小率を、横軸は漂砂量を示し、パラメータとして摩擦速度と底質の移動限界流速の比（底質が一定の場合、流量に比例する無次元量）を用いている。この図から明らかなように、たとえ、同じ流量であっても、漂砂が多くなれば、gorge の断面積は減少し、ある一定値に近づく傾向がみられる。こうした漂砂の影響は本論文では考慮されていないが、今後、この点についても検討を加えたいと考えている。

つぎに、所定の洪水によって、河口砂州が押流される直前の水位上昇を求めよう。いま、 F_{r3} および β_* を既知量として与えるならば、(23) 式と (22) 式とからそれぞれ ϕ および ψ が決定される。なお、 ϕ お

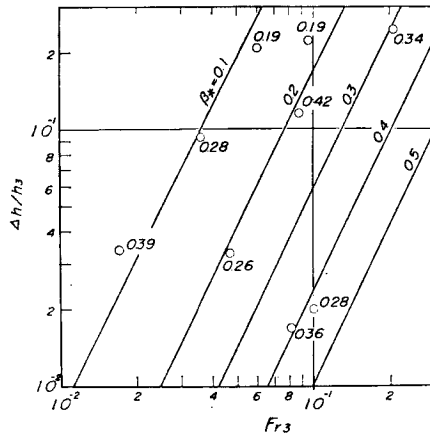


Fig. 19 The rise of water level by flood.

および ϕ は三次方程式の解であるので、一般には3つの相異なる実根が存在するが、Ⅰ～Ⅲ区間で流れはすべて常流とすると、その一つの解が物理的に意味をもつものとなる。いま水位上昇量を Δh とすると、

$$\frac{\Delta h}{h_3} = \frac{h_1 - h_3}{h_3} = \phi - 1$$

となる。Fig. 19 は $\Delta h/h_3$ と Fr_3 の関係を、 β_* をパラメータとして示したものであって、図中の実線は理論曲線であり、丸印は江川における実測値である。なお、外海の潮位は外の浦検潮所の潮位記録を用いて資料を整理した。この図から明らかなように、実測値のばらつきは著しく、水位上昇を正確に予測しているとはいえない。これは水位上昇という現象に対して、上述した巨視的な取り扱いでは不十分なことを示すものであって、今後、さらに基礎的な実験によって、河口砂州によるこの現象を正確に測定する必要があると考えられる。

5. 結 語

以上、著者らは、河口の gorge 断面の安定性を検討することによって、河口閉塞と洪水流の関係を論じてきた。ここで、えられた結果を要約すると、つぎのようである。すなわち、

1) わが国諸河川の河口 gorge 断面の断面特性のうち、その断面形状は三角形断面に近いこと、および A_* と B_* の間にはほぼ一定の関係が存在することがわかった。ただし、この断面形は従来の研究による水路の安定断面形状とは若干ことになっている。

2) Gorge theory における tidal prism と流水断面積の関係と同様の関係が、河川流量と流水断面積の間にみられ、これらの関係を図解法によって求めることができることが明らかとなった。

3) 海からの漂砂は河口閉塞に重大な影響を及ぼすので、これを無視することはできない。などである。なお、この研究は、河口閉塞に関する研究の第1段階であり、前節でも指摘したように、なお多くの疑問点が残されている。こうした点については、今後さらに検討を加えていくつもりである。

最後にこの研究を行なうにあたり、終始御指導を賜った岩垣雄一教授、石原安雄教授ならびに土屋義人教授に深謝の意を表するとともに、資料の収集にあたり御援助をいただいた、島根県土木部河川課ならびに建設省福知山工事事務所の諸氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 榎木亨：河口閉塞にともなう河道内水位の変化について—河口閉塞機構に関する基礎的研究，第3報一，第15回海岸工学講演会講演集，昭43.12，pp.195～202。

- 2) Grijm, W.: Theoretical Forms of Shoreline, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., 1964, pp.219~235.
- 3) Bakker, W. T. and N. P. Edelman: The Coastline of River Deltas, Proc., 9th Conf. on Coastal Eng., 1964, pp.199~210.
- 4) 篠原謹爾・椿東一郎・吉岡益男・上森千秋：波による海浜の砂移動，九州大学応用力学研究所報，第10号，昭32.3，pp.63~83.
- 5) 野田英明：河口閉塞に関する二，三の実験，京都大学防災研究所年報，第10号B，昭42.3，pp.223~233.
- 6) 榎木亨：河口閉塞機構に関する基礎的研究第1報，第12回海岸工学講演会講演集，昭40.11，pp.162~167.
- 7) 榎木亨・竹内宏：河口における沿岸砂州の発生，発達について，一河口閉塞に関する基礎的研究第2報一，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12，pp.151~155.
- 8) Bruun, P. and F. Gerritsen: Stability of Coastal Inlets, Proc. of ASCE, Vol. 84, No. WW 3, 1958, pp.1644~1~49.
- 9) O'Brien, M. P.: Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coasts, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., Vol. 1, 1966, pp.676~686.
- 10) Lane, E. W.: Design of Stable Channels, Trans. ASCE, Vol. 120, 1955, pp.1234~1279.
- 11) Iwagaki, Y. and Y. Tsuchiya: An Analysis of the Stable Cross Section of a Stream Channel, Bulletin of DPRI, Vol. 8, No. 29, 1959.
- 12) Stebbings, J.: The Shapes of Self-formed Model Alluvial Channels, Proc. of the ICE, No. 6642, 1963, pp.485~510.
- 13) 石原藤次郎・本間仁編：応用水理学中I，丸善，昭33，p.14.
- 14) 菱田耕造・谷岡克己・安岡武男・若林敏雄：由良川の河口閉塞について，海と空，第35巻，1959，pp.31~44.
- 15) 近畿地方建設局編：由良川河口中間報告書，昭42，pp.1~52.
- 16) 佐藤清一：河口閉塞とその防止策について一神戸川における河口処理の一例一，第2回海岸工学講演会講演集，昭30.11，pp.127~144.
- 17) 吉高益男：河口砂州の変化について一富田漁港模型実験による一，第6回海岸工学講演会講演集，昭34.11，pp.72~77.
- 18) 嶋文雄・吉村芳男・福田伸男：川内川河口の調査，第4回海岸工学講演会講演集，昭32.11，pp.145~156.
- 19) 古谷浩三・松山方彦：天塩川河口について，北海道開発局土木試験所月報，第107号，昭37.5，pp.1~20.
- 20) 本間 仁・堀川清司・影山正樹，鮮干澈：相模川河口について，第8回海岸工学講演会講演集，昭36.9，pp.202~210.
- 21) 石原藤次郎，志方俊之：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究，土木学会論文集，第138号，昭42.2，pp.30~38.