

図-2 記号

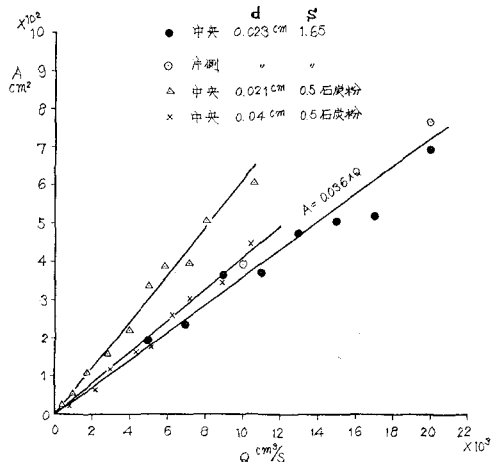


図-3 静的平衡断面

やし、ほぼ流砂量が零に近くなった時の河口断面を測定した。その結果が図-3である。 $d=0.023\text{ cm}$, $S=1.65$ の場合は $A \approx 0.036 Q$, $d=0.021\text{ cm}$, $S=0.5$ の石炭粉の場合は $A \approx 0.061 Q$, $d=0.04\text{ cm}$, $S=0.5$ の石炭粉は $A \approx 0.04 Q$ となった。全底質材料とも河口部に ripple が存在していた。Ripple 河床において流砂量が極端に小さくなる τ_* は $0.1 \sim 0.2$ である。いま $\tau_{*c}=0.2$ とし、 α として実験値の平均である 1.8 を使って式 (11) および実験結果より φ を求めると、 $d=0.023\text{ cm}$, $S=1.65$ で $\varphi=13.7$, $d=0.021\text{ cm}$, $S=0.5$ で $\varphi=15.3$, $d=0.04\text{ cm}$, $S=0.5$ では $\alpha=1.5$ (実験値の平均) を使って $\varphi=15.4$ となった。この φ は多少大きすぎるが²⁾、もともと式 (11) は近似式であり、開口部断面形も長方形でないこと、河床波の遷移点 (flat→ripple)、流れの遷移点であることを考えれば、式 (11) によって A と Q の関係を表わすことができると考えられる。

なお A を Q だけから求めるためには、河口の断面特性が知られていなければならない。断面形状を野田³⁾ が行ったように $A_* = A/h_c^2$, $B_* = B/h_c$ と無次元化すると断面形状がどんな形か分りやすい。静的断面と考えられる A_* , B_* の関係を示すと図-4のごとくである。ここにおいて片側流出とは水路の片側のみ砂州があり、その断面形状は図-2の断面形を半分に切った形となる。それゆえ A_* , B_* を2倍すると中央流出に相当する。これによると $A_* \approx B_* - 1.8$ に近いが、これは河口で流量が増すと水深の変化より、むしろ水路幅が広がることを

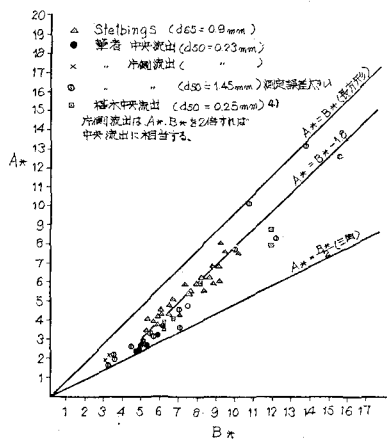


図-4 静的断面の A_* , B_*

示しているのではなく、断面形はその断面が作られるまでの履歴に支配され、上流から土砂補給なしの場合には Lane 断面に近く、上流から補給砂があって広がった場合には台形状になる。

4. 波と河川流のある場合の平衡断面

次に波によって漂砂の補給はあるが、補給量だけ河川流によって吐きだされる場合を考えてみる。ただし河川上流部より補給砂は無いものとする。

このような状態の底質の動きを見ると、流量がある程度大きい時は開口部主流部は流れの影響が強く、波の影響はほとんど受けず、河床は河川流によって動かされる。波による底質の動きがある所は砂州汀線沿いであり、砂州先端部は流れによって干渉された波が砂州部を走るように入り、漂砂を河道内に持ち込む。もし開口幅が平衡状態より広ければ、走り波による砂の持ち込みの方が多く、漂砂は河道内に持ち込まれ、狭ければ河川流によって掃き出される。流量が小さくなると波エネルギーが相対的に強くなり、流れによる流砂域が河道側に引込む形となり、砂州開口部は全面的に漂砂移動域になる。より流量が小さくなると開口部に砂が打ち上げられ、河道側水位は上昇し、砂州部を浸透する流量が多くなり、河口は閉塞してしまう。

このような現象を把握するために次のような実験を行い、その結果の物理的解釈を行った。

(1) 実験施設と方法

実験は幅 7 m 、高さ 0.6 m の矩形水槽を用いて行った。この水槽の一端には水を流せるように揚水ポンプと流量測定用の三角堰が取り付けられている。他端は水位調節用のフラップゲートがあり、その前面に幅 6 m の単ヒンジフラッター型造波機が設置されている。底質材料としては $S=1.65$, $d=0.023\text{ cm}$ と $S=0.5$, $d=0.021\text{ cm}$ の二種類とした。ケース 1~4 および 7~9 は砂と

しケース 5, 6 は石炭粉である。ケース 1, 5, 7, 9 の実験前に前浜は $i=1/10, 1/20, 1/30$ に整形し、河道幅は 1.5 m, 河床高は静水面とした。その後波を当て、流量 0 l/s 時の平衡海浜を作った後、小流量より実験を始め、平衡海浜が形成されたと考えられた時に河口の地形測量を行い、順次段階的に流量を増していった。なおケース 1 から 6 までは初期汀線より 4 m 海側に出た片側導流堤を設置し、7～9 は汀線までとし、ケース 9 は汀線を波向きに 20° 傾けた。なおこのほかに山口高志が行った $d=0.04$ cm, $S=0.5$ の実験結果 ($i_0=1/15, 1/10$ 波向は直角より 20° 傾いている) を利用した。

(2) 河口の断面積と河口形状特性

図-5 は $d=0.021$ cm の場合の A と Q の関係調べたものである。これを見ると河口の面積は、波高、波向きの変化に対して有義な差は明確でなく、ほぼ流量のみで決まり、その断面積も静的平衡断面に近い。図-6 は石炭粉の場合だが、ケース 5 は静的断面に近い。ケー

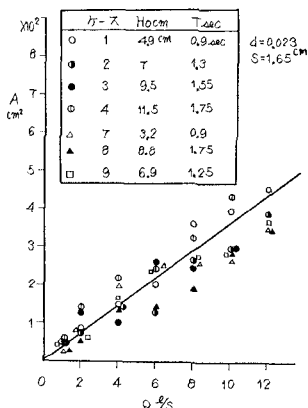


図-5 A と Q の関係, $d=0.027$ cm

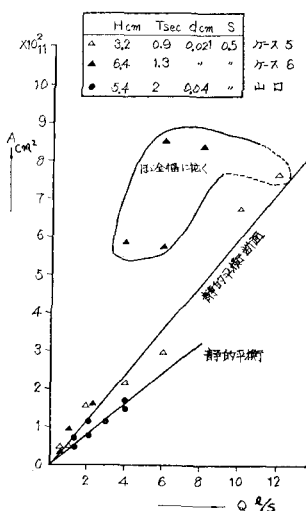


図-6 A と Q の関係, 石炭粉

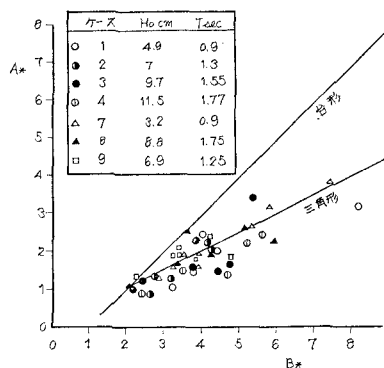


図-7 A_* と B_*

ス 6 は波が強く、流量が増加して開口幅が広がった時、波によってむしろ開口部がけずり取られ断面が大きくなり、河道内に新たな砂州を形成しはじめていた。 $d=0.04$ cm の場合も静的断面に近い。

図-7 は A_*, B_* の関係であるが、静的断面と異なっていた三角形断面に近い。

(3) 最狭部の断面形状に関する物理的考察

波と河川流がある場合の最狭部の断面積、川幅が波の無い場合の静的平衡断面とほとんど変わらない理由を考えてみよう。

実験を観察してみると、波は最狭部に弱くなってしまい、これより上流側の河道には漂砂をほとんど運んでいない。波エネルギーが河口で小さくなるのは、河川流による波の干渉や、河口前面、側面にたまる土砂によって最狭部に達する波エネルギーを小さくしてしまうためと考えられる。また波高が大きくなれば、砂州幅も増し、波のそ上距離が長くなることも波による砂の持ち込み量 W_s が小さい原因と考えられる。

一方河川流による砂の持ち出し量 Q_s は、ripple 河床の場合、 u_* の 10～12 乗に比例し、河口断面積の少しの減少によっても Q_s は急激に増大する²⁾。この河口断面変化に対する Q_s, W_s の変化量が極端に違うことが、波があっても河口河積は静的平衡断面に近い理由となっているわけである。

河床が ripple であれば、河口の最深部の無次元掃流力は、平衡状態で $\tau_* = 0.15 \sim 0.25$ 位であり、河床が flat なら $\tau_* = 0.06 \sim 0.08$ 位の値となる²⁾。よって河口の最狭部河積は、式 (11) 同様

$$A = 1/\varphi \cdot \alpha^{1/2} \cdot (sgd)^{-1/2} \cdot \tau_*^{1/2} \cdot Q \quad (12)$$

となる。 τ_* の値は上述した値を使えば良い。また平衡河口幅は A_*, B_* の定義より

$$B = (B_*/A_*)^{1/2} \cdot \varphi^{-1/2} \cdot \alpha^{1/4} \cdot (sgd)^{-1/4} \cdot \tau_*^{-1/4} \cdot Q^{1/2} \quad (13)$$

となり、河口断面形状が同一なら、 $Q^{1/2}$ に比例し、 $d^{-1/4}$ に比例すると考えられる。このことは河口の底質が 2～

3倍異なっても B はそれほど変わらないことを示している。なお河口の断面は三角形形状に近く、その場合 $\alpha \approx 2$ である。

5. 波と河川流による平衡断面形を持つ実河川 の例

前節で述べたような結果は、実河川にまで適用できるのであるか。まず初めに筆者の行った実験は、実河川ではどのくらいの流量、波高、底質材料に当るのか考えてみよう。

潮位変動の大きくない河川なら、河口の A, B を決める要因として考えられるものは、河川流量 Q 、沖波波高 H_0 、沖波波長 L_0 、粒径 d 、底質の密度 ρ_s 、河水の密度 ρ 、海水の密度 ρ_w 、波向き θ 、および場の加速度 g 、動粘性係数 ν と考えられる。

$$A \text{ or } B = f(Q, H_0, L_0, \theta, d, \rho_s, \rho, \rho_w, d, \nu) \dots (14)$$

基本量として Q, ρ, g を取ると上式は

$$\begin{aligned} A/(Q^2/g)^{2/5}, B/(Q^2/g)^{1/5} &= f(H_0/(Q^2/g)^{1/5}, \\ L_0/(Q^2/g)^{1/5}, \theta, d/(Q^2/g)^{1/5}, (\rho_s - \rho)/\rho, \\ (\rho_w - \rho)/\rho, (Q^2/g)^{3/10} \cdot g^{1/2}/\nu) \dots (15) \end{aligned}$$

となる。各項を良く知られた無次元量で表わすと、

$$\begin{aligned} A/(Q^2/g)^{2/5}, B/(Q^2/g)^{1/5} &= g(Q/H_0^2 \sqrt{gH_0}, \\ H_0/L_0, d/H_0, \theta, (\rho_s - \rho)/\rho, (\rho_w - \rho)/\rho, \\ \sqrt{gH_0} \cdot H_0/\nu) \dots (16) \end{aligned}$$

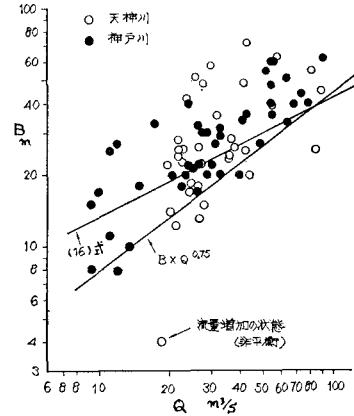
となる。ここで右辺第1項は河川流と波の強さの比を表わすものと考えられる。

筆者の行った実験は H_0/L_0 は $0.018 \sim 0.040$ 、 $Q/H_0^2 \sqrt{gH_0}$ は 0.065 以上、 θ は $0^\circ \sim 20^\circ$ 、 $(\rho_s - \rho)/\rho$ は 1.65 と 0.5 、 $(\rho_w - \rho)/\rho$ は 0 、 H/d は砂の場合 600 以下、石炭粉は 350 以下である。波による底質の動きやすさは H_0/S_d に比例すると考えられるから、石炭粉の H/d 350 は砂の $1000 \sim 2000$ に相当しよう。

よって現地河川として、海水が河口より出てしまうような小河川を考えれば、現地河川でも H_0/L_0 、 θ はこの程度であることより、 $Q/H_0^2 \sqrt{gH_0}$ が 0.065 以上 H/d が $1000 \sim 2000$ 以下の河川に相当する実験を行ったことになる。よって現地波高 2 m を考えると流量 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 以上、粒径 1 mm 以上の河川に相当する。実河川においては河口の底質は 0.3 mm 以上の場合が多いことを考えると、筆者の実験は河口で生じる H/d のすべての範囲を網羅していないが、実河川でも実験と同様な河口断面特性を持つものと考えられる（波による底質の動きやすさを粘性の影響も考えて $\sqrt{gH_0}/w_0$ であらわせば、石炭粉は 80 であり実河川で生じる $\sqrt{gH_0}/w_0$ をほぼ網羅している⁹⁾）。

(1) 神戸川⁵⁾、天神川

神戸川、天神川は日本海に注ぐ河川であり、流域面積



図—8 天神川、神戸川の B と Q

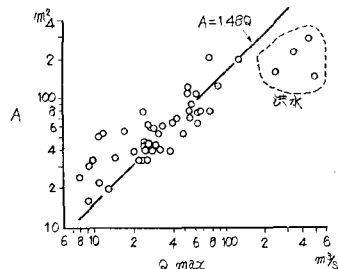
は約 500 km^2 である。図—8 は河口幅と流量の関係である。図中の Q に対する B の下限線は、波が大きくても流量によって維持しうる河口幅を示し、波と河川流による平衡河口幅を示すものと考えられる。いま $\tau_* = 0.25$ 、 $d = 0.1\text{ cm}$ 、 $\alpha = 2$ 、 $B_* = 7.5$ 、 $A_* = 3.75$ とし、 φ を H/d が実験値より大きいので 18 とすれば (ripple 河床なら H/d が1オーダー大きくなれば約 $6 \sim 7\varphi$ が増加する²⁾)、

$$B = 4.29 Q^{1/2} \dots (16)$$

となる。ここで、 B は m 、 Q は m^3/s の単位である。なお A_* 、 B_* は、実河川で取り得る A_* 、 B_* の最小値に近い値であり、神戸川の河口砂州の粒径は $0.6 \sim 1\text{ mm}$ 、天神川は筆者が見た感じでは $1 \sim 2\text{ mm}$ である。図中に式 (16) の関係を示したが、実河川の方が B が小さくなっている。一つには流量観測所の流量が、砂州、堤体を通して浸透し、河口流量となっていないのが原因しよう。また Q の乗数が 0.5 より大きいのは、流量が大きくなると河口断面積は相似に広がらず、河口幅の増加で大きくなろうとするのが原因する。図—9 は上森⁶⁾の報告による A と Q の関係で、 $\varphi = 18$ 、 $\tau_* = 0.25$ 、 $d = 0.07\text{ cm}$ 、 $\alpha = 2$ として式 (12) を計算すると $A = 1.48 Q$ となり予測値と一致する。

(2) 大北川、七北田川

大北川は、茨城県北部の太平洋に面した河川で流域面積約 190 km^2 、七北田川は宮城県を流れる流域面積 208



図—9 神戸川の A と Q

km^2 の河川で、底質はそれぞれ 1 mm 前後、 0.5 mm 前後である。太平洋に面しているため干満差が $1\sim 1.5\text{ m}$ 位ある。

1974年8月大北川で土木研究所海岸研究室と鹿島試験所で河口調査を行った。その結果が図-10である。河口の B , A は最狭部で計ったものでなく、少し上流側で川幅が少し広がった地点で計っている。この観測によると逆流は見られず、また塩水は河口に存在していなかった。潮位が低下すると河口の流速も増して τ_* も変化するが、平均的に見れば $\tau_*=0.2$ 前後となっている。 $\varphi=16$, $d=0.1\text{ cm}$, $\tau_*=0.25$, $\alpha=2$ として式(12)を計算すると $A=1.39Q$ となる。 $Q=6\text{ m}^3/\text{s}$ で $A=8.3\text{ m}^2$ で A の最小値に近い。

図-11 は上森⁶⁾の報告による七北田川の A と Q の関係である。 $\varphi=18$, $\alpha=2$, $d=0.05\text{ cm}$, $\tau_*=0.25$ とす

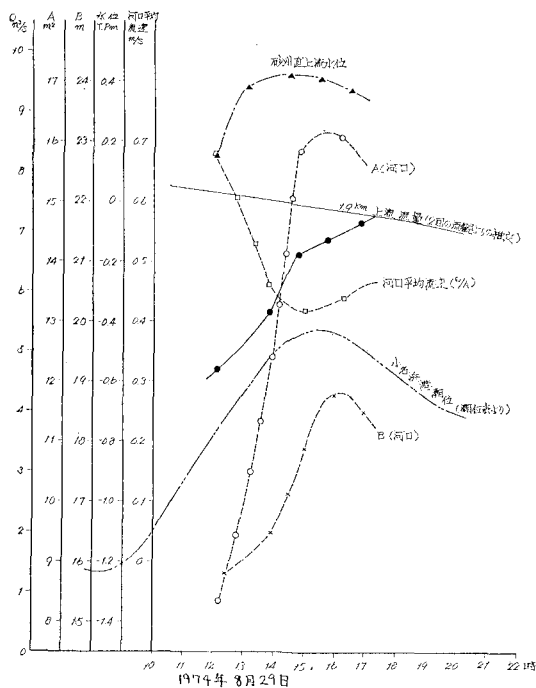


図-10 大北川河口の特性

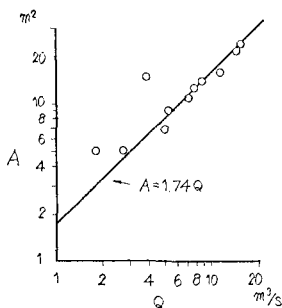


図-11 七北田川の A と Q

ると式(12)は $A=1.74Q$ となり、ほぼ妥当な値をあたえる。以上の結果より、太平洋側の河川でも七北田川位の河川規模なら式(12)による河口断面の推定は可能である。

(3) 阿武隈川

阿武隈川は流域面積 540.5 km^2 の河川で、 $d=0.6\text{ mm}$ 前後である。

図-12は阿武隈川における A と Q , 図-13は B と Q の関係である。 $d=0.6\text{ mm}$, $H/d=5000\sim 6000$ なので $\varphi=20$ とし、 $\alpha=2$, $\tau_*=0.25$, $B_*=8$, $A_*=4$ として、式(11), (12)を計算すると $A=1.43Q$, $B=4.79Q^{1/2}$ となる。 A はほぼ妥当な値を与えるが、 B は実測値の方が小さくなっている。この原因としては B の方が資料が多く、図中の資料の中には、流量が増加しつつある非平衡の資料が含まれる割合が多くなることによる。事実昭和38年の資料のみ取ると良くあっている。なお平衡時には河口の内部フルード数は1以上になり、塩水は河口の中に入れないものと考えられる。

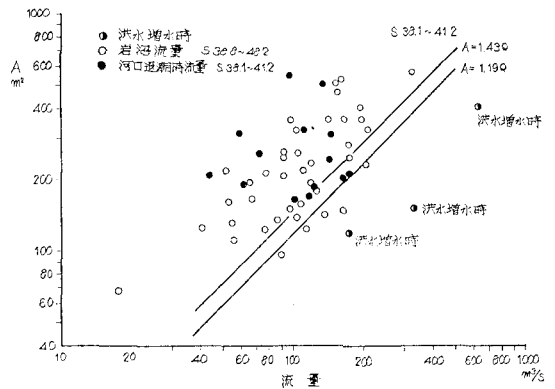


図-12 阿武隈川の A と Q

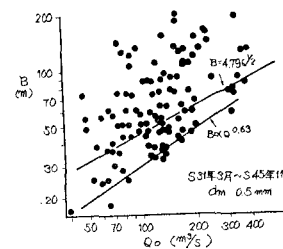


図-13 阿武隈川の B と Q

6. 潮汐による平衡断面

潮汐による平衡断面積も Q の一乗に比例していることは、4. で述べたのと同じ理由による。O'Brien⁷⁾の関係式を使うと、河口での最大流速は 100 cm/s 位である。 H/d が数万に達すると考えられ、 $\varphi=25$ とし、

$\tau_* = (V/\varphi)^2 / sg d \cdot \alpha$ であるので $d = 0.05 \text{ cm}$, $\alpha = 1.2$ とすると $\tau_* = 0.24$ となる (開口幅が広く断面形状は台形に近い)。

7. おわりに

実河川の河口特性はより複雑であり、塩水くさびの影響や、長周期波 (1分から数分の周期) などの影響もあける。また砂州上流水位には wave set up の影響も大きい。

参考文献

- 1) 山本晃一: 河口断面形状について, 第19回水理講演会, 1975.
- 2) 山本晃一: 相似律の観点から見た移動床の水理 [I], [II], 土木研究所資料第1059号, 1074号 1975,

1976.

- 3) 野田英明・木村 晃: 河口閉塞に関する研究 (1), 京大防災研報13号B, 1970.
- 4) 樫木 亨: 河口砂州の安定断面について, 第26回土木学会年講, 1971.
- 5) 佐藤清一・岸 力: 河口に関する研究, 土木研究所報告94号, 1959.
- 6) 上森千秋: 河口吐口の閉塞とその処理に関する研究, 高知大学農学部紀要第9号, 1963.
- 7) O' Brien, M.P.: Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coast, A.S.C.E. WW1 Feb. 1969.
- 8) Bruun, P. and Gerritsen, F.: Stability of Coastal Inlets, A.S.C.E. WW3 May, 1958.
- 9) 山本晃一・野積 尚: 海浜変形の相似性に関する研究, 土木研究所資料第975号, 1975.